

북서태평양에서 저기압 위상 공간도법을 이용한 태풍의 온대저기압화 특성 분석

이지윤* · 박종숙 · 강기룡 · 정관영

국립기상연구소

(2008년 5월 2일 접수; 2008년 8월 5일 승인)

Characteristics of the Extratropical Transition of Tropical Cyclones over the Western North Pacific using the Cyclone Phase Space (CPS) Diagram

Ji-Yun Lee, Jong-Suk Park, KiRyong Kang and Kwan-Young Chung

National Institute of Meteorological Research/KMA, Seoul, 156-720, Korea

(Manuscript received 2 May 2008; in final form 5 August 2008)

Abstract

The characteristics of the typhoon's extratropical transition (ET) over the western North Pacific area were investigated using the cyclone phase space (CPS) diagram method suggested by Hart (2003). The data used in this study were the global data assimilation prediction system (GDAPS) and NCEP data set. The number of typhoons selected were 75 cases during 2002 to 2007, and the three parameters were analyzed: the motion relative thickness asymmetry of the storm (B), the upper thermal wind shear and the lower thermal wind shear. Comparing the best-track data provided by the Regional Specialized Meteorological Center /Tokyo, the time of the ET based on CPS was 2~6 hours earlier than the best-track data. And it was shown that the 400- km and 30 kt wind radius of storm for the CPS method were better agreement than the previous suggested radius 500- km.

Key words: Extratropical transition, cyclone phase space

1. 서 론

북서태평양에서는 매년 평균적으로 약 27개의 태풍이 발생한다. 태풍은 중위도로 북상하면서 적도에 비해 상대적으로 차가운 해수면 위를 지나게 되고 중위도 경압시스템에 의해 구조가 변형되기 시작한다. 이후 태풍은 열대저기압 상태에서 세력이 약화되거나, 그 성질이 변형되어 열대저기압의 특징을 잃어버리게 되는데 이를 온대저기압화 (Extratropical Transition : ET)라 한다 (Sinclair, 2002). Klein *et al.* (2000)은 북서태평양에서

의 온대저기압화 (이후 온저화)를 정의 하는데 있어 2 단계로 구분하였다. 1단계는 변형 단계로 태풍이 경압적인 상태로 변형되는 것이고, 2단계는 변형된 태풍이 온저화되어 재 발달하는 단계이다.

온저화는 태풍의 예보에서 일반적으로 사용되는 용어이지만 국제적으로 통용되는 객관적인 기준이 없기 때문에 예보관들의 주관적인 판단에 의해서 결정되는 경우가 많다. 이러한 문제점을 해소하기 위해 국내외적으로 온저화에 대한 연구가 진행되어 왔다. 기상청에서는 '온대저기압화 현업 매뉴얼'을 통해서 온저화에 대한 보다 과학적이고 객관적인 기준을 마련하기 위해 관측 자료, 위성자료, 단열선도 그리고 일기도를 이용하여 4단계의 온저화 판단기준을 마련하였다 (기상청, 2007). 권혁조와 김지영 (2005)은 2004년 7호 태풍 '민들레' 사례를 통하여 열대저기압이 중위도 시스템과의 상호작용에 의해서 온저화 되는 과정을 분석하였다. 분

*Corresponding Author: Ji-Yun Lee, Forecast Research Lab., National Institute of Meteorological Research, Seoul, 156-720, Korea.
Phone: +82-2-6712-0410, fax: +82-2-834-5922
E-mail: jyl@kma.go.kr

석결과에서 태풍이 중위도로 이동하면서 북서쪽에서는 한랭한 공기가 유입되고 남동쪽에서는 온난한 공기가 유입되면서 점차 하층의 온난핵이 사라지게 되고, 진행방향의 오른쪽의 층후가 왼쪽보다 두꺼워지는 모습을 보였다.

Harr and Elsberry (2000a)은 북서태평양에서 발생한 태풍 중 온대저기압으로 소멸된 2개의 태풍을 선정하여 온저화 되는 과정을 분석하였다. 온저화의 진행은 태풍마다 차이가 있지만 시작단계에서는 태풍의 오른쪽으로 온난이류가 축적되면서 온난전선이 지배적인 형태를 보인다. 또한 연속적으로 진행된 연구에서는 온대저기압과 중위도 시스템과의 상호작용에 의한 구조적인 변화를 분석하였다. 태풍의 약화 및 재 발달은 중위도 상층골의 위치에 의해서 좌우되며 태풍의 북서쪽에 상층골이 위치하게 되면 태풍과 상층골 사이의 상호작용에 의해서 태풍이 발달하게 되고, 북동쪽에 위치할 경우 남동쪽에 위치한 아열대고기압 사이에 위치하게 되어 강한 동서류에 의해 상호작용은 저지되고 태풍은 빠른 속도로 동진하게 된다(Harr and Elsberry, 2000b). 반면 Zhu *et al.* (2005)은 1997년도 태풍 'Winnie' 사례를 통하여 온저화의 과정을 다른 측면에서 분석하였다. 태풍과 중위도 시스템은 서로 상호작용이 없고 태풍의 전면에서 생성된 강한 강수대에 의해 지속적으로 태풍의 상하층 사이에서 온도의 불균형이 진행되고 점차 태풍의 구조가 변형되어 온저화 되는 것으로 분석하였다. Hart and Evans (2001)은 태평양에서 온대저기압 과정을 겪은 61여개의 태풍에 대하여 대칭구조와 온도풍을 분석하여 온대저기압의 시작 시점과 종료시점을 판단하였다.

지금까지 태풍의 온저화와 관련하여 많은 연구가 진행 되었으나 실제적으로 태풍예보에 사용하기 위해서는 온저화를 판정할 수 있는 객관적인 기준이 필요하다. Hart (2003)은 온저화를 진단적으로 판단할 수 있는 저기압 위상 공간도 (Cyclone Phase Space : 이하 CPS)를 제안하였다. CPS는 Hart and Evans (2001)에 의해서 제시되었던 태풍의 대칭성과 상하층의 온난핵의 유무 등을 이용하여 태풍의 구조적인 변화를 시간의 흐름에 따라 분석한 것이다. 본 연구는 태풍의 온저화 과정을 판단하는데 있어 주관적인 판단을 줄이고 객관적인 판단 기준을 제안하고자 Hart (2003)가 제안한 CPS를 2002 ~ 2007년의 온저화 태풍사례에 적용하여 북서태평양의 온저화 특징과 예보에 활용 가능 여부를 판단하고자 하였다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

Evans and Hart (2003)은 온대저기압의 전이과정을 분석하기 위해 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 자료를 사용하였다. ECMWF는 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 해상도로서 Evans and Hart (2003)은 온대저기압의 전이 과정 동안의 태풍의 구조적 분석을 수행하는데 있어 이 모델의 해상도는 충분하다고 밝히고 있다. 이 연구에서는 위 연구를 근거로 하여 해상도가 비슷하거나 좀 더 세밀한 해상도를 가지는 기상청의 전지구 예보시스템과 NCEP/GDAS 자료를 사용하여 연구를 수행하였다.

기상청의 전 지구 예보시스템 (GDAPS :Global Data Assimilation and Prediction System) 과 NCEP (National Center for Environmental and Prediction)의 GDAS (Global Data Assimilation System) 재분석 자료는 각각 $0.562^\circ \times 0.562^\circ$ 와 $1^\circ \times 1^\circ$ 해상도를 가지고 있다. 온대저기압 판별의 기준을 위하여 일본 도쿄에 있는 RSMC(Regional Specialized Meteorological Center)에서 제공하는 자료 (<http://www.jma.go.jp/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>)를 사용하였다. 이 자료는 매 6시간 간격으로 태풍의 중심 위치, 기압에 대한 정보가 제공되며 중심에서의 최대 풍속과 강풍 반경에 대한 정보를 제공한다. 태풍의 등급은 열대 폭풍 (Tropical Storm), 강한 열대 폭풍 (Severe Tropical Storm), 태풍 (Typhoon), 온대성저기압(Extra-tropical cyclone)로 구분된다. 이 연구에서는 Table 1와 같이 Extra-tropical cyclone 으로 나타나는 시점을 온저화 시점으로 보았다.

2.2 분석 방법

이 연구에서 사용된 방법은 Hart (2003)가 태풍의 온저화 시점의 객관적인 결정을 위해 제안한 저기압 위상 공간도이다. Hart (2003)는 3가지 요소를 이용하여 태풍의 발달, 변질 그리고 쇠퇴하는 과정을 연속적으로 분석하였고, 이를 토대로 태풍의 온저화를 판단하였다. 3가지 요소는 각각 B , $-V_T^L$, $-V_T^U$ 로써 태풍의 영향 범위를 500 km로 가정하고 계산하였다. 먼저 B 는 태풍의 대칭성을 나타내는 요소로서 식 (1)과 같은 방법으로 계산되어진다. 식 (1)에서 Z 는 지위고도로서 Z_{600hPa} 은 600 hpa의 지위 고도를 나타낸다. RIGHT는 태풍 진

Table 1. Best-track data of RSMC/Tokyo of CHANCHU(0601). Shaded area in second column showed the ET process.

best track of CHANCHU (0601)						
TIME(UTC)	GRADE	Latitude(°N)	Longitude(°E)	Pressure(hPa)	Wind(kt)	
2006051318	5	138	1182	970	65	
2006051400	5	138	1176	960	75	
2006051406	5	139	1166	950	80	
2006051412	5	139	1160	940	85	
2006051418	5	138	1155	935	90	
2006051500	5	141	1154	930	95	
2006051506	5	148	1153	930	95	
2006051512	5	153	1152	930	95	
2006051518	5	159	1150	930	95	
2006051600	5	169	1148	930	95	
2006051606	5	178	1149	935	90	
2006051612	5	188	1152	940	85	
2006051618	5	195	1154	940	85	
2006051700	5	205	1156	945	85	
2006051706	5	213	1161	950	80	
2006051712	5	225	1166	960	75	
2006051718	4	235	1172	975	60	
2006051800	3	244	1180	992	45	
2006051806	3	259	1192	996	40	
2006051812	3	299	1225	998	40	
2006051818	3	314	1234	998	40	
2006051900	6	316	1249	996	-	
2006051906	6	322	1268	996	-	
2006051912	6	328	1287	1000	-	

행방향의 오른쪽을 나타내고, LEFT는 태풍 진행 방향의 왼쪽을 나타낸다. B 값은 태풍의 오른쪽의 상층 600 hPa의 지위 고도와 하층 900 hPa의 지위고도의 차이의 평균에서 왼쪽의 동일한 차이를 뺀 값으로 정의 한다. 이 차이가 0이면 태풍의 좌우가 대칭임을 나타내고 10 이상일 경우 태풍의 대칭성이 깨어진 상태로서 Hart (2003)은 온대저기압으로 전이되는 시점으로 보았다. 또 다른 요소인 $-V_T^U$, $-V_T^L$ 는 상,하층의 온도풍으로서 각각 상층과 하층 대류권의 한기 침투 여부의 인자가 되며 식(2), (3)으로 계산한다.

$-V_T^L$ 의 값이 양수인 경우 온난 핵을 나타내며 태풍에 성장에 필요한 열원이 태풍의 하층부(600 hPa과 900 hPa 사이)에 공급되고 있음을 나타낸다. 음수인 경우 태풍의 쇠퇴와 연관되어 한기가 침투되고 있음을 나타낸다. 식(3)은 상층의 온도풍 계산식으로 태풍의 상층부(300 hPa과 600 hPa 사이)에 한기의 침투 여부를 나타낸다.

이 연구에서는 온대저기압으로 완성된 시점을 $B > 10$ 이고 $-V_T^L$ 와 $-V_T^U$ 가 음수일 때로 보았다. 이는 대칭성이 깨어지고 상층과 하층이 모두 한기가 침투되었을 때를 의미한다.

$$B = \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}}_{\text{RIGHT}} - \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}}_{\text{LEFT}} \quad (1)$$

$$-V_T^L = \frac{\partial(Z_{MAX} - Z_{MIN})}{\partial \ln P} \Bigg|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}} \quad (2)$$

$$-V_T^U = \frac{\partial(Z_{MAX} - Z_{MIN})}{\partial \ln P} \Bigg|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} \quad (3)$$

3. 사례 선정 및 실험 설계

3.1 사례 선정

2002 ~ 2007년 동안 북서태평양에서 발생한 146개의 태풍 중 온저화로 변질된 사례는 총 75개이다. Fig. 1는 그 사례들의 경로를 나타낸 것으로 선위의 원은 태풍이 온저화 된 시점을 나타낸다. 이 연구에서는 온저화가 이루어진 75개의 사례 모두에 대해서 CPS를 적용하여 계산을 수행했다. 그러나 계산 결과에서 태풍이 소멸할 때까지 B 값이 10을 넘지 않거나 $-V_{L7}^L$ 이 음의 값을 나타내지 않은 사례가 있었다. 보통 이러한 경우는 대다수의 경우 약한 열대저기압의 경우로 분석에 의하여 태풍의 구조가 잘 결정되지 않거나 경로에서 약간 벗어난 태풍에 해당한다 (Hart, 2003). 이러한 사례는 온저화를 판단하는 것이 불가능하여 분석에서는 제외하였다. 제외 결과 온저화의 판단 기준인 $B > 10$ 과 $-V_{L7}^L < 0$ 이 두 기준을 동시에 충족시키는 51개의 사례에 대해서만 분석이 이루어졌고 그 사례는 Table 2에 정리되어있다.

3.2 실험 설계

북서태평양에서 발생한 태풍에 대해서 CPS를 적용하였을 경우 온대저기압을 판단하기 위한 객관적인 지표로 활용가능한지를 판단하기 위해서 총 6개의 실험을 수행하였다 (Table 3). 우선 모델에 따라 CPS의 결과가 어떻게 변화되는지를 분석하기 위하여 기상청 전구

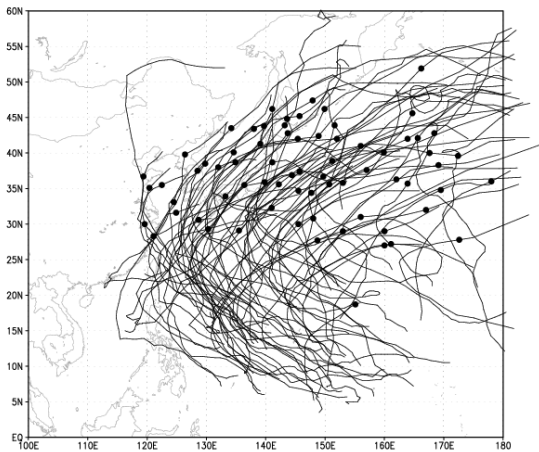


Fig. 1. Typhoon tracks which have the extratropical transition processes in the Northwestern Pacific during 2002 to 2007. Small solid circles mean termination position.

모델 자료인 GDAPS와 NCEP 자료를 사용하였다. 또한 CPS 계산 과정에서 태풍의 반경을 3가지로 각각 가정하고 계산하였다. 그 이유는 CPS는 태풍의 반경을 임의로 가정하고 계산을 수행하게 되는데 실질적으로 태풍의 수렴영역과 주변영역은 뚜렷한 구분이 없기 때문에 일정한 기준을 가지고 태풍의 반경을 결정해야 한다. Frank (1977)는 관측 자료를 이용하여 태풍의 수렴영역을 분석해 본 결과 평균적으로 $4^{\circ} - 6^{\circ}$ 정도의 크기를 나타냄을 밝혔고 Hart (2003)는 이를 바탕으로 하여 태풍의 잠재와도를 분석한 결과 태풍의 반지름을 500 km로 가정하고 CPS에 적용하였다. 이 연구에서는 Hart (2003)의 논문에서 제안한 500 km 뿐만 아니라 태풍의 반지름을 400 km와 강풍반경(30 kt 바람 영역)으로 가정하고 계산을 수행하였다. 400 km로 반지름을 가정한 이유는 재분석 자료에서 온대저기압으로 판단한 시점의 강풍반경을 분석해보면 강풍반경의 크기가 작은 경우에는 100 km, 큰 경우에는 800 km로 각 태풍의 사례 별로 차이가 크게 나타났지만 평균적으로는 약 400 km 정도의 크기를 보여 태풍의 반경을 대표할 수 있다고 판단하였다 (Fig. 2). 이는 기존 연구에서 사용된 500 km와 약 100 km 정도의 차이를 나타내기 때문에 온대저기압의 판단에서 다른 결과를 나타낼 것으로 보고 실험을 수행하였다. 또한 일괄적으로 같은 크기의 반경을 적용하는 것이 아닌 각 시점의 반경을 적용하였을 경우 CPS 결과의 변화를 살펴보기 위하여 반경의 크기를 재

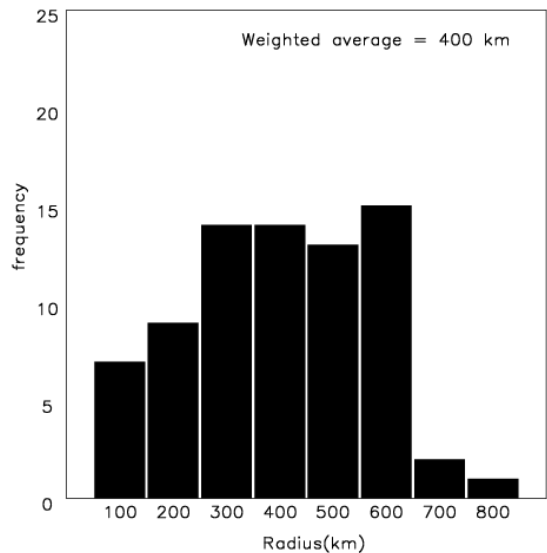


Fig. 2. Distribution of the 15 m s^{-1} wind speed radius when tropical cyclone begins to become ET.

Table 2. Summary of 51 tropical cyclones. The date and location of transition point were defined by RSMC/Tokyo.

year	number	name	Transition date	Transition lon.	Transition lat.
2002	0203	HAGIBIS	21 May	169.1	38.3
2002	0205	RAMMASUN	06 Jul	129.8	38.5
2002	0207	HALONG	16 Jul	148.9	42.4
2002	0213	PHANFONE	21 Aug	151.6	43.9
2002	0215	RUSA	01 Sep	134.2	43.5
2002	0219	CHANGMI	22 Sep	141.0	32.3
2002	0221	HIGOS	02 Oct	141.1	46.2
2002	0224	HUKO	07 Nov	172.6	27.8
2002	0225	HAISHEN	25 Nov	145.5	30.0
2002	0226	PONGSONA	11 Dec	160.0	29.0
2003	0303	CHAN-HOM	27 May	169.5	34.8
2003	0304	LINFA	31 May	133.2	33.9
2003	0305	NANGKA	04 Jun	135.5	29.1
2003	0306	SOUDELOR	19 Jun	134.9	38.7
2003	0310	ETAU	09 Aug	143.7	42.8
2003	0314	MAEMI	14 Sep	145.7	45.2
2003	0315	CHOI-WAN	23 Sep	156.0	41.0
2003	0316	KOPPU	30 Sep	150.7	35.6
2003	0317	KETSANA	26 Oct	147.7	34.4
2003	0321	LUPIT	02 Dec	149.7	36.7
2004	0401	SUDAL	16 Apr	153.0	29.0
2004	0402	NIDA	21 May	145.7	37.4
2004	0404	CONSON	11 Jun	136.4	35.5
2004	0406	DIANMU	21 Jun	139.1	41.3
2004	0407	MINDULLE	04 Jul	124.5	33.1
2004	0415	CHABA	20 Aug	152.0	42.0
2004	0418	SONGDA	08 Sep	139.7	43.8
2004	0421	MEARI	30 Sep	141.1	38.7
2004	0422	MA-ON	10 Oct	150.1	39.6
2004	0423	TOKAGE	20 Oct	139.8	35.9
2004	0424	NOCK-TEN	26 Oct	130.3	29.3
2004	0427	NANMADOL	04 Dec	122.6	23.2
2004	0429	NORU	22 Dec	161.1	27.2
2005	0503	SONCA	27 Apr	148.7	27.7
2005	0511	MAWAR	28 Aug	153.0	35.8
2005	0512	GUCHOL	25 Aug	164.7	45.6
2005	0514	NABI	08 Sep	147.9	47.4
2005	0515	KHANUN	13 Sep	122.5	35.5
2005	0517	SAOLA	26 Sep	151.2	38.9
2006	0601	CHANCHU	19 May	124.9	31.6
2006	0612	IOKE	06 Sep	166.2	51.9
2006	0614	YAGI	25 Sep	163.9	42.0
2006	0618	SOULIK	16 Oct	157.0	37.6
2007	0701	KONG-REY	06 Apr	160.0	27.0
2007	0702	YUTU	23 May	156.0	31.0
2007	0712	WIPHA	20 Sep	120.4	35.1
2007	0715	KROSA	08 Oct	121.1	28.3
2007	0717	PODUL	07 Oct	165.6	42.1
2007	0718	LINGLING	15 Oct	178.0	36.0
2007	0719	KAJIKI	22 Oct	162.0	36.3
2007	0720	FAXAI	27 Oct	142.2	35.6

Table 3. Experiment design of extratropical cyclone

radius	data	NCEP	GDAPS
500km		NCEP_500km	GDAPS_500km
400km		NCEP_400km	GDAPS_400km
Radius of 30kt wind		NCEP_30kt	GDAPS_30kt

분석 자료의 강풍반경으로 반지름을 가정하여 계산을 수행하였다.

4. 분석 결과

4.1 태풍의 진행방향과 강도에 따른 B 값의 변화

Hart (2003)는 태풍이 최대로 발달했을 때의 B값의 분포와 최대발달부터 소멸할 때까지의 B값의 분포를 각각 살펴보았다. 이 연구에서는 Hart (2003)와 달리 총 75개의 사례에 대해서 발생단계(열대저기압)부터 소멸 단계 (온대저기압)까지의 B 값의 변화를 조사하였다. Fig. 3은 그 결과로서 가로축은 태풍의 진행방향을 나타낸 것으로 E는 동쪽방향을 90은 90°의 각도를 가리킨다. 태풍의 진행방향은 재분석 자료를 이용하여 6시간 간격마다 산출하였다. 세로축은 B 값을 나타내며 -25에서 +125까지 표현하였다. Fig. 3a와 Fig. 3b는 각각 GDAPS와 NCEP에서 산출된 B값을 나타낸다. GDAPS과 NCEP 모델 모두 태풍이 북북동 방향으로 진행할 때 B값의 산포도는 -25 ~90 으로 넓게 흩어져 있는 모습을 보이고, 서북쪽방향으로 진행할 때 B값이 0에 밀집되어 것을 확인 할 수 있다. B값이 0에 가까운 경우는 태풍의 구조가 대칭을 이루는 단계로서 태풍이 발달하고 있거나 발달 중인 경우이다. 북서태평양의 태풍은 발생한 후 서~북서진하면서 점차 발달하고 위도 30도 부근으로 북상하면서 최성기를 이루며 전향을 한 후 북동~동진하면서 점차 약화된다. 또한 북동방향보다 동북동이나 동쪽으로 이동할 때 B값이 더 커지는 경향은 태풍이 고위도에서 소멸할 즈음 북 ~ 북북동으로 진행하는 태풍의 일생보다 동북동 ~ 동진방향으로 태

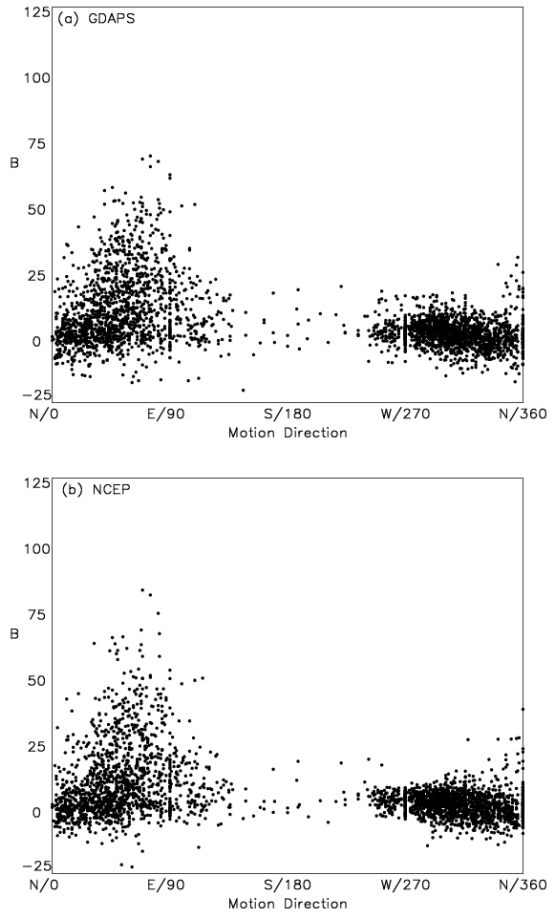


Fig. 3. Scatter plot of storm moving direction and ET onset diagnostic B: (a) GDAPS analyses and (b) NCEP reanalyses.

풍이 이동하면 태풍의 일생이 더 길어지면서 B값도 꾸준히 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 3b의 NCEP의 경우도 GDAPS와 비슷한 경향을 보이고 있으며, B값을 조금 더 크게 나타냈다. Hart (2003) 의 논문에서도 태풍의 진행방향에 따른 B값을 변화를 분석해 본 결과 북동진 하는 태풍의 경우 B값이 가장 크게 나타났으며, 남동~남쪽 방향으로 태풍이 이동하는 사례가 북서태평양의 태풍보다 좀 더 많았다. 이러한 태풍의 전형적인

Table 4. Statistical result of extratropical cyclone

	GDAPS		NCEP	
	mean time difference(h)	Std. Dev.	mean time difference(h)	Std. Dev.
500 km	-5.65	13.04	-6.63	13.92
400 km	-3.65	12.86	-2.75	12.78
RSMC 30 kt	-2.82	12.14	-4.63	12.44

진로를 볼 때 태풍의 진행방향과 B 값이 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 태풍이 발생하면서 중위도 부근으로 북상하는 경우에 B 값은 0 주변에 나타나게 되고 태풍이 전향을 한 후 북~북동진하면서 B 값이 증가해 태풍의 구조가 깨지는 것을 확인할 수 있다. 태풍이 남진하는 경우는 매우 드물게 나타나고 있어 북서태평양에서 나타나는 태풍의 일반적인 진로 경향을 파악할 수 있다.

Fig. 4는 태풍의 등급에 따른 B 값의 변화를 두 모델에 대해서 조사하였다. 열대저기압(TD)의 경우 B값이

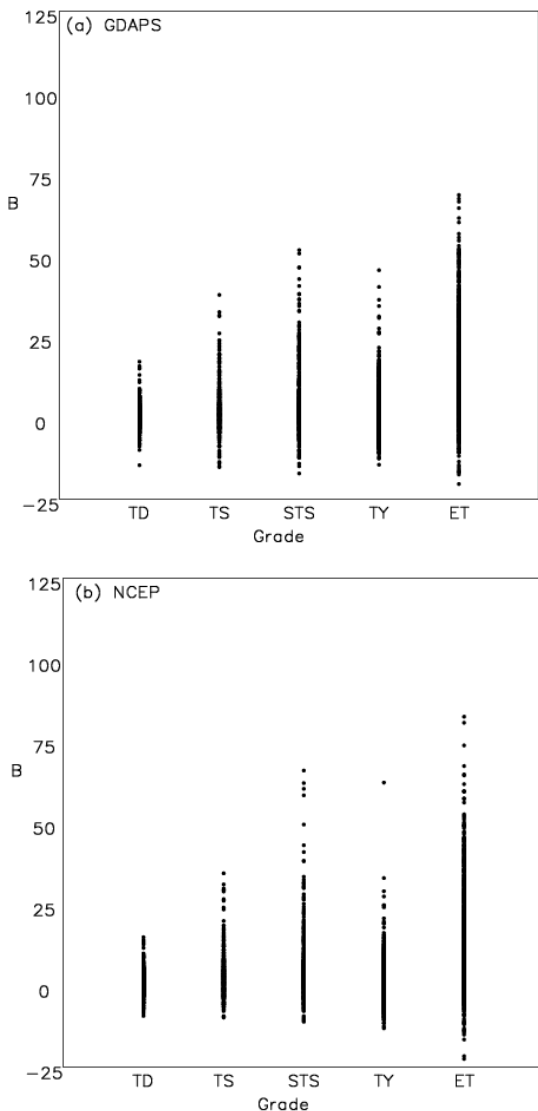


Fig. 4. Scatter plot of storm grades and ET onset diagnostic B: (a) GDAPS analyses and (b) NCEP reanalyses.

-10 ~ 20 사이에 분포하고, 열대성 폭풍(TS) 와 태풍(TY) 등급은 -15 ~25 에 B값이 집중되는 모습을 보였으며, 열대저기압 단계보다 분포의 범위가 넓어진 것을 확인할 수 있다. 온저화에 해당하는 ET의 경우는 -20 ~ 70 으로 온저화가 진행될수록 B 값이 매우 큰 값을 보였다.

또한 TY 급에서는 B값이 25 이상인 몇몇을 제외하고 대부분이 -10에서 25에 집중되어 있다. STS 등급에서 집중적으로 나타나고 있는 영역보다 좁게 나타난다. NCEP의 경우에도 GDAPS와 같은 양상으로 TY 급에서 B값이 0에 집중되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 태풍이 TY급으로 강해지면서 B값이 0 에 가까워짐을 두 모델의 결과를 통하여 확인할 수 있다. Hart (2003)의 논문에서도 Saffir-Simpson 허리케인 스케일로 허리케인의 강도를 분류하였을 때 카테고리 1단계에서 5단계로 갈수록 (1단계에서 5단계로 갈수록 허리케인의 강도가 강함) B 값이 0에 집중됨을 보였다. 결과적으로 B 값의 추이에 따라 태풍의 쇠퇴 또는 발달 상태를 알 수 있다.

4.2 재분석 자료의 온저화 시점과 CPS에서의 판단 시점 비교

CPS를 이용하여 태풍의 온저화를 판단하기 위해서는 실제로 태풍이 온대저기압으로 소멸된 시점과 CPS에서 분석된 온대저기압 시점을 비교해 보아야 한다. 이 연구에서는 사례 분석과 함께 2002~2007년의 온저화 된 태풍 75개중 CPS로 온대저기압을 판단 가능한 사례 51개에 대하여 CPS를 계산하고 그 결과를 전문과 비교했다.

Fig. 5 은 <http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase> 를 참고로 하여 2005년도 14호 태풍 나비 (0514) 사례에 대하여 CPS 방법을 적용한 결과를 나타낸 것이다. “태풍 나비는 2005년 8월 29일 12UTC에 열대폭풍(TS)으로 발생하였고 9월 2일 12UTC에 최대강도(중심기압 925 hpa, 최대풍속: 49 ms^{-1})로 발달하였다. 9월 6일 12UTC에 태풍은 부산 부근 해상에서 북북동진하여 동해상으로 북상하였다” (기상청, 2006). Fig. 5a 에서 가로축은 하층의 온도풍을 나타내고, 세로축은 B값을 나타낸 것이다. Fig. 5b에서 가로축은 하층의 온도풍을 나타내고 세로축은 상층의 온도풍을 나타낸 것이다. 원의 크기는 태풍의 강풍반경을 의미하며 중심기압에 따라 색을 다르게 표현하였다. Fig. 5a에서 4사분면은 태풍의 대칭 구조가 뚜렷하고($B < 10$), 하층에 온난 핵이 자리하고 있는 것으로 태풍이 발달하는 단계를 나타냄을 알 수

있다. 태풍 나비가 초기에 발생한 후 점차 발달하는 모습을 잘 표현하고 있다. Fig. 5b에서는 상하층의 온난핵의 유무를 확인할 수 있다. Fig. 5a처럼 태풍이 발생한 후 발달하는 동안에는 상하층에서 온난핵이 자리하고 있음을 알 수 있다. 태풍이 최대로 발달한 후에는 점차 B 값이 10을 넘기 시작하고 하층에 한기가 침투하기 시작하면서 태풍은 온저화를 겪게 된다. 위의 과정을 정리해보면 B값과 하층의 온도풍의 경우 (Fig. 5a) 처음

에 태풍은 4사분면에서 움직이다가 점차 3분으로 이동하면서 태풍의 일생을 마치게 되고, 상하층의 온도풍의 경우 (Fig. 5b) 4사분면에서 움직이다 점차 1사분면을 지나 2사분으로 진입하면서 태풍은 소멸하게 된다. 나비(0514)는 CPS 계산 결과 재분석 자료의 온저화 시점과 CPS에서 판단된 온저화 시점이 2005년 9월 8일 0600UTC로 동일한 결과를 나타냈다.

Fig. 6은 재분석 자료의 온대저기압 판단 시점과의 차이를 -30에서 30시간의 범위 안에서 6시간 간격으로 나누어 각각의 빈도수를 나타낸 것이다. 가로축에서 음수는 재분석 자료보다 CPS가 빠르게 온저화를 판단한 것을 의미하고, 반대로 양수는 CPS를 이용한 온저화 판단시점이 재분석 자료보다 늦음을 의미한다. 예를 들면 가로축에서 -6은 재분석 자료보다 CPS를 이용한 방법이 6시간 빠르게 온저화를 판단한 것이고 +6은 재분석 자료보다 CPS를 이용한 방법이 6시간 늦게 판단한 것을 나타내며 0의 경우는 재분석 자료의 온저화 시점과 CPS를 이용하여 판단한 온대저기압된 시점이 일치한 것을 나타낸다. Fig. 6(a)-(c)는 NCEP 모델 자료에서 산출된 CPS 자료를 이용하여 온대저기압을 판단한 시점과 실제 온대저기압의 시점을 비교한 것이고, Fig. 6(d)-(f)는 GDAPS 모델 자료를 이용한 것이다.

반지름을 500 km로 설정한 결과는 재분석 자료보다 평균적으로 6.63 시간 정도 빠르게 온저화를 판단하였고 400 km를 반지름으로 가정하여 계산한 결과는 평균적으로 재분석 자료에서의 판단 시점 보다 2.75 시간 빠르게 강풍반경을 사용하여 계산한 결과는 평균적으로 2.75시간 빠르게 판단하는 것으로 나타났다. 정리하면 NCEP을 이용한 결과의 경우 평균 오차로 판단할 때 500 km < 강풍반경 < 400 km의 순으로 결과가 좋은 것으로 나타났고 ±12 오차시간 범위에 들어오는 사례의 비율로 판단하면 500 km < 400 km < 강풍반경 순이었다. 두 판단 기준으로 평가 할 때 500 km의 반경으로 계산한 것 보다는 강풍 반경이나 400 km로 계산을 수행한 결과가 더 좋은 것으로 나타났다.

NCEP보다 좀더 세밀한 해상도를 가진 GDAPS의 실험 결과를 보면 500 km로 계산한 결과는 평균적으로 재분석 자료 보다 5.66 시간 빠르게 온저화를 판정했고 400 km로 계산한 결과와 강풍반경으로 계산한 결과는 각각 3.51, 3.6 시간 빠르게 판정하였다. 위의 결과로 볼 때 오차 평균으로 판단할 때는 500 km < 강풍반경 < 400 km의 결과였고 ±12 오차시간 범위에 들어오는 사례의 비율로 판단하면 500 km < 400 km < 강풍반경 순

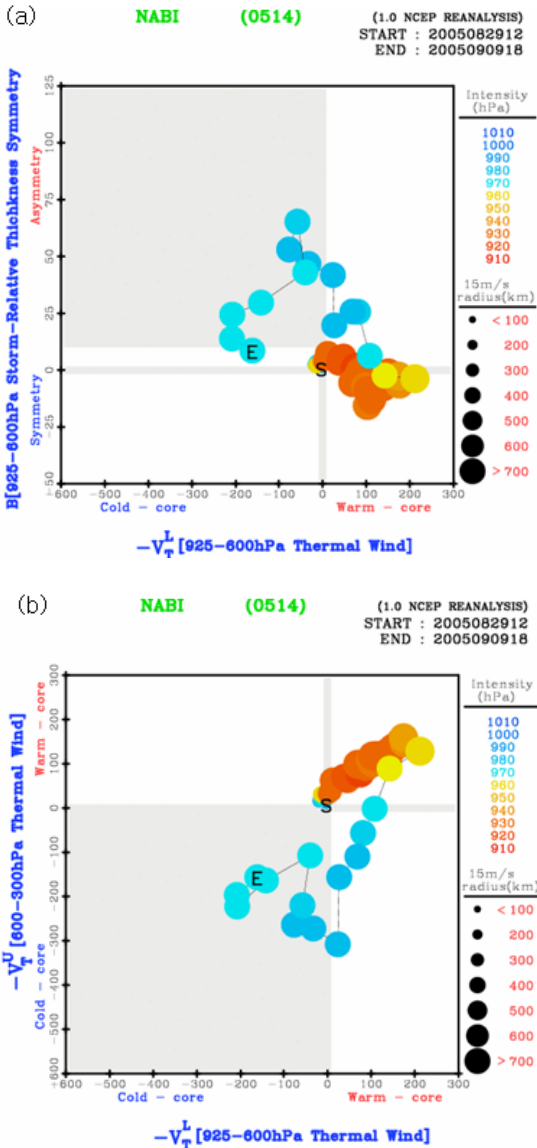


Fig. 5. CPS analysis of NABI(0514) with (a) B vs $-V_T^L$ and (b) $-V_T^U$ vs $-V_T^L$

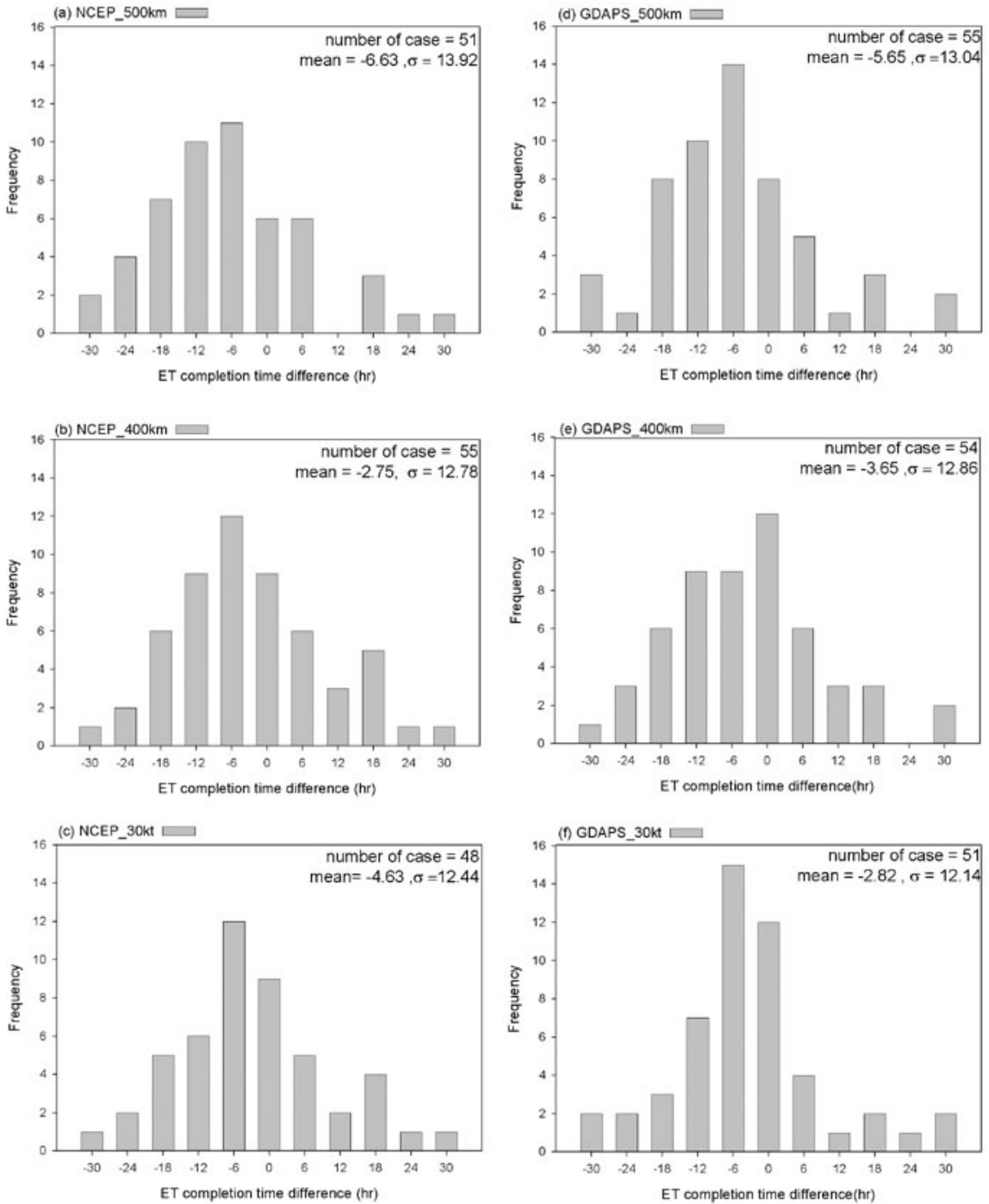


Fig. 6. CPS diagnosis compared to RSMC's ET declaration and NCEP (a-c) and GDAPS (d-f). See the text for the detail explanation.

서로 NCEP 결과와 동일한 결과를 나타냈다. 위의 결과로부터 CPS 방법을 이용한 온저화의 판단은 재분석 자

료에서의 온저화 판단 시간보다 짧게는 2시간 길게는 6시간 정도 빠르게 판단하는 것으로 나타났다. Fig. 6의

그 결과를 보면 GDAPS의 경우 500 km로 반지름을 한 경우 평균적으로 재분석 자료보다 5.65 시간 빠르게 온저화를 판정했고, 약 69% 정도의 사례가 ± 12 시간의 오차 범위 안에 포함되었다. 400 km 반지름으로 수행했을 경우에는 3.65 시간 빠르게 온저화를 판정했고, 사례의 약 73%가 ± 12 시간의 오차 범위 안에 포함되었다. 강풍반경으로 반지름을 사용했을 경우에는 2.82 시간 일찍 온저화를 판정 하였고 전체에서 약 78% 정도가 ± 12 시간의 오차 범위 안에 포함되었다.

사례를 동일하게 고정하고 계산한 경우 평균 오차로 평가 할 때 $500 \text{ km} < 400 \text{ km} < \text{강풍반경}$ 순으로 평균 오차가 적은 것으로 나타났고 ± 12 시간 분포에 따른 결과도 동일하게 나타났다. 이는 사례를 총수가 다르게 각각 계산하여 비교한 결과와는 약간 다른 결과로 사례를 달리하고 결과를 내었을 때는 강풍반경 $< 400 \text{ km}$ 로 나타났다. 그러나 강풍반경과 400 km의 평균오차 결과가 1시간 정도 차이로 큰 차이를 나타내지는 않았다. NCEP 자료를 이용하여 사례를 동일하게 사용하여 계산한 결과 평균오차시간과 ± 12 시간 분포비율에서 $500 \text{ km} < 400 \text{ km} < \text{강풍반경}$ 의 순서로 같은 결과가 나타나 자료 개수를 달리 했을 때와 동일한 결과를 나타냈다.

종합하면 해상도가 다른 두 모델을 이용하여 온저화를 판단했을 때 평균적으로 RSMC 보다 길게는 6시간, 짧게는 2시간 정도 빠르게 온저화를 판단하였다. 또한 Hart (2003)가 제안한 500 km의 반지름 계산 결과 보다는 북서태평양 온저화 시점에서의 평균 반지름인 400 km가 재분석 자료와 오차가 작게 나타났고 강풍 반경도 400 km의 결과와 비슷한 결과를 보였다.

5. 요약 및 결론

북서태평양에서 발생하는 태풍의 약 27%는 따뜻한 저위도 지역에서 발생하여 점차 발달하면서 중위도로 이동하고 편서풍대에서 온저화 과정을 거치면서 변질·소멸된다. 종종 온저화 된 후에도 강한 강수, 큰 파도, 돌풍 등을 일으키며 인명과 재산상의 큰 피해를 유발하는 경우가 있어 온저화를 정확하게 판단하는 것은 중요하다. 그러나 현재까지 태풍의 온저화에 대한 객관적이며 명확한 정의는 없으며 연구자나 예보자가 스스로 정의하거나 경험적으로 판단하는 등 태풍의 온저화 과정에 대한 이해는 아직까지 충분하지 못한 상황이다. Hart (2003)는 온저화 판단기준으로 저기압 위상 공간도 (Cyclone Phase Space: CPS)라는 객관화된 지표

제안하였다. CPS는 태풍의 대칭성과 상하층 온도풍을 이용하여 태풍의 성장과 변질, 쇠퇴를 나타내게 되고 태풍의 대칭을 나타내는 B값이 10보다 크고 하층에 온난핵이 사라진 시점을 온대저기압화 된 시점이라고 정의하였다.

Hart (2003)가 제안한 CPS 방법을 2002년에서 2007년까지의 태풍의 사례에 적용하여 북서태평양의 온저화의 특징에 대한 분석과 함께 CPS를 이용한 방법이 실제 객관적 지표로서 활용 가능한지를 판단하고자 했다. 그 결과, 태풍이 발생하면서 중위도 부근으로 북상하는 경우에 태풍의 대칭성을 나타내는 B 값은 0 주변에 머무르게 되고 태풍이 전향을 한 후 북-북동진하면서 B값이 10을 넘어서 태풍의 대칭성이 확인할 수 있다. 태풍이 남진하는 경우는 매우 드물게 나타나고 있어 북서태평양에서 나타나는 태풍의 일반적인 진로 경향을 파악할 수 있었다. 강도에 따른 B 값을 살펴 본 결과 온대저기압으로 진행될수록 B 값이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 온대저기압으로 진행여부를 판단하는데 있어 B 값이 활용가능한 지표가 됨을 알 수 있었다.

Hart (2003)가 태풍의 반지름을 500 km으로 가정한 것과 동일한 방법으로 태풍의 반지름을 500 km로 가정하고 재분석 자료와 비교하였다. 그 결과 재분석 자료의 온저화 판단 시점보다 평균적으로 5 ~ 6시간 정도 빠르게 판단하는 것으로 나타났다. 한편 온대저기압 시점에서 태풍의 반지름이 평균적으로 약 400 km로 나타난 것을 이용하여 태풍의 반지름을 500 km가 아닌 400 km로 변경하여 실험을 수행하였다. 그 결과 재분석 자료의 온저화 판단 시점보다 평균적으로 약 2 ~ 3시간 정도 빠르게 온저화를 판단하는 것으로 나타나 그 오차가 줄어드는 것으로 확인됐다. 마지막으로 태풍의 발생에서 소멸까지 반지름이 변화해 가는 것을 실험에 반영하고자 강풍 반경을 반지름으로 이용하여 실험을 수행하였다. 그 결과 실제자료와 비교하여 평균적으로 3 ~ 4시간 정도 빠르게 판단하는 것으로 나타났다.

종합하면 북서태평양의 태풍에 대해서 CPS 방법을 이용하여 온저화 시점을 판단한 결과 재분석 자료에서 판단한 시점 보다 평균적으로 2 ~ 6시간 정도 빠르게 온대저기압으로 판단하는 것으로 나타났고 태풍의 반지름을 500 km 가정한 것 보다는 400 km나 강풍 반경으로 반지름을 가정하고 실험을 수행한 것이 오차가 적게 나타났다. 따라서 실제 태풍예보에서 CPS를 사용하여 온대저기압을 판단할 때에는 2 ~ 6 시간 정도의 시간 차이를 고려하여 온저화를 판단한다면 예측성을 향

상시킬 수 있을 것으로 기대 된다. 한편 이 연구의 수행 과정에서 재분석 자료에서는 온저화로 변질되었으나 CPS에 적용해 실험해 본 결과 B 값이 10을 넘지 않거나 하층으로 한기 침투가 나타나지 않아 온저화를 판단할 수 없는 사례가 있었다 (GDAPS 자료기준 32%). 따라서 향후 연구에서는 CPS를 통하여 온저화 판단이 가능한 사례들을 좀 더 분석하여 태풍이 약화 되는 시점에서 CPS를 통한 판단이 가능한 사례인지 아닌지 여부를 판단 할 수 있는 후속 연구가 진행되어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소의 주요 사업인 “진보된 태풍 분석 및 예측 시스템 개발 (II)” 의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2006: 2005년 태풍분석 보고서, 기상청, 38 pp
- 기상청, 2007: 온대저기압화 현업 매뉴얼, 기상청, 37 pp
- 권혁조, 김지영, 2005: 태풍 민들레의 온대저기압화 과정에 대하여. *대기*, 15(1), 17-25
- Evans, J. L., and R. E. Hart, 2003: Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 909-925.
- Frank, W. M., 1977: The structure and energetics of the tropical cyclones. I. Storm structure. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1119-1135.
- Harr, P., and R. L. Elsberry, 2000a: 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.
- Harr, P., and R. L. Elsberry, 2000b: Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II: The Impact of Midlatitude Circulation Characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2634-2653.
- Hart, R. E., 2003: A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 585-616.
- _____, and J. L. Evans, 2001: A climatology of extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. *J. Climate*, **14**, 546-564.
- Justin M. A. and Jenni L. E., 2004: Characterization of Extratropical Transition Using Cluster Analysis: *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2916-2937.
- Klein, P., P. 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.
- Sinclair, M. R., 2002: Extratropical Transition of Southwest Pacific Tropical Cyclones. Part I: Climatology and Mean Structure Changes. *Monthly Weather Review*, **130**, 590-609.
- Zhu P., Zheng Y., Zhang C. and TAO Z., 2005: A Study of the Extratropical Transformation of Typhoon Winnie (1997). *Advances In Atmospheric Sciences*, **22**, 730-740.