

영동 대설과 관련된 낮은 층운형 구름의 위성관측

권태영^{1)*} · 박준영¹⁾ · 최병철²⁾ · 한상옥²⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과,

²⁾국립기상과학원 수치모델연구부 관측예보연구과 재해기상연구센터

(접수일: 2014년 11월 27일, 수정일: 2015년 7월 16일, 게재확정일: 2015년 10월 23일)

Satellite Image Analysis of Low-Level Stratiform Cloud Related with the Heavy Snowfall Events in the Yeongdong Region

Tae-Yong Kwon^{1)*}, Jun-Young Park¹⁾, Byoung-Cheol Choi²⁾, and Sang-Ok Han²⁾

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

²⁾High-impact Weather Research Center, Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Research, Gangneung, Gangwon, Korea

(Manuscript received 27 November 2014; revised 16 July 2015; accepted 23 October 2015)

Abstract An unusual long-period and heavy snowfall occurred in the Yeongdong region from 6 to 14 February 2014. This event produced snowfall total of 194.8 cm and the record-breaking 9-day snowfall duration in the 103-year local record at Gangneung. In this study, satellite-derived cloud-top brightness temperatures from the infrared channel in the atmospheric window (10 μm ~11 μm) are examined to find out the characteristics of clouds related with this heavy snowfall event. The analysis results reveal that a majority of precipitation is related with the low-level stratiform clouds whose cloud-top brightness temperatures are distributed from -15 to -20°C and their standard deviations over the analysis domain ($\sim 1,000 \text{ km}^2$, 37 satellite pixels) are less than 2°C . It is also found that in the above temperature range precipitation intensity tends to increase with colder temperature. When the temperatures are warmer than -15°C , there is no precipitation or light precipitation. Furthermore this relation is confirmed from the examination of some other heavy snowfall events and light precipitation events which are related with the low-level stratiform clouds. This precipitation-brightness temperature relation may be explained by the combined effect of ice crystal growth processes: the maximum in dendritic ice-crystal growth occurs at about -15°C and the activation of ice nuclei begins below temperatures from approximately -7 to -16°C , depending on the composition of the ice nuclei.

Key words: Yeongdong region, heavy snowfall, low-level stratiform cloud, cloud-top brightness temperature

*Corresponding Author: Tae-Yong Kwon, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 210-702, Korea.
Phone : +82-33-640-2323, Fax : +82-33-640-2324
E-mail : tykwon@gwnu.ac.kr

1. 서 론

위성 영상 분석에 의하면 영동 대설은 대류운뿐만 아니라 낮은 층운형 구름에서도 발생한다(Cho and Kwon, 2014; Kwon et al., 2014). 이러한 층운형 구름은 영동 주변의 육지와 바다에 균질하게 분포하며 위성의 대기창 영역($10\ \mu\text{m}\sim 11\ \mu\text{m}$)에 위치한 적외채널에서 휘도 온도는 약 $-15\sim -20^\circ\text{C}$ 에 집중되어 있다. 층운형 구름과 관련된 강설은 일반적으로 발생 빈도와 강설 강도가 상대적으로 낮고 약하다. 그러나 강설의 지속 시간이 길어 때때로 며칠 동안 지속되는 대설로 나타나고 이로 인해 오히려 더 큰 피해를 발생시킨다. 따라서 겨울철 동해와 동해안 지역에서 발생하는 낮은 층운과 관련된 강수 기작에 대한 이해는 영동 대설의 정량적 예보에 도움을 주고 대설로 인한 기상재해를 줄이는데 기여할 것이다.

Cho and Kwon (2014)은 지난 12년(2001~2012) 동안 발생한 영동 대설 사례를 유형에 따라 층운형 대설과 대류형 대설로 분류하고 각각의 기상학적 특징을 조사하였다. 층운형 구름과 관련된 영동 대설 사례에서는 대부분 대기 하층(지상에서 $850\sim 700\ \text{hPa}$ 까지)에서 한기이류 유입의 영향으로 기온하강과 바로 그 위층에 역전층이 존재하고 또한 이 기층에서 약한 동풍계통의 바람이 나타난다. Cho et al. (2004)은 영동 대설과 관련된 기단의 특성 분석에서 한기-해안형 강수의 경우 연해주와 화중 지역의 하층 기온에 음의 편차가 나타난다고 보고하였다. 그리고 Kim and Chung (2006)은 NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 사용한 동해상의 현열속과 잠열속 편차 분석에서 영동 지역의 겨울철 해안형 강수는 기온 하강과 밀접하게 연관되어 있다고 보고하였다.

Lee et al. (2012)은 영동 대설 전·후 기간에 나타난 열역학적 변화를 분석한 결과 동해상에서 대설 전 고도 $1\sim 2\ \text{km}$ 까지 습윤 단열적으로 불안정층(상당운위의 연직감소)이 발달한다고 보고하였다. 그리고 Nam et al. (2014)은 13년(2000~2012) 동안 영동 지역에서 관측된 17개 강설 사례(극한 대설 사례를 제외함)에 대한 분석에서 영동 지역의 적설량과 동해상의 해기차(SST와 $850\ \text{hPa}$ 기온의 차이) 사이에 통계적으로 밀접한 상관성이 있음을 보고하였다.

Hanna et al. (2008)은 강수 유형에 따라 위성 관측으로부터 획득한 운정 휘도온도(cloud-top brightness temperature)의 분포를 분석하였다. 강한 강설의 경우 휘도온도의 분포에 두 개의 최대가 나타나며 1차 최대와 2차 최대가 각각 $-16\sim -23^\circ\text{C}$ 와 $-35\sim -45^\circ\text{C}$ 에 분포한다. 반면 약한 강설의 경우 하나의 모드가 약 -16°C 에 분포하고 이 휘도온도보다 높은 쪽으로($-10\sim$

-15°C 범위에서) 빈도 분포에 급격한 감소가 나타난다. 이 연구에서는 이러한 급격한 빈도의 변화를 빙정핵의 활성화($-7\sim -16^\circ\text{C}$ 이하)와 나뭇가지모양 얼음 결정의 최대 성장률(약 -15°C) 그리고 얼음증식 과정($-3\sim -8^\circ\text{C}$)의 결합 효과에 기인하는 것 같다고 추측하였다. 그리고 약한 강설은 안정도가 높은 환경(강한 습윤 대류, 강한 상승 혹은 대기 불안정이 없는 경우)에서 발생하는 것 같다고 보고하였다.

이 연구에서는 위성 영상을 이용하여 영동 대설과 관련된 층운형 구름의 특징을 분석하고 위성의 휘도온도와 강수량 사이의 관계를 분석하였다. 또한 이러한 관계를 구름의 미세물리 과정과 연관시켜 이해하고자 시도한다. 2장에서는 낮은 층운형 구름과 관련된 영동 대설 사례를 선정하고 연구에 사용한 위성 자료를 설명한다. 3장에서는 2014년 2월 6~14일 사례에서 위성 휘도온도와 강수량의 관계를 조사한다. 4장에서는 층운형 구름과 관련된 겨울철 영동 강수를 대설과 소설로 나누어 휘도온도-강수량 관계를 분석한다. 5장에서는 이 연구의 주된 결과를 요약하고 이 결과와 구름의 미세물리 과정 사이의 관련성에 대해 토의한다.

2. 대설 사례 선정과 연구방법

2.1 대설 사례 선정

영동 지역은 한반도의 중동부 지역에서 동쪽 가장 자리에 위치한다(Fig. 1). 이 지역은 동쪽으로는 동해 바다 그리고 서쪽으로는 해발고도 $700\sim 1500\ \text{m}$ 의 태백산맥으로 둘러싸여 있어 다양한 기상 현상이 발생하는 곳이다(Kim and Chung, 2006; Lee and Kim 2008; Cho and Kwon, 2012). 영동 지역에는 5개의 기상 관측소(속초, 북강릉, 강릉, 대관령, 동해)에서 적설과 강수를 관측하여 왔다. 이들 가운데 대관령은 해발고도 약 $772\ \text{m}$ 의 산지에 있고 나머지는 해안 지역에 위치한다. 북강릉 관측소는 2008년에 신설되었고, 동해는 2011년 4월부터는 적설 자료를 제공하지 않는다. 현재는 강릉과 동해를 제외한 3개 지점(속초, 북강릉, 그리고 대관령)에서만 적설을 관측하고 있다. 이 연구에서는 먼저 이들 관측소의 일신적설 자료를 이용하여 영동 지역의 대설 일을 조사하였다. 대설 일은 위 5개 관측소 가운데 적어도 하나의 지점에서 $20\ \text{cm}$ 이상의 일신적설이 관측된 날이다. 지난 10년(2004~2014) 동안 대설일은 총 36일이다. 그리고 대설 일을 기준으로 연속적인 강수가 나타나는 기간을 영동 지역 대설 사례로 정의할 때 총 25개의 대설 사례가 선정되었다. 이 가운데 11 사례의 경우 대관령에서만 대설이 관측되었다. 또한 대관령에 산지 대설 기준(일신적설 $30\ \text{cm}$)을 적용하면 사례 수는 5개로 줄어들어

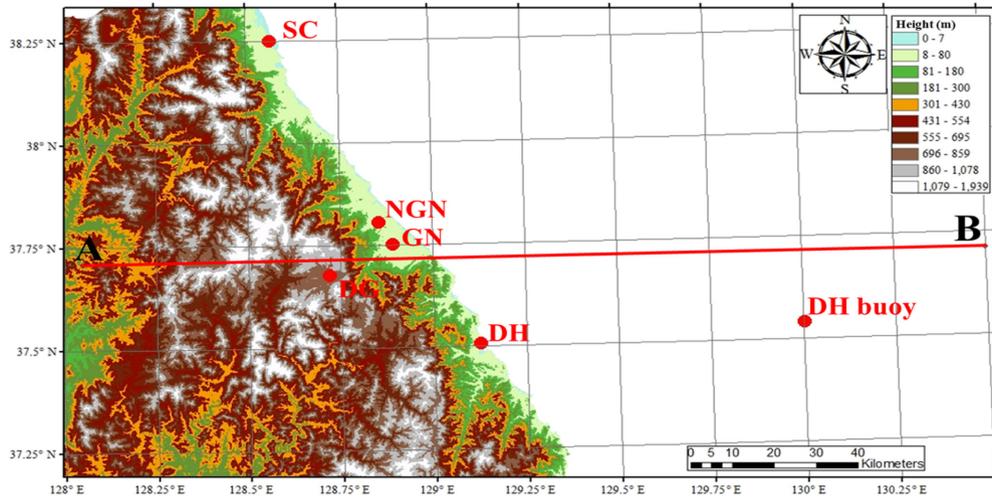


Fig. 1. Topographic map and location of 5 weather stations (SC: Sokcho, NGN: North Gangneung, GN: Gangneung, DG: Daegwallyeoung, DH: Donghae) and DH buoy used in this study. A-B line (red) is chosen to examine the variability of satellite-derived brightness temperature.

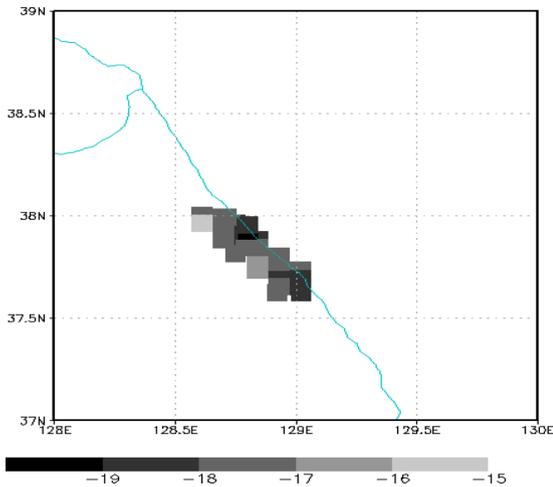


Fig. 2. Distribution of brightness temperature in the selected area to classify low-level stratiform clouds at 1133 KST 10 February 2014.

전체 대설 사례는 총 19 사례이다. 이러한 대설 사례 가운데 낮은 층운형 구름과 관련되어 있는 사례를 찾기 위하여 위성의 적외 휘도온도 자료를 사용하였다.

낮은 층운형 구름을 탐지할 목적으로 위성 휘도온도 (satellite-derived brightness temperature)를 이용하여 25개의 대설 사례를 조사하였다. 영동 지역의 강설과 관련된 구름이 낮은 층운형 구름인지를 판별하기 위하여 다음의 분석 과정을 적용하였다. 먼저 영동 지

역의 중앙에 위치하며 서로 인접한 북강릉과 강릉 관측 지점을 포함하는 약 1,000 km²(37개의 위성화소)의 면적을 연구 지역으로 선정하였다(Fig. 2). 그리고 이 지역에 대하여 한 시간 간격으로 위성 휘도온도의 평균값과 표준편차를 계산하였다. 이러한 계산은 상대적인 개념으로 보았을 때 평균 휘도온도가 -30°C 이상이면 하층운으로 그리고 휘도온도의 표준편차가 2°C 이하이면 운정의 높이가 수평적으로 균질한 층운형 구름으로 각각 정의하였다. 이 두 가지 조건을 모두 만족하는 구름이 낮은 층운형 구름이다. 25개 대설 사례에서 위의 연구 지역에 하층운이 사례 기간의 절반 이상 동안 분포하고 이 하층운 가운데 50% 이상이 낮은 층운형 구름이면 이 대설 사례는 낮은 층운형 구름과 밀접하게 연관되어 있다고 정의하였다. 이 방법은 3장의 2014년 2월 6~14일 사례 연구에서 자세히 언급하였다. 위의 방법으로 조사했을 때 낮은 층운형 구름과 관련된 영동 대설 사례는 지난 10년 동안 총 5회 관측되었다(Table 1).

위의 낮은 층운형 구름과 관련된 5개 대설 사례의 강수 특성을 요약하면 다음과 같다. 강수 사례의 평균 지속 시간은 116시간(4.8일)으로 비교적 길고 지속 시간이 최대 204시간인 사례(2014년 사례)도 발생하였다. 시간 강수량의 평균과 표준편차는 사례 전체에 대해서 평균했을 때 각각 0.92 mm hr⁻¹와 0.77 mm hr⁻¹로 비교적 강수 강도가 약하고 균일한 강수가 지속되었음을 알 수 있다. 그러나 최대 시간 강수량은 극히 일부 시간대에서 3.5~7.5 mm hr⁻¹로 크게 나타났다.

Table 1. Precipitation characteristics of the 4 weather stations in the Yeongdong region for the heavy snowfall events related with the low-level stratiform cloud.

Case No.	Period of the precipitation event (hr)	Maximum total precipitation amount (mm) /snowfall (cm)	Mean hourly precipitation (mm hr ⁻¹) /snowfall (cm hr ⁻¹)	Standard deviation of hourly precipitation (mm hr ⁻¹) /snowfall (cm hr ⁻¹)	Maximum hourly precipitation and time (mm hr ⁻¹) /snowfall and time (cm hr ⁻¹)
Case 1 11~14 Jan. 2008	84	48.0 GN /41.1 DG	0.69 /0.74	0.62 /0.84	7.5 GN (1500~1800KST 12 Jan.) /5.8 DG (0800KST 12 Jan.)
Case 2 09~13 Feb. 2010	110	96.7 DH /103.8 DG	1.07 /1.36	0.81 /1.29	5.3 DH (0800KST 12 Feb.) /10.0 DG (0800KST 11 Feb.)
Case 3 06~10 Mar. 2010	114	70.5 NGN /87.5 DG	0.77 /0.81	0.67 /0.95	4.0 GN (0200KST 10 Mar.) /6.7 DG (0600KST 10 Mar.)
Case 4 21~23 Jan. 2013	69	43.5 NGN /37.7 DG	1.02 /0.79	0.70 /0.62	3.5 NGN (0500KST 22 Jan.) /2.5 DG (1400KST 21 Jan.)
Case 5 06~14 Feb. 2014	204	185.0 NGN /194.8 NGN	1.06 /1.11	1.07 /1.05	7.5 NGN (1900KST 09 Feb.) /5.8 NGN (1900KST 09 Feb.)

DG: Daegwallyeong, GN: Gangneung, NGN: North Gangneung, DH: Donghae.

Table 2. Thermodynamic and dynamic features observed from radiosonde at Sokcho, wind profiler at N. Gangneung and buoy at Donghae for the heavy snowfall events related with the low-level stratiform cloud.

Case No.	East or North wind altitude /intensity	Sea-Air Temperature Difference (Sea and air temperature)	Stable layer bottom altitude (hPa)	Altitude of drop in temp./ Max. value & Altitude of drop in temp (hPa) / (hPa) & (°C 12 hr ⁻¹)	Total precipitable water (mm)
Case 1 1100~1800 KST 12 Jan. 2008	1.5~2 km /15~20 kts	No data	850	1000~840 850@-5	15.2
Case 2 0500~2200 KST 12 Feb. 2010	2~2.5 km /10~15 kts	10.2°C (9.4°C, -0.8°C)	775	1000~700 780@-8	no data
Case 3 0400~1400 KST 08 Mar. 2010	2~2.5 km /5~10 kts	7.8°C (9.5°C, 1.7°C)	700	800~650 700@-4	10.7
Case 4 0700~2200 KST 22 Jan. 2013	2~2.5 km /10~15 kts	6.8°C (11.4°C, 4.6°C)	780	950~690 800@-4	7.2
Case 5 1200 KST 0900~1300 KST 10 Feb. 2014	2~2.5 km /10~20 kts	9.1°C (10.4°C, 1.3°C)	700	1000~740 840@-3	6.1

여기서 강수량의 통계값을 계산할 때 Trace는 제외하였다(Table 1). 그러나 2010년 3월 6~10일 사례와 2013년 1월 21~23일 사례는 대관령에서만 대설이 관측되었다. 이것은 이 두 사례에서 영동 해안 지역은 대체로 눈보다는 비가 내렸다는 것을 의미한다.

낮은 층운형 구름과 관련된 대설 사례의 역학적 그리고 열역학적 특징은 다음과 같다(Table 2). 이들 사례는 동풍 계열의 바람과 밀접하게 관련되어 있고 이 바람은 최대 1.5~2.5 km 고도까지 나타나고 최대 풍

속은 10~20 kts로 비교적 약했다. 속초 라디오존데 자료를 통해 낮은 층운형이 관측 되었을 때의 특징을 조사한 결과 모든 사례에서 강수가 시작되기 전에 하층에 한기가 유입되었다. 강수가 시작될 무렵에 두께가 작은 역전층 혹은 안정층이 약 850 hPa 고도에서 위치했고 그 하층에서는 지상까지 전체적으로 기온 하강이 있었다. 최대 강수시에는 이 고도가 850~700 hPa 까지 높아졌고 최대 기온 하강은 일부 고도에서 3~8°C 12 hr⁻¹였다. 이때 총 가강수량은 6.1~15.2 mm로 비교

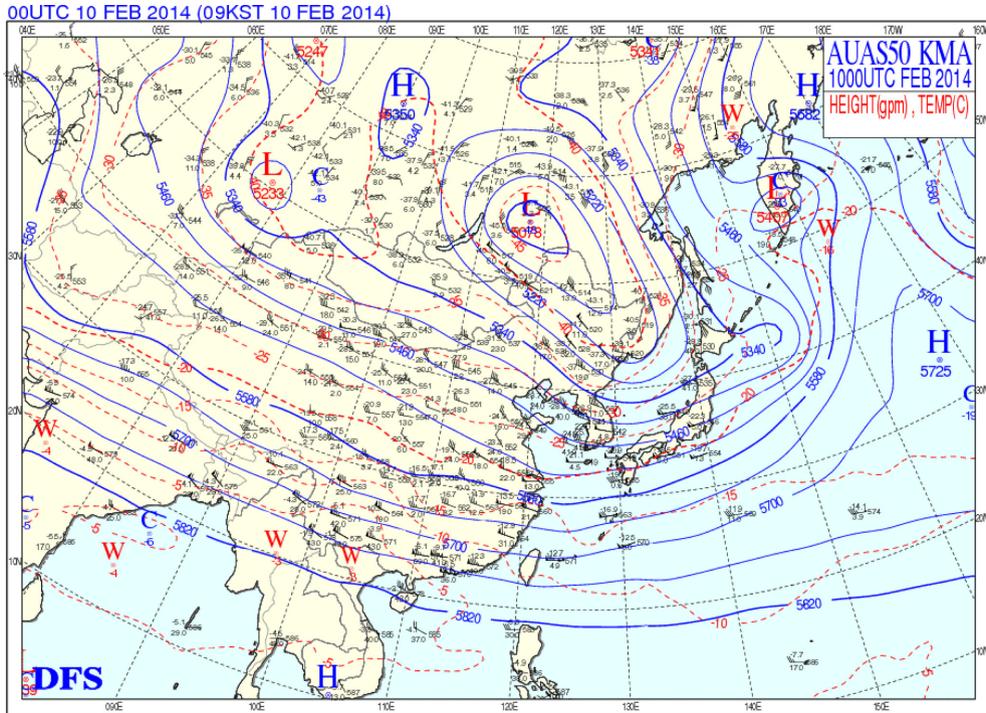


Fig. 3. 500 hPa weather chart at 0900 KST 10 February 2014.

적 높았고 동해 부이의 해기차는 7~12°C로 큰 값을 보였다.

2.2 자료와 연구방법

이 연구에서는 낮은 층운형 구름을 탐지하기 위하여 위성의 적외 휘도온도를 사용하였다. 지난 10년 동안 한반도 주변의 적외 휘도온도 관측은 약 15~30분 간격으로 관측을 수행하는 정지 궤도 위성인 MTSAT (Multi-Functional Transport Satellite), GOES-9 (Geostationary Operational Environmental Satellite-9), 그리고 COMS (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite)에 의해서 이루어져왔다. 기상청은 이 자료를 수집하여 약 5×5 km 해상도의 자료로 데이터베이스를 구축하여왔다. 이 연구에서는 사례별 휘도온도의 상호 비교를 위하여 연구기간동안 위성자료가 존재하고, 비교적 해상도(약 4×4 km)가 좋은 MTSAT 적외 1채널(약 10~11 μm) 휘도온도를 사용하였다.

2014년 2월 6일~14일 대설 사례는 영동지역에서 가장 최근에 발생한 사례로 신적설일수와 최심적설에서 새로운 기록을 경신하였다(강원지방기상청, 2014). 이 사례의 9일 동안의 강수 기간에 강수의 시간적 공간적 변동성은 크지 않았고, 영동 지역의 운정 휘도는

도에서도 큰 변동성은 없었으며 역학적 그리고 열역학적 특성에서도 뚜렷한 변화를 찾기는 어려웠다. 따라서 이 사례를 대설과 관련된 구름과 강수의 특징을 통계적으로 조사하기에 적합한 예로 보고 사례 연구를 수행하였다. 특히 이 사례에서 낮은 층운형 구름 휘도온도와 강수량 사이의 관계를 조사하였다. 또한 위의 관계성을 확인하기 위하여 다른 대설 사례뿐만 아니라 소설 사례 혹은 약한 강수 사례에서도 분석하였다. 대설 사례는 Table 1에 선정된 2014년 2월 6~14일을 제외한 나머지 4개 사례에 대해서 조사하였다. 그리고 소설 사례 혹은 약한 강수 사례는 사례 신적설과 강수량이 각각 3 cm와 3 mm 이하인 사례로 총 4개의 사례를 선정하고 분석하였다. 이 4개의 사례는 모두 낮은 층운형 구름과 관련되어 있었다.

3. 2014년 2월 6~14일 대설 사례

2014년 2월 6~14일 영동 대설은 강릉과 대관령에서 9일 동안 연속 신적설을 보였고 강릉에서는 최심적설(눈이 내려 쌓인 기간에 관계없이 관측시에 실제 지면에 쌓여 있는 눈의 깊이) 110.0 cm와 신적설 합계(최심신적설의 합) 194.8 cm를 기록하였다. 강릉의 연속 신적설 일수(9일)은 103년 만의 최장으로 기록

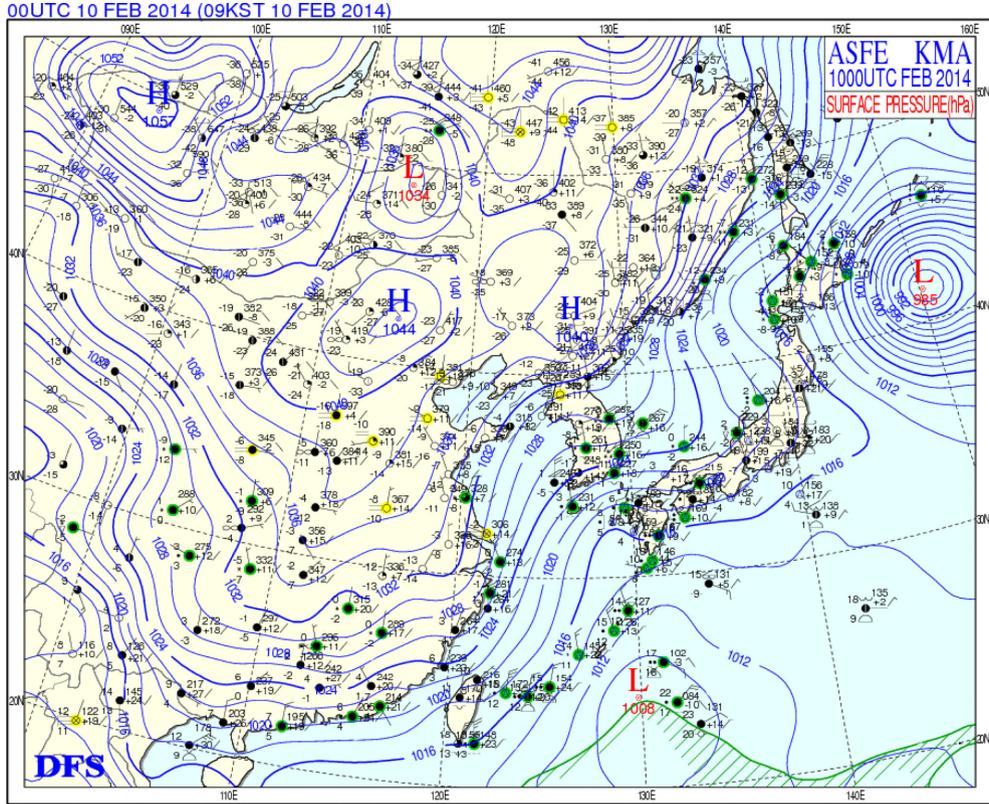


Fig. 4. Surface weather chart 0900 KST 10 February 2014.

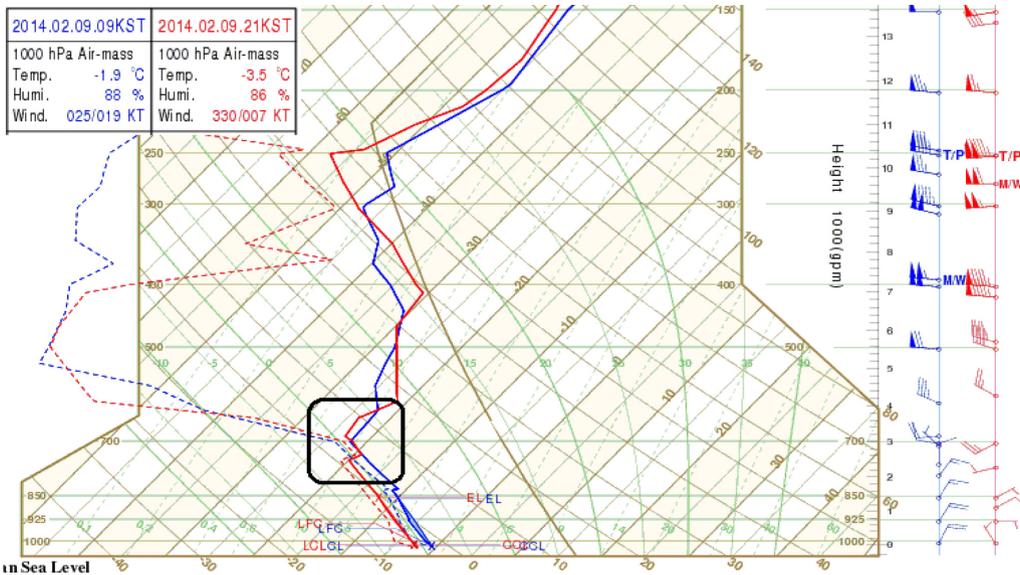


Fig. 5. Skew T-log P chart from Sokcho radiosonde data at 2100 KST 9 February 2014 (Red line) and 0900 KST 9 February 2014 (Blue line). Black Solid line shows the vertical domain in which vertical temperature gradient changes abruptly.

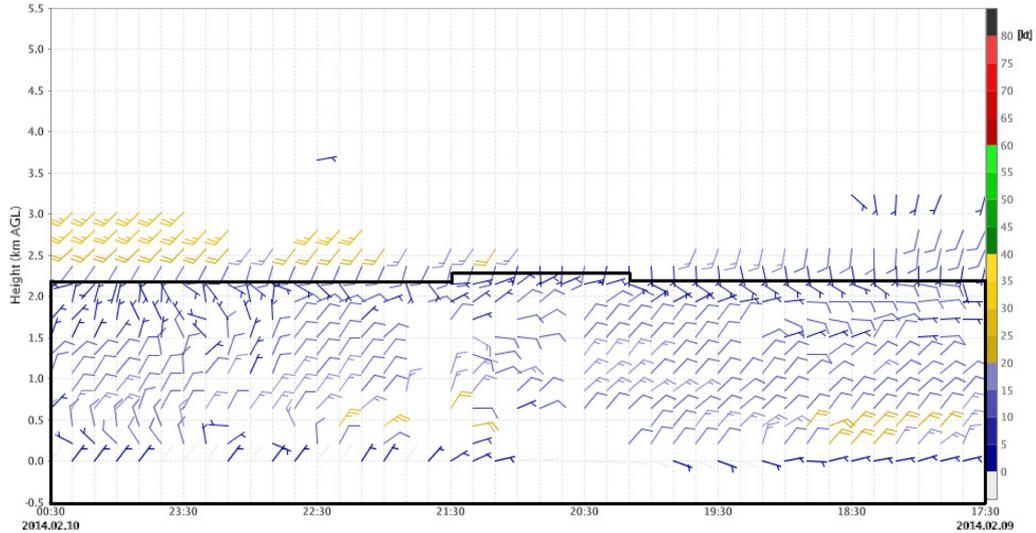


Fig. 6. Time-height cross section of horizontal wind observed by wind profiler at North-Gangneung for the period of 1730 KST 9~0030 KST 10 February 2014. Black Solid line is drawn for the purpose of indicating the vertical domain associated with easterlies.

되었다. 강원지방기상청은 이러한 장기간의 대설 사례가 블로킹 현상과 관련되어 있다고 보고하였다(강원지방기상청, 2014). 즉 배링해 부근에서 형성된 500 hPa 고도의 고기압에 막혀 대기 하층에서는 북쪽의 차고 건조한 고기압과 남쪽의 온난 다습한 저기압이 동해에서 서로 충돌하는 기압 배치가 장기간 유지되었다(Fig. 3). 따라서 영동 지역에서는 대기 하층에 차고 습윤한 동풍이 장기간 지속적으로 나타나고 이와 관련된 낮은 층운형 구름이 관측되었다(Fig. 4). Figure 5와 6은 기상청에서 제공되는 자료로 2014년 2월 9일 2100 KST의 속초 라디오존데 관측을 통해 얻어진 단열선도와 그 전후 시간대의 북강릉 수직층 풍장비를 통해 얻어진 수평바람의 연직시계열분포이다. 이 때 영동 지역에서는 강수를 동반한 낮은 층운형 구름이 장시간 관측되었다. 속초 라디오존데 관측 자료에는 고도 700 hPa 위에서 역전층 혹은 대기 안정층이 나타났고 그 하층은 포화되어 있었다. 이 때 총 강수량은 6.1 mm였다. 북강릉 수직층풍 자료에는 고도 2~2.5 km까지 10~20 kts 북동풍이 균일하게 관측되었다.

이 사례에서 강수량은 대부분 영동 지역을 중심으로 동해안에 분포하였다. Figure 7는 동해안 지역 4개 관측 지점(속초, 북강릉, 대관령, 동해) 강수량의 204 시간 시계열 자료이다. 여기서 북강릉과 강릉지점의 편차가 크지 않고, 현재 북강릉이 강릉지역을 대표하기 때문에 강릉지점의 강수량은 제외하였다. 사례 기간에서 최대 시간 강수량은 7.5 mm로 2월 9일 1900

KST에 북강릉에서 발생하였다. 5 mm 이상의 시간 강수량은 북강릉과 강릉 지점에서 4일(2월 7, 9, 10, 13 일) 동안 총 7시간에서 나타났다. 같은 날짜에 영동 지역에는 대체로 1~4 mm 시간 강수량이 상대적으로 여러 시간대에 걸쳐 분포하였다. 이 기간에 영동지역에는 대설 경보(일신적설 20 cm 이상)에 해당하는 강설이 있었다. 또한 산악 지역과 해안 지역을 각각 대표하는 대관령과 북강릉 지점의 강수량을 비교해 보면 2월 8일을 제외하고 대부분의 시간대에서 대관령보다 북강릉에서 더 많은 강수량이 관측되었다. 즉 산악지역보다 해안지역이 강수가 더 많이 관측되었다는 것을 의미한다.

2014년 2월 6~14일 영동 대설과 관련된 구름의 특징을 조사하기 위하여 위성의 적외 채널 자료에서 유도한 휘도온도를 분석하였다. 이 분석에서 영동과 동해안 지역을 대표하기 위하여 영동 지역을 동서 방향으로 가로지르는 선(A-B 선; 위도 약 37.7°와 경도 128.05~130.5°)을 선택하였다(Fig. 1). A-B 선은 서쪽으로는 대관령 지점을 그리고 동쪽으로는 동해 부이 지점을 포함한다. 그리고 이 선 주변에서 관측한 휘도온도의 시계열 자료를 분석하였다.

Figure 8은 위의 영동 대설 사례 기간 동안 동서 방향 휘도온도의 시계열 자료이다. 이 그림의 y축은 서경 128.05°인 산악 지역부터 130.5° 동해 바다까지를 포함한다. 휘도온도는 7일 이른 새벽과 늦은 밤에는 -30~-40°C 그리고 13일 오후에 -20~-30°C로 중·상층운이 A-B 선상에서 서쪽부터 영동 앞 바다까지

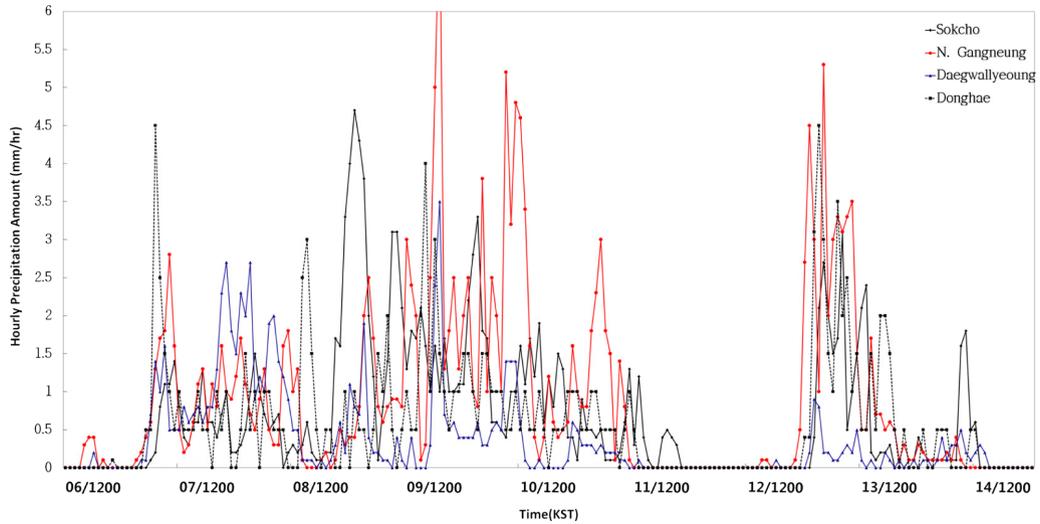


Fig. 7. Time series of hourly precipitation (mm hr^{-1}) at Sokcho, N. Gangneung, Daegwallyeong, Donghae from 1200 KST 6 February to 2400 KST 14 February 2014.

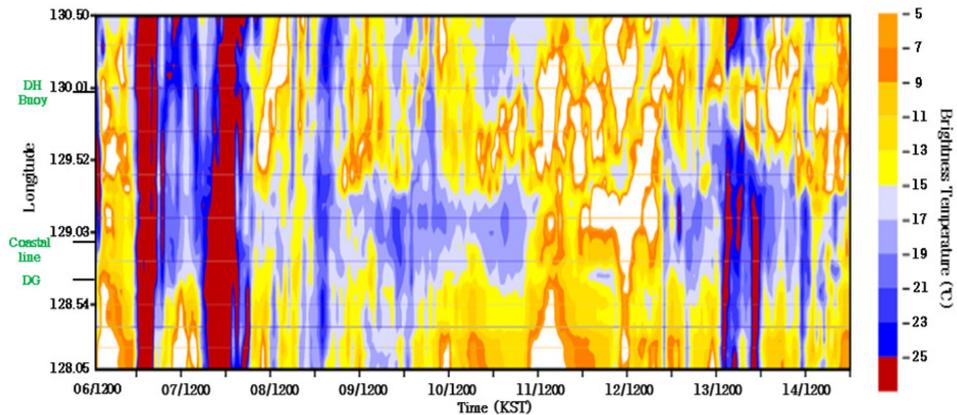


Fig. 8. Time series of satellite-derived brightness temperature ($^{\circ}\text{C}$) on the A-B line in Fig. 1. from 1200 KST 6 February to 2400 KST 14 February 2014.

균일하게 분포하고 있다. 이것을 한반도 전체 구름 영상에서 분석해 보면 이 구름은 국지적인 구름이 아니라 서에서 동으로 이동하는 종관규모 구름인 것으로 판단된다. 반면 9, 10, 11일의 경우 영동 앞 바다에서 대관령 지역의 휘도온도가 약 $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ 감소하여 $-15\sim -25^{\circ}\text{C}$ 인 하층운이 분포하고 특히 해안선 부근에서 최저값을 보인다. 따라서 이러한 구름은 영동 해안 부근에서 하층수렴에 기인하여 발달하는 국지적인 하층운으로 볼 수 있다. 종관규모 구름과 강수와의 관계를 조사하기 위하여 중·상층운이 영동 지역을 통과하는 전후 시간대의 강수 분포를 조사해 보았다. 7일 이른 새벽의 경우 영서 지역은 무강수 그리고 영동

지역에 무강수 혹은 매우 약한 강수가 관측되었기 때문에 이 구름은 강수와 무관하다고 판단하였다. 그리고 7일 늦은 밤의 경우 영서 지역에 약한 강수가 나타나고 대관령의 강수량이 북강릉 보다 많다는 점으로 미루어 보아 대관령 지역에서 하층운과 상층운 사이에 seed-feed 과정이 나타난 것으로 유추할 수 있다. 그러나 13일 오후의 경우 영서 지역에 무강수가 나타나고 구름의 휘도온도도 $-20\sim -30^{\circ}\text{C}$ 로 비교적 높아 이 구름은 영서에서 영동으로 이동하는 하층운과 관련되어 있다. 따라서 이 연구에서는 2014년 2월 6~14일 영동 대설이 대부분 휘도온도 $-15\sim -25^{\circ}\text{C}$ 의 하층운과 밀접하게 관련되어 있다고 결론을 내린다.

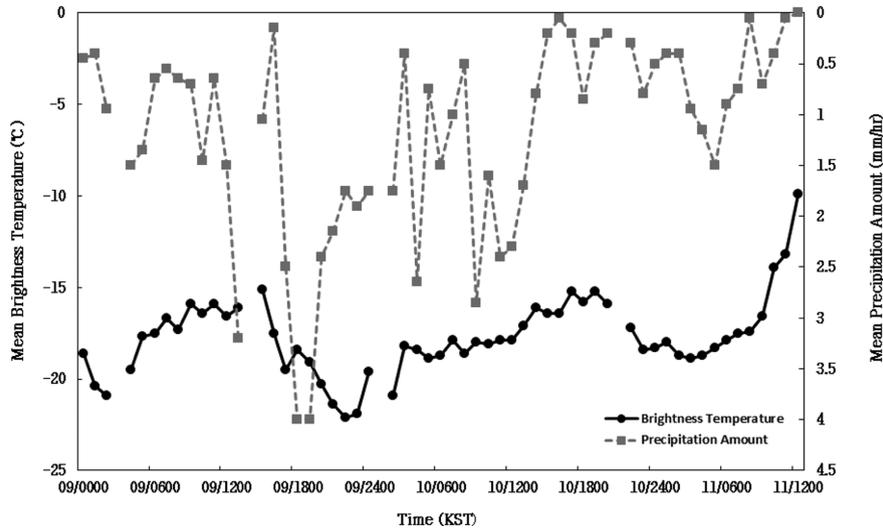


Fig. 9. Time series of mean brightness temperature ($^{\circ}\text{C}$) and mean precipitation amount (mm hr^{-1}) from 0000 KST 9 February to 1200 KST 11 February 2014, in which low-level stratiform clouds are detected.

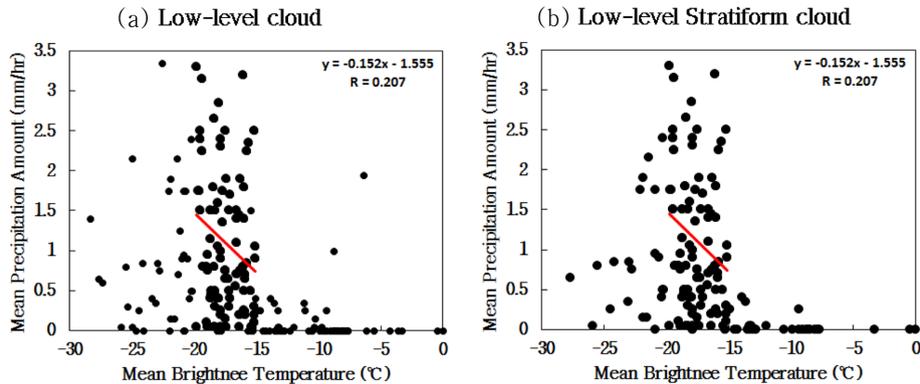


Fig. 10. Scatter plots of mean brightness temperature ($^{\circ}\text{C}$) vs mean precipitation amount (mm hr^{-1}) for (a) low-level clouds and (b) low-level stratiform clouds for the period of 1200 KST 6–2400 KST 14 February 2014.

2014년 2월 6~14일 영동 대설과 관련된 구름이 낮은 층운형 구름인지를 판별하기 위하여 다음의 분석 과정을 적용하였다. 먼저 Fig. 2에서 영동 지역의 중앙에 위치하며 서로 인접한 북강릉과 강릉 관측 지점을 포함하는 약 $1,000 \text{ km}^2$ (37개의 위성화소)의 면적을 연구 지역으로 선정하였다. 그리고 이 지역에 대하여 한 시간 간격으로 위성 휘도온도의 평균값과 표준편차를 계산하였다. Figure 8의 2014년 2월 10일 1133 KST에서 평균 휘도온도는 -17.9°C 이고 표준편차는 0.74이다. 만약 평균 휘도온도가 -30°C 이상이면 하층운으로 그리고 휘도온도의 표준편차가 2 이하이면 운정의 높이가 수평적으로 균질한 층운형 구름으로

각각 정의하였다. 이 두 가지 조건을 모두 만족하는 구름이 낮은 층운형 구름이다. 예를 들어 2014년 2월 10일 1133 KST 구름의 경우 평균 휘도온도는 위의 조건을 만족하므로 이 연구에서 낮은 층운형 구름으로 정의한다.

Figure 9은 낮은 층운형 구름이 약 60시간 동안 연속적으로 관측된 2월 9일과 11일의 평균 휘도온도와 평균 강수량의 시계열이다. 휘도온도는 앞서 선정한 연구 지역에 대해 계산한 평균 휘도온도이고 평균 강수량은 북강릉과 강릉 시간 강수량의 평균값이다. 평균 휘도온도는 대부분 -15 와 -20°C 사이에 분포하고 평균 강수량은 0.5와 2.5 mm 사이에 분포하였다. 이

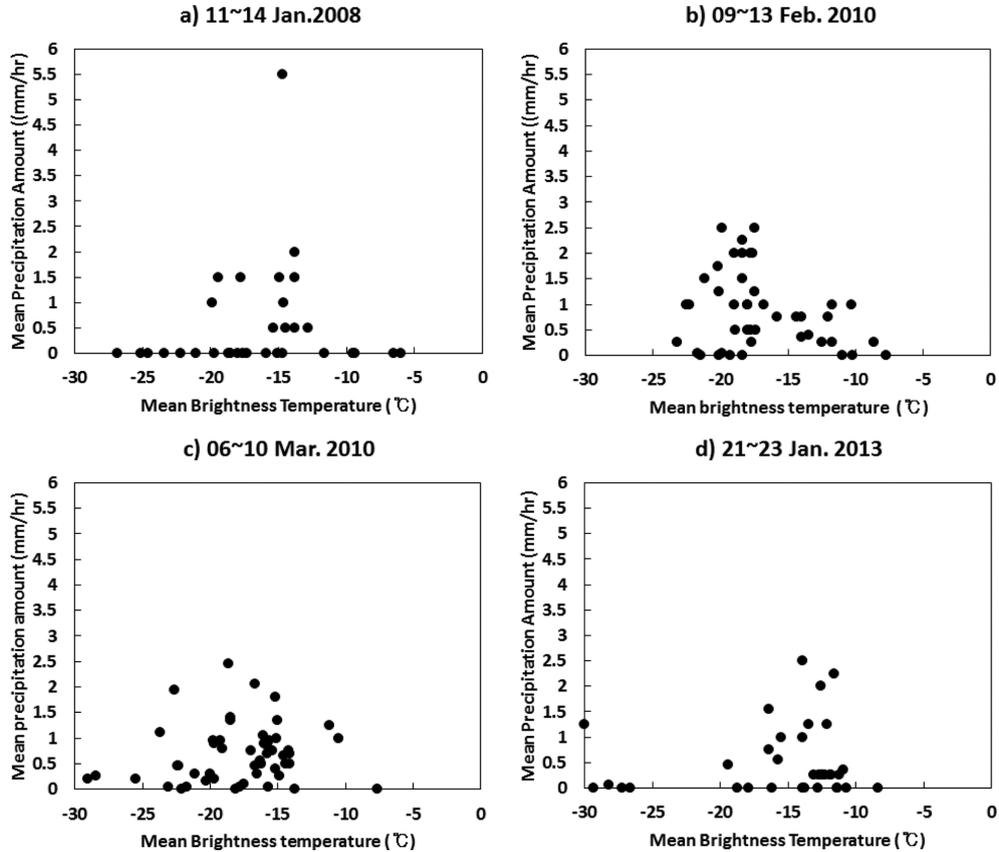


Fig. 11. Same as Fig. 10. except for low-level stratiform clouds in the heavy snowfall events of a) 11~14 January 2008, b) 9~13 February 2010, c) 6~10 March 2010, and d) 21~23 January 2013.

때 속초 라디오존데의 총 가강수량은 강수량이 상대적으로 큰 9일에 6.7 mm에서 강수량이 작은 11일에는 4.6 mm로 감소하였다. 그리고 역전층 혹은 대기 안정층이 나타나는 고도도 9일부터 점차 낮아졌다.

Figure 10은 낮은 하층운으로 분류된 구름에 대해서 휘도온도와 강수량의 관계를 보였다. 하층운의 경우 평균 휘도온도가 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 일 때 휘도온도가 낮아짐에 따라 평균 강수량이 증가함을 알 수 있으나 -20°C 이하에서는 이러한 관계가 분명하지 않았다. 반면 낮은 층운형 구름의 경우 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 에서 휘도온도의 감소에 따른 강수량의 증가는 더욱 뚜렷해지고 -20°C 이하에서는 층운형으로 분류된 구름세포가 감소하였다. 위성에서 추정된 휘도온도를 운정온도라 가정하면 낮은 층운형 구름과 관련된 강설에서 운정온도가 -15°C 이상일 때 거의 무강수이고 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 일 때 시간 강수량은 0.5에서 3.5 mm hr^{-1} 로 급격히 증가하였다.

4. 대설과 소설에서 휘도온도와 강수량 관계

낮은 층운형 구름에서 휘도온도(운정온도)와 강수량 사이의 관계를 보다 다양한 사례에서 조사하기 위하여 위의 방법으로 Table 1의 4개 대설 사례에 각각 적용하였다. 이들 4개의 사례는 위성의 적외 휘도온도 분석에서 모두 낮은 층운형 구름과 관련된 것으로 나타났다. 앞서 언급한 것과 같이 이들 사례에서 사례 기간의 50% 이상에서 하층운이 탐지되었고 이 하층운 가운데 50% 이상이 층운형 구름으로 판별되었다(휘도온도의 표준편차가 2이하).

Figure 11은 4개 대설 사례에 대한 운정온도와 강수량의 산포도를 보여준다. 여기서 뚜렷한 특징은 운정온도가 $-15 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 있을 때 시간 강수량이 일반적으로 크다는 것이다. 그러나 2013년 1월 21~23일 대설 사례에서는 21일 오전에 운정온도가 -15°C 이상인 경우에도 $1 \sim 3 \text{ mm hr}^{-1}$ 의 강수가 관측되었다. 이 때 속초, 북강릉, 강릉에서는 일강수량은

Table 3. Same as Table 2 except for the light snowfall events related with the low-level stratiform cloud.

Case No.	East or North wind altitude /intensity	Sea-Air Temperature Difference (Sea and air temperature)	Stable layer bottom altitude (hPa)	Altitude of drop in temp./ Max. value & Altitude of drop in temp (hPa)/ (hPa) & (°C 12 hr ⁻¹)	Total Precipitation Water (mm)
Case 1 16 Jan. 2012	0.75~1.5 km /5 kts	No data	925	-	9.2
Case 2 23 Feb. 2012	1.25~1.5 km /5 kts	6.4°C (10°C, 3.6°C)	830	1000~800 830@-3	8.3
Case 3 10 Mar. 2012	0.5~1.5 km /5 kts	5.6°C (9.8°C, 4.2°C)	-	-	8.1
Case 4 14 Jan. 2013	0.5~1.5 km /5~10 kts	10.9°C (12.9°C, 2°C)	845	1000~840 1000@-3	5.5

약 20 mm였으나 일신적설은 1.5 cm 이하로 강우가 주로 나타났다. 그리고 2010년 2월 9~13일 대설에서도 약 -15°C 이상인 경우에 0.5~1.0 mm hr⁻¹의 강우가 관측되었다. 이 자료는 2010년 2월 9~13일 대설 사례의 전반부에서 관측된 것으로 이때 강풍의 기온은 2~8°C로 높았고 대부분 강우가 관측되었다.

결론적으로 낮은 층운형 구름과 관련된 영동 대설 사례에서 강설이 주로 관측된 경우 강수량은 운정온도와 밀접하게 관련되어 있었다. 이 경우 강수는 대부분 운정온도가 약 -15°C 이하에서 나타났고 운정온도가 -15~-25°C의 범위에 있을 때 시간 강수량은 운정온도의 감소에 따라 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 강수, 특히 눈의 생성에 구름의 미세물리가 중요한 역할을 한다는 연구 결과 (Auer and White, 1982; Roebber et al., 2003)와 연관시켜 이해할 수 있을 것이다. 위성의 휘도온도를 운정온도라고 가정하면 그것은 일반적으로 구름 내의 최저 기온이 될 것이다. 따라서 운정온도가 -15~-20°C 일 때 급격한 강수량의 증가는 다음의 효과로 설명할 수 있을 것이다: 1) 나뭇가지모양 얼음 결정의 성장률이 약 -15°C에서 최대이고(Rogers and Yau, 1989; Fukuta and Takahashi, 1999), 2) 빙정핵이 -7~-16°C 사이에서 활성화되고(Rogers and Yau, 1989), 그리고 3) 얼음증식 과정이 -3~-8°C에서 나타나는(Hallett and Mossop, 1974; Mossop, 1985) 영향이 결합되어 나타나는 것 같다. 그리고 이러한 강설은 강한 습윤 대류나 강한 상승 운동과 관련되어 있는 것이 아니라 대기 하층의 불안정(반면 대기 중층은 안정)과 해안부근에 하층수렴에 기인한다고 볼 수 있다.

신적설이 작은 소설 사례 혹은 약한 강수 사례에서 운정온도와 강수량의 관계를 조사하기 위하여 낮은 층운형 구름과 관련된 영동 강수 사례를 조사하였다.

낮은 층운형 구름은 앞에서 사용한 방법으로 탐지하였고 소설 사례 혹은 약한 강수 사례는 사례 신적설과 강수량이 각각 3 cm와 3 mm 이하로 총 4개의 사례(2012년 1월 16~17일 사례, 2012년 2월 23~24일 사례, 2012년 3월 10일 사례, 그리고 2013년 1월 14~15일 사례)를 선정하였다. 이 4개 사례 가운데 2013년 1월 14~15일 사례에서만 신적설이 관측되었고 나머지 사례에서는 약한 강수만 관측되었다.

소설 사례의 역학적 그리고 열역학적 특징을 Table 3에 제시하였다. 소설 사례는 앞서 분석한 층운형 대설 사례와 마찬가지로 동풍 계열의 바람과 관계가 있음을 확인하였다. 그러나 동풍계열의 바람이 나타난 고도와 풍속은 각각 1.5 km 이하와 10 kts 이하로 대설 사례 보다 그 고도가 낮고, 풍속이 약했다. 속초 라디오존데 관측 자료를 분석한 결과 2사례에서 하층에 한기이류(-3°C 12 hr⁻¹)가 나타났고 이는 대설 사례의 한기이류(-3~-8°C 12 hr⁻¹)보다 약했다. 또한 역전층 하부의 고도는 830~925 hPa로 나타났고 해기차는 6.4~10.9°C였다. 이러한 결과를 층운형 대설 사례의 특징과 비교해보았을 때 동풍의 고도와 강도, 한기이류, 그리고 역전층의 고도가 모두 상대적으로 낮은 값을 알 수 있었다.

Figure 12에서 보면 영동 대설 사례와 마찬가지로 소설 혹은 약한 강수 사례에서도 낮은 층운형 구름에서는 휘도온도가 약 -15°C 이상일 때 대부분 무강수가 나타났다. 그러나 2013년 1월 14~15일 사례는 소설 사례임에도 불구하고 휘도온도가 약 -15°C 이하일 때 1 mm hr⁻¹ 이하의 강수가 관측되었다. 따라서 이러한 결과는 운정온도와 강수량의 관계가 강수량이 많고 적음에 관계없이 적용될 수 있음을 의미한다. 그러나 강수 사례에서 강설이 아니라 강우가 지배적인 경우에는 운정온도와 강수량 사이의 관계는 보다 주의해서 다루어질 필요가 있다.

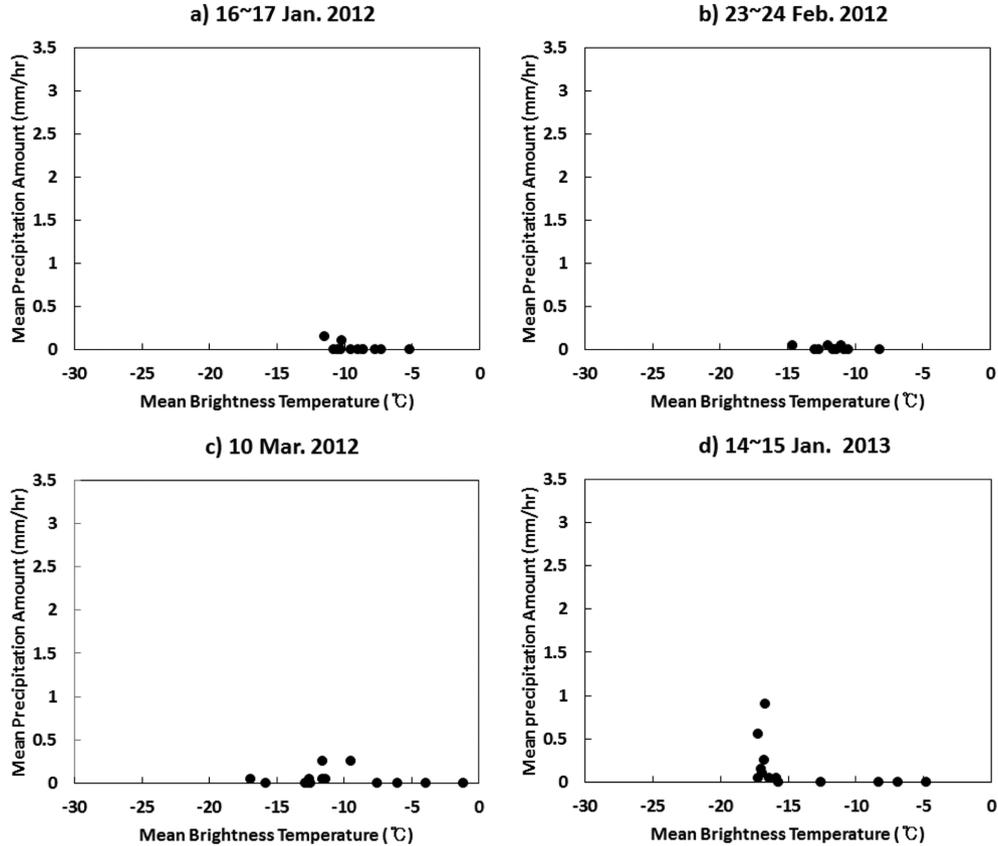


Fig. 12. Same as Fig. 10. except for the light snow or rain events of a) 16~17 January 2012, b) 23~24 February 2012, c) 10 March 2012, and d) 14~15 January 2013.

5. 결 론

2014년 2월 6일~14일 영동 대설은 강릉에서 최심 적설 110.0 cm와 신적설 합계 194.8 cm를 기록하였다. 강릉의 연속 신적설 일수(9일)는 103년 만의 최장으로 기록되었다. 위성 적외 휘도온도의 분석 결과에 의하면 이 대설은 휘도온도 $-15 \sim -25^{\circ}\text{C}$ 의 하층운과 밀접하게 관련되어 있었다. 또한 이 하층운은 영동 해안 부근에서 휘도온도가 $3 \sim 6^{\circ}\text{C}$ 의 감소를 보이며 대체로 층운형 구름으로 분류할 수 있었다. 이 대설 사례에서 위성의 휘도온도와 강수량 사이에 밀접한 관련성이 나타났다. 구름의 휘도온도, 즉 운정온도가 약 -15°C 이상에서는 무강수 혹은 약한 강수가 나타났고, 반면 운정온도가 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 의 범위에 있을 때 시간 강수량은 운정온도의 감소에 따라 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이 경우 시간 강수량은 대부분 4 mm hr^{-1} 이하에 분포하였다. 이러한 결과는 낮은 층운형 구름과 관련된 다른 4개의 영동 대설 사례(강설이 주로 관측된 경우)에서도 확인되었다. 또한 낮은 층운형

구름과 관련된 소설 사례와 약한 강수 사례에서도 운정온도는 대부분 위와 같이 -15°C 이상이었다.

위의 결과는 강수, 특히 눈의 생성에 있어 구름의 미세물리 과정과 연관시켜 이해할 수 있을 것이다. 운정온도가 $-15 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 범위에 분포할 때 운정온도에 따른 강수량의 급격한 변화는 다음의 효과로 설명할 수 있을 것이다; 1) 나뭇가지모양 얼음 결정의 성장률이 약 -15°C 에서 최대이고(Rogers and Yau, 1989; Fukuta and Takahashi, 1999), 2) 빙정핵이 $-7 \sim -16^{\circ}\text{C}$ 사이에서 활성화되고(Rogers and Yau, 1989), 그리고 3) 얼음증식 과정이 $-3 \sim -8^{\circ}\text{C}$ 에서 나타났다(Hallett and Mossop, 1974; Mossop, 1985). 그리고 이러한 강설은 대기 하층의 불안정(반면 대기 중층은 안정)과 해안 부근에서의 수렴에 기인한다고 볼 수 있다.

낮은 층운형 구름과 관련된 대설 사례의 역학적 그리고 열역학적 특징은 다음과 같다. 지상기압패턴을 이용한 분류에 의하면 이들 사례는 대부분 시베리아 고기압의 확장(cP 확장)과 관련되어있다. 상층 바람에서 풍속이 대부분 $10 \sim 20 \text{ kts}$ 로 비교적 약하고 동풍은

1.5~2.5 km 고도까지 나타났다. 850~700 hPa의 역전층으로부터 지상까지 전체적으로 기온 하강이 나타나며 일부 고도에서는 12시간 동안 3~8°C의 뚜렷한 기온 하강이 나타났다. 동해 부이의 해기차는 7~12°C로 큰 값을 보였다. 따라서 낮은 층운형 구름과 관련된 영동 대설은 동해상 대기 하층의 한기 이류와 이로 인한 대기 불안정으로 하층운이 생성되고 또한 영동 해안 부근에서 하층 수렴에 의해 이 구름의 운정온도가 낮아짐에 따라 발생하는 4 mm hr⁻¹ 이하의 강수이다.

감사의 글

본 연구에 사용된 자료는 기상청으로부터 제공받았고, 이 논문은 국립기상연구소 주요사업 ‘재해기상연구센터 설립 · 운영(사업관리번호: NIMR-2012-B-7)’의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Auer, A. H., and J. M. White, 1982: The combined role of kinematics, thermodynamics, and cloud physics associated with heavy snowfall episodes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 500-507.
- Cho, K.-H., and T.-Y. Kwon, 2012: Orographic and ocean effects associated with a heavy snowfall event over Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 57-71.
- _____, Y.-J. Cho, and T.-Y. Kwon, 2004: Characteristics of air mass related with precipitation events in Yeongdong region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 381-393.
- Cho, Y.-J., and T.-Y. Kwon, 2014: Cloud-cell tracking analysis using satellite image of extreme heavy snowfall in the Yeongdong region. *Korean J. Remote Sens.*, **30**, 83-107.
- Fukuta, N., and T. Takahashi, 1999: The growth of atmospheric ice crystals: A summary of findings in vertical supercooled cloud tunnel studies. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 1963-1979.
- Gangwon Regional Meteorological administration, 2014: *Weather*. **51**, 8-9.
- Hallett, J., and S. C. Mossop, 1974: Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, **249**, 26-28.
- Hanna, J. W., D. M. Schultz, and A. R. Irving, 2008: Cloud-top temperatures for precipitating winter clouds. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 351-359.
- Kim, J.-H., and I.-U. Chung, 2006: Study on mechanisms and orographic effect for the springtime downslope windstorm over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **16**, 67-83.
- Kwon, T.-Y., Y.-J. Cho, D.-H. Seo, M.-G. Choi, and S.-O. Han, 2014: Synoptic Environment associated with extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **24**, 343-364.
- Lee, J.-H., 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.
- Lee, J. G., and Y. J. Kim, 2008: A numerical simulation study using WRF of a heavy snowfall event in the Yeongdong coastal area in relation to the northeasterly. *Atmosphere*, **18**, 339-354.
- Mossop, S., 1985: The origin and concentration of ice crystals in clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **66**, 264-273.
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C. 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**, 541-551.
- Roebber, P. J., S. L. Bruening, D. M. Schultz, and J. V. Cortinas Jr., 2003: Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density. *Wea. Forecasting*, **18**, 264-287.
- Rogers, R. R., and M. K. Yau, 1989: *A Short Course in Cloud Physics*. Pergamon, 293 pp.