

TECHNICAL NOTE

서해 가로림만 수온의 시계열 분석

양준용* · 조성희 · 이준수¹⁾ · 한창훈 · 허 승

국립수산과학원 서해수산연구소 자원환경과, ¹⁾국립수산과학원 기후변화연구과

Time-series Analysis of Seawater Temperature in the Garolim Bay, the West Coast of Korea

Joon-Yong Yang*, Sunghee Cho, Joon-Soo Lee¹⁾, Changhoon Han, Seung Heo

West Sea Fisheries Institute, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Korea

¹⁾Oceanic Climate & Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 47514, Korea

Abstract

We used seawater temperature data, measured in the Garolim Bay, to analyze temperature variation on an hourly and daily basis. Lagrange's interpolation using before and after data was applied to restore nonconsecutive missing temperature data. The estimated error of the data restoration was 0.11°C. Spectral analyses of seawater temperature showed significant periodicities of approximately 12.4 h (semidiurnal tide) and 15.0 d (long-period tide), which is close to those of M₂ and M_f partial tides. Variation in seawater temperature was correlated more with tidal height than with air temperature around the Garolim Bay. In June and December, when the seawater temperature difference between the inside and outside of the Garolim Bay was very large, the periodicities of 12.4 h and 15.0 d were highly prominent. These results indicate that the exchange of seawater between the inside and outside of the Garolim Bay induced variations in seawater temperature owing to tide. Understanding temperature variation because of tide helps to prevent abnormal mortality of cultured fish and to predict seawater temperature in the Garolim Bay.

Key words : Garolim Bay, Temperature variation, Semidiurnal tide, Long-period tide, Seawater exchange, Data restoration

1. 서론

가로림만은 충청남도 서산시와 태안군의 해안으로 둘러싸인 반 폐쇄성 만(bay)으로 평균 조위 차이가 4.8 m에 달하여 북쪽의 만 입구를 통하여 해수가 두 개의 갯골을 중심으로 주기적으로 유출입하고 있다. Woo et al.(2009)에 의하면 가로림만은 해수 전체 부피의 76%가 조석에 의해 대량 유입되어 해수 유통이 좋은 해역이

라고 평가하였다. 이로 인하여 1981년부터 가로림만에 조력발전소의 건립이 여러 차례 추진되었으나, 투자우선 순위와 개발 경제성 등으로 무산되었다(Lee and Jung, 2015). 가로림만의 해양환경에 관한 연구는 가로림만 내 고정 정점에서 연 4회 또는 6회 관측한 수온, 염분, 용존 산소(DO), 영양염류 등의 자료를 이용하여 여름철의 저염분 현상과 빈산소 수괴 발생, 플랑크톤에 의한 영양염 소비에 대하여 계절적 분석을 하였다(Park et al., 2009;

Received 5 April, 2021; Revised 23 June, 2021;

Accepted 25 June, 2021

*Corresponding author: Joon-Yong Yang, West Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Incheon 22383, Korea

Phone : +82-32-745-0650

E-mail : joonyong.yang@gmail.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

Nam et al., 2012). 해양생물의 서식과 성장에 중요한 수온은 자료의 시간 한계로 인하여 겨울철에 낮고 여름철에 높은 전형적인 온대 해역의 계절에 따른 변화를 언급하였다.

최근 가로림만에 겨울철에 평년보다 수온이 낮은 저수온 현상이 발생하여 어류 및 패류 양식장에 피해가 발생하고 있다. 국립수산물과학원(NIFS, National Institute of Fisheries Science)은 가로림만에 2020년 12월 31일부터 2021년 3월 5일까지 65일 동안 저수온 주의보와 경보를, 2020년 2월 6일부터 2월 24일까지 19일 동안 저수온 주의보를 발령하여(NIFS, 2021), 가로림만에서 수온에 의한 해양환경 변화가 시작하고 있음을 시사한다. 또한 낮은 수온뿐만 아니라 급격한 수온 변동이 바지락, 농어, 참돔, 넙치 등 다양한 양식생물에게 스트레스를 유발하고, 생존과 대사에 영향을 미친다는 연구가 있다(Yoo, 2000; Lee et al., 2002; Kang et al., 2004; Min et al., 2004; Shin et al., 2018). 따라서 조석의 우세하고 해수유통이 활발한 해역의 경우, 서식 생물에게 미치는 수온의 영향을 이해하기 위하여 조석에 따른 수온의 변동을 파악할 필요가 있다. 이에 더하여 미래에 가로림만에 조력발전소 개발이 추진된다면 사전 환경 분석이 필요한 실정이다.

우리나라 남해 진주만(Choo and Yoon, 2015), 일본 오사카만(Yanagi, 1987) 등지에서 만(Bay) 규모의 수온 변동 연구 또한 계절 변동에 관한 것이다. Jang et al.(2018)의 연구는 완도해역에 위치한 30분 간격의 수온과 조위 자료를 이용하여 수온의 변동이 대략 12시간과 24시간의 조석주기와 상관성이 높다는 것을 보여 주었다. 그러나 분석 기간이 2016년 8월 한 달에 국한되어 짧았고, 연안의 조위관측소 한 지점에서 관측한 수온과 조위 자료를 이용하였으므로 자료 간의 독립성을 담보하기 어렵다. 이 연구에서 가로림만 내 고포도 남동부 해역에 위치한 국립수산물과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템의 수온 자료와 만 입구에 위치한 해양부이의 수온, 인근 해역의 기온과 조위 자료를 함께 시계열 분석에 이용하여 시기별로 가로림만의 수온 변동을 밝히고 조석과 기온과의 관련성을 파악하고자 한다. 분석에 앞서 무인 관측장비에서 빈번하게 발생하는 결측에 따른 자료 손실을 최소화하기 위한 자료 복원 방법을 제시하였다.

2. 자료 및 결측 복원

2.1. 자료

국립수산물과학원은 양식장 밀집 해역의 수온을 측정하여 어민과 관련자에게 실시간으로 전달하는 해양환경 어장환경정보시스템을 운영하고 있다. 양식장 플랫폼에 관측 장비를 설치하여 수심 3~5 m의 수온을 30분 간격으로 측정하고, 무선통신을 통해 국립수산물과학원 데이터베이스에 저장한다. 이후 홈페이지나 play스토어에 있는 수온정보서비스앱을 통해 관측 자료를 제공하고 있다. 분석에 이용한 자료는 충청남도 서산시 지곡면에 위치한 서산 지곡 관측소(이후 지곡으로 표기)에서 관측한 것이다(Fig. 1). 또한 지곡 수온과 비교하기 위하여 만 입구에 위치한 국립해양조사원(KHOA, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency)의 태안항 해양부이(이후 태안으로 표기)의 표층 수온 자료, 국립해양조사원 대신 조위관측소의 조위 자료와 기상청(KMA, Korea Meteorological Administration) 덕적도 해양부이의 기온 자료도 함께 사용하였다(Fig. 1). 분석에 사용한 자료의 기간은 Table 1에 정리하였다(KHOA, 2020a, 2020b; KMA, 2020; NIFS, 2020).

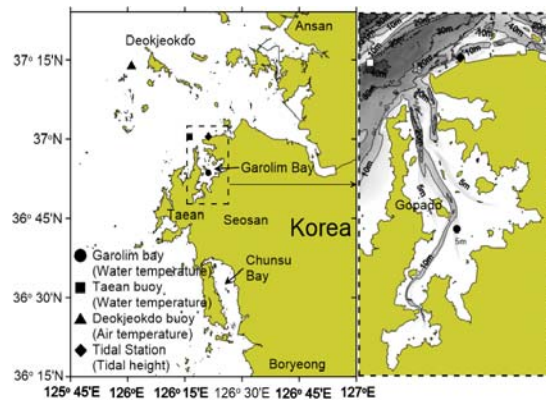


Fig. 1. Map showing the stations measuring seawater temperature, air temperature and tidal height (left) and bathymetry of the Garolim Bay (right). ●, seawater temperature station in the Garolim Bay; ■, seawater temperature station at the mouth of the Garolim Bay; ▲, air temperature station nearby the Garolim Bay; ◆, Tidal station nearby the Garolim Bay.

Table 1. Data used in this study

Station	Data	Period	Interval	Provider
Garolim Bay Aquafarm	Seawater temperature	Jan. 2016~ Dec. 2020	30 minutes	NIFS
Taeon Ocean buoy	Seawater temperature	Jan. 2017~ Dec. 2017	30 minutes	KHOA
Deokjeokdo Ocean buoy	Air temperature	Jan. 2017~ Dec. 2017	30 minutes	KMA
Daesan Tidal station	Tidal height	Jan. 2017~ Dec. 2017	1 minute	KHOA

Table 2. Number of consecutive missing data of seawater temperature at half-hour interval by year in the Garolim Bay

Missing data	2016	2017	2018	2019	2020
1	90	58	24	105	108
more than 2	1157	142	205	1524	325
Total	1247	200	229	1629	433
Missing rate (%)	7.1	1.1	1.3	9.3	2.4

Table 2는 2016년부터 2020년까지 연도별로 지곡 수온 자료의 결측률을 나타낸 것이다. 1개 결측(Table 2의 왼쪽 열에서 1에 해당)은 해당 시각의 전후에 자료가 있는 것으로 불연속 결측이라 정의할 수 있으며, 2개 이상 결측은 30분 간격의 자료이므로 1시간 이상의 연속 결측이 발생한 것이다. 2017년의 결측률이 1.1%로 가장 낮아서 이후 2017년을 선택하여 분석을 수행하였다. Fig. 2는 2017년의 지곡 수온, 태안 수온, 덕적도 기온, 대산 조위를 도시한 것이고, Fig. 3은 2017년 지곡 수온 자료에서 하루 48개의 자료가 있는 날만 선택하여 하루 최대치에서 하루 최소치를 뺀 일간 변동을 도시한 것이다. 반일주조(Semidiurnal tide), 일주조(Diurnal tide)과 같은 시간 단위의 변동을 분석하기 위하여 2017년 자료 중에서 일간 변동을 고려하여 4개 기간을 선택하였다(Fig. 3의 M, J, S, D). 각 자료 기간은 태음월에 해당하는 29.5일로, M은 2월 15일 0시부터 3월 16일 11시30분까지, J는 6월 1일 0시부터 6월 30일 11시 30분까지, S는 9월 10일 0시부터 10월 9일 11시 30분까지, D는 12월 2일 12시부터 12월 31일 23시 30분까지이다. 또한 조석의 사리와 조금과 같은 장주기조(long-period tide)를 분석하기 위하여 지곡의 2017년 5월 31일부터 7월 14일까지 45일간 일평균을 구하였다.

2.2. 결측 복원

무인 자동관측 자료에 결측은 자료의 부족을 유발하여 자료의 보간에 의한 오차 발생 등 시계열 분석에 많은 제약을 준다. 해양에서 무인 관측을 통해 얻는 시계열 자료는 부착생물과 염분 등으로 인한 장비 고장과 해양의 열악한 환경으로 인해 결측이 빈번하게 발생한다. 기온이나 지자기 시계열 자료에 결측이 있을 경우, 같은 시점의 주변 관측치를 이용하여 대체하거나, 자기상관 이동평균기법(ARIMA), 주성분 분석에 의한 복원 등이 연구되었으나(Ji et al., 2011; Kim et al., 2016), 연안 해역은 무인관측장비의 유지관리가 어려워 장기적인 결측의 발생이 잦으며, 수심과 해안선 같은 복잡한 지형적인 요인 등으로 공간적 상관성이 낮아 자료 복원과 대체에 관한 연구가 거의 없는 실정이다. 불연속 결측에 대해 1차와 3차 라그랑지 보간법(Lagrange's interpolation)을 적용하여 복원하고(Emery and Thomson, 1998), 그 오차를 계산하였다. 자료 (x, y)에 대한 라그랑지 N차 보간법은 식 (1)과 같다.

$$y(x) = \sum_{i=1}^{N+1} y_i [Q_i(x)/Q_i(x_i)] \quad (1)$$

$$\text{단, } Q_i(x) = (x - x_1)(x - x_2) \cdots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \cdots (x - x_{N+1})$$

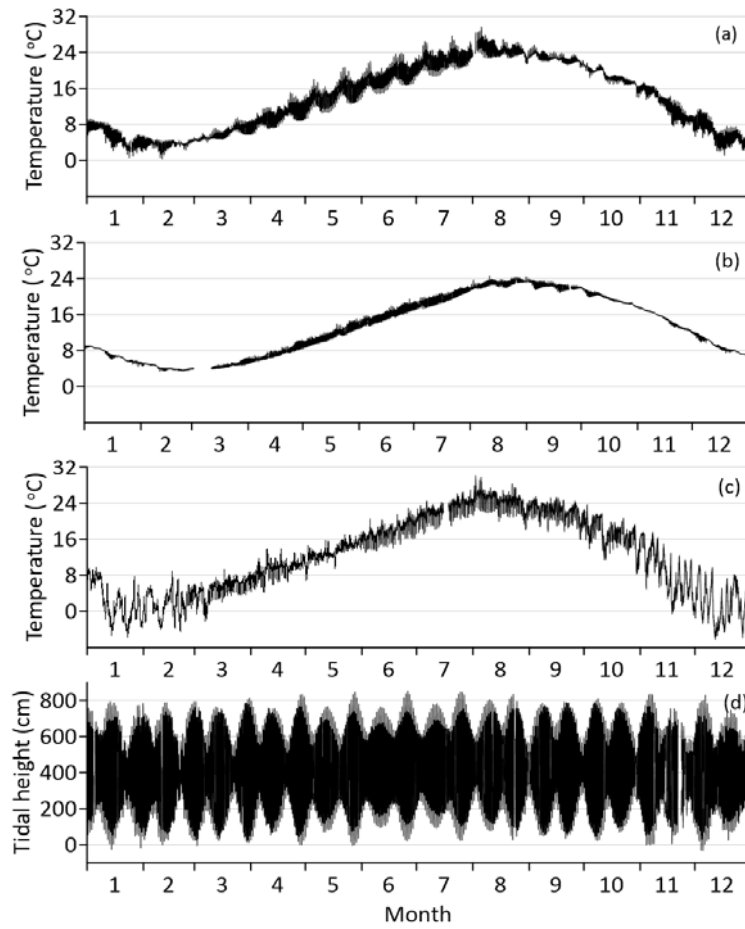


Fig. 2. Seawater temperature in the Garolim Bay (a), Seawater temperature of Taeam ocean buoy (b), Air temperature of Deokjeokdo buoy (c), and tidal height of Daesan tidal station (d) in 2017.

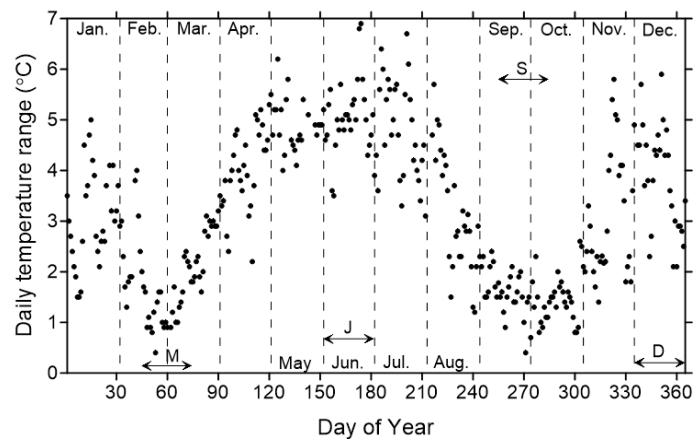


Fig. 3. Daily temperature range (maximum - minimum) of the Garolim Bay in 2017.

Data (x_i)	Restoration of missing data (x'_i) using x_{i-1} and x_{i+1}	Error of restoration ($e_i = x_i - x'_i$)	Data (x_i)	Restoration of missing data (x'_i) using $x_{i-2}, x_{i-1}, x_{i+1}$ and x_{i+2}	Error of restoration ($e_i = x_i - x'_i$)
x_1			x_1		
x_2	$x'_2 = (x_1 + x_3)/2$	$e_1 = x_2 - x'_2 $	x_2		
x_3	$x'_3 = (x_2 + x_4)/2$	$e_2 = x_3 - x'_3 $	x_3	$x'_3 = (-x_1/6 + 2x_2/3 + 2x_4/3 - x_5/6)$	$e_1 = x_3 - x'_3 $
\vdots	\vdots	\vdots	x_4	$x'_4 = (-x_2/6 + 2x_3/3 + 2x_5/3 - x_6/6)$	$e_2 = x_4 - x'_4 $
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_{46}	$x'_{46} = (x_{45} + x_{47})/2$	$e_{45} = x_{46} - x'_{46} $	x_{45}	$x'_{45} = (-x_{43}/6 + 2x_{44}/3 + 2x_{46}/3 - x_{47}/6)$	$e_{43} = x_{45} - x'_{45} $
x_{47}	$x'_{47} = (x_{46} + x_{48})/2$	$e_{46} = x_{47} - x'_{47} $	x_{46}	$x'_{46} = (-x_{44}/6 + 2x_{45}/3 + 2x_{47}/3 - x_{48}/6)$	$e_{44} = x_{46} - x'_{46} $
x_{48}			x_{47}		
			x_{48}		

Fig. 4. Schematic diagrams of calculating restoration errors for the 1st (a) and the 3rd order of Lagrange's method (b).

N이 1인 경우는 선형에 해당하며, 지곡의 자료의 경우 결측 시각의 전 30분과 후 30분의 자료를 평균한 것이다. N이 3인 경우는 결측 시각의 전 2개 자료와 후 2개의 자료를 이용하여 보간한다. 복원 오차는 자료가 있지만 없다고 가정하고 보간한 뒤(Fig. 4), 보간한 자료와 실제 자료를 비교하여 평균절대편차(Mean Absolute Deviation, MAD)를 산출하였다(Lee, 2013). MAD는 식 (2)와 같으며, 실제 자료 x와 해당 시각에 자료가 없다고 가정하고 보간법으로 복원한 값 x'의 차이의 절댓값을 평균한 것이다.

$$\text{평균절대편차(MAD)} = \frac{1}{n} \sum_i^n |x_i - x'_i| \quad (2)$$

2017년 1월부터 2017년 12월까지 하루 48개의 자료가 있는 매월 1일과 15일을 선택하여 총 24일 선택하였다. 단, 2017년 8월 1일의 경우, 결측이 있어 7월 30일과 31일에서 연속 48개의 자료를 선택하였다. 일 단위(48개)로 계산하였으므로 1차 보간법은 하루 48개 중 46개를 강제 복원하여 총 1,104개 자료를 비교하였고, 3차 보간법은 44개의 자료를 강제 복원하여 총 1,056개 자료를 비교하였다. 1차 보간법을 적용한 복원 오차는 0.112℃, 3차 보간법은 0.115℃로 1차와 3차 보간에 의한 차이는 크지 않았다. 따라서 라그랑지 보간법에 의한 복원 오차를 0.11℃이라 할 수 있으며, 이를 통해 2016년부터 2020년 자료를 지곡 수온 자료를 분석에 이용한다면 자

료 결측을 10.3% 줄일 수 있다. 앞으로 불연속 결측을 1차 라그랑지 보간법을 적용한 것을 불연속 결측 평균 복원이라 하겠다.

불연속 결측 평균 복원한 자료를 포함하여 일평균을 계산할 경우 발생하는 오차를 추정하기 위하여, 먼저 식 (3)과 같이 결측 수온 자료의 불연속 결측 평균 복원값 x'을 참값 x와 오차(ε)의 합으로 표시하였다.

$$x' = x + \epsilon \quad (3)$$

n개의 불연속 결측이 있는 경우에 일평균(\bar{x}')은 식 (3)을 이용하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{x}' &= \frac{1}{48} \sum_{i=1}^{48} x_i \\ &= \frac{1}{48} (x_1 + x_2 \cdots + x'_j + \cdots x_{47} + x_{48}) \\ &= \frac{1}{48} (x_1 + x_2 \cdots + x_j + \epsilon_j \cdots x_{47} + x_{48}) \\ &= \bar{x} \pm \frac{1}{48} \sum_{j=1}^n \epsilon_j \end{aligned} \quad (\text{단, } j = 1, \dots, n) \quad (4)$$

식 (4)에서 ε 1차 보간법의 평균절대편차 0.11℃를 대입하고, 2016년부터 2020년까지 지곡 수온 자료에 불연속 결측이 하루 최대 5개가 있으므로 n에 5를 대입하면, 일평균에 대한 오차는 다음과 같이 추정할 수 있다.

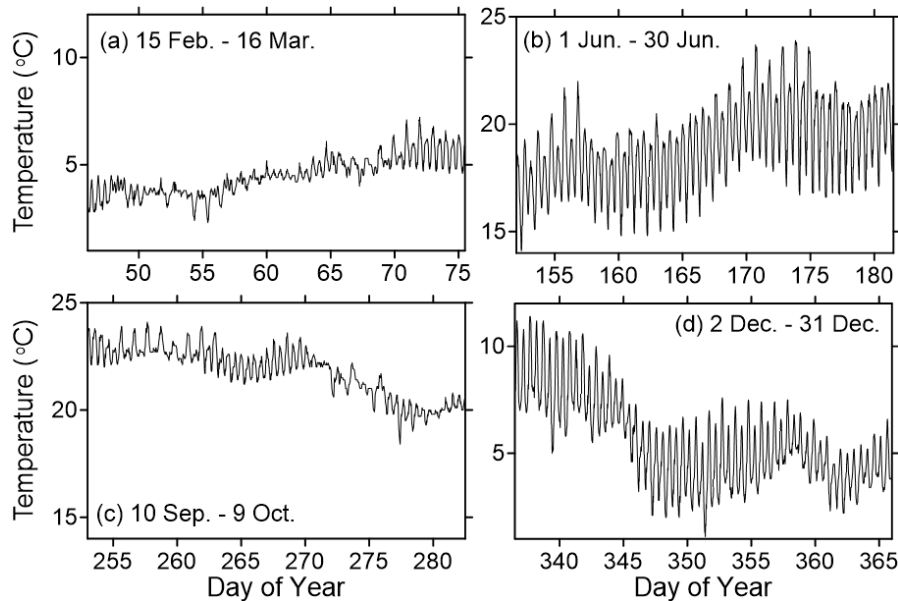


Fig. 5. Seawater temperature variation of seasonally selected 29.5-day datasets at half-hour interval in the Garolim Bay.

$$\begin{aligned}\bar{x}' &= \bar{x} \pm \frac{1}{48}n \times \epsilon \\ &= \bar{x} \pm \frac{5}{48} \times 0.11^\circ\text{C} = \bar{x} \pm 0.01^\circ\text{C}\end{aligned}$$

불연속 결측 평균 복원한 자료로 계산한 일평균은 0.01°C 정도의 작은 오차가 발생할 수 있어 이 연구에서 불연속 결측 평균 복원을 적용한 자료를 포함하여 시계열 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 가로림만 수온의 시간 단위 변동

Fig. 5는 Fig. 3에서 일간 변동을 기준으로 선정한 4개 기간의 수온을 도시한 것이다. 3월(M)과 9월(S)은 수온이 상승과 하강을 시작하는 시점으로 수온의 일변동이 1°C 내외로 상대적으로 작고, 반면에 6월(J)과 12월(D)은 수온의 상승기와 하강기에 해당하여 일변동이 5°C 이상으로 큰 것을 볼 수 있다(Fig. 3). 선택한 자료에 불연속 결측 평균 복원 자료를 10개 포함하고 있으며, 1시간 연속 결측이 있어 선형 보간법으로 복원하였다. 4개 기간에 대한 주기성 분석을 한 결과(Emery and Thomson,

1998), 3월에는 24.4시간, 12.6시간, 11.8시간 주기의 수온 변동이 탁월하였으나, 스펙트럼 밀도는 6월과 12월에 비해 작았다(Fig. 6a). 6월과 12월에는 약 24시간 주기의 수온 변동이 있지만, 주태음반일주조인 M_2 에 해당하는 12.42시간의 주기가 매우 탁월하였다(Fig. 6b, 6d). 9월에는 24.4~26.2시간, 12.0~12.6시간 주기의 변동이 있었으나 스펙트럼 밀도가 3월과 마찬가지로 작았다(Fig. 6c). 6월과 12월에 반일주조인 M_2 에 12.4시간 동안 최대 7°C 변하는 것은 시간당 약 0.6°C 수온이 상승과 하강을 반복하는 것으로 해양 생물에게는 급격한 수온 변동이라 할 수 있다. 모든 계절에서 대략 24시간 주기가 공통으로 나온 것은 태양 복사열의 일주기와 함께 가로림만의 특성상 썰물 시 많은 부분이 대기에 직접 노출되어 태양에 의한 24시간 주기의 갯벌 표층 지온이 일정 부분 해수의 열원으로 작용한 것으로 보인다(Song, 2013).

지곡 수온에 영향을 미칠 수 있는 요인을 분석하기 위하여 조위, 기온과의 상관관계를 분석하였다. 분석에 앞서 그림으로 나타내지는 않았지만 대산 조위의 주기성은 시기와 상관없이 약 24시간, 12.42시간, 6.2시간에 주기성을 보였으며, 특히 반일주조인 M_2 인 12.42시간에 매우 강했다. 또한 덕적도 기온은 대체로 24시간 주기성을

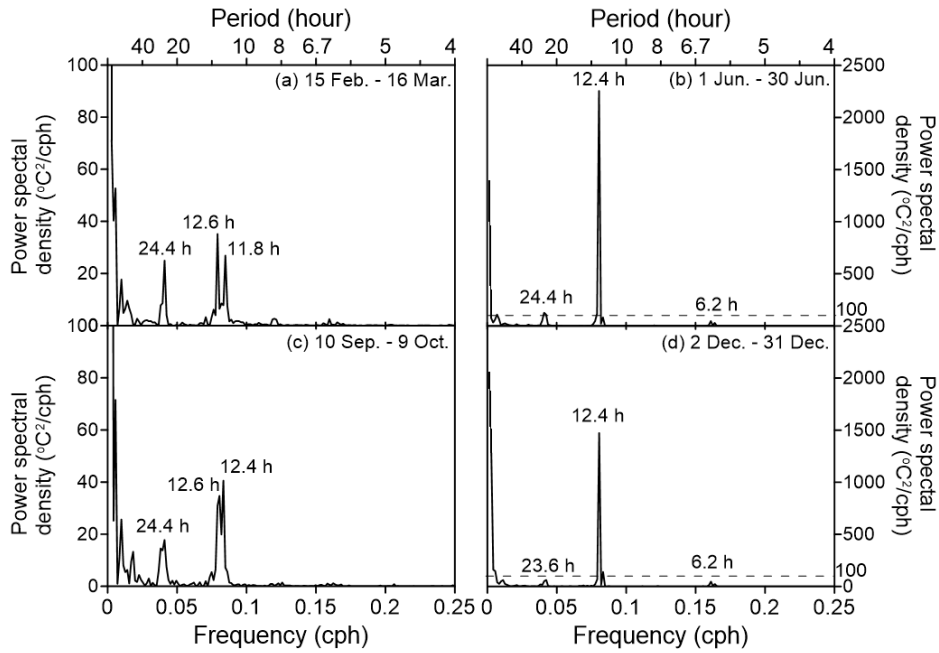


Fig. 6. Spectra of seawater temperature variation at half-hour interval in the Garolim Bay. Dashed lines in right panels denotes spectral density of 100 °C²/cph.

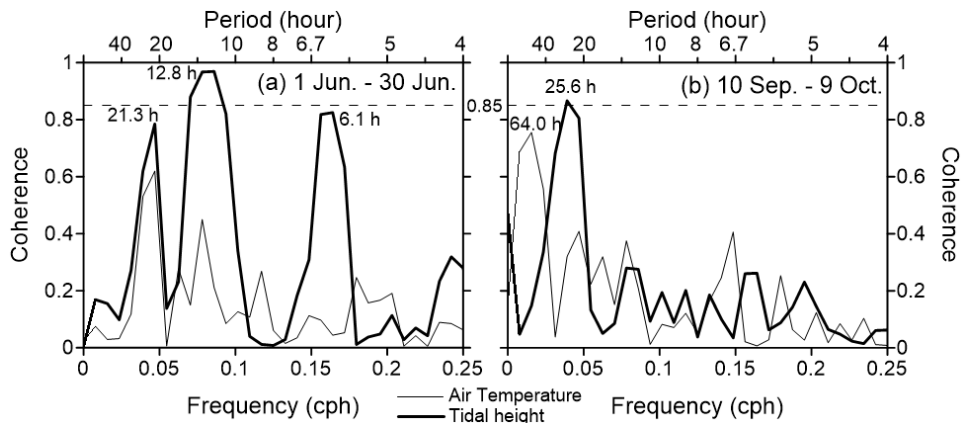


Fig. 7. Coherences of seawater temperature in the Garolim Bay with air temperature at Deokjeokdo (thin line), and with tidal height at Daesan (thick line) in June (a) and September (b).

보였다. 지곡 수온의 주기성 분석에서 반일주조가 탁월한 6월과 12월을 대표해서 6월을, 전체적으로 변동성이 작은 3월과 9월을 대표해서 9월을 선택하였고, 두 기간에서 지곡의 수온과 덕적도 기온, 대산 조위 자료와 각각 주파수 영역에서 Coherence를 계산하였다(Emery and

Thomson, 1998). 6월의 경우(Fig. 7a), 기온은 최고 상관계수는 주기 21.3시간에서 0.62인 반면 조위는 11.6시간에서 0.97로 매우 컸다. 특히 조위와 상관계수가 0.85 이상인 주기는 11.6~12.8시간으로 반일주조에 해당한다. 9월에 지곡 수온이 조위와 최고 상관계수는 주기

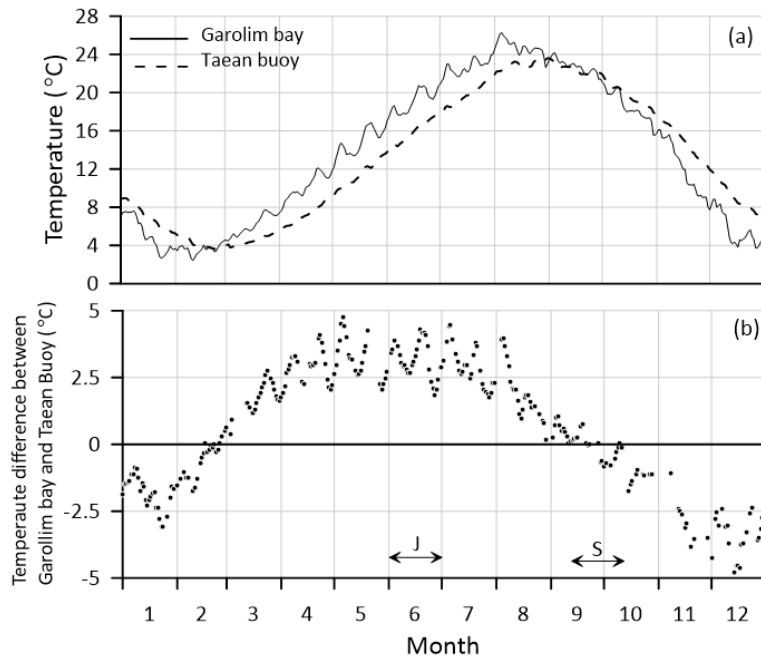


Fig. 8. Daily mean seawater temperature in the Garolim Bay (solid line in upper panel) and at the mouth of the Garolim Bay (dashed line in upper panel). Lower panel shows seawater temperature difference between the inside and outside of the Garolim Bay. Positive sign indicates that seawater temperature inside of the Garolim Bay was higher than outside and negative sign does the other way in lower panel.

25.6시간에서 0.87로 비교적 컸으며, 기온과는 주기 32 시간 이하에서 0.5를 넘지 못해 전체적으로 상관관계가 좋지 않았다(Fig. 7b). 다시 말하여 6월의 지곡 수온은 조위와 반일주조 주기에서 상관관계가 좋았고, 9월에는 1일 이하 단위 규모에서 기온과 조위 모두 상관관계가 좋지 않았다.

지곡 수온에 대한 외해수의 영향을 파악하기 위하여 지곡 수온과 만 입구에 위치한 태안의 수온을 비교하였다. Fig. 8a는 2017년 지곡과 태안의 일평균 수온을 도시한 것이고, Fig. 8b는 일평균 수온의 차이를 나타낸 것이다. Fig. 8b에서 양의 부호는 지곡의 수온이 태안보다 높은 것을, 음의 부호는 지곡의 수온이 태안에 비해 낮은 것을 의미한다. 2월에서 3월 사이에 지곡의 수온이 태안에 비해 낮다가 높아지고, 9월에서 10월 사이는 반대의 상황이다. 반면에 4월에서 7월까지 지속적으로 지곡의 수온이 태안에 비해 1.7°C~4.8°C 높았으며, 1월과 11월부터 12월까지 지곡의 수온이 태안에 비해 0.9°C~4.8°C

낮았다. 6월(J)과 12월(D)은 지곡과 태안의 수온 차이가 큰 시기이고, 3월(M)과 9월(S)은 수온의 차이가 적은

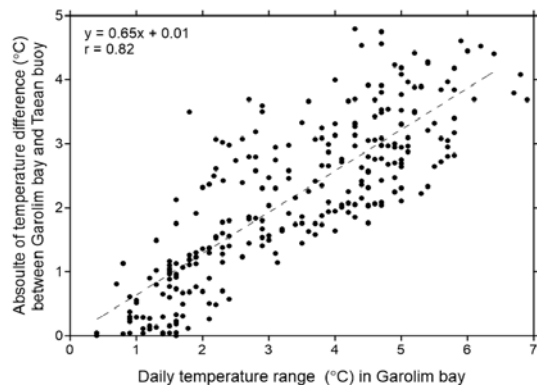


Fig. 9. Daily temperature range in the Garolim Bay with absolute of temperature difference between Garolim bay and Taaen buoy (outside of the Garolim Bay) in 2017. Dashed line shows linear trend.

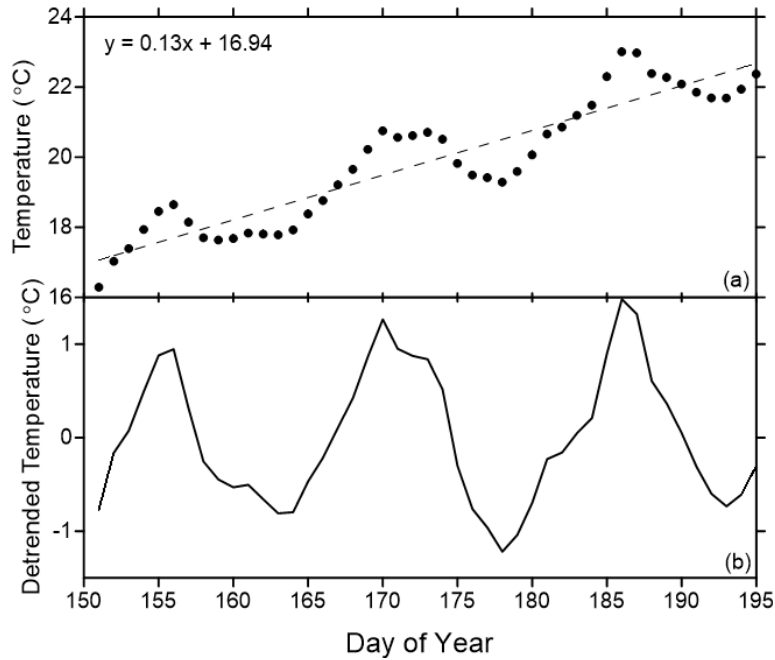


Fig. 10. Daily mean water temperature in the Garolim Bay from May 31 to July 14, 2017 with linear trend (dashed line) in upper panel (a). Lower panel (b) shows linearly detrended temperature.

시기에 해당한다. Fig. 9는 지곡 수온의 일간 진동폭(Fig. 3)과 지곡과 태안의 수온 차이를 도시한 것으로 두 자료의 상관계수는 0.82이다. 이것은 가로림만 내외부 수온 차이와 가로림만 내부의 수온 일변동 사이에 강한 상관성이 있음을 의미한다. 특히 Coherence 분석 결과, 6월에 가로림만 내부 반일주조 수온 변동과(지곡) 조위와 상관성이 높은 것으로 보아 조류에 의해 외해수가 가로림만 내부에 영향을 미치는 것을 시사한다.

3.2. 가로림만 수온의 일 단위 변동

자료의 결측이 적고 변동성이 큰 시기인 2017년 5월 31일부터 7월 14일까지 45일의 지곡 일평균 자료를 이용하여 일 단위 이상의 장주기 분석을 하였다(Fig. 10). 수온이 하루에 약 0.13°C 증가하는 선형 추세를 제거하면, 수온은 Fig. 10b와 같이 -1.2°C~1.5°C 사이에서 주기적인 변동을 한다. 이에 대한 주기성 분석 결과는 Fig. 11에서 보듯이 주기 15일에 스펙트럼 밀도가 높았으며, 이것은 조석의 태음반일주조(M₂)인 13.7일에 해당하는 것으로 판단된다. 그림으로 나타내지 않았지만 하루 중

조위 차이(최고 조위 - 최저 조위)와 선형 추세를 제거한 지곡 수온과의 상관계수가 0.73으로 높았다. 이것은 5월 말부터 7월 중순은 가로림만 내부와 외해와 수온 차이가 큰 시기에 해당하여 조석에 의한 장주기조 수온 변동임을 뒷받침한다(Fig. 8).

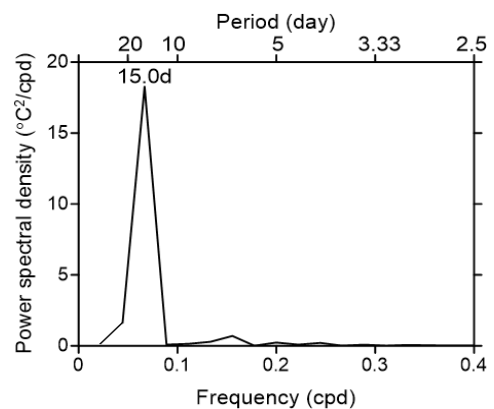


Fig. 11. Power spectrum of daily mean water temperature in the Garolim Bay without linear trend from May 31 to July 14, 2017.

4. 결론

서해의 태안반도에 있는 가로림만은 조석이 우세한 해역이므로 조석에 의한 시간과 일 단위의 수온 변동을 파악할 목적으로 2017년에 가로림만 내부에 위치한 지곡 관측소의 30분 간격 표층 수온 자료를 이용하여 시계열 분석을 하였다. 분석에 앞서 결측에 의한 자료 손실을 줄이기 위하여 불연속 결측을 복원하였다. 1차와 3차 라그랑지 보간법을 적용한 결과 두 개의 보간법 사이에 큰 차이는 없었다. 가로림만과 같이 약 12시간의 반일주조가 우세한 해역에서 30분 간격으로 측정된 수온 자료의 경우 선형의 1차 보간법과 곡률을 고려한 3차 보간법 사이에 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 불연속 결측 평균 복원의 평균절대편차는 0.11°C 였으며, 일평균의 경우 하루 최대 불연속 결측이 5개 있다면 오차는 0.01°C 로 더욱 낮아진다. 주어진 오차 범위에서 결측을 복원하여 자료를 분석할 수 있다. Fig. 12는 지곡의 하루 수온 변동폭과 결측 오차와 관계를 도시한 것이다. 두 자료 간의 상관계수는 0.93으로 일간 수온의 변동이 작은 경우 불연속 결측의 오차가 더욱 줄어드는 것을 확인할 수 있어 3월과 9월 같이 수온 변동이 작은 시기에 불연속 결측 복원은 더욱 효과적으로 생각된다.

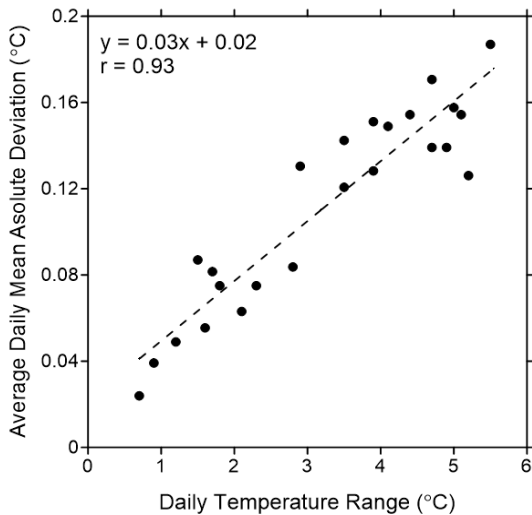


Fig. 12. Daily temperature range with daily mean absolute errors of restoration. Dashed line shows linear trend.

가로림만의 수온은 다른 연구 결과와 같이 1년 단위에서 보면 겨울철에 낮고 여름철에 높은 전형적인 온대 지역의 계절 변동을 보여주었다. 가로림만 수온 변동을 시간 단위와 일 단위로 분석한 결과, 기온과의 상관성은 낮은 반면 조위와 상관성은 크게 나타났다. 가로림만의 수온 변동에 반일주조 성분 중 12.42시간인 주태음반일주조와, 장주기조 성분인 태음반월주조에 해당하는 13.7일의 주기성을 확인하였으며, 6월과 12월에 두드러지게 나타났다. 6월과 12월에는 가로림만 내부와 외부의 수온 차이가 최대 5°C 정도 큰 시기로서, 활발한 해수 유통에 의해 조석 주기에 해당하는 수온 변동이 나타난 것으로 판단된다. 3월과 9월은 조석에 의해 가로림만 내외부의 해수 유통이 6월과 12월과 같이 유사하게 있음에도 불구하고 가로림만 내외부의 수온 차이가 거의 없어 6월과 12월만큼 수온 변동이 두드러지지 않은 것으로 생각된다.

넘치의 수온 변동 자극에 대한 생체 방어 연구 결과에 의하면, 하루 동안 7°C 수온 변동 자극에 노출된 넙치 중 18%가 1주일 이내에 폐사하였고(Lee et al., 2002), 참돔은 수온이 심하게 변하면 폐사한다는 연구가 있다(Yoo, 2000). 가로림만에서 조석에 의해 12.42시간 동안 최대 7°C 의 폭으로 수온이 상승과 하강을 지속적으로 반복하는 것은 해양생물에게는 위험한 해양 환경으로 양식생물의 폐사가 일어날 가능성이 높다. 따라서 가로림만에서 급격한 수온 변동과 높은 수온 또는 낮은 수온에 의한 수산 피해에 대응하기 위하여 시간 또는 일 단위의 수온 예보가 필요하며, 조석 주기에 따른 수온 변동의 주기성을 이해함으로써 수온 예보의 정확도를 높일 수 있을 것으로 생각된다. 또한 이 연구가 조력발전소가 건설될 경우 발생할 수 있는 수온을 포함한 환경 변화 기초 연구가 될 것이라 기대한다.

감사의 글

이 연구는 국립수산물과학원 ‘서해 연안어업 및 환경생태 조사(R2021033)’의 연구비 지원으로 수행하였습니다. 자료 처리에 도움을 준 서해수산연구소 자원환경과 신규진 연구원과 세심하게 논문을 검토해 주신 심사위원에게 감사드립니다.

REFERENCES

- Choo, H. S., Yoon, E. C., 2015, Temporal and spatial variation of sea surface temperature in Jinju bay in the south coast of Korea, *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 21, 315-326.
- Emery, W. J., Thomson, R. E, 1998, *Data analysis methods in physical oceanography*, Pergamon Press, 193-592.
- Jang, C. I., Jeong, D. W., Kim, D. S., 2018, A Study on the distribution of summer water temperature in Wando using time-series analysis and numerical experiments, *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 24, 188-195.
- Ji, Y., Oh, S., Suh, B., Lee, D. K., 2011, Restoration, prediction and noise analysis of geomagnetic time-series data, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 32, 613-628.
- Kang, D. Y., Han, H. K., Jun, C. Y., 2004, Influence of water temperature on growth of yearling sea bass, *Lateolabrax japonicus* in indoor tank, *J. of Aquaculture*, 17, 240-245.
- Kim, H. K., Kang, I. K., Lee, J. W., Lee Y. S., 2016, A Comparison of imputation methods for the consecutive missing temperature data, *The Journal of Applied Statistics*, 29, 549-557.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA), 2020a, http://www.khoa.go.kr/oceangrid/koofs/kor/observation/obs_real.do.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA), 2020b, <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/koofs.do>.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2020, <https://data.kma.go.kr/data/sea/selectBuoyRltnList.do?pgmNo=52>.
- Lee, D. C., Kim, D. H., Kim, S. M., Kang, M. S., Hong, M. J., Kim, H. J., Park, S. I., 2002, Effects of stress induced by changes of water temperature on the non-specific defense mechanism in cultured olive flounder, *Paralichthys olivaceus*, *J. Fish Pathol.*, 15, 65-75.
- Lee, K. N., Jung, J. H., 2015, Benefit analysis and profit of fishery sector about tidal power plant in Garolim bay, *Journal of fishery & marine educational research*, 27, 218-229.
- Lee, W. L., 2013, *Time series analysis and forecasting*, Tangjing Publishing Co., Korea, 3-17.
- Min, K. S., Lee, S. J., Kim, B. H., Park, K. Y., 2004, Tolerance against water temperature and growth of *Ruditapes philippinarum* spats in different substrates, *Korean Journal of Malacology*, 20, 121-124.
- Nam, H. J., Heo, S., Park, S. Y., Hwang, U. K., 2012, The physio-chemical characteristics in the Garorim bay, Korea, *Korean soc. Mar. Environ. Saf.*, 18, 101-114.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS), 2020, <http://www.nifs.go.kr/risa/risaInfo.risa>.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS), 2021, <http://www.nifs.go.kr/bbs?id=seastate>.
- Park, S. Y., Kim, H. C., Kim, P. J., Park, G. S., Ko, J. Y., Jeon, S. B., Lee, S. M., Park, J. S., 2009, Long-term variation and characteristics of water quality in the Garolim coastal areas of Yellow Sea, Korea, *Korean soc. Mar. Environ. Saf.*, 15, 315-328.
- Shin, Y. K., Kim Y. D., Kim, W. J., 2018, Survival and physiological responses of red sea bream *Pagrus major* with decreasing sea water temperature, *Korean Journal of Ichthyology*, 30, 131-136.
- Song, K. M., 2013, Soil temperature variations in intertidal sediments in Geunso bay and Seonyu Island, west coast of Korea, *Ocean & Polar Research*, 35, 281-290.
- Woo, H. J., Ryu, J. H., Cho, J. H., 2009, Hydro-hypsographic analysis for understanding of flushing characteristics in Garolim bay, *Journal of Wetlands Research*, 11, 39-46.
- Yanagi, T., 1987, Seasonal variation of water temperature and salinity in Osaka bay, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 43, 244-250.
- Yoo, S. K., 2000, *Mariculture*, Guduk Publishing Co., Korea, 570-590.
-
- Researcher. Joon-Yong Yang
West Sea Fisheries Research Institute,
National Institute of Fisheries Science
joonyong.yang@gmail.com
 - Researcher. Sung-Hee Cho
West Sea Fisheries Research Institute,
National Institute of Fisheries Science
chthdd11213@naver.com
 - Researcher. Joon-Soo Lee
Oceanic Climate & Ecology Research Division,
National Institute of Fisheries Science
leejoonsoo@korea.kr
 - Researcher. Chang-Hoon Han
West Sea Fisheries Research Institute,
National Institute of Fisheries Science
hanch@korea.kr
 - Director. Seung Heo
West Sea Fisheries Research Institute,
National Institute of Fisheries Science
seungheo@korea.kr