

## 영동 지역의 극한 대설 사례와 관련된 종관 환경

권태영<sup>1)\*</sup> · 조영준<sup>2),3)</sup> · 서동희<sup>1)</sup> · 최만규 · 한상옥<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과, <sup>2)</sup>국립기상연구소 예보연구과, <sup>3)</sup>연세대학교 대기과학과,  
<sup>4)</sup>국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터

(접수일: 2014년 4월 17일, 게재확정일: 2014년 5월 30일)

## Synoptic Environment Associated with Extreme Heavy Snowfall Events in the Yeongdong Region

Tae-Yong Kwon<sup>1)\*</sup>, Young-Jun Cho<sup>2),3)</sup>, Dong-Hee Seo<sup>1)</sup>, Man-Gyu Choi, and Sang-Ok Han<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

<sup>2)</sup>Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Seoqwipo, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>4)</sup>High Impact Weather Research Center, Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, Gangneung, Korea

(Manuscript received 17 April 2014; accepted 30 May 2014)

**Abstract** This study presents local and synoptic conditions associated with extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region, as well as the temporal and spatial variability of these conditions. During the last 12 years (2001~2012), 3 extreme snowfall events occurred in the Yeongdong region, which recorded daily snowfall greater than 50 cm, respectively. In these events, one of the noticeable features is the occurrence of heavy hourly snowfall greater than 10 cm. It was reported from satellite analysis that these heavy snowfall may be closely related to mesoscale convective clouds. In this paper the 3 extreme events are examined on their synoptic environments associated with the developments of mesoscale convective system using numerical model output. These 3 events all occurred in strongly forced synoptic environments where 500 and 300 hPa troughs and 500 hPa thermal troughs were evident. From the analysis of diagnostic variables, it was found in all 3 events that absolute vorticity and cold air advection were dominant in the Yeongdong region and its surrounding sea at upper levels, especially at around 500 hPa (absolute vorticity:  $20\sim60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , cold air advection:  $-10\sim-20 \text{ }^\circ\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ ). Moreover, the spatial distributions of cold advection showed mostly the shape of a narrow band along the eastern coast of Korea. These features of absolute vorticity and cold advection at 500 hPa were sustained for about 10 hours before the occurrence of maximum hourly snowfall.

**Key words:** Yeongdong region, extreme heavy snowfall, synoptic environments

\*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

강원 지역에서 겨울철에 재해를 일으키는 주된 기상 현상은 대설이다. 대설 경보 기준(일신적설 20 cm 이상)을 근거로 조사해 보면 최근 7년 동안(2005~2011) 대설 발생 빈도는 약 90%가 강원 동해안과 그 주변 산악 지역, 즉 영동 지역에 분포한다(Lee *et al.*, 2011). 이러한 영동 대설은 발생 빈도가 높다는 것뿐만 아니라 신적설량이 매우 크다는 것이 특징이다. 몇몇 사례에서는 50 cm 이상의 일신적설이 나타난 경우도 관측된다. 이러한 경우 교통마비, 산골 마을 고립, 시설물 붕괴 등 사회적, 경제적 피해가 막대하다. 따라서 이러한 극단적인 대설 현상의 피해 경감을 위해서 대설의 발달 구조에 대한 이해와 예보 능력의 향상이 필요하다.

대설과 관련된 영동 지역의 지리적 특징은 이 지역이 태백산맥과 동해로 둘러싸여져 있다는 점이다. 영동 지역에 인접한 태백산맥은 고도가 약 1 km로 높고 경사가 매우 급하다. 이러한 높은 고도는 하층 수렴에 원인이 되고, 큰 경사도는 지형효과 혹은 산악효과를 발생시킨다. 동해는 면적이 약 100만 km<sup>2</sup>로 매우 넓고 겨울철은 일반적으로 수온이 기온보다 더 높다. 이러한 특징은 바다로부터 대기로 다량의 수증기 공급을 가능하게 하고 또한 대기 불안정을 심화시킬 수 있다(Ahn and Jeong, 1984; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2012).

영동 지역 겨울철 강수와 관련된 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. Chung *et al.* (2004)은 강릉과 대관령 지점의 16년(1986~2001) 동안 겨울철 바람과 강수량 자료를 분석하여 강수량 분포와 풍향 사이에 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. 영동 지역에서 발생한 겨울철 강한 강수는 대부분 북풍을 포함하는 동풍류(북동풍)와 밀접하게 연관되어 있으며, 해안 지역(강릉)의 풍향에 따라 산악과 해안 지역 강수 분포가 크게 달라짐을 보고하였다. 강릉과 대관령의 풍향이 모두 북동풍이면 강릉보다 대관령에 강수량이 많고(산악형 강수) 반면 대관령은 북동풍이고 강릉은 북서에서 북풍이면 대관령보다 강릉에 강수량이 많다(해안형 강수). 또한 Cho and Kwon (2012)은 산악형 강수인 경우 대관령 강수량과 북동풍의 풍속 사이에 밀접한 상관성이 있으며 해안형 강수인 경우 강릉 강수량과 해기차(SST: Sea Surface Temperature와 925 혹은 850 hPa 기온의 차이) 사이에 약한 상관성이 있음을 보고하였다.

Kim *et al.* (2005)은 영동 지역 겨울철 강수 사례에 대하여 NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 사용하여 동해상의 현열속과 잠열속 편차를 분석하였다. 이 분석에서 현열속과 잠열속 편차는 산악형 강수의 경우 강한 풍속과 밀접하게 관련

되어 있고 반면 해안형 강수의 경우 뚜렷한 기온 하강과 관련되어 있음을 보고하였다. Lee *et al.* (2012)은 영동 대설 전·후 기간에 열역학적 구조의 변화를 분석한 결과 동해상에서 대설 전 고도 1~2 km까지 습윤 단열적으로 불안정층(상당온위의 연직감소)이 발달하는 것으로 보고하였다. 그리고 Nam *et al.* (2014)은 13년(2000~2012) 동안 영동 지역에서 관측된 17개 강설 사례(극한 대설사례를 제외함)에 대한 분석에서 영동 지역의 적설량과 동해상의 해기차(SST와 850 hPa 기온의 차이) 사이에 밀접한 관련성이 있음을 보고하였다.

한편 영동 지역 겨울철 강수에 대한 연구에는 중규모 혹은 중관규모 저기압과 관련된 다수의 연구가 있다. Lee *et al.* (1998)은 1995년 1월 29일 대설 사례에 대한 수치 실험에서 한반도 북동쪽 산악 지역의 풍하층인 동한만에서 meso- $\beta$  규모의 소용돌이가 발생하고 이 후 meso- $\alpha$  규모의 저기압으로 발달한다고 보고하였다. 그리고 이 과정에서 산악 효과와 하층 경압 불안정 그리고 상층 한기가 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 겨울철 동해상에서 급격히 발달하는 중규모 저기압은 한반도뿐만 아니라 동쪽으로 이동·발달하면서 일본에도 강한 대설을 유발한다. Asai (1988)는 1983~1984년 동안 직경이 약 200 km 혹은 그보다 작은 meso- $\beta$  규모의 소용돌이가 동해상에서 빈번히 발생함을 수치적으로 보였다. Nagata (1993)는 고해상도 수치모형을 통해 동해상에서 meso- $\beta$  규모 소용돌이의 발달을 모의하였고, 이 소용돌이의 발달 과정을 연구하였다. 모의된 결과를 통해 순압 층밀림 불안정(barotropic shear instability)이 meso- $\beta$  규모 소용돌이의 성장 과정에서 중요한 요소로 작용함을 보였다.

Ahn and Jeong (1984)는 1981년 1월 2일 동해상에서 급격히 발달하는 저기압 사례에 대해 연구하였다. 이 연구에서 동해상에서의 저기압 발달은 해양에서의 열과 수증기 공급 그리고 지형에 의한 하층 경압성 증가에 기인한다고 설명하였다. 그리고 이러한 경압성 증가는 육지와 바다의 온도 차이 그리고 한랭전선 후면의 한기 이류와 소용돌이도 이류와 관련이 있다고 보고하였다. Lee *et al.* (2002)은 중위도 지역 저기압 발달에서 경압 불안정이 주된 요인으로 인식되고 있으나 상부 대류권과 하부 성층권 사이의 상호 작용과 같은 다른 물리적 작용이 존재할 수 있음을 제기하였다. 그러나 Heo *et al.* (2005)은 2005년 3월 5일 부산 지역 대설 사례에서 이 대설이 지상의 한대 저기압이 아니라 주저기압이 통과한 후 남동해안에서 발달한 부저기압과 관련되어 있다고 보고하였다.

Cho and Kwon (2014)은 지난 12년(2001~2012) 동안 영동 지역에서 발생한 3개의 극한 대설사례(일신적설 50 cm 이상)에 대하여 GOES-9 (Geostationary

**Table 1.** Spatial distribution of daily snowfall (cm/day) for the 4 extreme heavy snow events selected during 12 years (2001~2012) in this study.

No.	Date	N. Gangneung	Sokcho	Donghae	Daegwallyeong	Chuncheon	Yeongwol
Case 1	4 Mar. 2005	44(Gangneung)	54.2	61.8	59.4	0	0
Case 2	22 Dec. 2008	48.5	55.0	24.5	9.4	0.5	1.2
Case 3	11(12) Feb. 2010	24.3(49)	18.5(32.2)	11.0(42)	59.3(21.9)	6.2(0.8)	3.6(1.5)
Case 4	11 Feb. 2011	77.7	33.0	70.2	20.0	0	0

Operational Environmental Satellite), MTSAT-IR (Multi-Functional Transport Satellite), MTSAT-2 위성 영상 자료를 분석하였다. 이 분석에서 극한 대설은 영동 앞 바다에서 발달하거나 이곳으로 이동하여 들어오는 발달된 작은 대류운(사례 최저회도온도  $-45\sim-50^{\circ}\text{C}$  그리고 회도온도  $-35\sim-40^{\circ}\text{C}$  이하 구름의 수평 면적  $17,000\sim 40,000\text{ km}^2$ )과 관련되어 있다고 보였다. 이 대류운의 운정 면적은 중규모 대류복합체(Mesoscale Convective Complex, MCC)의 면적보다 작았다. MCC의 운정 면적은  $50,000\text{ km}^2$  이상(회도온도  $-52^{\circ}\text{C}$  이하)이다(Maddox, 1980). 또한 이 연구에서 중규모 대류운의 발달은 한대 저기압이 아니라 소규모 부저기압 혹은 소용돌이와 관련되어 있을 것으로 추정하였다. 따라서 영동 지역의 극한 대설을 예보하기 위해서는 폭발적으로 발달하는 중규모 대류운의 발달 기작에 대한 이해가 필요하다.

이 연구의 목적은 영동 극한 대설과 관련된 중규모 대류운이 발달할 수 있는 국지적 기상 조건과 종관 환경을 조사하는 것이다. 이를 위하여 극한 대설 사례에 관측된 국지적 기상 자료를 이용하여 바람, 대기 안정도, 그리고 해기차에 나타난 특징을 분석하였다. 또한 수치모형 자료를 사용하여 영동 부근의 대기 상승운동과 밀접하게 연관되어 있는 역학적 그리고 열역학적 진단변수를 분석하였다. 이 논문의 2장에서는 극한 대설 사례를 선정하고 이와 관련된 국지적 그리고 종관적 환경을 조사하기 위한 방법론에 대하여 요약하였다. 3장에서는 종관 일기도와 국지적인 기상 관측 자료에 나타난 특징을 요약하고 4장에서는 수치모형 자료를 이용하여 극한 대설과 관련된 종관 환경의 특징을 분석하였다. 5장에서 영동 극한 대설에 대한 예측 가이드언스를 제시하고 결과를 요약하였다.

## 2. 사례 선정과 연구방법

### 2.1 극한 대설 사례 선정

이 연구에서는 일신적설이  $50\text{ cm}$  이상인 사례를 극한 대설 사례로 분류하고 선정하였다. 강원 지역의 극한 대설 사례는 12년(2001~2012년) 동안 4일 나타났으며, 모두 대관령을 포함하는 영동 지역에서 관측되

었다(Table 1). 4개의 사례 가운데 2번째와 4번째 사례는 신적설의 분포에서 영동의 산악과 해안 지역 사이에 뚜렷한 차이를 보였다. 즉 신적설이 산악 지역보다 해안 지역에 집중되어 나타났다. 여기서 대관령은 산악 지역을 대표하는 지점으로 가정한다. 반면 나머지 2개의 사례에서는 산악과 해안 지역 사이의 신적설에 큰 차이가 없었다. 3번째 사례의 경우 대설 사례가 약 3일 동안 나타났기 때문에 2010년 2월 11과 12일 양일간의 신적설을 표에 포함하였다. 그리고 북강릉 관측소의 신적설로 2005년 3월 4일 사례에는 강릉 신적설을 사용하고 나머지 사례에서는 북강릉 신적설을 사용하였다.

Table 2는 대설 사례를 포함하는 각각의 강수 사례에 대한 강수 특성(강수 기간, 총 신적설, 총 강수량, 최대 시간 강수량)을 보여준다. 여기서 강수 기간은 강수의 시작으로부터 끝까지 연속적인 강수가 나타난 기간이다. 강수 기간에서 미량의 강수(trace)가 나타난 기간은 포함하지 않았다. 1, 2, 4번 사례의 특징은 강수 기간이 약 20~40시간으로 상대적으로 짧고 최대 시간 강수량은 약  $10\sim 15\text{ mm hr}^{-1}$ ( $10\text{ cm}$  이상의 시간 신적설)로 상대적으로 큰 값을 보인다는 것이다. 반면 3번 사례의 경우 총 신적설과 총 강수량은 다른 사례들과 비슷한 값을 보이지만 강수 시간이 약 100시간으로 매우 길고 최대 시간 강수량은  $5.3\text{ mm hr}^{-1}$ 로 다른 사례의 약 반 값이다. 즉 3번 사례는 강하지 않지만 지속적인 강수가 나타난 경우이다. 산악과 해안 지역의 강수 분포는 Table 1에 나타난 신적설 분포와 유사하다. Table 2에서 1번 사례의 경우 시간 강수량 자료가 아닌 3시간 누적 강수량 자료가 제공되기 때문에 이 자료를 사용하였다. 그리고 관측소의 이전 때문에 강릉 주변의 강수 자료는 강릉과 북강릉 자료를 사용하였다.

### 2.2 연구 방법

영동 지역 극한 대설 발생 시 지리적 특징에 기인하는 지형효과와 해양효과를 조사하기 위하여 동풍 계열의 바람(동풍류)이 나타나는 고도와 풍속 그리고 해기차(수온과 기온의 차이)를 분석하였다. 이 분석에서 강릉 연직측풍장비 자료와 동해 부이 자료를 사용

**Table 2.** Precipitation characteristics of the 4 weather stations in the Yeongdong region for the extreme heavy snow events.

Case No.	Weather station	Period of the precipitation event (hr)	Total amount of snowfall (cm)	Total precipitation amount (mm)	Mean precipitation amount for the event period (mm hr <sup>-1</sup> )	Maximum hourly precipitation (mm hr <sup>-1</sup> )
Case 1 (4 Mar. 2005)	Sokcho	18	54.0	41.1	2.28	16.5 3 hr <sup>-1</sup> (0300~0600 KST 4 Mar.)
	Gangneung	24	44.2	26.1	1.08	6.63 hr <sup>-1</sup> (0600~0900 KST 4 Mar.)
	Donghae	24	62.5	43.6	1.81	11.53 hr <sup>-1</sup> (1200~1500 KST 4 Mar.)
	Daegwallyeong	21	59.4	45.6	2.17	19.33 hr <sup>-1</sup> (1200~1500 KST 4 Mar.)
Case 2 (21 Dec. 2008)	Sokcho	25	73.5	75.0	3.00	10.6(0200 KST 22 Dec.)
	Gangneung	27	-	53.0	1.96	6.0(0400 KST 22 Dec.)
	N. Gangneung	24	57.0	66.0	2.76	15.0(0400 KST 22 Dec.)
	Donghae	24	25.1	34.0	1.41	6.0(0500 KST 22 Dec.)
	Daegwallyeong	28	20.4	14.8	0.52	2.2(0600 KST 22 Dec.)
Case 3 (11 Feb. 2010)	Sokcho	86	52.2	74.3	0.86	3.5(0100 KST 13 Feb.)
	Gangneung	87	-	90.6	1.04	3.0(0900 KST 12 Feb.)
	N. Gangneung	98	76.3	110.4	1.12	2.5(2000 KST 12 Feb.)
	Donghae	93	57.0	92.5	0.99	5.3(0800 KST 12 Feb.)
	Daegwallyeong	95	99.6	85.5	0.90	3.0(1300 KST 11 Feb.)
Case 4 (11 Feb. 2011)	Sokcho	38	42.5	43.2	1.13	3.8(2100 KST 11 Feb.)
	Gangneung	37	-	72.5	1.96	5.0(1100 KST 11 Feb.)
	N. Gangneung	34	89.8	101.7	2.99	14.5(2300 KST 11 Feb.)
	Donghae	38	100.8	101.9	1.75	10.6(0200 KST 12 Feb.)
	Daegwallyeong	40	63.5	47.4	0.80	7.5(0700 KST 12 Feb.)

하였다. 그리고 속초 라디오존데 자료를 이용하여 대류운의 발달에 기여하는 주요 기상 요소인 대기불안정과 관련된 기상 요소(기온 감률, 대기안정도 지수, 총가장수량 등)를 조사하였다.

또한 대류운의 발달에 기여하는 또 하나의 기상 요소인 종관규모의 상승을 분석하기 위하여 이와 밀접하게 연관되어 있는 역학적 그리고 열역학적 진단변수를 조사하였다. 이 연구에서 사용한 진단변수는 상·하층 발산, 절대소용돌이도, 위치 소용돌이도, Q벡터 발산 그리고 온도이류이다. 이 진단변수는 기상청의 기상분석시스템(Forecast's Analysis System, FAS)과 웹 기반 기상분석시스템(WebFAS)을 통하여 제공되는 RDAPS10, RDAPS30, UM320 자료이다(Lim *et al.*, 2002). 이 자료를 사용한 이유는 1) 장기간의 수치모형 자료가 데이터베이스로 저장되어 있고 2) 누구나 특히 기상청 예보 종사자들이 자료에 쉽게 접근하고 예보에 이용할 수 있으며, 또한 3) 다양한 표출 기능을 활용해서 손쉽게 자료를 분석할 수 있다는 것이다.

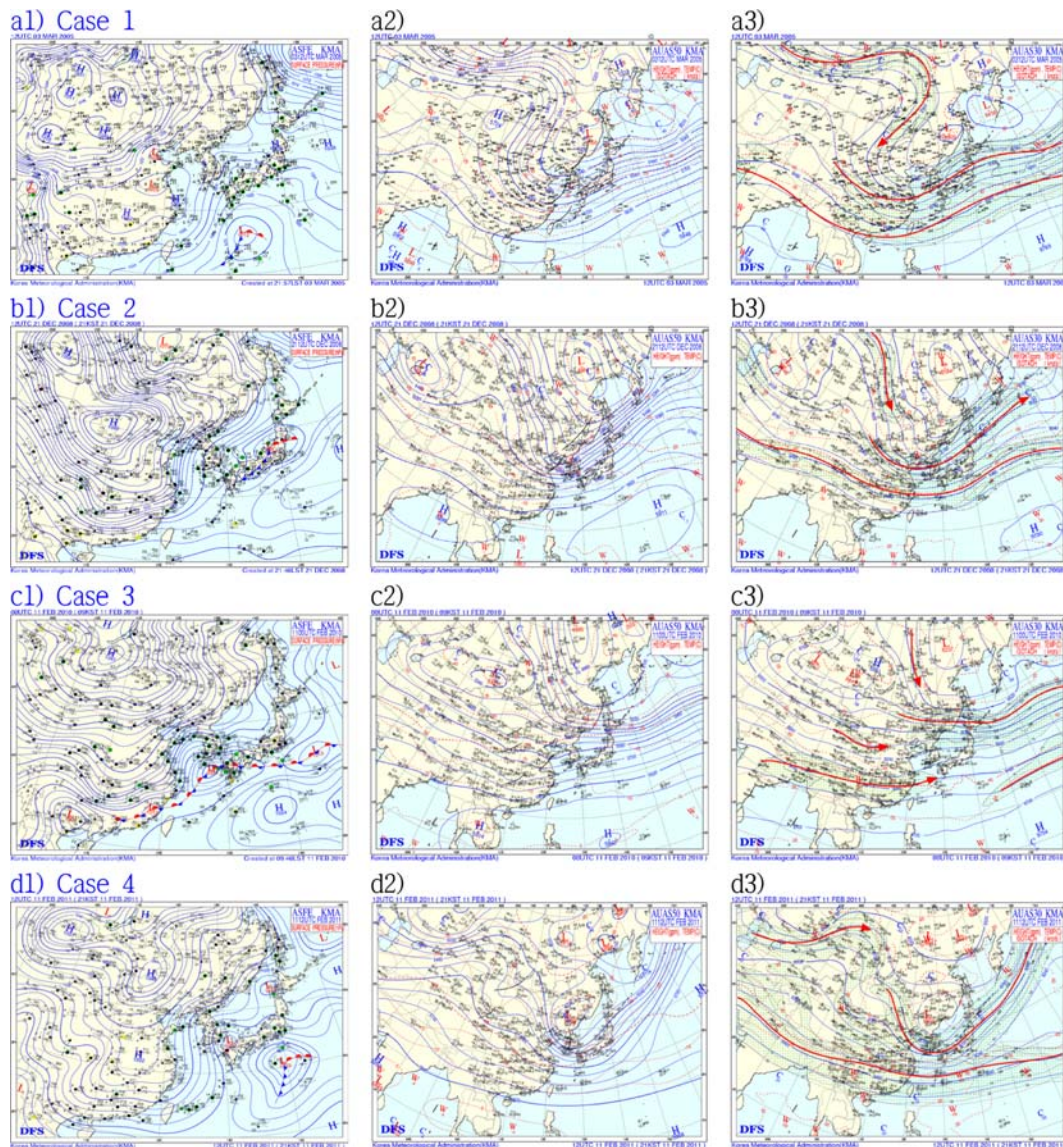
위의 분석에서 진단변수의 수평적 분포, 연직 단면

도, 그리고 시간-고도 단면도의 특징을 각각 조사하였다. 수평적 분포 분석은 700 hPa 연직 속도 분포에서 나타난 뚜렷한 상승 구역을 중심으로 300, 500, 850 hPa 고도면을 각각 조사하였다. 연직 단면도는 강릉과 최대 상승류가 나타난 지점을 연결하는 연장 선상에서 진단 변수의 연직 분포(지상에서부터 약 300 hPa 까지)를 조사하였다. 그리고 진단 변수의 시간-고도 단면도의 경우 지점은 진단 변수에 따라 최대 상승류가 나타나는 지점 혹은 강릉 지점을 선택하였고 시간은 최대 강수가 나타나기 전 약 15시간을 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 최대 강수가 나타나기 전 중규모 대류운이 발달하는 지역과 종관규모 상승류가 나타나는 지역에서 진단 변수의 분포에 어떠한 변화가 나타나는지 분석하였다.

### 3. 종관 일기도와 국지적인 기상 관측 자료

#### 3.1 종관 일기도의 특징

극한 대설 사례의 종관적 특징을 조사하기 위하여

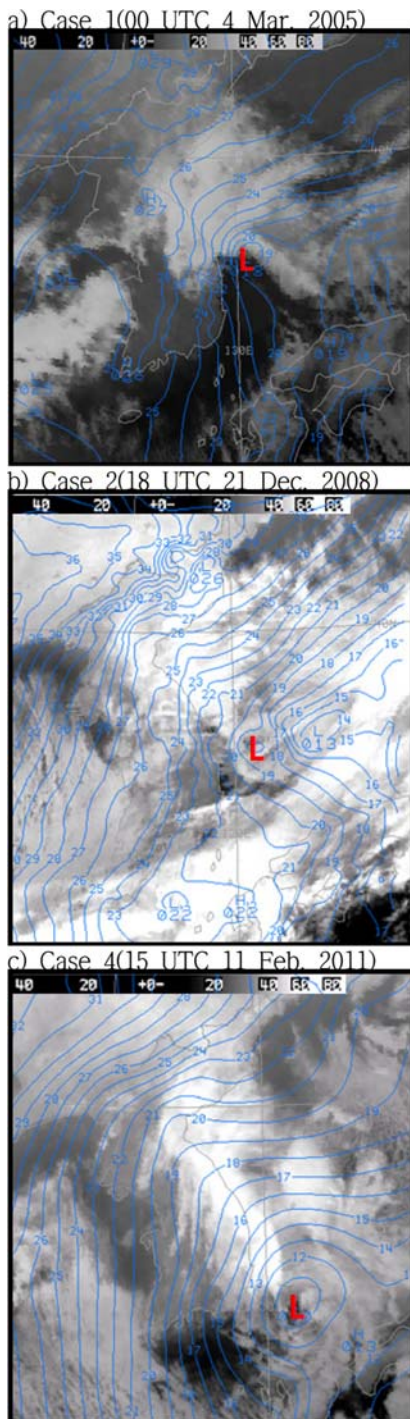


**Fig. 1.** Surface (a1~d1), 850 hPa (a2~d2), and 300 hPa (a3~d3) weather chart of the extreme heavy snowfall events at (a) 00 UTC 4 Mar. 2005, (b) 1200 UTC 21 Dec. 2008, (c) 0000 UTC 11 Feb. 2010, and (d) 1200 UTC 11 Feb. 2011.

앞에서 선정한 4개 사례에 대해서 상·하층 중관 일기도의 특징을 분석하였다. Figure 1은 4개 사례에서 최대 강수 시각과 인접한 시간대의 지상과 상층(500과 300 hPa) 일기도이다. 이 분석에 나타난 전반적인 특징은 1, 2, 4번 사례는 서로 유사한 특징을 보이나 3번 사례는 다른 3개 사례와 뚜렷한 차이를 보인다는 것이다. 지상 일기도의 경우 1, 2, 4번 사례 모두 주 저기압의 중심이 일본 혹은 일본 남쪽과 남동쪽에 위치하고 기압골 혹은 부저기압이 동해상에 위치한다. 500 hPa 일기도에서는 1과 2번 사례의 경우 뚜렷한

기압골과 온도골이 한반도 중부 지역까지 분포하고 4번 사례에서는 저기압 중심과 한핵이 만주 지역에 위치한다. 또한 300 hPa 일기도에서도 세 사례 모두 기압골 혹은 저기압 중심이 한반도 혹은 만주 지역에 나타난다. 그리고 제트스트리크(jet streak)가 한반도 중남부 부근에 위치한다.

반면 3번 사례의 경우 지상 일기도에서는 전선을 동반한 저기압이 제주도 남동쪽에 위치하고 동해상에는 만주 지역으로부터 확장되어있는 기압능이 위치한다. 그러나 상층 500과 300 hPa 일기도에서는 뚜렷한



**Fig. 2.** Infrared satellite image (white-gray color) overlapped by surface pressure (solid line; +1000 hPa) of RDAPS10 (Case 1, 2) and UM (Case 4) at (a) 0000 UTC 4 Mar. 2005, (b) 1800 UTC 21 Dec. 2008, and (c) 1500 UTC 11 Feb. 2011.

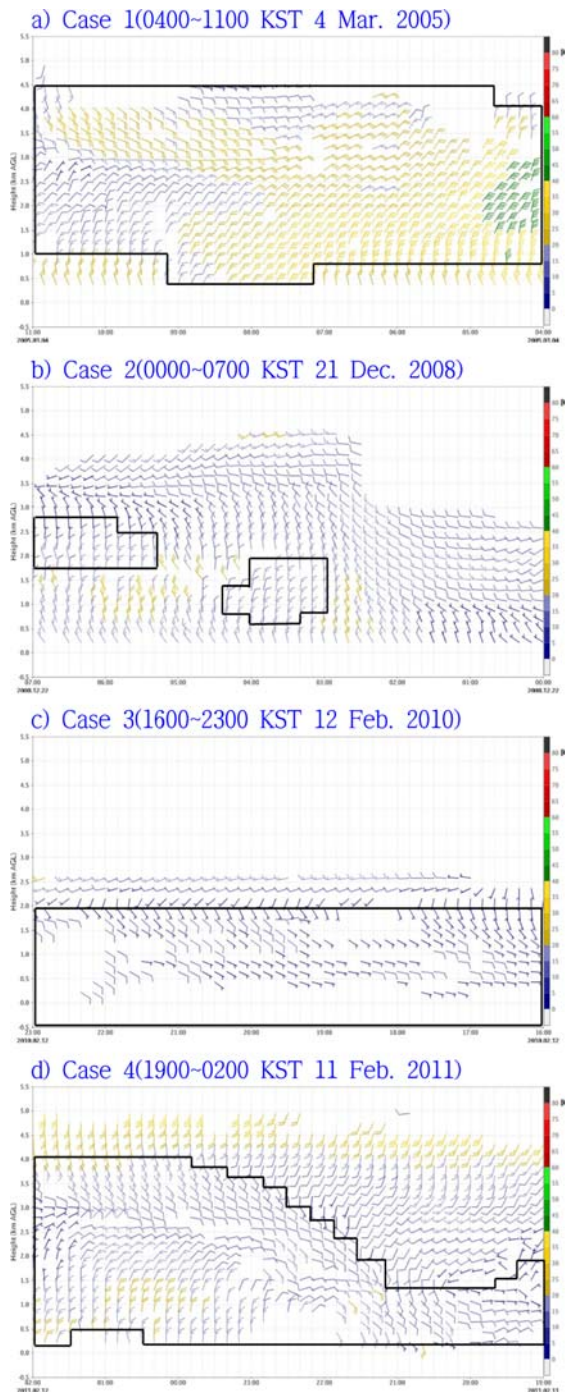
특징을 발견할 수 없다. 따라서 종관 일기도를 중심으로 조사할 때 위의 4개 사례에서 1, 2, 4번 사례는 서로 유사성을 보이거나 3번 사례는 다른 사례와 뚜렷한 차이(특히 상층 일기도에서)를 보인다.

Figure 2는 1, 2, 4번 사례의 특징을 자세히 비교하기 위하여 고해상도 수치모형 지역예보시스템(RDAPS, Regional Data Assimilation and Prediction System; 1, 2번 사례) 10 km와 영국통합모델(UM, Unified Model; 4번 사례)의 지상 분석장과 위성의 적외영상을 겹쳐 나타낸 그림이다. 이 그림에서 4번 사례뿐만 아니라 1번과 2번 사례에서도 영동 지역에 가까운 동해상에 부저기압 혹은 소용돌이가 나타남을 알 수 있다. 그리고 이 부저기압과 위성영상에 나타난 발달된 구름이 서로 연관되어 있음을 알 수 있다. Cho and Kwon (2014)은 영동 지역 극한 대설이 동한만 부근 혹은 영동 앞 바다에서 발달하는 중규모 대류운과 밀접하게 연관되어 있음을 보고하였다. 따라서 위에 선정한 영동 지역 극한 대설 사례별 고해상도 지상 일기도의 특징은 동해상에 부저기압과 소용돌이가 존재한다는 점이다.

### 3.2 강릉 연직축풍장비 자료 분석

영동 지역의 극한 대설 현상과 관련된 바람의 연직 분포의 특징을 조사하기 위하여 선정된 4개의 극한 대설 사례에 대해 강릉 지역의 연직축풍장비 자료를 조사하였다. Figure 3은 대설 사례 각각에 대해서 강릉 지점의 시간 강수량이 최대인 시각을 기준으로 7 시간 동안의 바람 자료이다. 이 그림에서 풍향이  $0\sim 170^\circ$  사이인 경우 동풍류로 정의하고 이 바람이 관측된 영역을 굵은 실선으로 표시하였다. 극한 대설 사례에서 연직축풍장비 자료에 나타난 공통된 특징은 대설 기간 동안 대류권 하층 바람이 모두 동풍 계열의 풍향을 보인다는 것이다. 이때 동풍류가 나타난 고도는 1, 2, 4번 사례에서 3~4.5 km이고 3번 사례에서는 약 2 km이다. 그리고 풍속은 1, 2, 4번 사례에서  $7\sim 15\text{ m s}^{-1}$ 로 강하고 반면 3번 사례는 약  $5\text{ m s}^{-1}$  이하로 상대적으로 약하다.

시간과 고도에 따른 바람의 분포를 자세히 분석해보면 1번 사례의 경우 3월 4일 0900 KST를 기준으로 전반과 후반의 풍향과 풍속에 뚜렷한 차이가 나타난다. 전반부는 약  $15\text{ m s}^{-1}$ 의 북동풍과 동풍이 우세하고 후반부에는 약 1.5 km 이하에서 북풍 혹은 북북서풍이 나타나고 풍속도 약  $10\text{ m s}^{-1}$ 로 감소한다. 2번 사례의 경우 최대 시간 강수량이 나타난 시각(12월 22일 0400 KST)에 연직 바람은 고도 약 3 km 이하에서 북서풍에서 북풍으로 주로 북풍에 가까운 바람을 보이고 풍속은 대체로  $5\sim 10\text{ m s}^{-1}$ 이다. 4번 사례에서는 최대 시간 강수량이 나타난 시각(2월 11일 2300



**Fig. 3.** Time-height cross section of horizontal wind observed by Gangneung wind profiler for (a) 0400~1100 KST 4 Mar. 2005, (b) 0000~0700 KST 21 Dec. 2008, (c) 1600~2300 KST 12 Feb. 2010, and (d) 1900~0200 KST 11 Feb. 2011. Solid line indicates the main wind associated with easterlies.

KST)의 약 3시간 전부터 고도 약 1.5 km 이하에서 동풍 혹은 남동풍이 나타난다. 그 후 남동풍이 나타나는 고도는 점차 증가하고 지상에서 고도 약 2.5 km까지 북풍 혹은 북동풍이 나타나며 풍속은  $7\sim 15\text{ m s}^{-1}$ 이다. 3번 사례의 경우는 고도 약 2 km까지 전체적으로  $5\text{ m s}^{-1}$  이하의 동풍 혹은 동남동풍이 균일하게 나타난다.

영동 지역의 극한 대설 사례와 관련된 연직 바람의 특징을 요약하면 다음과 같다. 1) 4개 사례 모두 대기 하층(2~4.5 km까지)에서 동풍류의 바람이 나타나며 동풍류가 나타나는 고도와 풍속은 3번 사례보다 1, 2, 4번 사례에서 상대적으로 높고 강하며 2) 1, 2, 4번 사례에서 영동 해안 지역에서 강수가 강한 경우 지상에서 고도 1.5~3 km까지 북서풍에서 북풍이 나타나고 3) 3번 사례의 경우 풍속이 약  $5\text{ m s}^{-1}$  이하로 비교적 약하고 풍향이 일정하다는 것이다. 따라서 이러한 연직 바람의 특징으로부터 다음을 추론할 수 있다. 풍향의 변동성으로부터(약 7시간 동안 3번 사례에서는 풍향이 일정하고 반면 1, 2, 4번 사례에서는 풍향의 변화가 심하다) 1, 2, 4번 사례가 3번 사례와 비교하여 상대적으로 작은 규모의 강수시스템과 연관되어 있음을 알 수 있다. 또한 1, 2, 4번 사례에서 고도 약 1.5 km까지 나타나는 북서풍 혹은 북풍은 영동 해안 지역 대설이 지형성 수렴과 연관되어 있음을 의미한다.

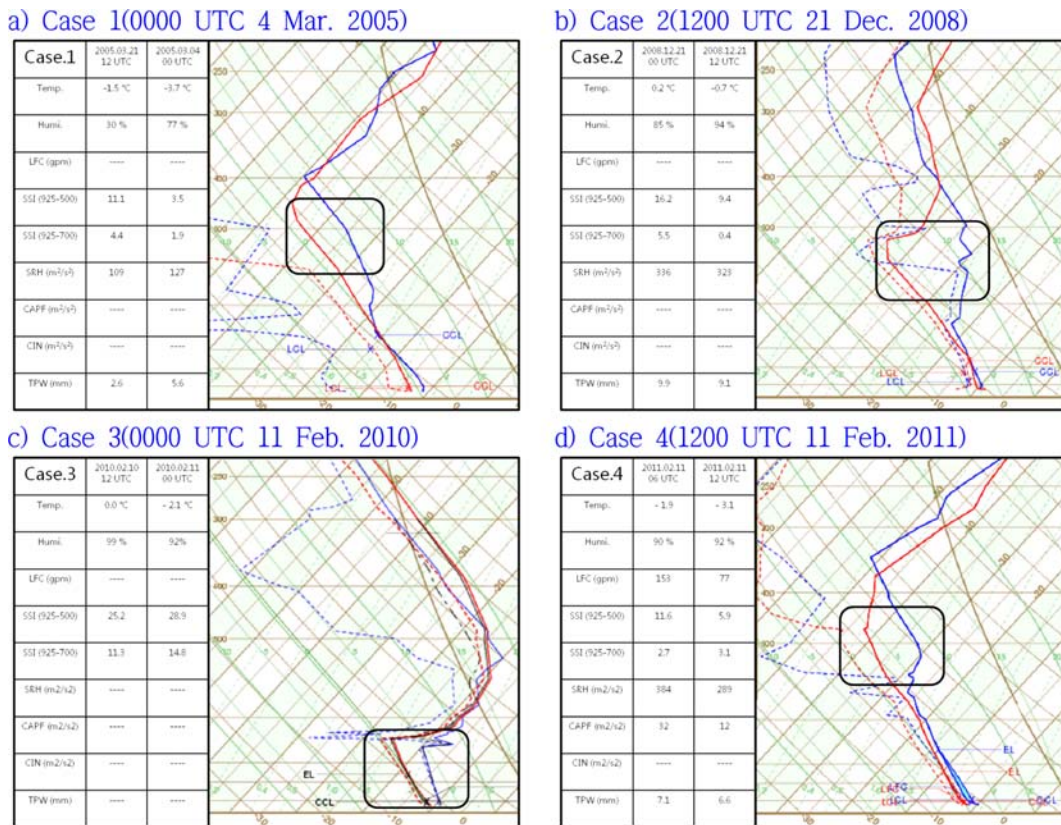
### 3.3 속초 라디오존데 자료 분석

이 연구에서 선정한 4개의 극한 대설 사례와 관련된 대기의 열역학적 특징을 조사하기 위하여 속초 지역의 단열선도를 분석하였다. 이 분석에서 단열선도로부터 기온 변화의 특징(기온 하강이 나타난 고도 그리고 최대 기온 하강 값과 그 고도)과 기온 감률, 쇼월터안정도지수(Showalter Stability Index, SSI), 총가장수량(Total Precipitable Water, TPW)을 조사하였다. Table 3은 각각의 대설 사례에서 속초의 고층 관측 자료에 나타난 열역학적 특징과 관련된 값을 보여준다. 여기서 기온 변화는 각각의 대설 사례에서 최대 시간 강수량이 나타나기 이전 6시간(4번 사례) 혹은 12시간(1, 2, 3번 사례) 동안의 기온 변화가 최대인 시간대의 값이다.

Figure 4에서 기온과 습도의 시간과 고도에 따른 변화를 자세히 분석해보면 1번 사례의 경우(2005년 3월 3일 1200 UTC와 3월 4일 0000 UTC 단열선도) 410~770 hPa 사이에 기온의 하강이 나타나고 약 500 hPa에서는 최대  $-6^{\circ}\text{C } 12\text{ hr}^{-1}$ 의 기온 하강이 나타난다. 그리고 지상부터 500 hPa 사이의 기온 감률은 약  $7^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 이다. 습도는 3월 3일 1200 UTC의 경우 전 고도에서 약 30% 이하를 보이고 3월 4일 0000 UTC에는 지상에서 600 hPa 까지 약 70% 이상이다. 따라서 이

**Table 3.** Thermodynamic features observed from radiosonde at Sokcho related with the extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region.

Case No.	Altitude of drop in temp./ Max. value & altitude of drop in temp.	Temp. lapse rate ( $^{\circ}\text{C km}^{-1}$ )	SSI (925-500) (925-700)	TPW (mm)
Case 1 (0000 UTC 4 Mar. 2005)	770~410 hPa/ $-6^{\circ}\text{C}$ @500 hPa	$\sim 7$	3.5(11.1) 1.9(4.4)	5.6(2.6)
Case 2 (1200 UTC 21 Dec. 2008)	850~430 hPa/ $-12^{\circ}\text{C}$ @580 hPa	$\sim 6.3$	9.4(16.2) 0.4(5.5)	9.1(9.9)
Case 3 (0000 UTC 11 Feb. 2010)	Sfc~750 hPa/ $-8^{\circ}\text{C}$ @780 hPa	$\sim 5.7$	28.9(25.2) 14.8(11.4)	-
Case 4 (1200 UTC 11 Feb. 2011)	620~380 hPa/ $-7^{\circ}\text{C}$ @500 hPa	$\sim 6.3$	5.9(11.6) 3.1(2.7)	6.6(7.1)



**Fig. 4.** Skew T-log P chart from Sokcho radiosonde data at (a) 0000 UTC 4 Mar. 2005, (b) 1200 UTC 21 Dec. 2008, (c) 0000 UTC 11 Feb. 2010, and (d) 1200 UTC 11 Feb. 2011.

기간 동안 600 hPa 이하의 대기층이 습윤해졌음을 알 수 있다. 이러한 특징은 2번 사례(2008년 12월 21일 0000 UTC와 1200 UTC 단열선도)와 4번 사례(2011년 2월 11일 0600 UTC와 1200 UTC 단열선도)에서도 비슷하게 나타난다. 2번과 4번 사례에서 기온 하강이 나

타나는 고도는 각각 430~850 hPa과 380~620 hPa이고, 최대 기온 하강 값과 그 고도는 각각  $-12^{\circ}\text{C}$  12  $\text{hr}^{-1}$ 와 550 hPa 그리고  $-7^{\circ}\text{C}$  6  $\text{hr}^{-1}$ 와 500 hPa이다. 또한 두 사례 다 지상부터 600 hPa 사이의 기온 감률이 약  $6.3^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 이다. 습도의 경우 1번 사례와 다르게 2번



과 4번 사례에서는 기온 하강이 나타나기 전부터 대기 하층이 습윤함(약 80% 이상)을 알 수 있다. 이러한 자료는 지상에서 관측된 강수 자료와 잘 일치한다. 즉 기온 하강이 나타나기 전부터 강수가 관측되었다.

그러나 3번 사례(2010년 2월 10일 1200 UTC와 2월 11일 0000 UTC)의 경우 지상부터 750 hPa까지 낮은 고도에서 기온의 하강이 나타나며 약 780 hPa에서  $8^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ 의 최대 기온 하강이 나타난다. 그리고 750 hPa 이상에서는 고도가 증가함에 따라 기온이 상승하는 역전층이 존재한다. 지상으로부터 780 hPa까지의 기온 감률은 약  $5.7^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 이다. 습도의 경우 기온의 하강이 일어나기 전인 2월 11일 0000 UTC부터 약 90% 이상으로 습윤하였다.

SSI는 925와 500 hPa 고도 사이에서 3번 사례를 제외하고 1, 2, 4번 사례 모두에서 뚜렷한 하강을 보인다. 이 사례에서 평균적으로 SSI (925~500 hPa)는 13에서 6.3으로 하강한다. 그러나 3번 사례의 경우 다른 사례들과는 다르게 SSI (925~500 hPa)뿐만 아니라 SSI

(925~700 hPa)도 큰 변화가 없고 값이 매우 크다. 그 이유는 기온 하강이 750 hPa 이하의 대기 하층에서 나타나고 이 고도 이상에서는 기온의 역전층이 존재하기 때문이다. 한편 SSI (925~700 hPa)는 1, 2번 사례와 비교할 때 4번 사례에서 값이 상대적으로 크고 변화가 크지 않다. 이러한 이유는 주된 기온 하강이 700 hPa 이상에서 나타나기 때문이다. 또한 주 강수가 나타나는 시기에 TPW도 4 사례 모두에서 5~10 mm에 분포하여 뚜렷한 특징을 보이지 않는다. 따라서 극한 대설 사례와 관련된 안정도 지수의 특징은 SSI (925~500 hPa)이 하강한다는 것이고 이는 대기 중층의 기온 하강과 연관되어 있음을 알 수 있다.

결론적으로 1, 2, 4번 사례에서는 대기 중층(약 430~620 hPa)에서 기온의 강한 하강이 공통적으로 나타났으며 이로 인하여 지상으로부터 대기 중층까지 기온 감률이 증가하여 조건부 불안정이 형성되었다. 이러한 기온 하강은 최대 시간 강수량이 나타나기 전 약 12시간 동안에 나타났으며 최대 시간 강수량은 약

**Table 4.** Wind direction and speed ( $\text{m s}^{-1}$ ), temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), and SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) from Buoy at Donghae during 24 hours on the extreme heavy snowfall days. Gray and dark shadows indicate that precipitation amounts are more than 3 and 8  $\text{mm hr}^{-1}$ , respectively.

Time (KST)	Case 3 2010. 02. 11				Case 4 2011. 02. 11			
	Wind direction	Wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	SST ( $^{\circ}\text{C}$ )	Wind direction	Wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	SST ( $^{\circ}\text{C}$ )
0000	ENE	12.1	0.9	9.5	ENE	7.5	2.6	9.8
0100	ENE	12.6	0.9	9.5	E	7.2	2.0	9.8
0200	ENE	11.8	0.8	9.4	ENE	7.8	1.7	9.8
0300	ENE	11.6	0.7	9.4	ENE	7.7	1.6	9.8
0400	ENE	10.5	0.6	9.4	ENE	7.9	1.9	9.8
0500	NE	11.4	0.5	9.5	E	7.9	1.9	9.8
0600	ENE	11.0	0.6	9.5	ESE	9.5	1.9	9.8
0700	NE	11.1	0.4	9.4	E	9.1	1.9	9.6
0800	ENE	11.3	0.4	9.4	ENE	9.5	0.4	9.7
0900	ENE	11.5	-0.8	9.4	NE	9.1	-0.1	9.7
1000	ENE	10.7			E	9.3	-0.3	9.6
1100	ENE	10.8	0.0	9.3	ENE	8.8	-0.4	9.6
1200	ENE	11.1	-0.4	9.1	ENE	8.9	-0.4	9.6
1300	ENE	11.4	-0.4	9.0	NE	8.5	-0.3	9.5
1400	NE	12.2	-0.4	8.9	E	8.2	0.0	9.6
1500	NE	11.2	-0.3	9.1	E	8.1	0.0	9.7
1600	NE	10.7	-0.5	9.2	ENE	10.0	0.1	9.7
1700	NE	11.4	-0.7	9.3	E	10.7	-0.1	9.8
1800	NE	11.0	-0.6	9.3	ENE	8.8	-0.2	9.8
1900	ENE	10.8	-0.3	9.3	ESE	11.5	0.1	9.8
2000	NE	11.0	-0.3	9.3	E	10.7	0.5	9.7
2100	NE	9.8	-0.4	9.3	ENE	11.8	0.6	9.6
2200	NE	10.1	0.0	9.2	NE	9.2	0.7	9.5
2300	NE	9.4	-0.1	9.2	E	10.3	0.9	9.5

10~15 mm hr<sup>-1</sup>로 매우 강했다. 3번 사례의 경우도 기온의 하강(기온 감률 증가와 대기의 조건부 불안정)이 나타나지만 1, 2, 4번 사례와의 차이점은 기온 하강이 나타나는 고도가 대기 하층(약 750 hPa 이하)으로 낮고, 기온 하강이 나타나는 시간이 주 강수대보다 약 24시간 전으로 상대적으로 이르다는 것이다. 이러한 3번 사례는 상대적으로 강수 강도가 약하고 균일하며, 강수 기간이 매우 긴 강수 특성을 보였다. 또한 최대 시간 강수량이 나타나는 시간을 찾는 데도 어려움이 있었다.

#### 3.4 동해 부이 자료 분석

영동 지역의 극한 대설 현상과 관련된 동해상의 바람, 기온, 그리고 수온의 변화를 분석하기 위해 동해 부이 자료를 조사하였다(Table 4). 동해 부이는 북위 37° 32'와 동경 130°에 위치하며 동해 관측 지점으로부터 동쪽으로 약 70 km 떨어져있다. 따라서 동해 지점은 영동 지역과 인접한 동해의 기상환경을 잘 대표할 수 있는 지점이다. 그러나 극한 대설 사례 1번과 2번의 경우 결측으로 인하여 동해 부이 자료가 존재하지 않기 때문에 이 연구에서는 3번과 4번 사례에 대해서 부이 자료를 분석하였다.

Table 4는 3과 4번 사례에 대해서 대설이 나타난 날짜(24시간 동안)에 동해 부이의 풍향, 풍속, 기온, 그리고 수온 시간 자료이다. 이 자료에서 연한 음영과 짙은 음영으로 표시한 부분은 영동 관측 지점(4개 관측 지점: 속초, 북강릉, 동해, 대관령) 가운데 한 곳 이상에서 각각 3과 8 mm 이상의 시간 강수량이 관측된 시간대이다. 두 사례에서 바람은 대부분 북동풍, 동북동풍, 동풍으로 서로 비슷한 풍향을 보였고 반면 풍속은 4번 사례(7~12 m s<sup>-1</sup>)보다 3번 사례(10~12 m s<sup>-1</sup>)에서 강했다. 또한 풍속은 3번 사례의 경우 대체로 균일한 반면 4번 사례에서는 증가 경향과 함께 16시 이후에는 10~12 m s<sup>-1</sup>가 되었다. 수온과 기온의 차이(해기차)는 4번 사례보다 3번 사례에서 크게 나타났다. 해기차는 3번 사례의 경우 8~10°C로 대체로 일정했으나 4번 사례는 3~8°C로 뚜렷한 증가 경향을 보였다.

두 사례에 대한 시간 강수량의 분포를 비교해 보면 3번 사례의 경우 극한 대설이 관측된 2010년 2월 11일에 시간 강수량은 영동 관측 지점(4개 관측 지점)에서 모두 3 mm 이하가 관측되었다. 그러나 4번 사례의 경우에는 2011년 2월 11일의 대부분 시간대에서 영동 관측 지점 가운데 한 곳 이상에서 3 mm 이상의 시간 강수량이 관측되었다. 특히 21시 이후에는 8 mm hr<sup>-1</sup> 이상의 강수량이 관측되었고 23시에는 북강릉에서 14.5 mm hr<sup>-1</sup>의 최대 강수량이 관측되었다. 풍속과 해기차에서는 3번 사례가 4번 사례보다 컸으나 강수

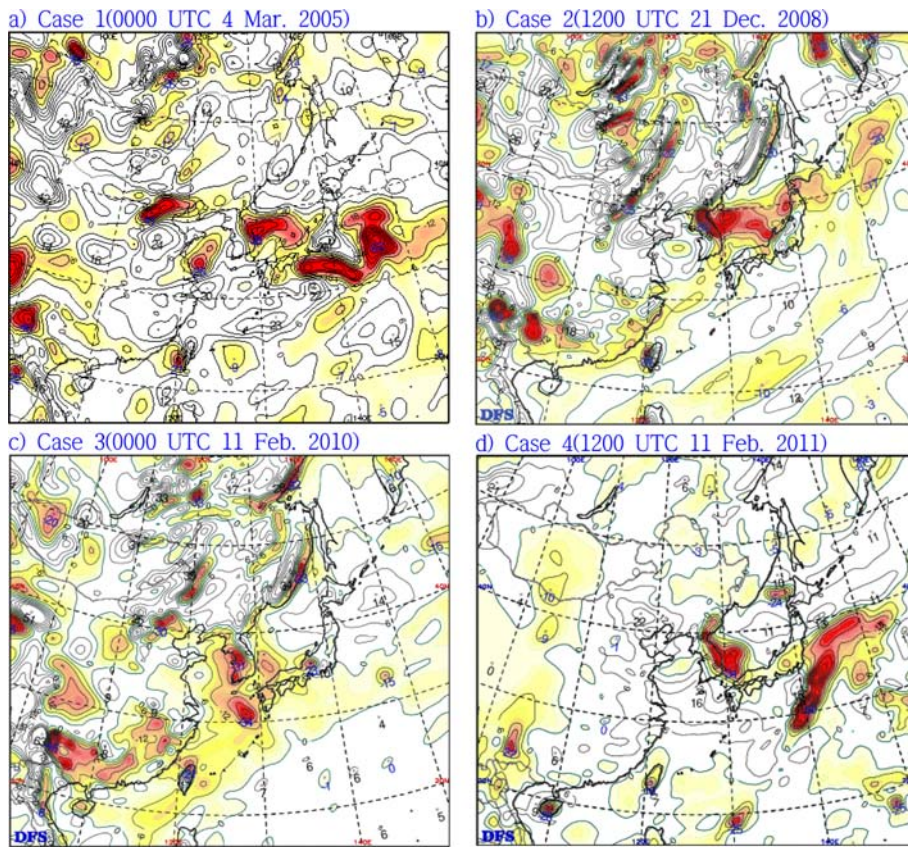
량에서는 4번 사례가 3번 사례보다 큰 값을 보였다. 이러한 결과는 풍속이 강할수록 그리고 해기차가 클수록 강수량 혹은 신적설량이 크다는 기존의 연구 결과에 상반된다. 그러나 4번 사례에서 시간 강수량, 풍속, 해기차를 서로 비교해 보면 풍속이 증가하고 해기차가 커짐에 따라 강수량이 급격히 증가함을 볼 수 있다.

### 4. 수치모형 자료 분석

강한 습윤대류와 관련된 강수의 경우 강수율은 혼합비와 상승속도의 곱에 비례한다(Doswell *et al.*, 1996). 따라서 극한 대설 사례의 경우 대설 메커니즘을 이해하기 위해서 우선적으로 상승류의 위치와 강도를 조사하는 것이 필요하다. 이 연구에서는 최대 강수가 나타난 시간에 가까운 시간대(0000 혹은 1200 UTC)의 연직속도를 조사하였다. Figure 5는 이 연구에서 선정된 4개의 극한 대설 사례에 대한 700 hPa 연직 속도의 분포를 보여준다. 이 그림에서 주목할 점은 1, 2, 4번 사례에서는 모두 영동과 동해상에 강한 연직 속도가 나타난다는 것이다. 그 중심 값은 1, 2, 4번 사례에서 각각 -38, -58, -36 hPa hr<sup>-1</sup>이다. 반면 3번 사례의 경우 이 지역에서 뚜렷한 상승류를 발견할 수 없었다. 따라서 이러한 영동과 동해상에 나타나는 강한 연직 속도는 영동 지역에 극한 대설을 가져온 중규모 대류운의 발달과 밀접하게 연관되어 있을 것이다. 이 연구에서는 영동과 동해상을 중심으로 대기의 상승운동과 밀접하게 연관되어 있는 역학적 그리고 열역학적 진단변수를 분석하였다. 이 분석에서 진단변수의 수평적 분포 특징은 표로 작성하였고 연직 분포와 시간변화를 조사하기 위하여 연직 단면도와 시간-고도 단면도를 분석하였다. 그러나 3번 사례의 결과는 뚜렷한 특징이 없어 생략하였다. 700 hPa 연직 속도와 진단변수의 수평적 분포는 1, 2, 4번 사례에 대하여 각각 2005년 3월 4일 0000 UTC와 2008년 12월 21일 1200 UTC RDAPS30 자료와, 2011년 2월 11일 1200 UTC UM320 자료를 사용하였다.

#### 4.1 진단변수의 수평 분포

Table 5의 수렴과 발산의 수평적 분포에서 세 사례(1, 2, 4번 사례) 모두 영동 해안 혹은 동해상에서 850과 500 hPa 고도에서 각각 강한 수렴과 발산을 보였다. 이러한 결과는 700 hPa 고도의 연직 속도 분포와 잘 일치한다. 절대소용돌이도의 분포에서는 세 사례 모두 영동과 동해 지역에서 850, 500, 300 hPa 고도에서 모두 강한 소용돌이도(16~26 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)가 나타났다. 그러나 절대소용돌이도의 중심 위치는 사례와 고도에 따라 상당한 변화를 보였다. 특히 4번 사례의 경



**Fig. 5.** Vertical velocity ( $\text{m s}^{-1}$ ) of 700 hPa at (a) 0000 UTC 4 Mar. 2005, (b) 1200 UTC 21 Dec. 2008, (c) 0000 UTC 11 Feb. 2010, and (d) 1200 UTC 11 Feb. 2011.

**Table 5.** Characteristics of diagnostic variables associated with the extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region.

Case No.	Pre. Level (hPa)	Divergence ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )	AV ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )	PV (PVU)	Div.-Q ( $\text{km}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10^{-16}$ )	12 hr Temp. Change ( $^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ )
Case 1 (4 Mar. 2005)	300	-	16~20	6	-10~-20	-5~-10
	500	4	16~20	1	-10~-20	-5~-10
	850	-6	12~24	-	-5~-10	-
Case 2 (21 Dec. 2008)	300	3	20~26	3~4	-30	-5~-10
	500	4	20~24	1.5~3	-30~-100	-5~-10
	850	-4	16~24	-	-10~-30	-
Case 4 (11 Feb. 2011)	300	2	20~24	6~8	-	10~15
	500	4	20~26	-	-30~-100	0~5
	850	-4	16~26	-	-10~-30	-

우 절대소용돌이도의 중심은 동해 남부와 대한해협 부근에 위치하였다.

위치소용돌이도는 상대적으로 300 hPa 고도에서 높고 850 hPa 고도에서 낮으나 수평 분포에서는 뚜렷한 특징을 보이지 않았다. 그러나 500 hPa 고도에서는 뚜

렷한 위치소용돌이도의 중심이 1, 2, 4번 사례에서 각각 산동반도의 남쪽 지역, 동한만, 발해만에 나타났다. 그리고 이 고도에서 1번과 4번 사례의 경우 영동과 동해 지역은 위치소용돌이도의 중심으로부터 가장자리에 위치하였다. Q벡터 수렴 및 발산의 수평적 분포

에서는 세 사례 모두 850에서 300 hPa 고도까지 동해에서 Q벡터의 강한 수렴이 넓게 분포하였다. 그러나 Q벡터 수렴의 중심 위치는 대체로 뚜렷하지 않았다. Q벡터의 수렴은 세 사례 모두 500 hPa 고도에서 가장 강하게 나타났다. 12시간 온도 이류의 수평적 분포 특징은 1, 2, 4번 사례의 300과 500 hPa 고도(4번 사례 300 hPa 고도 제외)에서 영동 지역 부근에서 한기 이류가 나타난다는 것이다. 특히 이러한 한기 이류의 분포는 북부와 중부 동해안을 따라 좁은 띠 모양(2번 사례 500 hPa 고도 제외)을 보였다. 한기 이류는 세 사례 모두 영동 지역 부근의 500 hPa 고도에서 상대적으로 강하게 나타났다.

영동 지역에 나타난 4개의 극한 대설사례와 관련된 진단변수의 수평적 특징을 요약하면 다음과 같다. 1, 2, 4번 사례에서 나타나는 진단변수의 특징은 상승류가 나타나는 동해 지역의 850, 500, 300 hPa 고도에서 강한 양의 절대소용돌이도와 강한 Q벡터 수렴이 나타나고 500과 300 hPa 고도에서 뚜렷한 한기 이류가 나타난다는 것이다. 특히 이러한 특징은 500 hPa 고도에서 뚜렷하게 나타나는데 절대 소용돌이도의 경우  $16\sim 26 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , Q벡터 수렴의 경우  $30\sim 100 \times 10^{-16} \text{ km}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 12시간 온도 이류의 경우  $-5\sim -10^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ 의 값을 보였다. 따라서 동해상에 위치한 상승류를 부저기압의 발달과 관련된 것으로 보면 위에서 언급한 절대소용돌이도, Q벡터 수렴, 온도 이류의 특징은 부저기압의 발달을 진단할 수 있는 적합한 변수가 될 수 있을 것이다.

#### 4.2 진단변수의 연직 단면도

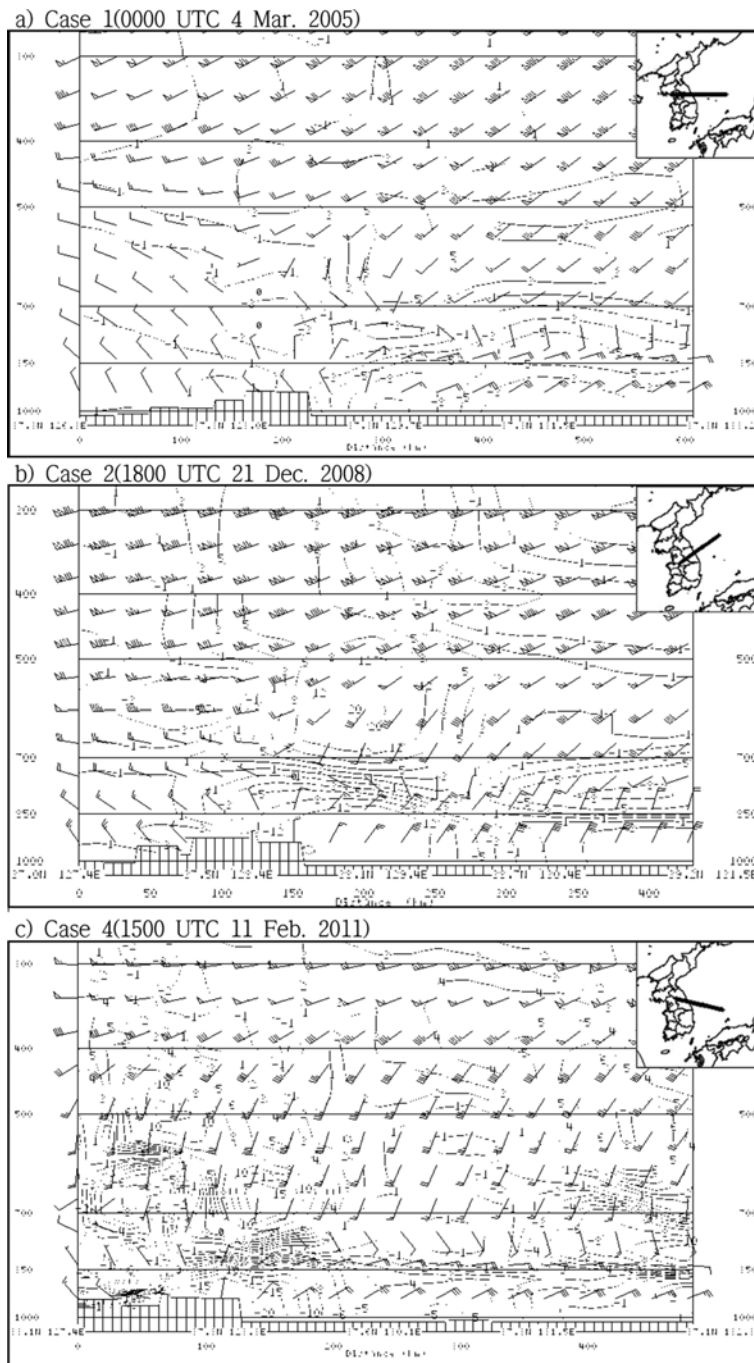
앞서 분석한 진단변수의 수평적 분포를 통해 700 hPa 고도에서 영동과 동해에 강한 상승류가 존재하고 이와 관련된 진단변수의 특징적인 값이 그 부근에 존재한다는 것을 알 수 있었다. 진단변수의 연직 분포를 자세히 분석하기 위하여 강릉과 최대 상승류가 나타나는 지점의 연직 단면에서 진단변수의 연직 분포를 분석하였다. 단 수평 분포의 분석에서 뚜렷한 수평적 분포 특징을 보이지 않았던 Q벡터 수렴은 분석에서 제외하였다. 여기서 강릉 연직측풍 바람 자료와 비교를 위하여 최대 강수가 나타난 시간 즉 2005년 3월 4일 0000 UTC 그리고 2008년 12월 21일 1800 UTC와 2011년 2월 11일 1500 UTC의 자료를 분석하였다. 1번 사례는 00 hr 예보장이고, 2번 사례와 4번 사례는 각각 06과 03 hr 예보장 자료이다.

Figure 6는 세 개 사례에 대한 바람장과 수렴 및 발산의 연직 분포를 보여준다. 세 사례에 나타난 공통점은 영동을 포함하는 동해 전 지역에서 동풍 계열의 바람이 지상에서부터 약 800 hPa 고도까지 나타난다는 것이다. 그리고 영동 해안 혹은 그 근해에서는 지상에

강한 수렴의 중심( $-10\sim -20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )이 나타나고 500과 700 hPa 고도 사이에 강한 발산의 중심( $5\sim 20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )이 나타난다. 또한 이 지역에서는 지상부터 약 700 hPa 고도까지 동풍 계열의 바람이 나타난다. 이러한 바람의 연직 분포는 가까운 시간대의 강릉 연직측풍 장비와 동해 부이의 바람 분포와 대체로 일치한다.

Figure 7은 세 개 사례에서 절대소용돌이도(실선 표시)와 위치소용돌이도(파선 표시)의 연직 분포를 보여준다. 여기서 절대소용돌이도의 경우 1, 2번 사례에서는 상층에서 뚜렷한 특징이 나타나는 반면 4번 사례에서는 상대적으로 그러한 특징이 나타나지 않았다. 1번 사례의 경우  $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  이상의 강한 절대소용돌이도가 약 500~350 hPa 고도에서 한반도와 동해상에 넓게 분포하였다. 그리고 지상 부근에서는 영동 지역에 가까운 동해상에  $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 절대소용돌이도의 중심이 나타났다. 2번 사례의 경우도 산악을 포함한 영동 지역의 지상부터 약 250 hPa 고도까지  $20\sim 34 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 절대소용돌이도가 나타났다. 그러나 4번 사례의 경우 지상과 대기 상층에서 높은 절대소용돌이도의 값이 한 두 지역에서 소규모로 나타나지만 뚜렷한 특징을 찾기에는 어려웠다. 위치소용돌이도의 경우 1번과 2번 사례에서 1.5 PVU (Potential Vorticity Unit;  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )의 값이 한반도에서부터 동해까지 혹은 영동 지역까지 그리고 상층 500 혹은 700 hPa 고도까지 내려와 분포하는 특징을 보였다. 그러나 4번 사례의 경우 비록 1.5 PVU의 값이 영서 지역에서 약 500 hPa 고도까지 내려온 상태이지만 수평적으로 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 이러한 차이의 이유는 4번 사례의 경우 수평 분포 분석에서 상층의 강한 절대소용돌이도와 위치소용돌이도가 한반도 남부와 동해 남부에 위치하기 때문이다. 즉, 이들 위치와 연구에서 선택한 강릉과 동해 중·남부를 연결하는 연장선의 위치 사이에 차이가 있기 때문이다.

Figure 8은 세 개 사례에서 12시간 온도 이류의 연직 분포를 보여준다. 여기서 1, 2, 4번 사례 모두 유사한 분포를 보이는데 그 주된 특징은 다음과 같다. 즉, 영동 부근의 500~300 hPa 고도에서 좁고 강한 한기이류가 나타나는 반면 상승류가 나타나는 지역의 약 500 hPa 이상의 고도에서  $10\sim 20^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ 의 뚜렷한 난기이류가 나타난다는 것이다. 그러나 4번 사례의 경우 1, 2번 사례의 분포와는 조금 다르게 동해상의 약 400 hPa 이상의 고도에서 약 250 hPa를 경계로 상층은 한기이류, 하층은 난기이류의 분포를 보인다. 또한 1, 2, 4번 사례 모두 동해상의 하층 약 850 hPa 이하의 고도에서  $-5\sim -20^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ 의 한기이류가 나타난다. 영동 부근의 대기 상층에서의 한기이류는 1번과 2번 사례의 경우 약 500 hPa 고도 이상에서 각각  $-5\sim -10^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ 와  $-20^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ , 그리고 4번 사



**Fig. 6.** Vertical cross section of wind and divergence (solid line;  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) for (a) 0000 UTC 4 Mar. 2005, (b) 1800 UTC 21 Dec. 2008, and (c) 1500 UTC 12 Feb. 2010. The unit of y-axis which represents pressure level is hPa. These figures are obtained from FAS system of KMA.

례의 경우 500 hPa 고도 부근에서  $0 \sim 5^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ 의 값을 보인다. 이러한 결과를 속초의 고층 관측 자료

와 비교해보면 속초 고층 관측 값에는 최대 기온 하강이 1번 사례에서 약 500 hPa에서  $-6^\circ\text{C} \text{ 12 hr}^{-1}$ , 2번

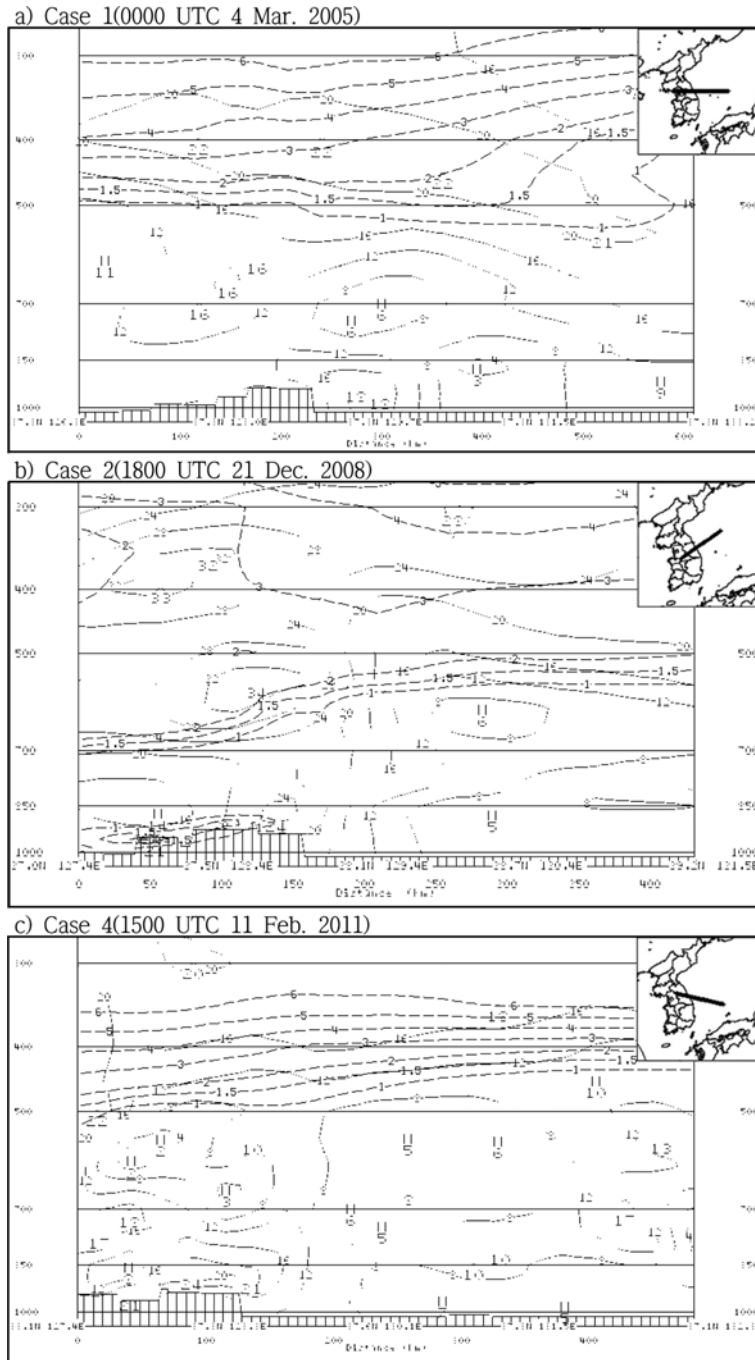


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for the absolute vorticity (solid line;  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and potential vorticity (dashed line; PVU).

사례에서 약 550 hPa에서  $-12^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$  그리고 4번 사례에서  $-7^{\circ}\text{C } 6 \text{ hr}^{-1}$ 로 관측되었다. 따라서 대기 상층의 기온 하강(속초 고층 관측 값)과 수치 모형의 한기이류는 1번과 2번 사례에서 비슷한 특징을 보였다.

그러나 4번 사례의 경우 수치 모형 자료에서는 한기이류가 잘 나타나지 않지만 06과 09 hr 예보장(그림 자료 생략)에서는 대기 상층에서 각각  $-5$ 와  $-20^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ 의 한기이류가 나타난다.

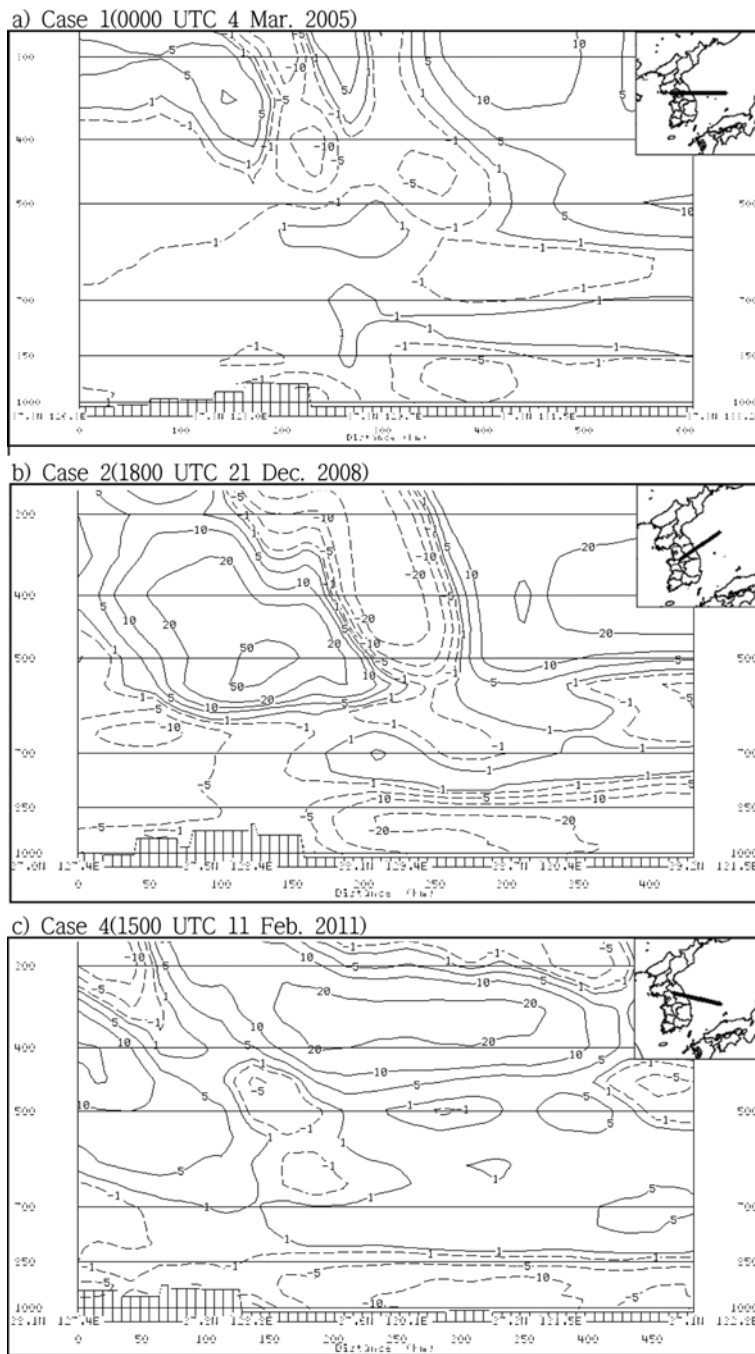
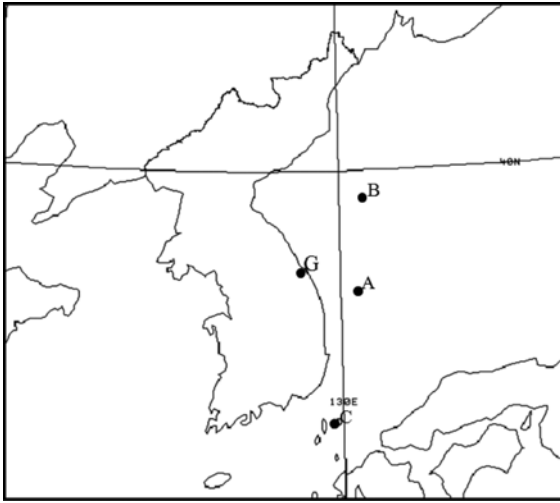


Fig. 8. Same as Fig. 6 except for the temperature advection ( $^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ ).

#### 4.3 진단변수의 시간-고도 단면도

앞서 분석한 진단변수의 수평 분포 분석과 연직 단면도 분석을 통해 극한 대설 사례에서 강한 상승류가 나타나는 영동 및 동해 지역에 다음과 같은 뚜렷

한 특징이 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, 절대소용돌이도가 약 500 hPa 고도 부근에서 큰 값을 보이며 약 1~1.5 PVU의 위치소용돌이도가 약 500 hPa 고도 부근에서 상층에서 하층으로 내려오는 경향을 보



**Fig. 9.** Locations for time-height cross section are indicated by A (Case 1; 37.44°N, 130.47°E), B (Case 2; 39.36°N, 130.67°E), C (Case 4; 34.53°N, 129.69°E) and D (Gangneung; 37.80°N, 128.85°E).

이고 영동 부근에서는 약 500 hPa 고도에서 강한 한기 이류가 나타난다. 이 절에서는 시간과 고도 단면도를 통해서 진단변수의 특징들이 최대 강수가 나타나기 전 시간대에 어떠한 변화가 나타나는지 분석하고자 하였다.

시간-고도 단면도에서는 절대소용돌이도, 위치소용돌이도, 12시간 온도 이류를 조사하였다. 여기서 절대소용돌이도와 위치소용돌이도의 경우 강한 상승류가 나타나는 동해상의 한 지점(1번 사례 A 지점: 37.44°N, 130.47°E, 2번 사례 B 지점: 39.36°N, 130.67°E, 4번 사례 C 지점: 34.53°N, 129.69°E)을 선택하고 12시간 온도 이류는 영동 지역의 온도 이류를 조사하기 위하여 강릉 지점(37.80°N, 128.85°E)을 선택하여 분석하였다(Fig. 9). 시간적으로는 최대 강수가 나타나기 10시간 전부터 이후 2시간까지 총 12시간 동안의 자료를 포함하고 고도는 지상에서부터 300 hPa까지 분석하였다(최대 강수가 나타난 시간은 각각 1번 사례 4일 0000 UTC, 2번 사례 21일 1800 UTC, 4번 사례 11일 1500 UTC이다). 여기서 1, 2번 사례의 경우 RDAPS10 분석장을 사용하였고 4번 사례의 경우 RDAPS10 자료가 없어 UM320 예보장을 사용하였다.

Figure 10은 세 개의 사례에 대한 절대소용돌이도의 시간-고도 단면도이다. 여기서 1, 2, 4번 사례 모두 유사한 분포를 보이며 주된 특징은 최대 강수시간을 전·후로 높은 절대소용돌이도 값의 영역이 증가한다는 것이다. 1번 사례의 경우 최대 강수가 나타나기 6시간 전에  $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  이상의 절대소용돌이도

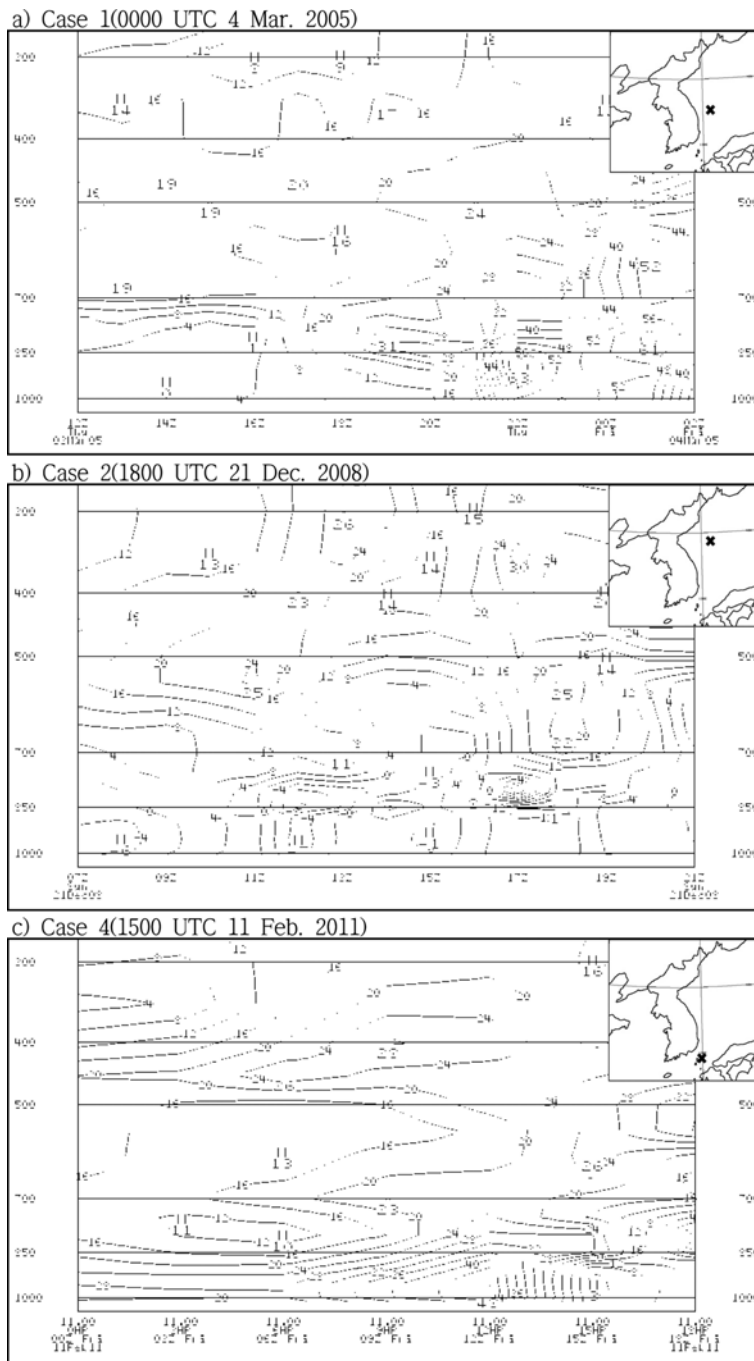
값의 영역이 약 700 hPa에서 처음 나타나고 시간이 지남에 따라 빠르게 증가하여 최대 강수 시각에는  $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  이상의 값이 나타나는 고도 영역이 지상에서 약 450 hPa까지 확장한다. 이 시간대에 지상부터 500 hPa 고도까지  $30 \sim 60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 절대소용돌이도가 나타난다. 2번 사례의 경우 최대 강수가 나타나기 10시간 전부터 약 400 hPa 고도에서  $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  이상의 절대소용돌이도 값의 영역이 처음 나타나고 빠르게 확장하여 최대 강수 시각에는  $20 \sim 30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 소용돌이도가 700~300 hPa 고도 사이에 분포한다. 4번 사례의 경우도 최대 강수가 나타나기 12시간 전에 약 450 hPa에서  $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  이상의 절대소용돌이도 값의 영역이 처음 나타나고 점차 확장하다 최대 강수 시각의 6시간 전부터는 지상부터 약 300 hPa 고도까지  $20 \sim 50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 절대소용돌이도가 나타난다.

Figure 11은 세 개의 사례에 대한 위치소용돌이도의 시간-고도 단면도이다. 여기서 1, 2, 4번 사례 모두 유사한 분포를 보이며 그 주된 특징은 사례에 따라서 시간의 차이는 있지만 최대 강수시간 이전 시간에 상층에서 1~1.5 PVU의 위치소용돌이도가 500 hPa 고도 이하로 내려오는 경향을 보인다. 1번 사례의 경우 최대 강수가 나타나기 2~6시간 전부터 1 PVU의 위치소용돌이도가 850 hPa 부근의 일부 고도에서 처음 나타나고 최대 강수 시각에는 500~850 hPa 고도에 1~2 PVU의 값이 분포한다. 2번 사례의 경우 최대 강수가 나타나기 약 10시간 전에 1 PVU의 값이 약 300 hPa 고도에서 500 hPa까지 하강하고 최대 강수시각에는 2 PVU의 값이 500 hPa 고도까지 하강한다. 4번 사례의 경우도 최대 강수가 나타나기 12시간 이전부터 1~1.5 PVU의 값이 약 350 hPa에서 약 500 hPa까지 하강하고 이후 점차 하강하여 최대 강수 시각에는 고도 약 600 hPa에 분포한다.

Figure 12는 세 개의 사례에 대한 12시간 온도 이류의 시간-고도 단면도이다. 앞선 수평 분포 분석과 연직 단면도 분석에서 나타난 12시간 온도 이류 분포의 특징은 영동 지역 부근의 500 hPa 고도 이상의 상층에서 나타나는 강한 한기 이류이다. 이러한 온도 이류는 그 분포가 매우 좁게 나타나기 때문에 정확한 시간대와 위치를 수치 모형에서 모의하기에는 상당한 어려움이 있다. 여기서 이러한 상층 한기 이류를 적절하게 모사한 분석장 혹은 예보장 자료를 분석하였다. 1번 사례는 RDAPS10 분석장, 2번 사례는 최대 강수 시간을 기준으로 볼 때 RDAPS30의 18 hr 예보장, 4번 사례는 UM320의 15 hr 예보장을 사용하였다. 위치는 세 사례 모두에서 강수가 많았던 강릉 지점에서 시간-고도 단면도를 작성하였다.

1, 2, 4번 사례에서 12시간 온도 이류의 시간-고도





**Fig. 10.** Time-height cross section of absolute vorticity ( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) for (a) 0000 UTC 4 Mar. 2005, (b) 1800 UTC 21 Dec. 2008, and (c) 1500 UTC 12 Feb. 2010. The unit of y-axis which represents pressure level is hPa. These figures are obtained from FAS system of KMA.

단면도의 공통된 특징은 최대 강수가 관측되는 시간 대의 약 500 hPa 고도 부근에서 나타나는 강한 한기

이류이다. 1번 사례의 경우 최대 강수가 나타나기 10 시간 전부터 약 500 hPa 고도 부근에  $-10^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ 의

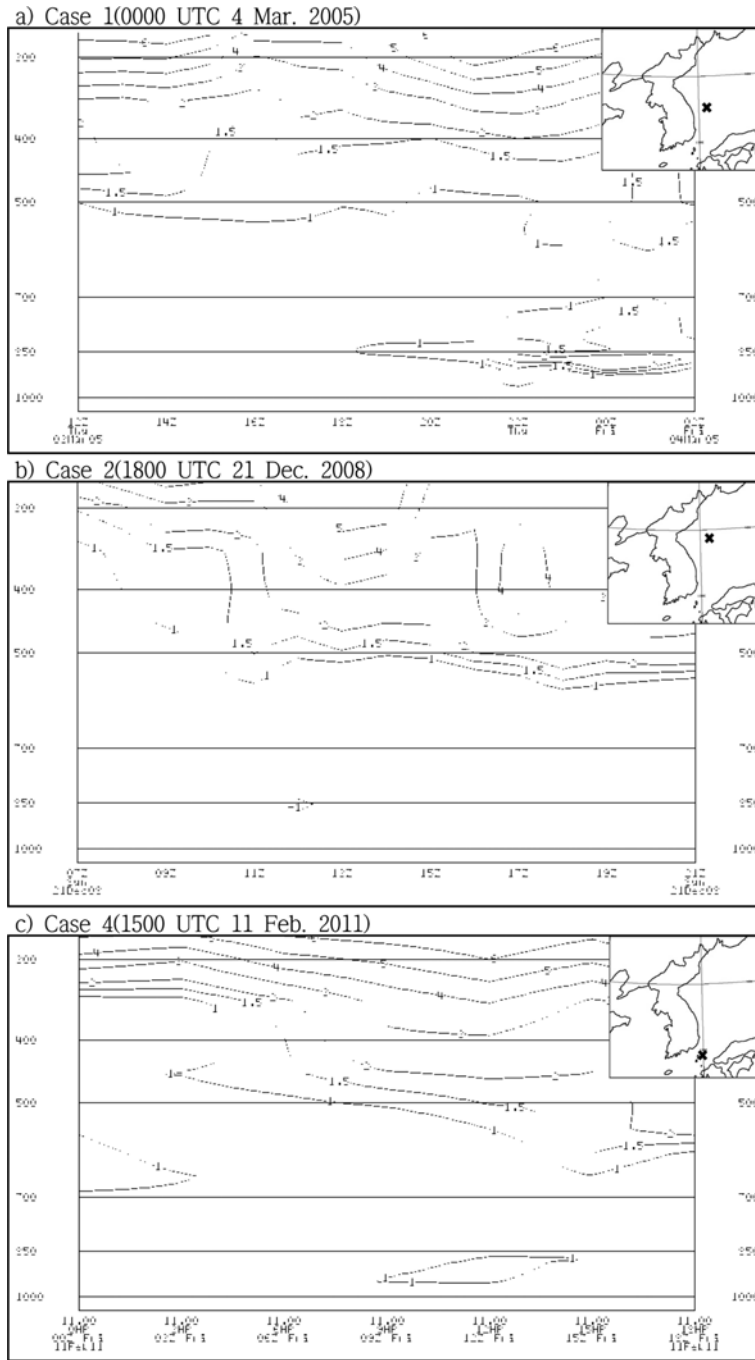


Fig. 11. Same as Fig. 10 except for the potential vorticity (PVU).

온도 이류가 나타나고 최대 강수 시각에는 약  $-20^{\circ}\text{C}$   $12\text{ hr}^{-1}$ 의 강한 한기 이류가 분포한다. 2번 사례의 경우 최대 강수 시각 약 10시간 전부터 고도 500~700 hPa에서 약  $-10^{\circ}\text{C}$   $12\text{ hr}^{-1}$ 의 온도 이류가 분포한다. 그

리고 4번 사례의 경우도 최대 강수가 나타나기 약 10시간 전부터 약 500 hPa 고도에서  $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$   $12\text{ hr}^{-1}$ 의 한기 이류가 분포하고 이 영역은 최대 강수시각 3시간 전부터 상승하여 최대 강수시각에는 300~400

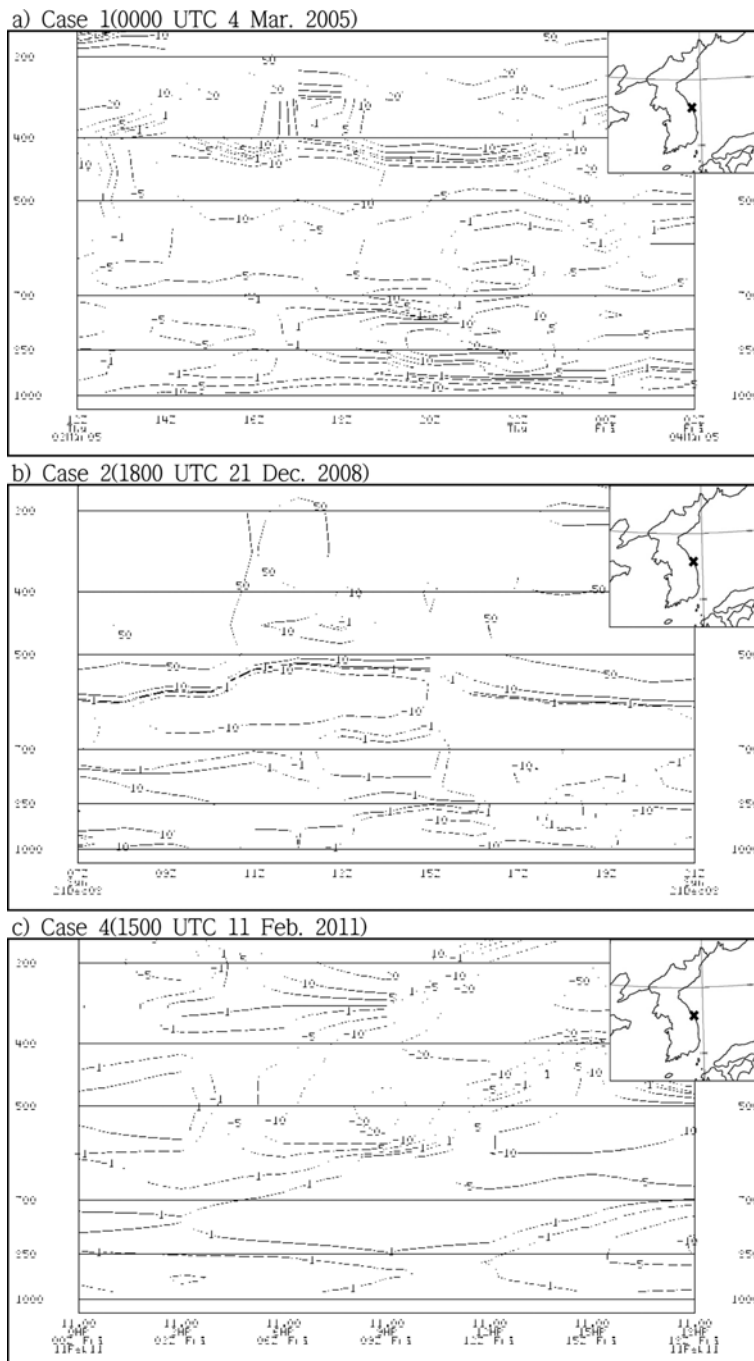


Fig. 12. Same as Fig. 10 except for the temperature advection ( $^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ ).

hPa 고도에서  $-20^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ 의 강한 한기 이류가 나타난다. 이러한 상층의 한기 이류는 속초 고층 관측 자료에 나타난 기온 하강 즉, 약 500 hPa 고도에서  $-6 \sim -12^{\circ}\text{C } 12 \text{ hr}^{-1}$ 의 기온 하강과 대체로 일치한다.

## 5. 요약 및 결론

영동 지역의 겨울철 강수는 종종 50 cm 이상의 일신적설을 보인다. 이것은 대설 경보 수준(일신적설 20

**Table 6.** Features of 3 extreme heavy snowfall events in the Yeongdong region.

	Case 1 (0000 UTC 4 Mar. 2005)	Case 2 (1200 UTC 21 Dec. 2008)	Case 4 (1200 UTC 11 Feb. 2011)	
Obs. data	Sfc chart	Center of low in the east region of Japan, Secondary cyclone or vortex	Center of low in the Honshu of Japan, Secondary cyclone or vortex	Center of low in the south-eastern region of Japan, Secondary cyclone
	Upper level chart	Trough & thermal trough (500 hPa) Trough (300 hPa)	Trough & thermal trough (500 hPa) Trough (300 hPa)	Closed low & cold core (500 hPa) Closed low (300 hPa)
	Wind profiler (East or North wind altitude)	NE~E (4 km)	N~NNW (3.5 km)	N~NE~SE (4 km)
	Radiosonde (12 hr temp. change)	-6°C 12 hr <sup>-1</sup> (500 hPa)	-12°C 12 hr <sup>-1</sup> (580 hPa)	-7°C 6 hr <sup>-1</sup> (500 hPa)
	Diagnostic variables	Absolute vorticity	20~60 × 10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup> (Sfc~500 hPa) Vorticity development (20 × 10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup> at 700 hPa) prior to 6 hr	20~30 × 10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup> (700~300 hPa) Vorticity development (20 × 10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup> at 500 hPa) prior to 10 hr
Potential vorticity		Center of potential vorticity at 500~300 hPa level is located on the west region of the Korean peninsula, except for 500 hPa of case 2 and 300 hPa of case 4		
12 hr temp. advection		1~2 PVU increase (below 500 hPa level) prior to 2 hr -10°C 12 hr <sup>-1</sup> (500 hPa) Strong cold advection at 500 hPa prior to 10 hr	1~1.5 PVU increase (500~300 hPa level) prior to 12 hr -25°C 12 hr <sup>-1</sup> (500 hPa) Strong cold advection at 300 hPa prior to 12 hr	1~1.5 PVU increase (500~350 hPa level) prior to 12 hr -12°C 12 hr <sup>-1</sup> (500 hPa) Strong cold advection at 500 hPa prior to 9 hr

cm 이상, 산지의 경우 30 cm)을 증가하는 적설량이다. 이 연구에서는 이러한 현상을 극한 대설 사례로 정의하고 이 사례를 예보하기 위한 예측 가이던스를 조사하였다. 지난 12년(2001~2012년) 동안 극한 대설 사례는 영동 지역에서 총 4차례 발생하였으며 이들 사례는 3번째 사례(2010)를 제외하고 모두 영동 해안 지역에서 짧은 시간 동안 많은 강수량(10 mm 이상의 시간 강수량과 10 cm 이상의 시간 신적설)을 기록하였다(Table 1과 2). 3번째 사례는 강수량에서 나머지 사례들과는 다르게 뚜렷한 강한 강수가 나타나지 않았고(50 cm 이상의 일신적설이 나타난 대관령에서 최대 시간 강수량은 3 mm이다), 700 hPa 고도의 연직 속도에서도 영동과 동해 지역에 뚜렷한 상승류가 나타나지 않았기 때문에 이 연구에서 제외하였다. 영동 극한 대설로 선정한 3개 사례의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 영동 지역의 최대 강수는 영동 해안에 인접해 위치한 부저기압 혹은 소용돌이의 발달과 관련되어 있으며 이들은 위성의 적외 영상에 나타난 영동 부근의 구름 덩어리의 발달과 잘 일치함을 볼 수 있었다(Cho and Kwon, 2014).

Table 6은 위의 조사에서 수집한 영동 지역 극한 대설과 관련된 세 사례의 특징들을 요약한 것이다. 극

한 대설은 종관 지상 일기도에서는 세 사례 모두 영동 지역이 고기압 전면 혹은 저기압 후면에 위치하고 영동 혹은 영동 부근 동해상에 부 저기압 혹은 소용돌이가 발달하였다. 이 때, 주저기압은 일본 지역 혹은 일본 동부에 위치하였다. 500 hPa 일기도에서는 1, 2번 사례에서 뚜렷한 기압골과 온도골이 한반도 중부 지역까지 분포하였고, 4번 사례에서는 저기압 중심과 한핵이 만주 지역에 위치하고 그 골은 한반도 중남부 지역까지 분포하였다. 또한 300 hPa 일기도에서도 세 사례 모두 기압골 혹은 저기압 중심이 북한 혹은 만주 지역에 나타났다. 이때 강릉 수직 측풍 자료에서 바람은 세 사례 모두 3~4 km 고도까지 북풍 혹은 동풍 계열로 나타났고 풍속은 약 5~13 m s<sup>-1</sup>로 나타났다. 속초 고층 기상 관측 자료에서는 세 사례 모두 최대 강수가 나타나기 이전 약 6시간에서 12시간 동안 500 hPa 고도 부근에서 뚜렷한 기온 하강이 나타나고 그 강도는 -6~-12°C였다.

수치모형 자료를 이용하여 조사한 진단 변수의 특징을 요약하면 다음과 같다. 절대소용돌이도의 경우 세 사례 모두 지상에서 500 hPa 고도까지 영동 혹은 동해에 20~60 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>의 강한 절대소용돌이도 값이 나타난다. 특히 4번 사례의 경우 하층에서 중심이 동

**Table 7.** Forecasting guidance using observation data and diagnostic variables for the extreme heavy snowfall in the Yeongdong region.

Forecasting guidance	
Surface chart	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yeongdong region is located in the rear of the low pressure and on the front of the high pressure.</li> <li>• Development of secondary cyclone or vortex over the Yeongdong or over East-sea near the Yeongdong region.</li> </ul>
Upper level chart	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Significant trough and thermal trough at 500 hPa level is located over the middle part or southern part of the Korean peninsula.</li> <li>• Similarly trough at 300 hPa level is located.</li> </ul>
Vertical wind	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Northerly or easterly wind is observed from surface to 3~4 km altitude.</li> <li>• Wind speed is 5~13 m s<sup>-1</sup>.</li> </ul>
12 hr temp. advection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strong cold advection (-10~-20°C 12 h<sup>-1</sup>) with narrow shape at 500 hPa level is located over the Yeongdong region or near East-sea.</li> </ul>
Absolute vorticity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorticity (20~60 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>) is shown from lower atmosphere to 500 hPa level.</li> <li>• Strong vorticity (≥ 20 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>) is shown at 700~500 hPa level prior to 6~12 hr of max. precipitation time.</li> </ul>
Potential vorticity	<ul style="list-style-type: none"> <li>• The center of potential vorticity at 500~300 hPa level is located over the west of the Korean peninsula.</li> <li>• Potential vorticity (1~2 PVU) near the Yeongdong region at max. precipitation time moves from upper level toward 600~500 hPa level.</li> </ul>

해 남부 지역에 위치하였다. 위치소용돌이도의 경우 그 중심은 500과 300 hPa(2번 사례의 500 hPa과 4번 사례의 300 hPa을 제외하고)에서 모두 한반도 서쪽에 위치하였다. 그리고 최대 강수 시각에 영동 부근의 위치소용돌이도는 1~2 PVU값이 500~600 hPa 고도까지 분포하였다. 그리고 이러한 높은 PVU 값은 상층에서부터 하층으로 이동하는데 그 선행 시간은 사례에 따라 차이를 보였다. 12시간 온도 이류의 경우 세 사례 모두 500 hPa 고도에서 영동 혹은 인접한 동해에 좁은 띠 모양으로 -10~-20°C 12 hr<sup>-1</sup>의 강한 한기 이류가 나타났다. 이러한 강한 절대소용돌이도와 강한 한기 이류는 최대 강수가 나타나기 약 10시간 전부터 나타나기 시작했다. 이 자료를 바탕으로 영동 지역의 극한 대설 예보를 위한 중관환경과 관련된 예측가이던스를 Table 7과 같이 제시하였다. 그러나 이러한 결과자료가 단지 3개의 극한 대설 사례로부터 작성되었다는 것은 이 연구의 한계이고 앞으로 정량적 예측가이던스를 위하여 보다 많은 대설 사례에 대한 연구가 필요하다.

### 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

- Ahn, J.-B., and C.-H. Jeong, 1984: The limited area energy budget associated with an extratropical cyclone developed over the Japan Sea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **20**, 22-34 (in Korean with English abstract).
- Asai, T., 1988: Meso-scale features of heavy snowfalls in Japan Sea coastal regions of Japan. *Tenki*, **35**, 156-161 (in Japanese with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- Chung, K.-B., J.-Y. Kim, and T.-Y. Kwon, 2004: Characteristics of lower-tropospheric wind related with winter precipitation in the Yeongdong region. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 369-380 (in Korean with English abstract).
- Doswell, C. A., III, H. E. Brooks, and R. A. Maddox, 1996: Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea. Forecasting*, **11**, 560-581.
- Heo, K.-Y., K.-J. Ha, and S.-H. Shin, 2005: On development mechanism of heavy snowfall event occurred in

- Busan on 5 March 2005. *J. of Korean Meteor. Soc.*, **41**, 547-556 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-E., T.-Y. Kwon, and B.-Y. Lee, 2005: Characteristics of sensible heat and latent heat fluxes over the East Sea related with Yeongdong heavy snowfall events. *Ocean Polar Res.*, **27**, 237-250 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-R., K.-E. Kim, J.-M. Yoo, and W.-J. Lee, 2002. Tropopause undulation associated with explosive development of a cyclone. *J. Korean Meteor. Soc.*, **38**, 431-463 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-G., T.-Y. Kwon, I.-U. Jeong, and B.-G. Kim, 2011: Development of the techniques for analyzing of severe weather meteorological variables in the Gangwon region I. *Nat. Inst. Meteor. Res.*, Seoul, South Korea, pp. 802 (in Korean with English abstract).
- 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 (in Korean with English abstract).
- Lee, T.-Y., Y.-Y. Park, and Y.-L. Lin, 1998: A numerical modeling study of mesoscale cyclogenesis to the East of the Korean peninsula. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2305-2329.
- Lim, B.-H., Y.-S. Jung, S.-K. Park, S.-J. Kim, J.-H. Lee, J.-S. Chung, N.-W. Kim, H. Lee, and S.-K. Chung, 2002: The Development of Forecaster's Analysis System(FAS). *J. Korean Meteor. Soc.*, **12**, 586-588 (in Korean).
- Maddox, R. A., 1980: Mesoscale Convective Complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **61**, 1374-1387.
- Nagata, M., 1993: Meso- $\beta$ -scale vortices developing along the Japan-Sea Polar-Airmass Convergence Zone (JPCZ) cloud band: Numerical simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 43-57.
- 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.