

기후변화 예측기술과 대기과학

“國家的 대응과 연구결과 公開 절실”



金正禹

延世大 이과대교수 · 대기역학

○ 지구온난화와 기후협약

지난 6월 중순 브라질에서 열린 유엔환경개발 회의에서 우리 정부는 기후협약에 서명함으로써 전세계적으로 공감대를 형성하고 있는 「지속가능한 개발」에 참여할 것을 공약하였다. 이 참여는 최근에 전국적으로 인기를 모으며 확산되고 있는 자원재활용운동, 쓰레기분리수거운동 등 환경보전국민운동과 근본적으로 궤를 같이 한다.

기후협약은 대기중 CO₂의 증가에 따른 지구온난화와 그 가능한 영향에 대한 세계 정치권의 지대한 관심에 따라 마련된 것이다. 대기중 CO₂의 농도는 산업혁명 이후 지난 100여년에 걸쳐 급격한 증가를 보인 것이 사실이고, 현재의 추세에 따르면 2050년에는 산업혁명 무렵때 값 280ppmv의 약 2배에 이르게 된다. CO₂는 해발 120여km 고도에 이르는 대기의 균질권(homosphere) 안에서 일정한 조성비로 나타나며, 그것이 없는 가상적 경우에 비하여 이 권역

전체의 평균기온을 높일 뿐만 아니라 성층권 이상을 냉각시키고 그 밑에 있는 대류권기온을 상승시킴으로써 권역 전체의 균질화에 기여하고 있다. 특히 대류권 기온의 상승은 대기중 수증기 함량의 증가와 맞물려 증폭되며 흔히 이를 온실효과의 강화라 부른다. 따라서 CO₂의 증가는 이런 온실효과로 말미암아 특히 지표부근의 기온상승을 초래하게 된다.

그런데 이 대기중 CO₂의 증가는 주로 무엇에 기인하는가? 화석연료(석탄, 석유)와 천연가스의 연소이다. 이 연소과정에서 필연적으로 방출되는 CO₂분자들의 대기중 평균 체류기간은 약 200년 정도로 추정되어, SO₂등과 같은 「대기오염물질」의 대기중 체류기간이 1주정도인 것에 비하면 CO₂는 한번 대기로 들어갔다하면 다시는 빠져 나오지 않는다고 보아 무방하며, 바로 이 사실이 돌이킬 수 없는 일방적 변화가 지구환경 전체에 걸쳐 일어나고 있다는 위기의식의 바탕인 것이다.

다소 해학적이긴 하나 이 변화가 반드시 파괴

적이라는 보장이 없는 한 좋은 선물을 줄 수 있다고 보는 견해도 있다. 특히 극지의 강한 기온 상승으로 시베리아 동토의 옥토화가 예상된다는 것이 이런 견해에 속한다. 그러나 지구 온난화의 예비 영향평가는 대체로 파괴적측면을 강조해 온 것이 사실이다. 예를 들면, 지구 온난화에 있어 해수온도의 상승도 예견되는 바, 만일 두께 100m의 수온이 평균 2℃ 상승한다면 해수의 팽창으로 말미암아 60cm의 해면 상승이 필연적이며, 이만한 수위 변화는 전세계 육지 면적의 축소와 더불어 해안선의 상당한 재배치를 의미하는 것이다.

아직 우리 정부는 지구 온난화와 그 파괴적 효과가 나타날 앞날에 대한 환경론 보다는 기후 협약에 따라 당장 「강요될 에너지 절약」이 우리에게 의미하는 경제론에 지대한 관심을 보이고 있다. 이런 분위기는 심지어 이 협약을 주도해 온 서방세계에서도 정착되어 있는 것으로 듣고 있다. 거기에는 그럴 만한 이유가 있을 것으로 믿는다. 여기에서는 지구온난화를 포함하여 지구환경의 파괴를 초래할 기후 변화에 대한 과학과 기술에 대하여 한 과학자의 입장에서 언급하고자 한다.

○ 기후는 우리에게 무엇이며 어떻게 변화하는가?

지구는 인류에게 오직 하나의 집이라고 한다. 이 말은 적어도 앞으로 100년동안 존재하는 모든 인류에게 대해서는 진리이다. 이 지구는 반경 6370여km의 유한한 구면체이며, 그 표면의 70%는 평균 깊이 3613m의 해양, 그리고 나머지는 평균 고도 668m의 육지이며, 이 해양과 육지를 대기권이 덮고 있다. 해양의 일부는 해빙으로 덮혀 있으며 육지의 일부는 빙하와 적설로 덮혀 있는데, 이들은 총체적으로 빙권이라 부른다. 기후란 대기권, 해양, 육지 및 빙권의 유체역학적, 열역학적 및 화학적 상태를 말하며, 이런 의미에서 해양, 육지, 대기 및 빙권은 총체적으로 기후계(climate system)를 구성한다.

기후는 우리에게 있어 삶의 조건이다. 이 조건은 어떻게 변화하는가? 크게 외부적 변화와 내부적 변화로 나누어 볼 수 있다. 대표적인 외부적 변화로 태양과 지구의 천문학적 위상 변화에 따라 태양 복사의 배분이 거의 주기적으로 변화함을 들 수 있는데, 기후계는 이에 대한 주기 반응을 보인다. 태양계가 그 운행중에 우주진 속을 통과하게 되어 이 때 지구가 받는 태양 복사의 감소 때문에 17세기 소빙하기가 출현한 것으로 보는 견해가 있는데, 이 견해에 따르면 이것 또한 외부적 기후변화라 할 것이다.

내부적 기후변화의 한 예로 요사히 흔히 언급되는 엘리뇨현상을 들 수 있다. 엘리뇨는 기후계의 구성요소인 해양과 대기간의 상호작용으로 생기는 반복적 현상이다. 엘리뇨때에는 태평양 해면온도가 매우 특징적인 거대조직(grand organization)을 보이며, 이와 관련하여 이상 기후의 출현이 높다.

이제까지는 외부적 변화이던 내부적 변화이던 기후 변화는 모두 자연적 변화인 것으로 보아 왔다. 최근에 들어서면서 인위적변화로서의 기후변화를 언급하게 되었다. 국지적으로 일어난 기후변화의 경우 의암댐 건설에 따른 춘천 지역 안개발생빈도의 변화, 탈당저수지 건설에 따른 양평의 흑한 출현 등을 들 수 있다. 대기중 CO₂의 증가에 따른 지구 온난화는 전지구적으로 일어나고 있는 인위적 기후 변화로 이해되고 있다. 이 인위적 변화는 대체로 화석연료의 연소라는 외부강제 때문에 외부적 변화로 취급되는 것이 사실이지만, 대기중 CO₂의 증가가 단순히 지구온난화로만 끝나는 것이 아니며, 오히려 이에 수반하여 나타날 태풍발생, 몬순, 엘리뇨 등 여러가지 내부 변동들의 구조적 변화가 더욱 중요할 수 있으며, 이러한 상세한 기후 변화들의 예측이 급세기 기상학자들에게 던져진 주요과제라 할 것이다.

○ 대기과학이 다루는 기후변화

기후계의 구성요소들 가운데 대기는 가장 빠

르게 변동하거나 변화하는 부분이다. 대기과학 (Atmospheric Sciences)은 대기의 물리와 화학을 취급하는 기초과학으로서 당연히 지구 온난화 등 비교적 빠르게 일어날 기후변화를 다루게 된다. 오늘날 대두된 주요문제로는 앞에 말한 지구온난화 이외에 오존층 파괴와 산성비 피해를 들 수 있다.

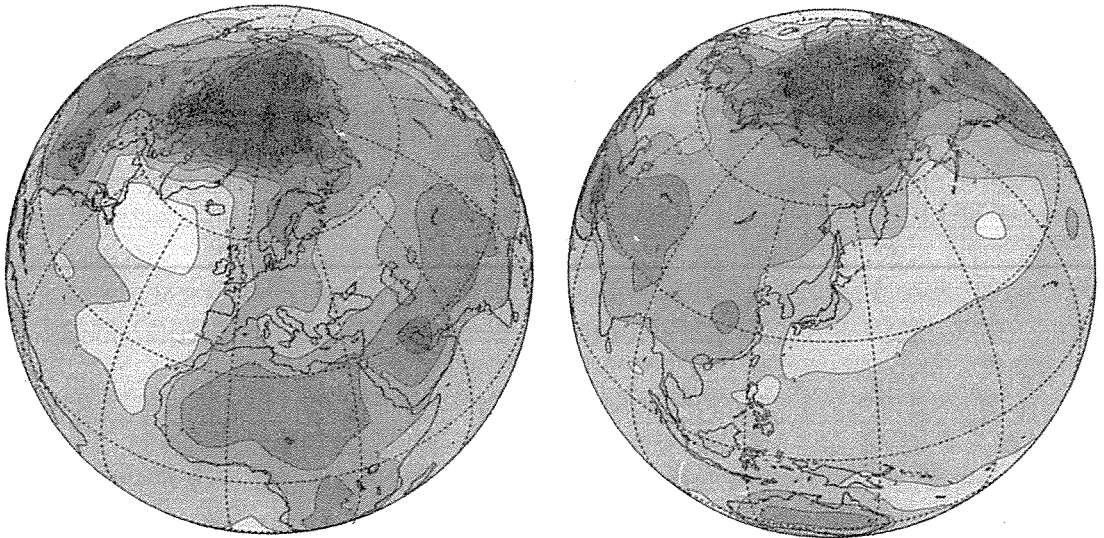
오존층파괴는 이른 봄에 잠시적으로 일어나는 남극 성층권 오존 농도의 극적감소가 발견된 1984년 이후로 지금까지 계절 최소값이 지속적으로 떨어지고 있어 매우 심각한 문제로 인식되고 있다. 남극겨울 성층권은 태양광이 없어 매우 차갑고 거센 편서풍 소용돌이안에 상당량의 오존을 함유하고 있으며 간간히 질산빙정으로 구성된 소위 성층권구름과 이에 더불어 지상으로 부터 방출되어 오랜 기간동안의 여행끝에 여기까지 올라온 CFC(Chlorofluorocarbon-염화불화탄소) 분자들과 이들로부터 유리된 염소 이온들이 부유하고 있다.

겨울이 막 지나 햇빛이 들어 자외선이 나타나기 시작하면 염소 이온들은 CFC로부터 더욱 유리되고 강력한 촉매로서 오존을 파괴하게 되는데, 이 반응은 균질매체안에서는 무시될 정도로 느리지만 질산 구름의 계면에서는 매우 빠르게 일어나는 것으로 판명되었다. 이 과정에서 오존 농도의 급격한 하강이 일어난다. 그러나 조만간에 태양광의 가열 때문에 질산 빙정의 증발로 성층권 구름이 없어지게 되면, 풍부한 염소 이온과 자외선에도 불구하고 오존 파괴는 중단되고, 오히려 유리되어 부유하던 산소원자와 산소 분자들이 충돌반응으로 자외선을 흡수하면서 오존으로 화합하게 되어 저위도로 부터의 오존 수입과 더불어 오존농도의 급상승이 일어나 원래의 오존농도가 복구된다. 매해 일어나는 이 계절적 변동의 와중에서 나타나는 오존농도의 최소값과 겨울철 성층권에 존재하는 CFC 함량은 높은 상관관계를 가지는 것으로 보인다. 실제로 지난 8년 동안에 오존 전량의 계절 최소값은 지속적으로 하강하였으며, 같은 기간에 CFC 함량은 증가하였을 것으로 추정되는 것이다.

오존층 파괴는 다른 위도에서는 남극 성층권에서와 같이 나타나지는 않으나, 최근에 북극 성층권에서 비슷한 현상이 관측되어 보고된 바 있다. 봄에 들면서 극적으로 감소되었던 오존농도가 결국 한달이 못되어 원상으로 복구하지만, 중위도로 부터의 수송이 이 복구에 한 몫을 하게 되며 결과적으로 저위도 오존량의 점진적 감소를 초래할 수 있다. 실제로 지난 8년 동안 연세대학교 오존 관측에서 측정된 「서울 오존자료」에 의하면 장년 감소(Secular Decline)가 보인다.

오존농도의 감소는 일차적으로 자외선 피폭량의 증가를 초래함으로써 돌연변이, 피부암 발생의 증가 등 생물학적 및 보건학적 영향이 중요한 것으로 보고되고 있다. 물론 오존층이 완벽하게 파괴되면, 모든 고등생물은 존재할 수 없다. 실제로 대기화학은 화산활동에 의한 수증기의 축적으로 바다가 먼저 생기고, 이로 부터 대기중에 들어간 수증기에서 유리된 산소원자, 산소분자들이 충분히 축적된 다음에 오존층이 형성되었을 것으로 보기 때문에, 오존층은 바다보다 훨씬 후에 생긴 것으로 추정되고 있다. 단세포생물을 포함한 저급생물들이 오존층이 생기기 전에도 있었는지 후에야 출현했는지는 알려지지 않고 있으나, 고등생물의 출현 시기는 지구상 생명 출현의 역사에서 후장에 속하는 것이 사실이다.

성층권 오존층의 전지구적 감퇴는 실로 매우 위험한 일이다. 성층권 오존의 기상학적 기능은 자외선 흡수로 따뜻해진 기층을 형성하여 상대적으로 차가운 대류권위에 돔으로써 전체적으로 매우 안정된 층리를 구성하는 것이다. 이 결과로(난류로 가득찬) 현재의 대류권은 대략 12km 정도에 머물며 특히 연직방향으로 발달하는 호우를 동반하는 적운들의 키가 제한되고 있다. 따라서 오존층의 감퇴는 안정 층리의 파괴를 초래하고 적운류 구름들의 키가 커짐으로써 첫째 우박의 형성조건이 완화되어 지상에 닿는 우박의 크기가 증가할 것이고 둘째로 구름 전하의 증가로 번개의 세기와 빈도가 증가하며, 셋째로



▲ 현재 추세대로 CO₂를 대기중에 방출했을 때 2080년에 나타나리라고 추정된 지표기온의 변화. 이 그림의 왼편은 영국 런던을, 오른편은 동북아를 각각 중심으로 하는 기온변화의 반구분포로서, 독일 기후계산센터의 모델응용책임자인 Ulrich Cubasch 박사가 제공한 것이다. 가장 진한 부분은 6℃ 이상의 기온증가, 가장 연한 부분은 1℃ 미만의 기온증가를 나타낸다.

대류순환의 증가로 수증기의 응결이 가속되어 강우량의 증가를 초래할 것이다. 이러한 시나리오의 지구바다 형성의 초기에 빈번한 화산 폭발과 더불어 천둥, 번개를 동반한 큰 비구름이 나타났을 것으로 판단하는 기초 논리에 불과하다. 자외선을 차단시키는 특수 의상을 입었다 해도, 전 인류가 돌발적이며 빈번한 홍수와 엄청난(보통 수박크기의) 우박 피해로 한 여름을 견디기가 힘들 것이다.

기후변화의 입장에서 볼 때, 산성비 피해문제는 산성비 예측문제와는 다른 차원의 문제로서, 현재 파악되고 있는 산성비 피해정도에 비교해서 미래에 일어날 산성비 피해정도가 어떠하리라는 것을 예측하는 문제이다. 산성비 피해는 지구 온난화나 오존층 파괴보다는 훨씬 빨리, 특히 우리에게, 틀림없이 닥쳐올 것이다. 산성비는 대기중 SO₂ 등 대기오염물이 구름방울들에 녹은 아주 낮은 pH의 빗물로서 지상으로 낙하하는 것을 말하는데, 특히 대도시와 공단지역

및 그 풍하지역에 출현한다. 산성비가 출현할 풍하지역의 위치와 피해정도는 대기 오염물의 발원지인 대도시나 공단지역의 크기, 오염물 배출량, 구름 및 이를 운반하는 기류의 성질 등에 관계된다.

중국의 산업화가 필연적이라면, 현재의 구조로 볼 때 그것은 주로 황해연안, 특히 발해만 부근, 산동반도부근, 상하이부근 등지에서 집약적으로 진행될 것이며 우리나라는 거의 모든 계절에 걸쳐 이들의 풍하지역이 될 것이다. 특히 발해만에서 발달하는 저기압은 매우 위험한 산성비 덩어리로 우리를 덮칠 가능성이 높다.

○ 기후변화에 대한 국가적 대응 - 제언

우리가 당면할 기후변화는 지구 온난화든, 오존층 파괴이든, 또는 산성비 피해이든, 공간적으로는 적어도 한반도를 넘어서는 대규모 (large-scale) 구조로 일어나며, 시간적으로도

한 세대를 넘어서는 장기적(long-term) 구조로 일어나는 현상이다. 그러나 한반도안에서도 기후분포가 복잡함에 비추어 기후변화의 분포를 상세히 알기 원하며, 또한 변화의 대상 자체가 태풍, 몬순(장마), 엘니뇨 등과 같이 단주기(수일~수년) 기상시스템들임에 비추어 이들의 구조변화를 구체적으로 알아야겠다.

기후변화에 대한 국가적 대응은 CO₂ 방출량의 제어와 관련된 에너지수급문제, O₃과피 매체의 생산제어와 관련된 신물질개발문제, 산성비 피해 저감을 위한 대기오염물 제어문제, 그리고 이 모든 기술적 문제들과 필연적으로 연계되는 경제·사회적 문제들, 국익과 국제관계 등 산적되는 문제 군들의 합리적 해결을 위해 당연히 정부차원에서 시급히 그러나 신중히 마련되어야 할 것이다. 그러나 이러한 대응은 여하한 경우에 있어서도 다양한 전문기술 개발과제들의 적극적 수행으로 구체화되어야 하며, 정부는 이에 전폭적 지원을 보장해야 될 것이다.

기후변화와 그 영향은 기상예보와 마찬가지로 지역 또는 집단이윤의 추구수단이 되어서는 안 되겠기에 기후변화와 그 영향에 대한 연구는 가급적 기업활동으로부터 독립되어야 하며 연구결과는 완벽하게 공개되어야 한다. 실제로 이러한 공개원칙은 국가간에도 적용되며, 따라서 기상

기술이나 환경기술의 국가간 이전은 다른 기술 분야와는 다르게 상당히 개방되어 있다고 보아야 할 것이다.

그러나 오늘날 환경보전을 위한 규제가 점차적으로 정비, 강화됨에 따라 모든 기업 개발은 「지속가능한 개발」의 모습을 갖추기 위한 치열한 경쟁을 거칠 수 밖에 없고, 따라서 기업 출연연구소들이 독자적으로 개발하는 상당수준의 환경보전 관련제품 생산기술들이 공개 활용될 경우 큰 국가이익을 줄 수 있음에도 불구하고 특별한 조치가 없는 한 독점될 것이다. 아마도 이 정도의 독점은 투자의욕의 유도를 위해 필요한 것인지도 모르겠다.

기후 변화에 대한 국가적 대응이 앞에 언급된 기술적 대책만으로 끝날 수 있다면 참 좋겠다. 그러나 기후변화는 궁극적으로 예측되어야 할 것이다. 올바른 예측은 검증과 개선의 대상이 될 수 있는 객관적 모형이 존재할 때 비로소 안정하게 얻을 수 있을 것이다. 이에 대한 정부의 이해로 최근에 「지구 환경감시 및 기후변화 예측기술」 개발사업이 G7 과제의 하나로서 탄생되었다. G7과제는 세계 제일을 표방하는 연구집단의 창출을 돕기 위한 국가적 배려에서 탄생되었다는 개념적 배경을 가지고 있는 만큼, 이 과제에 대한 우리 과학자들의 기대는 자못 크다.

●●●●●●●●●●●●●●●● 오염이 덜한 살충제

살충제는 현대농업에서 주춧돌 구실을 하지만 환경파괴를 가져올 수 있다. 이 화학물질이 씻겨서 냇물로 들어가면 하천을 오염시키고 이로써 곤충을 죽이는가 하면 해충들이 저항력을 키울 때 쓸모가 없게 된다. 그래서 과학자들은 해충과 싸울 새로운 방법을 모색하고 있다. 미국 농무부의 페오리아 농업연구소 과학자들은 최근 장래가 촉망되는 접근방법을 완성했다.

이들의 구상은 매우 간단하다. 살충제를 전분이나 옥수수가루와 섞어 끈적거리는 작은 알

갱이를 만든다. 보호할 식물에는 금방 씻겨 내리는 종래의 살충제와는 달리 이 끈적끈적한 알갱이들은 폭풍우가 몰아칠 때도 나무잎에 찰싹 달라붙는다고 농무부 연구자인 마이클 맥과이어는 말하고 있다.

그 결과 농민들은 농작물에 훨씬 적은 양의 살충제를 뿌려도 되고 더욱이 지하수나 또는 강물의 오염을 줄일 수 있다. 이밖에도 과학자들은 이 혼합물에 곤충유인제를 첨가하여 미끼 구실을 하면서 보다 큰 효과를 볼 수 있다. 지금까지 다우 케미컬사, 아메리칸 사이나마이드사 그리고 에코젠사는 이 방법을 라이선스하는데 합의했다.