

17
453.4
05962

석사학위논문

제주도 지방의 집중호우 경향과 사례 연구



제주대학교 대학원

해양학과

유 중 인

1998년 12월

제주도 지방의 집중호우 경향과 사례 연구

지도교수 방 익 찬
유 종 인

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.

1998년 12월

유 종 인의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장	윤 정 수 ㉠
위 원	고 유 봉 ㉠
위 원	방 익 찬 ㉠

제주대학교 대학원

1998년 12월

**Tendency of Heavy Rainfall and Case Study
over Cheju Island in Korea**

**Chong-In Yoo
(Supervised by Professor Ig-Chan Pang)**

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

DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

DECEMBER, 1998

목 차

그림 목차 (List of Figures)	i
표 목차 (List of Tables)	iv
Summary	v
I. 서 론.....	1
II. 자료 및 분석방법	4
1. 분석자료	4
2. 분석방법	4
III. 제주지방의 집중호우 경향	8
1. 지역 및 계절별 경향	8
2. 유형별 경향	12
1) 유형 분류	12
2) 유형별 종관 조건.....	14
IV. 집중호우 사례(CASE) 분석	16
1. 사례 선정	16
2. 종관분석(Synoptic Analysis)	16
3. 중규모분석(Mesoscale Analysis)	26
1) 지형특성.....	26
2) 대기선도.....	29
3) 수직단면도.....	34
4. 사례분석 결과	44
V. 결 론.....	47
- 참고 문헌.....	50
- 요 약	52
- 감사의 글	54

그림 목차 (List of Figure)

- Fig. 1. Horizontal distribution of annual mean precipitation for 30 years (1961~1990) in Korea.2
- Fig. 2. Topographic map and Weather observation network in Cheju Island which is divided into 5 areas. Weather Stations of Korea Meteorological Administration(KMA) and Local Administration station(LAS), and Automatic Weather Sysytem(AWS) are depicted respectively.5
- Fig. 3. Horizontal distribution of annual mean precipitation for 5 years (1992~1996) using data of the LAS in Cheju Island.9
- Fig. 4. (a)Monthly frequencies of heavy rainfalls with daily precipitation of more than 80 *mm* and 150 *mm* and (b)their seasonal frequencies using data of the KMA for 20 years(1978~1997). (c),(d)Same as (a),(b) except the KMA, AWS and LAS for 5 years(1993~1997) respectively. (e)Same as (d) except their regional tendency.11
- Fig. 5. Frequencies of rainfall amount which exceeded 0.1 *mm*/hour for raining durations in each area(Fig. 2) using data of the KMA, AWS and LAS.13
- Fig. 6. The paths of the center of low pressure or typhoon around Cheju Island for 5 years(1993~1997).15
- Fig. 7. The horizontal distribution of 24-hour accumulated precipitation for typical six cases out of total cases of heavy rainfalls during the period of 1993~1997 are studied case by case.17
- Fig. 8 Horizontal distribution of 24-hour accumulated precipitation in Korea for six cases used in Fig. 7.18
- Fig. 9 Surface weather chart for each CASE.20

Fig.10. Horizontal distribution of water-vapour mixing ratios (g/kg) at 850 *hpa* (solid lines) and 700 *hpa* (dashed lines) at 09h on May. 20, 1995 for CASE 1 and Aug. 21, 1996 for CASE 2 which are shown in (b) and at 21h on the previous day are shown in (a). Mixing ratios above 11.0 (for CASE 1) and 13.0 (for CASE 2) at 850 *hpa* are shaded thickly, and above 7.0 at 700 *hpa* are shaded thinly. Solid arrows of ① and ② indicates Upper-level and Low-level Jet stream respectively. Dashed arrows of ③ indicates paths of the center of low pressure or typhoon around Cheju Island.

.....21

Fig.11. Time series of hourly precipitation (mm) at 8 stations for CASE 1 (left) and Case 2(right)......22

Fig.12. Same as Fig. 10 except
 (a)21h on Jul. 22, 1995 and (b)09h on Jul. 23, 1995 for CASE 3.
 (a)09h on Aug. 3, 1997 and (b)21h on Aug. 3, 1997 for CASE 4.
 Areas with mixing ratios of more than 13.0 at 850 *hpa* are shaded thickly, and 7.0 at 700 *hpa* are shaded thinly.....24

Fig.13. Same as Fig.11 except CASE 3(left) and CASE 4(right).25

Fig.14. Same as Fig.10 except
 (a)21h on Oct. 30, 1996 and (b)09h on Oct. 31, 1996 for CASE 5.
 (a)21h on Nov.24, 1997 and (b)09h on Nov. 25, 1997 for CASE 6.
 Areas with mixing ratios of more than 9.0 at 850 *hpa* are shaded thickly, and 5.0 at 700 *hpa* are shaded thinly.....27

Fig.15. Same as Fig.11 except CASE 5(left) and CASE 6(right).28

Fig.16. Skew T, log P diagram at station 185(Kosan)
 (a)21h on May. 19, 1995 and (b)09h on May. 20, 1995 for CASE 1.
 (a)09h on Aug. 20, 1996 and (b)21h on Aug. 20, 1996 for CASE 2.

	Solid(●) and dashed(▲) line indicates air temperature and dewpoint temperature, respectively.	30
Fig.17.	Same as Fig.16 except (a)21h on Jul. 22, 1995 and (b)09h on Jul. 23, 1995 for CASE 3. (a)09h on Aug. 3, 1997 and (b)21h on Aug. 3, 1997 for CASE 4.	32
Fig.18.	(a)Horizontal distribution of 24-hour accumulated precipitation and (b)Skew T, log P diagram for station 185 at 09h on Jul. 22, 1995.	33
Fig.19.	Same as Fig.16 except (a)21h on Oct. 30, 1996 and (b)09h on Oct. 31, 1996 for CASE 5. (a)21h on Nov. 24, 1997 and (b)09h on Nov 25, 1997 for CASE 6.	35
Fig.20.	Time series of sectional patterns of wind, water vapor mixing ratios(solid lines) and equivalent potential temperature(dashed lines) at station 185(Kosan) for CASE 1(left), CASE 2(right).	37
Fig.21.	Time series of hourly wind, air temperature(curve dashed line), pressure(curve solid line) and precipitation at 4 weather stations (184, 185, 189, 265) from the previous day to the next day for CASE 1 and CASE 2.	38
Fig.22.	Same as Fig.20 except CASE 3 and CASE 4.	39
Fig.23.	Same as Fig.21 except CASE 3 and CASE 4.	40
Fig.24.	Same as Fig.20 except CASE 5 and CASE 6.	42
Fig.25.	Same as Fig.21 except CASE 5 and CASE 6.	43
Fig.26.	Schematic view of the circulation around Mt. Halla.	49

표 목차 (List of Tables)

Table.1	Description of the observation sites used in this study.	6
Table.2	Frequencies of heavy precipitation($P \geq 80$ mm and $P \geq 150$ mm in parenthesis) during the period of 1978~1997 using data of the KMA.	10
Table.3	Frequencies of heavy precipitation($P \geq 80$ mm and $P \geq 150$ mm in parenthesis) during the period of 1993~1997 using data of the KMA, AWS and LAS.	10
Table.4	Synoptic condition of each pattern.	14
Table.5	Summary of each CASE.	16
Table.6	Description of the results for analysis of each CASE.	45
Table.7	Max and hourly temperature($^{\circ}\text{C}$) at 3 stations(725, 751, 781) in AWS before heavy rainfall on Jul. 22, 1995.	46

Summary

Tendency of Heavy Rainfall and Case Study over Cheju Island in Korea

The observational network of precipitation in Cheju Island was confined to coastal areas before its recent expansion so that it was hard to study the tendency of heavy rainfall in the mountain areas, which have high rainfalls. However, the network expansion in recent 5 years(1993~1997) make it possible. In this paper, the tendency of heavy precipitation over Cheju Island has been studied with the data and its characteristics has been also analyzed with case study.

Heavy rainfall(≥ 80 *mm/day*) over Cheju Islands occurs more frequently in summer, spring, fall, and winter in order, most frequently in August, and unexpectedly rare in September. When compare to that most heavy rainfalls occurs in summer, its of ≥ 150 *mm/day* increased in number in March to May (spring) and Octorber to December, especially all the heavy rainfalls occured in Octorber to December of 1996 and 1997 are of ≥ 150 *mm/day*.

The heavy rainfall in Cheju shows regionally different tendencies. It may be because that the up-wind region is depend on the location of cyclones passing through the island and the precipitation is determined by mountain effect. For recent fine years, 56 cases(62%) out of 90 cyclones including typhoon which had passed through Cheju were recorded as heavy precipitation of ≥ 80 *mm/day*, and they occur more frequently in the south-east area, where come to be upwind regions, than north-west areas.

Cyclones generally caused southerly or south-easterly wind, and so heavy precipitation falls in the south-east area and the mountain area where come to

be up-wind region against southerly wind. The characteristics of heavy rainfall's formulation are as follows. First, with an expansion of moisture air to Cheju Islands and an swift advection in the layer of 850~700hpa, an inversion layer is formed in the height of mountain summit and an conditional instability is formed in the lower layer. Second, convergence zone is formed along Mt Halla by westerly or north-westerly wind in the upper layer and easterly or south-easterly wind in the lower layer. Third, a strong convection of moisture air ascended forcibly by the orographic effect. Since heavy rainfalls are affected by the wind direction and wind strength in the lower layer and the existence and altitude of inversion layer, heavy rainfalls seem to occur in the upwind region and mountain region when cyclones approach Cheju Islands. Without cyclone and typhoon, heavy rainfalls can occur when the waves, which is formed by air's climbing up and down the mountain with jet stream in the lower layer, push up the unstable air and the ascending is accelerated by heating of radiation or cold air divergence from the upper layer. However, the case seems to occur rarely.

Key Word : Heavy rainfall, Orographic effect, Upwind layer, Moisture tongue,
Inversion layer, Prefrontal wave.

1. 서 론

지금까지 제주도의 기상자료는 해안지방에 국한(제주, 고산, 서귀포, 성산)되어 중산간 지역까지 확대하여 분석할 만큼 관측망이 지역적으로 넓게 분포되어 있지 않아 집중호우를 연구하는데 어려움이 있었다. 그러므로 제주지방의 연평균 강수량은 Fig. 1(기상청, 1991)과 같이 아주 단순하게 1600~1700 mm로 인지되어 왔다. 이 등(1987)이 밝힌 우리나라의 호우발생빈도 조사에 따르면 제주지방의 집중호우 일수는 80~150 mm/day가 50일, 150 mm/day 이상이 20일이하로 13년동안 총 70일 미만에 불과하다. 이러한 결과들은 강수량이 많은 중산간 지역이 제외된 해안지역만의 강수량 자료를 이용한 것이므로 강수량과 호우 발생 빈도수가 과소평가 되었고, 지역적인 차이를 밝히는 데도 한계가 있었다.

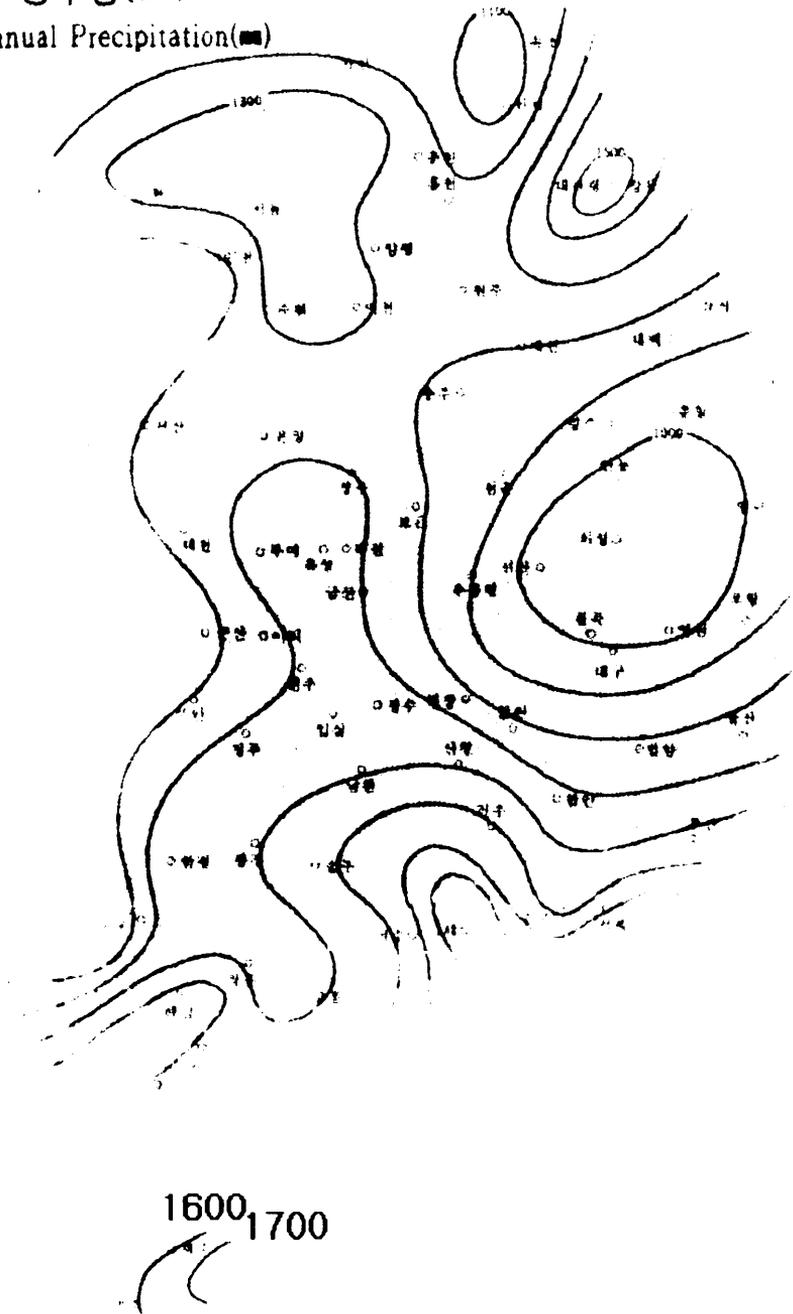
그러나 최근 제주도에는 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)가 1993년부터 운영되고 있고, 지방자치단체에서도 재난 방지를 위하여 중산간 지역을 포함한 제주도 전역에 강수관측을 실시함에 따라 균형된 관측자료가 축적되어 지역간 강수특성 연구가 가능해졌으며 이러한 자료들을 바탕으로 종관적 분석(Synoptic Analysis)과 함께 국지적 특성, 즉 지형 구조와 산악효과에 따른 지역별 특성을 파악할 수 있게 되었다.

집중호우는 짧은 시간에 많은 양의 비가 내리는 강수현상으로 대규모 기상운동에 의하여 넓은 지역에 걸쳐 내리기도 하지만, 중규모 이하의 운동에 의해 좁은 지역에 국한되어 내리기도 한다. 특히 제주도는 주변이 바다로 둘러싸여 있고 중앙에 한라산이 위치해 있어 해양과 산악에 의한 심한 기상변화로 집중호우가 많이 발생하며, 지역간의 거리가 협소함에도 불구하고 집중호우 발생수나 강수량이 차이가 크다.

집중호우에 관련된 연구로서 Doswell III et al(1997)은 종관적, 중규모(Meso- α ; 200~2000 km, meso- β ; 20~200 km)적 메커니즘을 바탕으로 하면서 지역적으로 습윤한 공기(Moist air)의 공급과 저층(Low-level)공기의 빠른 상승이 집중호우를 결정하기 때문에 이를 분석하기 위해서는 4가지 사항, 즉 대기의 1)습윤

연 강수량(mm)

Annual Precipitation(mm)



공급(Moisture supply), 2)정적 불안정도(Static stability), 3)수직운동(Vertical motion), 4)산악효과(Orographic effects)를 고려해야 한다고 하였다. 특히 산악효과에 관련된 연구로 Watanabe et al(1987)은 일본 서부지역의 시간당 90 mm의 집중호우 분석을 통해서 산악효과에 의한 상층 대기 조건 변화와 풍상층(Up-wind layer) 해안지역의 강한 수렴 형성이 집중호우 원인임을 보여 주었다. 현(1990)은 수치모델을 이용한 제주도의 해륙풍 모의와 국지 강수예보에 대한 연구에서 국지 강수예보의 실험모델 결과가 관측치와 100 mm이상의 차이를 보이고 강수구역이 반대로 나타나는 이유를 실측치는 정체전선에 의한 것이고 모델결과는 순수한 산악효과에 의한 결과라고 주장하여 산악효과의 중요성을 보여 주었다. 임(1992)은 지형성 구름과 강수에 관한 수치적 연구에서 첫째로 산의 높이와 넓이에 따라 적운발달과 강수다소(多少)를 수치적 모델 결과로 보였고, 둘째로 대기의 안정도 조건에 따른 산악효과로 대기가 강한 조건부불안정 상태에서 하층에 동풍, 상층에는 서풍이 있는 경우 구름이 깊게 발달하고 산 정상에서 장시간 정체하여 많은 비가 내린다고 밝혀 보다 구체적인 산악효과를 보여 주었다.

그 밖의 연구로 Landsberg(1958)가 산악지역에서 강수분포를 조사하면서 풍상층에서는 연평균 강수량이 100 m 고도마다 약 60 mm씩 증가하고, 풍하층에서는 그 증가 정도가 둔화된다고 하였다. Browning et al(1974)이 수행한 풍상·풍하층(Up-wind·Down-wind layer)과 산정상의 강수고도와 3차원 구조 조사에 따르면 영국의 Wales hill(약 600 m)에서 풍상층의 대류로 생긴 하층 구름(Feeder역할)이 중층의 구름(Seeder역할)과 반복되는 병합과정을 통해서 산 정상에 강수량이 최대가 나타난다. Lee et al.(1998)은 우리나라의 집중호우 특성을 10개의 중규모급(Meso α , β) 사례를 통해서 밝혔고, 그 결과 집중호우 구역이 상층제트(Upper-level Jet)와 하층제트(Low-level Jet) 사이에 위치함을 보여 주었다.

산악효과에 대한 이러한 연구 결과들은 제주도에도 적용될 수 있다. 이 연구의 목적은 기존의 자료와 더불어 최근 5년동안 축적된 AWS 및 제주도청의 강수관측 자료를 사용하여 중산간 지역을 포함한 제주도 지방의 지역별 강수 분포와 경향을 분석하고, 집중호우 사례분석을 통해서 산악효과를 정성적으로 분석해 보려는 데 있다.

II. 자료 및 분석방법

1. 분석자료

1) 관측망(Weather observation network)

분석에 이용된 자료는 기상청(Korea Meteorological Administration, **KMA**) 소속기관 4개소(제주지방기상청, 제주고층레이더기상대, 서귀포기상관측소, 성산기상관측소), 자동기상관측장비(Automatic Weather System, **AWS**)가 설치된 무인관측소 9개소, 재난 방지를 위하여 강수량 관측을 실시하는 제주도청 소속기관(Local Administration Stations, **LAS**) 20개소 등 총 33개의 관측지점에서 관측한 자료이다. 관측지점의 위치 및 지역별 분류는 Fig. 2, 관측지점의 개요는 Table 1에 각각 표시되어 있다.

2) 자료(Data)

(1) 강수량(Precipitation)

° K M A : 1978 ~ 1997 (20년)

° A W S : 1993 ~ 1997 (5년)

° L A S : 1992 ~ 1997 (6년)

(2) 바람(Wind), 기온(Temperature, *T*), 기압(Pressure, *P*)

° K M A : 1993 ~ 1997 (5년)

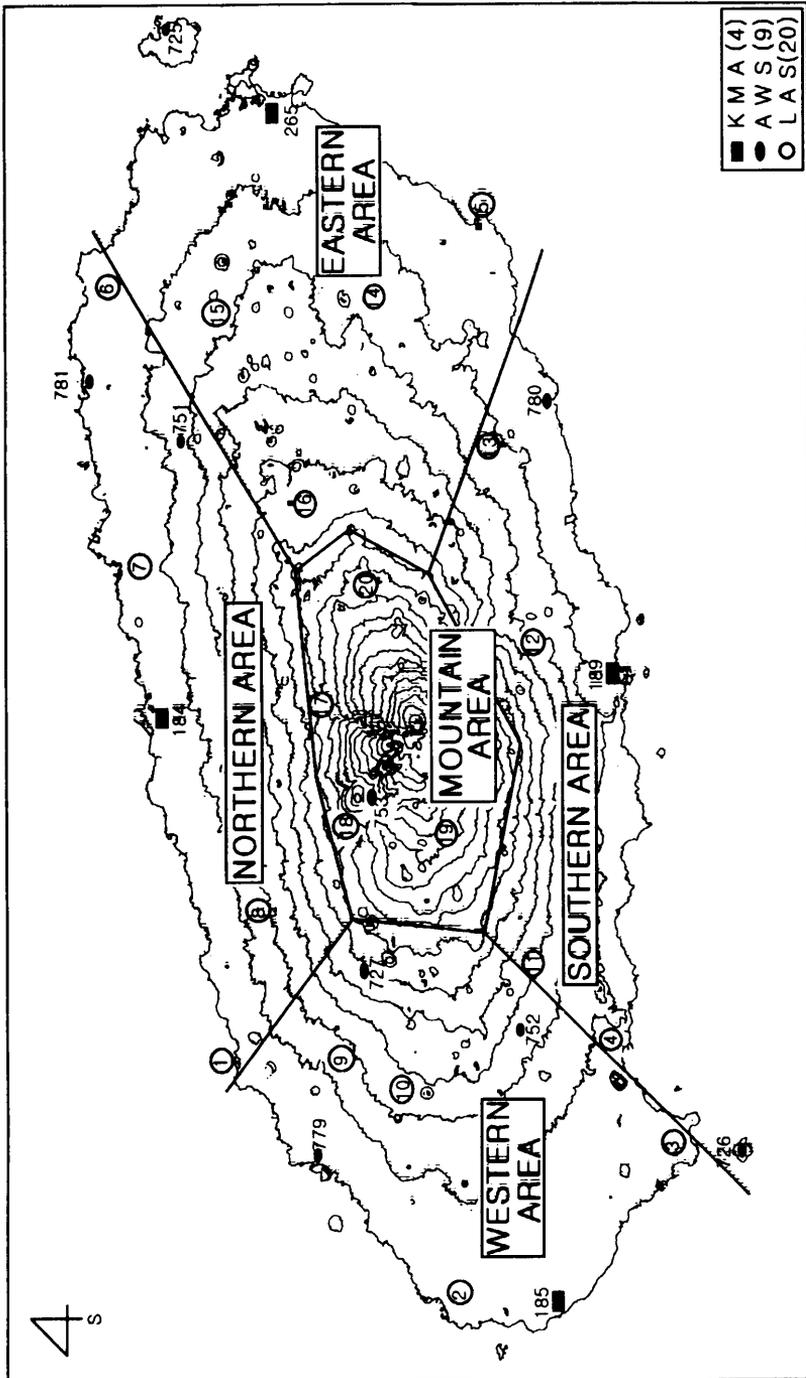
(3) 고층기상자료(Radiosonde)

° K M A : 1995. 5월 ~ 1997. 12월

(4) 기타 (종관일기도, 기상연보, 기상월보)

2. 분석방법

이 연구에서 집중호우는 일강수량이 80 mm 이상인 경우를 기준으로 하였다.



<Table 1> Description of the observation sites used in this study.

No.	Station Code	Description	Altitude (m)	Division of Area	Remarks	
1	1 8 4	Cheju (Cheju Regional Meteorological Office)	2 2 . 0	Northern area	K M A (4)	
2	1 8 5	Kosan (Cheju Upper,Radar Meteorological Station)	7 1 . 7	Western area		
3	1 8 9	Sogwipo (Sogwipo Weather Observation Station)	5 1 . 9	Southern area		
4	2 6 5	Songsan (Songsan Weather Observation Station)	1 7 . 5	Eastern area		
5	7 2 5	Udo ¹⁾	1 2 8 . 0	Eastern area	A W S (9)	
6	7 2 6	Marado ¹⁾	5 6 . 0	Southern area		
7	7 2 7	Kumdok ¹⁾	4 4 7 . 0	Western area		
8	7 5 1	Sonhul ²⁾	3 6 0 . 0	Northern area		
9	7 5 2	Sogwang ¹⁾	1 4 0 . 0	Western area		
10	7 5 3	Orimok ²⁾	9 7 0 . 0	Mountain area		
11	7 7 9	Hallim ³⁾	5 . 0	Western area		
12	7 8 0	Namwon ³⁾	1 5 . 0	Southern area		
13	7 8 1	Kimnvong ⁴⁾	4 0 . 0	Northern area		
14	1	Aewol	less than 100	Northern area		L A S (20)
15	2	Hangyong	"	Western area		
16	3	Taejong	"	"		
17	4	Andok	"	Southern area		
18	5	Pyoson	"	"		
19	6	Kujwa	"	Northern area		
20	7	Chochon	"	"		
21	8	Hangpaduri	less than 400	"		
22	9	Oum	"	Western area		
23	1 0	Choji	"	"		
24	1 1	Sangchon	"	Southern area		
25	1 2	Tonnaeko	"	"		
26	1 3	Sumang	"	"		
27	1 4	Songup	"	Eastern area		
28	1 5	Songdang	"	"		
29	1 6	Kyorae	less than 500	"		
30	1 7	Kwanumsa	more than 600	Mountain area		
31	1 8	Osongsang	"	"		
32	1 9	1100goji	1 1 0 0 . 0	"		
33	2 0	Songpanak	7 5 0 . 0	"		

Note) Established in ¹⁾Jan., 1993, ²⁾Apr., 1995, ³⁾Feb., 1994, ⁴⁾Mar., 1995 respectively.

따라서 제주도 지방의 집중호우는 KMA, AWS, LAS의 총 33개 관측지점 중 어느 한지점의 일강수량이 80 mm 이상이면 그 해당 일을 하나의 경우로 정하였고 80 mm 이상과 150 mm 이상으로 구분하여 경향을 분석하였다. 또한 집중호우 사례 분석에는 WMO(World Meteorological Organization)의 기상관측 통신망인 GTS(Global Telecommunication System)로부터 고층기상자료를 이용하여 혼합비, 수직 바람 분포, 대기선도, 온위 등을 분석하였고, 이때 사용한 물리량들의 근사적 해석 방법은 아래와 같이 구하여졌다.

1) 대기선도(Skew T, log P diagram)에서 Skew-T(x 축)과 Log P(y 축)의 x, y 직교좌표계의 변환은

$$y = \log P$$

$$x = T \operatorname{cosec} \theta + \cot \theta \cdot \dots \dots \dots (2-1)$$

로 구한다. 여기서 P 는 기압(hpa ; hectopascal), T 는 온도(°C)이고 log는 상용로그이며 θ 는 x 축에서 음의 방향으로 기울어진 각도로서 45°를 취하였다.

2) 수증기압(Vapor pressure) : E (hpa)

기압 중 수증기가 기여하는 분압을 말하며, Goff-Grath(1946)식의 전산화에 의한 해석적 방법(이, 1983)으로 구해진 근사식을 이용하였다.

$$\log E = \frac{-2949.076}{Td} - 5.02808 \log Td + 0.000052 Td + 23.8177 \cdot \dots \dots (2-2)$$

여기서 Td 는 절대온도(°K)로 표시한 노점온도(Temperature of dewpoint)이다.

3) 혼합비(Mixing ratio) : W (g/kg)

단위질량의 건조공기에 혼합된 수증기의 질량을 말하며

$$W = 0.622 \frac{E}{P-E} \times 1000 \cdot \dots \dots \dots (2-3)$$

로 구한다.

4) 온위(Potential temperature) : θ (°K)

공기덩이가 건조 단열과정을 거쳐 1000 hpa 고도까지 옮겨졌을 때 나타낼 온도이다.

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{\frac{R}{Cp}} \cdot \dots \dots \dots (2-4)$$

여기서 T 는 절대온도로 표시한 온도, R 은 건조공기의 이상기체상수($287 JK^{-1} kg^{-1}$), C_p 는 정압비열(Specific heat at constant pressure ; $1,004 JK^{-1} kg^{-1}$)이며, 건조공기일 때 온위는

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.286} \dots \dots \dots (2-5)$$

로 구한다.

III. 제주지방의 집중호우 경향

1. 지역 및 계절별 경향

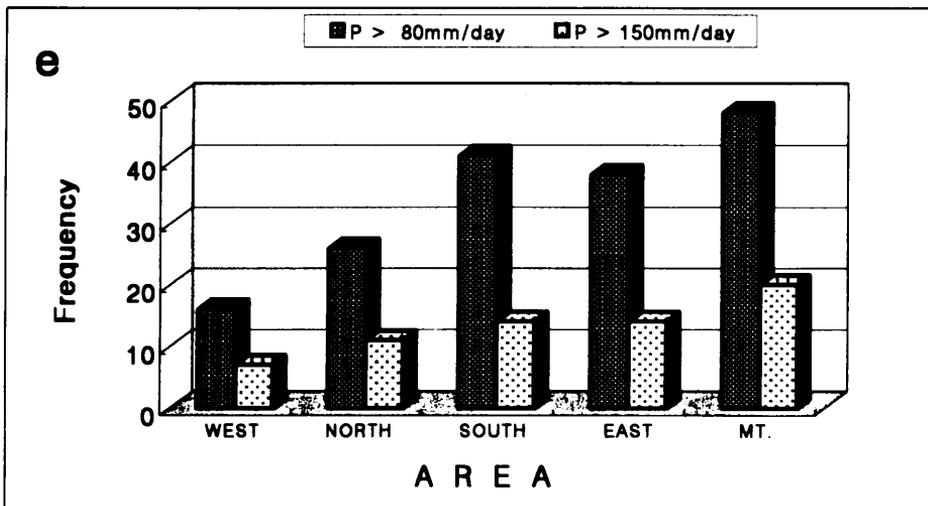
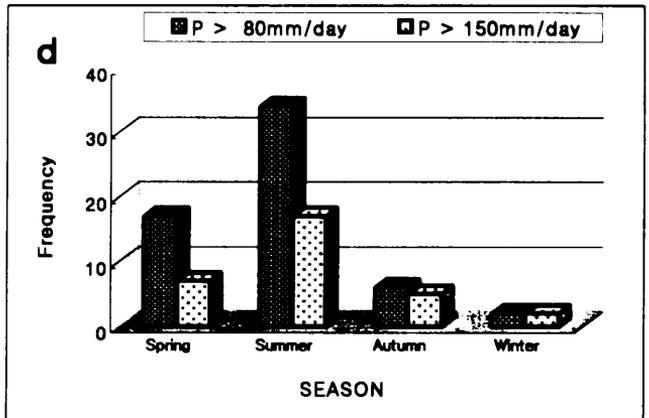
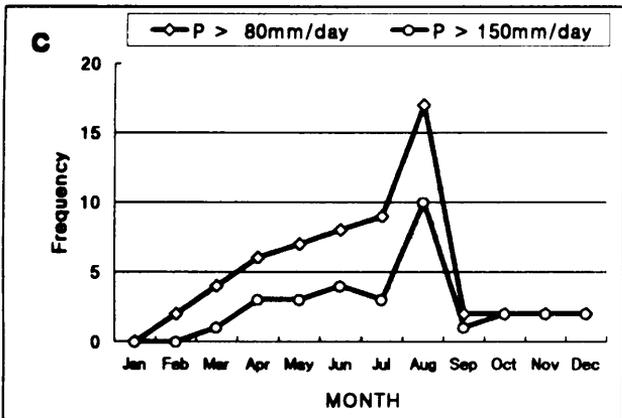
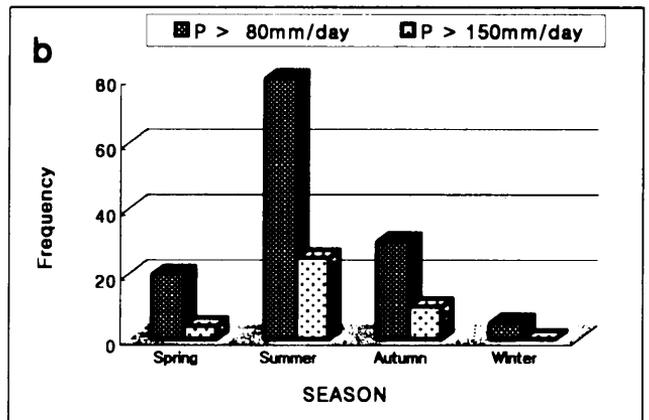
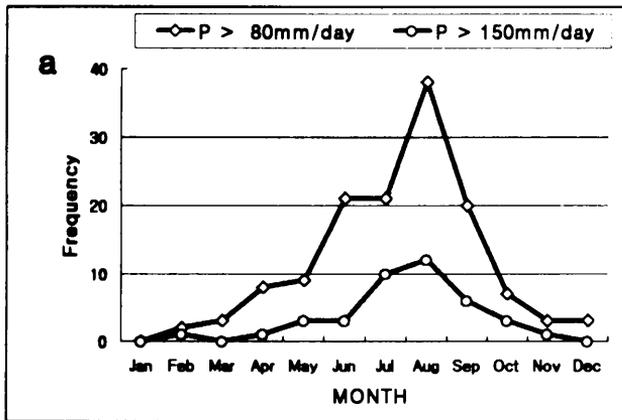
중산간 지역을 포함한 제주지방의 최근 5년(1992~1996)동안의 연평균 강수량 분포는 Fig. 3과 같이 중산간 지역의 성판악(Songpanak)과 남부지역의 돈내코(Tonnaeko)를 포함한 남동부 산간지역이 약 2,300 mm이상이고 북서부 해안지역(고도 약 400m이하)은 약 1,100~1,300 mm로서 약 1,000 mm이상 지역간의 큰 차이를 보여주고 있으며, 지금까지의 단순한 분포도(Fig. 1)와는 매우 다르게 나타나고 있다. 따라서 Table 2와 같은 해안지역에 국한된 자료(KMA)와 Table 3과 같은 KMA, AWS, LAS를 모두 포함한 최근 5년 동안의 자료로 구분하여 비교 분석하면 전자는 80 mm이상의 집중호우 빈도수가 총 135회로서 연평균 6.8회이고 150 mm이상이 총 40회로서 연평균 2.1회이며 80 mm이상의 집중호우에 약 30%를 차지한다. 그러나 후자는 80 mm이상이 연평균 12.2회로서 약 2배, 150 mm이상은 연평균 6.1회로서 약 3배 정도의 증가를 하고 있으며 150 mm이상이 차지하는 비율도 약 51%로 매우 높아 졌다. 이러한 차이는 Fig 4(a~b)와 Fig 4(c~d)의 월별, 계절별 분포에서도 잘 나타나고 있다. 특히 후자의 경우에 월별은 9월이 예상외로 적었고(Fig 4(c)), 계절별 경향은 80 mm이상의 경우 여름이 34회로 56%를 차지하고 봄(17회), 가을(6회), 겨울(4회) 순서(Fig. 4(d))로 봄이 가을보다 많이 발생

<Table 2> Frequencies of heavy Precipitaion($P \geq 80$ mm and $P \geq 150$ mm in parenthesis) during the period of 1978~1997 using data of the **KMA**.

Month Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
1978						1		1	2(1)				4(1)
1979		1(1)		1			2(1)	4(1)				1	9(3)
1980				1	1			3(1)			1		6(1)
1981						2		3(2)	2(2)	1			8(4)
1982				1				1					2(-)
1983							1		6(1)				7(1)
1984								1	1(1)				2(1)
1985			1	1	1	6(3)	2(2)	2(1)		2(1)			15(7)
1986						1	2	3(1)	1				7(1)
1987						1	4(2)	4(1)					9(3)
1988				1		2	1(1)	1					5(1)
1989					1	1	1		1(1)	1			5(1)
1990		1				1	1(1)	1	4	1			9(1)
1991					3(1)	2	1	1	1				8(1)
1992					1(1)		1(1)	3(1)					5(3)
1993			1			1		3(1)					5(1)
1994				1	1	2		3(1)	1	1(1)			9(2)
1995			1		1(1)		4(2)	2(1)	1				9(4)
1996				1		1		1(1)		1(1)		1	5(2)
1997				1(1)			1	1			2(1)	1	6(2)
Total	-	2(1)	3	8(1)	9(3)	21(3)	21(10)	38(12)	20(6)	7(3)	3(1)	3	135(40)

<Table 3> Frequencies of heavy Precipitaion($P \geq 80$ mm and $P \geq 150$ mm in parenthesis) during the period of 1993~1997 using data of the **KMA, AWS, and LAS**.

Month Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
1993		2	1(1)		1	4(1)	1	6(3)					15(5)
1994			1	2	4(2)	2(2)	1	4(3)	1(1)	1(1)			16(9)
1995			1	1	1(1)		4(3)	2(1)	1				10(5)
1996			1	1(1)		1(1)		3(2)		1(1)		1(1)	8(6)
1997				2(2)	1	1	3	2(1)			2(2)	1(1)	12(6)
Total	-	2	4(1)	6(3)	7(3)	8(4)	9(3)	17(10)	2(1)	2(2)	2(2)	2(2)	61(31)



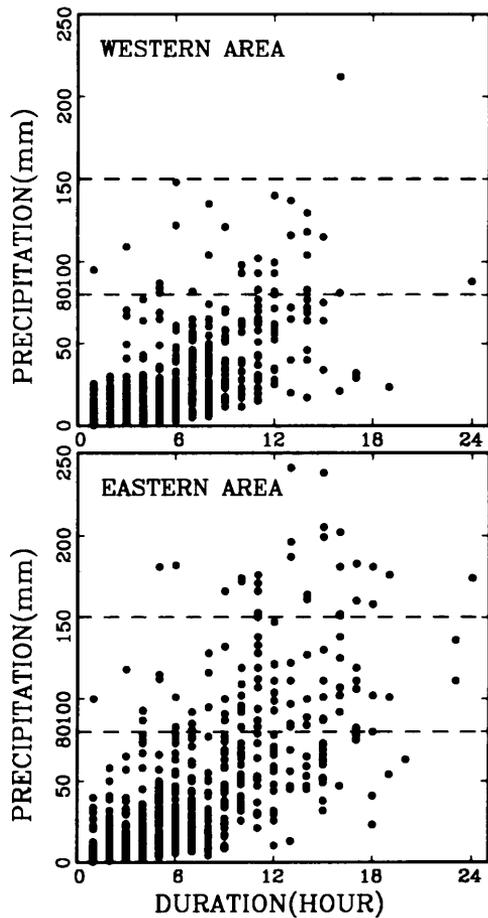
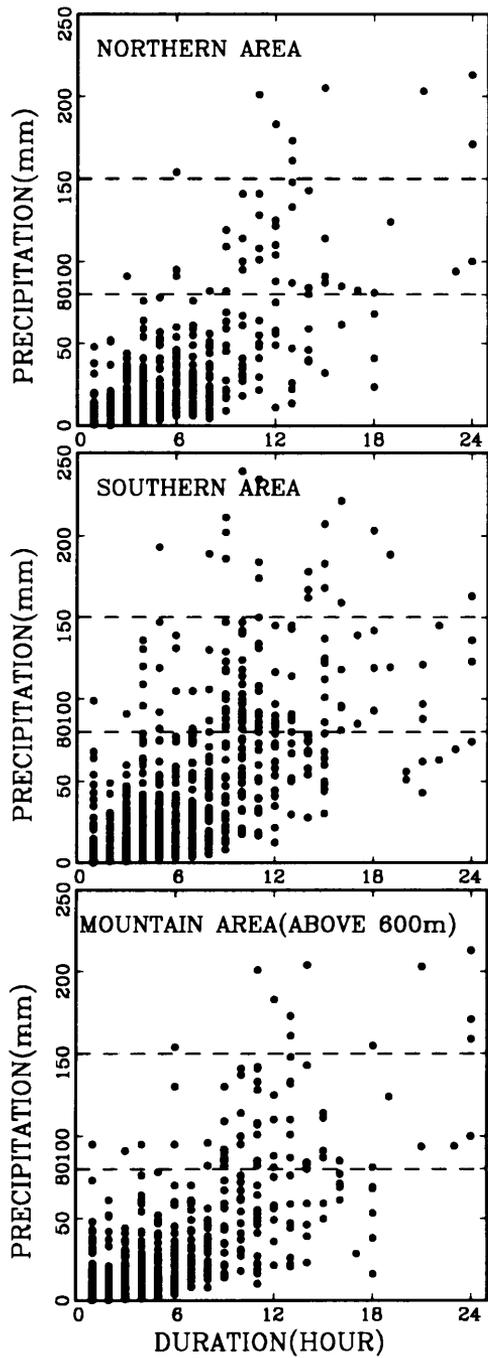
하였다. 이것은 우리나라 집중호우 발생 빈도 조사(이 등, 1987)의 여름, 가을, 봄, 겨울 순서와는 다른 결과이다. 또한 150 mm 이상의 빈도수가 전자에 비하여 봄(3월~5월)과 10월~12월에 급증하였고, 특히 최근년도(1996~1997) 10월~12월에 150 mm 이상의 집중호우가 5회 발생한 것은 우리나라의 집중호우 대부분이 여름철에 발생하는 점에 비하면 기후학(엘리뇨 등) 차원의 원인을 배제하고도 관심을 끌기 충분하다.

지금까지 살펴본 결과와 같이 제주도 지방의 집중호우는 관측망이 확충된 최근 5년동안의 자료를 이용하여 Fig. 2에서 구분한 지역별로 특성을 분석하는 것이 더 의미가 있다. 따라서 지역별 경향은 Fig. 4(e)와 같이 일강수량 80 mm 이상은 중산간지역(Mountain area, MT.), 남부지역(Southern area), 동부지역(Eastern area)이 각각 48회, 41회, 38회로 북부지역(Northern area) 및 서부지역(Western area)과 뚜렷한 지역 차이를 보여주고 있고, 150 mm 이상은 상대적으로 지역 차이가 적지만 경향은 비슷하다. 한편 Fig. 5는 강수 지속시간(Duration)대의 강수량별 빈도수를 지역별로 분류한 그림이다. 80 mm 이상은 물론 80 mm 미만에서도 남·동부지역이 현저하게 많이 분포되어 있어 역시 지역간의 차이가 뚜렷함을 뒷받침하고 있다. 또한 80~150 mm의 집중호우는 중산간 및 남·동부지역이 대략 9~11시간대에 많이 집중되어 있으며, 특히 남부지역은 4~6시간대에도 그 빈도수가 많은 편이다. 따라서 일반적인 생각과 달리 중산간 지역 보다 돈내코 등 남부 지역에서 단속적인 소낙성 강수가 더 많은 것으로 생각된다.

2. 유형(Pattern)별 경향

1) 유형 분류

지역별 강수량 분포에 따라 유형을 분류함으로써 지역별 차이를 파악하고 나아가서 동일한 종관조건(Synoptic Condition) 아래에서 가장 자주 발생하는 유형을 알 수 있다. 따라서 최근 5년(1993~1997)동안 KMA, AWS, LAS에서 발생한



총 61회 집중호우를 아래와 같이 분류하였다. 해안형(SCT)을 포함한 남부형(SAT)이 51%, 산악형(MAT)이 34%로 대부분을 차지한다(Table 4). 그러나 북부형(NAT)은 그 빈도수가 매우 적고 서부지역에 편중된 분포형은 거의 없다.

(1)남부형 : Southern Area Type(SAT) : 25회

한라산을 중심으로 남부지역(Southern area)에 강수량이 편중된 분포형.

(2)해안형 : Southern Coast Type(SCT) : 6회

남·동 해안지역에 강수량이 편중된 분포형.

(3)북부형 : Northern Area Type(NAT) : 9회

한라산을 중심으로 북부지역(Northern area)에 강수량이 편중된 분포형.

(4)산악형 : Mountain Area Type(MAT) : 20회

중산간지역(Mountain area)에 강수량이 편중된 분포형.

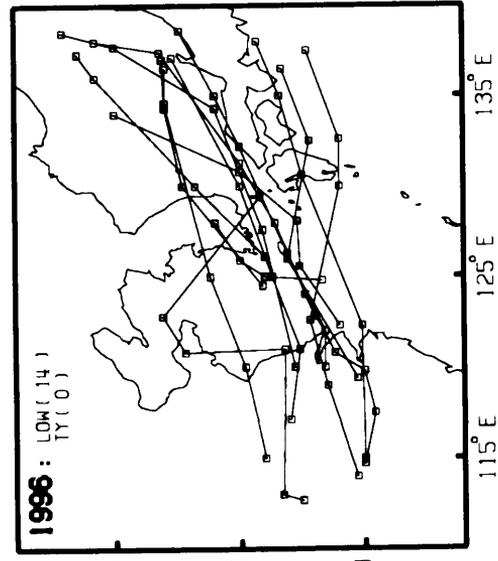
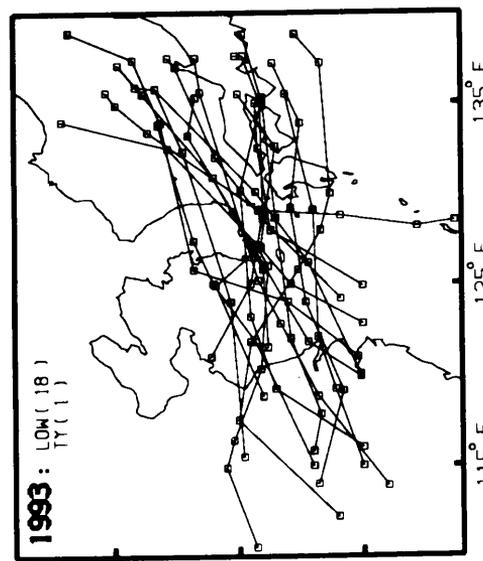
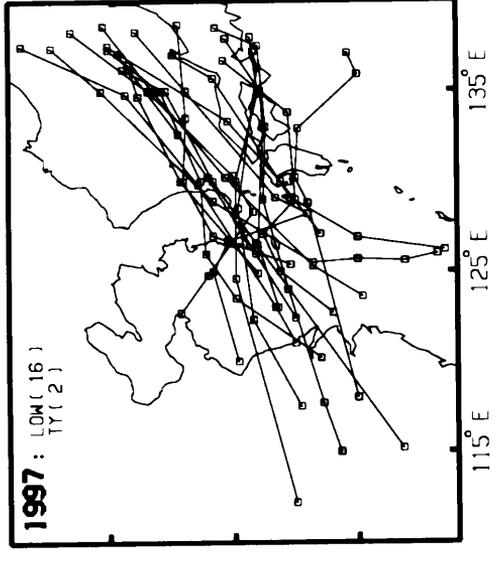
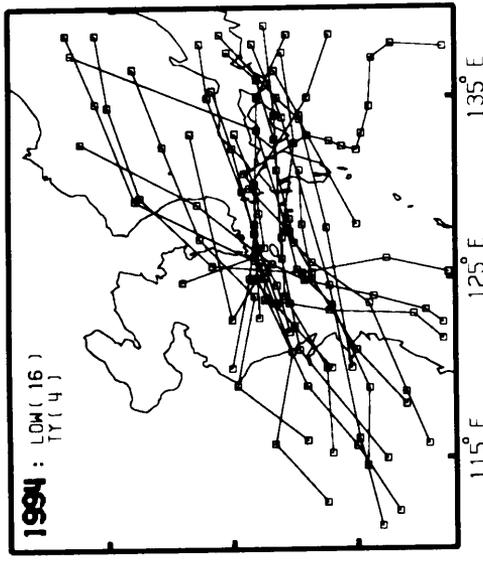
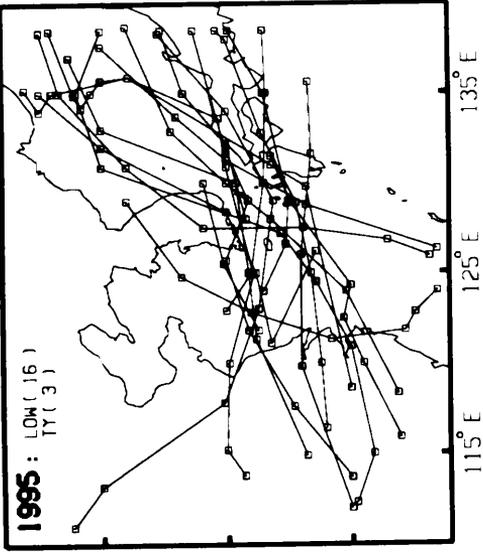
(5)기 타(Others) : 1회

2)유형별 종관조건(Synoptic Condition)

지난 5년동안 제주도 부근을 통과한 저기압은 태풍을 포함하여 90회(Fig. 6)로서, 연평균 18회가 제주부근을 통과하였고, 기층불안정(Instability)을 제외한 약 62%(56회)가 집중호우를 가져왔다. Table 4는 유형별 종관조건(Synoptic Condition)의 빈도수이다. 남부형(SAT)은 제주도 남쪽이나 북쪽으로 통과하는 저기압(Cyclone passed by south or north of Cheju)과 장마전선(Station front)에서 많고, 산악형(MAT)은 북쪽으로 통과하는 저기압과 태풍(Typhoon)에서 탁월하다. 국지적 기층불안정에 의한 경우는 예상외로 적었다.

<Table 4> Synoptic condition of each pattern.

Synoptic condition Pattern	Cyclone passed by north of Cheju	Cyclone passed by south of Cheju	Station front	Typhoon	Instability	Total	Rate (%)
S A T	8	9	5	1	2	25	41
S C T	1	2	2	-	1	6	10
N A T	1	2	2	2	1	8	13
M A T	11	2	1	7	-	21	34
Others	-	-	-	-	1	1	2
Total	21	15	10	10	5	61	100



IV. 집중호우 사례(CASE) 분석

1. 사례선정

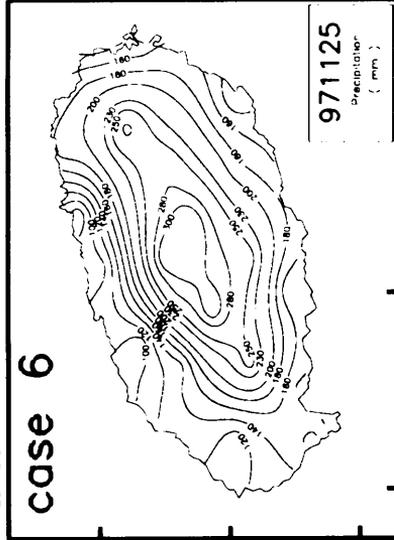
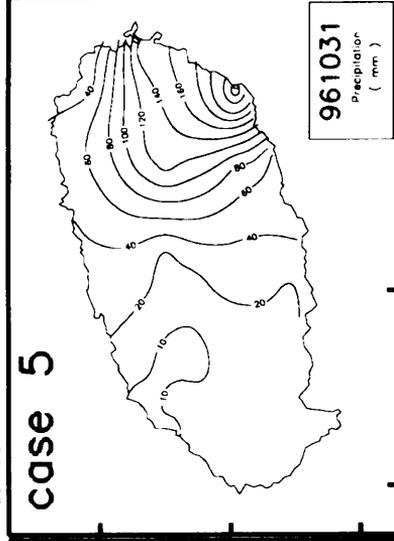
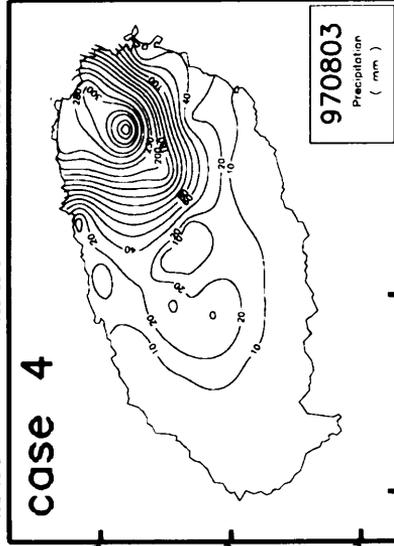
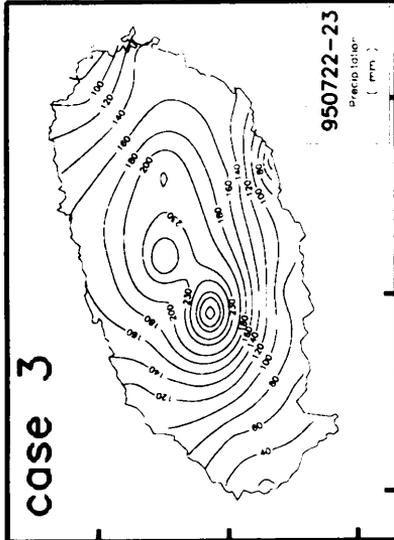
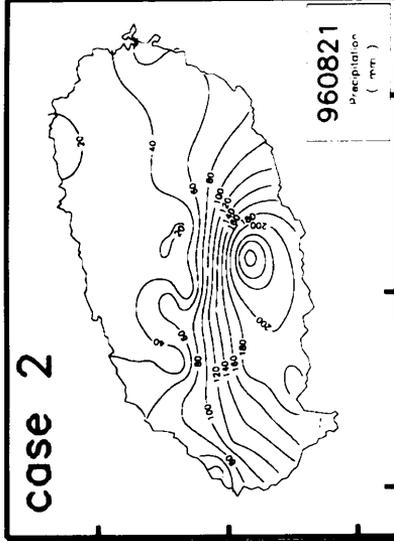
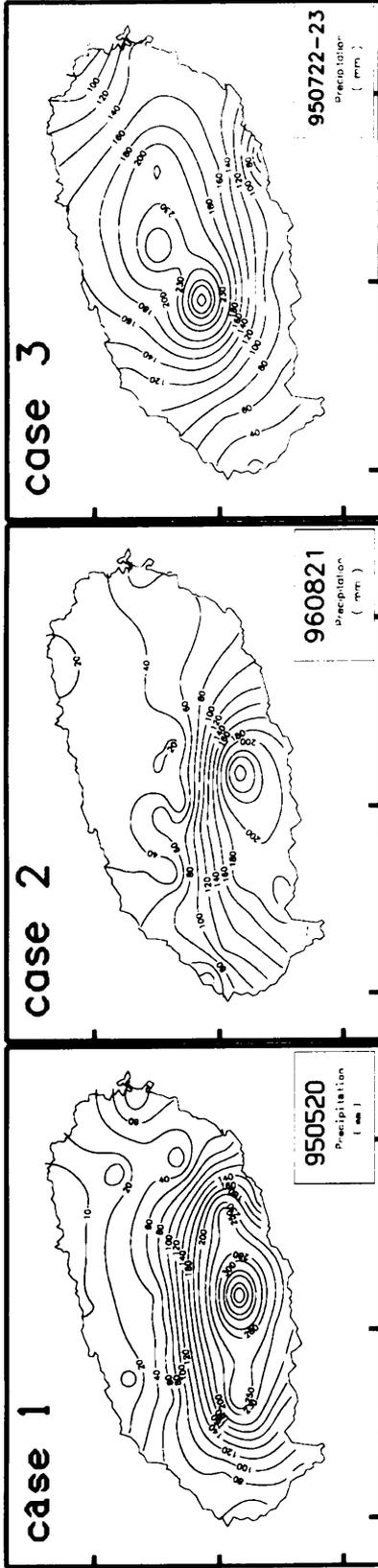
제주지방의 집중호우에 대한 국지적 특성을 파악하기 위하여 앞장에서 언급한 총 61회 사례 중 가장 최근(1995. 1~1997.12)에 발생한 6개의 사례를 선정하였다. 사례선정 기준은 (1)강수 분포 유형별, (2)종관조건별, (3)계절별 대표성을 갖는 일강수량 250 mm이상의 강한 집중호우를 대상으로 하였다. Table 5는 선정된 6개 사례들의 일련번호와 요약이며 Fig. 7은 일강수량 분포도이다. 다만 CASE 3은 태풍의 영향이 2일간 지속되었기 때문에 2일간의 누적 강수량으로 분포도를 그렸다.

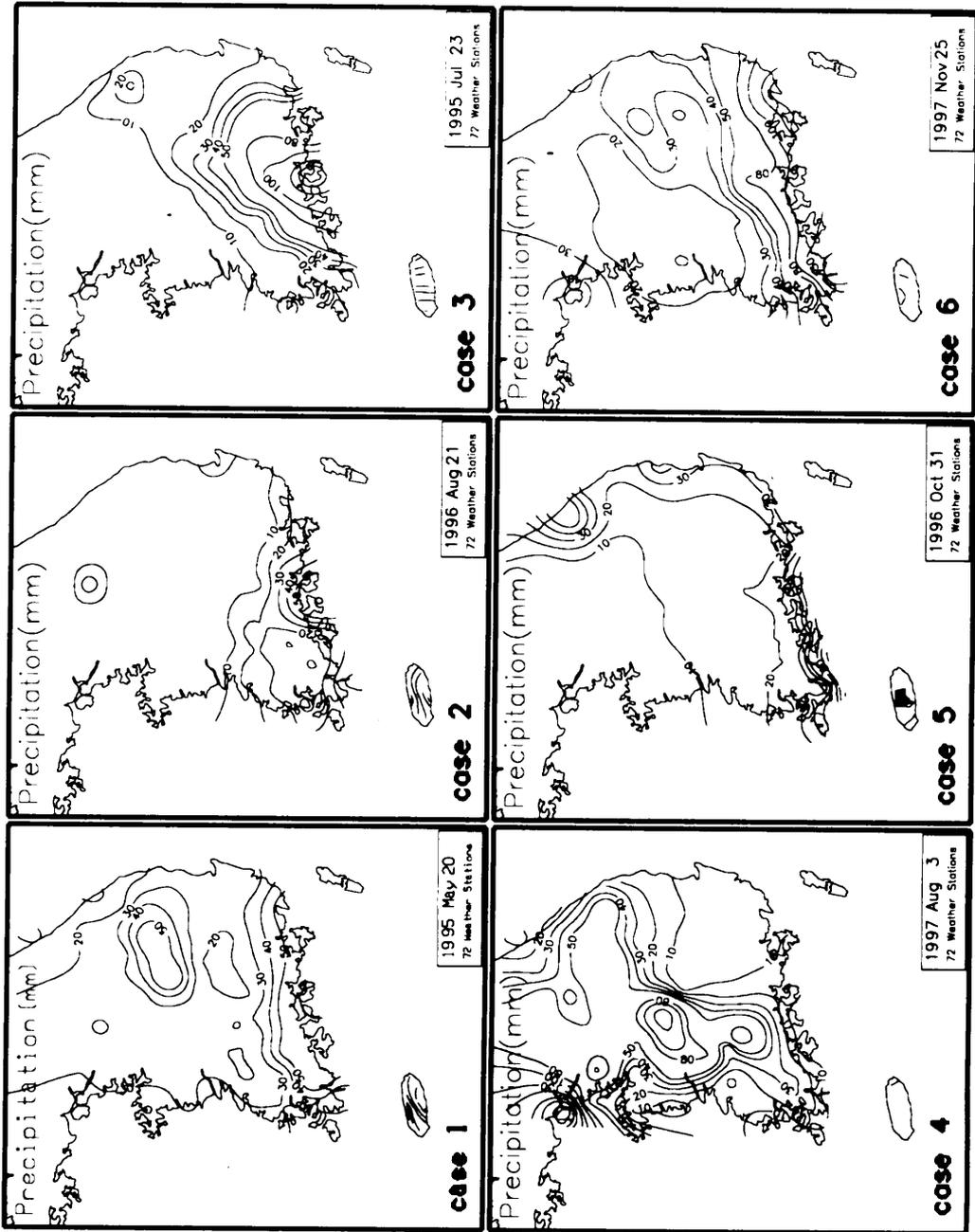
<Table 5> Summary of the eash CASE.

CASE	Date	Station of max precipitation	Max precipitation	Duration (hour)	Pattern	Synoptic system
1	'95. 5. 20	Tonnaeko	456 mm	18(02~19h)	SAT	Cyclone
2	'96. 8. 21	Tonnaeko	321 "	15(01~15h)	SAT	"
3	'95. 7. 22~23	1100goji	373 "	About 30	MAT	Typhoon
4	'97. 8. 3	Songdang	459 "	6(15~20h)	NAT	Meso- β
5	'96. 10. 31	Pyoson	271 "	15(07~21h)	SCT	Cyclone
6	'97. 11. 25	Songpanak	332 "	14(01~14h)	MAT	"

2. 종관 분석(Synoptic Analysis)

각 사례별 제주도 지방에 내린 강수량(Fig. 7)은 각 사례의 해당일에 우리나라 전국 일강수량 분포(Fig. 8)와 비교하여 상대적으로 많은 차이를 보이고 있다.





따라서 국지적인 특성에 의한 집중호우임을 개략적으로 우선 파악할 수 있으며, 그러한 결과를 더욱 규명하기 위하여 Fig. 9의 지상일기도(Surface weather chart)와 Fig.10, Fig.12, Fig.14와 같은 상층·저층제트류(Upper-level·Low-level Jet Stream), 태풍을 포함한 저기압의 이동경로 그리고 혼합비(850 hpa과 700 hpa)의 수평분포도 등 종합분석을 복합적으로 나타냈다.

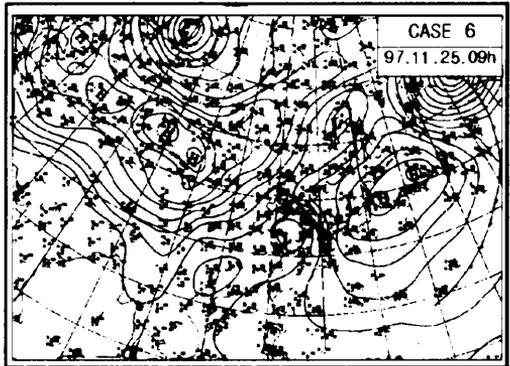
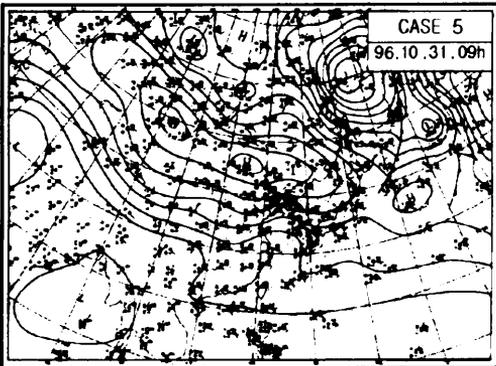
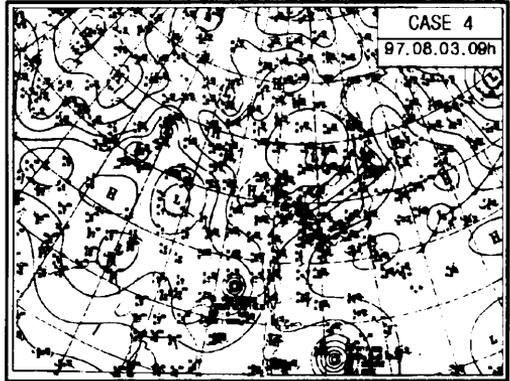
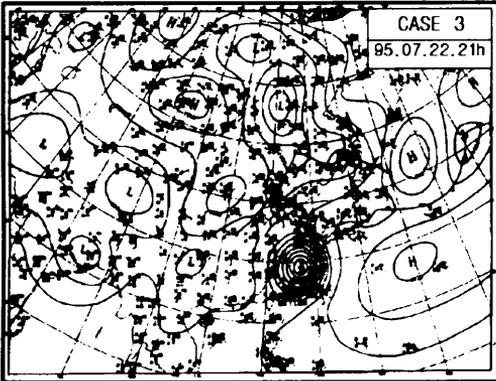
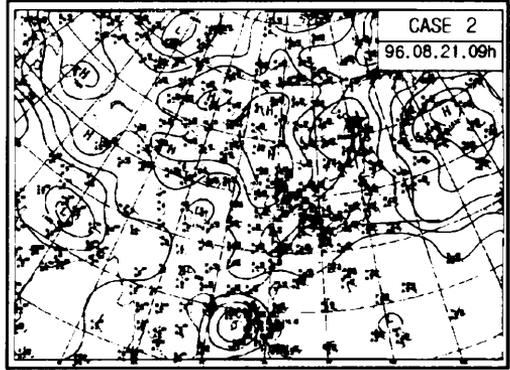
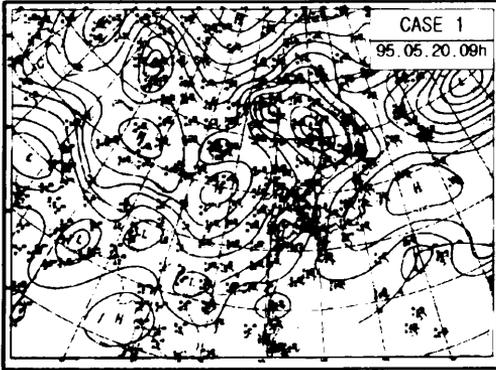
1)CASE 1

CASE 1은 서쪽에 한랭한 대륙성고기압(continental Polar, cP), 동쪽에 북태평양 고기압(maritime Tropical, mT)이 위치하면서 남북으로 길게 기압골이 형성(Fig. 9 CASE 1)되어 우리나라 남부해안 지방을 저기압이 통과하였고, 상층제트와 저층제트 사이에 850 hpa ($W \geq 11.0 \text{ g/kg}$)과 700 hpa ($W \geq 7.0 \text{ g/kg}$)의 습윤한 공기가 빠르게 제주 부근으로 확장하면서 습설(濕舌 ; Moisture Tongue)구조를 하고 있다(Fig.10 CASE 1). 강수량은 돈내코를 중심으로 서귀포, 상천(Sangchon), 수망(Sumang) 등 남부지역 전반에 걸쳐 200 mm이상 지속적으로 내렸다. 특히 돈내코에서 10~13시 사이 시간당 평균 약 60 mm 강수량을 보였다(Fig.11 CASE 1).

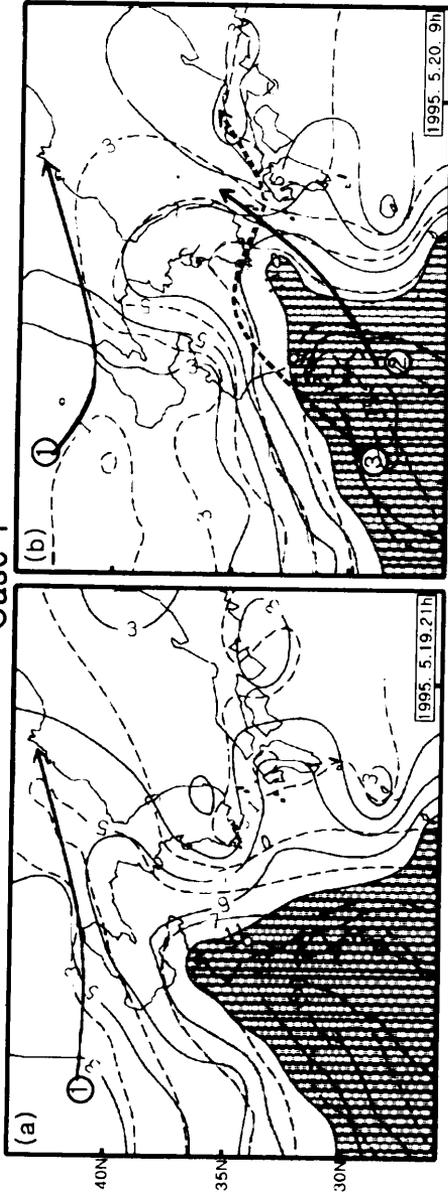
2)CASE 2

CASE 2는 CASE 1과 비슷한 기압 배치를 하고 있으나 상대적으로 기압골이 덜 발달하였고, mT확장이 훨씬 더 미약(Fig. 9 CASE 2)하여 저층제트는 뚜렷하지 못하며, 제주도 북쪽으로 지나가는 저기압은 우리나라 남부지방을 통과하였다. 제주도를 중심으로 850 hpa의 국지적 극대 혼합비 값($W \geq 13.0 \text{ g/kg}$)이 핵(Core)을 이루고 있고, 700 hpa에서는 동서로 길게 뻗어 있는 습설 모양을 하면서 폭넓게 확장하고 있다(Fig.10 CASE 2). 강수량은 돈내코를 중심으로 서귀포, 상천,안덕(Andok), 서광(Sogwang) 등 남·남서부지역에 평균 약 200 mm이상 비교적 단속적으로 내렸다(Fig.11 CASE 2).

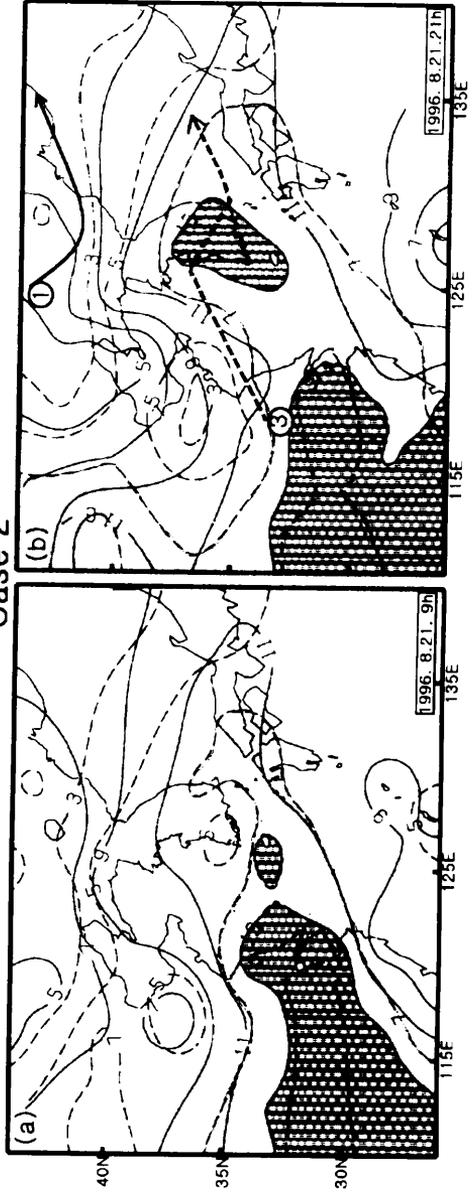
CASE 1과 2의 공통적 특징은 강수시작 약 6시간전 우리나라 남부지역에 강한 건조공기 핵(Dry air Core)이 확장하는 습윤공기와 제주도 북쪽 부근을 경계로 확실히 구별된다는 것이다. 다만 CASE 1은 850·700 hpa층 모두에서 나타났고



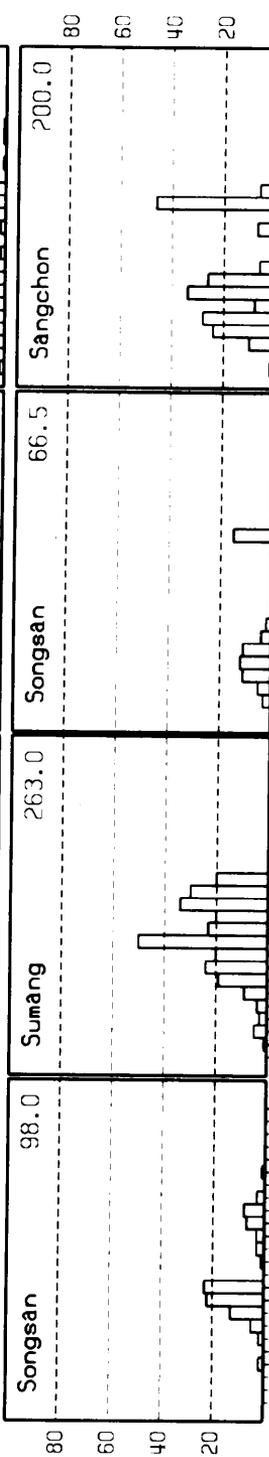
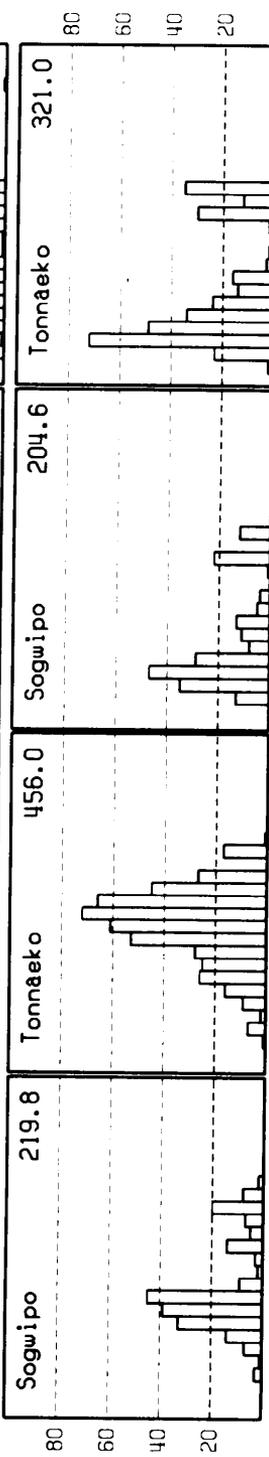
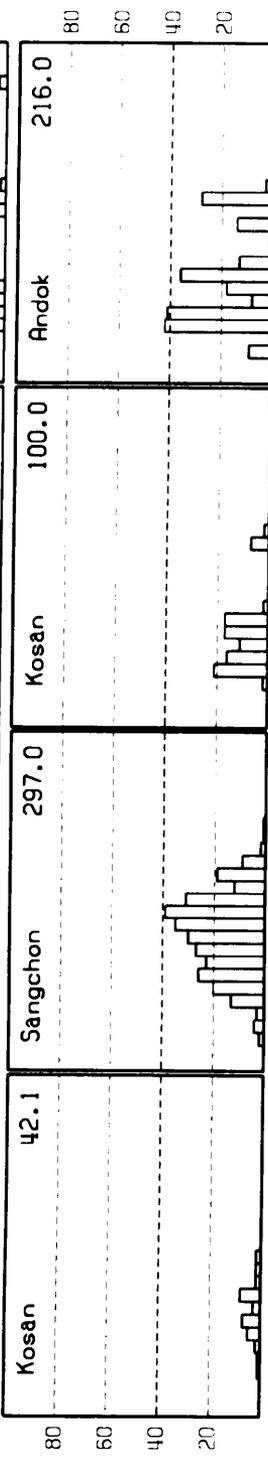
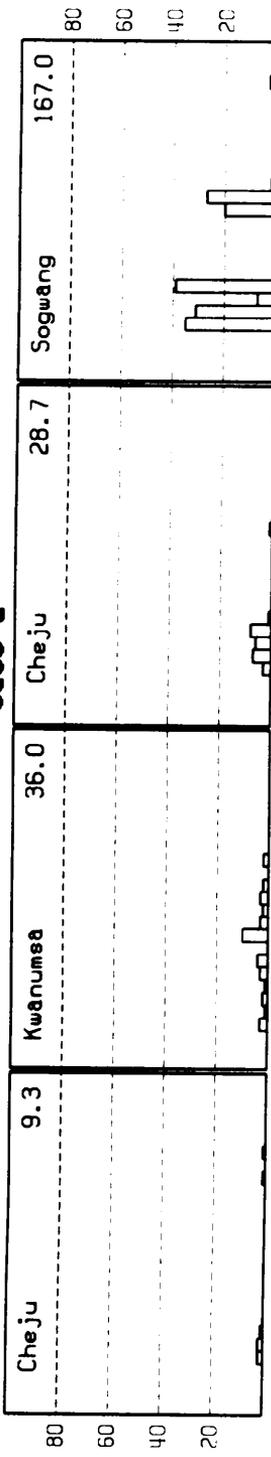
Case 1



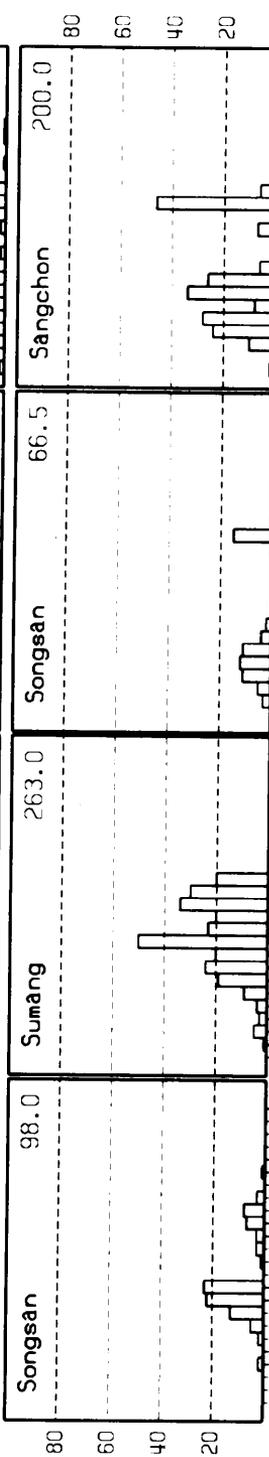
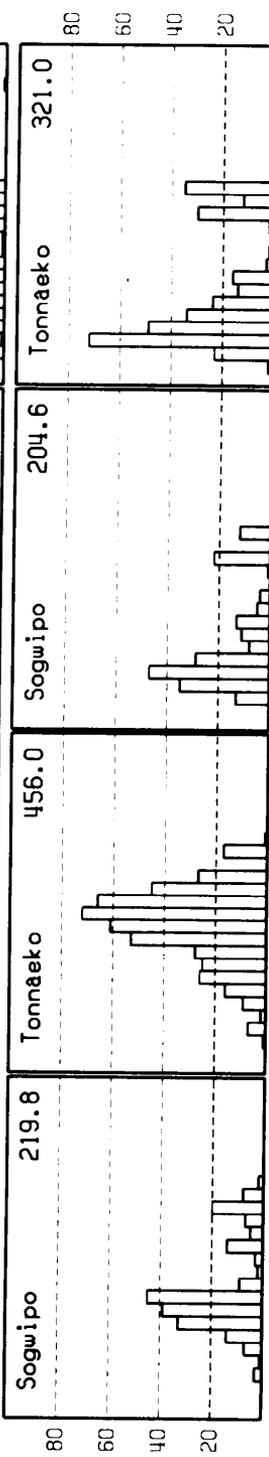
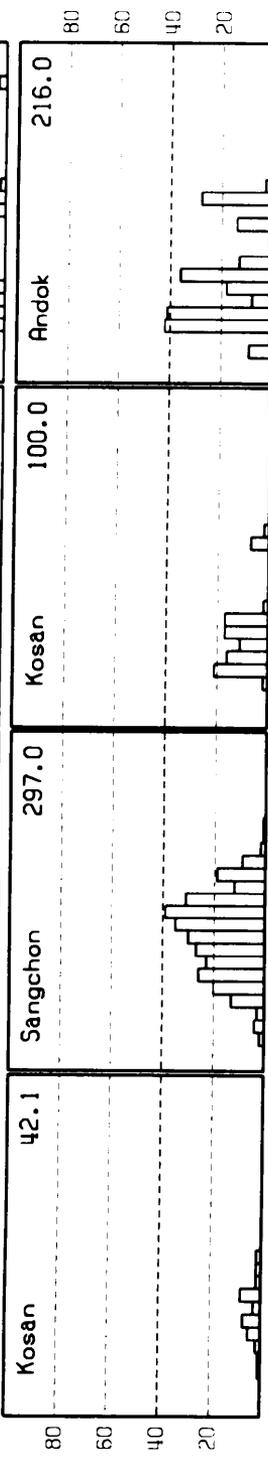
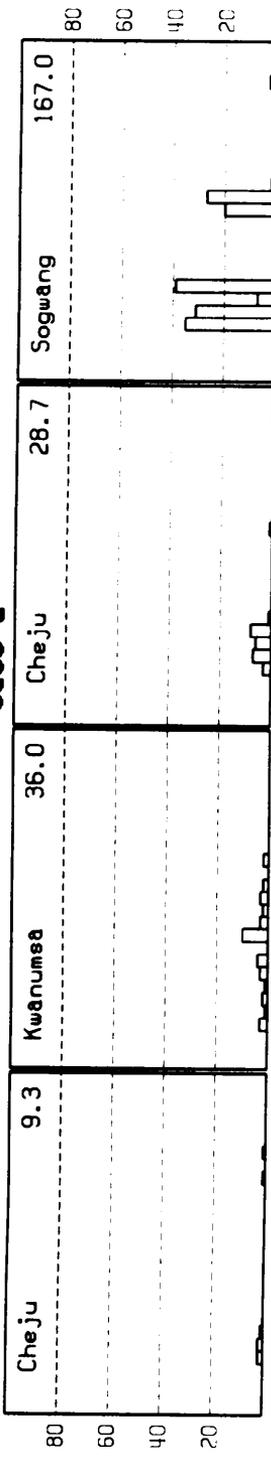
Case 2



case 1



case 2



(Fig.10 CASE 1(a)), CASE 2는 700 hpa에서만 뚜렷하다(Fig.10 CASE 2 (a)).

한편 두 사례 모두 한라산을 중심으로 남부지역에 강수량이 집중적으로 내린 전형적인 남부형(SAT)으로 저기압이 가장 근접하게 통과한 우리나라 남부지방의 강수량(80 mm미만)(Fig. 9 CASE 1, 2)과 약 200 mm이상의 큰 차이가 나면서 국지적 집중호우임을 잘 보여주고 있다.

3)CASE 3

CASE 3은 북상하는 태풍과 서해상으로 접근하는 기압골(Trough) 사이에 제주도가 위치(Fig. 9 CASE 3)하면서 습윤한 공기($W \geq 3.0 \text{ g/kg}$ (850 hpa), $W \geq 7.0 \text{ g/kg}$ (700 hpa))가 제주도를 중심으로 거의 정체하고 있고, 제주도 부근을 경계로 동중국해상의 건조한 공기와 동서로 구별된다(Fig.12 CASE 3). 강수량은 약 300 mm에 가까운 1100고지(1100goji)를 비롯 중산간 지역(Mountain Area)에 약 150 mm이상 내렸다(Fig.13 CASE 3).

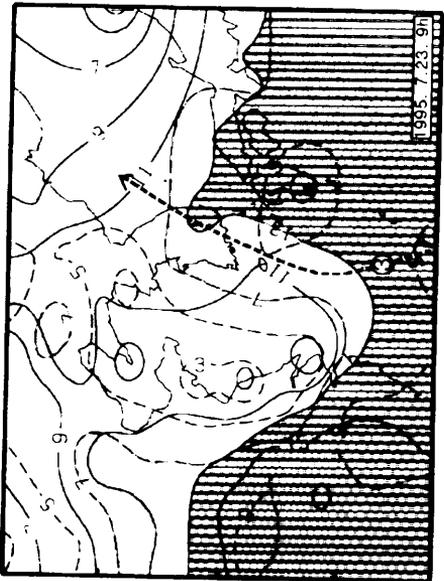
4)CASE 4

CASE 4는 뚜렷한 대규모 운동 없이 제주도 북부지역의 선홀리(Sonhul2), 김녕(Kimnyong), 구좌(Kujwa)와 동부지역 일부(송당(Songdang), 교래(Koyrae))에서 시간당 80 mm이상의 매우 강한 비가 불과 약 4시간동안 150~400 mm이상(Fig.13. CASE 4) 내린 Meso- β (20~200 km)급의 중규모 대류(Convection)운동으로 국지적 특성이 제일 강한 사례이다. 우리나라 북쪽으로는 기압골이 통과하고 있으나 제주도와는 거리가 많이 떨어져 있으며, 남쪽으로는 mT가 확장하면서 제주도는 그 가장자리에 위치하고 있어 남서류가 강하게 유입되고 있다(Fig. 9 CASE 4). 반면 우리나라 남부지방을 경계로 북쪽의 건조한 공기와 남쪽의 습한 공기가 확실히 구분된다(Fig.12 CASE 4 (b)).

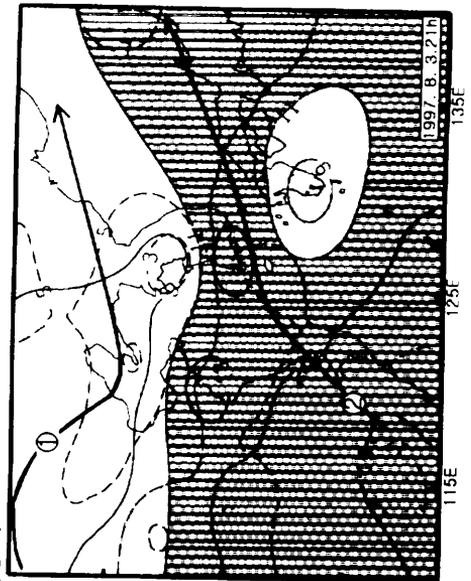
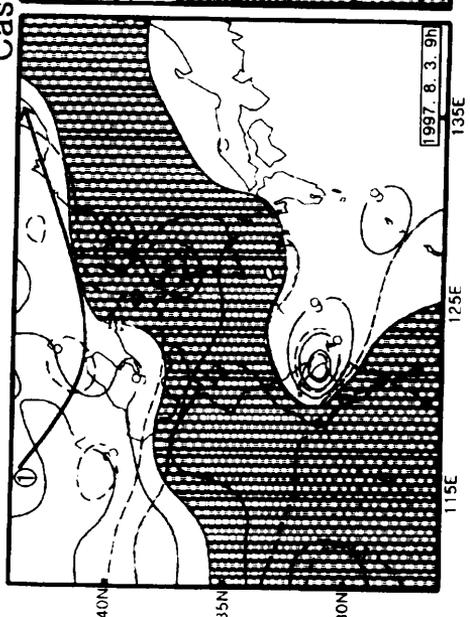
5)CASE 5

CASE 5는 cP가 확장하기 시작하는 동절기 초기에 제주도 남쪽으로 통과하는 저기압의 영향으로 집중호우가 내렸다. 즉 남중국해에서 형성된 기압골이 계속

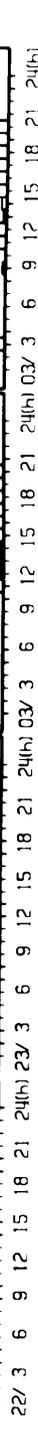
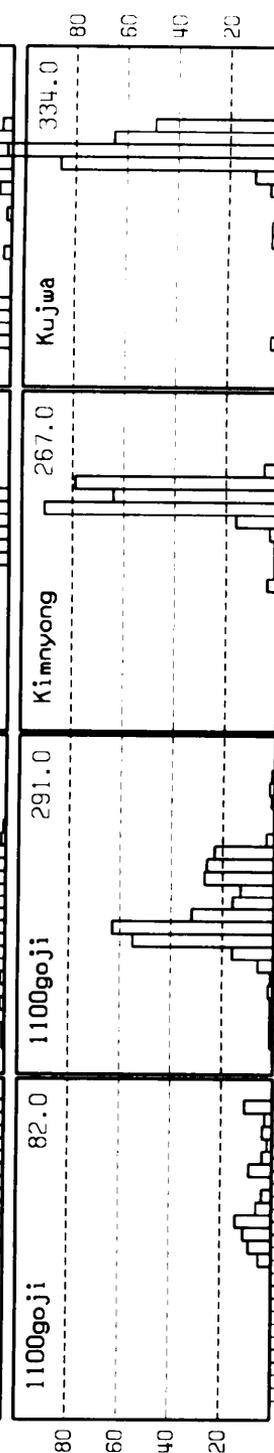
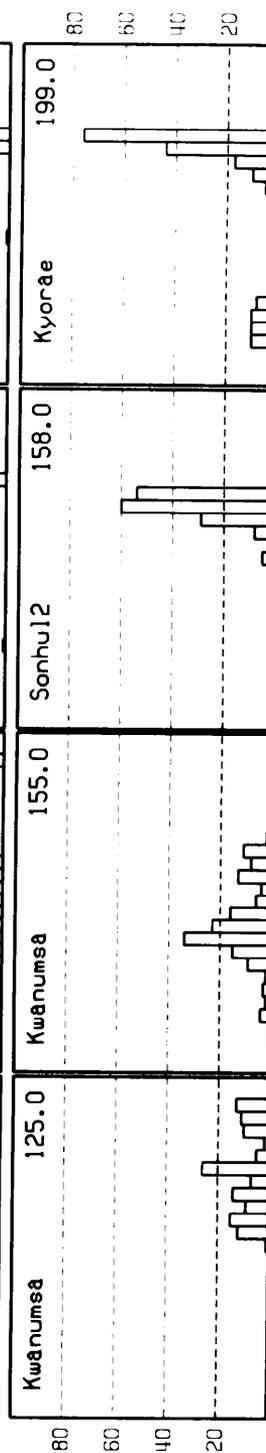
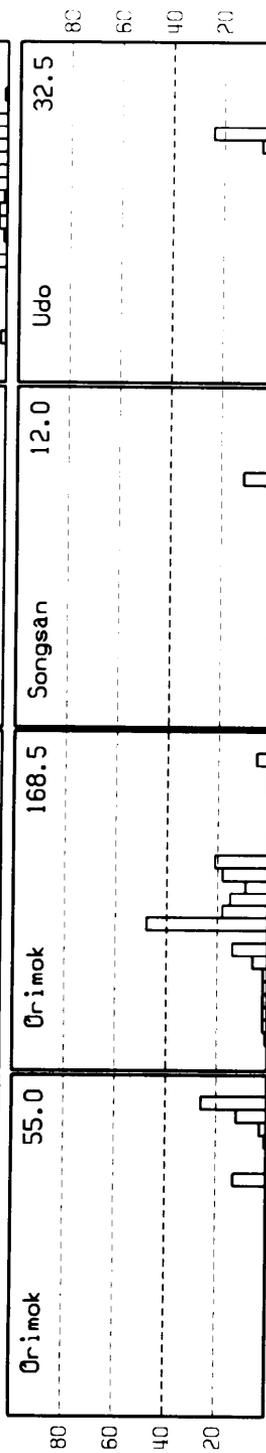
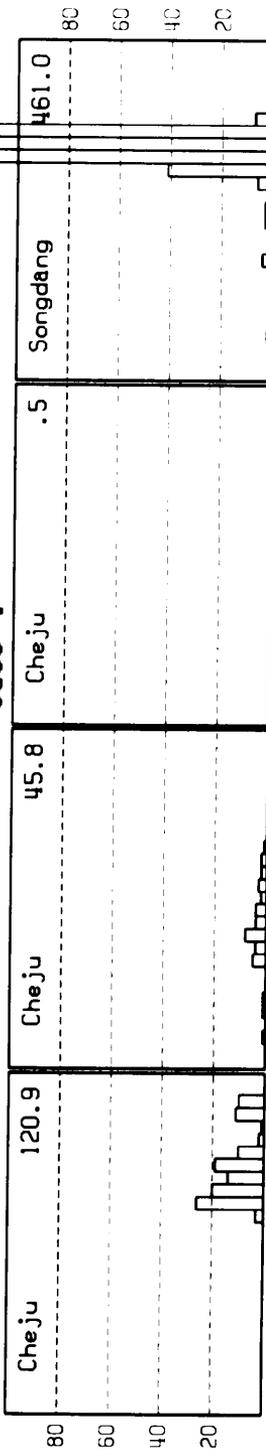
Case 3



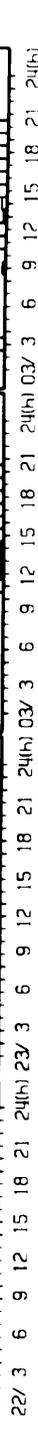
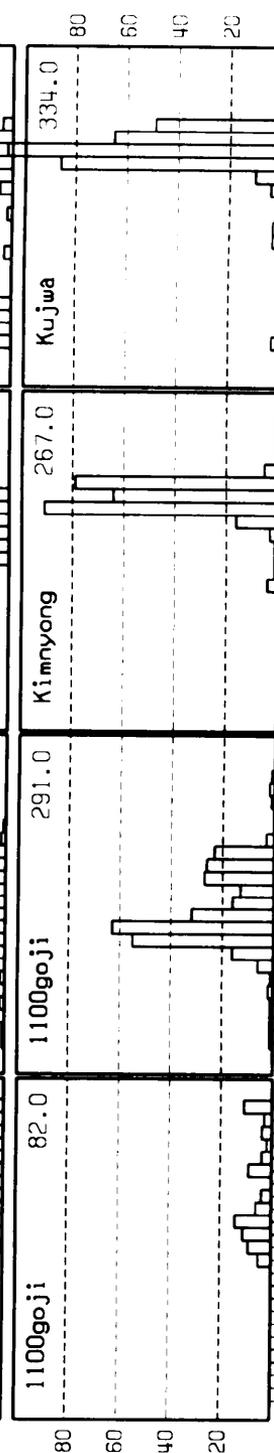
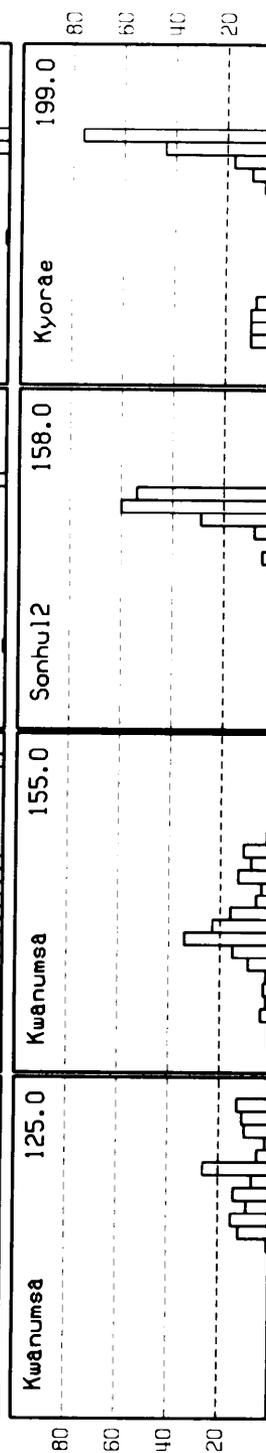
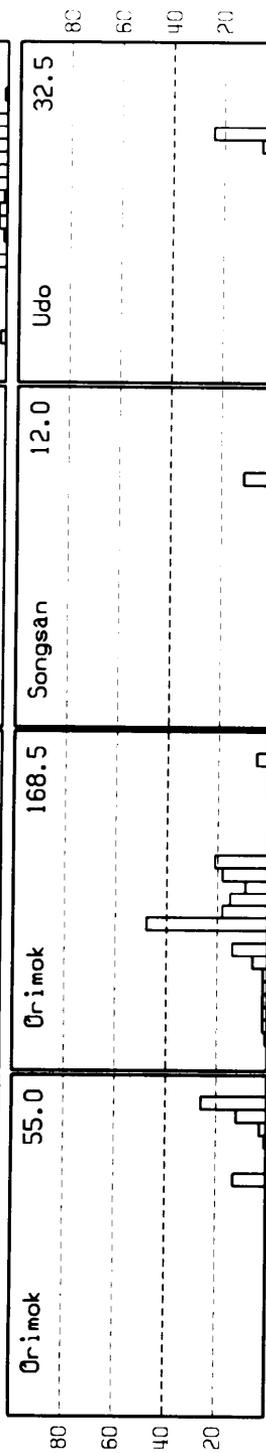
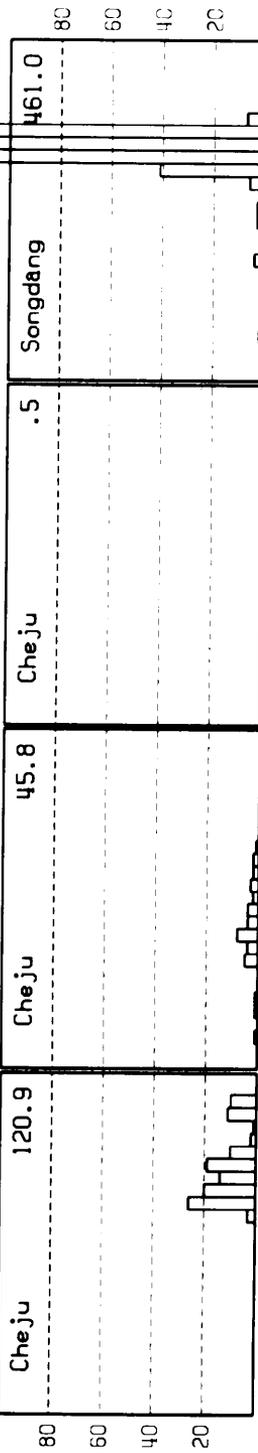
Case 4



case 3



case 4



발달(Fig. 9 CASE 5)하면서 제주도 남쪽으로 접근하였으며 저층 제트는 미약하다. 혼합비의 특징은 850 hpa에서는 9.0 g/kg이 전날 21시보다 조금 북상하였고, 700 hpa은 5.0 g/kg이 빠르게 확장하여 Moisture tongue 모양이 뚜렷하다(Fig.14 CASE 5). 강수량은 남동부 해안 지역인 성산, 표선에서 150~270 mm의 강수량(Fig.15 CASE 5)을 기록하였고, 전국적으로 남부 해안지역과 영동지방에서 내린 20~80 mm의 강수량(Fig. 8 CASE 5)과 비교할 때 국지적 특성이 강하다.

6)CASE 6

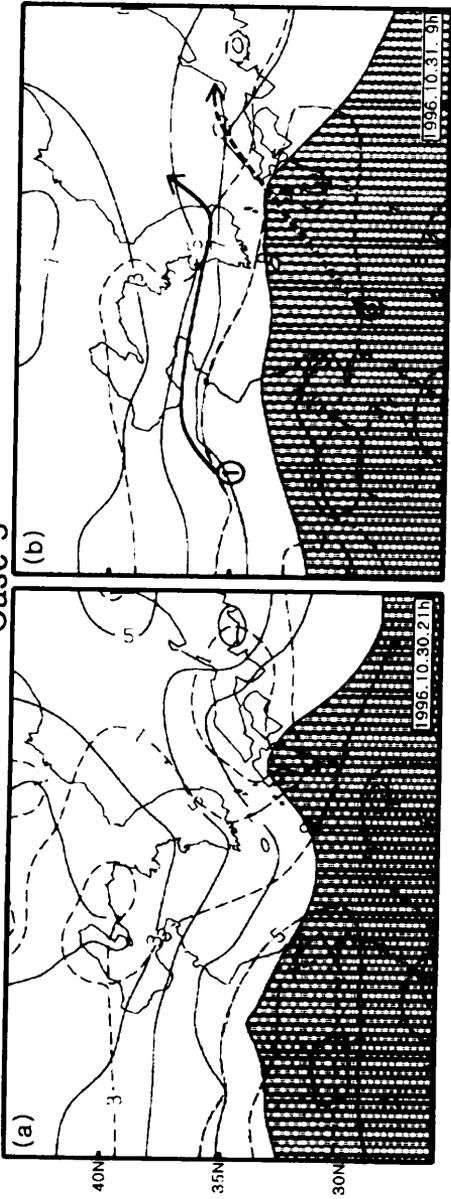
CASE 6은 CASE 1의 기압 배치와 매우 흡사하다. cP가 확장하고 남중국 쪽의 저기압이 발달하면서 제주도 서해상을 경유하여 북쪽으로 통과(Fig. 9 CASE 6)하였다. 상층 제트가 제주도 부근 상공까지 남하하였고 하층 제트는 여름형 패턴으로 매우 강하게 유입되면서 상·하층 제트가 제주도 부근 동쪽해상에서 교차되고 있다. 따라서 제주도는 그 안에 갇혀있는 모양으로 850 hpa 혼합비가 핵을 형성하고 있다(Fig.14 CASE 6 (b)). 강수량은 성판악의 최고 332 mm를 비롯하여 중산간 지역에서 평균 300 mm이상의 집중호우(Fig.15 CASE 6)가 내렸으며 전국적으로 남부 해안지역에서 내린 80~130 mm의 강수량(Fig. 9 CASE 6)과 큰 차이를 보이면서 역시 지역적 특성이 분명하다.

3. 중규모 분석(Mesoscale Analysis)

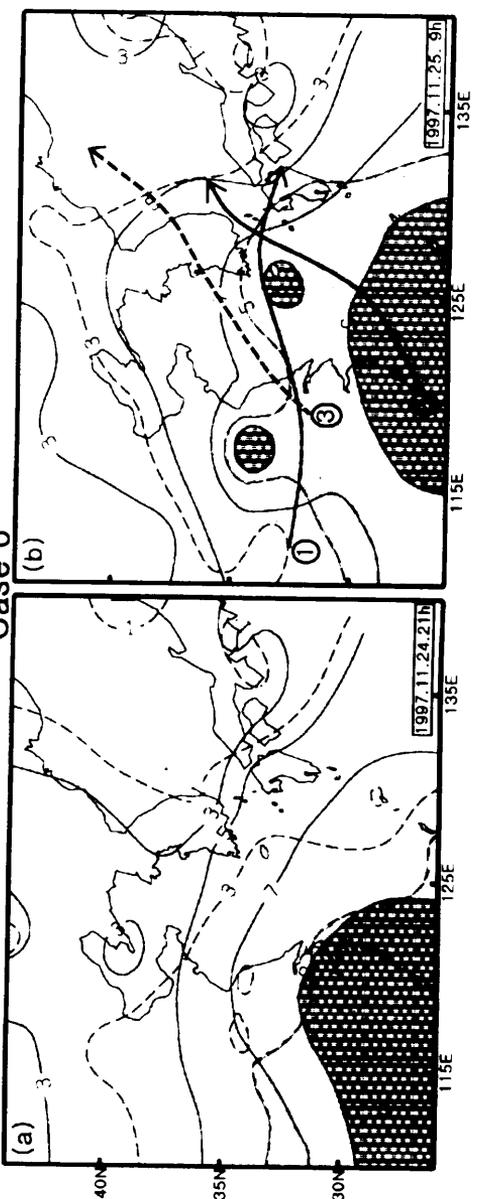
1)지형(Topography)특성

제주도 지방은 대칭형 원추모양의 한라산(1950 m)을 중심으로 남북경사도(1/6~1/9)가 급하고, 동서(1/20~1/18)는 완만하다. 특히 돈내코를 중심으로 남남동지역은 경사도가 제일 가파르다. 또한 “오름”이라 불리는 기생 화산체들이 약 360여개 산재하고 있다. 특히 동쪽사면을 따라 높은오름(405 m), 거문오름(718 m), 성널오름(1215 m) 등 평균 약 300~700 m의 비교적 높은 오름들이 많이 있다(Fig. 2).

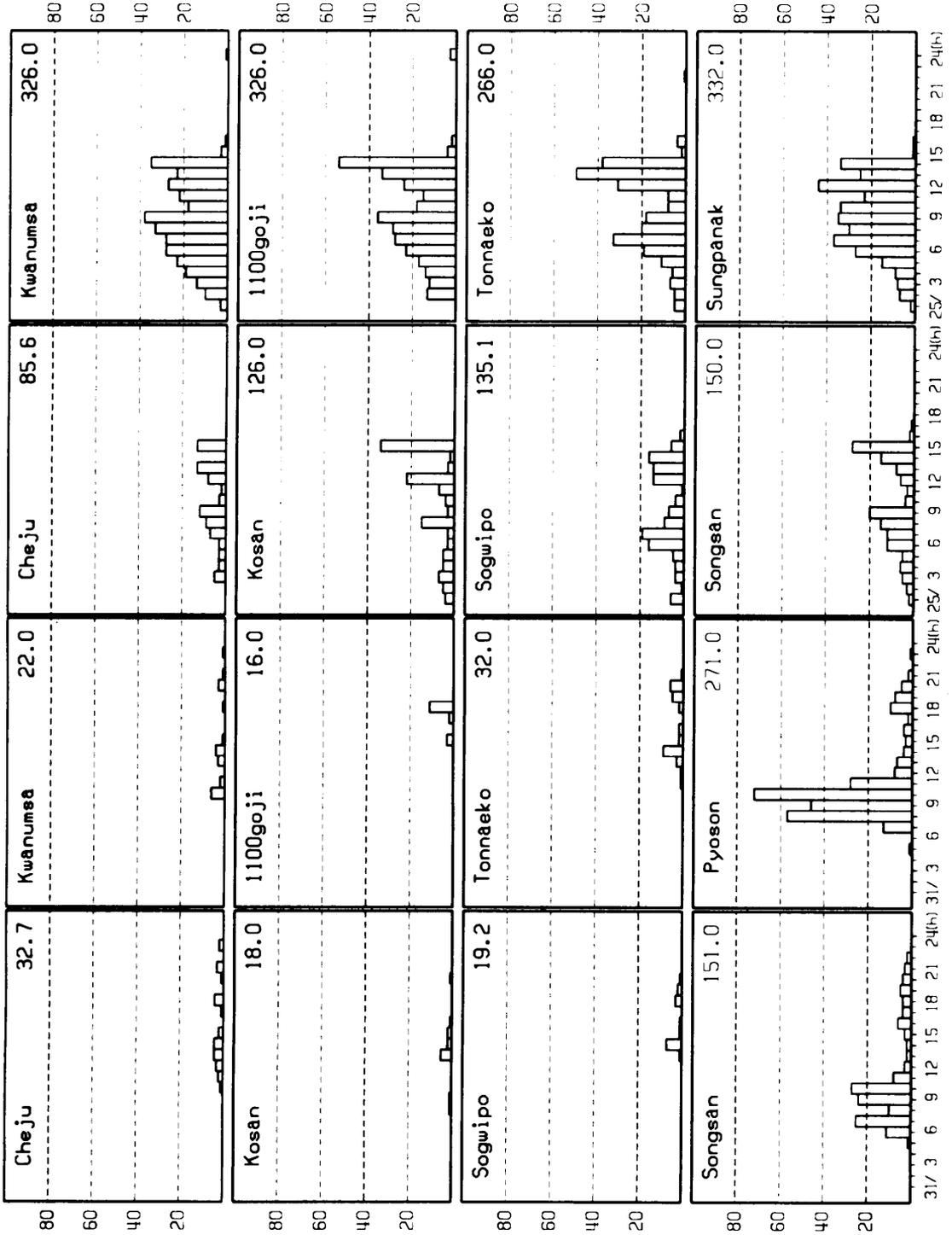
Case 5



Case 6



case 5



case 6

이러한 지형 특성 때문에 풍상층에서 강제상승의 산악효과는 매우 탁월하다. 반면 강제 상승한 공기는 원추형 산악구조 때문에 쉽게 이류(Advection)가 될 가능성도 배제할 수 없다.

2) 대기선도(Skew-T, log P diagram)

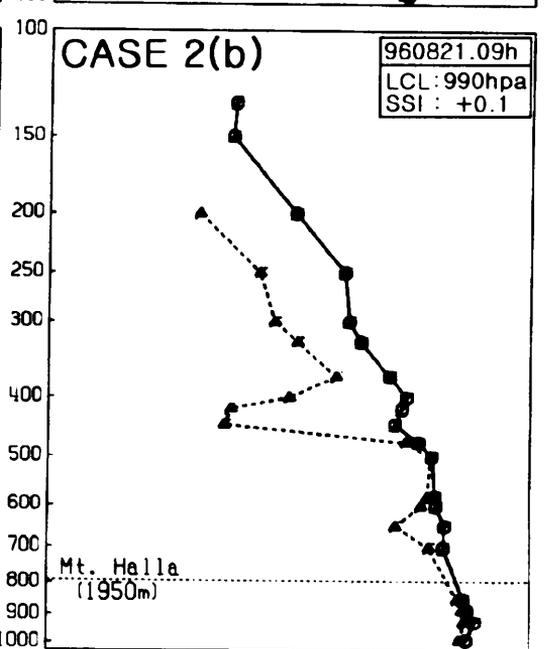
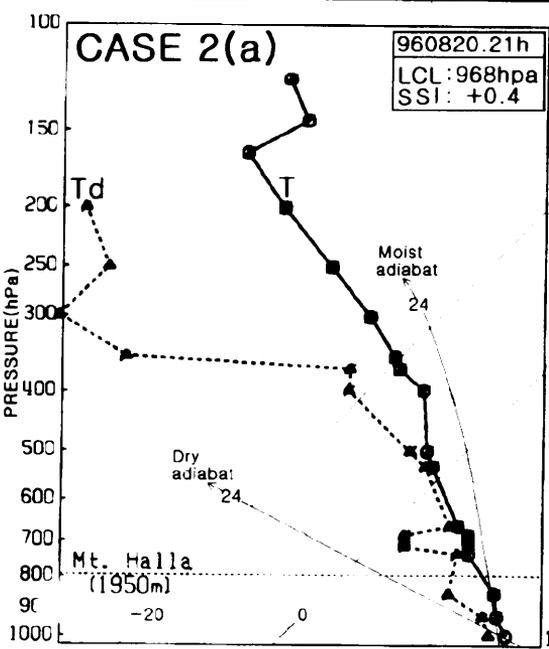
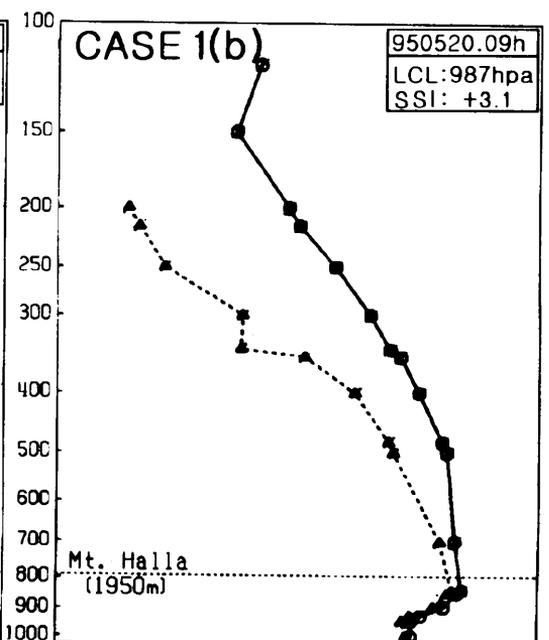
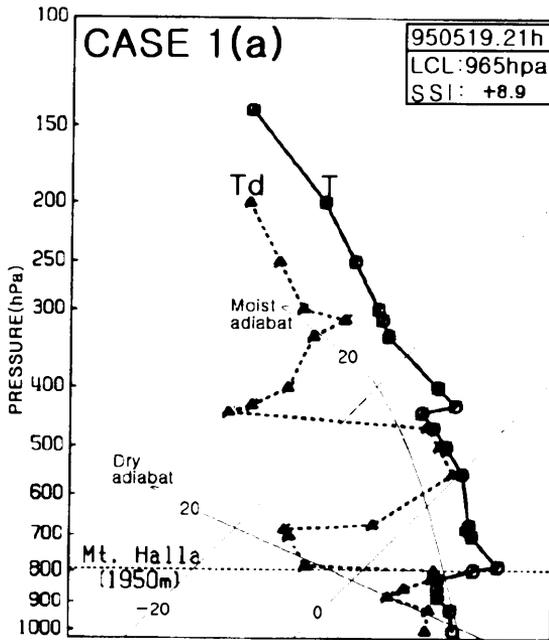
각 사례별 대기의 안정도를 파악하기 위하여 Fig.16~Fig.18과 같이 각층의 수직 기온(Temperature, T)곡선을 건조단열선(Dry adiabat) 또는 습윤단열선(Moist adiabat)의 경사와 비교하여 노점온도(Temperature of Dewpoint, TD)의 포화(Saturation) 여부와 함께 안정도를 조사하였으며 안정도 지수인 쇼월터지수(Showalter Stability Index : SSI)를 구했다. SSI가 +3보다 작으면 약한 불안정(소나기 및 뇌우 가능성), 1부터 -2 범위이면 불안정(뇌우 가능성 급증), -3부터 -5 범위이면 강한 불안정(심한 뇌우 가능) 그리고 -6 이하이면 절대 불안정(토네이도 가능)으로 정의하고 있다.

(1)CASE 1

CASE 1은 Fig.16 CASE 1(a)와 같이 약 580~480 hpa층의 온도(T)곡선 감율이 건조단열선의 감율보다는 작고 습윤단열선의 감율보다는 크기 때문에 조건불안정(Conditional instability)이나 습도가 높아서 포화상태이므로 불안정이다. 또한 850~500 hpa에서의 SSI는 +8.9이지만 1000~850 hpa의 저층에서는 SSI가 +0.8로 불안정하여 대류가 활발함을 알 수 있다. 반면 불안정한 층위로 한라산과 480 hpa 부근에 강한 역전층(Inversion layer)이 각각 존재하면서 안정한 상층이 불안정한 공기의 연직 운동을 억제시키고 있다. 강수가 가장 왕성한 20일 09시에는 Fig.16 CASE 1(b)와 같이 한라산 아래 저층에서 매우 포화되었고, 전선역전층(Frontal inversion layer)이 존재하면서 약 700 hpa까지 전반적으로 불안정하다. 따라서 Fig.10 CASE 1에서 보았듯이 건조한 700 hpa층 부근에서 빠른 이류가 있다.

(2)CASE 2

CASE 2는 700 hpa 부근과 약 500 hpa 위로 역전층이 있고 그 아래층에



서 각각 불안정하다. 850~500 hpa층의 SSI는 +0.4로 불안정이고 1000~850 hpa의 저층에서 SSI는 +1.1로 역시 약한 불안정이다(Fig.16 CASE 2(a)). 또한 700 hpa부근의 역전층은 미약하지만 21일 09시까지 지속적으로 유지되고, 그 아래층에서는 포화 상태의 불안정(Fig.16 CASE 2(b))이다.

(3)CASE 3

CASE 3은 태풍이 제주도 남쪽 약 300 km 해상(기상청, 1996)에 위치한 22일 21시에 대기 안정도가 불안정하며 SSI는 -1.6이다(Fig.17 CASE 3(a)). 또한 남동쪽 약 100 km까지 근접한 23일 09시에는 전반적으로 상층 200 hpa까지 조건 불안정한 상태(Fig.17 CASE 3(b))이다. 그러나 태풍은 상층 200 hpa까지도 강한 상승류가 존재하며 자체의 메커니즘이 압도적으로 탁월하기 때문에 대기의 안정도 분석은 그렇게 중요하지 않다.

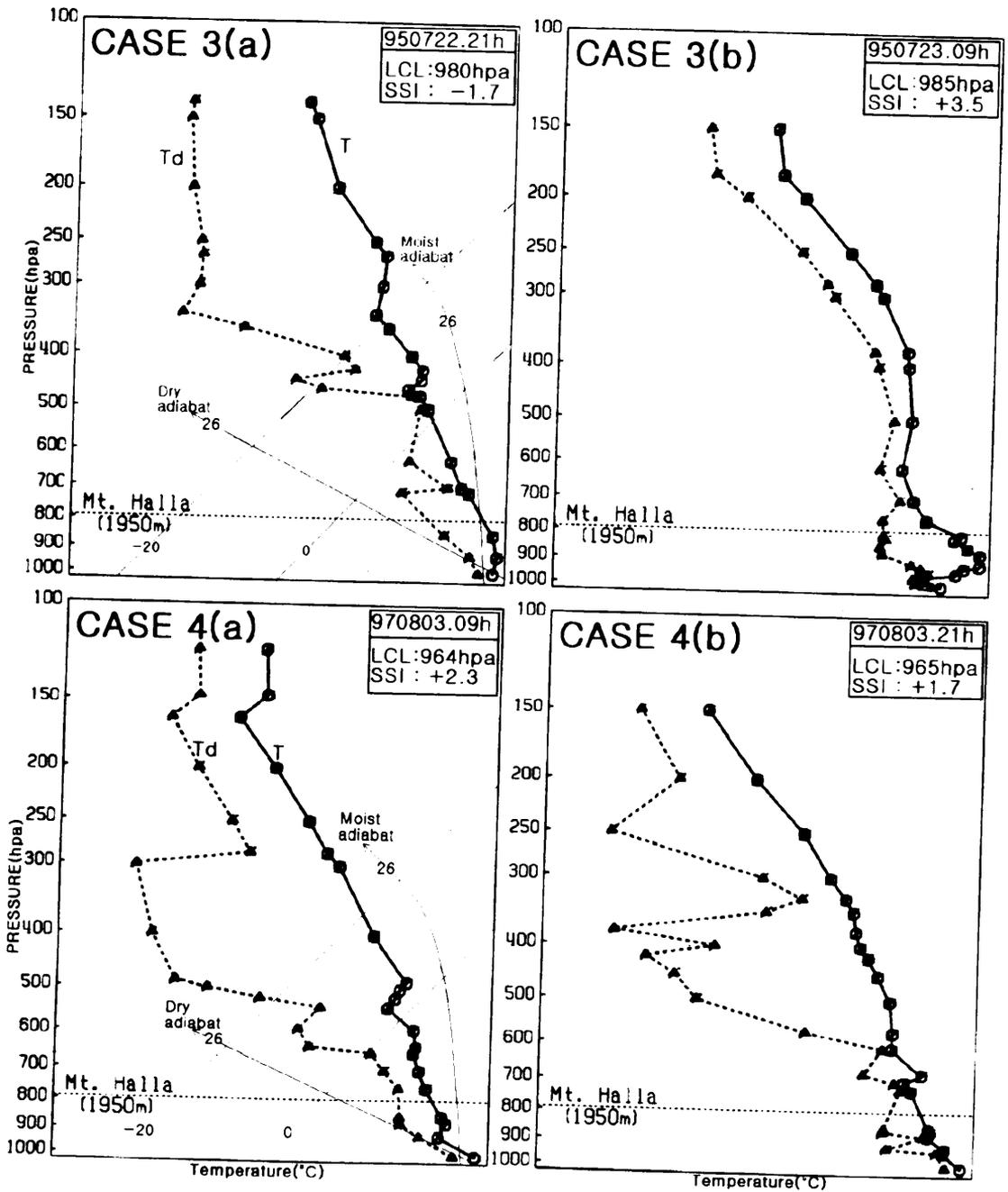
그러나 CASE 3에서 주목할 사항은 북부지역인 제주, 조천(Chochon), 향파두리(Hangpaduri), 관음사(Kwanumsa), 어리목(Orimok) 등에서 22일 12~24시까지 평균 약 100 mm/day 이상의 강수량을 나타내며 북부형(NAT)의 분포를 하고 있다(Fig.18 (a)). 이 때 태풍 위치는 22일 09시에 약 600 km해상에 있었고, 대기 안정도는 850~500 hpa의 SSI가 -0.3, 1000~850 hpa의 저층 SSI는 -1.0으로 불안정하며 다음의 CASE 4와 매우 비슷한 대기 구조를 하고 있다(Fig.18 (b)).

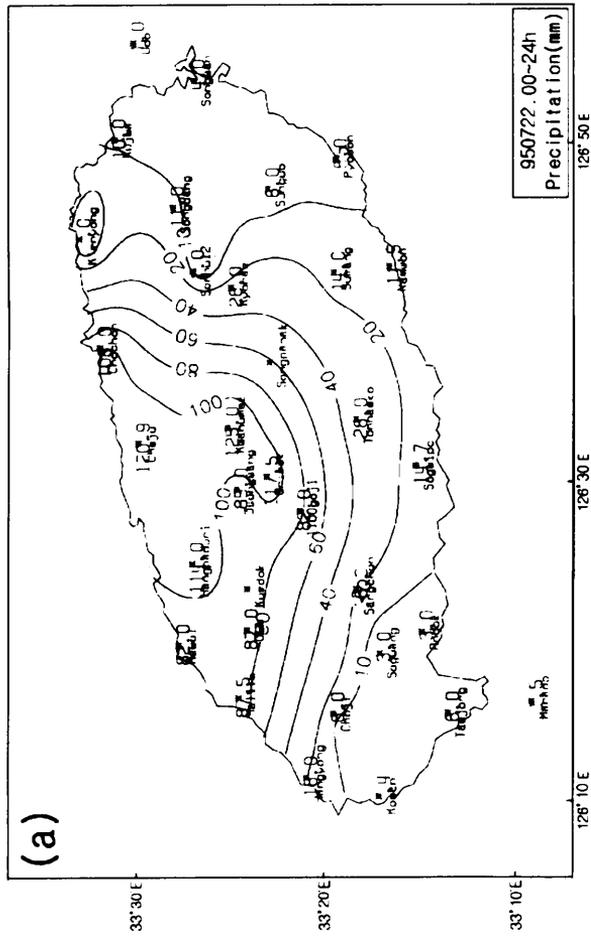
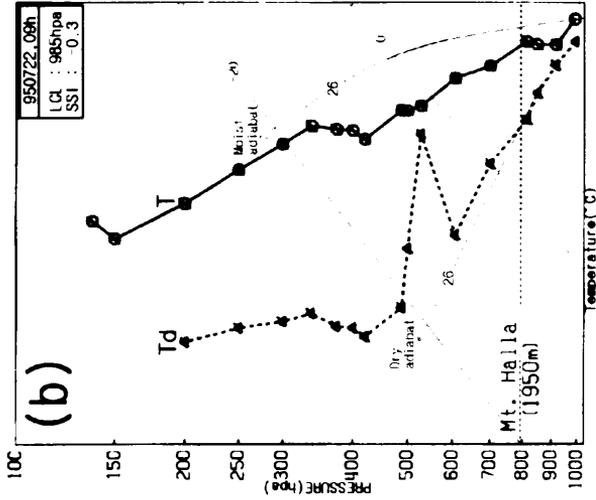
(4)CASE 4

CASE 4의 대기 안정도는 3일 09시, 21시의 850~500 hpa의 SSI가 각각 +2.3, +1.7로 약한 불안정이고, 1000~850 hpa의 저층에서 SSI는 각각 -1.6, -1.4로 저층에서 더 불안정하다. 따라서 약 600 hpa 부근 위로 건조한 공기의 안정 층이 불안정한 하층 공기의 상승 운동을 억제시키고 있다(Fig.17 CASE 4(a),(b)).

(5)CASE 5

CASE 5의 대기 안정도는 30일 21시와 31일 09시에 850~500 hpa의 SSI가 각각 +6.9, +5.3이고, 1000~850 hpa의 SSI는 각각 +0.1, -0.8로 저층에서는 불안정





하다. 강수 성숙기인 31일 09시에는 750 hpa층 아래에서 기온 감율이 습윤단열선의 감율보다 크면서 포화되어 있기 때문에 불안정이 강하다. 30일 21시에는 한라산 위로 약 800~700 hpa에 역전층이 있고, 그 위로 안정 층이 대류를 억제하고 있으며, 31일 09시에는 한라산을 지난 약 750 hpa 층위로 전선역전층이 두껍게 자리하고 있다(Fig.19 CASE 5 (a),(b)).

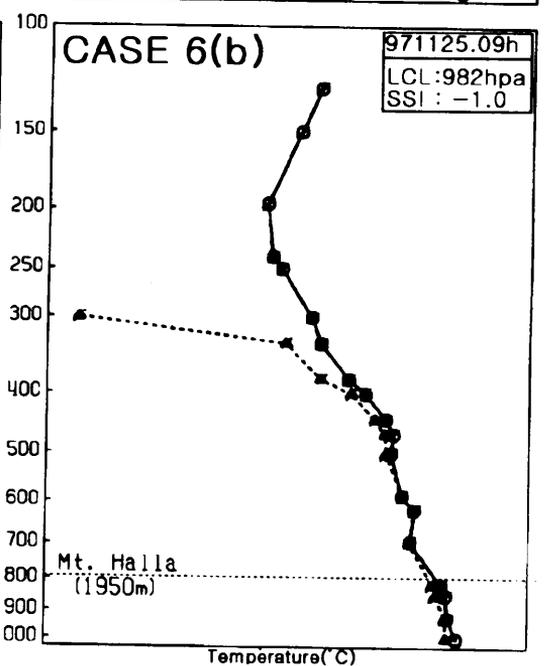
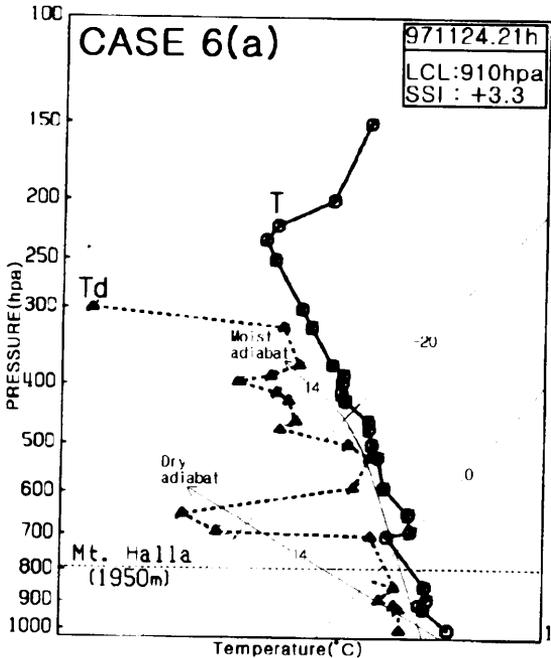
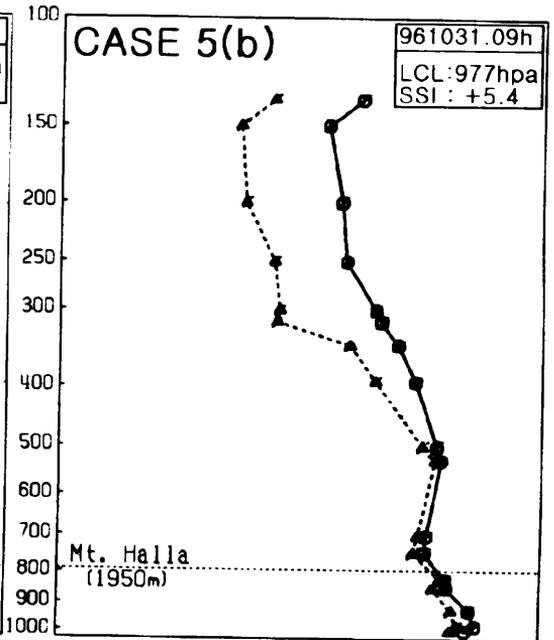
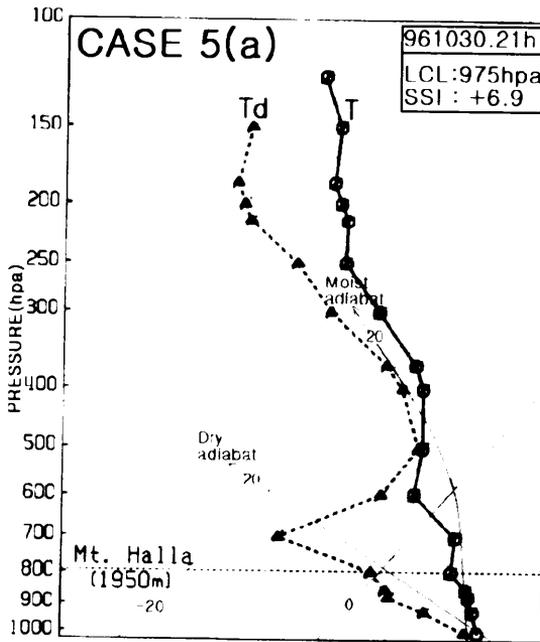
(6)CASE 6

CASE 6의 대기 안정도는 24일 21시에 SSI가 850~500 hpa에서 +3.3, 1000~850 hpa이 +0.1로 저층에서 불안정하다. 한라산을 지나 700 hpa 층에서 강한 역전층이 존재하여 그 아래층에서의 대류가 활발하다. 그러나 강수 성숙기인 25일 09시에는 SSI가 850~500 hpa에서 -1.0, 1000~850 hpa의 저층에서 -0.8로 불안정이 강하며 저층에서 약 340 hpa까지 크게 포화되어 있다(Fig.19 CASE 6 (a),(b)).

따라서 산악효과와 불안정으로 인한 공기의 대류 활동은 계속 부력을 받아 상승하는데 CASE 5는 한라산에서 억제 당하고, CASE 6은 한라산을 지나 700 hpa(약 3000 m)까지 대류가 활발할 수 있다. 두 사례 모두 강수 전날 21시의 건조한 구역(약 830~620 hpa)이 빠르게 이루어졌지만, 다음날 09시의 대류 활동 및 습윤 상태(Fig.19 CASE 5(b), CASE 6(b))는 CASE 5에 비하여 CASE 6이 더 높은 층까지 활발함을 보여주고 있으며, 그 원인은 역전층의 위치에 따라 구별된다고 생각된다.

2)수직단면도

각 사례별 바람(Wind), 혼합비(Water vapor mixing ratio : W) 그리고 온위(Water vapor mixing ratio : θ)의 수직 단면(Vertical cross section)을 고산(Kosan, 185)의 고층기상자료를 이용하여 Fig.20, Fig.22, Fig.24와 같이 나타냈다. 단지 고산의 관측 위치가 한라산 보다 동쪽에 위치(Fig.2)하므로 풍속은 산악효과를 감안하여 나타낸 그림의 자료보다 더 강화된 값으로 추정 분석할 수 있겠다.



(1)CASE 1

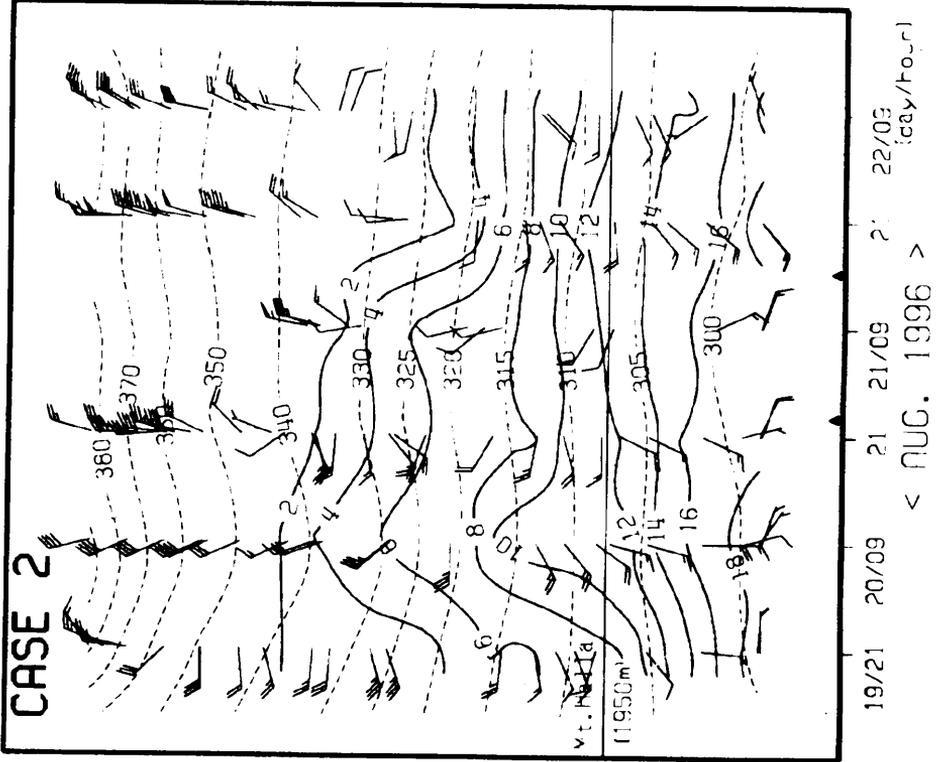
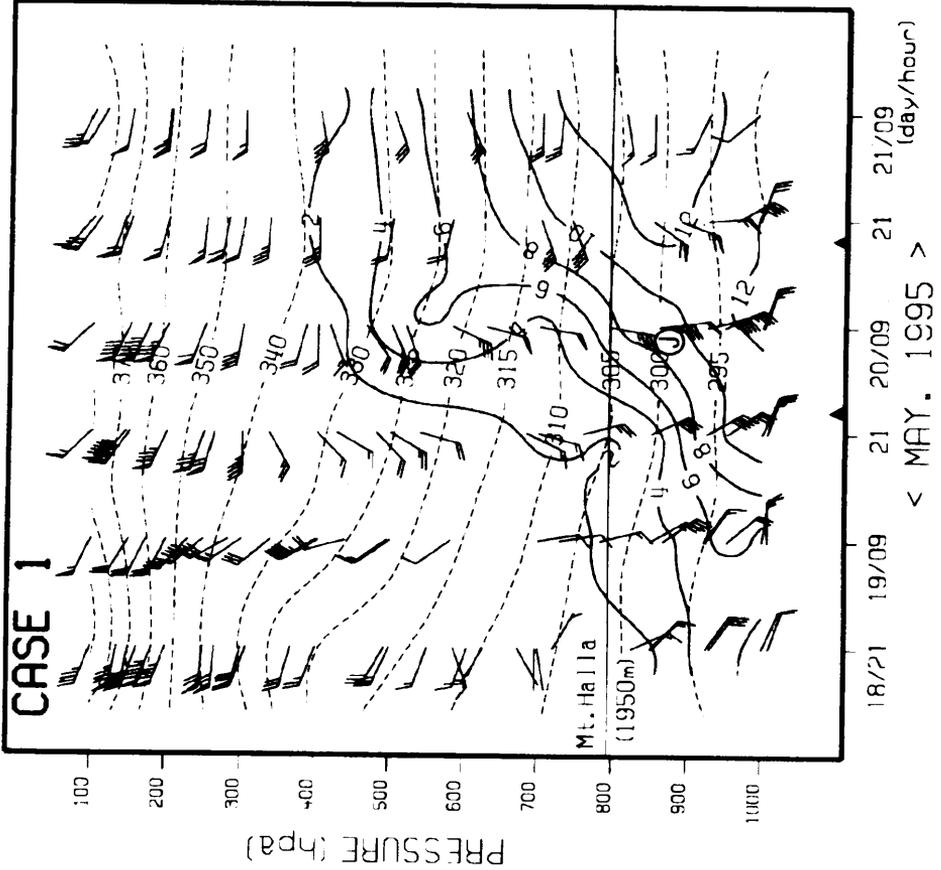
CASE 1의 수직바람 구조는 강수시작 전날의 21시부터 강수당일 09시까지 약 24시간이상, 상층과 하층의 바람시어(Wind shear)가 있고 한라산 정상을 경계로 저층에서의 남동풍이 매우 강하며 지속적이다. 또한 18일 21시부터 19일 21시까지 약 800~300 hpa 층에서 온위 변화가 심하면서 따뜻한 공기(Warm air)의 유입이 있어 19일 21시에 혼합비가 급격히 변화하고 있다(Fig.20 CASE 1). 그러므로 850~700 hpa층에서 빠른 이류와 하층의 대류가 한라산 이하에서 활발하여 중산간 지역과 서귀포, 돈내코 등의 제주도 남부지역에 집중적으로 강수(Fig. 8 CASE 1)가 있었고, 특히 제주, 고산 등 풍하층(Down-wind layer)보다 장시간 남동풍이 유입된 풍상층에서 강수가 탁월함을 Fig.21 CASE 1에서 볼 수 있다.

(2)CASE 2

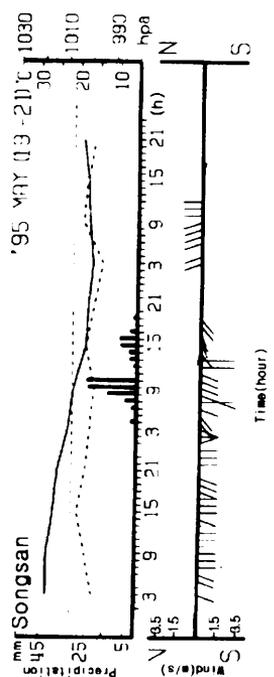
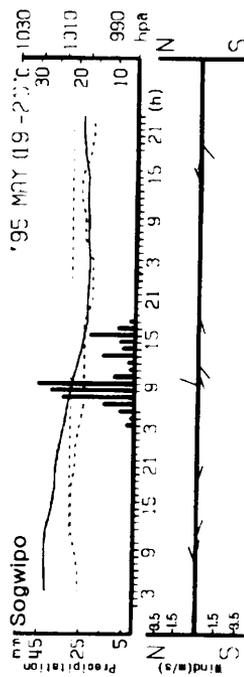
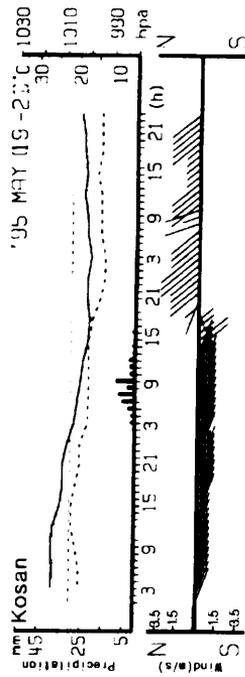
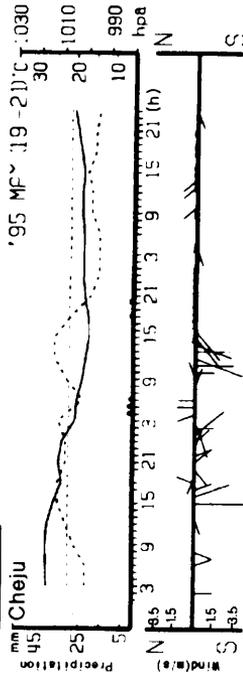
CASE 2는 CASE 1과 저기압 경로가 비슷함에도 불구하고 수직바람 구조는 조금 다르다. 특히 저층에서 바람이 CASE 1에 비교하여 미약하며, 온위 변화도 약 500~300 hpa층에서만 약간 뚜렷할 뿐이다. 그러나 혼합비는 20일 09시부터 강수 종료까지 장시간 높게 나타나고 있다(Fig.20 CASE 2). 풍상층에서 바람은 CASE 1과 같이 강하고 지속적이지 못하지만 강수 성숙기 전후로 남서 내지 남동풍이 돌풍(Gust)처럼 불고 있어 역시 남부지역에서 강수량이 많다(Fig. 8 CASE 2, Fig.21 CASE 2).

(3)CASE 3

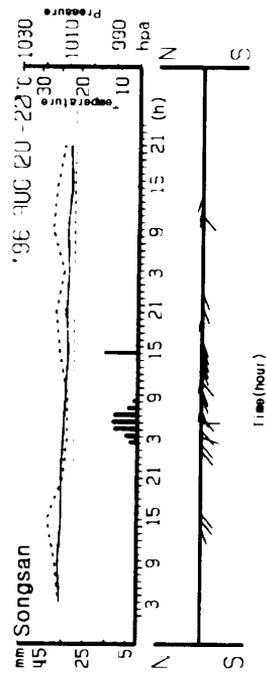
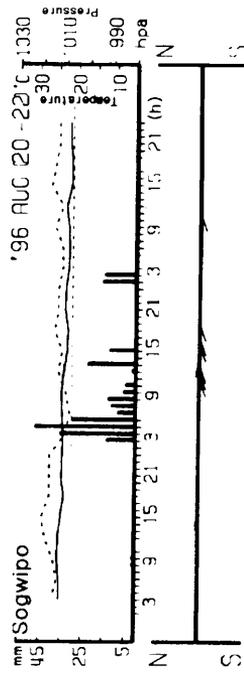
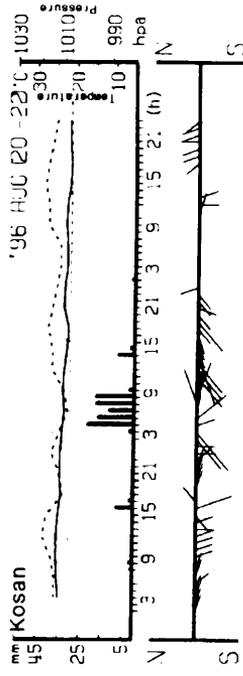
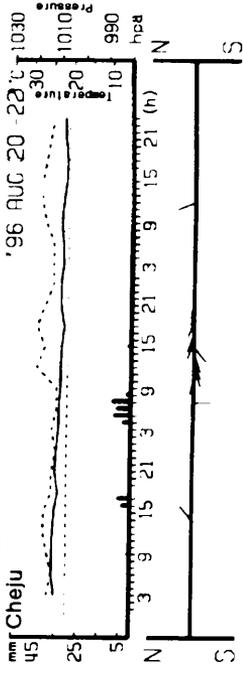
CASE 3은 태풍의 영향으로 수직 바람 구조가 시각별로 매우 민감하고 뚜렷하다. 따라서 태풍의 위치에 따라 22일 09~21시와 23일 09시의 풍계가 분명하게 구별된다(Fig.22 CASE 3). 또한 산악효과에 의한 강제 상승한 공기는 태풍 자체의 강한 상승류와 함께 산정상위로 계속 상승하면서 상층까지 왕성한 대류활동으로 중산간지역에 집중적으로 230 mm이상의 비가 내렸다. 기압과 바람의 변화 등은 각 지역에서 비슷하게 나타났다(Fig.23 CASE 3).

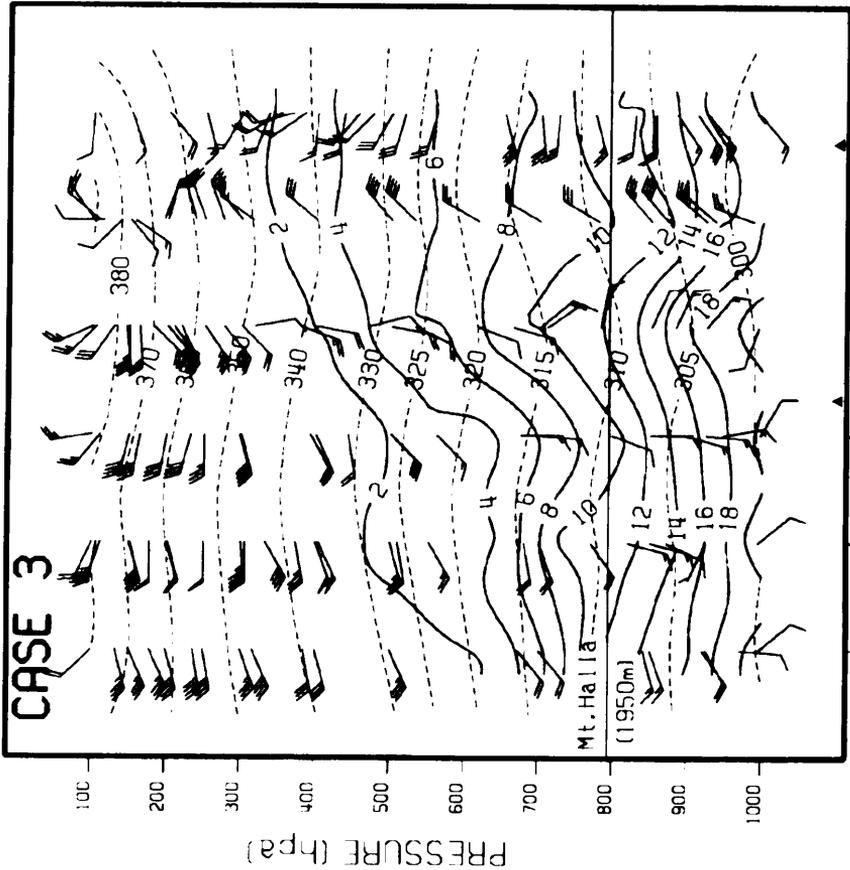
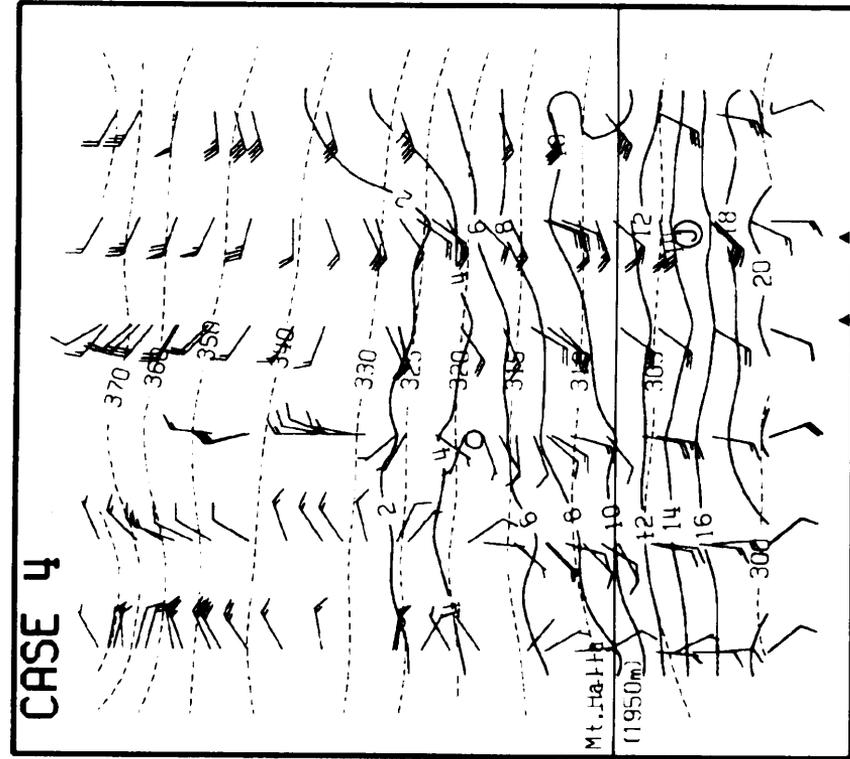


CASE 1



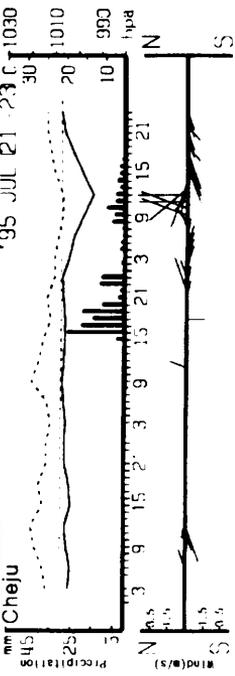
CASE 2



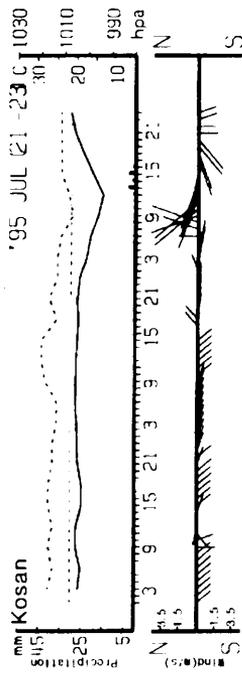


PRESSURE (hPa)

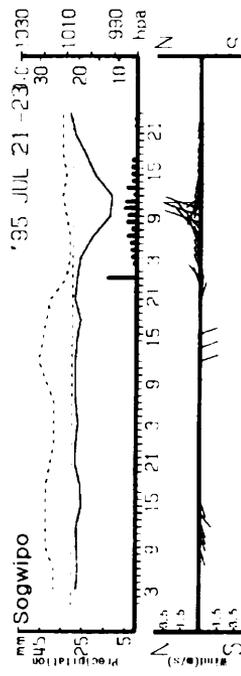
CASE 3



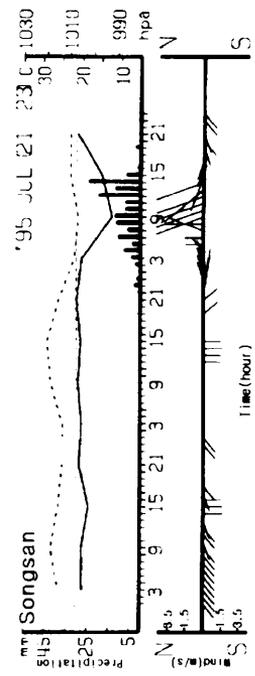
Kosan



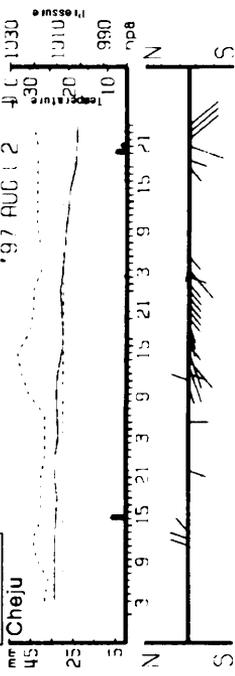
Sogwipo



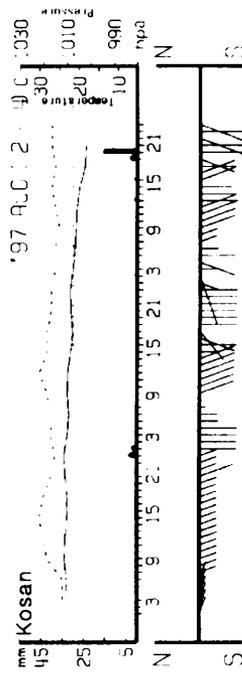
Songsan



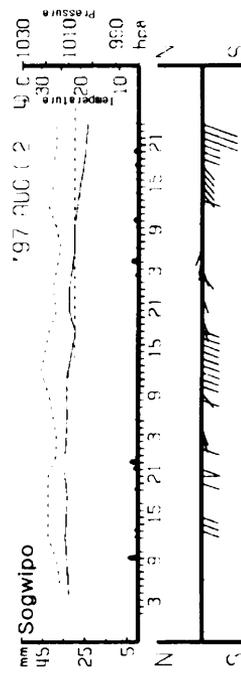
CASE 4



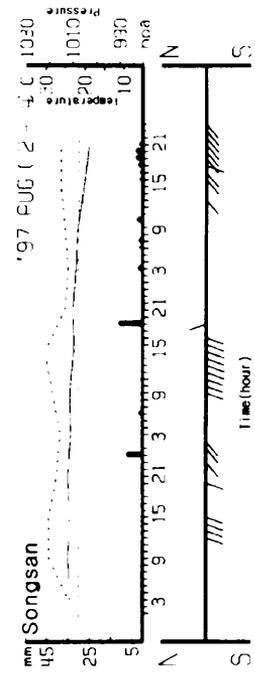
Kosan



Sogwipo



Songsan



(4)CASE 4

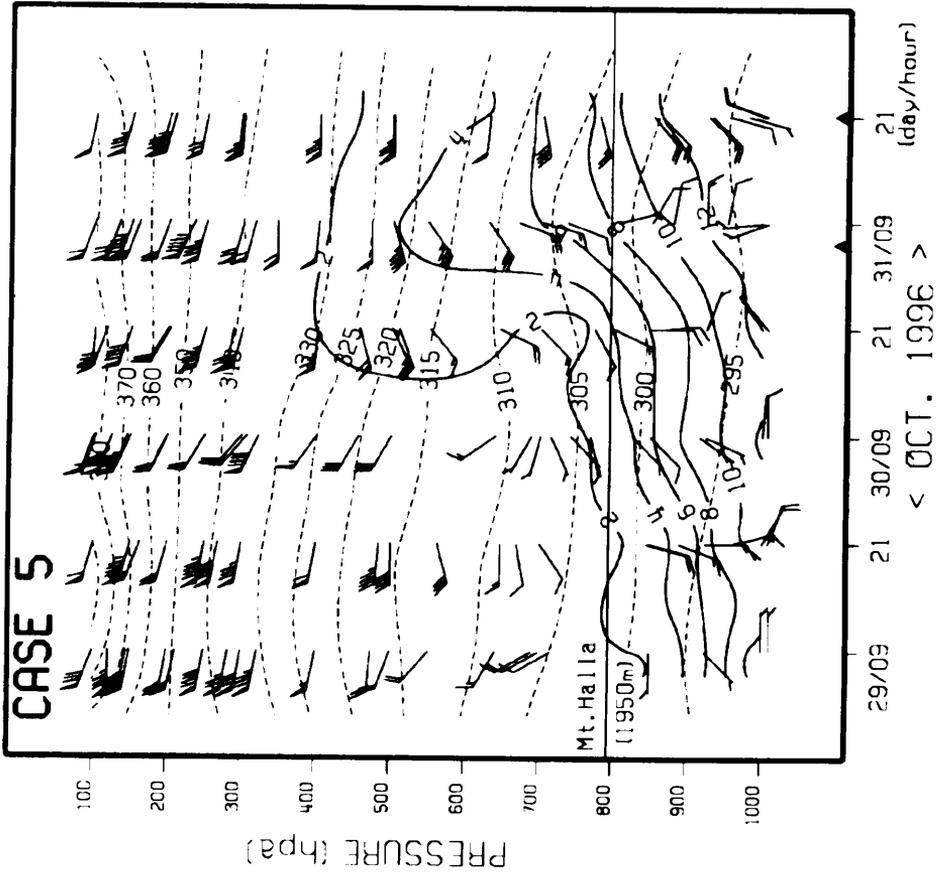
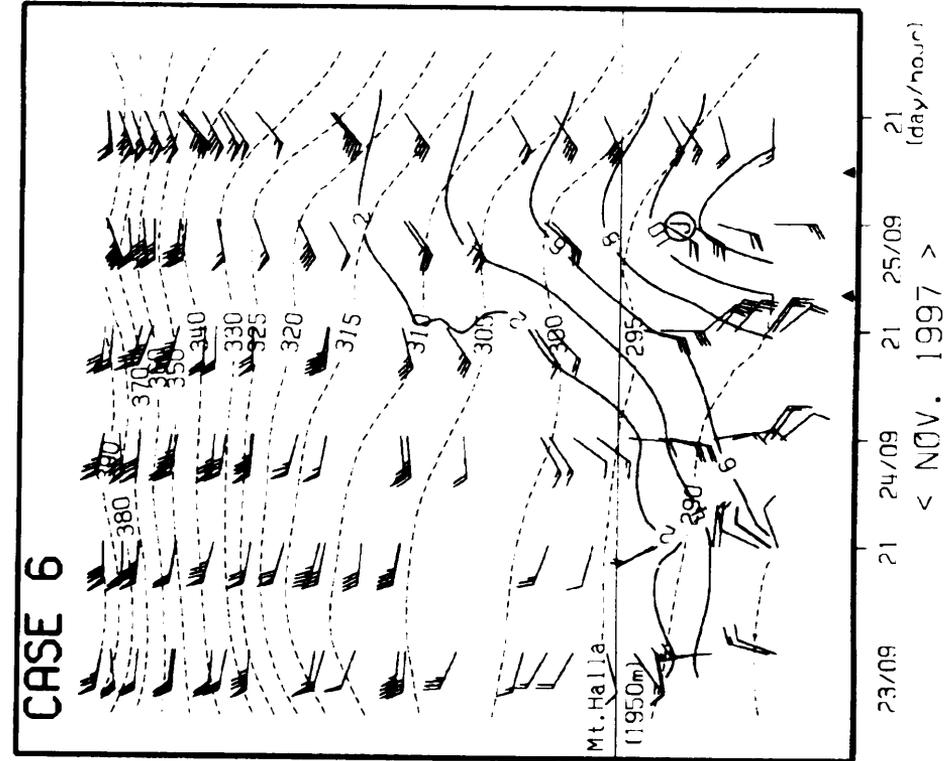
CASE 4의 수직바람 구조는 강수시작 전부터 남서풍이 강하게 불어 공기의 상승이 빠르며, 온위와 혼합비의 급격한 변화는 없지만 매우 습윤하다 (Fig.22 CASE 4). 그러나 Fig.23 CASE 4와 같이 풍상층에서 강수량은 매우 적고, Fig.13 CASE 4처럼 풍하층에서 매우 강한 집중호우가 내렸다. 이러한 풍하층 강수지역은 강수시작 약 3~4시간 전부터 불어준 저층에서 약 500 hpa 층까지의 남서풍 방향에 정확히 반대 지역인 것이다. 앞에서 살펴본 CASE 3의 7월 22일 경우에도 Fig.22 CASE 3에서 볼 수 있듯이 강수시작 약3~4시간 전부터 불어준 저층에서 약 700 hpa까지 남풍 방향에 반대 지역인 풍하층(Fig.18 (a))에서 집중호우가 내렸다. 또한 강수 시작전 2일 21시부터 3일 09시까지 약 500 hpa층을 경계로 풍계가 불연속을 하면서, 상층 한기(Cold air)와 하층 난기(Warm air)의 구분이 뚜렷하지 않지만 약한 온도골(Thermal trough)이 형성되어 있었다.

(5)CASE 5

CASE 5의 수직 바람구조는 저기압이 접근하면서 강수시작 전날의 21시부터 저층의 강한 남동풍과 남서풍이 한라산을 경계로 바람시어(Wind shear)를 가지며, 약 500 hpa 층까지 기압골이 형성되어 있다. 또한 600 hpa층에서 온위의 변화가 급격하면서 상층 한기와 하층 난기가 경계를 이룬다(Fig.24 CASE 5). 따라서 강수 성숙기에 동풍류가 불어서 풍상층인 동부지역에 집중적으로 강수가 있었다(Fig.25 CASE 5, Fig 8 CASE 5).

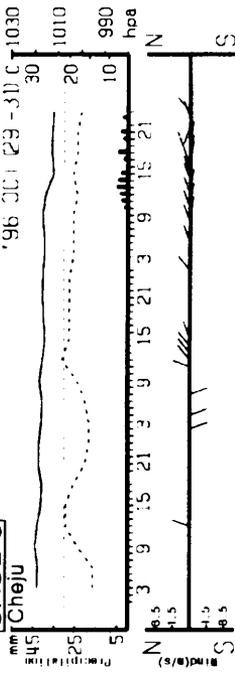
(6)CASE 6

CASE 6의 수직 바람구조는 CASE 5와 비슷하나 상대적으로 더욱 뚜렷하다. (Fig.24 CASE 6). 따라서 강수 성숙기에 남~남동풍이 강하고 지속적으로 불어 빠른 공기의 상승을 초래하였고, 상층까지의 왕성한 대류 활동(Fig.19 CASE 6)으로 중산간 지역에 집중적으로 내렸다. 그러나 산악효과에 의한 풍상층에서의 강수량은 역시 풍하층보다 많다.

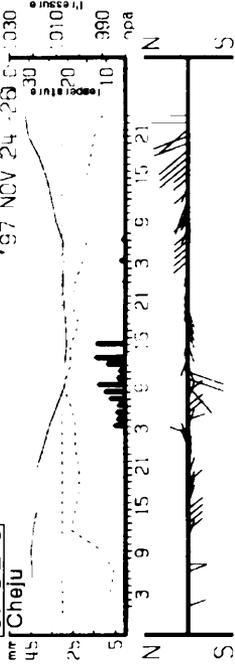


PRESSURE (hPa)

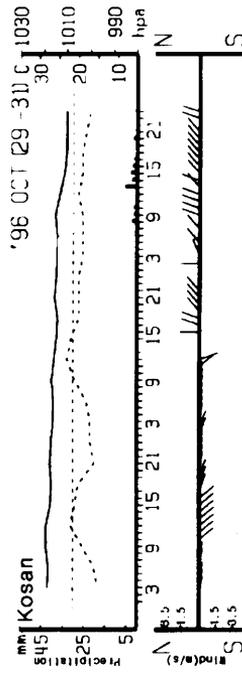
CASE 5



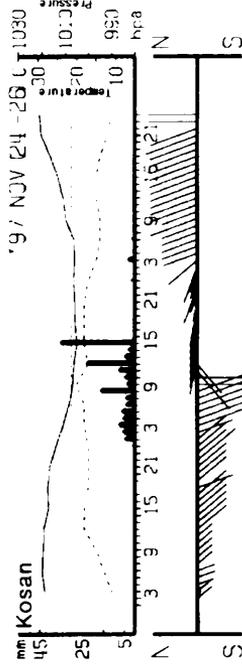
CASE 6



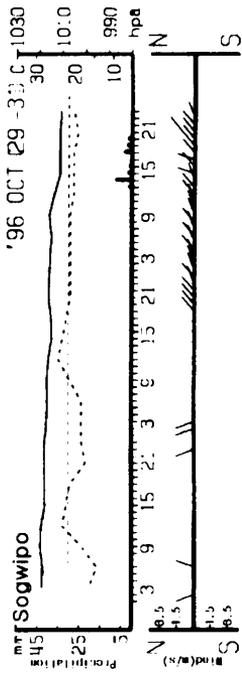
Kosan



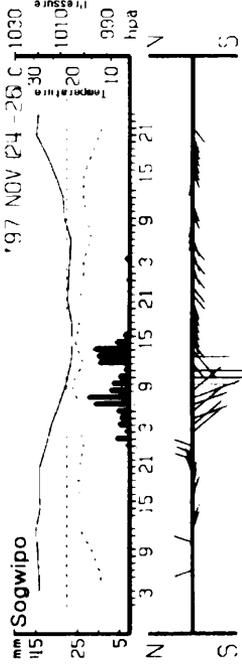
Kosan



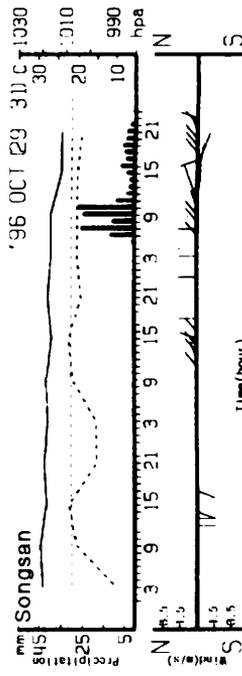
Sogwipo



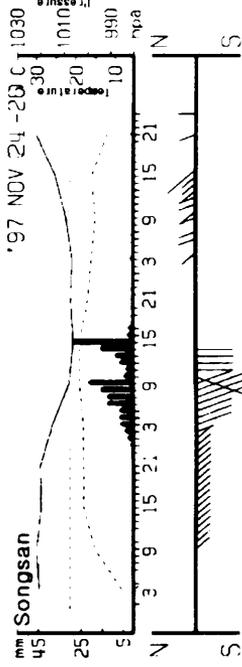
Sogwipo



Songsan



Songsan



4. 사례분석 결과

집중호우 분석시 고려되어야 할 4가지 사항(Doswell III et al, 1997), 즉 1) 습윤공급(Moisture supply) 3)정적 안정도(Static stability), 3)수직구조(Vertical motion), 4)산악효과(Orographic effects)에 맞춰 이장에서 언급한 6개의 사례들의 결과는 다음과 같고, Table 6으로 요약하였다.

1)종관적 관점에서 저기압이 제주도 부근을 통과하고, 850~700 hpa 층에서 핵(Core) 또는 습설(Moisture tongue) 구조의 혼합비가 빠르게 변화하여 난기류의 습윤공급(Moisture supply)이 원활히 이루어지면서, 제주도 부근을 경계로 남쪽의 습한 공기와 북쪽의 건조한 공기가 분명하게 구분 되는데 CASE 1~4는 뚜렷하고 CASE 5~6은 미약하다.

2)정적 안정도는 저층에서 주로 불안정하며, CASE 3, 6은 상층까지 불안정하고 포화되었으며, CASE 1, 2, 5는 하층에서만 포화되었고 불안정하다. CASE 4는 상층까지 불안정이 강하다. 이런 불안정층 위로 역전층이 뚜렷하거나 미약하지만 지속적으로 존재한다면 상승하는 공기를 억제시키는데 역전층의 고도가 한라산 정상을 경계로 위층에 있으면 상층까지 대류가 활발(CASE 6)하고 그 반대면 저층에서 대류가 활발하다(CASE 1, 2, 5).

3)대기의 수직구조에 있어서는 상층과 저층의 바람시어(Wind shear)가 강하고 뚜렷하다. 특히 한라산 정상을 경계로 바람시어에 의한 강한 수렴대(Convergence zone)가 형성되어 저층의 대류 활동을 촉진시키며, 풍상층에서의 강한 바람이 빠른 공기의 상승을 초래한다. CASE 1, 6은 저층제트가 분명하고, CASE 2와 CASE 5는 상대적으로 약하다.

4)공기의 강제상승을 유발하는 산악효과는 경사도가 급하고 오름(기생화산체)들이 많은 제주도 남동지역에서 남서~남동풍이 강하게 유입될 때 탁월하다.

따라서 CASE 3, 6은 산악효과 및 저층제트에 의한 강제상승된 공기가 불안정한 상층과 병합하여 더욱 활성화되면서 산 정상지역에서 강수량이 많은 경우이고, CASE 1, 2, 5는 강제상승한 공기가 역전층을 만나 그 아래에 갇히면서 새로

<Table 6> Description of the results for analysis of each CASE.

Case Factor	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5	CASE 6
1. Synoptic condition	Low pressure	Low pressure	Typhoon	Meso- β	Low pressure	Low pressure
-Path of low pressure	North	North	×	×	South	North
-Jet stream						
· Upper level	Far away	Far away	×	Near	Near	Close
· Low level	Near and Strong	Weak	×	Near and Strong	Weak	Near and Strong
2. Moist supply	Strong	Strong	Strong	Strong	Strong	Strong
-850 hpa	Tongue	Core	×	Core	Tongue	Core
-700 hpa	Tongue	Tongue	×	Tongue	Tongue	Tongue
3. Static stability						
-S S I	21h~09h	09h~21h	21h~09h	09h~21h	21h~09h	21h~09h
· 850~500 hpa	+8.9~+3.1	+0.4~+1.1	-0.3~+3.5	+2.3~-1.6	+6.9~+0.1	+3.3~+1.7
· 1000~850 hpa	+0.8~+4.9	+0.1~+2.0	-1.0~+3.2	+1.7~-1.4	+5.4~-0.8	-1.0~+0.3
-Inversion layer exist and life	Distinct, Short	Weak, Long	Weak, Short	Weak, Long	Distinct, Long	Distinct, Short
4. Vertical motion						
-Wind shear	Distinct,	Distinct	×	Distinct	Distinct	Distinct
-Low level Jet	Strong	Weak	×	Strong	Weak	Strong
	Strong	Weak	×	Strong	Weak	Strong
5 .Orographic effect	Excellent,	Weak,	Excellent,	Excellent,	Excellent,	Excellent,
-Upwind layer's effect	Strong	Strong	Strong	Weak	Strong	Strong

유입되는 대류운(Convective cloud), 즉 셀(cell)들과 혼합하여 풍상층에서 집중호우가 내리는 경우이다. 실제 관측시 한라산 부근에서 해안으로 되돌아오는 구름의 이동은 육안으로도 관측이 되는 경험을 자주 한다. 그러나 CASE 4는 불안정이 강하고 바람이 강했음에도 불구하고 예외적으로 풍상층보다 풍하층에서 매우 강한 집중호우가 내렸다. 이 경우는 뚜렷한 저기압에 의한 공기의 상승이 없는 상태에서 강한 남서풍에 의해 공기가 한라산을 넘으면 풍하층의 위 아래로 진동하게 되는데 이 때 파(Wave)를 생성시켜 발생한 것으로 생각된다. 이는 한랭전선(Cold front)을 넘은 공기가 전선 앞면에 파(Prefrontal wave)를 생성시켜 뇌우(Thunder storm)를 초래하듯(Eagleman, 1985), 이 파(Wave)는 강수시작전 대기의 불안정(Fig.17 CASE 4, Fig.18 (b))과 높은 온도(Fig.23 CASE 4, Table. 7)의 지면 가열이 불안정한 공기를 매우 빠르게 상승시켜 구름을 발달시키며, 북쪽의 건조한 공기는 질량이 더 가벼운 습윤한 공기를 상승시켜 구름 발달을 더욱 가속화 시킨다고 생각된다.

<Table 7> Max and hourly temperature(°C) at 3 stations(725, 751, 781) in AWS before heavy rainfall on Jul. 22, 1995.

Hour Station	12	13	14	15	Max temperature
Kimnyong	29.3	28.7	29.5	28.2 ↓	30.9
Sonhul2	27.3	26.1	27.8	25.7 ↓	29.6
Udo	29.4	29.5	29.1	28.5 ↓	30.0

※ Max temperature : Cheju : 33.5, Songsan : 31.0

V. 결 론

제주도 지방의 집중호우 특성을 파악하기 위하여 기존과 관측망 확충에 의해 축적된 자료를 사용하여 그 경향을 분석하였고, 사례분석을 통해서 국지적 특성을 조사하였다.

기상청(Korea Meteorological Administration, **KMA**)의 기존자료와 자동기상관측(Automatic Weather System, **AWS**) 및 제주도청 산하기관(Local Administration Station, **LAS**)의 자료를 이용한 최근 5년(1993~1997)동안의 제주도 집중호우는 발생 빈도수에 있어서 해안지역에 국한된 20년 동안의 자료(**KMA**)와 비교하여 연평균 2~3배 많았으며, 풍상층이 되기 쉬운 남·동부지역과 중산간지역에서 자주 발생하여 북·서지역과 큰 차이를 나타냈다. 또한 계절별로 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 많이 발생하는데 연중 6~8월에 약 55% 이상이 발생하고, 8월에 현저하게 편중되어 있는데 비해 9월에는 예상외로 적었다. 또한 150 mm/day 이상의 집중호우도 대부분 여름에 발생하는 것에 비하면 3월~5월과 10~12월의 증가율이 늘어나고 있다. 특히 최근 2년(1996~1997)동안의 10~12월에 발생한 집중호우 5회는 모두가 150 mm/day 이상이였다.

집중호우의 강수량은 접근하는 저기압의 위치에 따라 지역적으로 많은 차이를 보인다. 지난 5년 동안 제주도 부근을 통과한 저기압(태풍 포함)의 총 90건중 62%가 80 mm/day 이상의 집중호우를 보였는데 강수량 분포는 남부 해안형(Southern Coast Type, **SCT**)을 합친 남부형(Southern Area Type, **SAT**)이 51%, 산악형(Mountain Area Type, **MAT**)이 34%로 대부분을 차지한다. 이것은 제주도를 중심으로 저기압의 위치에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 제주도에는 겨울(북서풍)을 제외하면 남동·남서풍이 탁월하여 남·동부 지역이 풍상층(Up-wind layer)이 되기 때문이다.

사례분석을 통하여 집중호우가 형성되는 과정의 전형적인 특징에는 크게 3가지가 있다.

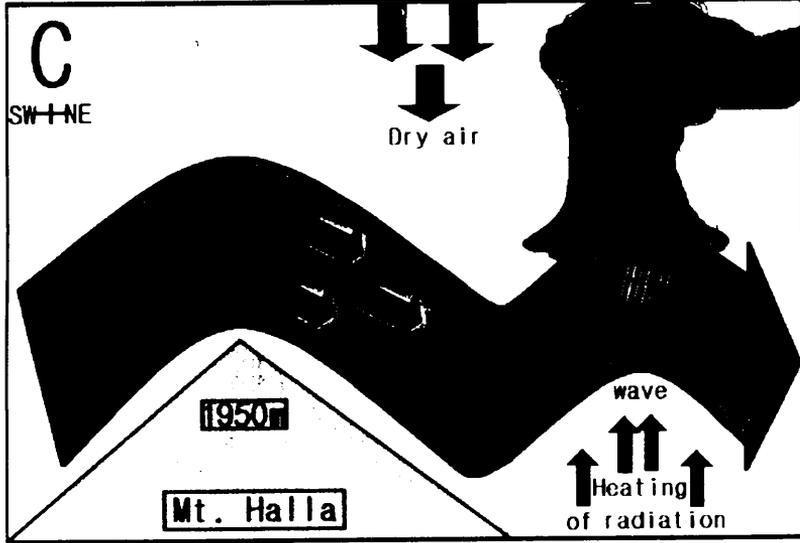
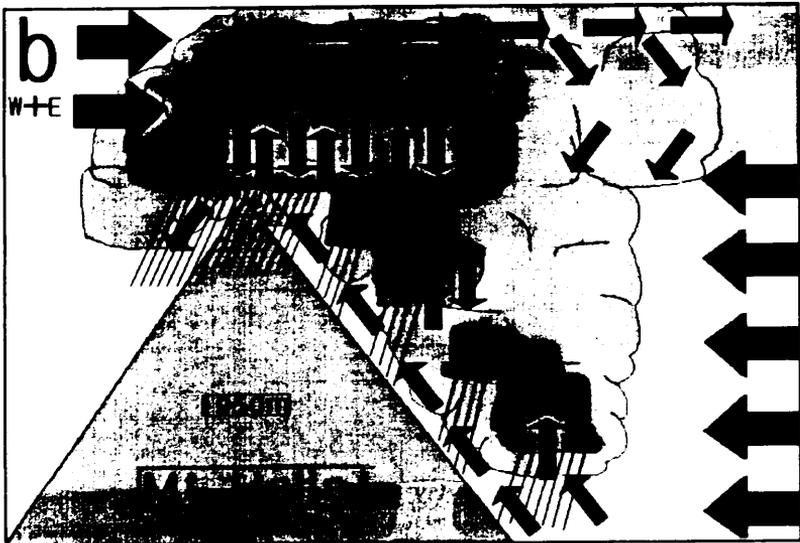
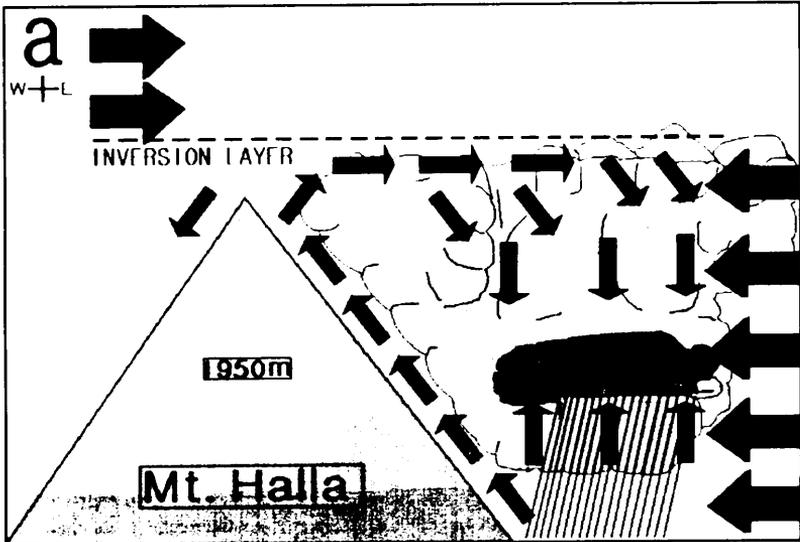
첫째, 습윤공기 확장이 뚜렷하여 강수 성숙기까지 850~700 hpa 층의 빠른 이류(Advection)가 있고, 한라산 정상을 경계로 역전층(Inversion layer)이 존재하며, 저층 또는 중층까지의 대기 안정도가 조건부 불안정(Conditional instability)하다.

둘째, 상층과 하층에 서풍과 동풍 또는 북서와 남동풍이 각각 불어서 한라산 정상을 중심으로 강한 수렴대가 형성된다.

셋째, 산악효과 및 저층의 강한 바람에 의하여 포화된 불안정한 공기가 빠르게 상승하여 국지적으로 왕성한 대류(Convection)가 발생한다.

이러한 특성들에 의해 집중호우 구역이 결정되는데 **Fig.26 (a)** 같이 저층에서 불안정한 대기가 산악효과 등에 의하여 강제상승 하다가 한라산 정상 부근에 역전층을 만나면 그 아래 갇히게 되므로 **풍상층**에서 집중호우가 탁월하고, **Fig.26 (b)** 같이 역전층이 미약하거나 한라산 정상보다 훨씬 위에 위치하면 대류가 산 정상 위층까지 활발하여 중층의 구름과 병합과정을 반복하기 때문에 **중산간지역**에서 집중호우가 많다. 이 경우에도 산악효과에 의한 풍상층에서의 강수량 증가 효과는 유지된다. 한편 **Fig.26 (c)** 같이 뚜렷한 종관조건(저기압, 태풍 등)없이 하층제트에 의한 강한 바람이 한라산을 넘으면서 생기는 파(Wave)가 불안정한 대기를 상승시키고, 이 때 지면가열(Heating of radiation)이나 상층의 한기(Cold air) 유입에 의하여 상승기류가 빠르게 가속화 되면 **풍하층 좁은지역**에 국한되어 집중호우가 내리는 조건이 형성될 수 있는데 사례의 빈도수는 극히 적어 보인다.

이상과 같이 제주도의 집중호우는 종관적 조건을 바탕으로 저층에서 풍향·풍속, 산악효과를 강화시키는 역전층 유무 및 고도 등에 의해 결정되므로 앞으로 이러한 시그널은 보다 깊게 연구되어야 하고 기상예보에 활용되어야 할 것이다.



-참 고 문 헌

- Browning, K. A., F. F. Hill and C. W. Pardoe, 1974. Structure and Mechanism of Precipitation and the Effect of orography in a Wintertime Warm Sector. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 100, 309-330.
- Doswell III, C. A., C. Ramis, R. Romero and Alonso, S., 1997. A Diagnostic Study of Three Heavy Precipitation Episodes on the Western Mediterranean Region. American Meteorological Society, 13. 102~124.
- Eagleman, J. R. 1985. Meteorology : The atmosphere in action, 2nd ed. Trimedia Pub Co., 204~207.
- Lee D. K., H. R. Kim and S. Y. Hong, 1998. Heavy Rainfall over Korea during 1980~1990. Korean Journal of the Atmospheric Sciences, 1-1. 32~50.
- Landsberg, H. E, 1958. Physical Climatology, 2nd ed. Gray Printing Co., Dubois, Pennsylvania, pp446.
- Ogura, Y., T. Asai and K. Dohi, 1985. A Case Study of a Heavy Precipitation Event along the Baiu Front in Northern Kyushu, 23 July 1982 : Nagasaki Heavy Rainfall. J. Meteor.Soc. Japan, 63, 883~900.
- Watanabe, H., Y. Ogura, 1987. Effects of Orographically Forced Upstream Lifting on Mesoscale Heavy Precipitation : A Case Study. J. Atmos. Sci., 44, 661~675.
- 기상연구소, 1988. 제주도의 접지층 기상특성 조사(II). 기상청. pp78.
- 기상청, 1991. 한국기후표. 기상청.
- 기상청, 1996. 태풍백서. 기상청. pp261.
- 중앙기상대 기상연구소, 1986. 기상정보시스템의 현대화를 위한 전산식예보 및 관측망 자동화 개발 연구(I) 과학기술처. pp431.
- 곽종흠, 소선섭, 1985. 일반기상학. (주) 교문사. pp521.
- 박순웅, 정창희, 김성삼, 이동규, 윤순창, 정영근, 홍성길, 1986. 1984년 9월 1~3일 한국에서 발생한 호우의 종관적 특징 분석. 한국기상학회지, 22(1), 42~81.

- 이미자, 1983. 고층기상 자료 처리의 전산화 연구. 연세대학교 산업대학원 석사학위 논문. pp20-46.
- 이충구, 김우규, 김동호, 1987. 우리나라 호우의 발생빈도 조사. 기상연구소, 4(1), pp9~16
- 윤진일, 전영신, 이춘식, 유근배, 1988. 제주지방의 강우분포와 관측지점 지형 특성 간의 관계. 기상연구소, 5(2), pp43~50.
- 임은하, 1992. 지형성 구름과 강수에 관한 수치적 연구. 연세대학교 대학원 천문 대기학과 석사학위 논문. pp59.
- 홍성길, 1983. 기상분석과 일기예보. 교학연구사. pp521.
- 현종훈, 1990. 수치모델을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의와 국지 강수예보에 대한 연구. 서울대학교 대학원 대기과학과 석사학위 논문. pp64.

-요 약

제주도 지방의 집중호우 경향과 사례 연구

제주도의 강수량 관측은 최근 관측망이 증가하기 전까지 해안에 국한되어 있었으므로 강수량이 많은 중산간지방의 집중호우 경향은 파악하기 어려웠다. 그러나 지난 5년(1993~1997)동안 자동기상관측(AWS) 등 관측망이 확대되면서 이러한 연구가 가능해졌다. 이 연구에서는 확대된 강수량 자료를 사용하여 제주도의 집중호우 경향을 분석하고 특정한 사례를 선정하여 특성을 파악해 보았다.

제주도 지방의 집중호우($\geq 80 \text{ mm/day}$)는 계절별로 여름, 봄, 가을, 겨울 순으로 많이 발생하고 월별로는 8월에 현저하게 편중되어 있으며 9월에 예상외로 적었다. 집중호우가 대부분 여름에 발생하는 것에 비하면 150 mm/day 이상은 3~5월과 10~12월에 증가율이 높았고, 최근 2년(1996~1997)동안 10월~12월에 발생한 집중호우 5회는 모두 150 mm/day 이상이었다.

제주도 지방의 집중호우는 지역적으로 많은 차이를 나타낸다. 이것은 제주도를 기준으로 접근하는 저기압의 통과 위치에 따라 풍상층이 결정되고, 산악효과에 의해 강수량이 결정되기 때문이다. 지난 5년동안 제주도 부근을 통과한 저기압(태풍 포함)은 총 90회이다. 이 중 62%가 80 mm/day 이상의 집중호우를 가져왔는데 저기압 통과로 풍상층이 되기 쉬운 남·동부 지역이 북·서지역보다 많다. 이에 따라 지역별 강수량 분포는 남부 해안형(Southern Coast Type, SCT)을 포함한 남부형(Southern Area Type, SAT)이 51%로 가장 많다.

제주도에서 집중호우가 형성되는 과정의 특징들은 1)습윤공기 확장이 뚜렷하여 $850\sim 700 \text{ hpa}$ 층의 빠른 이류가 있고, 한라산 정상을 경계로 역전층이 존재하며, 저층 또는 중층까지의 대기 안정도가 조건부 불안정하다. 2)상층과 하층에 서풍과 동풍 또는 북서와 남동풍이 각각 불어서 한라산 정상을 중심으로 강한 수렴대가 형성된다. 3)산악효과 및 저층의 강한 바람에 의하여 포화된 불안정한 공기가 빠르게 상승하여 국지적으로 왕성한 대류가 발생한다. 저기압 접근시 저층에서 풍향과 풍속의 강도, 역전층 유무 및 고도에 따라 영향을 받기 때문에 위와같은

위와같은 특성들에 따라 집중호우 구역이 중산간 지역이나 풍상층 지역으로 구별된다. 반면 뚜렷한 종관조건 없이 하층제트에 의한 강한 바람이 한라산을 넘으면 생기는 파가 불안정한 공기를 상승시키고, 이 때 지면가열이나 상층의 한기 유입에 의하여 상승기류가 빠르게 가속화 되면 풍하층 좁은지역에서 집중호우가 내릴 수 있는데 사례의 빈도수는 극히 적어 보인다.

- 감사의 글

학문의 길이 얼마나 어렵고 고달픈 과정인지도 모르고 의욕 하나로 무지하게 뛰어 들었던 나 자신의 뒤를 돌아보면서 많은 분들의 연려와 격려 그리고 기대에 부응하지 못한 부끄러움을 감출 길이 없으며, 이 한 권의 『논문』을 감히 세상 밖으로 내놓으면서 두려움도 앞서지만 결과보다는 과정을 소중히 간직하겠습니다.

많은 방황과 고통 때마다 학문의 대한 자세, 태도 그리고 공부 방법까지 세밀하게 알려 주시고, 저의 알량한 고집과 논리에도 끝까지 인내하시어 이런 작은 결실을 맺게 하여 주신 방익찬 교수님께 진정으로 감사의 말씀 올립니다. 그리고 논문 심사를 위해 애써 주신 존경하는 고유봉 교수님과 기회가 있을 때마다 격려 아끼지 않으신 심사위원장 윤정수 교수님께도 깊은 감사의 말씀 드립니다. 또한 많은 관심과 조언을 주셨던 최영찬 교수님, 이준백 교수님, 윤석훈 교수님께도 감사 드립니다.

2년동안 세미나 및 일련의 모임에 동고동락한 우리 대학원생들에게 좋은 결과와 많은 축복이 있기를 기원합니다. 그리고 항상 옆에 있으면서 나의 가장 큰 보람이 된 Fortran 프로그램을 자세히 가르쳐 준 현경훈에게 진심으로 고맙게 생각하며 마음의 장미 한아름 듬뿍 전합니다. 또한 경희, 창수, 영미, 성준에게도 미안하고 고마운 마음 전하며, 늦게 우리 실험실에 들어 온 경은, 희정, 태우는 열심히 공부하고 연구에 정진하기를 바랍니다. 제주대학교 해양학과 교수님, 대학원생, 학부생 여러분 모두와 좋은 인연으로 생각하며 앞날에 축복이 가득하시길 다시 한번 기원합니다.

저에게 이렇게 공부할 수 있도록 영광을 주신 대한민국 정부와 총무처 및 기상청 관계자 여러분들께 지면으로나마 감사의 말씀 드립니다. 그리고 제주지방 기상청의 이호청장님 비롯하여 항상 자상하게 충고해주신 김종만 예보과장님, 이창균 기후과장님과 주야로 필요한 자료를 부탁하면 협조해 주신 직원 여러분께 진심으로 감사 드립니다. 특히 김길엽, 강민협, 한경훈, 이경호, 박혜정, 김미경 등 후배 님들께 그 동안 신세 지면으로 감사드립니다. 또한 같은 길을 가면서 더욱

격려하고 충고 아끼지 않으신 이찬구 사무관님을 비롯하여 문재인, 송분호에게도 감사드립니다. 그리고 멀리 서울 기상청에서 자료를 지원해준 윤정빈씨, 논문에 필요한 외국 자료들을 아낌없이 지원해준 나의 동기 유진희씨에게 특별한 감사드립니다.

멀리 자유중국 대만에서 시간, 거리 불문하고 날아와서 용기를 북돋아준 나의 우정 홍성렬과 그의 아내 김은숙씨에게 감사의 말 어떻게 표현해야할 지 모르겠습니다. 우리의 우정이 영원하길 기원하며 정말 고마운 마음 전합니다. 그리고 국민학교에서 중학교 때까지 저에게 큰 도움을 주셔서 오늘날 이런 영광을 누릴 수 있게 하신 생사도 모르고 주소도 모르는 미국인 노르만 쉘만 여사님께 두손 모아 정중히 감사드립니다. 또한 어떠한 어려움이 있었도 인내하며 “하면 된다”라는 해병대 정신을 불어 넣어 주신 이웃집 양창광 선배해병님께도 감사드립니다.

결혼하고 나서 지금까지 오로지 공부에만 전념하라며 항상 뒤에서 엄격하게 저를 이끌어 주시고 걱정해 주신 장인어른과 장모님께 큰절 올립니다. 베풀어 주신 은혜 영원히 잊지 않겠습니다. 그리고 대학교 졸업하고 다시 대학원생의 길로 들어설 때 말없이 고개를 끄덕여 주던 나의 아내 이미정, 지금 이 순간까지도 가족들을 위하여 억척스러운 고생을 하고 있는 나의 아내 이미정에게 이 논문 한 권으로 대신하기에는 너무도 초라한 결실로 느껴집니다. 그 동안 바쁜 관계로 많은 시간 함께 하지 못한 연지, 창영이와 함께 아내에게 고맙고 미안한 마음을 진심으로 전합니다.

2년동안 온갖 집안 경조사에 소홀했던 저를 이해 해주신 형님 내외분, 누님들과 매형, 동생 내외에게 용서를 빌며, 특히 집안의 경사라고 늘 자랑하고 격려해준 큰 누님께 감사드립니다.

끝으로 저에게 아버지의 정을 듬뿍 주신 장인어른과 일찍 돌아가신 아버님을 대신 자식들을 위하여 한평생 고생하신 어머님께 이 소중한 책 한권을 바칩니다.

1998년 12월
유종인 올림