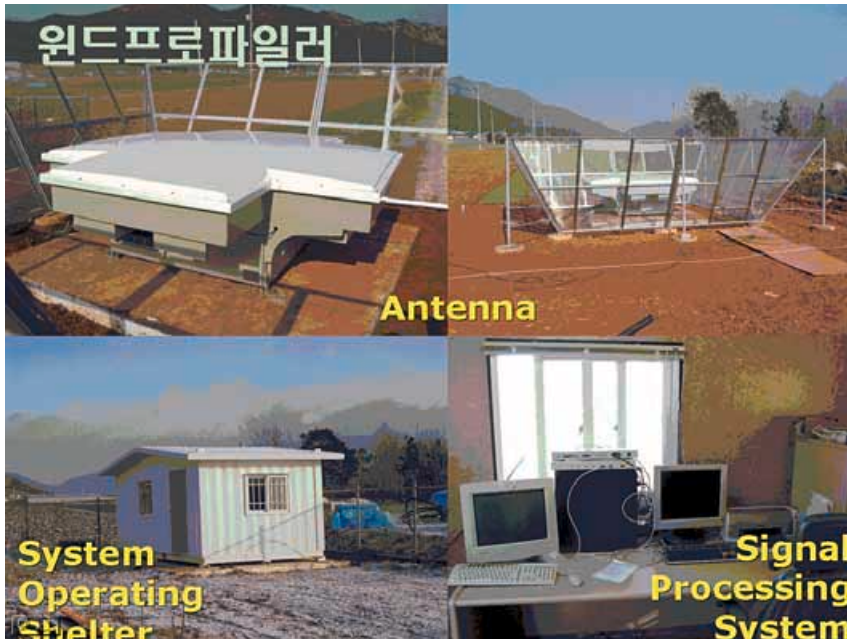


온실가스 농도 분석 .. 미래 기후 예측

인공위성 · 슈퍼컴으로 3차원 기후모델 그려

글_ 정효상 기상청 기상연구소 소장 hschung0@metri.re.kr



원드프로파일러

지구촌 곳곳에서는 지금 기상이변에 의해 고통받고 있다. 우리 나라는 금년 전반기에는 순조로운 날씨와 풍부한 강수 덕분에 큰 근심없이 지냈지만, 여름에는 10년 만의 무더위에 전국이 찜통더위에 시달렸다. 사실 아시아 대륙의 동쪽 변방에 위치하고, 서태평양 서쪽 끝자락에 위치하면서 삼면이 바다로 둘러싸인 우리 나라는 뚜렷한 사계절의 영향을 받는다. 그러나 세계적으로 발생하고 있는 기후변화와 관련하여 우리 나라의 사계절에도 심각한 변화를 맞이하고 있는데, 지난 30년 기후와 비교하여 1990년 이후 도시기후의 평균기온은 약 1.5℃ 이상 증가하였다. 이에 따라 도시에서 기온은 높아

기획연재순서

- 1 21세기의 물리학
- 2 21세기의 화학
- 3 21세기의 생명과학
- 4 21세기의 수학
- 5 21세기의 천문학
- 6 21세기의 해양학
- 7 21세기의 지질학
- 8 21세기의 생태학
- 9 21세기의 기상학
- 10 21세기의 우주학
- 11 21세기의 고고학
- 12 21세기의 인류학

최근 5년 사이 바뀐 100년 기상 기록

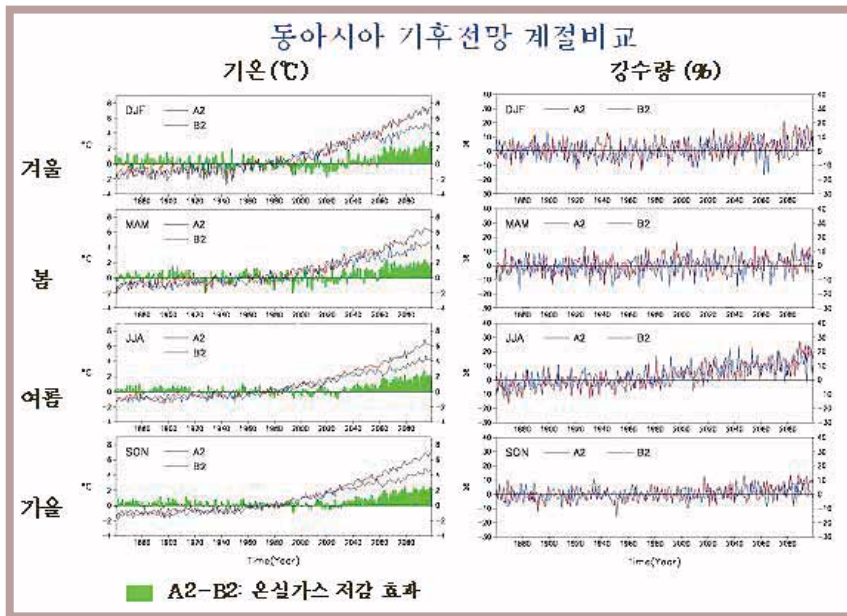
- ▲ 서울 2월 최고 기온 - 2004년 2월 20일 / 18.7도
- ▲ 3월 최대 폭설 - 2004년 3월 5일 / 대전 49cm
- ▲ 하루 최대 폭우 - 2002년 8월, 태풍 루사 / 1일 강수량 870.05 mm
- ▲ 하루 풍속 최대 강풍 - 2003년 9월, 태풍 매미 / 60 m/sec
- ▲ 속초 사상 최고 기온 - 2003년 7월 31일 / 36.6℃
- ▲ 가장 기간 열대야 - 2001년 8월 / 대구 16일 연속
- ▲ 봄철 최악 가뭄 - 2001년 3~5월 / 48개 관측지점 강수량 사상 최저, 총주 24.9 mm
- ▲ 철원 사상 최저 기온 - 2001년 1월 16일 / -29.2℃
- ▲ 가장 황사 발생 - 2001년 3~5월 / 32일

졌으며, 봄과 가을의 계절의 특성이 약화되고 있다.

2002년 8월 태풍 '루사'에 의해 전무후무한 강우기록으로 240여 명의 인명피해와 약 7조 원 가까운 재산 피해를 보았다. 영동지방은 강릉을 중심으로 하루 동안에 연강수량의 2/3인 870 mm의 집중호우가 내렸었다. 또한 2003년 9월 태풍 '매미'는 남부지방에 50 m/s 이상의 강풍을 동반하며 선박 및 시설물에 피해를 주었고, 마산일대에는 폭풍해일로 인해 110여 명의 인명피해와 약 4조 원 이상의 재산피해를 보였다. 이러한 자연재해는 국민총생산의 5% 이상에 달하는 우리나라 성장동력을 감쇄시켰다고 보고되었다.

우리 나라 봄·가을 계절특성 약해져

왜 이 조그만 한반도에 세계적인 이상기후가 빈번히 나타나는 것인가? 어떻게 인간의 힘으로 이런 자연현상에 적응하고, 대비할 수 있을까? 점점 더 심한 재해 유발 가능한 기상현상이 왜 빈번히 발생할까? 이런 현상이 발생하는 대기환경의 조건은 무엇이고, 그 구조는 어떠한가, 그런 현상을 적시에 감시하고 충분히 앞서서 예측할 수 있을까? 21세기를 맞는 우리나라는 어떠한 기후변화와 태풍, 집중호우, 폭설 등과 같은 자연재해는 어떤 강도, 빈도, 언제 유발될 것인가? 이에 대한 전망과 대비는 어떠한가? 기상학을 전공하는 우리는 국민의 쾌적한 삶을 보장하고 국가의 무궁한 발전과 안위를 위해 기상재해를 최소화하기 위해 이런 현상을 적시에 감시하고, 충분한 여유를 가지고 정확히 예보할 수 있어야 한다. 가뭄에 대비하여 충분한 수자원을 확보하여야 하며, 산업전반에 영향을 미치는 기상재해



에 적극적으로 대처하여야 21세기 2만 달러 시대를 맞이할 수 있다. 이를 위하여 세계의 현황과 한반도 기상학의 전망 및 미래의 모습을 살펴보기로 한다.

지구상의 기후변화를 시뮬레이션화

미래의 기후변화를 전망하기 위해서 대기, 해양, 지표, 설빙, 식생 등 지구기후시스템과 각 요소들 사이의 상호작용을 모의할 수 있는 기후모델이 사용된다. 기후모델은 다시 말하면 지구의 기후시스템을 단순화하여 수식적으로 표현한 것이다. 만약 기후에 영향을 미치는 요인들이 어떻게 변하는지 알 수 있다면 기후가 앞으로 어떻게 변할 것인지 시뮬레이션이 가능하다. 미래 기후에 영향을 미치는 요인으로 온실가스 농도의 변화에 대하여 다양한 시나리오가 IPCC(기후변화국제패널)에서 작성되어 미래의 기후를 전망하는데 사용되고 있다. 가장 많이 사용되는 시나리오는 A2와 B2 시나리오로 A2는 이산화탄소의 배출량이 비교적 급격하게

증가하여 2100년에는 820ppm이 되며, 이산화탄소가 완만하게 증가하는 B2 시나리오는 2100년까지 이산화탄소의 농도가 610ppm이 될 것으로 예상된다. 그러므로 이 온실가스 농도 변화 시나리오에 의해 미래의 기후가 어떻게 변할 것인지 기후모델을 이용하여 시뮬레이션화함으로써, 미래 기후를 전망할 수 있다. 이 시뮬레이션은 기상청의 슈퍼컴퓨터에서 수행되었다.

기상청 기상연구소는 독일 막스플랑크 기상연구소에서 개발된 기후변화모델(ECHAM4/ HOPE-G, ECHO-G)을 도입하여 장기간(1860~2100년, 240년) 시나리오 모의실험을 하였다. ECHO-G 모델은 기온, 강수량, 해면기압 등의 연평균, 계절변화, 변동성 등이 현재 기후를 잘 모의하고 있는지 검증되었다. IPCC 배출시나리오(SRES) 중 A2와 B2 시나리오에 따른 온실가스 농도 시나리오 자료를 수집하고, 이를 ECHO-G에 입력하여 기후변화 장기 시나리오 모의실험을 실시

기상학

디지털 예보 기획단

디지털 예보 서비스(예) 시연



2004. 4. 26

디지털예보

하였다. 온실가스 증가 시나리오에는 주요 온실가스인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 산화이질소(N₂O)를 비롯한 총 19종의 온실가스가 포함되었으며, A2 시나리오는 온실가스의 급격한 증가를 보이는 반면, B2 시나리오는 완만한 증가를 나타낸다.

A2[B2] 시나리오 모의결과 CO₂ 농도가 820ppm[610ppm]에 달하는 2100년에 지구 기온은 현재보다 4.6℃[3.0℃] 정도 증가할 것으로 나타났으며, 동아시아 지역(80°E-180°, 20°N-60°N)의 경우 지구평균보다 높은 6.5℃[4.5℃]의 증가 경향을 보여주었다. 2100년의 지구평균 강

수량은 약 4.4%[2.8%] 증가할 것으로 예상되었으며, 동아시아의 경우는 10.5%[6.0%]로 매우 높게 나타났다. 온실가스 농도가 급격히 증가하는 A2 시나리오에 의한 기후변화는 완만히 증가하는 B2 시나리오에 비하여 기온과 강수량이 더 크게 증가하였으며, 전지구에 비하여 동아시아 지역의 변화가 더 클 것으로 전망되었다.

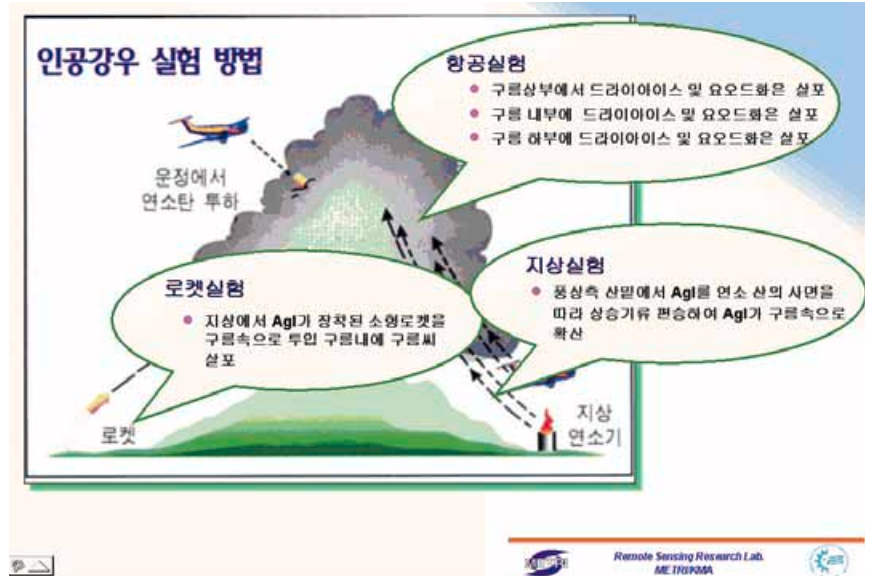
동아시아는 북서지역에서 기온이 가장 높게 상승하고, 강수량은 유라시아 대륙 연안에서 큰 변화를 보인다. 장기 기후변화는 계절에 따라 분석해보면(그림 1 참조) 기온은 여름과 가을에 비하여 겨울과 봄에 상승하는 폭이 클 것으로 전망된다. A2와 B2 시나리오에 의한 차이는 계절과는 크게 상관없이 B2 시나리오가 A2 시나리오보다 2℃ 정도 기온이 낮은 것을 볼 수 있다. 이것은 온실가스 저감효과를 의미한다. 강수량은 특히 여름철에 증가폭이 크게 나타나며, 다른 계절에는 증가가 뚜렷하지 않다. 기온 상승에 따라 증발량의 증가가 강수량의 증가보다 커져서 많은 지역에서 건조해질 것으로 예



상된다.

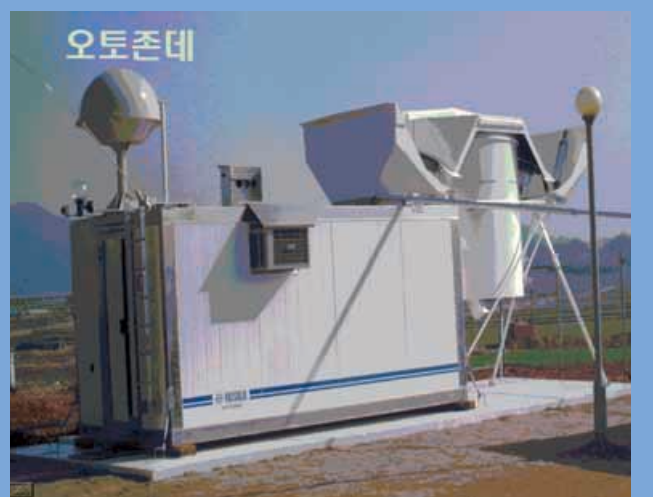
지역기후모델 이용 고해상도 자료 얻어

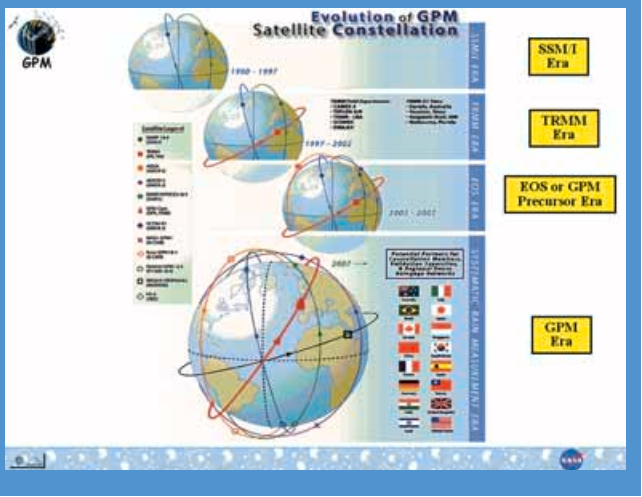
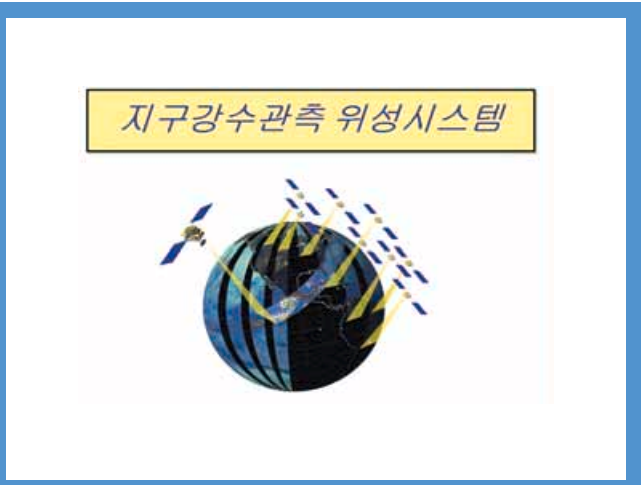
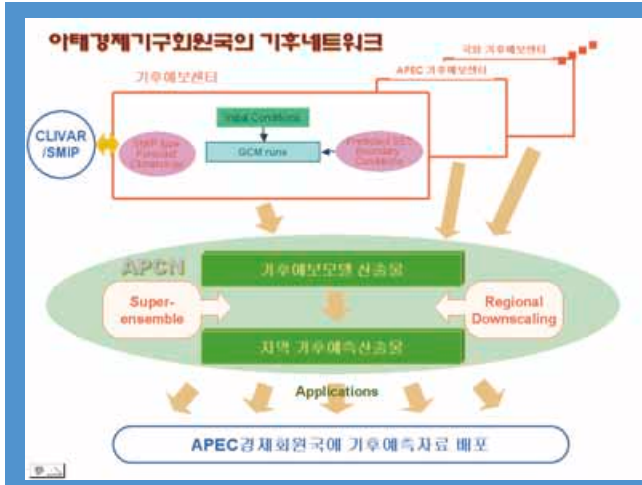
전지구기후모델에 의한 시뮬레이션 자료를 우리 나라와 같이 좁은 지역에 적용하는 것은 여러 가지 문제점이 있다. 우리나라는 지형이 복잡하고 남북으로 길게 위치하고 있으며 삼면이 바다로 둘러싸여 있어서 지역에 따라 기후 특성이 달리 나타난다. 또한 기후모델에서 한반도 남부는 육지가 아닌 바다로 표현되어 전지구모델의 결과를 직접 활용할 수 없다. 그러므로 기후변화 시나리오를 우리 나라에 활용하기 위해서 고해상도 기후변화모델을 이용하거나 제한지역기후모델(RCM)을 이용하여 우리 나라의 지형에 적합한 자료를 생산하여야 한다. 이 연구에서 사용한 기후변화모델은 약 400km 해상도를 가지고 있으나, 지역기후모델(RCM)은 해상도가 약 30km로 고해상도 자료를 생산할 수 있도록 150년(1951~2100년) 고해상도 자료를 산출하였다. 현재 모델의 편이(bias), 관측기후와 비교분석, 모델의 계통오차 수정기법 등 고해상도 자료에



대한 검증을 하고 있다. 150년 시뮬레이션한 결과(그림 참조)를 1971~2000년을 기준으로 10년 평균하여 나타낸 것이다. 관측기온과 강수량도 그림에 같이 표시하였다. 21세기에는 서리일의 발생횟수 감소, 열파현상 증가, 겨울의 단축, 강수일수 감소, 호우 및 가뭄 증가 등 온난화에 따른 변화가 심화될 것으로 전망되었다. 앞으로 이 자료는 더욱 자세히 분석될 것이다.

이 연구결과는 미래 기후변화 시나리오의 하나로 온실가스의 농도가 급속도로 증가하는 것을 가정한 것이다. 그러므로 미래 기후변화를 예견하기 위해서 다양한 시뮬레이션을 통한 시나리오가 작성되어야 할 것이다. 앞으로 기후변화에 영향을 미치는 에어로솔의 농도변화를 포함하는 연구를 진행할 예정이다. 또한 기후의 자연변동성은 모델에서 충분히 모의되지 못하고 있다. 그러므로 자연변동성이 어떤





영향을 미치는 지에 대한 연구도 지속되어야 한다. 궁극적으로 국가의 지속가능한 발전을 위해서 기후변화 과학연구를 기반으로 기후변화에 따른 우리 나라 사회·경제 및 자연생태계에 미치는 영향을 평가하고 그에 따른 대비책이 강구되어야 할 것이다.

기상청 기상연구소에서 IPCC의 기후변화 시나리오로 2020년대와 2050년대의 동아시아 지역의 기온, 강수량의 추세 변화를 분석한 결과, 동아시아 평균기온은 A2시나리오에서 2020년대에 1.2℃, 2050년대에 2.4℃, 2080년대에 4.0℃

상승하고, B2시나리오에서 각각 1.2℃, 2.3℃, 3.0℃ 상승하는 것으로 전망되었다. 동아시아 평균강수량은 A2시나리오에서 각각 0.6%, 2.4%, 5.4% 증가하고, B2시나리오에서 각각 1.4%, 2.6%, 4.0% 증가하는 것으로 전망되었다. 기후변화 전망을 계절별로 보면, 겨울과 봄의 기온 상승이 여름에 비하여 약간 높으며, 여름철 강수량은 증가하는 추세이나 변화가 클 것으로 예상되었다. 2050년대는 우리 나라 부근에서 기온은 약 2℃ 상승하고, 강수량은 특히 여름철에 증가할 것으로 보인다. 20세기의 변화 특성과 비

슷하며, 여름철 강수량의 증가 추세는 호우(즉 홍수재해) 발생빈도의 증가 가능성을 의미한다.

‘악기상 집중관측실험’ 해 3차원 관측

미국은 2002년 극심한 가뭄과 홍수의 피해를 보았고, 유럽에서는 기록적인 집중호우에 의한 2002년 8월의 체코 프라하의 홍수, 10월의 독일 드레스덴의 홍수로 수백 년을 자랑하며 지켜온 유적들이 물에 잠겨 폐허가 되었다. 이에 유럽의 기상선진국에서는 지구상의 육지, 대기, 물, 생물계는 상호 연관되어 끊임없이 변하고

있으나, 어떠한 나라도 전지구적 시스템에 대한 모든 관측정보를 제공하지 못하므로, 개별 국가나 역내 국가들끼리의 집중관측과 수치예측모델개발을 전세계적으로 확장시키려는 국제협력사업을 시작하였다. 그것은 2003년부터 시작되는 북반구 악기상 집중관측과 예측실험(The Hemisphere Observing System Research Predictability Experiment: THORPEX)이다. 이 실험은 최근의 재해 유발가능 기상현상(High-impact Weather)에 대한 단기예보, 중기예보 및 경보에 대한 정확성을 향상시키고, 이러한 향상이 사회·경제적 이익을 얼마나 산출하는가를 평가하여 지속적으로 인프라 구축과 실험을 추구하는 사업이다.

여기에는 새로 개발된 첨단관측기체인 표류존데(Driftsonde)서 수직하강관측기구(Dropsonde)와 해양상에서 로켓존데(Rocketsonde)를 사용하고 있다. 이 실험은 일본의 네 곳에서 비양기구를 띄워 3시간마다 수직하강관측기구를 해상으로 떨어뜨려 태평양상의 대기환경을 관측하고, 해양상에서는 이 비양기구의 공백지역에 부이에 장착된 로켓상향관측기구를 3시간마다 쏘아 올려 대기환경을 3시간마다 3차원으로 관측한다. 이 관측에서 재해유발가능기상현상의 구조, 발달과 이동의 메커니즘을 규명하게 된다.

이와 연계하여 우리 나라 기상청 기상연구소에서는 한반도 악기상 집중관측실험(KEOP: Korea Enhanced Observation Program)을 실시하고 있고, 일본 기상청 기상연구소에서는 태풍사냥프로그램(Typhoon Hunter Experiment)을 진행 중이다. 여기에는 무인비행기(Aerosonde), 해양관측선박에서 라디오

존데(Radiosonde), 이동식연구용기상레이더(Mobile X-band Radar), 자동고층관측기구(Autosonde), 자동수직측풍기구(Wind Profiler), 마이크로구름레이더(Micro Cloud Radar) 등으로 극동아시아 장마와 관련된 재해유발기상현상을 3시간마다 3차원으로 관측하여 구조와 발생, 발달의 메커니즘을 규명하고 있다.

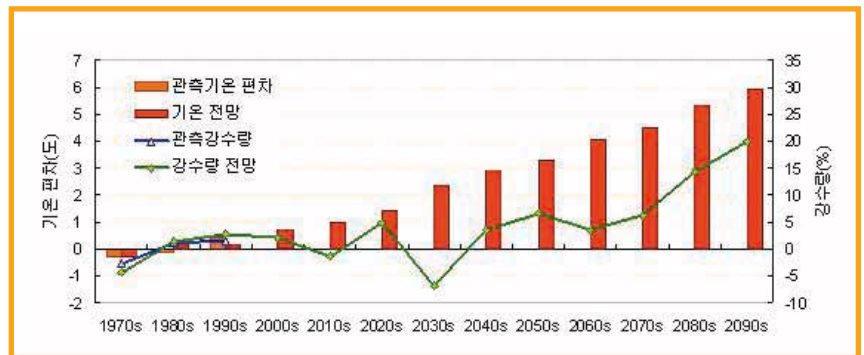
우리 나라에서 가장 큰 피해를 일으키는 현상은 집중호우, 태풍, 폭설 등이다. 예를 들어 우리 나라 기상재해는 6, 7, 8, 9월의 여름철과 초가을에 집중되며, 나타나는 시기도 다를 뿐만 아니라 그 발생 및 발달도 달라서 장마와 관련된 집중호우, 기단성 집중호우, 태풍에 동반된 강풍과 집중호우로 나타나고 있다. 이들 집중호우는 보통 중규모 대류계 및 중규모 대류 복합 구조계에 의하여 대부분 발생하는데 이들은 중규모 관측망으로는 그 현상의 이해와 예측이 거의 불가능하다. 즉, 한반도의 집중호우는 장마 전선상에서 발달하는 요란에서 중규모적 대류의 역할과 태풍이 주요 메커니즘이 된다. 이러한 집중호우를 이해하고 예측하는 데는 문순 규모(지구적 규모)의 대기 운동에서부터 뇌우 규모(대류 규모)에 이르기까지 다양한 규모의 대기 현상을 함께 이해하는 것이 필요하다. 따라서 오토

존데, 윈드프로파일러, 연구용 X-밴드 도플러 기상레이더 등과 같은 첨단 관측장비들을 이용한 장마전선상의 중규모 강우세포에 관한 시·공간 고분해능 악기상 집중관측을 통하여 한반도 여름철 악기상의 구조 및 발생, 발달 메커니즘을 규명하고자 한다.

범세계적인 지구관측계획 추진

최근 미국이 주도하여 한국을 포함한 44개국, 세계기상기구 등 26개 국제기구가 참여하는 전지구관측계획(GEO: Global Earth Observations)이 2003년 7월 워싱턴에서 창설되었다. 이 계획은 지구계의 기상, 기후, 해양, 육지, 지질, 생태계, 자연적·인위적 재난을 포괄적으로 관측하여 인류의 안전과 복지향상, 지구환경보호 및 지속가능한 발전을 추구하려는 범지구적 과학기술협력사업으로 2008년부터 본격 가동될 예정이다.

이 계획을 통하여 자연적·인위적 재해로부터 인명과 재산손실의 감소, 인류의 건강과 복지에 영향을 주는 환경적 요인들에 대한 이해, 에너지 자원관리의 개선, 기후변동과 변화에 대한 이해·평가·예측·경감·적응, 물순환에 대한 이해증진을 통한 수자원 관리개선, 기상정보·예보·경보의 개선, 육상·해안·해양 생태



계의 관리 및 보호의 개선, 지속가능한 농업의 지원과 사막화 방지, 생물다양성에 대한 이해·감시·보존을 궁극적인 목표로 범세계적인 지구관측 프로그램을 수행하려 하고 있다.

미국은 이를 통하여 기상예보에 1달러 투자시마다 농업분야에서 최소 15달러 이익, 태풍 예보·경보 및 관련 비상대응으로 30억 달러 피해방지 효과, 국제적으로 각국의 기상, 치수 및 기후서비스로 매년 200억~400억 달러에 달하는 편익, 엘니뇨에 대한 정확한 예측 향상으로 전세계의 농업분야에서 최소 4.5억~5.5억 달러의 이익을 얻을 것으로 예상하고 있다. 우리나라는 이 계획에 과학기술부, 기상청을 포함한 관련부처들이 적극적으로 참여하고 있으며, 이를 토대로 한반도 단기 및 중기예보를 향상시키고, 전세계를 상대로 교역하는 세계 10대 무역국가로서의 국제경쟁력 제고를 위한 장기예보 및 기후예측의 정확성을 향상시켜 기상분야 투자대


비효과와 사회·경제적 영향 평가를 통한 투자의 객관성확보를 기하고 있다.

디지털예보, 유비쿼터스 기술과 접촉

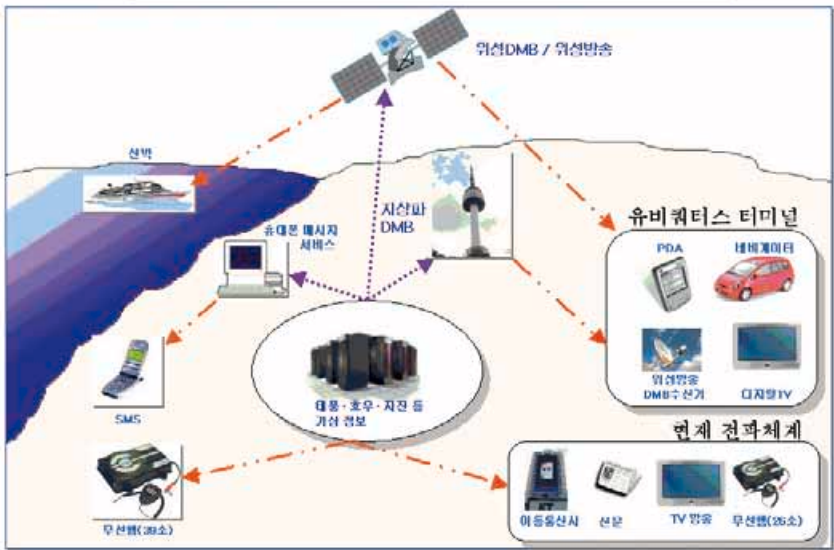
우리 나라에서는 2008년 기상위성을 발사하여 10분마다 1km에서 500m 이하 크기로 우리 나라 주변과 동중국 해상에서 발생하는 악기상 현상을 감시하여 사전에 기상재해를 대비하게 할 것이다. 국지기상수치예보모델은 점차 격자크기가 10m의 고분해능으로 디지털예보를 가능하게 하고, 이 기상정보는 유비쿼터스 정보 기술로 신속, 정확, 적시, 적소에 전달할 것이다.


6개월 예보, 1년 예측 등은 현재 단기예보 정확도(약 86%)에 버금 가는 수준으로 전세계의 장기예측을 가능하게 하는 아·태경제기구 산하 기후예측네트워크를 이용하고, 이를 통한 국제무역에 선도적 역할을 하여 국가의 경쟁력을 높이게 될 것이다. 기상재해를 줄이고자 하는 노력의

일환과 우리가 살고 있는 지역환경은 도시화 및 산업화로 점점 더 황폐화 되고 있으므로 인위적인 쾌적한 환경을 만들기 위한 인공기상조절기술인 인공증설과 안개소산의 기술이 실용화할 것이다. 이러한 기술을 발전시키기 위해서는 ▶전국가적 기상재해의 예방대응체계 구축 ▶필수적 수자원 확보 및 운영 지원 체계 수립 ▶전세계 기상·기후감시 및 예측으로 국제경쟁력 확보지원 ▶기후변화로 인한 산업·생명·보건·의료분야의 신기상 기술 개발 ▶최적 국민 삶을 위한 기상조절 기술개발 필요 ▶남북한 통합대비 재해유발기상 감시 및 예측성 제고와 같은 체계의 구축과 기술연구가 필수적이다.

기상학의 미래는 우리 국민의 쾌적한 삶을 보장하고 국가의 안위를 위하여 재해를 최소화하기 위해 이런 현상을 적시에 감시하고, 충분한 여유를 가지고 정확히 예보할 수 있어야 한다. 기상에 대비하고 연중 골고루 충분한 물을 확보해야 한다. 과거의 물 풍족 시대에서 앞으로 용수 수요의 대량화와 하천환경의 악화로 물 수요와 공급의 시간적·공간적 불균형을 해결하기 위해 전지구강수위성을 활용하게 될 것이며, 국지적으로 물의 이용을 더욱 다양화하고 고도화하는 물의 현안문제를 해소하기 위한 인공증우 및 증설 기술이 실용화할 것이다. 또한 산업전반에 영향을 미치는 기상재해에 적극적으로 대처하고 전세계의 기후예측을 할 수 있어야 우리는 21세기 2만 달러 시대를 맞이할 수 있다. 

유비쿼터스 기상정보 전파체계



 글쓴이는 연세대학교 천문기상학과 졸업, 동대학원과 미국 위스콘신-메디슨 주립대학교에서 석사학위를 받은 후 미국 텍사스 A&M 주립대학교에서 박사학위를 받았다. 현재 조선대 지구과학과 겸임교수, 한국기상학회 회장을 겸임하고 있다.