

태풍 민들레의 온대저기압화 과정에 대하여

권혁조* · 김지영

공주대학교 대기과학과/태풍연구센터
(2005년 3월 7일 접수; 2005년 3월 15일 승인)

On Extratropical Transition of Tropical Cyclone MINDULLE

H. Joe Kwon and Ji-Young Kim

Department of Atmospheric Science/Typhoon Research Center, Kongju National University
(Manuscript received 7 March 2005; in final form 15 March 2005)

Abstract

A significant number of tropical cyclones move into the midlatitudes and go through transformation procedure into extratropical cyclones. This process is generally referred to as extratropical transition of the tropical cyclone. In this study, MIDULLE(0407) case is selected. A thorough analysis is made using the GDAPS analysis data and MTM (Moving-nest Typhoon Model) model output. It is found that during the extratropical transition an important dynamics in the environmental flow field occurs in which colder, drier (warm, moist) air penetrates in the western (eastern) quadrant of MINDULLE's outer circulation, which in turn initiates an asymmetry in the distribution of wind and temperature of the tropical cyclone. Simulated MTM result also reveals similar properties as in GDAPS analysis data. MTM result shows the gradual transition to the asymmetric distribution of wind and thickness as the extratropical transition proceeds. It is also found that the warm core disappears during the extratropical transition stage. Also, vortex tube is shown tilting towards the west during the transition. And the precipitation expands poleward of the center and the maximum precipitation appears to the left of MINDULLE which is consistent to the observations.

Key words: tropical cyclone, extratropical transition, MINDULLE

1. 서 론

북서태평양에서는 평균적으로 매년 27개의 태풍이 발생하고 있으며, 이중 상당수가 중위도로 이동하여 온대저기압이 된다. 이 과정을 일반적으로 온대저기압화 (Extratropical Transition)라 부르며 기상청에서는 열대저기압인 태풍이 온대저기압화 과정을 거쳐 온대저기압이 되면 태풍으로서 일생을 마쳤으므로 이에 대한 예보를 종료하게 된다.

하지만 이 열대저기압은 온대저기압이 된 후에도 강한 강수, 큰 파도, 돌풍을 일으키며 여전히 큰 피해를 주고 있다. 이처럼 태풍이 온대저기압이 된 후에도 많

은 피해를 주고 있지만 태풍의 온대저기압화 과정에 대한 이해는 충분하지 못한 실정이며 이에 대한 연구가 계속 진행 중이다. 또한 중위도 지방으로 이동한 태풍의 온대저기압화 과정의 시작과 종료, 진로, 강도를 예측하는 수치모델의 예측성이 낮으며 모델 개선에 대한 자세한 연구도 필요하다. 현재 열대 저기압의 온대저기압화에 대한 보편적인 정의는 없으며 연구의 목적에 따라 연구자가 정의하여 사용하고 있다.

Harr 등 (2000)은 최근의 연구에서 온대저기압화가 일어나는 동안 상층 기압골의 위치에 따라 온대저기압화를 북동, 북서 형으로 분류하여 이들의 특징을 연구하였다. 북서 형은 중위도의 상층의 기압골이 진행하는 태풍보다 서쪽에 위치하며, 북동 형은 중위도의 상층 기압골이 태풍보다 동쪽에 위치하여 태풍이 그 성질을 좀 더 유지할 수 있도록 도와준다. 일반적으로 북서 형이 북동 형 보다 온대저기압화 과정 후에 좀 더 빨리 강도가 강해지는 경향을 보였으며 태풍의 경로가

*Corresponding Author: H. Joe Kwon, Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Kongju, Chungnam 314-701 Korea
Phone : +82-41-850-8527, Fax : +82-41-856-8527
E-mail: hjkwon@kongju.ac.kr

북쪽으로 치우쳐 진행하는 남북형의 경향을 보였다. 반면 북동 형은 북서 형보다 좀 더 느리게 이동하며 태풍이 북쪽으로 이동하면서 북서 형보다 좀더 동쪽으로 이동하여 태풍 경로가 동서로 길게 늘어지는 움직임은 것으로 나타났다.

Klein 등 (2000)은 온대저기압화를 변환 단계와 재강화 단계의 두 단계로 구분하였으며 태풍이 위성 이미지와 분석장에서 모두 경압 저기압의 특징이 나타나며 태풍풍의 중심으로 차고 하강하는 공기가 중심으로 파고 들 때를 변환 단계로 정의하며 태풍이 경압성 중위도 저기압으로서 기압이 낮아졌다가 변환 후 폭풍이 가장 높은 중심 해면 기압에 도달 했을 때를 재 강화 단계의 시작이라고 정의하였다. 이 논문의 연구에 의하면 1994년에서 1997년에 북서태평양에서 발생한 태풍 112개 중 30개가 온대저기압화 과정을 겪었으며 이중 거의 반인 14개가 9월에 발생한 것으로 조사되었다.

본 논문에서는 2004년 7호 태풍인 민들레를 선정하여 열대 저기압이 온대저기압화 과정을 거치는 동안 어떠한 구조변화로 온대 저기압이 되는지를 정밀하게 조사하였다. 태풍 민들레는 2004년 6월 23일 06 UTC ~ 2004년 7월 3일 18 UTC까지 활동한 태풍으로 6월 27일 12 UTC부터 30일 12 UTC까지 TY급으로 발달 했었으며 7월 3일 18 UTC에 서귀포 서남서쪽 약 200 km 부근 해상에서 열대성 저압부로 약화 되어 제주도 서쪽으로 계속 북동진 하여 3일 21 UTC에 온대성 저기압으로 변질된 것으로 분석 되었다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 2004년 6월 23일 06 UTC부터 7월 3일 18 UTC까지의 민들레 활동기간 동안 (Fig. 1) 민들레가 중위도로 이동해 온대저기압화 과정을 거치면서 발생한 일련의 변화들에 대해서 조사하였다. 즉 태풍 민들레는 중위도로 진행하면서 상층의 기압골과의 상호작용을 일으키게 되며 태풍의 주 에너지 원인 해수면 온도의 변화를 거치게 된다. 특히 민들레는 대만을 가로질러 계속 북진하면서 중국 동해안에 상륙하면서 태풍의 서쪽 반이 육지에 동쪽 반이 바다에 걸친 상태로 우리나라로 접근하였다. 그러한 과정에서 비균질적인 지면효과, 종관장의 연직 시어, 습도의 변화, 지형 효과에 의해 열대저기압의 강도가 감소하며 극으로 이동하는 속도가 빨라지고, 바람, 열적 구조, 습윤장, 구

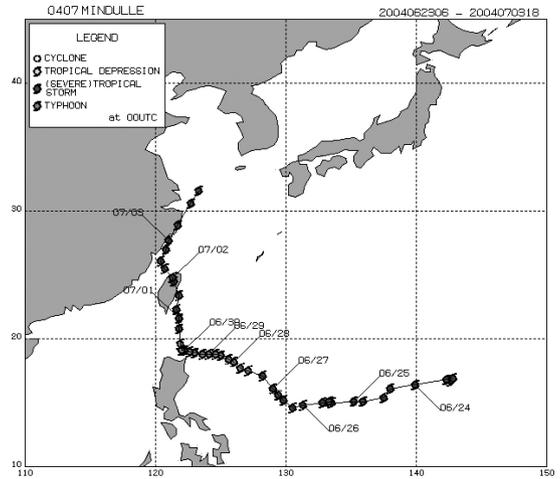


Fig. 1. Track of MINDULLE (0407) from 06 UTC 23 June to 18 UTC 3 July, 2004.

름, 대류, 강수, 표면 속 등이 비대칭이 되는 과정을 거친다.

분석에는 민들레의 활동 기간동안의 기상청 전구모델인 GDAPS (Global Data Assimilation and Prediction System)의 분석장, 위성영상이 사용되었다. 전구 분석장은 종관변수만을 갖고 있으므로 좀 더 상세한 구조 분석을 위해서 기상청의 준 현업 태풍모델인 MTM (Moving-nest Typhoon Model)을 수행하였다.

3. 분석 결과

3.1 GDAPS 자료 분석

민들레가 성숙한 태풍이었던 2004년 6월 28일 00 UTC의 상당온위와 남북 바람의 연직 구조 단면의 모습에서 상층과 하층 모두에서 온난 핵의 모습을 볼 수 있으며 남북 바람도 대칭적인 것을 알 수 있었다. 반면 민들레가 온대저기압화 과정을 거치고 있는 2004년 7월 3일 18 UTC의 모습에서는 하층에서 이미 온난 핵이 사라졌으며 남북 바람이 매우 비대칭적인 모습을 볼 수 있었다.

Fig. 2a는 2004년 6월 28일 00 UTC의 850 hPa의 상당온위 (온도가 높을수록 진하게 음영)와 유선을 나타낸 그림이며, Fig. 2b는 2004년 7월 3일 18 UTC 때의 상당온위 (온도가 낮을수록 진하게 음영)와 유선이다. Fig. 2a에서 민들레의 중심에 온난 핵이 있는 것을

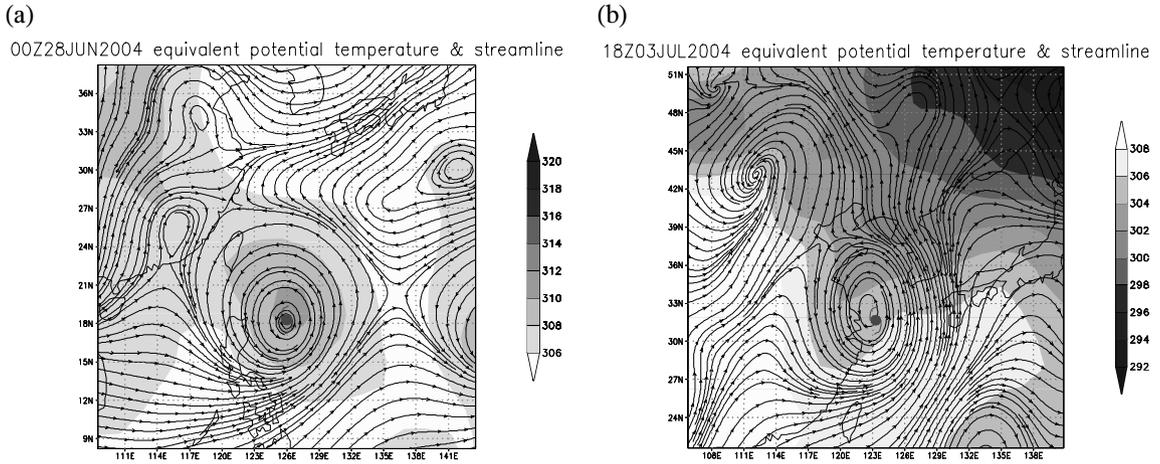


Fig. 2. Equivalent potential temperature (shaded, 2-K interval) and streamline at the 850 hPa level (a) at 00 UTC 28 June and (b) at 18 UTC 03 July 2004.

볼 수 있으나 온대저기압화를 겪는 단계인 Fig. 2b에서는 태풍 북쪽의 한랭한 공기가 민들레의 서쪽으로 파고들어 온난 핵 구조가 사라진 것을 알 수 있다.

Fig. 3의 (a), (b), (c), (d)는 각각 2004년 6월 28일 00 UTC (성숙한 단계, a), 7월 3일 18 UTC (온대저기압화 단계, b), 7월 4일 00 UTC(온대 저기압이 된 후, c, d)의 소용돌이의 연직 단면도이다. 성숙한 단계였을 때 소용돌이의 중심이 고도에 따라 바로 선 모습을 보였지만, 온대저기압화 과정을 거쳐 온대 저기압이 될 수록 와관 (vortex tube)이 서쪽으로 기울어지는 것을 볼 수 있다.

온대저기압화 과정을 거치는 민들레의 비대칭 모습을 좀 더 정량적으로 살펴보기 위해 Hart (2003)의 방법을 적용해 보았다. Hart (2003)에서는 진행 방향을 기준으로 태풍의 반경 500 km 범위 내에서 오른쪽 층후에서 왼쪽 층후의 차를 구하는 아래의 방법 (식 1)을 제시하였다. 태풍이 완전한 축대칭이라면 B 값은 0이 되겠지만 온대저기압이 되는 과정에서는 오른쪽으로 온난 이류 때문에 층후가 증가하며 왼쪽으로는 한랭 이류 때문에 층후가 감소하므로 시간에 따라 B 값이 증가할 것이다. Z_{500} 과 Z_{850} 은 각각 500 hPa과 850 hPa의 지위고도를 말한다. 민들레의 경우 GDAPS 분석장으로 계산된 B 값은 성숙한 단계일 때 약 ± 20 m의 차를 보이기도 했으나 온대 저기압이 된 후에는 30 m 이상으로 급격히 증가하는 모습을 보였다 (그림 생략).

$$B = h \left(\overline{Z_{500} - Z_{850}} \Big|_R - \overline{Z_{500} - Z_{850}} \Big|_L \right) \quad (1)$$

다음은 온난 핵이 사라지는 모습을 보기 위해 Hart (2003)의 방법을 사용하였다. Hart는 각 층에서 500 km 반경 내의 지위고도 값을 평균하여 지위고도의 편차를 구하고 (왼쪽), 각 층의 지위고도의 최대 값에서 최소 값을 차를 구해 ΔZ (오른쪽)를 구했다. Fig. 4의 (a)는 민들레가 성숙한 단계일 때의 모습으로 지위고도의 편차가 민들레 하층에서 큰 값을 보이는 것을 알 수 있다. 반면, 온대저기압화 과정을 겪고 있는 (b)에서는 지위고도 편차가 상층에서 큰 값을 보이며 기울어진 것을 알 수 있다. 또한 성숙한 단계일 때는 ΔZ 가 고도에 따라 감소하는 온난 핵의 구조를 보였으나 온대저기압화 과정을 겪고 있을 때 ΔZ 가 고도에 따라 증가하는 한랭 핵의 구조를 볼 수 있었다.

Fig. 5에는 이 ΔZ 의 시간에 따른 변화를 보였다. 또한 이들의 관계를 식 2와 3으로 나타내었으며 식 2는 하층 (500~850 hPa), 식 3은 상층 (300~500 hPa)의 관계이다. X축은 하부 대류권을 나타내며 값이 회색 바의 왼쪽으로 나타나면 한랭 핵, 오른쪽에 나타나면 온난 핵이 된다. Y축은 상부 대류권을 나타내며 값이 회색 바의 위쪽이면 온난 핵, 아래쪽이면 한랭 핵이 된다. 민들레가 성숙한 단계였던 2004년 6월 28일 00 UTC를 A점으로 나타내고 2004년 7월 3일 18 UTC를 Z점으로 표시하였다. 30 kt 반경을 상대적인 크기의 원으로 나타내었으며 6시간 간격으로 중심 기압이 1000 hPa 이상이면 흰색, 920 hPa 이하이면 검은색으로 단계적으로 음영으로 나타내었다. Fig. 5를 보면 민들레가 성숙한 단계였던 A점에선 상, 하층 모두 온난 핵

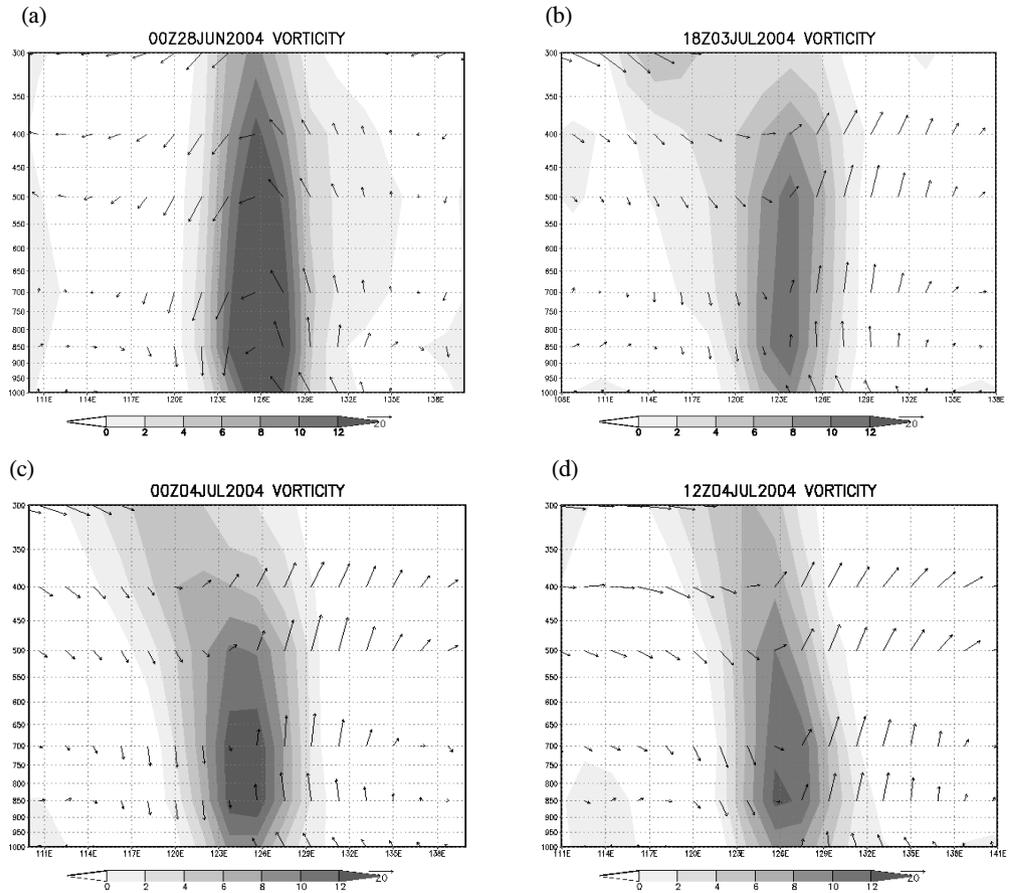


Fig. 3. Vertical east-west cross section of vorticity (shaded, in intervals of $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) at (a) 00 UTC 28 June (mature stage), (b) 18 UTC 03 July (extratropical transition stage), (c) 00 UTC 04 July, and (d) 12 UTC 04 July 2004 (extratropical cyclone).

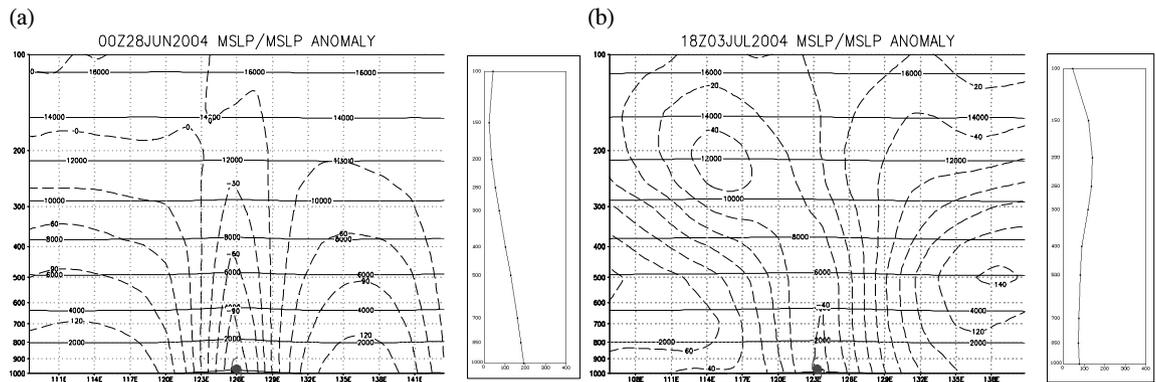


Fig. 4. Mean sea level pressure anomaly (dashed, in units of m) and geopotential height (contours, in units of m) and ΔZ at (a) 00 UTC 28 June and (b) 18 UTC 3 July 2004.

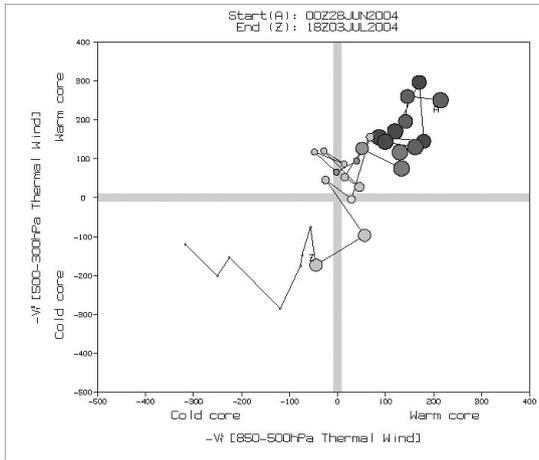


Fig. 5. Cyclone phase space diagram. Markers are plotted ever 6 h with the size of the maker indicating of gale force winds and the shading indicating the minimum mean sea level pressure(>1000 hPa white; <920 hPa black).

을 가지고 있었으며 중심기압이 낮고, 30 kt 반경이 큰 것을 알 수 있다. 하지만 온대저기압화 과정을 거치면서 태풍의 30kt 반경이 작아지고 중심기압이 상승하는 모습을 보였으며 비교적 상층 온난 핵, 하층은 약한 한랭 핵의 모습을 보이다 온대 저기압이 된 후에는 상층과 하층이 모두 한랭 핵의 구조로 바뀌고 있음을 말한다.

$$\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \Big|_{850}^{500} = -V_T^L \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \Big|_{500}^{300} = -V_T^U \quad (3)$$

다음으로 전선 발생과정에 대해 알아보기 위하여 변형장에 대해 조사하였다. 변형 (deformation)은 층 밀립 변형 (shear deformation)과 늘림 변형 (stretching deformation)으로 이루어져 있으며 전선 발생과정에서 이 두 항이 서로 다른 효과를 나타내는 것은 분명하지만 실제 적용에 있어 이 두 효과를 구분해내기 쉽지는 않다. 그래서 전체 변형장(식 4)을 온대저기압화를 거치고 전선 발생 중인 민들레의 경우에 적용해 보았다.

$$D = \sqrt{D_{sh}^2 + D_{st}^2} \quad (4)$$

$$D_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad D_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

Fig. 6은 2004년 7월 4일 06 UTC에 지상 바람에 대한 변형을 나타낸 그림이며 변형을 음영으로 등압선을 실선, 온도를 점선으로 나타내었다. 같은 시각 기상청의 지상 일기도에서 볼 수 있듯이 (Fig. 7) 전선으로 분석된 곳과 계산된 변형의 큰 값을 보이는 위치와 거의 일치하고 있고, 또한 이 부분의 온도 경도가 큰 것으로 보아 태풍의 동쪽에 온난전선이 남쪽에 한랭전선이 발생했다는 것을 알 수 있다.

3.2 수치모델을 활용한 정밀 분석

온대저기압화 분석에 사용한 GDAPS 분석장은 격

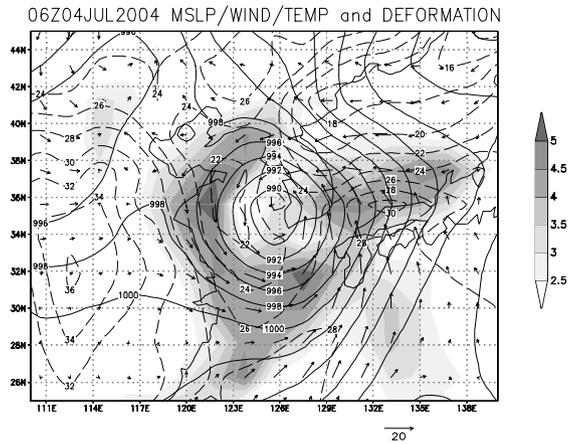


Fig. 6. Temperature (dashed, in units of °C), surface pressure (contour), and deformation(shaded, in intervals of $0.5 \times 10^{-5} s^{-1}$) at 06 UTC 4 Jul 2004.

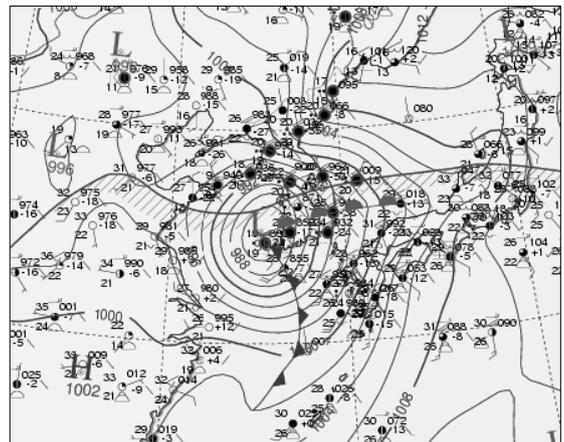


Fig. 7. Surface chart of KMA at 06 UTC 4 July 2004.

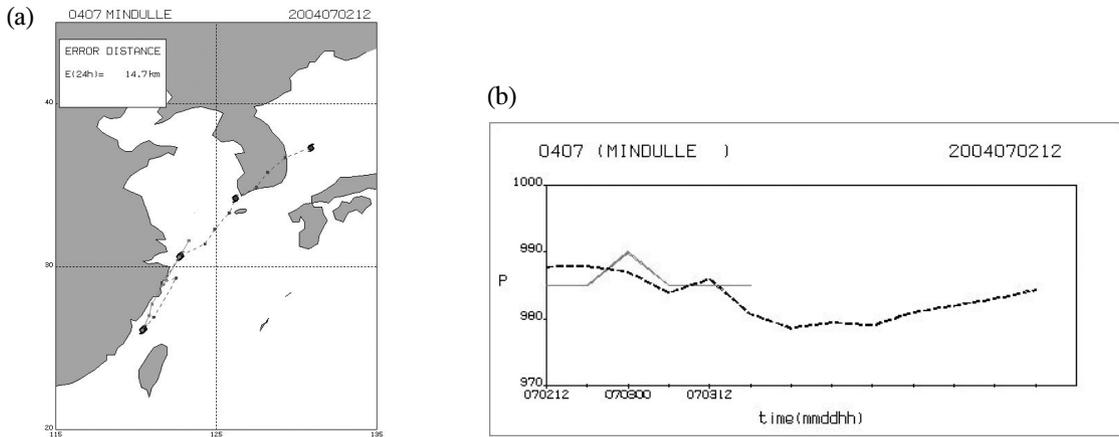


Fig. 8. (a) Forecast track (dashed) and (b) forecast intensity (dashed) of MINDULLE at 12 UTC 2 July 2004.

자가 1.875도 간격이며 6시간 간격의 자료로 자세한 분석을 하기엔 어려움이 있다. 그래서 수치모델을 수행하여 좀 더 상세한 격자 간격으로 모델 내에선 어떤 변화를 보이는지, 또 GDAPS 분석장으로 조사할 수 없는 다른 변수들도 조사를 해보았다.

사용된 모델은 중규모 커뮤니티 모델인 MM5를 기반으로 공주대학교 태풍연구센터와 기상청의 공동 연구에 의해 개발된 태풍 전용 모델인 MTM (Moving-nest Typhoon Model, MM5-based Typhoon Model)이다. 가장 바깥쪽 영역 (D1)은 81 km, 중간 영역 (D2)은 27 km, 가장 안쪽 영역 (D3)은 9 km의 격자 간격으로 수행되며 모델의 가장 큰 특징은 GFDL 방식의 태풍보거싱과 모델 수행 도중 태풍의 이동을 따라 자동으로 안쪽 격자가 이동하는 기능을 보유한 것이다.

Fig. 8은 2004년 7월 2일 12 UTC를 초기시각으로 수행한 MTM의 진로 및 강도 예측 결과다. RSMC 태풍 정보에 따른 진로 및 중심기압을 실선으로, MTM 모델 결과를 점선으로 나타내었다. 진로 예측은 거의 완벽하게 재현되었으나 강도 예측은 그렇지 못하였다. 실제로 적분 초기 시각 열대 폭풍이었던 민들레는 약 하루 후에 열대 저기압으로서의 일생을 끝마치고 온대 저기압을 변질되었으나 모델 결과를 보면 온대 저기압이 되기 전 기압이 약간 상승하였다가 다시 하강하는 것으로 나타났으며 다른 시간을 초기 시각으로 모델을 수행해 보아도 다시 기압이 하강하는 모습을 보여 모델 수행 동안 열대 폭풍 강도를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 이는 아마도 모델의 취약점 중의 하나이며 대개 다른 모델들도 특히 이 강도 예측 부분에서는 취

약점을 갖고 있다.

MTM 결과에서도 GDAPS 분석장과 같이 태풍의 북쪽의 차고 건조한 공기가 서쪽으로 파고드는 모습을 볼 수 있다. Fig. 9의 (a)는 MTM 예보의 초기 시간의 850 hPa의 상당온위(상당온위가 높을수록 진하게 음영)와 유선의 모습이며 태풍의 중심에 온난 핵이 남아 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 예보 30 시간 후의 상당온위(상당온위가 낮을수록 진하게 음영)와 유선을 나타낸 (b)를 살펴보면 태풍 중심의 서쪽으로 한랭한 공기가 파고든 것을 볼 수 있다.

Fig. 10a는 소용돌이의 연직 동서 단면도의 예보 초기 시간의 모습이며, 소용돌이 관이 연직을 똑바로 선 전형적인 열대저기압의 모습을 보이지만 예보 30시간 후인 (b)를 보면 소용돌이가 약해짐과 동시에 소용돌이 관의 축이 서쪽으로 기울어진 것을 알 수 있다. 실제로는 태풍의 강도가 시간에 따라 약해졌으나 모델 결과에서는 30 시간 후의 바람이 초기 시각보다 좀 더 강해진 것을 나타냈다. 심지어는 태풍의 등급에서 TY급으로 볼 수 있을 33 m/s 이상의 바람도 관측되었다. 이는 전술한 바와 같이 강도 예측의 부문에서 모델의 취약성을 드러낸 것과 같은 맥락으로 볼 수 있다. 또한 북진하는 상태를 고려해 볼 때 태풍의 오른쪽 바람이 왼쪽 바람보다 훨씬 강한 상태로 나타나 전술한 비대칭적 구조의 다른 면을 알 수 있다.

Fig. 11는 상당온위와 남북 바람의 연직 남북 단면의 모습이다. 예보 초기 시간인 (a)와 30 시간 후의 (b)의 모습에서 가장 큰 차이점은 비대칭성의 현격한 증가라고 할 수 있다. 초기시각의 경우 완전한 대칭은 아

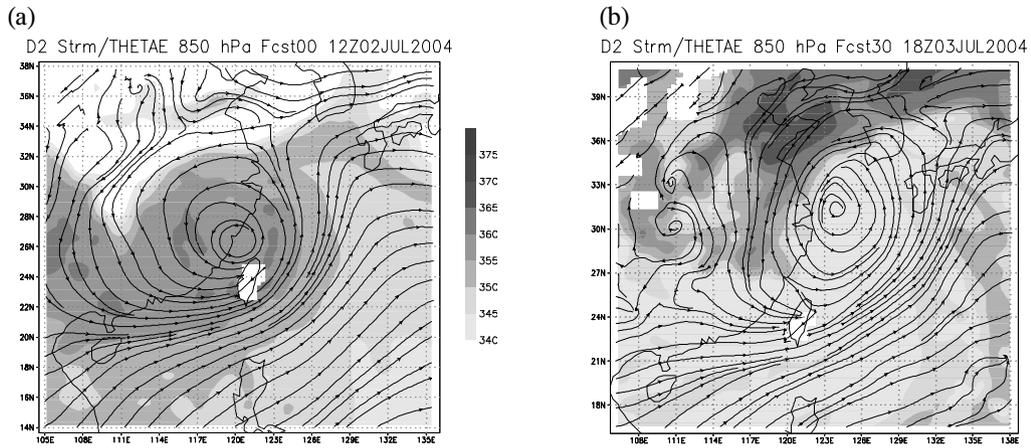


Fig. 9. Equivalent potential temperature (shaded, 5-K interval) and streamline at (a) 00 UTC 02 July and (b) 18 UTC 03 June 2004.

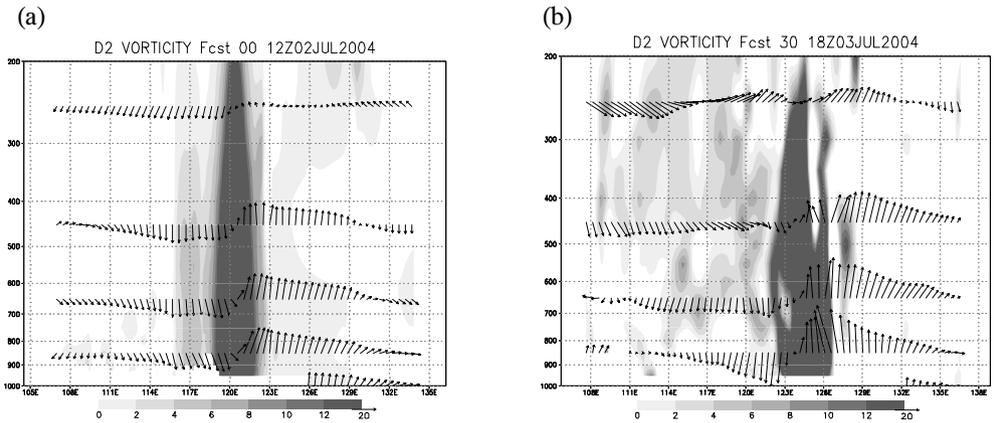


Fig. 10. Vertical east-west cross section of vorticity (shaded, in intervals of $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) at (a) 12 UTC 2 July and (b) 18 UTC 3 July 2004 ($t=30$).

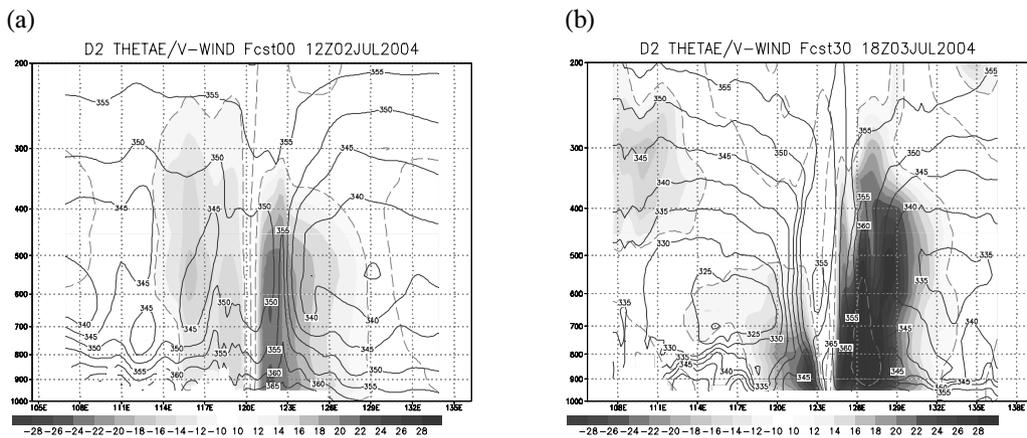


Fig. 11. Vertical east-west cross section of equivalent potential temperature (contour, 5-K interval) and wind (shaded, in units of ms^{-1}) (a) 12 UTC 02 July and (b) 18 UTC 03 July 2004.

니더라도 나중의 모습보다는 어느 정도 태풍의 대칭성을 유지하고 있다고 볼 수 있으며 바다 쪽에 속해 있는 동쪽의 경우가 내륙에 걸쳐있는 서쪽보다 바람이 좀 더 강하며 같은 고도에서 볼 때 상당온위도 높은 편이다. 이는 물론 같은 온도라 할지라도 바다 쪽의 높은 습기를 동반한 남풍계열의 바람의 영향으로 볼 수 있다. 이 비대칭성은 시간이 갈수록 더해져서 30시간 후에는 태풍 진행 방향의 좌·우의 차이가 현격하게 나타난다. 심지어 중층에서는 태풍의 중심보다 동쪽 바깥에서 더 높은 상당온위를 보이고 있다. 이 시각에 중층의 온도장에서는 중심 부근에서의 온난 핵 구조가 어느 정도 나타나고 있었으며 중심보다 바깥에서 높은 상당온위 값을 보이는 것은 그만큼 습기를 많이 보유하고 있다는 증거이다. 서쪽에서는 북풍계열의 비교적 건조한 한기 유입에 따라 낮은 상당온위 값을 보이는 것도 열대저기압의 온대저기압화 과정과 일관성 있는 현상이라고 볼 수 있다.

Fig. 12a는 2004년 7월 3일의 MTM이 예보한 24시간 누적 강수량이며 (b)는 같은 기간동안의 관측자료로 간주할 수 있는 GPCP (Global Precipitation Climatology Project)의 일 강수량이다. MTM 모델이 한반도 북쪽의 강수는 잘 모사하지 못했지만 중국의 동쪽 해변의 강수와 일본 동쪽의 강수 모습은 잘 모사하는 것을 볼 수 있다. Jones 등 (2003)의 연구에서 태풍의 온대저기압화 과정 때 태풍의 서쪽에서 강수가 강하게 나타난다고 했는데, MTM 모델 예보 결과에서도 예보 초기에는 태풍 진행 방향의 전면에서 강한 강수가 있었으나 온대저기압화를 거치면서 민들레의 서쪽으로 강한 강수가 나타나는 것을 볼 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 열대저기압이 중위도에서 어떻게 중위도 시스템과 상호 작용하여 온대저기압화를 거치게 되는지 한반도 근처에 왔던 0407호 민들레 사례를 선정하여 GDAPS 분석장을 살펴보고 또 MTM 모델을 수행하여 태풍이 성숙한 단계일 때와 온대저기압화 과정을 겪고 있을 때를 비교해 분석해 보았다.

먼저 민들레의 온대저기압화 과정을 GDAPS 전구 분석장으로 살펴보았을 때 민들레가 중위도로 이동하면서 민들레의 북서쪽으로 중위도의 한랭한 공기가 유입되고 남동쪽에선 온난한 공기가 유입되어 차츰 하층의 온난 핵이 없어지게 되며 그에 따라 전선이 발생하

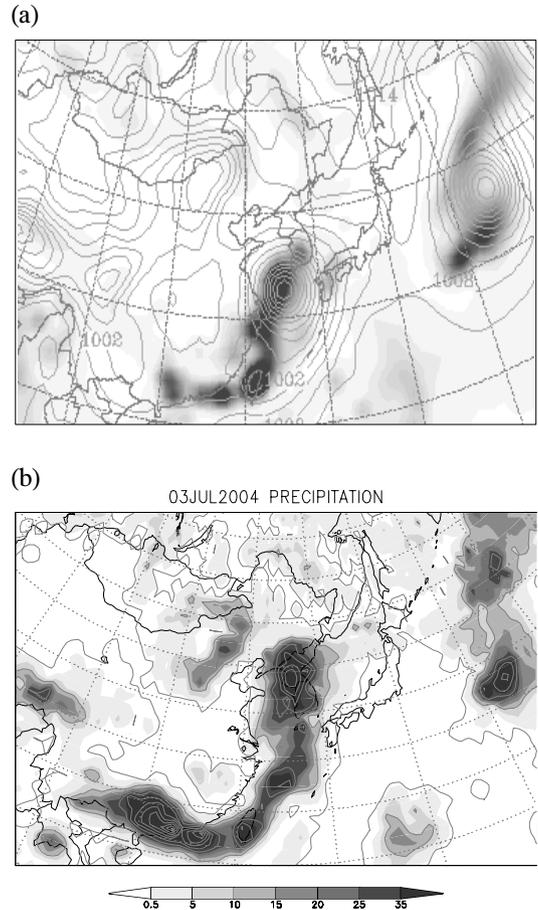


Fig. 12. (a) Simulated 24 hour accumulated rainfall on 3 July 2004, and (b) the corresponding GPCP rainfall.

는 모습이 나타났다. 그리고 중위도 편서풍의 영향으로 민들레의 오른쪽 반경 풍속이 왼쪽에 비해 강해지고 소용돌이의 축이 서쪽으로 기울어지는 모습을 볼 수 있었다. 또한 민들레 진행 방향의 왼쪽과 오른쪽의 층후를 구해 보았을 때 온대 저기압이 되면서 오른쪽 층후가 30 m 이상 두꺼워지는 모습을 보였다.

또한 MTM 모델을 이용한 분석에서는 진로의 모사는 비교적 정확하였으나 강도의 경우는 그렇지 못하였다. 따라서 중심기압이나 최대풍속의 변화에 대한 것은 논의 대상에서 제외하였지만 구조 변화에서는 전구 분석에서보다 상세한 결과를 얻을 수 있었다. 특히 모델에서는 태풍의 눈 부근에서의 약한 바람장과 바깥의 최대풍속 반경이 뚜렷이 나타났으며 이는 전구 분석장에서는 나타나지 않았던 구조이다. 온대저기압으로 변질되는 과정에서 태풍 진행방향의 오른쪽인 서쪽과 왼

쪽인 동쪽에서 상당온위의 현격한 차이가 나타나 온대 저기압으로 바뀌는 중에 비대칭성의 발달을 뚜렷이 보였다. 바다 쪽의 높은 습기를 동반한 남풍계열의 바람의 영향으로 태풍의 오른쪽에서 상당온위가 매우 높게 나타났다. 특히 민들레의 경우 왼쪽 반이 중국 대륙에 걸쳐 있었던 관계로 비교적 건조하고 한랭한 북풍계열의 유입이 비대칭성을 가속시켰다. 모사 초기엔 태풍 진행방향의 전면에서 강한 강수를 보였으나 온대저기압화 과정을 거치면서 태풍의 서쪽으로 강한 강수가 나타나는 모습도 모델 결과에서 관찰되었다.

본 연구에서는 민들레 하나의 사례로 태풍이 온대 저기압이 되는 과정을 조사하였지만 본 연구에서 관찰된 구조 변화가 모든 태풍의 온대저기압화에 동일하게 적용된다고는 볼 수 없을 것이다. 보다 보편타당성 있는 결론은 내리기 위해서는 많은 사례 연구가 추가되어야 할 것이다. 그렇게 함으로써 태풍이 온대저기압이 되는 시작 시점과 종료 시점을 보다 정량적으로 정의할 수 있을 것이다. 또한 예보의 관점에서도 어느 시점에서 태풍 정보를 종료하게 될 지에 대한 객관적 지침을 마련할 수도 있을 것으로 본다.

사 사

이 연구는 기상연구소 지원 ‘태풍예측기술의 고도화’ 사업의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- Harr, P. A., and R. L. Elsberry, 2000: Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I : Evolution of structural characteristics during the transition process. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2613-2633
- Hart, R. E., 2003: A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 585-616
- Jones, S. C., P. A. Harr, J. Abraham, L. F. Bosart, P. j. Bowyer, J.L. Evans, D. E. Hanley, B. N. Hanstrum, R. E. Hart, F. Lalaurette, M. R. Sinclair, R. K. Smith, and C. Thorncroft, 2003: The extratropical transition of tropical cyclones : Forecast challenges, current understanding , and future directions. *Wea. Forecasting*, **18**, 1052-1092
- Klein, P. M., P. A. Harr, and R. L. Elsberry, 2000: Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones : An overview and conceptual model of the transformation stage. *Wea. Forecasting*, **15**, 373-396