

한반도 중규모 대류복합체의 발달특성에 관한 연구

이순환^{1,*} · 원효성²

¹조선대학교 아시아몬순기후환경연구소, 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지
²광주시방기상청, 500-170 광주광역시 북구 운안동 산 1번지

Characters of Mesoscale Convective Complex Development in Korean Peninsula

Soon-Hwan Lee^{1,*} and Hyo-Sung Won²

¹Center for Asia Monsoon & Climate Environment Research, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²Gwangju Regional Meteorological Office, Korea Meteorological Administration (KMA), Korea, Gwangju 500-170, Korea

Abstract: Heavy rain fall in the Korean Peninsula often occurs in the summer season due to MCC (Mesoscale Convective Complex) with complex mechanism. We analysed the Characteristics and the developing mechanism of MCC occurred at 14 July 2004. The results are as follows: a) There is strong wind inflow from the South-west china sea with heavy moisture and this moisture flux acts as the source of heavy rain, b) Because of the separation of upper and lower atmosphere due to an inversion layer at 600hPa, atmosphere over the Korea Peninsula is suddenly unstable, c) This MCC shows strong shear not with wind direction, but with the wind speed, and this wind shear continues the thermodynamic instability of the convective system, d) MCC was suddenly developed over Heuksando at 1400LST 14 July 2004. Thus we can say that the topography also was strongly associated with the development of MCC and it is also necessary to clarify the relationship between topography and MCC development, in future research.

Keywords: Mesoscale Convective Complex (MCC), heavy rain, wind shear, inversion layer, atmospheric instability

요약: 한반도 집중호우를 유발시키는 중규모대류복합체는 매우 복잡한 특성을 띠고 있다. 2004년 7월 14일 발생한 중규모 대류복합체의 발달메커니즘을 분석한 결과, a) 대류복합체 생성 전에 강한 남서기류의 유입이 있었으며, b) 600 hPa상에서 강한 역전층이 나타났다. 역전층은 상층과 하층간의 상당온위의 차이를 유발하여 대기불안정을 더욱 강화시켰다. 그리고 c) 일반적인 중규모대류복합체 특징인 풍향의 쉬어보다는 풍속의 쉬어에 의해 대류계의 열역학 불안정이 강화되었다. 그리고 d) 흑산도 등 해안지방에 의해 유발되는 난류 및 대기불안정으로 인하여 중규모 대류복합체가 해안지방에서 발달한 것으로 보인다. 그러므로 지형에 의한 중규모 대류 복합체의 발달메커니즘 규명이 필요하다.

주요어: 중규모 대류복합체(MCC), 집중호우, 윈드시어, 역전층, 대기불안정

서론

대류시스템은 지구규모 순환에서 에너지와 운동량을 재분배하는 중요한 기구로써 작용하고 있으며, 그 규모는 각 직용시스템의 크기에 따라 나누어진다

(Cotton and Anthes, 1989; Lucas et al., 2001). 특히 중규모 기상현상은 집중호우와 관련하여 매우 중요한 연구대상이다. 일반적으로 동아시아 여름철에 주로 나타나는 중규모 대류 복합체(Mesoscale Cumulus Complex)는 위성사진에서 나뭇잎의 구름 시스템으로 관측된다. 그 발생기에는 지상 일기도에서 저기압이 나타나지 않은 경우가 많다. 특히 중규모 대류 복합체는 동진하여 비교적 경압성이 강한 일본 열도 부근까지 진출하여 중규모 α 규모 저기압으로 발달한

*Corresponding author: leeshh@chosun.ac.kr
Tel: 82-62-230-7714
Fax: 82-62-230-7915

다. 장마기간 중 집중호우 발생과 관련하여 강한 대류와 연관된 구름 무리가 중국 내륙에서 발생하여 동진하다 대륙의 동안에서 서해로 접어들면서 전이기간을 거친 후 전선성 교란으로 변하면서 한반도 중부이남 지방을 통과할 때 집중호우가 빈번히 나타난다. 홍성유(2000)는 한반도에서 발생한 집중호우 사례에 대한 분석에서 호우예측을 위해서 대류불안정과 주변 바람장, 수증기 이류 및 상하층 제트기류 분석으로 호우가능성을 판단할 수 있다고 하였고, 류환수 외(2004)는 호남해안지방 해안선의 복잡성에 따른 중규모 대류계의 변화를 보였다.

중규모 대류복합체의 일반적인 연구방법은 위성에 의한 정성적인 접근과 종단 기상관측에 의한 통계적 접근이 주로 이루어지고 있으며, 대륙내의 중규모 대류복합체의 발달에 관한 이론 및 관측적인 연구가 많이 진행되어 왔고, 해양상 및 열대에서 발달하는 중규모 대류 복합체는 관측적인 접근이 매우 어렵기 때문에 해양상에서 발달하는 중규모대류 복합체의 예측기술은 매우 부족하다(Anderson and Arriu, 1998; Gray and Marshall, 1998; Laing and Fritsch, 2000; Mohr and zipser, 1996; Lee et al., 2005).

그리고 집중호우 등의 악기상 현상은 그 공간 규모가 매우 국지적이고 수 시간 내에 발달하여 소멸함에 따라 이와 같은 악기상 현상을 예측하기 위해서는 짧은 예측시간과 보다 국지적인 현상에 초점을 두어 초단기예보의 필요성이 대두되게 되었다. 초단기예보는 중규모 대류계의 예보자체라고 말할 수 있다. 중규모 대류계는 개개의 뇌우보다는 여러 개의 뇌우로 구성된 조직화된 구조를 지니고 수평적으로 100 km 이상 연속된 강수지역을 만들어 내기도 한다. 또한 외관상 중규모 대류계는 현저히 큰 대류계들로 매우 다양한 형태로 존재한다.

MCC의 발달은 종관배경이 매우 약하며, 대부분의 상승강제력 또는 이를 유지시켜주는 것은 강한 하층 제트와 이에 수반되는 습한 난기이류 때문이다. 이처럼 중규모 대류 복합체는 우리나라의 집중호우 발생과 밀접한 관련이 있으며, 이에 대한 집중관측 및 구조 규명에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 해양상에서 발달한 중규모 대류 복합체의 특성을 잘 나타낸 2004년 7월 14일 사례를 분석함으로써 대류 복합체의 특성 및 진행과정을 살펴보고 중규모 악기상 예보 능력과 이해력을 향상 시키고자 한다.

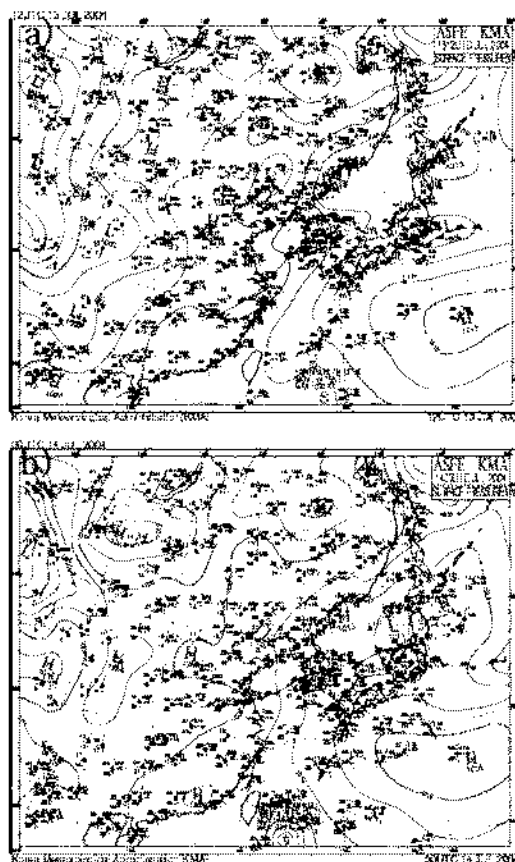


Fig. 1. Synoptic chart of Surface level at a) 21LST 13 and b) 09LST 14 July 2004 which were provided by Korean Meteorological Administration.

MCC 분석 및 토의

본 연구의 분석대상은 한반도 서해상에서 발달한 중규모 대류 복합체를 대상으로 하였다. 분석에 사용한 자료는 기상청의 지상 및 고층일기도, 자동관측장비(Automatic Weather System)에 의해 관측된 시간별 강수량자료, 정지 기상위성 적외선 자료, X 밴드레이저 자료를 사용하였다. 그리고 중규모 예보시스템인 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)의 유선 및 수증기 분석장과 중규모 모형인 MMS(The 5th generation Mesoscale Model)에 의해서 계산된 수치예보자료를 기류분석에 이용하였다.

Fig. 1은 2004년 7월 13일 21 LST와 14일 09LST의 지상일기도를 나타낸 것이다. 한반도는 북태평양

기단과 오호츠크해 기단 사이에 위치하고, 북태평양 기단의 경계면에 또는 남부지방에 장마전선이 활성화와 소강상태를 반복하고 있다. 그리고 850 hPa에서 한기를 동반한 상해 부근의 기압골이 서해중부 해상으로 이어져 남동진하면서 점차 북태평양 고기압이 확장하여 북쪽으로 향하였고, 온도골에 위치한 전선대가 판주에서 화중 내륙으로 형성되어 있다. 그림으로 나타 내지는 않았지만, 500 hPa에서 한기가 동반된 기압골이 발해반과 화중에 있어 17/12 hPa 북태평양 고기압 세력이 강화되어 거의 정체하고 있고, 온도골과 기압골이 더욱 깊어졌다. 그리고 14일에는 동중국해 아래에서 열대성저기압이 태풍으로 발달하고 있으며, 이에 따라 다량의 수증기가 한반도로 공급된다. 이때 전라남도 진도부근 해안에서 급격히 발달하면서 전남 남부 서해안지방을 시작으로 광주 및 전라남도지방에 천둥·번개를 동반한 집중호우가 단시간에 나타났다.

500 hPa에서 한기를 동반된 기압골이 발해반과 화중에 있어 17/12 hPa 고기압 세력이 강화되어 거의 정체하고 있고, 온도골과 기압골이 더욱 깊어졌으며, -6°C선이 남해안에 걸쳐 한기가 유입되다가 온도능이 위치함에 따라 하층 저기압의 발달을 약화시켰으며, 20-25 m/s의 속도를 가진 남서풍이 서해남부 해상으로 강하게 유입되다가 점차 약화되었다. 이것은 중위도저기압에서 불안정과 관련된 중규모 대류계에 의한 것이다.

Fig. 2는 중규모 대류계에 의하여 발생한 집중호우에 의한 시간별 강수량 분포를 나타낸 것이다. 관측 시간은 2004년 7월 14일 06시부터 12시 까지 3시간 간격이다. 06시 강수량분포를 보면 중부지방과 남부지방에 위치한 2개의 선상의 강수대가 나타난다. 중부 지방에 위치한 강수대는 장마전선에 의한 것이며, 남부지방에 위치한 것은 대류불안정에 의하여 형성된 중규모 대류 복합체에 의한 것으로 보인다. 즉 두 강수대의 기본 형성 메커니즘은 차이가 있으며, 이러한 강수구역분리는 12시까지 계속된다. 그리고 시간에 따라 강수강도가 증가한다. 강수량분포를 보면 0.5 mm에서 238.5 mm로 지역적인 편차가 크게 나타났고, 진도지방에서 단시간에 집중호우가 내며 일강수량이 238.5 mm로 가장 많이 내렸으며, 1시간 강수량 115.5 mm와 10분 강수량 30.5 mm가 내려 진도지역을 중심으로 중규모 대류계에 의한 집중호우가 발생하였다. 장마전선에 의한 직접적인 강수보다 중규모 대류계에 의한 강수편차가 크게 나타나고 있으며, 강수구역은

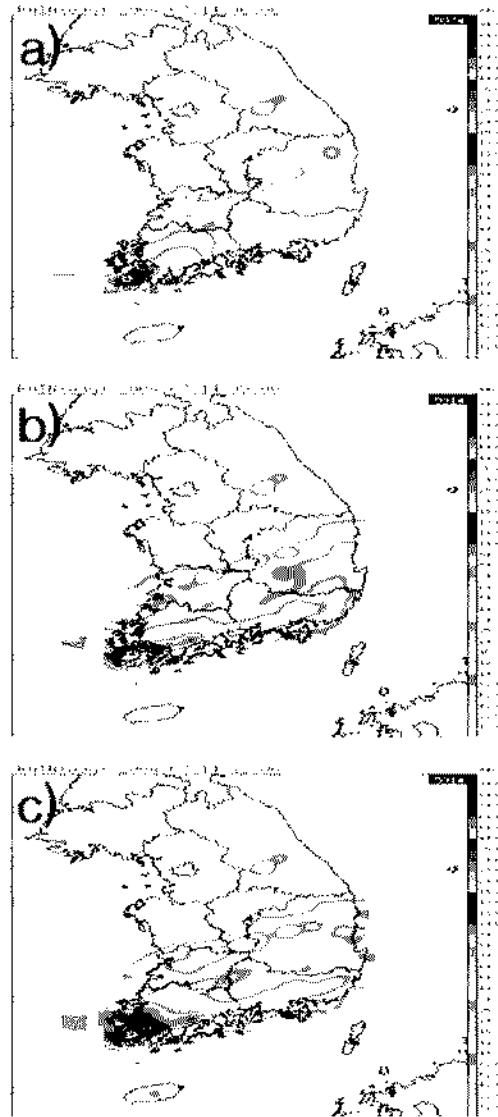


Fig. 2. Variation of precipitation observed by rain gage from 06LST to 12LST 14 July 2004 with 3hours interval.

전체적으로 확대되고 있으나 강수중심은 진도에 위치하여 12시간동안 큰 변화가 나타나지 않는다.

진도에서 발달한 중규모 대류계를 분석하기 위하여 관측 자료동화와 수치모델을 이용하여 한반도의 주변 기류와 안정도를 분석하였다. Fig. 3은 2004년 7월 14일 09LST의 한반도 주변 기상장을 수치 모의한 것이다. Fig. 3a,b는 한반도 주변의 850 hPa 고도의 수분속과 유선장을 나타낸 것인데, 북태평양고기압의 중심이 일본 남쪽 해상에 위치하고, 고기압성 흐름은

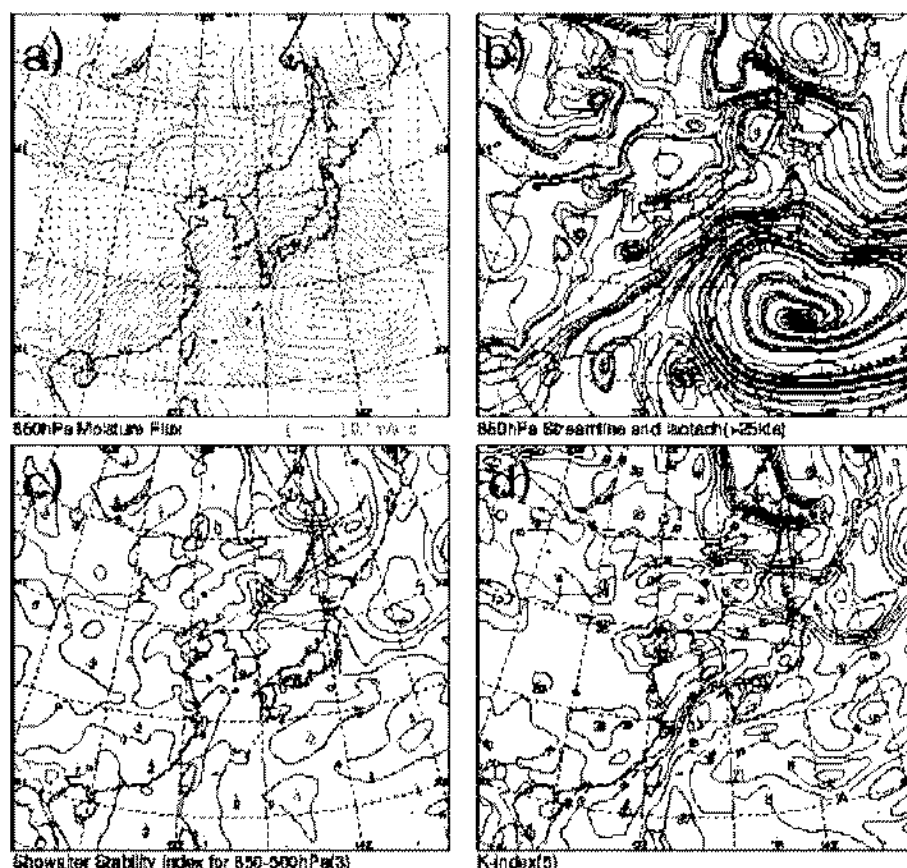


Fig. 3. The Auxiliary Analysis Chart which was calculated by Regional Data Assimilation Prediction System at 09LST 14 2004. a) moisture flux at 850hPa level, b) stream line at 850hPa, c) Showalter Stability Index (SSI), and d) K index.

로 동중국해에서 다량의 공기가 유입되고 있다. 해양 상의 유입되는 공기는 다량의 수증기를 포함하고 있기 때문에 이들 수증기가 급격히 한반도로 유입되는 것을 볼 수 있다. 850 hPa의 유선 12.5 m/s 이상 강풍역이 남해안으로 강한 수분속 복단을 따라 대류운의 유입이 지속될 가능성이 크기 때문에 강수에코의 발생과 소멸이 지속적으로 나타났다. 또한 Fig. 3c,d 는 대기의 불안정을 나타내는 Showalter Stability Index (SSI)와 K-index를 나타낸 것이다. 남부지방에 대기 불안정 지수(SSI < -2, K-index > 35)가 매우 큰 구역이 화남에서 서해남부와 남해서부 경계 해상으로 길게 연결되어 남부지방으로 강화되고 있다. 특히 K-index 는 수증기 수분속의 유입방향과 불안정 영역이 매우 잘 일치하고 있다. 이것은 북태평양 고기압과 동중국 해에서 발달하는 태풍의 영향으로 다량의 수증기가 유입되고, 수증기 유입에 의해 대기가 불안정하여 지

고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 한반도 남해안에 급격히 발달한 대류복합체의 적외선 강조 위성사진으로 14일 04시부터 07시 까지의 발달과정을 나타낸 것이다. 이전시간에 위성 등에서 관측되지 않았던 Oval type의 중규모 대류 복합체가 04시에 남서해안에서 급격하게 발달하였다. 그리고 발달한 대류 복합체는 편서풍을 타고 남동해안 쪽으로 이동하면서 강수를 유발하였다. 그리고 06 시 새로운 대류세포가 흑산도 부근에서 발달하는 것을 볼 수 있다. 그리고 두 번째 세포가 시간이 경과 함에 따라 강하게 성장하는 것을 볼 수 있다. 흑산도 부근에서 나타나는 급격하고 연속적인 대류 복합체의 발생은 중규모 대류복합체의 급격한 발전과 도시지형의 존재가 강한 관련성이 있음을 의미한다. 즉 대기가 다량의 수증기유입으로 불안정한 상태를 유지하면서 이동을 하다가, 한반도의 도서지역에서의 급격한

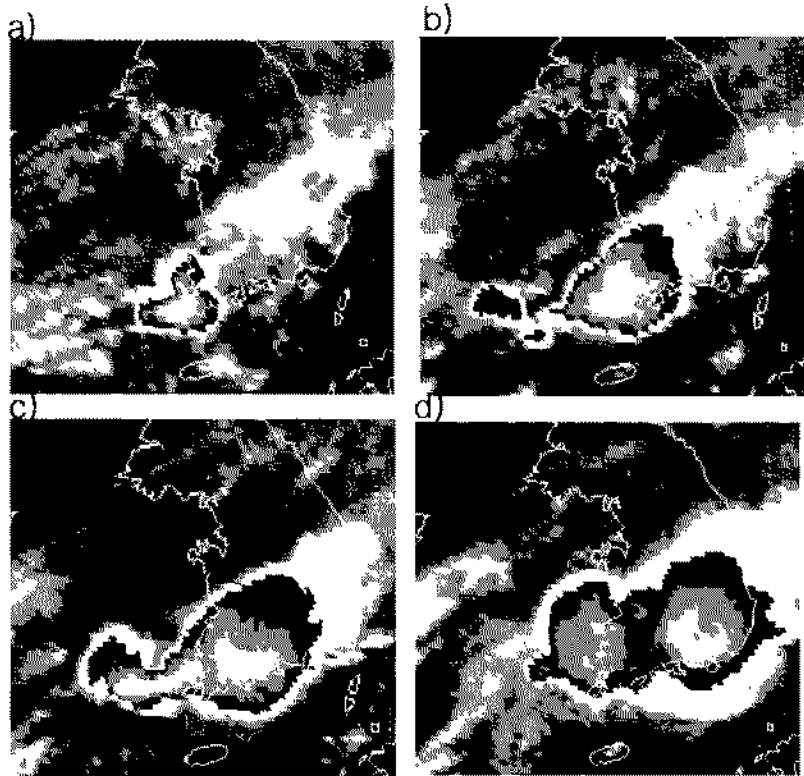


Fig. 4. Time evolution of Oval type MCC detected by GOES infrared image from 0400LST to 0700LST.

요란 등이 원인으로 작용하여 급격한 대류 복합체를 형성하였다고 볼 수 있다.

중규모 수치모형인 MM5(5th generation Mesoscale Model)의 계산 결과를 나타낸 것이 Fig. 5이다. 그림은 7월 14일 09LST와 12LST의 850 hPa 지위고도를 나타낸 것이다. 즉 갑작스러운 중규모 대류복합체가 발달할 때의 지위고도를 보면 후산도 부근에서 강한 요란이 발달하는 것을 볼 수 있다. 요란은 시간이 경과함에 따라 급격히 발달하여 12LST의 경우 원진한 저기압성 요란으로 성장하는 것을 볼 수 있다. 즉 풍상측에 위치한 해안 도시지형이 중규모 대류 복합체의 발달에 방아쇠 역할을 하였다고 볼 수 있다.

이러한 중규모 대류 복합체를 예보하기 위한 사전 인지 지표로 Q벡터를 이용하였다. Q벡터는 전진강화를 유도하는 바람과 등온선간의 상대적인 관련성의 역학적 표현으로 역학적 연직기류의 상승여부를 판단할 수 있다. 일반적으로 연직상승과 하강을 분석하는 오메가방정식은 와도이류와 증후이류가 종종 서로 상쇄하는 경향이 있으나, 이 벡터는 그 단점을 피할 수

있다.

Fig. 6은 한반도지역의 7월 14일 03LST와 06LST의 Q벡터를 나타낸 것이다. 03LST의 경우 강한 상승구역이 서해지방에 위치하고 있으며, 해안지방으로 접근하고 있음을 알 수 있다. 그리고 계속적으로 상승구역이 선상으로 유입되고 있다. 그러나 06LST의 경우 해안지방의 상승강도는 약화되면서 상승구역이 한반도 남해안 지역으로 확장되면서 빠르게 이동하고 있다. 이것은 Q벡터의 중규모 대류복합체 인지가능성을 보여주는 것으로 최성기 3시간 전의 Q벡터를 이용하여 한반도 남서해안의 집중호우 예측가능성을 높이는 방법의 하나로 사용할 수 있다.

Fig. 7은 무안 X 팬드레이터에서 관측한 연직 방향의 풍향과 풍속을 나타낸 것이다. 본 연구의 중규모 대류복합체의 경우 풍향에 의한 취어보다는 풍속에 의한 취어가 강하게 나타나고 있다. 즉 중규모 대류복합체가 접근하기 전인 05시 이전에는 진층에서 남서풍이 나타나고 있다. 그리고 중규모 대류복합체가 발달하면서 1.5Km비만에서 남동풍이 나타나고 위

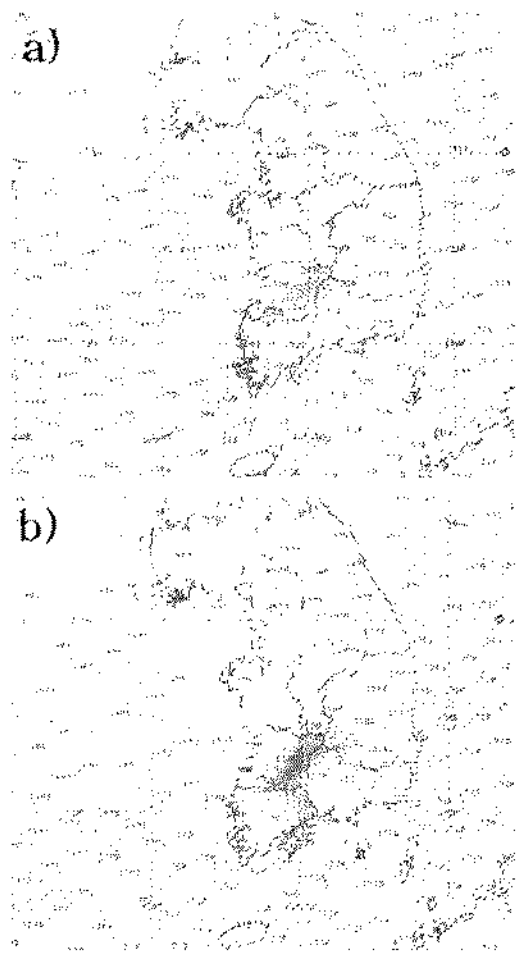


Fig. 5. Geopotential height of 850 hPa at a) 09LST and b) 12LST 14 July 2004.

층에서는 저층계열의 취어가 나타난다. 이것은 하층에서 약하지만 순전의 온난이류가 발달하고 있음을 나타낸다. 그리고 이러한 취어형태는 본 중규모 대류복합체의 특성을 대변하는 자료로 볼 수 있다.

Fig. 8은 중규모 대류복합체발생 전날인 13일 15LST와 14일 09LST의 광주지방 단열선도를 나타낸 것이다. 광주 대기선도에서 13일 15LST는 상층은 차고 건조한 역이 위치하고 있으며 하층에서 강풍으로 남사류가 불고 있다. 그리고 약 600 hPa 부근에 역전층이 형성되어 있으며 그 아래는 습윤층이 형성되어 있고 역전층을 경계로 상층은 차고 건조한 영역이 위치하고 있다. 역전층으로 상하층이 분리되어 있으나, 두층 모두 조건부 불안정을 나타내고 있다. 역전층을 경계로 하층은 잘 포화된 습윤층이 위치하

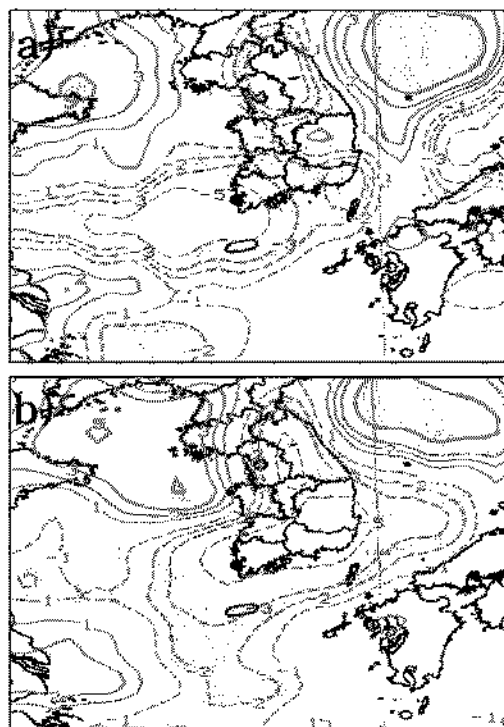


Fig. 6. Divergence Q vector around Korean Peninsula at a) 0300LST and b) 0600LST 14 July 2004.

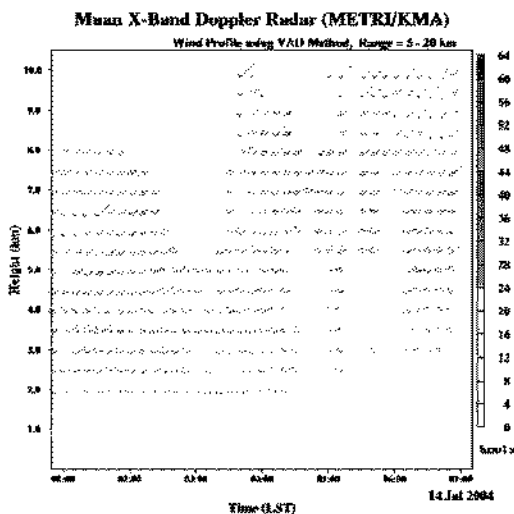


Fig. 7. Time variation of wind variation vertically observed by Muan X band radar from 0100LST to 0700LST with 10 minutes.

고 상층으로 갈수록 급격히 차고 건조한 역이 위치해 있을 때 하층에서 에너지가 축적되어 대기 연직

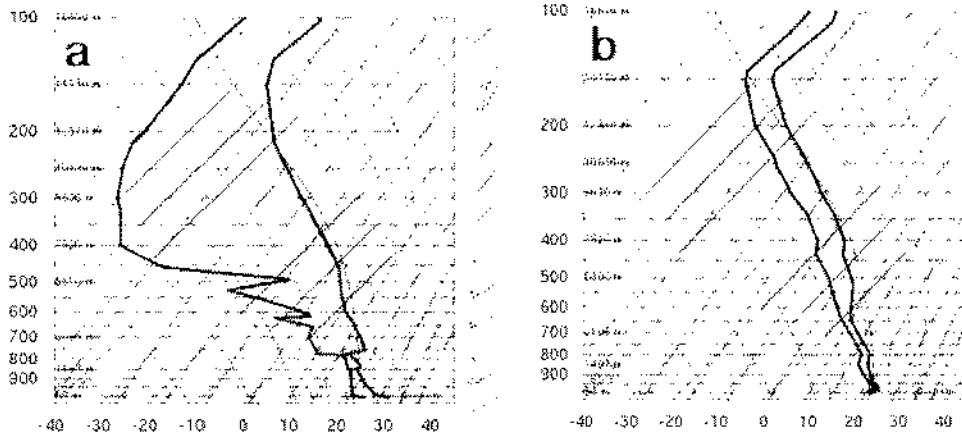


Fig. 3. Skew-T diagram observed at Gwangju, the observation time is a) 15LST 13 July, and b) 09LST 14 July 2004.

불안정을 급격히 증가시킨다. 이러한 구조는 미국의 경우 대평원 상에서 주로 나타나는 기단의 형태이다. 시간이 지남에 따라 점차 모든 층이 습윤해 지고 있으며, 특히 14일 00LST에는 하층에서 남서풍의 강풍역이 형성되어 유입되었다. 즉 상하층사이의 에너지 교환은 600 hPa의 안정층에 의하여 차단되고 있으며, 대기불안정도가 높아지고 있다. 이러한 안정층은 14일 03시부터 09LST 사이에 해소되면서 급격하게 불안정한 대기로 발달하고 있다. 이러한 불안정에너지가 큰 증류모 대류복합체 발달의 기본 에너지로 작용하고 있음을 알 수 있다.

결 론

2004년 7월 14일 한반도는 북태평양 기단과 오호츠크해기단 사이에 위치하고, 북태평양의 경계면에 드는 남부지방에 장마전선이 활상과 소강상태가 반복되어 전라남도 진도부근 해안에서 급격히 발달하면서 전남남부 서해안지방을 시작으로 광주 및 전라남도지방에 천둥·번개를 동반한 단시간 집중호우 현상으로 증위도저기압에서 불안정과 관련된 증류모 대류계에 의해 발생한 사례를 분석하였다.

장마 전선의 북상으로 남부지방에 많은 수증기를 동반한 강한 하층풍이 유입된다. 남부지방은 수증기의 유입으로 인하여 대기는 급격히 불안정 하여진다. 쇼윌터지수와 K-index의 불안정 지수가 화남에서 남서해상으로 길게 나선형으로 남부지방에 연결되어 강화되었다.

그리고 Q벡터의 분석을 통하여 Q벡터의 증류모 대류복합체 인지가능성을 확인하였고, 3시간 전의 Q벡터를 이용하여 한반도 남서해안의 집중호우 예측가능성을 높이는 방법의 하나로 사용할 수 있다.

X 밴드 레이더 시계열 관측에 의하여 풍계를 보면 전층에서 대부분 남서풍을 나타내고, 상하층의 풍속 차이가 매우 크게 나타난다. 또한 상하층의 기온경도가 매우 크게 나타나 두층을 역전층이 효과적으로 분리시켜서, 상하층간의 대기 불안정이 더욱 더 심화되었다. 그리고 역전층 소멸에 의한 급격한 대류는 증류모 대류 복합체를 형성하는 에너지 원으로 작용하였다. 대기하층에 풍향 차이가 나타나며, 전층에서 강한 풍속 차이가 나타난다. 이러한 층은 대류를 유지하는 메커니즘중의 하나이다. 만약 풍속 차이가 작다면 주로 다중뇌우세포의 전형적인 유형이지만 풍속 차이가 강하다면 악기상 가능성은 더욱 더 커지는데, 장마전선 상에서 발달한 요란으로 연직 적으로 매우 불안정한 기온 경도와 함께 연직 풍속 차이가 매우 강해 짧은 시간동안에 집중호우가 발생하였던 것으로 판단된다.

그리고 증류모 대류 복합체의 초기 발달이 흑산도 부근에서 지속적으로 발달하는 것으로 보아 증류모 대류 복합체의 발달과 지형은 매우 긴밀한 관계를 가지고 있다고 볼 수 있으며, 차후 과제에 이러한 지형에 의하여 나타나는 증류모 기상상의 변화가 증류모 대류 복합체의 발달에 미치는 영향을 정량적으로 고찰할 필요가 있다.

감 사

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발 사업의 하나인 “국지기상예측기술개발 과제”에서 수행된 것입니다.

참고문헌

김남욱, 1994, 1991년 7월21일 수원지방에 집중호우를 일으킨 뇌우의 연구, 연세대학교 대학원 석사학위논문, 101 p
 류찬수, 신유미, 이순환, 2004, 해안지형 복잡성이 중규모 순환장에 미치는 영향에 관한 수치연구, 한국기상학회지, 40 (1), 71-86.
 류찬수, 원희성, 이순환, 2005, 호남지방 고층권추 자료동화가 수치기상예보에 미치는 영향에 관한 연구, 한국지구과학회지, 26 (1), 66-77.
 홍성유, 1992: 한반도에서 발생한 집중호우의 수치 모의 실험, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 246 p.
 Anderson, C.J., and Arritt, R.W., 1998: Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over United States during 1992 and 1993, Monthly Weather Review, 126, 578-599.
 Cotton, W.R. and Anthes, R.A., 1989: Storm and cloud

dynamics, Academic Press, 880 PP.
 Dudhia, J., Gill, D., Guo, Y.R., Manning, K., and Wang, W., 2000, PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class note and users guide, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR, 5-12
 Gray, M.L.B., and Marshall, C., 1998: Mesoscale convective systems over the UK, 1981-97, Weather, 53, 388-396.
 Laing, A.G., and Fritsch, J.M., 2000: The large-scale environment of the global population of mesoscale complexes, Quarterly Journal Royal Meteorological Society., 123, 387-405.
 Lee, S.H., Kobayashi, T., Chino, M., and Ryu, C.S., 2005: Ocean model coupling with atmospheric model for prediction of radioactivity contaminant dispersion in emergency, Journal of Nuclear Science and Technology, 42 (8), 732-744.
 Lucas, C., May, P.T., and Vincent, R.A., 2001: An algorithm for the detection of front in wind profiler data, Weather Forecasting 16, 234-247.
 Mohr, K.J., and Zipser, E.J., 1996, Mesoscale convective systems defined by their 85GHz ice scattering signature: Size and intensity comparison over tropical oceans and continents, Monthly Weather Review, 124, 2417-2437.

2005년 8월 24일 원고 접수
 2005년 9월 16일 수정원고 접수
 2005년 9월 20일 원고 채택