

기상기술정책

METEOROLOGICAL
TECHNOLOGY &
POLICY



"도시기상관측 선진화방안"

발간사

- 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.

칼럼

- 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래
- 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안
- 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안
- 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계
- 도시 기상 관측 연구 현황

정책초점

- 도시기상 관측 선진화방안 연구

2011.12



기상청 Korea
Meteorological
Administration

『기상기술정책』

제4권 제2호(통권 제14호)

2011년 12월 30일 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 : 조석준

편집기획 : 국립기상연구소 정책연구과

편집위원장 : 권원태

편집위원 : 김백조, 김성균, 조천호, 서명석,

전용수, 최영진, 김세원

편집간사 : 이영곤, 박소연

발행처

주소 : (156-720) 서울시 동작구 여의대방로16길61 기상청

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

E-mail : ni_pol@kma.go.kr

인쇄 : 미래미디어

Contents



"도시기상관측 선진화방안"

발간사

- | | |
|------------------------------|---|
| • 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다. / 조석준 | 1 |
|------------------------------|---|

칼럼

- | | |
|---|----|
| • 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래 / 최광용 | 6 |
| • 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안 / 박만규 · 이석민 | 19 |
| • 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안 / 김해동 | 31 |
| • 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계 / 이순환 | 43 |
| • 도시 기상 관측 연구 현황 / 박영산 | 51 |

정책초점

- | | |
|---------------------------|----|
| • 도시기상 관측 선진화 방안 연구 / 이영곤 | 64 |
|---------------------------|----|

도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.

조 석 준
기상청장



1. 도시발전과 기상

유엔에 따르면 세계 인구가 2007년과 2008년 사이에 처음으로 시골보다 도시에 더 많이 거주하고 세계 인구의 50% 이상이 도시지역에 살고 있는 것으로 조사되었다. 또한 도시인구의 증가가 대부분 저개발국들을 중심으로 자연적인 인구 증가와 농촌에서 도시로의 이주 때문에 나타날 것으로 전망하였다. 이러한 인구이동은 인구 구성원 간 상호 연관성과 다양성을 반영함으로써 도시의 삶과 생계의 변화를 가져오고 국가 경제에 활발한 기여를 한다. 그러나 도시의 팽창과 토지의 고밀도 이용으로 도시 내 제한된 지역에 인구가 밀집되고, 인공구조물이 수평·수직적으로 중첩됨에 따라 도시지역의 재해가 복합재난으로 발전할 가능성이 높아지고 있다. 또한 대규모 도시개발에 따른 자연환경 개조로 호우, 저지대 또는 급경사지의 도시개발, 지표면 포장에 의한 우수유출속도의 변화, 침수 수위 이하의 지하공간개발 등으로 도시지역의 재해취약성은 증폭되고 있으며, 지금까지의 전통적인 재해 취약 공

간만이 아니라 새로운 도시공간들이 재해 취약지역으로 편입되고 있는 실정이다.

기상청이 1973년부터 기후값을 산출하는 전국 60개 지점에서 관측된 일일 총 누적강수량이 80 mm 이상인 ‘집중호우’ 일수를 분석한 결과 과거 80년대에 평균 2.5일에서 최근 20년간(‘91~’09년)은 평균 2.9일로 다소 증가하는 것으로 나타났다. 최근 여러 연구결과에서 집중호우의 빈도와 강도가 기후변화로 인해 더욱 커질 것이라는 전망에 따라 이에 대한 대책마련이 매우 시급하다. 특히 도시지역은 복잡하고 밀집된 인프라들로 인해 홍수와 폭설이 발생하였을 경우 교외에 비해 인적, 물적 피해가 훨씬 크고 복구도 여러 장애요인들로 인해 더 지연될 수 있다. 이처럼 도시지역의 기상재해로 인한 피해가 과거에 비해 더욱 커질 수 있다는 우려 속에서 이에 대응할 수 있는 방안 마련을 위하여 도시의 상세하고 정확한 기상 정보의 수요가 어느 때보다 높아지고 있다.

II. 도시기상의 중요성

도시에는 많은 가옥과 건축물들이 복잡하게 들어서고 땅 표면이 콘크리트나 아스팔트로 덮이는 등 복잡한 지면 구조로 시골과 교외에 비해 공기의 흐름에 많은 왜곡이 발생한다. 여기에 도시 거주민들이 많은 연료를 사용함으로써 발생하는 인공 열이나 대기오염 물질들의 배출은 도시만의 독특한 기상 또는 기후 현상을 유발한다. 장기간 관측된 기상자료로부터 산출된 도시기후의 특징은 기온이 높고(도시열섬), 습도가 낮으며 바람이 약하고 안개가 발생하는 날이 많으며(도시안개), 강수량이 다소 증가한다. 봄·가을에 주로 발생하는 안개와 여름철 폭염이 국민들의 건강과 생활에 많은 영향을 주지만 여름철 장마기간이나 태풍의 영향으로 인한 집중호우가 더 많은 인명과 재산상의 피해를 유발한다. 특히 여름철 집중호우는 도시 특유의 강수 증가 메커니즘과 결합하여 서울과 같은 대도시의 경우 지역에 따라 강수량의 편차가 매우 클 수 있다. 국지성 집중호우로 인한 대표적인 피해사례가 2011년 7월 27일 40여명 이상의 사망자를 유발한 우면산 산사태이다. 이날 오전 8시 40분 자동기상관측장비(AWS)에서 관측된 1시간 누적강수량이 강북지역의 경우 10mm 미만인데 반해 강남지역은 70mm 이상을 기록하였다. 현재 기상청에서 제공되고 있는 일기예보는 매 3시간마다 5km 격자공간에 대한 정보로서 일상생활에 대한 서비스 수요를 충족시키는 정도이다. 따라서 도심지에서 국지적으로 발생하는 집중호우를 보다 정확하고 신속하게 예·경보하기 위해서는 1km 범위에 1시간 이내의 예보가 가능한 관측기반과 기술을 갖추어야 한다.

도시기상은 방재 외에도 시민들의 쾌적한 삶을 유지할

수 있도록 친환경 도시 관리를 하는데 있어 기상자료를 기반으로 한 기후 정보의 중요성이 점차 높아지고 있다. 도시화가 전 지구적으로 진행되는 가운데 세계 인구의 50% 이상이 거주하는 도시가 전체 에너지 소비의 약 60~80%를 차지하고 있기 때문에 기후변화 대응에서 중요한 역할을 한다. 기존에 구축된 도시 인프라는 극심한 기상·기후 현상에 대응하도록 설계되어 있지 못한 실정으로 폭염과 한파, 폭설 등에 효율적으로 대처하지 못하고 냉·난방을 위한 많은 에너지 소비와 교통정체 등 문제를 야기한다. 이에 정부는 2011년 8월 9일 「국토계획법」 개정안을 국무회의에서 통과시킴으로써 광역도시계획과 도시 기본계획, 도시관리계획 수립 시 기후변화 대응 및 풍수해저감 등을 반드시 고려토록 수립기준을 보완할 예정이다. 개정 법안이 시행될 경우 도시 내 대규모 개발 사업에는 반드시 기상·기후영향평가가 포함되어야 하며, 이에 따라 기상관측 자료의 수요가 급증하고 더욱 상세하고 다양한 정보 생산의 요구가 늘어나고 있다.

III. 미래 도시기상 업무

산업이 고도화되고 기술이 더욱 발전할수록 도시지역의 사회·경제적 인프라는 더욱 복잡해지고 집적화된다. 따라서 집중호우와 태풍에 의한 홍수와 강풍, 폭설에 따른 교통, 물류마비 등에 의한 피해는 과거에 비해 더욱 커질 것이다. 게다가 도시뿐만 아니라 국가 사회·경제에 큰 피해를 주는 재해기상 현상이 기후변화에 따라 더욱 빈번해지고 강도가 커질 것이라는 전망이 정설로 받아들여짐으로써 이에 대한 대비를 조속히 강구해야 한다. 그러나 현재 기상청에서 제공하고 있는 도시기상 정보만으로는 지방자치단체의 비

전문 이해관계자들이 계획 과정에서 기후를 고려하기에는 현실적으로 불가능하다. 특히, 도시계획이나 도시 관리를 위해 활용하기에는 정보 제공의 유형에도 한계가 있다.

기상청은 도시기상·기후와 관련된 다양한 수요에 능동적으로 대처하고 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 고품질의 자료서비스를 위한 도시기상 관측망의 구축과 관측기술을 확보하기 위하여 지속적인 노력을 해오고 있다. 현재 기상청을 포함하여 타 부처와 지자체에서 운영하고 있는 기상관측 장비를 통합·운영하고 있다. 앞으로는 지상과 고층기상관측장비, 수직측풍장비, 기상위성, 기상레이더 등 서로 다른 장비에서 생산된 자료를 통합하여 새로운 3차원 관측 자료를 생산하고 분석할 수 있는 체계를 구축할 것이다. 또한 첨단 과학기술을 기반으로 도시지역의 기상관측 역량을 강화하기 위하여 미소규모(나노기상)의 도시기상 관측 유닛을 개발함으로써 고밀도 기상·환경 감시자료 생산 및 처리기반을 확보할 예정이다. 미래 사회적 요구에 대응하는 응용기상관측 기술을 고도화하기 위하여 도시의 고밀화, 수직화에 따른 기상영향평가 관측

체계를 설계·구축하고, 응용 및 화학기상 예측을 위한 관측요소를 확대하며, 소형 첨단 기상관측센서를 생활공간 곳곳에 설치·관측하는 셀프-모니터링 관측 체계의 구축과 미래 자동차 기술에 통신, 센서기술 등 관련기술이 융·복합된 스마트하이웨이 기상관측정보 기술을 개발할 것이다.

도시기상 관측은 미래의 기상관련 재난을 사전에 예방하고 그 피해를 최소화할 수 있으며 시민들이 보다 쾌적하고 풍요로운 삶을 누릴 수 있도록 하는데 중요한 역할을 한다. 기상청은 도시지역의 기상 관측을 지속적으로 수행함과 더불어 생산된 자료들이 도시 관리와 정책결정에 보다 활발하게 이용될 수 있도록 관련 기술개발과 정보제공에 더욱 노력할 것이다. 또한 선진국에 걸맞는 맞춤형 도시기상 서비스의 고도화와 다양한 첨단 기술이 융·복합된 정보제공 체계를 구축할 것이다. 이를 통하여 국민의 다수가 거주하고 있는 도시지역의 재난 및 미래의 위협요소에 선제적으로 대응하고 국민들이 풍요롭고 쾌적한 도시 삶을 영유하는데 있어 기상청이 핵심적인 역할을 담당할 것으로 기대한다.

칼럼

도시기후 연구의 과거, 현재, 미래

| 최광용

기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안

| 박민규 · 이석민

도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안

| 김해동

수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계

| 이순환

도시 기상 관측 연구 현황

| 박영산

도시기후 연구의 과거, 현재, 미래

최 광 용

제주대학교 사범대학 사회교육과 지리교육전공 교수
tribute@hanmail.net

1. 서론

전 세계 인류의 50% 이상이 현재 도시에 거주하고 있으며, 우리나라의 경우에도 절반에 해당하는 인구가 서울 중심의 수도권에 거주하고 있다. 서울은 조선시대 도읍이 되면서 인구가 모여들기 시작하였고, 일제시대를 거쳐 광복에 이르기까지 경제의 중심지가 되었다. 이후 1950년 한국전쟁 동안 모든 도시구조가 파괴되었으나 1960년대 후반부터 경제개발계획이 수행되면서 점차 이촌향도 현상이 심화되어 그 규모가 빠르게 성장하기 시작하였다. 인구의 도시 집중화 이후 1980년대에는 인간의 의식주 생활과 생지화학적 측면에서 대기오염, 수질오염 등 도시환경문제가 발생하여 이를 해결하기 위한 다양한 연구와 정책들이 제시되었다.

1990년대 도시지역의 대기오염과 수질오염 문제가 안정화 단계에 접어들면서 화석연료 사용과 관련된 도심의 열환경에 대한 문제가 가장 주목해야 할 도시기후환경 문제로 대두되기 시작하였다. 21세기에 접어들면서 국민 보건과 건강 측면에서 전 지구적으로 나타나고 있는 기후변화가 국지적인 도시기후 변화에 어떤 영향을 미치고, 이것이 인간의 의식주 생활에 어떠한 영향을 미치게 될 지에 대한 연구들도 매우 필요하게 되었다. 인구 피라미드 구조도 전 세계 선진국들과 유사하게 출산율이 낮아져 영유아가 차지하는 비율은 줄어들고 인구의 고령화로 노인계층이 차지하는 비율이 증가하는 변화를 보이고 있다. 따라서 변화하는 도시기후가 의식주 특히 건강과 장수를 위하여 어떠한 형태로 유지되어야 하는가에 대한 관점에서의 연구들이 필요한 실정이다.

21세기에 접어들면서 총 인구의 증가량은 둔화되었으나 인구의 도시집중 현상은 가속화되면서 겨울철 난방과 여름철 냉방장치 사용량이 급증하면서 정부에서도 최근 전력 수급문제에 대한 대안책 마련에 고심을 하고 있다. 전 지구 기후변화 저감 흐름 속에서 화석연료 사용량을 줄여야 하는 상황이나 환경위험요소 없는 이를 대체할만한 재생가능한 에너지는 수력 정도에 그치고 있는 실정이다. 풍력, 태양력 등 대체에너지가 일부 대안으로 제시되고 있으나 태양력의 경우 동아시아 여름철 몬순의 영향으로 영남지역 정도만 태양력이 사실상 그 효율성이 그나마 확보될 수 있고, 풍력 발전 시설만이 백두대간의 고산지역과 해륙풍이 탁월한 해안 및 도서지역을 중심으로 활발하게 증가하고 있다. 그러나 우리나라 전체 에너지 생산량의 5%이하가 이러한 시설에서 생산되고 있는 실정이다. 정부에서는 최근 단기적으로 이를 해결하기 위하여 원자력을 대안으로 내세우고 있으나, 원자력도 환태평양 조산대에 인접해 있어 2011년 3월 대지진 후 쓰나미에 의한 일본 후쿠시마 지역 원자력 발전소 파괴사건과 같은 위험성을 배제할 수 없고, 궁극적으로는 원자력 발전 이후 방사선 폐기물의 처리방법이 마련되어 있지 않아 이러한 저준위 방사선 쓰레기들도 적체되고 가고 있는 것이 현실이다.

여기에서는 이러한 우리나라 도시의 사회경제 활동의 역사에 따라 나타난 우리나라 도시기후환경의 변화상과 이에 따라 필요로 되는 연구들과 관측환경 개선점에 대해서 의견을 제시하고자 한다. 이를 위해 제 2장에서는 우리나라 도시기후연구의 주제들에 관한 역사적 맥락을 전 세계 도시기후연구의 흐름 속에서 재조명해보고, 제 3장에서는 현재 도시기후 연구 방법론과

우리나라 도시기후 관측망에 대하여 총체적으로 살펴봄으로써 향후 새로운 방법론과 관측망에 있어서 어떤 개선점이 필요한지에 대한 의견을 제시해 보고자 한다. 요약과 결론에서는 이러한 내용들을 종합적으로 제시하여 글을 마무리 하고자 한다.

II. 도시기후 연구의 흐름

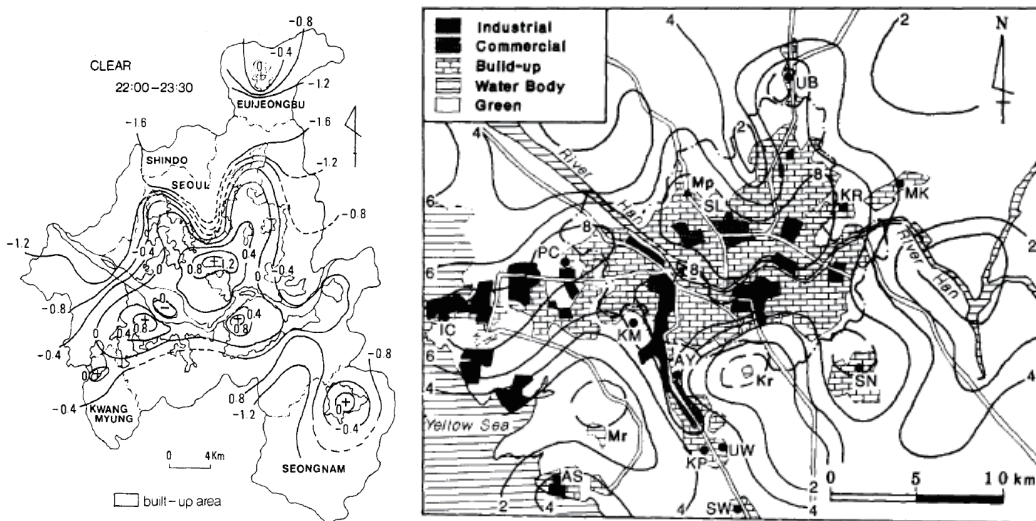
전 세계적으로 인간에 의해 변모하는 도시 기후환경에 대하여는 1810년대 영국의 아마추어 기상학자였던 Luke Howard(1772-1864)에 의해 처음 학계에 보고되었다. Luke Howard 는 처음으로 도시 중심부의 기온이 주변보다 높게 나타나는 열섬현상(urban heat island)에 대하여 기술하였다. 이후 오늘날까지 인위적으로 형성된 전 세계 수많은 도시 열환경 변화에 대한 연구들이 보고되었다. 도시 열환경 변화에 대하여 2차원적 분석에서 3차원적 분석이 진행된 것은 2차 세계대전 이후이다. 특히, 1950년대에 대도시 대기오염이 심각해지면서 스모그와 기온 역전층(temperature inversion layer) 형성에 의해 런던, 로스앤젤레스 등의 지역에서 단기간에 수천 명의 인명피해가 발생함에 따라 3차원적 도시 열환경에 대해서도 관심을 가지게 되었다. 1960년대 이후 이러한 열환경과 대기오염 물질의 분포에 따라 산성비, 도시 호우 등이 도시지역에 빈번함이 밝혀졌고, 1970년대에는 원격탐사 기법들이 도시기후 연구에 도입되면서, 대규모 도시피복변화가 정량화되고, 1990년대 초반부터는 이러한 변화가 도심의 열환경과 어떠한 관련성을 가지고 있는지에 대해서 보다 총체적인 분석 결과들이 제시되기 시작하였다. 이러한 원격탐

사기법 이외에도 지상에서는 도심의 열환경과 관련하여 고해상도 도시기후 관측망이 증가하고, 도시기후 모델(urban climate models)을 구축하여 시뮬레이션 하는 방법들이 도입되면서 도시의 열섬과 열수지(일사량, 현열, 잠열 등), 도시 바람장(전원풍, 빌딩풍 등), 도시의 호우와 홍수(도시 불투수층, 관거시설 등)에 대한 순수 기후학적 분야에서 점차 인간 의식주 생활과 관련된 기후요소들의 순환을 고려하는 응용기후학적인 연구결과들이 제시되기 시작하였다.

우리나라에서도 1970년대 중반이래로 도시지역의 일시적인 대기현상에 관한 사례 연구들이 기상학적 관점에서 분석되었다. 대부분이 이러한 대기오염과 관련된 대기 혼탁도와 바람장에 대한 사례들을 중심으로 보고되었다. 이 중 일부 연구는 장기간 대도시의 혼탁도(예. 오성남과 조희구, 1975)나 도시열섬 연구(김문일 등, 1978)에 관한 것이었나 상세한 도시 내부

의 기후환경 구조를 밝히는 연구들은 아니었다. 장기간 서서히 변모하는 도시 피복 변화의 관점에서 간이 관측과 원격탐사를 통하여 우리나라 도시 내부의 상세한 기후 구조에 대한 연구들을 처음으로 제시한 것은 1980년대에 지리학 분야의 기후학자들에 의해서이다. 1980년대 중반 이후부터 대도시의 토지이용변화 측면에서 도시열섬과의 관련성(Park, 1986, Lee, 1993)과 도시주변의 호우발생 패턴(이현영, 1988)에 대한 기후학적 연구결과들이 보고되었다(그림 1).

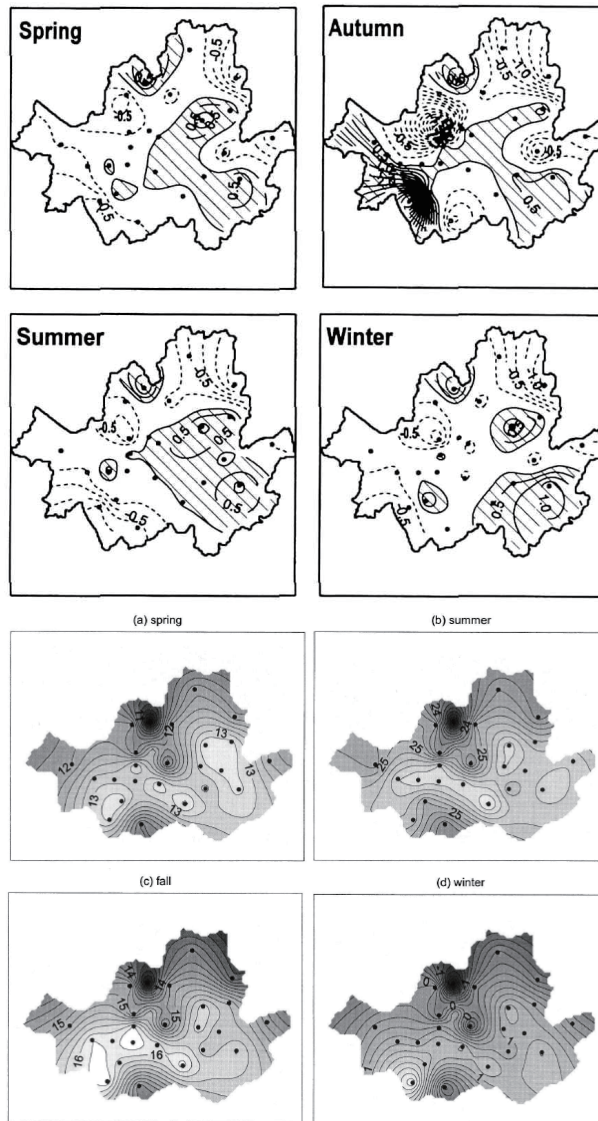
미기상학자들은 1980년대와 1990년대 걸쳐 주로 대기오염과 관련된 대기 혼탁도와 바람장에 관한 분석결과들을 제시하였고(예. 이석조, 1982, 김시완과 박순웅, 1996), 일부 도시화에 따른 도시의 상대습도의 변화를 분석한 결과도 보고되었다(엄향희 등, 1997). 우리나라에서도 1990년대 중반부터 도시내부에 자동 기상관측장비(AWS)가 여러 곳에 설치되기 시작하



[그림 1] 간이 관측과 원격탐사를 이용한 서울의 도시열섬 연구 사례: Park, 1986(좌), Lee, 1993(우)

면서 기상학자들에 의해 1990년대 후반부터 도시내부의 상세한 기온분포(예. 도시열섬의 강도)에 대한 연구결과들을 보고되기 시작하였다(예. 부경은 등, 1998, 부경은 2000). 2000년대 초반 이후에는 도

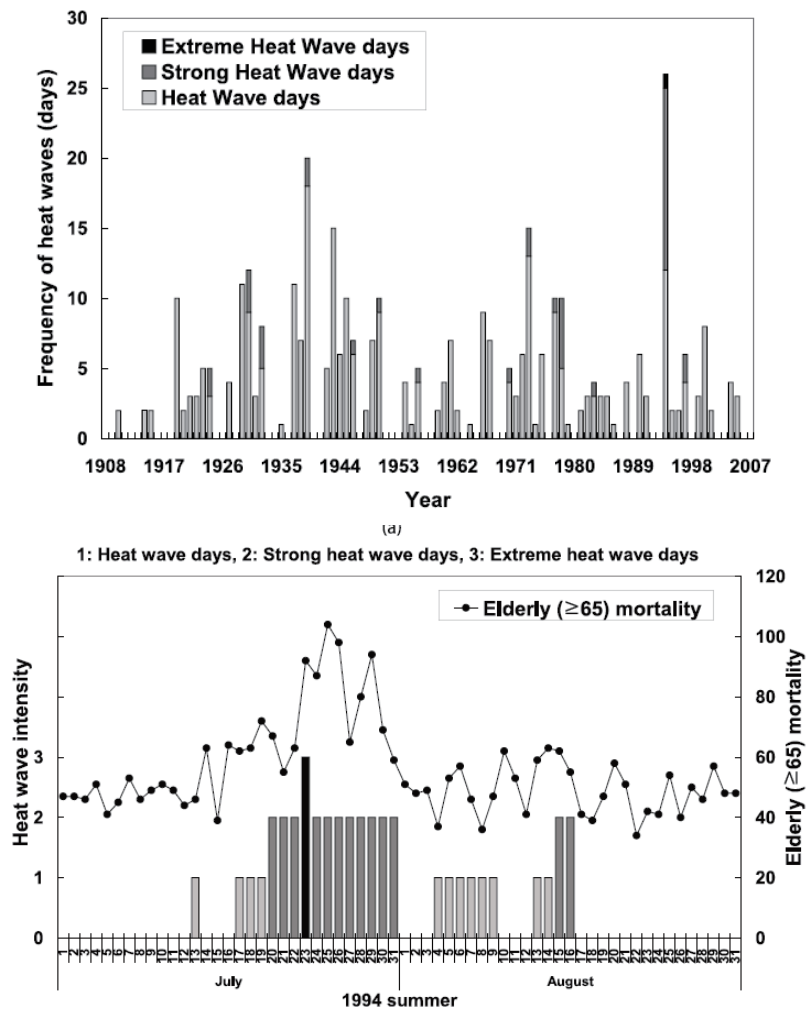
시열섬의 형성 측면에서 도시내부와 외부의 기온경도차를 가리키는 도시열섬 강도에 대한 기후학적 연구 결과들이 활발하게 제시되기 시작하였다(Kim and Baik, 2002, 2004, 2005; 김연희 등, 2011).



[그림 2] AWS 자료를 이용한 서울의 열섬현상 연구 사례: 부경은 등, 1999(上), Kim and Baik, 2005(下)

〈표 1〉 사망자 기준 우리나라에 적합한 생리기후학적 열파 정보 체계 (Choi, 2006)

Categories of heat waves	Daily Maximum Heat Index (DMHI)	Duration	Excessive mortality*
Heat wave days	$35.5^{\circ}\text{C} \leq \text{DMHI} < 38.5^{\circ}\text{C}$	3 days	14
Strong heat wave days	$38.5^{\circ}\text{C} \leq \text{DMHI} < 41.5^{\circ}\text{C}$		92
Extreme heat wave days	$41.5^{\circ}\text{C} \leq \text{DMHI}$		203

* per 1 million of baseline elderly (≥ 65 years old) population[그림 3] 서울의 지난 100년간 열파 발생기록(上)과 1994년 강한 열파 발생시 사망자 증가 사례(下).
출처: 최광용, 2010.

지리학 분야의 기후학자에 의하여 순수 도시기후 분석에서 벗어나 처음으로 도심의 열환경 문제가 생리 기후학적 측면에서 실제 도시 주거자들의 보건과 건강에 직결됨이 강조되기 시작하였다(예, 최광용 등, 2005; Choi, 2006). 또한 이후 몇몇의 기상학자들에 의해 이러한 연구들이 지속적으로 보고되고(예, 김지영 등, 2006, 2007) 기상청에서도 일부 연구자들이 이러한 연구결과들을 바탕으로 2000년대 후반부터 한파(cold surge)와 열파(heat wave) 등 열극한 기후현상에 대한 대국민 기상예보를 하기 위하여 생리 기후지수를 개발하여 제공하기 시작하였다(표 1). 최근에는 [그림 3]과 같이 도시열섬을 저감하기 위한 도시 녹지는 도시냉섬(cooling island)으로 열파 발생 시 사망자 저감효과가 있음을 밝히는 연구 결과도 보고되었다(최광용, 2010). 도시열섬의 저감과 관련하여 열적 구조에 따른 3차원 순환에 의해 도시 주변의 녹지대에서 도시의 중심부로 들어가는 바람과 관련하여 도시의 구조와 고층 건물의 증대간의 괴리에 대해서 논의 하기 시작하였다. 최근에는 일부 기상학자들에 의해 도시기후 모델이 개발되면서 도시의 바람장 등의 미래 도시기후분포 특성을 모사화 하려는 노력들도 진행중에 있다(Lee and Park, 2008; Ryu et al., 2009; 변재영, 2010).

최근에는 도시의 팽창이 가속화 되고, 기후변화에 의한 국지적 강한 호우의 발생이 가시화되면서 도시 열환경 및 물수지 관리에 대한 새로운 대안을 필요로 하고 있다. 2000년대에 들어 조선시대 이후 중심업무지구에 속하는 광화문이 두 차례나 도시홍수를 겪으면서 기존의 한강 지류천 중심의 도시홍수 연구에서 확장하여 도시전체 홍수 취약지구의 상하수도 관거시설

에 대한 종합적인 점검과 총체적인 연구들이 필요하게 되었다. 이외에도 2011년 우면산 산사태의 경우에도 살펴보면, 도시 호우와 도심 주변지역의 지면안정성과 도시 물순환 관리에 대한 새로운 연구들이 필요하게 되었다.

III. 도시기후 연구방법론과 향후 개선점

최근 우리나라에서도 전 지구 기후변화의 저감 대책으로 다양한 녹색성장(Green Growth)을 모토로 한 도시계획정책들이 제시되고 있다. 그러나 최근의 경우에는 아파트와 같은 도시 주거시설 확충에 의한 이익창출이라는 경제논리에 밀려 오히려 녹색성장이라는 목표에 역행하는 도시정책들이 진행되고 있다. 대표적으로 들 수 있는 것은 도심의 무질서한 팽창을 억제하고자 1971년에 처음 설정되고, 1976년에 확장·설치되었다가 최근 해제되고 있는 개발제한구역(greenbelt)이다. 서울의 경우 그린벨트는 도심에서 반경 15km 이내 1-9km 폭의 인접지역에서 해발고도 100m이상의 지역에서는 토지형질 변경이나 시설 설치 및 벌채 등이 불법행위로 간주되어 개발행위가 엄격히 규제되어 왔다. 그러나, 최근에는 서울 주변 수도권, 대전, 대구, 김해 등 지역에서 다양한 형태로 이러한 그린벨트지역이 해제되어 도시팽창은 더욱 가속화될 전망이다.

건조한 콘크리트 아스팔트로 이루어진 도시 피복은 도시의 인위적 열환경 형성의 일차적인 요인이기 때문에 그린벨트는 여름철 냉방장치 사용과 관련하여 지속가능한 도시계획 중의 하나였다. 최근에는 증가된 인구

를 수용하기 위해 도시에서는 고층건물 위주의 도시 협곡(urban canyon)을 이루고 있어 열을 흡수할 수 있는 면적도 3차원적으로 증대되고 있다. 더불어 도시 거주 인구의 기하급수적 증가로 다양한 화석연료를 이용한 냉난방 장치, 자동차 등의 사용량이 급증함에 따라 도시지역을 중심으로 국지적으로 온실효과가 강화되어 도시열섬의 강도를 더욱 증가시키고 있다. 이러한 가운데 이를 저감할 수 있는 도심 주변의 그린벨트를 해제하는 것은 도시열섬을 저감할 수 있는 도시 냉섬을 훼손시키는 것이며, 궁극적으로는 도시열섬의 강도가 높아져 여름철의 경우 도시에서 더 많은 전력을 사용하게 될 것이다. 도시의 녹지환경의 효율성에 대한 종합적인 평가가 시급하게 필요한 실정이다.

이러한 도시의 열섬과 열수지에 관한 기후연구들은 크게 지상관측, 원격탐사, 기후모델 등 3가지 연구 방법론을 기반으로 이루어져 왔다. 이 3가지 방법론에 대하여 현재의 현황은 어떠하며 차후 어떠한 개선을 해 나갈 필요성이 있는지에 대해서 살펴보기로 하자.

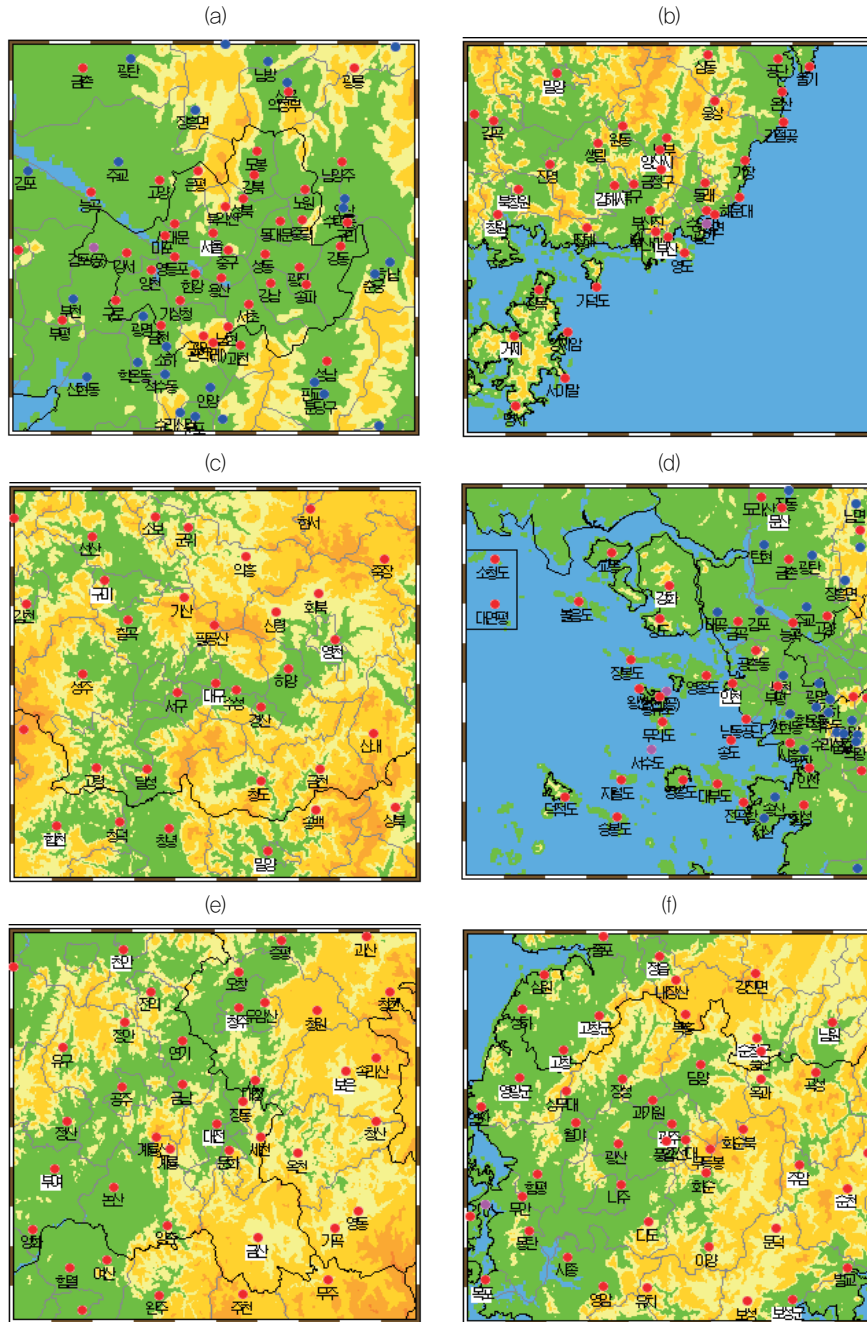
1. 지상 기후 관측망에 의한 도시기후 정보 제공

지상관측과 관련하여 전 세계적으로 19세기 중엽 이후 기상관측소는 인구가 많이 상주하는 도시지역을 중심으로 처음 개소하고 20세기에 접어들면서 점차 주변 중소도시 및 비도시 지역으로 확장하여왔다. 그러나 도시내의 고해상도 기후감시망이 구축된 것은 대체로 20세기 후반에 와서이다. 우리나라에서도 1990년대 초반 방재용으로 대도시를 중심으로 자동기상관측소가 증가하기 시작하였다. 서울의 경우는 1995년에 자동기상관측지점의 수가 20개로 증가 한 후 현재 27

개 지점에 이르고 있다. 그러나 지역적으로 이러한 관측망의 밀도는 지방에 위치한 광역시로 갈수록 줄어든다[그림 4]. 서울과 연담도시를 이루고 있는 인천이나, 대표적인 우리나라 무더위 도시인 대구, 남부 내륙지역에 위치하여 열파가 자주 발생하는 광주 등의 자동기상 관측망은 현재보다 확충해 나갈 필요성이 있다. 실제 서울을 제외한 다른 대도시의 도시 열섬에 대한 연구들의 수는 상대적으로 적다.

도심 내에서 표준 기상관측환경(잔디 피복으로 구성된 관측 노장)의 확보가 어렵지만 유사한 지역에 설치되어 있다. 비도시 지역의 경우에는 대표적인 표준 경관이 삼림이나 농경지로 되어 있다. 그러나 도심 내 이러한 자동기상장치가 설치된 곳은 도시의 열환경을 오히려 제대로 반영하고 있지 못하다. 비도시 지역은 전국 단위의 기상관측망에서 각 지역의 녹지를 기준으로 하는 표준 열환경을 탐측하는 것이 적합하지만, 도시 열수지와 열섬 연구에서는 오히려 온도계 센서가 실제 콘크리트나 아스팔트에 노출되어야 실제 도시의 열환경이 어떠한가를 파악할 수 있다. 따라서 미기상학적으로 지표의 인공적인 피복에 의해 흡수된 열을 관측할 수 있는 소위 표준화된 관측환경에서 벗어난 지역에 측정센서들이 설치해 나갈 필요성이 있다.

도시의 자동기상관측지점에서 관측 기후요소를 살펴보면 기온, 강수, 바람(풍향, 풍속) 등으로 도시의 열환경 평가에서 여름철 열파 발생 시 체감온도 산출을 위해 필요한 습도 관측은 거의 이루어지지 않았다. 최근 2009년 후반부터 전국적으로 일부 지점에서 상대습도를 측정하고 있지만 도시의 열섬에 의한 열파 발생 시 그 강도가 증가할 수 있는 지역의 경우에는 보



[그림 4] 2011년 12월 말 현재 전국 주요 대도시 자동기상관측망: (a) 서울, (b) 부산, (c) 대구, (d) 인천, (e) 대전, (f) 광주

다 상세한 여름철 체감온도 정보를 산출하기 위해서는 습도 관측지점의 수를 증가시켜 나갈 필요성도 있다.

지자체 단위에서 별도로 관리하고 있는 관측망의 자료 확보에도 관심을 두어야 할 것이다. 서울시에서는 기상청 관측망과는 별도로 약 26개의 자동기상 관측망을 유지하고 있으며, 사라져가고 있던 초등학교에 있는 야외실습장에도 수동 온도계를 설치하여 도시의 기온분포 정보 수집 지점을 늘려가고 있다. 이러한 자료들의 질적인 부분을 검증하여 현재 기상청 자료와 결합하여 제공한다면 보다 상세한 도시의 열환경 파악에 도움이 될 것이다.

또한 도심 내 녹지 공원의 크기와 형태 그리고 그 녹지 공원의 실제 피복 비율에 따라 도시 냉섬의 효과가 얼마나 있는지를 정량화 할 필요성이 있다.

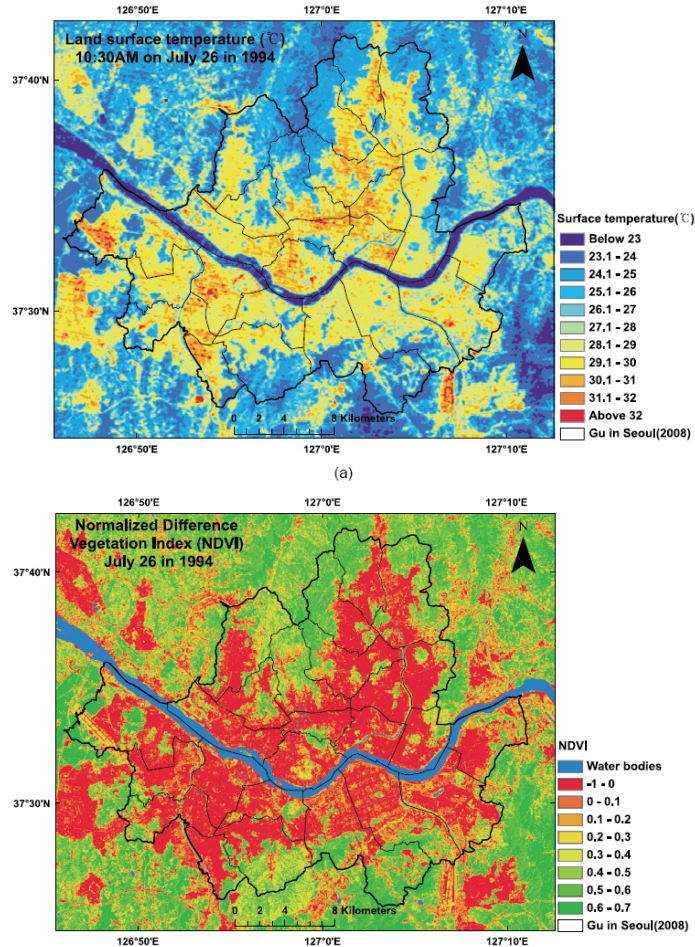
최근 도시의 피복변화는 빠르게 고층화 되어가고 있기 때문에 현재 도시의 열환경 관련 기상관측장비 설치도 3차원으로 이루어 질 필요성이 있다. 고층건물이 많은 중심업무 지구나 고층 아파트가 밀집된 주거지역을 중심으로 일정 높이마다 관측 센서를 새롭게 설치하여 3차원적 열환경을 모니터링할 필요성이 있다. 더불어 도시풍수와 관련된 고층 건물의 건축물 구조와, 내부 기후(indoor climate), 냉난방 장치 사용의 상관성에 대한 모니터링을 할 필요성이 있다. 가령, 현재 서울시에서 도시 미관을 위해 건물의 윗면 색을 녹색으로 칠하는 데 그칠 것이 아니라 실제 지붕에서 열 흡수를 저감시키는데 도움이 되는 누수를 고려한 식생이 자랄 수 있는 녹색지붕의 확대 사업을 할 필요성이 있을 것이다. 수직적으로도 고층 건물에서 냉방장치

사용시 개폐문의 설치 여부에 따라서 냉방장치에 의해 식혀진 공기가 얼마나 건물의 상층에서 하층으로 이동하는지에 대한 모니터링도 하여 제공한다면 보다 효율적으로 전기에너지를 사용할 수 있게 될 것이다.

2. 원격탐사 기법을 이용한 도시기후 모니터링

지상 자동기상관측장비의 밀도는 현재 도시기후정보의 정밀도에 큰 영향을 미친다. 이를 보완하는 데 유용한 도시기후 모니터링 방법 중의 하나가 넓은 광역 지역에 걸쳐 지표 피복 열환경 자료를 제공할 수 있는 원격탐사기법이다. 실제 접촉 없이 지표에서 반사되는 에너지를 통해 간접적으로 정보를 제공하는 위성영상을 포함한 원격탐사 자료들은 지표온도에 대한 정보뿐만 아니라 도시의 식생 피복, 알베도 등 도시 열환경에 영향을 미치는 거시적인 정보들도 제공한다. 1990년대 우리나라에서 원격탐사기법이 도시 열환경 탐지에 사용되었을 때에는 수 Km 이상의 해상도를 지닌 NOAA AVHRR영상이 사용되었으나(예, Lee, 1993), 2000년대에 접어들면서 수십 m 해상도의 Landsat MSS, TM, +ETM 이 도시 열환경 탐지에 사용되기 시작하였다(예, 권영아, 2006, 최광용, 2010).

이러한 위성영상은 구름이 낀 날에는 자료오염이 심하여 사용이 제한되고, Landsat 계열의 영상이 우리나라를 지나가는 것도 한 달에 2~3회이고, 하루 중 지나가는 시각도 오전 10시 30분 경위로 제한되어 계절별, 일별 도심열환경을 연구하는 데에는 많은 제약이 따른다. 대부분의 도심 열섬 강도에 대한 연구들 중 실제 우리 생활에 필요한 시기에 위성영상 정보가 제공



[그림 5] 지난 100년간 가장 강한 열파가 발생했던 1994년 7월 서울시 지표 온도
(오전 10시 30분경, 上)와 정규식생지수(NDVI) 분포(下.)

출처: 최광용, 2010.

된 사례들은 드물다. 실제 도심에서는 겨울철 보다는 여름철 고온 발생 시 도심의 열환경 분포에 대한 정보들이 필요하다[그림 5]. 최근 천리안 등 우리나라도 새롭게 위성자체 보유국으로 진입해 나가고 있다. 따라서 이러한 정지기상 위성에서 탐측한 자료들을 활용하여 도시 열환경 모니터링의 시간적 해상도 측면에서

규칙적이고 지속적인 위성자료 데이터 베이스를 확보할 필요성이 있다. 이외에도 도시의 물수지와 관련하여 레이더 영상도 일시적인 기상학적 관점에서 벗어나 장기간 고품질의 자료들을 누적시켜 기후학적 연구에 활용될 수 있도록 해당기관에서는 연구 인력을 늘려갈 필요성이 있다고 판단된다.

3. 도시기후모델과 미래 도시기후 변화 전망

미래 기후변화 연구의 공간 해상도를 살펴보면 대체로 정부간 기후변화 협의체(IPCC) 보고서를 중심으로 1990년대 중반 이후부터 최근까지 전 세계 20여 개의 전 지구 기후 모델(GCM)을 상호 비교하는 연구를 진행하여 모델에서 생산되는 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 줄이고 있다. 지역기후 변화를 전망하는데 불확실성을 줄이기 위해서 다중 지역기후모델에서 생산한 고해상도 지역기후시나리오 자료를 상호 비교하는 작업(PRUNEDENCE, ENSEMBLES 등)은 유럽지역을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다. 이에 비하여 도시 규모의 소규모 지역 기후 모델들을 상호 비교하는 경계층 기후 모사 프로젝트는 최근에서야 이루어지고 있는 실정이다. Grimmond et al.(2010, 2011)은 전 세계 30여 개의 도시기후 모델이 모사하는 모든 파의 복사에너지, 현열, 잠열을 실제 관측 자료와 상호 비교하여 모델의 모사능력을 검증하는 도시기후모델 비교 프로젝트를 진행해 나가고 있다(표 2). 이 프로젝트에 따르면 잠열의 모사 부분에서 대부분의 모델이 많은 불확실성을 내포하고 있는 것으로 평가되고 있다. 국내에서는 이 프로젝트에 Lee and Park(2008), Ryu et al., (2009)에 의해 도시의 식생 수관이 고려된 2개의 도시 에너지 균형 모델들이 참여 하였다.

최근 우리나라에서도 기상청 국립기상연구소를 중심으로 2013년에 발간 예정인 5차 보고서에서 미래 기후전망을 위해 진행된 국제 기후변화 모델 비교 사업(CMIP5)에 모사 능력이 우수한 해양모델과 접합하는 방법으로 영국모델(HadGEM2-AO)을 향상시켜

새로운 온실기체 배출 시나리오(Representative를 바탕으로 수 백 km 격자 해상도의 전 지구 미래(현재-2100년) 기후변화 자료)를 생산하고 있다. 한반도 공간범위내의 고해상도 국가 표준 지역기후 시나리오를 생산하기 위해 지역기후모델(HadGEM3-RA)을 사용하고 전구모델에서 생산한 자료를 경계자료로 하여 역학적 상세화(dynamical downscaling)하여 수십 km 격자 도의 한반도 규모의 지역 기후 시나리오를 생산하고 있다. 기상청 이외에도 각 대학들에서는(가령, 공주대, 부경대, 부산대, 서울대 등) 이러한 한반도 지역규모 고해상도 기후변화 시나리오 자료를 생산하고 있다. 이에 비하여 현재 기술력으로는 국내 일부 연구자들만이 도심 내의 초고해상도인 수 km의 격자의 도시기후 변화 시나리오 자료를 생산할 수 있는 기술을 보유하고 있다.

향후 이러한 제한된 도시기후모델에서 도시기후 자료를 생산하는 데에는 크게 2가지 측면의 노력이 필요하다고 판단된다. 첫째, 지속적으로 현재 가용한 도시기후모델의 모사 능력을 향상시켜야 한다. 이를 위해서는 앞에서 논의한 지상관측 자료와 원격탐사 자료를 확보하여 모델의 모수화를 정교하게 할 필요성이 있다. 둘째, 이러한 도시기후모델도 여러 대학을 중심으로 개발하도록 유도하여 상호 비교하여 불확실성 범위를 제공할 수 있도록 정부연구 기관들에서 지원을 해 나갈 필요성이 있다.

IV. 결론

지금까지 우리나라 도시기후 연구의 흐름과 도시기후 연구를 위한 방법론(지상관측망, 원격탐사, 도시기후

〈표 2〉 전 세계 도시 에너지 균형 모델 상호 비교 프로젝트에 참여한 모델들(Grimmond et al., 2010)

Code	Model Name	References	Versions	Groups
BEP02	Building Effect Parameterization	Martilli et al. (2002)	1	1
BEP_BEM08	BEP coupled with Building Energy Model	Martilli et al. (2002), Salamanca et al. (2009), Salamanca and Martilli (2009)	1	1
CLMU	Community Land Model-Urban	Oleson et al. (2008a,b)	1	1
GCTTC	Green Cluster Thermal Time Constant model	Shashua-Bar and Hoffman (2002, 2004)	1	1
IISUCM	Institute of Industrial Science Urban Canopy Model	Kawamoto and Ooka (2006, 2009a,b)	1	1
JULES	Joint U.K. Land Environment Simulator	Essery et al. (2003), Best (2005), Best et al. (2006)	4	2
LUMPS	Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme	Grimmond and Oke (2002), Offerle et al. (2003)	2	1
NKUA	University of Athens Model	Dandou et al. (2005)	1	1
MORUSES	Met Office Reading Urban Surface Exchange Scheme	Harman et al. (2004a,b), Porson et al. (2009, manuscript submitted to <i>Quart. J. Roy. Meteor. Soc.</i>)	2	1
MUCM	Multilayer Urban Canopy Model	Kondo and Liu (1998), Kondo et al. (2005)	1	1
NJU-UCM-S	Nanjing University-Urban Canopy Model-single layer	Masson et al. (2000), Kusaka et al. (2001)	1	1
NJUC-UM-M	Nanjing University-Urban Canopy Model-multiple layer	Kondo et al. (2005), Kanda et al. (2005a,b)	1	1
NSLUCM/NSLUCMK/ NSLUCM-WRF	Noah land surface model/Single-layer Urban Canopy Model	Kusaka et al. (2001), Chen et al. (2004)	3	3
SM2U	Soil Model for Submesoscales (Urbanized)	Dupont and Mestayer (2006), Dupont et al. (2006)	1	1
SNUUCM	Seoul National University Urban Canopy Model	Ryu et al. (2009)	1	1
SRUM2/SRUM4	Single Column Reading Urban Model tile version	Harman and Belcher (2006), Porson et al. (2009)	4	1
SUEB	Slab Urban Energy Balance Model	Fortuniak et al. (2004, 2005)	1	1
SUMM	Simple Urban Energy Balance Model for Mesoscale Simulation	Kanda et al. (2005a,b; 2007), Kawai et al. (2007, 2009)	1	1
TEB	Town Energy Balance	Masson (2000), Masson et al. (2002), Lemonsu et al. (2004)	1	1
TEB07	Town Energy Balance 7	Hamdi and Masson (2008)	1	1
TUF2D	Temperatures of Urban Facets 2D	Krayenhoff and Voogt (2007)	1	1
TUF3D	Temperatures of Urban Facets 3D	Krayenhoff and Voogt (2007)	1	1
VUCM	Vegetated Urban Canopy Model	Lee and Park (2008)	1	1

모델링)에 대하여 살펴보았다. 많은 연구들이 도시 내부 및 주변의 녹지공간의 토양이 집중호우 시 홍수를 저감할 수 있으며, 녹지 공간 내 식생들은 여름철에 휴식처를 위한 그늘이나 신선한 산소공급의 역할 뿐만 아니라 식생 잎의 기공에서 발생하는 증발산 작용을 통하여 도시의 현열(sensible heat)을 잠열(latent heat)의 형태로 전환시켜 도시열섬을 저감시킬 수 있는 지속가능한 도시환경 구성요소를 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 녹지 공간들이 우리나라 정부정책 마련 시 외면당하는 요인은 식생들이 정량적으로 얼마만큼의 열섬 저감 효과가 있어 지속가능한 것인지를 도시 전체규모에서 총체적인 연구결과로 제시하고 있지 않기 때문이다. 아파트 한 채를 더 지어서 30년간 얻는 이익과 그 지역을 녹지 공간으로 유지하여 주변 거주자들이 여름철 냉방을 위해 사용하는 전기에너지 중 절약할 수 있는 금액을 상호 비교하여

어떤 것이 더 경제적으로도 이익인지 손익계산을 해본 연구결과들을 전무한 상태이다. 이러한 총체적인 연구가 이루어지지 못한 일차적인 요인은 도시기후 관측을 위해서 현재 방재용 자동기상관측망이 유일하며, 이마저도 도시기후 연구에 적합하지에 대해서는 더 고민을 해봐야 할 부분이 있기 때문이다. 더 나아가 도시기후 연구는 순수한 학문의 범주를 넘어서 이러한 사회적 필요성 측면에서 대기과학자들만의 전유물이 아닌 도시 계획, 에너지, 도시 조경, 건축학 등 다양한 사회과학의 분야와의 협력 연구 체계가 필요하다.

참고문헌

- 권영아, 2006, Landsat ETM+ 영상을 이용한 서울시 자동기상관측지점(AWS) 주변의 열 환경 분석, 한국, 도시지리학회지, 9, 147-157.
- 김문일 등, 1978, 서울지방의 Heat island 특성 연구, 중앙기상대 기상연구소 연구보고서, MR-78-4.

- 김시완, 박순웅, 1996, 서울지방의 산성오염 물질의 건성침착도 추정, *한국기상학회지*, 32(2), 325-338.
- 김연희, 최다영, 장동연, 2011, 수도권 지역의 도시 기상 특성, *대기*, 21(3), 257-271.
- 김지영, 이대근, 박일수, 최병철, 김정식, 2006, 한반도에서 여름철 폭염이 일 사망률에 미치는 영향, *대기*, 16(4), 269-278.
- 김지영, 이대근, 최병철, 박일수, 2007, 클러스터 분석을 통한 종관기단분류 및 서울에서의 일 사망률과의 관련성 연구, *대기*, 17(1), 45-53.
- 변재영, 최영진, 서범근, 2010, WRF-UCM (Urban Canopy Model)을 이용한 서울 지역의 도시기상 예보 평가, *대기*, 20(1), 13-26.
- 부경은, 전영신, 박지용, 조하만, 권원태, 1999, 자동기상관측 장치자료를 이용한 서울의 기온수평분포 분석, *한국기상학회지*, 35(3), 335-343.
- 부경은, 오성남, 2000, 1999년 서울지역 기온의 사공간 분포 특성, *한국기상학회지*, 36(4), 499-506.
- 엄형희, 하경자, 문승의, 1997, 서울의 상대습도 변화에 나타난 도시 효과, *한국기상학회지*, 33(1), 127-135.
- 오성남, 조희구, 1975, 서울의 대기오염도의 경년변화과 계절 변화, *한국기상학회지*, 11(1), 31-40.
- 이석조, 1982, 서울 및 세계 여러지역의 Schüepf 대기혼탁도의 변화, *한국기상학회지*, 18(2), 61-66.
- 이현영, 1988, 서울과 그 주변지역의 하계강수, *지리학*, 37, 1-15.
- 최광용, 최종남, 권호장, 2005, 높은 체감온도가 서울의 여름철 질병 사망자 증가에 미치는 영향, 1991-2000, *예방의학학회지*, 38(3), 283-290.
- 최광용, 2010, 지난 100년 동안 서울시에 발생한 강한 열파 패턴과 노인사망자에 미치는 영향, *대한지리학회지*, 45, 573-591.
- Choi, 2006, A Definition of Korean Heat Waves and Their Spatio-temporal Patterns, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41(5), 527-544.
- Grimmond, C. S. B., and Coauthors, 2010, The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1268-1292.
- Grimmond, C. S. B., and Coauthors, 2011, Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison, *International Journal of Climatology*, 31, 244-272.
- Kim, Y.H. and Baik, J. J., 2002, Maximum urban heat island intensity in Seoul, *Journal of Applied Meteorology*, 41, 651-659.
- Kim, Y.H. and Baik, J.J., 2004, Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea, *Theoretical and Applied Climatology*, 79, 151-164.
- Kim, Y.H. and Baik, J.J., 2005: Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul, *Journal of Applied Meteorology*, 44, 593-605.
- Kim, Y.H., Ryoo, S.B., Baik, J.J., Park, I.S., Koo, H.J., and Nam, J.C., 2008, Does the restoration of an inner-city stream in Seoul affect local thermal environment? *Theoretical and Applied Climatology*, 92, 239-248.
- Lee, H. Y., 1993, An application of NOAA AVHRR thermal data to the study of urban heat islands, *Atmospheric Environment*, 27B, 1-13.
- Lee, S.H. and Park, S.U., 2008, A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Boundary Layer Meteorology*, 126, 73-102.
- Luke Howard, 1818-20, *The climate of London, deduced from meteorological observations, made at different places in the neighborhood of the metropolis*, 2vol., London.
- Park, H. S., 1986, Features of the heat island in Seoul and its surrounding cities, *Atmospheric Environment*, 20, 1859-1866.
- Ryu, Y.H., Baik, J.J. and Lee, S.H., 2009, A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmospheric models. Proc. Seventh Int. Conf. on Urban Climate, Yokohama, Japan, International Association for Urban Climate, paper A 16-1.

기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안

박 민 규

고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수

mkhoin@korea.ac.kr

이 석 민

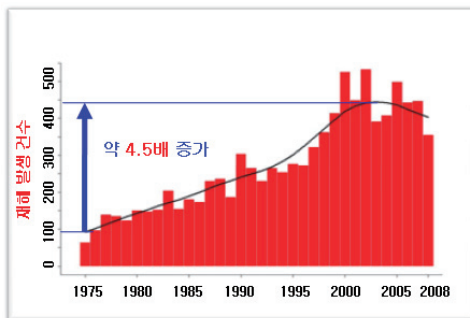
서울시정개발연구원 환경안전연구실 연구위원

lsm@sdi.re.kr

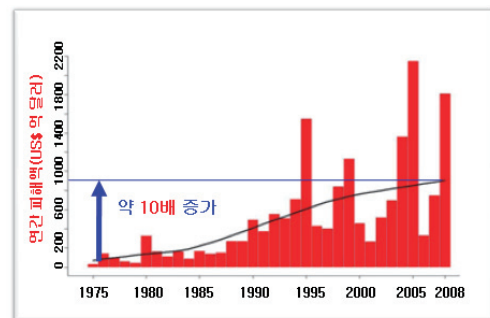
I. 머리말

지구온난화로 인한 기후변화는 우리의 생활에 직·간접적으로 많은 영향을 미치고 있다. 특히 기후변화로 인한 기상이변 및 그에 따른 피해규모의 확대는 놀라

울 정도로 크게 증가하고 있다. [그림 1]에서 소개되는 EM-DAT(Emergency Events Database)에 따르면 전 세계적으로 보고된 자연재해의 발생 현황의 통계적 분석결과를 확인할 수 있다. 이에 따르면 1975년부터 2008년 까지 전세계적인 자연재해 발생 건수



a. 재해발생건수



b. 연간 재해피해액

[그림 1] 전세계 자연재해의 발생경향

는 약 4.5배, 연간피해액은 약 10배 증가한 것으로 나타나고 있다. 즉, 기후변화로 인하여 자연재해의 발생 빈도와 강도가 증가함에 따라 막대한 인명 및 재산피해가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 관련하여 기후변화에 따른 재해의 양상변화 분석을 위해 도시 기상관측의 선진화 방안이 요구되고 있다.

기후변화는 단순히 평균기온의 상승만을 의미하는 것이 아니라 극한 온도, 바람, 강설, 강우, 해수면 상승과 같이 인간생활에 직간접적으로 영향을 미치는 자연현상의 변화를 초래한다. 그리고 이러한 자연현상의 변화는 국가와 국민들에게 막대한 물적, 정신적 피해를 입히게 된다. 따라서, 기후변화를 정확하게 예측하는 것은 국가가 지속가능한 성장을 실현하기 위한 전략 수립의 핵심도구이며, 국가발전의 성장 동력과 직결되므로 중·장기적 관점에서 수립할 필요가 있다. 특별히, 기후변화의 영향을 방재측면에서 고려하기 위해서는 기후변화를 평균 개념이 아닌 극한치 개념으로 접근할 필요성이 있다. 하지만 아직까지 극한치 개념으로 기후변화에 접근한 연구는 미비할 뿐만 아니라 관측자료의 활용 및 분석, 관측방법 측면에서도 많은 부분이 부족한 것으로 알려져 있다. 따라서 방재측면에서의 기후변화에 따른 자연재해 발생 메커니즘 분석과 더불어 방재시스템 강화를 위한 측면에서 도시 기상관측 시스템의 선진화가 필요할 것으로 판단된다.

본 고에서는 기후변화와 관련된 방재기상의 문제를 논의하기 위하여 우선적으로 극한치 개념의 방재기상 현상과 관련하여 주요 요인으로 지목되고 있는 기후변화 및 도시화와 관련된 기존 연구결과들을 살펴보기로 한다. 이와 함께, 국내에서 이용되고 있는 방재기상 관

측시스템으로서 기상청 외의 기관에서 실시하고 있는 것들을 살펴보고자 하겠다. 이때 방재기상 관측시스템은 주로 국내 재해의 90% 이상을 차지하는 것으로 알려진 강우로 한정하기로 한다. 또한 이를 토대로 방재기상과 관련하여 향후 요청되는 관측선진화 방안의 대표적인 사례로서 강우레이더와 관련하여 개선이 필요한 부분들을 소개하고자 한다.

II. 기후변화와 도시화

기후변화로 인한 도시 기상관측 선진화를 다룰 때에는 대도시 지역에서 재해기상의 빈도와 강도가 증가하고 있는 현상이 기후변화로 인한 것인지 아니면 도시화로 인한 것인지를 먼저 생각해 볼 필요가 있다. 현재까지 도시에서의 재해기상과 관련된 대부분의 연구는 기후변화나 도시화 중 어느 하나의 원인에만 주로 집중되어 왔다. 그러나 서울과 같은 거대 도시에서는 이 두 가지 영향이 복합적으로 나타나 강우의 특성에 보다 큰 변화를 줄 가능성이 높다. 여기서는 기후변화 및 도시화의 영향에 따른 도시지역의 강우특성 변화와 관련된 기존 연구들을 정리하여 살펴봄으로써 도시지역에서의 방재기상 선진화 방안 수립시 참고가 될 수 있는 기초정보를 제시하고자 한다.

일반적으로 기후변화 또는 도시화의 영향으로 나타날 수 있는 강우의 특성변화는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 평균적인 관측값의 변화이며 또 다른 하나는 시-공간적인 변동성의 변화이다. 현재까지의 관련연구는 주로 평균적인 변화에 초점이 맞추어져 있으나 강우의 경우에 있어서는 변동성의 변화가 평균의

변화에 못지않게 중요한 의미를 갖는다. 기본적으로 홍수재해를 대비하기 위한 도시방재시설물의 설계를 위해 요구되는 정보가 강우의 평균뿐만 아니라 변동특성도 함께 요구하고 있기 때문이다. 예를 들어, 강우의 시간적 변동성(강우의 시간분포, 집중성향)이 변하는 경우에는 궁극적으로 지점에서의 설계 강우량의 크기에 절대적인 영향을 미치게 된다. 아울러 강우의 공간적 변동성의 변화(공간분포, 공간적 규모 등)는 강우사상의 공간적 규모에 큰 영향을 미쳐 홍수량의 규모에 보다 큰 영향을 미칠 수 있다. 돌발 홍수의 경우처럼 짧은 시간에 국지적으로 발생하는 집중호우는 강우의 시-공간적 변동성이 매우 큰 상황을 보여주는 좋은 예가 될 것이다.

1. 도시화 및 산업화

기후변화가 관심을 받기 전에 기상특성의 변화의 주요인으로 많은 연구적 관심을 받았던 것은 도시화와 산업화였다. 특히, 대규모 도시화 및 산업화는 인근 지역에 여러 가지 기상특성의 변화를 야기하는 것으로 알려져 있다. 여러 가지 기상인자 중에서 그 변화가 가장 뚜렷한 것이 기온이며 소위 열섬효과(thermal island effect)라는 용어는 우리에게도 친숙한 단어가 되어 있다(Oke, 1981; 1995; Goldreich, 1996; Lo et al., 1997). 기온과 더불어 강우의 경우에도 대체로 강우량의 증가가 보고되고 있다. 상당히 많은 도시(영국 London(Atkinson, 1971), 인도 Bombay(Khemani and Murty, 1973), 미국 Phoenix(Balling and Brazel, 1987), 미국 St. Louis(Changnon et al., 1991), 멕시코 Mexico City(Jauregui and Romales, 1996))에

서 5~10% 이상의 연강수량 변화(주로 증가)가 보고된 바 있으며, 계절별로는 이 보다 훨씬 커서 30% 이상의 증가가 관측된 경우도 있다(Changnon et al., 1991; Rosenberger and Suckling, 1989). 강우빈도에 있어서는 이 보다 훨씬 큰 변화를 보이는데 100% 이상의 증가를 보이는 도시도 알려져 있다(Changnon, 1968; 1969). 이러한 변화는 무엇보다 강우가 입력조건이 되어 나타날 수 있는 재해와 관련하여 큰 영향을 미칠 수도 있다.

일반적으로 도시화로 인한 열섬효과 및 대기마찰의 증가는 대도시에서 관측되는 관측강우의 발생패턴의 변화와 밀접한 관련이 있는 것으로 소개되고 있다. 도시화로 인한 열섬효과는 도시 내의 증발을 인근 지역에 비해 월등히 우월하게 만들고, 이는 대기의 불안정과 더불어 강우발생의 한 원인으로 작용하게 된다. 아울러 도시화로 인한 대기마찰의 증가는 대기흐름에 일종의 장벽과 같은 역할을 하게 되어 수분의 집중을 가져오게 되고, 상승 또는 하강기류의 발생으로 강우의 발생을 촉진하게 된다. 아울러 도시 내 높은 건물군에 의한 기류 차단이나 상승 및 하강기류의 발생도 강우특성의 변화와 관련이 깊다. 도시의 불투수층의 증가로 인한 증발량의 증가도 한 원인으로 꼽히고, 이는 도시의 열섬효과로 인해 더욱 가속된다(Landsburg, 1979). 여기에, 산업시설로부터 직접 배출되는 수증기의 양도 도시강우를 촉진하는 한 원인으로 지목되고 있다(Cotton, 1995).

이러한 도시화로 인한 강우의 변화는 밀도 높은 종관 관측을 통해서만 파악할 수 있다. 그러나 도시지역의 경우 매우 제한적인 규모의 관측사례 만이 존재하는

것이 현실이다(Squires, 1966; Kline and Brier, 1961; Semonin, 1966; Langer et al., 1968). 아울러 강우의 경우에는 아직도 그 발생과정에서 나타나는 변화와 관련하여 정량적인 측면에서 불확실성이 상당히 존재하고 있다. 이는 기본적으로 강우가 시-공간적으로 불연속이며, 아울러 구름의 형성과정이나 강우과정을 지배하는 물리법칙에 대해서 아직도 해결해야 할 문제가 많기 때문이다(Changnon, 1992).

현재까지의 도시화의 영향은 주로 한정된 관측자료에 근거하여 분석되었다. 강우자료를 깊이의 단위로 그대로 이용하거나 아니면 주어진 시간 및 공간적인 규모를 고려한 평균으로 나눈 비율을 사용하여 분석하였다. 또한 관측된 강우량을 평균으로 나눈는 단순 정규화(normalization)를 이용한 연구사례를 찾아볼 수 있으며 이는 도시화의 영향을 공간적으로 파악할 때 유용하게 이용된다.(Huff and Changnon, 1973; Balling and Brazel, 1987; Jauregui and Romales, 1996). 이와 더불어 시간축에 대한 경향분석을 위해 2~5년 정도의 월 또는 계절 강우에 대한 이동평균을 이용한 경우도 찾아볼 수 있으며 폭풍의 수(뇌우를 동반한 또는 급격히 발생하는)를 비교하는 것 또한 자주 이용되는 방법 중 하나이다(Changnon, 1968). 이외에 강우 발생 또는 강우량의 일 주기를 비교한 경우도 찾아볼 수 있다(Balling and Brazel, 1987).

그러나 관측된 강우자료의 부족과 도시지역에 위치한 강우계의 위치 변동 등에 의해 자료만으로 도시화에 따른 강우특성의 변화를 조사, 연구하고 아울러 그 인과관계를 규명하는 것에 여러 가지 한계가 존재한

다. 또한 도시화로 인한 강우의 변화를 직접 측정하여 관찰하거나 설명하는 일은 기온, 습도 등과 같은 다른 기상인자에 비해 쉽지 않은 일이다. 우리나라에서는 기온의 변화와 관련해서는 이현영 (1989), 유철상 등(2000), 기상연구소 (2003, 2004), Oh et al. (2004) 등의 연구를 살펴볼 수 있으나, 홍수재해와 직접적인 관련이 있는 강우와 관련된 정밀하고 장기적인 관측사례 및 이와 관련된 연구는 상당히 많이 빈약한 상황으로 찾아보기 어렵다.

2. 기후변화

기후변화의 경우 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에 따르면 20세기 동안의 지구 평균온도가 약 0.6℃ 상승하였으며 이에 따른 강수특성의 변화 또한 무시할 수 없다. 지구 평균온도의 상승은 지구에서 발생하는 대부분의 기상학적 요소에 상당한 영향을 미친다고 할 수 있다. 기후변화의 영향으로 지구상의 생물체 중 일부는 상당한 생존 위협을 받고 있으며 식물의 개화시기나 동물의 출현빈도수를 상당히 변화시키고 있다. 이러한 기후변화가 강수 특성을 상당히 변화시켰을 가능성은 크며 최근 여러 국가에서 발생하고 있는 빈번한 이상기후 현상은 이 결과물이라 볼 수도 있을 것이다.

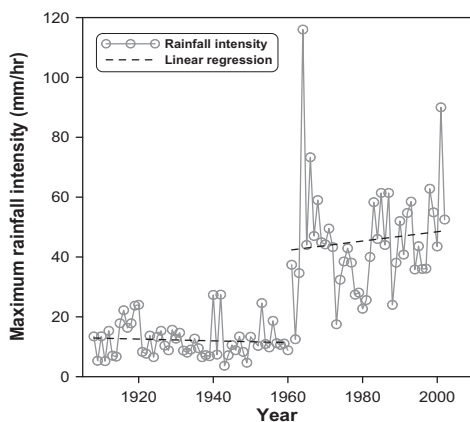
기후변화에 관련된 연구로는 과거의 관측기록에 대한 통계분석 및 시계열 분석을 통하여 장기변동 특성을 정량화 한 경우(김정우와 하경자, 1987; 강인식과 허창희, 1992; 임규호와 정현숙, 1992; 김승과 신현민, 1992)와 기후변화 시나리오를 적용하여 해석한 경우(이재수, 1998; 유철상과 이동물, 2000; 유철

상 등, 2002; 김웅태 등, 2000; 오세정 등, 2004; 박민규, 2009)로 분류할 수 있다. 전자의 경우는 자료의 통계적 특성을 이용하여 기후변화의 영향 정도를 파악한 연구라 할 수 있고 후자의 경우는 주로 대기대순환 모델(General Circular Model; GCM) 시나리오를 이용하여 향후 강우 및 이로 인한 도시의 물순환 특성에 대한 자료의 변동특성을 예측하는 연구라 할 수 있다.

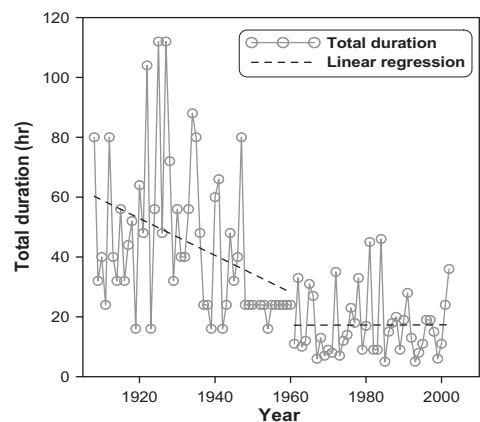
최근의 여러 연구동향을 정리해 보면 장래 기상변화를 예측하는데 있어 기존에 개발된 모델들의 결과가 최대 100배 이상 큰 차이가 벌어지는 경우가 나타난다. 사실상 100년 정도의 장기간을 대상으로 충분한 정확도와 정밀도를 가지는 모형을 개발하는 것이 어렵다는 인식하에 국가표준 시나리오를 작성하여 그에 따른 변화를 살펴보고 그에 따른 저감 및 적응대책을 마련하는 방안으로 관련 대책이 수립되고 있다. 이 경우 기상관측 측면에서 요구되는 것은 기상변화 요인을 과학적으로 물리적으로 명확히 파악할 수 있는 정밀한 관측

시스템의 구비 및 관련 연구의 지속적인 진행과 함께 보다 빈번하게 나타나면서 그 강도가 커지고 있는 폭우성 호우의 정확한 관측 및 예경보를 위한 시스템의 마련이라고 할 수 있다.

이와 관련하여 박민규(2009)에 제시된 서울지점에서 최근 100년간의 자료를 기초로 분석된 연도별로 가장 큰 재현기간을 가지는 호우사상을 분석한 결과는 [그림 2]와 같다. 이에 따르면 호우사상의 총 지속시간의 추세는 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 반대로 최대강우강도는 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있다. 그러나 1961년을 기준으로 이전과 이후를 분리하여 추세를 파악한 경우에는 1960년까지 호우사상의 총 지속시간은 변동 폭이 크기는 하지만 감소하는 경향을 보이는 반면 반대로 이후에는 상대적으로 변동 폭은 줄어들고 아울러 크게 유의한 추세를 나타내지는 않고 있다는 것을 알 수 있다. 최대 강우강도의 경우에는 1960년까지는 미미한 감소경향을 이후에는 뚜렷한 증가경향을 나타냄을 확인할 수 있다.



a. 최대강우강도



b. 총 지속시간

[그림 2] 연최대 호우사상의 특성 변화

III. 방재기상 관측 및 예측시스템

1. 홍수 예경보 시스템

우리나라 홍수통제소의 홍수예경보시스템은 홍수로 부터 인명 및 재산피해를 최소화하도록 하기 위한 목적을 달성하는 것이 관측기기는 일반적인 것이라고 할 수 있으나 관측자료를 취득한 후 이를 전달하고 가공해 홍수예경보를 위한 정보를 생산하기 위한 과정은 최신의 IT 기술들이 반영되어 있다.

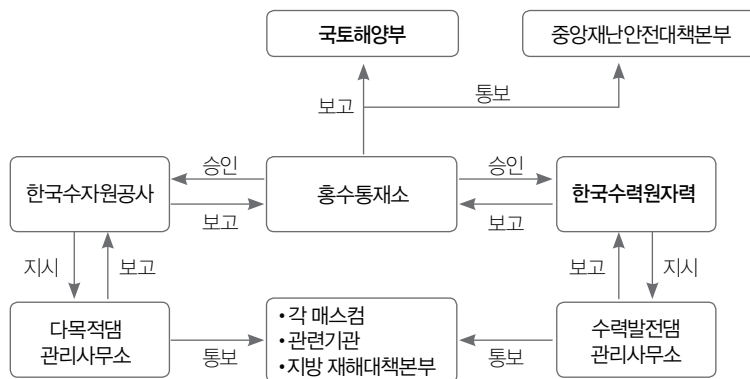
일반적으로 강우발생시 유역내에 설치된 무인관측소는 수위 및 우량자료를 자동 관측할 수 있다. 이렇게 해서 얻어진 자료는 초단파대 무선전화, 위성 통신 또는 전용망 등으로 홍수통제소로 전송되고 홍수통제소에서는 전산기를 활용한 홍수 규모 등에 대한 신속하고 정확한 분석을 수행하고, 그 결과에 따라 홍수예보를 중앙재난안전대책본부, 유관기관, 언론기관 등에 통보하여 사전대응책을 강구하도록 하고 있다.

이러한 홍수예보 업무수행은 국토해양부 건설수자원 정책실의 하천운영과가 총괄업무를 담당하고 있으며 보고체계는 다음 [그림 3]과 같다.

홍수 예보체계는 전국의 4개 홍수통제소가 유관기관의 협력을 통해 수행하고 있다. 홍수예보 절차는 우량 관측소 및 수위관측소에서 매 10분 단위로 수문자료 관측하고 강우에 따른 유출량 계산, 댐 저수량을 고려하여 주요 지점의 수위와 홍수 발생 가능성 예측한다. 그에 따른 하천의 수위가 홍수주위보 수위 또는 홍수경보 수위 이상 상승이 예상될 때 홍수예보를 발표하고 발표상황을 유관기관에 전달한다. 이와 같은 시스템은 우리나라 뿐만 아니라 미국, 일본, 유럽의 경우에도 거의 유사한 방식으로 구성되어 있다.

2. 기상관측 레이더 기술

최근에는 불규칙한 기후변화로 인해 집중호우의 발생 빈도가 증가하고 국지적인 돌발성 악기상이 증가하고

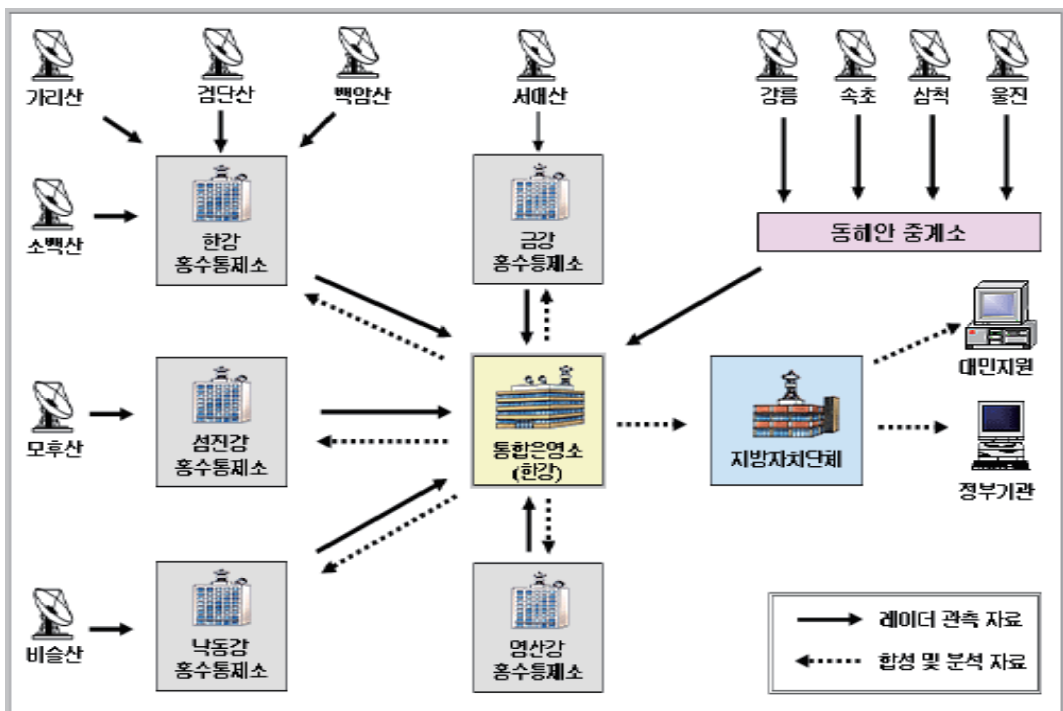


[그림 3] 국토해양부 관할 홍수 예보 체계

있으나 이를 예측할 수 있는 능력은 많이 부족하다. 강우와 관련된 재해에 대한 예측능력의 부족을 극복하기 위해 최근에는 레이더 자료가 예측 능력을 향상시키기 위한 방법으로 많이 활용되고 있다.

이를 위해 국립기상연구소는 레이더 자료를 이용한 초단기 강수 예측 시스템 다중레이더, 바람장 산출시스템의 개발을 통한 실황 예보 정확도 향상, 차세대 이중편파레이더를 이용한 강수량 추정의 정량적인 정확도 향상, 항공기 장착용 레이더를 활용한 강수구름 관측, 강수검증시스템을 이용한 강수량 추정에 대한 정확성 검증 등의 연구를 수행한 바 있다. 또한 국토해양부의 경우 최근 태풍, 국지성 집중호우 등으로 인하여 증가

하고 있는 홍수 피해를 줄이기 위하여, 강우레이더를 이용한 첨단홍수예보 시스템을 개발 중에 있으며, 한국건설기술연구원에서는 이에 관한 연구를 수행 중에 있다. 국토해양부에서는 2001년부터 3개년에 걸쳐 강우레이더 설치 입지조건을 조사하였으며 현재 임진강, 낙동강 유역에 대형 강우레이더를 설치, 잔여 유역에 연차적으로 설치하여 2012년까지는 관측시스템 구축을 완료할 예정이다. [그림 4]는 이와같은 강우레이더 관측망 운영 및 활용 구성도이며, 각 강우레이더의 관측 자료를 홍수통제소로 전송, 통합적인 운영소가 각 지자체에 전달하여 모든 강우레이더를 분석하고 대민지원을 하는데 쓰여질 수 있다.



[그림 4] 강우레이더 관측망 운영 및 활용 구성도

3. 자동우량경보시스템

자동우량경보시설은 1999년 대통령비서실 수해방지 대책기획단의 주관으로 수립한 수해방지종합대책 중 방재정보의 신속한 전달체계 구축방안의 일환으로 산간계곡, 하천변 유원지 상류지역의 강우상황을 관측, 하류지역에 자동으로 경보발령 및 안내방송을 실시하여 재해 상황을 즉시 전파함으로써 행락·야영객의 인명을 보호하기 위한 시설이다.

이 시설을 산간계곡 중·상류지역에는 다동우량 관측 시설, 하류지역에는 자동경보시설, 시·군·구 재해 대책본부와 읍·면·동사무소에는 원격통제 및 감시 시설을 설치하였다. 또한, 상호간 유·무선통신망을 구축하여 산간계곡 중·상류지역의 강우상황을 자동으로 관측하고, 그 관측결과에 따라 하류지역에 자동으로 경보발령 및 안내방송을 행하며, 이러한 일련의 동작을 자동 또는 수동으로 원격리에서 작동시키고 감시할 수 있는 재해정보시스템이라 할 수 있다.

IV. 도시홍수예보를 위한 강우레이더의 활용, 문제점 및 개선방안

1. 강우레이더의 활용

강우는 주로 점(point)관측에 의해 측정되어 왔다. 현재까지의 수준으로 볼 때 지상에 떨어지는 강우를 측정하는 가장 정확한 방법은 강우량계(rain gage)를 이용하는 것이다. 그러나 지점에서 강우를 관측하는 것은 공간적인 강우분포(rainfall field)을 파

악하는데 한계가 있다. 더욱이 강우는 시-공간적 변동특성이 다른 기상인자에 비해 월등히 크며 간헐성(intermittency)이라고 표현되는 강우-무강우의 특성을 함께 보여주기 때문에 그 특성을 파악하고 정량화하는 것은 매우 어려운 일이다. 물론 밀도 있는 강우 관측망이 구성되어 있다면 그것을 파악하는 것이 가능하지만 이를 구축하는 것은 설치 자체나 관리 측면에서 쉽지 않은 것임에 틀림없다. 더욱이 초고층 빌딩의 건설 등으로 강우의 변동특성이 더욱 더 커지고 있는 도시지역의 경우 정밀도 높은 관측망을 구성하고 유지하기가 쉬운 일이 아니다.

특히, 최근 기상 이변으로 인해 이상 강우가 빈번하게 발생하는 시점에서 점 관측을 중심으로 한 강우 관측은 더 큰 한계를 가지게 된다. 엘니뇨와 라니냐로 대변되는 기후변동이나 지구온난화로 인한 기후변화 등으로 인해 비정상적으로 큰 강도를 가지는 집중호우가 예상치 못한 지역에서 발생함에 따라 그 피해가 점점 커지고 있다. 이와 같은 피해는 앞서 설명된 도시화로 인한 인구 집중 현상으로 인해 더욱 더 가중되어 커지고 있는 상황이다. 현실적으로 이상 강우에 의한 재해의 발생을 원천적으로 방지하는 것은 불가능하다. 그러나 어느 정도 이상의 강우예측이 전제된다면 피해의 규모를 크게 줄일 수 있는 것 또한 사실이다. 강우예측을 위해서는 보다 선진화된 관측시스템의 도입을 통하여 강우분포의 정량적 파악이 선행되어야 하며, 이를 기반으로 다양한 예측방법이 적용될 수 있다.

강우분포의 공간적인 파악은 단순히 강우 현황을 파악하는 문제에 국한되지 않는다. 홍수예정보와 같이 강우의 예측 정도가 성패를 좌우하게 되는 경우에는

공간적으로 분포된 강우특성을 파악할 수 있다는 것은 강우예측의 효율성을 극대화하는데 큰 역할을 하게 된다. 주로 서해에서 유입되는 수증기로 강우가 발생하는 우리나라의 상황을 감안한다면, 지상에서 관측되는 강우장의 파악뿐만 아니라 해상에서 발생되고 있는 강우현황의 파악이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

이러한 점 관측의 한계를 극복하기 위한 방법으로 주목받고 있는 것이 앞에서도 소개된 강우레이더이다. 레이더는 실시간으로 넓은 지역의 강우 현황을 파악하는 것을 가능하게 하므로 강우 예측에 있어 매우 큰 장점을 갖는다. 또한 해상에서 발생되고 있는 강우 현황을 파악하는 것이 가능하기 때문에 강우 예측의 정확도를 극대화시킬 수 있다. 무엇보다도 중요한 점은 관측이 불가능했던 우량계사이의 강우를 관측할 수 있다는 점이라 할 수 있다.

2. 강우레이더의 문제점

많은 장점을 가지고 있는 강우레이더는 그 자체가 직접 측정이 아닌 원격탐사 된 자료라는 한계를 갖는다. 가장 근본적인 한계는 지구 곡면의 영향으로 인해 원거리에서의 레이더 강우와 지상 강우 사이의 상관성이 크게 떨어진다는 점이다. 이 외에도, 수신되는 전자기 반사파의 변환방법, 센서의 품질 및 유지관리 상태, 지형학적 조건 등에 따라 레이더 강우의 품질은 크게 달라질 수 있다. 이와 같은 한계를 갖는 레이더 강우의 품질을 향상하고자 하는 노력이 세계 여러 나라에서 경주되고 있으며, 우리나라에서도 마찬가지이다.

강우량의 크기와 공간적인 분포가 재해발생에 큰 영향을 미친다는 것은 당연한 사실이다. 그러나 이러한 영향을 정량적으로 파악하기 위해 필요한 강우의 품질이 어느 정도가 되어야 하는지는 명확하지 않다. 사실, 그러한 기준의 제시가 아직 된 바 없으며, 보다 근본적으로 그러한 평가를 위한 방법론조차 제시되어 있지 못한 것이 현실이다. 기본적으로 강우의 품질에 따라 재해를 유발하는 홍수발생 결과가 크게 다를 것이며, 따라서 이러한 강우자료의 품질평가 과정은 매우 의미 있는 일이 될 것이다.

우리나라에서의 강우레이더 자료를 활용한 연구로서 지상 강우량 자료와 레이더 강우량 자료의 실시간 보정방법을 이용한 레이더강우에 대한 적용성 검토가 주로 이루어져 왔다. 그러나 기존의 레이더 강우처리기법 관련 연구들은 대부분 레이더 빔 반사도(reflectivity)와 같은 디지털 원시자료로부터 각종 편차를 보정하고 빔 반사도와 강우강도간의 관계식을 적용하는 복잡한 처리 과정을 거쳐서 최종 강우자료를 산정하는 경우가 대부분으로 실제 재해예측에 활용을 할 수 있는 정도의 정확도를 보이지는 못하였다.

3. 강우레이더 활용개선을 위한 기존 연구동향

현재 강우레이더는 도시지역에 강우로 인한 재해를 대비하기 위한 자료를 제공하지는 못한다. 이는 근본적으로 레이더 강우가 상공의 강우량을 측정하는 것이기 때문에 지상에 떨어지는 강우량과는 차이를 가지게 된다. 이 외에도 여러 가지 오차 원인들로 인해 일반적으로 레이더 강우 추정치는 실제 강우를 과소 추정하는 경향을 가지고 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 먼저 시도되는 것이 바로 지상에서 관측된 자료를 이용한 레이더 강우자료의 평균적 편의보정(mean-field bias correction)이다. 일반적으로 오차 원인에 대한 충분한 고려 없이 지상에서 측정된 우량계 자료에 준하도록 레이더 강우자료의 평균을 보정하게 된다. 이 경우 가장 많이 이용되는 방법으로 레이더 강우와 우량계 강우의 차이를 보정계수(mean field (multiplicative) bias)를 적용하여 보정해 주는 방법과 두 자료의 확률밀도함수(probability density function)를 비교하여 보정해 주는 방법이다.

그러나 평균적 편의가 완벽하게 제거된다 하더라도 강우의 공간적인 변동특성까지를 고려하는 데에 한계를 가지게 된다. 이와 관련해서는 적절한 방법으로 레이더 강우 자료와 지상 강우 자료를 합성(synthesis)하는 방법을 통하여 문제점을 해결할 수 있다. 즉, 상대적으로 높은 정확도를 가지는 지상 강우 자료와 공간적인 분포경향을 파악할 수 있는 레이더 강우 자료의 장점을 적절하게 조합하게 되면, 공간적으로 분포된 정도 높은 강우 자료를 획득하는 것이 가능해진다. 여기서 두 자료를 합성한다는 의미는 독립적인 두 관측 방법의 특성을 합성한다는 의미를 포함하게 된다. 지상에서 측정되는 점 관측 자료는 시간적으로 연속적인 강우량을 파악하는 것이 가능하지만 공간적으로는 이산적인 관측 특성을 나타내고, 레이더의 경우는 공간적으로 연속적인 강우 관측을 수행하지만 시간적으로는 이산적인 관측 특성을 나타낸다. 따라서 두 강우 자료를 합성한다는 것은 단순히 정확도 높은 지상 강우 자료와 레이더 강우 자료를 합성한다는 의미뿐만 아니라 다른 관측 특성으로 인한 강우의 오

차 규모를 감소시킬 수 있다는 장점을 가지게 되는 것이다. 가장 빈번하게 이용되는 합성 방법은 지구통계학(Geostatistics)적 방법 중 하나인 Co-Kriging 방법이라 할 수 있다.

최근에는 추가로 자료동화기법(data assimilation technique)도 다양하게 시도되고 있다. 자료동화기법은 전통적으로 기상학 분야에서 많이 발전되어 온 방법으로 제한적인 정보, 즉 관측 자료를 이용하여 대기의 상태를 파악하는데 있어서 이를 잘 나타내는 모형을 이용하여 동화하는 방법이라고 정의할 수 있다. 여기서 동화(assimilation)란 관측치를 가장 잘 구현하는 모형을 찾아내는 과정을 의미한다. 전통적으로 자료동화기법들은 수치예보에 있어 성긴(corse) 관측 자료를 모형의 초기장과 동일한 시-공간적 해상도의 자료로 보정하기 위해 많이 이용되어 왔다. 자료동화기법은 연속수정법(successive correction method), Nudging, variational method, Kalman filtering 등과 같이 많은 방법들이 개발되고 응용되고 있다.

V. 맺음말

서울을 포함한 세계 각국의 주요 도시들은 인구집중으로 도시구조가 점차 복잡해지면서 이로 인한 기상현상의 효과가 증폭되고 있다. 뿐만 아니라 최근의 기후변화는 이러한 변화정도를 보다 가속화시키고 증대시키는 요인이 되고 있다. 이와 관련하여 재해기상 측면에서 잠재적인 도시위험을 줄이기 위한 수단으로서 도시 지역의 보다 정교한 기상정보 서비스가 필요한 것은

두말할 필요가 없다.

현재 운영 중인 도시기상 관측시스템이 재해기상 측면에서 보다 효율화하고 도움이 되기 위한 정보를 제공하기 위해서는 다음과 같은 내용들이 보다 적극적으로 다루어지고 개선될 필요가 있다. 첫 번째로 도시기상 현상의 변화특성을 정량화하고 기상학적으로 그 양상을 보다 정확하게 파악하기 위해 레디오존데 등을 활용한 연직 기상요소의 밀도높은 관측자료를 축적하고 관련 연구를 장기적으로 진행할 필요가 있다. 두 번째로 전통적인 지상관측장비 뿐만 아니라 최신의 열 및 수분 Flux 관측시설이나 기상위성 자료 등을 다각적으로 활용하기 위한 방안이 마련되어야 한다. 이는 첫 번째와 마찬가지로 강우발생 현상을 보다 정량적으로 파악하고 관련 과정의 정량적인 불확실성을 해소하는데 큰 도움이 될 것이다. 세 번째로 재해기상의 예보 측면에서는 무엇보다도 강우레이더의 도입이 필요하다. 특히 일본 동경도 등의 사례에서 살펴볼 수 있는 특정 도시지역을 대상으로 설계되어 운영되고 있는 강우레이더 시스템을 주요 도시별로 구축하는 것을 고려할 필요가 있다. 이러한 강우레이더는 공간적인 관측의 사각지대를 최소화하면서 예정보 효율을 높일 수 있는 재난대응시간을 마련할 수 있는 있다는 측면에서 반드시 그 품질이 지금보다는 제고될 필요가 있다. 마지막으로 도시기상 관측시스템의 활용을 도시재해 및 홍수관리를 담당하고 있는 분야 등과 연계하여 구축을 도모할 필요가 있다. 기관별로 산재된 자료와 서비스를 공유하기 위한 파트너십의 논의와 함께 최적의 관측자료를 얻을 수 있는 관측망의 조정 및 자료의 공동 운영을 원활히 할 수 있는 방안의 마련이 반드시 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 강인식, 허창희 (1992). "한반도 여름철 강수량의 장기 예측." 한국기상학회지, 제28권, 제3호, pp. 283-292.
- 기상연구소 (2003). 도시대기특성 예측 및 응용기술 개발(I). 연구보고서.
- 기상연구소 (2004). 도시대기특성 예측 및 응용기술 개발(II). 연구보고서.
- 김승, 신현민 (1992). "서울지점 강수의 장기간 변동성향에 대한 통계학적 검증." 1992년 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 264-272.
- 김용태, 유철상, 이동률, 이준열 (2000). "기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출영향 분석." 2000년도 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 483-486.
- 김정우, 하경자 (1987). "서울 월강수량의 경년변동과 기후 변화." 한국기상학회지, 제23권, 제3호, pp. 54-69.
- 김해경, 이명숙 (2005). (경제 및 금융자료를 위한) 시계열 분석. 경문사.
- 박민규 (2009). 기후변화와 도시화를 고려한 강우특성의 변화 추정, 2009 도시홍수 워크샵.
- 오세정 (2004). 기후변화에 따른 하천유역의 홍수유출 변화 분석. 석사학위논문, 고려대학교.
- 유철상, 이동률 (2000). "기후변화에 따른 강수일수 및 강수 강도의 변화 연구." 대한토목학회논문집, 제20권, 제 4-B호, pp. 535-544.
- 유철상, 정광식, 강인주 (2002). "지구온난화에 따른 일 강수 분포의 변화 평가." 대한토목학회논문집B, Vol. 22, No. 3, pp. 291-299.
- 이재수 (1998). "CO2 증가에 따른 수문-기상 변화 분석." 전주대학교 기술종합연구소 학술논문집, Vol. 4, No. 2, pp. 159-169.
- 이현영 (1989). "원격탐사기법에 의한 도시열섬연구." 대한지리학회지, Vol. 40, pp. 1-13.
- 임규호, 정현숙 (1992). "서울지방 연강수량의 경년 변동." 한국기상학회지, 제28권, 제2호, pp. 125-132.
- Atkinson, B. W. (1971). "The effect of an urban area on the precipitation from a moving thunderstorm." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 10, pp. 47-55.

- Balling, R. C. and Brazel, S. W. (1987). "Recent change in Phoenix, Arizona summertime diurnal precipitation patterns." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 38, pp. 50–54.
- Box, G.E.P., and Tiao, G.C. (1975). "Intervention analysis with applications to economic and environmental problems." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 70, No. 349, pp. 70–79.
- Changnon, S. A. (1968). "The La Porte weather anomaly—fact or fiction?" *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 49, pp. 4–11.
- Changnon, S. A. (1969). "Recent studies of urban effects on precipitation in the United States." *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 50, pp. 411–421.
- Changnon, S. A. (1992). "Inadvertent weather modification in urban areas: lessons for global climate change." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 73, pp. 619–627.
- Changnon, S. A., Shealy, R. T., and Scott, R. W. (1991). "Precipitation change in Fall, Winter, and Spring caused by St. Louis." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 30, pp. 126–134.
- Cotton, W. R. (1995). *Human Impacts on Weather and Climate*. Cambridge University Press.
- Goldreich, Y. (1996). "Urban topoclimatology." *Progress in Physical Geography*, Vol. 8, pp. 336–364.
- Huff, E. A. and Changnon, S. A. (1973). "Precipitation modification by major urban areas." *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 54, 1220–1232.
- Jauregui, E. and Romales, E. (1996). "Urban effect on convective precipitation in Mexico City, Atmospheric Environment." Vol. 30, No. 20, pp. 3383–3389.
- Khemani, L. T. and Murty, B. V. R. (1973). "Rainfall variations in an urban industrial region." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 12, pp. 187–194.
- Kline, D. B. and Brier, G. W. (1961). "Some experiments on the measurements of the natural ice nuclei." *Monthly Weather Review*, Vol. 89, pp. 263–272.
- Landsberg, H. E. (1979). "Atmospheric changes in a growing community." *Urban Ecology*, Vol. 4, pp. 53–81.
- Langer, G., Biter, C., and Dascher, A. (1968). "An automated aircraft instrumentation system for cloud nucleation studies." *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. 49, pp. 914–917.
- Lo, C. P., Quattrochi, D. A., and Luvall, J. C. (1997). "Application of high resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, pp. 287–304.
- Oh, S., Kim, Y. and Hyun, M. (2004). "Impact of urbanization on climate change in Korea, 1973–2002." *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 4, No. 6, pp. 725–740.
- Oke, T. R. (1981). "Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations." *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp. 237–254.
- Oke, T. R. (1995). "Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area." *Progress in Physical Geography*, Vol. 19, pp. 107–113.
- Rosenberger, M. S. and Suckling, P. W. (1989). "Precipitation climatology in the Pittsburgh urban area during late spring and summer." *Southeastern Geographer*, Vol. 29, pp. 75–91.
- Semonin, R. G. (1966). "Observations of giant chloride particles in the Midwest." *Journal of Atmospheric Research*, Vol. 2, pp. 251–260.
- Squires, P. (1966). "An estimation of the anthropogenic production of cloud nuclei." *Journal of Atmospheric Research*, Vol. 2, pp. 297–307.
- Tiao, G.C. and Box, G.E.P. (1981). "Modeling Multiple Time Series with Applications." *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 76, No. 376, pp. 802–816.

도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안

김 해 동

계명대학교 환경대학 지구환경학과 교수

khd@kmu.ac.kr

I. 서론

금년에 기상청이 수행한 기후변화백서에 의하면 지난 100년간 우리나라 6대 도시의 평균기온이 약 1.7℃ 상승하여 세계 평균의 2배를 상회하는 것으로 나타났다. 특히, 여름의 지속기간도 지역에 따라서 13~17일 늘어나고 열대야 현상은 4~10일 증가한 반면, 겨울철의 지속기간은 22~49일이나 단축되는 등 한반도가 세계 평균보다 훨씬 빠른 속도로 더워지고 있음이 확인되었다. 앞으로도 한반도의 기온상승은 전 세계 평균보다 더욱 가파르게 상승하여 2000년에 비해 2020년에는 0.9℃, 2050년에는 2℃, 2100년에는 4.2℃ 상승하는 등 향후 100년간에 세계 평균보다 1.5~2℃ 정도 더 상승할 것으로 전망되었다.

지난 11월 국립환경과학원이 펴낸 ‘한반도 기후변화 평가보고서’ 영문판에서도 한반도가 온난화의 영향을 세계 평균보다 많이 받고 기후변화가 수자원, 농업, 보건 등에 상당한 영향을 끼칠 것으로 전망되었다. 또한, 1991~2000년 한반도의 연평균 기온은 13.5도로 1912~1990년 12도에 비해 1.5도 상승했는데, 이는 같은 기간 세계 평균 기온 상승폭(0.6도)의 2.5배나 된다. 이러한 기온 상승으로 한반도에서는 아열대 기후지역의 확장과 빠른 식생변화가 있을 것으로 보고서는 예상하고 있다.

그런데 지역적으로 다르게 나타나는 기온상승 속도는 대기 중 온실가스 증가에 의한 지구온난화의 영향만이

아니라 도시화로 인한 토지이용과 피복의 변화에도 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. 일본의 경우 중소규모 도시에서는 지난 100년간에 기온상승이 1.0℃인 데에 비하여, 동경은 지구온난화에 따른 기온 상승보다도 5배정도 빨랐고, 일본의 6대 도시의 평균 기온상승도 약 4배 빠르게 진행되었다는 사실은 지역 규모에서의 기온상승을 억제하려면 도시의 열 환경 관리가 매우 중요하다는 것을 입증하고 있다(김해동 등, 2011).

이러한 도시의 고온화로 평균기온이 상승할 뿐만 아니라 일 최고기온이 35℃를 넘어서는 초고온일의 발생 빈도와 지속일수가 증가하고, 일 최저기온의 상승과 열대야 일수도 지속적으로 늘어 도시의 환경 쾌적성이 파괴되어 삶의 질이 저하된다. 나아가서 열사병과 열대성 전염병 및 광화학스모그와 같은 환경오염을 유발하여 건강을 위협하는데, 최근 연구에서 열사병과 열대야, 열대야일수 간에는 유의한 상관관계가 성립한다는 것이 확인되었다. 이뿐만 아니라 아스팔트와 콘크리트와 같은 인공구조물로 인해 도시의 지표는 여름철 한낮에 고온이 되어 대기불안정과 상승기류를 발생시켜 국지성 도시형 홍수를 가져오기도 한다. 이러한 사실을 파악하여 도시열섬의 현황을 파악하고 대처 방안을 마련하는 일체의 과정이 도시기후(도시열섬)의 환경평가이다. 도시열섬 환경평가는 지상관측과 고해상도 원격탐사자료를 이용하여 도시열섬의 현황을 제대로 파악하는 것에서 출발한다.

우리나라에서는 지자체가 대기오염 관측소에 설치한 자동기상관측자료와 기상청에서 구축한 AWS자료를 이용해서 도시기후를 어느 정도 파악할 수 있지만, 기

상청 이외의 자료는 연구자들의 접근이 어렵고 자료의 신뢰성도 제대로 평가되지 못한 실정이어서 도시기후의 현황을 고해상도로 파악하기가 어려운 상황에 있다. 이러한 배경에서 여기서는 외국의 사례를 바탕으로 도시기후(도시열섬) 영향평가와 이를 위한 관측시스템 구축 방안에 대하여 논의해 보고자 한다.

II. 도시기후(도시열섬)의 환경영향평가

도시열섬 영향평가는 현상파악을 위한 실태조사와 원인해석 및 완화대책에 관한 실증연구로 구성된다. 그리고 도시열섬현상 그 자체가 인간의 건강과 생태계, 자원소비 등의 인간 활동에 미치는 영향을 파악하는 일체의 과정으로 구성된다. 하지만 지금까지 이러한 활동이 본격적으로 수행된 사례가 많지 않은데, 여기서는 일본 오사카에서 수행된 사례를 간략히 살펴보기로 하자.

오사카에서는 2002년에 관측 자료에 기초한 오사카의 도시열섬 실태 조사와 주민설문을 이용하여 도시열섬이 시민들의 삶에 미치는 영향을 종합적으로 조사하였다(김해동 등, 2011). 설문을 통해서, 주민들은 도시열섬이 여름철 냉방이용 상황과 건강 및 생태계 변화에 영향을 미치고 있는 것으로 인식하고 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 연구진들은 오사카시와 전력회사의 자료를 이용하여 도시열섬이 오사카의 환경에 미치는 영향을 정량화하는 작업을 수행하였다. 그 결과 에너지, 인체 건강, 생태계, 도시의 물수지 및 대기환경에 미치는 영향 부분을 요약하면 다음과 같다.

1. 에너지 소비

낮에는 상업지구가 주택지구보다 큰 기온감응도(기온 1℃ 상승에 따른 전력소비량 증가율)를 보였고 야간에는 주택지구의 기온감응도가 높았다. 특히 20시 이후에는 주택지구의 기온감응도가 현저히 높았다. 또한 냉난방을 하지 않는 중간기 전력 소비량에 비하여 한여름 오사카 도심부의 전력 사용량은 112%나 높았고, 같은 기간에 교외지역에서는 62%로 나타나 교외부의 냉방 부하는 도심부의 절반에 지나지 않았다. 그리고 오사카 전체로는 여름철 평균기온이 1℃ 상승할 때마다 약 60만 kW의 전력수요가 추가로 발생하는 것으로 파악되었다. 이는 중규모 원자로 1기의 발전량에 상당한다.

2. 인체 건강에 대한 영향

열섬현상이 건강에 미치는 영향은 낮 기온의 상승에 따른 열사병이나 심장의 무리, 장시간 냉방에 따른 냉방병 발생, 야간 기온 상승에 의한 수면부족과 스트레스 등을 들 수 있다. 열사병은 일 최고기온이 32℃ 부근에서 증가하기 시작해서 35℃ 부근부터 병원으로 수송되는 열사병 환자 수가 급증하였다. 여름철 야간 기온 상승에 따른 에어컨 수요는 25℃ 부근에서 급격한 증가를 보여 야간 취침 시 에어컨 이용에 대한 역치(閾値)는 25℃에서 27℃ 부근에 존재하는 것으로 추정되었다. 또 도심부의 주민들이 여름철에 주·야간 모두 에어컨 사용 없이 견딜 수 없다고 답한 비율이 80%를 초과하였다. 이 연구로 도시인들의 건강과 환경쾌적성을 파괴하기 시작하는 역치로 낮 기온 35℃와 야간 기온 27℃가 설정되었다.

3. 생태계의 영향

도시열섬이 곤충류, 식생류의 변화에 미치는 영향에 관한 학술적 연구결과와 주민 설문을 통해 생태계도 열섬으로 인한 영향을 받고 있다는 것이 확인되었다. 이러한 환경영향에 대한 대책의 필요성과 대책에 따른 비용편익분석 도구개발을 서둘러야한다고 제안하였다.

4. 물 수지와 대기환경에의 영향

도시화에 따른 토지피복의 변화와 도시기온의 상승이 유발하는 도시 내의 지표면 수분 수지변화와 물 사용량 변화가 평가되었다. 일 최고기온이 20℃ 부근을 넘는 단계부터 기온이 상승할수록 급수량이 증가하는 경향을 보이며 기온 1℃ 상승에 급수량은 대략 1~2% 증가하는 것으로 평가되었다. 이외에, 도시열섬 강도가 강화될수록 특유의 바람장이 형성되어 특정지역에 도시형 홍수가 편재되어 나타났다. 또 대기오염과 열섬 현상과의 관계도 조사되었다. 열섬강도가 강해질수록 겨울에 청천약풍(晴天弱風)이 형성되기 쉬워 도시 전체에 먼지 돔이 형성되어 대기오염을 조장하고, 여름에는 광화학옥시던트 농도가 증가한다.

5. 도시환경영향평가의 장래 전망

도시열섬이 도시환경에 미치는 영향은 에너지소비에서 건강, 생태계 등에 다양하게 나타난다. 그래서 공학을 포함한 의학, 기상학, 농학, 심리학에 이르기까지 폭넓은 학문 분야의 전문가들이 참여하여 열섬이 도시인들의 삶에 미치는 사회적 편익을 정량화하는 도

구를 개발하는 것이 시급하다는 공감대가 형성되고 있다. 이러한 도구를 활용하여 도시열섬의 편익이 정량화된다면 도시열섬을 완화해 갈 수 있는 정책수립에 시민의 공감을 얻어낼 수 있는 유리한 환경이 조성될 것으로 기대된다.

III. 고밀도 도시기후 관측망 구축을 통한 도시 열섬 환경평가 사례 - 동경의 경우

1997년 5월부터 1998년 4월에 걸쳐 동경에서는 도시기후 모니터를 위해 120개 지점에 자동기상관측자료 수집 장치가 설치되었다. 관측된 기상정보는 인터넷 웹사이트에 공개되고 있다. 이 사업은 과학기술진흥사업단의 전략적 기초연구추진사업의 연구과제 중의 하나인 「도시열섬의 계측·제어시스템」의 지원으로 이루어졌다.

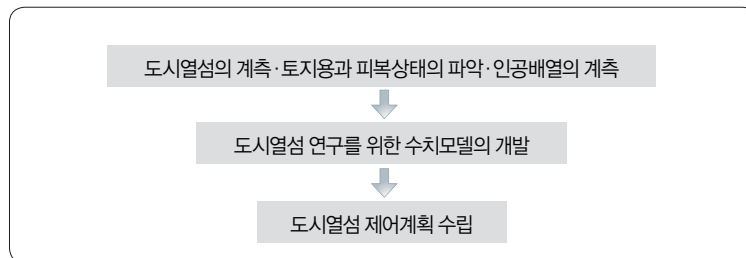
도시의 고온화는 도시 생활을 불편하게 만들뿐만 아니라, 온대이남 지역에서는 여름철 냉방기구 사용의 증가로 에너지 소비가 급증함에 따라서 전력 공급에 심대한 부하를 끼쳐 정전의 위험성을 가중시킨다. 더욱이 중국, 동남아시아, 태국, 중국 남부 등에서는 이

미 여름철 냉방에너지 부하로 인해 여름철 전력 부족이 만성화된 지역도 적지 않다. 그래서 열 환경 부하가 낮은 도시구조로 개선하여 에너지 소비 억제와 에너지 위기에 대응할 필요가 있다. 뿐만 아니라 도시의 고온화는 질병, 광화학스모그의 심화, 일상생활과 생명 그리고 생태계에도 큰 영향을 미치고 있어 도시열섬 완화대책 수립의 필요성이 더욱 높아지고 있다.

또 도시열섬은 지구온난화 시대에 지역차원의 기온상승을 더욱 부추기는 역할을 하고 있다. 지구온난화는 온실가스의 증가로 인해 발생하는 기온상승 현상으로 이해되고 있는데, 전 세계적으로 보더라도 도시 인구가 과반을 넘어서고 있는 오늘날에는 지구온난화로 인한 기온상승 속도보다도 훨씬 빠른 속도로 상승하고 있는 도시기온의 영향이 인간의 삶에 미치는 영향이 훨씬 큰 것으로 추정되고 있다(김해동 등, 2011).

이러한 배경에서 이 연구 프로젝트에서는 우선 동경의 도시열섬 실태 파악을 목적으로 계측, 모델제작, 도시열섬 제어계획 수립을 목표로 설정하였다(그림 1).

이 프로젝트의 세부 프로젝트는 다음과 같이 4개로 이루어졌다.



[그림 1] 동경의 도시열섬 계측·제어시스템 프로젝트 수행의 흐름도

Theme 1. 고해상도 원격탐사에 의한 도시열섬 실태 파악

Theme 2. 지상관측에 의한 도시열섬 실태 파악
2.1 동경의 모니터링

2.2 해외 사례 모니터링

Theme 3. 도시열섬 연구를 위한 수치모델의 개발

Theme 4. 토지이용 제어를 통한 도시열섬 완화 계획 수립

프로젝트의 세부 과제인 「모니터링 그룹(Theme 2)」의 책임자였던 동경수도대학(舊, 동경도립대학)의 T. Mikami 교수팀이 시공간적 고해상도 도시기후 해석과 수치모델 결과의 검증자료를 확보한다는 목적 하에 동경 권에 고밀도 도시 기후 관측 망을 구축하였다. 또 해외 사례 모니터링(Theme 2.2)으로 「도시 내 대규모 하천(서울 청계천)의 부활에 따른 서열(暑熱)현상 개선효과의 실증」을 우리나라 국립기상연구소 응용연구실과 공동으로 수행하기도 하였다. 동경 권에 설치한 이 관측 망을 이용한 기상자료의 수집은 프로젝트 완료 후에도 계속되고 있다. 기상 관측과 인터넷 웹사이트를 이용한 자료 관리의 실무는 여전히 동경수도대학에서 맡고 있으며, 자료는 모든 연구자들이 자유롭게 이용할 수 있도록 공개되고 있다. 그리고 이 자료를 활용하는 후속 연구과제도 지속되고 있어 일본의 도시기후연구발전에 중추적 역할을 하고 있다.

우리나라에서도 기상청이 환경 친화적 도시계획과 도시지역의 기후변화 적응대책 수립을 지원하기 위한 도시기후사업을 추진하기 위해서는 무엇보다도 고해상도의 기상 관측 망 구축이 가장 중요하다. 이런 점에서 일본 동경의 도시 기후 관측 망 구축사업을 상세히

알아보도록 하자.

1. 관측소 구축방침

이 사업을 통한 고해상도 도시 기후 관측망 구축 이전에 동경 권에는 우리나라의 AWS 시스템과 같은 일본 기상청의 자동기상관측 망인 AMeDAS가 수 개 지점에 위치하고 있었다. 일본의 경우에는 AMeDAS 관측 시스템이 일본 전국에 걸쳐 약 1,300개가 있는데 동경권에는 10개소가 있다. 다만 우리나라의 AWS와는 달리 일본의 AMeDAS 관측소는 지역기상관측소와 지역 우량관측소라는 2가지 종류가 있는데, 도시기후 연구에 중요한 기상요소인 기온, 일조, 바람의 관측은 지역관측소에서만 이루어지고 있다. 동경권의 경우에는 지역기상관측소가 7개 지점이 있다. 동경에 인접한 사이타마현에 8개소, 가나자와현에 5개소가 있고, 전국적으로 20 km 격자 간격마다 1개소의 비율로 지역기상관측소가 위치하고 있다. 동경 권에는 이 보다는 다소 고밀도로 지역기상관측소가 존재하고, 대기 오염 관측소에 설치되어 있는 자동기상관측장치는 동경 내에 약 50개소가 있다고 한다. 또 고속도로 공단, 건설성 등에서 설치한 자동기상관측소도 다수가 존재한다. 하지만 이들 관측소에 설치된 자동기상관측자료는 기상청의 자동기상관측자료와 달리 연구자들이 손쉽게 입수할 없는 문제가 있었다. 牛山 등(1999)이 작성한 보고서에 의하면, 일본에서는 이들 자료를 공식적으로 입수하려면 1년 가까이 시일이 소요되기도 하였다고 하므로, 일본에서는 이들 자료에 접근하기가 우리나라보다도 훨씬 어려운 사정에 있었던 것으로 보인다. 이러한 이유로, 기상청과 다른 정부기관의 자동기상관측소로부터 얻어지는 기상자료만을 이

용하여 도시기후연구를 수행하는 데에는 불충분하다는 사실에 공감이 모아져서 새로운 기상 관측 망 구축에 나서게 되었다고 한다.

새로운 도시기후 관측망 구축 팀에서는 이중 투자를 피한다는 의미에서 기상청의 자동기상관측 자료는 그대로 사용하기로 하고, 이것을 보완·강화하는 형태로 독자의 관측망을 구축하기로 하였다. 또, 당시 프로젝트에 참여하고 있는 연구자들의 요구를 반영하는 것은 물론이고, 후속 과제 수행자들도 보편적으로 자료를 활용할 수 있게 하기 위해서 관측망의 위치가 특정 지역에 편중되지 않고 동경을 중심으로 관동권역에 걸쳐 균등하게 배치하였다.

2. 관측소 밀도의 결정

동경에서는 1993년도에 동경도 환경과학연구소가 주로 초등학교의 백엽상을 빌려서, 동경 도내에 약 100개 지점에 관측 장치(온습도 데이터 로거)를 설치한 관측 망(이를, 93년 관측 망이라고 지칭함)을 1년간 운영한 사례가 있는데, 이 관측 성과로 동경의 도시열섬 분포 특성을 파악할 수 있는 흥미로운 결과가 얻어졌다(牛山 등, 1999). Mikami 그룹에는 93년 관측망 설치와 자료 분석 연구에 참여한 연구자도 있었기 때문에 그때의 경험을 살려서 새로운 도시기후 관측망 구축 사업이 원만하게 이루어질 수 있었다.

1993년 관측망이 안고 있던 문제 점 중의 하나는, 행정 구역으로서의 동경도에 집착해서 관측 망을 구축하였기 때문에 동경도와 다른 행정 구역간의 경계 지역에서는 관측소의 분포가 균질하지 못했다는 점이었

다. 이러한 자료의 불균질성은 격자형으로 산출되는 수치모델의 계산결과와 관측 자료를 비교·검증할 때에 한계를 드러낸다. 그래서 새로운 관측망에서는 관측밀도를 균질하게 하고, 행정구역에 관계없이 면적(面的)으로 전개하였다.

1993년 관측망은 동경 도내에 5 km(도심부에서는 2.5 km)의 격자를 설정하고, 각 격자의 중앙 부근에 위치한 초등학교의 백엽상을 빌려 관측기기를 설치하였다. 새로운 도시기후 관측망 구축에 있어서도 이러한 기본방침을 답습하여, 도내는 산간 지역을 제외한 전 지역을 포함하는 범위 내를 관측 대상지역으로 하였으며 나아가서 격자를 설정하는 영역을 북쪽으로 10 km, 남쪽으로 5 km 더 확대하였다. 북쪽으로 확대한 이유는, 도시의 고온역이 해풍의 진입에 따라 북쪽으로 이동해간다는 선행 연구결과를 실증해 보고자 함에 있었다.

3. 관측 장소의 선정

일반적으로, 초등학교의 백엽상 설치상황은 적절한 관측 값을 얻을 수 있는 좋은 조건을 갖추고 있지 못한 사례가 적지 않다. 1993년 관측망의 관측 값에 대해서도 이 자료를 이용한 연구자들로부터 다양한 문제가 지적되고 있었다[그림 2].

새로운 관측망을 설치함에 있어 그림3에 제시된 바와 같은 지적 사항을 바로 잡기 위해서 관측소 예정지를 답사하여 관측에 문제가 없다는 것을 확인한 후에 관측소 설치를 의뢰하는 작업을 하였다. 관측소 설치를 의뢰한 초등학교의 선정은 우선 93년 관측망의 영역

동경 환경과학연구소에 의한 기온 실체조사의 관측 상황에 관하여

1) 관측지점의 설치장소

기본적으로 초등학교의 백엽상. 이 외에 예외적으로 축산시험장, 수자원관리소 등

2) 관측지점의 설치상황

온도계는 백엽상 내에 설치하였지만, 백엽상의 위치와 주위 상황, 백엽상의 고도 등이 각 지점마다 다르다. 이하에 주요한 문제점을 소개한다.

a) 일사량의 문제

백엽상이 건물의 북쪽에 위치하여 그들이 지는 지점

백엽상 위에 나무 그들이 지는 지점

b) 백엽상의 지표면이 잔디가 아닌 지점(총 23%)

c) 백엽상과 건물간의 이격거리

2m 이내로 근접된 사례 4지점

d) 센서의 고도가 일정하지 못함

100cm~170cm에 걸쳐 다양함

e) 백엽상의 저면 고도가 일정하지 못함

70cm~130cm에 걸쳐 다양함

f) 기타

- 백엽상의 노후화
- 관측지점의 토지이용 구분의 불균질성
- 자료 분석의 결과 정상적인 기후값이 아닌 것으로 추정되는 지점

[그림 2] 1993년 관측 망의 문제점에 대한 지적 사항.
(牛山 등, 1999)

내에서는 1993년에 선정한 학교를 제1후보로 하고, 확대된 영역 내에서는 각 격자의 중앙 부근에 위치한 초등학교를 제 1후보로 하였다. 한편 2.1절에서 기술된 방침에 따라서, 제 1후보의 근방에 AMeDAS 관측소가 존재하는 경우는 관측소를 새로이 설치하지 않았다. 다음으로 후보 학교 간에 ①백엽상의 존재 여부, ②장해물(특히 남쪽)의 유무, ③지표면 상황 등을 비교·조사하였다. 하나의 격자 내에는 다수의 후보학교가 존재하기 때문에 그림 3과 같은 체크 시트를 작

성하고, 디지털 카메라로 현장을 촬영하여 자료를 축적해서 관계자들 간에 논의를 거쳐 최종적으로 연구책임자가 관측소를 결정하는 과정을 거쳤다.

지점 명: 초등학교

조사 일: 년 월 일

조사자 :

〈전반〉

☐ 백엽상을 확인할 수 있다.

〈장해물〉

☐ 시계(視界) 내에 4층 이상의 건물이 있다.

☐ 백엽상의 남쪽에 일사에 방해할 줄 수 있는 건물이 있다.

☐ 주변 건물의 고도가 대체로 일정하다.

☐ 백엽상 주변의 반경 10m 이내에 1.5m 이상의 구조물이나 나무가 있다.

〈백엽상 주변의 지표상태〉

☐ 초지

☐ 나대지

☐ ()

〈풍향풍속계 설치 가능 장소〉

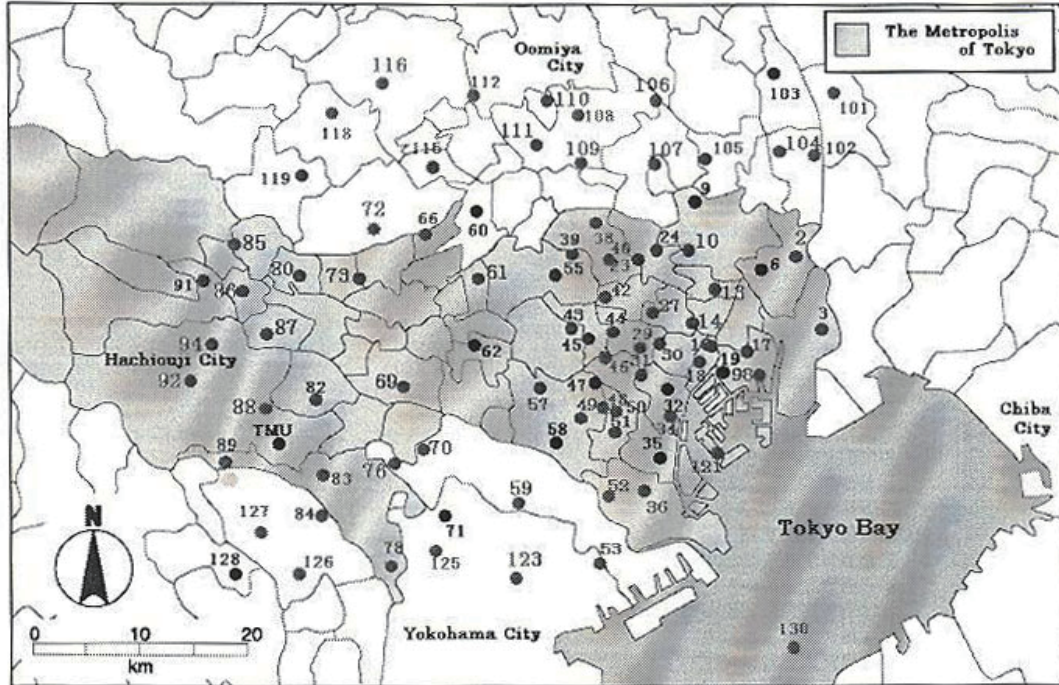
☐ 백엽상 주변에 기둥 등이 있다.

☐ 백엽상에서 수 십m 이내에 옥상이 있는 건물이 있다.

☐ 옥상에 기둥을 세울 수 있는 조건이 구비되어 있다.

[그림 3] 관측소 설치 후보 초등학교의 체크 시트

현장사진과 체크 시트를 바탕으로 평가한 결과 관측소의 조건에 문제가 없다는 사실이 확인된 경우, 그 초등학교를 관측소 설치 장소로 선정하고 해당 학교의 양해를 얻어 관측 장치를 설치하였다. 관측 조건에 문제가 있는 것으로 확인된 경우에만 의뢰하였지만 설치에 동의를 얻지 못한 경우에는 다른 후보 학교를 대상으로 마찬가지로의 절차를 거쳐 선정 작업을 수행하였다. 이런 과정을 거쳐서 관측소를 설치할 수 있는 학교로



[그림 4] 최종적으로 관측소가 설치된 장소. (牛山 등, 1999)

선정된 경우가 약 300개에 이르렀으며, 이 가운데서 119개소에 관측소를 설치하였다[그림 4].

4. 설치한 관측시스템

① A Type: 기온과 습도만 관측하는 유형의 관측소로 101개소가 여기에 속한다(이를 METROS 100이라고 지칭하고 있다.). 백엽상 내에 건전지로 작동하는 온·습도 데이터 로거[그림 5]를 설치해서 관측을 수행한다. 관측 간격은 15분이고, 2개월에 한 번씩 관측소를 방문하여 전지를 교환하고 자료를 수거하고 있다.



[그림 5] A Type 관측소에서 사용되고 있는 온습도 데이터로거. (牛山 등, 1999)

② B Type: 기온과 온도 이외에 풍향 풍속도 관측하는 유형의 관측소로 18개 지점이 이에 속한다(이를 METROS 20이라고 부르고 있다.). 백엽상 내에 습도 센서, 기록기·제어기를 두고, 백엽상에 근접해서 바람을 관측하기 위한 봉(조건에 관계없이 3m)을 세우고, 이 위에 풍향·풍속계를 설치하였다[그림 6]. 원격으로 자료를 회수할 수 있는 시스템을 사용하는 데, 통신에는 설치의 용이성을 고려해서 휴대전화를 이용하기로 하였다. 관측시스템의 운영에 소요되는 전기는 초등학교 측에 의존하지 않아도 되도록 태양전지로 발전하여 충전지를 충전하는 시스템을 채택하였다. 이 결과 특별한 이상이 없는 한 관측소를 순회하지 않아도 되게 되었다.



[그림 6] B Type 관측소의 외관. (牛山 등, 1999)

관측간격은 10분으로 설정하였다. 당초 자료의 회수와 서버에의 수록 및 인터넷에서의 공개를 전부 자동화할 계획이었지만 휴대전화로 인한 통신의 불안정으로 인해, 사실상 확실한 자료의 회수·축적을 우선시하여 2주에 1회씩 수동 통신으로 자료를 회수한 후에 수동으로 자료를 서버에 copy하는 방식을 채택하였다.

5. 자료의 보관과 제공 상황

예정된 관측소의 설치 작업은 적당한 학교를 선정하는 작업과 병행하여 1997년 5월부터 시작해서 1998년 6월에 완료하였다. 각 관측소의 위치정보, 주위 상황, 사진 등은 후보학교 조사 포맷 등을 이용하여, [그림 7]에 나타난 자료와 함께 서버 상에 정리해 두어 열람할 수 있게 하였다.

회수된 자료는 A Type과 B Type의 관측소 모두 텍스트 파일로서 웹 상에서 web, ftp 등으로 참조가 가능하여, 프로젝트에 참여하고 있는 연구자들이 편리하게 자료를 이용할 수 있도록 하였다. 관측 자료의 공개는 사업단의 규정에 따라서 프로젝트 수행기간 동안에는 관계자들에게만 공개하고, 그 이후에는 일반 공개를 계획하였다. 두 가지 타입의 관측소로부터 보존되고 있는 자료 포맷은 다음과 같다.

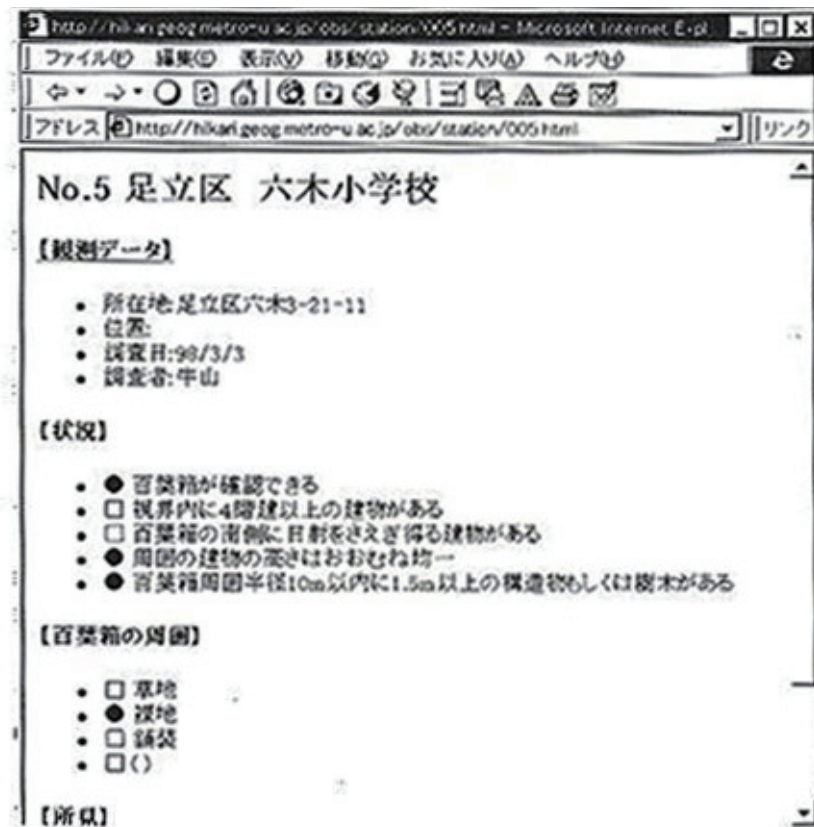
A Type

① , ② , ③ , ④ , ⑤

0000, "1997-10-22", "00:00:00", 14.6, 096.8

①: 데이터 번호(특별한 의미는 없음) ②: 연월일 ③: 시분초

④: 기온(0.1℃단위) ⑤: 습도(0.1% 단위)



[그림 7] 관측소의 상황에 관한 정보의 사례.

관측데이터(観測データ)를 클릭하면, 데이터파일을 열람할 수 있다.

B Type

① ② ③ ④ ⑤ ⑥

980707 2300 05 0013 0251 84

980707 2310 05 0006 0252 85

①: 연월일 ②: 시각

③: 관측 시 10분전의 평균풍향. 00:북, 01:북북동, 02:북동의 16방위

④: 관측 시 10분전의 평균풍속. 0.1m/s 단위(상기의 1행이라면 1.3m/s)

⑤: 기온. 0.1℃단위(상기의 1행이라면 25.1℃)

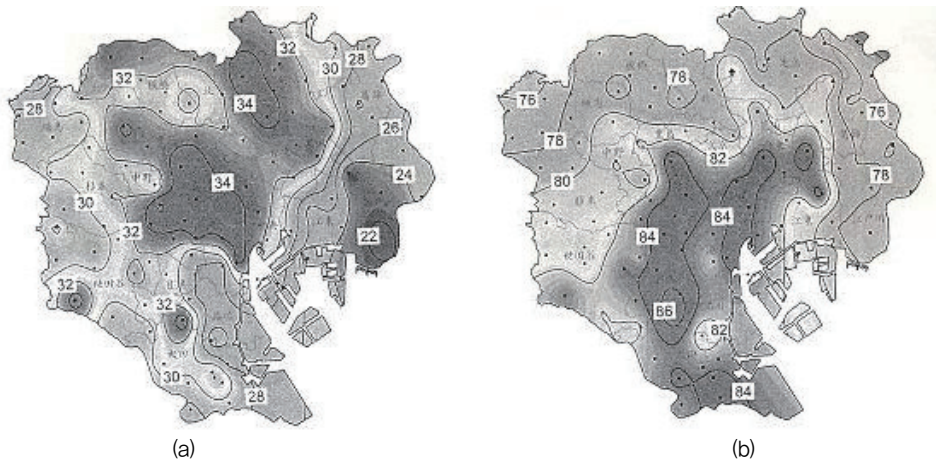
⑥: 습도. 1% 단위

6. 동경의 도시열섬 환경평가- 2002년 여름 사례

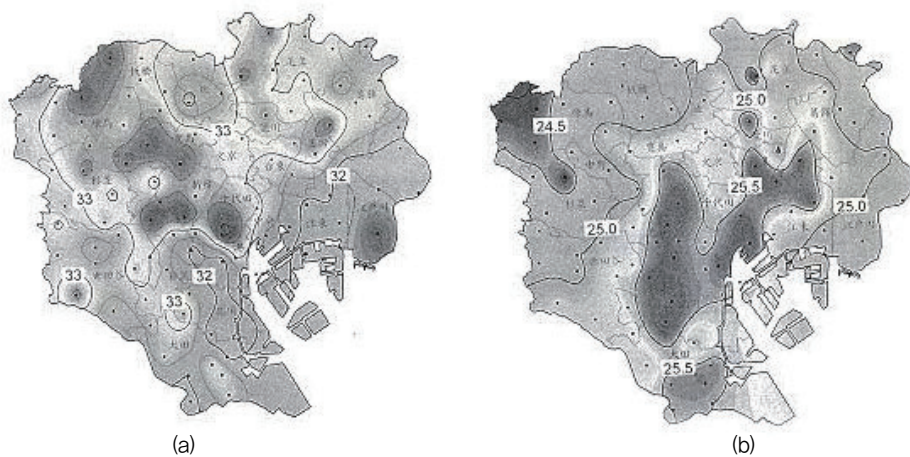
동경도 환경과학연구소와 Mikami교수 연구실은 공동으로 폭염이 기승을 부린 2002년 7월 20일부터 8월 31일 사이에 관측된 METROS 100의 기온관측 결과를 바탕으로 기온 공간분포도 및 열대야 일수 분

포도를 작성하였다[그림 8과 9]. 시공간적 고해상도의 관측 자료를 분석할 수 있게 됨으로써, 도시의 열 환경에 관한 세밀한 정보를 파악할 수 있게 되었다. 아울러 이러한 성과는 동경도가 도시열섬을 완화하기 위한 정책을 수립하는 데에 제공되어, 동경도가 2015년까지 목표로 추진 중인 동경도 환경기본계획(「도시

기온 2℃낮추기 프로젝트」라고도 지칭함) 수립에 기초자료로 활용되었다. 이 계획은 특히 “도시와 지구의 지속가능성의 확보-열섬현상과 지구온난화의 진행을 막는다”를 가장 중요한 목표로 설정하였고, 이를 달성하기 위한 5가지 중점 프로그램 중의 하나로 도시열섬 대책을 내세우고 있다.



[그림 8] (a) 동경의 30℃초과 시간비율(%)과 (b) 25℃초과 시간비율(%). (安藤 외, 2003)



[그림 9] (a) 동경의 일 최고기온 평균 값(℃)과 (b) 일 최저기온 평균 값(℃). (安藤 외, 2003)

이 기본계획에는 도시열섬 대책의 목표로, “2015년 까지 열대야 발생일수를 연간 30일에서 20일로 감소 시키고, 도시기온을 2℃ 낮춘다.”로 정하였다. 이 목표는 동경의 도시기후를 1980년대 이전 수준으로 복원시키는 것을 상정한 것이다(김해동 등, 2011). 또 동경 환경과학연구소에서는 이때 분석한 결과를 애니메이션으로 제작하여 도시기후연구를 위한 교육 자료로 제공하고 있다(<http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/heat2/>).

IV. 제언

오늘날 우리나라의 도시화 비율은 80%를 초과하고 있는데, 이것은 이상적으로 높은 것이다. 아울러 서울, 부산, 인천 등의 대도시의 도시화 속도는 일본 동경을 뛰어넘는 매우 빠른 수준에 있다(이와 김, 2008). 그 결과 우리나라 대도시의 기온상승속도는 매우 현저하며, 여름철 도시형 홍수의 발생과 그에 따른 도시의 재해발생도 현재화되고 있다.

도시열섬과 지구온난화는 서로 상승작용을 하면서 도심부의 기온을 더욱 높여 기후변화로 인한 재해 취약성과 도시의 환경 쾌적성을 더욱 악화시킨다. 이러한 문제를 완화하기 위해서는 도시의 기후환경을 정확히 파악할 수 있는 도시기후관측시스템의 구축이 중요한데, 바람직한 도시기후관측 망을 구축을 위해서는 다음과 같은 점이 고려되어야 한다.

첫째, 공간적 고해상도를 확보할 수 있는 관측 장소가 합리적으로 선정되어야 한다.

둘째, 도시의 요철효과로 인한 기상요소 관측의 제한점과 최소의 비용으로 고해상도 관측 망을 구축할 수 있는 방안이 고려되어야 한다. 예로서 지상에서는 기온을 측정하고 건물 옥상에서 바람, 강수량, 일조 등을 분리해서 관측할 필요가 있으며, 제한된 자금으로 공간적 고해상도를 확보하기 위해서는 일본의 AMeDAS(일본기상청 자동관측 망)나 METROS(도시기후관측 망)처럼 사이트별로 특화된 센서가 적재적소에 설치되도록 고안해야 한다.

셋째, 기상청의 사업평가 체제의 개선도 요구된다. 지자체에서 불과 수개 지점의 대기오염 관측사이트를 확보하는 것도 건물주들의 비협조로 관측 장소를 확보하기 어려운 실정이다. 이런 현실을 반영한 사업 평가체제를 마련해야 한다. 일본 동경처럼 우선 저가의 온습도 데이터로거를 이용한 도시열섬 연구 수행을 지원하여 관측소 확보 가능성을 우선적으로 확인 한 후에 본격적인 도시기후관측망 구축사업을 추진하는 것도 바람직할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- 安藤晴夫, 鹽田勉, 森島濟, 小島茂喜, 石井康一郎, 泉岳樹, 三上岳彦, 2003, 2002년 여름철 동경 도내의 기온분포 특징에 관한 연구(日本語), 동경도환경과학연구시보, 81-87.
- 김해동, 한상주, 2011, 도시열섬 대책과 기술, (주)푸른길
- 牛山素行, 三上岳彦, 木村圭二, 1999, 동경권의 고밀도 도시기후관측 망 정비에 관하여(日本語), Monitoring and Management of Urban Heat Island Interm Report, 4-15.
- Soon-Hwan Lee and Hae-Dong Kim, 2008, Effects of Regional Warming due to Urbanization on Daytime Local Circulations in a Complex basin of the Daegu Metropolitan Area, Korea, Journal of Applied Meteorology, 47, 1427-1441.

수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계

이 순 환

부산대학교 환경연구원 연구교수
withshlee@pusan.ac.kr

I. 서론

지구 온난화 등 지구규모의 기상 변화와 그에 따른 경제적 피해가 증가함에 따라 미래 기후와 국지기상의 변화 경향성에 대한 관심이 높아지고 있다. 도시지역의 대기는 다른 지역에 비하여 높은 에너지 소비와 다양한 지표환경이 혼재하기 때문에 매우 복잡한 특성을 지닌다. 특히 인구 집중에 따른 밀도의 증가는 도시대기환경을 결정하는 매우 중요한 요인 중의 하나인데, 1800년대에 세계인구의 약 3%만이 도시에 거주하고 있었으나, 1900년대에는 약 14%, 1950년에 약 30%가 도시지역에 거주하는 것으로 조사되었다. 현재는 전 세계 인구의 약 50% 정도가 도시지역에 밀집되어 있다. 그리고 1950년대에 인구 500만 명 이상의 도시가 단지 8개뿐이었으나, 2003년에는 46개

로 늘어났다(UN, 2003). 이러한 급격한 인구 집중으로 대기 환경 문제와 그에 대한 해결방안을 요구하는 사회적 압력이 커질 것이다. 따라서 도시 대기의 특성과 예측가능성에 대한 연구의 필요성이 최근 10년 동안 급격히 증가하고 있다.

그러나 이러한 필요성에도 불구하고 도시지역은 빌딩, 도로, 녹지와 같은 다양한 요소가 복잡하게 분포하는 지리적 요인과 지표면의 포장, 자동차의 증가, 인구증가에 따른 열적 요인 등으로 인하여 도시지역의 대기환경을 정확히 분석·예측하는 것은 매우 어렵다.

도시기상학의 학제적인 접근법에는 두 가지가 있는데, 첫 번째는 관측기기를 이용하여 도시대기환경을

이해하는 것이다. 이러한 관측기기에 의한 접근법은 다시 기상 타워 관측 등 관측 장비에 의한 직접 관측과 위성, 레이더 등을 이용한 원격 관측으로 나눌 수 있다. 이들은 도시 내 기상 요소를 직접적으로 측정하여 분석하기 때문에 실제 대기상태를 파악하는 측면에서 매우 중요한 정보를 제공한다. 그러나 관측 가능 지역이 한정되며, 장비의 설치와 유지 보수에 따른 경제적인 부담이 크다는 단점이 있다. 따라서 도시 전체의 전면적인 관측 보다는 제한된 지역내 집중 관측 등으로 한정되는 경향이 있다. 최근 실시된 대규모 도시기상 관측은 프랑스의 마르셀르 지역의 ESCOMP, 스위스 바젤의 BUBBLE(Rotach et al., 2005), 미국 유타주 솔트레이크시티의 URBAN 2000(Allwine et al., 2002) 등이 있다.

또 다른 접근 방법으로 물리 방정식을 수치화한 기상 모델을 통하여 도시대기 환경을 이해하는 것이다. 대기 흐름을 지배하는 운동방정식 등의 물리 방정식을 기초로 하기 때문에 명시적으로 미래 기상을 예측한다는 측면에서 매우 유용한 접근 방법이다. 또한 현재 일기 예보의 기본적인 도구로 수치모델이 활용된다. 그러나 다양한 형태의 모수화 과정이 필요하고, 초기 및 경계조건에 대한 높은 의존성으로 인하여 예측 불확실성이 높다는 단점이 있다. 실제적으로 이 두 가지 접근방식은 상호 독립적인 것이 아니고 서로의 단점을 보완하는 측면에서 동시에 수행되어야 한다. 본 칼럼은 도시대기 연구의 수치적 접근법에서 고려해야 되는 기상학적인 요인을 간단히 제시하고 현재 적용되는 수치모델과 이러한 모델이 가지는 한계에 대하여 살펴보고자 한다.

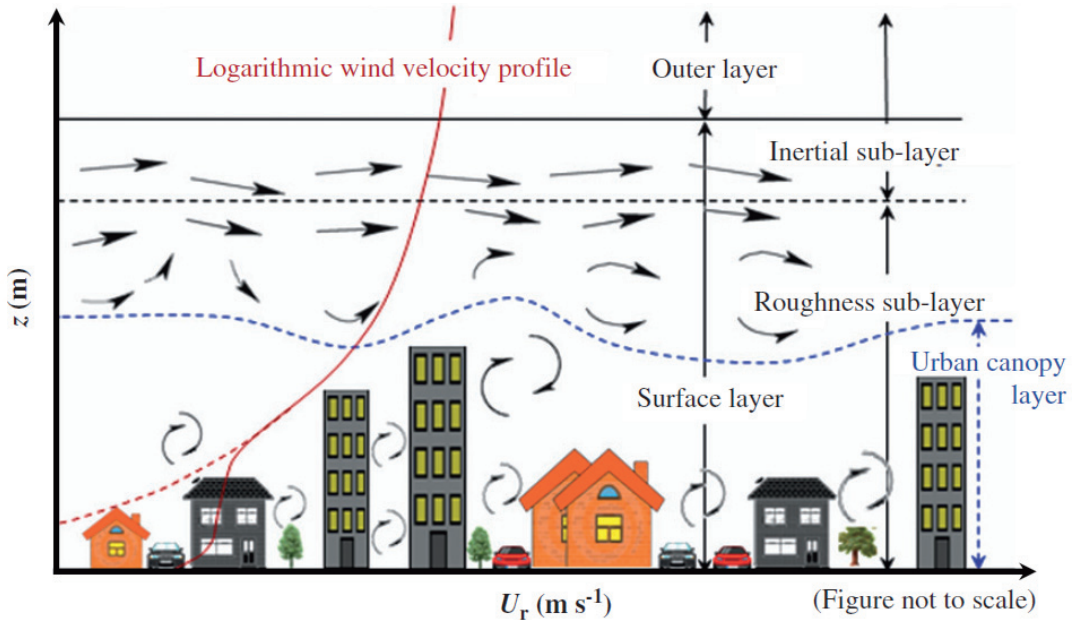
II. 도시 대기의 구조

빌딩 등 다양한 도시 내 구조물은 대기의 흐름을 매우 복잡하게 하고, 하층대기는 난류에 의한 흐름이 지배적이다. [그림 1]은 도시지역 대기의 흐름을 도식화한 것이다. 지표면 부근에 도시 캐노피층이 존재하고 이 층에서는 다양한 지표면 분포에 따른 열적, 역학적인 요인이 직접적으로 작용한다. 실질적인 도시대기의 연구대상은 이 층과 바로 위의 층에서 발생하는 흐름과 관련된 기상요소의 변화이다. 그러나 불행하게도 현재 도시대기를 연구하는 수치적인 접근법에서 사용되는 중규모 수치모델(mesoscale numerical model)은 이러한 지표의 복잡한 흐름을 직접적으로 해석하기 힘들다. 중규모 수치모델의 격자구조 보다 작은 규모(아격자 규모)의 대기흐름이 캐노피 부근에서 중요해지는데, 현재 컴퓨터의 전산 능력과 모델의 역학적인 한계로 인해 이러한 수치모델의 격자 보다 작은 규모의 흐름 특성을 명시적으로 해석하기는 어렵다. 그러나 이러한 아격자 규모의 대기 특성을 중규모 수치모델에 고려되어야 한다. 따라서 여러가지 도시 특성을 대변하는 기상요인을 모수화할 필요가 있다. 그러면 이러한 도시지역 대기흐름을 수치 모의하는데 필요한 아격자 규모의 역학적, 열적 요인들에 대하여 살펴보도록 한다.

1.역학적 요인

1) 거칠기길이 (Roughness length)

도시대기를 결정하는 중요한 요인 중의 하나는 대기의 역학적인 특성을 정의하는 거칠기 길이이다. 지표



[그림 1] 도시대기 흐름에 대한 모식도(Kumar et al., 2011).

면에서 대기로 전달되는 열과 운동량 플럭스는 전통적으로 Monin-Obukhov 상사이론에 의하여 결정되는데 이때 거칠기 길이와 영면 변위(zero plane displacement)가 적용된다. 야외 관측과 실험실내 형태 계측을 통하여 다양한 형태의 지표면 거칠기 길이에 대한 정보는 다양하게 산출되었다(Raupach, 1994; Oke, 1999).

수치모델 연구에서 도시를 모수화하는 가장 간단한 접근법이 바로 거칠기 길이를 도시의 형태로 모수화하는 것이다. 이 방법의 장점은 대기 수치모델 코드의 수정이 없이 그대로 사용 가능하며, 부수적인 계산이 자원이 필요 없다는 것이다. 그러나 평균 빌딩 높이의 2~3배에 달하는 영역 내 하층대기 특성을 모사하기

어렵다는 단점이 있다. 따라서 도시지표를 거칠기 길이로 모수화하는 것은 최하층 대기 내 흐름을 중요시하지 않는 기상예보에 자주 적용된다.

2) 마찰응력(Drag force)

도시 캐노피(Canopy)내 높은 빌딩은 대기의 흐름을 방해하는 장애물로 작용한다. 즉 바람에 대하여 마찰응력을 강화시키는 요인이 된다. 결국 빌딩의 큰 마찰응력은 대기가 가진 운동량을 소멸시키는 역할을 한다. 또한 빌딩에 의한 마찰응력은 경계층 내 발생하는 큰 규모의 난류를 작게 만드는데 매우 효과적이며, 평균적인 운동에너지를 난류운동에너지로 전환시키는데 매우 중요하다. 수치모델의 격자 내 빌딩 분포를 고

려하여 빌딩 벽면이 받는 마찰응력을 정확히 산정하여야 한다. 현재는 도시 내 지리정보 자료를 이용하여 격자내의 빌딩 분포를 이용하여 계산한다. 이러한 마찰응력 계산은 궁극적으로 기압을 바꾸는 역할을 한다.

2. 물리적 요인

1) 반사도(Albedo)

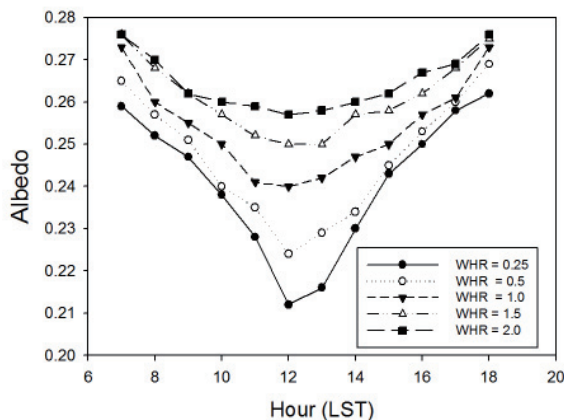
관측자료 분석에 따르면 도시지역의 반사도는 평지에 비하여 그 값이 작게 나타난다. 이는 빌딩 벽면에 의한 다중반사와 복사에너지의 포획 등이 원인인데 관측된 도시지역 반사도는 상업, 공업, 주택지역 등 위치에 따라 0.01에서 0.27로 다양하게 변화하며 평균적으로 약 0.15이다(Sailor and Fan, 2002). [그림 2]는 빌딩의 3차원 구조와 다중반사를 고려한 도시 지표면 반사도의 일변화를 나타낸 것이다(이순환 등, 2010). 반사도는 주간에 낮아지는 경향을 갖고 있으며, 그림에서 WHR은 빌딩의 밀도를 무차원화한 것

으로, 빌딩의 밀도가 높아지면 반사도가 뚜렷하게 낮아진다. 이러한 변화는 도시대기의 열수지 계산에 매우 중요한 요소로 작용한다.

2) 복사에너지(Radiation)

도시의 오염된 대기는 태양 복사에너지의 유입량에 직접적으로 영향을 미치는데, 에어로솔 등 다양한 대기 오염물질은 태양복사에너지를 차단하는 효과를 가진다. 따라서 최종적으로 지표면에 도달하는 태양 복사에너지가 감소한다. 이러한 오염된 대기에 의하여 감소하는 태양 복사에너지 총량은 세인트루이스, 밴쿠버의 관측에서 약 10%, 홍콩과 멕시코시티의 관측에서는 각각 약 33%와 22% 정도로 산정되었다. 그러나 앞에서 설명한 반사도 감소에 따른 변화를 고려하면 순 태양 복사에너지는 거의 비슷하게 나타난다.

반면 도시지표면의 높은 온도에 의하여 지구에서 방출되는 지구복사에너지는 증가하는 경향을 보인다. 그



[그림 2] 건물의 높이에 따른 반사도의 변화. WHR 값이 높을수록 건물의 높이가 높은 것을 의미함.

러나 태양 복사에너지와 마찬가지로 오염된 대기의 장파복사에너지 역시 증가하는 경향을 보이기 때문에 지표면 순 장파 복사에너지 역시 그리 큰 차이를 보이지 않는다.

3) 열용량(Heat storage)

열수지 측면에서 고려하여야 할 가장 큰 특징은 도시의 지표면 온도 즉 지중열 플럭스가 높다는 것이다(Grimmond and Oke 1999). 이는 도시의 열적 특성 즉 도시 지표의 큰 열용량과 높은 열전도도에 따른 것이다(Lee and Kim, 2011). 또한 3차원 빌딩의 높은 열용량 역시 도시 전체의 지표면 열용량 증대에 기여한다. 실제 관측에서 지표면 지중열 플럭스는 직접적인 측정이 아니라 열수지 방정식의 나머지를 이용하기 때문에 실질적으로 지중열 플럭스에는 인공열에 의한 요인 등 기타 모든 요인이 포함될 가능성이 크다. 수치적인 연구에서 도시지표면의 열용량은 경험적 자료를 바탕으로 산정하여 계산하기도 한다(Grimmond and Oke, 1999). 이는 수치모델의 격자 내에 다양한 지표환경, 예를 들어 숲, 포장도로, 벽면, 지붕 등의 비율을 고려하여 각각의 고유 수치를 설정한 후, 최종적인 열용량은 각각 비율에 의해 설정된 가중치를 순복사 에너지 항에 곱하여 산출하는 방식으로 매우 작은 CPU 시간만 소요되기 때문에 자주 적용되어 왔다.

그러나 계산기 능력이 향상됨에 따라 지표면과 대기층 사이에 캐노피층을 두고 이 층에서 도시의 열용량과 열전도도를 표현하는 방법을 사용한다(Best, 2005). 마지막 방법은 도시 지표면의 다양한 환경에

서 각자 독립적으로 열용량과 열전도도를 가지고 열수지 방정식을 산출한 후 이를 점유 비율에 맞추어 통합하는 방식이다. 이것은 MM5(5th Generation Mesoscale Model)와 WRF(Weather Research and Forecasting) 등 현재 사용되는 중규모 모델에서 적용하는 방식으로 다양한 사례에 적용되고 있다.

III. 도시기상 연구의 수치 모델

일반적으로 도시규모의 기상 흐름을 분석하고 해석하기 위한 수치적 접근은 중규모 모델(Mesoscale Numerical Model)을 통하여 이루어지고 있다. 중규모 모델은 수 km 에서 수백 km의 격자간격을 가지고 수km의 연직 공간을 1~12시간 규모로 분석할 수 있다. 해륙풍, 산곡풍 등이 이러한 중규모 모델로 계산가능한 범주에 속한다. 그리고 모델에 의한 중규모 기상 현상의 모의 가능성과 그 결과는 매우 우수한 것으로 보고되고 있다.

그러나 도시는 복잡한 지표면을 가지고 있으며, 수십 m 특정 규모의 빌딩, 도로, 공원 등이 혼재하고 이들과 비슷한 규모의 공기흐름이 지배적일 수 있다. 따라서 전통적인 공간규모의 중규모 모델을 이용한 직접적인 수치모의는 불가능하다. 이를 극복하고 도시의 영향을 중규모 기상모델에 반영하기 위하여 앞서 나열한 요소들을 모수화하여 나타낸 캐노피 모델을 중규모 모델에 결합한다. 또한 도시의 장애물에 의하여 생성되는 난류를 명시적으로 해석하기 위해서는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)적 접근법이 요구된다.

1. 캐노피 모델(Urban Canopy Model)

도시 캐노피 모델은 인접한 두 개의 빌딩을 대상으로 캐노피를 설치하고 지표면과 대기 그리고 빌딩과 대기 사이의 관계를 에너지수지 방정식을 이용하여 분석한다. UCM은 모든 지표와 캐노피 대기 사이에 전기적인 요소로 연결되어 저항의 개념을 적용하는데 이러한 개념은 식생을 모의하는 개념과 매우 유사하다. UCM은 다시 1층 모델과 다층 모델로 구분되는데 이는 빌딩 캐노피 내 층을 다시 구분하는가의 여부에 따라 달라진다. 1층 UCM 모델 (Kusaka et al. 2001)은 층 내 온도와 습도의 산출을 위하여 1개의 빌딩 층과 대기가 연결되었다고 가정하고, 다층모델(Brown and Williams, 1998)은 층 내 기상요소 산출에 도시캐노피의 여러 개 층이 관련되어 있다고 설정한다. 그러나 이러한 모델들은 도심 흐름장이 온도와 습도에 대하여 결합되지 않고 있으며, 동일한 형태의 빌딩구조가 무한히 일정하다고 가정하고 계산한다. 이러한 제한 때문에 독립적으로 사용하기 어렵고 다른 역학적인 모델과 결합하여 사용한다. 또한 중규모 기상모델과 결합된 도시캐노피 모델은 현실적으로 큰 계산 자원의 보강 없이 도시의 열적, 역학적 특성이 고려된다는 점에서 매우 유용한 도시 모수화 방법이다.

2. 유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics model)

도시의 흐름을 분석하는 또 다른 수치적 접근법으로 현재 대두되고 있는 것이 전산유체역학 기술을 이용하는 것이다. 이것은 도시의 난류를 모수화하지 않고 명시적으로 해석하는 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 중

규모 기상모델은 공간해상도 측면에서 한계가 있다. 즉 공간 단위 격자내의 기상장의 변화는 오로지 난류 특성에만 의존한다는 가정을 하고 계산을 한다. 따라서 난류의 크기보다 큰 수 km 격자에서는 난류를 무시할 수 있다. 우리는 이것을 mesoscale limit 라고 한다. 그러나 격자 간격 수백 m인 작은 도시의 흐름은 격자 내 난류를 무시할 수 없게 된다. 따라서 이러한 난류를 명시적으로 해석하기 위한 모델이 요구되는데 현재 이러한 요구를 충족할 수 있는 것이 CFD를 바탕으로 한 수치적 연구이다[그림 3].

CFD는 다시 난류를 어떻게 취급하느냐에 따라 RANS(Raynolds-Averaged Navier-Stokes equation), LES(Large Eddy simulation), DNS(Direct Numerical Simulation)로 나뉜다. 여기서 DNS는 난류에 대한 어떠한 가정도 없이 소멸직전의 난류 규모(Kolmogorov scale) 부터 대표적인 특성길이(Characteristic length)를 가진 난류까지 모든 시공간 규모의 난류를 명시적으로 분해하는 모델이다. 이러한 DNS 해석은 매우 제한적인 공간 내(수십 m 규모)에서만 가능하며, 도시규모에서 적용하는 것은 현재 전자계산기기술로 불가능하다.

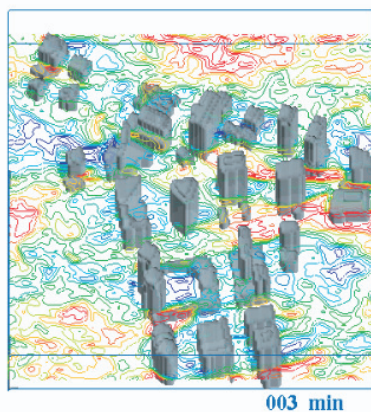
Kolmogorov 이론에 따르면 규모가 큰 난류는 지형 지물에 의존하며, 규모가 작은 난류는 매우 유사하다고 제시하고, Smagorinsky(1963)과 Deardorff(1970)는 Kolmogorov 이론을 바탕으로 규모가 큰 난류와 작은 난류로 분리하였다. 큰 난류는 3차원이며 시간 의존성을 가지고 지형지물에 의해 변화하는 난류로 실제 도시대기의 주요한 난류로 작용한다. 또한 대부분의 운동량, 열의 이류 확산은 규모가 상대적으로

큰 난류에 직접적으로 관계한다. 따라서 직접적으로 난류운동에 관계하는 큰 난류만을 명시적으로 분해하고 그 이하 규모의 난류는 모수화하는 것이 LES이다. 현재 가장 보편적으로 사용되는 전산유체역학 모델은 RANS이다. 제한된 계산기 자원과 도시규모의 상대적으로 넓은 공간의 대기 흐름은 급격하게 변동하는 난류 흐름장 보다는 평균 규모의 대기 흐름장을 해석하는 것이 유리하다. 그래서 도시흐름을 취급하는데 있어서 난류 자체가 아니라 난류의 평균화된 값을 이용하는 것이 RANS이다. 도시 대기의 연구 초기 난류를 모수화하는데 RANS를 집중적으로 적용하였다. RANS 모델에는 다시 eddy viscosity 모델과 Reynolds-stress 모델로 구별된다. 이들은 난류의 생성과 소멸을 해석하는 방식의 차이로 구분된다. 현재 가장 단순화된 eddy viscosity 모델 그룹에는 standard κ - ϵ 모델, RNG(ReNormalized Group) κ - ϵ , LRN(Low Reynolds Number)-LS(Launder-Sharma), κ - ω 모델 등이 있다. 현재

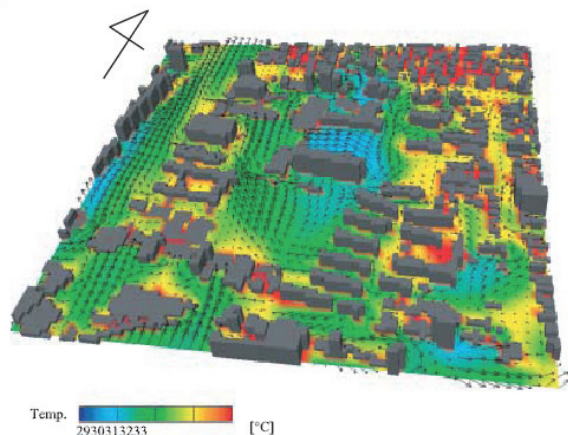
CFD 관련 도시기상의 연구는 계산기 자원의 급격한 변화에 따라 고차원의 난류를 직접적으로 분해하는 모델 연구로 전이되고 있다.

IV. 결론

지금까지 도시기상 대한 수치적 접근 방법과 한계에 대하여 살펴보았다. 인구집중과 그에 따른 대기오염으로 인하여 도시기상 및 대기질에 관한 관심이 급격히 증가하고 있는 시점에서 도시기상에 대한 연구의 필요성은 분명하다. 그러나 도시대기의 두 가지 접근법 모두 많은 어려움과 한계가 있다는 사실을 분명히 인식할 필요가 있다. 관측의 경우 막대한 경제적 부담과 관측 장비 설치의 어려움 등과 같은 다양한 문제를 가지고 있으며, 수치적 접근 역시 계산기 자원의 문제, 각종 도시 특성 모수화의 타당성 문제 등이 상존해 있는 것은 사실이다.



a) 동경 신주쿠의 지표면 바람장 (Kanda 2006)



b) 동경 해안 부두지역의 바람장 (Ashie et al. 2005)

[그림 3] CFD를 이용한 적용예

그러나 이러한 어려움에도 불구하고 도시기상의 특성과 기후변화와 관련된 도시 대기의 변화를 타당하게 예측 분석하는 것은 매우 중요하다. 특히 계산기 자원의 급격한 발전은 수치모델을 이용한 도시 난류의 명시적 해석 가능성을 급격히 증가시키고 있다. LES와 DNS 등 높은 기술적 수준을 요하는 전산 유체 역학 기술을 중규모 해석 기술에 접합하여 수십 m 수준의 대기흐름을 유추하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 도시기상을 대상으로 한 수치해석 능력이 향상된다면, 도시지역의 기상장 특성을 한층 높은 수준에서 이해 할 수 있을 것이다. 그러나 명심해야 할 것은 이러한 수치적인 접근법은 반드시 관측에 의한 검증작업이 거쳐야 한다는 것이다. 따라서 도시기상 수치해석과 관측적인 접근은 동시에 진행되어야 도시지역 대기 특성을 확립할 수 있다.

참고문헌

- 이순환, 안지숙, 김상우, 김해동, 2010, 도심 건축물 그림자효과에 의한 다중 반사도 변화와 도시지표면 열수지에 미치는 영향, 한국지구과학회지, 31(7), 738-748.
- Allwine, KJ, Shinn, JH, Streit, GE, Clawson, KL, Brown, M, 2002, Overview of URBAN 2000: a multiscale field study of dispersion through an urban environment. Bulletin of the American Meteorological Society, 83, 521-536.
- Best, M., 2006, How should we compare and evaluate urban land surface models?, Sixth symposium on Urban Environment, American Meteorological Society, Atlanta, GA.
- Brown, M., and Williams, M., 1998, An Urban canopy parameterization for mesoscale meteorological models. In AMS 2nd Urban Environment Symposium, Albuquerque, NM.
- Deardorff, J.W. 1970, A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics 42, 453-480.
- Grimmond, C.S.B., and Oke, T.R., 1999, Heat storage in urban area: local-scale observations and evaluation of a simple model, Journal of Applied Meteorology, 38, 922-940
- Kumar, P., Ketsel, M., Vardoulakis, S., Pirjola, L., Britter, R., 2011, Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road traffic in the urban atmospheric environment-A review, Journal of Aerosol Science, 42, 580-603.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikigawa, Y., Kimura, F., 2001, A simple singlelayer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. Boundary-Layer Meteorology 101, 329-358.
- Lee S.-H., Kim, H.-D., 2010, Modification of nocturnal drainage flow due to using surface heat flux. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science, 46, 453-465.
- Rotach, M.W.L., Vogt R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S.E., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, TR., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y.A., Ruffieux, D., Salmond, J.A., Schatzmann, M., Voogt, J.A., 2005, BUBBLE - an urban boundary layer meteorology project. Theoretical and Applied Climatology, 81, 231-261.
- Sailor, D.j. and Fan, H., 2002, Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities, atmospheric Environments, 36, 713-725.
- Smagorinsky, J. 1963, General circulation experiments with the primitive equations I: The basic experiment. Month. Weather Review 91, 99-164.
- UN report. 2003. on "World urbanization Prospect. The 2003 Revision". Department on Economic and Social Affairs.

도시 기상 관측 연구 현황

박 영 산

국립기상연구소 응용기상연구과 연구관
sanpark@korea.kr

1. 들어가는 말

도시인구가 늘어나면서 도시지역의 대기질, 교통, 보건, 물류 등에 영향을 미치는 기상에 대해 빠르고 상세하며 정확한 서비스의 수요 또한 크게 증가하고 있다. 이를 위하여 도시지역의 기상정보 생산을 위해서는 도시지역에 특화된 기상관측이 필수불가결하다. 그러나 도시에서의 기상관측은 복잡한 지형 등의 이유로 용이하지 않은 실정이다. 또한 그동안 국내 도시기상 관측은 예산 부족, 전문가 부족, 지자체의 협조부족 등으로 활발하지 못한 실정이었다. 도시지역에서는 적은 수의 정규 지표 관측 자료가 도시지역의 대표성을 갖기 어렵기 때문에 비용이 저렴한 무인 자동기상관측장비를 고밀도로 설치한다. 도시지역을 포함한 국지

기상관측은 자동기상관측장비(Automatic Weather System; AWS)를 이용한 상시기상관측, 일시적 집중기상관측(또는 특별관측), 이동기상관측, 고층기상관측으로 구분되어 수행되고있다. 이들 관측 자료를 이용한 학술연구는 주로 도시지역과 비도시지역사이의 기온, 풍속, 습도, 강수, 지표에너지 플럭스, 경계층 높이 등의 차이를 설명하기위한 연구들이 수행되어 왔으며 그 차이는 도시지역의 도시열섬, 냉기류, 바람길 분석에 이용된다. 도시는 지표의 비균질성이 매우 높은 특성을 가지고 있다. 따라서 도시의 일부지역을 대상으로 상세한 관측을 위해서는 고해상도 기상관측망을 별도로 구축하기도한다. 본 칼럼에서는 도시기상 관측 사례를 소개하고자한다.

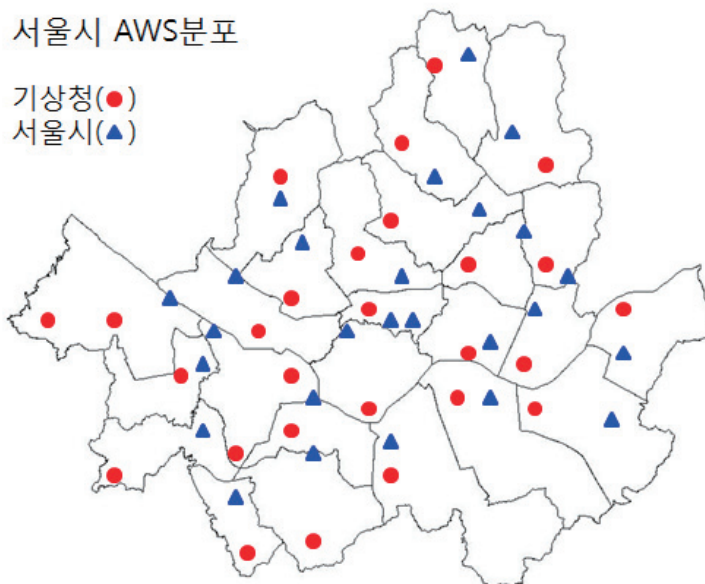
II. 도시기상 관측 연구

서울지역의 정규 기상관측은 기상청과 서울시에서 자동기상관측망(AWS)을 각각 27소, 26소 운영하여 수행하고 있다(그림 1 참조). 대략 각 구별로 1소씩 설치되어있다. 관측요소는 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강우량, 기압 등이며 1분 간격으로 자료를 수집하고 있다. 서울시에서는 적외선을 이용한 열화상촬영을 하기도 한다. 도시지역을 대상으로 관측 자료를 이용한 학술연구는 대부분 도시기온 및 열섬현상에 관심을 두고 있다. 부경온과 오성남(2000)은 4개월 동안의 바로 위에서 설명한 기상청 자동기상관측망(AWS) 자료를 이용하여 서울의 도시열섬을 분석하였고 Kim

and Baik(2005)은 1년 관측자료를 이용하여 서울 도시열섬의 시공간적 변화 특성을 조사하였다. 한영호 등(1993)은 부산 열섬 현상 분석을 위해 23개 지점에서 18일동안 기온을 관측하였다. 민경덕 등(1994)은 대구지역 도시기온, 습도 분포 분석을 위해 자동차로 이동하면서 관측을 수행하였다.

III. 국내 도시기상관측 연구 사례

서울지역의 개발에 따른 국지기상·기후 영향을 분석하기위해 수행한 기상관측 사례 두가지를 소개하고자 한다[표 1]. 청계천 복원사업은 도로가 하천으로 복원



[그림 1] 기상청과 서울시가 운영중인 서울지역 자동기상관측망

[표 1] 청계천 복원사업과 은평구 개발사업을 대상으로한 관측 연구

대상지역	연구기간	연구 내용	기상 관측망
청계천	2003~2009	○ 순복사 에너지와 현열플렉스의 비율 변화 ○ 청계천 복원에 따른 온습도 변화 분석 ○ 청계천 주변 지역 인지온도 분석	○ 상시 관측 - 26개 지점 온도, 습도 관측 - 두 개의 AWS 운영 ○ 집중 관측 : 2003, 2004, 2005 가을
은평구	2007~현재	○ 은평 뉴타운 개발지역 기온 분포 및 특성 ○ 도심지 내 플렉스 관측 : 현열·잠열 플렉스, 순복사 에너지 관측자료 분석 ○ 라디오 존데 관측 자료 분석	○ 상시관측 - 9개 지점 온도, 습도관측, 2011년에 18개 지점으로 온습도 관측 지점 확대 - 플렉스관측 1개지점, ○ 집중관측 : 2007, 2008, 2009 가을

되는 토목사업으로 지표 형태의 큰 변화, 즉 열적 성질이 크게 다른 지표로 변하기 때문에 국지적으로 기상에 영향이 있을 것으로 예상할 수 있다. 은평지역 뉴타운 개발사업은 저층 단독주택지역을 중·고층 집단건물 지역으로 개발하는 사업으로서 사업 완료 후 입주가 진행되면서 인구, 차량, 에너지 사용량 등이 늘어나기 때문에 뉴타운 지역의 기상에 변화가 발생할 것으로 예상된다. 이들 지역을 대상으로 국립기상연구소 응용기상연구과에서 구축하였던 관측망을 중심으로 연구 사례를 소개한다.

1. 청계천 국지 기상 관측

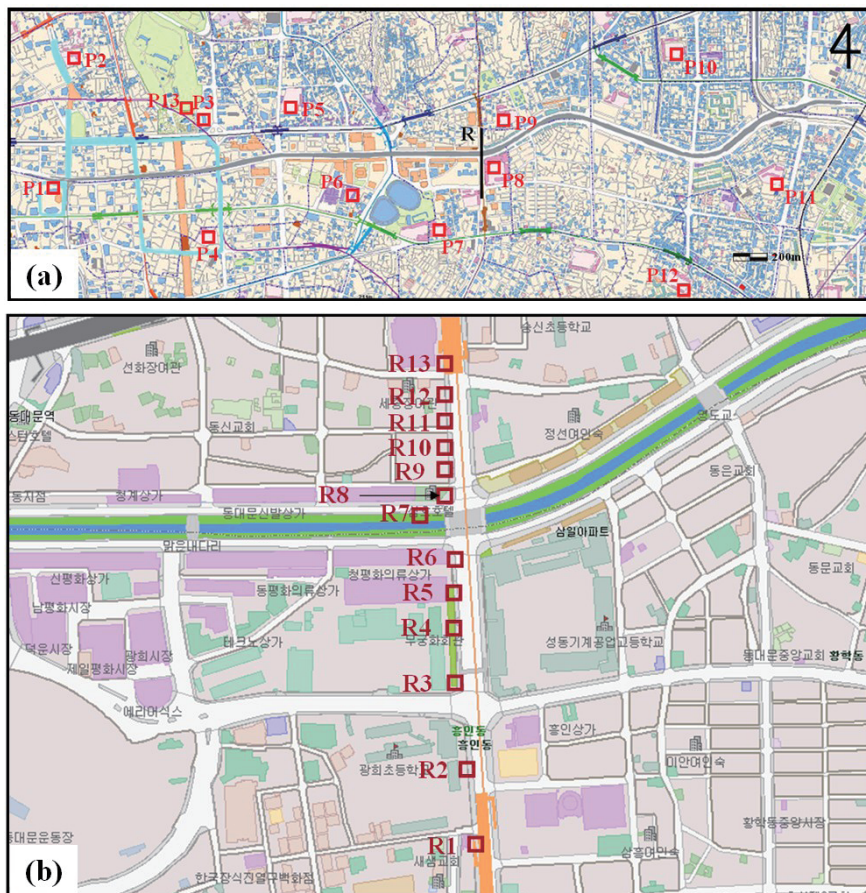
1) 국지 기상 관측망

청계천 지역 국지 기상연구의 목적은 도시 내부 토지 피복의 변화가 기상환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 청계천 복원에 따른 국지기상 변화를 모니터링하고 청계천이 주변 지역 기상환경에 미치는 영향을 분석하고자 함이다. 상시관측을 위해 청계천을 따라 동서방향으로 13개의 온습도 관측 백엽상을 설치하였으며, 남북 방향으로 13개의 온습도 관

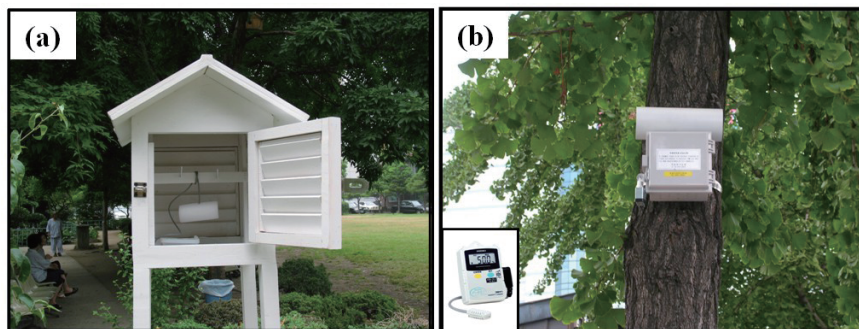
측 백엽상을 설치하여 운영 하였다. 운영기간은 동서 방향 설치 지점들은 2003년부터 2006년까지, 남북 방향의 설치 지점들은 2005년부터 2009년까지이며 온도와 습도를 관측하였다[그림 2~4]. 두대의 AWS는 성동기계공업고등학교(2004~2006)와 송신초등학교(2003~2007)에 각각 설치되어 운영 되었다. 집중관측은 2003년 8월, 2004년 8월, 2005년 8월과 9월에 총 4회에 걸쳐 청계천 주변지역에 있는 송신 초등학교에서 현열플렉스, 순복사량, 기온 등을 추가로 관측하였으며 기간은 1주일 정도였다.

2) 관측 자료 분석

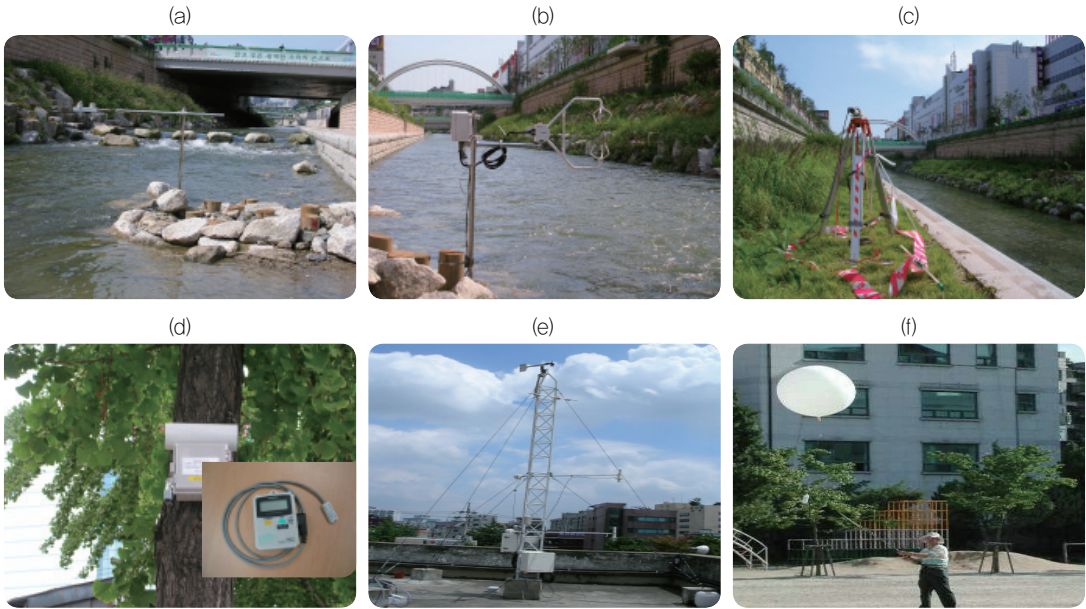
청계천이 아스팔트로 덮여 있는 2003년과 물이 차 있는 2005년의 순복사에너지와 현열플렉스의 관측결과 순복사량은 비슷한 반면 현열플렉스의 차이는 크게 나타났다[그림 5]. 청계천 복원 후 평균 기온은 0.13°C 하강하고[그림 6a] 약 300m까지 영향을 미친 반면 서울시(서울관측소 기준) 기온의 평균 연변화는 $0.0237^{\circ}\text{C yr}^{-1}$ 으로 상승하는 것으로 나타났다. 청계천 복원 후 상대습도, 비습 모두 증가하였으며 습도 증가는 100 m까지 나타났다. 시간대별 비교결과 아침 9시



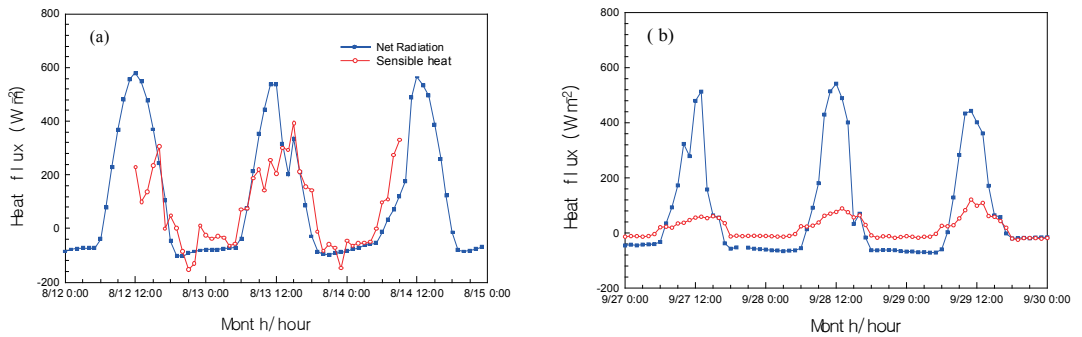
[그림 2] 청계천 주변 (a) 동서방향, (b)남북방향 온습도 측정망



[그림 3] 그림 2의 (a) 'P' 지점과 (b) 'R' 지점들에 설치된 백엽상



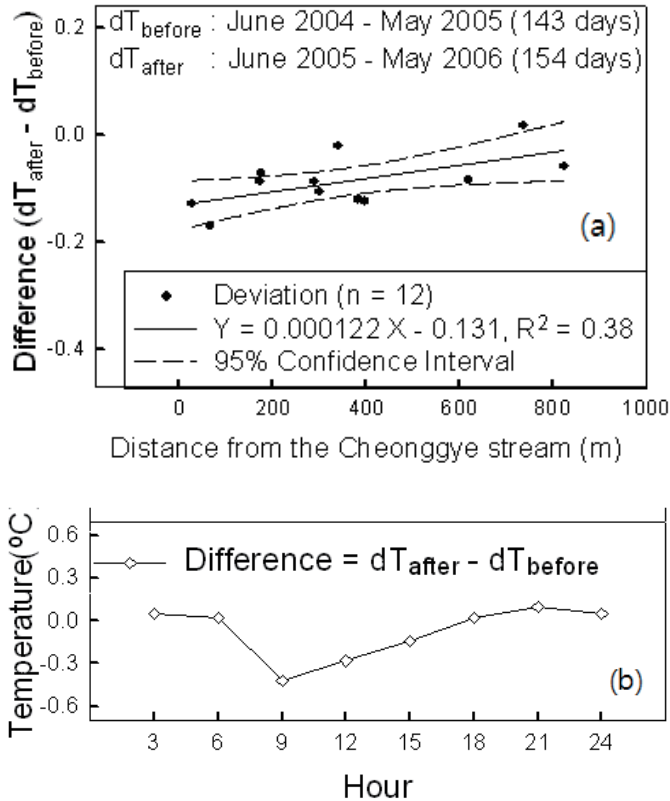
[그림 4] 지상관측에 사용된 기상 측기; (a) 순복사계, (b) 초음파 풍속계, (c) 신틸로미터, (d) 온습도계, (e) 자동기상 관측소, (f) 라디오존데



[그림 5] (a) 2003년 8월과 (b) 2005년 9월의 청계천에서의 순복사량과 현열 변화

기온이 0.4 °C 하강하는 등 15시까지 낮 시간대에는 기온이 하강하였고 그 외의 시간에는 0.1 °C 미만이지만 약하게 상승하는 것으로 나타났다[그림 6b]. 청계

천 효과는 가을철 맑은 날 오후에 가장 크게 나타났으며, 가장 큰 경우에 인지온도차는 7.4 °C에 달하였다.



[그림 6] 청계천 복원 전후의 (a) 청계천으로부터의 거리에 따른 기온 하강률과 (b) 시간에 따른 기온 하강률의 변화

2. 은평 뉴타운지역 국지 기상 관측망

1) 국지 기상 관측망

은평 뉴타운 개발 지역에서의 국지기상 관측은 도시 개발과 같은 대규모 국토 개발에 의한 기상환경 변화를 장기간 모니터링을 통해 분석함으로써, 동일 유형의 개발이 수행될 때 기상영향을 예측할 수 있는 기술의 개발이 주목적이다. 이 지역에 상시관측을 위해 2007년 3월부터 온습도 관측용 9개 지점과 플렉스 관

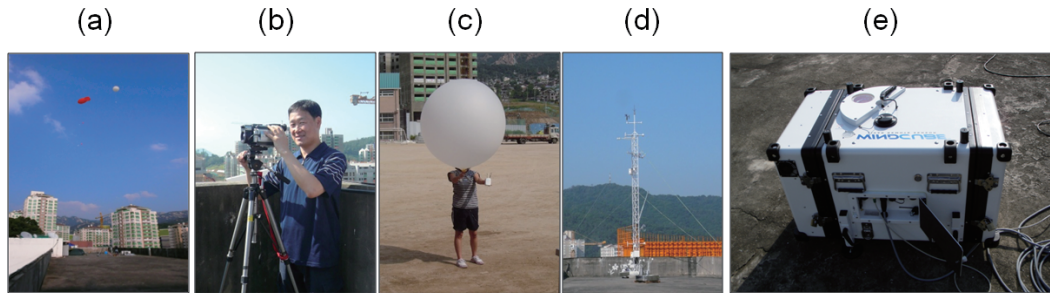
측 1개 지점을 선정하여 상시 관측망을 운영하였다. 2010년 상시 온습도 관측용 10개 지점을 추가 하였으며, 2011년에는 찬바람 이동 관측을 위해 한시적으로 10개의 온습도 관측 지점을 추가하여 총 29개의 온습도 관측 지점이 운용 되고 있다[그림 7~8]. 플렉스 관측은 은평 뉴타운 개발지역 내에 있는 고등학교 건물 옥상에서 2007년부터 2011년 현재까지 운영중에 있다. 또한 2011년 초에 은평 뉴타운 개발지역 중앙에 위치한 진관그린공원에 대기 밀도차에 의한 경사류



[그림 7] 은평지역 국지기상 관측망



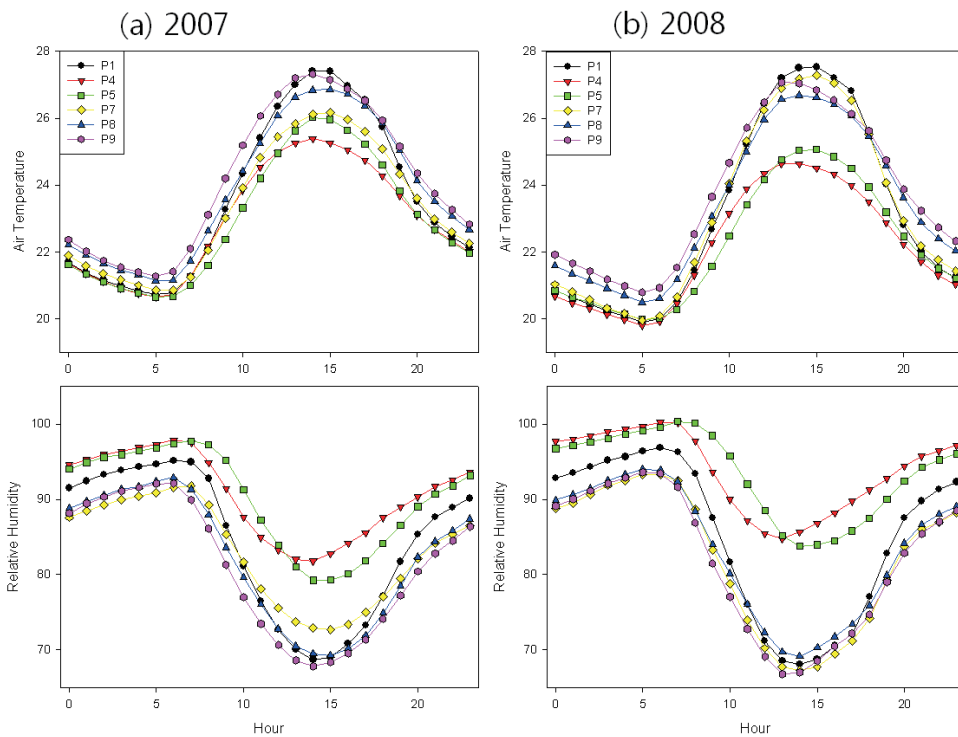
[그림 8] 은평지역 국지기상 관측망 설치 전경



[그림 9] 2009년 특별관측 (a) 테더존데, (b) 열화상카메라, (c) 라디오존데, (d) 플렉스 타워, (e) 윈드 라이더

를 관측하여 온습도 관측지점 3곳과 1곳의 3차원 바람 관측지점을 추가하였다. 특별 관측은 2007년부터 2009년까지 3년 동안 매년 1회씩 3번 수행 하였는데

온습도 연직관측, 고층관측, 플렉스관측, 열화상촬영 등이 추가되었다[그림 9].



[그림 10] 은평지역의 (a) 2007년과 (b) 2008년 여름철동안의 시간별 기온(위)과 상대습도(아래)

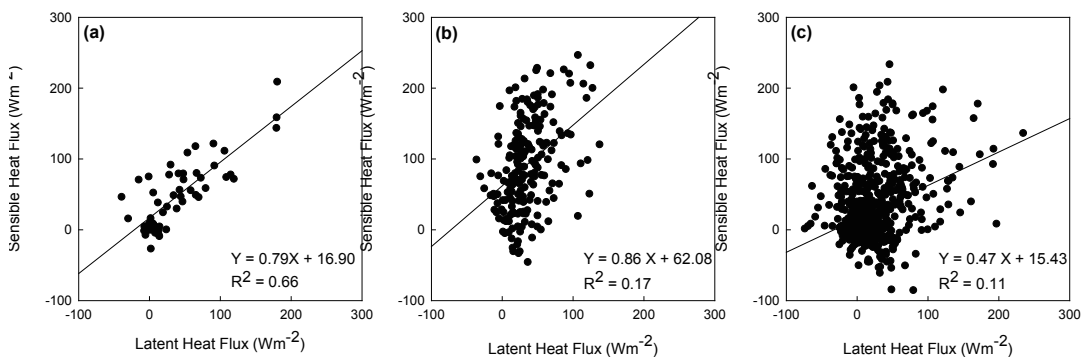
2) 관측 자료 분석

은평 뉴타운 개발 지역의 9개 지점에서 관측한 기온은 최고 6.8 °C의 차이가 발생할 정도로 지점에 따라 온도차가 다양하였다. 2008년 여름철의 시간별 평균 기온은 2007년 여름철 보다 약 0.8도 정도 상승하였다[그림 10]. 플렉스 관측을 통해서 뉴타운 개발 공사가 진행되는 동안 순복사량 중 현열이 차지하는 비율의 변화를 예상하였으나 2007년부터 2009년까지 뚜렷한 특징을 찾을 수 없었다. 이는 관측지역의 녹지비율이 상대적으로 높고 관측기간동안 입주민의 낮은 입주율이 원인으로 판단된다[그림 11]. 라디오 존테 관측을 통한 지표 거칠기의 변화는 도시 개발에 따라 거

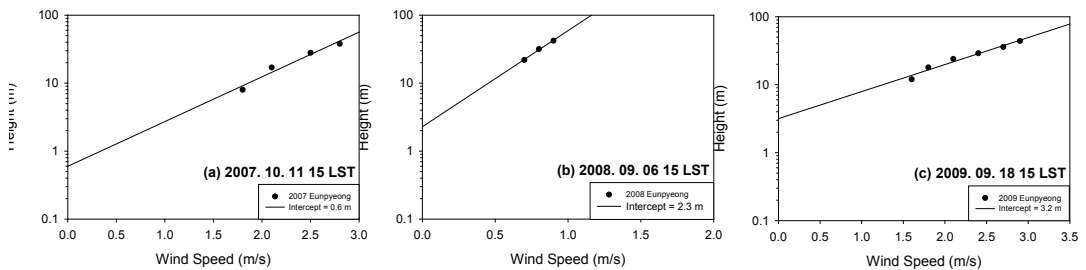
칠기가 소도시에서 대도시의 형태로 바뀌고 있는 것으로 나타났다[그림 12].

IV. 해외 도시기상 관측 연구 사례

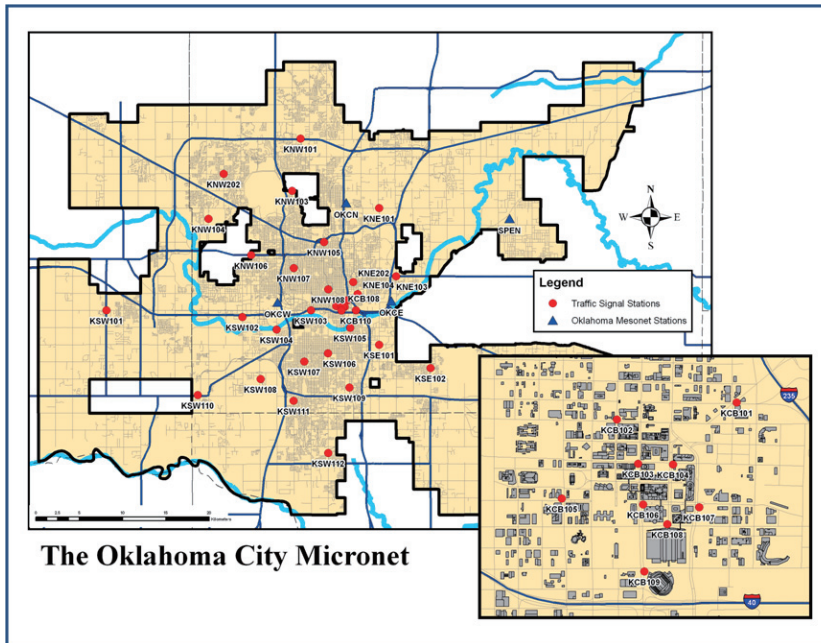
해외 도시기상 관측 연구 사례로 미국 오클라호마시에 설치된 상시관측망을 소개하고자한다. 미국 오클라호마시에 구축된 미규모 기상관측망 Micronet은 중규모 관측망 Mesonet 관측소 4소와 36곳의 교통신호등에 설치된 AWS로 구성되며 2008년에 구축을 완료하였다. 신호등에 설치된 장비의 높이는 9m 이며 무



[그림 11] (a) 2007년, (b) 2008년, (c) 2009년의 현열과 잠열 플렉스.



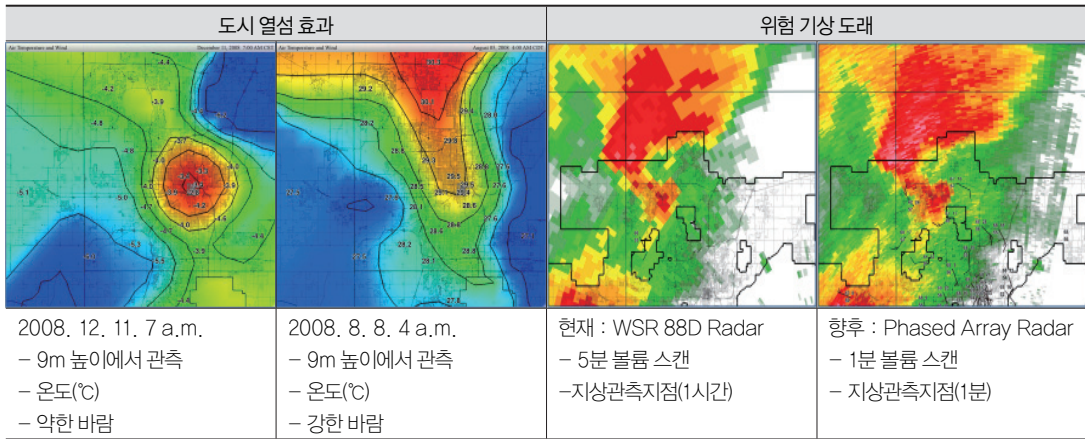
[그림 12] (a) 2007년, (b) 2008년, (c) 2009년의 풍속(m s⁻¹)의 연직 프로파일(로그 스케일)



[그림 13] 오클라호마시 Micronet 네트워크 구성도



[그림 14] 교통 신호등에 설치된 기상 측기



[그림 15] Micronet 자료 활용사례

선(Wi-Fi) 네트워크를 이용하여 자료를 수집하고 있다. 지상 정구관측소는 10km 거리로 배치되어 5분 시간간격으로 자료를 기록하는 반면 Micronet은 평균 3km 거리로 설치되어 있고 자료는 1분 간격으로 실시간 저장하고 있다[그림 13].

교통신호등은 도시중심지에 기물 훼손이 적은 비교적 안전하고 기상장비 설치 비용에서도 경제적인 잇점이 있는 장소이다[그림 14]. 오를라호마시는 세계에서 가장 큰 규모의 도시 무선망 네트워크를 설치하여 바람, 기온, 강수량, 기압, 일사량, 지중온도, 토양수분 등의 자료를 전송하고 있다. Micronet 자료의 품질은 Mesonet 표준 실험실에서 수행하는 교정 및 검정에 준하여 실시하며 추가로 자료 검정 관련 전문가의 데이터 분석을 통해 자료 품질을 높이고 있다. 관측자료는 도시열섬, 뇌우 및 전선 이동, 돌풍 등의 기상현상 감지에 활용되고 있다[그림 15]. 2008년 관측 네

트워크가 완료되었기에 앞으로 많은 연구 보고서가 발간 될것으로 예상된다.

V 맺음말

2010년 말 기준으로 우리나라 도시 면적은 전체 면적의 16.6%, 도시인구는 전체인구의 90.09%를 차지한다. 이렇게 도시화 비율이 높아지고, 국민소득의 증가에 따라 삶의 질이 향상되고 쾌적한 환경에 대한 요구가 증가하면서 도시민들의 고급 기상정보에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 도시개발에 따른 국지 기상 변화에 관한 정보는 도시계획에 매우 유용하게 활용될 수 있는데 이러한 정보는 정확한 도시기상 관측이 뒷받침되어야 확보될 수 있다. 이를 위해 재정 투자, 인력 양성, 국제 협력을 통한 연구·기술 교류 등에 대한 관심이 무엇보다도 필요한 때이다.

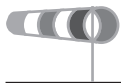
참고문헌

- 민정덕, 김경익, 윤일회, 이인숙, 1994: 대구 지역의 기상 특성 연구 및 대기 확산 모델의 개발 : I. 도시 기온 및 상대 습도의 수평 분포, *한국기상학회지*, 30(2), 289-301.
- 부경은, 오성남, 2000: 1999년 서울지역 기온의 시공간 분포 특성. *한국기상학회지*, 36(4), 499-606.
- 한영호, 김보현, 이동인, 1993: 부산지역 도심지의 열섬현상과 기온변화에 관한 연구. *한국기상학회지*, 29(3), 205-216.
- Kim, Y.-H, and J.-J. Baik, 2005: Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul. *J. Appl. Meteor.*, 44., 593-605

정책 초점

도시기상 관측 선진화 방안 연구

| 이영곤



도시기상 관측 선진화 방안 연구

이 영 곤

국립기상연구소 정책연구과 연구관

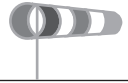
yglee71@korea.kr

I. 서론

도시는 인간의 정치, 경제, 사회적인 활동 무대가 되는 장소로서 인구와 자본이 타 지역에 비해 상대적으로 집중되는 지역을 일컫는다. 이러한 도시가 지구상에 등장한 것은 신석기 시대인 기원전 3,500~3,000년경으로 추정되며, 당시 고대의 도시들은 강 유역에서 형성되었고 당시 종교의 중심지이며 행정의 중심지였다. 이후 도시는 과학과 산업의 발전과 더불어 더욱 번창하였으며, 제 2차 세계대전 이후에는 인구 백 만 이상이 거주하는 도시가 전 세계적으로 400여 개 이상이 생겨났고 거대도시(megacity)로 불리는 인구 천 만 이상의 도시도 25여 곳이나 형성되었다(Brinkhoff, 1999). 최근 UN에서 발행한 보고서에 따르면 2007년 기준 전 세계 인구의 50%, 개발도상

국의 경우 인구의 75%가 도시에 거주하고 있으며 도시화가 20세기보다 조금 느려질 수는 있지만 21세기에 지속될 것으로 예상하고 있다(UN, 2008). 도시의 규모가 커지고 인구가 더욱 집중됨에 따라 도시의 지면과 공간 구조가 복잡해지고 대규모 에너지와 자원의 소비로 인한 열과 대기오염 물질 등의 배출이 주변 교외 지역과 비교했을 때 여러 가지 차이가 발생한다. 또한 도시의 규모, 성격, 형태 등 도시 자체의 특성, 도시 지형의 영향, 그 때의 기후 조건 등에 영향을 주는 요인들로 작용한다.

최근 기후변화로 인해 우리나라의 집중호우와 폭설, 가뭄, 폭염 등 재해기상의 빈도와 강도가 점차 증가하고 있는 추세에 있으며, 2009년 12월 15일 코펜하겐 시장들의 기후정상회담(Copenhagen Climate



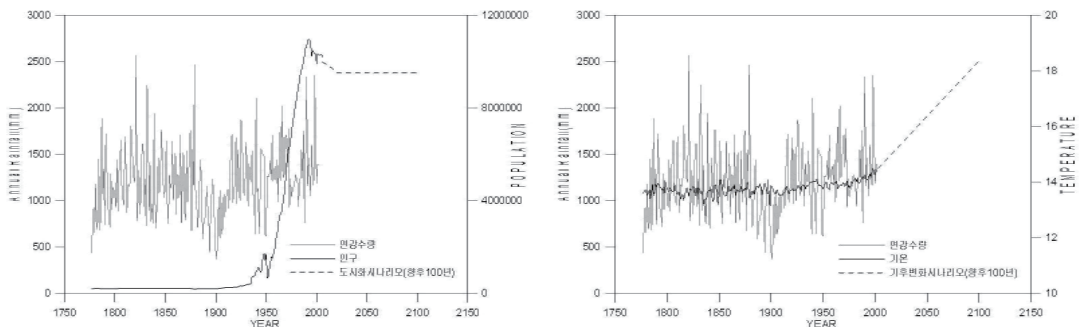
Summit for Mayors)에서 발표된 Angel Gurría OECD 사무총장 연설의 핵심이 '기후변화는 도시차원의 대응이 관건'이라고 할 정도로 재해기상으로 인한 피해 정도가 교외지역보다 인구와 시설의 집적도가 높은 대도시로 갈수록 급속히 증가할 것으로 예상된다 [그림 1]. 기후변화 대응과 관련하여 '도시' 차원의 접근이 중요함을 거듭 강조하는 이유는 도시가 CO₂를 배출하는 주요 원인제공자인 동시에, 기후변화로 인한 재해 및 극한기후 영향을 가장 많이 받는 당사자이기 때문이다. 따라서 기후변화 관련 정책시험장 (Policy Laboratories)이자, 기후변화 실천을 위한 핵심 영향요소의 집결지인 '도시'에서의 전략적 정책 마련은 기후변화대응을 위한 최상의 해결책이 될 것이다. 이를 위하여 도시지역 기상·기후 현상에 대한 정확한 이해와 전망에 따른 영향을 정확히 산출하기 위한 상세 관측 자료의 생산이 가장 시급히 해결해야 할 문제이다. 특히, 수 km 이내의 국지 기상현상이 상이하게 나타나는 대도시의 경우 재해기상을 효율적으로 대처하고 피해를 최소화하기 위해서는 관측해상도의 증가가 필수적이며, 경우에 따라서는 수십 m 간격의 상세한 기상관측 자료가 요구되기도 한다. 이외에도

최근 도시지역 대기오염과 테러로 인한 화생방에 대비하기 위한 노력의 일환으로 도심지의 상세 기상관측 자료의 수요가 증가하고 있는 추세이다.

이상에서와 같이 인명과 재산 피해를 경감하고 지속 가능한 기후변화 적응 대책을 수립하기 위해서는 보다 상세하고 정확한 도시기상 관측 자료가 지속적으로 제공되어야 한다. 본 연구에서는 주요 선진국들의 사례와 기상청 및 유관기관들의 기상관측 발전 계획들을 토대로 도시지역의 관측체계를 선진화할 수 있는 방안들을 제시하였다.

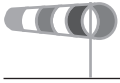
II. 국내·외 도시기상 관측 현황

도시만의 특수한 기상 또는 기후는 도시를 둘러싸고 있는 도시 주변의 교외지대와 비교 관측을 통해 쉽게 확인할 수가 있다. 도시기상·기후는 도시 내외에서 비교 관측을 해서도 알 수 있지만 삼림이나 전답이 새로이 도시화되는 경우에 그 지역의 기후상태에 다소의 변화가 일어나는 데서도 확인할 수가 있다. 그동안 관



[그림 1] 1750년부터 향후 100년(2150) 동안의 도시화시나리오(좌)와 기후변화시나리오(우)

출처 : 도시홍수재해관리기술연구단, 2008.



측 연구를 통해 도출된 도시기상·기후의 특징은 도시 내에서 기온이 높고 습도가 낮으며 고유의 풍계가 생기고 운량, 강수일수, 강수량, 안개일수 등이 많으며, 일사량 혹은 자외선 양이 적다는 것이다. 이러한 도시 특유의 기상·기후 형성의 원인은 주택이나 공장 혹은 자동차 등에 의한 대기오염 이외에 도시 내의 주택이나 공장 등에서의 인공열의 발생, 건축물의 건설이나 지표면의 포장 등에 의한 지상 피복의 상태 변화 등 인간생활이나 산업 활동에 수반된 복잡한 요인이 작용하고 있다.

이러한 복잡한 도시지역 특유의 요인들 때문에 일반 기상현상의 효과가 도시지역에서 증폭된다. 예를 들어 도시 열섬(heat island)은 지표면 열·복사 특성의 변화와 인간 활동에 의한 현열(sensible heat) 방출, 물 순환의 변화 및 이에 따른 복사수지 변화가 복합적으로 작용하여 형성된다. 도시지역 지표면 거칠기의 변화는 지표면과 대기 간 열·물질·운동량의 교환과 현지 혼합층의 두께에도 영향을 미칠 수 있다. 수문현상 또한 유거수·하천유량에 영향을 미치는 건물·도로포장으로 인해 상당한 변화를 보인다. 대도시 지역의 영향은 대류성 폭풍과 전선경계의 발생·강도·이동에서도 볼 수 있다. 그 결과 폭우가 심각한

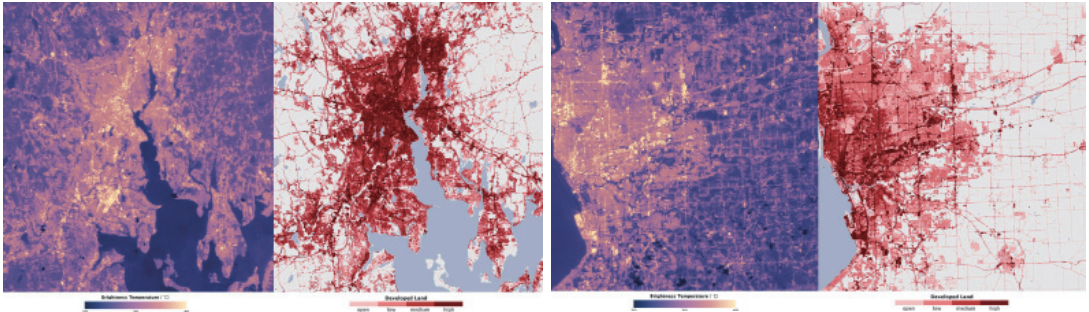
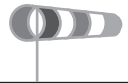
홍수를 유발할 수 있고, 강설과 어는 비는 교통 혼란을 가져올 수 있으며, 폭풍과 이것이 동반하는 낙뢰·강풍은 정전을 일으킬 수 있다. 또한 도시에서는 열사병·심한 대기오염·테러 등의 공중 보건·안전 문제가 발생할 확률이 높다.

이처럼 위험기상과 돌발홍수, 물 관리, 에너지 생산·관리, 교통관리, 산림·해안 생태계 감시·관리, 농업, 대기질, 도시지역 관리, 국토 안보, 국민 보건·안전 등에 대한 정책결정을 지원하기 위하여 기존의 시공간 분해능보다 훨씬 상세한 기상관측자료 수요가 증가함에 따라 도시지역의 중규모 관측망의 개선이 특히 중요하게 부각되었다. 특히 높은 인구밀도와 대형 건물(지형·해안 요소도 고려대상일 수 있음)로 인해 관측이 한층 어려운 도시지역에서는 고분해능 기상 정보를 어떻게 안정적으로 관측·수집·배포할 것이냐가 도시기상·기후 연구의 주요 과제로 대두되고 있다.

해외 주요 선진국들 중 도시기상 관측은 미국과 독일이 오랜 역사를 통해 축적된 기술과 지식을 기반으로 이 분야 연구를 주도하고 있다. 미국의 경우 정부 및 민간 기관과 연구소, 대학에서 다양한 목적에 최적화된 도시기상 관측망을 구축하여 운영하고 있으며, 수



[그림 2] 오클라호마 Micronet 네트워크 구성도(좌)와 관측 장비 설치 현황(우)



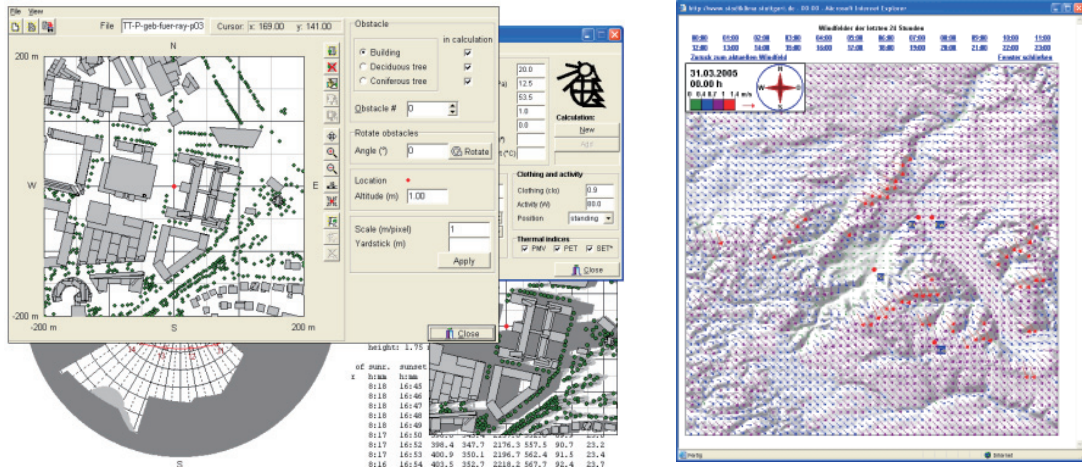
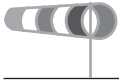
[그림 3] 새로운 도시열섬 기법으로 산출된 미국 로드아일랜드 주 Province 시(좌)와 뉴욕 주Buffalo 시(우)의 위성 밝기온도와 도시 개발 정도.

요처의 니즈에 최적화된 관측 자료를 제공하고 있다. 미국 오클라호마 시는 1993년부터 현재까지 120대의 자동 기상관측 장비를 설치·운영함으로써 도심 내의 상세 기상장을 실시간으로 분석할 수 있는 Micronet을 운영하고 있다[그림 2]. 여기서 관측된 상세 도시 기상 관측 자료를 통하여 오클라호마 시의 열섬 효과를 정량화하고, 도시에 발생하는 위험기상 영향을 결정하는 한편 도시 내 대기의 흐름과 국민들의 건강 관계를 평가하는 연구에 활용되고 있다.

일반적으로 도시 내 지상 온도 관측이 균일하지 않고 지역적인 편차, 도시와 비도시 지역의 수치화가 가능한 정의가 없어서 도시들 간 열섬 크기를 비교하는 것이 어렵기 때문에 목표설정 도시기상 관측망 구축 및 효율적인 도시기상 격자자료 생산에 어려움이 있어 왔다. 미국 고다드 우주비행센터의 연구진들은 USGS(United States Geological Survey)에서 운영하는 Landsat 위성에서 산출된 지표면 피복자료와 NASA의 Aqua와 Terra에 탑재된 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)에서 관측된 지표면 온도 자료

와의 상관관계를 이용하여 세계 도시들의 열섬을 보다 균일한 영상으로 제공하는 기술을 개발하였다. [그림 3]에서처럼 미국의 두 도시, Province 시와 Buffalo 시의 도시 열섬을 비교한 결과 도시 열섬에 가장 큰 영향을 미치는 것은 도시의 발전 과정인 것을 확인하였다. 동일한 규모의 두 도시 중 83%가 조밀하게 또는 중간정도로 발전한 Province 시가 46% 정도의 조밀한 발전을 한 Buffalo 시보다 5℃ 높은 12.2℃의 열섬효과를 나타내었다. 이외에도 미 국방부는 본부 주변의 화생방 테러와 오염물질 확산을 대비하기 위해 상세 기상관측망인 Pentagon Shield를 운영한다.

독일은 19세기 말 베를린에서 도시기후 연구를 위한 관측을 시작으로 최근 도시 열섬효과 뿐만 아니라 STUTTGART 21, BERLIOZ 등 [그림 4]와 같은 도시기후 모델링, 도시 생기후 및 대기오염 모델링, 도시계획을 위한 도시기후 응용 기술개발 등 다양한 목적을 위한 관측 프로젝트들이 수행되고 있다(Matzarakis et al., 2000). 같은 유럽 국가들 중 영국 기상청은 기후변화로 인한 도시지역 열대야 정보 및 특보 발령 시스템인 Heat-Health Watch를 개발



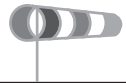
[그림 4] 대도시 오염물질 확산(좌)과 바람장(우)과 같은 도시 기후모델 결과 예

하여 운영하고 있다. 이 시스템은 보전국과 웨일즈의 회가 참여하여 매년 6월 1일에서 9월 15일까지 잉글랜드와 웨일즈 지방에 대해 열대야 예보 및 특보 서비스를 실시하고 있다.

아시아 지역에서는 중국이 도시기상·기후 취약성 평가 및 도시기상 예보 프로젝트를 활발하게 추진하고 있다. 상하이 기상국은 지난 30년간의 지역 기상 기록을 근거로 중국에서 최초로 기상-위험지도를 제작하였다. 이 지도는 태풍, 안개, 낙뢰 및 강풍과 같은 위험기상사례가 발생하기 쉬운 지역과 발생 빈도를 쉽게 확인할 수 있도록 나타내었다. 예를 들어, Chongming County와 포동신구의 난후이 지역 및 대부분의 해안지역은 거의 태풍의 영향을 받는 반면, Qingpu와 Songjiang 지역은 심한 강우의 영향을 받기 쉬운 것으로 구분된다. 홍콩기상청(HKO)은 한국 기상청(KMA) 및 일본 기상청(JMA)과 연합하여 아시아의 개발도상국에 특정 도시기상예보를 제

공하기 위한 세계기상기구(WMO) 프로젝트를 추진하고 있다. 이 사업은 개발도상국들이 수치기상예측(NWP) 산출물에 접근하여 각자의 공공 기상 서비스에 적용할 수 있도록 적합한 수단을 제공함을 목적으로 하고 있으며 아시아의 21개 WMO 회원국이 이 프로젝트에 참여하여 210여 도시의 예보가 하루 2회로 인터넷을 통해 제공되고 있다. 이밖에도 호주는 레이더 등 첨단 장비를 이용하여 도시지역의 위험기상에 대한 상세 정보를 수집하고 있다.

국내에서도 주요 선진국 수준의 첨단 장비를 이용한 도시기상·기후 관측연구가 수행되고 있다. 특히 대학과 연구소를 중심으로 특수 목적에 맞추어진 도시기상 관측(targeting urban meteorological monitoring)이 활발하게 수행되고 있다. 대표적인 것이 국립기상연구소를 중심으로 여러 대학이 참여한 청계천 복원과 은평 뉴타운사업 등 대규모 도시개발에 따른 도시 환경영향평가를 위한 첨단 기상관측 연



구가 지속적으로 추진되고 있다. 이와 관련하여 각 대학에서는 국지기상 관측을 위한 이동형 무선센서네트워크 필드서버 개발과 중규모 오염물질 확산모델 개선을 위한 윈드프로파일러 관측 자료동화 체계 구축 등 첨단 자료처리 시스템 구축과 도시 빌딩풍에 의한 피해영향 평가를 위한 기초 기상관측이 수행되고 있다. 최근에는 기상청을 중심으로 수요자 맞춤형 예측정보의 생산·유통·관리를 담당하는 새로운 형태의 도시 기상 정보 센터 개설을 추진하고 있으며, 서울시 등 지자체에서도 친환경 도시 관리 및 서울시 기후지도 제작을 위한 AWS 관측사이트(26개소) 운영 중에 있다. 또한 대도시 국지성 위험기상의 정확한 탐지를 위한 소형 기상레이더 개발이 민간업체를 중심으로 활발하게 진행되고 있다.

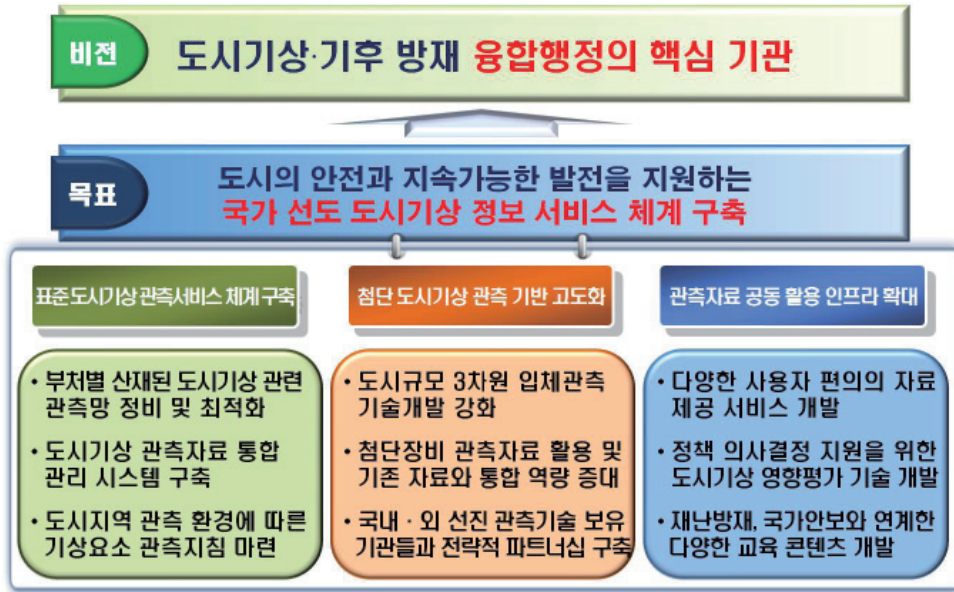
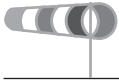
III. 도시기상 관측 선진화 방안

뉴욕과 도쿄, 서울 등 세계 각국의 주요 도시들은 인구와 기술의 집중에 따라 점차 구조가 복잡·다양화되고, 이로 인해 일반 기상현상의 효과가 도시지역에서 증폭된다. 가령, 폭우가 심각한 홍수를 유발할 수 있고, 강설과 어는 비는 교통 혼란을 가져올 수 있으며, 폭풍과 이것이 동반하는 낙뢰·강풍은 정전을 일으킬 수 있다. 또한 도시에서는 열사병·심한 대기오염·테러 등의 공중 보건·안전 문제가 발생할 확률이 높다. 이에 반해 높은 인구밀도와 대형 건물(지형·해안 요소도 고려대상일 수 있음)로 인해 관측이 한층 어려워지고 있다.

이러한 도시 관측의 어려움에도 불구하고 재해기상과

핵·생화학무기, 대기질·수질 악화로 인한 인적·물적 피해를 대폭 줄이고 기후변화로 인한 잠재적 도시 위험을 완화할 수 있는 정책적 의사결정을 지원하기 위하여 도시지역의 정교한 기상정보 서비스가 반드시 필요하다. 이를 위하여 과거에 공급자 중심의 일방적인 자료서비스에서 탈피하여 1) 신속한 도시기상 재해예·경보를 지원하기 위한 고해상도 표준 관측서비스를 제공하고, 2) 도시규모 기상현상 예측 정확도를 개선하기 위한 첨단 관측기술 개발 및 통합 활용 역량을 강화하고, 3) 도시기상 관측 자료가 환경, 보건, 국방 등 다양한 분야에 활용될 수 있도록 관련 인프라를 확대하는 방향으로 나아가야 한다.

기상청은 2020년까지 국민의 공감과 신뢰를 받을 있는 기상관측의 가치창출을 위해 차세대 지능기반 융합·입체기상 관측망 구축, 지속가능한 품질관리체계 확립과 리스크관리 체계화, 기상관측정보 활용범위의 확대 및 가치의 극대화를 발전목표로 설정하고 지능기반 3차원 통합 기상관측기술 인프라구축, 고품질 기상관측자료 생산을 통한 활용가치 극대화, 미래수요에 대응하는 기상관측자료 활용기술 고도화, 기상관측분야 국격 제고 및 기상장비산업 육성이라는 4가지 추진전략을 수행하고 있다. 본 연구는 상기의 기상관측 발전방안을 기반으로 도시기상 분야에서의 관측 선진화 방안을 모색하였다. 특히, 현재 운영 중인 도시기상 관측을 보다 효율적으로 운영하기 위해 통합·표준화하는 한편 보다 세밀하고 정확한 자료 서비스를 제공함으로써 기상청이 국가 도시기상 관측 정보 서비스의 선도 기관으로서 변모해 나갈 것인가에 초점을 두었다. 이상의 사항들을 통해 수립된 도시기상 선진화를 위한 비전과 목표, 3가지 추진전략이 [그림 5]와 같이 제시되었다.

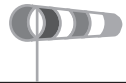


[그림 5] 도시기상 관측 선진화를 위해 기상청이 추진해야할 정책 방안의 비전과 정책목표, 주요 추진전략에 대한 체계도

1. 표준 도시기상 관측서비스 체계 구축

기상청에서 운영하고 있는 자동기상관측장비는 종관 기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 80개소와 방재 기상관측장비(Automated Weather System, AWS) 468개소 등 총 548개소가 운영 중이다(2011년 11월 기준). 이외에도 전국에는 유관 기관과 정부부처에 상당수의 자동기상관측장비를 운영하고 있으며, 최근 기상재난과 기후변화 대응과 관련하여 지상기상 관측망을 확대하고 있다. 기상청은 2011년 상반기에 16개 기관의 3,247개소에 대해서 지상기상 관측자료 공동 활용 시스템을 구축하였으며 2012년까지 3,519개소에 대해 시스템을 완료할 예정이다. 이러한 계획과 연계하여 가장 우선적으로 추진해야할 전략이 그림 5에서와

같이 표준 도시기상 관측서비스 체계를 구축하는 것이다. 이를 위하여 첫 번째로 전국 도시들에 기관별로 산재되어 있는 지상기상 관측망을 정비하고 각각의 목적을 충족할 수 있는 도시기상·기후 격자 자료를 생산할 수 있도록 최적화되어야 한다. 도시기상 관측망 정비 및 최적화와 관련한 세부시행 계획으로 다음의 세 가지 사항을 제시할 수 있다: 1) 미래 도시방재와 기후변화 대응과 관련하여 전국 도심지의 행정구역과 연계한 도시기상·기후 관측망의 통합하고 정확한 관측자료가 생산될 수 있도록 관리할 수 있도록 하여야 하고, 2) 최근 기상청과 지자체 간에 추진되고 있는 지역 기상예보관제와 연계하여 도시기상 관측자료가 가장 효율적으로 생산·활용될 수 있도록 지역 유관기관 및 단체 전문가들로 구성된 도시기상 관측 협의체를 운영하여야 하고, 3) 국가차원에서 모든 도시기상 관측자



료를 통합·관리·서비스할 수 있도록 부처 간 다양한 목적에 부합하는 도시기상 관측에 대한 범부처 통합방안을 수립하여야 한다.

두 번째 시행 계획으로는 도시기상 관측 자료를 통합 관리할 수 있는 시스템을 구축하는 것이다. 최근 기상청은 '국가 기후자료 관리 및 서비스 체계 구축' 사업을 추진하고 있으며, 세부 내용에는 유관기관(서울특별시, 경기도를 제외한 24개 기관) 기후자료의 메타데이터 발굴 및 DB화에 필요한 연구개발이 포함되어 있다. 따라서 이 사업과 연계하여 도시지역의 기상관측 자료들에 대해서도 자료 생산 형식의 통일화 및 종합 수집체계 구축하고 주변 환경을 고려한 자동/수동 자료질 관리시스템 구축·운영할 필요가 있다. 향후 국가 기후자료 서비스와 차별화된 도시지역 기상관측 정보 전달 체계를 마련한다면 '국가 도시기상정보센터(가칭)'의 설립을 제안한다. 여기에는 전국 도시별 상세 기상정보를 실시간으로 서비스함과 동시에 지역도시 환경에 특화된 기후정보를 사용자 편의에 맞게 제공하는 것이다.

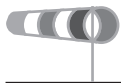
세 번째 시행계획은 도시지역 관측 환경에 따른 기상요소 관측지침을 제정하는 것이다. 우선 관측지침의 전문성과 객관성, 정합성을 확보할 수 있도록 민·관·학 분야의 저명한 전문위원을 20인 이내에 구성하여 '도시기상 관측 표준화 위원회(가칭)'를 구성하고 도시 환경에서 관측될 수 있는 기상요소들에 대해 각각의 관측지침 마련을 위해 정기적으로 운영할 것을 제안한다. 이렇게 마련된 도시기상 관측지침(안)을 해당 부처에 송부하여 검토·협의를 한 후 관련 법규나 내부규정에 추가할 수 있도록 한다. 새롭게 마련된 도

시기상 관측 표준화지침은 민·관·학 공청회를 통해 관련 분야와 산업계에 이해를 확산시키고, 특히 기상 산업 분야에서 관측장비 설치 매뉴얼에 이러한 지침을 추가한다면 국민들에 대한 홍보를 극대화할 수 있을 것이다.

2. 첨단 도시기상 관측 기반 고도화

도시기상 관측기술 분야의 선진화 방안으로는 국지성 집중호우, 대기오염물질 확산 등 도시에서 발생할 수 있는 기상 및 환경재해를 정확히 분석·예측할 수 있도록 도시 상공 연직 관측을 포함한 도시규모 3차원 입체관측 기술개발을 강화해야 한다. 이를 위하여 도시별 입체 관측망 최적화를 통하여 스톱 규모 이하 상시 입체 관측망 구축 방안을 마련할 필요가 있다. 이와 더불어 도시의 복잡하고 불균질한 환경을 고려하여 이동식레이더와 라이오미터 등 소형·이동식 연직기상 관측기술 개발 및 적용을 확대하고, 미국과 유럽 등 선진국과 같이 연직 수 km 이내 대기경계층과 같은 저고도 상공의 관측 공백을 보완하고 위성, 레이더 관측 자료의 검증에 위한 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 관측기술을 시급히 개발하여야 한다. 다른 한편으로 기기의 설치와 운영에 난이도가 높은 도시지역 관측기술의 개발을 위해서는 새롭게 개발되는 기상관측 장비들에 대한 현업적용 이전의 현장실험을 통한 성능검증 체계의 마련이 또한 필수적이다.

이와 더불어 첨단장비에서 관측된 자료에 대한 활용을 확대하고 기존 자료와의 통합 역량을 증대하여야 한다. 이를 위하여 기존의 지상관측 자료와 위에서 설명된 레이더, 위성 등 첨단 입체 관측 자료를 동화할



수 있는 기술 개발이 필수적이다. 이를 바탕으로 다양한 도시기상 및 환경예측 모델에 입력 자료로 사용될 수 있도록 도시지역 3차원 기상자료 산출 시스템을 개발하여야 한다. 여기서 생산된 자료는 도시 방재 및 관리와 관련된 다양한 커뮤니티에 의사결정 지원을 위한 자료로 활용될 수 있도록 수요자 맞춤형 3차원 도시기상 정보서비스 체계를 구축과 함께 추진되어야 할 것이다.

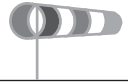
첨단 장비를 이용한 상세 도시기상 관측 및 3차원 입체관측 기술은 국내·외 선도 관측기술 보유 기관들과 전략적 파트너십을 통해서만 확보될 수 있다. 따라서 해외 주요 선진국들의 도시기상 관측과 관련한 학계와 연구기관을 중심으로 교류체계를 강화해야 한다. 이를 위하여 해외 주요 대학들과 도시기상 관측 기술 및 인력 교류를 지금보다 확대하고 해외 선진 기상관측 인프라를 벤치마킹하고 우리나라의 현실에 적합한 기술의 경우 이전을 촉진할 수 있는 지원체계를 구축하여야 한다. 이와 더불어 도시기상·기후 현상에 대한 연구가 한 국가만의 이슈가 아닌 관제로 도시기상과 관련한 국제 공동 관측 및 자료 교환 체계를 구축할 필요가 있다. 최근 동북아시아의 경제규모가 확대되고 서울과 동경, 북경, 상해 등 거대규모의 도시들이 속속 출현함에 따라 동북아시아를 거점으로 한 한·중·일 도시기상 국제공동 관측 프로젝트를 추진하는 것도 매우 시급한 사안으로 대두되고 있다.

3. 관측자료 공동 활용 인프라 확대

표준 도시기상 관측서비스 체계가 구축되고 첨단 도시기상 관측 기반이 고도화된 이후에는 이러한 관측

자료들이 여러 커뮤니티와 정책 의사결정자들 사이에 활용이 될 수 있도록 인프라가 확대되어야 한다. 기상청과 유관 기관이 아닌 민간분야에서도 다양한 사용자 편의의 자료제공 서비스 개발이 활발하게 이루어져야 한다. 3.1절의 '국가 도시기상정보센터(가칭)'와 연계하여 사용자 맞춤형 도시기상 관측자료 제공을 위한 첨단 DB화와 정보 서비스 기술을 민간에 지원하거나 기술이전을 확대할 필요가 있다. 또한 다양한 산업 및 경제 활동에 사용되는 정보에 도시기상 자료가 바로 중첩되어 활용될 수 있는 상호운용성(interoperability) 개념을 도입된 도시기상 그래픽 표출 기술개발이 강화되어야 한다. 이 개념은 도시의 날씨와 기후에 민감한 분야들의 종사자들이 관측 자료를 바로 자신의 업무내용과 중첩하여 의사결정을 할 수 있도록 지원하는 하는 것으로 미래 기상자료 서비스의 주요 지표방향 중 하나이다.

정책의사결정 지원을 위한 자료서비스와는 차별화된 도시기상 영향평가 기술 개발도 주요 이슈로 부각되고 있다. 특히 도시기상 관측 자료를 통해 도시별 기상·기후 취약성 평가를 할 수 있도록 도시기상과 사회·경제적 요소를 접목한 기술개발이 필요하다. 최근 미국에서는 “날씨예보”에서 “날씨예보 및 영향예보”로의 패러다임 전환을 위해 사회경제학과 물리학의 완전한 통합을 추구하고 있다. 이러한 과정에서 도시지역의 관측 자료를 통해 태풍, 집중호우 등 재해기상에 대한 영향예보의 기반 정보를 산출하고 있다. 또한 이러한 영향평가 결과를 통하여 관측기반의 방재기준 평가 및 규정 개선을 추진하여야 할 것이다. 이외에도 재난 방재 및 환경재해와 연계하여 도시기상 관측과 관련된 다양한 교육 콘텐츠를 개발하여 보급함으로써 도시기



상 관측 자료 활용 인프라를 확대하여야 한다. 여기에는 도시기상 관측과 관련한 일반국민 홍보자료와 도시핵, 화생방 테러 대응 도시기상 교육자료 제작·배포하는 것과 함께 대학생 대상의 도시기상 관측 전문교육 프로그램 개발·보급이 포함된다.

IV. 요약 및 결론

최근 후진국과 중진국을 중심으로 전 세계 도시 인구가 지속적으로 증가하는 추세에서 인구와 각종 인프라가 밀집된 거대도시 출현의 증가는 도시 환경의 쾌적성을 감소시키는 한편 자연재해에 대한 도시 방재능력을 크게 저하시킨다. 여기에 기후변화로 인한 재해기상의 빈도와 강도가 점차 증가하는 현상은 도시 관리에 있어 매우 심각한 어려움에 직면하게 한다. 따라서 이러한 도시지역의 자연재해와 기후변화에 적극 대응하고 그 피해를 최소화시키기 위해서는 이러한 도시재난 현상에 대한 정확한 예측과 영향평가가 필요하다. 이를 위해 우선적으로 실시되어야 할 사안이 바로 도시기상에 대한 정확하고 상세한 관측을 수행하는 것이고, 관련 자료에 대한 수요가 다양한 분야에서 급속히 늘어나고 있다.

현재 운영 중인 도시기상 관측을 효율화하고 보다 세밀하고 정확한 자료를 얻기 위해 몇 가지 방안을 제시한다. 첫 번째, 도시기상 관측 장비와 관측조건 등에 대한 통일 또는 표준화를 통해 자료의 균일화를 도모해야 한다. 두 번째, 기상청과 지자체 등 정부기관과 대학, 기업 등 민간 영역에서 소기의 목적에 따라 제각기 운영되고 있는 관측 시스템과 대기, 수질 모니터링

시스템, 도로상 기상 측기 뿐만 아니라 화상 감시 카메라 등 산재된 자료와 서비스를 공유를 위한 파트너십 구축을 논의해야 한다. 이를 위하여 참여기관들이 최적의 관측 자료를 얻을 수 있도록 관측망을 조정하고 자료들을 공동으로 활용할 수 있는 자료센터를 운영할 필요가 있다. 세 번째, 선진국과 같이 레이더와 위성 등 첨단 관측 장비를 도시지역에 확대·적용하여 관측 공백의 최소화와 대기경계층 내 연직 기상요소 등 추가자료 확보를 추진하여야 한다.

본 연구에서는 국내·외 도시기상 관측 동향을 기반으로 도출된 결과로서, 이외에도 도시기상 관측의 선진화를 위한 방안으로 방안이 더 있을 수 있다. 향후 이러한 부분은 관련 기관과 학계와의 지속적인 협의를 통해 체계화되고 현실적인 실천방안으로 도출되기를 기대한다.

참고문헌

- Brockerhoff, M., 1999: Urban growth in developing countries: A review of projections and predictions, *Population and Development Review*, 25(4), 757-778.
- United Nations, 2008: World Urbanization Prospects: The 2007 Revision, New York, Report from the Population Division of the Department of Economic and Social Affairs, United Nations.
- Matzarakis, A., F. Rutz, , H. Mayer, 2000: Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures, the Conference ICBICUC'99, Sydney, WCASP-50, WMO/TD No. 1026, 273-278.

기상기술정책지 발간 목록

참간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월

칼 럼	·기후변화 대응을 위한 기상청의 역할	권원태	3-11
정책초점	·기후변화감시 발전 방향	김진석	12-18
	·미국의 기상위성 개발현황과 향후전망	안명환	19-38
	·기상산업의 위상과 성장가능성	김준모	39-45
	·최적 일사 관측망 구축방안	이규태	46-57
	·국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의	김백조, 김경립	58-61
논 단	·A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities	L.S. Kalkstein, S.C. Sheridan, Y.C. Au	62-68
해외기술동향	·프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술	김상우	69-79
	·일본의 우주기상 기술	김지영, 신승숙	80-84

기상산업의 현황과 전략, 제1권 제2호(통권 제2호), 2008년 6월

칼 럼	·기후변화시대, 기상산업 발전상	봉종현	1-3
정책초점	·기상산업의 중요성과 전략적 위치	이중우	5-13
	·기후변화가 산업에 미치는 경제적 영향과 적응대책	한기주	14-22
	·기후경제학의 대두와 대응 전략	임상수	23-33
	·기후변화와 신재생에너지 산업	구영덕	34-45
	·기상산업 육성을 위한 정책대안 모색	김준모, 이기식	46-54
	·미국 남동부의 응용기상산업 현황	임영권	55-64
	·최근 황사의 특성 및 산업에 미치는 영향	김지영	65-70
	·A brief introduction to the European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST)	Radan Huth	71-81
논 단	·우주환경의 현황과 전망	안병호	82-92
해외기술동향	·유럽의 기후변화 시나리오 불확실성 평가 : EU(유럽연합) 기후변화 프로젝트를 중심으로	임은순	93-103
	·미국 NOAA의 지구 감시 현황	전영신	104-107

항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월

칼 럼	·기상 관측 · 연구용 항공기 도입과 활용	정순갑	1-4
정책초점	·무인항공기 개발 현황 및 응용 방안	오수훈, 구삼옥	6-18
	·해외 기상관측용 항공기 운영 및 활용 실태	김금란, 장기호	19-34
	·항공기를 이용한 대기물리 관측 체계 수립 방안	오성남	35-45
	·효과적인 항공기 유지 관리 방안	김영철	46-56
	·공군에서의 항공관측 현황과 전망	김종석	57-66
	·항공기를 이용한 대기환경 감시	김정수	67-74
	·항공/위성 정보를 활용한 재해 피해 조사	최우정, 심재현	75-84
	·유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시	윤순창, 김지영	85-93
해외기술동향	·미국의 첨단 기상관측 항공기(HIAPER) 운영 현황	김지영, 박소연	94-99
	·미국의 탄소 추적자 시스템 개발 현황 및 전략	조천호	100-108
	·미국의 우주기상 예보와 발전 방향	곽영실	109-117
뉴스 포커스	·한국, IPCC 부의장국에 진출	허 은	118-119

기상기술정책지 발간 목록

전지구관측시스템 구축과 활용, 제1권 제4호(통권 제4호), 2008년 12월

칼 럼	· 전지구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	· GEO/GEOSS 현황과 추진 계획	엄원근	6-21
	· GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안	김병수	22-31
	· GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안	허 은	32-39
	· 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안	신동철	40-41
	- 재해 분야	박덕근	42-44
	- 보건 분야	이희일	45-47
	- 에너지자원 분야	황재홍, 이사로	48-50
	- 기상 및 기후 분야	이병렬	51-53
	- 수문 및 수자원 분야	조효섭	54-56
	- 생태계와 생물다양성 분야	장임석	57-58
	- 농업 분야	이정택	59-62
	- 해양 분야	김태동	63-67
	- 우주 분야	김용승, 박종욱	68-71
논 단	· Taking GEOSS to the nest level	José Achache	72-75
해외기술동향	· GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향	강용성	76-83
	· 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황	이경미	84-95
뉴스 포커스	· 한국, GEO 집행 이사국 진출	이용섭	96-97

기상장비의 녹색산업화 전략, 제2권 제1호(통권 제5호), 2009년 3월

칼 럼	· 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	· 기상장비의 산업여건과 국산화 전략	김상조	4-13
	· 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략	이종국	14-21
	· 기상레이더 국산화 추진 방안	장기호, 석미경, 김정희	22-29
	· 기상레이더의 상용화 현황과 육성 방안	조성주	30-41
	· 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향	이부용	42-51
논 단	· 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원	52-72
해외기술동향	· 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로	방기석	73-80
	· 세계의 기상장비 및 신기술 동향	김지영, 박소연	81-89

기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

칼 럼	· 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	· 기후변화와 물환경정책	김영훈	4-15
	· 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향	노재화	16-27
	· 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰	김문모, 정창삼, 여운광, 심재현	28-37
	· 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안	문영일, 오태석	38-50
	· 수문기상학적 기후변화 추세	강부식	51-64
	· 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책	배덕호	65-77
	· 이상기후에 대응한 댐 운영 방안	차기욱	78-89
논 단	· 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석	90-110
해외기술동향	· 미국의 기상-수자원 연계기술 동향	정창삼	111-121
	· NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황	김지영 · 박소연	122-131
	· 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기	김용상	132-140

기상기술정책지 발간 목록

기상 · 기후변화와 경제, 제2권 제3호(통권 제7호), 2009년 9월

칼 럼	· 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	· 기후변화에 따른 에너지정책	박현중	4-18
	· 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향	박종현	19-29
	· 기후변화가 농업경제에 미치는 영향	김창길	30-42
	· 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정	김정인	43-52
	· 기상산업 활성화와 과제	이만기	53-59
	· 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언	김동식	60-69
논 단	· 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	· 기상정보의 사회 · 경제적 가치와 편익 추정	김지영	79-85
	· 강수의 경제적 가치 평가 방법론	유승훈	86-96
뉴스 포커스	· 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기	이영곤	97-103

날씨 · 기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월

칼 럼	· 날씨공감포럼의 의의와 발전방향	전병성	1-2
정책초점	· [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향	고상백	4-19
	· [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향	이재학	20-29
	· [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안	차두송	30-41
	· [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향	김의근	42-50
	· [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성	조명희, 조윤원, 김성재	51-60
	· [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성	김정배	61-72
	· [디자인] 생활디자인과 기후 · 기상과의 연계방안	김명주	73-88
논 단	· 국민과의 '소통' - 어떻게 할 것인가?	김연중	89-97
뉴스 포커스	· 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기	김정윤	98-101

기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월

칼 럼	· 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책	박광준	1-2
정책초점	· 기상이변의 경제학	이지훈	4-11
	· 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고	한기주	12-21
	· 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언	이종인	22-32
	· 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향	이상현, 정상기, 이상훈	33-45
	· 기후변화와 건설 산업	강운산	46-56
	· 코펜하겐 어코드와 탄소시장	노종환	57-66
	· 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영	이서원	67-77
	· 이산화탄소(CO ₂) 저감기술 개발동향: DME 제조기술	조원준	78-84
논 단	· 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로	양용석	85-99
	· 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임	김창섭	100-109
뉴스 포커스	· 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

기상기술정책지 발간 목록

국가 기후정보 제공 및 활용 방안, 제3권 제2호(통권 제10호), 2010년 6월

칼 럼	· 국가기후자료 관리의 중요성	켄 크로포드	1-2
정책초점	· 기후변화통합영향평가에 대한 국가기후정보의 역할	전성우	4-11
	· 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안	권영아	12-22
	· 기상정보의 농업적 활용과 전망	심교문	23-32
	· 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스	원명수	33-45
	· 경기도의 기상 · 기후정보 활용	김동영	46-57
	· 국가기초풍속지도의 필요성	권순덕	58-62
	· 국가기후자료센터 구축과 기상산업 활성화	김병선	63-74
	· 국가기후자료센터 설립과 민간의 역할 분담	나성준	75-83
	· 가치있는 기후정보	김윤태, 정도준	84-99
논 단	· 기상청 기후자료 활용 증대 방안에 관한 제언	최영은	100-110
뉴스 포커스	· 국가기후자료센터의 역할	임용한	111-119

장기예보 정보의 사회·경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월

칼 럼	· 장기예보 투자 확대해야	박정규	1-2
정책초점	· 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용	정응수	4-15
	· 기상 장기예보에 대한 소고	박창선	16-23
	· 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용	손미영	24-33
	· 장기예보의 사회 · 경제적 가치와 서비스 활성화 방안	김동식	34-43
	· 기상 장기예보의 농업적 가치와 활용	한점화	44-53
	· 장기예보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용	우수민, 김태국	54-64
	· 기상예보와 재해관리	박종윤, 신영섭	65-81
	· 장기예보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래	김지영, 이현수	82-89
해외기술동향	· 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후 영향에 관한 서비스 현황	조경숙	90-101
	· WMO 장기예보 다중모델 앙상블 선도센터(WMO LC-LRFMME)	윤원태	102-106
뉴스 포커스	· 영국기상청과의 계절예측시스템 공동 운영 협정 체결	이예숙	107-109

사회가 요구하는 미래기상서비스의 모습, 제3권 제4호(통권 제12호), 2010년 12월

칼 럼	· 시대의 요구에 부응하는 기상 · 기후서비스	권원태	1-3
정책초점	· 기상학의 역사	윤일희	6-16
	· 지질학에서 본 기후변동의 과거, 현재, 그리고 미래	이용일	17-29
	· 예보기술의 성장 촉진을 위한 광각렌즈	변희룡	30-44
	· 전쟁과 기상	반기성	45-55
	· 날씨와 선거	유현중	56-64
	· 기후변화와 문학	신문수	65-74
	· 기후변화와 문화 I (문명의 시작과 유럽문명을 중심으로)	오성남	75-87
	· 비타민 D의 새로운 조명	김상완	88-96
	· G20서울정상회담과 경호기상정보 생산을 위한 기상청의 역할	이선제	97-105
	· 기상정보의 축적과 유통 활성화를 통한 국부 창출	김영신	106-115
논 단	· 날씨의 심리학	최창호	116-122
해외기술동향	기상정보의 사회 · 경제적 평가에 관한 해외동향	김정윤, 김인겸	123-130

기상기술정책지 발간 목록

신규 시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안, 제4권 제1호(통권 제13호), 2011년 6월

발 간 사	· G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향	조석준	1-3
칼 럼	· 대학과 공공연구소의 기상기술 이전 활성화 및 사업화 촉진을 위한 기술이전센터(TLO) 발전 방안	박종복	4-13
	· 새로운 기상산업 시장창출과 연계된 금융시장 활성화에 대한 소고 - 보험산업의 입장에서	조재린, 황진태	14-23
정책초점	· 신규 기상시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안 연구	국립기상연구소 정책연구과	26-63

도시기상관측 선진화방안, 제4권 제2호(통권 제14호), 2011년 12월

발 간 사	· 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.	조석준	1-3
칼 럼	· 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래	최광용	6-18
	· 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안	박민규, 이석민	19-30
	· 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안	김해동	31-42
	· 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계	이순환	43-50
	· 도시 기상 관측 연구 현황	박영산	51-62
정책초점	· 도시기상 관측 선진화 방안 연구	이영곤	64-73

『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 제 1저자를 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:

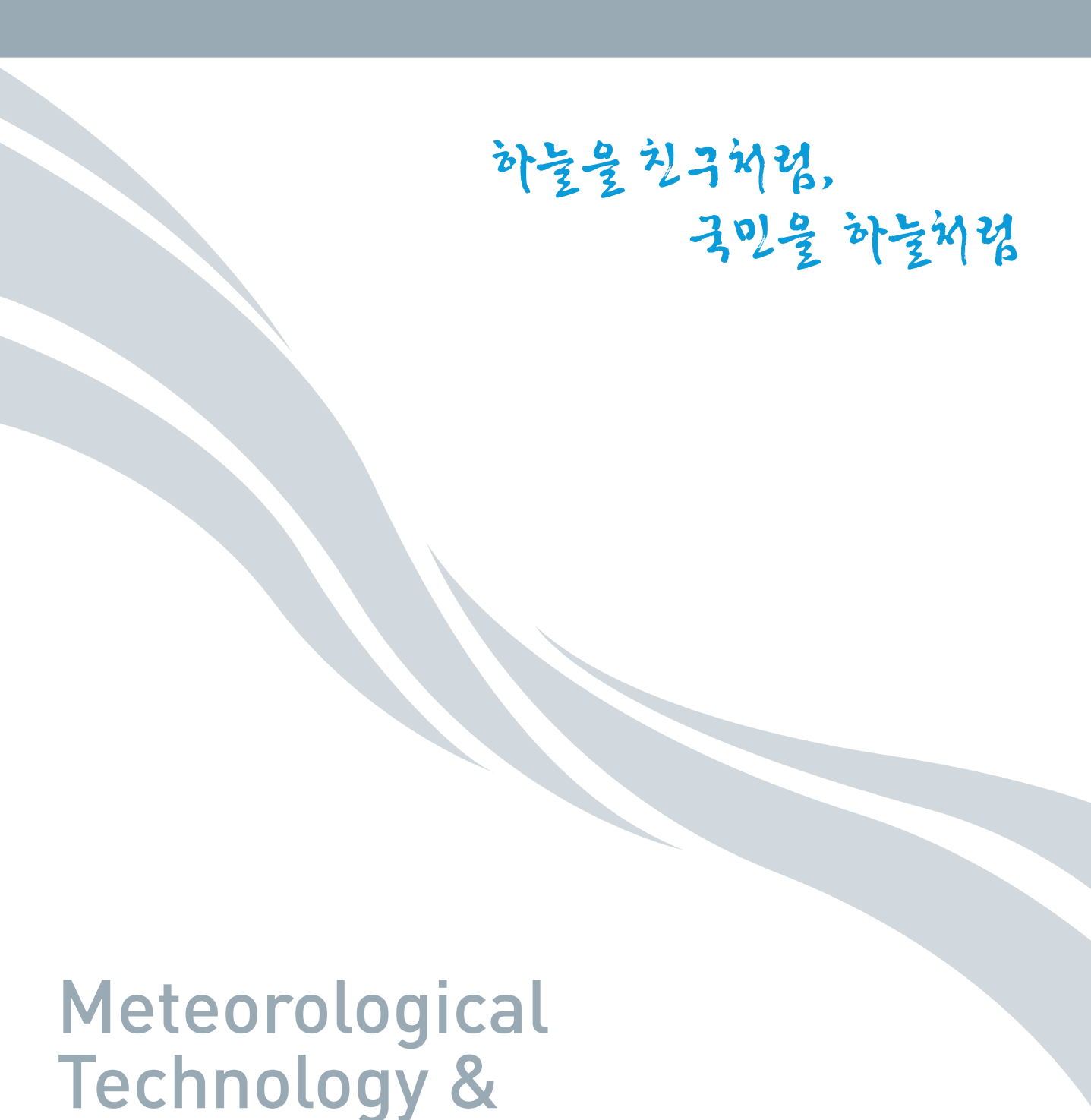
6. 참고문헌

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 4, Number 2

서울시 동작구 여의대방로16길 61
Tel. 02-6712-0235 / Fax. 02-849-0668
<http://www.kma.go.kr>