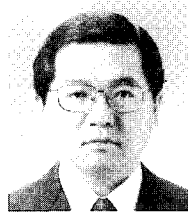


한반도 기상재해와 인공강우 기술개발



오 성 남 | 기상청 기상연구소 원격탐사연구실

1. 서론

인공강우는 강수를 내릴 만큼 발달되지 못한 구름에 인위적으로 구름씨(cloud seeding)를 투입하여 구름의 발달과 응결을 촉진시킴으로써 강수를 내리게 하는 강제성 있는 구름물리 방법이다. 따라서 인공강우는 기상조절(Weather Modification) 기술 중 하나로서 수자원 확보나 농경지 가뭄해소를 위한 인공증우(증설) 목적과 호우와 우박억제, 안개소산, 태풍의 세력약화, 낙뢰억제 등 기상방재를 위한 방법으로 활용된다.

최근 10년 동안 세계의 기상기술은 관측과 예보, 수치모델 개발 등 각 분야에서 크게 발전하여 왔다. 특히 1995년 이후 우리나라의 기상기술은 선진국 수준까지 도달되어왔다. 그러나 기상기술이 괄목하게 발전되었음에도 불구하고 기상재해의 규모는 과거 100년 전에 비해 적게는 2 배 크게는 100 배로 발생하고 있다. 산업규모의 성장과 인구증가, 자연환경변화와 대규모 시설의 밀집화 등에 원인이 있겠지만 기후변화에 따른 이상기상 발생과도 무관하지 않다. 특히 가뭄과 집중호우, 태풍과 강설 등 재해성 기상현상은 연속적 반복적으로 나타나 국지적으로 더욱 심화되고 있다.

기상재해는 예측할 수 있다. 그러한 재해를 억제하거나 조절하는 것은 막연히 인공강우 기술에 의하여 가능할 것이라는 개념으로 시도되어 왔을 뿐 실제 활용에 대한 의지는 매우 약하게 진행되어왔다.

인공강우 기술연구는 1990년대에는 그 실효성과 경제성에 대한 회의적 평가에 따라 크게 쇠퇴하여 미국의 경우 매년 200만 달러 이상의 연구비가 50만 달러 규모로 축소된 바 있다. 그러나 2000년대에 들어 새로운 레이더, 위성 등 첨단 기상관측 기기와 컴퓨터의 발달에 힘입어 기상예보 기술은 크게 향상되었지만 기상재해의 규모는 오히려 더욱 커져 과학의 힘으로 조절하여야 한다는 새로운 개념이 도입되었다.

2001년 미국기상청(NOAA)과 미국과학재단(NSF)은 “예기치 않은 기상과 기후변화의 영향”을 감당하기 위하여 “기상조절 인공강우 기술개발”을 거국적으로 실행할 것을 선포하고 이를 유엔(UN)에 통보하여 세계기상기구(World Meteorological Organization)와 협력할 것을 천명한 바 있다.

현재 세계 24 개국이 실제로 수자원 확보나 집중호우 우박억제 등에 인공강우 기상조절 기술을 활용하고 있으며 특히 미국은 10여개 주에서 66개 인공강우 활용 프로그램을 수행하고 있다. 다소 시간적 차

이는 있지만 러시아와 중국은 1980년대부터 꾸준히 개발하여 2005년 현재 크게 실용화 하고 있다.

2005년 1월 캘리포니아 샌디에고 미국기상학회에서 선언된 기상조절 기술 연구계획은 기상뿐만 아니라 물리·화학, 전자, 컴퓨터 등 다학적(多學的) 종합연구임을 밝혔지만 기술에 대한 한계와 범위도 인정하였다. 그러나 미국기상연구소(National Center for Atmosphere, NCAR)는 인공강우 기상조절 기술이 항공기 및 레이더와 지상 및 고층관측 등의 사용이 원활하고 컴퓨터의 성능에 의한 수치모델이 정확할 때 분명히 활용할 수 있는 기술임을 밝히고 있다.

다음은 각국의 기상조절 기술개발 현황과 우리나라의 개발 상황을 간단히 소개한다.

2. 인공강우 구름물리 기술

인공강우 기술은 크게 두 가지 방법으로 분류된다.

첫째 구름 속에 많은 빙정(ice crystal)을 뿌려주는 빙정이용 Glaciogenic Seeding 방법이 있다. 즉 영하의 차가운 구름 속에 존재하고 있는 작은 빙정과 과냉각수(-45℃까지 응결되지 않은 물방울)에 적정량의 드라이아이스(dry ice)나 옥화은(silver iodide) 등을 뿌려 줌으로써 빙정들을 더욱 성장하게 하고 병합으로 빙정의 집단인 그라우펠(graupel)을 형성하여 중력에 의하여 낙하함으로써 비가 되는 과정을 이용하는 방법이다.

두 번째는 다소의 강수현상이 있는 발달된 구름에 흡습성 구름핵입자를 뿌려주는 Hygroscopic Seeding 방법이다. 이 경우 구름 속 수분을 모을 수 있는 흡습효과가 높은 입자(salt par-

ticles)를 뿌려 줌으로써 구름 속에 부유하고 있는 빔방울을 더욱 성장시키고 구름 속 요란을 가중시켜 크고 무거운 우적(雨積)을 형성케 한다.

위의 두 방법을 구름의 발달상태와 온도에 따라 세분하여 설명하면 다음과 같다.

2.1 Glaciogenic Seeding 인공강우 기술

중위도 지역 구름은 대부분 온도가 0℃ 이하이다. 구름의 상부 기온이 -15℃ 이하의 환경에는 작은 얼음입자인 ice crystal과 -45℃까지 가능한 과냉각수가 공존하고 있다(그림 1). 여기에 많은 ice crystal을 첨가하여 주면 얼음 주위의 포화증기압이 물에 대한 포화증기압보다 상대적으로 낮아 과냉각 물방울은 증발하여 빙정에 흡착되고 빙정은 성장한다. 이들 빙정은 구름의 요란 운동에 의하여 주위의 빙정과 부딪혀 큰 빙정의 집단인 graupel로 성장하고 graupel은 다른 것과 병합하여 더욱 커져 낙하함으로써 녹아 비가 된다.

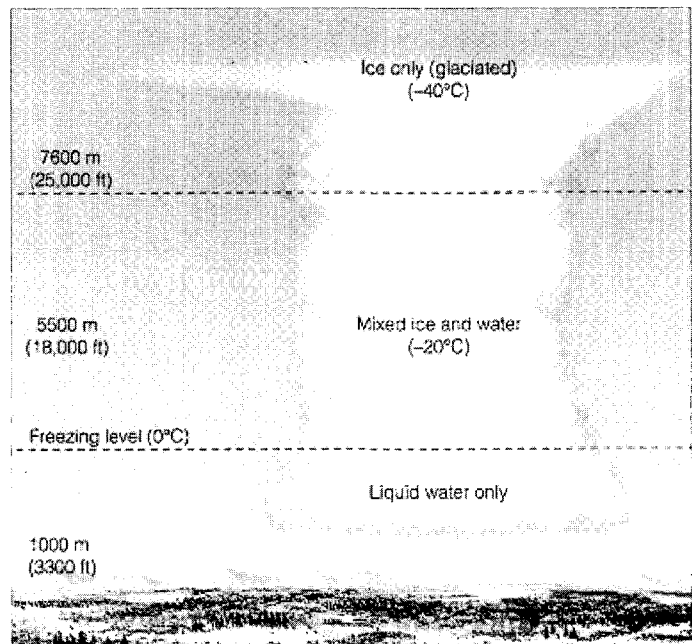


그림 1. 중위도 지역 구름의 온도에 따른 얼음과 물의 연직 분포

이러한 강수과정을 이용하는 방법에는 구름의 요란 상태에 따라 다음 두 가지 방법의 Seeding 기술로 나누어진다.

(1) 정적시딩(Static Seeding) : 구름의 내부 운동 상태보다는 빙정핵의 성장에 역점을 둔 방법으로서 구름의 미세물리과정을 이용하는 방법이다. 주로 구름 발달의 초기상태(earlier lifetime)에 AgI나 Dry Ice 등 빙정핵을 뿌려줌으로서 빙정의 수를 증가시키고 또 과냉각수가 빙정에 승화(Sublimation) 됨으로서 방출되는 잠열이 구름의 발달을 촉진시키게 하는 방법이다. 이 방법의 사례는 미국의 Climax I and II 프로젝트와 이스라엘의 White top 프로젝트가 대표적이다.

(2) 동적시딩(Dynamic Seeding) : 구름 속에 뿌려진 ice crystal에 승화된 과냉각수의 수분 응결로 인하여 잠열이 발생하고 이에 따라 구름의 요란 운동이 가속화됨으로써 상승되는 부력으로 구름의 발달은 더욱 커지고 내부 빙정 또는 수적의 병합 효과가 더욱 높아져 강수효과를 증가시키는 방법이다. 이 경우 대부분 구름 저층이나 하부 바닥에 seeding 물질을 방출하며 대표적으로 미국 플로리다 주 FACE I and II 프로젝트와 텍사스 주의 인공강우 활용이 있다.

2.2 Hygroscopic Seeding 인공강우 기술

흡습성 물질인 NaCl과 같은 입자는 구름 속에서 수분을 흡수하여 커지므로 큰 물방울로 쉽게 성장한다. 성장된 물방울은 낙하하면서 병합하여 더욱 커져 지상에 강수로 내리게 된다. 이 방법도 다음 두 가지 단계로 분류된다.

(1) 큰 흡습입자 방출(Large hygroscopic particle) : 입자가 큰($d > 10\mu\text{m}$) 건성 흡습입자를 구름 상부에 뿌려줌으로써 효율적 병합과정을 거쳐 짧은 시간 내에 강수를 내리게 한다. 이 경우 인도(India)와 태국(Thailand)의 Cloud Catcher 프로젝트가 여기에 해당된다.

(2) Hygroscopic Flare Seeding : 자연적 구름 응결핵(cloud condensation nuclei, CCN)의 입자크기는 $0.5\sim 3\mu\text{m}$ 분포이다. 구름 속에 이와 같은 크기 또는 다소 큰 입자의 인위적 흡습성 CCN을 연무형태로 피워 뿌려줌으로써 0°C 이상의 온난구름(보통 -5°C 이상)이나 수적과 빙정이 공존하는 혼합구름의 병합과정을 더욱 촉진시켜 강수를 증가하게 하는 방법이다. 남아프리카공화국 또는 멕시코의 인공강우 기상조절 프로젝트가 여기에 속한다(그림 2).



그림 2. 남아프리카공화국과 멕시코의 Hygroscopic Flare seeding

3. 국제 현황

그림 3은 현재 인공강우, 우박억제 등을 수행하고 있는 국가들이다. 세계 각국의 인공강우 기술 활용도는 수자원 확보에 70%, 우박억제, 태풍세력 약화, 공항의 안개소산 등 방재에 30%이다. 과거 10년간 인공강우를 실시한 통계에 따르면 강수의 증우 효과는 대체로 평균 10~20% 정도로 집계되고 있다. 2001년 까지 세계 약 40 개국에서 수행하고 있는 인공강우 사업을 주요 국가별로 열거하면 다음과 같다.

- 미국 : 1964년부터 시작한 미국의 인공강우 기술은 1971년부터 완전히 실용단계에 도달되어 캘리포니아, 텍사스, 네바다 등 17개 주에서 매년 70회 정도 지속적으로 실시하고 있으며 민영화도 달성되어 Atmospheric Incorporated Inc.(AI), Weather Modification Inc.(WMI), North American Weather Consultant (NAWC) 등 전문용역회사들이 국가에서 개발한 인공강우 기술을 실제 활용하고 있다.

인공강우 실시는 주로 항공기에 의한 비씨 뿌리기 방법을 택하고 있으며 네바다 타호 호수 지역에 수자원 확보를 위한 지상 Flare 연소 방법을 강설효과를 위한 작업으로 매년 겨울철 실시되고 있다. 미국기상청(NOAA)의 기상예보자료와 미국대기과학연구소(NCAR)의 구름모형 기술을 이용하여 최고 20~30% 증우 효과를 보인 바 있다. 인공강우 실시는 매년 11,940 km² 지역에 약 200만 달러 비용투자에 약 5천만톤의 수자원의 확보로 농업 및 산업에 크게 활용하고 있다.

- 호주 : 물 부족 현상이 심각한 남부지역 근처의 댐에 수자원을 확보를 목적으로 항공기를 이용한 인공강우를 실시하여 매년 10% 이상 증우 효과(호주내륙)를 보이고 있다. 매년 3,250 km² 면적에 약 64만 달러를 투자비로 2억4천만톤의 수자원을 확보하고 있다.

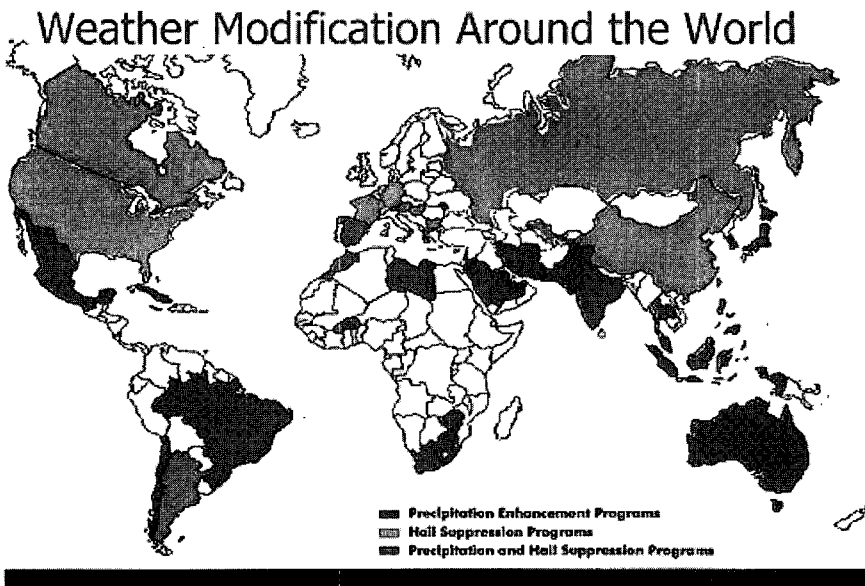


그림 3. 세계의 기상조절(인공증우, 우박억제 등) 수행국가

인공강우의 경제성이 가장 높은 국가로 평가되고 있다.

- 일본 : 1984년부터 일본 기상연구소를 중심으로 구름 물리 연구를 시작한 이래 인공강우 기술 개발은 국가의 주요사업으로 추진되어 왔다. 철저한 기초기술 개발에 역점을 두어 2001년까지 인공강우 지역에 대한 완벽한 수치모의 개발을 이루었고 1990년 일본기상연구소(Meteorological Research Institute, MRI)에 구름물리연구부를 조직하여 제1연구실(실장 Masataka Murakami 박사)에서 일본 서북부 니가타 지역 저수지 유역에 매년 인공증설 실험을 실시하고 있다.
- 중국 : 1980년대 후반부터 국가 주도하에 인공강우 기초연구와 실용화를 실시하고 있으며 이에 따라 중국 기상청의 기상과학연구원 소속 인공영향 천기연구소를 신설하여 길림성, 섬서성 하북성 등 강수량이 부족한 지역에 항공기 및 지상 연소 방법을 이용한 인공강우를 실시함으로써 가뭄해소에 주력하고 있다. 특히 과수원이 많은 길림성 등에서는 강하게 발달하는 뇌우에 포탄을 발사하여 그 세력을 약화시킴으로써 우박에 의한 과수 피해를 사전에 예방하는 기상조절 기술 개발도 병행하여 수행하고 있다. 또한 구름물리 기초 기술 개발을 위하여 cloud chamber를 갖추어 미세구름물리과정을 실험하고 있으며 국가최고회의에서 항공기를 지원하여 2004년에는 인공증우 효과를 크게 보여 주고 있다.
- 러시아 : 1973년부터 우크라이나 곡창지대 등에서 러시아 기상청이 중심이 되어 항공기 및

지상실험으로 가뭄해소를 위하여 인공강우를 실시하며 특히 기초 운물리 연구와 장비 개발로 실용화를 달성하여 농업 등 산업에 크게 이용하고 있다. 러시아 기상청의 소속 항공기와 민간소속 항공기를 임차하여 활용하고 있다. 러시아가 지난 9일 모스크바에서 연 '제 2차 세계대전 승전 60주년' 기념행사에서 시커멓게 드리운 비구름을 몰아냈다. 과학기술을 이용하여 굵은 날의 행사를 맑은 날로 바꿔놓은 것이다. 어떻게 그런 일이 가능할까. 모스크바 상공에는 이날 오전 5시 30분부터 공군 비행기 11대가 투입돼 모스크바 외곽 50km 지점에서부터 150km까지 10개 구간으로 나눠 비행하면서 비구름을 없애는 옥화은(AgI) 등 화학 약품을 살포했다. 그러자 시커멓던 하늘이 열리며 햇살이 비쳤다. 원리는 인공으로 비나 눈을 내리게 하는 방법을 이용한 것이다. 적당하게 구름의 비씨를 뿌려주면 빗방울로 성장하여 강수가 있지만 많은 비씨가 구름 속에 뿌려지면 과다한 구름 빙정(Ice crystal)이 생성되어 각 빙정에 배분되는 수분 할당량이 적어져 빗방울로 성장할 수가 없게 된다. 인공으로 뿌려준 구름의 비씨가 곧 비가 돼 떨어질 자연 상태의 한정된 구름에서 수분을 빼앗아가는 것이다. 따라서 구름 속 빙정이 성장하지 못하므로 응결된 빗방울이 적어지고 그렇게 되면 비구름은 점점 가벼워져 바람에 소산될 수 있다.

- 태국 : 세계의 주요 쌀 수출국인 태국은 1998년부터 2004년까지 곡창지대인 청마이 지역을 중심으로 미국의 기술을 도입하여 집중적으

로 인공강우를 실시하였다. 태국의 국왕이 직접 지휘한 왕실 사업으로 10-20%의 증우 효과를 보았으며 자체의 항공기(King Air)를 이용한 사계절 항공실험을 통하여 기반 기술을 확보하고 수자원 및 농업용수로 지원에 크게 활용하고 있다.

4. 우리나라의 인공강우 기술

1994년 가뭄을 계기로 정부에서는 지금까지 기상청을 중심으로 10회의 지상연소실험을 수행한 바 있다. 이들 실험에 따라 국내에 인공강우 기술을 도입하는 계기가 되었으며 한반도 기상조건에서 실현될 수 있는 가능성을 확인함과 더불어 기본적인 실험을 수행할 수 있는 체제를 구성하였다.

2001년 봄철에 도래한 90년만의 대 가뭄은 인공강우에 대한 필요성을 재강조하게 되었고 이에 따라 기상청에서는 6월 14일 가뭄이 심한 영남지역에서 공군의 항공기를 지원 받아 1차 인공강우 실험을 실시하였다. 이 실험에서 경북 영천과 울산지역에서 다소의 증우 효과를 봄으로써 우리나라에서 인공강우에 대한 가능성을 재확인하게 되었고 2002년 3월 2차 실험을 수행하였다(그림 4).

우리나라 봄철과 겨울철에 발생하는 구름조건에는 항공기를 이용한 인공강우 방법이 적절하다. 여름철에는 낮은 구름의 발생 빈도가 많을 때 산악효과를 이용한 지상실험이 매우 유리하다. 또 온난 구름에 이용하는 hygroscopic 재료와 한랭 구름에 이용되는 요오드화은(AgI) 이용 등은 구름의 물리적 특성을 파악하여 실시하여야 함으로 구름 실험실(cloud chamber) 등은 매우 유용하다. 또 cloud seeding 재료의 성능 시험과 살포장비의 개선 그리고 강수과정을 촬영할 수 있는 광학기기 등의 설비는 중국과 태국의 경우 초기부터 시설한 분야이다.

그 동안 국내에서 여러 번 인공강우 실험이 수행된 경험에 비하여 아직 까지 실용화가 이루어지지 않고 장기적인 계획이 지속적으로 추진되지 못하였던 문제점은 다음과 같다.

첫째 가뭄현상이 우리나라에서 반복되고 있는 상황에서 인공강우 기술개발을 위한 장기적이고 계획적인 과감한 정부의 투자가 없었음을 들 수 있다. 둘째, 인공강우에 대한 국내의 기술과 구름 물리에 대한 기초지식을 토대로 한 기반조사가 축적되어 있지 않다. 셋째, 중국, 일본 등이 국가 기관으로 두고 있는 인공강우 상설 전담 부서가 우리나라에 없는 상태에서 가뭄 때에만 일시적인 실험반을 구성하여 왔음이 중요한 문제점으로 간주된다. 네 번째로, 인공강우를 실

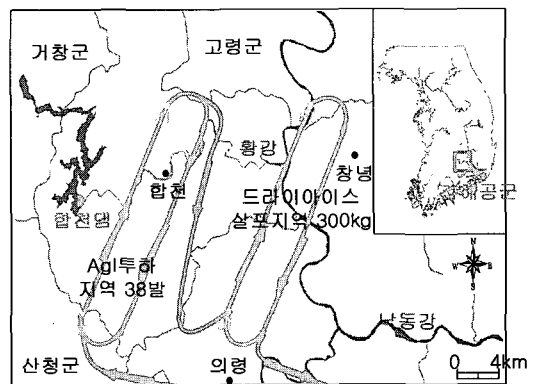
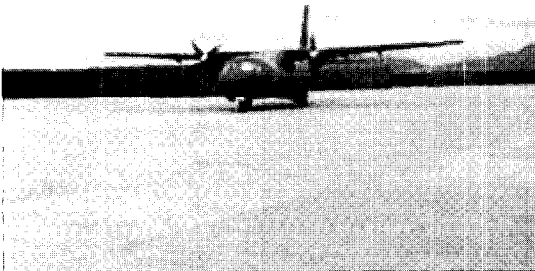


그림 4. 2002년 3월에 실시된 항공실험에서 사용한 공군비행기와 비행경로

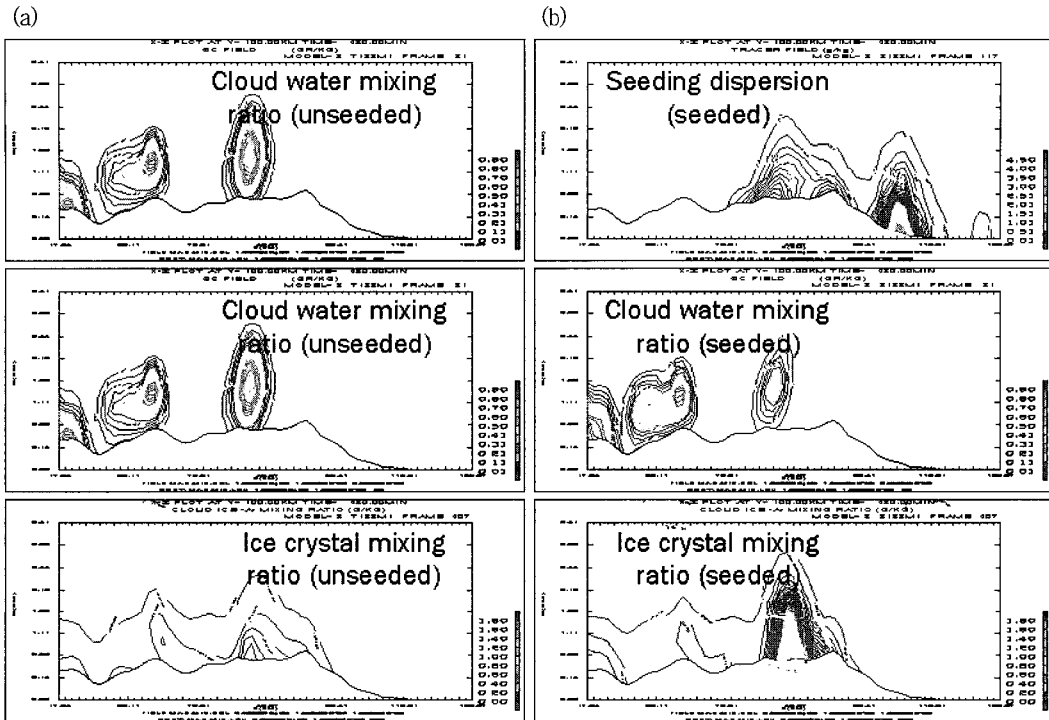


그림 5. Clark-Hall 모델을 이용한 시딩 전(a)과 후(b)의 구름물 혼합비와 빙정 혼합비 발달의 연직단면도

시할 전용 항공기와 구름 형성을 실험할 수 있는 운물리 실험실, 산악지대인 우리 지형에 이용될 이동식 레이더 등 관측과 실험에 대한 장비가 부재한 상태에서 효율적인 cloud seeding이 수행되지 않았다. 다섯 번째로 중국, 일본, 러시아, 태국 등이 수행하고 있는 기상, 구름물리 그리고 지리정보 등에 관한 자료 수집과 컴퓨터 수치 모형을 이용한 그림 5와 같이 수치모의 예비 실험 등을 포함한 일련의 분석이 이루어지지 않은 상태에서 인공강우 실시 그 자체에만 주력하여 왔다.

- 인공강우 전용 항공기
(Special Cloud Seeding Aircraft)
- 인공강우 항공기 약재 살포 시스템
(Airborne Seeding Equipment)
- 에어러솔 및 구름물리 측정기기
(Aerosol & Cloud Physics Equip.)
- 측정 자료 수집 시스템
(Data Acquisition System)
- GPS Navigation & Tracking
- 레인존데 시스템(Rawinsonde System)
- 사진촬영 기기(Photographic Equipment)

5. 인공강우 운영을 위한 첨단 장비

- 기상레이더 및 자동기상관측시스템
(Weather Radar and AWS)

이에 대한 기반 기술의 확립 위하여서는 다음의 3가지 단계로 나누어 진 연구 조사 실시되어야 한다.

인공강우를 위한 우리나라의 기상조건은 겨울철의 전형적인 서고동저형과 여름철 남고북저인 기압 구조

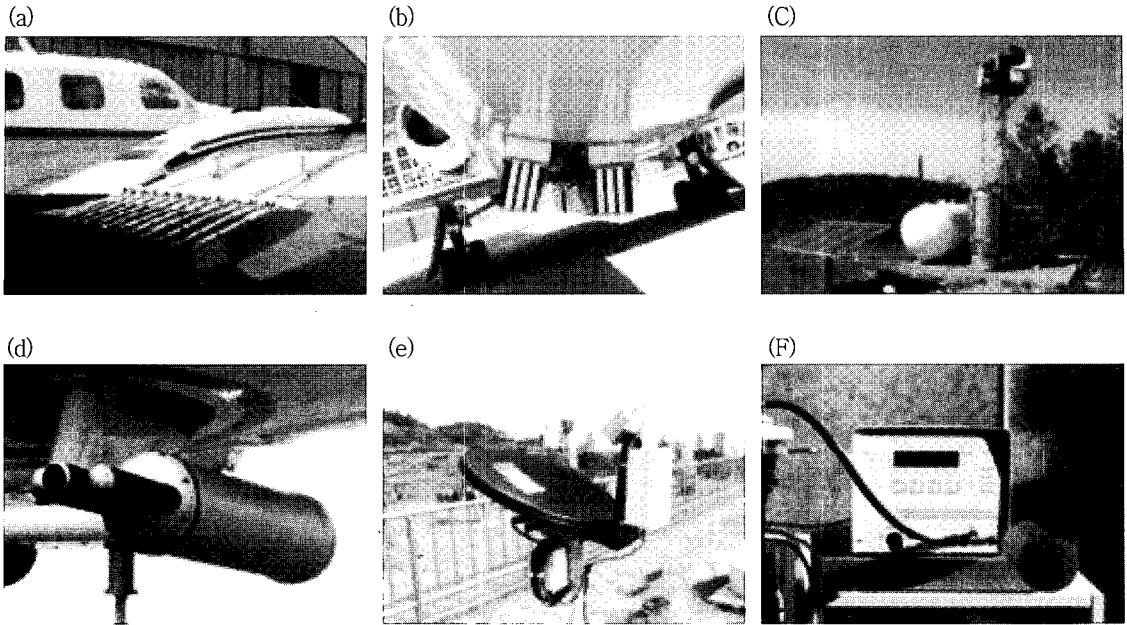


그림 6. 인공강우 항공기 약재 살포 시스템:(a~c), 대기의 에어러솔 및 구름물리 측정기기:(d~f)

- (a) Burn-in-Place Flares 살포 시스템
- (b) Ejectable Flares 살포 시스템
- (c) 원격 지상연소기 시스템
- (d) 전방산란스펙트로메타
- (e) 마이크로강수레이더
- (f) 구름응결핵계수기

에 따라 구름의 발달이 크게 차이가 난다. 또 복잡한 지형에 따라 구름의 성장과 강수 규모가 달라짐으로 중규모 구름예측은 지극히 용이하지 않다. 따라서 지속적인 인공강우 실험에 의한 기상예측과 구름 특성에 대한 경험을 쌓아 이를 이론과 접합함으로써 인공강우의 기술을 실용화 할 수 있다. 특히 대기의 에어러솔 구조와 인공위성 및 Radar 관측 자료 분석과 예측 기술은 인공강우의 실용화를 위해서는 필수적 경험이 된다.

또 항공기의 이용과 산악의 지상실험은 반복적이고 지속적으로 실시되어 기술 검토와 결과에 대한 평가가 반드시 이루어 져야한다. 이밖에 경험을 위한에 대한 연구 조사는 다음 내용이 포함되어야 한다.

- 우리나라의 온난 구름과 한랭 구름에 대한 강우 발달 과정 조사
- 한반도 월별 기압골 형성과 지역별, 시간별 구름 분포 조사

- 인공강우 실시 지역의 지리정보 및 수자원 정보 GIS

6. 결론

한반도 지역은 지하수자원이 적고 연중 강수량이 하절기에 집중되어 있고 동고서저의 가파른 산악지형으로 강수의 저수율이 매우 낮다. 또 지구온난화 등에 의한 기후 변화에 따른 이상가뭂의 빈도와 그 기간도 증가하고 국민생활 향상에 따른 용수 수요도 높아지고 있어 가뭂에 대한 체감도가 매우 크다.

인공강우 기술개발은 물 부족과 기상재해에 대한 과학적 근본 대책이므로 국가에서 최우선적으로 지속적으로 개발되어야 할 과제이다. 초기의 투자만 이루어지면 백년대계로 경제성이 높기 때문에 인공강우는

시급히 시작하여야 할 기술이다. 즉 과감히 투자하고 과학적 이해와 인내를 가진 장기적인 연구 계획에 따라 수행하여 할 것이다.

외국에서의 성공적인 인공강우 사례에 비하여 지금까지 인공강우 기술에 대한 국내에서의 연구개발은 시설과 장비 등의 불충분한 환경에서 산발적으로 수행되어 왔기 때문에 추진한 연구개발사업이 연계성이 없고 체계적이지 못하였다. 또한 연구의 지속성 결여에 따른 연구비 지원중단으로 그 동안 다소 실시하였던 실험에 대한 경험의 축적과 기술의 발전이 없었으며 장비와 실험을 위한 시설이 전무한 상태이다. 특히 인공강우 기술개발과 기상조절 등을 실시할 전담 부서와 항공기의 부재는 인공강우 기술 개발에 대한 가장 큰 저해 원인이며 외국의 첨단 기술을 도입을 어렵게 한다. 또 항공기의 사용은 필수적이므로 항공기의 구입이 용이하지 못할 경우 공군의 협력으로 항공기를 이용할 수 있으므로 공군의 항공기 사용을 위하여 관련 공군에도 연구에 참여할 있는 기회가 부여

되어야 한다.

항공기 외에 구름물리를 실험할 수 있는 cloud chamber 등과 같은 실험실 구성과 인공강우효과를 모의하고 Radar 기상 예측 정보를 효율적으로 분석하기 위한 전문가의 배양 등이 이루어 질 때 진정한 인공강우 기술 실용화가 이루어짐을 확신할 수 있다.

미국의 경우 매년 인공강우 실험 실시와 성공 여부에 따른 포상제도를 운영함으로써 인공강우의 효과를 높이고 기술의 발전을 도모하고 있다. 인공강우 실시의 위험도에 비하여 이해와 기대가 부족한 우리나라의 경우 이와 같은 사기 진작은 기술 개발과 실용화에 크게 도움이 될 것이다.

민영화를 위한 장기적이고 과감한 정부의 재정 지원과 민간 기업의 형성을 위한 특별 사업화(필요에 따라서 한시적으로 운영)는 반드시 필요하며 이와 같은 사업은 궁극적으로 수자원 확보와 관련성이 높은 기관이 참가하여야 하며 필요에 따라서 특별법의 제정도 고려하여야 한다.