

ORIGINAL ARTICLE

태풍 나크리(0208)의 강도변화에 관한 진단적 분석

김백조 · 김경식¹⁾ · 장기호²⁾ · 박종길³⁾

국립기상연구소 정책연구과, ¹⁾부경대학교 물리학과, ²⁾기상청 국가태풍센터

³⁾인제대학교 환경공학부 · 대기환경정보연구센터(AEI)

A Diagnostic Analysis on the Intensity Change of Typhoon NAKRI(0208)

Baek-Jo Kim, Kyung-Sik Kim¹⁾, Ki-Ho Chang²⁾, Jong-Kil Park³⁾

National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

¹⁾Department of Physics, Pukyong National University, Busan 608-707, Korea

²⁾National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration, Jeju 699-942, Korea

³⁾School of Environmental Sciences Engineering · AEI, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

Abstract

In this study, the cause of rapid intensity change of typhoon Nakri(0208) in view of point of a trough-typhoon interaction using diagnostic methods was examined based on 6-hourly GDAPS data from 10 to 13 July, 2002.

At 0000 UTC 13 July, high PV(Potential Vorticity) region moved southeastward, reaching to the western edge of the Korean peninsula and near typhoon center at surface and there shows an increasing value of EFC(Eddy Momentum Flux Convergence). Also, as the trough and typhoon approach one another at the same time, the vertical shear(850-200 hPa) increases to more than 15 m/s. Thus, it might be concluded that the trough-typhoon interaction made intensified significantly, providing the fact that typhoon Nakri(0208) underwent substantial weakening while moving northward to around Jeju island.

Key Words : Typhoon Nakri(0208), Intensity change, Trough-typhoon interaction, Diagnostic methods

1. 서론

열대성 저기압(또는 태풍)은 적도 부근의 열대 해상에서 발생하여 중·고위도 지방으로 이동하며, 강한 폭풍우를 동반하여 많은 재산과 인명에 피해를 준다(Park 등, 2005; 2008a). 비록 수치모델이 열대성 저기압의 진로예보에서 괄목할 만한 발전(e.g. Kurihara 등, 1998)을 보였음에도 불구하고, 태풍과 같은 열대

성 저기압의 폭풍 피해 및 강도예보는 아직도 도전해야 할 연구 분야로 남아있다(KMA, 2012; Park 등, 2010, 2008b). Avila(1998)는 1990~1997년 동안 태풍 강도예보에서 뚜렷한 향상도 없었음을 밝힌 바 있다. 이를 개선하기 위해 국립기상연구소에서는 2001년부터 ‘한반도 악기상 집중관측사업(Korea Enhanced Observing Period, KEOP)’을 통해 에어로존데, 오토존데 등 첨단기상관측장비를 이용한 태풍 집중관측을

Received 19 November, 2012; Revised 7 December, 2012;

Accepted 22 February, 2013

*Corresponding author : Baek-Jo Kim, Policy Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea
Phone: +82-70-7850-6552
E-mail: bjkim@kma.go.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

실시하였으며, 2002년 우리나라에 엄청난 인명과 재산 피해를 초래한 태풍 Rusa(0215)에 대한 3시간 간격의 오토존데 관측자료를 이용하여 태풍의 구조를 분석한 바 있다(Kim 등, 2003).

열대성 저기압의 강도예보를 향상시키기 위해서는 강도변화를 조절하는 중요한 메커니즘의 규명이 필수적이며, 열대성 저기압의 구조와 진화에 대한 이해를 돕기 위해 더 광범위한 연구가 필요하다. 태풍 강도는 일반적으로 중심기압 또는 중심 최대풍속으로 측정하는데, 이는 해양과 대기 환경 모두 태풍의 상호작용을 지배하는 복잡한 물리적 과정에 영향을 미치는 것을 의미한다. 일반적으로 태풍의 강도에 영향을 주는 요소는 크게 SST(Sea Surface Temperature)(Merrill, 1988a; 1988b; Emanuel, 1995; Bender 등, 1993)와 내부 눈 벽 역학(e.g. Willoughby 등, 1982; Shapiro와 Willoughby, 1982; Willoughby와 Black, 1996) 그리고 주변 환경장과의 상호작용(environmental interaction)으로 분류된다. 태풍 내부 역학에 대한 이해도 아직 완전하지 않으며, 눈 벽 영역에서 대류와 미세 물리과정 에 대한 태풍의 강도 변화는 아직 설명되지 못하고 있다. 반면, 태풍 강도에 대한 외부 대기의 영향, 즉 주변 환경장과의 상호작용에 대한 많은 관측적·수치적 연구들이 이루어지고 있다.

태풍과 그 주변과의 상호작용에 대한 가장 큰 잠재성은 내부 안정도(inertial stability)가 가장 작게 나타나는 유출층(outflow layer)에서 존재한다. 이러한 태풍에 미치는 유출층의 영향에 관해 Riehl(1950)은 일찍이 태풍 발달에 대한 상층 대류권에서 주변 환경장과의 상호작용의 중요성을 밝힌 바 있으며, 상층 유출이 태풍 주변에서 하강하지 않고 마침내 태풍이 강화되기 위해 필요한 시선방향의 온도경도를 파괴하는 것을 보상하기 위한 어떤 강제력이 필요함을 지적하였다. 또한, 상층 대류권의 영향은 Miller(1958), Colon과 Nightingale(1963), Fett(1966), Erickson(1967), Yanai(1968), Ramage(1974), Sadler(1976), Gray(1979), Chen과 Gray(1984) 그리고 Merrill(1988a)에 의해 강조되었다. 이들 연구자들의 대부분은 강화된 태풍이 태풍 중심의 몇 백 km 서쪽 그리고 북쪽 상층 대류권에서 열대·아열대 기압골이 존재함을 보였다. Miller(1958)는 상층 기압골이 태풍 중심을 향해 이동

하고 최소 중심기압이 나타나기 이전 24시간 동안 강화된다고 하였다. 또한 이들 연구들은 시간에 따른 태풍의 강도에 영향을 미치는 태풍 주변에 대한 잠재성과 큰 강도의 비대칭적 구조의 유출층을 보여준다. 특히, 북서쪽에 위치한 기압골의 존재는 고기압성 유출통로(outflow channel)를 잘 유지할 수 있게 하며, 이는 태풍에 대한 상층 질량 소멸과 운동량 생성을 제공한다. 그럼에도 불구하고, 기압골이 태풍 강화를 나타내지 않는 경우도 있다(Colon과 Nightingale, 1963; Merrill, 1988b).

내부 역학과 태풍 강도사이의 상호작용이 이해되기 매우 어려운 데 반하여, 관측적·수치적 연구들은 태풍 강도에 대한 외부 대기의 영향, 특히 상층 대류권에서의 상호작용에 많은 관심을 보였다. Pfeffer와 Challa(1981)은 운동량의 대규모 에디속의 중요성을 검토하였으며, 강한 각운동량의 에디속 수렴(eddy flux convergence, EFC)은 대서양의 열대성 요란을 태풍으로 발달시키는 필수적 요소임을 증명하였다. Pfeffer와 Challa(1981)는 에디 운동량 요소가 태풍의 발달 초기에 중요하다는 데 초점을 두었으며, Molinari와 Vollaro(1989, 1990)은 각 운동량의 상층 EFC가 태풍 Elena(1985)가 강화되는 기간 동안에 발생하며, 이것은 상층 대류권의 기압골이 Elena의 재강화에 중요한 역할을 하는 것을 나타내었다.

한편, Holland와 Merrill(1984)는 상층 운동량 요소에 의해 유도되는 시선-연직순환이 태풍의 중심지역에 직접적이고 중요한 영향을 준다고 하였다. 그들은 또한 태풍과 이동성 기압골과의 상호작용이 태풍의 유출제트를 강화시킬 수 있다고 제시하였다. 강화된 유출제트는 태풍 중심지역의 대류를 활성화시키고 태풍의 강도 강화 과정으로 발전시킬 수 있다. 각운동량의 EFC 외에, 태풍과 상층 대류권의 기압골 상호작용은 또한 연직 바람시어를 증가시킨다. Molinari 등(1995)은 태풍 Elena(1985)로부터 유출과 상층 대류권 기압골 사이의 상호작용이 상층 서풍의 침투 깊이와 연직 바람시어가 일어나는 기간을 감소시키고, 따라서 바람시어에 의한 Elena의 구조 파괴를 막는다고 지적하였다.

2002년 7월에 우리나라에 영향을 주었던 태풍 Nakri(0208)에 대해 Kim 등(2005)은 태풍의 약화 원

인에 대한 진단적 및 관측적 연구를 수행하였으며, 이를 통해 태풍 Nakri가 상층 대류권 기압골과 상호작용으로 약화되었고 에어로존데 관측을 통한 대기 연직 구조 분석에서 북서태평양 고기압이 확장하기 전에 850 hPa면의 저기압 남하가 태풍 전면 하부대류권 구조에 영향을 미쳤음을 밝혔다. 이 연구에서는 태풍 Nakri 약화 기간 동안 에어로존데 관측자료에 나타난 대기연직 구조에 초점을 맞추었으며, 태풍 약화에 영향을 미치는 유출층의 역할에 대해서는 체계적으로 분석되지 않았고 다만 연직 바람시어와 EFC의 자료 분석을 통해 태풍 약화와 관련 있음을 제시하였다.

본 연구에서는 태풍 Nakri(0208)의 급격한 약화에 미치는 유출층의 역할에 대해 좀 더 체계적인 측면에서 이해하기 위하여 등온위면에 대한 잠재와도(Potential Vorticity, PV)와 바람장 분석으로 태풍의 축대칭 구조를 살펴보고, 그 다음으로 태풍과 상층 대기환경간의 상호작용을 규명하기 위해 각운동량의 EFC와 연직 바람시어의 영향을 상세히 조사하였다. 이 같은 연구를 통해 2002년에 에어로존데, 오토존데를 이용한 태풍 집중관측 자료를 활용한 제주도 남쪽 해상에서 북상할 때와 남해안에 상륙할 때 태풍 강도 및 구조 변화에 관한 기존 연구들(Kim 등, 2003; Kim 등, 2005)과 비교 분석함으로써 최근 들어 한반도에 영향을 주는 태풍들이 대부분 동중국해상에서 바로 북상하면서 우리나라에 상륙하는 경우가 많으므로(Choi 등, 2009) 이에 대한 태풍강도 예보에 크게 기여할 것으로 판단된다.

3. 자료 및 방법

3.1. 자료

기상청 GDAPS(Global Data Assimilation and Prediction System) 분석 자료를 사용하였으며, 이들 자료는 수평적으로 위도 0.562° , 경도 0.562° 의 격자점 (640×321)을 가지고 연직으로 총 11개 고도면으로 구성되었다(1000, 850, 700, 500, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50 hPa). 태풍 Nakri(0208) 발생기간 동안인 2002년 7월 8일 1800 UTC부터 7월 13일 1200 UTC 까지 6시간 간격으로 분석 자료가 사용되었다. 폭풍 상대 바람(storm-relative wind)을 계산하기 위하여

0.562° 의 등격자 간격을 가지는 데카르트 격자자료를 태풍 중심으로부터 반경 2,000 km까지 $\Delta r=50$ km(시선방향), $\Delta \theta=7.5^\circ$ (방위각방향) 분해능을 가지는 원통 격자로 이중선형보간법을 수행하였다. 변환된 원통 좌표계는 Fig.1과 같다.

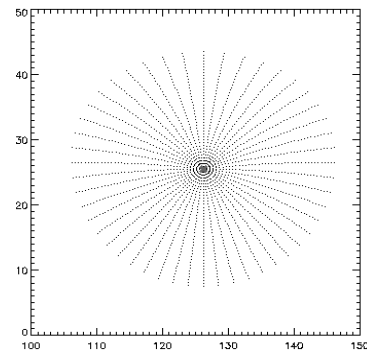


Fig.1. Cylindrical coordinate

3.2. 분석방법

본 연구에서는 잠재와도, 상대 각운동량의 에디속 수렴, 그리고 평균 연직 바람시어가 분석되었다. 또한, 태풍 상대 시선 및 접선바람의 방위각 방향의 평균과 등온위면에서의 PV도 살펴보았다.

3.2.1. 잠재와도(Potential Vorticity)

태풍과 그와 관련된 상층 대규모 환경적 현상사이의 상호작용을 살펴보기 위해 유출층에서의 PV 진화과정이 분석되었다. Ertel's PV는 다음과 같이 정의되며,

$$PV = \frac{[\zeta_a \cdot \nabla_\theta]}{\rho} \quad (1)$$

여기서, ζ_a 는 절대와도이며, θ 는 온위, 그리고 ρ 는 밀도이다. 등온위면 좌표계에서, PV는 식(2)와 같이 표현된다.

$$PV = -g \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^{-1} \left[f + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_\theta - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_\theta \right] \quad (2)$$

여기서, P 는 기압, f 는 코리올리 변수, 그리고 u 와 v 는 바람의 동서와 남북 성분을 각각 나타낸다. PV 계산시 등온위면의 최하층을 310 K로 두었으며 최상단을 370 K로 두어 총 13개의 층으로 계산이 이루어졌다. 여기서, $1 \text{ PVU} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ Ks}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 를 말한다.

3.2.2. 각운동량 에디속 수렴

Molinari와 Vollaro(1990)에 따라, 상대 각운동량의 EFC가 다음과 같이 정의된다.

$$EFC = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \overline{u'v'_L} \quad (3)$$

여기서, u_L 은 폭풍 상대 시선속도이며, v_L 은 폭풍 상대 접선속도이다. 그리고 r 은 태풍 중심으로부터의 거리, 즉 반경을 말한다. ‘ $\overline{\quad}$ ’는 방위각 방향의 평균을 의미하고, ‘ $'$ ’은 방위각 방향의 평균으로부터의 편차를 나타낸다.

3.2.3. 연직 바람시어

Molinari(1993)의 방법론을 따라 면적 평균된 사방 평균 데카르트 좌표계의 바람성분을 사용하여 850 hPa와 200 hPa 사이의 바람시어를 살펴보았다. 500 km 반경 내에 폭풍 횡단 평균바람의 요소는 다음과 같이 계산된다.

$$\langle U \rangle = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{\overline{U}_{i-1} + \overline{U}}{2} \right\} A_i \quad (4)$$

$$\langle V \rangle = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{\overline{V}_{i-1} + \overline{V}}{2} \right\} A_i \quad (5)$$

여기서, U 와 V 는 데카르트 좌표계에서 바람성분이며, i 는 시선방향의 지수, 그리고 ‘ $\langle \quad \rangle$ ’는 면적 평균을 의미한다. ‘ $\overline{\quad}$ ’는 방위각 방향의 평균이며 A_i 는 매 100-km 폭 원형 고리의 면적을 나타낸다. 200-850 hPa 연직시어는 면적 평균된 데카르트 좌표계의 바람 성분으로부터 계산된다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 태풍 Nakri(0208)의 강도와 진로

제 8호 태풍 Nakri는 7월 9일 1800 UTC 경 타이완 섬 남서쪽 약 400 km 부근 해상에서 발생하여 7월 13일 1200 UTC경 제주도 서귀포시 남서쪽 약 230 km 부근 해상에서 열대성 저기압으로 약화된 경우로 Park 등(2006)의 유형 2에 해당하는 진로를 갖는 태풍이었다. Fig. 2는 공주대 태풍연구센터(<http://www.typhoon.or.kr>)에서 제공하는 태풍 강도와 경로이다.

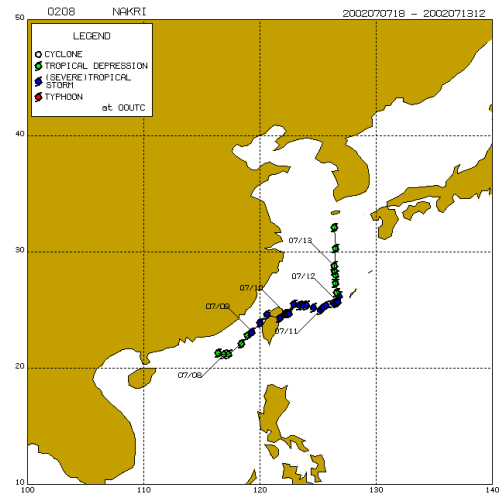


Fig. 2. Track of typhoon Nakri(0208)

태풍 Nakri는 발생 초기부터 동북동쪽으로 이상 진로를 택하여 느리게 이동하다가 10일 0600 UTC에 6호 태풍 Chataan(0206)이 오키나와 동쪽 해상에 접근함에 따라 후지와라 효과에 의해 느리게 동진하였으며, 크기는 중형으로 조금 커졌으나 강도는 유지되었다. 1800 UTC에 태풍 Chataan(0206)이 빠른 속도로 북동진함에 따라 후지와라 효과가 약화되면서 이동속도가 늦어지다가 북동쪽으로 이동 방향이 바뀌었다. 12일 0000 UTC에 진행 방향이 북쪽으로 바뀌고 점차 이동속도가 빨라지다가 13일 0600 UTC경에 제주도 서귀포시 남쪽 약 310 km 부근 해상에서 24 km/h의 속도로 북진, 그리고 1200 UTC에 갑자기 열대성 저기압으로 변하면서 소멸하였다. 이때 북위 30°부근의

해수면 온도가 26°C 이하로 낮게 나타났는데, 이는 주요 에너지원인 SST 하강은 태풍 Nakri 약화의 하나의 요인으로 생각된다.

4.2. 축대칭 구조

태풍의 축대칭 구조를 나타내기 위해 방위각 방향의 평균을 취하였다. Fig. 3은 시선 및 접선바람의 축대칭 단면도를 나타낸 것이다. (a)는 태풍 약화 이전 시기, 최대 풍속을 나타냈던 7월 12일 0000 UTC의 분포이며, (b)는 태풍 약화 이후 시기인 13일 1200 UTC의 분포이다. 태풍의 하층에서 유입과 상부 대류권에서 유출 구조를 잘 나타낸다(Fig. 3 (a)). 태풍 중심으로 저기압성의 접선바람이 약 360 K면까지 나타나며, 최대 접선바람이 약 1.5 RADIUS에서 나타난다. 그에

비해, 시선속도의 최대 유출(maximum radial outflow wind)은 355 K면에서는 2 RADIUS에서와 360 K면에서 7 RADIUS에서 각각 나타난다. 태풍의 축대칭 구조가 매우 약화되었음을 보여주는데, 태풍의 눈을 중심으로 접선바람이 급격히 약화되고 뚜렷하게 하층에서의 유입과 상층 대류권에서 유출의 구조를 나타내지 못한다(Fig. 3).

시선속도의 최대유출이 나타나는 2 RADIUS 와 7 RADIUS에서 방위각 방향의 평균 시선속도(azimuthal-mean radial wind)의 시간에 따른 연직범위를 살펴본다(Fig. 4). 태풍 Nakri가 발달되는 초기 동안 상당한 유출이 350 K면 부근에서 나타나며, 12일 1200 UTC를 전후로 360 K면에서 나타남을 볼 수 있다.

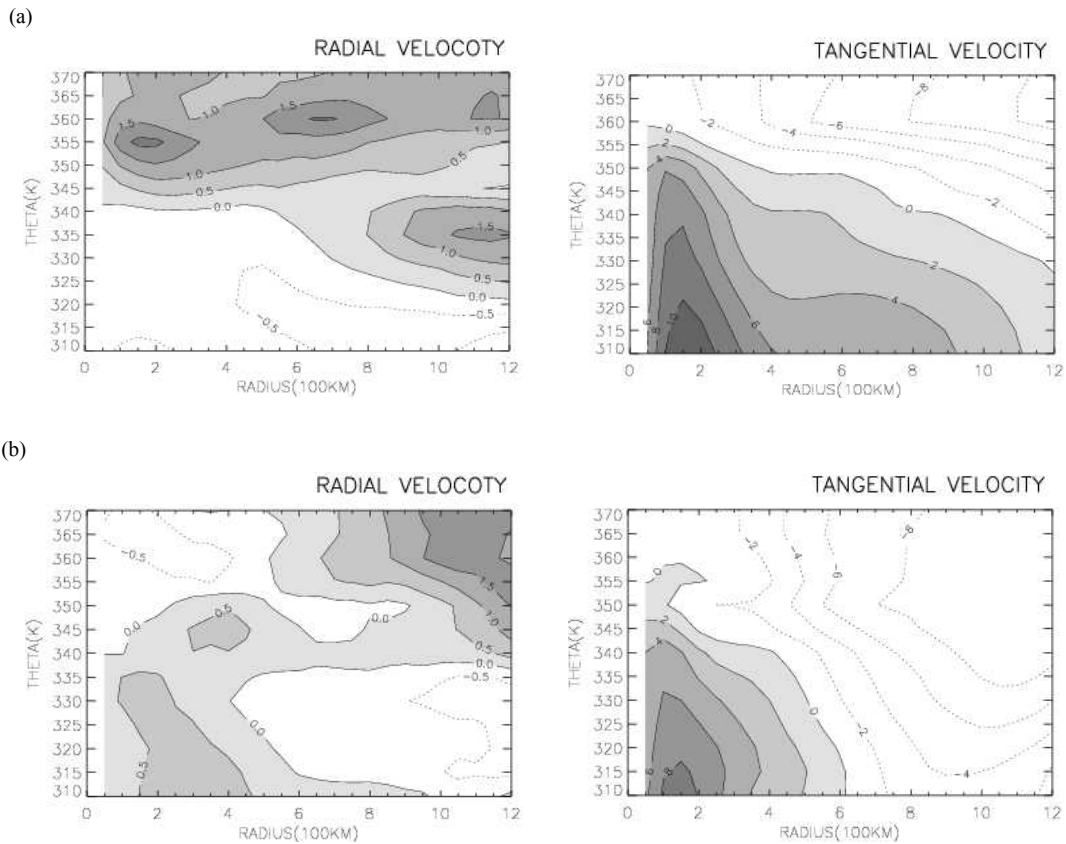


Fig. 3. Axisymmetric cross-sections of radial and tangential winds. (a: 0000 UTC 12 July, 2002, b: 1200 UTC 13 July, 2002)

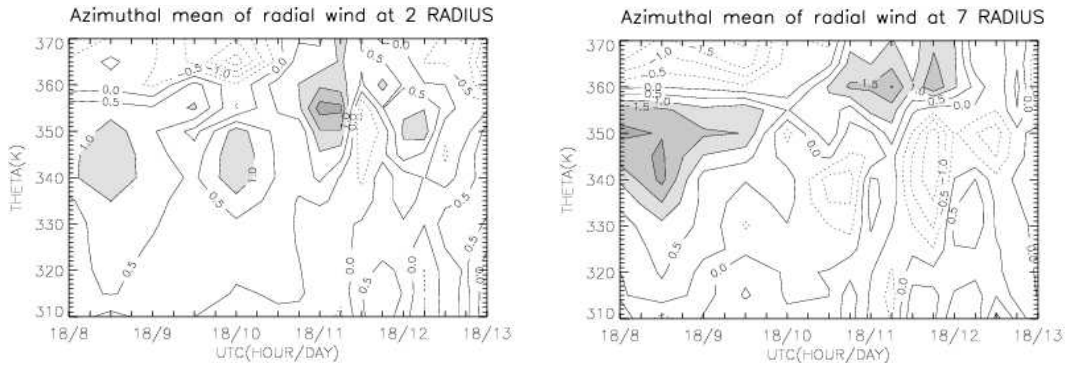


Fig. 4. Vertical(theta)-time distribution of azimuthal-mean radial wind.
(left: 2 RADIUS, right: 7 RADIUS)

4.3. 유출층

태풍 Nakri가 최대 풍속을 보였던 기간 동안 최대 유출이 360 K면에서 나타났으며, 따라서 360 K면에서의 잠재와도와 바람장의 발달 과정을 분석하였다(Fig. 5). 태풍 Nakri 위에서 낮은 잠재와도 영역을 나타내며, 지상에서 태풍이 위치한 지점(낮은 잠재와도)의 북쪽으로 높은 잠재와도를 나타내는 때가 나타났다. 태풍 강도가 유지되는 기간 동안 이와 같은 낮은 잠재와도의 일정 영역이 유지되는 것을 볼 수 있다. 높은 잠재와도가 나타나는 때가 태풍 Nakri의 북쪽으로 확장되어 있으며, 이를 따라 유출제트가 이동하였다. 태풍 Nakri 상단의 유출이 그다지 뚜렷하지 않았으며, 태풍 중심의 동쪽에 위치한 TUTT(Tropical Upper Tropospheric Trough)로 인해 태풍 Nakri 남동부에 유출흐름이 강화되었다(Fig. 5 (a)-(c)).

태풍 Nakri의 북쪽에 위치한 중위도 기압골과 관련된 높은 잠재와도가 남동쪽으로 이동하며, 북동쪽에 위치한 유출제트는 기압골 전면의 편서풍을 강화시켰다. 또한, 태풍의 남동쪽 TUTT의 남서쪽을 따라 동풍이 강화됨으로써 태풍 상층 유출이 뚜렷해졌다. 태풍의 북서쪽에 위치한 유출제트가 중위도 기압골을 따른 서풍과 태풍 서쪽을 향하여 굽어진 고기압성 흐름으로 갈라졌다. 태풍 Nakri 상단의 낮은 잠재와도 영역이 점차 작아지며, TUTT와 관련된 양의 잠재와도가 점차 태풍 중심 상단을 에워쌌다. 태풍 북쪽에 존재하는 양의 잠재와도가 점차 남하하여 태풍의 북서쪽 강한 고기압성 유출이 태풍 서쪽으로 점차 강화되어

나타났으며, 태풍의 북서쪽에 강한 북서풍에 의해 태풍 상단의 유출이 차단되었다. 이때 태풍 북서쪽 상단의 음의 잠재와도가 확연히 감소됨을 볼 수 있으며, 이는 태풍 Nakri가 급격히 약화되었음을 의미한다.

Fig. 6과 같은 시간대별 잠재와도의 연직 구조를 알아보기 위해 태풍 중심에서 잠재와도의 남북 단면도를 살펴보았다. 태풍 중심 영역의 중층 또는 그보다 낮은 고도에서 최대 잠재와도가 나타났으며, 유출층에서 거의 영에 가까운 잠재와도를 보였다. 태풍이 약화되는 시점(2002년 7월 13일 0000 UTC)에 상층 기압골의 접근과 태풍간의 상호작용을 분명히 확인할 수 있다. 태풍 중심으로 다가오는 북쪽의 초기 최대 잠재와도 값이 나타나는 높이가 점차 낮아지며 태풍 중심과 병합되었다. 즉, 대기상층 잠재와도 최대지역이 태풍의 잠재와도 최대지역의 위에 두게 됨을 알 수 있다.

4.4. 상대 각운동량의 에디속 수렴

태풍 Nakri와 상층 기압골 사이의 상호작용 강도를 측정하기 위해 방위각 방향의 에디(azimuthal eddies)에 의한 각운동량속 수렴(EFC; Pfeffer와 Challa, 1981; Holland와 Merrill, 1984; Molinari와 Vollaro, 1989)를 활용하였다. 여기서, 태풍-기압골 상호작용을 객관적으로 정의하는 것이 필수적이다. 태풍 주위의 기압골 존재가 꼭 상호작용을 의미하지는 않는다. 역학적 상호작용이 발생하기 위해서는 기압골과 태풍의 상대적 접근이 있어야 한다(e.g., Montgomery와 Farrell, 1993; Molinari 등, 1995). DeMaria 등(1993)은 태풍-기압골 상호작용을

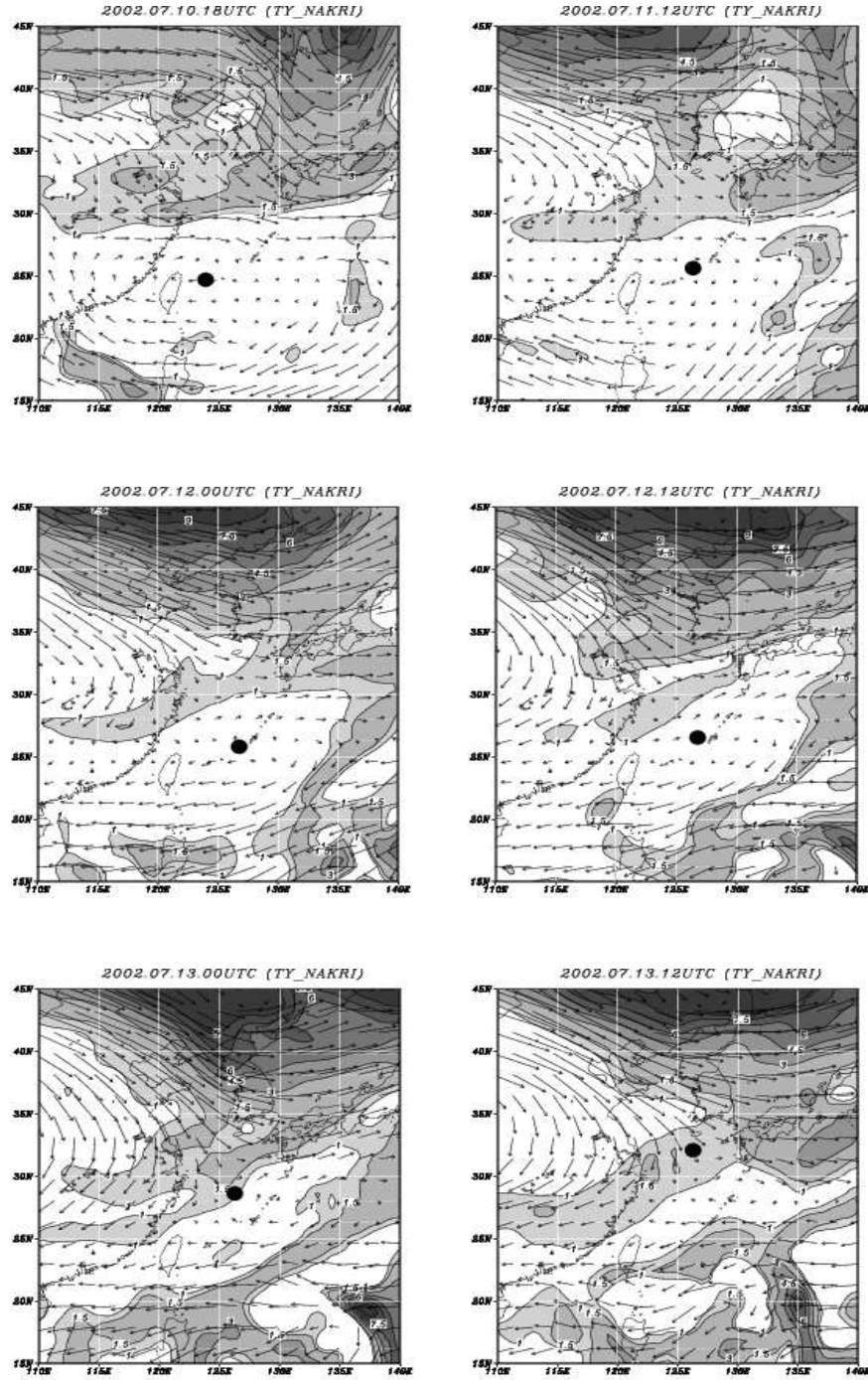


Fig. 5. Potential vorticity and wind field at isentropic surface of 360K.

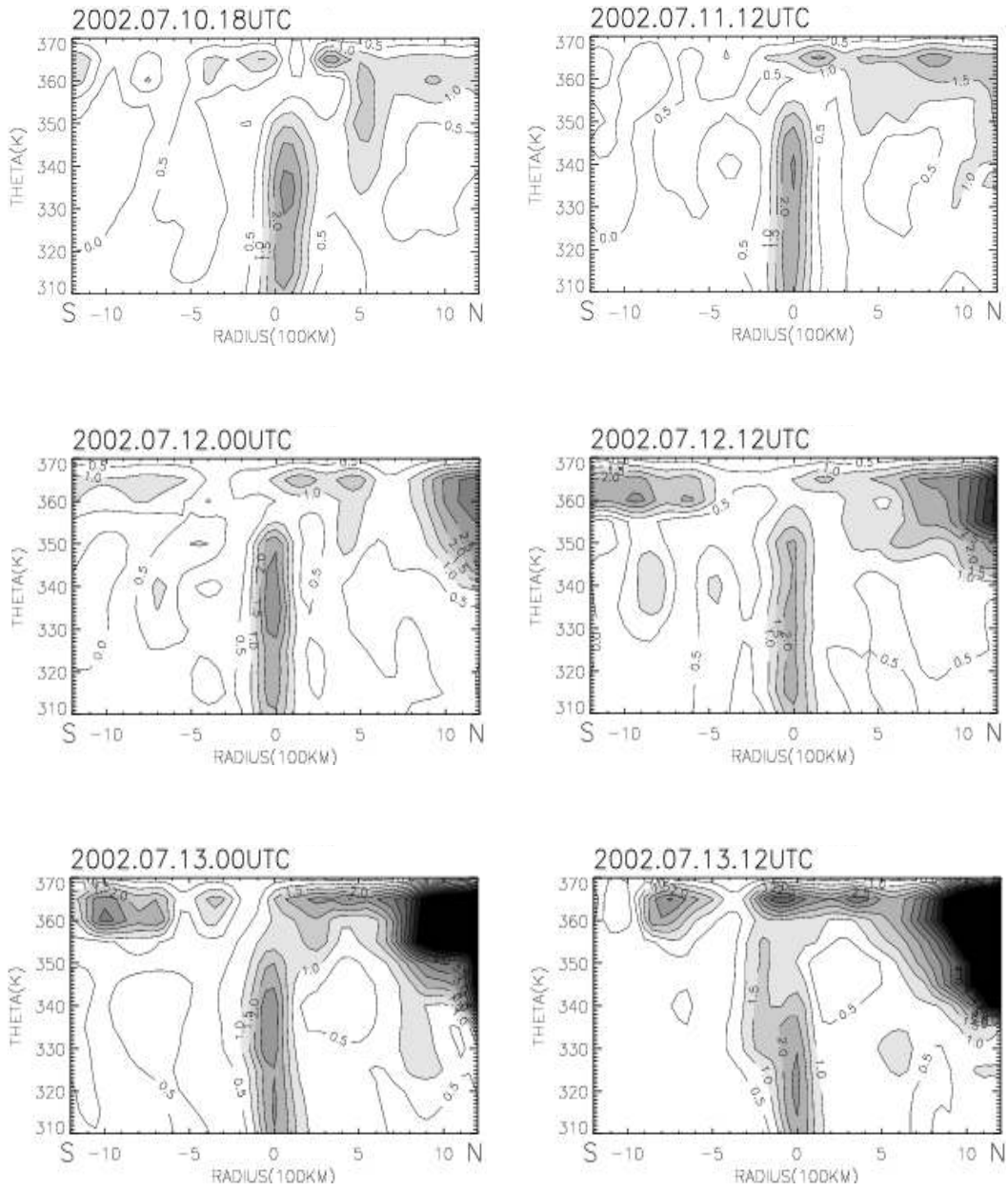


Fig. 6. North-south cross-section of potential vorticity at the center of typhoon Nakri.

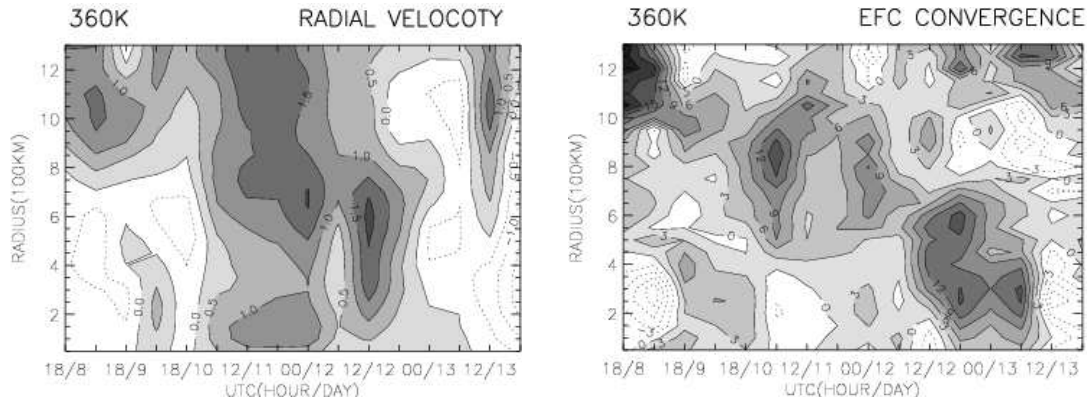


Fig. 7. Radius-time cross section of azimuthal-mean radial wind and EFC convergence at isentropic surface of 360K(200hPa).

나타내기 위해 200 hPa에서의 $EFC > 10(ms^{-1})day^{-1}$ 를 사용하였다. 200 hPa에서 EFC가 적어도 12시간 정도 $10(ms^{-1})day^{-1}$ 를 초과할 때 기압골 상호작용이 있다고 할 것이다.

Fig. 7은 360 K면(200 hPa 고도)에서 방위각방향 평균 시선바람(azimuthal-mean radial wind)과 EFC 수렴의 반경-시간 단면도를 나타낸 것이다. EFC의 분포는 시선바람의 경도가 강한 곳에서 큰 값이 나타났다. 최대 EFC는 태풍 발생 초기인 8일 1800 UTC에 10 RADIUS 외부에서 나타나며, 11일 0300 UTC에는 8 RADIUS, 그리고 12일 1800 UTC에 6 RADIUS 부근, 마지막으로 13일 0600 UTC경에 3 RADIUS에서 각각 나타났다. 이는 상층 기압골의 접근이 태풍 발생 초기에 태풍 중심 반경이 약 10 RADIUS 외부에서 각운동량의 상층 EFC를 생산하고, 시간에 따라 안쪽으로 치우쳐 나타낸다. EFC가 태풍 Nakri 중심 부근으로 다가올 때, 이때 EFC는 태풍의 유출층의 선회증가(spinup) 척도로 나타나며 태풍의 유출 통로를 강화시켰지만, 태풍 Nakri 중심을 지나칠 때 EFC는 오히려 태풍의 약화를 가져왔다.

4.5. 연직 바람시어

태풍 Nakri 약화에 미치는 200-850 hPa 연직 바람시어의 영향을 알아보기 위해서 2002년 7월 10일 0000 UTC에서 13일 1200 UTC까지 6시간별 연직 바람시어를 Fig. 8에 나타내었다. 상층 기압골과 태풍이 7월 10일 0000 UTC에 서로 접근했을 때 연직 바람시

어가 15 m/s 이상으로 증가하였다. 이 시각 이후에 연직 바람시어는 다시 감소하였다. 또한 연직 바람시어와 태풍 중심기압 변화 사이에는 음의 상관관계를 보였다. 연직 바람시어의 증가는 태풍에서의 풍하층 기울기(downshear tilt)의 결과이다. 즉, 태풍 연직 구조의 붕괴를 의미한다. 연직 바람시어와 태풍 강도변화가 같이 증가할 때를 보면, 어떤 프로세스가 연직 바람시어 증가에 대한 음의 영향에 반대되는 역할을 함을 알 수 있다. 최근 연구들에서 각운동량의 에디속 수렴(잠재와도 이류)이 연직 바람시어 증가의 음의 영향을 상쇄시키는 역할을 한다고 제시하였다.

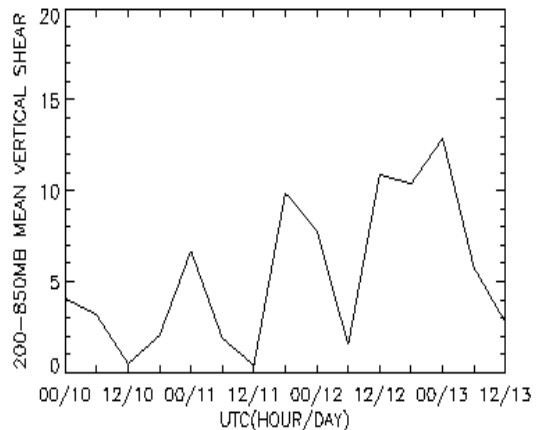


Fig. 8. Time series of 200-850hPa vertical wind shear from 0000 UTC 10 to 1200 UTC 13 July, 2002(after Kim et al., 2005).

5. 결론

2002년 7월 중순에 태풍 Nakri가 우리나라의 제주도 부근까지 북상하다가 급격한 강도변화를 통해 남해상에서 소멸된 사례를 선정하여 태풍 강도에 미치는 유출층의 영향에 대해 조사하기 위해 유출구조, 에디 운동량속 수렴, 그리고 평균 연직 바람시어를 조사하였다.

유출층에서 잠재와도의 시간적 변화를 살펴보면, 태풍 상부에서 낮은 잠재와도가 나타나며, 이런 낮은 잠재와도 영역은 태풍이 강해질 때 더욱 확장되다가 태풍 약화와 함께 낮은 잠재와도 영역이 점차 사라짐을 볼 수 있다. 유출유형은 상층 대류권 환경시스템에 의해 영향을 받는다. 상층 대기환경장의 특성은 태풍 강화에 결정적인 역할을 한다. 태풍 Nakri의 동쪽에 위치한 아열대 상층 대류권의 기압골은 태풍에 대해 유출통로를 제공하고 태풍 Nakri 북쪽의 상층 중위도 기압골의 접근은 태풍의 유출통로를 제한하며, 이는 태풍 강도의 약화를 가져왔다. 일반적으로 강화된 유출, 높은 상층 EFC, 낮은 연직 바람시어, 그리고 온난한 해수면 온도는 태풍 발달에 대한 최적의 조건을 제공한다. 반면, 태풍 Nakri의 강도 변화에 영향을 준 것은 상층 중위도 기압골과의 상호작용과 연관되어 있었다. 상층 기압골의 접근은 태풍 중심의 반경 약 10° 외부에서 각운동량의 상층 EFC를 생산하며, EFC는 시간과 함께 안쪽으로 치우쳤다. EFC가 태풍 중심부 근으로 다가올 때, 이는 태풍의 유출 통로를 강화시켰지만, 태풍 Nakri 중심을 지나칠 때 EFC는 오히려 태풍 강도의 약화를 가져왔다. 이런 강화 과정은 태풍의 강도 변화에 대한 상층 대류권의 날씨시스템의 중요성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 2002년 국립기상연구소 주요사업 “한반도 악기상 집중관측사업(Korea Enhanced Observing Period, KEOP)”를 통해 태풍 Nakri(0208)의 진단적 분석이 일부분이 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. 또한, 본 연구는 2012년 국립기상연구소 주요사업 “예보기술 지원 및 활용연구”의 일부 지원으로 수행

되었습니다.

참고 문헌

- Avila, L. A., 1998, Forecasting tropical cyclone intensity changes : An operational challenge. Preprints, Symp. on Tropical Cyclone Intensity Change, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 1-10.
- Bender, M. A., Ginis, I., Kurihara, Y., 1993, Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high resolution coupled model. *J. Geophys. Res.*, 98, 23,245-23,263.
- Choi, K. S., Kim, B. J., Choi, C. Y., Nam, J. C., 2009 : Cluster analysis of tropical cyclones making landfall on the Korean Peninsula, *Adv. Atmos. Sci.*, 26(2), 202-210.
- Chen, L., Gray, W. M., 1984, Global view of the upper level outflow patterns associated with tropical cyclone intensity changes during FGGE. Preprint Vol., 15th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, 224-231.
- Colon, J. A., Nightingale, W. R., 1963, Development of tropical cyclones in relation to circulation patterns at the 200 millibar level. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 329-336.
- 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.
- Emanuel, K. A., 1995, Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 52, 3969-3976.
- Erickson, C. O., 1967, Some aspects of the development of Hurricane Dorothy. *Mon. Wea. Rev.*, 95, 121-130.
- Fett, R. W., 1966, Upper level structure of the formative tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, 94, 9-18.
- Gray, M. W., 1979, Hurricanes: Their formation, structure, and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the Tropical Oceans*, D. B. Shaw, Ed., Royal Meteorological Society, 155-218.
- Holland, G. J., Merrill, R. T., 1984, On the dynamics of tropical cyclone structure changes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 110, 723-745.
- Kim, B. J., Cho., C. H., Chung, H. S., Shin, S. H., 2005,

- A Study on the intensity change of typhoon Nakri (0208) - Observation and GDAPS data analysis, *J. Korean Meteor. Society*, 41(5), 763-776.
- _____, Chung, H. S., Cho, C. H., Kim, H. J., 2003, Structural features of typhoon RUSA's center, *Vaisala News*, 162, 4-7.
- Korea Meteorological Administration, 2012, Development of risk assessment model and application of the prevention meteorological information to reduce the natural disaster: Development of multiple risk assessment model and improvement of the disaster prevention information, Atmospheric Environment Information Research Center(AEI), Inje university, Korea Meteorological Administration, pp134.
- Kurihara, Y., Tuleya, R. E., Bender, M. A., 1998, The GFDL hurricane prediction system and its performance in the 1995 hurricane seasons. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1306-1322.
- Merrill, R. T., 1988a, Characteristics of upper-tropospheric environmental flow around hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1132-1151.
- _____, 1988b, Environmental influences on hurricane intensification. *J. Atmos. Sci.*, 45, 1978-1687.
- Miller, B. I., 1958, On the maximum intensity of hurricanes. *J. Meteor.*, 15, 184-195.
- Molinari, J., Vollaro, D. 1989, External influences on hurricane intensity. Part I: Outflow layer eddy angular momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, 46, 1093-1105.
- _____, and _____, 1990, External influences on hurricane intensity. Part II: Vertical structure and response of hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, 47, 1902-1918.
- _____, 1993, Environmental controls on eye wall cycles and intensity change in Hurricane Allen(1980). *Tropical Cyclone Disasters*, J. Lighthill et al., Eds., Peking University Press, 328-337.
- _____, Skubis, S., Vollaro, D., 1995, External influences on hurricane intensity. Part III: Potential vorticity structure. *J. Atmos. Sci.*, 52, 3593-3606.
- Montgomery, M. T., Farrell, B. F., 1993, Tropical cyclone formation. *J. Atmos. Sci.*, 50, 285-310.
- Park, J. K., Kim, B. S., Jung, W. S., Kim, U. B., Lee, D. G., 2006, Change in statistical characteristics of typhoon affecting the Korean peninsula, *Atmosphere*, 16(1), 1-17.
- _____, Jung, W. S., Choi, H. J., 2008a, An analysis of the Korean peninsula damages vulnerabilities for a natural disaster mitigation : Focus on public facilities damages, *J. Environ. Sci.*, 17(4), 413-422.
- _____, _____, _____, 2008b, The study on the strong wind damage prediction for estimation surface wind speed of typhoon season(I), *J. Environ. Sci.*, 17(2), 195-201.
- _____, _____, _____, 2010, An estimation of amount of damage using the 3-second gust when the typhoon attack, *J. Environ. Sci.*, 19(3), 353-363.
- _____, _____, _____, 2005, An analysis of meteorological disasters occurred in the Korean peninsula, *J. Environ. Sci.*, 14(6), 613-619.
- Pfeffer, R. L., Challa, M., 1981, A numerical study of the role of eddy fluxes of momentum in the development of Atlantic hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 38, 2392-2398.
- Ramage, C. S., 1974, The typhoons of October 1970 in the South China Sea: Intensification, decay, and ocean interaction. *J. Appl. Meteor.*, 13, 739-751.
- Riehl, H., 1950, A model of hurricane formation. *J. Appl. Phys.*, 21, 917-925.
- Sadler, J. C., 1976, A role of the tropical upper tropospheric trough in early season typhoon development. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1266-1278.
- Shapiro, L. J., Willoughby, H. E., 1982, The response of balanced hurricanes to local sources of heat and momentum. *J. Atmos. Sci.*, 39, 378-394.
- Typhoon Research Center, Kongju National University, 2012, <http://www.typhoon.or.kr>.
- Willoughby, H. E., Black, P. G., 1996, Hurricane Andrew in Florida: Dynamics of a disaster. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 543-549.
- _____, Clos, J. A., Shoreibah, M. G., 1982, Concentric eyewalls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. *J. Atmos. Sci.*, 39, 395-411.
- Yanai, M., 1968, Evolution of a tropical disturbance in the Caribbean Sea region. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 46, 86-109.