

[Article]

제주도 신양 방두만에서 CTD 자료를 이용한 지하수와 육상양식장 배출수 유입 관측

민승환, 이태희, 권순열, 박광섭, 손영백*

한국해양과학기술원 제주특성연구센터

Monitoring of Discharged Water from Groundwater and Land-based Aquaculture Effluent using CTD Data in Shinyang Bangdu Bay, Jeju Island, Korea

Seung-Hwan Min, Taehee Lee, Soonyeol Kwon, Gwang Seob Park, Young Baek Son*

Jeju Marine Research Section, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Jeju 63349, Republic of Korea

(Received: 20 May 2020, revised: 10 June 2020, accepted: 15 June 2020)

*Corresponding author: sonyb@kiost.ac.kr

요약문: 제주도의 신양 방두만은 반폐쇄적인 만으로, 주위 육상으로부터 지하수와 육상양식장 배출수가 유입된다. 이러한 유출수의 분포를 알아보기 위해 2019년 4월부터 9월까지 Conductivity-Temperature-Depth(CTD)를 이용하여 9개의 정점에서 총 370개의 수온과 염분 자료를 수집했다. 조위 변화에 따른 유입수의 시·공간 변화를 이해하기 위해, CTD 관측은 1시간 간격으로 1-5회 연속적으로 관측을 수행했다. CTD 관측 자료는 일정한 속도로 관측된 downcast 자료를 이용했다. CTD 관측에서 수집된 수심별 수온과 염분 자료는 filter mean을 이용하여 0.1 m 간격으로 평균했다. 방두만으로 유입되는 지하수와 육상양식장 배출수는 주위 해수보다 상대적으로 낮은 염분을 나타냈고, 이런 특징은 만의 서쪽에서 강하게 나타났다. 이런 특징을 가지는 유입수는 조위 변화에 따라 공간적으로 다른 영향을 미치고 있었다. 밀물 시 육상양식장 배출수에 의한 영향이 강하게 나타났고, 만의 서쪽 해안을 따라 북상하면서 영향을 미쳤다. 썰물 시 지하수에 의한 영향이 강하게 나타났고 만의 서쪽 해안을 따라 남하하면서 영향을 미쳤다. 유입수에 의한 수온·염분의 수직 변화는 1 m 이내에서 급격히 변화되며, 1 m 이상 수심에서 유입수의 영향은 관측되지 않았다.

주요어: 지하수, 육상양식장 배출수, CTD, 방두만, 제주도

Abstract: The Sinyang Bangdu Bay in Jeju Island, a semi-enclosed sea, is introduced by the discharged water of the groundwater and land-based aquaculture effluent (LAE) from the surrounding land. To investigate the distribution of the discharged water into the Sinyang Bangdu Bay, 370 Conductivity-Temperature-Depth (CTD) casting data (temperature and salinity) were collected on the nine sampling points from April to September 2019. To understand the spatial and temporal variation of the influent water with changing tide, CTD observation was continuously performed 1-5 times at a 1-hour interval in the daytime. CTD hydrographic data were used the downcast data

controlled by constant speed. CTD casting data, water temperature and salinity, were averaged at 0.1 m intervals using the filter mean. The groundwater and LAE in the study area show relatively lower salinity than surrounding waters, and this feature was shown on the west coast in the study area. The both influent waters into the study area had a different spatial influence with changing tidal current. During the flood tide, the west coast of the study area was influenced by the LAE because the discharged water moved to northward along the west coastline of the bay. During the ebb tide, the west coast of the study area was influenced by the groundwater because the discharged water moved southward along the west coastline of the bay. The vertical variation of the discharged water sharply changed within 1 m, and the feature was not observed at more than 1 m water depth.

Keywords: groundwater, land-based aquaculture effluent, CTD, Bangdu Bay, Jeju Island

1. 지역 개관

제주도는 순상화산(shield volcano)으로 현무암질 용암류(basaltic lava flows)의 비율이 가장 높고, 그 외 화산 쇄설암(pyroclastic rock)과 퇴적암(sedimentary rock) 등으로 이루어져 있다(Hwang *et al.*, 2005). 다공질 화산암 사이로 유입된 담수는 암반층을 투과하여 주로 연안에서 용출되며, 낮은 염분, 일정한 수온, 그리고 높은 미네랄을 함유하는 것이 특징이다.

현재 제주도 동쪽 해안에 위치한 신양 방두만(Fig. 1)은 국내에서 처음으로 상업적 광어 양식이 이루어진 곳이다. 제주도에 육상 양식업이 발달한 것은 평균 16-18°C의 지하수를 이용하여 수온 조절이 용이하고, 외양에 위치하여 청정한 수질을 유지할 수 있으며, 적조와 같은 자연적 오염 발생이 적고, 동계에도 평균 14°C의 난류가 흐르고 있어 자연 해수를 이용한 사육이 가능하기 때문이다(Kang, 2001). 광어 양식에 사용되는 양식수는 주로 해수와 지하수(groundwater)를 혼합하여 사용하고 있으며, 여과막과 침전지를 통과시킨 후 연안으로 배출된다.

신양리 방두만은 입구가 약 300 m의 반 폐쇄적인 만으로 90년대 후반 서쪽 입구에 방파제가 건설되었다(Jeju Sea Grant, 2018, Fig. 1). 북쪽 해안과 동쪽 해안에는 넓은 모래사장이 있으며, 만 내부의 수심은 약최저저조면(approximate lowest low water) 기준으로 대부분 4 m 이하이다. 북서쪽 신양 포구에서 지하수가 용출되며(Hwang *et al.*, 2005), 서쪽 연안을 따라 육상양식장(land-based aquaculture effluent, LAE)들이 있다. 양식장 배출수는 지름 1 m 가량의 콘크리트 관을 통해 방파제 사이 위집 시설로 배출되고, 관 이음새 및 양식장 앞 암반 사이에서도 지속적으로 흘러 나온다. 지하수와 육상양식장 배출수는 해조류 대발생의 원인이 되기도 한다(Kwon *et al.*, 2017).

수온과 염분은 해양 물리 환경뿐만 아니라 생지화학 연구에도 일반적으로 활용되는 인자로 외력이 작용하지 않으면 보존되는 특성이 있어 수괴의 추적자로 활용된다(Kim *et al.*, 2008). 본 연구는 수온과 염분의 관측을 통하여 제주도 신양 방두만에서 지하수와 육상양식장 배출수에 의한 수온-염분 변화를 추적하였다.

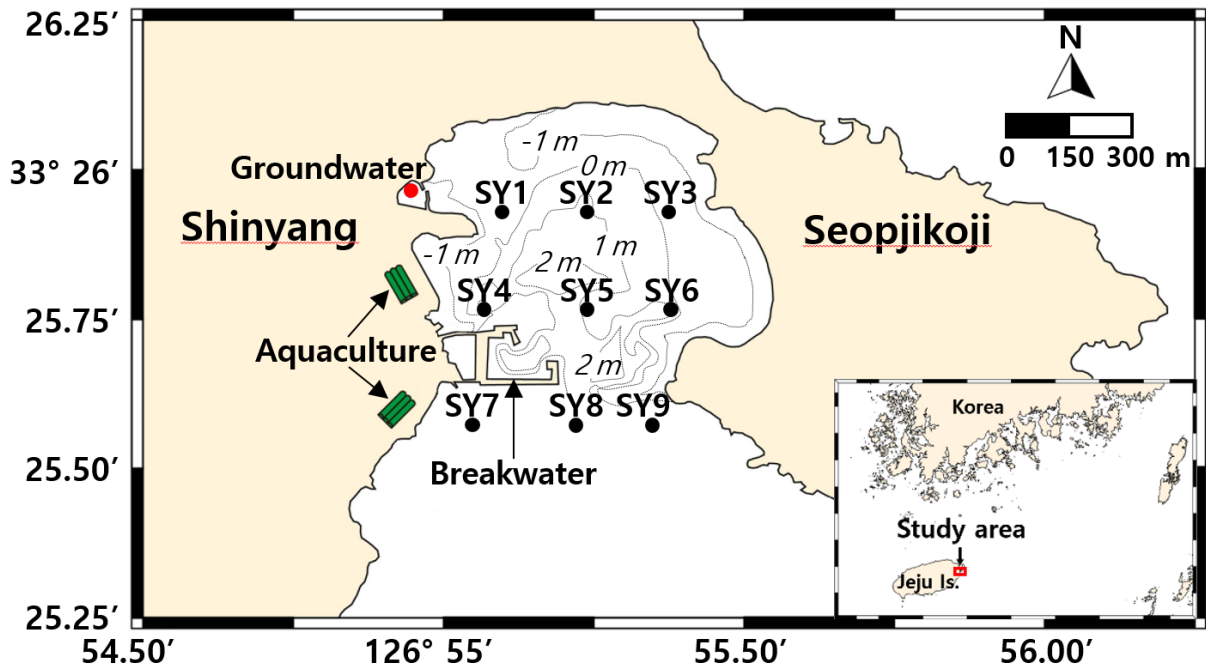


Fig. 1. The maps are showing the location of the study area and the sampling points in Shinyang Bangdu Bay, Jeju Island (Red circle: Groundwater discharge area, Green mark: The land-based aquaculture)

2. 자료 및 방법

제주 신양 방두만에서 지하수와 육상양식장 배출수의 분포 특성 조사를 위해 만 내(SY1-SY6) · 외(SY7-SY9)에 9개의 정점을 정하고 매일 연속 관측을 수행했다(Fig. 1). 2019년 4월부터 7월까지의 조위 변화를 고려하여 이들 연속 관측을 수행했고, 8월과 9월은 기상 악화로 하루만 현장조사를 수행했다. 현장조사는 얇은 수심으로 인하여 고무보트를 이용했다. 관측 정점 SY1와 SY3은 약최저조면 시 대부분 물 밖으로 노출되는 곳으로, 고무보트의 운용 가능한 최소 수심 확보를 위해 주간 만조 전후 2시간 이내에 모든 조사를 마쳤다. 조사 횟수는 한 시간 간격으로 총 5회씩 관측을 수행하여 조위 변화에 따른 해수 특성 변화를 관측했다. 6월 23일, 8월과 9월은 저수심과 태풍 등 기상 문제로 각각 4회, 1회, 3회씩 조사했다. 2019년 7월 23일의 12시, 13시, 14시와 9월 17일의 12시, 14시는 기상 악화로 방파제 바깥 정점(SY7, SY8, SY9)을 조사하지 못했다. 2019년 4월 22일의 9시와 10시에 SY3은 장비 문제로 인하여 자료를 획득하지 못했다. 본 연구에서 획득된 관측자료는 저수심, 기상악화 및 장비 문제로 인한 미획득 자료를 제외하고 최종적으로 연구해역에서 총 370개의 자료를 수집했다(4월: 88개, 5월: 90개, 6월: 81개, 7월: 81개, 8월: 9개, 9월: 21개).

수심별 수온과 염분 관측은 Seabird사의 SBE 25 plus 모델의 Conductivity-Temperature-Depth(CTD)를 사용했다(www.seabird.com). CTD 장비는 현장조사 시작 전 한국해양과학기술원 해양기기개발·운영센터에서 2019년 4월에 정밀 검교정을 받았다. CTD 관측은 고무보트의 선수에서 안정화를 위해 2분-3분간 표층 대기 후 표층에서부터 일정한 속도로 하강하면서 수심별 관측을 수행했다. CTD를 사용하는 동안 고무보트의 모터를 최소한으로 구동하여 정점의 위치를 유지했다. 본 관측에 사용된 CTD는 0.0625초마다 1개(16개/초)의 자료를 수집하기 때문에

얕은 수심에서 많은 자료를 획득할 수 있는 장점을 가지고 있다. CTD 자료는 일정한 속도로 관측된 downcast 자료를 사용했다.

CTD 원시 자료는 현장관측 이후 실험실에서 장비에 직접 연결하여 자료를 회수하고, SBE data processing 프로그램을 이용하여 변환했다. 전체 자료 중에서 표층 대기 자료와 upcast 자료를 제외하고 downcast 자료만 추출했다. 획득된 자료는 수심별 자료로 생성하기 위해 0.1 m 간격의 자료를 Filter Mean 방법을 사용하여 에러를 제거하고(Son *et al.*, 2009) 평균하였다(Eq. 1).

$$X = \frac{\sum_i (X - 1.5 \times \sigma) < X < (X + 1.5 \times \sigma)}{N} \quad \text{Eq. 1}$$

\bar{X} 는 원시 자료의 평균값, σ 는 원시 자료의 표준편차, N 은 $\bar{X} \pm 1.5 \times \sigma$ 에 포함되는 자료의 수

3. 관측결과

제주도 신양 방두만에서 표층수온은 만 안쪽에서 높게 나타나고, 만 외측에서 상대적으로 낮게 관측되었다. 각 정점에서 표층수온은 조위 변화에 따라 2°C 이하의 변화를 보였고, 고조보다 저조일 때 상대적으로 높게 나타났다. 지하수가 용출되는 북서쪽 신양 포구와 가장 가까운 정점 SY1의 표층 수온은 16.4-24.9°C로 다른 정점들(15.9-25.4°C)에 비해 4월부터 7월에는 높고, 8, 9월에는 낮게 나타났다(Fig. 2(a), (c)). 방두만의 지하수 수온은 16-22°C로 연중 유지되는 것으로 보고된 것에 비해(Song *et al.*, 2016) 0.4-2.9°C 높은 것은 지하수를 직접 측정한 것이 아니라 지하수가 용출되는 곳으로부터 고무보트로 접근 가능한 가장 가까운 정점에서 측정한 것이기 때문이다. 정점 SY1은 9개의 정점 중 지하수의 영향이 가장 클 것으로 예상되나 용출된 지하수는 조석, 지형 및 기상의 영향을 받으면서 주위 해수와 혼합된다. Song *et al.*, (2016)은 방두만에서 GPS를 장착한 부이(buoy)를 지하수와 양식장배출수 부근에 설치하여 이동을 관측하였는데 밀물 시 부이가 만 밖으로 빠져나가는 형태를 보였고, 썰물 시에는 해안을 따라 맞은편 해안으로 이동하는 것으로 측정되었다. 정점 SY1과 정점 SY3는 약최저저조위시 물 밖으로 노출되는 곳으로 햇볕에 가열된 모랫바닥이 수온을 높이는 것으로 판단된다(Song *et al.*, 2016). 육상양식장과 가장 가까운 정점 SY4의 표층 수온은 16.3-23.4°C로 정점 SY1을 제외한 다른 정점들에 비해 4, 5월에는 높고, 6월에는 비슷하며, 7월부터 9월에는 낮은 수온을 보였지만, 조사 정점들 중 표층 수온 변화가 가장 작았다. 넙치 (*Paralichthys olivaceus*)의 사료 효율이 가장 높은 수온은 19-23°C로(Kim *et al.*, 2014), 육상양식장에서 사용되는 해수는 일정한 수온 유지를 위해 해수와 지하수를 혼합하여 사용하기 때문에 주위 해수의 변화보다 상대적으로 일정한 수온을 유지한다.

제주도 신양 방두만에서 표층염분은 만 안쪽에서 낮고, 만 외측에서 상대적으로 높게 관측되었다. 각 정점에서 표층염분은 조위 변화에 따라 1 PSU 이하의 변화를 보였고, 저염수의 공간적 변화가 뚜렷하게 나타났다. 표층 염분은 정점 SY1에서 23.8-34.1 PSU로 다른 정점들(24.6-34.4 PSU)에 비해 상대적으로 낮다(Fig. 2(b), 2(d)). 신양 방두만 지하수의 염분은 2.47-6.92 PSU의 범위로 보고되었지만(Jeju Sea Grant, 2018), 정점 SY1은 지하수 용출 지점에서 약 200 m 거리에 위치하여 강한 저염수의 수괴는 관측되지 않았다. 그러나 주위 해수보다 상대적으로 낮은 저염수의 영향은 나타났고, 특히 밀물시기보다 썰물 시기에 뚜렷한 분포를 보였다(Fig. 2(b), 2(d)). 정점 SY4의 표

층 염분은 26.1-34.0 PSU로 4, 5월은 주변과 비슷하고 6월부터 9월까지의 주변보다 낮은 것이 특징이었다. 이는 하계에 적정 수온 유지를 위해 양식수에 지하수의 혼합 비율이 높아진 것 때문이다. 그리고 SY4의 표층 염분 변화는 표층 수온과 함께 정점들 중 가장 작았다. 육상양식장 배출수의 영향은 지하수의 영향과는 달리 썰물시기보다 밀물시기에 뚜렷한 분포를 보였다(Fig. 2(b), 2(d)).

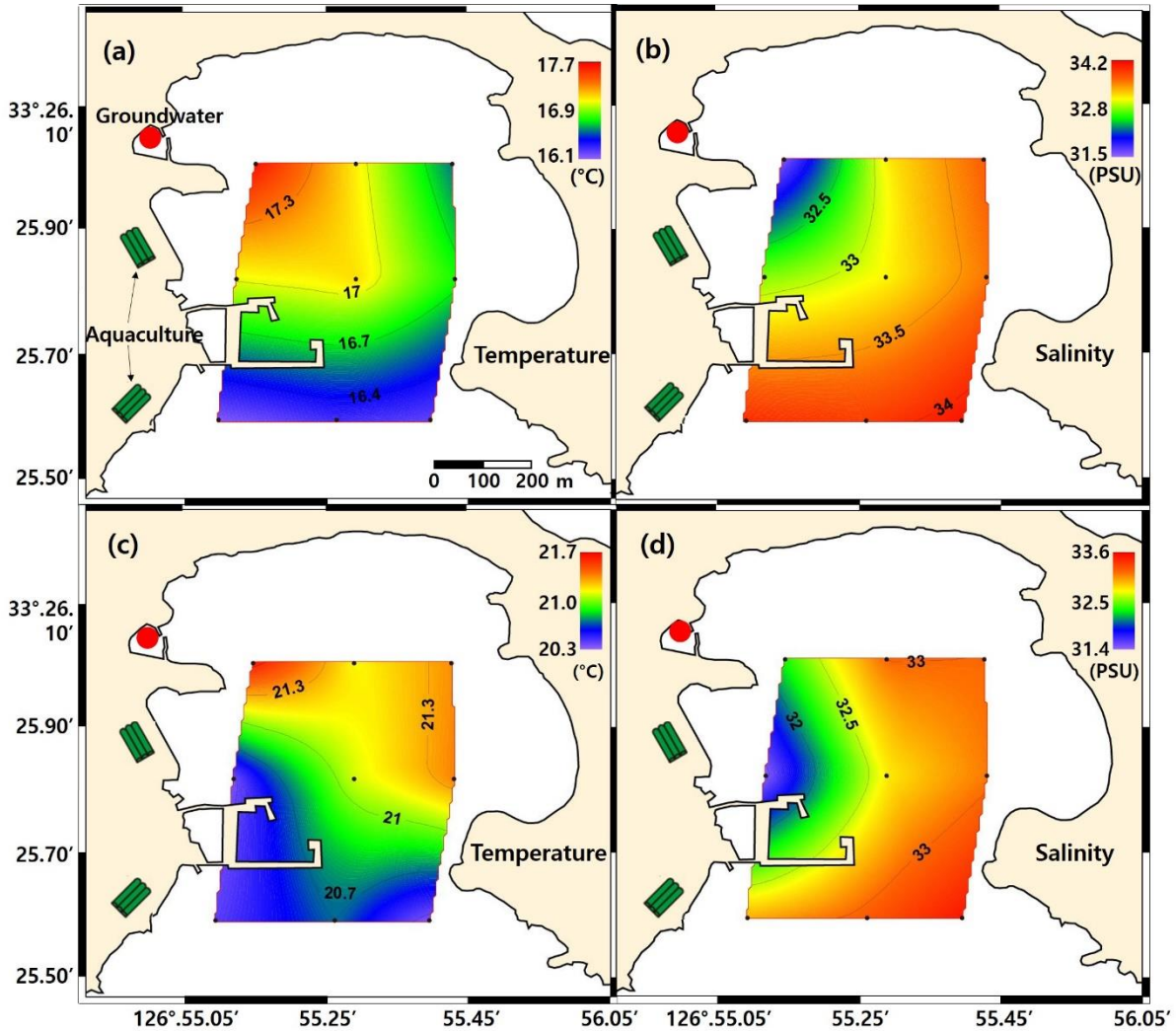


Fig. 2. (a) Sea surface temperature and (b) salinity observed from 13:21 to 13:49 April 24, 2019 during the ebb tide, and (c) sea surface temperature and (d) salinity observed from 10:58 to 11:28 June 23, 2019 during the flood tide in Shinyang Bangdu Bay, Jeju Island.

수온과 염분의 수직 분포는 밀물 시 만 내에서는 1 m 이내의 얇은 연직 혼합층을 나타내고, 만 외측에서는 전층에서 연직 혼합층이 발달되었다(Fig. 3(a), 3(b)). 지하수(SY1)와 육상양식장 배출수(SY4)가 존재하는 해역은 저염

분의 영향으로 낮은 밀도의 해수가 표층에 분포하면서 강한 연직 구조를 나타내지만, 유입원에서 멀어질수록 연직 구조가 약해졌다. 썰물 시에는 연직 구조가 약해지는 특징을 보였다(Fig. 3(c), 3(d)). 만 내의 저층에서는 수온과 염분의 급격한 변화가 관측되었다. 이것은 얇은 연안에서 난류(turbulence)에 의해 저층 흐름이 급격하게 변하는 현상(bursting effect)으로 사료된다(Heathershaw, 1974). 특히 만 서쪽 입구에 건설된 방파제로 인하여 해수 순환이 약화되고 지하수와 육상양식장 배출수에서 고영양염의 유입되면서 해조류 대발생과 같은 환경 문제가 발생하고 있다(Kwon *et al.*, 2017).

4. 결론

본 연구는 제주도 신양 방두만에서 매년 발생하는 해조류 대발생과 관련하여 해수 물성 자료 중 수온과 염분 자료를 이용하여 고영양염을 함유하고 있는 지하수와 육상양식장 배출수 유입 특성 변화를 관측했다. 연구해역 서쪽은 동쪽에 비해 지속적으로 저염의 해수가 관측되었고, 강한 성층 구조를 나타냈다. 수온과 염분은 조위 변화에 따라 차이가 발생하지만, 관측된 자료에서 밀물시기에는 육상양식장 배출수가 서쪽 해안을 따라 북상을 하면서 영향을 미치고 있었다. 썰물시기에는 육상양식장의 영향은 약화되고 지하수에 의한 영향이 강해지면서 서쪽 해안을 따라 남하여 영향을 미치고 있었다. 이것은 조류의 세기에 따라 영향 범위가 변화지만, 일반적으로 서쪽 해안은 동쪽 해안보다 지속적으로 고영양염을 함유하는 저염수의 영향을 받는 것으로 조사되었다.

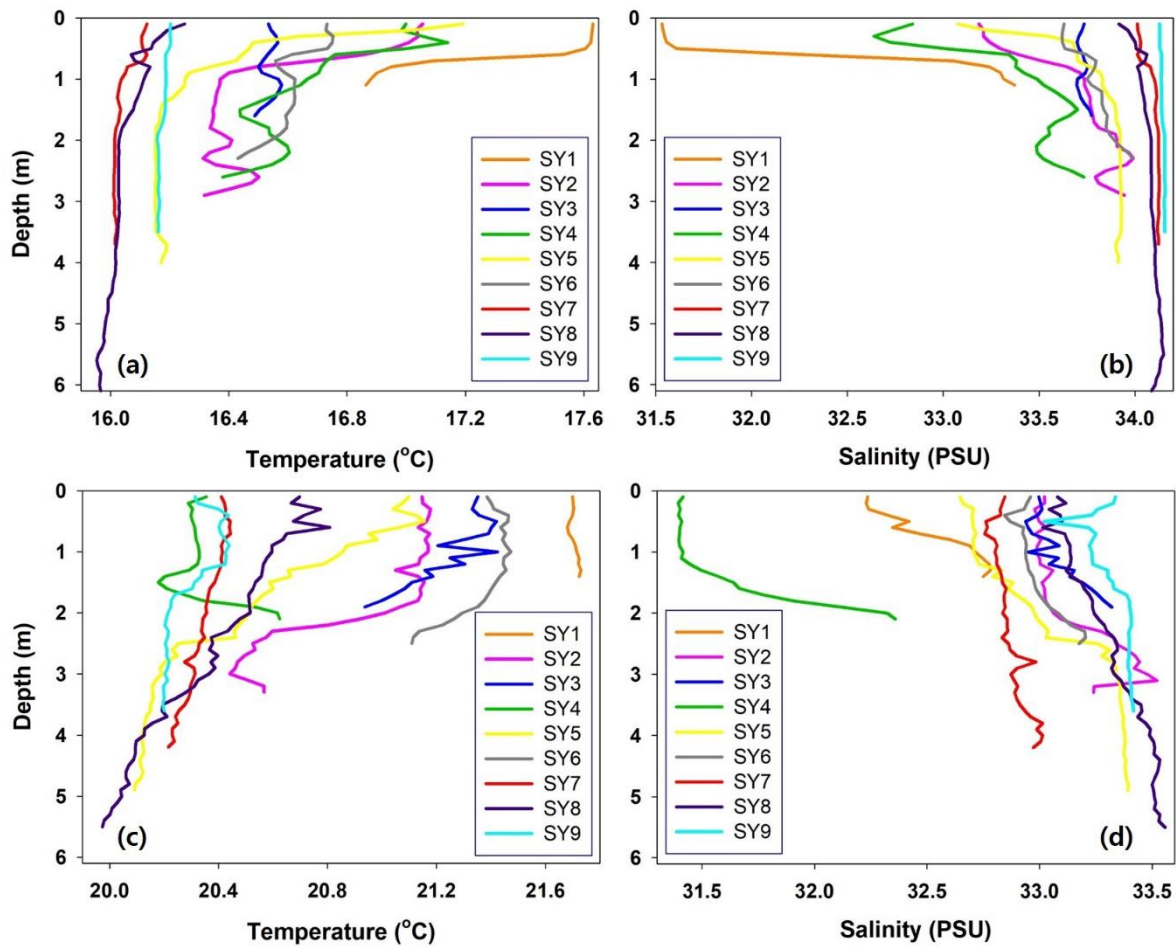


Fig. 3. (a) Vertical water temperature and (b) salinity observed from 13:21 to 13:49 on April 24, 2019 during the flood tide, and (c) vertical water temperature and (d) salinity observed from 10:58 to 11:28 on June 23, 2019 during the ebb tide in Shinyang Bangdu Bay, Jeju Island.

5. 사사

이 연구는 한국해양과학기술원 주요사업인 '생지화학 순환 및 해양환경변동 연구(PE99812)' 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

6. 참고문헌

Heathershaw AD (1974) "Bursting" phenomena in the sea. *Nature* 248: 394-395.

Hwang DW, Lee YW, Kim G (2005) Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea. *Limnol Oceanogr* 50(5): 1393-1403.

Jeju Sea Grant (2018) Identification and treatment service for the occurrence of *Ulva* in Jeju Island, mainly with Shinyang beach. Jeju Special Self-Governing Province, 197 p (in Korean).

Kang YH, (2001) A study on the problems and solutions of the inland aquaculture increased. Jeju Development Research 5: 57-77 (in Korean).

Kim K, Chang KI, Kang DJ, Kim YH, Lee JH (2008) Review of recent findings on the water masses and circulation in the East Sea (Sea of Japan). J Oceanogr 64: 721-735.

Kim SS, Kim KW, Kim KD, Lee BJ, Han HS, Kim JW, Bai SC, Lee KJ (2014) Optimum feeding rate in growing olive flounder *Paralichthys olivaceus* fed practical extruded pellet at optimum water temperature (21°C). JFMSE 26(4): 789-796 (in Korean with English abstract).

Kwon HK, Kang H, Oh YH, Park SR, Kim G (2017) Green tide development associated with submarine groundwater discharge in a coastal harbor, Jeju, Korea. Sci Rep-UK 7: 6325, doi:10.1038/s41598-017-06711-0.

Son YB, Gardner WD, Mishonov AV, Richardson MJ (2009) Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf of Mexico. Remote Sens Environ 113: 50-61.

Song YC, Kim SR, Park SJ, Kang GM, and Oh SS (2016) A study on the causes of *Ulva pertusa Kjellman* large breeding in Bangdu bay of Jeju Island. Report of JIHE 27: 57-69 (in Korean with English abstract).

7. 메타데이터

구분	필드명	하위카테고리#1	하위카테고리#2	
필수	Title	Temperature, Salinity		
	*DOI name			
	*Category	oceans	OCN	
	Abstract			
	*Temporal Coverage	2019-04-22	09:00-09:29, 09:56-10:21, 10:53-11:18, 12:15-12:39, 13:12-13:38	
		2019-04-24	09:26-09:55, 10:21-10:49, 11:20-11:46, 12:21-12:49, 13:21-13:49	
2019-05-23		09:40-10:09, 10:37-11:05, 11:34-12:08, 12:50-13:26, 13:52-14:22		
2019-05-24		09:56-10:24, 11:04-11:33, 12:00-12:31, 13:03-13:32, 13:57-14:20		

		2019-06-23	10:58-11:28, 11:53-12:22, 12:51-13:19, 14:16-14:42		
		2019-06-24	11:10-11:36, 12:03-12:29, 13:03-13:29, 14:07-14:34, 14:59-15:33		
		2019-07-22	10:16-10:44, 11:12-11:40, 12:12-12:41, 13:08-13:36, 14:04-14:34		
		2019-07-23	10:14-10:43, 11:12-11:43, 12:25-12:41, 13:25-13:44, 14:23-14:41		
		2019-08-30	09:36-10:16		
		2019-09-17	10:51-11:32, 12:11-12:22, 14:20-14:30		
	*Spatial Coverage	SY1	33° 25' 55.63"	126° 55' 5.87"	
		SY2	33° 25' 55.63"	126° 55' 14.31"	
		SY3	33° 25' 55.63"	126° 55' 22.42"	
		SY4	33° 25' 45.90"	126° 55' 4.25"	
		SY5	33° 25' 45.90"	126° 55' 14.31"	
		SY6	33° 25' 45.90"	126° 55' 22.64"	
		SY7	33° 25' 32.67"	126° 55' 1.96"	
		SY8	33° 25' 34.00"	126° 55' 12.69"	
		SY9	33° 25' 34.00"	126° 55' 20.58"	
	*Personnel	Name	Young Baek Son		
		Affiliation	KIOST		
		E-mail	sonyb@kiost.ac.kr		
*License	BY-SA				
선택	*Project	E99812	Biogeochemical cycling and marine environmental change studies		
	*Instrument	CTD	Manufacturer : Sea-Bird Scientific Model name : SBE 25 plus Resolution : 16 times / sec		