

후포분지 홀로세 퇴적물의 유기물에 대한 지화학 분석 결과 및 의미

김지훈¹ · 박명호^{2*} · 공기수¹ · 한현철¹ · 정태진¹ · 최지영^{1,3} · 김진호¹ · 강무희¹ · 이치원¹ · 오재호¹
¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부, ²한국석유공사 석유개발연구원, ³한국해양대학교 해양환경 · 생명과학부

Geochemical Results and Implication of the Organic Matter in the Holocene Sediments from the Hupo Basin

Ji-Hoon Kim¹, Myong-Ho Park^{2*}, Gee-Soo Kong¹, Hyun-Chul Han¹, Tae-Jin Cheong¹, Jiyoung Choi¹, Jin Ho Kim¹, Moo-Hee Kang¹, Chi-Won Lee¹ and Jae-Ho Oh¹

¹Petroleum and Marine Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²E&P Technology Institute, Korea National Oil Corporation, Anyang, Gyeonggi-do 431-711, Korea

³Division of Marine Environment & Bioscience, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

Geochemical approaches on the two recovered piston cores were performed to understand the characteristics of organic matters and the influence of the sea level variation of the East Sea in the Hupo Basin since the Holocene. The analyzing results on organic components (TOC and TN), and isotopic compositions of organic matters showed the variation to core locations and sampling depths. In core 08HZIP-01, their values were gradually changed with depth from 4 mbsf to seafloor. However, rapid variation was observed at the boundary of 4.71 mbsf (meter below seafloor) in core 08HZIP-03. Based on TOC/TN, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$, the origin of organic matters in the Hupo Basin can be divided into three groups; 1) predominant marine algae, 2) C_3 land plant, and 3) mixture of C_3 land plant and marine/freshwater algae. It is likely that the vertical and spatial variations of organic and isotopic compositions reflect the shifts in sedimentary environment (including sediment transportation) by ocean currents and sea-level changes and others during the Holocene period.

Key words : total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$, hupo basin, east sea

동해안의 후포분지에서 채취한 두 개의 피스톤 코어를 이용하여 후포분지에서의 홀로세 퇴적물 내 유기물의 특징 및 동해 해수면 변화와의 관계를 규명하고자 지화학적 접근을 시도하였다. 채취한 시료에 대한 유기물 성분 분석 (TOC와 TN)과 유기물 동위원소($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$) 분석 결과들은 코어와 시료 채취 심도에 따라 분석값들이 특징적으로 변화한다. 코어 08HZIP-01에서는 4 mbsf(meter below seafloor)에서 코어 표면까지 비교적 채취 심도가 상부로 갈수록 지화학 분석값들이 점이적으로 증가하지만, 코어 08HZIP-03에서는 4.71 mbsf를 기준으로 상부와 하부에서 급격한 지화학 분석값들의 변화가 발생한다. 유기물의 TOC/TN과 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 의 값을 종합적으로 고려하였을 때, 후포분지의 유기물은 해양 조류 기원이 우세한 집단, C_3 육성 식물 기원이 우세한 집단, 해성/육성 조류와 C_3 육성 식물의 혼합기원이 우세한 집단으로 구분할 수 있다. 이러한 퇴적물 내 유기물의 심도에 따른 특성 및 기원 변화는 주로 홀로세 동해 해류와 해수면 등의 변화에 따른 퇴적환경 변화 (퇴적물 이동 포함)에 기인한 것으로 보인다.

주요어 : 총유기탄소, 총질소, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$, 후포분지, 동해

1. 서 언

동해는 세 개(울릉, 야마토, 동해)의 주요 분지와 네

개의 해협(대한, 쓰가루, 라 페로우스, 타타르스키)으로 구성되어 있다. 또한 기존의 연구결과들에 의하면(Oba and Kitazato, 1980; Gorbarenko, 1983; Kim *et al.*,

*Corresponding author: myongho@knoc.co.kr

2000), 최근 후기 제4기 동안 간빙기-빙하기의 기후변화에 의한 해수면 상승 및 하강은 인접한 태평양과 동해의 수체 교환을 단속시켜왔고 이러한 해수면 변화에 대한 기록들은 동해 퇴적물 내에 잘 보존되어 있는 것으로 나타났다.

현재까지 동해에서 획득한 시추한 피스톤 코어 내 퇴적물 연구들은 주로 심해인 울릉분지에서 증점적으로 실시되었으며, 대부분이 퇴적환경, 층서 규명, 퇴적물 지화학적 특징 및 천부가스 기원 규명에 주요 목적을 두었다(Chough *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2000; Park *et al.*, 2002, 2003a, 2003b, 2005a, 2005b, 2006; Lee *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2007a, 2007b, 2008). 반면에, 마지막 최대 빙하기 이후 해수면 변동을 급격

히 겪은 후포분지 부근에서의 지구물리 및 퇴적물 연구는 그동안 매우 제한적으로 실시되었다. 현재까지 이 지역에서 보고된 연구결과로서는 Yoon and Chough (1993)에 의해 실시된 탄성과 탐사자료 해석과 KORDI(1998)에 의해 실시된 퇴적물 연구 결과 정도이다. 또한, 동해 중부 연안은 서해와 남해 또는 남동해 연안에 비해 좁고, 경사가 심하며 주변에 큰 규모의 쇄설물 공급원이 없기 때문에 홀로세 해침 이후 환경변화에 관한 연구가 매우 제한적으로 이루어졌다. 그러나 연구지역인 후포분지는 수심 200 m 이하의 넓고 평탄한 지형을 갖고 있고 동쪽으로 남-북 방향의 후포뱅크가 가로막고 있어 다른 지역에 비해 퇴적율이 높아 동해 중부 지역에서 홀로세 해침 이후 환경변화를

Table 1. Location of two piston cores (08HZP-01, 08HZP-03).

Core No.	Position		Water Depth (m)	Retrieved Sediment (m)
	Latitude (°)	Longitude (°)		
08HZP-01	36.700	129.539	121.0	7.42
08HZP-03	36.700	129.656	195.4	7.35

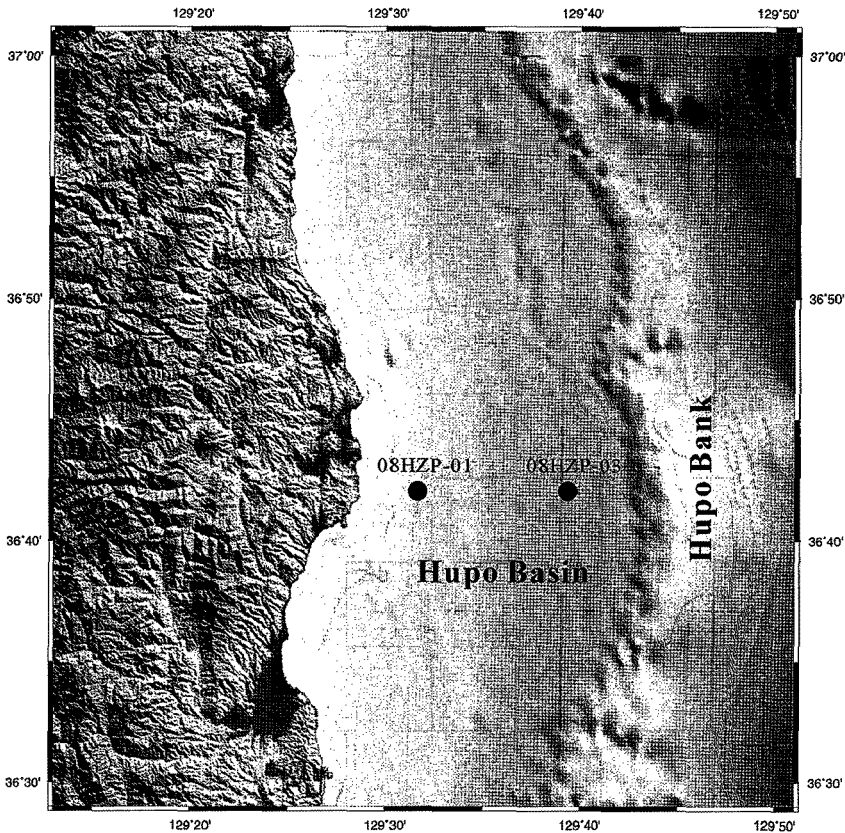


Fig. 1. Sampling location map in the Hupo Basin, East Sea.

연구하기에 적합한 지역적 요건을 갖고 있다.

이 연구의 주요 목적은 동해 후포분지 부근에서 채취한 피스톤 코어 퇴적물을 이용하여 홀로세 퇴적물의 코어 내 심도에 따른 유기물 (총유기물, 총질소)의 함량 변화 및 유기물 기원 변화를 소개하고 지화학적 특징을 규명하는 데에 있다.

2. 시료 채취 및 지화학 분석

2.1. 시료 채취

2008년 한국지질자원연구원(KIGAM)의 탐사선 탐해 II호(R/V Tamhae II)의 피스톤 코어러(piston corer)를 이용하여 후포분지 부근에서 채취한 다섯 개의 피스톤 코어 중 퇴적환경 변화 연구에 적합한 두 개를 연구코어로 선정하였다. 선정된 코어의 위치와 심도 및 회수 길이는 Table 1 및 Figure 1과 같다. 채취한 코어는 선상에서 약 4°C로 냉장 보관하여 실험실로 운반한 후 절개하였다. 절개된 코어 중 반쪽은 지화학 분석 및 퇴적상들을 분석하기 위한 작업용 코어(working core)로 사용하였고, 다른 한쪽은 보관용 코어(archive core)로 이용하였다.

퇴적물 내 지화학 분석을 위하여 퇴적상이 변화하는 구간에서는 퇴적물 부시료를 채취하였으며, 퇴적상이 변화하지 않는 구간에서는 약 20 cm 간격으로 일정하게 퇴적물 부시료를 채취하였다. 채취한 퇴적물 부시료는 냉동건조기(일신 Freeze Dryer)로 24시간 동안 건조시켰다. 건조된 시료는 마노 절구(agate-mortar)를 이용하여 분말로 분쇄하여 골고루 혼합하였다.

2.2. 원소 분석

퇴적물 내 총탄소(TC: Total Carbon)와 총질소(TN: Total Nitrogen) 함량은 한국지질자원연구원이 보유하고 있는 미국 Leco사의 CHN-900으로 분석하였다. CHN 900의 탄소와 질소의 검출한계(detection limit)는 각각 0.001%와 0.01%이다.

총유기탄소 함량(Total Organic Carbon: TOC)은 한국지질자원연구원의 Rock-Eval Turbo 6을 이용하여 실시하였다. Rock-Eval 열분해 시 생성되는 열분해 탄소(pyrolyzed carbon; PC)와 잔류 탄소(residual carbon; RC)의 합으로 TOC 함량이 계산된다(Arthur *et al.*, 1998; Lafargue *et al.*, 1998).

2.3. 유기물 동위원소 비 분석($\delta^{13}C_{org}$ 와 $\delta^{15}N_{org}$)

퇴적물 내 유기물의 탄소($\delta^{13}C_{org}$) 및 질소 ($\delta^{15}N_{org}$)

동위원소 비를 측정하기 위해서는 3N 염산(HCl)을 이용하여 무기 탄산염 및 무기 질소를 24시간 동안 용해하여 제거하였다. 산처리한 잔류물들은 3차 증류수로 4-5회 정도 세척한 후 70°C로 건조기(oven)에 24시간 건조하였다. 전처리를 완료한 시료는 서울대학교 농업과학 공동기기센터 (NICHEM)에서 탄소 및 질소 원소 분석기(NA Series 2, CE Instruments, Italy)에 연결된 연속 흐름 안정동위원소 질량분석기(IsoPrime-EA, Micromass, UK)를 이용하여 유기물의 탄소($\delta^{13}C$) 및 질소($\delta^{15}N$) 동위원소 비 분석을 실시하였다. 표준물질은 탄소의 경우 V-PDB(Vienna-Pee Dee Belemnite)를, 질소의 경우는 대기의 질소(Atmospheric N_2)를 이용하였다. 탄소($\delta^{13}C$) 및 질소($\delta^{15}N$)의 동위원소 비는 아래와 같은 식에 의해 계산된 값으로 표시하였다. 탄소 및 질소 동위원소 비의 재현성은 각각 <0.1‰와 <0.2‰이다.

$$\delta(\text{‰}) = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000$$

R: 시료 및 표준물질의 $^{13}C/^{12}C$ 과 $^{15}N/^{14}N$ 비

3. 결 과

3.1. 코어퇴적물의 층서와 퇴적상

코어 08HZZP-01과 코어 08HZZP-03 퇴적물은 이질(mud) 내지 사질 이질(sandy mud)로 주로 구성되었으며, 부분적으로 이질 사질(muddy sand), 사질 역질(sandy gravel) 등으로 구성되어 있다. 이질 퇴적물의 색깔은 대부분 올리브 회색(olive gray)에서 짙은 올리브 회색(dark olive gray)이며, 이질보다 큰 사질 내지 역질의 퇴적물들은 밝은 회색, 짙은 회색, 흰색, 갈색 등 이질보다는 다양한 색의 범위를 가진다.

퇴적물의 구성을 보면, 코어 08HZZP-01과 코어 08HZZP-03은 육성 환경의 영향을 상당히 받은 연안 퇴적물들로 이루어져 있으나, 코어 08HZZP-03은 코어 08HZZP-01보다 상대적으로 육성 환경의 영향을 덜 받은 것으로 보인다. 코어 08HZZP-01은 패각이나 패각 부스러기, 생교란작용 등의 영향을 많이 받았으며 7.50 mbsf(meter below seafloor)의 코어 전체 구간에서 생교란 이질 내지 사질 퇴적상이 우세하며, 부분적으로 약엽리 퇴적상을 보이기도 한다. 4.5 mbsf~5.8 mbsf와 같은 구간에서는 생교란작용에 의한 구조 내부에 기질보다 큰 입자의 퇴적물들로 채워져 있기도 하다. 1.15 mbsf~1.16 mbsf 및 1.39 mbsf~1.395 mbsf 구간에서는 사질 입자가 일부 존재하고 불의 함량이 높다. 반

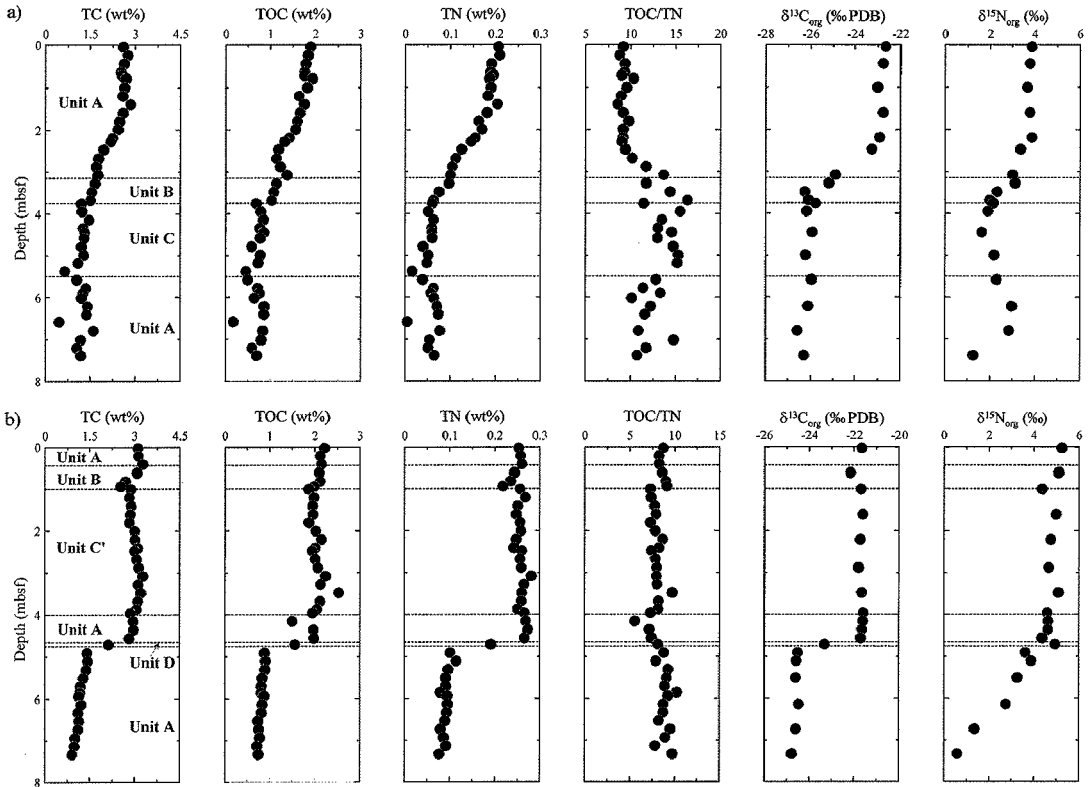


Fig. 2. Profiles of TC, TOC, TN, TOC/TN, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, and $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ for cores a) 08HWP-01 and b) 08HWP-03. Unit A indicates facies with weak bioturbation, Unit B bioturbated mud with slightly laminated mud, Unit C and C' transitional zone (increase or decrease in bioturbation), and Unit D homogeneous mud.

면 코어 08HWP-03은 코어 08HWP-01에 비하여 폐각이나 폐각 부스러기 등의 화석이 상대적으로 덜 발달되어 있으며, 생교란 퇴적상도 덜 발달되어 있다. 균질 퇴적상은 2.5 mbsf~4 mbsf 및 4.65 mbsf~4.75 mbsf 구간에서 관찰되며 일부 생교란 퇴적상과 교호하여 함께 나타나기도 한다. 2.47 mbsf~2.48 mbsf 구간에서는 작은 틈이 존재하며, 0.4 mbsf~1 mbsf 구간에서는 생교란 퇴적상과 함께 약엽리 퇴적상이 부분적으로 관찰된다.

두 코어에서 관찰되는 퇴적상의 특징을 보면, 코어의 상부와 하부에서는 전반적으로 약한 생교란작용이 지배적이며(Unit A), 약엽리 퇴적상을 보이는 구간에 생교란작용의 퇴적상이 우세한 구간(Unit B)과 생교란작용이 코어 하부로 갈수록 강해지거나 약해지는 전이 구간(Unit C 또는 C'), 그리고 균질이질 퇴적상이 지배적인 구간(Unit D) 등으로 구분할 수 있다(Fig. 2).

KIGAM(2009)은 코어 08HWP-01과 코어 08HWP-03의 조개 파편(shell fragment) 및 유공충(bulk foraminifera)을 이용하여 절대연령을 측정하였다. 보고된 절

대연령 분석결과에 의하면 코어 08HWP-01 4.35 mbsf에서의 절대연령은 10,090 yr B.P., 2.28 mbsf에서 6,030 yr BP이며, 코어 08HWP-03 5.11 mbsf에서의 절대연령은 10,630 yr B.P.이다. 즉, 상기한 절대연령 측정 결과에 따르면 두 코어의 퇴적물은 홀로세와 플라이스토세 경계 부분부터 퇴적된 것으로 보인다. 또한 이를 기준으로 코어 퇴적물의 퇴적율을 추정하면 울릉분지의 퇴적율(평균 17.61 cm/kyr~19.96 cm/kyr; Park *et al.*, 2006)에 비하여 두 배 이상 높게 나온다.

3.2. 총탄소, 총유기탄소 및 총질소 함량

퇴적물 내 총탄소(TC) 및 유기물 성분(TOC와 TN) 함량 분석결과를 코어별로 살펴보면, 코어 08HWP-01에서 TC 함량은 0.46 wt%~2.84 wt%, TOC 함량은 0.18 wt%~1.93 wt%, TN 함량은 0.01 wt%~0.21 wt%의 범위를 갖고, 코어 08HWP-03에서 TC 함량은 0.92 wt%~3.27 wt%, TOC 함량은 0.72 wt%~2.53 wt%, TN 함량은 0.08 wt%~0.28 wt%의 범위를 가진다(Fig. 2).

코어 08HWP-01에서 TC, TOC와 TN의 시료 채취

심도에 따른 수직적 변화를 살펴보면, 해저면에서 3.68 mbsf 구간(Unit A와 Unit B)에서 세 원소들의 함량은 시료 채취 심도가 증가할수록 감소하는 경향이 뚜렷하게 관찰되며 강한 상관관계를 보여준다($r^2 > 0.84$) (Fig. 2). 반면 3.76 mbsf 하부(Unit C와 Unit A)에서는 세 원소들의 함량이 심도에 관계없이 비교적 일정한 값(TC=1.2 wt%~1.6 wt%; TOC=0.7 wt%~0.9 wt%; TN=0.05 wt%~0.08 wt%)을 보여준다(Fig. 2). 이러한 결과는 코어 08HZIP-01의 3.76 mbsf부터 상부로 갈수록 퇴적물 내 유기물 유입이 지속적으로 증가하였다는 것을 지시한다.

코어 08HZIP-03에서의 TC, TOC와 TN의 값은 4.71 mbsf~4.91 mbsf 구간(Unit D)을 기준으로 상부와 하부에서 급격한 함량 변화가 관찰된다. 즉, 이 구간의 상부(Unit A, Unit B와 Unit C)에서 TC와 TOC와 TN의 값들은 심도에 관계없이 각각 2.99 ± 0.17 wt%, 2.04 ± 0.17 wt%, 0.26 ± 0.01 wt%의 값을 가지지만, 구간 하부(Unit A)에서는 상부보다 낮은 각각 1.18 ± 0.17 wt%, 0.82 ± 0.17 wt%와 0.09 ± 0.01 wt%의 값을 가진다(Fig. 2). 전반적으로 4.71 mbsf~4.91 mbsf 구간의 상부가 하부에 비해 TC, TOC와 TN의 값들이 최소 2배 정도의 높은 값을 갖는다. 그러므로 코어 08HZIP-03에서 4.71 mbsf~4.91 mbsf 구간은 지화학적 전이구간으로서 이 구간을 기준으로 하여 상부와 하부에서 퇴적물에 대한 급격한 유기물 유입량의 변화가 일어났다.

3.3. 유기물의 탄소 및 질소 동위원소 비

$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 은 코어 08HZIP-01에서는 $-26.6\text{‰} \sim -22.7\text{‰}$ (평균: -24.9‰), 코어 08HZIP-03에서는 $-24.8\text{‰} \sim -21.6\text{‰}$ (평균: -22.8‰)의 범위를 가지며, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 값은 코어 08HZIP-01에서는 $1.24\text{‰} \sim 3.86\text{‰}$ (평균: 2.77‰), 코어 08HZIP-03에서는 $0.6\text{‰} \sim 5.2\text{‰}$ (평균: 4.04‰)의 범위를 가진다(Fig. 2). 전반적으로 코어 08HZIP-03의 유기물들이 코어 08HZIP-01의 유기물보다 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 이 평균적으로 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 정도의 높은 값을 보인다(Fig. 2).

코어 퇴적물 채취 심도에 따른 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 의 수직적인 변화를 살펴보면, 코어 08HZIP-01에서 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 2.47 mbsf(Unit A)까지 $-23.3\text{‰} \sim -22.7\text{‰}$ 와 $3.4\text{‰} \sim 3.9\text{‰}$ 의 비교적 일정한 범위를 가지며 2.47 mbsf에서 3.48 mbsf 구간(Unit A 하부와 Unit B)에서 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 심도에 따라 값들이 감소하여 3.48 mbsf에서 각각 -26.3‰ 와 2.3‰ 의 값

을 가진다(Fig. 2). 3.48 mbsf 하부(Unit C와 Unit A)에서 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 각각 $-26.6\text{‰} \sim -25.8\text{‰}$ 와 $2.0\text{‰} \sim 3.0\text{‰}$ 의 비교적 일정한 범위를 가진다(Fig. 2). 코어 08HZIP-01의 2.47 mbsf에서 3.48 mbsf 구간은 유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 이 변화하는 전이구간으로서, 이 구간을 기준으로 하여 상부와 하부의 유기물의 기원이 변화하였다.

코어 08HZIP-03에서는 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 4.56 mbsf까지(Unit A, Unit B와 Unit C) 각각 $-22.2\text{‰} \sim -21.6\text{‰}$ 와 $4.4\text{‰} \sim 5.2\text{‰}$ 의 비교적 일정한 범위 값을 가지지만, 4.71 mbsf(Unit D)에서 급격하게 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 의 값이 낮아진다. 4.91 mbsf 하부(Unit A)에서 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 는 $-24.8 \sim -24.5\text{‰}$ 의 비교적 일정한 값을 갖는다. 그러나 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 $0.6\text{‰} \sim 3.9\text{‰}$ 의 값을 가지며 심도가 증가할수록 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 값이 감소하는 경향이 관찰된다(Fig. 2). 코어 08HZIP-03의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 이 변화하는 전이구간은 전기한 TC, TOC, TN의 전이구간과 동일하다.

분석된 지화학 결과를 종합하면, 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03에서 퇴적물 내 총탄소 함량, 유기물 성분 함량과 유기물의 탄소 및 질소 동위원소 비는 코어 시료 채취심도에 따른 수직적인 변화양상이 잘 관찰된다. 그러나 코어 08HZIP-03의 Unit D에서 분석된 대부분의 지화학 결과가 명확하게 변화하지만, 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03의 코어 상부와 하부에서 반복되는 Unit A는 퇴적심도가 다르기 때문에 퇴적시 환경 및 퇴적 후 받은 숙성작용이 서로 달라 동일한 Unit임에도 불구하고 분석된 지화학 결과들이 차이를 보이기도 한다. 따라서 토의 부분에서는 분석한 지화학 결과들을 Unit를 기준으로 하기보다는 코어의 수직적인 변화양상을 중심으로 퇴적환경 변화를 이해하는 데 초점을 맞춰 논의하였다.

4. 토 의

4.1. 총유기탄소/총질소(TOC/TN)

총유기탄소/총질소비(TOC/TN)는 유기 생명체의 중요한 요소 중 하나인 단백질 함유량에 따라 값이 변화하고, 일반적으로 동물이 식물보다 단백질 함유량이 높기 때문에 TOC/TN는 식물보다 동물이 상대적으로 낮은 값을 갖는다(Müller, 1975). 따라서 TOC/TN는 유기물의 기원을 규명하는 지화학적 지시자로 광범위하게 이용된다. 기존의 많은 연구결과에 의하면 조류기원 유기물의 TOC/TN는 4에서 10의 범위를 가지며

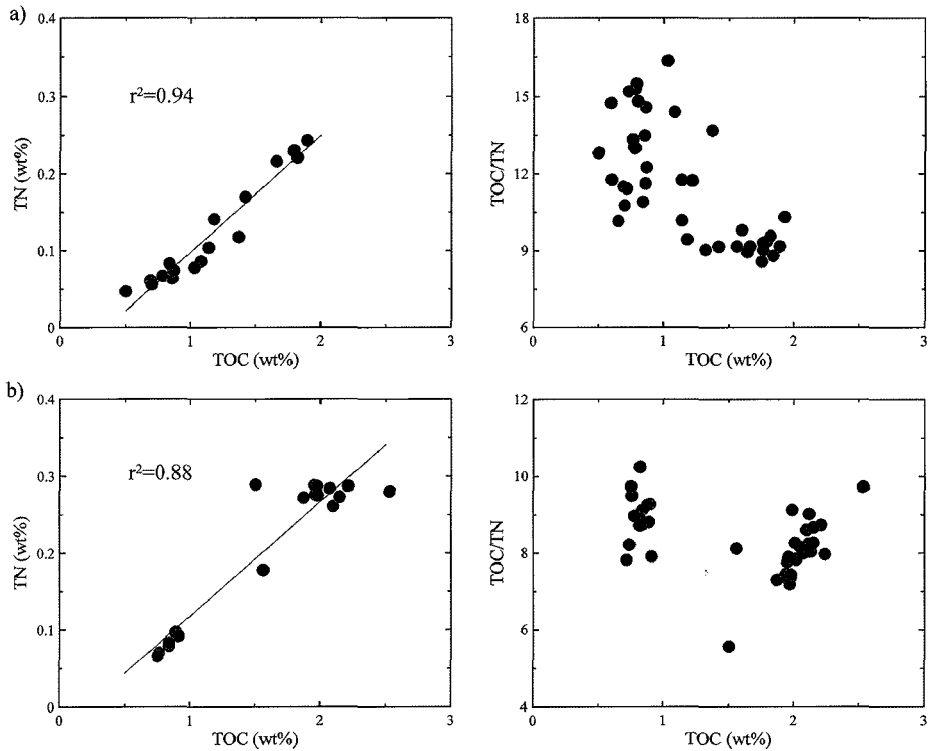


Fig. 3. Cross-plots of TN vs. TOC and TOC/TN vs. TOC for cores a) 08HZIP-01 and b) 08HZIP-03.

육성 식물기원 유기물은 20보다 높은 TOC/TN를 갖는다(Prahl *et al.*, 1980, 1994; Premuzic *et al.*, 1982; Ishiwatari and Uzaki, 1987; Jasper and Gagosian, 1990; Meyers, 1994; Meyers *et al.*, 1996; St-Onge and Hillaire-Marcel, 2001; Kim *et al.*, 2007b).

코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03에서 TOC와 TN은 강한 양의 상관관계($r^2 > 0.88$)를 보여준다(Fig. 3) 이러한 결과는 TOC와 TN이 동일한 기원을 갖고 퇴적 후 동일한 숙성작용에 의해 일정한 비율로 두 원소들이 소모되었을 가능성을 시사하는 것이다. 또한 코어 08HZIP-03에서 TOC의 함량 1 wt%를 기준으로 TOC와 TN을 두 개의 집단으로 크게 구분할 수 있다(Fig. 3). 첫 번째 집단은 채취심도 4.91 mbsf 이상의 시료들이 주로 해당되며, TOC 함량이 1 wt%이하이고 TN 함량이 0.1 wt%이하이다. 반면 두 번째 집단은 해저면에서 4.71 mbsf 미만의 시료들로서 TOC 함량이 1.5 wt% 이상이고 TN 함량이 0.15 wt% 이상이다. 코어 08HZIP-01의 경우 코어 08HZIP-03과 다르게 TOC와 TN 함량에 따라 뚜렷하게 집단화할 수 없다.

분석된 TOC와 TN을 이용하여 TOC/TN 비를 계산하면, 코어 08HZIP-01에서 8.8~16.3(평균값: 11.6)의

범위를, 코어 08HZIP-03에서 5.6~10.3(평균값: 8.3)의 범위에서 변한다(Figs. 2 and 3). 코어 08HZIP-01 시료 중 일부에서는 4에서 10의 TOC/TN 비의 범위를 보이며 일부는 10 이상의 값을 가진다(Figs. 2 and 3). 또한 TOC/TN의 비가 TOC 함량이 증가할수록 전반적으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 TOC 함량이 증가하면서 TN 함량도 증가함을 의미하는 것으로서, TOC 함량에 따라 퇴적물에 유입되는 유기물의 기원이 변화하였음을 지시한다. 코어 08HZIP-03의 시료들은 대부분이 4에서 10의 TOC/TN 비를 보인다(Figs. 2 and 3).

시료 채취 심도에 따른 수직적인 TOC/TN 변화를 살펴보면, 코어 08HZIP-01에서 TOC/TN 비는 해저면에서 2.68 mbsf까지 10 이하의 비교적 일정한 값을 가지며 2.88 mbsf에서 5.18 mbsf의 구간에서는 시료 채취 심도가 증가함에 따라 전반적으로 TOC/TN 비가 증가하는 경향을 보이며 10.2에서 16.3 사이의 범위를 가진다. 5.58 mbsf 하부에서는 TOC/TN 비는 2.88 mbsf에서 5.18 mbsf 보다 전반적으로 낮은 값을 보이지만 10보다 크다(Fig. 2).

반면에 코어 08HZIP-03에서는 시료 채취 심도에 상관없이 TOC/TN 비가 수직적으로 일정한 값(8.3 ± 0.6)

을 보인다. 이러한 결과는 코어 08HWP-01 내 유기물들의 기원이 시료 채취 심도에 따라 변화하였지만 코어 08HWP-03 내 유기물들은 변화하지 않았음을 시사한다. TOC/TN의 비만을 이용하여 코어 내 유기물들의 기원을 판단하면, 코어 08HWP-03은 심도에 관계없이 해양 조류 또는 육성 조류 기원이 우세한 반면에 코어 08HWP-01은 시료 채취 심도에 따라 유기물의 기원이 바뀐 것으로 나타났다. 즉, 코어 08HWP-01의 심도 2.88 mbsf 하부에서는 육상 식물 기원이 우세하다가 상부로 갈수록 해양 조류 및 육성 조류 기원의 유기물이 혼합되어 나타났다.

4.2. 유기물 탄소 동위원소비($\delta^{13}C_{org}$)

Hedges and van Geen(1982)의 연구에 의하면 유기물의 탄소 동위원소 비($\delta^{13}C_{org}$)는 퇴적 후 숙성작용에 의해 변화하지만 변화하는 양이 2% 이내로 작고 질소 동위원소 비($\delta^{15}N_{org}$)나 TOC/TN보다는 상대적으로 안정화하기 때문에, 퇴적물 내 유기물의 육성 및 해상 기원을 규명하는 유용한 지화학 지시자로 이용된다(Dean *et al.*, 1986; Thornton and McManus, 1994). 육성 식물은 광합성의 경로에 따라 Calvin(C_3)

과 Hatch-Slack(C_4)로 구분되며, 이러한 광합성 경로는 대기 중 CO_2 로부터 식물에 축적되는 유기물의 탄소 동위원소 비($\delta^{13}C_{org}$)의 분별작용(fractionation)에 영향을 준다. Calvin(C_3) 광합성 과정은 전체 식물의 90%를 차지하며 대기 중의 CO_2 탄소 동위원소 비보다 ($\delta^{13}C_{org} = -8\text{‰}$ PDB; Keeling *et al.*, 1995)보다 -20‰ 작은 -32‰ 에서 -21‰ 의 탄소 동위원소 비 범위(평균값: -27‰)를 가진다. 반면 Hatch-Slack(C_4) 경로를 따르는 식물은 사막 기후에서 자라는 식물들이 대부분이며 대기 중의 CO_2 탄소 동위원소 비보다 -7‰ 작은 -17‰ 에서 -9‰ 의 탄소 동위원소 비 범위(평균값: -14‰)를 가진다(Deines, 1980; Lamb *et al.*, 2006).

담수 조류는 -30‰ 에서 -26‰ 의 탄소 동위원소 비 범위를 가지며, 탄소 동위원소 비 값이 0‰ 인 해수의 용존된 탄산염을 이용하는 해양 조류들에 의해 생성된 유기물들의 $\delta^{13}C_{org}$ 는 -22‰ ~ -20‰ 의 범위를 가지고 있다(Jasper and Gagosian, 1990; Meyers, 1994). 이와 같이 육성 식물들과 해양 조류들은 서로 다른 탄소 기원에 의해 전형적으로 7‰ 의 $\delta^{13}C_{org}$ 값의 차가 발생하기 때문에 유기물의 기원 및 두 기원의 혼합비를 인지할 수 있다(Prahl *et al.*, 1994).

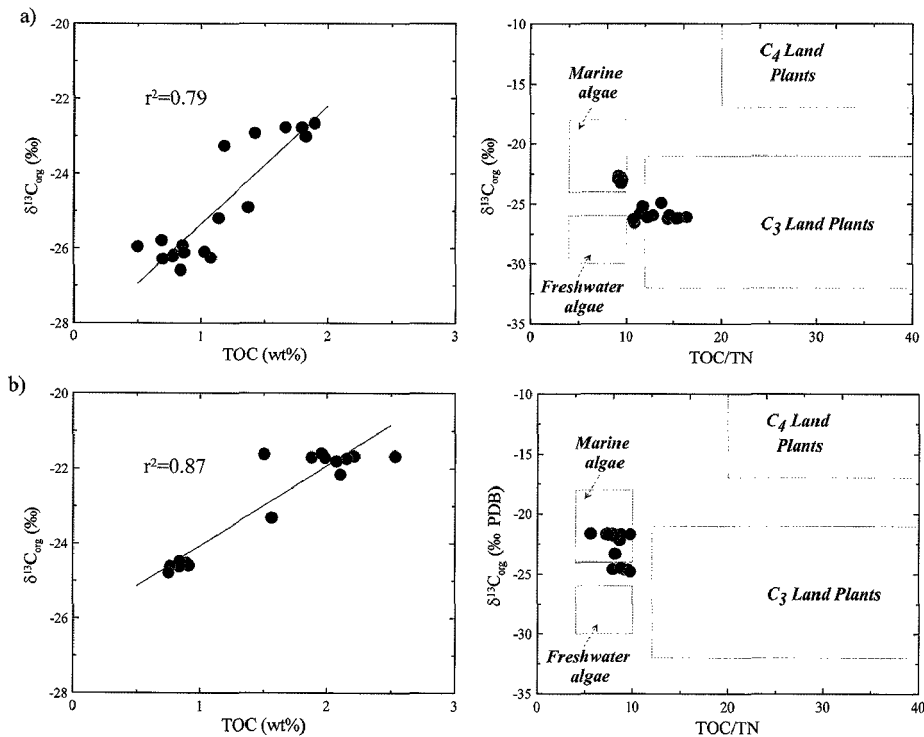


Fig. 4. Cross-plots of $\delta^{13}C_{org}$ vs. TOC and $\delta^{13}C_{org}$ vs. TOC/TN (revised from Lamb *et al.*, 2006) for cores a) 08HWP-01 and b) 08HWP-03.

전기한 바와 같이 분석된 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 는 퇴적물 채취 심도에 따라 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03에서 수직적으로 변한다(Fig. 2). 또한 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 는 TOC 함량에 따라 값의 차이가 명확히 관찰된다. TOC 함량과 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 는 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03에서 강한 양의 상관관계를 보여주며($r^2 > 0.79$), 코어 08HZIP-01에서 유기물 함량이 1.4 wt% 미만이면 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -25‰ 이하이고 유기물 함량이 1.4 wt% 이상이면 -24‰ 이상이다(Fig. 4). 전자는 주로 3.08 mbsf 하부 구간에 위치한 시료들에서 관찰되며, 후자는 해저면 표면에서 2.47 mbsf 구간의 시료들에서 관찰된다. 또한 코어 08HZIP-03에서는 TOC 함량이 1 wt% 이하이면 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -24‰ 이하이고 TOC 함량이 1.5 wt% 이상이면 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -23‰ 이상이다 (Fig. 4). 이러한 결과는 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 TOC 함량에 의해 영향을 받고 있고 유기물 기원이 TOC 함량에 따라 변한다는 것을 의미한다.

유기물 기원을 규명하기 위해 분석된 결과를 이용하여 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 TOC/TN 도표를 도시하면(Fig. 4), 코어 08HZIP-01의 유기물은 크게 세 가지의 유기물 기원을 갖는다. 첫 번째는 해저면 표면에서 2.47 mbsf에 위치한 시료들로서 TOC/TN이 9에서 10사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -24‰에서 -22‰의 범위를 갖는 해양 조류 기원, 두 번째는 주로 3.08 mbsf에서 3.76 mbsf 구간과 6.80 mbsf 이하에 위치하는 시료로서 TOC/TN이 10에서 12 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -27‰에서 -25‰의 범위를 갖는 C_3 육성 식물과 육성 조류 또는 육성 식물과 해양 조류의 혼합기원, 세 번째는 3.76 mbsf에서 6.80 mbsf에 위치하는 시료로서 TOC/TN이 12 이상이고 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -27‰에서 -25‰의 범위를 갖는 C_3 육성 식물 기원이다. 반면 08HZIP-03 코어의 경우 유기물은 두 가지의 기원을 갖는다. 첫 번째는 해저면으로부터 4.56 mbsf 사이에 위치하며 TOC/TN이 8에서 10 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -24‰에서 -21‰의 범위를 갖는 해양 조류 기원이고 두 번째는 4.71 mbsf 하부에 위치하며 TOC/TN이 7에서 10 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 값이 -25‰에서 -24‰의 범위를 갖는 해양 조류와 육성 조류가 혼합된 기원이다. 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03에서 유기물의 시료 채취 심도에 따른 유기물 기원 변화는 동해 제4기의 해수면의 변화와 직접적으로 관련성이 있는 것으로 추정된다.

4.3. 유기물 질소 동위원소 비($\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$)

유기물의 질소 동위원소 비($\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$)도 수층 시스템

에서 유기물의 기원 및 속성작용을 규명하는 지시자로 사용할 수 있다(Peters *et al.*, 1978; Sweeney and Kaplan, 1980). 일반적으로 육성 식물 기원의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 -5‰에서 8‰의 범위를 가지고 있으면 평균값은 대략적으로 3‰이고 해성 기원 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 의 평균값 범위가 7‰에서 10‰에 있다(Peters *et al.*, 1978; Schoeninger and DeNiro, 1984). 또한 Nakanishi and Minagawa(2003)는 동해분지에서 채취한 입자 유기물들(particular organic matter; POC)의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 4.2‰에서 5.1‰의 범위를 가지고 있다고 보고하였다.

분석된 코어 내 유기물의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 값을 살펴보면, 전반적으로 코어 내 유기물의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 값은 동해분지에서 보고된 입자 유기물보다 낮은 값(08HZIP-01 = $2.72 \pm 0.8\%$; 08HZIP-03 = $4.0 \pm 1.3\%$)을 보이고 있으며, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 코어 08HZIP-03에서 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 3‰ 미만인 시료를 제외할 경우 모든 코어 퇴적물의 TN 함량과 상관관계를 보여준다($r^2 > 0.62$) (Fig. 5). 또한 코어 08HZIP-03의 경우 TN의 함량에 따라 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 값이 뚜렷하게 두 집단으로 구분된다. 첫 번째 집단은 TN이 0.15 wt% 이상이고 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 4‰에서 6‰의 범위를 가지며, 두 번째 집단은 TN이 0.15 wt% 이하이고 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 4‰ 이하의 값을 갖는다. 전자에 해당되는 시료들은 대부분 해저면 표면에서 4.71 mbsf에 위치하고 후자에 속하는 시료들을 4.71 mbsf 하부에 위치한다. 전반적으로 코어 08HZIP-01의 경우 TOC/TN 값이 증가할수록 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 감소하는 경향이 관찰되며 코어 08HZIP-03에서는 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 과 TOC/TN 사이의 뚜렷한 상관관계가 관찰되지 않는다(Fig. 5).

코어 08HZIP-03 퇴적물 내 유기물의 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 3‰ 미만인 시료를 제외하면 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03 퇴적물 내 유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 역시 양의 상관관계를 보인다($r^2 > 0.59$). 즉, 유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 가 증가할수록 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 도 두 코어에서 증가한다(Fig. 5). $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 의 값을 종합하면, 코어 08HZIP-01과 코어 08HZIP-03의 유기물을 크게 두 개의 집단으로 각각 구분할 수 있다. 코어 08HZIP-01의 경우 첫 번째 집단은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 -24‰와 3% 이상이고 두 번째 집단은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 가 -27‰에서 -25‰ 사이의 범위를 가지며 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 0‰에서 3‰ 사이의 범위를 가진다. 반면 코어 08HZIP-03의 경우 첫 번째 집단은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 -24‰과 4% 이상이고 두 번째 집단은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 가 -25‰에서 -24‰ 사이의 범위를 가지며 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 0‰에서 4‰ 사이의 범위를 가진다.

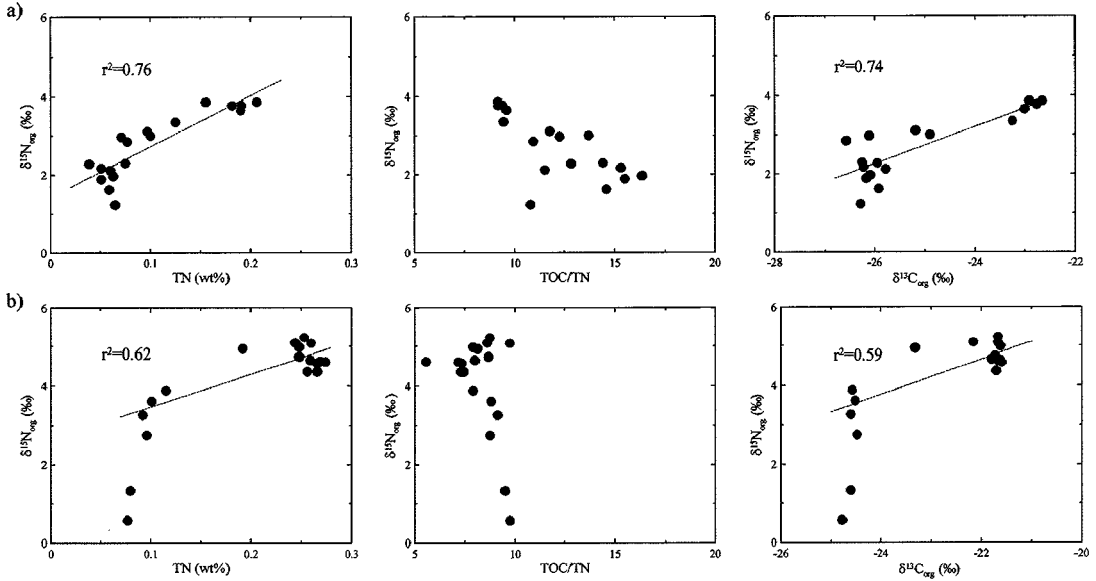


Fig. 5. Cross-plots of $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ vs. TN, $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ vs. TOC/TN, and $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ for cores a) 08HWP-01 and b) 08HWP-03.

유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 및 TOC/TN를 종합적으로 고려하였을 때, 후포분지의 유기물 기원은 세 집단으로 크게 구분할 수 있다. 첫 번째는 유기물의 TOC/TN이 7에서 10 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 -24‰ 과 3‰ 이상으로 해양 조류 기원이 우세한 집단, 두 번째는 TOC/TN이 12 이상이고 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 이 각각 -27‰ 에서 -25‰ 와 0‰ 에서 3‰ 사이의 범위를 갖는 C_3 육성 식물 기원이 우세한 집단이다. 세 번째는 유기물의 TOC/TN이 7에서 12 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 가 -27‰ 에서 -24‰ 의 범위를 가지고 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 0‰ 에서 4‰ 의 범위를 갖는 해성/육성 조류와 C_3 육성 식물의 혼합기원이 우세한 집단이다.

4.4. 해류 및 해수면 변화를 포함한 퇴적환경 변화에 대한 암시

동해는 제4기 빙하기와 간빙기 동안에 해수면 및 해류 변화에 따른 많은 고환경 변화를 경험하였다. 최후빙하기(Last Glacial Maximum; LGM) 동안 동해의 수심은 약 120 m 정도 하강하여 현재 약 130 m의 수심을 갖는 대한 해협과 쓰가루 해협이 거의 폐쇄되었으며, 인접한 북서태평양과 수체 교환이 거의 없어 동해는 고립된 환경에 놓였다. 이후 해수면이 서서히 상승하여 1.5만 년 전부터 동해에 쓰시마 난류가 유입되었고, 약 8천 년경 현재와 유사한 환경이 유지되었다(Oba and Kitazato, 1980; Gorbarenko, 1983; Kim

et al., 2000).

코어 퇴적물의 분석 결과에 의하면 코어 08HWP-01은 심도 3.76 mbsf에서 유기물의 함량이 서서히 증가하였고 3.48 mbsf에서 2.47 mbsf 구간에서 서서히 유기물의 동위원소 비가 서서히 증가하였다. 반면 코어 08HWP-03은 유기물과 유기물의 탄소 동위원소 비가 4.71 mbsf에서 4.56 mbsf 구간에서 급격히 증가한다. 코어 퇴적물의 분석결과와 절대연령 분석결과를 대비하면, 코어 08HWP-01의 경우 10,000 yr B.P.에 유기물의 함량이 서서히 증가하여 10,000 yr B.P.와 6,000 yr B.P. 사이의 시기에서 유기물의 기원이 서서히 육성 식물에서 해성 조류 기원으로 변화하였음을 알 수 있다. 이러한 후포분지의 유기물의 함량 변화 및 기원 변화는 홀로세 초기 쓰시마 난류의 유입에 따른 동해 해수면 상승과 직접적인 관련이 있는 것으로 생각된다. 동해와 같은 주변해에서 일차 생산력(primary productivity)의 증가에 따른 해양 기원의 유기물 증가는 외해로부터 유입되는 해류의 영향을 크게 받기 때문에(Knies and Stein, 1998), 쓰시마 난류가 동해에 유입되면서 유기물의 일차 생산력의 증가를 유발하여 퇴적물 내 유기물의 기원이 육성에서 해성 기원으로 변화하였고 퇴적물 내 유기물 함량이 증가하였다. 동해 해수면이 안정되어 현재와 유사한 해양 환경을 갖게 됨으로써 유기물의 함량과 탄소 및 질소 동위원소 비도 거의 변화가 없이 안정된 값을 갖게 되었다.

동해 해수면이 상승하였음에도 불구하고 수심과 육

상으로부터 유입되는 담수의 영향에 의해 쓰시마 난류의 유입 시기는 지역적으로 다르게 나타난다. Kong and Park(2007)에 의하면 낙동강 하구에 인접하여 낙동강의 영향을 직접적으로 받고 있는 코어 SSDP102에서는 약 6,000년경에, 연안류의 영향을 받는 울산 앞해역에서 획득한 코어 SSDP105에서는 약 8,000년경에 각각 쓰시마 난류의 영향을 받기 시작한 것으로 나타났다. 연구 지역인 후포분지에서 쓰시마 난류의 유입은 Kong and Park(2007)의 연구지역인 낙동강 하구 및 울산 앞해역 지역보다는 시기적으로 빠르다. 그러나 후포분지 내에서도 수심에 의한 쓰시마 난류의 유입 시기는 다른 것으로 추정된다. 코어 08HWP-03은 코어 08HWP-01보다 수심이 깊은 외해 쪽에 위치하고 있으며 10,000 yr B.P.경에 급격한 유기물의 함량 및 기원 변화가 일어났음을 보여준다. 일반적으로 해수면이 상승할 때 수심이 깊은 곳부터 외해로부터 유입되는 해류의 영향을 먼저 받게 된다. 따라서 두 코어의 유기물 변화가 서로 다르게 나타난 것은 코어 08HWP-03 지역의 퇴적환경이 해수면 상승에 따른 외해의 영향을 코어 08HWP-01보다 더 먼저 받았기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

1. 코어 08HWP-01과 코어 08HWP-03 퇴적물은 이질 내지 사질 이질로 주로 구성되어 있다. 두 코어에서 관찰되는 퇴적상의 특징은 지배적인 퇴적상에 따라 Unit A(약한 생교란작용의 퇴적상), Unit B(약엽리 퇴적상을 보이는 구간에 생교란작용의 퇴적상이 우세한 구간), Unit C 또는 C'(생교란작용이 코어 하부로 갈수록 강해지거나 약해지는 전이구간), Unit D(균질이질 퇴적상) 등으로 구분할 수 있다. 또한 절대연령 측정 결과에 따르면, 두 코어의 퇴적물은 홀로세와 플라이스토세의 경계 부분부터 퇴적된 것으로 추정된다.

2. 코어 08HWP-01과 코어 08HWP-03의 TC, TOC와 TN의 함량과 유기물 동위원소 비는 시료 채취 심도에 따라 뚜렷한 값들의 변화양상이 관찰된다. 코어 08HWP-01에서는 해저면에서 4 mbsf까지는 이들 값의 변화가 비교적 채취심도에 따라 점이적으로 변한 반면 코어 08HWP-03에서는 4.71 mbsf를 기준으로 상부와 하부에서 급격한 함량 변화를 보인다.

3. 유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 값, TOC/TN를 고려하였을 때, 후포분지의 유기물은 TOC/TN이 7에서 10 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 -24‰과

3% 이상인 해양 조류 기원이 우세한 집단, TOC/TN이 12 이상이고 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 이 각각 -27‰에서 -25‰와 0‰에서 3‰ 사이의 범위를 갖는 C_3 육성 식물 기원이 우세한 집단, TOC/TN이 7에서 12 사이의 범위를 가지며 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 가 -27‰에서 -24‰의 범위를 가지고 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 가 0‰에서 4‰의 범위를 갖는 해성/육성 조류와 C_3 육성 식물의 혼합기원이 우세한 집단으로 구분할 수 있다.

4. 코어 08HWP-01과 코어 08HWP-03의 TC, TOC, TN의 함량과 유기물의 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 와 $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 의 심도에 따른 변화는 동해 홀로세 퇴적환경의 변화, 예를 들면, 해류와 해수면 등의 변화와 관련이 있는 것으로 추정된다. 또한 10,000 yr B.P. 이후 동해에 쓰시마 난류가 유입되면서 유기물의 일차 생산력이 증가하였고 유기물의 기원이 육성 식물 기원에서 해성 조류 기원으로 변화하였다.

사 사

이 논문은 국토해양부의 재정지원 하에 한국지질자원연구원에서 수행 중인 연구개발 사업인 “연안지질 위험요소 연구(10-9106)”의 지원을 받았습니다. 심사과정에서 유익한 조언과 비평을 해주신 정공수 심사위원님과 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 코어 채취에 도움을 주신 탐해 II의 전 승조원들에게 감사드립니다.

참고문헌

- Arthur, M.A., Dean, W.D. and Laarkamp, K. (1998) Organic carbon accumulation and preservation in surface sediments on the Peru margin. *Chem. Geol.*, v.152, p.273-286.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H. (2000) Marine geology of Korean seas, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam, p.313.
- Dean, W.E., Arthur, M.A. and Claypool, G.E. (1986) Depletion of ^{13}C in Cretaceous marine organic matter: source, diagenetic or environmental signal? *Mar. Geol.*, v.70, p.119-157.
- Deines P. (1980) The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz P, Fontes, J.C. (Eds.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. The Terrestrial Environment*, v.1. A. Elsevier, Amsterdam, p.329-406.
- Gorbarenko, S.A. (1983) Paleogeographic conditions in the central part of the Sea of Japan during Holocene and late Pliocene time on the base of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in foraminiferal tests. *Oceanology*, v.23, p.224-227.
- Hedges, J.I. and van Geen, A. (1982) A comparison of lig-

- nin and stable carbon isotope compositions in Quaternary marine sediments. *Mar. Chem.*, v.11, p.43-54.
- Ishiwatari, R. and Uzaki, M. (1987) Diagenetic changes of lignin compounds in a more than 0.6 million-year old lathstring sediment (Lake Biwa, Japan). *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.51, p.321-328.
- Jasper, J.P. and Gagosian, R.B. (1990) The sources and deposition of organic matter in the Late Quaternary Pygmy Basin, Gulf of Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.54, p.117-132.
- Keeling, C.D., Whorf, T.P., Wahlen, M. and van der Plicht, J. (1995) Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, v.375, p.1021-35.
- KIGAM, 2009. Coastal geohazard factor analysis (Uljin area). Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon. p.279.
- Kim, J.H., Park, M.H., Ryu, B.J., Lee, Y.J., Oh, J.H., Cheong, T.J. and Chang, H.W. (2007a). Origin of Organic Matter and Geochemical Variation of Upper Quaternary Sediments from the Ulleung Basin. *Econ. Environ. Geol.*, v.40, p.605-622.
- Kim, J.H., Park, M.H., Tsunogai, U., Cheong, T.J., Ryu, B.J., Lee, Y.J., Han, H.C., Oh, J.H. and Chang, H.W. (2007b) Geochemical characterization of the organic matter, pore water constituents and shallow methane gas in the eastern part of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Isl. Arc*, v.16, p.93-104.
- Kim, J.H., Park, M.H., Tsunogai, U., Ryu, B.J., Lee, Y.J. and Chang, H.W. (2008). Origin of shallow gas from Upper Quaternary sediments of the Ulleung Basin. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.44, p.447-457.
- Kim, J.M., Kennett, J.P., Park, B.K., Kim, D.C., Kim, G.Y. and Roark, E.B. (2000) Paleoceanographic change during the last deglaciation, East Sea of Korea. *Paleoceanography*, v.15, p.254-266.
- Knies, J. and Stein, R. (1998). New aspects of organic carbon deposition and its paleoceanographic implications along the northern Barents sea margin during the last 30,000 years. *Paleoceanography*, v.13, p.384-394.
- Kong, G.S. and Park, S.C. (2007) Paleoenvironmental changes and depositional history of the Korea (Tsushima) Strait since the LGM. *J. Asian Earth Sci.* v.29, p.84-104.
- KORDI (1998). Marine Environment Changes and Basin Evolution in the East Sea of Korea (MECBES-98). Korea Ocean Research & Development Institute, Ausan, p.468.
- Lafargue, E., Espitalié, J., Marquis, F. and Pilot, D. (1998) Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production and soil contamination studies. *Rev. Inst. Franç. Pétrole.*, v.53, p.421-437 (in French).
- Lamb, A.L., Graham, P.W. and Melanie, J.L. (2006) A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Sci. Rev.*, v.75, p.29-57.
- Lee, S.H., Bahk, J.J., Chough, S.K., Back, G.G. and Yoo, H.S. (2004) Late Quaternary sedimentation in the Ulleung Interplain Gap, East Sea (Korea). *Mar. Geol.*, v.206, p.225-248.
- Meyers, P.A. (1994) Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chem. Geol.*, v.144, p.289-302.
- Meyers, P.A., Silliman, J.E. and Shaw, T.J. (1996) Effects of turbidity flows on organic matter accumulation, sulfate reduction, and methane generation in deep-sea sediments on the Iberia Abyssal Plain. *Org. Geochem.*, v.25, p.69-78.
- Müller, P.J. (1975). Diagenese stickstoffhaltiger organischer Substanzen in oxischen und anoxischen marinen Sedimenten. *Meteor. Forschungsergeb. Reihe C 22*, p.1-60 (in German)
- Nakanishi, T. and Minagawa, M. (2003) Stable carbon and nitrogen isotopic compositions of sinking particles in the northeast Japan Sea. *Geochem. J.*, v.37, p.261-275.
- Oba, T. and Kitazato, H. (1980) Analysis of paleoenvironment since the last glacial age based on two cores from the Japan Sea. *Archeol. Nat. Sci.*, v.13, p.31-49 (in Japanese with English abstract).
- Oba, T., Murayama, M., Matsumoto, E. and Nakamura, T. (1995) AMS- ^{14}C ages of Japan Sea cores from the Oki Ridge. *Quat. Res. Japan*, v.34, p.289-296 (in Japanese with English abstract).
- Park, M.H., Ryu, B.J., Kim, I.S., Cheong, T.J., Lee, Y.J. and Yu, K.M. (2002) Stratigraphical and sedimentological studies on core sediments from the southwestern Ulleung Basin, East Sea. *Econ. Environ. Geol.*, v.35, p.171-177.
- Park, M.H., Kim, I.S. and Ryu, B.J. (2003a). Framboidal pyrites in late Quaternary core sediments of the East Sea and their paleoenvironmental implications. *Geosci. J.*, v.7, p.209-215.
- Park, M.H., Kim, I.S. and Shin, J.B. (2003b) Characteristics of the late Quaternary tephra layers in the East/Japan Sea and their new occurrences in western Ulleung Basin sediments. *Mar. Geol.*, v.202, p.135-142.
- Park, M.H., Kim, J.H., Kim, I.S., Ryu, B.J. and Yu, K.M. (2005a) Tephrostratigraphy and paleo-environmental implications of late Quaternary sediment cores and interstitial water from the western Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Geo-Mar. Lett.*, v.25, p.54-62.
- Park, M.H., Kim, J.H., Ryu, B.J., Kim, I.S., Lee, Y.J. and Chang, H.W. (2005b) Sulfate Reduction and Origin of Organic Matter in the Ulleung Basin, East Sea. *Econ. Environ. Geol.*, v.38, p.335-346.
- Park, M.H., Kim, J.H., Ryu, B.J., Kim, I.S. and Chang, H.W. (2006) AMS radiocarbon dating of the marine late Pleistocene-Holocene sediment cores from the Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, v.243, p.211-215.
- Peters, K.E., Sweeney, R.E. and Kaplan, I.R. (1978) Correlation of carbon and nitrogen stable isotope ratios in sedimentary organic matter. *Limnol. Oceanogr.*, v.23, p.598-604.
- Prahl, F.G., Bennett, J.T. and Carpenter, R. (1980) The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.44, p.1967-1976.
- Prahl, F.G., Ertel, J.R., Goni, M.A. and Eversmeyer, B. (1994) Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin. *Geochim. Cos-*

- mochim. Acta, v.59, p.3035-3048.
- Premuzic, E.T., Benkovitz, C.M., Graffney, J.S. and Walsh, J.J. (1982) The nature and distribution of organic matter in the surface sediments of world oceans and seas. *Org. Geochem.*, v.4, p.63-77.
- Schoeninger, M.J. and DeNiro, M.J. (1984) Nitrogen and carbon isotope composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.48, p.625-639.
- St-Onge, G. and Hillaire-Marcel, C. (2001) Isotopic constraints of sedimentary inputs and organic carbon burial rates in the Saguenay Fjord, Quebec. *Mar. Geol.*, v.176, p.1-22.
- Sweeney, R.E. and Kaplan, I.R. (1980) Natural abundances of ^{15}N as a source indicator for near-shore marine sedimentary and dissolved nitrogen. *Mar. Chem.*, v.9, p.81-94.
- Thornton, S.F. and McManus, J. (1994) Applications of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland. *Estuar, Coast. Shelf Scie.*, v.38, p.219-233.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K. (1993) Evolution of Neogene Sedimentary Basins in the Eastern Continental Margin of Korea. *Kor. J. Petrol. Geol.*, v.1, p.15-27.

2009년 11월 29일 원고접수, 2010년 1월 31일 게재승인