

KEOP 집중관측자료를 활용한 2004년 2월 4일 황해 남부해상의 강설세포 형성과정 특성 분석

김 백 조 · 조 천 호 · 류 찬 수 · 정 호 상*
국립기상연구소, *조선대학교 대학원 대기과학과
(2007년 6월 22일 접수; 2007년 11월 1일 채택)

Characteristics of Snow-cell Formation Processes over the Southern Part of Yellow Sea on 4 February 2004 using the KEOP Intensive Observation Data

Baek-Jo Kim, Chun-Ho Cho, Chan-Su Ryu* and Hyo-Sang Chung*

Policy Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

*Department of Atmospheric Sciences, Graduate School Chosun University Gwangju 501-759, Korea

(Manuscript received 22 June, 2007; accepted 1 November, 2007)

The formation mechanism of the snow cells of the Yellow Sea associated with snowfall over the southwestern part of Korea on 4 February, 2004 has been investigated using special upper-air sounding and radar data obtained for the KEOP (Korea Enhanced Observing Period) Intensive Observing Period (IOP). Results show that the types of snow cells for the selected period are classified into L(Longitudinal)-mode, Low-level convergence, and T(Transverse)-mode with their evolution from L-mode to T-mode. In particular, the existence of low-level warm and humid layer associated with temporally southwesterly inflow for about 4 hours provides a favorable condition in forming the T-mode snow cells. The vertical depth of the T-mode snow cells is deeper than that of L-mode ones due to the southeastward penetration of cold and dry air into relatively warm and humid air. In addition, it is found that wind shear vector between 1000 hPa and 600 hPa is one of the factors which control the orientation of snow cells in formation embedded into the snowbands for the both modes.

Key Words : Formation process, Snow cells, KEOP, Wind shear vector

1. 서 론

한반도 남서지역은 울릉도, 영동지방과 더불어 겨울철 강설현상이 빈번하게 발생하는 지역 중 하나이다^{1,2)}. 특히 겨울철 차갑고 건조한 시베리아 기단이 따뜻한 황해상으로 진출할 때 하층으로부터 열과 수증기의 공급으로 하층이 불안정 하게 되어 강설운이 형성된다. 이렇게 형성된 강설운이 상대적으로 차가운 육지에 도달하게 되면 강설이 발생하게 되며, 때때로 서해안지역에 대설을 발생시켜 인명과 재산상의 피해를 초래하게 된다.

강설에 영향을 주는 대기시스템에 따라 수렴구름대(convergent cloud bands), 중규모 와도(mesoscale vortices), 저기압과 관련된 강설연구가 있다. 서³⁾가 한대 저기압 중심에서 대류권 중·상층에서의 와도 증가와 대류권 하층에서의 습윤공기의 수렴에 의한 강한 상승운동에 의해 우리나라 중부지방에 강설현상이 초래됨을 지적하였다. 또한 문길태와 김⁴⁾은 1981년 1월의 저기압에 동반된 대설의 특성 연구를 통하여 중층의 위치 불안정성이 지형에 의해 강제 상승으로 촉진되어 중층에서의 강설을 증가 시켰으며, 이 중층에서 증가된 강설은 하층운의 응결핵 역할을 함으로서 하층에서 강설이 급성장하여 대설이 발생하였다고 설명하였다. 다른 한편으로 황해상의 강설 현상에 중요한 기구인 기단변질에 관한 연구

Corresponding Author : Baek-Jo Kim, Policy Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea
Phone: +82-2-6712-0230
E-mail: bjkim@kma.go.kr

로 민⁵⁾과 백⁶⁾은 한랭 건조한 cP기단이 황해상을 지나면서 하층으로부터 받은 현열과 잠열을 수지 방정식으로 그 양을 구하였다. 북서기류가 황해상을 지나면서 현저히 변질되며, 이렇게 변질된 기단은 우리나라 서해안지방에 강설을 야기시킴을 밝혔다. 박순웅과 정⁷⁾는 혼합층 이론을 이용해서 기단변질 모델을 개발하여 cP기단의 강출에 적용한 결과, 우리나라 서해안에서 빈번히 발생하는 소낙운은 지형적 영향보다 한랭 건조한 북서기류가 황해상에서 변질되어 나타남을 지적하였다. 수치모형을 이용한 사례연구로 전종갑 등⁸⁾은 우리나라에서 발생한 대설을 3개의 대설권역으로 구분하고, 대표적인 사례를 택하여 수치모의 실험을 섬김격자계와 상세격자계에 대해 수행하였다. 이처럼 국내의 강설연구는 종분분석이나 열수지 분석 그리고 수치모형을 이용한 연구가 대부분으로 겨울철 집중관측을 통한 강설세포의 발생·발달에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

국외의 강설연구는 겨울철 집중관측프로그램을 통한 일본 서해상에서 발달하는 대류성 눈구름의 중규모 및 미세규모 구조의 발전과정을 분석한 연구나⁸⁾, 선박을 이용한 동해상의 고층관측으로 해상의 구름밴드의 중규모 구조를 조사한 연구⁹⁾ 등과 같이 겨울철 폭설집중관측을 기반하고 있다. 최근 들어 겨울철 동계 몬순기류의 방향과 직각으로 발달하는 T(Transverse)-모드의 눈구름밴드에 관한 연구가 진행되고 있다¹⁰⁻¹²⁾. Yagi¹⁰⁾는 위성 및 레이더 영상자료를 이용하여 T-모드 눈구름밴드를 확인하고 주변 고층관측자료를 이용한 호도그래프를 도식화하여 눈구름의 배열과 대류권 중·하층 바람사이의 관련성을 조사하였다. Fujiyoshi et al.¹¹⁾은 T-모드 눈구름밴드의 이중도플러 분석을 통하여 눈구름내의 중규모 감마규모의 3차원 운동학적 구조를 밝혔다. Shimizu¹²⁾는 일본 서해 연안지역에서 발생하는 중규모 폭설현상을 규명하기 위한 겨울철 중규모 대류시스템 특별관측자료를 사용하여 T-모드 강설밴드의 형성과정을 이중도플러 분석을 통하여 조사하였다. 이와 같이 겨울철 강설세포 형성과정 이해를 위해서는 집중관측이 매우 유효한 것으로 판단되며, 이들 자료를 이용한 강설세포의 다중규모 구조분석이 가능함을 암시한다. 또한 겨울철 집중관측을 통한 강설현상의 구조 이해는 겨울철 재해성 기상인 강설에 대한 이해 및 예측 능력 향상에 매우 중요하다. 이러한 관점에서 기상연구소 주요사업인 ‘한반도 악기상 집중관측사업(Korea Enhanced Observing Period, KEOP)’에서 2004년 겨울철 집중관측(Winter Monsoon Observation, WMO-2004)을 수행하였다.

본 연구에서는 WMO-2004 집중관측기간 중에 한반도 남서지역에 강설을 초래한 2004년 2월 4일 사례에 황해 남부해상에서 발달한 강설세포의 형성 기구 및 연직대기환경을 분석하였다. 특히 한반도 남서지역의 강설발생과 관련된 황해상의 다양한 강설세포 모드가 존재함을 확인하고자 한다.

2. 자료

WMO-2004는 2004년 2월 3일에서 7일까지의 한반도 남서지역에서 실시하였으며, 관측 장비는 해남의 오토존데, 무안의 레윈존데 및 X-밴드 도플러 레이더가 사용되었다. 본 연구에서는 한반도 남서지역에 강설이 발생한 2004년 2월 4일 사례에 대해 통째로 WMO-2004에서 수집된 관측 자료와 기상청의 고층(흑산도, 광주), 지상(목포, 흑산도, 제주) 그리고 레이더(진도) 관측 자료를 이용하여 강설세포 형성 특성을 분석하였다. 여기서 2004년 2월 4일의 강설발생과 관련된 위성, 레이더, 기상요소의 일변화 특성을 쉽게 알아볼 수 있도록 UTC (Coordinated Universal Time)대신에 LST (Local Standard Time) (= UTC + 9시간)를, 고층관측자료의 분석의 경우, 특별고층관측지점 외에 기상청 고층관측지점의 관측 자료를 사용하기 위해 UTC를 사용하였다.

WMO-2004에서 고층관측은 라디오존데(radio sonde)와 기구(balloon)를 이용하여 고도별 기압, 기온, 습도, 풍향 및 풍속을 관측하게 된다. 라디오존데의 센서와 송·수신 시스템은 흑산도와 광주지점에서는 (주)진양에서, 무안과 해남지점에서는 Vaisala(사)에서 각각 개발된 것이다. 특히 무안에서는 이동식 고층관측장비를 설치하여 관측자들에 의해서 관측하였고, 해남에서는 Vaisala사에 개발된 오토존데를 사용하여 자동고층관측을 수행하였다. 고층관측 자료의 정확도는 사용된 라디오존데의 정확도와 밀접하게 관련되어 있다. 여기서 사용된 라디오존데 센서는 대부분 제작사에서 자체 검정을 이미 받았고, 고층관측을 위해 센서와 기구의 발사 전에 관측지점의 자동기상관측자료와의 비교를 통해 다시 초기화하므로 정확도에 대한 신뢰도는 매우 높은 편이다. 또한 고층관측자료의 이상치는 라디오존데 센서의 오작동이나 센서와 지상국의 송·수신 시스템 간의 통신 장애에 의해 주로 발생하게 되는데, 이러한 관측 자료들은 고층 관측자료의 품질관리(quality control) 매뉴얼에 따라 처리하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사례선정

3.1.1. 중관기상상태

Fig. 1은 한반도 남서지역에서 발생한 강설과 관

(a) 0000UTC 4 Feb., 2004

(b) 1200UTC 4 Feb., 2004

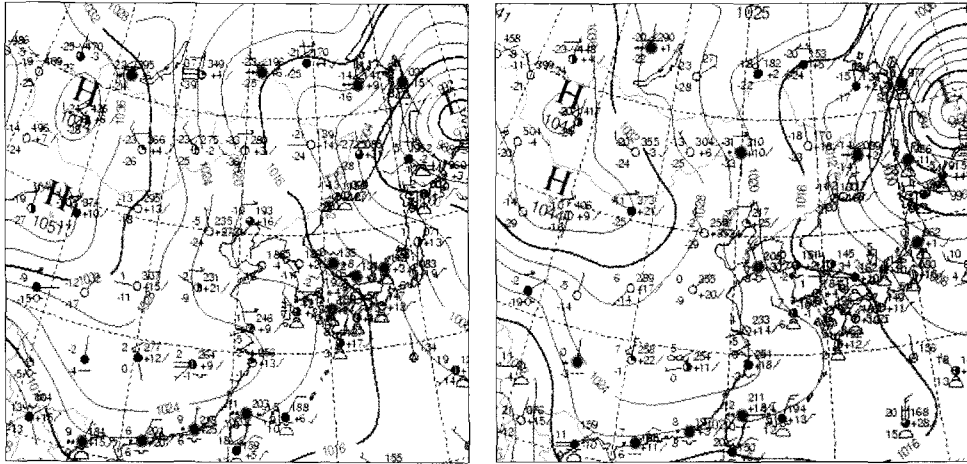


Fig. 1. Surface weather charts at (a) 0000 UTC and (b) 1200 UTC 4 Feb., 2004.

러된 강설세포의 형성 및 발달 특성을 분석하기 위해 선정한 2월 4일의 지상일기도이다. 전형적인 겨울 기압배치인 서고동저형의 기압배치, 즉 중국내륙 지역에 시베리아 고기압이, 사할린 동부지역에 알류산 저기압이 위치하고 있고, 한반도 중부지방에는 약한 기압골이 형성되어 있다. Zhang et al.¹³⁾은 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center of Atmospheric Research) 재분석자료를 이용하여 한파와 관련된 지상 고기압의 유적선을 조사한 결과, 대부분의 지상 고기압은 Baikal 호수의 북서쪽 지역과 Balkhas 호수의 북쪽 지역에서 주로 발생하여 주로 중국동안을 따라 남하 또는 남동진한다고 조사하였다. Fig. 1에 제시된 2월 4일의 지상일기도상에서 나타나는 지상고기압의 발생 지역을 조사하기 위해 사례 일을 기준으로 3~4일 이전 지상일기도를 연속적으로 분석해 본 결과, 2월 4일 0000 UTC의 한파 관련 지상고기압은 Zhang et al.에서 제시한 지상고기압의 주요 발생지역 중에서 Balkhas 호수의 북쪽지역에서 발생하였음을 알 수 있었다.

한파를 동반한 지상고기압의 남동방향으로의 확장과 관련하여 중부지역에 위치한 서울지점과 남부지방에 위치한 목포지점의 기온자료를 조사해 보면 (그림 미포함), 서울의 경우 4월 1일의 3.1°C에서 4월 3일의 -4.2°C로 약 7°C정도의 급격한 기온 하락이 있었으나, 목포의 경우 4월 1일의 3.9°C로 서울과 비슷하지만 4월 3일의 -0.4°C로 약 4°C정도의 기온 차이가 있었다. 이는 서울에 비해 상대적으로 기온하강이 작음을 알 수 있다. 겨울철의 전형적인 서고

동저형의 기압배치 하에서는 한반도 전체가 북서계절풍의 영향권에 놓이게 되어 기온하강이 전국에 걸쳐 나타날 수 있으나, 중국 대륙의 cP 기단의 세력이 다소 약하거나 그 세력이 점차 남쪽으로 장출하면서 변질될 때 이 고기압의 남동쪽 가장자리에서 중규모 β 규모의 국지 영역에서 온난한 남서기류의 유입이 나타나게 된다(Fig. 5참조). 이러한 남서기류에 의한 난기활승에 의해 지속시간이 짧고 약한 강설을 가진 구름이 만들어 진다.

황해 남부해상에서 발생하는 강설의 한반도 남서지역의 강설량은 2월 5일(광주: 5.1 cm, 목포: 2.9 cm)과 6일(광주: 7.0 cm, 목포: 0.8 cm)에 비해 적었으나 하루 동안 다양한 강설세포가 나타난 2004년 2월 4일(광주: 1.4 cm, 목포: 0.1 cm)을 본 연구의 사례일로 선정하였다.

3.1.2. 위성 및 레이더 영상

지상 고기압의 확장과 관련된 위성 및 레이더 영상을 Fig. 2에 제시하였으며, 먼저 위성영상을 살펴보면 2월 4일 0220 LST의 경우 황해 중부해상에서 구름열(cloud street)이 발생하여 한반도 서해안지역까지 영향을 미친다. 반면에 2월 4일 2025 LST의 경우 황해 남부지역에 발생한 구름무리가 서서히 동진하면서 상대적으로 차가운 육지상에 구름무리가 더욱 발달하였다. 대륙 고기압 남하에 따른 한기 남하에 따른 국지적인 난기활승에 의해 황해 남부해상에서 발달된 강설 구름열이 약한 중규모 기상흐름의 영향으로 북동방향으로 이동하여 호남내륙지방까지 확장하였다. 난기 활승에 의한 강설 구름의 분포와 높이는 난기 유입의 방향과 세기에 크

(a) 0220LST 4 Feb., 2004

(b) 2025LST 4 Feb., 2004

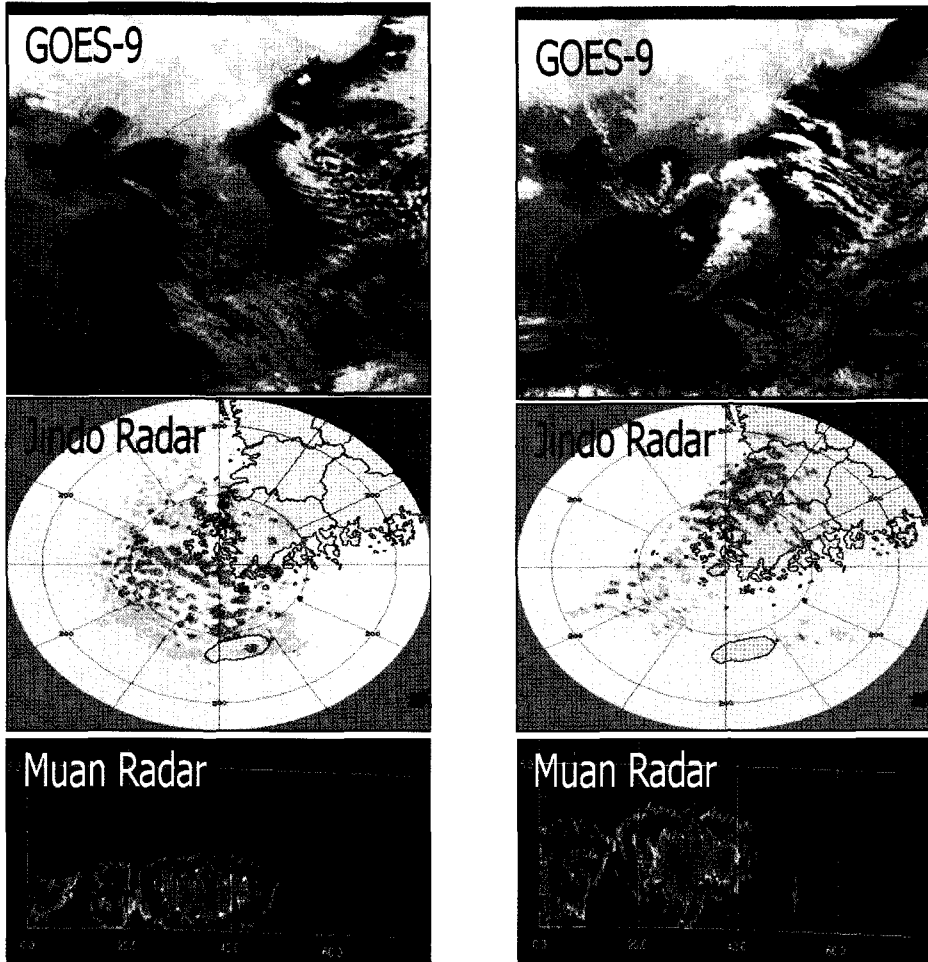


Fig. 2. Infrared satellite images from GOES-9 (upper panel), reflectivity from Jindo radar (middle panel) and RHI (bottom panel) from Muan X-band Doppler radar at (a) 0220 LST and (b) 2025 LST, 4 Feb., 2004.

게 의존하는 것처럼 보인다. Fig. 4에서처럼 구름열의 이동은 한기의 남하에 남서류가 활승하여 나타나는 구름열이 나타나는 지역의 유입이 강설세포의 발생, 발달 및 이동방향을 살펴보기 위하여 2 mm/h의 강우율을 가진 진도 레이더 반사도자료를 “강설세포(Snow cell)”로 정의하였다. 강설세포의 분포를 조사한 결과, 2월 4일 0220 LST에는 강설세포들의 배열이 북서-남동방향을 갖추었으나 2025 LST에는 다른 남서-북동방향의 배열을 보였다. 특히 강설세포의 남서-북동방향의 배열을 유지하기 위하여 강설세포가 소흑산도의 남서쪽 수십 km지역에서 지속적으로 발생·발달하여 한반도 남서지역으로 이동하였다. 무안 X-밴드 도플러 레이더에서 310°방향의 RHI(Range Height Indicator) 자료를 통하여 강

설세포의 연직범위를 살펴보면, 강설세포의 상부높이는 L(Longitudinal)-모드에서 2 km, T(Transverse)-모드에서 3.5 km이었으며, 하부높이는 L-모드가 지표부근인 반면에 T-모드는 다소 높은 500m정도이었다. 이런 결과는 L-모드의 강설세포가 지표에 접하여 발달함을 알 수 있다. 여기서 L-모드와 T-모드는 기존 연구들^{10~12)}에서 제시된 정의를 이용하였다. 다시 말해, 강설세포 L-모드와 T-모드는 하층 바람방향이 강설세포의 진행방향과 같은 경우와 직각인 경우를 각각 의미한다. T-모드의 강설세포 높이가 L-모드보다 다소 높고 지면에 접하지 않은 원인으로 황해 남부해상에서 이루어 온 상대적으로 따뜻하고 다습한 공기가 북서쪽에서 접근해 온 차갑고 건조한 공기 위를 따라 상승하였기 때문으로

생각된다.

3.2. 강설세포 발달 특성

3.2.1. 강설세포 형태

본 연구의 사례일인 2004년 2월 4일의 한반도 남서지역의 강설발생과 관련된 강설세포는 L(Longitudinal)-모드, 하층수렴대, T(Transverse)-모드로 크게 구분되어 진다(Fig. 3). T-모드 강설세포가 발달한 2월 4일 2100 LST의 지상일기도에 한반도 동한만에 지상 기압골이 존재하였다. 한파를 동반한 지상고기압의 세력이 동중국해상과 연해주로 확장

하면서 그 사이에 이 기압골 발달하였으며, 이 기압골은 황해 남부해상지역으로 국지적인 하층 남풍기류의 유입에 좋은 조건을 제공하는 것으로 생각된다. 이렇게 형성된 강설세포는 2월 4일 하루 동안 L-모드→수렴대→T-모드로 발전하였다.

여기서 제시한 T-모드 강설세포의 발생·발달을 확인하기 위하여 2월 4일 1930 LST부터 2100 LST까지 20분 간격의 진도레이더의 반사도 자료를 Fig. 4에 나타내었다. 1930 LST부터 1950 LST까지는 강설세포가 황해상에서 발생하여 한반도 남서지역으로 이동하는 동안 그 배열방향이 북서-남동이었으

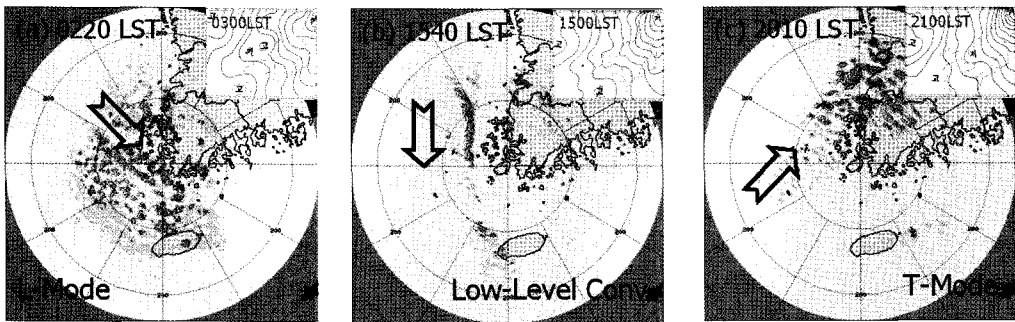


Fig. 3. Types of snow cells over the Yellow Sea associated with snowfall over the southwestern part of the Korean peninsula on 4 Feb., 2004. Surface weather chart is given in the upper-right sector of figure for each type. Empty thick arrow indicates the orientation of snow cells.

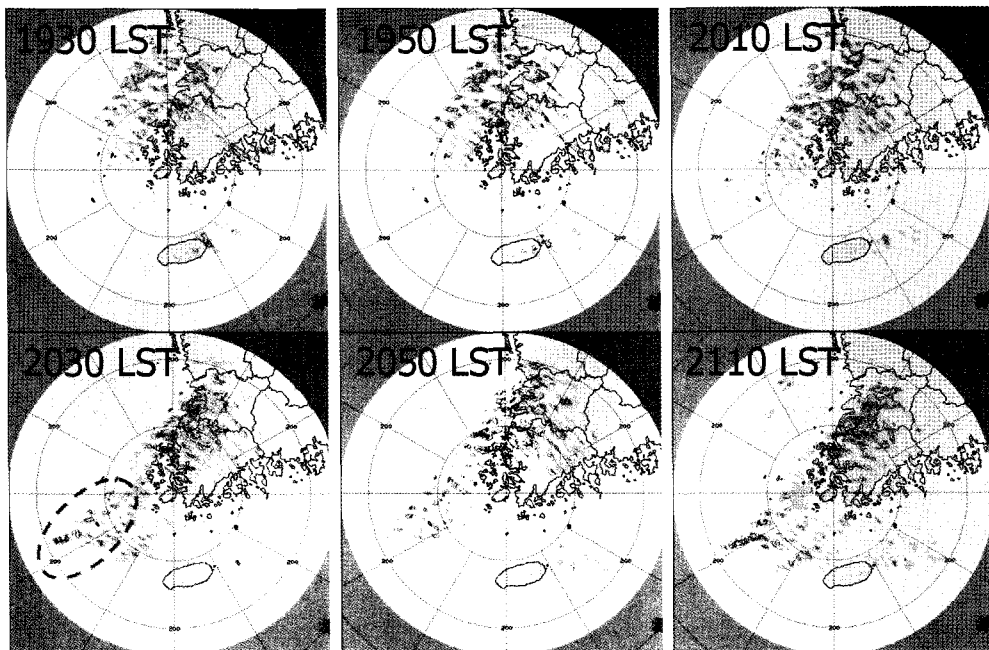


Fig. 4. Evolution of snow cells observed by Jindo radar reflectivity from 1930 LST to 2030 LST 4 Feb., 2004. Thick dashed lines denotes the formation area of T-mode snow cells.

나, 2010 LST부터 소흑산도 부근 해역에서 발생한 강설세포가 발생하여 북동진하면서 남서-북동방향의 배열이 우세하게 나타났다. 시간이 지남에 따라 남서-북동방향의 배열이 다소 뚜렷하여 2110 LST에는 강설세포의 수평거리가 약 200 km인 1개와 약 100 km인 2개로 총 3개의 강설세포 관련 구름열이 형성되었다. 앞에서 언급하였던 것처럼 강설세포 형태에 있어 지상바람은 중요한 요인중에 하나이다. 그러므로 강설세포의 형태에 있어 지상기상요소의 변화 특성을 알아보기 위하여 목포, 흑산도, 제주의 시간별 풍속과 풍향의 시계열을 Fig. 5에 나타내었다. L-모드 강설세포가 나타날 경우 3지점의 풍향과 풍속이 매우 유사하였으며 하층 수렴대를 형성할 때는 풍속이 다소 약하였고 풍향은 북서에서 서풍계열로 전환하였다. T-모드 강설세포가 형성할 시각에 3지점 모두에서 풍속이 약하였으나 강해지기 시작하는 시점이었다. 이같은 풍속변화와 함께 풍향도 서풍에서 남서풍계열로 바뀌었다. 특히 남서풍계열은 제주보다 흑산도와 목포에서 탁월하게 나타났다. 이는 T-모드 강설세포 형성을 위해서는 약하지만

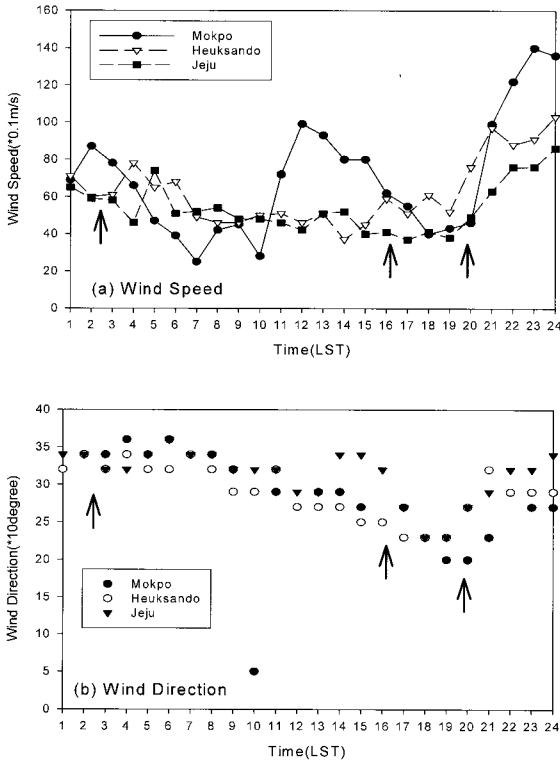


Fig. 5. Time series of wind speed and direction at Mokpo, Heuksando, and Jeju on 4 Feb., 2004. Arrow indicate the time when the type of snow cells appear over the southern part of Yellow Sea.

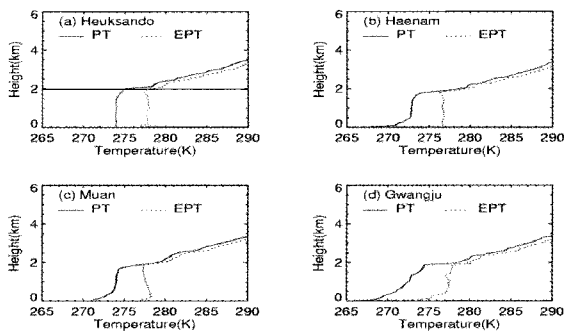
남서기류의 유입이 필요조건임을 짐작할 수 있다.

3.2.2. 강설세포 연직대기환경 특성

강설세포 형성 및 발달과 연관된 연직대기환경 특성을 분석하기 위하여 흑산도, 해남, 무안 및 광주의 고층관측자료를 이용하여 온위와 상당온위의 연직분포를 Fig. 6에 나타내었다. 이들 변수들은 대기의 안정도 분석 및 혼합층 고도를 알아보기 위하여 선택하였다. 강설세포 형성시 고층관측이 실시된 것이 아니므로 6시간별 고층관측자료를 기반으로 강설세포 형성에 가까운 관측시각의 고층관측자료를 활용하였다. 따라서 L-모드와 T-모드 강설세포 관련 연직대기환경 분석에 2월 4일 0000 UTC와 1200 UTC의 고층관측자료를 각각 사용되었다.

강설세포의 L-모드가 나타난 2월 4일 0000 UTC의 경우(Fig. 6a), 고도에 따른 온위가 일정한 것으로 판단할 때 혼합층이 흑산도에서 다른 관측지점들보다 잘 발달하였음을 알 수 있다. 이러한 혼합층 고도는 2 km 부근에 이르는 데 이 고도는 Fig. 2에 보였듯이 L-모드 강설세포의 구름 상층을 나타낸다. 이 같은 구름상부를 가로질러 상당온위의 급격

(a) 0000UTC 4 Feb., 2004



(b) 1200UTC 4 Feb., 2004

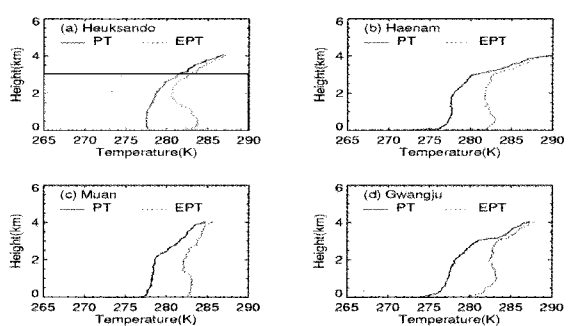


Fig. 6. Profiles of potential temperature and equivalent potential temperature at Heuksando, Haenam, Muan, and Gwangju at (a) 0000 UTC and (b) 1200 UTC 4 Feb., 2004.

한 감소는 강설구름내의 구름상부에서의 혼합과 하강류의 시작에 기인된다⁸⁾. 강설세포 T-모드의 경우 (Fig. 6b), 모든 지점에서 하층의 난기이류로 인해 고도 500~1,000 m에 상당온위가 높아 대류 불안정층이 존재하였다. 또한 고도증가에 따라 비습이 서

서히 감소하였고, 고도 3 km 부근까지 하층이 습윤하였다. 이 같은 비습의 연직구조는 일본의 서해상(우리나라 동해)에 T-모드 강설세포 형성시에도 나타났다⁹⁾. 또한 모든 지점에서 대체로 하층의 수증기량이 L-모드 보다 많았다.

3.2.3 강설밴드 형성 특성

최근에 Shimizu의 연구¹²⁾에서 강설세포의 발생·발달 방향, 즉 강설밴드의 형성은 925 hPa~736 hPa의 바람시어벡터와 대략 45도의 각을 이루어짐을 제시하였다. 또한 Asai의 연구결과에 따르면¹⁴⁾(Fig. 7), 불안정한 섭동의 선택적 모드(preferred mode)는 수평면에 투영된 기본류의 시어벡터에 대해 평형인 두루마리 대류운(convection roll)을 형성하고, 두루마리 대류운의 섭동축은 이 축에 수직인 기본류의 속도 성분을 따라 이동한다. 이 같은 연구들을 기초로 하여 L-모드 강설세포가 발달한 2월 4일 0000 UTC와 T-모드 강설세포가 형성된 1200 UTC의 고층관측자료를 이용하여 1000 hPa~600 hPa의 바람시어벡터를 계산하였다(Fig. 8).

Fig. 8의 굵은 화살표는 바람시어벡터를 나타낸다. 2월 4일 0000 UTC의 경우, 흑산도와 해남의 남서-북동 방향의 바람시어벡터를 고려해 볼 때 강설세포의 발생·발달 방향이 북서-남동임을 짐작할 수 있다. 반대로 광주, 흑산도, 해남지점에서 북서-남동 방향의 바람시어벡터를 보이는 1200 UTC의

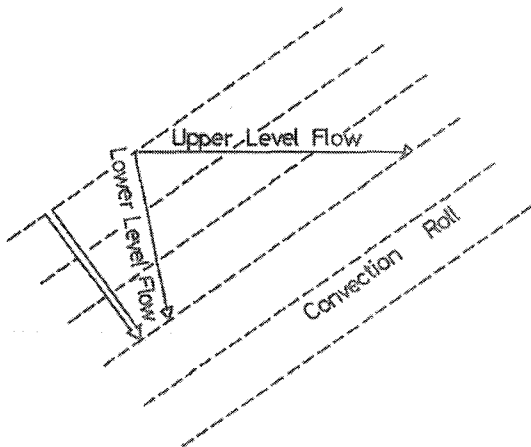


Fig. 7. Schematic diagram showing characteristics of thermal convection rolls in relation to the basic flow. Dashed lines indicates the axis of the preferred roll convection and a broad arrow denotes the phase velocity of the roll convection(from Asai(1972)).

(a) 0000 UTC 4 Feb., 2004

(b) 1200 UTC 4 Feb., 2004

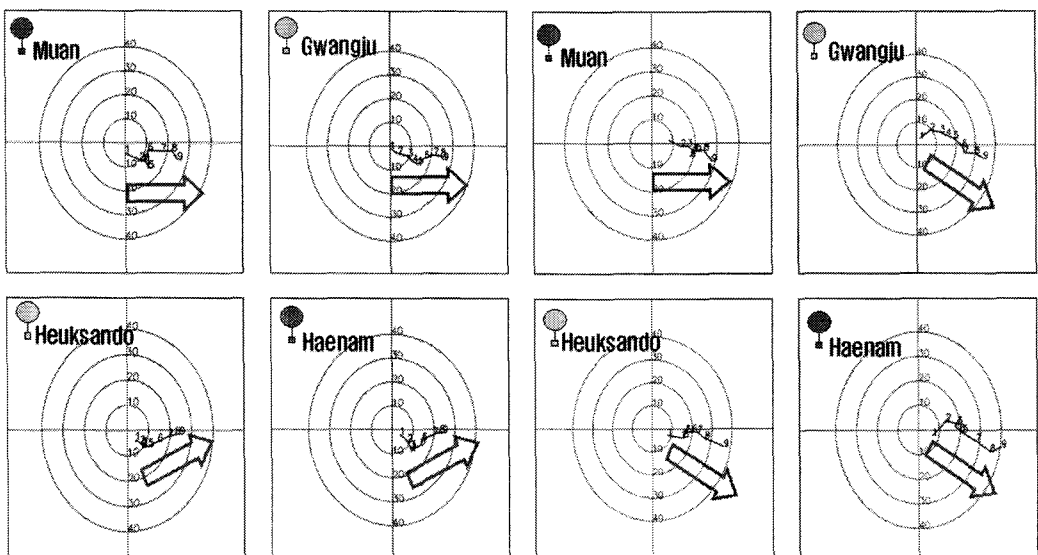


Fig. 8. Wind shear vector between 1000hPa and 600hPa calculated from upper-air sounding data observed at Muan, Gwangju, Heuksando and Haenam at (a) 0000 UTC and (b) 1200 UTC 4 Feb., 2004.

경우 남서-북동의 강설세포 발생·발달 방향을 예상할 수 있다. 이러한 바람시어벡터는 T-모드 형성과 관련된 하층의 남서기류의 유입과 관련되어 있음을 알 수 있다. 이같은 바람시어벡터는 다른 연구들에 비해 규모와 강도가 약한 황해남부해상에 형성된 T-모드 강설세포의 배열 방향을 설명할 수 있는 하나의 요소로 사용할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

2004년 겨울철 KEOP 집중관측(WMO-2004) 기간동안에 한반도 남서지역의 강설발생과 관련된 강설세포들이 다양한 형태로 발생·발달한 2004년 2월 4일에 관측된 고층관측자료와 레이더 자료를 이용하여 황해 남부해상의 강설세포 형성과정 특성을 분석하였다. 특히 4지점의 고층관측자료는 강설세포의 연직대기환경 분석과 강설밴드 형성을 위한 강설세포의 발생·발달, 진행 방향을 파악하기 위하여 활용되었고, 진도 및 무안의 레이더 자료는 강설세포 형태와 강설세포의 모드별 연직범위를 조사하는데 이용되었다. 분석결과, 한반도 남서지역의 강설발생과 관련된 2004년 2월 4일의 강설세포는 L-모드, 하층수렴대, T-모드로 구분되었으며, T-모드 형성을 위해서는 하층 난기류가 필요하였다. T-모드 강설세포는 L-모드 강설세포 보다 그 연직범위가 다소 높았으며, 이는 온난전선과 유사하게 T-모드 강설세포 형성과 관련된 따뜻하고 다습한 남서기류가 차고 건조하고 공기 위를 상승하였기 때문에 사료된다. 이러한 강설세포 모드는 하층과 중층 바람시어벡터를 이용하여 강설세포로 구성된 강설밴드 형성을 어느 정도 설명할 수 있으나 이에 대한 추가적인 분석기법 개발이 필요하다.

한편 한반도 남서지역의 겨울철 폭설현상은 차고 건조한 시베리아 기단이 상대적으로 따뜻한 황해상을 건너면서 변질되어 주로 발생하는 것이 일반적으로 알려져 있다. 하지만, 이러한 폭설현상과는 구별되는 이 지역의 강설발생 기구로 남서기류의 유입에 따른 T-모드 강설세포의 형성 및 발달을 제시하자 한다. 최근 Shimizu는 일본 동안에서 발달한 T-모드 강설세포의 발달 메커니즘을 이중도플러 레이더 분석을 통하여 조사하였다¹²⁾. 또한, 시베리아 고기압이 남쪽으로 장출하면서 변질되어 그 세력이 약화되고 고기압의 남동부 영역에서 약한 북서기류가 형성되어 동진하게 된다. 이러한 북서기류는 대체로 황해상을 지나오면서 기온과 습도가 높은 편이다. 이와 함께 서고동저 기압배치 하에서 한반도를 남북으로 관통하여 불어오는 북풍류는 상대적으로 기온과 습도가 낮은 편이다. 이러한 두 기류(풍

향, 기온과 습도차이가 뚜렷함)는 대체로 호남 서해안지역에서 다소 떨어져 하층 수렴대를 형성하게 된다(Fig. 3b 참조). 따라서 시베리아 고기압의 남하와 변질에 따른 고기압 남동부 영역의 동진은 T-모드의 전 단계인 하층 수렴대 형성과 관련성을 찾을 수 있다. 황해 남부해상의 관측자료의 부족으로 이러한 관련성에 대한 확실한 결론은 내리기에는 한계가 있으므로 추가적인 관측과 분석 연구가 필요하리라 사료된다.

한편, 황해 남부해상의 T-모드 강설세포의 발생 기구에 대해 체계적인 분석을 위해서는 강설세포들이 발생하는 흑산도, 홍도, 하태도, 소흑산도(가거도)를 연결하는 지역(동서: 50 km, 남북: 100 km)에 겨울철 강설 최적 집중관측망을 구축하여 이를 기반으로 한 특별관측이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 국립기상연구소 주요사업 “한반도 악기상 집중관측과 예측성(KEOP)”과 기상청 기상지진기술포발사업(CATER-2006-2305)의 지원으로 수행되었습니다. 특히, WMO(Winter Monsoon Observation)-2004 집중관측자료 생산을 위해 많은 도움을 주신 여러분들께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 전종갑, 이동규, 이현아, 1994, 우리나라에서 발생한 대설에 관한 연구, 한국기상학회지, 30(1), 97-117.
- 2) 정관영, 정영선, 황병준, 1999, 주성분 분석을 이용한 한반도 강설 지역 구분, 한국기상학회지, 35(3), 466-473.
- 3) 서명석, 1986, 한국 중부지방에 강설을 초래한 한대 저기압에 관한 사례 연구, 서울대학교 대학원 석사논문, 41pp.
- 4) 문길태, 김홍진, 1982, 1981년 1월 14일 ~16일 사이의 저기압에 동반된 대설의 특성 연구, 한국기상학회지, 18(1), 22-32.
- 5) 민경덕, 1974, 동계 황해상의 열 및 수증기 수지 해석과 이들이 시베리아 기단의 변질에 미치는 영향, 한국기상학회지, 10(1), 1-10.
- 6) 백종진, 1986, 한파 내습에 따른 황해상에서의 수증기 증발에 관하여, 서울대학교 대학원 석사논문, 34pp.
- 7) 박순웅, 정창희, 1984, 동계 한파내습시 황해상에서의 공기 변질에 관하여, 한국기상학회지, 20(2), 35-50.
- 8) Murakami M., Matsuno T., Mizuno H.,

- Yamada Y., 1994, Mesoscale and microscale structures of snow clouds over the Sea of Japan Part I : Evolution of microphysical structures in short-lived convective snow cloud, *J. Meteor. Soc. Japan*, 72(5), 671-694.
- 9) Japan Meteorological Agency, 1987, On the mesoscale structure of the cloud band system over Japan Sea in winter monsoon period-A mesoscale observation on board R/V Keifu-Maru, *Tenki*, 35(4), 237-248.
- 10) Yagi S., 1984, Large scale snow clouds with roll axes roughly perpendicular to the direction of winter monsoon burst : Observation studies of convective cloud roll axes and some theoretical consideration, *Tenki*, 32, 175-187.
- 11) Fujiyoshi Y., Yoshimoto N., Takeda T., 1998, A Dual-Doppler radar study of longitudinal-mode snowbands. Part I : Three-dimensional kinematic structure of meso- γ -scale convective cloud systems within a longitudinal-mode snowband, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 72-91.
- 12) Shimizu K., 2004, The Formation Process of Transverse-mode Snowbands over the Sea of Japan in Winter, Master Thesis, Nagoya University, 85pp.
- 13) Yi Zhang, Kenneth R., Sperber, James S. Boyle. 1997, Climatology and Interannual Variation of the East Asian Winter Monsoon: Results from the 1979 - 95 NCEP/NCAR Reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, 125(10), 2605 - 2619.
- 14) Asai T., 1972, Thermal Instability of a Shear Flow Turning the Direction with Height, *J. Meteor. Soc. Japan*, 50(6), 525-532.