

서해 함평만의 해수 물성구조 및 조류 특성

이경식* · 전수경

전라남도해양바이오연구원, 535-802, 전남 신안군 지도읍 읍내리 산132-2

Characteristics of Hydrography and Tidal Current in Hampyung Bay, the Western Coast of Korea

Kyeong Sig Lee* and Sue Kyung Jun

Jeollanamdo Marine-Bio Research Institute, Jeonnam 535-802, Korea

Abstract: Characteristics of hydrography and tidal currents were investigated in Hampyung Bay through in situ CTD data, tidal currents and elevations. According to the seasonal weather variability, hydrography showed the lower density with high temperature and low salinity in summer and the higher density with low temperature and high salinity in winter. In particular, the thermal structure like a tidal front was formed along the central channel at the neap tide of summer. The critical value of the parameter SH ($=\log_{10}(H/U^3)$ where H is depth and U is M_2 tidal current amplitude) representing the formation position of tidal front was estimated from 2.4 to 3.5. In addition, the potential energy anomaly (ϕ) was ranged between 0.985 and 6.998 Joule/m³, which gradually increased from the mouth into the inner bay. This front may be caused by the unique topography with wide tidal flat and the local difference of tidal current strength. The observed tidal currents at the mouth of bay showed that the ebb time was shorter than the flood time with the increase of depth. This asymmetric ebb-tide dominance is interpreted as a result of tidal distortion by the development of a shallow-water-constituent in Hampyung Bay with a wide macro-tidal flat.

Keywords: tidal flat, tidal front, ebb-tide dominance

요약: 함평만 해역에서 CTD, 조류 및 조석 자료를 이용하여 해수의 물성구조 및 조류 특성을 파악하였다. 이 지역 대기의 계절적 변화에 따라 수온, 염분은 여름철에 고온, 저염의 저밀도 상태를 나타내었으며, 겨울철에 저온, 고염의 고밀도 상태를 보였다. 특히, 여름철 소조기에 중심수로를 따라 조석전선과 유사한 수온 구조가 형성되었으며, 조석전선 위치를 나타내는 SH($=\log_{10}(H/U^3)$), 여기서 H는 수심, U는 M_2 조류진폭)값은 2.4-3.5로 평가되었다. 또한 성층계수(ϕ)는 0.985-6.998 Joule/m³으로 내만으로 갈수록 점차적으로 증가하였다. 이러한 전선구조 발생은 함평만 내부의 넓은 갯벌을 포함하는 독특한 지형학적 특성과 조류 세기의 지역적 변화에 의해 발생하는 것으로 여겨진다. 함평만 입구에서 관측된 조류는 수심이 증가할수록 창조시간 보다 낙조시간이 짧았다. 이러한 조류의 비대칭적인 낙조우세현상은 넓은 대조차 조간대가 분포하고 있는 함평만에서 천해조의 발달로 인한 조석 왜곡 현상 결과로 해석되어진다.

주요어: 조간대, 조석전선, 낙조우세

서론

서해안에 위치한 함평만은 반폐쇄적 내만으로 만 내의 흐름은 주로 바람과 매일 규칙적으로 작용하는 조석에 의해 지배된다. 해수교환은 주로 서남서 방향

의 긴 수로를 통해 서해와 연결되어 이루어진다. 조석은 반일주조가 우세하고 일조부등이 나타나며, 평균조차는 315.45 cm이다(국립지리원, 1983). 함평만은 주변 강이나 하천으로부터 담수 유입이 거의 없어, 해황은 주위 국지기상에 의해 지배되며 국립수산과학원의 함평만 환경조사 결과에 의하면 1991-2005년 동안 함평만의 수온염분은 각각 2.1-29.0°C, 20-34 psu로 연교차가 큰 해역이다.

만의 길이는 17 km이며 최대 폭은 12 km에 달하

*Corresponding author: mrlee@jeonnam.go.kr

Tel: 82-61-275-1021

Fax: 82-61-275-1026

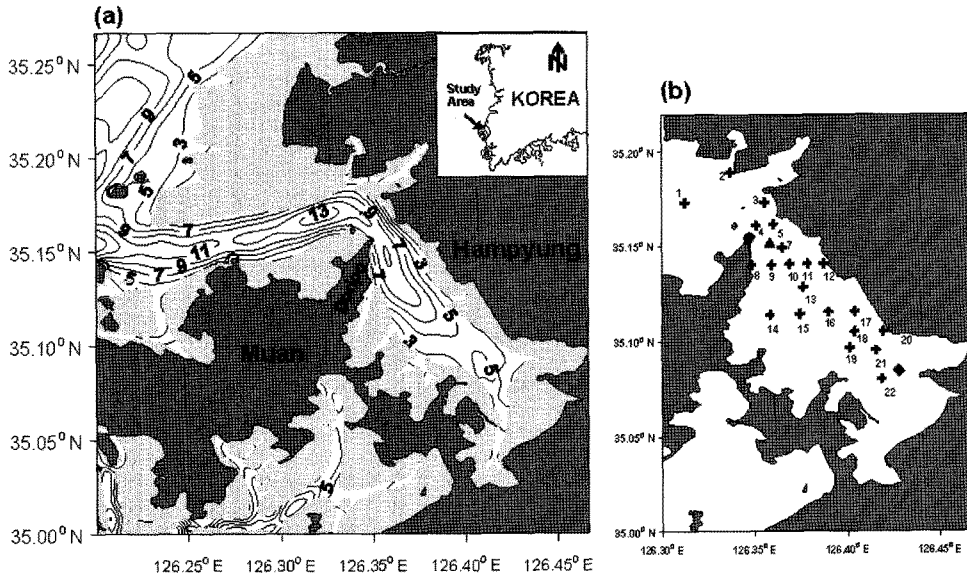


Fig. 1. (a) Bathymetry of study area with bottom contour in meter. Shaded area in the bay represent tidal flat. (b) Observation stations: The cross bar (+) denotes the survey stations of temperature and salinity. The triangle (▲) indicates the location of ADP observation and the circle (●) and diamond (◆) represents the tidal elevation observation stations at the mouth and inner area of bay, respectively.

고, 해수교환이 이루어지는 만 입구의 폭은 불과 1.7 km이다(류상욱 외, 1997). 만 입구에서부터 중앙부로 상대적으로 수심이 깊은 수로가 형성되어 있고, 양쪽 해안과 만의 안쪽으로 갈수록 점차 수심이 급격히 감소하여, 조간대가 4,961 ha로 만 전체면적의 절반 이상을 차지하는 독특한 지형학적 특성을 보인다(Fig. 1). 또한 함평만은 환경보전해역으로 어류 산란과 생육장소로 적합한 장소이나, 유류오염 등 유역내의 오염원 유입시 반 폐쇄적인 지형특성으로 해양환경관리상 많은 문제가 우려된다(조영철 외, 2001).

지금까지 함평만을 대상으로 퇴적환경, 퇴적물의 이동, 해안선 변화 등 지질학적인 관점의 연구가 주로 이루어져 왔다(김여상과 장진호, 1998; 류상욱 외, 1997; 추용식 외, 2000). 근래 들어 습지 보호의 관심이 높아지면서 함평만의 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안을 위한 연구가 수행되었으며(해양수산부, 1999), 조석에 의한 해수순환 수치모델연구(박용우와 조양기, 1999), 조간대 내부의 지은 변화 예측(조은주, 2006), 넓은 조간대를 가진 반 폐쇄적 내만에서의 조류변화(Byun and Cho, 2006) 등 최근 물리해양학적 관심이 고조되고 있다. 그러나 함평만의 종합적인 물리해양학적 특성을 파악하기 위해서는 기본적인 해수물성 및 해수유동 조사연구가 선행되어야

하나 이에 대한 연구는 미미한 실정이다.

따라서 본 연구는 반폐쇄적이며 만 면적의 절반이상이 조간대인 함평만에서 조류, 조류, 수온, 염분 관측 자료를 바탕으로 물질 이동과 분포에 중요한 역할을 하는 해수유동 및 해수물성 구조를 파악하는데 그 목적이 있다. 이러한 연구 결과는 향후 함평만의 연안환경오염관리를 위한 종합적인 대책 수립 등에 좋은 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

재료 및 방법

수온과 염분은 2000년 3-12월까지 10개월 동안 매일 소조기에 고조시를 기준으로 Micro-CTD 3"(FSI)을 사용하여 만내 22개 관측점에서 수심별로 관측하였으며(Fig. 1), 취득된 자료를 바탕으로 함평만 내의 수온, 염분의 수평, 수직구조를 살펴보았다.

함평만 입구에서 ADP(Acoustic Doppler Profiler, Nortek)를 해저에 계류하여 10분 간격으로 25시간 동안 해저 면에서 2.72 m 떨어진 곳에서부터 수직으로 1 m 간격으로 표층까지 흐름을 측정하였으며(Fig. 1), 관측된 유속자료로부터 층별 조류 벡터 및 25시간 평균 한 조류 잔차류 특성을 살펴보았다. 사용된 ADP의 최대분해능은 0.1 cm/sec이고, 정확도는 ± 0.5

cm/sec이며, 관측 시기는 2000년 5월 25일 소조기와 6월 1일 대조기 이었으며 관측기간 동안 만내 관측 정점에서 수온, 염분도 동시에 관측하였다. 대조시 관측된 유속 데이터의 경우 처음 7시간 동안의 자료는 신뢰할 수 없어 사용하지 않았다.

결 과

물성구조

함평만의 해수의 물리적 특성을 파악하기 위하여 관측된 모든 수온, 염분자료를 T-S 다이어그램 위에 표시하였으며(Fig. 2), 인근 목포 기상자료를 이용하여 월별 강수량 및 수평면 일사량을 분석하였다(Fig. 3). 함평만에서 수괴변동은 기상변화와 깊은 상관성을 가지며 순환하는 패턴을 보였다. 염분의 경우 갈수기인 봄철 3-5월경에 평균 31.9-33.0 psu로 고염 상태를 유지하였으며 홍수기인 6월부터 시작하여 10월 사이에 평균 27.4-31.7 psu의 저염 상태를 유지하다가 다시 강수량 감소와 함께 서서히 고염으로 증가 회복세를 보였다. 수온은 겨울철에 일사량 감소로 낮았고 높은 일사량을 유지하는 여름철 7-8월 사이에 높았으며 일사량 감소와 함께 9월 이후로 수온은 감소하였다. 5월의 경우 낮은 강수량과 높은 일사량에 의해 만 내에서의 염분은 상승하였으며, 9월의 경우 높은 강수와 상대적으로 낮은 일사량에 의해 염분은 감소하였다. 또한 8월의 경우 강수량은 9월보다 높지만, 일사량 또한 높게 나타나 고염의 상태를 유지한 것으로 보여 진다.

Fig. 4는 7월과 12월의 수온, 염분 표층수평 분포 상태로 만 입구에서 만 안쪽으로 1차원적인 수평구조를 보인다. 여름철에 해당하는 7월의 경우 수온은 만 안쪽이 만 입구보다 2°C 높고, 염분은 1.2 psu 낮았으며, 겨울철인 12월에는 만 안쪽에서 수온은 1.4°C 낮고 염분은 외해와 0.25 psu 정도로 큰 차이는 보이지 않았다. Fig. 5는 위와 동일한 시기에 관측된 자료를 이용하여 만 중앙 수로를 따라 분석한 수온, 염분 수직단면 구조이다. 대기로부터 일사량 유입과 강수량이 높은 여름철에는 만 안쪽에서 수온과 염분의 성층이 발달한 구조이나, 만 입구 및 주수로 부근에서는 수직혼합이 잘 된 상태였다. 반면에 겨울철에는 대기에 의한 냉각 및 강한 바람의 효과로 인하여 표, 저층 간 수온, 염분 차이가 없는 수직혼합이 잘 된 구조를 보였다.

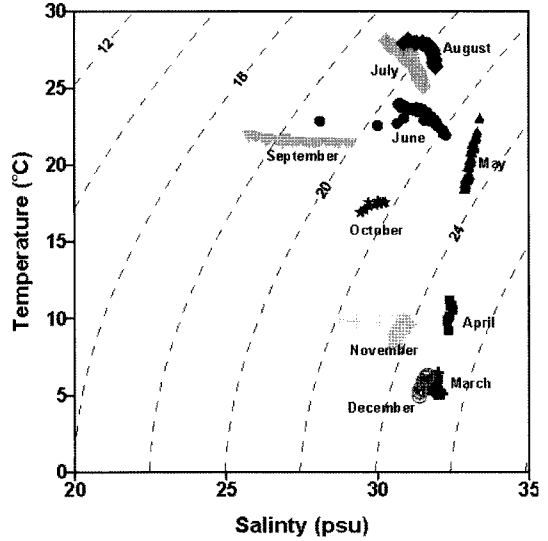


Fig. 2. T-S diagram of Hampyung Bay in 2000.

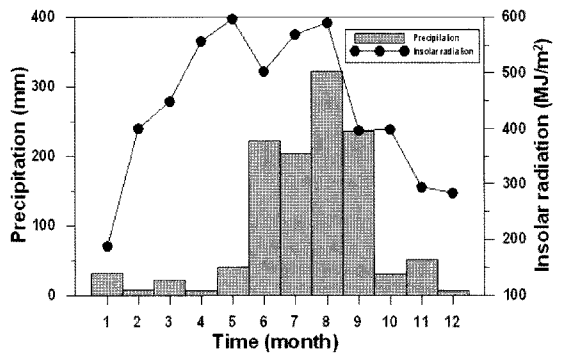


Fig. 3. Monthly precipitation and insolar radiation at Mokpo weather station in 2000.

함평만은 조석활동이 활발한 해역으로 대조와 소조의 변동성이 뚜렷한 지역이다.

따라서 대조와 소조간의 수온, 염분 구조는 다른 모습을 보일 수 있다. Fig. 6은 2000년 5월 25일 소조기와 6월 2일 대조기에 조류관측과 동시에 관측한 수온, 염분 수직분포이다. 두시기 모두 갈수기로 인하여 염분은 전체적으로 만 입구와 만 안쪽에서 수평적인 차이는 보이지만 수직적으로는 표, 저층 간에 큰 차이를 보이지 않은 균일한 상태를 유지였다. 수온의 경우 증가된 일사량으로 인하여 성층현상이 발생하였는데 소조기의 경우 만 중앙부와 만 안쪽에서 강하게 형성된 모습을 볼 수 있었다. 그러나 일주일 후 대조기 6월 2일에 관측결과에서는 표, 저층간의 수온차가 0.2-0.3°C로 크지 않았다.

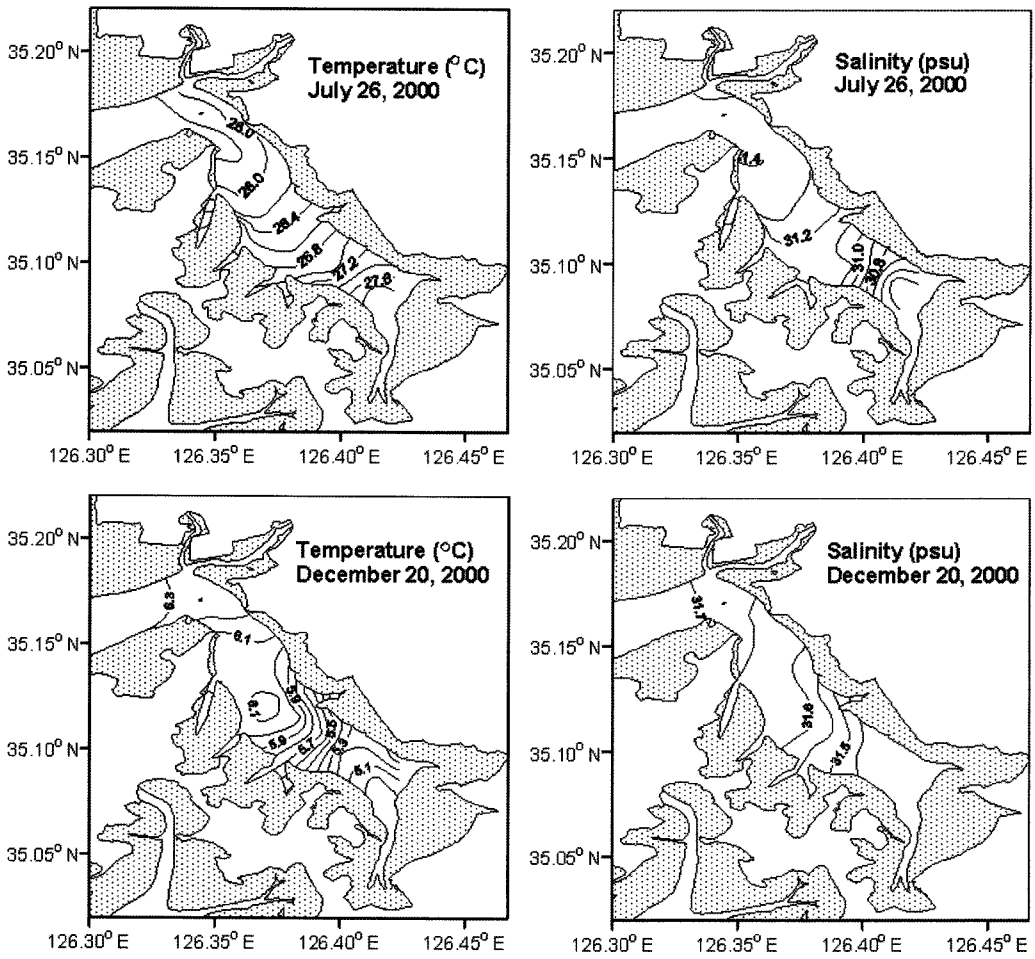


Fig. 4. Horizontal distribution of temperature and salinity in Hampyung Bay.

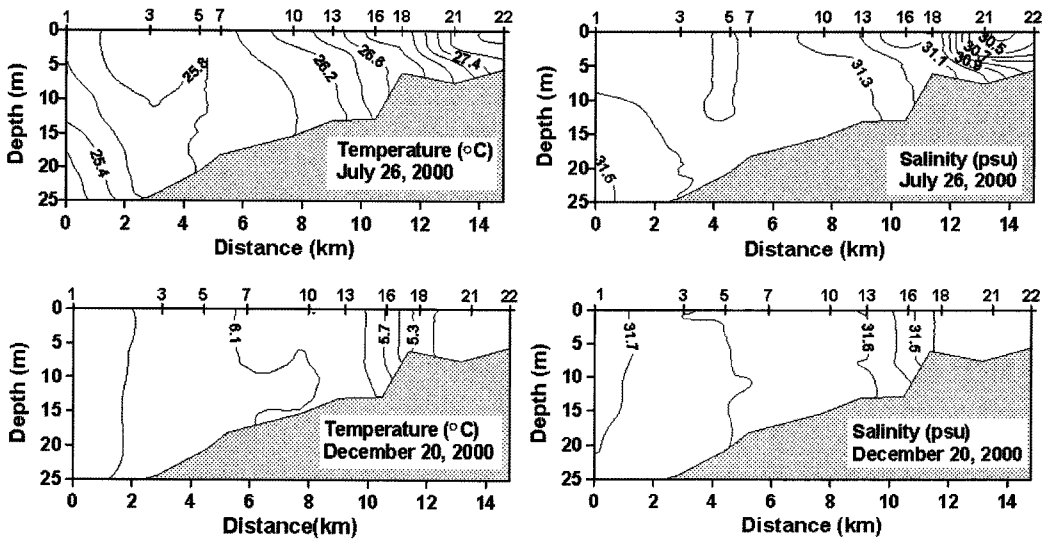


Fig. 5. Vertical sections of temperature and salinity in Hampyung Bay.

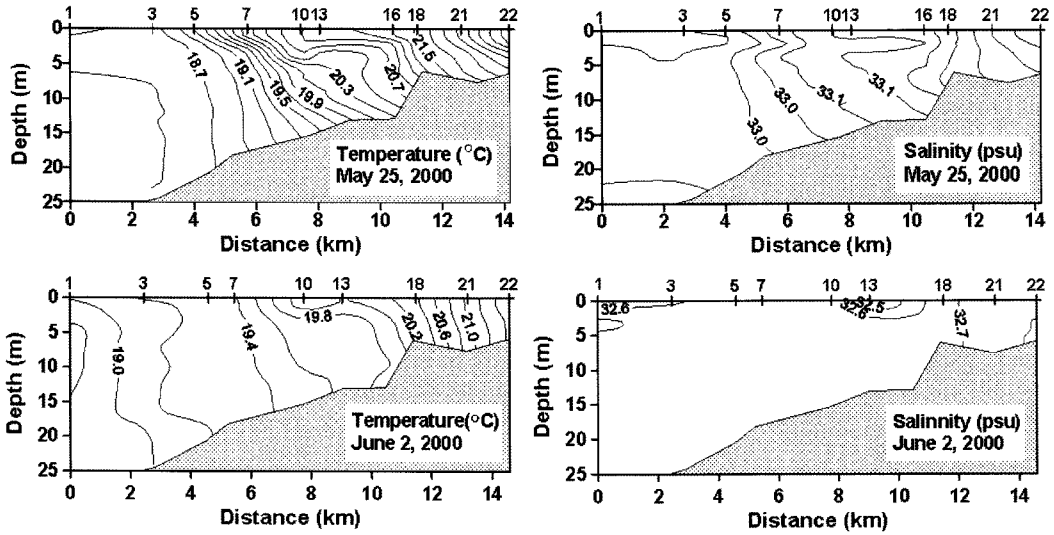


Fig. 6. The neap and spring tidal variation of temperature and salinity.

조류구조

Fig. 7은 Fig. 1b의 ADP(▲) 관측정점에서 각각 소조(2000년 5월 25일, 25시간)와 대조시(2000년 6월 2일, 18시간), 10분 간격으로 조위와 해저 면을 기준으로 수직방향으로 1m 간격으로 관측된 조류를 표층, 중층, 저층을 대표하는 수심에 대해서 조류벡터로 표시한 것이다. 또한 같은 시기에 인근 무안기상대에서 관측한 바람자료를 함께 나타내었다.

조류지속시간을 살펴보면 소조기에는 창조시간이 6시간 50분-7시간 30분, 낙조시간이 5시간-5시간 50분, 대조기에는 창조시간이 6시간 30분-6시간 50분, 낙조시간이 5시간 20분-5시간 40분으로 낙조시간이 창조시간보다 1시간-2시간 30분 정도 짧았다. 그리고 저층으로 갈수록 낙조시간이 표층의 낙조시간보다 20분 이상 짧고, 반대로 창조시간이 길어지는 조류의 비대칭 현상이 심한 것으로 나타났다.

최강유속 발생시기와 세기 또한 비대칭적인 면을 보이는데, 소조시 저고조(lower high water)후 약 1시간-1시간 30분 전후로 0.65-0.77 m/sec, 고고조(higher low water)후 약 1시간 40분-2시간 전후로 0.74-0.85 m/sec의 최강 낙조류가 나타났으며, 저고조 도달전 1시 40분 전후로 0.38-0.68 m/sec, 고고조 도달전 2시간 전후로 0.57-0.86 m/sec의 최강 창조류가 나타났다. 대조시에는 고고조 후 약 2시간 30분 전후로 소조시보다 약 0.3-0.5 m/sec 빠른 0.95-1.21 m/sec의 최강낙조류와 저고조 도달전 1시간 20분 전후로 0.85-1.22 m/sec 최강창조류가 나타났다. 특히, 해저에서 2.72

m 떨어진 저층의 경우, 소조와 대조시 최강낙조류와 최강창조류의 크기 차이는 약 0.1 m/sec 이상으로, 다른 층에 비해 낙조류의 최대유속이 창조류의 최대유속보다 상대적으로 컸다.

소조시 25시간 동안 관측한 수층별 잔차류의 크기는 0.007-0.065 m/sec로, 저층에서는(해저에서 2.72-4.72 m 층) 북서방향이지만, 표층과 중층에서는(해저에서 5.72-10.72 m 층) 남서방향이다. 즉, 해저로부터 4.72-5.72 m 층 사이에서 남북방향의 유향이 양의 값(북쪽)에서 음의 값(남쪽)으로 변한다. 또한 전수층의 평균 잔차류의 크기는 0.013 m/sec로, 상대적으로 큰 저층의 잔차류에 의해 흐름은 북서방향을 나타내었다(Table 1).

토 의

해황특성

함평만에서 2000년 3월부터 12월까지 매일 관측하는 동안 함평만 내에서 수온, 염분의 뚜렷한 수평구배가 자주 관측되며 여름철은 조석전선 구조와 유사한 형태를 보인다(Fig. 5). 보통 조석전선은 외해의 넓은 연안역에 걸쳐 조석의 강한 혼합에너지에 의한 수직 혼합된 수괴와 성층화 된 수괴사이에 형성되는 것으로 알려져 있으며(Simpson and Hunter, 1974), 우리나라에서는 흑산도 주변해역에서 태안반도 해역 및 경기만 주변까지 서해 연안은 조석전선이 발생되는 대표적인 해역이다(승영호 외, 1990; 조양기 외, 1995; 추효상과 조규대, 1984).

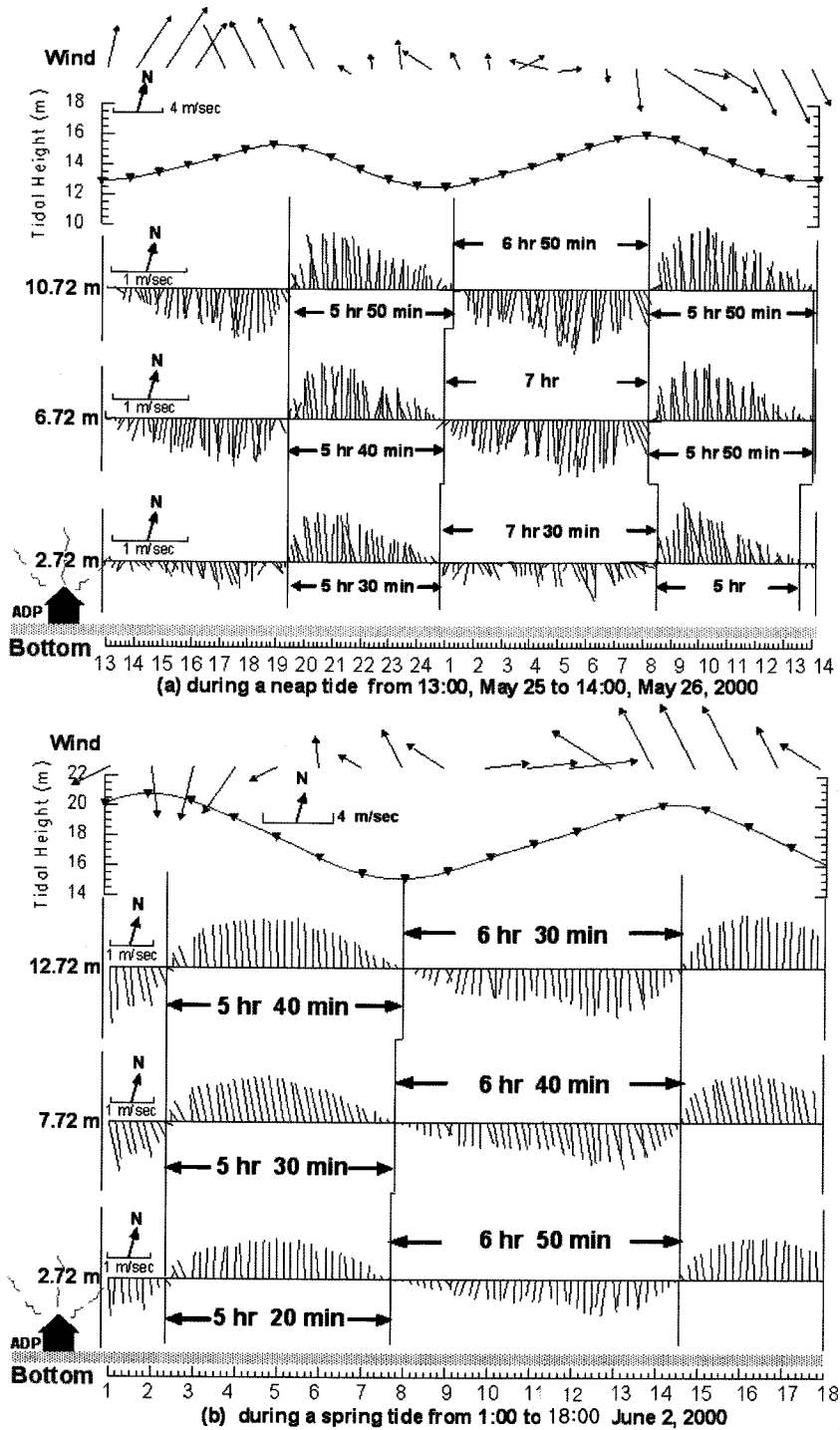


Fig. 7. Vector stick diagrams of velocity observed at the mouth of Hampyung Bay. Arrows indicate the north direction and bars represent the magnitude of velocity.

Table 1. Tidal residual currents with depth at the mouth of Hampyung Bay from 13:00, May 25 to 14:00, May 26, 2000

Depth from bottom (m)	U-velocity (m/sec)	V-velocity (m/sec)	Speed (m/sec)	Direction (deg., E=0°)
2.72	-0.0183	0.0626	0.065	106.3
3.72	-0.0140	0.0412	0.044	108.8
4.72	-0.0144	0.0095	0.017	146.6
5.72	-0.0212	-0.0130	0.025	211.5
6.72	-0.0131	-0.0217	0.025	238.9
7.72	-0.0131	-0.0171	0.022	232.5
8.72	-0.0112	-0.0140	0.018	231.3
9.72	-0.0039	-0.0122	0.013	252.3
10.72	-0.0005	-0.0073	0.007	266.1
Average	-0.0122	0.0031	0.013	165.7

Table 2. Stratification parameter calculated from in situ hydrographic data of Hampyung Bay

Period	Station								Tide
	5	7	10	13	16	18	21	22	
July	1.126	1.165	3.505	3.497	4.368	0.985	6.998	2.576	Neap
December	0.521	1.704	0.947	0.840	0.315	0.233	0.448	0.219	Neap
June	0.665	1.966	2.892	3.467	2.389	1.311	1.017	1.365	Spring

*Unit: Joule/m³

Simpson and Hunter(1974)는 다음과 같은 조석전선의 위치를 나타내는 식을 제시하였다.

$$SH = \log_{10}(H/U^3) \quad (1)$$

여기서 H는 수심, U는 M₂ 조류진폭(tidal current amplitude)이다.

Kasai et al.(1999)은 Clyde 해에서 이 식을 이용하여 조석전선이 SH=2.7-3.7 사이에 놓여 있는 것을 보였으며, Yuasa and Ueshima(1992)는 담수의 유입이 있는 Osaka 만에서 조석전선이 위치한 곳에서 SH=2.7을 가진다고 하였다.

만내 CTD 관측점과 유사한 위치에 해당하는 정점에서 Byun and Cho(2006)가 함평만 내에서 관측한 유속자료의 조화분해 분석 값을 이용하여 SH값을 계산하였을 때 만 중심 수로를 따라 수심이 급격하게 변하는 구간인 조사지점 16과 만 안쪽 조사지점 22 사이에서 2.5-3.4로, Clyde 해와 Osaka 만에서 조석전선이 관측된 지역과 유사한 값을 보였으며, 관측기간 동안 이 지역을 중심으로 수온, 염분 변화가 크게 나타났다.

외해 연안역에서 보이는 전선구조를 살펴보면 연안에 가까울수록 조석에 의한 수직혼합으로 밀도연직편차가 작고 성층이 발달한 외해에서 높은 것으로 나타난다(추효상과 조규대, 1984). Table 2는 함평만 내에서 Simpson et al.(1977)이 제시한 아래 식을 이

용하여 계산한 성층계수(potential energy anomaly) 계산 결과이다.

$$\phi = \frac{1}{H} \int_H^0 (\rho(z) - \bar{\rho})gzdz : \bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_H^0 \rho dz \quad (2)$$

여기서 H는 수심이며, g는 중력가속도 9.8 m/sec², ρ는 밀도이다.

전선구조 형태를 잘 나타내는 7월 소조기의 경우 계산된 성층계수는 함평만 내부에서 0.985-6.998 Joule/m³으로 수직혼합이 활발한 만 입구 조사지점 5 (1.126 Joule/m³)와 수심이 급격히 변하는 조사지점 18(0.985 Joule/m³)에서 가장 낮고, 성층이 발달한 만 안쪽 조사지점 21(6.998 Joule/m³)에서 가장 높아, 전반적으로 만 안쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 만 전체적으로 수직적인 수온, 염분차가 작은 12월과 대조기(6월 2일 관측)의 함평만 내부에서 계산된 성층계수는 각각 0.219-1.704 Joule/m³, 0.665-3.467 Joule/m³으로 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 만 내부 안쪽에서 여름철 소조시 성층이 발달하고, 만 내 주수로를 따라 2.5-3.4의 SH값을 가지는 수심 변화가 큰 지역을 중심으로 물성구조가 구별된다.

보통 만과 같은 해역에서의 조석전선은 강으로부터 담수 유입으로 인해 성층된 해역과 조석에 의한 혼합이 활발한 해역의 경계지역에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Yuasa and Ueshima, 1992). 그러나 담수

Table 3. Harmonic constants of the main tidal constituents and a shallow tide for the mouth and inner station of Hampyung Bay

Constituents Station	M ₂		S ₂		K ₁		O ₁		M ₄	
	amplitude	phase	amplitude	phase	amplitude	phase	amplitude	phase	amplitude	phase
Mouth (Doripo)	175.99	62.03	64.99	91.54	34.91	251.68	25.61	231.68	13.32	167.29
Inner	193.94	57.91	65.62	100.21	33.63	245.19	26.41	219.53	18.56	172.68

*Unit: amplitude in cm, and phase in degree referred to 135°E (Korean Time Zone).

유입원인 강과 하천이 없는 함평만의 경우, 만 내부의 넓은 갯벌을 포함하는 독특한 지형학적 특성과 조류 세기의 지역적 변화에 의해 발생하는 것으로 여겨진다. 함평만의 경우 좁은 만 입구에 비해 넓은 만 면적을 가지고 있어 입구 주변에서 깊은 수심을 유지하고 있으며, 만 안쪽으로 가면서 수심이 감소하고 조간대가 넓게 분포하는 항아리형태의 지형 구조를 보이고 있다. 따라서 만 입구에서 만 중앙부까지는 빠른 조류에 의해 수직혼합이 활발하고, 만 안쪽에서는 낮은 수심과 넓은 조간대가 분포하여 조류에 의한 수직혼합 에너지가 감소하여(박용우와 조양기, 1999; Byun and Cho, 2006) 만 안쪽에서 생성된 성층구조가 잘 유지된다고 할 수 있다. 따라서 급격하게 수심이 변하는 지역을 경계(조사지점 16-조사지점 22)로 만 안쪽 성층구조와 만 입구에서 만 중앙부까지 수직 혼합된 물성구조가 기본적으로 구별되면서 수평구배를 발생하여 조석전선을 생성하다고 할 수 있으며, 특히 이러한 구조는 만 안쪽으로 갈수록 넓은 조간대 분포로 인하여 담수 유입 및 대기로부터 유입된 일사량에 빠른 반응과 조간대 의한 열 교환의 부가적인 효과가 더해져(조은주, 2006) 해수성층구조가 발달한 여름철 소조기에 잘 유지될 수 있을 것으로 보인다.

조류비대칭

조류 관측 결과 함평만 입구에서는 창조시간이 낙조시간보다 약 1시간 이상 길며, 고조 2시간 전후로 최강 유속을 보이는 조류 및 조석은 뚜렷한 비대칭적인 특성을 보인다. 이러한 조류의 비대칭성은 조석이 전파되면서 바다마찰과 넓은 조간대의 발달, 수심과 수로 폭의 변화 등 지형변화에 의한 천해조 발달로 야기되며, 특히 반일주조 우세해역에서는 그 모체가 되는 천문조와 천해조 사이의 위상차이로 해역의 조석 비대칭 특성을 나타낼 수 있다(강주환 외, 1998). 즉 아래 식(3)과 식(4)로 표현되는 M₂ 분조와

M₄ 분조가 함께 해양에서 작용할 경우 각 분조의 상대적인 위상차 $\psi(2\phi_2 - \phi_4)$ 에 의해 조석의 비대칭은 형태가 달라진다.

$$\xi_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t - \phi_2) \quad (3)$$

$$\xi_4(t) = A_4 \cos(\omega_4 t - \phi_4) \quad (4)$$

여기서 ξ 는 각각 분조에 의한 조위변화 결과이고, A는 각각 분조의 진폭, ϕ 는 위상이다. 위상차 $\psi(2\phi_2 - \phi_4)$ 가 0-180° 사이에 있을 경우 창조시간이 낙조시간보다 짧은 창조우세(flood dominant), 180-360° 사이에 있을 경우 낙조시간이 낙조시간보다 더 지속되는 낙조우세(ebb dominant)의 비대칭 특성을 나타낸다.

함평만의 조석 비대칭 특성을 살펴보기 위하여 함평만 안쪽(Fig. 1b의 ◆ 정점)에서 파고계(Wave Tide Recorder, Valeport)를 설치하여, 2000년 5월 1일부터 30일까지 관측한 조위자료와, 1988년 11월 한 달 동안 농업진흥공사(1989)에서 만 입구 도리포 부근(Fig. 1b의 ● 정점)에서 관측한 조위자료를 조화분해 하였으며, 그 결과를 Table 3에 제시하였다. 만 입구와 만 안쪽에서 M₄와 M₂의 진폭비(A₄/A₂)는 각각 0.076과 0.096으로 만 안쪽으로 갈수록 천해조가 발달하고, 특히 조석의 비대칭 정도를 알 수 있는 위상차(2 $\phi_2 - \phi_4$)는 각각 316.77°와 303.14°로 180-360° 사이에 있어, 낙조우세 해역임을 알 수 있다(Table 4). 이러한 결과는 연구해역의 인근인 목포주변해역이 낙조우세해역이라는 분석결과와 유사하다(강주환 외, 1998; 강주환 외 2002). 또한 창조시 최강유속을 보이기 전 1차적인 최강유속에 도달한 후에 다시 최강유속으로 증가하는 쌍봉조류(double-peak tidal current) 현상이 전수층에서 나타났다. 이러한 현상은 특히 대조시에 특히 뚜렷하였으며, 이와 같은 점을 고려해 볼 때 함평만은 넓은 조간대가 분포하여 천해조에 의한 조석왜곡이 심한 지역으로 평가된다(Byun and Cho, 2006).

Table 4. Ratio of the amplitude and the phase difference between the M_2 and the M_4

Station	Mouth (Doripo)	Inner
A_4/A_2	0.076	0.096
$2\phi_2-\phi_4$	316.77	303.14

* A_2 (M_2 tide amplitude), A_4 (M_4 tide amplitude), ϕ_2 (M_2 tidal phase), ϕ_4 (M_4 tide phase)

결론

함평만은 반폐쇄적인 만으로 좁은 만 입구와 넓은 조간대 분포로 독특한 지형 구조를 하고 있다. 함평만은 만 내부로 유입되는 큰 강이 없고, 북서쪽에 위치한 입구를 통하여 해수의 유출입이 이루어지기 때문에 계절적인 기후 변화가 해수특성 변동의 주요 요인으로 분석되었다. 수온, 염분 조사결과 함평만 내부에서는 전선구조가 관찰되었다. 이러한 전선은 지형적인 특성에 의한 조류 마찰에너지 분포차이와 넓은 조간대로 인한 부가적인 효과가 더해져 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이러한 전선은 좁은 내만 내에서 조류변화에 따라 규모 및 위치 변동이 가능할 것으로 보여 전선역의 구조변화 및 생성소멸 과정을 파악하기 위해서는 조석주기별로 창, 낙조시기에 수온, 염분의 집중적인 추가조사가 필요할 것으로 보인다. 특히 이러한 전선역에서는 종종 환경학적으로 영양염류의 분포에도 큰 영향을 미치는데(Yuasa and Ueshima, 1992), 만내에서 작은 규모의 조석전선이 생태학적으로 어떤 역할 하는지에 대한 것도 앞으로 추가적으로 연구되어야 할 사항이다.

함평만의 입구에서 관측된 조류는 뚜렷한 비대칭 현상을 보이고 있으며, 만 안쪽으로 갈수록 조석 비대칭이 강화되며 천해조가 발달하는 것으로 나타났다. 이러한 비대칭 현상은 퇴적물 이동, 물질 수송 등에 많은 영향을 미칠 수 있다. 그러나 이번에 관측된 자료는 단기간의 자료로 함평만 전체적인 상황을 대표하기는 어렵다. 그리고 지금까지 만내의 장기 관측은 한 지점의 고정된 수심 자료가 대부분으로 전체적인 수심에서 관측한 자료 또한 드물다. 그리고 수직혼합된 수괴와 성층된 수괴에서 조류의 회전 특성은 상당히 다르다(Souza and Simpson, 1996). 함평만의 경우 만 안쪽의 성층 발달지역과 만 입구에서 주수로 지역의 수직혼합이 잘 된 두 지역에서 여름과 겨울의 조류/조석 잔차류 차이가 발생할 수 있으며 이에

따른 만과 외해 사이의 해수, 열 그리고 부유/용존 물질 등의 교환특성이 달라질 것으로 판단된다. 따라서 앞으로 함평만 내의 정확한 해수유동 특성과 물질 이동을 파악하기 위해서는 물성구조가 다른 두 지역에서 ADP등을 이용한 전수심 유속의 장기관측과 더불어 수온, 염분 구조 변화 조사가 요구된다.

사사

본 연구는 전라남도해양바이오연구원의 연안환경고유 특성 파악을 위한 연구과제 일환으로 수행되었습니다. 또한 본 논문의 세밀한 심사와 많은 조언을 아끼지 않으신 양우현 심사위원과 익명의 심사위원께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- 강주환, 문승록, 안성모, 2002, 천해조 및 조간대가 발달된 하구에서의 부유사이드 특성. 한국해양해양공학회지, 14, 201-208.
- 강주환, 송재준, 오남선, 1998, 낙조우세와 관련된 목포해역의 조류특성 분석. 대한토목학회지, 19, 185-193.
- 국립지리원, 1983, 연안해역기본조사보고서(임자지구). 국립지리원 연안해역 기본조사 보고서, 70 p.
- 김여상, 장진호, 1998, 한국 남서해안 함평만 조간대의 퇴적작용과 형성과정. 한국지구과학회지, 19, 664-674.
- 농업진흥공사, 1989, 서남해안 간척지 개발사업 합해지구 간척지 개발사업 기본조사. 농업진흥공사 보고서. 465 p.
- 류상욱, 유환수, 김민지, 문병찬, 1997, 한국 서해남부 함평만의 퇴적환경. 한국지구과학회지, 19, 343-353.
- 박용우, 조양기, 1999, 서해안 함평만의 조석에 관한 수치 실험. 한국지구과학회지, 20, 380-387.
- 승영호, 정정호, 박용철, 1990, 황해 중부의 조석전선과 연관된 해양학적 연구: 물리적 특성. 한국해양학회지, 25, 84-95.
- 조양기, 최병호, 정홍화, 1995, 한국 남서해역 조석전선 변화. 한국해양해양공학회지, 7, 170-175.
- 조영철, 이경식, 변도성, 전송미, 이성환, 2001, 함평만 기초해황조사. 전라남도수산시험연구소, 248 p.
- 조은주, 2006, 함평 조간대 내부 온도 변동 특성과 예측에 관한 연구. 전남대학교 석사학위논문, 63 p.
- 추용식, 이희준, 박은순, 이연규, 정갑식, 2000, 만 입구에서 부유퇴적물 거동과 플럭스: 한반도 서해 남부 함평만의 여름철 특성. 한국해양학회지, 5, 105-118.
- 추효상, 조규대, 1984, 1982년 하계 서해안 조석전선의 구조. 한국수산학회지, 17, 83-81.
- 해양수산부, 1999, 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구. 해양수산부 보고서, 875 p.

- Byun, D.S. and Cho, Y.K., 2006, Double peak-flood current asymmetry in a shallow-water-constituent dominated embayment with a macro-tidal flat. *Geophysical Research Letters*, 33, L16613, doi:10.1029/2006GL026967.
- Kasai, A., Rippeth, T.P., and Simpson, J.H., 1999, Density and flow structure in the Clyde sea front. *Continental Shelf Research*, 19, 1833-1848.
- Simpson, J.H., Hughes, D.G., and Morris, N.C.G., 1977, The relation of seasonal stratification to tidal mixing on the continental shelf. In Angel, M.(ed.), *A voyage of discovery*. Supplement to *Deep-Sea Research*, 24, 327-340.
- Simpson, J.H. and Hunter, J.R., 1974, Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250, 404-406.
- Souza, A.J. and Simpson, J.H., 1996, The modification of tidal ellipses by stratification in the Rihne ROFI. *Continental Shelf Research*, 16, 997-1007.
- Yuasa, I. and Ueshima, H., 1992, A tidal front in winter influenced by river discharge. *Journal of oceanography*, 48, 239-255.

2008년 12월 26일 접수
2009년 2월 11일 수정원고 접수
2009년 3월 23일 채택