

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우 에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer





2013년 8월 박사학위 논문

한반도에서 겨울철 지형성 구름에 대한 인공증설의 영향인자 분석

조선대학교 대학원

대기과학과

양 하 영

한반도에서 겨울철 지형성 구름에 대한 인공증설의 영향인자 분석

Analysis of Influence Factor of Snowfall Augmentation by Winter Orographic Cloud in the Korean Peninsula

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

대 기 과 학 과

양 하 영

한반도에서 겨울철 지형성 구름에 대한 인공증설의 영향인자 분석

지도교수 류 찬 수

이 논문을 이학 박사학위 신청논문으로 제출함.

2013년 4월

조선대학교 대학원

대기과학과

양 하 영

양하영의 박사학위 논문을 인준함

위원장 국가태풍센터 연구관 장 기호 (인)

위 원 부산대학교 교 수 이 순 환 (인)

위 원 국가태풍센터 센 터 장 이 종 호 (인)

위 원 조선대학교 교 수 정 효 상 (인)

위 원 조선대학교 교 수 류 찬 수 (인)

2013년 6월

조선대학교 대학원

Contents

List of Tables	iii
List of Figures	iv
ABSTRACT	vii
제1장 서론	1
제2장 실험지역의 기상 및 안개 특성	4
제1절 기상학적 특성	4
제2절 안개의 발생, 소산 및 지속시간	9
제3장 연구방법 및 자료	14
제1절 연구방법	14
제2절 연구자료	17
1. 적설계	17
2. 광학우적계	18
제3절 수치모델 및 모의설계	22
제4장 인공증설실험 사례분석	25
제1절 실험 사례일 기상장	25
제2절 SR1(Seeding Rate 1) 실험 사례분석	38
1. 바람장 및 수액량	38

2. 입자 수농도 및 크기분석	47
제3절 SR2 실험 사례분석	51
1. 바람장 및 수액량	51
2. 입자 수농도 및 크기분석	54
제5장 결론	55
References ·····	57

List of Tables

Table 2	2.1.	Cloud atlas from World Meteorological Organization (WMO)	6
Table 3	3.1.	Specifications of the ultrasonic snowdepth meter.	18
Table 3	3.2.	Specifications of the PARSIVEL disdrometer.	19
Table 3	3.3.	Classification according to volume-equivalent diameter	20
Table 3	3.4.	Derived equations of integral rain parameters.	21
Table 3	3.5.	Summary of the WRF model configuration.	23
Table	4.1.	Summary of the snow enhancement experiments for seeding rate	1
		(SR1). ····	39
Table	4.2.	Summary of the snow enhancement experiments for seeding rate	2
		(SR2).	51

List of Figures

Fig. 2.1. Monthly cloud type from 1987 to 2005: (a) December, (b) January, (c)
February, (d) March, and (e) April.	7
Fig. 2.2. The monthly cloud cover from 1987 to 2005.	8
Fig. 2.3. Monthly average of foggy days and fog duration from 1987 to 2005.	9
Fig. 2.4. Percentage of fog occurrence and dissipation times: (a) Spring, (b)
Summer, (c) Autumn, and (d) Winter.	11
Fig. 2.5. Same as Fig.2.4 except for percentage of fog duration.	12
Fig. 2.6. Windrose from 1987 to 2005: (a) All day, and (b) Foggy days	13
Fig. 3.1. Typical surface synoptic chart at 1200 LST 8 March, 2010	14
Fig. 3.2. Schematic diagram of the orographic snow enhancement experiment.	16
Fig. 3.3. The diagram of PARSIVEL distrometer's measuring principle	19
Fig. 3.4. Topography of the Daegwallyeong in the Taeback Mountains and Mod	el
domains. A-B in Domain4 (D4) stands for a horizontal path	of
cross-section, passing Wonju (WJ), Daegwallyeong (DG) ar	ıd
Gangneung (GN).	24
Fig. 4.1. Time series of Gangneung AWS (top), liquid water contents	of
Microwave Radiometer (middle), UHF wind vector and SNR (dl	3)
(bottom) at 9 February, 2010.	27
Fig. 4.2. Same as Fig. 4.1, except for 10 February, 2010.	28
Fig. 4.3. Same as Fig. 4.1, except for 12 February, 2010.	29
Fig. 4.4. Same as Fig. 4.1, except for 16 February, 2010	30
Fig. 4.5. Same as Fig. 4.1, except for 3 March, 2010.	31
Fig. 4.6. Same as Fig. 4.1, except for 4 March, 2010.	32
Fig. 4.7. Same as Fig. 4.1, except for 6 March, 2010.	33
Fig. 4.8. Same as Fig. 4.1, except for 7 March, 2010.	34

Fig. 4.9. Same as Fig. 4.1, except for 8 March, 2010
Fig. 4.10. Same as Fig. 4.1, except for 25 March, 2010
Fig. 4.11. Same as Fig. 4.1, except for 6 April, 2010 37
Fig. 4.12. Variation of fresh snow cover over (a) Gangneung (GN), (b)
Daegwallyeong(DG), and (c) Daegwallyeong observatory(DGR) at 12
February, 2010 40
Fig. 4.13. Same as Fig. 4.12, except for 4 March, 2010
Fig. 4.14. Same as Fig. 4.12, except for 7 March, 2010
Fig. 4.15. Same as Fig. 4.12, except for 8 March, 2010
Fig. 4.16. Simulated surface wind field and column-integrated cloud liquid water
at (a) 1700 LST 12 February, 2010, (b) 1100 LST 4 March, 2010, (c)
1400 LST 7 March, 2010, (d) 1700 LST 7 March, 2010, (e) 1100 LST
8 March, 2010, (f) 1400 LST 8 March 2010, and (g) 1600 LST 8
March, 2010. 43
Fig. 4.17. Same as Fig. 4.16, except for (a) 1800 LST 10 February, 2010, (b)
1900 LST 10 February, 2010, (c) 1500 LST 12 February, 2010, and (d)
1700 LST 8 March, 2010. 45
Fig. 4.18. Vertical cross-sections of horizontal wind vector and cloud water
mixing ratio at (a) 1800 LST 10 February, 2010, (b) 1900 LST 10
February, 2010, (c) 1500 LST 12 February, 2010, and (d) 1700 LST 8
March, 2010. 46
Fig. 4.19. Time series of the fresh snow cover(top) number concentration, mean
diameter, rain intensity, radar reflectivity (middle) and total number of
drops measured(bottom) by PARSIVEL disdrometer at Daegwallyeong
on 10 February, 2010. ———————————————————————————————————
Fig. 4.20. Same as Fig. 4.19, except for 12 February, 2010
Fig. 4.21. Same as Fig. 4.19, except for 4 March, 2010. ———————————————————————————————————
Fig. 4.22. Same as Fig. 4.19, except for 7 March, 2010

Fig.	g. 4.23. Same as Fig. 4.19, exc	ept for 8 March, 2010 50
Fig.	g. 4.24. Variation of fresh	h snow cover over (a) Gangneung, (b)
	Daegwallyeong, and (c)	Daegwallyeong at 7 March 2010 52
Fig.	g. 4.25. Simulated surface wind	d field and column-integrated cloud liquid water
	at (a)1100 LST 7 Marc	ch 2010, and (c)1500 LST 7 March 2010 53
Fig.	g. 4.26. Same as Fig. 21 excep	pt for vertical cross-sections of horizontal wind
	vector and cloud water	mixing ratio 53
Fig.	g. 4.27. Simulated surface wind	d field and column-integrated cloud liquid water
	at (a)1100 LST 7 Marc	ch 2010, and (c)1500 LST 7 March 2010 54

ABSTRACT

Analysis of Influence Factor of Snowfall Augmentation by Winter Orographic Cloud in the Korean Peninsula

Yang, Ha-Young

Advisor: Prof. Ryu, Chan-Su, Ph.D. Department of Atmospheric Sciences Graduate School of Chosun University

During the period February to April 2010, twenty-five ground-based an AgI NH₄I mixture burned in acetone, seeding experiments have been conducted over the Taebaek Mountains. Studies have been made on influence factor for snowfall augmentation by winter orographic cloud in Korean peninsula. We obtained the optimized conditions for the Daegwallyeong region as follows: surface temperature < 0°C, wind direction between 0 and 130°, wind speed < 5 m/s for at least 30 minutes. In order to get an appropriate AgI ratio for snowfall enhancement, we have been tested two seeding rate (SR1: 1.04 g min⁻¹,SR2: 2.08 g min⁻¹). As a results, eight out of twenty-five have been detected the enhancement of snowfall. It seems that the small AgI seeding (SR1) for snowfall augmentation is efficient for fall down.

The case of the snowfall enhancement is as in the following: 1) Increment of snowfall appeared in the smaller seeding amount (SR1) except in exp. 15. 2) Even though easterly wind has observed at the Daegwallyeong region, snow enhancement only appears when the inflow of the easterly wind blew in toward Gangwon region from the East Sea. The simulations showed that the main reasons for the difference in snowfall augmentation by winter orographic cloud as follows: The case of snowfall augmentation by seeding shows inflow of the easterly wind blew in toward Gangwon region from the East Sea with adequate supercooled liquid water. This suggests that the parcels absorbed an abundant

amount of heat and moisture from the sea surface, and were modified from below while moving over the sea, leading to the occurrence of condensation in lower clouds. Results indicate that suitable conditions, such as wind field and supercooled liquid water, are needed for snowfall increment by seeding. The snow enhancement appears when 30-min averaged particle size measured by PARSIVEL disdrometer at Daegwallyeong before the start of burning is larger than 8 mm. Results indicate that suitable conditions, such as wind field and sufficient supercooled liquid water, are needed for snowfall increment by seeding.

제1장 서론

최근 기후변화에 의한 에너지 및 물 순환의 편중으로 가뭄피해나 홍수 등의 자연재해 발생이 증가하는 추세이다. 이 중 가뭄으로 인한 물부족 사태는 사회전반에 걸쳐 악영향을 미친다.

우리나라 연평균 강수량은 약 1300mm로 지구 전체 평균인 880mm의 약 1.4 배에 해당하여 강수량이 부족한 것은 아니다. 하지만 최근 10년간(2001-2010년) 계절별 강수량 분포를 보면 연강수량의 60% 이상이 여름철에 집중되었으며 봄과 가을은 각각 15%, 겨울철은 연강수량 대비 6%로 나타났다(장기호 등, 2011). 이러한 경향으로 가을에서 봄철의 부족한 강수량으로 인해 지역적인 가뭄이 발생하고 있으므로 수자원확보와 체계적인 관리의 필요성이 더욱 커지고 있다. 비교적 적은 비용과 환경문제를 최소화하여 수자원을 확보하는 방안의 하나로 인공증우가 있다. 강원도 태백시에서는 2009년 1월 6일부터 4월 2일까지 87일간에 걸쳐 가뭄이 발생하여 심각한 물부족현상으로 제한급수를 실시하는 등 주민들이 심각한불편을 겪었으며 이로 인해 450억원의 고통비용이 산정되었다(박상덕,2009).

기상조절(weather modification)은 인공적으로 날씨를 제어하려고 하는 기술을 말하며 인공증우·인공증설, 안개소산, 우박억제 등이 있으며, 의도적이거나 비의도적인 것을 모두 포함한다. 의도적인 기상조절은 특별한 목적을 가지고 어떤 지역의 안개나 구름, 강수 등의 기상변화를 일으키는 것이며, 비의도적인 기상조절은 예상치 못한 기상이변이나 환경변화에 의해 발생하는 긴 기간의 기상변화를 말한다. 우리가 흔히 말하는 기상조절은 의도적인 기상조절로 인공증우·인공증설은 여름철의 강수나 겨울철의 눈의 양을 증가시키는 기술이다. 도로나 공항의 시정을 확보하기위해 안개를 제거하는 안개소산, 농작물의 냉해 피해를 저감하는 우박억제 등의 기술이 있다.

이러한 기상조절의 핵심은 구름씨뿌리기(cloud seeding)로 이 과정을 이해하기 위해서는 강우과정에 대한 이해가 필요하다. 대표적인 강수이론으로 구름 속 빙정 의 성장에 의해 강수가 발생하는 빙정설과 구름내의 기류의 상하작용에 의해 물방 울들이 충돌과 병합에 의해 강수가 내리는 병합설이 있다.

중위도 이상의 구름 위쪽 꼭대기는 0℃ 이하로 냉각되어 있는 구름이 많으며 이 구름들에는 빙정뿐만 아니라 과냉각물방울(supercooled droplet)이라고 불리는 0℃ 이하에서도 얼지 않고 존재하는 과냉각물방울이 포함되어 있다. 이 과냉각물방울의 포화수증기압이 빙정의 포화수증기압보다 높기 때문에 과냉각물방울로부터 증발된 수증기가 빙정에 달라붙으면서 점점 크게 성장한다. 이렇게 커진 빙정은 다른 과냉각물방울과 충돌·병합(collision-coalescence process)을 거쳐 성장하여 무거워져서 지상으로 떨어지게 된다. 이때 지상의 기온이 0℃ 이상이면 녹아서 비로 내리게 된다. 이를 베르게론-핀다이젠설(Bergeron-Findeisen) 또는 빙정설이라고 한다(Wallace and Hobbs, 2006).

열대지방이나 여름철 중위도 지방에 형성되는 구름은 최상부의 온도가 0℃ 이상으로 크기가 서로 다른 물방울로 이루어져 있어 크기에 따라 낙하속도와 상승속도가 다르다(Malkus and Simpson, 1964). 큰 물방울이 작은 물방울보다 빨리 떨어지게 되는데 떨어지면서 속도가 느린 작은 물방울과 부딪히게 되고 하나로 합쳐지는 병합현상이 발생한다. 물방울은 빙정핵과 마찬가지로 응결핵에 주위의 수증기가달라붙으며 형성되는데 주로 공장이나 자동차의 오염과 화산폭발, 산불 등의 에어로솔이 대부분이다. 이를 충돌·병합설이라고 한다.

인공증우·증설(precipitation enhancement, snow augmentation)은 구름층은 형성되어 있으나 대기 중에 응결핵(cloud condensation nuclei, CCN) 또는 빙정 핵(ice nuclei, IN)이 적어 구름방울이 빗방울로 성장하지 못할 때 인위적으로 구 름씨(응결핵 또는 빙정핵)를 뿌려 구름의 발달과 강수 응결을 더욱 활성화시켜 더 많은 강수를 내리게 하는 것이다. 최초의 기상조절실험은 Schaefer (1946)에 의 해 수행되었으며 항공기를 이용하여 과냉각된 층적운 구름에 드라이아이스(drv ice)를 뿌려 과냉각된 물방울을 빙정으로 성장시키는게 가능하다는 사실을 밝혀냈 다. 구름씨 물질은 강수발달 과정에 따라 빙정핵 역할을 하는 요오드화은(AgI)이 나 드라이아이스(dry ice)를 뿌리거나 응결핵 역할을 하는 흡습성 물질인 염화나 트륨(NaCl)이나 염화칼슘(CaCl₂)을 사용한다. 구름씨뿌리기 방법은 대기에 구름은 형성되어 있지만 빙정핵 또는 응결핵이 부족할 때, 이를 인위적으로 뿌려 강수를 유도하는 정적시딩(static seeding)과 구름 속의 응결핵과 수분은 충분하지만 구 름의 발달이 미약하여 빗방울을 형성하는 병합과정이 원활하지 못할 때 구름의 역 학적 요란을 유도하는 동적시딩(dynamic seeding)이 있다. 구름씨 물질을 뿌리는 위치에 따라 항공시딩과 지상시딩으로 나눠지며 일반적으로 겨울철 산악지형의 풍 상 측에서 활승기류를 이용하여 빙정핵을 살포하는 방법이 지금까지 알려진 인공 증우·증설 연구 중 가장 성공 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Hobbs 1975; Rangno 1986; Reynolds 1988; Deshler et al. 1989; Super 1990; Warburton et al. 1995a, b).

우리나라에서는 1963년 최초로 항공기를 이용한 실험이 실시되었다(양인기, 1965). 2000년대 초반까지 가뭄이 발생하면 이에 대한 한시적인 대응책으로 실시되다가, 이후 기상청 국립기상연구소를 중심으로 기초이론 연구과 관측을 중시하고이를 소규모 실험으로 검증하는 체계로 바뀌었다(이철규, 2010). 최근 국립기상연구소에서는 산악지형을 이용한 인공증설 실험을 수행하였으며, 요오드화은(AgI)시당 후 1.6mm의 증설을 확인하였다(Lee et al., 2009). Sinkevich(2002)등은수자원확보의 방안으로서 정기적인 인공증우실험의 부족이 우리나라에 미치는 경제적인 손실에 대하여 연구하였으며, 그 결과 1999년도 기준으로 약 1억 US달러로 추정하였다. 이철규(2010) 등은 국내에서 일강수량이 가장 적은 지역인 경북지역(한국수자원공사, 1998)의 주요 유역인 안동·임하댐 상류유역에서 인공강우 실험을 1년간 실시한다는 가정 하에 수자원확보(348백만원/년), 산불방지(22,458백만원/년), 가뭄피해저감(28,458백만원/년), 대기질개선효과(5,689백만원/년) 등에서 경제적 가치를 추정하였다.

본 연구는 2010년 겨울철에 대관령 산악지형에 수행한 인공증설에서 구름씨뿌리기에 의해 발생한 증설에 영향을 미치는 요인에 대해 실험을 수행한 결과를 분석하였다. 2장에서는 실험지역인 대관령의 종관 및 기상학적 특성을 분석하였다. 3장에서는 연구방법 및 자료와 WRF 수치모델에 대하여 설명하였다. 4장에서는 각실험 사례별 수액량 및 바람장, 입자직경 및 수농도변화 분석을 하였고, 5장에서는 결론 및 요약을 나타내었다.

제2장 실험지역의 기상 및 안개 특성

제1절 기상학적 특성

대관령은 태백산맥이 남북으로 길게 늘어져 동쪽으로 급경사면을 이루고 있고 동해안과 가까운 지리적 위치 때문에 전 계절에 걸쳐 지역적인 특성인 국지적인 기상현상이 많이 발생한다. 인공증설실험이 수행된 대관령(37°41′N, 128°45′E)은 관측지점의 해발고도가 842m로 하층운 고도이므로 하층운이 끼어 있는 경우 차폐현상이 발생하여 안개현상으로 관측된다. 한반도에 북동기류가유입될 경우 대기가 강제 상승하면서 구름을 형성하는 경우 장시간동안 안개가 발생하는 것으로 관측된다. 또한 저기압이 동해상에 위치하거나 태풍이 동해상으로 진행할 때 태백산맥의 저지효과(blocking effect)에 의해 지형적인 강우가 발생하기도 한다.

해발고도 수백 m 이상인 산악지역에 대한 연구로는 신현진(1978)의 대관령 농무특성에 관한 연구와 김경익(1995)의 보현산 천문대(1,127m)의 안개발생 빈도 분석이 있다. 이들 연구에 의하면 대관령 관측소와 보현산 천문대에서의 안개는 지표 냉각에 의한 복사무보다는 동풍계열의 바람에 의해 동해에서 유입되는 다습한 기류에 의한 이류무와 저기압 통과에 따른 하층운에 의한 경우가 대부분이라고 하였다. 또 허인혜(1998)와 전종갑(1998)은 한반도에 동풍계열의 기류가 유입될 경우 안개 지속시간이 길었는데 이는 대기의 강제 상승으로 지형성 구름을 형성하는 경우 장시간 동안 안개가 발생하기 때문이라고 하였다. 뿐만 아니라 중위도 지방의주요 강수 기구 되는 온대성 저기압이나 한 대 전선대의 영향을 받고 있는 경우도, 대관령은 구름 속에 있게 되므로 안개현상으로 관측할 수 있어 안개의 빈도가 높다고 하였다.

인공증우의 대상으로 현재 고려되고 있는 적정 과냉각 구름의 형태는 지형성 구름(orographic clouds), 두터운 층상운(층적운, stratiform clouds), 그리고 적운형 구름(cumuliform cloud)이다. 또한 고적운이나 고층운도 적합하다. 그 외에 지형적인 영향으로 산맥의 풍상측에 형성된 층적운이나 강한 대류 현상에 의해 발생된 적운 등이다. 이들 구름은 정역학적 씨뿌리기(static seeding)이나 동역학적 씨뿌리기(dynamic seeding)방식에 의해 증우나 증설의 시도가 가능하다. 통계분석

에 의하면 지형성 구름의 경우, 어떤 지역에서는 강수를 10-15% 이상 증가시키는 것으로 보고되고 있다.

이승호와 천재호(2003)는 일반적으로 적운형 구름의 출현 빈도가 높은 지역에서 강설이 많다고 언급한 바 있다. 운정의 온도가 -20℃ 이상이면서 저기압이나전선과 관련된 충상운은 상당한 양의 강수를 내린다. 동일한 형태의 전선이라도 구름의 분포와 과냉각수의 함량이 각 경우에 따라 다르므로 씨뿌리기 가능성에 대한평가가 필요하다. 충상운 중에서 두께가 얇은 충상운은 구름씨뿌리기에 의해 강수가 가능하다. 적운형 구름은 강수의 주원인이 되는 구름으로 상승기류의 속도가1m/sec 이상으로 이와 같이 강한 상승기류는 구름입자가 우박이나 우적으로 성장할 수 있을 만큼 오랫동안 대기 중에 떠 있을 수 있게 한다. 따라서 적운형 구름은모든 유형의 구름 가운데서 가장 많은 수액(liquid water)을 포함하여 강수율이가장 높다. 이런 이유 때문에 적운형 구름에 대해서는 정역학적 씨뿌리기나 동역학적 씨뿌리기가 모두 가능하다. 실제 지중해 동부의 겨울철 적운에 대한 장기간의씨뿌리기의 결과는 13-15%의 증우를 가져오는 것으로 알려져 있다.

실험지역인 대관령 구름물리선도센터는 1986년 8월 22일부터 2006년 11월 6 일까지 대관령기상대로 기상관측업무를 수행하였다. 실험지역의 구름특성을 분석하 기 위해 1987년부터 2005년까지 대관령 상공에 발생한 구름의 발생 형태(운형) 와 양(운량)을 3시간 간격의 목측자료를 이용하여 분석하였다. 운형은 표 2.1에 나타낸 세계기상기구(WMO)의 국제구름도감의 10가지 기본 운형 분류에 따른다. 그림 2.1은 겨울철 인공증설 실험기간에 해당하는 5개월(12월, 1월, 2월, 3월, 4 월)동안 대관령에서 3시간 간격의 목측으로 관측된 운형별 발생빈도를 나타낸 것 이다. 전 기간에 대해 층적운(Stratocumulus, Sc)이 24%, 권운이 23%로 가장 높 은 발생빈도를 나타냈으며, 층운과 난층운이 같이 관측되는 StNs는 16%, 층적운 과 고층운이 같이 관측되는 ScAs는 7%로 층운형 구름이 자주 발생함을 알 수 있 다. 월별 운형발생빈도를 보면 12월은 층운이 31%로 다른 계절보다 더 자주 발생 함을 보이며 4월의 경우 Ci가 30%로 다른 운형에 비해 더 자주 발생함을 알 수 있다. 전 기간에 대해 층적운(Stratocumulus, Sc)이 24%, 권운(Cirrus, Ci)이 23%로 가장 높은 발생빈도를 나타냈으며, 층운과 난층운이 같이 관측되는 StNs는 16%, 층적운과 고층운이 같이 관측된 ScAs는 7%로 층운형 구름이 자주 발생함 을 알 수 있다. 이를 보면 대관령지역은 구름씨뿌리기가 가능한 층운, 층적운 등이 30% 이상 발생하므로 시딩에 적합한 지역임을 알 수 있다.

Table 2.1. Cloud atlas from World Meteorological Organization (WMO).

Abbreviation	Korean name	Scientific name	Height	
Ci	권운	Cirrus	pole region : 3 - 8 km	
Сс	권적운	Cirrocumulus	temperature region : $5-13$ km	
Cs	권층운	Cirrostratus	tropical region: 6 -1 8 km	
Ac	고적운	Altocumulus	pole region : 2 - 4 km	
As	고층운	Altostratus	temperature region : 2 - 7 km	
Ns	난층운	Nimbostratus	tropical region / 2 - 8 km	
Sc	층적운	Stratocumulus	pole region / 0 - 2 km	
St	층운	Stratus	temperature region : 0 - 2 km	
Cu	적운	Cumulus	two sized we give to 0 1 1	
Cb	적란운	Cumulonimbus	tropical region : 0 − 2 km□	

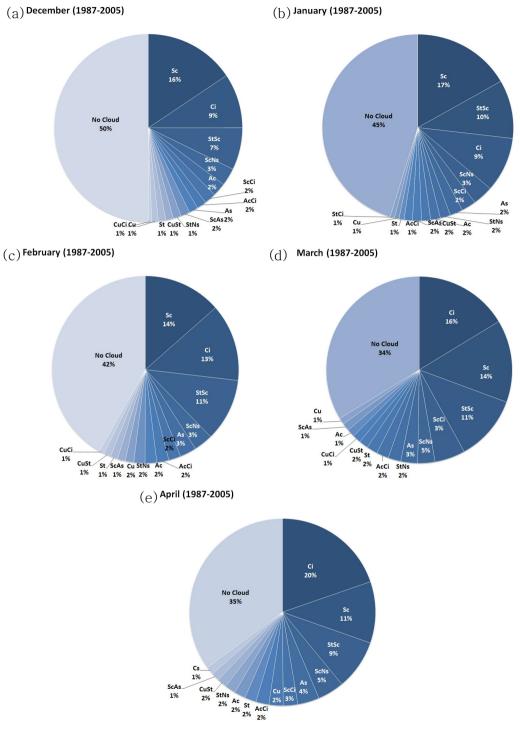


Fig. 2.1. Monthly cloud type from 1987 to 2005: (a) December, (b) January, (c) February, (d) March, and (e) April.

운량은 구름으로 덮여있는 부분을 전천에 대한 10분수로 표시한 것으로 천공에 구름이 5%미만이거나 없을시 운량은 0이고 천공이 구름으로 전부 덮여 있거나 95%이상 덮여 있을 때 운량은 10이다. 계절별 전운량을 보면 여름철은 평균 7/10, 겨울철은 평균 3.7/10의 전운량을 보인다(Fig. 2.2).

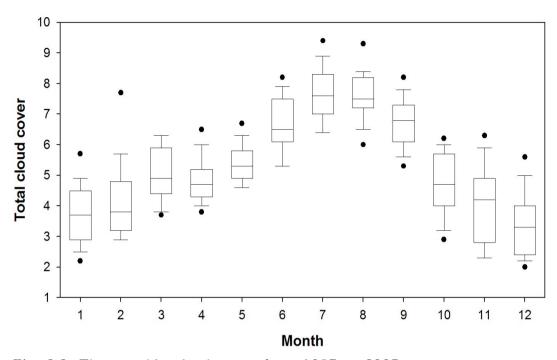


Fig. 2.2. The monthly cloud cover from 1987 to 2005.

제2절 안개의 발생, 소산 및 지속시간

대기 중의 수증기가 응결핵(Cloud Condensation Nuclei, CCN)을 중심으로 응결 성장하게 되면 구름이나 안개가 된다. 구름과 안개는 지면에 접하거나 상공에 있는 경우에 따라 구별되는데 대관령에서 관측되는 안개는 하층운이라고 할 수 있다. 그러므로 대관령에서 관측된 안개의 발생, 소산, 지속시간등을 분석하였다. 안개의 발생시각과 소산시각은 기상청의 통계분석시스템의 현상별 시작/종료/지속시간을 이용하였다. 안개발생 빈도는 안개가 발생하여 시정이 1km 이상이 될 때까지의 시각을 1회로 선정하였고 하루 중에 안개가 소산된 뒤 다시 안개가 발생한 경우는 2회의 안개로 간주하였다. 안개지속시간은 안개시작과 종료시간의 차이값이다.

1987년-2005년 기간 동안 대관령의 안개발생은 2,702회로 전 기간에 대하여 42.9%이상이 가을철에 발생하였으며 여름철과 봄철이 각각 33.8%, 16.5%이고 겨울철에는 9.0%로 나타났다. 대관령 지역의 연 평균 안개 지속시간은 10.4시간으로 계절별 지속시간을 보면 겨울철의 지속시간이 11.4시간으로 가장 길고, 봄철과 여름철이 10.8, 10.4시간이고 가을철의 지속시간은 9.0시간으로 나타났다(Fig. 2.3 참조).

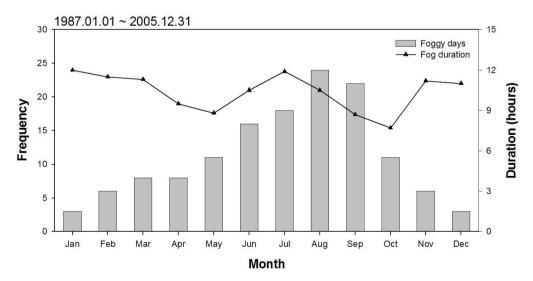


Fig. 2.3. Monthly average of foggy days and fog duration from 1987 to 2005.

Fig. 2.4는 대관령 안개의 발생시각 및 소산시각의 빈도를 계절별로 나타낸 것이다. 안개 발생시각을 보면 0400-0600LST에 가장 빈도가 높이나 대체로 전 시간대에 걸쳐 분포함을 알 수 있다. 소산 시각 또한 전 시간대에 골고루 분포하지만겨울철의 경우 다른 계절과 다르게 0700-0900LST시에 소산되는 빈도보다1600-2000LST에 소산되는 빈도가 더 높게 나타난다. Fig. 2.5는 안개지속시간을 계절별로 나타낸 것이다. 이를 보면 2-5시간의 지속시간을 가지고 있는 복사무의 빈도가 높게 나타나지만 24시간 이상 지속되는 이류활승무의 빈도도 높게 나타남을 알 수 있다. 가을철의 경우 활승무보다는 대부분 2-4시간의 지속시간을 가지는 복사무에 의한 안개가 발생하므로 발생하는 빈도는 높지만 지속시간이 짧게 나타난다. 겨울철은 발생하는 빈도는 낮지만 24시간 이상 지속되는 안개가 14% 이상 발생하는데 이는 복사무보다는 활승무가 많이 발생하기 때문으로 추정된다. Fig. 2.6의 1987년부터 2005년까지 전체일과 안개일의 바람장미를 보면 대관령의경우 전 기간에 대해 3m/s이상의 서풍계가 우세한 반면 안개일은 3m/s 미만의 동풍계가 우세함을 알 수 있다. 바람이 2m/s 이하인 calm상태는 안개 없을 때 4.5%, 안개 있을 때 4.9%로 유사하게 발생하였다.

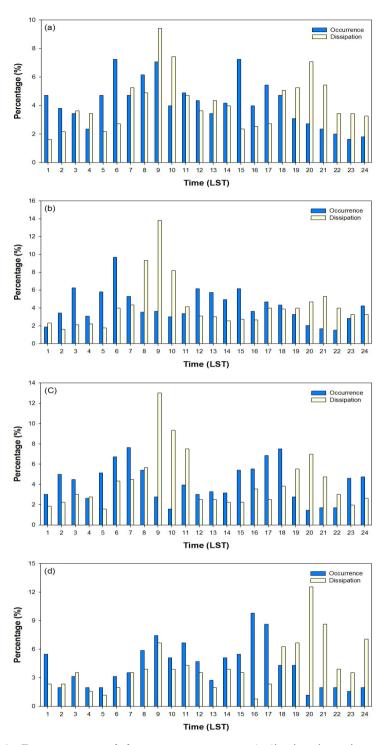


Fig. 2.4. Percentage of fog occurrence and dissipation times: (a) Spring, (b) Summer, (c) Autumn, and (d) Winter.

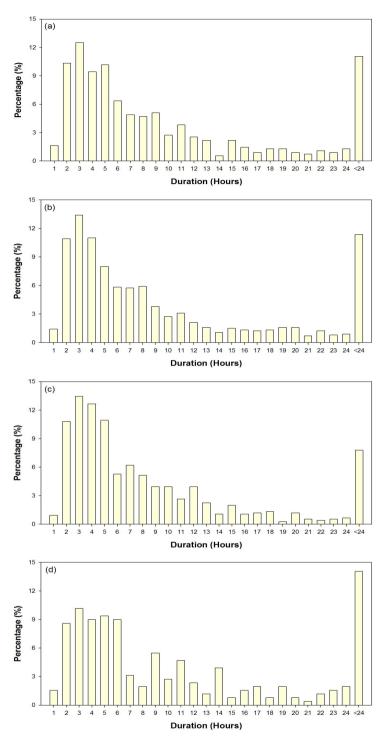


Fig. 2.5. Same as Fig. 2.4 except for percentage of fog duration.

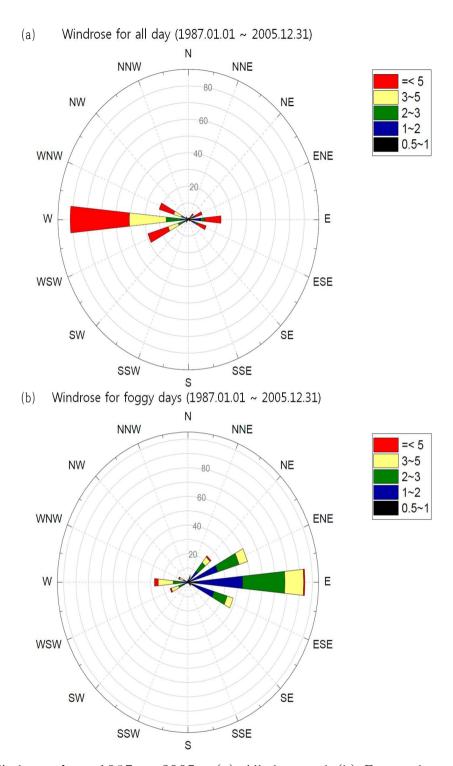


Fig. 2.6. Windrose from 1987 to 2005: (a) All day, and (b) Foggy days.

제3장 연구방법 및 자료

제1절 연구방법

본 연구는 국립기상연구소에서 2010년 겨울철에 대관령에서 수행한 인공증설실험 및 관측 자료를 이용하여 시당에 의한 증설에 영향을 미치는 인자를 연구한 것이다. 실험기간은 2010년 2월부터 4월이며 총 25회의 실험이 수행되었다. Fig. 3.1은 대관령에 동풍이 유입되는 전형적인 기압배치를 나타낸 것이다. 시베리아 고기압이 발달하여 연해주방향으로 확장되어 있고 남해안을 지나는 저기압에 의해 동해안에 위치한 습한 공기가 해안에서 유입되는 경우이다. 대부분 북고·남저의 기압배치를 보이며 동해상에서 들어오는 기류는 태백산맥에 의해 단열 팽창되어 과포화된 상태로 유입되므로 인공증설실험에 더 효과적이다.

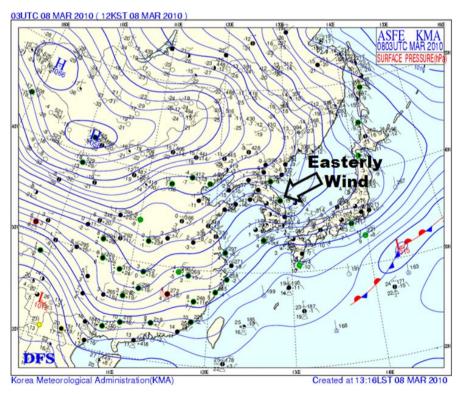


Fig. 3.1. Typical surface synoptic chart at 1200LST 8 March, 2010.

Fig. 3.2는 대관령에서 수행한 인공증설실험의 모식도이다. 인공증설실험의 기준은 실험지역에 동풍계의 하층운 유입, 풍속 5m/s 이하, 온도 0℃ 이하, 실험 전평균시정이 300m 이하일 때이다. 인공증설을 위한 구름씨물질은 요오드화은(AgI)을 사용하였다. 요오드와은은 결정체의 격자구조로 얼음과 매우 흡사하여 인공증우·증설실험에 가장 많이 사용되는 물질이다.

시당에 사용된 AgI용액은 요오드화암모늄(NH₄I)을 이용하여 20%의 요오드화은 -요오드화암모늄(AgI-NH₄I)용액을 만든 후 아세톤으로 희석하여 2%의 용액을 만들어서 사용하였다. AgI-NH₄I를 시당하는 경우, -5℃ 부근에서 월등한 활성한 능력을 보이지만(Blair et al., 1973), Dennis(1980)에 의하면 요오드화칼륨이나(KI)나 요오드화암모늄(AgI-NH₄I)을 AgI를 아세톤에 녹게 하는 촉매제로 사용하면 0℃ 부근에서 활성을 띠게 된다고 하였다.

요오드화은 입자는 승화(Deposition), 응결-동결(Condensation-freezing), 접촉에 의한 빙정핵화(Contact nucleation), 벌크동결(Bulk freezing) 등 네 가지 특징적인 방법으로 활성화된다. 특히 응결-동결 과정이 여러 조건하에서 가장 특출함을보이며, 실제 구름에서 적정한 시간과 조건 하에서 에어로솔의 모든 핵들이 활성화할 수 있게 한다(Dennis, 1980).

요오드화은 시딩에 영향을 미치는 접촉에 의한 빙정핵화(Contact nucleation)과정의 검증을 위해 실험실(Blumenstein et al., 1987; Demott, 1988; Li and Pitter, 1996)과 실험현장(Holroyd et al., 1987; Super and Boe, 1988; Rauber et al., 1987)에서 많은 연구들이 이루어졌다. 그 결과 접촉에 의한 빙정핵화 과정은 과냉각수적에 매우 민감함을 보였다. 그러나 이 과정은 1시간에 이르는 매우 긴 시간동안 반응을보이므로 요오드화은 입자의 이동경로를 알기 어렵기 때문에 시딩에 의한 증설을 검증하기에 어려움이 있다. Finnegan and Pitter (1988)는 요오드화은 입자를 뿌리는시당기 근처에서 1분 이내에 매우 작은 입자들이 즉시 발생하는 빠른 반응을 발견하였다. 시딩용액인 아세톤과 프로판 가스의 연소에 의해 방출되는 수분에 의해서일시적인 과포화상태가 발생하여 빙결핵인 요오드화은에 수증기가 즉시 응결하게됨을 지적하였다. Li and Pitter (1996)는 1분 이내의 빠른 접촉 결빙과정을 보이는 이 과정을 강제응결결빙과정(Forced condensation freezing process)라는 새로운 빙정생성 방법으로 제안하였다.

겨울철 산악형 강수에 대해 접촉결빙과정과 강제응결결빙과정을 수치모의하여 비교한 결과, 요오드화은 시딩기 근처에서 강제응결결빙과정이 접촉결빙과정 보다 평균 2배 더 높은 강수강도를 보였다. 이 과정은 실험실((Blumenstein et al., 1987)에서 검증이 이루어졌으나 실제 현장에서는 아직 검증되지 않았다. 강제응결결빙과정이 자연 상태에서도 확실하고 효과적이라면 겨울철 인공증설실험에 매우유용할 것이다.

산악지형을 이용한 인공증설실험에서 AgI 시딩양은 각 실험장소에 따라 다양하게 적용되었다. 로키 산맥의 southern Cororado 지역인 San Juan Mountains의실험에서는 400-600g/h를 연소하였으며(Rottner et al., 1975), northern New Mexico지역인 Jemez Mountains의 경우 97%이상의 실험에서 45g/h를 연소하였다(Keyes et al., 1972). Rottner et al. (1975)은 400-600g/h을 2시간 동안연소한 San Juan Mountains의 실험과 45g/h을 3시간 동안연소한 Jemez Mountains의 실험을 비교하였으며, 그 결과 지역에 따른 차이가 존재하지만 더 적은양을 시당한 경우가 더 효과적이라고 하였다. 요오드화은의 연소율은 5-1000g/h로 다양하지만 산악지형을 이용한 인공증설실험의 대부분은 5-100g/h이내를 연소하는 지상연소기를 사용한다(Dennis, 1980).

그러므로 산악지형을 이용한 증설실험을 위한 AgI 시딩양을 100g/h를 기준으로 SR1(Seeding Rate 1, 1.04g/min)과 SR2(Seeding Rate 2, 2.08g/min)로 나누어 실험하였다. SR1은 62.4h/h이며, SR2는 124.8g/h로 1분 이내의 빠른 반응을보이는 강제응결결빙과정에 기반을 두고 소규모 실험으로 실시하였으며 각 실험간 30분씩 시딩을 하였다. 검증을 위해 1시간동안의 신적설 및 강우강도, 입자수농도, 입자크기 변화 등을 관측하였다.

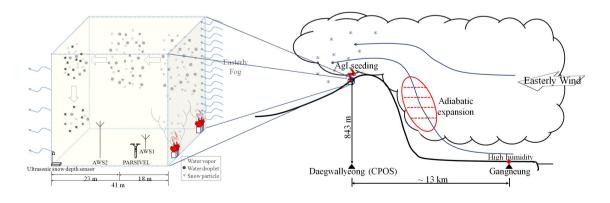


Fig. 3.2. Schematic diagram of the orographic snow enhancement experiment.

제2절 연구자료

본 연구가 수행된 대관령지점은 대관령기상대의 이전 이후 구름물리관측시스템 (Cloud Physics Observation System, CPOS)을 구축하여 구름과 강수특성을 분석하고 있다. 주요 관측기기는 전방산란스펙트로미터(Forward Scattering Spectrometer Probe, FSSP), 광학입자계수기(Optical Particle Counter, OPC), 시정계(Visibility Sensor, VS), 광학우적계(PARSIVEL disdrometer), 마이크로 파 라디오미터(Microwave Radiometer, MWR), 연직강우레이더(Micro Rain Radar, MRR), 초음파적설계(JMA-04, Ultrasonic Kaijo Sonic Corp.), AWS(200-WS-02E AWS, NovaLynx Corp.) 등이 있다. 각 장비의 관측값들은 좋은 검증결과를 보인다(장기호 등, 2007; 양하영 등, 2010).

실험 전 기상조건을 알아보기 위해 강릉지방기상청의 AWS, 수직측풍기 (PCL1300, Degreane), 마이크로파 라디오미터를 고려하였으며, 실험효과를 검증하기 위해서 대관령지점의 AWS, 광학우적계, 적설계의 변화를 분석하였다. 그림 3.2와 같이 광학우적계, 적설계는 지상연소기로부터 각각 18m와 41m 떨어진 곳에서 관측하고 있다.

1. 적설계

초음파적설계는 센서에서 초음파를 송수신하고 설명에서 반사되는 시간을 측정해계산 된다. 이때 음속음 전파 경로의 온도에 의해 변환되므로 설치대에 부착된 온도계는 음속 보정에 있어서 필수적이다. 표 3.1은 초음파적설계의 장비특성이다. 초음파로부터 적설면까지의 거리계산은 다음과 같다.

 $L = C \cdot T / 2$

L: 설면에서 센서까지의 거리

C: 음속

T: 초음파 전파시간

Table 3.1. Specifications of the ultrasonic snowdepth meter.

Parameter	Characteristics		
Measurement method	Aerial ultrasonic pulse reflection		
Control Method	cpu controlled by the program		
Frequency	40 KHz		
Measuring accuracy	0~5 m		
Measurement resolution	± 1 cm		
Average time	10 min		
Supply voltage	12 V DC		
Power consumption	5 W		
Data transmission interface	RS422		
Operating condition	-30℃ ~ +40℃		

2. 광학우적계

광학우적계(PARSIVEL disdrometer, 이하 PARSIVEL)는 모든 형태의 강수입자의 크기분포 스펙트럼을 측정하기에 적합한 레이저기반의 광학기기이다. PARSIVEL은 비나 눈 입자가 낙하할 때 차단효과(block off)를 전기신호로 변화하여 낙하속도와 입자크기를 측정한다(LOffler-Mang 1998, LOffler-Mang and Joss 2000, LOffler-Mang and Blahak 2001). Table 3.2는 PARSIVEL의 특성이며, Fig. 3.3은 PARSIVEL 관측원리를 나타낸 모식도이다.

강수입자가 레이저범의 경로를 지나면 입자의 지름에 비례하여 레이저범의 일부가 차폐되고 감소된 접압이 수신기에 감지된다. 감소된 전압은 입자크기의 함수이므로 이를 통해 강수입자의 크기가 결정된다(Fig. 3.3a 참조). Fig. 3.3b와 같이신호 주기를 측정함으로써 강수입자의 속도가 결정된다. 또한 강수입자의 크기(D)와 속도(V)로부터 강수입자 크기분포 스펙트럼을 산출하게 된다.(Fig. 3.3c 참조) PARSIVEL로 관측할 수 있는 액체상 강수는 0.2~5mm이며, 고체상 강수는 0.2~25mm 이다. Table 3.3은 PARSIVEL이 측정하는 입자의 크기별 관측범위를

나타낸 것이다. Table 3.4의 관계식을 통해 액체수함량, 레이더 반사도, 강우강도 등의 각 변수들을 유도한다.

Table 3.2. Specifications of the PARSIVEL disdrometer.

Parameter	Characteristics	
Beam size (W*T)	180 * 30 mm	
Wavelength	650 nm	
Average interval	10 ~ 3600 seconds	
Output power	3 mW	
Particle size of liquid precipitation	0.2 ~ 5 mm	
Particle size of solid precipitation	0.2 ~ 25 mm	
Particle speed	0.2 ~ 20 m/s	
Intensity	0.001 ~ 1200 mm/h	

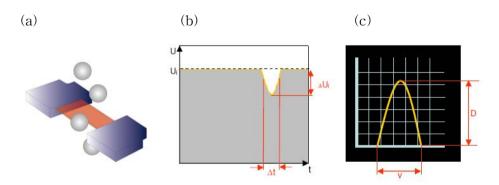


Fig. 3.3. The diagram of PARSIVEL disdrometer's measuring principle.

Table 3.3. Classification according to volume-equivalent diameter.

Class Number	Class Average in mm	Class Spread in mm	
1	0.062	0.125	
2	0.187	0.125	
3	0.312	0.125	
4	0.437	0.125	
5	0.562	0.125	
6	0.687	0.125	
7	0.812	0.125	
8	0.937	0.125	
9	1.062	0.125	
10	1.187	0.125	
11	1.375	0.250	
12	1.625	0.250	
13	1.875	0.250	
14	2.125	0.250	
15	2.375	0.250	
16	2.750	0.500	
17	3.250	0.500	
18	3.750	0.500	
19	4.250	0.500	
20	4.750	0.500	
21	5.500	1.000	
22	6.500	1.000	
23	7.500	1.000	
24	8.500	1.000	
25	9.500	1.000	
26	11.000	2.000	
27	13.000	2.000	
28	15.000	2.000	
29	17.000	2.000	
30	19.000	2.000	
31	21.500	3.000	
32	24.500	3.000	

Table 3.4. Derived equations of integral rain parameters.

$$M_n = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^n N(D) dD = \sum_{D_i = D_{\min}}^{D_{\max}} D_i^n N(D_i) \Delta D_i = 0$$

total # of drops : 0-th Moment of DSDs, M ₀	$M_3 = \frac{\pi}{6} \rho_L \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD$ $M_0 = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^0 N(D) dD$
optical extinction : 2-th Moment of DSDs, M ₂	$M_{2} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^{2} N(D) dD$
liquid water contents (LWC)	$LWC = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD$
radar reflectivity (Z)	$Z=\int_{D_{ m min}}^{D_{ m max}} D^4 N(D) dD$
rain rate (R) ≒ M3.67	$R = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^{3.67} N(D) dD$

제3절 수치모델 및 모의설계

Lee et al., (2009)은 대관령지역에서 겨울철 인공증설 실험 시, 산악지형에 의해 과포화된 상태의 공기가 유입될 때 요오드화은 시딩에 의한 증설효과가 나타난다고 하였다. 특히 강릉의 높은 습도와 동풍유입이 인공증설을 위한 중요한 요인이된다고 제안하였다. 강릉과 대관령은 관측공백으로 인해 상세한 기상장을 알기 어려우므로 수치모의를 통해 실험 전 기상상황을 분석하였다.

본 연구를 위해 사용한 모델은 WRF V3.1.1. 중규모 수치모델이다(Skamarock et al., 2008). 수치모의를 위한 모델 영역은 대관령 영역(37°41′N, 128°45′E)을 중심으로 총 4개의 영역으로 설정하였으며 각 영역의 수평격자 간격은 Domain 1(D1)이 27km (100×100), Domain 2(D2)는 9km(151×151), Domain 3(D3)은 3km(202×202), 그리고 Domain 4(D4)는 1km(142×142)로, Two-way interaction으로 Nesting 하였다. 수치모의 그림에서 x와 y의 숫자는 격자점의 지수(index)를 나타낸다.

연직층은 지형을 따르는 시그마 면상에서 27층으로 정의하였으며 경계층에서 최상단 기압은 50 hPa 이다. 측면 경계조건은 5개의 층으로 Specified zone이 1층, Relaxation zone이 4개의 층으로 이루어져 있다.

모델의 초기 입력 자료 및 경계자료는 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research)에서 6시간 간격으로 제공되는 수평 간격이 1°×1°인 FNL (Final analysis)를 이용하였다. 적분시간간격은 D1, D2, D3, D4이 각각 135초, 45초, 15초, 5초이다.

구름 미시물리 모수화는 Lin et al., (Lin et al., 1983) 기법을 사용하였고 행성 경계층은 PBL(Planetary Boundary Layer) 꼭대기에 Entrainment layer를 취급하는 YSU(Yonsei University scheme) PBL기법을 사용하였다(Hong et al., 2006).

장파복사 과정은 미리 설치된 표에 따라 계산되는 RRTM(Rapid Radiative Transfer Model) 장파복사기법을 사용하였고(Malwer et al., 1997), 단파복사과 정은 Goddard shortwave radiation (Chou and Suarez, 1994) 기법을 선택하였다.

적운모수화기법은 shallow convection을 포함하는 Kain-Fritsch cumulus

parameterization (Kain, 2004) 기법을 선택하였으며, 지표모델은 Noah Land Surface Model (Chen and Dudhia, 2001)을 선택하였다(Table 3.5 참조).

Fig. 3.4는 수치모의에 따른 도메인 영역과 강릉과 실험지역인 대관령을 지나 원주까지의 연직 단면도를 나타낸 것이다.

Table 3.5. Summary of the WRF model configuration.

1				
WRFV3.1.1				
Domains	Domain1	Domain2	Domain3	Domain4
Horizontal Spacing	27km	9km	3km	1km
Dimension	100×100 ×28	$\begin{array}{c} 151 \times 151 \\ \times 28 \end{array}$	202×202 ×28	$\begin{array}{c} 142 \times 142 \times 2 \\ 8 \end{array}$
Time step (s)	135	45	15	5
Vertical layer / Model top	/ Model 27 Sigma layers / 50 hPa			
Grid nesting	Two-way			
Lateral boundary condition	Specified zone=1, Relaxation zone=4			
Initial & Boundary Layer	NCEP/NCAR FNL DATA(6-hourly, 1° x 1°)			
Microphysics	Lin et al.	scheme		
Planetary Boundary Layer	YSU PBL			
C u m u l u s Parameterization	Kain-Fritsch			
Land-Surface Model	and-Surface Model Noah Land Surface Model			
Longwave radiation scheme	iative Transf	er Mode(RR	ГМ) 1	
Shortwave radiation scheme	Goddard s	shortwave		

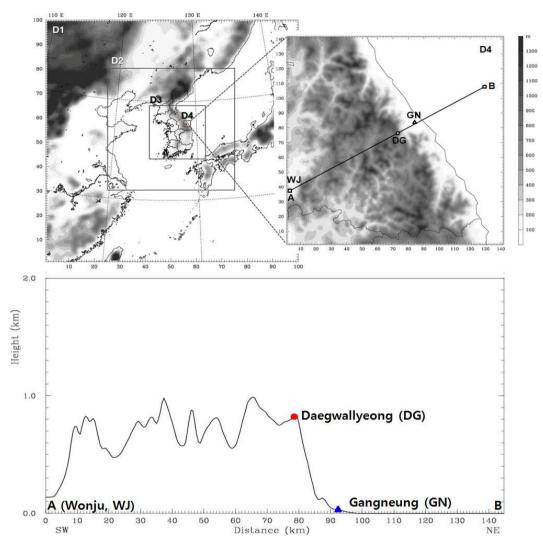


Fig. 3.4. Topography of the Daegwallyeong in the Taeback Mountains and Model domains. A-B in Domain4 (D4) stands for a horizontal path of cross-section, passing Wonju (WJ), Daegwallyeong (DG), and Gangneung (GN).

제4장 인공증설실험 사례분석

제1절 실험 사례일 기상장

산악지형을 이용한 인공증설실험은 대관령의 기상조건(동풍계의 하층운 유입, 풍속 5m/s 이하, 온도 0℃ 이하, 실험 전 평균시정이 300m 이하)을 우선으로 수행되었다. 2010년 2월부터 4월까지 총 25회의 실험이 실시되었으며, 대관령 AWS(위) 기상관측자료와 강릉의 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된 수액량(가운데) 및 수직측풍기에서 산출된 연직바람장을 그림 4.1~4.10까지 보여주고 있다. 그림에서 나타난 실험 사례번호는 실험 순서에 따른 것이다.

2010년 2월 9일의 1번째, 2번째 실험을 보면 라디오미터에서 관측된 수액량은 0.3g/m^3 이상을 보이지만, 수직측풍기에 관측된 연직바람장은 서풍으로 나타나 강 릉 상층에 존재하는 풍부한 수액량이 대관령으로 유입되지 않은 사례이다.

2010년 2월 16일에 수행된 7번째, 8번째 실험의 경우 강릉 수직측풍기의 연직바람장이 각각 북풍, 서풍이 관측되었으며 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된수액량도 $0.1g/m^3$ 을 보인다.

2010년 3월 3일은 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된 수액량이 0.1g/m³ 이하로 관측되었으며, 수직측풍기의 연직바람장을 보면 지면에서는 동풍으로 관측되고 있지만 700m 이상의 고도에서는 약한 남풍으로 나타난다.

2010년 3월 4일의 10번째 실험은 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된 수액량이 0.5g/m³ 이상이며 1km 고도까지 동풍이 유입되는 등 좋은 조건으로 보이지만, 그 이후 풍계가 바뀌어 11번째 실험을 실시할때 지면에서 700m 고도까지 북풍으로 관측되었으며 12번째 실험에서는 북서풍으로 풍계가 바뀌고 마이크로웨이브라디오미터에서 관측된 수액량도 0.1g/m³ 이하로 관측되었다.

2010년 3월 6일 사례를 보면 13번째와 14번째의 수직측풍기의 연직바람장과 수 액량은 유사하게 나타나지만 북서풍계열로 실험에 좋은 조건으로 보기 힘들다.

2010년 3월 25일의 23번째 실험기간 동안 강릉 수직측풍기의 연직바람장을 보면 지상에서 연직 2km 고도까지 북풍으로 나타나며 그 기간 동안 마이크로웨이브라디오미터의 수액량을 보면 0.5km 이하의 고도에서만 관측되었다. 2

010년 4월 6일의 경우 강릉 수직측풍기의 연직바람장을 보면 지상에서 연직

2km 고도까지 북풍으로 나타난다. 강릉 수직측풍기의 연직바람장 시계열 그래프와 마이크로웨이브 라디오미터의 수액량 관측자료를 보면 2010년 수행된 실험 중 2010년 2월 12일, 3월 4일, 3월 7일, 그리고 3월 8일의 사례가 동풍이 유입되어 산악효과에 의해 과포화된 기류가 유입된 것으로 추정된다.

산악지형을 이용한 인공증설을 위해 대관령에 적합한 요오드화은 시딩량을 알기위해 SR1(Seeding Rate 1, 1.04g/min)과 SR2(Seeding Rate 2, 2.08g/min)로 나누어 실험을 실시하였으므로 2절에서는 시딩에 의한 증설효과를 분석하기 위해시딩량별로 나누어 분석하였다.

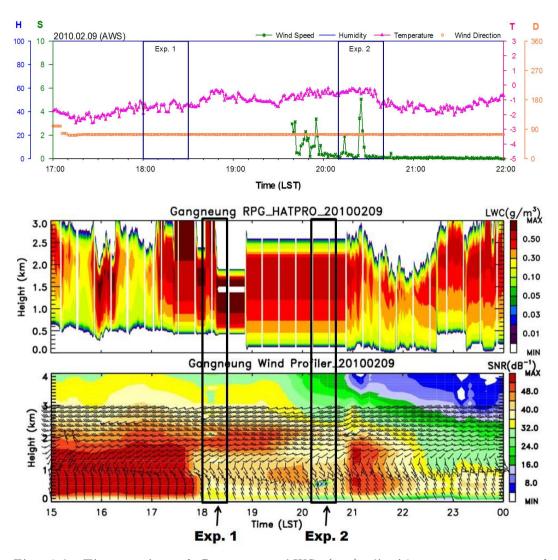


Fig. 4.1. Time series of Gangneung AWS (top), liquid water contents of Microwave Radiometer (middle), UHF wind vector and SNR (dB) (bottom) at 9 February, 2010.

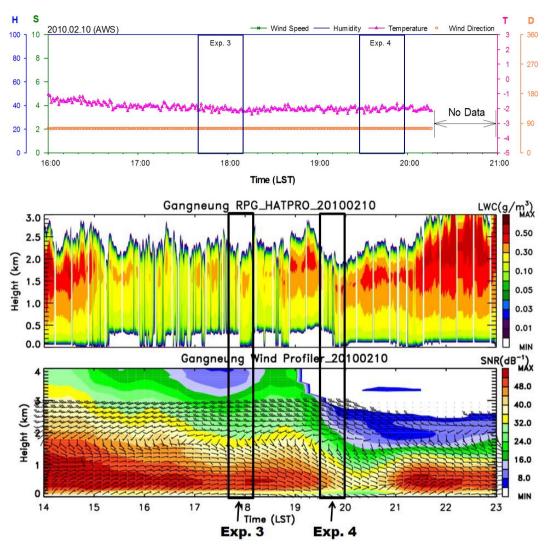


Fig. 4.2. Same as Fig. 4.1, except for 10 February, 2010.

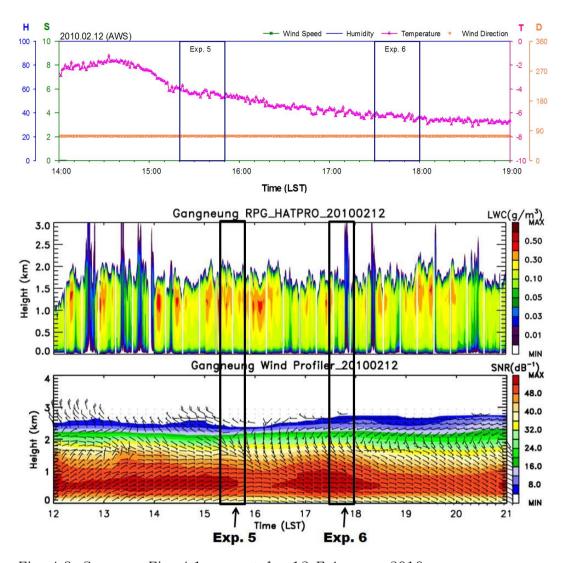


Fig. 4.3. Same as Fig. 4.1, except for 12 February, 2010.

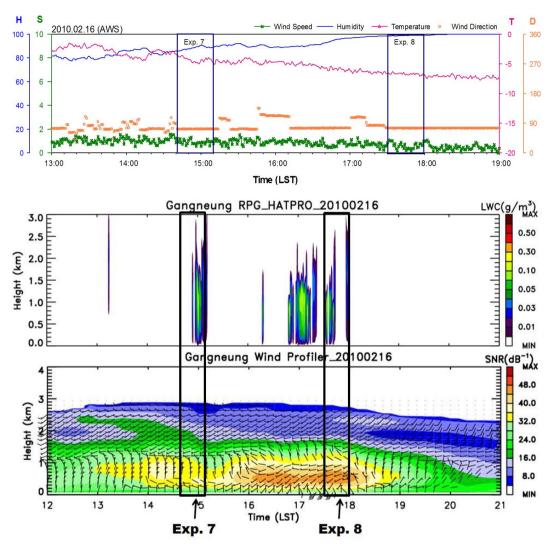


Fig. 4.4. Same as Fig. 4.1, except for 16 February, 2010.

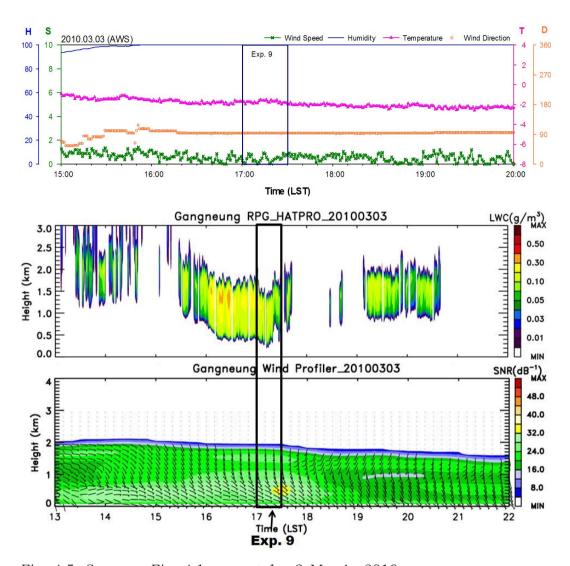


Fig. 4.5. Same as Fig. 4.1, except for 3 March, 2010.

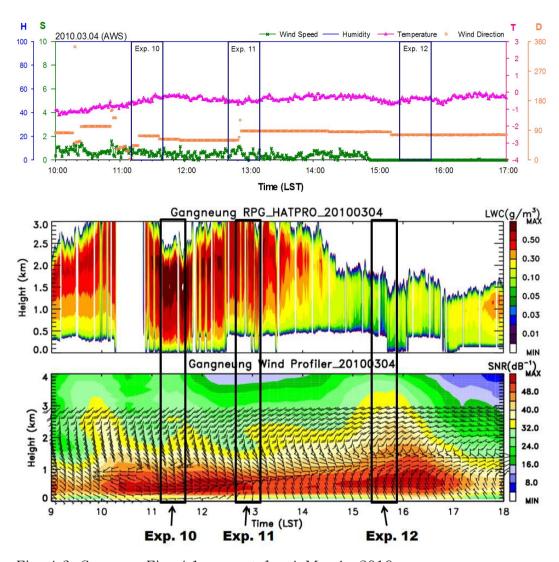


Fig. 4.6. Same as Fig. 4.1, except for 4 March, 2010.

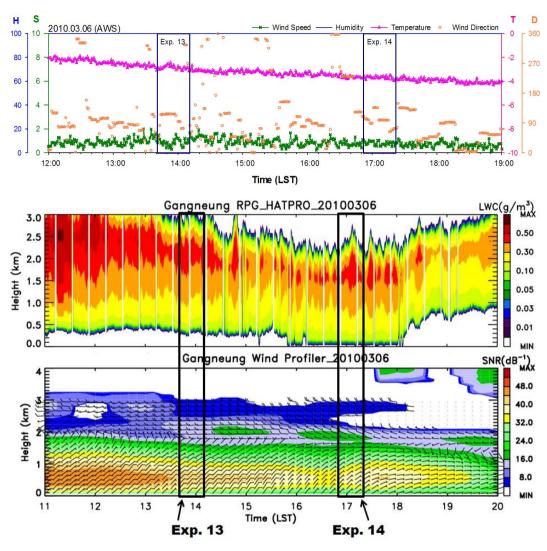


Fig. 4.7. Same as Fig. 4.1, except for 6 March, 2010.

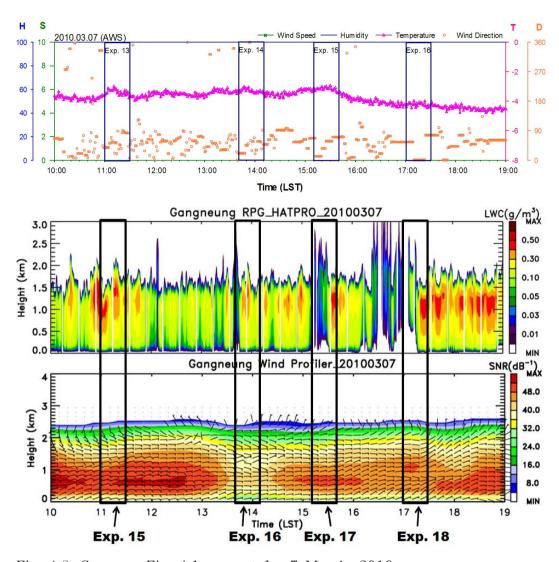


Fig. 4.8. Same as Fig. 4.1, except for 7 March, 2010.

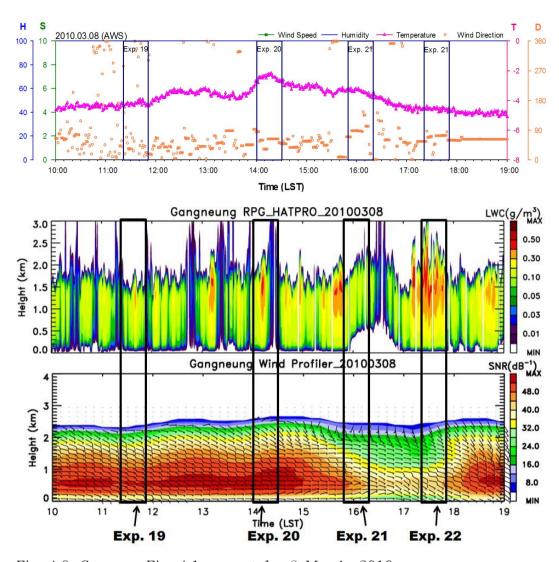


Fig. 4.9. Same as Fig. 4.1, except for 8 March, 2010.

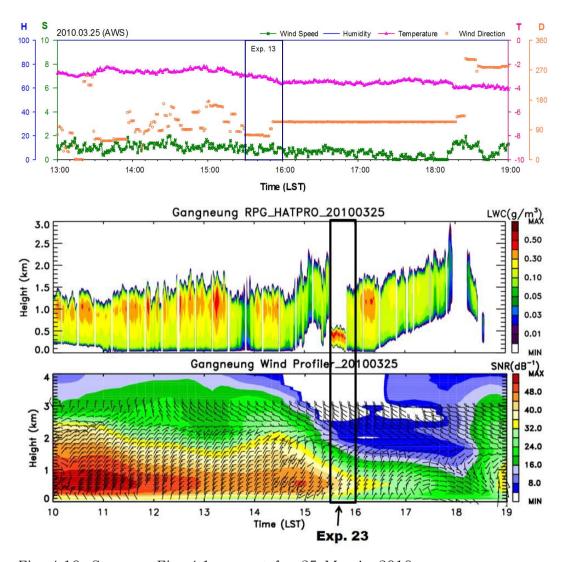


Fig. 4.10. Same as Fig. 4.1, except for 25 March, 2010.

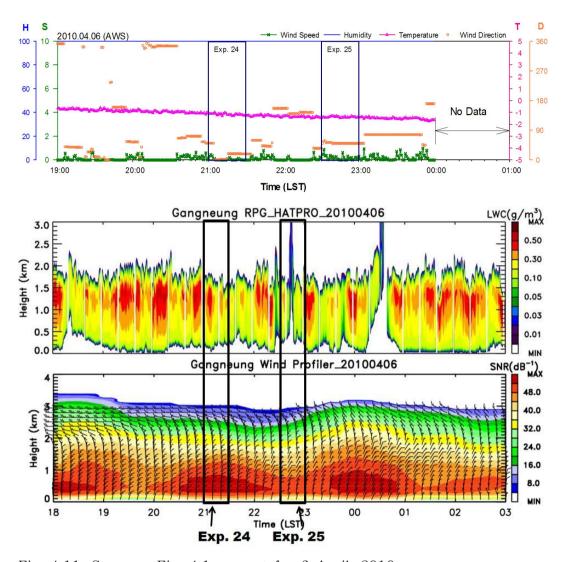


Fig. 4.11. Same as Fig. 4.1, except for 6 April, 2010.

제2절 SR1(Seeding Rate 1) 실험 사례분석

1. 바람장 및 수액량

Table 4.1은 SR1(seeding rate 1, 이하 SR1) 실험 수행 시 대관령의 기상조건, 강릉의 초기 기상장 및 1시간 신적설변화를 나타낸 것이다. SR1 실험 기간동안 대관령에서의 바람장은 대부분 동풍계, 1.0 m/s 이하로 관측되었다.

Table 4.1을 보면 각 조건이 만족함에도 신적설이 증가한 사례는 Lee et al., (2009)의 결과와 같이 강릉의 습도가 높을 때와 강릉 수직측풍기의 연직바람장에서 동풍이 관측될 때 이다. 증설이 관측되지 않은 1번, 6번, 7번, 9번, 17번 실험사례의 강릉 수직측풍기 연직바람장을 보면 대관령에 동풍이 관측되더라도 강릉에서 남풍계 또는 북풍계의 바람이 관측되었다. 북풍 또는 남풍계의 바람이 태백산맥에 의해 바람의 방향이 바뀌어 대관령에 동풍계로 들어오기 때문에 과포화되지 않고 들어오는 것으로 추정된다.

Fig. 4.12-4.15는 실험기간 동안의 강릉지방기상청, 대관령과 실험지역에서 약 13km 서쪽에 위치한 대관령기상대에서 관측된 신적설 변화량을 나타낸 것이다.

2010년 2월 12일의 경우(Fig. 4.12 참조) 5번째 실험후 대관령의 신적설이 0.7cm 증가하였으나, 강릉과 대관령기상대의 신적설은 증가하지 않아 시당에 의한 효과라고 추정된다.

Fig. 4.13의 2010년 3월 4일의 8번째 실험 후 대관령의 신적설이 0.3cm 증가하였으나 대관령 기상대의 신적설도 0.3cm 증가하여 시딩에 의한 증설인지 자연증설인지 판단하기 어렵다. 2010년 3월 7일의 11번, 12번 실험을 보면(Fig. 4.14참조) 시딩 후 두 사례 모두 신적설의 증가를 보이지만, 11번의 실험의 경우 대관령과 대관령기상대의 신적설 증가량이 0.3cm로 같다. 12번 실험은 대관령기상대의 신적설도 0.5cm 증가하였으나, 실험지역인 대관령은 1.1cm 증가하여 시딩에의한 효과라고 판단된다.

2010년 3월 8일의 신적설 변화그래프를 보면(Fig. 4.15 참조) 13번, 14번, 15번째 실험 후 신적설의 증가를 보인다. 13번, 15번째의 실험 후 신적설 증가량은 0.3cm로 관측되지만, 대관령기상대의 신적설이 각각 0.3cm, 0.4cm로 나타나 대관령에서의 신적설이 시딩에 의한 증설이라고 판단하기 어렵다. 14번째 실험 후

대관령 신적설은 1.9cm가 증가하였으며, 대관령기상대는 0.5cm가 증가되어 시딩에 의한 효과라고 추정된다.

Table 4.1. Summary of the snow enhancement experiments for seeding rate 1(SR1).

			Initial condition						Increa
No.		Seeding Period	Daegwallyeong		Gangneung			Seedi	se
of	Date		AWS		AWS		UHF	ng	of
exp.		1 CHOO	Temp	WD/WS	RH	WD/WS	East	rate	snow
			(℃)	(m/s)	(%)	(m/s)	wind		(cm)
1	2010. 2. 9	20:10 ~ 20:40	-1.0	ENE / 0.4	97	SW / 0.6	X	SR1	
2	2010. 2. 10	17:40 ~ 18:10	-2.1	ENE / 0.0	96	NW / 1.1	0	SR1	
3	2010. 2. 10	19:27 ~ 19:57	-2.0	ENE / 0.0	96	NW / 0.8	0	SR1	
4	2010. 2. 12	15:20 ~ 15:50	-4.6	ENE / 0.0	95	NE / 1.3	0	SR1	
5	2010. 2. 12	17:30 ~ 18:00	-6.5	ENE / 0.0	96	NE / 0.4	0	SR1	+ 0.7
6	2010. 2. 16	14:40 ~ 15:10	-4.4	ENE / 0.9	70	NW / 2.5	X	SR1	
7	2010. 2. 16	17:30 ~ 18:00	-6.9	ENE / 0.5	83	NW / 2.3	X	SR1	
8	2010. 3. 4	11:10 ~ 11:40	-0.4	ENE / 0.5	94	NW / 0.9	0	SR1	+ 0.3
9	2010. 3. 4	15:20 ~ 15:50	-0.4	ENE / 0.0	96	NW / 1.9	X	SR1	
10	2010. 3. 6	16:52 ~ 17:22	-3.8	E / 0.7	96	NW / 1.4	X	SR1	
11	2010. 3. 7	13:40 ~ 14:10	-3.4	ENE / 0.0	96	NE / 0.9	0	SR1	+ 0.3
12	2010. 3. 7	17:00 ~ 17:30	-4.3	NE / 0.0	97	NE / 0.7	0	SR1	+ 1.1
13	2010. 3. 8	11:20 ~ 11:50	-4.0	E / 0.0	93	SW / 1.2	0	SR1	+ 0.3
14	2010. 3. 8	14:00 ~ 14:30	-2.7	ENE / 0.0	95	NW / 0.6	0	SR1	+ 1.9
15	2010. 3. 8	15:50 ~ 16:20	-3.7	ESE / 0.0	92	NW / 0.9	0	SR1	+ 0.3
16	2010. 3. 8	17:20 ~ 17:50	-4.7	ENE / 0.0	91	NE / 0.8	0	SR1	
17	2010. 4. 6	21:00 ~ 21:30	-1.2	EN / 0.1	90	NW / 2.6	X	SR1	

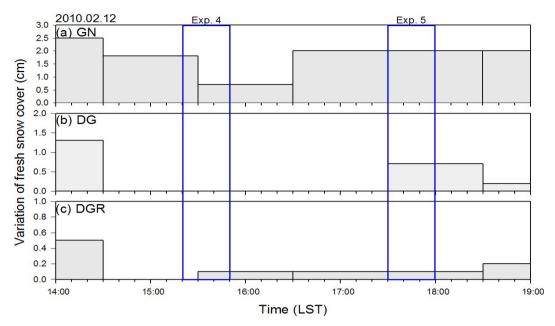


Fig. 4.12. Variation of fresh snow cover over (a) Gangneung (GN), (b) Daegwallyeong(DG), and (c) Daegwallyeong observatory(DGR) at 12 February, 2010.

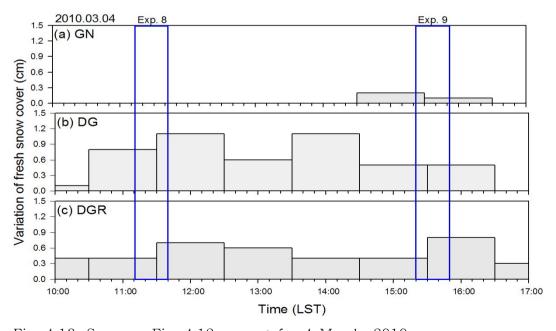


Fig. 4.13. Same as Fig. 4.12, except for 4 March, 2010.

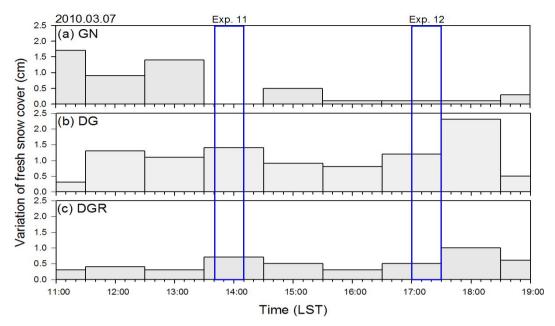


Fig. 4.14. Same as Fig. 4.12, except for 7 March, 2010.

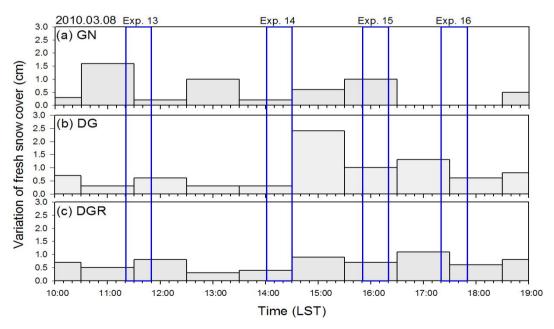


Fig. 4.15. Same as Fig. 4.12, except for 8 March, 2010.

Table 4.1을 보면 실험사례 2, 3, 4, 16의 경우, 강릉 수직측풍기에서 동풍이 관측이 되었음에도 시당에 의한 증설이 나타나지 않았다. 시당에 의한 증설유무에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위해 수평 및 연직 바람벡터, 수액량의 이동경로, 연직 수함량 등을 WRF 수치모의 하여 RIP (Read/Interpolate/Plot), version 4.3 (Stoelinga, 2007)으로 추정하였다.

구름씨뿌리기가 강수를 유발하기 위해서는 구름의 존재와 구름내 일정수준 이상의 과냉각수(supercooled liquid water)는 필수적이며 풍상층 사면에 대하여 수치모의실험(Young, 1974; Blumenstein et al, 1987)과 현장관측결과(Heggli and Rauber, 1988; Rauber et al., 1986)에서도 이를 잘 나타내고 있다. Huggins and Sassen (1990)은 요오드화은 시당실험에 대하여 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된 누적수액량이 0.1mm 이상일 때 증설을 보인다고 하였다. 또한 Sassen and Zhao (1993)은 유타주 남서쪽의 Thshar Mountains에서 요오드화은(AgI) 시당 후 증설이 나타나는 사례는 마이크로웨이브 라디오미터에서 관측된수액량이 0.15mm 이상일 때라고 지적하였다. Hashimoto et al. (2007)은 수치모의실험에서 시당이 가능한 구름은 연직누적수액량이 0.2mm 보다 더 클 때라고정의하였다.

Fig. 4.16은 요오드화은 시당에 의해 증설이 된 사례의 지표면 바람장과 연직누적 수액량을 나타낸 것이고, Fig. 4.17은 증설이 되지 않은 사례를 나타낸 것이다.

이를 보면 두 사례 모두 동풍이 유입되고 있으며 실험지역인 대관령에 0.1 g/kg 이상의 수액량이 존재하고 있는 것으로 모의된다. 그러나 Fig. 4.18의 연직 수평바람 및 구름수액량을 보면 2010년 2월 12일 1500LST(Fig. 4.18.c)와 2010년 3월 8일 1700 LST(Fig. 4.18.d)를 보면 산사면에는 수액량이 존재하지만 실험지역인 대관령에는 거의 존재하지 않음을 보인다.

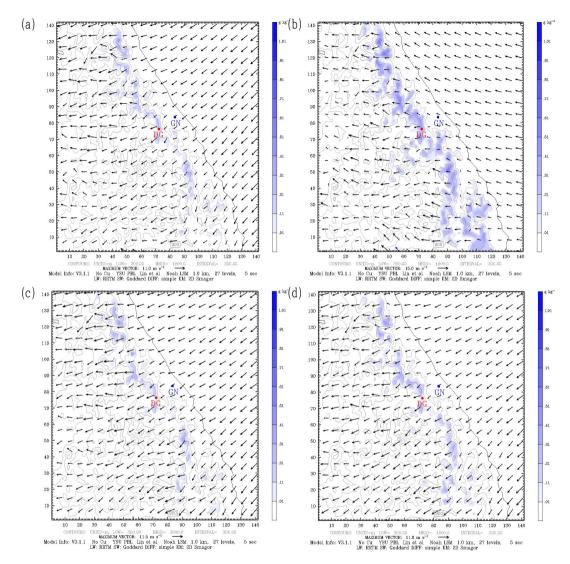


Fig. 4.16. Simulated surface wind field and column-integrated cloud liquid water at (a) 1700LST 12 February, 2010, (b) 1100LST 4 March, 2010, (c) 1400LST 7 March, 2010, (d) 1700LST 7 March, 2010, (e) 1100LST 8 March, 2010, (f) 1400LST 8 March 2010, and (g) 1600LST 8 March, 2010.

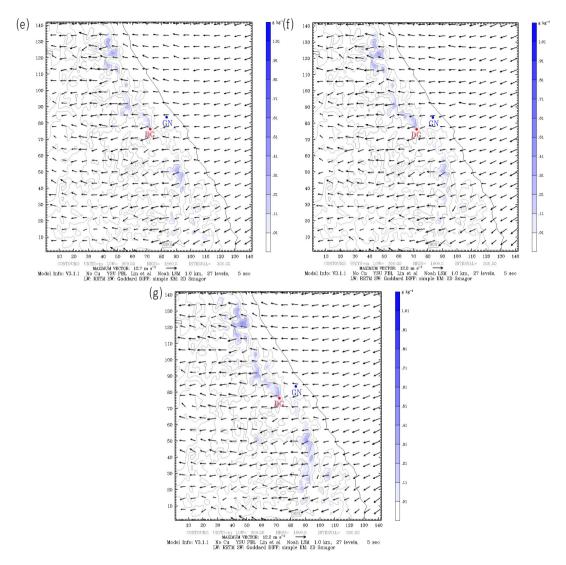


Fig. 4.16. Continued.

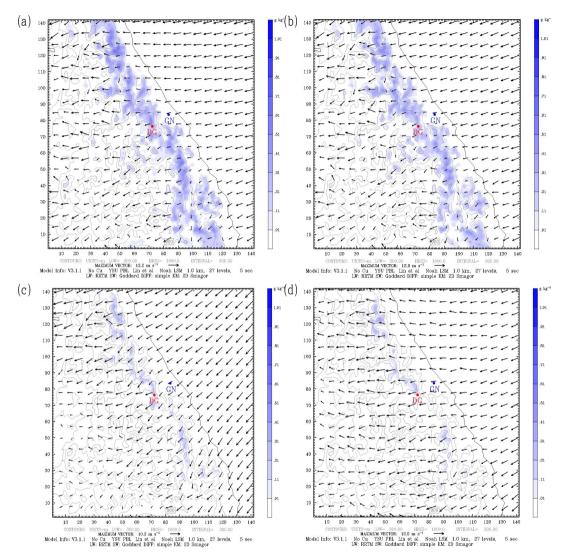


Fig. 4.17. Same as Fig. 4.16, except for (a) 1800LST 10 February, 2010, (b) 1900LST 10 February, 2010, (c) 1500LST 12 February, 2010, and (d) 1700LST 8 March, 2010.

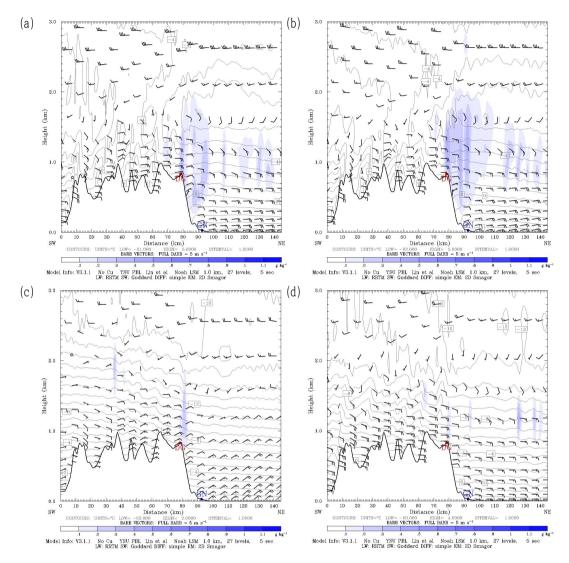


Fig. 4.18. Vertical cross-sections of horizontal wind vector and cloud water mixing ratio at (a) 1800LST 10 February, 2010, (b) 1900LST 10 February, 2010, (c) 1500LST 12 February, 2010, and (d) 1700LST 8 March, 2010.

2. 입자 수농도 및 크기분석

Fig. 4.19-4.23은 강릉에서부터 실험지역인 대관령까지 동풍이 유입되고 있는 실험일의 광학우적계로 관측된 입자수농도(number concentration), 입자평균직경 (mean diameter), 강우강도(rain intensity) 및 반사도(radar reflectivuty)와 시딩실험 30분전, 시딩기간, 시딩 후 30분평균 입자 크기 및 수농도를 나타낸 것이다.

Fig. 4.19의 2010년 2월 10일의 2번째 실험의 시계열 그래프를 보면 실험 전 30분과 실험기간 내에는 입자수농도의 큰 변화가 없지만, 실험 후 수농도가 급격하게 감소함을 보이며, 평균 입자크기도 증가함을 보인다. 입자크기별 수농도를 보면 시당 후 작은 입자는 감소하지만 큰 입자가 증가함을 보여 시계열 그래프에서 전체 수농도의 감소 나타낸 것으로 추정된다. 3번째 실험 후 시계열 그래프를 보면 입자수농도 및 입자평균직경은 큰 변화가 나타나지 않으며, 입자크기별 수농도를 보면 시당 후 입자크기 및 수농도 모두 감소함을 보인다.

2010년 2월 12일 15:20-15:50 시당 실험 후 입자수농도가 점차 증가하고 있으며 10분 뒤에 최대값을 보인다(Fig. 4.20 참조). 입자크기별 수농도를 보면, 작은입자 뿐만 아니라 큰 입자까지 모두 증가하여 시당에 의한 영향을 받았지만 증설은 되지 않은 것으로 생각된다. 2010년 2월 12일 17:30-18:00 시당 실험 후 4번째 실험과 유사하게 모든 사이즈의 입자가 증가함을 보인다. 또한 Fig. 4.21-4.23를 보면 다른 실험 사례일에서도 시당 후 입자크기 및 수농도의 변화가나타난다. SR1 실험사례의 풍속이 1.0m/s 이하이므로 AgI 지상연소기에서 18m 떨어진 광학우적계에서 관측된 변화는 실험에 의한 변화라고 할 수 있으며, 대부분의 실험에서 빙정핵 시당에 의해 입자수농도 및 크기에 영향을 받음을 알 수 있다.

시당에 의한 증설 사례와 증설이 되지 않은 사 례의 가장 큰 차이는 시당 전 관측된 입자의 크기이며, Ji (1991) and Wang and Ji (1992), Pruppacher and Klett(1997)등에 의하면 입자크기가 커질수록 충돌효율(collision efficiency)이 증가하고, 주변의 빙정(ice crystal)이 모여 입자가 커져 떨어지게 된다고 한다. 다양한 크기의 입자가 존재할 때가 작은 사이즈의 입자만 존재할 때보다 증설 가능성이 높다고 추정할 수 있다.

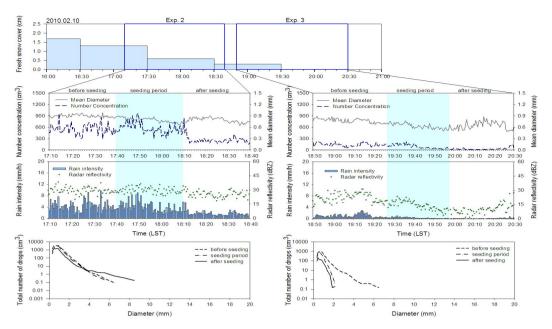


Fig. 4.19. Time series of the fresh snow cover(top) number concentration, mean diameter, rain intensity, radar reflectivity (middle) and total number of drops measured(bottom) by PARSIVEL disdrometer at Daegwallyeong on 10 February, 2010.

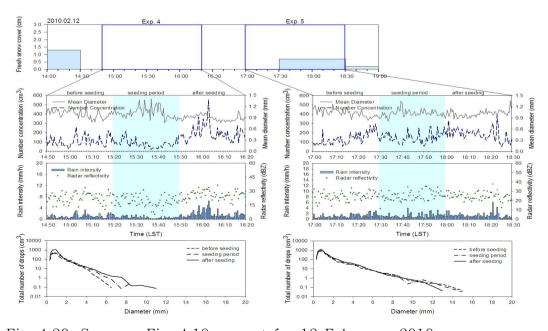


Fig. 4.20. Same as Fig. 4.19, except for 12 February, 2010.

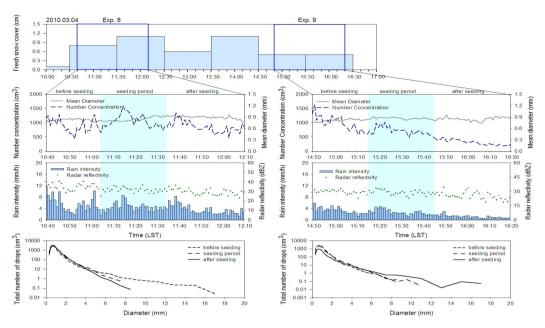


Fig. 4.21. Same as Fig. 4.19, except for 4 March, 2010.

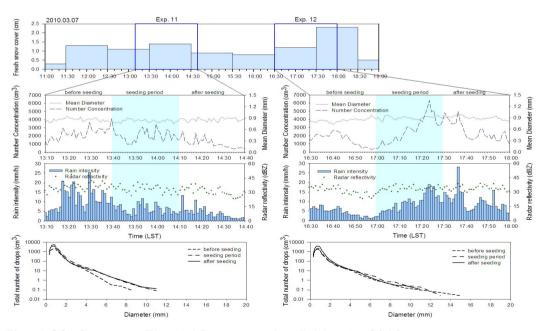


Fig. 4.22. Same as Fig. 4.19, except for 7 March, 2010.

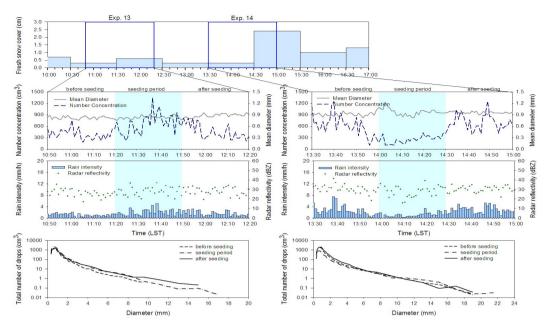


Fig. 4.23. Same as Fig. 4.19, except for 8 March, 2010.

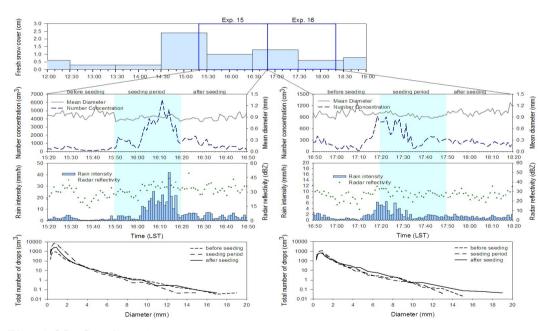


Fig. 4.23. Continued.

제3절 SR2 실험 사례분석

1. 바람장 및 수액량

Table 4.2는 SR2 실험을 수행할 때 대관령의 기상조건, 강릉의 초기 기상장 및 요오드화은(AgI) 시딩에 의한 증설변화를 나타낸 것으로, 실험사례 5, 6을 제외한 실험에서 강릉 수직측풍기에서 동풍이 관측이 되지 않았다.

Fig. 4.24는 2010년 3월 7일 실험기간 동안의 강릉지방기상청, 대관령과 실험지역에서 약 13km 서쪽에 위치한 대관령기상대에서 관측된 신적설 변화량을 나타낸 것이다. 5번째 실험후 대관령의 신적설이 1.0cm 증가하였으며 강릉의 신적설은 감소, 대관령은 0.1cm 증가하여 시딩에 의한 효과라고 추정된다.

Fig. 4.25는 지표면 바람장과 연직누적 수액량을 나타낸 것으로 두 실험 모두에서 동해안으로부터 동풍이 유입되고 있으며 실험지역인 대관령에 0.1 g/kg 이상의수액량이 존재하고 있다. 연직 수평바람 및 구름수액량도 실험지역인 대관령에 0.1 g/kg 이상의 수액량이 모의되어 있다(Fig. 4.26 참조).

Table 4.2. Summary of the snow enhancement experiments for seeding rate 2(SR2).

	No. of Date exp	Seeding Period	Initial condition						
of exp			Daegwallyeong		Gangneung				Increase
			AWS		AWS		UHF	Seeding	of
			Tem	WD/WS	RH	WD/WS	East	rate	snow (cm)
			(℃) b	(m/s)	(%)	(m/s)	wind		(CIII)
1	2010. 2. 9	18:00 ~ 18:30	-1.2	ENE / -	95	W / 0.8	X	SR2	
2	2010. 3. 3	17:00 ~ 17:30	-1.9	E / 0.5	79	NE / 2.2	X	SR2	
3	2010. 3. 4	12:40 ~ 13:10	-0.5	E / 0.4	96	NW / 1.0	X	SR2	
4	2010. 3. 6	13:40 ~ 14:10	-3.0	ESE / 1.1	94	NW / 1.6	X	SR2	
5	2010. 3. 7	11:00 ~ 11:30	-3.5	ENE / 0.0	98	NW / 1.1	0	SR2	+ 1.0
6	2010. 3. 7	15:10 ~ 15:40	-3.5	ENE / 0.0	96	NE / 0.9	0	SR2	
7	2010. 3. 25	15:30 ~ 16:00	-3.3	ESE / 0.7	98	NW / 1.3	X	SR2	
8	2010. 4. 6	22:30 ~ 23:00	-1.4	ENE / 0.2	91	NW / 1.9	X	SR2	

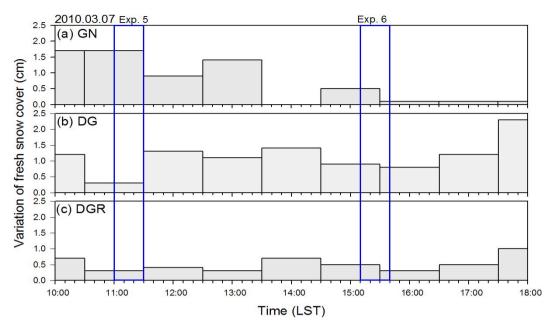


Fig. 4.24. Variation of fresh snow cover over (a) Gangneung, (b) Daegwallyeong, and (c) Daegwallyeong at 7 March 2010.

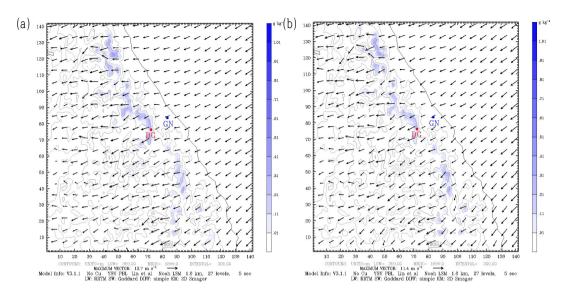


Fig. 4.25. Simulated surface wind field and column-integrated cloud liquid water at (a) 1100LST 7 March 2010, and (b) 1500LST 7 March 2010.

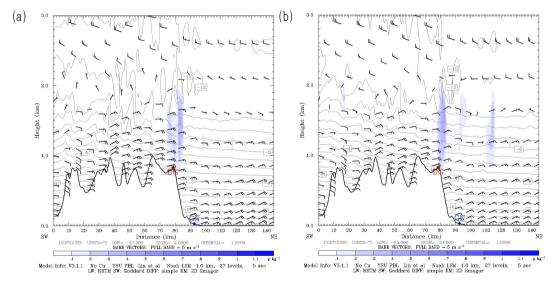


Fig. 4.26. Same as Fig. 21 except for vertical cross-sections of horizontal wind vector and cloud water mixing ratio.

2. 입자 수농도 및 크기분석

Fig. 4.27은 2010년 3월 7일 광학우적계로 관측된 입자수농도, 입자평균직경, 강우강도 및 반사도와 시딩실험 30분전, 시딩기간, 시딩 후 30분평균 입자 크기 및 수농도를 나타낸 것이다.

5번째, 6번째 실험의 시계열 그래프를 보면 실험 전에 비해 실험기간과 이후에 입자수농도가 증가함을 보인다. 두 실험은 유사한 조건에서 실험을 실시하였으나 5번째실험은 증설이 되었고 6번째 실험은 증설이 나타나지 않았다.

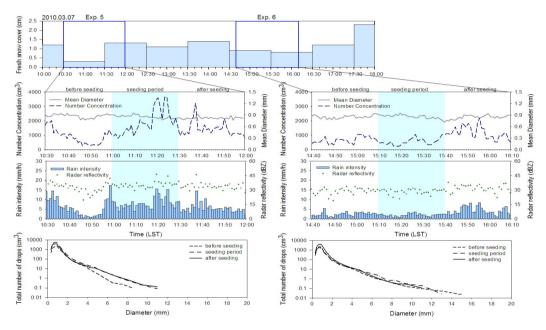


Fig. 4.27. Simulated surface wind field and column-integrated cloud liquid water at (a)1100LST 7 March 2010, and (c)1500LST 7 March 2010.

제5장 결론

한반도에서 겨울철 지형성 구름에 대한 인공증설에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위해 2010년 국립기상연구소에서 2010년 2월부터 4월까지 대관령에서 수행한 25회의 인공증설실험을 분석하였다.

대관령은 북고남저형의 기압배치하에서 한반도에 북동기류가 유입되면 태백산맥에 의해 대기가 강제상승하여 산악효과(단열팽창)에 의해 과포화된 기류가 유입된다. 대관령은 해발고도 842m로 하층운고도에 해당하므로 하층운이 끼어있는 경우차폐현상으로 안개로 관측된다. 대관령의 안개특성을 보면 1987년부터 2005년까지연평균 142일의 안개가 발생했으며 지속시간은 10.4시간을 보였다. 전 기간에 대하여 겨울철에 발생하는 비율은 9.0%로 발생빈도는 낮지만 24시간 이상 지속되는안개가 14%이상 발생하여 복사무보다는 활승무가 많이 발생함을 알 수 있다. 1987년부터 2005년까지 구름씨뿌리기가 가능한 12월, 1월, 2월, 3월, 그리고 4월의 월평균 운형을 보면 층적운이 24%, 권운이 23%로 가장 높은 발생빈도를 보이며, 구름씨뿌리기가 가능한 층운, 층적운 등이 30% 이상 발생하므로 시딩에 적합한지역임을 알 수 있다.

대관령에서의 인공증설실험은 동풍계의 하층운이 유입, 풍속 5m/s 이하, 온도 0℃이하, 평균시정이 300m 이하에서 수행하였다. 1987년부터 2005년까지 전체일의 바람장을 보면 전 기간에 대해 3m/s 이상의 서풍계가 우세하지만, 동풍안개가관측될 때 풍속은 대부분 3m/s 이하로 관측된다. 또한 요오드화은-요오드화암모늄 (AgI-NH₄I)용액는 -5℃ 부근에서 월등한 활성능력을 보이지만 AgI를 아세톤에 녹이는 촉매제로 요오드화암모늄(AgI-NH₄I)을 사용하면 0℃ 부근에서 활성을 띠게되므로 대관령에서 인공증설실험을 위한 적합한 조건임을 알 수 있다. 대관령에서 산악지형을 이용한 인공증설을 위해 얼음과 유사한 격자구조를 가지는 요오드화은 (AgI)을 빙정핵으로 사용하였다. 2%의 AgI-NH₄I를 시당하였으며, 효율적인 시당양을 알아보기 위해 SR1(1.04g/min)과 SR2(2.08g/min)로 나누어 실험을 수행하였다. AgI 시당 후 1분 이내의 빠른 반응을 보이는 Li and Pitter (1996)의 강제 응결결빙과정(Forced condensation freezing process)에 기반을 둔 소규모 실험으로 30분씩 번갈아 가며 시당을 하였다.

실험 시 바람장을 보면 대관령 실험지역에서 SR1과 SR2 대부분의 실험에서

1m/s이하의 동풍계의 바람이 관측되었다. 이는 1분에 60m 이내를 이동하는 것으로 추정되므로 AgI 지상연소기에서 각각 18m, 41m 떨어진 광학우적계와 적설계에서 관측된 1시간 동안의 입자크기 및 입자개수와 신적설 등은 시딩에 의한 변화를 관측하기에 합당하다고 여겨진다. SR1은 17회의 실험을 하였으며 7번의 신적설 증가가 관측되었으며, SR2는 8회의 실험 중 1회의 신적설 증가가 관측되었다. 강릉과 대관령에서 13km 떨어진 대관령기상대에서 관측한 신적설과 비교한 결과 SR1 실험의 경우 5, 12, 14번째 실험과 SR2의 5번째 실험은 AgI 시딩에 의한 증설로 생각되며, SR1의 8, 11, 13, 15의 증설은 대관령기상대에서도 신적설 중가가 관측되어 AgI 시딩에 의한 증설인지 자연증설인지에 대한 판단은 어렵다.

Lee et al., (2008)은 2006년 1월부터 2월까지 본 연구와 같은 조건일 때 대관령에서 9번의 증설실험을 수행하였다. 그 결과 인공증설을 위해서 가장 중요한 요인은 강릉의 습도가 90%이상이며 대관령에 동풍이 유입될 때라고 하였다. 2010년 2월부터 4월까지 25회의 실험을 분석한 결과 선행연구과 유사한 결과를 보이지만, 분석결과 강릉의 습도 뿐만 아니라 연직바람장도 중요한 요소로 동해로부터 유입된 기류가 강릉을 지나 태백산맥에 의해 과포화되어 유입될 때 증설이 될 가능성이 높게 나타난다. 또한 WRF로 모의한 수액량 분석 결과를 보면 실험지역에 수액량이 존재할 때 시딩에 의한 효과가 나타났다. Lee et al., (2008)의 실험에서도 본 연구에서와 같은 양의 AgI(Small AgI rate: 1.04g/min, Large AgI rate: 2.08g/min)를 시당하였다. Small AgI를 시당할 때 증설이 나타났으며, Large AgI에서는 증설이 나타나지 않았는데 그 이유로 너무 많은 빙정핵을 시당하여 작은 사이즈의 입자들이 많이 만들어져 눈으로 떨어질 만큼 자라지 못했기 때문이라고 추정하였다. 본 연구에서도 SR2 실험 결과 1번의 증설만 관측되었지만 총 8회의 실험 중 2010년 3월 7일 수행된 2번의 실험을 제외하면 강릉에서 동풍이 관측되지 않아 SR2가 SR1보다 비효율적이라고 단정하기는 어렵다.

광학우적계에서 관측된 입자수농도 및 평균입자크기를 보면 AgI 시딩 후 대부분의 실험에서 수농도 증가 및 입자크기를 보여 시딩에 의한 효과를 관측할 수 있었다. 대관령에서 수행된 지형성 구름에 대한 인공증설 실험 분석 결과 강릉의 높은습도 뿐만 아니라 실험지역에 적당한 양의 수액량 존재와 산악효과에 의해 충분히과포화 된 기류가 유입될 때 시딩에 의한 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

관측만으로는 시당에 의한 인공증설 실험을 검증하기에는 한계가 있으므로 Kim et al., (2005)이 수행한 수치모형연구가 동반되어야 할 것이다.

References

- 박상덕, 2009, 태백 가뭄의 경제적 피해액 산정. 강수의 경제적 가치평가 워크숍, 27-43.
- ASCE, 2004, Standard Practice for the Design and Operation of Precipitation Enhancement Projects. ASCE/EWRI Standard 42-04, Reston, Virginia, 63.
- ASCE, 1995, Guidelines for Cloud Seeding Augment Precipitation. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 81.
- Blumenstein, R. R., R. M. Rauber, L. O. Grant, and W. G. Finnegan, 1987, Application of ice nucleation kinetics in orographic clouds. J. Climate Appl. Meteor., 26, 1363–1376.
- Chang K.-H., S.-N. Oh, K.-D. Jeong, H.-Y. Yang, M.-J. Lee, J.-Y. Jeong, Y.-H. Cho, H.-K. Kim, G.-M. Park, S.-S. Yum, and J.-W. Cha, 2007, Cloud physics observation system (CPOS) and validation of its products. Atmosphere, 17, 101-108.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001, Coupling and advanced land-surface / hydrology model with the Penn State / NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. Mon. Wea. Rev., 129, 569-585.
- Chou M. D., and M. J. Suarez, 1994, An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Memo. 104606, 3, 85pp.
- Chung K.-B., J.-Y. Kim, and T.-Y. Kwon, 2004, Characteristics of Lower-Tropospheric Wind Related with Winter Precipitation in the Yeongdong Region. Asia-Pacific J. of Atmos. Sci., 4, 369-380.
- Cooper, W. A., and P. Lawson, 1984, Physical interpretation of results from the HIPEX-1 experiment. AMS Journal of Climate and Applied Meteorology, 23, 523-540.

- Breed D., 2011, Overview and evaluation of the Wyoming weather modification pilot project (WWMPP). International symposium on Weather Modification, Tsukuba, Japan.
- Davis, C. I., 1974, The ice-nucleating characteristics of various AgI aerosols. PhD. Diss., Dep. Mech. Eng., Univ. Wyo., Laramie, 267pp.
- DeMott, P.J., 1988, Comparison of the behavior of AgI-type ice nucleating aerosols in laboratory-simulated clouds. J. Wea. Mod., 20, 44-50.
- ______, 1994, Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols. Atmospheric Research, **38**, 63-99.
- Dennis. A. S., 1980, Weather modification by cloud seeding. Academic Press, NewYork, NY, 267pp.
- Deshler, T., D. W. Reynolds, and A. W. Huggins, 1989, Physical response of winter orographic clouds over the Sierra Nevada to airborne seeding using dry ice or silver iodide. J. Appl. Meteor., 29, 288-330.
- Finnegan, W. G., and R. L. Pitter, 1988, Rapid ice nucleation by acetone-silver iodide generator aerosols. J. Wed. Mod., 20, 51-53.
- Gagin, A., and J. Neumann, 1981, The second Israeli randomized cloud seeding experiment: evaluation of the results. AMS Journal of Applied Meteorology, 20, 1301-1311.
- Grant, L., 1986, Hypotheses for the Climax wintertime orographic cloud seeding experiments. Precipitation Enhancement, A Scientific Challenge, Meteorlogical. Monograph., No. 43, American Meteorological Society, 105–108.
- Grant, L.O. and R. D. Elliott, 1974, The cloud seeding temperature window. AMS Journal of Applied Meteorology, 13, 355-363.
- Griffith, D.A. and M.E. Solak, 2002, Economic Feasibility Assessment of Winter Cloud Seeding in the Boise River Drainage, Idaho. WMA, Journal of Weather Modification, 34, 39-46.
- Griffith D. A., Thompson J. R., and Risch D. A., 1991, A winter cloud

- seeding program in Utha. The Journal of Weather Modification, 23, 27-34.
- Hashimoto A., M. Murakami, S. Hayashi, and T. Kato, 2007, Statistical analysis with CRM data set on seeding potential for winter orographic cloud in Japan. International symposium on weather modification, 21–24.
- Heggli, M.F., and R.M. Rauber, 1988, The characteristics and evaoution of supercooled water in wintertime storms over the Sierra Nevada: A summary of microwave radiometric measurements taken during the Sierra Cooperative Pilot Project. J. Appl. Meteor., 27, 989-1015.
- Henderson, T.J., 2003, New Assessment of the Economic Impacts from Six Winter Snowpack Augmentation Projects. WMA, Journal of Weather Modification, 35, 41–44.
- Hill, G. E., 1980, Seeding-opportunity recognition in winter orographic clouds. J. Appl. Meteor., 19, 1371-1381.
- Hobbs, P.V., 1975, The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding. Part III: Case studies of the effects of seeding. J. Appl. Meteor., 14, 819-858.
- Holroyd III, E. W., J. T. Mcpartland, and A. B. super, 1987, Observation of silver iodide plumes over the Grand Mesa of Colorado. J. Appl. Meteor., 27, 1125 -1144.
- Hong, S.-Y., and J.-O. Lim, 2006, The WRF Single-moment 6-class Microphysics scheme (WSM6). J. Korean Meteor. Soc., 42, 129-151.
- Huggins, A. W., and K. Sassen, 1990, A high altitude ground-based cloud seeding experiment conducted in southern Utah. J.Wea.Mod., 22, 18-29.
- Kain, J. S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteorol., 43, 170-181.

- Keyes, C. G., Jr., J. V. Lunsford, F. D. Stover, D. Rotter and R. D. Wilkins, 1972: Atmospheric water resources research in the State of New Mexico. Interim Rept. No. 5, Eng. Exp. Sta., Mew Mexico State University, Las Cruces, to Bureau of Reclamation.
- Kim, C.-K, S.-S. Yum, S.-N. Oh, J.-C. Nam, and K.-H. Chang, 2005, A feasibility study of winter orographic cloud seeding experiments in the Korean Peninsula, Asia-Pacific J. of Atmos. Sci., 41, 997-1014.
- Kusunoki K., M Murakami, M. Hoshimoto, N. Orikasa, Y. Yamada, H. Mizuno, K. Hamazu, and H. Watanabe, 2003, The characteristics and evolution of orographic snow clouds under weak cold advection. Mon. Wea. Rev., 132, 174–191.
- Lee C.-K., K.-H. Chang, J.-W. Cha, J.-W. Jung, J.-Y. Jeong, H.-Y. Yang, S.-K. Seo, J.-Y. Bae, S.-Y. Kang, Y.-J. Choi, H.M. Cho and C.Y. Choi, 2010, Estimation for the economic benefit of weather modification (Precipitation enhancement and fog dissipation). Atmosphere, 20, 187-194.
- Lee J.-G., 1999, Synoptic structure causing the difference in observed snowfall amount at Daegwallyeong and Gangnung: Case study. J. Korean Meteor. Soc., **35**, 321-334.
- ______, S.-D. Kim, and Y.-J. Kim, 2011, A trajectory study on the heavy snowfall phenomenon in Yeoungdong region of Korea. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 47, 45-62.
- Lee M.-J. K.-H. Chang, G.-M. Park, J.-Y. Jeong, H.-Y. Yang, K.-D. Jeong, J.-W. Cha, S.-S. Yum, J.-C. Nam, K.-S. Kim, and B.-C. Choi, 2009, Preliminary results of the ground-based orographic snow enhancement experiment for the easterly cold fog (cloud) at Daegwallyeong during the 2006 winter. Adv. Atmos. Sci., 26, 222-228.
- Li Z., and R. L. Pitter, 1996, Numerical comparison of two ice crystal formation mechanisms on snowfall enhancement from Ground-Based

- Aerosol Generators. J. Appl. Meteor., **36**, 70–85.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983, Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Climate Appl. Meteor., 22, 1065-1092.
- LOffler-Mang, M., 1998, A laser-optical device for measuring cloud and drizzle drop size distribution. Meteor. Z., 79, 53-62.
- LOffler-Mang, M., and J. Joss, 2000, An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors. J. Atmos. Ocean. Tech., 17, 130-139.
- LOffler-Mang, M., and U. Blahak, 2001, Estimation of the equivalent radar reflectivity factor from measured snow size spectra. J. Appl. Meteor., 40, 843-849.
- Malkus, J. S., and R. H. Simpson, 1964, Modification experiments on tropical cumulus clouds. Science, 145, 541-548.
- NWS, cited 1996, Snow measurement guidelines (revised 10/28/96).

 NOAA/NWS, Silver Spring, MD.

 [http://www.noaa.gov/os/coop/snowguid.htm.]
- Oh, Sung-Nam, Y. H. Kim, J. Y. Kim, G. M. Park, J. Y. Jeong, and H. Y. Yang, 2005, Fog aerosol analysis and cloud seeding experiments at Daegwalryoung Korea. 85th AMS Annual Meeting (16th Conference on Planned and Inadvertent Weather Modification), p.13.
- Park, S. U. and C. H. Joung, 1984, Air modification over the Yellow sea uring cold-air outbreaks in winter. J. Korean Meteor. Soc., 20, 35-50.
- Rangno, A. L., 1986, How good are our conceptual models of orographic cloud seeding? Precipitation Enhancement A Scientific Challenge. Meteor. Monograph, 43, American Meteorological Society., 115–126.
- Rauber, R.M., L.O. Grant, D. Feng, and J.B. Snider, 1986, The characteristics and distribution of cloud water over the mountains of northern Colorado during wintertime storms. Part I: Temporal

- variation. J. Climate Appl. Meteor., 25, 468-489.
- ______, R. D. Elliot, J. O. Rhea, A. W. Huggins, and D. W. Reynolds, 1987, A diagnostic technique for targeting during airborne seeding experiments in wintertime storms over the Sierra Nevada. J. Appl. Meteor., 27, 811-828.
- Reynolds, D. W., 1988, A Report on Winter Snowpack-Augmentation. Bull. Amer. Meteor. Soc., 69, 1290-1300.
- Rottner D., S. R. Brown, and O. H. Foehner, 1975, The effect of persistence of AgI on randomized weather modification experiments.

 J. Appl. Meteor., 14, 939-944.
- Pruppacher, H. R., and J. D. Klett, 1997, Microphysics of Clouds and Precipitation, Kluwer Acad., Norwell, Mass., 599-601.
- Sassen K., and H. Zhao, 1993, Supercooled liquid water clouds in Utah winter mountain storms: Cloud-seeding implications of a remote-sensing dataset. J. Appl. Meteor., **32**, 1548-1558.
- Sinkevich A., J.-Y. Kim, B.-H. Song, and A.-S. Suh, 2002, Cloud seeding to regulate water supplies and their economic efficiency in Korea. Korea Water Resources Association, 3, 1-8.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008, A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 65-85.
- Song B. H., 1993, A comparative study for snowfalls between east coast and west coast region in South Korea. Seoul Univ.
- Super, A. B., 1990, Winter orographic cloud seeding status in the intermountain -West. J. Wea. Mod., 22, 106-116.
- Super, A. B. and B. A. Boe, 1988, Microphysical effects of wintertime cloud seeding with silver iodide over the Rocky Mountains. Part III: Observation over the Grand Mesa, Colorado. J. Appl. Meteor., 27, 1166-1182.

- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 2006, Atmospheric Science (Second Edition). Academic Press, 206-251.
- Warburton, J. A., R. H. Stone, and B. L. Marler, 1995a, How the transport and dispersion of AgI aerosols may affect detectability of seeding effects by statistical methods. J. Appl. Meteor., 34, 1930-1941.
- Warburton, J. A., L. G. Young, and R. H. Stone, 1995b, Assessment of seeding effects in snowpack augmentation programs: ice nucleation and scavenging of seeding aerosols. J. Appl. Meteor., 34, 121-130.
- WMI, 2005, Wyoming Level II Weather Modification Feasibility Study. Final Report to Wyoming Water Development Commission, 151.
- Yang H.-Y., J.-Y. Jeong, K.-H. Chang, J.-W. Cha, J.-W. Jung, Y.-C. Kim, M.-J. Lee, J.-Y. Bae, S.-Y. Kang, K.-L. Kim, Y.-J. Choi, and C.-Y. Choi, 2010, Intercomparison of Daegwallyeong cloud physics observation system (CPOS) products and the visibility calculation by the FSSP size distribution during 2006-2008. Korean Journal of Remote Sensing, 26, 65-73.
- Yang I.-K., 1965, A preliminary survey on the seeding experiment in Koea. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 3, 8-13.
- Young, K.C., 1974, A numerical simulation of wintertime, orographic precipitation, Part II. Comparison of natural and AgI-seeded conditions. J. Atmos. Sci., **31**, 1749-1767.