

기상기술정책

METEOROLOGICAL
TECHNOLOGY &
POLICY

칼럼

- 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할

정책초점

- 기후변화감시 발전 방향
- 미국의 기상위성 개발현황과 향후전망
- 기상산업의 위상과 성장 가능성
- 최적 일사 관측망 구축방안
- 국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의

논단

- A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities

해외기술동향

- 프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술
- 일본의 우주기상 기술

2008.3



기 상 청
Korea Meteorological Administration

『기상기술정책』

제 1 권 제 1 호(통권 창간호)

2008년 3월 5일 발행

등록번호 : 11-1360395-000017-09

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

본 『기상기술정책』지는 기상과 기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안 과제에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상청의 정책입안과 연구개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행하고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지의 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 채택되신 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

- ▶ 원고매수: A4 용지 10매 내외
- ▶ 원고마감: 수시접수
- ▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.

『기상기술정책』 편집위원회

발행인 : 이만기
편집기획 : 국립기상연구소 정책연구팀
편집위원장 : 김백조 팀장
편집위원 : 김지영, 김정립, 황의홍, 신승숙, 안숙희

발행처

주소 : (156-720) 서울시 동작구 기상청길 45 기상청
전화 : (02) 6712-0235
팩스 : (02) 849-0668
E-mail : jykim@kma.go.kr
<http://www.kma.go.kr/>

인쇄 : 미래미디어

발간사 / 기상청장 이만기	1
----------------	---

축사 / 한국기상학회장 오재호	2
------------------	---

칼럼

• 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할 / 권원태	3
-----------------------------	---

정책초점

• 기후변화감시 발전 방향 / 김진석	12
• 미국의 기상위성 개발현황과 향후전망 / 안명환	19
• 기상산업의 위상과 성장가능성 / 김준모	39
• 최적 일사 관측망 구축방안 / 이규태	46
• 국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의 / 김백조, 김경립	58

논단

• 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
---	----

해외기술동향

• 프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술 / 김상우	69
• 일본의 우주기상 기술 / 김지영, 신승숙	80

발간사



우리 기상청은 2011년까지 기상 6대 선진국 진입을 목표로 새로운 도약과 발전을 이루기 위해 기상청 비전을 『World Best 365』로 설정하고, 국가기상기술로드맵 수립과 함께 기상 업무 중·장기 발전계획을 마련하여 추진 중에 있습니다.

기상청의 궁극적 미션인 “기상재해로부터 국민의 생명과 재산 보호”임무를 성공적으로 달성하기 위해서는 무엇보다도 내실있고 효과적인 기상정책의 수립이 중요할 것입니다. 특히, 급변하는 21세기 고도 지식정보화 사회를 선도해 나갈 수 있는 경쟁력을 갖추기 위해서는 국내외의 최신 기술과 정책 동향을 정확하게 파악하고 지속·예측·실현 가능한 미래유망 기상기술력을 조기에 확보하는 것이 매우 중요할 것입니다.

최근 들어 한반도를 포함한 동아시아 지역은 지구온난화에서 비롯된 지역 기후변화로 인하여 예년에도 볼 수 없었던 이상기상 현상이 해마다 발생하여 많은 인명피해와 더불어 사회경제적 손실을 끼치고 있습니다. 또한, 온실가스 배출량 감축에 따른 기후변화 협약 대응은 국가경제 및 사회에 미칠 파급효과가 매우 클 것으로 예상되고 있습니다.

이러한 시점에서 국가 경쟁력을 제고시키고 국민의 삶의 질을 실질적으로 향상시킬 수 있는 우수한 기상정책의 발굴은 매우 시의적절한 것으로 사료되며, 국내·외의 최신 기상관련 정책정보를 담고자하는 『기상기술정책』의 발간은 매우 뜻깊은 일이라고 생각합니다.

아무쪼록 『기상기술정책』지가 기상분야의 전문정책지로 자리매김하여 국제경쟁력 향상과 더불어 기상과 기후분야의 정책결정을 위한 훌륭한 참고자료로 적극 활용될 수 있기를 바랍니다.

2008년 3월 기상청장 이만기

창간축사



- 기상/기후 정책 수립에 큰 역할을 기대하며

〈기상기술정책〉 창간을 진심으로 축하합니다.

최근의 기상현상은 더욱 강력해져 계속해서 새로운 기록을 수립하는 특징을 보이고 있습니다. 많은 사람들이 번덕스러운 날씨만큼 쫓아가지 못하는 기상청 예보에 대한 불만을 쏟아 놓고 있다는 점은 그 누구도 부인하지는 못할 것입니다. 이러한 실정은 현재에도 세계 곳곳에서 이상기상 현상으로 피해가 발생되고 있는 점을 고려할 때, 비단 우리나라에서만 일어난 일이라고 생각합니다. 이미 많은 기후학자들의 이러한 이상기상현상이 유례없이 빈번하게 발생하는 것을 지난 세기부터 본격적으로 관측되기 시작한 지구온난화현상 때문이라 지적하고 있습니다. 이미 경험한 바와 같이, 우리에게 다가오는 이상기상은 과거와는 달리 때로는 국지적이고, 때로는 엄청난 에너지를 가진 강력한 현상으로 나타나기에 과거의 경험과 지식으로는 그 예측이 더욱욱 용이하지 않습니다.

유엔 정부간기후변화위원회(IPCC)는 우리가 지구 온난화를 완화시킬 수 있는 시간이 불과 8년 밖에 남지 않았다고 각국의 결단을 재촉하고 있습니다. 그러나 지구온난화에 대한 사회의 인식과 대응 자세는 안타까울 정도로 미흡합니다. 정부의 대응책도 문제의 본질에 대응하기 보다는 우리나라의 온실가스의 의무 감축량을 완화시키는 일에 집중되어 있는 실정입니다. 이러한 상황을 고려할 때, 국내외의 많은 전문가들로부터 기상/기후 분야의 올바른 정책 방향에 대한 의견을 수렴하고 공유하는 〈기상기술정책〉의 발간은 매우 고무적이며, 미래에 대비한 균형 있는 정책수립을 위해 시기적절하다고 생각됩니다.

최근에 들어 지구온난화와 이에 따른 이상기상 발생 증가에 따른 기상정보의 중요성이 나날이 더해가고 있고, 그 수요 또한 지속적으로 증가 일로에 있습니다. 보다 더 정확하고 믿을 수 있는 기상정보가 항상 지원되기를 바라는 국민적 요구는 더 거세지리라 의심치 않습니다. 이러한 기상정보 수요 폭발에 대비하는 정책은 적어도 10년, 아니 한 세대를 내다보는 지혜가 필요하다고 봅니다. 지금이 바로 그러한 장기적인 기상정보에 관한 정책을 수립하는데 매우 중요한 시점이라고 생각합니다. 이러한 기상/기후 정책에 관련한 이슈를 다루는 전문잡지 〈기상기술정책〉의 무궁한 발전을 기원합니다.

2008년 3월 한국기상학회 회장 오재호

기후변화 대응을 위한 기상청의 역할

권 원 태

국립기상연구소 기후연구팀장

wontk@metri.re.kr

1. 서론

최근 기후변화(또는 지구온난화)는 세계적인 화두라고 할 수 있다. 2007년에는 세계 각지에서 극한기후 현상이 발생하였을 뿐만 아니라, UN 등에서 주도한 기후변화 관련 국제회의가 계속해서 개최되었다. 특히 노르웨이의 노벨상 위원회는 2007년 노벨 평화상을 인위적인 기후변화에 관한 과학적 이해를 증진시키고, 이러한 기후변화에 대응하기 위하여 노력한 공로로 정부간 기후변화 협의체(IPCC¹⁾)와 미국의 전 부통령인 앨 고어(Albert Arnold Gore)에게 공동 수여하였다.

기후변화에 대한 국제적 노력의 일환으로 지난해 12월 인도네시아 발리에서 개최된 유엔기후변화협약 당사국총회에서는 포스트-교토 협상대책으로 발리로드맵을 힘겹게 통과시켰다. 발리로드맵에서는 우선 온난화의 증거가 명백하며, 온실가스 감축을 더 이상 지연한다면 기후변화로 인한 심각한 영향의 위험이 증가할 것이라는 것을 거듭 확

인하였다. 이에 대한 대응방안으로 온실가스 감축, 삼림 보존, 기후변화 적응, 기술이전 등을 제시하고 있다. 발리로드맵은 2009년 덴마크 유엔정상회의 이전에 협상을 완료할 것을 목표로 하고 있다.

우리도 이제는 기후변화 관련 국제적 동향에 주목하고 이에 동참해야 한다. 우리나라는 세계 9위의 이산화탄소 배출국이며, 1990년 이후 배출량이 2배 이상 증가하였다. 그러므로 향후 우리나라에 대한 국제적인 압력이 더욱 증가할 것이다. 향후 미래 기후변화로 인한 위험을 줄이기 위해서 우리나라도 자발적으로 기후변화 문제를 해결하기 위한 노력을 기울여야 한다.

기후변화는 피할 수 없다. 최근 지구온난화로 인해 세계적으로 기상재해가 급증하고 대형화되는 추세다. 우리나라에서는 자연재해의 90% 이상이 기상재해에 의해 발생하고 있다²⁾. 기후변화로 인한 자연재해의 증가 및 생태계의 교란은 사회경제적으로 상당한 영향을 미칠 가능성이 높으며, 특히 사회기반 시설이 부족한 저개발국가나 사회적 취

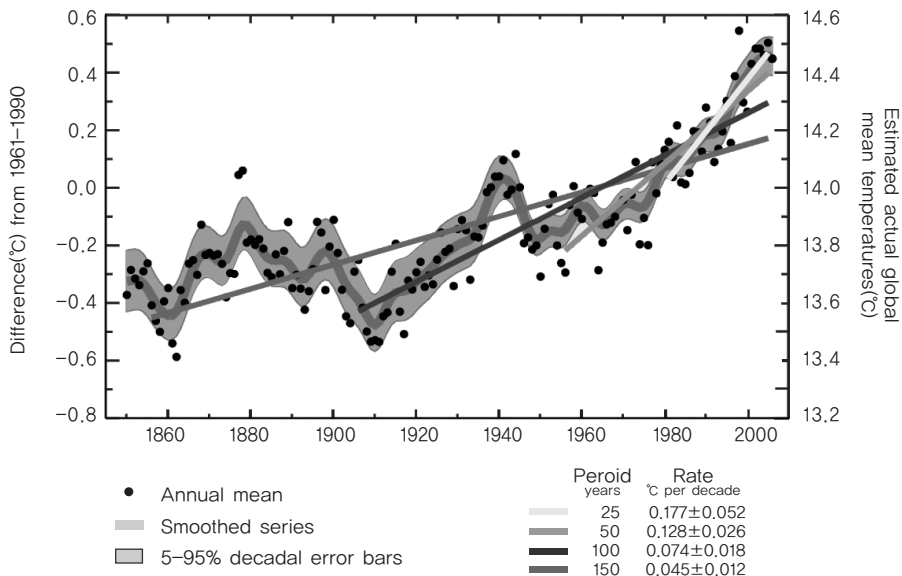
약계층의 경우 지구온난화로 인한 변화에 적응하는 것은 매우 어렵다. 미래 기후변화의 정확한 예측은 자연재해, 육상 및 해양 생태계의 변화에 대응하는데 필수적이다. 또한 이러한 예측정보는 다양한 산업분야에서 미래의 기술 및 문화 트렌드를 예상함으로써 전략적인 제품 생산량 조절 및 마케팅 전략 수립, 새로운 기술개발 등 능동적으로 대처하는데 기여할 수 있다.

2. 기후변화의 과학적 현황

2007년 발간된 IPCC 4차 평가보고서는 지난 100년간(1906~2005년)의 지구 평균기온은 0.74℃ 상승하고 최근 12년(1995~2006년) 중 11년이 최고 기온을 기록하였으며, 지난 50년이 과거

1300년 중 가장 따뜻한 시기라고 보고하였다(그림 1). 중요한 점은 기후변화의 가속화와 다양한 형태로 나타난다는 것이다. 해수면 상승, 북반구 적설 면적의 감소 등과 함께 육지와 해양 동식물 생태계에 온난화의 영향이 나타나고 있다. 인간활동으로 인한 온실가스 농도 증가가 지난 50년 간 관측된 지구온난화의 대부분을 야기했을 가능성이 높다.

온실가스 농도 증가는 화석연료의 연소, 삼림 파괴 등 인간활동이 주원인이며, 특히 이산화탄소의 배출량은 1990년대 연간 64억 Ct에서 최근에는 72억 Ct으로 증가하였다. 대기 중으로 배출된 온실가스는 종류에 따라 체류시간이 수십~수백 년 이상이다. 대기 중으로 배출된 온실가스는 해양과 육지 생태계에 의해 50~60%가 흡수되고, 남은 배출



[그림1] 지구평균기온과 선형 추세(기준: 1961-1990), 1850-1899년 평균기온에 비하여 2001-2005년 평균기온은 $0.76 \pm 0.19^{\circ}\text{C}$ 더 높다.
(출처: IPCC 4차 평가보고서)

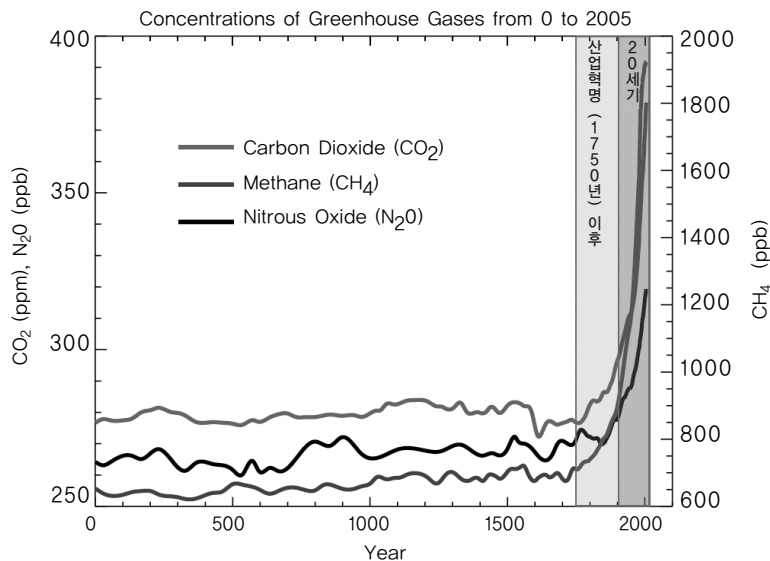
량은 대기 중의 농도를 증가시켜 온실효과를 증가시키고 있다. 그림 2는 지난 2000년간 온실가스의 농도 변화추세를 나타내고 있는데, 산업혁명 이후 온실가스가 증가하기 시작하여 그 증가추세는 20세기에 들어 빠르게 상승하고 있는 특징을 보인다.

지구온난화에 가장 큰 기여를 하는 이산화탄소(CO_2)의 지구평균농도는 2006년 381.2 ppm³⁾로 18세기 산업혁명 이후 약 36%가 증가하였다. 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O)의 농도는 각각 1,782 ppb, 320.1 ppb으로 산업혁명 이전 농도(715 ppb; 270 ppb)에 비하여 각각 약 150%, 19% 증가하였는데 최근 메탄은 안정화 추세를 보이고 있다⁴⁾. 지금까지 온실가스 농도 증가로 인한 복사강제력은 2.6 W/m^2 로 지구에서 흡수하는 태양에너지의 1%보다 크며, 산업혁명 이후 태양 활동의 변화(약

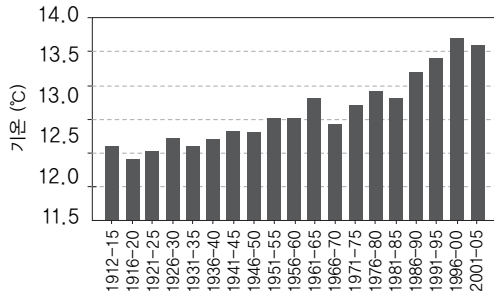
0.12 W/m^2)보다 매우 크다. 같은 기간 에어러솔의 영향은 냉각화에 기여한 것으로 분석되며, 오존의 영향을 포함하여 약 -1.0 W/m^2 이다.

기온은 거의 모든 지역에서 증가하는 추세며 특히 북반구 고위도 육지에서 가장 크고 적도지방과 해양의 온도 변화는 작은 특징을 보인다. 강수량은 지역적 변동성이 매우 크며, 일반적으로 고위도에서 증가추세를 보이고 아열대 고기압이 확장하는 지역에서는 감소하는 추세를 보인다. 많은 지역에서 호우의 발생빈도가 증가하고, 건조 또는 반건조 지역에서 가뭄이 심화되는 경향이 있다. 태풍이나 허리케인과 같은 열대폭풍의 활동이 강화도 보고되고 있다.

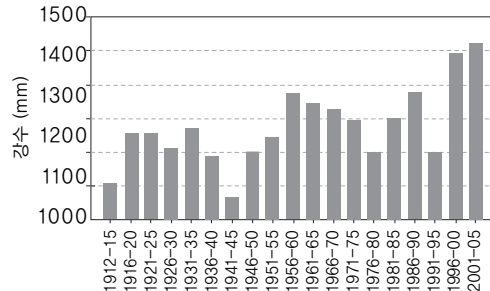
IPCC의 평가보고서⁵⁾에 의하면 21세기말까지



[그림 2] 최근 2000년간 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 농도 추세
(출처: IPCC 4차 평가보고서)



[그림 3] 우리나라 평균 기온의 변화



[그림 4] 우리나라 평균 강수량의 변화

화석연료가 집중적으로 사용되는 A1FI 시나리오(CO₂ 농도가 2100년 약 970 ppm로 증가)의 경우 평균기온은 4.0℃[2.4~6.4℃]가 상승하고 해수면은 26~59 cm 상승할 것으로 전망된다. 그러나 2100년 온실가스 배출량을 지금의 50% 이하로 감축하는 B1 시나리오(2100년 CO₂ 농도 약 550 ppm)에서는 지구평균기온은 1.8℃[1.1~2.9℃] 상승, 해수면은 18~38 cm가 상승할 것으로 전망된다. 즉 온실가스의 감축 효과는 평균 2.2℃가 된다.

모든 시나리오에서 온난화의 패턴은 거의 유사한 것으로 나타난다. 기온 상승은 내륙과 북반구 고위도에서 가장 크며, 북극과 남극의 빙하는 상당히 줄어들 것으로 전망되는데, 특히 여름철 북극해 해빙(海氷)은 21세기 말에는 거의 소멸할 것으로 예상된다. 강수량의 지역적 변화, 폭염, 호우빈도 증가, 태풍이나 허리케인의 세기 강화 등 20세기에 나타난 변화 패턴이 지속될 것으로 전망된다. 또한 온실가스가 저감·안정화 되더라도 이미 배출된 온실가스는 수백~수천 년에 걸쳐 기후변화를 계속 초래하고 피해를 발생시킬 것이다.

1912년 이후 우리나라의 평균기온⁶⁾은 약 1.5℃

상승하였는데⁷⁾(그림 3) 주요 원인으로는 지구온난화와 도시화(20~30%로 분석됨)를 들 수 있다. 기온 상승은 여름보다 겨울에 더 크게 나타나며, 그 결과 겨울은 짧아지고 여름은 길어지는 경향을 나타낸다. 서리일과 극한저온일은 감소, 생장기간은 증가하였으며, 열대야 및 극한고온일은 증가하였다. 우리나라 연평균 강수량은 수십 년의 큰 변동 폭이 보이나 장기적으로 증가 추세이며(그림 4), 강수일수는 감소하고 호우일수(일강수량이 80 mm 이상)는 증가하는 추세이다. 해수온도는 39년간(1968~2006년) 남해는 1.04℃, 서해는 0.97℃, 동해는 0.80℃ 상승하였으며, 해수면은 연간 0.10~0.20 cm 상승하였다⁸⁾.

국립기상연구소의 연구결과에 따르면 SRES A1B 시나리오(CO₂의 농도가 2100년 약 720 ppm)에 근거한 우리나라의 21세기 말 기온은 30년(1971~2000년) 평균 대비 4℃ 상승하고 강수량은 17% 증가할 것으로 전망된다. 이와 더불어 극한 저온현상의 빈도는 감소하고 극한 고온현상의 빈도는 증가할 것이다. 강수량 증가 추세와 더불어

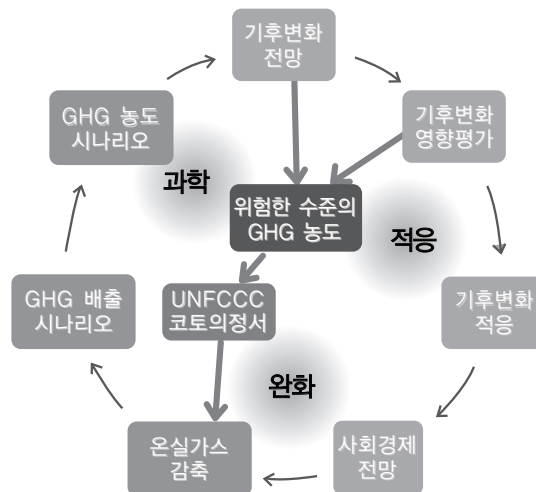
호우 빈도도 증가하고 우리나라에 상륙하는 태풍은 해수면온도의 상승으로 세기가 강화될 가능성이 높아질 것으로 전망된다. 아열대 기후구⁹⁾는 20세기 말 제주도와 남해안 일부 지역에서 21세기 말에는 서울-대전-남원-구미-안동-포항을 거쳐 동해안을 잇는 선까지 북상할 것으로 전망되며, 남부 지방 일부에서는 겨울이 사라질 것으로 전망된다. 이러한 온난화로 자연재해의 증가, 동식물 생태계의 교란, 열파 및 아열대 질병의 증가, 연안 침수, 식량생산 감소 등이 발생할 수 있다.

3. 기후변화 대응을 위한 기상청의 역할

향후 기후변화협약의 추진과 그에 따른 온실가스 규제 등이 국제사회의 최대 이슈로 등장하고 있으며, 2005년 교토의정서 발효에 따라 2013년부터 우리나라는 온실가스 의무감축국이 될 것에 대비

하여 온실가스 감시, 기후변화 예측 및 영향평가 등 과학적 근거 자료가 필요하다. 정부는 1999년 이후 기후변화 대응 종합대책을 추진하고 있으나, 온실가스 저감기술 개발에 치중하고 있어 기후변화 과학, 영향평가·적응 분야에 대한 투자가 부족한 실정이다. 정확한 자료·정보에 의한 적응대책을 수립하기 위해서는 기후변화를 감시·예측하고 영향·취약성을 평가하는 것이 필수적이다.

기후변화 대응은 과학, 적응, 완화로 구분할 수 있다(그림 5). 기후변화의 과학적 현황을 파악하고, 이에 의한 영향을 평가하는 것은 온실가스 감축을 위한 양적, 시간적 목표를 설정하는데 필수적이다. 온실가스 감축목표는 위험한 수준의 온실가스 농도의 수준에 의해 결정된다. IPCC는 4차 평가보고서에서 온도가 2~3℃ 상승하면, 생물종이 20~30% 멸종할 것이라고 전망하였다. 현재 유럽 각국은 2050년까지 1990년 대비 온실가스를 50%



[그림 5] 기후변화 대응 체계도

이상 감축하여야 한다고 주장한다.

외국의 기후변화 과학 관련 프로그램은 1990년 대를 시작으로 국가 주도의 대규모 사업을 수행하고 있으며, 그 결과는 IPCC 평가보고서 등에 수록되고 있다. 미국은 지구변화연구프로그램(US Global Change Research Program)에 이어 2003년 기후변화과학프로그램(Climate Change Science Program)을 시작하여 매년 약 18억 달러를 관측, 과학적 이해, 예측, 영향평가 등에 지원하고 있다. 일본은 프론티어연구사업(Frontier Research Program for Global Change), 영국은 기후변화프로그램(UK Climate Change Program), 기후변화영향프로그램(UK Climate Impact Program) 등 주요 프로그램을 통한 기후변화 대응을 추진하고 있다.

기후변화 대응을 위한 기상청의 주요 역할은 기후변화를 감시하고 예측하는 것이다. 기후변화의 원인 물질인 온실가스 및 에어로솔을 지속적으로 감시하고, 아시아 지역의 농도, 배출량 및 흡수량을 감시하여야 한다. 또한, 대기, 해양 등 기후시스템 전반에 나타나는 변화를 탐지할 수 있도록 자료를 통합 관리하는 체계를 구축함으로써, 기후변화 감시를 효율적으로 수행할 수 있다.

부문별, 지역별 기후변화 영향 및 취약성 평가를 위하여 정확하고 신뢰성 있는 기후변화 예측정보를 산출하여야 한다. 그러므로 고해상도 지구시스템모델¹⁰⁾ 및 한반도 지형에 적합한 지역기후모델을 개발하고, 국가표준 기후변화 시나리오 생산을 통하여 국가차원의 기후변화 대응에 기여해야 한다. 뿐만 아니라 지역기후변화의 추세를 심층적

으로 이해함으로써 미래 기상재해의 발생 빈도를 예측하여, 태풍, 홍수, 가뭄, 폭염, 황사 등으로 인한 국민의 안전과 삶의 질 향상에 노력해야 한다. 기후 극값의 변화 등 기후 변화 변동성 이해와 사회경제적 영향의 분석, 신재생에너지 자원지도, 농업기후지대 이동 및 환경변화 등 사회경제편익분야의 합리적 정책결정을 위한 과학적 분석정보도 제공할 수 있어야 한다. 앞으로 IPCC는 온실가스 농도 시나리오를 다시 결정할 것이다. 새로운 농도 시나리오에 의거한 기후변화를 예측하고 이에 의한 영향 및 취약성을 평가하는 것이 필요하다.

기상청은 2005년 이후 한반도 기후변화 시나리오를 시험적으로 생산하여, 수자원, 보건, 농업, 산림 부문의 연구에 제공하고 있다. 아직까지 국내 영향 및 취약성 평가 연구는 초보적인 수준이라고 할 수 있다. 불확실성이 높고, 첨단기술이 필요한 기후예측, 기후변화 문제에 있어 당면한 기술적·제도적 문제점 보강 및 해결을 위해, 중·장기적으로 계획을 수립하여 대비하여야 한다.

4. 향후 기후변화 대응을 위한 제언

국가차원의 기후변화 대응을 위하여 기후변화 영향평가, 적응전략 수립을 위한 국가표준 기후변화 시나리오가 산출되어야 한다. 국가표준 기후변화 시나리오는 국제적인 기준에 근거하여 수행되어야 할 것이다. 2009년 상반기까지 IPCC는 온실가스 농도 시나리오를 다시 선택할 것이다. 그러므로 새로운 농도 시나리오에 의거한 기후변화를 예측하여야 한다. 국가표준 기후변화 시나리오는 적어도 2~3 종의 온실가스 농도 수준에 대하여 산출

되어야 한다. 이를 위하여 고유의 지구시스템모델 및 지역기후모델이 개발되어야 하며, 기후변화에 대한 과학적 이해 증진을 위한 원인별 메커니즘 연구 및 고해상도 기후변화 시나리오가 단계별로 산출되어야 한다. 국제 기준을 공유할 뿐만 아니라, 자료의 신뢰성을 높이기 위하여 IPCC, WMO 등 국제기구에 보다 적극적으로 참여하는 것도 필요하다.

국가표준 기후변화 시나리오를 산출하는 과정에서 자료 이용자와의 대화가 매우 중요하다. 부문에 따라 영향평가를 위해 필요로 하는 변수의 종류가 달라진다. 그러므로 다부처/다학제 네트워크를 구축하여 부문별 영향평가에 필수적인 변수의 종류를 선정하는 것은 시나리오의 효율적인 활용을 위한 선제조건이다. 또한 기후변화의 특성을 정확하게 이해하기 위하여 전문가들의 정보 교류가 필요하다. 미래 수요자의 니즈를 충족시키기 위한 12개월 및 10년 상세 기후예측자료의 생산도 순차적으로 추진되어야 할 것이다. 생산된 시나리오 자료는 해상도의 규모에 따라 수~수십 테라바이트의 용량이므로 향후 기후변화 과학정보 생산 및 서비스를 전담하는 기구(예: 기후변화감시예측센터)가 필요하다.

고품질의 기후변화 감시자료 확보를 위한 노력도 계속되어야 한다. 현재 기상청은 안면도 이외에 제주도 고산에 제2 지구대기감시관측소를 운영할 예정이다. 그러나 관측요소, 관측망의 확충, 입체적 관측기술의 개선 등과 함께, 아시아 지역 온실가스 농도를 지속적으로 감시할 수 있는 탄소추적모델(Carbon Tracker)을 개발하여, 온실가스 배출량과 흡수량을 정량적으로 산정할 수 있도록 노

력해야 한다. 또한 기후시스템 전반에 걸쳐 체계적인 감시 및 자료 관리도 세계기상기구(WMO), GEOSS와 같은 국제협력사업을 통해 지속적으로 추진되어야 한다.

신뢰도 높고 가치 있는 기후변화 감시·예측정보 생산으로 사회경제적으로 복합적인 기여가 가능하다. 첫째, 기후변화로 인한 자연재해의 빈발로부터 국가의 위기관리 능력을 제고하고, 재해로 인한 피해와 복구비용을 감소할 수 있다. 둘째, 경제협약이라고 할 수 있는 기후변화협약 협상시 판단의 기반자료로 활용함으로써 국익을 대변하는데 기여할 수 있다. 마지막으로 기상·기후에 영향을 받는 산업의 경쟁력 강화에 기여할 수 있다. 또한 국제기구(IPCC, WMO) 활동 참여를 통한 자료 신뢰도 향상 및 국제적 기여도 증진하고, 아시아-태평양 지역 기후변화 감시, 예측 부문에서 리더십을 발휘할 수 있을 것이다.

[주]

- 1) IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change: 유엔 산하기관으로 1988년 설립
- 2) 우리나라는 최근 10년간(1996~2005년) 총 피해액이 18조원, 태풍 루사(2002년)의 경우 GDP 대비 약 0.9% 피해액 발생
- 3) ppm(백만분의 1 농도), ppb(10억분의 1 농도)
- 4) 세계기상기구(WMO) 자료
- 5) 4차 평가보고서에서 IPCC는 11개국, 23개

기후변화모델의 예측결과 사용(국립기상연구소 자료 포함)

6) 6개 지점 평균: 서울, 부산, 인천, 강릉, 대구, 목포

7) 북한은 1.9℃ 상승하였다고 보고됨

8) 해양수산부, 국립수산물과학원 자료

9) 트레와다의 기준에 근거하여 구분함. 트레와

다의 아열대 기후구는 월평균기온 10℃ 이상인 달이 8개월 이상이고, 최한월이 18℃ 이하인 지역으로 정의됨

10) Earth System Model은 대기, 해양, 해빙, 지표, 생태계를 포함하고 있으며, 온실가스, 에어러솔, 태양, 화산활동의 변화에 의한 기후변화를 시뮬레이션할 수 있다.

포토 TIP



반기문 UN 사무총장의 기후변화 비전
(2007.11.17, 제27차 IPCC 총회, 스페인 발렌시아) (사진: ENB)

- “기후변화는 개발에 심각한 위협이다.”
- “오늘, 회의(懷疑)는 끝났다. IPCC는 기후시스템의 온난화가 명백하며, 인간활동에 의한 것이라고 확인했다.”
- “현재 진행 중인 지구온난화 추세를 완화시키는 것이 우리 시대의 도전이다.”
- “지구온난화에 대한 국제활동을 추진하는 것이 사무총장의 주요 우선순위이다.”

정책초점

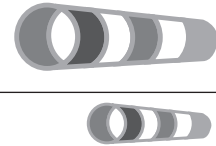
기후변화감시 발전 방향 / 김진석

미국의 기상위성 개발현황과 향후전망 / 안명환

기상산업의 위상과 성장가능성 / 김준모

최적 일사 관측망 구축방안 / 이규태

국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의 / 김백조, 김경립



기후변화감시 발전 방향

김진석

한국표준과학연구원 삶의질표준본부장
jkim@kriss.re.kr

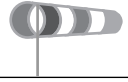
1. 서론

지난 10월 12일 노르웨이 노벨상위원회는 2007년 노벨 평화상을 인위적인 기후변화에 관한 과학적 이해를 증진시키고 이에 대응하기 위해 노력한 공로로 IPCC와 미국의 전 부통령 앨 고어에게 수여하기로 결정했다고 발표했다. 이와 같이 기후변화는 노벨 평화상의 수상으로 인하여 세계인의 전지구적인 문제점으로서 관심의 정점에 다다라 있으며 새로운 분기점을 맞고 있음을 보여주었다.

사실 기후변화와 지구온난화라는 주제가 오늘날 이렇게 이슈화가 되기에는 과학계, 방송/언론, 민간 환경단체 등의 노력이 있었다. 한 예로 2004년 상영된 투모로우(Tomorrow)라는 영화는 온난화로 인하여 북극해의 얼음이 녹아내려 지구해양

의 대류현상이 달라지고 수면상승 등의 기후변화를 통한 지구촌 재앙을 실감 있게 보여줌으로써 일반인들에게 지구온난화 문제는 전 인류가 공동으로 해결해 나가야 한다는 공감대를 이끌어 내는데 많은 기여를 하였다.

지구 온난화는 산업혁명 이후 이산화탄소와 같은 온실가스의 배출량이 증가하여 지구 기후의 급격한 변화를 가져오고, 결국에는 인류의 건강, 식량안보, 사회기반 및 환경 등에 최악의 위험요소로 평가되고 있기 때문에 일찍부터 이에 대한 공동 논의가 시작되었다. 기후온난화에 대한 논의의 시작은 1970년대로 거슬러 올라가, 1972년 로마클럽의 『The Limits to Growth』발간과 스톡홀름 유엔인간환경회의(UN Conference on Human Environment) 개최를 시작으로, 1979년 제1차 세

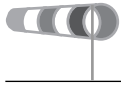


계 기후회의, 1985년 온실가스의 기후변화에 대한 영향평가회의, 1987년 세계환경개발위원회의 『Our Common Future』 발간 등으로 이어졌다. 이와 같이 지구온난화에 대한 문제의 중요성이 부상하기 시작하자, 기후변화의 메커니즘, 기후변화의 영향, 기후변화에 대한 대응전략 등을 체계적이고 국제적으로 접근하기 위하여 세계기상기구(WMO)와 유엔환경프로그램(UNEP)은 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)를 1988년에 설립하였고, 1990년 제1차 평가보고서를 제출하였다. 이로써 정부간 협상위원회(INC: Intergovernmental Negotiation Committee)에 의해 마련된 기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)이 1992년 6월 브라질 리우에서 열린 유엔환경개발회의(UNCED)에서 154개국의 서명을 받아, 1994년 3월 21일 정식으로 발효되었다. 1997년에는 선진국들을 대상으로 제1차 공약기간(2008년~2012년) 동안의 강제적인 온실가스 감축 의무를 설정한 교토의정서가 채택된 후, 우여곡절 끝에 교토의정서가 2005년 2월 16일 정식 발효되었다. 최근에 발리에서 개최된 유엔기후변화협약국 총회는 포스트 2012 로드맵을 발표하여 기후변화에 대한 심각성을 한층 높여주었다. 현재까지 논의된 내용에 따르면 미국을 포함한 선진국들은 2009년 11~12월 덴마크 코펜하겐에서 열리는 15차 기후변화협약 당사국 총회 때까지 협상을 통해 구체적인 온실가스 감축 목표를 내놓아야 한다. 또한 개발도상국은 온실가스를 측정가능하고 검증 가능한 방법으로 자발적으로 감축하는 방향으로

협상에 나가기로 했다. 발리 로드맵의 의의는 교토의정서의 효력이 2012년에 끝남에 따라 그 이후 온실가스 감축에 대한 협상 시한을 협의하였다는 데 있다. 이로써 각국의 온실가스 감축 목표에 대한 협상은 2009년까지 마치며, 선진국 중 39개국만 참여했던 교토회의 때와 달리, 모든 나라가 감축 협상에 참여해야 한다는 점이 협의되었다.

발리 총회에 참가한 190여개국 중 2004년 유엔개발계획(UNDP) 보고서 기준으로 한국의 이산화탄소 배출량 순위는 9위다. 1990년엔 2억4100만 톤에 불과하던 이 수치가 2004년 4억6500만 톤으로 수직상승했다. 증가율만 따지면 93%로 10위권 안에서는 중국(103%), 인도(97%) 다음으로 높다. 세계에서 이산화탄소를 가장 많이 뿜어내는 미국도 증가율은 23%에 그쳤고, 일본은 17%, 독일은 아예 18% 감소했다.

사실상 우리나라는 그동안 개도국으로 분류, 감축의무를 지지 않았지만 발리 총회를 기점으로 온실가스 감축에 대한 확실한 준비가 필요한 시점이 되었다. 더구나 한국은 세계 11위 경제 규모인 나라여서, 감축 목표를 높게 잡으라는 압력을 받을 경우 산업계가 큰 영향을 받을 전망이다. 우리나라의 에너지 수급 구조상 화력발전이 전체 60%를 넘기 때문에, 기업들에게 에너지를 조금 쓰라고 강요하지 않는다면 온실가스를 줄이기는 쉽지 않은 형편이다. 에너지경제연구원 분석에 따르면 온실가스를 5년 동안 평균 5% 줄이려면 매년 국민총생산(GNP)이 0.5% 감소한다. 결국 대체에너지 개발, 에너지 고효율 생산 방식 등 다양한 온실가스 감축 대책이 수립되지 않는 한 국가경제가 휘청거릴 수 있는 상황이다.



결과적으로 작년 발표된 IPCC 제4차 평가보고서의 ‘지구온난화는 논란의 여지가 없을 정도로 명백하며 온실가스의 증가가 20세기 중반 이후의 온난화를 일으켰을 가능성이 매우 높다’는 것으로서 수치상으로는 최근 5년 간 매년 72억톤씩 배출된 이산화탄소는 대기 중의 농도가 산업혁명 이전의 280ppm(약 0.03%)에서 2005년에는 379ppm(약 0.04%)으로 약 100ppm이 늘었으며, 이 중 20%는 최근에 증가한 것이라는 점을 인용치 않더라도 온실가스에 대한 구체적이고 체계적인 준비가 필요하다는 것은 결국 명백해 졌다.

국제 기후협약을 통해 규제되고 있는 온실가스는 CO₂(이산화탄소), CH₄(메탄), N₂O(아산화질소), HFCs(수소불화탄소류), PFCs(과불화탄소류), SF₆(육불화황) 등이 있다. 그 중에서 이산화탄소, 메탄 및 아산화질소(N₂O)는 자연적으로 발생되기도 하고 인위적으로 발생하기도 하는 온실가스이다. 인위적 발생원을 살펴보면, CO₂는 주로 에너지사용 및 산업공정에서, 메탄은 주로 폐기물과 농업 및 축산에서, N₂O는 주로 산업공정과 비료사용으로 들 수 있다. 특히 냉매, 절연체 및 반도체 공정의 세척용으로 사용되는 PFCs, HFCs, SF₆ 등은 순전히 인간 활동으로부터 발생하는 인위적인 가스로서 온난화 지수¹⁾가 높기 때문에 특별한 주의를 요구한다. 불화계 화합물은 온난화지수가 매우 높고, 안정도가 매우 우수하여 지구대기 중에 축적되며, 오랜 기간 온실효과를 유발시키기 때문에 비록 현재 존재하는 양은 미량일지라도 중요한 온실가스이다. 특히 반도체 및 IT 강국인 우리나라는 불화화합물의 사용량과 배출량이 크기 때문에, 세계의 주목을 끌기에 충분하므로 불화화합물에 대

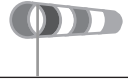
한 적극적인 대응이 필요하다.

2. 기후변화 정책 방향에 대한 제언

대기 중의 온실가스가 지표로부터 방출되는 장파인 적외선을 흡수하여 지구가 더워지는 현상을 지구온난화라 한다. 지구온난화로 인하여 여러 가지 영향이 발생하는데, 이를 유발하는 온실가스 감축정책이 시행되지 않을 경우, 지구의 평균 기온은 2100년까지 0.8℃~3.5℃ 상승하며, 해수면은 2100년까지 50cm 상승할 것으로 예상되고 있다. 이러한 기후변화는 기상이변, 강수량 변화, 해수면 상승 등을 초래하여 식량공급, 수자원공급, 인간건강 등 생태계와 사회경제적 분야에 돌이킬 수 없는 상황을 초래할 것으로 분석되고 있다.

온실가스 배출 증가로 인한 지구온난화 문제는 지구환경의 변화를 초래하므로 범지구적 차원의 환경문제이다. 그러나 획기적인 온실가스 저감기술과 대체에너지의 개발 등이 수반되지 않을 경우, 결국 온실가스 감축이 강제적인 에너지소비 감축으로 연결되어 국가의 생산 및 소비활동을 위축시키고 이에 따른 막대한 경제적 비용을 발생시킨다. 즉, 온실가스 배출량 감축은 필연적으로 경제체제의 변화를 요구하므로 결국 범국가적인 정책이 필요한 문제로 볼 수 있다.

그간의 기후변화대응은 에너지와 관련한 온실가스 감축 위주의 정책과 연구가 진행되어 왔으며, 기후변화 영향평가와 적응 분야에 대한 투자와 정책개발은 미흡한 실정²⁾이었다. 그러나 제 4차 중합대책에서 이를 지적하고 향후 기후변화의 영향평가와 적응, 예측 등의 분야의 연구개발을 강화하



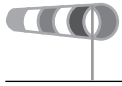
기로 한 점은 매우 고무적인 일이다. 기상청에서 발표한 기후변화감시 발전 5개년(2007-2011) 계획(기상청, 2007)을 살펴보면 기후변화감시 인프라보강, 기후변화감시 기술 선진화, 동북아 지역의 선도적 허브역할 수행이라는 큰 연구목표 아래 총 사업비 약 145억원의 투자를 계획하고 있다고 한다. 참고로 미국은 기후변화로부터 비롯된 과학적 영향, 적응 기반 등을 구축하기위하여 연 20억불 이상의 예산을 투입하고 있다. 또한 유럽 선진국은 감축대책과 적응 대책을 동시에 정책에 반영하여 대응하고 있다. 이러한 추세를 볼 때, 기후변화에 대응하는 우리의 노력이 선진국을 쫓아가는 수준에 머물지나 않을까하는 걱정이 앞선다.

현실을 들여다보면 우리나라는 안면도에서 지역급의 GAW를 운영하고 있으나 아직 선진국에 비하여 걸음마 수준에 지나지 않는다. 그러나 미국은 전 세계에 지구급 관측소 4소, 40여개 플라스크 샘플링 망, 세계 온실가스 자료센터, 품질보장과학활동센터, 교정센터(이산화탄소, 오존분광광도계)를 운영하여 30여개의 기상요소를 관측하고 있다. 그리고 일본은 전 세계에 지구급 관측소 1소, 지역급 관측소 9소, 세계 온실가스 자료센터, 품질보장과 학활동센터, 교정센터(메탄)를 운영하고 있다. 중국 또한 지구급 관측소 1소, 지역급 관측소 11소를 운영하며 역시 30여 요소를 측정하고 있다. 독일은 3개의 지구급 관측소, 21개 지역급 관측소를 운영하고 있으며 오존과 에어러솔의 세계자료센터, 휘발성 유기화합물 교정센터, 오존전량의 유럽교정센터로 활약하고 있다.

한국표준과학연구원과 기상청은 2002년부터 온실가스 측정관련 사업을 진행하여 왔다. '이산화

탄소 국가 표준가스'의 개발을 시작으로 2007년 SF₆ 연속관측 자료를 생산해내기까지 HCFC 계의 온실가스를 제외한 모든 대상 온실가스의 측정표준과 표준가스 제조를 연구 개발하여 기상청에 공급하고, 온실가스 국제표준을 선도하는 역할을 수행해오고 있다. 기상청 기후정책과와 안면도의 지구대기감시연구소의 전폭적인 지원과 협력을 통해 국내외적으로 자랑스러운 성과를 도출하였으며, 특히 각국의 표준기관들을 대상으로 실시되는 온실가스 국제비교에 참여하여 최고수준의 성과를 얻었고, 안면도 공기를 이용한 '대기 중 아르곤의 농도 재결정'은 한국표준과학연구원 30년 역사의 대표 실적으로 등록되기도 하였다. 지금까지의 연구개발 사업을 돌이켜보면, 물리적으로 떨어져 있는 3개 기관의 상호 신뢰를 바탕으로 사업의 기획과 투자와 운영에 있어서 상호 조화를 잘 이루었기 때문에 가능한 성과가 얻어졌다고 생각이 든다. 다년간의 기상청 온실가스 사업을 성공적으로 이끌면서 기후변화와 온실가스에 대한 애정이 남다르지 않음을 부인할 수 없다. 이 때문에 본 주제에 대한 기고를 작성하는 것에 보람을 느낀다. 다만, 기상청 밖에서 온실가스를 연구하는 연구자이기 때문에 비교적 자유로운 입장에서 기후변화와 온실가스라는 주제를 볼 수 있었고 그에 따른 정책을 구상할 수 있었다는 점을 이해하여 주기를 먼저 당부 드린다.

지금은 비록 후발주자이지만 우리나라가 기후변화에 효과적으로 대응하고 국제협약에 의한 경제적인 위축없는 지속적인 발전을 영위하고 유리한 입장에서 국제협상을 이끌 수 있는 차별화된 방안이 반드시 있을 것이라는 희망을 가져본다. 이러



한 경우 대개 강점을 더 부각하고 약점을 서서히 보완시켜 나가는 방법을 주로 쓰게 되는데 필자도 기후변화 관련 우리나라의 강점을 먼저 찾아봄으로써 전략 구상을 시작하였다. 이 글을 쓰기를 시작하면서 기후변화 전반적인 발전계획에 대한 언급보다는 기후변화 영향평가, 적응과 관련된 분야에 한정하여 논하고자 한다.

먼저 2007년 7월 기상청에서 발표한 기후변화 감시 발전계획을 살펴보면 강점과 약점이 잘 나타나 있다. 강점은 우리나라의 기후학적 지정학적 중요성, 온실가스분야의 품질관리와 표준가스 제조 능력으로 나타나 있으며, 약점으로는 GAW 전문인력부족, 국제적위상미흡, 연구개발비 부족을 들고 있다. 약점을 순식간에 불식시키고 강점을 강조할 수 있는 방안을 생각하여 보니 WMO에서 인정하는 동북아 온실가스 연구조직을 유치 운영하는 것이 좋은 방안으로 떠오른다. 우선 기후학, 지정학적으로 중요하니 동북아 중 우리나라에 설립하는데 당위성이 있을 것이고 더군다나 세계최고수준의 온실가스 품질관리 및 제조수준을 이미 인정받고 있으니 온실가스 보급의 기준센터의 설립으로 모자람이 없을 테고, 일단 WMO의 하부조직이 우리나라에 설립이 되면 국제적인 위상과 국제적 수준에 걸맞는 연구개발을 유지하고 국제적인 감각을 지닌 전문인력의 배출은 시간문제가 되리라 생각한다. 이것이야말로 강점을 이용하여 약점을 해결하는 좋은 방안 중의 하나라고 생각된다.

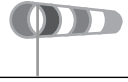
하지만 이러한 필요성과 당위성이 있다하더라도 준비하고 노력하지 않으면 거저 얻어지는 것은 없다는 것은 뻔한 일이다. 이를 위하여 현재 우리나라가 처한 입장에서 이 문제를 전략적으로 접근

할 수 있도록 하나하나 짚어보았다.

첫째, 기후변화와 관련한 초일류 과학적 지식을 생산해야 한다. 현재도 많은 수의 연구논문을 내고 있지만, 좀더 조직적이고 장기적으로 연구투자를 하여 세계가 인정하는 우수 학술지에 좋은 논문을 발표하여 국제적 영향력을 강화시킬 필요가 있다.

둘째, 한반도 온실가스 측정 및 감시능력의 제고를 통하여 정확한 기후변화 영향평가 및 적응평가를 내릴 수 있는 토대를 마련하는 것이 필요하다. 한반도 온실가스 변화 현황을 정확하게 파악하기 위하여 온실가스의 정확한 측정과 감시를 할 수 있는 지구급, 지역급 감시센터의 운영이 필요하다. 현재 운영되고 있는 안면도외에 제주도와 동해의 울릉도 등에 온실가스 측정 및 감시 기능을 추가하여 지역급의 GAW를 운영하도록 하면 한반도의 대기를 지형학적으로도 완벽하게 감사할 수 있으리라 본다. 그와 동시에 한반도 대표지역의 공기를 포집하고 보존하여 가까운 미래에 한반도 온실가스의 과거와 현재를 연구할 수 있도록 하는 준비가 필요하다. 한반도의 대기 중 온실가스를 체계적으로 측정할 수 있는 플라스크 네트워크를 한반도 지역급 수준의 GAW 사이트외에 지구급과 2개 정도의 지역급 GAW 사이트에서도 운영하도록 한다. 실제 장비의 설치와 검교정 등의 기능은 민간업체에 수탁을 주는 형식으로 운영하면 효율과 비용면에서 긍정적인 효과가 있을 것으로 판단되며 기상인력의 저변확대에도 도움이 될 것이라 믿는다.

셋째, 우리나라 IT와 반도체의 지속적인 발전을 유지하지 위하여 공정가스로 사용되는 불화화합물계의 온실가스 저감을 위하여 관련 기술 확대를 위



한 정책과 저감 현황을 정확히 파악하여, 향후 세계인의 이목이 집중될 불화화합물 온실가스가 체계적이고 효과적으로 관리되고 있음을 알려주어야 한다. 이로서, 반도체 강국의 온실가스 대응이 과학적으로 이루어지고 있음을 투명하게 나타낼 때 기후변화대응에 대한 국가적 신뢰가 올라갈 것이다. 자료를 살펴보면 1979년 이후 2006년까지 불화화합물로 인한 복사강제력이 3배 증가한 반면, 이산화탄소는 1.64배 증가하였다고 한다(NOAA/GMD 자료). 이 결과는 비록 현재로서는 대기중의 존재량이 미미하지만 오랜 수명을 가지는 불화화합물계 온실가스에 대한 체계적인 대응이 필요함을 의미한다.

넷째, 현재 우리나라의 강점인 온실가스의 측정 능력을 지속적으로 유지 향상시켜, 동북아의 온실가스 관리를 돕고 나아가 세계적으로 온실가스의 감축과 감시에 기여해야한다. 또한, 한중일이 동북아 온실가스 감축에 대한 과학적인 협력을 강화하여, 기후변화 대응에 주도적으로 참여하고 있음을 전 세계에 알릴 필요가 있다.

다섯째, 온난화의 주범인 탄소의 순환 특성과 과거를 바로 알아 효과적으로 대응하기위하여 탄소 플럭스 수지 모델링, 관측기술, 감시시스템을 한데 묶는 탄소프로그램을 구동해야한다. 순차적이고 입체적인 탄소의 감시를 통하여 유기적이고 합리적인 자료를 생산하여 탄소순환 연구에 과학적으로 일조를 할 수 있도록 해야 한다.

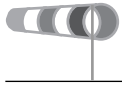
위와 같이 기후변화에 대응한 다섯 가지 분야에 대한 연구를 성공적으로 수행할 수 있도록 다각도의 전략적인 접근을 하면, 기후변화와 관련된 기반

연구가 활성화되고, 포스트 교토 협약에 능동적 대응과 동북아 온실가스 연구의 허브 역할을 수행할 수 있을 것이라 확신한다.

3. 맺는말

교토의정서에 비준한 55개국 중 38개국은 이미 1차 감축의무 이행을 위한 준비를 해 왔으나 우리는 거의 손을 놓아 왔다. 그런 만큼 포스트 교토의 정서의 부담은 클 수밖에 없다. 늦었지만 지금부터라도 온실가스 감축을 위해 국민이 의식을 공유해야 한다. 단지 국제협약에 따른다는 소극적인 자세 또는 국내 기업을 보호한다는 소아적인 입장에서 벗어나 지구생태계를 보호한다는 대승적인 관점에서 접근해야 한다. 정부의 온실가스 감축에 대한 실질적이고 적극적인 정책이 우선임은 두말할 필요도 없다 하겠다.

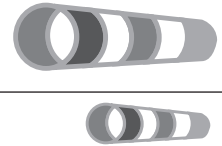
당장에 에너지 구조를 개선하고 온실가스 배출을 억제하도록 강제하는 일은 코앞에 닥친 국제적인 협약을 대응하는 데에 있어서 가시적인 성과를 낼 수 있을 것이다. 하지만 기왕이면 능동적이고 적극적인 자세로 기후협약을 준비하면 기후변화라는 국제적인 문제에 대한 위기와 불안을 기회와 성공으로 일굴 수 있을 것이라는 확신이 든다. 이를 위하여 중장기적 관점에서 기후변화 대응 정책을 준비하는 데 있어서 국가 산업과 경제방향, 국제관계를 동시에 고려하여 정부 정책의 방향 등이 결정되어야 할 것이다. 어려운 문제일수록 답은 쉬운데 있다는 진리가 있다. 바로 기후변화 문제를 푸는데 있어서 기본적인 단순한 해결의 시작은, 바로 기후변화 관련 기초과학을 육성하는 일이다. 산업과



경제를 살리고 위기를 기회로 전환시킬 수 있는 전력은 항상 탄탄한 기초로부터 비롯한다. 이를 위하여 정부의 정책과 더불어 국립기상연구소와 한국표준과학연구원의 협력은 기후변화 대응에 대한 성공 고리를 제공할 수 있을 것이라 생각한다. 마치 지난 몇 년 동안 성공해 왔던 것처럼.....

[주]

- 1) 온난화 지수(Global Warming Potential)란 가스별로 지구온난화에 기여하는 정도를 나타내는 지수로서, CO₂를 1로 보았을 때, CH₄가 21, N₂O가 310, HFCs가 1,300, PFCs가 7,000, SF₆가 23,900이다.
- 2) 기후변화 제3차 정부 종합대책에서 온실가스 감축사업 예산은 전체 예산의 90%이상이나, 적응 부문은 0.1%에 불과하였음.



미국의 기상위성 개발 현황과 향후 전망

안 명 환

미국 조지워싱턴대 우주정책연구소
mahn@gwu.edu

2005년에 우주개발진흥법과 이에 따른 우주개발진흥 기본계획이 수립되었다. 올해는 2009년 발사될 우리나라의 첫 번째 정지궤도 기상관측위성인 통신해양기상위성을 이을 정지궤도복합위성의 개발에 관한 작업을 본격적으로 시작해야 할 필요가 있다. 따라서 전 세계 기상관측위성의 선도적 역할을 담당하는 미국의 기상위성 현황 및 후속 위성의 개발을 위한 정책방향을 검토하는 것은 중요한 의미가 있을 것이다. 특히, 현재 진행되고 있는 차세대 위성인 GOES-R과 NPOESS 위성들이 기술 및 예산상의 문제로 사업을 시작하면서 수립한 임무계획들을 만족시키지 못하는 상황을 해결하기 위한 노력이 진행되고 있고, 지구과학 분야의 향후 20년 동안 요구되는 위성관측에 대한 조사 결과가 2007년에 처음으로 이루어져, 우리의 방향 설정에도 도움을 얻을 수 있게 되었다. 이들 현황과 조사결과에서 시사하는 중요한 방향은, 1) 새로운 기술의 현업위성 적용과정에서 실패를 최소화하기 위한 연구개발 위성을 통한 충분한 실험, 2) 위성 개발과 함께 현업활용을 위한 관측자료의 처리 및 활용(자료동화 기술 포함)의 개발 시작, 3) 연구개발 결과의 현업활용으로의 이전을 촉진할 수 있는 정책개발, 4) 적극적인 국제협력의 추진 등을 들 수 있겠다. 부족하지만 본 검토가 우리의 향후 방향을 설정하는데 도움이 되길 바란다.



1. 서론

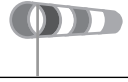
지난 십여 년간 이루어진 수치예보기술 발전 및 이에 따른 예보 정확도 향상 및 엘니뇨/라니냐와 같은 대규모 현상의 예측정확도 향상은 이들 현상을 예측하기 위한 수치모델의 성능 향상에 힘입었으며, 모델의 성능 향상은 관측자료의 자료동화 기술 향상과 궤를 같이 한다¹⁾. 즉, 지상, 항공 및 우주 기반의 다양한 관측자료를 성공적으로 모델에 활용하는 것이 모델 성능 향상을 이끈 핵심이 되었다. 특히, 이들 다양한 관측자료 중에서 우주기반의 자료들이 가지는 특성은 시공간적인 고해상도 자료를 광범위한 지역에 대하여 연속적으로 제공하는 것이다. 또한, 기술의 발달에 따라 위성에서 관측할 수 있는 자료의 양이 급증하고 있으며, 활용할 수 있는 위성의 수도 증가하고 있다.

반면, 위성개발은 초기에 많은 기초 투자가 필요할 뿐만 아니라, 새로운 위성의 개발 및 운영을 위해서는 상대적으로 많은 비용이 투입되어야 한다. 또한 기술발달에 따른 위성의 수명도 급격하게 증가하는 추세에 있기 때문에 장기적인 사업주기를 가지는 특징이 있다. 따라서 위성은 한번 개발되면 장기적으로 활용되며, 특히 현업위성의 경우에는 안정성과 연속성이 핵심 요소가 되므로 같은 종류의 위성을 오랫동안 사용할 가능성이 가장 높다. 이에 따라, 위성을 개발하기 위해서는 개발방향 및 정책을 초기에 수립할 필요가 있고, 이를 위해서는 많은 사항들이 고려되어야 한다. 일례로 현재 개발되고 있는 National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite Suite (NPOESS) 사업의 경우에는 1994년에 정책방향이

결정된 후, 본격적인 사업은 1996년부터 시작되었고, 최초의 위성발사는 2012년으로 예상하고 있다²⁾.

전 세계 기상·기후 관련 위성 중에서 미국이 차지하는 비중은 거의 절대적이다. 미국은 엄청난 양의 위성 자료를 매일매일 전 세계 공동체에 제공하고 있으며, 기상관련 위성자료의 자유로운 공개는 미국의 오랜 전통으로 남아 있다³⁾. 이를 통해 위성이 기상분야 발전에 기여한 역할은 현격하며, 미래의 기상분야 발전을 위해서는 현재에는 관측이 이루어지지 않는 부분의 관측자료를 위성에서 만들어주어야 함을 잘 이해하고 있다. 기상분야의 활용범위가 지속적으로 확장되는 상황에서 앞으로 필요로 하는 관측은 전통적인 기상분야뿐 아니라, 건강과 보전에 관련되는 대기화학적 예측 및 우주활동을 지원하기 위한 우주기상분야도 있기 때문이다. 이는 우리나라의 경우도 예외가 아닐 것이며, 특히 첫 번째 정지궤도 관측위성인 통신해양기상위성을 이을 정지궤도복합위성의 개발을 시작해야 할 우리의 입장에서, 미국의 기상위성 관련 방향을 현시점에서 검토하는 것은 의미가 있을 것으로 판단된다.

현재 운영, 개발, 계획 중인 기상·기후 관련 위성은 첨부된 『정보 스크랩』란에 소개된 바와 같이 다양한 임무와 기능을 가진다. 여기에서는 논의의 초점을 우리나라에서 가장 시급한 주제인 전통적인 기상분야에 맞추고자 한다. 이를 위해 현재 운영 중인 미국 내의 기상·기후 관련 위성들의 현황을 정리하고⁴⁾, 이들 현재 운용 중인 위성들을 대체하기 위해 개발되고 있는 위성의 현황 및 문제점을 분석하고, 이들 차세대 위성 이후의 위성개발을 위한 정책결정 방향에 대한 분석을 시도하였다. 특



히, 현재 운영 중인 기상위성들을 대체할 많은 수의 차세대 위성들이 발사될 시기가 2010년 초반기 이므로 지금의 위성 개발을 위한 주요 정책은 이들 차세대 이후인 2015년에서 2025년 시기에 발사될 위성들에 대하여 초점을 맞추었다.

2. 현황⁵⁾

1) 운영 중인 위성

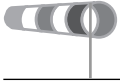
현재 미국은 전 세계에서 가장 많은 수의 현업 및 연구개발용 지구관측위성을 운영하고 있다. 기상·기후 관련 위성을 운영하는 기관은 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA; 해양대기청), National Aeronautics and Space Administration(NASA; 항공우주국), 그리고 국방부의 공군이 있다. 이들 기관이 운영하는 위성의 특성은 기관별로 분명하게 구분하고 있다. 현업용 기상위성 운용의 핵심은 NOAA가 담당하고 있으며, NOAA는 극궤도 위성인 NOAA 시리즈 위성과 정지궤도 위성인 GOES 시리즈를 운용하고 있다. 극궤도 위성의 오전 위성은 EUMETSAT과의 협력 사업으로 운영 중인 Metop이며, 오후 위성은 NOAA 18호이다. 정지궤도는 GOES 11호와 12호가 각각 미국 대륙 서쪽과 동쪽을 관측하고 있으며, 가장 최근에 발사된 GOES 13호는 대기모드로 운영되고 있다. 한편, 공군에서 오랫동안 운영해온 군사용 현업위성인 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 위성은 1994년 NPOESS 사업을 추진하기 위해 NOAA, NASA, DoD 공동으로 Integrated Program Office (IPO⁶⁾)를 구성하면서 그 운영이 이관된 상태이로

현재 DMSP의 주 운용기관은 NOAA가 되었다.

NASA는 연구개발용 위성의 개발 및 운용을 책임지는 기관으로 Earth Observing System (EOS) 시리즈인 Terra, Aqua, 그리고 Aura 위성 등과 EOS 프로그램의 후속 프로그램인 Earth System Science Pathfinder (ESSP) 시리즈인 Grace, Calipso, CloudSat 위성들과 TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission), QuickSCAT, Orbview, Landsat 위성과 같은 극궤도 위성을 운영하고 있다. 연구개발용 위성이라는 특성상 가능한 같은 종류의 센서가 다른 위성에 탑재하지 않으며, 새로운 관측자료 또는 정보를 제공할 수 있는 최첨단의 고성능 센서를 탑재하게 된다. 그렇지만, MODIS 센서와 같은 경우에는 Terra와 Aqua에 모두 탑재되기도 하였다. 연구개발용 위성은 현업위성과는 달리, 각 프로그램의 임무수명은 대부분의 경우 3년 이내로 짧지만, 많은 경우 임무수명보다 오랫동안 운영되기도 한다 (예를 들어 TRMM의 경우에는 임무수명은 3년이었으나, 10년 이상 운영되고 있음). 또한, 현업에서의 활용성을 높이기 위해 준 실시간으로 (QuickSCAT 및 TRMM 자료는 관측이후 3시간 이내에 사용자에게 공급) 자료를 서비스하기도 한다.

2) 개발 중인 위성

2010년대 초반 발사를 위해 현재 개발 중인 기상·기후 관련 위성은 NOAA의 NPOESS 시리즈와 GOES-R 시리즈, NASA의 ESSP 시리즈, NPOESS Preparatory Project (NPP), Global Precipitation Measurement (GPM) 등이 있다.



가. NPOESS

NPOESS 프로그램은 1960년대 초반부터 독립적으로 운영되어온 NOAA 시리즈와 DMSP 시리즈 위성을 하나로 합치는 프로그램이다. 이들 위성에서 관측된 자료는 서로 교환되었지만, 프로그램 자체는 오랫동안 독립적으로 운영되었다. 그러나 기상예보 지원이라는 같은 목적을 가지면서, 동일한 위성체 및 많은 부품을 공동으로 활용하는 위성을 독립적으로 운영하면서 발생하는 중복성이 자주 지적되었고, 이들 프로그램을 하나의 프로그램으로 통합하려는 시도가 여러 번 실패한 후, 예산 절감이라는 대의명분에 따라 1994년 클린턴 대통령의 지시로 민간과 군사용 요구사항을 하나의 프로그램으로 만족시킬 수 있는 NPOESS 프로그램으로 통합되게 되었다⁷⁾.

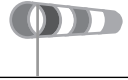
본격적인 NPOESS 사업은 1996년부터 시작되었으며, 이후 전 세계 기후문제가 부각되면서 전지구 기후감시 및 연구를 지원하기 위한 NASA의 EOS 프로그램과 계획 중이던 NPOESS 프로그램의 특성을 비교하면서, 지속적으로 감시되어야 할 기후요소들은 NASA의 연구개발용 위성프로그램이 아니라, NOAA의 현업위성프로그램의 독립적인 임무에 포함되도록 권고되었다⁸⁾. 다양한 권고에 따라, NASA와 NOAA는 NASA의 EOS 연구개발위성에서 NOAA의 NPOESS 현업위성으로 센서를 이전하는 방안을 수립하게 되었으며, 이 프로젝트가 현재 진행 중인 NPP 사업이다. 그렇지만, 최근의 사업지연 및 예산 증가⁹⁾에 따라 2006년에는 원래 계획하였던 위성의 숫자 및 탑재센서의 종류를 대폭 감소시킨 상황에서 사업이 진행되고 있

다. 우선 탑재가 취소된 센서들로는 Conical-scanning Microwave Imager Sensor (CMIS), Aerosol Polarimetry Sensor (APS), Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS)-Limb, Earth Radiation Budget Sensor (CERES는 C-1 위성에 탑재될 예정이지만 이후의 계획은 불명확한 상태임), Radar Altimeter (ALT) 등이 있다. 이들 센서가 취소되면서 직접적인 영향을 받는 부분은 기후관측분야이며, 정기적인 기상예보에는 최소한의 영향이 있도록 사업이 조정되었다.

이와 같은 결정은 IPO의 시스템 획득 책임이 공군에 있으며, 공군의 가장 중요한 임무는 전술 및 전략 작전을 지원하기 위한 기상정보의 수집에 있기 때문에 기후관련 요소들은 우선순위에서 뒤쳐졌기 때문인 것으로 보인다. 현재의 NPOESS 위성체는 이들 취소된 센서를 탑재할 수 있는 물리적 공간과 필요한 전력은 확보하고 있는 것으로 알려져 있으나, 이들 취소된 센서를 제작하기 위해 필요한 비용을 IPO에서 지불 할 수 없는 상황이기 때문에 이들 센서를 탑재하는 것은 현실적으로 어려운 것으로 보인다. 이에 따라, 현재까지 EOS, ESSP 등과 같은 프로그램을 통해 미국 내뿐만 아니라 국제적으로 기후분야의 선도적인 연구 및 관측을 담당하였던 NASA는 NPOESS에서 취소된 기후관련 프로그램들을 살릴 수 있는 방안을 마련하고 있다¹⁰⁾.

나. GOES-R

GOES-R 프로그램은 미국의 현업정지궤도기상위성의 4세대 사업으로 이전의 3세대와는 다른 차원의 임무규격을 설계하였다. 예를 들어 기존의

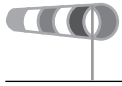


영상기(5채널, 30분 전구관측주기, 4 km 수평해상도)를 대체할 ABI (Advance Baseline Imager)는 16채널, 15분 전구관측, 1 km 수평해상도를 가지도록 하였으며, 기존의 50 km 수평해상도를 가지는 18채널 탐측기 대신에 최소 1000 채널 이상의 고해상도 탐측기인 HES (Hyperspectral Environmental Suite)를 고려하였다. 또한, 낙뢰 탐지영상기(Lightning Detection Imager), 특별 현상관측영상기(Special Event Imager) 등과 같은 특수한 목적을 위한 센서도 GOES-R에 탑재할 계획이었다. 그렇지만, GOES-R 프로그램도 임무 규격을 설계한 이후의 상황이 급격하게 변하면서 현재로서는 탑재센서가 ABI와 낙뢰탐지영상기로 제한되게 되었다.

GOES-R 프로그램에서 가장 큰 상황변화는 기상업무의 현격한 발전을 가져올 것으로 기대되었던 HES 센서를 취소한 것이며, 이를 취소한 이유 중의 하나로는 HES 센서의 원형으로 고려하고 있었던 NASA에서 개발 중이던 GIFTS (Geostationary Imaging Fourier Transfer Spectrometer) 프로그램이 중간에 중단된 것을 들 수 있다. GIFTS는 NASA의 새천년 프로그램으로 선정되었고, 해군에서 위성체와 발사체를 제공하고, NOAA에서 지상처리시스템을 개발하기로 합의하여 추진되던 공동프로그램이었으나¹¹⁾, 이라크 전쟁이 발발하면서 예산문제로 해군이 담당하였던 위성체와 발사체가 무산되면서 프로그램 전체가 중단된 상태에 있다. 이에 따라, 기술적, 프로그램적인 위험성, 그리고 가장 중요하게 예산상의 문제로 HES의 GOES-R 탑재는 취소되는 상태에 이르렀다.

또한, GOES-R 프로그램에 대한 예상 소요예산이 NOAA의 National Environmental Satellite and Data Information Service (NESDIS)에서 주장하는 70억~80억달러와 Government Accountability Office (GAO)에 의한 예상액인 93억달러와 상당한 차이를 보이고 있으며, NOAA는 2014년 발사를 추진하지만, GAO의 예상에 의하면 2017년으로 연기될 수도 있다. 또한, 소요예산이 급증함에 따라 GOES-R 위성이 당초 4개에서 2개로 축소되었다. HES를 탑재하지 못하는 상황인 경우에는 현재의 위성에 비해 급격한 성능 개선은 없는 것으로 판단되며, 이에 따라 현재의 GOES 위성시리즈를 지속적으로 활용하는 방향으로 사업을 진행하는 문제에 대해서도 논의가 되었다.

NESDIS의 연구결과에 따르면 현재의 GOES 위성은 GOES-R 위성 2기로 감당할 수 있는 업무를 3기가 담당해야 하기 때문에 경제적으로는 큰 이득이 없는 것으로 알려졌다. 또한 NOAA는 현재 GOES 위성시리즈의 마지막 1기를 확보할 수 있는 옵션이 있었으나 이전의 위성들을 더 오래 사용할 수 있는 강력한 발사체가 존재하여 마지막 위성은 구매하지 않기로 이미 결정하였다. 산업계에 따르면, 현재의 GOES 위성을 개발하고 발사한 보잉이 마지막 위성을 제작하여 발사해야 한다면 손해를 봐야 하는 입장으로 알려져 있다. 또한, 현재 GOES-R 사업을 위해 투자된 비용에다 현재의 GOES 위성시리즈를 다시 제작하기 위해 투자되어야 할 비용을 고려하면 이 시점에서 방향을 틀어서 이득이 없다는 것이다¹²⁾. 더구나, 현재의 위성에서 사용되는 많은 종류의 부품들이 더 이상은 존재하



지 않는 기술적인 문제도 있기 때문에, GOES-R 개발 프로그램은 현재의 규모가 축소된 상황에서 추진될 것으로 보인다.

다만, 최근의 NRC 연구보고서에서는¹³⁾ NOAA와 NASA가 협의를 통하여 GIFTS 프로그램을 완성하여 GOES-R 이전의 가능한 위성에 탑재하여 실증을 거친 이후, GOES-R 발사 시점에 HES를 복원하도록 권고하고 있다. 이 보고서는 지구과학 분야에서 최초로 이루어진 10년 주기의 우주기반 관측 프로그램에 대한 종합적인 검토/권고보고서라는 점에서 그 무게가 더해지고 있어, 앞으로 이러한 권고사항이 어떻게 정책에 반영되는지는 주의 깊게 지켜볼 필요가 있다.

다. NPP

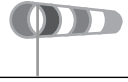
NPP는 앞서서도 언급되었듯이 IPO와 NASA의 공동협력 프로그램이다¹⁴⁾. NPP가 가지는 두 가지 중요한 목적은 우선 EOS 프로그램이 종료되고 NPOESS 프로그램이 시작되기 전까지의 공백기간 중에 고품질의 지구관측위성 자료를 지속적으로 생산하는 것이며, 두 번째로는 NPOESS에 탑재될 많은 센서들의 우주실험 및 자료처리 알고리즘의 검증 및 준현업운용을 통해 NPOESS 프로그램의 위험성을 낮추는 것이다. 즉, NPP 프로그램은 EOS라는 연구용 센서를 NPOESS라는 현업용 센서로의 전환을 이끌어주는 다리 역할을 하는 프로그램이 되었다. 현재로서는 2009년도 발사할 예정이며, 발사 이후의 임무 수명은 5년으로 고려하고 있다.

NPP에 탑재될 주요 센서로는 VIIRS (Visible Infrared Imaging spectroRadiometer Suite),

CrIS (Crosstrack Infrared Sounder), ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) 그리고 OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite)이다. 고품질 기후자료를 연속적으로 생산하고 신속하게 자료를 분배하는 현업위성의 특성을 모두 만족시키기 위해 NPP에서는, 이들 센서 자료를 관측이 이루어진 이후 90분 이내에 처리하여 Environmental Data Record (EDR)로 만들어 분배할 계획이다. 또한 자료의 품질을 관리하기 위해 과학자 그룹에서는 지속적으로 원시자료 및 산출 자료의 검보정을 수행할 계획이다. 현업적으로 제공되어야 할 EDR (예를 들어 대기의 연직온도 분포, 표면온도 등)은 NASA, NOAA, 그리고 국방부의 사용자 그룹과 함께 IPO에서 제시하였고, NPP의 발사 이후 이와 같은 요구사항을 만족시켜야만 두 가지 목적 중의 하나가 달성된 것으로 간주한다.

3) 기타 연구개발용 위성

이들 위성들 이외에 ESSP 프로그램을 통해 개발 중인 위성으로는 이산화탄소의 시공간 분포를 좀 더 정확하고 온전하게 관측하기 위한 프로그램인 Orbiting Carbon Observatory (OCO; 2008년 발사 예정), 해양의 염도를 측정하기 위한 Aquarius (2010년 발사 예정) 등이 있다. 또한 기대 이상의 성공을 거두고 있는 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)의 후속사업으로 추진되고 있는 GPM (Global Precipitation Measurement) 프로그램은, TRMM에 비해 더 정확하고, 짧은 주기(3시간)로, 전지구에 대하여, 고해상도의 강수량자료를 제공하는 목적을 가지고 있



다. 그러나 예산지원이 지연되면서 발사 일정은 당초의 2008년에서 순연되어 아직까지 결정되지 못하고 있는 실정이다.

3. 미래 전망

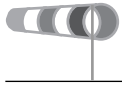
기상과 기후가 경제활동에 상당한 영향을 미친다는 것은 이제 더 이상 새로운 사실이 아니며, 앞으로 그 범위와 정도가 높아질 것이라는 데는 이견이 없다. 이에 따라 기상분야에 대한 사회적 요구사항은 넓고 깊어지는 실정이다. 이를 만족시키기 위해서는 현재 및 가까운 미래에 확보 가능한 관측요소뿐 아니라 새로운 관측요소도 필요하며, 이를 만족시키기 위한 위성관측에 관한 정책을 마련하기 위해서는 우선순위가 정해진 필수 관측요소들을 정의하는 것이 중요하다. 이를 정의하는 작업은 관측요소를 보는 시각에 따라 그 우선순위와 구체적인 요구사항이 달라지기 때문에, 획일적인 요구사항이 존재하는 것은 아니다.

여기에서는 NRC 2007년 보고서에서 제시된 우선적인 관측요구사항과 이를 달성하기 위해 제안한 위성 프로그램을 <표 1>에 하나의 예로 보았다. 이들 우선순위의 선정과정에서 적용된 기준은 열대폭풍과 같이 심각한 재해를 불러일으키는 악기상 예측 정확도를 높이기 위해 중요한 요소여부였다. 그 결과 대류권에서의 3차원 바람장과 전천후 연직온습도가 가장 중요한 관측요소로 선택되었다. 대류권에서의 바람장은 현재에도 산란계 및 마이크로파 복사계를 이용한 해상풍 산출 및 구름 및 수증기 이동을 추적하는 대기운동벡터 등이 제한적으로 산출되고 있으나, 현재 생산되는 대기 운

동벡터는 대기의 특정한 층에서의 값만 제공한다. 정확한 예측을 위해서는 3차원 바람장이 필요하며 이를 관측할 수 있는 프로그램을 제시하고 있다.

가장 선호하는 프로그램으로 제시된 바람관측용 라이다는 능동형 센서인 도플러 라이더 개념을 적용하여 대류권 및 하부 성층권에 존재하는 에어로솔의 반사 신호를 관측하여 바람의 연직분포를 측정하는 것이다¹⁵⁾. 다만, 에어로솔이 희박한 해양 지역이나 대기경계층 이상의 맑은 지역에서의 바람장 산출을 위해서는 공기 입자의 반사를 이용하기 위해서 다른 파장의 라이다를 함께 이용해야만 관측요구사항을 만족시킬 수 있다. 이와 같이 파장을 달리하는 이중의 라이더 개념을 적용하여 3차원 바람장을 생산하기 위해서는 해결해야 할 기술적인 문제가 많으므로, 새로운 기술을 우주에서 실현시키기 위한 단계적 프로그램¹⁶⁾ 추진하기 위해서는 최대한 빠른 시간 이내에 적극적으로 기술투자에 나설 것을 권유하고 있다.

연직온습도 분포의 경우에는 극궤도 현업기상 위성에서 정기적으로 관측하는 요소이지만, 위성에 따른 관측자료의 품질이 일정하지 않는 문제점이 있다. 예를 들어 최근에 발사된 Metop의 경우 연직해상도가 1 km 정도이지만, 기존의 NOAA 위성에서는 2 km의 해상도이며, 관측자료의 정확도도 Metop에 비해 낮은 편이다. 정지궤도의 경우는 불균질성이 더 심하여 연직분포를 제공할 수 있는 위성은 미국에서 운영하는 GOES 위성뿐이며, EUMETSAT의 2세대 Meteosat은 일부의 정보만 제공하고, 다른 정지위성들은 이에 대한 정보가 전혀 없는 실정이다. 연직온습도 분포의 활용성을 최대화하기 위해서는 모든 극궤도 위성의 수준이



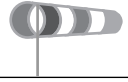
Metop과 유사하여야 하며¹⁷⁾, 정지궤도 위성에도 고품질의 탐측기 탑재가 필요하다. 특히, 중규모현상의 정확한 예측을 위해서는 정지궤도에서 높은 관측주기의 탐측기 자료가 필요한 것으로 나타났다¹⁸⁾. 정지궤도에서의 고성능 탐측기는 HES와 같은 센서로 만족시킬 수 있을 것으로 기대되었으나, 현재로서는 실현될 가능성이 낮은 실정으므로, 향

후 더 높은 우선순위로 사업을 추진할 필요가 있다.

지금까지 운영되거나 계획되고 있는 고성능 탐측기는 주로 적외파장의 관측을 통해서 이루어지는 것이므로, 구름이 존재하거나 강우가 있는 경우에는 관측에 한계를 가진다¹⁹⁾. 이를 극복할 수 있는 것이 NPOESS에 탑재할 계획인 CMIS

〈표 1〉 2015-2025년 시기에 우선적으로 실현되어야 할 위성기반의 기상관측요소.
이들 요소는 현재 또는 2010년대 발사될 위성은 그대로 유지된다고 가정한
상황에서 정의한 것임. 여기서 해상도에서 사용된 V는 수직, H는 수평을 나타냄.

중점요소	관측요소	센서형태	관측범위	해상도	관측주기	연관미션
대류권 바람 (3가지 종류)	수평바람의 연직분포	바람관측용 라이다(선호)	전구	350 km(H) 1 km (V)	TBD3-D	Winds
	해상풍	산란계	전구	20 km	6~12 시간	NPOESS
	수증기 이동벡터	물리냐 영상기	북반구	2 km (적외/ 수증기영상) ~25 km(H)	15 분(근지 점 관측시)	
전천후 온습 도 연직분포	청천 및 구름지 역에서의 온습 도 연직분포; 지상강수; 해수 면온도	마이크로파 배열 복사기; 강우레이더	지역 또는 전구	수평: 25 km (습도 및 강 우강도), 50 km (온도) 수직: 2 km (온습도)	15~30 분	PATH GPM
온습도 연직 분포	온습도 연직 분포	GPS	전구	~200 m (V)	~2,500/day	GPSRP
에어로솔- 구름 관련	에어로솔의 물 리 화학적 특성; 에어로솔의 구 름 형성, 성장, 반사도에 미치 는 영향; 구름 에서 빙정, 수 적의 전환	다중채널 에어로솔 라 이다; 도플러 레이더; 편광 기; A-밴드 복사계; 적외 배열기	전구	200 m (V)	TBD	ACE

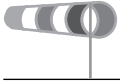


(Conical-scanning Microwave Imager Sensor)와 같은 마이크로파 센서이지만, 이것이 구현된다 고 하더라도 15분에서 30분 정도의 관측주기를 만족시킬 수 없기 때문에 2015-2025년 시기에는 이를 극복할 수 있는 중궤도 또는 정지궤도의 마이크로파 탐측기 사업을 추진하도록 권장하고 있다. 정지궤도의 마이크로파 탐측기는 저궤도의 마이크로파 탐측기에서 사용하는 55 GHz와 183 GHz 부근의 산소 및 수증기 흡수/방출선을 이용하기에는 너무 큰 안테나가 요구되는 기술적인 문제 때문에, 기술적으로 극복해야 할 많은 문제가 남아 있는 상황으로 현재 미국과 유럽에서 이를 극복하기 위한 이론적인 연구가 활발하게 진행되고 있으며, Coordination Group for Meteorological Satellite (CGMS)에서도 이 문제를 지원하기 위한 특별그룹을 구성하여 운영하고 있다.

한편, 이와 같은 우주시스템의 개발뿐 아니라 지상시스템의 개발 및 개발된 기술들의 현업으로의 이전도 위성개발 정책을 정하면서 고려하여야 할 중요한 요소들이다. 새롭게 개발된 기술과 확보된 정보들이 사용자들에게 신속하게 제공되지 않는다면, 실용적인 측면에서의 개발이 가지는 의미는 반감되고 말 것이다. 불행히도, 과거의 경험에 비추어보면 현업산출물의 개선을 동반하지 않은 신기술 개발에 대한 예들이 상당수 있었다. 예를 들어 위성에서 관측하는 연직온습도 자료를 수치예보에서 본격적으로 활용하기까지는 탐측기가 개발된 후 25년이라는 시간이 지난 후에야 가능해졌다. 이는 초기의 모델개발자들이 위성에서 라디오존데와 똑 같은 형태의 자료를 제공해주지 않는 한

위성자료를 사용하지 않겠다는 태도와 위성에서 산출된 연직온습도 자료가 가지는 특성에 대해서 제대로 이해시키지 못한 위성시스템 개발자들 모두의 책임이었다. 잘 알려진 것처럼 위성 자체는 제한적이지만 타국의 위성자료를 효율적으로 활용한 European Center for Medium-range Weather Forecasting (ECMWF)의 모델 성능이 다양한 위성을 보유한 NOAA의 모델보다 나은 것도 일부 이러한 요인이 있었다²⁰⁾. 따라서 연구에서 현업으로, 현업에서 사용자로의 기술, 정보, 자료의 흐름을 적절하게 설계해야만 발전된 기상위성 기술에 의한 사회경제적 이득을 현실화시킬 수 있게 된다. 이를 위해서 우주관련 기관 및 조직에서는 미래의 환경변화에 능동적으로 대처할 수 있는 유연성을 확보할 필요가 있다.

지상시스템은 위성발사와 동시에 수치예보와 같은 현업활용 분야에 직접 적용될 수 있도록 자료처리 알고리즘, 자료동화 알고리즘, 신속한 자료분배 및 저장을 위한 시스템 구축도 충분히 고려하여야 한다. 특히, 앞으로 증가할 위성자료의 크기를 고려한다면 고성능 컴퓨터의 확보가 필수적으로 동반되어야 한다. 이와 같은 지상시스템의 효과적인 준비를 위해서는 위성의 개발을 주관하는 기관과 현업시스템 운영을 주관하는 기관과의 공동기구를 구성하여 위성의 임무설계 초기단계에서부터 위성자료들이 모델시스템에 최적의 상태로 활용될 수 있도록 설계가 이루어지도록 관리할 필요가 있다. 또한, 여기에서 제시된 미션들에서 생산된 자료들은 실시간 활용뿐 아니라, 지속적인 발전이 이루어지는 모델이나 자료동화 시스템의 변화에 따른 재분석 과정에서의 영향평가도 이루어지도록



권고한다.

4. 맺음말

최근 증가하고 있는 기상 및 기후 현상의 사회 경제적 중요성에 비추어 이들 현상에 대한 예보역량을 강화하라는 요청이 증가할 것으로 기대된다. 이를 만족시키기 위해서는 현상에 대한 이해, 이론적 모델을 이용한 미래의 예측, 그 결과의 분석과 활용이 기본적으로 수행되어야 하며, 이 모든 과정에서 관측자료는 핵심적인 역할을 담당한다. 전형적인 관측자료가 가지는 한계를 극복하고, 다양하게 요구되는 자료를 생산하는 가장 중요한 수단인 위성기반의 관측은 이제는 없어서는 안 될 수단이었다. 기술발달 및 요구정보량이 증가하면서 위성을 이용한 관측은 점차 증가하고 강화될 것이며, 이를 구현시키기 위한 정책 방향의 중요성도 증가할 것이다.

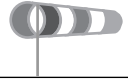
현재 미국에서 가장 시급한 환경위성관련 이슈들은 차세대 위성인 GOES-R과 NPOESS의 성공적인 추진과 이들의 초기 임무설정과정에서 계획되었던 임무들이 예산문제로 인하여 축소되면서 발생한 공백을 어떻게 최소화시킬 수 있는가에 대한 문제, 연구개발과정에서 만들어진 결과물들을 어떤 방식으로 현업에 효율적으로 활용할 수 있도록 하는가에 대한 문제, 그리고 기후문제에 대한 적극적인 위성활용을 지원할 수 있는 방안의 마련 등이다. 이들 이슈 전체를 한 번에 해결하는 것은 어려울지라도 하나의 방법을 제시한 것이 NPP 프로그램이며, 이 사업의 성공 여부는 향후의 정책설정에도 많은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 향후

정지궤도위성을 위해서도 NPP와 같은 프로그램이 개발되는지도 관심을 가지고 지켜볼 내용이다.

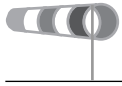
요구되는 위성관측 임무규격이 확장되면서 이제는 어느 한 나라가 이를 다 만족시킬 수 없는 상황이며, 이에 따른 국제적인 협력이 한층 강화될 것이다. 또한 위성사업은 장주기를 가지는 특성을 가지고 있으므로 우리나라도 지금부터라도 미국뿐 아니라 유럽, 일본, 중국 등의 장기적인 발전 계획을 종합적으로 검토하여 우리의 실정에 맞는 중장기적인 정책을 수립할 필요가 있다. 통신해양기상위성의 후속위성을 위한 초기연구가 시작된 것은 다행스러운 일이며, 앞으로도 좀 더 강화된 정책연구가 수행되길 바란다.

[주]

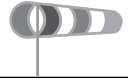
- 1) "Earth Science and Applications from Space," NRC, 2007.
- 2) NPOESS와 같이 현업위성의 경우에는 위성이 한번 개발되면 대부분의 경우 거의 유사한 규격의 위성을 15년정도 활용하기 때문에 사업주기가 15년 정도이지만, NASA에서 주도하는 연구개발용 위성의 경우에는 짧게는 5년에서 7년 정도의 사업주기를 가지는 사업도 있어, 현업용과 연구개발용에 따른 사업특성의 차이도 존재한다.
- 3) 한때, 미국의 기상위성업무를 사기업에 넘겨려는 시도가 있었지만, 의회에서 강력하게 반대하여 무산되기도 하였다.
- 4) 미국이외의 전세계 기상위성에 관한 최근의



- 정보는 WMO/CGMS 보고서를 참조하기 바란다.
- 5) 현황 부분에서 다루는 NOAA와 NASA에서 운영, 개발 및 계획 중인 각종 기상·기후 관련 관측위성에 대한 간단한 소개는 정보스크랩란을 참조하기 바란다.
- 6) IPO에 참여하는 기관의 책임도 1994년의 대통령 지시사항에서 명시하였는데, NOAA는 현업운영에 대한 모든 책임을 가지며, 국방부는 NPOESS 시스템의 구매와 확보에 대한 총괄책임을 가지며, NASA는 새로운 연구개발 기술을 NPOESS에 접목시켜 사업의 효율적 추진을 보장하는 책임을 가졌다. 이에 따라, NASA는 예산상이나 프로그램 상으로는 NPOESS에 대한 책임이나 권한이 없게 되었다.
- 7) "Exploring the Unknown: Selected Documents in the History of the U.S. Civil Space Program, Volume III: Using Space," Edited by J.M. Logsdon et al., Chap 2. 정보스크랩의 마지막부분에 NPOESS 프로그램의 형성과정을 간략하게 정리하였다.
- 8) NRC, "Global Environmental Change: Research Pathways for the Next Decade", 1998, The National Academies Press, Washington, D.C.
- 9) 사업을 지연시킨 가장 중요한 요인은 NPOESS에 탑재될 VIIRS 센서의 개발이 지연되었기 때문이었다. VIIRS는 EOS 위성의 MODIS를 근간으로 만들어지는 센서이며, 센서의 제작을 담당한 회사는 바로 MODIS를 제작하였던 회사였다. 또한, MODIS의 채널수는 36개이지만 VIIRS의 채널수는 21개로 줄었음에도 불구하고 현업용 센서라는 점, 공간해상도의 증가, 그리고 관측각에 따른 공간해상도 변화의 감소라는 요구사항 때문에 개발이 크게 지연되어, NPOESS 프로그램 전체의 일정 지연 및 예산 급증을 불러 일으켰다.
- 10) NRC, "Options to Ensure the Climate Record from the NPOESS and GOES-R Spacecraft: A Workshop Report", 2007, The National Academies Press, Washington, D.C.
- 11) GIFTS를 탑재한 위성이 인도양 상공에서 운영될 경우(해군의 작전 지원을 위해서), 위성의 관제 및 자료송수신을 호주에서 담당하기로 하고, 호주도 지상시스템을 구축하기로 합의하여 실질적으로는 국제공동프로그램으로 추진 중이었음
- 12) Space News October 29, 2007.
- 13) NRC, "Earth Science and Applications from Space," 2007, The National Academies Press, Washington, D.C.
- 14) 프로그램에 NASA가 참여하는 것으로 되어 있지만, 실질적으로 기여하는 것은 전무한 상황이었으며, NPOESS에 탑재되는 많은 센서들이 새롭게 개발되는 상황에서 실험도 없이 현업으로 운영되는 것에 대한 문제제기도 많은 상황에서, NASA의 NPOESS에 대한 기여를 현실화하고, NPOESS 사업의 위험성을 제거하기 위한 목적으로 자연스르게 NPP가 추진됨.



- 15) Sroga et al., "Lidar measurement of wind velocity profiles in the boundary layer.", 1980, J. Appl. Meteorol. 19:598-605, 실제 센서를 제작하여 항공실험을 수행하는 내용에 대해서는 Stoffelen et al., "The Atmospheric Dynamics Mission for global wind field measurement.", 2005 Bull. Am. Meteorol. Soc. 86:73-87를 참조할 수 있다.
- 16) 즉, 원형센서를 개발하여 항공기에 탑재하여 실험한 후 우주실험을 위한 준비가 완료되었다고 판단되면 실험용 극궤도위성에 탑재하여 실증을 거친 후에 현업용 위성에 탑재하는 개발 순서.
- 17) 현재 추진 중인 NPOESS 프로그램은 이를 달성할 수 있을 것으로 기대되고 있음.
- 18) Le Marshall et al., "Impact of atmospheric infrared sounder observations on weather forecasts." 2005, EOS 86(11):109, 115-116.
- 19) 즉, 적외파장의 경우에는 구름하부에서 방출되는 파장이 구름에 의해 흡수되므로 위성에는 신호가 전혀 도달하지 않아, 실질적으로 악기상 발생 가능성이 높은 구름이 존재하는 지역에 대한 대기의 연직온습도 정보를 제공하지 못하는 단점이 존재한다.
- 20) NRC. "Satellite Observations of the Earth's Environment: Accelerating the Transition of Research to Operations," 2003, The National Academies Press, Washington, D.C.



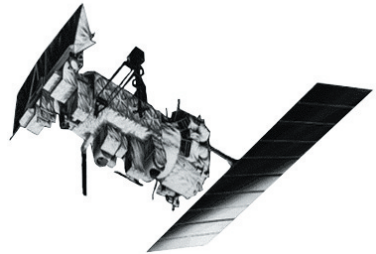
정보 스크랩

기상과 기후에 관련된 위성들

NOAA 현업위성 프로그램

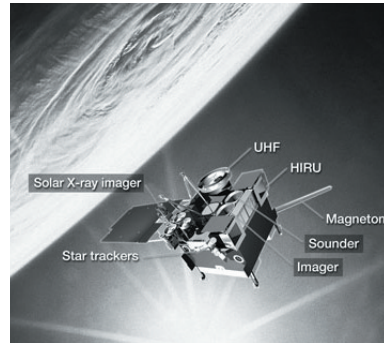
■ NOAA 극궤도 위성 시리즈

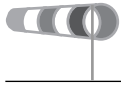
1970년대부터 NOAA에서 운영하는 극궤도 현업기상위성 시리즈로, 적도를 아침에 통과하는 위성과 오후에 통과하는 위성이 있다. NOAA에 탑재되는 주요 센서는 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer), HIRS(High resolution InfraRed Sounder), 그리고 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)가 있다. 가장 최신의 NOAA 극궤도 위성은 2005년 5월 20일에 발사된 오후 위성인 NOAA 18호이다.



■ 정지궤도 GOES 시리즈

미국 대륙 전체를 관측하기 위해 적도 대서양 상에 존재하는 서부 위성과, 태평양 상에 존재하는 동부 위성 2기를 운영하고 있다. 가장 최신의 GOES 위성인 GOES 13호는(2006년 5월 24일 발사) 이전의 SS/Loral 위성체가 아닌 보잉 위성체를 사용하며(태양전지판과 균형을 맞추기 위한 긴 막대가 없는 위성체), 궤도에서의 수명을 8년으로 연장하였으며, 현재는 대기모드로 운영 중에 있다. 탑재센서는 18채널 탐측기, 5채널 영상기, Solar X-ray Imager를 포함한 Space Environment Monitor (SEM)가 있다.

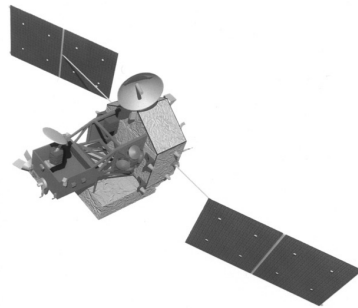




NASA 연구개발용 프로그램

■ Tropical Rainfall Measurement Mission(TRMM, 1997년 발사)

TRMM 미션은 현재의 기후 시스템 내에서의 물 순환에 대한 이해를 높이기 위하여 고안되었다. 지구상의 적도 및 적도 인근지역에 대한 관측을 통하여 TRMM은 강수 및 강수와 연관된 열 방출에 대한 자료를 제공한다. TRMM은 기후시스템을 조정하는데 핵심적인 역할을 하는 수증기, 구름, 강수 사이의 상호작용을 이해하는데 중요한 기여를 하고 있다. (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)



■ Quikck Scattrometer(QuikSCAT, 1999년 6월 19일 발사)

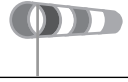
QuikSCAT 미션은 NASA의 산란계 NSCAT 자료 공백을 “신속하게 채우기” 위해 마이크로파 레이더인 SeaWinds 센서를 이용하여 해상에서 반사되어 오는 마이크로파 신호(13.4 GHz)의 강도를 측정하여 해상풍을 산출하는 임무이다. 회전형 접시 안테나를 이용하여 원형으로 1800 km의 폭으로 관측하여 하루에 400,000 관측자료로 지구 표면의 90%를 관측한다. 현재 25 km의 공간해상도를 가지는 자료를 준실시간 모드(자료의 관측 후 3시간 이내에 활용가능)로 제공하고 있다. (<http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/index.cfm>)



■ Jason(2001년 12월 7일 발사)

TOPEX/Poseidon 임무의 후속임무인 Jason-1은 NASA와 프랑스의 CNES와의 공동협력 사업으로 해수면고도를 정밀하게 측정하여 해양의 변화를 감시하는 목적으로 가지고 있다. Jason-1, GRACE, 그리고 QuikSCAT 산란계 관측자료의 종합적인 활용을 통한 해양정보 생산을 JPL에서 추진하고 있다. (<http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/jason-1.html>)





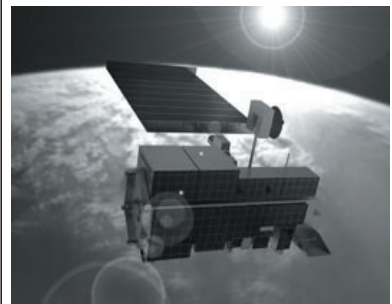
NASA EOS 프로그램

1991년부터 시작된 이 프로그램은 지구전체의 현상을 종합적으로 관측하기 위한 NASA의 선도적인 사업으로 위성을 비롯한 다양한 관측장비들을 이용하여 인간에게 영향을 주는 자연현상 및 인간의 활동이 자연에 미치는 영향에 대한 이해를 제고하기 위한 프로그램이다. 이를 통해 기상예보 및 자연자원의 관리의 개선, 그리고 궁극적으로는 미래의 기후변화를 예측할 수 있는 능력을 확보할 목적을 가지고 있다.

EOS 프로그램에는 크게 첨단위성, 자료처리시스템, 그리고 연구팀들이라는 3개의 구성요소를 포함하고 있다. EOS에서 관심을 가지는 요소들은 구름, 물과 에너지 순환, 해양, 대기화학, 지표면, 물과 생태계 순환, 빙하, 그리고 지질 분야이다. 본격적인 사업은 1999년에 첫 번째 EOS 위성인 Terra를 발사하면서 성공적인 첫발을 내딛게 되었는데, 지구전체시스템을 관측할 수 있는 다양한 센서들을 이용하여 성공적인 사업시작을 알렸다. 첫 번째로 발사된 기상 및 통신위성이 그랬던 것처럼, Terra 위성의 발사로 지구과학 연구의 새 지평을 열게 되었으며, 이후에 성공적으로 발사된 Aqua와 Aura를 통해 EOS 사업을 통해 달성하고자 하였던 목적을 성공적으로 완수하고 있다.

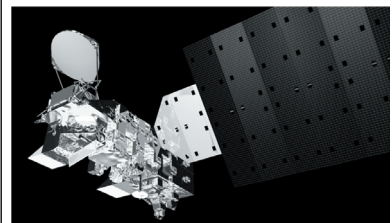
■ Terra(1999년 12월 18일 발사)

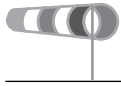
Terra 위성은 NASA의 Earth Observation System (EOS) 프로그램의 첫 번째 위성으로 일본, 캐나다와 협력으로 추진하는 다목적 위성으로 지구에 대한 이해와 예측 능력을 향상시키는 임무를 가지고 있다. 2000년 2월 24일부터 관측을 시작하여 2008년 현재까지도 지속하고 있다. 주요탑재센서로는 MODIS, ASTER, CERES, MISR, MOPITT 등이 있다. (<http://terra.nasa.gov/>)



■ Aqua(2002년 5월 4일 발사)

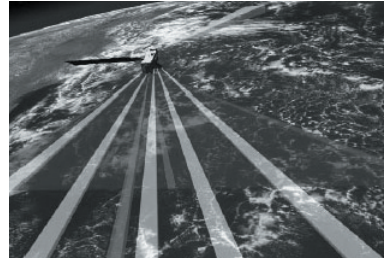
Aqua는 (라틴어로 물이라는 뜻) NASA EOS 프로그램의 두 번째 위성으로 지구의 물 순환에 대한 정보를 얻기 위한 다양한 센서 (AIRS, AMSR-E, AMSU-A, CERES, HSB, 그리고 MODIS)를 탑재하고 있다. 오후궤도 위성(A-Train라고도 불림) 중 첫 번째로 발사됨. A-Train은 OCO가 가장 먼저 통과하기 뒤이어 Aqua, CloudSat, CALIPSO, PARASOL, 그리고 Aura 순서로 비행하게 됨. (<http://aqua.nasa.gov/>)





■ Aura(2004년 7월 15일)

Aura (라틴어로 산들바람이라는 뜻)의 설계수명은 5년이지만 운영목표수명은 6년으로 EOS 시스템의 마지막 위성이며, 주 임무는 대기의 화학적 조성을 관측하는 것이다. Aura는 Aqua를 15분차이로 따르고 있다. 주요탑재센서로는 HIRDLS, MLS, OMI, 그리고 TES가 있다. (<http://aura.gsfc.nasa.gov/>)



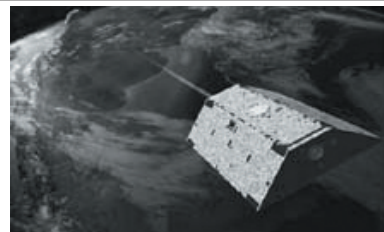
Earth System Science Pathfinder

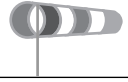
ESSP 프로그램은 NASA의 EOS 프로그램이 종료된 후, 지구과학 연구분야에서 구체적이고 독특한 주제를 집중적으로 다룰 수 있는 임무를 수행하기 위한 사업이다. 새로운 과학적 개척을 위해 모든 가능성을 열어놓고 2년에 한 번씩 공개적으로 제안서를 받아 공개적인 심사절차를 거쳐 사업을 선정하는 혁신적인 사업으로 중소규모의 임무 및 고정된 비용으로 비교적 짧은 시간에 위성을 개발하고 발사할 수 있는 임무들로 구성된다. 연구책임자 중심의 이 사업은 대기, 해양, 지질, 극지방, 지구물리 등의 분야를 망라하며, 사업범위는 개념정의, 설계, 개발, 운영, 자료생산, 분배 및 저장, 그리고 이들 관측자료를 이용한 연구 수행까지를 포함하는 형태의 프로그램이다. 연구책임자는 과학적 성취도, 임무수행을 위한 팀 구성, 그리고 임무를 성공적으로 수행할 책임을 가진다. 임무수행 팀에는 대학, 산업체, 정부, 공공연구기관, 국제기관 등 연구책임자의 판단에 의해 결정된다.

ESSP 프로그램을 통해 추진되고 있는 중요한 미션으로는 이미 발사되어 운영중인 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE; 2002년 발사), Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO; 2006년 발사), CloudSat(2006년 발사) 등이 있으며, 향후 발사를 위해 개발 중인, Orbiting Carbon Observatory (OCO; 2008년 발사 예정), Aquarius (2010년 발사 예정) 등이 있다.

■ Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE; 2002. 3. 17 발사)

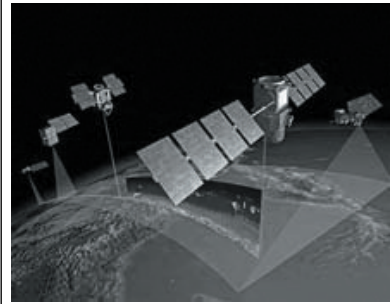
GRACE 프로그램은 해저기압의 변화를 측정하고, 해양의 질량 변화를 관측하고 육상의 물과 눈의 저장량을 감시하여 해양 표면의 흐름과 열 수송에 대한 이해를 제고하여 전지구 기후문제를 풀기위한 것이다. (<http://www.csr.utexas.edu/grace/>)





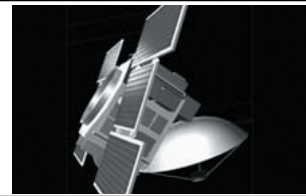
■ Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO; 2006년 4월 27일 발사)

CALIPSO (이전에는 PICASSO-CENA)는 전지구 에어로솔 및 구름 특성, 복사플럭스, 그리고 대기 상태에 대한 자료를 생산하기 위해 Aqua와 조화를 이루면서(소위 말하는 A-train 위성 그룹) 운영되는 프로그램이다. 에어로솔과 구름의 복사영향에 대한 새로운 평가를 가능하게 만들고, 이를 통해 미래의 기후변화 예측능력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다. (<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>)



■ CloudSat (2006년 4월 27일 발사)

CloudSat은 우주에서 구름의 연직구조를 측정하기 위해 설계된 실험위성이다. 위성에 탑재된 센서는 구름을 좀 더 잘 예측할 수 있는 구름 구조의 3차원 정밀정보를 제공할 수 있을 것이다. (<http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>)



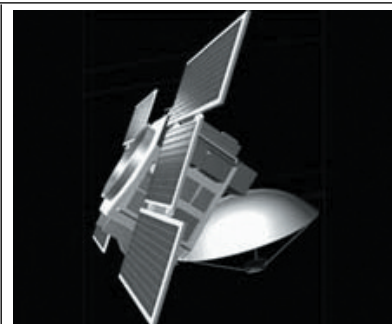
■ Orbiting Carbon Observatory (OCO; 2008년 발사예정)

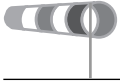
OCO는 기후변화의 주범으로 고려되는 대기중의 이산화탄소를 우주에서 관측하기 위한 프로그램이다. NASA의 최우선 순위에 있는 탄소순환 관측요구사항을 만족시키기 위하여 기존에 증명된 기술을 이용하는 프로그램이다. (<http://oco.jpl.nasa.gov/>)



■ Aquarius(2010년 발사예정)

Aquarius는 전지구 해양의 표면 염도 (Sea Surface Salinity; SSS)를 측정하기 위한 임무이다. 전통적인 염도 관측은 주로 현장관측에 의존하였기 때문에 자료의 시공간적 한계에 따라 과학적 이해가 부족하였고, 이를 극복할 수 있는 가장 좋은 방법은 위성의 활용이다. Aquarius 사업을 통해 물순환, 기후, 그리고 해양을 연결하는 중요한 물리적 과정을 해결하는데 기여할 것이다. (<http://aquarius.gsfc.nasa.gov/>)

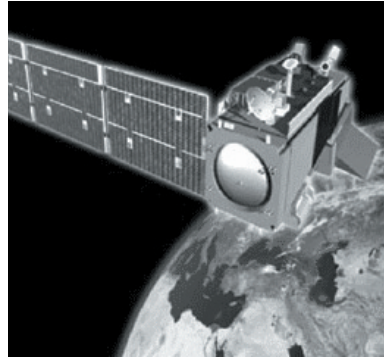




독립적인 프로그램

■ NPOESS Preparatory Project(NPP; 2009년 발사예정)

NPP는 NASA와 NPOESS Integrated Program Office (IPO)와의 공동임무로, Aqua와 같은 기존의 관측임무와 미래의 NPOESS 임무를 연결시키기 위한 목적을 가지고 있다. IPO의 입장에서는 NPOESS의 발사 이전에 새로운 센서, 처리 알고리즘, 위성운영, 지상시스템 등의 기술적인 문제들을 미리 시험하고 증명할 수 있는 기회를 제공하여 현업운영시스템의 위험성을 감소시킬 수 있도록 해준다. (<http://jointmission.gsfc.nasa.gov/>)



■ Glory Mission(2008년 12월 발사예정)

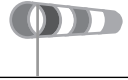
Glory는 두 개의 독립적인 목적을 달성하기 위한 지구관측 원격탐사 위성이다. 하나의 목적은 에어로솔의 화학적, 미세물리적, 광학적 특성과 시공간적인 분포를 관측하기 위한 것이며, 다른 하나는 장기간의 기후자료를 구축하기 위해 총태양일사량을 관측하기 위한 것이다. 이들 목적은 2개의 독립적인 센서를 통해서 달성될 예정으로, 편광된 태양반사광(0.4에서 2.4 마이크로미터)을 측정하는 Aerosol Polarimetry Sensor (APS)와 고도의 정확도와 정밀도를 가지는 Total Irradiance Monitor (TIM)이다. 추가적으로 구름카메라를 탑재하여 APS의 관측영역에 구름의 존재유무를 파악하게 한다. (<http://glory.gsfc.nasa.gov/>)



■ Global Precipitation Measurement (GPM; 발사시기는 미정)

GPM은 TRMM의 관측범위를 고위도로 확장하면서 관측주기를 단축하기 위한 임무이다. 이를 위해 주센서를 탑재한 위성(1기)과 수동형 보조센서를 탑재한 위성(최대 8기)들로 위성군단을 구축하여 체계적이고 정기적인 강수관측(3시간 간격)을 이루기 위한 미션이다. 주센서로는 Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)와 고해상도 다중채널 마이크로파 센서인 GPM Microwave Imager (GMI)가 있다. (<http://gpm.gsfc.nasa.gov/index.html>)





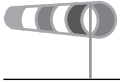
NPOESS 프로그램의 탄생까지

잘 알려진 바와 같이 미국의 위성개발 프로그램은 냉전상황에서 소련의 전략무기개발을 감시하기 위한 첩보위성의 개발을 최우선 과제로 삼으면서 시작되었다. 이런 측면에서 기상위성의 개발 또한 순수한 기상정보 제공이라는 측면보다는 첩보위성의 활용을 강화하기 위한 일환으로 시작되었다고 보는 것이 타당할 것이다. 이는 최초의 기상위성인 TIROS 1호의 개발 과정에서도 잘 나타나는데, 사업의 시작은 육군에서 첩보위성으로 활용하기 위한 카메라 개발로 시작되었으나, 모든 첩보위성은 공군에서만 개발하도록 정책방향이 결정되면서 육군은 이 카메라를 기상용으로 활용하기 위해 사업을 전환하게 된다. 사업초기의 이름도 Janus II 이었으나 사업의 조정을 통해 TIROS로 바꾸고 1959년 여름에 첫 위성을 발사할 계획이었다.

그러나 1958년 하반기에 NASA가 만들어지면서 TIROS 프로젝트도 NASA로 이관된다. 그렇지만 기상위성 자료에 대한 국방부의 관심은 계속되었고, 이는 NASA에서 개발하던 TIROS 시리즈가 군사용 요구사항을 만족시키지 못하였기 때문에 그 정도가 점차 강해졌다. 즉, 전략임무(첩보영상 촬영)를 지원하기 위해서는 특정지역의 구름영상을 특정시간에 정확하게 확보하여야 하는 군사용 요구사항을 TIROS 위성이 만족시킬 수가 없었고, 이른 시일 내에 이를 만족시키려는 의지도 보이지 않았기 때문에, 공군은 독자적으로 임시적인 군사용 기상위성 프로그램을 시작하게 된다. 그러나 NASA의 현업용 기상위성개발이 지연되면서 공군은 임시적으로 시작한 기상위성 프로그램을 군사적 목적에 맞는 정보를 생산하기 위한다는 명분으로 민간과 분리된 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 프로그램을 개발하기 시작하였다.

한편, NASA에서 개발하여 운영하던 TIROS 위성은 기상분야의 활용 가능성이 곧바로 증명되면서 실험적인 TIROS 프로젝트를 현업운영시스템으로 전환하라는 압력이 강해졌다. 이를 해결하기 위해 NASA와 Weather Bureau(당시의 NWS)와의 협의를 통해 Weather Bureau가 국가 현업기상위성시스템의 관리를 맡고 NASA가 발사 및 지상지원 시스템 관리 및 위성의 개발과 구매를 담당하도록 하였다. NASA는 현업시스템의 원형으로 Nimbus 위성을 개발하고 있었는데, 다양하고 새로운 성능을 포함하고 있었지만 점차 증가하는 비용과 연기되는 발사 날짜 때문에 Weather Bureau의 우선순위와 점차 멀어지게 되었다. 1963년에 이르러서는 Weather Bureau가 기존의 합의를 깨고 TIROS 기술을 바탕으로 현업위성 프로그램을 추진하려고 하자, NASA는 타협안으로 Weather Bureau에서 제공하는 예산으로 TIROS Operational System을 따로 개발하며 Nimbus 프로그램은 순수한 연구용으로 계속 진행하기로 결정하게 된다. 이후 Weather Bureau의 후속기관인 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 모든 민간부분 기상위성의 개발과 운영을 책임지고 있다.

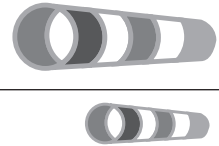
이후, 민간 두 프로그램을 합치려는 시도는 국방부와 NOAA의 요구사항이 분명히 다르다는 점 때문에



오랫동안 실패로 끝났다. 예를 들어, 국방부는 전략 및 전술작전을 지원하기 위해 이른 아침의 구름영상을 필요로 하는 반면, NOAA는 수치모델의 입력자료로 사용하기 위해 이른 오후의 대기연직분포 자료를 필요로 하였다. 1973년 관리예산국과 국가안보위원회가 공동으로 이 문제를 검토한 결과 통합시스템이 기술적 가능성과 비용 측면에서 유리하지 않다는 판단을 내렸지만(특히 군사위성 자료를 자유롭게 공개하는 문제에 대해서 국방부에서 많은 반대), 당시 공군에서 개발 중이던 DMSP Block 5D 위성체를 NOAA의 차세대 극궤도 위성의 기본골격으로 사용하도록 결정하였다. 이에 따라, 민군이 프로그램은 다르게 운영하였지만 위성시스템은 단일시스템을 활용하는 결과를 낳았고, 이는 전체적으로 두 프로그램의 차이점을 희석시키는 결과를 가져오게 되었다.

90년 초반에 들어서면서는 연방예산의 축소 및 정부의 효율성 제고 노력으로 두 시스템의 통합에 대한 논의가 다시 일어나게 되었다. 또한 NASA에서 추진하고 있던 EOS-PM 위성과 NOAA의 PM위성을 통합할 수 있는지에 대한 검토도 이루어졌다. 1993년 하원 및 상원에서 NOAA와 상무성에 통합의 가능성을 요구하였고, 당시의 클린턴 행정부에서도 통합에 적극적으로 동조하여 1994년 “미국의 극궤도 현업환경 위성시스템의 통합”이라는 이름의 대통령 결정명령(NSTC-2로도 알려짐)으로 두 프로그램을 결합한 NPOESS 프로그램이 탄생하게 되었다. 이에 따라 IPO도 구성하게 되는데, NOAA가 현업의 주 책임자가 되고, 국방부는 시스템 획득을 주도하고, NASA는 새로운 개발과 새로운 기술의 접목을 주도하게 되었다.

NPOESS는 기본적으로 국방부의 특수목적에 만족시키기 위해 이른 아침의 구름정보를 얻기 위한 아침위성과 NOAA의 주요 목적을 달성하기 위한 수치모델의 입력자료 제공을 위한 오후위성으로 구성된다. EUMETSAT과의 국제협력으로 운영하게 되는 METOP 위성은 늦은 오후에 적도를 통과하여 EUMETSAT의 유럽 사용자들이 특히 관심을 가지는 자료를 수집하게 된다. 이 과정에서 결정해야만 했던 중요한 이슈 하나가 METOP에 대한 자료정책이었다. 미국은 오랜 자료정책인 자유로운 자료분배를 고집하였고, EUMETSAT은 이득을 얻는 나라들은 상응하는 비용을 지불하여야 한다는 입장을 고수하였다. 반면, 미국은 전쟁이나 재난발생시 적성국에 대한 자료분배를 거부할 수 있는 권한을 가지고자 하였다. 결국 가능한 모든 자료들을 자유롭게 분배하는 기능을 위성에 포함시켜 Metop 1호를 발사하였으나, 분배를 위한 송신기의 고장으로 양쪽 모두가 원하는 일부분을 얻는 결과를 낳게 되었다.



기상산업의 위상과 성장 가능성

김 준 모

건국대 행정학과 교수
junmokim@konkuk.ac.kr

1. 기상산업의 정의

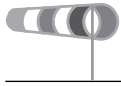
기상산업이라 함은 기상청이 생산한 기상정보를 가공 또는 원시자료 형태로 보급 판매하는 기상예보업, 기상 관측 및 관련 장비 기기의 생산업, 기상정보가 경제활동에 기여하도록 경영지원을 수행하는 컨설팅업, 그리고 금융자산 및 서비스를 활용하여 기상 및 재해관련 보험업무를 담당하는 금융보험업등을 말한다. 이들 업무들을 기상산업에 속한 회사는 겸하여 수행할 수 있다.

2. 기상산업의 범위

기상산업의 범위에 속하는 기상컨설팅산업, 기상장비산업, 기상금융산업 중 우선 기상컨설팅산

업이라 함은 기상정보가 경제활동에 기여하도록 여러 산업체 및 농업부문에 경영지원 및 전략 수립에 관련된 서비스를 제공하는 업종을 지칭한다. 기상장비산업이라 함은 기상 관측 및 정보의 전달, 전파과정에 관련된 기기들을 생산, 유지보수하는 업종을 지칭한다. 마지막으로 기상금융산업이라 함은 금융자산 및 서비스를 활용하여 기상 및 재해 관련 보험업무를 담당하는 금융업을 말한다. 기상 금융산업에 속한 회사들은 농작물 재해보험을 포함한 다양한 보험상품을 개발 판매하고, 선물거래에 참여할 수 있다.

다음의 <표 1>에서 보는 바와 같이, 기상산업은 전통적인 제조업은 물론, 소프트웨어 산업이나, 온라인 업계와도 구분되는 고유성을 갖고 있다.



〈표 1〉 기상산업과 여타 산업간의 공통점과 차이점.

구분	공통점	차이점
S/W 산업과 기상산업	• 자본금 규모가 적은 영세사업자 수가 많음 • 지속적 성장을 위해 연구·개발 요구됨	• S/W산업은 국내·외적으로 시장규모가 급속도로 성장하고 있는 반면 국내의 기상시장의 규모는 미약함
전통제조업과 기상산업	• 전통적으로 제조업은 산업 파급 효과가 큼 • 기상산업 역시 기상 정보가 기업 매출액과 직결될 수 있다는 인식이 확산됨으로써 타 산업과의 연계 가능성과 그 중요성이 날로 커짐 • IT기술을 이용한 고기술 산업이 각광을 받고 있음. 기상산업 역시 IT기술을 필요로 하는 고기술 산업임. • 기술향상을 위한 연구·개발 필수	• 기상산업은 전통제조업에 비해 고부가가치산업으로 발전할 개연성이 상대적으로 높음
온라인산업과 (전자상거래) 기상산업	• 기업과 소비자간의 직접적인 유통 라인 요구됨(B2C 중요) • 관련업체간의 통합 마케팅과 공동마케팅 요구됨. • 고객의 요구에 대응할 수 있는 다양한 콘텐츠 개발 필요	• 기상업체의 경우 유통 라인이 아직까지 구축되어 있지 못함. • 기상업체의 경우 요금 체계가 정립되지 못함. • 기상정보의 경제적 가치에 대한 인식이 낮음

※ 출처: 김준모, 이기식 지방정부연구 (제8권 제1호) 2004.5.

3. 기상산업의 성장가능성과 한계

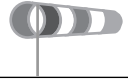
기상산업은 지식 정보사회의 특성 상 부의 창출에 기여할 수 있는 한 큰 성장 잠재력을 갖고 있다. 그러나, 현실은 정보 재화의 소비 특성 상 자신의 소비의사를 감추는 특성 때문에 유료화에 대한 실행이 어려워 지체되고 있는 것이 현실이라 할 수 있다. 이러한 환경속에서 기상 산업이 성장 할 수 있는 주요 분야를 살펴 보면 다음과 같다.¹⁾

(1) 기상사업

기상사업은 향후에도 꾸준히 성장할 수 있는 부문인데, 다음의 맥락에서 이해될 수 있다.

첫째, 다양한 기상서비스 수요 증대이다. 국민 생활수준이 향상됨에 따라 산업 각 부문은 물론 국민들의 기상수요분야가 다양해지고 있으며, 특별한 목적에 필요로 하는 기상정보 수요가 커지는 등 기상에 관한 인식과 관심이 높아졌다는 점이다.

둘째, 기상정보의 상업화서비스 출현이다. 세계



각국의 기상청은 세계기상기구(WMO)를 중심으로 긴밀한 국제협력 하에 기술혁신을 촉진하며, 자국민의 공공이익을 위한 기상서비스를 제공하는 한편, 개별적이고 특수한 목적의 기상정보 서비스를 상업화하거나, 민간기상사업자를 통하여 제공하는 제도를 시행하여 좋은 효과를 거두고 있는데, 이러한 환경은 기상예보 사업을 지식정보 처리산업으로 인식할 수 있도록 해주고 있는 것이다.

셋째, 수익자부담의 서비스 제공에 대한 공감대 형성이다. 수익자부담에 의한 특수서비스를 통하여 경제적 이익을 창출한 외국사례가 언론에 자주 소개되면서 우리나라의 기상서비스 제도개선 필요성에 대한 여론이 비등하고, 제도 혁신을 촉구하는 국회의 대정부질 의와 토론, 공청회 등의 공식적 토론을 거치면서 기상사업제도에 관한 국민적 공감대가 형성되었다는 점이다.

넷째, 정보시장 개방에 대비한 국내 기상정보산업의 육성이다. WTO의 출범을 계기로 상품, 서비스, 지적재산권 등에 이르기까지 광범위한 분야에 걸친 국제교역법 제정으로 세계화시대가 본격화하고 있을 뿐만 아니라, 기상정보시장의 개방에 대비하여 국내의 기상정보산업을 육성해야 할 시점이라는 점이다.

(2) 날씨와 관련된 금융상품을 통해 본 기상산업성장가능성

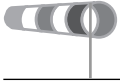
금융 부문은 기상산업의 규모와 질을 획기적으로 향상시킬 수 있는 촉매가 될 수 있는 산업이다.

그간 여러 제도적 제한으로 선진국들에 비해 원활한 투자가 이루어 지지 못하였으나, 향후 큰 잠재력을 지니고 있는 분야라 할 수 있다. 날씨금융상품의 종류를 간략하게 살펴보면

- 날씨보험(재정손실보험, 행사취소보험 및 Contingency보험)
- 농작물보험
- CATBOND(대재해채권)
- 날씨파생상품 등이 그것인데, 이들의 내용을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 날씨보험이다. 국내의 날씨보험으로는 재정손실보험과 행사취소보험, 농작물 보험, 상금보상보험이 있다. 시장 규모로서 우선 재정 손실 보험은 연간 6천 1백억원~ 1조2천억원 정도로 추정되며, Contingency 및 행사취소보험은 2000년 25억원, 2001년 100억원 정도 추정된다. 날씨상품의 특징으로는 ㉠ 기상현상으로 인한 기업의 이익 감소에 대비하고 안정적인 재정계획 수립을 가능케 한다. 통제 불가능한 기상요소에 대한 위험을 보험회사에 전가함으로써 경제적 손실을 최소화하며 ㉡ 크리스마스, 신정, 설날, 발렌타인데이 등 특정일의 날씨와 관련하여 새로운 마케팅 도구로 활용한다. ㉢ 과거 수십 년간의 기상자료 및 통계에 기초한 객관적인 요율을 산정하며, ㉣ 기온, 강수량, 강설량 등 기상요소의 보험 요율 산정에 활용한다. 날씨보험의 적용대상으로는 기상현상으로 인한 피보험 이익이 객관적인 자료에 의해 산정이 가능한 개인/법인체를 대상으로 한정하고 있다.

둘째, 농작물 보험이다. 해마다 우리나라는 6~7월의 장마철 또는 8월 하순~ 9월 상순에 영향

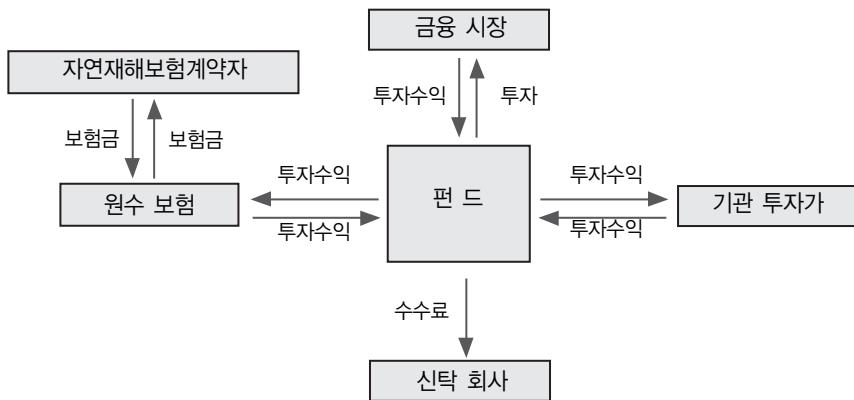


을 주는 태풍에 의한 풍수해(風水害), 여름철 이상 저온에 의해 일어나는 냉해(冷害), 가뭄에 의한 토양 수분부족으로 발생하는 한해(旱害), 작물이 얼어서 생기는 피해로서 특히 산간지역에 피해가 심한 동상해(凍霜害) 등 날씨로 인한 농작물의 피해가 매년 발생하고 있다. 통계에 따르면 1980년~1998년까지의 자연재해로 인한 농작물의 피해액은 3,564억원, 농경지 피해는 891억원에 이르고 있다. 따라서 농작물 보험은 이러한 자연재해로부터 농업인을 보호하고자 하는 제도이다. 즉 농작물보험은 농업인이 적정수준의 보험료를 내고 실제 날씨로 인한 자연재해가 발생할 경우에 보험회사가 그 피해액을 보상해주는 보험이다.

셋째, CAT-BOND(대재해채권)로서 폭풍우 지진 등으로 인한 피해보험이다. 여기서 Cat은 대재해를 의미하는 Catastrophe의 줄임 말이다. 실제로 폭풍우, 지진 등으로 인한 인명과 재산의 피해 규모는 상상을 초월한다. 예컨대 지난 1998년 9월

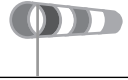
미국 카리브 해 연안을 강타한 허리케인은 무려 1백억 달러 재산 피해를 남겼고 이때 허리케인으로 인해 목숨을 잃은 사람만 4천명을 넘어섰을 정도이다. 자연재해로 인한 피해는 바다 건너 남의 나라 얘기만은 아니다. 우리나라의 경우 지난 1999년 한 해만 자연재해로 인해 무려 1조 9천억원이 넘는 피해를 입은 것으로 집계됐다. 더욱 심각한 사실은 갈수록 잦아지는 기상이변으로 인해 자연재해로부터 야기되는 피해는 갈수록 크게 늘어나고 있다는 점이다.

Cat-Bond의 시장규모를 볼 때 1999년 세계 시장규모는 11억 달러이고, 2004년에는 150억 달러로 그 규모가 커질 것으로 전망된다. 국내 시장의 경우는 6천1백억원~1조2천억원에 이르는 국내의 잠재적 자연재해보험 시장을 감안하면 시장규모가 약 천억원에 이를 것으로 전망되고 있다. Cat-Bond의 기본모형은 아래와 같다.



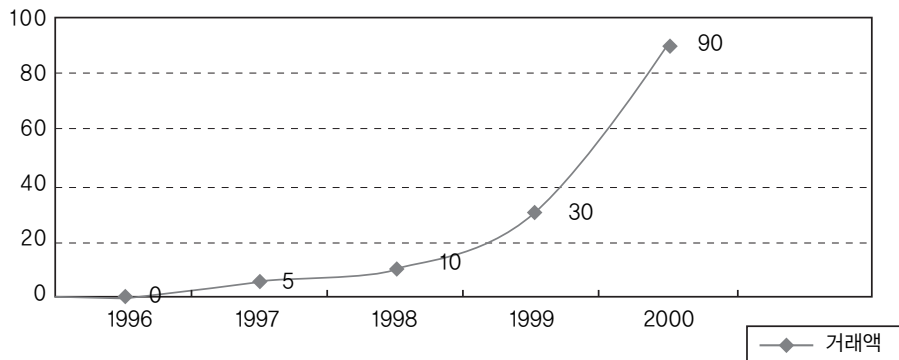
(재보험사,브로커사,투자은행 등이 설립)

[그림 1] Cat-Bond의 기본모형

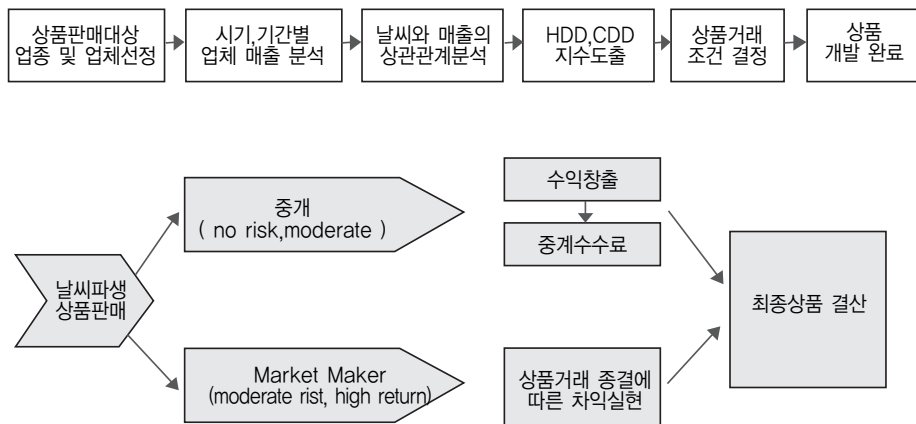


넷째, 날씨파생상품으로서, 특정지역의 기온이나 폭우, 풍속, 강설량, 일조 시간 등과 같이 객관적으로 관측 가능한 기후 요소를 바탕으로 날씨로부터 위험을 헤지할 수 있도록 개발된 일종의 금융 상품이다. 현재 날씨 파생 상품은 대부분 단일

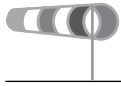
지역의 기후 지수를 기반으로 해 만들어진 콜 옵션과 풋 옵션 그리고 스왑의 형태로 거래가 이루어지고 있다. 지난 '97년 첫 선을 보인 미국에서는 2000년 시장 규모가 80억 달러에 이를 정도로 가장 급성장하는 파생상품 분야로 손꼽히고 있다.



[그림 2] 세계날씨 파생금융상품 시장 규모 (단위 : 1억 달러)



[그림 3] 날씨파생상품 프로세스



4. 향후의 정책 방향

그간 영세성을 벗어나지 못한 기상산업을 핵심적인 지식집약 산업으로 육성하려면, 어떠한 정책 방향이 필요할 것인가의 문제는 그리 쉽게 접근할 수 있는 사안은 아니라 보아진다. 기업의 비즈니스는 철저히 비즈니스의 원칙과 방법으로 이루어져야 하기 때문이다. 그럼에도 정부가 간접적으로 도울 정책방향성으로 몇 가지를 논하여 볼 수 있다.

첫째, 산업 및 생활기상 공급 강화와 기상정보 산업의 육성이다.

산업기상정보의 활용은 국민생활의 향상과 고도경제성장이 예견되는 미래사회에서 그 중요성이 더욱 커질 것이며, 잘 가공된 산업기상정보는 경쟁력의 중요한 요소이자 기술경제의 새로운 패러다임이 되고 있다. 고도의 지식정보사회에서 기술과 아이디어는 바로 상품이며, 곧바로 서비스에 적용됨으로써 차별적 부가 가치를 창출하게 된다. 이에 부응하여 앞으로의 산업기상정보는 현재의 '분석형'에서 '예측형' 서비스로의 전환이 요구되며, 기상청에서도 이러한 변화에 산파적인 역할을 담당해 나가야 할 것으로 판단된다.

둘째, 기상기술 활용문화 확산과 국가기상자료 관리의 효율화이다.

기상정보가 활용되면, 경제적 사회적 이득이 확대된다는 인식과 문화가 확산되도록 정책적 뒷받침이 있어야 하며, 이러한 것을 돕는 인프라로서의 국가기상자료 관리의 효율화도 요청된다. 현재 정부 및 공공기관 등에서 개별적으로 관리하고 있는

각종 기상자료를 종합 관리할 수 있도록 국가기상자료센터를 구축하여 기상자료의 체계적인 관리가 요청된다고 볼 수 있다.

셋째, 기상정보 서비스체계 다변화에 대한 대응이다.

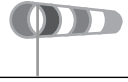
FM부가방송, DMB, PDA 등 새로운 미디어를 활용한 기상 정보 전파체계 구축, 언제 어디서나 쉽고 빠르게 접근할 수 있는 초고속 인터넷 구축 및 홈페이지의 콘텐츠 다양화는 기상청이 할 수 있는 공급적 측면 뿐 아니라, 민간부문이 담당하는 기상정보 공급네트워크가 활성화되어야 한다. 기상사업자를 통한 생활·보건·교통 등 분야별 맞춤형 기상정보의 상용화를 적극 촉진시킬 필요성이 있으며, 이 분야는 민관 협력을 근간으로 이루어지는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

넷째, 민관 역할 분담의 틀이 마련되어야 한다.

지난 1997년도에 도입한 기상사업제도는 시행 초기 IMF 경제위기로 산업체의 구조조정 등 사회·경제적 변화가 기상사업 활성화에 부정적 영향을 주었다. 그러나 1999년이후 지금까지 대략 9개 내외의 업체들이 진출하여 수요 창출과 함께 그 활성화에 주력하고 있다. 민간 업계와 기상청간의 상생적 환경이 여하히 이루어지는가가 민간 기상산업계의 육성에 핵심적 영향을 줄 것으로 보인다.

다섯째, 민간 기상산업이 육성될 수 있는 관련 지원체계의 정비가 요청된다.

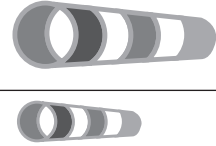
본고에서는 이상의 다섯가지의 정책 방향성을



제시해 보았는데, 기상산업 분야의 활성화가 경제 전반의 고도화에 가시적이고도 공감대 있는 기여를 해줄 것을 기대해 보는 바이다.

[주]

- 1) 본고에서는 지면 관계상 정보 산업에 초점을 두어 장비제조업 등의 분야의 논의는 제외하고 논의를 진행하였습.



최적 일사 관측망 구축방안

이 규 태

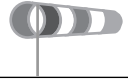
강릉대학교 대기환경과학과 교수
kilee@kangnung.ac.kr

1. 서론

태양 복사는 지구대기를 움직이는 1차적 원천 에너지일 뿐만 아니라 지구상의 모든 생명들의 에너지원이 되며 태양 복사의 공간 분포 자료는 복사 분야뿐만 아니라 기후와 위성 분야 및 관련 연구의 기초 자료로 사용된다. 또한 이들 자료는 수문학 분야에서 육지와 바다의 증발량 및 강수량 추정을 위하여 사용되고 환경, 생물, 의학, 생태계, 농수산업, 에너지, 건축 등의 연구 및 산업 활동 등에도 매우 중요하게 활용된다. 특히 일사는 농업 생태계에서 농작물의 재배 기간 및 분포와 관련하여 매우 중요한 요소이기 때문에 농업 분야에서는 일사량 자료에 근거한 연구가 국내외적으로 많이 진행되어져 왔다. 이러한 연구의 일환으로써 WCRP(World Climate Research Programme)

는 전 지구적으로 약 40개의 관측소(BSRN, Baseline Surface Radiation Network)를 구성하여 집중 관측 업무를 수행하고 있다. 이곳에서 생산되는 자료들은 기후 및 위성 자료 분석에 활용되고 있으며 또한 복사 모형을 위한 초기 자료와 일사계 검정 등에 이용되고 있다(Ohmura A. et al, 1998)

최근의 기후변화 관련 논쟁들은 여러 기구를 통하여 진행되고 있으며 그 중에서 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007년 보고서에 근거하면 자연적 요인이 0.12 W/m^2 의 태양 복사속 변화(복사강제력; Radiative Forcing)를 가져오는 것과 비교하여 인위적인 요인은 태양 복사속을 1.6 W/m^2 까지 변화시킬 수 있음을 밝혔다. 그리고 후자의 인위적



요인 중에서 이산화탄소, 대류권 오존, 메탄, 이산화질소, 할로겐화 탄소 등은 양의 강제력으로 작용하고 지표면 알베도와 에어로졸은 음의 강제력으로 작용될 수 있음을 설명하였다.

그러나 대기 성분들의 복잡한 시·공간적 변화 때문에 지표면과 대기 공간에서 태양 복사의 정확한 계산 및 예측은 쉽지 않다. 즉 태양복사는 대기 중에서 기체 분자와 에어로졸 및 구름 등의 대기 성분 분포와 파장에 따라 흡수 및 산란 정도가 크게 다르기 때문에 지표면에 도달하는 파장별 태양 복사는 매우 복잡한 형태로 나타난다. 따라서 태양 복사의 지표면 관측(일사 관측)은 장비의 설치 운영 및 자료 분석까지 세심한 주의와 전문적 지식이 요구되고 정확한 관측 자료를 생산하여 관계기관 등에 제공하는 것은 기상청의 중요한 임무 중 하나이다. 이러한 임무를 위하여 기상청은 1969년 수원과 진주에서 최초의 일사 관측을 수행하였고 현재에는 22개 관측소로 구성된 전국 일사 관측망을 통하여 전천 일사 관측 업무를 수행하고 있다. 그러나 그동안 일사 관측 시스템 개발에 관한 체계적인 진척이 없었기 때문에 일사 관측망의 운영 및 자료 관리는 만족스럽지 못한 실정이다.

2. 일사 변화 개요

지표면에 도달하는 태양 복사는 물리적 과정에 따라 직달 일사와 산란 일사로 구분되고 이들의 합은 전천 일사로 정의된다. 직달과 전천 일사는 태양 고도에 따라 크게 변화하기 때문에 여름철에는 겨울철 보다 그리고 저위도 지역은 고위도 지역보다 일사가 강하다. 그리고 대기 중의 구름과 에어

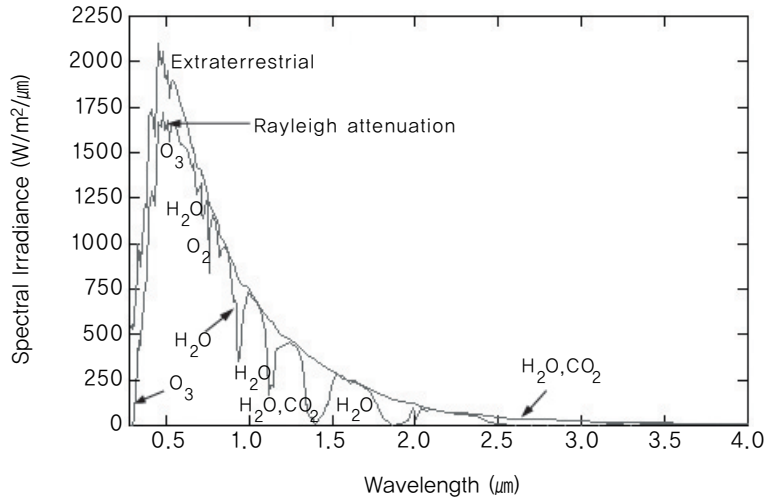
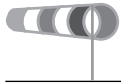
로졸은 산란 일사 변화의 가장 큰 요소이고 특히 지역적인 구름 분포 특성은 그 지역의 일사 분포를 좌우한다.

결과적으로 지표면에 도달하는 태양 복사 변화 요소는 천문 지리적인 요소와 대기 중의 태양 복사 감쇠 성분 분포에 따라 변화된다. 천문 지리적인 요소로는 계절에 따른 태양과 지구사이의 거리, 시간과 위·경도에 따른 태양의 천장각, 관측 지점의 고도 및 지표면 알베도 등이며 대기 중의 감쇠 성분들은 흡수 기체량(오존, 수증기, 이산화탄소)과 구름 및 에어로졸 등이다.

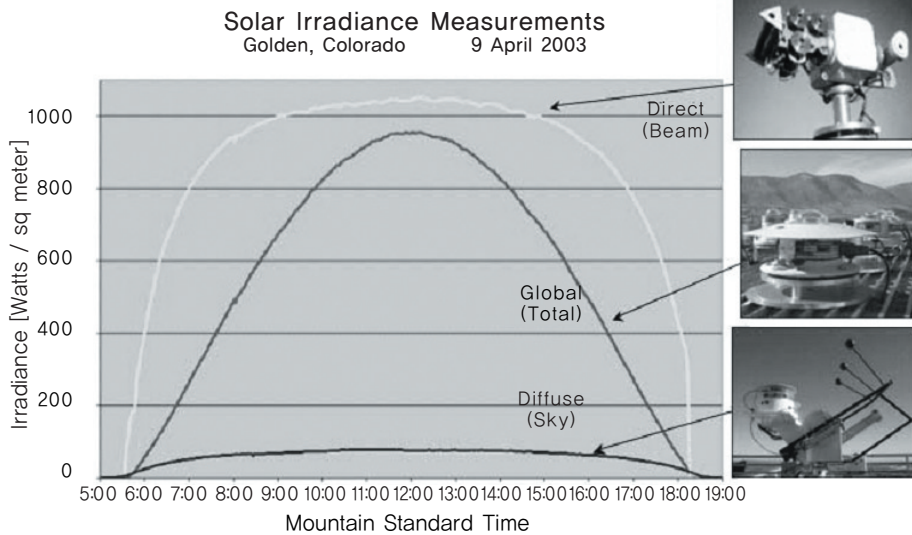
가. 지표면에서 파장별 태양 복사 및 관측값 변화

구름과 에어로졸이 없는 맑은 대기의 경우 지표면에 도달하는 파장별 태양 복사의 예를 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서와 같이 성층권에 다량 분포되어 있는 오존은 0.4 이하의 자외선 파장 영역과 가시광선 영역의 일부를 흡수하고 수증기와 이산화탄소는 0.75 이상의 적외 복사 파장 영역에 대한 주요 흡수 기체이다.

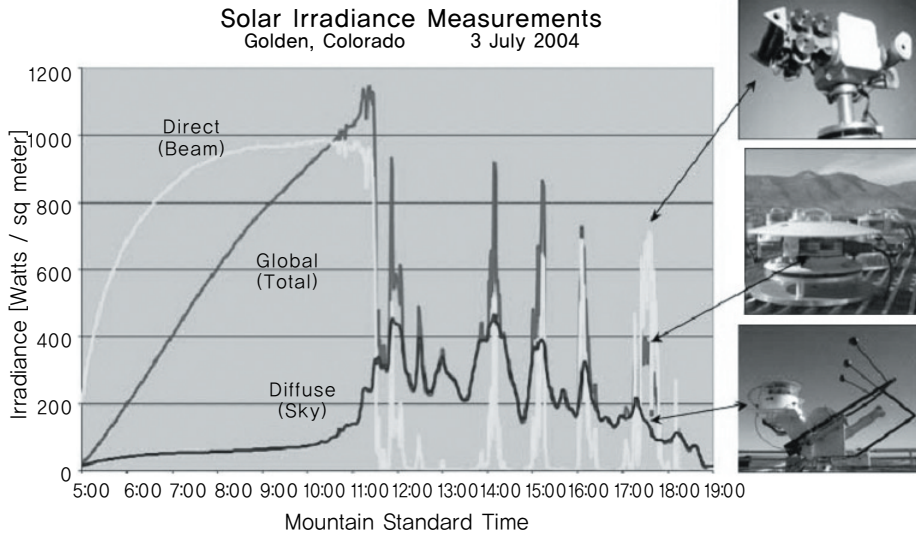
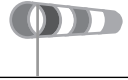
구름 없이 맑은 날 직달과 산란 및 전천 일사 관측 자료의 시간 변화 예는 그림 2에 나타내었다. 전천 일사는 수평면에 도달하는 직달 일사와 산란 일사의 합으로서 태양이 남중에 있을 경우 일 최대값을 나타내나 적도 부근의 특별한 위도 지역을 제외한 직달 일사는 전천 일사계에 수직으로 입사하지 않는다. 그러나 직달 일사는 태양의 이동에 따라 항상 태양과 수직 방향으로 관측되기 때문에 전천 일사 보다 큰 값이 관측된다. 그리고 산란 일사는 차폐판을 이용하여 전천 일사계에 입사되는 직달



[그림 1] 맑은 날 지표면에 도달하는 파장별 태양 복사



[그림 2] 맑은 날의 경우 직달과 산란 및 전천 일사의 시간 변화



[그림 3] 구름 낀 경우 직달과 산란 및 전천 일사의 시간 변화

일사 성분을 차단하여 관측된 값으로써 차폐판 모양에 따라 관측값은 다소 차이가 발생된다.

그림 3은 오후 시간 동안 구름이 낀 경우로서 맑은 날의 경우와는 매우 다른 분포를 보인다. 즉 구름에 의한 태양 복사의 흡수 및 산란 효과 때문에 전천 일사와 직달 일사는 감소되나 반대로 산란 일사는 증가하며 이들 일사량의 상대적인 크기는 구름 광학두께에 따라 변화된다.

3. 국내외 일사 관측 현황

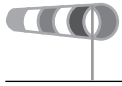
가. 국외

국외의 일사 장비들 중에서 기상 및 기후 분야 활용을 위한 전천 일사계로서는 대부분 Kipp & Zonen사의 CM21, 11(최근에 CMP 21, 11 등으로 명칭 변경)등과 Eppley사의 PSP가 가장 많이 사

용되고 있다. 미국은 자국에서 생산되는 Eppley사의 전천 일사계(PSP)와 직달 일사계(NIP)가 많이 사용되고 있으나 최근에 설치되는 장소에는 Kipp & Zonen사의 CM 장비들도 많이 설치되고 있다. 호주 기상청은 지표면 전천 일사 관측을 위하여 Kipp & Zonen사의 CM 11이 많이 사용되고 있으며 일본은 EKO 장비가 주로 설치되어 있다. 일사 관측 장비는 설치와 자료 생산뿐만 아니라 관리 및 운영 과정이 중요하며 다음은 기상 선진국들의 현황을 요약한 것이다.

1) 세계복사자료센터(World Radiation Data Center)

세계복사자료센터는 전 세계 약 1,200개 관측소의 일사 자료를 수집 및 관리하는데 현재 러시아에 위치하고 있다. 자료의 종류로서 전천과 산란 및



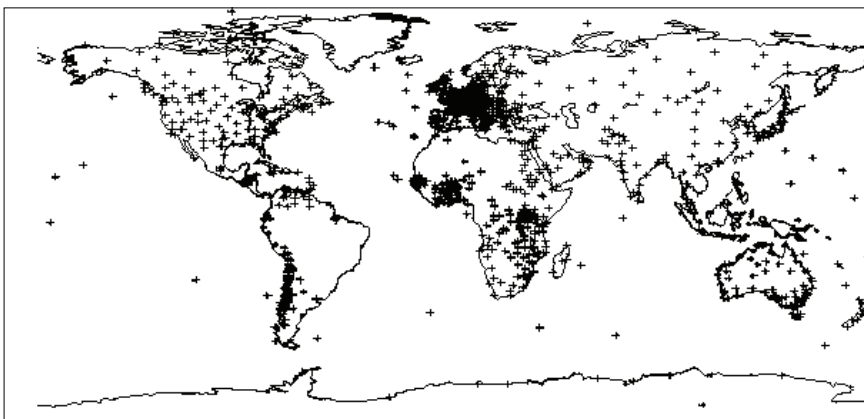
직달 일사 그리고 지표 반사율 자료를 수집한다. 그 외에 지구 및 대기에 의한 지구 복사와 일조량 및 순 복사와 스펙트럼 복사 성분들도 수집하고 있다. 이들이 수집하는 자료들의 관측소 위치는 그림 4와 같다. 우리나라는 서울, 부산, 광주, 목포의 4개 관측소가 포함되어 있고 미국은 65, 호주 75, 캐나다 61, 프랑스 131, 독일 42, 영국 32, 일본 18 등이 포함된다.

2) 미국

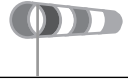
미국의 일사 관측은 재생에너지의 측면에서 많은 연구가 수행되고 있으며 국가 재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory, 이하 NREL)의 태양 복사 연구소(Solar Radiation Research Laboratory, 이하 SRRL)는 1978년부터 재생에너지 변환 기술과 기후 변화 연구를 위한 최고의 자료 생산 및 현장 연구 시설 제공을 목적으로 다음과 같은 활동을 수행 하고 있다.

- 복사계 검정 기술의 개발

- 콜로라도에 대한 태양 에너지 데이터베이스 개발
- 재생 에너지원의 관측을 위한 새로운 기기들의 특성화
- 태양 관측망의 설계, 운영, 유지 방법 교육
- NREL 연구를 위해 필요한 모든 관측과 시험 장비들에 대한 검정을 위한 기상 관측 수행
- 국제 기준과 맞출 수 있도록 복사계 검정과 특징 부여
- 태양 복사와 지표면 기상 요소의 관측에 대한 연속적인 품질 관리
- 기후 변화 연구를 위해 복사계를 필요로 하는 DOE의 ARM 프로그램 지원
- 표준 램프와 스펙트럼 복사계를 이용하여 복사량 관측을 위한 시험실 운영
- 지표 기상 상태를 관측하기 위한 종합 관측 시스템(70개 관측기기)운영
- 절대 공동 복사계 매년 비교 실험 수행
- 야외 현장 복사계 검정 수행



[그림 4] 세계 복사 자료 센터 관측망



미국이 1995년에 발표한 NSRDB(National Solar Radiation Database)는 239개소 관측소 자료 품질과 연속성 및 관측 환경에 따라 primary 관측소(56개)와 secondary 관측소(183개)로 구분하였다. 그리고 2007년에는 1991~2005년의 기간에 대해 1,454개 지점의 관측 자료를 Class I 관측소(221개)와 Class II 관측소(637개) 그리고 Class III 관측소(596개)로 분류했다. Class I 관측소는 모든 기간 동안 연속적으로 일사 관측을 수행하였고 일사 관측 자료의 정확성이 높을 뿐만 아니라 태양 복사 모형의 입력 자료로 사용되는 자료들을 관측하는 지점들이다. Class II 관측소는 Class I에 비교하여 자료들의 정확성이 다소 낮은 관측소이며 Class III는 자료의 연속성이 유지되지 않는 관측소들이다.

그리고 국내외에서 집중 관측 프로그램을 운영하고 있으며 그 대표적인 예로서 에너지성이 주관하는 ARM(Atmospheric Radiation Measurement) 프로그램, NOAA의 ISIS(Integrated Surface Irradiance Study)와 SURFRAD (Surface Radiation Budget Network) 등이 있다.

3) 영국

영국은 1908년에 Kew 천문대에서 최초의 직달 일사 관측을 하였다. 이후 1946년에 전천과 산란 일사 관측을 시작하였고 현재는 40개 지점에 전천 일사계를 설치하여 운영하고 있다. 이 관측소들 중에서 3개 지점은 태양 및 지구 복사를 관측을 위하여 여러 장비를 운영하고 있으며 이곳에서는 높은

품질의 자료가 생산된다. 그리고 20개 지점은 기후 복사 관측망으로 운영되어지고 이들 관측소 자료는 세계복사센터에 송부된다. 또한 이들 관측소는 종관 일사 관측망으로 운영되어 지기 때문에 다양한 시간별 기상 자료를 함께 공급 받을 수 있고 또한 이들 자료는 수치 예보 시스템의 초기 자료로 활용되고 있다.

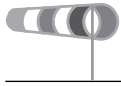
4) 호주

호주 기상청은 2004년 현재 22개 관측소에서 일사 관측을 수행하고 있다. 그 중 16개 관측소는 전천과 산란 일사를 동시 관측하고 6개 관측소는 전천 일사만 관측한다. 이들 관측 자료는 위성 및 모델 결과와 결합되어 실시간으로 일 누적 일사량을 웹에 표출하고 있다. 그리고 ASRDB(Australian Solar Radiation Data Handbook)을 통하여 일부 관측소 자료를 제공하고 있다.

5) 일본

일본 기상청은 현재 1,300개의 지상 관측소를 운영(전국 약 17 km 격자망) 중이고 이중에 약 100여개의 관측소가 유인 관측소로 운영 중이다. 이들 유인 관측소 중 66개 지점이 전천 일사를 관측하고 있으며 또한 기후 관측을 위하여 14개 관측소에서 직달 일사를 관측하고 있다. 그리고 일본은 PMO-6 절대 복사계를 이용하여 3년에 한번 정도 청정 지역인 스와 관측소에서 겨울철에 관측망 일사계들의 검정을 실시한다.

나. 국내



1) 관측소 및 관측망

현재 기상청에서는 그림 5와 같이 전국의 22개의 관측소에서 전천 일사계를 설치하여 일사 관측을 수행하고 있으며 직달 일사 관측은 수행하지 않고 있다. 그리고 한국에너지연구원은 이들 기상 관측소 중에서 15곳과 영주에서 전천 및 직달 일사 관측을 병행하고 있다. 그리고 농촌진흥청과 한국수자원공사 및 환경부 등에 의한 전천 일사 관측 지점을 모두 포함하면 전국적으로 약 200지점에서 일사 관측이 수행되고 있다.

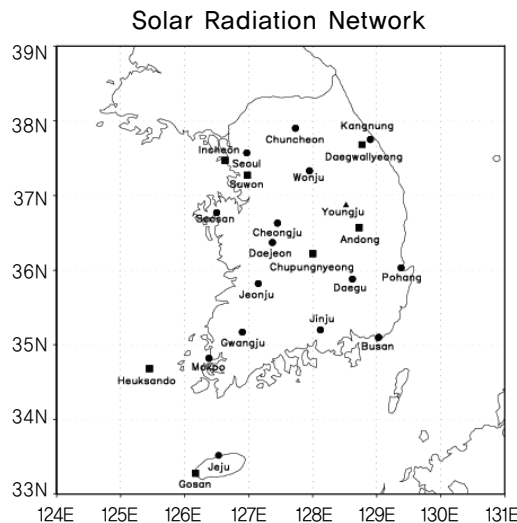
전 세계적으로 일사 관측망 구성에 대한 특별한 규정은 없으나 미국 재생에너지 연구소(NREL)는 최소한 100 km 간격 이내의 일사 관측망 구축을 추천하고 영국과 유럽 및 일본의 관측망들도 대부분 100 km 이내로 배치되어있으며 우리나라 기상청의 22개 일사 관측소들의 간격도 이 범위를 벗어

나지 않는다.

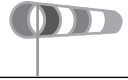
2) 관측망의 일사계

현재 기상청 일사 관측소에 설치된 전천 일사계들은 표 1과 같이 16개 관측소에는 네덜란드 Kipp & Zonen사의 CM 21 제품이 설치되어 있고 5개의 관측소(청주, 전주, 안동, 대구, 진주)는 마찬가지로 Kipp & Zonen사 CM 6b가 설치 운영되고 있으며 흑산도 관측소는 국내 유일의 YANKEE ENVIRONMENTAL SYSTEM사의 TSP-700 제품이 설치되어 있다. 이 밖에 기상청은 농업 분야 지원을 위하여 Kipp & Zonen사의 CM 3(전천 일사계)와 CGR 3(지구 복사계)를 전국 8개소(철원, 춘천, 수원, 청주, 안동, 전주, 진주, 순천)에 설치하여 순 복사를 관측하고 있다.

그리고 기상청에는 우리나라의 기준 전천 일사



[그림 5] 기상청의 일사 관측망(단, ●는 기상청 단독관측소이고, ■는 기상청과 에너지기술연구소 공동관측소, 그리고 ▲는 에너지 연구소 단독 관측소)



〈표 1〉 기상청 일사 관측망의 일사계 종류 및 관측 개시일

일사 관측소		모델	관측 개시일	일사 관측소		모델	관측 개시일
서울		CM 21	2003. 10. 01	광주	광주	CM 21	2002. 11. 01
부 산	부산	CM 21	2003. 03. 15		흑산도	TSP-700	1999. 10. 01
	대구	CM 6b	1998. 12. 10		전주	CM 6b	1998. 12. 01
	안동	CM 6b	1998. 12. 01		목포	CM 21	2007. 02. 01
	진주	CM 6b	1998. 12. 10		대전	CM 21	2006. 01. 01
	포항	CM 21	2007. 01. 22	청주	CM 6b	1999. 09. 13	
제 주	제주	CM 21	2004.08. 01	대 전	추풍령	CM 21	2000. 01. 01
	고산	CM 21	2007.03. 01		인천	CM 21	2005. 10. 20
강 원	강릉	CM 21	2005.01. 01		수원	CM 21	2007. 01. 17
	대관령	CM 21	2006. 11. 07		서산	CM 21	2005. 10. 20
	춘천	CM 21	2007. 01. 17				
	원주	CM 21	2004. 08. 24				

〈표 2〉 기상청 운영 전천 일사계 등급 및 관측 파장 영역

특성	CM22	CM21	CM6b	MS-802	TSP-700
ISO 9060 등급	부기준	부기준	일등급	부기준	부기준
스펙트럼 범위(nm)	200-3600	305-2800	305-2800	305-2800	300-3000

제로서 CM 21을 보유하고 있으며 지방 기상청에는 소속 기상대의 전천 일사계 검정을 위한 장비를 보유하고 있다. 그 장비로서 부산 지방 기상청에는 Kipp & Zonen사의 CM 21이고 대전과 강원 지방 기상청은 CM 22 그리고 광주 지방 기상청은 EKO사의 MS-802를 각각 보유하고 있다.

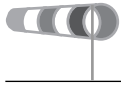
표 2는 22개 기상 관측소에서 운영 중인 전천 일사계들의 등급을 나타낸 것이다. 이 표에서 주 기준은 WRC(세계복사센터)가 보유하고 있는 약 15개의 직달 일사 장비들을 의미하고 부기준은 주 기준 기기들과 비교하여 관측 자료의 정확성이 손색 없는 기기들이며 일등급 및 이등급 기기들은 부 기준 기기들 보다 정확성 등이 다소 떨어지는 기기들

이다. WMO는 기상학적 목적으로 일사 관측망을 구성할 경우 부기준의 기기를 추천하고 있으며 수문학 등의 목적을 위해서는 일등급과 이등급도 사용 가능함을 제시하였고 우리나라 일사 관측망의 22개 전천 일사계들은 대부분 WMO의 권고 사항을 만족하고 있다.

3) 관측망 운영

전국 22개 관측소로 구성된 기상청 일사 관측망의 운영 현황은 일사계 설치와 보정 그리고 자료 생산 및 관리로 분류하여 다음과 같이 분석될 수 있다.

- 일사계 설치 : 22개 전국 기상 관측소들 대부



분은 일사 관측 장소로 분석된다. 기상 관측소 주변의 개발로 인하여 주변의 건물들과 일부 관측소의 계절 관측용 수목 등은 태양 복사 경로의 장애물이 되고 있다. 이러한 장애물을 피하기 위하여 관측소 건물 옥상에 설치된 일사계들은 주변의 ASOS 관측 탑과 위성 수신 장비 등이 태양 복사의 경로를 방해하고 있으며 옥상의 시멘트 바닥에 의한 지열 차단 조치가 충분히 되어있지 않다.

일사계 센서는 연중 수평 변화가 적고 관측자의 점검이 용이한 설치대 위에 설치되어야 한다. 그러나 현재 22개 관측소의 일사계들은 대부분은 ASOS 탑 위 또는 T자형 쇠파이프에 설치되어 있기 때문에 바람과 기온에 따라 수평이 변화할 수 있고 관측자의 점검이 용이하지 못한 상태이다. 그리고 기록기(recorder)를 다른 ASOS 장비와 공동으로 사용하는 경우가 많다. 이 경우 다른 기상 요소 관측 장비에 의한 유도전류 때문에 일사 관측 자료의 정확성이 결여될 수 있다.

• **일사계 점검 및 보정** : 일사계는 항상 대기 중에 노출되어 있고 대기 조건에 따라 기기 센서는 일사 관측에 적절하지 않은 상태로 놓여 있을 수 있기 때문에 빈번한 점검이 요구된다. 그러나 전국의 22개 기상 관측소에 설치되어 있는 일사계는 이러한 점검 및 관리 상태가 양호하지 못한 실정이다.

그리고 지방 기상청 소유의 기준 일사계는 국가 기준기 값으로 조정하여 소속 일사 관측망의 일사계 반응도를 조절하도록 되어 있는데도나 이 과정이 적절하게 시행하는 것이 필요하다. 즉 각 지방 기상청의 기준기와 관측망 일사계는 국가 기준기 값과 눈에 띄는 오차가 발생해서는 안 되고 약간의

오차가 발생될 경우 이 오차를 체계적으로 분석하여 일사 관측 자료를 기준기 값으로 보정할 수 있어야 한다.

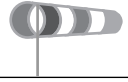
• **일사 관측 자료 생산 및 관리** : 일사계 보정과 관리 및 운영을 적절하게 수행하여도 일사계는 대기 중에 항상 노출되어 있고 기기 반응도 변화는 끊임없이 발생되기 때문에 이미 생산된 자료일지라도 완전할 수 없다. 따라서 생산된 자료를 적절하게 보정하여 저장하는 일은 일사계 관리와 보정 못지않게 중요하다. 그 방법으로서 비교 관측과 직달 일사계 이용 방법 및 복사 모형을 이용하는 방법 등이 있다. 이러한 방법들이 기상 선진국에서 사용되고 있으나 우리나라에서도 이를 적극적으로 활용하는 것이 필요하다.

4. 기상청 국내 일사 관측망 구축을 위한 제언

가. 일사 관측망

• **환경개선** : 현재 기상청의 일사 관측망은 기상 선진국(100 km의 관측소 거리 간격)과 비교하여 관측소 거리 간격은 양호하나 우리나라는 산악지역이 많고 기상 변화가 심하기 때문에 더 조밀하게 관측소를 배치할 수도 있다. 그러나 일사 장비는 설치보다 관리 및 운영이 더 중요하고 기상청에 일사 전문가가 많지 않은 현실에서 조밀하게 일사 관측망을 구성할 경우 부담이 될 수 있다. 따라서 단기적인 대안으로써 관측소 증가 보다는 현재의 관측소 환경을 개선하여 양질의 관측 자료 생산이 더 시급할 것으로 판단된다.

즉 현재 일사계를 설치한 관측소들은 대부분 도



시의 중심부를 크게 벗어나지 못한 곳에 위치하기 때문에 주변 건물 등에 의하여 태양 복사가 차단 및 반사되어 정확한 일사 관측자료 생산에 어려움을 겪고 있다. 이러한 환경 극복을 위하여 일사계를 관측소 건물 옥상 또는 ASOS 관측탑 위에 설치하는 경우가 발생하나 관측 환경 개선에 큰 도움이 되지 못하고 있다. 따라서 이러한 환경을 정밀 조사하여 일사 관측소를 재선정하거나 또는 일사계 설치 장소 이동을 통하여 관측망을 조정할 필요가 있다.

나. 일사계 선정 및 설치

• **일사 관측 업무** : 일사 관측은 직달과 전천 및 산란 일사 관측으로 분리되나 현재 기상청은 전천 일사 자료만 생산하고 있다. 직달 일사와 산란 일사 관측은 전천 일사계를 보정하기 위한 수단일 수 있고 특히 직달 일사계는 필터를 이용하여 다양한 파장 영역의 일사를 관측할 수 있기 때문에 기상학적으로 매우 중요한 장비이다. 따라서 전천 일사뿐만 아니라 직달과 산란 일사 관측을 업무에 포함 시키는 것이 바람직하나 직달 및 산란 일사계 운영을 위해서는 세심한 배려가 필요하기 때문에 관측소 선정과 배치를 신중하게 검토하여야 할 것이다.

그리고 일사 관측 자료에는 태양 복사 이외에 대기 성분들이 방출하는 적외 복사 에너지(700nm 이상)가 포함되어 있기 때문에 이 적외 복사 에너지 분석을 위하여 관측망의 일부 관측소에 적외 복사계를 설치할 필요가 있다.

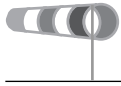
• **일사 장비의 동일화** : 현재 22개 일사 관측소에 설치된 전천 일사계는 표 1과 같이 동일한 장비

가 아니다. 장비의 종류가 다를 경우 일사계의 관측 파장 영역 및 센서의 반응도 차이에 따른 관측 값이 1%이상 발생될 수 있고 이 경우 관측망의 자료에 근거한 한반도 비정상적 일사 분포가 예상되므로 동일한 장비를 선정 및 설치하여야 할 것이다.

• **일사 장비 설치** : 일사계는 센서와 자료 저장 장치 및 연결 케이블로 구성된다. 그 중에서 센서는 외부의 충격으로부터 보호되고 특별히 강한 바람과 강한 태양 에너지 등의 기상 환경에서도 수평 위치가 변동되지 않도록 충분히 견고한 것을 사용하여야 하며 관리인의 손길이 쉽게 미칠 수 있는 장소에 설치하여야 한다. 그러나 현재는 대부분 T자 형태의 쇠 파이프 끝에 설치되어 있으므로 시정이 요구된다. 그리고 자료 저장 장치는 수시로 보정되어야 하는 대상이고 다른 기상요소 저장 장치의 영향을 받을 수 있으므로 독립적으로 설치되어야 한다. 또한 일사계와 자료 저장 장치 연결 케이블은 평범한 지면위에 매우 낮은 저항으로 연결되어 있기 때문에 반드시 피막(shielded) 케이블 사용이 필요하다.

다. 일사계 보정 및 관리

일사계 보정은 양질의 일사 자료 생산을 위하여 가장 중요한 일이고 이 과정은 반드시 전문가에 의해서 수행되어야 할 것이다. 관측망의 일사 관측 자료들은 상대적인 비교가 중요하기 때문에 관측망의 일사계 보정은 국가 기준기부터 일사 관측소의 현업 일사계까지 체계적으로 수행되어야 한다. 따라서 이 일사계 보정 업무를 다원화 할 경우 생산된 자료의 품질 저하가 우려되기 때문에 일사계



보정은 중앙 부서의 전문가에 의해 수행되어야 하며 그 결과를 기록부에 저장해야 할 것이다. 또한 보정된 일사계의 관리 상태를 매일 기록하는 것이 바람직하다.

- **국가 기준기 보정** : 일사 관측은 기기의 종류와 방법에 따라 관측값이 다를 수 있고 관측값들의 상대적 비교가 중요하기 때문에 서로 다른 기기들을 비교 관측 하여 보정하는 과정을 일사계 검정 또는 보정이라 한다. 즉 전 세계의 일사계들은 세계 표준기인 WRC(World Radiation Center, 스위스)의 값에 따라 보정하여야 하고 우리나라 국가 기준기는 매 5년마다 지역 기준기인 일본 기준기와 비교 및 보정한다. 그리고 보정을 마친 우리나라 기준기의 주 임무는 5년 동안 국내의 다른 일사계들을 보정하는 것이며 이 기간 동안 기준기 센서의 반응도 변화가 일어나지 않도록 관리해야 한다.

매 5년마다 세계 각국의 기준기들을 검정 및 보정하기 위한 WRC 프로그램에는 모든 국가 기준기들이 이 프로그램에 참여할 수 있다. 일본도 이 프로그램에 참여하여 그들의 기준기를 보정하는 것이고 차후는 우리나라도 WRC 프로그램에 직접 참여하여 국가 기준기를 보정하는 것이 기준기의 정확한 보정뿐만 아니라 선진 보정 기술 습득에 유리할 것으로 판단된다.

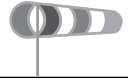
- **관측망 일사계 보정** : 정확한 일사 자료 생산을 위하여 일사 관측소의 현업용 일사계 보정은 매우 중요하다. 현재 기상청은 관측소 전천 일사계 보정을 위하여 국가 기준기를 이용하여 지방 기상청(대전, 부산, 광주, 강원)의 기준기를 보정하고 이들 지방 기상청의 기준기는 소속 일사 관측소 기기를 보정한다. 그러나 현행 기상청의 보정 방법은

정확성이 낮기 때문에 관측망 일사계들은 최적 상태에 있지 못하고 이 보정 작업은 중앙의 책임 관리 부서에서 WRC 규정 및 한국표준협회의 전천 일사계 보정 방법(2003년)에 근거하여 수행하여야 할 것이다.

라. 일사 자료 관리

- **자료 생산 및 저장** : 지표면에서 관측되는 일사 관측값은 구름 유무에 따라 크게 변화하기 때문에 1시간 누적 일사 관측 자료는 보통 구름이 있는 경우와 없는 경우를 모두 반영한다. 그러나 일사 자료 분석을 위하여 구름 없는 맑은 상태의 관측 자료가 빈번하게 요구되나 1시간 누적 자료에서 구름이 있을 경우와 없는 경우를 구별하는 것은 쉽지 않기 때문에 기상 선진국들은 초 또는 분 단위의 자료를 저장하고 있다. 우리나라의 경우 기상청의 일사 관측소들에서는 1분 단위로 전천 일사 평균값(W/m^2)과 1시간 누적 일사량(MJ/m^2) 자료를 생산하고 이들 중 1시간 자료는 기상청에 전달 및 저장되고 있다. 그러나 1분 자료는 각 일사 관측소에만 저장되고 있어 기상청 통합 관리가 바람직할 것이다.

- **자료 관리** : 일사 센서는 시간 경과에 따라 반응도가 변화하고 일사계 관리 상태가 양호하지 않을 경우 적절하지 못한 자료를 생산할 수 있기 때문에 관측 자료 검정 및 보정에 의한 품질 향상 과정이 중요하다. 따라서 전국 일사 관측소의 자료는 적절한 시간 간격으로 비교 관측하거나 복사 모형 등을 이용하여 수시로 점검 및 보정하여야 할 것이다. 이를 위하여 각종 품질 개선 프로그램 개발이 요구된다.



마. 일사 전문가 확보 및 책임 관리부서 선정

• **일사 전문가 확보** : 일사계 설치와 보정 그리고 자료 생산과 분석 등은 모두 전문가에 의해서 수행되어야 할 과정이고 양질의 일사 관측 자료 생산을 위해서는 다수의 전문가가 요구되나 현재는 만족스럽지 못한 상황이다. 또한 양질의 일사 자료가 되기 위한 조건으로서 자료의 연속성이 중요하나 기상청의 빈번한 보직 이동은 문제점으로 지적될 수 있다. 따라서 일사 관련 전문가를 다수 확보하여 관련부서에 장기 배치하는 방안이 강구되어야 할 것이다.

• **책임 관리부서 선정** : 일사 자료 생산과 관리 등은 규정과 원칙으로 확립할 수 있는 부분이 매우 제한적이므로 관리자 또는 관측자의 세심한 배려가 중요하다. 따라서 기상 선진국에서는 일사 관측 및 관리를 위한 전담 부서를 운영하고 있으며 이러한 부서는 일사계 보정 등을 위한 일사 관측 노장과 필수적인 장비들이 갖추어야 한다. 즉 양호한 일사 관측 노장을 선정하여 슈퍼사이트를 구성하고 일사 관련 모든 업무를 이곳에서 관할하는 것이 바람직하다. 이 경우 장소와 인력 및 장비 등에 관련된 세밀한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

현재 국내의 일사 관측은 기상청을 비롯하여 한국에너지기술연구원, 건설교통부, 농촌진흥청, 산림청, 한국수자원공사, 해양수산부, 행정자치부, 환경부, 대학 등에 의하여 약 200개 관측소에서 수

행되어지고 있으나 선진국에 비하여 체계적인 관리가 이루어지지 않는 실정이다. 이와 같이 다양한 기관에서 독립적으로 일사 관측이 시행되고 있는 이유는 기상청 일사 자료의 신뢰성이 낮고 자료 제공이 원활하지 못함을 반영하는 것이다. 따라서 기상청이 일사 관측망을 정비하고 양질의 자료를 생산하여 관계 기관 등에 제공해야 할 것이고 그 단계적 조치는 다음과 같이 요약할 수 있다.

가. 단기적 조치 사항 :

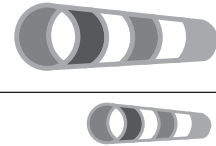
- 부적절한 일사 관측소 정비 및 관측 환경개선
- 관측소들의 일사계 단일화
- 일사계 설치와 보정 및 관리 개선
- 관측 자료 보정 및 저장 방법 개선

나. 중장기적 조치 사항 :

- 일사 관련 전문가 확보 및 양성
- 일사 관측 자료 관리 프로그램 개발
- 일사 관련 업무 수행을 전담할 수 있는 슈퍼 사이트 운영

- 참고문헌

기상청, 2007: 최적 일사관측망 구축·운영에 관한 연구-기상청 2007 연구용역보고서, pp.110.



국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의

김 백 조, 김 경 립

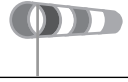
국립기상연구소 정책연구팀
bjkim@kma.go.kr

1. 배경

최근 기후변화로 인하여 기상이변이 빈번하게 발생하고 있고 기상재해로 인한 피해 규모가 점차 대형화되는 추세에 있다. 집중호우와 태풍에 관한 예를 살펴보면, 최근 10년 간(1997~2006년)의 집중호우 발생일 수가 과거(1977~1986년)에 비해 1.5배 증가하였고, 2002년 태풍 “루사(Rusa)”의 경우, 재산피해 규모는 국가 GDP대비 0.9%에 달하였다. 재해기상현상의 발생 특성과 관련된 기후 변화 문제는 국가 산업 및 경제 전반에 미치는 파급성이 매우 크기 때문에 국가적 차원의 대책마련이 필요하다. 특히, 주요 기상 선진국에서는 첨단 관측시스템과 지구시스템모델개발, 기후변화 예측 및 영향평가, 전략기상(군사·우주기상, 기상조절

등)에 대한 연구개발 투자를 아끼지 않고 있습니다. 이러한 환경여건에서 기상재해 대응 전략 개발과 기후변화 등 국가적 이슈에 대한 대기과학 분야의 역할 강화를 위하여 기상기술 혁신을 위한 중·장기 전략방향의 설정이 필요하다.

2006년 9월에 기상청이 차관급 기관으로 승격됨에 따라 미래 기상업무의 원동력이 될 수 있는 기상기술의 이정표가 필요하다는 인식이 폭넓게 대두되었다. 선진국 수준의 과학적 기상기술력 확보와 미래 핵심원천기술에 대한 경쟁력 강화를 위하여 기상 R&D 중·장기 추진전략 개발이 필요하다. 포괄적인 국내외 환경변화 및 기술수준 분석·조사를 통하여 전략분야, 핵심기술을 발굴하고, 이를 효과적으로 추진하기 위한 전략개발이 요구된다. 이를 위하여 자연재해저감에 연관성이 높



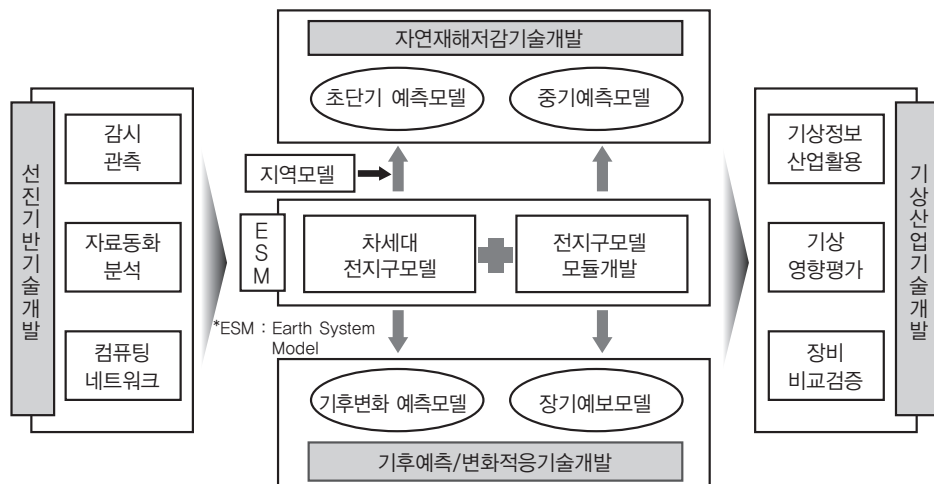
은 전략적 R&D 투자 우선순위 설정과 국가 R&D Total Roadmap 추진과 연계하여 핵심 원천기술 확보 전략 등이 반영되어 실행될 수 있는 국가기상 기술로드맵(Meteorological Technology Road Map, 이하 MTRM) 수립이 시급한 시점이었다.

2. 비전, 목표 그리고 전략

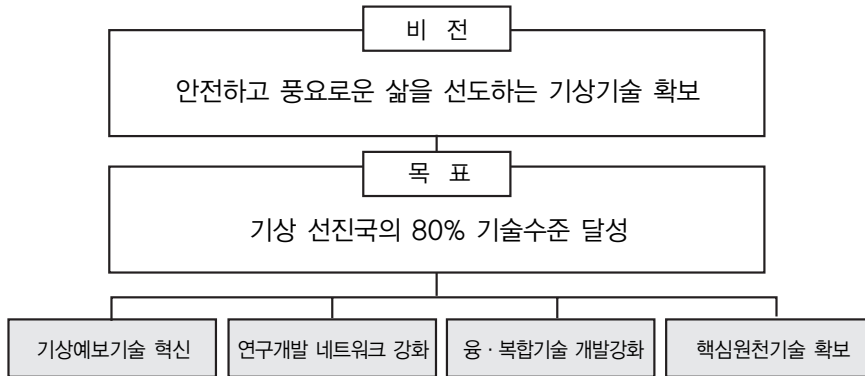
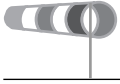
MTRM 전략분야는 자연재해저감, 기후변화 과학·적응/영향, 기상산업 그리고 선진 기상기반이다. 기상감시·관측, 자료동화, 컴퓨팅 네트워크 분야의 기반기술을 선진화하여 지구시스템모델 개발(차세대 전지구모델, 전지구모델 모듈)을 추진하여 초단기 및 중기예측 모델을 개선한다. 이를 통해 초단기 및 중기 예보정확도 향상을 위한 기술개발에 주력하여 선진국 수준의 기상기술을 달성하여 자연재해 저감에 이바지한다. 또한 선진화된

기후변화 예측모델과 장기예보모델을 개발하여 한반도 기후변화 시나리오 및 영향 평가 등 과학적 정보 생산과 상세 기후예측기법 개발을 통한 신뢰할 수 있는 장기예보자료를 생산한다. 이와 같은 정보와 자료는 국가 차원의 기후변화 적응·영향 및 취약성 분야의 대응책 마련에 활용된다. 게다가, 기상정보의 산업화를 통한 기상산업의 진흥과 기상경영·기상영향 평가의 사회적 적응 확대와 제도화를 통해 고급 응용기상 정보 개발 및 경제적 가치 증대를 추구할 것이다.

이와 같은 핵심 기술분야간의 연계성을 확보하여 MTRM 비전인 『안전하고 풍요로운 삶을 선도하는 기상기술 확보』을 달성하기 위하여 기상예보 기술 혁신, 연구개발 네트워크 강화, 융·복합기술 개발 강화, 그리고 핵심원천기술 확보를 추진전략으로 설정하였다. 이러한 전략을 기초로 현재 기상 선진국 대비 20~60%의 기술수준을 전략적 R&D



핵심 기술분야간의 연계도



국가기상기술로드맵 비전,목표 및 전략

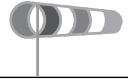
투자를 통하여 10년 후에는 80% 수준까지 도달하고자 한다.

중·장기적 핵심 기상기술 개발의 역량을 강화하고 분야별 특성화 기술을 확보하기 위한 MTRM 투자전략으로는 첫째, 기상예보 정확도 향상을 위한 기상재해저감 기술개발에 우선적 투자, 둘째, 범 정부적 기후변화 대응 체계 구축을 위한 기후변화 과학, 영향·적응 분야의 기술력 확보, 셋째, 기상기술의 국제 경쟁력을 제고할 수 있는 중점 기상기술 육성, 넷째, 미래 기상기술 수요에 적극적이고 능동적으로 대처할 수 있는 핵심원천 기상기술 개발을 설정하였다. 또한, 중·장기 추진전략은 단기적(2008~2011년)으로 과학적 예보역량 제고 및 기후변화 대응에 집중하고, 중장기적(2012~2017년)으로는 국민의 삶의 질 향상과 국가전략기상기술 분야를 중점적으로 육성할 것을 제시하고 있다.

3. 의의와 향후계획

MTRM을 통하여 자연재해저감, 기후변화 과학·적응/영향, 기상산업 그리고 선진 기상기반으로 4개 전략분야와 53개의 핵심기술을 발굴하였다. 특히 MTRM이 국가과학기술위원회 상정·의결(12.20)되어 장기적이고 체계적인 기상기술 개발 전략이 수립되어 중장기 기상 R&D 정책 개발을 위한 밑거름이 되었다고 볼 수 있다.

MTRM 수립을 통하여 먼저, 단·중기 예보정확도 향상으로 자연재해 저감에 필요한 기술혁신으로 국가 경쟁력을 제고시키고, 둘째, 국가의 지속가능 발전 및 기후변화 예측 기술 확보를 위한 선진국 수준의 지구시스템모델 개발 및 대응체계를 마련할 수 있을 것이다. 셋째, 국민경제 활동과 삶의 질 향상에 기여하는 고급 응용기상정보 기술 개발 및 기상경영 전략 기술 개발로 산업 경쟁력 강화와 국민의 삶의 질 향상을 선도할 것이다. 마지막으로, 기상선진국으로 도약을 위한 기술혁신 기반조성 및 인프라 구축과 핵심 원천기술 확보로 21세기 글로벌 기상강국이 될 것이다.



앞으로 국가기상기술로드맵(MTRM) 세부 시행 계획 수립 및 체계적 추진을 통하여 단계적으로 기상 R&D 역량 강화 및 기상기술력 제고에 이바지할 것으로 생각된다. 무엇보다 MTRM은 기상분야에 최초로 수립된 기상 R&D 분야의 종합적인 장기대책이라고 할 수 있으며, 향후 기후변화 대응전략 및 국가적 공동대응 체계 등 광범위하고 포괄적인

내용이 체계적으로 정리되어 있어 국민의 삶의 질을 한 단계 업그레이드 시킬 수 있는 중요한 계기가 될 것으로 평가된다. 또한, MTRM을 근간으로 21세기 대기과학의 새로운 블루오션 창출과 기상 기술 R&D 중장기 전략 수립을 위한 새로운 이정표가 될 것으로 기대된다.

A NEW GENERATION OF HEAT HEALTH WARNING SYSTEMS FOR SEOUL AND OTHER MAJOR KOREAN CITIES

Laurence S. Kalkstein
University of Miami Coral Gables, Florida USA
larryk@udel.edu

Scott C. Sheridan
Kent State University Kent, Ohio USA

Yang Ching Au (Nicole)
Housing and Development Board Singapore

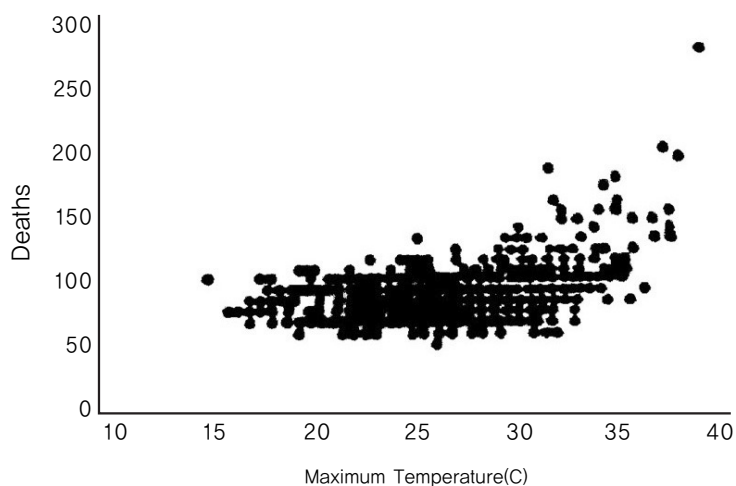
Heat is considered the deadliest of weather-related phenomena over much of the developed world. It has its most severe impact in mid-latitudes, where intense heat waves have killed thousands of people, such as the 2003 European heat event, which alone was responsible for over 35,000 deaths. The most vulnerable areas for heat-related problems are found in locales where heat waves occur at irregular intervals, and where summer climates are highly variable. Thus, cities like New York, Philadelphia, Paris, Rome, Shanghai, and Seoul have been impacted by large numbers of deaths during excessive heat events. These deaths are

often difficult to identify, unlike deaths from other natural disasters such as hurricanes and tornadoes, but during excessively hot weather, deaths from most causes rise dramatically, sometimes doubling on the worst days (Figure 1). As most deaths from heat are never reported as such, heat is the “silent killer”, since most of these deaths are associated with little or no physical damage.

It has only become recently recognized that heat has such a devastating impact on human health. Thus, over the last 15 years, a proliferation of techniques has been devised in an attempt to mitigate the impact of extreme heat

편집자 주

이 글의 저자인 Kalkstein 교수는 현재 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology)의 회장을 맡고 있으며, WMO/WHO/UNEP의 기상과 기후의 보건 영향 분야에 대한 자문위원으로 활동하고 있다. Sheridan 교수는 국제생명기상학회지(International Journal of Biometeorology)의 편집책임자(Editor-in-Chief)로 활동하고 있다. 국립기상연구소는 미국 마이애미 대학과 2007년 11월에 폭염이 보건에 미치는 영향 연구에 대한 공동연구 협력을 위하여 MOU를 체결한 바 있다.



[Figure 1] Total daily deaths during summer vs. daily maximum temperature: New York City.

on the population. We have been working with a variety of countries and agencies to develop the most sophisticated means possible to issue heat-related warnings, to assist in the development of urban plans to lessen the impact of heat, and to check the effectiveness of heat systems in major cities around the world. We are honored to have recently entered into a contract with the Korean National Institute of Meteorological Research(METRI) to develop a heat/health watch warning system (HHWS) for Seoul, and possibly for other major cities in the country, based upon our successes in other parts of the world. In this article, we will describe how the new HHWS works, its many advantages, and how we integrate with stakeholders (interested agencies) to make certain that proper plans are implemented whenever the HHWS indicates

health-debilitating conditions.

The premise behind these heat/health systems is solid knowledge of the actual heat-health relationship at each locale that a system is implemented. Thus, the threshold conditions that induce an adverse health response need to be identified. Of great importance is the fact that these thresholds vary across space, which strongly suggests that the systems must be location specific. For example, people in New York react very differently to heat than citizens of Seoul, not only because the climate is different but also because of the different urban structure and demographics of each city. In the past, similar thresholds have been used across large areas with disregard to this concept. The system for Seoul is specific to that city only, and different

thresholds for issuing heat warnings will be necessary in other cities, even in Korea. Another interesting finding in our research is that thresholds which induce a negative health impact on people actually vary during a season in the same city. Thus, thresholds in our HHWS are often different for June and August in the same city. We have found that it takes less heat to increase mortality early in the summer season than later, partially because we acclimatize to heat as the season progresses. In addition, many susceptible people die early in the summer from heat, leaving less to die later in the season. Since the HHWS is based on determining thresholds of human health tolerance to heat, rather than being simply a comfort index, these thresholds must vary as the season progresses, even in a single city.

Another unique aspect of our system is the use of air masses, rather than simple weather variables like temperature and humidity, to evaluate heat health relationships. Air masses are large homogeneous bodies of air, which when present, exhibit distinctive meteorological characteristics. For example, a moist tropical (MT) air mass is always associated with hot, humid conditions, little nighttime temperature relief, partly cloudy skies, and sometimes an afternoon thunderstorm. A dry tropical (DT) air mass is even hotter during the day, but less humid, with clear skies and usually no

precipitation. Both of these air masses are associated with elevated mortality in most mid-latitude cities, but their impacts vary spatially. In some cases, DT air may cause little harm and MT air masses can be worse; in other cities, the opposite could be true.

The use of an air mass based approach is key to identify the impact of heat on human health. We don't respond independently to the meteorological elements of temperature, humidity, and wind. Instead, we respond to the combination of these weather elements as they represent themselves within an air mass. We are thus sensitive to the simultaneous impact of all weather elements within a mass of air, and this is the reason why we first develop a daily "air mass calendar" for each day during the summer season using various statistical techniques to determine the differential impacts of weather on human health. To read more on how we develop this calendar, go to http://www.as.miami.edu/geography/research/climatology/IJOC_Sheridan_2002.pdf which describe the techniques in detail

Daily mortality data for Seoul was provided by the METRI so we could develop relationships between daily weather and variations in deaths. During a heat wave, deaths in mid-latitude cities can increase markedly, as illustrated in Figure 1. This is particularly true when looking at daily air mass type and increases in mortality (Table 1). It

is clear that, during certain air mass intrusions, mortality can increase significantly; for example, in Seoul, an average DT air mass day leads to an increase of almost 7 deaths, which represents a 7 percent increase in mortality. It is impressive to think that a certain set of meteorological conditions can induce such a negative response in human health. The increase varies across months; in July during DT air mass intrusions, average daily mortality in Seoul can increase by over 30 individuals. When compared to other cities, residents of Seoul are rather sensitive to heat. Some other cities are even worse; for example, in Rome, an average DT air mass day yields a 14 percent increase in mortality, and in Shanghai, a typical MT+ day is associated with a 16 percent rise. Obviously, in many cities there are significant daily mortality increases during particularly oppressive air mass days, and DT

and MT+ air masses must therefore be isolated when they are forecast, since they obviously can contribute to important negative health issues when they occur.

Although most days within the “oppressive” DT and MT+ air masses lead to increased mortality, these impacts also vary from day to day, depending upon meteorological and other variations within the day. For example, an MT+ air mass with a particularly high minimum temperature may cause more deaths than a similar air mass day with a lower minimum temperature. Often even more important, it may be necessary to have three or more days in a row of an oppressive air mass before any negative health outcome can occur. In Seoul, for example, on the first day of a DT air mass, there are only 2 or 3 excess deaths, on average.

〈 Table 1 〉 The impact of heat on human mortality in various cities around the world, including Seoul. “Deaths” represent the daily average increase in mortality during the air mass intrusion, and “percentage” is the percent increase in daily average mortality that this increase represents.

City	Mean increase in mortality, DT days		Mean increase in mortality, MT+ days	
	Deaths	Percentage	Deaths	Percentage
Seoul	6.9	7	6.7	7
Chicago	5.2	5	7.4	7
Washington	0.9	4	1.7	7
NewOrleans	None	None	3.7	9
Rome	6.2	14	5.0	12
Shanghai	None	None	42.4	16
Toronto	4.2	11	4.0	10

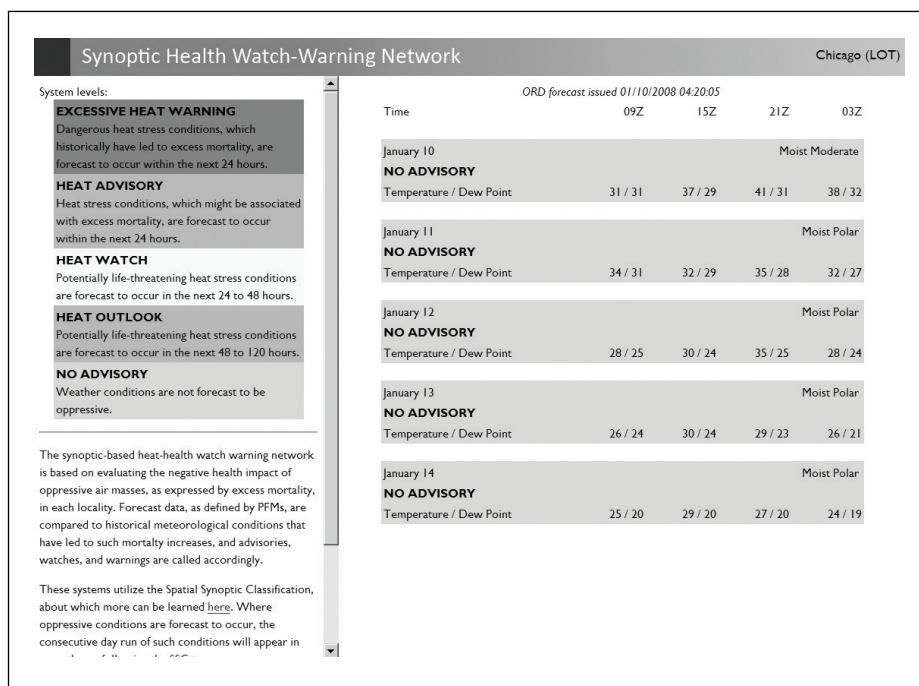
However, after 5 or more consecutive days of the air mass, the average daily increase in deaths approaches 40. Thus, the first day of an offensive air mass may not trigger a “warning” from the system, but the fifth consecutive day most certainly would. Thus, it is necessary to develop full relationships between daily mortality and a number of variables, both meteorological and non-meteorological, within the oppressive air masses to establish estimates of the number of people expected to die that day from the stressful conditions.

Using forecast data from METRI, we can actually estimate heat-related mortality for several days before the excessive heat event actually occurs. This is where the HHWS becomes an important piece of information for weather forecasters, so they can have the most reliable information available to call heat/health related warnings. We have devised password-protected websites, such as the one for Chicago, USA illustrated in Figure 2, to provide guidance to forecasters when they should call excessive heat warnings. The colored bars on the left side of the system page are related to the increasing negative impact of the heat, and with increasing numbers of estimated heat-related deaths, the level of warning is heightened accordingly.

Although it is most important to devise an accurate warning system that informs the public and decision-makers about the times when the

negative health impact will be most severe, it is equally important to have in place a set of intervention measures to lessen the potential catastrophic impacts. The development of intervention measures requires two steps: first, to identify those “stakeholders”, both private and public, that must reach out to vulnerable populations and attend to them during the most severe times of an excessive heat event, and second, to coordinate activities that these stakeholders pursue to try to save lives. The stakeholders and their concomitant activities vary from city to city; often the stakeholders form a “heat task force” in a city, which permits proper coordination among the local weather service, health department, emergency managers, utility companies, and other similar stakeholder agencies. Although this varies dramatically from city to city, the opening of air conditioned shelters, attending to the elderly and homeless, and setting up call centers to advise people what to do during a heat emergency are some of the necessary steps that cities take when an excessive heat warning is called.

The level of technology in the call centers can have a significant impact on the effectiveness of the heat alert system and corresponding intervention measures. Call centers are strategic points of contact where heat information and related health advice are disseminated to the



[Figure 2] An example of the HHWS page (this one for Chicago, USA), that is password protected. The information provided on the page includes warning level, forecast weather conditions, air mass type, and an estimate of heat-related deaths on severe days.

public who do not have ready access to the internet who need an interactive form of contact. When a caller chooses not to wait for his/her call to be answered, an automated voice message system can be activated, prompting this person to leave a name and contact number so that someone can get in touch as soon as the information line is available.

An automated dial-up service that provides information to particular groups of people, such as seniors alone at home, may be useful. These vulnerable groups need specific types of

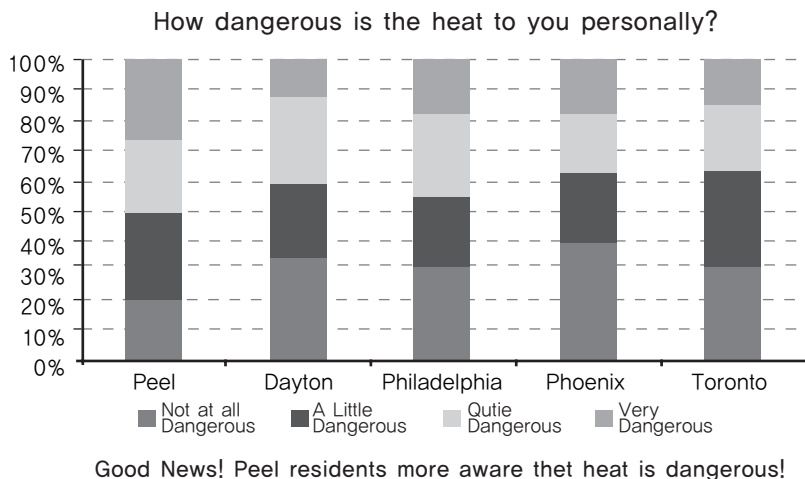
information conveyed and worded in certain ways that less vulnerable groups do not. For instance, an elderly may not be educated and may not understand what a heat wave is or what it can do to his health. He may not know why it can kill him or understand why he needs to take certain measures like going to an air conditioned shelter, or not switching on a fan in an unventilated room. This service does not require the person to call in, and can be used without increasing resource requirements. Nurses may be stationed at each call-center to provide expert

support in complex situations

The final important issue in the development of a new HHWS is effectiveness checking. We have already done much of this for a number of cities in the United States and Canada, and plan to follow up after the new system in Seoul is implemented during the summer of 2008. Effectiveness is evaluated in many ways. For example, are the citizens aware of whether a heat warning has been called? Do they understand what to do if such a warning is in place? Do they perceive that they are vulnerable to the negative impacts of heat (much of our work shows that people lack understanding of the dangers of heat, and consider themselves generally not vulnerable)? We have devised questionnaires that have been

administered to individuals in various cities to see how they perceive the dangers of heat; an example question is shown in Figure 3. Such an activity is desirable for Seoul as well after the HHWS has been operating there this summer, to see if the message is getting across.

We look forward to working closely with the METRI and other government agencies in the country to develop our state-of-the art HHWS. As this essay has hopefully demonstrated, the development of such a system is complex, with aspects relating to estimating negative health impacts on a day-to-day basis, disseminating information in a proper manner, organizing stakeholders who deal with intervention measures, and evaluating the quality of the system and the population response.



[Figure 3] One of the questions on our questionnaire evaluation for various communities in North America. Over 50 percent of residents in these urban areas underestimate the impact of heat upon their health, even in an exceedingly hot desert city like Phoenix, USA.



프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술

김 상 우

프랑스 기후환경과학연구소 객원 연구원
서울대학교 BK 21 지구환경과학사업단 조교수
kimsw@air.snu.ac.kr

1. 들어가는 말 - 예술의 나라 프랑스는 과학도 예술인 나라이다

금세기 들어서 세간의 관심을 끄는 최대 화두(話頭)중의 하나는 기후 변화로 인해 세계 곳곳에서 일어나고 있는 이상 기상 현상과 그로 인한 발생하는 기상재해, 그리고 미래 기후에 대한 정확한 예측일 것이다. 특히, 지난해 유엔의 기후 변화에 관한 정부간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)¹⁾는 4차 보고서를 통해 이러한 일련의 기후 변화가 명백한 과학적 사실이고, 인간 행위에 의해 발생한다고 밝혔다. 세계 각국은 교토의정서에 명시된 온실가스 등 기후변화 원인물질의 배출 저감과 기후 변화에 따른 경제적, 사회적 피해를 최소화 하긴 위한 대응 방안 수립과 그 실천에 분주한 가운데, 실생활에서의 작은

변화를 통해 이를 실천에 옮기고 있다는 소식이 얼마 전 프랑스에서 들려왔다. 대부분의 뉴스 매체에서 보도되었듯이 문화와 예술의 도시 프랑스 파리에서 '자전거 혁명' 바람이 불고 있다는 소식이다. 파리가 적극 주도하는 자전거 혁명이란 프랑스어로 자전거를 뜻하는 '벨로(Velo)' 와 혁명을 의미하는 '레볼루션(Revolution)'의 합성어로 파리는 이를 통해 자연스런 자동차 운행의 감소를 유도하여 도심 교통 정체를 줄일 뿐만 아니라, 온실효과를 유발하는 이산화탄소의 배출 감소 및 질소산화물 등의 배출량 감소를 통한 도시 대기질의 개선, 그리고 자전거를 이용하는 시민들의 자연적인 건강 증진 또한 기대하고 있다. 불어에 대한 그들의 자부심만큼이나 프랑스의 사람들은 그들의 문화유산을 보존하기 위한 환경 문제의 중요성을 깊이 인식하고, 이를 실천하기 위해 얼마나 노력하는



지를 볼 수 있었다.

부분의 사람이 ‘프랑스’ 하면 떠올리는 것이 문학과 예술이기 때문에 상대적으로 과학 기술은 그늘에 가려진 듯한 느낌을 받는다. 실제로 프랑스에 대해서 바로 떠올릴 수 있는 것을 묻는다면 미술(루브르, 오르세), 패션, 건축(에펠탑), 프랑스 혁명 등 과학기술보다는 문화나 예술에 관련된 것들이 많을 것이다. 또한 와인, 치즈 그리고 바게트 등 프랑스 먹거리 역시 흔히 들을 수 있는 대답의 하나일 것이다. 그러나 자세히 들여다보면, 예술의 나라 프랑스는 과학도 예술인 나라이다. 기초과학이론 연구에 있어 독보적일뿐만 아니라 일부 분야에서 세계 최고의 과학기술을 보유하고 있는 유럽연합(EU)의 대표적인 국가이다. 피에르시몽 라플라스(Pierre-Simon Laplace), 앙드리에-마리 르장드르(Adrien-Marie Legendre), 블라세 파스칼(Blaise Pascal) 등의 유명한 수학자들, 근대 화학의 아버지라 불리는 앙투안-로랑 라부아지에(Antoine-Laurent Lavoisier), 여성 최초의 노벨상 수상자인 마리 퀴리((Maria Curie, 물리학자), 루이 파스퇴르(Louis Pasteur, 생화학자), 회전하는 시스템에서 느껴지는 관성력으로 코리올리 힘(Coriolis Force)을 최초로 설명한 가스파-구스타브 코리올리(Gaspard-Gustave Coriolis) 등 수많은 프랑스 과학자들이 근, 현대 과학사에 큰 업적을 남겼다. 제2차 세계대전 후 1958년 드골 정부가 강력한 국가 리더십을 발휘하면서 원자력, 항공 우주, 교통산업 등의 과학기술 분야를 중점적으로 육성하여 오늘날 독보적인 기술을 지닌 강국이 되었다. 대표적인 예로, 우리나라의 고속철도(KTX)가 프랑스의 TGV(Train à Grande Vitesse)인 것과

울진 원전 1, 2호가 모두 프랑스의 기술로 세워진 것이라는 것을 생각하면, 최고 수준의 기술을 가지고 있음을 알 수 있다. 2009년 발사 예정인 국내 최초의 정지궤도 위성인 통신해양기성 위성(COMS)의 위성체 역시 프랑스의 아스트리움(Astrium)사와 한국항공우주연구원이 공동으로 개발 중이며, 위성체 발사 서비스는 프랑스의 아리안스페이스(Arianespace)사가 담당하고 있다. 미국의 보잉사와 더불어 민간 여객기의 양대 산맥을 형성하고 있는 에어버스, 최신예 전투기인 라팔기 역시 프랑스에서 개발되어 세계적으로 인정받고 있는 것들 중의 하나일 것이다.

본문에서는 기후변화원인 물질 중에서 토양 기원의 흙먼지(예, 황사)나 산불 등의 생물체 연소를 통해 발생하는 연무들, 자동차 등에서 배출되는 대기오염물질 등 대기 중에 부유하는 입자상의 물질, 즉 에어로솔에 의한 기후 영향 측정 연구의 중요성과 필요성을 되짚어 보고, 최첨단 항공 및 위성 기술을 바탕으로 한 프랑스의 에어로솔 기후 효과 관측 기술 현황 및 향후 추진 방향 등을 소개 하고자 한다.

2. 에어로솔과 기후 변화

전 지구적인 온실기체의 증가로 인한 지구온난화의 영향으로 인류가 이전에 경험하지 못했던 극단적인 재해 현상(태풍, 가뭄, 폭설, 폭염, 황사 등)들이 지구촌 곳곳에서 빈번하게 발생하고 있다. 2001년 발간된 IPCC 보고서는 에어로솔(예, 대기오염물질, 황사 등)에 의한 햇빛의 산란과 흡수 등의 직접적인 에어로솔 복사 효과와 구름 생성에 기



여와 구름 생성 결과로 나타나는 간접적인 에어로솔 효과가 온실기체에 따른 지구온난화 효과를 상쇄할 수 있음을 보고하고 있다. 장기간 안정적으로, 그리고 전 지구적으로 균일하게 분포하는 온실기체와 달리 대기 중의 에어로솔은 대기 중에서의 잔류 시간(lifetime)이 수 시간 ~ 수 일(주)로 시간적인 변화가 클 뿐만 아니라 그 종류와 크기, 화학적, 물리적, 광학적 성질 등이 배출원에 따라 매우 다양하다. 또한, 기상 패턴에 따라 장거리 이동할 뿐만 아니라, 대기 중에서 물리적인 성장이나 화학적, 광화학적 반응을 통해 그 광학 및 복사 성질이 쉽게 바뀌는 특성으로 인해 대기 중 에어로솔이 야기하는 지역적인 또는 전 지구적인 기후변화를 산정하는 데 있어 현재 그 불확실성이 매우 크다. 특히, 우리나라는 전 지구적인 온실기체의 증가 속에 아시아 대륙의 급진적 산업화에 기인한 세계 최대의 에어로솔(황사와 대기오염물질) 배출원에 인접해 있음에도 불구하고, 이러한 에어로솔에 의한 기후 변화 영향을 가늠할 수 있는 과학적 근거를 아직 마련하지 못하고 있는 실정이다.

이러한 대기 중 에어로솔에 의한 기후 변화 영향을 정확하게 예측하기 위해서는 고도의 관측 기술과 모델링 기술이 요구된다. 특히, 대기 중의 에어로솔에 의한 햇빛의 산란, 흡수 등 종합적인 효과를 정확하게 측정, 규명하기 위해서는 라이다(Lidar)와 정밀 태양 복사 측정 기기들, 에어로솔 흡수 및 산란 계수 측정기, 입자 수 농도 측정기, 구름 응결핵 측정기 등 수 많은 첨단 에어로솔 측정 기기들이 필요할 뿐만 아니라, 동시에 측정된 정보가 활용되어야 하므로 지상과 선박, 항공기, 위성 등의 3차원 측정을 통한 측정 결과를 공유하

는 공동 관측이 필요하다. 특히, 항공 관측의 경우 지상이나 위성 관측과 비교하여 보다 세밀한 에어로솔의 연직 분포 특성을 관측할 수 있는 장점이 있다. 그러나 지상 관측과 달리 항공기가 빠른 비행 속도로 비행할 뿐만 아니라 항공기의 기체의 진동, 그리고 비행 고도의 급격한 변화에 따른 기압과 온도, 습도, 풍속 등 기상 변수들 역시 빠르게 변화하므로, 항공기에 탑재될 측정 기기들은 정밀한 측정 자료를 얻기 위하여 이러한 관측환경여건에 맞추어 개발하는 기술이 요구된다. 그러나 상당한 비용과 장기간의 세밀한 측정 준비가 요구되는 항공 측정의 특성상 주기적이고 반복적인 측정은 현실적으로 어려울 뿐만 아니라, 항공 측정 역시 지역적, 국지적 측정으로 한정되는 단점을 지니고 있다. 최근 전 지구적 범위에서 에어로솔에 의한 기후 효과를 규명하고, 기후 예측의 정확도를 향상시키기 위해서는 비록 지상이나 항공 관측에 비해 초기 투자비용이 크고, 고도의 기술이 관측 센서 등의 탑재체 개발과 발사에 요구되지만, 위성 측정 자료의 필요성과 활용에 대한 요구가 증대되고 있다. 미국과 프랑스를 비롯한 선진국들이 이러한 항공 및 위성 관측 자료를 통한 에어로솔 기후 효과 연구에 독보적인 지위를 구축하고 있다.

3. 에어로솔의 관측 기술 동향 및 기후 효과 연구

프랑스의 에어로솔 관측 기술 개발 및 연구는 프랑스 원자력청(CEA; Commissariat à l'Énergie Atomique), 프랑스 국립 과학원(CNRS; Centre national de la recherche scientifique),



프랑스 국립 우주연구소(CNES; Centre National d'Etudes Spatiales), 국립 기상역학 연구소(LMD; Laboratoire de Meteorologie Dynamique) 등의 국가 연구기관과 에콜 뿔테크닉(Ecole Polytechnique), 파리 6, 7, 12 대학(Université Paris 6, 7, 12), 대기광학 연구소(LOA; Laboratoire d'Optique Atmosphérique) 등 대학과 대학 부설 연구소 등에서 활발히 이루어지고 있다. 본 장에서는 프랑스 원자력청(CEA; Commissariat à l'Énergie Atomique)과 프랑스 국립 과학원(CNRS; Centre national de la recherche scientifique)이 공동으로 운영하는 프랑스 최대의 기후 환경 분야 연구소인 기후환경과학연구소(LSCE; Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement)의 관측 기술 개발 및 연구 현황을 중심으로 소개하고자 한다. 특히, 이동 측정이 가능한 지상 모바일 측정시스템과 초경량 항공기를 활용한 에어로솔 관측 및 프랑스 국립 우주연구소(CNES; Centre National d'Etudes Spatiales)와 미국 항공우주국(NASA)가 공동으로 발사한 위성탑재 라이다 시스템의 관측 기술에 대해 중점적으로 소개하고자 한다.

지상 관측 기술

-정규 지상 관측소 운영 및 차량 이동 시스템의 개발

에어로솔의 광학적, 복사적, 그리고 물리적 특성의 지상 관측은 다양한 측정 기기들의 장기간 안정적인 운영을 통해 에어로솔 기후 효과를 산정하는데 큰 의의를 가진다. 또한, 이들 지상 관측소의

네트워크를 구성함으로써 시·공간 변화 특성을 유추할 수 있으나, 전 지구규모로 볼 때 거의 모든 관측소가 육지에 위치한 단점이 있다. 국내의 경우, 기상청에서 운영하는 안면도 지구대기감시센터와 국내외 연구팀이 참여하는 국제공동관측 프로그램인 대기 갈색 구름(Atmospheric Brown Cloud) 프로젝트의 일환으로 제주도 고산에서 에어로솔 지상 관측소가 운영 중에 있다. 프랑스의 경우, 각 연구소 및 대학을 거점으로 하여 지상 관측소를 구축하고 있으며, 유럽 연합(EU)내에서 다양한 관측 프로그램과 네트워크 프로그램이 운영되고 있다. 에콜 뿔테크닉의 경우 원하는 사람 누구나 와서 관측할 수 있는 야외 관측 실험 인프라를 완벽히 구축해 두고, 관측을 희망하는 연구팀들에게 항상 문호를 개방하고 있다. 최근에는 지상 관측소의 운영과 더불어 지상에서 이동 가능한 관측소, 즉 모바일 관측소의 개발을 통한 현장 관측 실험 참여에 상당한 비중을 두고 연구를 수행해 오고 있다.

그림 1은 기후환경과학연구소(LSCE)의 이동 에어로솔 관측 차량의 전경으로 라이다(내부 후면)를 비롯하여 에어로솔 산란 및 흡수 계수 측정기, 입자 수농도 측정기 등 10여 종류의 에어로솔 관측 기기들(내부 전면에 설치되어 있음)이 설치되어 있으며, 차량 지붕에는 기상 레이더와 GPS 시스템 및 각종 기상 관측 센서들이 설치되어 있다. 이러한 모바일 시스템의 구축을 통해 원하는 지역(지점) 어디서든 이동 관측이 가능할 뿐만 아니라, 위성이나 항공기와 동시 관측을 통해 시너지 효과를 창출할 수 있어, 그 필요성이 증대되고 있다.



[그림 1] 프랑스 기후환경과학연구소(LSCE)의 에어로솔 관측 차량 전경

항공 관측 기술

-초경량 항공기를 이용한 새로운 도전

현재까지 중·소형 항공기를 이용한 관측 캠페인은 전지구적으로 주요 에어로솔 발원지와 그 부근에서 많이 수행되어왔다. 중·소형 항공기를 이용한 항공 관측의 경우 많은 연구팀이 공동으로 참여, 다양한 측정 장비들을 설치, 운영할 수 있다. 이를 통해 에어로솔 특성에 대한 종합적인 자료 수집이 가능할 뿐만 아니라 이들의 세밀한 연직 분포 자료를 제공한다. 그러나 중·소형 항공기를 이용할 경우, 이·착륙이 제한적일 뿐만 아니라 다수의 연구팀 참여와 측정 장비들의 운영에 따른 막대한 비용이 소요될 뿐만 아니라 준비 과정에 장기간이

소요된다. 최근 프랑스에서는 그 대안으로 초소형 경비행기(Ultra-Light Aircraft)를 활용한 에어로솔 관측 기술의 개발과 활용이 눈에 띈다. 기존의 중·소형 항공기를 이용한 관측 실험의 경우와 달리 초소형 경비행기는 이·착륙에 필요한 거리가 수백 미터이면 충분할 뿐만 아니라, 중·소형 항공기보다 비행 속도가 느려 보다 세밀한 관측이 용이하다. 또한, 빠른 비행으로 유발되는 흡입 유량의 조절 등 측정 과정에서 발생하는 각종 문제점을 피할 수 있으며, 도심 지역 등 기존 항공기 관측이 쉽지 않았던 좁은 지역을 면밀하게 관측할 수 있는 장점이 있다. 그림 2는 프랑스 기후환경과학연구소(LSCE)이 최근에 개발, 2006년 1월과 2월 (건기)에 실시된 아프리카 몬순 관측 실험(AMMA; African Monsoon Multidisciplinary Analyses)



[그림 2] 프랑스 기후환경과학연구소(LSCE) 초경량 항공기를 이용한 에어로솔 관측 시스템 전경

에 참여한 초경량 항공기의 사진으로, 사하라 사막에서 발생하는 흙먼지와 초원 및 산림이 타면서 나오는 바이오매스 버닝 에어로솔의 연직 및 공간 분포를 성공적으로 측정하였다. 2인용 초경량 비행기의 좌석을 개조하여 라이더(LIDAR)와 에어로솔 산란 계수 측정기와 기상 측정 장비, 데이터 수집 컴퓨터 그리고 GPS 등 탑재 하였으며, 약 2-3시간 정도 비행이 가능하고, 최대 비행 고도는 약 6 킬로미터이다. 관측 수행 시 비행 속도가 시간당 약 수십 킬로미터 내외이며, 회전 반경이 100-200미터에 불과한 장점이 있어 좁은 지역의 정밀한 측정도 가능하다. 에어로솔 관측 실험용 중·소형 항공기가 전무하고, 군사적인 문제로 비행 허가 절차가 복잡한 것을 고려한다면, 레저용으로 국내에 도입되어 있는 이러한 초경량 항공기를 이용한 관측 연구가 국내 항공 측정 연구의 새로운 대안으로 고려될 수 있을 것이다.

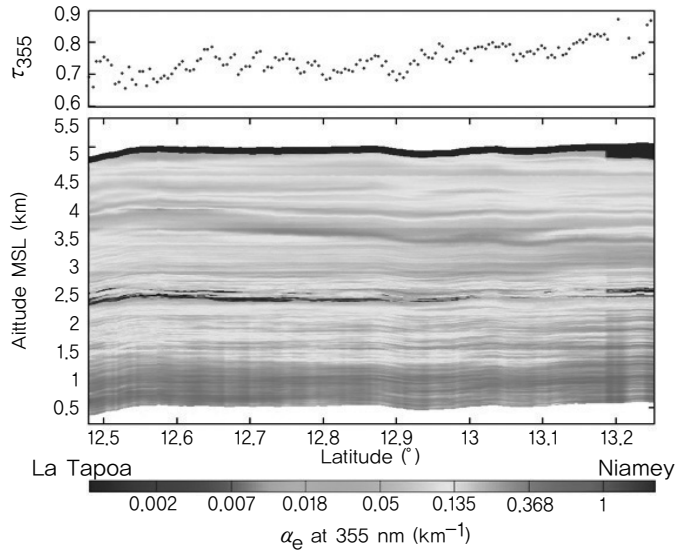
그림 3은 아프리카 몬순 관측 실험(AMMA) 중 Niger(니제르)의 La Tapoa에서 출발하여 Niamey에 이르는 구간의 초경량 항공기 비행을

통해 관측한 에어로솔의 연직 분포를 보여주는 예로, 붉은 색일수록 에어로솔의 양이 많음을 의미한다. 약 2.4 킬로미터 부근의 깨끗한 공기층을 경계로 두 층의 에어로솔이 비행경로를 따라 지속적으로 존재함을 알 수 있다. 비록 중·소형 항공기를 이용한 관측처럼 에어로솔의 물리적, 화학적, 광학적 특성들을 한꺼번에 측정할 수는 없지만, 이와 같이 초경량 항공기를 활용한 에어로솔 관측은 원하는 에어로솔의 특성을 효과적으로, 그리고 상대적으로 중·소형 항공기를 통한 관측보다 쉽게, 좀더 세밀한 지역에 대해 수행할 수 있다. 예로, 서울과 같은 대도시 규모의 오염이나 황사 또는 구름의 연직분포 특성을 측정하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

에어로솔 위성 관측 기술

-엑스레이 사진에서 컴퓨터 단층 촬영으로의 발전

전 지구적으로 균일하게 장기간 분포하면서 동일한 기후 효과를 가지는 온실 기체와 달리 에어로솔의



[그림 3] 아프리카 몬순 관측 실험(AMMA) 중 Niger(니제르)의 La Tapoa에서 출발하여 Niamey에 이르는 구간의 비행동안 초경량 항공기에 탑재된 라이다를 통해 관측한 에어로솔의 연직 분포(아래)와 이를 토대로 구한 에어로솔의 광학적 두께(위)

분포와 기후 효과는 배출원 근처에서 최대로 나타나며, 기상 패턴에 따라 수송이 되면서 그 풍하층에 영향을 끼치게 된다. 따라서 전 지구적인 에어로솔의 기후 효과를 산정하여 그 불확실성을 감쇄하기 위해서는 지상 및 항공 관측 등을 통한 국지적 그리고 지역 규모의 관측에 추가하여 전 지구적 규모의 관측 필요성이 대두 되고 있다. 지상 및 항공 관측과 비교하여 막대한 비용이 소요될 뿐만 아니라, 최첨단 탑재체 및 발사 기술이 요구되는 위성 관측의 경우 미국과 더불어 프랑스가 선두적인 역할을 하고 있다. 특히, 지난 2006년 4월 발사, 그해 6월부터 현재까지 자료를 생산 중인 칼립소(CALIPSO; Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)는 프랑스 위성 관측 기술

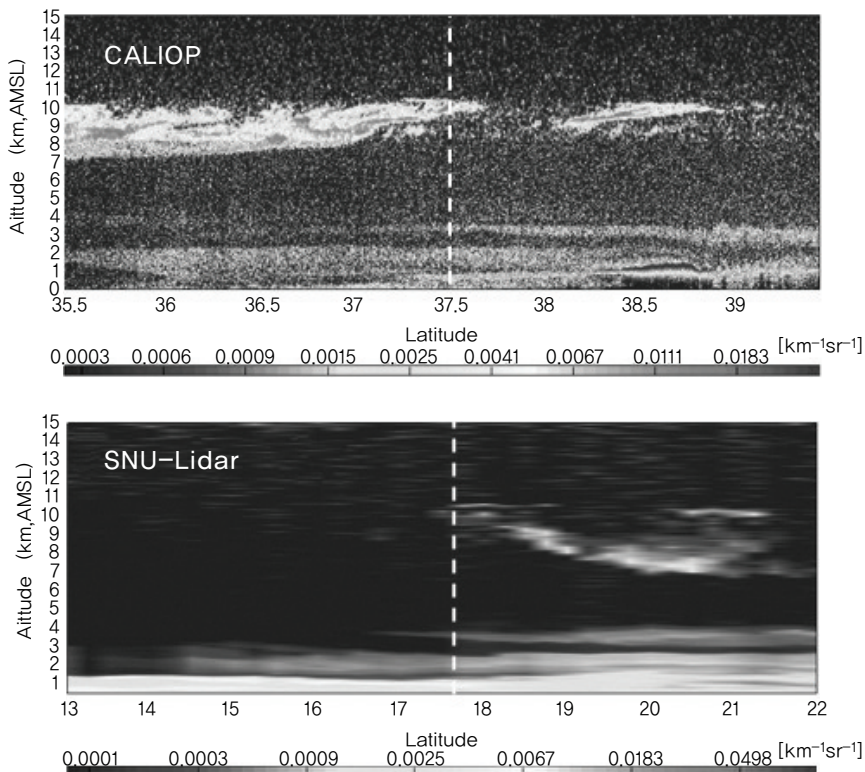
의 우수성을 보여줄 뿐만 아니라 이전에 관측하지 못했던 에어로솔과 구름에 대한 새로운 정보를 주는 좋은 예이다. 미항공우주국(NASA)의 Earth System Science Pathfinder의 일 환 인 CALIPSO는 프랑스 우주 기관인 국립 우주 연구소(CNES; Centre National d'Etudes Spatiales)와 Institut Pierre Simon Laplace(IPSL)과 미국의 Ball Aerospace 및 Hampton University 등의 공동 연구개발의 결과이다. CALIPSO는 3 채널 편광 라이다(LIDAR; Light Detection and Ranging Instrument)인 CALIOP(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), 광대역 카메라(WFC; Wide Field Camera) 그리고 적외 영역 복사측정기(IIR; Imaging Infrared



Radiometer)로 구성되어 있다. Ball Aerospace는 CALIOP과 광대역 카메라 등의 과학 장비와 통신 장비를 담당하고 있다. CNES는 3채널 영상 적외선 분광기를 제공했으며, 36개월간 CALIPSO의 모니터링과 제어를 담당하고 있다.

CALIOP의 경우, 태양복사가 반사되어 대기 상부로 되돌아오는 복사량을 측정하여 에어로솔의 시·공간적 특성을 산출하는 기존의 수동 센서(Passive Sensor)를 탑재한 위성들과 달리, 레이더와 유사한 방식으로 위성에 장착된 레이저를 사

용하여 능동적으로 측정을 수행한다. 레이저를 지표면을 향해 발사한 후, 대기를 투과하면서 구름과 에어로솔에 의해 후방 산란되어 오는 빛을 감지, 이들의 연직 분포 및 연관된 광학 특성에 대한 기초적인 정보를 제공해준다. 이러한 CALIOP 측정은 기존의 수동적 센서를 활용한 위성 측정법과 비교하여 엑스레이 사진과 컴퓨터 단층 촬영의 차이에 비유될 정도로 지구 기후 시스템에 영향을 미치는 에어로솔과 구름에 대한 이해를 높이고 기후 예측 모델의 입력 자료를 획기적으로 향상시켜 전지



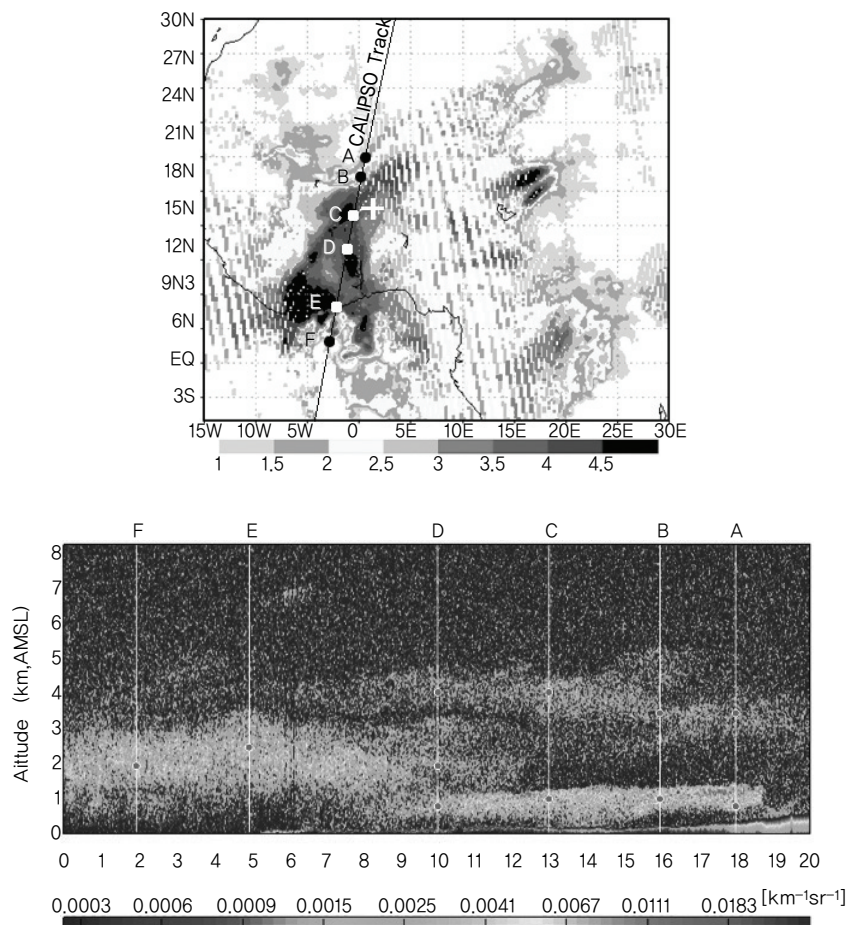
[그림 4] 위성탑재 라이다 CALIOP (위 그림)가 서울대(SNU)의 지상관측 라이다 측정소(아래 그림) 상공을 지나갈 때 (흰색 점선)의 에어로솔 및 구름의 연직 분포 비교 (2007년 2월 21일, 17:41 GMT)



구규모의 기후 예측 정확도 향상에 크게 기여, 기후 시스템에서 이들의 역할에 관해 존재했던 불확실성을 줄이는데 크게 기여할 것으로 기대되고 있다.

그림 4는 CALIOP 라이다가 서울(서울대학교 라이다 측정소) 상공을 지나갈 때의 관측의 한 예

로, 지구 대기 상부에서 지표면으로 내려다보고 측정하는 CALIOP(위 그림)과 지표면에서 대기 상부를 올려다보면서 관측하는 지상 라이다(아래 그림)의 동일한 시점의 관측 결과(흰색 점선)가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 특히 상층 약 10 km 고도 부근에 반투명한 권운이 존재하고, 그 아래로



[그림 5] 수동 센서를 탑재한 OMI 위성을 통해 관측한 에어로솔 지수(위 그림)와 CALIOP으로 위도에 따른 에어로솔 층의 연직 분포

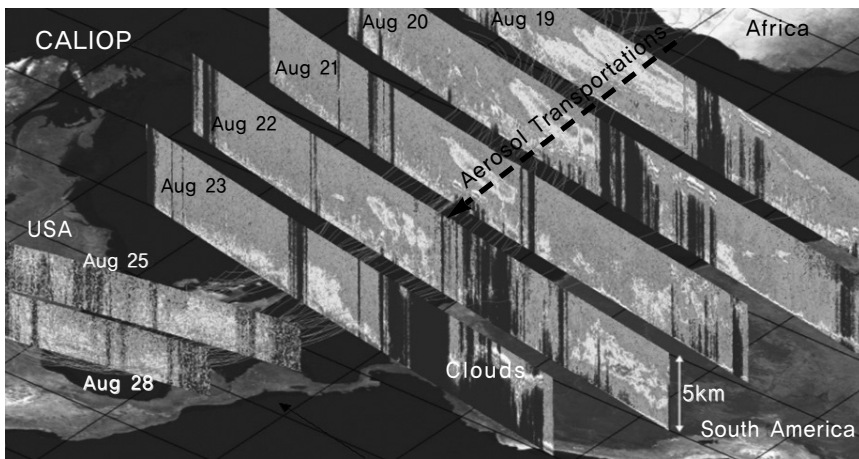


3 개의 얇은 에어로솔 층이 존재함을 볼 수 있다.

그림 5는 기존의 수동 센서(Passive Sensor)를 통한 위성 관측 결과와 CALIOP 결과의 차이점 및 상호 보완을 통한 시너지 효과를 잘 보여주고 있는 사례이다. 그림 5의 위 그림은 수동 센서인 Ozone Monitoring Instrument(OMI)를 통해 관측한 에어로솔 지수(Aerosol Index)로 에어로솔의 광범위한 수평 영역에서의 공간 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다(흰색에서 검은색으로 갈수록 에어로솔이 대기 중에 많이 존재함을 의미함). 이에 반해 지상 약 700 km 고도에서 지구를 관측하는 극궤도 위성 CALIPSO에 탑재된 CALIOP의 경우, 고위도에서 저위도로 이동하는 궤적(위 그림의 검은색 실선)을 따라 에어로솔의 연직 분포를 잘 보여주고 있다. 특히 에어로솔 플룸의 가장자리와 높은 에어로솔 지수가 관측된 지점(A~F)을 표시한 CALIOP

프로파일(아래 그림의 연직 흰색 실선)을 보면, 위도에 따라 다양한 두께의 여러 에어로솔 층들이 존재함을 볼 수 있다.

그림 6은 CALIOP을 통한 에어로솔의 연직 분포 관측의 장점을 가장 잘 보여주는 예이다. 아프리카 사하라 사막(우측 상단)에서 발생한 흙먼지가 대서양을 가로질러 미국에 도달하는 장거리 수송 과정에서 어떻게 변화하는지 연직 구조를 잘 보여주고 있다. 또한, 대서양 위에서 에어로솔 층(주황색) 아래로 존재하는 낮은 구름(흰색)도 잘 관측되어 나타나고 있다. 이와 같이 전지구규모의 기후 예측 모델의 입력 자료로 활용될 수 있는 에어로솔의 공간 및 연직 분포와 대기 중의 거동에 대한 우주 공간에서의 직접 측정이 활발해 질 것으로 전망되고 있다.



[그림 6] 위성탐재 라이더 CALIOP 시스템을 통한 관측의 예로, 아프리카 사하라 사막에서 발생한 흙먼지(dust)가 대서양을 가로질러 미국에 도달하는 장거리 수송과정의 연직 분포



4. 끝맺음

현재 프랑스에서의 에어로솔 기후 효과 관측 연구의 동향은 본문에서 언급된 바처럼 다음 세 가지로 크게 요약될 수 있다.

첫째, 지상 관측소의 운영을 통해 축적된 에어로솔 측정 기술을 활용한 이동 측정 시스템을 구축함으로써 한정된 지역을 벗어난 관측이 활성화되고 있다.

둘째, 항공 측정 자료의 필요성 증대에 따라 기존의 중·소형 항공기를 활용한 종합 에어로솔 관측 실험과 달리 소형 및 초경량 항공기를 이용한 관측이 최근 활발히 진행되고 있다. 기존의 중·소형 항공기를 이용할 경우와 달리 원하는 몇 종류만의 에어로솔 관측 장비를 탑재하여 필요시 수시로 측정을 수행하고 있다. 이를 통해 위성 자료 검증에 필요한 자료를 생산할 뿐만 아니라 지상 이동 관측 시스템 및 위성 관측 결과와의 비교 검증 및 에어로솔 기후 효과에 있어 큰 시너지를 발휘하고 있다.

셋째, 기존의 수동 센서를 이용하여 에어로솔의 관측시, 공간 분포를 파악하였으나, 최근에는 인위적으로 레이저를 발사하여 대기 중의 에어로솔의

연직 분포와 연관된 특성을 직접 측정하는 능동 센서를 탑재한 위성 관측이 에어로솔 기후 효과 연구에 크게 기여하고 있다. 즉, 이러한 자료를 활용한 기후 예측 모델링과 모델의 결과 검증 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 에어로솔 관측 이외에도 대형 풍선에 라이다 및 에어로솔 관측 장비를 달아 성층권에 올라갈 수 있는 수평관측 관측계획도 향후 예정되어 준비 중에 있다. 또한 대기 중의 에어로솔의 거동을 보다 면밀히 파악하기 위해 위성에서 바람장 등 기상 변수를 정확히 측정하기 위한 연구가 진행중이며, 향후 수 년 이내에 임무수행을 위한 위성발사가 예정되어있다.

[주]

- 1) 세계 기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 지구기후변화에 대한 과학적 정보를 평가하기 위하여 설립된 정부간의 협의체로, 지구 온난화 등 기후변화에 대한 과학적인 근거를 제시한 공로를 인정받아 미국의 전 부대통령 앨 고어와 함께 2007년 노벨 평화상을 공동 수상함.



일본의 우주기상 기술

김 지 영 · 신 승 숙

국립기상연구소 정책연구팀
jykim@kma.go.kr

1. 들어가며

태양 활동과 지자기적인 현상은 우리의 일상적인 생활의 많은 부분에 영향을 줄 수 있다. 예를 들면, 네비게이션, 인공위성, 통신·전력시스템, 그리고 우주공간에서 또는 비행 중 인간의 건강 등이 그것이다. 과학기술이 고도화 됨에 따라 세계적으로 우주기상에 의해 영향을 받는 범위가 점점 커지고 있으며, 우주기상은 기상학의 새로운 연구 분야로 떠오르고 있다.

“우주 기상”이란 인류의 삶과 건강, 또는 우주와 지상 기술시스템의 성능 및 신뢰도에 영향을 줄 수 있는 태양풍·자기권·전리층·열권·태양의 상태를 의미한다. 우주 개발 시대에 맞추어 최근 선진국에서는 “우주 기상”에 대한 활발한 연구와

동이 이루어지고 있다.

우주기상에 대해 알아보기 위해, 일본에서 수행되고 있는 우주기상예보 연구 프로젝트에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

성공적인 우주 기상 예측을 위해서 태양-지구 현상에 대한 훌륭한 물리모델이 필수적이다. 이 모델은 태양에서의 플레어나 코로나 물질방출에서부터 지자기 폭풍과 이것이 지구 상층대기에 미치는 영향까지 주요 프로세스들을 포함하여야 한다. 또한, 이러한 프로세스는 다음과 같은 기본적인 문제를 해결함으로써 완성된다.

- 1) 태양 플레어의 트리거 조건은 무엇인가?
- 2) 어떻게 코로나 물질 방출이 형성되나?
- 3) 입자 가속의 메커니즘은 무엇인가?
- 4) 지자기 폭풍이나 준폭풍의 메커니즘은 무엇



인가?

서로 다른 스케일에서 발생하는 다양한 물리적 프로세스에 대한 멀티스케일 커플링을 이해하는 것이 우주기상 연구가 이루어야 할 기본적인 목적이다. 물리적 프로세스의 이해가 없는 경험식만으로는 모든 우주기상 현상을 성공적으로 예측할 수 없을 것이다.

성공적인 우주기상예측을 위하여, 창조적인 과학연구를 위한 Grant-in-Aid로부터 지원을 받은 “우주기상예측의 기초연구”라는 새로운 우주기상 프로젝트가 일본에서 수행되고 있다. 이 프로젝트는 태양 플레어와 코로나 물질 방출로부터 자기 폭풍까지 우주의 주요 현상에 대한 기초 물리학을 해결함으로써 우주기상예측의 기본인 태양-지구 현상과 우주 폭풍의 물리적 모델을 개발하는 것을 목적으로 한다.

2. 프로젝트의 구성

우주기상예측 프로젝트의 기본 연구는 현재 SCOSTEP(Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics)에 의해 운영되고 있는 CAWSES(Climat and Weather of the Sun-Earth System)의 국제협력으로 수행되고 있다.

2005년에 시작된 프로젝트는 5년간, 446.4백만엔(약 4백만\$)의 예산으로 진행 될 것이다. 일본의 연구그룹을 대표하는 11명의 주요 연구자들이 직접적으로 이 프로젝트의 지원을 받고 있으며, 실제로 이 프로젝트에 포함되어 있는 연구자는 50명 정도이다.

프로젝트는 다음과 같이 총 4개의 그룹으로 구

성된다.

- 1) 태양의 에너지 방출 메커니즘
- 2) 행성간의 섬광 관측으로부터 태양풍 모델링
- 3) 실시간 관측과 우주기상지도
- 3) 가상 관측소

주요 지자기폭풍 예측뿐만 아니라, 태양-지구 시스템에서 관측을 재생산할 수 있는 멀티스케일 커플링 모델을 개발 하여, 일본의 NICT(National Institute of Information and Communication Technologies)와 우주기상을 예측하는 다른 기구 및 부서에 활용 할 수 있도록 하는 것이 이 프로젝트의 주요 목표이다. 또 하나의 목표는 국내·외 태양물리학자와 지구물리학자들 사이의 긴밀한 소통을 증진시킴으로써 향후 우주기상연구를 더욱 발전시키는데 기여하는 것이다.

지금의 일본은 Solar-B라고 재명명된 Hinode 우주선과 STEREO(Solar Terrestrial Relations Observatory) 미션이 2006년에 성공적으로 발사되어, 우주기초자료를 충분히 확보 할 수 있는 시기이기 때문에 우주기상연구를 수행하는데 적절한 시기이다.

다음은 프로젝트의 4개 그룹에 대한 설명이다.

3. 태양의 에너지 방출 메커니즘

태양은 우주기상 현상에 대한 가장 큰 에너지원이다. 그러므로 태양관측은 기본적으로 수행해야 하며, 관측자료는 태양-지구 시스템에 주요한 입력 파라미터로 사용 될 수 있다.

이 그룹은 다음과 같은 역할을 한다.

- 1) 플레어의 에너지 방출 및 트리거 메커니즘



연구

2) 교토대학의 Hinda 관측소 SMART(Solar Magnetic Activity Research Telescope)의 지상 관측과 Hinode 위성의 우주관측을 이용한 코로나 물질 방출연구

Hinode 자료를 이용하면, 우주로부터 온 백터 자기장을 처음으로 측정할 수 있었음. 자기장, 광학 및 X선 이미지, 그리고 아주 세밀한 공간 분해능으로 초자외선을 측정할 수 있다.

태양 망원관측을 통합·연결하는 국제적인 프로젝트인, CHAIN(Continuous H Alpha Imaging Network)이 일본에 의해 제안되어 수행되고 있다. CHAIN은 전지구 고해상도 H Alpha 네트워크를 자연적으로 확장한 것이다. 세계의 7개 태양 관측소가 협력하여 24시간 연속으로 수소 스펙트럼 선의 태양관측을 하고 있으며, 이는 태양의 역동적인 코로나를 이해하는데 유용하다. 전지구 고해상도 H alpha 네트워크는 좁은 스펙트럼 범위에서 관측을 집중하고 있으며, CHAIN은 H alpha 중심과 함께 H Alpha 적색 및 청색의 바깥쪽을 포함한 세 요소까지 스펙트럼 창을 확장한다. 이러한 H alpha 관측을 사용하여, 태양의 형성에서 폭발까지 태양의 연속적인 진화를 따라, 빠르게 움직이는 전자유체역학적 충격의 원인이 되는 파를 관측할 수 있을 것이다. 이러한 지식은 태양 플레어와 코로나 물질 방출을 예측하는데 필수적이다.

동시에, 백터 자기장의 Hinode 관측은 자기장의 세부적인 구조를 밝힘으로써 얼마만큼의 자유 자기에너지가 저장되는지, 플레어와 코로나 물질 방출을 트리거하는 것은 무엇인지 등에 대한 답을 얻을 수 있게 할 것이다.

4. 행성간의 섬광 관측으로부터 태양풍 모델링

태양풍 자료는 나고야 대학의 태양-지구 환경 실험실에서 행성간 섬광법을 통한 초고주파(327MHz) 라디오 망원관측으로 얻어진다. 이 망원관측 시스템은 업그레이드되어서, 과학자들이 볼 수 있는 관측 가능한 현상을 배가 시켰다. 게다가, 태양풍의 전자밀도변동에 의한 라디오파의 산란으로 야기되는 행성간 섬광(IPS)자료는 X선 단층 촬영 기술을 사용하여 삼차원적으로 합성될 수 있다. IPS 패턴을 관측함으로써, 밀도변동과 태양풍 속도의 공간적 분포를 추정할 수 있다.

이러한 자료를 이용하여, 태양풍과 행성간 코로나 물질 방출(ICMEs)의 역학과 구조에 대한 3차원 모델을 개발할 것이다. 이는 부분적으로 3차원 전자유체역학 시뮬레이션을 사용한다. 이러한 자료를 이용한 모델링은 지구 근처에서의 태양풍 속도와 ICMEs의 전파를 추정하는데 유용하다.

5. 실시간 관측과 우주기상지도

태양풍 자료뿐만 아니라 지상기반 자기계 자료를 사용하여, 전리층의 전위와 전류의 분포를 밝히는 우주기상지도는 현재 5~10분 간격으로 생산이 가능하다. 자력기록 변환 알고리즘을 업그레이드한다면, 전지구 오로라 영상과 레이더 자료 등을 실시간으로 추적할 수 있다.

이러한 기상지도를 사용한다면, 태양풍-자기권 커플링뿐만 아니라 자기권-전리층-열권 커플링을



좀 더 자세히 연구할 수 있다. 예를 들면, 열권 바람의 컴퓨터 시뮬레이션과 예측이 현저하게 개선될 수 있으며, 자기권에서 입자를 추적하는 것도 가능해 질 것이다. 또한 지자기 폭풍, 자기권 내부에서의 입자 가속 및 난류 발생이 일어나는 동안 지구를 둘러싼 링 모양의 전류의 형성과 같은 기본적인 물리 프로세스 연구도 가능해 진다.

6. 가상 관측소

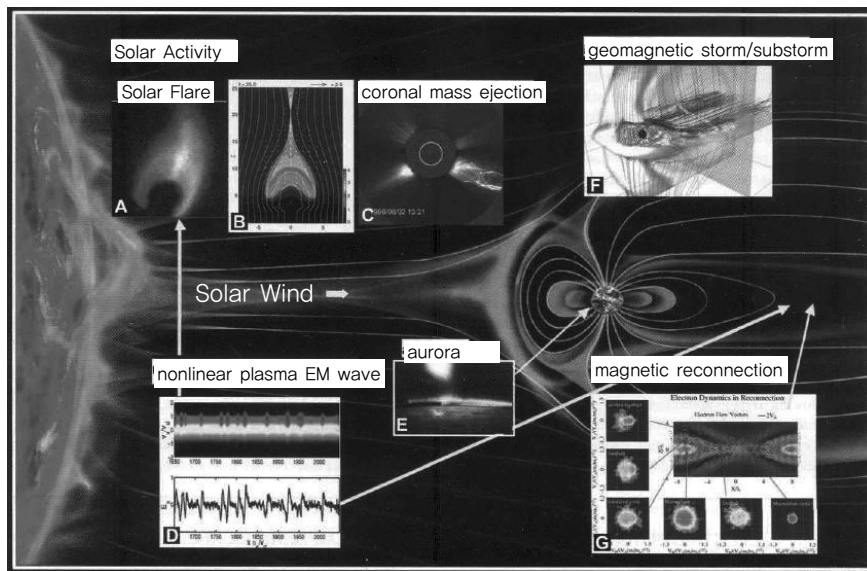
모델을 생산하는데 중요한 것 중에 하나가 우주 기상예측 프로젝트의 기본 연구에서 나오는 풍부한 정보에 사용자들이 쉽게 접근하도록 하는 것이다. 태양과 지구 대기 사이의 공간에 있는 어떤 위

치에서나 자료를 추정할 수 있도록, 태양-지구 시스템의 실제자료를 경계 조건으로 사용한 수치 모델링으로부터 “가상 관측소”가 개발 될 것이다.

가상 관측소 개발을 위해서, 우선 태양과 지구 물리학적 자료를 모두 포함하고 있는 다양한 관측을 연결해 주는 신뢰성 있는 소프트웨어 시스템을 개발해야 한다. 여기서, 관측과 모델링은 상호 보완적인 역할을 수행한다: 모델링 결과는 실시간 관측으로 테스트 될 수 있고, 관측이 부족한 부분은 모델링에 의해서 보충될 수 있다.

7. 우주기상예측을 향한 도전

세계에 개방되어있는 SMART와 Hinode 자료



[그림 1] 태양-지구시스템 : (A) 태양 플레어, (B) X선 플레어 루프 모델링, (C) 코로나 물질 방출, (D) 플라스마 전자기(EM)파, (E) 오로라, (F) 지자기 폭풍/준폭풍 시뮬레이션, (G) 자기의 재연결



를 통해서, 일본의 태양풍 수치모델개발 기술은 중반쯤 와있고, 이제 태양 플레어와 코로나 물질 방출연구에 노력을 집중하고 있다.

가상관측소와 자료 보존 시스템은 다양한 태양-지구 자료뿐만 아니라, Hinode와 SMART 자료에 전 세계의 사용자가 접근할 수 있도록 할 것이다. 이러한 자료 보전 및 공유는 전 세계 과학자들이 태양대기로부터 지구대기까지의 우주기상 현상에 대한 수치모델을 쉽게 수행할 수 있도록 함으로써 실제로 우주기상에 대한 새로운 발견을 이끌어 낼 수 있도록 도움을 줄 수 있다. 향후, 이러한 기초자료들을 공유하고, 자체위성자료를 생산·보유 한다면 우리나라도 우주기상연구 수행에 주도적으로 참여 할 수 있을 것이다.

지구의 한정된 공간에서 머무르지 않고 우주를 향해 나아가고자 하는 도전이 계속되고 있다. 여러 선진국에서는 우주개발연구에 주력하고 있으며, 미래의 경쟁력을 우주관련 기술에서 찾고 있다. 우

리나라도, 단지 지구 상에 영향을 미치는 우주기상뿐만 아니라, 인류가 우주에서 생활하게 될 미래를 위한 우주기상 연구를 준비해야 할 것이다.

편집자 주 : 정보출처 및 저자소개

참고 : Shibata, K., and Y. Kamide(2007), Basic study of space weather predictions: a new project in Japan, Space Weather, 5, S1200X, doi: 10.1029/2007SW000306

- 저자소개 -

Kazunari Shibata : 교토대학, 과학대학원 물리·천문학과 교수

Yohsuke Kamide : 교토대학, 지속가능한 인류권 연구소 교수