

새만금해역에서 밀도성층의 계절 변동

김태인^{1*} · 이형래¹ · 장경일²

¹(주)지오시스템리서치
 (435-824) 경기도 군포시 금정동 1-40번지
²서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부
 (151-742) 서울시 관악구 신림동 산 56-1번지

Seasonal Variation of Density Stratification in the Saemangeum Waters, Korea

Tae In Kim^{1*}, Hyung Rae Lee¹, and Kyung-II Chang²

¹GeoSystem Research Corporation
 Gunpo 435-824, Korea

²School of Earth and Environmental Sciences, College of Natural Sciences
 Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

Abstract : Seasonal and tidal variations of density stratification in the Saemangeum waters are investigated based on synoptic CTD observations between July 2003 and September 2005. CTD data used in this study are those obtained after closing the dike No. 4 and before closing the two final gaps, the Sinsi and the Garyeok, on the Saemangeum tidal barrier. A total of 19 field campaigns comprehend a wide temporal spectrum, that is, four seasons, spring and neap tides, and high and low waters. In addition, ADCPs were anchored and CTDs were cast at three stations for 25 h in July 2005. Water columns are vertically homogeneous in autumn and winter. The vertical homogeneity persists in spring but with an occasional weak stratification in the northern part of the Gogunsan Islands. Increased freshwater runoff tends to stabilize the water columns and strong density stratification is established in summer. The mean potential energy anomaly (PEA) in summer used as a stratification parameter is the largest (27.7 J m^{-3}) in the northern part of the Gogunsan Islands where the Geum River discharge dominates, the smallest (16.9 J m^{-3}) is in the inner area of the barrier, in between the two (21.6 J m^{-3}) in the southern part of the Gogunsan Islands. Whereas the stratification is generally strengthened in summer, strong winds or large tidal currents over the shallow depths frequently destratify the water column near the mouth of river runoff inside the tidal barrier. Periodic stratification, the development of stratification on the ebb and its breakdown on the flood, occurs in the mid-area inside the barrier induced by the tidal straining, which can also be found in the results of 25 h observation.

Key words : density stratification, potential energy anomaly, estuary, tidal straining, tidal barrier, Saemangeum waters

1. 서 론

밀도 성층은 수온 또는 염분의 수직적인 차이가 커서

상층과 하층의 밀도가 서로 다른 두 층으로 구분되는 현상을 일컫는다. 하구·연안해양학의 핵심 주제중 하나는 해양생태계에 큰 영향을 미치는 밀도 성층의 발달과 소멸 과정을 이해하는 것이다. 성층은 상·하층 간의 열, 염, 운동량, 영양염 교환을 제한하므로 해역의 일차생산력을 조

*Corresponding author. E-mail : tikim@geosr.com

절하는 요인이 된다. 하계에 염양염이 풍부한 담수가 하구·연안으로 유출되어 표층에서 플랑크톤의 과다 증식이 발생하면 다량의 플랑크톤 사체가 해저로 가라앉아 유기물로 분해되면서 산소가 많이 소모된다. 이 때 성층이 형성되어 있으면 대기 중의 산소가 저층까지 공급되기 어렵기 때문에 용존산소가 2 mg l^{-1} 이하인 빈산소층이 형성되고, 보다 열악한 조건에서는 무산소층이 형성되기도 한다. 이러한 해역에서는 저서생물 군집뿐만 아니라 이들을 먹이로 하는 어류에 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

하구·연안에서 밀도 성층은 바람, 조류속, 해저면 마찰 등 수직 혼합을 촉진하는 외력과 일사, 담수 유입, 강수 등 수직 성층을 유발하는 외력간의 상호작용의 결과로 나타난다. 이와 같은 요인 외에 조류의 수직 구조에 의해 낙조류시 성층이 강화되고 창조류시 약화되는 성층 강도의 주기적인 변화가 나타나기도 한다(tidal straining). 성층 형성에 대한 연구는 1970년대에 본격적으로 시작되었는데, Simpson and Hunter(1974)는 일사와 조석을 고려한 단순한 모델에서 혼합 수역과 성층 수역의 경계인 조석 전선의 위치가 $\log(h \text{ u}^{-3}) = 2.0$ 의 등치선과 대체로 일치한다는 것을 밝혀냈다. 여기서 $h(\text{m})$ 와 $u(\text{m s}^{-1})$ 는 각각 수심과 대조기 표층 최강유속이다. 이후 이 모델은 일사와 조석 외에 바람의 영향을 고려한 모델로 발전되었다(Simpson et al. 1978). 또한 Simpson and Bowers(1981)는 표층 수온에 따른 열속의 변화를 고려하는 모델을 통해 수온 구조와 성층 강도의 계절 변화를 검토하였다. 측면 경계에서 담수가 유입되는 해역에서는 밀도 성층의 해석이 더욱 복잡해진다. 하폭이 넓고 수심이 얕은 미국 Alabama주 Mobile Bay에서의 연구에 의하면 성층의 형성과 소멸은 조류속보다 하천유량과 풍속의 영향을 더 크게 받으며, 이 두 요인의 상대적 크기에 따라 완전 혼합부터 강한 성층까지 수일에서 수개월 주기의 시간 변동을 나타낸다(Schroeder et al. 1990).

한편 Rhine ROFI(region of freshwater influence)에서 반일 주기로 성층 강도의 변화가 발생하는 것이 보고되었는데, 반일 주기의 변화 정도가 평균적인 성층 강도와 같은 크기로 나타났다(Souza and Simpson 1997). 바람은 성층을 소멸시키는 외력으로 인식되어 왔는데, 미국 York River 하구에서 상류로 부는 바람은 성층을 약화시키지만 하류로 부는 바람은 성층을 강화시키는 것으로 나타났다(Scully et al. 2005). 이 외에도 증발량이 매우 큰 호주의 Shark Bay에서는 증발에 기인한 밀도류가 조석 전선의 형성에 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Nahas et al. 2005).

새만금 해역은 최대 조차가 7 m에 달하는 대조차 환경으로서, 새만금방조제 내측의 만경·동진강 하구에 조간대가 넓게 발달되어 있고, DL(-)10 m 등수심선이 방조제

외측으로 5~10 km 떨어져서 남북 방향으로 분포하고 있다. 1991년에 착공된 새만금방조제는 2003년 6월에 북측의 4호 방조제가 연결되어 신시도와 비응도 사이 구간의 해수 유통이 차단되었고, 남측의 신시 및 가력 개방구간 2.7 km가 유지되다가 2006년 4월에 두 개방구간도 차단되었다. 2006년 7월 현재는 신시 배수갑문 폭 300 m (30 m×10련)와 가력 배수갑문 폭 240 m(30 m×8련)만 개방된 채로 방조제 내·외측의 해수 유통이 일부 이루어지고 있다.

새만금방조제의 차단으로 방조제 내·외측을 통과하는 조량이 크게 감소하고 풍파의 발달이 제한되어 수직 혼합을 일으키는 두 외력의 영향이 방조제 내측에서 크게 감소하고, 방조제 외측에서도 다소 감소할 것으로 예상된다. 또한 방조제 내측에서 담수의 체류시간이 길어지고 일사에 의한 수직적인 수온 차가 증가하여 밀도 성층이 강화될 것으로 예상된다. 저밀도의 기수가 수직 혼합 외력이 저하된 외해로 유출되면 방조제 외측 수역에서도 수직 성층이 강화될 가능성이 있다. 이 연구에서는 4호 방조제 차단 이후부터 신시·가력 개방구간 차단 이전까지 새만금 해역에서 밀도 성층의 계절 변동 양상을 파악하고 변동 원인을 초기 평가하고자 한다. 방조제 차단 이전의 성층 구조를 파악하는 것은 방조제 차단 후 내·외측 수역의 성층 변화를 평가하기 위한 기준 자료로 활용할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

2. 자료 및 방법

2003년 7, 8, 11월과 2004년 5, 7, 9월, 그리고 2005년 2, 5, 7, 9월의 대조기에 새만금 방조제 내·외측 수역에서 CTD 관측을 실시하였다(Table 1, Fig. 1). 2003년에는 고군산군도의 외해역을 포함하는 40여개 정점에서 고조시와 저조시에 관측하였으며, 8월의 저조시 관측은 소조기에 해당한다. 2004년과 2005년에는 외해역 정점수를 줄이고 방조제 내·외측 해역에서 조밀한 관측을 실시하였다. 2004년에는 고조시와 저조시에 50여개 정점에서 관측하였으며, 우기인 7월에는 소조기에도 관측을 실시하였다. 2005년에는 40여개 정점에서 저조시에 관측을 실시하였고, 7월에는 고조시에도 관측하였다. CTD 관측은 다수의 선박을 이용하여 전류 시간 전·후 2시간 이내에 실시하였다.

조시에 따른 유동과 물성 변화를 파악하기 위하여 2005년 7월의 대조기에 25시간 동안 3개의 고정점에서 ADCP와 CTD 관측을 실시하였다. 25시간 관측은 방조제 내측에서는 신시 개방구간 동쪽의 정점 A, 방조제 외측은 신시 개방구간 서쪽의 정점 C와 가력 개방구간 외측의 정점 D에서 실시하였다.

Table 1. Period of the field measurement campaigns. The letters H and L designate the high water and low water, respectively. The numbers indicate the measurement date. The small n in August 2003 and in July 2004 means the neap tide. All the other measurements were carried out in spring tide.

| | Year | Feb. | May | Jul. | Aug. | Sep. | Nov. |
|--------------|------|------|----------------|--------------------------------------|------------------|--------------|-----------------|
| CTD casting | 2003 | | | H 14,16 L 10,11 | H 13 Ln 22,23 | | H 24 L 24,25 |
| | 2004 | | H 3,4 L 5,6 | H 19 L 20,21 Hn 13,15 Ln 14 | | H 16 L 17 | |
| | 2005 | L 24 | L 10 | H 20 L 21 | | L 21 | |
| ADCP mooring | 2005 | | | 22-23 | | | |

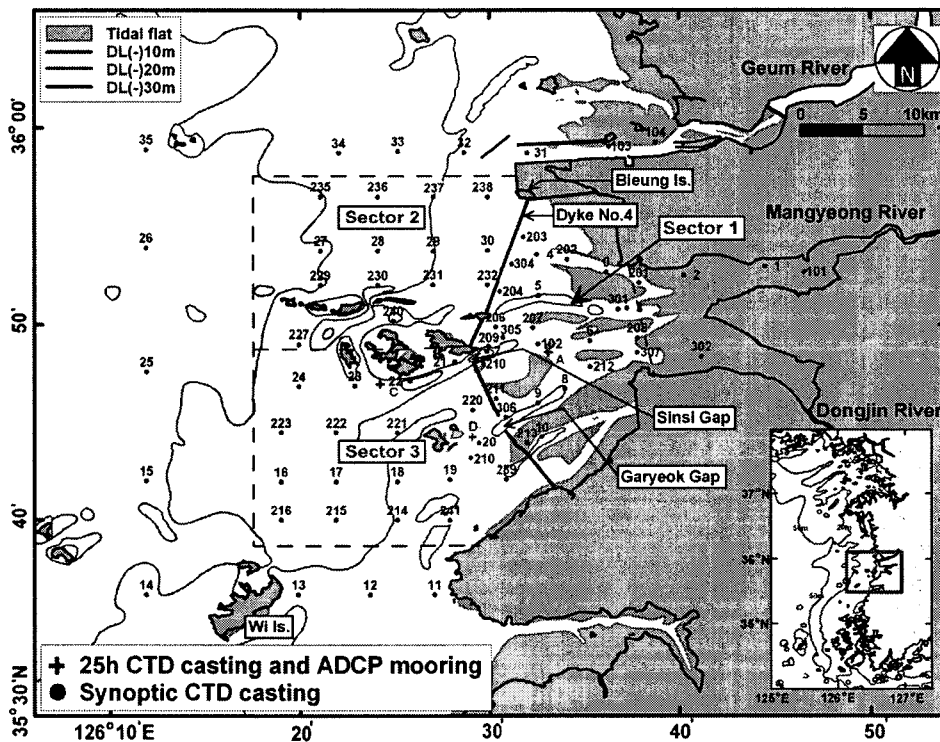


Fig. 1. Bathymetry and measurement stations. The tidal flats and depth contours are based on the Nautical Chart No. 302 revised in September 2004 by the National Oceanographic Research Institute. The offshore boundary of the grayish tidal flat corresponds to DL. The DL (datum level, or approximate lowest low water) defined as “local mean sea level” minus “amplitude of $M_2 + S_2 + K_1 + O_1$ ”, is the reference of tide level as well as water depth in nautical chart.

사용한 CTD는 이탈리아 Itronaut사의 Ocean Seven (OS) 316과 304이며, CTD 관측은 CTD를 해면 하 1 m 수심에 내리고 센서가 안정될 때까지 2~3분간 대기 후 해면으로 올렸다가 다시 천천히 내리면서 해저면 위 0.5 m 까지의 수심에 따른 수온과 전기전도도를 측정하였다. 전기전도도는 Lewis(1980)에 의하여 염분으로 환산하였고, CTD에 의한 염분 측정 오차를 최소화하기 위하여 캐나다

Guildline사의 Salinometer(Autosal 8400B)를 이용하여 염분 보정을 실시하였다. 몇 개의 정점에서 채취한 표층 해수의 염분을 Autosal로 정밀 측정하여 CTD에 의해 관측된 염분과 Autosal로 측정된 염분의 직선회귀식을 구하여 CTD 염분값을 보정하였다. 수온과 염분 자료는 수직 0.2 m 간격으로 평균하여 분석에 사용하였다. 조류 관측에 사용된 ADCP는 미국 RDI사의 300 kHz(정점

D), 600 kHz(정점 C) 및 1200 kHz(정점 A) WorkHorse Sentinel(WHS)로서, ADCP를 내부에 장착한 TRBM (Trawl Resistant Bottom Mount)을 해저에 설치하고 upward-looking 방식으로 층별 조류 관측을 실시하였다. 정점 A와 D에서는 수심 0.5 m 간격으로, 정점 C에서는 수심 1.0 m 간격으로 10분마다 유향과 유속을 측정하였다.

조사기간의 조석은 국립해양조사원이 운영하는 군산외항 검조소의 관측 자료를 이용하였다. 금강하구둑의 일별 방류량은 농업기반공사 금강사업단에서 제공받았고, 만경강과 동진강의 일별 유량은 일별 수위 자료와 수위-유량 곡선식을 이용하여 산정하였다. 두 하천의 수위는 건설교통부 영산강홍수통제소에서 제공받았는데, 만경강은 대천 수위측정소의 값을, 그리고 동진강은 태인 수위측정소의 값을 적용하였다. 기온, 바람, 강수량 등의 기상 자료는 기상청 군산기상대의 자료를 이용하였으며, 군산기상대에서 관측하지 않는 일사량은 기상청 전주기상대의 자료를 이용하였다.

3. 결 과

기상 및 하천유량

2002~2005년의 기간 동안 군산의 월평균 기온, 월평균 풍속과 월 강수량 및 전주의 월 일사량을 Fig. 2(a), (b), (c), (d)에 각각 제시하였다. 월평균 기온은 7월 또는 8월에 가장 높는데 24~26°C의 범위이고, 12~2월에 가장 낮다. 월평균 풍속은 1~4월에 강하고 8~12월에 약하며, 1.8~4.7 m s⁻¹의 범위를 보인다. 강수량은 2002년에 1,193 mm로 최소이고 2003년에 1,509 mm로 최대이다. 7~8월의 강수량은 2002년에 510 mm로 최소이고 2005년에 872 mm로 최대를 보였으며, 2005년의 경우 7~8월의 강수량은 연 강수량의 58%를 차지한다. 월 일사량은 4~6월에 530~630×10⁶ J m⁻² mo⁻¹로 크고, 12~1월에 210~240×10⁶ J m⁻² mo⁻¹로 작다.

세만금 해역에 영향을 미치는 하천은 금강, 만경강 및 동진강이다. 유역 면적은 금강이 9,844 km²이고, 만경강과 동진강은 각각 1,504와 1,124 km²로서 만경강과 동진강을 합한 유역 면적은 금강의 약 27%에 해당한다(건설교통부 2003). 금강은 1994년 8월부터 하구둑 배수갑문을 통해 담수를 방류하고 있는데, 연 평균 방류량은 5.3×10⁹ m³ y⁻¹(170 m³ s⁻¹)이며, 연 방류량의 57%가 7~9월에 집중된다(Kim et al. 2006). 2002~2005년 기간 중 월 방류량의 최대치는 2003년 7월의 3.3×10⁹ m³ mo⁻¹이고, 2004년 7월과 2005년 8월에 각각 2.3×10⁹ m³ mo⁻¹ 및 2.1×10⁹ m³ mo⁻¹를 기록하였다(Fig. 2(e)). 만경강과 동진강을 합한 월 유량의 연 최대치는 2003~2005년에 0.62~0.63×10⁹ m³ mo⁻¹로서 금강의 월 방류량 연 최대치의

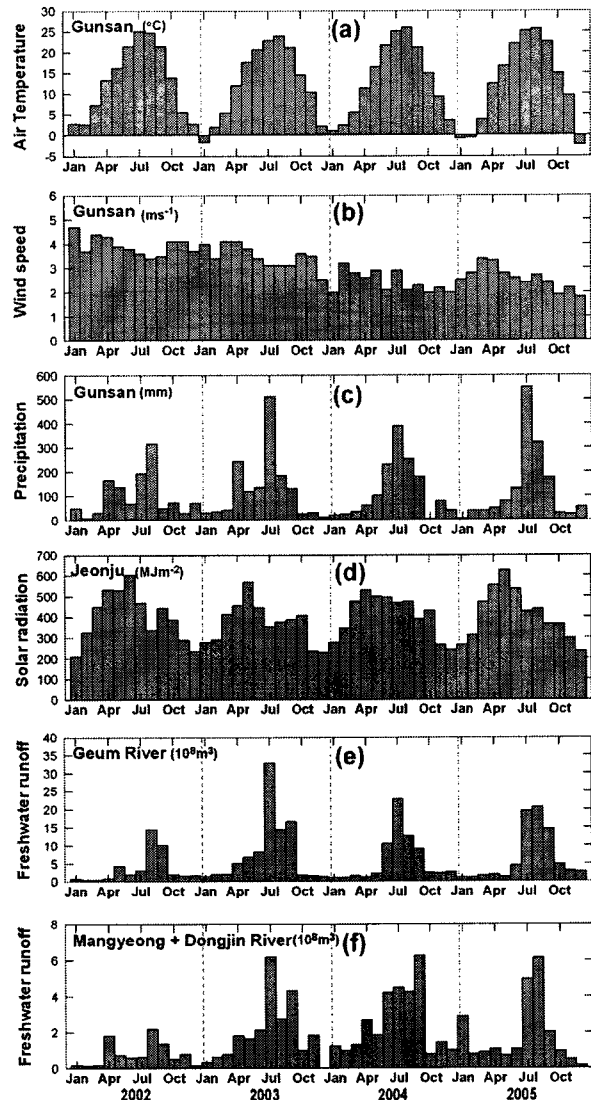


Fig. 2. Monthly mean air temperature (a), monthly mean wind speed (b), monthly precipitation (c) in Gusan, monthly solar radiation in Jeonju (d), monthly freshwater runoff from the Geum River (e) and the Mangyeong plus the Dongjin River (f) in 2002-2005.

20~30% 정도이다(Fig. 2(f)).

수온·염분의 계절 변화

동계(2005년 2월), 춘계(2004, 2005년 5월), 하계(2003, 2004, 2005년 7월), 추계(2003년 11월)의 CTD 측정 자료로부터 표층과 저층의 T-S diagram을 작성하였다(Fig. 3). Sector 1은 방조제 내측, Sector 2는 방조제 외측의 고군산군도 북측, 그리고 Sector 3은 방조제 외측의 고군산군도 남측이며, 각 sector의 경계가 Fig. 1에 표시되어 있다. 표

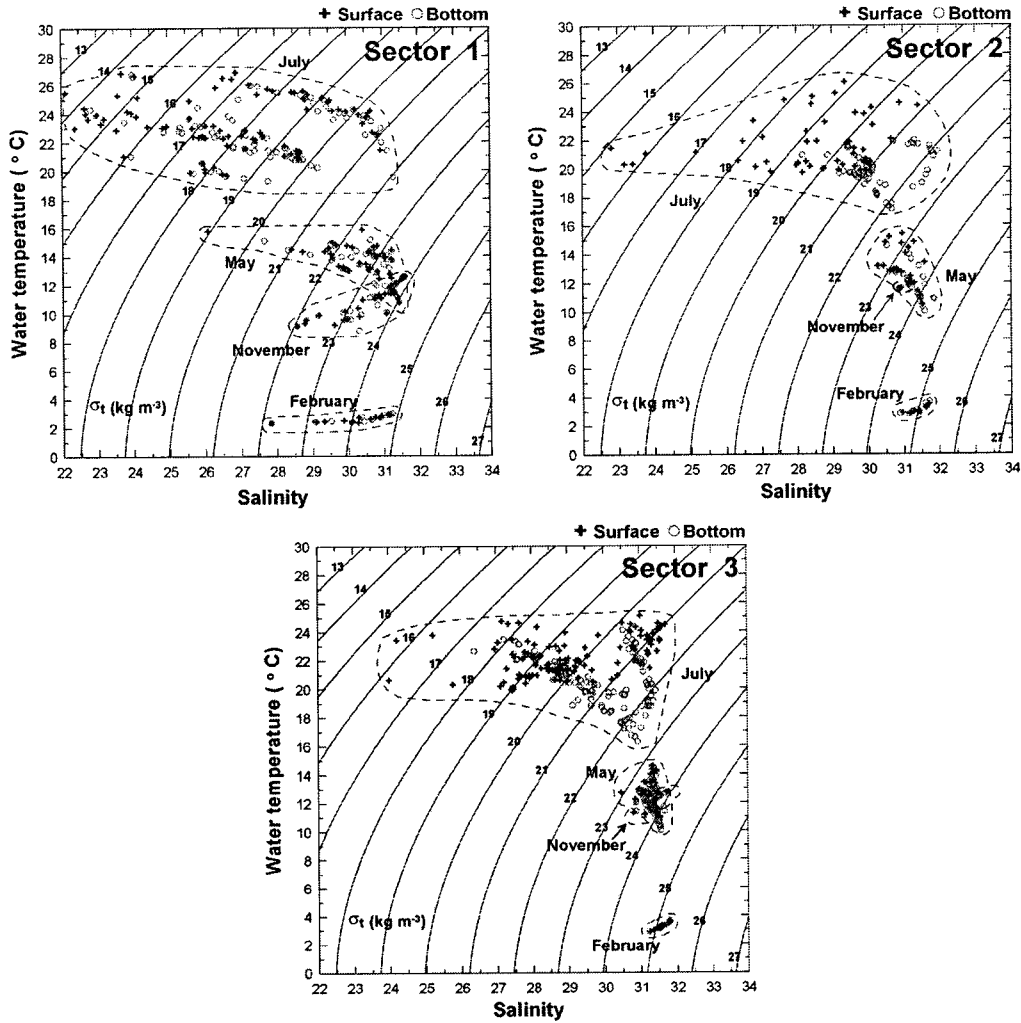


Fig. 3. T-S diagrams showing the seasonal variation of water properties in three areas, that is, the inner part of the barrier (Sector 1), the northern (Sector 2) and the southern part (Sector 3) of the Gogunsan Islands. The sectors are marked with dotted line in Fig. 1.

층은 해면부터 수심 1.0 m까지의 평균이고, 저층은 저면 위 0.5~1.5 m의 평균이다.

동계의 수온은 2~4°C의 범위로서 방조제 내측이 외측보다 약간 더 낮으며, 수직적으로 차이가 거의 없다. 염분은 Sector 2와 3에서 31~32의 범위이고, Sector 1에서는 27~32의 범위이며 저염수는 만경강 하구에서 나타난다. σ_t 는 Sector 2와 3에서 25 kg m⁻³ 정도이고, Sector 1에서는 22~25 kg m⁻³로서 수평적인 차이가 나타난다. 동계의 해수 밀도 변화는 주로 염분의 영향을 받지만 하천 유량이 적기 때문에 그 영향은 만경강 하구에만 미치며, 전반적인 수직 성층을 유발하지 못한다.

춘계의 수온은 Sector 1과 2에서 10~16°C의 범위이고, Sector 3에서 약간 낮아서 10~15°C의 범위이다. 동계와

비교하면 표·저층간의 수온 차가 약간 증가하여, 2004년 5월 3~4일의 고조시 관측에서는 수온 차가 2°C까지 나타났다. 염분은 Sector 2와 3에서 30~32의 범위이고 수직적인 차이가 크지 않으며, Sector 1에서는 26~32로 수평적인 차이가 크고 만경강 하구에서는 2 정도의 표·저층간 차이를 보인다. σ_t 는 Sector 1에서 19~24 kg m⁻³이고, Sector 2와 3에서 22~25 kg m⁻³이다. 방조제 외측에서는 수온과 염분이 같은 정도로 해수 밀도에 영향을 미치고 있으며, 내측에서는 염분의 영향이 보다 지배적이다. 2004년 5월 3~4일에 만경강 하구에서 저밀도수와 약한 수직 성층이 나타난 것은 관측일의 강수에 의한 유량 증가에 기인한 것으로 보인다.

하계에는 해안으로 갈수록 고온·저염 분포가 뚜렷하

게 나타난다. 수온은 Sector 1에서 19~27°C의 범위이고, Sector 2에서 17~26°C, Sector 3에서 16~25°C의 분포이다. 표·저층간의 수온 차가 크게 나타나는데, 수심이 얇

은 방조제 내측보다는 외측에서 현저하며 고조시에 최대 약 4°C의 차이를 보인다. 염분은 만경·동진강의 영향을 직접 받는 Sector 1과 금강의 영향을 받는 Sector 2에서

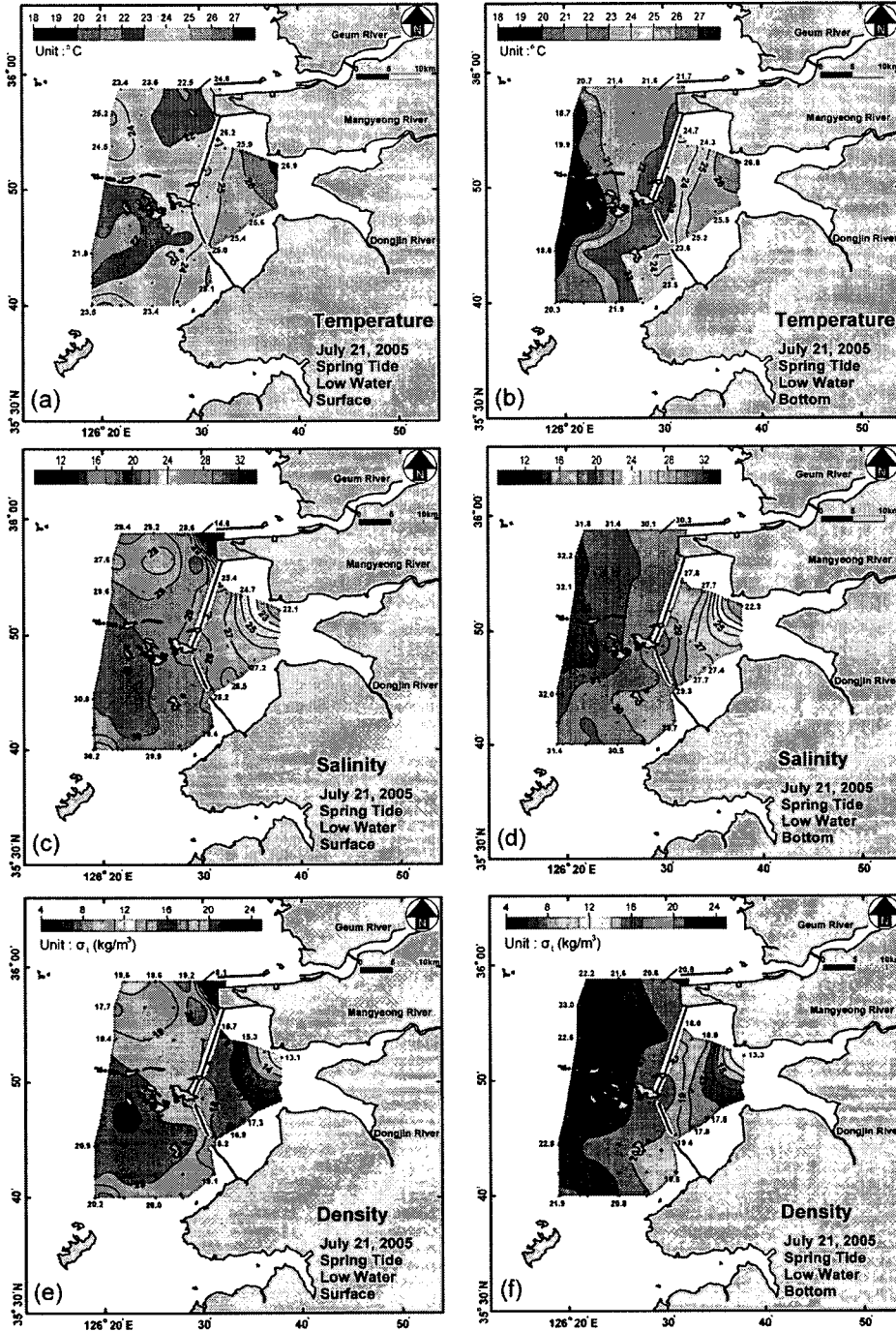


Fig. 4. Horizontal distributions of water temperature, salinity and density at surface (a, c and e) and bottom layer (b, d and f) round the low water at spring tide in July 21, 2005. The data at surface layer are the averages from the instantaneous sea surface to 1.0 m below, and those at bottom layer are the averages from 0.5 to 1.5 m above the sea bed.

22~32의 범위이고, Sector 3에서는 최저 염분이 약간 높은 24~32의 범위이다. 표·저층간의 염분 차는 수온의 경우와 같이, 방조제 내측보다 외측에서 더 크게 나타난다. Sector 2의 북측 수역에서는 2004년 7월 14일의 소조기 저조시에 최대 10 정도의 차이를 보이는데, 이는 관측일

이전에 지속된 장마로 인해 금강 방류량이 계속 크게 유지되었기 때문이다. σ_t 는 Sector 1에서 13~22 kg m^{-3} 이고, Sector 2와 3에서 15~23 kg m^{-3} 이다. 7월의 수온·염분 분포 특성은 8월에도 유사하게 유지된다.

Fig. 4와 5는 하계 대조기인 2005년 7월 21일의 저조시

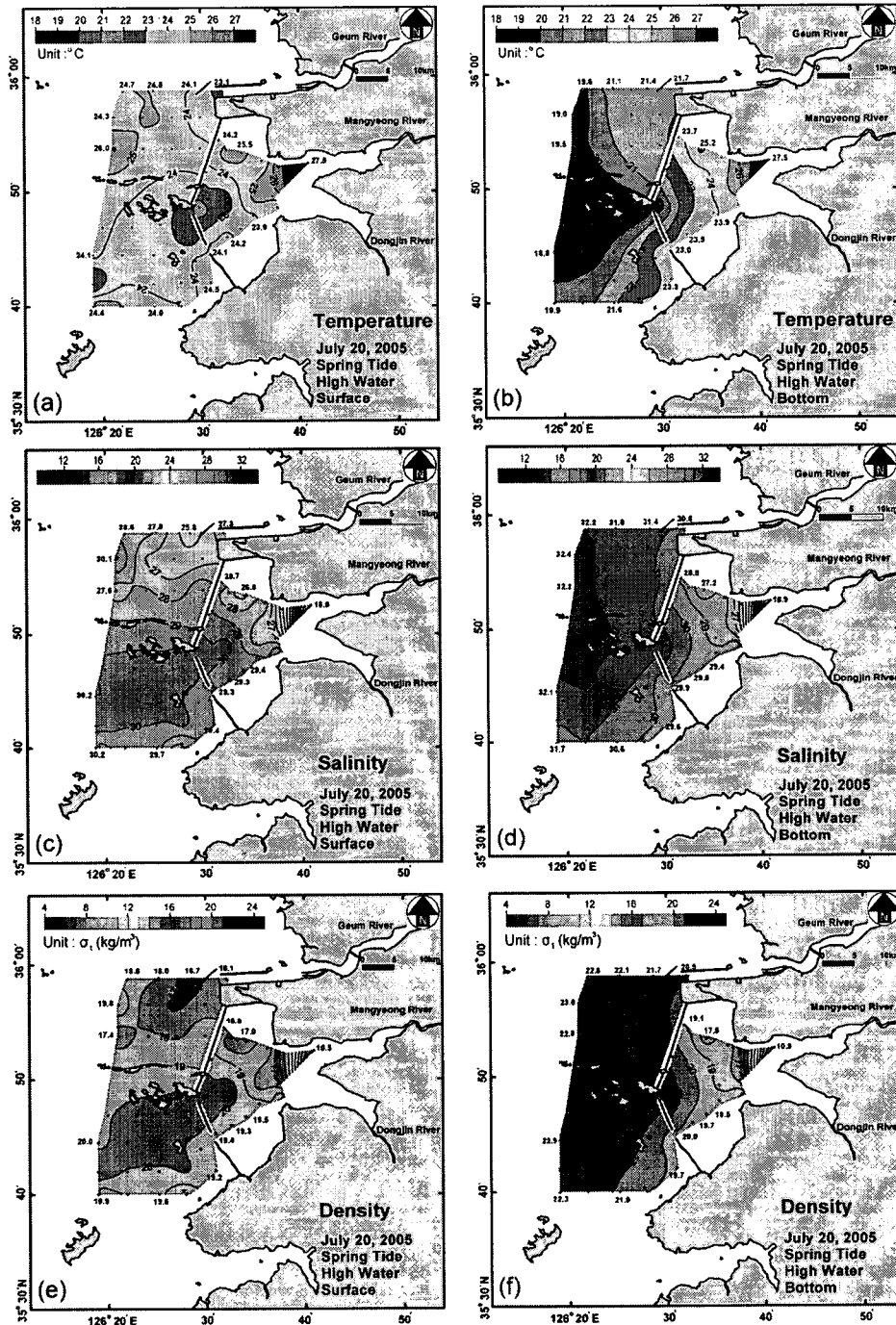


Fig. 5. Horizontal distributions of water temperature, salinity and density at surface (a, c and e) and bottom layer (b, d and f) round the high water at spring tide in July 20, 2005.

와 7월 20일의 고조시에 각각 관측한 표층과 저층의 수온, 염분 및 밀도 분포이다. 저조시에 표층 수온은 만경강 하구에서 가장 높은 약 27°C가 나타나고, 방조제 외측에서는 22°C 이하의 저온수가 남서쪽으로부터 고군산군도 쪽으로 확장하는 양상이다. 저층 등수온선은 방조제 내·외측 모두 남북 방향으로 대체로 평행한 분포를 나타낸다. 만경강 하구에 약 27°C의 고온수가 존재하며, 고군산군도 서쪽에 20°C 이하의 저온수가 분포한다. 표층 염분은 금강 하구에서 15, 만경강 하구에서 22로 낮은 염분을 보이며, 29 이하의 금강 회석수가 4호 방조제를 따라 신시도 쪽으로 확장되는 양상을 보인다. 외해에서는 고군산군도 남서쪽에 30 이상의 고염수가 존재한다. 저층 등염분선은 저층 수온 분포와 유사하게 남북 방향으로 대체로 평행하게 분포한다. 만경강 하구에서 염분 약 22의 저염수가 나타나고, 고군산군도 서쪽에 32 이상의 고염수가 분포한다. 밀도 분포는 염분 분포와 유사한 양상을 보인다. 표층의 σ_t 는 금강 하구에서 10 kg m⁻³ 이하이고, 만경

강 하구에서 13 kg m⁻³ 정도이며, 고군산군도 남서쪽에 20 kg m⁻³ 이상의 고밀도수가 분포한다. 저층의 σ_t 는 금강 하구에서 21 kg m⁻³ 이하이고, 만경강 하구에서는 표층과 같은 13 kg m⁻³ 정도이다. 금강 하구에서 밀도 성층이 뚜렷하게 나타나는 것은 수심이 DL(-)10 m 이상으로 상대적으로 깊기 때문인 것으로 판단된다. 고군산군도 서쪽에는 22 kg m⁻³ 이상의 고밀도수가 분포한다. 고조시에는 고군산군도 남서측에 존재하는 수온 20°C 이하, 염분 31 이상의 저층수가 주로 신시 개방구간을 통하여 방조제 내측으로 유입되는 양상을 보인다. 만경강 하구역에서는 염분의 수평적인 차이가 매우 급하게 나타나지만 수직적으로는 거의 차이를 보이지 않는다.

이 관측자료를 이용하여 만경강 하구부터 산동갯벌 남쪽과 4호 방조제 내측을 거쳐 신시 개방구간을 통해 고군산군도 남쪽으로 이어지는 만경 회석수의 주수로를 따라 수온, 염분, 밀도의 저조시 및 고조시 종단 분포를 각각 Fig. 6과 7에 제시하였다. 저조시 관측은 만경강 하구의

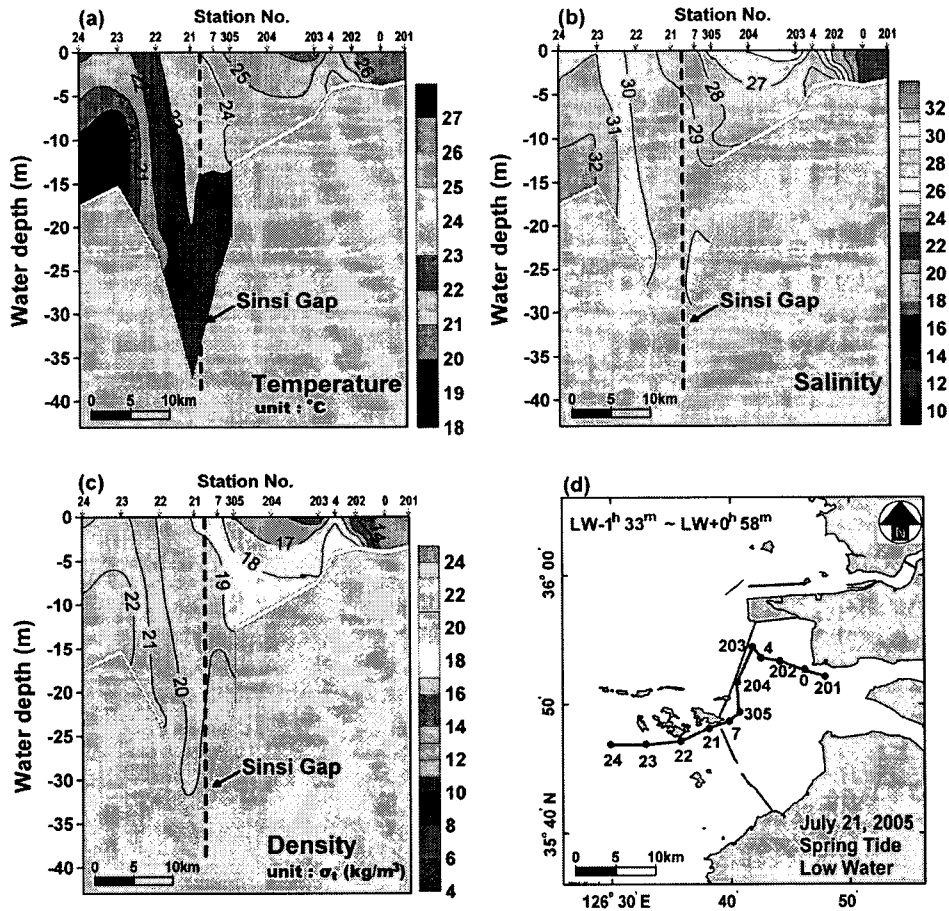


Fig. 6. Vertical distributions of water temperature (a), salinity (b) and density (c) along the longitudinal channel cross-section from the mouth of the Mangyeong River through the Sinsi Gap to the south of Gogunsan Islands (d), round the low water at spring tide in July 21, 2005.

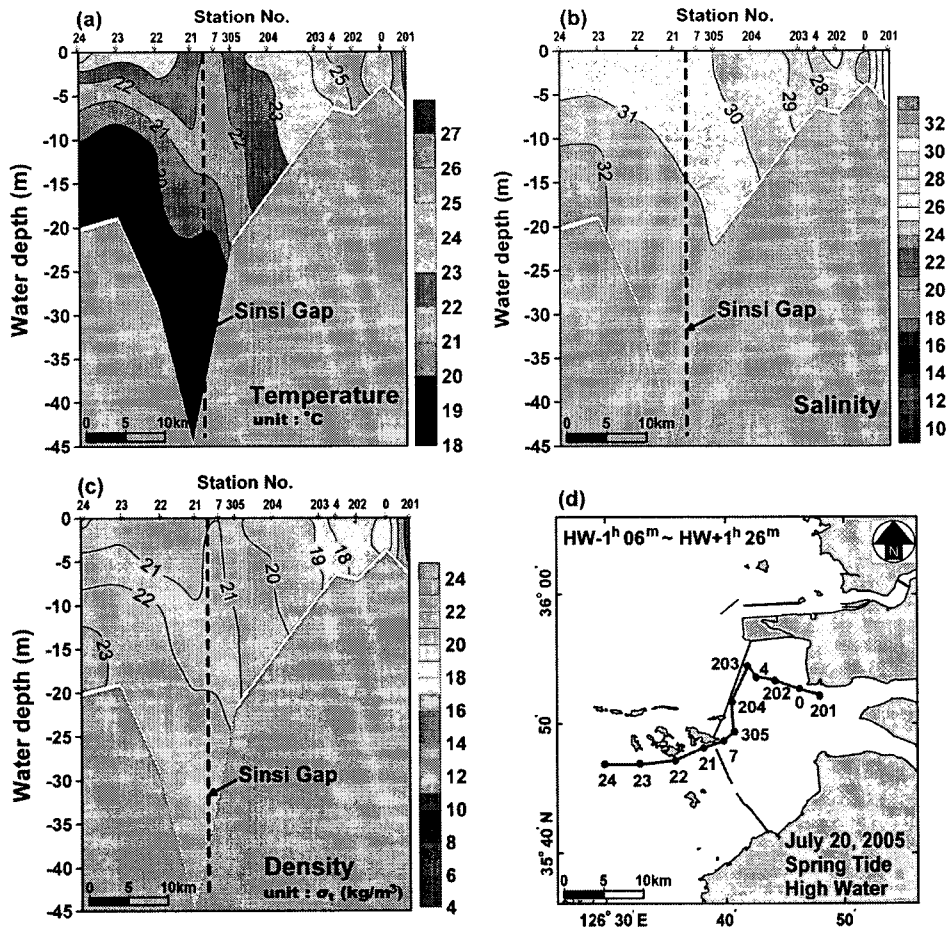


Fig. 7. Vertical distributions of water temperature (a), salinity (b) and density (c) along the longitudinal channel cross-section from the mouth of the Mangyeong River through the Sinsi Gap to the south of Gogunsan Islands (d), round the high water at spring tide in July 20, 2005.

정점 201에서 저조 1시간 33분 전에 시작하여 정점 24에서 저조 58분 후에 종료하였고, 고조시 관측은 정점 201에서 고조 1시간 6분 전에 시작하여 정점 24에서 1시간 26분 후에 종료하였다. 저조시에 만경강 하구의 수심이 5 m 보다 얕은 정점 201부터 정점 202까지의 수역에서 염분이 22에서 27로 수평적으로 급하게 증가하지만, 수직적으로는 거의 균일하다. 수심이 5~15 m 사이인 정점 202부터 정점 305까지의 수역에서는 수온 2°C, 염분 2 정도의 수직 성층이 뚜렷하게 발달한다. 정점 305부터 신시 개방구간을 지나 정점 23까지는 수심이 15 m 이상으로 깊지만 수직적으로 수온·염분 차가 크지 않다. 이는 신시 개방구간과 그 내·외측의 유속이 매우 강하기 때문에 수직 혼합이 활발하게 일어나기 때문인 것으로 보인다. 한편 수심이 다시 15 m 정도로 되는 정점 23과 정점 24 사이에서는 수온 3°C, 염분 2 정도의 수직 성층이 나타난다. 고조시에는 방조제 외측에서 수직적인 수온 차가 4°C 이

상으로 저조시보다 더 커서 밀도 성층이 상대적으로 강화되는 반면에, 방조제 내측에서는 수온과 염분의 수직적인 차이가 거의 나타나지 않는다. 즉, 방조제 내측에서는 저조시에 성층이 강화되고 고조시에 성층이 약화되는 tidal straining이 뚜렷하게 나타난다. 한편 표층에서 염분 28의 등염선은 저조시에 정점 7 부근에 위치하고 고조시에는 정점 4와 203 사이에 위치하여, 그 거리는 약 14 km에 해당하며 6.2시간동안 등염분선의 평균 이동속도는 약 0.6 m s⁻¹이다.

추계에는 해안으로 갈수록 저온·저염의 분포 특성을 보인다. 수온은 방조제 내측에서 8~13°C, 외측에서 11~13°C의 범위이다. 염분은 방조제 내측에서 28~32, 외측에서 30~32의 범위이다. 수온·염분의 표·저층간 차이는 거의 나타나지 않으며, 특히 방조제 외측에서는 거의 균질한 특성을 보인다. σ_t 는 방조제 내측에서 22~24 kg m⁻³, 외측에서 23~24 kg m⁻³의 분포이다.

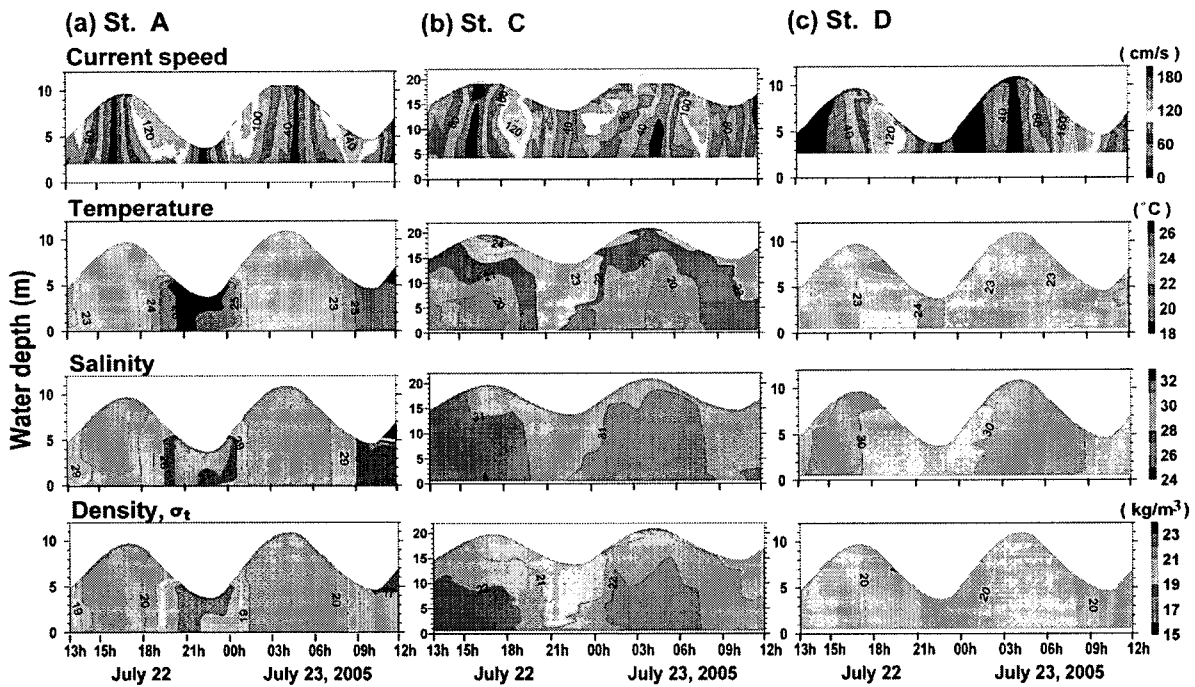


Fig. 8. Time variations of current speed, water temperature, salinity and density at stations A, C and D measured at spring tide in July 22-23, 2005. The measurement locations are marked with cross in Fig. 1.

수온·염분의 조시 변화

방조제 내·외측에서 2005년 하계 대조기의 25시간동안 층별 유향, 유속, 수온, 염분을 관측한 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 유속은 3개 정점 모두 창조류 보다는 낙조류가 강하게 나타난다. 이는 4호 방조제 연결 이전에 신시·가력 개방구간을 통하여 해수가 유입하여 4호 방조제 개방구간을 통하여 유출되는 반시계방향의 순환 형태가 4호 방조제 연결 이후 나타나지 않음을 의미한다(이 등 2003). 낙조 최강유속은 낙조의 중반부터 후반에 걸쳐 나타나는데, 정점 A와 D에서는 최강유속이 1.5 m s^{-1} 를 초과하고, 정점 C에서는 1.2 m s^{-1} 를 초과한다.

수심이 DL(-)5 m 정도인 방조제 내측의 정점 A에서 수온은 22~26°C, 염분은 27~31의 범위이다. 수온·염분은 창조 중반부터 낙조 중반까지 거의 일정한 값을 보이며, 낙조 중반부터 저조까지 고온·저염화하다가 저조부터 창조 중반까지 저온·고염화한다. 낙조 중반에 표층 유속이 강해지면 표층에서 수온과 염분의 수직 성층이 약하게 발생하며(7월 22일 19시 부근), 수심이 얕은 낙조 후반에 유속이 강한 경우에는 성층이 형성되지 않는다(7월 23일 09시 부근). 수온·염분의 계절 변화에서 살펴본 바와 같이 방조제 내측에서는 낙조류속의 수직 구조에 따라 성층이 형성되고 창조류시에는 성층이 소멸되는 tidal straining 현상을 확인할 수 있다. 그러나 정점 A가 신시 개방구간

에서 만경강 하구로 이어지는 주수로에서 벗어나 있기 때문에 이 현상이 뚜렷하게 나타나지는 않는다. 신시 개방구간 외측인 고군산군도 남측의 정점 C에서는 수심이 DL(-)15 m 정도인데, 고조시 부근에 밀도 성층이 뚜렷하게 나타난다. 표·저층간의 수온 차가 약 4°C이고, 염분 차는 약 1로서 수온의 수직적인 차이가 두드러진다. σ_t 는 표·저층간에 2 kg m^{-3} 정도의 차를 보인다. 반면에 저조시 부근에는 수온·염분이 수직적으로 거의 균일한 양상을 보인다. 가력 개방구간 외측의 정점 D에서는 수온이 23~24°C이고 염분은 29~31의 범위로서, 수온·염분의 조시에 따른 변화가 크지 않고 수직적으로도 비교적 균일하다. 이는 정점 D의 수심이 DL(-)5 m 정도로 얕기 때문인 것으로 보인다.

성층 강도

많은 연구자들이 수직 적분한 potential energy anomaly (이하 PEA) 자료를 이용하여 하구·연안의 성층 분석을 수행하였다(Simpson and Bowers 1981; 최 등 1998; Lee and Cho 1998; Simpson et al. 1990; Rippeth et al. 2001; Lie et al. 2002; Palacios-Hernández et al. 2002). PEA는 수층을 완전 혼합시키는데 필요한 단위 체적당의 일로서, 수층의 현재 위치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전 혼합되었을 경우의 위치에너지의 차이이다.

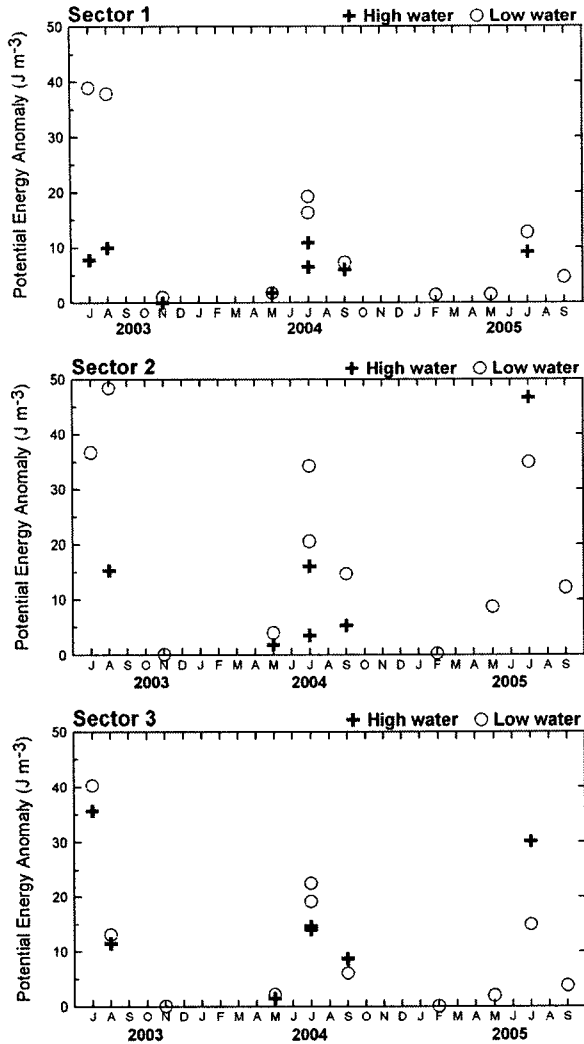


Fig. 9. Time history of the potential energy anomalies averaged over each sector.

$$PEA = \int_h^0 (\bar{\rho} - \rho(z))zdz$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z)dz$$

여기서, $\rho(z)$ 는 총 수심 h 인 수층에서의 수직 밀도 분포이고, g 는 중력가속도, $\bar{\rho}$ 는 수심평균 밀도이다. PEA가 0이면 완전 혼합이고 성층이 강할수록 값이 커진다. 그리고 수직적으로 밀도가 역전되어 있으면 음의 값이 된다. Table 1에 제시된 총 19회에 걸친 관측 자료에 대하여 Fig. 1에 표시된 3개 구역별 평균 PEA를 산정하여 Fig. 9에 제시하였다.

Sector 1에서 2003년 11월, 2004년 5월, 2005년 2월과 5월 즉, 추계, 동계, 춘계에는 PEA가 5 J m⁻³ 이하로서 완전 혼합에 가깝다. 하계인 7월과 8월의 PEA는 저조시에

Table 2. Ensemble average of potential energy anomaly (J m⁻³) in July and August from 2003 to 2005.

| Tidal phase | Sector 1 | Sector 2 | Sector 3 |
|-------------|----------|----------|----------|
| High water | 8.8 | 20.4 | 21.2 |
| Low water | 25.0 | 35.0 | 22.0 |
| Average | 16.9 | 27.7 | 21.6 |

10~40 J m⁻³로 성층이 형성되며, 고조시에는 5~10 J m⁻³ 정도로 성층이 약해진다. 하계 저조시의 PEA는 2003년에 약 40 J m⁻³이고 2004년과 2005년에는 10~20 J m⁻³로서 같은 저조시에도 차이를 보인다. 이는 2003년 7월과 8월의 관측일 모두 일평균 풍속이 2.5 m s⁻¹ 정도로 약했고, 7월 관측일에는 만경+동진강 유량이 50×10⁶ m³ day⁻¹로 컸으며 8월 관측일에는 조차가 2.5 m 정도의 소조기이었기 때문이다. 반면에 2004년과 2005년의 7월 저조시에는 조차 또는 풍속이 커서 수직 혼합이 촉진된 것으로 보인다. 2004년과 2005년의 9월에는 5 J m⁻³ 정도로서 성층이 미약해진다. Sector 1에서 7~8월의 PEA는 저조시 25.0 J m⁻³, 고조시 8.8 J m⁻³이고 평균 16.9 J m⁻³이다(Table 2).

Sector 2에서 2003년 11월, 2004년 5월, 2005년 2월과 5월 즉, 추계, 동계, 춘계에는 PEA가 10 J m⁻³ 이하로서 Sector 1에서와 같이 성층이 형성되지 않는다. 2003년 하계인 7월과 8월의 저조시 PEA는 35~50 J m⁻³로서 성층이 발달하고, 고조시에는 15 J m⁻³ 정도로서 수직 혼합이 증가한다. 2004년 7월의 저조시에는 20~35 J m⁻³로서 성층이 강화되는데, 고조시에는 20 J m⁻³ 이하로 약화된다. 2005년 7월에는 35~50 J m⁻³의 범위로서 성층이 뚜렷하게 나타나며, 고조시에 성층 강도가 더 큰 것은 금강의 담수 유출과 창조시 외해 저층의 저온·고염수 유입이 복합적으로 작용하였기 때문인 것으로 사료된다(Fig. 10). 9월에는 5~15 J m⁻³로서 7~8월보다 약화되며 저조시의 성층 강도가 더 강하다. Sector 2에서 7~8월의 PEA는 저조시 35.0 J m⁻³, 고조시 20.4 J m⁻³이고 평균 27.7 J m⁻³로서 Sector 1의 1.6배이다.

Sector 3에서 2003년 11월, 2004년 5월, 2005년 2월과 5월 즉, 추계, 동계, 춘계에는 PEA가 5 J m⁻³ 이하로서 Sector 1에서와 같이 거의 완전 혼합에 가깝다. 하계인 7월과 8월의 PEA는 10~40 J m⁻³의 범위를 보이며, 대체로 저조시의 PEA가 고조시보다 약간 크다. 그러나 2005년 7월에는 저조시에 15 J m⁻³, 고조시에 30 J m⁻³ 정도로서 고조시에 성층이 더 강화되며, 이는 외해 저층으로부터 저온·고염수의 유입에 기인하는 것으로 보인다(Fig. 10). 9월에는 10 J m⁻³ 이하로서 7~8월보다 크게 약화된다. Sector 3에서 7~8월의 PEA는 저조시 22.0 J m⁻³, 고조시 21.2 J m⁻³이고 평균 21.6 J m⁻³로서 Sector 1의 1.3배이다.

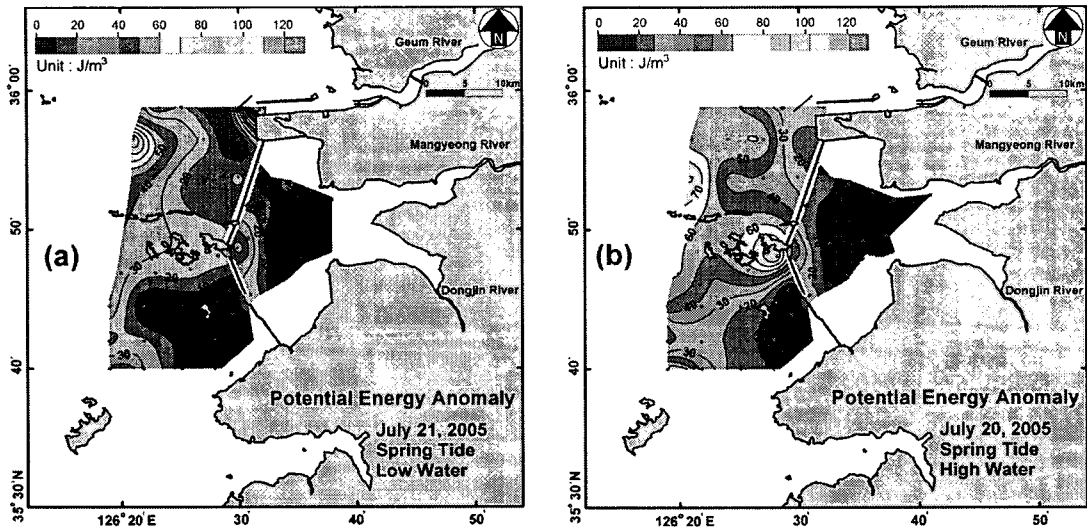


Fig. 10. Distributions of potential energy anomalies round the low water at spring tide in July 21, 2005 (a) and round the high water at spring tide in July 20, 2005 (b).

4. 토의 및 결론

수직 성층을 생성·유지시키는 담수 유량과 일사량, 그리고 수직 혼합을 촉진시키는 풍속과 조류속이 PEA에 미치는 영향 정도를 파악하기 위하여 각 파라메타와 구역 평균 PEA를 Fig. 11에 도시하였다. 기온과 풍속은 군산기상대의 일평균치이고, 일사량은 전주기상대의 1일간 총량, 조차는 군산외항 검조소의 일평균치, 하천 유량은 동진강과 만경강을 합한 일간 유량인데, 기온, 조차와 하천 유량은 관측일의 값이고 풍속과 일사량은 해당 관측일 이전 3일간의 평균치이다.

먼저 기온과 PEA의 관계를 보면 Fig. 11(a)에 기온에 대한 PEA의 상한을 점선으로 표시한 바와 같이 기온이 약 20°C를 초과하는 경우에, 즉 하계를 중심으로 성층 강도가 커진다. 수심이 얇은 방조제 내측보다 방조제 외측에서 표·저층간의 수온 및 염분 차이가 더 크게 나타나며, 고군산군도 북측에서 수온은 최대 약 4°C, 염분은 최대 약 10의 표·저층간 차이가 관측되었다. 수심이 DL(-)15 m 이상으로 깊은 신시 개방구간과 그 주변은 유속이 매우 강하기 때문에 수직적으로 수온·염분이 거의 균일한 특성을 나타낸다. 신시 개방구간 외측의 수심 약 DL(-)15 m 수로 상에서 하계 저조시에 밀도 성층이 거의 소멸되었다가 고조시에 2 kg m⁻³의 표·저층간 밀도 차를 보인다. 그러나 하계 중에도 수직 혼합이 활발한 경우가 상당히 있으며, 이는 수직 혼합 외력이 상대적으로 큰 경우이다. 하계의 평균 성층 강도는 고군산군도 북측 수역이 방조제 내측 수역의 1.6배이고, 고군산군도 남측 수역은 두 수역의 중간 정도이다. 방조제 내측의 하계 저조시 평균 PEA

는 25.0 J m⁻³이고 고조시에 8.8 J m⁻³로서 낙조시에 성층이 강화되고 창조시에 성층이 약화되는 tidal straining 현상이 뚜렷하게 나타난다. 추계부터 동계를 거쳐 춘계에는 수직적으로 수온과 염분의 차이가 크지 않은 거의 균질한 해수 특성을 보인다. 춘계에 고군산군도 북측 해역에서 수직 성층이 나타나기도 하지만 그 강도는 약하다.

Fig. 11(b)에 풍속에 대한 PEA의 상한을 점선으로 표시한 바와 같이 풍속이 약할 때에는 풍속과 PEA가 뚜렷한 상관성을 보이지 않지만 일평균 풍속이 4 m s⁻¹ 이상으로 강하면 PEA가 20 J m⁻³ 이하로서 바람의 수직 혼합 효과를 확인할 수 있다. 특히 방조제 내측(Sector 1)에서는 평균 풍속이 3 m s⁻¹ 이상일 때 바람의 수직 혼합 효과가 뚜렷하다. 이는 방조제 내부의 평균 수심이 DL(-)3.6 m로서 매우 얇기 때문으로 판단된다(서 등 2006).

일사량은 표층을 가열시켜서 수직 성층을 일으키는 요인이 되지만, 일사량과 PEA는 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다(Fig. 11(c)). 대기로부터 해수 표층으로의 열속은 기온과 수온의 차, 풍속, 이슬점 온도 등의 요인에 의해 조절되므로 대기로부터의 가열이 연구 해역의 성층에 미치는 영향에 대하여는 앞으로 세밀한 분석이 필요한 것으로 생각된다(Edinger et al. 1974).

조류속의 증가는 일반적으로 수직 혼합을 증가시키는 요인이다. 수심이 얇은 방조제 내측(Sector 1)에서는 조차가 6 m 이상일 때 PEA가 20 J m⁻³ 이하로서 성층이 약화 또는 소멸되는 양상을 보이며, 실선으로 표시된 조차와 PEA간 회귀직선의 상관계수는 0.57이다(Fig. 11(d)). 그러나 방조제 외측(Sector 2와 3)에서는 조차와 PEA가 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다.

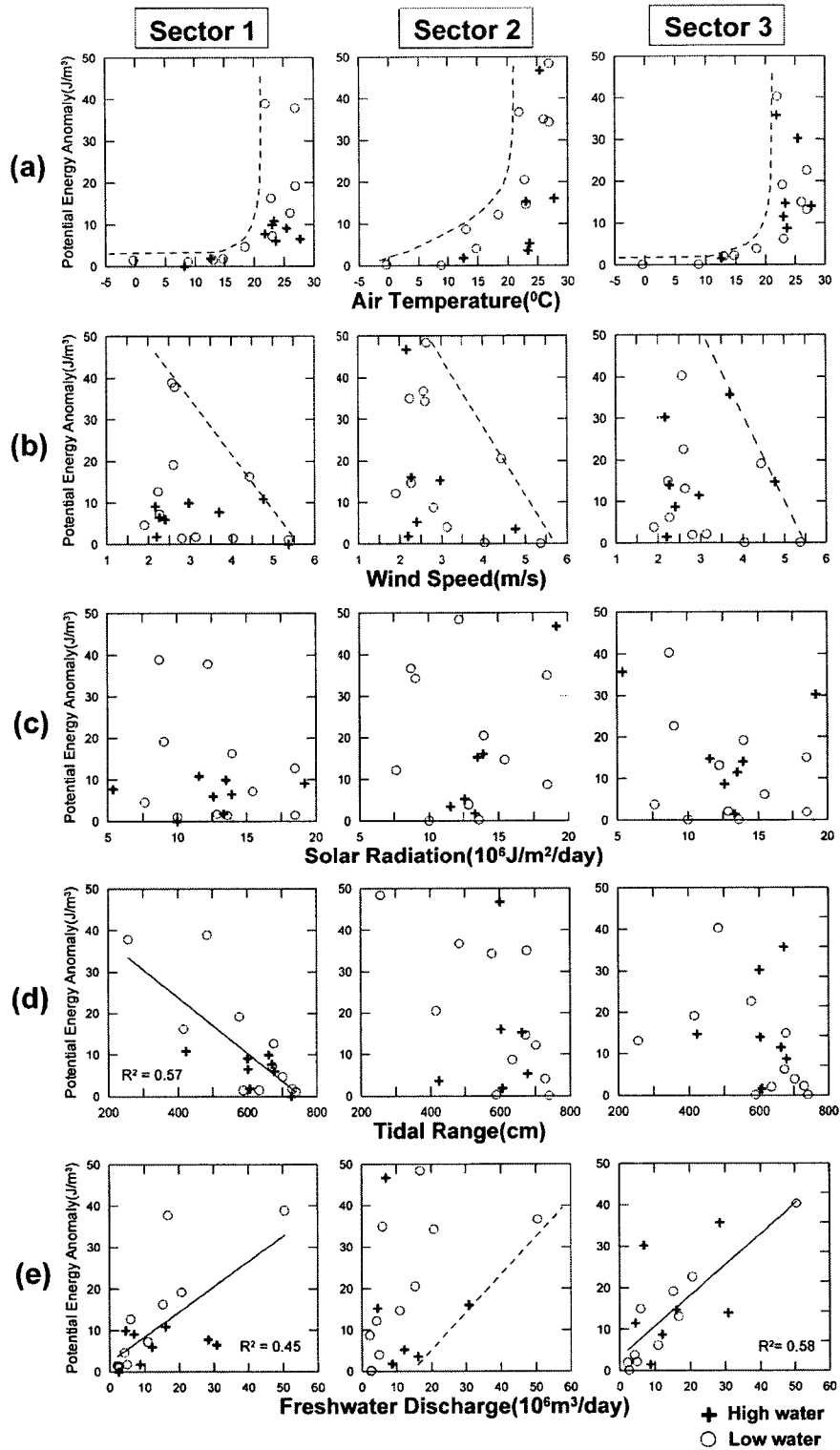


Fig. 11. Relationship between the potential energy anomalies averaged over each sector and the season (a), the wind stirring (b), the surface heating (c), the tidal stirring (d) and the lateral buoyancy (e). The air temperature, tidal range and freshwater discharge are the data of the measurement date. The wind speed and solar radiation are the averages for three days just before the measurement date.

하천 유량은 하구역의 표층 염분을 감소시킴으로써 성층 형성 및 유지에 기여하게 된다. Sector 1과 3에서는 실선으로 표시된 하천유량과 PEA간 회귀직선의 상관계수가 각각 0.45와 0.58로서 하천 유량이 증가하면서 수직 성층이 강화되는 양상이 비교적 뚜렷하게 나타난다(Fig. 11(e)). Sector 2에서는 하천 유량에 대한 PEA의 하한을 점선으로 표시한 바와 같이, 하천 유량이 클 때 PEA가 증가하지만 하천 유량이 크지 않을 때에는 완전 혼합부터 강한 성층까지 다양하게 나타난다.

사 사

이 연구는 해양수산부가 시행하는 새만금 해양환경보전 대책을 위한 조사연구 사업의 일부로서 수행되었다. 연구에 참여할 수 있는 기회를 주신 해양수산부 관계자 및 한국해양연구원 이홍재 박사님, 김은수 박사님께 감사드린다. 아울러 현지조사와 자료 분석에 참여한 한국해양연구원의 홍창수, 황상철, 장영석 연구원 및 (주)지오시스템리서치 연구원들께 감사드린다.

참고문헌

- 건설교통부. 2003. 한국수문조사연보. <http://211.114.42.226/YearCD/2003/water>.
- 서승원, 조완희, 유경선. 2006. 새만금호 수문 개방에 따른 내측의 혼합수송 및 외해역의 방류영향모의. *한국해양·해양공학회지*, 18, 43-52.
- 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영근, 양재삼, 정해진, 김종구. 2003. 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환. *한국해양학회지 「바다」*, 8, 138-150.
- 최현용, 이상호, 오임상. 1998. 황해 중부 연안 수온전선역의 정량적 해석. *한국해양학회지 「바다」*, 3, 1-8.
- Edinger, J.E., D.K. Brady, and J.C. Geyer. 1974. Heat exchange and transport in the environment. Report No. 14. Research Project RP-49. Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA.
- Kim, T.I., B.H. Choi, and S.W. Lee. 2006. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 68, 515-528.
- Lee, B.-G and H.-D. Cho. 1998. The spatial characteristics of stratification in Deukryang Bay, Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 7, 223-231.
- Lie, H.-J., S. Lee, S.-H. Cho, and C.-H. Kim. 2002. Tidal front in the main tidal channel of Kyunggi Bay, eastern Yellow Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 37, 10-19.
- Lewis, E.L. 1980. The practical salinity scale 1978 and its antecedents. *IEEE J. Ocean Eng.*, OE-5, 3-8.
- Nahas, E.L., C.B. Pattiaratchi, and G.N. Ivey. 2005. Processes controlling the position of frontal systems in Shark Bay, Western Australia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 65, 463-474.
- Palacios-Hernández, E., E. Beier, M.F. Lavín, and P. Ripa. 2002. The effect of the seasonal variation of stratification on the circulation of the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 705-728.
- Rippeth, T.P., N.R. Fisher, and J.H. Simpson. 2001. The cycle of turbulent dissipation in the presence of tidal straining. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 2458-2471.
- Schroeder, W.W., S.P. Dinnel, and W.J. Wiseman, Jr. 1990. Salinity stratification in a river-dominated estuary. *Estuaries*, 13, 145-154.
- Scully, M.E., C. Friedrichs, and J. Brubaker. 2005. Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field. *Estuaries*, 28, 321-326.
- Simpson, J.H., C.M. Allen, and N.C.G. Morris. 1978. Fronts on the continental shelf. *J. Geophys. Res.*, 83, 4607-4614.
- Simpson, J.H. and D. Bowers. 1981. Models of stratification and frontal movement in the shelf seas. *Deep-Sea Res.*, 28, 727-738.
- Simpson, J.H., J. Brown, J.P. Matthews, and G. Allen. 1990. Tidal straining, density currents and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13, 125-132.
- Simpson, J.H. and J.R. Hunter. 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250, 404-406.
- Souza, A.J. and J.H. Simpson. 1997. Controls on stratification in the Rhine ROFI system. *J. Mar. Syst.*, 12, 311-323.

Received Jun. 23, 2006

Accepted Aug. 3, 2006