

ORIGINAL ARTICLE

조위 및 수온, 염분 데이터를 이용한 동해 연안의 해수면 변화

박세영 · 이충일¹⁾*

강릉원주대학교 대학원 해양생물공학과, 강릉원주대학교 해양자원육성학과

Long-term Change in Sea Level along the Eastern Coastal Waters of Korea using Tide Gauge, Water Temperature and Salinity

Se-Young Park, Chung-Il Lee¹⁾*

Department of Marine Biotechnology, Graduate School, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 201-702, Korea

¹⁾Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 201-702, Korea

Abstract

Long-term change in sea level along the eastern coast of Korea was illustrated using four tide-gauge station (Pohang, Mukho, Sokcho, Ulleung) data, water temperature and salinity. Seasonal variation in the sea level change was dominant. The sea level change by steric height derived from water temperature and salinity was relatively lower than that measured from the tide-gauge stations. Sea level rising rate per year by steric height increased with latitude. The effect of salinity(water temperature) on the sea level change is greater in winter(in summer).

Key words : Salinity, Sea level change, Steric height, Tide-gauge station, Water temperature

1. 서론

해수면 변화는 해수의 열염변화에 따른 밀도 변화 뿐만 아니라 지각의 융기, 침하, 해면 기압, 파랑, 조석 등과 같은 다양한 요인에 의해 나타난다. 기후변화에 관한 정부간 위원회(IPCC)는 현재 추세대로 지구온난화가 진행될 경우 2100년 지구 평균 기온은 0.8-3.6℃ 상승하고, 열적팽창과 빙해의 용해 등으로 해수면의 높이도 15-95 cm 상승할 것으로 예측하였다(IPCC, 2007). 특히, 동해는 전 지구 평균보다 해수면 상승률이 높은 것으로 나타나고 있어 이와 관련하여 동해의 해수면 변화 정도 및 원인을 분석 하려는 시도가 있었

다(Oh 등, 2011; Kang 등, 2005; Ha 등, 2006). 그러나 외해의 해수면은 정확하게 측정하기가 어렵기 때문에 과거에는 주로 조위관측소의 자료를 위주로 측정하였다. 이후 Topex/Poseidon 등의 인공위성 고도계 자료를 이용한 자료가 20년 정도 쌓이면서 이를 이용하기도 하지만 인공위성 고도계 자료는 연안에서 정확도가 떨어지기 때문에(Yoon 등, 2002) 동해처럼 육지와 섬으로 둘러싸여 있는 반폐쇄성 해역에서의 연구에는 적당하지 않다. 한편, 외해의 해수면을 간접적으로 측정하는 다른 방법으로 수온, 염분 자료를 이용하여 역학고도를 산출하는 방법이 있다. Ishii 등(2006)은 NODC 데이터 등을 사용하여 1955년부터 2003년까지

Received 16 December, 2013; Revised 11 February, 2014

Accepted 19 February, 2014

*Corresponding author : Chung-Il Lee, Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 201-702, Korea

Phone: +82-33-640-2855

E-mail: leeci@gwnu.ac.kr

© 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.

지 전지구의 해수면 상승률을 구하였다. Kang 등 (2006)은 수온, 염분 자료 뿐 아니라 Topex/Poseidon 위성 등 다양한 방법으로 동해의 해수면 상승률을 구하여 동해의 해수면 상승은 주로 열팽창에 의한 것이라고 하였다.

그러나 해수면의 변화를 관측하는 가장 확실한 방법은 직접 관측을 하는 것이다. 조위관측소 자료는 연안에 치우쳐 있는 약점이 있으나 전통적인 관측 방법인 만큼 오랜 기간의 자료를 가지고 있어 장기적 변화를 알아보는데 유리하다. 본 연구에서는 조위관측소에서 측정된 해수면 변위를 인접한 해역의 수온, 염분 값으로부터 계산된 steric height와의 비교를 통해 신뢰성을 알아보고 해수면 변화에 미치는 수온과 염분의 기여도를 알아보고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용된 조위관측소 자료는 국립해양조사원에서 제공하는 1시간 간격의 자료이다. 현재 동해에는 부산을 포함하여 10개의 조위관측소가 있으나 비교적 최근에 관측이 시작되어 10년 미만의 자료가 있는 조위관측소(후포, 왕돌초, 속초등포, 쌍정초)는 제외하였다. 동해에서 조석의 영향은 상대적으로 작은 편이기 때문에 조석 성분을 따로 분리하지 않고 월평균을 구하는 방법으로 조석을 제거하였다. 그러나 이 경우에는 장기간의 결측 발생시 평균값의 오차가 발생할 가능성이 있어 한 달에 5일 이상의 결측이 있을 경우에는 한 달 전체를 결측으로 처리하였다. 또한 월평균시 기압의 효과는 미미하였기에 기압의 효과도 무시하였다.

조위관측소 자료와 열염에 의한 해수면 변화를 비교하기 위해 각 조위 관측소에 인접한 해역의 수온과 염분 자료를 이용하였다(Fig. 1). 수온, 염분 자료는 국립수산물과학원 한국해양자료센터(KODC)에서 제공하는 정선관측 자료를 사용하였다. 연구해역은 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 단위로 구분된 후 조위관측소와 가장 가까운 구역이 속한 정점의 자료를 평균하여 사용하였다.

Steric height(Δh)는 해수의 밀도를 이용하여 해수면 높이를 구하는 방법으로, KODC의 수온, 염분 자료로부터 해수밀도(ρ)를 계산한 후 다음과 같은 식으

로 계산되었다.

$$\Delta h = \int_{300}^0 \frac{(\alpha - \alpha_0)}{g} dp \quad (1)$$

여기서, $\alpha = 1/\sigma$, $\sigma = (\rho(s,t,p)-1) \times 1000$, $\alpha_0 = \alpha$ at 0°C , 35 psu를 나타낸다.

해수의 밀도에 영향을 주는 성분은 수온에 의한 영향, 염분에 의한 영향, 수온과 염분의 상호작용에 의한 영향으로 나눌 수 있다. 따라서 각각의 성분이 steric height에 미치는 기여도를 구할 수 있으며 다음과 같이 이를 이용하여 상대적 비율도 구할 수 있다.

$$r(T) = \frac{\Delta h(T, 35)}{\Delta h} \times 100, r(S) = \frac{\Delta h(0, S)}{\Delta h} \times 100 \quad (2)$$

여기서, $r(T)$ = 수온(T)이 steric height에서 차지하는 비율, $r(S)$ = 염분(S)이 steric height에서 차지하는 비율, $\Delta h(T, 35)$ = steric height at $T^\circ\text{C}$, 35 psu, $\Delta h(0, S)$ = steric height at 0°C , S psu를 나타낸다.

한편, Steric height 계산시 기준면 설정은 깊을수록 좋다. 혼합층과 수온약층에서는 수온의 변화가 심하기 때문에 기준면으로 사용하기 적당하지 않기 때문이다. 따라서 수심이 깊을수록 수온과 염분의 변화가 적어지므로 해수면의 오차를 줄일 수 있도록 기준면을 깊게 설정한다. Ishii et al.(2006)는 기준면을 700m로 하였으며 보통은 500m가 사용된다. 그러나 Kang 등(2006)은 기준면을 300m로 정하였는데 수심이 얇은 연안 가까운 곳의 데이터를 얻기 위해서였다. 본 연구 역시 연안에 위치한 조위관측소 데이터와의 비교를 목적으로 하기 때문에 기준면을 300m로 정하였으며 KODC 자료는 해역을 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 단위로 구분한 후 수심이 300m 이상인 정점의 자료만을 평균한 자료 중 조위관측소와 가장 가까운 구역의 자료를 사용하였다. 이에 따라 부산, 울산 조위관측소의 자료는 제외하였다. 결국 사용된 자료는 4곳(속초, 묵호, 울릉도, 포항)였으며 기간은 1970년부터 2010년까지 41년간의 자료를 사용할 수 있었다(Fig. 1). 그리고 4군데 자료 중에서도 관측 수심이 300m 이하인 기간의 자료는

제외하였다.

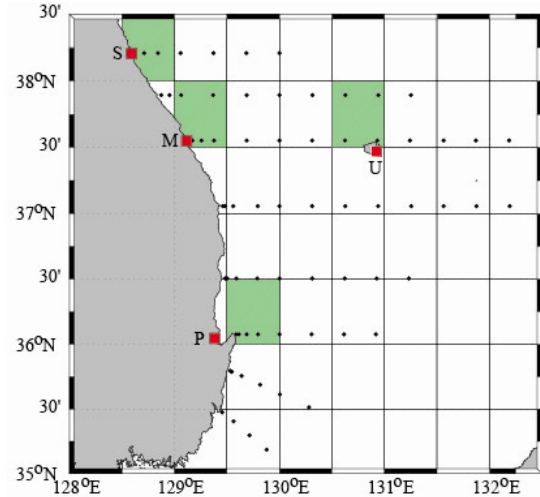


Fig. 1. Tide gauge (rectangular with alphabet) and serial oceanographic observation (dot) stations. Dot within shaded rectangular indicates station for steric height calculation, and ‘M’, ‘P’, ‘S’, ‘U’ stand for Pohang, Mukho, Sokcho, Ulleung tide gauge station, respectively.

3. 결과

1970년부터 2010년까지 조위관측소에서 측정된 해수면 변화와 수온-염분 자료를 이용하여 구한 steric height의 시계열 변화(Fig. 2)를 구하였다. 두 값의 비교를 쉽게 하기 위하여 두 값 모두 평균이 제거된 편차값으로 비교하였다. 해수면 변화는 계절적 변화가 상당히 크게 나타났다. 상관계수는 묵호가 0.28로 상대적으로 낮은 상관성을 보였으나 묵호를 제외한 다른 지역은 0.49-0.66의 값을 보여 조위관측소와의 거리를 생각하면 비교적 높은 값을 보였다. 이 기간 동안의 해수면 상승률을 회귀분석을 통해 구하였는데 (Table 1) 조위관측소에서 측정된 값보다 열염변화에 의한 값이 낮게 나타났다. 특히 포항 조위관측소에서는 41년간 2.00mm/yr의 해수면 상승률을 보였으나 수온-염분 자료를 이용하였을 때는 오히려 -1.35 mm/yr로 해수면이 하강하였다.

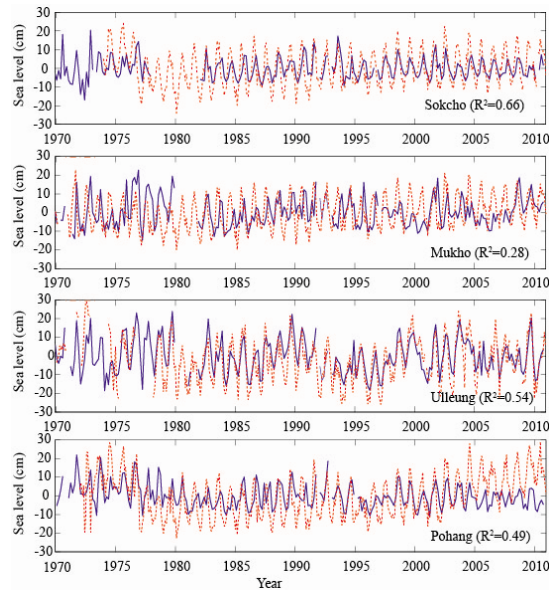


Fig. 2. Time-series change in sea level using tide gauge (dotted line), and water temperature and salinity (solid line).

Table 1. Comparison of sea level change at four stations

stations	sea level change (mm/yr)	
	Tide gauge	Steric height
Sokcho	1.01	0.08
Mukho	2.00	0.23
Ulleung	-0.39	-0.52
Pohang	2.00	-1.35

해수면 변화에 수온과 염분이 차지하는 상대적 기여도(Fig. 3) 역시 계절에 따른 변화가 있어 겨울에는 염분의 기여도가 높은 반면, 여름에는 수온의 기여도가 높았다. 또한 이 기여도값은 위도에 따라 차이가 나타나 포항에서는 염분의 기여도가 40-70% 사이였지만 속초에서는 60-90%를 차지하였다. 그리고 외해에 위치한 울릉도에서의 염분의 기여도 역시 낮았다. 41년간의 평균 기여도에서도 포항에서는 염분이 56%, 수온이 44%였지만 묵호에서는 염분이 58%, 수온이 42%, 속초에서는 염분이 72%, 수온이 28%로 증가하였다. 그리고 외해에 위치한 울릉도에서는 염분이 47%, 수온이 53%로 연안에 비해 염분의 기여도가 낮게 나왔다.

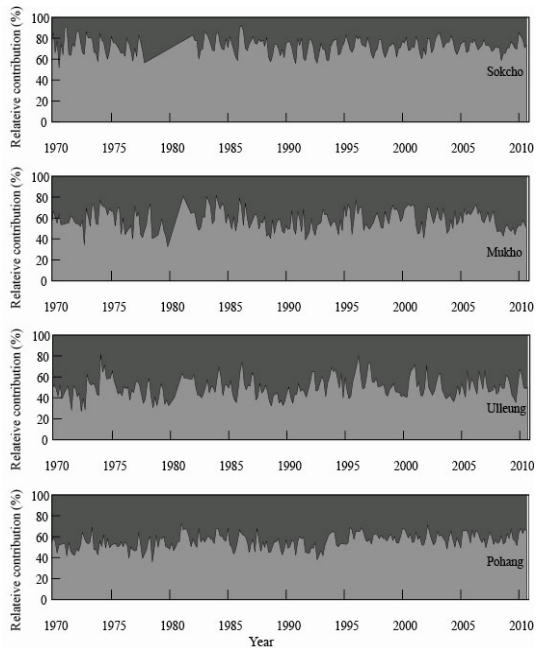


Fig. 3. Relative contribution of water temperature (dark gray) and salinity (light gray) to steric height.

4. 고찰

동해에서 수온과 염분 자료를 이용하여 구한 steric height와 주변의 가까운 조위관측소에서 관측된 해수면을 비교한 결과 상관계수는 0.5 전후로 높지 않았다. 이는 전체적으로 0.7 정도의 상관성을 보이거나 동아시아 지역에서 상관도가 0.5 이하로 떨어지는 Ishii 등(2006)의 결과와 비슷한 수준이지만 Ishii 등(2006)의 결과에서는 동아시아 지역의 상관도가 상대적으로 낮았다. 또한 steric height를 회귀분석한 결과에서도 조위관측소의 자료와 다르게 해수면의 상승이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 동해안에서 2-3mm/yr의 상승률을 보인 국립해양조사원의 결과(2009)와 비교해도 차이는 크다. 본 연구에서는 지반 침하 등으로 인한 조위관측소의 위치 변화를 고려하지 않았기 때문으로 보인다. 특히 포항 조위관측소의 조위값은 1995년 이후 지속적으로 상승하고 있는데 이와 관련이 있을 것으로 생각된다. 1970년부터 1994년까지의 자료만으로 회귀분석을 하였을 경우 해수면은 오히려 크게 하강하는 모습을 보였다.

Steric height에서 수온과 염분이 차지하는 높이를

구해보면 수온의 영향($\Delta h(T, 35)$)이 10-50 cm, 염분의 영향($\Delta h(0, S)$)이 30 cm 정도인 반면 수온과 염분의 상호작용에 의한 영향($\Delta h(T, S) - \Delta h(T, 35) - \Delta h(0, S)$)은 최대 3mm로 아주 작았다. 따라서 수온과 염분의 상호작용에 의한 영향을 무시할 수 있었다. Steric height에서 수온과 염분이 차지하는 상대적 기여도는 염분이 차지하는 비율이 대부분 50%를 넘어 큰 비율을 차지하였으며 위도가 높을수록 더 증가하는 경향을 보였다. 이 역시 적도 지방에서 0.1 이하의 아주 낮은 영향을 보이지만 위도가 올라가면서 높아지는 Ishii 등(2006)의 결과와 잘 맞았다.

그러나 이 비교 방법은 과거의 연구 결과와 비교하기에는 적당한 방법인지 모르나 실제 steric height에 영향을 미치는 수온과 염분의 영향을 구하는 데에는 무리가 있을 수 있다. 상대적 기여도는 수온과 염분에 의한 기여도 사이의 상대적 비교만 가능하기 때문이다. Steric height가 변할 경우 기여도를 정량적으로 보기 위해서는 절대적 기여도라 할 수 있는 $\Delta h(T, 35)$ 와 $\Delta h(0, S)$ 를 비교하는 것이 더 효과적이다. 절대적 기여도의 시계열 변화를 보면(Fig. 4) 염분에 의한 영향

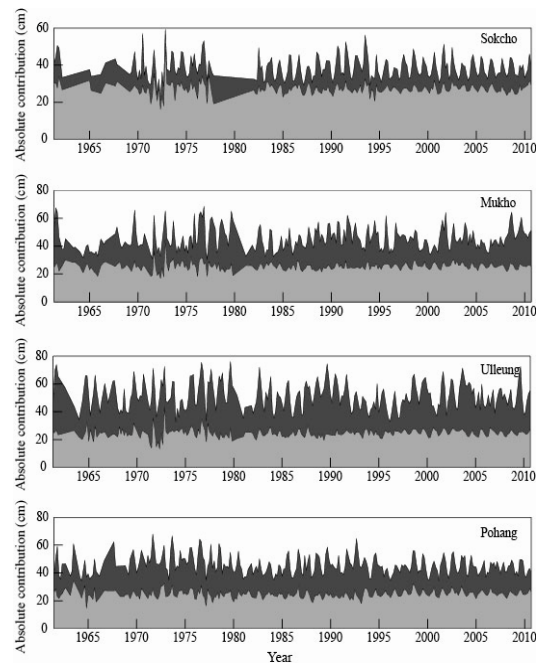


Fig. 4. Absolute contribution of water temperature (dark gray) and salinity (light gray) to sea level change.

은 시계열 편차가 작아 4개 구역 모두 약 30 cm 정도로 일정한 반면 수온에 의한 영향은 시간, 특히 계절에 의한 편차가 크게 나타났다. 공간적으로도 염분에 의한 변화는 4개 구역 모두 약 30 cm 정도로 일정한 반면 수온에 의한 변화는 4개 구역에서 10-50 cm의 차이를 보였다.

즉 steric height의 시계열은 염분보다 수온에 의한 steric height의 변화에 더 민감하게 반응하였으며 이는 수온의 계절적인 변화가 해수면 변화에 더 큰 영향을 차지한다고 말할 수 있다. 결국 동해안에서의 해수면 변화는 수온에 의한 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

이를 구체화하기 위하여 네 지역의 TS diagram을 그려보았다(Fig. 5). 동해 심층에는 수온, 염분이 거의 균일한 동해고유수가 있어 비교가 어려우므로 표층의 자료만 비교하였다. 앞서 언급한 바와 같이 해수면의 변화는 계절적 변화가 컸기 때문에 여름(8월)과 겨울(2월)로 구분하여 표시하였다.

여름(8월)은 겨울(2월)에 비해 수온은 높고 염분은 낮은 경향을 보였다. 그리고 염분의 변화(32-34 psu)가 큰 반면 수온의 변화(20-26°C)가 작았다. 이는 연도별 염분의 변화가 큼을 의미한다. 반면 공간적으로는 네 지역의 수온과 염분이 비슷한 특징이 있었다. 하계 동해 연안의 저염분수는 동중국해에서 유입된 저염수의 유입(Senjyu 등, 2006, 2009)과 여름의 높은 강우의 영향으로 보인다.

반면 겨울(2월)은 여름(8월)에 비해 수온은 낮으나 염분은 높은 경향을 보였다. 수온과 염분 모두 북쪽으로 갈수록 값이 작아지는 경향을 보였으나 염분의 변화(34-34.6 psu)가 여름에 비해 작은 반면 수온의 변화(5-13°C)는 아주 컸다. 따라서 동해안에서 수온에 의한 해수면 변화가 큰 것은 계절에 따른 동해안 수온의 변화가 크기 때문으로 나타났다. 이는 동해의 해수면 변화가 동해에 공급되는 난류의 세기와 연관성이 있다고 볼 수 있으며 Ha 등(2006)도 인공위성 자료와 수온 분석을 통해 같은 결론을 도출한 바 있다.

5. 결론

동해에서 수온과 염분 자료를 이용하여 구한 steric height와 주변의 가까운 조위관측소에서 관측된 해수면을 비교한 결과 중위도 지역에서는 염분이 차지하는 해수면 편차의 비율이 50%보다 높아 수온보다 염분에 의한 해수면의 기여도가 더 컸으며, 이는 위도가 높을수록 더 증가하는 경향을 보였다. 그러나 해수면의 변화에는 수온의 변화가 더 민감하게 반응하였으며 이는 수온의 계절적인 변화가 해수면 변화에 더 큰 영향을 차지한다고 볼 수 있다. 또한 수온의 변화는 대한해협을 통해 들어오는 대마난류의 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 그러나 조위관측소값과 steric height 사이의 만족스럽지 못한 상관도로 인해 해수면 상승률은 많은 차이를 보였다. 이는 steric height를 구할

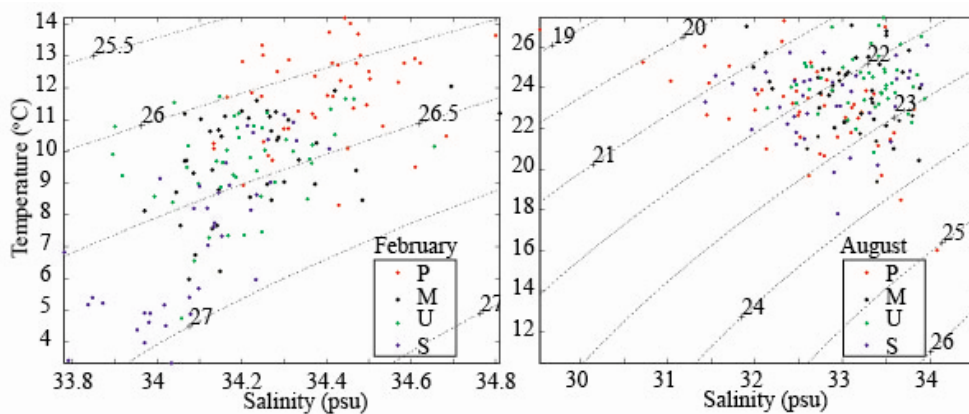


Fig. 5. TS diagram in February(left) and August(right).

때 연안 가까운 곳의 데이터를 얻기 위해 기준면을 300m로 설정한 것이 영향을 미쳤을 것이다. 지반의 침하 역시 고려되지 않았다. 보다 정확한 결과를 위해서는 이들에 대한 고려가 필요할 것이다. 또한 Ishii 등 (2006)은 steric height와 조위관측소의 해수면의 차이에는 비steric 효과가 있음을 지적하였다. 한편, Wu 등 (2012)은 지구온난화로 인해 서안경계류가 강화되었음을 보고하였는데 steric height로 설명할 수 없는 해수면의 변화는 결국 외부적인 요인(유입 혹은 유출)이라 생각할 때 대한해협을 통한 대마난류의 수송량과 동해의 해수면 변화와의 관계에 대한 연구도 필요하리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 강원씨그랜트사업에 의해 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

- Choi, Y. K., Kwon, K. Y., Yang, J. Y., 2012, Descriptive Analysis of Low Saline Water in Youngdeuk, the East Coast of Korea in 2010, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 18(5), 379-387.
- Ha, K. J., Jeong, K. Y., Jang, S. R., Kim, K. Y., 2006, Variation of the Sea Surface Height around the Korean Peninsula with the Use of Multi-satellite Data(Topex/Poseidon, Jason-1, ERS, Envisat) and its Association with Sea Surface Temperature, *J. Korean Remote Sens.*, 22(6), 519.
- IPCC, 2007, Climate change, the Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ishii, M., Kimoto, M. Sakamoto, K., Iwasaki, S. I., 2006, Steric Sea Level Changes Estimated from Historical Ocean Subsurface Temperature and Salinity Analyses, *J. Oceanogr.*, 62, 155-170.
- Kang, S. K., Cherniawsky, Foreman, M. G. G., Min, H. S., Kim, C. H., Kang, H. W., 2006, Patterns of Recent Sea Level Rise in the East/Japan Sea from Satellite Altimetry and in situ Data, *J. Geophys. Res.*, 110(C7), C07002.
- KHOA, 2009, Study on the Sea Level Change and Predictions around the Korean Water.
- KHOA, 2010, Study on the Sea Level Change and Predictions around the Korean Water.
- Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., 2005, Warming of the World Ocean, 1955-2003, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02604.
- Wu, L., Cai, W., Zhang, L., Nakamura, H., Timmermann, A., Joyce, T., McPhaden, M. J., Alexander, M., Qiu, B., Visbeck, M., Chang, P., Giese, B., 2012, Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*, 2, 161-166.
- Oh, S. M., Kwon, S. J., Moon, I. J., Lee, E. I., 2011, Sea Level Rise due to Global Warming in the Northwestern Pacific and Seas around the Korean Peninsula, *Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 23(3), 236-247.
- Pang, I. C., Oh, I. S., 1994, Long-Period Sea Level Variations around Korea, Japan, and Russia, *Korean Fish. Soc.* 27(6), 733-753.
- Senjyu T., H. Enomoto, T. Matsuno and S. Matsui, 2006, Interannual Salinity Variations in the Sushima Strait and Its Relation to the Changjiang Discharge, *J. Oceanogr.*, 62, 681-692.
- Senjyu, T., I. S. Han and S. Matsui, 2009, Connectivity between the Interannual Salinity Variation in the Western Channel of the Tsushima Strait and Hydrographic Conditions in the Cheju Strait, *J. Oceanogr.*, 65, 511-524.
- Yoon, Y. H., Kim, N. Y., Kim, K. H., Hwang, J. S., Kim, J. W., 2002, Comparison of Sea Level Data from Topex/Poseidon and in-situ Tide Gauges in the East Sea, *J. Korean Ear. Sci. Soc.*, 23(4), 349.
- Yoon, Y. H., Oh, I. S., Kim, K. H., Pakr, Y. H., 2000, Comparison of Sea Level Data from TOPEX/POSEIDON Altimeter and in-situ Tide Gauges in the East Asian Marginal Seas, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 5(4), 267.