

기상위성서 입체적으로 관측 대기조절 인공강우도 실현

레이더로 비·구름 측정

제2차 세계대전을 통해 영국의 방공망 체제 중 레이더는 매우 중요한 역할을 수행했다. 독일의 폭격편대가 영국 런던을 향해 날아올 때 방공 레이더를 통해 이를 미리 탐지하여 폭격에 대비하기도 하고 역으로 폭격편대를 공격할 수 있었다. 이 기술을 1941년에 미국에서 레이더(RADAR, Radio Detection And Ranging)라고 부르기 시작했다. 레이더 기술은 개발 과정에서 구름이나 비가 관측되었는데 당시로서는 이를 레이더 운영상의 장애물로 여겼다. 그러나 이 구름과 비를 레이더로 측정하는 기술은 기상학 지식을 한단계 높이는 매우 중요한 계기가 되었다.

레이더가 사용하는 전자파의 파장은 수cm로부터 수10cm 정도이다. 기상 레이더 전자파 파장은 구름 입자를 살필 수 있는 K-band(파장 1cm 정도)로부터 대규모 호우를 살필 수 있는 S-band(파장 10cm 정도)까지 사용된다. K-band나 X-band처럼 파장이 짧은 레이더는 구름 입자와 구름 속의 입자는 관측되지만 전자파의 감쇠가 너무 커서 큰 구름 한 덩어리의 앞면만

볼 수 있어서 구름의 연구에만 적합하다. 반대로 S-band처럼 파장이 긴 경우는 비를 많이 머금었거나 비가 내리고 있을 때의 큰 물방울만 측정할 수 있게 되어 구름의 상세한 모습은 볼 수 없지만 비가 내리는 기압계의 전체를 개관할 수 있다. 기상레이더 기술의 이용으로 기상현상의 이동을 추적할 수 있고 구름 내부의 공기 순환과 구름이 가지고 있는 강수량을 추정하게 됨으로써 구름의 이동경로에 내릴 강수량을 추정할 수 있게 되었다.

1970년경부터는 도플러 레이더(Doppler Radar)기술이 시작되었는데 이는 구름 속의 구름·비 입자의 운동을 3차원으로 알아낼 수 있는 기술로서 레이더의 효율성을 한단계 높인 기술이다. 레이더 1기의 탐지 영역은 반경 2백km 혹은 4백km 정도의 원형 범위이다. 대부분의 국가에서는 지상관측 공백지까지 자기의 영토 전체를 커버하는 레이더 관측망을 운영하고 있으나 레이더를 설치할 수 없는 해상이나 사람이 살지 못할 불모지에 대해서는 아직 속수무책이다.

그리하여 인공위성에 레이더를 탑재하여 강수량이 많은 전 세계의 열대

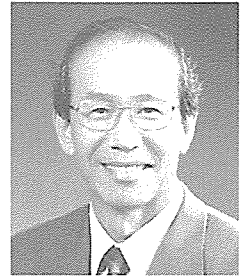
지방에 내리는 강수량을 정량적으로 관측하는 TRMM(Tropical Rain Measurement Mission)계획이 1991년 미국 NASA와 텍사스 농업·기계대학(TEXAS A&M)에 의해 공동으로 계획되어 세계 각국의 협조 하에 시행되고 있다. 아직은 초기 단계이지만 이 계획이 성공되면 전 세계에 내리는 강수량 분포를 실시간으로 파악하게 된다.

기상위성, 美서 60년 첫 발사

1957년 10월 구 소련의 인공위성 스푸트니크 1호가 83.6kg의 무게를 가지고 지상 2백25~9백50km의 타원궤도로 지구선회에 최초로 성공하였다. 이에 자극받은 미국이 다음해 2월 익스플로러 1호를 성공시킴으로써 위성의 역사가 활짝 열렸다. 이는 우주탐사를 위한 힘찬 출발이었지만 1960년 처음으로 미국에서 극궤도 기상위성인 TIROS I이 성공적으로 발사되어 기상학 분야에서도 기상위성시대가 열린 것이다(그림 1).

기상위성 관측에 의해서 구름의 분포, 구름 고도, 상층바람, 기온, 수증기의 분포, 해수면 수온 분포, 태양풍

기상관측기술은 2차 세계대전을 통해 등장한 레이더와 57년에 발사된 인공위성이 지구선회에 성공함으로써 획기적인 발전을 거듭해 왔다. 이제는 기상관측은 물론 기상상태를 조절하는 기술이 발달하여 필요에 따라 마음대로 비나 눈도 내리게 할 수 있게 되었다. 앞으로는 기상위성을 통해 입체적으로 대기를 관측하고 또 슈퍼컴퓨터의 발달이 기상관측의 새로운 장을 열어 줄 것이다.



洪性吉
(전 한국기상학회장)

(a) 극궤도 기상위성

궤도 위성	95년	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
0530 ORBIT USA DMSP USA NPOESS																				
0730 ORBIT NOAA-12, K, M																				
0930 ORBIT METOP-1, 2, 3 PRC FY1-C, D METEOR-3M-1, 1 METEOR-3M-2, 2																				
1330 ORBIT NOAA-11, 14, L NOAA-N, N' USA NPOESS NON SUN-SYNC METEOR-3-7, 8																				

(b) 정지궤도 기상위성

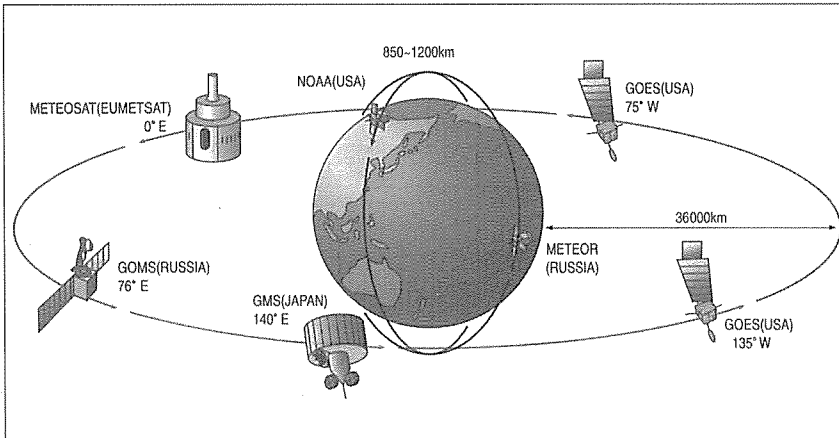
위 치 위성	95년	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
E, PACIFIC GOES-7 GOES-J, L GOES-N, P GOES-R, ...																				
W, ATLANTIC GOES-8, K, M GOES-O, Q GOES-S, ...																				
E, ATLANTIC METEOSAT-5, 6, 7 METEOSAT II-1, 2, 3 METEOSAT III																				
INDIAN OCEAN GOES-N1, N2																				
W, PACIFIC FY-2B GMS-4, 5 MTSAT-1																				

<그림 1> 기상위성의 발전과 계획

의 강도 등을 광범위하게 관측할 수 있게 되었다.

기상위성은 크게 2가지로 나뉘는데 그 하나는 TIROS I 처럼 비교적 낮은 고도인 지구 대기권의 상부(지상 약 8백50km 고도) 정도에 떠서 지구를 타원궤도로 선회하는 극궤도 기상위성이다. 이러한 극궤도 위성은 북극과 남극을 거쳐 돌면서 24시간에 지구의 같은 지점 상공을 하루 4~6회 통과하면서 지표면을 약 3백km 폭의 띠 모양으로 촬영해 나가게 한다. 비교적 근접 촬영인 셈이다.

다른 한가지는 기상위성을 지상 3만 6천km(궤도위성 높이의 40배 이상 높이)의 적도 상공에서 지구 자전방향으로 지구 자전속도와 같은 속도로 띄우면 적도 지표면 한점의 상공에 계속 떠 있어서 정지해 있는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 이를 정지 기상위성이라고 한다. 이 기술로 <그림 2>에 서처럼 1974년에 미국이 GOES-E를 미국 동부를 지나는 서경 75°의 적도 상공에 띄웠고 그 다음해엔 GOES-W를 미국 서부와 하와이의 중간에 해당하는 서경 135°에 띄웠다. 1977년에는 일본이 동경 140°의 적도 상공에



<그림 2> 세계의 정지기상위성의 분포.

기상위성은 우주공간에서 전 지구상의 구름, 수증기, 대기온도 등 기상변화를 24시간 감시하므로 지상 기상관측, 고층 기상관측과 더불어 기상분석 및 예보에 없어서는 안될 중요한 관측수단이다. 세계기상기구(WMO)는 세계기상감시계획(WWW)의 일환으로 5개의 정지기상위성과 수개의 극궤도기상위성으로 구성된 세계기상위성 관측망을 운영하고 있다.

GMS를 띄우고 이를 히마와리(해바라기)라고 명명했다. 같은 해 유럽연합에서 경도 0°의 적도 상공에 METEOSAT을 띄웠고, 1982년에는 인도에서 동경 74°에 INSAT라는 이름으로 띄웠다. 이것은 후에 러시아에서 띄운 GOMS로 대체되었다. 이러한 5개의 정지기상위성 시스템으로 지구 전체의 기상을 최소한 1시간마다 한번씩 촬영하여 자료를 얻음으로써 중요한 기상현상의 발생, 발달, 이동을 파악하게 되었다.

정지기상위성은 3만6천km 상공에서 내려다보기 때문에 정지기상위성 직하 직경 약 1만2천km의 원형지역을 촬영하게 되는데 이는 지구표면의 4분의 1 넓이에 해당한다(그림 3). 대기 분석을 위해 가시광선 촬영 뿐만 아니라 적외선, 적외선, 수증기 채널 촬영도 동시에 이루어진다. 정지기상위성에 의한 관측은 주로 평면분포관측에 해당된다. 그러나 궤도 위성인 NOAA 기

상위성 관측은 근접촬영이기 때문에 수평분포 뿐만 아니고 대기의 수직방향의 입체구조도 알아낼 수 있어서 수치예보의 입력자료인 지표면 수평분포자료 뿐만 아니고 상층의 기상자료까지 얻어낼 수 있는 TOVS(Tiros Operational Vertical Sounder)기술 개발에 상당한 성공을 거두고 있다.

그러나 기상위성에 의한 기상 관측은 어디까지나 원격탐사이기 때문에 현지에서 재래적 방법으로 실제로 관측한 자료와의 비교검정이 계속 필요한 것이다. 기상위성 기술의 발달로 실제 관측인 Radiosonde 관측과의 오차는 점차 좁혀지고 있어 수치예보모델 결과의 정확도 증진에도 그만큼 희망을 가지게 되었다. 이제까지 인간은 대기의 자연 상태에 순응하면서 살아왔다. 그러나 인간이 지구상에 살면서 인간이 의도한 것은 아니지만 지구의 기상이 인간 때문에 변화된 부분이 많은 것도 사실이다.

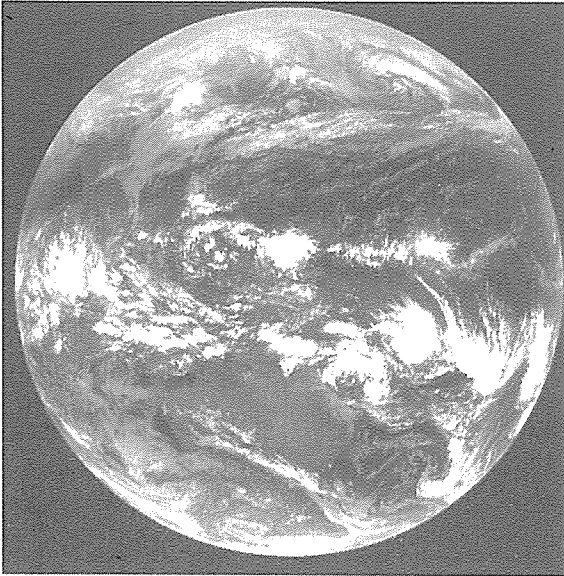
美선 정기적 인공강우 실시

국지적이기는 하지만 식량생산을 위해 나무를 베어내고 곡식을 심으면 지표면 기상이 많이 변한다. 초원에 가축을 기르면 나무와 풀이 자라지 못하고 사막화가 진행된다. 인간의 육식에 대한 욕망이 지구를 황폐화시키고 있다. 또한 인구의 증가에 의한 도시화와 산업화로 도시기후가 형성됨으로써 기상을 변화시켜 왔다.

또 17세기 이후의 산업화로 인해 배출된 이산화탄소 등의 온실기체의 급속한 증가로 지구 전체의 온난화가 심각한 속도로 진행되고 있음도 사실이다. 앞으로 세계 각국은 고가의 탄소 소비세를 지불해야하는 고통을 겪을 것임에 틀림없다. 그러면서도 지구 온난화를 방지할 수 있을 것인가는 아직 미지수이다. 인간이 의도하였던 바가 아닌 이러한 기후변화도 있지만, 반면 의도적으로 기상을 변화시키는 방법도 계속 발전시켜 왔다.

역사는 좀 거슬러 올라간다. 1938년 독일의 W. F. Indeisen에 의해 구름 조절에 의하여 강수 증가와 우박 억제 가능성이 제시된 지 10년도 안되어 미국의 V. Schaefer와 I. Langmuir는 실험실에서 고체 이산화탄소(dry ice)로 빙정(氷晶)을 형성시킬 수 있었고 B. Vonnegut는 빙정을 잘 형성시키는 물질로 요드화은(Agi)을 발견해냈다.

이와 같은 기상의 인공조절 기술은 토대로 1950년에는 기상조절학회(Weather Modification Association)가 설립되고 1950년~70년대에 걸쳐 인공강우를 발전시켰다. 그러나



〈그림 3〉 정지기상위성에서 찍은 지구상의 구름 사진
(가시·적외·수증기 합성영상)

그때까지는 기술 발전이 크지 않아 인공강우의 효과에 대한 부정적인 입장이 대두되는 한편 환경 변화에 대한 우려의 목소리 때문에 1970년대 중반에는 비교적 소극적인 개발에 그쳤지만 기술의 급진전으로 70년대 후반부터는 다시 미국 NOAA를 중심으로 기상조절 프로그램이 시작되어 오늘날 많은 국가에서 산업차원의 인공강우와 우박 억제제를 시행하고 있으며 조건이 적합한 환경에서는 큰 성과를 거두고 있다. 이웃나라 일본의 경우는 강수량이 많아 인공강우의 개발에 소극적이지만 중국에서는 정기적으로 인공강우와 우박 억제제를 시행하고 있다.

인공강우는 겨울철 3천m 이상의 고봉들로 이어진 산맥의 서쪽 사면에서 인공강우를 시행하여 산에 눈을 많이 쌓이게 함으로써 다음해 봄에 수자원으로 활용한다든지 기타 계절에 비행기로 요드화는 연기를 구름 속에 뿌려

강수량을 더 증가시키는 방법으로 시행되고 있다. 미국에서는 지방자치단체와 인공강우 사업자와의 계약에 의해 정기적으로 인공강우를 시행하고 있는 실정이다.

수자원 소비증가에 따라 세계는 곳곳에서 심각한 수자원 부족에 직면하게 되었다. 비행기로 요드화를 살포하는 방법에 의한 인공강우 시

행은 여건만 구비되면 대부분의 지역의 대기환경에서 충분히 시행 가능한 것으로 보고 있으며 인공강우의 수확과 아울러 우박 피해 감소를 위한 우박 억제, 교통장애물인 안개의 소산 기술이 상당히 보급 될 것으로 보인다.

슈퍼컴의 역할에 기대

대기라는 것은 공기의 집단이고, 기상현상이란 대기의 상태와 그 변화현상이라고 정의된다. 대기 수치모델은 해당 모델이 어떤 규모의 어떤 대기 현상을 대상으로 하느냐에 따라 그 모델에 최초로 입력될 자료의 성격이 정해지고 그에 따라 규정된 실제 값을 필요로 하게 된다. 소나기를 내리게 하는 구름 한 덩어리는 그 직경이 1~수km에 불과하다. 그래서 한 도서에 내린 소나기라 해도 그 지역의 기상관측소에는 비가 떨어지지 않아 실제로

는 소나기가 내렸지만 기록이 되지 않는 경우도 많다.

예를 들어 소나기를 모두 관측하기 위해서는 기상관측소가 1km에 1개씩은 있어야 한다는 이야기가 된다.

현재 우리나라 기상청에서 운영하는 지상 기상관측소는 4백여개의 자동기상관측소를 포함하여 5백개 정도가 있다. 육상에서 관측소간의 평균거리는 약 15km가 된다. 이는 세계적으로 보아도 매우 부족한 관측망이다. 바다에도 관측소가 있어야 하는데 형편은 그렇지 못하다. 섬에 관측소를 두지만 망망대해에는 그것도 없다. 해상에 자동 부이(buoy)를 설치하기도 하지만 이를 관리 유지하는 것이 매우 어려운 실정이다. 바다, 산지, 사막, 극지에는 관측소를 운영하기가 매우 어렵다. 더구나 대기를 입체적으로 관측하는 것은 더욱 어렵다.

따라서 기상위성의 기술개발은 매우 중요하다. 기상위성에 의해 어느 곳이나 대기를 입체적으로 관측 가능한 날이 올 것이다. 기상위성은 실제 관측값과의 비교 보정에 의해 대기중의 필요한 모든 입체 교차점의 대기 상태를 측정할 수 있게 됨으로써, 이를 바탕으로 정교한 대기 예측 수치모델이 운용될 수 있다. 관측을 바탕으로 한 수치모델의 적분방정식들을 일정시간(예: 1분)마다 적분해 나가게 되는데 24시간 예보를 위해 적분하는 경우라도 이는 막대한 계산량이기 때문에 슈퍼컴퓨터의 지속적인 발달이 뒤따라 줄 때 대기의 단기적인 변화는 물론 장기적인 기후변화를 인간이 이해해 나갈 수 있을 것이다. ⑤7