

하계 동중국해 북부 해역에서의 해수 혼합

장성태* · 이재학 · 홍창수
한국해양연구원 해양환경연구본부

Mixing of Sea Waters in the Northern Part of the East China Sea in Summer

SUNG-TAE JANG*, JAE HAK LEE AND CHANG SU HONG

Marine Environment Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea

하계 동중국해 북부 대륙붕 해역에서 해수 혼합을 연구하기 위하여 2005년 8월과 2006년 8월에 한국해양연구원 연구선 이어도호를 이용하여 해수 물성 및 난류 관측을 수행하였다. 유속 변형으로부터 산출한 난류운동에너지 소산율은 표층에서 10^{-7} ~ 10^{-4} , 저층에서 10^{-7} ~ 10^{-6} 와 수온약층에서 10^{-7} W/kg의 높은 값이 나타났다. 관측 자료는 표층의 경우 바람에 의해 지속적으로 혼합이 이루어짐을 보여주었다. 수온약층 하부에서의 높은 소산율은 내부파의 영향으로 판단된다. 저층의 높은 소산율은 저층의 탁도 분포의 경향과 일치하여 조류에 의한 해저면층 교란의 결과임을 시사해주었다. 바닥에서의 연직확산계수는 낮은 안정도와 높은 난류상태의 복합적인 영향으로 10^{-3} ~ 10^{-2} m²/s로 높은 값이 나타났다.

In order to investigate the mixing of sea waters on the continental shelf in the northern East China Sea, Korea Ocean Research and Development Institute conducted hydrographic surveys including turbulence measurements using the R/V Eardo in August 2005 and August 2006. The turbulent kinetic energy dissipation rates based on velocity shear measurements are estimated to be 10^{-7} ~ 10^{-4} , 10^{-7} ~ 10^{-6} , and 10^{-7} W/kg in the surface layer, bottom layer, and lower thermocline, respectively. The data sets suggest that surface layer water is being constantly mixed by winds. High dissipation rate in the lower thermocline seems to be caused by internal waves. The bottom layer with high dissipation rate also shows high turbidity, indicating the effect of tidal stirring turbulence. The vertical eddy diffusivities are 10^{-3} ~ 10^{-2} m²/s near the bottom, and these high values appear to arise from both the low stability and high turbulent mixing.

Keywords: East China Sea, Mixing, The turbulent kinetic energy dissipation rate, Brunt-Väisälä frequency, Vertical eddy diffusivity

서 론

대부분 수심 200 m 이내의 넓은 대륙붕으로 이루어진 동중국해는 쿠로시오(Kuroshio), 양자강유출수(Changjiang River Discharge), 바람, 대기와의 열교환 등 외부 인자의 지배를 받으며 해황의 계절 변동이 뚜렷하다. 일반적으로 동중국해 동쪽과 서쪽에 각각 분포하는 대마난류수를 비롯한 고염수와 중국연안수를 포함한 저염수가 계절에 따라 북서-남동방향으로 이동 분포한다. 겨울철에는 강한 북서풍에 의한 혼합으로 해수 물성이 수직적으로 균질한 특징을 나타내고, 여름철에는 상층은 태양 복사열과 연안수에 의한 고온, 저염수로 밀도가 낮아지고 저층에는 대마난류수 기원의 고염수 및 황해저층냉수의 영향을 받은 저온수가 분포하여 강한 성층을 형성한다. 동중국해 상층 해황에 영향을 미치는 양자강유출

수는 유출량의 연변화와 계절 변동이 크며(Shen *et al.*, 1998) 겨울에는 중국 연안을 따라 하구의 남쪽으로 흐르는 반면 여름에는 북동방향으로 확장하는 것으로 알려져 있다(Beardsley *et al.*, 1985).

여름철 양자강유출수는 동중국해를 통과하면서 주위 고염수와 혼합되어 염분이 낮은 양자강희석수(Changjiang Diluted Water)로 형성되는데 최근 관측에서는 염분 30 이하, 두께 10~20 m의 고립된 덩어리 형태로 분포하는 것으로 보고된바 있다(Lie *et al.*, 2003). 양자강희석수가 극저염수 형태로 제주도과 남해안에 도달할 경우 양식어장에 피해를 주기 때문에 연안어장 관리 등의 목적으로 저염수 분포 예측의 필요성이 높은바 이를 위하여 수괴의 이동 예측뿐만 아니라, 저염수의 고염화 과정의 한 요인이 되는 수직 혼합 과정의 이해도 필요하다. 최근 Matsuno *et al.*(2006)은 양자강희석수의 고염화 과정과 관련하여 동중국해 대륙붕단 해역에서 미세구조(micro structure) 관측 자료를 분석하여 수직 혼합에 의한 염분의 수직이동 가능성이 낮음을 제시한바 있다. 그러나 대륙붕

*Corresponding author: stjang@kordi.re.kr

역에서는 난류(turbulence) 관측이 아직 이루어지지 않아 정상적인 혼합 특성이 파악되지 않은 상태이다.

이 등(2000)은 동중국해 대륙붕상의 CTD 관측을 통하여 해저면 부근에 수온과 염분이 균질한 층이 있으며 이의 두께는 약 50 m 까지 이르고 있음을 보고한 바 있다. 이는 특정한 수괴가 해저면 부근에 분포하였거나 조류 등의 영향으로 활발한 혼합 결과 형성된 해저면 혼합층에 의한 결과로 볼 수 있다. Matsuno *et al.*(1994)은 동중국해 대륙붕단역에서 미세구조 관측 결과 해저경계층에서 수직확산계수가 $10 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 로 혼합이 활발함을 보여주었다. 해저면 경계층에서의 혼합은 열, 퇴적물 및 영양염 등 물질 순환에 크게 기여하는바 대륙과 대양 사이의 물질 이동 과정을 이해하고 물질 수지를 정량화하는데 동중국해 대륙붕 해저면 경계층 혼합 과정 연구의 필요성이 있다. 또한 바람에 의한 표층의 영향을 파악하고, 이를 판단할 수 있는 유용한 수치를 제시할 필요성이 있다.

지금까지 동중국해에서의 난류 혼합 연구는 CTD 관측 자료에 의한 정성적 접근만 있었을 뿐 미세구조와 관련한 난류 관측에 의한 연구는 수행되지 못하였다. 본 연구에서는 국내에서 처음 시도된 미세구조 관측 결과와 관측 자료로부터 산출된 혼합 관련 변수의 정량화 결과를 설명코자 하였다.

관 측

2005년 8월 21일부터 29일까지와 2006년 8월 12일부터 16일까지 한국해양연구원 연구선 이어도호를 이용하여 동중국해 북부인 북위 $31^{\circ}30' \sim 34^{\circ}15'$ 과 동경 $124^{\circ}15' \sim 127^{\circ}30'$ 해역에서 수심을 가로 지르는 선상에 관측정점을 선정하여 해수 물성 및 유동 관측을 실시하였다(Fig. 1). 해수 물성 관측은 SeaBird사의 911 CTD를 사용하였고, 실제 관측 소요 시간은 4일 이내로 최대한 동시성을 유지하도록 하였다. Fig. 1의 실선으로 표시된 관측선 b는 2005년과 2006년 관측에서 동일한 정점으로 선정하였다. 난류 관측은 미세구조 관측장비(Microstructure profiler)인 일본 Alec사 TurboMAP

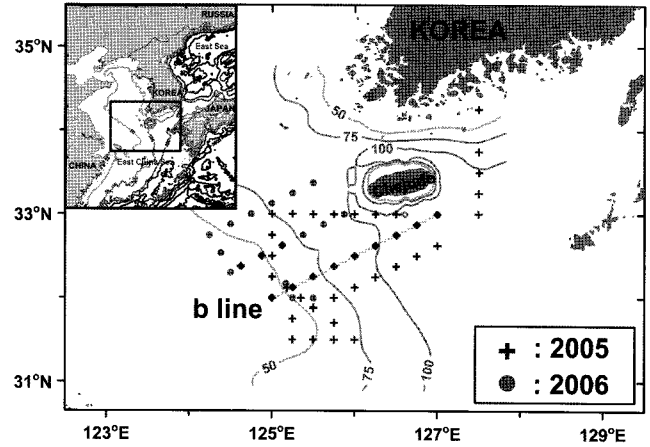


Fig. 1. Study area and station map in the northern East China Sea on 21-29 August, 2005 and on 12-16 August, 2006. Solid box indicates the study area and the bathymetry is shown with thin depth contours.

(TURBulence Ocean Microstructure Acquisition Profiler)을 이용하여 2005년과 2006년 모두 CTD 관측과 같은 정점들에서 실시하였다. TurboMAP은 자유 낙하하면서 유속 변동(velocity shear), 압력, 수온, 전기전도도, 탁도(turbidity)와 클로로필을 측정할 수 있다(Wolk *et al.*, 2002). 바람 및 기압 등 기상 자료는 연구선과 이어도 종합해양과학기지의 관측 자료를 사용하였다.

해수 물성 분포 특성

Fig. 2는 2005년과 2006년에 관측하였던 CTD 자료를 T-S도(T-S diagram)에 나타낸 것이다. 2005년 수온과 염분의 분포 범위는 각각 $11.1 \sim 29.6^{\circ}\text{C}$ 와 $29.4 \sim 34.7$ 로 나타났고, 2006년에는 각각 $12.1 \sim 31.1^{\circ}\text{C}$ 와 $25.0 \sim 34.5$ 로 나타났다. 2006년 하계 수온은 2005년 하계 수온에 비해 저층에서 1°C , 표층에서 1.5°C 정도 높은 특징을

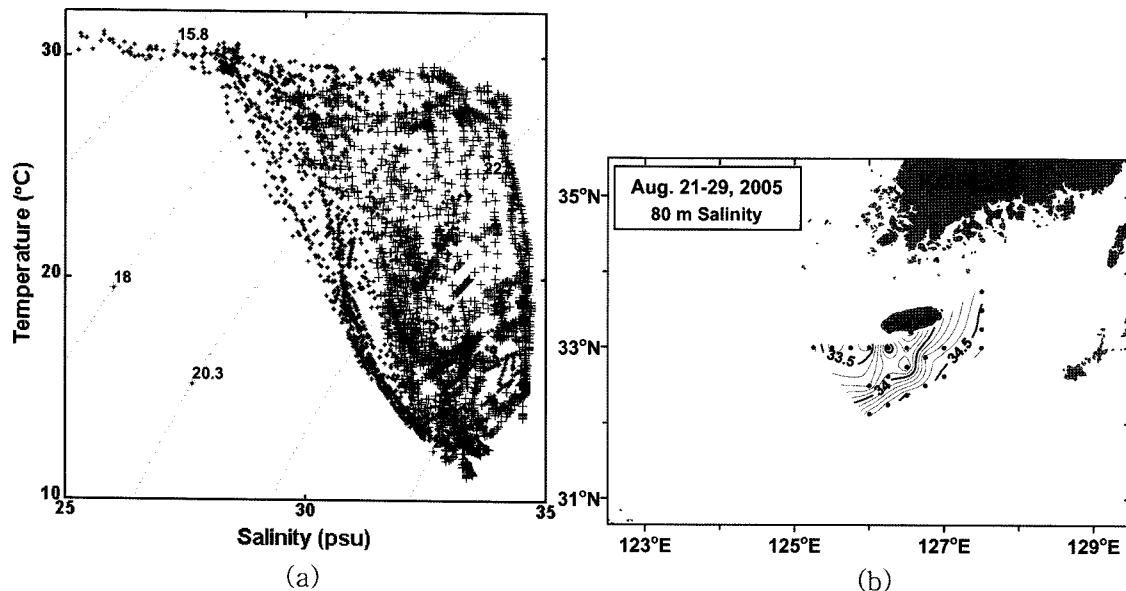


Fig. 2. (a) Temperature-Salinity Diagram in August 2005(+) and 2006(●). (b) Horizontal distribution of salinity observed at the 80 m depth in August 2005.

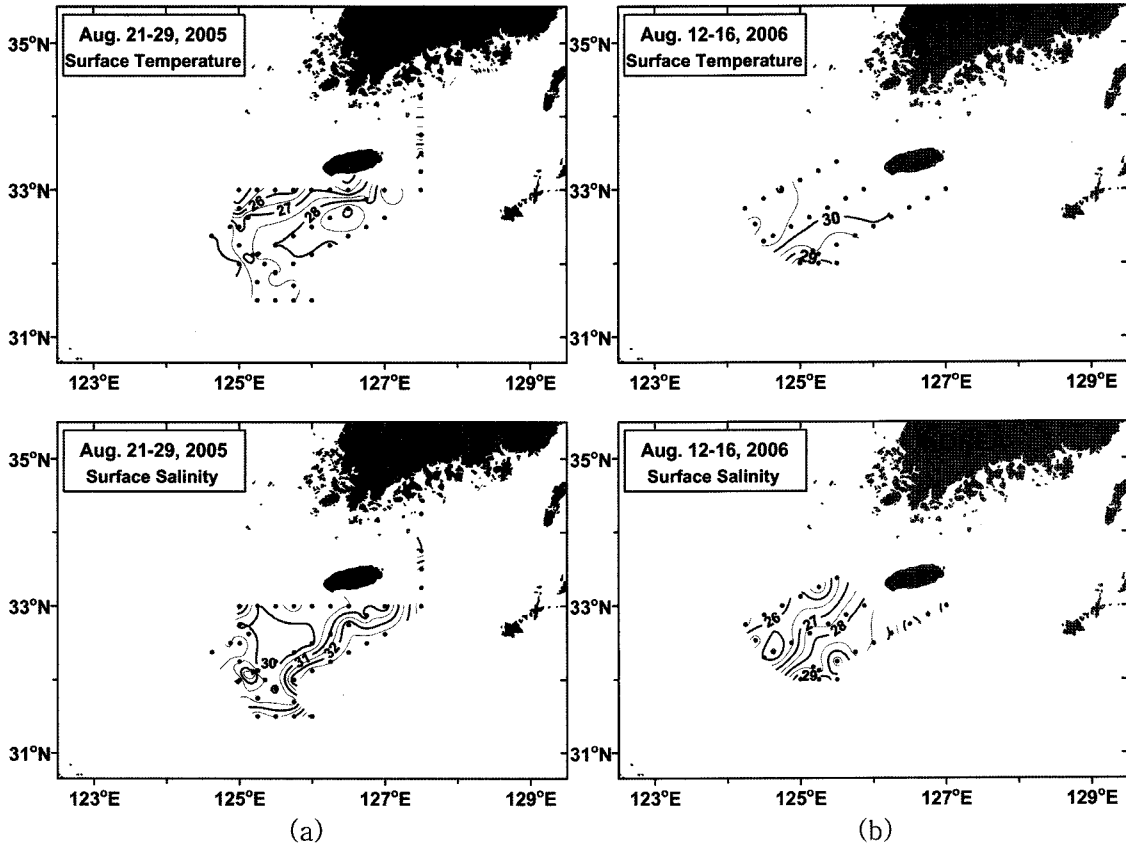


Fig. 3. Horizontal distributions of temperature and salinity observed at the surface layer in (a) August 2005 and (b) August 2006.

보여준다. 염분은 전반적으로 2006년이 2005년보다 낮게 나타나고 있는바 저층에서는 그 차이가 미약하나 표층에서는 4 이상의 차이를 보인다. 이는 2005년의 관측 시기가 2006년보다 10일 정도 늦어 양자강희석수가 고염화 되었거나 양자강희석수의 주 이동 방향이 달라 나타난 결과로 판단된다. 제주도 남쪽의 저층에는 두 관측 모두 34.0 이상의 고염수가 분포하고 황해저층냉수의 염분보다 높은 33.5~33.8의 등염분선은 저층의 대마난류수가 제주도 서쪽 해역에까지 분포하고 있음을 예상할 수 있게 한다(Fig. 2(b)).

Fig. 3에 2005년과 2006년 8월의 표층 수온과 염분의 분포를 각각 나타내었다. 표층 염분은 2005년과 2006년에 제주도 남동 해역에서 각각 32.0 및 29.0 이상으로 높게 나타났고 북서 방향으로 낮아지는 경향을 보여준다. 반면 수온의 경우 2005년은 관측 해역의 남동쪽에서 28 °C로 높고 북서 방향으로 낮아지는 경향을 보이지만 2006년은 관측 해역의 남쪽에서 29 °C 부근으로 낮고 북쪽 해역에서는 30 °C 이상의 높은 값을 보이고 있다. 염분 분포는 8월의 제주도 남동쪽 해역에서 대마난류의 영향으로 표-저층 모두 고염이 나타나고 서쪽으로 갈수록 표층 염분이 낮아져 표층 저염수(양자강희석수)가 서쪽으로부터 공급됨을 나타내는 일반적인 경향과 일치한다. 2005년 8월 관측 기간에는 30 이하 패치(patch) 형태의 저염수 핵이 나타나고 있지만, 2006년 8월 관측 기간에는 전 정점에서 29 이하의 저염수가 전선 형태의 모양으로 분포하였다. 표층 수온은 태양열 복사열로 인해 수평적으로 균질한 특징을 보이는 것이 일반적이지만 2005년의 경우 수온의 수평 변화가 커 태

양열 복사보다는 해수 흐름에 의해 표층 수온이 변화했을 가능성이 있다.

2005년과 2006년의 동일한 관측선인 제주도 남서쪽에서 남쪽에 이르는 정점에서(Fig. 1의 실선: 관측선 b) 수온과 염분의 수직 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 수온 분포는 표층으로부터 15~25 m 수심까지 28 °C 이상의 고온수가 분포하고 이어서 30 m 수심까지 강한 수온약층이 나타나고 있다. 저층은 15 °C 이하의 저층수가 2005년에는 얇고 외해 쪽으로 치우쳐 나타난 반면 2006년에는 관측점 b2~b7의 저층에서 보다 두껍게 분포하고 있다. 이는 황해저층냉수의 남쪽방향 확장에 연변화가 있거나 수온약층 하부의 수괴와 저층의 수괴 사이에 혼합 과정이 2005년에 보다 활발하였을 가능성이 있다. 해저면 부근의 균질층은 조석에 의한 혼합의 결과이거나 쿠로시오로부터 공급된 균질한 고염수(또는 황해저층냉수의 확장)가 분포하여 나타날 가능성이 있는바 난류관측 자료는 혼합의 결과가 우세함을 보여주었다(다음 절 참조). 염분 분포는 양자강에 가까운 서편에 저염수가 분포하고, 부분적으로 저염수핵들이 군데군데 나타나 수온 분포보다 복잡한 특징을 나타내었다. 쿠로시오 계열의 고염수는 2005년과 2006년 공히 관측점 b7~b9의 저층에 나타났다. 수심이 50 m 부근인 2005년 관측점 b2~b3와 2006년의 b1~b2에서 온도가 각각 16~20 °C와 14~20 °C로 등수온선들이 수직으로 형성되어 수괴 사이의 수직 해수 혼합이 활발할 것으로 예상된다.

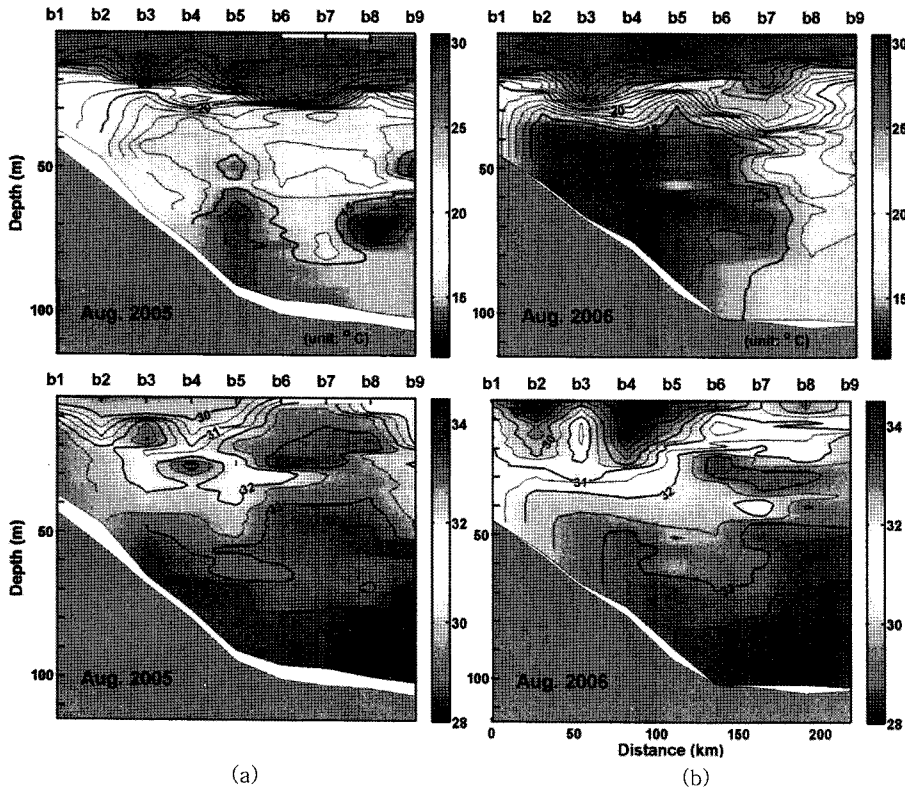


Fig. 4. Vertical distributions of temperature and salinity observed at the blue line in Fig. 1 in (a) August 2005 and (b) August 2006.

난류 특성

난류 변수

관측한 유속 변형 자료로부터 혼합의 정도를 나타내는 난류 운동에너지 소산율(the dissipation rate of turbulent kinetic energy: ϵ)을 다음과 같이 계산할 수 있다(Crawford and Osborn, 1979).

$$\epsilon = \frac{15}{2} \nu \overline{\left[\frac{\partial u'}{\partial z} \right]^2} \quad (1)$$

여기서 ν 는 동점성계수(kinematic molecular viscosity), u' 은 수평 유속 이상치(anomaly), 그리고 z 는 수직방향의 좌표이다. $(\overline{\quad})$ 은 장비의 통과 관측거리 평균을 의미한다(예, 3 m). 계산된 값으로

부터 연직 확산계수(vertical eddy diffusivity: K_z)를 추정할 수 있는데 본 연구에서는 Osborn(1980)의 수식을 사용하였다.

$$K_z = \gamma \frac{\epsilon}{N^2} \quad (2)$$

여기서 N 은 부력주파수(Brunt-Väisälä frequency, $N^2 = g/\rho(dp/dz)$)이고 γ 는 경험식을 통해 0.2로 정하였고, 일반적인 γ 는 0.18-2를 갖는다(Britter, 1974).

2005년 난류 관측 결과

2005년 8월 조사기간 중 일본 남쪽에서 발생한 태풍 마와(Mawar)의 영향으로 바람장의 변화가 있었다. Fig. 5는 연구선 이어도호

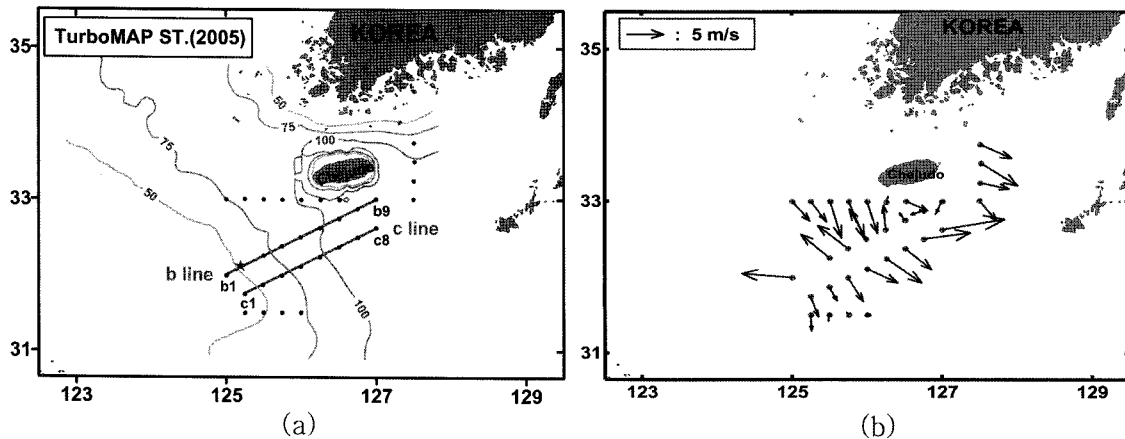


Fig. 5. TurboMAP Station maps on 21-29 August, 2005. (a) Bottom topography and locations of TurboMAP stations. A star mark denotes the Ieodo Ocean Research Station (IORS). (b) wind vectors measured at the R/V Eardo.

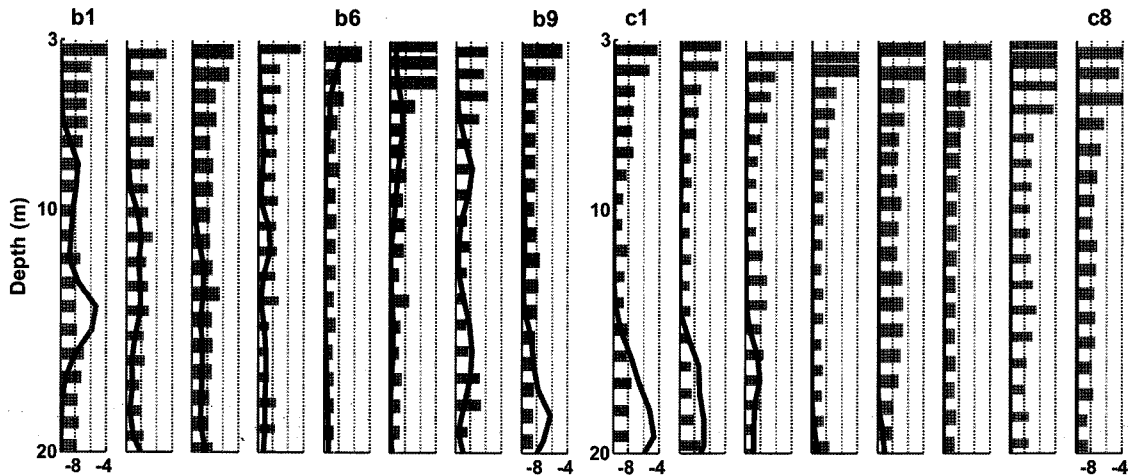


Fig. 6. Vertical profiles of the dissipation rate of turbulent kinetic energy (ϵ) and vertical density gradient (thick line) obtained with the turboMAP along transects b and c. The bar shows the value of ϵ and expressed a common logarithm. The minimum depth is 3 m.

에 장착된 기상 관측 장비로부터 측정된 바람을 TurboMAP 관측 정점에 도사한 것이다. 태풍 영향을 받기 전인 b 라인 관측시에는 하계의 특징인 남동풍이 최대 7 m/s로 불었고, 태풍의 영향을 받은 c 라인 관측시에는 풍향이 북서 계열로 바뀌고 풍속도 강하였다. Fig. 6은 TurboMAP 관측 자료로부터 산출한 표층 20 m까지의 ϵ 값 수직 분포이다. 그림의 막대 모양은 ϵ 의 크기를 나타내며 로그(log) 값으로 치환하였고, 굵은 실선은 각 수심에 대한 밀도차(density gradient)를 말하며 실선의 범위는 $0-1 \text{ kg m}^{-3}$ 이고 ϵ 와 동일한 축으로 구성하였다. $\log \epsilon$ 값이 -6 이상 되는 수심은 2005년의 경우 c 라인이 1~2 m 깊게 나타나 표층의 난류 상태가 바람 영향에 의한 것임을 보여주고 있다. 표층에서 20 m 수심까지 수괴의 안정도를 나타내는 $\log N^2$ 의 평균값은 b 라인에서 -3.1이고, c 라인에서 -4.4로 태풍이 지나가기 전이 훨씬 안정된 상태를 보여주고 있고, $\log \epsilon$ 의 평균값은 각각 -7.7과 -7.5로 나타났다. 관측점 b7의 경우 5 m 깊이 까지 $\log \epsilon$ 값이 -4 정도의 매우 큰 값을 보이나 수직방향으로 밀도가 변하는 것은 표층수의 염분 특성과 태양열 복사 등의 복합적인 영향으로 보이는 반면 c 라인은 전 관측점에서 밀도 혼합층이 15~20 m 이상으로 나타나 태풍 영향에 의한 강풍으로 혼합층이 형성되어 있었을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 효과적인 도사를 위해 상대적으로 매우 큰 값이 나타나는 표층 5 m를 제외하고 관측선 b와 c 상 정점별 ϵ 의 수직 분포를 보여주고 있다. 미세 규모의 혼합 상태의 수직분포를 보기 위해 관측선 b와 c에서 ϵ 와 수온의 수직 단면을 Fig. 7(a)에 나타내었고, 이 때 등수온선은 1°C 간격으로 표시하였다. 두 관측선 모두 표층과 저층의 ϵ 는 $10^7 \sim 10^6 \text{ W/kg}$ 로 높게 나타났고, 수온약층 아래에서도 상대적으로 높게 나타났다. 태풍이 지나간 후 관측한 c8 정점에서 바람이 9 m/s 로 불었고 6 m에서의 ϵ 가 $5 \times 10^5 \text{ W/kg}$ 의 높은 값이 나타난 반면, 태풍이 오기 전에 관측한 b1에서는 6 m/s의 바람에 $1 \times 10^7 \text{ W/kg}$ 로 나타나 표층의 혼합은 바람이 주도함을 알 수 있다. 수온약층은 15~30 m 사이에 존재하고, 수온약층 주변에서의 ϵ 는 부분적으로 주변 해수에 비해 10 배 이상 높은 값을 보였다. 일반적으로 밀도약층은 상하층간 해수의 수직방향 혼합을 억제하지만 수온약층 하부의 높은 ϵ 는 내부 조석

(internal tide)이나 내부파(internal wave) 소멸 과정에서 나타나는 난류 상태에 의한 영향으로 판단된다. 밀도의 수직구조상 강한 성층이 내부파의 발생 요건을 만족하고 있는바 Lee *et al.*(2006)은 이어도 해양과학기지 부근 해저면에 계류하였던 ADCP와 CTR7 자료를 통해 비선형 내부파가 저조시 자주 발생하였음을 보여준 바 있어 관측 해역이 전반적으로 내부파 발생이나 통과가 활발할 가능성이 높다. 내부파의 존재는 상층의 저염수가 주위 고염수와 혼합되는 과정에서 수평 혼합뿐만 아니라 내부파 영향에 의한 수직적 혼합도 무시할 수 없음을 암시한다.

저층 ϵ 의 높은 값은 조류에 의한 바다 교란의 영향으로 난류상태가 강함을 보여주고 있다. 특히, 탁도 관측치와 분포 경향이 일치하여 해저면 경계혼합층이 두껍게 형성되어 있음을 잘 보여주고 있다. 저층의 높은 ϵ 값은 조석에 의한 해저면 마찰의 영향으로 동중국해의 대륙붕단역에서 미세 관측을 실시하였던 Matsuno *et al.*(1994)도 조류에 의해 저층의 혼합이 활발함을 언급한 바 있다. 계산된 ϵ 와 관측한 탁도를 비교해보면(Fig. 7(b)), 상층의 탁도는 1 ppm 이하로 거의 나타나지 않았지만, 저층에는 64 ppm 정도의 높은 탁도를 보였다. Ahn *et al.*(2004)에 의하면 인공위성 해석 원격탐사 자료 및 현장 직접 관측된 자료로부터 동중국해 표층에서 부유 퇴적물(suspended sediment: 이 후부터 SS로 표기)의 농도가 낮더라도 해저면층의 SS 농도가 높다고 하였다. 저층의 높은 탁도와 높은 ϵ 의 상관성은 해저면 부근에서 조류에 의한 난류상태가 강화되어 혼합이 활발할 것임을 시사해준다. Fig. 8은 저층에서 관측한 탁도와 저층의 물을 채수하여 측정된 부유퇴적물의 수평 분포를 함께 표시한 것으로 부유퇴적물의 농도와 탁도가 높은 상관성을 보여주고 있고, 관측선 b의 이어도 과학기지 주변에서 두 값 모두 최대치를 보여 하계에 혼합이 활발함을 뒷받침하고 있다.

수온의 수직 단면에서 수온 역전 현상이 간간히 나타나는 바 정점 c7의 72 m와 80 m 수심에서 수온의 역전 현상이 나타났다(Fig. 9(a)). 수온 역전이 나타나는 수심의 수괴는 저온과 고염에 의해 밀도가 높아져, N^2 는 높고 ϵ 는 낮은 안정된 형태로 존재한다. 역전 현상이 두드러진 80 m의 최고 염분은 수온 역전층 아래에 존재하여 미세구조에 의한 혼합 과정이 있음을 시사해준다. 이러한

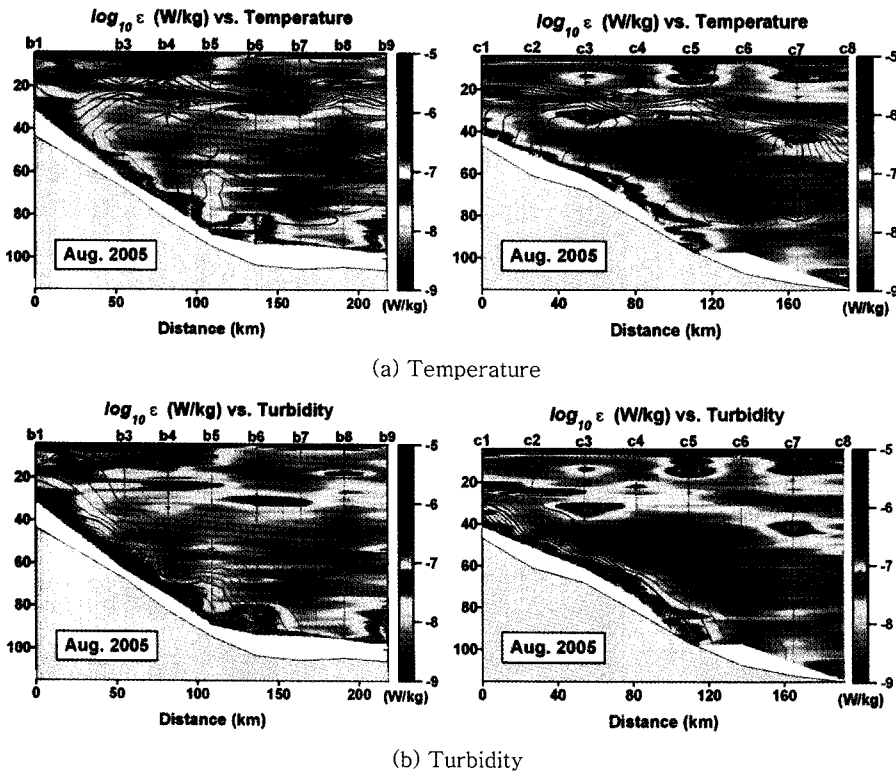


Fig. 7. Vertical contours of the dissipation rate along transects b and c. The black contour lines denote isothermal line at intervals 1°C, and turbidity line at intervals 10 ppm.

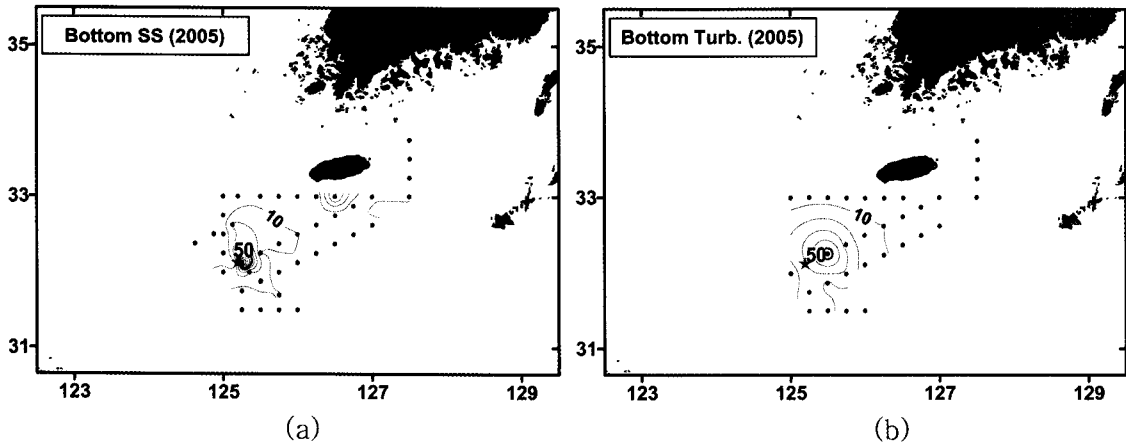


Fig. 8. Horizontal distributions of (a) the suspended sediment (unit: g/m^3) and (b) the turbidity (unit: ppm) measured at the bottom layer.

미세구조의 발달은 두 수괴 사이에서 일어나는 수평적 관입의 결과 일 수 있으며 N^2 는 수온 역전층 아래에서 $1 \times 10^{-7} s^{-2}$ 로 나타나 주위에 비해 $O(3)$ 이상 낮아 상대적으로 혼합이 쉬울 것으로 예상되며 계산된 Kz 도 $3 \times 10^{-3} m^2/s$ 로 $O(3)$ 이상의 높은 값을 나타내어 연직 혼합을 가속시킴을 의미하여 미세구조의 소멸과정과 관련이 높을 것으로 판단된다. 또한 52m와 67m에서의 변동도 유사한 양상을 보인다. 저층은 바다 경계에 의한 영향으로 수괴의 안정도가 약하게 나타나서 Kz 는 $1 \times 10^{-1} m^2/s$ 이상의 높은 값이 나타났다.

2006년 난류 관측 결과

2006년 관측선 b는 2005년 저층의 혼합이 활발하였던 관측선 b

와 동일한 라인이며, 2005년과는 달리 북서쪽 라인과 비교하였다 (Fig. 10). b 라인 관측시 불던 남풍 계열의 바람이, 북서쪽에 위치한 a 라인 관측시에는 방향이 바뀌어 북풍 계열이 우세하였다. 또한 바람의 세기는 5.5 m/s를 넘지 않아 2005년에 비해 약하였다. Lie et al.(2003)이 설명한 것처럼 양자강회석수의 이동은 바람의 직접적인 영향을 받아 남동풍일 때 북동진 한다. 2006년 하계의 높은 수온은 제주도 쪽으로 이동하던 양자강회석수가 약한 바람에 의해 제주도 서편에 정체된 상태에서 표층의 난류 상태가 약하고 태양 복사열이 누적되어 높은 수온 상태를 유지하였을 가능성이 높다. 이어도 해양과학기지에 설치되어 10분 간격으로 태양 복사열을 관측할 수 있는 일사계(pyranometer) 자료에서 2005년과 2006년 8월 낮 동안의 평균 복사열은 420과 482 W/m^2 로 2006

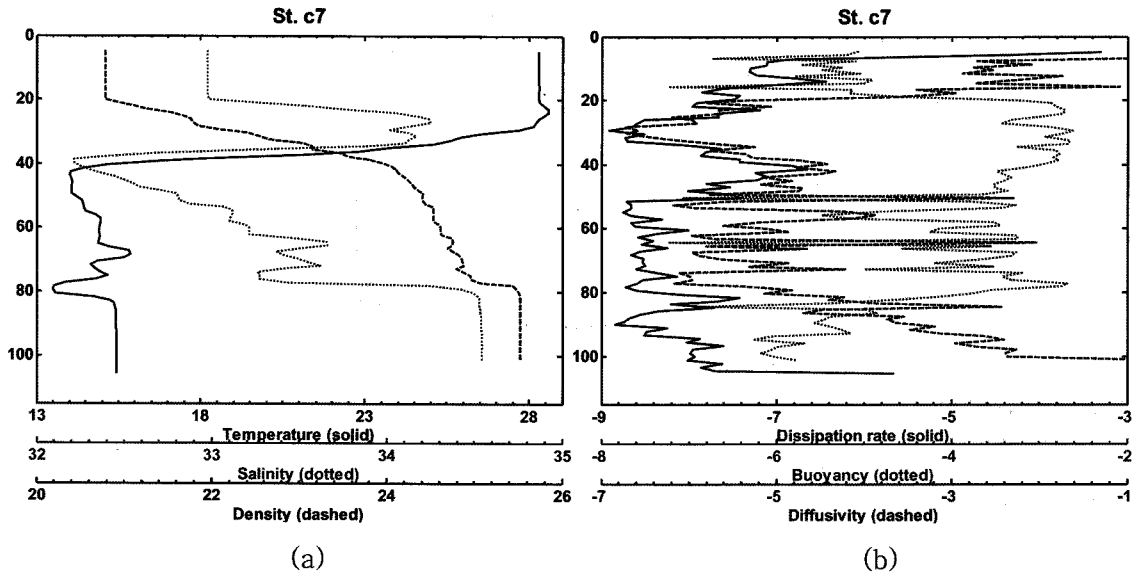


Fig. 9. Vertical profiles of (a) temperature, salinity and density, (b) dissipation rate, Brunt-Väisälä Frequency and vertical eddy diffusivity.

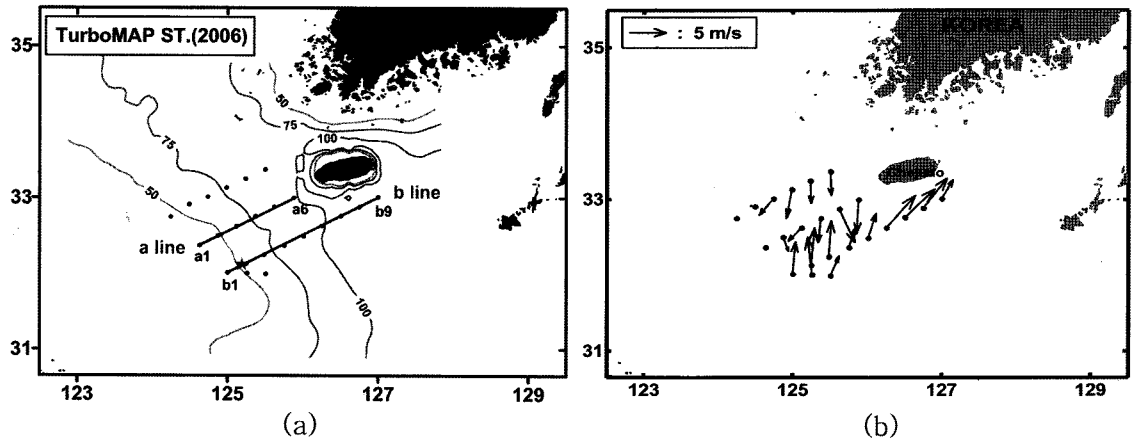


Fig. 10. Station maps on 12-16 August, 2006. (a) Locations of TurboMAP stations (b) wind vectors measured at the R/V Eardo.

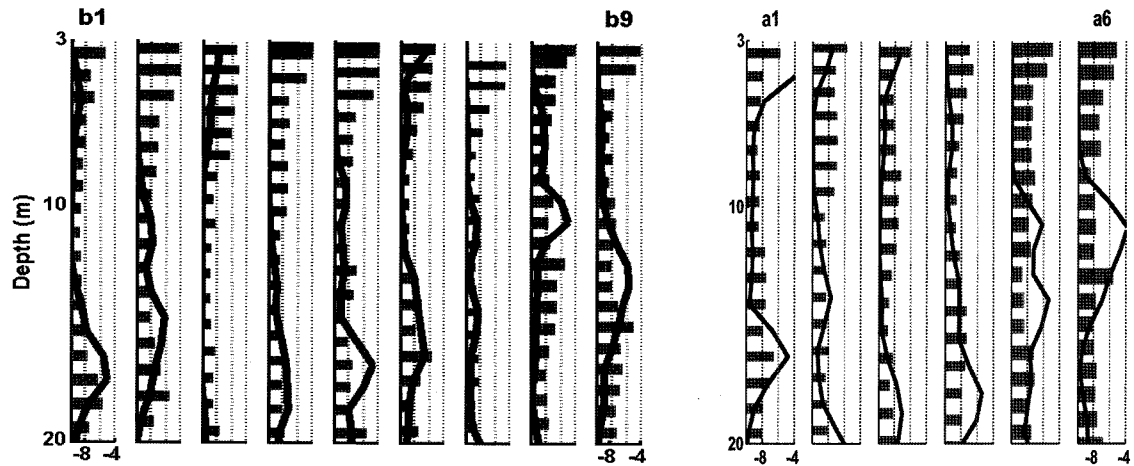


Fig. 11. Vertical profiles of the ϵ and vertical density gradient (thick line) obtained with the TurboMAP along transects b and a.

년의 복사열이 높게 나타나 이를 뒷받침해 준다. 그러나 이러한 연변동은 쿠로시오 등 주변 해수의 전반적인 변동성의 다른 요인

도 있을 것이므로 추후 정밀한 분석이 요구되는 부분이다. 수심 20m까지의 ϵ 와 수심에 대한 밀도 차와의 수직 분포에서

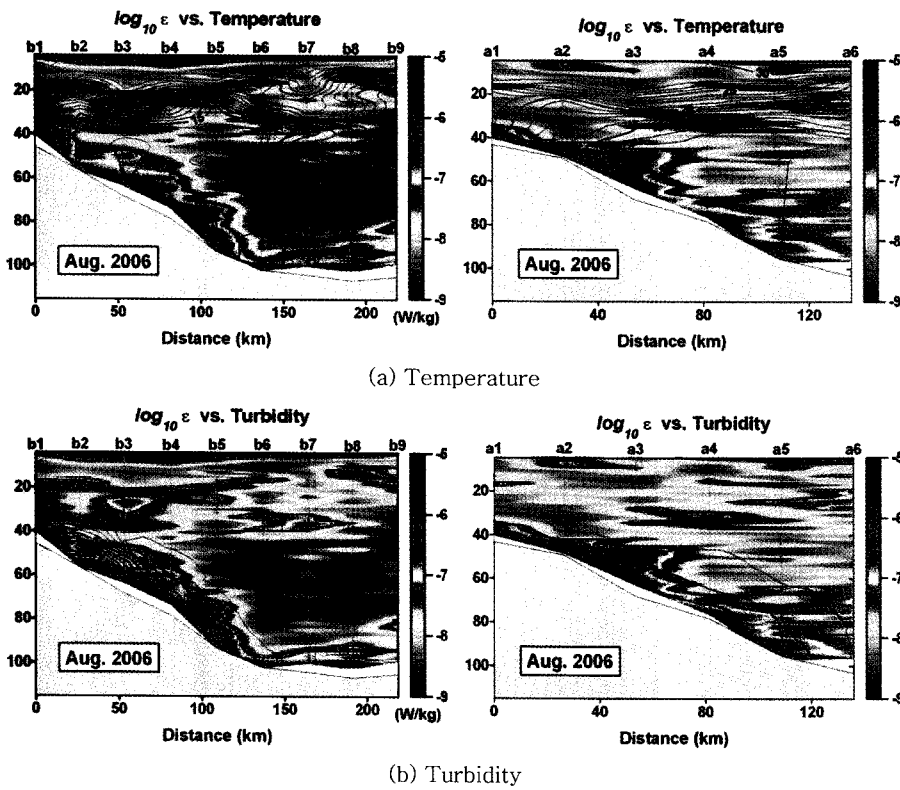


Fig. 12. Vertical contours of the dissipation rate along transects b and a. The black contour lines denote isothermal line at intervals 1 °C, and turbidity line at intervals 10 ppm.

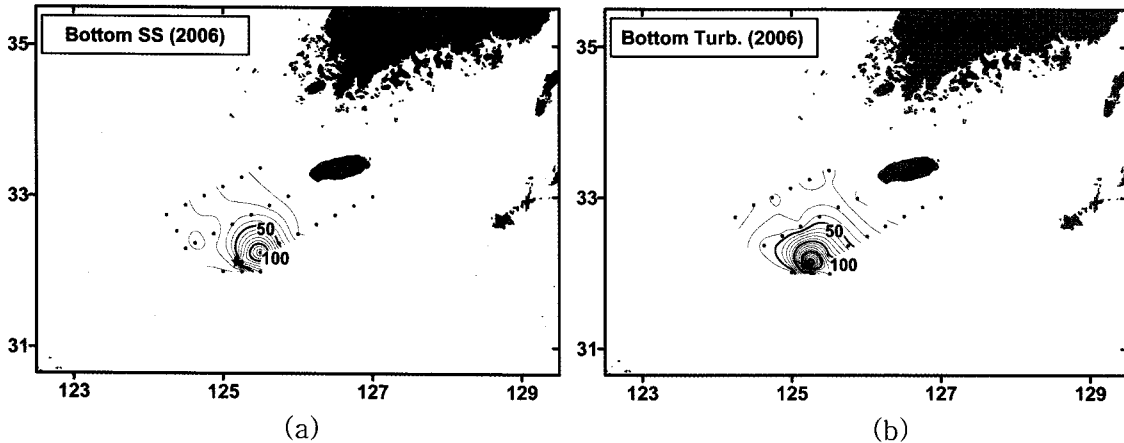


Fig. 13. Horizontal distributions of (a) the SS and (b) the turbidity measured at the bottom layer.

b 라인은 2005년과 유사한 분포를 보인다(Fig. 11). 다만 약한 바람에 의해 표층 ϵ 의 크기는 작게 나타난 점이 달랐다. b 라인보다 a 라인에서 수심에 대한 밀도 차가 커, 밀도약층이 강화되고 수괴가 나뉘어져, 밀도약층을 통해 혼합이 방해 받으리라 판단된다. 여기서 밀도약층은 수직적으로 밀도 차가 0.6 kg m^{-4} 이상일 때로 정의하였다.

ϵ 와 수온과의 수직 단면에서 저층의 ϵ 의 범위가 2005년에 비해 $O(1)$ 정도 큰 값을 나타내어 저층 혼합이 훨씬 활발하였음을 알 수 있었다(Fig. 12(a)). 해저면 경계층에서의 혼합도 활발하지만, 수온약층에서도 2005년에 비해 큰 값을 보였다. 두 라인 모두 수온 약층이 2005년처럼 15~30 m 사이에 존재하였지만, 수온 약층의 수심은 제주도 쪽으로 알아졌고 a 라인의 10 m까지 30°C 이

상의 온도를 나타내었다. b 라인 수온 약층의 평균값은 $2 \times 10^7 \text{ W/kg}$ 이고, a 라인 수온약층의 평균값은 $5 \times 10^8 \text{ W/kg}$ 로 $O(1)$ 이상의 차이를 보여 지역별 편차를 보여주고 있다. a 라인 수온 약층보다 높은 b 라인 수온 약층의 ϵ 은 상대적으로 내부파 등에 의한 혼합이 강함을 시사하고 있고 수온 역전 현상도 나타나고 있다. 저층에서의 탁도도 2005년에 비해 3배 이상의 높은 수치를 보여 해저면 층에서의 혼합이 2005년에 비해 활발함을 나타내고 있다(Fig. 12(b)).

b1과 b2 사이는 14~19°C의 강한 전선이 있어 저층 혼합을 촉진시켜 150 ppm 이상의 높은 탁도를 나타내었다. 저층에서 관측한 탁도와 저층의 물을 채수하여 측정된 부유퇴적물 농도의 수평 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 관측 결과 2005년에 비해 2배 이상의 값을 나타내었고, 이어도 종합과학기지 해역에서 가장 높은 값

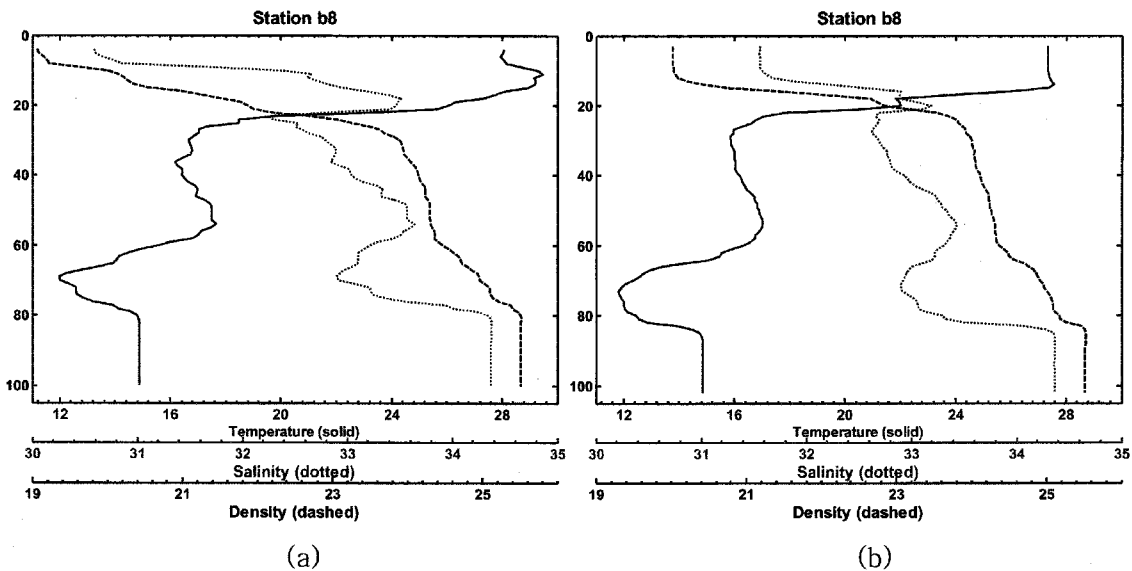


Fig. 14. Vertical profiles of temperature, salinity and density at the b8 station in August 2005. (a) observed before Typhoon Mawar (b) After Typhoon Mawar.

을 보여 이 해역의 해저면층 고탁도 분포가 여름철의 일반적 해황일 가능성이 높다.

토의 및 결론

하계 동중국해 북부 대륙붕 해역에서 해수 혼합 기작을 연구하기 위하여 2005년과 2006년 8월 미세구조 관측기인 TurboMAP을 이용하여 미세 구조와 난류 관측을 수행하였다. 유속 변형 자료로부터 산출한 난류 운동에너지 소산율은 표층과 저층에서 각각 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ W/kg 및 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ W/kg의 높은 값을 보였고, 수온약층 하부에서도 10^{-7} W/kg로 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 강한 난류 상태의 원인으로 표층은 바람, 해저면층은 조류 그리고 수온약층 하부는 내부파 소멸에 의한 해수 교란의 결과로 판단된다.

관측 결과 표층은 절대적으로 바람이 난류 상태를 주도함을 알 수 있었고, 태풍의 간접 영향에 의한 강풍에 의해 수심 15 m까지 혼합이 되었음이 관찰되었다. Fig. 14는 2005년 8월의 관측 정점 b8에서 태풍 마와 통과 전·후의 수온, 염분 및 밀도의 수직 분포를 나타낸 것으로 태풍 통과 전 표층의 28 °C 이상의 수온과 31 이하의 염분 분포는 태풍이 지나간 후 혼합층이 깊어져 수온은 27.5 °C 이하로 낮아지고 염분은 31.5 이상 높은 값으로 변하여 강풍의 영향을 보여주고 있다. 하지만 반대로 2006년의 경우는 바람이 약한 상태에서 태양 복사열로 인해 밀도약층이 강화되면 혼합이 억제됨을 잘 보여주었다.

수온약층과 보다 깊은 수심대에서 간헐적으로 나타난 높은 소산율 값은 내부파와 수괴의 관입에 의한 혼합에 의한 것으로 판단된다. 연구 해역에서 관측되는 수온과 염분 분포상 다양한 수직 미세구조는 대미난류수를 통해 공급된 에너지가 대륙붕 지역을 지나면서 증류모나 미세규모의 난류에너지로 전달되는 과정으로 이해할 수 있다.

저층의 높은 소산율은 탁도와 부유퇴적물의 농도와도 상관성이 높은 것으로 관측되었고, 연직확산계수도 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ m²/s의 높은 값

으로 나타나 조류에 의한 바닥층 교란으로 혼합이 활발함을 보여 주었다. 높은 연직확산계수는 높은 소산율 뿐만 아니라 낮은 *N*의 영향에 의한 것이다(식 (2)). 관측해역에서 낮은 *N*값을 보이는 밀도의 수직구조가 해수 혼합 결과로 나타난 것인지 아니면 특정한 수괴의 분포에 의한 것인지는 더 분석해야 할 필요가 있다. 해저면 경계층에서의 혼합 과정은 물질 이동 및 이동량 파악에 중요하기 때문에 본 연구의 결과가 동중국해 대륙붕의 영양염 수지 연구에 유용할 것으로 판단된다.

본 논문에서 설명된 동중국해 대륙붕에서 해수혼합의 정량적 특성은 생태계와 물질 수지와 관련이 높을 것으로 사료된다. 해저면층에서의 혼합과 이에 따른 고탁도 환경은 저서생물의 생태계에 영향을 있을 것으로 판단되며 상대적으로 높은 난류상태가 관측된 수온약층 하부의 동일수심대에서 클로로필 및 용존산소 최대층도 자주 관측되기 때문에 해수 혼합과의 관련성 연구도 저준위 생태계 기작을 밝히는 데 의미가 있을 것으로 본다.

추 후 수직 혼합이 활발하였던 이어도 과학기해역에서 미세 구조에 대한 보다 세밀한 조사와 분석을 통해 혼합 기작을 밝힐 예정이다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 종합해양과학기 구축 및 활용연구 (PM38300)와 기후변화와 산사댐 건설에 따른 동중국해(남해) 해양환경 영향연구(PM44500)의 지원으로 수행되었습니다. 본 연구의 조사에 협조해주신 이에도호 승조원들에게 감사드립니다. 아울러 본 논문의 심사를 맡아주셔서 세세한 부분까지 조언해주신 심사위원님들과 담당 편집위원이신 장경일교수님께 감사 드립니다.

참고문헌

이홍재 등, 2000. 동중국해 중·서부해역의 해양순환 연구, 한국해

- 양연구원 연구보고서, 428p.
- Ahn, Y.H., P. Shanmugam and S. Gallegos, 2004. Evolution of suspended sediment patterns in the East China and Yellow Seas, *J. Korean Soc. Oceano.*, **39**: 26–34
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, H. Yu and G.A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont. Shelf Res.*, **4**: 57–76.
- Britter, R.E., 1974. An experiment on turbulence in a density-stratified fluid, Ph. D. Thesis, Monash University, Victoria, Australia.
- Crawford, W.R., and T.R. Osborn, 1979. Microstructure measurements in the Atlantic Equatorial Undercurrent during GATE. *Deep-Sea Res.*, GATE Suppl. II, **26**: 285–308.
- Lee, J.H., I. Lozovatsky, S.T. Jang, C.J. Jang, C.S. Hong and H.J.S. Fernando, 2006. Episodes of nonlinear internal waves in the northern East China Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18601, doi:10.1029/2006GL027136.
- Lie, H.J., C.H. Cho, J.H. Lee and S. Lee, 2003. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **108**(C3), 3077, doi:10.1029/2001JC001194.
- Matsuno, T., S. Kanari, C. Kobayashi, and T. Hibiya, 1994. Vertical Mixing in the bottom mixed layer near the continental shelf break in the East China Sea. *J. Oceanogr.*, **50**: 437–448.
- Matsuno, T., J.S. Lee, M. Shimizu, S.H. Kim and I.C. Pang, 2006. Measurements of the turbulent energy dissipation rate ϵ and an evaluation of the dispersion process of the Changjiang Diluted Water in the East China Sea. *J. Geophys. Res.*, **111**, C1S09, doi:10.1029/2005JC003196.
- Osborn, T.R., 1980. Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**: 83–89.
- Shen, H., C. Zhang, C. Xiao, and J. Zhu, 1998. Change of the discharge and sediment flux to estuary in Changjiang River. *Health of the Yellow Sea* edited by G.H. Hong, J. Zhang, and B.K. Park, 129–148.
- Wolk F., H. Yamazaki, L. Seuront and R.G. Lueck, 2002. A new free-fall profiler for measuring biophysical microstructure. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **19**: 780–793.

2007년 6월 25일 원고접수

2007년 11월 26일 수정본 채택

담당편집위원: 장경일