

여수해만 수온의 시공간적 변동특성

추효상*

전남대학교 해양융합과학과 교수

Temporal and spatial fluctuation characteristics of sea surface temperature in Yeosu Bay, Korea

Hyo-Sang CHOO*

Professor, Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

Temporal and spatial fluctuations of surface water temperature in Yeosu Bay for the period from 2010 to 2011 were studied using the data from temperature monitoring buoys deployed at 32 stations in the south coast of Korea. Temperatures in the northern part of the bay are higher in summer and lower in winter than in the southern part of the bay. The lowest and highest temperature of the annual mean are found at the eastern coast of POSCO and at the west of Dae Island, respectively. Cold water masses appear at estuarine area when the discharge of Sumjin river is affluent. Amplitude of temperature fluctuation whose period is less than semi-diurnal is largest at Hadong coast and around Dae Island. Spectral analysis of surface water temperature shows a significant peak at a periodic fluctuation of 0.5 to 24 days and about 15-day period of predominant fluctuation is most frequent in Yeosu Bay. From the cross-correlation analysis of temperature fluctuations, Yeosu Bay can be classified into six areas; the south area affected by South Sea of Korea, the mixed area in the center of the bay, the estuarine area affected by river discharge at the north of the bay, the hot waste water area near Hadong coast, the area around Dae Island and the area near Noryang Channel affected by the water in Jinju Bay, respectively.

Keywords: Yeosu Bay, Surface water temperature, Time-series analysis, Sumjin River discharge, Temporal and spatial fluctuation

서론

한국 남해안 중앙부에 위치하는 여수해만은 여수반도와 남해도 사이에 있는 좁고 긴 수로와 북쪽 하동연안의 광양만 동쪽 일부를 포함하는 해역을 말한다. 보통 여수해만이라고 하면 여수반도와 남해도 사이의 수로까지만 지칭하는 경우가 많으나, 광양만이 1970년대부터 국가

공업단지 조성을 위한 연안 매립 공사가 진행되어 섬진강 하구를 중심으로 POSCO(광양제철소), 광양컨테이너항, 여천공단을 비롯한 각종 공단이 조성됨에 따라 POSCO~여수반도 북단의 서쪽해역까지를 편의상 광양만이라 부르고, POSCO~섬진강하구~하동연안~남해도 북쪽해역은 여수해만에 포함시키기도 한다(Yoon and

*Corresponding author: choo@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7144, Fax: +82-61-659-7149

Kim, 1994; Kim et al., 2007; 2008). 따라서 섬진강 하구를 포함한 여수해만은 북쪽에서 하천수가 방류되고, 서쪽은 광양만 내 공업단지로부터의 풍부한 염양염류가 공급되며, 남쪽은 대마난류와 남해연안수가 혼합된 혼합수의 영향을 받는 외해수가 유입되어 예로부터 각종 어류의 산란장 및 색이장으로 각종 정치망을 중심으로 많은 어업이 성행해 온 남해안 중심어장 중 하나이다 (Kim et al., 1989).

여수해만은 남쪽으로는 남해 외해와 접하고 북쪽은 하동연안을 따라 진주만과 연결되며, 광양만 동쪽 입구 부의 묘도, 섬진강 하구 주변의 태인도, 하동 연안의 대도 등 크고 작은 섬들이 산재해 수심이 얇고 지형이 매우 복잡하다(Fig. 1). 수심은 섬진강 하구 주변이 5 m 이하로 얇고, 하동연안 노량수로와 남쪽 여수반도~남해도 사이 수로는 20 m 이상으로 깊다. 여수해만 중 가장 수심이 깊은 곳은 여수반도북단~남해도 사이 Y자 모양 해역으로 30 m 이상의 수심(최대 34 m)을 가진다. 또 광양만 동쪽의 POSCO~묘도수로와 노량수로로 통하는 하동연안 대도서쪽과 동쪽수로는 10~20 m 정도의 수심으로 섬진강하구와 주변 여수해만 북쪽해역과는 상대적으로 급한 해저경사를 이룬다. 여수해만 내 해수유동은 조석·조류현상이 지배적이거나 계절적으로 하천유량에 의한 흐름이 하구역과 주변해역의 유동구조에 영향을 미치기도 한다(Lee, 1994; Kang et al., 2011; Kim et al., 2006a; 2005; 2008). 여수해만의 조류는 창조시 남해 외해로부터 북류하여 유입된 해수가 POSCO 남단 최심부 부근에서 분기되어 일부는 광양만의 묘도 남쪽과 북쪽 수로를 흐르고 일부는 대도남쪽과 북쪽수로를 지나 노량수로로 빠져나가는 패턴이며, 낙조시는 대체로 이와 반대방향의 흐름 양상을 보인다(Choo, 2007; Choo and park, 2007). 조류와 함께 계절적으로 유출되는 여수해만 내 섬진강하천수의 거동은 Kim et al. (2006b)이 수치실험을 통해 표층 저염분수가 대기 최강낙조류시 광양만 입구와 섬진강하구에 24 psu의 약한 염분전선을 형성하고, 이러한 수평염분분포는 조류에 크게 영향을 받고 있음을 재현하였다. Park et al. (2012)은 조석과 우기, 건기의 강물유출량에 의해 염분 및 각종 수질요소의 변동이 결정되고 염분소 분포는 하천수 유출량과 관련성이 있음을 제시하였고, Noh et al. (2011)은 수치실험에서 섬진강 하구의 flushing 방류가 수질개선과 염분침입

방지에 매우 효과적이며, 하천 유량이 많을 경우 염분을 하천 하구로 밀어내고 하천유량이 작으면 염분이 좀 더 상류로 침입하는 결과를 제시하였다. 또 Kwon et al. (2001)은 섬진강 하구역의 영양염 유입원, 강우량과 영양염 및 엽록소 a의 관계를 조사했고, Lee et al. (2010)은 조석주기별로 섬진강 하구를 비롯한 여수해만 해저면의 부유물 농도와 크기를 측정해, 부유물의 분포와 거동을 조사하였다.

연안해역의 연간 표층수온은 해류, 조류에 의한 열의 이류와 연직혼합과정을 통한 대류, 대기와 해면을 통한 열교환 등에 의해 결정되며(Simpson et al., 1990), 이와 동시에 대기와의 상호작용으로 열과 수증기, 운동량 등을 교환하여 기상 및 기후변동에 영향을 미친다(Gill, 1982). 또 연안수온은 매년 유사한 연 변동 주기에 따른 계절변화와 함께 비계절적 변동을 한다(Kang and Gong, 1987). 우리나라 연안수온의 변동에 관한 연구는 주로 조화분해법을 사용한 분석에서 대체로 계절적 연 변동 주기에 영향을 받고 있는 것으로 고찰되었다(Gong, 1968; Hahn, 1970; Lim, 1972; Kim, 1983; Kang, 2000). 한편, 여수해만의 수온변동에 관해서는 Han

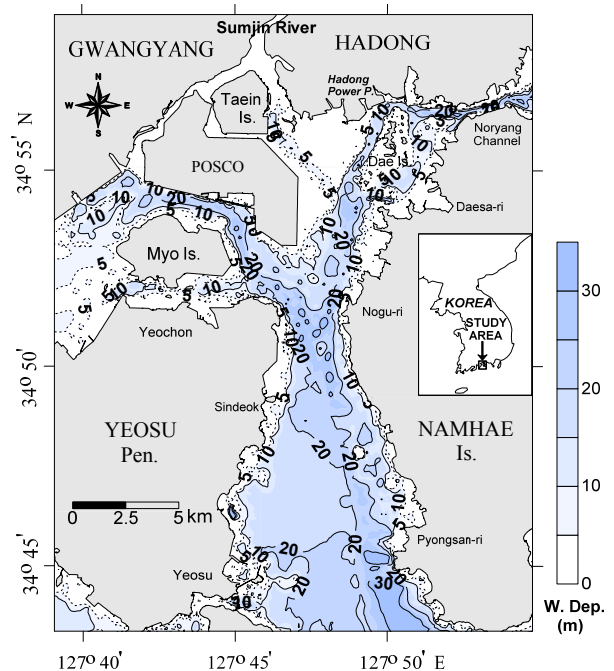


Fig. 1. Bottom topographical map of the Yeosu Bay in Korea. Contours represent depth in meters.

(1975)이 POSCO가 건설되기 전 광양만과 여수해만의 수온·염분조사를 통해 최고와 최저수온은 9월과 1월에 출현해 연간 온도차가 약 20℃임을 조사하였고, 이러한 온도차는 동 해역이 대기영향을 매우 크게 받고 있기 때문임을 지적하였다. 또 Kim et al. (1989)은 정지망어장과 관련된 여수해만역의 해황변동 조사에서 수온은 봄과 여름, 연안이 높고 외해쪽이 낮으며 가을과 겨울 이러한 수온분포는 반대가 되며, Choo et al. (2002)은 계절별 CTD조사와 진단모델실험으로 계절에 따른 여수해만 남북방향의 밀도분포에 대해 설명하였다. 그리고 Min and Kim (2006)은 여수를 포함한 우리나라 연안의 장기 수온측정시계열로부터 low-pass 필터와 경험적 직교함수분석을 통해 표층수온의 연변동특성을 파악하였다.

그러나 지금까지의 이러한 여수해만 일부 해역의 계절 수온조사나 단일 정점의 장기측정에 의한 수온분석 연구는 연중 여수해만에 영향을 주는 남해 외해수, 노랑수로를 통한 진주만내수, 섬진강 하천수, 하동연안에서 배출되는 온배수와 같은 여수해만 내 수온변동에 직접적인 영향을 주는 해수들의 영향을 세부적으로 파악하기 어려웠고 또한 이들의 영향이 어디까지 미치는지 알 수 없었다. 본 연구는 여수해만 남쪽입구에서 광양만묘도주변, 노랑수로, 하동연안, 섬진강하구에 이르는 여수해만 전역의 1년 연속 장기계류부이에 의한 수온관측 시계열, 대기, 조위, 하천유량 측정시계열로부터 조화분석, 주파수영역의 스펙트럼과 coherency 분석, 상호상관성분석을 시행해 여수해만 수온의 조석 및 비조석 특성을 파악하고, 이들의 시공간적 변동특성에 대해 논하였다.

재료 및 방법

여수해만 해역의 표층수온 분포와 그 변동특성을 파악하기 위해 Fig. 2의 32개 수온모니터링 정점에서 2010~2011년(1년) 수온연속 관측을 실시하였다. 수온관측은 해수면 약 50 cm 깊이에 소형 정밀수온계 (Magic-T100, GnC Bio Co., Korea, 최대분해 0.005℃, 정확도 ±0.02℃)를 설치하여 60초 마다 연속 측정하였다. 측정된 자료는 매시 평균(mean)값을 산출해 내외부적 잡음을 제거하였으며, 자료의 검·보정을 거친 다음 연속시계열 자료로 사용하였다.

또한 하동군 금남면 덕천리의 금남 AWS (St.28 주변), 여수시 월내동의 여천 AWS (St.8 주변), 여수시 고

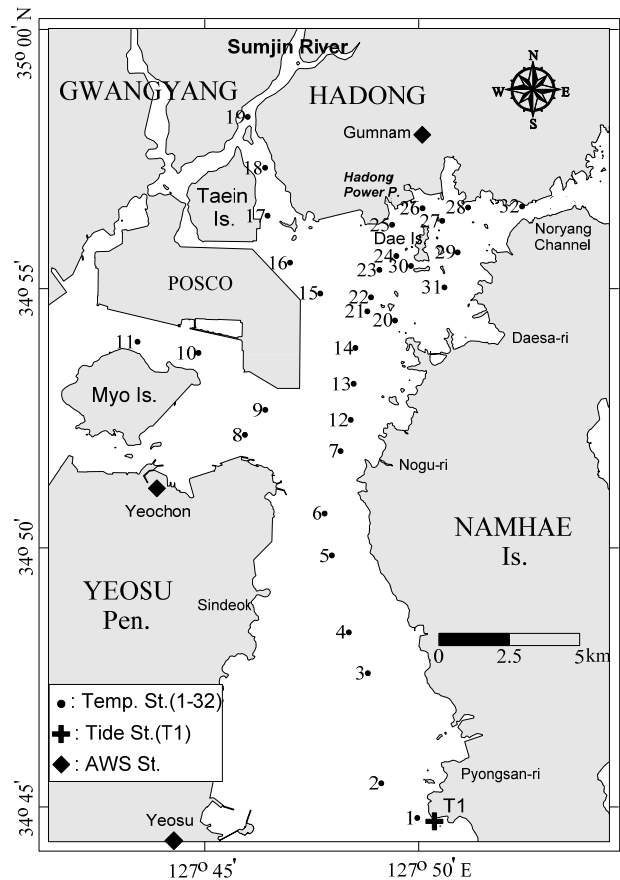


Fig. 2. Locations of temperature monitoring, tide observation and automatic weather observation system (AWS) stations in the research area around Yeosu Bay.

소동의 여수 AWS (St.1 주변) 지점에서 측정된 기온, 풍향, 풍속자료(기상청)를 분석에 이용하였다(Fig. 2). 해역 내 유입되는 하천유량에 대해서는 경남 하동군 하동읍 읍내리 하동2지점(섬진교, 경도 127°44'25" 위도 35°03'60")에서 수온측정기간과 동일시기의 섬진강 하천 유량측정 자료(WAMIS, 2015)를 활용하였다. 하동2지점 주변해역은 하천 유출수와 해수가 만나는 지점으로 알려져 있다. 수온측정과 함께 2011년 1월, 4월, 8월, 10월 각 1달 동안 St.1 주변 St.T1에 조위계를 설치하여 조석변화를 측정하였다. 조위는 매 10분 간격으로 측정 한 후, 매시 평균값을 추출하여 분석에 활용하였다. 수온 연속측정 중 일부기간은 기기의 기계적 오류와 자료가상이 발견되어 분석에서 제외하였다. 한편, 몇몇 정점 (St.8~11, 31)은 관측기간 중의 기기 유실로 자료손실이 발생해 일부 구간 자료를 얻을 수 없었다.

자료분석은 계절변동 특성파악을 위해 St.1~32의 표층수온, 3개 기상관측 지점의 기온, 풍향, 풍속에서 최소 좌승법으로 1년 및 반 년 주기분석을 시행하였다. 또 조석변화에 따른 변동을 파악하기 위해 조화분석법 (Foreman, 1978; Pawlowicz et al., 2002)을 사용해 64개 분조의 진폭과 지각을 구하였다. 한편, 각 정점 자료의 주기변동특성을 조사하기 위해 40시간 low-pass 필터링과 40시간 및 30일 high-pass 필터링 기법을 각 시계열 자료에 실시하였다. 조석과 조류가 강한 여수해만 해역은 반일과 일일 주기변동이 탁월하고, 이 변동으로 야기될 수 있는 관성주기(약 19~21시간)와 그 밖의 준 관성주기(내부파)로 알려진 약 1.7일(약 40시간) 주기가 존재할 수 있다. 따라서 40시간 low-pass 필터링은 이러한 조석-조류에 의한 단주기 성분의 제거를 위한 것이다 (Roy and Heston, 1981; Rory, 1983). St.T1 지점에서 측정된 조위자료는 조화분석을 통해 34개의 조화상수(4대 분조 포함)를 구하였다. 조석과 수온, 대기요소(기온, 바람)와의 관계를 파악하기 위해 시계열해석, 시계열의 스펙트럼 분석, 코히런스(coherence)분석, 상관계수 분석 등을 시행하였다.

결 과

수온의 계절변동

Fig. 3에 여수해만 해역 내 32개 정점 중 광양만 입구

를 포함한 남북 라인(St.1, 3, 6, 9, 11, 13, 15, 17, 19)과 하동연안의 대도주변 라인(St.20, 22, 23, 24, 31, 29, 27, 28, 32)의 수온 시계열을 나타낸다. 수온은 매시간 평균 자료이다. 또 Table 1에 매시 수온변화에 40시간 low-pass 필터링 처리를 한 후, 정점별로 최저, 최고, 연평균 및 평균편차를 제시한다. 측정기간 중 결측이 많은 정점은 * 표식을 붙였다. 한편, 여수해만 주변 3개 AWS 지점 (YS: 여수, YC:여천, GM: 금남(하동))의 기온에 대한 통계지도 함께 제시했다.

Fig. 3에서 하동연안 St.22~24, 여수해만 북쪽 섬진강 하구주변 St.15~19에서 단주기 변화가 다소 큰 것을 제외하면 수온은 대체로 계절에 따른 변동이 뚜렷하다. 수온의 단주기변동이 큰 해역은 하동연안의 대도서쪽에서 POSCO 동쪽까지로, 타 정점에 비해 수심이 상대적으로 얇고, 하천수와 인근 해안에서 배출되는 온배수가 존재하는 곳이다. 수온은 계절변동과 함께 동계 1월 말(1월 29일 경) 최저를 보이고, 하계는 8월 전후(7월 25일~9월 18일)에 최고를 나타낸다. 일부 결측 정점을 제외한 여수해만 내 연중수온의 최저(Table 1)는 1.8~8.2℃로, 북쪽 섬진강 하구(St.19)에서 가장 낮고 정점 St.25에서 가장 높다. 외해와 접한 남쪽(St.1~2)은 약 6.0℃로 중, 북부보다 1℃ 정도 높다. 해역 중 수온이 가장 낮은 곳은 섬진강 하구~POSCO 동쪽(St.15~19)의 4℃ 이하이다. 최고수온은 하동연안 St.24~25를 제외하면

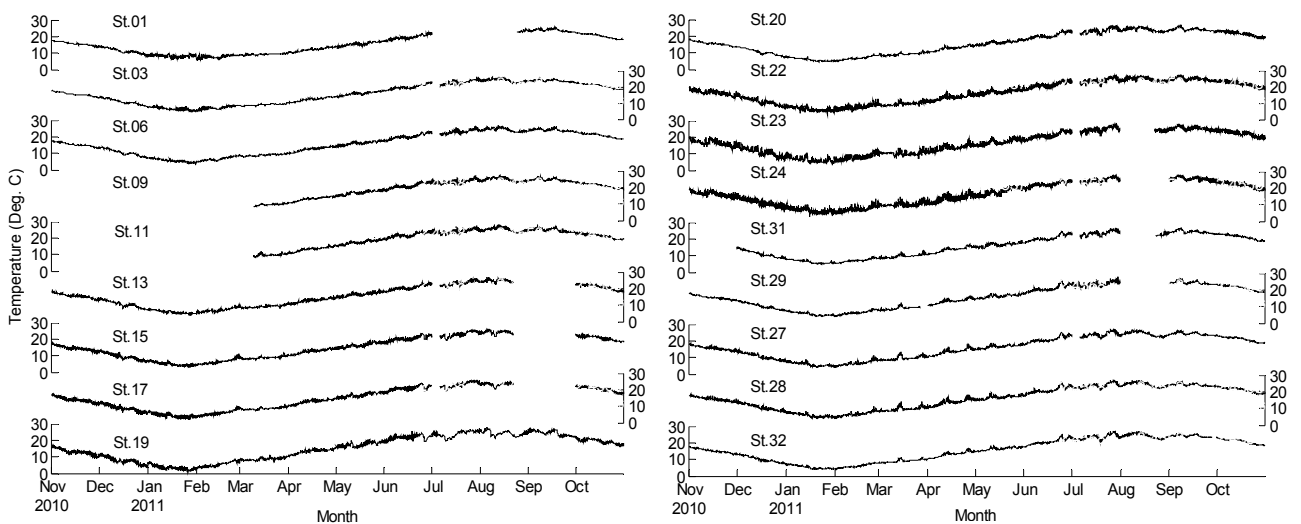


Fig. 3. Surface water temperature time series for stations 1~19 (left, north-south line) and stations 20~32 (right, around the Daedo line) from November 2010 to October 2011.

Table 1. Statistics for low passed surface water temperature from St.1 to St.32 and air temperature in AWS stations of Yeosu, Yeochon and Geumnam from November 2010 to October 2011

St.	Min. (°C)	Max. (°C)	Ann. Mean (°C)	S.D. (°C)	St.	Min. (°C)	Max. (°C)	Ann. Mean (°C)	S.D. (°C)
1	6.3	25.1	15.9	5.79	19	1.8	27.0	15.3	7.44
2	5.7	25.9	15.8	6.20	20	5.0	25.7	15.8	6.53
3	5.1	25.4	15.7	6.28	21	5.2	26.2	16.2	6.51
4	4.6	25.5	15.6	6.41	22	5.1	26.3	16.4	6.56
5	4.4	25.5	15.7	6.48	23	4.9	27.1	16.6	6.58
6	4.3	25.7	15.7	6.59	24	4.6	27.3	16.9	6.90
7	4.6	25.5	15.7	6.48	25	8.2	27.8	19.3	5.55
8*	8.6*	26.1*	-	-	26	4.8	26.6	16.3	6.51
9*	8.6*	26.1*	-	-	27	4.6	26.4	16.1	6.63
10*	8.5*	26.4*	-	-	28	4.7	26.7	16.1	6.61
11*	8.3*	26.9*	-	-	29	4.6	26.0	15.9	6.65
12	5.0	25.5	15.8	6.43	30	4.8	26.9	16.3	6.57
13	4.7	25.6	15.8	6.43	31*	5.3*	26.3*	-	-
14	4.8	25.6	15.9	6.46	32	4.1	26.4	15.8	6.73
15	3.8	25.6	15.3	6.60	Total	4.7	26.1	16.0	6.53
16	3.6	25.4	15.3	6.64	YS AWS	-7.2	29.2	13.8	8.99
17	3.3	25.3	15.2	6.73	YC AWS	-7.9	29.9	14.6	9.24
18	3.0	26.0	15.2	7.07	GN AWS	-8.0	29.9	13.8	9.38

* Lack of data due to missing.

25.1°C (St.1)~27.8°C (St.19)로 해역 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 높아진다.

연 평균수온은 POSCO 동쪽(St.15~19)이 15.2~15.3°C로 해역 중 가장 낮고, 하동연안의 대도서쪽(St.21~28, 30)이 16.1~19.3°C로 가장 높다. 해역 남~중앙부(St.1~14)는 15.6~15.9°C, 노량수로~대도동쪽(St.29, 32)은 15.8~15.9°C이다. 표층수온의 표준편차(S.D.)는 해역 남쪽(St.1)이 작고, 북쪽(St.19)에서 크다. 표준편차의 최저치는 St.25에서 출현한다. 여수, 여천, 금남(하동) AWS에서 연 중 측정된 기온은 최저 -7.2~-8.0°C, 최고 29.2~29.9°C로, 최저는 표층수온보다 12.4°C 낮고, 최고는 3.6°C 높다. 표준편차는 9.2°C로 표층수온보다 약 2.7°C 크다.

Fig. 4는 여수해만 남북라인(St.1~7, 12~19)에서의 수온 연 변화를 나타낸다. 수온은 11~12월 18°C에서 점차 6°C로 낮아지며, 남북 정점 간 수온 차는 2~4°C이다. 남북 간 수온은 1월 하순 북쪽(St.19)이 2°C, 남쪽(St.1) 8°C로 차가 가장 크다. 그러나 2월로 접어들면 수온의 수평경도가 급격히 감소해 3월 중순~4월 초순 모든 정점이 거의 균일한 수온을 가지면서 9~12°C까지 상승한다. 4월 중순~6월 하순은 12~22°C로 점차 증가하나 북

쪽이 남쪽보다 더 빨리 상승해 남북 간 약 2°C의 수온차를 가진다. 7~8월은 대체로 22~24°C 분포로, 북쪽에

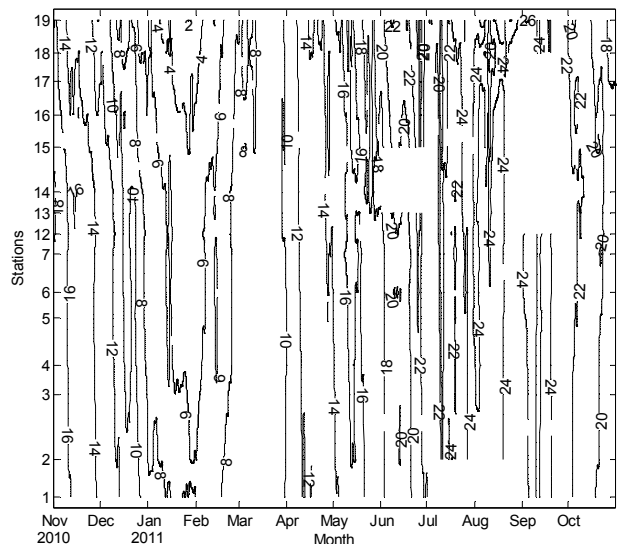


Fig. 4. Low-passed surface water temperature change in the north-south line (stations 1 to 7 and 12 to 19) from November 2010 to August 2011.

20~22℃의 저 수온이 해역에 번갈아 출현하는 양상을 보인다. 9~10월의 수온은 24~18℃로 점차 하강하고, 또 북쪽정점 수온이 남쪽보다 먼저 내려가는 수온하강기 분포패턴을 나타낸다.

기온변동에 따른 수온변화를 비교하기 위해 여수해만 남쪽(St.1), 중앙부(St.12), 북부 섬진강 하구(St.18), 북동쪽 노량수로(St.32)의 표층수온과 해당해역 주변 기온의 연 변화를 Fig. 5에 나타낸다. 4월 초순 이후 기온은 수온보다 높은 값을 유지하나, 9월 초순부터는 수온이 기온보다 높다. 기온 상승기의 기온과 수온의 최대차는 2~3℃로, 7월 초~하순 출현한다. 기온하강기 수온과 기온의 최저온도차는 5~7.5℃로, 기온상승기보다 컸으며 1월 중순경 나타난다. St.18은 기온과 수온변동 위상이 가장 일치하는 정점이고, 기온과 수온의 온도차도 타 해역보다 작아 해역 중 대기영향에 가장 잘 반응한다.

동계의 기온과 수온 차는 외해에 인접한 St.1이 가장 크고, 이어서 St.32, St.12 순서이며 북쪽 내륙에 위치한 섬진강 하구(St.18)에서 가장 작다.

표층수온과 기온변동에 대한 연 주기와 반년주기 분석을 실시해 각각의 조화상수를 구하였다(Table 2). 기온의 연 변동과 반년변동 진폭은 평균 12.4℃, 1.4℃인데 반해 수온은 평균 9.2℃(기온의 74%), 1.2℃(86%)로 변동 폭이 작다. 기온과 수온의 최고치 위상은 7월 27일(264.6°)과 8월 12일(280.1°)로 기온의 위상이 약 15일 정도 빠르다. 수온의 연 변동 진폭이 가장 큰 곳은 St.19, 가장 작은 곳은 St.25이다. 정점 St.25를 제외하면 여수해만 남쪽 St.1의 연 변동 진폭이 8.3℃로 가장 작고, 해역 중앙에서 북쪽(St.19)으로 갈수록 커진다. 연 변동의 위상도 진폭과 유사하게 St.1이 284.9°로 가장 늦고, 해역 중앙을 거쳐 북쪽으로 진행할수록 271.7°로 점차 빨

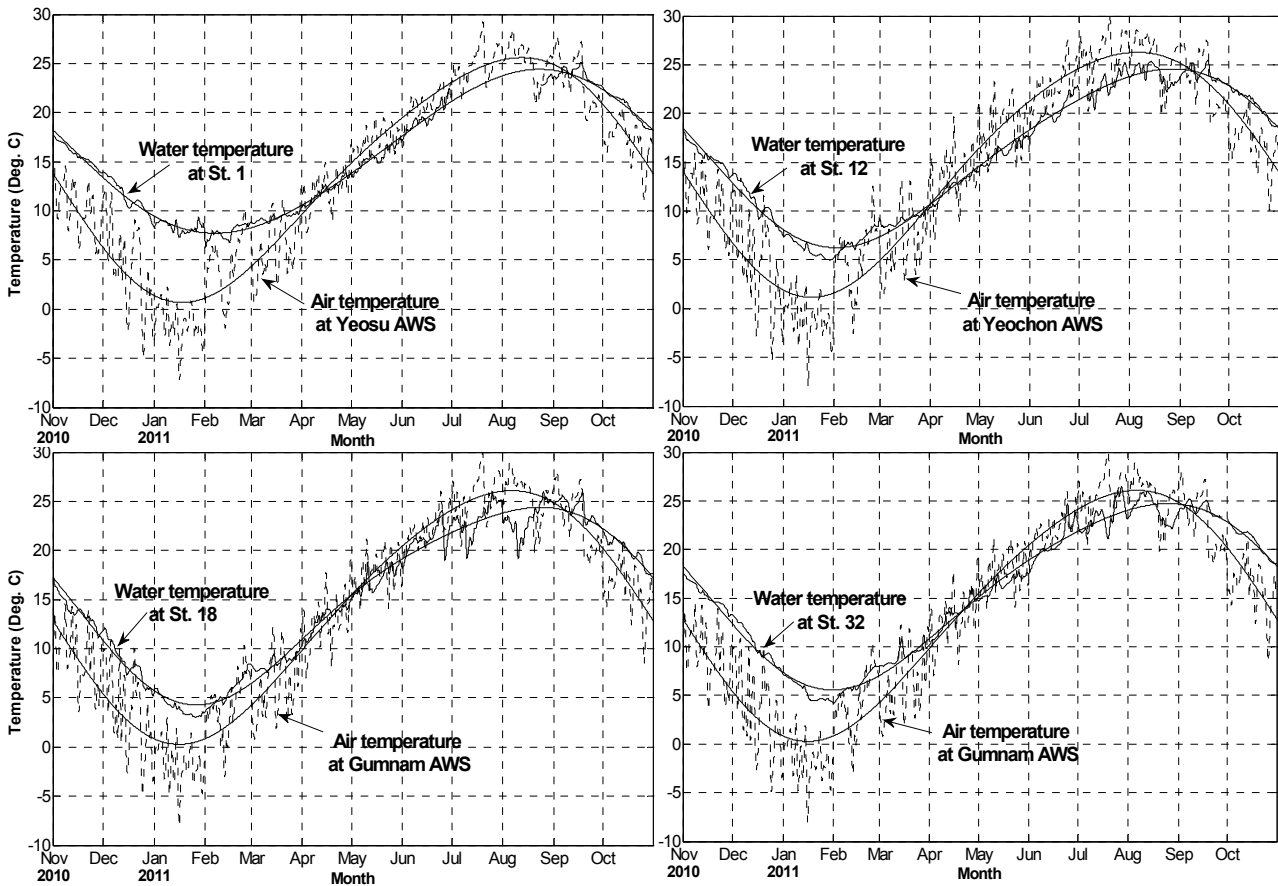


Fig. 5. Annual variations and their harmonic components of sea water temperatures at stations 1, 12, 18 and 32 and air temperatures at AWS stations in Yeosu, Yeochon and Gumnam from November 2010 to October 2011 (Dotted lines are observed. Solid lines are computed with harmonic components for sea water and air temperature, respectively).

Table 2. Annual and semi-annual harmonic constants of surface water temperatures at St.1~32 and air temperatures at Yeosu, Yeochon and Gumnam AWS station

St.	Annual		Semi-ann.		St.	Annual		Semi-ann.	
	Amplitude (°C)	Phase (°)	Amplitude (°C)	Phase (°)		Amplitude (°C)	Phase (°)	Amplitude (°C)	Phase (°)
1	8.3	284.9	0.6	285.5	19	10.3	271.7	1.4	315.1
2	8.7	283.3	0.6	298.7	20	9.1	281.6	1.1	320.8
3	8.8	282.7	0.9	311.7	21	9.1	281.2	1.2	324.0
4	9.0	282.3	1.0	315.8	22	9.1	281.0	1.2	323.3
5	9.0	281.7	1.1	318.8	23	9.3	280.9	1.2	311.1
6	9.2	281.3	1.1	318.3	24	9.8	278.9	1.0	318.5
7	9.1	281.7	1.2	316.4	25	7.6	280.6	1.4	350.3
8*	-	-	-	-	26	9.3	281.2	1.3	352.5
9*	-	-	-	-	27	9.2	279.4	1.2	325.1
10*	-	-	-	-	28	9.2	279.2	1.2	325.5
11*	-	-	-	-	29	9.5	280.4	1.2	315.5
12	9.0	281.9	1.0	319.1	30	9.1	279.4	1.1	323.3
13	9.2	280.6	1.1	315.6	31*	-	-	-	-
14	9.2	280.7	1.2	316.9	32	9.4	279.2	1.2	323.5
15	9.4	279.2	1.3	314.0	Total	9.2	280.1	1.2	319.3
16	9.5	278.2	1.4	316.1	YS AWS	12.2	266.9	1.5	292.8
17	9.5	276.0	1.4	323.4	YC AWS	12.4	263.6	1.3	303.2
18	9.8	274.5	1.5	321.2	GN AWS	12.7	263.4	1.3	288.1

* Lack of data due to missing.

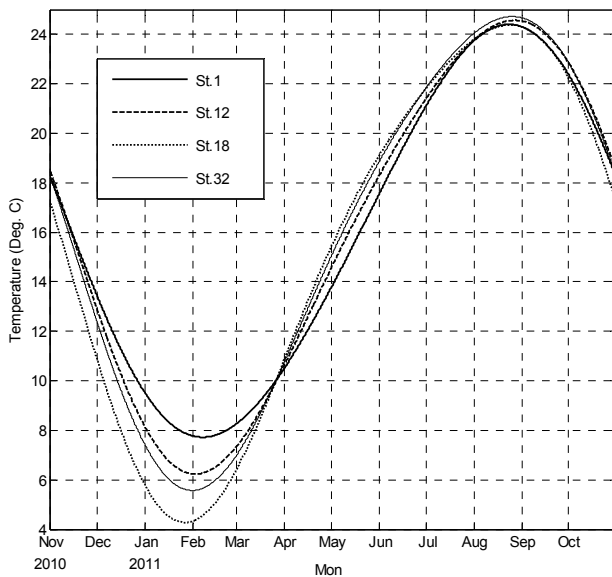


Fig. 6. Annual variations of harmonic component for sea water temperature at st. 1, 12, 18 and 32 from November 2010 to October 2011, respectively.

라진다. 한편, 대도 서쪽(St.20~24)의 진폭은 9.1~9.8°C로 대도에 가까워질수록 증가하고 위상은 281.6~278.9°

로 빨라진다. 그러나 대도 동쪽(St.27~32)은 9.1~9.5°C의 진폭과 279.2~280.4°의 위상으로 해역중앙~북쪽의 변동과 유사하다.

Table 2에 제시된 St.1(남쪽), St.12(중앙), St.18(북쪽), St.32(동쪽) 수온의 연 변동주기와 위상에 따른 변화를 Fig. 6에 비교하였다. 수온은 11월 초순~3월 하순 해역 남쪽이 중앙, 동쪽, 북쪽보다 높으나, 3월 하순~7월 하순은 수온분포에 공간적 역전이 발생한다. 즉, 북쪽이 수온이 더 높고 이어 동쪽, 중앙, 남쪽으로 갈수록 점차 수온이 낮아지는 분포를 보인다. 8~10월의 수온은 해역 간 차이가 크게 나타나지 않는다.

조석과 바람, 하천수 유출에 의한 수온변동

수온변동 중 조석변화에 따른 특성을 파악하기 위해 연중수온 시계열 자료에서 조석변동주기와 진폭을 조화분해로 구하였다. Table 3은 각 정점에서 출현한 일일 이상 장주기(5개), 일일(18개), 반일(14개) 및 1/3~1/10일(23개) 성분 모두를 포함한 진폭에 대한 일일 이상, 일일, 반일, 반일 이하 주기성분 진폭들의 백분율을 나타낸다. 일일 주기성분은 8~15%로 다른 주기에 비해 비율

Table 3. Percentage of amplitudes for period constants greater than one day, one day, half and less than half a day for all amplitudes of 60 period constants calculated in harmonic analysis of surface water temperatures from St.1 to St.32

St.	≥1 day/all const.	1 day/all const.	1/2 day/all const.	≤1/2 day/all const.	St.	≥1 day/all const.	1 day/all const.	1/2 day/all const.	≤1/2 day/all const.
1	75.8	7.7	6.7	9.9	17	75.4	8.0	9.1	7.5
2	55.5	15.4	10.8	18.3	18	66.5	10.2	9.7	13.6
3	65.2	10.1	10.4	14.3	19	70.7	9.6	7.2	12.5
4	71.6	9.9	7.9	10.5	20	71.6	10.1	8.1	10.2
5	73.4	9.0	6.6	11.0	21	50.3	11.2	21.8	16.7
6	68.0	10.5	9.7	11.8	22	47.7	9.7	22.9	19.7
7	74.5	9.0	7.8	8.7	23	59.5	9.3	15.7	15.5
8*	-	-	-	-	24	61.6	9.1	16.5	12.8
9*	-	-	-	-	25	35.1	10.2	28.1	26.6
10*	-	-	-	-	26	68.4	8.7	10.4	12.5
11*	-	-	-	-	27	68.1	9.1	11.4	11.4
12	63.2	12.2	10.7	13.9	28	56.8	9.6	17.7	15.9
13	70.3	10.7	8.4	10.6	29	79.6	9.6	5.2	5.6
14	65.6	10.1	11.2	13.1	30	54.2	14.9	15.5	15.5
15	74.1	9.2	7.5	9.1	31*	81.2	8.8	3.4	6.6
16	77.3	8.7	4.9	9.2	32	73.2	10.2	8.9	7.6

* Lack of data due to missing.

이 낮다. 반일주기성분은 3~28%로 정점별 차이가 크나 하동연안과 대도주변(St.21~25, 28, 30)이 15%이상으로 비율이 높다. 반일주기성분 비율이 가장 큰 해역은 St.25이다. 천해조를 포함한 반일이하 주기성분의 분포는 6~27%로, 반일주기 성분비율과 유사하고 정점 St.25에서 가장 크다. 일일 이상 장주기성분은 35~80% 분포로 대도동쪽(St.29, 31)에서 비율이 높고 대도서쪽(St.21~25, 30)에서 낮다.

단주기 조석성분에 의한 월별 수온변화를 보기위해, Fig. 7에 조석 4대 주기성분(M2, S2, K1, O1) 합인 변화에 따른 St.18 수온의 월 진폭과 위상을 나타낸다. Fig. 7에 수온자료와 함께 St.T1에서 측정된 조위의 진폭과 위상을 점선으로 표시하였다. 수온변화는 1~2월 조석과 대체로 동 위상을 이루나 3월 이후 점차 바뀌어 4~6월 약 6시간 정도의 위상차를 보인다. 7~9월도 대체로 조석과 역 위상이나, 시간이 경과됨에 따라 수온변동의 폭이 감소한다. 10월부터 12월까지는 위상차가 작아져 조석과 동 위상을 나타낸다. 조석변화에 따른 수온변동 폭은 12월과 6월에 1.3~1.7℃로 크고, 위상이 바뀌는 3월과 9월은 0.5℃로 작다. 이러한 수온변동은 조석 조류 영향이 상대적으로 큰 해역북쪽의 섬진강 하구(St.15~19)에서 현저하다. 그러나

만 중앙~대도서쪽(St.12~14, St.20~25)은 연중 낙조시 수온상승, 창조시 수온하강을 나타냈고, 대도북쪽(St.26~28)은 이와 반대로 연중 낙조시 수온이 하강하고 창조시 수온이 상승하였다. 한편, 만 남쪽~중앙(St.1~5)과 대도동쪽(St.29, 31,32)은 Fig. 7의 월별 수온변동과 대체로 유사하나 조석과 수온변화의 위상에 다소 차이를 보였다.

바람에 따른 수온변동을 파악하기 위해 Fig. 8에 동계(1~2월)와 하계(8월) 해역남쪽(St.2), 중앙(St.12), 북쪽(St.18), 동쪽(St.32)의 비 조석주기성분의 수온과 바람 벡터를 나타낸다. 바람은 동계 북서풍(Fig. 8에서 남동방향), 하계 남동~남서풍 계열이 탁월하나, 하계는 남서풍 전후로 북동풍이 불기도 해 동계보다 풍향이 일정하지 않은 경향을 나타낸다. 동계 북서풍이 강해지는 시기 표층수온은 하강하고 풍속이 약해지면 다소 상승하는 패턴을 보인다. 하계는 남풍계열 바람이 불 경우 수온이 상승하고 북서풍 계열에서 하강한다. 그러나 하계는 수온변동에 대한 바람의 영향이 해역에 따라 일정하지 않고 정점별로 수온변동 특성이 다르게 나타난다. 특히, 남풍이 불었던 8월 7~10일 St.2와 32는 수온이 대체로 상승하나 St.18에서 수온이 급격히 하강하고, 이 영향은 St.12에도 나타난다. 하계 St.18 주변의 저수온은 7~8월

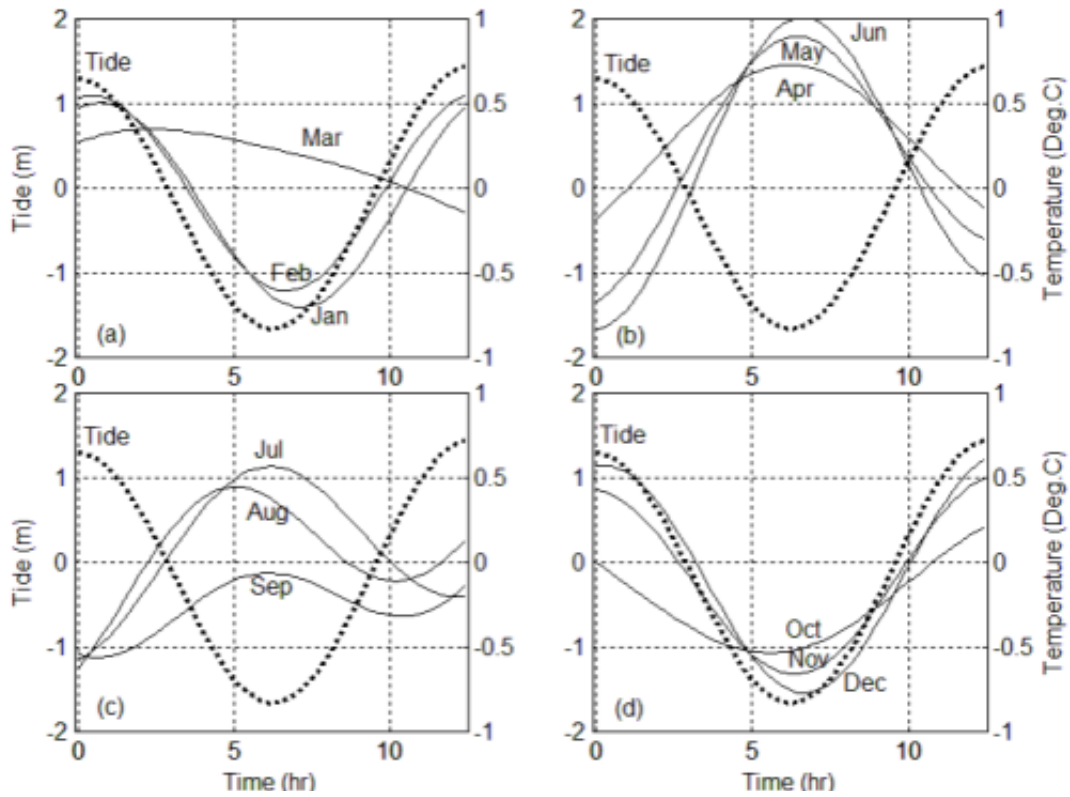


Fig. 7. Seawater temperature (solid line) and calculated tide (dotted line) by four components (M2+S2+K1+O1) at St.18 (a) January to March, (b) April to June, (c) July to September and (d) October to December respectively.

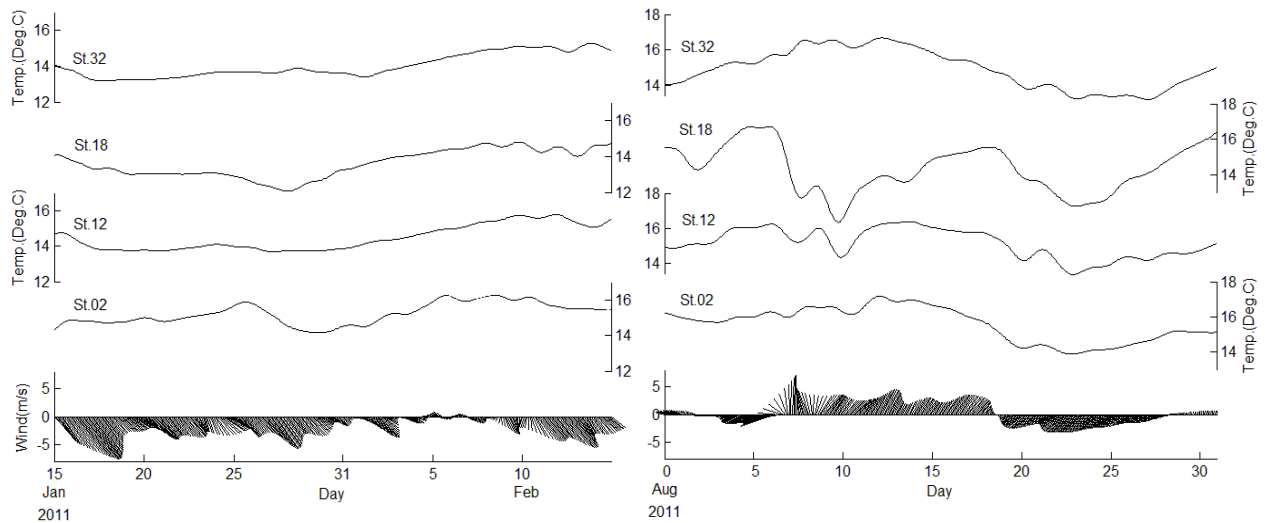


Fig. 8. Time series of surface water temperatures from which tidal and seasonal components are removed at station 2, 12, 18 and 32 and wind vectors at Yeosu AWS station (a) in January~February and (b) in August, 2011.

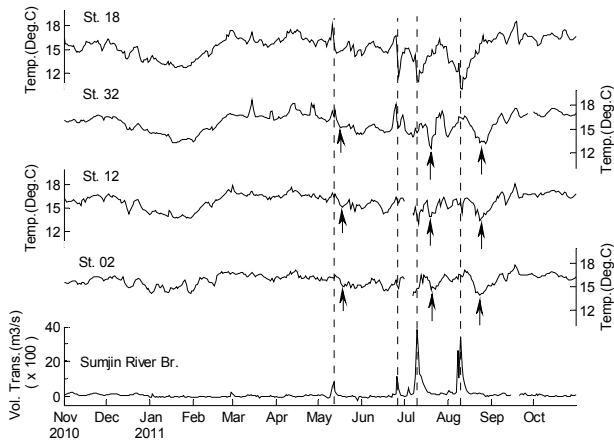


Fig. 9. Time series of surface water temperature with tidal and seasonal components removed at station 2, 12, 18 and river discharge of Sumjin at Hadong-2 (Sumjin River Bridge) from November 2010 to October 2011.

북쪽해역 전반에 출현하는 저수온 분포(Fig. 4)시기와 일치한다. 하구해역은 해역에 부는 바람 외에 조류와 하천수 유출로 인한 밀도류, 하천수 유출 유량증가로 인한 염분경사 및 하구전선의 시공간적 변동에 따라 해역의 표층수온에 변화가 발생할 수 있다. 하계 여수해만 북쪽 섬진강 하구해역에 출현한 저수온 현상을 파악하기 위해 동일시기 하구역 주변 수온정점과 가장 인접한 하동2지점(섬진

교)의 섬진강 하천유량측정 시계열자료를 Fig. 9에 제시한다. Fig. 9에 하천유량과 함께 St.2, 12, 18, 32 정점의 비조석 주기성분 수온시계열도 함께 표시하였다. 하천유량은 몇몇 시기를 제외하면 연중 약 40 m³/s의 평균값을 가지나, 5월 12일, 6월 26일, 7월 10일, 8월 10일을 전후로 각각 최대 804, 1,148, 3,835, 3,409 m³/s의 많은 유량을 기록하였다. 이러한 유량은 해당시기 우리나라 남부지방에 많은 강수량을 기록한 태풍 에어리(2011년 5월 7~12일), 메아리(2011년 6월 22~27일), 무이파(2011년 7월 28일~8월 9일)와 2011년 7월 10일 중·남부지방의 기록적인 폭우로 인한 것이다. 하천유량이 증가한 시기 섬진강 하구에 위치한 St.18의 표층수온은 급격히 하강한다. 5, 6월보다 하천유량이 큰 7, 8월은 수온이 더 많이 하강해, 하천유량이 증가할수록 표층수온은 더 크게 내려간다. 하구역 St.18에서 유량증가와 수온하강 시기는 거의 일치하나, 동쪽 노량수로 St.32, 중앙부 St.12, 남쪽 St.2에서는 Fig. 9의 화살표로 표시한 것과 같이 2~10일 정도의 위상차를 가진다. 하천유량이 미미한 11~5월은 4개 정점 사이의 수온변동 경향에 큰 차이가 없다.

수온변동의 탁월주기

조석·조류로 인한 주기변화가 포함된 표층수온과 해

Table 4. Frequency of occurrence of major fluctuation periods (unit: days) in 30day high-passed surface water temperature from St.1 to St.32

St.	0.5	1.0	10.7 ~ 13.0	14.0 ~ 15.2	15.9 ~ 16.9	18.3	21.5	23.6 ~ 24.3	St.	0.5	1.0	10.7 ~ 13.0	14.0 ~ 15.2	15.9 ~ 16.9	18.3	21.5	23.6 ~ 24.3
1		1	1					1	18		1	1	1				
2				1	2				19		1		2				
3				1	2				20			1	1				1
4		1			2				21	1			1				1
5		1			2				22	1			1				1
6		1			2				23	1			2				
7					2			1	24	1			2				
8	1				1			1	25	2			1				
9	1				1			1	26				2	1			
10					1		1	1	27				2				1
11					1		1	1	28				2			1	
12		1	1		1				29				2		1		
13		1	1		1				30		1		2				
14		1	1				1		31			1	2				
15	1	1		1					32			1	1	1			
16	1	1		1					Tot.	11	12	8	29	20	1	4	11
17	1			1				1									

Table 5. Frequency of occurrence of major fluctuation periods (unit: days) in 30day high-passed sea level pressure, air temperature, wind speed and wind direction at auto weather system stations of Yeosu, Yeochon and Gunnam

Period	0.5	1.0	6.3~8.5	10.7~13.0	14.0	15.9	17.4~18.3	20.3	21.5~22.8
Sea L. Pr.				1	1			1	
Air Temp.	1	3	1			3			1
Wind Spd.	1	3	3	2					
Wind Dir.		3	1				3		2

면기압, 기온, 바람의 변동을 파악하기 위해 표층수온과 대기요소들의 탁월주기 분석결과를 Table 4와 5에 나타낸다. 탁월주기 빈도는 스펙트럼 분석 시 1~3위 밀도를 가지는 주파수를 주기로 환산하고, 각 주기가 출현한 횟수로 산정하였다. 표층수온의 탁월주기는 1/2일, 1일, 12, 15, 20, 24일 전후로, 조석·조류변동인 반일, 일 일주기, 월령변화에 따른 주기, 기온, 바람 변화 등에 따른 주기에서 에너지 피크가 나타난다. 해역 내 정점에서 가장 자주 출현한 탁월주기는 14~15.2일, 15.9~16.9일이다. 이는 조류가 강한 여수해만 특성상 보름을 전후한 주기의 조류 유속차에 따른 성층상태 변화가 해역에 영향을 준 결과로 판단된다. 14~15.2일 주기는 St.15~32의 해역북쪽~하동연안에서 출현빈도가 크고, 15.9~16.9일 주기는 St.2~13의 해역남쪽~중앙부에서 많이 출현한다. 한편, Table 5에 제시된 해면기압과 기온의 탁월변동에 14.0, 15.9일 주기가 출현해, 대기에 의한 영향도 표층수온과 상호작용을 하고 있음을 시사한다. 일일주기는 해역의 남북라인(St. 1~19)에서 주로 나타나고, 반일주기는 POSCO~대도서쪽 하동연안(St.15~17, 21~25)에서 탁월하다.

Table 5의 기온과 풍속에 탁월한 반일주기는 해륙풍에 의한 변화로 추정되며, 따라서 비조석 성분인 기온, 바람의 상관성에 의한 반일주기 수온변동도 예상된다. 반일, 일일주기 외 해면기압, 기온, 풍속, 풍향의 장주기 변동은 Table 4의 수온변동 주기에도 출현한다.

수온의 단주기변동

St.2, 12, 18, 32의 수온과 그 외 정점수온 간의 상관관계를 파악하기 위해 Table 6에 수온변동주기 별 상관도(코히런스, 0~1.0)와 위상차에 따른 시간지연 결과를 나타낸다. 해당 정점과 나머지 정점들 간의 교차 스펙트럼 결과는 23.8 시간변동 주기에서 가장 탁월했고, 다음이 12.5, 24.4, 12.3 시간이었다. 따라서 Table 6에는 탁월

23.8 시간변동주기에 대한 상관도와 시간지연 값을 제시하였다. 시간지연에 음(-)의 부호가 있는 것은 St.2, 12, 18, 32 보다 그 외 정점의 수온변동이 느리다는 것을 의미한다.

St.2 정점에 대한 수온변동은 인근 St.3 정점에서 상관도가 0.91로 가장 크고, 0.8 이상의 상관도를 보인 정점은 여수반도~남해도, 광양만 내 묘도 주변의 St.1~6, 10, 11 정점들이다. 0.5보다 낮은 상관도를 보인 곳은 St.21~25로 주로 대도 서쪽 하동연안 해역이다. St.25는 정점들 중 가장 상관도가 낮았다. 해역중앙~POSCO~섬진강 하구 해역의 상관도는 0.5~0.6 이다. St.32는 여수해만에 조류가 유·출입하는 노량수로 입구로 해역 북쪽정점 중 상관도가 비교적 높다(0.7).

한편, 시간지연은 양(+)의 값인 St.26, 28, 32와 그 밖의 몇몇 정점을 제외하면 음(-)의 값인 -0.03~-2.54 시간으로, St.2의 위상이 다른 정점에 비해 앞선다. 노량수로(St.32) 인근해역 위상차는 해역남쪽(St.2)보다 약 0.4시간 느린 위상을 나타낸다. 해역중앙 St.12는 해역남쪽(St.1~2)과 대도 서쪽(St.23~25)이 상관도 0.6 이하로 작다. 그 밖의 해역은 0.7~0.9의 분포이다. 0.9 이상의 값을 나타낸 해역은 St.6~7, 대도남쪽 St.20, 30, 31이다. 시간지연은 해역 남쪽(St.1~6)과 대도남쪽(St.20, 21), 대도동쪽(St.26, 28, 31, 32) 일부가 St.12 정점보다 0.1~1.78시간 위상이 빠르다. 한편, 해역북쪽 St.18에 대한 반응은 해역중앙 St.12에서의 반응과 대체로 유사하다. 노량수로 St.32는 주변 St.27~28에서 상관도 0.9 이상이고, 대도 서쪽(St.21~25)과 해역남쪽(St.1)이 0.6이하로 작다. 그 밖의 대부분 해역은 0.7~0.8 이다. 시간지연은 몇몇 해역을 제외하면 대체로 음(-)의 값으로 노량수로 해역의 수온변동이 타 해역에 비해 대체로 앞선다.

Table 7에 각 정점의 수온변동에 대한 상호상관계수

Table 6. Coherences and time lags for the predominant fluctuation of 23.8 hours between 40hour high-passed water temperatures of the remainder stations and at station 2, 12, 18 and 32

St.	St.2		St.12		St.18		St.32	
	coherence	time lag	coherence	time lag	coherence	time lag	coherence	time lag
1	0.75	0.35	0.53	0.19	0.67	0.42	0.54	-0.45
2	-	-	0.57	0.54	0.57	0.54	0.68	-0.27
3	0.91	0.15	0.71	0.53	0.71	0.51	0.77	0.08
4	0.79	-0.03	0.78	0.27	0.80	0.27	0.73	0.01
5	0.84	0.26	0.74	0.61	0.74	0.58	0.79	0.27
6	0.78	-0.38	0.91	0.30	0.82	0.47	0.84	-0.15
7	0.60	-0.44	0.97	-0.13	0.92	0.25	0.83	-0.45
8	0.73	-1.78	0.79	-0.45	0.90	-0.68	0.77	-1.97
9	0.73	-1.78	0.79	-0.45	0.90	-0.68	0.77	-1.97
10	0.77	0.51	0.59	1.65	0.72	0.89	0.67	0.43
11	0.90	0.39	0.76	1.78	0.80	1.05	0.81	0.52
12	0.57	-0.54	-	-	0.89	0.40	0.80	-0.29
13	0.43	-0.62	0.84	-0.51	0.82	-0.19	0.73	-0.48
14	0.48	-0.24	0.80	-0.27	0.82	-0.09	0.72	-0.30
15	0.52	-0.17	0.74	-0.29	0.86	0.03	0.70	-0.65
16	0.59	-0.07	0.70	-0.27	0.86	0.09	0.75	-0.58
17	0.59	-0.22	0.77	-0.33	0.90	0.13	0.80	-0.67
18	0.57	-0.54	0.89	-0.40	-	-	0.73	-0.79
19	0.49	-0.48	0.80	-0.67	0.95	-0.11	0.70	-1.00
20	0.62	0.50	0.92	0.91	0.86	1.14	0.78	0.64
21	0.37	-0.37	0.76	0.16	0.72	0.32	0.53	0.40
22	0.44	-0.41	0.71	-0.09	0.72	0.02	0.55	-0.02
23	0.36	-0.91	0.53	-1.47	0.57	-1.58	0.54	-0.93
24	0.21	0.25	0.57	-0.33	0.56	0.00	0.55	0.22
25	0.05	-2.52	0.36	-1.21	0.21	-0.61	0.33	-0.18
26	0.49	0.46	0.82	0.61	0.78	1.31	0.79	0.30
27	0.51	-0.35	0.64	-0.87	0.54	-0.33	0.90	-0.82
28	0.59	0.29	0.74	0.10	0.76	0.73	0.95	-0.23
29	0.38	-1.40	0.64	-0.09	0.47	0.57	0.68	-0.90
30	0.47	-0.62	0.94	-0.26	0.90	0.19	0.73	-0.53
31	0.60	-0.43	0.94	0.81	0.86	0.79	0.79	-0.23
32	0.68	0.27	0.80	0.29	0.73	0.79	-	-

를 나타낸다. 상관계수는 월 평균치를 사용하였다. 최대 상관계수는 0.8 이었으며, 0.5 이상에서 유의성이 있다고 판단했다.

0.5 이상의 상관계수를 기준으로 정점 간 상관도를 구분해 보면 대체로 광양만 입구를 포함한 여수해만 남북라인(St.1~19), 대도서쪽(St.21~24), 대도동쪽(St.26~29, 32), 대도남쪽(St.20, 29, 31)으로 분류된다. 즉 남북라인 정점들과 대도주변 정점들 간에는 0.4 이하로 상관도가 낮고, 대도주변 정점들 사이에도 서쪽, 동쪽, 남쪽 정점들 각각은 서로 상관도가 낮다. 또한 St.25와 St.30은

모든 정점과의 상관계수가 0.4 이하로 상관성이 매우 낮다. 한편, 광양만 입구 및 남북라인을 같은 방법으로 좀 더 세부적으로 구분하면 여수해만 남쪽(St.1~4), 중앙부 및 광양만 입구(St.5~9, 12~14), 광양만 내 묘도 주변 및 POSCO~섬진강하구(St.10~11, 15~19)로 분류할 수 있다. 그러나 해수해만 남쪽 일부(St.3~4)는 중앙부(St.5~6) 또는 POSCO~섬진강하구(St.16~19)와 0.5 이상의 상관도를 보여 남북라인 및 광양만 입구 정점들의 단주기 수온변동 간에는 전체적으로 상관성을 있음을 나타낸다.

Table 7. Annual average cross-correlation coefficient between high-pass filtered surface water temperatures from station 1 to station 32

St.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
1	1.0	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	-0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2		
2		1.0	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	
3			1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	
4				1.0	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	
5					1.0	0.7	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	
6						1.0	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.3	0.2	
7							1.0	0.6	0.6	0.4	0.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.4	0.3	0.1	
8								1.0	0.8	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	-0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.3	0.2	
9									1.0	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.3	0.2	
10										1.0	0.6	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.3	
11											1.0	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	0.3	
12												1.0	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.4	0.3	0.1	
13													1.0	0.7	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.4	0.3	0.1	
14														1.0	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.2	0.3	0.3	0.1		
15															1.0	0.7	0.7	0.6	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4	0.2	0.2	
16																1.0	0.7	0.6	0.7	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	
17																	1.0	0.7	0.6	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
18																		1.0	0.7	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	
19																			1.0	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.3	
20																				1.0	0.4	0.3	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2	
21																					1.0	0.8	0.4	0.4	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.2	0.1	0.0	
22																						1.0	0.5	0.4	0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.2	0.1	0.0	
23																							1.0	0.5	0.2	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	
24																								1.0	0.4	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	
25																									1.0	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.3	
26																										1.0	0.5	0.5	0.3	0.1	0.3	0.3	
27																											1.0	0.7	0.5	0.1	0.3	0.6	
28																												1.0	0.5	0.1	0.3	0.5	
29																													1.0	0.3	0.5	0.5	
30																														1.0	0.4	0.2	
31																															1.0	0.4	
32																																	1.0

고찰

여수해만 내 표층수온의 변동은 조석(조류)에 의한 것과 비조석(조류)에 의한 것으로 나눌 수 있다. 이 중 비조석에 의한 변동에는 기온변화에 따른 계절변동(Han, 1975)과 해면기압, 바람, 하천수유입(Lee, 1994; Kim et al., 2008) 등의 영향이 포함되어 있으나, 이들 상호간은 해수의 역학적 과정을 통해 수온변화에 관여하게 된다. 수온은 계절변동과 함께 1월 말 최저, 8월에 최고를 나타냈다(Fig. 3). 온배수역인 St.24, 25를 제외하면 연중 최저(1.8℃)와 최고수온(27.8℃)은 섬진강 하구(St.19)에서 출현해, 동 해역의 식물플랑크톤 계절변동에 의한 결과(Park, 2007)와 유사하였다(Table 1). 수온은 하계 해역 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 점차 높아지고 동계는 반대로 낮아지는 형태로, 동계(1~2월)와 하계(7~8월) 여수해만 남북 간 수온 차는 춘계(3~4월)와 추계(9~10월)를 지나면서 수온경도의 공간역전이 발생한다(Fig. 6). 여수해만의 이러한 수온분포 특성은 남쪽이 연

중 남해 외해수 영향이, 북쪽은 하천수 또는 내륙 연안의 영향이 수온분포에 작용하고 있음을 말해주며, 이는 해역 간 수온표준편차(Table 1) 분석을 통해 확인되었다.

연 평균수온은 POSCO 동쪽해역이 가장 낮고, 하동연안의 대도서쪽이 가장 높았으며, 해역 남부~중앙부와 노량수로~대도동쪽이 그 중간이었다. 대기영향이 동일하면 POSCO 동쪽은 얇은 수심과 하천수 유입, 조류에 의한 해수 연직혼합이 크므로 표층수온은 낮아진다(Park et al., 2012; Kim et al., 2008). 대도서쪽 하동연안역은 수심과 조류조건은 유사하나 온배수의 직, 간접영향이 주어져 평균수온이 높아지고(Park, 2007) 수온의 표준편차는 해역 중 가장 작다(Table 1). 남부~중앙부 및 노량수로~대도동쪽은 해역수심과 외부경계를 통한 조류영향에 따라 수온이 결정될 것으로 추정된다.

하계 얇은 수심과 육지로 둘러싸인 북쪽해역은 비열차로 인한 해수가열로 남해 외해에 접한 남쪽해역보다 수온이 더 높은 것이 일반적이거나, 7, 8월 몇몇 시기에

남쪽보다 2℃ 정도 낮은 저수온이 북쪽 섬진강 하구를 시작으로 해역 중부까지 출현하였다(Fig. 4). 이러한 저수온은 섬진강 하천유량이 매우 큰 시기와 일치하였다(Fig. 9). 기온변동에 따른 해역 내 수온변화에서 평균 연변동 진폭은 기온의 74%였고 기온위상보다 평균 15 일 정도 느렸다(Table 2). 기온과 수온의 변동위상이 가장 일치하는 곳은 북쪽 섬진강하구로, 7일의 위상차와 기온-수온 간 가장 작은 온도차를 나타내어 대기영향에 가장 잘 반응하였다(Fig. 5). 해역 남쪽은 위상차가 가장 늦었으며(20일) 해역중앙(15일)에서 북쪽으로 갈수록 점차 빨라져, 계절에 따른 남북 간 표층수온 분포와 수온경도(Fig. 6)는 기온변화에 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다.

수온변동의 조성성분에서 반일주기와 반일이하 천해 조 성분이 하동연안과 대도주변, 특히 온배수 배출 인접해역 St.25에서 그 비율이 가장 커(Table 3), 탁월 반일주기 창, 낙조류에 의한 수온변화의 영향이 표층수온 변동에 잘 반영되어진 것으로 해석된다. 탁월조석에 의한 표층수온의 변화는 북쪽 섬진강하구에서 동계는 조석과 동 위상, 하계는 역 위상을 나타내어(Fig. 7), 수온하강기는 창조시 수온상승, 낙조시 수온하강, 수온상승기는 그 반대현상이 출현하고 있음을 보여주었다. 이러한 수온변동 패턴은 온배수 배출구 주변 일부를 제외한 대부분 해역에 나타난 현상으로, 창조시 남쪽과 동쪽에 존재하는 외해수가 여수해만 내로 유입되고, 낙조시 반대로 만내수가 바깥으로 유출됨에 따른 계절별 만 내외 해수의 수온변화로 해석되었다.

여수해만은 파랑이 발달할 만한 충분한 취송거리가 없어 파랑의 영향이 적고 바람에 의한 취송류도 그다지 우세하지 않은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2008). 그러나 여수해만은 남북 길이가 매우 긴 폐쇄적 구조의 만 형태로, 남해 외해에서 전파되어온 파랑이 남쪽입구에서 여수해만을 따라 북진할 경우, 의외로 파랑이 발달될 가능성과 남북방향 탁월풍에 의한 해황반응은 배제할 수 없다. 연중 여수해만에 부는 바람의 시계열분석에서 바람은 동계 북서풍, 하계 남동~남서풍 계열이 탁월하였다. 계절변동을 제거한 표층수온 비조석 주기성분과 바람벡터와의 비교(Fig. 8)에서 동계 북서풍이 강한 시기 여수해만 표층수온은 대체로 하강하고 하계 남풍 계열 바람이 불 경우 상승하였다. 그러나 하계는 각 해역

의 수온변동에 큰 차이를 보여 바람이외의 수리학적 요소가 수온변동에 크게 작용하고 있는 것으로 판단된다. 연안해역의 저수온 현상은 바람이나 기타 비조석(조류) 성분에 의한 외력 등으로 발생할 수 있으나, 다양한 요인들이 복합적으로 작용하므로 어느 것이 그 직접적 원인인지 명확히 구분하기 어렵다. 그러나 하천유량 증가와 함께 7, 8월 저수온수가 출현한 섬진강 하구(Fig. 9)는 하천수 유출유량 증가로 인한 하천수와 해수사이의 염분경사 및 하구전선역의 연직혼합이 증가하여 나타난 현상(Mcclimans, 1988)으로 해석되며, 하천유량이 클수록 수온하강의 폭도 컸다. 섬진강 하천수 유출로 인한 하구역의 저수온수는 주변 조류와 혼합·확산을 통해 여수해만 전역에 영향을 주며, 하구에서 멀어질수록 수온하강의 위상과 주기에 변동이 컸다.

섬진강 하천수 유출로 인한 하구 주변해역의 수리구조와 수온하강 그리고 조류와의 관계를 살펴보면, 수심이 얇은 섬진강 하구역에 배출된 하천수는 조류에 의해 상하가 잘 혼합되며, 하구 안에서 바깥까지 염분의 수평구배가 생긴다. 하구에서의 염수 침입길이와 혼합형태는 담수와 염수가 만나는 경계면의 전단력에 영향을 받고, 이러한 밀도차로 하구부근에 하구 밀도류가 생긴다. 하구는 담수와 염수 혼합의 강약에 따라 약 혼합형, 완(중간) 혼합형, 강 혼합형의 3가지 형태로 구분된다(Jay and Smith, 1988). 섬진강 하구는 담수와 염수의 밀도차에 의한 염분경사가 존재해 완 혼합형으로 볼 수 있고(Noh et al., 2011), 하천유량이 큰 하계 대조시 조류가 강해지면 강 혼합형이 될 가능성이 있다. 섬진강 하구의 조석은 남해 외해의 조석 진행으로 발생해 하구 안 육지 쪽에서 반사되고, 5 m 이하의 얇은 수심과 섬진강과 연결된 북측 하구역의 큰 해저경사로 진폭이 커진다. 그러나 섬진강 하구주변은 하구길이가 길지 않아 하구 바깥의 조위와 위상차가 크게 나지 않는다. 대조시 섬진강 하구의 조차는 약 3.5 m에 이른다(Kim et al., 2008). 따라서 섬진강 하구의 조류는 조석진폭이 클수록 강하고 얇은 수심과 급격한 해저경사로 하구 안으로 갈수록 유속이 증가한다(Sugimoto, 1988). Kim et al. (2008)은 섬진강 하구의 조시에 따른 3차원 수치모델 연구에서 하계 섬진강 하천유출량이 크고 조류가 강해지는 대조기 저조시 저염분수가 수로를 따라 POSCO 동쪽해역 아래(Fig. 2의 수온 정점 St.12)까지 광범위하게 확산되

어짐을 지적하였다. 섬진강 하천수 유출로 발생하는 밀도류와 연직순환류의 세기는 대류를 일으키는 밀도의 수평구배와 대류를 약화시키는 마찰(연직혼합) 크기와 의 비율에 비례한다(Murota and Nakatsuji, 1988). 조류에 의한 연직혼합이 작을 경우 상·하층 간 성층이 강해 하층의 해수가 쇄기 형태로 섬진강 하구에 파고들고 상층엔 하천수가 유출된다. 이때 상층과 하층 간 속도차로 발생한 내부파가 소멸될 때 하층해수가 상층에 연행 가입된다(New and Dyer, 1988). 한편, 조류의 연직혼합이 강하면 상·하층 간 염분차는 작아지나 수평염분구배가 강해 밀도류(상층에서 하층으로 유입되는 연직순환류)가 발달하여 표·저층 해수의 연직혼합이 커지게 되므로 섬진강 하천수의 영향을 받는 해역(저염분 수역) 내 표층수온은 더 크게 하강하게 될 것이다(Fig. 9). 하천수로 인한 섬진강 하구(St.18)의 표층수온은 유량증가와 거의 동시에 하강하나 여수해만 동쪽(St.32), 중앙(St.12), 남쪽(St.2) 해역은 2~10일 정도 이후 급격한 수온하강 현상이 나타났다. 이는 조류 유출입으로 인한 해수교환을 등을 고려할 때 10일의 위상차는 너무 큰 값으로 판단된다. 태풍, 홍수 등으로 인한 일시적 대량 하천수가 만 전체에 미치는 구체적 추적과정이 향후 필요할 것으로 생각된다.

여수해만 내 출현한 표층수온의 탁월 변동주기는 대체로 1/2, 1, 12, 15, 20, 24일 전후로(Table 4), 조석이 우세한 해역의 반일주기 수온변동은 내부조석파와 관련되어 있다고 알려져 있다(Lee et al., 1992; Lim, 1991; Kang, 2013). 일일주기 변동은 일 태양복사에 의한 기온 변동과 연관되거나(Choi et al., 2002) 바람에 의한 준관성 주기(동 해역의 관성주기 21.1시간 보다 고주파; Nam, 2006)에 의한 것일 가능성이 크다. 또 수층 내 연직속도 차는 천해역의 성층안정도를 약화시켜 수층 간 혼합을 야기하므로 해역의 성층발달 정도에 따라 바람이나 조류 등의 외력에 의한 일일 이상 표층수온의 변동 주기는 관성주기 바깥 영역에서 다양하게 출현될 수 있다. 한편, 수심이 급격히 변하는 수로나 섬, 리아스식 해안에서는 등수심선을 가로지르는 흐름성분에 의해 내부조석(Baines, 1986)이 발생하고, 이들 조석파의 불안정과 계절풍 같은 기상요인에 의한 해면냉각과의 혼합 효과(Matsuyama, 1985) 그리고 해수 성층과 지형 등의 복합으로 출현하는 흐름의 비선형효과(Friedrichs and

Aubrey, 1988; Ippen and Harleman, 1966)가 다양하게 혼재되어 수온에 여러 주기변동이 출현될 가능성이 있다.

탁월주기 중 조류가 강한 여수해만 특성상 보름을 전후한 조류 유속차에 따른 14~15.2일, 15.9~16.9일 주기의 수온변동이 출현빈도가 크고, 이 중 14~15.2일은 해역북쪽~하동연안, 15.9~16.9일은 해역남쪽~중앙부에서 자주 출현하였다(Table 4). 두 탁월주기는 1일 정도 차이가 있는데, 이는 조류가 노량수로에서 유입되어 하동연안~해역북쪽에 미치는 부분과 여수해만 남쪽입구를 통해 해역남쪽~중앙부까지 미치는 두 영역으로 구분되고, 또 두 입구의 수평범위가 해역북쪽은 동서방향 길이가 짧고, 남쪽은 남북방향 길이가 길어서 나타난 지형적 차이에 따른 현상으로 생각된다. 여수해만의 탁월 일일 수온변동주기는 해면기압을 제외한 기온과 여수해만을 남북으로 부는 풍속 변동에서 출현빈도가 커, 대기영향에 의한 것임을 유추할 수 있다(Table 5). 여수해만 해역에 탁월한 바람의 일 변동은 해역주변이 섬과 육지로 둘러싸인 구조로 인해 해륙풍이 잘 발달되어 있음을 말해준다. POSCO~대도서쪽 하동연안은 비교적 수심이 얇고, 저층해수보다 밀도가 작은 하천수와 온배수가 배출되는 해역이다. 따라서 이들 해수들로 인한 하구전선 또는 열전선이 표층에 존재할 것으로 판단되며, 반일주기의 장, 낙조류가 이들 전선의 수평이동과 수괴 간 연직혼합을 왕성하게 해 동 해역의 표층수온에 반일주기 변화를 일으킬 가능성이 크다. 또 해륙풍에 의한 풍속변화는 하루 2회 발생해 기온, 풍속과 함께 수온에서도 해륙풍에 의한 반일주기 변동이 나타날 수 있으며, 대기요소에 출현한 일일 이상의 장주기 변동은 수온에서도 출현하였다(Table 4, 5).

여수해만 남쪽과 동쪽 입구의 수온변동 위상은 타 해역에 비해 대체로 앞섰고, 해역중앙과 섬진강 하구는 대도주변 해역보다 늦었다(Table 6). 수온시계열의 상관도로 본 해역은 크게 여수해만 남북을 연결하는 해역과 대도를 중심으로 한 서쪽, 동쪽, 남쪽해역으로 구분되었다(Table 7). 또 남북 간 해역은 세부적으로 남쪽, 중앙부(광양만 입구 포함), POSCO~섬진강하구(묘도주변 포함)로 분류할 수 있었다. 따라서 정점들 간 상관성과 위상차, 상호상관계수로 본 해역별 여수해만의 수온변동 특징은 1) 여수해만 남쪽(St.1~4)의 남해 외해수 영향역 2) 중앙부(St.5~9,12~14)의 내만 고유(혼합)수역 3)

POSCO~섬진강하구(St.10~11, 15~19)의 섬진강하구 수역 4) 대도 서쪽(St.21~25)의 온배수 주변 수역 5) 대도 남쪽(St.20, 29, 31)의 대도연안 수역 6) 대도 동쪽(St.26~29, 32)의 진주만수 영향역으로 구분할 수 있다.

결론

여수해만 수온의 시공간적 변동특성을 장기 연속수온 관측 자료를 이용하여 분석하였다. 수온은 1월 말 최저, 8월이 최고로, 하계 만 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 높아지고 동계는 낮아지는 경향을 나타냈다. 연중 평균수온은 POSCO 동쪽연안이 가장 낮고 대도서쪽 하동연안에서 가장 높았다. 7~8월 섬진강 하천수 유량이 큰 시기 섬진강하구~해역남부에 저수온이 출현하였다. 이러한 표층수온 하강은 여수해만 전역에서 시간적 위상차를 가지고 발생해, 향후 태풍이나 홍수 시 이들 대량 하천수의 만내 이동과 혼합이 어떠한 역학적 과정을 통해 이루어지는지, 확산, 수송되어지는지에 대한 보다 구체적인 연구가 필요할 것으로 본다. 수온변동은 기온보다 약 15일 정도 늦었다. 조석에 따른 반일 및 반일 이하 천해조로 인한 수온변동은 하동연안과 대도주변에서 가장 컸다. 비조석 수온성분에서 동계 북서풍이 불면 수온하강, 하계 남풍계열의 바람이 불면 수온이 상승하는 경향을 나타냈다. 수온의 탁월변동주기는 0.5, 1, 12, 15, 20, 24일로, 조류변화로 인한 15일 전후 주기에서 출현빈도가 가장 컸다. Coherence 분석결과, 해역남쪽과 노량수로 주변의 수온변동위상이 타 해역보다 빨랐다. 상관계수분석으로 조사된 여수해만은 외해수 영향수역, 내만 고유수역, 섬진강 하구수역, 온배수 주변수역, 대도 연안수역, 진주만 영향수역으로 분류되었다. 여수해만 전 해역 표층수온의 장기모니터링 결과로부터 얻어진 이러한 시, 공간적 수온변동특성은 해역 내 표층수온의 분포와 예측, 해양과 기상 및 주변해역 상호간의 관련성을 파악하기 위한 기본지식을 제공한다. 본 연구결과는 여수해만에 대한 해양변동과 그 변동원리를 이해하게 해, 여수~광양~하동~남해에 이르는 해역의 해양예보와 양식시설에서 발생할 수 있는 어류와 해조류 등의 수온피해를 미연에 방지할 것이다.

사사

논문 작성에 필요한 자료수집에 대해 윤은찬 박사님

께 감사드립니다.

References

Baines PG. 1986. Internal tides, internal waves and near-inertial motions, In: Baroclinic processes on continental shelves edited by Mooers CNK. American Geophysical Union, Washington, D.C., 19-31.

Choi YH, Ro YJ and Jun HK. 2002. Variation of seawater temperature in the coastal waters off the Dangjin Power Plant, Asan Bay, Korea. The Sea, Journal of the Korean Society of Oceanography 7, 43-50.

Choo HS. 2007. Tide and tidal currents around Namhae Island of the south sea. Korea, Bull. Fish Sci Inst, Chonnam Nat'l Univ 16, 22-31.

Choo HS, Lee BG and Lee GH. 2002. Numerical simulation of residual currents diagnostic multi-level model in Gwangyang Bay. Korea, J of the Environmental Sciences 11, 41-56.

Choo HS and Park SE. 2007. Pollutant dispersion mechanism by constructions of route of Gwangyang Bay. Bull Fish Sci Inst, Chonnam Nat'l Univ 16, 46-51.

Foreman MGG. 1978. Manual for tidal currents analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 78-6; Institute of Ocean Science: Patricia Bay, Sydney, BC, Canada, October 2004.

Friedrichs CT and Aubrey DG. 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. Estuarine, Coastal and Shelf Science 27, 521-545.

Gill AE. 1982. Atmosphere-ocean dynamics. Academic press, New York, 19-38.

Gong Y. 1968. On the seasonal variation of coastal surface water temperature. Bulletin of Fisheries Research & Development Agency No. 3, 59-79.

Hahn SB. 1970. Periodic variation of water temperature in the seas of around Korea (I): Annual and secular variations of surface water temperature, Kumun-do region, Southern Sea of Korea. Journal of Oceanological Society of Korea 5, 6-13.

Han YH. 1975. On the annual variations of water temperature and salinity in Gwangyang Bay. Bull Korean Fish Tech Soc 11, 1-7.

Ippen AT and Harleman DRF. 1966. Tidal dynamics in estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics Edited

- by Ippen AT. McGraw-Hill New York, 493-545.
- Jay DA and Smith JD. 1988. Residual circulation in and classification of shallow, stratified estuaries, -Physical Processes in Estuaries- edited by Dronkers J and Leussen WV. Springer-Verlag, 21-41.
- Kang CY. 2013. The Characteristic of internal waves observed in the tidal fronts near Ocheong-Do in the eastern Yellow Sea. Master Thesis, Graduate school of Kunsan Nat Univ, 60-61.
- Kang YS, Chae YK and Lee HR. 2011. Variation of density stratification due to fresh water discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay. *Journal of Korean Soc. of Coastal and Ocean Engineers* 23, 126-137. <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2011.23.1.126>.
- Kang YQ. 2000. Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936-1995). *J Fish Sci Tech* 3, 173-179.
- Kang YQ and Gong Y. 1987. Markov chain properties of sea surface temperature anomalies at the southeastern coast of Korea. *Journal of Oceanological Society of Korea* 22, 57-62.
- Kim BK. 1983. Periodic and correlation analysis between water temperature and air temperature in the Korean waters. *Journal of the Oceanological Society of Korea* 18, 55-63.
- Kim DS, Lee CC, Kim DA and Park YS. 1989. The characteristics of a fishing ground at Yeosu Bay -pound net fishing ground-. *Bull Korean Fish Tech Soc* 25, 44-53.
- Kim JK, Kang TS, You HY and Jeong WJ. 2006a. The characteristics of tidal current in Gwang0yang Bay using Long-term observing ADCP data. *Proceeding of the Autumn Meeting 2006 of Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 274-280.
- Kim JK, Kim MW, Kang TS and Yoon EC. 2006b. Three-dimensional mixing behavior characteristics of Seomjin River discharges. *Journal of the Korean Soc of Ocean Engineers* 20, 50-57.
- Kim JK, Kwak GI and Jeong JH. 2008. Three dimensional mixing characteristics in Seomjin river estuary. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* 11, 164-174.
- Kim JK, Lee JW and Na WB. 2007. Real-time physical observation buoy system in Yeosu Bay. *Proceeding of the Autumn Meeting 2007 of Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 246-252.
- Kim MW, Kim JK, Kang TS and Lee MO. 2005. The characteristics of estuarine tidal circulation in Gwangyang Bay. *Proceeding of the Autumn Meeting 2005 of Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 139-143.
- Kwon KY, Moon CH and Yang HS. 2001. Behavior of nutrients along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J Korean Fish Soc* 34, 199-206.
- Lee BK, Kim SY and Cho HM. 2010. Distribution and behaviors of In-situ suspended particulate matters of Gwangyang Bay. *Journal of the Korean Soc of Ocean Engineers* 24, 99-105.
- Lee HJ, Shin CW and Seung YH. 1992. Internal tidal oscillations of temperature off Jukbyun on the east coast of Korea. *J Oceanol Soc Korea* 27, 228-236.
- Lee SW. 1994. Hydrography of Korean harbours and bays. Zipmoondang Press, 117-121.
- Lim KB. 1972. On the study of monthly variation of surface water temperature and its annual mean condition in the coast of Korea. *Bulletin of Fisheries Research & Development Agency No. 9*, 29-45.
- Lim KS. 1991. Internal tides in an axially symmetric basin. *J Oceanol Soc Korea* 26, 133-143.
- Matsuyama M. 1985. Internal tides in Uchiura Bay: subsurface temperature observations near the bay head. *J Oceanogr Soc Japan* 41, 135-144.
- Mcclimans TA. 1988. Estuarine fronts and river plumes -Physical Processes in Estuaries- edited by Dronkers J and Leussen WV. Springer-Verlag, 55-69.
- Min HS and Kim CH. 2006. Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface temperature in Korea. *Ocean and Polar Research* 28, 415-423. <https://doi.org/10.4217/OPR.2006.28.4.415>.
- Murota A and Nakatsuji K. 1988. Spreading of a river plume: Field observations, integral model analyses and numerical experiments -Physical Processes in Estuaries- edited by Dronkers J and Leussen WV. Springer-Verlag, 110-129.
- Nam SH. 2006. Near-inertial current variability off the east coast of Korea. Ph.D. Dissertation Graduate school of Seoul Nat Univ, 14-21.
- New AL and Dyer KR. 1988. Internal waves and mixing in

- stratified estuarine flows-Physical Processes in Estuaries-edited by Dronkers J and Leussen WV. Springer-Verlag, 239-254.
- Noh JW, Lee JY and Shin JK. 2011. Analysis of saltwater intrusion by flushing discharge in the Seomjin River estuary. *Journal of Environmental Impact Assessment* 20, 325-335.
- Park YQ. 2007. Seasonal variation of marine environment and phytoplankton community in Gwangyang Bay. Master Thesis, Graduate school of Chonnam Nat Univ, 4-5.
- Park MO, Kim SS, Kim SG, Kwon JN, Lee SM and Lee TW. 2012. Factors controlling temporal-spatial variations of Marine environment in the Seomjin River estuary through 25-hour continuous monitoring. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* 15, 314-322. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2012.15.4.314>.
- Pawlowicz R, Beardsley B and Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences* 28, 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4).
- Roy AW and Heston C. 1981. Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters. *Journal of physical oceanography* 12, 112-115. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012<0112:RTPVFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012<0112:RTPVFT>2.0.CO;2).
- Rory ORY Thompson. 1983. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *American Meteorological Society* 13, 1077-1083. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1983\)013<1077:LPFTSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1983)013<1077:LPFTSI>2.0.CO;2).
- Simpson JHS, Brown J, Matthews J and Allen G. 1990. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries* 13, 125-132. <https://doi.org/10.2307/1351581>.
- Sugimoto T. 1988. Ecology and ecotechnology in estuarine-coastal area. edited by Kurihara Y, Tokai Univ Pres, 7-8.
- Water Resources Management Information System (WAMIS). 2015. Statics of river discharge. Retrieved from <http://www.wamis.go.kr>. Accessed 11 January 2020.
- Yoon YH and Kim SA. 1994. Seasonal variations and primary products for phytoplankton at the coast of South Sea, Korea. *Proceeding of the 1994 Meeting of the Korean Fish. Society*, 15-16.
-
2020. 09. 10 Received
 2020. 10. 13 Revised
 2020. 10. 21 Accepted