

기상기술정책

METEOROLOGICAL
TECHNOLOGY &
POLICY



"기후변화와 수문기상"

칼럼

- 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향

정책초점

- 기후변화와 물환경정책
- 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향
- 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰
- 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안
- 수문기상학적 기후변화 추세
- 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책
- 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안

논단

- 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안

해외기술동향

- 미국의 기상-수자원 연계기술 동향
- NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황
- 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기



기상청 Korea
Meteorological
Administration

『기상기술정책』

제2권 제2호(통권 제6호)

2009년 6월 25일 발행

등록번호 : 11-1360395-000017-09

ISSN 2092-5336

『기상기술정책』지는 범정부적인 기상·기후 분야의 정책 수요에 적극적으로 부응하고, 창의적인 기상기술 혁신을 위한 전문적인 연구 조사를 통해 기상·기후업무 관련 분야의 발전에 기여할 목적으로 발간 기획되었습니다.

본 『기상기술정책』지는 기상·기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상 정책입안과 연구개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행되고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지에 게재된 내용은 출처와 저자를 밝히는 한 부분적으로 발췌 또는 인용될 수 있습니다.

원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 기술 혁신과 관련된 원고를 모집하고 있습니다. 뜻있는 분들의 많은 참여를 부탁드립니다. 편집위원회의 심사를 통하여 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

▶ 원고매수 : A4 용지 10 매 내외

▶ 원고마감 : 수시접수

▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.

☞ 더 자세한 투고방법은 맨 뒷편의 투고요령을 참고바랍니다.

『기상기술정책』 편집위원회

발행인 : 전병성

편집기획 : 국립기상연구소 정책연구과

편집위원장 : 조하만

편집위원 : 권원태, 김백조, 김성균, 서명석,
전용수, 조석준, 최영진

편집간사 : 김지영

발행처

주소 : (156-720) 서울시 동작구 기상청길 45 기상청

전화 : (02) 6712-0235 팩스 : (02) 849-0668

E-mail : ni_pol@kma.go.kr

인쇄 : 미래미디어

Contents



"기후변화와 수문기상"

칼럼

- 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향 / 전병성 1

정책초점

- 기후변화와 물환경정책 / 김영훈 4
- 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향 / 노재화 16
- 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰 / 김문모 · 정창삼 · 여운광 · 심재현 28
- 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안 / 문영일 · 오태석 38
- 수문기상학적 기후변화 추세 / 강부식 51
- 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책 / 배덕효 65
- 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안 / 차기욱 78

논단

- 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안 / 양용석 90

해외기술동향

- 미국의 기상-수자원 연계기술 동향 / 정창삼 111
- NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황 / 김지영 · 박소연 122
- 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기 / 김용상 132

기후변화에 따른 수문기상 정책 방향

전 병 성
기상청장

chunbs@kma.go.kr



일반적으로 기상은 시시각각 변하는 날씨현상을 말하며, 기후는 평균기상(average weather)이라고 정의되어 있다. 기후변화를 확인해 주는 것이 시간 경과에 따른 기상변화의 통계자료이다. 이렇듯 기상과 기후는 서로 밀접히 연관되어 있다. 기후가 변하면 특정 기상현상이 일어날 확률도 영향을 받는다. 예를 들면, 지구 평균기온 상승으로 인해 어떤 기상현상은 빈도와 세기가 더 강해졌고(열파와 집중호우), 반면에 어떤 기상현상은 더 드물게 출현하고 더 약해졌다(극단적 한파).

지구 평균 지표온도는 1950년 이후로 계속 증가했다. IPCC 4차 보고서(2007)에는 지난 100년간 전지구 평균기온은 0.74℃가 상승하였으며, 앞으로 100년간 약 1.4~5.8℃의 온도 상승을 예측하고 있다. 지난 50년간의 평균 온난화 속도는 과거 100년간 속도의 거의 두 배이다. 그만큼 열파와 집중호우는 더 강해질 거란 의미이다.

지구온난화의 여파는 남극과 북극의 빙산을 포함한

산악빙하의 해빙, 해양 생태계의 변화, 영원히 얼어 붙어 있으리라 생각했던 영구 동토의 해빙, 해수면 상승으로 인한 저지대의 침수, 악기상(가뭄, 홍수, 태풍, 폭염, 폭설 등)의 출현 등으로 우리에게 서서히 모습을 드러내고 있다. 특히, 강수량과 강수특성, 증발산량 등의 변화를 야기해 유역의 물 순환에 영향을 줄뿐만 아니라 수자원 부족량의 변화와 홍수 및 가뭄의 빈도와 규모에도 영향을 미친다. 아이러니하게도 지구온난화는 홍수의 리스크를 높이고 물의 공급을 상당부분 감소시킨다.

기후변화는 원인과 결과가 전 지구적이다. 한반도라고 예외일 수는 없다. 오히려 한반도 기후변화 진행 속도는 지난 100년간 기온상승이 지구 평균의 2배를 상회하는 1.7℃로서 유역의 물 순환이 더 취약하다고 볼 수 있으며, 동고서저의 좁은 국토에서 그만큼 물 관리가 더 어려워진다는 반증이다.

이를 입증하듯 지난 10년간(1997~2006년) 집중호우(1시간 강수량 50mm 이상) 발생빈도는 254회로

과거 1977~1986년의 143회에 비해 큰폭으로 증가하고 있다. 또한, 국립기상연구소(2008)에 따르면 한반도 지역의 강수량은 평년(1971~2000년)에 대비하여 21세기말(2071~2100년)에는 약 17%가 증가할 것으로 예상되나, 강수량의 시공간 변동성은 더 커져 수자원관리에 불리하게 변하면서 지역에 따라 가뭄 및 호우현상은 더욱 심화될 것으로 예측되고 있다.

그럼에도 불구하고 우리나라는 여전히 물관리 업무가 정부부처간에 다원화되어 있어 강수량 예측은 기상청이, 지상유량은 국토해양부가 관리하는 등 국가 물관리 효율성에 문제점이 지적되고 있다. 이는 1967년 대가뭄 이후 최근까지 40년 이상 안정적인 장마 발생으로 심각한 가뭄 피해가 발생하지 않아 사회기반시설 보강 및 수자원관리의 중요성에 대한 사회적 관심도가 낮았기 때문인 이유도 있을 것이다.

그러나 지난 30년간 집중호우 빈도 증가, 홍수로 인한 재산피해액이 매 10년마다 3.2배가 증가하는 등 기후변화로 인한 강우패턴의 변화는 물부족국가로 분류되고 있는 우리나라의 물관리 정책의 변화를 요구하고 있다.

다목적댐 관리의 홍수관리 비중을 높이면 가뭄발생의 위험도가 증가하고, 가뭄대응 비중을 높이면 홍수발생의 위험도가 증가하고, 이로 인해 사회기반시설을 개선해야 하는 상황에서 기후변화로 인한 미래의 불확실성을 추가로 고민해야 하는 난처한 상황에 처해 있다. 비근한 예로 지난해 이미 변하고 있는 강수패턴이 반영되지 못한 수문관리로 인해 올 상반기까지도 물 부족으로 인해 어려움을 겪고 있다.

이러한 물관리 변화에 대응하기 위해서는 홍수, 가

뭄 예측 등에 강우정보를 활용하기 위한 강우자료의 특성에 대한 과학적 이해가 필요하며, 특히 기후변화와 관련하여 강우변동성이 심화되고 있어 기상과 수문이 융합된 기술정보의 파악 및 활용 등이 필요한 시점이다. 기상을 도외시한 물관리 대책의 수립은 더 이상 곤란하다. 이는 마치 맑은 날 우산을 팔고 비 오는 날 쥘신을 파는 것처럼 물관리는 물론 환경적 측면에서도 매우 부적절하다.

그렇다면 이제 우리의 관심사는 우리나라 수자원의 지속가능성 확보를 무엇으로 담보할 것인가에 있다. 고려해 볼 수 있는 것으로는 그간 여러 기관에 산재해 있던 수문기상의 기술과 인력이 통합된 연구센터를 설립하여 적극적인 기후변화 대응체제를 갖추는 것이다. 또한 기술적으로 매우 어려운 난제이나 물 문제의 장단기 대책을 위해서는 반드시 필요한 한반도 수자원지도를 개발하는 것이다. 아울러 미국, 오스트레일리아, 일본 등에서는 그동안 연구와 실험이 활발하게 이루어졌고 거의 실용화 단계에 이르고 있는 인공증우 기술도 고려해 볼 수 있다. 기상현상의 조절이 가능해진다면 많은 경제적 이익을 가져다 줄 수 있을 것이다.

지속가능한 수자원 확보를 위해서는 기상과 수문의 합리적인 접목이 필요하다는 건 누구나 알고 있다. 이제는 행동이 필요한 때이다. 그렇게 하려면 무엇보다도 물관리 기관의 상호 협력은 필수요건이다. 그동안 대책점에 있던 평행선의 각도를 수정하여 한 점에서 만나야 한다. 그리하여 서로의 강점을 내어 놓고 이를 융합할 수 있는 필요한 연구와 기술개발에 전념하여야 한다. 그리하여 우리나라에 최적화된 효율적인 물관리 방법을 찾아내야 한다. 하고자 하는 의지만 있다면 지금이 시작할 수 있는 절호의 기회다.

정책 초점

기후변화와 물환경정책 | 김영훈

기후변화에 따른 물 관리 정책 방향 | 노재화

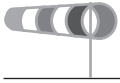
기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰 | 김문모 · 정창삼
여운광 · 심재현

수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안 | 문영일 · 오테석

수문기상학적 기후변화 추세 | 강부식

기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책 | 배덕효

이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안 | 차기욱



기후변화와 물환경정책

김영훈

환경부 물환경정책과장

hoonky@me.go.kr

I. 들어가며

올해는 오랜 가뭄이 계속되다가 봄이 실종된 채 어스새 더운 여름이 우리 옆에 성큼 다가서 있다. 국내 외적으로 기후변화영향으로 추정되는 이러한 이상 기후 사례들이 빈번히 나타나고 있고 기후변화 및 대응방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 정부에서도 기후변화에 대응하기 위한 각종 정책방안을 연구하고 탄소저감 국민실천운동인 그린스타트운동 등 기후변화 대응방안을 다각적으로 추진해 나가고 있다.

국제적으로는 기후변화 및 기후변화 정책수립에 관한 최상위기구인 유엔기후변화협약체(UNFCCC; United Nations Framework Convention on Climate Change), 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC;

Intergovernmental Panel on Climate Change) 및 세계기상기구(WMO; World Meteorological Organization)에서 기후변화 평가 및 기후변화에 관한 과학기술 발전을 위한 지원을 수행해 오고 있다.

국내에서도 지난 2007년 12월 발리로드맵 이후 기후변화 및 영향평가, 대응대책 등에 관한 연구가 본격화되고 있다.

기후변화의 원인에 대해서 IPCC는 기후변화가 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 발생되지만, 최근의 기후변화는 인간 활동에 의해 더욱 가속화되고 있다고 주장한 바 있다. 기후변화의 영향은 자연식생, 농업, 삼림, 인간의 건강, 산업, 해안지역 뿐 아니라 물환경에도 큰 영향을 미친다.

II. 기후변화로 인한 물환경영향

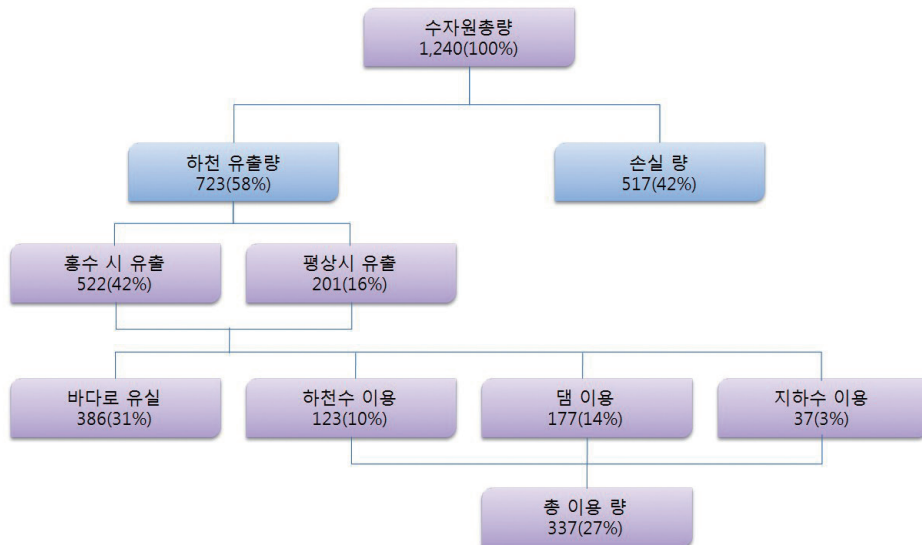
2007년 2월에 발표된 IPCC 제4차 보고서에 따르면 지난 100년간(1906~2005년) 지구평균온도는 0.74℃가 올라가고, 해수면은 0.7m 상승했다고 한다. 또한, 최악의 경우에는 100년 후에 기온이 6.4℃ 상승하는 가능성을 제시하고, 2100년도에 온도가 3℃ 이상 상승할 경우 전 세계 11~32억 명이 물 부족을 겪을 것으로 예측하였다.

기후변화로 인한 기온과 수온 상승은 물순환 시스템에 영향을 주며, 수량의 변화는 수질 및 수생태계에도 큰 변화를 줄 것으로 예측된다.

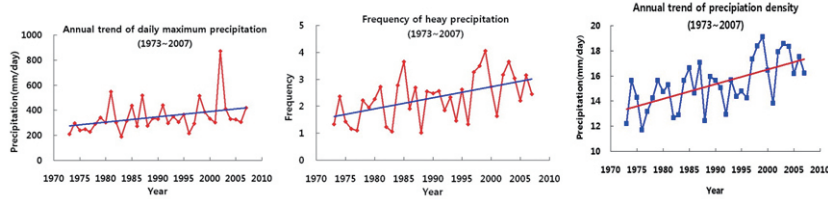
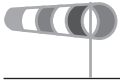
1. 수문 및 수자원에 미치는 영향

기후변화의 영향을 받는 기상요소중 수자원과 직접적 관련을 갖는 변수는 기온과 강수이다. 기온의 경우 순수한 기후변화의 영향과 도시화의 영향이 복합적으로 나타나고 있어, 도시화 효과를 제거한 후 한반도의 온난화는 100년간 0.4~0.8℃ 높아질 것으로 평가되고 있다(한화진, 2005).

일반적으로 수자원 부족량이란 인간이 이용 가능한 수자원량을 의미하며 수자원장기종합계획(2006~2020)에 따르면 우리나라의 경우 연강수량은 세계평균보다 크나(평균강수량 1,245mm/세계평균 880mm), 높은 인구밀도로 인하여 1인당 강수량은 상대적으로 매우 적은 양이라고 한다(1인당 강수량



[그림 1] 수자원부존량 및 이용현황(단위:억㎥/년)



[그림 2] 연강수량 분석결과

2,591m³/세계 19,635m³). 우리나라의 경우 수자원총량의 약 27%에 해당하는 양을 이용하고 있다.

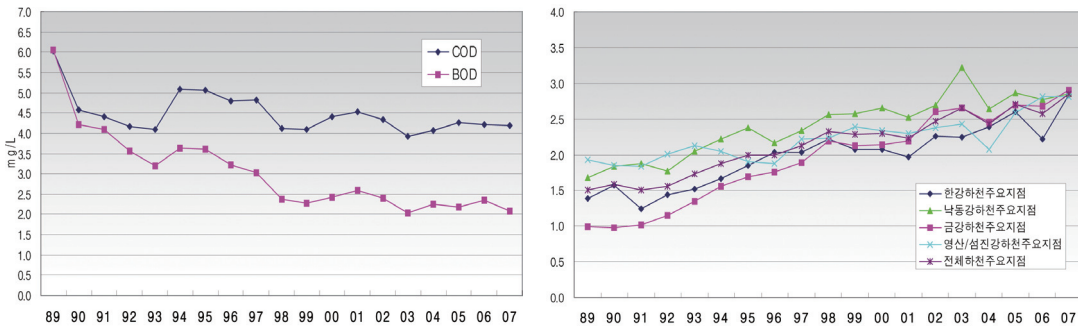
강수량의 경우 계절별, 연도별, 지역별 편차가 심해지고 있어, 용수별 이용현황에 따라 합리적인 수자원 이용방안이 설립되어야 한다고 판단된다.

우리나라의 강우는 홍수기(6월과 9월 사이)에 연강수량이 집중되는 계절성을 가지고 있다. 최근 80mm/일 이상 집중호우빈도는 1970년대에 비해 2배 이상 증가하는 등 전 수계의 강우 강도 증가로 인한 홍수빈도가 증가하고 있다. 강수발생일당 평균 강수량 분석결과, 모든 수계에서 증가경향을 보이고 있는 것으로 나타나고 있다.

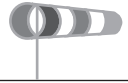
IPCC(2007) 보고서에 따르면 지구의 평균 지표기온은 1906년부터 2005년까지 약 0.74℃ 상승하였는데, 강수의 경우 온도와 기상조건에 큰 영향을 받아 온도가 1℃ 상승할 때 대기의 수분 보유력은 약 7% 증가한다고 한다. 따라서, 온도의 변화는 수증기의 증가를 가져올 것이며 강수의 발생빈도는 더 높아질 것으로 예측되고 있다.

2. 수질 및 수생태계에 미치는 영향

기후변화가 수질 및 수생태계에 미치는 영향은 크게 수온상승과 물 흐름패턴의 변화에 기인한 난분해성 유기물 증가, 탁수의 발생, 조류의 이상증식 및 어류 등의 서식환경 변화 등으로 볼 수 있다.



[그림 3] 전국 하천의 수질오염도 추이



1) 난분해성 유기물의 증가

우리나라의 수질측정자료 중 BOD와 COD항목에 대한 그간 측정자료를 살펴보면, BOD의 값은 점차 감소하는 추세에 있으나 COD의 경우에는 큰 변동이 없이 계속적으로 수질이 악화되는 상황을 보여주고 있다.

그간 정부의 수질관리정책에도 불구하고 BOD 농도는 감소하였으나 난분해성 물질의 지표인 COD의 농도가 정체상태를 보이고 있는 것에는 여러 가지 가능성이 있다.

난분해성 유기물은 도시화 및 농경지 확장과 같은 토지 이용도 변화에 따라 수체로 유입되는 유기탄소의 양 증가, 지구온난화로 인한 평균 기온 상승에 따른 유기물의 분해속도 증가, 대기 중 CO₂ 농도 증가에 따른 식물의 일차 생산성 증가, 가뭄과 집중 호우 빈도의 증가 등 강수 패턴 변화에 따른 유량의 증가 등 기후변화와 관련된 원인들이 수중 난분해성 유기물을 증가시킬 수 있는 것으로 연구결과 발표되고 있다.

이러한 난분해성 유기물은 수돗물의 냄새나 맛을 유발하고, 소독 부산물인 THM(trihalomethane)을 발생시키며, 생태적인 물질 순환에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

2) 탁수의 발생과 빛물 오염의 증가

우리나라는 아시아 몬순기후지역으로 장마, 집중호우 및 태풍 등이 여름철에 집중되어있으며, 기후변화

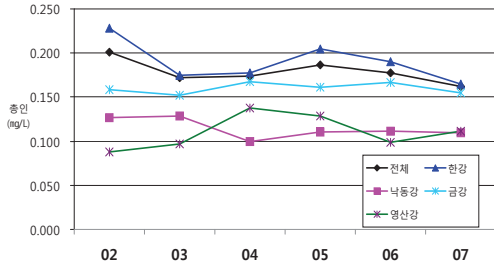
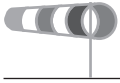
로 인해 강우일수는 감소하고 강우량은 증가하여 연간 강수량 집중도가 더욱 증가하고 있다. 이와 맞물려 고랭지밭, 산지 개간, 도시지역 확대로 탁수와 빛물에 의한 오염(비점오염)이 늘어날 전망이다.

탁수는 시각적인 자연경관훼손 뿐 아니라 수생태계의 훼손, 하류지역 정수처리비용 증가, 어족자원 감소 등의 피해를 가져온다. 국내에서는 강원도, 경상북도 등 백두대간 지역의 고랭지밭으로 인한 흙탕물 피해가 가장 심각하며, 2006년 태풍 에위니아로 탁도가 소양호 328NTU, 도암호 750NTU, 임하호 461NTU까지 상승한 바 있다. 이에 안동시는 임하댐 탁수로 인해 초기 어업피해액이 32억원에 이르렀으며, 임하댐에 위치한 취수장을 탁수발생이 적은 안동댐 하류로 이전시키기도 하였다. 소양강댐에서는 탁수 발생으로 인해 2008년 한강수계 어민 및 요식업 종사자들의 피해보상 산정액이 96억원에 달하였다.

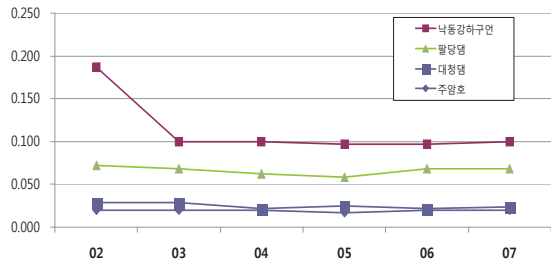
한편 도시에서의 도로먼지, 기름·오일, 중금속, 쓰레기와 농촌에서의 농약, 비료 등은 강우시 그대로 하천에 유입되어 수질저하, 부영양화, 독성작용을 일으키기도 한다. 조사 결과 2003년 기준 비점오염원이 전체 수질오염부하량 중 42~69%를 차지하며, 기후변화와 앞으로의 개발수요 증가를 고려할 경우 2015년에는 65~70%까지 증가할 전망이다.

3) 조류의 이상증식

조류의 성장률은 온도, 광도, 영양염류(질소, 인 등)에 영향을 받는데, 기후변화로 인한 수온 및 일사량



[그림 4] 하천 전체 평균 T-P



[그림 5] 주요 호소 T-P

과영양	부영양	중영양	빈영양
0.1 이상	0.1 - 0.035	0.035 - 0.01	0.01 이하

[그림 6] OECD의 영양 기준(호소기준, 단위 : mg/L)

증가, 여름철 집중호우에 따른 영양염류 과다 유입 등은 조류의 이상증식을 일으킬 가능성이 커지게 된다. 조류의 이상증식은 호소의 부영양화를 일으키고 정수처리장애를 유발하며, 어족 자원 감소 등의 원인이 된다고 볼 수 있다.

강분류의 지류에서 수온은 증가하는 경향을 나타냈다. 온도는 많은 생물의 서식을 결정짓는 매우 중요한 요소로서 지속적으로 수온이 상승할 경우 담수생태계에 서식하고 있는 생물상이 크게 변할 가능성이 있다.

TP(총인)의 경우, 전국 하천 평균값이 0.16~0.20mg/L로 높아 OECD 기준으로 과영양 단계에 해당하고 있다. 하천의 TN(총질소)/TP 비율이 33.7~106.8로 TN이 조류증식에 영향을 미칠 수 있는 비율(16)을 초과하여 TP가 제한인자로 작용하고 있다.

하천과 호소에 대한 물의 흐름은 서식처간 생물종 분포를 결정짓는 요소로서 작용하여 한반도의 기후 패턴이 변화하면 담수생태계에 영향을 미칠 수 있다. 수온이 낮은 하천에 적응하고 있는 냉수어종은 수온상승 현상이 발생하면 생육에 적절한 온도를 찾기 위해 상대적으로 수온이 낮은 상류로 지속적으로 이동하게 될 것으로 예측된다.

4) 담수생태계 변화

수질측정망 중 한강 수계(하천수 185개 지점, 호소수 35개 지점)에 대하여 장기간(1989-2007년) 측정된 수질자료 (Temperature, BOD, COD, TN 및 TP)에 대해 수질 변화 추이를 분석해 본 결과, 한

현재 우리나라 담수생태계에서의 기후변화로 인한 물리, 화학, 생물학 및 인문환경적 요인의 변화 가능성 중 두드러지는 점은 [표 1]과 같다(주기재, 2009).

[표 1] 기후변화가 우리나라 담수생태계에 미치는 영향 및 변화 가능성

구분	주요 요소	변화가능성
물리적	- 강수량 - 유량 - 유속 - 체류시간 - 수온상승	- 댐 저수량의 변화 (안동댐 등 초대형 댐) - 하구둑을 가진 큰 강의 호수화 구간 확대 (낙동강, 영산강, 금강 하류) - 습지주변 식생대의 변화로 인한 습지면적감소 (우포) - 하천의 건천화 가속 (동해유입하천, 제주도)
화학적	- 수질변화	- 갈수기의 유기오염 증가 (낙동강) - 남조류와 같은 특성 생물의 번성으로 인한 수질변화
생물학적	- 적응 온도대의 변화 - 먹이연쇄 - 외래종 유입	- 난온대성 어류 서식처 변화(DMZ, 백두대간하천) - 난온대성 생물의 번성 (식물, 동물-낙동강하류의 물상추, 부레옥잠, 뉴트리아, 월동철새) - 외래 포식어종에 의한 먹이사슬변화 - 온도에 민감한 무척추동물 (수서곤충)의 생활사 변화 - 4대강 동식물플랑크톤의 계절변화(천이)양상: 남조번성
인문환경	- 제방강화 - 관정개발 - 도시화	- 지하수과다 이용으로 인한 강 호수 하천의 유지유량 감소 (우리나라전역) - 도시화로 인한 소하천관리 강화 및 강 본류의 홍수 부하 가속 (4대강) - 하천 정비를 통한 하천 서식처의 단순화로 인한 생물다양성의 전반적인 감소 (전국 소하천)

III. 기후변화와 물관리 대응정책

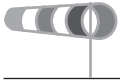
지구온난화로 인한 기온, 강우량 및 해수면 등의 변화는 수자원 및 용수관리에 위협이 되고 있다. 기후변화로 인해 연간 강우량은 유사하지만 강우시기의 집중현상이 더욱 심해져서 비가 내릴 때 담아뒀다가 가뭄 때 공급하는 시스템의 개편과 확충이 절실한 것으로 보인다.

먹는물을 비롯한 생활용수, 농업관개용수, 공업용수, 야생동물, 레크리에이션 용수 등 요구되는 수질기준이 다르므로 용도별로 적절한 수질의 물이 적기에 공급될 수 있도록 수량의 확보와 동시에 적절한

수질관리가 추진되어야 하며, 사람 뿐만 아니라 생태계를 함께 고려하는 지속가능한 물환경관리가 필요한 것이다.

1. 난분해성물질 등 수질오염물질 관리강화

우리나라의 수질 및 수생태계 환경기준은 국민의 건강 보호 및 쾌적한 환경조성을 목적으로 하는 행정상의 목표로서, 국가의 사회, 경제, 산업수준, 자연환경 등의 특성을 최대한 반영하여 설정하고 있다. 환경정책기본법에 있는 수질 및 수생태계 환경기준은 하천과 호소의 특성을 감안하여 생활환경기준을 각각 규정하고 있다.



하천은 BOD 등 6개 항목이며, 호수는 COD·TP·TN·Chl-a 등 9개 항목에 대해 수질을 등급으로 나타내고 있다. 행정력 낭비와 비용손실을 회피하고 취수원이 없는 하류지역에 대한 관리비용을 최소화하기 위해 조류발생이 되지 않는 하천에 대하여는 질소와 인 항목을 제외하였던 것이다.

산업의 발달 및 인구 집중에 따라 그동안 오염물질의 유입을 규제하고 공공수역의 수질을 개선하기 위해 BOD를 집중적으로 관리한 결과, BOD는 전반적으로 크게 개선되었다.

낙엽분해물질, 산업화·도시화 등 난분해성 물질의 증가, 축산분뇨의 자원화로 인한 액비성분의 강우 유출 등으로 인한 COD의 증가로 BOD 중심의 환경기초시설 확충 및 규제정책만으로는 점점 격차가 벌어지고 있는 COD를 개선하기에는 어려움이 있다.

이에, 호소에만 설정되어 있는 COD와 TP항목에 대한 환경기준을 하천에도 도입하고, BOD중심에서 COD를 함께 고려하는 오염물질 관리정책방향을 전환하는 조치를 추진하고 있으며, 유역내 유기물질 배출특성에 적합한 저감대책을 수립하기 위해 하천과 호소에 유출되는 유기물질에 대한 정확한 분석 모니터링 방안을 보완해 나가고 있다.

2. 조류 부영양화 대책 추진

수계내 유기물질은 식물플랑크톤과 수생식물이 생산하지만 주로 대량 번식하는 식물플랑크톤에 의해 유기물질 생산량이 결정된다. 체류시간, 일사량, 온도, 총인 등 영양염류 풍부도 등의 조건에 따라 다르지만 식물플랑크톤과 수생식물이 생산하는 유기물질량은 전체 유기물질량의 약 25~30%일 것으로 추정되며, 유량부족 등으로 영양염류농도 상승과 유속이 감소하면 조류가 증식하게 되고 BOD와 COD 농도가 높아지게 되는 것이다.

[표 2] 유기물질의 특성

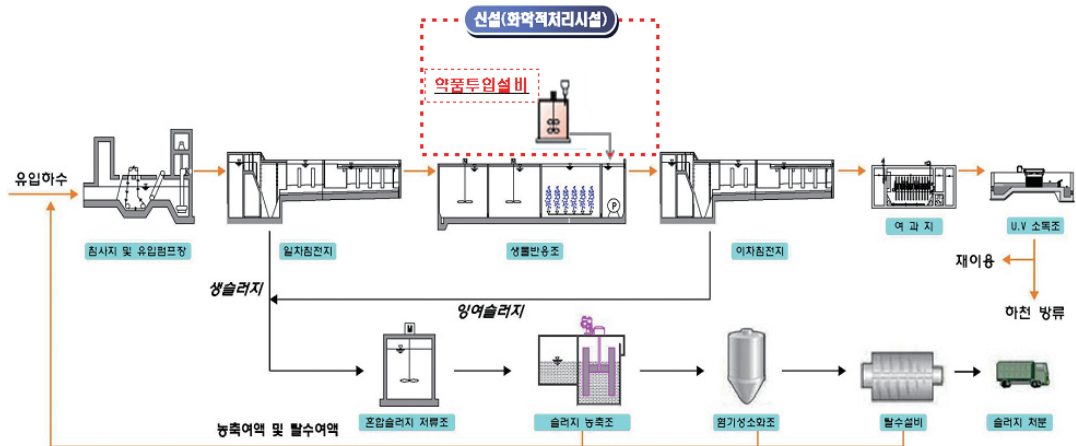
구 분	총 유기물질(유기탄소)		
	생분해성 물질	난분해성 물질	고 난분해성 물질
특성 및 종류	- 미생물이 쉽게 분해가 가능한 저분자 화합물	- 미생물의 분해가 어렵거나 오래 걸리는 고분자 화합물 · 미생물이 분해하고 남은 부식질로 식물의 섬유조직(셀룰로오스, 리그닌)	
주요 배출원	- 생활하수, 축산, 분뇨 - 음·식료폐수 등 유기성폐수 - 조류 발생·성장 및 사멸 등	- 생활하수, 축산, 분뇨 - 산업폐수(섬유, 제지, 피혁, 제약, 석유화학, 금속) - 산림, 밭, 도시지역 등 비점 오염원 - 생물학적 하·폐수처리 후 남은 유기물질 - 조류 발생·성장 및 사멸 등	
수질영향	- 산소고갈, 어류폐사 - 부패성 악취 발생 - 수돗물 염소소독 부산물 THM 생성	- 수돗물 냄새 및 맛 유발 - 부식질은 저분자 생분해성 물질(BOD)보다 THM 2-3배 생성	

이에 총인관리를 위해 호소의 영양상태를 총인만이 아닌 내외부 요인을 고려한 종합적인 평가체제로 개선하여 외부유입 COD, 내부에서 생성되는 유기물질에 대한 주요 지표인 Chl-a 항목을 포함하도록 하였다.

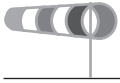
또한, 대규모 점오염원인 하수처리장에 총인처리를 강화하기 위해 시범사업을 추진중에 있다. 인 성분 처리방법은 일반적인 하수처리 후 생물처리하거나 화학처리 또는 두 가지를 조합하여 사용하는데 생물처리의 인 제거효율은 70~80%로서 방류수수질 기준에 적합하지만, 화학처리를 추가하는 등 총인 처리를 0.5~1mg/L 수준으로 강화하는 경우에는 전국 총인 배출량의 약 14%를 저감할 수 있는 것으로 예측되고 있다. 시범사업의 결과에 따라, 하수처리장의 총인 추가처리 도입여부를 결정하고 확대해 나갈 예정이다.

국내의 “총인” 처리는 일반적인 생물학적 처리 또는 고도 처리하고 있으나, 평균적 처리효율이 67%(’07)에 불과하지만, 화학적 처리 또는 여과시설을 추가할 경우에는 처리효율이 95% 수준으로 처리할 수 있다.

공공수역 수질오염총량을 과학적으로 관리하기 위한 수질오염 총량제가 '98년부터 시행중이나 BOD 항목에 대해서만 시행하고 있어, 수질개선 및 조류 발생 제어를 위해 TP 방류농도 개선과 함께 수계의 TP 총량을 과학적으로 관리하는 총량제가 필요한 것으로 판단된다. 낙동강·금강·영산강 수계에는 이미 총인 총량제 시행을 확정('05.12월)하여 광역 시도 경계지점 목표수질이 설정되어 있다. 현재 수질오염총량제 의무적 시행을 위한 법령개정 중인 한강 수계에는 향후 BOD·TP 항목 총량제 동시 도입을 추진할 계획이다.



[그림 7] 화학적 TP 처리 공정



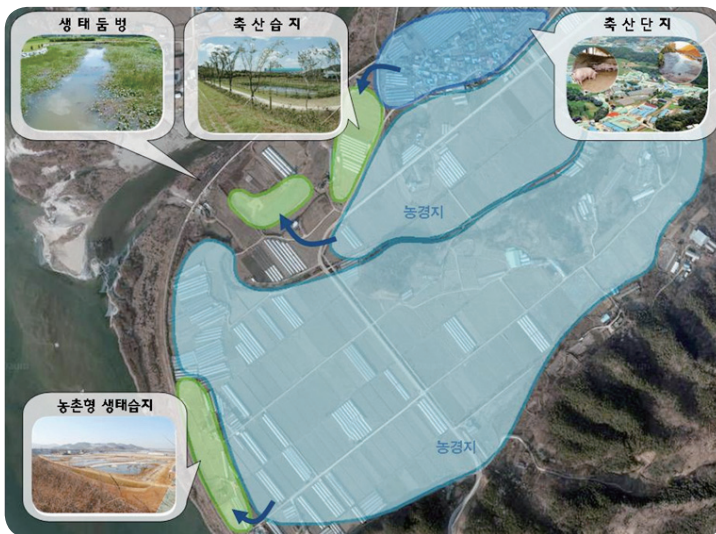
3. 비점오염원 관리강화

강우 시 유출되는 비점오염물질(빗물오염물질)은 유출과 동시에 확산이 되어 수집과 처리가 어렵고 그 효율 또한 떨어지는 특성이 있다. 따라서 발생원부터의 관리가 무엇보다 중요하므로 비점오염원 관리 대상 사업장을 단계별로 확대(개발사업 12종→17종, 배출시설 9종→16종, '07.12월)하여 사전예방적 개발·관리를 유도하고 있다.

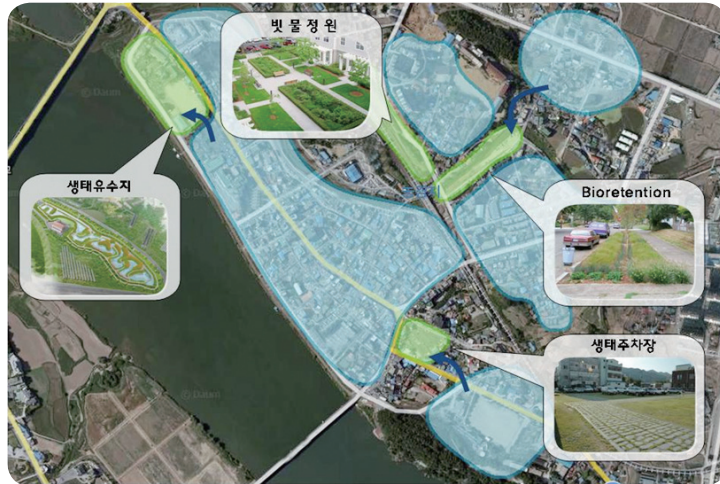
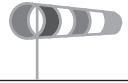
또한 비점오염원에서 유출되는 강우유출수로 인하여 하천·호소 등의 이용목적, 주민의 건강·재산이나 자연생태계에 중대한 위해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 지역을 비점오염원관리지역으로 지정·고시(소양호, 도암호, 임하호 유역 및 광주광역시, '07.8월)하였다. 관리지역별로는 중장기 시행계획을 수립('09.12월)하여 우회수로·침사지·식생완충대 등을

통해 소양호·도암호·임하호의 탁도를 50NTU 이하로 줄이고, 초기강우 유출수 처리를 통해 광주광역시 BOD를 5mg/L 이하로 저감시킬 계획이다. 또한 산업단지, 인구밀집지역 등을 대상으로 관리대상지역을 단계별로 확대하여, 4대강 수계 전역의 비점오염원 부하율을 '15년까지 절반 이하로 저감시킬 계획이다.

효과적인 비점저감시설의 도입을 위해 4대강별 비점오염저감시설 설치 시범사업을 추진하여(~'09) 왔으며, 이를 바탕으로 도시·농촌간 토지이용별 특성을 고려하여 도시지역 내 유희공간인 우수지를 활용한 생태우수지 조성, 농촌지역에는 생태습지·둠벙과 축산습지 조성 등 자연형 비점오염저감시설을 전국적으로 확대할 계획이다. 또한 도시비점제화 모델개발과 저영향 개발기법(LID, Low Impact Development)의 연구를 통해 비점오염원 발생



[그림 8] 농촌 및 축산지역 생태습지 등 비점오염저감시설



[그림 9] 도시지역 생태유수지 등 비점오염저감시설

자체를 줄이고 자연적인 물 순환에 적합한 개발 방법을 유도하는 정책을 추진 중이다.

4. 생태하천 복원 및 수변생태벨트 조성

지구온난화 및 도시열섬화에 대비하여 도시지역을 포함한 생태하천 복원을 추진하고 있다. 생태하천

복원사업은 기존 이치수 중심의 하천사업을 수요자인 시민과 야생동식물 입장에서 수생태계 건강성 보전으로 패러다임을 전환하는 것으로서 2012년까지 살아있는 건강한 하천 100개소를 우선 복원할 계획이다.

하천구역 내의 특정구간만을 고려하는 선적인 하천

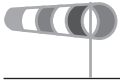


▲ 복원전



▲ 복원후

[그림 10] 생태하천 복원 사례(양재천)



복원에서 벗어나 유역단위의 조사와 계획에 기초한 통합개념의 하천복원으로 확대하여 추진중으로, 하천 중심의 중·형적 생태 네트워크를 구축하기 위해 하천 최상류에서 하류까

지, 본류로 유입되는 지천 및 지천으로 유입되는 실개천까지 통합적인 연계성을 고려, 하천구역 내 뿐만 아니라 하천주변을 생태공간으로 확대하여 수변 완충녹지, 생태공원, 생태습지 등을 조성하고, 하천에 대한 수생태계 모니터링 및 평가를 통해 하천특성에 맞는 복원목표를 설정 및 시행하고, 하천별 고유의 역사와 문화를 살피고 이를 보전·복원하거나 새로운 하천문화를 창출해 나가는 것이다.

[사례 : 밀양 해천]



위치도



현재



미래

[그림 11] 밀양 해천의 현재와 미래

또한, 도심하천 생태복원을 위해 메마른 도심하천에 맑고 풍부한 물을 공급하고 콘크리트로 복개되어 사라진 옛 물길을 복원하는 '청계천 + 20 프로젝트'를 추진하고 있다. 2012년까지 건전화된 복개하천 20개소를 제2의 청계천으로서 하천의 건강성을 회복하고 하천과 인간이 공생하는 녹색 도시공간을 조성하여 물과 자연이 깃든 하천으로 복원하는 사업이다.

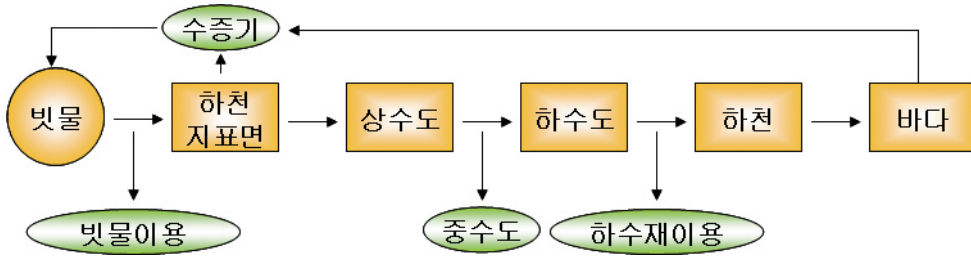
하천의 모니터링과 평가를 통해 하천특성에 맞는 복원목표를 설정하고, 하천과 그 수변지역 및 유역, 본류와 지류 실개천까지 통합적인 연계성을 고려, 복개 구조물을 철거하고 수생동식물이 서식하는 생태공간으로 조성해 나가고 있다.

수변토지를 매수하여 2012년까지 8,130천㎡의 생태림을 생태벨트로 조성하여 그 일부는 기후변화에 대비하여 속성수를 재배하여 바이오매스 에너지원으로 활용할 계획이다.

5. 물순환이용체계 구축

물 사용량은 늘어나는 반면, 한정된 수자원과 기후 변화로 인하여 앞으로 물 공급의 지역적인 불균형이 나타날 것으로 전망됨에 따라 기존 수자원에 대한 의존도를 줄이고 수자원을 효율적으로 이용하고 기후 변화로 인한 물 부족에 능동적으로 대처하기 위해 그동안 버려졌던 빗물, 오수 및 하·폐수처리수를 생활용수 등 각종 용수로 재이용을 추진하고 있다.

일정규모 이상의 종합운동장, 실내체육관에 빗물 이용시설 설치를 의무화하고, 그 밖에 공공청사(국가·지자체청사)까지 확대할 계획이며, 중수도시설



[그림 12] 물 순환 및 재이용체계

설치대상은 현행 호텔, 백화점, 공장에서 나아가 택지개발 및 산업단지 등 개발사업까지 확대할 예정이다.

또한, 고도처리로 수질이 양호하고 발생량이 막대한 하수처리수를 재처리하여 공업용수, 농업용수, 하천 유지용수 등으로 공급하고 있으며, '07년말 기준 하수처리수 재이용률은 9.9%에 이르고 있으며, '13년까지 연간 10.8억톤 16.6%를 목표로 하고 있다.

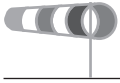
IV. 향후 과제

기후변화가 미래에 어떤 영향을 미칠지 명확하지는 않지만 다양하고 수많은 분야에 영향을 미칠 것으로

예상되고 있다. 발리로드맵을 통해 선진국과 개도국 모두가 2013년 이후에는 어떠한 방식으로든 온실가스 감축에 참여하기로 한 바 있다.

따라서, 온실가스 저감을 위해 전국민적인 노력과 아울러, 과학적인 모니터링을 통해 대응방안을 끊임 없이 모색하여 추진해 나가야 할 것이다.

기후변화로 인한 물환경변화에 선대응하고, 사전예방을 위해 국내 주요 하천에 대한 홍수·가뭄 방지와 동시에 수질문제를 해결하기 위해 추진되고 있는 4대강 살리기 등을 통해 하천의 유량을 확보하고 오염물질관리강화 및 수생태계 서식처를 확보해 나가는 등 끊임없는 우리의 노력이 요구되고 있다.



기후변화에 따른 물 관리 정책 방향

노재화

국토해양부 수자원정책관

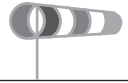
nojih21@korea.kr

I. 서론

최근 들어 세계 곳곳에서 이상가뭄 및 태풍, 허리케인, 폭우 등으로 인한 피해가 급증하고 있다. 우리나라의 경우 기온은 20세기 동안 1.5°C 상승하였으며, 최근 20년간 강수량은 7% 증가한 반면, 강수일수는 14% 감소하였으며 80mm 이상의 호우 발생빈도가 증가하는 추세를 보이고 있는 것으로 나타났다. 우리나라에서 기후변화의 사실여부는 이제 더 이상 논란거리가 아니다. 특히, 기후변화의 영향을 직접적으로 받을 수밖에 없는 수자원 분야에서는 1990년대부터 잦은 홍수와 가뭄의 반복으로 곤란을 겪고 있다. 특히, 우리나라는 협소한 국토면적과 과다한 인구로 토지나 수자원 등 국토자원 이용의 강도가

다른 나라에 비하여 현저하게 높기 때문에 지구온난화에 따른 기후변화와 같은 약간의 기후변동으로도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 내포되어 있다. 따라서 그 동안 기후변화에 대한 과학적 근거가 불충분하다는 이유로 무시되거나 보류되어 왔던 기후변화 영향을 국가 수자원계획을 비롯한 수자원 관리 실무에서 고려하는 것이 시급하다. 왜냐하면 수자원 정책은 그 계획수립에서 실행이 완료될 때까지는 20년 이상의 기간이 소요될 수 있으며 그 동안에 기후변화가 더 심해 질 수 있기 때문이다.

20세기 가장 중요한 자원이 석유와 같은 화석연료였던 데 반하여, 21세기에는 물이라는 자원으로 인한 국제분쟁이 발생할 것으로 여러 국제 기관들은



경고하고 있다. 특히, 물 부족 국가로 분류된 우리나라의 경우 물 문제는 다가오는 21세기에 있어서 국민생활의 질적 향상과 국제 경쟁력을 유지하기 위하여 우선적으로 해결되어야 하는 중요한 문제일 것이다. 이러한 물 문제는 가뭄 또는 국지적 물 부족, 홍수, 수질오염으로 대별 할 수 있으며 이에 덧붙여 이러한 문제를 효과적으로 해결하고 관리하기 위한 사회·경제적 영향 파악과 법·제도적 틀을 구성하는 것도 포함한다.

기후변화는 수문 현상에 많은 영향을 미쳐, 물 순환 과정의 정확한 파악을 더욱 어렵게 하고 있다. 또한, 기후변화는 안정적인 물 공급을 위한 수자원 계획 수립에 불확실성을 증대시키고 홍수나 가뭄 등과 같은 극심한 자연재해의 대비책 마련에 어려움을 가중시키고 있다. 이러한 기후변화에 대응하기 위해서는 수자원의 변동성을 정량적으로 평가하여 국가 수자원 정책 수립에 반영하여야 할 것이다.

본고에서는 기후변화가 물 관리에 전반적으로 미치는 영향을 살펴보았으며, 기후변화에 대응하는 외국의 사례를 소개하고, 마지막으로 기후변화에 적응하기 위한 지속가능한 물관리 정책 방안에 대하여 언급하였다.

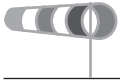
II. 기후변화로 인한 물 관리의 환경적 여건 변화

21세기 이후 물 관리는 전 세계 각국의 주요문제로 대두 되고 있으며 2009년 UN 보고서에서는 향후

10년 후인 2018년 지구촌이 해결해야 할 15개 과제 중 기후변화와 물 부족을 핵심과제로 선정하고 있다. 기후변화의 최신 전망이 아직 신뢰성에 문제가 남아 있다고는 해도 현시점에서는 그것을 기본으로 하고 홍수, 갈수 그리고 수질 등 물 관리에 어떠한 변화나 문제가 생기지를 전망하여 그 문제를 파악하고 부정적 영향을 최소화하는 대책을 강구하는 것은 당연한 대응일 것이다.

1991년 World Climate Conference에서는 “과거의 기후나 수문현상의 기록은 더 이상 믿을 만한 미래에 대한 지침이 아니며 수자원 시스템에 대한 구조적 비구조적 설계와 관리는 기후변화에 의한 가능성을 고려해야 한다”라고 하였다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 수자원 관리자들에게 수자원 시스템의 설계범위, 운영 규칙, 비상 계획, 그리고 물 배분 정책에 대한 체계적인 재검토와 기후변화에 대한 불확실성에 대응하기 위한 방안으로 물수요 관리와 제도개선을 강력하게 권고한 바 있다.

지구의 환경은 끊임없이 변화하고 있고 그 변화 경향은 21세기에 보다 빠르게 진행할 것으로 예상되고 있다. 즉, 미래의 전망은 더욱 더 큰 불확실성을 내포하게 되는 것은 당연한 일이라 할 수 있다. 그러나 이러한 불확실성을 이유로 미래에 대한 대비를 소홀히 하는 것은 더욱 더 어리석은 일일 것이다. 특히 물을 다루는 수자원 기술자에게 있어 앞으로의 미래가 더욱 큰 도전의 시대가 될 가능성이 크다.



III. 기후변화가 물 순환과 수자원에 미치는 영향

기후변화는 물 순환과 수자원 관리에 대해 직접적이고 근본적인 영향을 미쳐 왔다. 여기서 중요한 점은, 매우 작은 기후변화라고 할지라도 물 순환과정을 거치면서 그 변동의 규모가 커지게 되며 이것은 수자원 관리자들에 있어 중요한 의미를 가지게 된다는 점이다. [표 1]은 한 예로서 1970년 ~ 1980년대 서아프리카 지역의 가뭄에 대한 자료(Servat et al., 1999)를 발췌한 것으로, 표를 통해 알 수 있듯이 약 25%의 강수 감소에 의해 약 50%의 연간 유량이 감소하였다. 이것은 강수 패턴의 작은 변화가 수자원에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주는 것이다.

농도는 1750년에 280ppm이었지만 1999년에는 367ppm까지 증가하였으며 2050년과 2100년쯤에는 각각 463-623ppm과 470-1099ppm까지 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 전 지구의 평균기온이 20세기를 지나며 약 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 상승할 것이며 이는 지난 1000년 동안 가장 큰 상승이라고 하였다. Clausius-Clapeyron의 물리식에 따르면 온도가 높아질수록 증기압은 더 증가하게 되는데 이는 홍수를 유발할 수 있는 강우의 잠재력이 온도와 함께 증가하게 됨을 의미하며, 이러한 현상은 실제로 이미 많은 지역에서 관측된 바 있다(IPCC, 2001). 기후변화가 물 순환 과정을 빠르게 진행시키고, 극한 사상의 빈도와 극치 상태를 증가시킨다는 가정이 실제 수문자료에서 관측됨에 따라 최근 주된 관심사가 되고 있다.

IPCC(2007) 4차 보고서에 의하면 대기 중의 CO₂

[표 1] 서아프리카와 중앙아프리카 국가들의 강수 감소와 하천 유량 감소(Servat et al., 1999)

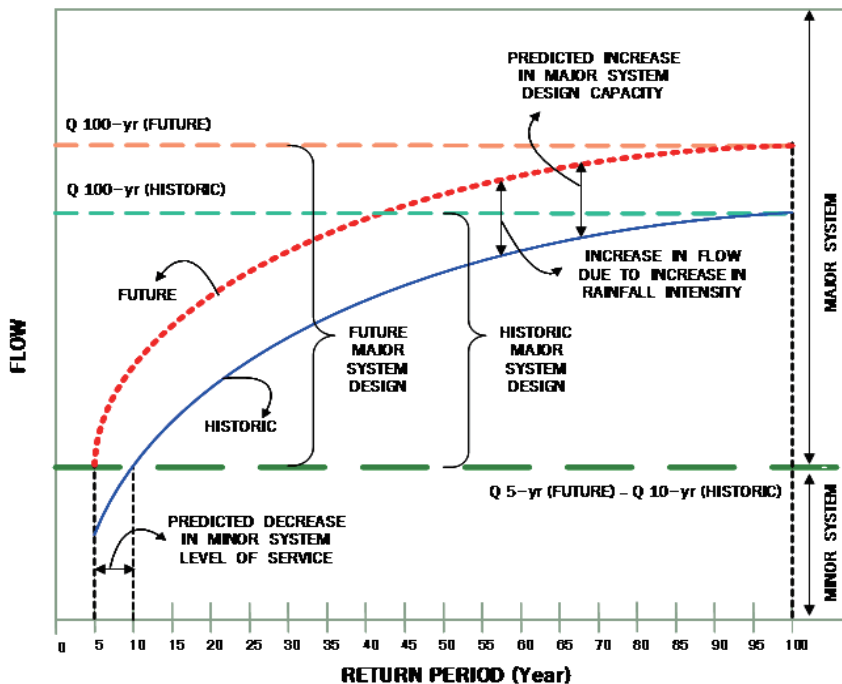
Country	Reduction in Precipitation (%)	River	Gauging Station	Reduction of Annual Flow (%)
Cameroon	16	Comoe	Aniassue	50
Togo	16	Chari	Ndajmena	51
Central African Rep.	17	Logone	Lai	39
Benin	19	Niger	Malanville	43
Ghana	19	Niger	Niamey	34
Nigeria	19	Bani	Douna	70
Guinea	20	Oueme	Sagon	42
Chad	20	Sassandra	Semien	36
Ivory Coast	21	Senegal	Bakel	50
Burkina Faso	22	Bakoye	Ouali	66
Guinea Bissau	22	Black Volta	Dapola	41
Mali	23	Black Volta	Boromo	46
Senegal	25	Oubangui	Bangui	30

기후변화로 인한 자연재해는 해마다 크게 증가하고 있으며, 전 세계적으로 홍수 및 가뭄의 강도와 빈도의 증가, 지구온난화로 인한 계절적인 하천 건천화 등의 문제들이 대두되고 있다.

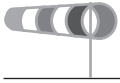
1. 기후변화가 홍수관리(치수)에 미치는 영향

기후변화에 의한 강수량과 강우강도의 증가는 댐과 같은 수공구조물에 막대한 영향을 미치게 된다. 댐이 붕괴할 경우 댐 하류 유역에 막대한 피해를 초래할 수 있기 때문에 댐의 설계 시에는 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation)을 고려하도록 되어있다. 가능최대강수량은 일반적으로 온도가

1℃ 상승하면 약 10% 증가한다. 만일, 기후변화에 의해 온도가 1℃~2℃ 상승한다고 가정한다면, 가능최대강수량이 10% 이상 증가 되는 것은 충분히 가능할 것이다. 이처럼 기후변화는 수공시설물을 설계하는 데 있어 가장 중요한 변수인 극한 수문사상을 변화시키기 때문에 수공관련 기반시설물을 계획하고 설계하는 수공기술자들에게 있어 기후변화를 고려해야 한다는 것은 이제 현실이 되고 있다. 또한, 기후변화로 인한 수문과정의 점진적 변화 영향은 수공관련 기반시설물의 설계연한 기간 동안 침투 홍수량의 규모와 빈도를 변화시킬 것으로 예상하고 있다. 미래 강우강도의 잠재적 변화는 수공관련 기반시설의 서비스 수준을 변화시킬 것이며 수공구조물



[그림 1] 기후변화에 따른 수공구조물의 설계 빈도곡선의 변화



설계를 위한 계획에 이용되는 설계 방법론의 변화를 필요로 한다.

[그림 1]은 기후변화에 따른 수공구조물 설계빈도곡선의 변화를 나타낸 것으로 파랑색 실선은 과거자료만을 이용한 설계빈도곡선이며 빨강색 점선은 미래의 설계빈도곡선을 나타낸 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 과거 10년 빈도 설계홍수량은 미래에는 5년 빈도 설계홍수량으로 줄어들게 되며, 또한 100년 빈도 설계홍수량의 경우에도 미래에는 과거에 비해 증가된다는 것을 보여 주는 것으로 기후변화로 인해 기존 수공구조물의 홍수방어 능력이 감소하게 되어 홍수관리의 어려움이 증가될 수 있음을 알 수 있다.

2. 기후변화가 가뭄관리(이수)에 미치는 영향

기후변화의 영향 중 하나가 가뭄의 확대이다. 기후변

화는 물 순환 요소의 양의 변화에 영향을 미칠 뿐만 아니라 각 물 순환 요소의 시공간적 특성에도 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 겨울철의 최저기온의 상승은 적설량 및 용설 시기를 변화시키며, 이는 봄 가뭄을 유발할 수도 있다. 또한, 많은 연구에서도 기후변화의 영향으로 유출량의 변화와 더불어 유출시기의 변화가 발생할 것으로 예측하고 있다. 가뭄의 경우 그 위험성을 직접적으로 인지하기는 어려우나 실제 물 부족으로 인해 사망하는 사람이 증가하고 있으며, 위생급수를 공급받지 못해 수인성 질병 등으로 사망하는 사례도 빈번히 발표되고 있다. 이제는 물이 무한한 천연재가 아니라 희소한 경제재로 자리 바뀐 것이다. 이러한 절대 용수의 부족은 물 분쟁의 발생가능성을 높이게 될 것이며, 이러한 분쟁은 주로 후진국을 중심으로 발생하게 될 가능성이 크다고 할 수 있다.



[그림 2] 기후변화가 하천유량에 미치는 영향

앞으로 예상되는 극치사상의 증가와 수자원의 시공간적 불균형은 더욱 취약성을 증가시킬 것으로 판단된다. 또한, 기후변화는 생활 및 공업용수의 수요에도 커다란 파급효과를 가져올 수 있다. 강수량과 증발산량의 변화는 관개수량과 회귀수량에 영향을 미칠 것이다. 안정적인 수자원의 공급 및 확보를 위해서는 장기적이고 효율적인 수자원계획이 요구되지만, 기후변화로 인해 변동성이 커지게 된다면 수자원 확보에 대한 불확실성도 커질 것이다.

3. 기후변화가 수질 관리에 미치는 영향

기후변화로 인한 이상기온 현상은 해수면 온도 상승, 강수량 증가 또는 강우 발생 기간 및 일조시간의 변화 등 과거와는 다른 양상의 기상패턴으로 나타나고 있다. 그리고 이러한 변화는 홍수와 가뭄을 유발하는 수량 뿐 아니라 수생 생태계와 수질 전반에 부정적인 영향을 미치는 것으로 파악되고 있으며, 이는 수질과 수자원을 구분하여 관리 할 수 없음을 보여주는 것이기도 하다. 그러나 아직까지는 기후변화가 수질에 미치는 영향 또는 대응에 대한 연구는 미비한 실정이다.

IV. 외국의 기후변화에 따른 수자원 대응방향

국가별 기후변화 관련 수자원 분야의 대응사례를 살펴보면 각 국가별로 국가의 특성에 맞게 다양한 전략을 수립하고 있다. 특히, 영국, 핀란드, 일본의 경우 홍수를 대비하기 위한 전략을 수립하고자 하는 노력이 돋보이며, 호주의 경우는 홍수보다는 수자원의 합리적 분배와 효율적 사용이라는데 주목적을 두고 있다. 각 국가별 기후변화에 대응한 수자원 관리 사례를 간략히 소개하면 다음과 같다.

1. 기후변화에 대응한 치수 측면의 국외 사례

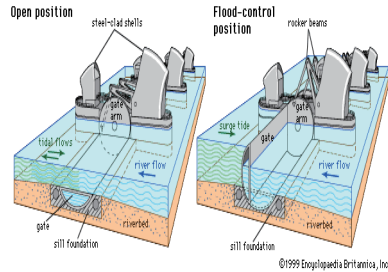
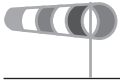
1) 영국의 사례 (기후변화를 고려한 홍수위험 관리)

- 계획 및 개발과정에서 홍수방어를 위한 최상위 계획정책지침은 PPS 25의 ‘개발과 홍수위험(Development and Flood Risk)’에 담겨 있으며, PPS 25는 공간계획 수립과정에서 홍수위험을 고려함으로써 보다 안전하고 지속가능한 개발을 달성
- 현재 PPS 25에서 권고하는 홍수위험관리에 있어 기후변화 영향을 고려하기 위한 침투강우강도 등에 대한 가중치와 해수면 상승에 대한 여유치(contingency allowance) 등 제안

[표 2] 영국의 기후변화 영향을 고려한 강우 등에 대한 가중치

구분	1990-2025년	2025-2055년	2055-2085년	2085-2115년
침투 강우강도	+5%	+10%	+20%	+30%
침투 하천홍수량	+10%		+20%	
내륙지역 풍속		+5%		+10%
극한 파고		+5%		+10%

자료) UK Dept. of Communities and Local Government, PPS 25(2006)



[그림 3] 템즈 강 수문 증고계획 (해수면 상승 대비)

- 런던시내를 홍수로부터 보호하기 위해서 2030년을 목표로 건설된 Thames Barrier의 목표년수를 기후변화를 고려하여 2100년으로 연장하기 위한 연구를 진행 중(현재보다 2m 수문을 증고하여 미래의 홍수 대비 계획 수립)

※ 많은 국가들이 기후변화 관련 수자원 정책을 수립하고 있지만 기후변화를 고려해서 수공구조물을 실제로 설계한 경우는 영국이 유일

2) 네덜란드의 사례

- 네덜란드는 국토대부분이 해수면보다 낮아서 기후변화에 대비하여 국토해발고도를 높이기 위한 복토계획을 수립 중
- 방재와 감재를 병행하고, 더 높은 제방은 더 높은 위협을 초래한다는 개념으로 자연하천(홍수터, 범람원)을 복원하는 등 21세기 신 물관리 정책 수립

3) 일본의 사례

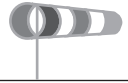
- 기후변화에 수반되는 수자원 부분의 변화를 다각적이면서 구체적으로 분석(강수량·하천유량·

용설시기·해면상승·수온의 변화 등)하여 세부 대응책 마련을 추진 중

- 우리나라와 유사하게 기후변화로 인한 극한 강우의 빈도가 증가. 이로 인하여 제방의 치수 안전성에 문제가 생기고 있으며 치수안정성을 제고하고자 고규격 제방인 '슈퍼 제방'을 도입

4) 핀란드 사례

- 지난 10년 동안 기후변화가 자연과 인간에 미치는 영향을 평가하기 위한 투자가 진행. 기후변화의 부정적 영향을 감소시키고 이를 기회로 삼아 활용하기 위해 2005년 "국가 적응 전략 보고서" 작성
- 치수 안정성의 확보를 위하여 댐에 대하여 안정성 평가를 수행하고 있으며, 수행결과를 바탕으로 위험성이 있다고 판단된 댐에 대하여 여수로(Spillway)의 증축이나 비상 여수로를 추가적으로 설치하는 등의 대책 시행



[표 4] 핀란드의 기후변화 대응 수자원 분야
증장기 계획

단기 (2006-2010)
<ul style="list-style-type: none"> - 기후변화와 연관된 수자원 관리계획의 수립 - 위험지역에 관한 조사와 위험지역의 기본 계획 마련 - 임시 홍수 조절 구조의 설치 및 응급 조치 계획 - 홍수 위험을 감소시키는 토지이용계획(특히 홍수터에서의 건축 금지 방안) - 도시계획에 있어서 강수관련 상황 고려
증장기(2010-2080)
<ul style="list-style-type: none"> - 홍수 예측 방법의 개선 및 토양 수분함량의 원격 모니터링 시스템 구축 - 홍수 위험에 대한 정보의 확충 - 적절한 지역에 홍수 방지 댐의 높이 조절 - 수자원 관리 관련 법령의 재검토

2. 기후변화에 대응한 이수 측면의 국외 사례

1) 영국 사례

- 기후변화프로그램(UKCCP)과 기후변화영향 프로그램(UKCIP)을 두고 해들리 센터와 틴달 센터에서 기후변화 예측 및 유역별 수자원 영향 평가를 수행하고 이를 기반으로 분야별 적응방안 도출

[표 3] 영국의 수자원 분야에 대한 적응 대책 사례

적응 정책 및 방안
<ul style="list-style-type: none"> • 수자원 관리, 유량 관리 및 공급에 대한 전략 및 계획 시 기후변화에 대한 전망 고려 • 장기간의 위험 감소를 위해 홍수 경보 서비스, 홍수나 해안 보호를 위한 기반시설 확충 및 홍수 위험에 대한 대중의 인식 • 'Envirowise' 프로그램 : 규제를 통하여 물 사용의 효율성을 제고하기 위한 기준 설정

2) 호주의 사례

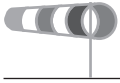
- 호주는 건조한 기후지역에 속하며, 강우량과 하천 유량의 변동이 매우 심한 국가로서 여기에 기후변화로 인한 영향까지 더해져 수자원 관리 측면에서 다양한 문제에 직면
- CSIRO 주관으로 기후변화를 고려한 수자원의 수량 및 수질변화, 지표 및 지하수연계해석, 수자원 및 유역환경 관리 등에 필요한 기술개발에 관한 연구 진행
- 호주의 기후변화 대응에 관한 정책은 주로 수자원의 효율적이고 균형적인 배분과 수자원 및 수자원 관련 기반 시설의 확보, 수자원 관리를 위한 새로운 기법 개발에 중점을 둠
- 호주는 "National Plan for Water Security (January 2007)"에서 물 안보 관련 장기 계획을 발표하였으며, 10년간 10개 사업에 중점을 두고 100억 달러를 투자

3) 캐나다의 사례

- C-CIAP 프로젝트에서 물 관련 분야의 기후변화에 따른 취약성 및 적응방안을 도출하여 지표 및 지하수 그리고 수자원관리로 구분하여 지역별 영향평가 수행
- 캐나다는 Okanagan 유역을 대상으로 기후변화의 영향과 가능한 적응전략을 수립(Water Management and Climate Change in the Okanagan Basin)

4) 독일의 사례

- 전지구물순환변화(GLOWA, 2001-2008) 연구사



업에서 기후변화에 따른 물순환, 물이용, 효율적인 수자원관리, 사회영향평가 등 수행

- 기후변화를 고려한 라인강 유역 미래의 물수지 분석 및 미래의 수자원 계획 수립

V. 수자원에 대한 기후변화 영향의 극복과 대응 방향

1. 현재 수행 중인 수자원 분야의 기후변화를 고려한 연구

국토해양부는 기후변화에 대처하기 위해 폭 넓은 기후조건 하에서 능동적인 수자원 관리 및 계획을 수립하기 위하여 다음과 같은 노력을 하고 있다.

1) 이상기후에 대비한 수공시설물 설계기준 강화

앞에서 언급한 바와 같이 우리가 적용하고 있는 과거 기록에 근거한 계획 및 설계 방법을 더 이상 고집해서는 안 된다. 이미 일부 현실화되어 나타나고 있는 기후변화의 영향을 고려할 수 있는 방안을 시급히 연구개발하고 이를 실무에 사용할 수 있도록 노력해야 한다. 특히, 이제까지 우리가 적용해 왔던 순이익을 최대화하기 위한 최적설계 방식보다는 정책적으로 결정된 극한 조건을 만족하기 위한 최적설계를 채택하는 것으로 설계방식을 전환할 필요가 있다. 이를 위해 국토해양부는 미래의 기후변화에 의한 이상홍수에 대응하기 위하여 2005년부터 『이상기후에 대비한 시설기준 강화 연구단』을 세워 다양한 연구를 진행 중이다.

2) 기후변화 대비 국가 물 안보 확보 방안 연구

우리나라뿐만 아니라 외국에서의 가뭄, 홍수와 같은 이상기후의 빈번한 출현은 사회, 경제적으로 심각한 영향을 주고 있으며, 이와 관련된 연구도 선진국을 중심으로 매우 활성화되어 있는 상태이다. 이에 국토해양부는 기후변화로 인해 발생하는 홍수, 가뭄 그리고 생태환경 변화에 대처 할 수 있는 장기 수자원 정책의 개발과 미래의 국가 물 안보 확보를 목적으로 2007년부터 『기후변화 대비 국가 물 안보 확보 방안』과업을 수행 중이다.

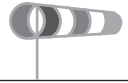
2. 기후변화에 대응한 수자원 정책방향

1) 기후변화를 고려한 수자원 계획

지금까지 우리나라는 1965년부터 10년마다 수자원 장기 종합계획을 수립하고 있으며 최근에는 2006년에 '수자원장기종합계획(2001-2020)'을 수립하였다. 아직까지는 수자원장기종합계획에 기후변화에 대한 영향은 별도로 고려하지 않았으나, 2008년 4월 『하천법』을 개정하여 '기후변화에 따른 국가의 물확보 방안'을 수립하도록 하여 현재 수자원장기종합계획을 보완 중에 있다. 수자원장기종합계획의 수립과정에서 수자원 공급량과 용수수요가 추정되면, 전 국토에 대한 취약성이 분석되며 이를 근거로 댐개발종합계획과 유역종합계획이 수립된다.

2) 기존 시스템 운영 방법의 개선

기후변화는 기존의 수자원 시스템이 설계되고 운영 되도록 가정되어 있는 자연조건과는 다른 수문조건과 극한 상황을 만들어 낼 것이며 그 복잡성은 한



층 더 심화될 것이다. 그러나 기후변화에 대한 대책은 기존 시스템의 기후변화에 대한 효과적인 운영을 찾는 것이며 기존의 시스템만으로 기후변화에 대한 영향을 처리할 수 있는지를 검토한 후 경제적 비용을 고려하는 것이다. 즉, 시스템 운영자들이 취할 수 있는 최선의 방안은 현재 운영하고 있는 것보다 적용범위를 확대한 시스템에 대한 민감도를 확인해 보고, 운영효율을 개선하기 위한 방법과 기술을 개발하는 것이다.

3) 유역관리를 위한 첨단 기상기술의 활용

최근 기후변화로 인한 국지성 이상호우의 발생으로 인해 돌발홍수가 빈번하게 발생하고 있으며 이로 인해 유역관리 측면에서는 사전예측과 대비에 어려움을 겪고 있다. 이에 강우레이더 및 수치예보자료를 활용한 강우예측의 신뢰성을 확보하기 위한 노력이 필요하며 유역의 강수실황예보를 할 수 있는 체계 구축이 필요하다.

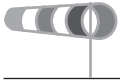
4) 댐유역 홍수관리체계의 종합적인 재검토

한반도의 강우패턴 변화로 인해 집중호우가 발생하는 시기가 빨라지거나 느려질 수 있기 때문에 이러한 불확실성을 고려하여 탄력적으로 댐을 운영할 수 있는 홍수기 댐가변제한 수위의 재검토가 필요할 것이다. 아울러 여름철에 물을 가두어 갈수 시 물을 이용하는 패턴에서 연중 저수량을 확보함으로써 필요한 시점에 효율적으로 배분할 수 있는 체계가 필요하다.

5) 홍수방어능력 평가와 이상홍수에 대응한 선택적 홍수방어 체계 수립

기후변화로 인한 홍수 대책은 단순 구조적 대책으로는 그 한계가 분명하다. 구조적인 대책은 예산 및 인력, 그리고 구조물이 설치된 주변의 환경에 따라서 시행되기 어려운 경우가 있으며, 특히 이상홍수의 경우 이를 대비하기 위하여 무한정 구조적인 대책으로 설계기준을 높이는 것은 힘들다.

최근과 같이 수공시설물의 설계규모를 넘어서는 극한 강우사상의 발생은 여러 수공구조물과 홍수방어 시스템을 파괴하는 원인이 되고 있기 때문에 극한 강우사상에 대한 현재의 시공간적 특성을 파악하는 것뿐만 아니라 미래의 기후변화 하에서 극한강우사상이 어떻게 변화하고 수공구조물의 설계수명기간(Design Period)에 대한 분포형이 어떻게 변화할지를 이해하는 것이 매우 중요하다. 또한 이상홍수에 대응하기 위한 전략으로 구조적인 분석과 함께 비구조적인 접근으로 적절한 완화(Mitigation), 적응(Adaptation), 위험관리(Risk Management) 전략이 필요하다. 이러한 전략 수립을 위해서는 홍수방어 대책을 수립할 때 어느 지역이 홍수에 취약한가를 파악하여 제일 먼저 투자가 이루어지고 대책이 세워져야 한다. 이를 위해서는 기후변화로 인해 유발되는 이상홍수에 대하여 이미 설치되어 있는 제방이나 댐, 그리고 하천교량 등 홍수와 관련된 사회기반 시설들이 설계방어능력을 가지고 있는지를 평가해 볼 필요가 있다. 또한, 유역통합관리(IWRM)에 의한 종합적인 홍수관리가 필요하다. 유역차원에서 상류는 저류기능, 중류는 억제기능, 하류는 배수기능의



역할을 주로 할 수 있는 선택적 홍수방어가 필요하다.

6) 기후변화 수자원영향 평가체제 구축

기후변화에 능동적으로 대처할 수 있는 수자원의 장기적인 계획을 수립하기 위해서는 유역규모의 기후변화시나리오를 생산하고 이를 이용하여 유출시나리오를 생산할 수 있는 체계가 구축되어야 한다. 또한, 기후변화에 대한 예측과 이해를 향상시키고 우리나라의 국제적 위상을 제고하기 위해서는 동아시아 규모의 국가 간 상호협조체제의 구축이 필요하다.

VI. 맺음말

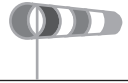
이미 선진 외국은 잠재적인 기후변화 영향을 이미 인지하고 “후회 없는(no-regrets)” 정책으로 불확실한 미래를 준비하고 있다. 여기서, “후회 없는” 정책이란 기후변화의 결과가 예상대로 발생하는지의 여부에 상관없이 실행하는 것으로 미래에 발생할 수 있는 기후변화의 위기를 적응과 완화 전략을 지원하여 기회로 삼는 것을 의미하는 것이다. 그러나 불행하게도 우리나라의 경우 아직까지도 기후변화에 대한 불확실성을 핑계로 적응 정책 수립이 미루어지고 있는 것이 현실이다.

물 관리가 기후변화에 가장 취약한 분야임에도 불구하고 우리나라 수자원 분야의 경우 기후변화에 대한 조치가 미흡하였으나, 최근 설계 홍수량을

벗어나는 극한 홍수를 자주 경험하고 있는 상황에서 좀 더 적극적으로 새로운 접근 방식과 기술 개발을 추진해야 하며, 보다 더 체계적이고 깊이 있는 연구로 기후변화에 대응한 물관리 정책을 개발하여야 할 것이다. 21세기에도 깨끗한 물을 안정적으로 공급하기 위해서는 변화된 수자원의 여건을 다양하게 고려하여야 하며 자연적, 사회적인 환경변화와 제도 및 조직변화, 달라지는 국민의식, 시대적 요구까지 고려하여야 한다.

지구온난화와 세계적인 기후변화에 따른 이상기후, 다양한 생활양상에 따른 물 수요의 증가, 각종 오폐수의 증가로 수질오염이 심화되어 사용할 수 있는 물은 점점 적어지는 심각한 상황을 맞고 있다. 미래의 지구환경변화에 따른 이상기후와 홍수 등에 대비한 각종 시나리오를 수립하고 그 대응책을 마련해야 한다. 최선의 대안을 선택해야 하고, 효율적인 개발·공급·관리를 위해서 장기적인 수자원정책을 수립하여 체계적으로 시행하여야 할 것이다. 수자원 문제는 종합적이고 합리적으로 계획하여야 하고 무엇보다도 사회적 공감대를 형성하여야 할 것이다.

‘종(種)의 기원’으로 알려진 생태학자 찰스 다윈은 “궁극적으로 살아남는 종은 강한 종도, 지적 능력이 뛰어난 종도 아닌, 변화에 가장 잘 적응한 종”이라고 강조하였다. 찰스다윈의 말처럼 우리가 기후변화라는 변화에 살아남기 위해서는 변화에 현명하게 적응할 필요가 있다. 그러므로 물을 관리하고 정책을 수립하는 정부와 전문가들은 기후변화에 대한 감축정책과 적응정책을 동시에 만족할 수 있는 녹색기반시설(Green Infrastructure)과 녹색강(Green River)을



추진함으로써 기후변화를 위기가 아닌 새로운 도약의 기회로 활용해야만 한다. 이는 곧 정부의 녹색뉴딜 정책을 실천하는 하나의 방향이라고 생각된다.

참고문헌

기후변화 대응 국가물안보 확보방안 (2007; 2008), 국토해양부, 한국건설기술연구원

김병식 등, 2004: 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향, 한국수자원학회논문집, 제 37권 3호, 185-193

김병식, 2005: 기후변화에 따른 유역의 수문요소 및 수자원 영향평가, 박사학위논문, 인하대학교, 9-13.

김영오, 1999: 기후변화를 고려한 수자원 관리기법, 한국수자원학회, 제 47권, 제5호

박진혁, 김우구, 2007: 기후온난화에 따른 수자원 전망과 댐유역 관리, 한국수자원학회지 Vol. 40(5), 83-87

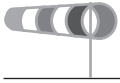
배덕효, 정일원, 2004: 기후변화와 수자원 대응, <http://crlweb.metri.re.kr/korea1/lab/crl/data2/Climate2004-5.pdf>

Communities and Local Government (2006). Planning Policy Statement: Planning and Climate Change -- Supplement to PPS1, Consultation

Gill, S., Handley, J., Ennos, R., and Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: the Role of the Green Infrastructure. Built Environment, 33(1): 115-133.

IPCC (2001). "Climate Change 2001: Impacts, Adaptations, And Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.", Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Servat, E., et. al., 1999: De differents aspects de la variabilite de la pluviometrie en Afrique del'Ouest et Centrale non Sahelienne. Rev. Sci. Eau, 363-387



기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰

김 문 모

신구대학 공간디자인학부 건설정보과 교수
mummo310@shingu.ac.kr

정 창 삼

인덕대학 토목환경설계과 교수
csjeong@mail.induk.ac.kr

여 운 광

명지대학교 토목환경공학과 교수
yeo@mju.ac.kr

심 재 현

국립방재연구소·연구관
shim1001@nema.go.kr

I. 서 론

최근 들어 전 세계적인 기후변화로 인해 이상강우 및 폭우를 동반한 홍수 등의 재해가 빈번해 지고 있으며, 이로 인해 많은 인명과 재산피해가 발생되고 있다. 1998년 중국에서 발생한 홍수, 2002년 유럽에서 발생하여 수많은 목숨을 앗아간 폭우 등 기후변화로 인한 재해는 향후 그 발생빈도나 규모면에서 더욱 증가할 것으로 예상된다(국립방재연구소, 2005).

기상연구소(2007)에서 발표한 보고서에 따르면 국내 강우일수의 감소, 총강우량 및 강우강도의 증가가 지속적으로 관측되고 있으며, 이를 토대로 향후 홍수의 피해를 예측해 본 결과, 2100년에는 해수면

이 1m 가량 상승하여 한반도의 1.2%로 여의도 면적의 300배에 달하는 2,643km² 가량의 연안 지역이 침수되고 남북 전체인구의 2.6%인 1,255,000명이 삶의 터전을 잃을 것으로 예측되었다. 이러한 총강우량 및 강우강도의 증가는 향후 홍수의 양상 변화에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고 있다.

본 연구에서는 통계적 기법을 사용하여 대상유역인 청미천 유역의 강우의 경향성, 변동성을 분석하여 기후변화에 따른 강우량 변화추이를 확인하였으며 또한 2000년을 기점으로 1963년부터 1999년까지의 강우자료와 1963년부터 2006년까지의 강우자료를 이용하여 빈도분석을 통해 도출된 강우자료를 이용하여 빈도분석을 통해 도출된 설계빈도강우량을 HEC-HMS(Hydrologic Eng. Center-Hydrologic

Modeling System)와 HEC-RAS(Hydrologic Eng. Center-River Analysis System)를 이용하여 홍수량과 홍수위에 대한 변화를 비교해 보았다. 그 결과 1963년부터 2006년까지의 강우자료를 이용하여 구한 홍수량과 홍수위가 더 크게 산정되었으며, 이는 최근 들어 발생하는 강우량이 증가됨에 따른 결과로 판단되며 이에 따라 하천의 설계 빈도를 재평가할 필요가 있다.

II. 강우자료 분석

본 연구의 강우자료는 1971년부터 2006년까지의 강우량을 이용하였으며 이 자료를 이용하여 연도별 계절별 경향성 및 변동성 분석을 실시하였다.

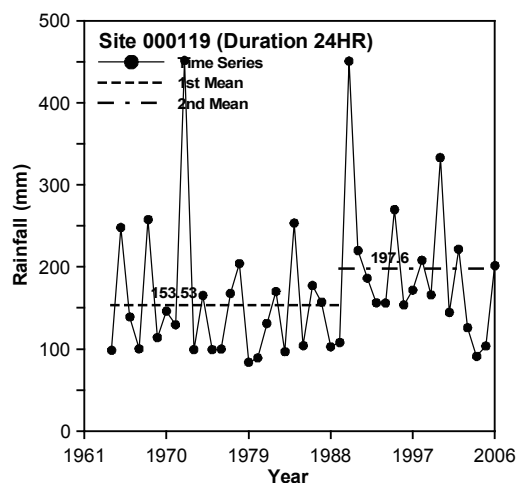
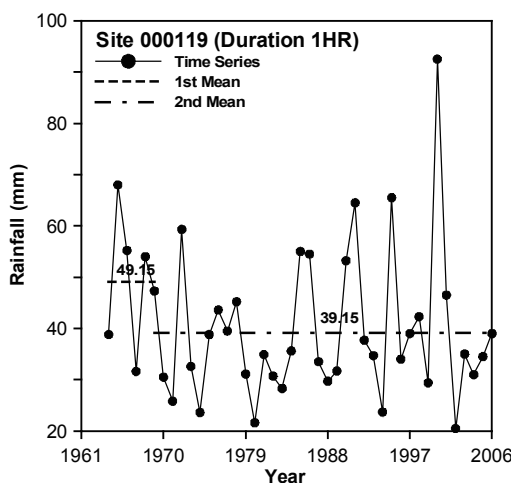
확정적 자료해석을 통한 변동분석은 자료의 평균과 분산의 변화를 파악하는 방법으로 Mann-Whitney

test, Sign test, Abbe test of homogeneity, Simple T-test, Simple F-test, Modified T-test, Modified F-test 등이 있다.

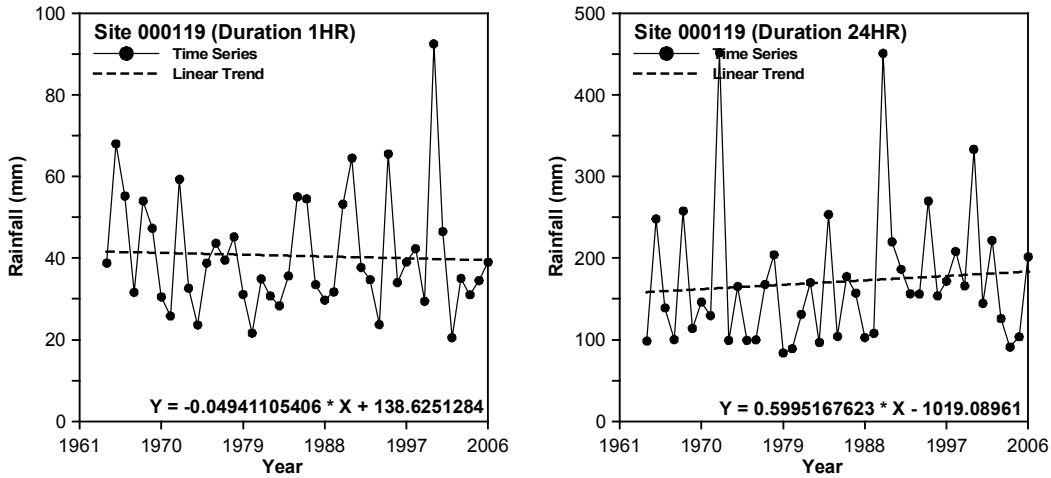
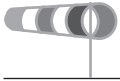
본 연구에서는 이러한 방법들 가운데 Modified T-test와 Modified F-test를 이용하여 수원 지점에 대해 변동성을 분석하였으며, 그 결과는 [그림 1]과 같다. [그림 2]는 수원지점의 강우자료에 대하여 경향성 분석을 실시한 결과이다.

III. 확률강우량 산정

본 연구의 대상지인 청미천 지역의 확률 강우를 구하기 위하여 1963년부터 1999년까지 강우자료와 1963년부터 2006년까지의 강우자료를 통해 확률강우량을 각각 산정하였다.



[그림 1] 수원지점 변동성 분석(1HR, 24HR)



[그림 2] 수원지점 경향성 분석(1HR, 24HR)

지속시간은 2, 6, 12시간 최대 강우량을 적용하였고 빈도는 20, 50, 100년 빈도를 적용하였다. 강우 빈도 분석은 FARD 2006을 이용하여 설계하였다.

확률강우량은 Gumbel 분포형의 매개변수 및 강우량에 해당하는 재현기간으로 설정하였다. 1963년에서 2006년까지의 Gumbel 분포형을 이용한 확률강우량은 다음의 [표 1]과 같이 산정되었다.

본 연구에서는 설계강우의 시간적 분포에 대하여 Huff 방법(2분위 채택)을 사용하여 설계강우를 분포시켰다. 2분위를 채택한 배경은 홍수량 산정시 유효수량 산정방법을 선택할 경우 초기 1, 2분위는 초기손실의 영향으로 설계우량주상도의 첨두부분이 상당 부분 손실로 처리되므로 홍수량이 상대적으로 작게 산정될 우려가 있지만 지역적 설계 강우의 시간적 분포(2000) 보고서에서 제안한 중호우의 최빈분위를 채택하는 방안에 따라 2분위를 채택하여 분포형을 결정하였다.

[표 1] 지속시간에 따른 재현기간별 확률강우량(1963년~2006년)

(단위: mm)

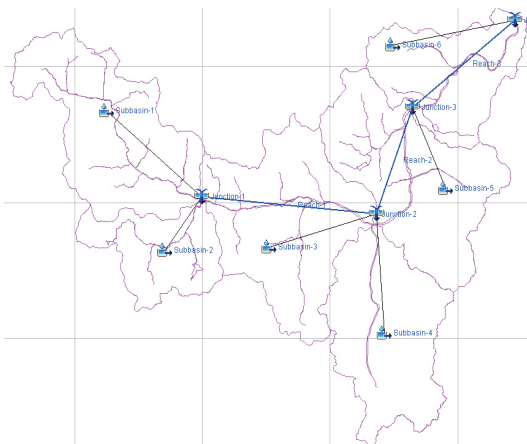
재현 기간 (년)	지 속 시 간									
	60분	120분	180분	360분	540분	720분	900분	1080분	1440분	2880분
20	69.2	109.7	140.5	192.7	233.3	259.9	280.2	296.8	333.7	388.1
50	83.5	134.5	180.8	247.6	296.6	334.6	359.6	385.8	433	487.8
100	95.3	155.4	217.6	297.7	353	402.4	430.7	467.4	522.9	573.6

IV. 유출량 분석

본 연구에서는 3장에서 구한 확률 강우량을 이용하여 HEC-HMS 모의를 통하여 청미천 유역에서 유출 모의를 실시하였다.

HEC-HMS 모의를 위하여 청미천 유역을 6개 소유역으로 분할하였다. [그림 3]은 유출곡선지수도를 바탕으로 소유역 분할도를 나타낸 것이다. 면적, CN 값, 초기손실, 도달시간 등을 HEC-HMS의 입력값으로 활용하였고 3장에서 구한 확률강우량을 통한 HEC-HMS모의 결과는 [표 2], [표 3]과 같다.

1964년부터 1999년까지의 강우자료를 활용하여 산정한 확률강우량에 의한 유출량과 1964년부터 2006년까지의 강우자료를 활용하여 산정한 확률강우량에 의한 유출량을 지속기간별, 재현기간별로 분석해 보았다. 지속기간 2시간에 따른 재현기간 20년



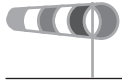
[그림 3] 청미천 유역의 HEC-HMS에서의 소유역도

의 유출량의 경우는 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ 감소하였으나 그 경우를 제외한 경우에는 지속기간 2시간에 따른 재현기간 50년의 유출량은 17.47% 증가하였고 같은 지속기간에 재현기간 100년의 유출량은 41.75% 증가하였다. 또 이 유출량 결과는 설계 홍수위 산정시 입력 자료로도 사용되었다.

V. 설계 홍수위 분석

본 연구에서는 설계 홍수위 산정을 위하여 HEC-RAS 모의를 실시하였다. 대상 모의 구간은 청미천 하류에서 상류 방향으로 약 24.6km 떨어진 지점까지로 설정하였으며 지형자료 및 조도 계수는 청미천 하천정비기본계획에 수립되어 있는 자료를 기본으로 하여 입력자료를 구축하였다. 또, 유량 자료는 앞서 구한 유출량을 상류단 유입 유량 조건으로 지정하였으며 하류단 수위 경계조건은 등류상태로 가정한 하류단 수심 산정값을 지정하여 모의하였다. 모의 실시 결과는 [그림 4~9]로 나타내었다.

현재 국내 하천 설계에 적용되는 설계빈도가 100년 빈도 홍수위를 가장 널리 활용하는 것을 감안하여 재현기간이 100년일 경우의 홍수위 산정 결과를 1963년부터 1999년까지의 강우자료를 활용하였을 경우와 1963년부터 2006년까지의 강우자료를 활용하였을 경우를 비교하여 다음 [그림 10~13]으로 나타내었다. 그 결과 지속시간이 2시간, 6시간, 12시간인 모든 경우에서 1963년부터 2006년까지 강우자료를 활용한 경우의 홍수위가 높게 나타났으며,



[표 2] HEC-HMS 지속시간 및 재현기간에 따른 유출량

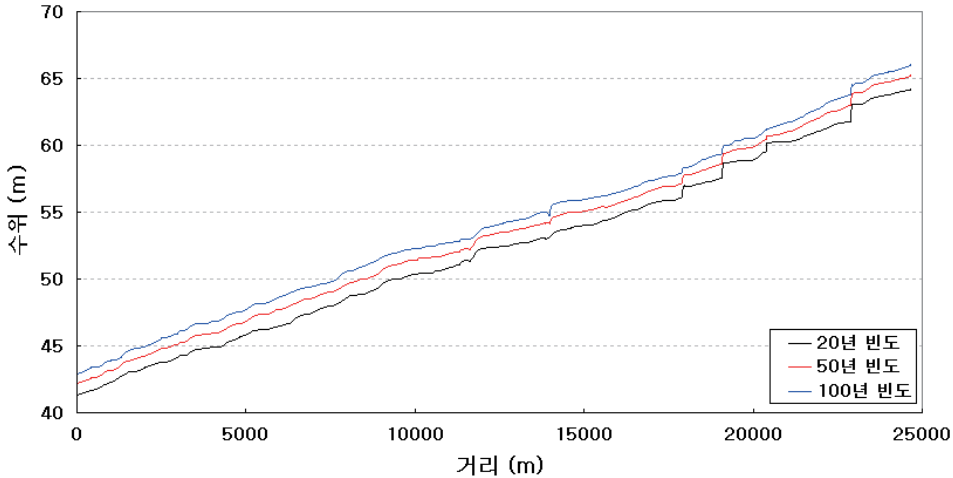
(단위: m³/s, 1963년~1999년까지 강우자료를 활용한 경우)

지속시간 (hr)	재현기간 (year)		
	20	50	100
2	156.3	403.6	677.9
6	1,569.4	2,437.7	3,018.9
12	2,474.5	3,490.5	4,184.8

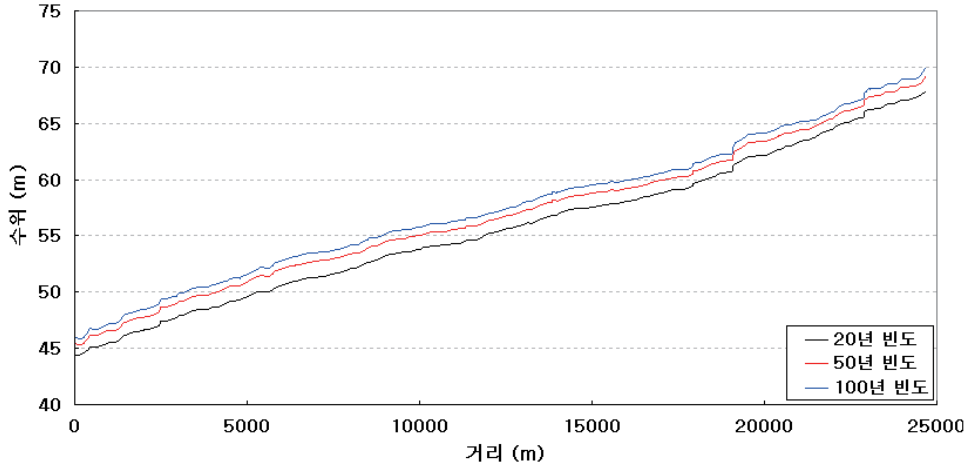
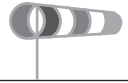
[표 3] HEC-HMS 지속시간 및 재현기간에 따른 유출량

(단위: m³/s, 1963년~2006년까지 강우자료를 활용한 경우)

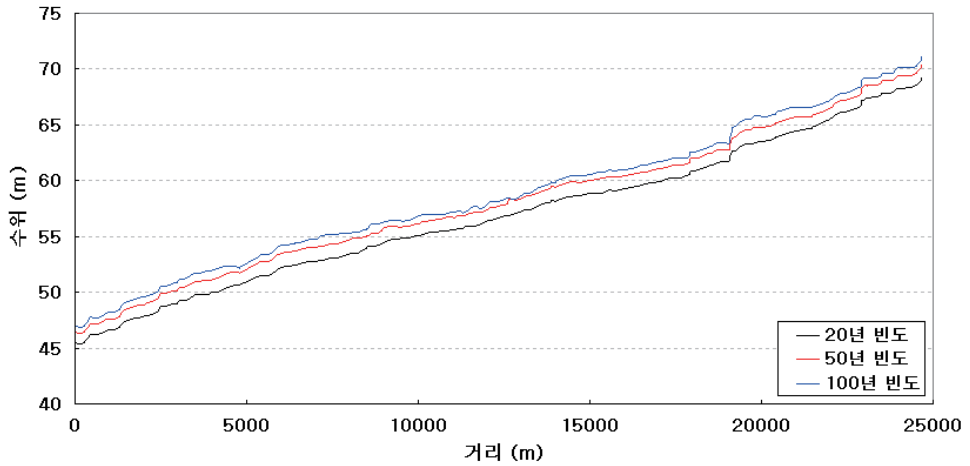
지속시간 (hr)	재현기간 (year)		
	20	50	100
2	152.6	474.1	960.9
6	1,876.7	3,334.5	4,939.4
12	2,957.2	4,668.8	6,328.7



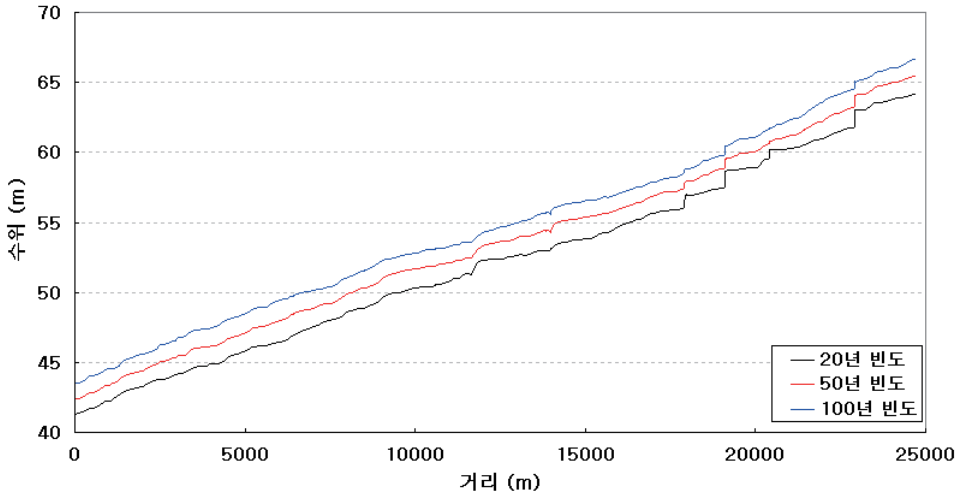
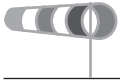
[그림 4] 지속시간 2시간인 경우의 재현기간별 수위
(1963년부터 1999년까지의 강우자료를 활용한 홍수위 산정)



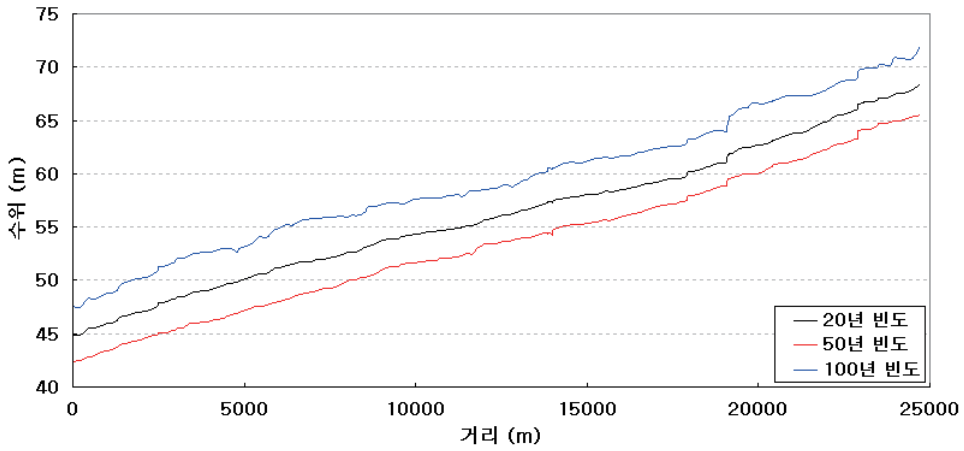
[그림 5] 지속기간 6시간인 경우의 재현기간별 수위(1963~99년)



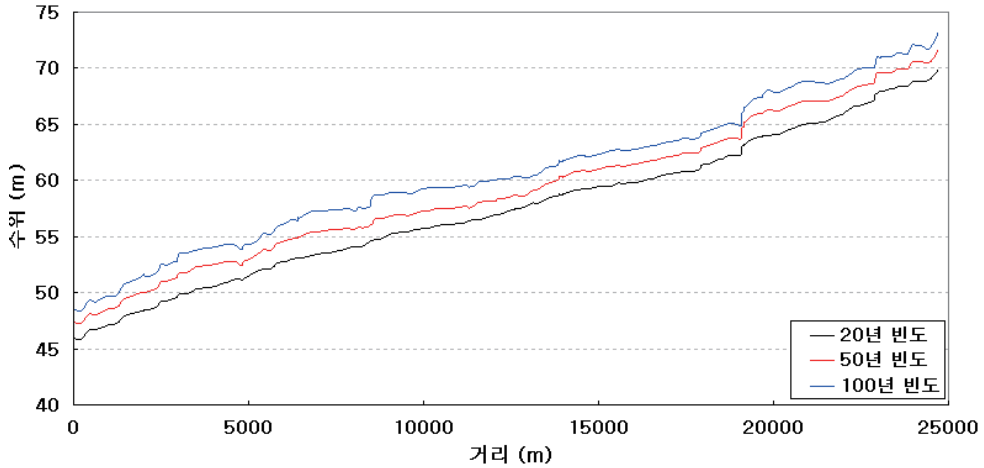
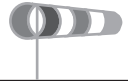
[그림 6] 지속기간 12시간인 경우의 재현기간별 수위(1963~99년)



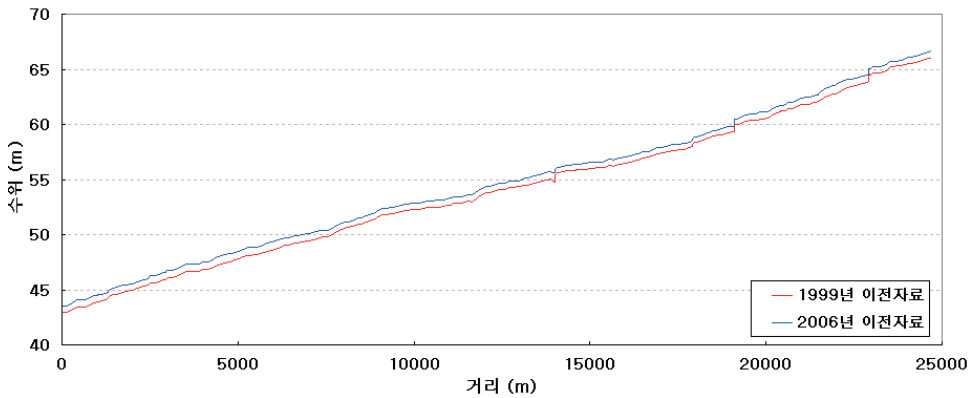
[그림 7] 지속기간 2시간인 경우의 재현기간별 수위
(1963년부터 2006년까지의 강우자료를 활용한 홍수위 산정)



[그림 8] 지속기간 6시간 경우의 재현기간별 수위(1963~06년)



[그림 9] 지속시간 12시간 경우의 재현기간별 수위(1963~06년)

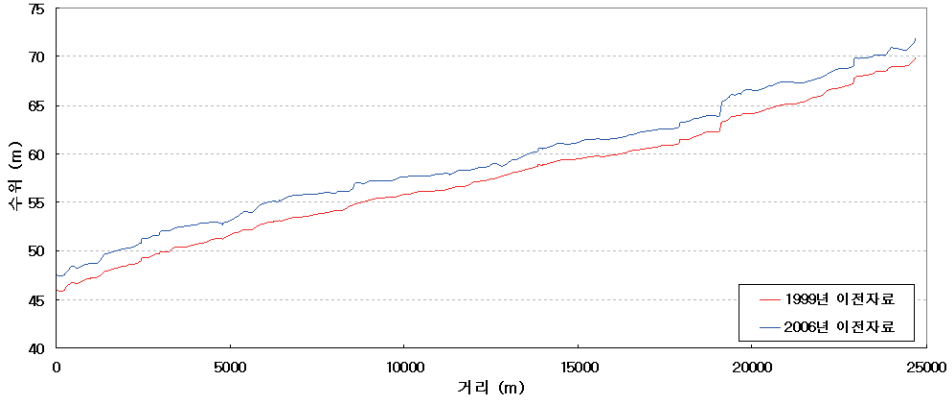
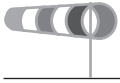


[그림 10] 지속시간 2시간, 재현기간 100년 경우의 홍수위 비교(1963~06년)

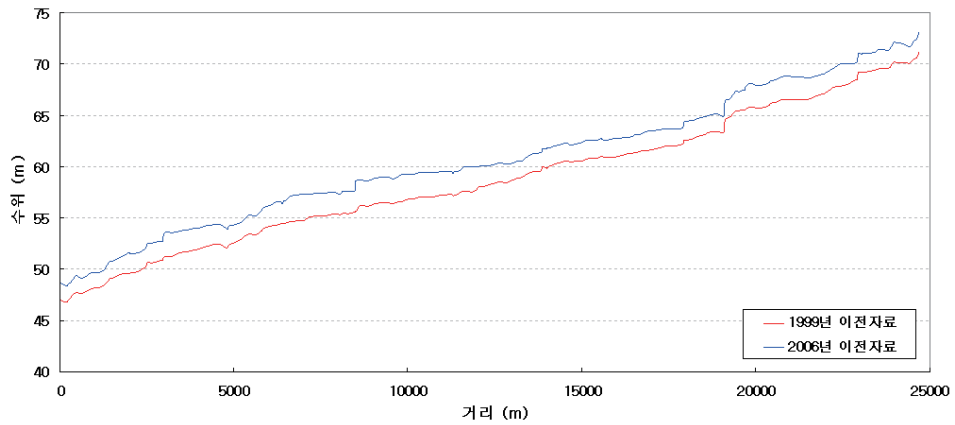
1963년부터 1999년까지 강우자료를 활용한 경우와 비교하여 각각 0.605m, 1.814m, 1.961m의 수위차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 지속시간이 길어질수록 홍수위의 차이가 커지는 결과를 확인할 수 있었다.

[그림 13]은 재현기간 100년에 대한 지속시간별 차

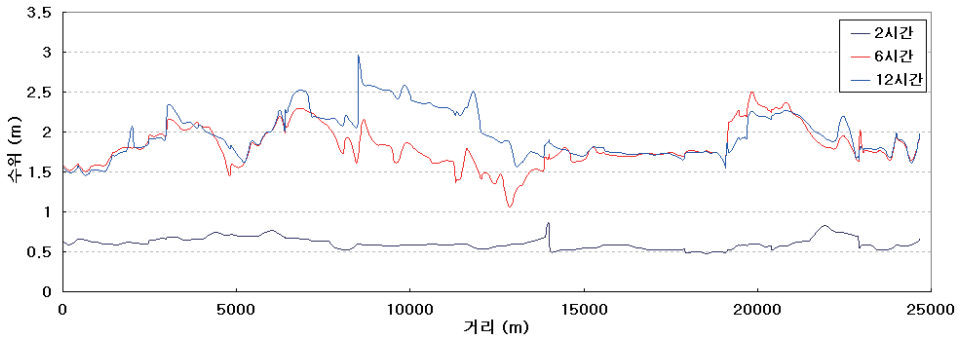
이를 나타낸 것으로 지속시간 2시간인 경우에 비해 지속시간 6시간, 12시간인 경우 홍수위차가 매우 높음을 알 수 있다. 또한 지속시간 6시간과 12시간의 경우는 모의 구간 최하류단으로부터 상류 9km에서 14km 구간에서만 큰 차이를 보이고 나머지 구간에서는 그렇지 않은 것으로 분석되었다. 결론적으로 기후 변화로 인한 확률강우량의 증가는 유출량



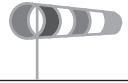
[그림 11] 지속기간 6시간, 재현기간 100년 경우의 홍수위 비교(1963~06년)



[그림 12] 지속기간 12시간, 재현기간 100년인 경우의 홍수위 비교(1963~06년)



[그림 13] 재현기간 100년에 대한 지속시간별 홍수위 비교(1963~06년)



및 그로 인한 홍수위를 증가시킴을 알 수 있었고, 이에 따른 설계빈도의 재산정이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

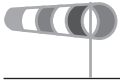
VI. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 하천에서의 유출변화를 모의하기 위하여 강우량 자료의 변동성과 경향성을 분석하고 FARD2006을 이용하여 확률강우량을 산정하였다. 변동성 분석결과를 이용하여 1999년을 변동점으로 판단하여 강우계열을 1963년~1999년과 1963~2006년의 두 그룹으로 나누고 이에 따른 하천에서의 유출량과 홍수위의 변동상황을 비교, 분석하였다. 그 결과 최근의 자료까지를 포함하는 경우(1963~2006년자료)의 확률강우량이 변동점 전까지의 자료(1963~1999년자료)를 이용하는 경우보다 모든 지속기간과 재현기간에 대해 크게 산정되

었으며, 이로 인하여 하천에서의 홍수량과 홍수위도 크게 나타났다. 이러한 연구결과가 꼭 기후변화로 인하여 일어났다고 단정지을 수는 없겠지만 최근의 여러 연구결과로 판단하여 볼 때 충분한 가능성은 있으므로 차후에 보다 심도깊은 연구를 통하여 하천 수공구조물의 설계빈도를 재평가할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (2005) 기후변화에 대한 자연재난 대처방안 연구.
- 건설교통부 (2003) 청미천 하천 정비 기본 계획.
- 건설교통부 (2000) 지역적 설계강우의 시간적 분포.
- 국립기상연구소 (2008) 기후변화 2007 종합보고서.
- 소방방재청 (2008) 풍수해 대응체계 고도화 기술개발.
- 정종호 (2007) 수자원 설계 실무.



수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안

문 영 일

서울시립대학교/토목공학과 교수

ymoon@uos.ac.kr

오 태 석

서울시립대학교/토목공학과 박사후과정

taesuk79@gmail.com

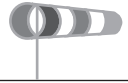
I. 서론

수문학적 물순환 과정에서 강우사상은 여러 수문기상인자들과 밀접한 관련을 맺으며 발생하는 것으로 알려져 있다. 최근에는 지구온난화에 따른 기후변화로 강우 사상 중에서 극치강우의 발생빈도와 크기가 증가함으로써 과거에 비하여 홍수의 경향과 특성이 변화하고 불확실성이 증대되고 있는 실정이다. 따라서 안정적인 수공구조물의 설계를 위하여 합리적인 확률강우량의 산정은 필수적인 과정이라 할 수 있다. 일반적으로 강우사상은 매우 복합적인 발생과정을 보이므로 지구온난화에 따른 기후변화의 영향에 의한 강우사상의 변화를 직접적으로 분석하기 매우 어려운 실정이다. 반면에 대표적인 수문기상정보라 할 수 있는 해수면온도와 같은 수문기상인자들은

기후변화에 의한 변동특성을 분석하는데 보다 용이하다는 장점이 있다.

수문기상정보에 해당하는 수문기상인자들은 산업혁명 이후로 매우 빠른 변화를 보이고 있다. 대표적으로 IPCC 4차 보고서에서는 지난 100년간 전세계 평균기온은 0.74°C 상승하였으며, Smith 등(2004)에 따르면 전세계 평균해수면온도는 0.2°C 상승한 것으로 보고되었다. 따라서 지구온난화에 따른 기온과 해수면온도의 변화는 강우의 형성 및 발생과 같은 강우특성에 많은 영향을 끼칠 수 있는 가능성이 매우 크다.

수문기상정보는 물순환과정에 영향을 줄 수 있는 기온, 습도, 해수면온도, 토양 수분과 같은 여러



기후학적·기상학적 정보들을 의미한다. 물순환 과정에서 강우는 물순환을 유발시키는 인자로서 여러 수문기상인자와 밀접한 관련을 갖으며 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 강우의 발생형태와 빈도는 현재 명확히 규명하기는 매우 어려운 실정이다. 이는 강우의 발생형태와 발생빈도가 여러 기상인자들과 매우 복잡한 관계를 맺으며 비선형적인 형태를 보이면서 발생하고 있기 때문이다. 여러 기상인자 중에서 해수면온도(Sea Surface Temperature, SST)는 강우와 밀접한 관련이 있는 매우 중요한 요소로 인식되고 있으며 최근에는 강우의 빈도 및 강우량과 저빈도(low frequency) 관계 등을 밝히기 위한 상관성 분석을 통해 시·공간적인 분석을 시도하고 있는 추세이다.

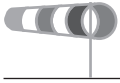
수문기상정보를 이용하여 강우량에 대한 분석을 수행한 사례로는 Klein과 Bloom(1987), Kiladis와 Diaz(1989), Cayan과 Peterson(1989) 및 Kim 등(2006)은 저빈도 분석을 수행하여 해양과 대기 성분이 북미 지역의 강우사상에 많은 영향을 끼치고 있음을 밝혔다. Moon과 Lall(1996)은 기후변동과 수문학적 요인의 동역학적 관계를 분석하기 위하여 미국의 Great Salt Lake와 남방진동지수(Southern Oscillation Index, SOI)를 포함한 여러 대기 순환 지수를 이용한 저빈도 분석을 수행하였다. Repelli 등(1998), Harshburger 등(2002), Rautenbach와 Smith(2001), Misra(2003)은 태평양 등의 해수면 온도 변화와 강우량과의 상관관계에 대한 분석을 수행하였다. Higgins 등(2004) 및 Barnston과 Smith(1996)는 해수면온도 변화에 따른 강우량에 대한 예측을 여러 통계적 기법을 통하여 수행하였다.

이와 같이 여러 수문기상정보를 활용하여 수문학적 순환과정과의 관계에 대한 분석을 많이 수행하고 있는 추세이다. 특히, 수문기상정보 중에서 해수면온도는 수문학적 물순환과정과 주요한 상관관계를 맺고 있는 인자 중의 하나로 인식하고 있다. 따라서 해수면온도와 강우사상과의 상관관계 분석과 기상인자를 이용하여 태풍의 재해위험도를 평가할 수 있는 EST(Empirical Simulation Technique)을 소개하고, 또한 EST 모형을 개선하여 서울 지점의 태풍으로 인한 재해위험도에 대한 확률강우량 산정방안을 제시하였다.

II. 시간강우량과 해수면온도의 상관성 분석

오테석 등(2008)은 기상청에서 관할하는 서울관측소에서 관측된 연최대시간강우량과 범지구적 SST와의 상관성을 분석 하였으며 내용을 정리하면 다음과 같다. 먼저, 사용된 서울관측소의 시간강우량은 1961년부터 2005년까지 45년 동안 관측된 자료를 활용하였다. 서울지점에서 관측된 시간강우량 자료로부터 지속시간 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 36, 48, 72시간에 해당하는 연최대치시간강우량과 각 연도별 지속시간별 연최대 시간강우량이 발생한 날짜를 추출하였다. 다음 [표 1]과 [표 2]는 서울지점의 연최대시간강우량과 각각의 발생월을 정리한 결과를 나타낸 것이다.

해수면온도는 NOAA에서 관측하여 제공하고 있는 Extended Reconstructed SST(Smith, 2003; 2004)를 이용하였다. 해수면온도의 관측 범위는



60°S~60°N, 180°W~180°E이며, 2°×2°간격으로 관측자료가 존재한다. 이 범위에 포함되는 관측격자의 수는 10,980개이며, 이 중에서 육지부분에 해당하는 2,699개 격자를 제외한 8,281개 지점에서 관측한 해수면온도자료를 이용하였다.

속시간별로 연최대시간강우량이 발생한 월을 조사하였다. 따라서 각 지속시간에서 연최대시간강우량이 발생한 월과 동일한 월의 관측된 해수면온도 자료를 추출하여 시계열을 구성하였다. 즉, 2002년의 지속시간 1시간의 연최대시간강우량이 8월에 발생하였으므로 8월에 관측된 해수면온도 자료들을 추출하고, 2003년에는 8월에 1시간 연최대강우량이 발생

[표 2]에 나타낸 바와 같이, 서울지점에서 관측된 지

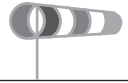
[표 1] 서울지점의 지속시간별 연최대시간강우량

(단위: mm)

연도	지속시간										
	1	3	6	9	12	15	18	24	36	48	72
1961	42.2	63.6	95.4	101.7	102.4	103.1	103.7	107.6	122.5	144.9	215.7
1962	19.2	33.1	54.6	68.5	70.7	72.0	74.1	86.1	96.1	116.7	118.0
1963	39.1	71.2	110.5	126.1	157.7	168.1	170.1	175.4	176.2	176.5	184.3
1964	112.0	124.2	127.4	128.4	129.1	129.1	129.1	129.7	143.4	151.9	164.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2002	59.3	123.4	152.0	177.5	188.8	199.2	208.6	287.4	328.5	338.0	439.9
2003	72.8	139.5	147.4	149.8	166.1	174.5	178.0	183.9	243.6	257.5	259.1
2004	43.9	54.7	78.0	99.9	105.2	106.1	109.6	133.2	144.7	162.2	187.3
2005	55.3	81.1	95.2	110.4	121.8	128.8	132.0	132.0	132.5	133.1	146.6

[표 2] 서울지점의 지속시간별 연최대시간강우량이 발생한 월

연도	지속시간										
	1	3	6	9	12	15	18	24	36	48	72
1961	9	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8
1962	10	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9
1963	8	8	6	6	6	6	6	7	7	7	6
1964	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2002	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
2003	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
2004	8	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2005	6	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6

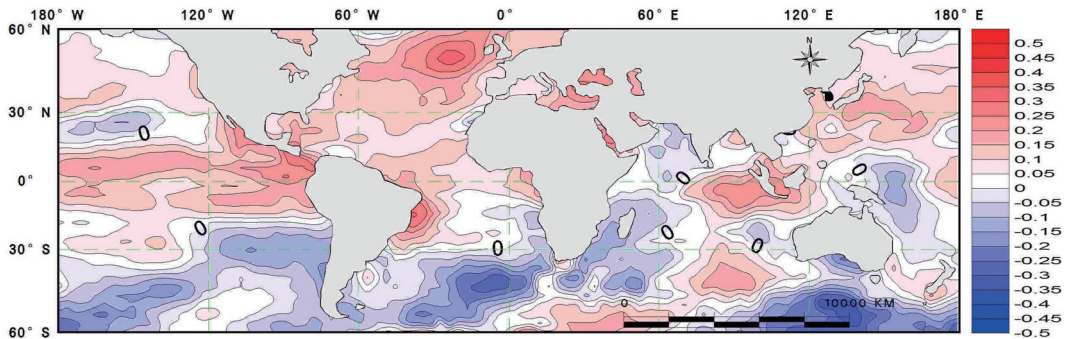


하였으므로 8월의 월별해수면온도들을 추출하였다. 또한, 연최대 시간강수량들이 발생한 월보다 1개월 이전부터 11개월 이전까지의 월별해수면 온도 자료를 추출하여 상관성 분석을 수행하였다.

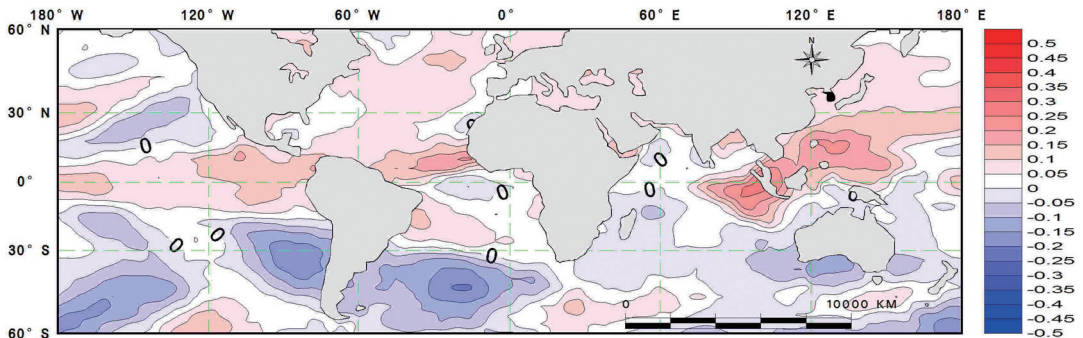
상관성분석 방법은 연최대시간강수량이 발생한 월의 해수면온도를 연도별로 정리한 시계열 자료를 구성하여 비교하였으며, 연최대시간강수량이 발생하기 1개월전부터 11개월전까지의 해수면온도자료와도 상관계수를 산정하여 비교하였다. 산정된 상관계수는 자료간의 선형적인 관련도를 표현하는 정량적

지수인 pearson 상관계수를 이용하였다. 분석 결과에서 양(+)의 상관계수가 음(-)의 상관계수보다 약간 더 크게 산정되는 것을 알 수 있었다. 연최대시간강수량이 발생한 월에 관측된 해수면 온도 사이에서 산정된 상관계수가 가장 큰 값을 갖는 것으로 나타났다으며, 이후의 지체시간은 양(+)과 음(-)의 상관계수의 결과가 약간 차이를 보이고 있다.

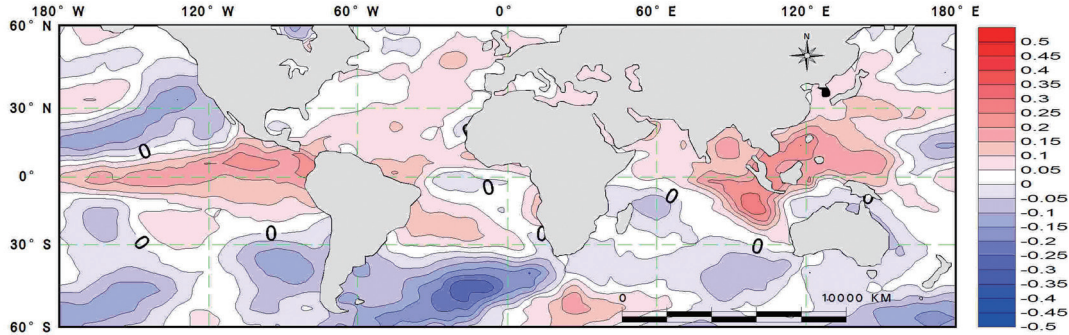
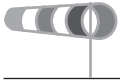
지체시간 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 36, 48, 72시간의 연최대시간강수량과 해수면온도의 상관성 분석을 통해 산정된 상관계수를 평균하여 지체 시간별



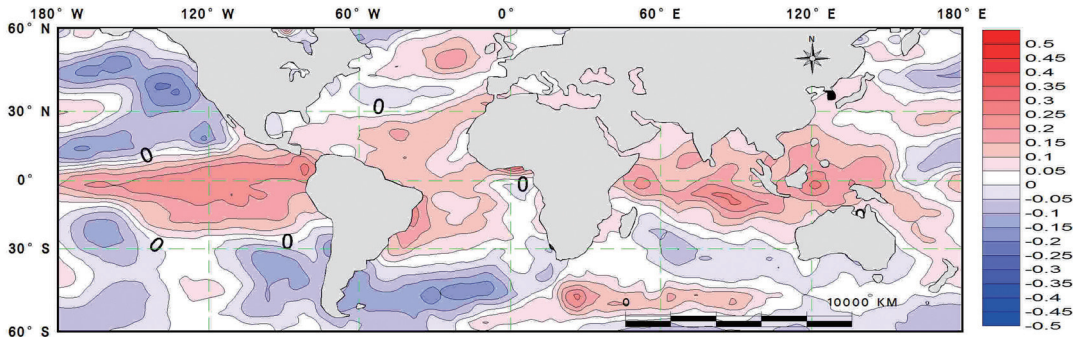
[그림 1] 동일 월의 해수면온도와의 상관성분석 결과



[그림 2] 2개월전의 해수면온도와의 상관성분석 결과



[그림 3] 3개월전의 해수면온도와와의 상관성분석 결과

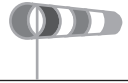


[그림 4] 4개월전의 해수면온도와와의 상관성분석 결과

로 도시분석을 수행하였다. 도시 분석 결과에서 연최대시간강우량이 발생한 월과 해수면온도 관측월과의 차이가 6개월 이상인 경우에는 상관계수는 크게 산정되었을지라도 상관성이 큰 해수면 온도의 관측지역이 뚜렷이 나타나지 않았다. 동일한 월의 해수면온도와의 상관성 분석 결과에서는 [그림 2]와 같이, 우리나라와 다소 많이 떨어져 있는 40°N~50°N, 30°W~15°W 지역의 상관계수가 가장 크게 산정되었다. 지체시간 2, 3, 4개월에서는 태평양 지역의 해수면온도와의 상관계수가 크게 산정되었으며 이를 [그림 1]~[그림 4]에 도시하였다.

III. 기상정보를 이용한 태풍의 확률강우량 평가

오태석 등(2008)은 서울지점의 관측된 시간강우량 자료를 이용하여 지속시간 24시간의 연최대치 시간강우량 자료를 추출하였고, 또한 태풍에 의한 시간최대강우량을 추출하기 위하여 우리나라에 영향을 준 143개 태풍사상에 대한 자료인 발생연도, 월, 일, 시간과 태풍등급, 태풍의 중심위치(경도와 위도), 해수면기압 자료를 태풍연구센터(<http://www.typhoon.or.kr/>)에서 확보하여 제시하였다. 이 자료를 활용하여 태풍의 중심이 북위 32°~40°, 동경



120°~138°의 범위 내에 있는 동안에 강우관측소에서 발생한 24시간 최대강우량 자료를 추출하여, 동일시간의 태풍의 물리적 특성자료를 구축하였다. 태풍의 물리적 특성자료는 태풍의 발생 월, 태풍등급, 태풍중심의 위도와 경도, 해수면기압(태풍연구센터 자료) 및 해수면온도(Smith 등, 2004)이다. [표 3]은 강릉 지점에서 태풍에 의해 발생한 24시간 최대강우량과 동일 시간의 태풍의 물리적 특성자료를 정리한 결과로 143개 태풍 사상 중에서 몇몇 태풍에 대한 결과만을 나타낸 것이다. 이와 같이 태풍의 물리적 특성을 나타내는 기상정보들을 활용하여 태풍으로 인해 발생하는 강우량을 평가하는 방안을 소개하고자 한다. 분석 방법으로는 미공병단에서 개발한 EST(Empirical Simulation Technique) 모형과 이를 개선시킨 NL 모형을 이용하였다. NL 모형은 비매개변수적 모의 발생(Nonparametric monte carlo simulation)과 지역가중다항식(Locally weighted polynomial regression)을 결합하여 태풍에 의한 강우량을 평가할 수 있는 통계적 기법이다.

태풍에 의하여 발생한 극치강우량을 빈도해석, EST 기법 및 비매개변수적 모의발생과 지역가중다항식

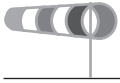
을 결합한 NL 기법을 통해 추정하여 비교·분석하였다. 여러 기법을 통하여 확률강우량을 산정하여 비교하였으므로 기법에 따라 확률강우량의 명칭을 다음의 같이 정리하였다. 첫 번째로 빈도해석에 의해 산정한 확률강우량은 분석대상자료에 따라 구분하였다. 강우관측소의 연최대치 시간강우량을 이용한 분석 결과는 ‘확률강우량’, 태풍 사상에 의해 발생한 시간최대강우량을 이용한 분석결과는 ‘태풍 확률강우량’으로 하였다. 두번째로 EST(Empirical Simulation Technique) 기법에 의해 산정한 확률강우량은 ‘EST확률강우량’으로 하였다. 마지막으로 비매개변수적 모의발생과 지역가중다항식을 이용하여 추정한 확률강우량은 ‘NL확률강우량’으로 명칭하였다.

1. EST 모형을 이용한 태풍의 확률강우량 평가

EST는 미공병단(U. S. army corps of engineers, Washington, DC)에서 1990년대 초에 태풍과 관련된 수공구조물의 설계시에 기존에 적용하던 빈도해석을 통한 설계폭풍(design storm)의 개념에서 해당 빈도의 평균치와 이에 대한 오차(error)와

[표 3] 태풍의 물리적 특성인자와 24시간 최대강우량 자료

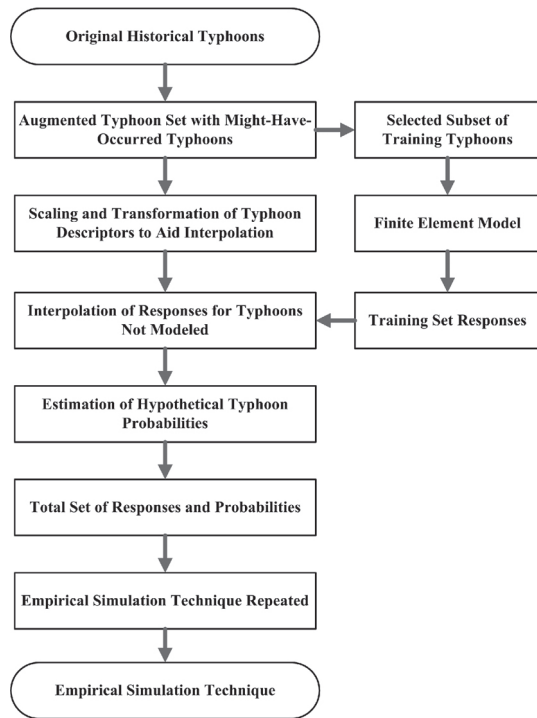
태풍번호	월	등급	위도	경도	중심기압	해수면온도	강우량(mm)
6110	8	6.38	37.03	127.82	997.96	25.99	29.7
6123	10	6.12	35.20	128.17	999.20	21.37	33.7
6209	8	9.00	34.93	124.59	976.00	25.14	37.0
6309	8	3.38	37.17	132.10	993.92	25.31	153.8
:	:	:	:	:	:	:	:
0415	8	4.88	36.30	131.08	970.83	25.58	242.0



불확실성(uncertainty)을 함께 적용하기 위해서 개발된 방법이다.

EST 기법은 위험도 해석(risk analysis)과 연계하여 빈도해석(frequency analysis)과 오차해석(error analysis)을 다중 수명-주기 모의를 수행하는 방법으로 태풍의 매개변수가 상호 독립적이지 못하고 때때로 비선형적인 상관관계를 가지므로, 기존의 JPM(Joint Probability Method) 기법을 보완하기 위해 개발되었다. 따라서 EST 기법에 의한 빈도 해석은 고정된 매개변수들의 상호 관계에 의존하지 않으며 매개변수의 독립성을 가정하지 않는 비매개변수적인 'Distribution free' 기법이라고 할 수 있다. EST 기법은 한정된 크기의 데이터베이스(database)를 활용하여 보다 큰 데이터베이스를 생성시키는 무작위 추출 방법인 'Bootstrap' 기법에 기초하고 있다. Bootstrap 기법은 자료의 재추출(resampling)과 반환(replacement), 내삽(interpolation) 및 연속평활화 방법(subsequent smoothing technique)을 의미한다. EST 기법의 유일한 가정은 미래에 발생할 사상(future events)의 크기와 빈도는 과거에 발생한 과거에 발생한 사상(past events)과 통계적으로 유사성을 가져야 한다는 것이다. EST 기법은 특정한 장소에 영향을 주는 과거 사상의 분석으로부터 시작한다. 데이터베이스로부터 선택된 사상의 특징과 영향을 변수화하여 태풍의 입력벡터(input vectors)로 활용하게 된다. 응답벡터(response vectors)는 범람이나 해안선 및 사구의 침식과 같은 태풍에 연관된 영향으로 정의되게 된다. 이러한 입력벡터와 응답벡터는 태풍 사상의 수명 주기 모의(life-cycle simulations)를 생성시키는 기초로 활용된다. EST

기법에 의한 모의는 이러한 입력벡터와 응답벡터들 간의 상호 관계에 의해 추정되는 값으로 Scheffner 등(1996)에 자세히 설명되어 있으므로 [그림 5]와 같은 EST 기법의 흐름도를 제시하였다.



[그림 5] Empirical Simulation Technique의 흐름도

EST 기법을 이용하여 우리나라의 서울 지점에서 관측된 24시간 최대강우량 자료와 이때의 태풍의 물리적 특성인자를 통해 모의를 수행하였다. 분석 방법은 [표 3]에 나타난 것과 같은 1961년부터 2005년까지 우리나라에 영향을 준 태풍 사상 143개를 입력벡터로 구성하여 200년×2,000회의 태풍 자료를

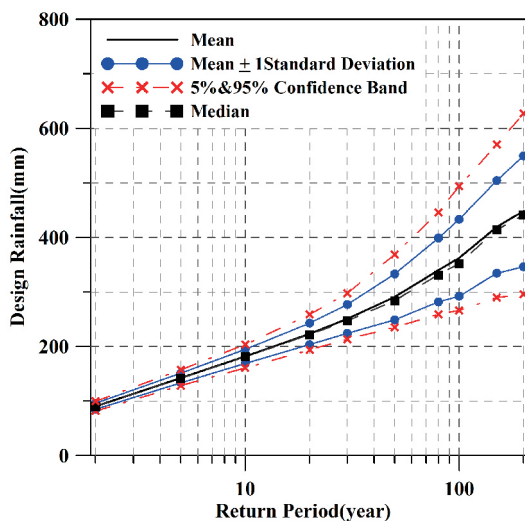
모의하여 EST확률강우량을 추정하였다. 단, 입력벡터를 구성하면서 태풍이 우리나라에 영향을 끼치는 기간이었으나 지점강우량이 발생하지 아니한 경우와 태풍의 영향시간이 24시간 이상 발생하지 않은 경우는 입력벡터의 구성에서 제외하였다. [그림 6]은 EST 기법을 통해 산정한 EST확률강우량을 도시한 결과이다.

2. NL 모형을 이용한 확률강우량 추정

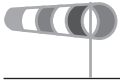
EST 기법은 [표 3]에 나타낸 것과 같은 태풍이 갖는 물리적 특성 자료를 bootstrap 기법을 통하여 모의하여 반환(replacement), 내삽(interpolation) 및 연속평활화 방법(subsequent smoothing technique)을 통하여 태풍 사상을 평가하게 된다. 따라서 비매개변수적 모의발생기법(nonparametric monte carlo simulation)과 지역가중다항식(locally

weighted polynomial regression)을 통해 태풍에 의한 극치강우를 평가하였다. 태풍의 물리적 특성을 독립변수로 설정하고, 발생한 강우량을 종속변수로 설정하여 지역가중다항식을 통해 회귀관계를 규정하였다. 다음으로 비매개변수적 모의발생 기법을 통하여 태풍이 갖는 물리적 특성을 모의하였으며, 지역가중다항식을 통해 모의된 물리적 특성자료를 이용하여 강우량을 추정하게 된다. 추정된 강우량은 모의 set별로 gumbel 분포형을 통해 확률강우량을 산정하게 된다. [그림 7]은 NL확률강우량을 산정하기 위한 흐름도이다.

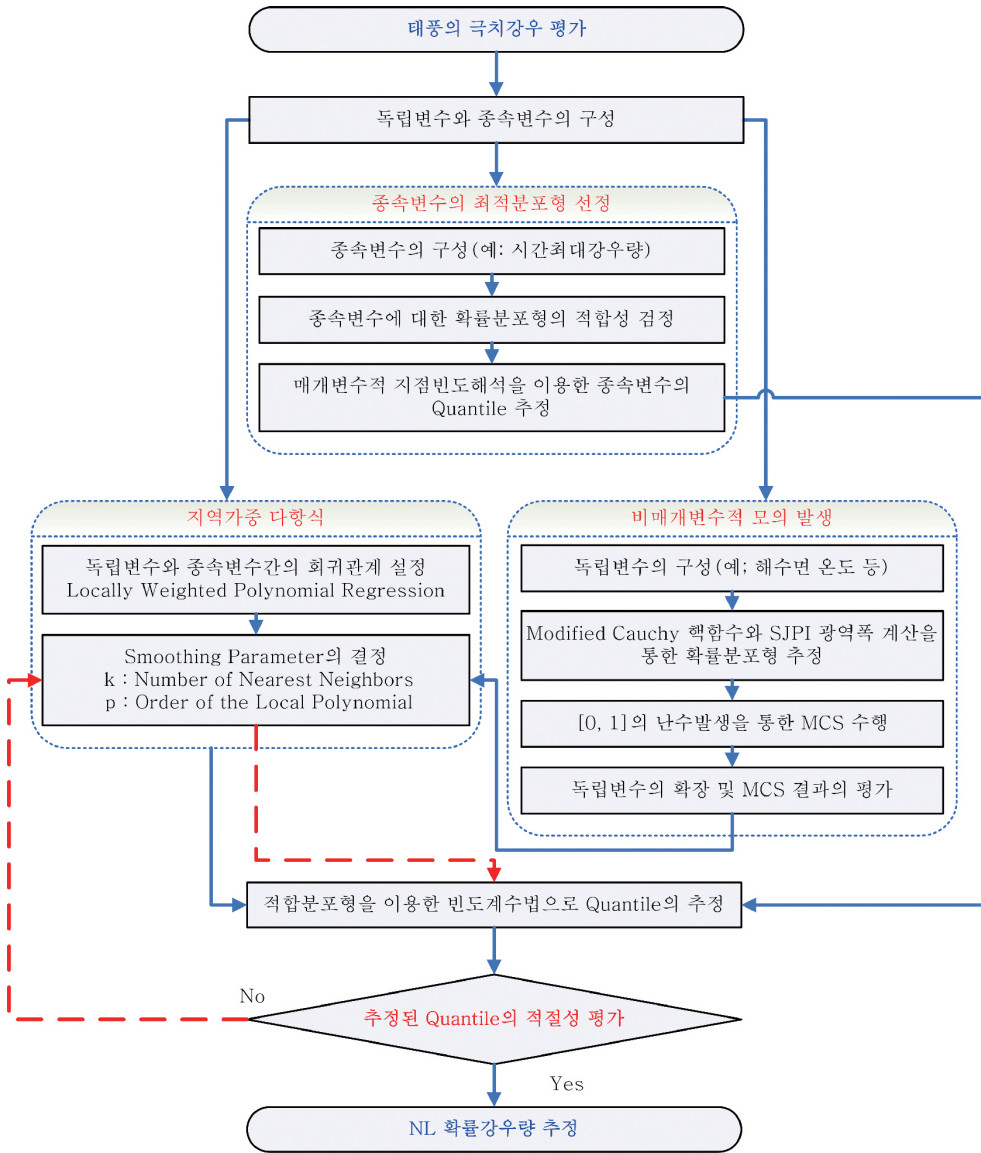
비매개변수적 모의발생기법을 통하여 태풍이 발생한 월, 태풍등급과 태풍중심의 위도, 경도, 해수면 기압, 해수면온도를 모의발생하였다. 각각의 변수에 대한 확률분포형을 변동핵밀도함수를 이용하여 추정하고, 난수를 발생시켜 모의발생을 수행하였다. 태풍의 발생 월은 이산형 변수이므로 모의발생 후에 반올림하여 정수로 변환하여 분석에 적용하였다. 태풍 등급은 시간에 따라 변화하므로 24시간 동안의 태풍 등급을 평균하여 이용하였으므로 연속형 변수로 보고 모의를 수행하였다. 따라서 태풍 사상의 독립변수를 대상으로 비매개변수적 모의발생(nonparametric monte carlo simulation)을 통해 200년간 1000번 모의발생하였다. 모의횟수는 200년 동안에 우리나라에 영향을 끼치는 태풍의 개수는 과거 1961년부터 2005년까지 발생한 태풍과 유사하다는 가정 하에서 모의발생을 수행하였다. [그림 8]~[그림 9]는 서울 지점의 모의 발생된 자료 중에서 해수면기압과 해수면온도의 모의된 자료를 나타낸 것으로 a)는 대상이 되는 변량의 확률밀도



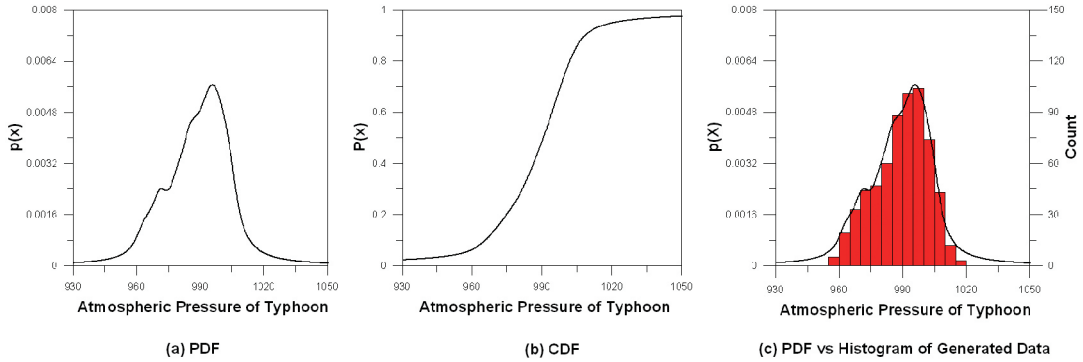
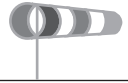
[그림 6] 서울 지점의 EST 분석 결과



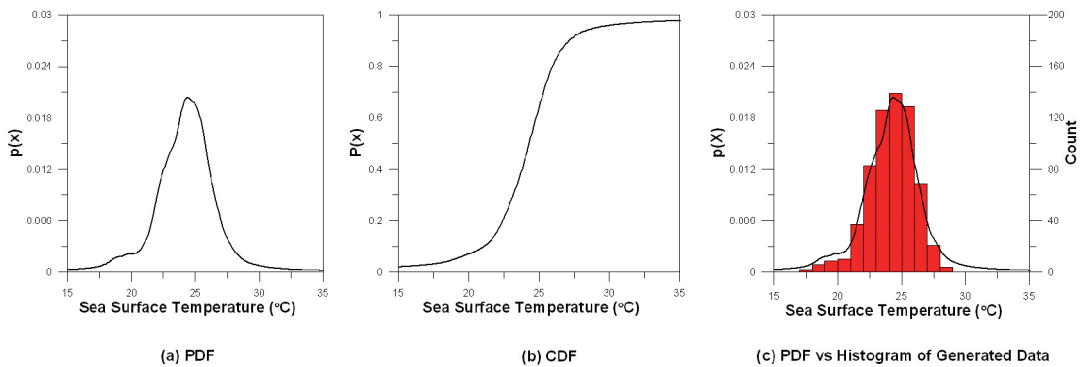
함수(PDF)이며, (b)는 누가확률밀도함수(CDF)이고, (c)는 확률밀도함수와 모의된 자료를 막대그래프로 중첩시켜 도시한 결과이다. 단, (c)에서 나타낸 모의된 자료는 1000번 모의발생 된 자료 중에서 임의로 1개를 선택하여 나타낸 것이다.



[그림 7] NL확률강우량 추정을 위한 순서도



[그림 8] 서울지점을 대상으로 한 태풍의 해수면기압 모의발생결과

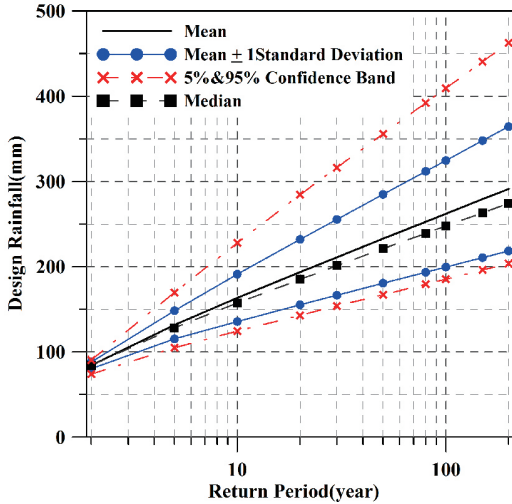
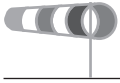


[그림 9] 서울지점을 대상으로 한 태풍의 해수면온도 모의발생결과

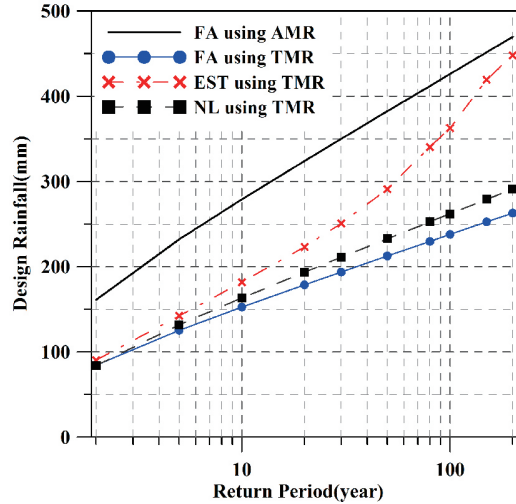
[그림 8~9]에서 나타낸 것과 같이 태풍의 물리적 특성인 독립변수들은 변동확밀도함수에 의하여 추정된 확률분포형에 의한 모의가 적합하게 수행된 것으로 보인다.

모의한 태풍의 독립변수를 통해 모의사상별 강우량을 지역가중다항식을 통해 추정하였다. 독립변수인 월, 등급, 태풍 중심의 위도, 경도, 해수면기압, 해수면온도와 종속변수인 강우량과의 회귀관계

를 지역가중다항식을 통하여 설정하여, 모의된 독립변수로부터 강우량을 추정하였다. 추정된 강우량은 gumbel 빈도계수법을 이용하여 set별로 quantile을 추정하여 빈도 해석한 결과와 비교를 통해 적절한 quantile이 산정될 때까지 지역가중다항식의 매개변수인 α 를 변경하여 추정하였다. [그림 10]은 지역가중다항식을 통해 추정된 강우량을 이용하여 산정한 NL확률강우량을 도시한 결과이다.



[그림 10] 서울 지점의 NL확률강우량



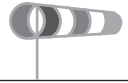
[그림 11] 서울 지점의 확률강우량 비교

3. 기법별로 산정된 확률강우량의 비교

첫번째로 연최대치를 빈도 해석하여 산정한 확률강우량과 태풍에 의한 사상별 24시간 최대강우량을 관측연수만큼 추출하여 빈도해석을 수행한 태풍확률강우량을 도시하였다. 두 번째로 EST 기법에 의한 EST확률강우량의 평균값을 나타내었으며, 세 번째로 비매개변수적 모의발생과 지역가중다항식을 이용한 NL확률강우량을 도시하였다. [그림 11]은 여러 기법에 의해 산정한 확률강우량들을 비교한 결과로 FA는 'Frequency Analysis(빈도 해석)', AMR은 'Annual Maximum Rainfall data(연최대강우량 자료)', TMR은 'Typhoon Maximum Rainfall data(태풍사상의 시간최대강우량)', EST는 'Empirical Simulation Technique', NL은 'Non-

parametric monte carlo simulation & Locally weighted polynomial regression(비매개변수적 모의발생 & 지역가중다항식)'을 의미한다.

태풍이 갖는 불확실성과 오차를 정량적으로 평가하여 산정한 EST확률강우량은 일반적인 수공구조물 설계에 이용되는 빈도해석 결과와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 태풍의 물리적 특성 자료와 강우량 사이의 회귀관계를 회귀모형의 매개변수를 통해 조정 할 수 있는 지역가중다항식을 이용한 태풍의 극치강우를 평가한 NL확률강우량은 태풍확률강우량보다 약간 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 45년 자료를 이용하여 200년 자료를 모의하므로 어느 정도의 확률강우량은 증가할 수 있는 것으로 판단된다.



IV. 결론

수문학적 물순환과정에서 발생하는 강우사상은 여러 수문기상정보들과 매우 복잡하고 밀접한 관계를 가지면서 발생하고 있다. 수문기상정보 가운데서 해수면온도를 이용하여 강우사상과의 상관성 분석 결과와 EST 모형과 NL 모형을 이용하여 기상정보를 반영한 태풍의 평가 결과를 본문에서 소개하였다.

월해수면온도를 연최대시간강우량이 발생한 월의 온도와 1개월부터 11개월 이전까지의 해수면온도와의 Pearson 상관계수를 산정하여 비교하였다. 서울지점의 연최대시간강수량은 태평양 적도부근과의 해수면온도와 통계적인 유의수준 이내에서 상관관계가 있음을 확인하였으며, 양(+)의 상관계수가 음(-)의 상관계수보다 크게 산정되었다. 따라서 태평양 부근의 해수면온도가 상승한다면, 우리나라의 연최대시간강수량이 증가할 수 있는 가능성이 있다.

태풍에 의해 발생하는 호우 중에서 24시간 최대강우량을 통계적 기법을 통한 평가 결과를 소개하였다. EST확률강우량의 산정결과는 태풍의 물리적 특성인자를 모의 발생하여 강우량을 추정된 후에 확률강우량을 추정하게 된다. 추정된 EST확률강우량은 빈도해석을 통해 추정된 결과와 비교하였을 때 재현기간이 커질수록 편차는 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

NL확률강우량은 태풍확률강우량과 비슷한 quantile을 추정하는 것으로 나타났다. 또한 태풍확률강우

량은 NL확률강우량의 오차범위 내에 포함되는 것으로 나타났다. 따라서 미래개변수적 모의발생과 지역가중다항식을 결합하여 태풍을 모의 발생하여 극치강우를 평가하는 방안이 EST 분석 기법에 의한 태풍의 평가보다 타당한 것으로 사료 된다.

따라서 강우사상은 수문학적 기상정보들과 유의한 상관관계를 갖으며 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로 앞으로 다가올 지구온난화에 따른 기후변화에 대비하기 위해서 이러한 수문기상정보를 적극 활용하여 이·치수 대책 수립 등에 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 아울러 우리나라의 강우량에 영향을 주는 기상정보 및 기상인자에 대한 계속된 연구를 통하여 우리나라의 강우사상의 변동경향성을 예측하고, 수문학적 물순환과정에 활용할 수 있는 수문기상지표를 개발하여 이를 적극 활용할 필요성이 있다.

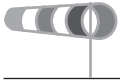
참고문헌

오태석, 문영일, 2008: 태풍으로 인한 극한강수 특성 분석. 대한토목학회 논문집, 28(2B), 515-524.

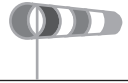
오태석, 문영일, 권현한, 문장원, 2008: 서울지점의 연최대시간강수량과 해수면온도와의 상관성 분석. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1583-1586.

오태석, 문영일, 전시영, 권현한, 2009: 미래개변수적 모의발생기법과 지역가중다항식을 이용한 태풍의 극치강우량 평가. 대한토목학회 논문집, 29(2B), 193-205.

Barnston, Anthony G., and Smith, Thomas M., 1996: Specification and Prediction of Global Surface Temperature and Precipitation from Global SST Using CCA. Journal of Climate, 9, 2660-2697.



- Cayan, D.R., and Peterson, D.H., 1989: The influence of North Pacific atmospheric circulation on streamflow in the west, Aspects of climate variability in the Pacific and Western Americas, American Geophysical Union, Washington, D.C.
- Harshburger, Brian, Ye, Hengchun, and Dzialoski, John, 2002: Observational evidence of the influence of Pacific SSTs on winter precipitation and spring stream discharge in Idaho. *Journal of Hydrology*, 264(1-4), 157-169.
- Higgins, R. W., Kim, H.-K., and Unger, D., 2004: Long-Lead Seasonal Temperature and Precipitation Prediction Using Tropical Pacific SST Consolidation Forecasts. *Journal of Climate*, 17, 3398-3414.
- Klein, W.H. and Bloom, H.J., 1987: Specification of monthly precipitation over the United States from the surrounding 700 mb height field. *Month Weather Review*, 115, 2118-2132.
- Kiladis, G.N. and Diaz, H.F., 1989: Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2, 1069-1090.
- Kim, T.-W., Valdes, J.B., Nijssen, B., and Roncayolo, D., 2006: Quantification of linkages between large-scale climatic patterns and precipitation in the Colorado River Basin. *Journal of Hydrology*, 321, 173-186.
- Misra, Vasubandhu, 2003: The Influence of Pacific SST Variability on the Precipitation over Southern Africa. *Journal of climate*, 16, 2408-2418.
- Moon Y.I., and Lall, U., 1996: Atmospheric flow indices and interannual Great Salt Lake variability. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(2), 55-61.
- Rautenbach, C. J. deW., Smith, I. N., 2001: Teleconnections between global sea-surface temperatures and the interannual variability of observed and model simulated rainfall over southern Africa. *Journal of Hydrology*, 254(1-4), 1-15.
- Repelli, Carlos A., Zebiak, Stephen E., and Kushnir, Yochanan, 1998: The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. *Journal of climate*, 11, 551-562.
- Scheffner Norman W., Clausner, J. E., Militello, Borgman, L. E., Edge, B. L. and Grace, P.J., 1999: Use and Application of the Empirical Simulation Technique: User's Guide, Technical Report CHL-99-10 Final Report, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Smith, T.M. and Reynolds R.W., 2004: Improved Extended Reconstruction of SST(1854-1997). *Journal of Climate*, 17, 2466-2477.



수문기상학적 기후변화 추세

강 부 식

단국대학교 토목환경공학과 조교수/공학박사

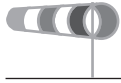
bskang@dankook.ac.kr

I. 서론

기후변화에 대한 적절한 적응대책을 수립하기 위해서는 신뢰성있는 기후변화 전망이 반드시 필요하다. 현재 기후변화에 대한 50~100년 정도의 중장기 전망은 대부분 전지구기후모형(GCM; Global Climate Model)의 IPCC시나리오별 전망을 근거로 하고 있다. 이는 채택할 수 있는 가장 유력한 접근법임에는 틀림없지만, 가상의 시나리오에 근거한 전망이라는 점과 기후모형에서 계산하는 모의값들은 여전히 모델자체의 불완전성과 경계조건 및 자료동화과정에서의 불확실성등으로 인하여 실제 나타날 수 있는 값들로부터 상당한 편차를 보일 수 있다고 예상되기 때문에 수자원관리기관에서 현업에 활용하기는 아직은 다소 무리가 있다고 보여진다. 반면에 20~30년

내외의 단기적인 기후변화는 과거 관측된 수문기상학적 정보들을 이용하여 보다 현실적이고 신뢰성있는 전망이 가능하다. 특히 한반도지역에서 최근에 진행되고 있는 기후변화는 주목할 만한 수준으로서 최근의 수문기상학적 패턴변화의 이해는 신뢰성있는 미래전망을 위해서 반드시 필요하다.

기후변화의 영향을 받는 기상요소중 수자원과 직접적 관련을 갖는 변수는 기온과 강수이다. 기온의 경우 순수한 기후변화의 영향과 도시화의 영향이 복합적으로 나타나고 있다. 도시화 효과를 제거한 후 한반도의 온난화는 0.4~0.8℃/100년 정도로 평가되고 있다. 같은 방법으로 도시화의 영향을 제거한 일본 51개 지점의 기온변화는 0.8℃/100년으로 제시된바 있어 우리나라와 일본은 기온변화추세에 있어

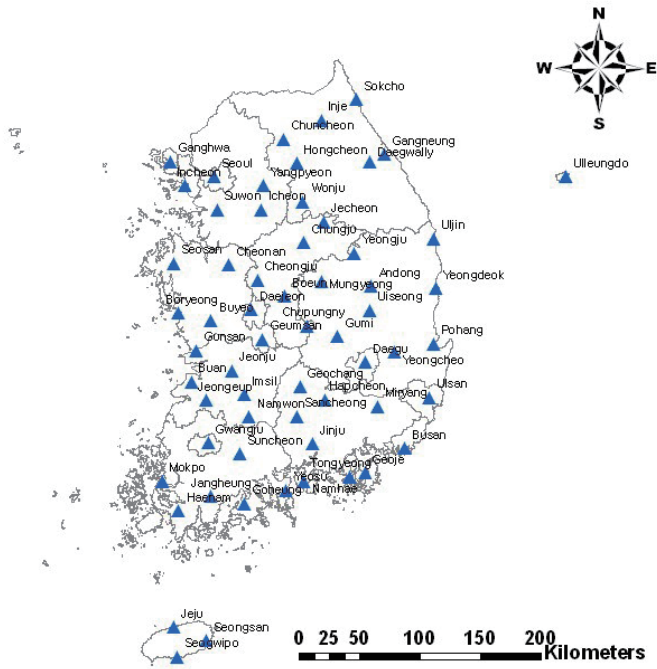


서 비슷한 경향을 보이고 있다(한화진, 2005). 기온 상승에 대한 지구평균값이 $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18/100\text{년}$ 이라는 점을 감안한다면 이는 세계평균수준으로 볼 수 있다. 권원태 등(2007)도 한반도 지역의 최근 10년(1996~2005) 기후특성에 대한 연구를 통해 한반도 지역의 평균기온 상승과, 최근 10년 강수량의 증가를 확인한 바 있다. 본고에서는 북한지역을 포함하여 한반도 지역의 수문기상학적 현황의 수계별·지역별 추세분석을 제시하고자 한다.

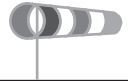
II. 자료수집

강수의 변화 경향을 살펴보기 위하여, 한반도 지역의 과거 관측자료를 이용하여 지역별 변화경향을 분석하였다. 지역별 변화경향 분석을 위하여 수계별(한강, 금강, 낙동강, 섬진/영산/동진강), 해안 및 내륙지역, 도시 및 자연배수지역에 대하여 분석을 실시하였다. 이러한 지역별 분석을 통하여 한반도 전역의 기후변화 경향과 비교 하였다. 분석에 사용된 자료는 기상청(KMA)에서 제공되는 일강수량(mm/day) 자동기상관측(AWS)자료를 이용하였다. 분석기간은 1973~2007(35년)이며, 분석에 사용된 지상관측소는 전국적인 분포와 충분한 관측기간이 확보될 수 있는 지점을 고려하여 총 60개소(그림 1)의 자료를 사용하였다.

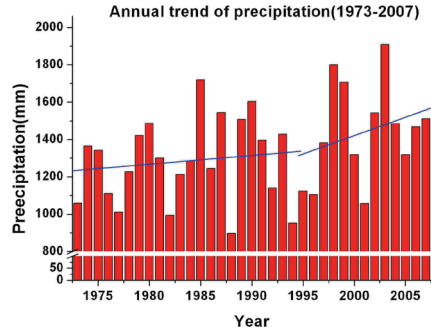
- 기상청 남한지역 관측자료 수집
 - 대상관측소 : 서울, 인천, 수원, 대구, 목포, 울산 등 60개소
 - 관측기간 : 1973~2007(35년), 일관측자료
 - 관측변수 : 강수량, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 습도
- 북한지역 지상관측자료 수집
 - 대상관측소 : 신의주, 풍산, 함흥, 남포, 평양 등 27개소
 - 관측기간 : 1973~2007(35년), 일관측자료
 - 관측변수 : 강수량, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 습도



[그림 1] 남한지역 대상관측소 분포현황(60개소)



여름철에 연강수량의 2/3가 집중되는 한반도 지역의 대륙적 특성을 고려하여 강수량이 많은 홍수기(6~9월)와 상대적으로 적은 비홍수기(1~5월/10~12월)로 구분지어 변화경향을 살펴보았다. 전국적인 분석과 더불어 지역적인 변화특성을 살펴보기 위하여 수계별(한강, 낙동강, 금강, 섬진/영산/동진강)구분에 의한 분석을 실시하였으며, 한반도의 전반적인 변화 경향과 비교하여 보았다.



[그림 2] 남한지역 연강수량 변화(1973~2007년)

III. 기후변화 추세분석

1. 남한지역 연강수량 변화

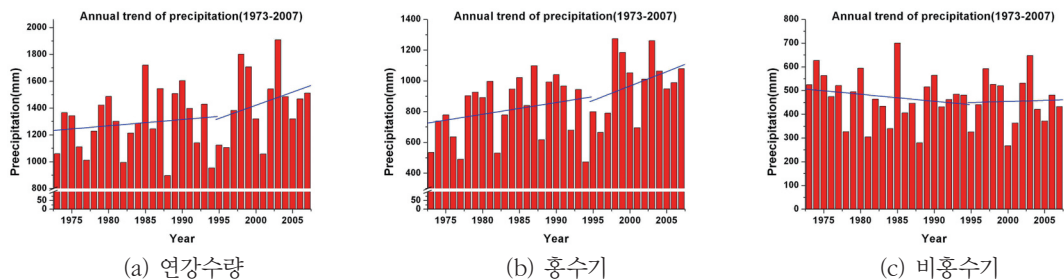
한반도 지역의 연강수량 변화를 분석한 결과 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 1995년 이전에 비하여 1995년 이후의 증가경향이 더 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다[그림 2]. 이러한 경향은 지역별 분석에서 역시 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이기간 남한지역의 연평균강수량은 1342.2mm로 분석되었다.

1) 홍수기/비홍수기 변화

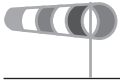
여름철 집중되는 강수량의 영향을 고려하여 홍수기(6~9월)/비홍수기(1~5월/10~12월)로 나누어 분석을 실시한 결과 한반도지역의 강수량변화는 비홍수기보다 홍수기의 영향을 더 많이 받는 것으로 분석되었으며[그림 3], 이는 여름철 강수가 집중되는 영향을 반영한 것으로 판단되어 진다.

2) 수계별 변화

수계별 연강수량 분석결과 모든 수계에서 증가하는 경향을 나타내는 것을 확인하였으며, 낙동강과



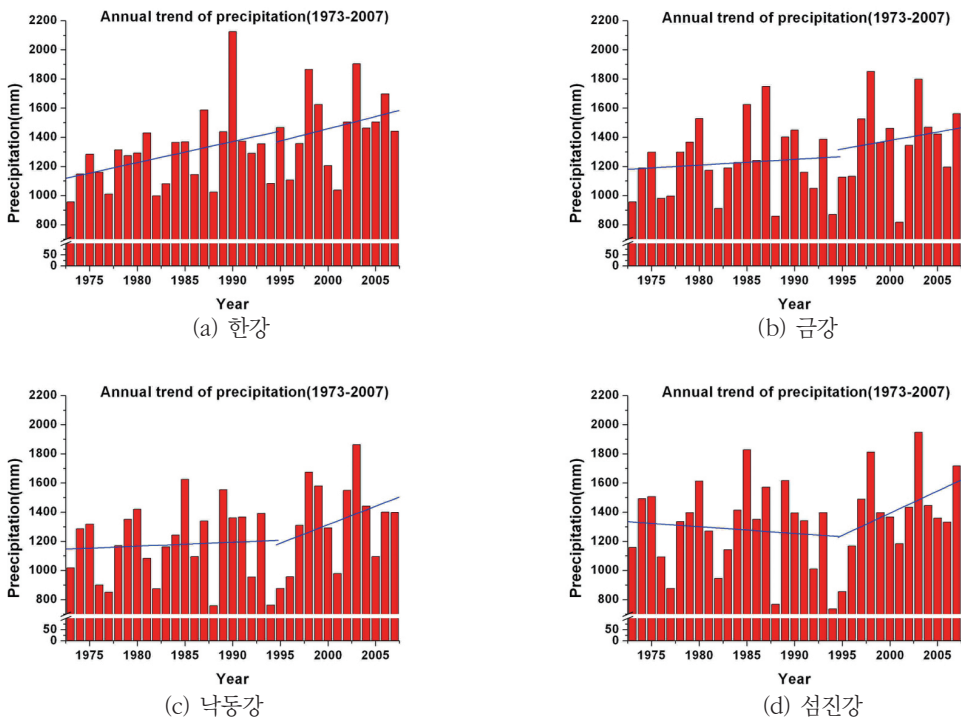
[그림 3] 남한지역 연강수량 변화(1973~2007년)



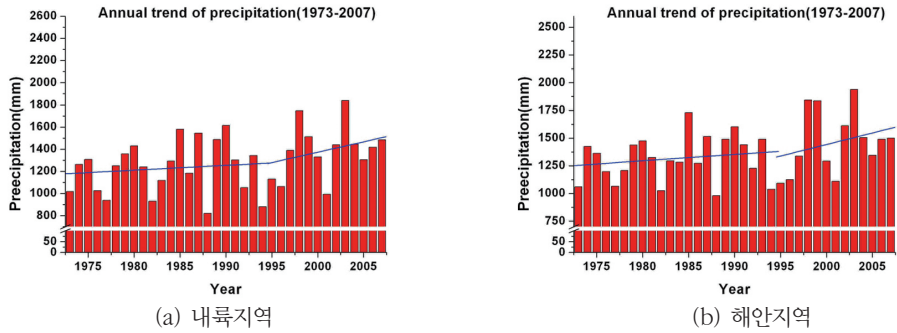
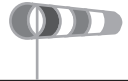
섬진강의 경우 1995년 이전보다 이후에 증가경향이 더 크게 나타나는 전국적인 변화경향과 비슷한 경향을 나타내었다[그림 4]. 반면, 한강과 금강의 경우는 1995년 이전과 이후의 변화경향에 있어 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 판단되어진다. 분석기간 수계별 연평균강수량은 한강의 경우 1350.8mm로 가장 많은 강수량을 나타내었으며, 섬진강 1335.9mm, 금강 1284.8mm로 나타났다. 한편 낙동강은 1236.7mm로서 가장 적은 연평균강수량을 나타내었다.

3) 내륙 및 해안지역 변화

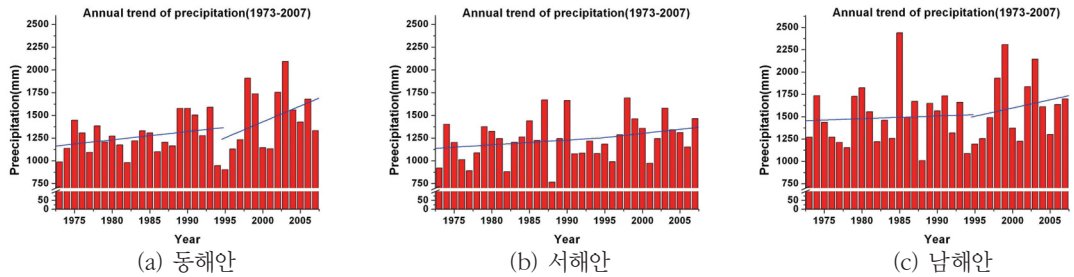
내륙 및 해안구분에 따른 분석결과 한반도 지역의 변화경향과 비슷한 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 분석기간의 내륙지역의 연평균강수량은 1287.6mm이며, 해안지역은 1370.4mm로서 내륙 지역에 비하여 90mm가 많은 것으로 분석되었다 [그림 5]. 더불어 해안지역의 구분에 따른(동해안, 서해안, 남해안) 분석결과 동해안 지역이 상대적으로 변화경향이 크게 나타났다[그림 6]. 남해안 지역의 연평균강수량은 1535.9mm로서 다른 지역(동해안 1337.8mm, 서해안 1237.6mm)에 비하여 상대적으로 많은 것을 확인하였다.



[그림 4] 수계별 연강수량 변화(1973~2007년)



[그림 5] 내륙 및 해안지역 연강수량 변화(1973~2007년)

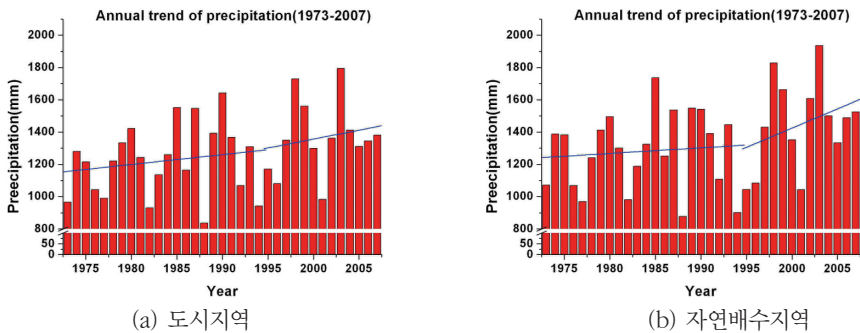


[그림 6] 해안지역 연강수량 변화(1973~2007년)

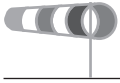
4) 도시 및 자연배수지역 변화

도시 및 자연배수지역 분석결과 자연배수지역이 도시지역보다 상대적으로 한반도 전반적인 변화경향

과 비슷하게 나타났다. 분석기간내 도시지역의 연평균 강수량은 1275.4mm이며, 자연배수지역은 1342.8mm로 나타났다[그림 7].



[그림 7] 내륙 및 해안지역 연강수량 변화(1973~2007년)



[표 1] 홍수기강수량/연강수량 비율(%)

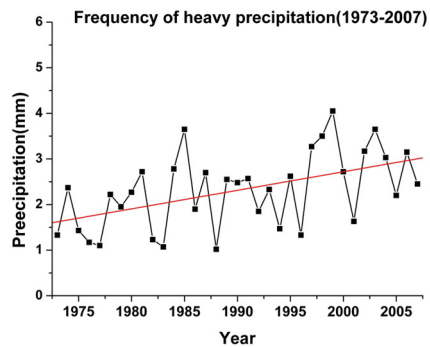
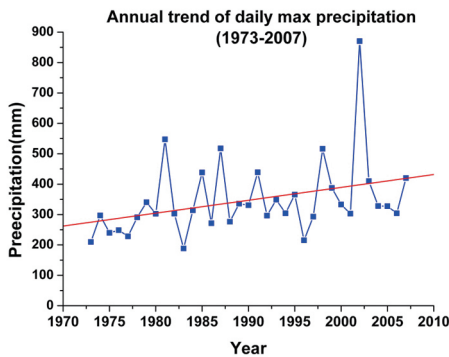
한반도	수계별				내륙 및 해안					도시 및 자연배수	
	한강	금강	낙동강	섬진강	내륙	해안				도시	자연배수
						전체	동해	서해	남해		
65.2	70.2	67.5	67.9	65.5	68.3	62.1	59.5	67.2	60.3	67.3	66.2

지역적인 분석결과 역시 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 홍수기의 강수량은 지역별로 차이는 다소 있지만 전반적으로 연평균강수량의 65.2%에 해당하는 수치임을 분석을 통해 알 수 있었으며, 한강지역이 70.2%로서 가장 높게 나타났으며, 남해안 지역이 60.3%로서 가장 적게 나타났다[표 1].

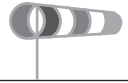
2. 남한지역 일최고강수량 및 집중호우빈도

최근 한반도지역 국지성호우 및 돌발홍수가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 경향성을 살펴보기 위하여 일

최고강수량 및 집중호우빈도에 대하여 분석을 실시하였으며, 분석결과 일최고강수량 및 집중호우빈도는 증가하는 경향을 나타내고 있으며 이는 앞서 언급된 국지성호우 및 돌발홍수와 연관성이 있는 것으로 판단되어진다[그림 8, 표 2]. 한반도지역의 일최고강수량을 분석한 결과 증가하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 특히 2002년의 경우 태풍 루사의 영향으로 강릉지방에는 870.5mm라는 일강수량을 보였다. 더불어 집중호우빈도 분석결과역시 증가하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

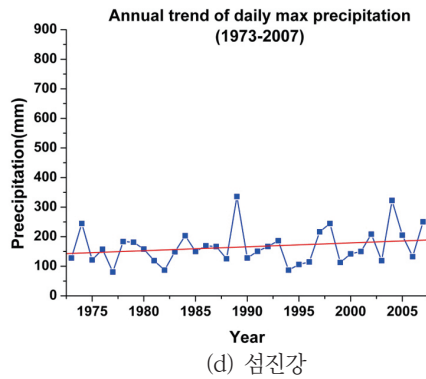
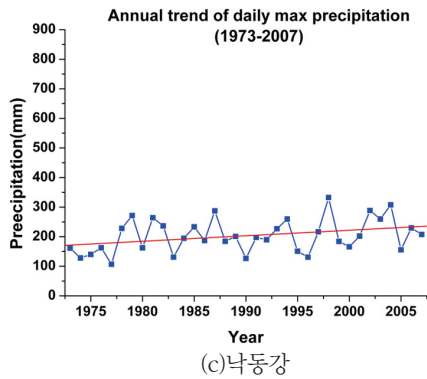
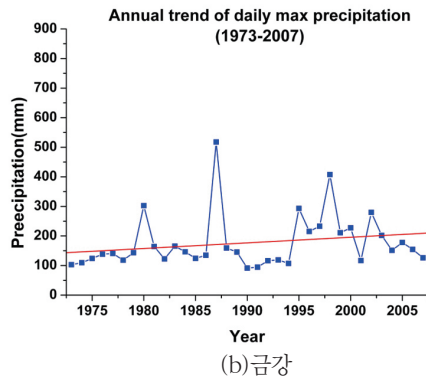
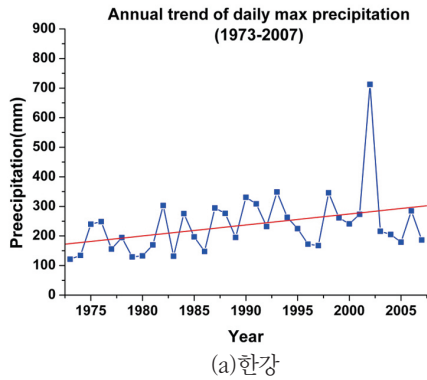


[그림 8] 한반도 일최고강수량 및 집중호우빈도 변화추세

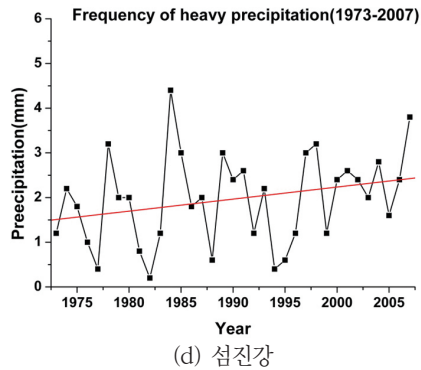
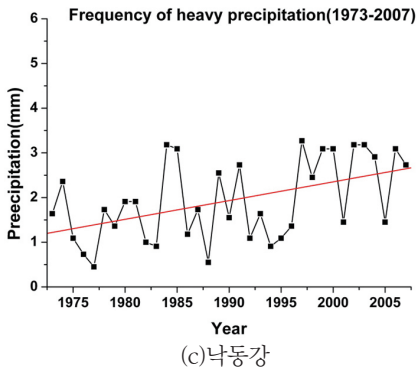
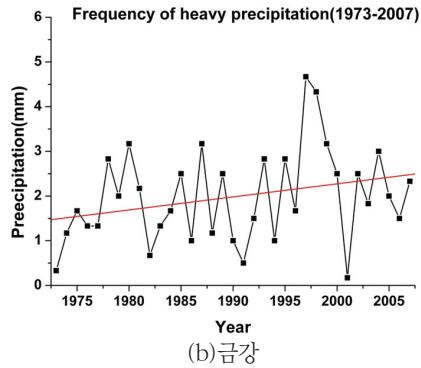
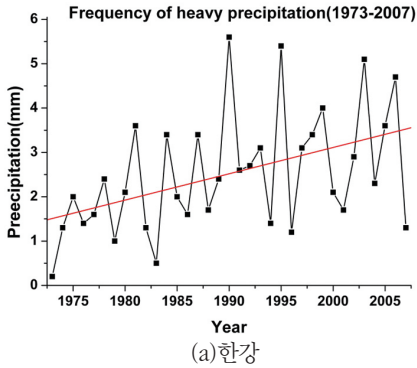
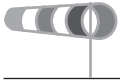


[표 2] 한반도 일최고강수량 및 집중호우빈도 변화(1973~2007년)

	연평균강수량 (mm)	일최고강수량 (mm)	집중호우 발생횟수 (회)		
			80mm/day 이상	90mm/day 이상	100mm/day 이상
1973~1977	1177.1	297.0	7.40	5.10	3.50
1978~1982	1286.1	547.4	10.38	7.97	6.15
1983~1987	1401.6	517.6	12.10	9.25	7.13
1988~1992	1309.2	439.0	10.47	7.62	5.47
1993~1997	1198.3	365.5	11.02	8.03	6.05
1998~2002	1485.1	870.5	15.07	11.63	9.25
2003~2007	1538.2	420.0	14.48	10.92	8.23



[그림 9] 수계별 일최고강수량 변화(1973~2007)



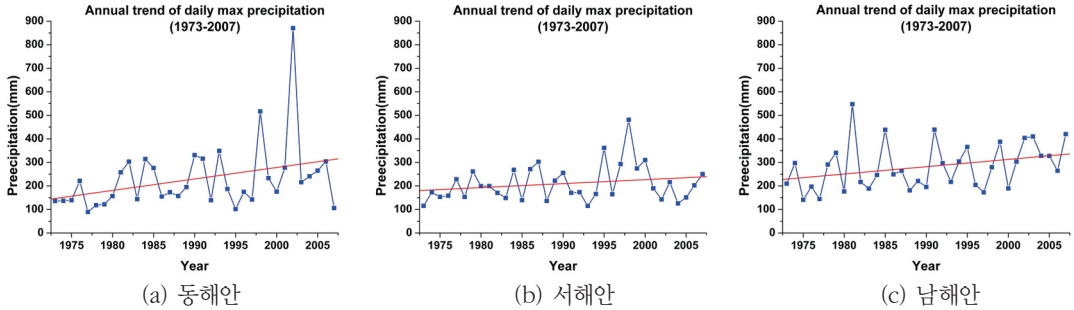
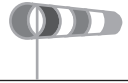
[그림 10] 수계별 집중호우빈도변화(1973~2007년)

수계별 일최고강수량 분석결과 한강수계의 경우가 상대적으로 큰 증가경향을 나타내었으며, 섬진강수계가 다른 수계에 비하여 완만한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다[그림 9]. 또한 집중호우빈도 분석결과 한강수계가 다른 수계에 비하여 상대적으로 큰 증가경향을 나타내는 것을 확인하였다[그림 10].

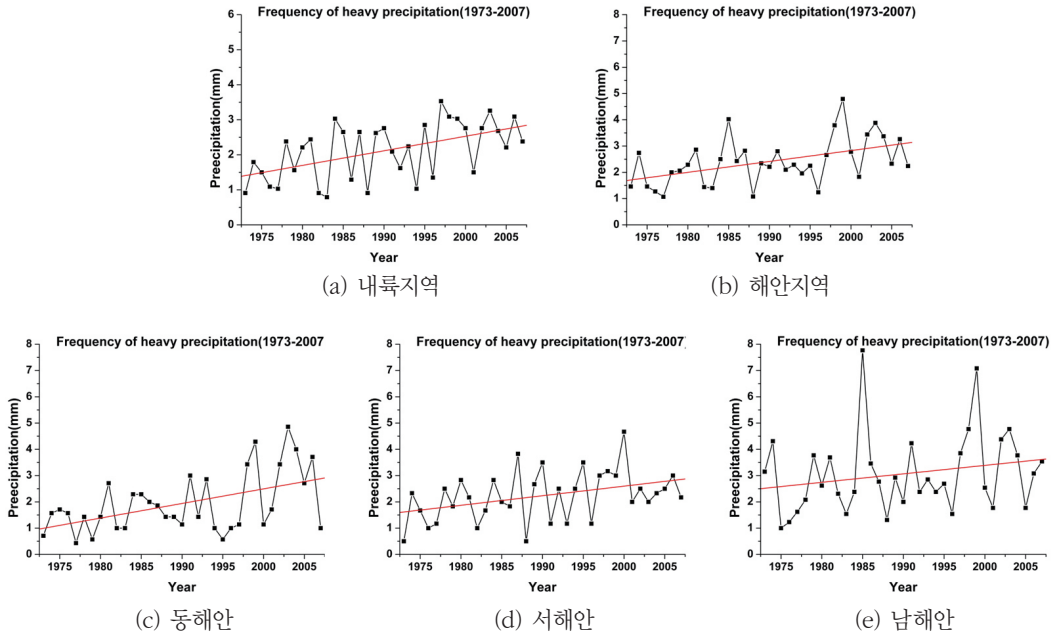
내륙 및 해안지역의 일최고강수량 분석결과 내륙의 경우 큰 변화경향은 나타나지 않았으며, 해안지역의 경우 전체적으로는 증가하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다[그림 11]. 이는 동해안의 증가경향이

반영된 것으로 판단되어 지며, 서해안의 경우 다른 해안에 비하여 다소 완만한 경향을 나타내는 것으로 판단되어 진다. 더불어 집중호우빈도 분석결과 해안 지역에 비하여 내륙지방의 증가경향이 상대적으로 강하게 나타나는 것을 확인하였으며, 해안별로는 동해안의 증가경향이 다른 해안에 비하여 상대적으로 큰 것을 확인하였다[그림 12].

도시 및 자연배수지역의 일최고강수량 분석결과 다소 완만한 증가경향을 나타내는 것을 확인하였으며, 상대적으로 자연배수지역이 도시지역에 비하여 변



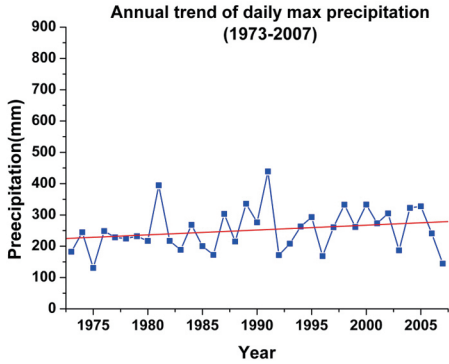
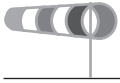
[그림 11] 해안지역 일최고강수량 변화(1973~2007년)



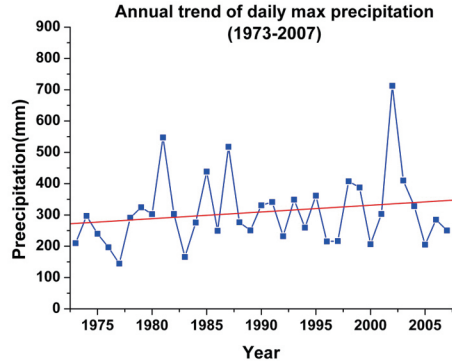
[그림 12] 내륙 및 해안지역 집중호우빈도 변화(1973~2007년)

동성이 크게 나타났다[그림 13]. 더불어 이지역의 집중호우빈도 분석결과 두지역 모두 증가경향을 나타내는 것을 확인하였다[그림 14].

이러한 일최고강수량 및 집중호우빈도의 증가경향은 최근 한반도지역에서 빈번히 일어나는 국지성 호우 및 돌발홍수와 연관성이 있는 것으로 판단되어진다

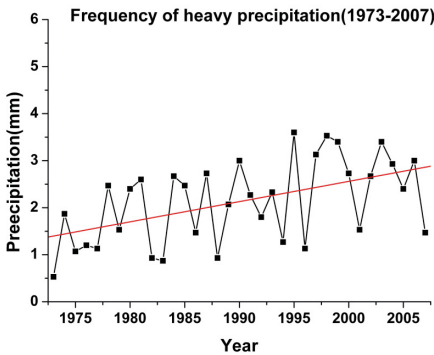


(a) 도시지역

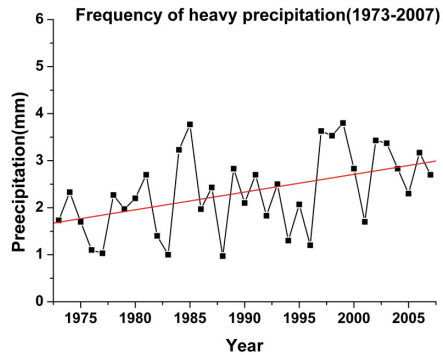


(b) 자연배수지역

[그림 13] 도시 및 자연배수지역 일최고강수량 변화(1973~2007년)



(a) 도시지역



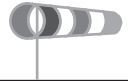
(b) 자연배수지역

[그림 14] 도시 및 자연배수지역 집중호우빈도 변화(1973~2007년)

3. 북한지역 연강수량 추세분석

북한지역의 경우 총27개소의 관측자료[그림 15]를 이용하여 1983~2007(25년)에 대하여 북한지역의 전반적인 연강수량의 변화, 일최고강수량의 변화, 집중호우빈도의 변화를 분석하였다. 더불어 여름철에 연강수량의 2/3가 집중되는 한반도 지역의 대륙적

특성을 고려하여 강수량이 많은 홍수기(6~9월)와 상대적으로 적은 비홍수기(1~5월/10~12월)로 구분하여 변화경향을 살펴보았으며, 연강수량에 있어 홍수기와 비홍수기의 영향을 분석하였다. 이러한 분석결과를 통하여 남한지역의 강수량변화경향과 비교·분석하였다.



총 27개소의 관측자료를 이용하여 북한지역의 연평균강수량을 분석한 남한지역의 증가경향과는 달리 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인하였다[그림 16]. 1995년 이전의 북한지역의 연평균강수량은 953.6mm이며, 1995년 이후는 775.7mm로 분석되었다. 이는 같은 기간 남한지역의 연평균강수량에 비하여 약 600mm 적은 양이다. 지역적으로는 함경북도지역에서의 최근 강수량감소가 두드러지고 있다[그림 17].

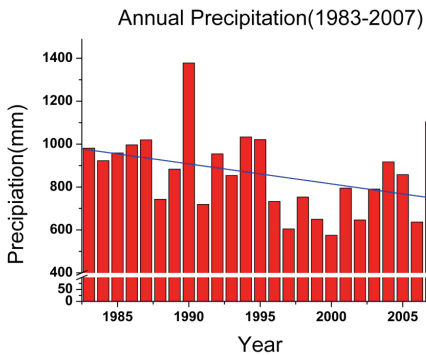


[그림 15] 북한지역 관측소 분포현황(27개소)

1) 홍수기/비홍수기 변화

북한지역의 홍수기/비홍수기 연강수량을 분석한 결과 홍수기에는 감소경향을 비홍수기에는 증가경향을 나타내는 것을 확인하였다[그림 18]. 더불어 이러한 강수변화경향을 세부적으로 분석하기 위하여 월별 강수량 변화를 분석하였다. 월별강수량 변화를

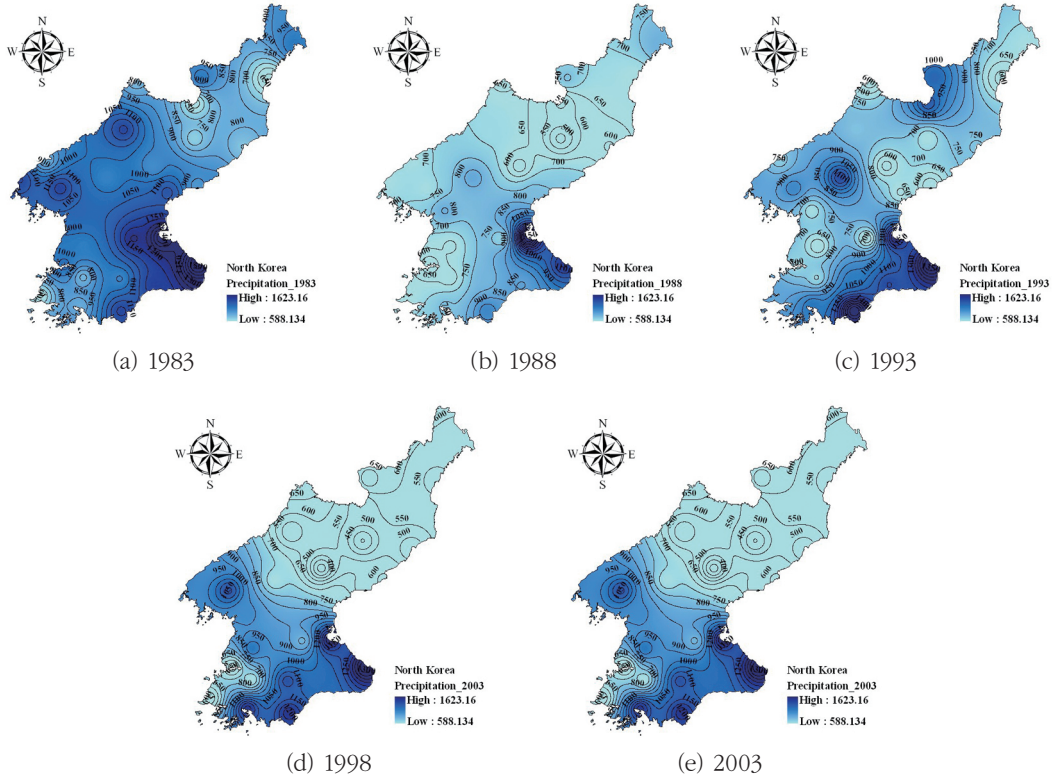
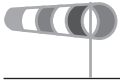
분석한 결과 2~8월 까지 월별 강수량은 감소하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 그 외의 9~1월 기간의 월강수량은 증가경향을 나타내었다. 북한지역의 연강수량 감소경향은 세부적인 월별 분석결과 2~8월 기간의 강수량 감소영향을 받는 것으로 판단되어 진다. 반면 10~11월의 기간은 다른 월에 비하여 상대적으로 큰 강수량의 증가를 보이는 것을 확인할 수 있었다.



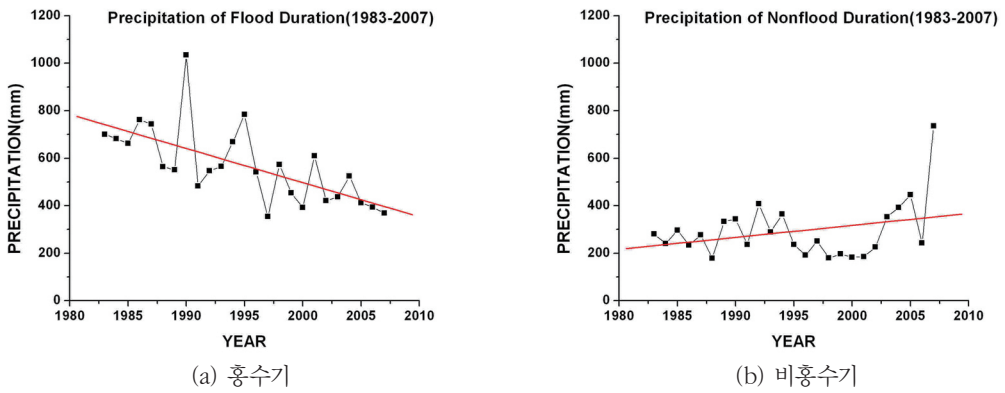
[그림 16] 북한지역 연평균강수량 변화(1983~2007년)

2) 일최고강수량 및 집중호우빈도

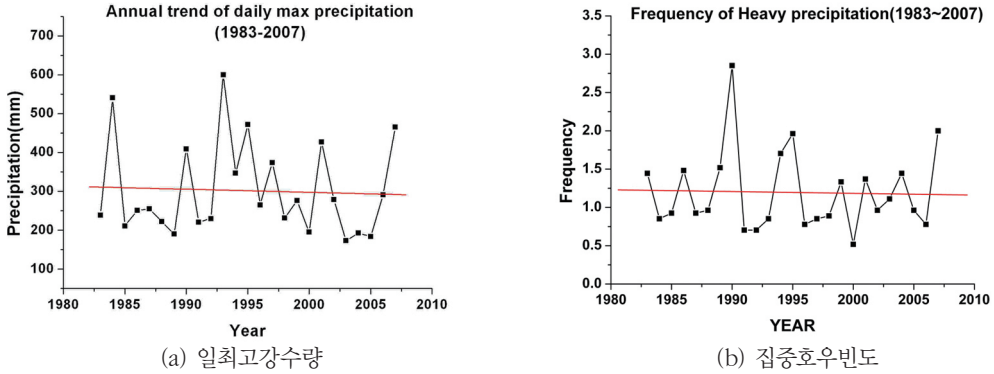
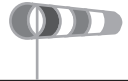
북한지역의 일최고강수량 및 집중호우빈도 분석결과 변동성은 있지만 큰 경향성은 나타나지 않는 것으로 분석되었다[그림 19, 표 3]. 이는 남한지역의 증가경향과는 다른 결과이다. 하지만 일최고강수량의 경우 남한지역보다 상대적으로 크게 나타나는 것을 분석을 통해 알 수 있었다.



[그림 17] 북한지역 연평균강수량 분포



[그림 18] 북한지역 홍수기/비홍수기 강수량변화(1983~2007년)



[그림 19] 한반도 일최고강수량 및 집중호우빈도 변화추세(1983~2007년)

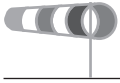
[표 3] 북한지역 일최고강수량 및 집중호우빈도 변화(1983~2007년)

	연평균강수량 (mm)	일최고강수량 (mm)	집중호우 발생횟수 (회)		
			80mm/day 이상	90mm/day 이상	100mm/day 이상
1983~1987	975.7	541.0	5.63	4.00	3.07
1988~1992	935.7	409.0	6.74	5.26	3.48
1993~1997	849.2	600.3	6.15	4.63	3.48
1998~2002	683.9	427.0	5.07	3.63	2.63
2003~2007	861.2	466.0	6.30	4.56	3.48

IV. 맺는말

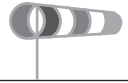
지난 35년간의 수문자료를 이용하여 남북한을 포함한 한반도지역에서의 기후변화 추세를 제시하였다. 강수는 기온과는 달리 지역간의 변화패턴이 다양하게 나타남을 확인하였다. 연강수량의 경우 홍수기의 변화가 두드러졌는데, 남한지역의 경우 증가추세를 보이는데 반하여 북한지역의 경우는 감소추세를 보이고 있어 대조적인 패턴을 보이고 있었다. 이 부분에 대한 물리적인 설명을 위한 추가적인 연구가 필

요하다고 판단된다. 남한지역의 강수량 증가는 지역적으로 낙동강지역과 동해안지역에서 급격한 추세를 보이고 있었다. 일최고강수량과 집중호우빈도등 강수와 관련된 대부분의 지표가 최근 상승추세를 보이고 있었다. 하지만 이와 같이 강수량이 증가함에도 불구하고 하천관리 측면에서는 건천화가 심화되는등 강수와 하천유량간의 불균형이 증가하고 있어 하천관리에 있어서의 특별한 대책수립이 필요한 상황이 되고 있다.



참고문헌

- 권원태, 부경은, 허인혜, 2007: 한반도 최근 10년 기후특성, 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집, 278-280 pp.
- 김영오, 서용원 (2000). "선진국의 기후변화 연구동향(II): 수자원 관리에 대한 영향을 중심으로" 한국수자원학회지, 33(3), pp. 32-41
- 한화진, 안소은, 최은진, 한기주, 이정택, 김해동, 손요환, 박용하, 조광우, 윤정호, 이은애, 김승만, 2005: 기후변화 영향평가 및 적응시스템 구축(I), 한국환경정책평가연구원



기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책

배 덕 효

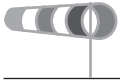
세종대학교 토목환경공학과 교수

dhbae@sejong.ac.kr

1. 서 론

최근 지구온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 지구상의 많은 지역에서 집중호우 및 가뭄이 발생하고 있으며, 우리나라도 예외는 아니다. 이처럼 생·공·농업용수의 효율적인 이용과 홍수 및 가뭄 문제로 대표되는 물관리는 기상현상과 매우 밀접한 관계가 있다. 만약 우리가 원하는 시기에, 원하는 장소에서 원하는 만큼의 수자원이 항상 존재한다면 물관리 문제는 없을 지도 모른다. 그러나 실제로는 강수의 시공간적 불균형이 물관리를 더욱 어렵게 만드는 근본 원인이 된다(Bae et al., 2008, Chang et al., 2007).

통상 지금까지의 물관리는 장기간의 과거 관측자료를 근거로 하여 수자원의 시공간적 변동성을 파악하고, 미래의 물수요량을 추정하여 다양한 구조적, 비구조적 대책을 강구하여 왔다. 일례로 정부에서는 홍수 피해를 경감하기 위해서 홍수조절용 다목적 댐 건설과 같은 구조적 대책과 홍수를 사전에 예측할 수 있는 홍수예경보 시스템 구축과 같은 비구조적 대책을 병행하여 추진하고 있다. 그러나 홍수예경보 시스템의 일부로 사용되는 기존의 강우-유출 모형은 강우 관측치를 모형의 입력치로 요구하므로 실시간 홍수예측 모델로서는 부적절하다. 왜냐하면 실제 대부분의 경우 강우량이 관측될 때 홍수에 대한 예보를 하기 위해서는 시간이 매우 촉박하기 때문이다. 이와 같은 관점에서 최근에는 기상



정보를 홍수에 직접 활용하려는 다양한 노력이 경주되고 있다.

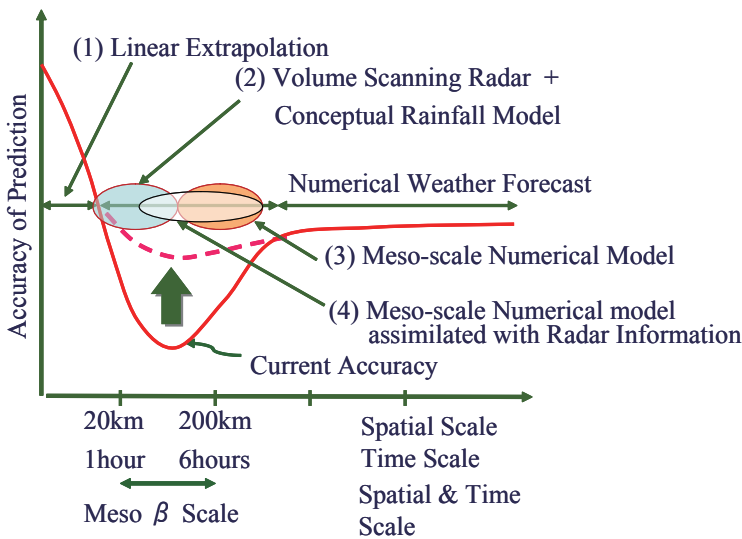
따라서, 본 고에서는 보다 효율적인 물관리를 위해서 활용 가능한 기상정보는 어떤 것이 있는지, 이들 정보는 어떻게 활용될 수 있는지 국내외 현황 및 사례 중심으로 소개하고, 향후의 물관리 방향을 전망·제시하고자 한다.

II. 기상정보의 생산 및 한계

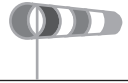
대기현상은 비선형성이 매우 강하여 현재의 기상조건으로 2주 후의 기상상태를 예측할 수 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 물관리를 위해서는 다양한 시공간적 기상예보 정보를 요구하고 있다. 홍수 및

돌발홍수의 경우 초단시간예보(6시간 이내) 정보가 요망되며, 대유역의 홍수기 댐운영을 위해서는 2~3일의 예측강우, 용수수급을 위해서는 월간예보 및 계절예보 등이 요망된다(건설교통부, 2003). 이처럼 사용 목적에 따라 서로 다른 시공간적 스케일의 기상정보가 요망되나, 현실적으로 이들 모든 경우에 대한 정확한 정보를 제공하는 것은 현대 과학의 범주내에서 한계가 있다. 보다 효율적인 물관리를 위해서는 현재 생산되고 있는 기상정보를 이해할 필요가 있다.

[그림 1]은 시간적, 공간적 규모에 따른 강수예측의 정확도를 나타낸 그림이다. 그림에서 제시한 바와 같이 통상 6 시간 이내의 초단시간예보에는 중규모 수치 모형의 적용에도 한계가 있어 레이더 강수자료와 개념적 강수모형을 결합하여 생산하는 것이 일반적인



[그림 1] 기상예보정보의 정확도



특징이다. 초기 국내 기상레이더의 경우 강수정보 생산보다는 바람장을 생산하여 수치예보의 초기조건 제공으로서의 기능이 더 강조되었다. 그러나 최근에는 돌발홍수예보 등 치수 목적의 활용도에 대한 인식이 높아져 초단시간 예보 모형(Very Short Range Forecast Model) 등에 레이더의 활용성이 증대되고 있으며, 특히 최근에는 이중편파 레이더의 도입에 대한 연구도 많이 진행 중이다.

기상청에서 운영하고 있는 수치모델로는 전지구예보 모델(Global Data Assimilation Prediction System, GDAPS)을 운영하여 중기(10일) 및 장기예보(1개월)를 수행하고 있으며, 지역예보모델(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS)의 초기 추정값 및 측면 경계값을 제공하고 있다. 또한 전구분석 결과를 이용하여 분석일기도를 생산하고 있다. 모델은 해상도에 따라 T106과 T213이 운영되고 있으며, T106은 수평격자 간격이 약 110km 이고 21개의 연직층으로 구성되어 있으며, T213은 약 55km 수평격자 간격에 30개의 연직층으로 구성되어 있다. 앙상블 예보에는 T106을 사용하고 있으며 28일 예보를 수행하고 있다.

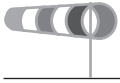
지역예보 모델 RDAPS는 30km 격자간격의 동아시아영역 예보와 10km 격자간격의 한반도 및 주변영역 예보, 5km 격자간격의 한반도 예보가 수행되고 있으며 모두 33개의 연직층으로 구성되어 있다. 동아시아영역 예보의 경우 48시간 예보를 수행하고 있으며, 나머지는 24시간 예보를 수행하고 있다. 이외에도 태풍예보 및 파고예보 모델이 운영되고 있으며, 통계예보 모델은 칼만필터 및 PPM(Perfect Prog

Model)을 이용하고 최고/최저 기온을 비롯한 강수 확률 예보를 수행하고 있다.

III. 국외 기상정보활용 물관리 사례

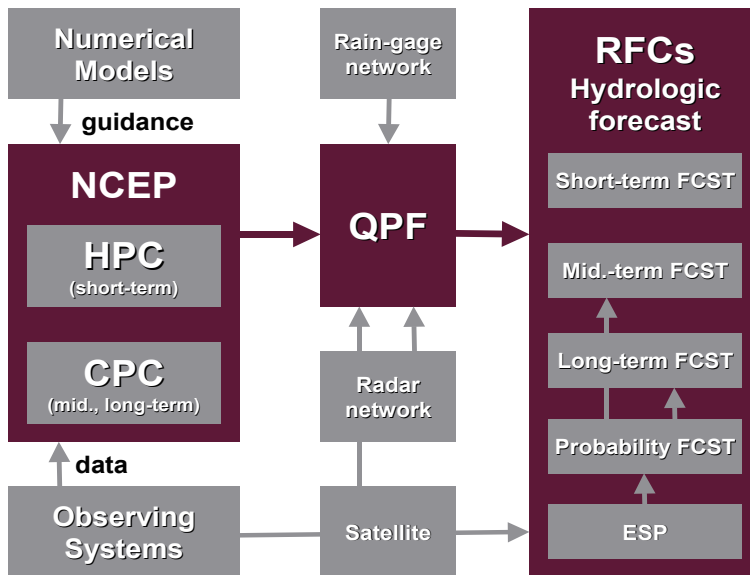
기상정보를 활용한 물관리의 대표적인 사례는 홍수 및 가뭄예보, 댐운영 등이다. 전 세계적으로 이 분야에 가장 선진기술을 보유한 국가중 하나인 미국의 경우 장기간에 걸쳐 꾸준한 연구개발이 수행되고 있으며, 다양한 현업분야에 실제 응용되고 있다(기상청, 2004). 미국의 현실태를 살펴보는 것은 미래의 물관리에 기상정보가 어떻게 활용될 수 있는지 이해하는데 도움이 될 것이다.

미국의 경우 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하의 NWS(National Weather Service)에서 홍수 예·경보 업무를 담당하고 있다. 미국에서는 1917년 이후에 제방 및 둑 건설 등 홍수피해를 줄이기 위한 구조적 대책이 시작되어 1960~1980년 사이 최대의 댐 건설붐을 맞이하였다. 2차 세계대전 직후부터 강수량과 홍수의 특정 단계와 관련시킨 간단한 표에 근거하여 처음으로 지역적 홍수 예·경보를 제공하였으며, 이후 1970년도 초에 자동 LFWS(Local Flood Warning System)가 캘리포니아 북부에 위치한 USBR(U.S. Bureau of Reclamation)에 의해 설치되었다. 이와 동시에 NWS 수문실(Office of Hydrology)에서 돌발홍수 경보 시스템(Flash Flood Alarm System)을 개발하여 홍수가 발생하기 쉬운 주에 제공하였다.

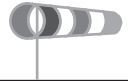


강수량 관측자료에 기초한 홍수 예측 시스템의 경우, NWS 산하의 수문실에서 홍수 예·경보 시스템인 LFWS를 개발하였으며, 현재도 이 시스템은 지속적으로 개선되고 있다. 이는 미국의 경우 통상 유역면적이 우리나라 보다 매우 크기 때문에 홍수도 달시간이 늦어 관측강우도 유용하게 활용되는 지역이 많이 있다. 1970년대 후반부터 1980년대 초반 사이에 NWS는 의회의 명령에 따라 아팔라치아에서 IFLOWS(Integrated Flood Observing and Warning System)이란 이름의 국지 규모 LFWS 개발 계획을 수립하여 개발하기 시작하였다. 현재 미국 전역에는 400개 이상의 LFWS가 운영 중이며, 앞으로도 LFWS의 보급은 계속 확대될 것으로 예상된다. 여러 주 정부에서는 자동 LFWS를 홍수문제에 대한 여러 구조적/비구조적 해결 방안들을 결합하기 위한 방법으로 이용 중이다.

그러나 LFWS는 강수 관측자료에 근거한 시스템으로 돌발홍수에 대처하기 위한 충분한 예·경보 시간을 갖지 못하여, 홍수에 효율적으로 대처하지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 개발된 것이 강수량 예측 시스템에 근거한 홍수 예측 시스템인 AHPS(Advanced Hydrologic Prediction System)이다. 이 시스템은 수자원 관리와 수해방지를 목적으로 개발되었으며, 수문 예보를 장단기 기상예보와 결합시킨 것이 특징이다. 이 시스템은 며칠에서 수개월까지 미리 예보가 가능하며, 주요 홍수와 가뭄의 영향을 현저히 감소시키기 위한 신속하고 효과적인 대처능력을 크게 개선할 것으로 기대된다. 또한 이 시스템은 농업, 수산업, 수자원관리 및 다른 목적을 위한 경쟁적인 용수 요구를 관리하는데 보다 나은 정보를 제공할 것이다.



[그림 2] RFC 수문예보 연산 처리과정

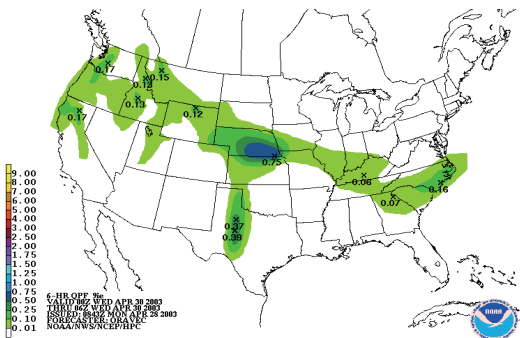


AHPS는 다른 물관련 기관(연방, 주, 준정부와 사설 기관)과 NWS 하부조직, 13개 RFC(River Forecast Center)와 협력하고 있으며, 대규모 강들을 따라 약 4,000개의 지점에서 유출 또는 수위의 시계열 예보를 생산하기 위하여 RFC 수문학자들이 매우 광대한 소프트웨어 시스템을 구축하였다. RFC는 대유역의 하천, 저수지, 호수를 위한 수문 모델링 조작을 관리하고 NWS의 수문 산출물을 위한 기초적인 예측정보를 생산하기 위해 AHPS와 협력 프로그램 구축하여 [그림 2]와 같이 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 HPC(Hydrometeorological Prediction Center), CPC(Climatic Prediction Center)의 QPF (Quantitative Precipitation Forecast) 및 관측정보를 입력으로 수문예보를 수행하며, 비홍수 기간에 하루 두 번의 스케줄로, 중대한 홍수나 홍수발생 가능 기간에는 24시간 연장된 조작을 운영한다.

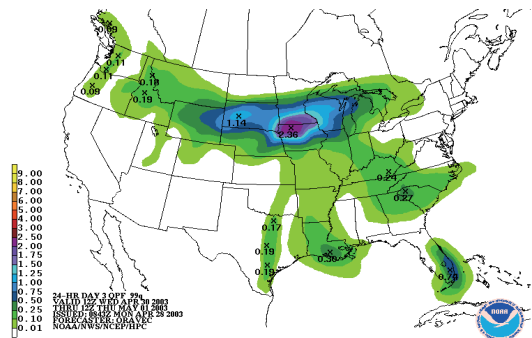
RFC에서는 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System) 모델과

SSARR(Streamflow Simulation and Reservoir Regulation) 및 ESP(Ensemble Streamflow Prediction)를 이용하여 실시간 홍수예보 및 하천 예보와 장기 (확률)예보를 수행한다. NWSRFS는 수문모델로 Sacramento 토양 수분 모델과 Snow-17 Accumulation and Ablation 모델, 여러 가지 API 모델과 연결 알고리즘 및 저수지 조절 기구를 포함하고 [그림 2]에서와 같이 정량적 강수량 및 기온의 예보값 및 관측값을 입력 자료로 사용한다.

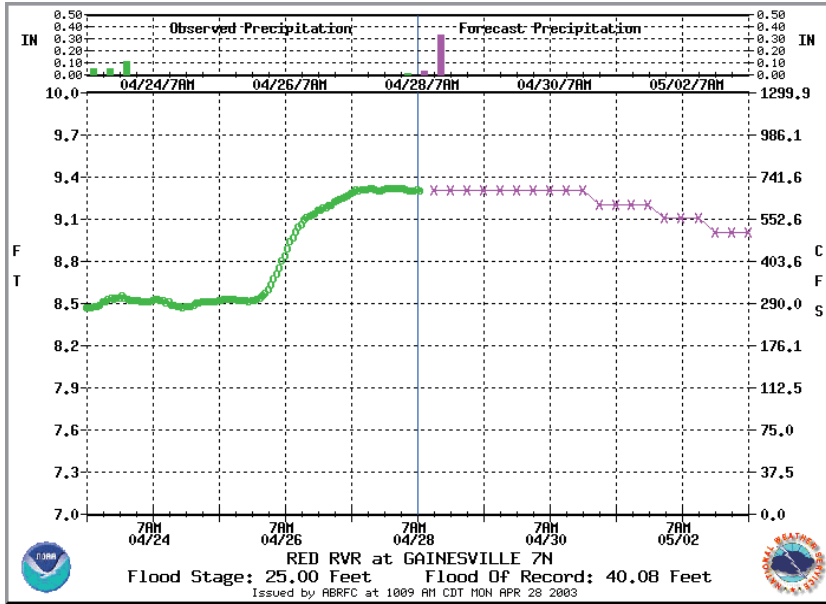
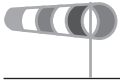
정량적 강수량 예보 QPF에 의한 강수량 예보 값은 적어도 하루에 한번 제공되며, NCEP/HPC로부터 5일간의 6시간 강수량과 24시간 강수량 예보값과 CPC로부터 5일 이상의 확장 기간에 대한 QPF가 제공된다. [그림 3]과 [그림 4]는 미국 전역에 걸친 HPC의 6시간, 24시간 QPF의 예를 나타낸 것이다. 이러한 예보값은 지점별 또는 유역 평균값으로 제공된다. 관측값의 경우 품질관리 과정을 거치게 되는데 이는 NWSRFS 모델을 사용하여 예보를 하는데 있어 오류를 줄이기 위한 것이다. 또한 다음 3일간의



[그림 3] HPC의 6시간 QPF 예보



[그림 4] HPC의 24시간 QPF 예보



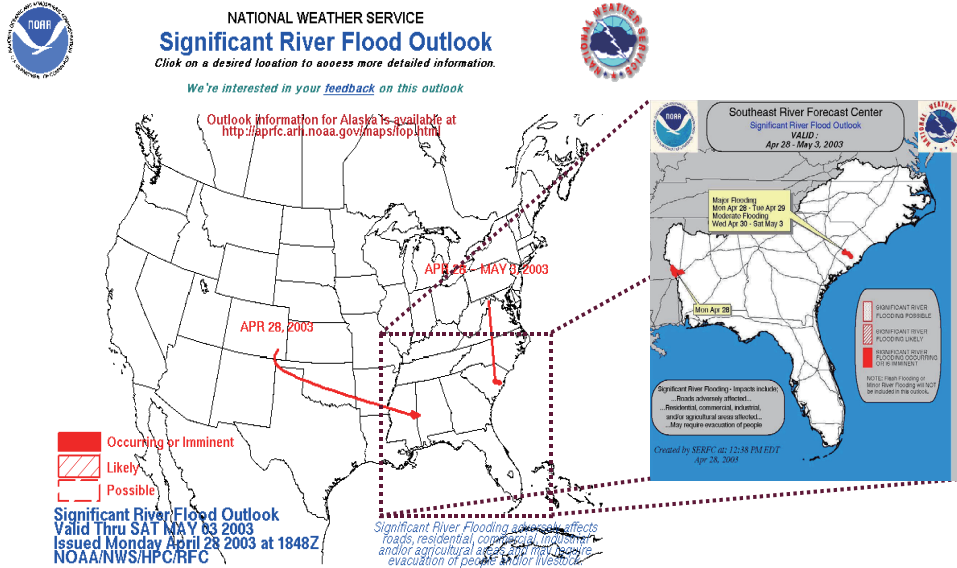
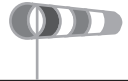
[그림 5] 단기 수문예보 사례

빙결고도 예보값을 제공받아 강수의 형태(눈 혹은 비)를 결정하는데 사용된다. 품질관리를 거친 기온 및 강수량의 관측값과 예보값을 NWSRFS 모델에 입력하여 계산을 수행하게 된다.

RFC의 주요 초점은 단기(0~7일) 하천예보에 있는데, 이것은 WFO(Weather Forecast Office) 홍수 정보 산출과 고객 및 협동기관의 의사결정 과정에서 중요한 입력자료로 제공되기 때문이다. 단기 운영에 사용되는 예보 시스템은 편리한 예보 수문곡선 출력물과 예보의 정확도를 전달하는 확률정보를 생산한다. 예보 수문곡선은 기본적으로 일련의 예보시간에서 때때로 “최상의 결정”으로 평가되는 예보수위의 단일 집합이다. 일례로 미국 남부지역의 ABRFC에서는 HPC의 5일간의 6시간 QPF를 활용

하여 실시간 단기 수문예보를 수행 중이며, [그림 5]와 같은 산출물을 일반 사용자에게 제공하고 있다.

RFC 예보자들은 그들 책임영역의 수문기상학적 상황을 그들이 운영중인 예보 시스템의 결과물과 함께 지속적으로 분석한다. 이들 분석을 기초로 중대한 하천홍수의 위험영역을 정의하는 그래픽적 5일 예보 전망([그림 6])을 생산한다. 이러한 산출물은 경계 비상 관리자와 홍수에 대한 다른 잠재적 사용자들에게 활용된다. 이러한 시스템과 더불어 NWS는 근대화 프로그램에 의해 AWIPS(Advanced Weather Interactive Processing System) 장비와 그래픽 기능을 갖춘 강력한 워크스테이션 전산망을 제공하고 있다. 또한 근대화 프로그램은 전국에 걸친 약 140개의 WSR-88D 도플러 레이더 관측망을



[그림 6] RFC의 5일 선행 하천홍수 전망

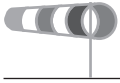
이용하여 ASOS(Automated Surface Observing System)와 같은 관측망에서 관측된 지표 강수량 관측자료를 이용하여 고해상도의 강수량 자료를 생산한다. WSR-88D 자료를 이용한 강수량 생산 알고리즘은 밝은 띠 효과를 고려할 수 있도록 기능이 향상되었으며, 지표 강수 관측자료에 의하여 조정되도록 개선되었다.

IV. 우리나라 기상정보 활용 물관리 사례

우리나라는 미국 등 구미 선진국에 비해 수치예보 정보의 생산이 늦게 출발한 것은 사실이다. 국내의 경우 1989년 기상청 수치예보과가 신설되면서 많은 발전을 거듭해 왔으며, 비교적 짧은 역사에도 불구하고

하고 기상정보를 활용한 물관리 노력은 지속되어 왔다. 기상정보를 물관리에 활용하려는 대표적인 초기 연구로는 기상연구소의 「한반도 악기상(집중호우 등) 감시 및 예측 기술 개발」일 것이다. 그 후 국토해양부에서도 하천정보센터를 신설하고, 기상정보의 물관리 활용에 많은 노력을 경주하고 있다. 몇몇 연구사례를 소개하면 다음과 같다.

한강유역의 돌발홍수에경보 시스템 개발 사례는 기상정보를 활용한 물관리의 대표적인 사례라 할 것이다 (배덕효와 김진훈, 2007). 돌발홍수는 통상 100km² 이내의 지형이 좁고 경사가 급한 유역에서 느리게 유역을 통과하는 호우나 동일한 국지지역 내에서 빠르게 움직이는 집중호우로 짧은 시간 이내에 하천수위의 급격한 상승을 유발하여 많은 인명과 재산피해를

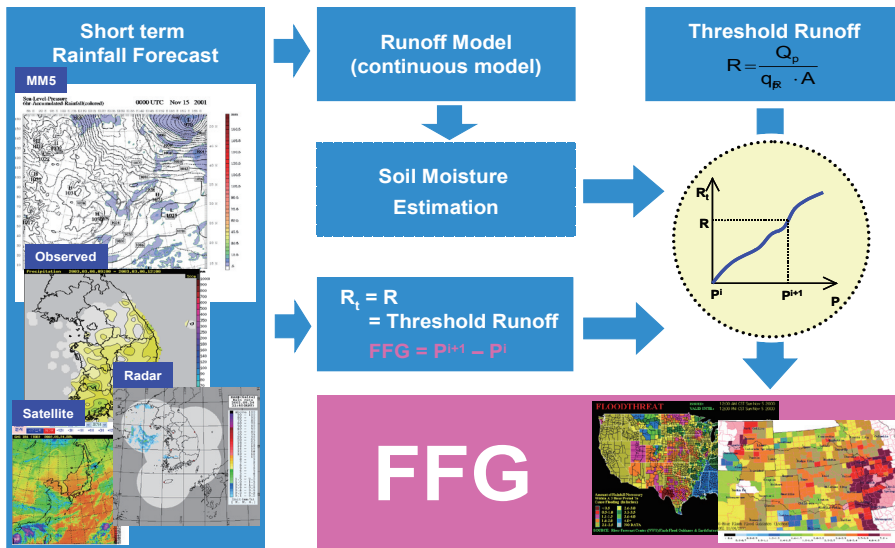


초래하는 것으로 이를 효율적으로 예방하기 위해서는 기상정보, 특히 6시간 이내의 초단시간 예보정보의 활용이 필수적이다.

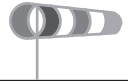
돌발홍수를 사전에 예방할 수 있는 최선의 방법은 미래에 발생할 강우를 사전에 예측하고, 이를 효율적인 유출 모델과 결합하여 연계·운영할 수 있는 홍수예측 시스템을 구축하는 것이다[그림 7]. 돌발홍수 예경보 시스템의 주요 현안 중 하나는 초단시간 정량적 강수예보 기술이며, 레이더 강수 및 단기 수치예보 결과 이외에도 지상관측 강수량과 위성강수정보의 통합 활용이 요망된다. 돌발홍수예경보 시스템의 수문학적 컴포넌트는 한계유출량 산정과 토양수분량 산정모형이 기본이다. 한계유출량이란 토양수분이 포화된 상태에서 특정유역의 소하천 제방이 월류하는데 필요한 강수량으로 정의되며, 유역의 지

형특성이 변하지 않는 한 유역고유의 값을 갖는 것으로 가정할 수 있다. 이에 비해 토양수분은 강수량 및 증발산량 정도에 따라 변하는 값으로 통상 하루에 두 번 정보를 생산하며, 토양수분 상태와 한계유출량 값을 이용하여 돌발홍수능(Flash Flood Guidance)을 결정한다. 특정 시간동안 예상되는 강수량이 돌발홍수능을 초과하게 되면 돌발홍수발생 정보를 발령하는 기법이다.

홍수예보의 선행시간을 확보하기 위해서는 대기-유역수문 접합 시스템의 개발도 유용한 방법이다(기상청, 2004). 대부분의 기상모형에 장착된 컬럼형 LSM(Land Surface Model)은 지면과 대기간의 상호작용(물과 에너지 순환)을 수직적으로만 처리한다. 반면 TOPMODEL과 같은 수문모델은 유역별 물유출입 균형화 과정을 통한 유역평균 지하수면을 계산



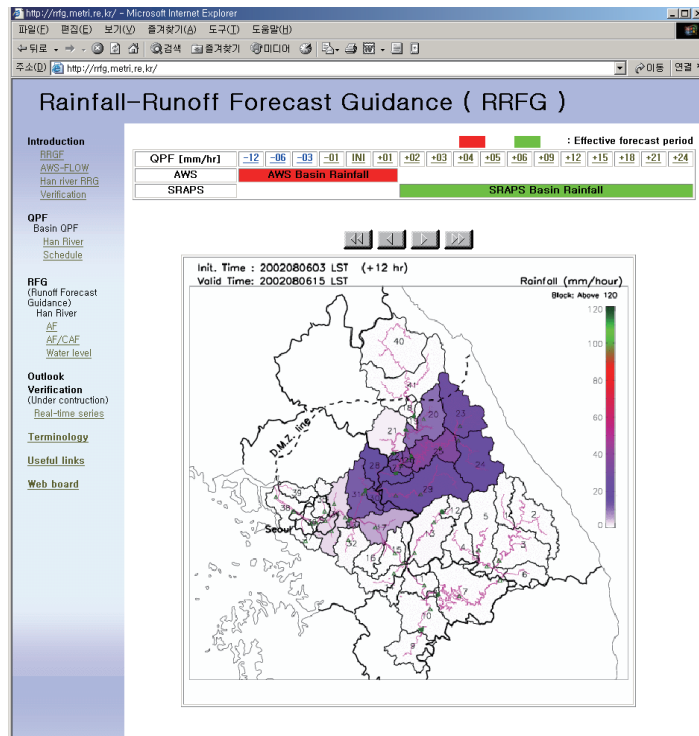
[그림 7] 돌발홍수예보 시스템 구성요소



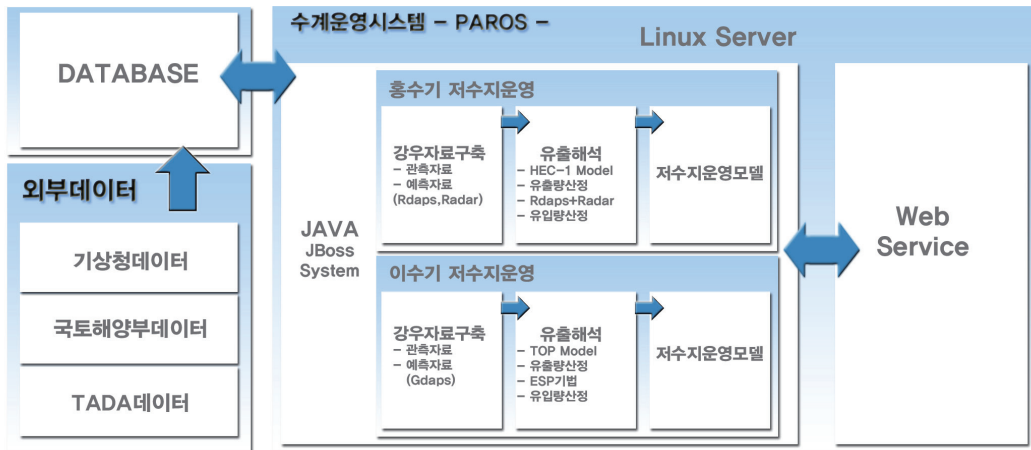
한다. TOPLATS는 컬럼형 LSM같이 수직적 물 및 에너지 상호작용을 계산한 후에 TOPMODEL처럼 수평적(유역별) 지하수 이동과정과 지형지수를 이용한 재분배과정을 실제 격자체계로 계산하므로써 수직 및 수평적 물이동을 동시에 모의할 수 있는 모형이다. 이와 같은 모형을 개발하기 위해서는 다양한 지형정보가 요구된다. GIS 도구를 활용하여 인공위성 사진이나 국립지리원의 수치지도로부터 등고선을 추출한 후 DEM(Digital Elevation Model)을 생성할 수 있고, 또한 수문모델 구축을 위해 토양도, 토지이용도 정보가 요구된다. 이들 자료를 활용하여 소유역을 구분하고 각 단위 소유역의 면적, 유역 및

하도경사, 유역 흐름길이, 유역 흐름중심길이 등을 산정하여야 한다. [그림 8]은 한강유역 실시간 유량 예측 시스템 사례를 나타낸 것이다.

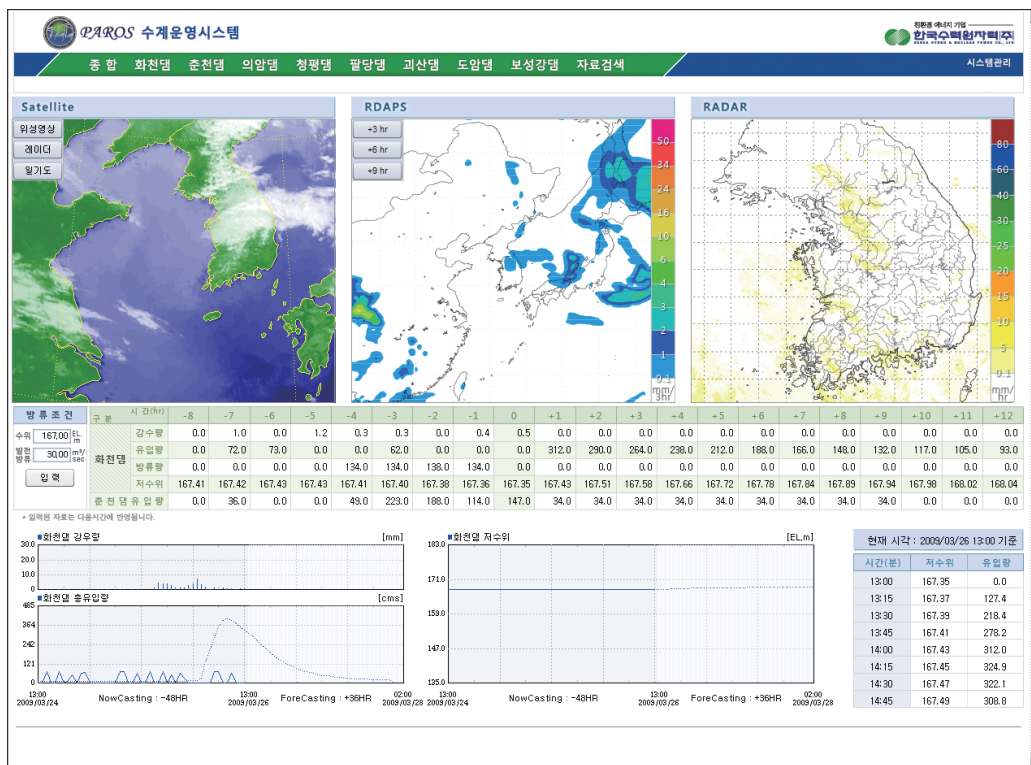
또 다른 사례는 한강수력원자력(주)의 발전수계시스템에 기상정보의 활용이다. 지금까지 국내 발전용 댐 운영 실무에서는 대부분의 경우 기상관측자료에 의존하고 있는 실정이었다. 최근 한강수력원자력(주)에서는 수력발전소 운영체계 개선을 위해 기상청에서 생산되고 있는 다양한 기상정보를 댐운영에 연계할 수 있는 PAROS 시스템을 개발하였다(한강수력원자력, 2008). [그림 9]에서와 같이 수계운영 시스템은



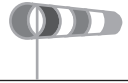
[그림 8] 한강유역 실시간 유량 예측 시스템



[그림 9] 기상정보 활용 수계운영 시스템 흐름도



[그림 10] 화천댐 운영현황



홍수기 저수지운영과 이수기 저수지운영으로 구분하여 개발하였으며, 활용되는 기상정보로는 기상청 및 국토해양부의 지상관측강수량 자료 이외에 기상청의 레이더 강수량 자료, 단기 및 장기 수치예보자료가 활용되고 있다. 홍수기 댐유입량 예측모형으로는 HEC-1모형의 Clark 모형과 Muskingum-Cunge 모형을 사용하였으며, 이수기 장기유출모형으로는 중규모 TOPMODEL을 적용하였다(배덕효와 김진훈, 2005). 홍수기 댐운영 모형은 ROM 기법을 활용하였으며, 이수기에는 앙상블 모의기법(ensemble simulation technique)을 장착하였다. 통상 기상예측정보에는 오차가 필연적으로 수반되므로 이를 감안하여 댐유입량 예측 및 댐운영에 활용할 수 있는 기법의 개발이 매우 중요하며, 대기-수문연계 시스템의 평가 시스템도 향후 모델 개선을 위해서는 중요한 부분이다. [그림 10]은 구축된 PAROS 시스템의 운영 사례를 나타낸 것이다.

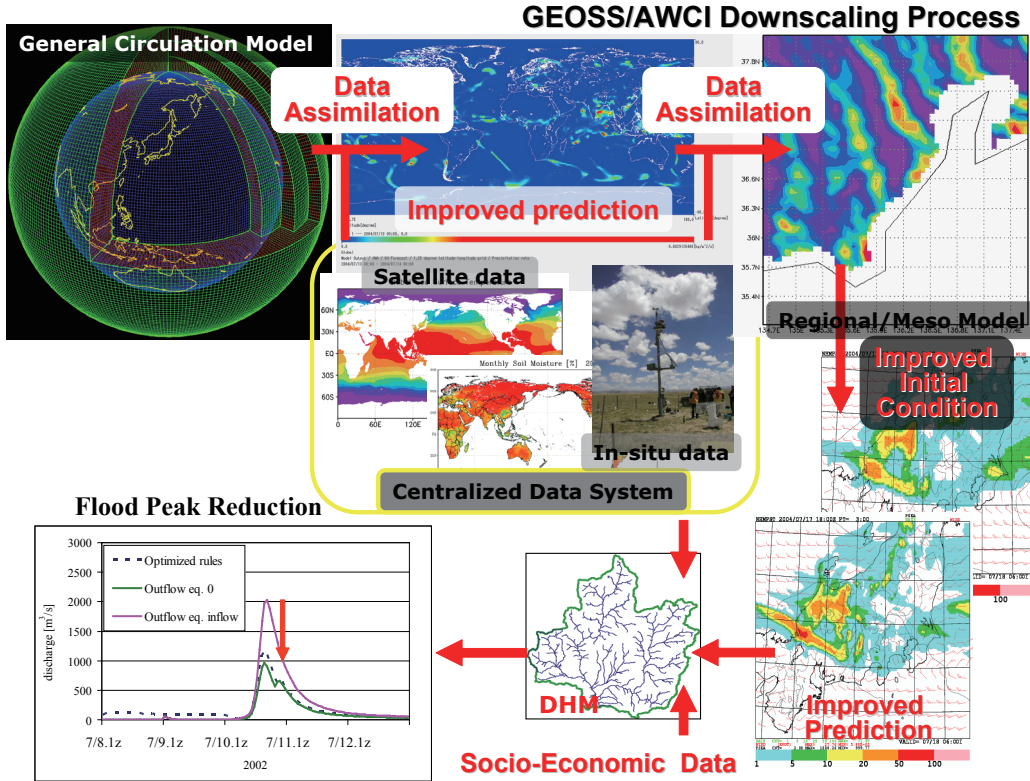
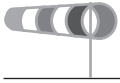
V. 결론 및 향후과제

국내의 경우 기상정보를 활용한 물관리 수준은 아직 초기단계라 생각된다. 그러나 기상정보를 활용한 물관리의 필요성이 시간이 지날수록 더욱 강조될 것이다. 그 이유는 현대사회가 발전함에 따라 정보의 다양화 및 정확도에 대한 욕구가 더욱 증가하고 있기 때문이고, 또한 최근의 기상이변은 물관리를 더욱 어렵게 하고 있어 기상정보를 활용하지 않고서는 다른 대안이 없기 때문이다(Bae, 2007). 이에 대해 국내외에서도 다양한 노력이 진행되고 있다.

그 대표적인 노력중에 하나가 GEOS/AWCI(Global Earth Observation System of Systems/ Asia Water Cycle Initiatives, <http://monsoon.t.u-tokyo.ac.jp/AWCI/>)에서 그리고 있는 국제협력을 통한 기상-수문연계 관측 D/B 구축 및 모형 개발이다([그림 11]). 즉, GCM의 정보로부터 Regional/Meso Model를 이용하여 해당 지역에 활용 가능한 지역 기상정보를 생산하고, 이는 댐상류 유역의 댐유입량 예측에 활용되어 댐의 침투유량을 저감시키는 역할을 하고 있다. 물론 이들 과정에는 위성정보와 레이더 강우정보도 이용된다. 이와 같이 과거에는 단편적으로 기상 및 물관리 분야 각각에서 수행되던 과업들을 통합하여 연계운영 시스템의 개발이 가까운 시일내에 가시화될 것이다.

또한, 전술한 국내외 기상정보 활용 물관리 실태를 살펴보면 단기 및 중, 장기 강우예측정보를 홍수 및 댐운영 등에 활용하려는 방법은 유사하다고 할 수 있다. 다만, 미국의 경우는 NOAA에서 전략적으로 추진중인 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)을 통해 위성을 통한 강수량 추정, 온도 추정, 토양수분함량 추정 등이 실제로 이루어지고 있다. 위성을 통한 이와 같은 강우예측은 전지구 감시 실시간 기상수문정보 획득 측면에서 의미를 갖는다. 현재 우리나라에서도 국가적으로 자체 기상위성발사 계획을 가지고 있어 기상위성 시스템을 이용한 물관리의 활용도가 높을 것으로 기대된다.

기상정보를 활용한 미래의 물관리를 위해 시급히 해결되어야 할 사항중 하나는 레이더 자료, 강우관측망 자료, 수위 및 유량 관측 자료 등의 수문기상자료의



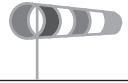
[그림 11] 대기-수문-댐 연계운영 개념도

품질관리 부분이다. 기상정보를 활용한 물관리의 국내외 사례에서 살펴본 바와 같이 구축되는 시스템의 골격에는 큰 차이가 없다. 그러나 구축된 시스템의 결과 정확도에는 다소 차이가 있다고 생각된다. 이를 개선하기 위해서는 구축된 자료의 실시간 보정기법과 같은 방법론의 개발도 중요하지만, 원자료의 품질이 개선되지 않고서는 불가능하기 때문이다. 특히 우리나라는 지형이 좁고 연강수량의 2/3가 여름철에 집중하는 특성 때문에 기상정보를 활용한 물관리는 세계 어느 나라보다 쉽지 않은 기상학적, 지형적 조건을 가지고 있으므로, 이는 원자료 정보의 품

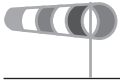
질향상과 기상-수문연계 기법의 선진화만이 기상정보를 활용한 물관리 현업화의 유일한 방법일 것이다.

참고문헌

건설교통부, 한국수자원공사, 2003: 수계별 계절예측강우의 댐 운영 적용방안 연구보고서, 441pp.
 기상청, 2004: 한반도 약기상(집중호우 등) 감시 및 예측 기술 개발, 기상지진기술개발사업, MR033F15.



- 배덕효, 김진훈, 2005: 준분포형 TOPMODEL 개발, 한국수자원학회 논문집, 38(10), 895-906.
- 배덕효, 김진훈, 2007: 한국형 돌발홍수예경보 시스템 개발 (I) 이론 및 시스템 설계, 대한토목학회논문집, 27(3B), 237-243.
- 한국수력원자력(주), 2008: 수력발전소 발전 및 수계운영설비 보강사업 -발전용댐 수계운영 모델개발- VOL.I 수계운영모델개발, 498pp.
- Bae, D.H., 2007: Current activities flood for forecasting enhancement in Korea, The 3rd GEOSS Asian Water Cycle Symposium, Beppu, Japan.
- Bae, D.H., I.L. Jung, H.J. Chang, 2008: Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins, Hydrological Processes, 22(14), 2644-2656
- Chang, H.J., J. Franczyk, E.S. Im, W.T. Kwon, D.H. Bae, 2007: Vulnerability of Korean water resources to climate change and population growth, Water Science and Technology, 56(4), 57-62.
- <http://monsoon.tu-tokyo.ac.jp/AWCI/>



이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안

차기욱

한국수자원공사 물관리팀장

cku@kwater.or.kr

I. 들어가는 말

지난해 여름철은 소위 “마른장마”로 큰 비가 없었고 태풍이라고는 7월에 ‘갈매기’가 발생하였으나 서해안바다에서 소멸되면서 큰 영향은 없었다. 큰 홍수피해는 발생치 않았던 것은 매우 다행스런 일이나 물 담을 기회가 없어 전국의 하천은 물론 소규모 저수지는 바닥을 드러내고 대형 댐들도 저수율이 예년에 비해 매우 낮은 가뭄상황은 또한 매우 불행한 일이다. 강원도 광동댐을 중심으로 한 태백지역에서는 금년 1월 5일부터 4월 3일까지 80일 이상을 제한급수를 해야 했고, 낙동강 수계는 작년 8월 이후 현재까지 하천유지용수를 감량해서 공급해야 하는 실정이다. 다행히 농업용수 사용량이 급증하는 지난 5월

중순 이후에 전국적으로 100mm 정도의 단비가 내려 우선 급한 고비는 넘겼지만, 낙동강이나 섬진강 일대에 지속되고 있는 가뭄이 해소되려면 적어도 100mm이상의 비가 빠른 시일 내에 내려야 하는데 장마가 빨리 시작되기를 기대하는 상황이다. 이러한 우리나라의 가뭄현상은 통상 5~7년의 주기로 나타났는데, 금년에도 2001년 가을부터 2002년 초여름까지 발생한 가뭄 이후 7년 만에 다시 발생한 것이다. 여름철 홍수와 달리 가뭄은 장기간에 걸쳐 발생하므로 우리나라에서 쓰는 대부분의 물을 공급하는 전국 15개 다목적댐의 역할은 이런 상황에서 더욱 중요하다고 할 수 있다. 따라서 여기에서는 작년부터 이어지고 있는 가뭄 현황과 특성을 살펴보고, 한국수자원공사에서 운영 중인 다목적댐을 이용한 가

물극복 수행과정과 향후 물 공급 전망에 대한 제언을 기술하고자 한다.

름철 끝 무렵인 9월과 10월에 걸쳐서는 과거의 절반 정도에도 못 미치는 비가 내림으로써 금년까지 이어지는 가뭄이 발생하게 되었다.

II. 가뭄 현황

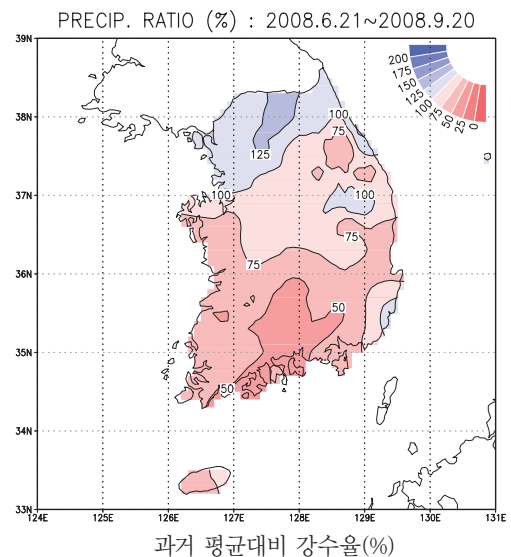
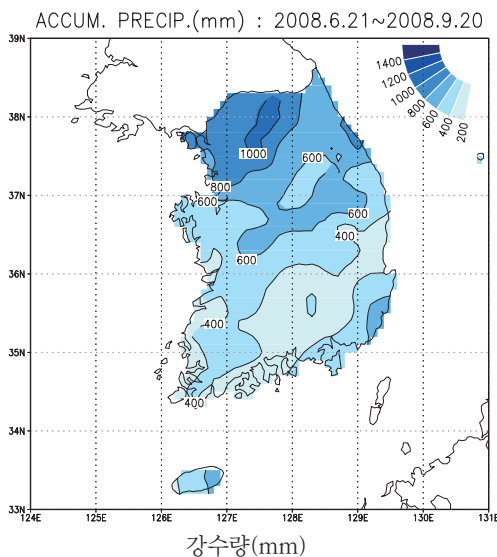
1. 강수량

작년 초반만 하더라도 전국적으로 내린 비의 양은 과거 평균과 비슷한 수준이었으나, 여름철 초반 마른장마로 인해 건조한 날씨가 자주 나타나다가 여

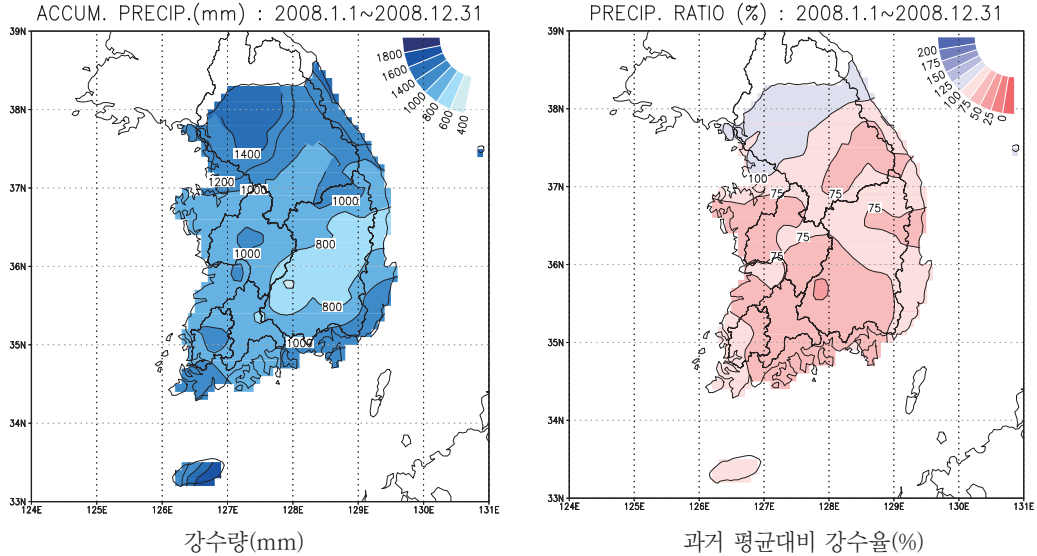
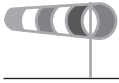
2008년 1월 1일부터 2009년 5월 31일 현재까지 전국 다목적댐에 내린 강수량은 1,159mm으로 과거 평균인 1,565mm의 74% 수준으로, 특히 한강을 제외한 남부지방에서는 강수량 부족으로 인해 댐 및 광역 상수도의 혜택을 받지 못하는 간이급수 및 도서지역에 심각한 가뭄이 계속되고 있다([표 1]).

[표 1] 댐 유역 강수량 현황 (2008.1.1~2009.5.31)

구 분	평균	한강	낙동강	금강	섬진강	기타
금년(mm)	1,159.0	1,256.2	1,077.7	1,019.9	1,214.6	1,276.9
과거 평균(mm)	1,565.2	1,497.8	1,602.0	1,567.5	1,711.7	1,866.5
대비(%)	74.0	83.9	67.3	65.1	71.0	68.4



[그림 1] 2008년 여름철 전국 강수량 현황 (6월 21일 ~ 9월 20일)



[그림 2] 2008년 전체 전국 강수량 현황

작년 여름철 홍수기(6.21~9.20) 동안 전국에 내린 강수량(539.5mm)도 과거 평균(706.5mm)대비 76%로 지역별로는 경기, 강원영서 일부지방을 제외하고는 전국적으로 강수량이 적었으며, 특히 경남, 전남 일부지역은 50%에도 미치지 못하는 강수량을 기록하였다([그림 1]).

다목적댐에 내린 비의 양을 살펴보면 한강을 제외한 모든 곳에서 과거대비 60% 정도의 수준에 머물렀으며, 특히 낙동강의 합천댐, 남강댐, 밀양댐은 댐 건설 이래 최저수준의 강수량을 기록하고 있다.

2. 유입량

현재 전국 15개 다목적댐의 유입량을 살펴보면 금년 5월까지 특히, 낙동강유역의 임하댐, 합천댐, 남강댐이 과거 평균 대비 26~38% 수준이며, 섬진강수계의 주암댐도 40% 수준으로 매우 적은 유입상황을 나타내고 있다. 작년 여름철 동안 댐 유입량도 전체 평균이 과거대비 51% 정도에 불과 하는 등 가뭄이 전국적으로 발생하고 있음을 알 수 있다([표 2 참고]). 또한, 작년부터의 각 수계별 유입량을 분석한 결과 과거대비 한강은 약 62%, 낙동강 39%, 금강 37%, 섬진강 47%정도로 가뭄상황이 심각함을 알 수 있다. 특히, 낙동강의 경우 다른 곳에 비해 댐 유입량이 현저히 악화된 상황으로 가뭄이 매우 심하게 나타나고 있다.

[표 2] 다목적댐 유입량 현황

(단위 : 억m³, %)

다목적댐	전체('08.1.1~'09.5.31)			작년 여름철('08.6.21~'08.9.20)			금년 유입량('09.1.1~5.31)		
	금년	과거평균	대비	금년	과거평균	대비	금년	과거평균	대비
계	108.6	219.4	49.5	64.3	125.6	51.2	1.60	3.33	48.0
한 강	58.3	93.7	62.2	39.4	54.3	72.6	0.82	1.41	57.9
낙 동 강	22.3	60.8	39.2	11.3	32.1	35.2	0.34	0.87	39.0
금 강	16.3	44.1	37.0	8.0	25.5	31.2	0.27	0.67	40.6
섬 진 강	9.6	20.3	47.2	4.6	10.9	42.6	0.13	0.31	42.6
기 타	2.1	4.6	45.8	1.0	2.7	36.2	0.04	0.07	54.6

주) 한강 : 소양강·충주·횡성댐, 낙동강 : 안동·임하·합천·남강·밀양, 금강 : 대청·용담, 섬진강 : 주암·섬진강, 기타 : 부안·보령·장항댐

3. 댐 저수량

현재 전국 15개 다목적댐에 담겨진 수량은 총 41.1억m³으로 한강 22.6억m³, 낙동강 7.3억m³, 금강 7.8억m³, 섬진강 2.4억m³, 기타 1.0억m³으로 예전보다는 전체적으로 약 11억m³ 정도 적은 수준이다([표 3]). 이는 작년 여름철 동안 강수량 및 유입량이 과거대비 74%, 50% 수준으로 아주 적음에도 불구하고 여름철 마른장마가 나타남에 따라 다목적댐에서 필요한 수량만을 공급하는 등 가뭄에 대비한 운영으로 여름철 후반에 과거대비 85%의 저수량을 확보했기 때문이다. 한강, 금강, 섬진강수계는 비교적 용수공급

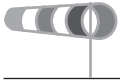
에 여유가 있으나, 낙동강수계는 우기가 시작되는 6월말까지 댐 하류 하천상황을 고려하여 운영을 할 필요성이 있다.

III. 가뭄 특성

지난해는 여름철 북태평양 고기압이 예전과 달리 장기간 우리나라에 머무르며 장마전선을 약화시켰을 뿐만 아니라 여름철 후반 북상하는 태풍들도 중국까지 확장한 북태평양 고기압 세력에 밀리며 우리나라에 별다른 영향을 주지 못하였다. 여름철 초반

[표 3] 다목적댐 저수량 현황 (2009. 5. 31 기준)

구 분		합계	한강	낙동강	금강	섬진강	기타	
금 년	저수량	억m ³	41.1	22.6	7.3	7.8	2.4	1.0
	저수율	%	32.7	39.3	24.2	33.9	20.8	28.6
	과거대비	%	78.3	87.8	66.2	79.3	55.6	64.4
과거 평균	저수량	억m ³	52.5	25.7	11.0	9.8	4.4	1.6



제7호 태풍 갈매기의 한 차례 영향이 있었으나 주로 서울·경기, 충청 서해안에 집중호우가 발생되었으며, 8월말에서 9월초까지 발생하던 2차 장마도 형성되지 못하였다. 또한, 여름철 후반이후에도 강수가 없는 건조한 날씨가 계속되었으며 그 후 가을부터 현재까지 큰 비 없이 가뭄상황이 지속되고 있다.

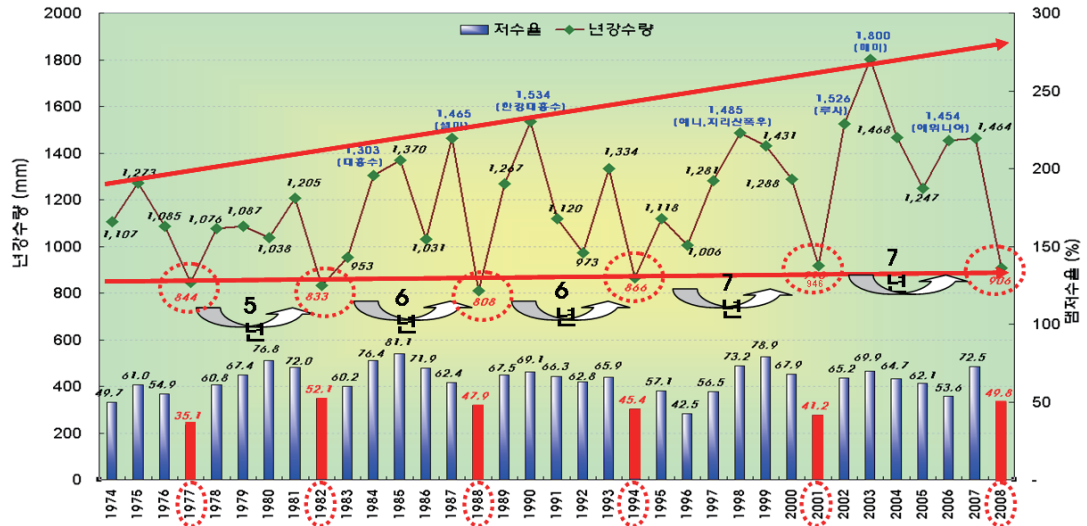
1. 주기적 반복

1960년대 이후 우리나라의 주요 가뭄으로는 1968년, 1977년, 1982년, 1988년, 1994년, 2001년으로써 대략 5~7년에 한번 정도 가뭄이 발생하였다(그림 3).

[표 4]와 같이 2008년 전국 강수량은 906mm로서 과거 심각한 가뭄이 발생하였던 1994년과는 유사하고, 2001년 가뭄보다는 152mm정도 적게 내린 상황이다.

2. 과거 가뭄과의 비교

근래에 나타난 심각한 가뭄으로는 지난 1994~1995년과 2001~2002년 등이 있으며, 그 당시 상황을 작년부터 시작된 가뭄과 비교·분석하여 현재의 상황이 어느 정도에 도달해 있는지 살펴보고자 한다.



[그림 3] 전국 다목적댐 강수량 및 저수율 변화

[표 4] 가뭄의 주기성

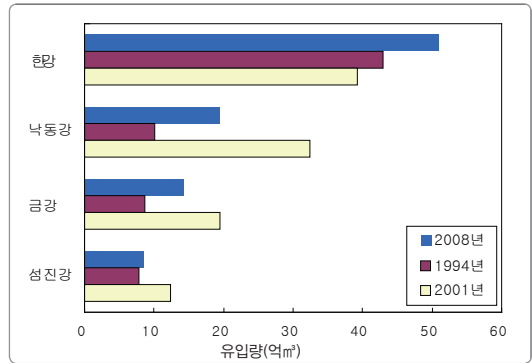
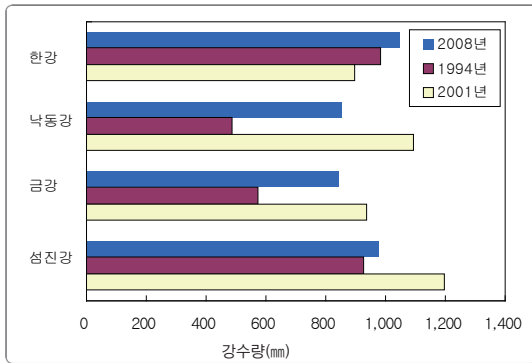
가뭄년	1968년	1977년	1982년	1988년	1994년	2001년	2008년
년강우량(mm)	1,053	965	971	906	918	1,058	906

1994~1995년도와 비교하여 금년 현재까지의 강수량은 105~175% 정도 수준을 보이고 있으며, 댐 유입량의 경우도 1994년 이후 건설된 댐(횡성, 남강보강, 밀양, 용담, 부안, 보령, 장흥댐)등의 영향으로 약 110~190%이상을 보이는 등 금년도가 양호한 상황을 보이고 있다(그림 4) 참고). 또한 댐 저수량도 주압댐만 과거 가뭄년 대비 약 60% 수준이나, 전체적으로는 120% 정도의 높은 상황을 나타내고 있다(표 5) 참고). 또한, 2001~2002년도와 비교하면 한강을 제외하고 강수량은 78~90% 수준, 유입량은 60~74% 정도로 적은 상황이고, 댐 저수량은 한강과 금강을 제외하고는 모두 69~82% 수준으로 적은 양의 물을 저수하고 있다.

전반적으로 금년도는 과거 가뭄해인 1994~1995년에 비해서는 양호하며 2001~2002년도에 비해서는 다소 불리한 편이나 작년 여름철부터 가뭄에 대비한 댐 방류량 조정 등의 적극적 대응으로 금년 여름철까지의 물 공급에 큰 영향을 미치는 작년 여름철 후반 저수량은 매우 양호한 수준을 보였다.

3. 가뭄에 대응한 다목적댐 운영

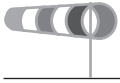
가뭄과 관련한 다목적댐 운영은 크게 가뭄이 발생하기 전에 준비하는 단계와 가뭄이 진행되면서 시행되는 두 단계로 나눌 수 있다. 이 단계는 가뭄발생시 나타날 수 있는 피해를 사전에 최소화하고 극심한



[그림 4] 강수량 및 유입량 비교

[표 5] 9월말 저수율 비교

구 분		한강	낙동강	금강	섬진강	기타
2008년	저수율(%)	65.5	38.8	52.9	35.4	50.3
	'94년 대비(%)	137	149	140	91	-
	'01년 대비(%)	148	108	143	98	94
1994년		47.7	26.0	37.9	39.1	-
2001년		44.3	35.8	37.0	36.3	53.7



가뭄발생시 이를 극복하고자 하는 댐 운영 대책을 말한다. 다목적댐의 물 공급을 위한 운영은 가뭄을 조기에 감지하여 물 공급에 지장이 없도록 순응적으로 댐 방류량을 조정하고, 가뭄이 예측보다 더 심하게 발생할 경우 실제 가뭄상황을 반영하여 물 공급량을 조정하는 것이다.

1) 가뭄발생 준비단계

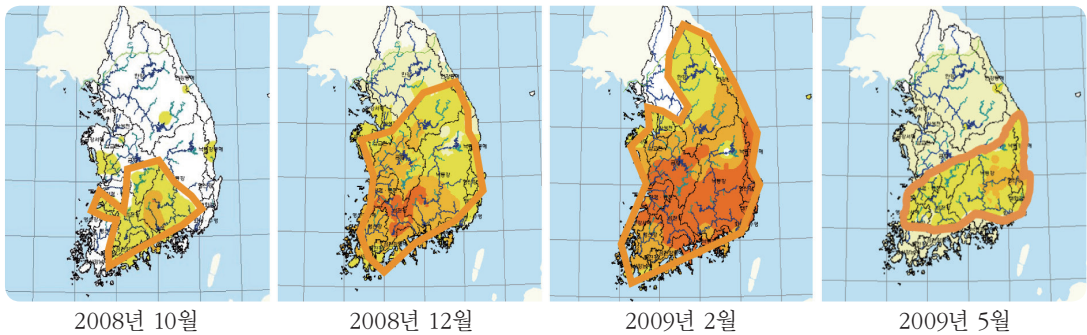
가뭄은 그 특성상 홍수 등 기타 자연재해와는 달리 진행속도가 느려 시간적으로 대처할 여유가 많기 때문에 비록 진행 중인 상태라 하더라도 그 진행상황을 조기에 감지한다면 가뭄피해를 최소화할 수 있다. 가뭄을 조기에 감지할 수 있는 가뭄정보시스템, 가뭄상황에도 안정적인 물 공급을 위한 댐 운영기준수위, 댐 상하류 하천상황을 실시간으로 파악하는 것은 물론 하천수량이나 수질상황을 고려할 수 있는 저수지 운영시스템 등을 구축하여 보다 효과적으로 가뭄에 대비하고 있다.

(1) 가뭄정보시스템(Drought Information System)

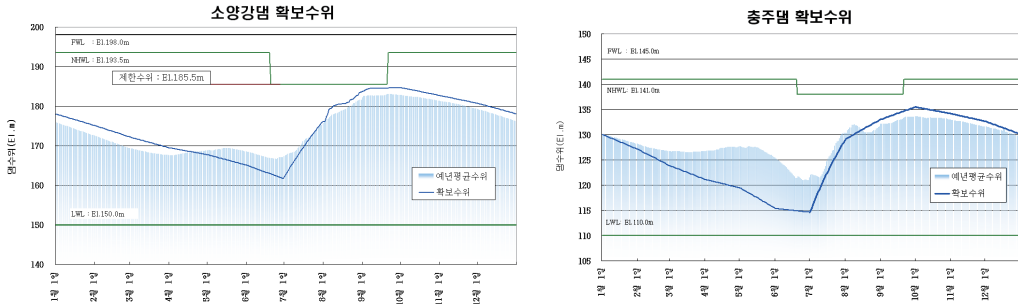
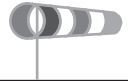
가뭄진행상황을 모니터링하고 평가하여 객관적 수치인 가뭄지수로 제시함으로써 가뭄의 시공간적 전개과정을 조기에 확인하여 가뭄에 대비하고자 가뭄정보시스템을 구축운영 중에 있다(<http://drought.kwater.or.kr>). 가뭄정보시스템에서는 기상 및 강수 자료를 이용한 기상학적인 가뭄지수(파머지수등)는 물론 하천수량과 지하수 등을 감안한 수정 지표수 공급지수(MSWSI) 및 표준강수지수(SPI), 토양수분지수(SMI) 자료를 제공하고 있다([그림 5] 참고).

(2) 댐운영 기준수위

다목적댐은 안정적 물 공급 및 홍수조절이라는 기능을 모두 충족시킬 수 있는 Guide-line으로 댐 운영 기준수위를 설정하여 운영 중에 있다. 안정적 용수공급을 위해서는 댐 수위를 비교적 높게 유지하여 저수량을 많이 확보하여야 하나, 홍수조절은 가능한 댐 수위를 낮추어야 하므로 이 두 가지는 서로 상반된 댐 운영을 필요로 한다. 따라서 이를 적절히 조합할 수 있는 방법으로서 기준수위가 사용되게



[그림 5] 가뭄지수 현황(가뭄정보시스템)



[그림 6] 다목적댐 확보수위(예)

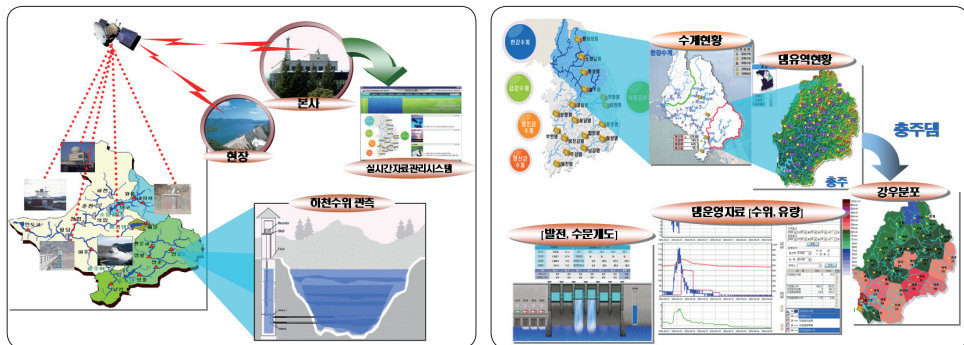
되며 이중 안정적 용수공급을 위한 운영기준 수위로 확보수위를 적용한다(그림 6) 참고). 확보수위란 다음해 여름철 전까지 가뭄상황이 발생하더라도 안정적 물 공급이 가능한 댐 수위를 말한다. 실제 가뭄대비 댐 운영 시에는 강수량 및 댐 저수상황에 따라 탄력적으로 댐 방류량을 조절함으로써 해당시기에 설정된 확보수위를 최대한 유지하도록 하고 있다.

작년에도 여름철 초반 장마전선의 소강으로 인한 마른장마 발생 시 확보수위를 감안하여 실제 필요한 물만 공급함으로써 여름철 후반 별다른 태풍의 영향이 없음에도 저수량을 최대한 확보할 수 있었다.

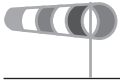
(3) 실시간 수문자료 관리시스템

(HDAPS ; Hydrological Data Acquisition and Processing System)

한국수자원공사에서는 전국 댐 유역에 161개의 강수량 관측소와 댐 상·하류 주요지점에 126개의 수위관측소(수위·우량 병설관측소 포함)를 설치·운영하고 있으며, 이러한 관측소에서 관측된 자료들은 우리나라 자체 위성인 무궁화 5호 위성을 통해 매 1분마다 실시간으로 수신함으로써 댐 및 하천의 유량 등 수문상황을 실시간으로 모니터링하고 있다 ([그림 7]).



[그림 7] 실시간 수문자료 관리시스템



(4) 실시간 저수지 운영시스템

하천 상·하류 수량과 수질은 상호 연관된 인과관계가 있으므로 수자원관리는 하천유역단위로 통합적으로 이루어져야 한다. 특히, 한정된 수자원으로 하천의 수량과 수질 목표를 동시에 달성하기 위해 물의 수요와 공급을 실시간 정보로 획득하면서 기상과 유출 분석기술을 활용하여 운영기간 동안의 물 수요와 공급 가능량을 예측하고, 이를 바탕으로 하천과 저수지의 수질을 고려한 최적의 물 공급계획을 수립할 수 있도록 실시간 저수지운영시스템(Integrated Water Resources Management System)을 구축·운영 중에 있다(그림 8) 참고).



[그림 8] 실시간 저수지 운영시스템

실시간 저수지 운영시스템은 기상청 예보자료와 유출량 해석프로그램(SSARR)을 이용하여 하천수량을 예측하고 최적화 및 모의운영 프로그램으로 안정적인 물 공급을 위한 댐 운영계획을 수립한다. 또한, 하류 하천의 수질상태를 고려한 댐 운영을 위해

수질프로그램(QUAL2E, CE-QUAL-RIV1)을 포함하여 운영 중이다.

2) 가뭄단계 대응

(1) 가뭄상황에 따른 댐 공급량 조정

가뭄이 일단 발생하게 되면 두 가지의 댐 운영으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 물 사용에 불편이 없도록 적극적으로 대처하여 저수지를 운영하는 경우로서 이는 예측된 댐 유입량보다 실제 유입량이 적게 되면 물 공급에 차질이 우려되는 위험성을 내재하고 있고, 예상하지 못한 극심한 가뭄이 발생하면 물 부족에 대처할 수 없는 상황이 초래된다. 또 하나는 하류의 실제 물수요량보다 적은 양을 공급하여 댐 저수량 확보에 적극적으로 대처하는 경우로서 이는 장래 가뭄상황에 대한 물 공급 안정성은 증대되나 당장의 물 수급에는 어려움을 감수해야 한다. 따라서 실제 운영 시는 이 두 가지 방법을 적절히 조합하여 운영하게 되나, 기본적으로는 여름철전까지의 물 공급 가능량을 분석하고 부족이 발생할 경우에는 다목적댐의 물 공급량을 단계적으로 조정하고 있다.

용수공급량의 단계별 조정은 “다목적댐 관리규정”에서 생활용수, 공업용수, 농업용수 및 그 밖에 용수 순으로 공급의 우선순위를 정하고 있으므로 실무적으로도 [표 6]과 같이 댐건설 당시 정해진 생공용수 기본계획 공급량 중 실 사용량을 공제한 잔여량을 우선 조정하고 하천유지용수, 농업용수의 순으로 조정하게 된다. 현재 낙동강의 다목적댐은 낮은 댐 저수율을 감안하여 2단계 수준으로 용수공급 중이며, 한강·금강·섬진강은 1단계로 운영 중이다.

[표 6] 다목적댐 물 공급 상황별 가뭄단계 설정

구 분	물공급 상황
1 단계	·생공용수 여유량 조정
2 단계	·생공용수 여유량 및 하천유지용수 조정
3 단계	·생공용수 여유량과 하천유지용수 및 농업용수 조정
4 단계	·하천유지용수·농업용수 및 생공용수 실사용량 조정

(2) 댐의 비상용량 활용

가뭄상황이 지속되고 매우 악화되어 댐 수위가 저수위(低水位)이하로 낮아지면 사실상 댐의 정상적인 운영범위를 넘어선 비상단계에 이르게 된다. 이런 상황에는 댐 저수위이하 비활용용량 중 별도의 시설 추가 없이 공급 가능한 방류설비까지의 비상용량을 활용하여 용수를 공급한다.

● 지하수 관측용 관정 활용

소규모 마을 상수도 급수 중단 시에는 인근에서 관리중인 지하수 관측망 320개소를 취수정점으로 변환 후 활용할 계획이다. 지하수 관측망의 관정은 토출관이 약 10cm이고, 1일 150~200m³이 취수 가능한 규모이다. 과거 2001년 가뭄 시에도 128천m³을 공급한 바 있다.

(3) 가뭄지역 지원

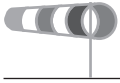
안정적인 물 공급을 위한 댐 운영과 함께 한국수자원공사에서는 가뭄지역 주민들을 위한 지원 대책으로 광역 및 지방 상수도간 연계운영, 지하수 관측 정 활용, 비상급수 및 병물 지원 등을 수행하고 있다.

● 비상급수 및 병물 지원

한국수자원공사에서는 현장 사업단에 비상시 운반 급수를 위해 급수차량(16대), 급수탱크 88개(225m³)를 보유 중에 있으며, 1일 45,000개(25m³) 생산규모의 병물 공장을 갖추고 있다. 이러한 다양한 방안을 토대로 가뭄지역 지원 대책을 강구함으로써 가뭄으로 인한 급수 중단이나 물이용에 어려움이 발생할 경우 물 공급 대국민 서비스를 신속하고 체계적으로 수행하여 국민들에게 보다 더 신뢰받는 공기업을 될 수 있도록 하는데 최선을 다할 것이다.

● 광역 및 지방 상수도간 연계운영

가뭄으로 인한 지방상수도 취수중단에 대비하여 광역상수도에 인접해 있는 지역을 대상으로 총 41개소의 비상 연결 관로를 설치하여 가뭄에 즉각 대응할 수 있는 체계를 구축하였다. 만일 가뭄 악화로 인한 지방상수도 취수가 어려울 경우는 비상 연결 관로를 이용하여 광역상수도의 물을 공급할 수 있다.



IV. 맺음말

현재까지 강수량 부족으로 인해 가뭄이 지속되고 있으나 다목적댐의 경우 지난 여름철부터 하천의 물 공급 상황을 고려하여 댐 공급량을 단계적으로 조정하여 운영함으로써 금년 여름철 전까지 다목적댐으로부터 물 공급을 받는 지역들은 심각한 물 부족은 겪지 않을 것으로 판단된다. 5월말 기준으로 다목적댐의 물 공급 전망을 분석한 결과, 현재 수준의 가뭄상황이 여름철 전까지 지속될 경우에도 물 공급에 사용가능한 수량이 23.2억 m^3 으로 용수 수요량인 7.8억 m^3 대비 15.4억 m^3 정도 여유가 있는 상황이다.

낙동강 수계의 용수공급상황은 타 수계와 비교하여 여유가 많지 않으나 하천유지용수를 일부 조정하고 댐 하류 지류하천의 유황을 고려한 댐 운영을 시행하면 우기 전까지 용수공급에 전혀 문제가 없다.

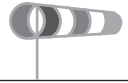
앞으로 봄철 가뭄상황이 지속될 경우, 하천수량 감소로 인한 수질저하는 물론 평상시 수준의 오염물질 유입에도 하천의 수질이 급격히 악화될 가능성이 매우 높아진다. 따라서 댐 방류량에 따른 하천수질을 예측할 수 있도록 함으로써 하천수질 저하에 사전 대응하는 방안도 강구하고 있다.

최근 기후변화에 따라 강수일수는 감소하는 반면에 강수강도와 연강수량은 증가하여 홍수와 가뭄이 빈번히 발생할 것으로 전망하고 있으며, 봄철 강수가 그리 많지 않은 우리나라의 강수특성으로 인해 앞으로 가뭄이 지속될 가능성이 높을 것으로 예상되

고 있다. 다목적댐 및 광역상수도로부터 물 공급을 받는 지역은 물 사용에 큰 어려움이 없겠지만 산간 지역이나 해안지역 등 다목적댐이나 광역상수도의 혜택을 받지 못하는 곳은 가뭄으로 인한 물 부족 현상이 심화될 것으로 예상된다. 현재 다목적댐 저수량은 낙동강을 제외하고는 여름철 우기 전까지 20년에 한 번 올 정도의 가뭄에는 용수공급에 큰 어려움이 없을 것으로 예상되나 가뭄이 예상외로 악화될 경우에는 이 또한 마음을 놓을 수 없는 상황이므로 더욱 많은 관심과 대비가 필요하다. 앞으로 가뭄은 최근의 지구온난화 등 기후변화로 더욱 빈번하게 발생할 수 있으므로 장래 주기적으로 반복되는 가뭄으로 인한 물 부족 위기를 다음 세대에 물려주지 않기 위해서는 미리 준비하고 대처하는 우리 모두의 지혜가 필요하다.

① 가뭄 때 물 공급에 어려움을 겪는 지방상수도 지역 및 해안 도서지역에 대한 안정적 용수공급을 위한 맞춤형 급수체계 구축이다. 광역상수도 연결 및 용수 전용 댐 개발 사업이 있을 수 있으며 해안 도서지방의 경우에는 적극적으로 해수담수화 설비를 설치하고 건물 옥상이나 지하층을 활용한 빗물이용시설의 설치도 좋은 방안이 될 수 있다.

② 1년 내릴 비의 2/3가 여름철에 집중되는 우리나라의 기상특성상 여름철에 집중되는 수량을 연중 골고루 사용하기 위해서는 물그릇의 지속적인 확보가 필요하다. 물론, 새로운 물그릇은 사회적 여건과 지역 여건에 맞고 환경 친화적이어야 할 것이다.



- ③ 무엇보다 물은 우리 모두의 공유물이며 무한정 쓸 수 없는 유한한 자원이라는 인식과 국민적 공감대가 필요하다. 우리나라의 국민 1인당 물 사용량은 아직도 일부 선진국에 비해서는 높은 편이므로 조금 더 많은 관심과 노력이 절실한 시점이다. 후손에게 보다 풍요롭게 깨끗한 물의 시대를 남겨주는 것은 우리 모두의 책임일 것이다.

참고문헌

한국수자원공사, 2001: 가뭄극복 비상대책 활동보고서

한국수자원공사, 2008: 다목적댐 운영 실무편람

한국수자원학회, 1996: 가뭄극복방안

한국수자원학회, 2006: 국내외의 가뭄관리 현황 및 개선 방향

기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안*

양 용 석

국회예산정책처 사업평가국 조사관
前 기상청 기후변화뉴스레터 집필위원

yongseok.yang@nabo.go.kr

I. 논의 배경

지난 2007년 10월 12일 노르웨이 노벨위원회는 앨 고어 전 미국 부통령과 유엔 정부간기후변화협의체 (IPCC)를 노벨평화상 수상자로 공동 선정한 바 있다. 이러한 배경의 주된 요인으로 “지구온난화 심각성의 경고”가 그만큼 설득력이 있고 지구온난화에 대처하기 위한 범국가적인 협력을 촉구하는 차원에서 그 함의(含意)는 매우 크다고 할 수 있다. 특히, 지구온난화로 인한 기후변화는 그 피해가 굉장히 광범위하고 에너지 문제와도 연관성이 크기 때문에 더욱 각별한 대책이 요구되는 실정이다. 이에 본고에서는 지구환경변화와 미래의 기후변화를 전망해보고 기후변화 진행시 예상되는 피해를 살펴보고 이를 통한 기후변화 대응전략을 모색해보고자 한다.

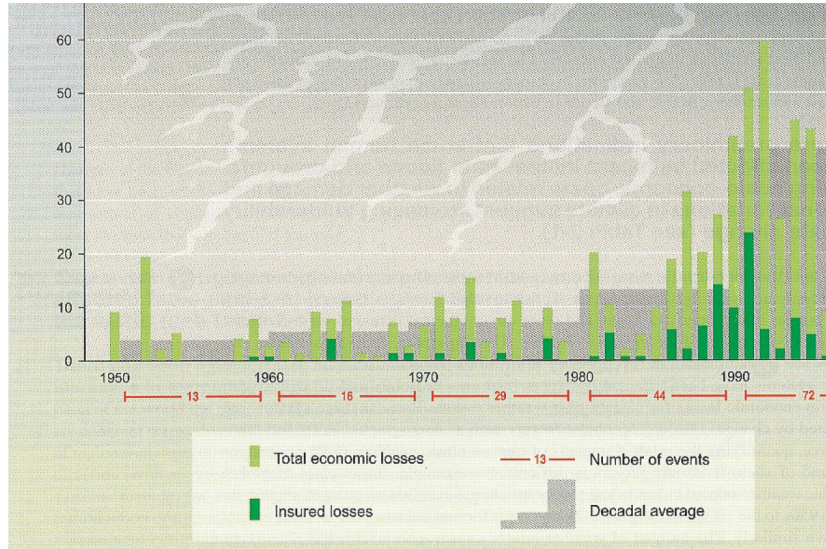
II. 21세기의 도전: 지구환경변화

우리의 경우 2002년 태풍 ‘루사’, 2003년 태풍 ‘매미’로 인해 약 10조원에 달하는 어마어마한 재산피해와 수백 명의 인명피해를 겪었으며, 이를 계기로 단일 기상현상으로 인한 피해 규모가 1조원 대를 넘어서게 되었다.

또한, 최근 3년간 피해액이 1990년대 10년간에 비해 2배에 달하고(약 10조원) 있으며, 이는 전 세계적으로도 비슷한 현상이 나타나는 가운데 2000년대 들어 유럽의 40℃에 달하는 폭염과 가뭄, 아프리카의 가뭄과 흉작, 미국의 기록적인 토네이도, 인도의 50℃에 이르는 폭염, 중국의 대홍수 등으로 지구촌 전체가 기상재해로 몸살을 앓고 있다.¹⁾

* 본 원고는 국회예산정책처의 공식입장이 아니며, 국회예산정책처의 입장과 배치될 수도 있는 순수한 사견임을 밝힘.

1) 1990년대는 기상변화로 인한 피해 규모가 1905년대에 비해 약 10배가량 증가하였다.



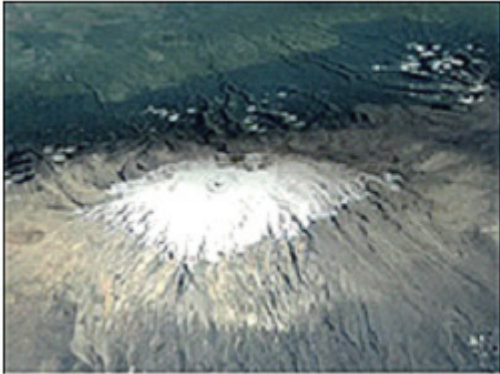
[그림 1] 기상변화로 인한 전 세계 재해 피해 규모

미국 항공우주국(NASA)은 지난 7년간 촬영한 인공 위성 사진을 비교한 결과 킬리만자로 산의 눈(雪)이 눈에 띄게 줄어들고 있다고 밝힌바 있다. 대륙과 극지방 빙하의 용해는 해수면 상승을 야기 시키고 섬 전체가 물에 잠겨 타국으로 망명을 떠난 남태평양의 투발루 공화국은 지구온난화가 가져온 비극의 상징으로 여겨지고 있다.

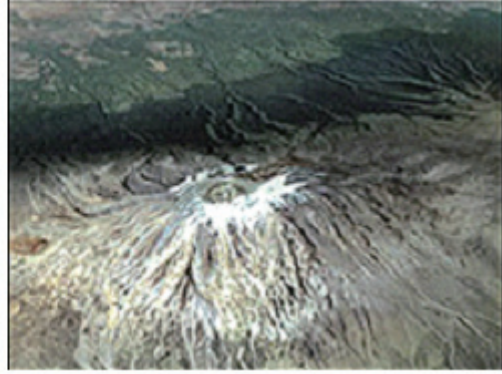
전문가들은 이런 현상이 '오존층 파괴'와 '온실가스 증가'로 인한 '지구온난화'와 관련이 있다고 분석하고 있다. 이러한 기상이변은 세계 각국의 무역, 금융, 산업, 식량생산 등 많은 부분에 악영향을 끼치고 세계경제에도 큰 타격을 입힐 가능성이 크다. 이처럼 기상은 기업의 산업 활동과 인간의 생존까지

좌우하는 요소로 작용하고 있는 실정인 것이다. 선진국들은 기후변화 문제를 교역과 금융 등 문제를 뛰어 넘는 심각한 과제로 이미 인식하고, 제반 정책 수립의 척도로 삼고 있다. 기상재해는 기업마케팅에도 큰 영향을 미쳐 기업들은 기상문제를 경영환경 변화의 주요 요인으로 보고 마케팅전략 수립에 크게 활용하고 있다. 다시 말해, 이제는 기후변화의 큰 흐름과 그 영향을 분석·활용하여, 글로벌 시대의 교역·통상 전략수립 등 국익 창출을 위한 새로운 활로와 기회를 찾는 데 지혜를 모을 때이다. 이러한 맥락에서 세계 각국은 심각성을 인지하고 기후변화에 관한 UN 기본협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)²⁾을 체결하고 있는데 그 의미는 매우 중요하다.

2) 지구의 온난화를 규제·방지하기 위한 국제협약이며 리우환경협약이라고도 한다.



1993년



2000년

[그림 2] 킬리만자로 산의 만년설 비교

※ 자료: NASA, Satellite Images, 2008.

지난 1992년 5월 9일 미국 뉴욕에서 채택되고 리우에서 열린 1992년 지구정상회담에서 150개국 이상과 유럽연합에 의해 서명된 협약이며, 궁극적인 목적은『기후시스템에 위협한 인위적 간섭을 방지하는 수준으로 대기 중의 온실가스 농도를 안정화시키자』는 것이다. 여기에는 모든 당사국을 위한 공약이 포함되어 있다. 협약 하에서 부속서 1³⁾에 포함된 국가들은 몬트리올 의정서의 규제를 받지 않는 온실가스의 배출량을 2000년까지 1990년 수준으로 동결하는 것을 목표로 삼고 있다. 동 협약은 1994년 3월에 발효되었다.

이렇듯 기후변화협약의 의미는 범지구적인 환경협약으로, 구체적으로 이행에 들어가면 화석연료의 사용제한으로 경제활동의 위축이 예견되는 경제협약이라 할 수 있기 때문에 결국, 온실가스 배출을 줄

이거나 처리하는 첨단기술을 많이 보유한 국가나 기업이 세계경제에서 우위를 차지(새로운 경제 질서 대두)할 수 있다는 것을 반증하고 있다. 또한, UNFCCC는 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택하여 2005년 2월 16일에 발효하였지만 아직까지 미국, 호주 등이 교토의정서에 참여하지 않고 있으며, 우리나라를 비롯한 중국, 인도 등에서 온실가스 배출량이 계속 증가함으로써 교토의정서에 의한 온실가스 감축의 실효성이 의문시되고 있는 실정이다. 그럼에도 불구하고 기후변화의 원인을 분석하고 대책을 마련하기 위한 세계 각국의 노력과 경쟁은 매우 치열하다.

지금까지 밝혀진 기후변화의 원인으로는 산업혁명 이후 급속도로 증가한 화석에너지, 각종 온실가스 배출, 인공 화학물질(냉매가스, 반도체세척용 가스

3) OECD 24개국 및 EU와 동구권 국가 등 40여 개국을 지칭한다.

등)의 무절제한 사용 및 산림 파괴 등에 기인하고 있으며 이는 지구온난화를 비롯한 지구환경문제로 귀결되어 지구 규모로 발생하지만 대응성격은 거주 지역을 포함한 국지적·민족적·국가적 규모 등 다양한 양태로 나타나고 있다. 그렇기 때문에 기후변화 문제를 해결하고 지구 환경을 보호할 목적으로 세계적 차원의 유엔기후변화협약, 사막화방지협약, 생물다양성협약, 오존층 보호를 위한 몬트리올 의정서 등이 체결되고 있다.

우리의 경우 아직까지 UNFCCC의 활동과는 크게 상관이 없으며, 2010년대이나 온실가스 감축이 의무화 되면, 경제에 막대한 영향을 미칠 것이라고 막연히 생각하는 경향이 많다. 그러나 우리나라는 OECD국가이며, 온실가스 배출량이 세계 9위로 향후 온실가스 감축이 불가피한 상황이다. 또한, 온실가스가 감축된다고 하더라도 이미 배출된 온실가스가 장기간 대기 중에 남아있어 이로 인하여 기후변화는 지속적으로 일어날 것이며(기후변화의 관성), 기온 상승, 홍수, 가뭄 등의 재해 발생빈도도 증가하고 해수면이 상승하는 등의 문제점이 예상된다.

따라서 전 세계 국가가 기후변화협약(UNFCCC)을 체결하고, 온실가스의 의무감축에 대하여 논의하고 있는 작금의 시점에서 우리도 적극적으로 동참하고 기후변화의 심각성을 대변해야 한다고 사료된다.

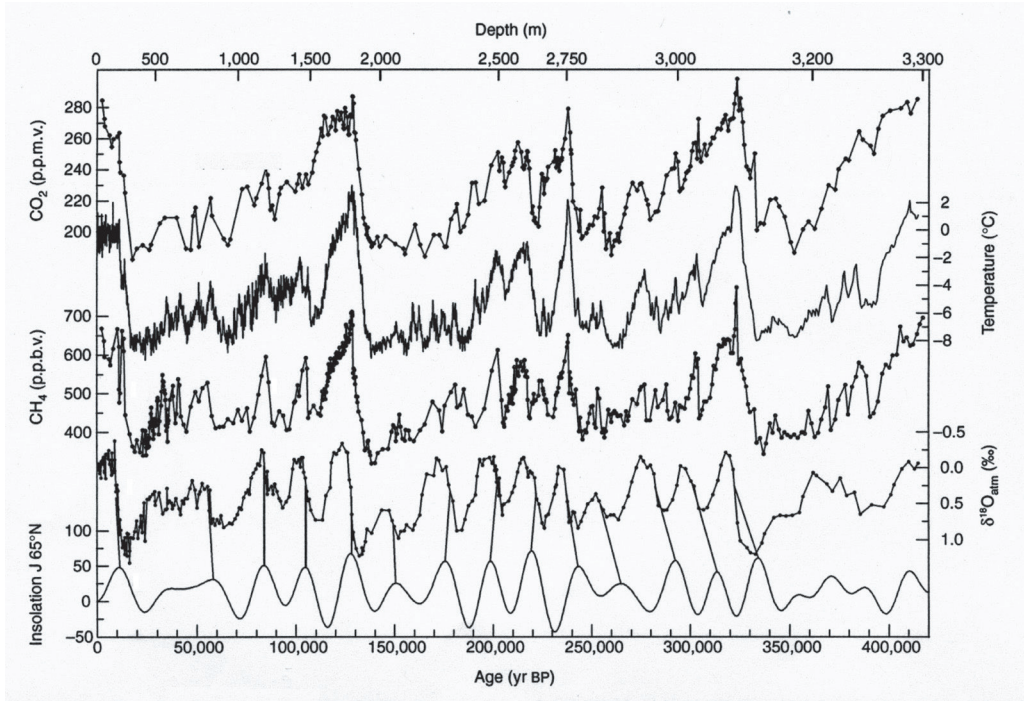
III. 지구의 역사와 기후변화

과거 지구환경에 대한 자료를 보면 지구 평균기온과 이산화탄소 농도의 변화는 매우 밀접한 관계였음을 알 수 있다. 예를 들면, 빙하기에는 이산화탄소의 농도가 190ppm, 간빙기에는 280ppm이었으며, 이때 지구의 기온이 크게(5℃ 이상) 변화했다는 증거가 단적으로 이를 뒷받침해 주고 있다.

이러한 맥락에서 현재까지의 기후변화 추이⁴⁾를 살펴보면, 온실효과를 유발하는 온실기체의 하나인 이산화탄소의 대기 중 농도는 산업혁명 전의 280ppm(1ppm은 백만분의 1 농도)과 비교하여 2005년에는 379ppm으로 증가하였고 최근 6년간 CO₂ 평균 배출량은 '90년대에 비해 약 20% 증가하는 등 1850년 관측 이래 가장 따뜻했던 12년 중 11년이 최근 12년 동안에 발생하는 등 전 지구적으로 온난화가 가속화되고 있다. 기온은 해양보다 육지에서, 특히 북반구 고위도 육지에서 상승추세가 컸으며, 전 지구 평균 해수면 상승률은 연 평균 1.8(1.3~2.3)mm 증가하였고 온난화에 의해 지역에 따라 서리일은 감소, 식물의 성장기간은 증가하였다. 또한, 북반구의 중고위도 지역 등에서 강수량의 증가로 더 극심한 강수현상을 초래하였고 고산지역의 빙하가 감소하였으며, 기온의 상승에 따라 적설면적이 줄어들고 호수와 강의 결빙 기간이 짧아졌다. 엘니뇨 현상⁵⁾의 경우도 이전 100년과 비교해 지난 20~30년 동안 그 빈도가 더 자주, 지속적으로 높아졌다.

4) IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) 제1실무그룹(WGI) 제4차 평가보고서, 2007.

5) 남미의 페루연안에서 적도에 이르는 태평양의 수온이 3~5년을 주기로 상승하여 세계각지에 홍수·가뭄·폭설 등을 몰고 오는 기상 이변 현상이다.



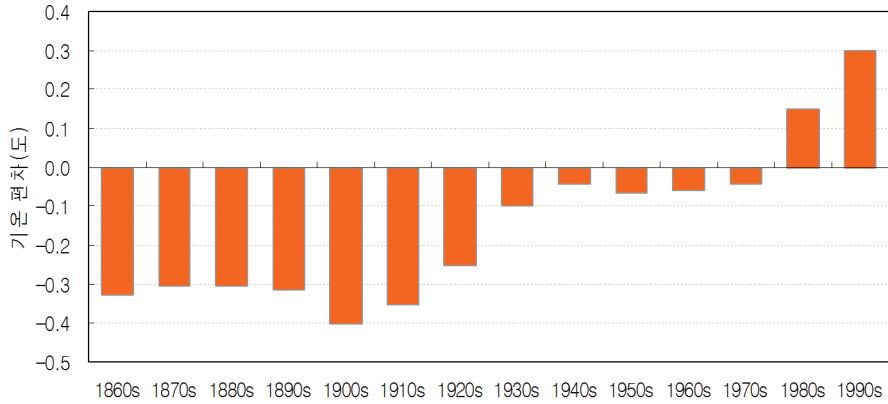
[그림 3] 남극대륙의 보스톡(Vostok)에서 시추한 과거 42만 년의 빙하코어로부터 얻은 분석자료(UNEP) 결과

- ※ 주 : 위에서부터 이산화탄소 농도, 기온, 메탄 농도이며, 산소동위원소 농도와 태양 에너지의 변화. 왼쪽이 현재를 나타내며, 오른쪽은 42만 년 전임. 시간에 따라 일정한 변화 경향을 보이다가 현대에 들어와 비정상적으로 급격하게 이산화탄소 농도가 증가한 것을 알 수 있음.
- ※ 자료 : 기상연구소, 정기국회 업무보고 자료, 2008.

특히 이산화탄소 등 온실가스 농도 변화를 여러 가지 상황에 맞추어 가정한 시나리오별 예측 결과⁶⁾를 살펴보면 상황은 더욱 심각하다. 기온의 경우 2100년 지구 평균기온이 1.1~6.4°C 상승할 것으로 예측되었고, 극한기후 증가, 해수면은 최대 59cm 정도 상승할 전망(이산화탄소 농도는 550~970ppm)이다. 지역별로 동아시아지역은 여름과 겨울에 평균

이상의 온난화가 예상되는 가운데 겨울에 온난화가 더 클 것이며 여름철 강수량이 조금 증가하는 반면 겨울철 강수량 증가는 불명확한 것으로 예측하고 있다. 지역적 규모에서는 일반적으로 5~20% 증가 또는 감소, 전지구의 연평균 강수량은 증가할 것으로 예상된다. 이러한 기후변화의 결정적인 원인은 인간의 활동으로 인한 온실가스와 에어러솔(aerosols, 대기

6) IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) 제1실무그룹(WGI) 제4차 평가보고서, 2007.



[그림 4] 1860년대-1990년대 지구 평균기온의 변화(1961~1990년 평균과의 차이)

※ 자료 : 영국 기후연구단(CRU), 기후변화 보고서, 2008.

오염물질)의 배출이다. 이는 기후에 직접적인 영향을 줌으로써 대기를 지속적으로 변화시킬 것이다. 무엇보다 지난 50년 동안 관측된 대부분의 온난화는 인간의 활동에 기인한 것이라는 새롭고 유력한 증거가 있는 상황에서 앞으로의 미래 환경변화는 더욱 악화될 가능성이 크다. 또한, 전 지구 평균온도와 해수면도 모든 온실가스 배출 시나리오에서 상승되는 것으로 예측되면서 인위적인 기후변화는 여러 세기 동안 지속될 것이다.

우리나라의 경우도 기후변화에서 자유롭지는 못하다. 최근 개최된 제13차 유엔기후변화회의에서는 이른바 ‘발리 로드맵(Bali Roadmap)’⁷⁾을 채택함으로써 개발도상국으로 분류되어 빠져 있던 우리나라도 온실가스 배출에 대한 감축 의무를 저야 하며, 세

계 10위권의 경제 대국이면서 온실가스 배출량이 세계에서 9번째로 많은 나라임을 감안하면 국제사회에서 지구온난화를 막는데 적극적인 역할을 해야 한다는 주장도 설득력을 얻고 있다. 또한, 우리나라에서도 식생, 해양, 곤충, 동물 등에 기후변화로 인한 피해가 확산되면서 종합적인 대책이 요구되는 상황이다.

이러한 요구에 대해 정부는 ‘기후변화 제4차 종합대책’을 통해 기후변화와 관련된 국제 동향, OECD 가입국으로서의 지위 등 우리나라의 위상을 고려하여, 대외적으로는 국제사회의 온실가스 저감노력에 적극적으로 동참하겠다는 대응의지를 표명하였다. 또한, 국내적으로도 기후변화에 대한 조기 대응방안을 통해 향후 기후변화 대책을 국가 경제·사회

7) 2013년 이후에는 교토의정서에서 정한 38개 선진국뿐만 아니라, 여기서 제외된 미국과 개발도상국들도 국가별 온실가스 감축 계획을 마련해 제시토록 하였으며 구체적 협상을 2009년까지 완료한다는데 합의한 바 있다.

[표 1] 21세기 기후변동성과 극단적 기후 현상 및 그 영향의 예

극단적 기후현상	예상되는 영향의 예
육지에서 최고기온 상승 및 더운 날 증가	<ul style="list-style-type: none"> · 노인층과 도시 빈민의 사망과 질병 발생률 증가 · 가축과 야생동물에 대한 열 스트레스 증가 · 관광 여행 목적지 변화 · 많은 곡물에 대한 손실 위험 증가 · 전기 냉각 수요 증가, 에너지 공급 신뢰도 감소
육지에서 최저기온 상승, 추운 날과 서리일 발생 감소	<ul style="list-style-type: none"> · 추위와 관련된 인간의 질병 발생률과 사망률 감소 · 약간의 곡물에 대해서 손상 위험 감소, 나머지에 대한 위험 증가 · 일부 해충과 전염 곤충의 범위 및 활동성 증가 · 난방 에너지 수요 감소
강수 강도 증가	<ul style="list-style-type: none"> · 홍수, 산사태, 진흙사태 위험 증가 · 토양 침식 증가 · 홍수 유수 증가로 일부 홍수 투수층의 재침수 증가 · 정부 및 개인 홍수 보험시스템과 재난 구조의 압력 증가
여름 건조 증가와 관련된 가뭄 위험 증가	<ul style="list-style-type: none"> · 곡물 생산 감소 · 지반 침하로 인한 건물 기반의 위험 증가 · 수자원의 양과 질 저하 · 산불 위험 증가
열대 저기압의 최고 바람강도, 평균 강수, 최고 강수 강도 증가	<ul style="list-style-type: none"> · 인간 생활에 대한 위험과 전염병, 그 밖의 위험 증가 · 해안 건물과 기반 시설물에 대한 해안 침식 위험 증가 · 산호초와 망그로브 같은 해안 생태계에 대한 손상 증가
많은 다른 지역에서 엘니뇨와 관련된 가뭄과 홍수 강화	<ul style="list-style-type: none"> · 가뭄이나 홍수가 우세한 지역에서 농업 생산성 하락 · 가뭄 지역에서 수력발전 가능성 감소
아시아 여름 몬순 강수변동성 증가	<ul style="list-style-type: none"> · 온대 및 열대 아시아에서 홍수와 가뭄의 정도 및 위험증가
중위도 폭풍의 강도 증대	<ul style="list-style-type: none"> · 인간 생명과 건강에 대한 위험 증가 · 재산 및 기반 시설물 손실증대 · 해안 생태계에 대한 위험 증가

※ 자료: IPCC, 제3차 평가보고서, 2001.



[그림 5] 논문 및 매스컴 보도에 나타난 우리나라 기후변화 영향의 종류

※ 자료: 기상연구소, 정기국회 업무보고 자료, 2008.

전반을 포괄하는 최우선 의제로 설정하여 추진함과 동시에 국제협상 과정에서도 우리나라의 부담이 최소화될 수 있도록 창의적이고 유연하게 대응할 방침이다. 하지만 대책의 성공적인 추진을 위해서는 국민들의 관심과 자발적 참여가 필수적인 만큼, 대책 추진과정에서 사회적 공감대 마련에 최선을 다해야 한다.

IV. 미래의 기후변화 전망

어떻게 미래의 기후를 전망할 수 있을까? 이를 위해 먼저 현재의 기후를 시뮬레이션 할 수 있는 기후모델을 선정한다. 특히 기후변화에 영향을 미치는 온실가스 및 에어러솔의 대기농도 변화의 관측(과거)과 전망(미래) 시나리오를 IPCC의 권고하에 작성한다. 기후모델에 온실가스 및 에어러솔⁸⁾ 시나리오를 적용하여 1860~2100년 기간에 대한 기후변화 시나리오를 생산하고, 기후모델에서 생산된 시나리오를

8) 에어러솔(Aerosols) : 전형적인 크기가 0.01~10 μ m 사이이고 고체 또는 액체 상태로 대기 중에 적어도 수 시간 동안 머물면서 떠 있는 입자의 집합이다. 에어러솔은 자연적으로도 생성되고 인위적으로도 생성되며 두 가지 방법으로 기후에 영향을 미치는데, 직접적으로는 복사를 산란시키거나 흡수하고 간접적으로는 구름 형성에 필요한 응결핵으로서 작용하는 경우이다.

지역별, 분야별 영향평가에 적합하도록 상세화 한다. 이러한 과정을 통해 상세 기후변화 시나리오에 나타난 평균, 변동폭, 극한기후 등을 분석함으로써 미래 기후를 전망할 수 있다.⁹⁾ 온실가스 배출 시나리오에 관한 특별 보고서¹⁰⁾(IPCC, 2008)에서 제시된 시나리오 중 대표적인 A1B, A2, B1 시나리오를 채택한다. 각 시나리오의 내용은 다음과 같다.¹¹⁾

1. A1B 시나리오

- 경제 발전이 아주 급속히 이루어지는 미래 세계를 그리는 시나리오.
- 전 지구 인구는 세기의 중간쯤 절정에 올랐다가 그 뒤로 감소, 효율적인 신기술들 계속적으로 등장.
- 기본 주제는 지역과 능력 구축, 문화 및 사회적 통합 가속화, 지역에 따른 일인당 소득 격차의 상당한 해소.
- 에너지 시스템에서 기술적 변화의 대체 방향으로 모든 에너지원간의 균형 추구(여기서 균형은 비슷한 개선 비율을 모든 에너지 공급 및 최종 사용 기술에 적용한다는 가정에서 한 가지 특정 에너지원에 지나치게 기대지 않는 상황을 의미).

2. A2 시나리오

- 복잡하고 다양한 세계를 그리는 시나리오.

- 기본 주제는 자급자족과 지역 공동체의 자기 주체성 유지.
- 비옥도 패턴(Fertility Pattern)은 모든 지역을 통틀어 아주 서서히 집중, 이로 인해 인구는 지속적으로 증가.
- 경제 발전은 주로 지역 지향적으로 이뤄지고 일인당 경제적 성장과 기술적 변화는 다른 시나리오보다 더 분열된 상태이고 더 느리게 진행됨.

3. B1 시나리오

- 집중적인 세계를 그리는 시나리오.
- 전 지구 인구는 세기 중간쯤 절정에 올랐다가 그 뒤로 감소.
- 경제구조는 서비스 부문과 정보 쪽으로 급속하게 바뀌는 구조, 원료 집중성이 감소하는 한편 자원 효율성이 높은 청정 기술이 도입됨.
- 경제·사회·환경의 지속 가능성에 대한 전 지구 해결책을 강조, 형평성은 개선되지만 추가적인 기후 관련 주 정책은 없음.

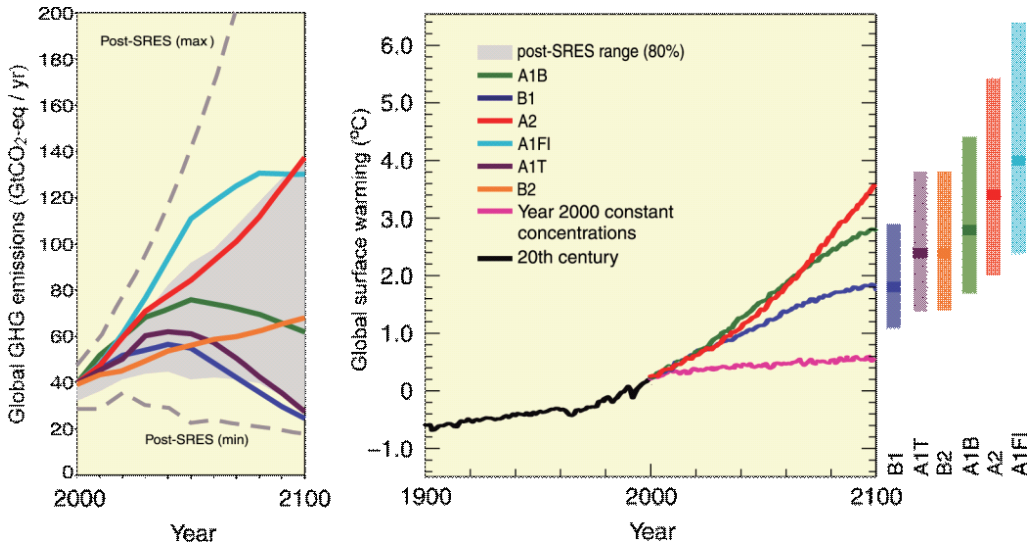
무엇보다 독일 막스플랑크기상연구소(MPI-M)에서 개발한 온실가스 및 에어러솔 효과를 포함할 수 있는 대기-해양 결합 기후모델(AOGCM, 모델명: ECHO-G 모델)¹²⁾을 도입하여 슈퍼컴퓨터에서 장기간

9) IPCC 분석보고서를 인용하였다.

10) IPCC 배출 시나리오에 관한 특별보고서(IPCC Special Report on Emission Scenarios, 2000)에 따르면 2000년에서 2030년까지 전 세계 온실가스는 25~90%(CO₂-상당) 증가할 것이며, 화석연료는 2030년 이후에도 전 세계 에너지원에서 주도적 위치를 고수할 것이라고 전망한 바 있다. 추가 배출량 완화를 고려하지 않은 최근의 시나리오에서도 그 범위는 비슷하다

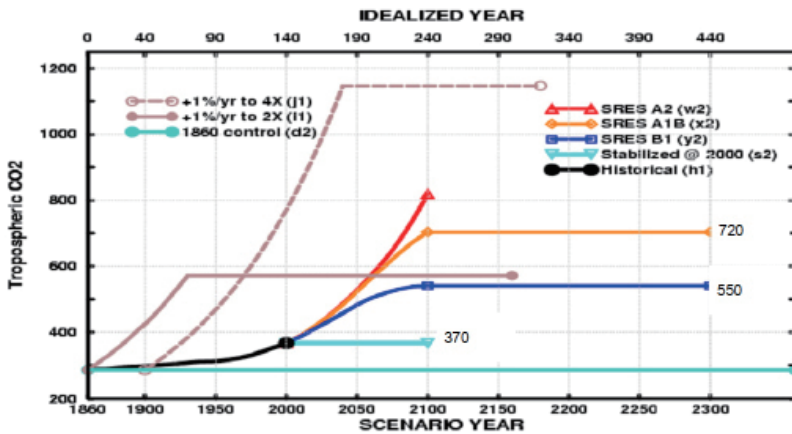
11) 논자가 'IPCC 배출 시나리오에 관한 특별보고서'를 간략히 해석하여 재구성함을 밝힌다.

12) 대기-해양 결합 기후모델(AOGCM): 대기만을 고려해 기후변화를 예측했던 기존의 방식과 달리, 대기에 영향을 주는 해양을 같이 고려해서 기후변화를 예측하는 기후모델이다.



[그림 6] 2000~2100년의 온실가스 배출량 시나리오(추가 기후정책 부재 시) 및 추정 지표온도

- ※ 주: <왼쪽 그래프> 기후정책 부재 시 전 세계 온실가스 배출량(CO₂-상당): 6가지 도식적 SRES의 시나리오 (유색 실선)와 SRES 이후에 발표된 최근 시나리오(SRES 이후 시나리오)의 80 백분위수 범위(회색 음영 부분). 파선은 SRES 이후 시나리오의 전체 범위를 나타낸다. 배출량은 CO₂, CH₄, N₂O, F 가스의 배출량이다. <오른쪽 그래프> 실선은 A2, A1B, B1 시나리오에 따른 전 세계 평균 지표 온난화의 다중모델로 20세기 시뮬레이션의 연장이다. 이러한 예측 역시 단기적 온실가스와 에어러솔의 배출량을 고려한 것이다. 분홍색 실선은 시나리오가 아니라 대기 농도를 2000년 수준으로 고정하고서 AOGCM 시뮬레이션을 한 결과를 나타낸다. 그래프의 오른쪽에 있는 막대는 SRES 6가지 시나리오에서 2090~2099년에 대해 평가한 최적의 추정치(각 막대안의 실선)와 예상 범위를 보여준다. 모든 온도는 1980~1999년 기간의 온도를 기준하였다.
- ※ 자료: IPCC 제4차 평가보고서, 2008.



[그림 7] 기후변화 전망에 사용된 이산화탄소 시나리오 및 시뮬레이션 기간

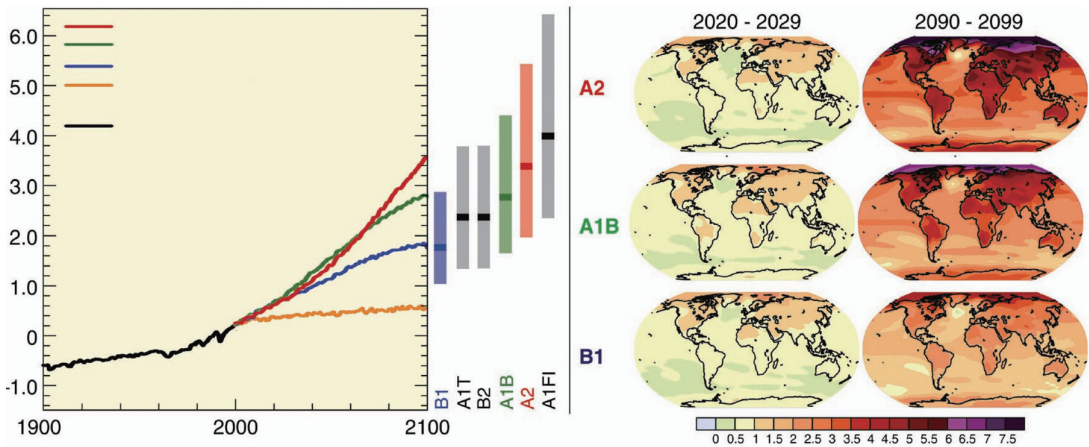
- ※ 자료: IPCC 제3차 평가보고서, 2001.

시나리오 실험 및 자료생산을 통해 상세화 기법을 이용하여 기후변화 시나리오를 생산 및 분석하면 더욱 정교한 결과를 도출할 수 있다.

기 A1B시나리오 실험에서는 2.7℃, 3.8℃, B1시나리오 실험에서는 2.0℃, 3.2℃ 상승하여 동아시아지역의 기온상승이 클 것으로 전망되었다.¹³⁾

시나리오 전망 결과를 살펴보면, 전 지구 및 동아시아 지역 기온이 21세기 후반 30년 평균으로 21세기 안정화 실험에서는 각각 0.6℃, 0.9℃ 상승하고 21세

강수의 경우 전 지구 및 동아시아지역에서 모두 증가할 것으로 전망되나 지역적인 차이가 매우 크며, 동아시아는 특히 여름철 강수가 증가할 것으로 예측

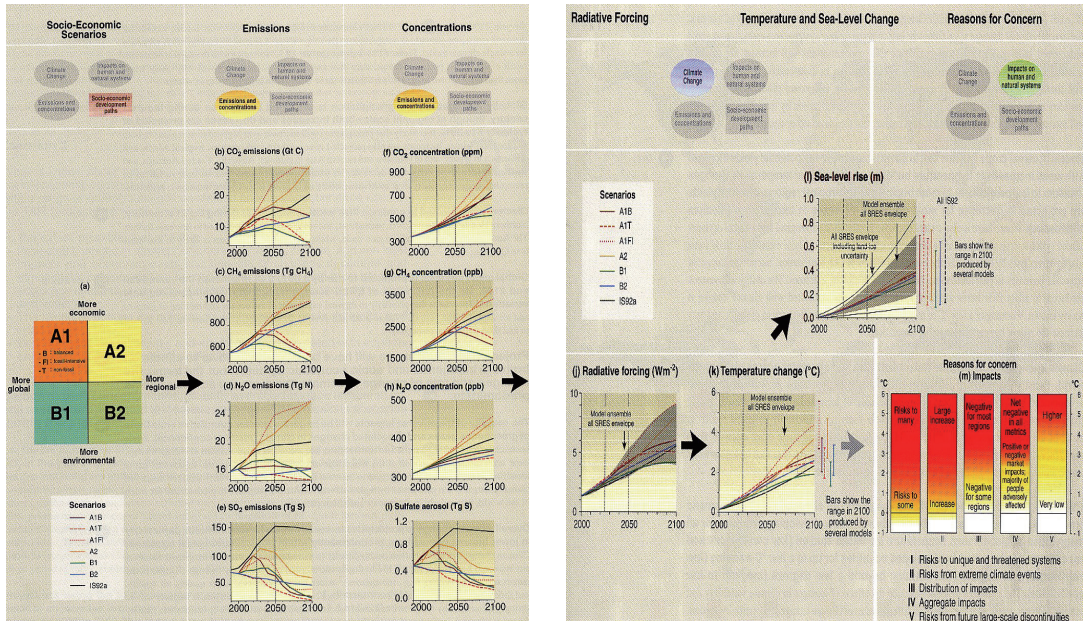


[그림 8] 대기-해양 대 순환 모델(AOGCM)을 통한 지표 온난화 전망

※ 주: (좌) 실선은 SRES 시나리오 A2, A1B, B1에 따른 지표 온난화(1980~1999년 대비)의 다중 모델 지구 평균을 20세기 시뮬레이션에 연장시켜 나타낸 것이다. 오렌지색 실선은 농도를 2000년 수준으로 일정하게 유지한 실험의 결과이다. 그림의 중앙에 있는 막대는 6가지 SRES 마커 시나리오에 대해 평가된 1980~1999년 대비 2090~2099년의 최적 추정치(각 막대의 실선)와 가능한 범위를 나타낸다. 막대의 최적 추정치와 가능한 범위는 그림의 왼쪽에 있는 AOGCM 뿐 아니라 독립된 모델 및 관측치 제약의 결과를 포함시켜 평가되었다. (우) 1980~1999년 대비 21세기 초기와 말기의 지표 기온 변화 전망. SRES 시나리오 A2(위), A1B(가운데), B1(아래)에 대하여 2020~2029(좌측) 10년과 2090~2099년(우측)10년을 평균한 다중 AOGCM의 평균 전망이다.

※ 출처: IPCC 제4차 평가보고서, 2008.

13) IPCC 제4차 평가보고서(2008)에 따르면 SRES 시나리오는 2000년부터 2030년 사이에 지구의 베이스라인 온실가스 배출량이 9.7~36.7 GtCO₂-상당(25~90%) 증가할 것이라고 전망하였으며 이들 시나리오에서 화석연료는 2030년 이후에도 전 지구 에너지원에서 지배적 위치를 유지할 것이라고 전망하였다. 그래서 2000년부터 2030년 사이에 에너지 사용으로 인한 CO₂ 배출량은 40~110% 증가할 것으로 예측하였으며 기온변화의 경우 A1B(2.7℃), A2(3.4℃), B1(1.8℃)의 최적 추정치를 나타내었다.



[그림 9] 시나리오별 주요 기후변화에 대한 통합평가 구조와 관련된 관점 I & II

※ 주: I, II는 하나의 그림.

※ 출처: IPCC 제3차 평가보고서, 2001.

되었고, 대류성 강수가 증가할 것으로 전망되었다. 기온과 강수는 온실가스 농도가 빠르게 증가하는 시나리오에서 가장 변화가 크게 나타났다.

지금까지 간략하게 온실가스 증가로 인한 기후변화를 이해하고 전망함과 동시에, 온실가스 증가 시나리오에 근거한 결과를 살펴보았다. 특히 IPCC 제4차 평가보고서에서는 기후변화가 자연적인 요인에 의해서가 아니라 인간이 만든 공해물질 때문에 일어난다고 있다며 오염물질이 현재 추세로 배출되면 금세기에는 지난 1만년 동안 겪었던 것보다 심각한 기후변화를 겪게 될 것이라는 것이 최종적인 결론이었다.

V. 기후변화 진행시 예상되는 피해

1. 우리나라 기상재해의 일반적인 특성

우리나라에서 가장 많이 발생하고 있는 기상재해는 전체의 95% 이상을 차지하고 있는 수해이다. 이는 우리나라가 3면이 바다로 둘러싸여 있고 대륙과 해양성 기후의 교차점에 위치해 강우량이 세계 평균인 970mm보다 많은 1,316mm로서 다우지대에 속해 있기 때문이다. 특히 국지적 집중호우가 빈발하고 북태평양에서 발생하는 태풍의 진로 상에 위치하여 매년 2~3회에 걸쳐 태풍의 영향을 받고 있으며 국토의 2/3가 산지인데다가 유로도 짧고 급한

산악으로 형성되어 수원함량 기능과 토양보전 기능이 약해 일시에 강우가 하천으로 유출되면서 큰 홍수가 발생하는 등 상대적으로 재해에 취약한 자연 구조를 지니고 있다.

또한, 농작물의 개화 결실기인 6월 중순부터 9월 중순 사이에 지속적인 저기압의 통과와 태풍의 영향으로 연평균 강우량의 2/3 정도가 이 기간 중에 집중되어 피해가 더욱 심각하다. 이는 산지 및 산림지대의 지질상태가 대부분 화강암과 편마암으로 구성되어 피복도가 낮고 보수기능이 약하여 수목생장에 부적당해 풍화, 침식 등으로 산사태를 유발하거나 하천 유사량을 증가시켜 하상의 상승원인이 되어 홍수피해를 가중시키기 때문이다.

무엇보다 인구의 도시집중과 이로 인한 토지수요의 급증으로 재해에 취약한 도시하천 주변·저지대 및 급경사지 등이 개발되고 방재개념을 고려하지 않고 수립한 도시계획 및 토지 이용계획 등이 재해의 확대요인이 되고 있으며, 방재기술 및 행정의 연구가 소홀히 취급되거나 부족한 실정이다. 특히 과도한 개발과 도시화로 유출이 증가되고 침투홍수량(Flood Peak)¹⁴⁾이 크게 늘어나고 있으며 유출이 짧은 시간에 이루어지는 등 급속한 개발로 인한 재해발생 잠재력이 크게 늘어나고 있다.

이러한 요인으로 인해 우리가 겪고 있는 재해는 홍수와 가뭄으로 크게 대별할 수 있는데 홍수재해는 매년 여름철이면 겪게 되는 재해로 주택·농경지는

물론 도시 전체의 기능을 마비시키는 등 그 피해 규모와 사회전반에 미치는 영향은 실로 막대하다. 또한, 홍수재해 못지않게 생활수준 향상과 산업발달에 따른 생활·농업·공업용수 수요가 증가하고 있는 상황에서 심각한 용수부족 문제를 야기시키는 가뭄 재해는 그 피해액을 계량화할 수는 없지만 용수 부족현상을 동반하고 있어 우리 삶을 위협하는 재해로 그 피해 또한 무시할 수 없다.

2. 기후변화 시 예상되는 피해

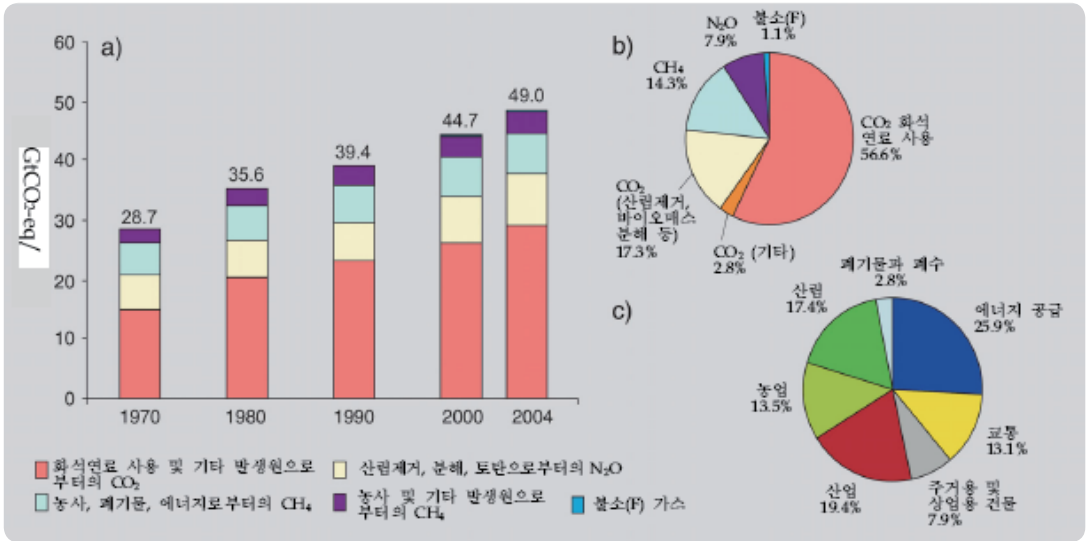
1) 일반적인 양상

예상되는 기후변화가 환경 및 사회경제 시스템에 미치는 영향은 이로울 수도 있고 해로울 수도 있다. 다만, 기후의 변화와 그 변화율이 클수록 해로운 영향이 우세할 것이다.

기후변화는 국지적·지역적 대기오염을 심화시키고 성층권 오존층의 회복을 지연시키며 토지 붕괴 및 담수의 양과 질에 관련된 문제를 심화시킨다. 또한, 생산성을 변화시키고 유전자와 종의 다양성 감소 유발, 육지와 해양 생태계 구성을 변화시킬 것으로 예상된다. 특히 온실가스 배출이 누적될수록, 이와 연관된 기후 변화가 클수록 해로운 영향이 더 클 것이다. 물론 긍정적 영향도 일부 지역과 분야에서 나타날 수 있지만, 이는 기후의 변화가 커짐에 따라 감소할 것으로 예상된다.

반면 그동안 확인된 해로운 영향은 기후변화의 정도에

14) 수공 구조물의 설계에서 그 구조물이 소통해야 할 최대 홍수량. 대부분의 경우 구조물의 설계 홍수량과 동일한 뜻으로 사용된다.



[그림 10] 지구 전체 인위적 온실가스 배출량

- ※ 주: (a) 1970~2004년 지구 전체 인위적 온실가스 연간 배출량.
- (b) 2004년 인위적 온실가스 총 배출량 중 가스별 배출량(CO₂-상당).
- (c) 2004년 인위적 온실가스 총 배출량 중 부문별 배출량(CO₂-상당). (산림에는 산림제거 포함).
- ※ 출처: IPCC 제4차 평가보고서, 2008.

따라 그 범위와 심각성 면에서 모두 증가할 것이다. 지역적인 면을 고려할 때, 해로운 영향은 세계의 여러 지역, 특히 열대·아열대 지역에서 클 것으로 예상되며 전체적으로 보아 기후의 변화는 인간 건강에 대한 위협을 증가시킬 것으로 예측된다.

전염병을 일으키는 곤충(모기 등)의 범위 변화, 수인성병원체, 수질, 대기질, 식량 이용 등에도 간접적으로 영향을 미친다. 실제적으로 건강에 미치는 영향은 해당 지역의 환경 조건과 사회경제적 상황은 물론 사회와 제도, 기술, 대처 적응력 등에 크게 좌우될 것이다.

2) 분야별 양상

(1) 건강에 미치는 영향

기후변화는 인간의 건강에 직접적으로 영향을 미친다(예를 들어, 온난한 국가에서 추위에 대한 스트레스는 줄어드는 반면 더위에 대한 스트레스는 증가할 것이고, 홍수와 폭풍으로 인한 인명 손실이 커질

(2) 생태계의 생산성과 생물의 다양성

기후의 변화와 해수면 상승에 의해 생태계는 많은 영향을 받을 것이다. 이에 따라 일부 취약한 생물종의 멸종 위험이 증가하고 화재와 가뭄, 해충의 만연, 새로운 생물종의 침입, 폭풍, 산호 백화 등과 같은 교란으로 인한 생태계의 붕괴가 가속화할 것으로

예상된다. CO₂농도 증가의 영향은 실제로 1차적으로는 식물 생산을 증가시키지만, 기후변화 및 이와 관련된 교란은 생태계의 순 생산량을 증가시키거나 감소시킬 수도 있기 때문이다. 특히 몇몇 전지구 기후모델에 의하면 육상 생태계에 의한 탄소 흡수가 21세기의 처음 50년 동안은 증가하지만 그 다음에는 수준이 낮아지거나 감소할 것이라는 예측도 이를 뒷받침한다. 이는 기온이 수 °C 이상 오르는 온난화로 인해 전지구적으로 음식의 가격을 올리고, 취약 인구에 대한 기아의 위험을 증가시키는 것으로 분석하고 있다.

(3) 수질 및 수자원 관리에 미치는 영향

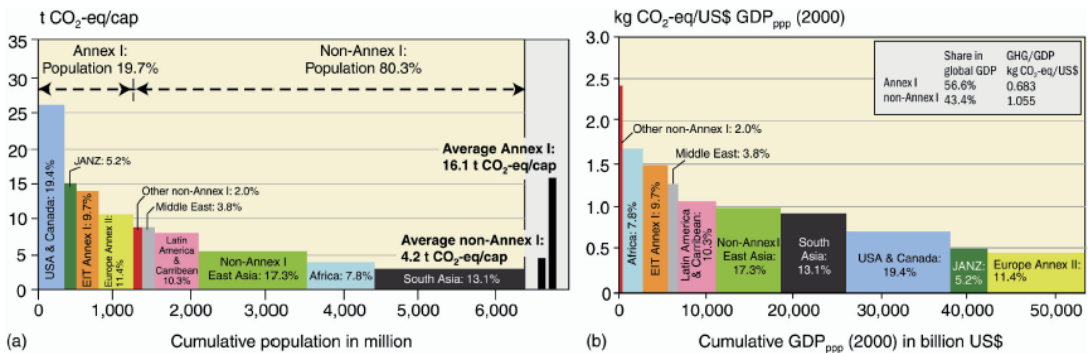
기후변화는 세계의 여러 물 부족 지역의 이용가능한 물의 양을 감소시켜, 물 부족 현상을 심화시킬 것으로 예측된다.

(4) 개발도상국과 빈민층에 미치는 영향

기후변화로 인한 악영향은 개발도상국과 전세계의 빈민층에게 심각하게 작용할 것이며, 이들은 기후변화의 불리한 영향에 상대적으로 더 많이 노출되고 이로 인해 대처·적응능력이 낮은 상황에 놓이게 될 것이다. 따라서 건강한 상태, 절적인 음식, 깨끗한 물, 그 밖의 자원에 대한 접근의 불평등이 더 심화될 것으로 예상된다.

(5) GDP

국내 총생산(GDP)에 생긴 변화로 측정된 전체 시장 부문에서 보면, 모든 전지구 평균 온도의 증가 정도에 대해 많은 개발도상국들이 부정적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 선진국들이 받는 영향은 긍정과 부정이 혼재하지만, 그 수 °C의 범위를 넘어서면 부정적인 영향을 받는다는 것이 일반적 견해이다.



[그림 11] 인구와 GDP_{PPP}에 따른 온실가스 배출량의 지역적 분포

※ 주: (a) 2004년에 국가 그룹의 인구에 따른 1인당 온실가스 배출량의 지역적 분포(국가그룹에 대한 정의는 부록 참고). (b) 2004년에 국가 그룹의 GDP에 따른 GDP_{PPP} 1달러(US\$) 당 온실가스 배출량의 지역적 분포. 막대 안의 %는 전지구 온실가스 배출량에서 그 지역이 차지하는 비율을 뜻한다. 여기서 GDP_{PPP}란 구매력 평가(Purchasing Power Parity: PPP)에 기초한 전세계 국내총생산(GDP_{PPP})을 의미한다.

※ 출처: IPCC 제4차 평가보고서, 2008.

(6) 인간 거주 환경

작은 섬이나 해안 저지대에 살고 있는 인구는 해수면 상승과 폭풍 및 해일에 의한 심각한 사회경제적 위협에 처할 가능성이 크다. 특히 인간 거주지역의 상당 부분이 증가하는 해안 홍수와 침식 위협에 직면할 가능성이 있으며 델타 지대와 해안 저지대, 작은 섬에 거주하는 수천만 인구가 거주지를 떠나야 하는 위험에 노출될 수도 있다. 해수욕장, 담수, 어업, 산호초, 환초 등 도시민과 해안 지대 거주민들의 생활에 필수적인 자원이 위협받고, 야생동식물의 서식지도 위협에 처해질 수 있다. 자연계 또는 인간계(Human Systems) 내에서 새로운 환경이나 변화하는 환경에 맞게 순응하는 개념인 적응(adaptation)을 기후변화에 대해 고려해보면 적응이 기후변화의 부정적 영향을 감소시킬 잠재력이 있으며, 즉각적인 부수 이익을 창출하기도 하지만, 결과적으로 모든 위험을 막을 수는 없다는 것이 핵심이다. 그동안 자연 및 인간계는 손실의 위험은 낮고 복원력은 높은 상황에서 기후 변동 범위에 대처하는 능력을 발달시켰지만, 기후 변화로 각 시스템이 대처할 수 있는 역사적 범위를 벗어난 사건들의 빈도가 증가하면서 심각한 손실과 불완전한 복원 또는 시스템의 완전한 파멸을 가져올 위험을 증가시켜 왔다. 또한, 기후변화에 대처하려는 수많은 적응 방법이 기후변화의 부정적 영향을 줄이고 긍정적인 면을 증대시키지만, 그에 상응하는 비용도 동반하여 발생시킨다. 따라서 더 크고 빠른 기후변화는 작고 느린 변화보다

적응을 더 어렵게 하고 손해를 가져올 위험도 더 크기 때문에 이로 인한 비용과 이익의 정량적 평가, 그리고 그것이 지역 및 개체에 따라 어떻게 변화하는지 대한 평가는 여전히 과제이다.

VI. 기후변화 대응전략: 완화와 적응

1. 기후변화 대응방안¹⁵⁾

사회가 기후변화에 대응할 수 있는 방법은 기후변화의 영향에 적응하고 온실가스 배출량을 완화하여 기후변화의 속도와 크기를 감소시키는 것이다. 즉, 다음 20~30년 동안 이행될 수 있는 완화와 적응, 그리고 그것들과 지속 가능한 발전과의 상호관계에 초점을 맞춰야 한다는 것이다. 특히 이 대응들은 상호보완적 역할이라는 관점에서 좀 더 장기적인 방안이 요구된다. 적응하고 완화할 수 있는 능력은 사회경제적, 환경적 정황, 이용 가능한 정보와 기술에 달렸다.¹⁶⁾ 그러나 완화 대책보다 적응 대책의 비용과 효과성에 관한 유효한 정보가 훨씬 적은 실정이다.

1) 완화(Mitigation)

완화란 기후변화의 원인 물질인 온실가스의 배출 감축으로 온실가스 농도를 낮추어서 기후변화의 정도를 줄이는 것을 의미한다. 상향식 연구와 하향식 연구 결과에 의하면, 다음 몇 십 년 동안 전 지구 온실

15) 논자가 '기후변화 2007: 종합보고서'를 일부 참고하여 재구성함을 밝힌다.

16) 기술이란 특정 과제를 성공시키기 위해 기술적 인공물(하드웨어, 장비)과 (사회적)정보("소프트웨어", 즉 인공물을 생산하고 사용할 노하우)를 활용하여 지식을 실용적으로 적용하는 것이라고 정의된다.

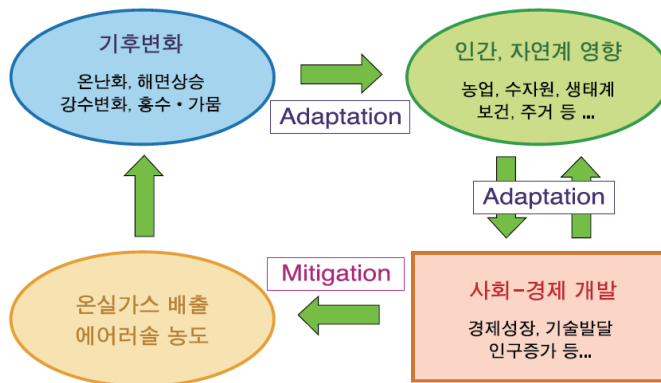
가스 배출량을 감축하기 위해 전 지구 배출량의 전망된 증가량을 상쇄하거나 현재 수준보다 낮출 수 있는 실질적 완화를 위한 경제적 잠재력(Economic Potential)¹⁷⁾이 있다는데 공감대가 높다.

물론 연구에 사용된 방법론은 서로 다르지만, 분석 대상의 세계 모든 지역에서 온실가스 배출량 완화 조치의 결과로 인한 대기오염의 감소는 단 시일 내에 보건상 전반적인 수혜 폭은 상당히 클 것이고 완화비용의 상당한 부분을 상쇄시킬 수도 있다는 것에 많은 증거들이 있다.¹⁸⁾

2) 적응(Adaptation)

적응이란 기후변화로 인한 부정적인 영향에 미리 대비하여 피해를 저감하고, 긍정적인 영향은 극대화하는 것이다. 이는 온실가스 배출감축을 성공적으로 달성한다 해도 이미 배출된 온실가스는 대기 중 체류 수명이 매우 길기 때문에 대기 중에 장기간 축적되어 있을 수밖에 없어 지구기온 상승은 당분간 피할 수 없는 환경에 처해진다는 이론에 근거한 개념이다. 적응은 장기적으로도 단기적으로도 취약성을 감소시킬 수 있다. 기후변화에 대한 취약성은 여러

기후변화의 평가 및 대응 체계



[그림 12] 기후변화의 평가 및 대응 체계

※ 자료: IPCC 제4차 평가보고서, 논자 재구성, 2008.

- 17) 순 마이너스 비용 (후회 없는 기회) 옵션이란 에너지비용 감소와 국지적/지역적 오염물질 배출량 감소 같은 이득(기후 변화 방지에 따른 이득은 제외)이 사회비용보다 크거나 같은 옵션이라고 정의된다.
- 18) 탄소 누수(Carbon Leakage)의 규모가 불확실하긴 하지만 부속서에 포함된 국가들의 지구적 경제 및 배출량에 관한 조치가 효과적인 수도 있다는 것이 높은 공감대와 보통 증거 속에 확인된다. 또한, 모든 부문에 걸쳐 생활방식과 행동패턴의 변화는 기후변화 완화에 기여할 수 있다는 높은 공감대와 보통의 증거가 있다. 관리도 긍정적으로 기여할 수 있다. 특히 정부가 완화조치의 인센티브를 창출하는 데 사용할 수 있는 매우 다양한 국가 정책과 도구가 있다는 공감대가 높고 증거가 많다. 그것들의 적용 가능성은 국가 상황과 파악된 그것들의 상호작용에 달렸지만 여러 국가 및 부문의 이행 경험이 알려주는 바로는 어떤 도구를 이행하든 장단점은 있다.

스트레스에 의해 심화될 수 있다. 이런 취약성은 현재의 기후 유해요소, 빈곤, 자원 활용의 불평등, 식량불안, 경제적 세계화 경향, 갈등, HIV/AIDS 등과 같은 질병 발생 등에서 기인한다. 하지만, 적응 능력은 사회적, 경제적 발달과 긴밀한 관계가 있지만 사회 전체적으로 균등하지는 않다. 적응 능력은 역학적이며, 사회의 생산력 기반에 좌우된다. 이러한 사회적 생산력 기반으로는 자연적, 인위적 자산, 사회적 네트워크와 권리, 인적 자본과 제도, 관리, 국가 소득, 보건과 기술 등이 있다. 적응 능력은 다중적 기후 및 비기후 스트레스는 물론 개발 정책에 의해서도 좌우된다. 최근의 연구결과들은 적응이 관건이고 득이 된다는 소견을 재확인해 준다. 그러나 재정,

기술, 인식, 행동, 정치, 사회, 제도, 문화 측면의 제약 때문에 적응 대책의 이행과 효과가 제한된다. 적응 능력이 높은 사회조차도 기후 변화, 기후 변동성, 기후 이변에 취약하다. 실례로 2003년의 열파는 유럽 사회에 엄청난 수의 사망자(특히 고령자들)를 발생시켰고, 2005년에는 허리케인이 미국에 인적, 재정적 큰 희생을 안겼다.

따라서 기후변화 문제에 대하여 전 지구 차원의 대응을 확립하고, 일련의 국가 정책을 수립하도록 격려하며 국제 탄소시장을 창출하고, 미래 완화노력의 토대가 될 수 있는 새 제도적 장치를 수립하는데 더욱 많은 노력과 협력이 필요하다.

[표 2] 한국에서의 기후변화 영향, 취약성 및 적응조치

	취약성 및 영향	적응 조치
기후 변화	<ul style="list-style-type: none"> • 작물재배 가능지역의 북상 • 작물의 생산성 위협 • 농업생태계 생산성 및 안정성 장애 	<ul style="list-style-type: none"> • 농작물 재배방법 • 품종육성 • 지역별 재배작물 변화
	<ul style="list-style-type: none"> • 산림식생대의 이동 • 산림생태계 구조 변화 • 산림재해 증가 • 병해충 발생추이 변화 	<ul style="list-style-type: none"> • 생물다양성 보전체계 수립 • 산림 생산성 유지 대책 수립 • 산림재해 방지대책
	<ul style="list-style-type: none"> • 수온의 변화로 해양생태계와 수산자원의 변동 • 해수면 상승으로 연안침식과 연안시설물 유실 	<ul style="list-style-type: none"> • 수산자원 변동에 대한 대응방안 • 한반도 해수면상승 영향평가 및 대응 • 연안침식 및 연안 구조물 방어대책 수립
	<ul style="list-style-type: none"> • 홍수, 가뭄 및 태풍으로 피해 증가 • 수자원의 양적, 질적 저하로 피해 증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 재해 대응 방안 수립 • 수자원확보 대책
	<ul style="list-style-type: none"> • 더위로 스트레스와 질병 증가 • 전염성 질병체의 분포변화로 전염병 이동의 증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 질병 예방활동의 강화 등 • 전염병 유행 예측 사업

※ 자료: 기후변화협약 국가보고서, 논자 재인용, 2008.

2. 우리나라 및 해외의 기후변화 대응방안

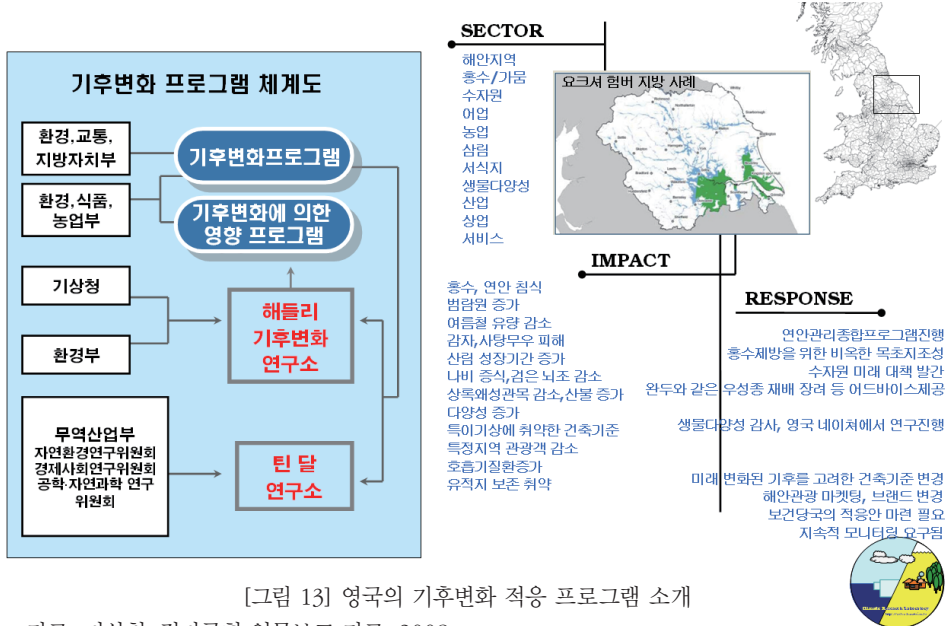
1) 기후변화 적응

먼저 농업부문의 적응으로 온난한 기후에 적합한 농작물 품종을 개량함으로써 기후변화에 따라 품종을 선택하여 농업생산성 안정화를 꾀할 수 있어야 한다. 또한, 보건부문의 적응으로 온난화에 따라 발생 가능한 열대전염병에 관한 증상 등에 관한 교육을 의대에 추가하고 국가차원의 열대전염병의 예방약 및 치료약 확보함으로써 열대전염병 발생 시 신속한 발견 및 조치로 확산을 방지해야 한다. 특히 재해부문의 적응으로 온난화로 인하여 집중호우 세기가 증가할 가능성이 높으므로, 향후 댐 및 제방의

건설기준을 강화하고, 저류지 확보 및 위험지역 개발 제한함으로써 홍수의 위험도 감소로 재산 및 인명 피해를 저감시킬 수 있어야 한다.¹⁹⁾

2) 선진국의 기후변화 적응 프로그램 사례

영국의 기후변화적응 프로그램은 기상, 환경, 교통, 농업, 무역 등 정부 각 부처에서 공동으로 추진하고 있다. 기후변화과학 정보 및 국가표준 기후변화 시나리오(해들리연구소)를 산출하여 영향평가(UKIP) 및 적응 조치 개발에 활용하고, 개발된 적응조치는 부문별 및 지역별(요크셔지방정부)에 적용되고 있다.



[그림 13] 영국의 기후변화 적응 프로그램 소개

※ 자료: 기상청, 정기국회 업무보고 자료, 2008.

19) 부적응의 예: 2005년 미국 뉴올리언즈에서 허리케인 '카트리나'에 의한 제방 유실로 막대한 인명 및 재산 피해가 발생하였다.

미국은 대통령 직속 장관급 기후변화위원회를 구성하고 기후변화기술사업(CCTP)과 기후변화과학사업(CCSP)에 연간 각각 30억달러, 17억달러를 지속적으로 투자하여 기후변화의 '완화' 및 '적응'에 대응하고 있다.

3) 향후 추진과제

(1) 제도적 측면

먼저 기후변화 관련 법 및 제도를 정비해야 한다. 기후변화는 수많은 분야가 복합적으로 연계되어 있는 문제로서, 체계적·효율적인 대처를 위해서는 법적 근거가 필요하다. 이를 위하여 기후변화 대응을 위한 법률의 제정이 시급하다. 이미 여러 차례 기후변화종합대책특별법, 지구온난화방지대책법 등의 명칭으로 정부나 국회에서 법률안 제정이 시도된 바 있으나, 아직까지 국회에서 최종 통과된 사례는 없다. 둘째, 온실가스 배출 감축을 위한 국가 정책적 개발이 필요하다. 에너지 다소비국가인 우리나라의 경우 온실가스 배출감축은 국가 경제와 직결되는 중요한 문제임을 감안할 때 경제 성장전략과 기후변화 대응전략 간의 균형 잡힌 시점이 필요하다. 셋째, 다부처-다학제간 기후변화 적응체계 개발이 요구된다. 기후변화 완화 전략과 함께, 기후변화 영향평가 및 적응 전략의 정립이 병행되어야만 완전한 기후변화 대응 대책이 될 수 있다. 특히 기후변화 영향평가 및 적응 전략 수립에 필요한 산행 단계로서 다부처-다학제간 공동연구사업의 확충이 시급하다.

(2) 기반 조성 측면

민간부문의 자발적 대응기반 형성과 공동대응을 위

한 부문별 파트너십 활동 촉진이 필요하며 무엇보다 기후변화 대응을 위한 국민적 공감대 구축에 필요한 국민 인식 확산과 기후변화 관련 분야별 전문가 양성을 위한 국가 프로그램의 개시가 요구된다. 그렇게 된다면 기후변화 대응에 필요한 분야별 연구개발의 획기적 확충과 이를 활용하여 세계수준의 지식 역량을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅶ. 결 언

최근에 나타나고 있는 기후변화는 과거 1만년 동안 나타난 기후변화에 비하여 매우 급격한 변화라고 할 수 있다. 이러한 추세가 당분간 계속될 경우, 앞으로는 더 급격한 기후변화로 육지의 생태계뿐만 아니라 해양 생태계에도 심각한 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 기후변화에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

무엇보다 기후변화에 대응한 사회적 합의체가 구축되어야 한다. 다학제간 연구를 위한 정부-연구기관-학계-산업-민간의 협조 체제를 구축하고 국가차원에서 법적·제도적 기반을 마련하고 지속적인 지원이 요구된다. 또한, 기후변화는 사회전반에 영향을 미치므로, 다양한 분야의 전문가들이 참여할 수 있는 자리가 지속적으로 마련되어야 하며 기후변화의 예측에서부터 영향, 감축, 적응까지 보다 과학적이고 종합적인 기후변화 대응책을 수립하여 국가 전체에 대하여 기후변화를 슬기롭게 대처해갈 사회·경제·정치체제를 구축하는 협력적인 노력이 무엇보다 필요하다. 이와 함께 기후변화에 대응한 대국민 교육과 홍보 방안도 마련되어야 한다.

16세기 영국의 무역상이자 금융가인 토마스 그레이 샴은 'Bad money will drive good money out of circulation' 할 수 있다고 경고한 바 있다. 우리말로 바꾸면 '악화(惡貨)가 양화(良貨)를 구축한다'는 뜻으로 통제가 이루어지지 않는다면 품질이 좋은 상품은 시장에서 퇴거되고 품질이 낮은 상품만 남게 된다는 의미정도로 해석할 수 있을 것이다. 이러한 맥락에서 우리는 기후변화가 불러올 수 있는 미래의 심각성을 면밀히 검토하고 지속가능하며 적절한 통제가 가능한 실질적인 방안을 모색함으로써 향후 발생할 수 있는 문제점에 대비해야 한다. 무엇보다 악화와 양화가 서로 양립하지 않고 양화가 건설하게 뿌리내릴 수 있도록 우리 모두의 지혜와 역량을 모아야하며 사회적 합의를 이끌어 낼 수 있는 협력적인 자세가 필요하다.

참고문헌

- 국회 과학기술정보통신위원회, 국정감사 현황자료, 2004-2007.
- 국회 과학기술정보통신위원회, 국정감사 결과보고서, 2004-2007.
- 국회 환경노동위원회, 국정감사 현황자료, 2008.
- 국회 환경노동위원회, 국정감사 결과보고서, 2008.
- 기상연구소, 정기국회 업무보고 자료, 2004-2008.
- 기상청, 정기국회 업무보고 자료, 2004-2008.
- 기후변화협약 국가보고서, 2008.
- 영국 기후연구단(CRU), 기후변화 보고서, 2008.
- IPCC 배출 시나리오에 관한 특별보고서(IPCC Special Report on Emission Scenarios), 2000.
- IPCC, 제3차 평가보고서, 2001.
- IPCC 제4차 평가보고서, 2008.
- NASA, Satellite Images, 2008.



미국의 기상-수자원 연계기술 동향

정 창 삼

인덕대학 토목환경설계과 교수

csjeong@mail.induk.ac.kr

1. 국외 관련기술 및 적용사례 분석

1. 미국 하천정보센터 사례

NOAA의 NWS에서는 하천 예보센터(River Forecast Center, RFC)를 운영하고 있다. RFC에서는 하천의 상태를 예보하여 홍수에 의한 인명과 재산 피해를 줄이는데 노력하고 있으며, 나아가 효율적인 수자원 관리를 위한 예보를 제공하고 있다. RFC는 각 지역별, 하천별로 운영되고 있으며 지역별 현황은 [그림 1] 및 [표 1]과 같다.



[그림 1] 미국 RFC 분포도

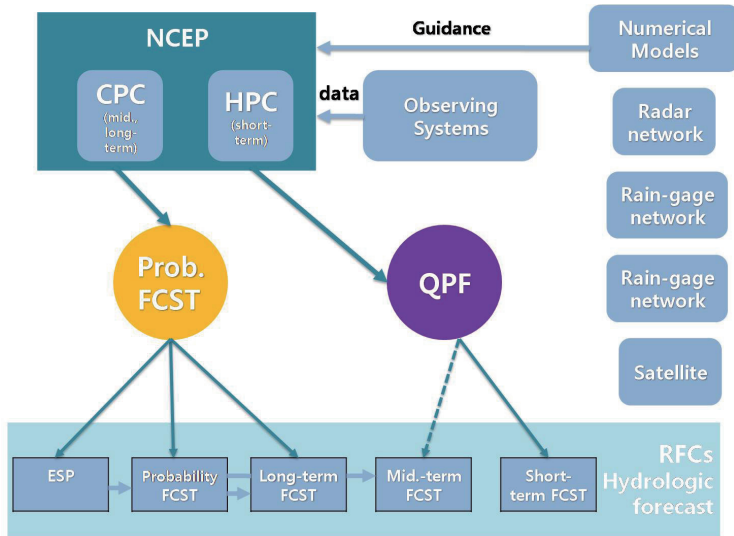


RFC는 대유역의 하천, 저수지, 호수를 위한 수문 모델링 조작을 관리하고 NWS의 수문 산출물을 위한 기초적인 예측정보를 생산하기 위해 그림 2와 같이 NCEP의 HPC(Hydrometeorological Prediction Center)와 CPC의 QPF 및 관측정보를 입력으로 단

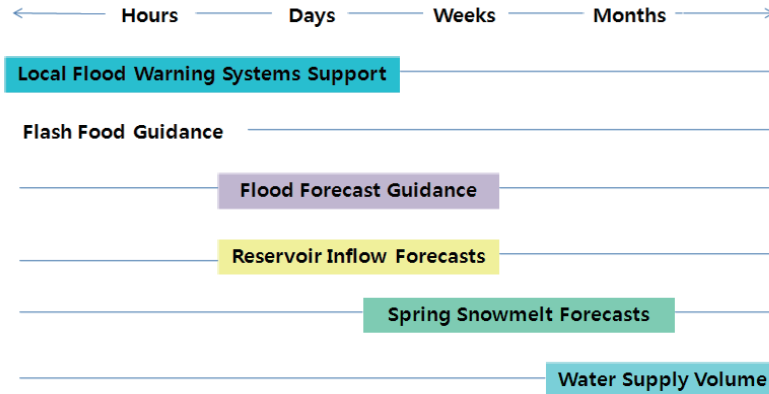
기, 중기, 장기 수문예보를 수행하고 있으며, 비홍수 기간에 하루 두 번의 스케줄로, 중대한 홍수나 홍수발생 가능 기간에는 24시간 연장된 조작을 운영한다.

[표 1] 지역별 RFC

지역 및 하천	River Forecast Center
동부 지역	<ul style="list-style-type: none"> • Mid Atlantic RFC • Northeast RFC • Ohio River RFC
남부 지역	<ul style="list-style-type: none"> • Arkansas/Red River Basin RFC • Lower Mississippi RFC • Southeast RFC • West Gulf RFC
중부 지역 본부	<ul style="list-style-type: none"> • Missouri Basin RFC • North Central RFC
서부 지역 본부	<ul style="list-style-type: none"> • California/Nevada RFC • Colorado Basin RFC • Northwest RFC
알래스카 지역 본부	<ul style="list-style-type: none"> • Alaska RFC



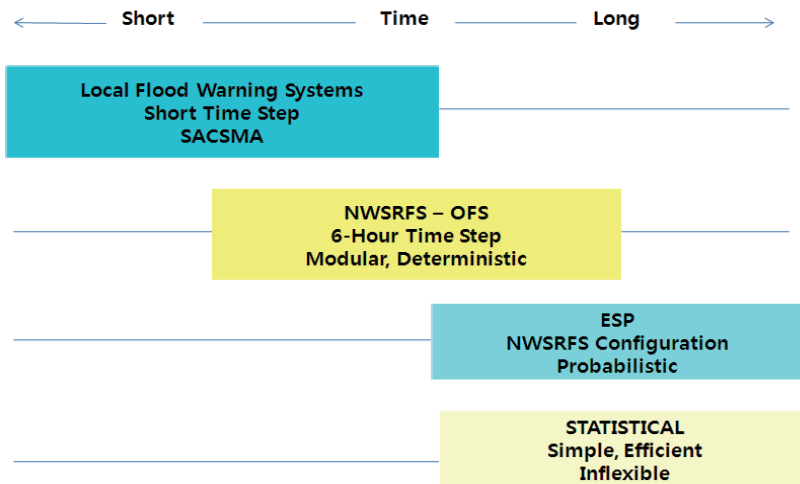
[그림 2] RFC 수문예보 연산 처리과정



[그림 3] 시간 간격에 따른 수문학적 예보

RFC는 다음 [그림 3]에서 보여주는 것과 같이 시 (flash flood guidance and support to Local Flood Warning Systems), 일(traditional flood forecasts), 주(snowmelt forecasts), 월(seasonal water supply)의 시간에 대한 수문학적인 예보를 제공한다.

RFC는 이 예보의 제공을 위해 다음의 [그림 4]와 같이 많은 수문 모형을 이용하고 수문 모의과정을 위해 간단한 방법부터 복잡하고 경험적인 방법까지 다양한 과정을 수행한다.

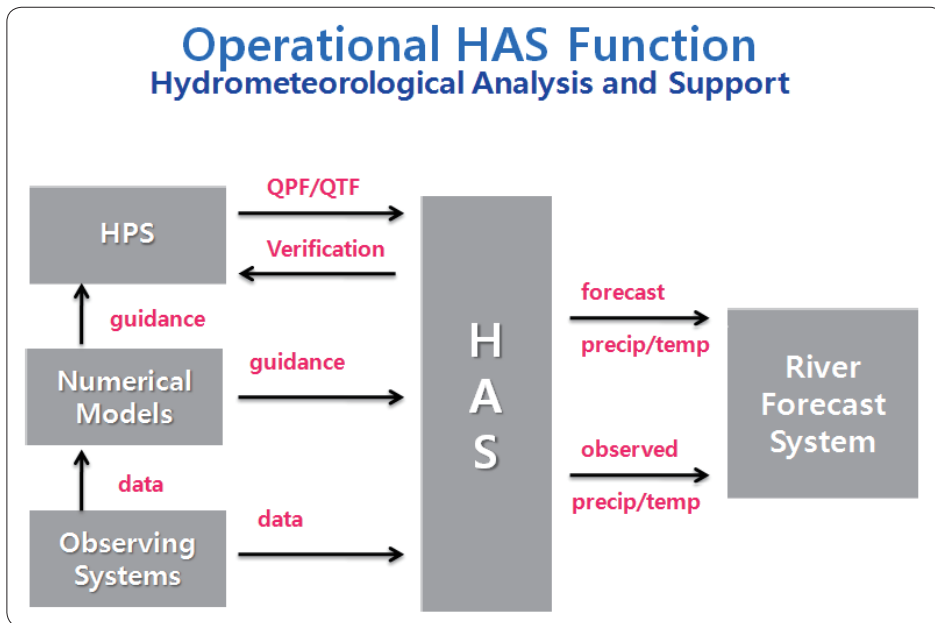


[그림 4] 수문 모형과 절차에 따른 예측모형의 구분



각 지역별 RFC는 실무자 또는 설계자에게 가장 정확한 하천 정보의 예측을 제공하기 위해 구성되었으며, 홍수, 용설, 물수요 공급 예측 등의 질적 향상과 광범위한 적용을 위해 많은 개선이 이루어지고 있다. 특히 홍수예측의 경우, 각 RFC는 인접한 2개 주에 위치한 대략 80지점에 대해 홍수예측결과를 제공한다. 홍수 예측은 입력되는 시간 자료가 신뢰할 수 없으면 큰 의미가 없다. 따라서 각 RFC는 정확한 홍수 예보를 위해 여러 기관 중에서 신뢰성이 높은 기관에 의해 수집된 자료를 사용한다. 이러한 자료들은 수동계측이 아닌 자동계측자료가 필수적이며, 자동화된 자료는 무전, 극초단파, 위성, 전화기와 같은 다양한 기술을 사용하여 계측지점으로부터 보내진다. 실제 각 RFC에서 수문기상학적 자료를 수집, 제공하는 기관에는 CADWR,

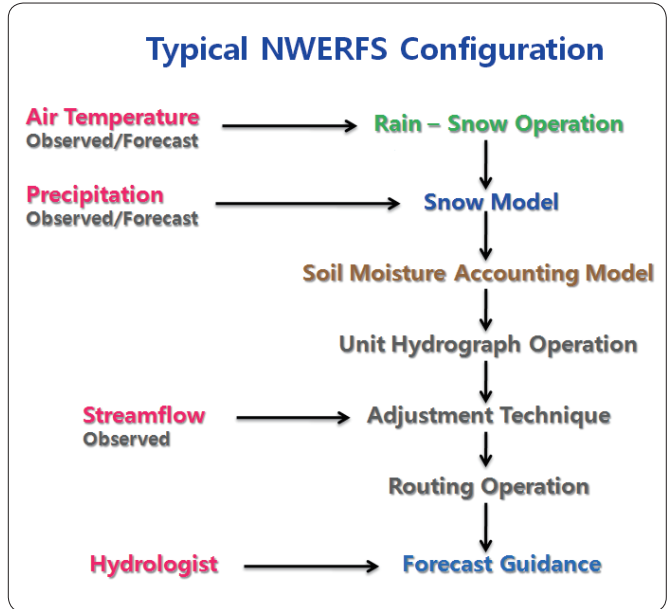
USBR, COE, U.S. Geological Survey (USGS), U.S. Forest Service (USFS), U.S. Natural Resources Conservation Service (NRCS) 등이 포함되어 있으며, 여기에는 각 RFC내에 1200개 이상의 강우 관측소, 600개의 기온 센서, 500 수위관측소, 유역 고도 측정, 풍속, 풍향, 습도, 그리고 대기압과 같은 다른 변수들을 계측할 수 있는 120개의 관측소 등의 자료를 조합하여 사용한다. RFC에서는 예보관들이 그림 5와 같이 HAS (Hydrometeorological Analysis and Support)를 운영하여 관측 자료를 조합하고 기상을 예측하여 하천예보모형에 적용하며, 이러한 예보관들은 현재의 QPF가 예측상태를 잘 반영하는지 확인하기 위하여 입력되는 온도, 강수 등의 자료를 질적으로 제어하고 감시한다.



[그림 5] 기상학적 분석 및 지원

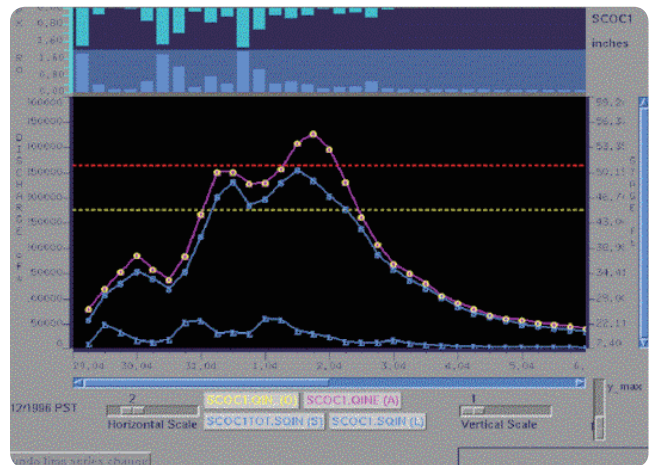


RFC에서는 NWSRFS(National Weather Service River Forecast System) 모델과 SSARR(Streamflow Simulation and Reservoir Regulation) 및 ESP(Ensemble Streamflow Prediction)를 이용하여 실시간 홍수예보 및 하천 예보와 장기 (확률)예보를 수행한다. [그림 6]에서와 같이 NWSRFS는 수문모델로 Sacramento 토양 수분 모델과 Snow-17 Accumulation and Ablation 모델, 여러 가지 API(Antecedent Precipitation Index) 모델과 연결 알고리즘 및 저수지 조절 기구를 포함하고, 그림 2에서와 같이 정량적 강수량 및 기온의 예보값 및 관측값을 입력 자료로 사용한다.



[그림 6] NWSRFS의 일반적인 구성요소

NWSRFS는 GUI (graphical user interface)를 통한 유사상호적인 방법으로 지역적으로 운영되는데, IFP (Interactive Forecast Program)라 불리는 인터페이스를 이용하여 예보관이 예보지점을 운영한다. 모형의 운영은 수일에서 수주까지 이루어지며, 하천은 현재 모형의 상태뿐만 아니라 기온, 강수, 저수지 조정 등의 예보까지 사용하여 다음 3일에서 5일까지 계획된다.

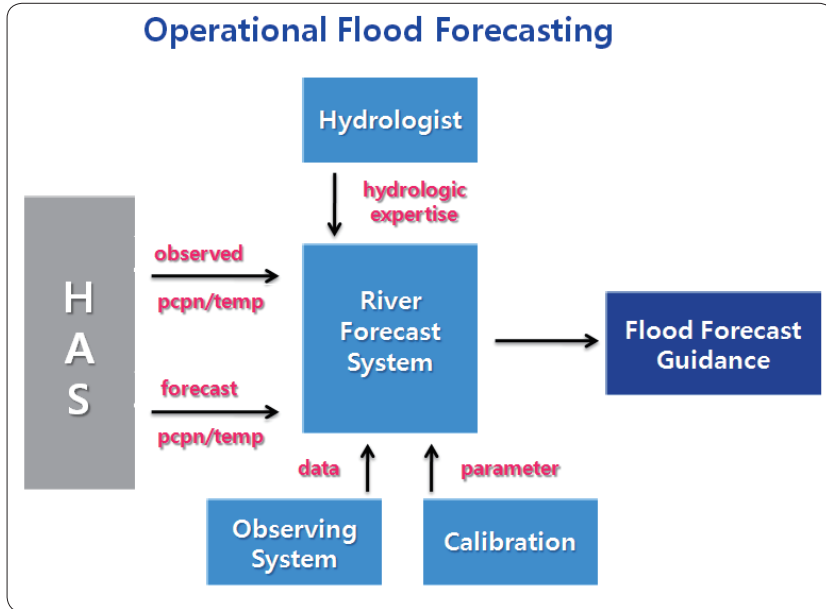


[그림 7] NWSRFS Interactive Forecast Program

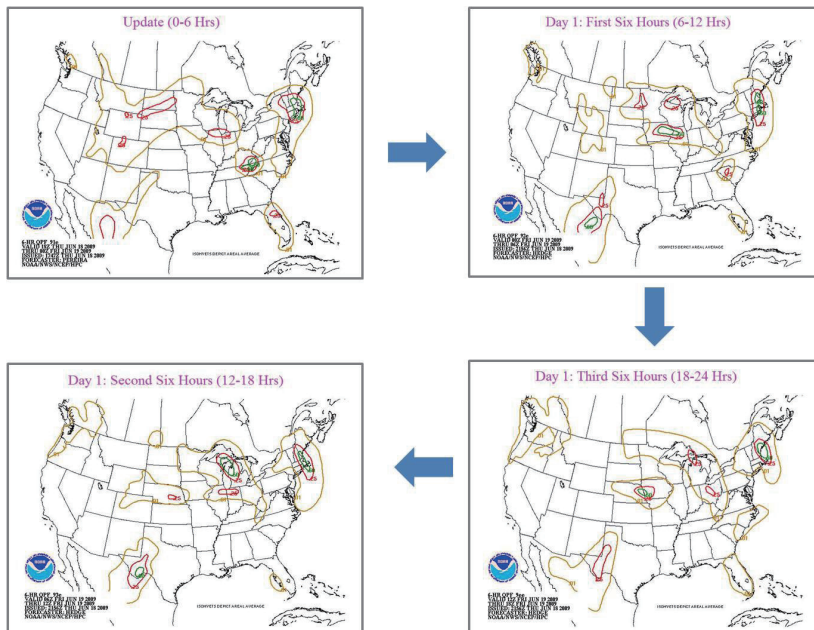
[그림 7]은 IFP의 인터페이스를 보여준다.

실제로 RFC는 예보의 작업에 따라 8개의 분야로 세

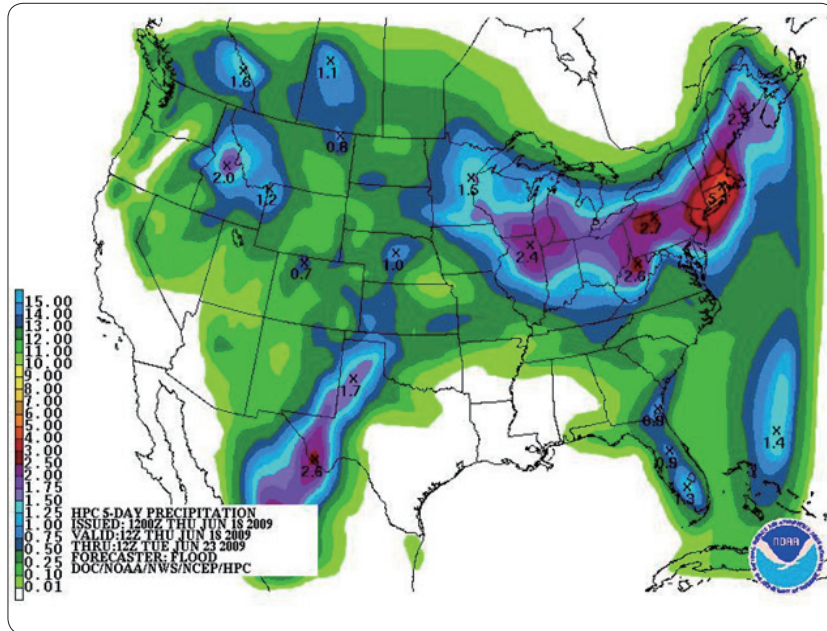
분화된다. 여기에는 경험의 균형, 현재 상태 분석, 모형의 분석 능력과 섬세함 등을 고려하여 세분화된 다[그림 8].



[그림 8] 홍수예보과정



[그림 9] HPC의 6시간마다 예보되는 QPF 생성자료



[그림 10] HPC의 5일간의 QPF

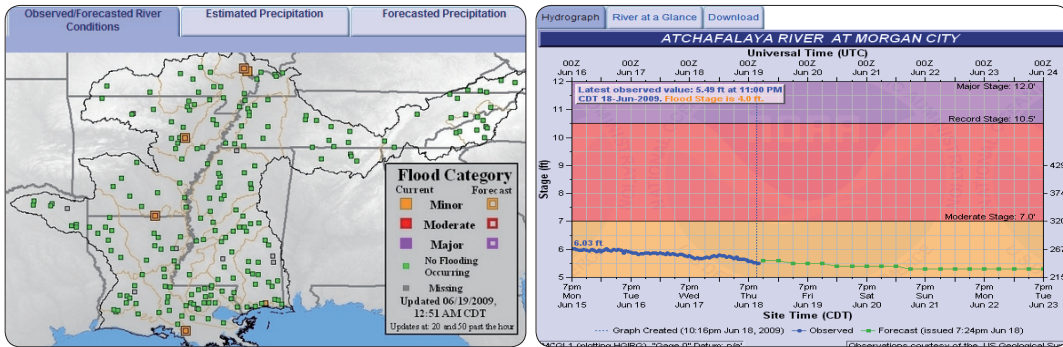
QPF에 의한 강수량 예보 값은 적어도 하루에 한번 제공되며, NCEP/HPC로부터 5일간의 6시간 강수량과 24시간 강수량 예보값, CPC로부터 5일 이상의 확장 기간에 대한 QPF가 제공된다. 그림 9는 6시간 단위로 예보는 HPC의 생성시 자료이고 이후 그래픽 처리를 통하여 예보된다. 그림10은 5일동안의 QPF를 나타낸 것이다. 이러한 예보값은 지점별 또는 유역 평균값으로 제공된다. 관측값의 경우 품질관리 과정을 거치게 되는데 이는 NWSRFS 모델을 사용하여 예보를 하는데 있어 오류를 줄이기 위한 것이다. 또한 다음 3일간의 빙결고도 예보값을 제공받아 강수의 형태(눈 혹은 비)를 결정하는데 사용된다. 품질관리를 거친 기온 및 강수량의 관측값과 예보값을 NWSRFS 모델에 입력하여 계산을 수행하게 된다.

1) 단기 하천예보

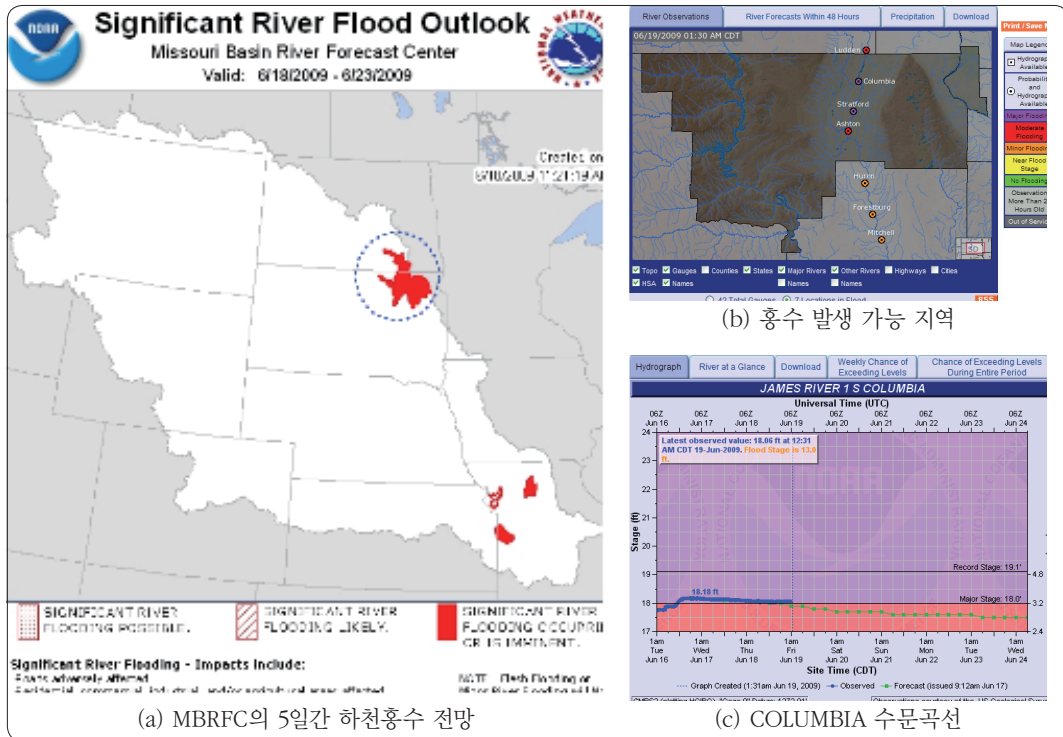
RFC(River Forecast Center)의 주요 초점은 단기(0~7일) 하천예보에 있는데, 이러한 것은 WFO(Weather Forecast Office) 홍수정보 산출과 고객 및 협동기관의 의사결정 과정에서 중요한 입력 자료로 제공되기 때문이다. 단기 운영에 사용되는 예보 시스템은 편리한 예보 수문곡선 출력물과 예보의 정확도를 전달하는 확률정보를 생산한다. 예보 수문곡선은 기본적으로 일련의 예보시간에서 때때로 “최상의 결정”으로 참조되는 예보수위의 단일 집합이다. 미국은 전지역을 13개의 지역으로 구분하고, 각 지역 RFC(River Forecast Center)에서 하천단기예보를 하고 있다. 그림의 LMRFC(Lower Mississippi RFC)에서는 HPC의 5일간의 6시간 QPF를



활용하여 실시간 단기 수문예보를 수행 중이며 [그림 11]과 같은 산출물을 일반 사용자에게 제공하고 있다.



[그림 11] LMRFC의 단기 수문예보 사례



(a) MBRFC의 5일간 하천홍수 전망

(b) 홍수 발생 가능 지역

(c) COLUMBIA 수문곡선

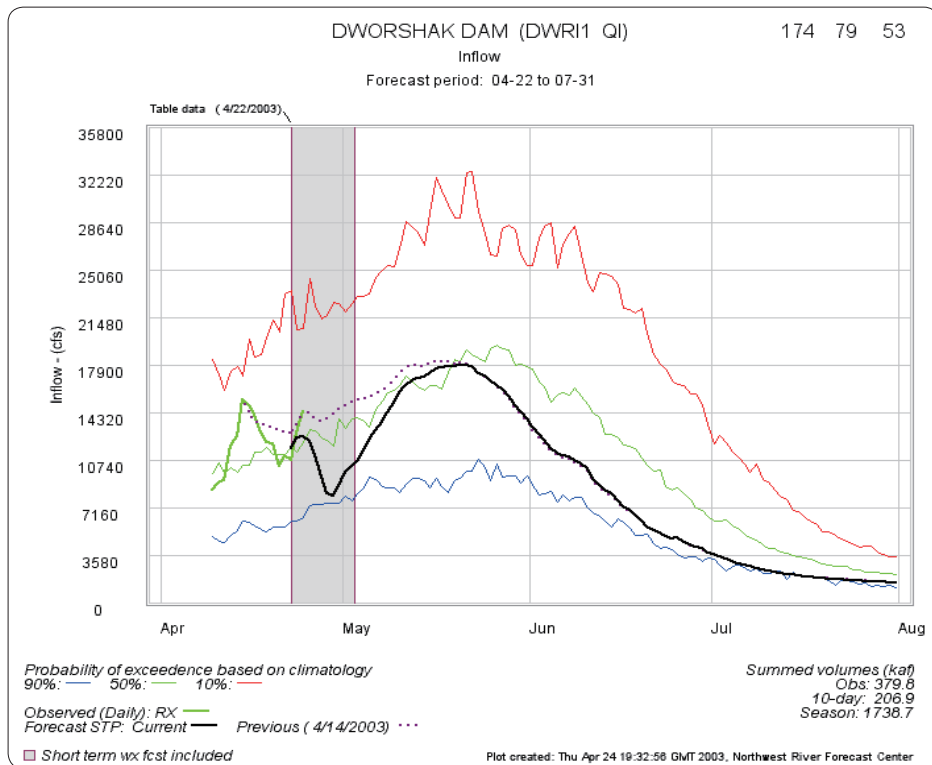
[그림 12] MBRFC의 5일 동안의 중대한 하천홍수 전망



2) 중기 하천예보

중기(8~14일)예보 또한 선택된 하천지점에서 생산된다. 단기 산출물과 같이 중기예보는 예보 수문곡선과 확률정보를 포함한다. 중기 예보지점들 중에는 90일에 걸친 장기 수문예보 혹은 그 이상의 예보를 수행하기도 한다. 이러한 자료들은 CPC로부터 생산된 확장 범위의 강수 및 온도 예보정보와 연계된다. 장기 확률 산출물은 앙상블 모델링이나 통계학적 물공급 기술에 기초를 둔다. 그림 13은 서부지역의 Northwest RFC인 NWRFC의 중기예보에 대한 실례를 나타낸 것인데, 이는 Dworshak

댐의 유입량을 앙상블 예보의 구성요소로 알려진 STP(Single Trace Procedure) 기법으로 예측한 것으로서 NWRFC 단독의 결과이기보다는 NWS의 AHPS(Advanced Hydrologic Prediction Services)와의 공동연구로 산출된 결과이다. 그림 13에서 알 수 있는 것과 같이 실제 총 예보 기간은 2003.4.22 ~2003.7.31로 총 100일 동안의 댐 유입량 예측자료이며, 8일 동안 단기 예보자료, 기후학적 확률예보, 관측값(과거 통계자료), 이전 실행시간에서 계산된 예측값 등이 포함되어 있다.



[그림 13] Dwokshak 댐 하천 유입량 중기예보

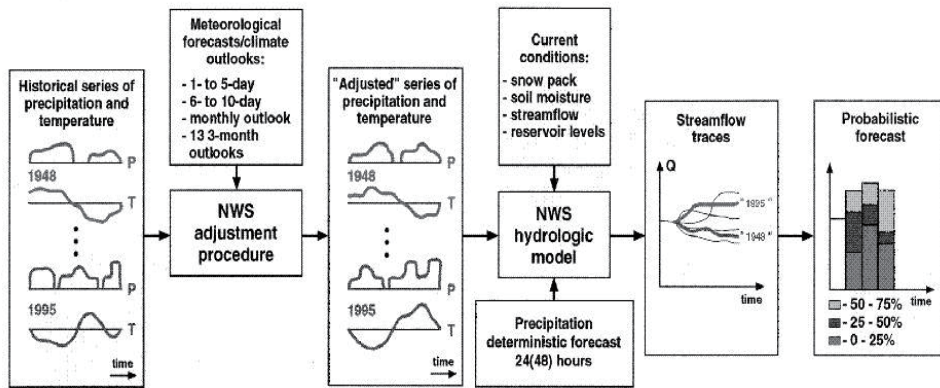


3) 장기 하천예보

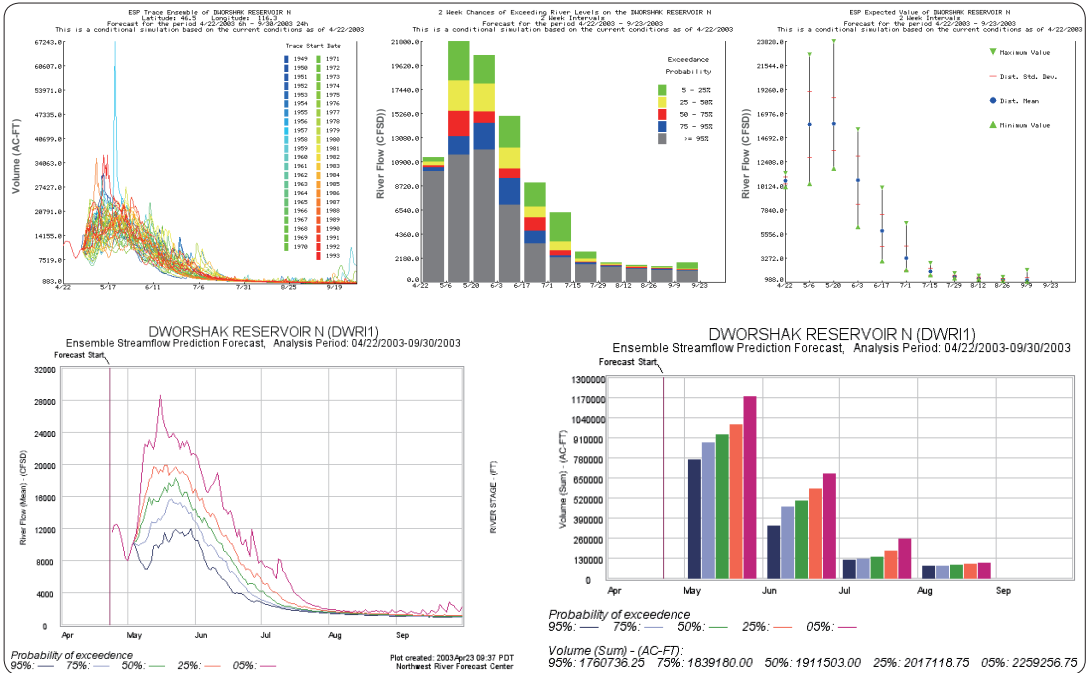
중기이상의 수문예보 산출물 생산에서 정확한 정보를 가지기 위해서는 집중적인 계산 모델링을 통한 확률론적 시계열 연산이 필요하다. NWS/AHPS는 이러한 확률론적 결과를 계산하기 위한 접근방법으로 그림 14와 같은 앙상블 수문 모델링(ESP) 기법을 사용한다. 이 접근 방법은 기본적으로 하천유량이 현시점에서 미래에 어떻게 유도될 것인지를 모의하기 위해 수년에 걸친 과거 기록으로부터의 입력자료(예: 강수, 온도)를 사용한다. 또한 단기 및 중기 예보 연산에 입력되는 QPF는 HPC의 가이던스를 기초로 RFC에서 생산한 산출물들과 NCEP 중기 대기 모델로부터 유도된 격자형 예보자료의 혼합물이다. 소프트웨어적 연산과정은 다양한 출처와 시간 범위, 과거 관측자료, 앙상블 수문 모델링에 사용되는 수문모델 등의 강수 예보를 통합한다.

RFC에서는 ESP 기법을 활용하여 장기 수문예보를 수행 중이며, 실례로 NWRFC Dworshak 댐의 장기 유입량 예측결과를 살펴보면 [그림 15]와 같다. 총 예측기간은 150일이며 앙상블 멤버들의 추적 곡선, 2주 간격의 하천수위 초과 확률예보, ESP 통계 특성치, 일단위의 초과 확률예보, 월간 초과 확률예보 등을 수행 중에 있다.

단기, 중기, 장기 수문예보 연산의 확정론적 및 확률론적 결과는 관측 수위/유량자료와 같은 자료원과 통합하거나 그래픽적 산출물에 기여하기 위해 규격화된 포맷으로 기록된다. RFC는 이러한 예보정보를 USBR과 같은 수자원 유관기관과 계속적으로 상호 교환한다. 또한 그들의 웹페이지를 통하여 RFC D/B에 저장된 확정론적 및 확률론적 정보에 기초한 수문 산출물을 일반 사용자에게 제공한다.



[그림 14] ESP 예보 기법 연산과정



[그림 15] ESP 장기 확률예보



NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황

김 지 영

국립기상연구소 정책연구과 기상연구관

jykim@kma.go.kr

박 소 연

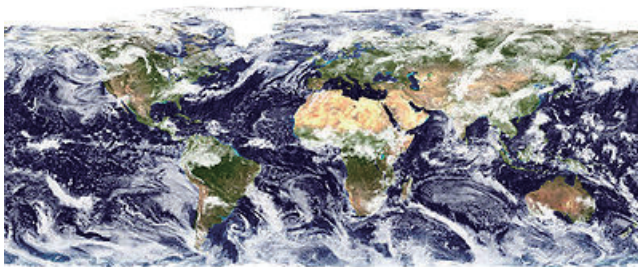
국립기상연구소 정책연구과 연구원

imsyeon@metri.re.kr

I. 서론

기후변화로 인한 이상기상 현상의 발생 빈도가 잦아지고 그 강도가 점차 세어지고 있다. 이와 비례하여 날씨와 기후정보가 국가 경제에 미치는 영향 또한

날로 커지고 있다. 지구온난화가 전지구적인 물순환 과정(global hydrological cycles)에 변화를 초래하기 때문에 종전과는 다른 형태의 강수형태가 나타나는 것이다(그림 1 참조). 기온이나 강수량 등이 단기간 또는 장기간에 걸쳐 비정상적으로 높거나 낮



[그림 1] 기상위성을 통해 바라 본 지구의 모습. 지구 온난화로 인한 전지구적 물순환 과정의 변화로 예전에 경험할 수 없던 호우와 가뭄이 지구촌 곳곳에서 나타나고 있다.

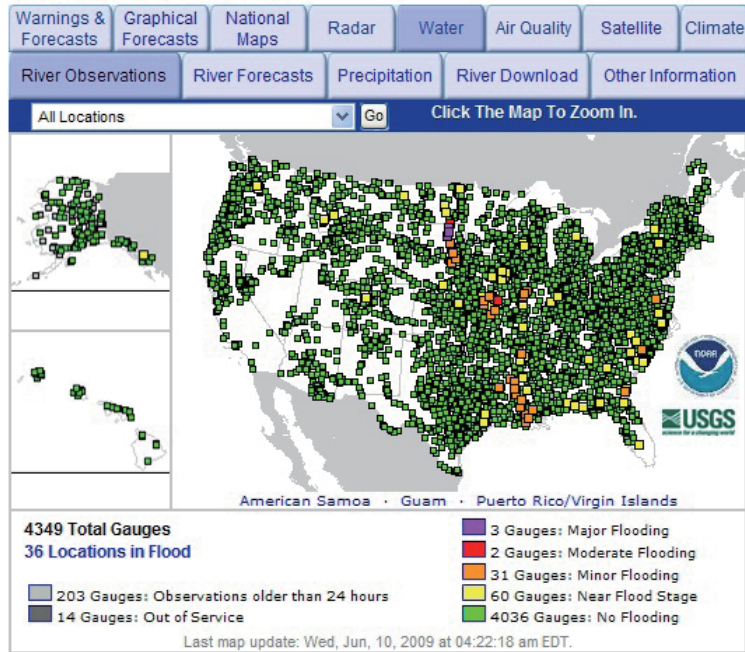
게 나타나는 이상기상이나 이상기후 현상 중 사회경제적인 영향을 많이 주는 것이 가뭄이나 호우 등 수문기상학적 요소이다. 따라서, 앞으로 우리사회가 기후변화 문제에 효과적으로 대응하고 기후변화로 인한 사회경제적 피해를 최소화하기 위해서는 미국 등 선진국의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황을 살펴보고, 향후 우리의 발전방향을 모색해 볼 필요가 있다.



II. 미국의 수문기상 서비스 현황

미국 해양대기청(NOAA)에서 2001년에 발표한 자료에 따르면 날씨와 기후 이벤트로 인한 미국 경제의 영향이 연간 2.2조 달러에 달한다고 한다(NOAA, 2001). 영향이 높은 분야로 농업, 산림, 어업, 에너지, 수송, 건설 등 산업분야가 있고, 공공 유틸리티, 재정과 보험, 소매상, 호텔과 레크레이션, 공공/민간 재산 손실 등이 있다(NHWC, 2002). 이들 중 극심한 가뭄이나 호우로 인한 홍수 등 수문기상학적 현상이 높은 퍼센트를 차지하여 재해와 손실의 주요 원인이 되는 것으로 알려져 있다. 또한 홍수로 인한 재해로 많은 인명의 손실이 해마다 초래되고 있다.

미국 기상청(National Weather Service)의 수문국(Office of Hydrology)은 국가의 홍수 특보와 수자원 예보에 대한 업무를 담당하고 있다. 또한 수문국은 1997년 10월에 “수문학적 예보의 편익”이란 제목의 내부 보고서를 발간한 바 있다. 이 보고서(Stallings, 1997)에는 지난 20년간의 편익 내용에 대한 분석결과가 포함되어 있다. 또한 미래의 잠재적인 편익을 증진시키기 위하여 선진수문예측서비스(Advanced Hydrologic Prediction Service, 이하 AHPS)로 불리는 수문기상정보의 새로운 생산과 활용을 위한 서비스 계획을 제시하였다. 이 연구 이후 AHPS 개발이 프로토타입에 대한 연구비 지원과 필드 평가(field evaluation)를 거쳐 만족할 만한 결과에 도달하였다.



[그림 2] 미국 NOAA의 수문기상 정보 서비스 현황.

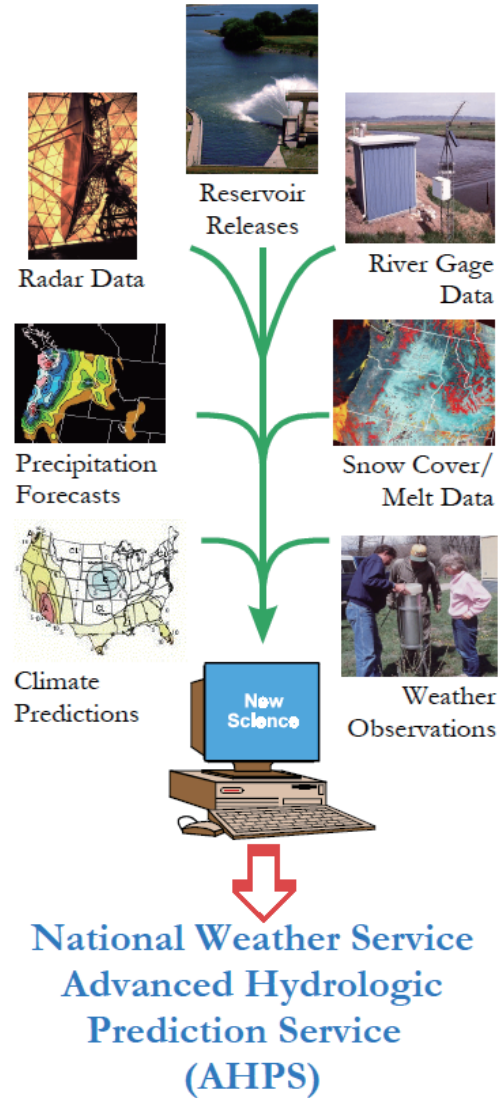


AHPS는 시간적으로는 한 시간에서 계절 규모의 범위를 갖고 다양한 공간 규모에 걸쳐 강물의 수위 (river levels)와 유량(river flow volumes)에 대한 예측정보를 제공한다. 수문기상에 대한 첨단 정보와 지식을 통해 홍수로 인한 피해를 최소화 할 수 있다. AHPS의 주요 수요자로는 강을 이용한 교역 분야, 수력 발전 및 댐 분야, 긴급 대응 분야, 환경 분야, 레크리에이션 분야, 농업 분야 등 매우 다양하다 (<http://www.nws.noaa.gov/oh/ahps>). AHPS를 통해 미국은 해마다 홍수로 인해 피해를 입는 많은 생명을 구하고 연간 2억달러 정도의 절감효과를 가지며, 수자원 사용자에게 연간 4억달러 정도의 추가적인 기여를 하는 것으로 평가 받고 있다. AHPS가 공적인 목적으로 제공하는 서비스 항목은 다음과 같다.

- 강물의 수위가 얼마나 올라갈 것인가?
- 강물이 언제 피크에 도달할 것인가?
- 어디에 있는 자산(주택이나 토지 등)이 물에 잠길 것인가?
- 홍수가 얼마나 오래 계속될 것인가?
- 가뭄이 얼마나 오래 지속될 것인가?

등이다. AHPS는 수문 관리자와 시의 행정 당국자들에게 그들이 의사결정을 하는데 도움을 주기위하여 더 나은 정보를 제공하기 위해서 노력하고 있다. 의사결정의 내용은 다음과 같다.

- 잠재적인 홍수 지역에 대해 더 많은 생명을 구하기 위하여 언제 어디에 있는 국민을 소산시킬 것인가?



[그림 3] 미국 기상청의 선진수문예측 서비스(AHPS)를 위해 사용되는 다양한 자료들.

- 경제적인 피해를 줄이기 위해서 물품과 산업적 자산을 언제 이송시킬 것인가?



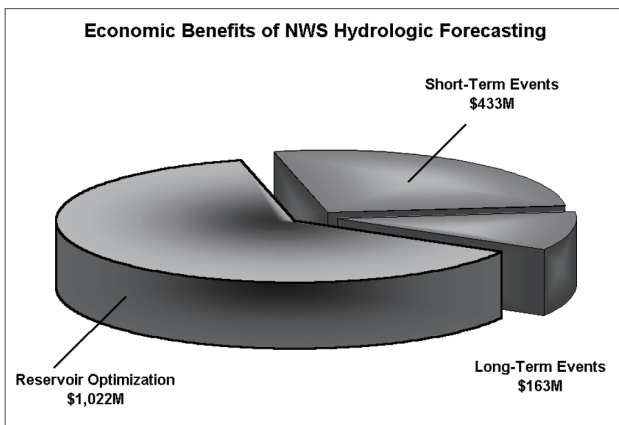
- 홍수로 인한 사람들과 비즈니스 상의 피해를 줄이기 위해 저수지 저장 용량을 어떻게 활용할 것인가?
- 인근지역으로의 홍수 피해가 확산되는 것을 방지하기 위해 언제 제방을 보강하고 어느 정도의 높이로 해야 할 것인가?

미국은 현재 세계 최고수준의 수문기상 전문가들을 보유한 가운데 믿을 수 있는 양질의 예보 서비스를 제공하고 있으며, 최고의 기술을 사용하여 비용효과적인 방식의 서비스를 제공하고 있다. 또한, 날씨와 관련된 인명피해를 최소화 하고, 날씨정보의 경제적 가치를 높이기 위해 부단히 노력하고 있다.

[그림 3]에는 AHPS를 위해 사용되는 다양한 자료들이 제시되어 있다. 저수지에서의 물 방출, 레이더 자료, 강에서의 게이지 자료, 강수 예보, 적설 자료, 기후예측, 기상관측 등의 자료를 종합하여 AHPS를 제공한다. 또한 [그림 4]에는 미국 기상청의 수문예보를 통한 경제적 편익을 분석한 결과를 제시하였다. 전체 편익 비용의 합계는 16억 1천만 달러에 달하는 것으로 집계되었다.

III. 미국의 수문기상 연구개발 현황

수문기상과 관련된 폭풍(storm) 속에서의 호우 발생과 발달에 관한 과학적 메커니즘을 이해하기 위하여 다양한 관측과 모델 연구 등이 활발하게 수행 중이다. 수문기상과 관련하여 다양한 연구를 수행하고 있는 미국위험기상연구소(National Severe Storm Laboratory, NSSL)을 중심으로 연구개발 현황을 소개하고자 한다.



[그림 4] 미국 기상청의 수문기상 예보를 통한 연 평균 경제적(홍수 손실) 편익 분석 결과. 저수지 최적화로 10억 2천만 달러, 단기 및 장기 이벤트에 대해서 각각 4억 3천만 달러 및 1억 6천만 달러의 경제적 편익이 있는 것으로 파악되었다. 제시된 금액은 2000년의 물가 수준으로 환산된 것임.

NSSL은 위험기상의 프로세스를 연구하고 기상청의 예보자들을 돕는 시스템을 개발하는 역할을 하고 있다. 또한, 연방 정부, 대학, 민간기업에서 날씨정보를 보다 효과적으로 사용할 수 있도록 다양한 노력을 기울이고 있다. NSSL 내에는 예측, 특보, 레이더에 관한 3개의 연구과가 있다. 특히, NSSL은 수문기상에 중요한 관측 장비인 기상레이더의 기능을 개선하고 새로운 레이더 시스템을 디자인하고 테스트하는 역할을 담당하고 있다. 심한 폭풍을 감시하고 예측하는 수문기상학적 연구 개발을 주관하는 것 또한



NSSL의 주요한 임무 중 하나이다. 예보와 특보를 개선시키기 위한 도구들을 개발하고 테스트하는 역할을 담당하고 있으며, 심한 폭풍의 프로세스에 대한 기초적인 이해를 개선하기 위한 야외 관측연구를 수행하고 있다. NSSL은 또한 여러기관과 전략적 연구 파트너십을 가지고 있는데, 그 주요 기관으로는 오클라호마대학 중규모기상 협력연구소(NOAA의 연합 연구 중의 하나), 미국 해군, 공군, 육군, 운수성, 연방항공청, 기타 대학 및 법인 등이 있다. NSSL의 연간 예산은 1600만 달러(NOAA 지원은 620만 달러)이고 연방직원 50명과 85명의 계약직 연구원으로 구성되어 있다(그림 51의 NSSL 조직도 참고). NSSL의 이러한 조직, 인원 및 예산은 미국이 수문기상 및 위험기상 분야의 글로벌 리더로서 나아가는데 중요한 기술적 뒷받침 역할을 한다.

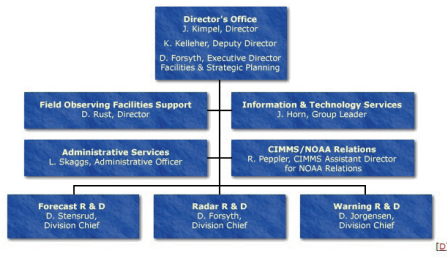
NSSL 내의 수문기상 연구 그룹(NSSL's Hydrometeorology Research Group, HMRG)은 강수의 감시, 추정, 예측 업무를 담당하고 있다. 정확한 정량적 강수 추정(quantitative precipitation estimates, QPE)와 초단기 정량적 강수 예보(very short-term quantitative precipitation forecasts, VSQPF)는 미국과 전세계의 수문관리에 핵심적인 요소이다. 미국 기상청 예보자들은 더 나은 현업적 정보 생산을 위한 니즈를 기록해 왔다. 유역(또는 강) 예보센터들은 더 정확한 QPE/VSQPF를 필요로 한다. 또한, QPE의 불확실성 및 그것이 유역 예보에 미치는 영향에 대한 더 나은 지식을 필요로 한다. 일기예보 당국은 개선된 돌발홍수 특보를 위해 위와 같은 식의 지식을 필요로 한다. NSSL의 HMRG는 이러한 이슈를 해결하기 위하여 현재

의 현업용 시스템을 개선할 수 있도록 그들의 전문성을 발휘하고 있다. 수문기상 업무와 관련하여 NSSL의 상세한 기능과 역할에 대한 내용은 <http://www.nssl.noaa.gov/>에 소개되어 있다.

수문기상 연구를 위해서 다양한 야외관측 실험연구가 수행되고 있다. 이러한 실험은 주로 호우를 유발하는 폭풍우(severe storm)의 구조와 운동학적 특성, 구름 내부의 미세물리학적(microphysical) 구조와 특성, 폭풍우의 발달 메커니즘 등에 대한 이해를 증진시키는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 첨단 기상관측용 레이더를 포함하여 항공기, 대형 풍선 등 다양한 관측장비들이 야외실험에 투입되고 있다. 대표적인 야외 관측실험에 대한 내용을 몇가지 소개하고, 수문기상 연구를 위한 이동식 관측장비에 대하여 다음 절에서 간단하게 소개하고자 한다.

TELEX(Thunderstorm Electrification and Lightning Experiment)

TELEX 실험은 주로 봄철(5월)에 이루어진다. TELEX 실험의 목적은 어떻게 번개와 기타 전기적 폭풍의 특징이 폭풍의 구조와 상층류, 강수 등에 관련되어 있는가를 밝히는 것이다. 이러한 정보는 미국 기상청이 위험한 기상에 대한 예보와 특보를 개선시키기 위하여 낙뢰관측을 사용하는데 있어서 새로운 방법을 제공해 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다. TELEX에서는 NSSL에서 루틴하게 사용되는 새로운 센서의 득을 보고 있는데 그중 하나가 WSR-88D 레이다에 강수 입자의 크기와 상태(phase)에 관한 정보를 제공해 줄 수 있는 편광측정 요소가 추가되어



Director's Office	Forecast R & D (FRDD)	Radar R & D (RRDD)	Warning R & D (WRDD)
Director Staff Jeff Kimpel Kevin Kelleher Kelly Lynn Randy Peppler Les Showell Suzanne Van Cooten	FRDD Staff Dave Stensrud Linda Foster-McGuckin Students: Craig Schwartz Mesoscale Applications (MAC) Harold Brooks Mike Coniglio Michael Douglas Jack Kain Students: Somer Erickson Richard Lam John Mejia Models & Assimilation (MAT) Dave Stensrud Meg Carr John Lewis Heather Reeves Dusty Wheatley Qin Xu Nusrat Yussouf Conrad Ziegler	RRDD Staff Doug Forsyth Dena Grose Bob Staples Doppler Radar & Remote Sensing (DRARS) Dusan Zrnica Dick Doviak Pam Heinselman Vlad Mazur Valery Melnikov Alexander Ryzhkov Terry Schuur Sebastian Torres David Warde Pengfei Zhang Students: Jelena Andric Kevin Haghi Rick Huchan Radar Engineering & Development (RED) Allen Zahrai Mark Benner John Carter Chris Curtis Igor Ivic Mike Schmidt Richard Wahkonney Realtime Applications & Display Technology (RADT) Kurt Hondl Jeff Brogden Charles Kerr Vallappa Lakshmanan Robert Toomey Software Engineering & Technology Improvement (SETI) Mike Join Ric Adams II Hoyt Burcham Eddie Forren John Krause Dave Priegnitz Dan Suppes John Thompson	WRDD Staff Dave Jorgensen Kim Elmore J.J. Gourley Tonia Rollins Greg Stumpf Katherine Willingham Students: Jesa Eringsis Zac Fleming Erica Griffin Dustin Williams Convective Weather Research (CWRC) Rodger Brown Don Burgess Don MacGorman Ted Mansell Bob Rabin Lou Wicker Jim Wood Students: Sam Dient Jeff Makowski Terra Thompson Sean Waugh Hydrometeorological Research (HMRG) Ken Howard Ami Arthur Ming Fang Carnie Langston Steve Vasiloff Jan Zhang Severe Weather Warning Applications & Technology Transfer (SWAT) Travis Smith Kristin Kuhlman Kevin Manross Kiel Ortega Arthur Witt Students: Steve Irwin Angelyn Kolodziej Tiffany Meyer Joe Young
Administrative Services (Finance) Linda Skaggs Sandra Allen Tracy Reinke Field Observing Facilities Support (FOFS) Dave Rust Sherman Fredrickson Doug Kennedy Dennis Nealson Students: Rebekah LaBar Dung Pham	Information & Technology Services (ITS) Jeff Horn Will Agent Robert Coggins Karen Cooper Vicki Farmer Steve Fletcher Paul Griffin Brett Morrow James Murrain Joan O'Bannon Brad Sagowitz Brian Schmidt Greg Trotter Public Affairs (Public Affairs) Keli Tarp Susan Cobb Daphne Thompson		

NSSL Staff Directory

Legend:
Group/Division Leader
Federal Employee
CIMMS Employee
INDUS Employee
Student Employee
Other

[그림 5] 미국 NOAA 소속의 NSSL의 조직도. 위험기상을 포함하여 수문기상과 관련된 관측, 연구, 기술 개발 등 다양한 업무를 수행하고 있다.

진 KOUN 레이더를 사용하고 있다는 것이다. 또 다른 센서로서 Oklahoma Lightning Mapping Array(OK-LMA)가 있다. The OK-LMA는 모든 종류의 낙뢰의 3차원적 구조를 연속적으로 그릴 수 있는 오클라호마 중부의 10개 관측소의 네트워크이다. 또한 TELEX 팀은 폭풍의 전기장 프로파일을 측정하기 위해 대형 풍선을 다양한 다(그림 6 참조). 전기장 프로파일은 어떻게 폭풍이 대전되며 번개의 발생에 관여하는가에 대한 정보를 과학자들에게 제공한다.

BAMEX(Bow Echo and MCV Experiment)

2003년에 실시된 BAMEX 실험의 목적은 뇌우의 복잡성에 의해 야기되는 폭풍의 발생 과정을 이해하는데 있었다. 모바일 프로젝트의 두가지 목표로, 첫째는 중규모와 폭풍규모의 과정에 대한 예측의 향상이며, 둘째로는 중규모 대류 소용돌이 형태에 대한 이해와 중규모 대류 시스템 내에서 대류의 변화와 초기 움직임에서의 역할에 대한 이해의 폭을 넓히는데 있었다. 이 프로젝트는 무인항공기를 사용하여 열역학과 환경적인 구조에 대한 대류의 복잡성에 대하여 관측하였다.

JPOLE(Joint Polarization Experiment)

NSSL은 최근 KOUN WSR-88D 레이더에 이중 편파 기능을 추가하여 업그레이드 하였다. 이는 Joint Polarization Experiment (JPOLE)의 목표는 공학설계 테스트와 KOUN WSR-88D



레이더 자료 품질 개선, 실용성 강화와 레이더 사용자의 계획 및 비용에 대한 편익 분석을 위한 정보를 수집하는데 있다. 도출된 결과는 이중편파 및 WSR-88D 네트워크 운영을 개선하는데 기여하였다.

IHOP 2002(International H2O Project)

지난 IHOP 2002에 참가한 미국, 프랑스, 독일, 네덜란드, 캐나다의 과학자들은 정확한 습도 측정 자료를 얻기 위한 프로젝트를 실시하였다. 과학자들은 NEXRAD 레이더와 NOAA의 윈드프로파일러 네트워크, 순간적인 바람과 습도를 측정하는 관측 장비를 사용하였다. 레이더, 라이더, 라디오미터를 항공기, 지상, 자동차와 트럭에 설치하여 실험을 수행하였다. 다양한 기상 예보 모델을 사용하였고 보다 나은 습도 측정을 위한 노력은 강우 예보 모델의 향상을 가져왔다. 대류에 관한 연구에는 모바일 기기가 사용되었다.

연구자들은 대기 경계층에 대한 연구를 위해 지표에서의 변동성과 공기의 습도 변동성 사이에서의 관련성에서 찾았다.

STEPS 2000(Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study)



[그림 6] 미국기상학회지(BAMS)에 게재된 NSSL 이동 풍선관측 실험의 과정. 2003년 TELEX 기간동안 중규모 대류계(MCS) 속으로 관측 장비가 탑재된 대형 풍선을 띄우기 위해 학생들이 과학자들을 돕고 있는 장면.

2000년 5~7월에 과학자들은 회전력이 높은 상층 기류를 타고 쉽게 소멸되지 않는 뇌우 및 거대세포 뇌우를 관측하는 것을 목표로 삼았다. 초기 단계의 연구자들은 거대폭풍에 초점을 두었다. 무인항공기가 구름 입자와 전기장에 대한 데이터를 얻기 위해 폭풍 속으로 투입되었다. 연구자들은 다양한 소형



연직관측시스템(mobile sounding systems)을 띄웠고, 이동성 지상관측장비 및 중규모 자동기상관측차량을 이용하여 관측을 수행하였다. 데이터는 또한 3개의 도플러레이더와 두개의 이중편광레이더, 하나의 낙뢰 맵핑시스템을 이용하여 수집되었다. 초기단계에 과학자들은 3개의 핵심지역에 관심이 있었다. 거대폭풍의 강수형태가 어떠한지? 이러한 폭풍이 전기와 낙뢰를 어떻게 생산하는지? 편광레이더가 폭풍에서의 강수총량과 강수타입을 추정하는데 어떻게 사용될 수 있는지? 등에 관하여 관심을 가졌다. 연구자들은 초기단계 동안 강수량이 적은 뇌우를 통해 시작부터 끊임없이 연직자료(sounding)를 얻었다. 프로젝트에 참여한 과학자들은 몇몇 폭풍이 “반전된” 양극 구조를 가지고 있음을 발견했다.

IPEX(Intermountain Precipitation Experiment)

IPEX 연구는 겨울 폭풍의 진화와 구조에 대한 이해의 폭을 넓히기 위해 시작되었다. 2000년 1월과 2월 동안 과학자들은 몇 개의 거대 폭풍을 포함하여 상세하게 관측하였다. 그들은 또한 전례에 없는 전하를 측정하고, 겨울 폭풍에서의 번개와 그레이트솔트 호와 산악지대 주변에서 한랭 전선의 작용을 이중 도플러 레이더를 통하여 분석하였다. 관측은 NOAA의 P-3 항공기와 NSSL 모바일 실험실에서의 대형풍선(balloons)을 사용하였다. 3개의 도플러 기상 레이더와 마이크로 웨이브 라디오미터를 유타주 북부에 배치하여 실험을 수행하였다.

IV. 수문기상 및 위험기상 관측용 장비

1. 고정 관측 시스템

다양한 고정관측 시스템들이 야외관측 실험 연구에 사용되고 있다. WSR-88D는 현장의 연구자들에게 레이더는 실시간으로 기상 정보 자료를 제공한다. 그리고 오클라호마 번개 지도 어레이(Oklahoma Lightning Mapping Array, OKLMA)는 오클라호마 대부분 지역의 번개에 대한 자료를 2차원으로 제공하며, 오클라호마의 서쪽 중앙 지역은 3차원 지도로 번개 채널을 제공한다. 번개의 위치와 현상에 대하여 천개이상의 지점이 지도에 나타난다. NSSL 과학자들은 뇌운과 낙뢰가 생성되는 과정과 토네이도와 다른 위험기상과의 관련성에 대한 연구를 수행한다. 대규모 야외 관측 프로그램에서 종종 콜로라도주의 CHILL 레이더와 같이, 부분적으로 고정된 관측장비를 만들어 사용하기도 한다. 11cm 파장의 다중-파라미터 레이더는 이동이 가능하고 기상 연구에 이용 가능한 이중편파 도플러 기상 레이더이다. 일단, 최적의 위치에 배치되면, 레이더의 범위 내에서 추가적인 데이터 범위를 제공한다. 지표 부근에서 대류권계면까지의 바람의 수평 속도와 풍향의 수직 프로파일을 관측할 수 있도록 설계되었다. NOAA Profiler Network(NPN)의 자료는 실시간으로 현업, 연구 분야, 민간 기상학자에게 배포되며, 수직 온도 프로파일을 측정하고, 생산할 수 있는 RASS(Radio Acoustic Sounding System)를 갖추고 있다. 미국 기상청은 상층 대기를 자동으로 관측하는 장비를 운영하고 있으며, 일반적으로 매시간 한번 대기를 측정 한다. 일부 주에서는 Mesonet(중규모 자동 기



상관측망)을 운영하며, 작은 규모나 중규모로 자주 발생하는 기상 현상을 관측한다. 관측기와 센서는 습도, 바람, 기압, 강우, 복사열, 토양의 온도 등을 측정한다. 오클라호마의 Mesonet은 110개 지점에서 실시간으로 관측을 수행한다.

2. 이동관측 시스템

SMART-RADARS는 홍수, 허리케인, 토네이도 등 대기의 대류와 중규모의 중요한 기상현상의 과정을 연구하기 위한 자료를 수집 한다. NSSL은 텍사스 A&M, 텍사트 테크, 오클라호마 대학과 협력하여, Shared Mobile Atmospheric Research and Teaching Radars (SMART-RADARS)를 구축하였다([그림 7] 참조). 두 개의 트럭위에 5cm 파장의 도플러 레이더를 운영하며, 토네이도와 허리케인을 자세히 관측한다. Mobile X-Band Dual-Polarization Radar는 매우 짧은 범위의 기상 현상을 관측한다. NSSL과 오클라호마 대학에 의해 새롭게 추가된 모바일 레이더는 NO-PX이며, X-밴드 이중편파 레이더이다. X-밴드 레이더는 매우 작은 입자를 감지할 수 있으며, 이중편파는 폭풍우의 미세물리학적 특성을 추가적으로 상세하게 제공한다. NO-XP 는 2008년 9월 허리케인을 감지하기 위하여 걸프 만에 배치된 바 있다. Mobile Ballooning Laboratories는 지표 온도와 상층 대기를 관측한다. NSSL에서 개발한 모바일 연구소는 지표 기상의 다양한 특성을 관측하고, 라디오존데로부터 자료를 받으며, 모든 형태의 기상현상에 대해 전문적으로 조사한다. 최근, 과학자들은 뇌우 내부의 양극 구조에 대한 증거를 발견하였다. Mobile MESONET Vehicles는 토네이도

와 기타 위험기상 등에 대해 관측한다([그림 8] 참조). 과학자들이 현장에서 폭풍우의 전체 발달단계에 대하여 사진을 찍고, 관측을 수행하며, 뇌우, 번개, 토네이도 형성에 관한 자료를 수집하기 위한 연구토론을 진행한다.

현장 코디 차량은 실시간으로 폭풍의 구조와 활동에 대하여 전달한다. 관측 지점에 대한 정보를 실시간으로 팀원에게 전달하고, 모바일 디지털 무선 네트워크를 통하여 방송한다. 900 MHz 의 안테나



[그림 7] NSSL's SMART-R mobile Doppler radars



[그림 8] Mobile MESONET



를 사용하며, 10m의 대형 안테나를 설치하며, 인터넷을 통하여 광대역 위성 링크를 통해 전송된다. NOAA P-3 항공기는 광범위하게 움직이며 자료를 수집한다. 기본적인 날씨 정보를 수집하고, NOAA P-3 연구용 무인항공기에 도플러 레이더를 장착하여 폭풍우 내부의 바람을 관측한다.

V. 맺는 말

미국의 수문기상정보에 대한 수요와 서비스 현황을 살펴본 결과 효과적인 수문기상 서비스를 위해서는 수문기상과 관련된 다양한 관측 자료가 통합적으로 운영될 필요가 있다. 또한 수문관리 및 재난 관리 등 의사결정 과정에 실질적으로 도움을 줄 수 있는 첨단 의사결정 도구로서의 수문기상 모델 개발이 필요함을 알 수 있다. 그리고 수문기상 정보의 경제적 가치를 산정하기 위한 별도의 정책 연구가 수행될 필요가 있다. 무엇보다도 양질의 수문기상 서비스를 하기 위해서는 첨단 기상레이더 등 다양한 고정 및 이동식 관측 장비를 이용한 지역적 기상 및 기후 특성에 맞는 폭풍우 관측기술의 향상과 연구개발 결과의 실용화가 반드시 선행되어야 할

필요가 있다.

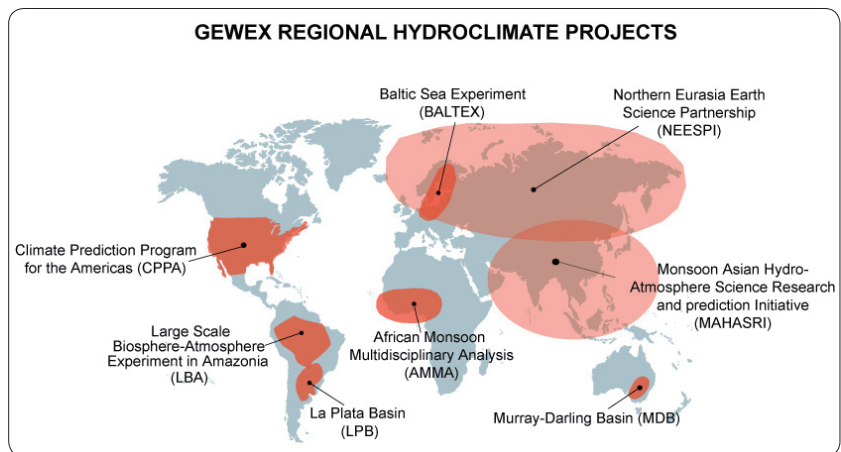
[그림 9]에는 GEWEX의 지역 수문기후 프로젝트를 나타낸 것으로서 한반도가 속한 동아시아 지역의 수문기상학 및 수문기후학 분야의 발전을 위해서 MAHASRI나 NEESPI 등 국제공동 프로젝트에 보다 적극적으로 참여할 필요가 있을 것이다.

참고문헌

NHWC(National Hydrologic Warning Council), 2002: Use and Benefits of the National Weather Service River and Flood Forecasts, May 2002.

NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), 2001: NOAA Weather Magazine, November 1, 2001, Washington, D.C.

Stallings, E.A., 1997: The Benefits of Hydrologic Forecasting, National Oceanic and Atmospheric Administration, Contract #43AANW701167, Silver Spring, Maryland.



[그림 9] GEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment)에서 주관하고 있는 세계의 각 지역 별 수문기후 프로젝트



제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기

김 용 상

기상청 수치모델관리관실 수치자료응용팀 기상사무관
yskim@kma.go.kr

I. 서론

2009년 3월 16일부터 22일까지 터키의 이스탄불에서 제5차 세계물포럼이 개최되었으며, 세계 192개국의 물과 관련된 여러분야의 사람들 총 32,000여명이 참가하여 8일동안 6개 주요주제별로 123개 세션에서 주제발표와 토론이 이루어 졌다. 우리나라에서도 한승수 국무총리를 수석대표로 기상청, 국토해양부, 외교통상부, 환경부 등 정부대표단과 관련기관, 기업, NGO 등 민간대표단 100여명이 참가하여, 관심분야별로 활발한 활동을 전개하였다. 세계물포럼은 각국정부, 국제기구, 물관련업체, NGO 및 일반시민 등 각계 각층의 사람이 한자리에 모여 21세기 국제사회에서의 물부족, 환경, 홍수피해 등의 물문제 해결을 논의하고 그 중요성을 세계에 알리기 위해 1996년 세계물위원회에 의해 창설된 대회로 매

3년마다 세계 물의 날인 3월 22일을 전후로 약 일주일에 걸쳐 개최된다.

II. 세계 물포럼 개요

1. 연혁

세계 물포럼은 세계물위원회(WWC: World Water Council)와 세계물파트너십(GWP: Global Water Partnership)이 서로다른 개인, 조직, 기구간의 대화와 협력이 이루어질 수 있도록 하기 위하여 1996년에 세계물포럼 위원회를 조직하였으며, 1997년 모로코의 마라케쉬에서 제1차 세계 물포럼이 개최되게 되었다. 제1차 세계 물포럼에는 63개국에서 500여명이 참가하여, 깨끗한 물을 공급받고 위생시설을



확보하는 것이 인간의 기본 권리라는 “마라캐쉬” 선언이 발표되었다.

제2차 세계 물포럼은 2000년에 네덜란드 헤이그에서 156개국 5,700여명이 참가하여, 빗물이용을 포함한 물관리와 관련된 27과제가 논의되었으며, 처음으로 “물안보”의 개념이 도입되어 21세기에 있어서의 물 안전보장을 목표로 한 “헤이그 선언”이 채택되었다. 또한 미래를 대비하여 전 세계인이 취해야 할 행동을 여러 측면에서 검토한 “세계 물비전”이 발표되었다.

제3차 세계물포럼은 183개국 24,000여명이 참가한 가운데 2003년 일본 교토에서 개최되었으며, 국가적 차원에서의 통합수자원관리에 대해 중점 논의되었다. 제3차 세계 물포럼에서도 지난 대회와 마찬가지로 각료선언문이 채택되었는데 그 내용으로는 주제별, 분야별 성명과 권고에 주목하여 일반정책, 수자원관리와 이익배분, 안전한 음용수와 위생, 식량과 농촌개발을 위한 물분야, 물오염 방지와 생태계 보호, 재해경감과 위험관리에 관한 내용이 포함되었다. 제3차 대회부터 당시 건설교통부를 중심으로 한 정부대표단이 파견되기 시작하였다.

제4차 세계물포럼은 2006년 멕시코의 멕시코시티에서 “지역사회 활동을 통한 전지구적인 변화”라는 주제로 전세계 148개국에서 19,000여명이 참가한 가운데 개최되었다. 이 대회에서는 성장과 개발을 위한 물, 통합 수자원 관리의 이행, 모든 사람을 위한 물관리와 위생, 식량과 환경보전을 위한 물관리 등의 주제에 대하여 논의되었다. 제4차 대회를 앞두

고 우리나라에서는 한국물포럼 준비위원회가 발족하여 체계적인 대응을 하게 되었으며, 당시 건설교통부 차관을 수석대표로 약 70여명의 정부대표단이 파견되었다. 기상청에서도 처음으로 세계물포럼에 참가하여 “한국의 홍수관리”라는 주제로 건설교통부와 공동으로 발표하였으며, 건설교통부, 환경부, 농림부와 공동으로 정부공동 부스에 세계 최초의 우량계인 측우기 모형을 전시하고 디지털예보 기술을 홍보하였다.

2. 제5차 세계물포럼의 주요 내용

제5차 세계물포럼은 “물분야에서의 통합 및 격차 해소”(Bridging Divides for Water)라는 주제[그림 1]로 동서양 문명이 만나는 터키 이스탄불에서 3월 16일부터 22일까지 전세계 192개국에서 32,000여명이 참가한 가운데 성황리에 개최되었다. 주요 행사로는



[그림 1] 제5차 세계물포럼의 로고와 핵심 테마



[표 1] 제5차 세계 물포럼 프로그램

	08:30-10:30	11:00-13:00	14:30-16:30	17:00-19:00	20:30-	전일
3.16 (월)	개막식		국가수반 회의 주제별 회의 개최	세계 물 개발 보고서	청소년포럼 문화행사	물 엑 스 포
3.17 (화)	미주 지역회의		유럽 지역회의		ECC 2010 이벤트	
	물과 재해 패널		재정 패널			
	OECD 재정보고서	물·재정위기 전문가 패널	물 관리 2020 세션			
	주제1-기후변화 및 위기관리 세션		내륙수송 세션			
	주제4-거버넌스와 관리 세션		주제1-기후변화 및 위기관리 세션			
	주제4-거버넌스와 관리 세션		주제4-거버넌스와 관리 세션			
3.18 (수)	의원 회의		의원 회의		터키 및 주변국 이벤트	
	지방당국 회의		지방당국 회의			
	아프리카 지역회의		터키 및 주변국 지역회의			
	물,식량,에너지 패널	위생 패널	멕시코-이스탄불 세션			
	주제1-기후변화 및 위기관리 세션		주제2-인류발전과 MDGs달성 세션			
	주제5-재정 세션		주제1-기후변화 및 위기관리 세션			
	주제4-거버넌스와 관리 세션		주제5-재정 세션			
3.19 (목)	의원 및 지방당국 회의		의원 회의		물 엑 스 포	
	지중해 지역회의		지방당국 회의			
	적응패널(지역별)		아랍 지역회의			
	주제2-인류발전과 MDGs달성 세션		주제4-종합 주제1-기후변화 및 위기관리 세션	주제1-종합 주제5-재정 세션		
	주제4-거버넌스와 관리 세션		주제2-인류발전과 MDGs달성 세션			
	주제5-재정 세션					
3.20 (금)	아시아-태평양 지역회의		주제3-수자원 보호·관리 세션		청소년 포럼 폐막식	
	주제3-수자원 보호·관리 세션		주제6-교육,지식,역량강화 세션			
	주제6-교육,지식,역량강화 세션	각료급 회의 개회식		적응 패널(고위급)		
	주제5-종합	3자 정치적 토론				
3.21 (토)	주제3-수자원 보호·관리 세션		주제3-종합		ECC 2010 이벤트	
	주제6-교육,지식,역량강화 세션		주제6-종합			
	각료급 원탁회의(물과 적응)		각료급 원탁회의			
	주제2-종합	3 방향 지역토론				
3.22 (일)	각료급 회의 폐회식		폐막식			
	UN 물의 날 행사					



[표 1]에서 보는 바와같이 국가수반회의, 주제별 세션, 지역별세션, 장관급 회의, 물엑스포 및 축제, Water Prize 등 다채롭게 진행되었으며, [표 2]에 각 세션별 논의주제를 나타내었다. 100여명으로 구성된 우리 정부대표단은 각 분야별 세션에 참여하여 세계의 물문제에 있어서 우리의 입장을 개진하고 관련 동향을 파악하였으며, 각국의 다양한 물관련 이 해당사자간의 상호교류 및 협력을 증진시켰다.

1) 주제별 세션

[표 2]와 같이 “Bridging Divides for Water” 라는 주제 아래 2개의 이슈(issues), 6개 테마(Themes), 23개 주제(Topics), 123개의 세션(Secessions)으로 구성되어 분야별 전문가에 의한 심도있는 논의가 진행되었다.

2) 지역별 세션

5개 대륙별(아프리카, 아메리카, 유럽, 아시아·태평양, 터키·주변국)로 구분하여 해당지역의 공통된 물

[표 2] 제 5차 세계물포럼의 이슈 및 주제

최상위주제	이슈	테마	세부주제
물분야의 격차해소	지속가능한 개발을 위한 물공급	지구적 기후변화와 위기관리	<ul style="list-style-type: none"> ○ 기후변화 적응 ○ 토지이용 변화, 인간주거와 물환경 변화 ○ 재해 경감
		인간 개발과 새천년 개발 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모든 사람을 위한 물과 위생 - 적절한 인프라 - 단기적인 공중위생 ○ 에너지를 위한 물, 물을 위한 에너지 ○ 빈곤과 배고픔을 종식시키기 위한 물과 식량 ○ 다목적 물 이용
		수자원 관리와 보호 그리고 인간과 환경 의 수요에 부응하는 고급 시스템	<ul style="list-style-type: none"> ○ 유역관리와 국경간 수자원 협력 ○ 농업, 에너지 그리고 도시수요를 만족시키기 위한 적절한 수자원 시설 구축 ○ 자연적 생태 시스템의 보존 ○ 지표, 지하 그리고 빗물의 관리와 보호
	발전을 위한 메커니즘 확립	거버넌스와 관리	<ul style="list-style-type: none"> ○ 물과 위생을 공급받을 수 있는 권리 강화 ○ 제도적 접근을 통한 성과 향상 ○ 이해 당사자간의 윤리, 투명성, 권한위임 ○ 효과적 수자원관리를 위한제도적 장치
		재정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지역 물관리 권한과 시스템을 위한 지속가능한 방안 ○ 공정하고 지속가능한 물값 전략 ○ 가난을 극복하는 정책과 전략
		교육, 지식, 그리고 역량 강화	<ul style="list-style-type: none"> ○ 교육과 역량 강화 전략 ○ 물과학과 기술 :21세기를 위한 적절하고 혁신적인 해결 방안 ○ 물 섹터의 강화를 위한 전문 네트워크의 강화



문제를 도출하고 지역적 특성을 고려한 물문제 해결 방안이 제시되었다.

3) 정치적 과정

물문제를 주요 국제정치적 문제로 부각시키기 위하여 각국 수반, 정부, 지자체, 국회의원 등의 논의의 장이 마련되었으며, 주요 회의 내용은 다음과 같다.

- 국가정상회의(3.16) : 5차 포럼에서 최초 시도된 회의로서 약 15개국 세계정상이 참여하여, 물과 관련된 일반적인 원칙과 가치를 담은 “호소문 (Appeal)”이 채택되었다.
- 장관급 회의(3.20~3.22) : 세계 각국의 물관리 담당부처 장관이 참여하는 정부간 회의로서 모든 국가에 참여가 개방되어 있으며, 구속력이 없는 “장관회의 선언(Ministerial Declaration)” 및 “아젠다(Agenda)”가 채택되었다.

4) 세계 물박람회 등

본 대회에는 각국의 물관련 부처, 기업, 연구기관, NGO 등이 전시부스를 설치하여 물관리 정책홍보 및 물분야 선진 기술 소개, 다양한 정보 교환, 상호 협력강화 등을 목적으로 800개 부스 규모의 세계 물박람회가 동시에 개최되었다. 우리나라는 기상청을 포함한 정부 4개 부처와 지자체 그리고 관련기관 등 총 12개 기관이 22개 부스에 공동으로 한국관(Korea Pavillion)이라는 이름으로 전시관을 운영하였다[그림 2].

한국관 운영을 통해 국내 선진 수자원관리 정책 및 연구성과, 최신기술 등을 홍보함으로써 국가위상을 제고하고 미래 물산업의 해외 진출을 지원하는 한편, 2015년 제7차 세계 물포럼의 한국유치를 적극 홍보하였다. 기상청에서는 수문관련 업무 홍보 판넬 [그림 3]을 통해 우리의 선진 강수량 예보기술 및 한반도 기후변화 시나리오에 따른 향후 한반도 물부족에 대비하는 내용 등을 소개하였다.



[그림 2] 한국관내 부스 참여 기관 및 한국관 전경



물엑스포에서는 물과 관련된 여러 산업이 소개되었으며, 깨끗한 물에 대한 수요가 늘어나면서 21세기 필수적인 자원으로 물이 새롭게 등장할 것이며, 더불어 물산업 자체도 유망 산업으로 떠오르게 될 것이라고 전망하였다. 또한 선진국의 물산업에 의한 이익이 개도국에도 분배되어 물격정이 없는 세상을 만들자는 공감대가 이루어 졌다. 기타 청소년 포럼 등 물축제에서는 물과 관련된 다양한 주제의 사회, 문화, 교육 행사와 단막영화, 놀이문화, 공연, 사진 전시, 종교의식 등의 다채로운 행사가 개최되었다.

III. 정부대표단의 주요 활동

1. 물과 재해 고위급 전문가 회의

한승수 국무총리는 본 회의의 의장으로서 준비회의를 주재하였고, 전체회의에서 기조연설을 통해 물안전 및 기후변화 대응 관련 국가적·지역적·국제적 정책 수립을 위한 가이드라인으로서 6개 긴급행동계획*을 명시한 “Water and Disaster Action Plan” 합의를 도출하였다. Action Plan의 효과적 이행을 위한 국가적·지역적·국제적 차원의 조치 필요성을 강조하고, 유엔 조직의 틀 속에서 관련기구 설립을 제의함으로써 향후 세계 물포럼에서의 토의와 국제사회 물 논의과정에서 선도그룹으로서의 역할을 확보하였다.

6개 긴급행동 이행계획은 ① 재난발생 이전의 대응태세 정립, ② 조기 예측·통보·경보·소개 체제 확

립, ③ 재난 피해경감 및 기후변화 적응을 국가개발 전략에 통합, ④ 재난대응체제 개선, ⑤ 재난발생시 안전한 식수·위생시설 신속 제공 및 ⑥ 물로 인한 재해대응을 위한 국제협력 실행으로 구성된다.

2. 국가원수/정부수반회의

국가원수/정부수반회의는 물관련 선언문 채택을 통해 모든 나라가 물문제에 대처하기 위한 전지구적 차원의 방안을 발전시키고 그 이행을 위해 전세계가 협력할 것을 제안하였다. 이 회의에서 한승수 총리는 물 관련 재해 대응 강화를 위한 국제사회의 협력 제고의 필요성을 강조하고, 저탄소 녹색성장정책과 녹색 뉴딜계획에 따른 4대강 살리기 등 지속가능 발전을 위한 우리나라의 수자원정책을 소개하였으며, 2015년 개최되는 제7차 세계 물포럼의 한국 유치 의사를 표명하였다.

3. 장관급 회의

정부대표단은 또한 장관급 회의에 참석하여 우리나라 기후변화 적응정책과 녹색뉴딜 정책을 홍보하고 참석자의 지지를 받았다. 특히 “물과 기후변화와의 연결(Bridging water and climate issue)”을 주제로 한 장관급 원탁회의에 주요 연설국가로 참석하여 “전 세계 경제위기 상황 속에서 기후변화로 인한 물 적응대책을 추진하기 위해서는 무엇보다 한국 녹색뉴딜 정책과 같이 정치적 의지가 가장 중요하며 그 외에도 각국의 능력개발과 기후변화 회의에 물 포럼 결과 전달이 필요함”을 역설하여, 참석한 대부분의 대표들의 동의를 이끌어 내었다. 한편 장



Water-related Activities at KMA

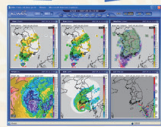
Korea Meteorological Administration(KMA) was founded in 1904 to provide long- and short-range weather forecasts and warnings by observing and analyzing meteorological phenomena on the ground, in the ocean, and in the atmosphere, as well as earthquake events. As regards water resources management, KMA's role consists of providing accurate rainfall observation and forecast information to the organizations concerned.

Observation

Cheugugi (the oldest rain gauge in the world)
In 1441 (in the 23rd year of King Sejong's reign of the Chosun Dynasty), Hojo (the ministry of finance) proposed the installation of a rain gauge, enacted a law prescribing the measurement of rainfall, manufactured rain gauges, and installed them in the counties of each province. The Korean Rain Gauge was the first of its kind in the world, predating its Italian counterpart (Benedetto Castelli's) by 198 years.

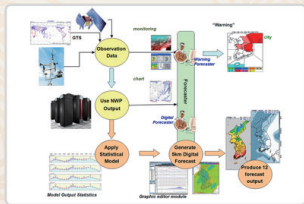
Weather Radar
KMA has installed doppler radars at 11 sites. The radar output greatly contributes to short-range forecast by enabling monitoring and tracking of the early stages of torrential rains, etc.

Automatic Weather Station (AWS)
KMA operates approximately 540 AWSs to monitor small-scale severe weather phenomena such as heavy rainfall.



Automatic Local Weather Information System (ALWAIS)
ALWAIS was set up for monitoring nationwide weather conditions in real time and ensuring appropriate response against severe weather. This system collects and analyzes data from 540 AWSs and radar data every minute.

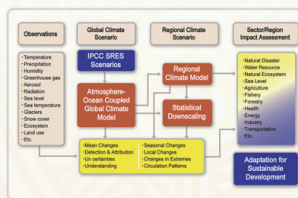
Digital Forecast



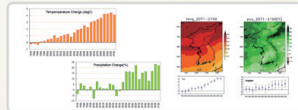
Digital weather forecast has been served to the public since October 30 2008.

- Around the Korean peninsula in 5km resolution
- With updates every 3 hours up to 48 hours
- For 12 weather forecast elements
- Via the internet in various formats

Climate Change

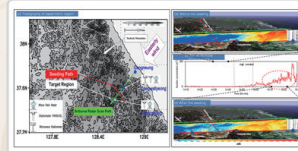


The Schematic Diagram of Climate Change Scenario
KMA has been producing future climate scenarios using a coupled atmosphere-ocean model, and these climate scenarios are distributed to all relevant agencies, each of which users them according to its needs.



Projection Temperature and Precipitation in Korea
By the end of the 21st century, the annual mean temperature and rainfall amount in Korea will increase by 4 degrees and 17%, respectively according to the regional climate change scenario based on IPCC SRES A1B.

Weather Modification Research



Snow Enhancement during the winter

- Airborne target (Yangpyeong) snow enhancement experiments
- Validation of the seeding effect by disdrometer and airborne radar
- Enhanced airborne radar reflectivity is observed from the seeding path

KMA supports sustainable development and management of water resources in Korea through accurate observation and forecast of precipitation.



[그림 3] 기상청 수문업무 소개 홍보 판넬



관급 회의에서는 지속가능한 발전을 위해 기후변화, 도시화, 인구증가와 이동 등 전 세계적 변화에 대응하기 위한 물 안보, 깨끗한 물과 위생 서비스 증진, 생태계 보전 등을 주요 골자로 하는 “장관 선언문 (Ministerial Statement)”과 “정책 지침서(Istanbul Guidance)”가 채택되었다.

4. 기타 활동

정부 대표단은 본 대회의 제1주제인 “기후변화와 위기관리”와 관련하여 “기후변화로 인한 물관련 위기관리”를 주제로 세계기상기구와 공동 세션을 주관하였다. 국토해양부 차관의 기조연설에서 기후변화로 인한 위기관리의 중요성 및 새로운 패러다임 정립의 필요성을 역설하였고 “이상홍수에 대비한 수공구조물의 설계방안” 및 “첨단 기술을 적용한 홍수에 보시스템”에 대한 국내사례가 중국과 일본이 주관하는 세션에서 각각 발표되었다.

아시아·태평양 지역 각료회의에서는 “물안보 확보”를 주제로 회의가 개최되었으며, 아·태 지역 40여국의 장관을 초청하여 각국의 물문제 및 물안보 확보 방안에 대한 발표 및 패널 토의에서 물환경이 취약한 아시아의 현실을 극복하기 위해 아시아 각국의 정책개발, 능력개발, 지식공유, 지역 모니터링 기반구축 방안 등의 논의를 진행하고 “아·태 지역 보고서”를 발표하였다.

IV. 맺음말

세계 192개국에서 32,000여명이 참석한 제5차 세계 물포럼에서 세계 각국의 수자원 정책과 현황을 파악할 수 있었으며, 기후변화가 가속화될 수록 물 자원 부족 문제가 심각해 지리라는 공감대가 전 참석자에게 형성되었다. 세계 물포럼은 1997년 모로



[그림 4] “물과재해 패널회의(3.17)”에서의 국무총리 기조연설 및 “위생 패널회의(3.18)”에서의 환경부 차관 주제발표



코의 마라케쉬에서 63개국 500여명의 참가로 시작되었으나 이번 제5차 세계 물포럼에는 참가자의 수가 기하급수적으로 늘어나 미래의 물부족 현상에 여러분야에서 대처하고자 하는 높은 의지와 관심을 보여 주었다.

3월 22일 17회 세계 물의날에 진행된 제5차 세계 물포럼 폐막식에서 참가국 대부분은 수자원의 중요성에 공감하며 가뭄과 홍수에 대비하고, 깨끗한 물을 확보하기 위해 협력해 나갈 것을 결의하였다. 이는 21세기에 깨끗한 물을 보존한 국가는 20세기 산유국이 석유의 힘으로 누렸던 강력한 영향력을 전세계에 행사할 수 있을 것이라는 데 대부분의 참가자들은 동감하였으며, 성명을 통해 “전 세계가 인구증가, 도시화, 기후변화, 사막화, 가뭄, 지층붕괴, 경제와 식습관 변화 등 빠르고 전례없는 변화에 직면해 있다”고 지적하였으며, 이에 대한 공동대응 및 협력

을 결의하였다.

대회 기간중 대부분의 회의나 발표에서 기후변화가 화두에 오를 정도로 미래 물문제에 있어서 기후변화 문제의 중요성이 강조되었다. 기상청은 물(강수) 예측 및 기후변화시나리오 생산의 국내 유일한 기관으로서 향후 국내·외 물관련 회의 등에서 주도적 역할을 수행하게 될 것으로 생각되며, 이에 대한 대비에 만전을 기해야 할 것이다.

마지막으로 2015년 제7차 세계 물포럼이 우리나라에서 개최되기를 희망하며, 대회 유치가 결정된다면 단계적 계획과 실행을 통해 성공적이고 선진화된 행사가 되도록 범 정부적으로 준비를 해야 할 것이며, 기후변화와 물부족이 핵심주제가 될 세계 물포럼에서 기상청의 역할이 더욱 커질 것으로 기대한다.

『기상기술정책』 투고 안내

투고방법

1. 본 정책지는 기상기술 분야와 관련된 정책적 이슈나 최신 기술정보 동향을 다룬 글을 게재하며, 다른 간행물이나 단행본에서 발표되지 않은 것이어야 한다.
2. 원고의 특성에 따라 다음과 같은 5종류로 분류된다.
(1) 칼럼 (2) 정책초점 (3) 논단 (4) 해외기술동향 (5) 뉴스 포커스
3. 본 정책지는 연 4회(3월, 6월, 9월, 12월) 발간되며, 원고는 수시로 접수한다.
4. 원고를 투고할 때는 투고신청서, 인쇄된 원고 2부, 그림과 표를 포함한 원본의 내용이 담긴 파일(hwp 또는 doc)을 제출하며, 일단 제출된 원고는 반환하지 않는다. 원고접수는 E-mail을 통해서도 가능하다.

원고심사

1. 원고는 편집위원회의 검토를 통하여 게재여부를 결정한다.

원고작성 요령

1. 원고의 분량은 A4용지 10매 내외(단, 칼럼은 A4용지 3~5매 분량)로 다음의 양식에 따라 작성한다.
 - 1) 워드프로세서는 ‘아래한글’ 또는 ‘MS Word’ 사용
 - 2) 글꼴 : 신명조, 글자크기 : 본문 11pt, 표·그림 10pt
 - 3) 줄간격 : 160%
2. 원고는 국문 또는 영문으로 작성하되, 인명, 지명, 잡지명과 같이 어의가 혼동되기 쉬운 명칭은 영문 또는 한자를 혼용할 수 있다. 학술용어 및 물질명은 가능한 한 국문으로 표기한 후, 영문 또는 한문으로 삽입하여 표기한다. 숫자 및 단위의 표기는 SI규정에 따르며, 복합단위의 경우는 윗 첨자로 표시한다.
3. 원고 첫 페이지에 제목, 저자명, 소속, 직위, E-mail등을 명기하고, 저자가 다수일 경우 제1저자를 맨 위에 기입하고, 나머지 저자는 그 아래에 순서대로 표시한다.
4. 원고의 계층을 나타내는 단락의 기호체계는 I, 1, 1), (1), ①의 순서를 따른다.
5. 표와 그림은 본문의 삽입위치에 기재한다. 표와 그림의 제목은 각각 원고 전편을 통하여 일련번호를 매겨 그림은 아래쪽, 표는 위쪽에 표기하며, 자료의 출처는 아랫부분에 밝힌다.
예) [표 1] [표 2]...[그림 1] [그림 2]

※ 출처:

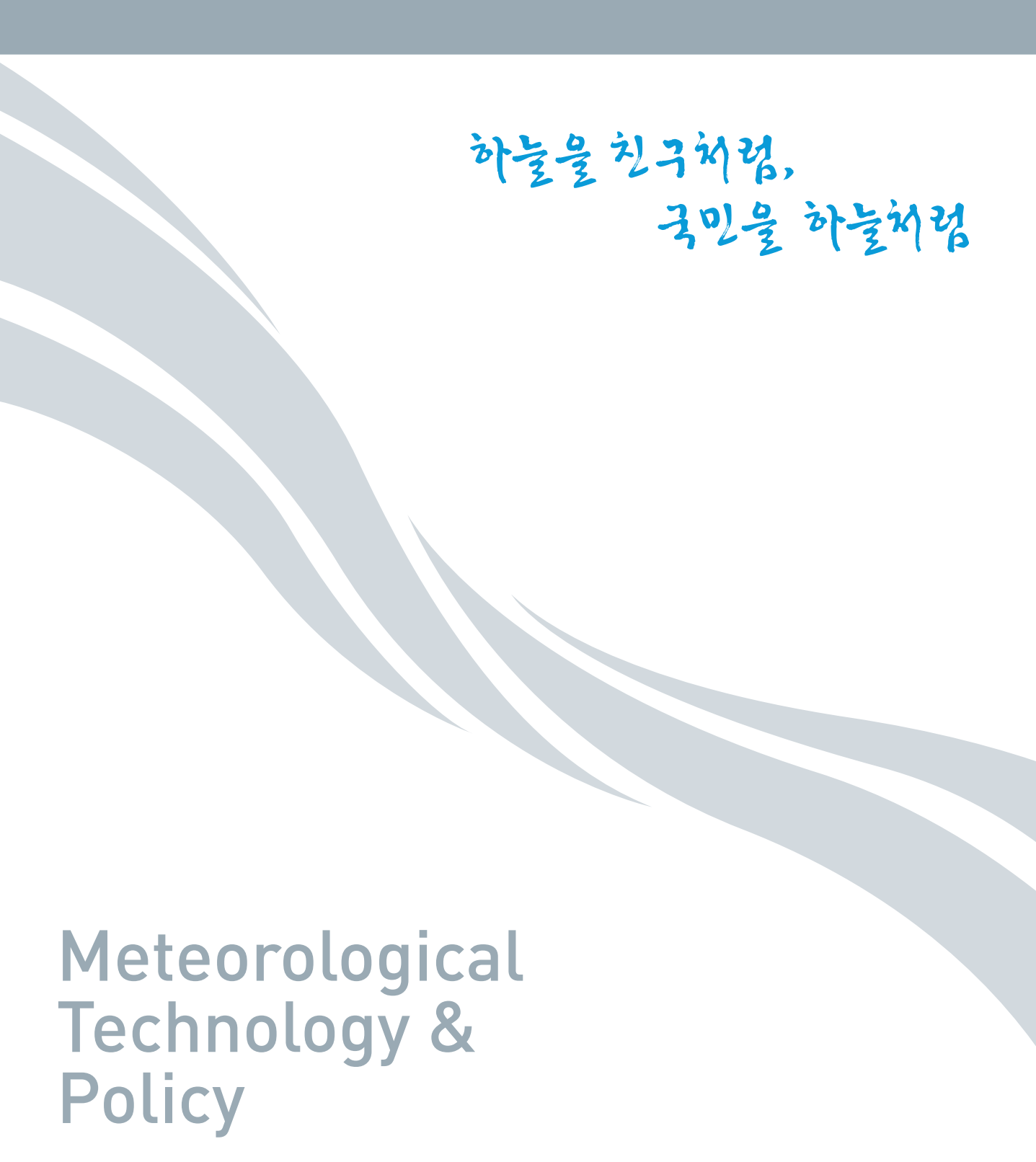
6. 참고문헌

1) 참고문헌 표기 양식

- 참고문헌(reference)은 본문의 말미에 첨부하되 국내문헌(가나다 순), 외국문헌(알파벳 순)의 순서로 정리한다.
- 저자가 3인 이상일 경우, '등' 또는 'et al.'을 사용한다.
- 제1 저자가 반복되는 경우 밑줄(_)로 표시하여 작성한다.

2) 참고문헌 작성 양식

- 단행본 : 저자, 출판년도: 서명(영문은 이탤릭체). 출판사, 총 페이지 수.
(예) 홍성길, 1983: 기상분석과 일기예보. 교학연구소, 521pp.
Sutton, O.G., 1953: Micrometeorology. McGraw-Hill Book Co., 333pp.
- 학술논문 : 저자, 출판년도: 논문명. 게재지(영문은 이탤릭체), 권(호), 수록면.
(예) 허창희, 2006: 서울에서 1954-2005년 동안 관측된 설날 귀성에 따른 일교차의 변화. 대기, 16(1), 49-53.
Seinfeld, J., et al., 2004: ACE-Asia: Regional climatic and atmospheric chemical effects of Asian dust and pollution. Bull. Amer. Meteor. Soc., 5(3), 367-380.
- 학술회의(또는 세미나) 발표논문 : 저자, 발표년도: 논문명, 프로시딩명(영문은 이탤릭체), 수록면.
(예) 신경섭, 2005: 기상청 디지털예보 개발 및 운영계획. 한국기상학회 봄철 학술대회 논문집, 2-5.
Song, I.-S., and H.-Y. Chun, 2005: Impacts of convectively forced internal gravity waves in Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM). Proceedings of the Spring Meeting of the Korean Meteorological Society, 58-59.
- 인터넷자료 : 웹 페이지 주소
(예) <http://www.kma.go.kr/>



하늘을 친구처럼,
국민을 하늘처럼

Meteorological Technology & Policy

Volume 2, Number 2

서울시 동작구 기상청길 45
Tel. 02-6712-0235 / Fax. 02-849-0668
<http://www.kma.go.kr>