

Microwave radiometer를 이용한 안동지역의 수액량 및 빙우강강량 추정

정관영 · 김효경 · 이선기 · 정영선

기상연구소 수문기상연구실

The Distributions of Liquid Water Content(LWC) and the Potential Enhancement of Precipitation over Andong Area observed from Microwave Radiometer

Kwan-Young Chung, Hyo-Kyung Kim, Seon-Ki Lee, and Young-Sun Jung
Hydrometeorology Laboratory, Meteorology Research Institute

Abstract

The observation of liquid water content(LWC) and the estimation of precipitation enhancement by cloud seeding were made over the Andong in Korea from March 1997 through Feb 1998.

A dual-channel microwave radiometer was used to measure the liquid water content and water vapor. It was shown that the 90% of observational period had the amount of less than 0.1 mm in LWC, and that the amount of precipitation was proportionally increased to liquid water content. The amount of LWC has maximum in summer and minimum in winter. The content of liquid cloud water was showed higher value from the time of 12 to the time of 17 except for summer season in which it extremely fluctuated with a large precipitation. The majority of liquid water content over the area occurred with westerly and southwesterly wind which were flowed from the Sobaek mountain. The ratio of horizontal LWC flux and vertical precipitation flux, P_{en} is almost ranked in the interval of 0.0 ~ 0.5 with maximum of 0.5 in spring, 0.2 in summer and fall, and 0.1 in winter. Accordingly, it is estimated that the potential enhancement of precipitation over Andong area by cloud seeding has high value in spring with westerly wind.

Keywords : radiometer, liquid water, potential enhancement of precipitation, cloud seeding.

요 약

구름 속의 수액량 분포와 인공강우에 의한 잠재적 증우 가능성을 조사하기 위해 1997년 3월부터 1998년 2월까지 이중채널 마이크로웨이브 레디오메타를 사용하여 안동 지방에서 관측을 실시하였다. 안동 지방의 수액량은 대부분의 시간대에서 0.1mm 이하로 매우 작은 값을 보였다. 계절적 특성을 살펴보면 여름철에 수액량이 가장 풍부하였으며, 봄, 가을, 겨울 순이었다. 수액량의 일변화 양상은 여름철을 제외한 계절에서 12시부터 17시까지 비교적 높은 수액량을 보였으며, 강수량이 많은 여름철에는 수액량의 시간 변동이 심한 것으로 조사되었다.

풍향에 따른 수액량의 분포는 소백산맥을 넘어오는 기류인 서풍과 남서풍 계열의 바람에서 수액이 풍부하게 존재하는 것으로 조사되었다. 수평 수액량 플럭스와 연직 강수량의 비인 잠재적 증우 가능량(P_{em})은 대부분 0.5 이하였으며, 계절적으로는 봄철에 0.5, 여름과 가을철에 0.2, 그리고 겨울철에 0.1 이었다. 결과적으로 안동지역에서 인공강우에 의한 최대 증우 가능성은 봄철 서풍계열의 바람에서 높은 것으로 조사되었다.

I. 서 론

세계 곳곳에서 인구 증가와 잦은 가뭄으로 인한 수자원의 부족으로 극심한 곤란을 겪었으며, 우리 나라 역시 1994년 여름 극심한 무더위와 더불어 가뭄이 한 때는 전국적으로 계속되어 1996년 봄에는 주요 댐의 저수율이 30% 정도 수준에 머물러 식수와 공업 용수 부족 등을 초래하였다.

강수량이 부족한 상태에서 물을 얻기 위한 가장 손쉬운 방법은 지하수를 이용하는 것이지만 지하수자원을 오염시킬 우려가 있으며, 해수를 이용하는 방법은 해수 중에 함유되어 있는 염분 등의 성분을 제거하여 담수화해야 하는 기술상의 난점과 시설 투자상의 경제성이 대두된다. 이러한 관점에서 볼 때 인공강우를 이용한 증우는 가뭄 피해 경감 대책으로 세계적으로 긍정적인 평가를 받으며 수행되고 있다. 세계기상기구(WMO)에 의하면 수자원을 확보하기 위한 인공증우는 이미 10여개국에서 실용화 단계에 있고, 미국, 호주, 중국, 이스라엘, 태국 등에서는 매년 정기적으로 실시하고 있다.

호주 타스마니아의 수력 발전소에서 분석한 인공증우에 대한 경제성을 살펴보면 톤당 약 0.3센트의 저렴한 비용으로 수자원을 확보하는 것으로 조사되었다. 이에 1995년부터 기상 연구소에서도 가뭄을 극복하고 물 부족사태를 대비하기 위해 지상실험과 항공실험을 통한 인공강우 기술 개발을 시도하고 있다(기상연구소, 1997).

인공증우 성공 여부를 결정짓는 중요 요소 중의 하나는 구름의 운립이 함유하고 있는 수액량(cloud liquid water)이므로 이에 대한 조사가 사전에 선행되어야 한다. 이를 위해 수액량의 연직 누적량을 연속적으로 측정할 수 있는 microwave radiometer가 유용한 도구로서 사용되어 오고 있다(Hogg *et al.*, 1983). 특히, dual-channel radiometer는 대기 중 수증기와 수액량을 분리해서 측정할 수 있다(Warburton and Wetzel, 1992). 이를 이용한 주요 연구는 미국의 Sierra Nevada에서 겨울철

storm 형태에 따른 수함량 분포 연구(Heggli and Rauber, 1988), Utah주에서 중규모 강수대에 따른 구름 수함량의 분포 조사 연구(Long *et al.*, 1990; Sassen *et al.*, 1990), 호주에서 인공증우의 잠재적 가능량 연구(Long and Huggins, 1992) 등이 있다.

대기 중 인공적으로 증우될 수 있는 잠재적인 최대량은 인공강우의 목표 지역으로 이동하는 수액량 flux 중 자연적인 강수에 사용되고 남은 여분의 수액량으로 생각할 수 있으며, 이러한 양을 여분속 (Thompson and Super, 1987) 또는 자연적 잉여량 (Super and Boe, 1988) 등으로 부르기도 한다.

따라서, 본 연구는 인공강우의 목표지역인 안동지역 주변에 설치된 microwave Radiometer의 관측 자료를 이용하여 이 지역의 구름 수량 분포를 조사하고, 구름 내에 있는 수액의 수평 플럭스를 통해 인공강우 목표 지역의 연직 강수 플럭스와 비교하여 잠재적 증우 가능성에 대해 고찰하였다.

II. 자료 및 분석 방법

본 Radiometer 설치지역은 소백산 풍하측에 위치한 영주관측소이다(Fig. 1). 이는 주로 편서풍대인 한반도에서 안동댐을 인공강우 목표지역으로 설정할 경우 소백산의 풍하측인 영주는 이지역의 풍상측에 해당되기 때문이다. 관측기간은 1997년 3월에서 1998년 2월까지이며, 관측된 수증기량 및 수액량 자료를 바탕으로 잠재적 증우 가능량을 계산하기 위하여 다른 기상학적 요소들 (강우량, 850 hPa 풍속 및 풍향)이 추가로 사용되었다.

관측된 Radiometer 자료로부터 수증기 및 수액량 자료를 추출하는 방법은 다음과 같다. Radiometer와 같은 장파 복사 수신기는 분자의 진동, 회전 운동에서 기인되는 전자기 노이즈를 안테나로 수신한다. Radiometer가 측정하는 안테나 노이즈(복사에너지)는 안테나의 온도에 선형적으로 비례하며, 이 온도를 복사 측정 장비에서는 밝기온도(T_B)라 한다. 따라서, 대기가 비산란매체(국지열역학평형)라 가정하면(연직20 km까지 허용), 흑체 복사를 할 수 있으므로 이에 대한 복사

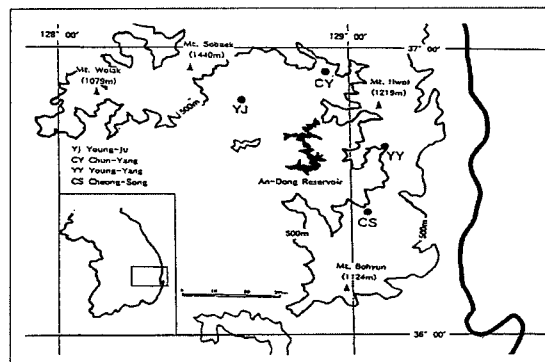


Fig. 1. The location of radiometer in YoungJu (YJ)

Where CY, YY, and CS mean Choon-Yang, Young-Yang and Cheong-Song, respectively.

전달 방정식은

$$T_B = T_c e^{-\tau(\infty)} + \int_{sfc}^{\infty} T(s) \alpha(s) e^{-\tau(s)} ds \dots\dots\dots(1)$$

이다. T_B 는 밝기온도, α 는 흡수계수, τ 는 opacity, T_c 는 외기후체복사온도를 나타낸다.
여기서, 대기의 평균복사온도 T_{MR} 을 도입하면 위 방정식은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$T_B = T_c e^{-\tau} + [1 - e^{-\tau}] T_{MR} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 opacity(τ)는 아래와 같다.

$$\tau = \ln \left[\frac{T_{MR} - T_C}{T_B - T_C} \right] \dots\dots\dots(3)$$

위 식에서 얻은 τ 를 사용하여 Radiometer에서 사용되는 23.8 GHz와 31.4 GHz 두 채널에서 수증기량과 수액량에 관한 선형식을 추출하여 얻는다.

$$\text{Water vapor} = Cvp0 + Cvp1 \times \tau_{23.8} + Cvp2 \times \tau_{31.4} \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{Liquid water} = Clq0 + Clq1 \times \tau_{23.8} + Clq2 \times \tau_{31.4} \dots\dots\dots(5)$$

본 연구에 사용된 Radiometer의 추출상수는 1990년~1994년까지 상층관측자료로부터 계산하였으며, Table 1과 같다.

Table 1. Retrieval coefficients calculated by bi-linear regression method using RAOBs data for 1990-1994.

Cvp0	Cvp1	Cvp2	Clq0	Clq1	Clq2
0.002	-22.08	-13.23	0.0033	-0.192	-0.577

인공강우 실험지역의 풍상측과 풍하측(목표지역)에서 전체 구름량에 대한 물수지를 고려하면 두 가지 성분을 생각할 수 있다. 하나는 풍하측으로 이동하는 수평 수액량 플럭스이고 또 하나는 풍하측에서의 연직 강수 플럭스이다. 우선 목표지역으로 이동하는 수액량 flux는

$$W_{flux} = LWC \cdot \bar{V} \cdot D \dots\dots\dots(6)$$

이다. 여기서 LWC는 수액량, \bar{V} 는 풍속, D는 목표지역의 평균 너비이다. 목표 지역의 중심으로부터 실험지역의 풍상 측에서 불어오는 바람방향과 수직하는 면을 만들고 이 면에서 수액량 플럭스를 계산하였다.

실제 계산에 사용된 LWC는 영주관측소에 설치된 레디오메타에서 산출된 수액량이며, \bar{V} 는 오산 850 hpa의 일평균 바람벡터, D는 목표지역의 평균너비로 영주관측소가 포함된 반경 25 km인 원형면적에 대응하는 수직 단면적의 너비인 44.3 km로 가정하였다.

연직 강수 플럭스는 다음 식으로 계산하였다.

$$P_{flux} = \bar{P} \cdot A \dots\dots\dots (7)$$

여기서 \bar{P} 는 목표지역의 면적강수량으로 본 연구에서는 영주 관측소의 강수량을 사용하였고, A는 목표지역의 면적으로 여기서는 원형면적(반경 25 km)으로 가정하였다.

위 두 식으로부터 얻은 수평 수액량 플럭스와 연직 강수 플럭스의 비율($P_{en} = W_{flux}/P_{flux}$)은 목표 지역에 내린 강수량에 대하여 대기 중에 남아있는 물의 비율이므로, 이를 통해 인공적으로 증우 될 수 있는 최대량이 추정될 수 있다.

III. 결 과

1. 수액량의 시간적 분포 특성

Fig. 2는 1997년 3월에서 1998년 2월까지 관측된 수액량의 계절별 시간평균값을 나타낸 것이다. 관측기간 동안 시간대별 수액량의 변화 특성을 살펴보면 봄철의 경우 15시부터 23시에 높은 값을 보였고, 여름철의 경우는 시간대별 변동량이 심하며, 5시에서 7시 사이에 최고 값을 보였고, 약 3~4시간 간격으로 변동하는 것을 볼 수 있다. 가을철의 경우는 야간 보다 주간이 높은 값을 보였고 약 12시경에 최대값으로 조사되었으며, 겨울철의 경우는 시간별 평균 수액량이 0.1 mm 이하로 대체적으로 시간별 변동량이 적었으며, 15시에서 17시 사이에 상대적으로 약간 높은 값을 보였다.

계절별 전반적 특성을 살펴보면 여름철에 수액량이 가장 많이 존재하며, 봄, 가을, 겨울 순으로 나타났고, Fig. 3에 나타난 바와 같이 연간 시간대별 수액량 flux 비율을 살펴보면 13시부터 19시 까지가 비교적 높은 비율을 차지하였으며, 총 flux 비율의 거의 절반에 가까운 42%를 차지하여, 수액량 flux가 오후 시간에 집중되는 것을 볼 수 있다.

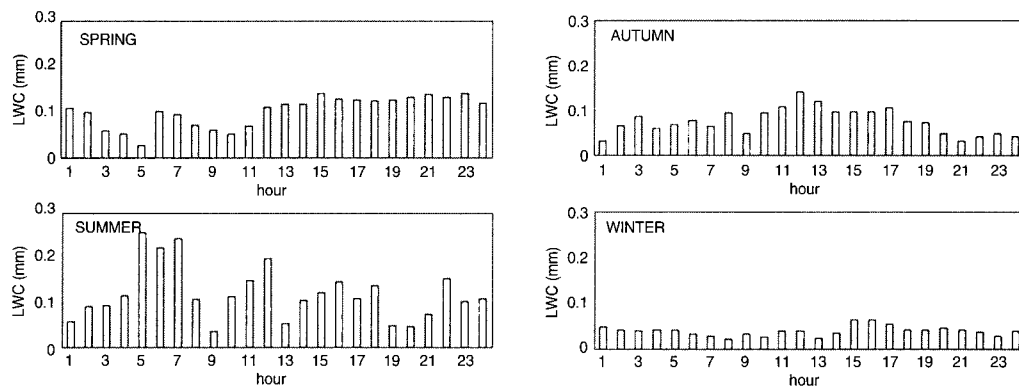


Fig. 2. Distribution of hourly mean of liquid water content in spring, summer, autumn and winter

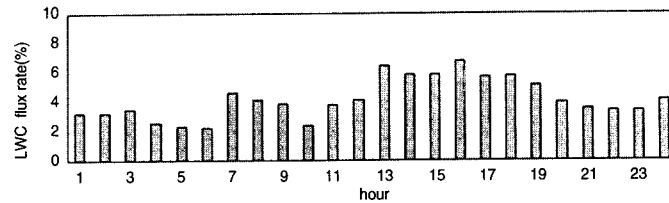


Fig. 3. The rate of hourly mean of liquid water content (1997. 3~1998. 2)

2. 수액량과 강수량과의 관계

Fig. 4는 시간당 평균 수액량을 알아보기 위하여 수액량을 13계급으로 나누어 총 시간 수를 조사한 것으로 각 계급별 범위는 Table 2에 나타나 있다. 조사 결과 수액량이 0.1 mm 이하인 계급이 2685 시간으로 총 관측 시간의 약 90%를 차지하였고, 수액량이 1mm 이상인 시간은 전체의 2%에 불과했다.

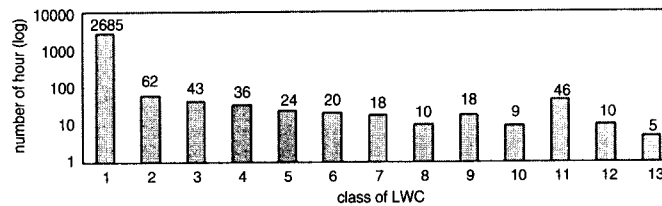


Fig. 4. Number of hour according to class of liquid water content

Table 2. Liquid water content values for each level.

계급번호	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
범위	≤0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	≥3.0

Fig. 5는 수액량의 계급에서의 강수량을 평균한 것으로 관측된 수액량의 범위인 0~4mm 사이에

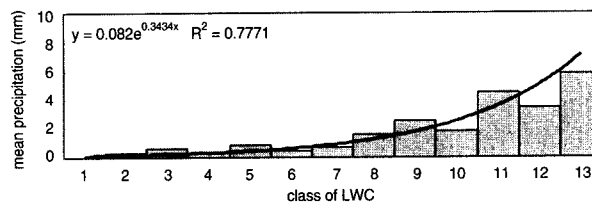


Fig. 5. Hourly mean of precipitation vs. class of liquid water content

서는 수액량이 증가할수록 강수량도 지수적으로 비례하여 증가하는 추세를 보였다. 수액량이 0.1 mm 이하 시에는 평균강수량이 0mm로 나타났고, 평균 수액량이 0.6mm 이상 시에는 평균 강수량이 1 mm 이상으로 조사되었다.

3. 잠재적 증우 가능성

본 인공강우 목표지점의 연평균 풍향분포는 Fig. 6과 같으며, 서풍과 북서풍 등 서풍계열이 대부분을 차지해 남북으로 길게 뻗은 소백 산맥을 넘어오는 흐름이 강한 것으로 조사되었다. 특히, 서풍과 남서풍의 서풍계열의 바람에서 수액량 flux가 풍부하게 존재하는 것으로 조사되었으며, 이것은 산악에 의한 지형적 강제 상승으로 인해 수액량이 증가한 것으로 판단된다(Fig. 7).

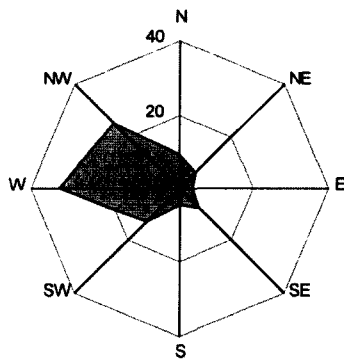


Fig. 6. The distribution of wind direction (1997.3 - 1998.2)

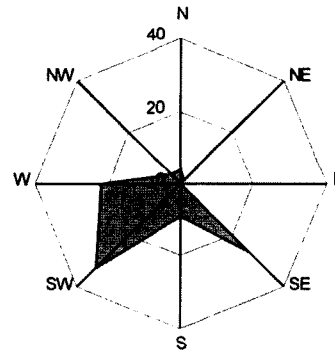


Fig. 7. The flux of liquid water content depending on wind direction (1997.3 - 1998.2)

Fig. 8은 목표지역에 대한 인공강우로 증우될 수 있는 최대량을 조사하기 위하여, 풍향별로 몇 가지 강수사례일을 선정하여, 강수량, LWC, P_{en} 의 시간대별 변화를 분석한 결과이다.

먼저 1997년 5월 24일의 경우(북풍 계열) P_{en} 이 최고 0.7 이상이 나타났고 평균 약 0.3의 값으로 조사되었으며, 또한 강수가 끝난 직후에도 많은 구름 수액량이 목표지역으로 유입되고 있어 강수가 끝난 후에도 증우 가능성이 있음을 시사하고 있다. 1997년 5월 12일의 경우(남풍 계열) 북풍보다 많은 양의 구름 수액함량이 목표지역으로 유입되었고, P_{en} 은 평균 약 0.27로 나타났다. 한편 5월 13일(서풍계열)의 경우 앞의 두 경우보다 많은 양의 수액함량이 목표지역으로 수송될 뿐만 아니라 P_{en} 의 값이 1이상으로 수 시간 이상 지속되었으며, 평균하여 약 0.7의 높은 증우 가능성을 보여주었다. 또한, 북풍의 경우에서와 같이 강수가 끝난 후에도 여분의 구름 수액함량이 계속적으로 유입되는 것으로 관측되었다. 여름철의 사례일인 1997년 7월 15일을 보면, 강수 최고치가 나타나기 전에 LWC유입이 1 mm 이상으로 왕성하였으며 P_{en} 도 2.5 이상의 높은 값을 나타냈었고 이때의 풍향은 서풍계열이었다.

따라서 북풍계열과 남풍계열의 경우에 모두 P_{en} 이 낮은 반면 서풍계열에서는 상대적으로 $P_{en} > 1.0$ 의 빈도가 높은 것으로 조사되었으며, 이것은 서풍계열일 때 지형에 의한 상승과 응결로 강수 증대 효과가 두드러지고, 다른 두 풍계에서는 그 효과가 미미함을 알 수 있다.

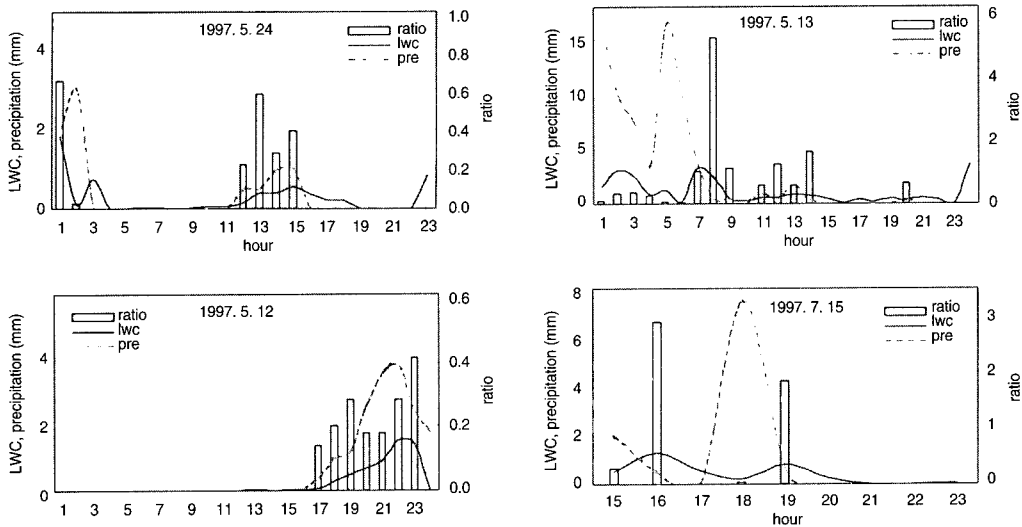


Fig. 8. The seedability(P_{en}), precipitation and liquid water content of each case

Fig. 9는 인공 증우 목표 지점내에 강수량 플럭스가 존재하는 162시간 동안 잠재적 증우 가능성 즉, P_{en} 의 분포를 조사한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 잠재적 증우 가능성은 0에서 0.5 사이에 대부분 분포하며, 증우 가능성이 1 보다 큰 때는 약 10시간 정도인 것으로 조사되어 인공 증우의 가능성이 비교적 낮았다.

강수량 플럭스가 존재하는 시간중 잠재적 증우 가능성, P_{en} 을 계절별로 살펴보면 봄철이 0.5로 가장 높고 여름과 가을이 0.2로, 그리고 겨울이 가장 낮은 0.1로 조사되었다.

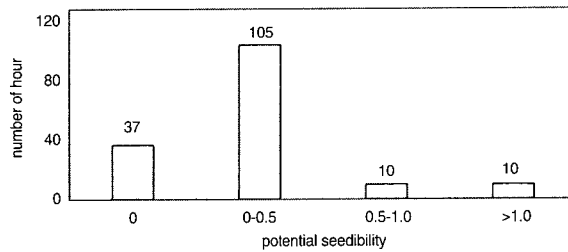


Fig. 9. The distribution of potential seedability

IV. 결 론

인공증우의 목표지역인 안동 주변에 설치된 microwave radiometer 자료를 이용하여 이 지역 구름의 수함량 분포 및 잠재적 증우 가능성을 살펴보기 위해 1997년 3월부터 1998년 2월까지 관측을 실시하였다. 이의 결과를 요약하면,

- 1) 수액량은 0.1 mm 이하가 대부분을 차지하였으며, 계절적으로는 여름철의 수액량이 가장 풍부하며 일 변화도 심한 것으로 조사되었고 봄, 가을, 겨울 순으로 수액량은 나타났다. 시간에 따른 일변화를 살펴보면 수액량의 변동이 심한 여름철을 제외한 모든 계절에서 12시부터 17시까지 비교적 높은 수액량을 보였다.
- 2) 풍향별 수액량의 분포는 서풍과 남서풍계열의 바람에서 수액량 flux가 풍부하게 존재하는 것으로 조사되었으며, 이것은 서쪽에 위치한 소백 산맥에 의해 지형적 강제 상승으로 인해 수액량이 증가하는 것으로 판단되었다.
- 3) 목표지역에서 인공적으로 증우될 수 있는 가능성을 나타내는 P_{en} 을 풍향별로 조사한 결과 서풍계열의 풍향에서 P_{en} 이 1.0 이상인 때가 관측되었으며, 다른 풍향에서는 증우 가능성이 낮은 것으로 조사되었다.
- 4) 인공증우 목표 지점내에 강수량 플럭스가 존재하는 시간 중의 잠재적 증우 가능성, P_{en} 을 조사한 결과 0.5 이하가 대부분을 차지하였으며, 계절적으로는 봄철이 평균 0.5, 여름과 가을이 0.2, 겨울이 0.1 이하로 낮아, 봄철에 인공적으로 증우될 수 있는 잠재량이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, 강수가 끝난 후에도 수액량이 계속적으로 유입되어, P_{en} 이 높은 값을 나타낼 수 있었다.

상기의 결과는 영주 관측소 그 지점에서 1년간 radiometer로 측정한 자료에 근거 한 것이며 보다 자세한 수액량의 공간적 분포를 알아 보기 위해서는 여러 곳에 radiometer를 설치하여 장기적인 관측을 통해 비교 분석하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 과학기술부 특정연구과제 '한반도 대설 특성 및 운물리에 관한 연구'의 일환으로 수행되었으며, 연구 수행에 많은 조언과 도움을 아끼지 않으신 수문기상연구실과 영주 관측소의 모든 분께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상연구소, 1997 인공강우 실험 연구, 33pp
Heggli, M.F. and R.M. Rauber, 1988 The characteristics and evolution of supercooled liquid water in

- winter storm over the Sierra Nevada: A summary of radiometric measurement taken during the Sierra Cooperative Pilot Project, *J. Appl. Meteor.*, 27, 989 - 1015.
- Hogg, D.C. F.O. Guiraud, J.B. Snider, M.T. Decker, and E.R. Westwater, 1983 A steerable dual-channel microwave Radiometer designed for measurements for integrated water vapor and cloud liquid water in the troposphere, *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 798-806.
- Long, B.A. and A.W. Huggins, 1992 Australian Winter Storm Experiment(AWSE) I : Supercooled Liquid Water and Precipitation-Enhancement Opportunities, *J. Appl. Meteor.*, 31(9), 1319 - 1055.
- Long, A.B., B.A. Campistrone and A.W. Huggins, 1990 Investigation of winter mountain storm in Utah. Part I: Synoptic analyses, mesoscale kinematics, and water release rate, *J. Atmos. Sci.*, 47, 1302-1322.
- Sassen, A.W. Huggins, A.B. Long, J.B. Snider, and R.J. Meltin, 1990 Investigation of winter mountain storm in Utah. Part II: Mesoscale structure, supercooled liquid water development, and precipitation processes, *J. Atmos. Sci.*, 47, 1323-1350.
- Super, A.B and B.A. Boe, 1988 Wintertime cloud liquid water observation over the Mogollon Rim of Arizona, *J. Wea. Mod.*, 20, 1-8.
- Thompson, J.R. and A.B. Super, 1987 Wintertime supercooled liquid water flux over the Grand Mesa, Colorado, *J. Wea Mod.*, 19, 92-98.
- Warburton, J.A. and M.A. Wetzel, 1992 Field study of the potential for winter precipitation in the Australian snowy mountains, *Atmos. Res.*, 28, 327-363.