

## ICE-POP 2018 기간 드롭존데 자료를 활용한 강설 구름의 열역학적 특성

정승필\* · 이철규 · 김지형 · 양호진 · 윤종환 · 고희종 · 홍성은 · 김승범

국립기상과학원 관측예보연구과

(접수일: 2019년 9월 30일, 수정일: 2020년 2월 10일, 게재확정일: 2020년 2월 25일)

### Thermodynamic Characteristics of Snowfall Clouds using Dropsonde Data During ICE-POP 2018

Sueng-Pil Jung\*, Chulkyu Lee, Ji-Hyoung Kim, Hyo Jin Yang, Jong Hwan Yun,  
Hee Jong Ko, Seong-Eun Hong, and Seung-Bum Kim

Observation and Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 30 September 2019; revised 10 February 2020; accepted 25 February 2020)

**Abstract** The aircraft observation campaign was performed to investigate thermodynamic conditions of snowfall cloud over the East Sea of Korean peninsula from 2 February to 16 March 2018. During this period, four snowfall events occurred in the Yeongdong region and three cases were analyzed using dropsonde data. Snowfall cases were associated with the passage of southern low-pressure (maritime warm air mass) and expansion of northern high-pressure (continental polar air mass). Case 1 and Case 2a were related to low-pressure systems, and Case 2b and Case 3 were connected with high-pressure systems, respectively. And their thermodynamic properties and horizontal distribution of snowfall cloud were differed according to the influence of the synoptic condition. In Case 1 and Case 2a, atmospheric layers between sea surface and 350 hPa contained moisture more than 15 mm of TPW with multiple inversion layers detected by dropsonde data, while the vertical atmosphere of Case 2b and Case 3 were dry as TPW 5 mm or less with a single inversion layer around 750–850 hPa. However, the vertical distributions of equivalent potential temperature ( $\theta_e$ ) were similar as moist-adiabatically neutral condition regardless of the case. But, their values below 900 hPa were about 10 K higher in Case 1 and Case 2a (285–290 K) than in Case 2b and Case 3 (275–280 K). The difference in these values is related to the characteristics of the incoming air mass and the location of the snowfall cloud.

**Key words:** Aircraft, dropsonde, snowfall, Yeongdong, thermodynamic characteristics

## 1. 서 론

태백산맥 동쪽(영동지역)의 겨울철 강설은 주로 중 규모 기압계에 의해 발생하는 동해상 기류변화와 관련이 있다(Jung et al., 2012; Kwon et al., 2014; Ko

et al., 2016; Song et al., 2016). 한반도 남쪽으로 저 기압이 통과하거나 북쪽의 고기압이 동해상으로 확장하면서 동해상의 기류는 서풍에서 동풍 또는 북풍으로 전향하게 된다. 동쪽의 해상으로부터 유입되어 영동지역으로 향하는 기류는 상대적으로 따뜻한 바다를 통과하면서 열에너지 및 수증기의 공급이 이루어진다(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014). 대기-해양 상호 작용에 의해 기류는 열역학적으로 중립 또는 불안정한 상태가 된다. 해양으로부터 유입된 기류는 태백산맥에 가로막혀 수렴 및 상승하여 운정온도  $-15\sim-20^\circ\text{C}$

\*Corresponding Author: Sueng-Pil Jung, Observation and Forecast Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo, Jeju-do 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6623, Fax: +82-64-738-6513  
E-mail: suengpil@korea.kr

의 낮은 증운형 구름으로 발달한다. 특히, 12시간 이상 지속되며 강설을 내리는 특징을 가지기 때문에 영동지역 대설피해의 주된 원인이다(Lee et al., 2012; Kwon et al., 2014, 2015).

낮은 증운형 구름에 의해 발생하는 영동지역 강설을 이해하기 위해서, 중관 기압배치, 대기-해양 상호작용, 그리고 태백산맥에 의한 지형효과에 관하여 다양한 연구가 수행되었다. 이 중 중관 기압배치에 대한 연구는 1990년대부터 시작되어 최근까지 수행되고 있다. Seo and Jhun (1991)은 한반도 남쪽의 저기압과 관련된 동풍기류와 시베리아 고기압과 관련된 차고 건조한 공기가 동해안에서 수렴한다고 하였고, Lee et al. (2011)은 시베리아 고기압의 궤적을 분석하여 기압배치에 따라서 수렴영역(해안 또는 산악)이 다르게 나타남을 확인하였다. Kwon et al. (2014)는 50 cm 이상의 강설사례에서 영동지역이 고기압 전면 또는 저기압 후면에 위치하고, 동해 남부 또는 대한해협 부근에서 해수면에서 500 hPa까지 절대소용돌이가 증가한다고 하였다. 최근에 수행된 연구들은 중관 기압배치의 유형을 분류하여 차이점을 보였다. Ko et al. (2016)은 한반도 남쪽 저기압의 상태(관통, 남쪽통과, 정체)에 따라서 영동지역으로 유입되는 가강수량(Total Precipitable Water, TPW)과 강수분포가 차이 있음을 보였다. Song et al. (2016)은 20년간 발생한 89개 강설 사례를 통해 영동지역의 강설패턴을 “시베리아 고기압 확장형”, “시베리아 고기압 확장형 + 기압골형”, “남쪽 기압골형”, 그리고 “동해 기압골형” 등으로 분류하였다.

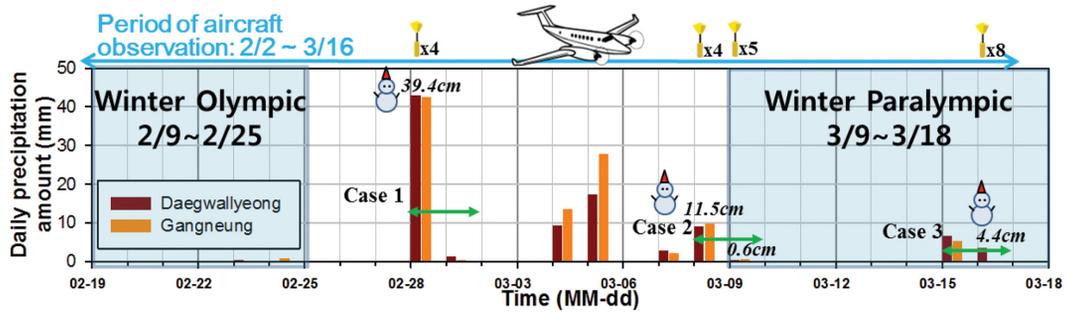
대기-해양 상호작용과 산악에 의한 지형효과 연구는 주로 수치모의 재현실험과 재분석자료의 분석을 통해 수행되었다. Ahn and Cho (1998)는 해수면 온도에 대한 민감도 실험을 수행하여, 해수면 온도가 높을수록 기온과 비습이 증가하여 강설이 증가함을 보였고, Lee and Kim (2008a)은 수치모의 재현실험을 통해 동해 먼 바다의 차가운 공기가 동해상을 지나면서 온난 습윤한 바람으로 변질된다고 하였다. Jung et al. (2012)는 해수면의 민감도 실험을 통해 해수면 온도가 증가할수록 강설의 에너지원으로 작용하는 현열 및 잠열 플럭스의 강도가 증가하여 강설이 증가한다고 하였다. 재분석자료를 활용한 연구(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014)에서는 50 cm 이상 강설을 기록한 사례에서 해수면 온도와 대기 온도의 차이(해기차: Air-Sea Temperature difference,  $T_{SST-850}$ )가 10 K 이상으로 증가함을 확인하였다. 그리고 해수면에서 2 km까지 습윤단열적으로 증립 또는 불안정한 대기층이 형성됨을 보였다. 이는 상대적으로 따뜻한 해수면 위로 차가운 공기가 유입되면, 열과 수증기가 해양에서 대기로 공급되어 강설을 발생시키기에 용이하기 때문이다

(Anderson and Nilson, 1990; Seo and Jhun, 1991; Ahn and Cho, 1998).

산악효과에 관한 연구인 Lee and Lee (1994)는 2차원 구름-역학 모델을 활용하여 동해상을 통과하는 바람의 풍향과 풍속에 대한 민감도 실험을 수행하였다. 북동풍보다 남풍이 영동해안으로 유입될 때 강설이 증가하고, 동해안의 기류가 해안에 수직일 때 강수가 빠르게 발달함을 보였다. 특히, 동일한 풍향에서 풍속이 감소하면 강설이 감소하였는데 이는 경사면에서 상승류의 강도와 대기의 내륙수송이 약해지기 때문이라고 하였다. Lee and Kim (2008b)은 태백산맥이 존재하는 경우가 존재하지 않을 경우보다 수렴역의 크기가 5배 가량 크고, 지형에 의한 강제 상승효과로 강수가 집중됨을 확인하였다. Lee et al. (2011)은 수치모의 재현실험을 통해 궤적분석을 수행하여, 기류가 유입되는 경로와 강도에 따라서 태백산맥에 가로막혀 해안지역에 강설이 집중되는 해안형과 내륙으로 진입하여 태백산맥에도 강설을 내리는 산악형으로 구분됨을 보였다. 즉, 태백산맥에 의한 블로킹 효과(blocking effect)에 의해 해안으로부터 유입된 기류가 수렴하고, 강제 상승하여 강설 구름으로 발달한다.

영동지역 강설에 대한 연구들(중관 기압배치, 대기-해양 상호작용, 그리고 태백산맥에 의한 지형효과)은 공통적으로 동해상에서 기류의 특성이 변질됨을 언급하였다. 그러나 동해상에서 기류의 특성을 분석할 수 있는 자료는 부이(Buoy) 자료뿐이고, 이 또한 해수면 부근에서만 관측이 이루어진다. 관측지점을 육상으로 넓히더라도 북강릉지점의 연직측풍장비(wind profiler)와 하루 2회(0900, 2100 KST) 수행되는 레윈존데(rawinsonde) 관측자료뿐이고, 이들 장비는 동해상에서 이미 변질되어 유입된 기류를 관측한다는 한계가 있다. 또한, 원격탐사 장비인 강릉 레이더는 고도각에 기인한 지형적 차폐와 강설입자(snowfall particle)보다는 강우입자(rainfall particle) 탐지에 용이한 S밴드 레이더이기 때문에 영동지역 강설 연구에 제한적으로 이용되었다(Jung et al., 2016). 이러한 어려움 때문에 영동강설현상의 대기-해양 상호작용 연구는 수치모의 실험과 재분석자료에 의존할 수밖에 없었고, 선행연구들에서는 동해상 관측망의 보완이 필요하다고 하였다(Lee et al., 2012; Jung et al., 2014, 2016; Nam et al., 2014).

영동강설현상의 관측망 한계를 해결하고, 평창 동계올림픽의 기상정보 제공을 위하여 동계올림픽기간 전후를 포함한 2017년 11월부터 2018년 4월까지 “2018 평창 동계올림픽과 패럴림픽에 대한 국제공동실험 캠페인(International Collaborative Experiments for Pyeongchang Olympic and Paralympic winter game 2018, ICE-POP 2018)”이 수행되었다. ICE-POP 2018



**Fig. 1.** Temporal variations of daily precipitation (vertical box) at two weather stations during aircraft observation period (refer to Table 1 for details). Here, daily snowfall amounts at daegwallyeong are denoted by italic character. The launched dropsonde amounts for snowfall cloud observation are denoted at the top of the time series.

캠페인에는 11개국, 26개 기관의 원격관측장비(레이더, 라이더 등), 레윈존데, 기상선박, 그리고 기상항공기를 활용한 3차원 입체관측이 평창주변과 동해바다에서 이루어졌다. 특히, 기상항공기는 드롭존데(dropsonde)를 활용하여 동해상 중하층대기의 관측을 수행하였으며, 이는 앞서 언급된 동해상 기류를 최초로 직접 관측한 자료이다. 본 연구에서는 ICE-POP 2018기간 기상항공기의 드롭존데 관측자료를 활용하여 4개 영동지역 강설사례의 열역학적 특성과 차이에 대하여 분석하였다. 본 연구의 2장 자료 및 연구방법에서는 기상항공기와 드롭존데, 그리고 연구방법에 대하여 기술하였다. 다음으로 3장에서는 4개 드롭존데 자료를 활용하여 4개 강설사례의 동해상 열역학적 특성과 대기-해양 상호작용에 대하여 분석하였다. 또한, 마지막으로 4장에서는 위의 연구결과에 대하여 요약하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

본 연구에서는 기상청 국립기상과학원의 기상항공기를 통해 수행한 ICE-POP 2018 집중관측 캠페인의 드롭존데 관측자료를 활용하였다. ICE-POP 2018 기간 중 기상항공기의 관측은 2018년 2월 2일부터 3월 16일까지 수행되었고, 이 기간 동안 총 4번의 강설사례가 발생하였다(Fig. 1). 두 번째 사례를 제외한 3개 강설사례에 대하여 4일 동안 드롭존데 관측을 수행하였다. 본 연구에서는 드롭존데 관측자료 외에도, 지상 관측소(속초, 대관령, 북강릉)의 레윈존데 자료도 분석에 활용하였다. 각 사례의 강설 특징을 이해하기 위하여 기상청의 종관일기도와 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)의 일 강수분포 자료를 이용하였다. 또한, 기상청의 천리안위성(Communication, Ocean, and Meteorological Satellite, COMS)의 가시영역 영상과 레이더 1.5 km 합성장

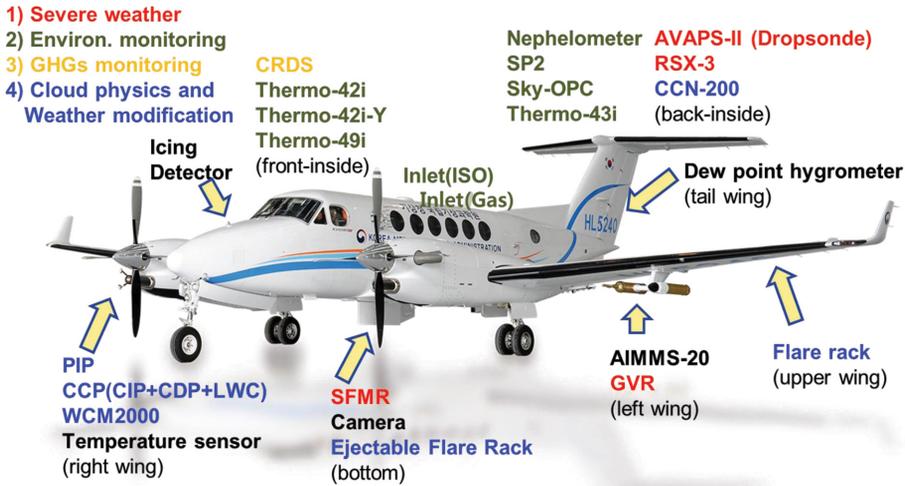
(Constant Altitude Plan Position Indicator at a height of 1.5 km, CAPPI 1.5)의 강우강도 영상을 활용하였다. 추가적으로, 기상항공기의 탑승자가 촬영한 영상자료도 분석에 이용하였다.

### 2.1 기상항공기 소개

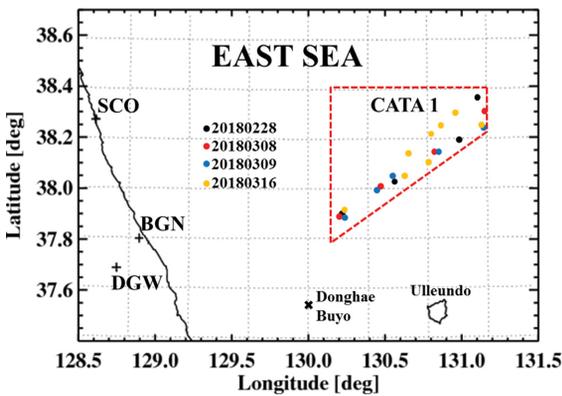
본 연구에 활용된 기상항공기는 미국 비치크래프트(Beechcraft)에서 제작된 King Air 350 HW로, 2017년 11월에 도입되었다(Fig. 2). 기상항공기의 엔진은 두 개의 프로펠러가 작동하는 Turbo-prop 방식의 소형비행기로서, 최대운항고도와 운항시간은 각각 약 10 km와 5.5시간이다. 기상항공기에는 4개의 주요임무 1) 위험기상 선행관측, 2) 환경기상 감시, 3) 온실가스 감시, 그리고 4) 구름물리관측 및 기상조절 실험을 수행하기 위하여 총 25종의 기상관측장비가 탑재되어 있다(NIMS, 2018; Yang et al., 2019). 이 중 후우, 태풍, 대설과 같은 위험기상현상의 선행관측을 수행하기 위하여, 드롭존데, 해상풍 측정용 마이크로파 라디오미터(Stepped frequency Microwave Radiometer, SFMR), 그리고 G밴드 수증기 라디오미터(G-band Water Vapor Radiometer, GVR)가 설치되어 있다. 위험기상 선행관측의 첫 번째 집중관측 캠페인으로 ICE-POP 2018에 참여하였고, 드롭존데를 활용한 동해상 강설 구름 관측을 수행하였다.

### 2.2 드롭존데

드롭존데에는 기압, 온도, 습도 센서들과 GPS (Global Positioning System)가 장착되어 있으며, 낙하된 고도에서 해수면까지의 연직 프로파일을 관측할 수 있다. 여기서 풍향과 풍속은 GPS 정보를 이용하여 계산된다. 본 연구에서 사용된 드롭존데(RD-94)와 수신기(Airborne Vertical Atmospheric Profiling System-II, AVAPS-II)는 미국 국립대기과학 연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 개발되어, 편



**Fig. 2.** Appearance of the atmospheric research aircraft and installed 25 scientific instruments. Here, four missions and their equipment are denoted by colors of character: 1) Preceding observation of severe weather (red), 2) air quality monitoring (green), 3) greenhouse gases monitoring (orange), and 4) cloud physics and weather modification.



**Fig. 3.** Dropsonde observation area (CATA 1, red dashed line) and daily dropsonde launched points (small shaded dots) for ICE-POP 2018. Three rawinsonde observation sites and one buyo point are denoted by small crosses and x.

란드 바이살라(Vaisala)에서 제작되었다(UCAR/NCAR, 1993; Hock and Franklin, 1999; NCAR, 2012). 동해 상에서의 드롭존데 관측은 민항기 훈련 공역(Civil Aircraft Training Areas 1, CATA 1)에서 수행되었고, 이는 지상의 레윈존데 관측이 이루어진 북강릉지점보다 동쪽으로 약 150~250 km 떨어진 영역이다(Fig. 3). 드롭존데 관측은 CATA 1 구역의 좌측하단에서부터 우측하단까지 북동진하며 수행되었다. 3월 16일에는 4회의 드롭존데 관측을 수행한 후, 다시 남서진하며 4회의 드롭존데 추가 관측을 수행하였다. 일자별로 2

월 28일, 3월 8일, 3월 9일, 그리고 3월 16일에 각각 4회, 4회, 5회, 그리고 8회로, 총 21회의 드롭존데 관측이 이루어졌다(Figs. 1, 3). 기상항공기는 약 9 km 상공을 비행하면서 드롭존데를 낙하하였고, 드롭존데는 약  $11 \text{ m s}^{-1}$ 로 하강하며, 약 13분 동안 연직 대기 상태를 관측하였다. 여기서, 드롭존데가 낙하 된 시간은 1400~1500 KST이고, 이들 관측자료를 1500 KST 관측으로 정의하였다.

관측된 드롭존데 자료는 NCAR에서 개발된 품질관리 프로그램(Atmospheric Sounding Processing Environment, ASPEN)을 통해 각 센서의 한계값과 이상값을 제거하였고, 관측자료의 연속성 검사 등 총 24단계의 품질 관리가 이루어졌다(Martin, 2009). 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 드롭존데 관측자료를 활용하여 영동강설과 관련된 동해상 구름의 열역학적 특성 및 대기해양 상호작용을 분석하였다. 또한 지상 레윈존데 관측자료와의 비교를 통해 육지와 해상간의 연직 대기특징의 차이를 분석하였다.

### 2.3 레윈존데

ICE-POP 2018기간의 강설 구름의 열역학적 특징과 지상과 해상간의 차이를 분석하기 위하여, 레윈존데 관측자료도 연구에 활용하였다. 레윈존데는 지상에서 비양되어 약  $5 \text{ m s}^{-1}$ 로 상승하며, 약 1시간~1시간 반 가량 연직기상정보를 관측한다. 기상청의 영동지역 레윈존데 정규관측은 북강릉지점에서 일 2회(0900와 2100 KST)가 이루어지지만, ICE-POP 2018 캠페인 기간에는 일 4회(0300, 0900, 1500, 그리고 2100 KST)

**Table 1.** Precipitation amounts and TPW for aircraft dropsonde observation cases at Daegwallyeong and Gangneung weather stations.

Case	Period	Daegwallyeong (37.67°N, 128.71°E)			Bukgangneung (37.80°N, 128.85°E)			Remarks
		Snowfall amount (cm)	Rainfall amount (mm)	TPW (mm)	Snowfall amount (cm)	Rainfall amount (mm)	TPW (mm)	
1	2018.02.28.	39.4	42.9	13.1	no data	42.6	17.3	Low pressure case
2a	2018.03.08.	11.5	9.0	9.4	3.5	9.8	12.8	Low pressure case
2b	2018.03.09.	0.6	0.5	6.0	no data	0.7	7.6	High pressure case
3	2018.03.16.	4.4	3.5	2.3	no data	0.2	6.4	High pressure case

수행되었다. 또한, 속초, 대관령, 먼은, 삼척에서 추가적인 레인존데 관측이 이루어졌고, 이 중 드롭존데의 낙하구역(CATA 1)과 유사한 위도에 있는 영동지역 3 지점(속초, 북강릉, 대관령)의 레인존데 관측자료를 연구에 활용하였다(Table 1 and Fig. 3). 이들 레인존데 관측지점에서는 프랑스 모뎀(MODEM)에서 제작된 M10 레인존데를 통해 연직기상관측이 이루어졌다. 본 연구에서는 기상항공기 드롭존데 관측자료와의 비교를 위하여 1500 KST 레인존데 관측자료를 주로 활용하였고, 3월 9일과 3월 16일 북강릉 1500 KST 자료가 존재하지 않아 0900 KST 자료를 이용하였다.

#### 2.4 연구방법

기상항공기 드롭존데 관측이 이루어진 3개의 사례 발생 원인을 이해하기 위하여 종관일기도, AWS 강수 분포, 원격탐사 관측자료(위성, 레이더)를 이용하여 각 사례의 종관유형 분류를 수행하였다. 종관유형 분류 기준은 선행연구(Ko et al., 2016; Song et al., 2016)를 참조 하였으며, 2번 사례의 경우 드롭존데 관측이 이루어진 3월 8일(Case 2a)과 9일(Case 2b)로 구분하여 분석하였다. 드롭존데와 레인존데 관측자료를 활용하여서는 강설 구름의 열역학적 특성을 조사하였다. 먼저 강설 구름이 발생하는 환경을 이해하기 위하여 드롭존데 관측자료를 통해 각 일별 단열선도를 생산하였다. 단열선도의 온도, 습도, 바람의 연직분포를 통해 역전층의 고도, 습윤영역, 그리고 TPW를 분석하였다. 또한, TPW과 역전층 고도는 선행연구(Jung et al., 2014; Ko et al., 2016)에서 조사된 영동강설사례의 기준치와 비교하였다. 다음으로, 기단의 특성을 잘 반영하는 상당온위(Equivalent Potential Temperature,  $\theta_e$ )의 연직분포를 조사하여 대기의 열적상태 및 안정도를 분석하였다. 그리고 대기-해양 상호작용을 이해하기 위하여 드롭존데 관측자료의 850 hPa 관측자료와 동해부이로 관측된 해수면 온도의 차이를 통해 해기차( $T_{SST-2m}$ ,  $T_{SST-850}$ )를 조사하였고, 선행연구(Lee et al., 2012; Nam et al., 2014; Song et al., 2016)를 통

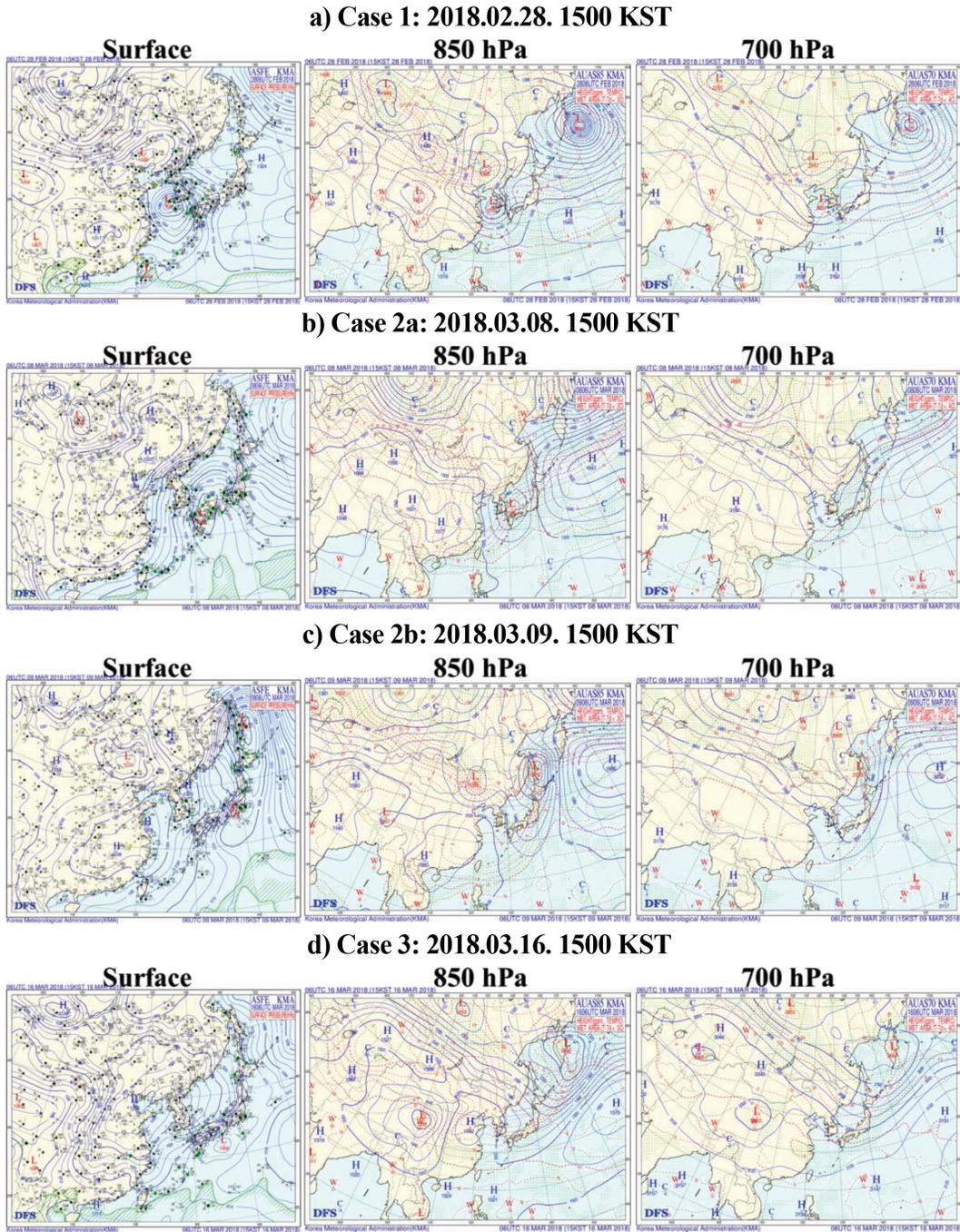
해 조사된 수치모의 재분석자료의 해기차 값과 비교하였다. 마지막으로 레인존데와 드롭존데 관측자료를 비교하여 각 강설사례의 특징 및 육상과 해양의 열역학적 특성 차이를 비교하였다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1 사례별 강설 유형 및 종관특성

기상항공기 드롭존데 관측이 이루어진 3개 사례의 강설 유형을 이해하기 위하여 종관일기도, AWS 강수 분포, COMS 가시영상, 그리고 레이더 1.5 km 강우강도 영상을 분석하였다(Figs. 4, 5). 여기서 Case 2는 드롭존데 관측이 이루어진 3월 8일(Case 2a)과 9일(Case 2b) 모두를 제시하였다. 먼저 종관일기도를 살펴보면, Case 1 (2월 28일)의 경우 저기압이 목포 앞 바다에 위치하고 있으며, 700 hPa까지 성장하였다. 저기압 전면에 형성된 온도능에 의해 영동지역을 포함한 동해로 온난한 기류가 유입될 수 있었다. 저기압이 한반도 남부지역을 통과하여 중부와 영동지역을 비롯한 전국에 10 mm 이상의 강수가 관측되었다(Figs. 4a, 5a). 드롭존데의 관측이 이루어진 1500 KST의 위성과 레이더 영상에서는 한반도 전역과 동해상에서 짙은 하층운과 강수예코가 탐지되었다. Ko et al. (2016)과 Song et al. (2016)이 사용한 분류기준을 적용했을 때 이 사례는 저기압이 한반도를 통과하는 “저기압 관통형(Low Crossing, LC)” 기압패턴에 속한다.

다음으로 Case 2는 이틀간의 특징이 달랐다. 먼저 Case 2a(3월 8일)는 한반도 남해상을 통과한 저기압에 의해서 전국적으로 강수가 발생하였다(Figs. 4b, 5b). 지상 저기압 중심은 한반도 남쪽(일본 규슈)에 위치하였지만, 850 hPa의 일기도를 보면 저기압이 북쪽(대한해협 부근)으로 기울어져 있어 한반도 전역이 영향을 받았다. 700 hPa에서는 북쪽의 기압골이 영동지역까지 뻗어 있었고, Case 1에 비해 키가 작은 저기압이 한반도 남쪽을 통과하였다. 한반도 남해상을 통과한 저기압에 의해 중부지역에서의 강수는 10 mm



**Fig. 4.** Surface and upper air synoptic weather maps at 1500 KST for three snowfall cases related with aircraft dropsonde observations.

이하인 반면, 남부와 영동지역은 20 mm 이상의 강수가 관측되어 지역에 따른 차이가 있었다. 1500 KST의 위성영상에서는 중부지역을 제외한 남부지역과 동해

상에서 옅은 하층운을 볼 수 있으며, 레이더 영상에서는 동해상에서만 에코를 볼 수 있다. 해당 사례는 저기압이 한반도를 통과하는 “저기압 관통형(Low

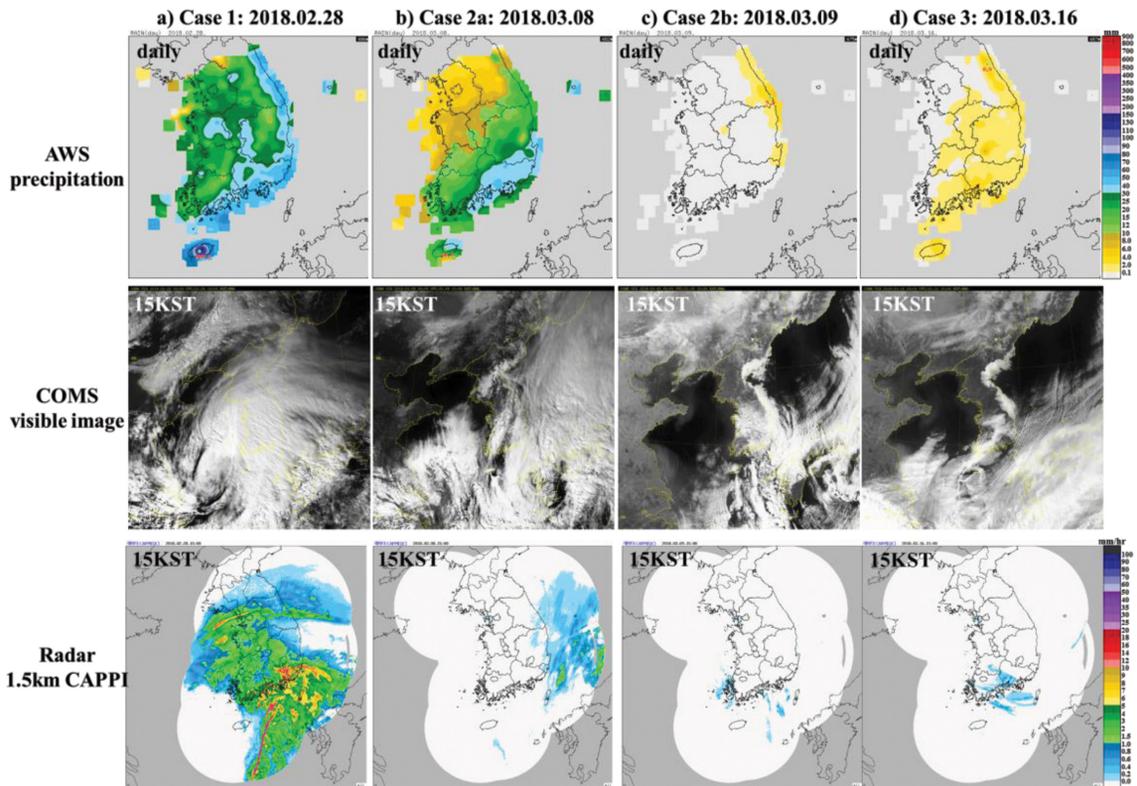


Fig. 5. Spatial distributions of daily precipitation (upper), COMS visible image (middle), and Radar 1.5 CAPPI rain rate (bottom) for three snowfall cases related with aircraft dropsonde observations.

Crossing, LC)에 속한다.

그러나 Case 2b(3월 9일)은 북쪽 고기압의 영향으로 영동지역에서만 강수가 발생하였다(Figs. 4c, 5c). 3월 8일 영동지역에 영향을 주었던 저기압 통과 이후 북쪽의 고기압이 동해바다로 확장하였고, 850 hPa과 700 hPa 일기도에서는 동해안에 온도골이 위치하고 있다. 북쪽의 차고 건조한 공기가 동해바다로 유입될 수 있었고, 영동지역에는 약 5 mm 이하의 강수가 관측되었다. 1500 KST의 위성영상에서는 해안가에만 짙은 하층운이 형성되어있음을 알 수 있다. 그러나 레이더 영상에서는 동해안 부근에서 강수에코가 탐지되지 않는 차이가 있었다. 이는 영동해안가에 낮은 층운형 구름이 존재할 경우, 지형적 차폐와 고도각의 영향으로 레이더를 통해 탐지하는데 한계가 있다는 선행 연구 결과(Jung et al., 2016)와 유사한 결과로 보인다. 해당 사례는 Song et al. (2016)의 기준에 의하면 “시베리아 고기압 확장 + 기압골형”, 그리고 Ko et al. (2016)에 의하면 “저기압 통과형(Low Passing, LP)”에 해당하였다. 즉, 강수분포와 구름의 유형은 뚜렷하게 달랐고, 이는 종관 기압배치의 영향 차이에 기인한 것으

로 보인다.

마지막으로 Case 3은 앞서 분석한 Case 2b와 유사하였다. 저기압이 제주도 남쪽 해상을 지나 일본 남쪽 해상으로 통과하면서 북쪽의 고기압이 확장하였다(Fig. 4d). 850 hPa과 700 hPa에서는 동해상으로 온도골이 위치하고 있으며 영동지역으로 한기가 유입될 수 있었다. 추가적으로 Case 3의 하루 전(3월 15일)을 살펴본 결과, 한반도 중부와 남부지역에 20 mm 이상의 강수가 관측된 반면 영동지역에는 10 mm 이하의 강수가 관측되었다. 드롭존데 관측이 이루어진 Case 3(3월 16일)에는 중부를 제외한 한반도 동쪽과 남쪽 지역에서 10 mm 이하의 약한 강수가 관측되었다(Fig. 5d). 원격탐사 자료에서는 Case 2b와 유사하게 영동 지역 해안가에만 하층운이 탐지되었고, 동해상에서는 소규모의 열은 구름이 산발적으로 존재하였다. 레이더 영상은 Case 2b와 같이 동해안 부근에서 강수에코가 탐지되지 않는 차이가 있었으며, 이는 앞서 언급한 Jung et al. (2016)의 연구결과와 관련되어진다. 따라서 이 사례의 경우 Case 2b (3월 9일)와 유사한 “시베리아 고기압 확장 + 기압골형” 또는 “저기압 통

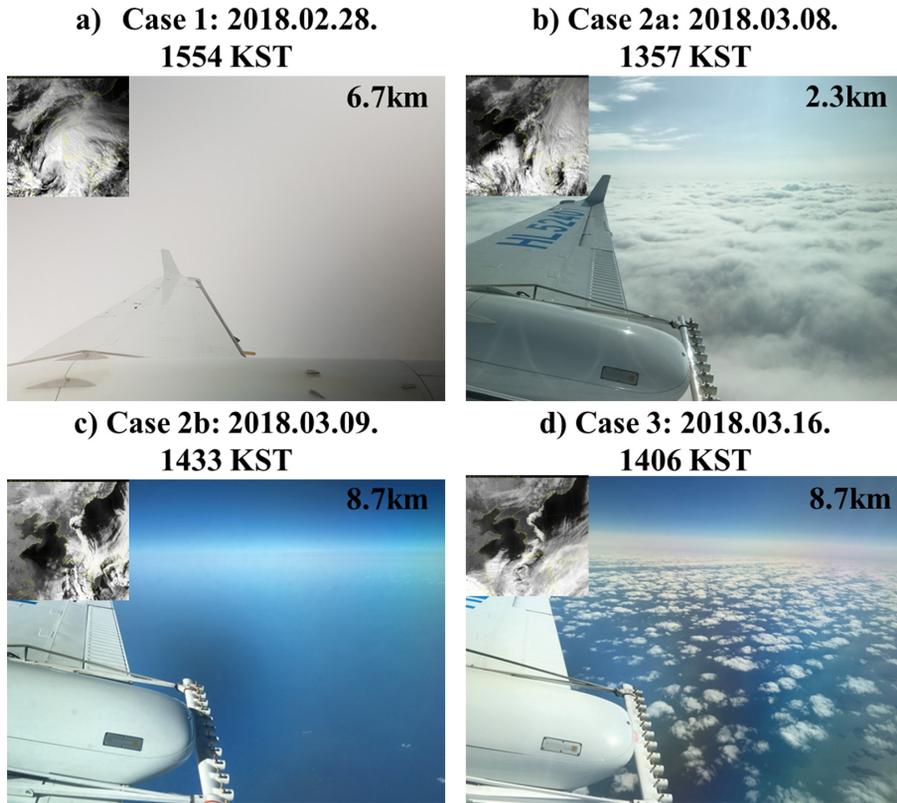


Fig. 6. In-situ cloud images of mobile camera over the East Sea taken by atmospheric research aircraft observation crew.

과형(Low Passing, LP)”이다.

사례별 종관일기도를 살펴본 결과, Case 1과 Case 2a는 한반도 남쪽 저기압 또는 기압골의 영향을 받은 것을 알 수 있다. 이러한 기압배치는 한반도 남쪽의 습윤한 공기가 동풍기류를 타고 영동지역으로 유입되기에 용이하다. 반면 Case 2b와 Case 3은 북쪽의 고기압의 영향을 받은 사례이다. 북쪽의 차고 건조한 공기가 영동해안으로 유입되면서 영동지역에만 강수가 내렸다. 위성영상에서는 Case 1, Case 2a, Case 2b, Case 3 순으로 동해상에 짙은 하층운, 옅은 하층운, 그리고 소규모의 옅은 구름이 산발적으로 분포하는 특징을 확인할 수 있었다. 추가적으로, 각 사례의 이해를 돕기 위하여 각 관측 비행 중 촬영된 구름영상을 제시하였다(Fig. 6). Case 1의 경우 동해상 전역에 짙은 하층운이 형성되어있고, 비행 중 촬영된 구름영상에서도 이를 확인할 수 있다(Fig. 6a). Case 2a의 촬영영상에서는 비행고도 하부에 낮은 하층운이 존재함을 확인할 수 있었다(Fig. 6b). 다음으로 Case 2b와 Case 3에는 영동지역 해안가에 강설 구름이 형성되었기 때문에, 촬영영상에서는 구름이 없거나 소규모의 산발적인 구름이 관측되었다(Figs. 6c, d).

## 3.2 드롭존데 자료를 활용한 열역학적 특성

### 3.2.1 사례별 강설 구름 특성

강설 구름과 관련된 기상학적인 특성을 이해하기 위하여, 드롭존데 관측자료를 통해 단열선도를 분석하였다(Fig. 7). 관측지점에 따른 차이를 줄이기 위하여 각 일자의 첫 번째 관측지점(37.9°N, 130.2°E 부근)의 드롭존데 관측자료를 제시하였다(Fig. 3 참조). Case 1의 경우, 드롭존데가 낙하 된 고도에서 해수면 부근까지 온도와 이슬점온도의 차이가 약 3°C 이하(상대 습도 70% 이상)로 중층에서 하층까지 대기가 습윤한 것을 알 수 있다(Fig. 7a). 이때의 TPW은 15.1 mm로 영동지역 강설 시 북강릉에서 TPW가 약 10 mm 이상으로 증가한다는 선행연구(Jung et al., 2014; Ko et al., 2016)와 일치하였다. 여기서 드롭존데가 낙하 된 고도보다 상층대기의 수증기량은 고려하지 않았다. 또한, 500 hPa 부근, 600~700 hPa, 그리고 950 hPa 부근에서 각각 역전층이 존재하는 특징을 확인할 수 있었고, 특히 600~700 hPa의 역전층이 뚜렷하였다. 고도에 따른 바람의 변화를 보면, 해수면 부근에서는 약 15 m s<sup>-1</sup>의 동풍, 700 hPa에서는 약 17 m s<sup>-1</sup>의 남풍, 그리고 500 hPa에서는 30 m s<sup>-1</sup> 이상의 남서풍이 관측

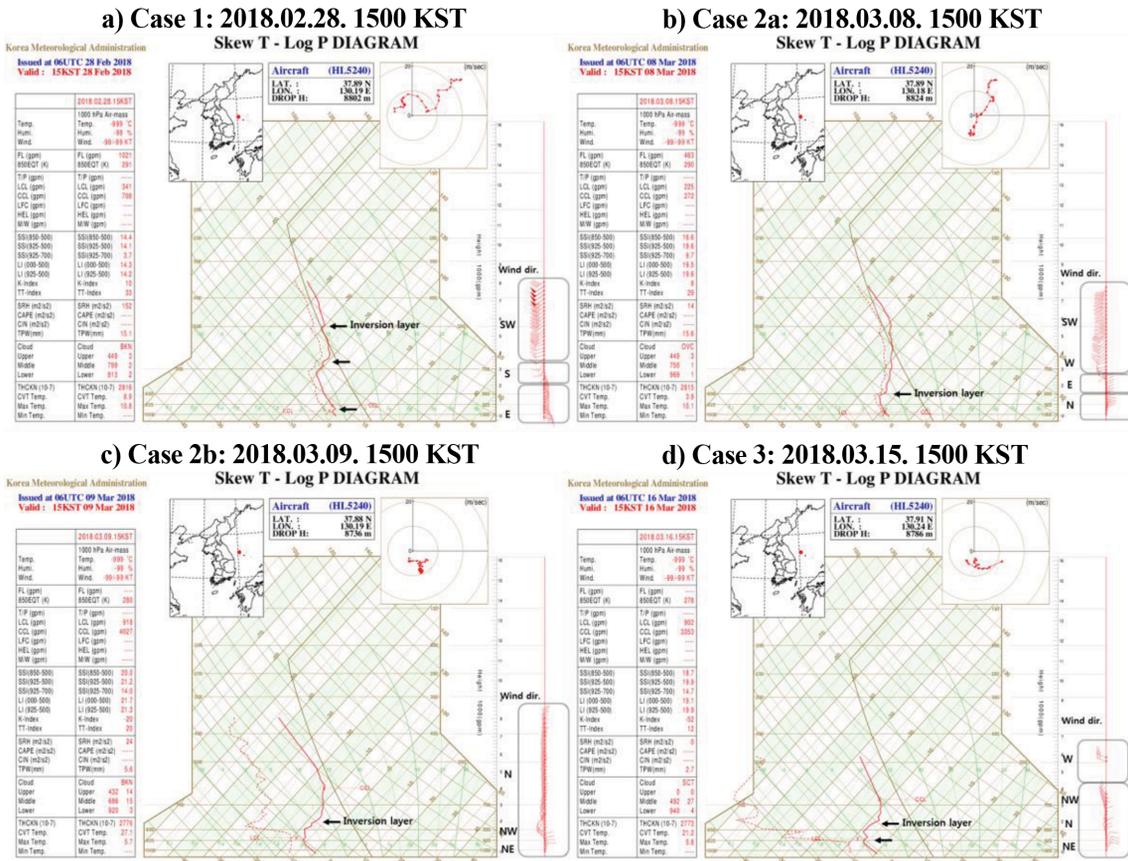


Fig. 7. Representative skew T - log P diagrams for three snowfall cases using aircraft dropsonde data.

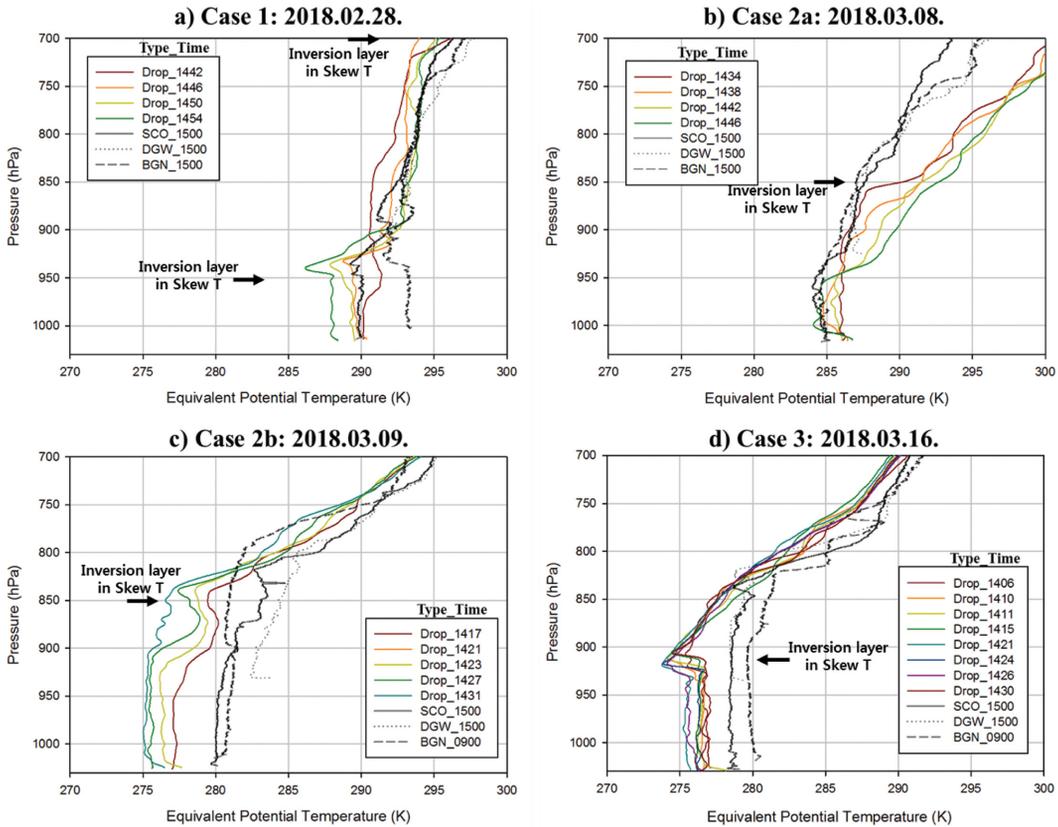
되었다. 즉, 고도가 증가할수록 시계방향으로 풍계가 회전(순전, veering)하는 특징을 확인할 수 있었고 이는 온난이류가 유입되고 있음을 의미한다(Tuduri and Ramis, 1997).

다음으로 Case 2a는, 앞선 사례와 유사하게 관측된 층의 온도와 이슬점온도의 차이가 약 3°C 이하로 습윤한 대기를 이루고 있었고, TPW는 15.6 mm로 강설이 발생하기에 충분한 수증기가 존재하였다(Fig. 7b). 역전층은 850 hPa 부근에 존재하였고, 역전층을 경계로 상하층간 바람의 변화가 뚜렷했다. 해수면에서 850 hPa까지의 역전층 아래에서는 10~15 m s<sup>-1</sup>의 북풍이 관측된 반면, 역전층 상부(850 hPa~760 hPa)에서는 약 5 m s<sup>-1</sup>의 동풍으로 풍향과 풍속이 변화하였다. 760 hPa 이상의 고도에서는 서풍, 남서풍, 남풍으로 풍향이 바뀌고, 약 30 m s<sup>-1</sup>까지 풍속이 증가하는 특징을 확인하였다. 해수면에서 약 760 hPa까지는 바람이 순전하였고, 700 hPa이상의 상층은 서풍이 지배적이었다.

Case 2b의 단열선도는 Case 2a와 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 7c). 850~925 hPa를 제외한 대부분의 고도

에서는 온도와 이슬점온도의 차이가 10°C 이상으로 건조하였고, TPW도 전 날(3월 8일)보다 약 10 mm 감소한 5.6 mm였다. 또한, 850 hPa에서 750 hPa까지 역전층이 형성되어 있었고, 연직바람은 전 층에서 북풍 계열의 바람이 관측되었다. 앞서 종관일기도 분석에서 북쪽 고기압의 영향으로 차고 건조한 공기가 유입될 수 있다는 결과와 일치하고, 이러한 영향으로 Case 2a보다 수증기량이 감소하였고, 풍계가 변화한 것으로 이해할 수 있다.

마지막으로 Case 3 단열선도는 Case 2b와 유사하다(Fig. 7d). 925 hPa 부근을 제외하고 대부분이 온도와 이슬점온도의 차이가 10°C 이상인 것을 알 수 있다. 특히 950 hPa부터 500 hPa까지의 중층대기에서는 그 차이가 20~30°C로 건조한 대기를 이루고 있었다. TPW는 2.7 mm로 앞선 두 강수사례(Case 1과 Case 2a)에 비하여 현저하게 낮았고, 영동지역의 비강설기간의 TPW 수준(5 mm 이하)에 해당하였다(Jung et al., 2014; Ko et al., 2016). 하지만, 이 사례에도 다른 사례와 같이 역전층이 존재함을 확인할 수 있었다. 역



**Fig. 8.** Vertical profiles of equivalent potential temperature for three snowfall cases. Colorful solid line denotes the dropsonde data except for grey line. Black solid, dotted, and dashed line indicates sokcho (SCO), daegwallyeong (DGW), and bukgangneung (BGN) rawinsonde data, respectively.

전층은 750~850 hPa와 900 hPa 부근으로 두 층의 역전층이 존재하였다. 연직바람의 경우, 해수면에서 650 hPa까지 10~15 m s<sup>-1</sup>의 북풍계열의 바람이 불고 있었으며, 그 상층에서는 20 m s<sup>-1</sup> 이상의 서풍이 관측되었다.

단열선도를 통해 강설 구름의 특징을 살펴본 결과, Case 1과 Case 2a는 700 hPa 이하의 하층대기에서 온난 습윤한 동풍이 유입되고 있음을 알 수 있었다. 이를 3.1절의 강설 유형 및 중관 특성분석 결과와 결합하면, 두 사례는 한반도 남쪽 저기압의 영향으로 상대적으로 온난 습윤한 기류가 영동지역으로 유입되어 동해상 전역에 하층운이 형성된 것으로 판단된다. 다음 두 사례(Case 2b와 Case 3)는 북쪽 시베리아 고기압의 영향으로 해수면에서부터 약 600 hPa까지 차고 건조한 북풍계열의 바람(한기이류)이 유입되었다. 이러한 한기이류는 중층 대기의 기온하강을 유발하여 역전층을 발생시킨다(Kwon et al., 2014, 2015; Nam et al., 2014; Seo et al., 2015). 약 850 hPa 부근의 역

전층 하부에서만 습윤영역이 존재하였고, 소규모의 구름이 산발적으로 존재하거나 구름이 형성되지 않았다(Figs. 5, 6 참조). 즉 Case 2b와 Case 3는 강설 구름이 위치한 육지의 레윈존데 관측결과에 대한 분석이 필요하며, 이는 3.3절에서 다루었다.

### 3.2.2 대기 열적상태 및 불안정도

각 사례의 열적상태와 불안정도를 분석하기 위하여 상당온위( $\theta_e$ )의 연직분포를 조사하였다(Fig. 8). 해상에서 낙하된 드롭존데 관측자료는 채색된 실선으로 표기하였고, 육상에서 비양된 레윈존데(속초, 대관령, 북강릉) 관측자료는 검은색(실선, 점선, 파선)으로 나타내었다. 여기서, 각 드롭존데와 레윈존데의 관측시간을 표시하였고, Case 2b와 Case 3의 북강릉 지점 1500 KST 관측자료가 존재하지 않아 0900 KST 자료로 대체하였다. 드롭존데(동해상)와 레윈존데(육지)의 비교는 다음절(3.3)에서 자세히 다루었다.

드롭존데 관측자료를 이용하여 Case 1의 하층대기

표준기압면의 상당온위 평균값을 계산하였다. 1,000 hPa, 925 hPa, 그리고 850 hPa에서 각각 289.3 K, 289.9 K, 그리고 292.3 K이다(Fig. 8a). 대부분의 드롭존데 관측자료가 해상에서부터 약 925 hPa까지 290 K으로 상당온위의 연직변화가 없는 중립적인(neutral) 대기상태를 이루고 있었다. 925 hPa~900 hPa까지는 고도가 증가할수록 상당온위가 증가하였고, 이는 습윤단열적으로 안정된 대기를 의미한다. 해당 고도는 3.2.1항 단열선도 분석에서 기온의 역전층이 존재하는 고도와 일치한다. 또한 900 hPa에서 700 hPa까지의 상당온위 변화가 거의 없는 중립에 가까운 대기조건임을 알 수 있다. 700 hPa 상당의 증상층대기는 습윤단열적으로 절대 안정한 대기조건을 보였고, 해당 기압면을 기준으로 상하층간 풍계가 급격히 변화함을 알 수 있었다(Fig. 7a). 즉, 해상에서 역전층 아래인 700 hPa까지 중립적인 대기가 형성되어 혼합이 용이한 대기 층(well-mixed layer)이 형성되었음을 알 수 있었고, 이는 저기압의 영향을 받아 영동지역에 강설이 발생한 사례의 상당온위를 분석한 Lee et al. (2012)의 연구결과와 일치한다.

이들 동안 드롭존데 관측이 이루어진 Case 2a와 Case 2b는 종관 기압배치의 영향 및 강설 구름의 위치에 따른 차이를 확인할 수 있다. 먼저 동해상 강설 구름이 관측된 Case 2a의 표준기압면 상당온위 평균은 1,000 hPa, 925 hPa, 그리고 850 hPa에서 각각 285.3 K, 287.1 K, 그리고 291.4 K이다(Fig. 8b). 첫 번째로 낙하 된 1434 KST 드롭존데 관측자료는 해수면에서 850 hPa까지 중립 또는 안정한 대기를 이루고 있었지만, 다른 드롭존데 관측자료에서는 해수면에서 950 hPa까지 습윤단열적으로 불안정한 대기조건을 보이고 있다. 연직으로 상당온위가 증가하는 절대 안정층의 고도는 850 hPa에서 950 hPa로 드롭존데 관측시작지점(CATA 1의 서쪽)에 동쪽으로 갈수록 낮아졌다. 각 사례의 단열선도를 추가적으로 확인한 결과, CATA 1의 서쪽지역에서 동쪽지역으로 갈수록 하층대기의 주풍이 동풍에서 북풍으로 변한 것을 확인하였다.

영동 해안지역에서만 강설 구름이 존재한 Case 2b는 전날인 Case 2a보다 전 층에서 드롭존데 상당온위가 약 10 K 감소하였다(Fig. 8c). 드롭존데로 관측된 1,000 hPa, 925 hPa, 그리고 850 hPa의 상당온위 평균은 각각 276.1 K, 276.2 K, 그리고 278.3 K이다. 즉, 동해안에 영향을 주는 기단이 남쪽 저기압에서 북쪽 고기압으로 변하면서 상당온위가 약 10~13 K 감소하였다. 그러나 레윈존데 관측이 이루어진 육상의 경우 약 5 K의 감소가 나타나 해상보다 변화량이 적었다. 이는 영동 해안(레윈존데 관측지역)에만 낮은 하층운이 형성되었기 때문이다(Figs. 5, 6 참조). 레윈존데와의 비교는 다음절(3.3)에서 자세히 다루었다. 또한, 해수

면에서부터 약 850 hPa까지 중립적인 대기상태로 전 날에 비해 중립적인 대기층의 상당온위는 감소하였고, 그 고도는 증가한 것을 확인하였다. 또한, 단열선도 분석을 통해 확인한 역전층의 하부에서 상당온위가 감소하는 특징이 나타났고, 이는 차고 건조한 한기이류에 의해 상당온위가 감소한 것으로 생각된다.

Case 3의 상당온위 평균값은 1,000 hPa, 925 hPa, 그리고 850 hPa에서 각각 276.2 K, 276.0 K, 그리고 277.8 K로 전국 강설사례(Case 1과 Case 2a)보다 약 9~14 K 낮았다. 오히려 영동 해안지역에만 강설 구름이 관측된 Case 2a와 비교해보면 0.5 K 이하의 차이로 유사하였다. 연직 상당온위의 분포 특징은 다음과 같다. 해수면에서 925 hPa까지 습윤단열적으로 중립적인 대기층을 이루고 있고, 925 hPa 부근에서 고도에 따라 상당온위가 감소하는 불안정층이 존재하는 특징이 있다. 이는 Case 2b와 같이 한기이류의 영향으로 생각된다. 해당 고도는 3.2.1항의 단열선도 분석에서 온도와 이슬점 온도의 차이가 가장 적은 층(상대적으로 습윤한 층)이다.

각 사례의 상당온위 연직분포를 살펴본 결과, 공통적으로 해수면 부근에서부터 하층 또는 중층까지 중립적인 대기가 형성됨을 알 수 있었다. 이는 강설기간동안 지상에서 1~2 km까지의 하층대기가 습윤단열적으로 안정에서 중립으로 변화한다는 선행연구 결과들(Lee et al., 2012; Jung et al., 2014; Nam et al., 2014; Seo et al., 2015)과 일치한다. 또한 약 40 cm의 눈이 내린 Case 1의 800 hPa 이하 상당온위가 290~295 K으로 가장 높았고, 약 10 cm의 눈이 내린 Case 2a는 285~295 K으로 해수면 부근의 상당온위가 낮아짐을 알 수 있었다(Figs 1, 5 참조). 영동 해안에만 강설 구름이 형성되어 1 cm 이하와 3 cm 이하의 눈이 내린 Case 2b와 Case 3은 800 hPa 이하 상당온위가 약 275~280 K으로 뚜렷하게 감소함을 확인하였다. 이는 Case 1과 Case 2a는 남쪽의 저기압 또는 기압골의 영향으로 습윤다습한 기류가 영동지역으로 유입된 반면, Case 2b와 Case 3은 북쪽 고기압의 영향으로 차고 건조한 기류가 영동지역으로 유입되었기 때문이다. 즉, 상당온위의 차이는 하층의 수증기량 감소에 기인한 결과이며, 영동강설 현상의 정량적인 변화에는 수증기가 주요한 요소였다(Jung et al., 2014; Ko et al., 2016).

### 3.2.3 동해상 해기차

해기차는 대기와 해양의 에너지 교환에 있어서 중요한 요소이기 때문에, 본 연구에서는 드롭존데를 통해 관측된 850 hPa의 기온과 동해부이 자료를 활용하여 선행연구에서 조사된 영동지역 강설현상의 해기차 특징과 비교하였다(Fig. 3 and Table 2). 선행연구 결과는 저기압의 영향을 받은 사례와 고기압의 영향을

**Table 2.** Air-sea temperature differences for three snowfall cases using dropsonde and buoy observational data.

Case and previous studies	Dropsonde	Donghae Buoy (37.54°N, 130.0°E)				T <sub>SST-850</sub> (°C)	T <sub>SST-2m</sub> (°C)
	Averaged 850 hPa air temperature (°C)	Sea surface temperature (°C)	2 m air temperature (°C)	Wind speed (m s <sup>-1</sup> )	Main wind direction		
Case 1 (19-02-28)	-2.4	9.2	7.2	11.3	E	11.6	2.0
Case 2a (19-03-08)	-3.1	9.5	4.4	11.2	N	12.6	5.1
Case 2b (19-03-09)	-9.8	9.4	1.4	5.8	NE	19.2	8.0
Case 3 (19-03-16)	-8.4	10.1	1.7	6.4	NE	18.5	8.4
Lee et al. (2012)*	-	8~10	-	-	-	> 10	> 4
Song et al. (2016)*	-	-	-	-	-	7~20	-
Nam et al. (2014)**	-	-	-	-	-	17.0~21.7	5.5~8.8
Kwon et al. (2014)**	-	9.0~9.8	-0.4~2.0	7~12	ENE	-	7~10

\*Study associated with low pressure case.

\*\*Study associated with high pressure case.

받은 사례로 구분하여 제시하였다. 먼저 해당 기간의 해수면 온도는 사례와 관계없이 9~10°C로 관측되었으며, 선행연구들에서 조사하여 제시된 강설현상의 해수면 온도와 유사하였다.

그러나, 850 hPa의 기온은 종관기압의 영향에 따라 차이가 있었다. 먼저 저기압의 영향을 받아 약 40 cm와 10 cm의 강설이 내린 Case 1과 Case 2a는 850 hPa 기온이 -2.4°C와 -3.1°C로 관측되었다(Table 1과 Fig. 1 참조). 해수면 온도와 850 hPa 기온의 해기차는 Case 1과 Case 2a가 각각 11.6°C와 12.6°C로 저기압의 영향과 관련된 강설현상을 분석한 Lee et al. (2012)과 Song et al. (2016)에서 제시한 강설현상의 해기차 수준에 해당되었지만, 다른 두 사례에 비해 뚜렷하게 낮았다. T<sub>SST-2m</sub>에서도 2.0°C와 5.1°C로 대기와 해양의 온도차이가 다른 두 사례보다 크지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 저기압의 영향으로 영동지역에 강설이 발생한 사례들에서 해기차와 강설의 상관관계가 낮다는 결과와 유사하다(Song et al., 2016).

다음으로 고기압의 영향을 받아 영동해안에만 강설 구름이 존재하였던 Case 2b와 Case 3의 850 hPa 기온은 -9.8°C와 -8.4°C로 앞의 두 사례보다 약 6°C 낮았다. 이는 단열선도 분석에서 언급한 한기이류와 관련이 있다. 해수면 온도와 850 hPa 기온의 해기차는 Case 2b와 Case 3이 각각 19.2°C와 18.5°C로 저기압의 영향을 받은 사례들보다 뚜렷하게 해기차가 증가한 것을 알 수 있고, T<sub>SST-2m</sub>에서도 약 8°C로 증가하였다. 이들 사례는 고기압의 영향과 관련된 강설현상을 분석한 Nam et al. (2014)와 Kwon et al. (2014)에서 제시한 해기차 수준과 유사하였다.

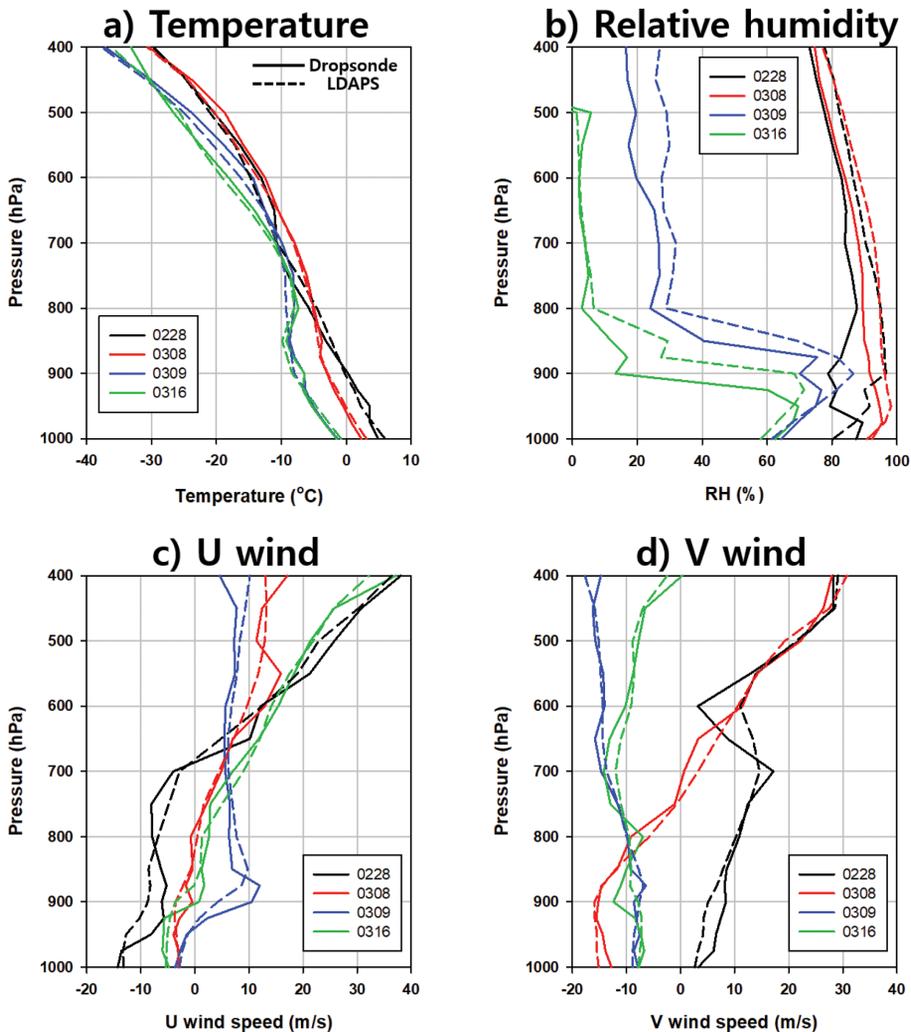
본 연구에서 분석된 사례들은 크게 두 유형으로 구분될 수 있다. 첫 번째 유형은 저기압의 영향을 받은 사례(Case 1, Case 2a)이고, 다른 유형은 고기압의 영

향을 받은 사례(Case 2b, Case 3)이다. 두 유형은 선행연구에서 제시한 유형별 해기차 수준과 유사하였지만, 선행연구들의 분석지점(129.0°E~131.1°E)에 비해 드롭존데 관측지점(130.2°E~131.2°E)이 상대적으로 동쪽으로 치우쳐져 있었다. 이러한 차이로 영동지역에 형성된 강설 구름의 위치(육상/해상)에 따라서 해기차(T<sub>SST-850</sub>)의 차이가 발생할 수 있다. 또한, 총 4개 사례에 대한 관측결과이기 때문에 드롭존데자료를 이용한 해기차의 특징을 일반화하기에는 힘들다. 향후 추가적인 관측을 수행하여 영동지역 강설현상에 대한 해기차 특징의 일반화가 필요하다.

### 3.3 육상 및 해상 대기연직구조 특성비교

해상의 드롭존데와 지상의 레윈존데 자료를 비교해 보고자 한다. Figure 8의 연직상당온위의 분포를 살펴 보았을 때, 동해안 전역에 하층운이 형성된 Case 1과 Case 2a는 대체로 육지(속초, 대관령, 북강릉)와 해상의 상당온위가 차이가 Case 2b와 Case 3에 비해 대체로 적었다(Figs. 8a ,b). Case 1의 경우, 북강릉 레윈존데의 950 hPa이하의 상당온위는 다른 관측값에 비해 3 K 높았다. 해상의 드롭존데는 북동쪽으로 갈수록(관측시간이 늦어질수록) 950 hPa 이하의 상당온위가 감소하였고, 이는 한반도 남서쪽에 위치한 저기압의 영향권에서 멀어짐을 의미한다(Fig. 4a 참조). Case 2a의 경우 해수면에서 역전층 하부까지 드롭존데의 상당온위가 레윈존데 보다 2~3 K 가량 높았다. Case 1과 Case 2a의 경우, 드롭존데 관측위치에 따라서 육지와 해상의 상당온위가 2~3 K 가량 차이가 났다. 즉, 영동해안에서부터 동해상까지 형성된 강설 구름의 상당온위가 지점에 따라 2~3 K 가량 차이가 났지만, 그 차이가 크지 않아 동서간의 열적상태가 유사하다고 생각된다. 특히, 관측지점과 관계 없이 해수





**Fig. 10.** Comparisons of vertical profiles between dropsonde data and numerical model output (LDAPS). Here, dropsonde data and LDAPS are denoted with solid line and dashed line, respectively.

이가 다른 고도에 비해 증가하는 특징을 확인할 수 있었다. 마지막으로, 남북바람은 대체로 일치하는 특징을 확인할 수 있었다. 비교 결과를 요약하면, 드롭존데 관측자료와 수치모델(LDAPS)의 동해상 기상 요소가 잘 일치하였다. 그러나, 강설 구름의 형성과 관련된 수증기량(상대습도)과 동풍바람(u wind)에서는 다른 두 요소에 비해 차이가 컸다. 이러한 이유에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 요약 및 정리

2018년 겨울철 영동지역의 강설시 해상대기의 열적 연직구조특성을 이해하고자, 드롭존데 관측을 수행하

였다. 기상항공기의 드롭존데 관측은 2018 평창 동계 올림픽과 패럴림픽에 대한 국제공동실험 캠페인(ICE-POP 2018)의 일환으로 2018년 2월 2일부터 3월 16일까지 수행되었고, 이 기간 동안 총 4개 강설사례가 발생하였다. 이 가운데 2월 28일(Case 1), 3월 8~9일(Case 2a, 2b), 그리고 3월 16일(Case 3)까지 총 3개 사례(4일)에 대하여 강설 구름 관측을 수행하였다. 울릉도 북쪽 해상에서 관측한 드롭존데자료, 이외에도 중관일기도, 위성과 레이더와 같은 원격탐사자료, 그리고 지상(속초, 북강릉, 대관령)에서 수행된 레인존데 관측자료를 함께 분석하여, 각 강설사례의 발생원인과 강설 구름의 열역학적 특성을 비교·분석하였다.

Case 1과 Case 2a는 한반도 남쪽을 통과하는 저기

압에 의해 전국적으로 강수가 내린 사례이며, 영동지역을 비롯한 동해상 전역에 강설 구름이 탐지되었다. 그러나 Case 2b와 Case 3은 한반도 북쪽의 고기압의 영향을 받은 사례로, 영동 해안가에만 강설 구름이 형성되었다. 종관 기압배치의 차이로 두 그룹간의 강설 분포와 열역학적 특성의 차이가 나타났다. 각 그룹의 열역학적 특성은 다음과 같다. 먼저 저기압의 영향을 받은 Case 1과 Case 2a는 드롭존데 관측이 수행된 약 350 hPa에서 해수면까지 전 층의 대기가 상대습도 70% 이상으로 습윤하였다. TPW는 약 15 mm 이상으로 영동지역의 TPW 임계값(10 mm 이상)을 만족하였다. 그리고 영동지역의 강설현상과 관련된 특징 중 하나인 역전층이 존재함을 확인하였다. 종관 기압계의 영향을 받아 동해상 700 hPa 이하의 중·하층 대기에서는 동풍계열바람이 유입되고 있었고, 중·상층은 서풍계열이 지배적이었다.

북쪽의 고기압의 영향을 받은 Case 2b와 Case 3은 앞의 두 사례와 다른 특징을 보였다. 850 hPa에서 925 hPa를 제외한 대부분의 층에서 상대습도 50% 미만의 건조한 대기를 이루었고, TPW는 5 mm 이하로 영동지역 강수량의 임계값을 만족하지 못하였다. 그러나 이들 사례에서도 앞 사례들과 유사하게 750~850 hPa 부근에 역전층이 형성됨을 확인하였다. 연직 바람의 경우, 중·하층 대기가 북풍계열로 관측되었고, 이는 영동지역이 북쪽 고기압의 전면에 위치하면서 북쪽의 차고 건조한 공기가 유입되고 있음을 의미한다.

열적상태와 불안정도를 분석하기 위하여 상당온위( $\theta_e$ )의 연직분포를 조사하였다. 사례와 관계없이 해수면에서부터 단열선도의 역전층과 관련된 하층 또는 중층까지 습윤단열적으로 중립적인 대기(neutral)가 형성되었고, 이는 혼합이 용이한 대기 층(well-mixed layer)을 의미한다. 그러나 상당온위 연직분포에서도 남쪽 저기압의 영향을 받은 사례(Case 1과 Case 2a)와 북쪽의 고기압의 영향을 받은 사례(Case 2b와 Case 3)간의 차이가 나타났다. 먼저 Case 1과 Case 2a의 900 hPa 이하 상당온위가 285~290 K였지만, Case 2b와 Case 3은 275~280 K로 약 10 K 낮았다. 이러한 차이가 나타난 이유는 Case 2b와 Case 3은 강설 구름이 영동지역의 해안가에 형성되었기 때문이다. 육상에서 레윈존데를 통해 측정된 강설 구름의 상당온위는 280 K로 동해바다의 상당온위 보다 약 5 K 높았다.

정리하면, 드롭존데 관측을 통해서 동해바다에 형성되는 강설 구름과 영동지역 해안가로 유입되는 기류의 특성을 확인하였다. 이러한 기류는 종관 기압계의 영향에 따라서 다른 특성을 보이고 있었다. 상당온위는 약 10~15 K 차이를 보였고, 하층 풍계의 경우 북풍과 동풍으로 달랐다. 사례에 따라서 약 40 cm에서 8 cm까지 적설의 차이가 나타났다. 즉, 동해안 드

롭존데 관측을 통해 영동지역 강설 구름의 형성과 관련된 기단의 특성을 파악한다면, 강설의 정량적 예측에도 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 기상항공기의 드롭존데 관측자료를 활용하여 영동지역 강설 구름의 특징을 분석하였다. 드롭존데를 활용하여 영동강설 구름을 직접 관측했다는 점과 기존연구에서 재분석자료를 통해 분석된 강설 구름의 특징을 비교·검증했다는 데 의미가 있다. 해기차와 강설의 정량적 관계에서는 강설과 관련된 종관 기압배치에 따라 선행연구결과와 유사하였지만, 본 연구 사례가 4회의 관측결과이기 때문에 일반화하기에는 한계가 있었다. 또한 강설 구름의 분포 및 위치에 따라서 열역학적 특성은 차이가 있을 수 있었다. 영동강설과 관련된 구름의 특성을 일반화하기 위해서는 드롭존데 관측뿐만 아니라, 시공간적 고해상도의 레윈존데 관측이 영동지역에서 지속적으로 수행되어야 한다. 또한 기상항공기에 탑재된 구름물리 관측장비를 활용하여 영동강설 구름의 직접관측이 이루어진다면 구름내부 특성의 이해도 향상 및 강설현상의 정량적 예보 개선에 도움이 될 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 국립기상과학원의 주요사업 「기상항공기 활용기술 개발연구」(KMA2018-00222)의 지원으로 수행되었습니다. 기상항공기의 운항업무를 수행한 주식회사 스펙코어 항공기상사업본부와 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원 분들께 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- Ahn, J.-B., and E.-H. Cho, 1998: Atmospheric mesoscale model responses to given sea-surface temperatures around Korean peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 643-651 (in Korean with English abstract).
- Anderson, T., and S. Nilsson, 1990: Topographically induced convective snowbands over the Baltic sea and their precipitation distribution. *Amer. Meteor. Soc.*, **5**, 299-312.
- Hock, T. F., and J. L. Franklin, 1999: The NCAR GPS Dropwindsonde. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **80**, 407-420.
- Jung, S.-H., E.-S. Im, and S.-O. Han, 2012: The effect of topography and sea surface temperature on heavy snowfall in the Yeongdong region: A case study with high resolution WRF simulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 259-273, doi:10.1007/s13143-012-0026-2.
- Jung, S.-P., Y.-K. Lim, K.-H. Kim, S.-O. Han, and T.-Y.

- Kwon, 2014: Characteristics of precipitation over the east coast of Korea based on the special observation during the winter season of 2012. *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, **35**, 41-53 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, T.-Y. Kwon, J.-Y. Park, and B.-C. Choi, 2016: A study on the radar reflectivity-snowfall rate relation for Yeongdong heavy snowfall events. *Atmosphere*, **26**, 509-522, doi:10.14191/Atmos.2016.26.4.509 (in Korean with English abstract).
- Ko, A.-R., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-S. Park, and B.-C. Choi, 2016: Analysis of the relationship of water vapor with precipitation for the winter ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) period. *Atmosphere*, **26**, 19-33, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.019 (in Korean with English abstract).
- 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, doi:10.14191/Atmos.2014.24.3.343 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, J.-Y. Park, B.-C. Choi, and S.-O. Han, 2015: Satellite image analysis of low-level stratiform cloud related with the heavy snowfall events in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **25**, 577-589, doi:10.14191/Atmos.2015.25.4.577 (in Korean with English abstract).
- Lee, H., and T.-Y. Lee, 1994: The governing factors for heavy snowfalls in Yeongdong area. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **30**, 197-218 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. G., and Y. J. Kim, 2008a: A numerical simulation study using WRF of heavy snowfall event in the Yeongdong coastal area in relation to the northeasterly. *Atmosphere*, **18**, 339-354 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2008b: A numerical case study examining the orographic effect of the Taebaek mountains on snowfall distribution over the Yeongdong area. *Atmosphere*, **18**, 367-386 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. G., S.-D. Kim, and Y.-J. Kim, 2011: A trajectory study on the heavy snowfall phenomenon in Yeongdong Region of Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 45-62, doi:10.1007/s13143-011-1004-9.
- Lee, J.-H., S.-H. Eun, B.-G. Kim, and S.-O. Kim, 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).
- Martin, C., 2009: Atmospheric Sounding Processing Environment User manual. National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, 59 pp.
- 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**, 541-552, doi:10.1007/s13143-014-0044-3.
- NCAR, 2012: Operating Instructions Airborne Vertical Atmospheric Profiling System (AVAPS II). National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado 80307-3000, 103 pp.
- NIMS, 2018: Development of application technology on Atmospheric Research Aircraft (II). National Institute of Meteorological Sciences, 122 pp (in Korean with English summary).
- Seo, E.-K., and J.-G. Jhun, 1991: A case study of the heavy snowfalls occurred in the Korean peninsula from 29 January to 1 February 1990. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **27**, 165-179 (in Korean with English abstract).
- Seo, W.-S., S.-H. Eun, B.-G. Kim, A.-R. Ko, D.-K. Seong, G.-M. Lee, H.-R. Jeon, S.-O. Han, and Y.-S. Park, 2015: Study on characteristics of snowfall and snow crystal habits in the ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) campaign in 2014. *Atmosphere*, **25**, 261-270, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.261 (in Korean with English abstract).
- Song, J.-A., J. G. Lee, and Y.-J. Kim, 2016: The study of correlations between air-sea temperature difference and precipitation and between wind and precipitation in the Yeongdong coastal region in relation to the Siberian high. *Atmosphere*, **26**, 127-140, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.127 (in Korean with English abstract).
- Tuduri, E., and C. Ramis, 1997: The environments of significant convective events in the Western Mediterranean. *Wea. Forecasting*, **12**, 294-306.
- UCAR/NCAR, 1993: NCAR Airborne Vertical Atmospheric Profiling System (AVAPS). UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory, doi:10.5065/D66W9848.
- Yang, H. J., C. Lee, J.-H. Kim, S.-P. Jung, H.-J. Ko, and J.-H. Yun, 2019: User Manual for Model 300 data acquisition system in Atmospheric Research Aircraft. National Institute of Meteorological Sciences, 66 pp (in Korean).