

## 태풍통과시 동해에서의 해수면 냉각현상

홍철훈\* · 손익성  
부경대학교 해양생산관리학과

## Sea Surface Cooling in the East Sea with the Passage of Typhoons

Chul-Hoon HONG\* and Ik-Sung SOHN

Department of Marine Production Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Sea surface cooling (SSC) with the passage of typhoons is examined in the East Sea using the Japan Meteorological Agency buoy data (37°45'N, 134°23'E) during 1983-2000 and a three-dimensional primitive equation model (the Princeton Ocean Model). Forty typhoons in this period induced the SST decrease ranging from about -0.5°C to -4.3°C. Intense SSC (<-2°C) occurs with typhoons that passed mainly through the left-hand side of the buoy station. The model is implemented to examine a physical process of SSC with a typical-track typhoon in the northwestern Pacific (24°N to 52°N). The model well reproduces prominent features in the observation and addresses how it happens; SSC is induced mainly by momentum mixing effect stirred with the typhoon rather than upwelling.

Key words: Typhoon, Sea surface cooling, Mixing effect, Upwelling, POM, East Sea

### 서 론

태풍통과시 흔히 해면온도 (SST)가 하강하는데 이러한 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°C인 것으로 보고되었다 (Jordan, 1964; Leipper, 1967, Fedorov et al., 1979; Wright, 1969). 특히, Price (1981)는 entrainment와 upwelling을 SSC의 주 발생기구로서 보고한 바 있고, Stramma et al. (1986)는 13개의 허리케인에 대해 위성자료를 이용하여 SSC의 특징을 조사하였다. 한편, 태평양에서는 일찍이 Pudov et al. (1979)가 해양관측을 통해 SSC를 처음 보고하였으나 이후 이에 대한 지속적인 연구가 거의 수행되지 않았다. 그러나 최근 들어 활발한 연구가 시작되어, Sakaida et al. (1998)는 일본기상청 부이자료 및 위성자료를 이용하여 오야시오 역을 통과하는 2개의 태풍에 대한 SSC를 조사하였고, Hong (2003a)은 약 20년 간 일본 기상청 부이자료를 이용하여 북서태평양 (북위 약 30°부근)에서의 SSC를 통계적으로 조사하였으며, 3차원 원시방정식 수치모델 (POM)을 이용하여 이 현상을 모사하였다.

한반도 주변에서의 SSC에 관하여는, Kim (1995)이 남해역에서 그 발생현상을 처음 보고한 바 있고, 이후 Suh et al. (2002), Lee et al. (2003), Suh et al. (2003)는 해양관측자료 (또는 위성자료)를 이용하여 태풍통과시 동중국해-남해역에서의 해황분석과 관련 SSC를 논의한 바 있고, Hong et al. (2003)은 POM을 이용하여 동중국해에서 태풍 Holly 통과후의 SSC가 발생하는 것을 보고하였다.

본 연구해역인 동해에서는 Senjyu et al. (1999)가 태풍 올리와(Oliwa) 통과시 일본 북부연안을 따라 SSC가 발생하는 것을 처음 관측하였고, Hong (2003b)은 3차원 수치모델을 이용하여 이 현상이 연안용승에 의한 것임을 보고한 바 있다. 그러나 동해 내부 역에서의 SSC에 관하여는 연구된 바가 없다.

한편, 바다에서는 1-2°C의 작은 수온변화에도 생물들이 크게 영향을 받으므로 SSC는 생물상의 변동에도 크게 영향을 미칠 것으로 생각된다. 특히, 태풍통과 후 적조생물이 소멸되고, 1차, 2차 생산력 변동 등이 발생하는 것은 그 변동기구가 충분히 밝혀진 것은 아니라 하더라도 일반적으로 널리 회자되어 왔다. 최근 Chen et al. (2003)에 의해 태풍이 대만 근해역을 통과할 때 영양염 (NO<sub>3</sub>, POC 등) 및 Chl-a가 변동하는 것이 관측된 것도 태풍통과가 생물상에 영향을 미치는 좋은 예가 될 것이다. 따라서 SSC 현상을 살피는 것은 물리현상 그 자체를 밝히는 데에 우선 의미가 크지만 향후 생물현상과의 관련성을 살피는 기초연구로서도 매우 중요할 것으로 생각된다.

본 연구는 이러한 생물상의 변동과 관련된 동해에서의 그 기초연구의 일환으로서 먼저 이 해역에서의 SSC의 물리적 발생과정에 초점을 맞추어, 1983-2000년 기간 중 통과한 태풍에 대해 동기간 동해에서의 일본 기상청 부이자료를 이용하여 SSC의 실태를 파악하고, 이들 결과에서 나타나는 SSC의 특징들을 3차원 원시방정식 모델을 이용하여 조사하였다.

### 재료 및 방법

#### 관측자료

본 연구에서는 일본기상청 (JMA) 관측부이 (Fig. 1) 중 동해

\*Corresponding author: hongch@pknu.ac.kr

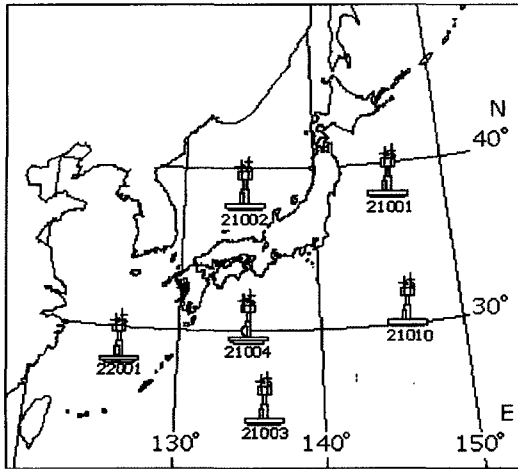


Fig. 1. A map of the JMA buoy stations in the northwestern Pacific. Used is the observation data at the Buoy 21002 in this study.

남부에 설치된 부이 St. 21002에서 1983-2000년 기간 중 태풍 통과 시기의 기압, 표층수온(20 m, 50 m, 100 m 층) 자료가 사용되었다. 부이 위치 및 관측 수심은 해에 따라 다소 변경되었다. 즉, 1985년 이전까지는 관측수심(부이위치)이 20 m, 50 m (37°45'N-134°23'E)이었으나 그 이후부터는 50 m, 100 m (37°55'N-134°32'E)로 바뀌었다. 한편, 동기간 동안 통과한 태풍경로 및 자료(중심기압, 이동속도 등)는 일본 기상청에서 발간된 자료를 사용하였다.

수치모델

본 연구에서 사용된 모델은 Blumberg and Mellor (1987)가 개발한 The Princeton Ocean Model (POM)이며, 그 세부적인 모델 기본구조(configuration)는 연직 level 수를 26층으로 늘린 것, 모델태풍이 Oliwa에서 Holly로 바뀐 것을 제외하면 Hong (2003b)와 거의 같다. 모델의 중요한 부분만 간략히 기술하면, 직교좌표계에서 격자간격은 동서방향 각 20 km, 연직층은 26층 ( $\sigma=0.000, -0.003, -0.006, -0.008, -0.011, -0.014, -0.017, -0.019, -0.022, -0.025, -0.028, -0.042, -0.056, -0.069, -0.083, -0.167, -0.250, -0.333, -0.417, -0.500, -0.583, -0.667, -0.750, -0.833, -0.917, -1.000$ )이다. 초기조건에서, 연직수온은 표면의 29°C로부터 지수함수적으로 감소하고 (Fig. 2), e-folding scale (EFS)은 태풍이 통과한 8월-9월 중 부이근처의 수온구조를 고려하여 70m로 주어졌다. 또 염분은 편의상 34.5 psu로 일정하게 주어진다. 개방경계에서, 내부 범선속도는 Sommerfeld 방사조건, 수위는 외부개방경계조건, 수온 및 염분은 slippery 조건에 의해 결정된다. 모델을 단순화하기 위해 해면을 통한 열 교환과 쿠로시오, 대마난류와 같은 기본장의 흐름들은 무시하였다(POM 모델구성에 대한 보다 상세한 것은 Mellor (1996)을 참고).

Fig. 3은 모델해양을 보여준다. 남북으로는 24°30' N-52°00'N, 동서로는 117°25'E-143°00'E로 둘러싸인 해역으로서 동중국

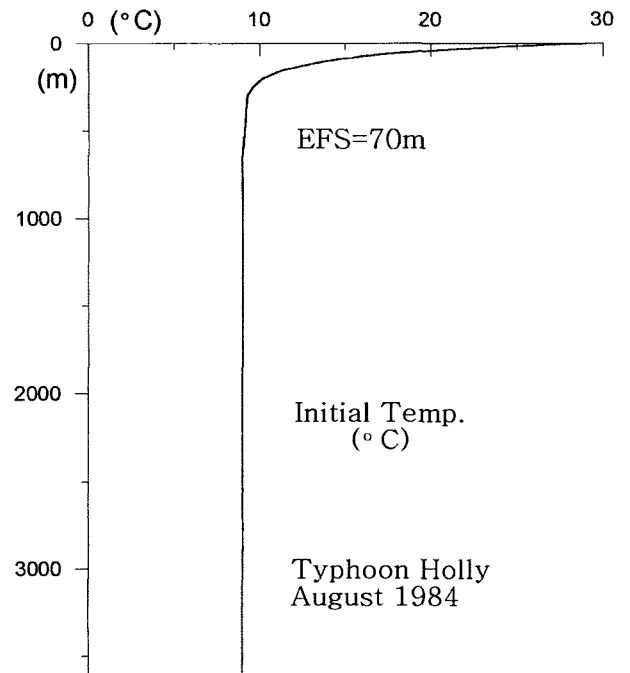


Fig. 2. Vertical profile of an initial temperature in the model. Temperature at the surface is 29°C, exponentially given in the vertical.

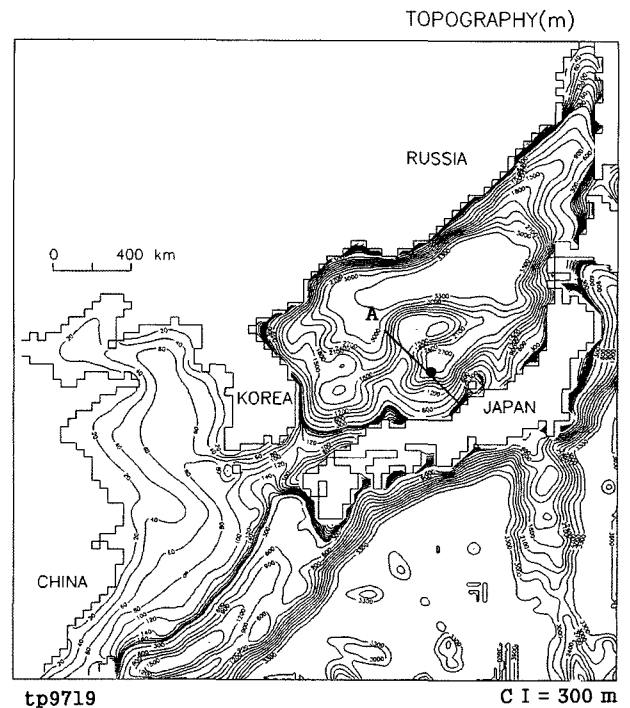


Fig. 3. The model domain. Depth is in meter. The contour interval is 300 m except for 20 m in the region shallower than 200 m. Black circle represents the JMA Buoy St. 21002. Line A gives vertical profiles of calculated velocity and temperature.

해, 황해 및 동해 전역이 포함되었다. 해저지형은 최대 3,600 m에서 절단 (cut-off)하였으며, 가파른 해저경사로 인해 발생할 수 있는 불안정을 완화시키기 위해 평활화하였다. 대기조건에 있어, 태풍의 기압은 Fujita (1952) 식, 바람은 Miyazaki et al. (1961)를 적용하였다. 모델 태풍은 편의상 1984년 8월 동중국해→대한해협→동해를 통과한 Holly로 하였다 (Hong et al., 2003 참조). 수치계산은 태풍으로 발달하기 시작한 1984년 8월 17일 21시부터 약한 저기압으로 바뀔 때까지 10일간 수행되었다.

**결 과**

1983년-2000년 기간 중 SSC의 통계적 분석

본 연구기간 중 동해를 통과한 태풍 수는 40개로서 그 경로는 Fig. 4에 주어진다. 대체로 북위 10° - 20°근해에서 발생하여 동중국해→대한해협 주변→동해를 통과하는 것이 주류를 이루고 있다. 동기간 중 북태평양 전체 태풍 발생 수 (Fig. 5)는 553개로서 매년 25개 정도 발생하였으며, 이 중 동해를 통과한 태풍 (흑색부분)은 전혀 통과하지 않은 1983년, 2000년을 제외하면 평균 2개였다. 또 1993년의 경우는 평년보다 두 배 이상 많은 5개의 태풍이 통과하였다.

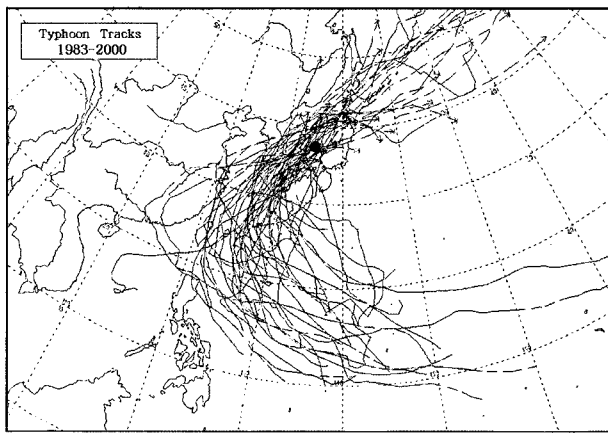


Fig. 4. Tracks of typhoons through the East Sea during 1983-2000. A black circle represents the JMA buoy station.

Fig. 6은 태풍통과시 부이 지점 사이의 최단거리와 SSC와의 관계를 보여준다. 여기서는 -1°C 이상 SSC를 일으킨 태풍 (약 20개)만 나타내었으며, 그 범위는 -1 - -4.3°C를 보였다. 관측부이로부터 대개 200 km 이내를 통과한 태풍의 경우에 주로 SSC가 발생하였으며, -3.5°C 이상 SST가 하강한 태풍의 경우는 주로 150 km 이내를 통과하였다. 물론, SST의 하강이 태풍의 세기나 이동속도와도 관계가 있겠으나 대체로 태풍이 부이 지점에 가깝게 접근하여 통과할수록 SSC가 큰 경향을 보였다. 특히, 태풍이 부이를 중심으로 오른편으로 통과한 태풍 (검은 원; ●)보다 왼편으로 통과한 경우 (흰 원; ○)에 SSC 반응이 잘 나타났다. 이러한 결과는 Price (1981)가 지적한

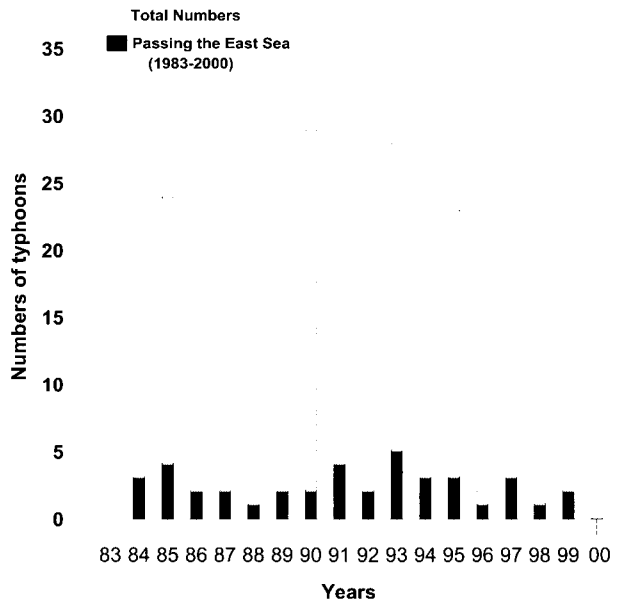


Fig. 5. Numbers of typhoons through the East Sea during 1983-2000.

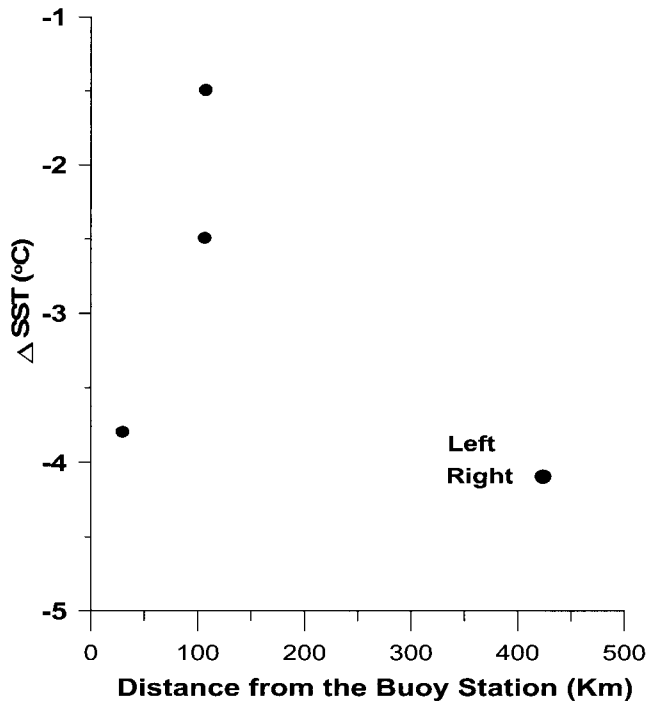


Fig. 6. Scatter diagram of  $\Delta$ SSC versus distance from the buoy station when typhoons passed. White and black circles represent tracks of typhoons advancing leftward and rightward from the buoy station, respectively.

바와 같이, 태풍통과시 진행방향의 오른편쪽 해수반응이 강하다는 소위 'rightward bias'를 반영한 것으로 보인다. 관측기간 중 -2°C 이상 SSC를 일으킨 태풍은 대개 10개 정도이며 대표적

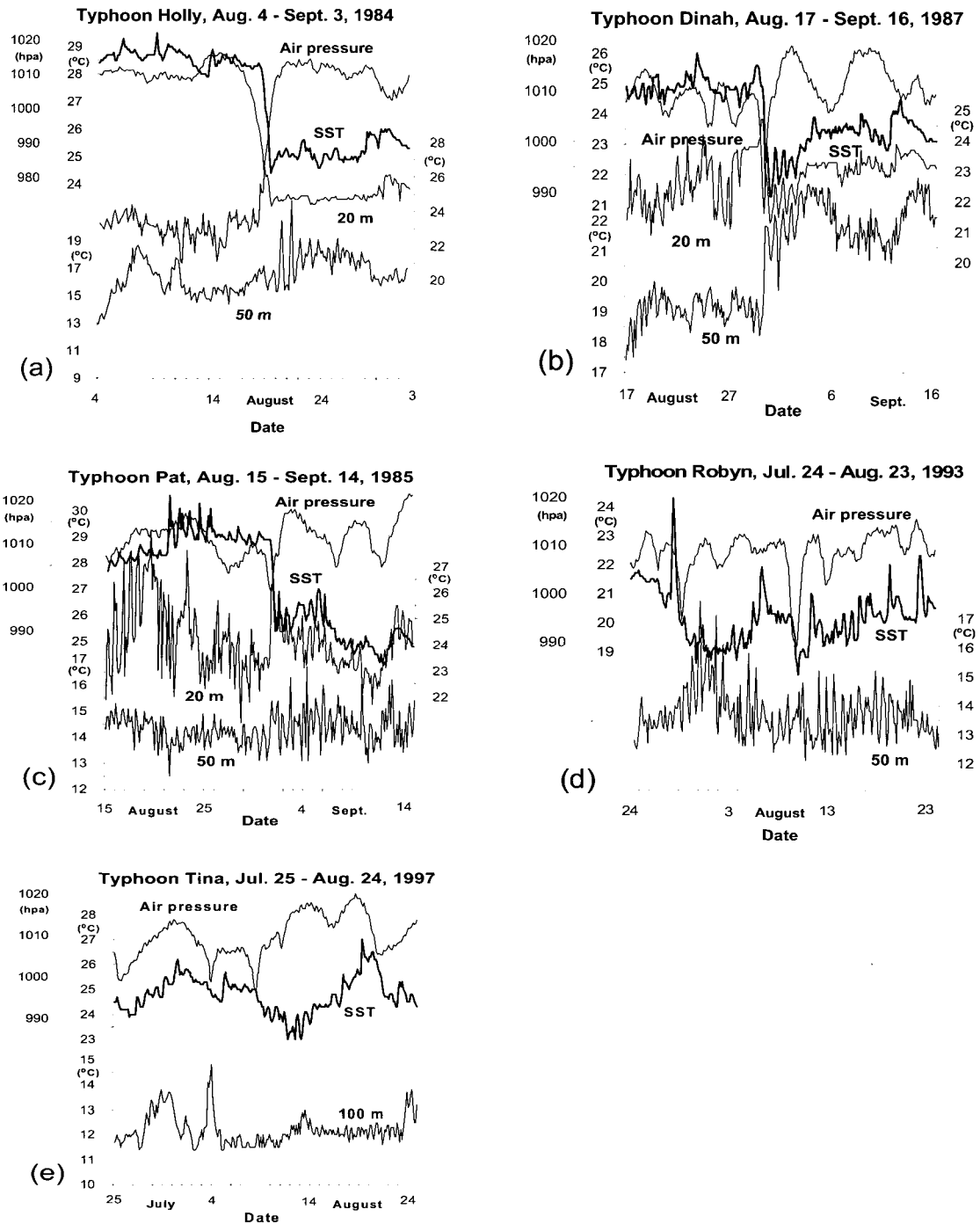


Fig. 7. Air pressure (hpa), SST (°C), temperature (°C) at 20 m and 50 m (or 100 m) at the JMA buoy station in the East Sea with the passage of Typhoons Holly (a), Dinah (b), Pat (c), Robyn (d), and Tina (e).

인 5개의 태풍에 대한 수온변화가 Fig. 7에 주어진다. 시계열은 태풍이 부이를 통과한 시점을 중심으로 전후 15일간, 즉 전체 1개월 간의 기압, SST 변동 및 20 m, 50 m (또는 100 m)에서의 수온변동을 보여준다. 이들 태풍들은 모두 동중국해에서 대한해협을 지나 부이의 왼쪽을 통과하였다.

1984년 8월 동해를 통과한 Holly (Fig. 7a)의 경우, 부이를 통과하기 전에는 SST가 28-29°C 정도를 유지하였으나, 통과 후에는 약 4°C 이상 급하강함을 알 수 있다. 특히 주목되는 것은 태풍 통과 후 기압은 태풍통과 이전의 기압으로 곧 회복됨에 비해 SST는 회복되지 않고 SSC상태를 수일간 유지하는

점이다. 또 SST 최소는 태풍이 통과한 후 약 반나절 이후에 발생하는 점도 흥미롭다.

한편, 20 m, 50 m 층에서는 SST의 감소시기에 오히려 수온이 일시적으로 상승하는 경향을 보이는 것도 특이하다. 태풍 통과 후 관성진동이 탁월하게 나타나고 그 진폭은 표층보다 중층(50 m)에서 더 큰 경향을 보이는 점도 특징으로 지적할 수 있다. 이러한 특징은 태풍 Dinah (Fig. 7b), Pat (Fig. 7c)의 경우에도 유사하게 나타난다. 다만, Dinah의 경우는 태풍통과시 50 m 층의 수온이 Holly의 경우보다 조금 더 높은 3°C 정도 증가하고 있고 태풍통과전의 온도(약 19°C)로 회복되지 않는 것이 다르다. 이것은 태풍통과 후 기압의 일시적인 변동(9월 6일경 다시 기압이 하강)과 관련된 것으로 보인다. 한편, 태풍 Robyn (Fig. 7d), Tina (Fig. 7e)의 경우에도 태풍통과시의 SST의 하강이나 통과 후 SSC의 수일간 유지상태, SST 최소의 시간차, 태풍통과 후 현저한 관성진동 등 Holly와 유사한 특징을 보여주고 있다. 다만, 태풍통과시 20 m 혹은 50 m의 수심자료가 유실되었다.

이상의 결과를 정리하면 태풍통과시 대체로 다음과 같은 특징이 나타났다.

- ① SST가 -3~-4°C 급하강하였다.
- ② 태풍통과 후 SSC의 상태를 수일간 유지하였다.
- ③ SST 최소는 태풍통과 후 반나절-1일 사이에 발생하였다.
- ④ 태풍통과시 SST 감소와 달리 20 m, 50 m 층에서는 수온이 일시적으로 증가하였다.
- ⑤ 태풍통과 후 관성진동이 탁월하고 특히 표층보다 중층에서 그 진폭이 컸다.

본 연구에서는 태풍통과시 이러한 현상이 어떻게 발생하는지를 3차원 원시방정식 모델(POM)을 이용하여 조사하였다.

**수치실험결과**

Fig. 8은 태풍 Holly에 대한 수치실험에서 얻어진 기압(hpa) 및 3 m, 22 m, 49 m에서의 수온 시계열을 보여준다. 관측수심(Fig. 7a)과 다소 차이는 있으나 대응에는 큰 지장이 없을 것으로 생각된다. 계산기간 중 태풍이 부이를 통과하기 수일 전에는 거의 변화가 없으므로 이 기간은 시계열에서 제외하였다.

실험결과는 전반적으로 관측과 매우 좋은 대응을 보였다. 즉, 태풍이 통과하는 8월 22일 00:00시경부터 SST가 약 -3°C 정도 급속히 하강하였으며, 통과 후에도 수일간(약 4일간) SSC 상태를 유지하였다. 특히 SST 최소는 태풍통과 후 약 1일 뒤(23일 00:00시경)에 발생하는 점, SST 하강시기에 20 m 층 수온이 반대로 약 1.5°C 정도 상승하는 점, 태풍통과 후 관성진동(약 19시간)이 탁월하고 특히 표층보다 중층(약 49 m)에서 더욱 발달하는 점등이 관측결과와 잘 대응된다. 다만, 49 m 층 수온은 SST 하강시기(22일 06:00시경)에 상승하는 온도가 매우 작아(약 0.1°C) 관측과 좋은 대응을 보여주지 못하였다. 이것은 모델이 연직혼합과정을 충분히 잘 표현하지 못한 것과 관련될 것으로 생각된다(이것은 뒤에 다시 논의함). 또 관측결과(Fig. 7a)에서는 태풍통과 후 본래의 수온

으로 회복되지 않고 10일 이상 SSC 상태를 그대로 유지하고 있으나 모델결과는 수일(약 4일) 후 본래의 온도로 회복되고 있는 점도 다르다. 이것은 계절적인 수온변동과 관련될 것으로 생각된다. 즉, 9월의 경우, 부이설치해역(37°47'N-134°23'E)의 누년 평균 SST가 24-25°C(수로국, 1982)인 점을 고려해 볼 때, 태풍 Holly가 통과한 후 약 24°C까지 하강한 SST가 8월 23일-24일경까지는 일시적으로 상승하다가 이후 9월의 대기온도(약 25°C)에 동화되고 있다. 이러한 경향은 태풍 Dinah (Fig. 7b)나 Pat (Fig. 7c)의 경우에서도 역시 볼 수 있다. 더구나 8월 중 태풍이 통과한 Robyn (Fig. 7d)이나 Tina (Fig. 7e)의 경우에는 태풍통과 후 수일 내에 본래 온도로 회복되고 있어 이 같은 추론을 뒷받침해주는 것 같다. 다만, 본 모델에서는 대기와의 상호작용을 배제하였으므로 이에 대한 보다 상세한 논의는 대기상호작용을 포함한 보다 정교한 모델 상에서 가능할 것이다.

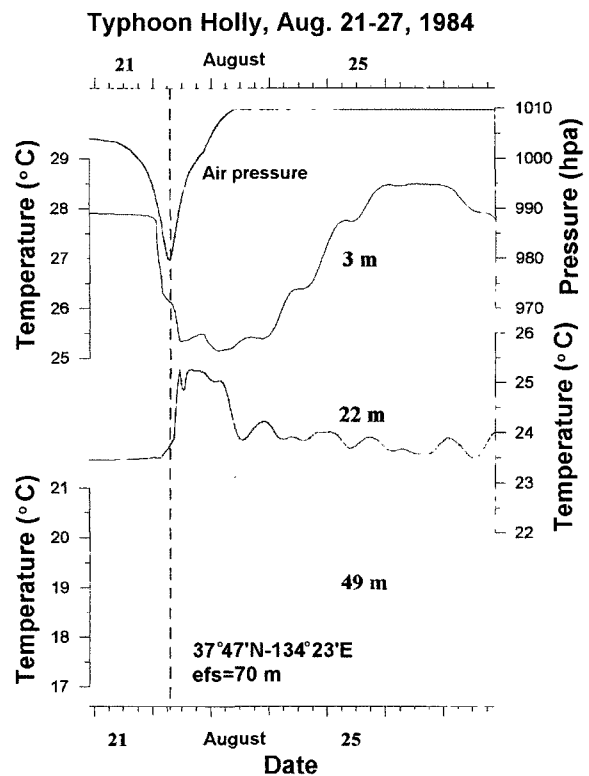


Fig. 8. Time series of calculated air pressure, temperature at 3 m, 22 m, and 49 m on JMA buoy station. A vertical bar (dashed line) represents a time when Typhoon Holly passed in a close proximity to the station.

태풍통과로 인한 해수의 영향은 일반적으로 태풍의 세기(바람, 중심기압 등), 이동속도 등에 영향을 받는다. 특히 저위도에서보다 중위도와 고위도로 이동할수록 편서풍의 영향을 받게 되므로 이동속도는 빨라지는 경향을 보인다. 태풍 Holly의 경우도, 저위도에서의 이동속도(보통 10 km/h) 및 중심기

압 (960-970 hpa)을 고려해 볼 때 부이근처를 통과할 때는 그 세력이 많이 약해지고 (예를 들면, 중심기압이 약 980 hpa) 이동속도는 빨라져 (약 45 km/h) 태풍통과로 인한 연직방향에 있어서의 수온변동은 표층 수심 메타에 한정됨을 알 수 있다 (Fig. 9). 즉 본 실험에서는 49 m 수심에서 태풍통과 후 0.5-1.0°C 정도의 변동범위를 보이나 80 m 수심에서는 거의 변화가 없어 0.1-0.2°C 변화에 불과하였다. 태풍통과 후에 나타나는 수온변동은 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 연직방향의 유속변동 (즉 water column 상하진동)과 약 6시간의 time lag을 갖고 잘 대응하고 있다. 더구나 관측부이근해에서의 관성주기가 약 19시간인데 이것은 관측결과 (Fig. 7)와 좋은 대응을 보인다. 따라서 실험결과로 볼 때, 관측결과에서 보여준 태풍통과 후의 수온변동은 연직방향의 유속변동으로 인한 관성진동에서 비롯된 것임을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 부이직점에서 태풍통과전후의 연직방향의 수온변화를 보여준다. 태풍통과 6시간 전인 22일 01시의 수온분포는 모델의 초기수온 조건과 거의 변화가 없다. 그런데 태풍통과 시인 22일 07시에는 약 15 m 층까지 혼합층이 형성되면서 그 결과 SST는 약 2°C 정도 하강하는 것을 볼 수 있다. 동시에 20 m 층 수온은 약 0.5°C 증가하였다. 태풍통과 후 9시간이 지난 22일 16시에는 SST가 약 3°C 하강하면서 혼합층은 약 25 m 수심까지 깊어지고 동시에 20 m 수심의 온도는 처음보다 1°C 정도 증가하였음을 알 수 있다. 즉 실험에서 볼 때, 관측에

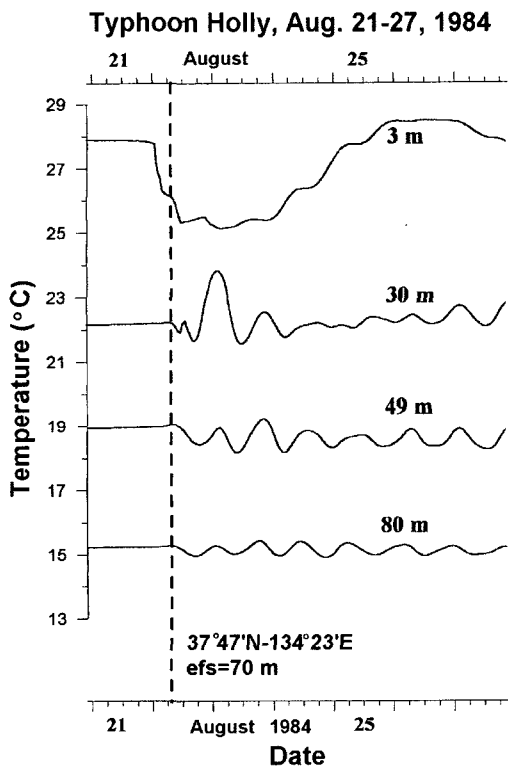


Fig. 9. The same as Fig. 8 except for temperature at different depths.

**Typhoon Holly, Aug. 21-27, 1984**

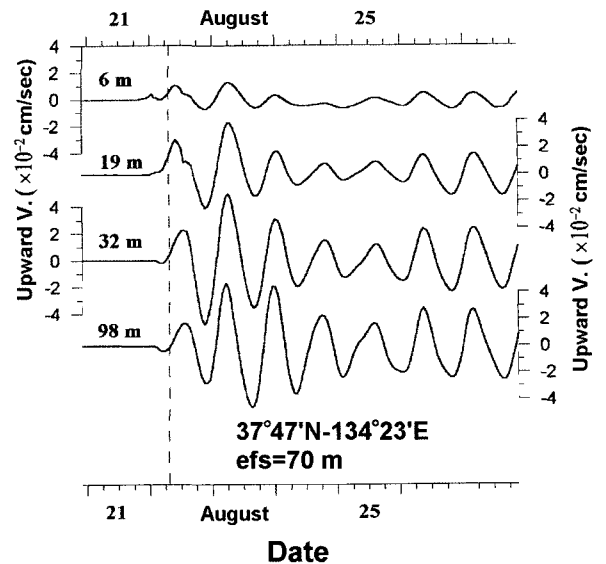


Fig. 10. The same as Fig. 8 except for vertical velocity ( $\times 10^2$  cm/sec).

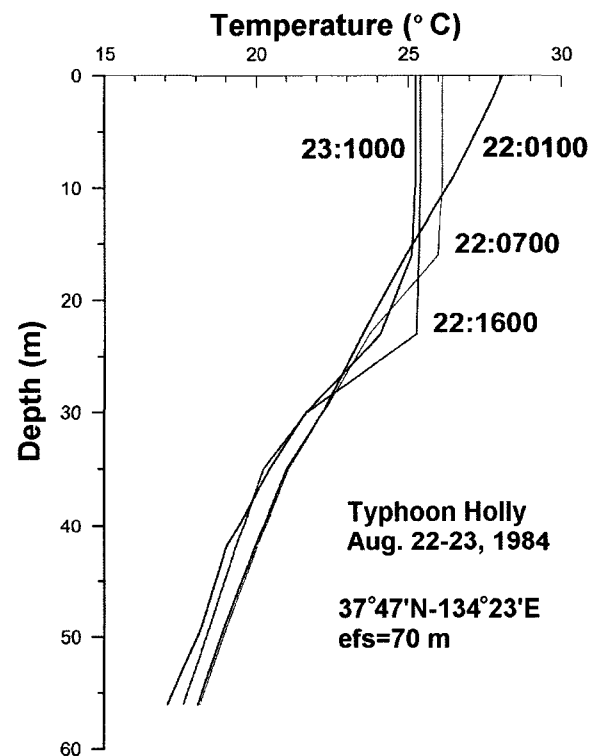


Fig. 11. Vertical profiles of temperature at the buoy station.

서 보여준 태풍통과시 SST의 급하강은 혼합작용에 의한 것임을 알 수 있으며, SST의 하강과 달리 20 m 층에서의 일시적인 수온상승은 이 시기 상층 고온수와의 혼합과정에서 발생한

것으로 해석할 수 있다. 이 과정에서 SST의 최소화는 약 하루가 경과한 23일 10시경 (약 25.2°C)에 발생하는데, 이것은 태풍통과 후에도 한동안 계속되는 혼합효과에서 비롯된 것임을 알 수 있다. 이후 시간이 경과할수록 점점 혼합층의 두께는 얇아지면서 (예를 들면, 23일 10:00시에는 약 15m가 됨) 본래의 온도로 점차 회복된다. 이것은 관측에서 보여준 태풍통과 후 발생하는 SSC의 유지가 외부와의 열 혼합작용 예를 들면, 대기온도와의 상호작용 또는 주변해수의 이류혼합작용 등에 의해 결정됨을 시사해 준다. 한편, 부이저점을 가로지른 단면 A (Fig.3)에서 태풍통과시기의 수온변동 및 유속변화 (Fig. 12)를 살펴봄으로써 이와 같은 열 혼합작용과정을 보다 더 잘 알 수 있다.

태풍통과 4시간 전 수온단면 (Fig. 12a 상도)을 보면, 10 m 이천 층에 한정되어 수온변동이 발생하고 있으나 연직방향의 속도 (upwelling) (Fig. 12a 중도)는 거의 변하지 않는 반면에 수평속도(남북방향의 성분, Fig. 12a 하도)는 약 20-30 m 층에서 매우 강하게 발달 (약 50-60 cm/s)하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 수평적인 해수운동에 의한 혼합효과가 SSC를 일으키는 것을 알 수 있다.

태풍통과 후 2시간 뒤 (Fig. 12b)에는 수온변동의 영향수심이 더 깊어져 약 30 m 층에 이르고, 수평유속 층도 약 50 m까지 깊어졌다. 특히 이 시기에는 부이근처에서 upwelling (약 18

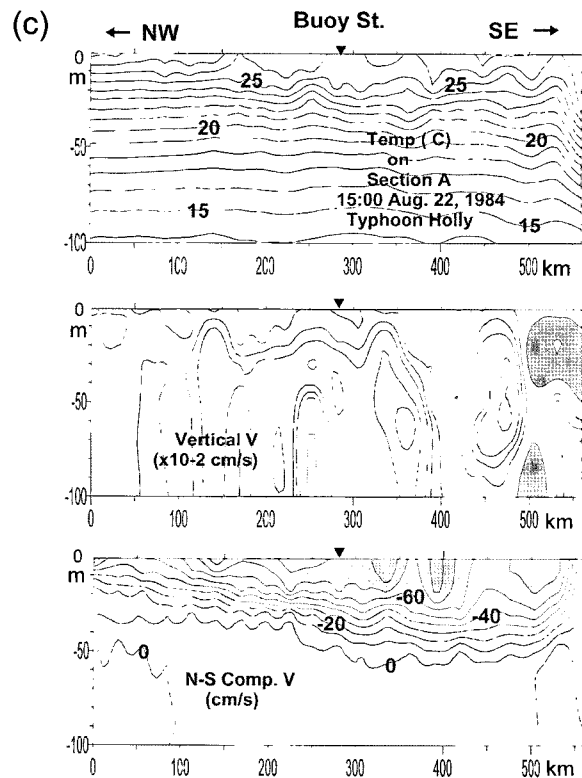
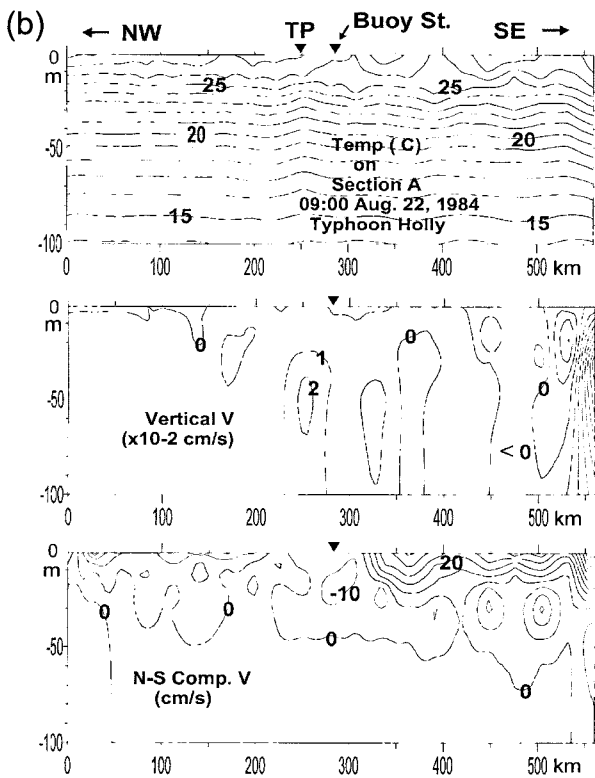
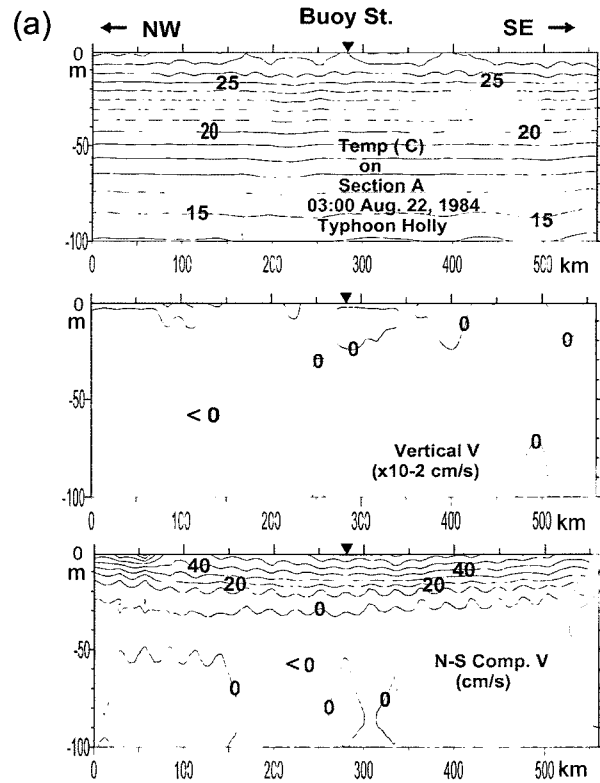


Fig. 12. Temperature (upper), vertical velocity ( $\times 10^{-2}$  cm/sec; middle), and the north-south component of horizontal velocity on transect A (see Fig. 2) at 03:00 (a), 09:00 (b), and 15:00 (c), August 1984.

m/day)이 발생하는 것이 주목된다. 태풍이 통과한 후 8시간 뒤 (Fig. 12c)에는 수온 perturbation 층이 더욱 깊어져 약 50층까지 미치나 대체로 수평유속 층은 여전히 50 m 이진 층에 한정된다. 다만, 태풍통과 뒤 남풍계열의 영향을 받아 유속은 남향을 보인다. 동시에 이 시기에는 연직방향의 유속변동이 심해져 water column의 상하진동을 유도한다.

한편, 수온단면 (Fig. 12c 상도)에서 본 연안 쪽을 주목하면 외해보다 약 1°C 이상 고온의 수괴가 존재하고 있음을 알 수 있다. 이것은 Hong et al. (1993)이 2차원 순압모델결과에서 보인 바와 같이 태풍의 이동과 함께 일본연안을 따라 전파하는 파와 관련된다. Fig. 13은 태풍 Holly가 부이 근처를 통과하는 22일 03시 (좌도)와 15시 (우도) 사이의 해면변위를 보여준다. 태풍의 이동 (태풍중심은 x)과 함께 일본 북부해역에서 파의 전파를 볼 수 있다. 이와 함께 같은 시각 외해보다 1-2°C 파스한 해수가 연안을 따라 전파한다 (Fig. 14). 한편 외해 (Fig. 14c)에서는 태풍의 후방에 “냉수의 띠 (cold water belt)”를 형성하며 태풍의 뒤를 따른다. 이것은 특히 20 m층 (Fig. 14c의 우도)에서 보다 잘 나타난다. 따라서 모델결과는 태풍통과 후 동해 내부의 광범위한 해역에 냉수역이 형성됨을 시사한다.

### 결론 및 고찰

본 연구에서는 1983년-2000년 간 동해 남부 역에 설치된 일본기상청 부이관측자료를 이용하여 동기간 태풍(40개)통과 시 수온변동을 조사하였다. 그 결과 태풍통과시에는 수온변동에 몇 가지 특징이 발견되었다. 즉, ① SST가 -3 - -4°C 급하강하고, ② 태풍통과 후 SSC의 상태를 수일간 유지하였으며, ③ SST 최소화는 태풍통과 후 반나절-1일 사이에 발생하였고, ④ 태풍통과시 SST 감소와는 달리 20 m, 50 m 층에서는 수온이 일시적으로 증가하는 경향을 보였다. 또, 태풍통과 후 관성진동이 탁월하고 특히 표층보다 중층에서 그 진폭이 컸다.

본 연구에서는 태풍통과시 이러한 현상의 발생기구를 3차원 원시방정식 모델 (POM)을 이용하여 조사하였다. 실험결과는 태풍통과 후 SST의 급하강 현상, SSC 상태의 수일간

유지, SST 최소가 태풍통과 후 약 1일 뒤 발생하는 것 등 대체로 관측에서의 특징을 잘 재현하였다. 특히 SST의 감소 시기에 20 m 층에서의 일시적인 수온상승도 모델에서 잘 재현되었다. 그러나 관측에서처럼 50 m층에서의 수온상승 (약 1°C)은 재현되지 못했다. 이것은 실험결과에서, 20 m층 수온상승이 태풍통과시의 모멘텀 난류확산에 의한 것이었음 (Fig. 11)을 고려해 볼 때, Hong (1996)이 지적한 바와 같이, 모델태풍이 실제적인 태풍을 충분히 재현할 수 없는 점과 일차적으로 관련될 것으로 생각된다. 다른 한편으로는, 본 연구에서 연직난류확산과정을 표현하는 Mellor and Yamada model (Galperin et al., 1988)의 적정성과도 관련될 수 있을 것으로 예상된다. 즉, 이 모델의 확산계수 (예를 들면,  $K_M$ ,  $K_H$ ,  $K_q$ ,  $K_j$  등)들이 Richardson number 및 각종 경험적 계수들로 표현된 안정도 함수들에 의존하고, 이 계수들은 기본적으로 외양에서의 대표적인 값들을 반영하므로 본 연구에서와 같이 태풍통과시는 난류과정이 실제보다 과소평가 되었을 것으로 사료된다. 그러나 이에 대한 상세한 논의는 본 연구의 한계를 넘는 것이므로 추후 연구과제로 남긴다.

Hong (2003a)은 POM을 이용하여 북태평양에서 태풍 Abby를 모사하였고, 그 결과 태풍통과 후 SSC 상태가 장기간 (15일 이상) 유지되는 것은 태풍 후방에 발생하는 저기압성 eddy (Hong et al., 2003) 때문이라고 지적하였다. 더구나 그의 결과에서는 SSC현상에 upwelling 효과가 탁월하였다. 그러나 본 연구에서는 태평양에서와 같은 강한 저기압성 eddy는 형성되지 않았으며, upwelling 효과도 태풍통과시를 제외하고는 작았다 (Fig. 12). 비록, Price (1981)가 지적한 바와 같이, 태풍통과시의 SSC는 entrainment와 upwelling 효과에 의해 발생한다

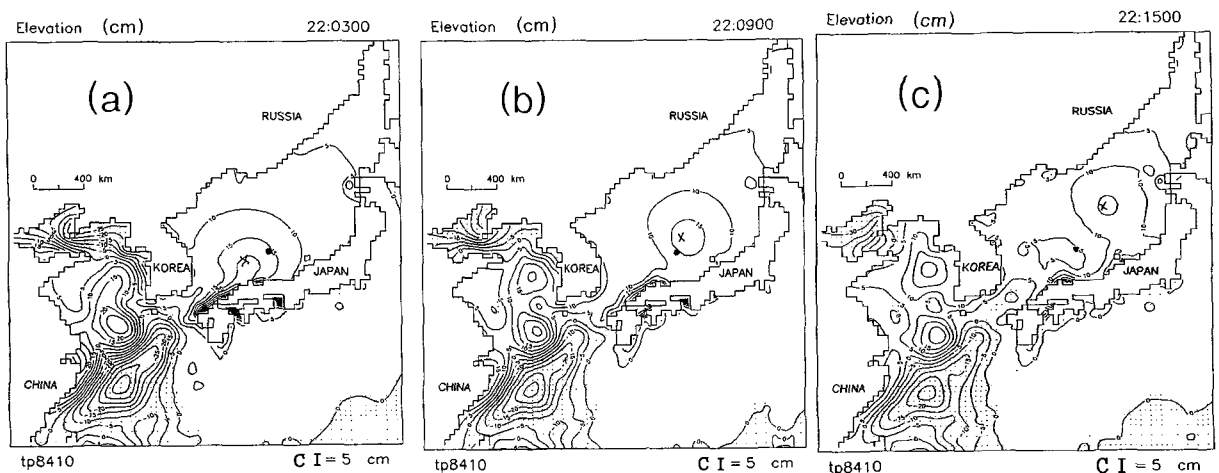


Fig. 13. Sea surface elevation at 22:0300 (a), 22:0900 (b), and 22:1500 (c). Shade region represents negative values.



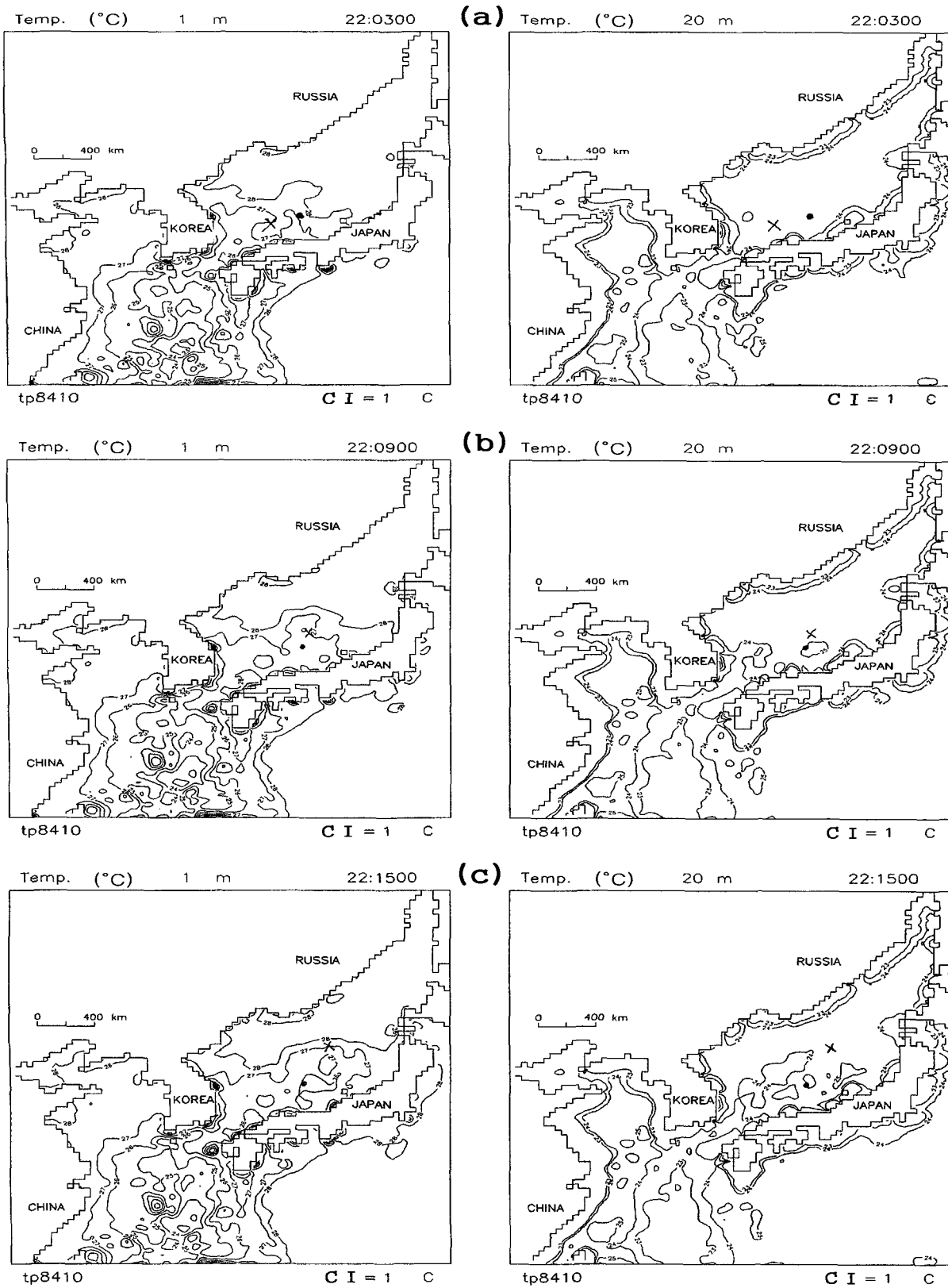


Fig. 14 Temperature fields from 22:0300 to 22:1500 (a-c) for every 6 hours at 1 m (right panels) and 20 m (left panels).

하더라도 본 실험결과는 후자보다 전자의 효과가 훨씬 큰 것으로 보인다. 이것은 앞서 지적한 바와 같이 태풍 Holly가 동해에 진입한 후 그 세기가 약해지고 (980 hpa), 이동속도 (45 km/h)가 빨라짐에 따라 spin-up time이 짧아짐으로 상대적으로 모멘텀 난류확산효과가 upwelling 효과보다 탁월하게 나타난 결과로 생각된다.

본 연구에서는 SSC의 물리적 과정에 그 초점을 맞춰 조사하였다. 그러나 생물의 변화과정에도 SSC의 영향이 매우 클 것으로 예상된다. 최근 Chen et al. (2003)에 의해 태풍이 대만 근해역을 통과할 때 영양염 ( $\text{NO}_3$ , POC 등) 및 Chl-a가 변동하는 것이 관측된 것은 이 같은 사실을 잘 뒷받침해 준다. 이러한 영양염의 변동은 태풍통과시의 연직혼합과정 및 upwelling에 의해 비롯될 수 있는데, 본 연구에서도 연직혼합과정 (약 50 m 이천 해역)이 잘 나타나고 있고 (예를 들면, Fig. 11, Fig. 12), 비록 태풍통과시기에 한정되었다 하더라도 upwelling (약 18 m/day)이 발생하고 있으므로 이 같은 추론을 가능케 한다.

모델은 SSC의 물리적 과정을 조사하는데 그 초점을 맞추었으므로 많은 부분에서 단순화되었다. 열 및 모멘텀 이류효과에 영향을 미치는 모델영역내의 기본류 (쿠로시오, 대마난류 등)나 대기해양간 열 교환이 무시되었다. 이들 조건들은 모델 결과를 정량적으로 수정할 수 있다. 특히, 대기와의 상호작용이 제외된 것은 비록 그 영향이 작더라도 (Sakaide et al., 1998), SSC현상을 논의함에 가장 큰 약점이 될 것이다. 그러나 이러한 모델의 제한적인 요소들에도 불구하고 본 연구에서 얻어진 물리적인 개념을 크게 바꾸지는 않을 것이다 (보다 상세한 고찰은 Hong (2003b)참조). 끝으로 SSC현상과 생물현상과의 관계규명을 위한 한반도 주변의 해양관측 및 학제간 공동연구가 시급함을 지적해 둔다.

## 사 사

본 연구는 2003년 부경대학교 연구비지원에 의해 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Three Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal Estuarine Science, vol. 4, Heaps, N.S. ed. AGU, Washington, D.C., pp 208.
- Chen, C.T., Lie, C.T., Chung, W.S., Yang, Y.J., Shiah, F.K., Tang, T.Y. and Chung, S.W. 2003. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea, *J. Mar. Syst.*, 42, 65-79.
- Fedorov, K.N., A.A. Varfolomeev, A.I. Ginzburg, A.G. Zatsepin, A.Y. Krasnopevtsev and A.E. Skylarov. 1979. Thermal reaction of the ocean on the passage of the Hurricane Ella. *Okeanologiya*, 19, 992-1001.
- Fujita, T. 1952. Pressure distribution within typhoon. *Geophys. Mag.*, 23, 437-451.
- Galperin, B., L.H. Kantha, S. Hassid and A. Rosati. 1988. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows, *J. Atmos. Sci.*, 45, 55-62.
- Hong, C.H. and J.H. Yoon. 1993. The response of sea levels to typhoons in the Japan Sea: I. The response on the north Japanese coast, *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 26, 567-579.
- Hong, C.H. 1996. Sea level response in the Korea Strait to typhoons, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 31, 107-116.
- Hong, C.H. 2003a. Sea surface cooling with the passage of typhoons in the northwestern Pacific Ocean. *Proc. IUGG 2003, Abstracts Week B*, B409.
- Hong, C.H. 2003b. A three-dimensional numerical study of coastal upwelling in the northern Japanese coastal region with the passage of Typhoon Oliwa. *J. Kor. Fish. Soc.* 36, 723-734. (in Korean)
- Hong, C.H. and J.H. Yoon. 2003. A three-dimensional numerical study of Typhoon Holly in the northern Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* 108 (C8), 3282, 38-1-18.
- 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.
- Kim B.K. 1995. Vertical variation of sea surface temperature caused by typhoon on south coastal waters in summer season. Abstract of the Spring Meeting in 1995 of the Korean Society of Oceanography, pp. 19. (in Korean)
- Lee D.K. and P. Niiler. 2003. Ocean response to typhoon Rusa in the south sea of Korea and in the East China Sea. *J. Kor. Oceanogr.*, 38, 60-67.
- Leipper, D.F. 1967. Observed ocean conditions and Hurricane Hilada, 1964, *J. Atmos. Sci.*, 24, 182-196.
- Hydrographic Office of Korea. 1982. Marine Environmental Atlas of Korean Waters, pp 3. (in Korean)
- Mellor, G. 1996. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. *Atmos. Ocean. Sci. Prog. Princeton Univ.*, pp 39.
- Miyazaki, M., T. Ueno and S. Unoki. 1961. Theoretical investigation of typhoon surges along the Japanese coast. *Oceanogr. Mag.*, 13, 51-75.
- Price, J.F. 1981. Upper ocean response to hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 153-175.
- Pudov, V.D., A.A. Varfolomeev and K.N. Fedorov. 1979. Vertical structure of the wake of a typhoon in the

- upper ocean. *Okeanologiya*, 21, 142-146.
- Sakaida F.H. Kawamura and Y. Toba. 1998. Sea surface cooling caused by typhoons in the Tohoku area in August 1989. *J. Geophys. Res.* 103 (C1), 1053-1065.
- Senjyu T. and T. Watanabe. 1999. A sudden temperature decrease along the Sanin coast induced by a typhoon. *Umito Sora*, 75, 1-8. (in Japanese)
- Stramma, L., P. Cornillon and J.F. Price. Satellite observations of sea surface cooling by hurricanes, *J. Geophys. res.*, 91, 5031-5035.
- Suh J.W., H.M. Lee, H.J. Oh, Y.S. Chang and Y.H. Yoon. 2002. An analysis of oceanic variation before and after the passage of typhoons. Abstract of the Autumn Meeting, 2002 of the Korean Society of Oceanography. 47-51. (in Korean)
- Suh Y.S., J.Y. Gu, J.D. Hwang, N.K. Lee and B.K. Kim. 2003. Abnormal oceanic conditions caused by typhoons around the Korean peninsula. *J. Kor. Fish. Soc.*, 36, 417-429. (in Korean)
- Wright, R. 1969. Temperature structure across the Kuroshio before and after Typhoon Shirley, *Tellus*, 21, 409-413.

---

2004년 1월 12일 접수

2004년 4월 17일 수리