

## 선행 태풍의 해수 냉각에 의한 해수면 온도 경도가 후행 태풍의 진로에 미치는 영향: 볼라벤(1215)과 덴빈(1214)

문민철 · 최유미 · 하경자\*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공

(접수일: 2016년 8월 12일, 수정일: 2016년 10월 7일, 게재확정일: 2016년 12월 6일)

### Effect of Sea Surface Temperature Gradient Induced by the Previous Typhoon's Cold Wake on the Track of the Following Typhoon: Bolaven (1215) and Tembin (1214)

Mincheol Moon, Yumi Choi, and Kyung-Ja Ha\*

Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System,  
Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 12 August 2016; revised 7 October 2016; accepted 6 December 2016)

**Abstract** The effects of sea surface temperature (SST) gradient induced by the previous typhoon on the following typhoon motion over East Asia have been investigated using Weather Research and Forecasting (WRF) model for the previous Typhoon Bolaven (1215) and following Typhoon Tembin (1214). It was observed that Typhoon Bolaven remarkably reduced SST by about 7°C at Yellow Sea buoy (YSbuoy). Using the WRF experiments for the imposed cold wake over West of Tembin (WT) and over East of Tembin (ET), this study demonstrates that the effects of eastward SST gradient including cold wake over WT is much significant rather than that over ET in relation to unexpected Tembin's eastward deflection. This difference between two experiments is attributed to the fact that cold wake over WT increases the magnitude of SST gradient under the eastward SST gradient around East Asia and the resultant asymmetric flow deflects Typhoon Tembin eastward, which is mainly due to the different atmospheric response to the SST forcing between ET and WT. Therefore, it implies that the enhanced eastward SST gradient over East Asia results in larger typhoon deflection toward the region of warmer SST according to the location of the cold wake effect. This result can contribute to the improvement of track prediction for typhoons influencing the Korean Peninsula.

**Key words:** Typhoon motion, cold wake, SST gradient, potential vorticity tendency, binary tropical cyclone, Yellow Sea, East China Sea

## 1. 서 론

국가태풍센터에서 제공하는 정보에 따르면 태풍은 북서태평양에서 발생하는 열대저기압으로 대한민국

에서 근대적 기상관측이 개시된 이후 1904년부터 2015년까지 345개의 태풍이 한반도에 영향을 주었고, 1년에 3개 정도의 태풍이 한반도에 영향을 미친다. 태풍이 발생하여 한반도에 접근하였을 때 강풍과 호우에 의해 건물이 무너지고, 홍수가 발생하는 등 한반도에 큰 피해를 준다고 알려진다(National typhoon center, 2011). 이렇듯 태풍은 주변지역에 매우 큰 피해를 끼치기 때문에, 태풍의 진로에 대한 이해는 필수적이다.

\*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63 beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.  
Phone: +82-51-510-2177, Fax: +82-51-515-1689  
E-mail: kjha@pusan.ac.kr

태풍의 진로는 대기의 지향류, 베타효과, 연직 시어, 지형효과, 해수면 온도 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다(Wang et al., 1998; Chan, 2005). 이러한 인자들 중 해수면 온도의 분포는 공간적인 특징에 따라 태풍의 이동이 영향을 받는다. 특히, 해수면 온도 경도의 분포가 태풍의 진행방향에 대해 수직일 경우, 가장 큰 변화를 보이며, 해수면 온도가 더 온난한 지역으로 가려는 경향이 나타난다는 것을 가상적인 실험을 통하여 선행연구에서 나타냈다(Chang and Madala, 1980). 이러한 선행연구를 바탕으로 실제 사례인 태풍 매미(2003)를 전향하고 난 이후, 가상적인 해수면 온도 분포의 영향이 진로에 어떠한 영향을 끼치는지 알아 보았는데, 공간적인 특징없이 등온조건에서 해수면 온도를 높여 실험을 하였을 때, 해수면 온도가 낮았을 때에 비해 온도가 높을수록, 동쪽으로 편향하는 특징이 나타났다. 그리고 등온조건이 아닌 가상의 해수면 온도의 경도를 강제력으로 주었을 때, 해수면 온도의 경도가 동쪽으로 발달할 때, 매미의 진로가 가장 크게 진로 차이를 보이며 동쪽으로 편향하는 특징이 나타났다(Yun et al., 2012). 최근의 선행연구에서는 북진하는 태풍인 에위니아(0603)와, 전향하는 태풍 매미사례에 대해 가상의 해수면 온도 경도가 진로에 어떠한 영향을 끼치는지 실험하여 잠재와도 경향분석을 하였고, 앞선 Chang and Madala (1980)와 Yun et al. (2012)에서의 결과와 마찬가지로, 태풍의 진행방향에 수직으로 발달하는 해수면 온도의 경도가 태풍의 진행방향에 큰 영향을 주었다. 북진하는 태풍의 경우, 동서로 발달한 해수면경도에 의해, 태풍의 진행방향은 온난한 지역으로 향했고, 전향하는 태풍의 경우, 동서로 발달한 해수면 온도의 경도에 의해 서쪽이 온난하였을 때, 전향 후 빠르게 북동진하였고, 동쪽이 온난하였을 때, 전향 후 천천히 북동진하는 특징이 나타났다(Choi et al., 2013).

이렇게 해수면 온도 분포는 태풍의 진로를 바꾸는데, 큰 영향을 주는 인자이다. 해수면 온도 분포를 바꾸는 요인은 여러 가지 인자들이 있겠지만, 순간적으로 발생하는 강한 냉각효과는 주로 태풍에 의하여 일어난다. 전향하는 태풍과 북진하는 태풍의 사례를 이용하여 해수면 온도의 감소를 고려한 모형실험을 하였고, 전향하는 태풍의 경우 전향하는 동안 전향점에 오래 머무르면서, 북진하는 태풍에 비해 해수면 온도를 더 냉각시키는 것을 보였다(Lee et al., 2006). 태풍이 지나간 뒤 태풍 경로를 따라 난류 혼합과 용승 작용에 의해 해수면 온도가 최대 3~9°C 감소하여 해수면 온도 분포의 변화가 나타나기도 한다(Price, 1981; Cione and Ulhorn, 2003; Lin et al., 2003; Walker et al., 2005; Price et al., 2008). 실제

로, 2010년 발생한 태풍 말라커스(2010)의 경우 해수 냉각(cold wake) 효과로 인해 동서로 해수면 온도 경도가 발달하며 국지적인 해수면 온도 분포의 차이를 보였다(D'Asaro et al., 2013). 일반적으로, 선행 태풍의 해수 냉각 효과는 냉각이 이뤄지고 나서 약 5일 이후 난류 혼합에 의한 냉각 효과가 44% 회복되고, 30일 이후 해수 냉각 효과가 88% 회복된다(Dare and McBride, 2011). 이러한 태풍의 해수 냉각 효과는 후행 태풍의 진로 예보와 강도에 영향을 준다. 선행 태풍에 의한 해수 냉각이 후속 태풍에 미치는 영향과 관련된 사례연구를 살펴보면 선행 태풍 에위니아가 지나간 후 발생한 해수 냉각 효과로 인하여 후행 태풍인 빌리스(0604)의 발달을 저해하였다는 연구 결과가 있었다(Jeong et al., 2013). 다른 선행연구 결과로는 볼라벤에 영향을 받은 황해 연안의 반응으로 전라남도 앞바다가 10°C 가까이 감소되는 특징이 있었고, 급속하게 냉각된 해수면에 의해 덴빈의 강도가 약해지는 특징이 있었다(Kim et al., 2014). 하지만 Kim et al. (2014)에서 볼라벤에 의한 해양의 반응을 분석하는 것이 주요 결과였고, 덴빈의 강도가 약화되는 것에 대해 언급하였을 뿐 진로에 관한 언급은 하지 않았다. 선행 태풍의 해수 냉각효과로 인해 변한 해수면 온도 분포가 후행 태풍의 강도에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 연구는 있지만, 후행 태풍의 진로에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 부족한 실정이다.

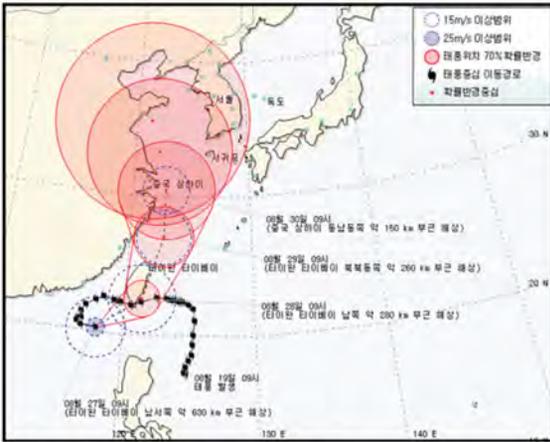
본 연구에서는 선행 태풍인 볼라벤의 해수냉각 효과를 고려하여, 동서로 발달 시킨 해수면 온도 경도가 후행 태풍 덴빈의 진로가 동쪽으로 편향하는데 어떠한 역할을 하였는지 알아보고자 했다. 본 연구에서는 고해상도 해수면 온도 자료를 기반으로 실제 편차의 차이를 이용해 동서방향으로 발달한 해수면 온도 경도를 강제력을 주어 실험을 했고, Weather Research and Forecast version 3.2(이하 WRF) 모형을 이용해 실험하였다. 본 연구는 총 4장으로 구성되어 있고, 2장에서 모형의 특징과 초기 자료와 실험 설계에 대한 설명 및 분석방법과 사례선정에 대해 소개하고, 3장에서 모형실험에 따른 결과 검증과 해수 냉각 효과에 의해 변한 해수면경도에 따라 태풍의 진로 차이에 대해 잠재와도 경향과 비대칭류를 통해 분석하고, 4장에서 주요 결과에 대한 요약 및 토의를 하였다.

## 2. 실험설계 및 방법

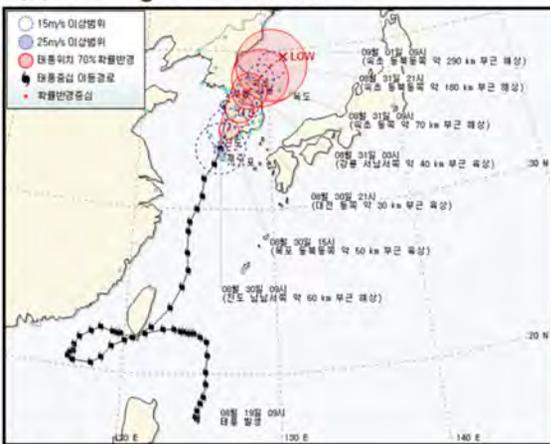
### 2.1 사례선정

태풍 볼라벤과 태풍 덴빈은 북서태평양에서 후지와라 효과가 발생한 가장 최근 사례로, 선행 태풍의 해수냉각이 해수면 온도 경도를 바꾸며 후행 태풍에

(a) 27 Aug



(b) 30 Aug Before landfall



(c) 30 Aug After landfall



**Fig. 1.** Track prediction of typhoon Tembin (1214) at (a) 1030 LST 27 August 2012, (b) 1000 LST 30 August 2012, and (c) 1300 LST 30 August 2012 by Korea Meteorological Administration (KMA).

영향을 주었다. 2012년 태풍 분석 보고서에 따르면, 19일 발생한 덴빈의 경우 북태평양고기압이 태풍 카이탁(1213)의 영향으로 동쪽으로 수축하면서 남중국 해부터 괌까지 몬순골이 형성되었고, 주변 고기압의 부재로 인하여 뚜렷한 지향류가 형성되어 있지 않았다. 그리고 발생 초반 이후 대륙의 고기압이 버티면서 북진하지 못하고 서진하게 되었고 몬순골 흐름은 볼라벤쪽으로 수렴되었다. 이러한 조건에서 볼라벤은 발생초기부터 넓은 바람장을 동반하였다(Lee et al., 2014). 이후 상대적으로 크기가 작은 덴빈은 볼라벤의 지속적인 직·간접적인 영향에 의해 대만에 1차 상륙 후 알파( $\alpha$ ) 형태의 이상진로를 보였다(Fujiwara, 1921; Brand, 1970; Chang, 1983; Carr and Elsberry, 1998). 덴빈이 이상진로를 보이고 난 뒤, 한반도에 상륙하기 전까지 예보를 살펴보면, 8월 27일 덴빈이 8월 28일 0000 UTC에 타이베이 남쪽 280 km 해상에 위치하고, 48시간 후 중국 상하이 동남동쪽 150 km 부근 해상에 위치한 이후, 중국 연안을 따라 북상할 것으로 예보하였으나(Fig. 1a) 덴빈은 예보와 달리 북동쪽으로 이동하며 한반도에 영향을 미쳤다. 8월 30일 덴빈이 8월 30일 0000 UTC 진도 남남서쪽 60 km 부근 해상에 상륙한 이후 목포와 대전을 지나 강원도 북부를 통과할 것으로 예보하였다(Fig. 1b). 하지만 덴빈의 경로는 30일 13시 더욱 동쪽으로 편향하여, 고흥에 상륙한 후 경상북도를 통과하며 울릉도 부근 해상에서 온대 저기압화되었다(Fig. 1c). 예보와 달리 덴빈이 동쪽으로 편향하면서 크기는 소형 태풍이었지만, 바람의 세기가  $30 \text{ m s}^{-1}$ 로 강했던 덴빈의 진로예측에 차이로 인해, 태풍의 영향권에 들지 않을 것으로 예상되었던 부산에서는 미처 대비를 하지 못해 강풍에 의해 인명피해 및 정전이 발생하였다(National typhoon center, 2013).

덴빈이 먼저 발생하여 북상했음에도 불구하고 알파형태의 이상진로를 보이는 동안 하루 뒤 발생한 태풍인 볼라벤이 먼저 북상하였고, 덴빈은 볼라벤이 지나간 뒤 이어서 북상하면서 동쪽으로 편향하였다(Fig. 2). 볼라벤이 덴빈보다 먼저 통과하면서, 해수면 온도의 분포에 어떠한 영향을 끼쳤는지 알아보기 위해 이어도 종합과학기지(Ieodo Ocean Research Station, IORS)와 황중부이(YSbuoy)의 관측지점자료와 IORS가 위치한 지점의 OISST의 자료를 비교하여 보았다. 관측된 해수면 온도의 시계열을 보면, 이어도 종합과학기지에서도 선행 태풍 볼라벤이 접근하며 8월 27일 0000 UTC에 감소하기 시작해서 약  $3^{\circ}\text{C}$ 가 감소하였지만, 볼라벤이 통과한 8월 27일 1200 UTC 이후엔 결측이 되었고, 황중부이에서 8월 29일 0000 UTC에서 약  $7^{\circ}\text{C}$ 가 감소하는 특징이 나타났다. 그리

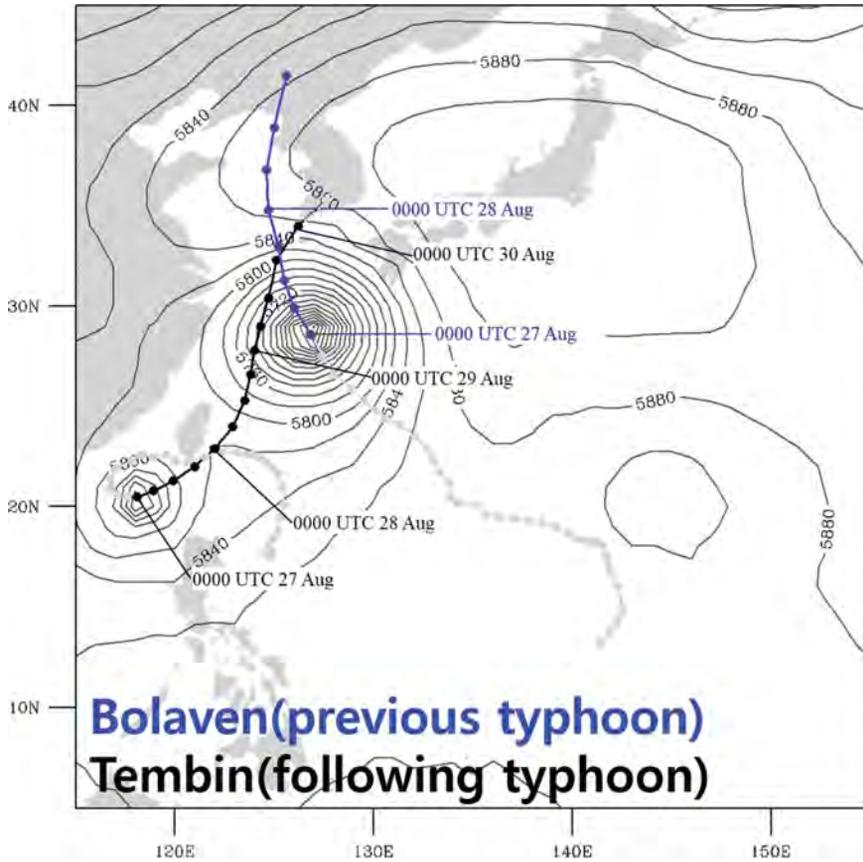


Fig. 2. The track of the previous Typhoon Bolaven (blue solid line) and the following Typhoon Tembin (black solid line) was simulated by WRF and spatial patterns of 500 hPa geopotential height (contour) at experiment starting point (0000 UTC 27 August 2012). Gray solid line was not simulated WRF experiment.

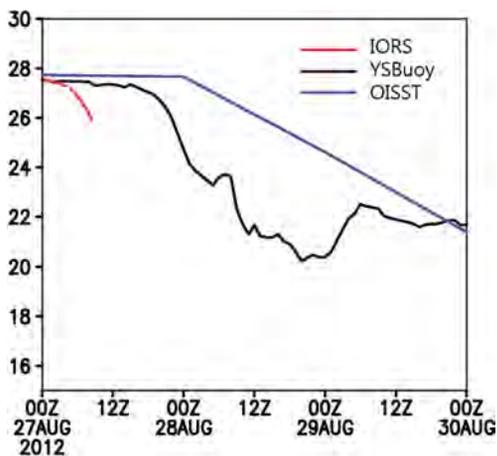
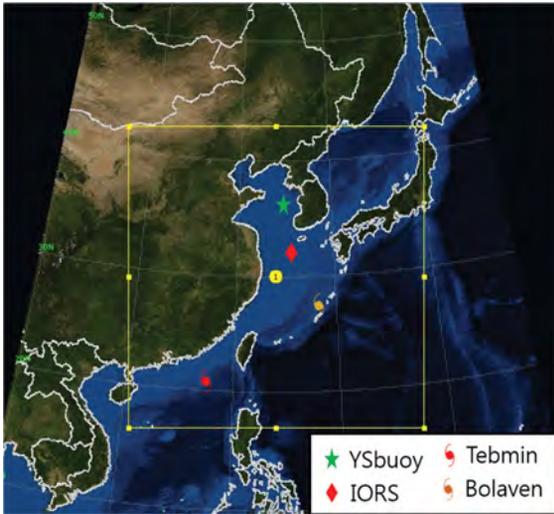


Fig. 3. Time series of SST at IORS (red line), YSBuoy (black line), and OISST (blue line) from 0000 UTC 27 August 2012 to 0000 UTC 30 August 2012.

고, OISST에서 살펴보면 8월 27일 0000 UTC와 30일 0000 UTC에서 관측과 비슷한 수치를 보였지만, 감소하는 경향이 실제 관측에 비해 약한 것을 확인할 수 있다(Fig. 3).

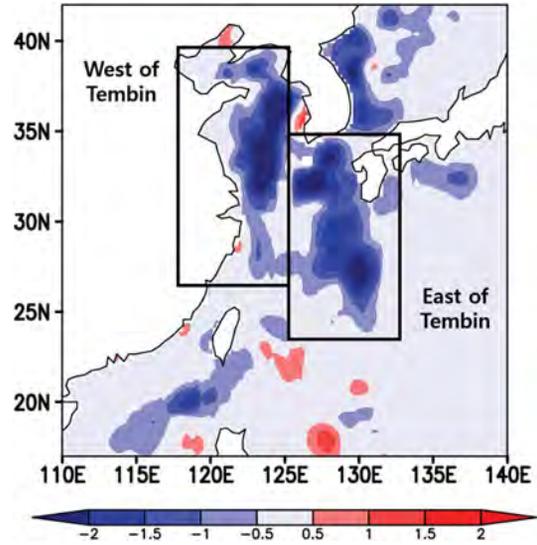
### 2.2 모형 실험

본 연구에서는 WRF 모형을 이용하여 선형 태풍 볼라벤으로 인한 해수 냉각 효과로 인해 변한 해수면온도의 경도가 후행 태풍 덴빈의 진로에 어떠한 영향을 주었는지를 알아보기 위하여 실험하였다. 모든 실험에서 사용된 수평해상도는 동중국해(30°N, 124°E)를 중심으로 하여 240 × 240개의 격자의 동아시아 지역으로 격자간격은 12 km로 실험을 진행하였고, 연직적으로 27개의 구간을 정의 하였다(Fig. 4). 60초 간격으로 72시간 동안 적분을 하였다. 물리과정으로, 적운 모수화에는 Kain-Fritsch scheme이 이용되었고(Kain and Fritsch, 1993), 경계층 모수화에는



**Fig. 4.** The WRF domain used for the case of Typhoon Bolaven and Typhoon Tembin. The horizontal grid spacing is 12 km for D01. Red (yellow) typhoon symbol is represented Typhoon Tembin (Bolaven).

는 Yonsei University Scheme을 이용하였다. 다른 물리과정에 대해 Table 1에 요약하여 정리하였다. 실험에 이용된 자료로는 The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Final (FNL) Operational Global Analysis 6시간 간격의  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  자료와 해수면 온도 자료는 Optimal Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) 1일 간격의  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  자료를 초기장 및 경계장으로 이용하였다. 태풍최적경로자료(Best track)는 미국 합동태풍경보센터 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 자료를 이용하였다. 모조 소용돌이 방법은 the fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model (MM5)에서 이용한 모조 소용돌이 방법을 이용하였다(Davis and



**Fig. 5.** Spatial patterns of SST difference (shading) between 28 August 2012 and 27 August 2012. Left box defined region of West of Tembin ( $27^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$ ,  $115^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$ ) and right box defined East of Tembin ( $22^{\circ}\text{N}-35^{\circ}\text{N}$ ,  $125^{\circ}\text{E}-132^{\circ}\text{E}$ ).

Low-Nam, 2001).

CTL 실험은 선행 태풍 볼라벤의 해수 냉각 효과를 고려하지 않기 위하여 볼라벤이 지나가기 전 해수면 온도 분포를 이용한 실험으로 정의 하였다. 본 연구에서 해수면 온도를 변화시키는 영역을 선행 태풍 볼라벤이 지나가기 전 해수면 온도와 볼라벤이 지나가고 난 후 해수면 온도의 차이가  $0.5^{\circ}\text{C}$  이상 냉각된 지역을 기준으로 West of Tembin (WT) 지역 ( $27^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$ ,  $115^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$ )과 East of Tembin (ET) 지역 ( $22^{\circ}\text{N}-35^{\circ}\text{N}$ ,  $125^{\circ}\text{E}-132^{\circ}\text{E}$ )으로 구분하여 정의하였다(Fig. 5). 냉각 시키는 부분은 IORS에서는 결측으로 인해 나타나지 않았지만, 황중부이의 해수면 온도 자료에서 나타난 해수면 온도의 감소가 약  $7^{\circ}\text{C}$ 인

**Table 1.** Configuration of the WRF model used in this experiment.

Model	WRF version 3.2
Horizontal grid spacing	12 km
Dimension	$240 \times 240$
Vertical layers	27 full sigma levels
PBL	Yonsei University scheme
Cumulus	Kain-Fritsch scheme
Microphysics	WRF single-moment 6-class scheme
Longwave radiation	Rapid radiative transfer model (RRTM) scheme
Shortwave radiation	Dudhia scheme
Surface layer	MM5 similarity
Land surface	5-layer thermal diffusion

**Table 2.** Experimental design of control run (CTL) and SST distributions changed by cold wake.

Experiment	CTL	ET-CW	WT-CW
Change in SST condition	Initial condition of SST obtained from OISST data on 27 August 2012, which is considered without cold wake	Decrease SST by three times more than the cold wake (28 August minus 27 August) over the ET and increase SST by the cold wake over the WT	Decrease SST by three times more than the cold wake (28 August minus 27 August) over the WT and increase SST by the cold wake over the ET

것과, 선행연구인 Kim et al. (2014)의 볼라벤이 지나가고 난 뒤 약 10°C가 냉각된 것을 고려하고, 온난하게 한 부분은 황중부이에서 7도가 감소하고 난 이후 2°C가 회복된 것을 적용하여, IORS가 포함된 ET 지역에는 편차의 3배를 냉각시키고, 서쪽으로 해수면 온도 경도 효과를 강화하기 위해, WT 지역을 해수면 온도의 편차만큼 온난하게 한 해수면 온도를 이용한 실험을 ET-CW 실험으로 정의했다. 반대로, 황중부이가 포함된 WT 지역을 편차의 3배를 냉각시키고, 동쪽으로 해수면 온도 경도효과를 강화하기 위해 ET 지역을 편차만큼 온난하게 한 해수면 온도를 이용한 실험을 WT-CW 실험이라 정의하고 모형실험을 진행하여 비대칭성이 강화된 해수면 분포에 따른 진로의 차이를 살핀다(Table 2). 모든 실험에서 해수면 온도는 초기값을 그대로 경계값으로 이용하였고, 초기값 이후 실시간으로 변화를 주지 않았다.

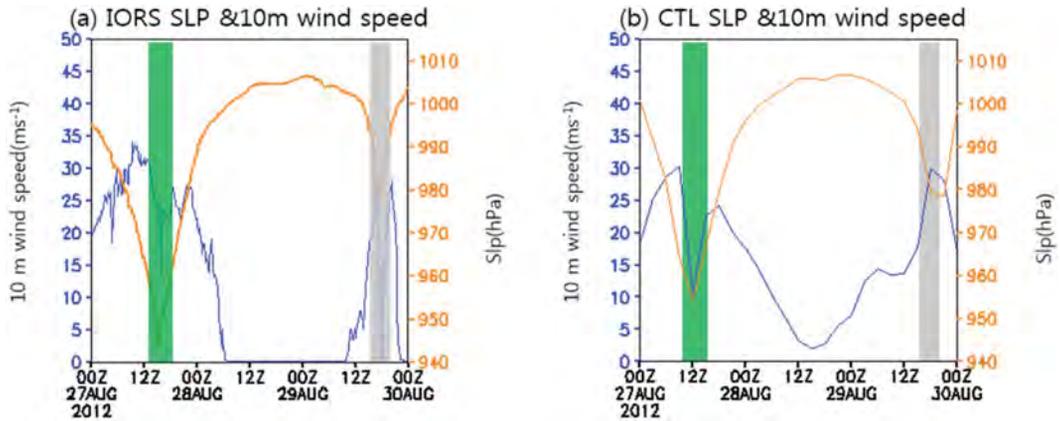
**2.3 분석방법**

후행 태풍 덴빈의 진로를 분석하기 위하여 잠재와도 경향방정식(Potential vorticity tendency equation)을 이용한 분석과, 바람장에서 대칭성분을 제거한 비대칭 성분을 이용한 비대칭류(Asymmetric flow) 분석을 이용하였다. 잠재와도 경향방정식을 이용한 분석은 경압성 대기의 특징과, 비단열적인 실제 태풍 이동의 물리적인 해석이 용이한 장점이 있다. 선행 연구에 따르면 태풍은 잠재와도 경향의 파수 1 성분이 최대값인 지역으로 가는 경향이 있다(Wu and Wang, 2000; Chan et al., 2002; Wong and Chan, 2006). 시그마좌표계에서 파수 1 성분의 잠재와도 경향방정식은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Wu and Wang, 2000).

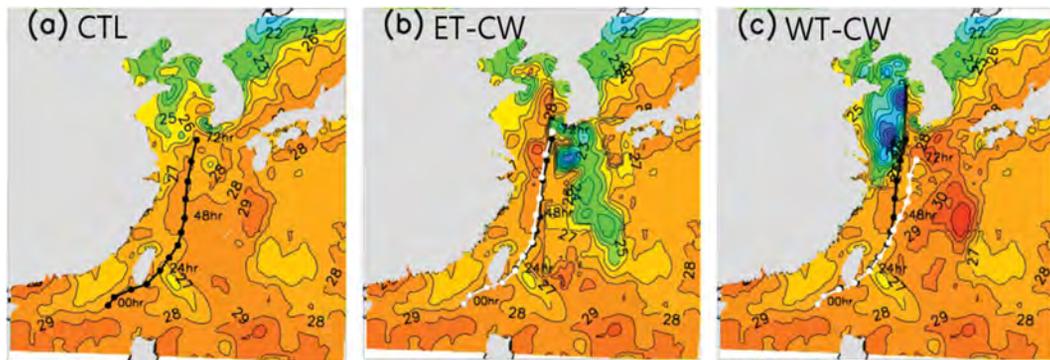
$$\left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)_1 = \Lambda_1 \left\{ -u \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial y} - \sigma \frac{\partial P}{\partial \sigma} + \frac{g}{p_s} \left[ \{-(\zeta + f)\} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} - \frac{\partial u \partial \theta}{\partial \sigma \partial y} + \frac{\partial v \partial \theta}{\partial \sigma \partial x} \right] \right\} \quad (1)$$

좌변은 잠재와도의 경향성의 파수 1 성분이고, 우

변의  $\Lambda_1$ 은 파수 1 성분을 구하는 연산자이고, 베타 효과와 비대칭류의 영향이 포함된  $\left(-u \frac{\partial P}{\partial x} - v \frac{\partial P}{\partial y}\right)$ 을 잠재와도의 수평이류향(Horizontal Advection, HA), 연직시어가 포함된  $\left(-\sigma \frac{\partial P}{\partial \sigma}\right)$ 을 잠재와도의 연직이류향(Vertical Advection, VA), 마지막으로 연직시어와 강수 등의 영향이 포함된  $\frac{g}{p_s} \left[ \{-(\zeta + f)\} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} - \frac{\partial u \partial \theta}{\partial \sigma \partial y} + \frac{\partial v \partial \theta}{\partial \sigma \partial x} \right]$ 을 비단열가열향(Diabatic Heating, DH)이라 한다(Wu and Wang, 2000; Chan, 2005). 잠재와도 경향의 경우 고도에 따른 차이가 많이 나타나기 때문에 구간을 나누어 연직평균을 하여 구한다. 본 연구에서 이용된 구간은 중하층 구간(0.9 ≥ σ ≥ 0.55)이며, 직진하는 태풍의 경우 중하층의 주변장 영향을 많이 받아 중하층 구간을 분석하도록 하였다(Wong and Chan, 2006; Choi et al., 2013). 그리고, 비대칭류 분석의 경우 모형 실험을 통해서 생산된 자료에서, 태풍의 중심을 기준으로 720 km 반경의 영역의 전체 바람장에서 같은 영역 내 태풍으로 대표될 수 있는 대칭성분을 제거하고, 남은 성분을 비대칭류라 정의한다. 태풍 덴빈의 경우 크기가 작은 태풍이기 때문에 실제 분석에 이용된 범위는 태풍의 중심을 기준으로 반경 300 km 영역의 비대칭류를 분석하였다. 이러한 비대칭류에는 태풍의 중심에서 영향을 받는 지향류와 태풍의 비대칭성분을 포함하고 있다(Fiorino and Elsberry, 1989; Wang and Holland 1996a, 1996b, 1996c; Chan and Cheung, 1998; Wong and Chan, 2006). 비대칭류는 잠재와도 경향의 수평이류향을 대표할 수 있는 성분으로, 비대칭류 역시 고도에 따른 차이가 나타나기 때문에, 잠재와도 경향 분석 때 분석한 구간인 중하층 분석을 통해 실험 간 진로 차이를 설명한다.



**Fig. 6.** Time series of SLP (right y-axis, orange) and 10 m wind speed (left y-axis, blue) at (a) IORS and (b) CTL. Green-shaded and gray-shaded areas indicate pass of Typhoon Bolaven and Typhoon Tembin, respectively.



**Fig. 7.** The simulated tracks from (a) CTL (black solid line), (b) ET-CW, and (c) WT-CW (white solid lines) of Tembin. The initial forecast time is at 0000 UTC 27 August 2012. The SST distributions (contour) are considering the affected area of wake effect for each experiments. The contour interval is 1.0°C.

### 3. 연구결과

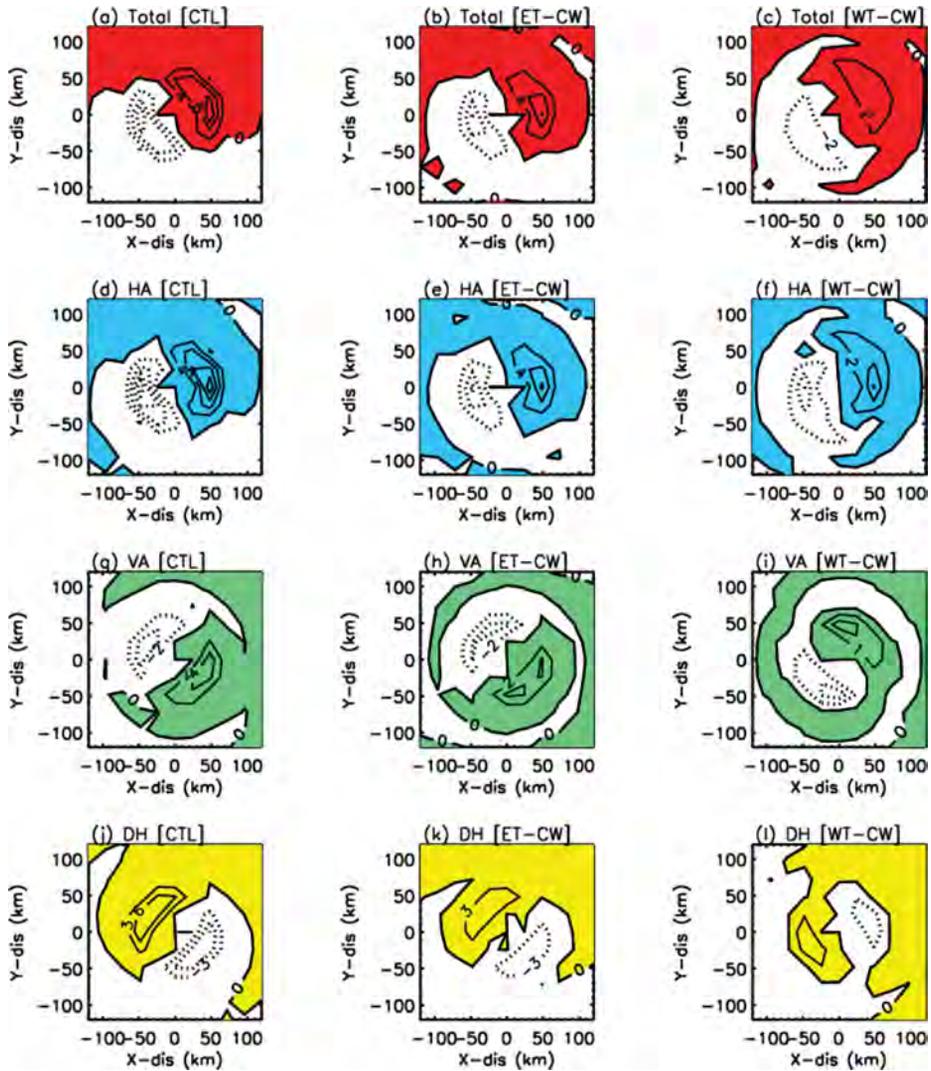
#### 3.1 모형 실험 검증

모형의 모의신뢰성을 위하여 10분 간격의 이어도 지점자료를 활용하여 모형 실험결과와 비교검증을 실시 하였다. 시간은 8월 27일 0000 UTC~8월 30일 0000 UTC까지 72시간 동안 해면기압과, 10 m 바람의 세기를 비교하였다(Fig. 6). Figure 6a는 이어도 지점자료를 나타내며 시계열을 살펴보면, 볼라벤은 2012년 8월 27일 1200 UTC 이후 이어도를 통과했다. 이때 해면기압은 약 945 hPa, 10 m 바람은 35 m s<sup>-1</sup>의 강한 바람이 불었다. 덴빈은 8월 29일 2100 UTC에 통과하였고, 이 때 해면기압은 약 980 hPa, 10 m 바람은 30 m s<sup>-1</sup>의 바람이 불었다. Figure 6b는 CTL 실험에서 이어도 위치의 해면기압과 10 m 바람을 나타낸다. 관측과 비교하여 모든 실험결과에서 볼라벤이

통과하는 구간에서 해면기압은 약 955 hPa, 10 m 바람은 30 m s<sup>-1</sup>로 관측에 비해, 해면기압과 10 m 바람은 과소모의 되는 특징이 나타났다. 그리고, 덴빈이 통과하는 구간에서는 해면기압의 경우 약 980 hPa로 관측과 비슷한 특징이 나타났고, 10 m 바람의 경우 관측과 거의 비슷한 세기의 바람이 불었다. 태풍이 통과하는 순간의 모의는 상당히 비슷했지만, 10 m 바람의 경우 29일 0000 UTC부터 1200 UTC 사이 관측에 비해 과하게 모의되었지만, CTL 실험을 이어도 지점자료와 비교하였을 때, 상당히 유사하게 모의되었음을 확인되었다.

#### 3.2 서쪽으로 증가하는 국지적인 해수면 온도 경도에 따른 덴빈의 진로 차이

선행 태풍 경로에 따른 해수 냉각으로 인한 해수면 온도의 변화에 영향을 받은 덴빈의 진로는 CTL

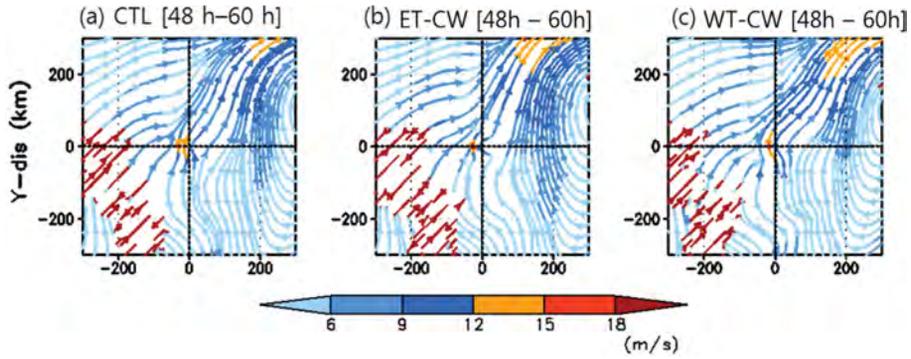


**Fig. 8.** Wavenumber-1 components of (a)-(c) total potential vorticity tendency, (d)-(f) horizontal advection, (g)-(i) vertical advection, and (j)-(l) diabatic heating, which are 12-h composites of lower-level ( $0.9 \geq \sigma \geq 0.55$ ) averages during 48~60 hours in (left) CTL, (middle) ET-CW, and (right) WT-CW experiment of Tembin. Positive values are shaded. The contour interval is 4.0 in (a), (b), (d), (e), 2.0 in (c), (f), (g), (h), (j)-(l), and 1.0 in (i) [Unit:  $10^{-4}$  potential vorticity unit (PVU) per seconds (PVU, where  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ Km}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )].

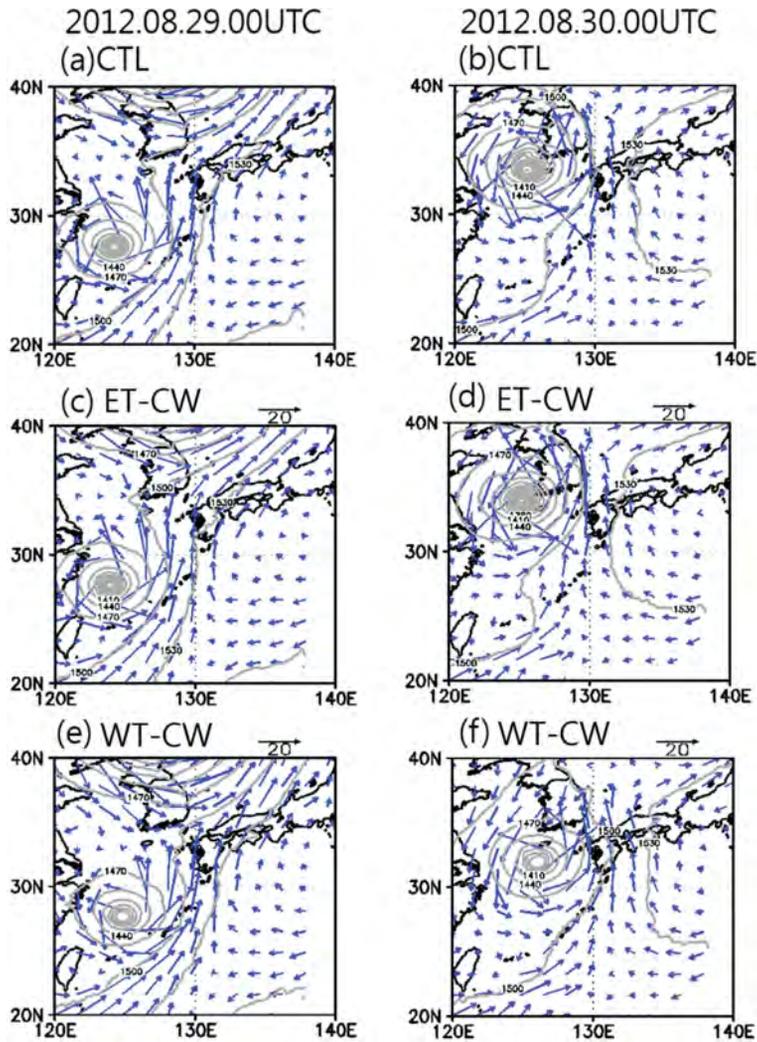
실험과 비교하였을 때 ET-CW 실험에서 차이는 나타나지 않았다(Fig. 7). CTL 실험과 ET-CW 실험 사이에 태풍의 잠재와도 경향의 차이가 있는지 알아보았다. 분석 구간은 WT-CW 실험이 다른 두 실험과 진로 차이를 나타내기 시작한 48시간~60시간까지 12시간 평균된 구간을 살펴보고 성분은 파수 1의 성분을 이용하였다. 잠재와도 경향은 실험간 진로 차이를 설명하기에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다(Figs. 8a, b). 잠재와도 경향의 가장 지배적인 성분

인 수평이류항부터 연직이류항과 비단열항을 살펴보면, CTL 실험과 ET-CW 실험에서 거의 차이가 없는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 8).

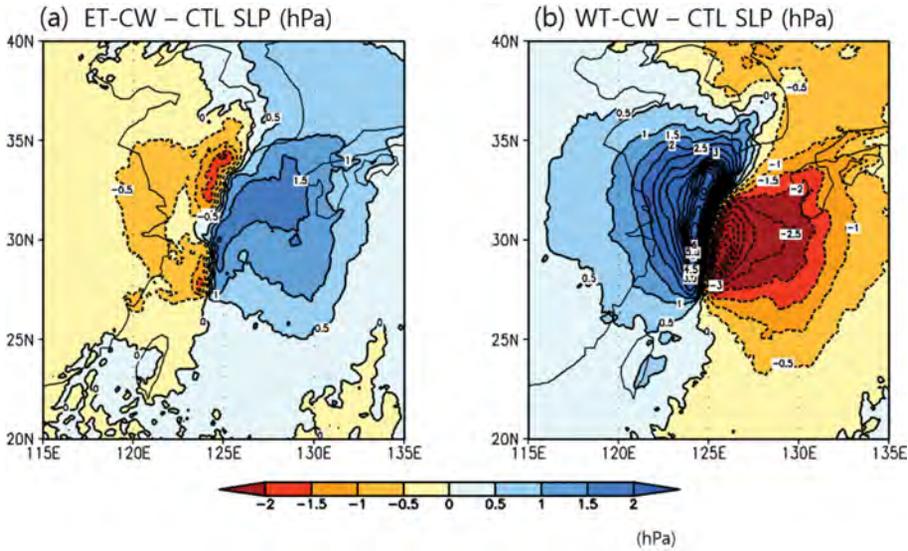
잠재와도 경향과 같은 구간의 비대칭류에서도 역시 CTL 실험과 ET-CW 실험간에 방향의 차이는 거의 없고, ET-CW 실험의 비대칭류가 CTL 실험에 비하여 조금 더 강한 특징이 나타났다(Figs. 9a, b). 8월 29일 0000 UTC에서 850 hPa 종관장(20°N-40°N, 120°E-140°E)을 살펴 보면 CTL 실험과 ET-CW 실험



**Fig. 9.** The 12-haverages of lower-level (900 hPa-550 hPa) asymmetric flow in the Typhoon Tembin core region (300 km × 300 km) over periods (48~60 h) in (a) CTL, (b) ET-CW, and (c) WT-CW experiment of Typhoon Tembin.



**Fig. 10.** Spatial patterns of wind (Blue,  $m s^{-1}$ ) and geopotential height (gray contour, gpm) at 850 hPa in (a), (b) CTL, (c), (d) ET-CW, and (e), (f) WT-CW experiments on 0000 UTC 29 August and 0000 UTC 30 August.



**Fig. 11.** Spatial patterns of and SLP differences of (a) ET-CW - CTL and (b) WT-CW - CTL on 48~72 hours average. Positive value means that pressure is higher than CTL experiment, and negative value means that pressure is lower than CTL experiment.

의 경우 태풍의 동쪽에 지향류가 130°E 기준으로 태풍의 남쪽에서 불어오는 남서풍과 일본의 남쪽 해양에서 발생한 고기압성 순환이 수렴하여 ET-CW 영역에서 남풍 계열의 바람이 강화 된다 이는 24시간 이후 8월 30일 0000 UTC에서도 유지되는 특징이 나타났다. ET-CW 실험의 경우 고기압성 순환이 CTL 실험에 비해서 더 크게 유지되었다(Figs. 10a-d). ET-CW 실험에서 고기압성 순환이 더 크게 유지된 원인은 해수면 온도가 CTL 실험에 비하여 상대적으로 ET 지역에 해수면 온도가 낮아 대류 활동이 약해지면서, 상대적으로 고기압이 형성되어 중하층까지 고기압성 순환이 유지되었지만, WT 지역은 CTL 실험에 비해 온난하지만, 기압의 변화에 유의한 영향을 주지 않았다(Fig. 11a).

**3.3 동쪽으로 증가하는 국지적인 해수면 온도 경도에 따른 덴빈의 진로 차이**

WT-CW 실험에서는 태풍의 진로는 CTL 실험에 비해 48시간 이후 동쪽으로 편향하는 특징이 나타났다(Fig. 7). 이러한 진로의 방향 차이를 이해하기 위해 48시간~60시간까지 12시간 평균된 구간에서 잠재와도 경향 분석을 하였는데, WT-CW 실험의 경우 앞선 두 실험과 잠재와도 경향성은 동일하게 북동쪽에 양의 최대값이 위치하였지만, 가장 지배적인 수평이류향에서 양의 최대값이 북동쪽이 아닌 동쪽에 나타나는 특징이 있다(Figs. 8d-f). WT-CW 실험에서도 역시 연직이류향과 비단열향의 경우 서로 상쇄하

였다(Figs. 8i, l).

수평이류향의 차이는 지향류를 포함한 비대칭류분을 통하여 확인 할 수 있었는데, WT-CW 실험의 비대칭류는 CTL 실험에 비해 동쪽에 위치한 고기압성 순환이 기울어지고 약화되고, 비대칭류가 보다 남서풍이 지배적으로 나타났다(Figs. 9a, c). 진로 차이가 나기 시작한 8월 29일 0000 UTC의 850 hPa 종관장(20°N-40°N, 120°E-140°E)에서 바람장을 살펴보면 CTL 실험에서 태풍의 동쪽에 지향류가 130°E 기준으로 태풍의 남쪽에서 불어오는 남서풍과 일본의 남쪽 해양에서 발생한 고기압성 순환이 수렴하였다. 하지만 WT-CW 실험의 경우 130°E 보다 동쪽에서 남서풍과 고기압성 순환이 수렴하는 구간이 이동하였다. 수렴대가 동쪽으로 이동한 것은 CTL 실험과 ET-CW 실험에 비해, WT-CW 실험에서 일본의 남쪽 해양에서 고기압성 순환이 동쪽으로 수축하였기 때문이다(Figs. 10a, e). 24시간 이후 8월 30일 0000 UTC에서 덴빈이 북상하면서 CTL, 그리고 WT-CW 실험에서 수렴대는 북쪽으로 이동하였다(Figs. 10b, f). WT-CW 실험에서 고기압성 순환이 더 수축하여 동쪽으로 편향한 원인은 해수면 온도가 CTL 실험에 비하여 상대적으로 ET 지역에 해수면 온도가 높아 대류 활동이 강했고, WT 지역의 경우 해수면온도가 아주 낮음으로 인해 해수면 온도의 경도가 발달하며 서풍이 강화되고 기압경도력 역시 동쪽으로 강화되면서, 저기압이 형성되어 중하층의 고기압성 순환을 수축시키는 특징이 나타났다(Fig. 11b).

#### 4. 요약 및 토의

본 연구에서는 선행 태풍에 의한 해수 냉각 효과를 반영한 가상의 해수면 온도 경도가 후행 태풍의 진로에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 알아보고자 2012년에 발생한 선행 태풍인 15호 태풍 블라벤과 후행 태풍인 14호 태풍 덴빈 사례를 이용하여 WRF 모형으로 실험을 실시하였다. 블라벤과 덴빈의 사례는 크기가 크고 강한 블라벤의 대기장이 뒤이어 오는 덴빈에게 영향을 준 후지와라 효과가 발생한 사례였다. 하지만 본 연구에서는 강한 태풍인 블라벤에 의해 변한 대기장의 영향이 아니라, 블라벤의 지역에 따른 해수 냉각 효과로 인한 해수면 온도 경도의 변화가 후행 태풍인 덴빈의 진로가 동쪽으로 편향되는데 어떠한 영향을 주었는지에 대하여 살펴 보았다.

이러도 지점자료를 통하여 WRF 실험결과와 비교하였을 때, 초기값을 경계값으로 둔 CTL 실험과 비교하였을 때, 선행 태풍 블라벤이 지나가는 구간에서는 해면기압과 10 m 바람은 관측 자료에 비해 모형실험에서 과소모의 되었다. 하지만, 후행 태풍 덴빈이 지나가는 구간에서는 이어도 지점자료와 CTL 실험결과 사이에서 매우 비슷하게 모의 되었다.

CTL 실험, ET-CW 실험, 그리고 WT-CW 실험에서 해수면 온도 분포에 따라 진로 차이가 나타났다. 진로 차이에 대해 물리적인 해석을 잠재와도 경향 방정식을 이용한 파수 1 성분의 분석과, 비대칭류 분석을 통하여 실시 하였다. 잠재와도 경향 방정식을 이용하여 분석하였을 경우, 수평이류향에서 CTL 실험과 ET-CW 실험에서는 북동쪽에 양의 최대값이 위치하여, 방향성의 차이는 나타나지 않았고, WT-CW 실험에서는 동쪽에 양의 최대값이 위치하며 다른 실험에 비해 진로의 방향이 동쪽으로 진행하는 특징이 잘 나타났다. 수평이류향과 관련된 비대칭류에서, CTL 실험과 ET-CW 실험의 비대칭류가 남풍에 가까운 남서풍이 불었지만 WT-CW 실험의 비대칭류가 남서풍이 불어 상대적으로 동쪽으로 향하는 흐름이 발달하고 태풍의 동쪽에서 고기압성 순환이 기울어져 있고, 약한 특징이 나타나, 실험간 진로 차이를 나타낼 수 있었다. 태풍의 진로가 차이가 나타나는 구간의 24시간 간격의 850 hPa 종관장에서 CTL 실험과 ET-CW 실험의 경우 태풍의 남쪽에서 부는 남서풍과 일본의 남쪽 해양의 고기압성 순환 130°E에서 수렴대를 이루어 남풍이 불었지만, WT-CW 실험에서 고기압성 순환이 동쪽으로 수축하면서, 130°E 보다 동쪽으로 이동 하였다. 이러한 수렴대의 위치가 달라지면서 WT-CW 실험에서 덴빈의 진로가 CTL 실험과 ET-CW 실험보다 동쪽으로 이동하는 특징이

나타났다. 이러한 수렴대의 차이는 해수면 온도 경도에 의해 기압 분포가 상대적으로 변했기 때문이다. ET-CW 실험의 경우 ET 지역에 상대적으로 고기압이 형성되며, 중하층 고기압성 순환이 확장되며 유지되었던 반면, WT-CW 실험의 경우 ET 지역에 상대적으로 저기압이 형성되며 중하층의 고기압성 순환을 수축시키며 동쪽으로 이동시켰다. 하지만 500 hPa 종관장에서는 실험간에 지위고도장과 바람장의 차이가 나타나지 않았던 것으로 보아, 본 실험에 변화를 준 해수면 온도의 영향이 상층까지 영향을 미치지 못 하고, 하층까지 영향을 끼친 것으로 판단된다.

추가적으로, 선행 태풍 블라벤이 지나가면서 변한 해수면 온도를 고려한 실험과 ET 지역과 WT 지역을 다 IORS와 황중부이의 해수면 온도가 냉각된 만큼 냉각시킨 해수면 온도를 초기값 및 경계값으로 이용한 실험에서 후행 태풍 덴빈의 강도가 약해지는 특징을 보이고 CTL 실험과 진로의 차이는 유의하지 않았다. 그리고 ET-CW 실험에서 온난한 ET 지역을 냉각시키고, WT 지역을 온난하게 만들었지만, WT-CW 실험의 해수면 온도의 범위가 아니기에 동일한 범위를 유지하여 실험하기 위해, WT-CW 실험의 해수면 온도의 범위만큼 차이가 나도록 ET 지역을 더 냉각시키고 WT 지역을 더 온난하게 하여 서쪽으로 해수면 온도 경도를 강하게 하여 실험을 해보았지만, WT-CW 실험 결과만큼 덴빈의 진로가 차이 나지 않았다.

본 연구는 대기모형을 이용해 선행 태풍 블라벤의 해수 냉각 효과를 ET 지역에 주어 서쪽으로 해수면 온도 경도를 만들었을 때 덴빈의 진로에 영향을 미치지 않았지만, WT 지역에 해수 냉각 효과를 고려하여 동쪽으로 해수면 온도 경도가 강화되며 후행 태풍 덴빈의 경로를 동쪽으로 편향시키는 것을 밝혔다. 추가적으로 보다 정확한 태풍의 진로 예측을 하기 위해서는 해양의 지역별 특성을 고려해서 대기-해양 접합 모형을 이용한 실험이 필요 할 것이다. 또한 본 연구는 사례연구로서 선행 태풍의 해수 냉각이 강화 시킨 해수면 경도가 후행 태풍의 진로에 영향을 미치는 다른 사례들을 추가적으로 분석할 필요가 있다. 이러한 결과들을 통해 한반도에 영향을 주는 태풍의 진로 예측 향상에 도움이 될 것으로 기대 된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(종합 해양과학기술기 지 구축 및 활용연구II)입니다.

## REFERENCES

- Brand, S., 1970: Interaction of binary tropical cyclones of the western north pacific ocean. *J. Appl. Meteorol.*, **9**, 433-441.
- Carr, L. E., and R. L. Elsberry, 1998: Objective diagnosis of binary tropical cyclone interactions for the western North Pacific Basin. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1734-1740.
- Chan, J. C. L., 2005: The physics of tropical cyclone motion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **37**, 99-128.
- \_\_\_\_\_, and K. K. W. Cheung, 1998: Characteristics of the asymmetric circulation associated with tropical cyclone motion. *Meteor. Atmos. Phys.*, **65**, 183-196.
- \_\_\_\_\_, F. M. F. Ko, and Y. M. Lei, 2002: Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1317-1336.
- Chang, S. W., 1983: A numerical study of the interaction between two tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1806-1817.
- \_\_\_\_\_, and R. V. Madala, 1980: Numerical simulation of the influence of sea surface temperature on translating tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2617-2630.
- Choi, Y., K.-S. Yun, K.-J. Ha, K.-Y. Kim, S.-J. Yoon, and J. C. L. Chan, 2013: Effects of asymmetric SST distribution on straight-moving Typhoon Ewiniar (2006) and recurving Typhoon Maemi (2003). *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3950-3967.
- Cione, J. J., and E. W. Uhlhorn, 2003: Sea surface temperature variability in hurricanes: Implications with respect to intensity change. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1783-1796.
- Dare, R. A., and J. L. McBride, 2011: Sea surface temperature response to tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3798-3808.
- D'Asaro, E. A., and Coauthors, 2013: Impact of typhoons on the ocean in the Pacific: ITOP. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1405-1418, doi:10.1175/BAMS-D-12-00104.1.
- Davis, C. A., and S. Low-Nam, 2001: The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme. NCAR Tech. Note, 13 pp.
- Fiorino, M., and R. L. Elsberry, 1989: Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975-990.
- Fujiwara, S., 1921: The natural tendency towards symmetry of motion and its application as a principle in meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **47**, 287-293.
- Jeong, Y., I.-J. Moon, and S.-H. Kim, 2013: A study on upper ocean response to Typhoon Ewiniar (0603) and its impact. *Atmosphere*, **23**, 1-16 (in Korean with English abstract).
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. In K. Emanuel et al. Eds., *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models of the Atmosphere*. American Meteorological Society, 165-170.
- Kim, C., H.-S. Lim, J. Jeong, J.-S. Shim, I.-J. Moon, Y. Oh, and H. You, 2014: Response of coastal waters in the Yellow sea to Typhoon Bolaven. *J. Coastal. Res.*, **70**, 278-283.
- Lee, D., H. Kwon, S.-H. Won, and S. Park, 2006: Typhoon simulation with a parameterized sea surface cooling. *Atmosphere*, **16**, 97-110 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-D., H.-B. Cheong, H.-G. Kang, and I.-H. Kwon, 2014: Tropical cyclone track and intensity forecast using asymmetric 3-dimensional bogus vortex. *Atmosphere*, **24**, 207-223 (in Korean with English abstract).
- Lin, I., W. T. Liu, C.-C. Wu, G. T. F. Wong, C. Hu, Z. Chen, W.-D. Liang, Y. Yang, and K.-K. Liu, 2003: New evidence for enhanced primary production triggered by tropical cyclone. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL017141.
- National typhoon center, 2011: Typhoon white book. NTC-KMA, 342pp.
- \_\_\_\_\_, 2013: 2012 typhoon analysis report. NTC-KMA, 171-189.
- Price, J. F., 1981: Upper ocean response to a hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 153-175.
- \_\_\_\_\_, J. Morzel, and P. P. Niiler, 2008: Warming of SST in the cool wake of a moving hurricane. *J. Geophys. Res.*, **113**, doi:10.1029/2007JC004393.
- Walker, N. D., R. R. Leben, and S. Balasubramanian, 2005: Hurricane-forced upwelling and chlorophyll a enhancement within cold-core cyclones in the Gulf of Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18610, doi:10.1029/2005GL023716.
- Wang, Y., and G. J. Holland, 1996a: The beta drift of baroclinic vortices. Part I: Adiabatic vortices. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 411-427.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1996b: The beta drift of baroclinic vortices. Part II: Diabatic vortices. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 3737-3756.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1996c: Tropical cyclone motion and evolution in vertical shear. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 3313-3332.
- \_\_\_\_\_, R. L. Elsberry, Y. Wang, and L. Wu, 1998:

- Dynamics in tropical cyclone motion: A review. *Chinese J. Atmos. Sci.*, **22**, 416-434.
- Wong, M. L. M., and J. C. L. Chan, 2006: Tropical cyclone motion in response to land surface friction. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1324-1337.
- Wu, L., and B. Wang, 2000: A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1899-1911.
- Yun, K.-S., J. C. L. Chan, and K.-J. Ha, 2012: Effects of SST magnitude and gradient on typhoon tracks around East Asia: A case study for Typhoon Maemi (2003). *Atmos. Res.*, **109**, 36-51.