



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2007년 8월
석사학위논문

겨울철 *cP* 확장 시 발생하는
*Cloud Streets*의 레이더 영상 분석

- 2003년 1월 3~5일 서해안 대설사례 연구 -

조선대학교 대학원

대기과학과

申起昌

2007년 8월

석사학위논문

겨울철

cP

확장

시

발생하는

Cloud

Streets

의

레이더

영상

분석

申

起

昌

겨울철 *cP* 확장 시 발생하는
*Cloud Streets*의 레이더 영상 분석

- 2003년 1월 3~5일 서해안 대설사례 연구 -

*The Analysis of Radar Reflectivity of Cloud Streets
Occurred by cP Expansion in Winter*

- A Case Study on the Heavy Snowfall Event(January 3~5, 2003)
over the Western Coast of the Korean Peninsula -

2007년 8월 24일

조선대학교 대학원

대기과학과

申 起 昌

겨울철 cP 확장 시 발생하는
*Cloud Streets*의 레이더 영상 분석

- 2003년 1월 3~5일 서해안 대설사례 연구 -

지도교수 류 찬 수

이 논문을 이학석사학위신청 논문으로 제출함.

2007년 4월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

대 기 과 학 과

申 起 昌

신기창의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 겸임교수 정 효 상 인

위 원 조선대학교 교 수 류 찬 수 인

위 원 조선대학교 겸임교수 이 종 호 인

2007년 5월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

ABSTRACT	iv
I. 서 론	1
II. 자료 및 분석방법	3
A. 자료	3
B. <i>Cloud streets</i> 의 구조 및 발달 조건	7
C. 분석방법	10
III. 분석결과 및 토의	11
A. 기상개황	11
B. 위성영상 분석	25
C. <i>PPI</i> 분석	28
D. <i>RHI</i> 분석	32
E. <i>CAPPI</i> 및 수직 단면도 분석	35
F. <i>VAD</i> 및 <i>VVP</i> 분석	40
IV. 결 론	43
참고문헌	44
부 록	47

List of Figures

Fig. 1	The amount of fresh snow observed during the period from 3rd to 5th January 2003.	4
Fig. 2	The amount of fresh snow observed in the Gwangju province for (a) 3rd January, (b) 4th January, (c) 5th January and (d) accumulated from 3rd to 5th January 2003, respectively.	5
Fig. 3	The structure of Cloud streets(after ZAMG, 2007) ; the cross section of (a) the perpendicular direction, and (b) the horizontal direction to wind direction, respectively.	8
Fig. 4	The formation condition of Cloud streets(after ZAMG, 2007) : (a) the distribution of temperature and wind speed along the altitude, and the horizontal surface pressure pattern.	9
Fig. 5	Accumulated fresh snow at intervals of three hours from 3rd to 5th January 2003 observed from Gwangju weather station.	11
Fig. 6	Same as in Fig. 5 except for (a) the northern part of Honam province, (b) the middle-up country part of Honam province, (c) the southern part of Honam province, and the two islands.	13
Fig. 7	Weather charts at (a) surface (b) 850 hPa, (c) 500 hPa, and (d) relative vorticity chart at 500 hPa for 00 UTC 3 January 2003.	16
Fig. 8	Same as in Fig. 7 except for 12 UTC 3 January 2003.	17
Fig. 9	Same as in Fig. 7 except for 00 UTC 4 January 2003.	18
Fig. 10	Same as in Fig. 7 except for 12 UTC 4 January 2003.	19
Fig. 11	Skew T-Log P diagrams at (a) 00 UTC 3rd, (b) 06 UTC 3rd, (c) 12 UTC 3rd, (d) 18 UTC 3rd, (e) 00 UTC 4th, (f) 06 UTC 4th, (g) 12 UTC 4th, and (h) 18 UTC 4th January 2003, respectively.	21

Fig. 12	Images from the stationary weather satellite, GMS-5 at 14LST 4th January 2003 ; (a) composite, (b) visible, (c) infrared, and (d) water vapor.	27
Fig. 13	PPI images at 15LST 4th January 2003 : (a) the reflectivity of Jindo radar, (b) the radial velocity of Jindo radar, (c) the reflectivity of Muan radar, and (d) the radial velocity of Muan radar.	29
Fig. 14	RHI images at 1438LST 4th January 2003 : (a) reflectivity, (b) radial velocity.	33
Fig. 15	Same as in Fig. 14 except for 1458 LST 4th January 2003.	34
Fig. 16	Reflectivity CAPPI images of Muan radar at 15LST 4th January 2003, for the height of (a) 1.0 km, (b) 1.5 km, (c) 2.0 km, and (d) 2.5 km.	36
Fig. 17	Same as in Fig. 16 except for Radial velocity CAPPI images.	37
Fig. 18	Vertical cross section of (a) reflectivity of zonal direction at 15 km north, (b) reflectivity of zonal direction at 15 km south, (c) radial velocity of zonal direction 15 km north, and (d) radial velocity of zonal direction 15 km south of Muan radar site at 15LST 4 January 2003, respectively.	39
Fig. 19	VAD images of Muan radar during the period (a) from 09 LST to 15 LST 3rd, and (b) from 09 LST to 15 LST 4th January 2003, and VVP images of Jindo radar during the period (c) from 0930 LST to 1130 LST 3rd and 0750 LST to 0950 LST 4th January 2003, respectively.	42
Fig. A1	Geometry of radar scan from Browning and Wexler(1968)	48
Fig. A2	Flow chart of wind retrieval using VAD method.	50
Fig. A3	Radial velocity of Doppler radar with respect to the azimuth angle on 22nd February. 2003.	51
Fig. A4	Averaged RMSE of horizontal wind with respect to height on 22 February 2003.	52

ABSTRACT

The Analysis of Radar Reflectivity of Cloud Streets Occurred by cP Expansion in Winter

- A case study on the heavy snowfall event(January 3~5, 2003)
over the western coast of the Korean Peninsula -

Shin, Ki-Chang

Advisor : Prof. Ryu, Chan-Su Ph.D.

Department of Atmospheric Science,

Graduate School of Chosun University

When the cold surge of the Siberian anticyclone expands southward during the wintertime, it enforces to produce lower clouds over the yellow sea where often are converted into the cloud streets type and produce heavy snowfall over southwestern coast of the Korean peninsula, Honam Province.

On the current study, the formation and development conditions of the cloud streets has been investigated through analysis of the three dimensional snow cloud structures by using the CAPPI, RHI, VAD and VVP data of X-band radar at Muan Weather Observatory and S-band radar at Jindo Weather Station. The data to be used are obtained from January 3 to January 5, 2003, when heavy snow storm hits on the Honam Province.

The formation conditions for the cloud street such as the pressure pattern, vertical

distribution of temperature, wind velocity /direction, and the strengthening and weakening of the cloud street with these conditions are analyzed. At the beginning of the cloud streets generation stage, these has elongated the band structure of cloud which the horizontal pattern is parallel or perpendicular to the wind direction. Distance between the bands depends on the development stage and ranges from 25 km to about 100 km. When the cloud street hits over land mass, the horizontal structure begins to break, but vertically develops

The PPI radar images show that the cloud band distributes in perpendicular to the expansion direction of the high pressure and that the radius of cloud cells is about 5-8 km with 20-30 dBZ. Distance between each cell is about 10 km. On the other hand, the vertical radar images show that the cloud street is a small scale convective type cloud with height of about 3 km where a stable layer exists. From the VVP images, the time period of the high pressure expansion, the moving direction and development stages of the system are delineated. Finally, the vertical distribution of wind direction is fairly constants, while the wind speed sheer increases with altitude.

By combining the horizontal and vertical distribution of the meteorological parameters obtained from the radar data and analyses of additional cases, it may be possible to improve the forecast capability of moving direction and future development of the heavy snowfall from the cloud street.

I. 서론

북반구 중위도 편서풍 지대에 속한 한반도는 겨울철에 대륙성 한대기단인 시베리아 기단이 확장할 때 대기가 상대적으로 온난 다습한 서해상을 통과하면서 변질된 기단의 영향으로 호남지방에 강설이 나타나며 때때로 대설이 국지적으로 발생하여 교통두절이나 인명재해, 산업재해 등 큰 재해를 유발하기도 한다.

대설에 의한 재해를 줄이기 위해서는 대설의 발생 및 지속시간, 규모, 강설지역 등에 대한 보다 정확한 예측이 필요하다.

한반도의 강설구역은 기단의 영향에 따라 크게 대관령을 포함한 영동지역, 호남 서해안지역, 울릉도지역 등 세 구역으로 나뉘어 진다(김성삼, 1979; 전종갑 등, 1994). 이 중 호남 서해안지방의 강설과 관련하여 민경덕(1974)은 겨울철 황해상의 열 및 수증기 수지해석과 이들이 시베리아 기단의 변질에 미치는 영향을 연구하였고, Park and Joung(1984)은 기단변질모델을 개발하여 우리나라 서해안에 빈번히 발생하는 소낙눈은 한랭 건조한 시베리아 기단의 변질에 의한 것임을 설명하였다. 특히 호남지방의 강설에 대한 연구는 류찬수 등(2005, 2006)과 Ryu et al.(2005)에 의해 다각적인 이루어진 바가 있다.

이러한 시베리아 기단의 확장으로 인하여 생성되는 구름은 cloud streets의 형태를 가지는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 구름의 생성 조건과 원리에 관한 연구를 수행함으로써 대설 예측 및 발달 메커니즘을 파악할 수 있다.

Cloud streets에 관한 외국에서의 연구는 비교적 활발하였다. Asai(1970)는 cloud streets는 수평과 수직비로써 발달의 규모를 나타낼 수 있고, 평균 바람쉬어를 가진 시스템이 경도방향으로 가장 잘 발달하는 것을 밝혔다. Lilly(1966)와 Brown(1970)은 종관 규모의 흐름 내부에 있는 Ekman 경계층에서의 2차 흐름의 불안정으로 인하여 cloud streets가 발달한다는 것을 개념 모델을 통하여 제시하고 경계층 내에서의 상대적 흐름으로 분석하였다. Sun(1978)은 잠열과 cloud streets의 형성으로 고려되어지는 바람 구조를 고려하여 cloud streets의 선형적 안정성을 분석하였다. 그러나 한반도 서해안에서 발생하는 cloud streets의 구조 및 발달 메커니즘에 대하여 수행된 연구는 극히 적다.

Cloud streets의 형성조건은 기압의 패턴과 고도별 기온 및 풍향과 풍속의 분포에 따라서 강화와 약화가 이루어진다. Cloud streets는 거의 고도별로 일정한 풍향과

안정층인 역전층까지 증가하는 풍속으로 인하여 형성되는 작은 대류형태의 구름이다.

구름의 수평적 구조는 풍향에 나란한 방향 또는 수직한 방향으로 길게 늘어진 띠 형태의 패턴을 보이고 띠 사이의 간격은 발달의 정도에 따라서 약 25~100 km의 간격을 가지고 형성된다. 서해상에서 발생하는 cloud streets는 풍향과 나란한 방향으로 발달하다가 한반도를 만나면서 형태가 깨어지는 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 2003년 1월 3일부터 5일 사이에 호남 서해안 지방에서 발생한 대설 사례를 분석하였고 위성 및 레이더를 이용하여 강설의 강도 및 이동과 발달에 대한 예측가능성 및 특성을 연구하였다. 특히 무안에 위치한 연구용 X-band 레이더와 진도에 위치한 S-band 레이더의 PPI(Plan Position Indicator), CAPPI(Constant Altitude PPI), RHI(Range Height Indicator), VAD(Velocity Azimuth Display), VVP(Velocity Volume Processing)의 영상을 이용하여 강설의 3차원 구조를 분석하였으며, cloud streets의 형성 및 발달 조건에 관한 연구도 수행하였다.

II. 자료 및 분석방법

A. 자료

Fig. 1은 2002년 11월부터 2003년 2월까지 광주에서 관측된 신적설의 분포를 나타낸 것이다.

이 기간 동안 4회의 강설이 관측되었고, 2003년 1월 3일부터 5일 사이에 30 cm 이상의 강설을 기록하여 이 사례를 선정하였다.

선정된 사례의 강설 분포를 살펴보기 위하여 2003년 1월 3일부터 5일까지의 일별 누적 신적설량(Fig. 2a~c) 및 사례기간 전체의 누적 신적설량(Fig. 2d)을 나타내었다.

사례기간동안 가장 많은 신적설량을 기록한 날은 2003년 1월 4일이며(Fig. 2b), 공간적으로는 호남지역이 가장 많은 강설이 있었음을 Fig. 2(d)를 통해서 확인할 수 있다.

겨울철 찬 대륙성 고기압인 시베리아 고기압이 서해상으로 확장할 때 호남지방에서 집중적으로 강설이 발생하는 것이 한반도 겨울철 강설의 한 특징이며 이번 사례에서도 호남지방에 많은 강설량을 기록하였다.

일반적으로 노령산맥과 차령산맥의 중앙에 위치한 광주 일대는 대설을 기록하는 기후적인 패턴을 보인다. 시베리아 고기압이 확장하면서 서해상을 통과하여 한반도 서해안 지역에서 강설을 발생시키고 지형에 의한 효과로 인해 추가된 강설까지 더하여 광주 일대에 대설을 야기하였다.

이 연구에 사용된 자료는 사례기간 동안 무안에 위치한 연구용 X-band 레이더와 진도에 위치한 S-band 레이더 영상 자료를 이용하였고, GMS 5 위성영상과 기상청의 각 관서에서 기록된 신적설 자료를 이용하였다.

(Kwangju 2002.11.1–2003.2.28)

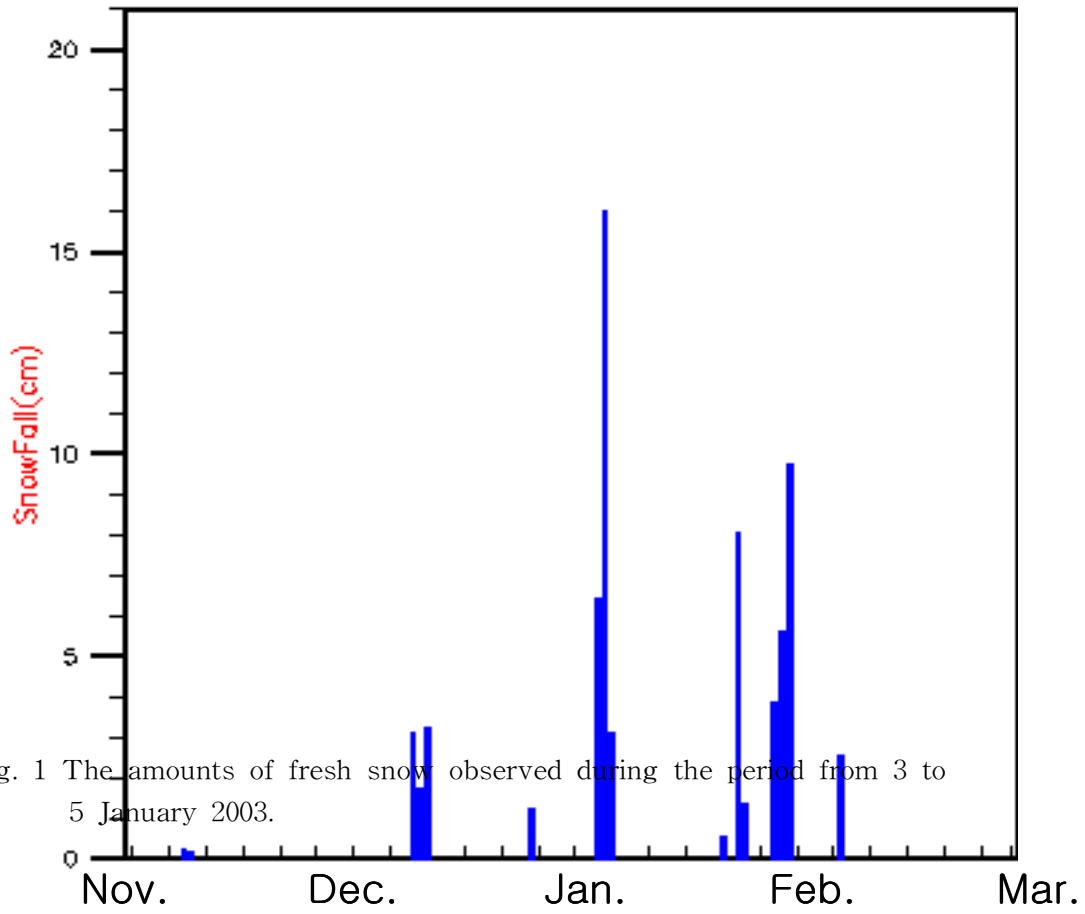


Fig. 1 The amounts of fresh snow observed during the period from 3 to 5 January 2003.

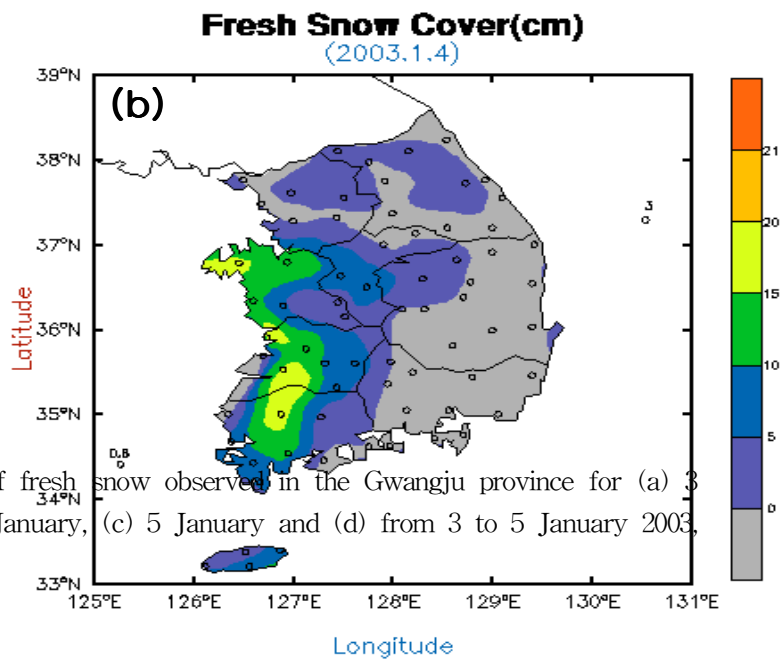
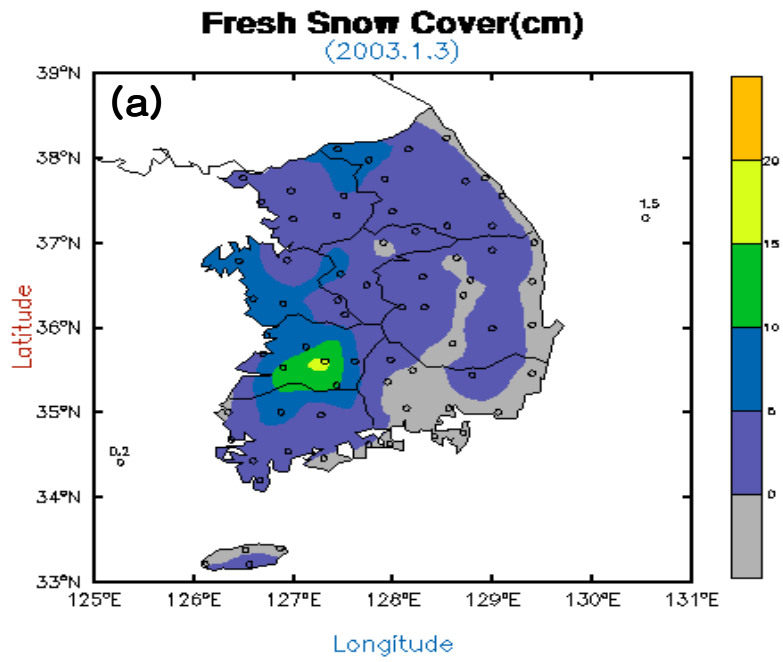


Fig. 2 The amounts of fresh snow observed in the Gwangju province for (a) 3 January, (b) 4 January, (c) 5 January and (d) from 3 to 5 January 2003, respectively.

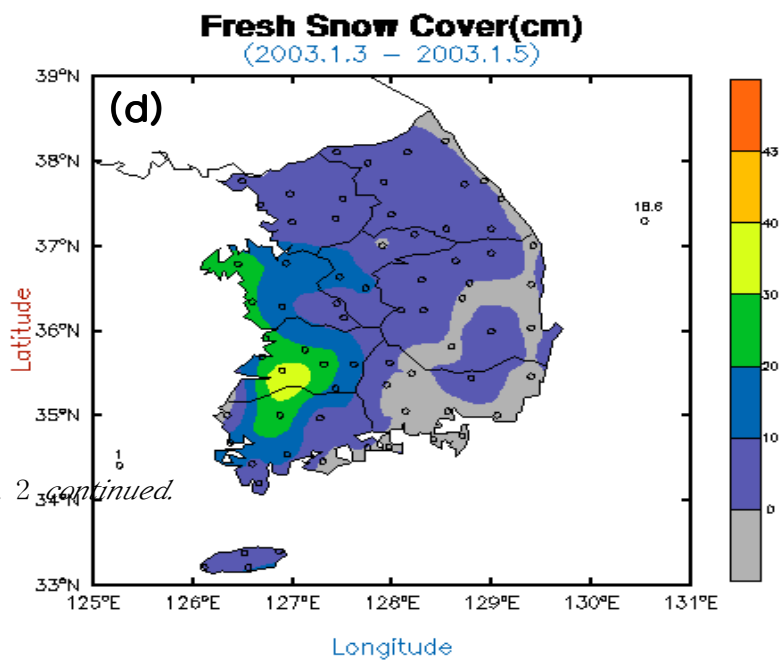
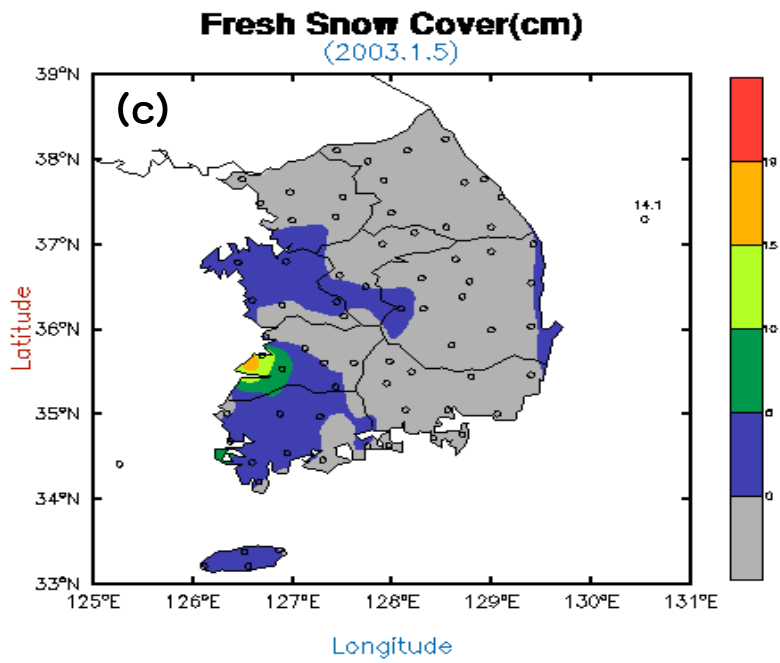


Fig. 2 *continued.*

B. Cloud streets의 구조 및 발달 조건

Cloud streets는 정렬된 대류형 구름의 일종이다. 풍향에 평행한 방향과 수직한 방향으로 띠를 형성하고 풍향과 풍속은 고도에 관계없이 거의 일정하다.

Fig.3 은 cloud streets의 구조를 나타낸 것으로, Fig. 3(a)는 풍향에 수직한 방향으로 고도별 연직운동을 나타낸 것이고 Fig. 3(b)는 상층에서 바라본 수평면 상에서 cloud streets의 모양을 나타낸 것이다.

Fig.3 (a)에서 연직운동을 살펴보면 C 지역에서는 하층수렴에 기인한 대류형의 구름이 형성되고, D 지역에서는 하층발산의 영역으로써 구름이 존재하지 않는 지역이다. H는 cloud streets의 높이를 나타낸 것이고, 점선은 상층과 하층의 경계가 되는 기온의 변화가 역전되는 불안정층의 경계를 나타낸다.

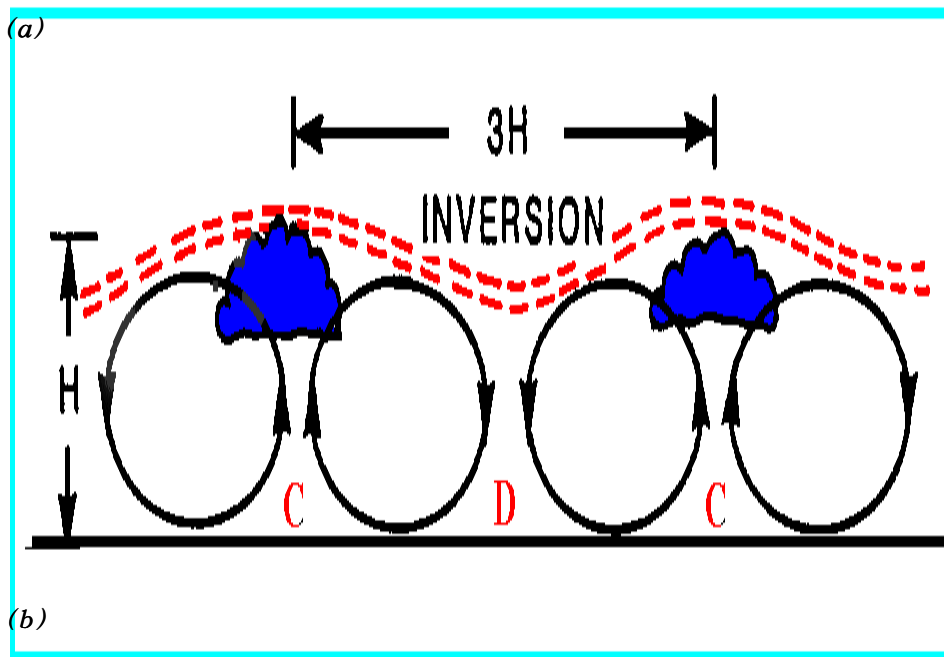
또한, 상대적으로 온난다습한 해수면에서 생성된 잠열은 주변 평균 바람쉬어로 인해 형성된 부력에 의하여 대류형 셀이 형성된다. 이와 반대로 하강으로 인한 발산 영역이 약 $3H$ 간격으로 발생한다.

수평면 상에서의 형태를 살펴보면 풍향에 수직으로 길게 늘어진 띠 모양의 구름을 형성한다. 발달 된 운정의 높이에 따라서 띠의 간격이 달라진다. 보통 25~100 km의 주기를 가지고 길게 늘어진 띠 모양을 형성한다.

Cloud streets의 형성 조건은 지표면의 풍속이 5~8 m/s이고, 풍향은 대류형의 구름이 형성되는 영역에서 고도에 관계없이 거의 일정한 형태이며, 풍속은 고도가 증가할수록 증가하는 형태이다. 대개 2 km 부근에서 안정층이 형성되고 대기의 안정층 또는 역전이 일어나는 고도까지 발달한다.

Fig. 4는 cloud streets의 형성 조건을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)는 고도에 따른 기온분포와 풍속의 변화량을 표시한 것이고 Fig. 4(b)는 지표면에서 기압 및 기온의 분포를 나타낸 것이다. 고도별 기온의 변화는 약 2 km 부근에서 기온이 증가하다가 감소하는 형태의 안정한 역전층이 존재하여 구름의 발달을 저지한다.



CLOUD STREETS

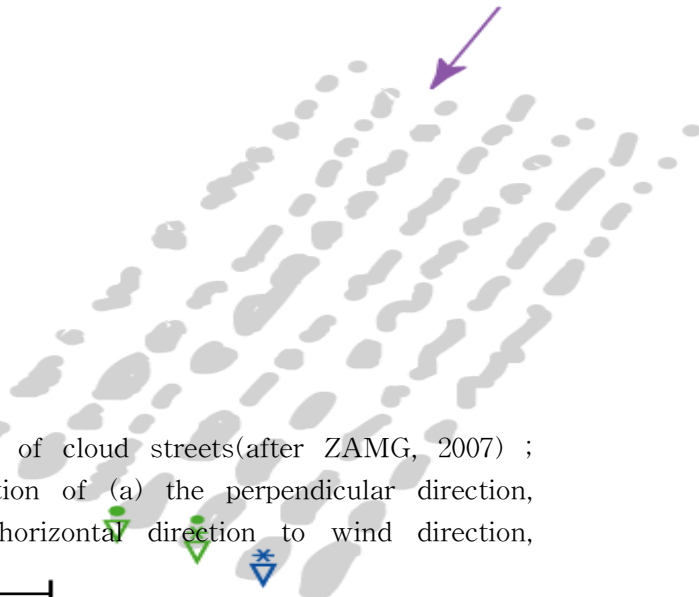
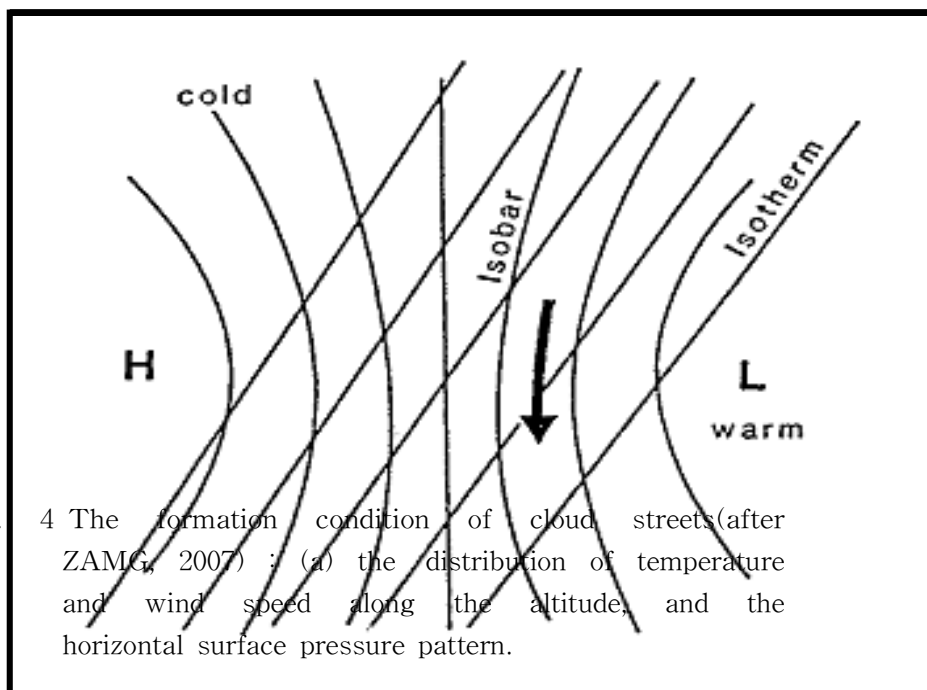
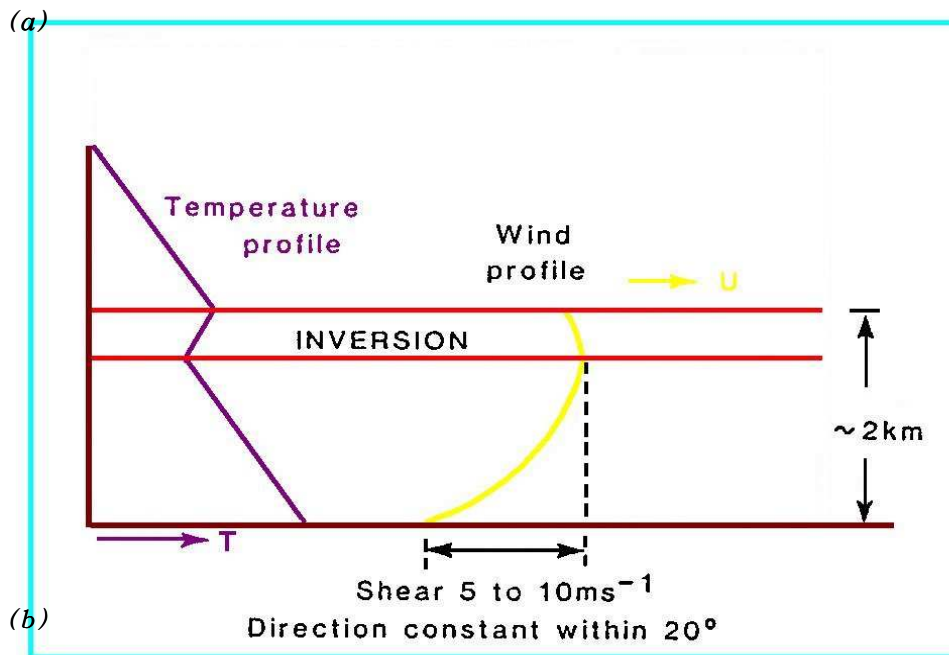


Fig. 3 The structure of cloud streets(after ZAMG, 2007) ; the cross section of (a) the perpendicular direction, and (b) the horizontal direction to wind direction, respectively.

~ 100 km



이러한 안정층의 위치는 운정의 높이를 결정짓는다.

풍속은 지상에서부터 역전층 고도까지는 점차적으로 증가하였다가 역전층 고도 상부에서는 감소하는 형태이다. 기압의 패턴은 서고동저형이고, 기온의 분포는 풍향에 수직으로 증가하는 형태이다.

Fig. 4(b)의 화살표는 저기압의 순환 방향을 나타낸다.

C. 분석방법

기압배치에 따라서 분류된 강설 형태인 서고동저형과 저기압형 및 상층 골에 의한 남쪽 기압골 강화형의 형태가 있다.

본 연구에서는 선택한 사례가 서고동저형의 기압 패턴을 나타내는지와 찬 대륙성 기단의 확장 여부와 관련된 500 hPa 기압골의 위치와 500 hPa 와도 이류의 특성이 나타나는지를 분석하였다.

또한 진도에 위치한 S-band 레이더와 무안에 위치한 연구용 X-band 레이더 반사도 영상을 분석하여 구름의 발달 과정과 분포 영역을 분석하였다. 이 분석을 통하여 강설의 분포와 발달 규모를 분석하고, 레이더 시선속도 영상을 통하여 구름의 이동과정을 파악하고자 하였으며, PPI, CAPPI, RHI, VVP의 영상을 이용하여 강설의 3차원 구조를 분석하였다.

그리고 cloud streets의 생성 및 발달 조건에 대한 입체적인 분석을 통하여 그 규모와 대설 가능성에 대한 풍향 및 풍속의 고도에 따른 변화량과 한반도에서 나타난 대설의 형태에 대하여 분석하였다.

III. 분석결과 및 토의

A. 기상개황

2003년 1월 3~5일 사이에 광주 지방에 많은 신적설을 기록하였다. 특히 1월 4일에는 16 cm 이상의 많은 적설을 기록하였다.

Fig. 5는 2003년 1월 3~5일 사이에 광주지방에서 관측된 3시간 신적설을 나타낸 것이다.

강설의 시간분포는 2003년 1월 3일 21시와 2003년 1월 4일 9시, 그리고 2003년 1월 4일 21시 부근에서 3 cm 이상의 많은 강설량 기록하였다. 특히 2003년 1월 4일 18시에서 24시까지 6시간 동안 약 8.5 cm의 신적설이 집중적으로 기록되었고 다른 시간대에는 3시간 신적설이 약 2 cm 이하로 분포하고 있다.

신적설이 5 cm 이상일 때 대설 주의보가 발효됨을 감안할 때 6시간 동안 8.5 cm는 상당히 많은 양의 적설이다.

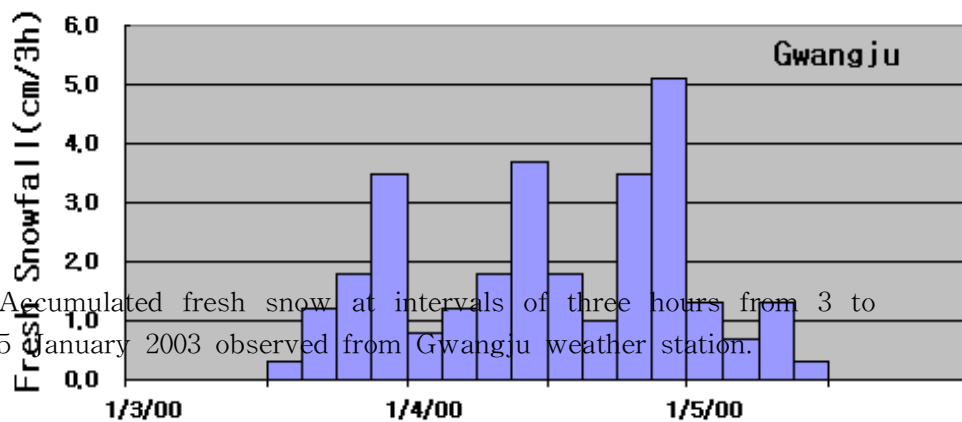


Fig. 5 Accumulated fresh snow at intervals of three hours from 3 to 5 January 2003 observed from Gwangju weather station.

Fig. 6은 서해안 지역의 8개 관측소에서 관측된 3시간 신적설을 히스토그램으로 나타낸 것이다.

선정된 지역은 서해안과 근접하고 호남 북부지역에 해당하는 군산, 부안과 호남 중부내륙지역에 해당되는 정읍, 광주와 서해안에 근접하고 호남 남부지역에 속한

목포, 해남과 도서지역에 해당하는 흑산도와 제주도에 대하여 나타내었다.

강설량의 분포는 호남 북부지역과 호남 중부내륙지역에 해당하는 지역에서는 많은 강설량을 기록하였다. 그리고 강설량의 시간대별 분포는 호남 중부내륙지역은 시간적으로 넓게 분포하고, 강설이 많은 패턴을 보인다. 그러나 호남 북부지역은 단시간에 많은 강설을 기록하고 소강상태를 반복하는 강설패턴을 보이는 것이 특징이며, 호남 남부지역에 해당하는 목포와 해남에서는 넓은 시간대에 걸쳐서 강설을 기록하고 있지만 호남 중부지역과 북부지역보다 상대적으로 적은 강설을 기록하고 있다. 또한, 도서지역에 해당하는 흑산도와 제주도에서는 강설의 강도가 약하게 나타나고 있다.

이러한 원인은 시베리아 고기압이 확장하면서 서해상에서 변질되어 발달하지만 강설을 내릴 수 있는 것은 잠열속의 변화에 있다는 것을 보여주는 증거이고, 특히 호남 중부내륙지역에서 더 많은 강설량을 기록하는 것은 지형적인 효과가 추가된 것으로 볼 수 있다.

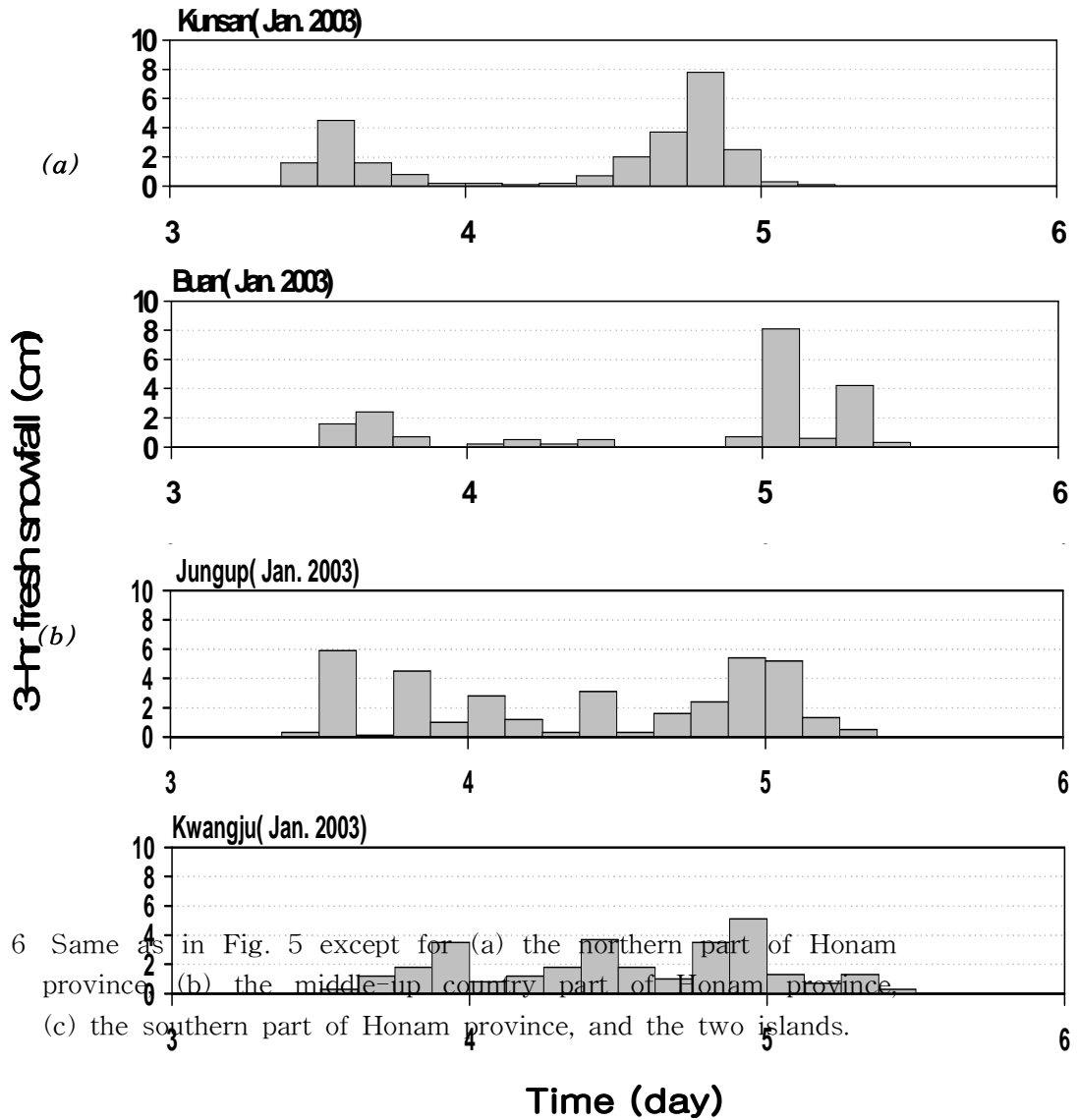


Fig. 6 Same as in Fig. 5 except for (a) the northern part of Honam province, (b) the middle-up country part of Honam province, (c) the southern part of Honam province, and the two islands.

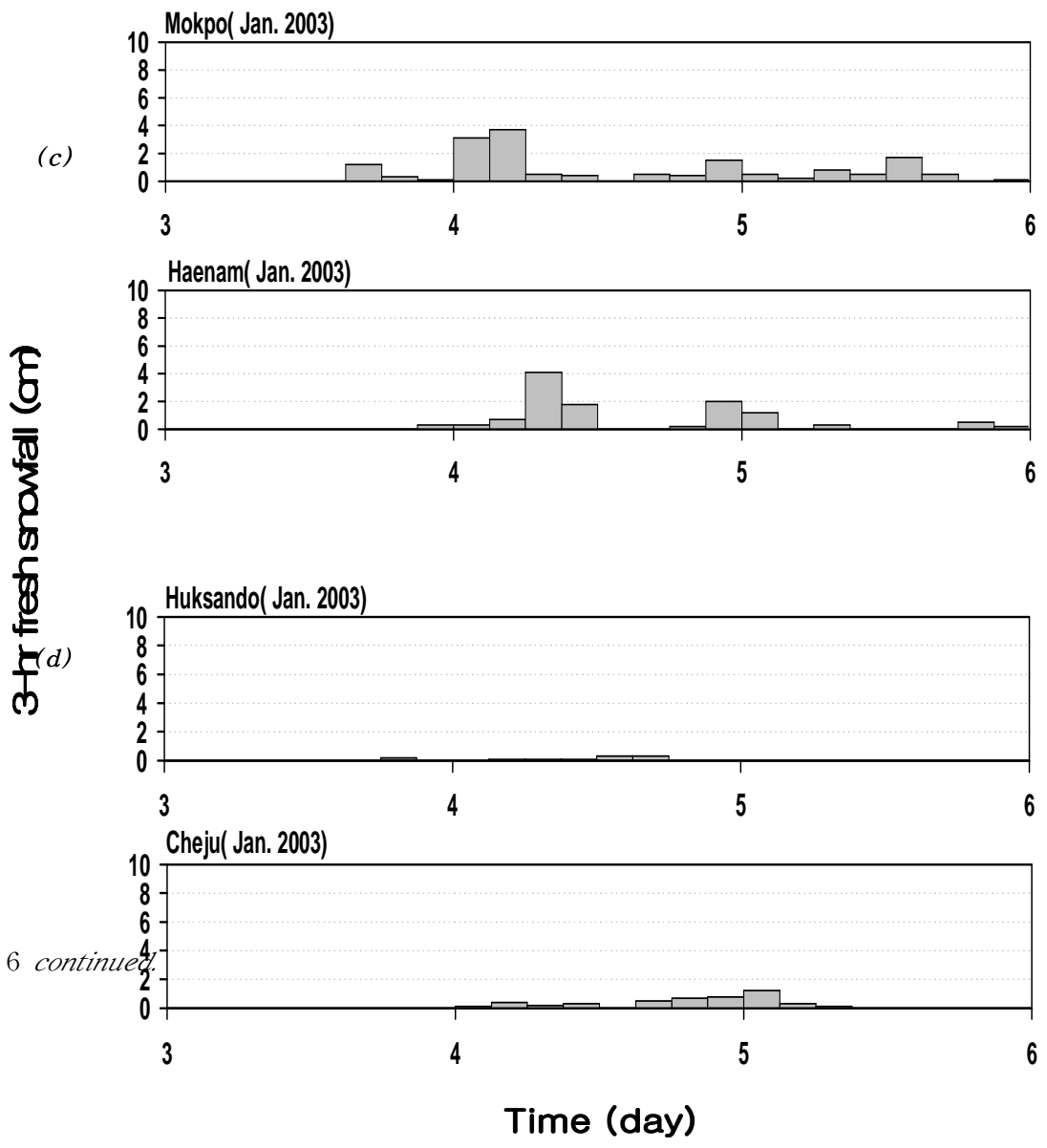


Fig. 6 *continued*.

호남지방에 대설을 초래한 종관상태를 조사하기 위하여 2003년 1월 3일 00 UTC 에서 1월 4일 12 UTC 까지의 지상일기도, 850 hPa 일기도, 500 hPa 일기도 및 500 hPa 상대와도를 조사하였다.

2003년 1월 3일 00 UTC의 지상일기도인 Fig. 7(a)에서는 동해상에 중심기압 1018 hPa인 지상저기압이 위치하고 있고, 중국 화북지역에는 중심기압이 약 1050 hPa의 대륙성 고기압이 위치하고 있다. Fig 7(b)에서 지상저기압과 관련된 850 hPa의 기압골은 서해상에 위치하고 있고, 중국 동해안 지역에 만주지역으로부터 확장된 기온골이 위치하고 한반도 동해상에는 기온능이 나타나고 있어 경압불안정이 서해상에 나타나고 있다.

Fig. 7(c)에서 500 hPa 기압골은 산둥반도에서 중국 동해안 지역을 따라 위치하고 있으며 등고선과 등온선은 거의 평행하다. Fig. 7(d)는 500 hPa의 상대와도이며 강한 저기압성 와도가 산둥반도 지역에 위치하고 있다. 따라서 2003년 1월 3일 00 UTC의 한반도는 동해상에 위치한 지상저기압의 영향권에 들어있음을 알 수 있다.

Fig. 7에서와 마찬가지로 Fig. 8에서는 2003년 1월 3일 12 UTC의 종관상태를 조사하였다. 지상저기압은 발달하면서 동진하여 중심이 동해 먼 바다에 위치하고 있고 중심기압은 12시간 동안 14 hPa 이나 급격히 하강하여 1004 hPa이다. 850 hPa 일기도에서 지상저기압과 관련된 기압골은 동진하여 동해상에 위치하고 있고 500 hPa 일기도의 기압골은 한반도 서해안지역에 나타나있다. 따라서 1월 3일 12 UTC 이후에 한반도는 동해상에 위치한 지상저기압의 영향에서 벗어나 대륙성 고기압의 영향권에 들고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 찬 대륙성고기압의 영향으로 서해상에서 발달한 cloud streets에 의해 호남지역에 대설이 발생한 2003년 1월 4일의 지상 및 고층일기도와 500 hPa 상대와도 이다.

2003년 1월 4일 00 UTC의 지상일기도인 Fig. 9(a)에서는 지상저기압이 더욱

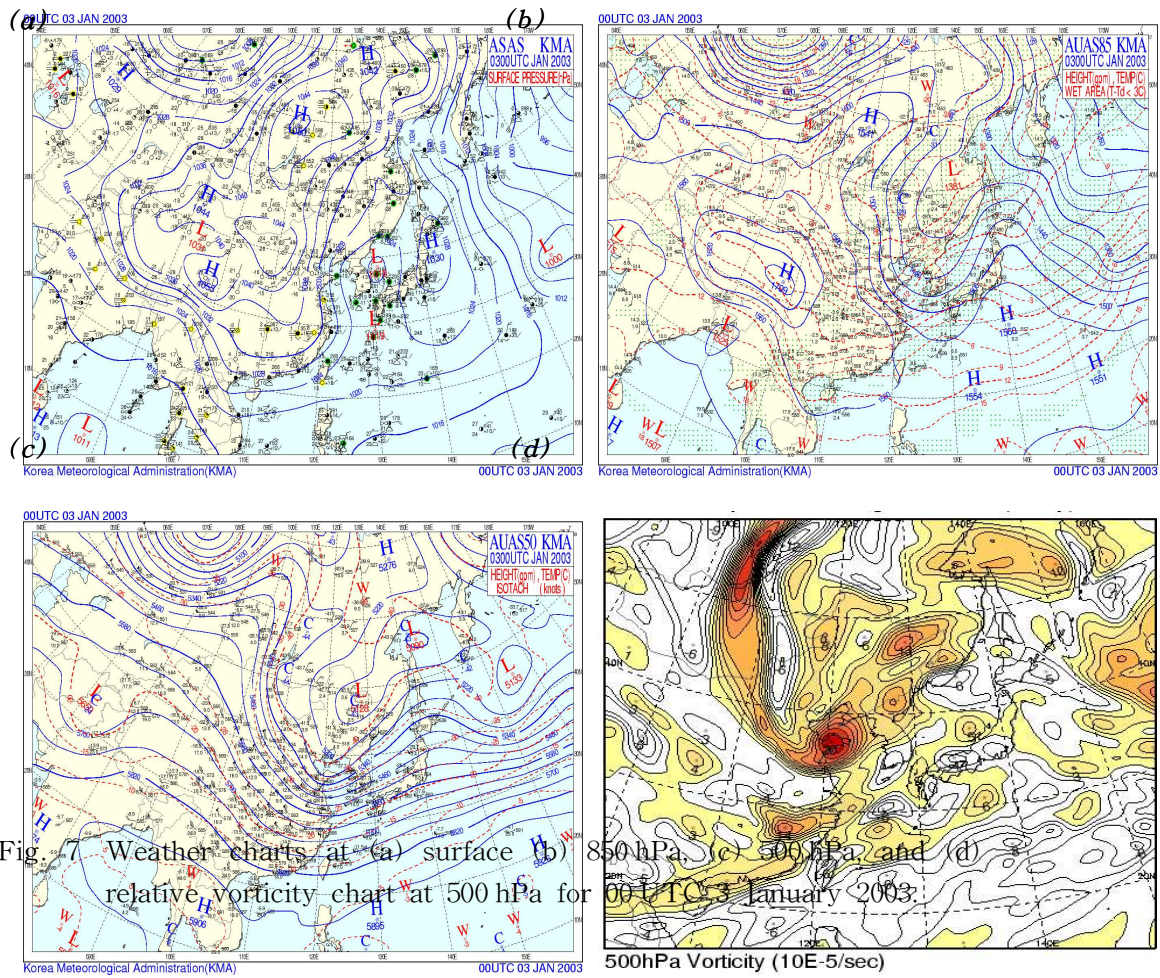


Fig. 7 Weather charts at (a) surface (b) 850 hPa, (c) 500 hPa, and (d) relative vorticity chart at 500 hPa for 00 UTC 3 January 2003.

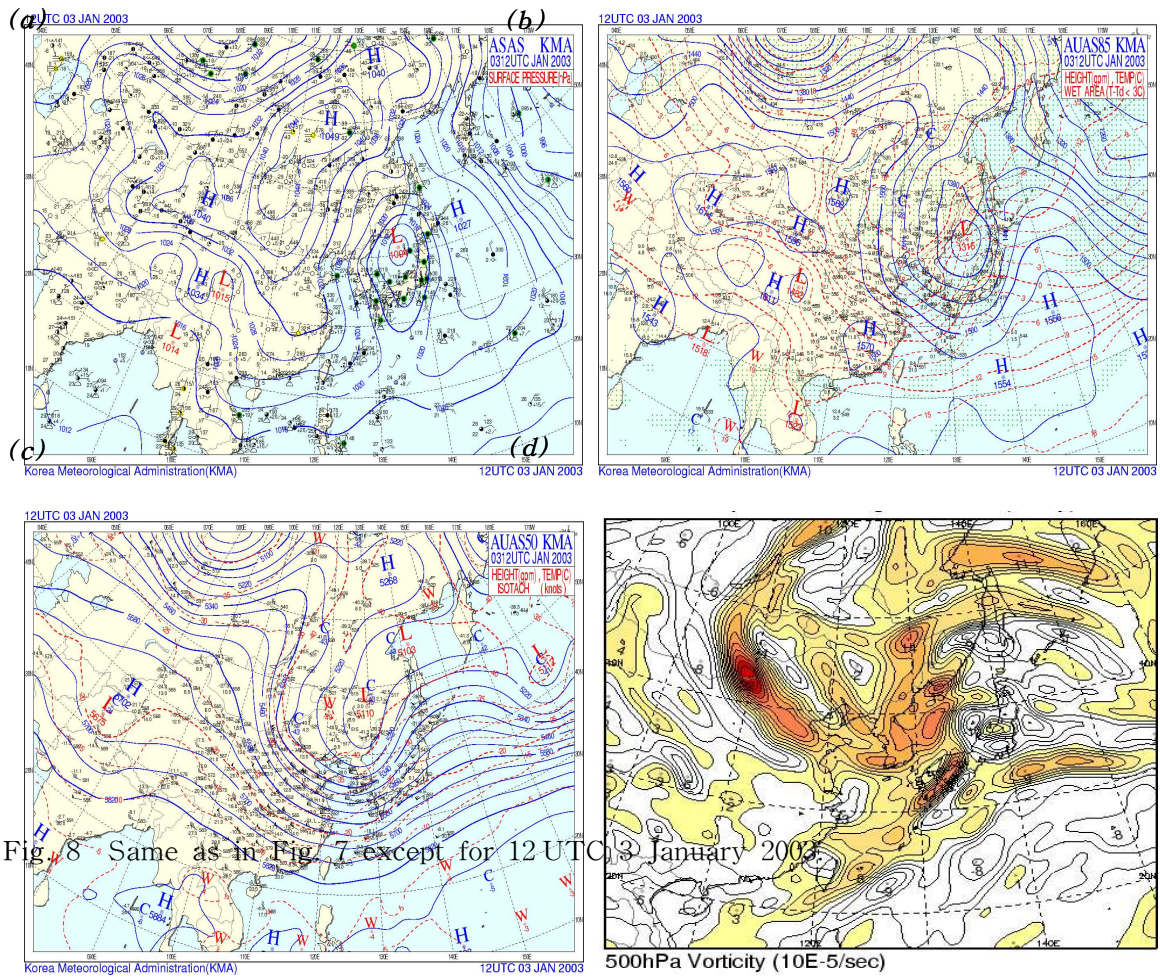


Fig. 8 Same as in Fig. 7 except for 12 UTC 03 January 2003

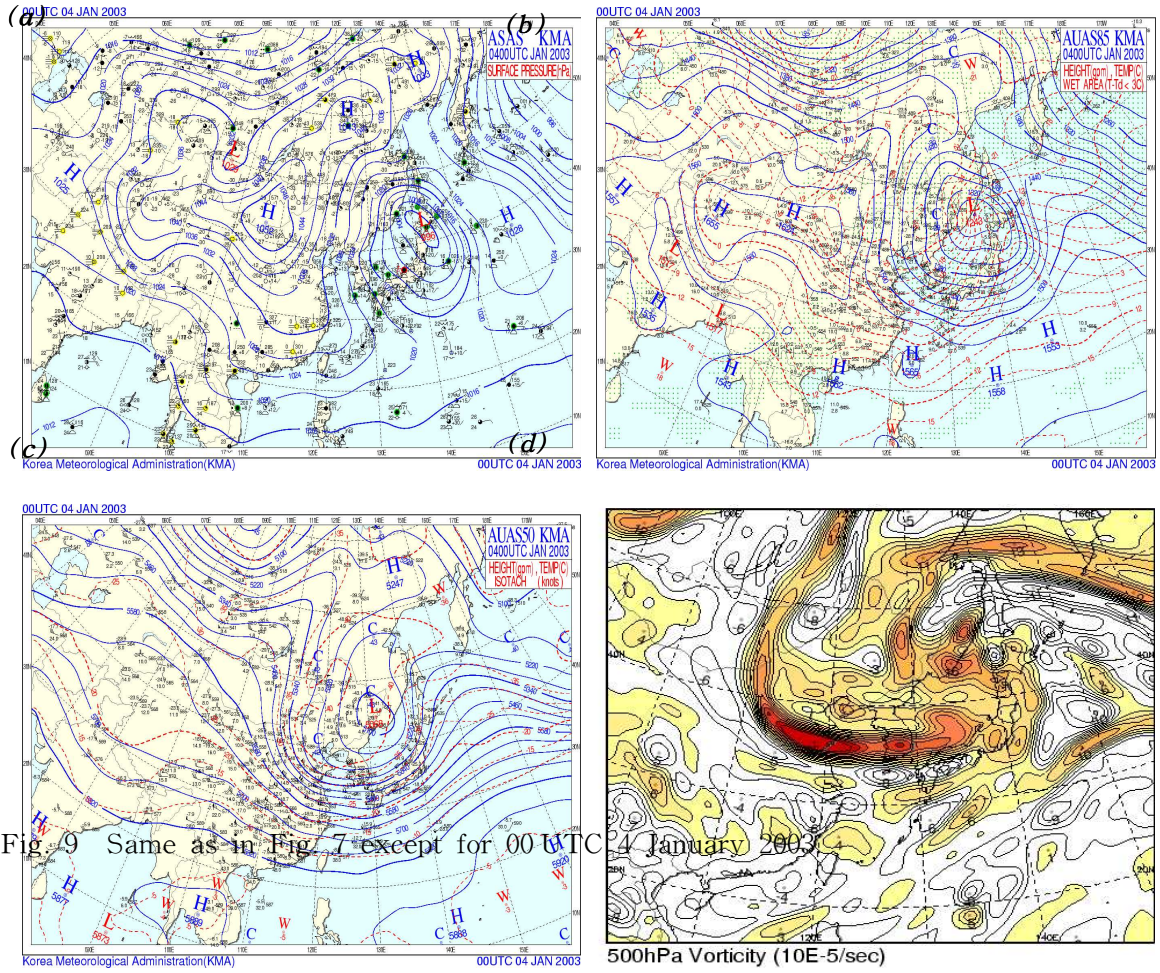


Fig. 9 Same as in Fig. 7 except for 00 UTC 4 January 2003.

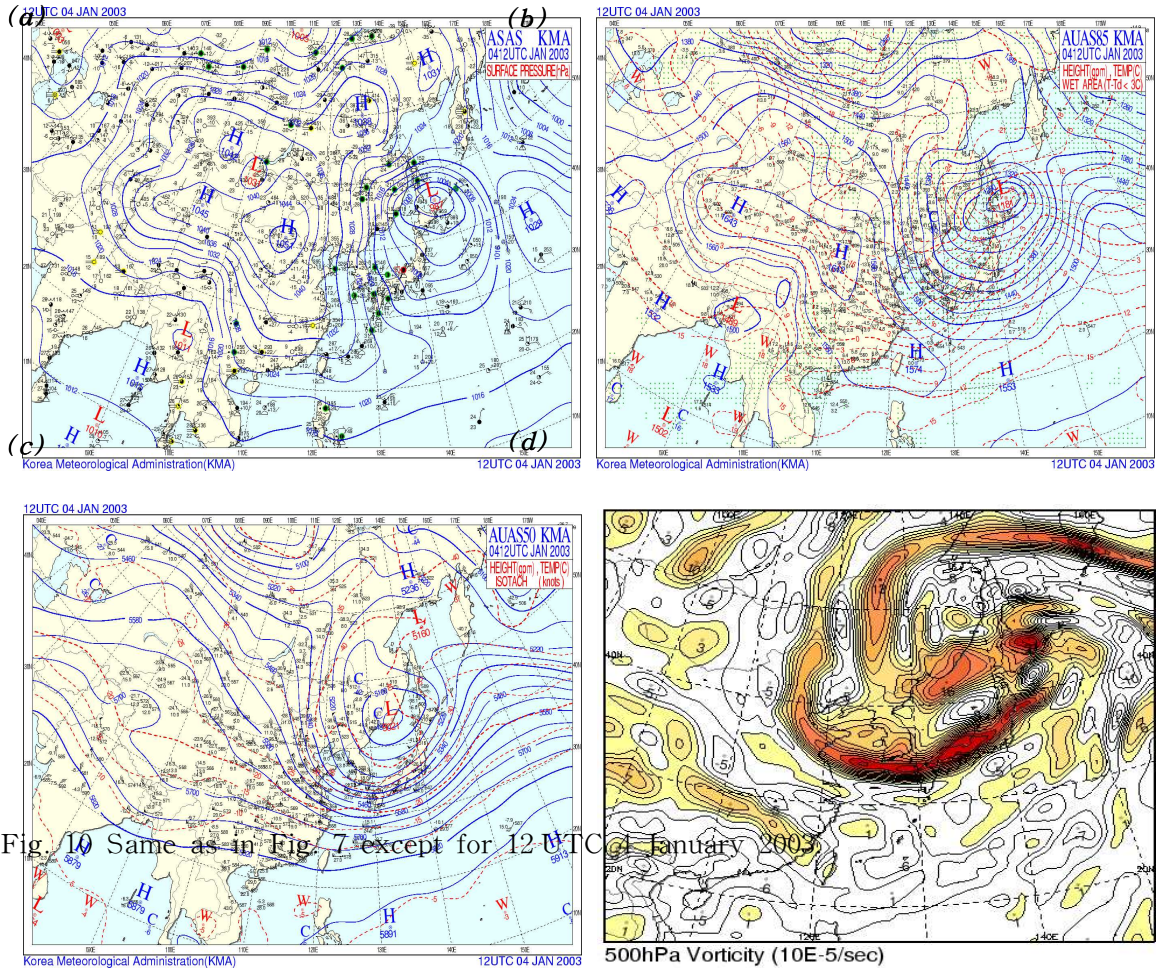


Fig. 10 Same as in Fig. 7 except for 12 UTC of January 2003

발달하여 중심기압이 996 hPa 이며 일본 홋카이도 북쪽에 중심이 위치하고 있다. 또한 중국 화북 내륙지역에 위치한 중심기압 1052 hPa의 대륙성 고기압으로부터 화중 해안지역으로 기압능이 강하게 확장하고 있어 한반도는 서고동저형의 기압패턴의 중심에 위치하고 있다. 한반도 동쪽에서는 저기압이 발달하고 있고 서쪽에서는 고기압이 확장하고 있어 서해상의 기압경도가 커져 서해상에서 강한 북서풍이 불고 있다.

Fig. 10에서는 대륙성 고기압이 더욱 확장하여 지상일기도에서 등압선이 남북으로 놓이며 강한 북서풍이 불고 있다.

Fig. 7에서부터 Fig. 10까지의 종관분석을 통하여 광주에서 관측된 2003년 1월 3일의 강설은 저기압의 영향으로 발생한 것이며 2003년 1월 4일의 강설은 순수하게 찬 대륙성 고기압이 상대적으로 온난다습한 서해상으로 확장하며 만들어진 cloud streets에 의한 것으로 분석할 수 있다.

Fig. 11은 2003년 1월 3일 00 UTC 부터 2003년 1월 4일 18 UTC 까지 6시간 간격으로 광주에서 관측된 고층기상관측자료를 이용하여 분석한 SKEW T-LOG P 단열선도이다.

Cloud streets는 고도별 풍향의 변화가 20도 이내에서 균일하여야 하고, 풍속은 하층에서 안정층으로 갈수록 강하게 나타나는 패턴을 이루어야한다. 2003년 1월 3일 06 UTC부터 1월 4일 00 UTC까지 3 km 이하인 약 700 hPa 이하 고도의 대류권 하층에서 고도에 따른 풍향 변화는 310°~290°로 분포하여 약 20° 이내에서 변화를 보이고 있다.

또한, 풍향은 925 hPa에서 강설이 강해지는 1월 4일 00 UTC로 갈수록 북서풍이 강화되었다. 이것은 cP 확장이 강화되어 시베리아 고기압의 세력이 강화되고 있다는 증거이다. 그리고 풍속의 변화는 고도가 증가할수록 풍속이 증가하는 패턴인데 925 hPa에서는 약 5 m/s이고 700 hPa에서는 약 16 m/s로 나타나고 있다. 강한 대설이 보인 1월 4일 00 UTC 이전에는 하층의 풍속이 약하다가 강한 대설을 보인 시각에 가까워질수록 하층에 상대적으로 강한 바람이 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

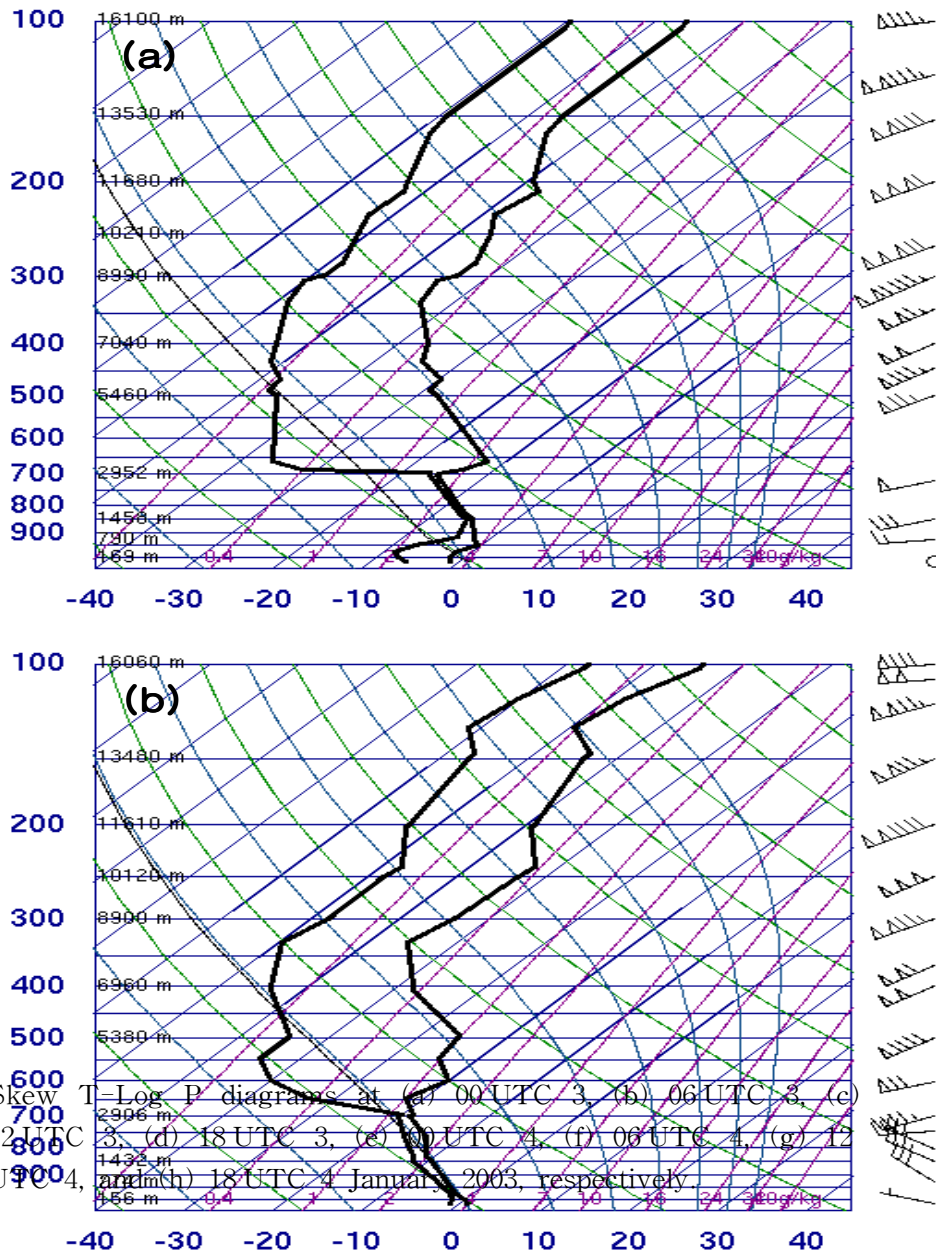


Fig. 11 Skew T-Log P diagrams at (a) 00 UTC 3, (b) 06 UTC 3, (c) 12 UTC 3, (d) 18 UTC 3, (e) 00 UTC 4, (f) 06 UTC 4, (g) 12 UTC 4, and (h) 18 UTC 4 January, 2003, respectively.

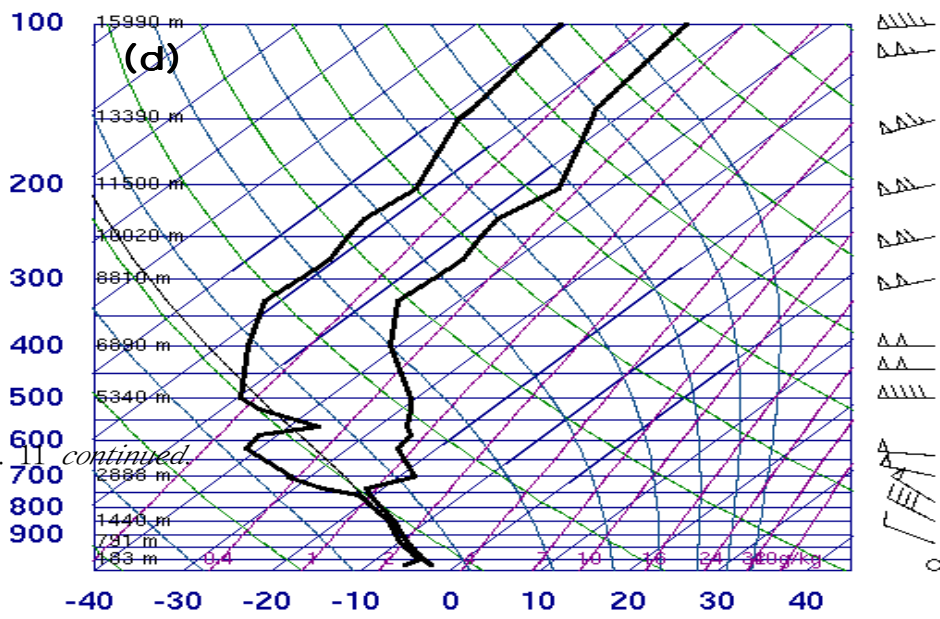
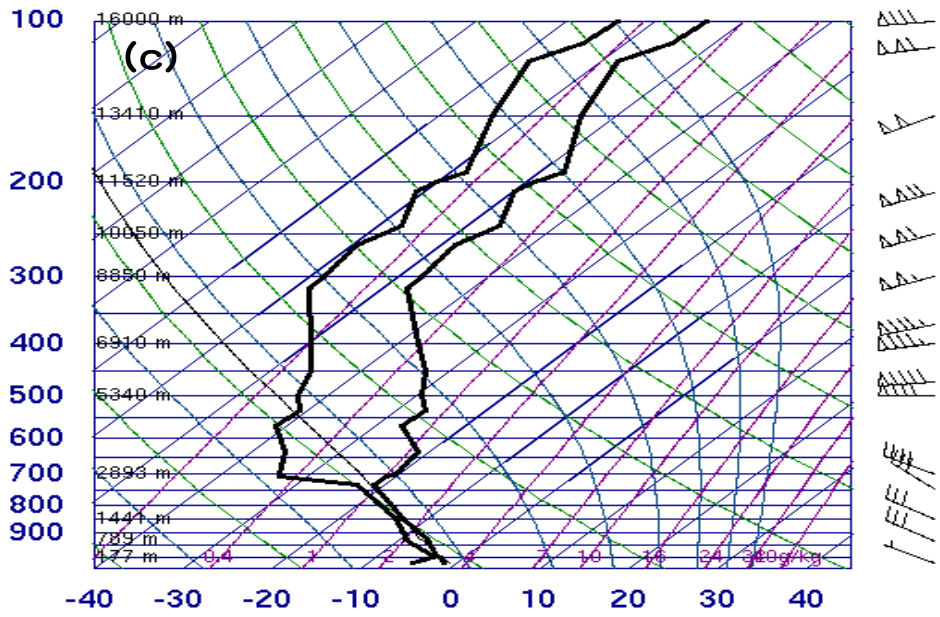


Fig. 11 continued.

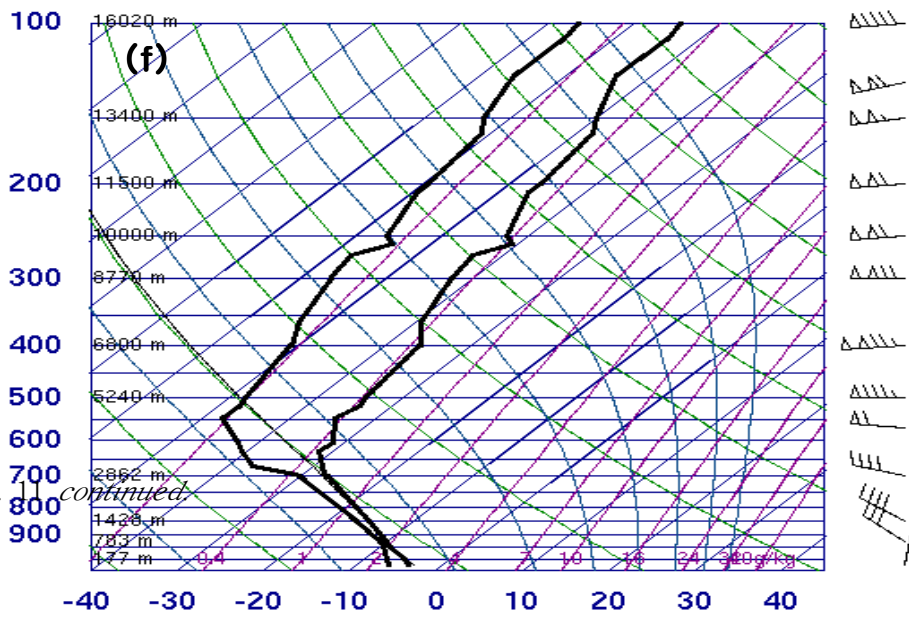
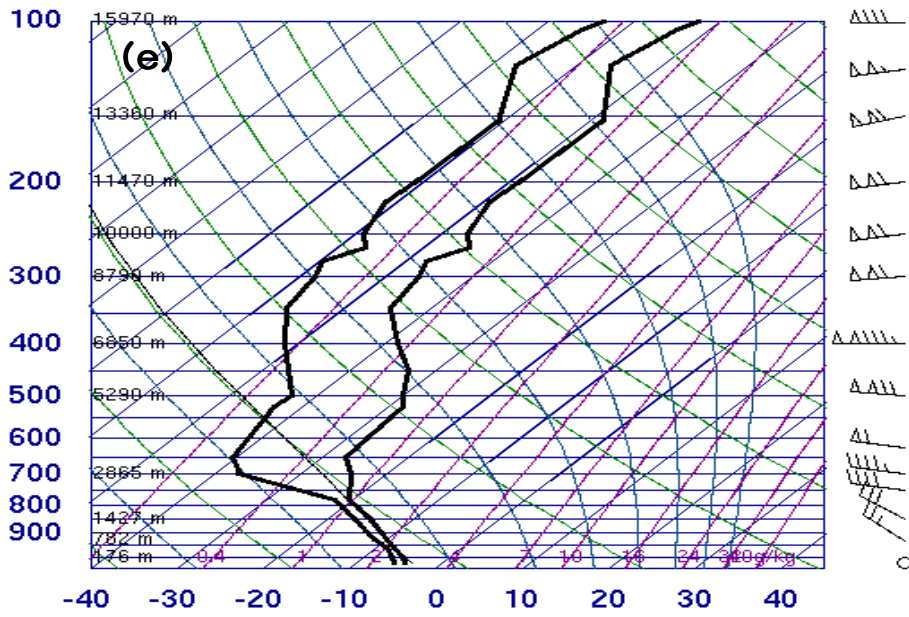


Fig. 11 continued

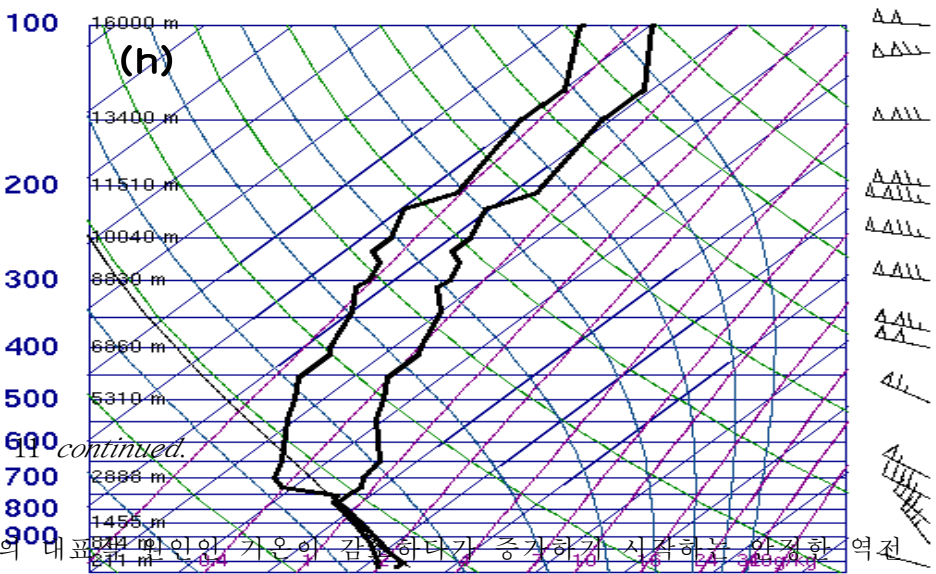
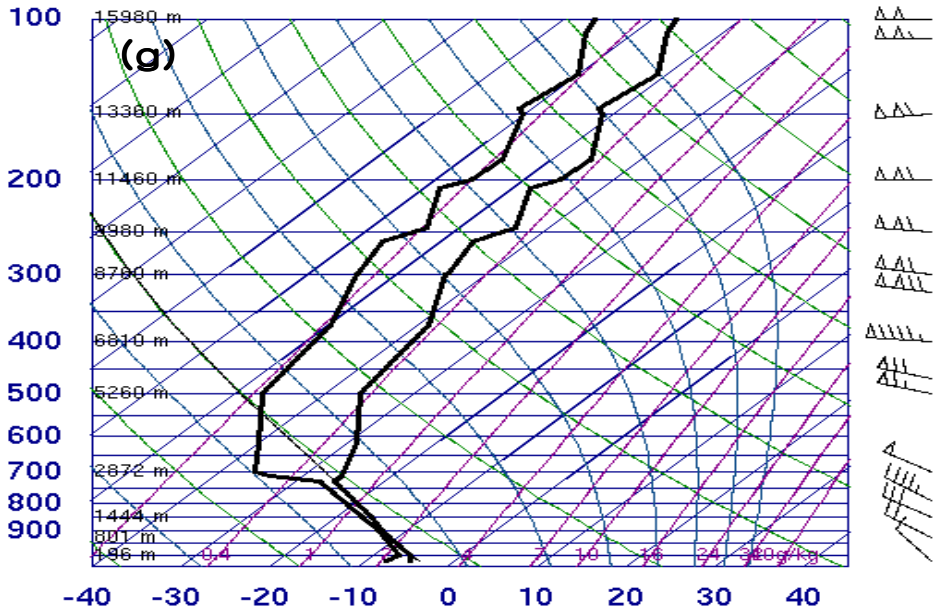


Fig. 11 continued.

구름 발달의 대표 고도의 위치는 -2003년 3월 3일 06 UTC에 약 3.5 km 고도에서 약 30 km 정도 형성되고, 1월 3일 12 UTC에서는 2.8 km 부근에서 형성하다가 1월 3일 18 UTC와 1월 4일 00 UTC까지 2.8 km 정도를 계속 유지하였다. 따라서 구름의 발달고도는 2.8 km

이하라고 할 수 있다. 이러한 불안정층은 cloud streets를 형성하는 조건을 만들며 불안정층이 끝나는 고도까지 발달하는 특성을 보인다.

B. 위성영상 분석

Cloud streets의 수평적인 발달 구조를 분석하기 위하여 한반도 주변의 위성영상을 분석하였다.

Fig. 12는 2003년 1월 4일 14시 GMS 5 정지기상위성의 영상을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)은 RGB 합성영상이고 Fig. 12(b)는 가시영상이며 Fig. 12(c)는 적외선영상, Fig. 12(d)는 수증기영상이다.

RGB 합성영상은 적외선영상과 가시영상을 조합하여 작성하며 적외선영상을 푸른색으로, 가시영상은 붉은색으로 처리하여 합성한 영상이다. 합성영상에서 상층운은 푸른색, 하층운은 붉은색, 발달한 구름은 밝은 흰색으로 표출된다.

Cloud streets는 주로 하층운이기 때문에 3 km 정도의 고도를 감안하면 적색 또는 청색으로 나타내는 것처럼 보이나 겨울철의 하층의 기온은 지상에 까지 0°C 이하이기 때문에 북반구로 갈수록 백색으로 나타는 것을 알 수 있고, 한반도 남부 지방 아래에 적색으로 나타나는 것은 구름의 기온이 북반구보다 상대적으로 높기 때문에 나타는 것이다.

Cloud streets의 형태를 살펴보기에는 하층운의 형태를 가장 잘 보여주는 가시영상이 가장 적합한 영상이다. 그러나 야간에는 태양광의 반사도를 이용하여 작성되는 가시영상은 만들어지지 않기 때문에 현업에서 운영하는 일반적인 패턴에서 구름의 분포를 파악하기 쉬운 적외선영상을 활용하여야 한다.

본 사례에서는 강설이 집중된 시간이 일사가 있는 낮 시간이기 때문에 가시영상을 이용하여 수평적인 패턴을 분석할 수 있다.

발해만에서 시작된 cloud streets가 서해상에서 잠열속의 차이로 인하여 수분이 공급되어 발달하고 있는 것을 알 수 있다. 수평적으로는 풍향과 나란한 방향으로 띠모양으로 북서에서 남동방향으로 펼쳐져 있다. 그리고 북 일본열도 동쪽에 위치한 cloud streets도 확인할 수 있다.

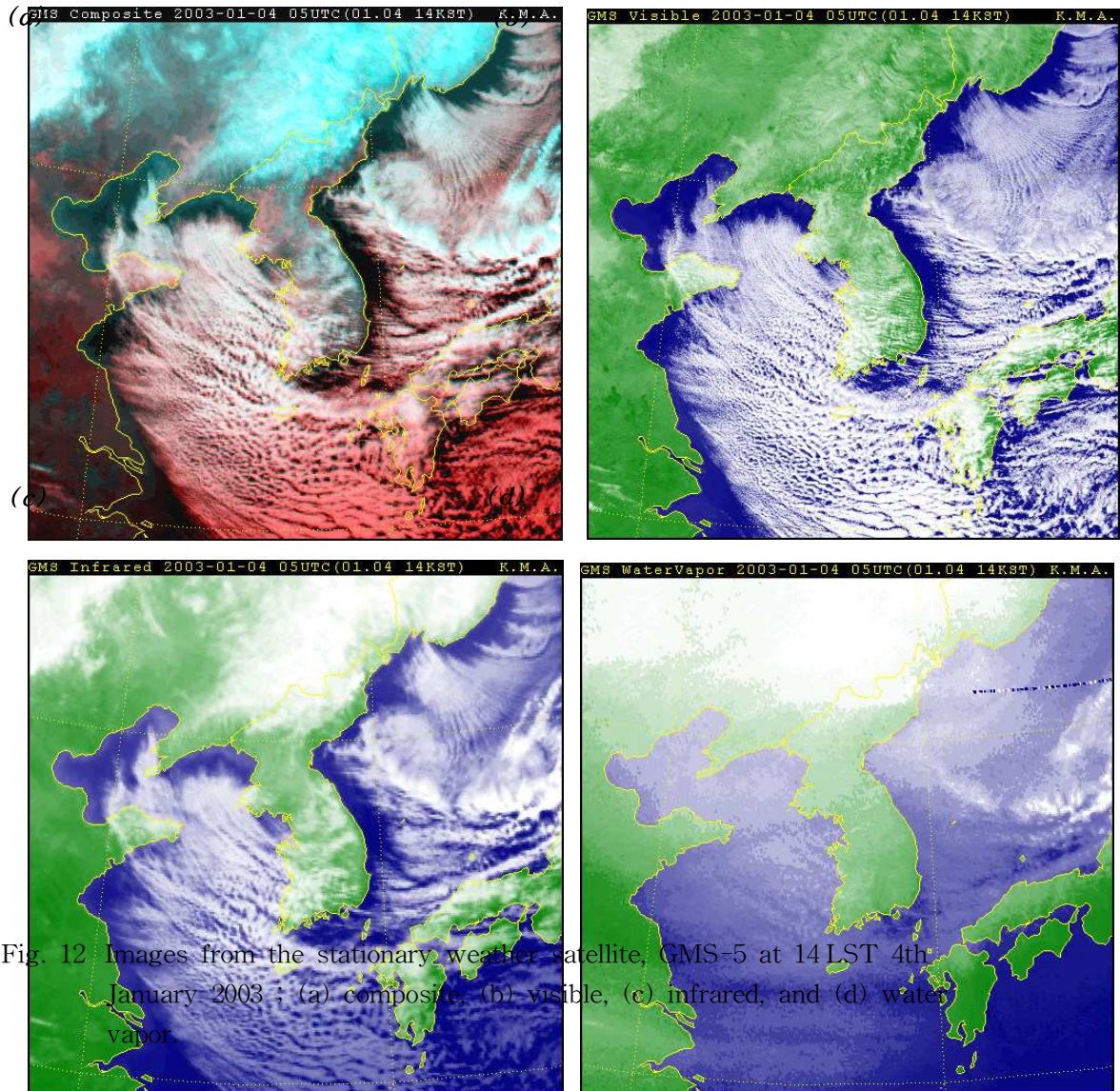
중국에 위치한 대륙성 고기압과 일본 열도에 위치한 저기압에 의해 동고서저의 기압패턴으로 말미암아 서해상에서는 cloud streets의 발달 조건이 적당하게 유지

되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 기압패턴에서 cloud streets의 발달은 시베리아 고기압의 확장의 지속여부에 따라서 발달의 지속을 예측할 수 있다.

경압불안정과 해수면과 찬 대륙성 고기압의 상대적인 차이에서 비롯된 cloud streets는 중국에 가까울수록 그 형태를 그대로 유지하다가 한반도에 상륙하면서 전체적인 풍향과 풍속 및 잠열의 변화로 인하여 그 모양이 변형되는 것을 확인 할 수 있다.

수증기 영상은 중상층의 구름의 속성을 알 수 있기 때문에 cloud streets를 분석하기에는 적당하지 않지만 이 시간대의 수증기 영상을 살펴보면 정확한 형태나 위치를 알 수 없지만 전체적으로 강하게 발달한 구름에 대한 정보는 어느 정도 나타내고 있다.

전체적으로 Fig. 12(b)의 가시영상을 이용하여 분석된 내용을 정리하면 발해만에서 시작된 cloud streets는 서해상에서 발달하여 대설이 발생한 한반도 호남지역으로 뻗어있고, 형태는 수평바람의 풍향과 일치하는 방향으로 북서에서 남동 방향으로 길게 늘어진 띠모양의 나타나며 간격은 약 30~50 km 정도를 가진다.



C. PPI 분석

레이더의 반사도는 강수의 강도를 나타내는 관측량이다. 따라서 강우 또는 강설의 경우 입자의 개수 및 크기에 따라서 달리 관측되는 레이더 반사도 자료를 활용하여 강설의 강도를 추정할 수 있다.

본 사례의 강설의 규모 및 이동 방향을 살펴보고, 광주지방 일대에 강한 강설을 기록한 1월 4일 15시 이후의 패턴을 살펴보기 위하여 Fig. 13에 2003년 1월 4일 15시에 관측된 진도와 무안레이더 영상을 나타내었다.

Fig. 13(a)는 진도 레이더 반사도 0.19도 PPI 영상을 $Z=200R^{1.6}$ 을 적용하여 환산한 강우강도이고, Fig. 13(b)는 진도 레이더 시선속도의 0.19도 PPI 영상이며, Fig. 13(c)는 무안 연구용 X-band 레이더(이하 무안레이더)의 반사도 2.4도 PPI 영상, Fig. 13(d)는 무안레이더 시선속도의 2.4도 PPI 영상이다.

무안레이더는 진도레이더의 북쪽으로 약 70 km 떨어진 지점에 위치한다. 무안 레이더는 파장이 3 cm인 X-band 레이더이고, 진도 레이더는 파장이 10 cm인 S-band 레이더이다. 각 레이더의 특성은 무안 레이더는 강수에 의한 감쇠가 심하여 강수를 관측하기에는 적절치 않지만 미세규모의 강수 분포 및 국지규모를 파악하기에는 적합하며 진도의 S-band 레이더는 중규모의 패턴 및 강수를 파악하기에 적합한 관측 장비이다.

시베리아 고기압의 변질로 인해 발해만에서 시작하여 서해상에서 발달한 구름의 형태는 수평으로 약 10~20 km이고 수직으로 약 4 km 이하이며, 주 풍향에 나란한 방향으로 길게 늘어진 띠 형태를 가진 소규모의 대류형 구름으로, 이러한 구름들은 무리를 이루고 있고, 띠 모양의 수평 간격은 약 25~100 km의 주기를 가지고 펼쳐져 있다. 그러나 한반도에 가까워지면서 cloud streets의 구조는 주 풍향에 수평한 방향으로 펼쳐진 형태로 변질된 띠 모양이 아닌 구름이 서로 병합하여 하나의 작은 대류형 시스템을 이루는 형태로 나타난다.

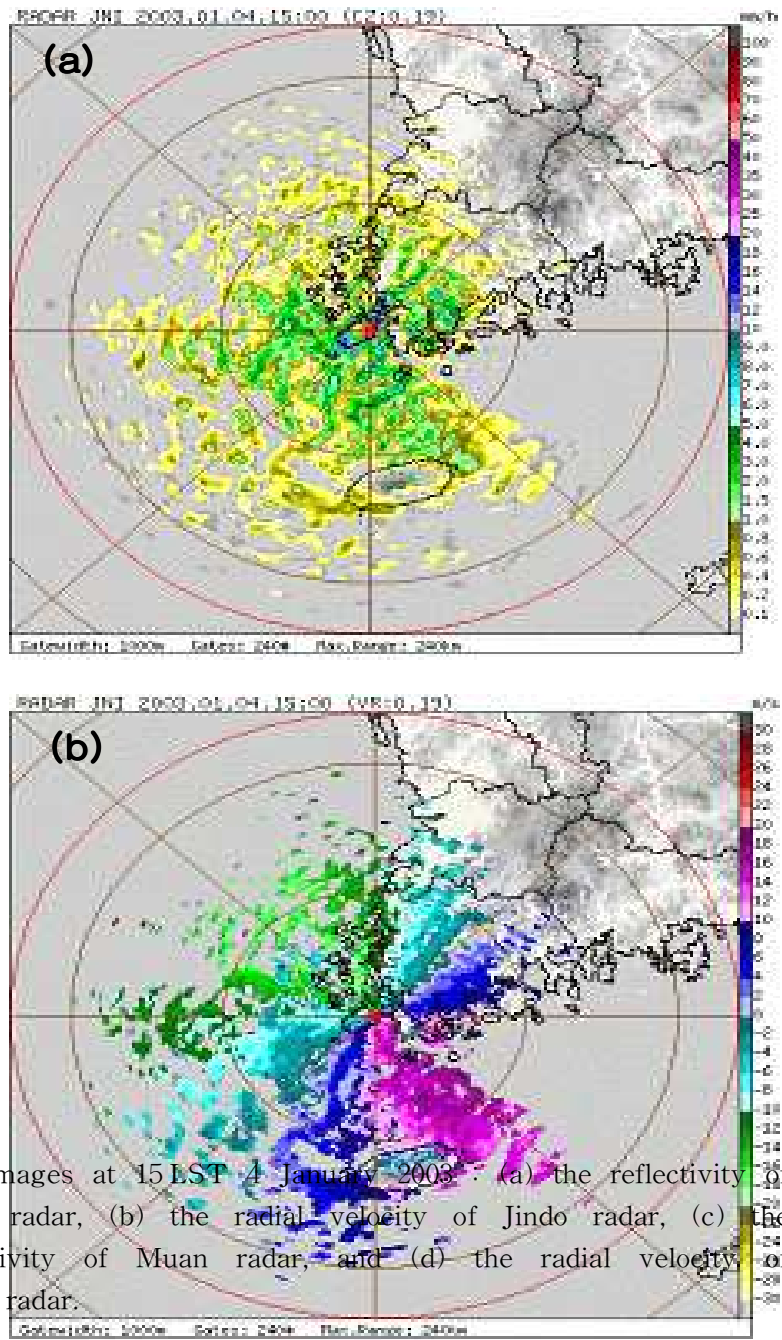


Fig. 13 PPI images at 15 LST 4 January 2003 : (a) the reflectivity of Jindo radar, (b) the radial velocity of Jindo radar, (c) the reflectivity of Muan radar, and (d) the radial velocity of Muan radar.

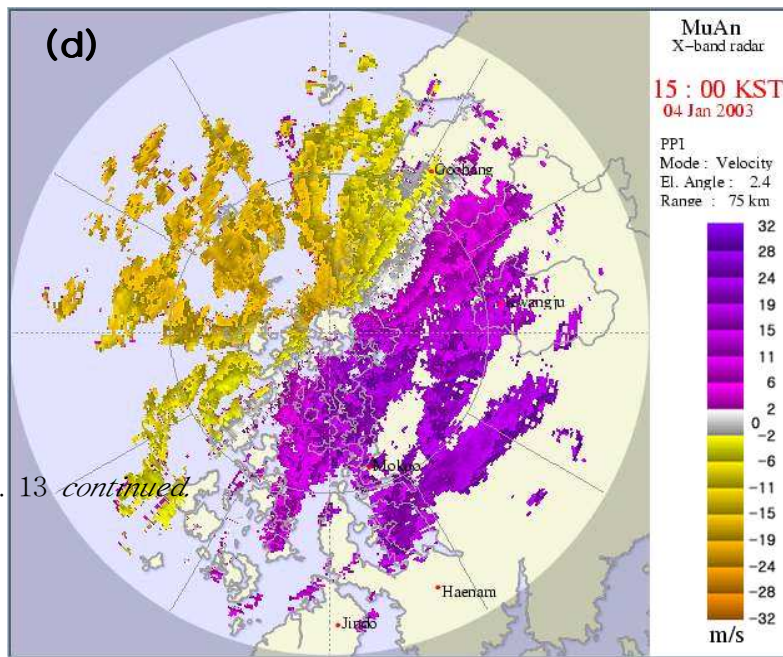
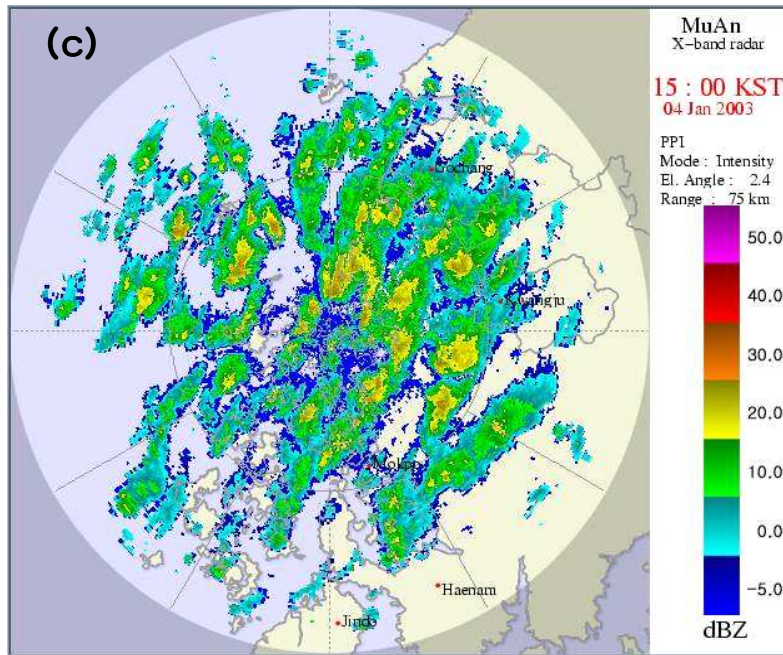


Fig. 13 *continued.*

진도 레이더와 무안 레이더의 시선속도를 분석하면 시스템의 이동 방향을 파악할 수 있다. 두 레이더에서 관측된 시선속도는 레이더를 중심으로 북서쪽에서 다가오는 도플러 시선속도 최대값이 나타나고, 남동쪽에서 멀어지는 시선속도의 최저값이 나타난다. 그리고 북동쪽과 남서쪽에서 도플러 시선속도가 0 m/s에 가까운 값이 나타난다. 이는 시스템의 이동 방향이 북서 방향으로 나타나고 있음을 말한다.

무안레이더의 반사도 및 진도레이더의 환산 강우강도의 분포에서, 서해상에서 cloud streets의 형태를 이루다가 서해안과 만나면서 기온 차이에 의해서 그 형태가 깨어지고 하나의 시스템의 덩어리로 병합되는 것을 확인 할 수 있다.

진도레이더에서 관측된 반사도로부터 환산된 강우강도는 무안레이더가 커버하는 부근의 영역을 잘 대표하지는 못하지만 무안레이더는 미세규모의 분포를 나타내고 있다. 특히 서해안 일대의 20 dBZ 이상의 반사도가 나타나는 작은 대류형 형태의 구름을 잘 보여주고 있다. 무안레이더의 반사도 분포는 약 0~30 dBZ에 주로 분포하고 있고 강한 강설을 내리는 지역은 20 dBZ 이상으로 관측되는 것을 알 수 있다.

그리고 시선속도의 분포는 진도레이더의 경우 약 15 m/s 정도의 최대값을 가지고 무안 레이더도 약 15 m/s 부근에서 시선속도의 최대값을 가진다. PPI 관측은 거리가 증가할수록 고도각의 크기에 따라서 관측고도가 증가한다. 즉 고도각 0.1도로 PPI 관측 시 10 km 떨어진 지점의 관측고도는 약 0.3 km이지만 240 km 떨어진 지점의 관측고도는 약 4 km 부근이다. 따라서 거리에 따른 시선속도의 변화는 고도에 따른 바람의 쉬어를 나타낸다. 거리에 따른 시선속도의 시어는 거의 일정한 패턴을 보이고 있다. 이는 cloud streets 발달 조건에 해당된다.

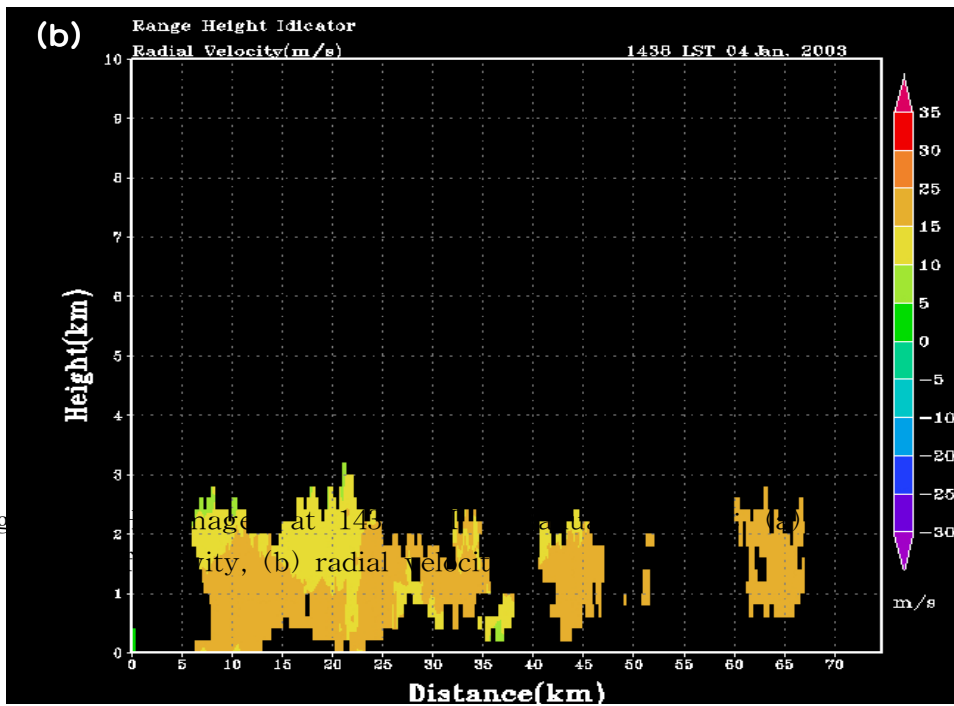
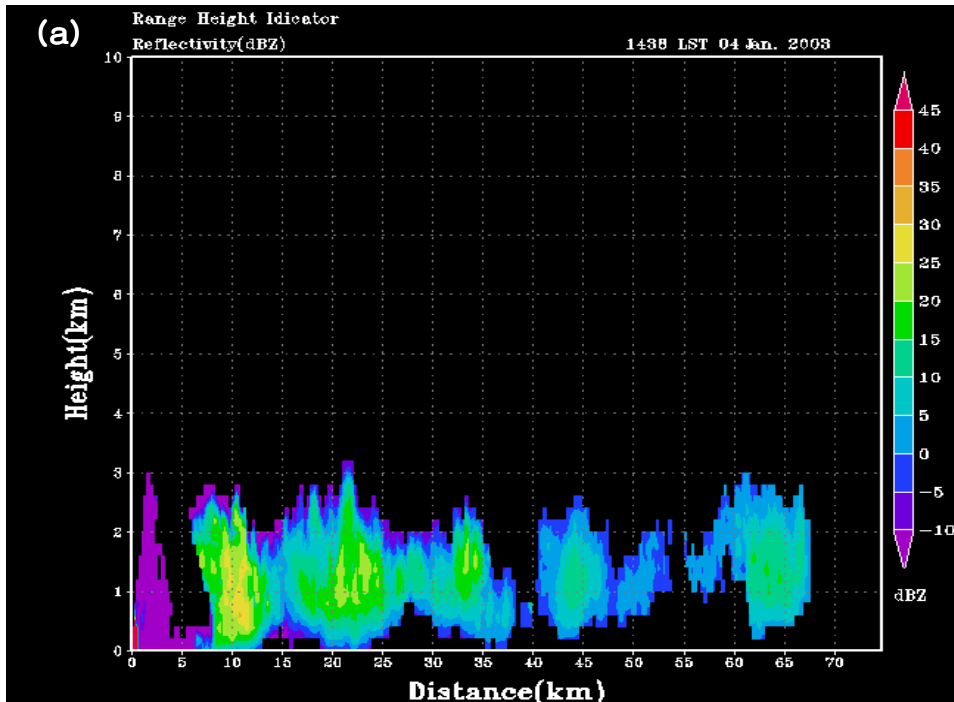
D. RHI 분석

Cloud streets의 구조를 연직적으로 파악하고 발달의 규모를 분석하기 위하여 Fig. 14와 15는 2003년 1월 4일 14시 38분과 58분에 무안 레이더에서 해남방향으로 관측된 RHI 영상을 나타내었다.

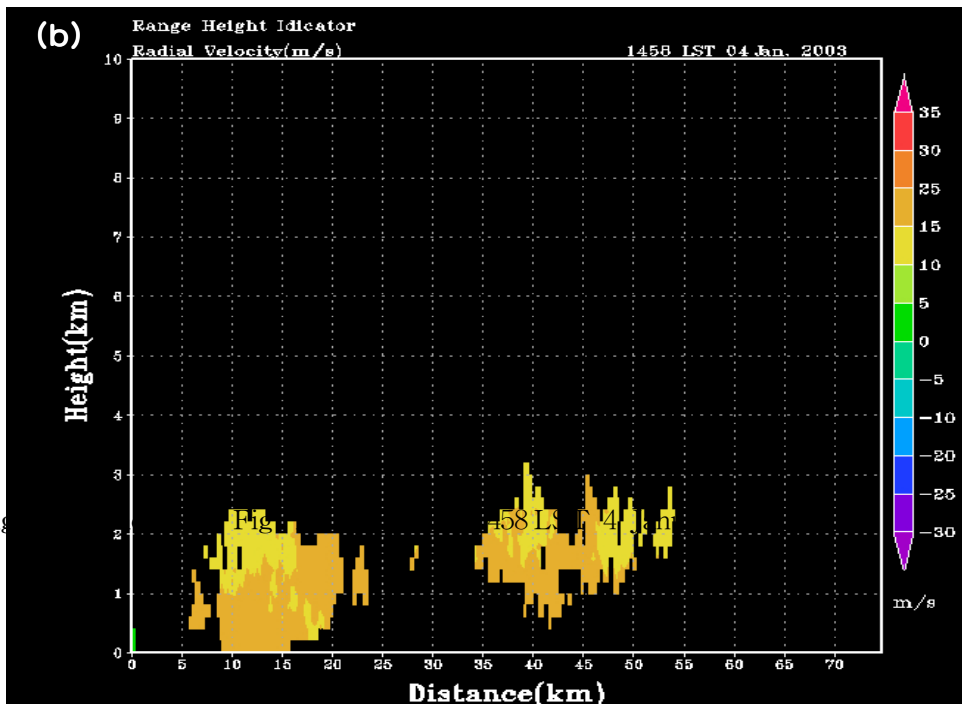
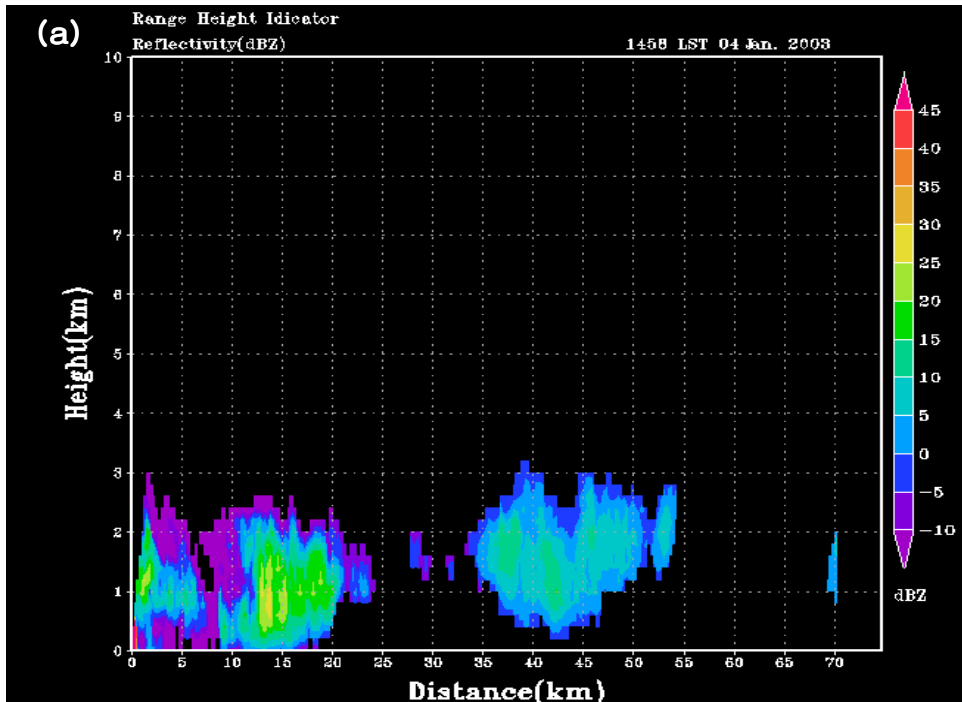
Fig. 14(a)와 Fig. 15(a)는 레이더 반사도 영상이고 Fig. 14(b)와 Fig. 15(b)는 시선속도 영상이다.

RHI 영상은 방위각을 고정하고 고도각을 변화시키면서 관측한 것이다. 반사도 영상을 살펴보면 반사도의 분포는 약 0~30 dBZ로 분포하고 있고 반사도가 20 dBZ가 넘는 중심 셀의 위치는 10, 23, 34, 44, 64 km 부근에서 나타나며 수직적으로는 약 3 km 이하에서 구름이 발달된 것으로 보아 고도 3 km 이상에 안정층이 존재하는 것으로 파악된다. 그리고 중심 셀의 간격은 약 10~20 km 로 떨어져 있고, 셀의 크기는 수평으로는 약 7~10 km이고, 높이는 3 km이다.

시선속도의 분포를 보면 약 13~20 m/s 정도로 떨어지는 도플러 시선속도가 나타난다. 주 풍향이 북서풍인 것을 감안할 때 이 크기는 수평바람의 크기라 해도 무방하다. 고도별로 시선속도의 차이를 보면 쉬어가 존재하지 않고 상층으로 가면서 시선속도가 약해지는 패턴을 보인다. 전체적인 풍향의 쉬어는 존재하지 않는 것으로 나타났으며, 7 km 이내에서 도플러 시선속도는 관측되지 않았다.



Fig



Fig

E. CAPPI 및 수직 단면도 분석

수평규모의 발달을 살펴보기 위하여 Fig. 16과 Fig. 17에 2003년 1월 4일 15시에 무안 레이더에서 관측된 부피주사 자료를 NCAR/SPRINT(National Center for Atmospheric Research / Sorted Position Radar INTerpolation)와 NCAR/CEDRIC (Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space)프로그램을 이용하여 고도별 영상을 나타낸 것이고, 1.0~2.5 km 까지 0.5 km 간격으로 나타낸 반사도와 시선속도의 CAPPI 영상을 나타낸 것이다. CAPPI 영상은 레이더 부피주사 자료를 객관 분석하여 등고도면에 자료를 나타낸 것이다.

전체적인 에코의 분포는 약 10 km 정도의 셀의 크기를 가지고 무리를 지어서 골고루 분포하고 있는 패턴이다. 앞에서 언급한 것 같이 cloud streets는 풍향에 수평으로 형성이 되었으나 서해안과 다른 기온과 잠열속을 가지고 있는 육지를 만나면서 발달을 강화시키는 요인이 사라지고 또 다른 메커니즘으로 이전되는 패턴으로 나타난다.

에코의 분포는 주 풍향에 수평한 방향으로 띠 모양을 형성하는 패턴이 깨어지고 수직으로 병합되어 나타나고 있다. 광주지방 일대에 강한 강설을 기록한 원인은 노령산맥과 차령산맥의 중앙에 위치한 지형적인 요인으로 인하여 구름의 강제상승을 일으켜 보다 더 많은 구름이 강설로 전이되는 양상을 나타낸다.

고도별로 나타난 구름의 패턴은 2.0 km 이하에서는 패턴을 파악할 정도로 많은 에코의 분포를 보이고 있지만 2.5 km 부근에서는 구름의 분포가 약해지는 패턴을 보인다. 이는 구름의 발달이 안정층으로 판단되어지는 3 km 부근에 약해지고 있음을 나타내고 있다는 증거이다.

Cloud streets의 발달조건인 고도에 따른 풍향의 변화를 살펴보면 고도에 따른 시선속도의 패턴은 0.5~2.5 km까지 모두 북서풍향을 보이는 일정한 모습을 나타낸다.

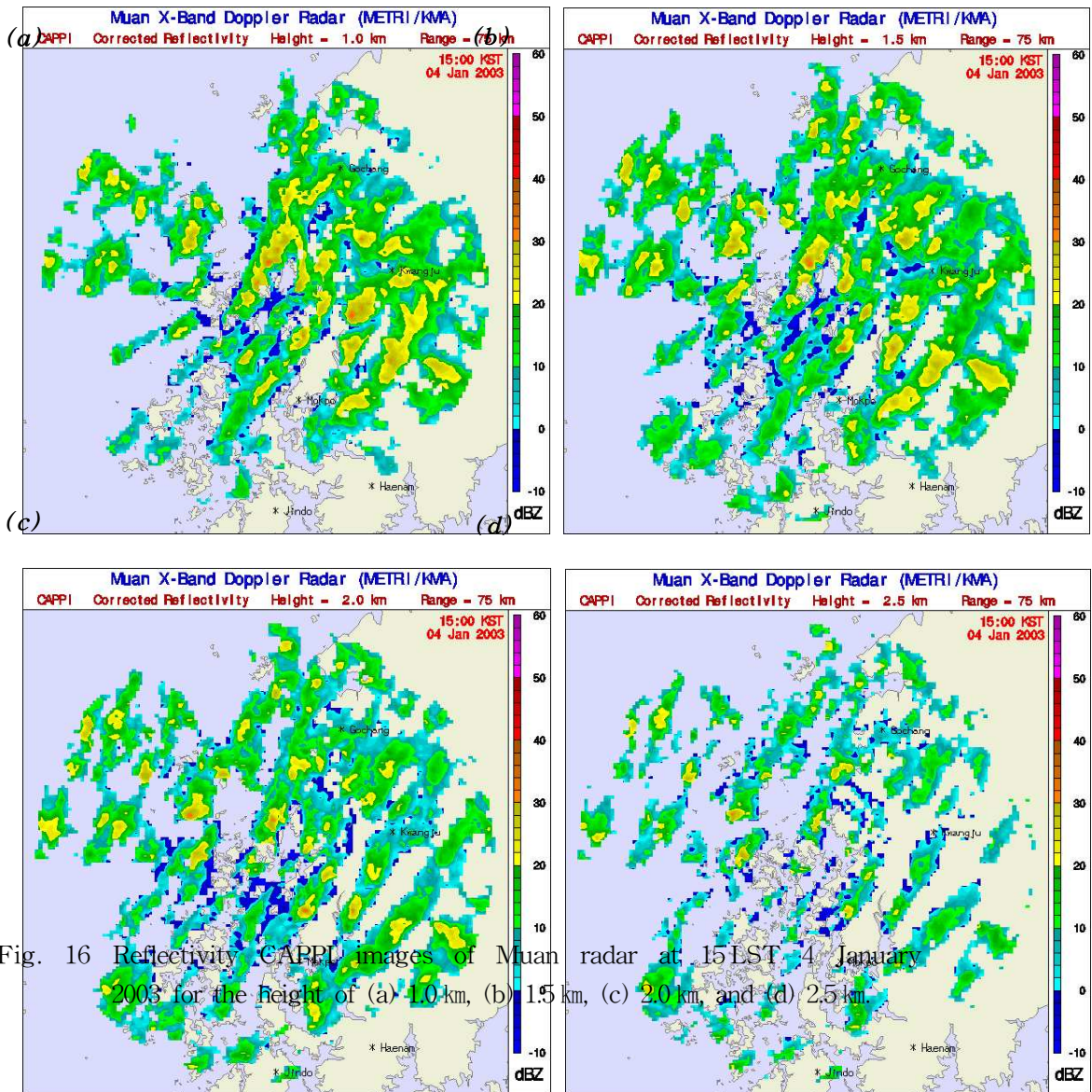


Fig. 16 Reflectivity CAPPI images of Muan radar at 15 LST 4 January 2003 for the height of (a) 1.0 km, (b) 1.5 km, (c) 2.0 km, and (d) 2.5 km.

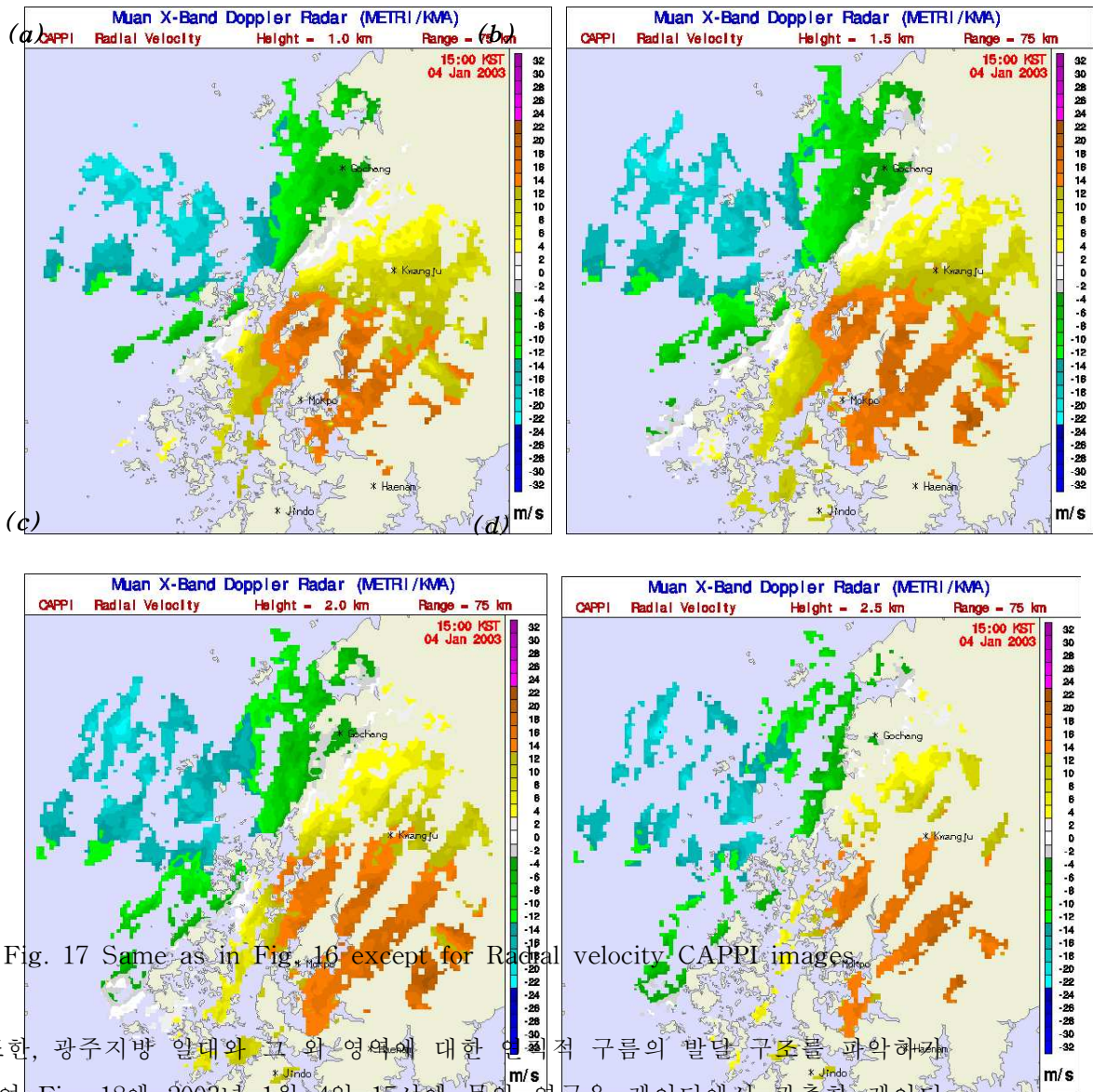


Fig. 17 Same as in Fig. 16 except for Radial velocity CAPPI images.

또한, 광주지방 일대와 그 외 영역에 대한 연직적 구름의 발달 구조를 파악하기 위하여 Fig. 18에 2003년 1월 4일 15시에 무안 연구용 레이더에서 관측한 레이더 반사도와 시선속도의 수직 단면도를 나타낸 것이다.

Fig. 18(a)는 레이더를 중심으로 북쪽으로 15 km 떨어진 동서방향의 단면도이고 Fig. 18(b)은 남쪽으로 15 km 떨어진 동서방향의 단면도이며 Fig. 18(c)와 Fig. 18(d)는 시선속도에 대한 북쪽으로 15 km와 남쪽으로 15 km의 수직 단면도이다.

구름의 구조는 수평으로 약 10 km이고, 수직으로 2.5~3.5 km 규모를 가진 약한 대류형을 띤다. 그리고 전체가 띠 모양으로 나열되어 시스템의 진행 방향과 수직으로 분포하는 것을 알 수 있다.

반사도의 강도는 셀의 중심이 약 20~33 dBZ의 강도를 가지고 셀의 가장자리는 10 dBZ 이하의 강도를 가진다.

전체적으로 RHI 분석에서와 같은 패턴으로 나타났다.

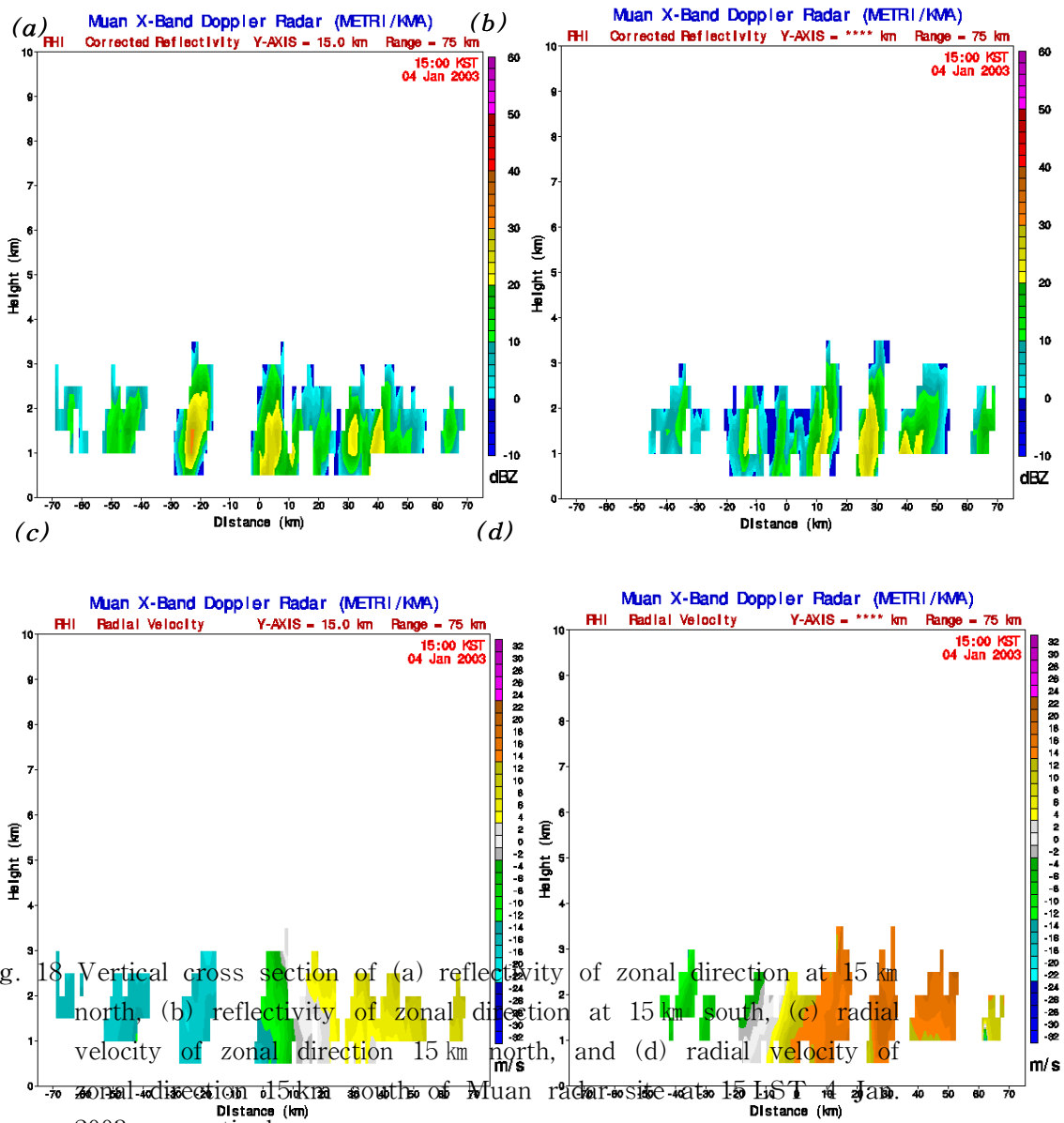


Fig. 18. Vertical cross section of (a) reflectivity of zonal direction at 15 km north, (b) reflectivity of zonal direction at 15 km south, (c) radial velocity of zonal direction 15 km north, and (d) radial velocity of zonal direction 15 km south of Muan radar site at 15:00 KST on 4 Jan. 2003, respectively.

F. VAD 및 VVP 분석

레이더는 시선속도 성분만을 관측하기 때문에 수평성분의 바람장을 산출하기 위해서는 수학적 접근이 필요하다. 레이더의 시선속도 성분을 이용하여 고도별로 바람의 크기와 방향을 산출할 수 있는 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 가장 보편적이고 일반적인 VAD 방법을 이용하여 표출하고 분석하였다.

VAD 방법에 대한 산출 이론은 부록에 수록하였다.

VAD 방법은 종관적인 시스템의 흐름에서 벗어나지 않는 영역에 대한 분석에는 높은 정확도를 가진 방법이다.

Fig. 19는 무안과 진도 레이더에서 관측된 시선속도 성분에서 고도별 수평 바람장을 매 10분마다 산출하여 시계열로 나타낸 것이다.

VAD의 분석에서 알 수 있는 것은 고도별 수평 바람장의 변화와 시간적인 패턴으로부터 임의의 지점을 통과한 한 시스템의 공간적인 분포로도 대변할 수 있으며, 구름의 발달고도를 추정할 수 있다.

Fig. 19(a)에서, 1월 3일 11시경에 약 0.5 km 고도의 진도레이더의 풍향이 남서에서 서풍으로 다시 북서풍으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 이것은 일본 열도에 위치한 저기압의 세력이 중국 북부에 위치한 고기압의 확장에 의하여 동쪽으로 이동하여 점차 중국 북부에 위치한 고기압의 영향을 받기 때문이고 이러한 이유로 cloud streets가 강화된다.

Fig. 19(b)는 1월 4일 9시부터 15시까지의 수평의 바람의 패턴이다.

전체적으로 고도별로 일정한 풍향과 풍속을 가지고 계속하여 시스템이 이동하고 있다. 구름의 발달 고도는 약 3 km 이하이고, 고도별 풍향 및 풍속의 쉬어가 거의 존재하지 않을 때 강설이 발생한다. 풍향은 북서풍이고 풍속은 약 20~35 kts로 산출되었다.

이러한 분석은 PPI, RHI 분석과 일치한다.

Fig. 19(c)는 진도레이더에서 VVP방법으로 산출된 2003년 1월 3일 9시 30분부터 11시 30분까지의 고도별 수평 바람장을 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)에서 나타난 것과 같이 저기압의 세력이 약화되고 고기압의 세력이 강화되고 있음 알 수 있다.

Fig. 19(d)는 진도레이더에서 산출된 2003년 1월 4일 7시 50분부터 9시 50분까

지의 수평 바람장이다. 1월 4일 무안에서 관측된 수평 바람장과 같은 결과를 보여 준다. 풍향과 풍속의 쉬어가 없는 거의 일정한 패턴이다.

강설은 저기압의 세력이 약화되고 고기압이 확장하면서 서해안의 해수면을 만나면서 변질되어 구름을 형성하고 한반도로 유입되면서 발생하는 것이다. 따라서 Fig. 19(a)와 Fig. 19(c)는 고기압의 확장 시기를 알 수 있고, Fig. 19(b)와 Fig. 19(d)는 강설 시 수평 바람장의 고도별 패턴을 알 수 있다.

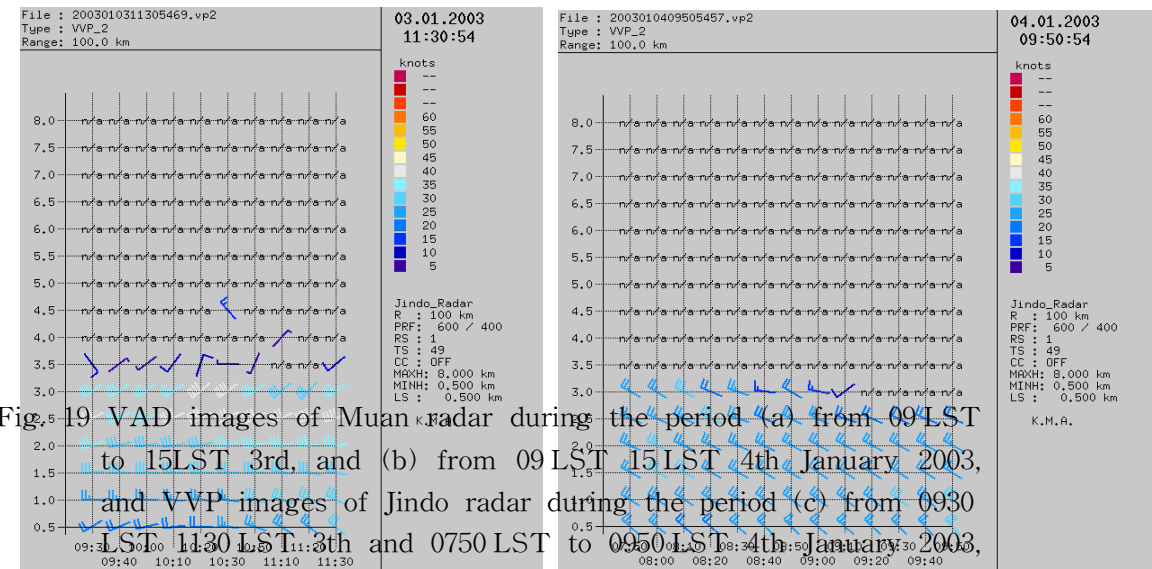
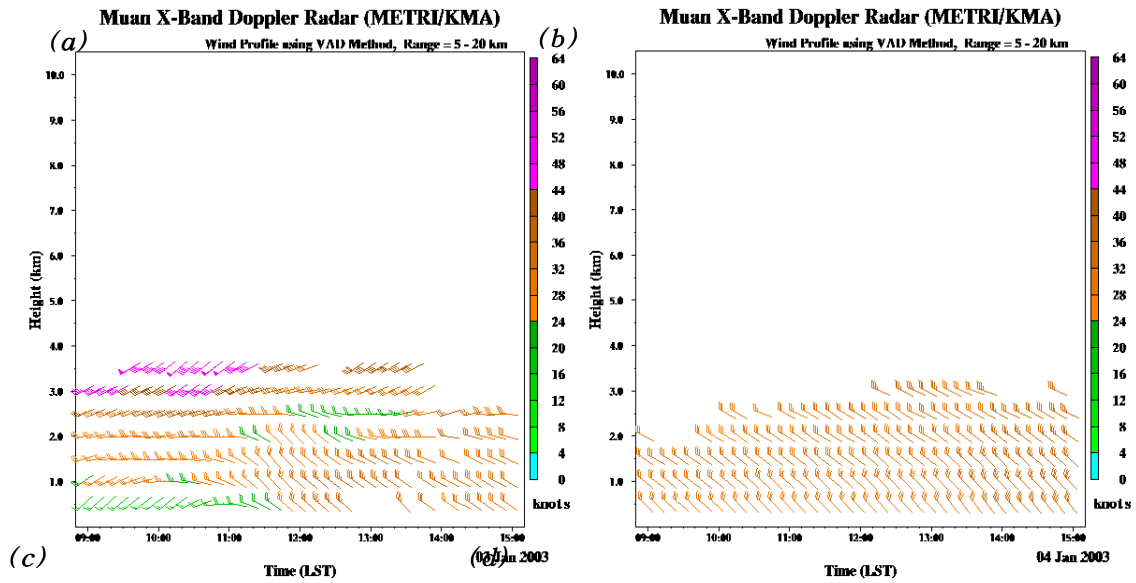


Fig. 19 VAD images of Muan radar during the period (a) from 09 LST to 15 LST 3rd, and (b) from 09 LST to 15 LST 4th January 2003, and VVP images of Jindo radar during the period (c) from 0930 LST to 1130 LST 3th and 0750 LST to 0950 LST 4th January 2003, respectively.

IV. 결 론

본 연구에서는 2003년 1월 3일부터 1월 5일 사이에 호남 서해안 지방에서 발생한 대설 사례를 선행연구에 근거하여 기초 분석하고, 무안의 연구용 X-band 레이더와 진도의 S-band 레이더의 PPI, CAPPI, RHI, VAD 및 VVP의 영상을 이용하여 강설의 강도 및 이동과 발달에 대해서 분석하였다.

또한, cloud streets의 형성조건인 기압의 패턴과 고도별 기온 및 풍향과 풍속의 분포에 따라서 강화와 약화의 여부를 분석하였고, 구름의 수평적 구조가 풍향에 나란한 방향 또는 수직인 방향으로 길게 늘어진 띠 형태의 패턴을 보이고 띠 사이의 간격은 발달의 정도에 따라서 약 25~100 km의 간격을 가지고 형성되어 발달하다가 한반도를 만나면서 수평적인 형태가 깨어지는 cloud street의 3차원 구조를 파악하였다

호남 서해안에서 발생하는 cloud streets는 고기압의 확장방향과 수직하게 길게 분포하고, 셀의 반경이 약 5~8 km 정도의 크기이며, 셀 중심의 레이더 반사도는 약 20~30 dBZ이고, 셀 중심 사이의 거리는 약 10 km 거리를 가지는 형태로 파악되었다. 연직구조는 수평으로 약 10 km, 수직으로 약 3 km 정도의 크기를 가진 작은 대류형 세포 셀의 형태이고, 고도 3 km 부근 이내에서 불안정층의 존재로 인하여 구름이 발달하고 약 3 km 부근의 고도에 따라 기온이 증가하는 안정층의 존재로 인하여 운정 고도는 약 3 km 이었다.

Cloud streets는 시베리아 고기압의 확장 방향으로 주 시스템이 이동하며 발달하였고, 고도 약 3 km 이내에서 북서에서 서풍으로 바뀌는 반전의 풍계를 지녔으며 풍속은 약 5~16 m/s 이내로 분포하였다.

본 연구는 2003년 1월 4일에 국한된 사례분석에 해당하지만 향후 호남서해안 대설연구와 강설의 이동경로 및 강설 강도의 예보 정확도를 향상 시키는 기초자료로 활용될 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

- 김성삼, 1979 : 남한의 10 cm 이상의 강설의 기상 조건. *한국기상학회지*, 15(1) 1-11.
- 김학송, 류찬수, 2006 : cP 확장 시 대기파동에 의한 충청지방의 대설 연구. *한국기상학회 봄학술대회 Proceeding*, 한국기상학회, 116-117.
- 류찬수, 권태영, 최효, 이규태, 이재규, 정일웅, 김병곤, 2006 : 국지기상예측기술 개발/강원지방 폭설예측기술개발. 기상청, 연구개발보고서.
- 류찬수, 손건태, 정영근, 이정형, 이순환, 2006 : 국지기상예측기술개발/호남지방 국지호우. 대설예측기술개발. 기상청, 연구개발보고서. 388pp.
- 류찬수, 이순환, 2006 : 서해상의 해수면 기온 분포에 따른 대설 강도변화에 관한 수치 연구. *한국지구과학회 추계학술대회 Proceeding*, 한국지구과학회, 229-231.
- 민경덕, 1974 : 동계 황해상의 열 및 수증기 수지해석과 이들이 시베리아 기단의 변질에 미치는 영향. *한국기상학회지*, 10(1), 1-10.
- 박근영, 모선진, 장기호, 류찬수, 2006 : 기상레이더 종류에 따른 파장별 강설 분해능. *한국환경과학회 가을학술발표회 논문집*, 99-101.
- 박근영, 이순환, 류찬수, 2005 : 레이더 관측자료를 이용한 호남지방의 국지강수량변화에 관한 수치모의. *한국지구과학회 춘계학술대회 proceeding*, 182-187.
- 손건태, 이정형, 류찬수, 2005 : 강수량 예측을 위한 통계모형 개발. *Journal of the korean data analysis society*, 7-2, 507-521.
- 손건태, 이정형, 류찬수, 2005 : 신경회로망을 이용한 호남지역 세범주 대설예보. *Journal of the korean data analysis society*, 7-6, 1999-2007.
- 원효성, 이순환, 류찬수 2005 : 호남지방 고층관측자료동화가 수치기상예보에 미치는 영향에 관한 연구. *한국지구과학회지*, 26-1, 66-77.
- 원효성, 정관영, 원효성, 이강휴, 류찬수, 2006 : 겨울철 대륙고기압 확장 시 호남지방 대설 특성. *한국기상학회 봄학술대회 Proceeding*, 한국기상학회, 44-45.

- 전종갑, 이동규, 이현아, 1994 : 우리나라에서 발생한 대설에 관한 연구. *한국기상학회지*, **30**(1), 97-117.
- Armijo, L., 1969 : A theory for the determination of wind and precipitation velocities with Doppler radar. *J. Atmos. Sci.*, **26**, 570-573.
- Asai, T., 1970 : Stability of a plane parallel flow with variable vertical shear and unstable stratification. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 129-139.
- Brown, R. A., 1970 : A secondary flow model for the planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 742-757.
- Browning, K. A. and R. Wexler, 1968 : The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, **7**, 105-113.
- Carton, P. G. F., 1963 : The measurement of wind and convergence by Doppler radar. *Proc. 10th Conf. Radar Meteor.*, Washington DC, Amer. Meteor. Soc., 290-296.
- Koscielny, A. J., R. J. Doviak, and R. M. Rabin, 1982 : Statistical considerations in the estimation of divergence from single Doppler radar and application to pre-storm boundary-layer observation. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 197-210.
- Lhermitte, R. M. and D. Atlas, 1961 : Precipitation motion by pulse Doppler radar. *Proc. 9th Conf. Radar Meteor.*, Kansas City, Amer. Meteor. Soc., 218-223.
- Lilly, D. K., 1966 : On the stability of the Ekman boundary flow. *J. Atmos. Sci.*, **23**, 481-494.
- Matejka, T. and Ramesh C. Srivastava, 1991 : An Improved Version of the Extended Velocity-Azimuth Display Analysis of Single-Doppler Radar Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **8**, 453-466.
- Park, S. U., & Joung, C. H., 1984 : Air modification over the Yellow Sea during cold-air outbreaks in winter. *Journal of Korean Meteorological Society*, **20**(2), 35-50.

- Ryu C-S, Shon K-T, Lee J-H, 2005 : Statistical prediction of occurrence of heavy snow in Honam area, Korea. *ISAM5 Proceeding*, ISAM5 Organizing Committee, 63-65.
- Sun, Wen-Yih, 1978 : Stability Analysis of Deep Cloud streets. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 466-483.

【부록】 VAD 방법을 이용한 단일도플러 레이더 수평 바람장 산출

A. 이론

단일 도플러 레이더를 이용한 바람장 산출 방법에는 Lhermitte and Atlas(1961)가 고안하고, Caton(1963)과 Browning and Wexler(1968)에 의해 체계적으로 적용된 VAD(Velocity-Azimuth Display)방법, Srivastava *et al.*(1986)과 Matejka and Srivastava(1991)이 강수입자의 낙하속도를 산출하기 위하여 고안한 EVAD(Extended Velocity-Azimuth Display) 방법, Koscielny *et al.*(1982)이 대류형 강우에서 바람장을 산출하기 위해서 다중변화 회귀 분석을 통하여 고안한 VVP(Volume Velocity Processing) 방법 등이 있다. 그리고 이중 도플러 레이더를 이용한 바람장 산출 방법(Armijo, 1969; Ray *et al.*, 1980)은 두 대의 레이더를 이용하여 같은 강수입자의 운동을 두 방향에서 관측하여 특정 영역에 대하여 보다 더 정밀한 바람장을 산출할 수 있다.

VAD 방법은 레이더 에코 관측 방법 중 PPI (Plan Position Indicator) 모드에서 관측된 자료를 사용하여 같은 거리 주사원상에서의 입자의 시선 속도를 이용하여 고도별 수평 및 연직 바람을 산출하는 방법이다. 레이더에서 관측된 시선속도(V_r), 관측고도(h) 그리고 방위각(θ)을 사용하여 고도(h)별로 수평풍속(V_h), 수평풍향(ϕ) 그리고 강수입자의 낙하속도(V_f)를 사용하여 기하학적으로 나타내면 Fig. A1과 같이 나타낼 수 있다. 낙하속도는 강수 입자의 종단속도와 공기의 연직 속도의 합으로 주어진다. α 변형이 거의 없는 균일한 수평 바람장과 낙하속도가 일정하다고 가정하면 시선속도는 식(A1)과 같이 표현된다.

$$V_r(\theta) = V_x \cos \theta \cos(\theta - \phi) + V_y \sin \theta \cos(\theta - \phi) + V_f \sin \theta \quad (A1)$$

$$= -V_x \cos \theta \cos \phi - V_y \cos \theta \sin \phi + V_f \sin \theta$$

여기서 V_x 는 레이더를 중심으로 동서방향의 바람성분이고, V_y 는 남북방향이다. 동서방향과 남북방향으로 선형적으로 바람이 변한다고 가정하고 V_x 와 V_y 를 이차항까지의 변분법을 사용하여 식(A1)의 나타낸 다음 Fourier 시리즈 2차항까지 대응하

$$\alpha \quad \theta \quad \alpha \quad \theta \quad \alpha$$

면 식(A2)와 같이 표현할 수 있다(Matejka and Srivastava, 1991).

$$\hat{V}_\lambda(\theta) = \sum_{i=1}^7 a_i f_i(\theta) \quad (A2)$$

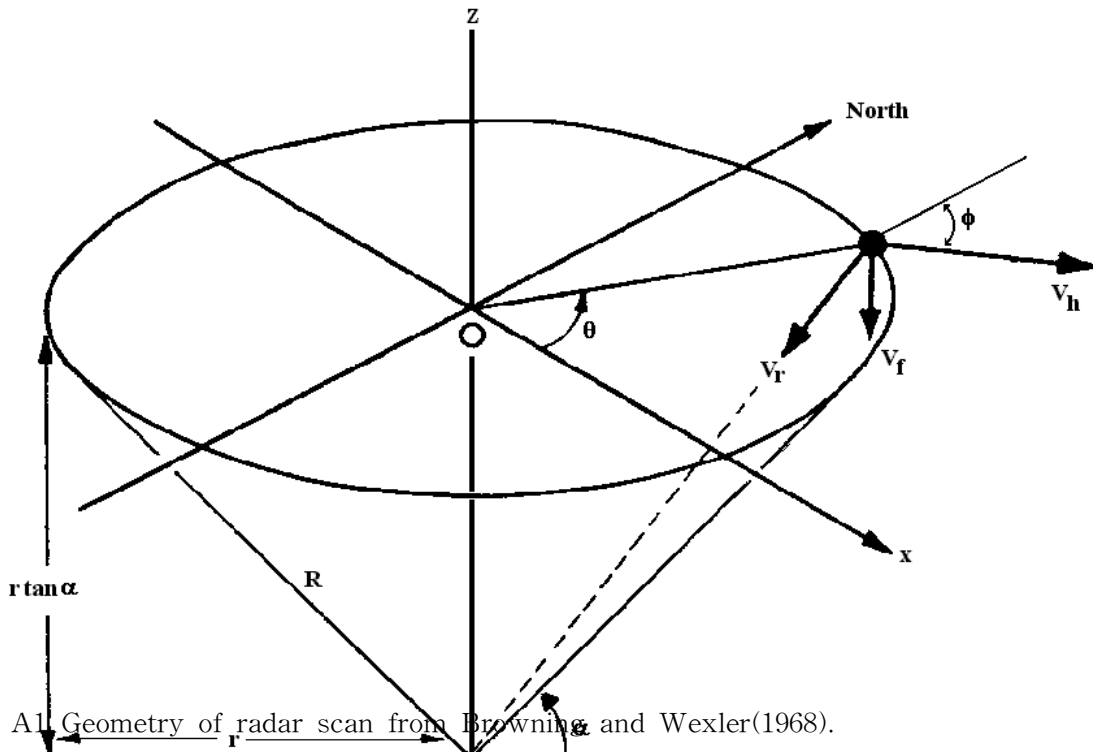


Fig. A1. Geometry of radar scan from Browning and Wexler(1968).

여기서 $f_1=1$, $f_2=\sin \alpha$, $f_3=\cos \alpha$, $f_4=\sin 2\alpha$, $f_5=\cos 2\alpha$, $f_6=\sin 3\alpha$ 그리고 $f_7=\cos 3\alpha$ 이다. a_i 는 Fourier 계수이다. 주사원상의 N개의 Radar 속도를 통하여 최소자승법을 적용하여 Fourier 계수 열 텐서 a_i 를 구하기 위하여 열 텐서 b_i 와 텐서 A 를 각각 식(A4)와 식(A5) 같이 정의할 수 있고, Fourier 계수 텐서 a_i 는 식(A3)과 같이 구할 수 있다.

$$a = A^{-1}b \quad (A3)$$

$$b_i = \sum_{k=1}^N f_k(\theta) V_\lambda(\theta) \quad (A4)$$

$$A_{i,j} = \sum_{k=1}^N f(\theta_k) f(\theta_j) \Theta \quad (A5)$$

여기서 $i, j=1,2,3, \dots, 7$ 이다. Fourier 계수 열 텐서, a_i 를 구하기 위하여 Gauss-Jordan 소거법을 사용하였다.

그리고 계산된 Fourier 계수의 값은 주사원상의 전체를 대표하는 값이므로 각 방위각에 따른 변화량이 존재한다. 따라서 Fourier 계수의 변화량을 계산하여 결과 값의 타당성을 판단하여야 한다. Fourier 계수의 변화량은 식(A6)과 같이 계산할 수 있다.

$$var(a_i) = A^{-1}_{i,i} s^2 \quad (A6)$$

$$s^2 = \left(\frac{1}{N-7} \sum_{k=1}^N [V_r(\theta_k) - V_r(\theta)]^2 \right) \quad (A7)$$

여기서 식(A7)의 s^2 는 회귀에 의한 관측 사선속도의 변화량이다.

B. 무안 연구용 레이더 적용

VAD 방법을 사용하여 고도별 수평 풍속과 풍향을 얻기 위해서는 레이더 에코가 관측되어야 하고, 상층으로 발달한 시스템일수록 통계적인 수치를 얻기에 유리하며, 바람의 성분에 대한 신뢰도가 커진다. 하지만 VAD 방법은 일반적으로 넓은 영역에 대하여 균일한 바람장을 가진 경우에 분석이 가능하기 때문에 층운형에 대하여 적용하는 것이 일반적인 경우이다.

연구용 X 밴드 도플러 레이더는 빔 간격이 250 m인 고분해능 자료이다. 따라서 선행연구자들이 적용한 VAD 분석 영역, 반경 30 km(Matejka and Srivastava, 1991) 보다 작은 15 km 반경을 사용하여 분석을 수행하였다. 이러한 좁은 반경에 대한 분석은 강우시스템의 변화에 따른 국지적인 바람의 특성을 나타낼 수 있고 Wind Profiler와 비슷한 효과를 낼 수 있다. 그리고 레이더 자료는 주위 환경에 의한 빔 차폐와 레이더 시스템의 불안정으로 인한 빔 시작점의 자료의 손상을

고려하여 유효 분석 영역을 2~5 km로 설정하였다.

Fig. A2는 VAD 방법을 이용한 고도별 수평 바람장을 산출하는 순서도를 나타낸 것이다. 레이더에서 관측한 UF 형식의 자료로부터 시선속도 성분을 추출하고 동일 주사원상의 N 개의 방정식을 만들고 Gauss-Jordan 소거법을 이용하여 각 해를 결정한다. 그리고 결정된 해는 VAD 방법의 정의에 따라 고도별 수평 바람장의 u, v를 결정하게 된다. 이러한 과정을 분석영역 내의 모든 자료에 적용하여 100 m 고도별 수평 바람장을 산출한다.

Fig. A3는 2003년 2월 22일 14시에 관측된 레이더 시선속도 성분을 VAD 방법으로 표현한 것이다. 사용된 자료의 거리는 레이더를 중심으로 10 km 떨어진 지점의 모든 방위각에 대한 대칭적인 자료이다. 60° 부근에서 레이더에서 멀어지는 방향 약 20 m/s의 시선속도 최대값이 존재하고 240° 부근에서 약 -20 m/s의 시선속도의 최소값이 존재한다. 이러한 VAD 분석을 통하여 수평 바람의 주방향이 240°이고, 수평 바람의 속도는 20 m/s인 것을 알 수 있다.

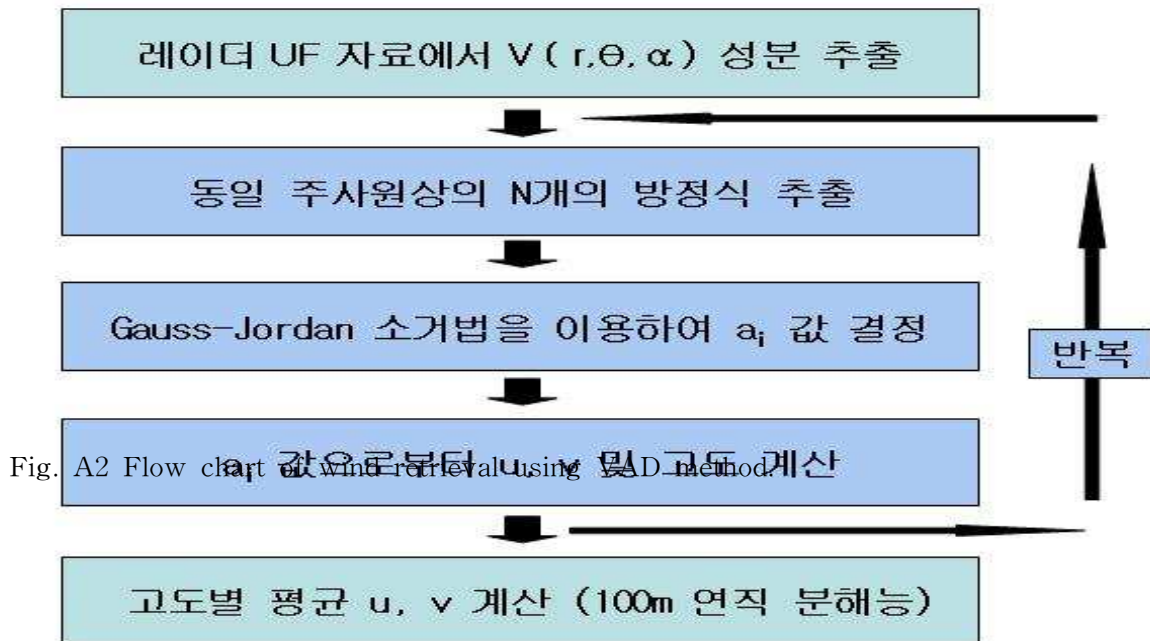


Fig. A2 Flow chart of wind retrieval using VAD method.

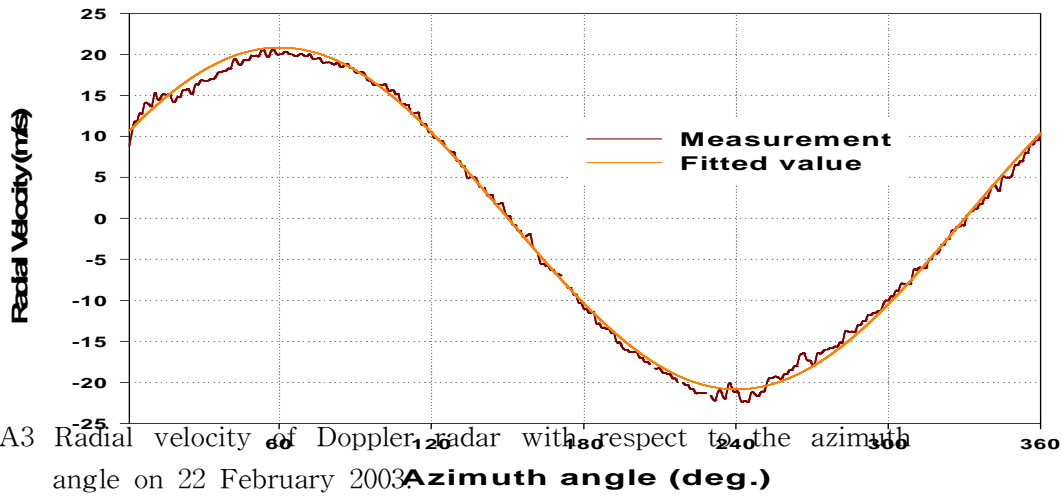


Fig. A3 Radial velocity of Doppler radar with respect to the azimuth angle on 22 February 2003

Fig. A4는 2003년 2월 22일 동안 수평 바람의 풍속의 RMSE를 고도별로 나타낸 것이다. VAD 방법에 의하여 산출된 바람의 RMSE는 지표에 가까운 곳 1 km 이하에서 약 0.6~1.2 m/s 정도로 나타났고, 1 km 이상에서는 0.5~0.75 m/s로써 고도별 수평 풍속은 1 km 이상에서 정확성을 보이는 것을 알 수 있다.

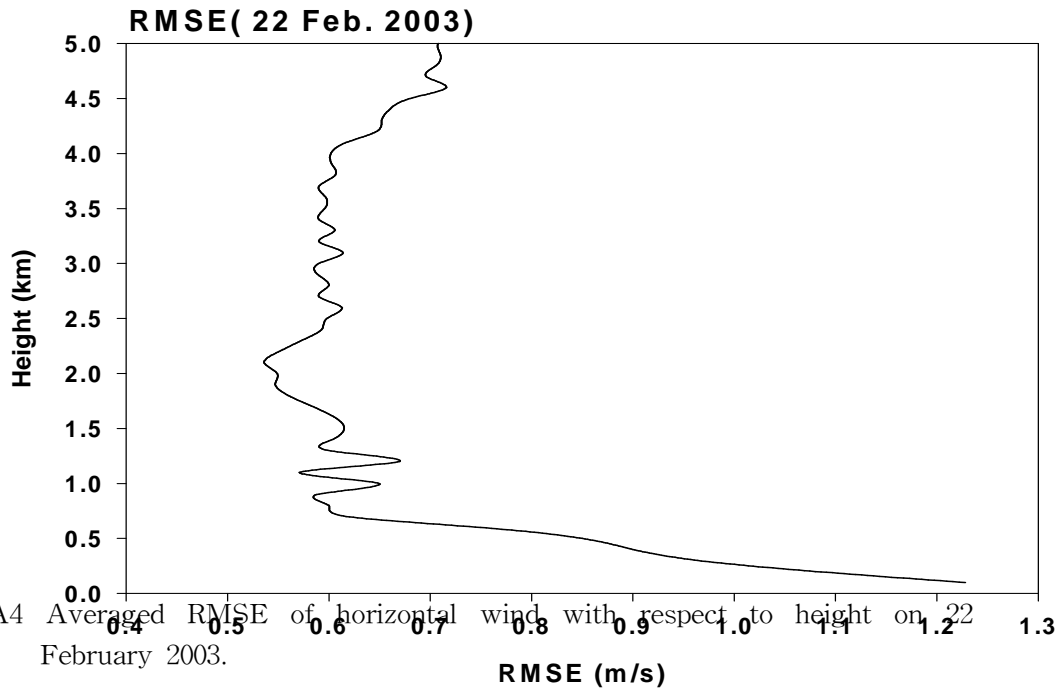


Fig. A4 Averaged RMSE of horizontal wind with respect to height on 22 February 2003.

감사의 글

망설임 속에서 시작했던 대학원 입학이 엇그제 같은데 벌써 졸업을 준비하게 되었습니다. 이렇게 시간이 빠르게 느껴지는 것은 대학원 생활이 저에게는 무척 소중한 값진 것이기 때문일 것입니다. 그리고 직장생활과 학업을 병행하는 것이 결코 쉽지는 않았지만 뒤돌아보면 그동안 저를 도와준 많은 고마운 분들이 계셨다는 것을 다시금 생각하게 됩니다. 이 작은 결실을 맺을 수 있도록 만학의 꿈을 일깨워 주고 용기와 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

먼저 부족함이 많은 저에게 학문의 진리와 아낌없는 사랑과 관심을 가져 주시고 한결같이 용기와 격려를 아끼지 않으셨던 류찬수 지도교수님께 머리 숙여 존경과 감사의 마음을 올립니다. 더불어 바쁘신데도 불구하고 심사위원장을 기꺼이 맡아 먼 길 마다하지 않고 왕래하시면서 논문 심사를 해 주시고 세세한 조언과 가르침을 주신 정효상 겸임교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 학문적 가르침은 물론 배움에 대한 노력하는 자세와 자긍심을 일깨워 주신 이종호 겸임교수님과 대학원 과정동안 많은 것을 가르쳐 주시고 격려해 주신 대기과학과 교수님들께도 감사를 드립니다.

또한 직장생활을 하면서도 학업을 병행 할 수 있도록 배려해 주신 이만기 청장님, 구본제 차장님, 정순갑 정책홍보관리관님, 최치영 재정기획관님, 논문작성에 많은 도움을 주신 권태순 사무관님, 남경엽 연구사님, 이 논문의 마무리를 위해 수고해 준 박지훈 주무관님을 비롯한 선배님, 후배님 동료 여러분께 감사를 드립니다.

아울러 같이 학문을 수행하면서 서로를 격려하고 이끌어 준 동료 학생들에게도 감사를 드립니다.

끝으로 언제나 명쾌한 응원군으로서 묵묵히 인내하며 무한한 사랑으로 뒷바라지와 조언을 해준 사랑하는 아내에게 감사하고 그동안 아버지로서의 역할을 소홀했던 점에 대한 미안한 마음과 고마움을 우정·영준이에게 전하며 함께 이 결실의 기쁨을 나누고자 합니다. 그리고 모든 분들이 언제나 건강하고 행복하시길 진심으로 기원하며 항상 겸허한 마음으로 오늘의 작은 열매에 자만하지 않고 배움의 자세를 견지하며 더더욱 정진하며 나아가도록 하겠습니다.

2007년 5월
신 기 창

저작물 이용 허락서

학 과	대기과학과	학 번	20057727	과 정	석사
성 명	한글: 신기창	한문: 申起昌	영문: Shin, Ki-Chang		
주 소	경기도 성남시 분당구 정자동 90번지 느티마을 405-1803호				
연락처	E-MAIL : kcshin@kma.go.kr				
논문제목	<p>한글 : 겨울철 cP 확장 시 발생하는 Cloud streets 의 레이더 영상분석 -2003년 1월 3~5일 서해안 대설사례 연구-</p> <p>영어 : The Analysis of Radar Reflectivity Cloud Streets Occurred by cP Expansion in Winter</p> <p>A case study on the heavy snowfall event (January 3~5, 2003) over the western coast of the Korean Peninsula -</p>				
- 다 음 -					
<ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. 					
동의여부 : 동의(<input type="radio"/>) 반대(<input type="checkbox"/>)					
2007년 8월 일					
저작자: 신 기 창 (인)					
조선대학교 총장 귀하					
- 54 -					