

태풍-중위도 종관 시스템 상호작용 연구: 루사(0215), 매미(0314) 사례분석

최기선·김백조·박종길*
국립기상연구소 정책연구팀, *인제대학교 대기환경정보공학과
(2007년 3월 22일 접수; 2007년 7월 13일 채택)

A Case Study on Typhoon-Midlatitude Synoptic System Interaction: Typhoons Rusa(0215) and Maemi(0314)

Ki-Seon Choi, Baek-Jo Kim and Jong-Kil Park*

Policy Research Lab. National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-849, Korea

*Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gyeongnam 621-170, Korea

(Manuscript received 22 March, 2007; accepted 13 July, 2007)

The impact of midlatitude synoptic system (upper-level trough) on typhoon intensity change was investigated by analyzing the spatial and temporal characteristics of vertical wind shear (VWS), relative eddy momentum flux convergence (REFC), and potential vorticity (PV). These variables were computed over the radial mean 300~1,000 km from the typhoon center by using GDAPS (Global Data Assimilation and Prediction System) data provided by the Korea Meteorological Administration (KMA). The selected cases in this study are typhoons Rusa (0215) and Maemi (0314), causing much damage in life and property in Korea.

Results show that the threshold value of VWS indicating typhoon intensity change (typhoon to severe tropical storm) is approximately 15 m/s and of REFC ranges 6 to 6.5 $\text{ms}^{-1}\text{day}^{-1}$ in both cases, respectively. During the period with the intensity of typhoon class, PVs with 3 to 3.5 PVU are present in 360K surface-PV field in the cases.

In addition, there is a time-lag of 24 hours between central pressure of typhoon and minimum value of VWS, meaning that the midlatitude upper-level trough interacts with the edge of typhoon with a horizontal distance less than 2,000 km between trough and typhoon. That is, strong midlatitude upper-level divergence above the edge of the typhoon provides a good condition for strengthening the vertical circulation associated with the typhoons. In particular, when the distance between typhoon and midlatitude upper-level trough is less than 1,000 km, the typhoons tend to weaken to STS (Severe Tropical Storm).

It might be mentioned that midlatitude synoptic system affects the intensity change of typhoons Rusa (0215) and Maemi (0314) while they moves northward. Thus, these variables are useful for diagnosing the intensity change of typhoon approaching to the Korean peninsula.

Key Words : Typhoons Rusa (0215) and Maemi(0314), Vertical wind shear, Relative eddy momentum flux convergence, Potential vorticity, Intensity change

Corresponding Author : Ki-Seon Choi, Policy Research Lab.
/ National Institute of Meteorological Research, Seoul
156-849, Korea
Phone: +82-2-847-2496
E-mail: choiks@kma.go.kr

1. 서론

태풍은 5°~25°N, 120°~160°E의 북서 태평양 해역에서 형성되는 ITCZ (Inter-Tropical Convergence Zone) 부근에서 발생하며 한해 약 3~4개 가

량 우리나라로 내습한다. 우리나라 근처를 통과하는 태풍의 월별 발생 빈도는 6월 5.6%, 7월 28.7%, 8월 37.2%, 9월 25.5%로서 7월~9월의 내습빈도가 전체의 91.4%를 차지하는 여름철 중요 기상현상 중 하나이다¹⁾. 따라서 우리나라는 거의 매년 태풍에 의한 강풍과 호우로 수많은 인명 피해뿐만 아니라 수목의 유실, 건물의 파괴, 통신의 불능, 하천 범람에 의한 농토와 농작물 유실 그리고 항구 내 항만 구조물 및 선박의 파손 등으로 막대한 국가적 경제손실을 초래해 왔다. 이러한 태풍의 인명 및 재산에 미치는 막대한 재해의 측면과 강력한 운동계의 발생원인 및 기구에 대한 관심은 일찍부터 태풍의 이론적 연구 및 정확한 예측에 관심을 가지게 하였으며, 국내외적으로 많은 연구를 수행하게 하였다.

현재 태풍 강도의 예측 정확성은 진로의 예측 정확성 수준에 이르지 못하고 있는 실정이다. 이에 대해 DeMaria and Kaplan²⁾은 National Hurricane Center (NHC)에서 생산되는 진로 및 강도 예보 자료를 이용하여 오차 분석을 하였다. 그 결과, 진로는 12~72시간 동안에 99%의 정확성을 보인 반면, 강도의 정확성은 12시간부터 급격히 감소하기 시작하여 36시간 후에는 통계적으로 어떠한 유의성도 나타내지 못하는 신뢰수준까지 떨어졌다. 이런 강도에 측 기술의 부정확성에 대해 Hanley et al.³⁾은 허리케인 Opal과 Bertha의 사례 분석을 통해 태풍의 강도 예보 시 허리케인-중위도 상층 기압골사이의 상호작용에 대한 중요성을 지적했다. 두 허리케인 모두 상륙 후 24시간 내에 급격한 강도변화를 보였지만 실험 예보는 정확하지 못했다. Bertha의 경우 상륙 후 강도가 급격히 증가한 반면, Opal은 증가하다가 다시 급격하게 감소하는 경향을 보였기 때문이었다. 하지만 두 허리케인에서 나타난 공통적인 특징은 급격한 강도 변화 시 중위도 상층 기압골이 허리케인으로 접근하는 환경에 있었다는 것이다.

따라서 중위도 상층 기압골이 태풍의 강도변화에 미치는 영향 정도를 판단하기 위해 Relative Eddy momentum Flux Convergence (REFC)와 태풍의 강도변화의 관계에 대해 많은 연구자들에 의해 연구되어졌다^{3,6)}. 이들 연구의 결론은 REFC에 의해 이루어진 2차 순환이 태풍의 비대칭구조를 야기하여 태풍의 약화를 가속화 시킨다는 것이다. 반대로 Chen and Ding⁷⁾과 Shi et al.⁸⁾ 등의 수치모델 결과에서는 상층 제트 합류지역에서의 강한 상승류에 동반된 발산 흐름이 태풍의 발달에 긍정적으로 작용함을 보인다. 그러나 REFC는 시간의 경과에 따라 그 값이 증가하여 태풍의 발달 정도를 가늠할 수 있는 문턱값 (threshold value)을 정확하게 제공할 수 없다는 단점이 있다²⁾.

중위도 상층 기압골이 태풍의 강도변화에 미치는 영향은 vertical wind shear (VWS; 연직바람시어)로도 분석되어졌다. 특히, Yu and Kwon⁹⁾은 중위도 상층 기압골과 태풍과의 상호작용이 태풍 온난핵의 "ventilation"을 야기하거나, 구름과 강수분포의 비대칭을 야기하여 태풍의 강화에 부정적으로 작용함을 언급한바 있다. 하지만 많은 태풍이 중위도에 진입하거나 중위도 상층 기압골의 동쪽에서 전향하여 연직바람시어가 증가 하더라도, 태풍의 강도는 변하지 않고 중위도 지역에 예기치 않은 피해를 입히기도 한다. 따라서 태풍의 강도변화에 따른 연직바람시어의 문턱값은 여전히 태풍의 사례마다 다른 결과 값을 나타내고 있다¹⁰⁾.

한편 potential vorticity (PV; 잠재소용돌이도)는 중위도 상층 기압골이 태풍의 강도변화에 미치는 영향에 대해 주로 수치모의로 분석되어졌다. Thorpe¹¹⁾는 상층 잠재소용돌이도 최대값이 강하고 넓을수록 태풍 가장자리의 연직바람시어 증가속도가 급격하여 태풍 역시 급격하게 약화됨을 보였다. 이는 중위도 상층 기압골이 강할수록 태풍으로의 진행속도 역시 빨라 태풍의 약화도 빨라질 수 있음을 의미한다. Molinari et al.¹²⁾ 역시 비교적 약하고 작은 규모의 잠재소용돌이도 최대값은 태풍의 강화와 연관됨을 언급하였다. 따라서 잠재소용돌이도는 태풍예보를 생산하는 현업에서 실시간으로 태풍의 강도예보를 생산하는데 도움이 될 수 있는 유용한 변수이다¹³⁾.

지금까지 언급하였듯이 중위도 상층 기압골이 태풍의 발달에 있어서 긍정적 또는 부정적 역할을 하는지에 대한 의견은 연구자들마다 분분함을 알 수 있다. 긍정적 관계에 대한 연구는 주로 태풍의 각 발달 단계에서 중위도 상층 기압골의 영향에 대해 광범위하게 이루어져 왔다^{5,6,8,12,14~17)}. 특히, Rodgers et al.¹⁸⁾는 중위도 상층 기압골의 합류지역에서 발생하는 2차 순환은 태풍의 대류를 강화시키고 태풍의 벽운을 유지하는데 도움이 됨을 언급하였다. 그러나 Drury and Evans¹⁹⁾는 중위도 상층 기압골은 태풍의 발달을 지연시켜 부정적인 효과가 큼을 그들의 수치모의 결과를 통해 보였다. 한편 Hanley et al.³⁾은 최근 10년 동안 대서양에서 발생한 태풍을 분류·조사하였으나, 태풍의 발달에 상층 기압골의 역할은 여전히 불확실하며 태풍 사례마다 다르다는 결론을 내렸다.

위의 연구들은 주로 대서양에서 발생한 허리케인을 대상으로 이루어졌으며, 북서태평양에서의 태풍과 관련된 연구들은 드문 실정이다. Wu and Cheng⁵⁾과 Yu and Kwon⁹⁾은 각각 태풍 Flo (9019)와 Gene (9020), Prapiroon (0012)와 Olga (9907)의

강도변화에 대한 중위도 상층 기압골의 영향에 대해 연구하였으며, Titley and Elsberry¹⁷⁾ 역시 태풍 Flo (9019)의 급격한 강도변화에 대한 종관상태를 조사한 정도이다.

본 연구는 한반도에 상륙한 태풍 중 아주 강한 강도를 가진 두 태풍을 선택하여 태풍의 발달과 중위도 상층 기압골과의 연관성에 대해 조사하였다. 태풍의 발달과 상층 기압골의 관계 진단을 위한 변수는 위에서 서술하였던 것처럼 연직바람시어, REFC, 잠재소용돌이도를 통해 이루어졌으며, 이 세 변수가 선택되어진 배경은 자료 및 분석방법에서 설명되어졌다. 분석은 주로 태풍의 최전성기에서부터 약화 과정동안 이루어졌으며 특히, 약화시 세 변수의 문턱값을 산출하여 이전연구에서 결과와의 비교가 이루어졌다. 이 문턱값은 차후 태풍 내습시 강도에보에 조금이나마 도움이 되고자 하는 목적에서 분석되어졌다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

본 연구에서는 Regional Specialized Meteorological Center (RSMC) - Tokyo에서 제공하는 best track 자료를 사용하였다. 이 자료는 6시간 간격의 태풍 중심기압 (Central Pressure; hPa), 중심최대풍속 (kt) 및 이동위치 (위도·경도) 등을 포함한다.

태풍-중위도 시스템 상호작용을 분석하기 위한 대기장 자료는 Global Data Assimilation Prediction System (GDAPS)이다. 이 자료는 6시간 간격의 시간분해능과 위·경도 0.562° 및 17개 층의 공간분해능으로 이루어져있다.

2.2. 분석방법

2.2.1. 사례선정

태풍-중위도 시스템 상호작용을 분석하기 위해 Rusa (0215)와 Maemi (0314)의 태풍사례가 선정되었다. 두 태풍의 한반도 영향권 (32°~40°N, 120°~138°E) 진입시의 강도는 각각 950hPa (75kt), 930 hPa (95kt)로서 한반도에 상륙한 태풍 중 가장 강한 강도를 보였다. 두 태풍의 발생 및 이동경로는 Fig. 1과 같다. 서태평양에서 태풍의 평균 발생지역은 경도 142°E 부근이나²⁰⁾, 이 두 태풍은 훨씬 더 동쪽인 165°E, 155°E 부근에서 발생하였다. 또한 TY (64kt 이상)의 강도를 유지하면서 한반도 남해안에 상륙한 것을 볼 수 있다. 이는 태풍의 발생이 동쪽에서 이루어질수록 그 태풍의 수명뿐만 아니라 강도까지 증가한다는 이전연구의 결과와 일치하는 사례이다²¹⁾.

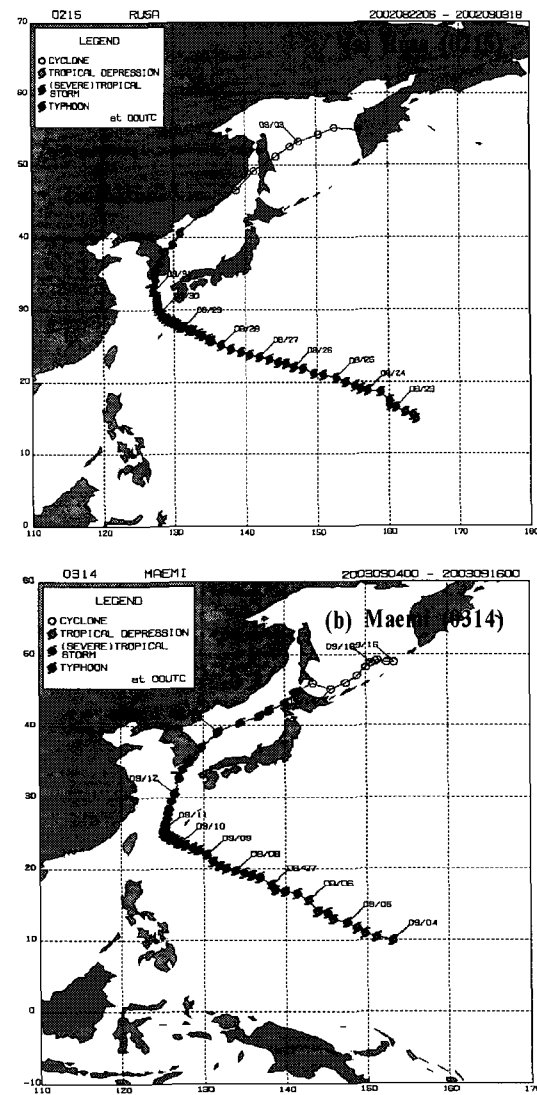


Fig. 1. Typhoon tracks for (a) Rusa (0215) and (b) Maemi (0314) cases.

2.2.2. 상호작용 진단을 위한 인자 선정

태풍-중위도 시스템 상호작용을 진단하기 위해 많은 연구들이 이루어져왔다. 특히, DeMaria et al.⁴⁾은 대서양에서 발생한 태풍을 대상으로 여러 인자들을 선택하여 진단한 결과 i) 연직바람시어, ii) Relative Eddy momentum Flux Convergence (REFC), iii) Maximum Potential Intensity (MPI) 등이 최적의 인자임을 제시한 바 있다. 또한 Montgomery and Farrel²²⁾과 Molinari et al.¹²⁾은 상층 잠재소용돌이도의 값은 연직바람시어와 음의 작용을 하여 태풍의 구조 및 강도 변화 진단 시 유용한 인자임을 보였다. 따라서 본 연구에서는 태풍-중위도 시스템

상호작용을 진단하는 인자로서 MPI를 제외한 연직 바람시어, REFC 및 잠재소용돌이도를 선택하였다.

연직바람시어는 상·하층의 선택 및 계산되어지는 반경에 따라서 그 값이 달라질 수 있을 것이다. 이에 관해 Yu and Kwon⁹⁾은 태풍 Prapiroon (0012)을 대상으로 태풍 중심으로부터의 반경별 및 연직별 연직바람시어 값 사이에서의 차이는 크지 않음을 보였다. 또한 Molinari and Vollaro²³⁾는 평균되어지는 태풍의 반경이 증가할수록 값의 불확실성은 감소되는데, 태풍중심으로부터 500 km까지는 30%이하, 800 km까지는 20%이하, 1,000 km까지는 10%이하로 오차가 감소함을 보인바 있다. 따라서 본 연구에서는 태풍 중심으로부터 300~1,000 km 반경평균 850 ~200 hPa 연직바람시어를 식(1)과 같이 구하였다.

$$VWS = \sqrt{(uwnd_{200-850})^2 + (vwnd_{200-850})^2} \quad (1)$$

여기서, $uwnd$ 및 $vwnd$ 는 각각 동서 및 남북 바람을 의미한다.

200 hPa에서 300~1,000 km 반경평균 REFC는 식(2)에서 처럼 Molinari and Vollaro²³⁾의 계산방법을 이용하였다.

$$REFC = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \overline{u_L v_L} \quad (2)$$

여기서, u, v 는 각각 반경방향 및 접선방향의 바람을 의미하며, r 은 태풍중심으로부터의 반경을 나타낸다. ['] 기호는 편차이며, 아래첨자 L 은 태풍과 함께 움직이는 라그랑지안 좌표계를 나타낸 것으로서 전 시각 태풍의 위치를 고려하여 지향류(steering flow)를 제거한 것이다.

Ertel 잠재소용돌이도는 식(3)과 같이 정의되며, outflow layer (대략 360K면 또는 200 hPa 지위고도 면)에서의 300~1,000 km 반경평균 및 수평면에서의 잠재소용돌이도가 계산되었다. 또한 태풍의 발달 단계별 잠재소용돌이도의 연직단면 분석이 이루어졌다.

$$PV = \frac{(\zeta_a \cdot \Delta \theta)}{\rho} \quad (3)$$

여기서, ζ_a 는 절대와도벡터이며, θ 는 온위 그리고 ρ 는 밀도이다. 등온위좌표계에서, PV 는 식(4)와 같이 표현된다.

$$PV = -g \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^{-1} \left[f + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_\theta - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_\theta \right] \quad (4)$$

여기서, P 는 기압, θ 는 온위, f 는 코리올리스 파라미터, 그리고 u 와 v 는 각각 바람의 동서, 남북 성분을 나타낸다. PV 계산 시 등온위면의 최하층을 310K로 두었으며 최 상단을 370K로 두어 총 13개의 층으로 계산이 이루어졌다. 여기서, $1PVU = 1 \times 10^{-6} m^2 K s^{-1} kg^{-1}$ 를 의미한다.

3. 태풍의 강도변화에 따른 종관인자의 특성

3.1. 시계열 분석

3.1.1. Vertical wind shear (VWS)

태풍 Rusa와 Maemi 사례 모두 TY강도로 전향 및 한반도에 상륙함을 Fig. 1로부터 볼 수 있다. 따라서 태풍-중위도 상층 기압골과의 상호작용을 분석하기 위해 STS → TY → STS의 단계 동안 태풍 중심으로부터 300~1000km 반경 평균의 연직바람시어, REFC 및 잠재소용돌이도를 분석하였다 (Figs. 2 and 2.2.3).

두 태풍에서 모두 연직바람시어는 중심기압과의 변화경향이 전체적으로 비슷하게 이루어진다 (Figs. 2a and 3a). 그러나 태풍의 약화 과정 동안에는 두 변수사이에 지연이 나타난다. 즉, 연직바람시어는 Rusa와 Maemi의 경우 각각 8월 29일, 9월 10일부터 증가하기 시작하지만, 중심기압은 하루 뒤인 8월 30일, 9월 11일부터 증가하기 시작하여 두 변수 사이에는 하루 (24시간) 정도의 지연이 있음을 알 수 있다. 이는 대류권 전체를 통해 구해진 연직바람시어가 5 ms^{-1} 의 최저값을 보인 후 24 시간 내에 허리케인이 약화되기 시작함을 수치모의로 분석한 Ritchie¹⁰⁾의 결과와 잘 일치한다. 하지만 본 연구에서 태풍 약화 시 연직바람시어의 값은 대략 3 ms^{-1} 로 Ritchie¹⁰⁾의 결과와는 약간의 차이를 보인다.

더욱 더 두드러진 특징은 TY단계에서 STS단계로의 약화 과정 동안 나타난다. Rusa와 Maemi 모두 STS단계로의 약화 시 대략 15 ms^{-1} 의 연직바람시어 값이 계산되었다 (Table 1). 이 결과는 최근 10년 동안 대서양에서 발생한 허리케인을 대상으로 허리케인의 약화시 평균적으로 15 ms^{-1} 이상의 연직바람시어 값이 계산됨을 보인 Hanley et al.³⁾과 일치한다. 또한 Zehr²⁴⁾는 허리케인 약화시의 연직바람시어 값을 $12.5 \sim 15 \text{ ms}^{-1}$ 로 제시함으로써 연직바람시어 값이 10 ms^{-1} 이상이 되면 태풍은 일반적으로 약화가 시작됨을 알 수가 있다.

3.1.2. Relative eddy momentum flux convergence (REFC)

REFC는 Rusa의 경우 전반적으로 증가하는 경향

을 보이는 반면 (Fig. 2b), Maemi는 증가하다가 STS단계 시작 시부터 급격하게 감소하는 경향을

Table 1. Threshold values of each factor during the typhoon-midlatitude upper-level trough interaction for Rusa (0215) and Maemi (0314)

Factor	threshold value		
	Rusa (0215)	Maemi (0314)	Average
VWS (ms^{-1})	14.8	15.5	15.2
REFC ($\text{ms}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$)	6.1	6.5	6.3
PV (PVU)	3.2	3.4	3.3

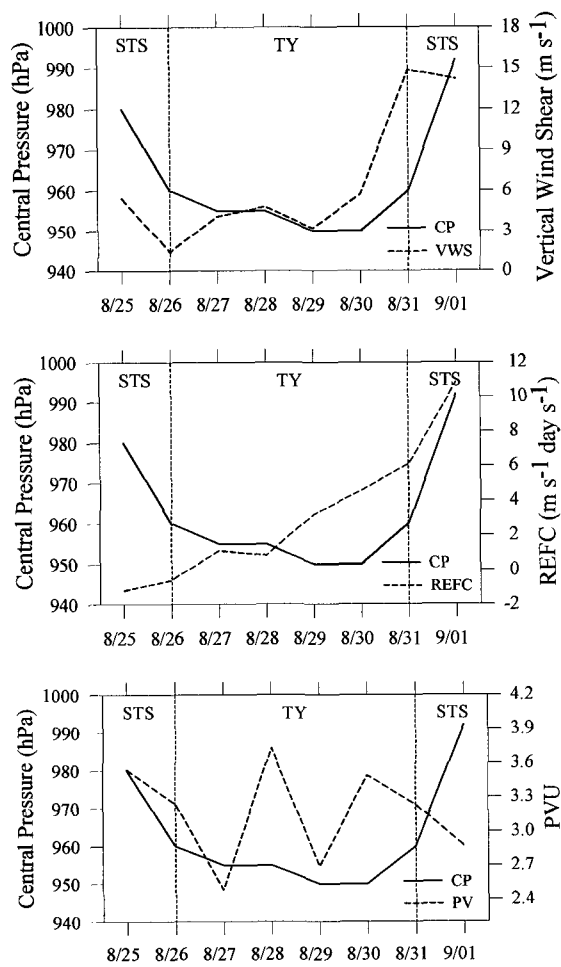


Fig. 2. Timeseries of (a) Vertical wind shear (VWS) between 850-hPa and 200-hPa, (b) relative eddy momentum flux convergence (REFC), and potential vorticity (PV) of the radial mean 300-1,000 km from the center for Rusa (0215) case.

보인다 (Fig. 3b). 하지만 TY강도에서 STS강도로의 약화 시 두 태풍은 $6 \sim 6.5 \text{ ms}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 비슷한 REFC의 값을 갖는다 (Table 1).

본 연구의 결과와는 다소 차이가 나지만 DeMaria et al.⁴⁾은 허리케인-중위도 상층 기압골의 상호작용 시작시의 REFC 값으로 $10 \text{ ms}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ 를 제시하였다. Hanley et al.³⁾ 역시 평균적으로 REFC 값이 $10 \text{ ms}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ 이상이면 중위도 상층 기압골에 의해 허리케인의 약화가 시작된다고 결론지었다. 이러한 REFC 값의 차이는 각 연구에서 사용된 자료의 수평해상도 차이에 기인한 것으로 보인다. 이에 대해 DeMaria and Kaplan²⁾는 고분해능의 자료일수록 REFC의 값에 국지적 상층제트의 영향이 잘 반영될 수 있기 때문에 저 분해능의 자료에서 구해진 REFC의 값과 차이가 날 수 있음을 언급한 바 있다.

3.1.3. Potential vorticity (PV)

360K 면에서의 잠재소용돌이도 역시 두 태풍에서 공통적인 변동 경향은 보이지 않는다. 다만

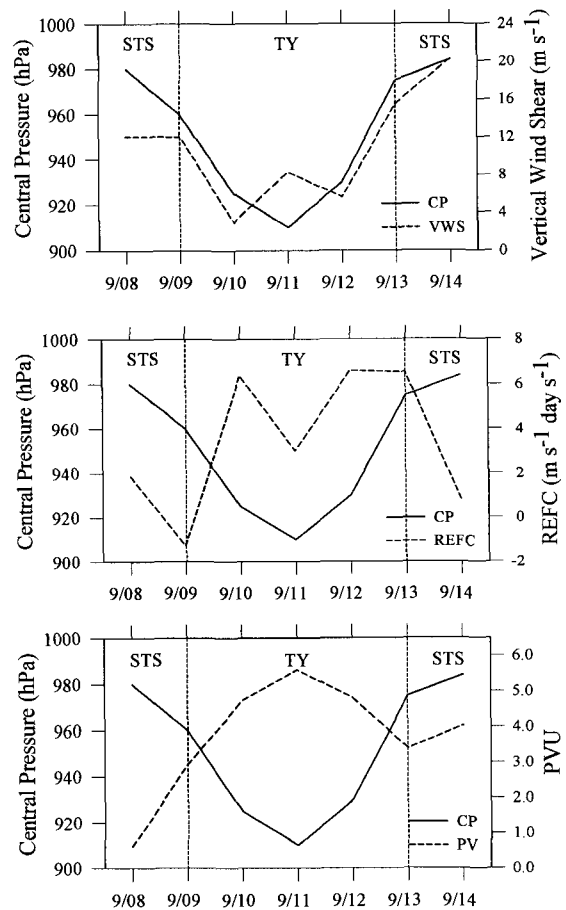


Fig. 3. Same as Fig. 2 but for Maemi (0314) case.

Maemi의 경우 중심기압과 반대의 변화경향을 나타낸다. 그러나 TY강도의 시작과 종료시 두 태풍에서의 잠재소용돌이도 값은 3~3.5 PVU로 거의 비슷하다는 공통점이 있다 (Table 1).

지금까지 태풍의 강도변화에 따른 잠재소용돌이도의 문턱값을 정의한 이전연구는 거의 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서 계산된 잠재소용돌이도 값이 타 지역에서 태풍의 강도변화에 따른 잠재소용돌이도 값과 어떠한 차이점이 있는지는 비교할 수가 없다. 다만 본 연구로부터 더 나아가 태풍의 사례를 추가하여 좀 더 일반적인 잠재소용돌이도 값을 구한다면, 이는 태풍 예보생산에 도움이 될 것으로 판단된다.

3.2. 잠재소용돌이도의 공간분포 변화 분석

태풍-중위도 상층 기압골의 상호작용을 좀 더 자세히 알아보기 위하여 두 태풍 사례에 대해 360K 면에서의 잠재소용돌이도의 수평분포 (left panels in Figs. 4 and 5)와 태풍 중심으로부터 남북 방향의 잠재소용돌이도 연직 단면도 (right panels in Figs. 4 and 5)를 분석하였다. 분석은 두 사례 모두 TY강도 시작일 (Rusa: 2002년 8월 28일, Maemi: 2003년 9월 9일)로부터 STS강도 시작일 (Rusa: 2002년 8월 31일, Maemi: 2003년 9월 13일)의 기간 동안 이루어졌다.

3.2.1. Rusa (0215)

2002년 8월 28일~29일 동안에는 중위도 기압골로부터의 기류와 태풍으로부터의 기류사이의 합류 지역이 한반도 동쪽임을 볼 수 있다 (Figs. 4a and 4b). 또한 이 기간동안의 연직단면도에서 역시 태풍의 중심으로부터 북쪽에 상층 기압골의 모습이 보이지 않는다. 이는 태풍이 아직 중위도 기압골로 접근하지 못하여 두 시스템간의 상호작용은 없음을 의미한다. 그러나 태풍의 영역이 점차 동쪽과 북쪽으로 확장하면서 8월 30일에는 두 시스템에 의한 합류가 30°N 부근의 중국내륙에서 이루어진다 (Fig. 4c). 또한 태풍의 이동 속도가 그 이전시기에 비해 상당히 빨라졌으며, 중위도 상층 기압골의 남하 역시 상당히 빨라졌음을 연직단면도로부터 알 수 있다. 이로 인해 8월 30일부터 연직바람시어의 값이 급격하게 증가하기 시작하였다 (Fig. 2a). 그러나 중위도 기압골은 태풍의 중심까지 영향을 미치지 못하여 중심부근에서의 저기압성 순환은 여전히 뚜렷하고 중심기압은 최대로 낮아졌다. 이는 8월 30일에 태풍의 가장자리와 중위도 기압골과의 상호작용이 먼저 이루어지기 시작했음을 의미한다. 결국 8월 31일에는 태풍이 중위도 기압골속으로 들어감으로서

중심기압도 급격하게 상승하며 (Fig. 2a) 연직 단면도에서도 태풍 중심의 잠재소용돌이도 값이 상당히 작아졌음을 볼 수 있다 (Fig. 4d).

3.2.2. Maemi (0314)

2003년 9월 9일~10일 동안에는 태풍-중위도 상층 기압골과의 상호작용이 일어나지 않음을 3 PVU 등치선으로부터 알 수 있다 (Figs. 5a and 5b). 그러나 9월 11일부터 두 시스템과의 상호작용이 시작된다. 이는 9월 11일에 태풍의 북쪽 가장자리가 중위도 기압골의 영역으로 들어감으로서 풍속이 세어지고, 태풍의 모양이 이전 시간에 비해 남북으로 길어짐으로부터 확인 할 수 있다 (Fig. 5c). 연직단면도에서도 11일부터 중위도 기압골이 남하하기 시작한다. 이로 인해 연직바람시어는 11일부터 급격하게 증가한다 (Fig. 3a). 그러나 Rusa 사례에서처럼 이 시기에 중위도 기압골은 태풍의 중심까지 영향을 미치지 못하여 중심기압은 최소를 나타낸다. 이후 13일에는 태풍이 중위도 기압골의 영역으로 완전히 들어감으로서 STS의 강도로 약해졌음을 알 수 있다 (Fig. 5e).

3.2.3. Rusa와 Maemi의 비교

TY강도 기간동안 Maemi는 Rusa보다 더 강하게 발달했다. 실제로 Rusa의 경우 TY강도 기간동안 최소 중심기압은 950 hPa이었으나, Maemi는 910 hPa까지 떨어졌다. 이러한 차이점은 잠재소용돌이도 값에서 확인할 수 있다. Fig. 2c와 Fig. 3c를 비교해 보면, TY강도 기간동안 Maemi 사례에서의 잠재소용돌이도 값이 더 높다. 그리고 잠재소용돌이도의 수평분포에서 태풍쪽으로 접근하는 중위도 상층 기압골의 잠재소용돌이도 값이 Rusa보다 Maemi 사례에서 전반적으로 더 높다. 이는 서론에서 언급하였듯이 상층 기압골에서의 발산 흐름 (잠재소용돌이도 값)이 강할 (높을)수록 태풍의 상승운동을 증가시켜 태풍이 발달하는데 긍정적으로 작용한다는 Chen and Ding⁷⁾, Shi et al.⁸⁾ 및 Thorpe¹¹⁾의 결과와 일치하는 사실이다.

3.3. 태풍-중위도 상층 기압골 거리분석

DeMaria et al.⁴⁾은 허리케인-중위도 상층 기압골의 상호작용은 잠재소용돌이도 최대값이 태풍의 중심으로부터 약 1000 km이내에 위치할 때 발생한다고 언급하였다. 또한 Hanley et al.³⁾은 최근 10년 동안 대서양에서 발생한 허리케인을 중위도 상층 기압골과의 거리를 기준으로 분류한 4 패턴 중 "Favorable distance interaction"은 잠재소용돌이도 최대값이 태풍의 중심으로부터 400~1000 km에 위

치할 때 상호작용이 일어남을 분석하였다.

본 연구에서는 두 태풍에서 연직바람시어가 최소인 날 (Rusa: 2002년 8월 29일, Maemi: 2003년 9월 10일)로부터 STS강도로 약화되는 날 (Rusa: 2002년

8월 31일, Maemi: 2003년 9월 13일) 동안 태풍의 중심으로부터 중위도 상층 기압골의 3 PVU까지의 거리를 계산해 보았다 (Table 2). 연직바람시어가 최소가 되는 거리는 2000~2500 km이며, 2000 km이하

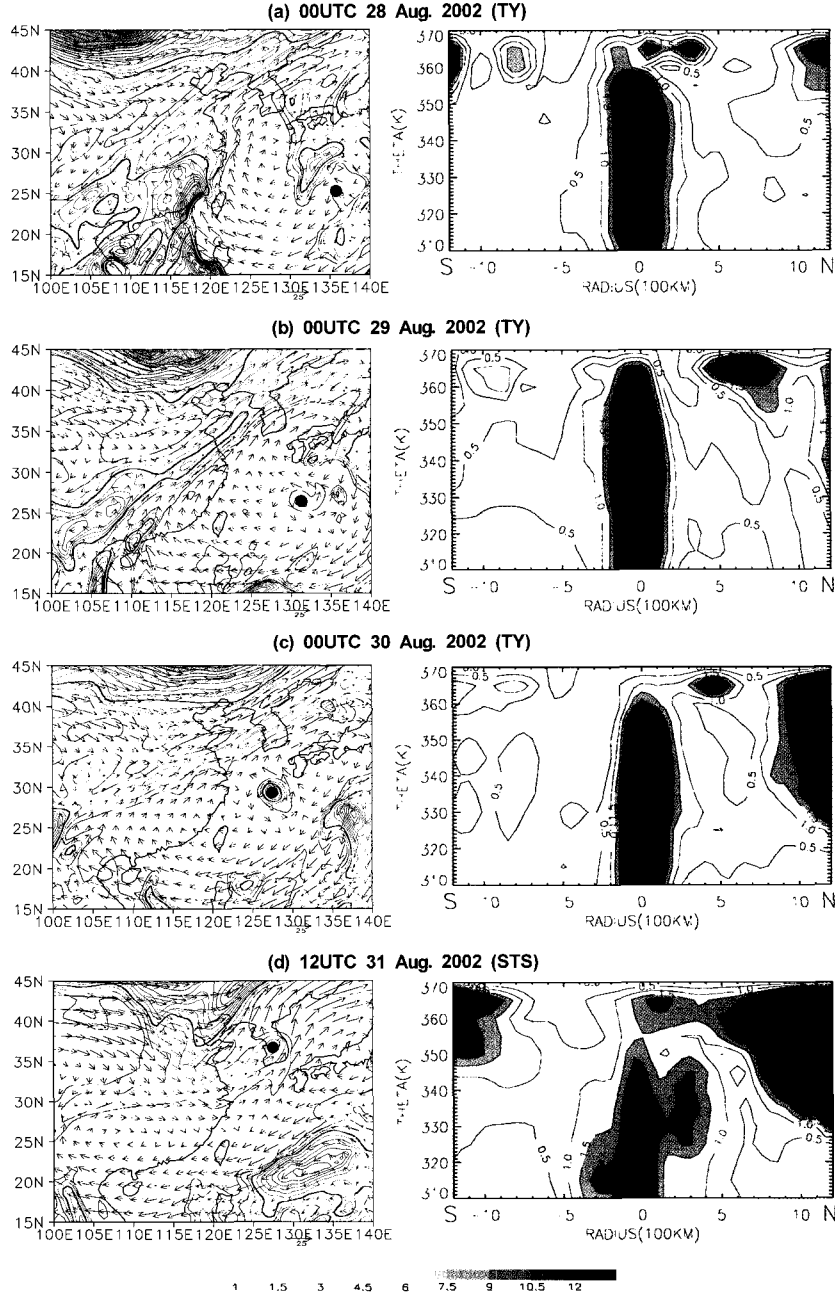


Fig. 4. Horizontal distribution (left panel) and vertical cross-section (right panel) of the meridional direction centering around the typhoon center of the PV for the period from 00UTC 28 August 2002 to 12UTC 31 August 2002 for Rusa (0215) case. In the left panel, red lines denote 3 PVU. Solid black dots are typhoon centers in the left panel.

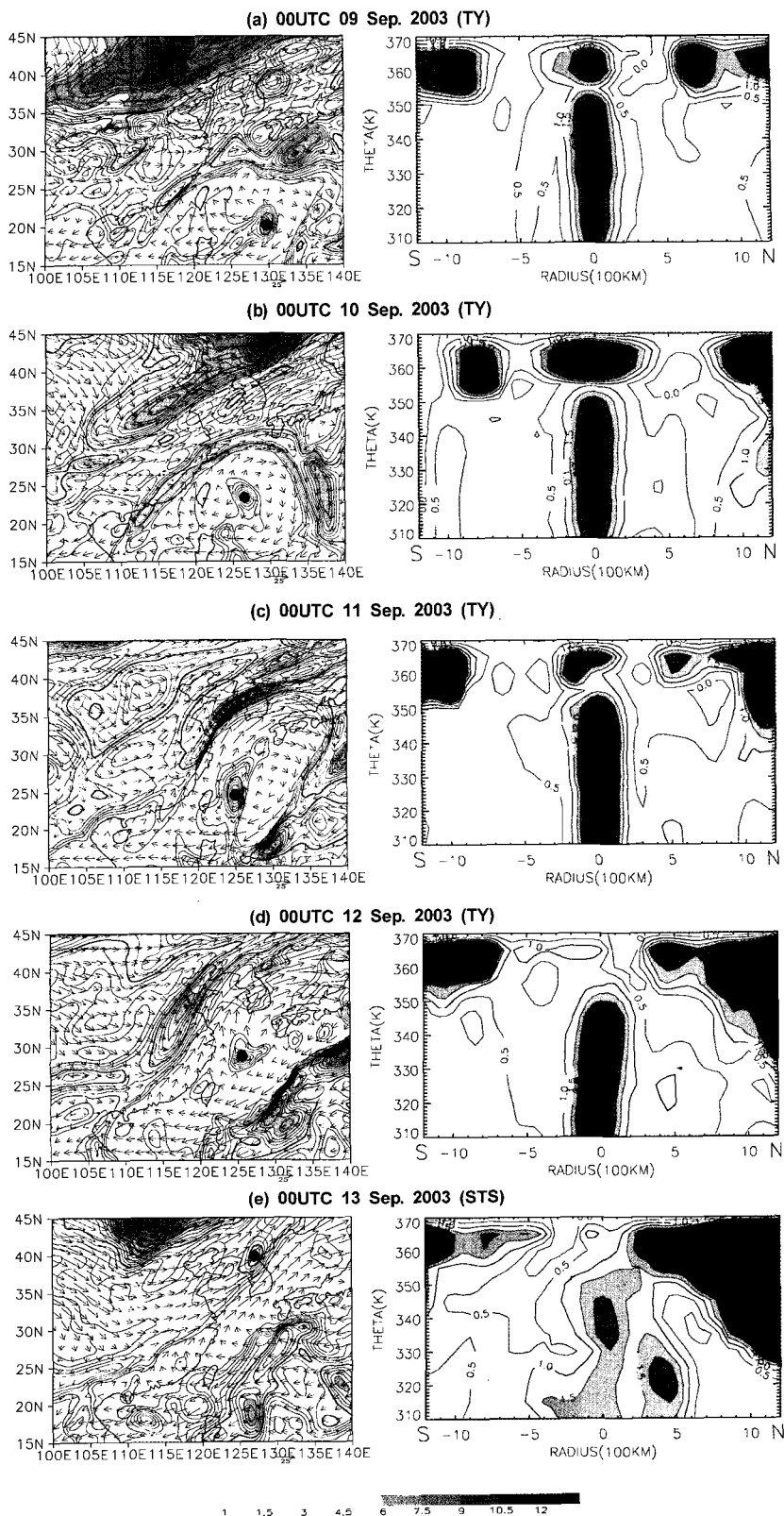


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for Maemi (0314) case.

Table 2. Distance between the typhoon center and the 3 PVU line of the midlatitude upper-level trough for the period from the minimum VWS day to the starting day of the STS intensity for Rusa (0215) and Maemi (0314)

Intensity	From Min. VWS day to stating day of STS	Distance (km) between trough and typhoon center	
		Rusa (0215)	Maemi (0314)
TY	D(0)	2,200	2,300
	D(+1)	1,400	1,800
	D(+2)	-	1,200
STS	D(+3)	700	600

가되면 연직바람시어가 증가하기 시작하는데, 이는 태풍의 가장자리에서 중위도 상층 기압골과의 상호작용이 시작되었음을 의미한다. 이때 태풍의 중심기압은 최소가 되는데, 태풍의 가장자리 위에 있는 상층 기압골에 의한 강한 발산이 태풍의 상승운동을 증가시켰기 때문이다. 태풍과 중위도 상층 기압골과의 거리가 더욱 가까워져서 1000 km이내가 되면 두 태풍은 모두 STS강도로 약화되는 특징을 나타낸다. 이는 DeMaria et al.⁴⁾ Hanley et al.³⁾와 일치하는 결과이다. 본 연구에서의 결과는 비록 두 사례로부터 계산된 것이지만 대서양 및 태평양에서 발생하는 공통적인 특징이라고 볼 수 있으며, 이는 앞으로 좀 더 많은 사례의 분석이 필요한 부분이다.

4. 결 론

태풍의 한반도 영향권 (32°~40°N, 120°~138°E) 진입시 가장 강한 강도를 나타낸 Rusa (0215)와 Maemi (0314)의 사례를 선정하여 태풍-중위도 시스템 상호작용을 분석하였다. 중위도 시스템은 주로 상층 기압골에 초점을 두었다. 이 두 태풍은 서태평양에서 태풍의 평균 발생 경도보다 훨씬 더 동쪽인 165°E 부근에서 발생하였으며, TY (64 kt 이상) 강도를 유지하면서 한반도 남해안에 상륙하였다.

두 사례에 대해 STS → TY → STS의 강도변화 동안 태풍 중심으로부터 300~1000 km 반경 평균의 연직바람시어, REFC 및 잠재소용돌이도를 분석하였다. 연직바람시어의 경우 최소 연직바람시어와 최소 태풍의 중심기압 사이에는 24시간의 지연이 나타났다. 즉, 연직바람시어가 최소값을 기록한 24시간 후에 태풍의 중심기압도 최소값을 나타낸다는 것이다. 더욱 더 두드러진 특징은 TY강도에서 STS 강도로의 약화 과정 동안 나타났는데 두 사례 모두 STS강도로의 약화 시 대략 15 ms⁻¹의 연직바람시어 값이 계산되었다. 이 결과는 Hanley et al.³⁾와 Zehr²⁴⁾의 분석결과와 일치하였으며, 따라서 연직바람시어 값이 10 ms⁻¹ 이상이 되면 태풍은 일반적으

로 약화가 시작된다고 결론 내릴 수 있었다.

REFC의 경우 TY강도에서 STS강도로의 약화시 두 태풍은 6~6.5 ms⁻¹·day⁻¹의 비슷한 REFC의 값을 나타냈다. 본 연구의 결과와는 다소 차이가 있지만 DeMaria et al.⁴⁾와 Hanley et al.³⁾은 허리케인-중위도 상층 기압골의 상호작용 시작시의 REFC 값으로 10 ms⁻¹·day⁻¹를 제시하였다. 이러한 REFC 값의 차이는 각 연구에서 사용된 자료의 수평해상도 차이에 기인한 것으로 보인다.²⁾

두 태풍에 대한 360K 면에서의 잠재소용돌이도 분석에서 TY강도의 시작과 종료시 두 태풍의 잠재소용돌이도 값은 대략 3~3.5 PVU로 거의 비슷하였다. 이 분석 결과와 함께 태풍의 사례를 더하여 TY강도의 시작과 종료시에 대한 좀 더 일반적인 잠재소용돌이도 값을 구한다면 태풍 예보생산에 도움이 될 것으로 판단된다.

두 태풍 사례에 대해 360K 면에서의 잠재소용돌이도의 수평분포와 태풍 중심으로부터 남북 방향의 잠재소용돌이도 연직 단면도를 분석하였다. 연직바람시어가 최소를 보인 후 다시 급격하게 증가하는 시점에 태풍의 중심기압이 최소를 보인 것은 태풍의 가장자리가 중위도 상층 기압골과 상호작용을 시작함으로써 태풍의 가장자리 위에 있는 상층 기압골의 강한 발산이 태풍의 상승운동을 증가시킬 수 있는 환경을 만들었기 때문이었다. 또한 TY강도 기간동안 Maemi가 Rusa보다 더 강하게 발달한 것은 잠재소용돌이도의 수평분포에서 역시 확인 할 수 있었다. 태풍을 향하여 접근하는 중위도 상층 기압골의 잠재소용돌이도 값이 Rusa보다 Maemi사례에서 전반적으로 더 높았는데, 이는 상층 기압골에서의 발산 흐름이 강할수록 태풍의 상승운동을 증가시켜 태풍이 발달하는데 긍정적으로 작용했기 때문이었다.

두 태풍에서 연직바람시어가 최소인 시점으로부터 STS로 강도가 약화되는 시점 동안 태풍 중심으로부터 중위도 상층 기압골의 3 PVU까지의 거리를

분석하였다. 연직바람시어가 최소가 되는 거리는 2000~2500 km이며, 태풍의 가장자리와 중위도 상층 기압골과의 상호작용이 시작되고 태풍의 중심기압이 최소가 되는 거리는 2000 km이하로 분석되었다. 특히, 태풍과 중위도 상층 기압골과의 거리가 1000 km이내가 되면 두 태풍은 모두 STS강도로 약화되어 이전연구와 일치되는 결과를 나타냈다.

지금까지의 결과는 비록 두 사례로부터 계산된 것이지만 대서양의 허리케인으로부터 분석된 결과와 많은 차이를 보이지 않았으며, 앞으로 좀 더 많은 사례의 분석이 추가 될 필요성을 남겼다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소의 주요사업인 “진보된 태풍분석 및 예측시스템 개발연구”의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

- 1) Korean Meteorological Administration, 1996, Typhoon White Book, 22pp.
- 2) DeMaria M., Kaplan J., 1999, An updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, 14, 326-337.
- 3) Hanley D. E., Molinari J., Keyser D., 2001, A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2570-2584.
- 4) DeMaria M., Baik J.-J., Kaplan J., 1993, Upper-level eddy angular momentum fluxes and tropical cyclone intensity change. *J. Atmos. Sci.*, 50, 1133-1147.
- 5) Wu C.-C., Cheng H.-J., 1999, An observational study of environmental influences on the intensity changes of Typhoons Flo and Gene. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 3003-3031.
- 6) Bosart W., Bracken E., Molinari J., Velden C. S., Black P. G., 2000, Environmental influences on the rapid intensification of Hurricane Opal (1995) over the Gulf of Mexico. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 322-352.
- 7) Chen L. S., Ding Y. H., 1979, A General Description of Typhoon in the Northwestern Pacific. China Meteorology Press, 491pp.
- 8) Shi J. J., Chang S. W.-J., Raman S., 1997, Interaction between Hurricane Florence and an upper-tropospheric westerly trough. *J. Atmos. Sci.*, 54, 1231-1247.
- 9) Yu H., Kwon H. J., 2005, Effect of TC-Trough Interaction on the Intensity Change of the Two Typhoons. *Wea. Forecasting*, 20, 199-211.
- 10) Ritchie E. A., 2002, Environmental effects. Topic Chairman and Rapporteur Reports of the Fifth WMO International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-V), WMO/TD 1136.
- 11) Thorpe A. J., 1986, Synoptic scale disturbances with circular symmetry. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1384-1389.
- 12) Molinari J., Skubis S., Vollaro D., Alsheimer F., Willoughby H. E., 1998, Potential vorticity analysis of tropical cyclone intensification. *J. Atmos. Sci.*, 55, 2632-2644.
- 13) Patrick S., Georgiev C. G., 2005, Weather Analysis and Forecasting, Elsevier academic press, 9pp.
- 14) Bracken W. E., Bosart L. F., 2000, The role of synoptic-scale flow during tropical cyclogenesis over the North Atlantic Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 353-376.
- 15) Bosart L. F., Bartlo J. A., 1991, Tropical storm formation in a baroclinic environment. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1979-2013.
- 16) Molinari J., Skubis S., Vollaro D., 1995, External influences on hurricane intensity. Part III: Potential vorticity structure. *J. Atmos. Sci.*, 52, 3593-3606.
- 17) Tittley D. W., Elsberry R. L., 2000, Large intensity changes in tropical cyclones: A case study of Supertyphoon Flo during TCM-90. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3556-3573.
- 18) Rodgers W. S. Olson., Karyampudi V. M., Pierce H. F., 1998, Satellite-derived latent heating distribution and environmental influences in Hurricane Opal (1995). *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1229-1247.
- 19) Drury S., Evans J. L., 1998, Modeling of tropical cyclone intensification as a result of interaction with middle-latitude troughs. Preprints, Symp. on Tropical Cyclone Intensity Change, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 65-72.
- 20) Lander M. A., 1994a, An exploratory analysis of the relationship between tropical storm for-

- mation in the western North Pacific and ENSO. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 636-651.
- 21) Wang B, Chan J. C. L., 2002, How Strong ENSO Events Affect Tropical Storm Activity over the Western North Pacific. *J. Climate*, 15, 1643-1658.
- 22) Montgomery M. T., Farrell B. F., 1993, Tropical cyclone formation. *J. Atmos. Sci.*, 50, 285-310.
- 23) Molinari J., Vollaro D., 1989, External influences on hurricane intensity. Part I: Outflow layer eddy momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, 46, 1093-1105.
- 24) Zehr R. M., 1992, Tropical cyclogenesis in the western North Pacific. NOAA Tech. Rep. NESDIS 61, 181pp.