



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

제주도 담지하수 유출량 변화에 따른
영양염류와 용존유기물질 플럭스 특성 연구

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 지구해양전공

송 병 찬

2021년 2월

제주도 담지하수 유출량 변화에 따른 영양염류와 용존유기물질 플릭스 특성 연구

지도교수 김 정 현

송 병 찬

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2021년 2월

송병찬의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 김 태 훈



위 원 윤 석 훈



위 원 김 정 현



제주대학교 대학원

2021년 2월



Monthly variations of submarine fresh groundwater discharge (SFGD) and SFGD-driven nutrients and dissolved organic matter fluxes in Jeju Island

Byung-Chan Song
(Supervised by professor Jeonghyun Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science

2021. 2.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Tae-Hoon Kim, Prof. of Faculty Earth and Environmental Sciences

Seok-Hoon Yoon, Prof. of Faculty of Earth and Marine Convergence

Jeonghyun Kim, Prof. of Faculty of Earth and Marine Convergence

Date 2020. 12

Faculty of Earth and Marine Convergence

Earth and Marine Science

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
List of Figures and Tables	ii
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 연구지역 및 분석방법	5
2.1 연구지역	5
2.2 시료채취 및 분석방법	6
3. 결과 및 고찰	11
3.1 염분, 수온 및 영양염류, 용존유기탄소의 분포 비교	11
3.2 담지하수 유출량 산정	41
3.2.1 체류시간 산정	41
3.2.2 DSi 물질 수지 모델을 이용한 담지하수 유출량 산정	45
3.3 담지하수 유출을 통한 영양염류 및 용존유기탄소 거동	50
3.4 본 연구 지역과 타 지역의 영양염류 플럭스 비교	54
4. 요약 및 결론	57
5. 참고문헌	59

List of Figures and Tables

Fig. 1 A schematic diagram of hydrology and submarine groundwater discharge of coast.	4
Fig. 2 Maps showing the study area and sampling locations for Hwasun Bay for the analyses of nutrients and DOC in Jeju Island.	9
Fig. 3 A schematic diagram showing the analysis method procedure.	10
Fig. 4 Correlations between salinity and DIN in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DIN.	37
Fig. 5 Correlations between salinity and DSi in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DSi.	38
Fig. 6 Correlations between salinity and DIP in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DIP.	39
Fig. 7 Correlations between salinity and DOC in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DOC.	40
Fig. 8 The bar graph shows the residence time, and the straight graph shows the tidal range.	44
Fig. 9 The monthly precipitation 3 days before and submarine fresh groundwater discharge in the Hwasun Bay, Jeju Island in 2019.	49
Fig. 10 The monthly SFGD-driven nutrients flux and SFGD during the sampling period.	52

Fig. 11 The average DOC concentration of fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun in 2019.53

Table 1. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in January 2019.	15
Table 2. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in February 2019 (n.d. = not detected).	16
Table 3. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in March 2019 (n.d. = not detected).	17
Table 4. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in April 2019 (n.d. = not detected).	19
Table 5. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in May 2019 (n.d. = not detected).	21
Table 6. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in June 2019 (n.d. = not detected).	22
Table 7. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in July 2019 (n.d. = not detected).	24

Table 8. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in August 2019 (n.d. = not detected).	26
Table 9. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in 10 September 2019 (n.d. = not detected).	28
Table 10. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in 24 September 2019 (n.d. = not detected).	29
Table 11. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in October 2019 (n.d. = not detected).	31
Table 12. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in November 2019 (n.d. = not detected).	33
Table 13. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in December 2019 (n.d. = not detected).	35
Table 14. Values for each notation in residence time in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. A_{bott} is the bottom area of the bay, V_s is the volume of bay water, T is period of tide, H is the range of tide, Z is the average depth of the bay, P is tidal prism, and T_f is residence time of bay.	43

Table 15. Values for each notation in the DSi mass balance model measured in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019.48

Table 16. The summaries of the geochemical-tracer based SGD estimates and the associated nutrient fluxes to the coast zones.56

Abstract

To investigate the impact of Submarine Groundwater Discharge (SGD) on Hwasun Bay, surveys were conducted 13 times in total in Hwasun Bay, Jeju Island from January through December 2019. Throughout the entire period, collecting submarine fresh groundwater, submarine saline groundwater, bay water, and open water, the water temperature, salinity, and the concentrations of Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN), Dissolved Inorganic Phosphate (DIP), Dissolved Silicate (DSi), and Dissolved Organic Carbon (DOC) were measured. Nutrients showed significant negative correlations (DIN: $r^2 = 0.82$, DIP: $r^2 = 0.63$, DSi: $r^2 = 0.82$) in all the surveys, and there was an impact of Submarine Fresh Groundwater Discharge (SFGD) in this bay. DOC showed a significant positive correlation ($r^2 = 0.69$) in all the surveys and tended to increase to the open sea, so it is judged that there was an increase in concentration due to biological activity, rather than depending on SFGD.

The residence time was calculated based on the tidal prism, and through the calculated result, SFGD was estimated, using the DSi-mass balance model, and as a result, it was $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. As a result of the estimation of the flux by multiplying the concentration of nutrients in the groundwater and SFGD, DIN, DIP, and DSi were respectively 6.7 ± 4.8 , 0.004 ± 0.003 , $4.0 \pm 4.2 \times 10^5 \text{ mol yr}^{-1}$. Also, as a result of the calculation of the nutrients-mass balance model, of the total flux of nutritive salts supplied to Hwasun Bay, DIN, DIP, and DSi, supplied by SFGD were respectively approximately 96, 25, and 80 %, and of them, about 49, 84, and 41 % were removed by biological production, and 51, 16, and 59 % were mixed with the open sea water and leaked.

As compared to the previous studies conducted in Hwasun Bay, in this study, as the groundwater runoff decreased, and nutrient flux increased, it is judged that the groundwater is depleted, and the contamination progresses. Currently, on Jeju Island, the contamination of the groundwater is in progress, which must seriously be recognized. Thus, to understand the behavior of SGD, it is necessary to trace the origins of substances, using various radioactive

isotopes, to conduct an extensive study of the spatial and temporal scales, including wider areas and natural phenomena like typhoons, simultaneously and to continue to monitor them.

1. 서론

지하수는 일반적으로 퇴적물의 공극이나 암반의 파쇄면 내 부존하는 물을 의미한다. 땅으로 스며든 지하수는 해저 담지하수 및 해저 염지하수로 해양으로 유입되며, 대부분 확산에 가까운 미세한 흐름으로 암석 또는 해양 퇴적물 경계를 통하여 막대한 양의 육상기원 화학물질(영양염류, 중금속, 유기물, Ra, Rn, CH₄ 등) 및 오염물질을 연안으로 운반하는 중요한 역할을 하고 있다(Church, 1996; Burnett et al. 2001; Taniguchi et al. 2002). 대수층을 따라 해양으로 유출되는 해저 담지하수 유출(Submarine Fresh Groundwater Discharge: SFGD)과 조수간만의 차에 의해 퇴적층을 통하여 해저 면으로 유입되었다가 해양으로 다시 유출되는 해저 염지하수 유출(Submarine Saline Groundwater Discharge: SSGD)을 통틀어 해저 지하수 유출(Submarine Groundwater Discharge: SGD)이라 명한다(Church, 1996; Taniguchi, 2002). 이러한 SGD는 대표적으로 물의 육상 기원인 강의 유출량과 비슷하거나 더 많은 수준이라고 알려져 있으며, 대서양은 SGD가 강의 유출량보다 약 80 ~ 160% 많다고 보고되었다(Moore 2008). 또한, Kwon et al. (2014)은 전 세계 SGD가 강을 통해 바다로 유입되는 유출량보다 3 ~ 4배 더 많고, 인도 및 태평양 주변 SGD가 전 세계 SGD의 약 70%를 차지한다고 발표한 바 있다.

제주도는 화산활동에 의해 생성되어 섬 대부분이 다공성 현무암으로 구성되어 있고, 건천을 제외한 하천 및 강이 없어 강수의 대부분이 지하수를 통해 연안으로 유출된다. 제주도의 지하수 연령은 1 ~ 4년으로 국내 타 지역(충북 청양

연령 26 ~ 29년)에 비해 상대적으로 젊은 연령을 보여줌으로서 내륙지역보다 제주도의 지하수 순환 속도가 매우 빠르다고 보고되었다(오진석과 김선준, 1995; Koh, 1997). 그렇지만, 현재의 기술로 SGD의 크기와 메커니즘을 정확하게 측정할 수 있는 수단이 없고, 이 기원은 보이지 않으며, 느리고 규모가 커 시간 및 공간적으로 변동이 심하여 그 규모와 메커니즘을 연구하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해 최근 연구에서 넓은 공간과 시간 규모로 SGD를 추적하기 위해 해수에 비해 지하수에 훨씬 더 많이 농축된 ^{226}Ra (Half-life = 1,650 yr), ^{222}Rn (Half-life = 3.83 d), CH_4 및 DSi 와 같은 다양한 지화학적 추적자를 사용했다(Bugna et al. 1996; Corbett et al. 2000; Hwang et al. 2005a). Kim et al. (2003) 에 따르면 제주도의 동쪽과 서쪽의 유출량은 다르다 보고되었는데, 제주도의 동쪽 SFGD는 $0.2 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$, SSGD는 $9.0 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 이며, 서쪽 SFGD은 $1.3 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$, SSGD는 $6 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 으로 총 $16.5 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 라 보고 되었으며, 이러한 유출량의 차이를 보이는 양상은 지리적인 대수층(서귀포층)의 차이로 인하여 다르다(Koh, 1997).

해양 내 용존유기물질(Dissolved Organic Matter: DOM) 중 약 97%가 용존유기탄소의 형태로 존재하며 그 양은 대기중에 존재하는 이산화탄소의 양(약 700 Gt)과 비슷한 약 750Gt이 저장되어 있다(Emerson and Hedge 1988; Amon and Benner 1996). 해양과 대기의 기체 교환을 통해 유입된 이산화탄소가 일차생산자의 광합성을 통해 유기탄소(Organic Carbon: OC)로 존재하는데, 이러한 유기탄소는 입자 크기에 따라 입자성유기탄소(Particulate Organic Carbon)와 용존성유기탄소(Dissolved Organic Carbon: DOC)로 존재한다. 이러한 OC는 동물플랑크톤의 섭식 과 분해, 입자성 유기물의 용해, 재광물화(Remineralization) 등 생물학적 펌프(biological pump)에 중요한 영향을 주지만(Carlson et al. 1994;

Hansell et al. 2002), 제주도와 같이 강이 없는 섬 연안에서의 육상에서 유입되는 기원에 대한 탄소 순환은 연구가 미비한 실정이다.

화산섬은 지표수가 부족하여 지하수에 크게 의존하고 있으며, 제주도 역시 지하수가 급수량의 약 64%를 제공한다(제주도. 2003). 이처럼, 제주도에 나오는 대규모 지하수는 수자원 보존에 중대한 영향을 미친다. 하지만, 축산 폐수의 무단 배출, 농가의 무분별한 비료 및 화학비료 사용, 오염물질의 유입 통로가 되고 있는 지하수공, 땅속으로 흘러 보내는 생활하수 등이 대수층으로 침투하여 지하수가 오염된다. 이러한 대량의 영양염류(Nutrients)를 포함한 지하수가 연안으로 과잉 공급된다. 그로 인하여 해양에 녹조 대 발생을 일으키는 중요한 요인이며, 유해 식물플랑크톤을 생성, 조류 번식의 원인이 될 수 있다(Laroche et al. 1997; Gobler and Sañud-Wilhelmy 2001; Hwang et al. 2005a; Hu et al. 2006; Lee and Kim 2007; Lee et al.2010). 따라서 SFGD를 평가하는 것은 지하수에 크게 의존하는 제주도에 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 제주도 남서쪽에 위치한 화순만에서 (1) 수온, 염분, 영양염류와 용존유기탄소의 농도 분포를 확인하고, (2) 월별 체류시간 및 DSi 물질 수지모델을 이용하여 해저 지하수 유출량을 산정하였으며, 이에 따른 영양염류와 용존유기탄소의 플럭스(단위면적 및 시간 당 물리량이 수송되는 비율)을 계산하였다. (3) 과거 화순만에서 이루어진 이전 연구 및 전 지구적으로 해저 지하수 유출량을 비교하여 제주도 화순만에서의 SGD 중요성에 대해 알아보았다.

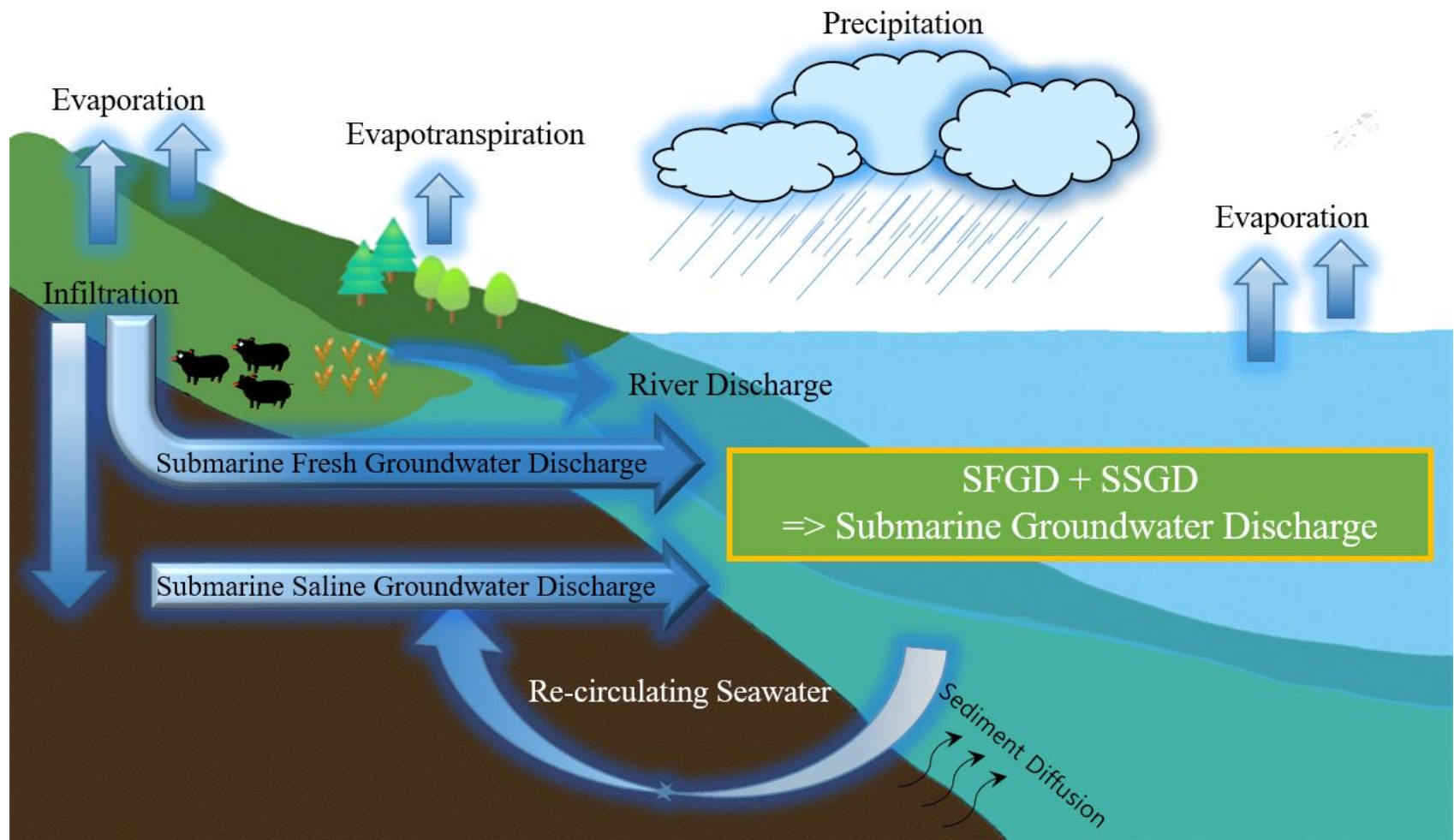


Figure 1 A schematic diagram of hydrology and submarine groundwater discharge of coast.

2. 연구지역 및 분석방법

2.1 연구지역

제주도는 우리나라에서 가장 큰 화산섬으로 면적은 약 1,845km², 해안선 길이는 약 253km이며 섬의 모양은 타원형이다. 우리나라 남해안에 위치해 있으며 연안에 난류가 흐르고 있어 연중 온난하고 기온의 연교차도 적은 해양성기후가 나타난다. 한라산의 지형적인 특성으로 인하여 남부와 북부의 강수량 차이가 크다(Park et al. 1994). 2019년 강수량은 연 평균 1,980mm(제주시) ~ 2,210mm(서귀포시)로 우리나라 최 다우 지역에 해당한다(기상청). 특히 연 강수량 중 69%(제주시), 53%(서귀포시)가 7~9월에 집중적으로 내리며 이때, 열대성저기압(태풍)의 영향으로도 많은 비가 내린다. 또한, 해상에 고립된 섬으로 연중 바람이 불고 흐린 날이 많은 다변성 일기를 보인다. 한라산 주변에는 약 360개의 오름이 분포하고 있으며, 한라산 기준 동쪽과 서쪽은 완만하며, 남쪽과 북쪽은 경사가 급하고 지형의 변화가 심하며 험준하다.

과거 수성화산의 화산활동에 의해 화구 주변 화산분출물이 쌓이고, 오랜 시간 풍화작용과 해양퇴적물이 쌓이기를 반복하여 약 100m 두께의 서귀포층이 형성되었다. 계속된 화산활동으로 인하여 서귀포층 위로 용암과 해양퇴적물들이 퇴적되었으며, 물리적 특성상 불투수층으로 존재하여 지하수가 더 이상 지하에 침투하지 못하게 한다. 이러한 서귀포층은 지하에 광범위하게 분포하고 있으나, 지역에 따라 분포 및 층의 두께가 다르다. 제주도 동부지역은 지하 깊숙이

분포하고 있는 반면, 남부지역은 해수면 상부에 위치하고 있어 남서부지역에 위치한 본 연구지역은 서귀포층으로 인한 해저 담지하수가 동부지역보다 비교적 우세하다.

연구지역인 화순항은 제주특별자치도 서귀포시 안덕면 화순리에 위치하는 연안항이며 남서부지역에 위치하였다. 화순항은 형성 초기에는 자연적으로 형성된 개방적인 만이었으나 1996년부터 본격적인 항만 광역 개발로 인한 반복적인 폐쇄적인 만으로 변형되었다. 또한, 2013년부터 시작된 화순항 2단계 개발사업이 진행되었고, 2018년 완료가 되었다.

2.2 시료채취 및 분석방법

본 연구는 2019년 매월 (9월 2회) 총 13회에 걸쳐 조사를 하였다. 태풍이 지나간 후 채수하였고, 제17호 태풍 타파가 지나간 후 채수하여 9월에 2회에 걸쳐 조사를 하였다. 염분이 0.1 이하인 해저 담지하수, 염분 1~35사이의 염지하수, 화순항 내 연안 해수, 화순항 외 해수를 채수하였다. 해저 담지하수는 화순 해변 인근의 용천에서 채수하였으며, 해저 염지하수는 간조 전후 2시간 사이에 해변의 모래사장을 1.5m 깊이로 파낸 후 솟아오르는 해저 염지하수를 채수하였고, 연안 해수는 화순 해변 앞 약 10m 지점에서 채수하였으며, 만 내 해수는 방파제에서 채수하였다. 만 내 해수(B1~B4)는 이전 연구(Kim et al. 2013)의 데이터를 참고하였으며, 외 해수는 제주대학교 제라호 실습선으로 매월 제주연안

조사 중 화순 앞 연안 데이터를 참고하였다(Figure 2). 모든 지하수는 염산 및 증류수로 세척한 HDPE 광구 샘플병(Nalgene; ~1L)에 채수하였다.

염분 및 수온은 YSI(PCD 650, THERMO EUTECH, Singapore)를 이용하여 현장에서 측정을 하였으며, 조사 전 실험실에서 Conductivity Solution (THERMO EUTECH, Singapore)용액으로 보정을 하였다. 채수 직 후 DOC와 영양염류를 분석하기 위해 여과지(Whatman 0.45 μm , GF/F)를 이용하여 여과하였고 DOC 시료는 500°C에서 5시간 열처리한 유리 앰플(20 mL)에 채수하여 미생물활동을 억제하기 위해 6 M 염산을 20 μL 넣어 pH를 2 이하로 낮춘 후 토치를 이용하여 입구를 밀봉한 후 분석 전 까지 실온 보관 하였다(Figure 3).

DOC의 경우, 총유기탄소 측정기(TOC-L_{CPH}, Shimadzu, Japan)를 이용하여 측정하였다. 고온연소산화법(High Temperature Combusion Oxidation)을 기초로 한 분석법으로 시료를 자동 분석기에 넣은 후 시료가 720 °C 백금촉매를 통과하여 유기탄소가 산화된 후 이산화탄소의 형태로 전환되어 비분산형 적외선 검출기에서 농도를 검출하였다. 측정 시 유기물이 없는 증류수로 안정화를 진행하였으며, 검출한계는 <5 μM 을 보였다. 아세트아닐리드(Acetanilide) 용액으로 농도를 표준화 하였고, DOC 표준 물질(DSR: 44 ~ 46 μM , University of Miami)를 사용하여 5% 이내의 오차를 보여 분석의 신뢰도를 확보하여 측정값을 사용하였다.

영양염류의 경우, 여과된 해수를 산 세척된 HDPE 125ml 용기에 채수 후 냉동(-4°C) 보관하여, 측정 시 실온에서 해동시킨 후 영양염류 자동 분석기(New QuAAtro39, SEAL Analytical GmbH, Germany)를 이용하여 측정하였다. 측정 시 유기물이 없는 증류수로 안정화를 진행하였으며, 검출한계는 질산염 질소 0.02

μM , 아질산염 질소 $0.40 \mu\text{M}$, 암모니아 질소 $0.05 \mu\text{M}$, 인산 인 $0.01 \mu\text{M}$, 용존규산염 $0.14 \mu\text{M}$ 를 보였다. 측정 시 KANSO(Japan)사에서 제작된 Lot. CA, CJ, BZ 영양염 표준물질을 함께 사용하였으며 5% 이내의 오차를 보여 신뢰도를 확보하였다. 본 연구에서 용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen: DIN)는 질산염 질소(NO_3^-), 아질산염 질소(NO_2^-), 암모니아 질소(NH_4^+)의 합으로, 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphate: DIP)는 인산 인(PO_4^{3-}), 용존규산염(Dissolved Silicate: DSi)은 규산염(SiO_2)으로 정의하였다.

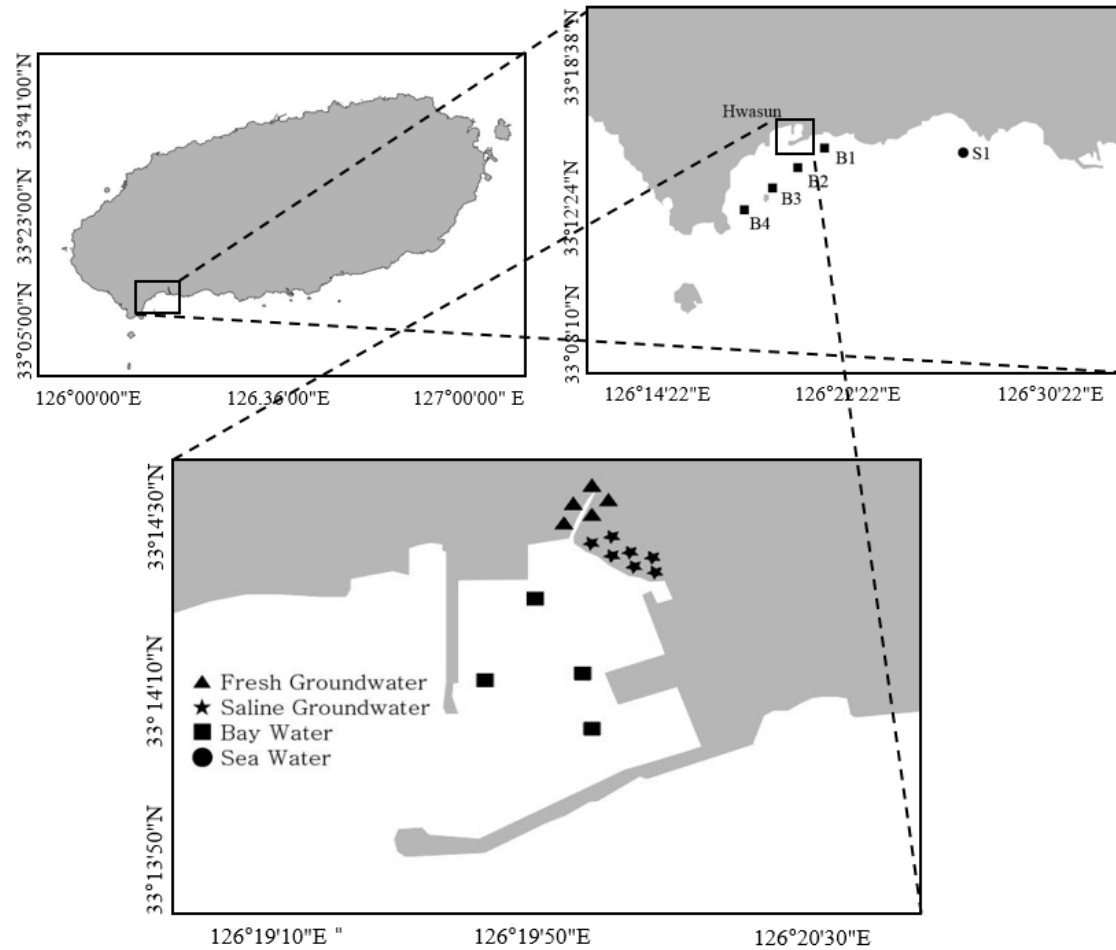


Figure 2 Maps showing the study area and sampling locations for Hwasun Bay for the analyses of nutrients and DOC in Jeju Island.

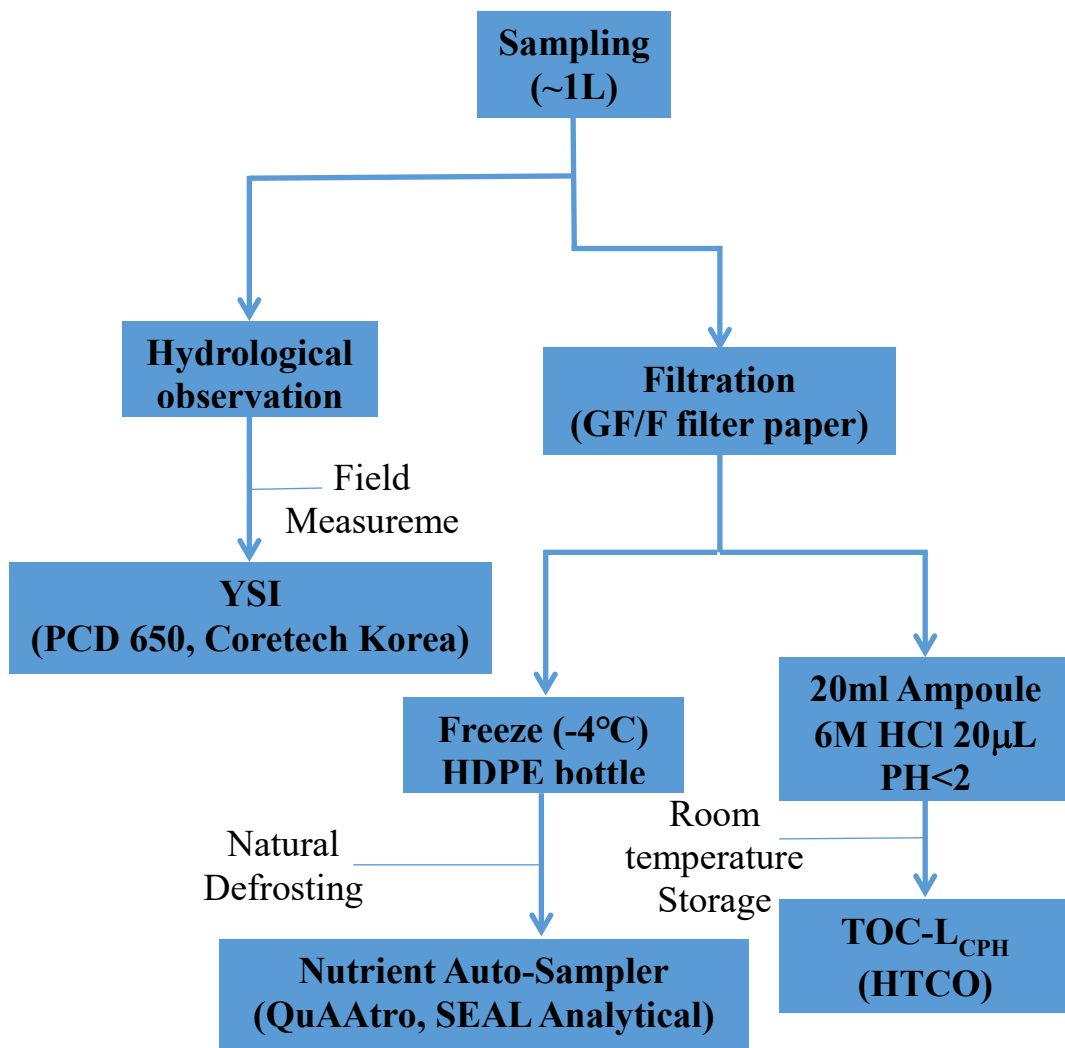


Figure 3 A schematic diagram showing the analysis method procedure.

3. 결과 및 고찰

3.1 염분, 수온 및 영양염류, 용존유기탄소의 분포 비교

해저 담지하수의 염분은 전 기간에 걸쳐 평균 0.1 ± 0.0 로 조사일의 기상, 조수간만의 차와 상관없이 일정한 값을 보였다(Tables 1 ~ 13). 해저 염지하수의 염분은 월평균 12.9~18.8 (평균: 15.5 ± 1.6)로 나타났으며 월별 차이가 나는 이유는 조사일에 염분 별로 채수한 시료의 수에 따라 다르게 조사되었다. 만 내 해수의 염분은 월평균 28.6 ~ 33.6 (평균: 31.7 ± 1.6)로 조사되었으며, 외 해수는 30.5 ~ 33.6 (평균: 32.3 ± 0.9)로 조사되었다(Table. 1 ~ 13). 계절별로 보았을 때, 겨울철(1,2,12월)에 만 내 해수 및 외 해수의 농도가 높았고, 여름철(9월 ~ 11월)에 상대적으로 낮게 나왔다. 염분의 차이는 제주도 지역적 특성상 담수의 유입인 지하수가 대부분이며, 지하수는 강수에 의존한다. 여름철의 염분이 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였는데 동아시아 몬순의 영향에 따른 강수의 증가로 해수가 희석되어 염분이 낮아진 것으로 판단된다.

해저 담지하수의 수온은 13.0 ~ 18.8 °C (평균: 16.3 ± 1.6 °C)로 나타났으며, 봄철(3 ~ 5월)에 평균 16.0 ± 1.3 °C, 여름철(6 ~ 8월)에 17.4 ± 0.7 °C, 가을철(9 ~ 11월에 17.2 ± 1.1 °C, 겨울철(1, 2, 12월)에 14.2 ± 1.0 °C로 조사되었다. 해저 염지하수의 수온은 9.7 ~ 25.2 °C (평균: 18.6 ± 5.1 °C)로 나타났으며, 봄철에 평균 18.1 ± 3.8 °C, 여름철에 평균 22.9 ± 0.4 °C, 가을철에 21.1 ± 3.8 °C, 겨울철에 11.4 ± 1.5 °C로 조사되었다.

화순만 내 해수의 수온은 $18.7 \sim 24.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (평균: $21.9 \pm 2.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $22.0 \pm 1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 여름철에 $23.2 \pm 0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 가을철에 $23.0 \pm 1.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 겨울철에 $19.0 \pm 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 조사되었다. 외 해수의 수온은 $15.6 \sim 25.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (평균: $20.0 \pm 3.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $16.4 \pm 0.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 여름철에 $21.3 \pm 3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 가을철에 $23.7 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 겨울철에 $17.3 \pm 1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 조사되었다(Table. 1 ~ 13). 외 해수를 제외한 대부분 모든 시료에 대해 겨울철에 온도가 가장 낮았으며, 여름철에 높은 경향을 보였고 이는 계절적인 특성에 영향을 받았다고 판단된다.

해저 담지하수의 영양염류 중 DIN은 $288.0 \sim 2485.2 \text{ } \mu\text{M}$ (평균: $818.3 \pm 730.1 \text{ } \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $1926.6 \pm 227.8 \text{ } \mu\text{M}$, 여름철에 $299.5 \pm 2.3 \text{ } \mu\text{M}$, 가을철은 $336.5 \pm 39.3 \text{ } \mu\text{M}$, 겨울철에 $871.3 \pm 198.3 \text{ } \mu\text{M}$ 로 조사되었으며 봄철에 가장 높았다. 해저 염지하수의 DIN은 $64.9 \sim 831.9 \text{ } \mu\text{M}$ (평균: $364.2 \pm 274.3 \text{ } \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $781.3 \pm 520.7 \text{ } \mu\text{M}$, 여름철에 $181.5 \pm 54.4 \text{ } \mu\text{M}$, 가을철에 $171.8 \pm 76.6 \text{ } \mu\text{M}$, 겨울철에 $386.4 \pm 196.5 \text{ } \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 화순만 내 해수의 DIN은 $1.3 \sim 40.9 \text{ } \mu\text{M}$ (평균: $15.9 \pm 13.7 \text{ } \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $10.0 \pm 17.49 \text{ } \mu\text{M}$, 여름철에 $17.8 \pm 18.0 \text{ } \mu\text{M}$, 가을철에 $24.3 \pm 30.3 \text{ } \mu\text{M}$, 겨울철에 $8.8 \pm 10.3 \text{ } \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 외 해수의 DIN은 $0.3 \sim 10.7 \text{ } \mu\text{M}$ (평균: $4.2 \pm 4.1 \text{ } \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $7.4 \pm 2.9 \text{ } \mu\text{M}$, 여름철에 평균 $3.0 \pm 3.0 \text{ } \mu\text{M}$, 가을철에 평균 $0.6 \pm 0.2 \text{ } \mu\text{M}$, 겨울철에 $6.9 \pm 5.3 \text{ } \mu\text{M}$ 로 조사되었다(Table. 1 ~ 13). 모든 월에서 해저 담지하수 DIN의 농도가 가장 높았고 외 해수의 농도가 가장 낮은 값을 보였다. 염분과 DIN의 회귀 직선을 살펴보면 유의미한 음의상관관계 (평균 $r^2 = 0.82$)를 보였으며(Figure 4), 이는 DIN이 해저 담지하수에 의해 연안으로 유출됨을 보여준다.

해저 담지하수의 DIP는 2.3 ~ 5.8 μM (평균: $3.7 \pm 1.1 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 평균 $4.9 \pm 0.5 \mu\text{M}$, 여름철에 $3.7 \pm 0.4 \mu\text{M}$, 가을철에 $3.0 \pm 0.7 \mu\text{M}$, 겨울철에 $3.6 \pm 0.3 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 해저 염지하수의 DIP는 1.1 ~ 5.2 μM (평균: $2.8 \pm 1.4 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $4.8 \pm 1.8 \mu\text{M}$, 여름철에 $3.2 \pm 1.2 \mu\text{M}$, 가을철에 $1.6 \pm 0.7 \mu\text{M}$, 겨울철에 $2.6 \pm 1.1 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 화순만 내 해수의 DIP는 0.3 ~ 0.7 μM (평균: $0.5 \pm 0.1 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $0.6 \pm 0.3 \mu\text{M}$, 여름철에 $0.4 \pm 0.1 \mu\text{M}$, 가을철에 $0.5 \pm 0.2 \mu\text{M}$, 겨울철에 $0.5 \pm 0.2 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 외 해수의 DIP는 0.0 ~ 0.7 μM (평균: $0.2 \pm 0.2 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $0.3 \pm 0.0 \mu\text{M}$, 여름철에 $0.1 \pm 0.1 \mu\text{M}$, 가을철에 $0.1 \pm 0.0 \mu\text{M}$, 겨울철에 $0.4 \pm 0.3 \mu\text{M}$ 로 조사되었다(Table. 1 ~ 13). 염분과 DIP의 상관관계를 살펴보면 DIN보다 비교적 낮은 상관관계를 보여주지만 여전히 유의미한 음의 상관관계(평균 $r^2 = 0.63$)를 보였다(Figure 5). DIP 농도 또한 DIN과 비슷하게 지하수에 의존함을 보여준다.

해저 담지하수의 DSi는 157.7 ~ 566.2 μM (평균: $336.6 \pm 141.5 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $390.3 \pm 57.8 \mu\text{M}$, 여름철에 $392.4 \pm 83.2 \mu\text{M}$, 가을철에 $384.4 \pm 81.2 \mu\text{M}$, 겨울철에 $163.2 \pm 38.2 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 해저 염지하수는 96.9 ~ 268.5 μM (평균: $184.2 \pm 55.0 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $216.8 \pm 85.2 \mu\text{M}$, 여름철에 $207.3 \pm 35.1 \mu\text{M}$, 가을철에 $194.6 \pm 82.6 \mu\text{M}$, 겨울철에 $114.7 \pm 44.3 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 화순만 내 해수는 7.7 ~ 30.6 μM (평균: $15.9 \pm 7.7 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $10.4 \pm 4.4 \mu\text{M}$, 여름철에 $20.1 \pm 11.9 \mu\text{M}$, 가을철에 $19.8 \pm 17.2 \mu\text{M}$, 겨울철에 $11.9 \pm 7.7 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 외 해수는 3.6 ~ 13.0 μM (평균: $7.2 \pm 3.2 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $6.2 \pm 3.3 \mu\text{M}$, 여름철에 $9.9 \pm 3.1 \mu\text{M}$, 가을철에 $4.3 \pm 1.1 \mu\text{M}$, 겨울철에 $9.3 \pm 1.6 \mu\text{M}$ 로 조사되었다(Table. 1 ~ 13). 해저 담지하수와 외 해수의 DSi 농도 차이가 크고

뚜렷한 음의 상관관계(평균 $r^2 = 0.82$)를 보이는 것으로 보아 화순항의 DSI는 해저 담지하수에 의존하고있으며, 보존적인 양상을 보이는 것으로 판단된다(Figure 6).

모든 영양염류의 농도가 해저 담지하수에서 외 해수에 비해 약 7 ~ 555배 높은 농도를 보이고 있으며, 해수와 혼합되어 외 해수로 유출될수록 낮아지는 경향을 보인다. 또한, DSI를 제외한 DIN, DIP 농도가 1 ~ 5월에 가장 높은 농도를 보이고 있다. 화순만 주변에서 화순만에 직접적인 영향을 주는 요소(강, 하천 및 양식장)가 없어 육상기원의 오염물질이 지하수와 혼합되어 연안으로 유출되는 것으로 판단된다.

해저 담지하수의 DOC는 20 ~ 40 μM (평균: $29 \pm 6 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $24 \pm 4 \mu\text{M}$, 여름철에 31 ± 2 가을에 $34 \pm 3 \mu\text{M}$, 겨울철에 $24 \pm 2 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 해저 염지하수는 35 ~ 68 μM (평균: $48 \pm 8 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $46 \pm 11 \mu\text{M}$, 여름철에 $46 \pm 8 \mu\text{M}$, 가을철에 $54 \pm 13 \mu\text{M}$, 겨울철에 $42 \pm 12 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 화순만 내 해수는 63 ~ 76 μM (평균: $68 \pm 5 \mu\text{M}$)로 나타났으며, 봄철에 $65 \pm 4 \mu\text{M}$, 여름철에 $73 \pm 6 \mu\text{M}$, 가을철에 $71 \pm 8 \mu\text{M}$, 겨울철에 $64 \pm 4 \mu\text{M}$ 로 조사되었다. 외 해수는 62 ~ 98 μM (평균: $76 \pm 12 \mu\text{M}$)으로 조사되었으며, 봄철에 $64 \pm 2 \mu\text{M}$, 여름철에 $83 \pm 11 \mu\text{M}$, 가을철에 $85 \pm 10 \mu\text{M}$, 겨울철에 $70 \pm 7 \mu\text{M}$ 로 조사되었다(Table. 1 ~ 13). 염분과 DOC의 상관관계를 살펴보면 높은 양의 상관관계 ($r^2 = 0.69$)를 보이며, 영양염류와 다르게 해저 담지하수에서 낮은 값을 보이고 외 해수로 유출될수록 증가하는 경향을 보인다(Figure 7). 따라서, DOC는 지하수에 의존하기 보다는 지하수 외의 다른 영향으로 증가하거나 일차생산자들의 생물 활동에 의한 DOC 농도 증가로 판단된다.

Table 1. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in January 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	13.9	0.1	948.3	4.1	158.6	24
	2	12.9	0.1	1185.4	4.3	122.5	22
	3	12.9	0.1	1660.0	5.3	155.1	24
	4	12.4	0.1	773.4	4.4	194.6	26
Saline Groundwater	1	7.2	3.1	514.4	5.4	213.9	30
	2	8.3	4.1	n.d.	n.d.	n.d.	33
	3	8.1	5.9	589.4	2.4	110.3	30
	4	8.4	7.3	619.9	1.7	115.8	23
	5	9.7	9.3	864.6	3.4	148.6	28
	6	11.6	10.2	911.0	3.6	157.9	30
	7	9.4	13.5	675.3	2.6	136.0	31
	8	9.6	14.3	523.2	2.8	135.1	35
	9	7.9	17.5	481.5	2.3	89.6	33
	10	9.2	19.4	324.1	1.7	77.4	35
	11	10.4	20.3	246.4	1.4	77.4	48
	12	10.8	21.4	247.3	1.5	87.3	38
	13	10.4	22.2	244.2	3.0	44.7	n.d.
	14	10.2	22.2	201.2	1.9	90.5	30
	15	12.6	25.9	282.1	2.1	96.0	52
	16	11.7	28.7	122.3	1.7	85.7	47
Bay Water	1	14.2	32.4	30.2	0.6	20.2	55
	2	16.1	32.5	27.0	0.5	26.0	60
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	17.3	32.9	4.3	0.2	10.4	73

Table 2. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in February 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	14.5	0.1	1018.7	4.3	138.6	22
	2	15.1	0.1	n.d.	3.7	204.1	19
	3	15.4	0.1	1315.2	3.6	137.6	22
Saline Groundwater	1	12.1	1.2	n.d.	6.7	221.9	23
	2	13.1	7.8	1205.0	6.4	178.7	40
	3	13.1	8.3	600.3	2.5	189.1	46
	4	12.1	9.7	559.5	2.5	155.5	31
	5	12.6	11.4	562.1	1.2	112.0	n.d.
	6	12.4	14.4	281.4	2.0	82.2	n.d.
	7	13.0	15.2	668.7	4.5	82.8	41
	8	12.2	16.5	979.3	4.8	157.8	30
	9	13.6	18.9	468.4	4.1	110.1	43
	10	14.0	19.2	540.5	n.d.	152.8	42
	11	12.1	20.8	523.8	4.1	135.9	49
	12	11.2	24.0	294.1	3.4	100.4	64
	13	11.6	26.4	98.9	1.8	92.1	61
Bay Water	1	15.0	30.8	32.8	0.9	35.1	61
	2	14.9	32.4	24.0	1.3	n.d.	64
	3	15.1	33.4	26.1	0.7	n.d.	60
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61	
Sea Water	1	15.6	33.3	8.4	0.6	11.9	62

Table 3. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in March 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	14.8	0.1	1707.1	4.4	241.7	29
	2	14.7	0.1	1461.4	4.3	321.9	20
Saline Groundwater	1	13.9	0.5	n.d	n.d.	301.5	19
	2	13.9	1.0	n.d	4.0	390.5	22
	3	13.8	1.4	n.d	n.d.	321.2	26
	4	13.6	3.4	924.2	n.d.	291.4	33
	5	13.9	5.3	n.d	1.3	240.2	30
	6	14.2	7.0	1162.0	3.6	285.8	44
	7	13.6	8.4	725.3	3.0	277.0	44
	8	14.3	9.1	920.9	2.9	259.3	55
	9	13.6	10.5	460.2	5.1	277.5	34
	10	15.1	11.1	1396.6	6.2	284.4	29
	11	13.3	12.6	729.3	3.5	270.1	52
	12	14.6	13.6	1152.1	n.d.	215.0	56
	13	14.1	13.7	841.3	3.2	216.7	61
	14	14.1	14.7	563.9	3.5	191.2	55
	15	14.5	16.5	999.3	7.8	213.8	45
	16	14.3	17.0	1342.1	7.7	239.1	44
	17	13.6	19.8	802.8	6.8	110.7	50
	18	15.1	20.4	343.1	4.0	97.3	45
	19	13.3	21.9	399.1	3.8	92.6	55
	20	13.7	23.7	550.9	4.5	120.1	50
	21	13.4	24.9	268.1	4.5	127.1	64
	22	14.1	27.3	377.8	3.6	129.0	63
	23	13.9	28.4	330.6	3.7	146.7	61
	24	13.9	33.2	66.2	4.7	138.5	61
Bay Water	1	14.9	32.8	27.6	n.d.	n.d.	65
	2	14.4	25.3	26.7	n.d.	n.d.	59
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63

	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	15.6	32.7	5.7	0.3	6.7	62

Table 4. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in April 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	15.7	0.1	1475.8	4.5	333.2	19
	2	16.3	0.1	1945.2	4.8	381.9	22
Saline Groundwater	1	17.1	2.5	1045.0	8.3	322.6	29
	2	19.9	3.4	1319.1	6.2	238.3	24
	3	17.8	5.4	1306.7	5.2	263.9	35
	4	17.4	6.3	1616.1	7.3	259.3	31
	5	18.6	8.8	1685.1	5.3	263.4	36
	6	18.3	9.8	851.5	3.5	186.3	37
	7	17.4	12.9	1104.5	7.4	275.0	37
	8	18.9	13.1	1279.6	6.5	248.5	33
	9	19.4	14.3	1136.4	8.5	291.0	37
	10	19.4	15.4	979.1	6.9	303.1	40
	11	18.0	17.7	916.9	6.8	280.2	36
	12	18.0	20.2	658.4	5.0	247.9	48
	13	17.6	21.0	551.1	5.2	240.4	43
	14	19.6	24.0	494.4	5.7	236.1	63
	15	18.1	24.8	416.5	4.2	158.2	51
	16	18.2	25.8	387.0	5.2	230.5	53
	17	21.1	27.0	168.0	3.0	168.3	57
	18	17.9	27.1	287.6	3.3	114.6	53
	19	21.3	29.1	225.0	1.5	59.2	68
	20	20.0	30.5	172.3	1.7	56.5	65
	21	20.0	31.7	76.3	1.5	61.0	66
Bay Water	1	19.4	29.4	36.5	1.3	n.d.	60
	2	19.6	29.0	n.d.	1.0	n.d.	60
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61

Sea Water	1	16.0	32.7	5.9	0.7	5.1	65
-----------	---	------	------	-----	-----	-----	----

Table 5. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in May 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	17.6	0.1	2723.7	7.5	653.9	28
	2	17.2	0.1	2381.6	5.2	477.1	26
	3	17.2	0.1	2322.4	4.9	505.6	23
	4	17.2	0.1	2513.0	5.8	490.3	28
Saline Groundwater	1	20.2	4.9	1591.3	7.6	289.8	44
	2	22.1	5.1	2455.7	6.2	397.6	46
	3	20.5	6.5	1241.6	6.1	315.1	49
	4	21.3	10.8	533.1	2.0	253.8	39
	5	25.9	11.2	1751.6	2.9	204.6	39
	6	22.1	15.6	687.1	2.2	300.4	37
	7	22.2	16.3	1578.3	3.9	335.2	39
	8	22.3	17.2	1269.1	3.2	281.7	43
	9	20.5	21.6	450.3	2.5	162.7	41
	10	21.2	23.0	15.7	2.4	122.4	46
	11	21.5	23.6	558.4	2.7	151.0	51
	12	21.0	24.1	311.5	3.1	237.6	49
	13	21.0	25.0	590.0	3.6	169.2	57
	14	21.6	26.8	422.3	2.8	139.3	54
	15	21.7	27.2	446.0	2.7	138.0	53
	16	20.8	30.2	86.5	1.8	61.3	57
	17	20.7	31.0	153.1	2.5	139.9	53
Bay Water	1	20	30.9	53.1	0.8	30.7	68
	2	19.5	31.5	n.d.	0.9	32.9	70
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	17.3	33.6	10.7	0.4	9.9	65

Table 6. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in June 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	18	0.1	288.0	3.5	358.1	27
	2	18.1	0.1	287.5	3.6	379.1	27
	3	18.4	0.1	288.7	3.6	278.4	28
Saline Groundwater	1	21.0	3.2	295.9	10.3	303.7	30
	2	21.9	6.8	269.6	5.6	323.3	36
	3	21.6	7.7	288.0	8.5	309.2	36
	4	22.2	8.3	282.6	6.0	325.3	39
	5	22.5	12.0	277.7	7.6	351.1	40
	6	22.6	12.6	278.1	3.9	282.3	43
	7	22.2	13.7	288.8	5.9	308.5	31
	8	23.0	15.6	273.4	5.6	270.8	52
	9	23.3	16.6	257.7	3.3	264.6	41
	10	23.3	18.8	227.6	2.7	280.8	45
	11	23.5	19.2	222.2	3.9	275.7	47
	12	23.6	20.5	234.4	3.8	270.1	48
	13	24.0	22.6	193.8	2.3	170.1	45
	14	24.1	26.0	85.3	2.5	224.9	59
	15	24.5	26.6	97.7	2.7	216.2	53
	16	24.6	27.8	72.1	3.6	209.0	62
	17	24.6	28.1	69.2	3.0	179.5	64
Bay Water	1	23.6	31.0	n.d.	0.1	17.5	78
	2	23.5	31.1	12.7	0.2	13.6	77
	3	23.4	31.2	4.0	0.1	11.1	80
	4	23.2	31.2	2.3	0.0	n.d.	77
	5	23.4	31.2	5.7	0.2	12.8	76
	6	23.6	31.3	2.3	0.1	n.d.	77
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61

Sea Water	1	20.3	32.4	3.2	0.1	6.8	87
-----------	---	------	------	-----	-----	-----	----

Table 7. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in July 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	16.5	0.1	304.7	4.7	479.7	36
	2	16.8	0.1	313.2	6.3	662.7	32
	3	17.4	0.1	303.9	4.4	556.3	34
Saline Groundwater	1	20.7	3.7	298.6	5.9	247.5	41
	2	21.4	5.6	298.0	2.7	188.9	32
	3	23.1	8.6	293.3	3.9	208.8	44
	4	21.1	9.3	305.7	5.9	317.8	43
	5	23.9	10.9	288.9	3.7	210.6	48
	6	22.2	11.2	288.6	3.2	212.3	45
	7	24.1	12.1	293.7	3.5	220.0	50
	8	21.6	13.0	279.1	3.0	186.8	45
	9	23.0	14.2	283.4	3.0	177.8	49
	10	23.2	15.1	290.2	3.3	206.0	49
	11	22.9	16.2	278.9	2.7	159.7	49
	12	22.9	17.2	266.7	3.1	191.2	54
	13	23.4	18.4	280.5	3.0	209.3	52
	14	22.3	19.3	261.4	3.0	190.5	50
	15	22.2	20.5	274.7	3.9	241.5	58
	16	22.2	21.8	216.6	3.1	193.5	67
	17	22.9	22.8	203.9	2.8	157.2	56
	18	22.4	23.1	155.5	2.8	160.0	60
	19	22.5	24.9	193.8	3.7	196.4	62
	20	22.0	25.0	167.7	3.1	177.6	66
Bay Water	1	24	29.5	n.d.	0.4	24.1	74
	2	23.8	30.1	n.d.	0.4	22.4	72
	3	23.8	30.1	n.d.	0.4	n.d.	73
	4	23.8	30.3	n.d.	0.4	34.1	70
	5	23.6	30.9	20.5	0.2	35.2	73
	6	23.8	31.0	28.4	0.3	24.1	72
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63

	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	21.7	32.0	7.3	0.2	9.9	71

Table 8. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in August 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	17.1	0.1	304.5	2.5	352.9	29
	2	17.1	0.1	302.1	2.4	201.7	25
	3	17.3	0.1	303.4	2.4	371.0	33
	4	17.3	0.1	302.8	2.4	164.5	35
Saline Groundwater	1	22.0	5.7	64.2	2.1	168.1	29
	2	23.3	6.4	27.2	1.9	164.7	35
	3	22.9	8.3	27.9	1.5	130.5	46
	4	22.1	9.0	59.6	1.1	128.8	33
	5	22.3	10.6	30.8	0.9	127.2	41
	6	24.1	11.9	51.7	2.1	182.6	38
	7	23.4	12.9	48.9	0.8	149.1	44
	8	23.6	13.2	68.7	0.7	139.6	n.d.
	9	22.7	14.7	43.2	1.4	156.1	48
	10	23.2	15.6	76.6	1.4	156.9	42
	11	23.7	16.9	72.4	1.6	142.6	44
	12	23.3	17.2	69.9	1.5	166.1	46
	13	23.6	18.9	130.0	1.4	156.8	46
	14	23.8	19.6	138.1	1.6	141.0	43
Bay Water	1	24.5	25.0	n.d.	0.9	50.8	75
	2	24.7	26.4	n.d.	0.7	37.2	76
	3	24.4	24.7	n.d.	0.3	38.2	75
	4	25.5	28.3	12.3	0.3	25.4	80
	5	25.2	28.3	14.0	0.3	21.7	78
	6	24.8	25.5	n.d.	0.5	59.6	76
	7	24.6	25.7	n.d.	0.6	56.1	78
	8	24.6	28.4	40.3	0.4	30.5	79
	9	24.7	28.0	40.0	0.4	39.1	80
	10	24.6	27.6	n.d.	0.5	37.1	79
	11	24.3	24.9	n.d.	0.7	70.6	79
	12	26.1	28.8	7.5	0.2	10.4	84

	13	25.8	29.5	8.9	0.2	11.9	85
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	26.9	30.5	0.4	0.2	13.0	91

Table 9. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in 10 September 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	18.6	0.1	309.7	2.4	387.1	32
	2	18.9	0.1	308.5	2.4	459.0	31
	3	19.1	0.1	308.8	2.5	395.5	32
	4	18.4	0.1	308.5	2.5	433.1	36
Saline Groundwater	1	23.6	6.9	197.4	0.6	140.0	47
	2	24.2	7.3	265.9	1.5	226.1	49
	3	24.6	8.5	275.4	1.2	110.8	57
	4	25.3	10.8	214.1	1.3	142.7	46
	5	23.8	11.5	273.2	1.7	317.1	67
	6	24.9	12.1	181.7	0.9	100.8	54
	7	26.2	12.3	269.0	1.5	293.5	68
	8	26.1	12.5	84.9	0.8	116.9	49
	9	25.3	13.8	208.0	1.5	146.0	54
	10	25.2	14.1	169.2	0.9	154.5	49
	11	25.3	15.7	83.4	0.8	153.4	48
	12	25.8	16.2	108.9	1.1	136.1	42
	13	26.4	18.2	67.7	0.8	113.5	45
	14	25.4	19.5	128.2	1.2	146.9	51
	15	25.5	20.9	95.7	1.0	95.1	50
Bay Water	1	26.9	23.4	n.d.	0.9	66.1	73
	2	27.9	23.9	n.d.	0.7	78.4	81
	3	27.8	25.0	n.d.	0.7	60.7	84
	4	26.8	27.1	44.3	0.3	28.1	78
	5	28.5	28.0	21.6	0.3	17.5	93
	6	28.1	28.0	14.6	0.2	10.6	87
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	24.6	31.1	0.6	0.1	4.0	85

Table 10. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in 24 September 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	16.4	0.1	221.2	4.8	337.3	47
	2	17.1	0.1	519.5	2.2	198.0	35
	3	17.3	0.1	413.5	2.0	162.3	36
	4	17.7	0.9	519.1	2.3	228.6	41
Saline Groundwater	1	20.0	2.8	182.3	1.6	199.1	50
	2	19.3	3.4	128.2	2.1	176.5	68
	3	22.4	4.7	196.6	1.2	234.6	61
	4	20.0	5.3	141.8	1.3	186.5	80
	5	20.5	6.4	149.7	1.0	184.8	54
	6	20.9	10.9	95.4	3.0	116.4	64
	7	21.6	12.3	94.6	1.0	136.2	73
	8	20.6	13.9	145.9	1.2	154.7	87
	9	24.6	14.6	129.2	1.4	142.2	73
	10	22.8	17.1	n.d.	1.2	131.3	65
	11	21.2	18.7	109.4	0.9	152.3	71
	12	24.6	19.7	105.9	1.9	178.9	60
	13	24.9	21.1	123.7	1.3	128.4	58
	14	22.8	22.3	73.3	1.7	141.8	75
	15	20.5	23.8	63.5	1.0	157.7	70
	16	21.4	24.0	82.8	1.1	109.6	67
	17	23.6	25.9	79.3	1.2	111.9	65
	18	25.2	28.3	25.5	0.3	27.4	76
	19	25.9	29.4	20.3	0.3	31.0	81
Bay Water	1	25.6	29.8	12.0	0.5	15.2	85
	2	25.4	29.5	18.9	0.6	18.3	84
	3	24.8	29.5	20.3	0.6	15.6	75
	4	24.4	27.1	77.7	0.5	48.9	75
	5	24.2	27.3	86.5	0.6	67.0	81
	6	25.1	29.1	36.5	0.4	32.6	77
	7	24.8	30.6	30.1	0.2	16.0	85

	8	24.7	30.6	20.8	0.2	11.6	91
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	24.6	31.1	0.6	0.1	4.0	98

Table 11. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in October 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	17	0.1	321.8	4.2	667.4	36
	2	17	0.1	302.4	2.4	368.0	37
Saline Groundwater	1	16.8	0.5	300.4	4.6	324.5	45
	2	18.7	1.5	315.0	1.4	473.3	11
	3	19.5	3.5	318.4	1.5	462.8	18
	4	19.5	4.5	307.2	0.7	353.8	18
	5	19.3	5.5	290.4	3.9	257.8	72
	6	19.5	9.3	293.8	0.9	377.6	31
	7	18.9	10.4	200.9	0.8	276.8	27
	8	20.7	11.2	236.3	1.5	202.9	55
	9	20.8	13.3	152.7	1.8	234.8	67
	10	20.8	14.4	194.7	2.2	231.7	68
	11	21.0	15.2	283.2	3.0	305.2	80
	12	21.2	16.8	222.5	1.9	242.6	80
	13	21.6	17.7	234.0	2.5	270.5	72
	14	21.9	18.4	85.3	1.7	182.3	53
	15	21.4	19.4	129.8	1.4	175.0	61
	16	21.9	20.3	176.0	1.7	205.5	57
	17	22.2	21.5	216.1	3.3	301.8	83
	18	21.9	23.3	145.2	1.7	175.1	70
	19	22.5	24.9	130.9	2.0	197.3	61
	20	22.6	25.8	119.6	1.7	184.3	66
	21	22.5	27.2	66.1	1.2	140.1	63
	22	22.9	29.7	61.7	2.2	175.9	59
Bay Water	1	25.0	30.9	14.4	0.4	41.3	68
	2	25.1	31.3	7.2	0.4	16.6	70
	3	25.0	30.2	18.1	0.6	10.9	68
	4	23.7	26.9	n.d.	0.9	12.1	60
	5	23.7	26.7	n.d.	0.8	75.4	62
	6	24.3	30.1	n.d.	0.6	28.8	69

	7	25.0	31.2	14.5	0.3	11.5	74
	8	24.4	31.5	25.1	0.5	10.7	76
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	24.6	32.1	0.3	0.2	3.6	80

Table 12 Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in November 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	16.1	0.1	305.2	3.3	366.8	29
	2	16.1	0.1	308.3	3.1	372.5	24
Saline Groundwater	1	14.4	3.8	270.5	2.1	290.3	41
	2	16.8	5.6	283.8	2.6	378.6	18
	3	15.7	6.2	274.1	2.7	439.2	65
	4	16.4	7.5	277.8	2.4	372.0	25
	5	16.6	8.3	174.6	1.5	402.2	53
	6	16.6	9.0	283.2	3.1	355.0	25
	7	14.6	10.9	188.4	2.1	163.9	48
	8	15.7	11.2	226.1	3.1	225.1	55
	9	14.4	11.9	197.4	2.7	198.3	49
	10	15.9	12.9	279.6	2.1	172.0	27
	11	15.9	15.0	124.4	1.9	135.2	41
	12	15.8	16.9	243.4	1.8	144.1	33
	13	16.1	17.0	88.9	1.4	111.1	48
	14	15.6	17.5	238.2	3.3	222.7	42
	15	17.2	18.1	217.5	1.3	117.7	35
	16	16.5	23.5	139.2	1.2	103.0	40
	17	17.1	28.4	65.5	1.1	87.7	52
	18	17.1	30.1	43.6	1.3	94.9	50
	19	17.1	31.3	26.1	1.0	76.2	57
Bay Water	1	18.9	31.5	n.d.	0.4	n.d.	71
	2	17.9	22.1	n.d.	1.1	n.d.	55
	3	18.5	23.2	n.d.	0.9	n.d.	52
	4	19.2	30.9	n.d.	0.4	n.d.	62
	5	20.3	33.1	n.d.	0.2	10.6	68
	6	21	33.4	n.d.	0.2	10.0	63
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63
	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68

	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	21.7	33.0	0.9	0.5	7.2	75

Table 13. Temperature, salinity, and concentrations of inorganic nutrients, and DOC in fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun, Jeju Island in December 2019 (n.d. = not detected).

Sample No.	Temperature [°C]	Salinity	DIN [μM]	DIP [μM]	DSi [μM]	DOC [μM]	
Fresh Groundwater	1	14.2	0.1	304.7	2.3	122.2	26
	2	14.5	0.1	304.8	2.3	178.0	28
	3	15	0.1	305.8	2.3	215.5	28
Saline Groundwater	1	11.6	11.4	130.4	2.0	65.7	79
	2	12.1	9.8	146.6	2.2	143.7	78
	3	11.4	8.0	171.9	1.3	111.8	56
	4	11.8	12.9	158.0	2.6	58.6	48
	5	12.2	13.1	172.0	2.1	140.1	34
	6	12.0	15.0	158.5	2.1	102.7	34
	7	11.7	17.5	145.1	1.8	99.1	42
	8	11.9	19.5	113.5	1.6	75.2	33
	9	11.8	18.4	129.8	1.4	70.3	41
	10	11.5	20.6	120.1	1.1	67.3	42
	11	11.7	15.4	181.3	1.0	66.1	36
	12	11.7	27.0	54.9	0.8	54.5	49
	13	11.6	25.6	56.8	0.9	55.7	45
	14	11.4	27.1	45.7	0.9	57.7	53
	15	11.6	23.9	101.1	1.0	60.0	54
	16	12.0	16.2	167.3	0.8	49.0	33
	17	10.9	22.8	72.0	0.6	49.1	40
	18	12.1	4.5	156.6	1.5	171.0	46
	19	12.5	4.0	228.7	2.2	161.3	50
	20	13.0	11.0	159.4	2.7	99.6	60
	21	12.0	5.0	204.4	1.3	199.1	43
	22	12.4	7.0	152.9	1.6	174.3	40
Bay Water	1	16.1	32.7	7.4	0.4	15.7	67
	2	15.8	33.6	4.5	0.3	10.1	65
	3	15.1	33.7	4.6	0.2	9.9	67
	4	15.6	33.4	4.5	0.2	9.8	68
	B1	20.8	33.7	2.4	0.5	8.3	63

	B2	21.6	33.9	1.6	0.4	7.6	70
	B3	21.6	33.9	1.4	0.5	7.7	68
	B4	22.7	34.0	0.1	0.4	7.3	61
Sea Water	1	19.1	33.0	1.9	0.2	8.6	75

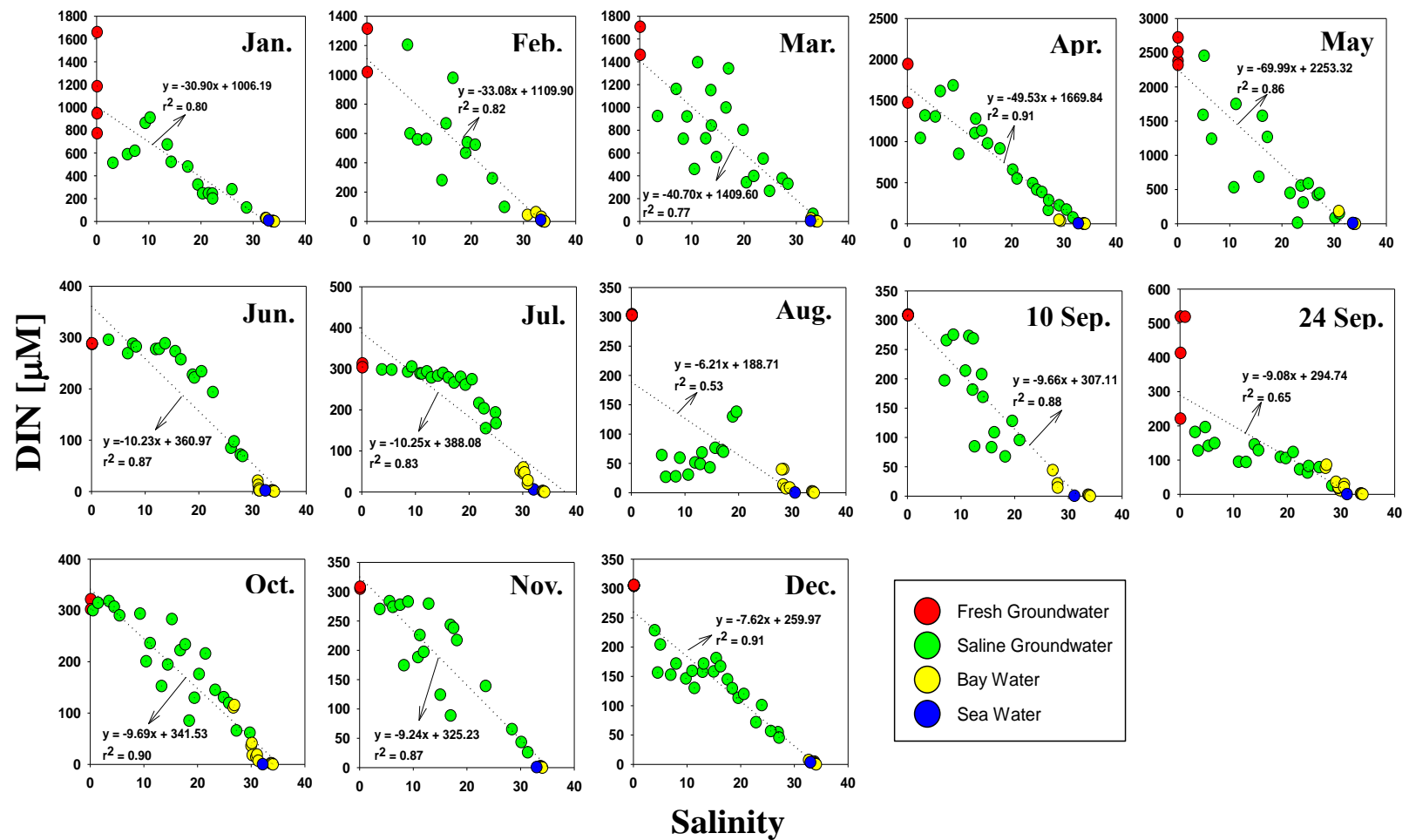


Figure 4 Correlations between salinity and DIN in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DIN.

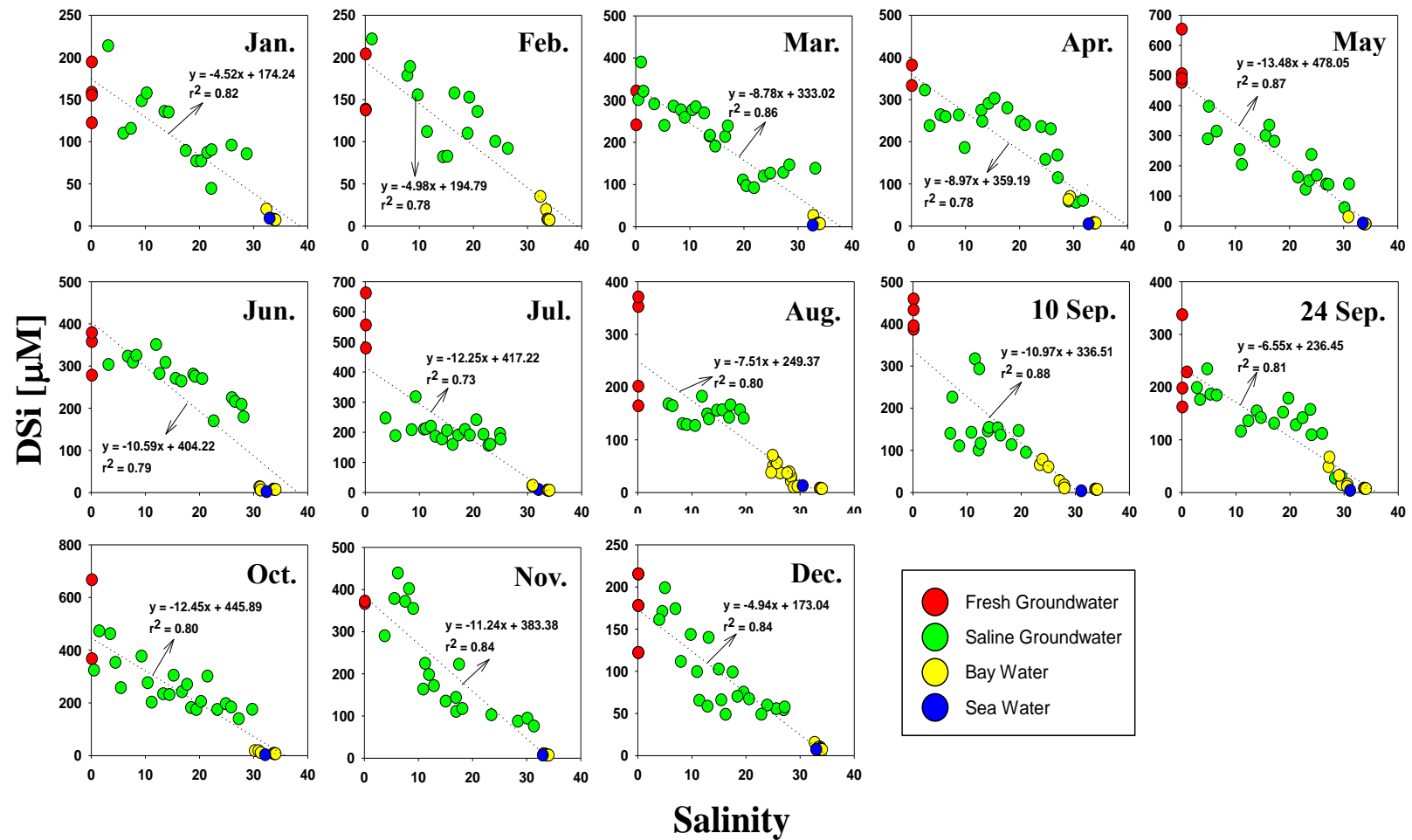


Figure 5 Correlations between salinity and DSi in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DSi.

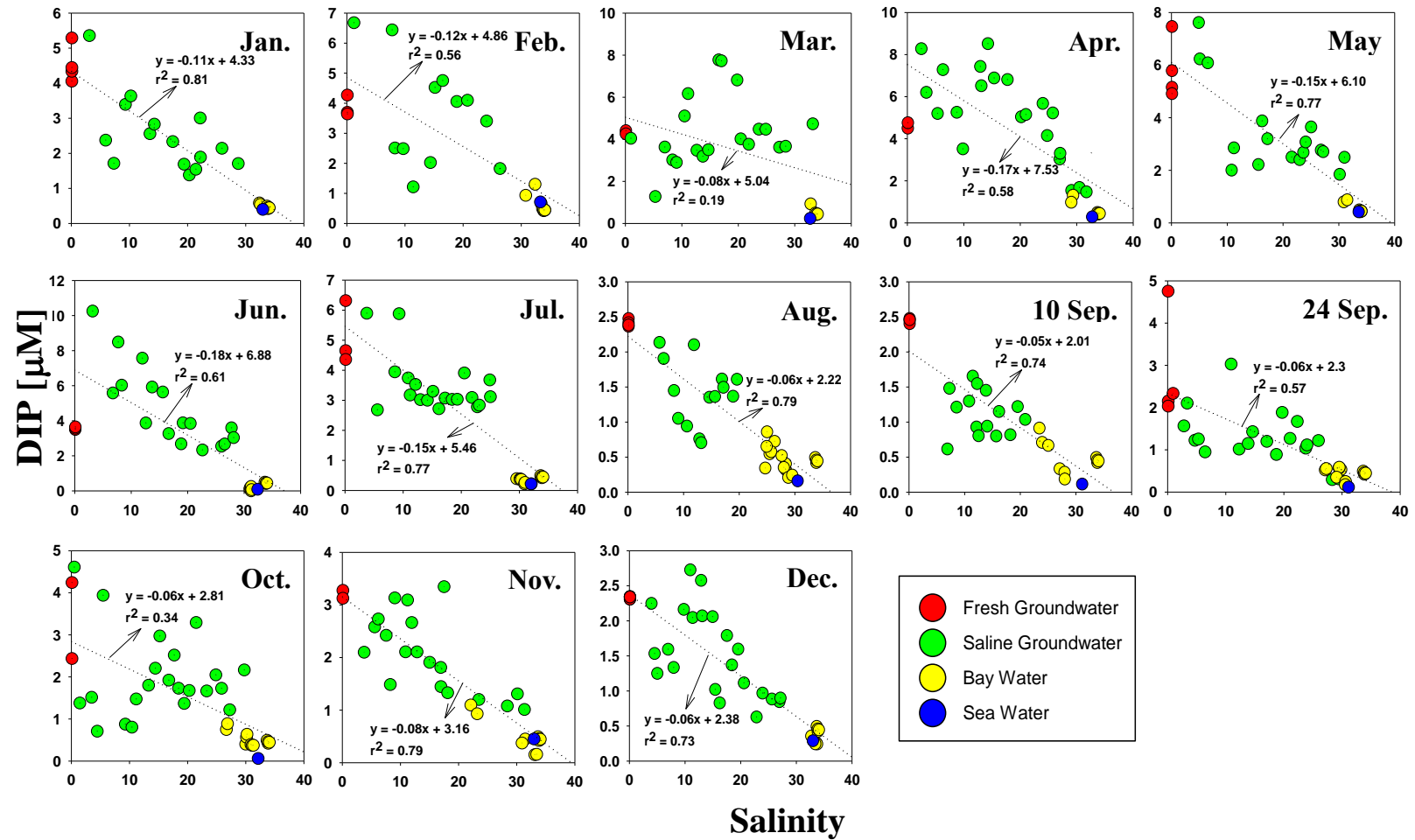


Figure 6 Correlations between salinity and DIP in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DIP.

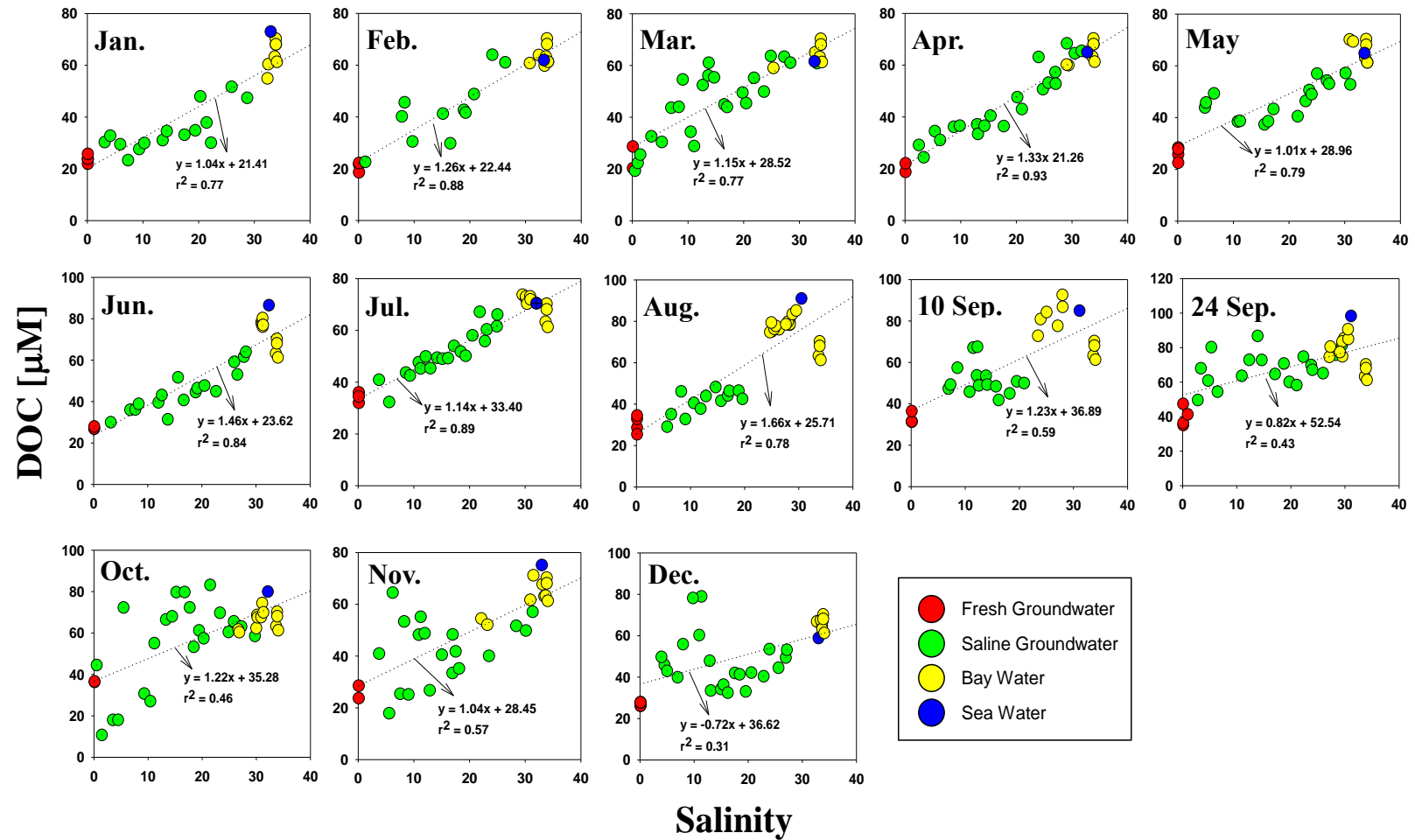


Figure 7 Correlations between salinity and DOC in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. The dotted lines indicate the correlation slope between salinity and DOC.

3.2 담지하수 유출량 산정

3.2.1. 체류시간 산정

지하수 유출량을 산정하기 위해 DSi 물질 수지모델 식을 사용하며, 외 해수와 혼합으로 인하여 농도가 낮아지는 대량의 DSi는 연구 해역의 체류시간에 의해 크게 좌우가 된다. 따라서, 본 연구에서의 유출량을 산정하기 위해 조석 프리즘(Tidal Prism)을 사용하여 체류시간을 계산하였다(Sanford et al. 1992). 조석 프리즘 모델은 조석에 의하여 해안 내에 유·출입하는 해수의 총량을 뜻하며, 조수간만의 차를 포함하여 낙조 및 창조 시의 해수의 비율을 함께 고려하였으며, 첫번째로 바람의 영향은 무시하였고, 두번째로 지하수와 해수의 혼합이 잘되며, 세번째로 화순만에서 조수간만의 차에 의하여 해수 순환에 큰 영향을 준다고 가정을 하여 다음의 식으로 산정하였다.

$$T_f = VT / (1 - b)P \quad (1)$$

$$P = \int_H^0 Adz \quad (2)$$

계산식 (1)에서 T_f 는 물의 체류시간(residence time), V 는 화순항의 체적(m^3), T 는 조석의 주기(d), b 는 Return flow factor, P 는 조석 프리즘(tidal prism, m^3), H 는 조수간만의 차(m), A 는 화순항의 면적(m^2), z 는 평균 수심(m)을 나타낸다.

화순항의 체적은 평균 수심에 조사일의 고조 및 저조를 가감하여 수심을 산정하였으며, 산정된 수심과 화순항의 면적을 곱하여 체적을 계산하였다. 조석의 주기는 반일 주조인 평균 12시간 25분(0.52 d)을 사용하였다. Chang et al. (2000) 에 의하면 제주 주변 해류의 유속이 매우 빠르기 때문에($10 \sim 15 \text{ cm}^{-1}$) Return flow factor가 만 내에 영향이 미비할 것으로 판단되어 무시하였다(Kim et al. 2011). 식(2)에서 H는 조사 당시 국립해양조사원 조석 예보 자료를 참고하여 조차를 사용하였고, A는 $1.9 \times 10^7 \text{ m}^2$ 로 조석프리즘을 계산 할 때 사용하였다.

화순만에서의 체류시간은 조수간만의 차가 가장 큰 2월 (조차: 2.87m)에 체류시간이 1.4일로 가장 짧았으며, 조수간만의 차가 가장 작은 9월24일 (조차: 0.89m)에 4.0일로 가장 길어(Table 14), 조사 시기 별 체류시간은 조수간만의 차에 의하여 큰 영향을 받았다.

Value (unit)	Residence Time												
	January	February	March	April	May	June	July	August	10 September	24 September	October	November	December
$A_{\text{bott}}(\text{m}^2)$	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7	1.9×10^7
$V_s(\text{m}^3)$	1.3×10^8	1.5×10^8	1.5×10^8	1.5×10^8	1.3×10^8	1.3×10^8	1.3×10^8	1.4×10^8	1.3×10^8	1.3×10^8	1.4×10^8	1.5×10^8	1.5×10^8
T (day)	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
H (m)	1.08	2.87	2.77	2.58	1.15	0.91	0.96	1.65	1.03	0.89	1.44	2.43	2.72
Z (m)	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
P (m^3)	2.1×10^7	5.4×10^7	5.3×10^7	4.9×10^7	2.2×10^7	1.7×10^7	1.8×10^7	3.1×10^7	2.0×10^7	1.7×10^7	2.7×10^7	4.6×10^7	5.2×10^7
$T_f(\text{day})$	2.6	1.4	1.5	1.6	1.9	3.6	2.6	1.8	3.5	4.0	2.6	1.6	1.5

Table. 14 Values for each notation in residence time in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019. A_{bott} is the bottom area of the bay, V_s is the volume of bay water, T is period of tide, H is the range of tide, Z is the average depth of the bay, P is tidal prism, and T_f is residence time of bay.

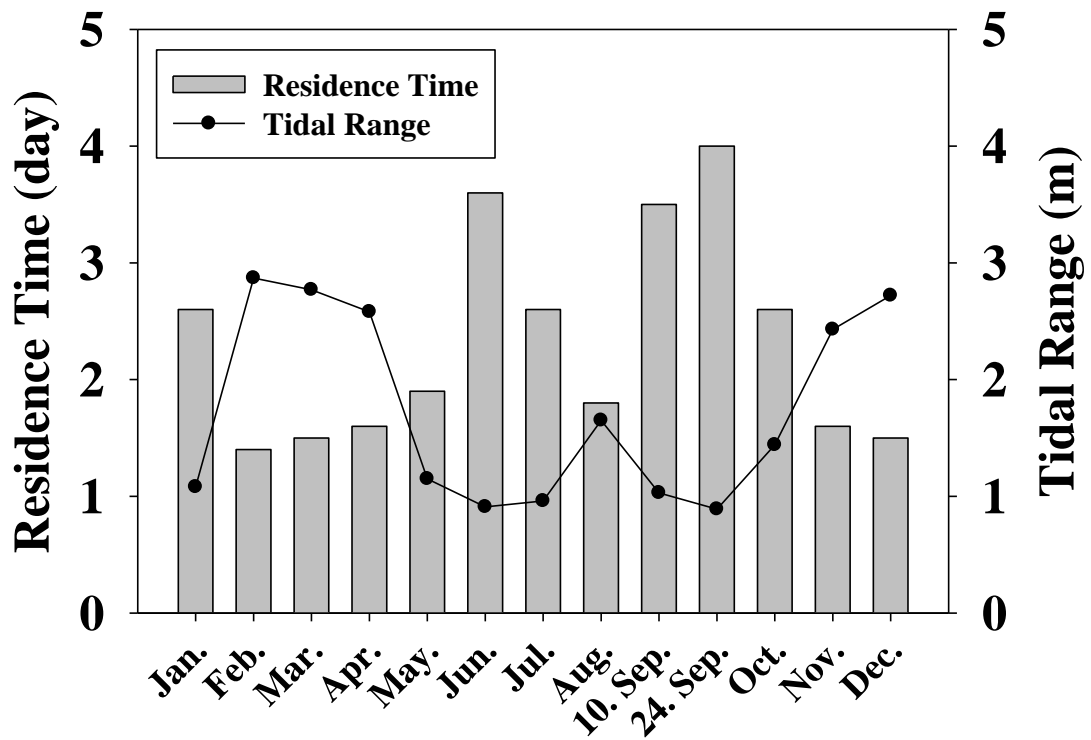


Figure 8 The bar graph shows the residence time, and the straight graph shows the tidal range.

3.2.2. DSi 물질 수지 모델을 이용한 담지하수 유출량 산정

일반적으로 해양으로 유출되는 SGD를 산정하는 방법은 크게 3가지가 있다. 첫째로 물-염분 수지 모델(water or salt balance), 수리 지질학 모델(Darcy's Law)과 같이 모델링을 사용한 방법(Zektzer et al. 1973; Giblin and Gaines. 1990; Oberdorfer et al. 1990), 둘째로 침투계(seepage meter)를 이용하여 직접적으로 알아내는 방법(Cable et al. 1997; Kim et al. 2003), 셋째로 ^{226}Ra , ^{224}Rn , CH_4 , DSi 등과 같이 지하수 자체에서 풍부한 원소를 추적자로 이용한 방법이 있다(Corbett et al. 1999; Kelly and Moran. 2002; G. Kim et al. 2005; Hwang et al. 2005b). 지하수 내 풍부한 원소 추적자를 사용한 방법은 대규모 시간 및 공간규모에서 SGD를 측정하는데 매우 효과적이므로 추적자를 이용한 방법을 사용하였으며, 해저 담지하수와 해수 사이 DSi농도 차가 크고 보존적인 거동을 보일 때, DSi 물질 수지 모델을 사용하여 유출량을 산정하였다(Hwang et al. 2005b). 화순만 해저 담지하수 중 DSi의 농도는 해수에 비해 약 18 ~ 187배 높았으며, 염분과 매우 좋은 음의 상관관계(평균 $r^2 = 0.82$)를 보였으므로, 이는 DSi가 해저 담지하수에 보존적인 것으로 판단되어 DSi의 물질 수지 모델을 변형하여 SFGD를 산정하였다.

화순항 주변에는 강 또는 하천 등 지하수 이외에 공급원이 없고, DSi의 특성상 해양과 대기의 교환 작용을 무시하여 DSi물질 수지 모델을 정상상태로 가정할 때 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$F_{Diff} + F_{FGD} - F_{Mix} = 0 \quad (3)$$

$$F_{Diff}^{DSi} + C_{FGW}^{DSi} \times A_{Bott} \times \psi_{FGD} - C_{EX}^{DSi} \times V_S \times \lambda_{Mix} = 0 \quad (4)$$

식 (3)은 공급항과 제거항으로 나눌 수 있으며, 공급과 관련된 항은 만 내 퇴적물로부터 DSi의 확산(F_{Diff})항, SFGD(F_{FGD}), 제거와 관련된 항으로는 외 해수와 외 해수의 혼합으로 인한 제거(F_{Mix})항이 있다. 식 (3)을 자세히 나타낸 식 (4)를 살펴보면, SFGD는 해저 담지하수의 DSi농도(C_{FGW}^{DSi})에 화순만의 면적(A_{Bott})과 SFGD(ψ_{FGD})의 곱, 제거항은 상대적으로 농도가 높은 만 내 해수가 외 해수와 혼합되거나, 낙조 시 유출되어 제거가 되어 농도의 차 값을 고려하여 계산하였다. DSi의 특성상 규소는 지각 물질로 대기와 교환은 무시하여 계산하였다. DSi의 만내 해수의 농도와 외 해수 농도의 차 값(C_{EX}^{DSi}), 화순만의 체적(V_S), 체류시간의 역수(λ_{Mix})의 곱으로 산정하였다. SFGD를 제외한 모든 항의 값을 유추할 수 있어 연립방정식을 사용하여 산정하였다.

ψ_{Diff} 는 Hwang et al. (2005b)이 퇴적물 확산 실험을 통하여 산정한 DSi의 확산속도($5.0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)를 이용하였으며, 확산속도와 화순만의 면적(A_{Bott})을 곱하여 산정하였다($\psi_{Diff} = \psi_{FGD} \times A_{Bott}$). 해저 담지하수의 DSi의 농도는 분산이 심하고, 상대적인 기여가 확실하지 않기 때문에 C_{FGW}^{DSi} 의 농도는 외삽하여 추정하였다.

DSi 물질 수지 모델을 이용하여 SFGD를 산정한 결과 8월 조사일에 가장 많은 유출량($5.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$)을 보였으며, 6월 조사일에 가장 낮은($2.8 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) 유출량을 보였다(Table 15). 기상청에서 조사일 기준으로 3일전부터 강수를 확인 결과(Figure 8), 높은 유출량을 보이는 8~10월에 비교적 높은 강수를 기록하였다. 특히, 9월 두 번의 조사는 태풍이 지나간 직후 조사를 하여 태풍에 의한 많은

강수가 내린 것으로 보인다. 본 지역은 해저 담지하수 유출은 평상시 체류시간에 의한 일상적인 SFGD를 보이다가, 강수 및 태풍과 같은 이벤트적인 자연현상에 의해 SFGD가 급격하게 증가하고, 다시 일상적인 변동 양상으로 돌아오는 특징을 보인다. 따라서, 본 연구결과를 통해 SFGD는 강수의 영향을 직접적으로 받으며, 태풍과 같은 이벤트적인 요소로 인하여 SFGD의 급격한 증가를 확인할 수 있었다.

Value (unit)	DSi-mass balance model												
	January	February	March	April	May	June	July	August	10. September	24. September	October	November	December
F_{Diff} (mmol d ⁻¹)	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7	9.5×10^7
C_{FGW} (mmol m ⁻³)	174	194	333	359	478	404	417	249	337	236	446	383	173
C_{EX} (mmol m ⁻³)	2.5	1.3	1.1	2.6	5.8	4.0	9.1	17.5	25.3	17.4	16.3	1.4	1.0
λ_{mix} (d ⁻¹)	0.38	0.71	0.67	0.63	0.52	0.28	0.38	0.56	0.29	0.25	0.38	0.63	0.67
$SFGD$ (m ³ d ⁻¹)	5.2×10^5	6.3×10^5	8.3×10^5	3.6×10^5	5.3×10^5	2.8×10^4	6.1×10^5	5.0×10^6	2.6×10^6	2.0×10^6	1.7×10^6	3.2×10^5	2.7×10^5

Table. 15 Values for each notation in the DSi mass balance model measured in Hwasun Bay, Jeju Island in 2019.

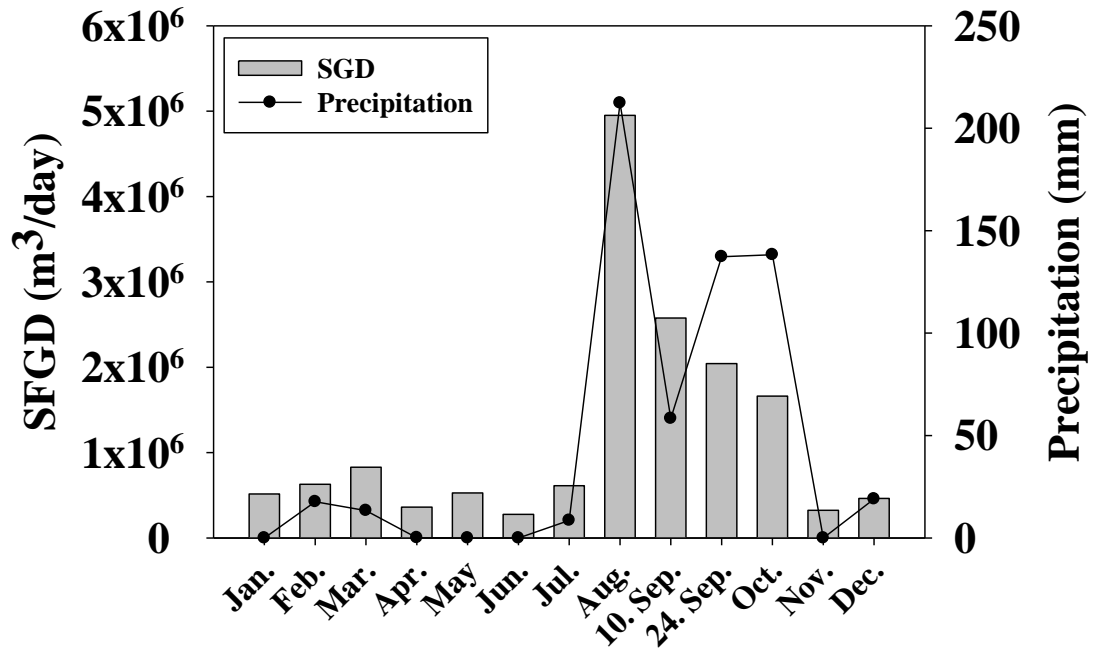


Figure 9 The monthly precipitation 3 days before and submarine fresh groundwater discharge in the Hwasun Bay, Jeju Island in 2019.

3.3 담지하수 유출을 통한 영양염류 및 용존유기탄소 거동

일반적으로 대양에서의 영양염류 공급은 질소고정, 대기 침적 등의 영향을 받는다(Karl et al. 1997; Baker et al. 2003). 하지만, 연안환경에서는 강, 지하수, 양식장 배출수 등의 영향을 받는데(Rabouille et al. 2001; Neofitou and Klaoudatos 2008), 본 연구 지역 주변에 해저 담지하수를 제외한 다른 영향이 없기 때문에 해저 담지하수 유출이 주요 공급원이라 판단된다. 따라서, SFGD에 따른 영양염류의 플럭스를 정량화 하였다. SFGD 해저 담지하수 중 영양염의 평균농도를 곱하여 해저 담지하수를 통해 화순만으로 공급되는 영양염 플럭스를 산정하였다(Figure 9). DSi의 플럭스는 모든 시기에서 SFGD와 비례한 경향을 보였다. 허나, DIN 및 DIP의 플럭스는 다른 DSi와 다르게 1 ~ 5월에 다른 월보다 비교적 적은 유출량에도 높은 플럭스를 보여주었다. 본 지역은 9월 ~ 12월에 활발한 농업 활동 등으로 인하여 지하수 이용량이 급증하며, 계절적인 특성으로 인한 지역 전체적으로 지하수위가 낮아진다(Song et al. 2013). 이에 따라, 낮아진 지하 수위로 인하여 9월 ~ 12월에 퇴적층에 농축된 영양염류가 1월부터 비교적 높아진 지하 수위로 인하여 높은 농도의 DIN 및 DIP가 해저 담지하수를 통한 유출로 판단된다. 따라서, DSi는 대부분 지각 물질로 지하 수위에 관계없이 농도가 일정하다고 판단이 되며, DIN과 DIP의 농도 증가는 낮은 지하수위 및 계절적으로 비교적 낮은 강수량으로 인한 영향으로 판단된다.

지하수 중 용존유기탄소의 농도는 영양염류의 농도와 달리 외 해로 갈수록 높은 농도를 보이고 있으며, Kim et al. (2013), Kim and Kim. (2017)의 연구결과에

의하면 제주도 지하수 중 용존유기탄소의 농도가 연안에 비해 매우 낮다고 보고하였다(Figure 11). 본 연구에서 해저 담지하수의 DOC 농도(avg: 28 μM)와 해수를 비교해보면 타 지역 연안인 Tempa Bay(175 ~ 516 μM)와 Gulf of Mexico($>1237 \pm 41 \mu\text{M}$)보다 매우 낮은 농도를 보였다(Chen et al. 2007; Santos et al. 2009). 또한 전 세계적으로 큰 강들과 비교하였을 때 (Amazone River: 375 μM , Yukon River: 700 μM , Mississippi River: 733 μM , Changjiang River: 1,033 μM) 화순만 지하수 중 DOC 농도는 매우 낮은 농도를 보여준다(Meybeck. 1982; Gao et al. 2002). 허나, 태평양 심층수 (avg: 36 μM) 및 대서양 심층수 (avg: 44 μM)와 비슷한 농도분포를 보여주며(Bauer et al. 1992), 지하수의 낮은 농도의 DOC는 연안 환경에서 높은 농도의 해수와 혼합되어 농도를 희석시킬 수 있다(Beck et al. 2007). 따라서, 연구지역에서의 DOC는 지하수에 의존하기 보다는 연안 해수 중 일차생산자의 생물 활동의 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, 해저 담지하수의 매우 낮은 농도가 연안 환경에 희석 영향을 미칠 것으로 판단되어 용존유기물질의 거동은 매우 중요한 것으로 보인다.

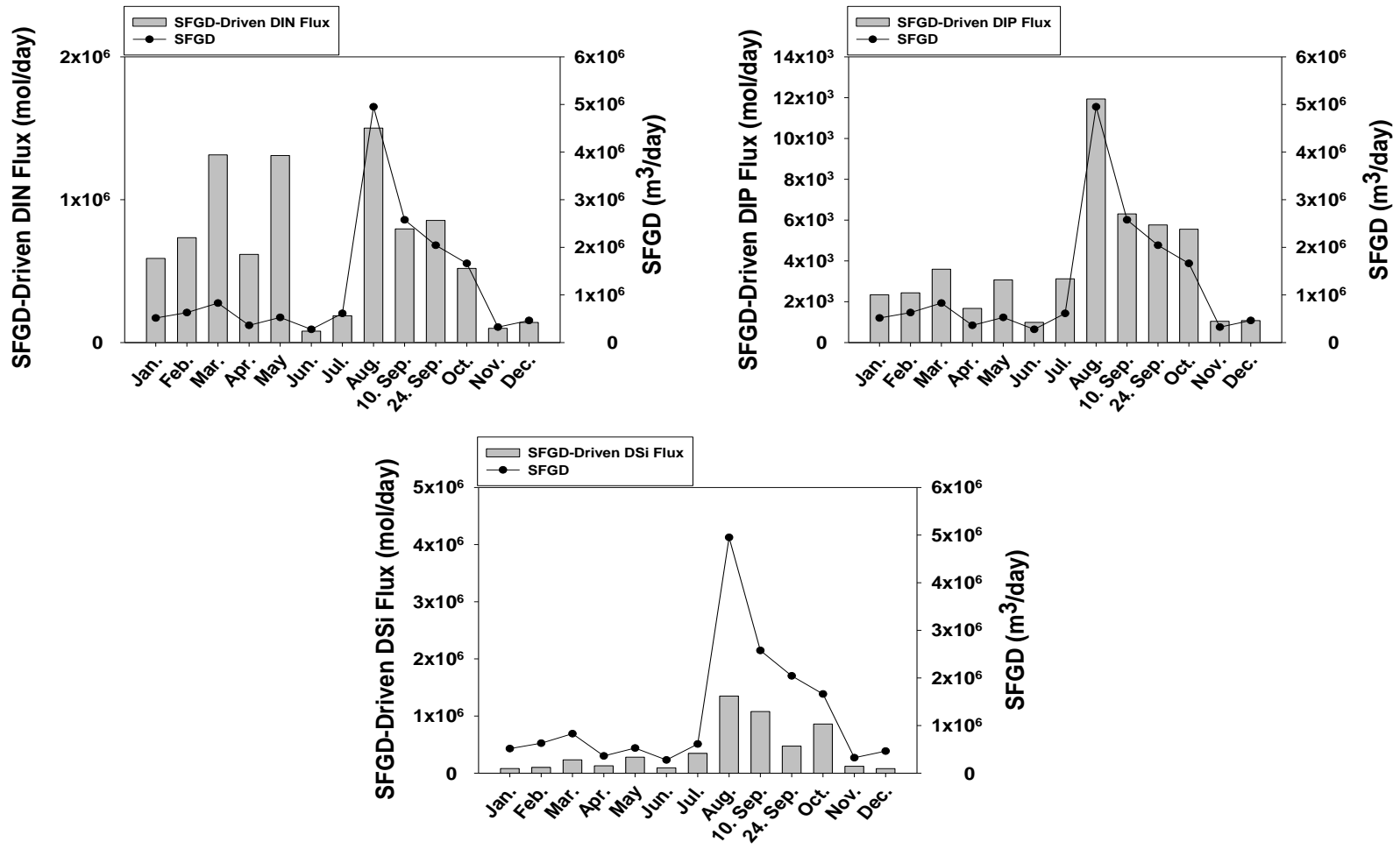


Figure 10 The monthly SFGD-driven nutrients flux and SFGD during the sampling period

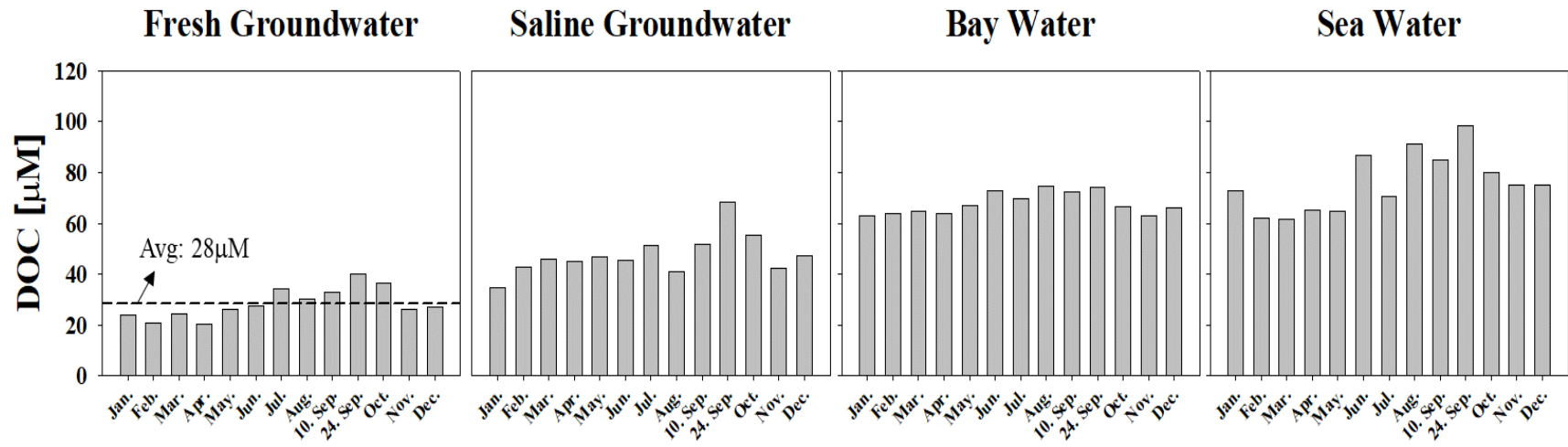


Figure 11 The average DOC concentration of fresh groundwater, saline groundwater, bay water, and sea water in Hwasun in 2019.

3.4 본 연구 지역과 타 지역의 영양염류 플럭스 비교

화순만과 전 세계 및 국내 연안의 유출 속도를 비교한 결과, 본 연구 지역인 화순만은 SFGD를 산정하였지만, 전 세계 및 국내 연안은 SGD를 산정하여 직접적인 비교는 어려워 간접적으로 비교하였다. 본 지역의 유출 속도는 평균 6.4 cm d^{-1} 로 미국의 Lynch Cove, Hood canal, Pamet River Estuary, 중국의 Lasoye lagoon, Tolo Harbor 보다 느리지만, 그 외 연안(Loxahatchee River Estuary, Tempa Bay, Elizabeth Estuary, Bamen Bay, Plove cove, Wanquan River Estuary)보다 빠른 속도를 보여주었다. 국내지역에서는 제일 느린 유출 속도를 보여주고 있다(Table 16). DIN의 플럭스는 평균 $2.0 \times 10^8 \text{ mol yr}^{-1}$ 로 여자만과 가막만보다 낮은 수준이었고 방두만 보다 높은 플럭스를 보여주었다. 본 연구의 SFGD는 $1.1 \times 10^6 \text{ mol d}^{-1}$ 수준으로 동일 지역의 이전 연구(SGD: $2.2 \times 10^6 \text{ mol d}^{-1}$)보다 절반 수준의 유출량을 보였으나(Kim et al. 2013), DIN의 플럭스는 약 2배 증가하였다. DIP의 플럭스는 $1.4 \times 10^6 \text{ mol yr}^{-1}$ 로 DIN과 마찬가지로 세계 다른 지역과 비슷한 플럭스를 보여주고 있으나, 국내 다른 지역과 비교해보면 낮은 수준의 플럭스를 보여준다. DSi의 플럭스는 $1.5 \times 10^8 \text{ mol yr}^{-1}$ 로 국내 지역에 비해 다소 낮은 플럭스를 보여주고 있지만 국외 지역 보다는 상대적으로 높은 플럭스를 보여주고 있다(Table 16). 비교 결과, 직접적인 비교는 어렵지만, 본 연구에서의 DIN 플럭스 대부분 높은 수준을 보여주고 있어 현재 해저 담지하수 오염이 활발하게 진행되고 있다고 판단된다. 특히, 연구 지역 주변 양돈 농협 도축장이 설치되어 2019년 1월부터 도축을 시작하였으며, 농가들 또한 많이 분포하고 있어 축산폐수

및 농업 비료 등으로 인한 높은 농도의 영양염류가 혼합되며 연안으로 유출되어 높은 영양염류의 플럭스를 보이는 것으로 판단된다.

Region	SGD	DIN	DIP	DSi	Methods	References
	cm d ⁻¹		mol yr ⁻¹			
United States						
Loxahatchee River Estuary	2.0 ~ 7.4	-	$3.6 \pm 4.3 \times 10^5$	-	Ra and ²²² Rn mass balance model	Swarzenski et al. (2006)
Pamet River Estuary	77	$1.6 \sim 6.6 \times 10^7$	$1.2 \sim 5 \times 10^6$	-	Ra based three end member model	Charette. (2007)
Tempa Bay	0.2 ~ 1.5	$4.7 \sim 32.7 \times 10^7$	$0.7 \sim 5.1 \times 10^7$	$3.3 \sim 22.6 \times 10^7$	Ra and ²²² Rn mass balance model	Swarzenski et al. (2007a)
Lynch Cove, Hood Canal	85.0 ± 84.0	$1.8 \sim 2.2 \times 10^7$	$8 \sim 9.5 \times 10^5$	$1.1 \sim 1.3 \times 10^8$	Ra and ²²² Rn mass balance model	Swarzenski et al. (2007b)
Elizabeth Estuary	1.8 ~ 3.2	7.7×10^7	2.7×10^6	-	Ra based three end-member model	Charette and Buesseler. (2004)
China						
Bamen Bay	1.5 ± 2.2	$5.7 \pm 9.2 \times 10^7$	$6.2 \pm 14 \times 10^5$	$4.4 \pm 6.7 \times 10^7$	Ra mass balance model Silica and ²²² Rn mass balance models	Su et al. (2011)
Laoye lagoon	10 ~ 20	6.2×10^7	1.9×10^4	1.9×10^7	Ra and silica mass balance model	Ji et al. (2012)
Plove cove, Hong Kong	2.0 ~ 4.3	$4.5 \sim 9.5 \times 10^5$	$1 \sim 2 \times 10^4$	$6.8 \sim 14 \times 10^5$	²²² Rn mass balance model	Tse and Jiao (2008)
Tolo Harbor	16.6	4.0×10^8	5.1×10^6	5.1×10^8	Ra mass balance model	Lee et al. (2012)
Wanquan River Estuary	0.5 ± 0.5	$3.4 \pm 3.3 \times 10^6$	$0.7 \pm 1.1 \times 10^4$	$9.5 \pm 10.2 \times 10^5$	Ra mass balance model	Su et al. (2011)
Korea						
Bangdu Bay	27	1.4×10^8	4.1×10^6	5.1×10^8	Silica and ²²² Rn mass balance model	Kim et al. (2011)
Gamak Bay	8.0 ~ 12.0	$4.8 \sim 6.6 \times 10^8$	$5.5 \sim 12.4 \times 10^6$	-	Ra mass balance model Silica and ²²² Rn mass balance model	Hwang et al. (2010)
Yeoja Bay	8.1	1.0×10^9	4.4×10^6	1.0×10^9	Ra and silica mass balance model	Hwang et al. (2005b)
Hwasun Bay	12	1.1×10^8	-	-	²²² Rn mass balance model	Kim et al. (2013)
Hwasun Bay	6.4	2.5×10^8	1.4×10^6	1.5×10^8	Silica mass balance model	This study

Table. 16 The summaries of the geochemical-tracer based SGD estimates and the associated nutrient fluxes to the coast zones.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 제주도 화순만에서 SFGD 변화에 따른 영양염류와 용존유기물질의 영향을 알아보기 위하여 2019년 1월부터 12월까지 총 13번의 관측을 하였다. SFGD의 유출량을 월별로 산정하였으며, 이를 유도하여 영양염류 플럭스 및 용존유기탄소의 특성 변화에 대해 연구하였다.

DSi의 물질 수지모델을 사용하여 SFGD의 유출량을 산정한 결과, 평균 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 이었다. SFGD는 평상시에는 체류시간에 의한 영향을 받았고, 조사 시기에 강수 및 태풍과 같은 이벤트가 있을 시 이러한 자연현상에 의한 직접적인 영향을 받았다. 특히, 9월 두번의 조사는 태풍에 의한 많은 강수의 영향을 받아 일시적인 SFGD의 증가를 보였다. 허나, 본 물질 수지모델은 태풍과 같은 이벤트적인 자연현상에 의한 파도, 바람, 해류 등의 영향을 고려하지 않아 불확실성을 내포하므로 보다 정확한 연구를 위하여 다양한 자연현상을 함께 고려하면 보다 정확한 연구가 될 것으로 판단된다.

해저 담지하수에서 영양염류의 농도는 지하 수위와 육상오염원의 영향을 받아 계절별로 상이한 농도가 나타났다. DIN, DIP, DSi 플럭스의 평균은 각각 $6.7 \times 10^8 \text{ mol d}^{-1}$, $3.8 \times 10^6 \text{ mol d}^{-1}$, $4.0 \times 10^8 \text{ mol d}^{-1}$ 로 플럭스 산정의 특성상 SFGD에 따라 큰 변동을 보였지만, 고농도의 영양염류로 인한 플럭스의 증가도 함께 보인다. 또한, 화순만에서의 유출 속도는 타 지역보다 비교적 느린 양상을 보였지만, DIN의 플럭스는 상대적으로 많이 유출되는 것으로 나타나, 본 연구지역에서 타 지역에 비해 지하수의 오염이 상당한 것으로 판단된다.

DOC는 영양염류와 반대의 경향을 보였다. 지하수에서 해수에 비해 상대적으로 매우 낮은 농도를 분포하고 있었으며, 외 해수로 유출될수록 증가되는 경향을 보였다. 매우 낮은 해저 담지하수 중 DOC의 농도는 연안 DOC 농도에 희석 작용을 일으켜 큰 영향을 미칠 것으로 보이며, 해수의 농도 증가는 일차 생산자 생물 활동의 영향을 받는 것으로 추측된다. 따라서, 영양염류 및 DOC가 연안 생물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 메소코즘 등의 연구를 함께 진행하여 보다 정확한 복합적인 모델을 수립하면 정확한 연구가 진행 될 것으로 판단된다.

본 연구 결과는, 제주도는 전 세계 화산섬 면적의 약 1%로 전 지구적으로 투수성이 높은 화산섬에서 지하수 유출이 일어난다는 것을 감안 하였을 때 지하수가 주변 해역으로 유입되는 영양염 수지에 막대한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서, 제주도 지하수 유출의 거동에 대해 파악하기 위해서는 다양한 동위원소 및 방사성 동위원소를 사용하여 물질 기원을 추적하고, 지속적인 모니터링이 중요하다고 시사한다.

5. 참고문헌

- 제주도. (2003). 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사 (III).
- 오진석 & 김선준. (1995). 삼중수소를 이용한 지하수 연령측정 방법에 관한 연구. *지하수환경*, 2, 49-57.
- Amon, R. M., & Benner, R. (1996). Bacterial utilization of different size classes of dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography*, 41(1), 41-51.
- Baker, A. R., Kelly, S. D., Biswas, K. F., Witt, M., & Jickells, T. D. (2003). Atmospheric deposition of nutrients to the Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 30(24).
- Bauer, J. E., Williams, P. M., & Druffel, E. R. (1992). ^{14}C activity of dissolved organic carbon fractions in the north-central Pacific and Sargasso Sea. *Nature*, 357(6380), 667-670.
- Bugna, G. C., Chanton, J. P., Cable, J. E., Burnett, W. C., & Cable, P. H. (1996). The importance of groundwater discharge to the methane budgets of nearshore and continental shelf waters of the northeastern Gulf of Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(23), 4735-4746.
- Burnett, W. C., Taniguchi, M., & Oberdorfer, J. (2001). Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. *Journal of Sea Research*, 46(2), 109-116.
- Carlson, C. A., Ducklow, H. W., & Michaels, A. F. (1994). Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso Sea. *Nature*, 371(6496), 405-408.

Charette, M. A. (2007). Hydrologic forcing of submarine groundwater discharge: Insight from a seasonal study of radium isotopes in a groundwater-dominated salt marsh estuary. *Limnology and Oceanography*, 52(1), 230-239.

Charette, M. A., & Buesseler, K. O. (2004). Submarine groundwater discharge of nutrients and copper to an urban subestuary of Chesapeake Bay (Elizabeth River). *Limnology and Oceanography*, 49(2), 376-385.

Church, T. M. (1996). An underground route for the water cycle. *Nature*, 380(6575), 579-580.

Corbett, D. R., Chanton, J., Burnett, W., Dillon, K., Rutkowski, C., & Fourqurean, J. W. (1999). Patterns of groundwater discharge into Florida Bay. *Limnology and Oceanography*, 44(4), 1045-1055.

Corbett, D. R., Dillon, K., Burnett, W., & Chanton, J. (2000). Estimating the groundwater contribution into Florida Bay via natural tracers, ^{222}Rn and CH_4 . *Limnology and Oceanography*, 45(7), 1546-1557.

Emerson, S., & Hedges, J. I. (1988). Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments. *Paleoceanography*, 3(5), 621-634.

Gao, Q., Tao, Z., Shen, C., Sun, Y., Yi, W., & Xing, C. (2002). Riverine organic carbon in the Xijiang River (South China): seasonal variation in content and flux budget. *Environmental Geology*, 41(7), 826-832.

Giblin, A. E., & Gaines, A. G. (1990). Nitrogen inputs to a marine embayment: the importance of groundwater. *Biogeochemistry*, 10(3), 309-328.

- Gobler, C. J., & Sañudo-Wilhelmy, S. A. (2001). Temporal variability of groundwater seepage and brown tide blooms in a Long Island embayment. *Marine Ecology Progress Series*, 217, 299-309.
- Hansell, D. A., Carlson, C. A., & Suzuki, Y. (2002). Dissolved organic carbon export with North Pacific Intermediate Water formation. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(1), 7-1.
- Hu, C., Muller-Karger, F. E., & Swarzenski, P. W. (2006). Hurricanes, submarine groundwater discharge, and Florida's red tides. *Geophysical Research Letters*, 33(11).
- Hwang, D. W., Kim, G., Lee, W. C., & Oh, H. T. (2010). The role of submarine groundwater discharge (SGD) in nutrient budgets of Gamak Bay, a shellfish farming bay, in Korea. *Journal of Sea Research*, 64(3), 224-230.
- Hwang, D. W., Kim, G., Lee, Y. W., & Yang, H. S. (2005). Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. *Marine Chemistry*, 96(1-2), 61-71.
- Hwang, D. W., Lee, Y. W., & Kim, G. (2005). Large submarine groundwater discharge and benthic eutrophication in Bangdu Bay on volcanic Jeju Island, Korea. *Limnology and Oceanography*, 50(5), 1393-1403.
- Jung, H. Y., & Cho, K. J. (2003). SOD and inorganic nutrient fluxes from sediment in the downstream of the Nagdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 36(3), 322-335.
- Karl, D., Letelier, R., Tupas, L., Dore, J., Christian, J., & Hebel, D. (1997). The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean. *Nature*, 388(6642), 533-538.

Kelly, R. P., & Moran, S. B. (2002). Seasonal changes in groundwater input to a well-mixed estuary estimated using radium isotopes and implications for coastal nutrient budgets. *Limnology and Oceanography*, 47(6), 1796-1807.

Kim, G., Kim, J. S., & Hwang, D. W. (2011). Submarine groundwater discharge from oceanic islands standing in oligotrophic oceans: Implications for global biological production and organic carbon fluxes. *Limnology and Oceanography*, 56(2), 673-682.

Kim, G., Lee, K. K., Park, K. S., Hwang, D. W., & Yang, H. S. (2003). Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island. *Geophysical Research Letters*, 30(21).

Kim, G., Ryu, J. W., Yang, H. S., & Yun, S. T. (2005). Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by ^{228}Ra and ^{226}Ra isotopes: Implications for global silicate fluxes. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1-2), 156-166.

Kim, J., & Kim, G. (2017). Inputs of humic fluorescent dissolved organic matter via submarine groundwater discharge to coastal waters off a volcanic island (Jeju, Korea). *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.

Kim, T. H., Kwon, E., Kim, I., Lee, S. A., & Kim, G. (2013). Dissolved organic matter in the subterranean estuary of a volcanic island, Jeju: Importance of dissolved organic nitrogen fluxes to the ocean. *Journal of Sea Research*, 78, 18-24.

Koh, G. (1997). Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implementations of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. Dissertation, Pusan National University.

Kwon, E. Y., Kim, G., Primeau, F., Moore, W. S., Cho, H. M., DeVries, T., Sarmiento, J. L., Charette, M. A., & Cho, Y. K. (2014). Global estimate of submarine groundwater discharge

based on an observationally constrained radium isotope model. *Geophysical Research Letters*, 41(23), 8438-8444.

LaRoche, J., Nuzzi, R., Waters, R., Wyman, K., Falkowski, P., & Wallace, D. (1997). Brown tide blooms in Long Island's coastal waters linked to interannual variability in groundwater flow. *Global Change Biology*, 3(5), 397-410.

Lee, J. M., & Kim, G. (2006). A simple and rapid method for analyzing radon in coastal and ground waters using a radon-in-air monitor. *Journal of Environmental Radioactivity*, 89(3), 219-228.

Lee, Y. W., Kim, G., Lim, W. A., & Hwang, D. W. (2010). A relationship between submarine groundwater borne nutrients traced by Ra isotopes and the intensity of dinoflagellate red-tides occurring in the southern sea of Korea. *Limnology and oceanography*, 55(1), 1-10.

Meybeck, M. (1982). Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 282(4), 401-450.

Moore, W. S., Sarmiento, J. L., & Key, R. M. (2008). Submarine groundwater discharge revealed by ²²⁸Ra distribution in the upper Atlantic Ocean, *Nature Geoscience*, 1, 309-311.

Neofitou, N., & Klaoudatos, S. (2008). Effect of fish farming on the water column nutrient concentration in a semi-enclosed gulf of the Eastern Mediterranean. *Aquaculture Research*, 39(5), 482-490.

Oberdorfer, J. A., Valentino, M. A., & Smith, S. V. (1990). Groundwater contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California. *Biogeochemistry*, 10(3), 199-216.

Rabouille, C., Mackenzie, F. T., & Ver, L. M. (2001). Influence of the human perturbation on carbon, nitrogen, and oxygen biogeochemical cycles in the global coastal ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(21), 3615-3641.

Sanford, L. P., Boicourt, W. C., & Rives, S. R. (1992). Model for estimating tidal flushing of small embayments. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(6), 635-654.

Song, S. H., Choi, K. J., & Kim, J. S. (2013). Evaluation of regional characteristics using time-series data of groundwater level in Jeju Island. *Journal of Environmental Science International*, 22(5), 609-623.

Suk, M. S., Pang, I. C., Teague, W. J., & Chang, K. I. (2000). Observations of the Cheju current. *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 35(3), 129-152.

Swarzenski, P. W., Orem, W. H., McPherson, B. F., Baskaran, M., & Wan, Y. (2006). Biogeochemical transport in the Loxahatchee River estuary, Florida: The role of submarine groundwater discharge. *Marine Chemistry*, 101(3-4), 248-265.

Swarzenski, P. W., Reich, C., Kroeger, K. D., & Baskaran, M. (2007). Ra and Rn isotopes as natural tracers of submarine groundwater discharge in Tampa Bay, Florida. *Marine Chemistry*, 104(1-2), 69-84.

Swarzenski, P. W., Simonds, F. W., Paulson, A. J., Kruse, S., & Reich, C. (2007). Geochemical and geophysical examination of submarine groundwater discharge and associated nutrient loading estimates into Lynch Cove, Hood Canal, WA. *Environmental Science & Technology*, 41(20), 7022-7029.

Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E., & Turner, J. V. (2002). Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Processes*, 16(11), 2115-2129.

Tse, K. C., & Jiao, J. J. (2008). Estimation of submarine groundwater discharge in plover cove, Tolo harbour, Hong Kong by ^{222}Rn . *Marine Chemistry*, 111(3-4), 160-170.

Zektzer, I. S., Ivanov, V. A., & Meskheteli, A. V. (1973). The problem of direct groundwater discharge to the seas. *Journal of Hydrology*, 20(1), 1-36.