

## 제주도 사질 조간대 공극수중 영양염류의 시·공간적 변화

황동운\* · 김형철 · 박지혜 · 이원찬

국립수산과학원 어장환경과

### Temporal and Spatial Variation of Nutrient Concentrations in Shallow Pore Water in Intertidal Sandflats of Jeju Island

Dong-Woon Hwang\*, Hyung-Chul Kim, Jihye Park and Won-Chan Lee

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

To examine temporal and spatial variation in salinity and nutrients in the shallow pore water of intertidal sandflats, we measured salinity and nutrient concentrations (dissolved inorganic nitrogen [DIN], phosphorus [DIP], and silicate [DSi]) in pore water of the intertidal zone along the coastline of Jeju Island at two and/or three month intervals from May 2009 to December 2010. Geochemical parameters (grain size, ignition loss [IL], chemical oxygen demand [COD], and acid volatile sulfur [AVS]) in sediment were also investigated. The surface sediments in intertidal sandflats of Jeju Island were mainly composed of sand, slightly gravelly sand and gravelly sand, with a range of mean grain size from 0.5 to 2.5  $\phi$ . Concentrations of IL and COD in sediment were higher along the eastern coast, as compared to the western coast, due to differences in biogenic sediment composition. Salinity and nutrient concentrations in pore water were markedly different across time and space during rainy seasons, whereas concentrations were temporally and spatially more stable during dry seasons. These results suggest that salinity and nutrient concentrations in pore water depend on the advective flow of fresh groundwater. We also observed an imbalance of the DIN/DIP ratio in pore water due to the influence of contaminated sources of DIN. In particular, nutrient concentrations during rainy and dry seasons were characterized by high DIN/DIP ratios (mean-127) and low DIN/DIP ratios (mean-10), respectively, relative to the Redfield ratio (16) in offshore seawater. Such an imbalance of DIN/DIP ratios in pore water can affect the coastal ecosystem and appears to cause outbreaks of benthic seaweed along the coastline of Jeju Island.

Key words: Sediment, Pore water, Nutrients, Intertidal sandflat, Juju Island

### 서 론

연안지역에서 파도와 조석은 육상의 지하수면(water table)과 바다의 해수면(sea level) 사이의 수리학적 경사(hydraulic pressure gradient)를 변화시키고, 이는 공극수의 이류적 흐름을 야기한다(Shum and Sundby, 1996; Burnett et al., 2006). 공극수의 유동은 수평·수직방향의 3차원적인 복잡한 양상을 보이며 주로 퇴적물 내에서 일어나지만 해수-퇴적물의 경계면을 통해 공극수가 해양으로 빠져 나오기도 한다. 이러한 해수-퇴적물의 경계면을 통해 해양으로 유입되는 공극수의 이류적

흐름을 해저지하수 유출(submarine groundwater discharge)이라고 하며, 이는 육상의 담지하수(fresh groundwater) 뿐만 아니라 해저 퇴적물에 스며들었다가 빠져 나오는 재순환하는 해수(re-circulating seawater)를 포함한다(Burnett et al., 2003; 2006).

공극수 중 용존 화학성분들의 농도는 퇴적물 내에서 이동하는 동안 산화-환원환경(redox condition)에 따른 용출과 흡착, 파도나 조석 등에 의한 상부 해수와 활발한 교환, 다른 이화학적 특성을 가진 지하수의 유입 등 다양한 요인에 의해서 시·공간적으로 큰 변화를 보인다(Charette et al., 2005; Charette

#### Article history;

Received 8 June 2012; Revised 20 November 2012; Accepted 22 November 2012

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2532 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: dwhwang@nfrdi.go.kr

Kor J Fish Aquat Sci 45(6) 704-715, December 2012

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0704>

pISSN:0374-8111, eISSN:2287-8815

© The Korean Society of Fishereis and Aquatic Science. All rights reserved

and Sholkovitz, 2006; Hwang et al., 2008). 따라서, 이러한 공극수의 흐름은 퇴적물 내에서 용존 화학성분의 분포와 퇴적물 내 서식하는 저서미세조류나 저서동물의 분포에 매우 중요하다(Hwang et al., 2008; Waska and Kim, 2010; 2011). 퇴적물 내에서 공극수의 유동은 퇴적물의 구성과 밀접한 관련이 있으며, 투수성이 뛰어난 모래로 이루어진 사질 지역에서 더욱 활발하다. 특히, 확산(diffusion)이 점토와 실트 퇴적물에서 해양으로 물질을 공급하는 중요한 과정이라고 한다면, 사질 퇴적물에서는 공극수의 이류적 흐름, 즉 해저지하수의 유출이 해양으로 물질을 공급하는 중요한 과정이라 할 수 있다(Huetzel et al., 1998).

최근, 해저지하수 유출량이 강물과 비슷하거나 높다는 사실이 밝혀지면서 전세계의 많은 연구자들에게 관심을 받고 있다(Taniguchi et al., 2002; Burnett et al., 2003; Burnett et al., 2006; Kim et al., 2005; Moore et al., 2008). 특히, 일부 연구결과들에 의하면, 해저지하수가 해양에서 영양염류의 물질수지에 중요한 공급원인 것으로 밝혀지고 있다. 미국 동부의 Massachusetts 부근의 염습지(salt marsh)에서 염습지내 영양염류의 공급에 해저지하수가 중요한 역할을 하고(Valiela et al., 1990; Krest et al., 2000), 미국 New York의 Great South Bay에서 만해수 중 질산염의 50%가 해저 지하수를 통해 공급된다고 보고되었다(Capone and Slater, 1990). 또한, 한반도 연안해역에서도 남해안의 여자만과 가막만 등과 같이 반폐쇄적인 내만해역에서 만해수 영양염류 중 질산염과 규산염의 약 80% 이상이 해저지하수에 의해 공급되는 것으로 밝혀지기도 하였다(Hwang et al., 2005a, 2010a; Lee et al., 2009).

이러한 해저지하수를 통한 영양염류의 유입은 연안 부영양화를 야기하고(Valiela et al., 1990), 조간대 저서미세조류(Waska and Kim, 2010; 2011), 식물플랑크톤의 기초생산(LaRoche et al., 1997; Herrera-Silveira, 1998) 및 적조발생(Lee and Kim, 2007; Lee et al., 2010) 등과 같은 연안 생태계에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서, 연안해역으로 유입되는 해저지하수와 지하수 기원 영양염류 유입량을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 해저지하수를 통한 영양염류 유입량은 해저지하수의 유출속도와 공극수나 지하수중 영양염류 농도에 의해 크게 달라진다. 지금까지 해저지하수의 유출속도에 대해서는 전 세계적으로 수동 혹은 자동 seepage meter를 이용하거나(Cable et al., 1997; Kim et al., 2003; Taniguchi et al., 2006; Burnett et al., 2007), 지하수중에 높은 농도로 존재하는 Ra 동위원소,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\text{CH}_4$  등과 같은 지화학적 추적자(Moore, 1996; Charette et al., 2001; Kelly and Moran, 2002; Hwang et al., 2005b), 물수지(water or salt balance) 및 수리·지질학적 모델(hydrogeologic assumption, Darcy's Law) 등과 같은 모델링 기법(Oberdorfer et al., 1990; Oberdorfer, 2003) 등 유출속도를 알아내는 다양한 방법을 이용하여 해저지하수의 유출량 및 시간적 변화에 대한 많은 연구가 진행되어져 왔으며, 일정 시기의 해저지하수를

통한 영양염류 유입량에 대해서도 일부 연구가 진행되었다. 하지만, 해저지하수를 통한 영양염류 유입량 산정에 중요한 공극수중 영양염류 농도의 시·공간적 변화에 대해서는 그 중요성에도 불구하고 아직 충분한 연구가 이루어지지 않고 있다.

따라서, 이 연구에서는 해저지하수를 통한 영양염류 유입량 산정에 중요한 공극수중 영양염류의 시·공간적 변화특성을 파악하고자 한반도 연안에서 해저지하수 유출이 가장 활발하다고 알려져 있는 화산섬인 제주도를 연구지역으로 선정하여 연안 사질 조간대 지역에서 퇴적물과 공극수 중 여러가지 지화학적 인자들에 대하여 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 연구지역

제주도는 총면적이 약 1,830  $\text{km}^2$ , 해안선의 길이가 263 km 달하는 한반도 남해에서 가장 큰 화산섬(volcanic island)이다(Booh et al., 2005). 장축인 동서방향이 약 74 km, 단축인 남북방향이 약 32 km 인 동북동-서남서 방향성을 가진 반타원체의 형태를 갖추고 있다(Kim et al., 2011a; Youn and Kim, 2011). 섬의 중앙부에는 높이가 약 1,950 m인 순상화산(shield volcano)인 한라산이 위치하고 있으며, 그 주변에는 약 360여 개의 다양한 크기의 오름이 분포한다. 이 산을 중심으로 동서방향의 지형은 기울기가 약 3-5°로 경사가 매우 완만한 반면, 남북방향으로는 기울기가 약 5-8°로 경사가 비교적 급한 편이다(Kang et al., 2008).

제주도는 지역적인 특성상 해양성 기후의 영향을 받는 동시에 동북아시아의 몬순기후의 영향을 받아 연평균 강수량이 약 1,900 mm 이상으로 한반도 내륙지방에 비해 강우량이 약 600 mm가 더 많은 다우지역으로 알려져 있다(Oh et al., 2006). 계절적으로 강우량의 차이는 크며, 장마와 태풍의 영향을 빈번히 받아 하계 집중형의 강수형태를 보인다. 또한, 섬의 중앙부에 위치한 한라산의 지형적인 효과로 인해 국지적인 집중호우가 자주 발생하여 지역적으로도 강우량의 차이가 커 해안지역에서 고도가 높은 산간지역으로 갈수록 강우량이 많다(Park et al., 2011). 대륙주변의 연안지역과 달리 하천이나 강과 같은 배수시설이 잘 발달되어 있지 않고, 대부분의 하천은 투수층과 추상절리를 통하여 유수가 쉽게 지하로 침투되어 건천을 이루고 있으며 강우시에 일시적으로 유출하는 간헐천의 특성을 가지고 있다(Youn and Koh, 1994). 또한, 지하수 함량은 총 강우량의 약 46%로 다른 대륙 주변부보다 상당히 높다(Park et al., 1994).

제주도의 지질은 아래에서부터 중생대 백악기말부터 신생대 제3기초의 기반암과 이를 부정합으로 피복한 시대미상의 미고결 퇴적층, 서귀포층, 그리고 그 위로 신생대 제3기말 플라이오세 중기부터 제4기 플라이스토세 후기에 지속된 화산활동과 연관된 화성쇄설성 퇴적층과 화산분출암류가 연속적으로 나

Table 1. The concentrations of geochemical parameters in the intertidal surface sediments of Jeju Island from July 2009 to May 2010. The parenthesis represents the average and standard deviation of each parameter.

Station No.	Mz (Ø)	WC (%)	IL (%)	COD (mgO <sub>2</sub> /g-dry)	AVS (mgS/g-dry)	
Western coast	St. 1	1.4-2.0 (1.7±0.2)	26-43 (33±6)	1.7-4.2 (2.8±1.0)	0.9-2.3 (1.5±0.6)	ND <sup>1</sup>
	St. 2	0.7-1.4 (1.0±0.3)	25-39 (33±5)	2.5-3.8 (3.2±0.4)	0.8-2.6 (1.4±0.7)	ND
	St. 3	1.3-1.9 (1.6±0.2)	36-42 (40±2)	3.1-5.5 (4.2±0.9)	1.1-2.8 (1.9±0.6)	ND
	St. 4	1.8-2.2 (2.0±0.1)	15-35 (25±7)	2.4-3.4 (2.7±0.4)	0.5-3.4 (1.3±1.2)	ND
	St. 5	1.5-2.3 (1.8±0.3)	17-27 (23±3)	3.5-7.3 (4.8±1.4)	0.5-1.6 (0.9±0.4)	ND
Eastern coast	St. 6	1.7-2.1 (2.0±0.1)	31-52 (45±9)	3.6-5.4 (4.8±0.7)	1.6-4.2 (3.3±1.0)	ND
	St. 7	1.5-1.9 (1.7±0.1)	24-32 (29±3)	3.9-5.9 (4.7±0.7)	0.7-2.1 (1.5±0.5)	ND
	St. 8	1.7-2.0 (1.8±0.1)	28-47 (38±8)	2.8-6.8 (4.4±1.6)	2.5-4.3 (3.5±0.7)	ND
	St. 9	1.3-1.9 (1.7±0.2)	40-61 (46±8)	2.8-6.8 (4.5±1.4)	2.0-5.3 (3.0±1.3)	ND
	St. 10	0.9-1.3 (1.1±0.2)	49-57 (53±3)	3.3-6.6 (5.0±1.2)	2.7-5.7 (3.8±1.1)	ND
	St. 11	1.7-2.2 (1.9±0.2)	25-31 (28±2)	1.3-2.0 (1.7±0.3)	0.3-1.3 (0.8±0.4)	ND

<sup>1</sup>ND = Not Detected

탄난다(Koh et al., 2007; Kang et al., 2008). 또한, 지층의 내부에는 용암동굴, 용암터널의 붕괴에 의해 생성된 공동(숨골), 파쇄대, 냉각에 의한 절리대 등과 같은 다양한 투수성의 지질구조를 이루고 있다(Hamm et al., 2005; Won et al., 2006; Kim et al., 2011a).

### 조사항목 및 분석방법

제주도 연안 사질 조간대 공극수 중 영양염류의 시·공간적 변화 특성을 알아보기 위하여 2009년 5월부터 2010년 12월 사이에 2-3개월 간격으로 해저지하수 유출이 활발하다고 알려진 대조기(spring tide)에 제주도의 한라산을 중심으로 서쪽 연안의 5개 지역(이호, 광지, 협재, 하모, 화순)과 동쪽 연안의 6개 지역(표선, 신양, 세화, 김녕, 함덕, 삼양)의 해안가에서 총 11개의 퇴적물 및 공극수 시료를 채취하였다(Fig. 1). 먼저, 퇴적물 시료는 최고조 이후 2시간부터 4시간 사이에 조간대 표층 0-2 cm 내의 퇴적물만을 고밀도 폴리에틸렌병(high density polyethylene bottle)에 담아 냉장 및 냉동상태로 보관하여 실험실로 운반한 후 입도(grain size)와 강열감량(ignition loss, IL), 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산취발성 황화물(acid volatile sulfide, AVS)을 Hwang et al. (2011)이 실시한 방법에 따라 분석하였다.

공극수 시료는 퇴적물 채취와 동시에 퇴적물 채취정점 주변에 Rhizon sampler를 설치하여 공극수를 직접 채수하거나 깊이 약 5 cm의 작은 구멍을 만들어 고이는 공극수를 주사기로 채취하였다. 공극수 중 수온과 염분은 휴대용 염분계(Oakion, Model Salt 6 and Hach, Model Sension 5)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 영양염류(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,

PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, [Si(OH)<sub>4</sub>]<sub>4</sub>)는 25 mm GF/F 여과지와 주사기형 여과세트를 이용하여 현장에서 바로 여과한 후 15 mL conical tube에 담아 냉동상태로 실험실로 옮겨 영양염 자동분석기(Alliance, Model INTEGRAL FUTURA and Seal analytical GmbH, Model QUAATRO)로 분석하였다 이때, 질소계 영양염류인 질산질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), 아질산질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N), 암모니아질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)의 합을 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN), 인산인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)과 규산규소[Si(OH)<sub>4</sub>]<sub>4</sub>)는 각각 용존무기인(dissolved inorganic phosphorus, DIP)과 용존무기규소(dissolved inorganic silicate, DSi)로 정의하였다.

## 결과 및 고찰

### 퇴적물의 입도 및 유기물 함량

제주도 연안 사질 조간대의 퇴적환경 특성을 살펴보기 위하여 2009년 7월부터 2010년 5월까지 총 5회에 걸쳐 조사한 각 정점별 퇴적물 중 평균입도(mean grain size, Mz), 함수율(water content, WC), IL, COD, AVS 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 제주도는 몬순계절풍의 영향을 받아 여름철에 비해 겨울철에 부유사의 양이 더 많아 여름에는 퇴적되고 겨울에는 침식되는 전형적인 개방형의 해안 특성을 보이는 곳이다(Youn and Koh, 1994). 퇴적물의 입도분석 결과를 바탕으로 각 시기별 조사정점에 따른 자갈, 모래, 펄 함량을 Folk(1968)의 삼각좌표에 도시한 결과, 퇴적물은 주로 사(sand), 약역질사( slightly gravelly sand, (g)S), 역질사(gravelly sand, gS)의 총 3개 퇴적물 유형(sedimentary type)이 나타났다(Fig. 2). 공간

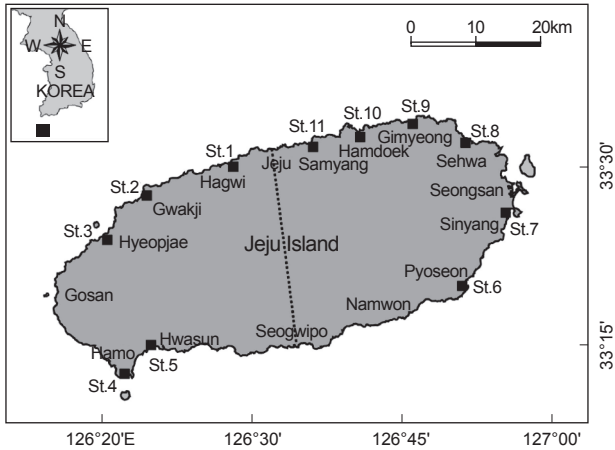


Fig. 1. A map showing the location of study area and the sampling sites for collecting the sediment and pore water in intertidal sandflat of Jeju Island from May 2009 to December 2010. The dotted line represents the boundary between the western and eastern coasts in Jeju Island in order to determine the characteristics of geochemical parameters in sediment and pore water.

적으로 제주도 북서쪽의 정점 2와 정점 3, 제주도 동쪽의 정점 7, 정점 8, 정점 10 은 연구기간 내내 약역질사((g)S), 제주도 북쪽의 정점 11은 사(S)로 이루어져 있었으며, 그외 정점들은 약역질사((g)S)가 우세한 가운데 사(S) 혹은 역질사(gS)가 시기별로 반복되었다. 이 같은 결과는 퇴적물의 시간에 따른 평균 입도 변화에서도 잘 반영되어 나타난다.

Folk and Ward (1957) 계산식에 의하여 구한 퇴적물의 통계학적 특성을 나타내는 Mz는 연구기간 내 모든 정점에서 0.5-2.5 Ø 범위로 극조립사(very coarse sand)와 세립사(fine sand) 사이였으며 각 정점별로 Mz의 시간에 따른 변화는 거의 없었다. 이는 Youn and Koh (1994)가 제주도 연안 해변 퇴적물을 계절별로 조사한 결과, 입도가 주로 0-3 Ø 범위에 분포하였다는 이전의 연구결과와 아주 잘 일치한다. 공간적으로도 제주도 북서쪽의 정점 2와 북동쪽의 정점 10에서 각각 평균 1.0 Ø 과 1.1 Ø로 다른 제주도 연안지역에 비해 상대적으로 낮은 Mz값을 보이지만(Fig. 3), 서로 뚜렷한 Mz의 차이는 아니었다. 이와 같은 결과는 제주도가 다른 대륙 연안지역과 달리 보다 세립한 퇴적물을 공급할 수 있는 하천이 발달되어 있지 않고 제주도 연안 전체가 개방형의 환경 특성을 가지고 있어 보다 세립한 퇴적물은 외해로 빠져 나감으로써 서로 비슷한 퇴적상을 가지고 있기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 연구지역과 같이 중립사 혹은 세립사 퇴적물로 이루어져 있고 외해와 노출되어 있는 개방형의 해안에서는 조석이나 파랑과 같은 작은 수리역학적 에너지에도 퇴적물이 쉽게 재부유되어 다른 지역으로 이동하는 특성을 보인다(Ryu et al., 2006; Jung et al., 2010).

퇴적물 중 WC 는 연구기간 내 15-65% 범위였으며, 각 정점별 시간에 따른 변화는 크지 않았다. 그러나, 정점별 비슷한

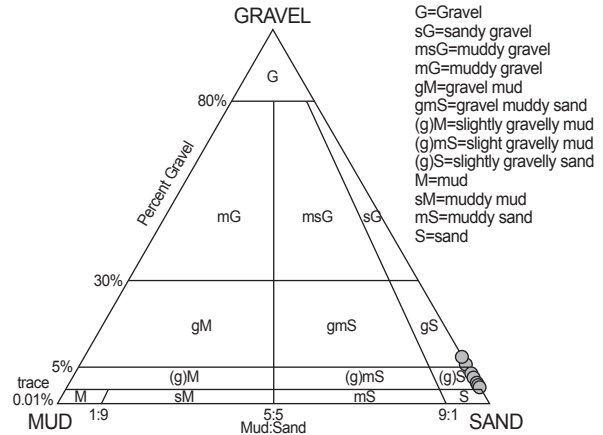


Fig. 2. The ternary diagram showing the major sediment types of surface sediment in the intertidal zone of Jeju Island from July 2009 to May 2010.

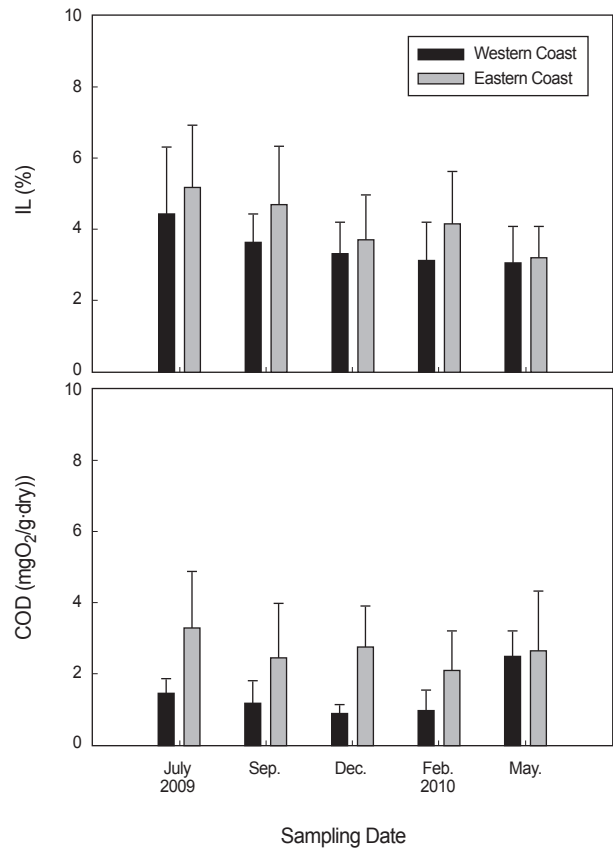


Fig. 4. The average concentrations of ignition loss (IL) and chemical oxygen demand (COD) in intertidal surface sediment with each sampling period in the western and eastern coasts of Jeju Island from July 2009 to May 2010.

Mz를 보임에도 불구하고 공간적으로는 큰 차이를 보였는데 제주도 남서쪽의 정점 4와 정점 5, 제주도 북쪽의 정점 11이다

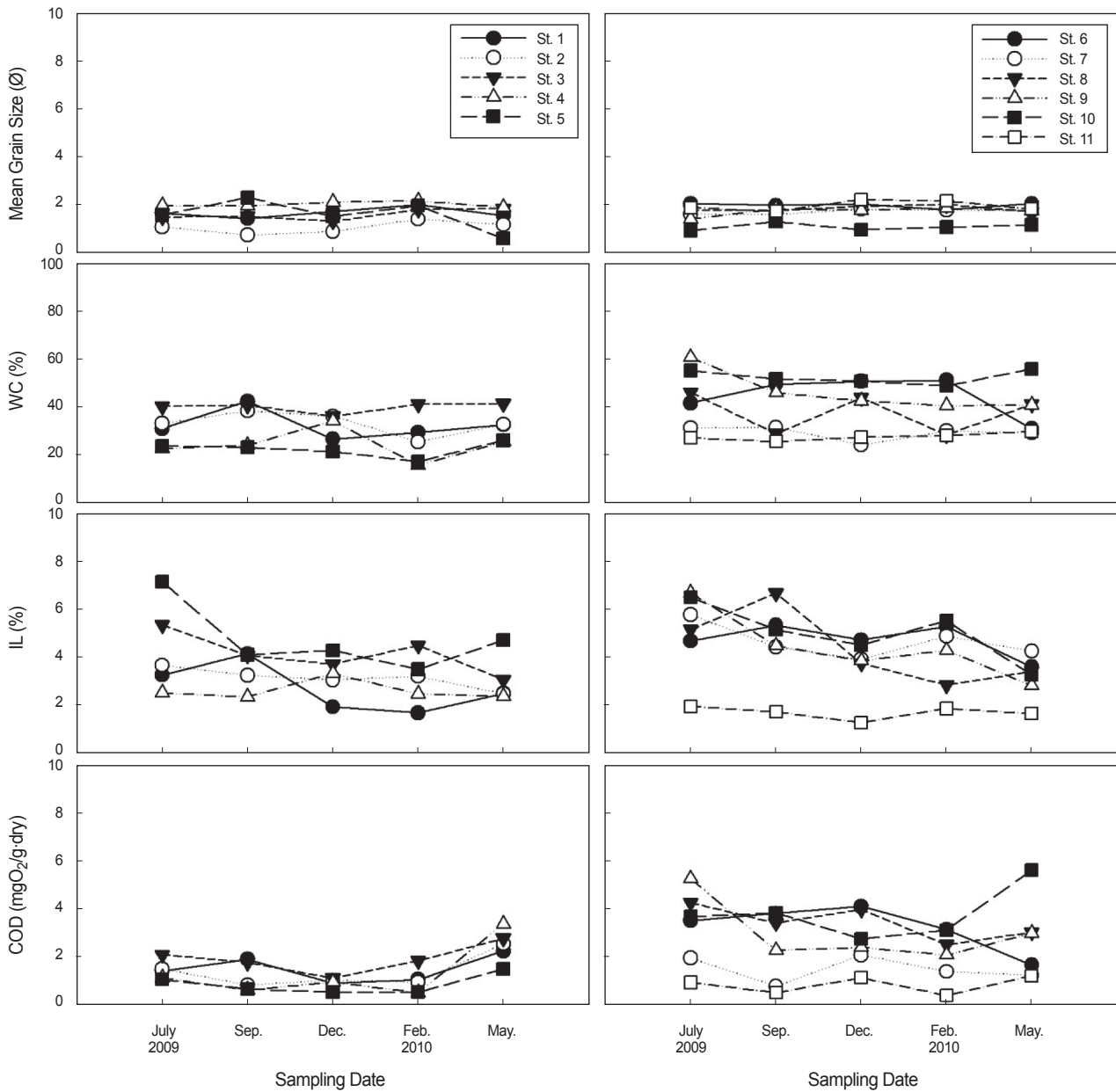


Fig. 3. The temporal variations of mean grain size (Mz), water content (WC), ignition loss (IL) and chemical oxygen demand (COD) in intertidal surface sediment in the western (left) and eastern (right) coasts of Jeju Island from July 2009 to May 2010.

른 정점들에 비해 상대적으로 낮은 WC를 보였다(Fig. 3). 이는 각 정점별 퇴적물 채취 위치 즉, 조위가 서로 다르고, 조석 주기에 따른 시료채취 시간의 차이 때문인 것으로 보인다. 유기물 함량 특성을 나타내는 IL과 COD는 연구기간 동안 각각 1.3-7.3%와 0.5-5.7 mg O<sub>2</sub>/g·dry 범위로 각 정점별 시간에 따른 변동은 적었으나, 공간적으로는 큰 차이를 보였다. 낮은 WC를 보였던 제주도 남서쪽의 정점 4와 정점 5, 그리고 제주도 북

쪽의 정점 11에서 다른 정점들에 비해 낮은 IL과 COD 값을 나타내었다 (Fig. 3). 또한, 제주도의 한라산을 중심으로 서쪽에 분포하는 정점 1-5과 동쪽에 분포하는 정점 6-11 지역의 퇴적물 중 IL과 COD 농도의 평균값을 비교한 결과, 2010년 5월을 제외하면 대체로 퇴적물 중 IL과 COD는 제주도 동쪽지역이 서쪽지역에 비해 다소 높은 농도를 보였다(Fig. 4). 이는 제주도 동쪽지역의 퇴적물 중에 생물기원 유기 쇄설성 퇴적물 (bio-

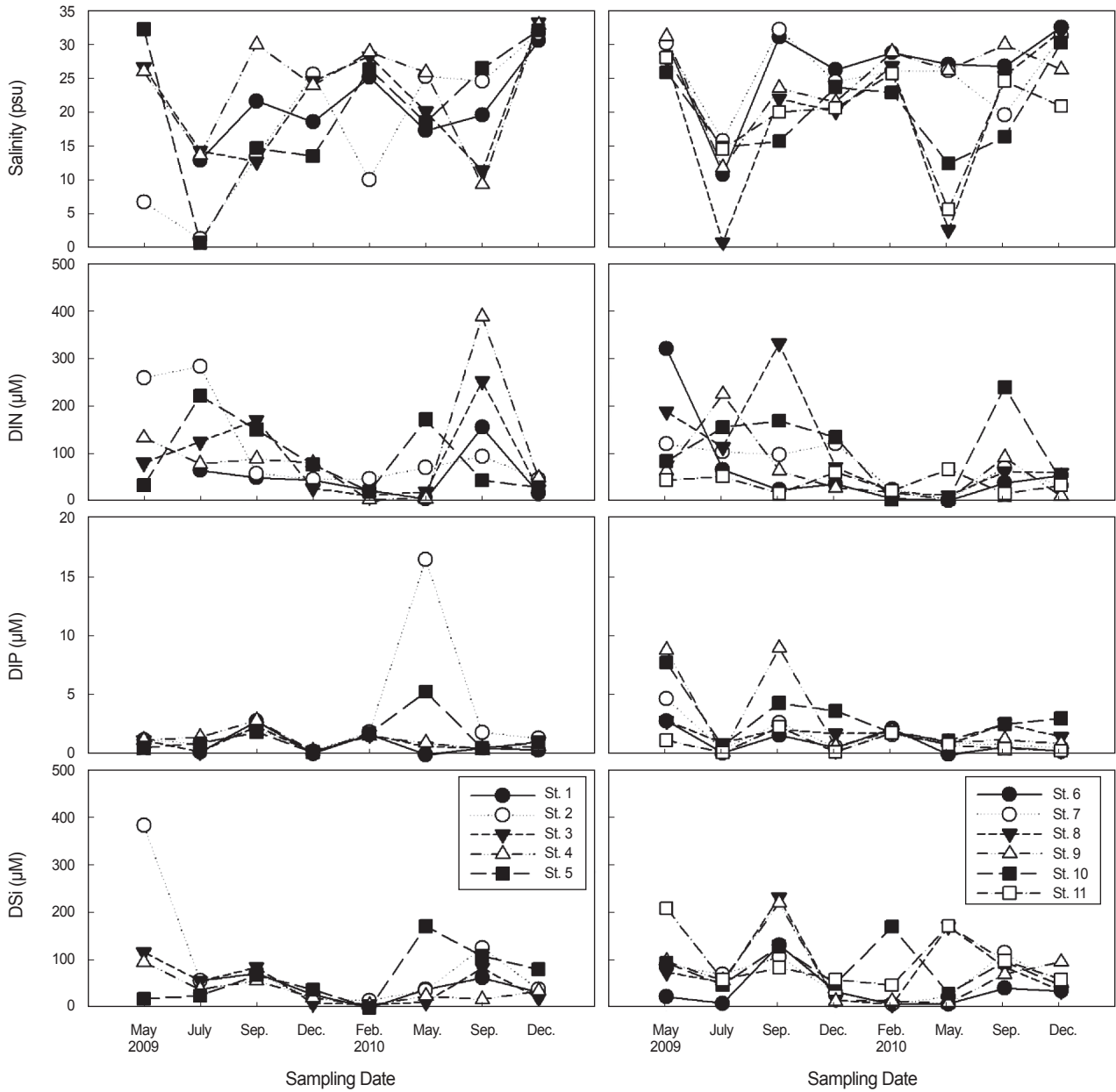


Fig. 5. The temporal variations of salinity and nutrients concentrations in shallow pore water in the western (left) and eastern (right) coasts of Jeju Island from May 2009 to December 2010.

genic detritus) 비중이 서쪽지역에 비해 높기 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 제주도의 해안지역의 모래는 주로 조립질 패각편 혹은 화산쇄설층 및 현무암 등의 침식물질과 패각편이 혼재한 사질로 이루어져 있다(Youn and Koh, 1994; Youn and Kim, 2011).

한편, 연구지역 내 퇴적물의COD 농도는 일본에서 퇴적물 중 유기물 오염 기준으로 제시하는 COD농도(20 mg O<sub>2</sub>/g-dry, Hwang et al., 2010b) 보다는 상당히 낮았으며, 연구기간 동

안 퇴적물 내 AVS 농도는 모든 시기에 모든 정점에서 검출되지 않아 퇴적물 내 유기물에 의한 오염은 없는 것으로 보인다. 또한, 이 연구가 이루어진 제주도 조간대 퇴적물 중 IL 농도는 연구지역에 비해 세립질 퇴적물로 이루어진 한반도 서해중부의 변산반도 조간대(Jung et al., 2010)와 영광-무안 조간대(Hwang et al. 2010b)에서 조사된 결과 보다는 다소 높고, 서해남부의 압해도 조간대(Hwang et al., 2011) 그리고 전남서부 도서 조간대(Hwang and Kim, 2011)에서 조사된 결과와는 비

Table 2. A comparison of mean grain size (Mz), ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and acid volatile sulfide (AVS) in intertidal surface sediment of Korea

Study Region	Mz (Ø)	IL (%)	COD (mg O <sub>2</sub> /g-dry)	AVS (mg S/g-dry)	Reference
Byeonsan Peninsula	-0.8-3.4 (2.8 ± 0.5)	0.2-2.9 (1.4 ± 0.4)	0.2-18.5 (3.9 ± 3.4)	ND <sup>1</sup>	Jung et al. (2010)
Southwestern Coast of Korea (Yeonggwang-Muan)	2.1-8.3 (5.5 ± 1.6)	0.8-5.5 (2.9 ± 1.2)	3.9-13.8 (8.5 ± 2.6)	ND	Hwang et al. (2010b)
Aphae Island	3.9-7.8 (6.9 ± 0.8)	2.4-5.7 (3.9 ± 0.8)	4.6-9.9 (7.4 ± 1.1)	ND-0.53 (0.04 ± 0.10)	Hwang et al. (2011)
Coastal island (Shinan)	1.3-8.2 (5.3 ± 1.7)	0.6-5.3 (3.2 ± 1.0)	0.4-12.6 (5.8 ± 2.6)	ND-0.41 (0.05 ± 0.09)	Hwang and Kim (2011)
Jeju Island	0.7-2.3 (1.7 ± 0.4)	1.3-7.3 (3.9 ± 1.4)	0.3-5.7 (2.1 ± 1.3)	ND	This study

<sup>1</sup>ND = Not Detected

Table 3. The temperature, salinity and nutrients concentrations in shallow pore water of Jeju Island from May 2009 to December 2010. The parenthesis represents the average and standard deviation of each parameter.

Station No.	Temperature (°C)	Salinity (psu)	Nutrients (µM)			DIN/DIP ratio	
			DIN	DIP	DSi		
Western coast	St. 1	9.7-28.9 (18.7±7.2)	12.9-30.6 (20.8± 5.7)	5-156 (52± 51)	ND <sup>1</sup> -2.8 (0.8±1.0)	1- 74 (43± 25)	13-571 (240±221)
	St. 2	10.3-25.8 (17.4±5.6)	1.3-31.7 (17.3±10.9)	46-285 (114±100)	0.3-16.5 (3.3±5.4)	16-387 (95±123)	4-308 (102±111)
	St. 3	8.1-26.3 (18.3±6.5)	11.4-33.3 (21.4± 8.1)	10-254 (89± 88)	0.2-2.4 (1.0±0.8)	7-118 (50± 43)	6-510 (165±208)
	St. 4	8.0-29.6 (19.9±8.3)	9.3-32.9 (23.8± 8.2)	3-390 (104±123)	0.3-2.9 (1.2±0.8)	6- 98 (38± 28)	2-786 (164±264)
	St. 5	9.5-29.8 (20.5±7.3)	0.7-32.3 (20.6±10.8)	20-223 (85± 77)	0.2-5.3 (1.5±1.6)	1-174 (65± 57)	11-375 (111±126)
Eastern coast	St. 6	8.6-28.6 (19.4±7.9)	10.8-32.6 (26.7± 6.8)	1-322 (68±105)	ND-2.9 (1.0±1.1)	8-134 (37± 41)	2-507 (125±165)
	St. 7	7.6-25.7 (17.0±6.6)	15.8-32.2 (25.7± 5.7)	3-122 (72± 46)	0.4-4.7 (1.6±1.5)	9-118 (62± 41)	3-250 (83± 90)
	St. 8	8.4-27.7 (18.1±7.9)	0.8-32.0 (19.7±11.7)	11-333 (108±107)	0.9-2.9 (1.8±0.7)	7-234 (86± 79)	11-156 (58± 52)
	St. 9	7.9-25.5 (17.8±7.3)	11.8-31.2 (24.9± 6.2)	3-226 (63± 73)	0.7-9.0 (3.1±3.6)	10-223 (74± 70)	3-302 (57±102)
	St. 10	8.6-25.5 (17.9±7.5)	12.4-30.3 (20.3± 6.3)	3-241 (104± 85)	0.8-7.8 (3.2±2.2)	30-173 (85± 49)	1-207 (51± 70)
	St. 11	8.7-25.5 (18.5±6.4)	5.6-28.1 (20.0± 7.2)	15-68 (39± 20)	0.2-2.3 (0.9±0.8)	48-211 (100± 60)	6-292 (103±113)

<sup>1</sup>ND = Not Detected

수한 수준이었다. 그러나, COD와 AVS 는 대륙주변부의 다른 지역들과 비슷하거나 약간 낮은 농도를 나타내었다(Table 2).

### 공극수 중 수온, 염분 및 영양염류 농도

제주도 연안 조간대 공극수의 이화학적 특성 및 시·공간적 분포특성을 살펴보기 위하여 각 정점별 공극수 중 수온, 염분, 영양염류(DIN, DIP, DSi) 분석결과를 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다. 공극수 중 수온은 7.6-29.8°C 범위로 전형적인 한반도 연안 해수의 수온변화와 유사하게 겨울철인 2010년 2월에 가장 낮고 여름철인 2010년 9월에 가장 높았다.

염분은 0.7-33.3 psu 범위로 시·공간적으로 큰 차이를 보였다. 대체로 강우의 영향을 많이 받는 여름철(7월과 9월)에 낮고 건기인 겨울철(12월과 2월)에 높은 W 형태의 시간적 변화 경향을 나타내었으며, 제주도 서쪽지역은 2009년 7월과 2010년 9월에, 동쪽지역은 2009년 7월과 2010년 5월에 다른 시기에 비해 염분이 낮았다. 공간적으로는 제주도 북서쪽의 정점 2

과 북동쪽의 정점 8에서 다른 정점들에 비해 낮은 평균염분을 보였으며, 겨울철인 2009년 12월, 2010년 2월과 12월에는 각 정점간에 염분차이가 적었으나 그 외 시기에는 정점간에 염분차이가 컸다. 이는 제주도 연안 공극수 중 염분이 각 시기별 담지하수의 유동량에 의해 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 또한, 제주도 서쪽지역과 동쪽지역의 염분범위는 서로 비슷하였으나, 2010년 5월과 2010년 12월을 제외하면 거의 모든 시기에 제주도 동쪽지역이 서쪽지역보다 높은 평균 염분을 나타내었다(Fig. 6). 이는 제주도의 지질학적 특성과 활발한 인간활동과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 이전에 Kim et al. (2003)은 제주도 서쪽지역의 경우 높은 투수성의 화산암 아래에 낮은 투수성의 퇴적층인 서귀포층이 얇은 깊이에 존재하고 피압 대수층(artesian or confined aquifer)이 발달되어 있어 담지하수의 영향을 많이 받는 반면, 동쪽지역은 높은 투수층의 현무암 아래에 미고결 세립사층이 존재하고 자유면 대수층(unconfined aquifer)이 발달되어 있어 재순환하는 해수의 영

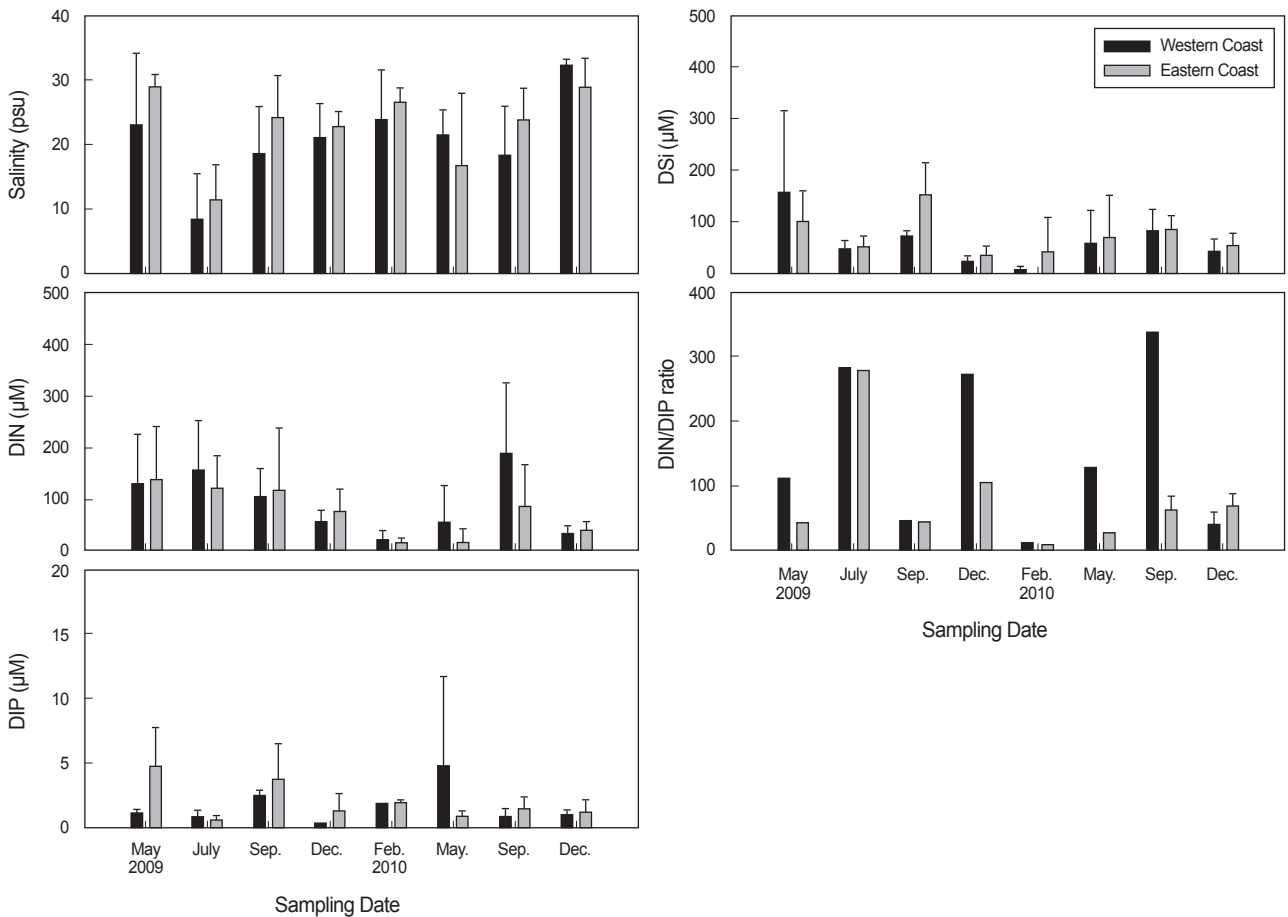


Fig. 6. The average of salinity and nutrient concentrations in pore water with each sampling period in the western and eastern coasts of Jeju Island from May 2009 to December 2010. The solid line represents the Redfield ratio (N/P ratio, - 16) in offshore seawater.

향을 많이 받는다고 보고한 바 있다. 또한, 제주도 동쪽지역의 경우 다른 지역에 비해 지하수위가 낮고 생활용수로 이용하기 위한 담지하수와 육상 수조식 양식장의 양식수 확보를 위한 염지하수(brackish groundwater)의 과잉양수로 해수침입(seawater intrusion)이 용이하여 지하수의 염수화가 활발하게 진행되고 있다(Booh and Jeong, 2000; Kim et al., 2001)

공극수 중 영양염류는 성분별 각기 다른 시-공간적 농도 분포특성을 나타내었다. 연구기간 동안 DIN은 1-390 µM 범위로 염분과 달리 대체로 여름철에 높고 겨울철에 낮은 M 형태의 시간적 변화 경향을 나타내는데, 제주도 서쪽지역의 경우에는 상대적으로 낮은 염분을 나타내었던 2009년 7월과 2010년 9월에, 동쪽지역은 2009년 5월과 9월에 다른 시기에 비해 다소 높은 농도를 보였다(Fig. 5). 공간적으로는 다소 낮은 염분을 나타내었던 제주도 북서쪽의 정점 2과 북동쪽의 정점 8에서 연구기간 동안 다른 정점들에 비해 높은 DIN 농도를 나타내었다. 염분차이가 적었던 겨울철인 2010년 2월과 12월에는 각 정점간의 DIN 농도차이가 적었으며 그 외 시기에는 각 정점간에

농도차이가 매우 컸다. 또한, 낮은 염분을 보였던 2009년 7월, 2010년 5월과 9월에는 제주도 서쪽지역이 동쪽지역에 비해 상대적으로 높은 평균 DIN 농도를 보였으나 그 외 시기에는 동쪽지역이 서쪽지역에 비해 비슷하거나 높은 평균 DIN 농도를 나타내었다(Fig. 6). 염분대별 DIN 농도를 살펴 보았을 때, 각 염분대별로 DIN 농도의 분산이 크지만 평균농도에 있어서 염분이 높을수록 DIN의 농도는 낮았으며, 염분별 DIN 농도에 있어서도 음의 상관성( $r = -0.52, P < 0.001$ )을 보이며 유의한 차이가 나타났다(Fig. 7). 이는 최근 Kim et al. (2011b)이 제주도의 화순만과 방두만 연안에서 측정된 염분에 따른 공극수 및 지하수중 영양염류 농도 경향과 유사한 연구결과이다. 이러한 공극수 중 DIN의 농도는 퇴적물 내에서 강우에 의해 육상으로부터 오염된 DIN의 유입으로 높은 DIN 농도를 가진 담지하수와 재순환하는 해수의 영향으로 낮은 DIN 농도를 가진 염지하수 사이의 혼합과 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉, 지하수중 DIN 농도는 일반적으로 농·축산활동, 생활하수의 유입 등에 의한 인위적인 요인의 영향으로 높은 농도를 보이는데(Slomp



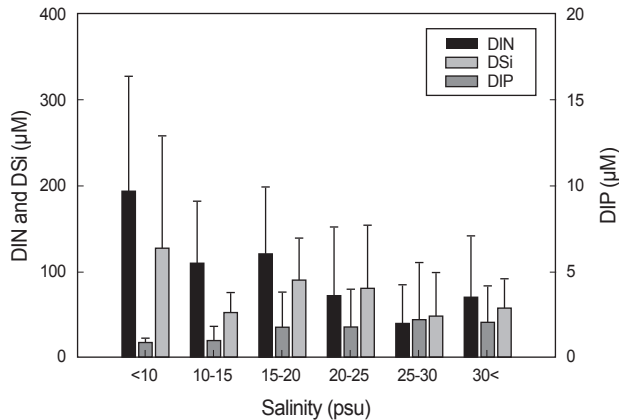


Fig. 7. The average of DIN, DIP, and DSi concentrations in pore water with each salinity zone during the study periods.

and Cappellen, 2004), 제주도 또한 지질 특성상 강우에 의해 빗물이 쉽게 지표면에 스며들어 지표면의 오염된 질산성 질소를 지하로 이동시켜 담지하수 중 DIN 농도가 높은 농도를 보인다(Oh et al., 2006). 따라서, 제주도 연안 공극수 중 DIN 농도는 염분과 마찬가지로 각 시기별 담지하수의 유동량에 의해 시·공간적으로 크게 달라지는 것으로 생각된다.

DSi는 1-387  $\mu\text{M}$  범위로 대체로 겨울철인 2009년 12월과 2010년 2월에 다른 시기에 비해 낮은 DSi 농도를 나타내었고, 제주도 서쪽지역에서는 2009년 5월에, 동쪽지역에서는 2009년 5월과 9월에 다른 시기에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였다(Fig. 5). 공간적으로는 제주도 북서쪽의 정점 2과 북동쪽의 정점 11에서 연구기간 동안 다른 정점들에 비해 높은 평균 DSi 농도를 나타내었다. 특히, DIN과 유사하게 염분차이가 적었던 2009년 12월과 2010년 2월과 12월에는 각 정점간에 DSi 농도 차이가 적은 반면 그 외 시기에는 농도 차이가 매우 컸으며 제주도 동쪽지역이 서쪽지역에 비해 그 변화가 더욱 컸다. 또한, 2009년 5월에는 제주도 서쪽지역이 동쪽지역에 비해 다소 높은 평균 DSi 농도를 보였으나 그 외 시기에는 동쪽지역이 서쪽지역에 비해 비슷하거나 높은 평균 DSi 농도를 나타내었다(Fig. 6). 염분대별 DSi 농도를 살펴본 결과, DIN과 유사하게 각 염분대별로 DSi의 농도의 분산이 크고 평균농도에 있어서 염분이 높을수록 DSi의 농도는 작았으나, 염분별 DSi 농도에 있어서는 유의한 상관성을 보이지 않았다(Fig. 7). 이러한 공극수 중 DSi의 농도는 퇴적물 내에서 재순환하는 해수의 영향으로 낮은 DSi 농도를 가진 염지하수와 상대적으로 각기 다른 체류시간을 가진 높은 DSi 농도를 함유한 담지하수 사이의 혼합과 관련이 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 DSi는 암석 내 규산염 광물의 화학적 풍화작용과 가수분해에 의해 공급되며 지하수 내에서 체류시간이 길수록 용출로 인해 그 농도는 높아진다(Freeze and Cherry, 1989). 따라서, 제주도 연안 공극수 중 DSi 농도는 지하수의 체류시간에 따른 용출과 각 시기별 담지하수의 유동에 의해 시·공간적으로 크게 달라지는 것으로

생각된다.

DIP는 연구기간 동안 ND-9.0  $\mu\text{M}$  범위로 DIN, DSi와 달리 시·공간적으로 큰 변화를 보이지 않았다. 2010년 5월에 제주도 북서쪽의 정점 2과 남서쪽의 정점 5, 2009년 5월과 9월에 제주도 북동쪽의 정점 9-10을 제외하면 대부분의 시기에 약 2.5  $\mu\text{M}$  이하의 낮은 농도를 보이며 각 시기별로 큰 변화를 보이지 않았고, 정점간에도 큰 농도차이를 보이지 않았다(Fig. 5). 또한, 2010년 5월에는 제주도 서쪽지역이 동쪽지역에 비해 다소 높은 평균 DIP 농도를 보였으나 그 외 시기에는 동쪽지역이 서쪽지역에 비해 비슷하거나 높은 평균 DIP 농도를 나타내었다(Fig. 6). 각 염분대별로 DIP의 평균농도도 거의 일정하였으며 염분별 DIP 농도에 있어서도 유의한 상관성을 보이지 않았다(Fig. 7). 이러한 공극수 중 DIP 농도는 육상의 담지하수 중 DIP 농도와 재순환하는 해수의 영향을 받는 염지하수 중의 DIP 농도가 서로 비슷하기 때문인 것으로 생각된다. 즉, DIP는 DIN과 마찬가지로 인위적인 오염에 의해서 지하수중에 높은 농도를 보이지만(Slomp and Cappellen, 2004), 담지하수 중 DIP 농도가 재순환하는 해수에 의한 염지하수 중의 DIP 농도와 유사할 경우 본 연구와 같이 퇴적물 내에서 이동하는 동안 서로 혼합되어도 염분대별로 큰 차이가 없을 가능성이 있다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 제주도 연안 조간대내 공극수 중 영양염류의 농도는 각 시기별 다른 강우 패턴에 의한 담지하수의 유동과 퇴적물의 산화-환원환경(redox condition) 등 퇴적물 내에서의 복잡한 수리적 혹은 지화학적 과정의 영향을 받아 시공간적으로 큰 변화를 보이는 것으로 생각된다. 강우의 영향을 받는 시기엔 지표면으로부터 오염된 지표수의 유입 및 긴 체류시간을 가진 높은 영양염류 농도를 함유한 담지하수가 해안가로 빠져나오면서 퇴적물내 공극수 혹은 재순환하는 해수와 혼합되어 해안가 부근의 공극수에서 높은 영양염류 농도를 보이고 공간적으로 큰 차이를 보이는 반면, 겨울철에는 조석에 따른 낮은 영양염류 농도를 가진 해수의 영향을 받아 공극수 중 영양염류의 농도가 낮고 공간적으로도 유사한 농도를 보인다.

한편, 연구기간 동안 제주도 연안 공극수 중 DIN/DIP 농도비는 1-786 범위로 시공간적으로 큰 차이를 보였으며, 일반적인 해수 중의 DIN/DIP 농도비(Redfield ratio, ~16)와 큰 차이를 나타내었다. 특히, 건기인 2010년 2월에는 DIN/DIP 농도비가 평균 10으로서 Redfield ratio 보다 상당히 낮았으나 강우의 영향을 받는 그 외 시기에는 DIN/DIP 농도비가 평균 127로서 Redfield ratio보다 상당히 높았다(Fig. 6). 최근, Hwang et al. (2005b)은 방사성 동위원소 추적자를 이용하여 제주도 동부에 위치한 방두만에서 영양염류의 주 공급원은 해저지하수이고, 색소분석을 통한 저서미세조류의 분포로부터 해저지하수를 통해 유입되는 과잉의 영양염류에 의해 연안 부영양화가 발생할 가능성이 높다고 보고한 바 있다. 따라서, 이러한 DIN/DIP 농도비가 불균형을 이루고 있는 공극수가 제주도 연안에 해저

지하수를 통해 유입될 경우 겨울철 DIN이 제한 영양염류로 작용하는 환경에서 여름철 DIP가 제한 영양염류로 작용하는 연안환경에 큰 변화를 일으키며, 최근 제주도 해안가를 따라 발생하는 해조류의 이상번식의 원인으로 작용할지 모른다. 또한, 제주도 연안에는 담지하수 혹은 염지하수(fresh or brackish groundwater)를 이용한 대규모의 육상 수조식 양식시설이 분포하고 있고, 이들 양식장으로부터 양식 사육수가 여과 없이 연안해역으로 유입되기 때문에 자연적으로 유입되는 해저지하수에 더하여 이로 인한 과잉의 영양염류의 유입으로 연안 부영양화가 가속화 될 것으로 예상된다. 따라서, 제주도 연안 지하수중 높은 영양염류 특성과 해저지하수를 통한 영양염류 유입의 중요성을 인식하고 연안해역으로의 해저지하수 유입에 따른 생태계 영향에 대한 보다 심도있는 연구가 필요하며, 아울러 제주도 연안 생태계의 보호 및 보전을 위해 연안 담지하수 및 염지하수 이용에 대한 체계적인 관리가 필요하다.

## 사 사

이 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준 국립수산과학원 갯벌연구소 연구원들에게 감사를 드립니다. 이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업(RP-2012-ME-34)의 지원에 의해 연구되었습니다.

## 참고문헌

Booh SA and Jeong GC. 2000. Saline water intrusion into fresh groundwater aquifer of eastern area, the Cheju Island. *J Engin Geol* 10, 115-130.

Booh SA, Jeong GC, Kim HB, Kim KS, Woo MH and Lee BH. 2005. Geological structural lines and Hamdeok-Pyoseon graben in Jeju Island. *J Engin Geol* 15, 475-486.

Burnett WC, Aggarwal PK, Aureli A, Bokuniewicz H, Cable JE, Charette MA, Kontar E, Krupa S, Kulkarni KM, Lovelless A, Moore WS, Oberdorfer JA, Oliveira J, Ozyurt N, Povinec P, Privitera AMG, Rajar R, Ramessur RT, Scholten J, Stieglitz T, Taniguchi M and Turner JV. 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Sci Total Environ* 367, 498-543.

Burnett WC, Bokuniewicz H, Huettel M, Moore WS and Taniguchi M. 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry* 66, 3-33.

Burnett WC, Wattayakorn G, Taniguchi M, Dulaiova H, Sojisuporn P, Rungsupa S and Ishitobi T. 2007. Groundwater-derived nutrient inputs to the upper Gulf of Thailand. *Cont Shelf Res* 27, 176-190.

Cable JE, Burnett WC, Chanton JP, Corbett DR and Cable PH. 1997. Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment. *Estuar Coast Shelf Sci* 45, 367-375.

Capone DG and Slater JM. 1990. Interannual patterns of water

table height and groundwater derived nitrate in nearshore sediments. *Biogeochemistry* 10, 277-288.

Charette MA, Buesseler KO and Andrews JE. 2001. Utility of radium isotopes for evaluating the input and transport of groundwater-derived nitrogen to a Cape Cod estuary. *Limnol Oceanogr* 46, 456-470.

Charette MA and Sholkovitz ER. 2006. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 2. Geochemistry of the pore water. *Geochim Cosmochim Acta* 70, 811-826.

Charette MA, Sholkovitz ER and Hansel CM. 2005. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 1. Geochemistry of the permeable sediments. *Geochim Cosmochim Acta* 69, 2095-2109.

Folk RL. 1968. Petrology of sedimentary rock, Hemphill Publishing Co., Austin TX, U.S.A., 170.

Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *J Sed Petol* 27, 3-26.

Freeze RA and Cherry JA. 1989. Ground-water. Prentice-Hall, Inc. Eaglewood Cliffd, New Jersey, U.S.A., 604.

Hamm SY, Cheong JY, Jang S, Jung CY and Kim BS. 2005. Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. *J Hydrol* 310, 111-121.

Herrera-Silveira J. 1998. Nutrient-phytoplankton production relationship in a groundwater-influence tropical coastal lagoon. *Aquat Ecosyst Health Manage* 1, 373-385.

Huettel M, Ziebis W, Forster S and Luther III GW. 1998. Advective transport affecting metal and nutrient distributions and interfacial fluxes in permeable sediments. *Geochim Cosmochim Acta* 62, 613-631.

Hwang DW, Kim G, Lee WC and Oh HT. 2010a. The role of submarine groundwater discharge (SGD) in nutrient budgets of Gamak Bay, a shellfish farming bay, in Korea. *J Sea Res* 64, 224-230.

Hwang DW, Kim G, Lee YW and Yang HS. 2005a. Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. *Mar Chem* 96, 61-71.

Hwang DW, Kim G and Yang HS. 2008. Active exchange of water and nutrients between seawater and shallow pore water in intertidal sandflats. *Ocean Sci J* 43, 223-232.

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

Hwang DW, Park SE, Kim PJ, Koh BS and Choi HG. 2011. Assessment of the pollution levels of organic matter and metallic elements in the intertidal surface sediments of Aphae Island. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 759-771.

Hwang DW and Kim SG. 2011. Evaluation of heavy metal contamination in intertidal surface sediments of coastal islands in the western part of Jeollanam province using geochemical assessment techniques. *Kor J Fish Aquat Sci* 44, 772-784.

- Hwang DW, Ryu SO, Kim SG, Choi OI, Kim SS and Koh BS. 2010b. Geochemical characteristics of intertidal surface sediments along the southwestern coast of Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 146-158.
- Jung RH, Hwang DW, Kim YG, Koh BS, Song JH and Choi HG. 2010. Temporal variations in the sedimentation rate and benthic environment of intertidal surface sediments around Byeonsan Peninsula, Korea. *Kor J Fish Aquat Sci* 43, 723-734.
- Kang DH, Yang SI, Kim TY, Park HJ and Kwon BH. 2008. The variation characteristics of groundwater level with distance from shoreline in the Jeju Island. *J Engin Geol* 18, 157-166.
- Kelly RP and Moran SB. 2002. Seasonal changes in groundwater input to a well-mixed estuary estimated using radium isotopes and implications for coastal nutrient budgets. *Limnol Oceanogr* 47, 1796-1807.
- Kim BS, Hamm SY, Lee CM, Ok SI, Cha EJ and Ko YS. 2011a. Features of regional hydrogeology and groundwater distribution of volcanic rocks in Jeju Island. *J Geol Soc Kor* 47, 263-276.
- Kim G, Hwang DW, Ryu JW and Lee YW. 2005. Submarine groundwater discharge (SGD) into the Yellow Sea revealed by  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{226}\text{Ra}$  isotopes: Implications for global silicate fluxes. *Earth Planet Sci Lett* 237, 156-166.
- Kim G, Lee KK, Park KS, Hwang DW and Yang HS. 2003. Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island. *Geophy Res Lett* 30, doi:10.1029/2003GL018378.
- Kim G, Kim JS and Hwang DW. 2011b. Submarine groundwater discharge from oceanic islands standing in oligotrophic oceans: Implications for global biological production and organic carbon fluxes. *Limnol Oceanogr* 56, 673-682.
- Kim JY, Oh YK and Ryu SP. 2001. Study on the salinization in groundwater of the eastern area of Cheju Island. *J Kor Environ Sci Soc* 10, 47-58.
- Koh DC, Niel PL, Busenberg E and Kim YJ. 2007. Evidence for terrigenous  $\text{SF}_6$  in groundwater from basaltic aquifers, Jeju Island, Korea: Implications for groundwater dating. *J Hydrol* 339, 93-104.
- Krest JM, Moore WS, Gardner LR and Morris JT. 2000. Marsh nutrient export supplied by groundwater discharge: Evidence from radium measurements. *Global Biogeochem Cycles* 14, 167-176.
- LaRoche J, Nuzzi R, Waters R, Wyman K, Falkowski PG and Wallace DWR. 1997. Brown tide blooms in Long Island's coastal waters linked to interannual variability in groundwater flow. *Global Change Biol* 3, 397-410.
- Lee YW, Hwang DW, Kim G, Lee WC and Oh HT. 2009. Nutrient inputs from submarine groundwater discharge (SGD) in Masan Bay, an embayment surrounded by heavily industrialized cities, Korea. *Sci Total Environ* 407, 3181-3188.
- Lee YW and Kim G. 2007. Linking groundwater-borne nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer. *Estuar Coast Shelf Sci* 71, 309-317.
- Lee YW, Kim G, Lim WA and Hwang DW. 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. *Limnol Oceanogr* 55, 1-10.
- Moore WS. 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by  $^{226}\text{Ra}$  enrichment. *Nature* 380, 612-614.
- Moore WS, Sarmiento JL and Key RM. 2008. Submarine groundwater discharge revealed by  $^{228}\text{Ra}$  distribution in the upper Atlantic Ocean. *Nature Geosci* 1, 309-311.
- Oberdorfer JA. 2003. Hydrogeologic modeling of submarine groundwater discharge: Comparison to other quantitative methods. *Biogeochemistry* 66, 159-169.
- Oberdorfer JA, Valentino MA and Smith SV. 1990. Groundwater contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California. *Biogeochemistry* 10, 199-216.
- Oh TG, Kim YJ, Kim KS and Kim SR. 2006. Nitrate and chloride characteristics in the groundwater in Jeju area. *J Environ Res* 3, 1-14.
- Park WB, Kim GP, Lee JH, Moon DC, Kim SJ, Koh GW, Pang SJ and Pang IC. 2011. Variation of groundwater level and recharge volume in Jeju Island. *J Environ Sci* 20, 857-872.
- Park WB, Yang SK and Koh GW. 1994. Study on the fluctuations of groundwater levels in Cheju Island, Korea. *J Kor Environ Sci Soc* 3, 333-348.
- Ryu SO, Kim JY, Chang JH, Cho YG, Shin SE and Eun GYN. 2006. A study on the transport mechanism of tidal beach sediments I. Deukryang Bay, south coast of Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 27, 221-235.
- Shum KT and Sundby B. 1996. Organic matter processing in continental shelf sediments – the subtidal pump revisited. *Mar Chem* 53, 81-87.
- Slomp CP and Cappellen PV. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: Controls and potential impact. *J Hydrol* 295, 64-86.
- Taniguchi M, Burnett WC, Cable JE and Turner JV. 2002. Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrol Process* 16, 2115-2129.
- Taniguchi M, Burnett WC, Dulaiova H, Kontar EA, Povinec PP and Moore WS. 2006. Submarine groundwater discharge measured by seepage meters in Sicilian coastal waters. *Cont Shelf Res* 26, 835-842.
- Valiela I, Costa J, Foreman K, Teal JM, Howes B and Aubrey D. 1990. Transport of water-borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters. *Biogeochemistry* 10, 177-198.
- Waska H and Kim G. 2010. Differences in microphytobenthos and macrofaunal abundances associated with groundwater discharge in the intertidal zone. *Mar Ecol Prog Ser* 407, 159-172.

Waska H and Kim G. 2011. Submarine groundwater discharge (SGD) as a main nutrient source for benthic and water-column primary production in a large intertidal environment of the Yellow Sea. *J Sea Res* 65, 103-113.

Won JH, Lee JY, Kim JW and Koh GW. 2006. Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea. *Hydrogeol J* 14, 532-547.

Youn J and Kim TJ. 2011. Seasonal variations of Hamo and Hy-eopjae Beach sediments in the western part of Jeju Island. *J*

*Kor Earth Sci Soc* 32, 265-275.

Youn JS and Koh GW. 1994. Seasonal variations of beach sediments in Cheju Island, Korea. *J Kor Earth Sci Soc* 15, 46-59.