

동해 독도 사면 퇴적물의 높은 재광물화와 탈질소화

정진현¹ · 김동선² · 이태희³ · 안순모^{1*}

¹부산대학교 지구환경시스템학부

²한국해양연구원 기후연안재해연구부

³한국해양연구원 남해특성연구부

High Remineralization and Denitrification Activity in the Shelf Sediments of Dok Island, East Sea

JIN HYUN JEONG¹, DONG SEON KIM², TAE HEE LEE³ AND SOONMO AN^{1*}

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University

²Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI

³Southern Coastal Environmental Research Department, KORDI

동해의 독도 사면 지역에서 퇴적물 산소 배양과 ¹⁵N isotope pairing technique를 이용하여 측정된 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 각각 1.04~9.08 mmol m⁻² d⁻¹와 7.06~37.67 μmol m⁻² d⁻¹로 유사한 수심의 다른 심해 지역에 비해 모두 높게 측정되었다. 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 퇴적물 내 유기 탄소 함량이 높은 정점에서 높았으며, 표층 퇴적물 내 유기물 함량은 질산화에 의해 생성된 질산염을 이용하는 탈질소화(coupled nitrification-denitrification)와 높은 상관관계를 보였다. 이는 본 조사 지역의 퇴적물 산소요구량뿐만 아니라 탈질소화율 역시 표층 퇴적물 내 유기물에 가장 큰 영향을 받는 것을 시사한다. 독도 사면 지역의 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량은 1.8~2.4%로 다른 심해 지역보다 높게 측정되었으며, 이는 높은 일차생산량에 의해 내보내기 생산이 높기 때문으로 추정된다. 독도 사면 지역에서 표층 퇴적물 내 유기물 농도는 일차생산에 의한 내보내기 생산에 의해 조절되며, 내보내기 생산이 퇴적물에서 일어나는 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율 같은 유기물 분해율의 가장 큰 조절 요인인 것으로 추정된다.

The rates of sediment oxygen demand(SOD) and denitrification(DNF) were measured using ¹⁵N isotope pairing technique in intact sediment cores in the shelf of Dok Island. The SOD and DNF in the continental shelf of Dok Island were ranged from 1.04 to 9.08 mmol m⁻² d⁻¹ and from 7.06 to 37.67 μmol m⁻² d⁻¹, respectively. The SOD and DNF values in this study are higher than typical deep sea sediment. The SOD and DNF in this study were high in the high organic matter content sediment and high organic matter content was promotive of coupled nitrification-denitrification. Organic carbon contents in surface sediment ranged from 1.8 to 2.4%, which is higher than typical deep sea sediments. Therefore we conclude that the organic matter content in surface sediment is determined by the nature of the export production not the water depth in East sea sediment and the nature of the export production also determines remineralization processes such as SOD and DNF in East sea/Ulleung Basin sediment.

Keywords: East Sea, Denitrification, Sediment oxygen demand, remineralization, Dok island

서 론

유광대(euphotic zone)에서 일차생산에 의해 만들어진 유기물은 수층에서 미생물에 의해 분해되거나 “내보내기 생산(export production)”에 의해 퇴적층에 도달하게 된다. 퇴적층으로 유입된 유기물은 재부유 되거나 퇴적층에 묻히기도 하지만 대부분은 초기 변성(early diagenesis) 과정에서 미생물에 의해 분해된다. 이러한 분해 과정에서 생성되는 무기 형태의 질소 화합물은 일차 생

산을 조절하는 주요 인자로 작용하며, 생물에게 있어 성장과 번식에 중요한 역할을 한다(Arrigo, 2004). 식물플랑크톤에게 필요한 질소 영양염의 공급은 유광층 내 영양염 재순환(regenerated nitrogen)이나 영양염이 풍부한 저층수의 유입(new nitrogen)에 의해 이루어지며, 모두 유광층의 일차생산에 중요하다(Yool *et al.*, 2007). 저층수의 영양염 농도는 퇴적층 표면의 유기물 분해에 영향을 받으므로, 퇴적층 표면에서 일어나는 유기물의 재광물화(remineralization) 과정이나 초기 변성 과정은 심해수의 화학적 성분에 영향을 끼칠 뿐만 아니라 전지구적인 생지화학적 순환에 영향을 미칠 수 있다(Brunnegard *et al.*, 2004).

*Corresponding author: sman@pusan.ac.kr

퇴적물에서 일어나는 질소 변환 과정은 주로 미생물 활동에 의해 진행된다(Zehr and Ward, 2002). 미생물에 의한 질소 변환 과정 중 탈질소화 과정은 질산염을 질소 가스로 변환시키는 과정으로, 혐기성 박테리아에 의해 일어난다(Straub *et al.*, 1996; Zumft, 1997; Tuominen *et al.*, 1998). 탈질소화 과정은 생물이 이용할 수 있는 질소 화합물을 해양에서 제거시키는 역할을 하기 때문에 중요하게 인식되고 있다(Seitzinger and Giblin, 1996). 따라서 전 세계의 여러 해양 환경에서 질소 제거 과정에 대해 많은 연구가 진행 중이다(Cai and Reimers, 1995; Nakamura, 2003; Grenz *et al.*, 2003; Giles *et al.*, 2003; Sorensen *et al.*, 1984; Tuominen *et al.*, 1998; Laursen and Seitzinger, 2002; Brunnegard *et al.*, 2004).

수층에 비해 상대적으로 무산소 환경이 쉽게 만들어지는 퇴적층은 탈질소화 과정이 일어나기에 이상적인 장소가 된다(Seitzinger and Giblin, 1996). 퇴적물 내 탈질소화 과정은 수층으로부터 퇴적물 내로 공급되는 질산염을 환원하는 탈질소화 과정(uncoupled denitrification)과 퇴적물 내 질산화(Nitrification) 과정에서 생성된 질산염을 환원하는 탈질소화 과정(coupled nitrification-denitrification)으로 구분되며, 일반적으로 해양에서는 이 두 과정 모두를 통하여 해수 중의 질소 화합물이 제거된다(Nielsen *et al.*, 1996).

동해는 전형적인 “대륙 주변해(marginal sea)”로, 대륙 주변해의 일반적인 해양학적 특성은 일차생산이 대양에 비해 비교적 많다는 것이다. 일차생산에 의해 만들어진 유기 물질이 많기 때문에 일반적으로 심해로의 침강이 많이 일어나게 되고, 더군다나 해류에 의해 수평으로 이동되는 유기 물질이 존재하는 경우 많은 양의 유기물이 퇴적층으로 유입될 수 있다(Jahnke and Jahnke, 2000; Kawahata *et al.*, 2006). 따라서 동해 같은 대륙연변지역의 특성을 갖는 지역에서는 유기 물질의 퇴적이 많고, 재광물화율이 높은 것이 일반적이다(Jahnke and Jahnke, 2000; Kawahata *et al.*, 2006).

여러 연구에서 동해 퇴적물 내 탈질소화 과정이 활발하게 일어날 것이라는 가능성이 제시되었다(Chen *et al.*, 1999; Yanagi, 2002; Lee *et al.*, 2007). Chen *et al.* (1999)은 동해로 유입되는 새로운 저층 냉수의 생성의 약화에 의해 용존산소 공급이 감소하여 동해가 무산소 환경으로 변하고 있다는 가능성을 제시하였다. 이러한 동해 무산소환경화의 가능성은 향후 혐기성 유기물 분해 과정인 탈질소화 과정이 높아질 수 있음을 암시한다. Yanagi (2002)는 퇴적층을 고려하지 않은 모델을 통하여 동해에서 질소 영양염의 유입유출량을 계산하였는데 그 결과, 동해 내에서 질소 영양염의 유입유출량이 평형을 이루지 않았으며, 동해 상층수와 저층수의 N:P ratio가 11.3으로 Redfield ratio보다 작은 값을 나타내었다. 이는 동해 내에서 무기 질소 영양염이 제거됨을 지시하며, 그 기작으로써 퇴적물 내 탈질소화 과정이 중요함을 시사하였다(Yanagi, 2002). Lee *et al.*(2007)은 동해 울릉분지 일부 지역에서 저층수의 용존산소 농도가 높고 질산염 농도가 낮음에도 불구하고 아질산염이 발견되었다고 보고하여 역시 탈질소화가 활발히 일어날 가능성을 보고하였다.

이처럼 현재 동해에서 퇴적물 내 초기 변성과 질소 순환에 연관된 다양한 관심사들이 제시되고 있다. 하지만 현재 동해 퇴적물에서 재광물화 과정이나 탈질소화 과정에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 연구의 목적은 독도 사면 지역의 퇴적물에서 산상 배양과 ¹⁵N isotope pairing technique를 통하여 퇴적물 산소

요구량과 탈질소화율을 측정하여 공간적 분포를 살펴보고, 다른 지역과의 비교를 통하여 동해 심해 퇴적물의 재광물화와 탈질소화의 변동에 영향을 미치는 요인들을 추정하여 보는데 있다.

재료 및 방법

미생물에 의한 질소 영양염의 변환 과정을 알아보기 위해 2007년 3월과 11월, 2008년 3월 총 세 차례 조사하였다. 연구 지역은 동해의 독도 사면 지역으로 조사 정점은 총 8개로 설정하였으며, 한국해양연구원(Korea Ocean Research & Development Institute; KORDI)의 조사 정점을 바탕으로 하였다(Fig. 1).

각 조사 정점에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율을 측정하기 위해 박스 코어를 이용하여 퇴적물을 채취한 후 박스코어로부터 다시 6개의 퇴적물 코어(지름 4×높이 22 cm)를 채취하였고, 퇴적층 상부 약 50 m 위의 저층수를 현장수로 사용하여 산상 배양하였다. 저층수 채취에는 Rossette sampler를 이용하였다. 산상 배양 과정에서 ¹⁵N isotope pairing technique를 이용하기 위해 질소 안정 동위 원소를 가진 질산염(sodium nitrate-¹⁵N; 98+ atom% ¹⁵N, Sigma-Aldrich)을 첨가하였는데, 첨가 후 최종 농도는 100 μM로 맞추었다. 질산염 첨가 후 24시간 동안 현장은도를 고려한 1°C 이하의 온도에서 전배양하여 퇴적물 내 질산염 농도가 수층 농도와 평형상태를 이루도록 하였다. 그 후, 수조 내 해수와 유동을 차단하기 위해 코어 윗부분에 실리콘 마개를 설치하여, 수조의 해수와 코어 내의 해수 교환을 차단하였다. 그리고 해수와 차단하는 순간을 0시로 하고, 0시를 기준으로 하여 2시간 후 그리고 24시간 후 각각 2개의 배양하는 퇴적물 코어에서 상부 해수를 채취하였다. 채취한 해수 시료는 20 mL 용량의 유리 용기에 가득 채우고 고정시약으로 50% ZnCl₂ 0.1 mL를 넣은 후 밀봉하여 1°C 이하에서 냉장보관 하였다. 모든 샘플은 1°C 이하의 온도를 유지한 채 실험실로 운반하였고, 실험실에서 Membrane Inlet Mass Spectrometer

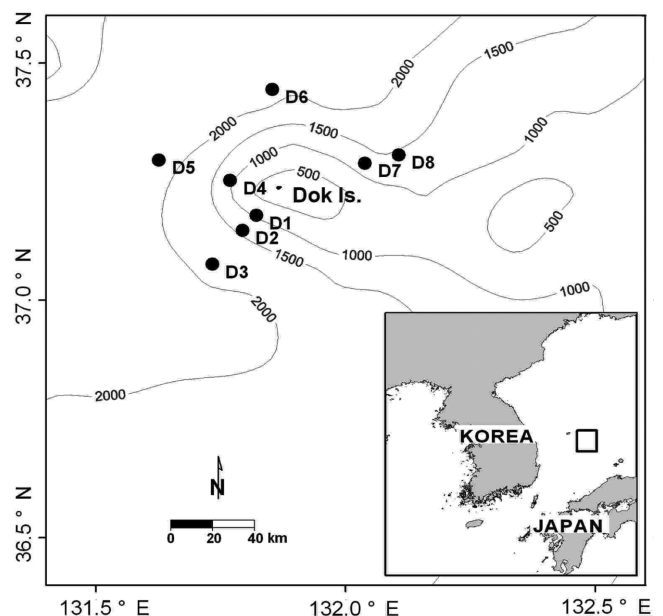


Fig. 1. Locations of the sampling stations.

(MIMS)를 이용하여 각 샘플의 용존산소 농도 및 $^{29}\text{N}_2$ 농도와 $^{30}\text{N}_2$ 농도를 측정하였다.

MIMS 시스템은 용존 가스가 실리콘 막을 통해 직접 질량분석기의 검출기로 유입되기 때문에 측정 과정이 간편하고 다른 방법에서 용존 가스 추출 시 발생하는 오차를 크게 줄일 수 있다(An *et al.*, 2001). An 등(2001)은 이러한 MIMS 시스템의 장점에 안정성 동위원소를 가진 질소 가스($^{29}\text{N}_2$, $^{30}\text{N}_2$)를 측정할 수 있는 기능을 더함으로써, isotope pairing technique를 가능하게 하였다. 이는 질소 가스의 농도를 보다 간단하고 정밀하게 측정할 수 있으며, 따라서 탈질소화율을 비교적 정확하게 측정하는 것이 가능하기 때문에 본 논문에서는 탈질소화율을 측정함에 있어 MIMS 시스템을 이용하였다.

MIMS 시스템으로부터 얻은 각 샘플의 용존 가스 분압은 아르곤 가스에 대한 비율(O_2/Ar , $^{28}\text{N}_2/\text{Ar}$, $^{29}\text{N}_2/\text{Ar}$, $^{30}\text{N}_2/\text{Ar}$)로 나타내었고 표준용액(20 °C로 유지된 염분 0‰과 35‰의 인공해수)의 비율과 비교하여, 농도로 환산하였다(Kana *et al.*, 1994). 퇴적물 산소요구량은 시간에 따른 용존산소의 감소량으로부터 계산하였으며, 총 탈질소화율은 $^{15}\text{NO}_3^-$ 를 이용한 탈질소화율(D_{15})과 $^{14}\text{NO}_3^-$ 를 이용하는 탈질소화율(D_{14})의 합으로부터 추정하였다(Nielsen, 1992).

$$D_{15} = n(^{14}\text{N}, ^{15}\text{N}) + 2n(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N})$$

$$D_{14} = n(^{14}\text{N}, ^{15}\text{N})/2n(^{15}\text{N}, ^{15}\text{N}) \times D_{15}$$

$$\text{total denitrification rate} = D_{14} + D_{15}$$

총 탈질소화율에서 uncoupled denitrification(D_w)과 coupled nitrification-denitrification(D_n) 구분은 저층수의 $^{14}\text{NO}_3^-$ 와 $^{15}\text{NO}_3^-$ 농도 비율로 계산하였다(Nielsen, 1992).

$$D_w = D_{15} \times [^{14}\text{NO}_3^-]/[^{15}\text{NO}_3^-]$$

$$D_n = D_{14} - D_w$$

해수의 특성은 CTD를 이용하여 각 조사 정점의 수심과 저층수의 수온, 염분을 측정하였으며, 2007년 11월 조사 정점에서 퇴적물 내 깊이별 평균 입도와 유기 탄소 함량, 유기 질소 함량을 측정하였다.

결 과

저층수의 특성

본 조사 정점의 수심은 1162~2234 m이며, CTD로 측정된 저층수의 수온은 모든 정점에서 0.2 °C로 조사 시기에 따른 차이를 보이지 않았다. 저층수의 염분 역시 34.05~34.07‰로 조사 정점 간 매우 유사하였으며, 조사 시기에 따른 차이가 미약하였다. 저층수의 용존산소 농도는 조사 정점 간 다소 차이를 보였지만, 모든 정점에서 약 52~60% 정도의 포화도를 나타내었다(Table 1).

퇴적물 특성

2007년 11월 조사 정점에서 표층 퇴적물의 평균 입도는 7.7~9.5 ϕ 로 점도가 대부분을 차지하였으며, 정점 D3에서는 실트 함량이 다소 높게 나타났다(Fig. 2).

2007년 11월 조사 정점에서 표층 퇴적물의 유기 탄소 함량은

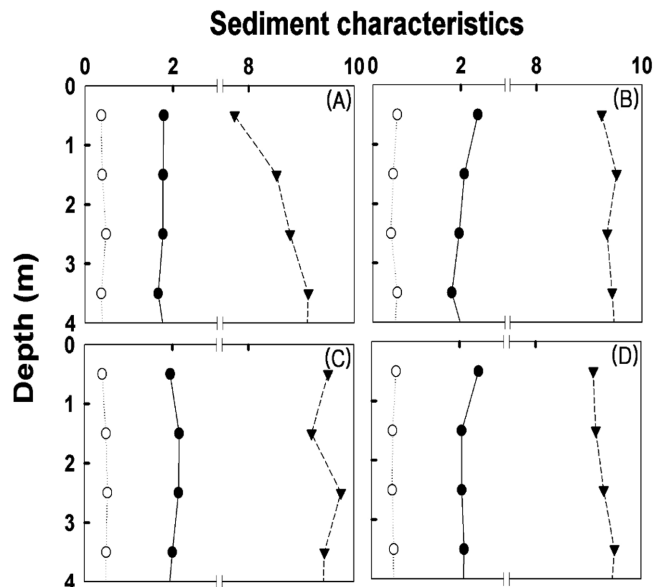


Fig. 2. Organic nitrogen (○) content, organic carbon (●) content and mean grain size (▼) with sediment depth at the stations surveyed in November 2007((A); D3, (B); D5, (C); D6, (D); D7).

Table 1. Geographical positions and water depths of the investigated stations. Temperature(T), salinity(S) and dissolved oxygen concentration in bottom water measured using CTD at each station. ND mean no data.

Date/Ship	ID	Water depth (m)	Longitude °E	Latitude °N	Bottom water		
					T (°C)	S (‰)	O ₂ (μM)
March 2007 R/V ONNURI	D2	1868	131°47'580"	37°08'850"	0.2	34.07	193
	D3	2084	131°44'723"	37°04'476"	0.2	34.06	194
November 2007 R/V EARDO	D5	2208	131°37'517"	37°17'676"	0.2	34.06	198
	D6	2234	131°51'041"	37°26'651"	0.2	34.06	183
	D7	1730	132°02'356"	37°17'384"	0.2	34.06	173
	D1	1540	131°49'232"	37°10'747"	ND	ND	186
March 2008 R/V EARDO	D3	2084	131°44'723"	37°04'476"	0.2	34.06	185
	D4	1162	131°52'168"	37°24'468"	ND	ND	191
	D5	2208	131°37'517"	37°17'676"	0.2	34.06	179
	D7	1730	132°02'356"	37°17'384"	0.2	34.06	182
	D8	1206	132°27'960"	37°42'024"	0.2	34.06	182

Table 2. Rates of sediment oxygen demand (SOD) and uncoupled denitrification (Dw), coupled nitrification-denitrification (Dn) and total denitrification (Dw + Dn) at each station.

Date	Station	Bottom Depth (m)	SOD (mmol m ⁻² d ⁻¹)	DNF (μmol m ⁻² d ⁻¹)		
				Dw	Dn	Total
March 2007	D2	1868	1.04	8.40	0	8.4
	D3	2108	2.03	14.27	0.33	14.60
November 2007	D5	2244	2.05	2.84	18.09	20.93
	D6	2250	3.33	3.01	7.04	10.05
	D7	1792	5.12	2.36	35.31	37.67
March 2008	D1	1540	2.01	22.40	0	22.40
	D3	2108	2.37	7.06	0	7.06
	D4	1162	7.53	3.55	10.15	13.70
	D5	2244	4.12	8.13	2.69	10.82
	D7	1792	2.75	7.42	11.48	18.90
	D8	1206	9.08	32.35	0	32.35

1.8~2.4%로, 모든 정점에서 높게 나타났다. 특히, 정점 D5와 D7에서 각각 2.3%와 2.4%로 조사 정점 중 비교적 높게 나타났으며, 퇴적물 내 깊이에 따라 감소하는 경향을 나타내어 최근에 유기물 농도가 높은 퇴적물이 쌓였음을 시사하였다.

반면, 정점 D3과 D6에서 표층 퇴적물의 유기 탄소 함량은 조사 정점 중 비교적 낮았고 퇴적물 내 깊이 3 cm까지 거의 변화가 없거나 증가하는 경향을 나타내었다. 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량은 수심에 따라 감소하는 경향이 나타나지 않았다.

퇴적물 산소요구량과 탈질소화율

본 연구에서 배양 과정 동안 시간에 따른 용존산소 농도 감소를 이용하여 계산한 퇴적물 산소요구량은 1.04~9.08 mmol m⁻² d⁻¹의 범위를 나타내었다. 2007년과 2008년의 중복 정점 중 정점 D3과 D5에서 퇴적물 산소요구량은 2007년 11월보다 2008년 3월에 전반적으로 높게 나타난 반면, 정점 D7에서 퇴적물 산소요구량은 2008년 3월보다 2007년 11월에 높게 측정되어 조사 정점마다 계절 변화의 양상이 다르게 나타났다(Table 2). 전 조사 정점에서 퇴적물 산소요구량은 수심이 낮은 정점 D4와 정점 D8에서 가장 높게 측정되었다. 독도 사면 지역의 정점들에서 퇴적물 산소요구량은 전반적으로 수심에 따라 감소하는 경향을 나타내었지만, 수심 1500 m 이상의 수심을 갖는 조사 정점들에서는 수심에 의한 감소 경향이 뚜렷하지 않았다(Fig. 3).

퇴적물 선상 배양 동안 ²⁹N₂와 ³⁰N₂ 농도의 시간에 따른 증가율을 이용하여 추정된 탈질소화율은 7.06~37.67 μmol m⁻² d⁻¹의 범위로 측정되었다. 탈질소화율은 조사 정점 간 다소 차이를 나타내었으며, 2007년 11월과 2008년 3월의 중복 조사 정점에서는 2008년 3월에 측정된 탈질소화율이 2007년 11월에 측정된 탈질소화율보다 약 2배 정도 높게 측정되어 계절 변화의 가능성을 나타내었다(Table 2). 독도 사면 지역에서 탈질소화율 역시 수심에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 나타내었지만 경향성은 퇴적물 산소요구량에 비해 미약하였다(Fig. 3).

탈질소화 과정에 사용되는 질산염의 기원에 따라 uncoupled denitrification와 coupled nitrification-denitrification으로 구분한 결과, 대부분의 조사 정점에서 탈질소화 과정은 수층에서 공급되는 질산염에 의한 탈질소화 과정(uncoupled denitrification)이 우세하게 일

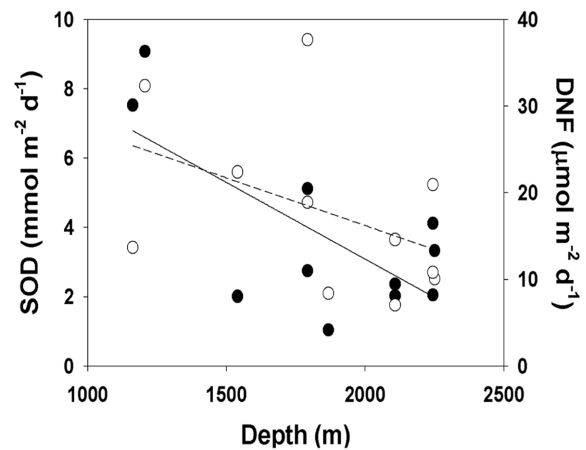


Fig. 3. Rates of sediment oxygen demand (SOD; ●) and total denitrification (DNF; ○) with water depth at the study site. Solid regression line is SOD (R²=0.49, p<0.05) and dotted regression line is DNF (R²=0.20, p>0.05).

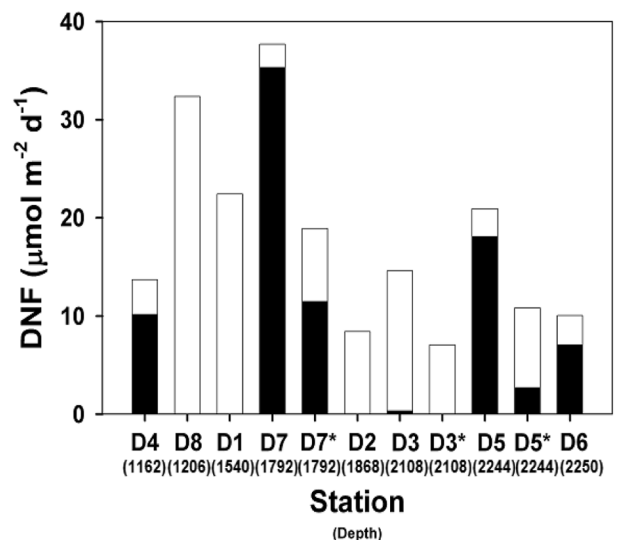


Fig. 4. Rates of uncoupled denitrification (white bar), coupled nitrification-denitrification (black bar) and total denitrification at the study site. *; stations surveyed in 2008.

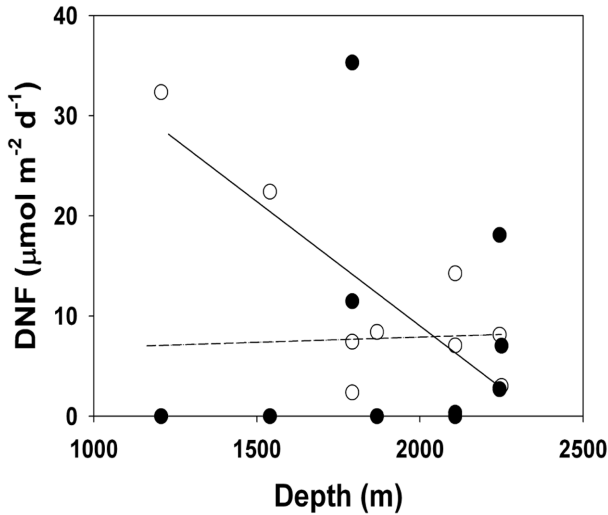


Fig. 5. Uncoupled denitrification (○) and coupled nitrification-denitrification (●) with water depth at the study site. Solid regression line is uncoupled denitrification ($R^2=0.64$, $p>0.05$) and dotted regression line is coupled nitrification-denitrification ($R^2=0.01$, $p>0.05$).

어났다. 정점 D2와 2008년 3월 조사 정점인 D1, D3, D8을 제외한 정점들에서는 uncoupled denitrification과 coupled nitrification-denitrification이 함께 일어났으며, 이러한 정점들 중 2007년 11월 조사 정점인 D3을 제외한 정점들에서 coupled nitrification-denitrification이 총 탈질소화율의 약 60% 이상을 차지하며 총 탈질소화율의 대부분을 차지하였다(Fig. 4). 본 조사 정점에서 uncoupled denitrification은 정점 D4를 제외하면 전반적으로 수심에 따라 감소하는 경향이 나타났다. coupled nitrification-denitrification은 수심에 따른 감소 경향을 보이지 않았으며, 수심이 깊어짐에 따라 uncoupled denitrification에 비해 상대적으로 우세하게 나타났다(Fig. 5).

토 의

표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량

동해 독도 사면 표층 퇴적물의 유기 탄소 함량은 1.8~2.4%로, 북대서양과 태평양의 심해 표층 퇴적물에서 측정된 유기 탄소 함량보다 약 2~10배 이상으로 높게 나타났다(Table 3). 본 연구에서 측정된 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량은 여러 연안 지역에서 측정된 1.3~4.8% 범위(Nowicki *et al.*, 1997; Tuominen, 1998)에 잘 일치하였는데, 일반적으로 퇴적물 내 유기물 농도가 육지에서 멀리 떨어질수록 또는 수심이 깊어질수록 낮아지는 경향을 나타내는 것을 볼 때(Banse, 1990; Smith *et al.*, 1992), 본 조사 정점은 평균 수심이 약 1500 m 이상으로 깊음에도 불구하고 매우 높게 나타난 것이다.

수심이 깊으면서도 유기물 농도가 높은 퇴적물은 일차생산량이 높거나 강물의 유입이 커 해저 바닥으로 유기 물질의 유입이 많은 즉, 내보내기 생산(export production)이 높은 지역에서 보고된 바 있다(Cociasu *et al.*, 1996; Reschke *et al.*, 2000). California 대륙사면 지역의 수심 약 1000 m에서 유기 탄소 플럭스는 $6.9\sim 7.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 나타났다(Walsh and Nittrouer, 1999). 울릉분지 지역

Table 3. Organic carbon (OC) content in surface sediments and organic carbon flux in deep sea area.

Area	OC (%)	OC flux ($\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	Reference
Ulleung Basin	1.8~2.4 avg. 2.6	8.8	1, 2
Atlantic	0.2~0.8	0.7~2.6	3, 4, 5, 6, 7, 11
Pacific	0.44~1.2	0.7~4.4	4, 8
high export production region		6.9~7.2	9, 10

*Reference: (1) this study (2007); (2) Lee *et al.* (2008); (3) Ziveri *et al.* (2000) (4) Broerse *et al.* (2000); (5) Sprengel *et al.* (2000); (6) Romero *et al.* (2002); (7) Jahnke (1996); (8) Emerson *et al.* (1997); (9) Walsh (1991); (10) Pilskaln *et al.* (1997); (11) Sorensen *et al.* (1984)

수심 약 1000 m에서 측정된 유기 탄소 플럭스는 $8.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (Lee *et al.*, 2008)로 위에 언급한 지역의 유기 탄소 플럭스와 유사하게 나타났으며, 다른 심해 지역의 유사한 수심에서 퇴적물 포집기(sediment trap)를 이용하여 측정된 유기 탄소 플럭스보다 약 4배 이상 높게 측정되었다(Table 3).

하지만 울릉분지 지역에서 내보내기 생산이 높게 나타나는 것에 대한 원인은 아직 연구 중이다. 울릉분지 지역은 육지로부터의 강물 유입이 작으며 표층 퇴적물의 C : N 비가 6.98로 Redfield 비와 유사하게 나타난 것으로 보아, 표층 퇴적물로 육지 기원 물질의 유입은 매우 작을 것이라 예상된다(Lee *et al.*, 2008). 울릉분지 지역의 표층 부근에서는 충분한 빛과 동물플랑크톤에 의해 재순환되는 암모니아가 식물플랑크톤의 일차생산에 사용되며, 수온 약층 부근에서는 빛은 다소 제한적이지만 심층으로부터 질산염 공급이 충분하여, 식물플랑크톤 현존량의 척도로 사용되는 엽록소 양이 최대를 나타내고 있다(Chung *et al.*, 1989; Cho *et al.*, 1997). 또한 현재 울릉분지에서는 고온의 동한 난류와 저온의 북한 한류에 의해 전선수역이 형성되어 높은 일차생산력을 가진다고 보고되고 있다(Chung *et al.*, 1989). 최근 연구에서 동해의 유기탄소 침강플럭스는 일차생산력에 의해 큰 영향을 받으며, 유기탄소 침강플럭스와 일차생산력의 비율은 심해역에서 높게 나타난다고 보고되었다(Kim *et al.*, 2009). 따라서 울릉분지 지역에서 내보내기 생산이 높은 것은 동해의 일차생산량이 높기 때문으로 생각된다(Kim *et al.*, 2009).

퇴적물 산소요구량과 탈질소화율

퇴적물 산소요구량이나 탈질소화처럼 심해 퇴적물 표층에서 일어나는 미생물 과정을 측정하기 위해서는 현장 배양이 가장 이상적이다. Benthic lander 등을 이용하는 방법이 개발되어 있으나 비용과 운용의 제약 등으로 제한된 지역에서만 사용되어 왔다. 본 조사에서는 퇴적물을 채취하여 선상에서 현장 조건을 재현하고 배양하는 방법을 사용하였는데, 이에 따른 추정 문제점을 고려하여 보았다.

본 연구에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율을 측정하기 위하여 6개의 퇴적물 코어를 사용하였으며, 본래의 미생물 활동이 회복되도록 하기 위하여 각 조사 정점의 저층수와 함께 현장 온도를 고려하여 24시간 동안 전배양하여 안정화시켰다(Wenzhofer *et al.*, 2001). 따라서 6개 퇴적물 코어는 채취 시 발생하는 환경적 교

란에 의해 초기 상태가 달라졌다 할지라도 24시간 동안의 전배양 과정에서 각 퇴적물 코어의 초기 환경 상태는 모두 같아졌으며, 각 조사 정점의 저층수를 이용하였기 때문에 각 퇴적물 코어 상층수의 환경이 각 조사 정점의 실제 환경과 매우 유사해졌을 것으로 예상된다.

각 시간대에 두 개의 퇴적물 코어에서 시료를 채취하여 용존산소 농도와 $^{29}\text{N}_2$, $^{30}\text{N}_2$ 농도를 측정하였고 그 평균값을 사용하여 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율을 추정하였다. ^{15}N isotope pairing technique의 평가 연구에서 인위적으로 넣어준 $^{15}\text{NO}_3^-$ 는 실제 탈질소화율 측정에 큰 영향을 미치지 않는다고 보고되었다(Middleburg *et al.*, 1996). 따라서 본 연구에서 측정한 탈질소화율은 실제 환경에서의 탈질소화율을 잘 반영할 것으로 예상된다.

기존의 많은 퇴적물 선상 배양 실험에서 대기 중의 산소 유입에 의한 용존산소 농도 증가에 의한 영향이 문제시 되어 왔다(Wenzhofer *et al.*, 2001; Rabouille *et al.*, 2003). 하지만 본 연구의 각 조사 정점에서 측정한 저층수의 용존산소 농도는 모두 $170 \mu\text{M}$ 이상으로 높았으며, 일정 용존산소 농도 이상에서는 용존산소 농도 증가에 따른 미생물의 활동 변화가 매우 미약한 것으로 나타났다(Boudreau, 1997). 따라서 본 연구에서 측정한 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 용존산소 농도의 증가에 의한 영향을 받았을 것으로 추정되지만, 그 영향은 무시할 만 하다고 생각된다.

심해 퇴적물 연구에서 압력에 의한 영향은 반드시 고려해야 할 사항이며(Wenzhofer *et al.*, 2001; Rabouille *et al.*, 2003; de Jesus Mendes *et al.*, 2007), 본 연구에서 측정한 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율 역시 압력 감소에 의한 영향을 고려하여야 한다. 하지만 퇴적물 내 미생물 활동에 있어 압력에 의한 영향은 현재 논쟁 중에 있으며(Wenzhofer *et al.*, 2001; Rabouille *et al.*, 2003; de Jesus Mendes *et al.*, 2007), 본 연구에서도 압력에 의한 영향은 정확히 평가하지 못하였다. 기존의 퇴적물 선상 배양 실험에서 퇴적물 배양을 통해 측정한 퇴적물 산소요구량이 benthic lander를 이용하여 현장에서 직접 측정하였을 때 보다 1.5~2배 정도 높게 나타났다(Wenzhofer *et al.*, 2001; Rabouille *et al.*, 2003), 따라서 본 연구에서 측정한 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 실제 퇴적물에서 일어나는 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율보다 높게 측정되었을 가능성이 있다.

독도 사면 지역에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율에 영향을 주는 요인 추정. 각 조사 정점에서 CTD로 측정한 저층수의 수온과 염분은 전 조사 시기, 모든 정점에서 매우 유사하였다. 퇴적물 형태 역시 조사 정점 간 다소 차이를 보였지만 모두 세립질(평균 8.4ϕ)로 나타났다. 따라서 본 연구의 조사 정점 간 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율이 차이 나는데 있어 수온과 염분, 퇴적물 형태의 차이에 의한 영향은 미미할 것으로 추정된다.

2007년 11월 조사 정점에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량이 가장 높게 나타난 정점 D7에서 가장 높게 나타났으며, 정점 D3을 제외한 정점에서 탈질소화 과정 중 coupled nitrification-denitrification이 우세하게 나타났다(Fig. 4). 본 연구에서 표층 퇴적물의 유기물 농도는 탈질소화율 특히, coupled nitrification-denitrification을 촉진시키는 것으로 나타났다(Fig. 6).

이는 산소를 이용하는 유기물 분해 과정에서 생성된 암모늄이 질산화 과정을 통해 질산염으로 바뀌었으며 이러한 질산염이 탈

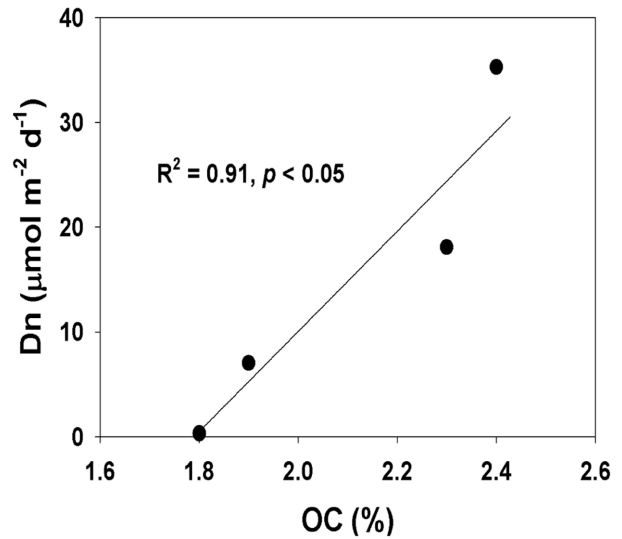


Fig. 6. Correlation between organic carbon (OC) content in surface sediment and coupled nitrification-denitrification (Dn) at the station surveyed in November 2007.

질소화 과정에 사용되었기 때문으로 추정할 수 있다. 또한 질산화 박테리아가 서식하는 온도 범위는 $3\sim 35^\circ\text{C}$ 이지만(Focht and Verstraete, 1977), 1°C 이하의 퇴적물에서도 질산화 과정이 일어난다는 연구 결과도 있다(Horrigan, 1981). 이러한 결과들은 본 연구에서 퇴적물 내 질산화율을 직접 조사하지 않았지만, 조사 정점의 퇴적물에서 온도가 낮음에도 불구하고 퇴적물 내 질산화 과정이 일어났을 가능성을 지시한다.

본 연구에서 측정한 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율 사이에서 상관관계는 미약하였지만 퇴적물 산소요구량이 높을수록 탈질소화율도 높아지는 경향을 나타내었다(Fig. 7). 이는 본 조사 지역의 퇴적물에서 유기물 농도가 높기 때문에 유기물 분해율이 높으며, 따라서 유기물 분해 과정에서 해수 중의 산소와 질산염이 동시에 사용되었기 때문으로 추정된다(Devol, 1991).

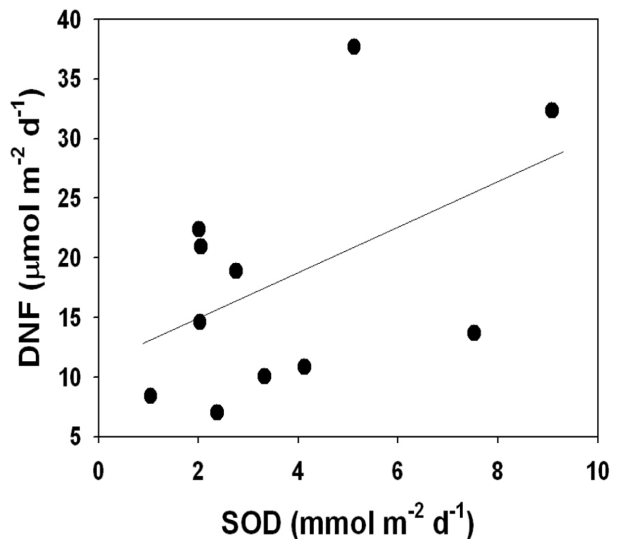


Fig. 7. Relationship between sediment oxygen demand (SOD) and total denitrification (DNF) at the study site. $R^2=0.24$, $p>0.05$.

Table 4. Comparison of sediment oxygen demand (SOD) and denitrification (DNF) rates between Dok Island and other continental shelf sediments.

Area	Depth (m)	SOD (mmol m ⁻² d ⁻¹)	DNF (μmol m ⁻² d ⁻¹)
Dok Island	1162~2234	1.04~9.08	7.06~37.67
other continental shelf sediments	1190~2750	1.01~2.85	9.04~27.67
Reference		1, 2, 3, 4	5, 6, 7, 8

Reference: (1) Smith *et al.* (1983); (2) Cai and Reimers (1995); (3) Rowe *et al.* (2008); (4) Sayles *et al.* (1994); (5) Balzer *et al.* (1998); (6) Seitzinger and Giblin (1996); (7) Soetaert *et al.* (1996); (8) Wijsman *et al.* (2002)

다른 지역과의 비교. 독도 사면 지역의 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 유사한 수심의 여러 사면 퇴적물에서 측정된 퇴적물 산소요구량(1.01~2.85 mmol m⁻² d⁻¹)과 탈질소화율(9.04~27.67 μmol m⁻² d⁻¹)에 비해 상대적으로 높게 측정되었다(Table 4).

본 조사 정점에서 측정한 저층수의 수온은 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율을 측정한 다른 심해 지역의 저층수 수온(2~4 °C)보다 낮았기 때문에 미생물의 활동이 상대적으로 억제 되었을 가능성이 있다. 하지만 울릉분지 저층수의 용존산소 농도가 풍부하고, 표층 퇴적물 내 유기물 농도가 높기 때문에 호기성 유기물 분해 과정이 활발히 일어날 가능성이 크다. 또한 상대적으로 깊은 퇴적물에서는 퇴적물 입자가 세립하여 수층으로부터 퇴적물로의 용존산소 확산이 느리게 일어나기 때문에 용존산소 공급이 적으며, 호기성 분해 과정과 질산화 과정 동안 미생물에 의해 용존산소가 소모되기 때문에 무산소 환경이 쉽게 형성되어 혐기성 유기물 분해 과정이 활발히 일어날 가능성이 크다(Howes *et al.*, 1984). 따라서 본 연구 지역에서는 높은 표층 퇴적물 내 유기물 함량에 의해 퇴적물 내에서 호기성 유기물 분해 과정과 혐기성 유기물 분해 과정이 동시에 일어났으며(Devol, 1991), 높은 내보내기 생산에 의해 표층 퇴적물에서 유기물 농도가 높기 때문에 다른 심해 퇴적물에서보다 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율이 높게 나타나는 것으로 추정된다(Lee *et al.*, 2008).

Rowe *et al.* (2008)은 Gulf of Mexico에서 퇴적물 산소요구량이 수심에 따라 감소하는 경향을 발견하였다. 독도 사면 지역에서 퇴적물 산소요구량은 Gulf of Mexico 지역과 비교하였을 때, 수심 2000 m 보다 깊은 곳에서는 유사한 값의 범위를 나타내었지만 수심 2000 m 보다 얕은 수심에서는 큰 차이를 보였다(Fig. 8).

이러한 차이는 유기물의 기원이 다르기 때문에 생겼을 가능성이 있다. 즉, 울릉분지 지역에서 표층 퇴적물 내 유기물은 일차생산의 영향을 크게 받기 때문에 해양 기원의 유기 물질이 대부분을 차지한다(Lee *et al.*, 2008). 반면, Gulf of Mexico 지역의 퇴적물에서는 대륙으로부터 수평적 이동에 의한 유기물 공급이 많은 부분을 차지한다(Jahnke and Jackson, 1991). 퇴적물 내 유기물 농도가 높다고 하더라도 미생물이 사용하기 어려운 육지 기원의 유기물이 많이 존재한다면 유기물 분해율이 상대적으로 낮게 나타날 가능성이 있다(Seiki *et al.*, 1994). 따라서 수심 약 1000 m 부근에서 독도 사면 지역의 퇴적물 산소요구량이 Gulf of Mexico 지역에 비해 매우 높게 나타나는 것은 표층 퇴적물 내 유기물 종류의 지

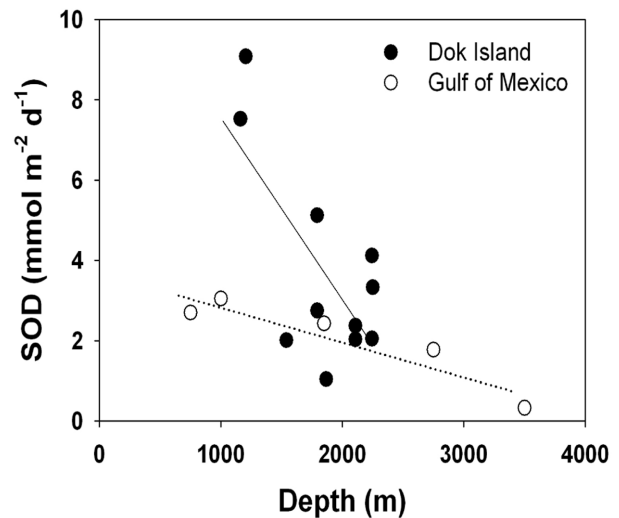


Fig. 8. Comparison of sediment oxygen demand (SOD) in the Dok Island (●; solid line) and Gulf of Mexico (○; dotted line).

역적 차이에 의한 결과라 추정된다. 하지만 유기물이 수층을 통과하여 퇴적층에 도달할 때까지 해양 생물의 섭식과 미생물에 의한 분해 작용, 화학적 작용 등으로 쉽게 분해되는 물질들이 우선적으로 제거되기 때문에, 수심 깊은 곳에서는 퇴적층에 도달하는 유기물의 양이 감소하고 분해되기 어려운 물질만 남게 된다(Banse, 1990; Smith *et al.*, 1992). 그렇기 때문에 독도 사면 지역과 Gulf of Mexico 지역에서 퇴적물 산소요구량이 수심 2000 m의 깊은 곳에서 유사한 범위를 갖는 것으로 추정된다.

퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 퇴적물의 형태와 수심, 수온과 염분, 일차생산량, 퇴적되는 유기물의 양과 종류 등에 영향을 받으며(Herbert, 1999; An and Joye, 2001), 이러한 요인들에 의해 일반적으로 수심이 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 나타낸다(Banse, 1990; Smith *et al.*, 1992; Hoppe *et al.*, 1993). 독도 사면 지역에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 다른 지역과 비교하였을 때 전반적으로 수심에 따라 감소하는 경향에 잘 일치하였지만, 수심 약 1500 m 이상의 일부 정점들은 수심에 따른 감소 경향에 포함되지 않았다(Fig. 9).

버뮤다 지역의 수심이 깊은 곳에서 유기물과 퇴적물 산소요구량, 탈질소화율 사이에 관련성이 낮게 나타났으며(Sayles *et al.* 1994), 이러한 결과는 미생물에 따라 선호하는 유기물의 종류와 유기물 분해율이 다르기 때문으로 추정하였다(Calow, 1975; Gunnison and Alexander, 1975; Harrison and Mann, 1975). Gulf of Mexico 지역에서 퇴적물 산소요구량 역시 수심이 깊어질수록 수심에 따른 감소 경향이 미약하게 나타났으며, 그 원인으로 대륙사면에서 발생하는 사태나 함몰에 의한 질량류(mass flow)에 의해 대륙사면 이하의 수심에 공급되는 유기물의 양이 다르기 때문으로 추정하였다(Rowe *et al.*, 2008). 이러한 결과들은 퇴적물 산소요구량이나 탈질소화율이 수심에 따른 감소 경향을 나타내지 않는 것에 가장 큰 영향을 주는 요인이 표층 퇴적물의 유기물임을 지시한다. 본 연구에서도 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율이 표층 퇴적물의 유기물에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 따라서 본 조사 지역의 수심 1500 m 이상에서 퇴적물 산소요구량과

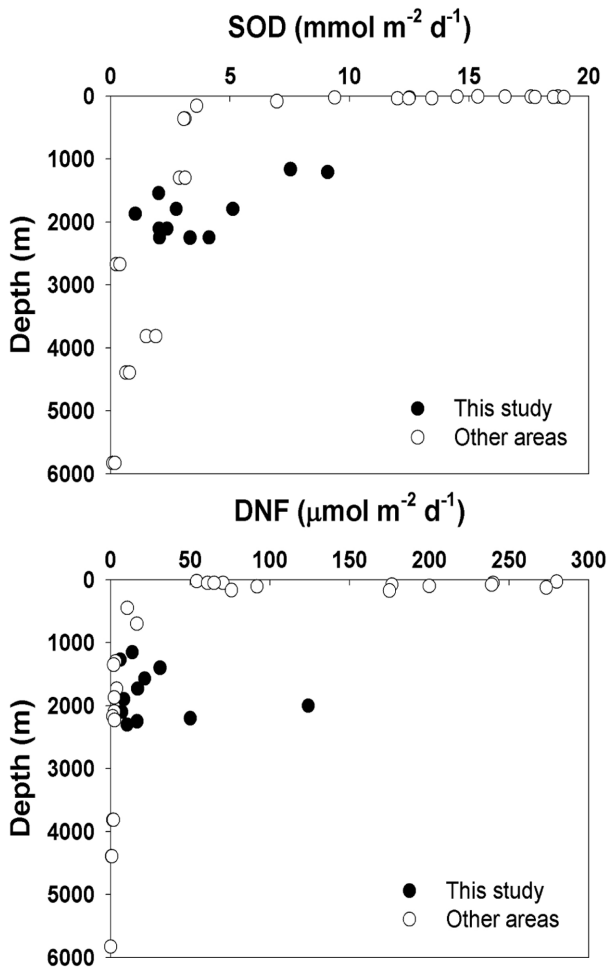


Fig. 9. Rates of sediment oxygen demand (SOD) and denitrification (DNF) with water depth.

탈질소화율의 수심에 따른 감소 경향이 미약한 것은 독도 사면 지역에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 추정되는 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량이 수심 1500 m 이상에서 수심에 따라 감소하는 경향을 나타내지 않았기 때문으로 생각된다.

결론

본 연구에서 퇴적물 선상 배양과 ¹⁵N isotope pairing technique를 이용하여 측정된 독도 사면 지역의 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 각각 1.04~9.08 mmol m⁻² d⁻¹와 7.06~37.67 μmol m⁻² d⁻¹의 범위를 나타내었다.

독도 사면 지역의 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 다른 심해 지역에서 비해 모두 높았으며, 수심에 따른 전반적인 감소 경향에는 잘 일치하였지만 수심 약 1500 m 이상에서는 수심에 따른 감소 경향에 일치하지 않는 정점들이 관찰되었다. 본 연구에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량이 높은 정점에서 높게 측정되었다. 그리고 표층 퇴적물의 유기물 농도는 coupled nitrification-denitrification(질산화 과정에 의해 생성

된 질산염을 이용하는 탈질소화 과정)을 촉진시키는 것으로 나타났다. 대부분의 조사 정점에서 coupled nitrification-denitrification이 우세하게 나타났다. 이러한 결과들을 바탕으로 할 때, 본 조사 지역에서 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율은 표층 퇴적물 내 유기물에 가장 큰 영향을 받는 것으로 추정된다.

2007년 11월 조사 정점에서 측정된 표층 퇴적물 내 유기 탄소 함량은 1.8~2.4%로, 다른 심해 지역에 비해 매우 높게 측정되었다. 이는 울릉분지 지역에서 내보내기 생산이 높기 때문으로 추정되며, 본 연구에서 동해 퇴적물이 다른 심해 지역에 비해 퇴적물 산소요구량 및 탈질소화율이 높게 나타나는 원인인 것으로 추정된다. 또한 수심 1500 m 이상에서 수심에 따른 감소 경향이 미약한 것은 퇴적물 산소요구량과 탈질소화율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 추정되는 표층 퇴적물의 유기물 농도가 일정 수심 이상에서 수심에 따른 감소 경향을 나타내지 않기 때문으로 추정된다.

사사

본 연구에 많은 도움을 주신 연구선 이어도호 선장님과 승조원 여러분께 감사드립니다. 자세히 살펴주시고 좋은 의견을 주신 두분의 심사위원께도 감사드립니다. 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

An, S.M. and Joye, S.B., 2001. Enhancement of coupled nitrification-denitrification by benthic photosynthesis in shallow estuarine sediments. *Limnol. Oceanogr.* **46**: 62-74.

Arrigo, K.R., 2004. Marine microorganisms and global nutrient cycles. *Nature* **437**: 349-355.

Balzer, W., W. Helder, E. Epping, L. Lohse, and S. Otto, 1998. Benthic denitrification and nitrogen cycling at the slope and rise of the N.W. European Continental Margin (Goban Spur). *Oceanography*, **42**: 111-126.

Banse, K., 1990. New views on the degradation and disposition of organic particles as collected by sediment traps in the open sea. *Deep-Sea Research* **37**: 1177-1195.

Boudreau, B., 1997. Diagenic models and their implementation. Springer.

Broerse, A.T.C., 2000. Coccolithophore export production in selected ocean environments: seasonality, biogeography, carbonate production. Ph. D. Thesis, Free University Amsterdam, Amsterdam, 185.

Brunnegard, J., Grandelb, S., Stahla, H. Tengberga, A. and Halla, P.O.J., 2004. Nitrogen cycling in deep-sea sediments of the Porcupine Abyssal Plain, NE Atlantic. *Oceanography* **63**: 159-181.

Cai, W.J. and Reimers, C.E., 1995. Benthic oxygen flux, bottom water oxygen concentration and core top organic carbon content in the deep northeast Pacific Ocean. *Deep-Sea Research I* **42**: 1681-1699.

Calow, P. 1975. The feeding strategies of two freshwater gastropods, *Ancylus fluviatilis* Mull. and *Planorbis contortus* Linn. (Pulmonata) in terms of ingestion rates and absorption efficiencies. *Oecologia* **20**: 33-49.

Capone D.G., Zehr, J.P., Paerl, H.W., Bergman, B. and Carpenter, E.J., 1997. *Trichodesmium*, a globally significant marine cyano-

- bacterium. *Science* **276**: 1221–1229.
- Chen, C.T.A., Bychkov, A.S., Wang, S.L. and Pavlova, G.Y., 1999. An anoxic Sea of Japan by the year 2200? *Marine Chemistry* **67**: 249–265.
- Cho, H.J., Moon, C.H., Yang, H.S., Kang, W.B. and Lee, K.W., 1997. Regeneration Processes of Nutrients in the Polar Front Area of the East Sea: III. Distribution Patterns of Water Masses and Nutrients in the Middle-Northern East Sea of Korea in October, 1995. *J. Korean Fish Soc.* **30**: 393–407.
- Chung, C.S., Shim, J.H., Park, Y.C. and Park, S.G., 1989. Primary Productivity and Nitrogenous Nutrients Dynamics in the East Sea of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea* **24**: 52–66.
- Cociasu, A., Dorogan, L., Humborg, C. and Popa, L., 1996. Long-term ecological changes in the Romanian coastal waters of the Black Sea. *Mar. Pollut. Bull.* **32**: 32–38.
- de Jesus Mendes, P.A., Thomsen, L., Holscher, B., de Stigter H.C. and Gust, G., 2007. Pressure effects on the biological degradation of organo-mineral aggregates in submarine canyons. *Marine Geology* **246**: 165–175.
- Devol, A.H., 1991. Direct measurement of nitrogen gas fluxes from continental shelf sediments. *Nature* **349**: 319–321.
- Emerson, S., Quay, P., Karl, D., Winn, C., Tupas, L. and Landry, M., 1997. Experimental determination of the organic carbon flux from open-ocean surface waters. *Nature* **389**: 951–954.
- Focht, D.D. and Verstraete, W., 1977. Biochemical ecology of nitrification and denitrification. *Adv. Microbiol. Ecol.* **1**: 135–214.
- Giles, H., Pilditch, C.A., Nodder, S.D., Zeldis, J.R. and Currie, K., 2003. Benthic oxygen fluxes and sediment properties on the northeastern New Zealand continental shelf. *Continental Shelf Research* **27**: 2373–2388.
- Grenz, C., Denis, L., Boucher, G., Chauvaud, L., Clavier, J., Fichez, R. and Pringault, O., 2003. Spatial variability in Sediment Oxygen Consumption under winter conditions in a lagoonal system in New Caledonia (South Pacific). *J. Experimental Marine Biology and Ecology* **285**: 33–47.
- Gunnison, D. and Alexander, M., 1975. Resistance and susceptibility of algae to decomposition by natural microbial communities. *Limnol. Oceanogr.* **20**: 64–70.
- Harrison, P.D. and Mann, K.H., 1975. Detritus formation from eelgrass (*Zostera marina*): The relative effects of fragmentation, leaching and decay. *Limnol. Oceanogr.* **20**: 924–934.
- Herbert, R.A., 1999. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. *FEMS Microbiol. Rev.* **23**: 563–590.
- Hoppe, H.G., Ducklow, H. and Karrasch, B., 1993. Evidence for dependency of bacterial growth on enzymatic hydrolysis of particulate organic matter in the mesopelagic ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **93**: 273–283.
- Horrigan, S.G., 1981. Primary Production under the Ross Ice Shelf, Antarctica. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 378–382.
- Howes, B.L., John, W., Dacey, H. and King, G.M., 1984. Carbon flow through oxygen and sulfate reduction pathways in salt marsh sediments. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 1037–1051.
- Jahnke, R., 1996. The global ocean flux of particulate organic carbon. *Global Biogeochemical Cycles* **10**: 71–88.
- Jahnke, R. and Jackson, G., 1991. The spatial distribution of sea floor oxygen consumption in the Atlantic and Pacific oceans. In: Rowe, G., Pariente, V.(Eds.), *Deep-sea Food Chains and the Global Carbon Cycle*. NATO Advanced Research Workshop. Kluwer, Boston, MA, 295–307.
- Jahnke, R.A. and Jahnke, D.B., 2000. Rates of C, N, P and Si recycling and denitrification at the US Mid-Atlantic continental slope depocenter. *Deep-Sea Research I* **47**: 1405–1428.
- Kana, T.M., Darkangelo, C., Hunt, M.D., Oldham, J.B., Bennett, G.E. and Cornwell, J.C., 1994. Membrane inlet mass spectrometer for rapid high precision determination of N₂, O₂, and Ar in environmental water samples. *Anal. Chem.* **66**: 4166–4170.
- Kawahata, H., Nohara, M., Aoki, K., Minoshima K. and Gupta, L. P., 2006. Biogenic and abiogenic sedimentation in the northern East China Sea in response to sea-level change during the Late Pleistocene. *Global and Planetary Change* **53**: 108–121.
- Kim, D.S., Choi, M.S., Oh, H.Y., Kim, K.H. and Noh, J.H., 2009. Estimate of Particulate Organic Carbon Export Flux Using ²³⁴Th/²³⁸U Disequilibrium in the Southwestern East Sea During Summer. *J. Oceanol. Soc. Korea* **14**: 1–9.
- Laursen, A.E. and Seitzinger, S.P., 2002. The role of denitrification in nitrogen removal and carbon mineralization in Mid-Atlantic Bight sediments. *Continental Shelf Research* **22**: 1397–1416.
- Lee, T.H., Hyun, J.H., Mok, J.S. and Kim, D.S., 2008. Organic carbon accumulation and sulfate reduction rates in slope and basin sediments of the Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Geo-Mar. Lett.* **28**: 153–159.
- Lee, T.S., Kim, I.N., Kang, D.J. and Kim, D.S., 2007. Implication of Deep Nitrite in the Ulleung Basin. *J. Oceanol. Soc. Korea* **12**: 239–243.
- Middleburg, J.J., Soetaert K. and Herman, P.M., 1996. Evaluation of the nitrogen isotope pairing method for measuring benthic denitrification: A simulation analysis. *Limnol. Oceanogr.* **41**: 1839–1844.
- Nakamura, Y., 2003. Sediment oxygen consumption and vertical flux of organic matter in the Seto Inland Sea, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **56**: 213–220.
- Nielsen, L.P., 1992. Denitrification in sediment determined from nitrogen isotope pairing. *FEMS Microb Ecol.* **86**: 357–362.
- Nielsen, L.P., Risgaard-Petersen, N., Rysgaard, S. and Blackburn, T.H., 1996. Reply to the note by Middelburg et al. *Limnol. Oceanogr.* **41**: 1845–1846.
- Nowicki, B.L., Requentina, E., van Keuren, D. and Kelly, J.R., 1997. Nitrogen losses through sediment denitrification in Boston Harbor and Massachusetts Bay. *Estuaries* **20**: 626–639.
- Pilskaln, C.H., Paduan, J.B. and Chavez, F.P., 1997. Carbon export and regeneration in the coastal upwelling system of Monterey Bay, central California. *Oceanographic Literature Review* **44**: 685–686.
- Rabouille, C., Denis, L., Dedieu, K., Stora, G., Lansard B. and Grenz, C., 2003. Oxygen demand in Coastal marine sediments: comparing in situ microelectrodes and laboratory core incubations. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **285–286**, 49–69.
- Reschke, C.J., Ittekkot, V. and Panin, N., 2000. The nature of organic matter in the Danube river particles and north-western Black Sea sediments. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* **54**: 563–574.

- Romero, O., Boeckel, B., Donner, B., Lavik, G., Fischer, G. and Wefer, G., 2002. Seasonal productivity dynamics in the pelagic central Benguela System inferred from the flux of carbonate and silicate organisms. *J. Marine Systems* **37**, 259–278.
- Rowe, G.T., Morse, J., Nunnally, C. and Boland, G.S., 2008. Sediment community oxygen consumption in the deep Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research II* **55**: 2686–2691.
- Sayles, F.L., Martin, W.R. and Deuser, W.G., 1994. Response of benthic oxygen demand to particulate organic carbon supply in the deep sea near Bermuda. *Nature* **371**: 686–689.
- Seiki, T., Izawa, H., Date, E. and Sunahara H., 1994. Sediment oxygen demand in Hiroshima bay. *Wat. Res.* **28**: 385–393.
- Seitzinger, S.P. and Giblin, A.E., 1996. Estimating denitrification in North Atlantic continental shelf sediments. *Biogeochemistry* **35**: 235–260.
- Smith, D.C., Simon, M., Alldredge, A.L. and Azam, F., 1992. Intense hydrolytic enzyme activity on marine aggregates and implications for rapid particle dissolution. *Nature* **359**: 139–142.
- Smith, K.L., Jr. Lauer, M.B. and Brown, N.O., 1983. Sediment community oxygen consumption and nutrient exchange in the central and eastern North Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, **28**(5), 882–898.
- Soetaert, K., Herman, P.M.J. and Middelburg, J.J., 1996. A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**(6): 1019–1040.
- Sorensen, J., Hydes, D. J. and Wilson, T. R. S., 1984. Denitrification in a deep-sea sediment core from the eastern equatorial Atlantic. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 653–657.
- Sprengel, C., Baumann K.H. and Neuer, S., 2000. Seasonal and inter-annual variation of coccolithophore fluxes and species compositions in sediment traps north of Gran Canaria (29°N 15°W). *Marine Micropaleontology* **39**: 157–178.
- Straub, K.L., Benz, M., Schink, B. and Widdel, F., 1996. Anaerobic, nitrate dependent microbial oxidation of ferrous iron. *J. Appl. Environ. Microbiol.* **62**: 1458–1460.
- Tuominen, L., Heinanen, A., Kuparinen, J. and Nielsen, L.P., 1998. Spatial and temporal variability of denitrification in the sediments of the northern Baltic Proper. *Marine Ecology Progress Series* **172**: 13–24.
- Walsh, J.J., 1991. Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. *Nature* **350**: 53–55.
- Walsh, J.P. and Nittrouer, C.A., 1999. Observations of sediment flux to the Eel continental slope, northern California. *Marine Geology* **154**: 55–68.
- Wenzhofer, F., Holby O. and Khols, O., 2001. Deep penetrating benthic oxygen profiles measured in situ by oxygen optodes. *Deep-Sea Research I* **48**: 1741–1755.
- Wijsman, J.W. M., Herman, P.M.J., Middelburg, J.J. and Soetaert, K., 2002. A Model for Early Diagenetic Processes in Sediments of the Continental Shelf of the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **53**: 403–421.
- Yanagi, T., 2002. Water, Salt, Phosphorus and Nitrogen Budgets of the Japan Sea. *Oceanography* **58**, 797–804.
- Yool, A., Martin, A.P., Ferna'ndez, C. and Clark, D.R., 2007. The significance of nitrification for oceanic new production. *Nature* **447**: 999–1002.
- Zehr, J.P. and Ward, B.B., 2002. Nitrogen cycling in the ocean: New perspectives on processes and Paradigms. *Environmental Microbiology* **68**: 1015–1024.
- Ziveri, P., Broerse, A., van Hinte, J.E., Wesbroek, P. and Honjo, S., 2000. The fate of coccoliths at 48N 21W, north eastern Atlantic. *Deep-Sea Research II* **47**: 1853–1875.
- Zumft, W.G., 1997. Cell biology and molecular basis of denitrification. *Microbiol. Mol. Ecol. Rev.* **61**: 533–616.

2009년 2월 27일 원고접수

2009년 5월 19일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진