

동해 실시간 해양관측 부이로부터 관측한 태풍 매미에 대한 연안해양의 반응 고찰

남성현* · 윤재열 · 김 구
서울대학교 지구환경과학부

Observations on the Coastal Ocean Response to Typhoon Maemi at the East Sea Real-time Ocean Buoy

SUNGHYUN NAM*, JAE-YUL YUN AND KUH KIM

OCEAN Laboratory/RIO, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

한국 동해시에서 약 10 km 떨어진 수심 130 m 해역에 실시간 동해 해양관측 부이를 계류하여 기상(기온, 기압, 풍속, 순간최대풍속, 풍향, 상대습도) 및 해양(파랑, 해수물성, 전층해류) 자료를 실시간으로 수집하였다. 2003년 9월 13일 03:00에 태풍 매미의 눈이 한국 울진시 부근을 통과할 때, 순간최대풍속은 25 m/s(10분 평균풍속은 최대 20 m/s) 그리고 최저기압은 980 hPa로 기록되었다. 파고는 이로부터 한 시간 뒤인 04:00에 최대가 되었으며 유의파고는 4 m 그리고 최대파고는 9 m에 이르렀다. 표층부근에서 측정된 유속은 태풍의 눈이 통과한 뒤 점차 증가하여 약 10시간 뒤인 13:00에는 약 100 cm/s에 달하였고 그 방향은 남남동이었다. 강한 남남동향류를 동반한 표층혼합층은 고온저염의 특성을 유지하였으며, 그 두께는 같은 10시간동안 20 m에서 40 m로 서서히 증가하였다. 일정경사면의 해저지형을 가지는 해양에서 해안선방향의 순간 바람에 대한 이층유체의 반응을 알아보기 위해 Csanady(1984)가 제안한 간단한 해석모형을 적용하였다. 그 결과 실시간 해양관측부이의 계류 위치($x=8.15$ km)에서 태풍의 눈 통과 후 10시간동안 전개된 해안선 방향과 이에 수직한 방향의 유속구조와 상하층의 경계에 대한 적절한 추정치를 얻을 수 있었고, 태풍 매미 통과 후 동해시 연안해양의 특징적인 반응을 부분적으로 설명할 수 있었다.

An ocean buoy was deployed 10 km off Donghae city, Korea at a depth of 130 m to measure meteorological (air pressure, air temperature, wind speed, wind gust, wind direction, relative humidity) and oceanographic data (water properties and currents in the whole column) in real-time. The buoy recorded a maximum wind gust of 25 m/s (10 minutes' average speed of 20 m/s) and a minimum air pressure of 980 hPa when the eye of typhoon Maemi passed by near the Uljin city, Korea at 03:00 on 13 September 2003. The wave height reached maximum of 9 m with the significant wave height of 4 m at 04:00 (1 hour after the passage of Maemi). The currents measured near the surface reached up to about 100 cm/s at 13:00 (10 hours after the passage of Maemi). The mixed layer (high temperature and low salinity) thickness, which was accompanied by strong southward current, gradually increased from 20 m to 40 m during the 10 hours. A simple two layer model for the response to an impulsive alongshore wind over an uniformly sloping bottom developed by Csanady (1984) showed reasonable estimates of alongshore and offshore currents and interface displacement for the condition of typhoon Maemi at the buoy position ($x=8.15$ km) during the 10 hours.

Key words: Typhoon, Maemi, Buoy, Two Layer Model, Response To Impulsive Alongshore Wind, Uniformly Sloping Bottom

서 론

태풍이나 허리케인과 같은 강한 대기외력에 대한 해양의 반응은 중 규모 대기·해양교환의 대표적인 예이지만, 이 같은 태풍이나 허리케인에 대해서는 자료수집이 쉽지 않아 아직까지도 연

안 정점의 해면자료를 제외하고는 현장관측 해양자료가 매우 부족한 실정이다. 많은 이론 및 수치실험 연구를 통해 부분적으로 밝혀진 태풍이나 허리케인 통과 시의 해양변화 특성들도 양질의 현장관측 자료를 바탕으로 한 검증이 필요하다. Taira *et al.*(1993)이나 Hong(1999), Lee(2003) 등은 태풍의 눈 통과 시에 외해역에서 수집한 기상 및 해양 자료로부터 바람, 기온, 수온과 유속의 변화에 대하여 보고한 바 있고, Kwon and Riser(2003)나 Brink

*Corresponding author: namsh@ocean.snu.ac.kr

(1989)등은 대양에서 허리케인의 눈이 통과하면서 나타난 바람, 기온, 수온, 유속 등의 구조변화를 보고하였다. 허리케인이나 태풍에 의한 강한 해표면 바람응력은 연안해양과 같이 수심이 얕고 해안선에 가까운 해역에서 해면 상승을 일으키고 해수순환을 급격하게 변화시킬 수 있으며, 이에 따른 급격한 해수물성 변화가 동반될 수 있어 강한 바람에 의한 연안해양의 해류 및 물성 변화에 대한 연구는 동해에서 연안해양의 변동성을 이해하는데 기여할 것으로 생각된다. 본 연구에서는 2003년 9월 12-13일 동안 한반도를 통과한 태풍 매미에 의한 한국 동해시 부근 연안해상의 기상과 그에 따른 연안해양의 급격한 변동 특성을 밝히고, 그 원인을 고찰하였다.

양관측 부이를 이 해역에 설치·운영하여 지속적으로 기상 및 해양 상태를 감시, 이를 인터넷(<http://eastsea.snu.ac.kr>)을 통해 실시간으로 제공해 오고 있다(Nam *et al.*, 2003). 본 논문에서는 이로부터 관측된 태풍 매미의 통과에 따른 기상 및 해양의 변화에 국한하여 다루기로 한다.

태풍 매미가 통과했던 2003년 9월에는 부이를 수심 130 m 해역에 설치하여 같은 해 1월부터 지속적으로 10분 간격의 해상 기상(풍향, 풍속, 기온, 기압과 습도), 및 해양(파고, 파주기, 수심별 해수 물성과 수심별 유향 유속) 자료를 실시간으로 수집해왔다(Fig. 1).

부이설치 해역에서 태풍 매미 통과 전의 기상 및 해양 상태

태풍 매미의 눈이 동중국해 해상에 머물고 있었던 9월 11일에 수집된 자료를 통해 태풍 통과 전의 기상 및 해상 상태를 살펴보기로 한다(Fig. 2).

9월 11일에 부이에서 측정된 풍향은 대체로 북서풍(270-360)이

동해 실시간 해양관측 부이의 위치 및 체계

한국 동해시 연안 역은 동한남류에 의한 난수와 북한한류에 의한 냉수가 만나 해류와 물성의 시·공간 변동이 큰 해역으로, 서울대학교 해양순환계 연구실에서는 지난 1999년 이후 실시간 해

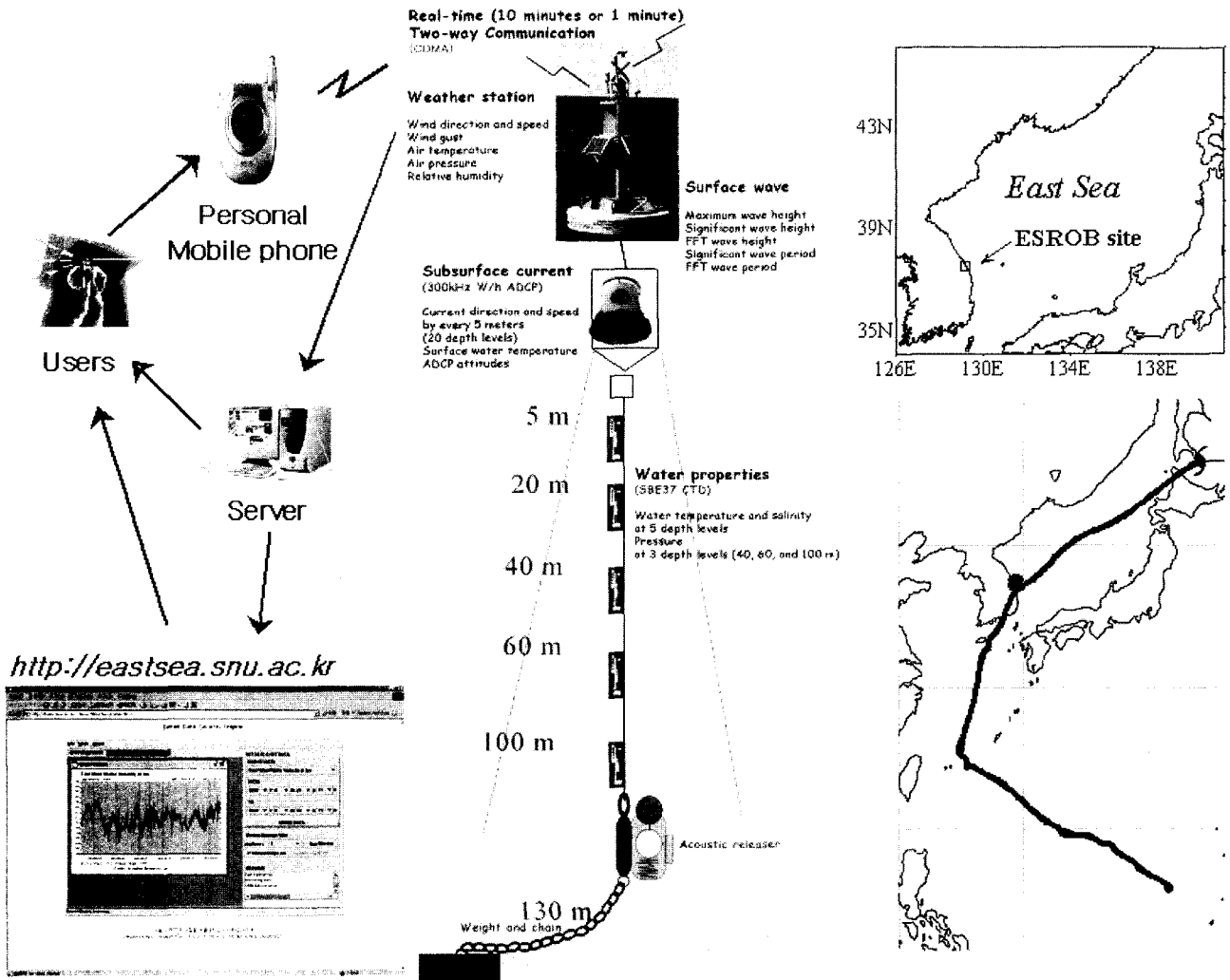


Fig. 1. Position (upper right) and mooring design (middle) of ESROB4 (East Sea Real-time Ocean Buoy 4) and conceptual view for the data flow (left) with the path of the Typhoon 'Maemi' (lower right).

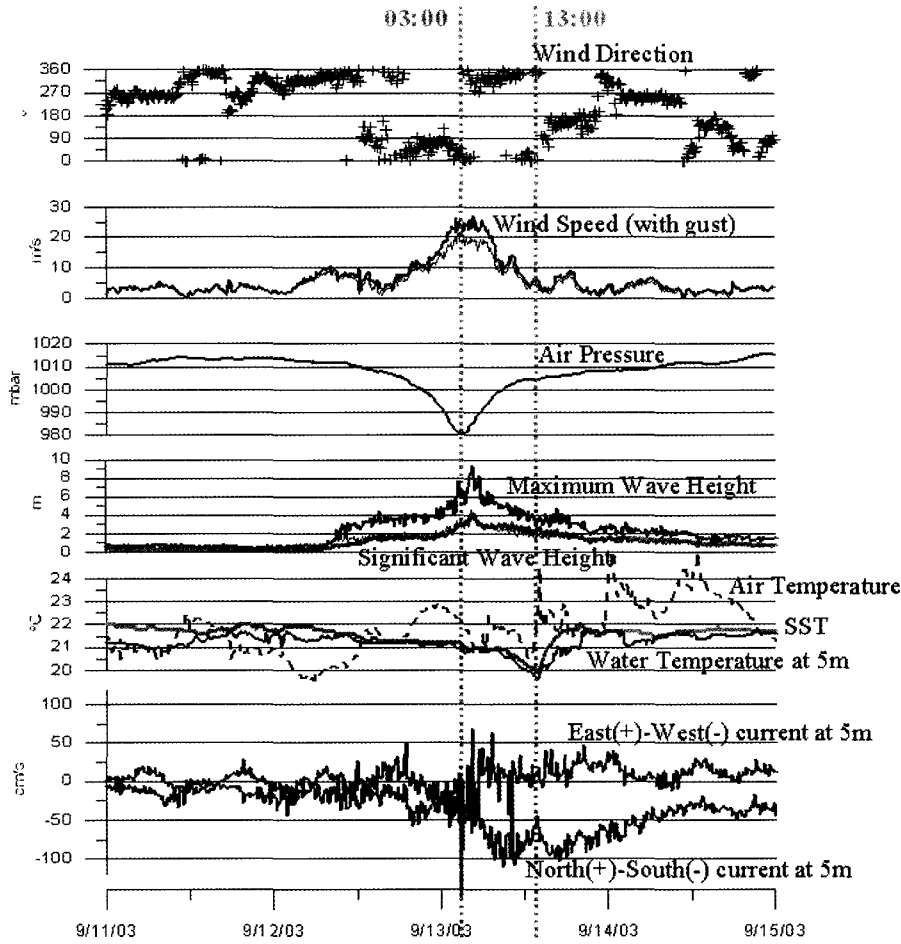


Fig. 2. Time series of atmospheric (wind direction, wind speed with gust, air pressure, maximum and significant wave heights, and air temperature) and oceanographic (SST; Sea surface temperature, water temperature and currents at 5 m) variables during September 11-15, 2003, when the eye of 'Maemi' has passed by near the ESROB site. Here, two vertical gray dashed lines denote local time of 03:00 and 13:00.

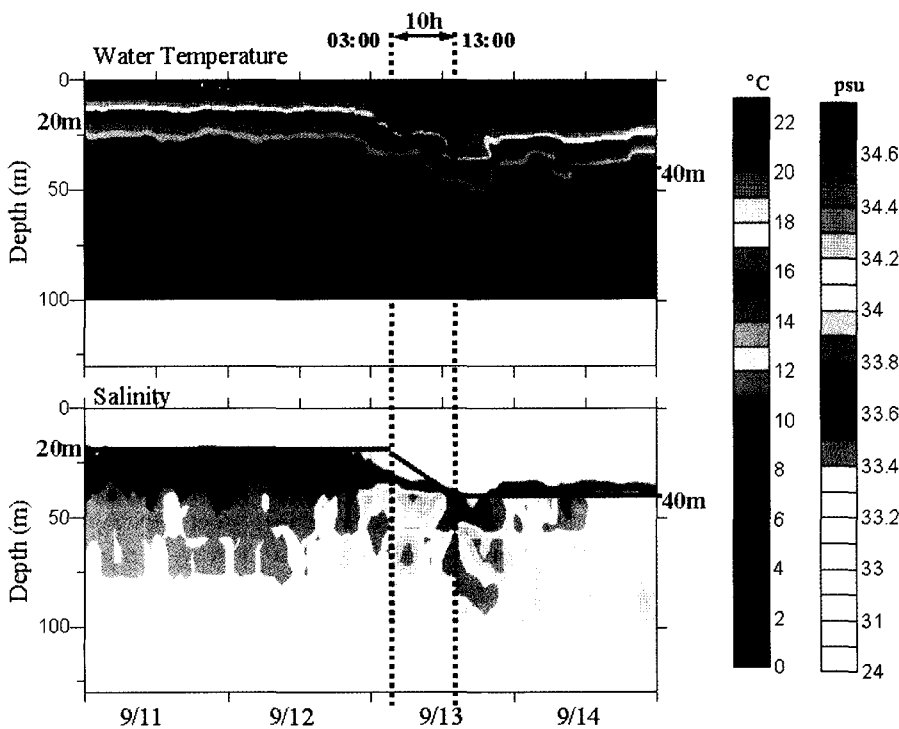


Fig. 3. Time-depth contours of water temperature and salinity during the period same as in Fig. 2.

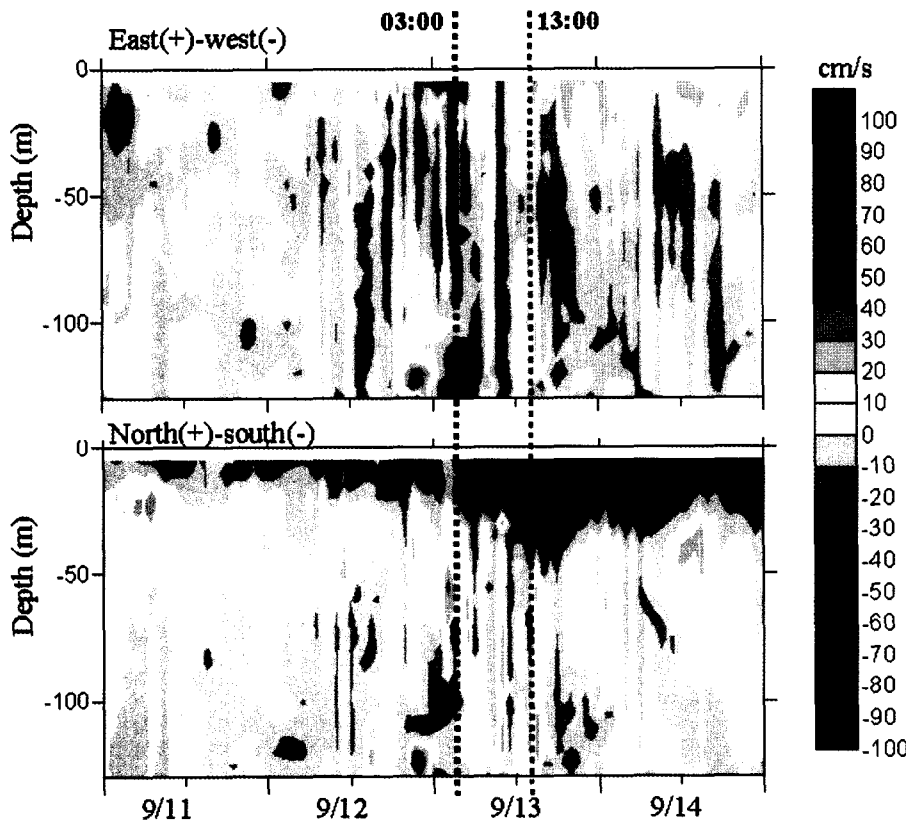


Fig. 4. Time-depth contours of horizontal currents (east-west and north-south components) during the same period as in Fig. 2.

우세하였고, 풍속은 5 m/s 내외의 크기로 기록되었다. 표층수온과 5 m 수심 수온은 각각 약 22°C와 21°C였고, 기온과 기압은 각각 20.5-22.5°C, 1011-1014 hPa 범위의 변화를 보였다. 파고는 잔잔하여 유의파고 뿐만 아니라 최대파고도 1 m 이내였다.

수심별 수온의 시간에 따른 변화를 보면(Fig. 3), 11일 정오에 수온은 5 m 수심에서의 21°C로부터 수심에 따라 감소하여 40 m에서 약 8°C 이하가 되었으며, 80 m 이심에서는 3°C 이하의 찬 냉수가 채워져 있었다. 염분은 표층에 극저염수(<33.5 psu)가 약 20 m 두께로 채워져 있었고, 그 이심에서는 약 34 psu(100 m 수심에서 34.04 psu)의 상대적으로 일정한 값을 가졌음을 알 수 있다. 11일 하루동안 수심별로 측정된 평균유속벡터는 5 m 수심에서 남남동향으로 약 14 cm/s, 50 m 수심에서는 북북동향으로 약 5 cm/s, 그리고 100 m 수심에서는 1 cm/s 이내의 크기를 가졌다. 시간적인 유속 변동폭은 상층에서 약 30 cm/s 내외, 하층에서는 10 cm/s 이내였다(Fig. 4).

태풍 매미에 대한 연안해양의 반응 관측

태풍 매미의 눈이 부이에 접근하면서 기상자료에 변화가 나타나 가장 근접했던(부이에서 남동향으로 약 62 km 거리까지 접근) 9월 13일 03시경에는 기압과 풍속이 각각 최소와 최대값에 이르렀다(Fig. 2). 즉, 기압은 03시경 980 hPa로 감소되었고, 이때 풍속은 약 20 m/s(순간최대 풍속 25 m/s)에 이르렀다. 파고도 점차 증가하여 이로부터 한 시간 뒤인 04시경에 최대가 되었으며 이때 유의파고는 4 m 그리고 최대파고는 9 m에 달하였다. 매미의 눈

이 통과한 뒤에는 기압이 다시 가파르게 증가하고, 풍속 및 파고도 빠르게 감소하는 등 기상 및 파랑이 급격히 정상으로 회복되어, 전형적인 특성을 유지하였다.

표층수온과 5 m 수심에서의 수온 변화를 비교하면, 매미의 눈이 근접하기 전에는 약 1°C의 차이를 보이다가 매미의 눈이 접근하면서 점차 줄어들어 거의 같아졌는데 이것은 눈이 근접하면서 강풍에 의해 표층 혼합층이 적어도 5 m 이상의 두께로 발달했음을 의미한다. 매미의 눈이 근접하면서 표층과 5 m 수심의 수온 모두 점차 감소하다가 03시경부터는 급격히 감소하여 13시경에 20°C 이하로 일시적으로 떨어졌다. 그렇지만 기온은 강한 시간 변동폭에도 불구하고 전체적으로는 증가하여 해양표층 수온보다 더 커졌으며, 이는 매미의 눈 통과를 전후로 하여 해양으로부터 대기로의 열속이 점차 커졌음을 의미한다. 약 2°C 정도 일시적으로 감소했던 표층과 5 m 수심 수온은 매미의 눈 통과 10시간 뒤인 13시경부터 빠르게 회복하기 시작하여 이후 표층과 5 m 수심에서 약 21.5-22.0°C로 유지되었다.

매미의 눈이 통과하면서 수온이 소폭(2°C) 감소했던 표층과 달리 수온약층 부근(20-40 m)에서는 수온이 대폭(약 10-20°C) 증가하였다. 13일 03시 이후 13시까지 10시간동안 수온약층 부근 수심들에서 수온의 감소에 따라 등수온선이 약 20 m 깊어지는 것을 Fig. 3(up)에서 확인할 수 있다. Fig. 3(down)은 수심별 염분의 변화를 나타내는데, 표층 부근의 극저염수(<33.5 psu) 두께가 12일 20시경부터 두꺼워지기 시작하여 03시 이후 계속 두꺼워지고 13시경에는 약 40 m 두께로 증가했음을 알 수 있다.

수심별 유속자료에서도 이러한 수심별 수온·염분의 변화와 일

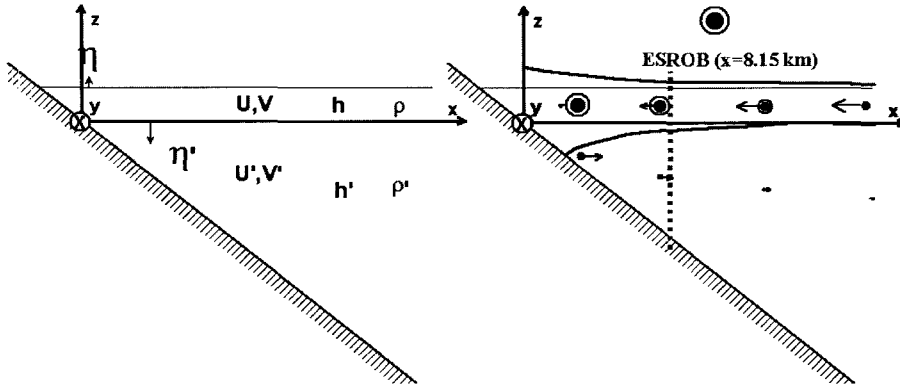


Fig. 5. (a) Schematic views of the analytic model by Csanady (1984) with variables and the coordinates noted. (b) Schematic diagram for the structure of the model results 10 hours later from impulsive (negative) alongshore wind-stress on the surface, where the location of the ESROB (x=8.15 km) is noted with gray colors.

관되게 13일 03시경까지 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다가, 그 이후로 약 10시간동안 상층에서 점차 남남동향류가 강해져 약 1.0 m/s에까지 이르렀고(Fig. 2 및 Fig. 4), 그 남남동향류층의 두께도 점차 두꺼워져 13시경에는 약 40 m에까지 이르렀다(Fig. 4).

연안해양 반응에 대한 간단한 해석모형

태풍 매미의 눈이 동해 연안을 가로질러 통과한 직후 10시간 동안 나타난 연안해양 변화의 특징을 설명하기 위해 여기서는 간단한 해석 모형을 이용하였다. 이 모형은 Csanady(1984)에 의해 제안되었으며, 이는 해안선방향으로 해표면 표층에 바람응력이 있을 때, 일정한 기울기의 해저경사면 위에서 연안 이층 해양의 반응에 대하여 해석적으로 접근한 모형이다. 이 모형을 적용하기 위해 도입한 좌표계와 단면도는 Fig. 5(left)와 같다. 여기서 \$x, y\$ 방향은 각각 연안을 가로지르는 방향과 연안에 수직인 방향을 의미하고, 부이가 위치한 해역의 해안선을 고려하여 이들은 각각 동북동방향과 북북서방향을 양의 방향으로 하였다. 사용한 해저면 기울기(\$s\$), 바람응력의 크기(\$\tau_y\$), 상·하층의 밀도(\$\rho, \rho'\$)와 두께(\$h, h'\$), 그리고 코리올리 계수(\$f\$) 등은 Table 1에 정리하였다. 방정식은 상·하층 각각의 \$x\$방향과 \$y\$방향의 운동방정식 및 연속방정식의 총 6개 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} - fV = -g(h+sx)\frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fU = -g(h+sx)\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial t}(\eta - \eta')$$

$$\frac{\partial U'}{\partial t} - fV' = -gsx\frac{\partial \eta}{\partial x} - \epsilon gsx\frac{\partial \eta'}{\partial x}$$

$$\frac{\partial U'}{\partial t} + fU' = -gsx\frac{\rho}{\rho'}\frac{\partial \eta}{\partial y} - \epsilon gsx\frac{\partial \eta'}{\partial y}$$

$$\frac{\partial U'}{\partial x} + \frac{\partial V'}{\partial y} = -\frac{\partial \eta'}{\partial t}$$

(1)

이로부터 Csanady(1984)가 구한 6개 변수 \$\eta, \eta', U, U', V\$ 및 \$V'\$에 대한 일시해(transient solution)는 아래와 같다.

$$\eta = -\frac{\tau_y}{\rho\sqrt{g(h+sx)}}t\left[e^{-x/R1} + \sqrt{\frac{\epsilon(h+sx)^2}{shx}}e^{-x/R2}\right]$$

$$U = \frac{\tau_y}{\rho f}\left[1 - \frac{h}{h+sx}e^{-x/R1} - \frac{sx}{h+sx}e^{-x/R2}\right]$$

$$V = \frac{h}{h+sx}\frac{\tau_y}{\rho}t\left[e^{-x/R1} + \frac{sx}{h}e^{-x/R2}\right]$$

$$\eta' = -\frac{\tau_y}{\rho\sqrt{\epsilon sghx/(h+sx)}}t\left(\frac{sx}{h+sx}\right)\left[\sqrt{\frac{\epsilon(sx)}{h}}e^{-x/R1} + e^{-x/R2}\right]$$

$$U' = \frac{sx}{h+sx}\frac{\tau_y}{\rho f}\left[e^{-x/R1} + e^{-x/R2}\right]$$

$$V' = \frac{h}{h+sx}\frac{\tau_y}{\rho}t\left[e^{-x/R1} - e^{-x/R2}\right]$$

(2)

여기서 \$\eta\$와 \$\eta'\$는 해면고도와 상·하층 경계의 고도, \$U, U'\$와 \$V, V'\$는 각각 상·하층 \$x\$와 \$y\$방향의 수심적분된 유속(수송)이며, \$R1\$과 \$R2\$는 각각 아래와 같이 표현되는 순압 및 경압 로스비 변형 반경을 나타낸다.

$$R1 = \sqrt{g(h+h')}/f = \sqrt{g(h+sx)}/f$$

$$R2 = \sqrt{\epsilon gh'h'/(h+h')}/f = \sqrt{\epsilon sghx/(h+sx)}/f$$

(3)

연안으로부터 충분히 멀리 떨어진 경우(\$x \gg R1\$)를 가정하면, 아

Table 1. Constants used in this study for the Csanady(1984)'s model

Parameter	Value	Unit
\$h = h_0\$	20	meters
\$s\$	0.0135	
\$f\$	\$8.85 \times 10^{-5}\$	(rad)/s
\$\rho\$	1020.48	kg/m ³
\$\rho'\$	10.27.26	kg/m ³
\$\epsilon = \frac{\rho - \rho'}{\rho}\$	0.0066	

래와 같이 그 해가 상층에서 x 방향으로만 에크만 수송이 있고 그 외 다른 수송이나 해수면 구조는 없는 것으로 근사화 된다.

$$U \approx \frac{\tau_y}{\rho f}, \eta \approx \eta' \approx U' \approx V \approx V' \approx 0 \quad (4)$$

또한 충분히 연안에 근접($x \ll R2$)하여 순압성분과 경압성분이 모두 중요해지는 경우,

$$\eta \approx -\frac{\tau_y}{\rho \sqrt{g(h+sx)}} t \left(\frac{\sqrt{hsx} + \sqrt{\epsilon(h+sx)}}{\sqrt{hsx}} \right) \quad (5-1)$$

$$\eta' \approx -\frac{\tau_y}{\rho \sqrt{\epsilon s g h x / (h+sx)}} t \left(\frac{sx}{\sqrt{h+sx}} \right) \quad (5-2)$$

$$V \approx \frac{\tau_y}{\rho} t, U \approx U' \approx V' \approx 0 \quad (5-3)$$

와 같이 되어 상층에서 y 방향으로만 수송이 존재하고 x 방향 수송이나 하층에서의 수송은 없는 것으로 근사화 된다.

모형 결과 및 토의

위의 (식 5-3)으로부터 y 방향 상층 수송은 연안에(내부 로스비 변형반경 거리보다) 충분히 가까운 거리에서는 가해진 바람응력과 시간에 비례함을 알 수 있었다. 만약 음의 y 방향으로 20 m/s의 바람 (약 -0.8 N/m^2 의 바람응력)이 10시간 동안 가해졌을 경우, 상층에서 음의 y 방향으로 약 150 cm/s의 유속을 얻어 정량적으로 일치하는 것은 아니나 그 규모가 실제 관측치의 규모에 근접하게 된다. 이 때, 하층 유속은 모두 0으로 근사되는데(식 5-3), 부이에서도 하층 유속은 10 cm/s이내의 매우 작은 값을 보여 모형의 적용 가능성이 높음을 시사했다. 이때, 상·하층의 경계면은 $\tau_y / \rho \sqrt{\epsilon s g h x / (h+sx)}$ ($sx/h+sx$)와 같이 근사 되는데(식 5-2), 10시간 뒤($t = 10 \text{ h}$)의 값을 계산해보면 약 -20 m (음의 부호는 경계면의 하강을 의미)가 되어 그 방향과 규모에서 역시 관측치와 유사한 크기를 가진다. 그러나 식 5-3으로부터 계산된 근사해의 상층 유속 추정치, 약 150 cm/s는 실제 부이 측정값인 100 cm/s에 비해 약 50 cm/s나 더 크고, 하층유속 추정치들, 0 cm/s는 실제 부이 측정값들에 비해 작다. 이 차이들은 근사해가 연안에 매우 가까운 거리($x \ll R2$, 여기서 $R2$ 는 10-20 km 범위에 해당)에서만 성립하는 값들임을 감안할 때, 부이 위치가 이로부터 크게 떨어진 탓에 기인한 차이로 볼 수 있다. 뒤에서 언급된 일반해(식 2)로부터 계산된 결과는, 실제 부이 위치($x=8.15 \text{ km}$)에서 정량적인 추정치들이 근사해(식 5)의 결과보다 매우 관측치에 근접하여 모형의 적용 가능성을 좀 더 높여주고 있다. 또, 태풍 통과 직후 약 10시간동안 바람은 대체로 연안에 평행한 방향으로 불었는데(Fig. 2에서 13일 03:00-13:00 동안의 풍향이 270-360 방향-북서풍-으로 지속됨), 이것 또한 모형의 가정에 타당하여 그 적용 가능성을 높였다. 그러나, 뒤에서도 언급되지만 풍속은 실제로 태풍의 눈이 통과하고 나서 서서히 작아져 10시간 뒤에는 태풍통과전의 수준으로 떨어지는데(Fig. 2), 이 모형에서는 시간에 따라 변하는 바람응력을 고려하지 못하여 이로인한 오차가 관측결과와의 차이를 가져온 것

으로 예상할 수 있다.

Fig. 5(right)는 구한 해로부터 단면 모식도를 나타낸 것이다. 정성적으로는 매미의 눈이 통과하면서 그 경로의 서쪽(뒤에서 보았을 때)에 위치한 동해시 부근 연안역에 강한 북서풍계열 바람이 남동향의 강한 바람응력(매우 강한 음의 τ_y)을 해표면에 가하게 되고, 표층에서는 연안쪽으로의 에크만(Ekman) 수송이 일어나지만 그 크기는 연안에 가까워지면서 점차 작아져 원점($x=0$)에서 0이 된다. 해면은 연안쪽에서 상승, 상·하층 경계면은 연안쪽에서 하강하며, 하층에서는 외해쪽으로의 수송이 일어나는 전체적으로 연안침강(coastal downwelling) 형태의 반응을 일으키게 된다. 하층은 그 두께가 상층에 비해 두껍기 때문에 같은 수송량(부호는 반대)에도 불구하고 상층에 비해 유속의 크기가 매우 작아지게 된다. 또, 연안쪽이 외해쪽에 비해 고압이 되면서 음의 y 방향으로 지형류가 유지되는데, 이것이 연안침강과 연관된 상층 연안제트류(coastal jet relevant to the coastal downwelling)로 해석될 수 있다. 실제 부이에서 관측된 특성에 근거하면, 매미의 눈이 근접하면서 표층 냉각이 일어나다가, 13시 이후 표층 수온이 다시 빠르게 증가하며 회복되었는데, 이것은 알려진 바와 같이 초기에 열역학 과정(증발열 등에 따른 해양 표층의 열손실 등)에 의해 표층수온냉각(Sea Surface Cooling)이 발생하다가(Kwon, 2003; Hong, 1999), 연안침강을 일으키는 강풍에 의해 표층에서 연안쪽으로 수송이 형성되어 외해역 표층의 난수괴가 연안쪽으로 유입함에 따라 나타난 현상으로 볼 수 있다. 또, 상·하층의 경계에 해당하는 수온약층의 수심이 태풍 매미의 눈이 통과한 뒤 약 10시간 동안 점점 깊어졌는데, 이것도 모형의 연안침강과 연관된 상·하층 경계면의 하강으로 설명될 수 있다. 마지막으로 매미의 눈이 통과한 뒤에 표층에서 강한 남남동향류가 생성되어 그 두께가 두꺼워졌는데, 연안쪽으로의 수송과 연안에 평행한 남동향 제트류로 분해함으로써, 모형 결과와 일관된 정성적 해석이 가능하다.

좀 더 정량적으로는, 10시간 후 해의 x 방향 구조들 (Fig. 6)에서 부이위치($x=8.15 \text{ km}$)의 x , y 방향의 유속값들(U/h , U'/h , V/h , V'/h)과 그 수직구조 (Fig. 7), 그리고 상·하층의 경계면 하강값(η')이 실제로 측정된 수치들과 유사함을 확인할 수 있다 (Fig. 6). 단, 여기서도 연안에 아주 근접한 영역에서는 근사해(식 4-6)와 유사해짐을 확인할 수 있다. Fig. 3에는 부이에서 측정된 수온·염분의 수심 및 시간에 따른 변화와 더불어 여기서 계산된 η 의 해(회색선)를 함께 나타내었다. Fig. 7의 유속 수직구조에서 굵은 점선과 굵은 실선으로 표시한 곡선들은 각각 태풍 매미의 눈이 통과한 직후인 9월 13일 03시부터 통과 후 10시간 뒤인 9월 13일 13시경에 해당되는 유속 수직구조들이며, 회색 실선은 모형에서 계산된 유속구조이다. 13시경에 해당하는 유속수직구조(굵은 실선)는 모형에서 계산된 구조(회색)와 유사성을 보였다.

그러나 이 간단한 해석 모형만으로 실제 매미 통과 시에 부이에서 측정된 자료에 나타난 복잡한 연안해양 변화를 사실적으로 모의하기에는 무리가 있으며, 그것은 Csanady의 해석 모형이 가지는 한계로 볼 수 있다. 실제로는, 표층에 10시간동안 일정하게 20 m/s의 바람이 가해진 것이 아니라 시간에 따라 점차 그 크기가 증가하였다가 감소한 바람응력이 가해졌고(Fig. 2) 이 시간변화는 이 모형에서 고려되지 못하였다. 또한 x 좌표의 원점을 수심 20 m 되는 해역으로 하고 그 이심의 해역은 모두 벽(solid wall)으로 처

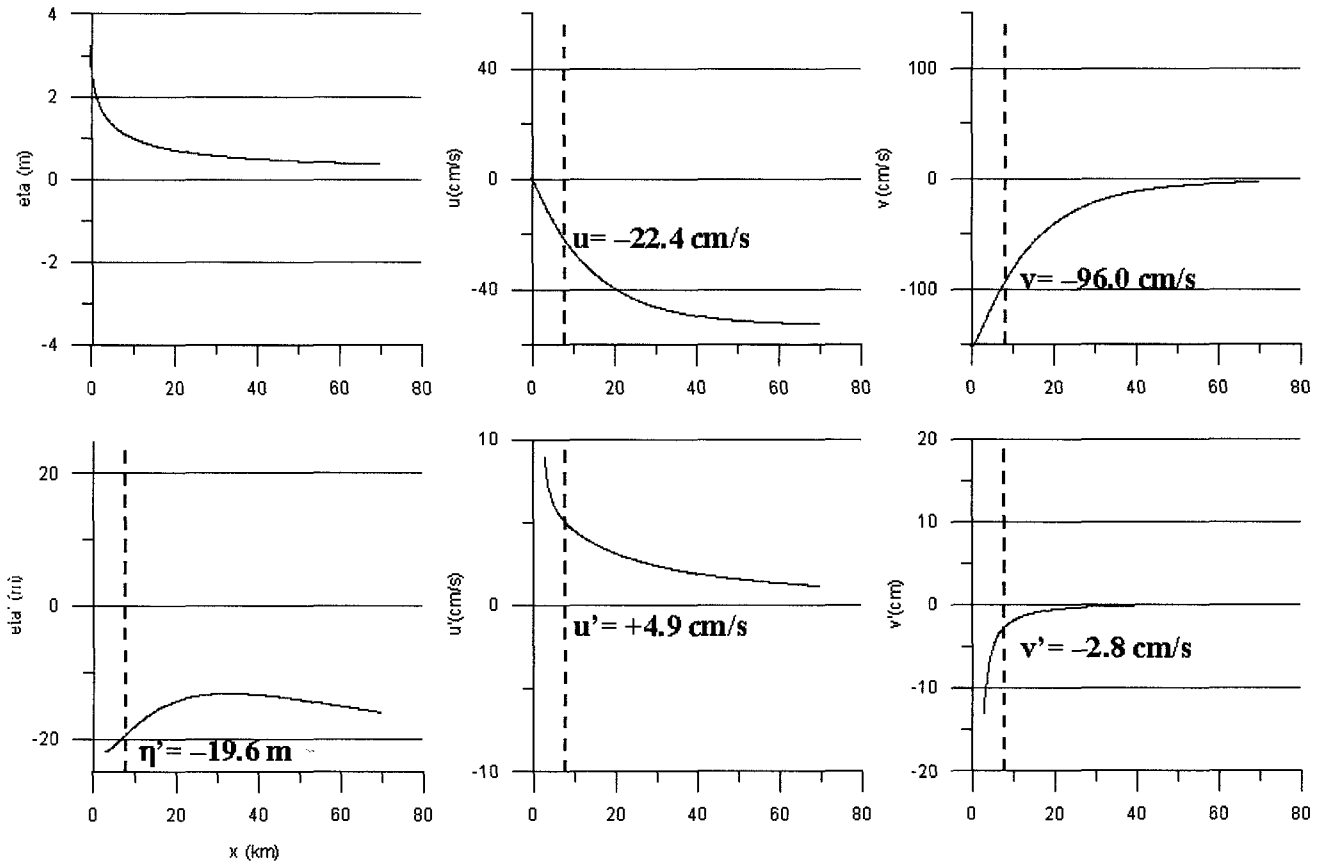


Fig. 6. The offshore structure of the model solution for surface elevation, interface between the layers, and alongshore and offshore currents in both layers, where dashed vertical lines represent the ESROB location ($x=8.15$ km).

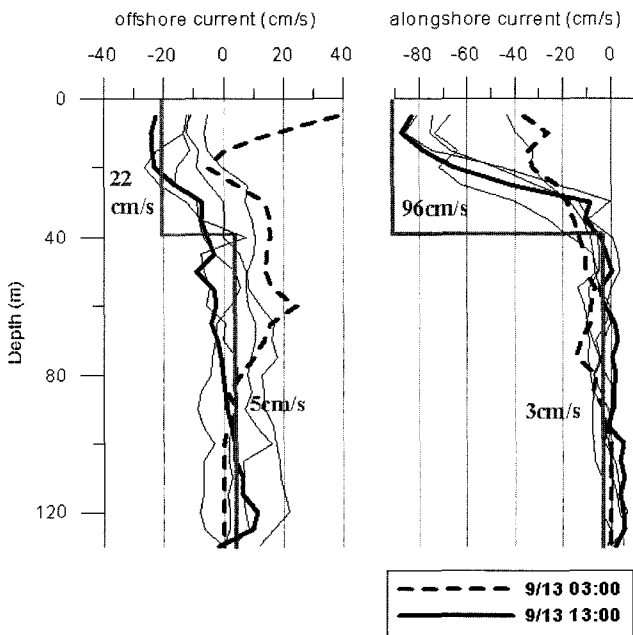


Fig. 7. Vertical structures of offshore and alongshore currents measured from the ESROB on September 13 from 03:00 (thick dashed lines) to 13:00 (thick solid lines) every two hours (thin solid lines) and the model solutions for those currents (gray lines) with the values at the ESROB location noted together (gray numbers).

리함에 따른 오차도 존재할 수 있다. 아울러 본 모형에서 표층 냉각 등의 열역학과정에 대한 고려는 전혀 이루어지지 않았다. 좀 더 실제적인 모의실험을 하기 위해서는 3차원 좌표계 하에서 사실적인 해저지형과 성층화, 태풍의 눈 이동에 따른 바람과 열속의 시간변화 등을 포함하여 수치적인 모형을 적용할 때에야 가능할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 매미의 통과에 따른 동해시 연안해양의 급작스러운 변동특성을 간단한 해석모형을 통해 정량적으로 고찰함으로써 그 역학을 이해하는 데에 기여했다는 점에서 본 연구의 의의를 찾을 수 있겠다. 본 연구결과로 제시된 바와 같이 태풍에 대한 연안해양의 반응은 외해역에서와 달리 해안선의 존재와 얕은 수심 등의 이유로 태풍과 연관된 강풍에 크게 좌우되는 것으로 사료된다.

관측치에 나타난 변동특성과 모형결과를 비교한 10시간의 시간 규모는 마찰적용 시간규모(frictional adjustment time scale)와 연관된 것으로 판단된다. 본 모형의 일시해(transient solution)도 마찰적용 시간규모내에서만 존재할 수 있다. 이 해역에서 통상의 y 방향 풍속(약 5 m/s 내외의 크기)자료와 부근 수심 약 20-30 m되는 곳들에 계류하여 얻은 y방향 유속자료와의 회귀분석 결과는 통계적으로 약 9-15시간 사이의 시간지연(바람의 위상이 빠름)에서 최대상관관계를 가지며(Nam *et al.*, 2002), 이는 마찰적용 시간규모를 $H/2\sqrt{c_d\tau_y/\rho}$ 로 정의할 때(Csanady, 1984) 주어진 바람응력과 수심에 대한 이론적인 추정치 9-13시간과 매우 가깝다. 부이에

서 태풍 매미의 눈 통과 시 측정된 자료에서는 풍속이 약 4배 정도 증가했지만 수심 또한 약 4배가 되어 비슷한 마찰적용 시간 규모를 가지게 된다. 통상의 y방향 풍속변화와 부이에서 측정된 유속과의 시간지연은 통계적으로 뚜렷하지 않지만 풍속이 약 4배 감소하였으므로 4배정도 더 긴 약 40시간 정도로 사료된다.

결 언

태풍 매미 통과 기간동안 서울대학교 동해 실시간 해양관측 부이(ESROB)에서 기상 및 해양의 급격한 변화를 관측하였다. 태풍 매미의 눈이 부이에 가장 근접(약 62 km 거리)하여 통과할 때(9월 13일 03시경) 기압이 최소가 되어 980 hPa를, 풍속은 최대가 되어 20 m/s(순간 최대 풍속 25 m/s)를 기록했다. 파고는 이로부터 약 한 시간 뒤인 04시경 최대가 되어 유의파고 4 m, 최대파고 9 m를 기록하였다. 표층부근에서 측정된 유속은 03시경 이후 점점 남남동향류가 강해져 약 10시간 뒤인 13시 경에는 1.0 m/s에 이르렀고, 그 두께도 점차 두꺼워져 40 m에 이르렀다. 강한 남남동향류를 보이는 수심층에서 고온의 극저염수가 나타나며 그 층의 두께도 유속과 일관되게 점점 두꺼워져 같은 기간 동안 20 m에서 40 m로 변화했다. Csanady(1984)에 의해 제안된, 연안에 평행한 방향 표면 바람응력에 대한 일정 경사면 위의 이층유체 해석모형으로부터 태풍 매미의 눈 통과 10시간 후의 관측치와 부합하는 유속 수직구조와 상·하층 두께에 대한 정량적인 추정치를 얻을 수 있었다. 모형 결과로부터 태풍 매미의 눈이 근접하며 나타난 강한 남동향의 표층 바람응력이 연안침강 형태의 반응을 일으켜, 상층에서 연안쪽으로의 수송이 일어나고 연안쪽 해면은 상승, 상·하층의 경계면은 하강하면서 이와 연관된 상층 연안 제트류가 형성된 것으로 해석 가능하다. 실제 부이에서 측정된 결과를 모의하기 위해서는 이 모형에서 고려하지 않은, 열역학 과정을 비롯한 3차원 좌표계에서의 좀 더 실제적인 해저지형과 성층화, 그리고 태풍의 눈 이동에 따른 바람과 열속의 시간변화 등을 종합적으로 고려하여 수치적으로 풀어야 할 것이다. 본 연구에 사용한 해석모형의 시간 영역은 10시간으로서 이는 태풍 매미와 같은 강풍(20 m/s)에 대한 이 해역의 마찰적용 시간규모와 유사하다. 통상의 바람(~5 m/s)에 대한 이 해역의 마찰적용 시간규모는 이보다 긴 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업(2000-N-NL-01-C-012)과 기상청 기상연구소 ARGO 프로그램을 통해 지원을 받았

으며, 제1저자는 부분적으로 교육부 두뇌한국21 사업의 지원도 받아 이에 대한 감사를 표시합니다. OCEAN Laboratory Contribution No. 24.

참고문헌

- 문일주, 오임상, 2003. 파랑-해양순환 접합모형을 이용한 폭풍해일에 대한 파랑과 조석의 영향 연구. *한국기상학회지*, 36권 5호, 563-574.
- Brink, K.H., 1989. Observations of the response of thermocline currents to a Hurricane. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1017-1022.
- Csanady, G.T., 1984. Circulation in the coastal ocean, D. Reidel publishing company.
- Hong, C.H., 1999. A three-dimensional numerical study of effects of Typhoon on oceanographic conditions in the Korea Strait. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **34**, 73-85.
- Kwon, Y.O. and S.C. Riser, 2003. The upper ocean response to North Atlantic Hurricanes and tropical storms, 1997-2001, *J. Geophys. Res.* (in revision)
- Lee, D.K. and P. Niler, 2003. Ocean response to Typhoon Rusa in the south sea of Korea and in the East China Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **38**, 60-67.
- Nam, S.H., K.W. Kim, H.R. Kim, C.B. Cho, S.J. Lyu, Y.G. Kim and K. Kim, 2003. Development of ESROB (East Sea Real-time Ocean Buoy), PICES (North Pacific Marine Science Organization) Scientific Report Series for the MONITOR workshop in 11th annual meeting.
- Nam, S.H. and K. Kim, 2002. 2-5 day band coastal ocean variability in winter of 1997-98 and 2000-01 off the Donghae city, Korea, *Proc. Spring Meeting Kor. Soc. Oceanogr.*, Kwangju, Korea.
- Taira, K., S. Kitagawa, H. Otake and T. Asai, 1993. Observation of temperature and velocity from a surface buoy moored in the Shikoku Basin (OMLET-88)-An oceanic response to Typhoon-. *J. Oceanogr.*, **49**, 397-406.

2004년 1월 12일 원고접수

2004년 5월 3일 수정본 채택

담당편집위원: 강석구