

KEOP-2007 라디오존데 관측자료를 이용한 장마 특성 분석: Part II. 2007년 장마의 역학적 및 열역학적 특성에 관한 사례연구

김기훈 · 김연희* · 장동언

국립기상연구소 예보연구과

(2009년 3월 24일 접수; 2009년 11월 3일 승인)

The Analysis of Changma Structure Using Radiosonde Observational Data from KEOP-2007: Part II. The Dynamic and Thermodynamic Characteristics of Changma in 2007

Ki-Hoon Kim, Yeon-Hee Kim* and Dong-Eon Chang

Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA

(Manuscript received 24 March 2009; in final form 3 December 2009)

Abstract

The synoptic structures and the dynamic and thermodynamic characteristics of Changma in 2007 are investigated using the ECMWF analysis data and the radiosonde data from KEOP-2007 IOP. The enhancement of the North-Pacific High into the Korean peninsula and the retreat of the Okhotsk High are shown during the onset of Changma and the change of wind component from southwesterly to northwesterly is appeared during the end of Changma. The baroclinic atmosphere is dominant during Changma at most regions over the Korean peninsula except at Gosan and Sokcho. The quasi-barotropic atmosphere is induced at Gosan by warm air mass and Sokcho by cold air mass. Precipitation in the Korean peninsula occurs when dynamic instability is strengthened as the baroclinic and quasi-barotropic structure is weakened. An empirical orthogonal function (EOF) analysis is performed to find the dominant modes of variability in Changma. The first EOF explains the onset of Changma. The second EOF is related to the discrimination for existence and nonexistence of precipitation during Changma period according to the alternation of equivalent potential temperature between middle and lower atmosphere.

Key words: Changma, KEOP-2007, Dynamic instability, Thermodynamic instability

1. 서론

장마는 중위도와 아열대 지역 기단의 상호작용에 의해 유발되는 몬순시스템에 의한 준정체전선의 영향으로 발생하며 동아시아 내에서 여름철 계절풍을 초래하는 우기로 우리나라에서는 장마, 일본에서는 바이우

(Baiu), 중국에서는 메이유(Mei-yu)로 불린다. 장마기간 동안 적도 서태평양 상 수증기가 하층 남서 기류를 통해 중위도로 유입되어 대류 불안정을 증가시킨다(Krishnan and Sugi, 2001). 대류 불안정의 증가는 하층 제트의 형성과 함께 장마 전선 내에서 중규모 대류 시스템을 발달시켜 지역적으로 호우 및 홍수를 유발하기도 한다(Chen *et al.*, 2008). 즉 장마는 몬순과 같은 대규모 운동의 현상이면서 내부에는 중규모 현상 또한 발생하므로 다중 규모의 현상으로 볼 수 있다. 또한, 중국 남쪽으로부터 한반도를 거쳐 일본까지 동서로 이어진 장마전선은 지역적으로 그 특징이 다르다.

이전 연구에서 중국의 메이유는 수평 바람 쉬어가 강하고, 연직 기온 경도가 작으며 온난핵(warm core)

*Corresponding Author: Yeon-Hee Kim, Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA, Seoul 156-720, Republic of Korea.
Phone: +82-2-6712-0253, fax: +82-2-834-5922
E-mail: kyh@kma.go.kr

Table 1. The start and end date of Changma on the middle, southern part and Jeju Island over the Korean peninsula. The dates in the parentheses denote the start and end date in a normal year.

Area	Starting date (normal)	Ending date (normal)	Period (normal)
Middle part	6.21 (6.23 ~ 6.24)	7.29 (7.23 ~ 7.24)	39(32)
Southern part	6.21 (6.22 ~ 6.23)	7.24 (7.22 ~ 7.23)	34(32)
Jeju Island	6.21 (6.19)	7.24(7.20 ~ 7.21)	34(33)

Table 2. The information of starting and ending date of BEF, DUR, and AFT cases. BEF, DUR and AFT denote the period before Changma, the period during Changma, and the period after Changma, respectively.

Cases	Starting date	Ending date	Datasets
BEF	2007. 06.15 00:00	2007. 06.20 18:00	24
DUR	2007. 06.21 00:00	2007.07.24 18:00	136
AFT	2007.07.25 00:00	2007.07.31 18:00	28

을 가지는 준 순압형 구조를 보이는 반면, 일본의 바이우는 강한 연직 기온 경도와 시스템이 연직으로 서쪽으로 기울어지며 중층에 한랭핵(cold core)을 가지는 경압성 구조를 보임을 보이고, 메이유의 남쪽에서 발생하는 하층제트(Low Level Jet, LLJ)가 호우를 내리는데 중요한 요소이며, 바이우는 남북 수증기의 차이 및 바람 구조에 큰 영향을 받는다고 알려져 있다(e.g., Chen and Chang, 1980; Chen *et al.*, 2008; Maeda *et al.*, 2008).

박순웅 등(1986)은 1978년 사례에서 장마기간 초반에는 일본 바이우와 유사한 경압구조가 한반도 남부지역에서 나타나고, 장마 중후반에는 중국의 메이유와 유사한 순압구조가 한반도 중북부지역에서 나타남을 보였다. Hübener *et al.*(2000)은 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 자료 및 라디오존데 자료를 이용하여 1981년부터 1993년까지의 장마기간 동안의 경압 불안정을 분석하였다. 그 결과 경압 불안정은 장마 초반 뿐만 아니라 전기간에 걸쳐 나타났고, 장마기간동안 한반도 남부지역에서의 강수는 경압 불안정이 그 원인이며 북부지역에서의 강수는 경압성의 강화와는 관계가 없음을 밝혔다.

이처럼 장마는 다중 규모의 현상일 뿐만 아니라 지역적으로 특성이 다르기 때문에 국내의 현재 종관 관측망으로 지역별 특성을 분석하기는 어려워 장마전선의 지역별 발생/발달/쇠퇴에 관한 역학적 및 열역학적 구조를 조사하기 위해서는 시공간적으로 고해상도의 고층 관측자료가 필요하다. 2007년 국립기상연구소에서는 여름철 기간 동안 라디오존데를 이용한 전국 규모의 한달간의 고해상도 집중관측(KEOP-2007 IOP)을 수행하였다. 하지만 라디오존데 고층관측 자료만을

사용하여 동아시아 지역에서 나타나는 종관 규모 현상을 분석하기에 한계가 있으므로 0.5°간격의 고해상도 ECMWF 분석자료 및 KEOP-2007 IOP 자료를 활용하여 2007년 장마전선의 구조적 특징 및 지역별 특성에 대한 분석을 수행하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

본 연구에서는 장마의 종관적 특성을 분석하고자 0.5° 간격의 ECMWF 분석 자료를 사용하였고, 지역별 특성을 찾아내고자 KEOP-2007 IOP 자료를 활용하였다. 단 KEOP-2007 IOP 자료는 6월 15일부터 7월 15일까지 한반도 내 10개 지점(이어도, 속초, 문산, 백령도, 오산, 포항, 광주, 흑산도, 해남, 고산)에서 6시간 간격의 라디오존데 자료로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 관측기간이 짧은 이어도 지점을 제외한 9개의 지점 자료 중 기압, 상당온위, 관측지점별 강수 자료가 활용되었다.

2007년 장마는 6월 21일 한반도 전 지역에서 동시에 시작되어, 중부지방은 7월 29일, 남부지방과 제주에서는 7월 24일 종료되었다(Table 1). 장마의 시종에 있어 종관적 차이를 분석하기 위해 Table 2와 같이 장마 전(BEF), 장마(DUR), 장마 후(AFT)로 분류하여 상당온위와 바람의 평균장을 계산하였다.

전은희 등(2009)은 2007년 태풍 나리에 대하여 SREH (Storm Relative Environmental Helicity)와 CAPE (Convective Available Potential Energy)를 계산하였고, 각각은 대기의 역학적 불안정 및 조건 불안정 대기에서 열역학적 불안정의 정도를 나타냄을 밝힌 바 있다. 본 연구에서도 장마기간 중의 대기의 불안정의 원

Table 3. The threshold meaning of CAPE and SREH.

CAPE	Values	SREH	Values
$0 > \text{CAPE}$	stable	$\text{SREH} = 150$	threshold for super-cell development
$0 < \text{CAPE} < 1000$	marginally unstable	$150 < \text{SREH} < 299$	weak tornadoes possible
$1000 < \text{CAPE} < 2500$	moderately unstable	$300 < \text{SREH} < 449$	strong tornadoes possible
$2500 < \text{CAPE} < 3500$	very unstable	$\text{SREH} > 450$	violent tornadoes possible
$\text{CAPE} > 3500$	extremely unstable		

인을 조사하고자 위의 지수들을 활용하였다. CAPE와 SREH의 계산식은 식(1), (2)와 같고, 지수의 크기에 따른 현상에 대한 분류는 Table 3에 나타내었다.

$$\text{CAPE} (Jkg^{-1}) = g \int_{LFC}^{ZE} \frac{\theta(z) - \bar{\theta}(z)}{\bar{\theta}(z)} dz \quad (1)$$

여기서, LFC는 자유대류고도(level of free convection), ZE는 평형고도(equilibrium level), g는 중력가속도, $\theta(z)$ 는 특정 입자의 가온도, $\bar{\theta}(z)$ 는 입자 주위의 가온도이다.

$$\text{SREH} (m^2s^{-2}) = \int_{0km}^{3km} (\nabla \times \vec{V}_H) \cdot (\vec{V}_H - \vec{V}_c) dz \quad (2)$$

여기서, \vec{V}_H 는 horizontal velocity vector, \vec{V}_c 는 storm motion vector이다.

주성분분석(EOF; Empirical Orthogonal Function)은 공분산 행렬을 통한 고유벡터와 고유값을 계산하는 것으로서 물리적으로 복잡한 현상을 쉽게 이해하고자 규모에 따라 각각 독립적인 모드로 분리하여 이를 해석하는 기법이다. 본 연구에서는 장마 기간 동안 상당온위의 연직 분포가 통계적으로 어떠한 의미를 가지는지를 분석하고자 주성분 분석을 수행하였다. 본 연구에서 주성분 분석의 계산은 미국 UCAR에서 제공하는 NCL 프로그램(<http://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/eofunc.shtml>) 내 eofunc 코드를 활용하였다.

3. 분석결과

3.1 2007년 장마의 중관 특성

2007년 장마는 한반도 북쪽으로 상층 기압골이 자주 지나가고, 오후츠크해 고기압이 예년보다 강한 경

향을 보이는 특징을 보였다(기상청, 2007). 평년(1971~2000년)과 비교해 보면, 한반도 중부 및 남부지역은 평년에 비해 약 2일 일찍 시작된 반면, 제주에서는 2일 늦게 시작되었고 2~5일 늦게 종료되었다. 또한 장마가 저위도부터 시작되는 일반적인 경향과는 달리 2007년의 경우 전 지역에서 동시에 시작되는 차이를 보였다.

2007년 장마의 시작 및 종료에 따른 중관 특성을 살펴보고자 기간을 장마 전(BEF), 장마 기간(DUR), 장마 후(AFT)로 분류하여 하층 850 hPa에서의 상당온위 및 바람을 기간 평균하고 이를 Fig. 1에 나타내었다. 장마 전(BEF) 850 hPa에서는 289 K 이하의 상당온위가 한반도 주변에 위치하고 있는 반면, 위도 40°N 이상의 중국 화북지역에서는 위도 32°N 이하에서와 같이 289 K 이상의 상당온위를 보여, 한반도를 기준으로 고위도 지역에서 높은 상당온위를 보인다. 이는 이전 연구에서 장마 이전에 대륙과 해양의 비열 차로 인해 북고남저의 기온분포가 형성되어 경압 불안정이 약화되고 이로 인해 건기가 나타나는 현상과 잘 부합된다(변희룡 등, 1992). 바람의 경우 장마기간 동안 수증기의 유입을 강화시키는 남서풍이 위도 30°N 이하에서 뚜렷이 나타나지만 아직 한반도까지 북상하지 못하였다.

장마 기간(DUR)동안 한반도 주변에서는 장마이전에 비해 서쪽에서부터 289 K 이상의 상당온위의 증가를 보이고, 특히 제주도의 경우 291 K 이상의 더 높은 상당온위를 보인다. 한반도 북동지역의 경우는 장마 전과 장마기간 동안 상당온위가 동일하여 다른 지역과는 차이를 보인다. 이러한 상당온위의 증가는 계절적으로 오후츠크해 주변에 위치한 280 K 이하의 오후츠크해 기단이 쇠퇴함에 따라 저위도로부터 북태평양 고기압이 북상하기 때문이며, 한반도 북동지역의 경우 상당온위가 뚜렷한 차이가 나타나지 않는 것은 장마기간 중에도 오후츠크해 기단의 가장자리에 위치하면서 그 영향을 받기 때문으로 사료된다. 바람의 경우에는 장마 기간 동안 저위도로부터 많은 수증기를 한반도로 유입할 수 있도록 남서류가 장마 전에 비해 한반도 남

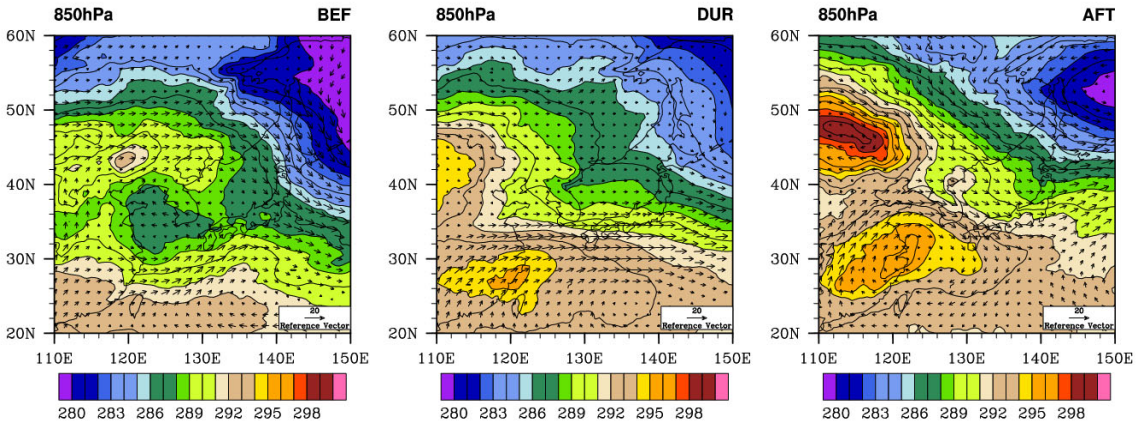


Fig. 1. The composite maps of equivalent potential temperature and wind vectors from ECMWF at 850 hPa during BEF (left), DUR (center), and AFT (right) periods.

Table 4. The detailed information of radiosonde stations during KEOP-2007 IOP.

ID	Name	Latitude (deg)	Longitude (deg)	Sea level height (m)
47090	Sokcho	38.2508	128.564	17.79
47099	Munsan	37.8858	126.766	30
47102	Baengnyeongdo	37.9660	124.630	144.44
47122	Osan	37.0999	127.033	52
47138	Pohang	36.0326	129.379	1.88
47158	Gwangju	35.1166	126.816	13
47169	Heuksando	34.6871	125.451	79.43
47185	Gosan	33.2938	126.162	71.21
47261	Haenam	34.5535	126.569	13.74

부지방까지 북상하여 불고 있다.

장마 종료(AFT)기간 동안 중국 화남지역에서 발생한 295 K 이상의 상당온위 지역이 한반도 주변까지 북상하면서 상당온위는 더욱 높아졌다. 열적으로 유발된 강수가 발생할 수 있음에도 불구하고 장마가 종료된 이유는 남서풍이 북서풍으로 바뀌면서 저위도로부터의 수증기를 한반도로 유입하지 못하기 때문으로 보인다. 즉 장마기간에는 북태평양 고기압이 티베트 고원 남쪽에 위치하면서 하층의 강한 바람이 티베트 고원 남쪽지역을 돌아 한반도로 부는 반면, 장마 이후에는 북태평양 고기압의 세력이 티베트 고원까지 북상하면서 하층의 강한 바람이 티베트 고원 북쪽을 돌아 한반도로 유입되기 때문으로 해석된다.

3.2 지점별 연직 대기 특성

Fig. 1에서 보였듯이 2007년 장마기간(DUR) 동안

한반도 내의 지역에 따른 상당온위와 풍속의 차이를 상세히 조사하고자 6월 15일부터 7월 15일까지 9개 지점(Table 4)에서 라디오존데를 통해 관측된 상당온위를 Fig. 2에 나타내었다.

2007년 장마 시작일인 6월 20일 이전에 모든 지점의 500 hPa 이하에서는 330 K 이하의 낮은 상당온위를 보인다. 이 중 특히 고위도에 위치한 속초(Fig. 2a), 문산(Fig. 2b), 백령도(Fig. 2c), 오산(Fig. 2d)과 동쪽에 위치한 포항(Fig. 2e)에서의 상당온위는 320 K 이하로 다른 지점에 비해 더 낮은 값을 보인다. 변희룡 등(1992)은 850 hPa에서의 비습과 위상당온위를 이용하여 기단이 320 K 이하의 위상당온위를 보일 경우 한대기단, 340 K 이상일 경우 열대기단으로 분류한 바 있고, ECMWF 분석장에서 낮은 상당온위의 분포가 오호츠크해 부근에 중심을 두고 한반도로 확장한 것을 감안하면, 이러한 낮은 상당온위의 분포는 장마이전 오호츠크해 고기압의 확장에 따라 한대기단이 유입된

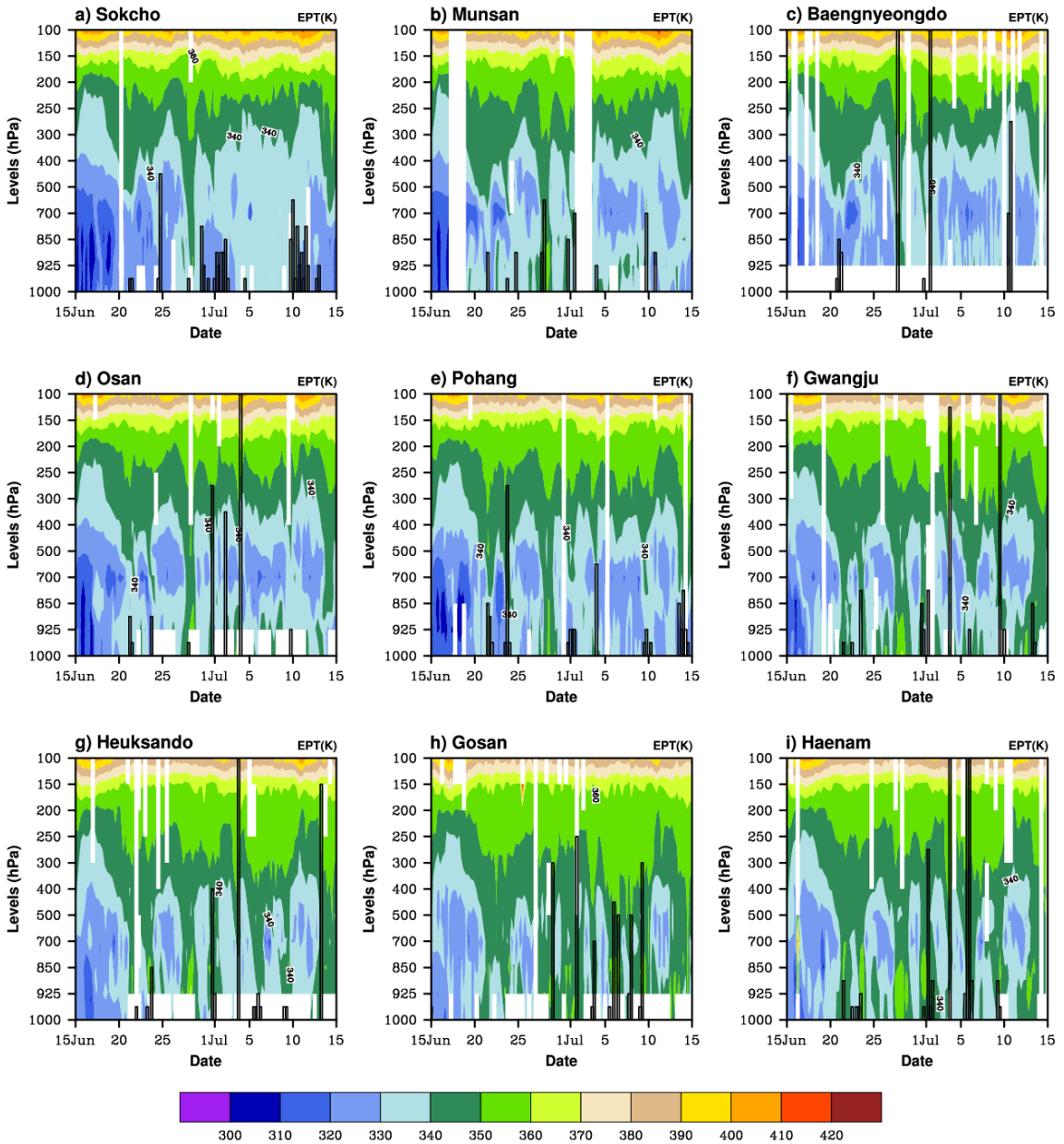


Fig. 2. The time-vertical distribution of equivalent potential temperature (K) and precipitation (mm) at a) Sokcho, b) Munsan, c) Bengnyeongdo, d) Osan, e) Pohang, f) Gwangju, g) Heuksando, h) Gosan, and i) Haenam from 15 Jun. 2007 to 15 Jul. 2007.

것으로 설명될 수 있다.

장마 시작과 함께 400 hPa 이하의 중하층에서의 상당온위 변동은 위도 별로 차이를 보인다. 저위도에 위치한 흑산도(Fig. 2g), 광주(Fig. 2f), 해남(Fig. 2i)에서는 상당온위가 340 K 이상인 열대 기단이 700 hPa 중

층에서 유입 됨에 따라 연직적으로 증립 대기가 형성되고 이후 열대 기단의 후퇴로 인해 열적 불안정 대기가 반복되어 나타나는 특성을 보인다. 하지만 고산(Fig. 2h)의 경우 다른 저위도에 위치한 지점과 달리 장마 시작 이후부터 중층에서의 열대기단 유입이 지속

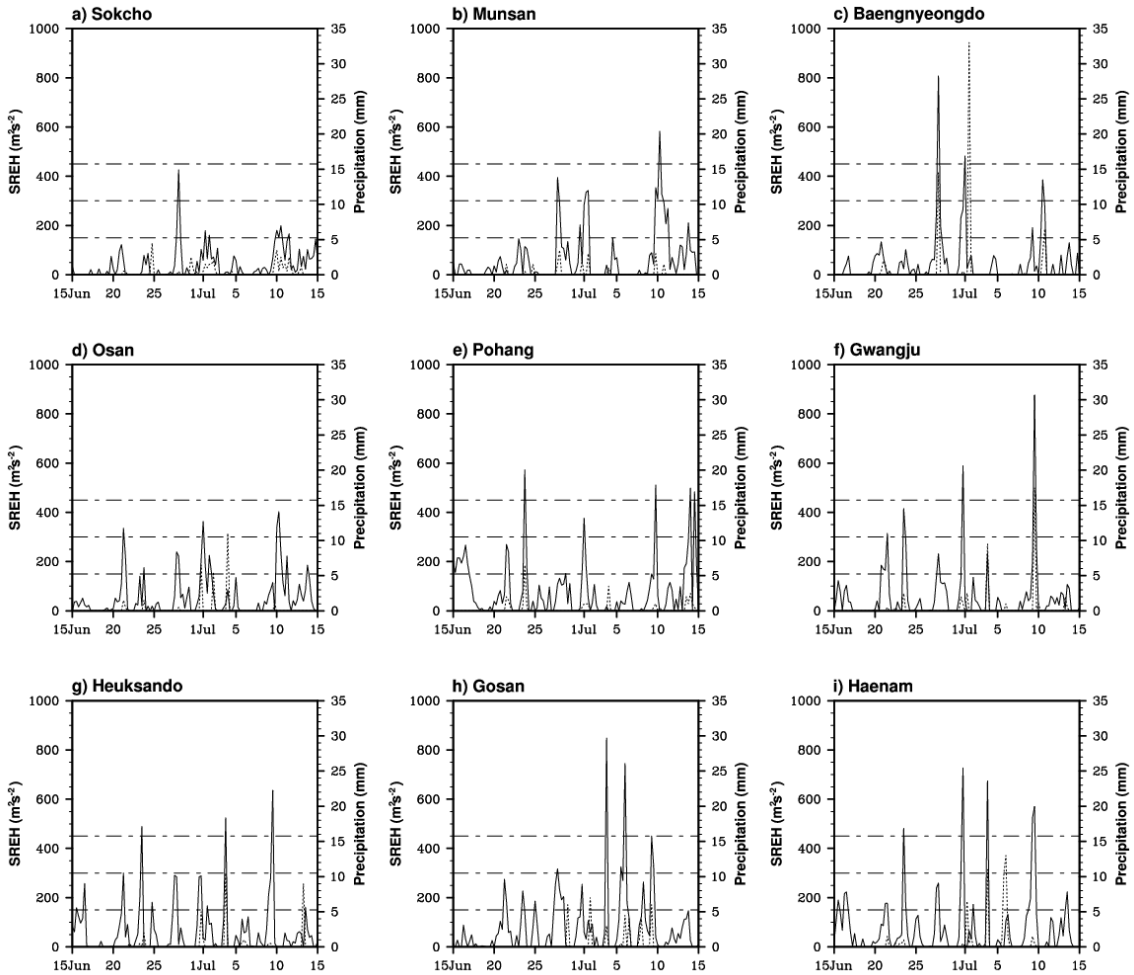


Fig. 3. The time-series of SREH index and precipitation amount (mm) at nine stations. Solid line indicates SREH and dotted line does precipitation

되면서 중립대기가 분석 기간 내내 우세하였다. 그리고 속초(Fig. 2a)에서는 열대기단의 유입과 중층에서 상당온위의 감소 또한 나타나지 않아 330 K 미만의 중립대기가 우세하며 때로는 고도의 증가에 따라 상당온위가 증가하여 안정한 대기상태를 보인다. 고산과 속초에서 나타나는 이러한 특성은 앞선 ECMWF 분석결과와 비교해 볼 때, 고산의 경우 북태평양 고기압의 세력권 내에 위치하면서 다른 지점과 달리 주기적인 변동이 나타나지 않기 때문이며, 속초의 경우 북태평양 고기압의 세력이 미치지 않은 상황에서 북동쪽에 위치한 오후츠크해 고기압 세력의 가장자리에 위치하기 때문으로 추정된다.

Fig. 2의 상당온위 변동과 강수량(막대 그래프로 표

시)간의 관계를 살펴보면 전반적으로 강수는 열적으로 불안정한 대기보다 중립대기 상태에서 발생하고 상당온위가 감소하여 열적 불안정 대기로 변화하면서 종료된다. 반면 속초의 경우에는 7월 1일과 같이 하층 상당온위가 감소하는 안정대기 상태에서도 강수가 나타나 다른 지점과는 차이를 보인다. 이를 통해 2007년 장마 기간 동안 강수의 발생은 연직적으로 대기가 불안정할 경우보다는 중립 혹은 안정대기 상태에서 주로 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3 지점별 역학적 및 열역학적 특성

장마기간 동안 강수는 대기의 열역학적 불안정과는

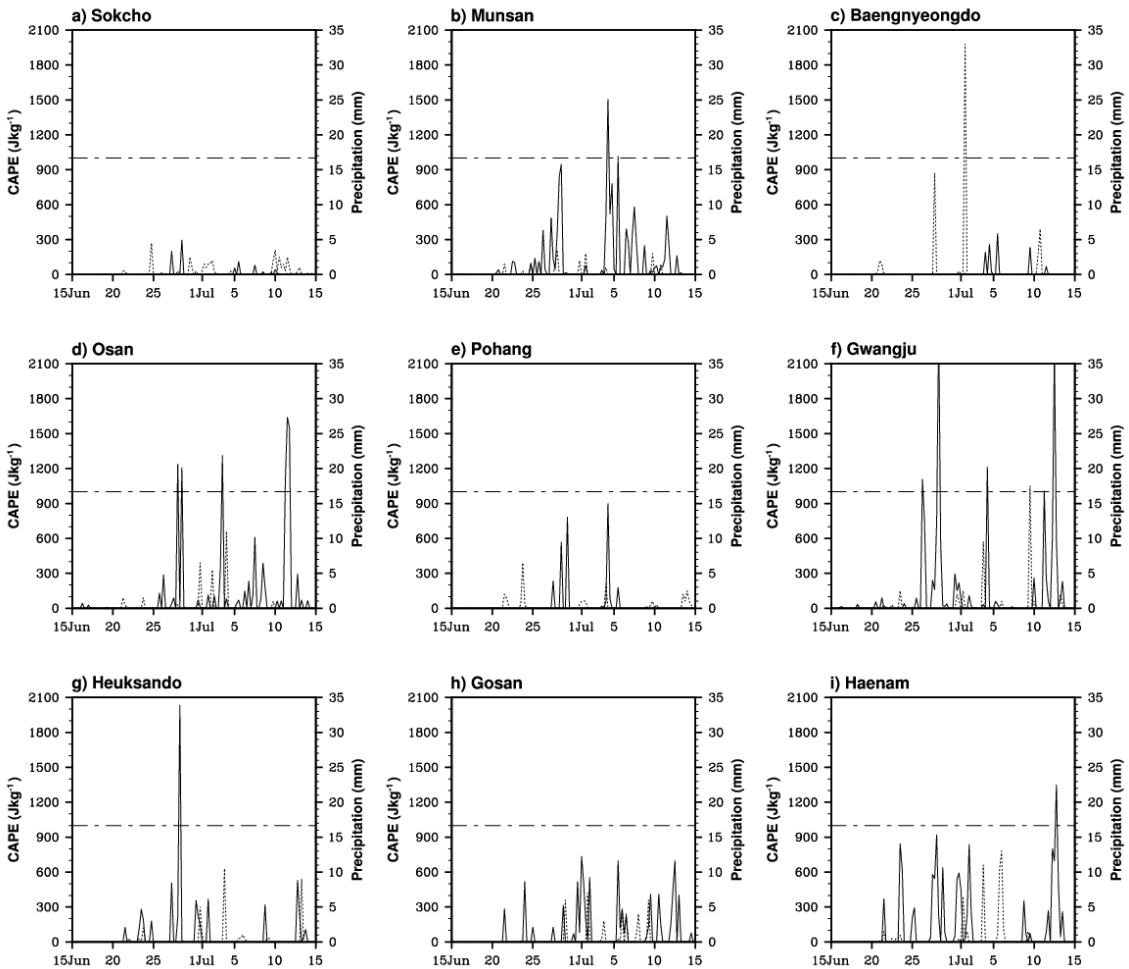


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for CAPE index.

무관하게 증립 혹은 안정한 대기에서 발생하였는데 이를 상세히 분석하고자 지점별로 대기의 열역학적 특성을 설명할 수 있는 CAPE와 역학적 특성을 나타내는 SREH를 계산하여 각각 Figs. 3~4에 나타내었다.

분석기간 동안 포항에서의 SREH 평균값은 약 $79 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 으로 다른 지점에 비해 가장 높고 그 뒤를 이어 고산($77 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$), 해남($74 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$) 순으로 나타나 저위도에 위치한 지점에서 상대적으로 높았다. 반면 고위도에 위치한 속초와 백령도에서는 각각 $40 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 과 $48 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 으로 고위도에 위치할수록 낮은 SREH를 보였다. CAPE의 경우에는 전반적으로 저위도에서 높고 고위도에서 낮은 특성을 보이지만, CAPE 평균값이 가장 저위도에 위치한 고산(69 Jkg^{-1})보다는 광주(115 Jkg^{-1})

와 해남(106 Jkg^{-1})에서 높은 값을 보여 SREH와 같이 위도 별로 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 강수량과의 관계를 살펴보면 강수 발생은 CAPE의 증가보다는 SREH와 잘 일치하여 모든 지점에서 SREH가 $150 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ 이상일 경우 강수가 발생하였고 SREH의 값이 클수록 강수량 또한 증가하였다.

즉 대기의 역학적 불안정과 열역학적 불안정은 저위도로 갈수록 커지나 강수의 유무는 대기의 역학적 불안정과 밀접한 연관성을 가진다. 그러므로 역학적 불안정이 갈수록 약해지는 고위도에서 강수량이 상대적으로 작은 것으로 분석된다. 하지만 제주 고산의 경우는 다른 지점과 달리 역학적 불안정에 부가하여 열역학적 불안정 또한 강수 발생과 연관성을 보인다.

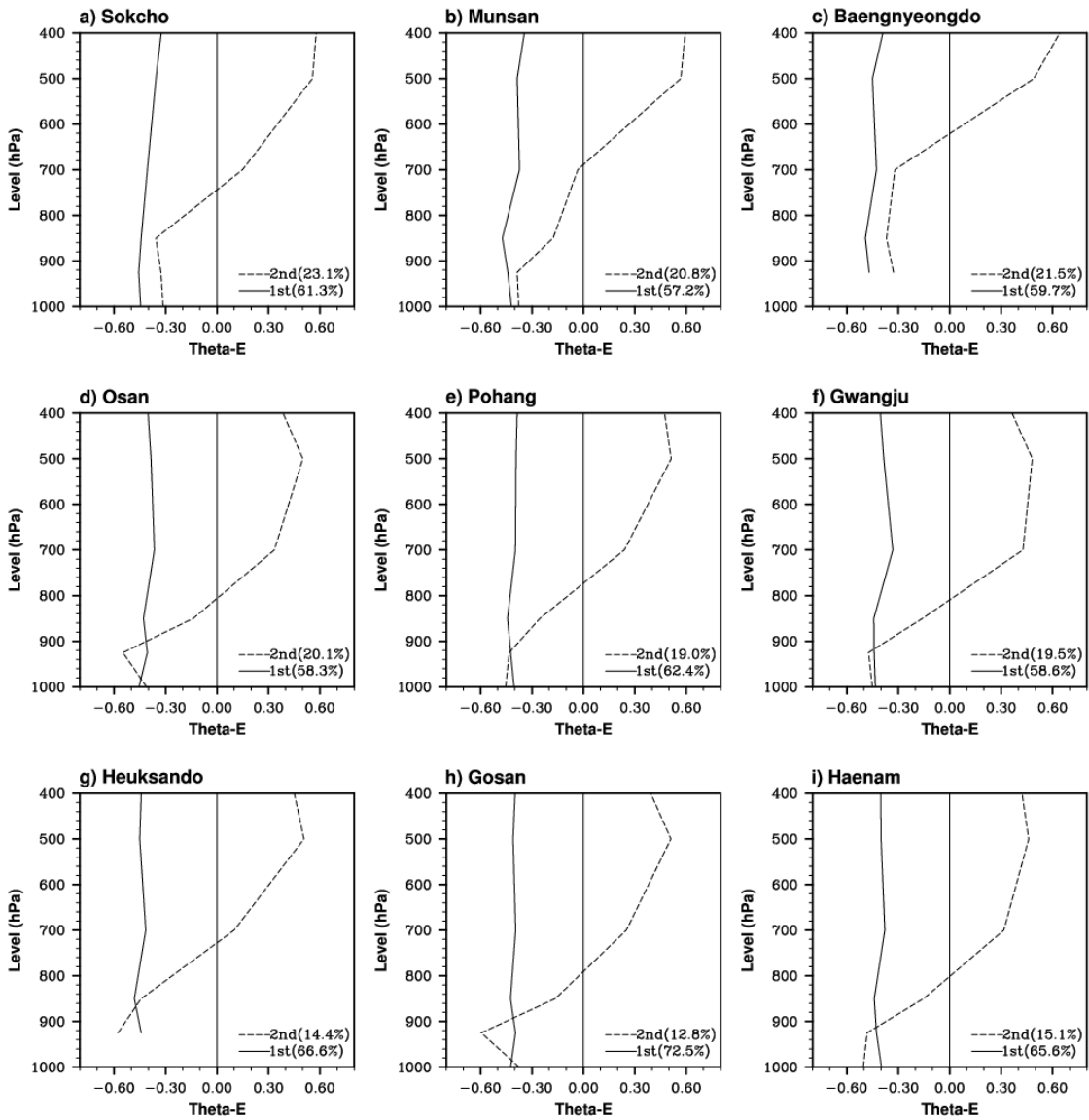


Fig. 5. Eigen vectors of EOF analysis. Solid line indicates the first mode and dotted line does the second mode.

연직 상당온위의 분포(Fig. 2)와 불안정도 계산 결과(Figs. 3~4)를 토대로 요약해 보면, 속초 및 고산을 제외한 나머지 지역에서는 2007년 장마기간 동안 중층에 한랭핵(cold core)을 가지고 열적으로 불안정한 바이우와 같은 경압구조가 우세하였다. 하지만 강수는 경압구조에 직접적인 영향을 받지 않았고 열대기단이 북태평양에서 확장됨에 따라 중층 대기의 경압구조가 약화될 때 발생하였다. 이는 고기압의 북상에 따른 남서류의 강화가 역학적 불안정을 증가시켜 강수를 유발

하는 것으로 사료된다. 고산의 경우에는 장마기간 동안 중립대기가 유지되면서 연직 기온경도가 약하고 하층에 온난핵(warm core)을 보여 메이유 형태의 준 순압구조를 보였다. 고산에서의 강수는 열적 그리고 역학적 불안정이 증가될 때 나타나는 것으로 보아, 순압대기가 약화되는 시점에 나타나는 것으로 해석된다. 한편 속초 또한 고산과 같이 열적으로 안정된 준 순압구조를 보이지만 연직 쉬어가 상대적으로 약하고 상당온위가 10 K 정도 낮아 다른 지점에 비해 상대적으로

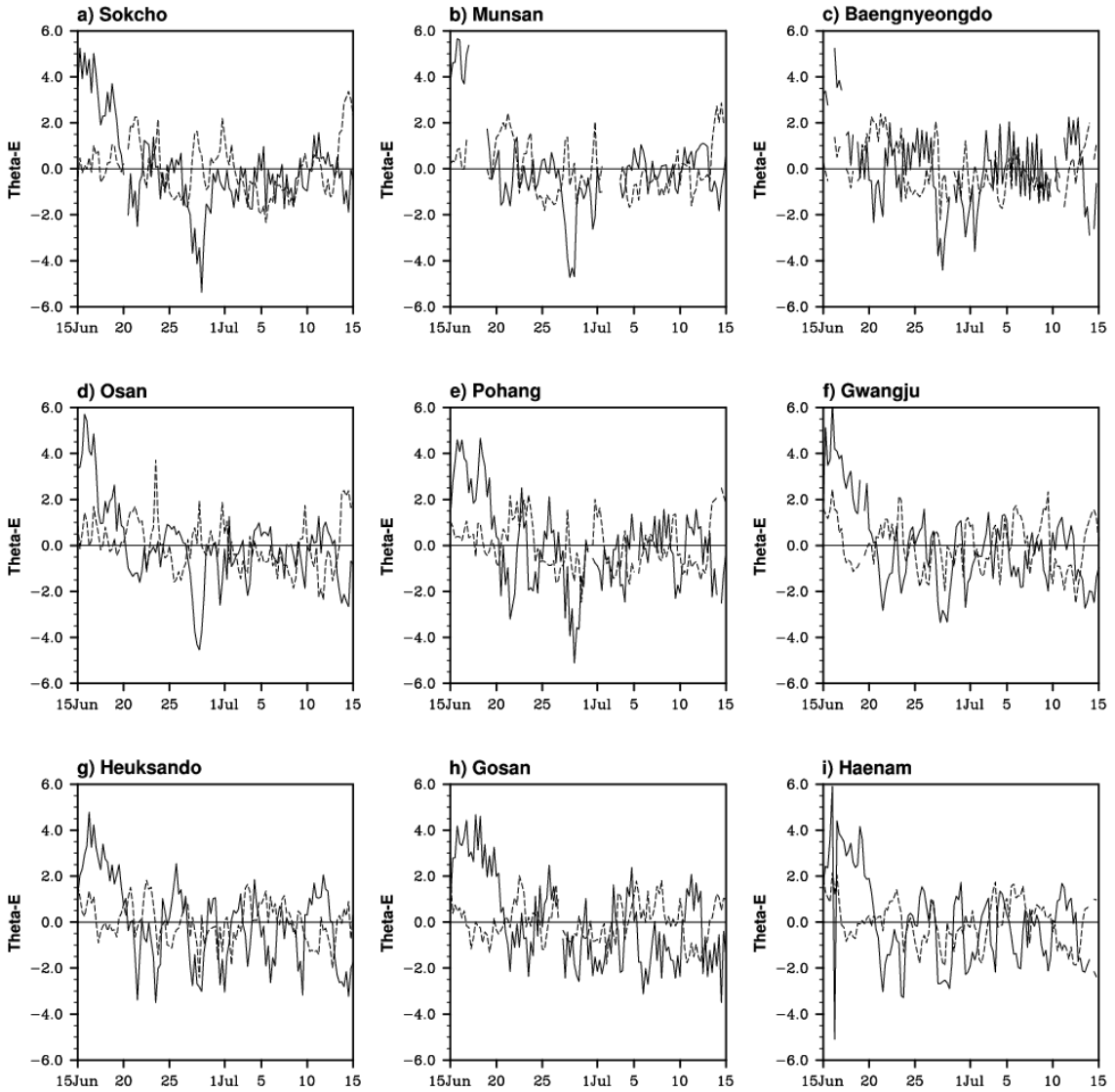


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for time series of principle components

작은 강수량을 보인다. 과거 박순용 등(1986)은 1978년 장마 초반에 한반도 남부지역에 경압구조가 나타난다고 밝혔는데 2007년 장마는 경압구조의 특징이 속초와 고산을 제외한 대부분의 지역에서 나타날 뿐만 아니라 장마기간 동안 지속적으로 유지되어 1978년 장마와는 다른 특징을 보인다.

3.4 주성분분석(EOF) 결과

장마기간 동안의 400 hPa 이하에서의 상당온위 변

화는 지역별로 차이를 보였는데 장마의 시공간적 변화 특징을 살펴보고자, 지점별 연직 상당온위에 대한 주성분 분석(EOF)을 수행하였다.

Fig. 5는 지점별 상당온위의 EOF 분석결과를 보여준다. 고산에서 제1모드는 총 분산의 72.5%를 설명하여 가장 높았고 전반적으로 고위도로 갈수록 점차 낮아지는 경향을 보인다. 고유 벡터의 분포는 모든 지점에서 동일한 패턴을 보였는데 시간에 따른 변화를 살펴보면(Fig. 6) 장마 시작일인 20일을 기점으로 이전 전 층에서 상당온위의 감소를 보이다 장마 시작과 함

계 상당온위의 증가가 400 hPa 이하 전 층에서 나타나며 이후 주기적으로 증감이 반복되는 경향을 보인다. 하지만 상당온위의 주기적인 감소 경향은 저위도에서 뚜렷한 반면 고위도에서는 거의 나타나지 않는다. 이를 통해 제1모드에서는 장마의 시작이 뚜렷이 나타나 통계적으로 장마시작을 정의할 수 있는 지수로 활용이 가능함을 알 수 있다.

제2모드는 총 분산의 12.8%(고산)에서 23.1%(속초)를 설명하고 있으며, 제1모드와는 달리 고위도로 갈수록 제2모드 경향이 우세하다. 고유벡터의 연직 분포는 지점별로 차이는 있지만 약 700 hPa를 기준으로 상층과 하층 사이에 위상이 반대로 나타난다. 강수 유무와 비교할 경우 700 hPa 이상의 고도에서 상당온위가 증가하고 이하의 고도에서 상당온위가 감소하는 열적 안정대기 상태에서 강수가 나타나는 것을 확인하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 중층에서의 상당온위 증가는 북태평양 고기압의 확장 및 후퇴에 기인함을 감안하면 결국 제2모드는 북태평양 고기압에 의한 강수 유무에 따른 연직 구조를 설명하는 것으로 분석되어 통계적으로 장마기간 동안 강수의 유무를 판별할 수 있는 지수로 활용이 가능할 것으로 보인다. 하지만 이러한 결과는 2007년의 장마 사례만을 통해 도출된 결과이므로 향후 분석기간을 확장하여 이를 살펴볼 필요가 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 ECMWF 분석자료 및 라디오존데 관측자료를 이용하여 2007년 장마기간 동안 상당온위 변화에 따른 연직 대기 특성을 살펴보았다. 장마는 오호츠크해 기단이 쇠퇴함에 따라 북태평양 고기압이 북상하면서 열적 불안정이 증가하고 남서류가 한반도 남부지방까지 북상하면서 시작되었다. 이후 열대 기단이 더욱 북상하여 850 hPa 하층 풍계가 북서로 바뀌면서 장마는 종료되었다.

2007년 장마기간 동안 한반도 9개 지점에서의 강수 발생시 대기 연직구조의 특성을 분석한 결과 강수의 주요 원인은 열적 불안정보다 역학적 불안정이 더 우세하였다. SREH가 $150 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이상 증가할 경우 지상 강수가 나타나며 역학적 불안정이 클수록 강수량 또한 증가하는 경향을 보였다. 또한 한반도에서는 장마기간 동안 경압대기가 우세하였으나, 고산에서는 북태평양 고기압의 영향으로 그리고 속초에서는 오호츠크해 고기압의 영향으로 순압대기의 특징을 보였다. 2007년

장마기간 동안 강수는 경압대기와 순압대기가 약화되는 시점에 나타나 열적 불안정 보다는 역학적 불안정이 강수의 주요 원인임을 알 수 있었다.

상당온위에 대한 주성분 분석결과 제1모드에서는 400 hPa 이하 전 층에서 장마시작과 함께 상당온위가 증가하여 장마시작을 표현할 수 있는 지수로 활용 가능할 것으로 분석되었고 제2모드에서는 중층과 하층간의 상당온위의 변동으로 장마 기간 동안 강수 유무를 판별할 수 있는 지수로 활용 가능할 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 한반도 악기상 집중관측 사업의 일환으로 2007년 하계 집중관측(KEOP-2007)동안 전국적인 규모로 장기간 집중관측을 수행하였고 이를 통해 장마전선의 발생/발달/쇠퇴에 관한 역학적 및 열역학적 구조를 보다 상세히 분석할 수 있었다. 또한 목표관측시스템과 WRF/KLAPS 및 WRF/3DVAR를 기반으로 하는 관측시스템을 구축하였고 KEOP-2007 집중관측자료를 기상청 현업 모델에 적용한 결과 관측자료가 수치모델의 예측능력 향상에 기여함을 알 수 있었다. 향후에도 한반도에서의 위험기상 예측성 향상을 위한 집중관측을 지속할 예정이며 이를 통해 한반도에 유입되거나 발생하는 재해기상의 예보 정확도 향상에 기여하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업인 “예보기술지원 및 활용연구”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2007: 2007년 장마분석, 기상청, p143.
- 박순용, 윤일희, 정순갑, 1986: Heat and Moisture Sources Associated with the Changma Front during the summer of 1978, *J. Korean Meteor. Soc.*, **10**, 1-27.
- 변희룡, 이동규, 정창희, 1992: 장마전 건기의 대기순환에 관한 연구, *J. Korean Meteor. Soc.*, **6**, 71-88.
- 전은희, 김연희, 김기훈, 이희상, 2008: 지상기반 듀얼 밴드 라디오미터의 운영 및 활용 가이드선, *대기*, **18**, 441-458.
- Chen, G. T.-J., and C.-P. Chang, 1980: The structure and vorticity budget of an early summer monsoon trough ('Meiyu') over southeastern China and Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 942-953.
- _____, C.-C. Wang, and S.-W. Chang, 2008: A diagnostic case study of Mei-yu front genesis and development of wavelike frontal disturbances in the subtropical environment.

Mon. Wea. Rev., **136**, 41-61.

Hübener, H., U. Ulbrich and P. Speth, 2000: The role of baroclinic instability for Changma rainfall. *J. Korean Meteor. Soc.*, **3(2)**, 53-66.

Krishnan, R. and M. Sugi, 2001: Baiu rainfall variability and associated monsoon teleconnections. *J. Meteor. Soc.*

Japan, **79**, 851-860.

Maeda, S., K. Tsuboki, and Q. Moteki, 2008: Detailed structure of wind and moisture fields around the Baiu frontal zone over the East China Sea, *Sci. Online Lett. Atmos.*, **4**, 141-144.