

천수만 수온의 시공간적 변동

추효상*

전남대학교 해양융합과학과

Spatiotemporal Fluctuation of Water Temperature in Cheonsu Bay, Yellow Sea

Hyo-Sang Choo*

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

In the north and northeast of Cheonsu Bay, short-term fluctuations of surface water temperature are large owing to shallow water depth, weak current, and freshwater runoff. However, in the south of the bay, water temperature fluctuations are small owing to the inflow of offshore water by tidal currents. The water temperature in the north of the bay is higher in spring and summer than in the south of the bay, but lower in autumn and winter. During spring season, the fluctuation in the northern surface water temperature is the highest. The temperature fluctuations owing to tides are in phase with the tide in autumn and winter, and in the reverse phase with the tide in spring and summer. The dominant periods of water temperature fluctuations are half a day, daily, 15 days, and 1 month owing to the tide and 7 to 10 days, which are estimated based on atmospheric factors. Half a day and daily water temperature fluctuations are also highly correlated with air temperature and wind fluctuations. The sea area where water temperature fluctuations are highly correlated is divided into the north and south of the bay. The fluctuation phase is faster in the north of the bay than in the south or in the center.

Keywords: Cheonsu bay, Surface water temperature, Time-series analysis, Tide and atmospheric factor, Dominant fluctuation period

서론

천수만은 우리나라 황해 중부(36°23'-36°37'N, 126°20'-126°30'E) 연안에 위치하고, 지리적으로 충남 태안군 태안반도(안면도)와 서산시, 홍성군, 보령시로 둘러싸인 반 폐쇄성 내만이다. 만 남쪽 입구에는 장고도, 원산도, 삼시도 등의 크고 작은 섬들이 산재한다. 남쪽 만 입구의 폭은 5 km, 만 중앙 죽도를 중심으로 한 만의 폭은 9 km, 남북방향 만 전체 길이는 35 km에 이른다. 만 내 수심은 10-25 m (평균수심 10 m), 최대수심은 30 m (만 남쪽 입구 주변)의 천해 내만으로, 강한 조류와 얇은 수심, 탁월계절풍과 만 동쪽 연안방조제와 하천에서의 담수유입 등으로 만 내 수층 탁도는 연중 높게 나타난다(Fig. 1). 황해 외해의 직접적 영향으로부터 격리된 천수만은 해양생물자원의 산란, 색이 및 성육에 있어 높은 생산성을 나타내는데, 이는 만

내 유입되는 하천과 방조제에서의 다량의 담수와 만 남쪽수에서의 조류를 통한 해수교환 등이 천수만 내 서식생물들에 적합한 환경을 만들어 주고 있기 때문이다. 그러나 한편으로 천수만은 하계 방조제에 의한 다량의 하천수 방류로 인한 부영양화(Kim et al., 2005; Park et al., 2006) 현상이 빈번하고, 표층 담수 방류로 인한 하계 성층강화와 저층 빈산소층의 출현(Lee et al., 2012b) 현상이 나타나기도 한다. 또 천수만은 얇은 수심과 강한 조류에 의한 조석전선현상의 출현(Choo and Cho, 1984)으로 전선역 주위의 다양한 수괴분포와 이로 인한 해양 기초생산력(Lee et al., 2012a; Lee et al., 2014) 증가, 방조제 방류로 인한 해수 내 인위적 영양염 부하와 하천수 유입에 의한 계절적 수질환경변화(Kim et al., 2005; Park et al., 2013)가 매우 뚜렷이 나타나는 특징을 가진다. 한편, 담수유입이나 바람, 조석변화로 인한 만내 해수유동에 관한 연구로 Jung et al. (2013a)은 수

*Corresponding author: Tel: +82. 61. 659. 7144 Fax: +82. 61. 659. 7149

E-mail address: choo@jnu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0090>

Korean J Fish Aquat Sci 54(1), 90-100, February 2021

Received 4 January 2021; Revised 26 January 2021; Accepted 29 January 2021

저자 직위: 추효상(교수)

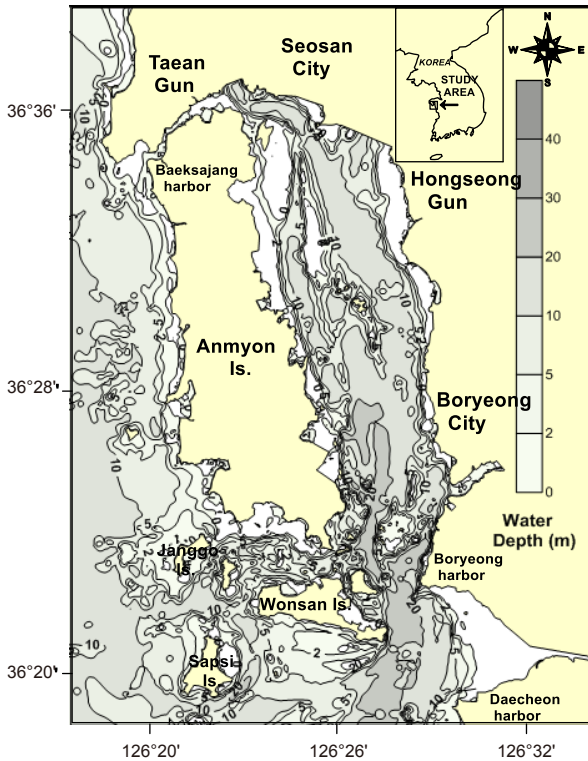


Fig. 1. A bathymetric map of the study area. Contours denote the depth in meters.

치모델실험으로 조류와 조석잔차류를 재현하였고, 또 Jung et al. (2013b)은 바람과 담수유입이 만내 비조류(잔차류)특성에 영향을 끼쳐 만 내 잔차류의 북향은 계절풍, 남향은 담수의 영향(밀도류)에 의하며, 잔차류 변동과 바람, 담수유량의 변동에 일정 위상차의 유의한 주기성이 존재하고 있음을 조류현장 측정에 의한 조화분해, 스펙트럼 분석 등을 통해 주장하였다. 천수만은 황해 외해역과 달리 하계는 고온의 표층수와 저역의 하천수 유입으로 표층에서 밀도감소(성층증가)가 발생하며, 동계는 강한 해면냉각으로 인한 밀도증가로 표·저층 간 연직혼합(Choo and Yoon, 2015)이 주변 외해수보다 활발하다. 또 하계의 이러한 공간적 밀도분포는 조류에 의한 순압상태 흐름에 표·저층 간 경압적 기울기를 만들어 표층수와 저층수가 반대로 흐르는 경압류를 종종 발생시키기도 한다(Cho, 2005). 또 Jung and Ro (2010)은 바람을 부과한 만내 수치모델실험에서 풍향, 풍속이 수층 내 유속변화를 일으켜 상하층간 혼합에 크게 기여하고 있음을 연구한 바 있으며, Park and Kim (2012)은 CTD (conductivity-temperature-depth meter)에 의한 천수만 내 수온·염분 연구에서, 하계 대기가열에 의한 성층, 동계냉각과 조류로 인한 대류, 장마로 인한 담수 증가 등이 만내 수온·염분 분포를 결정하는 주된 원인이 될 수 있음을 지적하였다. 이와 같이 천수만 해역은 육지에서 다량 유입되는 담수, 황해 외해로부터

터 유입되는 강한 조류, 얇은 수심역과 넓은 조건대, 외해와 격리된 폐쇄적 구조로 인한 기온, 바람, 강수량 등의 대기영향을 복합적으로 받는다.

천수만의 해황변동에 관한 이러한 기초조사결과는 대체로 단기 해양관측, 해수유동 수치실험, 방조제의 담수유출로 인한 해양에의 영향 등에 초점이 맞추어져, 해수순환, 해양수질 및 특성, 서식생물군집 변동과 같은 현상에 관해 연구가 수행되어 왔다. 그러나 천수만 해역은 최근 여름철 이상 고수온, 겨울철 한파로 인한 이상 저수온 현상 등으로 양식생물(조피볼락, 송어 등)의 집단폐사가 빈번이 발생하고 있어, 수온변동으로 인한 해역의 해양환경변화에 인근 어민들과 관계기관이 많은 관심을 기울이고 있는 실정이다(Chungcheongnamdo, 2019). 조석·조류와 함께 계절적 하천수, 간헐적인 대량의 담수 유출과 대기 등에 큰 영향을 받는 천수만의 해양환경변동을 파악하기 위해서는 만 전역에 대한 수온의 계절변동 특성이 우선 파악되어야 하고, 이를 위해서는 만 전역에서 장기 연속적으로 관측된 수온 측정 자료가 요구된다. 본 연구는 천수만 남북 입구 수로 주변을 포함한 만 전역에서 장기 수온 연속관측(모니터링)을 실시하고, 이들 수온시계열 자료로 표층수온의 장, 단주기 및 계절 변동특성, 조석, 대기조건이 천수만의 수온변동에 미치는 영향 등에 대해 살펴보았다.

자료 및 방법

천수만 내 표층수온의 분포와 변동을 파악하기 위해 계절별로 2011년 8월(하계)과 11월(추계), 2012년 2월(동계)과 5월(춘계)에 각각 1개월 동안 50개 정점에서 수온 연속관측을 실시하였다. 정점 위치는 Fig. 2와 같이 천수만 전체 영역이 포함되게 배치하였다. 전체 정점 중 St. 20, 50, 45, 38은 천수만 내 주요 담수 유입원인 서산 A, B 방조제, 홍성 및 보령방조제 내측 해역에 설치되었다.

모니터링에 사용된 수온계는 스티로폼 부이(styrofoam buoy, ϕ 540 mm \times 890 mm) 하부에 스테인리스 하우징(housing)을 만들어 계류하고, 2개의 닻을 사용해 고정하였다. 수온측정은 수온계가 해수면으로부터 50 cm 수심에 위치하도록 설치하였다. 측정에 사용된 수온계는 분해능 0.005°C, 정확도 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 의 초소형 정밀수온계(Model Magic-T100, GnC Bio Co., Daejeon, Korea)로, 연안 해역 수온분포 연구(Choo and Yoon, 2015) 등에 다수 사용되었다. 1분 간격으로 측정된 자료는 외부 노이즈 제거를 위해 시간 평균(hourly mean)한 후 분석에 사용하였다.

천수만의 해황과 관련된 기상요소(기온, 해면기압, 바람)는 천수만 남쪽 대천항 AWS (automatic weather system; 충남 보령시 신흑동)와 북동쪽 서부 AWS (St. 48 주변, 충남 홍성군 서부면 이호리)에서 10분 간격으로 측정(기상청, 2011-2012)되었으며, 이를 시간 평균한 후 사용하였다. 바람자료는 동서 및 남북성분으로 분해한 후 시간 평균하였으며, 바람벡터는 시계열

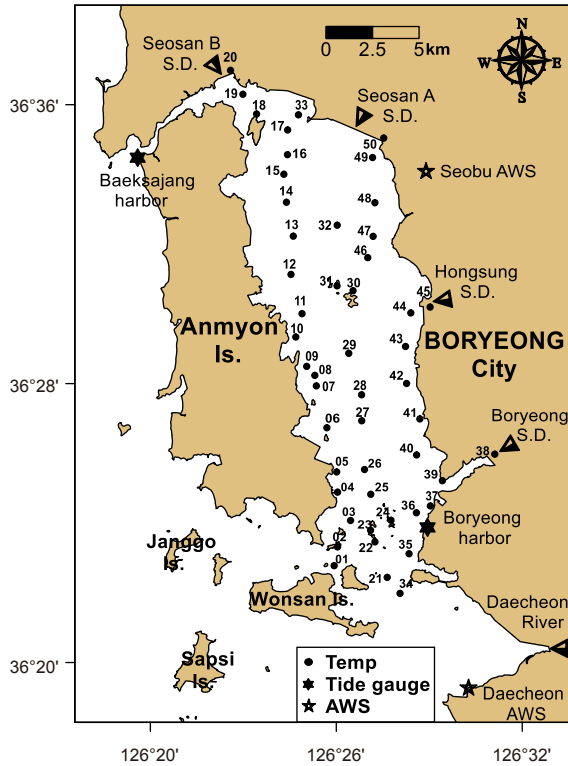


Fig. 2. Observational stations of temperature, tide and auto weather system (AWS) around Cheonsu Bay. The abbreviation S.D. in the figure refers to the location where the sea dikes are located.

작성시 원점에서 바람이 불어가는 방향으로(풍향 각도로부터 시계방향 180도 회전) 하였다. 천수만 내 조석은 천수만 북쪽 입구에 위치한 백사장 항(36° 35' 15" N, 126° 19' 09" E)에서 수온모니터링 시기와 동일하게 조위계(Model XR-420TG, RBR Ltd., Ottawa, Canada)를 설치해 측정하였다. 조위는 10분 간격으로 각 계절 1달 동안 측정된 다음, 시간 평균하여 사용하였다. 또 천수만 남쪽 국립해양조사원 보령항 검조소(36° 24' 23" N, 126° 29' 10" E)에서의 조위측정자료도 활용하였다. 모니터링 기간 중, 일부 수온정점에서 수온계 유실과 이상이 발생해, 부득이 이들 기간의 자료는 분석에서 제외하였다.

수온, 대기요소, 조위 시계열의 변동주기는 최소자승법을 이용한 1년 및 만 년 주기분석(Kang, 2000)과 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)를 포함한 34개 분조의 진폭과 지각을 구하기 위한 조화분석(Foreman, 1978; Pawlowicz et al., 2002)을 실시해 분석하였다. 시계열의 장, 단주기 변동을 파악하기 위한 시계열분석(time series analysis)에서는 40시간 저주파 통과 필터(low-pass filter)와 30일 고주파 통과필터(high-pass filter)와 같은 신호처리 필터(signal processing filter)를 적용하였다. 40시간 저주파 통과 필터링은 천수만 내 탁월한 조석·조류에 의한 만일(12.4시), 일일(24.8시)변동, 이로 인한 관성주기(19-21시)변동

및 내부파로 인한 준 관성주기(40시)변동 등에 의한 단주기 성분의 제거를 위한 것이다(Roy and Heston, 1981; Rory, 1983). 천수만 표층수온의 변동과 대기요소, 조위변화와의 관계를 파악하기 위해 시계열자료의 시·공간 변동, 스펙트럼 밀도분석에 의한 탁월주기변동, 상호 관련성 조사를 위한 코히런스(coherence) 및 상관계수 분석을 시행하였다.

결과 및 고찰

표층수온의 시·공간적 변동

천수만의 각 계절(월)에 따른 표층수온의 시계열 변동을 Fig. 3에 나타낸다. 그림 속 정점들은 해역 내 모니터링 된 50개 정점 가운데 천수만 중앙부를 따라 최대한 결측없이 시계열 모두 조사된 정점들[St. 21, 24, 28 (29), 30, 32 (13), 48 (49), 17, 19]을 선택하였다. 표층수온은 시간 평균된 자료이다.

수온의 1일 이하 단주기 변동은 계절에 따라 차이는 있으나 St. 48 (49) (서산 A 방조제 주변)에서 현저하고, 만 남쪽(St. 21, 24) 보다 만 중앙(St. 28-32)과 북쪽 정점(St. 17, 19)들에서 더 두드러진다. 천수만 북-북동부 연안은 방조제의 담수방류로 인한 부유물질 퇴적과 얕아진 수심(2-5 m)으로 조건대 영향이 큰 해역이다. 따라서 이들 해역의 표층수온은 조석이나 대기 온도의 단주기적 변동이 타 해역보다 우세하다. Fig. 3에 나타난 St. 48 (49)의 수온변동은 하계(8-9월) 인근 방조제에서 방류된 고온의 담수로 인한 3-4°C의 급격한 수온상승과 추, 동계(11월, 1-2월) 저온의 담수방류로 인한 급격한 수온하강이 나타나는 것이 특징이다. 하계의 고온 담수(단주기적 변동 피크) 배출은 밀도차로 인해 조류에 의한 연직혼합보다 수평이류확산이 더 우세해 만 중앙(St. 13, 30)으로 단주기적 수온변동이 전파되는 양상을 보인다(Fig. 3). 그러나 추계(11-12월), 동계(1-2월)는 표층냉각에 의한 연직혼합이 우세해 수온하강으로 인한 단주기 변동의 전파가 하계처럼 뚜렷하지 않다. 표층냉각으로 인한 표층수온하강은 해역의 수주 내 수온역전현상을 유발하고, 이로 인한 연직혼합과 수평적 조류혼합은 추, 동계 천수만 해역의 수온 수평 및 연직구조형성의 주 요인으로 판단된다. 향후, 천수만 해역에 대한 연직수온의 시공간적 변동조사가 이루어진다면 천수만의 물리해양환경 변화를 이해하는데 큰 도움이 될 것이다. 한편, 2월 10일 전후, 일시적 표층수온상승은 갑작스런 기온상승의 영향으로 판단된다. 만 중앙-북쪽 정점의 수온 단주기 변동은 계절적으로 춘계(5월)에 현저한데, 이는 동계 연직 혼합된 천해역(만 중앙-북부)의 해수가 춘계 일사량증가로 인한 표층성층과 저층으로부터의 조류혼합이 단주기적으로 반복되며 출현한 현상인 것으로 추정된다. 그러나 하계 일사량이 점차 증가해 표, 저층 간 수온약층이 강하게 형성되면, 조석·조류에 의한 표층수온의 단주기적 변동진폭은 점차 약화된다. 이러한 천수만 전역에 대한 계절별, 해역별 수온변동특징은 향후, 천수만 내에서 양식업을 하는 어업인이 양식 대상물을 선

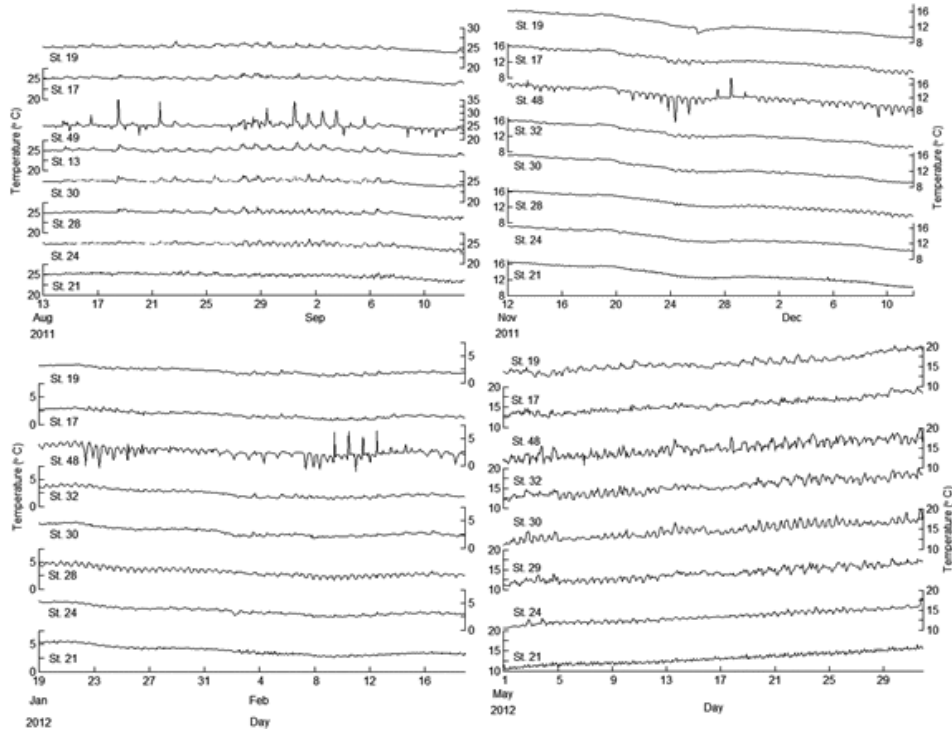


Fig. 3. Time series of surface water temperature at station 21, 24, 28 (29), 30, 32 (13), 48 (49), 17 and 19 in August, November 2011, January-February and May 2012, respectively.

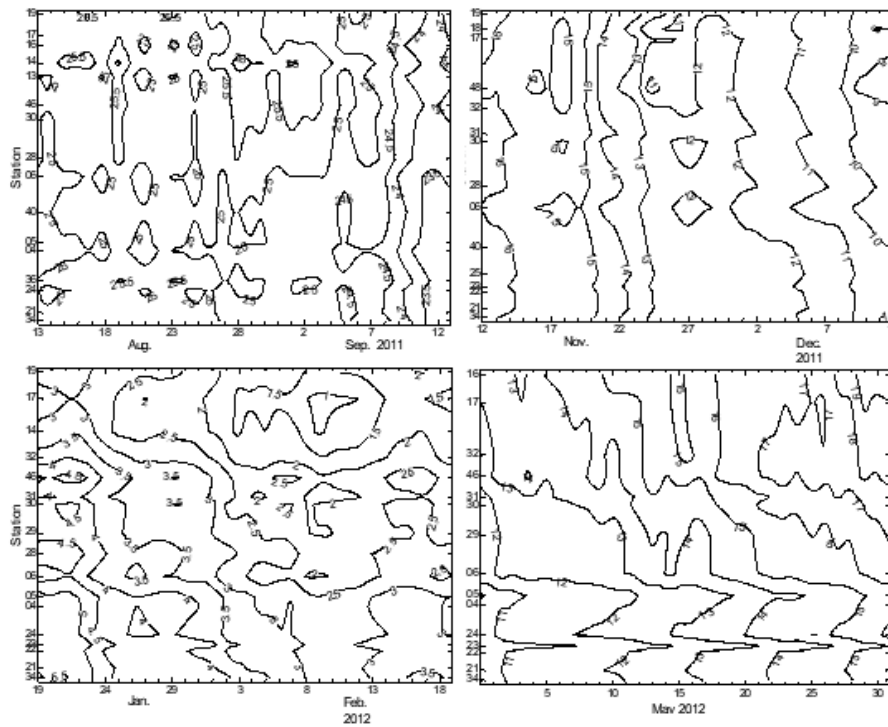


Fig. 4. Variations of low-passed surface water temperatures along the south-north line (station 34-19) in August, November 2011, January-February and May 2012, respectively.

정하거나, 양식시설의 입지를 정할 때 유용한 정보로 활용 될 수 있을 것이다.

천수만 내 수온의 시공간적 변화를 보기 위해 Fig. 4에 천수만 남북라인 정점(St. 34, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 14, 17, 19를 기준으로 결측이 있을 경우 주변 정점)을 따라 매시 수온변화에 40시간 low-pass 필터링 처리를 한 수온의 계절(월)변화를 나타낸다. 하계 8월 13-25일 만 전역의 수온은 대체로 25°C 전후이다. 이후 28일경 북부 정점은 26°C까지 상승해 남부해역과 약 1°C의 온도차를 가진다. 9월 3-12일, 만 북부는 25-24°C, 남부 24.5-23.5°C로 수온이 하강해 온도차는 0.5°C로 다소 낮아진다. Lee et al. (2012a; 2014)은 하계 천수만의 표층 수온은 약 24.4-25.4°C로, 만 남쪽 해역에서 낮고 북으로 갈수록 점차 증가하는 경향을 나타낸다고 지적한 바 있다. 추계인 11월

12-24일, 남북 간 온도는 거의 균일하고 16-13°C까지 하강한다. 12월 1일 이후 수온은 12-9°C로, 북부가 남부보다 먼저 하강해 남북 간 1°C의 온도차를 나타낸다. 추계의 수온분포는 하계와 달리 만 남쪽에서 높고 수심이 얇은 북쪽에서 낮아지는 형태를 보인다. 동계는 측정기간 중, 만 남부와 북부 해역 간 약 2°C 온도차를 가진다. 1월 9일 남부 2.5°C, 북부 1°C로, 연중 수온이 가장 낮다. 동계의 표층수온 분포는 1.8-4.6°C로, 추계에서와 같이 남쪽에서 중, 북부 해역으로 갈수록 수온이 낮아져 북쪽 천해역은 2.0°C 이하이다. Kim et al. (2005)은 동계 천수만의 표·저층 수온은 8-11°C이고, 만 남쪽 입구가 높고 내만으로 갈수록 감소해 약 2°C 온도차가 나타남을 제시한 바 있다. 이와 같이 북부 천해역을 포함한 만 전역의 동계 표층수온 범위가 현저히 낮은 것은 동계에 해면냉각이 매우 활발함을 의미하고, 동시에 만 입구

Table 1. Percentage of amplitude on the average of August, November, January and May from 2011 to 2012 for the periodic constant of above one day, one day, half day and below half day to all amplitudes of thirty two periodic constants calculated from harmonic analysis for surface water temperatures at station 1-50

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	38.1	22.4	17.4	22.1	27	-	-	-	-
2	32.1	25.1	19.9	22.8	28	32.1	24.2	23.5	20.2
3	43.7	19.4	18.8	18.1	29	24.3	24.9	25.6	25.4
4	32.1	23.6	21.5	22.8	30	34.2	30.0	17.0	18.9
5	33.3	23.9	21.7	21.1	31	37.6	23.1	19.2	20.0
6	26.9	29.7	21.1	22.1	32	36.3	25.7	18.1	20.0
7	32.4	28.4	21.2	18.0	33	38.4	34.1	10.1	17.4
8	35.3	28.4	19.6	16.7	34	35.1	20.3	19.9	24.6
9	31.5	27.5	22.8	18.2	35	21.5	16.8	27.0	34.8
10	33.0	21.4	20.8	24.9	36	35.5	19.7	14.6	30.3
11	18.0	30.4	25.6	26.0	37	39.6	22.0	17.4	21.1
12	20.1	31.3	22.5	26.1	38	26.9	48.0	7.6	17.4
13	25.6	41.9	13.4	19.1	39	39.4	20.4	20.2	20.0
14	32.5	37.5	12.2	17.9	40	36.3	23.6	20.0	20.1
15	-	-	-	-	41	16.0	35.9	16.6	31.5
16	30.8	45.5	6.7	17.1	42	30.6	29.9	20.6	18.9
17	37.4	30.5	11.4	20.7	43	33.0	33.0	15.3	18.7
18	29.3	35.1	11.9	23.7	44	25.1	38.8	11.3	24.8
19	36.3	34.3	11.1	18.4	45	33.5	44.4	8.1	14.1
20	41.6	38.6	6.9	13.0	46	27.2	38.7	15.6	18.6
21	40.0	19.8	13.8	26.3	47	41.0	20.9	16.4	21.8
22	48.8	22.1	11.2	17.9	48	18.6	28.3	19.8	33.3
23	47.6	20.5	11.9	20.0	49	8.4	39.3	13.5	38.7
24	36.0	28.0	15.5	20.5	50	40.1	38.8	7.0	14.2
25	63.0	18.3	4.8	13.9					
26	-	-	-	-	Mn	33.1	29.0	16.3	21.5

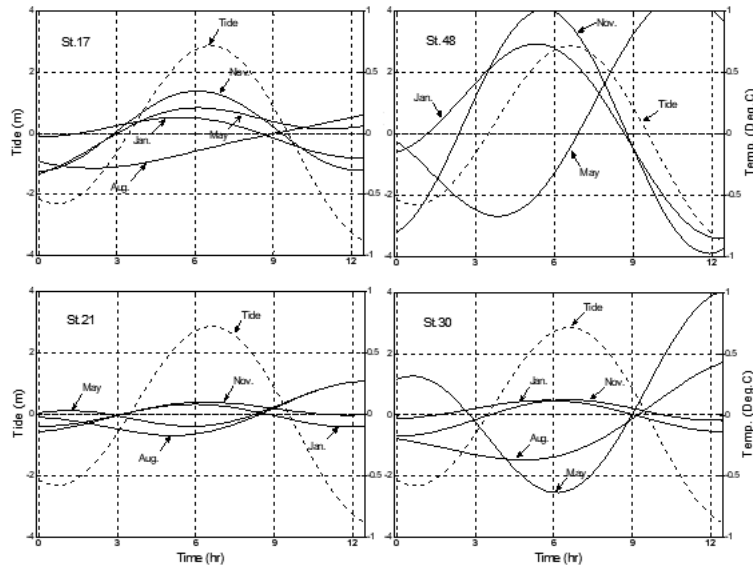


Fig. 5. Comparison of tide (dashed line) with surface water temperature (solid line) by their four constituents ($M_2+S_2+K_1+O_1$) in August, November, January and May at station 17, 48, 21 and 30, respectively.

를 통한 외해수 유입과 조류의 해저면 마찰에 의한 연직혼합으로 대류가 전 층에서 효과적으로 발생(Park and Kim, 2012)하고 있음을 말해준다. 춘계(5월)는 남부가 11-15°C, 북부가 13-19°C로, 북부가 남부보다 2-4°C 표층수온이 높다. 춘계는 만 남북 간 수온기울기가 연중 가장 크다. 수온분포는 동계와 달리 만 남쪽에서 수온이 낮고, 중, 북부 해역으로 갈수록 수온이 증가한다. 춘계 천수만의 표·저층수온(Kim et al., 2005)은 10-14°C 이고, 만 남쪽 입구에서 중앙부로 갈수록 표·저층 수온은 약 2°C 증가해, 이번 조사에 나타난 표층수온의 범위가 증가율에 대체로 큰 차이가 없었다. 이와 같이 춘계나 추계의 수온상승, 하강기는 강한 조류에 의한 저층혼합이 표층까지 영향을 주어 표·저층 간 수온 차는 크지 않으나, 대기영향이 증가하는 동, 하계의 해면냉각, 해면가열 시기는 표층과 저층 간 수온차가 점차 발생하는 것으로 생각된다. 천수만 중앙부-북부는 수심 20-10m로, 북으로 갈수록 얕아진다(Fig. 1). 따라서 수온상승기인 춘-하계는 만 남부-중앙부보다 만 북부에서 수온이 더 상승하고 추-동계 수온하강기는 수온이 더 낮아지는 공간분포를 나타낸다. 또, 만 북쪽 입구(백사수도)의 조류유량은 남쪽 입구보다 적어 조류소통이 미약한데(Jung et al., 2013a), 이는 천수만 내 유입되는 황해 외해수의 유입량과 관련되므로 만 중앙부-북부의 표층수온은 남부보다 육지연안과 기온의 영향을 더 받게 되고 따라서 대기영향으로 인한 일 변동은 더 우세하다.

조석, 기온, 바람에 의한 표면수온변동

천수만 내 표층수온 변동은 조석(조류)에 의한 것과 비 조석에 의한 것으로 나눌 수 있다. 이 중 비 조석에 의한 수온변동은 기온에 의한 계절변동(Park et al., 2013), 해면기압, 바람, 하천

수 유입(Lee, 1994; Park et al., 2013)에 따른 영향 등이 포함되고 이들은 조류와 같은 해수유동과의 역학과정을 거쳐 해수 내 수온변화에 관여한다. 따라서 수온시계열에서 추출한 비 조석성분을 비 조석 요소들(기온, 바람, 담수유입 등)의 시계열로 구분해 내는 것은 매우 어렵다. 수온변동 중 조석변화에 따른 특성을 파악하기 위해 계절별 수온 시계열 자료에서 조석변동 주기와 진폭을 조화분해로 구하였다. Table 1은 각 정점에 출현한 일일 이상 장주기(1개), 일일(9개), 반일(5개) 및 1/3-1/10일(17개) 성분들의 진폭을 계절 평균한 후, 전체주기 진폭에 대한 일일 이상, 일일, 반일, 반일 이하 주기성분 진폭들의 백분율을 각각 나타낸다.

표층수온변동에서 일일주기 성분이 차지하는 비율은 16.8-48.0%, 평균 29.0%로 높은 편이나 반일주기 성분은 4.8-25.6%, 평균 16.3%로 낮다. 일일주기 비율이 큰 정점은 주로 방조제 주변 St. 20, 38, 45, 50으로 38.6-48.0% 분포이나, 반일주기는 6.9-8.1%로 다른 주기에 비해 비율이 낮다. 반일주조 비율이 가장 큰(27%) 곳은 St. 35의 화력발전소 주변이다. 반일주조 비율이 20% 이상인 해역은 St. 2, 4-12, 28-29, 34-35, 39-40, 42 로 안면도 연안을 따라 만 중앙까지 분포한다. 천해조를 포함한 반일 미만 주기성분의 분포는 13.0-34.8%, 평균 21.5%로 반 일주기성분 다음으로 비율이 높다. 반일 미만 주기성분 비율이 가장 높은 정점은 반일주기성분과 같이 발전소 배출구 주변 St.35이다. 일일 이상 장주기 성분은 8.4-63.0%, 평균 33.1%로 정점 별 차이가 크다.

수온변동의 조석주기 특성 분석(Table 1)에서 일일주기 성분은 우세하나 반일주기 성분이 약한 곳은 방조제 주변으로 이는 방조제 내 수온변화가 반 일주 조석과 격리되어 기온에 의

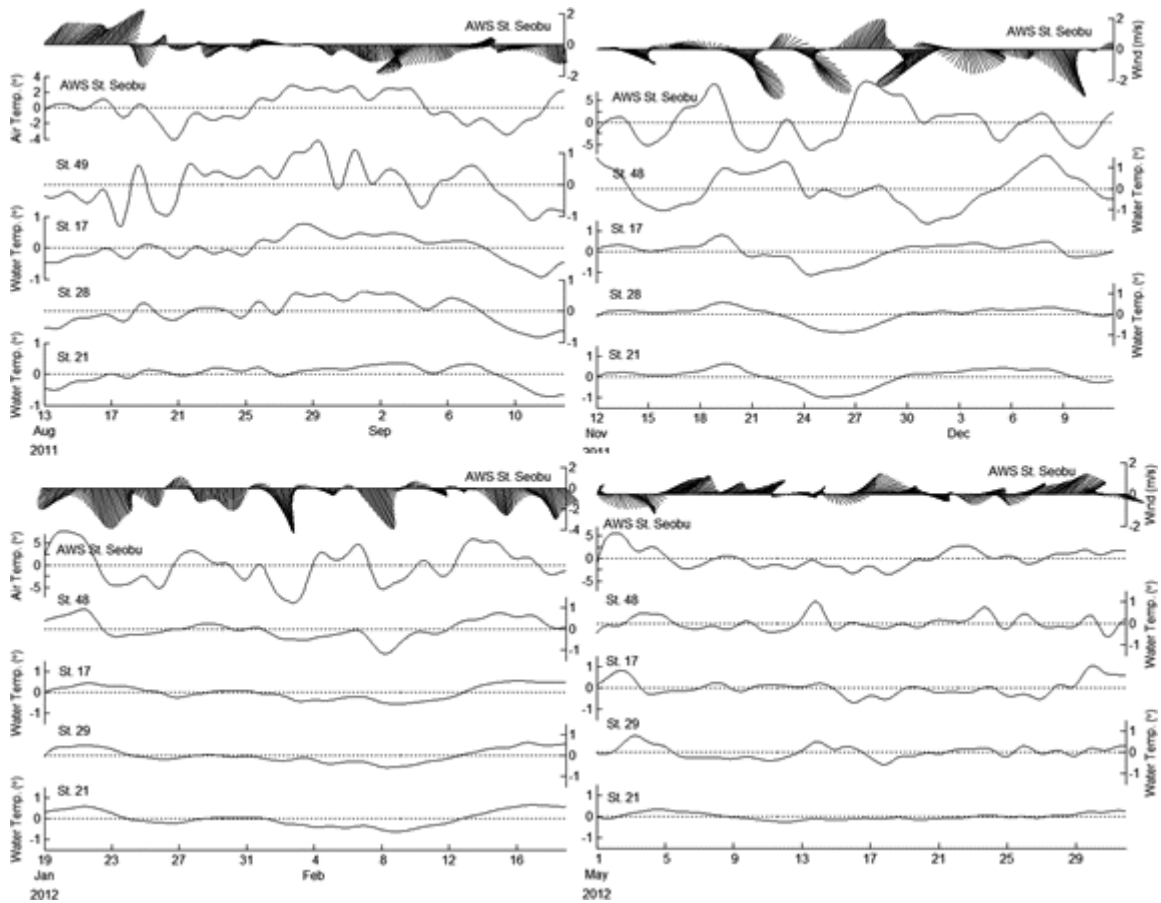


Fig. 6. Time series of low-passed surface water temperatures from which tidal and seasonal components are removed at station 21, 28, 17 and 48(49) and low-passed wind vectors and air temperatures at Seobu AWS station in August, November, January and May, respectively.

한 일 변동이 탁월했음을 말해준다. 한편, 반 일주조 비율이 가장 큰 해역은 화력발전소 주변으로, 배출되는 온배수가 반 일주기 조류를 따라 이동함에 따라 나타난 것으로 판단된다. 반 일주조 비율이 높은 해역은 안면도 남쪽연안-만 중앙부까지로, 만 남쪽 입구에서 유입되는 탁월 반 일주기 진행조석이 만의 지형에 의한 고유진동이나 정상파의 영향으로 나타난 현상으로 추정된다.

단주기 조석에 의한 계절별 수온변동을 파악하기 위해 Fig. 5에 St. 17, 48, 21, 30 정점수온의 4대 분조 성분 합($M_2+S_2+K_1+O_1$)에 의한 반일주기 진폭과 위상(실선)을 나타낸다. 수온과 함께 동일시기 만 북쪽 백사장 항(백사수도)에서 측정된 조위의 진폭과 위상(점선)을 그림에 표시하였다. 수온변화는 정점 별 차이는 있으나 대체로 11-12월(Nov)은 조석과 동 위상이며, 1-2월(Jan.) 이후 점차 바뀌어 5월(May)엔 3-4시간의 위상차, 8-9월(Aug)은 역 위상을 나타낸다. 수온변동 폭은 전 계절에 걸쳐 만 남쪽(St. 21)이 1°C 미만으로 작고, 서산 A 방조제 연안(St. 48)이 6-8°C로 크다. 계절별로는 방조제 연안을 제외하면 11-2월

(Nov-Jan)이 1-2°C로 작고, 5-9월(May-Aug)에 2-4°C로 점차 커지는 경향을 보인다.

이와 같이 조석에 의한 수온변동이 추, 동계에 조위와 동 위상, 춘, 하계에 역 위상을 보이는 것은 수온 하강기(추, 동계)에 창조로 만외에서 유입되는 상대적 고온의 외해수로 인해 수온은 상승하고, 낙조시 하강한다. 수온 상승기(춘, 하계)는 그 반대로 창조시 상대적 저수온의 외해수 유입으로 수온이 하강하고 낙조시 수온이 상승하는 현상으로 설명할 수 있다. Choi et al. (2002)은 서해 아산만 내 수온과 조석의 반 일주기 위상변화에서 겨울철 수온의 위상은 조석과 약 1시간, 여름철은 약 6시간 정도의 위상차를 보이고 있음을 밝혔다. 수온변동 폭은 수심이 깊은 만 남쪽이 작고 방조제 연안에서 커, 수심이 얕아질수록 조차가 증가해 수온변동 폭이 커짐을 알 수 있다. 계절별로 추, 동계에 변동 폭이 작고 춘, 하계는 큰데, 이는 천수만의 연직방향 수온차가 수온하강기에 작고 수온상승기는 표층수온 상승으로 점차 커지기 때문에 나타나는 현상이다.

바람과 기온에 따른 수온변동을 파악하기 위해 Fig. 6에 계절

별 St. 21, 28, 17, 48에서의 비 조석 주기성분의 수온과 만 북쪽 홍성군 서부면에서 측정된 기온, 바람벡터를 40시간 low-pass 필터링 처리한 후 나타냈다. 바람은 하계 8월 중순 남서풍(2 m/s) 이후 북풍계열(1 m/s) 바람이 불고, 동계(1-2월)는 북-북서풍 계열(2 m/s)이 2-3일 주기로 분다. 춘계(5월)는 남서-북서의 서풍계열 바람(1 m/s 전후), 추계는 11월 하순 이후 북서풍과 남동풍이 교대로 부나 12월부터 북서풍(2 m/s)이 강해진다. 천수만의 수온과 풍향·풍속 관계는 하계 남풍계열과 동계 북풍계열이 강할 때 만 내 표층수온은 전반적으로 하강하고, 그 반대의 경우 상승하는 형태이다. 바람변동으로 수온변화가 두드러진 해역은 기상 측정지점과 가까운 St. 48 (49)이다. 북풍과 남풍계열 바람이 교대로 분 추계는 계절 중 수온변동이 가장 크나, 서풍계열의 약한 바람이 지속적으로 분 춘계는 수온변동이 작

다. 동계는 북풍계열 바람이 강하게 지속적으로 부나 바람에 의한 수온변동은 크지 않다. 기온은 추, 동계 북풍계열, 하계 남풍계열의 바람이 강해지면 하강하는 형태로, 육지와 인접한 St. 48 (49) 정점의 표층수온 변동과 잘 일치한다. 만 남쪽 입구에 위치하는 St. 21의 표층수온 변동은 만 북쪽에 위치한 지점의 바람과 기온변동의 영향을 그다지 받지 않는다.

수온변동의 탁월주기

조석·조류에 의한 주기변화를 포함한 30일 이내의 만 내 표층 수온변동과 주변 해면기압, 기온, 풍속, 풍향변동 특성을 파악하기 위해 30일 high-pass 필터링 된 각 정점의 탁월주기 분석 결과를 Table 2와 Table 3에 나타낸다. 표에 제시된 탁월주기에 대한 빈도는 스펙트럼 밀도분석에서 최대 1-3위의 밀도를 가지

Table 2. Frequency in appearance of predominant fluctuation periods (unit: days) of 30 day high-passed surface water temperatures from station 1 to station 50

St.	0.3	0.5	1.0	5.0	7.5	10.0	15.0	30.0	St.	0.3	0.5	1.0	5.0	7.5	10.0	15.0	30.0
				-	-	-	-	-					-	-	-	-	-
				5.2	7.7	10.3	15.5	30.9					5.2	7.7	10.3	15.5	30.9
1		3	2		2	1	3	1	27								
2		2	2		1	2	2	3	28		1	1		1	2	3	1
3		1	1		1	2	2	2	29		2	1		1	1		1
4	1	2	2		1	2	3	1	30		2	2	2	1	1	3	1
5		2	3		1	1	3	2	31		2	1	1	1		2	2
6		2	3		1	3	2	1	32		1	2		1	2	1	2
7		3	2		1	1	3	2	33		1	2		1	1	1	3
8		2	2	1	1	1	2	3	34		3			2	1	4	2
9		4	2		1	1	2	2	35	2	4			1		2	3
10		2			2		1	1	36	1	1			1	1	3	2
11		3			1	1		1	37		2			2		3	2
12		1			1		1		38			1		1		2	2
13		1	3		1	1	2	1	39		2	1		1	1	3	1
14			2		1		2	1	40		2	1		3	1	3	2
15									41		1	3	1	1		2	3
16			1				1	1	42		3	3	1	1	1	1	2
17		1	3		1	3	2	2	43		1	2	1		1	1	3
18			2		2	1	1	3	44			2	2	1	1	2	4
19			3	1	1	3	1	3	45				2		2	3	2
20			1		1	1	3	3	46		2	3		1		1	2
21	1	1	1		2	2	3	2	47		1			1	1	2	1
22		1			1	2	3	2	48			3	2		1		2
23		1	1		1	2	2	2	49	1			3	1	1		
24		2	2		2		4	2	50			1	1	1	1	2	3
25						1	1	1									
26									Total	6	68	69	14	52	49	94	88

는 주파수를 주기로 환산한 다음, 각 주기가 해당정점에 출현한 횟수를 가리킨다.

수온변동의 탁월주기(Table 2)는 0.5일, 1.0일 및 7일, 15일, 30일 주기와 7-10일 전후 주기에서 에너지밀도가 높다. 가장 자주 출현한 탁월주기는 15일 전후이다. 0.5, 1.0, 15, 30일과 같은 변동주기는 전 정점에서 고루 출현하나, 7.5와 10일 전후는 만남쪽과 북쪽 정점 주변에서 출현빈도가 다소 크다. 천수만 내 출현한 표층수온의 탁월변동은 조석·조류 운동에 의한 반일, 일일 및 월령에 따른 보름, 한 달 주기와 대기요소에 의한 것으로 추정되는 7-10일 주기인데, 이 가운데 반일주기 수온변동은 조석이 탁월한 해역의 여러 연구조사(Lim, 1991; Lee et al., 1992; Kang, 2013)에서 내부조석파와 관련되어진 것임이 밝혀져 있다. 또 수온의 일일주기 변동은 기온변화와 같은 태양복사에너지에 의한 것(Choi et al., 2002)이거나 바람에 의한 준 관성주

기(동 해역의 관성주기 20.2시간 보다 고주파; Nam, 2006)에 의한 가능성이 크다. 일일 이상의 변동은, 수심이 얇은 해역의

Table 3. Frequency in appearance of predominant fluctuation periods (unit: days) of 30 day high-passed sea level pressure, air temperature, wind speed and wind direction at auto weather system stations of Seobu and Daechon

Period	0.5	1.0	4.9	8.7-8.9	9.6	11.1	12.2	13.6
Sea L. Pr.					2	2	2	
Air Temp.	1	2		2			1	
Wind Spd.	1	1		3				1
Wind Dir.	2	2	1		1			

L. Pr, level pressure; Temp., temperature; Spd., speed; Dir, direction.

Table 4. Coherences and phase differences (time lag) on the average of August, November, January and May from 2011 to 2012 for the predominant fluctuation of 12.3 h between 40 h high-passed water temperatures of the remainder stations and at station 17, 21, 29 and 48, respectively

St.	St. 17		St. 21		St. 29		St. 48		St.	St. 17		St. 21		St. 29		St. 48	
	coh	tlag	coh	tlag	coh	tlag	coh	tlag		coh	tlag	coh	tlag	coh	tlag	coh	tlag
1	0.4	-1.2	0.6	0.3	0.6	0.3	0.5	1.1	26	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0.4	1.0	0.6	1.4	0.5	1.5	0.7	2.5	27	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.3	0.9	0.6	0.1	0.5	0.4	0.6	2.1	28	0.3	-1.3	0.7	-0.2	1.0	0.2	0.3	0.1
4	0.2	-0.7	0.5	0.2	0.5	0.3	0.4	1.4	29	0.3	-0.6	0.8	0.7	-	-	0.4	1.4
5	0.2	-1.1	0.5	-0.3	0.5	0.3	0.4	1.2	30	0.2	1.4	0.5	1.1	0.4	0.9	0.5	1.3
6	0.2	-1.0	0.7	-1.7	0.7	-1.9	0.5	-1.3	31	0.4	0.2	0.6	0.8	0.5	0.0	0.6	1.2
7	0.3	-2.5	0.7	-0.2	0.8	-0.4	0.6	0.4	32	0.5	0.0	0.6	0.5	0.6	0.1	0.6	1.1
8	0.3	-2.5	0.6	-0.3	0.7	-0.5	0.5	0.4	33	0.3	1.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.6	1.1
9	0.3	-2.3	0.7	-0.3	0.7	-0.5	0.6	0.2	34	0.2	1.2	0.6	1.5	0.4	1.5	0.4	1.9
10	0.7	-0.6	0.6	-0.8	0.7	-0.5	0.8	-0.2	35	0.3	1.3	0.5	-0.6	0.4	-0.9	0.4	-0.3
11	0.3	-2.4	0.8	0.2	0.7	-0.7	0.7	0.9	36	0.3	-2.1	0.5	0.7	0.5	-3.1	0.3	-3.4
12	0.6	0.2	0.9	0.4	0.9	0.1	0.6	0.5	37	0.4	-1.4	0.6	-0.9	0.6	-0.9	0.5	0.1
13	0.3	0.0	0.5	1.7	0.6	0.8	0.6	1.3	38	0.2	-0.6	0.2	-1.4	0.3	-1.6	0.1	1.2
14	0.4	-0.6	0.4	2.0	0.5	1.0	0.4	1.0	39	0.4	-1.4	0.7	-1.1	0.7	-1.3	0.6	-0.3
15	-	-	-	-	-	-	-	-	40	0.3	-0.8	0.7	-1.3	0.7	-1.5	0.5	-0.7
16	0.7	-0.2	0.0	-3.3	0.1	3.8	0.2	2.4	41	0.6	-0.5	0.4	-1.2	0.4	-1.3	0.8	-0.3
17	-	-	0.2	0.2	0.3	1.3	0.4	0.8	42	0.4	1.5	0.6	-0.6	0.6	-0.9	0.7	-0.2
18	0.5	0.8	0.1	-1.4	0.1	1.5	0.6	-0.1	43	0.3	-2.2	0.5	-0.6	0.6	-0.8	0.7	0.1
19	0.4	1.0	0.4	-0.7	0.4	2.1	0.5	-0.1	44	0.3	-0.5	0.3	-0.4	0.3	-0.6	0.5	1.4
20	0.4	1.1	0.1	3.9	0.2	3.2	0.1	0.3	45	0.1	-1.1	0.1	1.6	0.1	-1.0	0.3	1.2
21	0.2	-0.2	-	-	0.7	-0.1	0.4	0.4	46	0.3	-0.3	0.6	0.6	0.6	0.4	0.5	1.4
22	0.4	-1.6	0.5	-1.5	0.5	-1.7	0.6	-0.5	47	0.7	-0.3	0.5	-0.6	0.7	-0.3	0.7	0.1
23	0.2	-3.0	0.5	0.5	0.4	0.8	0.4	-1.6	48	0.5	-0.3	0.5	-1.0	0.4	-1.1	-	-
24	0.2	-1.6	0.5	1.4	0.4	1.1	0.4	1.3	49	0.4	-1.4	0.3	0.6	0.4	0.2	1.0	0.1
25	0.1	-6.0	0.2	0.8	0.1	2.2	0.1	6.1	50	0.4	0.8	0.2	2.9	0.2	1.7	0.3	2.0

수층 내 연직 속도차는 성층안정도를 떨어뜨려 수층혼합을 야기하므로 조류, 바람, 해면기압 등 외력에 의한 표층수온의 변동과 진폭은 성층발달 정도에 따라 관성주기 바깥에서 다양하게 나타날 수 있다. 또한 수로와 섬, 리아스식 해안으로 수심이 급격히 변하는 해역은 등수심선에 수직한 해·조류성분에 의한 내부조석파의 발생(Baines, 1986)과 파의 불안정으로 인한 혼합, 해면냉각, 계절풍과 같은 외부 기상요인에 의한 혼합효과(Matsuyama, 1985) 및 수층상태와 지형적 복합작용에 의한 비선형효과(Ippen and Harleman, 1966; Friedrichs and Aubrey, 1988) 등이 혼재할 수 있어 이로 인한 여러 주기변동이 나타날 수 있다. 천수만 내 수온변동주기 중 15일 전후 주기가 가장 빈도가 높는데, 이는 조류가 강한 천수만 특성상 보름 전후 주기의 조류유속 차에 따른 성층상태 변화가 해역에 영향을 준 결과로 판단된다.

한편, 대기요소인 해면기압과 기온, 바람 변동에 나타난 탁월주기(Table 3)는 1.0, 9.0, 0.5, 12일 전후로, 0.5일과 1일은 해륙풍과 태양복사에 의한 주기변동으로 판단된다. 이와 같이 표층수온의 단주기 변동에는 조석성분에 의한 영향 외, Table 3의 대기요소에 의한 변동도 포함될 것으로 추정된다. 4.9-9.6일 주기는 Fig. 6에 제시한 수온변동의 비 조석 성분과 바람변동에 출현하는 주기와 대체로 일치하여 7-10일 전후의 수온변동(Table 2)과 관련성이 있다. Jung et al. (2013b)은 천수만 중앙부의 조류조사에서 비 조석 성분으로 3-6개의 유의한 주기가 2-8일 주기에 포함되어 있음을 스펙트럼과 코히런스 분석으로 제시하고, 이러한 주기성분이 바람에서도 나타나고 있음을 밝혔다. 이와 같이 모니터링 자료의 스펙트럼 주기분석 결과, 천수만 해역의 표층수온에 탁월 조석·조류로 인한 반일, 일일 및 보름, 한 달 주기와 섬과 육지에 둘러싸인 지형적 특성과 계절풍 취송으로 인한 반일, 일일, 7-10일 전후의 주기 변동이 복합되어 있음에 따라, 향후 7-10일 주기의 대기요소로 인한 수온변동에 보다 구체적인 근거와 역학과정에 관한 연구가 있어야 할 것으로 보인다.

천수만 내 북쪽(St. 17), 남쪽(St. 21), 중앙(St. 29), 방조제 연안(St. 48)의 수온과 그 외 정점들 간의 단주기 수온변화에 대한 상관성과 위상차를 파악하기 위해 40시간 high-pass 필터링된 수온변화 주기($T=1/f$, f 는 주파수)별 코히런스(coherence; 0-1.0)와 위상차(θ)에 의한 시간지연($\tau, \tau=\theta/2\pi f$)결과를 분석하였다. 각 계절 결과는 평균하였다. 정점 St. 17, 21, 29, 48과 나머지 정점들 간 교차스펙트럼에 의한 주기는 12.3 시간변동에 가장 탁월했고, 다음으로 24.4, 23.8, 12.5시간이었다. Table 4에 탁월 12.3시간 변동에 대한 코히런스와 시간지연 결과를 나타낸다. 분석에서 시간지연이 음(-)인 경우는 St. 17, 21, 29, 48에 비해 그 정점들의 수온변동 위상이 느린 것을 의미한다. 만 북쪽 St. 17에 대한 반응은 St. 10, 16, 47에서 코히런스가 0.7로 가장 크고, 그 외 0.5-0.6은 만 중앙-북쪽 정점들에서 나타난다. 만 남쪽 St. 21은 St. 1-12의 만 남쪽-중앙까지 0.5-0.9의 코히런스로 비교적 높은 값이나, St. 16-20, 44, 45, 49, 50의 만 북쪽과

방조제 주변은 0.1-0.3으로 낮다. 만 중앙 St. 29는 만 북쪽과 방조제 연안 정점들에서 낮았다. 방조제 연안 St. 48과 코히런스가 높게 나타난 곳은 연안에 인접해 수심이 비교적 얇은 St. 10-11, 41-43, 47, 49 등이다. 따라서 코히런스 분포로 본 만내 수온변동 특성은 만 중앙부(St. 29)를 중심으로 북쪽과 남쪽으로 구분된다. 방조제 주변 연안은 서산-보령 및 안면도 연안의 얇은 수심역과 상관도가 높다. 방조제 내 수온의 변동은 만 남쪽, 북쪽, 중앙 및 연안 해역 모두와 상관도가 낮다. 한편, 위상차에 따른 시간지연은 St. 17은 St. 25에서 최대 -6.0 시간으로, 만 남쪽-중앙 정점들이 대체로 음(-)의 값을 보여 St. 17정점 수온의 변동 위상이 앞선다. 만 남쪽입구 St. 21은 보령과 안면도 남동연안(St. 37-44, 5-10)에서 -0.2~-1.7로, 위상에서 앞서나 나머지 정점들은 대체로 양(+)의 값이다. St. 29도 서산-보령과 안면도 남동 연안(St. 35-48, 6-11)에서 음의 값을 나타내, 서산-보령 및 안면도 남동연안의 수온변동위상이 St. 17, 21, 29 보다 공통적으로 늦음을 보여준다. 이 현상은 서산 A 방조제 연안 St. 48에 대한 만 내 정점 대부분의 위상이 전반적으로 양의 값을 통해서도 알 수 있다.

천수만 전역의 계절별 수온모니터링 결과, 계절별 해역별 수온변동특성이 파악되었다. 이러한 결과는 천수만 내에서 양식대사물을 선정하거나, 양식시설의 입지를 정할 때 유용한 정보로 활용될 수 있다. 본 연구는 수온, 대기, 조위자료 등의 시계열 자료를 바탕으로 한 주기분석과 스펙트럼 분석에 의한 변동 간 관련성 분석에 의한 결과이다. 향후 천수만의 수온·염분 자료를 활용한 수괴의 시공간적 변동과 조류, 취송류, 하천수방류로 인한 유동요소 변동에 따른 물리환경변화에 관한 조사가 더 이루어져야 할 것으로 생각된다.

사 사

논문 작성에 필요한 자료수집에 대해 윤은찬 박사님께 감사드립니다.

References

- Baines PG. 1986. Internal tides, internal waves and near-inertial motions. In: Baroclinic processes on continental shelves. Mooers CNK, ed. American Geophysical Union, Washington DC, U.S.A., 19-31. <https://doi.org/10.1029/CO003p0019>.
- Cho CW. 2005. A study on the circulation between the Gwangyang Bay and the Jinju Bay, the south coast of Korea. M.S Thesis, Graduate school of Chonnam National University, Yeosu, Korea, 22-31.
- Choi YH, Ro YJ and Jun HK. 2002. Variation of seawater temperature in the coastal waters off the Dangjin Power Plant, Asan Bay, Korea. J Korean Soc Oceanogr 7, 43-50.
- Choo HS and Cho KD. 1984. The structure of tidal front in Eastern Yellow Sea in summer of 1982. Bull Korean Fish Soc

- 17, 83-91.
- Choo HS and Yoon EC. 2015. Temporal and spatial variations of sea surface temperature in Jinju Bay in the South Coast of Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 21, 315-326. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.4.315>.
- Chungcheongnamdo. 2019. Respond to the water temperature rise of Cheonsu Bay through private, institutional and academic cooperation. Retrieved from <http://www.chungnam.go.kr>.
- Foreman MGG. 1978. Manual for tidal currents analysis and prediction. In: Pacific marine science report 78-6. Institute of Ocean Science, Patricia Bay, Sydney, BC, Canada.
- Friedrichs CT and Aubrey DG. 1988. Nonlinear tidal distortion in shallow mixed estuaries: A synthesis. *Estuar Coast Shelf Sci* 26, 521-545. [10.1016/0272-7714\(88\)90082-0](https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90082-0).
- Ippen AT and Harleman DRF. 1966. Tidal dynamics in estuaries. In: Estuary and coastline hydrodynamics. Ippen AT, ed. McGraw-Hill, New York, NY, U.S.A., 493-545.
- Jung KY and Ro YJ. 2010. Stratification and destratification processes in the Kangjin Bay, South Sea, Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 15, 97-109.
- Jung KY, Ro YJ and Kim BJ. 2013a. Characteristics of tidal current and tidal residual current in the Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea based on numerical modeling experiments. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 25, 207-218. <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.4.207>.
- Jung KY, Ro YJ and Kim BJ. 2013b. Tidal and sub-tidal current characteristics in the central part of Chunsu Bay, Yellow Sea, Korea during the summer season. *J Korean Soc Oceanogr* 18, 53-64.
- Kang CY. 2013. The characteristic of internal waves observed in the tidal fronts near Ocheong-Do in the eastern Yellow Sea. M.S. Thesis, Graduate school of Kunsan National University, Kunsan, Korea, 60-61.
- Kang YQ. 2000. Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936-1995). *J Fish Sci Tech* 3, 173-179.
- Kim DS, Lim DI, Jeon SK and Jung HS. 2005. Chemical characteristics and eutrophication in Cheonsu Bay, west coast of Korea. *Ocean Polar Res* 27, 45-58. [10.4217/OPR.2005.27.1.045](https://doi.org/10.4217/OPR.2005.27.1.045).
- 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 JK, Park C, Lee DB and Lee SW. 2012a. Variations in plankton assemblage in a semi-closed Chunsu Bay, Korea. *J Korean Soc Oceanogr* 17, 95-111. <https://doi.org/10.7850/jkso.2012.17.2.095>.
- Lee JS, Kim KH, Shim JH, Han JH, Choi YH and Khang BJ. 2012b. Massive sedimentation of fine sediment with organic matter and enhanced benthic-pelagic coupling by an artificial dyke in semi-enclosed Chonsu Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* 64, 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.033>.
- Lee SW. 1994. Hydrography of Korean harbors and bays. Zipmundang Press, Seoul, Korea, 117-121.
- Lee SW, Park C, Lee DB and Lee JG. 2014. Effects of freshwater discharge on plankton in Cheonsu Bay, Korea during in the rainy season. *J Korean Soc Oceanogr* 19, 41-52. <https://doi.org/10.7850/jkso.2014.19.1.41>.
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF02111113>.
- Nam SH. 2006. Near-inertial current variability off the east coast of Korea. Ph D. Dissertation, Graduate school of Seoul National University, Seoul, Korea, 14-21.
- Park SU and Kim JK. 2012. Sea water temperature and salinity distributions in the Cheonsu Bay. In: Proceeding of the autumn meeting 2012 of Korea Society of Marine Environment and Energy, Goseong, Korea, 251-257.
- Park SY, Park GS, Kim HC, Kim PJ, Kim JP, Park JH and Kim SY. 2006. Long-term changes and variational characteristics of water quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea. *J Environ Sci Int* 15, 447-459. <https://doi.org/10.5322/JES.2006.15.5.447>.
- Park SY, Heo S, Yu J, Hwang UK, Park JS, Lee SM and Kim CM. 2013. Temporal and spatial variations of water quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 19, 439-458. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.5.439>.
- Pawlowicz R, Beardsley B and Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput Geosci* 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. *J Physical Oceanogr* 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 ORYT. 1983. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *Am Meteorol Soc* 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).