

2014년 대설관측실험(Experiment on Snow Storms At Yeongdong: ESSAY)기간 강설 및 눈결정 특성분석

서원석¹⁾ · 은승희¹⁾ · 김병곤^{1),*} · 고아름¹⁾ · 성대경¹⁾ · 이규민¹⁾ ·
전혜림¹⁾ · 한상옥²⁾ · 박영산³⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립기상과학원 관측예보연구과, ³⁾응용기상연구과

(접수일: 2015년 2월 17일, 수정일: 2015년 3월 11일, 게재확정일: 2015년 3월 11일)

Study on Characteristics of Snowfall and Snow Crystal Habits in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) Campaign in 2014

Won-Seok Seo¹⁾, Seung-Hee Eun¹⁾, Byung-Gon Kim^{1),*}, A-Reum Ko¹⁾, Dae-Kyeong Seong¹⁾,
Gyu-Min Lee¹⁾, Hye-Rim Jeon¹⁾, Sang-Ok Han²⁾, and Young-San Park³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾Department of Observation and Forecast Research, Jeju, Korea

³⁾Department of Applied Meteorology Research, National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

(Manuscript received 17 February 2015; revised 11 March 2015; accepted 11 March 2015)

Abstract Characteristics of snowfall and snow crystal habits have been investigated in the campaign of Experiment on Snow Storms At Yeongdong (ESSAY) using radiosonde soundings, Global Navigation Satellite System (GNSS), and a digital camera with a magnifier for taking a photograph of snowfall crystals. The analysis period is 6 to 14 February 2014, when the accumulated snowfall amount is 192.8 cm with the longest snowfall duration of 9 days. The synoptic situations are similar to those of the previous studies such as the Low pressure system passing by the far South of the Korean peninsula along with the Siberian High extending to northern Japan, which eventually results in the northeasterly or easterly flows and the long-lasting snowfall episodes in the Yeongdong region. In general, the ice clouds tended to exist below around 2~3 km with the consistent easterly flows, and the winds shifted to northerly~northwesterly above the clouds layer. The snow crystal habits observed in the ESSAY campaign were mainly dendrite, consisting of 70% of the entire habits. The rimed habits were frequently captured when two-layered clouds were observed, probably through the process of freezing of super-cooled droplets on the ice particles. The homogeneous habit such as dendrite was shown in case of shallow clouds with its thickness of below 500 m whereas various habits were captured such as dendrites, rimed dendrites, aggregates of dendrites, plates, rimed plates, etc in the thick cloud with its thickness greater than 1.5 km. The dendrites appeared to be dominant in the condition of cloud top temperature specifically ranging $-12 \sim -16^{\circ}\text{C}$. However, the association of snow crystal habits with temperature and super-saturation in the cloud could not be examined in the current study. Better understandings of characteristics of snow crystal habits would contribute to preventing breakdown accidents such as a greenhouse destruction and collapse of a temporary building due to heavy snowfall, and traffic accidents due to snow-slip-

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheongil (123 Jibyun), Gangneung-si, Gangwon-do 210-702, Korea. Phone : +82-33-640-2326, Fax : +82-33-640-2320
E-mail : bgk@gwnu.ac.kr

pery road condition, providing a higher-level weather information of snow quality for skiers participating in the winter sports, and estimating more accurate snowfall amount, location, and duration with the fallspeed of solid precipitation.

Key words: Snowfall, snow crystal habits, ESSAY, Yeongdong

1. 서 론

눈결정은 빛의 산란과 낙하속도에 영향을 주기 때문에 구름 물리 측면에서 중요한 역할을 하며, 기후와 복사수지, 나아가 위성을 활용한 원격관측에서도 필수적인 기본 요소이다. 또한, 눈결정은 빙정핵이 존재하는 상황에서 다양한 비균질 핵화과정을 통해 생성된 이후 과냉각 수적이 기존에 존재하는 빙정에 결착(Riming)되는 현상 혹은 빙정끼리의 부착(Aggregate) 과정을 통해 성장하게 된다. 다양한 눈결정 변화에 따른 낙하속도는 중규모기상예측 모델에서 강설의 정확한 위치나 정량적인 예측시에도 영향을 미친다. 이와 같이 눈결정은 강설의 가장 기본적인 요소로써 눈의 무게(밀도), 스키장의 설질, 눈의 낙하속도 등 다양한 기상학적인 측면에서도 중요성을 갖는다.

국내에서 눈결정에 대한 체계적인 연구가 미흡한 반면에 국외에서는 Bentley (1902)가 과학적인 측면보다는 종교적인 신념에서 선구자적인 업적을 낸 이래, 최근 Garrett et al. (2012) 연구에 이르기까지 눈결정 촬영과 다양한 분석 연구가 수행되어 왔다(Magono and Lee, 1966; Korolev and Sussman, 1999; Masataka et al., 2003; Bailey and Hallett, 2008; Takahashi, 2014). 기존 연구결과들에서 제시한 바에 의하면 눈결정 생성에 가장 크게 영향을 주는 인자는 온도이지만 2차적인 특성은 과포화도에 의해 영향을 받는다. Magono and Lee (1966)은 실제 관측을 통해 온도에 따른 눈결정의 형태를 분류하였으며 Pruppacher and Klett (1997)는 추가적인 실험실 관측을 통해 선행연구(Magono and Lee, 1966) 결과를 뒷받침한 바 있다. 두 실험결과에 의하면 $0 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 의 눈결정의 형태는 유사한 결과를 보였지만, $0 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 온도에서는 눈결정의 차이가 발생하였는데, 이는 임의로 일정한 기상조건을 유지하기 어려운 기상조건 때문이라고 언급한 바 있다. Bailey and Hallett (2008)는 약 70여 년간의 실험실 연구결과와 실제 관측결과를 종합하여 과포화도와 온도에 따른 눈결정 형태를 정리(review)한 바 있으며, 최근 Takahashi (2014)는 $-12 \sim -17^{\circ}\text{C}$ 온도조건에서 구름수함량(Liquid Water Content; LWC)에 따른 눈결정 성장 결과, 구름수함량이 클수록 $-13 \sim -14^{\circ}\text{C}$ 사이는 별모양(Stellar)에서 나뭇가지(Dendrite)형태로 변화하였는데, 이는 구름수함량이 높을수록 작은 나뭇가지 형태의 눈결정 빈도가 증가하는

것을 의미한다.

국외의 활발한 눈결정에 대한 체계적인 연구와는 달리 국내에서의 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히 강원영동지역은 동해안과 산악지역의 영향으로 겨울철 대설과 강풍 등의 재해기상이 빈번히 발생하는데, Park et al. (2009)은 정적 안정도 변화에 따른 영동지역의 눈구름의 생성연구, Lee et al. (2012)은 대설 전·후와 대설 기간 동안의 열역학적인 연직구조분석, Nam et al. (2014)은 대설과 유사한 종관 조건하에서 대설과 대비되는 중설 및 소설 사례를 포함한 대류불안정 및 에너지의 관점에서 대기 열역학적인 특성 분석 등의 강설현상에 대한 거시적인 관점의 연구는 활발히 수행되었지만 강설의 가장 기본요소인 눈결정에 대한 미시적인 분석은 전무한 실정이다.

본 연구에서는 2013년 12월~2014년 3월까지 강원 영동 지역의 강설 기간을 중심으로 강릉과 대관령에 설치된 각종 구름원격장비 및 라디오존데 관측을 통한 대설관측 캠페인(Experiment on Snow Storms At Yeongdong: ESSAY)을 수행하였다. 더불어 아이폰 카메라와 캐논카메라에 각각 5배, 20배 확대경을 각각 부착하여 눈결정 사진을 촬영하였다. 이는 연직기상 관측과 원격관측이 동시에 수행된 국내 최초의 눈결정 연구이다.

2. 분석 자료 및 방법

본 연구에서는 2013년 12월~2014년 3월까지 실시한 강설집중관측 캠페인(ESSAY) 기간 중에 강설 시작 전에는 6시간 간격, 강설기간 동안에는 3시간 간격으로 라디오존데 관측을 수행하였다. 라디오존데 관측으로부터 온위(potential temperature; θ), 상당온위(equivalent potential temperature; θ_e), 혼합비(mixing ratio; q), 포화혼합비(saturation mixing ratio; q_s) 등의 열역학적인 특성과 운정고도(Cloud top)를 산출하였고(상대습도, 온위구조 활용), 운고계(Ceilometer)를 이용하여 운저고도(Cloud base)를 추정하였다. Table 1은 ESSAY 캠페인 기간 동안에 활용된 주요관측기기에 대한 개요 및 사양을 정리한 것이다. 주요 분석 기간인 2014년 2월 6~14일(9일간)의 라디오존데 관측은 GRAW사와 (주)진양 공업에서 제작된 서로 다른 센서를 이용하여 비교 관측을 실시하였는데 이를 통해 관측 신뢰도 향상뿐만 아니라 자료의 손실을 줄일 수

Table 1. Summary of primary instrumentation.

Instrument	Measured variables (unit)	Manufacturer (Model)	Accuracy
Radiosonde	T (°C), RH (%), P (hPa), WS (m s ⁻¹), WD (°)	GRAW (DMF-06)	T (± 0.2°C), RH (± 2%), P (± 1 hPa), WS (± 1 m s ⁻¹), WD (± 2°)
		Jinyang (RGS-20A)	T (± 0.5°C), RH (± 5%), P (± 1 hPa), WS (± 2 m s ⁻¹), WD (± 5°)
Ceilometer	Cloud base (m)	Väisälä (CL51)	± 1% (± 5 m)
GNSS	PWV (mm)	Trimble (NetR9)	[Baseline < 30 km] - Horizontal 3 mm - Vertical 4 mm [Baseline > 30 km] - Horizontal 4 mm - Vertical 9 mm
I-phone	Snow crystal habits	Apple (v5)	-
Digital camera	Snow crystal habits	Canon (650D)	-

* GNSS: Global Navigation Satellite system, T: Temperature, RH: Relative Humidity, P: Pressure, WS: Wind Speed, WD: Wind Direction, PWV: Precipitable Water Vapor.

있었다(총 9일간 35회 GRAW; 35회, (주)진양공업; 20회). 또한, 위성항법 시스템(Global Navigation Satellite system; GNSS)을 활용하여 가강수량(Precipitable Water Vapor; PWV)을 추정하였다.

Lee et al. (2012)과 Nam et al. (2014)의 대설연구에서는 주로 대기하층의 상세한 열역학적인 분석이 이루어졌던 반면에, ESSAY 캠페인 기간 중에는 강설 기간에 눈결정 촬영(2014년 2월 7~18일, 총 1,974장, 3.9 GB)이 추가되었다. 최근 Garrett et al. (2012) 등이 Multi-Angle Snowflake Camera (MASC)를 이용한 연구를 살펴보면 3차원으로 눈결정 촬영이 가능하고, 눈결정이 지면에 닿기 전에 대기 중에서 촬영하여 눈결정이 손상되지 않는 장점이 있다. 본 연구팀에서 실시한 눈결정 촬영은 고가의 장비가 아닌 손쉽게 접근할 수 있는 방식으로 눈결정을 촬영하였다. 아이폰 카메라와 캐논카메라에 각각 확대경을 부착하여 촬영하는 방식인데, 20배율 확대경은 아이폰에, 5배율 확대경은 캐논카메라에 부착하여 촬영하였다. 5배율 확대경에는 눈결정의 크기를 가늠할 수 있도록 1 mm, 5 mm 단위로 눈금을 표시하였다. 확대경과 눈결정 수집관 간의 초점거리를 약 1.5 cm 정도 유지하여 촬영하였다. 본 연구에서는 5배 확대경을 이용한 캐논카메라로 촬영한 눈결정보다 20배율 확대경을 이용한 아이폰 카메라로 촬영한 눈결정의 해상도가 우수하여

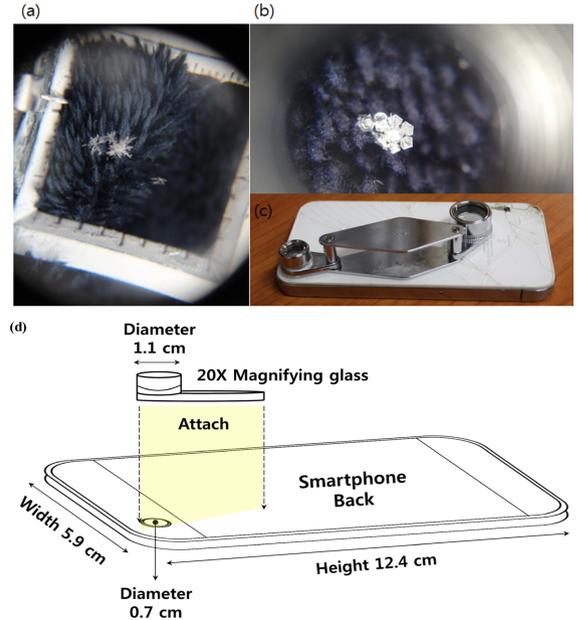


Fig. 1. Examples of snow crystals using (a) a canon-camera with a 5-times magnifier, and (b) an i-phone camera with a 20-times magnifier. The i-phone camera (c) mainly used in this study and its detailed schematic diagram (d) are shown as well for the reference.

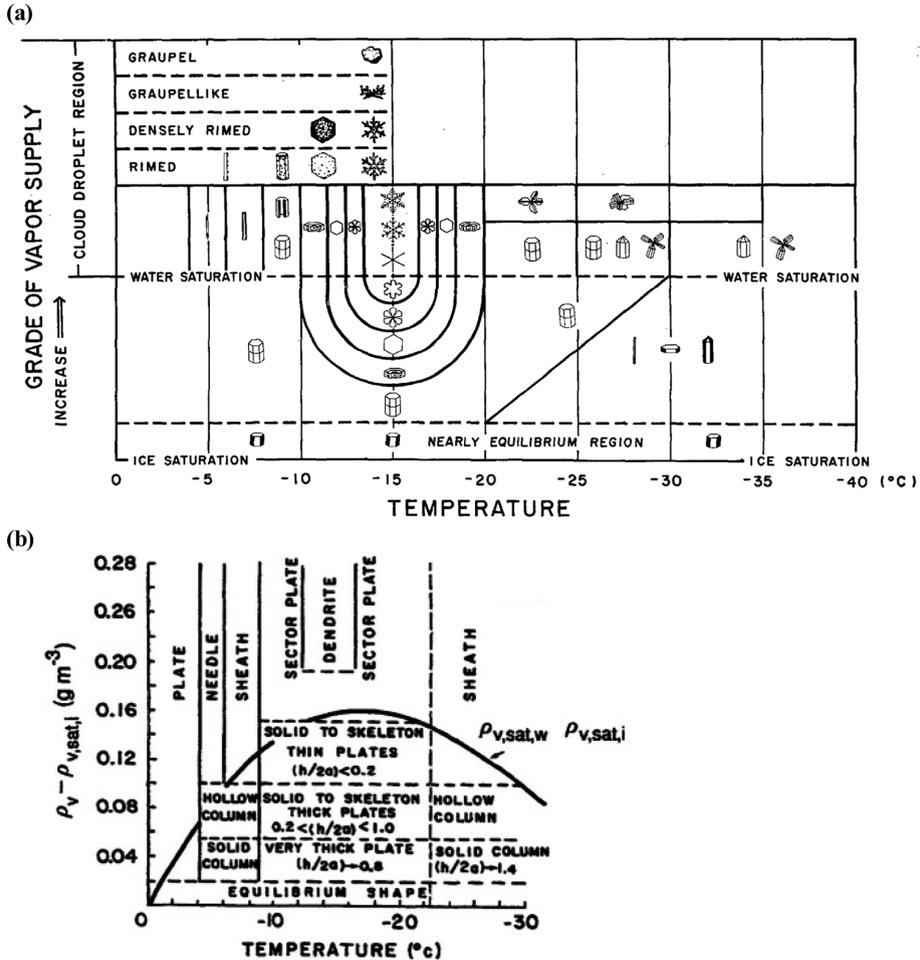


Fig. 2. Habit diagrams adapted from (a) Magono and Lee (1966) and (b) Pruppacher and Klett (1997).

아이폰 카메라 결과가 주로 제시되었다. Figure 1은 본 연구에 사용된 캐논 카메라와 주로 활용된 i-phone 카메라의 개략적인 도식도를 나타낸 것이다.

눈결정 촬영에 있어 낙하하면서 눈결정이 파손되는 것을 방지하기 위해 표면이 거친 플리스(fleece) 소재의 검은 천을 사용했으며, 천에 남아 있는 온기에 의해 눈결정이 용해되는 것을 방지하기 위하여, 일정시간 실외에 보관한 후 촬영을 실시하였다. 촬영 시간은 라디오존데 관측전 10분부터 관측후 30분까지이고, 현행 촬영방식은 자동방식이 아니기 때문에 사진 촬영수와 촬영 간의 간격은 일정하지 않았다. 또한 지표면에 낙하한 눈결정을 촬영하는 것이기 때문에 눈결정의 지면 충돌로 인한 파손이나 관측자의 체온으로 인하여 눈결정이 일부 용해되는 경우도 발생하였다. 하지만 두꺼운 천을 활용하여 파손문제점을 최소화하였으며, 낙하 후 즉시 촬영을 통해 변형되지 않는 상태

의 눈결정 사진 확보에 주력하였다. 눈결정 촬영상의 기술적인 문제로서 주간에 찍는 사진과 야간에 찍는 사진은 조명의 차이로 인한 초점문제가 발생하였다. 사진촬영에 있어서 조명은 필수요소라고 할 수 있는데, 특히 눈결정 촬영에서 주간에는 햇빛에 의해 눈결정 촬영에 전혀 문제가 없지만, 야간 촬영시에는 빛이 부족하기 때문에 초점을 정확히 맞추기 힘들었다. 여기서 직접조명방식으로 빛을 공급하면 눈결정에 의한 빛의 다중 산란 때문에 과도한 양의 빛이 반사되어 촬영에 문제가 발생하기 때문에 랜턴을 이용한 간접조명방식으로 빛을 공급하여 촬영을 수행하였다.

3. 결 과

3.1 눈결정 분류

우선 눈결정에 대한 자세한 분석에 앞서 기존 실험

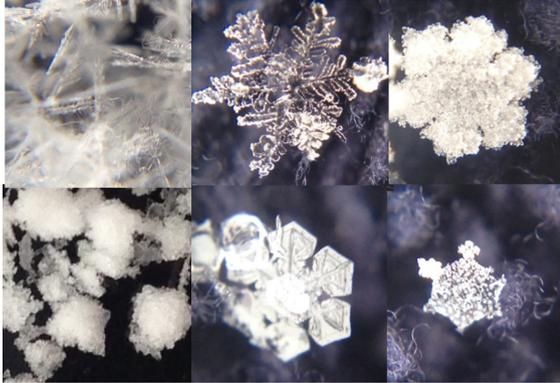


Fig. 3. Images of dominant snow crystal habits taken in the ESSAY campaign (Clockwise from top left; Aggregates of Dendrite, Dendrite, Rimed Dendrite, Rimed Plate, Plate, Graupel).

Table 2. Overall frequency of snow crystal habits mainly captured in the ESSAY campaign.

Name	Percentage (%)
Aggregates of Dendrite	32
Dendrite	27
Rimed Dendrite	10
Graupel	1
Plate	3
Rimed Plate	1
unknown	26

실 연구를 통해 개략적으로 정리된 온도와 과포화도에 따른 눈결정 분포도를 Fig. 2에 제시하였다(Magon and Lee, 1966; Pruppacher and Klett, 1997). 본 연구에서는 관측자의 주관적인 판단을 최소화하기 위하여 ESSAY 캠페인에서 관측빈도가 높게 나타난 총 6가지(Aggregates of Dendrite, Dendrite, Rimed Dendrite, Graupel, Plate, Rimed Plate) 눈결정으로 단순화하여 분류하였다. 이상의 6가지 눈결정은 대기과학용어집(Atmospheric Sciences Terminology)의 명명법에 의거하여 표기하였다. 나뭇가지(Dendrite)결정은 핵을 중심으로 작은 가지들이 성장한 모양을 나타낸 것이며, 나뭇가지부착(Aggregates of Dendrite)결정은 앞선 나뭇가지결정끼리 서로 엉겨 붙은 형태를 의미한다. 그리고 나뭇가지결착(Rimmed Dendrite)결정은 나뭇가지결정이 하강할 때 주위의 과냉각수적이 눈결정에 충돌하여 빙결된 것이다. 판(Plate)결정은 얇은 판모양이고, 결착판(Rimmed Plate)결정은 판결정에 과냉각수적이 결착된 (Rimmed)형태이다. 마지막으로 싸락눈(Graupel)결정은 다량의 과냉각수적이 빙정에 엉겨 붙은 얼음덩

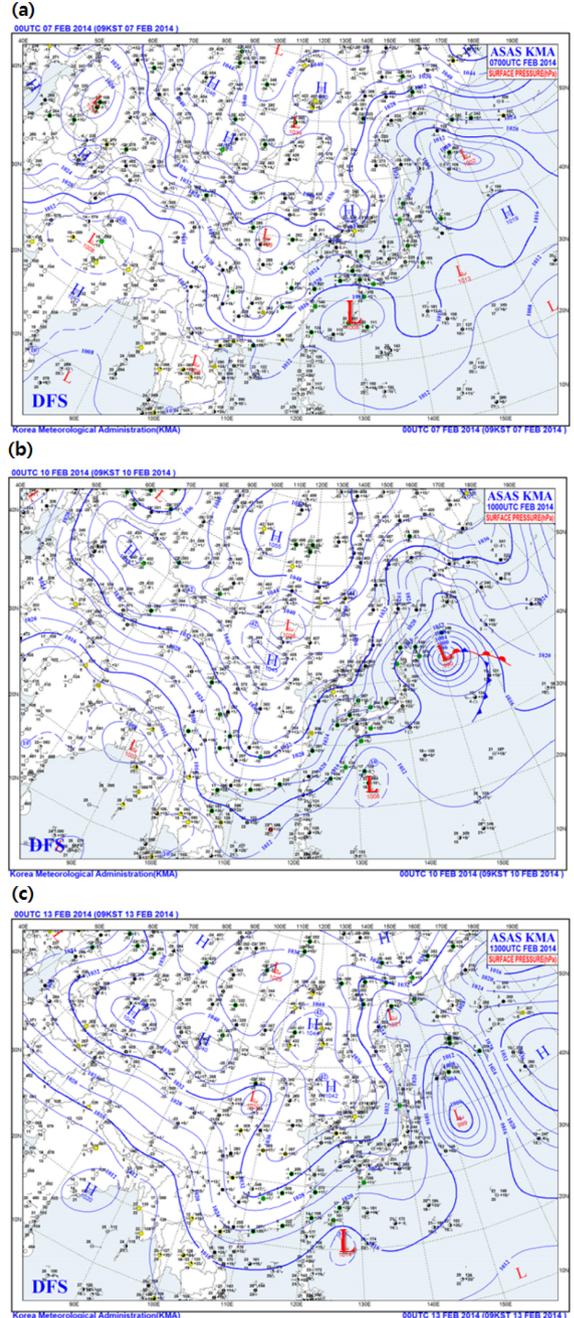


Fig. 4. Surface synoptic charts with a moving low pressure system to the South at 0900 LST (a) 07 (Phase 1), (b) 10 (Phase 2), and (c) 13 Feb (Phase 3) 2014.

어리를 의미한다. Figure 3은 본 연구에서 주로 제시된 6가지 눈결정 형태를 나타낸 것이다. Table 2는 전체분석기간 동안 촬영된 눈결정중에서 6가지 종류의

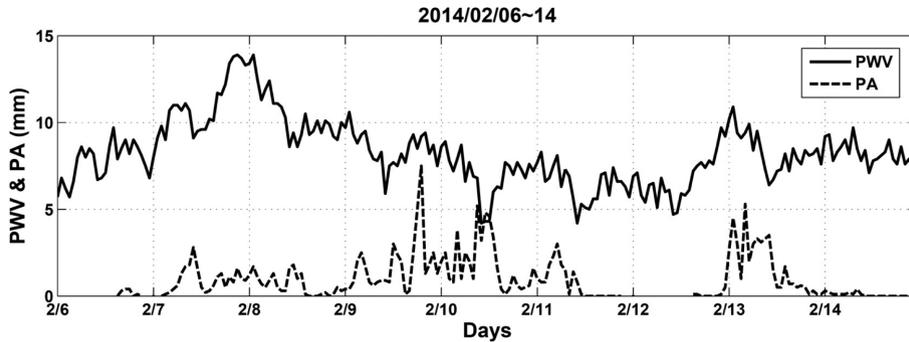


Fig. 5. Time series of precipitation amount (PA) and precipitable water vapor (PWV) from 06 to 14 Feb 2014.

눈결정의 관측빈도를 나타낸 것인데, 눈결정의 대부분은 나뭇가지 형태이거나 나뭇가지의 변형된 형태(나뭇가지형, 나뭇가지 부착형, 나뭇가지 결착형)이었다.

Nam et al. (2014)에 의하면 영동지역 강설구름의 운정고도는 대부분 약 2~3 km, 운정온도는 $-12 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 이었는데, 이를 ESSAY 관측을 통해서도 전반적으로 재확인할 수 있었다. 선행연구(Korolev and Sussman, 1999; Masataka et al., 2003; Bailey and Hallett, 2008; Takahashi, 2014)에서 제시된 결과에 의하면 $-12 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 사이에서는 나뭇가지 형태의 발생 빈도가 높게 나타나고, 다음으로 판모양의 결정이 주로 생성된다고 보고된 바 있다.

3.2 눈결정 촬영기간의 전반적인 기상조건

ESSAY 기간 중의 전반적인 중관특성을 살펴보기 위하여, 캠페인 기간 동안의 지상 일기도를 Fig. 4에 제시하였다. ESSAY 기간 중에 한반도 남쪽으로 지속적으로 이동성 저기압이 통과하는 패턴이 반복적으로 나타나고 있는데, 이는 선행 연구들에서 제시하는 영동지역 대설을 유발하는 대표적인 중관패턴이다. 한반도 남쪽에 이동성 저기압이 위치하면서 영동지역에 북동풍 혹은 북풍계열의 바람으로 인해 한기가 따뜻한 동해상을 통과하게 된다. 해수온도와 상층 공기온도(850 hPa)의 차이(해기차)가 증가하면서(약 15°C 이상) 동해 해수면으로부터 대기 중으로 수증기가 공급되는데, 이는 상층에서 냉각되면서 포화에 도달하여 눈구름이 발달하게 된다(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014). 이렇게 생성된 눈구름은 동풍과 함께 영동지역으로 유입되면서 강설을 유발하는데, 태백산맥에 의한 수렴효과에 의해 강설메커니즘이 강화되게 된다(Nam et al., 2014). ESSAY 캠페인 기간 중후반으로 갈수록 일본 동쪽에 저기압이 정체되면서 동풍을 유지하는 중관장이 지속되었다.

Figure 5는 GNSS로 추정된 가강수량과 강수량의 시간변화를 나타낸 것인데, 중관적인 상태에 따라 캠페

인 기간(9일)을 3일씩 3가지 Phase로 나누어 분석하였다. 전체 기간 중 Phase 1 기간(2월 6~8일)에는 가강수량이 증가하면서 강수가 시작되었고, 다음 Phase 2 기간(9~11일)에는 가강수량은 줄어들지만 시간당 최고강설량이 기록되었다. 마지막 Phase 3 기간(12~14일)에는, 가강수량이 증가하면서 강설이 다시 관측되었다. Phase 1의 가강수량은 신적설량이 최대치를 나타낸 시점을 기준으로 6시간 전에 10 mm 이상 증가하였으며, 지상일기도(Fig. 4)에서 제시된 것처럼 한반도 남쪽에 이동성 저기압의 통과로 인하여 영동지역에 동풍이 유발되면서 강설이 시작되었다. Phase 2에는 가강수량이 Phase 1에 비해 감소하는 경향을 보였으며, 한반도 남쪽에서 또 다른 이동성 저기압이 북동진함으로써 영동지역에 지속적인 북동풍의 유입으로 인하여 ESSAY 기간 중의 최대 강설량을 기록하였다. 마지막 Phase 3은 Phase 1처럼 가강수량이 10 mm 이상으로 증가하면서 강설이 시작되었으며, 단기 동안 강설강도가 강하게 관측되었다.

3.3 ESSAY 캠페인 기간 관측된 눈결정 특성

Figures 6~9은 35회의 상층기상연직구조 관측 사례 중에서 4가지 사례(2월 7일, 8일, 10일, 11일)를 각각 선정하여 대기의 열역학적 특성과 눈결정을 제시한 것이다. 첫 번째로 제시한 7일 0900 LST 사례(Fig. 6)의 경우 운고계로 관측한 운정고도는 250 m이고, 라디오존데 관측으로 추정된 운정고도는 약 2500 m이었다. 구름 내에서는 온위의 경우 잠열의 방출로 인하여 온위가 약하게 증가하는 경향이 있는 반면에 상당온위는 상대적으로 일정한 경향이 있다. 그리고 약 2500 m 이내의 구름층에서는 혼합비와 포화혼합비의 경우 거의 일치하는 것을 잘 보여준다(약 90% 이상의 상대습도). 이 기간은 강설이 시작되는 시점이었는데 구름층 이하 고도에서는 약한 동풍이 관측되었으며 3000 m 이상 고도에서는 강한 북서풍(약 7 m s^{-1})이 관측되었다. 눈결정은 주로 약 3~4 mm 크기의 싸

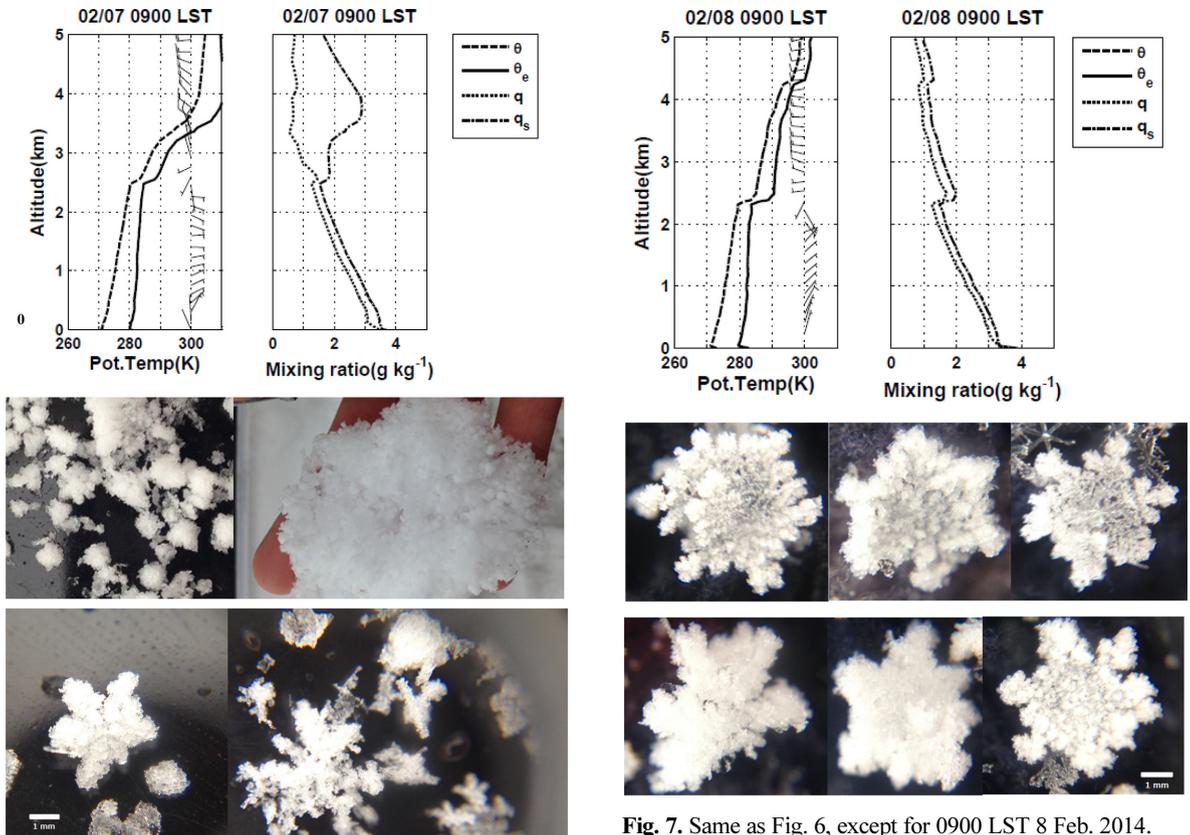


Fig. 6. Vertical profiles of potential temperature (θ), equivalent potential temperature (θ_e), wind (black flag), mixing ratio (q), saturation mixing ratio (q_s) at 0900 LST 07 Feb 2014. Images of snow crystal habits are shown in the bottom during the same period. The length of the white line is equivalent to 1 mm.

락눈(Graupel) 형태로써 전체 관측기간 중에서 유일하게 관측되었다(Fig. 6 하단부).

두 번째 사례인 2월 8일(Fig. 7)에는 두 층의 구름이 관측되었는데 두 층 사이 2400~2500 m 부근에 강한 역전층이 존재하는 것을 알 수 있고 전체 기층이 상당히 습윤한 것을 확인할 수 있었다. 이 기간은 Fig. 5에서도 제시된 바와 같이 Phase 1에 해당하여 ESSAY 기간 중에 기층 내의 수증기량이 상대적으로 가장 큰 시기였는데, 라디오존데 연직수증기량 분포도 이를 잘 뒷받침하고 있다. 그리고 Fig. 6과 유사하게 하층 구름층에서는 약한 동풍계열이, 상층 구름층에서는 서풍계열의 바람이 관측되었다. 이 사례의 경우는 서쪽에서 생성된 눈구름이 영동지역 상층으로 이루어졌고, 하층에서는 동풍에 의한 동해상의 눈구름이 이루어진 것으로 생각된다. 상·하층 두 층 눈구름의 상호작용

Fig. 7. Same as Fig. 6, except for 0900 LST 8 Feb. 2014.

이 강설메커니즘에 영향을 주었을 것으로 생각되는데, 이와 관련한 분석은 본 연구에서 다루지 않았다. 이 기간 동안의 대표적인 눈결정은 약 4~6 mm 크기의 나뭇가지결착(Rimed Dendrite)형태로써 전날(Fig. 6)에 비해 약간 컸는데, 상층에서 생성된 나뭇가지 결정이 낙하하는 과정에서 습윤한 대기층을 통과하면서 과냉각수적과의 충돌 혹은 빙결을 통해 성장하였을 것으로 생각된다.

Figure 8은 2월 10일 2100 LST 사례의 대기연직구조와 눈결정을 나타낸 것이다. 운고계에서 운저고도는 480 m이었고, 운정고도로 추정되는 2000 m 고도까지 혼합비와 포화혼합비가 거의 일치하는 두꺼운 습윤 층이 잘 나타나고 있었다(구름 두께는 1520 m). 그리고 Fig. 7과 달리 구름층 바로 위에는 혼합비가 0.1~0.2 g kg⁻¹ 가량의 건조한 층이 존재하였다. 운정온도는 -19°C이었는데, 주요 눈결정은 Table 1에서 제시된 6가지 눈결정 중 5가지 형태(나뭇가지부착형 19%, 나뭇가지형 60%, 나뭇가지결착형 3%, 판형 16%, 결착관형 2%)가 다양하게 분포하는 것이 확인되었다.

마지막 2월 11일(Fig. 9) 사례에서는 Fig. 8에 비해 상대적으로 얇은 단일 구름층이 관측되었다. 운고계

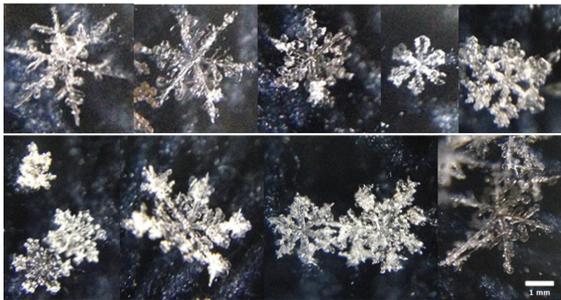
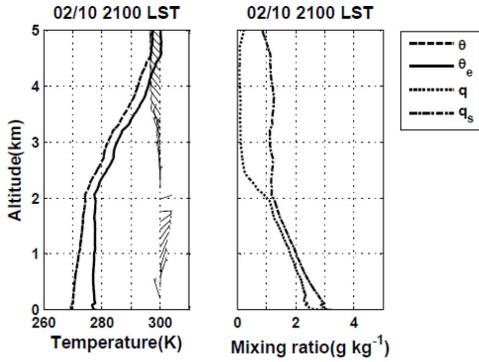


Fig. 8. Same as Fig. 6, except for 2100 LST 10 Feb. 2014.

에서 관측된 운저고도는 1360 m이었고, 운정고도로 추정되는 약 1900 m 고도에 역전층이 나타났는데, 결국 구름두께가 Fig. 8(10일 2100 LST 사례)에 비해 약 1/3 수준으로 얇은 것을 알 수 있다. 구름층 바로 위는 전날과 유사하게 매우 건조한 층이 유지되었다. Figures 6~7에서와 같이 2 km 이하 고도에서는 북동풍에서 동풍계열의 바람이, 2 km 이상 고도에서는 북풍에서 북서풍계열로 전환되는 것을 확인할 수 있다. 이 당시의 운정온도는 약 -16°C 이었고, 눈결정은 나뭇가지 부착형(Aggregates of Dendrite) 16%, 나뭇가지형(Dendrite) 84%의 2가지 종류로만 분포하여 앞선 두꺼운 구름층 사례와는 달리 눈결정 빈도가 대체로 균질한 경향이 나타났다. 눈결정은 온도와 과포화도에 따라 다양한 형태가 생성되는데, 두꺼운 구름일수록 얇은 구름에 비해 구름 내의 온도 및 상대습도의 변화가 크며, 생성된 눈결정이 구름 내부에서 낙하하면서 주위의 수증기에 의한 성장이 활발하기 때문에 얇은 구름에 비해 다양한 눈결정이 생성되는 것으로 추정된다. 하지만 눈결정 생성에 대한 체계적인 이해를 위해서는 향후 눈결정과 구름 내의 온도 및 과포화도와와의 정량적인 연관성 분석이 필요하다.

3.4 토의

겨울철 다양한 눈결정 종류에 따라 눈의 무게가 결

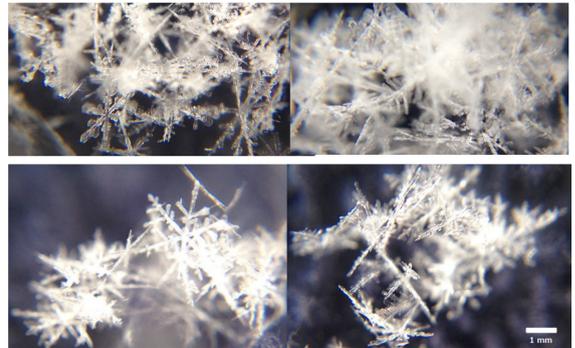
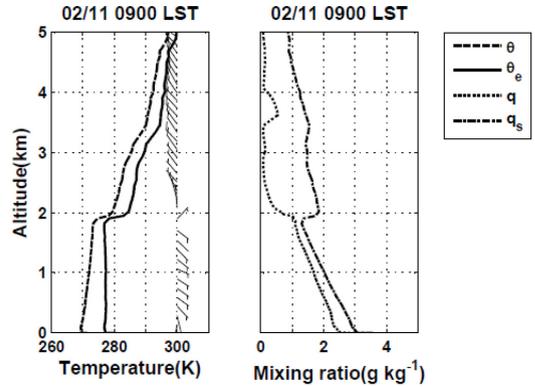


Fig. 9. Same as Fig. 6, except for 0900 LST 11 Feb. 2014.

정되기 때문에 비닐하우스 파손이나 가건물 등의 붕괴 등에 의한 인명 및 재산 피해를 최소화하기 위해서는 눈결정에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 실제 대기조건에서 다양한 눈결정을 촬영하여 분석한 결과 영동지역에 다양한 눈결정을 관측할 수 있었으며, 나뭇가지형 혹은 나뭇가지 결합형결정의 빈도가 높게 나타남을 확인하였다.

하지만 현재 분석의 한계로 인하여 구름의 온도와 과포화도 조건에 따른 눈결정 생성 연관성에 대한 이해는 이루어지지 못했는데, 첫째 이유는 두꺼운 구름층의 경우에는 눈결정의 처음 생성 위치를 파악하기 어려운 점이 있다. 반면에 눈구름층의 두께가 상대적으로 얇고, 높이가 약 2 km 내외에서 형성되는 경향이 있고, 운정고도의 온도가 $-12 \sim -16^{\circ}\text{C}$ 정도일 때는, 선행 실험실 연구들과 유사하게 나뭇가지형이나 나뭇가지형의 변질된 형태(결착형 혹은 부착형) 눈결정의 빈도가 높게 나타나는 경향이 있었다. 특히 구름층이 500 m 이하의 단일층 구름의 경우는 나뭇가지 형태의 눈결정이 균질하게 나타났다. 본 연구에서는 기상조건과 눈결정의 상관관계 분석에 용이한 구름두께가 얇은 눈구름의 빈도가 낮아 기상조건과 눈결정의 정량적 측면에서의 상세분석이 이루어지지 못

하였다.

둘째는 강설이 시작되는 시기에 주로 싸락눈(Graupel) 결정이 주로 관측되었고, 이후 두 층의 눈구름이 존재할 경우에는 다양한 종류의 눈결정이 관측되었다. 한편 단일층 구름 중에서 두꺼운 조건에서는 나뭇가지결착형 결정이, 상대적으로 얇은 조건에서는 나뭇가지형 결정이 주로 관측되었다. 이와 같이 9일간의 강설과정에서도 눈결정의 형태가 다양하게 변하고 있기 때문에 눈의 밀도 역시 뚜렷한 차이가 있었을 것으로 추정된다. 구형에 가까운 싸락눈 형태의 눈결정 무게가 나뭇가지형 눈결정보다는 클 것이고, 나뭇가지결착형눈결정의 무게가 균질한 나뭇가지형 눈결정보다는 클 것이라고 예상된다. 하지만 본 연구에서는 눈밀도 관측 정확도가 확보되지 못하여 눈의 밀도와 눈결정과의 정량적인 상세분석이 이루어지지 못하였다. 이상의 제한적인 문제점들을 고려하여 향후 추가적인 정밀분석이 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 강원영동지역의 2014년 2월 중 대설 관측 캠페인(ESSAY)의 일환으로 라디오존데 관측, 가강수량 관측 및 카메라를 이용한 눈결정 촬영을 수행하였다. 분석 기간은 최장 기간 동안 누적적설량(192.8 cm)이 기록된 2014년 2월 6~14일(9일간)으로, 이동성 저기압 시스템이 한반도 남쪽을 순차적으로 통과하면서 영동지역에는 장기간 지속적으로 동풍이 유도되어 대설이 발생하였다. 분석결과 영동지역의 강설구름은 기존 연구결과와 유사하게 일반적으로 2~3 km 이내의 낮은 층운형 구름임을 라디오존데 및 원격 관측을 통해 확인하였으며 2~3 km 이내의 하층에서는 북동풍에서 동풍계열의 바람이 관측되었고, 상층으로 갈수록 북풍에서 북서풍으로 전환되는 것을 보였다.

국내에서 최초로 수행된 눈결정 분석에서 강릉지역은 나뭇가지형태(Dendrite)의 눈결정이 약 70% 정도로 대부분을 차지하였으며, 두 층 구름이 존재하는 경우 과냉각수적의 빙결에 의해 나뭇가지결착형(Riming) 눈결정 빈도가 증가하였다. 또한 두꺼운 구름층과 얇은 구름층을 상호 비교한 결과 두꺼운 구름층에서는 여러 형태의 눈결정이 다양하게 관측된 반면에(나뭇가지형, 나뭇가지부착형, 나뭇가지결착형, 관형, 결착관형), 얇은 구름층(500 m 이내)에서는 상대적으로 균질한결정(나뭇가지형)이 주로 관측되었다. 특히 구름층이 얇고 운정온도가 약 $-12 \sim -16^{\circ}\text{C}$ 인 조건에서는 나뭇가지 혹은 나뭇가지부착형 눈결정이 주로 관측되었다. 하지만 현재 관측결과에서 온도와 상대습도 등의 기상조건과 눈결정 빈도 간의 뚜렷한 연관성을 확인하지는 못하였기 때문에 향후 눈결정 생성에 영향

을 미치는 온도, 과포화도, 리차든수(안정도) 등에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

눈결정은 겨울철 강설관련 연구의 기본적인 요소이기 때문에 눈결정에 대한 체계적인 이해가 이루어진다면 눈의 무게에 의한 사고예방, 동계스포츠 알파인 스키 경기의 기록향상을 위한 설질정보 제공, 눈길 교통사고예방, 눈결정의 대기 복사효과 산정, 강설량의 정량적인 예측 등 다양한 대기과학 분야발전에 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 재해기상연구센터의 ‘강원영동 대설 및 한파 특성분석 및 예측기법개발’ 사업의 일환과 응용기상연구과의 ‘인공증설 실험 수치모델링기술 개발연구(II)’의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bailey, P. M., and J. Hallett, 2008: A Comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: Confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2888-2899.
- Bentley, W. A., 1902: Studies among the snow crystals during the winter of 1901-1902. with additional data collected during previous winters and twenty-two half-tone plates.: Reprinted from the Annual Summary of the Monthly Weather Review for 1902. Washington, D. C.
- Garrett, T. J., C. Fallgatter, K. Shkurko, and D. Howlett, 2012: Fall speed measurement and high-resolution multi-angle photography of hydrometeors in free fall. *Atmos. Meas. Tech.*, **5**, 2625-2633.
- Korolev, A., and B. Sussman, 1999: A technique for habit classification of cloud particles. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 1048-1057.
- Korean Meteorological Society, 2013: *Atmospheric Sciences Terminology*. Sigma Press, 1042 pp.
- Lee, J. W., S. H. Eun, B.-G. Kim, and S. O. Han, 2012: An analysis of low-level stability in the heavy snowfall event observed in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 209-219 (in Korean with English abstract).
- Magono, C., and C. W. Lee, 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7*, **2**, 321-335.
- Masataka, M., Y. Yoshinori, M. Takayo, I. Koyuru, D. John, and G. Glenn, 2003: The precipitation process in convective cells embedded in deep snow bands over the sea of Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 515-

- 531.
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C.-K. Lee, and S.-S. Lee, 2014: Characteristics of easterly-induced snowfall in yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552.
- Park, J. H., K. E. Kim, and B. H. Heo, 2009: Comparisons of development mechanisms of two heavy snowfall events occurred in Yeongnam and Yeongdong regions of the Korean peninsula. *Atmosphere*, **19**, 9-36 (in Korean with English abstract).
- Pruppacher, H. R., and J. D. Klett, 1997: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Kluwer Academic, 945 pp.
- Takahashi, T, 2014: Influence of liquid water content and temperature on the form and growth of branched planar snow crystals in a cloud. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 4127-4142.