

## 한반도에서의 인공증우 가능성에 대한 연구 A Study on Feasibility of Cloud Seeding in Korea

정 관 영\* / 엄 원 근\* / 김 민 정\* / 정 영 선\*

Chung, Kwan-Young / Eom, Won-Geun / Kim, Min-Jeong / Jung, Young-Sun

### Abstract

The feasibility of cloud seeding in Korea is presented from analyses of precipitation, cloud amount, satellite data, and upper air data. The daily mean precipitation over Dae-Kwan-Ryong is the largest (~4.5 mm/day), while the intensity of precipitation (amount of yearly rainfall divided by the frequency of rain days) over Southern area is above 14 mm/day, which shows the largest in Korea. Both the daily mean and the intensity of precipitation over Andong area are the smallest with values of ~2.7 mm/day and ~11 mm/day, respectively. In the meanwhile, the occurrence frequency of appropriate cloud top temperature ( $-10^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ ) for cloud seeding over the region has a large value (~130 days/year). The precipitation patterns of the region vary with wind direction and intensity calculated from 43 AWSs(Automatic Weather Station) and the additional 7 rain gauges which were installed along Northern and Southern part of the Sobaek mountain. The Sc (Stratocumulus) cloud type over Andong is frequently observed, and Cirrus and Altostratus next. From the results, it is estimated that the feasibility of cloud seeding over the area would be high if a proper strategy of cloud seeding is set up. LCL (Lifting Condensation Level) and CCL(Convective Condensation Level) have the most frequency in 1000-950 hPa being occupied 4/9 of total analysis period and in 400-500 hPa, respectively, with both small variations from season to season. The correlation between vapor mixing ratio and CCL is the highest in Summer and the lowest in Winter. It means that the height of cumulus in Summer is high with an abundant water vapor but vice versa in Winter, and that the strategy of cloud seeding should be different with seasons.

*Keywords:* cloud seeding, precipitation, cloud amount, cloud type

### 요 지

한반도에서 비씨뿌리기에 의한 인공증우 가능성을 강수량 관측자료, 운량, 위성자료 및 상층관측자료로부터 조사하였다. 안동지역의 일 강수량도는 약 2.7 mm/day, 1회 강수량도는 11 mm/day로 가장 작은 값을 보였다. 그러나 인공증우에 적합한 구름(운정온도가  $-10^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$ )의 출현일은 1년에 130일로서 큰 값을 나타냈다. 이 지역에서 출현 유형은 층적운(Sc)이 가장 많았고, 다음으로 권운(Cirrus) 및 고층운(Altostratus)였다. 상기 결과로 이 지역에서 비씨뿌리기의 적절한 전략이 세워진다면 인공증우의 가능성은 높을 것으로 추정된다. 상승응결고도(LCL) 및 대류응결고도(CCL)은 계절에 따른 변화가 적었으며, 각각 100-950 hPa 및 450-500 hPa 고도에서 가장 큰 빈도를 나타내었다. 여름철에 적운의 고도는 높으나 많은 수증기량을 함유하고 있는 반면 겨울철은 그 반대의 현상이 나타나 계절별 비씨뿌리기 방법의 차이가 있어야 함을 보여주었다.

**핵심용어 :** 비씨뿌리기, 강수, 운량, 유형

\* 기상연구소 수문기상연구소

Staff, Hydrometeorology Research Lab., Meteorological Research Inst., Seoul, 110-360, Korea

## 1. 서 론

세계 곳곳에서 인구 증가와 잦은 가뭄으로 인한 수 자원의 부족으로 극심한 곤란을 겪고 있다. 우리 나라 역시 1994년 여름 극심한 무더위와 더불어 가뭄을 겪은 적이 있으며, 1996년 봄에는 남부지방 주요 댐의 저수율이 30 % 정도 수준에 머물러 식수와 공업 용수 부족 등을 초래하였다.

강수량이 부족한 상태에서 물을 얻기 위한 가장 쉬운 방법은 지하수를 이용하는 것이지만 지하 수자원을 오염시킬 우려가 있으므로 해수를 이용하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 이 방법은 해수에 함유되어 있는 염분과 같은 성분을 제거하여 담수와 같은 상태로 가공해야 하는 기술상의 난점과 시설 투자상의 경제성이 대두된다. 이러한 관점에서 볼 때 인공강우를 통한 증우는 가뭄 피해 경감 대책으로 여러 나라에서 긍정적인 평가를 받으며 수행되고 있다. 세계기상기구(WMO) 자료에 의하면 수자원을 확보하기 위한 인공 증우는 10개국에서 실용화되어 있으며, 미국, 호주, 중국, 이스라엘, 태국 등에서는 매년 실시되고 있다. 1995년부터 기상연구소에서도 현재의 가뭄을 극복하고 물 부족 사태를 대비하기 위하여 지상실험과 항공실험을 통한 인공강우 기술 개발을 시도하고 있다(WMO, 1994).

보통 한랭구름에 적용되는 강수 발달 이론은 Bergeron-Findeisen 과정이다. 이 이론은 동일 온도에서 물에 대한 포화 수증기압이 얼음에 대한 포화 수증기압보다 높기 때문에 생기는 과냉각 수적의 증발에 의한 빙정의 성장을 설명하고 있다. 과냉각 수적과 빙정이 공존하는 층에서는 두 입자 주위의 수증기압 차이에 의해 과냉각 수적에서 빙정으로 수증기의 확산이 일어난다. 그 결과 수적은 증발하는 반면에 빙정은 수증기의 침착에 의해 성장하는데 이를 Bergeron 강수 과정이라고 한다.

구름은 형성되어 있으나 강수가 없는 경우를 조사해 보면 구름이 얇거나 수명이 짧으며, 또는 이 두 조건이 동시에 해당되는 경우가 많다. 이와 같은 구름의 경우에는 인위적으로 구름의 역학 과정을 조정하여 강수를 증대시킬 수 있다. 강수 증가를 위한 역학 과정의 조절 방식에는 정역학적 방식(static mode)과 동역학적 방식(dynamic mode)이 있다(Young, 1993). 정역학적 방식은 씨뿌림이 구름의 미세 물리 구조에 영향을 주어 이 효과가 바로 증우를 가져오도록 하는 방법으로

과냉각 구름의 강수 효율(precipitation efficiency)을 증가시키는 데 있다. 이 방식의 기본 가설은 과냉각 구름에 옥화은이나 드라이 아이스를 투입하여 적정 농도의 빙정을 형성하면 Bergeron-Findeisen 과정에 의하여 이들 빙정이 강수 입자로 성장한다는 것이다.

동역학적 방법은 과냉각 구름에 많은 양의 안정적인 빙정핵이나 드라이 아이스와 같은 냉매(coolant)의 투입에 의한 구름의 급속한 빙정화(glaciation)를 유도하여 이에 따른 잠열 방출이 상류 기류를 더욱 발달케 하여 구름을 성장시킴으로써 증우를 가져오는 방법이다.

실제로 인공강우 실험에서 주로 사용되는 비씨 물질인 AgI는 정역학적 그리고 동역학적 방법에서 사용된다. AgI가 활성화되는 조건은 구름 층이 두꺼운 대류운으로 운정온도가  $-10^{\circ}\text{C} \sim -30^{\circ}\text{C}$  사이이고, 운저 온도는  $-5^{\circ}\text{C}$  이하로,  $-12^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 의 온도층이 존재하여야 한다. 구름 내의 온도 분포가 중요한 것은  $-5^{\circ}\text{C}$  부근에서부터 AgI가 활성화하여 잠열을 방출하므로써 구름의 상승기류를 강화시켜 생성된 빙정을  $-12^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$  층으로 이송시키게 된다. 이송된 빙정은 착빙 현상에 의해 성장하며 또 다른 구름 입자들과 충돌로 인하여 부서져서, 작은 얼음 조각에서 분리되어 나온 핵이 빙정핵으로 작용하는 증식 과정을 하게 된다.  $-12^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$ 의 온도층이 특별히 중요한 것은 이 온도 부근에서, 빙정에 수증기가 승화되어 달라붙는 착빙(riming)에 필요한 시간이 최소화되기 때문이다(Dennis, 1980).

이 연구는 한반도에서의 인공강우 가능성을 조사하기 위하여, 먼저 년강수량이 비교적 적은 안동지역을 선택하여 이 지역에서의 강수량 및 운량 분포, 위성자료, 고층 관측자료등을 인공강우 조건에 맞는지 분석하는 것이다. 우선, 한반도에서 강수분포 및 강수강도 분포, 인공강우 적정 운정온도 일수를 분석하여 계절별 분포 특성을 파악하며, 고층 자료를 이용하여 계절별 구름이 형성될 수 있는 고도 및 가강수량의 분포를 추정한다. 마지막으로, 안동지역에서 계절별, 풍향별 강수 분포를 기상청 AWS 및 소백산 남, 북 사면에 설치한 7개의 우량계 자료로부터 분석하고자 한다.

## 2. 우리 나라의 강수 특성

우리 나라의 연평균 강수량은 500-1500 mm이며, 전국적으로 볼 때 비교적 습윤한 지역에 속한다. 그러나 강수의 계절적 분포, 지역적인 차이, 강수 유형, 강수량의 연변화 등에 따라 현저한 특색을 보인다. 특히

강수량의 계절적 분포가 균등하지 않고 1년 강수량의 대부분이 여름철에 집중되고 겨울의 강수는 매우 적다. 이러한 특징은 우리 나라에만 나타나는 것이 아니고 아시아 본순 지대의 공통적인 특징이다. 6, 7, 8월을 여름철이라 할 때 연 강수량에 대한 여름 강수량의 백분비는 40-60 % 정도나 된다. 반면에 봄철의 우량은 연 강수량의 15 % 정도에 불과하다(김광식, 1973).

여러 가지 기상 요소 중 가장 변화가 심한 것은 강수량이다. 우리 나라의 강수량의 변화는 그 중에서도 심한 편에 들고 있다(김광식 등 1973). 여름철에 오는 비는 그 해의 강수량을 결정하며 이것은 해에 따라 변화가 크다. 어떤 해에는 평균 강수량에 미치지 못하고 어떤 해에는 평균량 보다 훨씬 많은 비가 오기도 한다. 이와 같이 평균치에 대한 편차나 변동량은 여러 가지로 표시할 수 있으나 가장 간단한 방법은 산술적인 편차로 연 평균 강수량을 기준으로 하여 평균량 보다 큰 것은 양(+)의 편차, 적은 것은 음(-)의 편차라 하여 각각의 최대값의 차를 살펴보는 것이다(김연옥, 1981). 서울의 경우 1961-1990년의 30년간 최다우년은 1990년으로 강수량은 2,355.5 mm였고, 최소우년은 1973년으로 928.1 mm였다. 이것을 평균 강수량 1,369.8 mm에서 편차를 구하면 각각 +985.7 mm와 -441.7 mm로 최대 교차가 1,427.4 mm나 된다. 서울에서 비가 가장 적었던 해는 1949년으로 633.7 mm였다. 그리고 우리 나라에서 벼농사에 필요한 우량을 약 1,000 mm라 할 때 연 강우량이 1,000 mm이하였던 해는 대략 8년에 한번 정도, 700 mm이하였던 해는 35년에 한번 정도 나타났다고(기상연구소, 1997).

우리 나라의 강수분포는 대체적으로 남에서 북으로 올라감에 따라 점차적으로 감소하고 있으며, 그 감소량은 남해안 지대가 1,500 mm로 가장 많고, 가장 적은 지역은 함경북도 내륙지대로서 500-600 mm 정도이다. 섬지방에서는 제주도의 남중 해안지대가 1,800 mm 내외로 가장 많고 울릉도는 1,400-1,500 mm의 강수량을 갖는다(김광식, 1973). 그러나, 같은 제주도에서도 북서 해안지대는 1,200 mm밖에 되지 않는 적은 분포를 보여 지형에 따라 큰 차이가 있고, 육지에서도 지형에 따라 비가 많은 지역과 작은 지역은 구별된다. 특히 울릉도는 여름철 보다 겨울철 눈의 양이 더 많아 우리 나라에서는 특이한 강수 형태를 보이고 있다(기상연구소, 1997).

우리 나라에서 가장 강수량이 많은 최다우 지역은 제주도, 남해안 및 섬진강 유역 일대로 연 강수량이

1,400 mm 이상을 나타내고 있다. 이 지역은 해안 및 섬으로서 해양의 영향을 크게 받고 소백 산맥과 노령 산맥에 의한 지형의 영향이 크며, 장마 전선과 중국 양자강 유역에서 발생하여 우리 나라로 이동하는 저기압의 진로에 해당하기 때문이다. 1,300 mm 내외의 한강 중상류, 중부 동해안 지역은 양자강과 중국 대륙으로부터 이동해 오는 저기압이 태백 산맥과 차령 산맥의 영향을 받아 제 2의 다우지역을 형성하고 있다. 울릉도 및 중부 동해안의 강수량이 비교적 많은 것은 다른 지역에 비해 강설량이 많기 때문이다(기상연구소, 1997).

900 mm 내외의 연강수량을 갖는 대구 지역은 지형상으로, 동쪽은 태백 산맥, 서쪽과 북쪽은 소백 산맥, 남쪽은 해안 산맥 등으로 막혀 있는 분지로서 습한 바람이 이 일대에 도달하기 전에 비를 내리게 되므로 건조한 바람만 불게 되어 남한 제 1의 소우 지역을 이루고 있다. 이렇게 국토가 좁은데 비하여 강수량의 지역적 차가 크고 강수량의 변화 변동이 큰 것은 홍수나 가뭄을 빈번히 일으키는 원인이 된다(기상연구소, 1997)

이와 같은 결과는 이번 연구의 기상관측소 강수자료 분석에서도 나타났다. Fig. 1은 1980-1994년 15년간의 기상청 강수자료를 이용하여 전체 강수량을 총 분석일수로 나눈 평균 일강수량 분포이다. 가장 강수량이 많은 지역은 대관령을 포함하는 태백산맥으로서, 최고 4.5의 값을 보였으며, 남부지방의 해안가를 따라서도 큰값을 보였다. 연평균 강수량에서와 마찬가지로 노령 산맥, 소백산맥의 동쪽에 위치하고 있는 경상 북도 부근이 2.7 mm의 최소 값을 보이는 파우 지역으로 나타

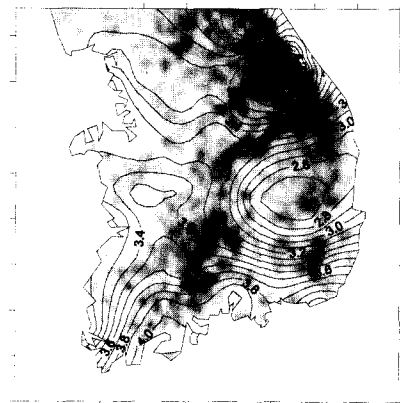


Fig. 1. Distribution of Daily Mean Precipitation

났다.

우리 나라와 같은 경우는 각 계절별로 일기계를 지배하는 종관 패턴이 뚜렷하게 차이가 나기 때문에, 그에 따른 강수 분포의 패턴에서도 차이가 난다. 기존의 연구에 의하면 우리 나라의 강수형은 여름에 집중하는 하계 다우형이며, 여름 3개월의 강수량은 연 총강수량의 거의 50~60%를 차지하여 우계를 이루며, 여름 우계 이외에는 비가 적어 건계를 형성한다. 여름 집중율은 해안 지방이 대체로 50% 정도이며, 그 중 동해안 중부에서 남부에 걸쳐서는 50% 이하로 여름 집중율이 가장 낮다. 반면 서해안 지방은 55%, 내륙지방은 60%, 특히 임진강 상류는 65%로 가장 높은 하계 집중율을 보인다. 이에 비해 겨울 강수는 총 강수량의 10% 이하로 건계를 나타낸다(기상연구소, 1997).

계절별 강수 분포를 조사하기 위하여 앞에서와 같은 방법으로 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)로 구분한 뒤, 계절별 전체강수량을 분석일수로 나누어 분석하였다(Fig. 2, 계절별 평균 강수량). 여름철의 경우는 6mm 이상의 값들이 대부분의 지역에서 나타나는 등 다른 계절과 비교할 때 전체적으로 가장 강수량이 많고, 다음으로 봄철과 가을철에는 2~4mm 값을 보였으며, 겨울철은 1.2mm 이하의 작은

값들이 전체적으로 나타난다.

각 계절별 지역적 특성을 살펴보면, 봄철의 경우는(Fig. 2(a)) 대관령 보다 남부 지방, 특히 남해안을 따라 큰 강수량을 보였으며, 이 지역에서의 남북 강수량 정도가 크게 나타난다. 다음으로 대관령 부근이 큰 값을 보였고, 소백산맥, 노령산맥, 태백산맥으로 둘러싸인 안동, 영주, 제천, 단양 지역이 최소값을 보였다.

여름철의 경우는(Fig. 2(b)) 봄철과는 달리 남해안 근처의 큰 강수량 정도가 사라지고(봄철과 마찬가지로 강수량은 많지만), 대신 강릉, 대관령 부근에서 산맥을 경계로 등치선이 밀집된 것을 알 수 있다. 즉, 이 지역은 산악의 영향으로 영동과 영서의 강수량 차이가 크다는 것이다. 경상북도 지역은 봄철의 경우와 마찬가지로 과우임을 알 수 있다.

가을철에도(Fig. 2(c)) 봄철과 마찬가지로 강릉, 대관령 부근에서 최대치가 나타나지만, 강수량 정도의 방향에 있어서 봄철의 경우와 차이가 있다. 즉, 봄철의 경우는 산맥의 동쪽으로 갈수록 강수량이 줄어들지만, 가을철의 경우는 동쪽으로 갈수록 강수량이 증가한다. 소백산맥의 동쪽 지역을 봄, 여름철과 마찬가지로 상대적인 과우가 나타난다.

겨울철은 전국적으로 작은 값들이 보이지만, 태백산

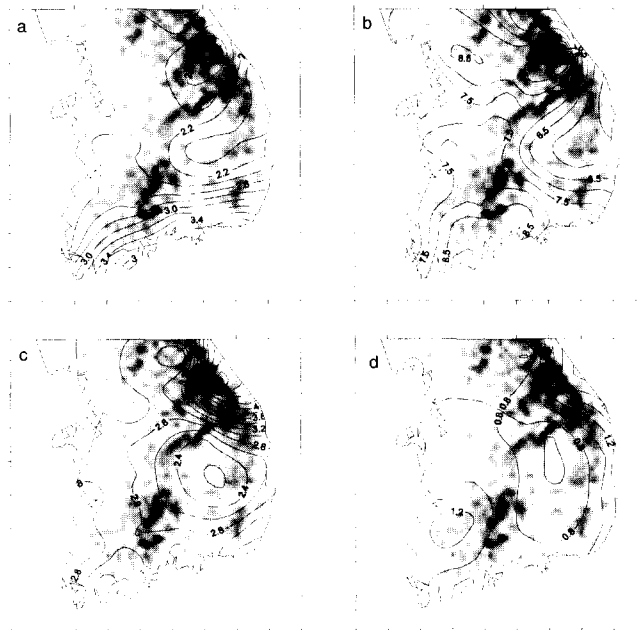


Fig. 2. Distribution of Daily Mean Precipitation in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

맥의 동쪽과 소백산맥의 서쪽은 상대적으로 큰 값을, 소백산맥 동쪽은 상대적으로 작은 값을 보였다(Fig. 2(d)).

Fig. 1과 Fig. 2는 총강수량을 총분석일수(강수일+무강수일)로 나눈 결과들을 분석한 것인데, 이와 다르게 Fig. 3과 Fig. 4는 총강수량을 총강수일수로 나눈

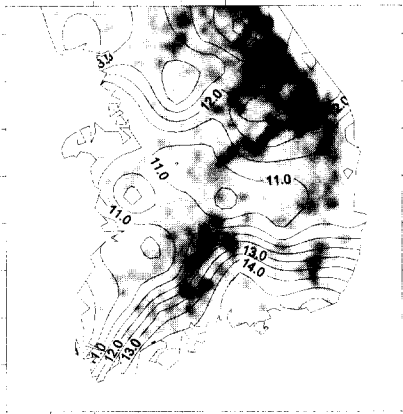


Fig. 3. Distribution of Mean Rainfall Intensity

값들이다. 즉, 전자의 분석으로부터는 어느 지역이 다른 지역에 비해 과우인지, 다우인지를 알 수 있는데 반해, 후자로부터는 각 지역마다의 상대적인 강수 강도를 파악할 수 있다. 먼저 Fig. 3은 앞에서와 마찬가지로 1980~1994년의 강수자료를 분석한 것이다. 남부 지방에서의 강수 강도가 14 mm/일강수일 이상으로 가장 큰 것을 알 수 있고, 그 중에서도 특히 지리산, 덕유산, 가지산으로 둘러싸인 지역이 전국에서 가장 평균강수강도가 크게 나타났다. 장마기간동안 이러한 특징이 두드러졌는데, 장마 전선이 남북으로 진동할 때 주변의 높은 산맥에 의해 강제 상승되는 효과에 의한 것으로 생각된다. 노령산맥 부근의 중부지방에서는 강수 강도의 값이 작았다.

계절별로 나눠서 분석한 결과, 여름철의 강수 강도가 전국적으로 17 mm/강수일 이상으로 가장 컸고, 두 번째로 가을철로 10.5 mm/강수일 이상으로 나타났으며, 그 다음이 봄철과 겨울철 순이었다.

봄철의 경우(Fig. 4(a)), 남부 지방이, 가을철의 경우(Fig. 4(c)) 남부지방과 대관령 부근에서 강수 강도가 컸고, 단양, 영주지방 부근에서 가장 약한 강수 강도를 보였다. 겨울철에는(Fig. 4(d)) 태백산맥, 소백산맥의 동쪽이 서쪽과 비교할 때 상대적으로 강수강도가 컸다.

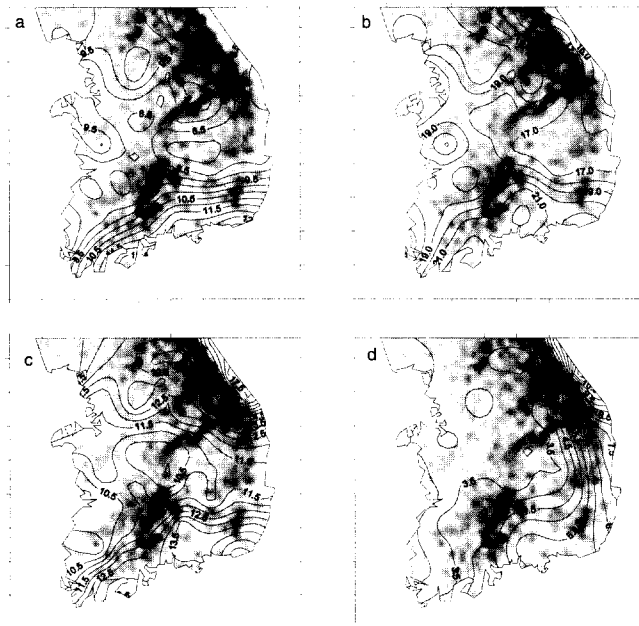


Fig. 4. Distribution of Rainfall Intensity in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

### 3. 인공강우에 적합한 구름 분석

우리 나라는 중위도 편서풍대에 위치하고 있어 주 1회 정도 기압골이 통과하며, 이때 비교적 구름의 양이 많아 다른 나라에 비해 인공강우 실험에 좋은 환경이라 할 수 있다. 우리나라는 1년에 평균 80일에서 108일정도 비가 온다. 구름은 평균 운량 7.5 이상인 날이 110일에서 170일 정도이고, 2.5 이하인 날은 50일에서 106일 정도로 둘을 합하면 구름 낀 날은 1년에 평균 250일이 넘는다(기상연구소, 1997).

강수 현상은 대기 중에 빙정핵이 충분히 존재할 때 일어나고 부족할 때는 일어나지 않는다. 구름에서 인위적으로 강수의 씨(precipitation embryo)을 만드는 방법으로 흡습성 분말이나 미세한 물방울을 뿌리는 방법도 있지만, 특히 혼합구름에서는 드라이 아이스를 뿌리거나 액체 공기, 액체 프로판 가스 등을 분사하여 급냉각시키면 빙정화시킬수 있다. 씨뿌리기 물질과 관련하여 인공 구름 빙정을 만들기 위해 개발된 가장 진보된 기술은 단위 g당 많은 수의 요오드화은(AgI) 입자를 구름에 살포하는 것이다(기상연구소, 1997).

구름 내의 온도 분포가 중요한 것은  $-5^{\circ}\text{C}$  부근에서부터 AgI가 활성화하여 잠열을 방출하므로서 구름의 상승기류를 강화시켜 생성된 빙정을  $-12\sim-15^{\circ}\text{C}$  층으로 이송시키게 된다. 이송된 빙정은 착빙 현상에 의해 성장하며 또 다른 구름 입자들과 충돌로 인하여 부서져서, 작은 얼음 조각에서 분리되어 나온 핵이 IN으로 작용하는 증식 과정을 하게 된다.  $-12\sim-15^{\circ}\text{C}$ 의 온도층이 특별히 중요한 것은 이 온도 부근에서, 빙정에 수증기가 승화되어 달라붙는 착빙(riming) 기준에 도달하는데 필요한 시간이 최소화되기 때문이다(Dennis, 1980).

적정 구름의 형태는 두터운 층적운(Sc)이며, 중층운(2~7 km)으로 고적운(Ac)나 고층운(As)도 적합하다. 그 외에 지형적인 영향으로 산맥의 풍상측에 형성된 층적운이나 강한 대류 현상에 의해 발생된 적운 등이다. Bergeron(1949)과 Ludlam(1951)은  $0^{\circ}\text{C}$  이하 고도까지 연장되어 있는 지형성 구름은 상승 기류를 따라 AgI 연소기로 지속적인 씨뿌리기를 하면 강수를 증가시킬 수 있는 이상적인 대상 구름이란 점을 지적한 바 있다. 대류성 구름에 비해 해양성 구름이 보다 쉽게 강수를 형성한다. 이것은 CCN의 발생원에 따른 입자 크기 분포의 차이로 대기 미립자 중 해양성 입자가 대류성에 비해 크기 때문이다. 대류성 구름에 지형



Fig. 5. Distribution of the Daily Mean Cloud Amount

성 구름이 포함되거나, 전선등에 관련된 넓은 층운이 포함되면 더욱 좋다.

Fig. 5는 1980~1994년의 기상관측소 운량자료를 이용하여 일평균운량을 구한 것이다. 지리산, 덕유산을 포함하는 소백산맥 부근에서 최고 5.9의 큰 값을 보였고, 노령산맥, 소백산맥의 동쪽지역에서 4.9이하로 일평균 운량값이 가장 작았다.

계절별로 나눠서 분석해 본 결과(Fig. 6), 사계절 모두 지리산 부근의 운량이 가장 컸다. 여름철과 가을철에는 강원도 지역의 운량도 크게 나타났는데, 그 중에서도 여름철에는 태백산맥의 동쪽에서 큰 값으로, 가을철에는 태백산맥의 서쪽의 원주, 보성 부근에서 운량이 컸다. 가장 과우였던 다른 지역에 비해서 상대적으로 운량도 작았음을 알 수 있다.

앞에서 언급한 것과 같이 인공강우를 수행하기 위한 적정구름의 조건은 층이 두꺼운 대류운으로 운정온도가  $-10\sim-30^{\circ}\text{C}$  사이이고, 운저 온도는  $-5^{\circ}\text{C}$  이하의 구름으로 구름내에  $-12\sim-15^{\circ}\text{C}$ 의 온도층이 존재하여야 한다. 그러나 우리의 아직 국내에서는 구름 내부의 3차원 구조를 조사할 수 있는 기가재가 없을 뿐 더러, 연직 온도 구조도 오산, 광주, 포항, 제주도에 위치한 고층 기상 관측소에서 하루에 두 번(09시, 21시) 관측된다. 그 결과 인공강우에 적합한 구름을 정확히 가려내고 분석하기가 어렵다. 다만, 위성자료를 이용해 운정온도를 구하는 정도만이 가능하다.

이 연구에서는 1996년 12월~1997년 11월의 1년치 GMS 위성자료를 이용해 Cloud Top Brightness

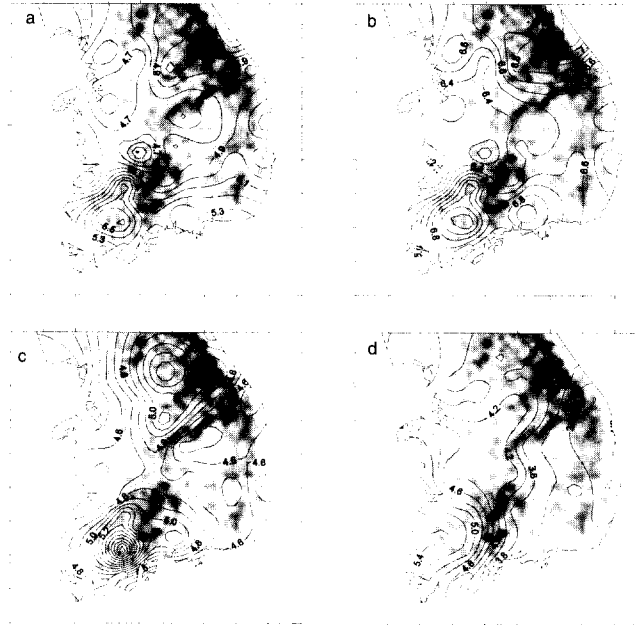


Fig. 6. Distribution of the Daily Mean Cloud Amount in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

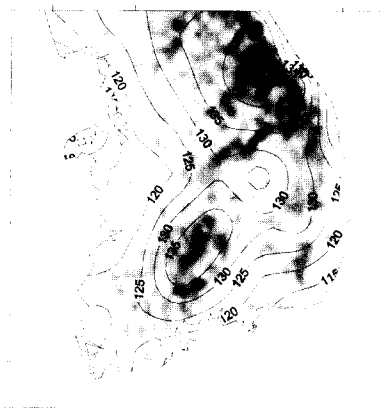


Fig. 7. Frequencies of the Day of Appropriate Cloud Top Temperature for Cloud Seeding Experiment

Temperature를 추출해 내고, 그 결과를 분석하였다. Fig. 7은 이 자료들 가운데, 09시 자료만을 가지고, 운정온도가  $-10 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 였던 날의 일수를 구한 것이다. 태백산맥과 소백산맥, 노령산맥의 따라 빈도수가 뚜렷하게 컸다. 특히, 대관령 부근에서 1년중 140일 이상의

적정 운정온도 일수를 보였고, 다음으로, 지리산과 덕유산 정상에서 135일 정도의 큰 빈도수를 보였다.

계절별로 나누어 분석한 결과(Fig. 8), 사계절중 겨울에 대관령부근에서 50일 이상으로 큰 전국적으로 가장 빈도수가 컸으며, 다음으로 봄철, 가을철, 여름철 순으로 높은 빈도수를 보였다(Fig. 8(d)). 앞에서의 강수량 분석에서는 소백산맥의 동쪽지역이 상대적으로 과우였던 것에 반해, 적정 운정온도일수 분석에서는 봄철(Fig. 8(a))과 가을철(Fig. 8(c))에 빈도수가 뚜렷하게 컸으며, 여름철(Fig. 8(b))과 겨울철(Fig. 8(d))에도 다른 지역에 비해서 큰 빈도수를 보였다.

우리 나라에서 인공강우가 필요한 지역, 가능한 지역 등을 구분하기 위한 기초자료 제공을 위해, 지금까지의 강수량, 강수 강도, 운량, 적정 운정온도 빈도수등의 분석 결과를 정리하였다(Fig. 9). 우선 연평균으로 볼 때, A지역은 운량이 많았고, 강수량이 전국에서 가장 컸으며, 적정운정온도 빈도수도 아주 컸던데 비해, 강수 강도는 보통이었다. B지역의 경우는 전국적으로 강수량이 최소를 보여, 가장 과우한 지역으로 나타났으며, 운량도 적었고, 강수강도 역시 약했지만, 운정온도 빈도수는 다른 지역에 비해 컸다. C지역의 경우는 지리산, 덕유산, 가지산으로 둘러싸인 지형적인 특성 때문

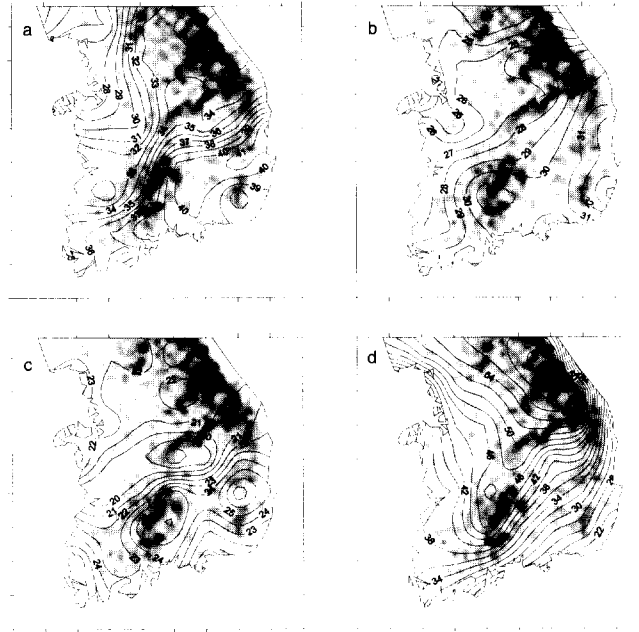


Fig. 8. Frequencies of the Day of Appropriate Cloud Top Temperature for Cloud Seeding Experiment in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

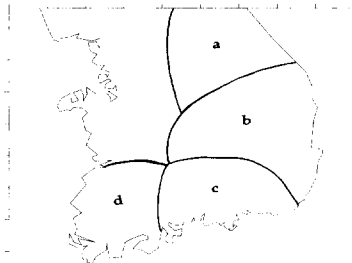


Fig. 9. Regional Division of Precipitational Characteristics

에, 강수 강도가 가장 컸으며, 강수량도 많았다. D지역의 경우는 운량이 다른 어떤 지역보다도 탁월하게 많았고, 적정 운정온도 빈도수도 아주 컸던 데에 반해, 강수량은 보통 수준이었고, 강수강도 역시 약했다.

이로부터, B지역의 경우는 전국에서 가장 과우한 곳이므로, 인공강우가 가장 필요한 곳이다. 연평균 운량이 다른 지역에 비해서 작은 편이지만, 인공강우에 적합한 운정온도 빈도수도 크므로, 이 지역에 대한 상세 기상자료 분석을 통해, 적합한 기상 조건만 찾는다면, 다른 지역에 비해서, 인공강우의 효율성이 아주 크다고

볼 수 있겠다. D지역의 경우는 운량과 적정 운정온도 빈도수가 다른 지역에 비해서 탁월하게 높은데에 반해, 강수량은 많지 않으므로, B지역 다음으로 인공강우가 효율적으로 이루어 지지 않을까 사료된다.

#### 4. 고층 기상 관측자료 분석

우리 나라에서는 오산, 광주, 포항, 제주의 네 곳에서만 하루 두 번 고층기상 관측을 하므로 대기의 연직구조와 그 변화를 충분히 파악하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고, 강수현상의 유무와, 구름의 발생, 성장, 소멸 등의 과정이 대기의 연직 안정도, 온도구조, 수분 분포 구조에 좌우되므로, 1991~1995년 09시 오산 고층기상 관측자료를 이용하여 평균 상승응결고도, 가강수량, 대류응결고도 등을 조사하였다.

##### 4.1 상승응결고도(Lifting Condensation Level, LCL) 분석

Fig. 10은 상승응결고도의 계급별 빈도수를 분석한 것이다. 상승응결고도란 지상 부근의 불포화 습윤공기 덩이가 어떠한 원인에 의하여 치울려졌을 경우 단열냉각에 의하여 수증기가 포화상태에 달하여 응결이 시작



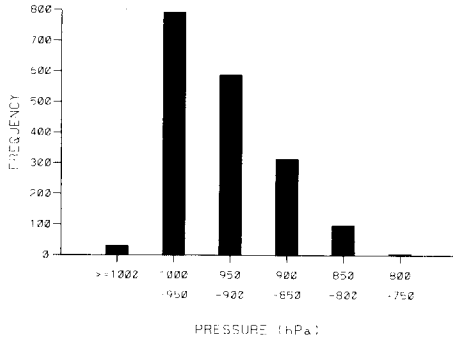


Fig. 10. Frequencies of LCL in Each Value

되는 고도를 말한다.

1000~950 mb인 경우가 760일(전체 분석일의 4/9)로 나타나 가장 빈도수가 컸다. 각 계절별로 살펴보면(Fig. 11), 봄철과 겨울철은 1000~850 mb 사이에서 빈도수가 고르게 분포하였으며, 여름철에는 1000~900 mb인 경우가 대부분을 차지했다.

#### 4.2 가강수량(precipitable water) 분석

가강수량이란 어떤 일정 대기층이나 대기 중에 함유

되어 있는 수증기가 전부 응결한다고 가정하였을 경우의 물의 양을 깊이(mm)로 표시한 것으로서 두 기준기압면 사이의 기압차를  $\Delta p$ (mm), 그 사이에 있는 기층의 평균 비습을  $q$ (g/kg)라고 하면, 가강수량  $W_p$ (mm)는 다음 식과 같이 계산된다.

$$W_p = \sum 0.010 \times q \times \Delta P$$

여기서  $\sum$ 는 지상으로부터 대기의 상층한계까지의 총합을 의미한다. 비습  $q$ 는 고도가 증가함에 따라 감소하여 약 300 mb 고도에서는 거의 0에 가까우므로  $\sum$ 의 상한은 통상 300 mb면 고도가 된다. 지구대기의 연평균 가강수량은 열대해양에서는 약 45 mm, 극지방에서는 약 7 mm로서 평균 25 mm 정도이다. 한편, 전지구 표면에 대한 연강수량은 평균 1,000 mm정도가 되므로 대기 중의 수증기는 1년간에 약 40회(1,000 ÷ 25) 교체되는 셈이다.

Fig. 12는 앞에서의 고층관측자료를 이용하여, 가강수량의 계급별 빈도수를 분석한 것이다. 먼저 전체적으로는 0.5~1.0 cm에서 480회 이상으로 가장 큰 빈도수를 보였고, 가강수량 값이 커질수록 그 빈도수가 감소했다.

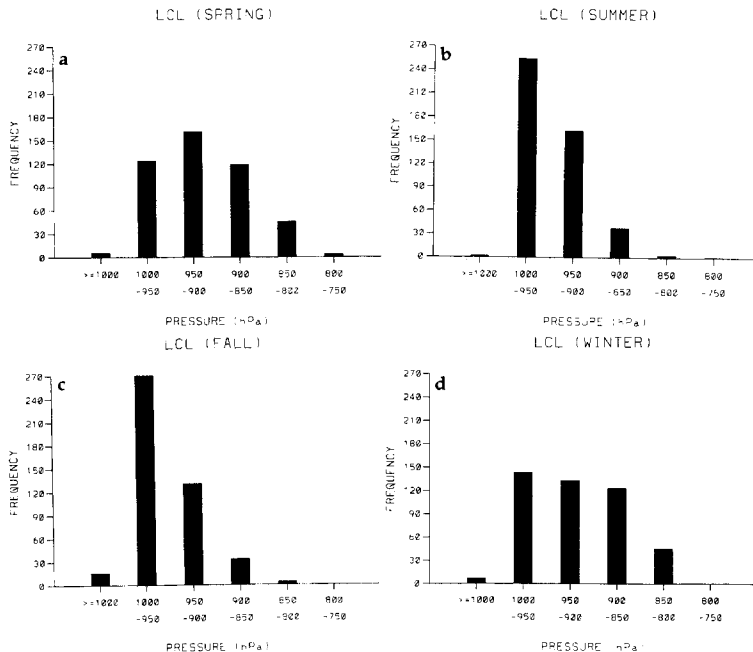


Fig. 11. Frequencies of LCL in Each Value in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

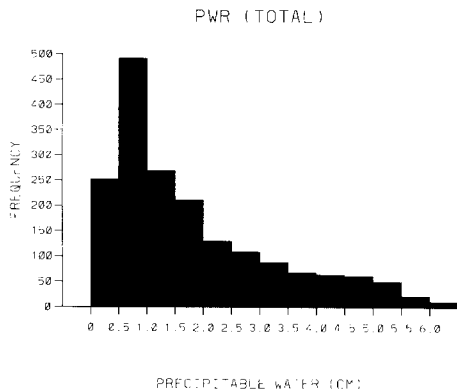


Fig. 12. Frequencies of Precipitable Water in Each Value

계절별로 나뉘서 보면(Fig. 13), 두드러지게 그 분포가 다른데, 먼저, 봄철의 경우(Fig. 13(a))는 0.5~1.0 cm에서 가장 큰 빈도수를 보이는 등, 앞의 그림과 비슷한 분포 곡선을 보였다. 여름철의 경우(Fig. 13(b)) 다른 계절에 비해서 가장수량값들이 컸으며, 1.5 cm이 상의 큰 계급값들을 나타냈다. 그리고 그 빈도수도 60 일 안팎으로 비슷했다. 가을철의 경우(Fig. 13(c))에도

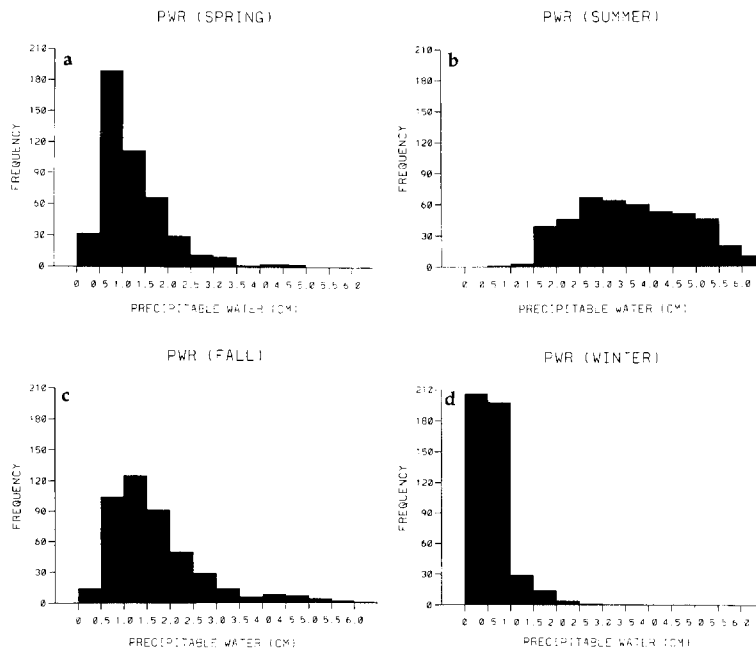


Fig. 13. Frequencies of Precipitable Water in Each Value (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

0.5~2.5사이에서 빈도수가 크고, 봄철과 겨울철(Fig. 13(d))에 비해서는 대기가 수분을 많이 포함했음을 알 수 있다.

### 4.3 대류응결고도(Convective Condensation Level, CCL) 분석

지표 부근의 공기가 지표의 가열로 에너지를 받은 후 단열적으로 상승하여 포화에 이르는 고도를 대류응결고도라 한다. 이 고도는 보통 지표가열에 의해 생기는 적운형 구름의 운저고도가 된다. 지표 부근의 공기가 이 고도에 이르면 그 후에는 해당 공기가 자동적으로 계속 상승하게 된다. 고층관측자료를 이용해서 각 CCL 계급값별 빈도수를 조사하였다. 전체적으로나 계절별로 나누어서 분석한 결과, 모두 비슷한 분포를 보였으며, 400~500 mb사이에서 가장 큰 빈도수를 보였다(Fig. 14, Fig. 15).

### 4.4 평균 혼합비와 대류응결고도 사이의 상관관계 분석

Fig. 16은 앞에서 구한 대류응결고도(Convective Condensation Level)와 연직층에 대한 평균 혼합비(Mean Mixing Ratio) 사이의 상관관계를 보기 위해

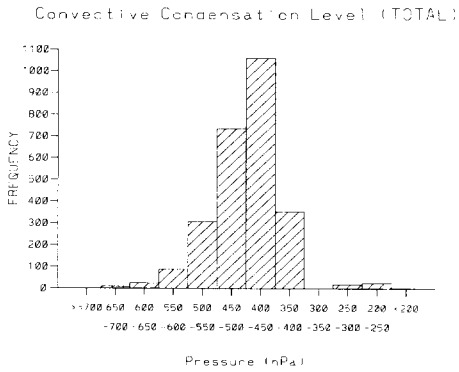


Fig. 14. Frequencies of CCL in Each Value

모든 분석일수에 대해 분석한 것이다. 가로축은 대류응결고도(hPa)이고, 세로축은 평균혼합비값(g/kg)이다.

사계절 모두를 합해서 분석한 Fig. 16에서 보면, 두 값들 사이에는 전체적으로 양의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 상관관계 기울기를 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 즉, 이것은 같은 양의 수분을 포함 하더라도 대류응결고도, 즉 적란운의 운저고도가 다를 수 있음을 의미하는 것이다. 이렇게 상관관계 기울기가 세 가지로 나뉘는 원인을 찾기 위해 각 계절별로 나누어 분석하였다(Fig. 17).

분석한 결과, 여름철의 경우(Fig. 17(b)) 가장 큰 양의 상관관계 기울기가 나타나고, 봄철(Fig. 17(a))과

Convective Condensation Level vs. Mean Mixing Ratio (TOTAL)

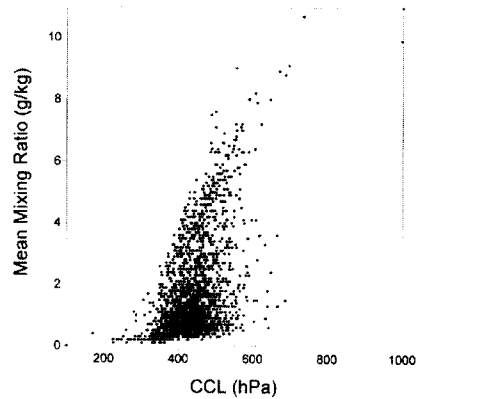


Fig. 16. Correlation between the Precipitable Water and Mean Mixing Ratio

가을철(Fig. 17(c))의 경우에 그 다음 큰 기울기가, 겨울철의 경우(Fig. 17(d))에 가장 작은 기울기 값들을 나타냈다. 이로부터, 여름철에는 상층의 수분량이 많더라도, 적란운이 나타날 수 있는 운저 고도는 다른 계절에 비해서 높고, 수분량이 증가하더라도, 운저고도가 크게 낮아지지 않음을 알 수 있다. 이에 반해, 겨울철의 경우는 평균혼합비가 0~2 g/kg이 대부분이지만, 작은 수분량에 비해 대류응결고도가 낮고, 또한 수분이 조금만 증가하더라도, 운저고도는 크게 낮아지는 것이다. 이것은 여름철의 경우는 수분은 많지만, 모든 연직

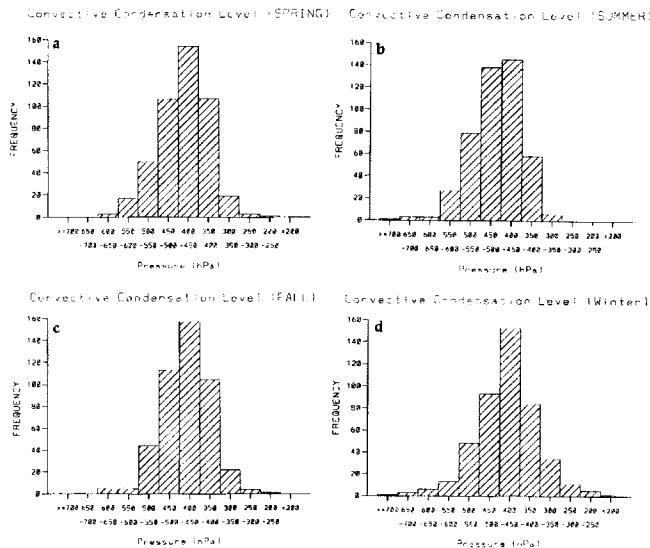


Fig. 15. Frequencies of CCL in Each Value in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

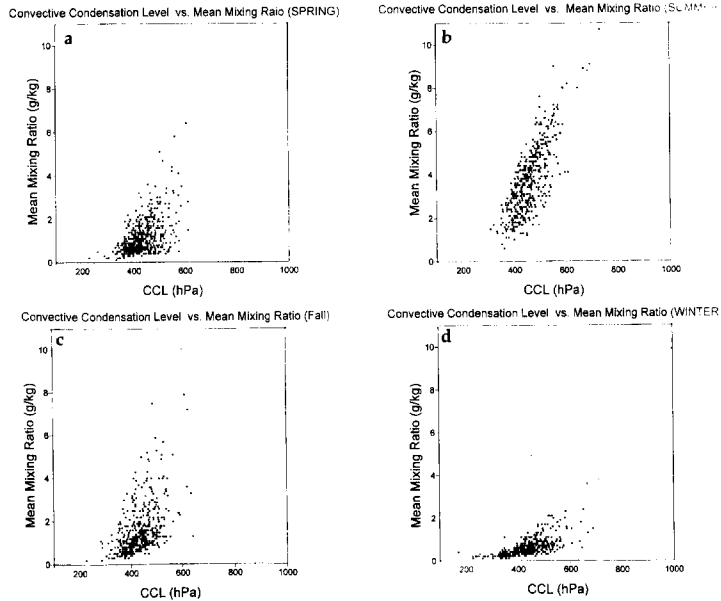


Fig. 17. Correlation between the Precipitable Water and Mean Mixing Ratio in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

층에 걸쳐 온도가 다른 계절에 비해 높기 때문에, 지표면 근처에서 상승한 공기덩어리의 방출된 응결잠열로 얻은 부력이 주변 대기의 온도보다 높기위한 고도가 다른 계절보다 훨씬 높기 때문이고, 겨울철의 경우는 상층대기의 다른 계절에 비해 낮기 때문에, 적은 양의 수분을 가진 지표면 근처 공기덩어리가 조금만 상승하더라도 방출된 응결잠열로 주변대기보다 가벼워 질 수 있는 고도에 도달하게 되기 때문이다. 즉, 인공강우 측면에서 본다면 두 계절모두 장단점을 가지므로, 여름철에는 높은 운저고도를 고려해야하고, 겨울철에는 운저고도는 낮지만, 적은 수분량을 고려하는 등 각 계절에 맞는 방법을 모색해야 할 것이다.

### 5. 안동지역 상세 기상자료 분석

앞에서는 우리 나라에서의 인공강우 가능성을 타진하기 위하여 여러 가지 기상 자료들을 거시적으로 분석하였으나. 그러나, 인공강우 실험은 한반도 전역이 아니라, 훨씬 더 좁은 영역을 대상지역으로 설정하고, 이곳에 집중적으로 수행되므로, 대상지역이 선정되면, 상세한 기상자료를 이용하여, 지형, 국지적 순환 등의 지역적 특성을 고려한 대상지역에 맞는 인공강우 조건을 찾아야 할 것이다.

이 연구에서는 앞에서의 분석결과로부터, 우리나라에서 가장 과우한 안동지역을 대상 지역(Fig. 18)으로 하여, 상세한 강수분포 및 구름을 분석하였다.

### 5.1 자동기상관측시스템(AWS) 및 우설량계 강수량 자료 분석

이 분석에 이용된 자료는 대상지역(Fig. 18) 내에 위치한 43개 지점의 기상청 자동기상관측시스템 강수량자료(1993~1997년)와 기상연구소에서 소백산 부근에 설치한 7개의 우설량계 관측자료, 같은 기간의 850 hPa 09시 고층 바람 자료이다.

계절별 평균 일누적 강수량을 조사한 결과, 봄철의 경우(Fig. 19(a))는 일평균 2 mm 정도로 소백산맥의 서쪽에 위치한 원주 부근이 다른 지역에 비해 강수량이 많았다. 그렇지만, 다른 계절에 비하여 지역에 따른 차이가 뚜렷하지 않다. 여름철의 경우(Fig. 19(b))는 지형의 영향이 훨씬 뚜렷하여, 전체적으로 산맥의 서쪽에서 강수량이 많으며, 춘천과 영주시, 또 안동, 춘양을 잇는 대상모양으로 상대적으로 큰 값이 나타났다. 가을철의 경우(Fig. 19(c))에도 지형의 영향이 약하게 나타나는데, 제천과 문경을 잇는 산악을 포함하여 그 서쪽에서 약간 더 큰 값을 보였다.

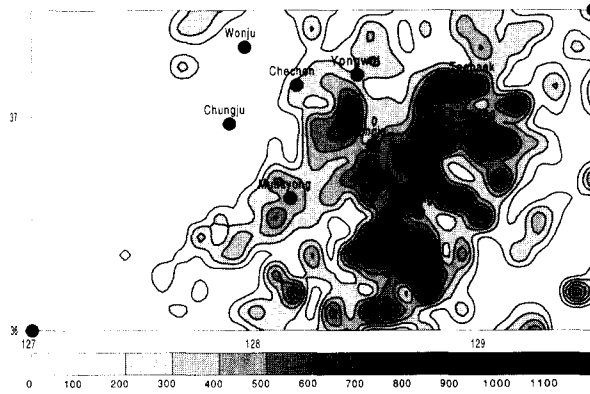


Fig. 18. Topography of the Target Area

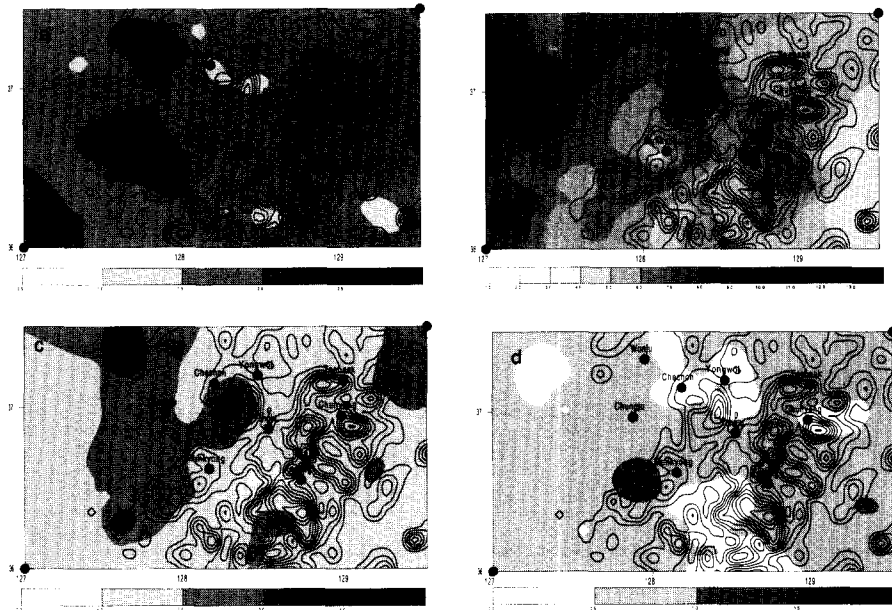


Fig. 19. Daily Mean Precipitation Using the AWS Data in (a) Spring, (b) Summer, (c) Fall, and (d) Winter

풍향과 지형 효과가 강수량 분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 오산 고층 바람자료를 이용하여 풍향별로 평균 누적 강수량을 구하였다(Fig. 20). 주풍이 동풍계열인 경우 산맥의 동쪽에서 서쪽에 비해 많은 강수가 내린 것을 알 수 있고, 서풍일 경우는 이와 반대로 산맥의 서쪽에서 더 많은 강수량이 나타나 지형에 의한 강제 상승이 강수발달에 영향을 미친다는 결론을 내릴 수 있다. 남풍과 북풍의 경우에는 동쪽 사면과 서쪽 사면사이의 차이는 아니지만, 산맥의 정상부근에서

상대적으로 큰 강수량 값을 보였다.

## 5.2. 운형 자료 분석

구름 내에 인위적으로 응결핵이나 빙결핵을 투입하여 강수를 유발시키려면 증우 가능성(seedability)을 지닌 적당한 구름을 먼저 선정해야한다. 적정 구름의 형태는 중층운이나 층적운으로 알려져 있으며 지형성 구름이나 강한 대류로 발생한 적운등도 포함된다(기상연구소, 1997). 따라서 인공 강우 실험을 위한 기초 자료로서,

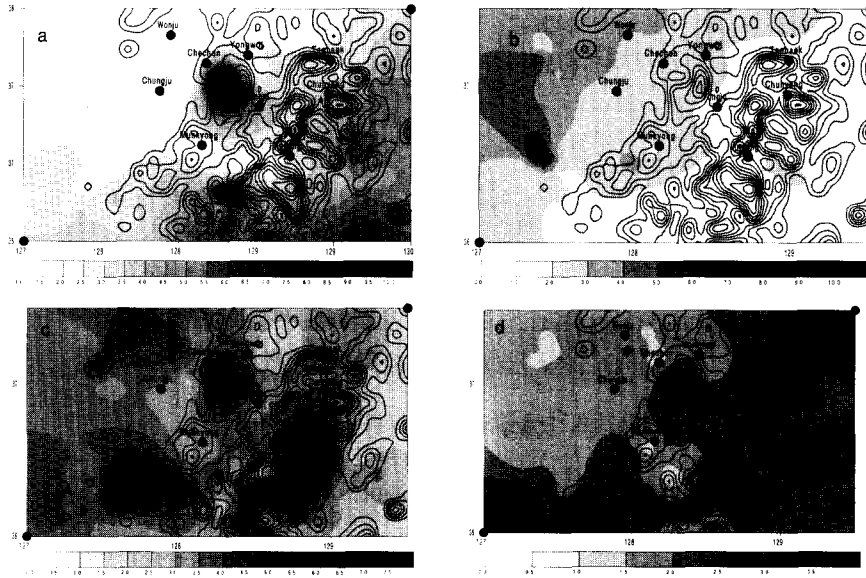


Fig. 20. Daily Mean Precipitation Using the AWS Data in (a) Easterly, (b) Westerly, (c) Southerly, and (d) Northerly Wind Cases

Table 1. Frequencies of Occurrence for Each Cloud Type

	안 동(관측소 코드 : 136)										제 천(관측소 코드 : 221)									
	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Ns	Sc	St	Cu	Cb	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Ns	Sc	St	Cu	Cb
봄	66	0	2	20	42	18	91	16	8	0	17	0	1	5	15	8	41	8	0	0
여름	67	0	1	26	48	26	108	26	65	0	10	0	2	8	11	11	46	8	13	2
가을	58	2	1	20	27	14	98	19	17	0	10	0	1	4	12	4	38	5	4	0
겨울	44	0	1	9	20	13	51	12	1	0	12	0	2	2	6	7	30	7	0	0
Total	235	2	5	75	137	71	348	73	91	0	49	0	6	19	44	30	155	28	17	2

실질적으로 대상지역 상공에 나타나는 구름의 형태, 출현 빈도에 관한 기본 조사를 수행하였다.

분석에 사용된 자료는 1995-1997년 안동, 제천 기상관측소에서 관측된 3시간 간격의 운형자료이다. 먼저, 12시 관측값을 대표값으로 하여 운형별 빈도수를 계산하였다(Table 1). 같은 시간대에 두 종류이상의 운형이 관측될 때도 있는데, 이런 경우에는 각각의 운형 빈도수에 포함시켰다.

전체적으로 안동의 운형별 빈도수가 제천에 비해 월등히 크다는 것을 알 수 있다.

두 지역 모두, 사계절 모두 Sc형의 빈도수가 가장 높았으며, 계절별로는 여름철에 안동이 108일, 제천이 46일로 가장 큰 빈도수를 보였다. 다음으로 큰 빈도수

를 보인 운형은 두 지역 모두 Ci, As 순이었다. 표에는 제시되지 않았지만, 구름이 없는 일수가 안동은 356일, 제천은 827일로 산맥을 사이에 두고 두 지역의 운형 및 운량 분포에서 큰 차이를 보였다.

## 6. 요약

인공강우관 구름 층은 형성되어 있으나 대기 중에 응결핵 혹은 빙정핵이 적어 구름 방울이 빗방울로 성장하지 못할 때 인위적으로 인공의 구름씨를 뿌려 특정지역에 강수를 유도하거나, 과냉각수적을 자연적인 상태보다 빨리 동결시켜 잠열 방출에 의한 구름내부의 상승류가 강화되어 자연적인 강우량에 비해 더욱 많은 강수를 유발하는 것이다. 인공 강우를 실시함으로써 인

위적으로 강수량을 증가시키는 것은 기상분야에서 가뭄의 피해를 경감시키는 수단이 될 수 있다.

이 연구에서는 한반도에서의 인공강우 가능성을 타진하기 위하여 강수량, 운량, 위성자료, 고층 관측자료 등의 기상자료를 이용하여 중규모, 종관규모적 특징을 분석하였다. 특히, 강수 자료 분석 결과, 가장 강수량이 많은 지역은 대관령을 포함하는 태백 산맥이었고, 남부 지방의 해안가를 따라서도 큰 값을 보였다. 그러나, 소백산맥의 동쪽에 위치하고 있는 안동댐 유역은 평균 2.7 mm로 가장 파우한 지역으로 나타나, 전국에서 가장 인공강우가 필요한 지역으로 나타났다.

남부 지방에서의 강수 강도가 14 mm/일강수일 이상으로 가장 큰 것을 알 수 있고, 그 중에서도 특히 지리산, 덕유산, 가지산으로 둘러싸인 지역이 전국에서 가장 평균강수강도가 크게 나타났다. 장마기간동안 이러한 특징이 두드러졌는데, 장마 전선이 남북으로 진동할 때 주변의 높은 산맥에 의해 강제 상승되는 효과에 의한 것으로 생각된다. 노령산맥 부근의 중부지방에서는 강수 강도의 값이 작았다.

우리 나라에서 인공강우가 필요한 지역, 가능한 지역 등을 구분하기 위한 기초자료 제공을 위해, 지금까지의 강수량, 강수 강도, 운량, 적정운정온도 빈도수 등을 분석한 결과, 안동댐 지역은 연평균 운량이 다른 지역에 비해서 작은 편이었고, 인공강우에 적합한 운정온도 빈도수는 컸기 때문에, 이 지역에 대한 상세한 기상자료 분석을 통해 적합한 기상조건만 찾는다면 다른 지역에 비해서 인공강우의 효용성이 아주 크다고 볼 수 있다.

고층 자료를 분석한 결과, 상승응결고도(LCL)는 1000~950 mb인 경우가 분석일의 4/9로 가장 높게 나타났으며, 봄철과 겨울철은 1000~850 mb 사이에서 빈도수가 고르게 분포하였으며, 여름철에는 1000~900 mb인 경우가 대부분을 차지했다. 대류응결고도(CCL)는 계절별 큰 차이를 보이지 않았으며, 400~500 mb 사이에서 가장 큰 빈도수를 보였다. 평균 혼합비와 대류응결고도 사이의 상관관계는 여름철 크고, 겨울철에 가장 작은 값들을 나타냈다. 이는 여름철에는 상층의 수분량이 많더라도, 적란운이 나타날 수 있는 운저 고도는 다른 계절에 비해서 높음을 그리고, 겨울철의 경우는 작은 수분량에 비해 대류응결고도가 낮음을 의미한다. 따라서, 인공강우 실험시 여름철에는 높은 운저 고도를 고려해야하고, 겨울철에는 운저고도는 낮지만, 적은 수분량을 고려하는 등 각 계절에 맞는 방법을 모

색해야 할 것이다.

이 안동 지역내에 위치한 43개의 자동기상관측시스템 자료와 이 연구를 위해 소백산맥 북서쪽 사면, 남동쪽 사면을 따라 설치된 7개의 우설량계로 부터 얻은 자료를 이용해 상세한 강수분포를 조사한 결과, 이 좁은 지역 내에서도 주풍의 방향에 따라 강수분포가 뚜렷하게 차이가 나는 것을 알 수 있었다 이것은 높은 산악이 위치하고 있기 때문에 바람의 세기, 방향에 따라 강제 상승되는 방향, 정도가 달라지기 때문인 것으로 생각된다.

안동지역의 운형은 사계절 모두 Sc형이 가장 많았으며, 계절별로는 여름철에 가장 큰 빈도수를 보였다. 다음으로 큰 빈도수를 보인 운형은 두 지역 모두 Ci, As 순이었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정연구과제인 '한반도 대설 특성 및 운물리에 관한 연구'의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 기상연구소 (1997). 인공강우 실험 연구(II).  
김광식 (1973). 한국의 기후. 일지사.  
김연옥 (1989). 한국의 기후와 문화. 이화여자대학교 출판부.  
Bergeron, T. (1949). "The problem of artificial control of rainfall on the globe. I. General effects of ice-nuclei in clouds." *Tellus*, 1, 32-43  
Dennis, A.S. (1980). *Weather modification by cloud seeding*. Academic Press.  
Ludlam, F.H. (1951). "The production of showers by the coalescence of cloud droplets." *J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 77, pp. 402-417.  
Young, K.C. (1993). *Microphysical processes in clouds*. Oxford Univ. Press.  
WMO (1994). *Sixth scientific conference on weather modification*. Vol II, WMP Report No. 22, WMO/TD=No. 596.

(논문번호:98-046/접수:1998.07.29/심사완료:1998.09.21)