

ORIGINAL ARTICLE

태풍의 이동경로에 따른 동해연안 수온변화 특성

박명희 · 이준수 · 서영상* · 김해동¹⁾ · 배현균¹⁾

국립수산과학원 기후변화연구과, ¹⁾계명대학교 지구환경학과

Characteristics of Variation of Sea Surface Temperature in the East Sea with the Passage of Typhoons

Myung-Hee Park, Joon-Soo Lee, Young-Sang Suh*, Hae-Dong Kim¹⁾, Hun-Kyun Bae¹⁾

Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

¹⁾*The Department of Global Environment, Keimyung University, Daegu 42601, Korea*

Abstract

In this study, the wind direction and the wind speed of the nearest temperature observations point of the National Weather Service was analyzed in order to investigate the rapid rise and drop of water temperature in the East Coast appeared after passing of the 2015 typhoon No. 9 and 11. Then the figures were simulated and analyzed using the WRF(weather research and forecast) model to investigate in more detailed path of the typhoon as well as the changes in the wind field.

The results were as follows. A sudden drop of water temperature was confirmed due to upwelling on the East coast when ninth typhoon Chanhom is transformed from tropical cyclones into extra tropical cyclone, then kept moving eastwards from Pyongyang forming a strong southerly wind after 13th and this phenomenon lasted for two days. The high SST(sea surface temperature) is confirmed due to a strong northerly wind by 11th typhoon Nangka. This strong wind directly affected the east coast for three days causing the Ekman effect which transported high offshore surface waters to the coast. The downwelling occurred causing an accumulation of high temperature surface water. As a results, the SST of 15m and 25m rose to that of 5m.

Key words : Typhoon, SST, Wind direction, Ekman transport, WRF model

1. 서론

태풍은 우리나라에서 발생하는 여러 자연재해들 중 가장 큰 피해를 주는 위협적인 기상현상이다(Moon and Choi, 2011). 과거 태풍기록을 보면 제주도의 우측을 통과하여 남해안으로 상륙한 태풍이 제주도 좌측을 통과하여 서해를 거쳐 서해안으로 상륙하는 태풍보다 더 강력했고, 피해도 컸던 것으로 보고하였다(Moon and Kang, 2012). 반면 태풍이나 허리케인과 같은 강한 대기외력에

대한 해양의 반응은 중규모 대기해양교환의 대표적인 예이지만, 이 같은 현상에 대한 자료수집이 쉽지 않아 아직 까지도 연안 정점의 해면자료를 제외하고는 현장관측 해양자료가 매우 부족한 실정이다. 또한 많은 이론 및 수치 실험연구를 통해 부분적으로 밝혀진 태풍이나 허리케인 통과에 따른 해양변화 특성들도 양질의 현장관측 자료를 바탕으로 검증이 필요하다(Nam et al., 2004).

적도해역에서 상승된 해수온도는 열대성 저기압의 발달에 주요 원인으로 작용하며, 저기압에서 발달된 태풍

Received 27 October, 2015; Revised 7 December, 2015;

Accepted 8 December, 2015

*Corresponding author : Young-Sang Suh, Ocean Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

Phone: +82-51-720-2210

E-mail: yssuhkorea@korea.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.

은 상대적으로 해수면 온도가 높은 25~30°C 수온분포 해역에서 세력이 커진다(Eagleman, 1985; Miller, 1985; Kang and Suh, 1986; Emanuel, 1987; Emanuel, 1988; Evans, 1993; Suh et al., 2003). Suh et al.(2002)은 한반도 주변을 통과하는 태풍경로에 따라 한국연근해역의 수온이 다르게 변동할 수 있음을 밝히고, 동해연안의 경우 태풍이 동해 우측 원거리를 통과하는 간접영향으로 수온이 상승하나, 태풍이 동해연안 근거리 통과 및 서해 통과시는 수온이 급하강 할 수 있음과 태풍 통과시 수온의 변동 정도를 위성관측 및 현장관측으로 정량화하였다. 태풍 통과시 흔히 해면온도(SST)가 하강하는 현상은 해수면 냉각현상(sea surface cooling, SSC)으로 널리 알려져 왔다. SSC에 대해서는 주로 대서양을 중심으로 1960년대 초부터 광범위하게 연구되어왔고, SSC의 범위는 대체로 1~6°C 감소한 것으로 보고되었다(Jordan, 1964; Leipper, 1967; Wright, 1969; Fedorov et al., 1979; Hong and Sohn, 2004). Emanuel and Zivkovic-Rothman(1999)은 태풍에 의한 해수면 냉각이 2.5°C 초과되면 태풍의 전체 에너지 공급이 일시에 차단되어 태풍은 더 이상 발달할 수 없음을 보고하였다. 한반도 주변해역에서는 Kim et al.(2007)은 차세대 위성관측해양 표면수온(new generation sea surface temperature, NGSST)을 이용하여 한반도 동부해역의 태풍 Nabi 통과에 따라 전후 차이를 공간적으로 제시하여, 태풍 통과시와 통과이전의 수온 차이를 보면 동해 전 해역에서 1~4°C 낮아졌고, 통과 이후에는 대한해협 부근, 일본연안 및 동해 강릉주변에서는 1~2°C 낮았으나, 북위 38도 이북해역은 수온의 변동이 없거나 1°C정도 상승하였음을 보고하였다. Hong(2003)은 태풍 Oliwa가 통과할 때 일본 북부 연안에서 발생한 해면수온(SST)의 급하강 현상(Senjyu and Watanabe, 1999)을 3차원(3D) 원시방정식 모델(primitive equation model, POM)을 이용하여 연안에서의 에크만(Ekman)역학과 관련된 용승현상에 의한 것임을 보고하기도 하였다.

우리나라 동해남부 연안 역에서는 거의 매년 6~8월에 주변해역보다 낮은 냉수대가 발생한다. 냉수대는 3~5°C의 급격한 수온변화를 발생시켜 주변 양식장에 대량 폐사를 일으키기도 하며, 냉수대에서 형성되는 해무로 인하여 선박운항에 영향을 미치기도 한다(Hahn et al., 1995; Kim et al., 2011). 또한 강원 및 울진 연안의 20

~30 m 수심에서는 수온이 불과 1~2시간 만에 10°C이상 상승 및 하강하는 경우가 나타나는데, 이는 북풍 또는 남풍 계열의 바람이 지속적으로 불어 에크만 수층에 의하여 표층수가 침강 혹은 저층수의 용승에 기인한다(Lee et al., 2008; Kim et al., 2011).

본 연구에서는 2015년 7월에 각각 한반도의 서해안과 동해안을 통과한 제9호 태풍 찬홈과 제11호 태풍 낭카를 대상으로 태풍의 이동경로에 따른 태풍 전후와 태풍 통과시의 동해안 수온의 급격한 변화의 원인을 파악하고자 풍향과 풍속자료를 분석하고, 태풍의 이동과정과 바람장 변화를 알아보고자 WRF(Weather Research and Forecast)모델을 이용하여 수치모의 하고 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 태풍의 이동경로에 따른 동해연안 수온 변화특성을 조사하기 위하여 사용된 자료는 2015년 7월 8일~19일(제9호 태풍 찬홈과 제11호 태풍 낭카가 우리나라 동해연안에 영향을 미친 기간)까지 국립수산물품질관리원에서 제공하는 동해연안의 실시간 어장정보자료(수온)와 수온관측정점에서 가장 가까운 곳에 위치한 기상관측지점에서 제공하는 기상요소(기온, 풍속, 풍향)를 분석하였다. 또한 태풍이동에 따른 동해안의 바람장 변화 분석을 위하여 WRF 모델을 이용한 수치실험을 실시하였다.

Fig. 1(a)는 우리나라에 직간접적으로 영향을 미친 태풍 찬홈과 낭카의 이동경로와 태풍의 중심위치를 나타내었고, Fig. 1(b)는 동해연안의 수온관측정점을 표시하여 제시하였다. Fig. 1(a)를 통해 태풍의 이동경로를 살펴보면 제9호 태풍 찬홈(Chanhom)은 열대해역에서 북서쪽으로 이동하여 제주도 서쪽을 지나 북동쪽으로 이동하는 전형적인 전향태풍이었으며, 서해상을 지나 북한 평양에서 온대저기압으로 변질되었다. 제11호 태풍 낭카(Nangka)는 남쪽 해상으로부터 오키나와 동쪽 해상과 시코쿠 고치 현을 지나 북동쪽으로 이동하여 찬홈과 마찬가지로 전향 태풍의 특징을 보였으며 동해상으로 진출하여 소멸하였다.

Fig. 2는 태풍의 이동경로에 따른 바람에 의한 동해연안의 수온변화 원인을 살펴보기 위하여 에크만 수층에 의한 해류의 연직순환을 그림으로 제시하였다. Fig. 2의 에크만 수층과 에크만 펌핑을 간단히 살펴보면 북반구에서

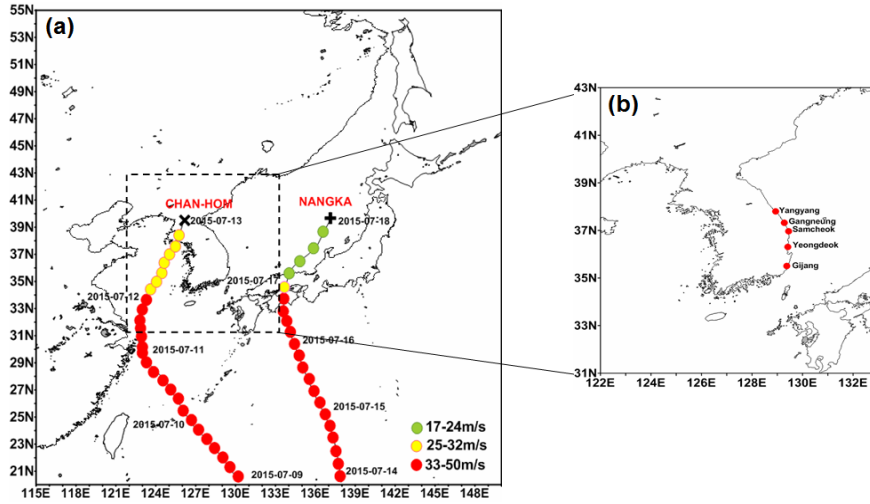


Fig. 1. The distributions of (a) tracks of two landfall typhoons in Korean peninsula. Each time interval between black cycles on the track is a day. (b) site of the buoy and meteorological observation in the NIFS(National Institute of Fisheries Science, NIFS).

는 바람에 의한 에크만 수송이 바람이 불어가는 방향에 대하여 오른쪽 직각방향으로 일어나기 때문에 저기압에서는 에크만 수송이 바깥쪽으로 고기압에서는 안쪽으로 이루어진다. 또한 연안에서 바람이 해안선과 나란하게

부는 경우 바람에 의한 에크만 수송이 일어나고 그에 따라 연직 방향의 해수운동인 용승(upwelling)과 침강(downwelling)이 발생하게 되는데, 이를 에크만 펌핑(Ekman pumping)이라고 한다.

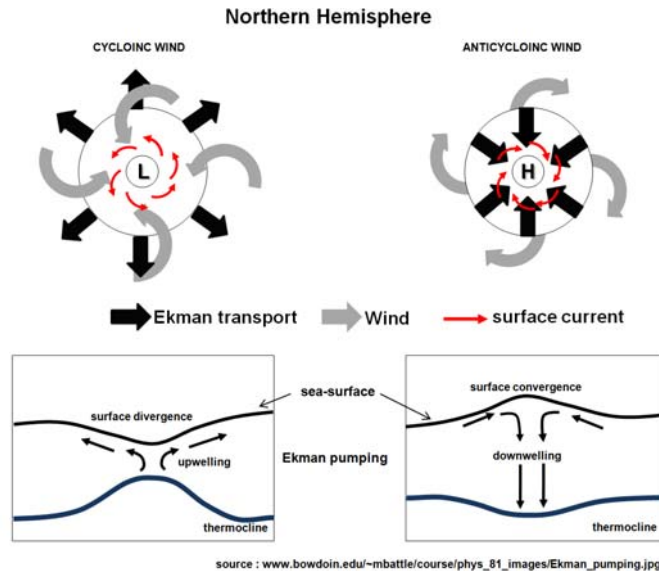


Fig. 2. The effect of a cyclonic wind in the Northern hemisphere on surface waters, on the shape of the sea-surface and thermocline.

2.1. 일기도 분석

다음은 태풍의 이동에 따른 동해 연안의 수온변화를 살펴보기에 앞서 연구기간의 기상상태를 알아보기 위하여 일보기상청에서 제공하는 2015년 7월 8일~19일까지 매일 09시 지상일기도를 분석하였다(Fig. 3). 7월 8일의 지상일기도를 살펴보면 북상하는 태풍의 영향으로 장마전선이 제주도 에 걸쳐 있으며, 북태평양고기압은 동아시아 쪽으로 확장되었음을 알 수 있다. 9일에는 장마전선이 남부지방까지 북상하였고, 우리나라는 고기압의 가장자리에 위치하였다. 또한 제9호 태풍 찬홈은 대만 남동쪽 해상에서 발달하면서 북서진 하였다. 10일과 11일은 북태평양고기압이 동쪽으로 확장 되었고, 중국 북동부에 위치한 기압능이 느리게 동진하면서 지상고기압이 발달하였다. 또한 동해상은 고기압의 가장자리에 들어 구름이 많고, 동해연안의 일부지역에는 박무가 발생하였다. 12일은 북상하는 제9호 태풍 찬

홈의 영향으로 전국에 많은 비가 내렸고, 우리나라는 태풍의 오른쪽에 위치하면서 고온다습한 남풍이 강하게 불었다. 13일은 제9호 태풍 찬홈이 약화되어 열대저압부에서 온대저기압으로 변질되었으며, 북한에서 동진하는 저압부 후면 기압골의 영향을 받았다. 또한 제11호 태풍 낭카는 오키나와 남동쪽 해상에서 북북서진 하였다. 14일에는 제9호 태풍 찬홈이 온대저기압으로 변질되었으나, 사할린 부근 서쪽까지 이동한 상태로 중심에 강한 저기압을 형성하였다. 우리나라는 산둥반도 부근의 고기압에 의한 기온상승으로 상하층의 온도차가 발생하여 대기가 불안정하였다. 15일은 동해상에 위치한 고기압의 가장자리에 들고, 중국 북동지방에서 동진하는 고기압의 영향으로 동풍류가 유입되어 내륙에 한기와 시어가 나타나면서 하층대기가 불안정하였다. 제11호 낭카는 중심기압이 945 hPa로 많은 수증기를 포함하여 북상하였다. 16일은 중국 북동지방에 고

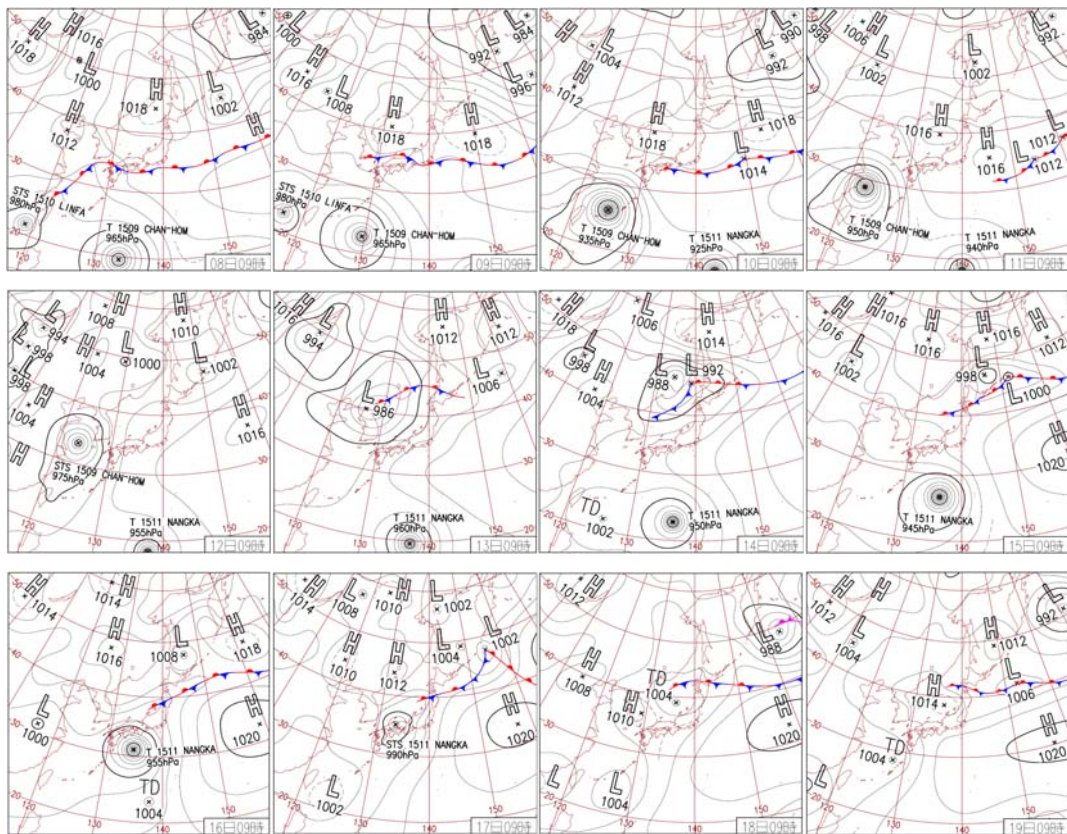


Fig. 3. Surface synoptic chart from 09UTC 08 July 2015 to 09UTC 19 July 2015.

기압이 위치하고 있어 전국이 기압능에 영향을 받고, 북태평양고기압의 가장자리를 따라 태풍이 북상하였다. 따라서 동해상으로 동풍이 유입되어 하층대기가 불안정하였다. 17일은 제11호 태풍 낭카가 동해로 이동함에 따라 많은 수증기가 유입되어 전국이 흐리고, 비가 내리는 지역이 있었다. 태풍의 전면인 우리나라는 동해안 북쪽으로 중심기압이 1013 hPa인 고기압이 위치하였고, 일본 시코쿠는 중심기압이 975 hPa인 기압이 위치하였다. 이러한 기압배치에서는 시원한 북동풍이나 북서풍이 불게 된다. 18일은 제11호 태풍 낭카가 온대저기압으로 변질되면서 동해상에서 멀리 위치하고 있으며, 그 뒤로 기압이 높은 고기압이 위치하였다. 19일은 동해상에 위치한 고기압의 가장자리에 들어 구름이 많고 날이 흐렸다.

2.2. 수치모델 구성

본 연구에서 사용한 중규모모델은 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 ARW-WRF(advanced research weather research and forecasting) V3.5.1 모형이다. WRF 모형은 완전압축성 비정수계(fully compressible non-hydrostatic) 중규모 모델로 수평 격자는 Arakawa-C 격자체계를 사용한다. 연직격자로는 Eulerian 질량좌표계(mass-based terrain following coordinate)를 사용한다. 수치계에서는 3차 Runge-Kutta split-explicit 시간적분을 사용하며, 이류 항에 대해서는 5차 또는 6차 중심 차분법을 도입하였다. 모형의 초기장과 경계 자료에 사용된 입력 자료

는 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research)의 GDAS FNL(Final Analysis) 6시간 간격의 $1^\circ \times 1^\circ$ 자료, 지형 자료는 30초 전구 자료, 해수면 온도는 RTG-SST $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ 자료를 사용하였다. 적분시간은 2015년 7월 7일 00 UTC 부터 20일 00 UTC 까지 총

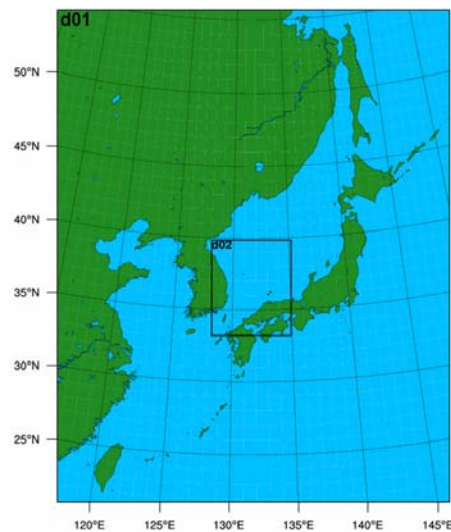


Fig. 4. Domains used in the simulations.

312시간을 수행하였다. 수치모의를 위한 영역과 구성은 Fig. 4과 Table 1에 제시하였다. 사용된 물리모수화 방안

Table 1. The overview of model configurations

Period	Start: 00UTC 7 July 2015 End: 00UTC 20 July 2015
Input data	NCEP FNL Analysis (6-hourly, $1^\circ \times 1^\circ$) NCEP SST Analysis RTG_SST(daily, $0.083^\circ \times 0.083^\circ$)
Nesting	2-way nesting
Horizontal resolution and grid	Domain 1: 30.8km (100×125) Domain 2: 61.6km (101×101)
Vertical layer	30 levels(surface to 50 hPa)
Physics options	Microphysics scheme: WDM6 Radiation scheme: Lowe wave - RRTM Short wave - Dudhia Planetary boundary scheme: MRF Cumulus parameterization scheme: Kain-Fritsch Land surface scheme : Noah land-surface model

은 미세물리 방안으로는 WDM6(WRF double moment 6-calss scheme), 경계층 모수화는 MRF(medium range forecast model scheme)를 사용하였다. 그리고 장파복사와 단파복사에 관한 물리 과정은 각각 RRTM(rapid radiative transfer model) 장파복사기법과 Dudhia scheme(Dudhia, 1989)방법이 사용되었다. 적운모수화 과정은 shallow convection을 포함하는 Kain-Fristsh기법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 태풍 이동경로에 따른 동해연안의 수온변화

태풍 이동경로에 따른 동해연안의 수온변화를 살펴보기 위해 동해연안을 따라 5개 정점을 선정하고 수심별 수온을 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 양양(Fig. 5(a)) 정점의 5 m 수온을 살펴보면 7월 8일부터 12일까지는 일정한 변화경향을 나타내고 있다. 이는 제9호 태풍 찬홈이 서해안을 지나 내륙으로 전향할 때 동해안의 수온변화에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 13일 이후 수온이 급격히 낮아져 이전에 비해 6°C이상 낮은 수온이 2일간 지속되었다. 15일 이후 제11호 태풍 낭카의 직·간접영향으로 점차 수온이 상승하여, 16일 이후에는 20°C이상의 높은 수온을 유지하였다. 다음으로 15 m 수온은 7월 8일부터 15일까지 9~11°C의 일정한 변화를 유지하다가, 16일 이후 16~20°C까지 수온이 급격히 상승하였다. 특히 제11호 태풍 낭카가 동해상에 직접영향을 미친 17일과 18일은 20°C이상의 최고수온을 나타내었다. 이는 5 m의 수온과 동일한 수온분포이다. 25 m의 수온은 부이의 이상으로 10일 22시 이후 측정하지 못하여 분석에서 제외하였다. 두 번째 강릉(Fig. 5(b)) 지점의 5 m 수온을 살펴보면 12일까지 양양정점에 비해 수온은 2°C이상 높았으나, 변화경향은 거의 차이가 없었다. 양양과 마찬가지로 13일 이후 크게는 8°C이상 수온이 급격히 낮아졌다. 15일 이후 점차 회복하여 수온이 20°C까지 상승하고 유지되었다. 15 m 수온은 5 m 수온과 같이 양양정점에 비해 2°C 높게 나타났고, 변화경향은 거의 차이가 없었다. 16일 이후에는 20°C 내외로 수온이 급상승하여 유지되었다. 25 m의 수온은 7월 17일을 제외하고는 6~12°C의 수온분포를 나타내었다. 17일의 경우는 18°C이상의 높은 수온분포를 나타내어 5 m의 수온과 동

일한 수온분포를 나타내었다. 세 번째 삼척(Fig. 5(c)) 정점은 위의 두 정점과 유사한 수온분포 경향을 나타내었으나, 15 m와 25 m 수온이 상승하여 5 m 수온과 동일해지는 시점이 16일로 다른 정점 비해 시간적으로 빠르고, 기간적으로 하루가 더 길게 이어지는 특징이 있었다. 또한 5 m 수온이 13일과 14일에 크게는 11°C이상 낮아져 다른 정점에 비해 냉수대가 강하게 발생하였다. 네 번째 영덕(Fig. 5(d))과 다섯 번째 기장(Fig. 5(e))정점은 5 m 수온은 위의 3정점과는 다른 변화경향을 나타내었다. 다른 정점들과 달리 12일까지 시간변화에 상관없이 일정한 21°C를 유지하고, 수온분포 역시 3~5°C이상 높게 나타났다. 이렇듯 정점에 따른 수온의 차이가 발생하는 이유는 위의 양양, 강릉, 삼척 정점이 지리적으로 북한 한류의 영향을 받아 낮은 수온분포를 나타낸 반면 영덕과 기장정점은 동한 난류의 영향을 받아 표층 수온이 높고, 균질하게 나타나기 때문으로 판단된다. 13일 이후에는 9~11°C정도 낮아져 삼척과 같이 강한 냉수대가 발생하였다. 16일 이후 수온이 상승하여 18°C이상의 수온분포를 나타내었다. 15 m 수온은 10일 10시까지의 변화폭이 8°C이상 크게 나타났다. 그러나 15일 이후 수온이 급격히 상승하여 5 m 수온과 거의 차이가 없었다. 25 m 수온은 12일까지 10°C 내외를 나타내고, 13일부터 하강하기 시작하여 14일에는 6.8°C로 가장 낮았다. 반면 16일 이후 증가하기 시작하여 17일은 5 m과 동일한 수온을 나타내었다. 기장(Fig. 5(e))정점은 다른 정점과 달리 냉수대가 발생한 7월 13일부터 15일까지를 제외하고는 5 m, 10 m, 15 m의 수온분포가 동일하게 나타났다. 이는 기장정점이 다른 정점들에 비해 비교적 연안에 위치하여 조류의 영향을 크게 받아, 연직 적으로 혼합이 잘 일어나고, 수심 역시 5 m, 10 m, 15 m로 다른 정점에 비해 깊지 않아, 수심에 따른 수온의 차이가 거의 없는 것으로 판단된다. 12일까지 19~21°C의 분포를 나타내었고, 13일 이후 수온이 낮아져 14일에 15°C로 13일 이전에 비해 4~6°C이상 낮아졌다. 16일 이후 수온이 상승하기 시작하여 평균 20°C의 수온분포를 나타내었다. 냉수대가 발생한 7월 13일부터 15일까지 10 m, 15 m의 수온변화는 5 m의 수온변화와 유사한 경향을 나타내었다.

위의 결과를 통해 알 수 있듯이 정점별 수온이 일정한

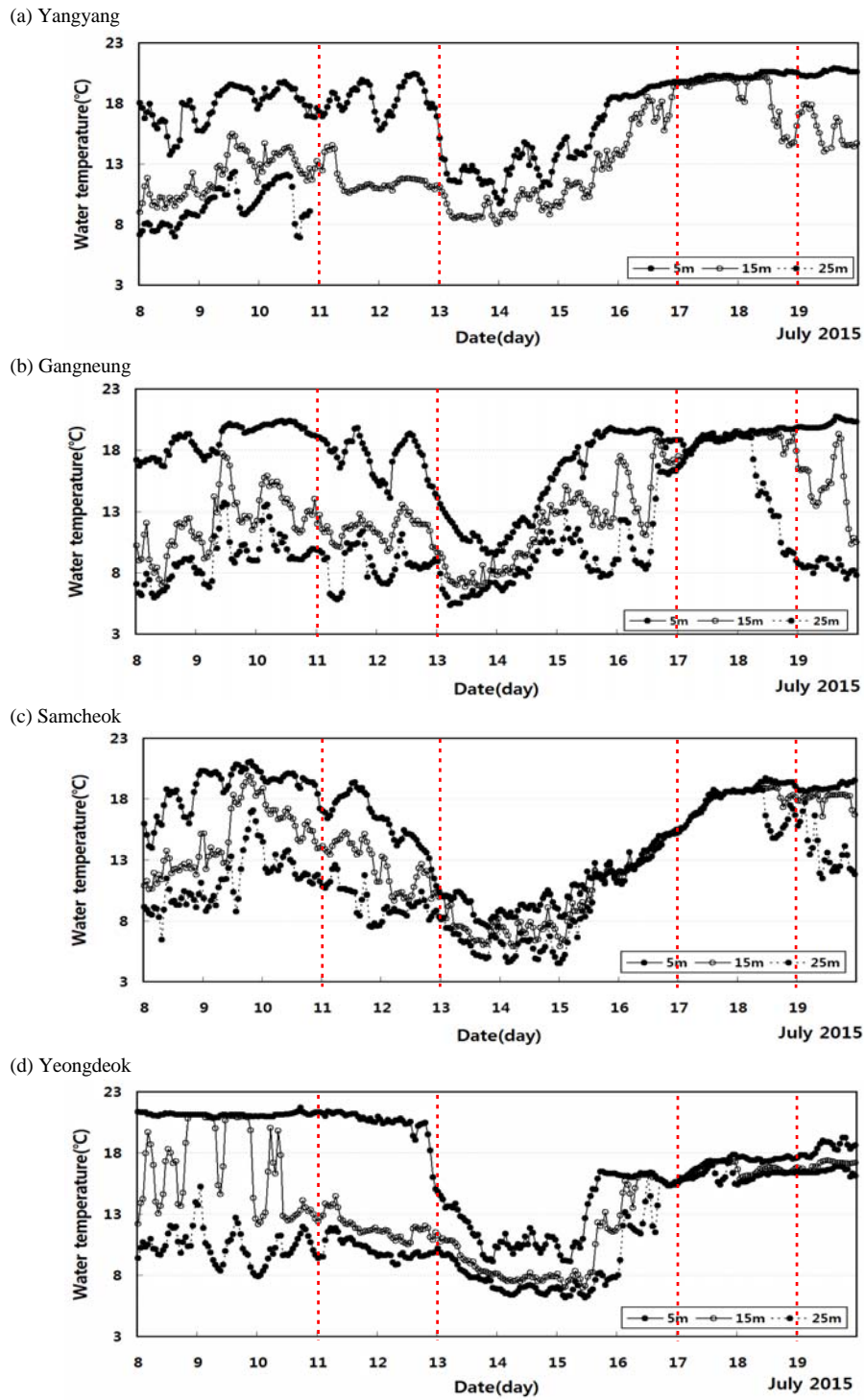


Fig. 5. Time variation of water temperature at buoy observation points.

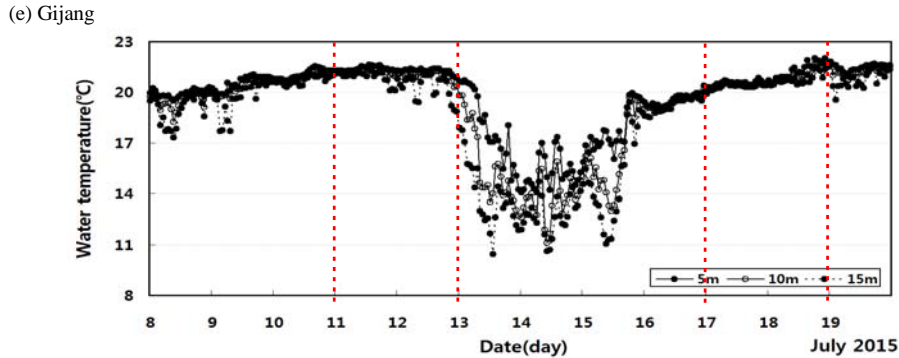


Fig. 5. Continued.

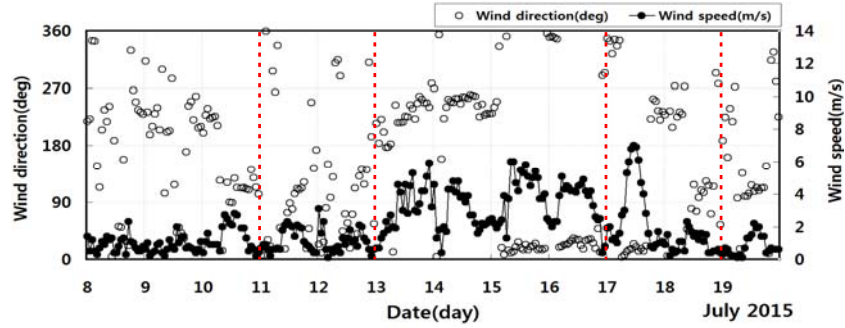
계 유지되지 못하고, 태풍의 변질에 의해 급격히 낮아지기도 하고 태풍의 직접적인 영향으로 상승하기도 하였다. 수온이 급격히 낮아지는 이유는 12일에 서해안에 영향을 미친 제9호 태풍 찬홈이 7월 13일 03시에 온대저기압으로 변질되면서 북만으로 동진하여 동해로 진입함에 따라 저기압 중심으로 불어 들어가는 바람이 강화되었다. 이에 풍속이 강한 남풍과 남서풍계열의 바람이 2일 동안 지속되면서 동해연안에 용승(upwelling)을 야기시켜 저층의 차가운 냉수가 표층으로 상승하였기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 Hong and Sohn(2004)은 태풍통과 후 1일 뒤 최저수온이 발생하는 것은 태풍통과로 인한 해수의 영향은 일반적으로 태풍의 세기(바람, 중심기압 등), 이동속도 등에 영향과 관계가 있다고 지적한 바와 잘 일치한다. 반면 수온이 급격히 상승한 이유는 17일과 18일에 동해상에 직접적으로 영향을 미친 제11호 태풍 낭카의 영향으로 2~3일 동안 풍속이 강한 북풍계열의 바람이 지속적으로 불어 높은 외해 측의 표층수를 연안으로 밀어내는 에크만 효과로 인해 침강(downwelling)이 일어나면서 연안 쪽에 수온이 높은 표층수가 쌓여 15m와 25m의 수온이 5m의 표층수와 비슷하게 상승한 것으로 판단된다. 이러한 원인분석 결과는 3.2장 태풍의 이동경로에 따른 동해연안의 기상변화에서 자세히 기술하였다.

3.2. 태풍이동경로에 따른 풍속과 풍향의 변화

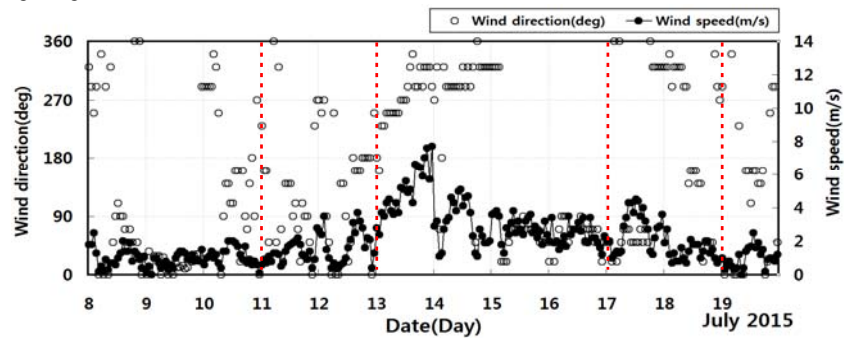
다음은 풍향과 풍속의 변화를 Fig. 6에 제시하였다. 먼저 양양(Fig. 6(a))지점의 평균풍속과 풍향을 살펴보면 7월 8일부터 12일까지 낮에는 2 m/s, 밤에는 1 m/s 내외

의 풍속을 나타내었으며, 풍향은 9일까지는 남서풍 계열의 바람, 10일부터 12일까지는 북풍계열의 바람이 우세하게 나타났다. 수온이 급격히 낮아진 13일과 14일의 풍속은 낮에는 4~5 m/s, 밤에는 3 m/s로 이전에 비해 다소 강했으며, 풍향은 남서풍의 바람이 지속적으로 불었다. 풍속이 다소 강해진 원인은 제9호 태풍 찬홈이 온대저기압으로 변질되면서 저기압 중심으로 불어 들어가는 바람의 강화로 판단된다. 이러한 풍속이 강한 남서풍이 2일간 지속되면서 에크만 수송에 의해 용승(upwelling)을 일으켜 저온의 차가운 냉수가 표층으로 상승하여 수온이 낮아졌음을 알 수 있다. 반면 15일부터는 북풍계열의 바람이 불기 시작하였다. 제11호 태풍 낭카의 간접영향을 받은 16일은 낮에는 5 m/s, 밤에는 3 m/s의 북풍계열의 바람이 지속적으로 불었으며, 17일에는 낮에는 7 m/s, 밤에는 2 m/s의 북풍계열이 바람이 3일간 지속적으로 불었다. 이러한 원인으로 16일 이후 높은 외해 측의 표층수를 연안으로 밀어내는 에크만 효과로 인해 침강(downwelling)을 일으켜 연안 쪽에 수온이 높은 표층수가 쌓이면서 15m와 25m의 수온이 5m의 표층수와 같이 수온이 상승한 것으로 판단된다. 두 번째 강릉(Fig. 6(b))지점의 평균풍속은 7월 8일부터 12일까지 양양지점과 거의 일치하는 변화 경향을 나타내었으나, 풍향은 10일까지 동풍계열의 바람이 우세하고, 11일과 12일은 남풍과 남동풍 계열의 바람이 우세하게 나타남에 따라 수온이 12일 12시 이후 낮아지기 시작하였다. 13일의 풍속은 낮에는 6 m/s, 밤에는 4 m/s로 양양지점에 비해 강하게 나타났으나, 14일의 경우 낮에는 3~4 m/s, 밤에는 2 m/s로 다소 약하였다. 풍향은 13일은 남서풍과 서풍이

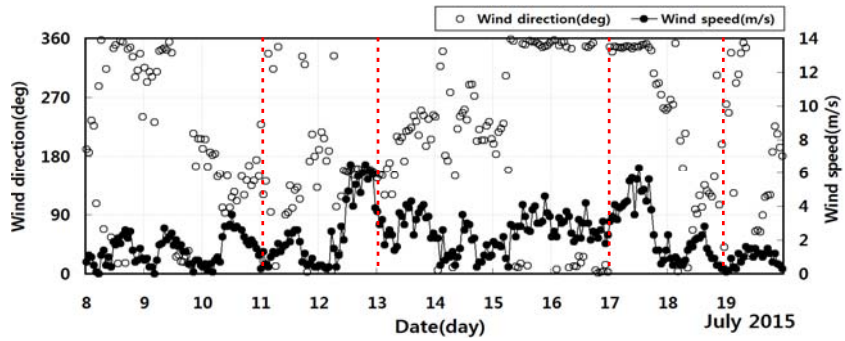
(a) Yangyang



(b) Gangneung



(c) Samcheok



(d) Yeongdeok

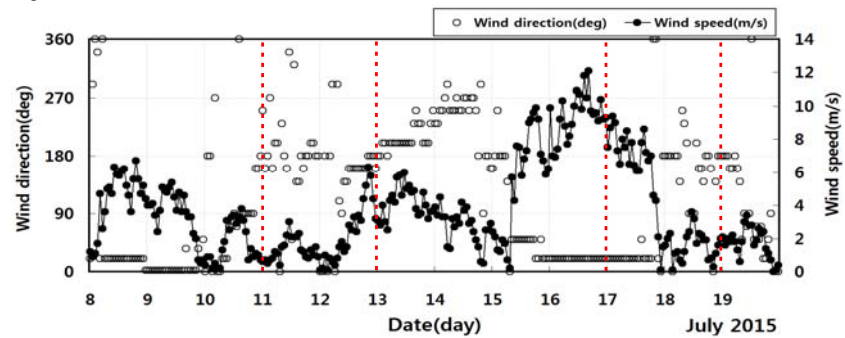


Fig. 6. Time variation of wind direction and wind speed at meteorological observation points.

(e) Gijang

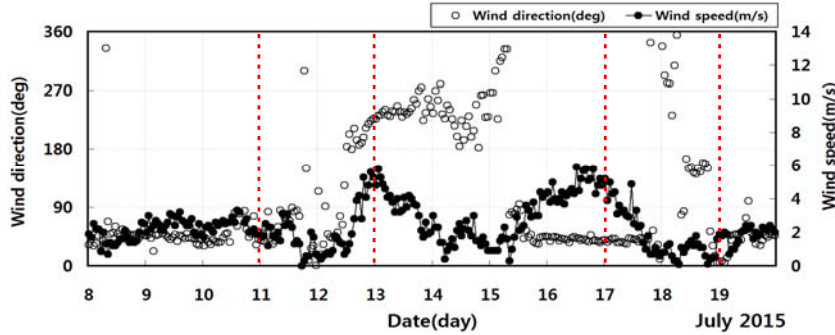


Fig. 6. Continued.

우세하였고, 14일에는 북서풍이 우세하였다. 이러한 남풍계열의 바람과 강한 풍속은 수온저하의 원인이 되었다. 15일과 16일의 경우 낮의 풍속은 3 m/s, 밤에는 2 m/s를 유지하였고, 풍향은 북동풍이 우세하였다. 17일은 낮에는 4 m/s, 밤에는 2 m/s의 풍속을 나타내어 양양지점에 비해서는 약하였다. 풍향은 북동풍과 북서풍이 우세하였다. 이러한 원인으로 양양과 같이 15 m와 25 m의 수온이 5 m의 표층수만큼 수온이 상승하였다. 세 번째 삼척(Fig. 6(c))지점을 살펴보면 8일부터 12일 12시 이전까지 낮에는 2~3 m/s, 밤에는 1 m/s로 위의 두 지점과 비슷한 풍속분포를 나타내었다. 반면 12일 12시 이후 10시간 동안 다른 지점에 비해 2배 이상 강한 풍속이 나타났는데, 이는 제9호 태풍 찬홈이 12일 03시 이후 서귀포 서남서쪽에서 지향류를 따라 동북동진하면서 서해상을 이동함으로써 간접적으로 동해중부 해상까지 풍속강화에 영향을 미친 것으로 판단된다. 13일부터 16일까지는 낮에는 3~4 m/s, 밤에는 2 m/s로 12일에 비해 약화되었다. 17일에는 제11호 태풍 낭카의 영향으로 낮에 5~6 m/s로 다소 강했으나, 밤에는 2 m/s 내외로 약화되어 18일 이후에는 다른 지점과 비슷한 분포를 나타내었다. 풍향은 8일에서 9일까지는 북풍이 우세하고, 9일 이후는 남풍과 남동풍이 3일간 지속되었다. 그 후 13일 이후에는 남서풍이 2일간 우세하게 나타나 삼척지점의 수온저하를, 15일 이후에는 북풍이 3일간 지속되면서 저층수온의 고온화를 3일간 유지하였다. 네 번째 영덕(Fig. 6(d))지점은 8일과 9일에 다른 지점에 비해 다소 강한 풍속을 나타내고 있다. 풍향은 북풍계열의 바람이 불고 있다. 13일 이후 제9호 태풍 찬홈이 변질된 온대저기압의 영향으로

다소 풍속이 강한 남서풍계열의 바람이 2일간 지속적으로 불고 있다. 15일 이후에는 제11호 태풍 낭카의 영향으로 강한 풍속의 북풍계열의 바람이 3일간 지속적으로 불고 있다. 18일 이후에는 남풍계열의 바람이 우세하게 나타났다. 다섯 번째 기장(Fig. 6(e))은 삼척지점과 유사한 변화 경향을 나타내었으며, 지리적 위치가 동해남부에 위치하고 있어 동해 중부에 위치한 다른 지점에 비해 하루 빠른 16일에 최대 풍속을 나타내었다. 풍향은 7월 12일에서 14일까지를 남서풍이 우세하였고, 이 기간을 제외하고는 북동풍이 우세하게 나타났다.

3.3. 수치모의 결과

3.3.1. 태풍의 이동경로

태풍 이동에 따른 동해상의 바람장을 살펴보기 위하여 제9호 태풍 찬홈과 제11호 태풍 낭카를 대상으로 WRF 모델을 수치모의 하여 실시하였다. 아래에 모의한 태풍진로와 일본기상청에서 제공한 태풍의 이동경로를 비교하여 제시하였다. Fig. 7(a)는 제9호 태풍 찬홈의 이동경로를 모의한 결과로 Fig. 7(b)와 비교하면 서해안을 지나 북한에 상륙하여 관통하는 경로는 서로 비슷하였으나, WRF 수치모의의 경우 좀 더 서쪽으로 치우쳐 통과함을 알 수 있었다. 그러나 모델의 이동속도는 실제 이동속도와 비교해 거의 차이가 없었다. 다음으로 제11호 태풍 낭카를 모의한 Fig. 8(a)를 살펴보면 실제 이동경로인 Fig. 8(b)와 비교해보면 일본 오키나와 동쪽 해상을 지나 우리나라 동해안으로 이동하여 소멸하는 경로는 거의 비슷하였으나, WRF 수치모의의 경우 좀 더 동쪽으로 치우쳐 통과하는 것으로 모의되었다.

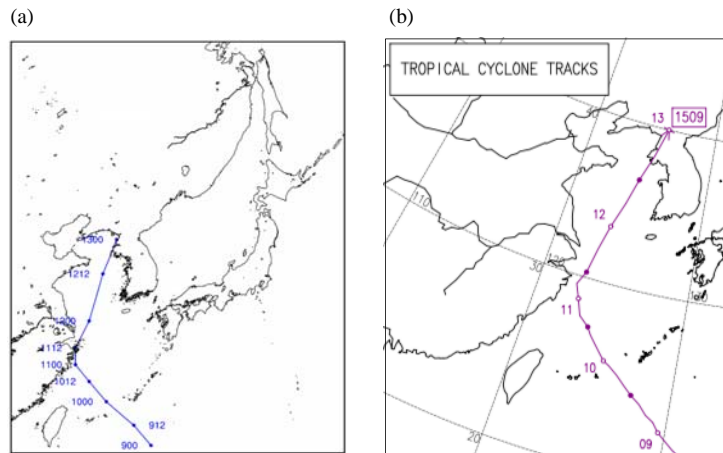


Fig. 7. Comparison simulated track from WRF simulation (a) and tropical cyclone tracks (b) of typhoon 'Chanhom'.

3.3.2. 바람장 분석

다음은 태풍의 이동에 따른 동해안의 바람장 분석을 위하여 Domain 1에서 모의된 바람장을 나타낸 것으로 붉은 색일수록 강한 풍속을 나타낸다. Fig 9는 제9호 태풍 찬홈의 이동경로에 따른 바람장의 변화를 나타내었다. 09일 09LST(Fig. 9(a))의 경우 제9호 태풍 찬홈 중심 주변으로 32 m/s 이상의 강한 풍속이 나타나고 있으며, 동해중부해상에는 4~6 m/s, 동해남부해상에는 6~8 m/s의 북동풍계열의 바람이 불고 있다. 다음 날인 10일 09LST(Fig. 9(b))에는 태풍 찬홈의 중심 주변으로는 최대풍속 40 m/s이상의 강한 바람이 불고 있으며, 동해남

부와 중부해상에는 동해안에 위치한 고기압의 영향으로 동풍 계열의 바람이 불고 있으며, 풍속은 9일보다 다소 약화되었다. 태풍 찬홈이 중국 타이저우 동쪽해상을 지나 북서진하고 있는 11일 09LST(Fig. 9(c))에는 동해남부와 중부해상의 풍속의 경우 북태평양고기압의 세력 확장으로 더욱 약화되었고, 풍향은 동풍계열의 바람이 지속적으로 불고 있다. 태풍 찬홈의 간접영향을 받은 12일 09LST(Fig. 9(d))에는 동해남부해상에는 6~8 m/s의 다소 강한 풍속이 나타났으나, 동해중부해상에는 풍속의 변화가 거의 없었다. 풍향은 동해중부해상에는 동풍계열의 바람이 불고, 동해남부해상에는 남동풍계열의 바람이

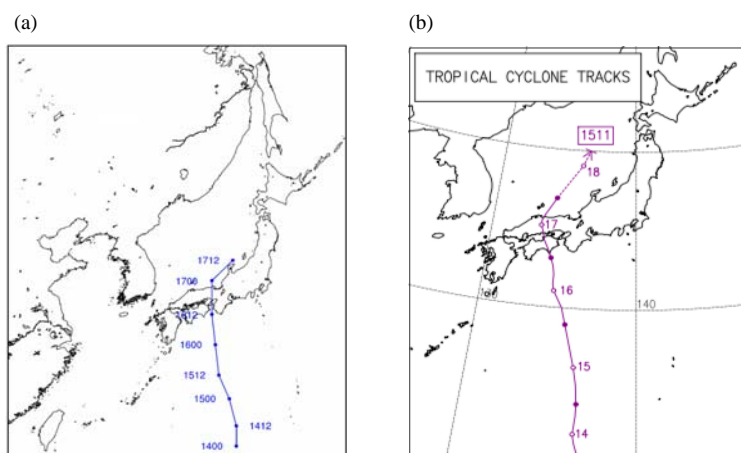


Fig. 8. Comparison simulated track from WRF simulation (a) and tropical cyclone tracks (b) of typhoon 'Nangka'.

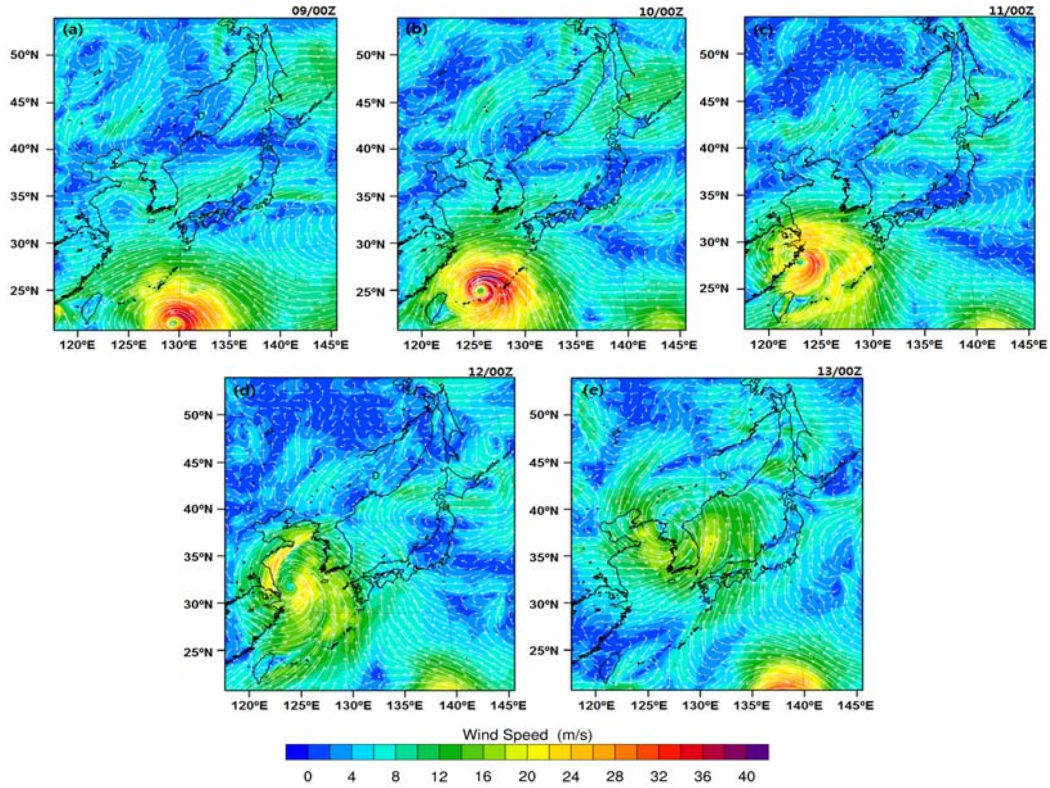


Fig. 9. Simulated wind vectors and shading for wind speed at 00UTC 9-13 July 2015.

불어 동해남부해상에 위치한 지점들에서 수온이 낮아지기 시작하였다. 이는 Fig. 5의 수온변화를 통해 확인할 수 있다. 13일 09LST(Fig. 9(e))의 경우는 태풍 찬홈이 온대저기압으로 변질되어 북한 평양을 지나가면서 동해남부와 중부해상에서 남풍계열의 강한 바람이 불고 있다. 12일 이후 풍속이 다소 강한 남풍계열의 바람이 지속적으로 불면서 동해연안에 용승(upwelling)을 야기 시켜 저층의 차가운 냉수가 표층으로 상승시킴으로써 급격히 수온이 낮아진 원인이 되었다. 다음의 Fig. 10은 제11호 태풍 낭카의 이동경로에 따른 바람장 변화를 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 먼저 14일 09LST(Fig. 10(a))의 경우 제9호 태풍 찬홈이 변질된 온대저기압의 영향으로 동해상에서 풍속이 강한 남서풍계열의 바람이 지속적으로 불고 있다. 그리고 제11호 태풍 낭카는 일본 남쪽해상에 위치하고 있으며, 태풍 낭카의 중심 주변으로 최대풍속 40 m/s이상의 강한 바람이 불고 있다. 15일 09LST(Fig. 10(b))에는 동해중부해상에는 풍속이 약한 북동풍계열의

바람이 불고, 동해남부해상에서는 풍속이 약한 남서풍계열의 바람이 불고 있다. 태풍 낭카는 일본 남쪽해상에서 북진하고 있음을 알 수 있다. 16일 09LST(Fig. 10(c))에는 태풍 낭카가 일본의 시코쿠 고치 남쪽 해상에 위치하여 동해상에 영향을 미쳐 동해상에서 북서풍계열의 바람이 다소 강하게 불기 시작하였다. 17일 09LST(Fig. 10(d))에는 태풍 낭카가 일본을 관통하여 지나가면서 동해상으로 진입하고 있어 동해상에 풍속이 다소 강한 북풍의 바람이 불고 있다. 18일 09LST(Fig. 10(e))에는 태풍 낭카가 독도 인근해상에서 열대저압부로 소멸하면서 풍속은 약화되었으나, 그 영향으로 동해중부해상에는 북서풍계열의 바람이 불고 동해남부해상에는 남풍계열의 바람이 불고 있다. 15일 이후 동해상에서 풍속이 다소 강한 북풍계열의 바람이 지속적으로 불면서 수온이 높은 외해 측의 표층수를 연안으로 밀어내는 에크만 효과에 의한 침강(downwelling)이 일어나면서 연안 쪽에 수온이 높은 표층수가 쌓여 15 m와 25 m의 수온이 5 m의 표

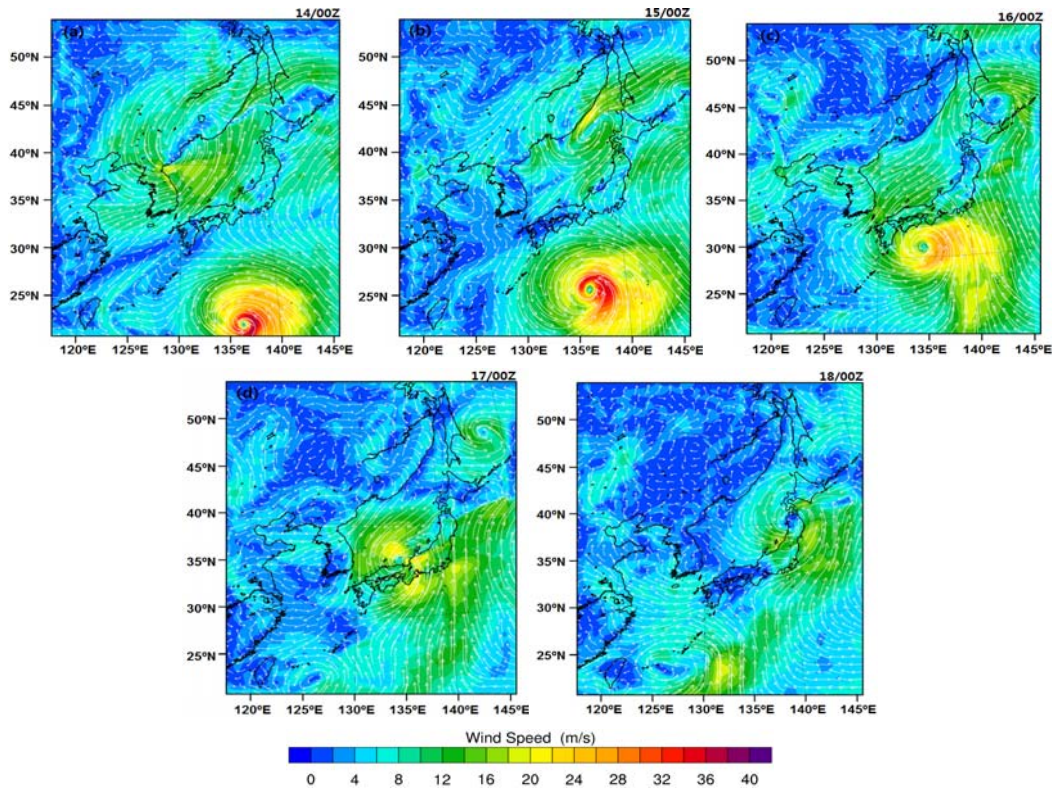


Fig. 10. Simulated wind vectors and shading for wind speed at 00UTC 14-18 July 2015.

층수와 같아지는 수온상승을 일으켰다.

수치모의 결과와 Fig. 6의 풍향, 풍속의 변화를 비교하여 살펴보면 수치모의 결과에서 풍속은 관측 자료보다 다소 크게 재현되었으나, 풍향은 관측 자료와 잘 일치하여 태풍이동에 따른 급격한 수온변화를 예측하는 데에 유용한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 태풍의 이동에 따른 수온의 변화분석을 통해 크게 두 가지 현상을 확인할 수 있었다. 첫 번째는 제9호 태풍 찬홈에 의한 동해안 5 m 수온의 급격한 저온화이고, 두 번째는 제11호 태풍 낭카에 의한 15 m와 25 m 수온의 급격한 고온화현상이었다. 그 원인을 분석하기 위하여 수온관측정점에서 가장 가까운 기상청의 풍향과 풍속자료를 이용하여 분석하였고, 태풍의 이동과정과 바람장 변화 좀 더 자세히 알아보기 위하여 WRF모델

을 이용하여 수치모의하고 분석하였다.

지금까지 수행된 해수면 냉각과 관련된 해양반응에 대한 대부분의 선행연구는 태풍 통과시기에 나타난 현상에 관한 것이었다. 이는 태풍 통과시기에 해양의 반응이 가장 강하고, 태풍강도도 가장 크게 영향을 받기 때문이다. 그러나 태풍이 통과한 후 해양은 관성운동(inertial motion)에 의한 지속적인 용승으로 해수면 냉각이 오랫동안 지속되고 강화되기도 하고(Shay et al., 1992; Lin et al., 2003; Shang et al., 2008), 해양환경은 해양생물의 생산성 변화(Lin et al., 2003) 및 중장기 기후변화(Korty et al., 2008) 등에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2013). 그래서 태풍 통과에 수반된 해양 환경 변화 특성을 파악하여 대응하는 일은 어업 환경의 보전이라는 측면에서도 매우 중요하다.

이러한 배경에서 2015년도 태풍 9호와 11호의 통과 후에 나타난 동해 연안의 수온 급상승과 급하강의 발생을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 급격한

수온의 하강은 제9호 태풍 찬홈이 열대저기압에서 온대저기압으로 변질된 후 평양에서 동진하면서 풍속이 강한 남풍계열의 바람이 13일 이후 2일간 지속적으로 불면서 동해 연안에 용승(upwelling)을 발생시키는 것에 기인한 다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 수온의 고온화는 동해안에 직접 영향을 미친 제11호 태풍 낭가에 의해 북풍계열의 강한 바람이 3일간 지속되면서 높은 외해 측의 표층수를 연안으로 수송하는 에크만 효과로 인해 연안 부근에서 침강(downwelling)이 발생하여 수온이 높은 표층수가 쌓이면서 15 m와 25 m의 수온이 5 m의 표층수와 같은 수준으로 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 수산자원 품종별 포획·채취 금지관련 규정 설정을 위한 연구(RP-2015-ME-067) 사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Eagleman, J. R., 1985, *Meteorology: The Atmosphere in Action*, 2nd ed., Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 177-198.
- Emanuel, K. A., 1987, The dependence of hurricane intensity on climate, *Nature*, 326, 483-485.
- Emanuel, K. A., 1988, The maximum intensity of hurricanes, *J. Atmos., Sci.*, 45, 1143-1155.
- Emanuel, K. A., Zivkovic-Rothman, M., 1999, Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models, *J. Atmos. Sci.*, 56, 1766-1782.
- Evans, J. L., 1993, Sensitivity of tropical cyclone intensity to sea surface temperature, *J. Climate*, 6, 1133-1140.
- Fedorov, K. N., Varfolomeev, A. A., Ginzburg, A. I., Zatespin, A. G., Krasnopevtsev, A. Y., Ostrovskii, A. G., Skylarov, A. E., 1979, Thermal reaction of the ocean on the passage of the Hurricane Ella, *Oceanology*, 19, 992-1001.
- Hahn, S. D., Suh Y. S., Ahn, Y. H., 1995, Mapping cold water zone and warning service for aquaculture groups at the southeastern coast of Korean peninsula, In proceeding of International Symposium on Remote Sensing, 11th Fall Symposium of KSRS, 67-74.
- Hong, C. H., 2003, A three-dimensional numerical study of coastal upwelling in the Northern Japanese coastal region with the passage of Typhoon Oliwa, *J. Kor. Rishk. Soc.*, 36(6), 723-734.
- Hong, C. H., Sohn, I. S., 2004, Sea surface cooling in the East sea with the passage of typhoons, *J. Kor. Fish. Soc.*, 37(2), 137-147.
- Jeong, Y. Y., Moon, I. J., Kim, S. H., 2013, A study on upper ocean response to typhoon Ewiniar(0603) and its impact, *Atmosphere*, 23(2), 205-220.
- Jordan, C. L., 1964, On the influence of tropical cyclones on the sea surface temperature, *Proc. Symp. Trop. Meteorol.*, Wellington, New Zealand Meteor. Serv., 614-622.
- Kang, Y. Q., Suh, Y. S., 1986, Relationships between air temperature and sea surface temperature anomalies in Korea, *J. Korean Met. Society*, 8-13.
- Kim, S. W., Yamada, K., Jang, L. H., Hong, C. H., Go, W. J., Suh, Y. S., Lee, J., Lee, G. H., 2007, Short-term variation of sea surface temperature caused by typhoon Nabi in the Eastern sea of Korean peninsula derived from satellite data, *J. Kor. Fish. Soc.*, 40(2), 102-107.
- Kim, J. K., Cho, Y. G., Lee, J. Y., 2011, Variations of air and water temperature in the southeastern coastal waters of East sea of Korea, 2011 Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, 1708-1711.
- Korty, R. L., Emanuel, K. A., Scott, J. R., 2008, Tropical cyclone-induced upper-ocean mixing and climate, application to equable climates, *J. Climate*, 21, 638-654.
- Leipper, D. F., 1967, Observed ocean conditions and Hurricane Hilada 1964, *J. Atmos. Sci.*, 24, 182-196.
- Lee, Y. H., Jin, H. K., Hang, J. D., Yoon, S. H., Sim, J. M., Kim, Y. S., Kwon, K. Y., 2008, The variation of water temperature in the coast of East sea, *Proceedings of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 97.
- Lin, I. I., Liu, W. T., Wu, C. C., Wong, G. T. F., Hu, C., Chen, Z., Liang, W. D., Yang, Y., Liu, K. K., 2003, New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone, *Geophys. Res., Lett.*, 30(13), 51-1-51-4.
- Miller, B. I., 1985, On the maximum intensity of

- hurricanes, *J. Meteor.*, 15, 184-195.
- Moon, I. J., Choi, E. S., 2011, A definition and criterion on typhoons approaching to the Korean peninsula for the objective statistical analysis, *Atmosphere*, 21(1), 45-55.
- Moon, I. J., Kwon, S. J., 2012, Impact of upper-ocean thermal structure on the intensity of Korean peninsula landfall typhoons, *Progress in Oceanography*, 105, 61-66.
- Nam, S. H., Yun, J. Y., Kim, K., 2004, Observation on the coastal ocean response to Typhoon Maemi at the East sea real-time ocean buoy, *J. Korean Society of Oceanography*, 9(3), 111-118.
- Senjyu T., Watanabe, T., 1999, A sudden temperature decrease along the Sanin Coast induced by a typhoon., *Umito Sora*, 75, 1-8.(in Japanese)
- Shang, S., Li, L., Sun, F., Wu, J., Hu, C., Chen, D., Ning, X., Qiu, Y., Zhang, C., Shang, S., 2008, Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to typhoon Lingling, 2001. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10602, 1-6.
- Shay, L. K., Black, P. G., Mariano, A. J., Hawkins, J. D., Elsberry, R. L., 1992, Upper ocean response to Hurricane Gilbert, *J. Geophys. Res.*, 97, 20227-20248.
- Suh, Y. S., Kim, D. S., Kim, B. K., Lee, D. I., Kim, Y. S., Kim, I. K., 2002, Temporal and spatial variation of SST related to the path of typhoons around the Korean waters in summer, *J. Environmental Sciences*, 11(7), 627-636.
- Suh, Y. S., Gu, J. Y., Hwang, J. D., Lee, N. K., Kim, B. K., Jang, L. H., Kang, Y. Q., Lee, D. I., 2003, Abnormal oceanic conditions caused by typhoons around the Korean peninsula, *J. Kor. Fish. Soc.*, 36(4), 417-429.
- Wright, R., 1969, Temperature structure across the Kuroshio before and after typhoon Shirley, *Tellus*, 21, 409-413.