

석사학위논문

夏季 韓半島 南西海上에서 發達하는  
中規模 對流시스템에 관한 研究

제주대학교 산업대학원

 해양생산학과 중앙도서관  
제주대학교 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY  
해양학 전공  
한 경 훈

2006

석사학위논문

夏季 韓半島 南西海上에서 發達하는  
中規模 對流시스템에 관한 研究

지도교수 윤석훈

 제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주대학교 산업대학원

해양생산학과

해양학 전공

한 경 훈

2006

# 夏季 韓半島 南西海上에서 發達하는 中規模 對流시스템에 관한 研究

지도교수 윤 석 훈

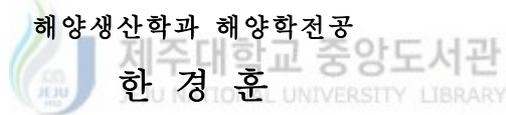
이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

2006년 6월

제주대학교 산업대학원

해양생산학과 해양학전공

한 경 훈



한경훈의 이학석사학위 논문을 인준함.

2006년 6월

심사위원장	(인)
위 원	(인)
위 원	(인)

---

---

---

A study on Mesoscale Convective System in  
the Southwestern Sea of the Korean Peninsula  
in summer

Gyoung-Hun Han

(Supervised by Professor Seok-Hoon Yoon)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE



DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY

GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2 0 0 6

< 목 차 >

목차 .....	i
List of Figures .....	ii
List of Tables .....	vi
Summary .....	vii
I. 서론 .....	1
II. 자료 및 분석과정 .....	4
III. 중규모 대류시스템 .....	8
1. 제주지방 집중호우의 기후적 특징 .....	8
2. 2003년 여름철의 특징적인 중규모 대류시스템 .....	13
IV. 발생사례 분석 .....	15
1. 선상 중규모 구름무리(2003년 7월 2일~3일) .....	15
2. 원형 중규모 구름무리(2003년 7월 17일~18일) .....	31
V. 결론 .....	46
요 약 .....	48
참고문헌 .....	50
사 사 .....	51

## List of Figures

Fig. 2-1. Observation sites for KEOP-2003 (6.20.~7.20.).	7
Fig. 3-1. The frequency of daily heavy rainfall over 100mm/day (2001~2005) (a) by season, and (b) by synoptic condition pattern.	9
Fig. 3-2. Monthly(early·mid·late) (a) mean precipitation intensity and (b) frequency of daily heavy rainfall over 100mm/day in summer (2001~2005).	9
Fig. 3-3. The frequency of daily and hourly heavy rainfall by group (2001~2005) (a) over 100mm/day ( $100.0\text{mm} \leq 120 < 130.0\text{mm}$ , $130.0\text{mm} \leq 140 < 150.0\text{mm}$ and so on), (b) over 30mm/hour ( $30.0\text{mm} \leq 30 < 40.0\text{mm}$ , $40.0\text{mm} \leq 40 < 50.0\text{mm}$ and so on).	9
Fig. 3-4. The time series of frequency of daily heavy rainfall over 100mm/day (2001~2005).	11
Fig. 3-5. Regional frequency of heavy rainfall occurrence (2001~2005) Numbers represent daily precipitation over 100mm/day and parenthesis is hourly precipitation over 30mm/hr.	11
Fig. 3-6. The distribution of horizontal and time scale over 30mm/hr heavy rainfall on MCS in Jeju Island (2001~2005).	12
Fig. 3-7. The dimensions and shapes of cloud clusters appeared over the Yellow Sea and the East China Sea in the summer of 2003 (a) line-type cloud cluster 2 July, and (b) oval-type cloud cluster 17 July 2003.	14
Fig. 4-1. Surface weather charts of the heavy rainfall cases by MCS on (a) 21:00 KST 2 July, (b) 03:00 KST and (c) 09:00 KST 3 July 2003.	16

Fig. 4-2. (a) Daily accumulated precipitation from 00:00 KST 2 to 24:00 KST 3 July 2003. and (b) 1-hour lightning distributions from 21:00 KST 2 to 03:00 KST 3 July 2003. .... 16

Fig. 4-3. Daily variation of hourly accumulated precipitation at Haenam, Heuksando, Jeju, Tongyoung, Pusan and Pohang from 00:00 KST 2 to 23:00 KST 3 July 2003. .... 18

Fig. 4-4. 850hPa and 925hPa analyses of specific humidity (a, c) temperature (b, d) at 21:00 KST 2 July 2003. Wind bands are also shown. Low level Jet is shown by the circle line. Black dot marks Haenam station. .... 19

Fig. 4-5. The sequence of rainfall intensity by Automatic Weather Station network. Subsequent track of convective cell is indicated. Stations are marked by red dots. .... 21

Fig. 4-6. 3-Hour satellite and radar imageries associated with line-shaped MCS in front of cold front along the Changma front from 18:00 KST 2 July to 06:00 KST 3 July 2003. .... 23

Fig. 4-7. Maps of TBB from GOES-9 at (a) 02:25 KST, (b) 03:00 KST, (c) 03:25 KST 3 July 2003. The shading indicates the areas where TBB is colder than 40°C. .... 23

Fig. 4-8. Cross-sections of radar reflectivity observed Jindo S-band radar at 03:00 KST 3 July 2003. AA' and BB' lines denote the locations of strong reflectivity for the frontal and prefrontal convective rainbands, respectively. .... 24

Fig. 4-9. Profiles of equivalent potential temperature obtained from upper-air soundings from Heuksando, Gwangju, Gosan, and Haenam at (a) 21:00 KST 2 July 2003 and of Heuksando and Gwangju at (b)

03:00 KST 2 July 2003. ....	26
Fig. 4-10. Wind profile from upper-air soundings at Heuksando from 03:00 KST 2 July to 15:00 KST 3 July 2003. ....	27
Fig. 4-11. Time series of surface weather elements observed at Heuksando from 2 to 3 July 2003 (a) rainfall, (b) temperature, (c) relative humidity, (d) wind speed, and (e) wind direction. ....	30
Fig. 4-12. Surface weather charts of the heavy rainfall cases by MCS on (a) 09:00 KST and (b) 21:00 KST 17 July, (c) 09:00 KST 18 July 2003. ....	32
Fig. 4-13. (a) Daily accumulated precipitation from 21:00 KST 17 to 03:00 KST 18 July 2003. and (b) 1-hour lightning distributions from 21:00 KST 17 to 03:00 KST 18 July 2003. ....	32
Fig. 4-14. Daily variation of hourly accumulated precipitation at Gosan, Jeju, Seogwipo, Seongsanpo, Hallim, Seongpanak, Gasi, Seoheul from 21:00 KST 17 to 05:00 KST 18 July 2003. ....	34
Fig. 4-15. Auxiliary analysis charts at 21:00 KST 17 July, 2003 from KMA RDAPS (Regional Data Analysis and Prediction System) (a) 850hPa Moisture Flux, (b) 850hPa Streamline and Isotach (>25kts), (c) Showerwalter Stability Index for 850~500hPa, (d) K-index, (e) 850hPa Equivalent Potential Temperature(3K) and (f) 200hPa Divergence (10E - 6/sec) and Isotach (>50kts). ....	36
Fig. 4-16. The sequence of rainfall intensity by Automatic Weather Station network. Subsequent track of convective cell is indicated. Stations are marked by red dots. ....	38
Fig. 4-17. 1-hour satellite and radar imageries from 24:00 KST 17 July to 02:00 KST 18 July 2003. ....	40

- Fig. 4-18. Maps of TBB from GOES-9 at (a) 23:25 KST 2 July 2003, (b) 01:25 KST and (c) 02:25 KST and (d) 03:25 KST 3 July, 2003. The shading indicates the areas where TBB is colder than 40°C. .... 40
- Fig. 4-19. Profiles of equivalent potential temperature obtained from upper-air soundings at Gosan from 00:00 UTC 17 July to 12:00 UTC 18 July 2003. .... 42
- Fig. 4-20. Distribution of 30-min. wind vector over Jeju (a) 24:00 KST 17 July, (b) 00:30 KST 18 July, (c) 01:00 KST 18 July and (d) 01:30 KST 18 July 2003. .... 45
- Fig. 4-21. Time series of surface weather elements observed at Jeju, Seogwipo, Gosan, and Seongsanpo from 17 to 18 July, 2003 (a) wind direction, and (b) wind speed. .... 45



## List of Tables

Table 1. Locations of weather observation stations in Jeju Island. ....	6
Table 2. Observations and time schedule in KEOP-2003 (6.20.~7.20.). ..	6
Table 3. A extreme maximum precipitation records by daily and hourly in Jeju Island (1927~2005). .....	12



# **A study on Mesoscale Convective System in the Southwestern Sea of the Korean Peninsula in summer**

**Gyoung-Hun Han**

**Department of Oceanography  
Graduate School of Industry  
Cheju National University**

**Supervised by Professor Suk-Hun Yoon**

## **Summary**

When heavy rain occurs in Jeju region, it is usual that the daily mean precipitation is 120~140mm and the hourly rainfall is 40~60mm. The maximum value of daily mean precipitation is 189.9mm in the early part of July. The highest frequency of heavy rain occurrence is from the latter part of June to the early part of July, from the latter part of July to the early part of August and latter part of August. The former is due to the period of Jeju's Changma season from the middle and latter parts of June to the middle and latter parts of July. The latter is caused by convergence area located in front of tropical depression which is weakened from typhoon or by the influence of typhoons. Its usual occurrence is at early mornings before sunrise or late evenings after sunset. The distinction of convection system in summer is 10~30km of horizontal scale and 1~3hr of time scale. It is equivalent to meso- $\beta$  of Orlanski's(1975) scale classification.

In the summer of 2003, various mesoscale cloud clusters has developed and influenced Jeju region and the southern coast of Korea while the low pressure accompanied by Changma front travelled over the yellow sea and the East China sea. Its examples were chosen the mesoscale line-type cloud cluster in front of cold front over the Yellow Sea on the morning of July 3, 2003 and the mesoscale oval-type cloud cluster suddenly developed near Jeju province at night on July 18. The former shows that the depth of convective rain band in front of cold front is lower than the depth of cold front and accompanied precipitation is relatively less than the precipitation of cold front. The two rain band at 03:00 KST of July 3 are distinctive and the horizontal distance between them is 13.7km. The rain band in front of cold front continued 3 hours and created medium sized rainfall, when the convective rain band accompanied by the cold front approached. There is strong wind over 15m/s at surface and low-level jet is appeared at vertical structure. The shear vortex connected with the low-level jet is closely related to the development of the convective rain band in front of front. The latter, mesoscale oval-type cloud cluster accompanied by thunderstorm and southwesterly created linear radar echo. Some parts of radar echoes is caused by the convergence and forced convection due to Mt. Halla's orographic effects, resulting in 20~30mm rainfall by hour in northern, southeastern Jeju and mountain area when mesoscale cloud cluster travels over Jeju region. It also shows very different distribution of the change of wind direction. As a result of analysis the vertical structure from the sounding data at Gosan site located in the western Jeju, there are strong unstability layer in the middle atmosphere and strong low-level jet in the lower atmosphere.

Key word : Mesoscale Convective System, Heavy rain, Changma front,  
Cloud cluster

## I. 서론

중규모(mesoscale) 대기순환 중에는 매우 강렬하여 짧은 기간에 심각한 기상재해를 가져오는 것들이 있다. 이러한 현상의 대표적인 것들은 뇌우와 태풍 같은 중규모 폭풍우들이다. 국지적으로 갑자기 발달하는 중규모 대류시스템은 집중호우, 우박, 돌풍, 뇌전 등을 동반함으로써 경우에 따라서는 순식간에 많은 인명과 경제적 손실을 초래하는 사회적 관심이 큰 기상현상 중의 하나이며, 또한 예측이 어렵기 때문에 현재까지도 기상학 분야에서 중요한 연구대상 중의 하나가 되고 있다.

중규모 기상현상들의 핵심은 매우 잘 발달된 대류운, 즉 뇌우이다. 중규모 폭풍우는 수 km~수십 km의 수평규모를 갖는 개개의 독립적 뇌우(isolated thunderstorm)로부터 여러 개의 뇌우로 구성되고 수평규모가 수 백 km에 달하는 중규모(synoptic-scale) 시스템에 이르기까지 다양한 형태로 존재한다. 이들 중 개개의 뇌우보다는 현저히 큰 대류시스템을 총칭하여 중규모 대류시스템(Mesoscale Convective System: MCS)이라 부르는데, 이들은 보통 여러 개의 뇌우로 구성된 조직화된 구조를 지니고 수평적으로 100km 이상 연속된 강수지역을 만든다. 외관상 중규모 대류계는 여러 개의 적란운과 그 주변의 층운형 구름으로 구성된 무리인데, 위성사진에 나타난 구름계의 특징에 따라 선형계(line-type)와 원형계(oval-type)로 구분될 수 있다. 뇌우가 연장된 선을 따라 발달하는 스콜라인(squall line) 형태가 전자에 속하며, 보통의 원형 모양을 갖는 구름무리(cloud cluster)가 후자에 해당된다. 그렇다고 우리나라 여름철 집중호우가 모두 한반도 남서쪽 해상에서 발달하는 중규모 대류시스템에 기인하는 것은 아니며, 설사 이러한 시스템이 발생하더라도 주변의 기상학적인 환경과 여건에 따라서 다양한 형태로 전이과정을 거친다. 중국내륙에서 발생하는 구름무리는 생성, 발달, 전이, 구풍발생(cyclone-formation)의 4단계 과정을 거친다. 즉 중국내륙의 불안정한 열대기단에서 강한 대류불안정과 연관

되어 생성·발달한 구름무리는 대륙의 동안에서 한반도로 접근하면서 전이기간을 거쳐 전선성 요란으로 변하면서 한반도를 통과할 때 많은 비를 내린다(Akiyama, 1984). 잘 알려진 중규모 대류복합체(Mesoscale Convective Complex: MCC)는 가장 큰 규모의 중규모 대류시스템으로서 상당히 조직화된 구름무리이다. 중요한 사실은 발생빈도의 측면에서 중규모 대류계의 대부분은 MCC보다 작은 규모를 갖는 다세포뇌우의 형태를 띠는 구름무리로서 그 예측성이 어려움과 함께 강한 뇌우 등 악기상을 유발하기 때문에 그 자체로도 매우 중요하며, 또한 종종 다른 현상으로 발전하거나 더 강한 현상을 만들어 내기도 한다는 것이다.

집중호우는 단시간에 국지적으로 발생하는 중규모 기상현상으로서 이에 대한 명확한 정의는 없으나, 일반적으로 시간당 강우량이 30mm 이상, 일강우량이 100mm 이상, 연강우량의 10%에 상당하는 비가 하루에 내릴 때로 간주한다. 우리나라의 집중호우는 주로 장마전선 상의 요란, 태풍, 저기압 및 고기압 가장자리의 기단 불안정에서 비롯된다. 이러한 불안정의 요인은 여러 개의 적란운으로 구성된 군집체를 발생시켜 종관적 배경 하에서 중규모적인 대류시스템이 복합되어 좁은 지역에 강한 호우를 유발한다. 우리나라에서 호우발생 빈도가 높은 지역으로는 제주도과 남해안, 지리산 부근, 경기북부, 대관령 부근의 산간지역 등이며, 강우량 80mm 이상의 호우일수는 25일, 150mm 이상은 연평균 7일 정도로 전체의 85%가 여름철 6~9월 사이에 집중되고 있다.

집중호우를 유발하는 대류시스템에 관한 많은 연구가 이루어졌는데, Lee et al.(1988)은 강한 대류와 연관된 구름무리가 중국 내륙에서 발생하여 동진하다가 우리나라 남서해상으로 접어들면서 전선성 요란으로 전이되면서 한반도 중부지방을 통과할 시점에서 집중호우를 빈번히 유발시킨다고 하였다. Kim et al.(2003)은 제주도 부근에서 급격히 발달하는 중규모 구름무리의 발달특성 및 지상 기상요소의 변화 특성에 대하여 조사한 바 있으며, 강길봉(2005)은 급격히 발달한 원형 중규모 구름무리 통과시 제주도 지상 및 고층기상 특성

에 관한 연구를 한 바 있다. 또한 특정사례에 대한 분석적 접근을 통하여 집중호우와 대류시스템의 역학적 기구들을 밝히려는 연구(황승연, 1992; 하종철, 1999; 김기남, 2001)가 있었고, 수치모의를 통하여 중규모 대류계의 역학과정 및 물리현상을 분석한 연구(위태권, 1999)도 있었다. 그러나 이러한 연구들은 대부분 중규모 관측망에 의한 자료를 이용한 연구들이었다. 따라서 우리나라의 집중호우 발생 및 강수의 시공간적 특성과 밀접한 관련이 있는 중규모 대류시스템에 관한 좀 더 세밀한 연구와 이를 위한 여름철 집중관측이 요구된다.

본 연구에서는 여름철 중국 동해안에서부터 제주도 남서해상으로 이어지며 발달하는 중규모 대류시스템에 의한 집중호우 발생 사례를 선형계와 원형계로 나누어 집중분석 하고자 한다. 이러한 연구결과는 하계 제주도 지역의 시·공간적 강우분포 특성을 이해하고 예보하는데 많은 도움을 줄 뿐만 아니라, 향후 유사한 대류시스템 발생시에 집중호우 발생에 대한 예측정보와 구조를 이해하는 데에도 크게 기여할 것이다.



## II. 자료 및 분석과정

제주지방의 집중호우 발생에 대한 시·공간적 특성을 파악하기 위하여 2001년부터 2005년까지 5년간 제주지방기상청(Jeju Regional Meteorological Office: JRMO) 관할 유인관측소 4개소와 자동기상관측장비(Automatic Weather System: AWS)가 설치된 무인관측소 12개소 등, 총 16개 관측지점(Table 1)에 대한 강수자료를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 집중호우 발생은 16개 관측지점 중 24시간 누적강우량이 100mm 이상인 지점이 한 군데라도 발생한 경우로 정의하였고, 여기에 시간당 강우량이 30mm 이상인 지역을 찾아내어 중규모 호우세포(heavy rain cell)로 정의하여 그 이동을 추적하였다. 또한 30mm/hr 강수지역이 서로 근접해 나타나는 경우는 동일한 호우세포, 분리되어 나타나는 경우는 독립된 호우세포로 처리하였다. 태풍으로 인한 집중호우는 사례에서 제외하였다.

사례분석은 2003년도 기상연구소의 한반도 악기상 집중관측사업(Korea Enhanced Observing Period: KEOP)으로 해남기상관측소에 구축된 각종 첨단 기상관측장비에 의한 관측자료(Table 2)를 활용하였다 KEOP-2003은 우리나라 여름철 한반도 남서지방의 악기상 구조를 파악하기 위하여 수행되었다. 관측기간 동안 여러 대류현상이 일어났지만, 7월 2일 밤 8~9시 사이에 전라남도 해남지방을 통과한 선형계 중규모 구름무리와, 7월 17일 자정에서 7월 18일 새벽 3시 사이에 일본열도 남쪽해상에 걸쳐있는 장마전선 상에서 저기압 후면을 따라 발생하여 발달한 원형계 중규모 구름무리에 대하여 분석하였다. 지상관측 자료는 1분 간격으로 관측되는 약 18km 분해능의 AWS 관측망을 이용하였다. 따라서 10~15분 동안 약 3hPa의 작은 기압변화도 관측할 수 있어서 중규모 저기압 분석이 가능하였다. 고층관측은 제주 고산과 흑산도기상대, 광주 공군기상관측소의 4회 관측자료(03:00, 09:00, 15:00, 21:00 KST), 해남 오토존데(autosonde)와 고흥 이동식 레윈존데(rawinsonde)는 평시에 4회

관측, 강수 발생시에는 3시간 간격으로 하루 8회 관측된 자료를 이용하였다. 또한 전라남도 진도에 설치된 S-밴드 도플러 기상레이더의 10분 간격 반사도 자료와 GOES-9 위성에서 관측된 흑체 밝기온도 자료를 이용하여 대류세포의 시·공간 규모와 구조, 생애에 대하여 분석하였다. Fig. 2-1에 2003년 여름철 악기상 집중 관측망을 나타내었다.



Table 1. Locations of weather observation stations in Jeju Island.

Region	Station	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Remarks
North	Jeju	33° 30' 39.391"	126° 31' 54.132"	22.0	JRMO
	Yusuam	33° 24' 35.574"	126° 23' 34.671"	429.0	AWS
	Seonheul	33° 27' 30.575"	126° 42' 42.850"	360.0	"
South	Seogwipo	33° 14' 34.214"	126° 34' 02.501"	50.5	JRMO
	Seogwang	33° 17' 06.073"	126° 18' 07.903"	146.0	AWS
	Namwon	33° 16' 47.881"	126° 43' 15.104"	73.0	"
West	Gosan	33° 17' 26.006"	126° 09' 53.357"	71.7	JRMO
	Marado	33° 7' 01.265"	126° 16' 10.248"	49.0	AWS
	Hallim	33° 24' 37.816"	126° 16' 02.247"	48.0	"
	Moseulpo	33° 13' 00.047"	126° 14' 59.902"	20.0	"
East	Seongsanpo	33° 23' 00.785"	126° 52' 56.812"	17.5	JRMO
	U-do	33° 30' 23.467"	126° 57' 12.167"	128.0	AWS
	Gujwa	33° 31' 21.351"	126° 51' 06.739"	40.0	"
	Gasi	33° 21' 13.625"	126° 46' 18.213"	100.0	"
Mt. Halla	Eorimok	33° 23' 31.412"	126° 29' 38.771"	970.0	AWS
	Seongpanak	33° 23' 04.318"	126° 37' 09.802"	750.0	"

Table 2. Observations and time schedule in KEOP-2003 (6.20.~7.20.).

	Station	Equipment	Element	Unit		
				Site	Period	Rainfall
Surface	22 (KMA)	AWS	Temp, Wind, Prep	1 min data	1 min data	1 min data
	Gosan	rawinsonde	Temp, Wind	2 times/day	2 times/day	2 times/day
	Heuksando	"	"	2 times/day	2 times/day	2 times/day
Upper air	Haenam	autosonde	"	-	"	"
	Goheung	rawinsonde	"	-	"	"
	Gwangju	"	"	4 times/day	4 times/day	4 times/day
Radar	Jindo	S-band	reflectivity	10 min data	10 min data	10 min data

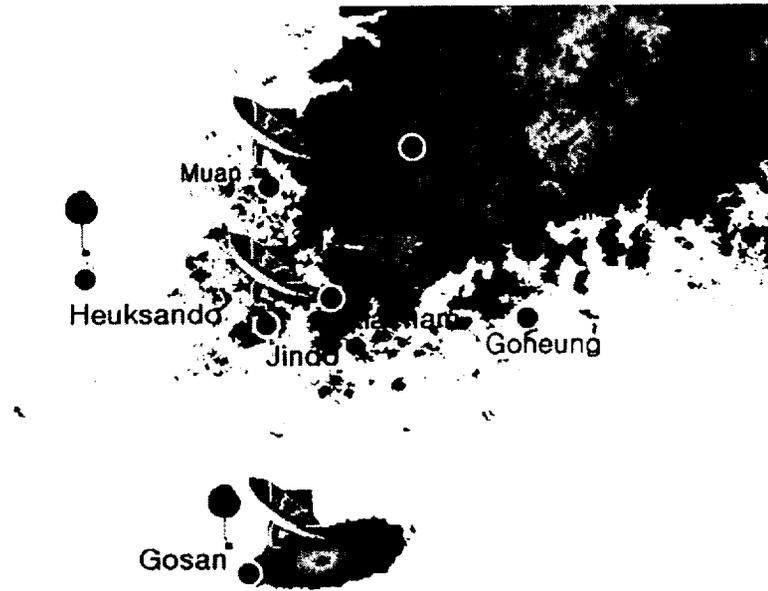


Fig. 2-1. Observation sites for KEOP-2003 (6.20.~7.20.).

### Ⅲ. 중규모 대류시스템

#### 1. 제주지방 집중호우의 기후적 특징

제주지방에 호우발생일수를 계절별, 기압계 유형별로 분류하였다. 계절별로는 5년 동안 총 호우일수 63회 중 여름철에 33건, 가을에 19건, 봄에 8건, 겨울에 3건순으로 나타났다. 기압계 유형별로는 태풍 단독효과에 의한 호우가 12건, 여름철 북태평양기단(maritime Tropical air mass: mT)의 가장자리 수렴대와 전선대(장마전선)의 상호작용에 의한 호우가 21건, 온대저기압에 의해서 30건이 나타났다(Fig 3-1). 제주지방에 집중호우는 여름철에 집중되고 있으며 전선대에 동반된 저압부(온대저기압)가 가장 큰 역할을 하고, 다음으로 mT의 역할이 중요하게 작용하였다.

집중호우의 발생빈도는 6월 하순~7월 상순, 7월 하순~8월 상순, 그리고 8월 하순에 높은 반면, 6월 상순~중순, 7월과 8월 중순에는 집중호우의 빈도수가 상대적으로 낮았다. 이는 제주지방의 장마시기가 6월 중·하순에 시작되어 7월 중·하순까지 한 달 정도 지속되는 것을 반영한다. 또한 8월과 9월의 집중호우는 약화된 열대저기압(Tropical Depression: TD)의 수렴역이나 태풍에 의한 영향으로 분석되었다. 집중호우의 강도는 7월 상순과 8월 중순에 강하며, 특히 7월 상순의 집중호우는 하루 평균 190.0 mm에 가까운 강도를 보였다. 한편, 모든 사례의 평균은 151.7 mm/day 이며 제주지방에서 호우가 발생하면 이만한 정도의 강수가 있을 것이라는 의미가 된다(Fig. 3-2).

집중호우의 강도를 보면 대략 하루 동안 120~140mm 정도의 집중호우가 가장 많이 발생하였는데, 250mm이상 집중호우도 5년 동안에 16회 관측되어 통계적으로 매년 이만한 정도의 호우가 3회 이상은 일어남을 알 수 있다(Fig. 3-3). 1999년 7월 1일에 성판악에서는 562.0mm가 하루 동안에 내리기도 하였다. 또한 시간당 강수량 40mm 정도는 언제든지 발생할 수 있음을 알 수 있고, 시간당 90~100mm의 강력한 집중호우도 3번이나 발생하였는데, mT 가장

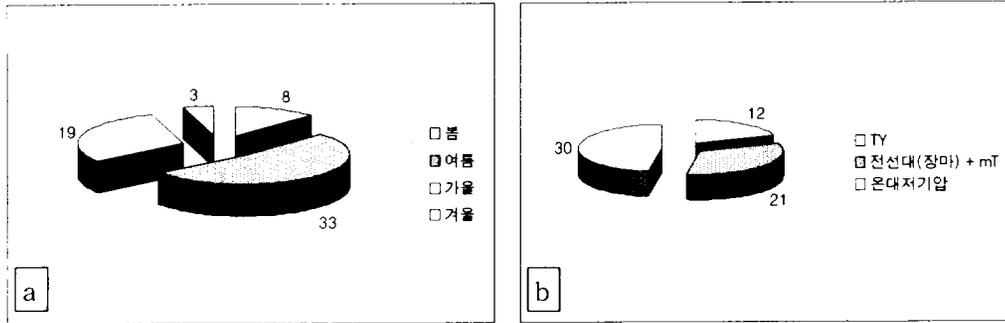


Fig. 3-1. The frequency of daily heavy rainfall over 100 mm/day (2001~2005) (a) by season and (b) by synoptic condition pattern.

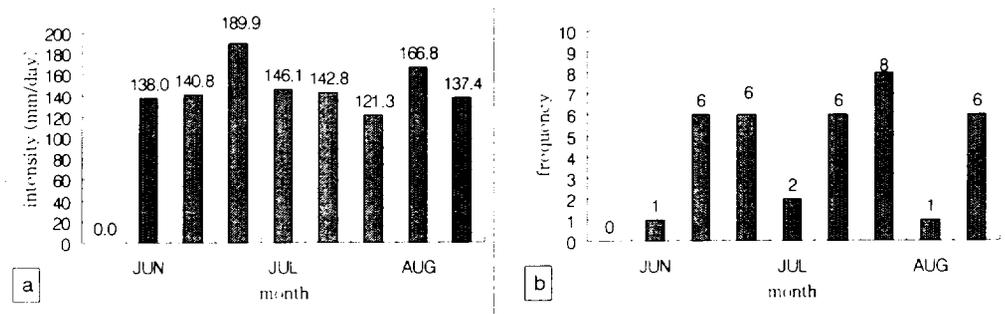


Fig. 3-2. Monthly (early · mid · late) (a) mean precipitation intensity and (b) frequency of heavy rainfall over 100 mm/day in summer (2001~2005).

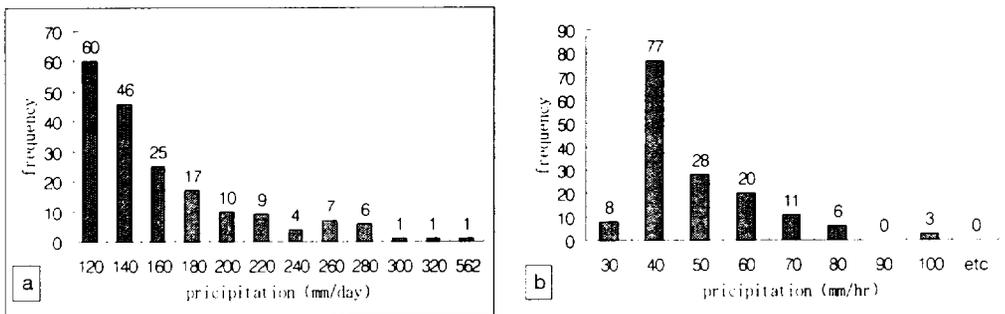


Fig. 3-3. The frequency of daily heavy rainfall by group (2001~2005) (a) over 100 mm/day ( $100.0\text{mm} \leq 120 < 130.0\text{mm}$ ,  $130.0\text{mm} \leq 140 < 150.0\text{mm}$  and so on), (b) over 30 mm/hour ( $30.0\text{mm} \leq 30 < 40.0\text{mm}$ ,  $40.0\text{mm} \leq 40 < 50.0\text{mm}$  and so on).

자리 수렴대에서 2회(성산구좌), 온대저기압에 동반된 전선대에서 1회(성산) 발생하였다.

집중호우 발생 시간대(Fig. 3-4)를 보면 일출 전의 새벽 시간대와 일몰 후의 밤 시간대에 주로 분포하고 있는데, 이는 낮에 대류에 의한 구름대가 밤이 되면서 구름하부에서 열을 차단하는 역할을 하고, 운정 부근에서는 복사냉각에 의해 열이 상층으로 방출되는 과정을 통하여 구름 상층에서는 대기의 냉각, 하층에서는 따뜻한 공기가 갇힘 현상으로 인하여 구름내부 상하층간의 온도경도가 커져서 불안정을 유발하기 때문으로 판단된다(이동규, 1999).

집중호우 사례의 최대강수가 나타난 관측지점에 대한 빈도 분포를 나타내었다(Fig. 3-5). 제주도의 호우지역은 한라산을 중심으로 남동사면 방향인 서귀포-남원-성산으로 이어지는 남동부지역에 집중되고 있는데, 특히 해발 750m의 한라산 중턱에 위치한 성관악은 산악효과까지 증첩되어 우리나라 최대 호우구역 중에 하나가 되고 있다. 지역별 연평균 강우량은 서귀포 1850.7mm, 성산 1840.9mm, 제주 1457.0mm, 고산 1094.7mm 순이며, AWS 자료에 의하면 2001년도 성관악 연평균 강우량은 3268.0mm이며, 하루 동안(1997년 7월 1일)에 562.0mm가 내렸던 1997년 총강우량은 5802.0mm, 7월 한달간 강우량은 1950.5mm를 기록하였다. 제주지방기상청 산하 유인관측지점의 강우량 극값순위를 보면, 1시간 최대강우량은 시간당 100mm 이상, 그리고 1일 최대강우량은 300mm 이상 될 때 극값순위가 갱신되는 것으로 나타났다.

Fig. 3-6은 AWS 15분 누적강수자료를 이용하여 Orlanski(1975)의 기상현상별 규모분류기준에 의거하여 태풍 단독효과에 의한 중규모- $\alpha$ (meso- $\alpha$ ) 규모의 호우를 제외하고, 전선대 내의 중규모적 요란과 불안정에 의한 중규모- $\beta$ (meso- $\beta$ ) 규모의 대류계 호우세포의 수평규모와 시간규모를 나타낸 그림이다. 제주지방에 나타나는 여름철 대류시스템의 규모적 특징은 수평규모 10~30km, 시간규모 1~3hr, 시간당 평균 강우강도는 40~60mm 정도로 국지적으로 좁은 지역에 집중되어 나타나는 것으로 분석되었다.

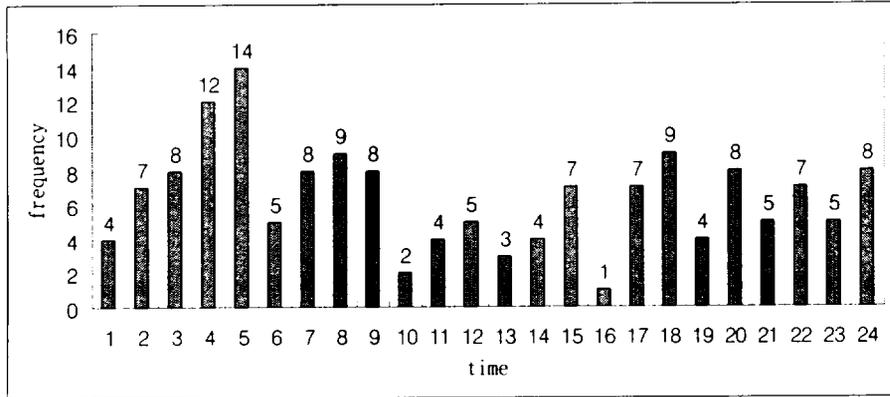


Fig. 3-4. The time series of frequency of daily heavy rainfall over 100 mm/day (2001~2005).

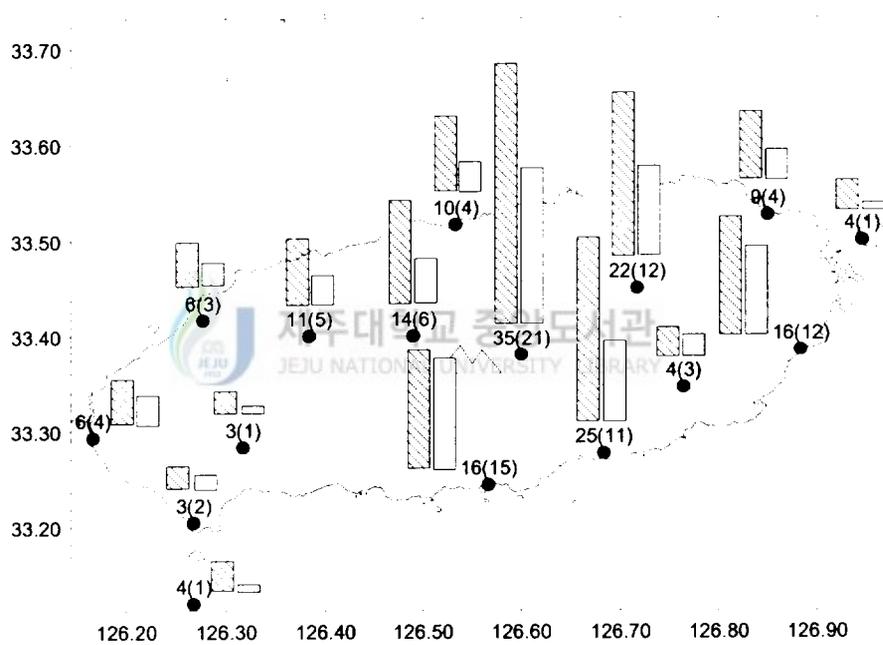


Fig. 3-5. Regional frequency of heavy rainfall occurrence (2001~2005). Numbers represent daily precipitation over 100 mm/day and parenthesis is hourly precipitation over 30 mm/hr.

Table 3. A extreme maximum precipitation records by daily and hourly in Jeju Island (1927~2005).

Daily (mm/day)				Hourly (mm/hr)			
Rank	Station	Precipitation	Date	Rank	Station	Precipitation	Date
1	Seogwipo	365.5	1995.07.02	1	Jeju	105.0	1927.09.11
2	Seogwipo	304.0	1994.08.11	2	Seongsanpo	101.0	1981.08.10
3	Seongsanpo	302.0	1995.07.02	3	Jeju	100.2	1986.08.18
4	Jeju	301.2	1927.09.11	4	Seongsanpo	94.0	2001.07.10
5	Seongsanpo	296.5	1992.08.12	5	Seogwipo	92.5	1995.07.07

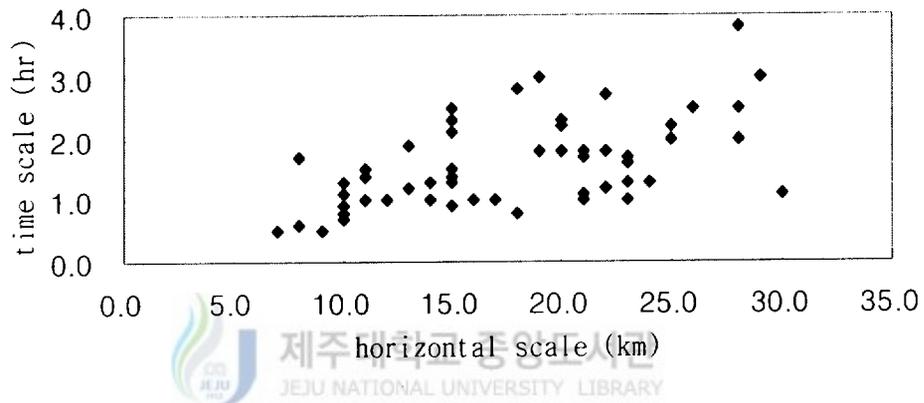


Fig. 3-6. The distribution of horizontal and time scale over 30 mm/hr heavy rainfall on MCS in Jeju Island (2001~2005)

## 2. 2003년 여름철의 특징적인 중규모 대류시스템

Fig. 3-7은 GOES-9 위성영상에 나타난 2003년 여름철 황해와 동중국해상에서 발달한 특징적인 중규모 구름무리 양상이다. 먼저 7월 3일의 경우(Fig. 3-7a), 장마전선에 동반된 저기압의 한랭전선이 한반도 남서지역으로 접근하면서 그 전선 전면에서 중규모 구름 무리가 연속적으로 발달하였으며, 레이더 영상에서는 선상의 에코가 나타나 전선 전면에서 선상 중규모 구름무리(line-type cloud cluster)를 형성하였다. 이 경우에 한랭전선 전면의 선상 에코 외에 약 15km 정도 떨어져 대류성 강우대와 관련된 선상 에코가 나타났다. 대류성 강우대가 흑산도를 통과하는 시점에 흑산도 부근에서는 15m/s이상의 강한 풍속과 약한 강수가 발생하였다. 7월 17일의 경우(Fig. 3-7b)는 저기압이 서해남부 해상을 지나갈 때 제주도 서쪽에 나타난 중규모 구름무리가 제주도를 지나면서 급격히 발달하는 경우로 원형 중규모 구름무리(oval-type cloud cluster)가 나타났다. 이 경우 동풍계열이 지속적으로 유입된 제주도 동부지역에서는 7월 17일 23:00 KST와 18일 03:00 KST 사이에 시간당 20~30mm 이상의 강수를 기록하였다.

위에서 약술한 2003년 여름철에 나타난 두 가지 중규모 대류시스템에 대한 위성영상 패턴에 따른 7월 2일 서해상의 한랭전선 전면에 출현한 선상 중규모 구름무리와 7월 17~18일 양 일간 제주도 부근에서 나타난 원형 중규모 구름무리에 대한 지상 및 대기의 연직구조 특성과 그 기작을 밝히고자 한다.

(a)line-type cloud cluster



(a)oval-type cloud cluster



Fig. 3-7. The dimensions and shapes of cloud clusters appeared over the Yellow Sea and the East China Sea in the summer of 2003. (a) line-type cloud cluster 2 July, and (b) oval-type cloud cluster 17 July 2003.

## IV. 발생사례 분석

집중호우 예측에 있어 가장 어려운 부분 중 하나는 바로 MCS에 의한 강수 현상이다. MCS는 수 백 km 규모에서 수 시간 동안에 강수를 발생하기 때문에 기존의 종관 기상관측망 으로는 관측이 거의 불가능하며, 따라서 이에 대한 이해와 예측 능력이 현저히 떨어진다. 여기서는 2003년 여름철에 발생한 MCS 사례에 대하여 종관적 배경 및 중규모적 분석 도구를 이용하여 그 특징들을 살펴보았다.

### 1. 선상 중규모 구름무리(2003년 7월 2~3일)

#### 1.1. 지상일기도 및 강수구조

이 사례는 오호츠크해 고기압이 정체하면서 장마전선의 북상을 저지하고 있으나 북태평양고기압이 서쪽으로 확장하면서 북상하는 장마전선 상에서 발달한 저기압이 한반도로 접근하며 호우를 기록한 사례이다. Fig. 4-1a는 7월 2일 21:00 KST의 지상일기도를 나타낸 것으로 중국대륙의 동안에서 발달한 저기압이 한반도로 북동진하고 있다. 7월 3일 09:00 KST의 지상일도에서 저기압의 중심이 한반도 남서지역까지 이동한 모습을 볼 수 있고, 이후 점차 장마전선의 영향으로부터 벗어나고 있다. 저기압의 통과 시점 및 위치를 바탕으로 해남, 흑산도, 제주와 영남지역의 부산, 통영, 포항의 일강수량 및 시간 강수량과 기온의 시·공간분포를 살펴보기 위해 Fig. 4-2a, Fig. 4-3과 같이 나타내었다. 강수량은 한반도 전체에서 기록되었으나 특히 전라북도 지방을 중심으로 많은 양을 기록하였다. 그리고 경상북도 장기지역에 7월 2일~3일 2일간 누적강수량 159.0mm를 기록하였다. 강수의 시간별 분포를 살펴보면 해남과 흑산도 모두 두 차례의 강수최대치가 나타나는 것을 볼 수 있다. 흑산도에서 1차 최대치가 나타나는 시각 및 2차 최대치가 나타나는 시각은 해남과 약 2시간 정도의 시차를 두고 있다. 그리고 제주지역은 강수량이 아주 작

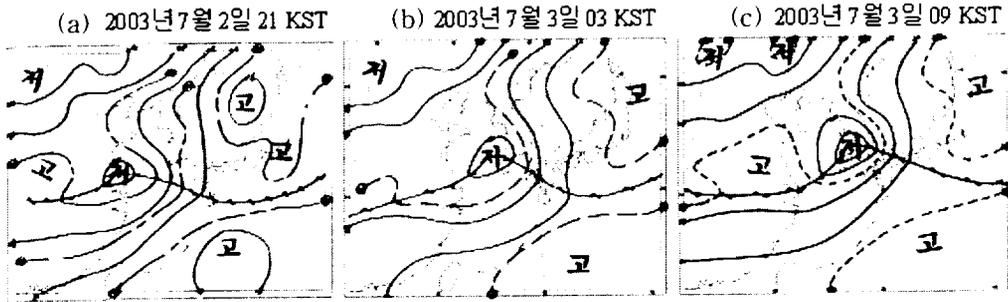


Fig. 4-1. Surface weather charts of the heavy rainfall cases by MCS on (a) 21:00 KST 2 July, (b) 03:00 KST and (c) 09:00 KST 3 July 2003.

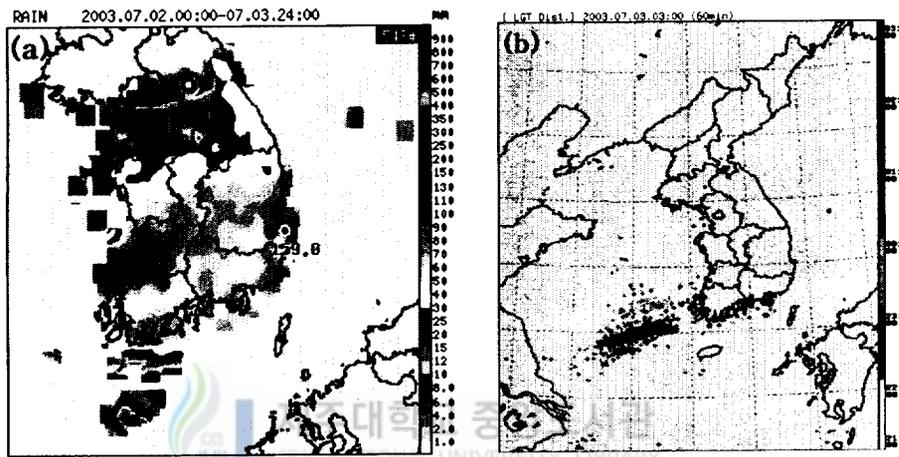


Fig. 4-2. (a) Daily accumulated precipitation from 00:00 KST 2 to 24:00 KST 3 July 2003, and (b) 1-hour lightning distributions from 21:00 KST 2 to 03:00 KST 3 July 2003.

게 나타나고 있다. 해남과 흑산도의 각 강수최대치의 시간차는 저기압통과에 따른 전선의 통과 시점의 차이가 나타나므로 Fig. 4-3과 같은 분포를 보이고 있고 호남지역의 강수패턴이 두 차례의 최대치를 보이는 반면 영남지역의 강수는 전선의 통과에 따라 구분되어 나타나는 강수의 패턴을 보이지 않았다. 영남지역의 강수형태는 온난전선 통과 후 많은 양의 강수가 지속적으로 유지되고 있는 모습을 볼 수 있고, 한랭전선의 통과 시에는 강수량이 거의 나타나지 않았다. Fig. 4.2b는 한시간 간격(7월 2일 21시~7월 3일 03시)의 뇌전발생 분포도이다. 뇌전현상은 온난전선 통과시점인 7월 2일 20시 경에는 거의 발생하지 않았으나 자정 무렵부터 한반도 남서쪽 약 150 km 해상에서부터 발생하기 시작하여 7월 3일 새벽 02~03시경 흑산도 지역을 시작으로 북동쪽으로 이동하면서 우리나라 남해안 지역에 영향을 미치다가 06시경 해남지역을 통과하면서 점차 약화되어 소멸하였다.

## 1.2. 비습(specific humidity) 및 기온 분포

850hPa과 925hPa 면의 비습, 기온과 바람장을 나타내었다. Fig. 4-4는 현업 관측자료 외에 집중관측 자료를 모두 포함하여 6km의 수평 분해능으로 재분석한 것이다. 여기서 우리나라 남서부는 북서에서 남동 방향의 온난전선 전면 에 위치하고 있다. 온난전선 후면은 전면에 비해 상대적으로 습하고 따뜻하며 북동 방향의 하층 제트기류가 잘 발달되어 있다(Fig. 4-4a, b). 하층제트는 수증기 수송과 관련하여 집중호우를 유발하는 한 원인으로 작용한다. 925hPa 기온 분석에서는 온난전선면을 따라 우리나라 서해상과 남서지방에서 강수의 증발과 관련하여 주변부의 열 흡수에 기인하는 냉각효과가 뚜렷이 나타났다(Fig. 4-4d).

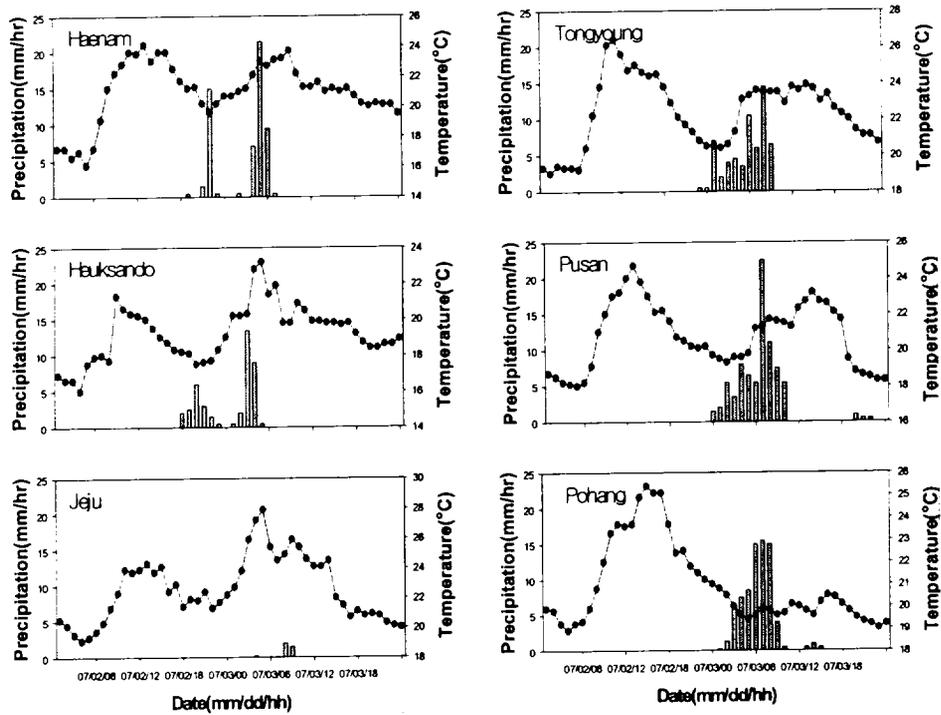


Fig. 4-3. Daily variation of hourly accumulated precipitation at Haenam, Heuksando, Jeju, Tongyeong, Pusan and Pohang from 00:00 KST 2 to 23:00 KST 3 July 2003.



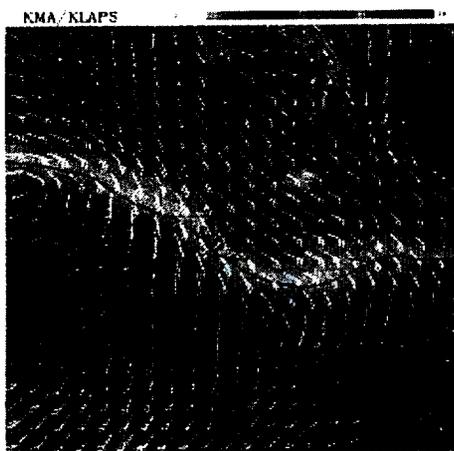
**(a) 850hPa Humidity**



**(b) 850hPa Temp.**



**(c) 925hPa Humidity**



**(d) 925hPa Temp.**



Fig. 4-4. 850hPa and 925hPa analyses of specific humidity (a, c) temperature (b, d) at 21:00 KST 2 July 2003. Wind bands are also shown. Low level Jet is shown by the circle line. Black dot marks Haenam station.

### 1.3. 호우세포의 시·공간 분포

기상청의 AWS 관측망으로 부터 관측된 15분 누적 강수량 분포의 시간 변화를 살펴보았다. 스톰(storm)의 수평 공간규모는 약 50km 정도이며 내부의 구름계는 북동쪽으로 확장되나 스톰 자체는 약 60km/hr의 속도로 동진하였다. 서해상에서 발생한 이 대류세포는 서남해안에서 쓰시마섬으로 빠져나갈 때까지 발달과 약화를 반복하면서 약 8시간 동안 지속되었다(Fig. 4-5).

### 1.4. 위성 및 레이더 영상

3시간 간격 위성과 레이더 영상자료(Fig. 4-6)를 살펴보면, 7월 2일 18:00 KST에 장마전선 북쪽지역 서해상에서 중규모 대류세포로 이루어진 중규모 구름 무리들이 발달하고 있고, 한반도 남서부 지역에서는 온난전선에 동반된 대류성 구름이 나타났다. 시간이 지남에 따라 이들이 조직화되어 선상형태를 갖추기 시작하였다. 7월 3일 03:00 KST에 장마전선에 동반된 저기압이 한반도 남서지역에 위치할 때 이에 동반된 저기압상의 한랭전선이 서해상에 놓이게 되어, 이 전면에서 선상 중규모 구름무리는 위성영상을 통하여 구분할 수 있을 정도로 발달하였다. 이 시각에 레이더 영상에서 선상의 레이더 에코가 출현하기 시작하여 3시간 정도 그 형태를 유지하였다. 특히 7월 3일 03:00 KST에 레이더 반사도에서 한랭전선상의 강한 에코 외에 약하지만 그 전면에 넓은 폭을 가진 또 다른 선상 에코가 존재하였다. 위성과 레이더 영상에서 나타난 서해상에서 발달된 중규모 구름무리, 특히 한랭전선상과 그 전면의 대류세포의 시·공간 규모를 확인하기 위하여, GOES-9 위성에서 관측된 흑체 밝기온도(TBB)자료를 이용하여 전선 전면의 선상 중규모 구름무리가 뚜렷하게 나타난 7월 3일 02:25 KST, 03:00 KST 및 03:25 KST의 TBB 분포를 살펴 보았다(Fig. 4-7). 한랭전선상의 강한 선상 대류운과 함께 그 전면에 다소 넓은 대류운이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 한랭전선상의 대류운들은 그 보다 작은 규모의 여러 개의 대류 세포들로 구성되어 나타났다. 또한 이러한 전선

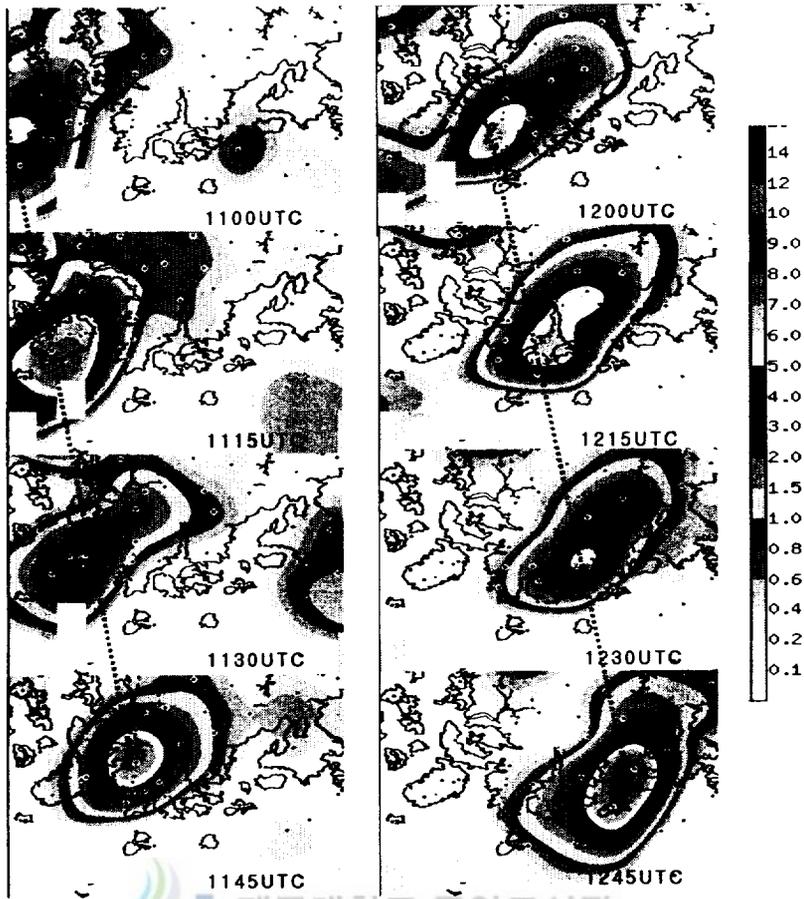


Fig. 4-5. The sequence of rainfall intensity by Automatic Weather Station network. Subsequent track of convective cell is indicated. Stations are marked by red dots.

전면의 대류운은 초기에 한랭전선상의 대류운의 규모보다 크지만, 한랭전선이 강화되면서 그 세력이 약화되다가 두 대류성 구름대가 합성되는 양상을 보였다. 한랭전선상의 대류운의 조직화는 한랭전선 후면의 차고 건조한 공기가 고온 다습한 공기의 하층 부분을 파괴하면서 강한 상승운동을 야기시켰기 때문으로 분석된다.

한랭전선 전면에 나타난 두 개의 대류운의 깊이를 조사하기 위하여 2003년 7월 3일 03:00 KST에 진도 S-band 기상레이더에서 관측된 레이더 반사도를 한랭전선상(AA')과 그 전면(BB')에 대한 단면도(Fig. 4-8)를 분석하였다. 이 시각에 강한 레이더 에코는 진도의 북북서 방향에 놓였으며, 이 중심으로 남서방향으로 두개의 선상 에코가 나타났다. 한랭전선상에 동반된 대류성 강우대는 고도 약 7km 까지 강한 레이더 에코를 보였지만, 그 전면의 대류성 강우대에서는 약 4km 정도로 다소 낮게 나타났다. 그리고 두 강우대간의 거리는 13.7km로 나타났다.

위성 및 레이더 영상자료 분석결과, 장마전선에 동반된 저기압이 서해상에 위치할 경우, 한랭전선 전면에 두 개의 대류성 강우대가 존재함을 확인할 수 있었다. 특히 4km 깊이를 갖는 전선 전면의 선상 중규모 구름 무리는 3시간 정도 지속되다가 한랭전선이 남하 및 강화로 합성되었다.

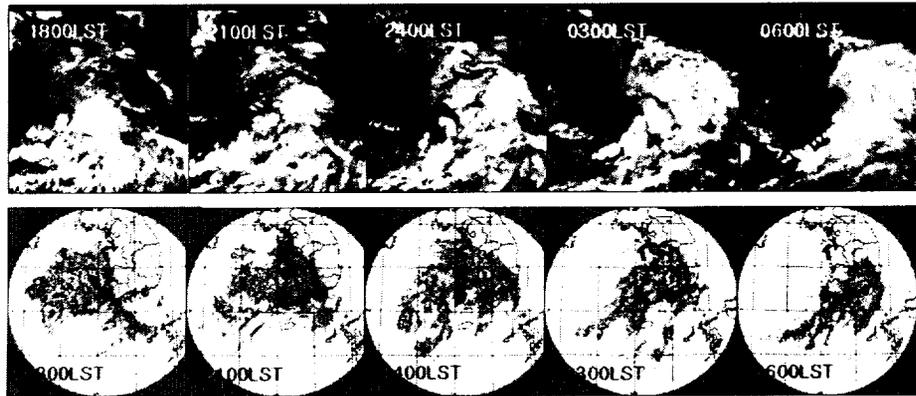


Fig. 4-6. 3-Hour satellite and radar imageries associated with line-shaped MCS in front of cold front along the Changma front from 18:00 KST 2 July to 06:00 KST 3 July 2003.

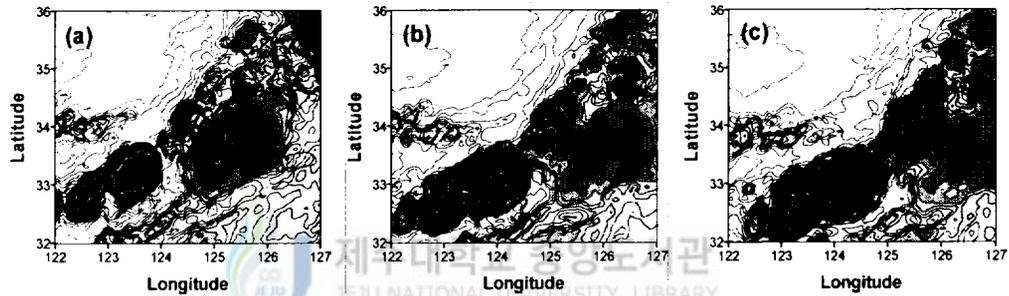


Fig. 4-7. Maps of TBB from GOES-9 at (a) 02:25 KST, (b) 03:00 KST, (c) 03:25 KST 3 July, 2003. The shading indicates the areas where TBB is colder than 40°C

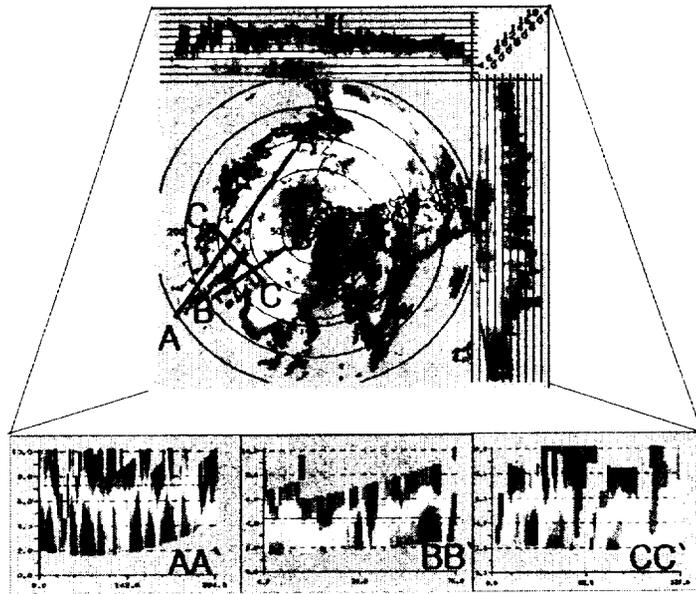


Fig. 4-8. Cross-sections of radar reflectivity observed Jindo S-band radar at 03:00 KST July 3, 2003. AA' and BB' lines denote the locations of strong reflectivity for the frontal and prefrontal convective rainbands, respectively.

## 1.5. 대기의 연직 구조

서해상에서 선상의 중규모 구름무리를 동반한 저기압 통과와 관련된 대기 연직구조를 조사하기 위하여 2003년도 7월 2일~3일 양일간 흑산도에서 관측된 특별관측자료와 우리나라 남서지역 및 제주에 위치한 고층관측자료(광주, 해남, 제주)를 이용하여 상당온위의 연직 분포(Fig. 4-9)를 분석하였다. 온난 전선 통과 시각 1시간 후인 7월 2일 21:00 KST에 다른 지점들과 달리 흑산도에서는 지상에서 고도 1.5km에 강한 역전층이 존재하였으며, 이 고도 위에서는 깊은 불안정층이 나타났다. 이는 지상 강풍에 동반된 난기가 온난 전선면으로 상승하여 강한 역전층이 존재한 것으로 판단된다. 중층의 낮은 상당온위 값은 북쪽지역으로부터의 한랭 건조한 공기의 이류가 있었음을 지시한다. 이러한 대기 열역학 구조는 중층에 깊은 불안정층이 발생한 것으로 설명된다. 한랭전선 전면이 통과한 7월 3일 03:00 KST에서는 하층에서만 얇은 불안정층이 존재하였다.

바람의 연직분포(Fig. 4-10)에서 고도 1km 이하에서는 남동 내지 남서풍이 탁월하였으며, 그 이상의 고도에서는 남서 내지 서풍이 탁월하였다. 또한 온난전선 통과 시에는 하층에서 바람이 남동에서 남서 방향으로 고도에 따라 순전(veering)하는 양상을 보여 온난 이류가 발생하였음을 알 수 있고, 상층에서는 서풍계열의 저온 건조한 공기의 이류가 대기의 조건부 불안정성을 야기 시킨 것으로 짐작된다. 한랭전선 통과 전에는 고도 2km 부근에 강한 하층 제트가 나타나 하층에 강한 바람시어가 나타났다.

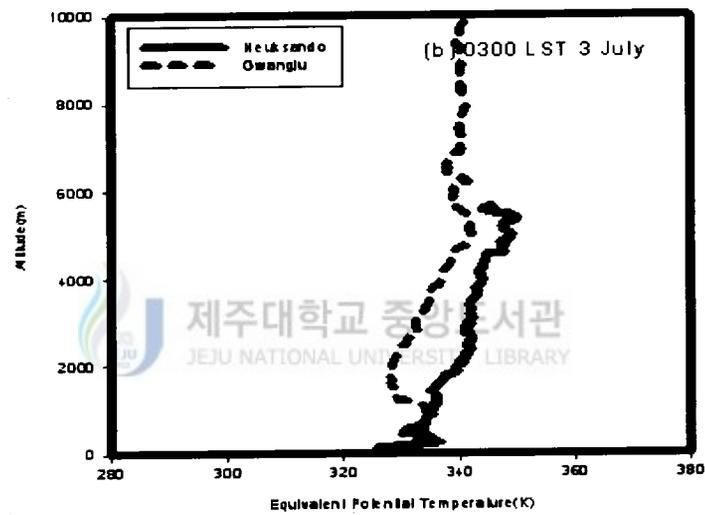
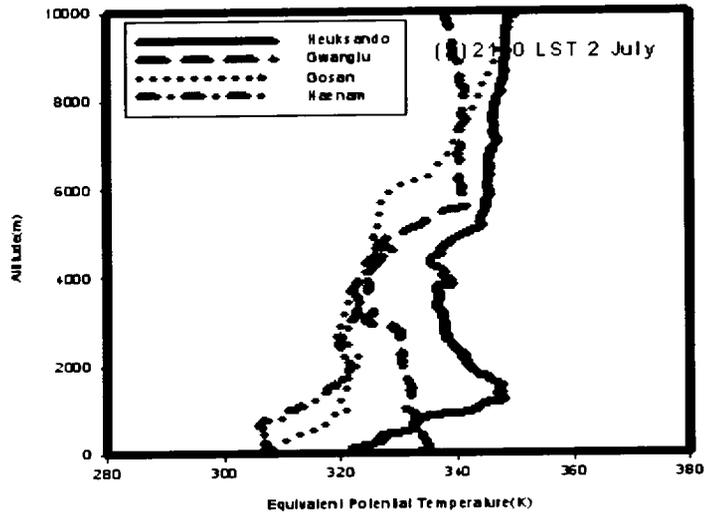


Fig. 4-9. Profiles of equivalent potential temperature obtained from upper-air soundings from Heuksando, Gwangju, Gosan, and Haenam at (a) 21:00 KST 2 July, 2003 and of Heuksando and Gwangju at (b) 03:00 KST 2 July 2003.

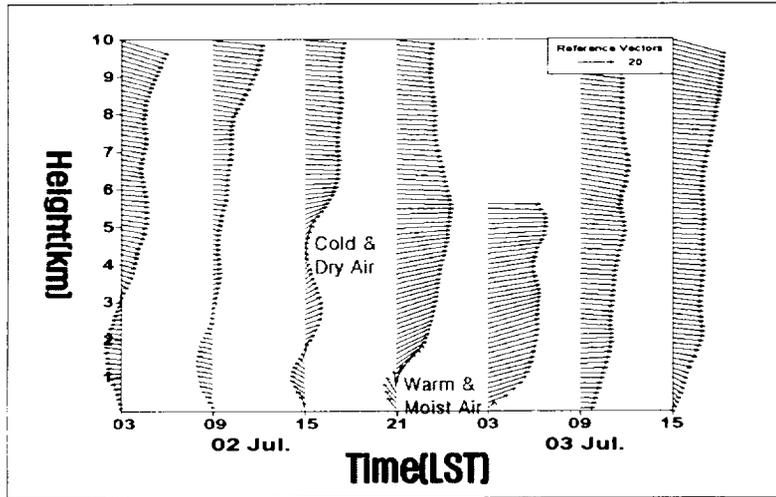


Fig. 4-10. Wind profile from upper-air soundings at Heuksando from 03:00 KST 2 July to 15:00 KST 3 July 2003.

## 1.6. 지상 기상요소의 변화

한랭전선상과 그 전선 전면 강수대의 통과와 관련된 지상기상요소의 시간 변화를 조사하기 위하여 7월 2일~3일 양일간 흑산도에서 관측된 지상 기상 요소들의 시계열 자료(Fig. 4-11)를 분석하였다. 일반적인 전선 통과시기의 기압변화를 고려하여(민경덕, 2001), 흑산도에서 기압이 갑자기 감소하다가 서서히 증가하는 시각인 7월 2일 20:00 KST를 온난전선 통과 시각으로 간주하였으며, 이 시각에는 뇌우를 동반하지 않은채 6.0mm의 약한 강수가 기록되었다. 7월 3일에 나타난 강수는 강한 뇌우를 동반하면서 02:00 KST에 2.0mm, 03:00 KST에 13.5mm, 그리고 04:00 KST에 9.0mm를 각각 기록하였다. 이러한 강수 변화는 위성에서 관측된 TBB 자료와 레이더 반사도 자료 분석에서 언급한 것처럼, 높이가 낮은 전선 전면의 대류성 강우대에서 약한 강수를 내렸고, 그 후면에 따라오는 한랭전선과 관련된 깊은 대류성 강우대에 의해 다소 강한 강수가 발생하였다. 그 이후 이들 두 강우대가 합쳐져 중간정도의 강수를 유발한 것으로 분석된다.

이러한 두 대류성 강우대의 분리와 발달 깊이에 관하여 7월 3일 03:00 KST에 나타난 지상과 하층의 강풍축이 이들 대류성 강우대를 통과하면서 강풍 축의 북쪽에 양의 시어와도(positive shear vorticity), 남쪽에 음의 시어와도(negative shear vorticity)를 발생시켜 이 수평시어 효과가 두 대류성 강우대의 발달에 기여한 것으로 판단된다. 또한, 흑산도에서 관측된 기압의 일변화에서 최소기압은 7월 3일 04:58 KST에 나타났다. 그러므로 이러한 강수발생을 한랭전선상과 그 전면의 강우대에 의한 강수로 간주할 수 있다. 온난전선의 통과 시각에는 기온은 서서히 감소하다가 증가하였고, 상대습도는 거의 100%를 유지하였다. 이는 온난전선 후면이 하층의 고온 다습한 기류의 유입 때문이다. 흥미로 사실은 온난전선 통과시 15m/s 이상의 강한 풍속이 관측되었다는 것이다. 이러한 하층의 강풍은 효과적인 수증기 속 수송에 기여하였다고 볼 수 있다. 풍향은 서서히 남풍계열에서 남서풍계열로 전환하였다. 한랭

전선 전면 강우대가 통과하는 시각에서는 기온이 증가하였다가 급격히 떨어졌으며 상대습도는 거의 100%를 유지하면서 시간이 지남에 따라 작은 변화를 보였다. 풍속은 서서히 감소하였고 풍향은 남서풍 계열에서 북풍 계열로 바뀌었다. 게다가 강수가 발생한 시간대인 7월 3일 02:00~04:00 KST에 한랭전선 통과 후 기온의 급락이나 상대습도의 감소가 뚜렷이 나타나지 않아 강수가 한랭전선 전면에서 발생한 것으로 생각할 수 있다.



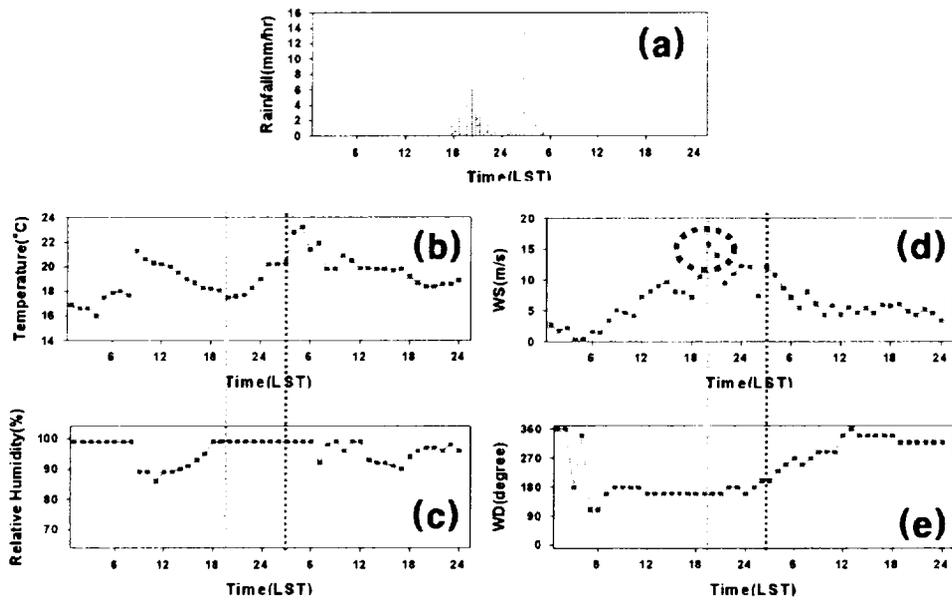


Fig. 4-11. Time series of surface weather elements observed at Heuksando from 2 to 3 July, 2003 (a) rainfall, (b) temperature, (c) relative humidity, (d) wind speed, and (e) wind direction.

## 2. 원형 중규모 구름무리(2003년 7월 17일~18일)

### 2.1. 지상일기도 및 강수구조

원형 중규모 구름 무리가 장마전선 상에서 발달할 수 있는 종관 기상상태를 알아보기 위하여 2003년 7월 17일 09시부터 7월 18일 09시까지 12시간 간격의 지상일기도를 분석하였다. 중국대륙 동해안에서 일본 열도 남쪽해상까지 걸쳐 있는 장마전선을 따라 중국대륙 에서부터 발달한 저기압이 일본 남쪽해상에 위치한 또 다른 저기압 후면을 따라 7월 17일 24:00 KST에서 7월 18일 02:00 KST 경까지 동진하여 우리나라 제주도 부근해상을 지났고, 장마전선은 ‘중국 내륙 - 상해 - 남해 먼해상 - 일본 남쪽해상’ 으로 이어져 나타났다(Fig. 4-12). 동해 북부 해상에 중심을 둔 오호츠크해기단(maritime Polar air mass: mP)의 세력이 우리나라 중남부에까지 미쳤고, 북상하는 장마 전선의 영향으로 제주도와 남부지방을 중심으로 강수현상을 보였다. 17일 주요 지역의 누적 강수량은 성산포 67.5mm, 제주 61.0mm, 완도 52.0mm, 흑산도 35.0mm 진도 32.5mm, 고흥 29.0mm, 목포 27.0mm, 여수26.0mm 등이다.

장마전선은 점차 북상하면서 7월 18일 오전에는 ‘중국 내륙 - 서해상 - 한반도 중남부 - 일본 남쪽해상’ 으로 이어져 나타났으며 점차 동쪽으로 이동해 나갔다. 장마 전선을 끌어올린 저기압은 서해 북부 해상에서 그 세력을 우리나라 전역에 미치고 있으며 일본 열도 북단에서 ‘동해 북부 - 서해 북부 해상’ 으로 mP가 자리 하였다. 18일에도 우리나라는 장마 전선의 영향으로 전국에 걸쳐 비가 왔으며, 특히 중부와 영동, 지리산 부근을 비롯한 남부지방, 남해안 지방에 많은 비가 내렸다. 주요 지역 강수량으로는 속초 113.5mm, 거제 103.0mm, 영주 93.5mm, 부산 91.5mm, 성산포 86.0mm, 남해 80.5mm, 강화 79.0mm, 문경 72.5mm, 제천 56.5mm, 부여 53.0mm 등이다. 사례에서의 원형 중규모 구름 무리는 저기압이 서해남부 해상을 지나갈 때 제주도 서쪽해상에서 발생 및 발달(7월 17일 23시 ~ 18일 03시)하여 제주도 동부지역을 중심으로 시간당 20~30mm의 강수량을 기록하였다(Fig. 4-13a).

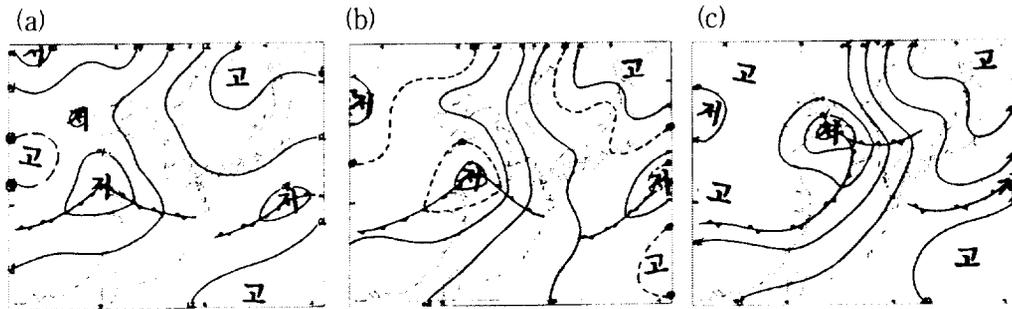


Fig. 4-12. Surface weather charts of the heavy rainfall cases by MCS on (a) 09:00 KST and (b) 21:00 KST 17 July, (c) 09:00 KST 18 July 2003.

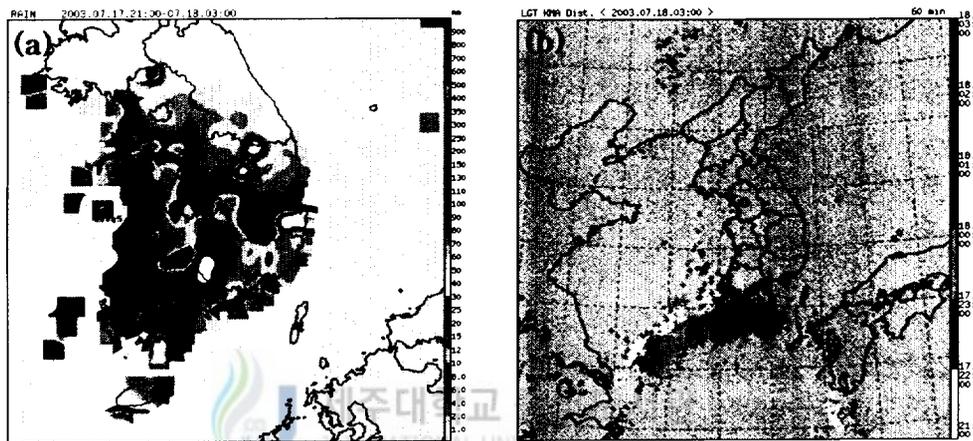
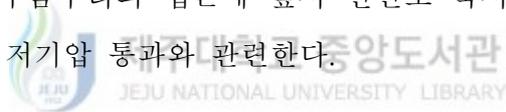


Fig. 4-13. (a) Daily accumulated precipitation from 21:00 KST 17 to 03:00 KST 18 July 2003. and (b) 1-hour lightning distributions from 21:00 KST 17 to 03:00 KST 18 July 2003.

Fig. 4-13b는 원형 중규모 구름무리가 발생하여 급격하게 발달했던 시기의 1시간 간격(7월 17일 21시~7월 18일 03시) 뇌전발생 분포도이다. 뇌전현상은 17일 21~22시경 중국 동해안에서부터 발생하여 제주도 서쪽해상(18일 00~01시), 남해안 및 제주도(18일 01~02시) 지역에 영향을 미치다가 18일 03시경에 일본 쓰시마섬 남쪽해상으로 완전히 물러났다.

제주지방의 강수량의 시간대별 분포(Fig. 4-14)를 살펴보면 제주와 고산, 서귀포, 한림 등 해안 지역으로는 시간당 최고 21.5~31.5mm 정도의 강수가 약 2시간 정도 지속된 것으로 나타났다. 중규모 구름무리의 주 이동경로로 분석된 한라산 성판악과 성산포, 제주 동부의 일부 중산간 지역(선흘, 가시)으로는 시간당 최고 23.0~43.5mm(성판악)의 강수량을 기록하였으며 강수지속시간도 해안지역과 달리 3~5시간 정도 계속되었다. 이는 탁월한 남서기류의 유입에 의한 수증기 수송과 한라산의 지형효과와 연관된 기류수렴의 결과로 중규모 구름무리의 중심구역이 직접 도달하기 이전부터 한라산 및 산간지역으로 이미 강수가 시작되었음을 의미한다. 7월 17일 22시의 제주지역 시간당 강수량 42.0mm는 중규모 구름무리의 접근에 앞서 한반도 북서해안 쪽으로 이동한 장마전선을 동반한 저기압 통과와 관련한다.



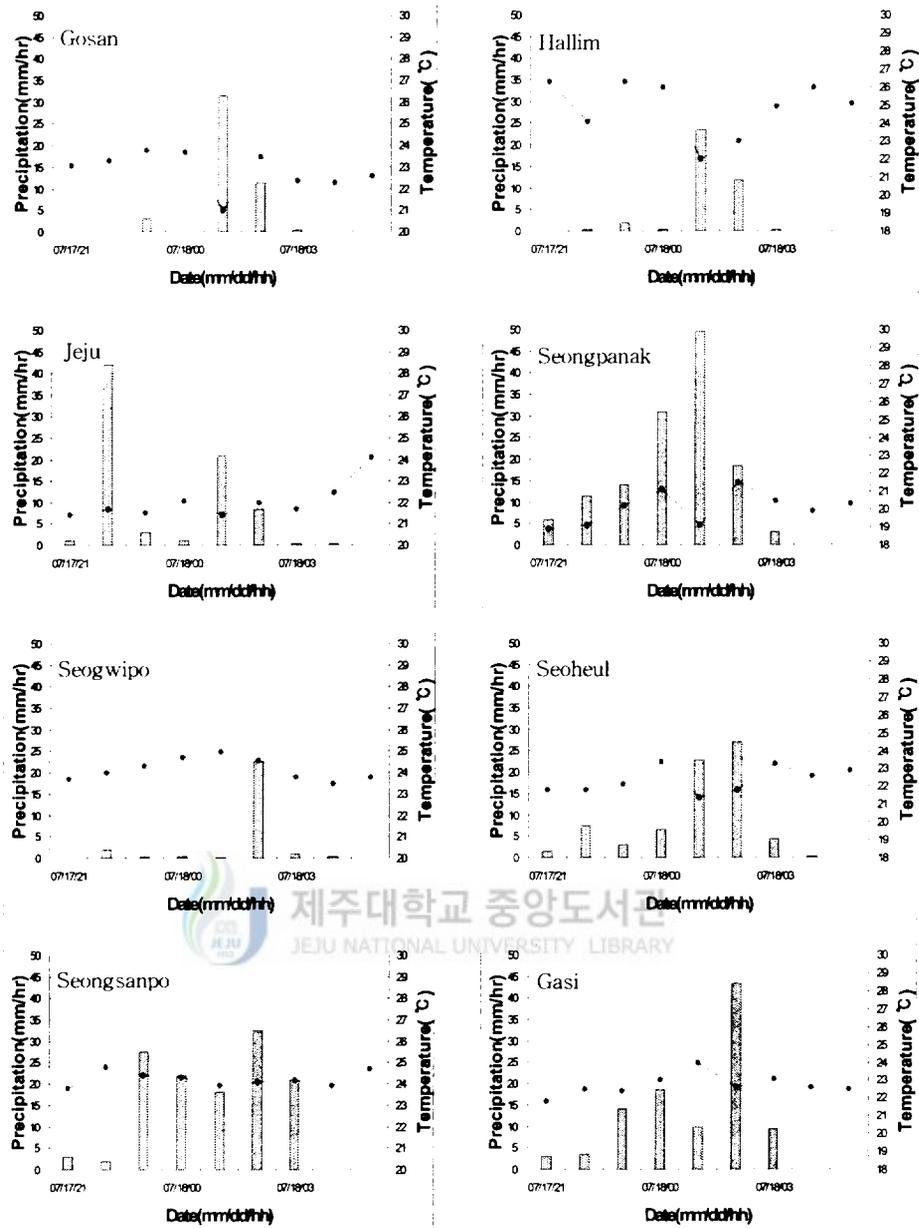


Fig. 4-14. Daily variation of hourly accumulated precipitation at Gosan, Jeju, Seogwipo, Seongsanpo, Hallim, Seongpanak, Gasi, Seoheul from 21:00 KST 17 to 05:00 KST 18 July 2003.

## 2.2. 수분과 안정도 분석

Fig. 4-15는 장마전선상에서 발달한 구름무리의 발생, 발달, 소멸 원인을 수분과 안정도를 통하여 분석하기 위하여 2003년 7월 17일 21:00 KST의 기상청의 수치실험 자료를 사용하였다. 수분속(Fig. 4-15a)은 중국 화남지방과 동중국해의 습기가 상해부근의 한랭전선 부근으로 수렴되어 제주도 서쪽해상에서 최대 수렴역을 보였다. 850hPa 유선과 등풍속(>25kts)은 중국 화북 해안 지역에서 우리나라 남부지방까지 25kts 이상역이 위치하고 있으며, 제주도 서쪽에 35kts 이상의 강풍역이 위치하고 있어 강한 수렴역이 제주도 서쪽해상에서 나타나 대기의 불안정을 유발하였다(Fig. 4-15b). SSI지수(Fig. 4-15c) 분포는 -3 이하의 불안정구역이 중국 상해부근에서 제주도 서쪽해상으로 광범위하게 분포하였으며, K-index 35이상의 불안정 구역도 상해부근에서 제주 지역까지 분포하였다(Fig. 4-15d). 850hPa 상당온위는 354(K)의 고온다습한 구역이 중국 화남해안을 따라 상해부근까지 이어졌고, 상해부근에서 제주도까지는 345~354(K)가 이어져 나타났다(Fig. 4-15e). 200hPa 발산구역은 상해 북쪽, 제주도 북서쪽과 동쪽에 존재하여 장마전선상의 대기를 상승시키는 원인을 제공하여 원형 구름무리의 발달과 지속시간을 유지시키는 메커니즘을 제공하였다(Fig. 4-15f).

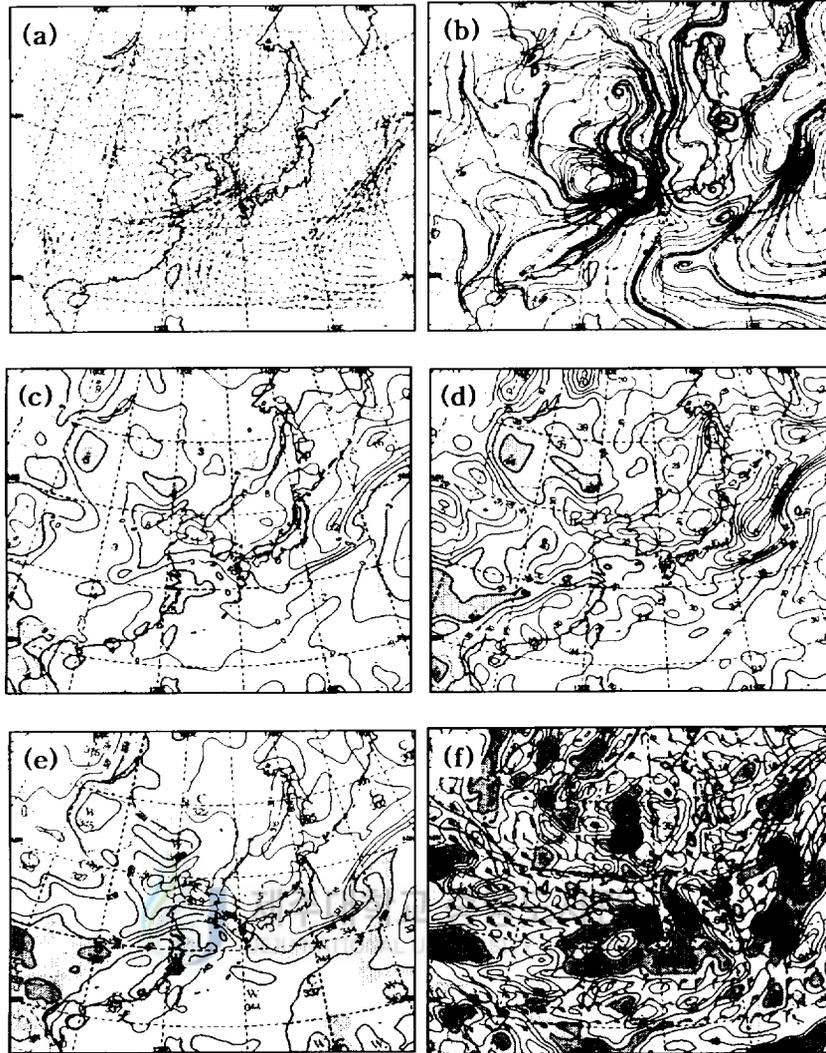


Fig. 4-15. Auxilary analysis charts at 21:00 KST 17 July, 2003 from KMA RDAPS (Regional Data Analysis and Prediction System) (a) 850 hPa Moisture Flux, (b) 850 hPa Streamline and Isotach (>25kts), (c) Showerwalter Stability Index for 850~500 hPa, (d) K-index, (e) 850 hPa Equivalent Potential Temperature(3K) and (f) 200 hPa Divergence (10E - 6/sec) and Isotach (>50kts).

### 2.3. 호우세포의 시·공간 분포

AWS 관측망 으로부터 관측된 15분 누적강수량 분포의 시간변화를 이용하여 호우세포의 이동경로 및 시·공간 분포를 분석하였다. 호우세포의 수평규모는 약 50km 정도로 내부의 구름계는 위성영상에서 북동쪽으로 확장되는 것으로 나타났으나 호우세포 자체는 약 50km/hr 속도로 동북동진 하여 제주 지역까지 이동한 이후에 성산포 방향으로 남동진 하였다. 중국 동해상에서 발생하고 제주도 부근에서 발달한 원형의 중규모 대류세포는 제주도 남동쪽 해상으로 빠져 나가면서 소멸될 때까지 발달과 약화를 반복하면서 약 8시간 동안 지속되었으며, 제주지방에는 약 3시간 정도 영향을 주었다(Fig. 4-16).



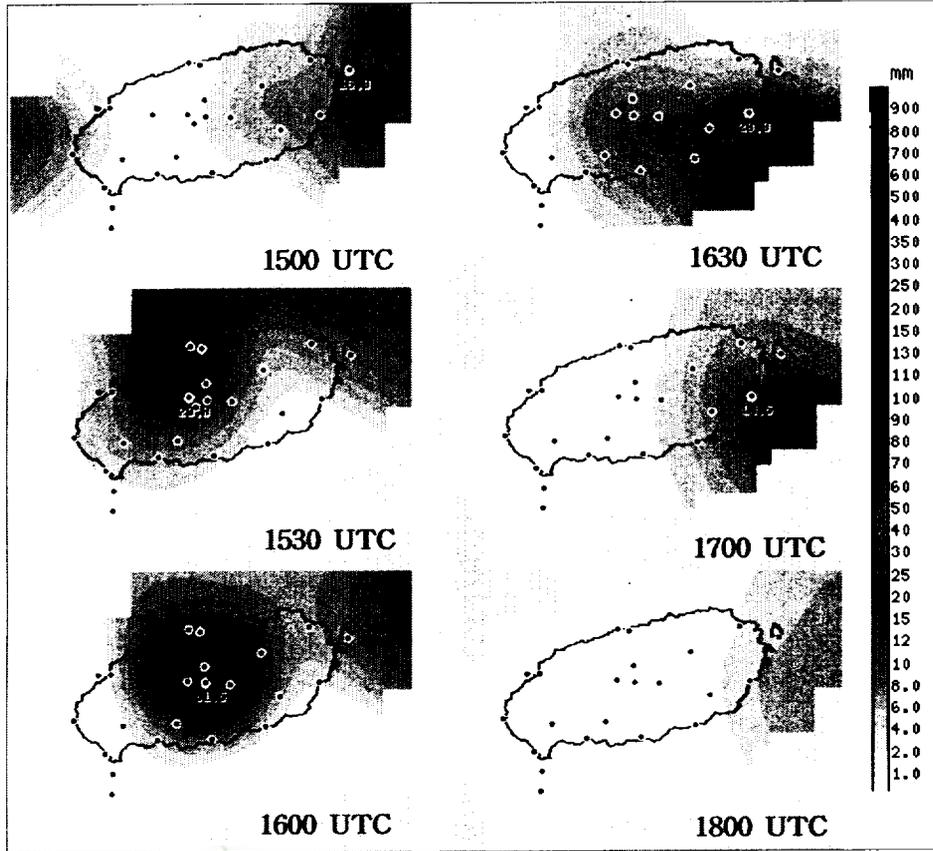


Fig. 4-16. The sequence of rainfall intensity by Automatic Weather Station network. Subsequent track of convective cell is indicated. Stations are marked by red dots.

#### 2.4. 위성 및 레이더 영상

7월 17일 24:00 KST에서 18일 02:00 KST까지 제주도 부근에서 급격히 발달한 중규모 구름 무리를 파악하기 위하여 1시간별 위성과 레이더 영상자료를 분석하였다. GOES 위성 영상에서 전선시스템과 직접 연관된 중규모 구름 무리가 존재하였고 이것이 탁월한 남동~남서기류의 영향으로 북동방향으로 진행하고 있는 양상이다(Fig. 4-17). 진도 레이더에서 관측된 레이더 에코는 강한 뇌우를 동반하면서 제주도 서쪽 해상의 남북방향으로 놓인 2개의 강한 에코와 제주도 성산포를 중심으로 동쪽 해상에 동서방향으로 놓인 1개의 강한 에코 그리고 제주도 북쪽 해상의 남북으로 놓인 또다른 1개의 강한 에코로 총 4개의 레이더 에코를 보였다. 전자는 동중국해에서 접근해 오는 원형 중규모 구름무리와 관련이 있으며, 후자는 저기압 통과와 관련된 강한 남서기류의 유입시 한라산의 지형효과와 연관된 기류수렴의 결과에 기인한다. 7월 17일 23:25 KST에서 03:25 KST까지 제주도 부근에서 시간별 GOES-9 흑체 밝기온도 분포에서 중규모 구름 무리는 동진하였으며 그 수평 규모는 처음 접근시의 3배에 이를 정도로 발달하였다(Fig. 4-18). 강한 대류의 중심은 제주도로 접근하면서 제주도 통과 직전에 더욱 발달하여 제주도 북쪽지역을 지나 다시 제주도 남동쪽 해상으로 빠져 나갔다.

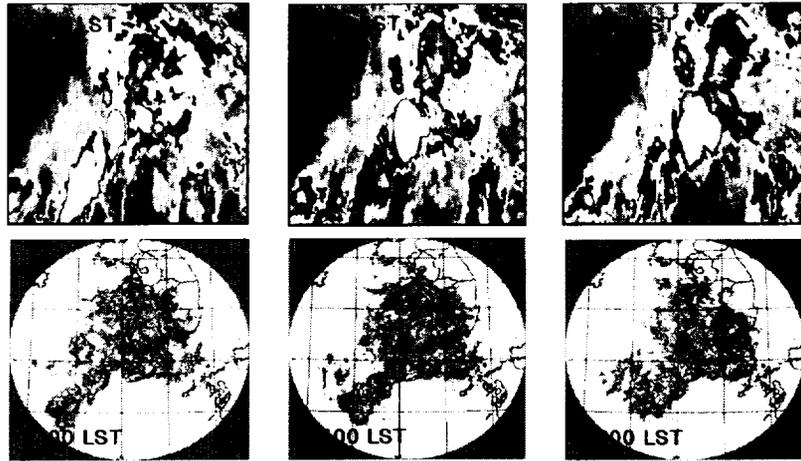


Fig. 4-17. 1-hour satellite and radar imageries from 24:00 KST 17 July to 02:00 KST 18 July 2003.

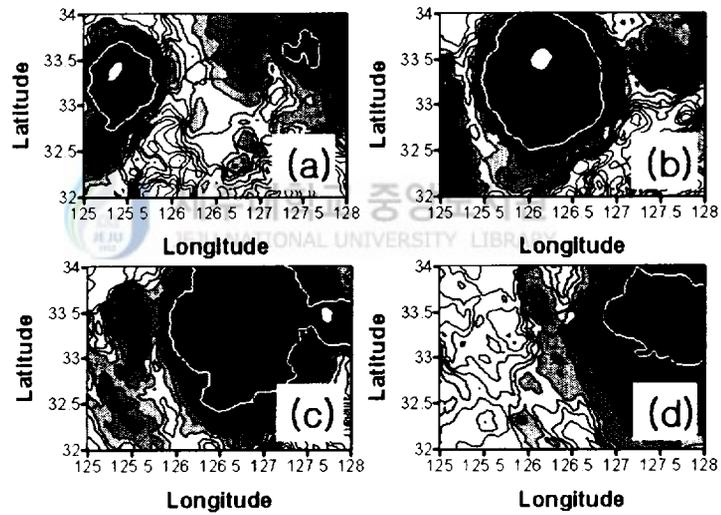


Fig. 4-18. Maps of TBB from GOES-9 at (a) 23:25 KST 2 July 2003, (b) 01:25 KST and (c) 02:25 KST and (d) 03:25 KST 3 July, 2003. The shading indicates the areas where TBB is colder than 40°C.

## 2.5. 대기의 연직구조

장마전선상에서 발생되어 제주를 통과한 원형 구름무리의 발달과 관련하여 대기의 연직구조와 불안정성을 알아보기 위하여 제주 고산지역의 2003년 7월 17일 00:00UTC부터 18일 12:00UTC 동안 12시간 간격의 상당온위(equivalent potential temperature) 단면을 분석하였다(Fig. 4-19). 2003년 7월 17일 12:00UTC의 상당온위 연직 단면에서 700hPa 주위의 대기 중층은 하층으로부터의 습하고 따뜻한 공기의 수렴으로 역전층이 형성되었으며 건조층은 700hPa 이상에서 존재하여 대기의 불안정성이 한층 가중된 것으로 분석되었다.



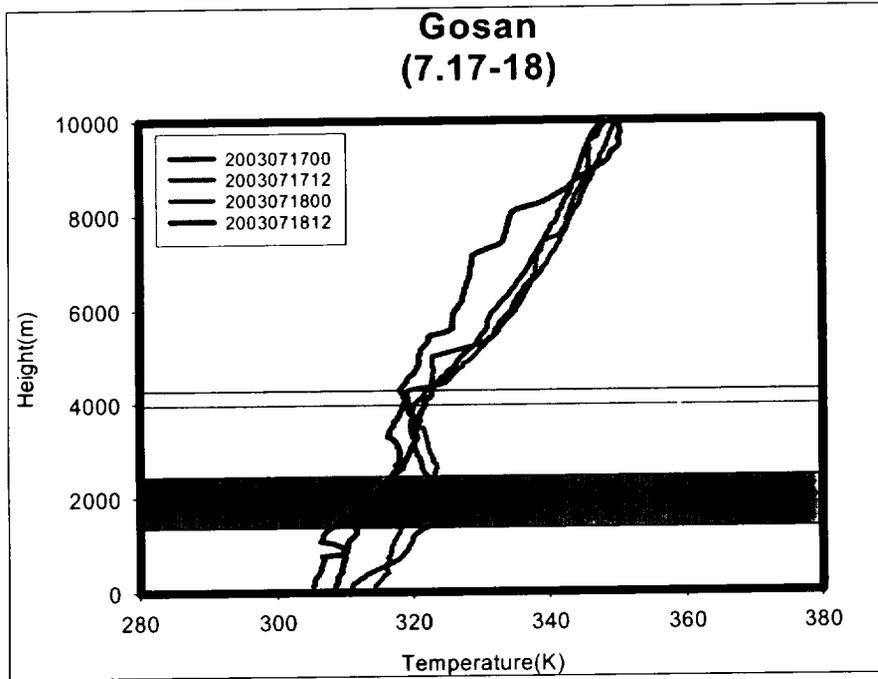


Fig. 4-19. Profiles of equivalent potential temperature obtained from upper-air soundings at Gosan from 00:00 UTC 17 July to 12:00 UTC 18 July 2003.

## 2.6. 지상 기상요소의 변화

동중국해상에서 발달한 원형 중규모 구름무리가 제주도 부근에서 급격히 발달하여 제주도를 통과할 시점에서 지상 바람의 변화를 살펴보기 위하여 7월 17일 24:00 KST에서 7월 18일 01:30 KST까지 AWS 관측 30분 간격의 바람 분포를 나타내었다(Fig. 4-20). 7월 17일 24:00 KST에 제주도 남서쪽 지역에서는 강한 남동풍이 제주도 동쪽지역으로는 상대적으로 약한 동풍계열이 나타났으며, 제주 고산에서는 15m/s이상의 강풍이 나타났다. 30분이 지난 7월 18일 00:30 KST 경에는 이들 두 기류가 제주 부근에서 합성류(confluent flow)를 만들었다. 이런 기류의 합성은 진도 레이더에서 관측된 남북방향으로 연결된 선상의 레이더반사도에 의해서도 설명된다. 제주도 북쪽지역에서 나타난 강한 레이더 에코는 중규모 구름무리의 급격한 발달이 일어나기 2시간 전에 있었으며, 7월 17일 22:00 KST에 제주에서만 시간당 42.0 mm의 강한 강수가 기록되었다. 이러한 국지적인 집중호우는 한라산의 지형효과에 의한 산악 후면의 기류 수렴의 결과를 반영한다.

7월 17일 01:00 KST 경에 제주도 동부지역의 바람이 남서풍 계열에서 남동풍 계열로 서서히 풍향 전환이 나타났다. 이때 제주도 북동부 지역에서 약한 소규모 저기압(mesolow) 형태가 나타났으며, 이는 원형 중규모 구름무리의 진행과 함께 느린 동진을 하였다. 원형 중규모 구름무리의 대류 중심이 제주 중심에 놓인 시각인 01:30 KST경에 한라산을 중심으로 기류의 수렴이 존재하였다. 이 시각에 종(bell) 모양의 한라산의 모습에 따른 산 중심으로의 효과적인 기류 수렴으로 인해 원형 중규모 구름무리의 크기가 상당히 커졌음을 알 수 있다.

원형 중규모 구름무리의 제주도 통과시점에 나타나는 지상기상요소 변화를 살펴보기 위하여 제주도를 중심으로 동서남북에 위치한 4개의 관측지점에서 관측된 시간별 바람자료(Fig. 4-21)를 분석하였다. 원형 중규모 구름무리가 제주도 동쪽에 접근하면서 3배 정도로 급격하게 발달한 7월 18일 00:30 KST

에 제주도 남쪽지역에서 상대적으로 강한 남풍계열과 함께 한라산을 중심으로 강한 수렴이 관측되었다. 원형 중규모 구름무리가 급격히 발달한 시각에는 거의 모든 관측지점에서 20mm/h 정도의 강수가 기록되었고, 풍향은 지점별로 상당히 상이하게 나타났다. 이는 원형 중규모 구름무리의 제주도 통과시 강한 상승기류와 관련하여 하층의 고온다습한 기류 수렴과 이들 수렴이 지형 효과에 의한 강제 상승에 의해 모든 지점에서 강수가 발생한 것으로 분석된다. 풍향 변화는 산 중심으로 기류 수렴에 따른 결과로 해석된다.



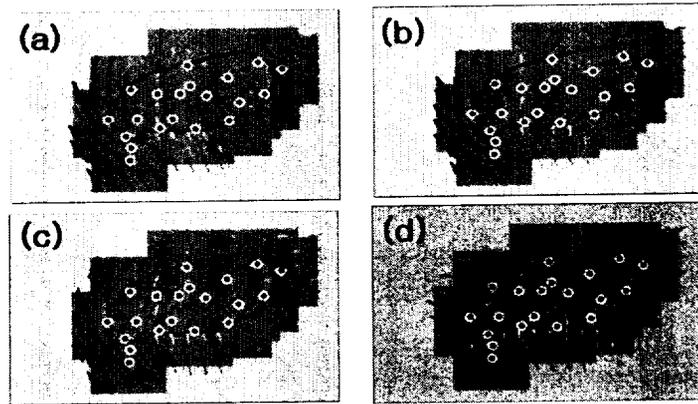


Fig. 4-20. Distribution of 30-min. wind vector over Jeju (a) 24:00 KST 17 July, (b) 00:30 KST 18 July, (c) 01:00 KST 18 July and (d) 01:30 KST 18 July 2003.

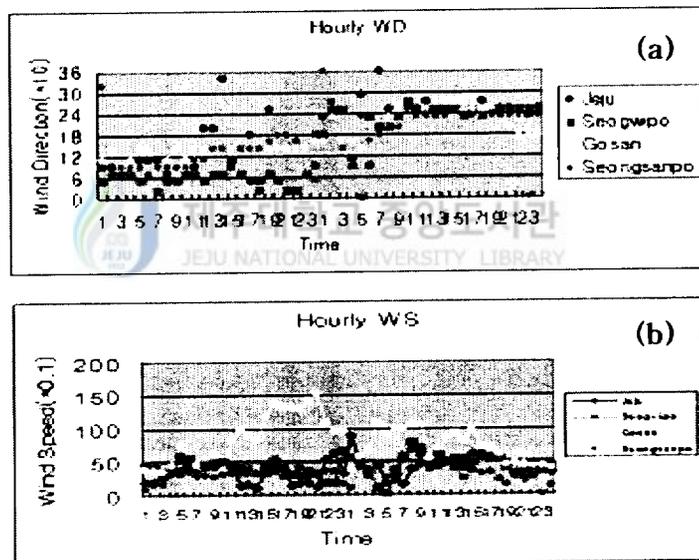


Fig. 4-21. Time series of surface weather elements observed at Jeju, Seogwipo, Gosan, and Seongsanpo from 17 to 18 July 2003 (a) wind direction, and (b) wind speed.

#### IV. 결론

제주지방의 집중호우는 여름철 남부와 동부지역에 집중되는데, 그 원인은 온대저기압, 장마전선 및 그 주변의 수렴대, 태풍 등이다. 집중호우 발생시 일평균 강수량은 120~140mm, 시간당 강수량은 40~60mm 정도이다. 일강수량 평균최대치는 7월 상순에 189.9mm로 가장 높게 나타났고, 호우 발생빈도는 6월 하순~7월 상순, 7월 하순~8월 상순 및 8월 하순에 높게 나타났다. 호우 발생 시간대는 일출 전의 새벽 시간대와 일몰 후의 밤 시간대에 주로 분포하는 것으로 나타났다.

여름철 제주지방 대류시스템의 규모적 특징은 수평규모 10~30km, 시간규모 1~3hr 정도로 Orlanski(1975) 규모분류 기준으로 볼 때 meso- $\beta$  규모에 해당되었다. 발생 및 발달과정은 주로 장마전선대내의 중규모적 요란과 중국 내륙의 대류불안정에 기인하는 구름무리가 경암불안정지역인 한반도 남서해상으로 이동하는 과정에서 전이 및 변형 과정을 거쳤다.

2003년 여름철 한랭전선 전면에서 발달한 선상 중규모 구름무리(7월 3일)와 원형 중규모 구름무리(7월 18일) 발생사례를 분석하였다. 첫번째 사례의 경우 한랭전선 전면에 나타난 대류성 강우대는 한랭전선상의 강우대보다 깊이는 낮았고, 이에 동반된 강수량도 상대적으로 적었다. 두 강우대가 뚜렷하게 나타난 7월 3일 03:00 KST경에 이들 간의 수평거리는 13.7km 정도였으며, 전선 전면의 대류성 강우대는 3시간 정도 지속되다가 한랭전선상에 동반된 대류성 강우대가 접근하면서 합성되어 중간 정도의 강수를 유발시켰다. 기상기상요소에서 15m/s 이상의 강풍과 함께 대기 연직구조에서도 강한 하층제트가 출현하였다. 두번째 사례는 강한 뇌우를 동반한 원형 중규모 구름무리가 강한 남서기류를 동반하면서 제주도 부근에 다양한 방향의 선형 레이더 에코를 형성하였다. 일부 레이더에코는 한라산의 지형효과에 따른 기류 수렴과 강제 상승에 기인하여 중규모 구름무리가 제주도를 통과할 때 제주도 북부 및

중산간 지역, 남동부 지역을 중심으로 시간당 20~30mm의 강수를 유발하였으며, 풍향의 변화는 매우 상이한 분포를 보였다. 대기의 연직구조는 첫번째 사례와 동일하게 중층에 강한 불안정층과 함께 850hPa 이하 하층에는 강한 하층제트가 나타났다.

본 연구의 사례는 중규모- $\beta$ , 중규모- $\gamma$  시스템이 계층적 구조를 이룬 경우로써 강수의 대부분은 중규모- $\gamma$  시스템에서 발생하였다. 이런 시스템에 의한 강수는 국지성이 강하여 현재의 기상관측 규모와 종관분석장 만을 통해서서는 정확한 강수구역 및 강수량 예측에 한계를 보일 수밖에 없었다. 향후 중규모 이하의 대류시스템 운동에 대한 좀 더 세밀한 연구는 높은 시공간 분해능의 중규모 관측망(윈드프로파일러, 도플러레이더 등) 자료를 이용할 때 훨씬 더 효과적일 수 있을 것이다. 이들 관측 자료의 분석과 대류계의 구조 및 역학적 특징을 밝혀낼 수 있는 중규모 수치모사 등 다양한 연구를 통하여 각각의 중규모 대류시스템에 대한 개념과 모델을 제시할 수 있다면, 이에 동반된 악기상 현상의 예측 능력과 이해력을 한층 더 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.



## 요 약

제주지방의 집중호우 발생에 대한 기후학적 특징을 파악하기 위하여 2001년부터 2005년까지 최근 5년간 제주지방기상청 관할 유인관측소 4소와 AWS 12소 등 총 16개 관측지점에 대한 강수자료를 통계 분석하였고, 2003년 여름철 중국 동해안에서 시작되어 제주도 남서해상으로 이어지며 발달하는 중규모 대류시스템에 의한 집중호우 발생사례를 선형계와 원형계로 나누어 분석함으로써 제주지방의 시공간적 강우분포 특성과 여름철 중규모 대류시스템에 의한 집중호우 발생기작 및 예측정보를 얻어내고자 하였다.

제주지방의 집중호우는 제주 남동부 지역을 중심으로 여름철에 집중되는데, 그 원인은 온대저기압, 장마전선 및 그 주변의 수렴대, 태풍 순이다. 제주지방의 집중호우 발생시 일평균 강수량은 120~140mm, 시간당 강수량은 40~60mm 정도이다. 일강수량 평균최대치는 7월 상순에 189.9mm로 가장 높게 나타났고, 호우 발생빈도는 6월 하순~7월 상순, 7월 하순~8월 상순 및 8월 하순에 높게 나타났다. 전자는 제주지방의 장마기간(6월 중하순~7월 중하순)이며, 후자는 태풍에서 약화된 열대성저기압 전면의 수렴구역이나 태풍에 의한 영향으로 분석되었다. 호우발생 시간대는 일출 전의 새벽 시간대와 일몰 후의 밤 시간대에 주로 분포하는 것으로 나타났다. 이것은 낮에 발달한 대류운이 복사냉각에 의해 구름상층에는 대기의 냉각, 하층에서는 따뜻한 공기가 갇혀서 나타나는 상하층간의 기온경도 때문으로 알려져 있다.

여름철 대류계의 규모적 특징은 수평규모 10~30km, 시간규모 1~3hr 정도로 Orlanski(1975) 규모분류 기준으로 볼 때 meso- $\beta$  규모에 해당되었다. 발생 및 발달과정은 주로 장마전선대내의 중규모적 요란과 중국내륙의 대류불안정에 기인하는 구름무리가 경압불안정지역인 한반도 쪽으로 이동하는 과정에서 전이 및 변형 과정을 거쳤다.

강수가 빈번하게 발생한 2003년 여름철에는 다양한 중규모 구름 무리들이

장마전선에 동반된 저기압이 서해상이나 동중국해상을 통과할 때 발달하여 제주지방 및 남해안 지역을 중심으로 한반도에 영향을 주었다. 본 연구에서는 이러한 중규모 구름무리의 발달, 이동과 관련된 중관적 배경, 대기의 연직구조, 지상 기상요소의 변화특성 등을 살펴보기 위하여 (1) 7월 3일 새벽 서해상에서 나타난 한랭전선 전면의 선상 중규모 구름무리와, (2) 7월 18일 야간에 제주도 부근에서 급격히 발달한 원형 중규모 구름무리를 사례로 선정하여 집중분석 하였다.

첫번째의 경우, 한랭전선 전면에 나타난 대류성 강우대는 한랭전선상의 강우대보다 깊이는 낮았고 이에 동반된 강수량도 상대적으로 적었다. 두 강우대가 뚜렷하게 나타난 7월 3일 03:00 KST경에 이들 간의 수평거리는 13.7km 정도였으며, 전선 전면의 대류성 강우대는 3시간 정도 지속되다가 한랭전선상에 동반된 대류성 강우대가 접근해 오면서 합성되어 중간 정도의 강수를 유발시켰다. 지상기상요소에서 15m/s 이상의 강풍과 함께 대기 연직구조에서도 강한 하층제트가 출현하였다. 이러한 하층제트와 관련된 시어 와도가 이러한 전선 전면 대류성 강우대의 발달과 관련이 있었다.

두번째 경우 강한 뇌우를 동반한 원형 중규모 구름무리가 강한 남서기류를 동반하면서 제주도 부근에 다양한 방향의 선형 레이더 에코를 형성하였다. 일부 레이더에코는 한라산의 지형효과에 따른 기류 수렴과 강제 상승에 기인하여 중규모 구름무리가 제주도를 통과할 때 제주도 북부 및 중산간 지역, 남동부 관측지역을 중심으로 시간당 20~30mm 내외의 강수를 유발하였으며, 풍향의 변화는 매우 상이한 분포를 보였다. 제주도 서쪽에 위치한 고산의 고층 관측자료를 사용하여 대기 연직구조를 분석한 결과 대기 중층에서 강한 불안정층이 존재하였으며 하층에는 강한 하층제트가 나타났다.

## 참고문헌

- 강길봉, 2005; 급격히 발달한 원형 중규모 구름무리 통과시 제주도 지상 및 고층기상특성 연구. 석사학위논문, 대구대학교 정보통신공학과, pp38-41.
- 기상연구소, 2003; 한반도 악기상 집중관측사업(Ⅲ), 재해성 기상현상의 메커니즘 규명. pp169-196.
- 기상청, 2002; 중규모기상학, 기상청 예보관과정 교재. pp43-50.
- 김기남, 2001; 한반도 중규모- $\beta$  대류계 사례분석(1997년 6월 30일 ~ 7월 1일 사례). 석사학위논문, 서울대학교 지구환경과학부, pp56-57.
- 이동규, 1999; 집중호우. 물리학과첨단기술 8,6('99.6) pp19-24.
- 위태권, 1999; 중규모 대류계의 구름 분해 모의에 기초한 적운매개 변수화. 박사학위논문, 서울대학교 대기과학과. pp56-58.
- 하중철, 1999; 한반도 집중호우시 종관배경의 역학 연구. 석사학위논문, 서울대학교 지구환경과학부, pp74.
- 황승언, 1992; 한반도에서 발생한 호우와 하층 제트의 관련성에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교 지구환경과학부, pp39.
- Akiyama, T., 1984; A medium-scale cloud cluster in a Baiu front. Part 1: Evolution process and structure. *J. Meteor. Soc. Japan*, 62, pp485-504.
- Kim, B. J., Yonghee Lee, Jeong-Hoon Kim, Chun-Ho Cho, Hyo-Sang Chung, 2003; Mountain Impacts on Mesoscale Cloud Cluster Development around Jeju Island, *Atmosphere*. 13(3), pp350-351.
- Lee, D. K. and T. K. Wee, 1988; Numerical simulation of a meso-beta scale heavy rainfall event over the Korea peninsula. *Proceeding of international conference on monsoon and hydrological cycle*, Kyongju Korea, pp76-80.
- Orlanski, L., 1975; Additional subdivision of scale for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 56, pp527-530.

## 사 사

단순한 의욕 하나로 무지하게 뛰어 들었던 2년여의 학문의 길을 뒤로하고 한 권의 「논문」을 세상 밖으로 내놓으면서 두려움과 아쉬움, 학문의 길이 얼마나 어렵고 고달픈 과정인지 새삼 깨닫게 되었습니다.

학문적으로 부족한 저를 끝까지 인내하시어 마지막까지 직장과 학업을 병행할 수 있도록 이끌어 주신 윤석훈 지도교수님, 방익찬 교수님, 문일주 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 논문 심사를 위해 애써주신 윤정수 심사위원장님과 기회가 있을 때마다 많은 관심과 조언, 학문적 지도를 아끼지 않으셨던 최영찬 교수님, 이준백 교수님, 고유봉 교수님, 그리고 유종인 선배님께도 깊이 감사드립니다.

또한 바쁜 직장생활 속에서 학업에 열중할 수 있도록 격려와 용기를 주신 최홍연 기후정보과장님 이하 직장동료 여러분들께도 그 고마움을 지면으로 대신합니다. 2년 6개월 동안 끝까지 동고동락 하면서 어려움을 같이 했던 강영범 선배님과 홍근도 후배님은 특별한 인연으로 영원히 같이할 것입니다.

오늘이 있기까지 항상 사랑으로 묵묵히 지켜봐 주신 부모님께 이 자리를 빌어 큰절 올립니다. 그리고 지금 이 순간까지도 가족들을 위하여 억척스러운 고생을 하고 있는 사랑스런 나의 아내와 바쁘다는 핑계로 많은 시간 함께 하지 못한 혜령과 채우에게도 미안한 마음을 전합니다.

끝으로 고통스러운 암투병 속에서도 용기를 주시다 끝내는 운명을 달리하신 형수님께 소중한 이 책을 바치며, 소홀했던 저를 끝까지 이해해 주신 양산에 계시는 형님과 인성, 인철 조카들에게도 고맙고 미안한 마음을 함께 전합니다.

본 논문의 완성되기까지 애정 어린 격려와 협조로 작은 결실을 맺게 하여 주신 모든 분들께 다시 한번 깊은 감사의 마음을 전합니다.

2006년 7월