

동해 남서부 해역의 제 4기 후기 퇴적물과 공극수에서의 퇴적학적 및 지화학적 변화의 의미

Implications on Sedimentological and Geochemical Changes in Late Quaternary Sediments and Pore Water of the Southwestern East Sea

박명호 (Myong-Ho Park)* · 김지훈 (Ji-Hoon Kim)** · 류병재 (Byong-Jae Ryu)** · 이성숙 (Songsuk Lee)* ·
한상근 (Sang-Geun Han)* · 길영우 (Young-Woo Kil)***

요약 : 동해 남서부해역에서 채취한 4개의 코어퇴적물과 공극수를 이용하여 제4기 후기의 층서와 퇴적환경변화를 연구하였다. 이를 위하여 테프라층서, 탄소연대측정, 퇴적상, 퇴적물의 암질, 퇴적물과 공극수의 원소성분 등을 분석하였다. 테프라층서와 탄소연대측정 결과, 코어의 층서는 MIS 3의 중반 시기부터 최상부의 MIS 1 (홀로세)까지 구성되어 있음을 보여준다. 코어의 평균퇴적률은 대부분 10~20 cm/kyr의 값을 보여주고 있으나, 구간별로 퇴적률은 크게 변동을 한다. 특히 퇴적률은 MIS 2 시기에 상대적으로 높은 값을 보여주고 있는데, 이는 해수면 변동과 관련이 있는 것으로 추정된다. 반면, 측정된 $\delta^{13}C_{org}$ 과 C/N 비를 도식한 결과, 코어의 유기물질은 대부분 해성조류 기원임을 가리킨다. 또한 메탄가스의 $\delta^{13}C_{CH_4}$ 값을 고려할 때, 메탄가스가 이산화탄소 환원작용의 경로를 따르는 박테리아기원으로 형성되었음을 보여준다.

주요어 : 제4기 후기 층서, 퇴적률, 박테리아기원, 울릉분지, 동해

Abstract : Late Quaternary stratigraphy and sedimentary environmental changes were studied based on four core sediments and their pore water taken from the southwestern part of the East Sea. The results of tephrostratigraphy and radiocarbon dates indicate that the cores cover the time interval from the middle stage of Marine Isotope Stage (MIS) 3 to MIS 1 (Holocene). The average of sedimentation rate in core sediments varies from 10 cm/kyr to 20 cm/kyr, but it fluctuates generally in particular time intervals such as MIS 2, which would be related with the sea-level changes at that time. On the other hand, the relations between $\delta^{13}C_{org}$ and C/N ratios suggest that the organic matter in the cores was originated mainly from marine algae. In addition, the value of $\delta^{13}C_{CH_4}$ indicates bacterial origin rather than thermogenic one.

Keywords : late Quaternary stratigraphy, sedimentation rate, bacterial origin, Ulleung Basin, East Sea

서론

신생대 제4기 초기 이후로 동해의 남서부 해역에 위치한 울릉분지는 동해의 다른 해양 분지들과 마찬가지로 고해양학적 변화에 의해 크게 영향을 받아왔다. 이 시기 동안 분지의 중앙부분보다는 주변부나 해곡들이 있는 부분들이 고해양학적 변화에 줄곧 민감하게 영향을 받아왔다. 특히 이와 관련된 퇴적과정들은 일반적으로 대규모 사면붕괴나 사면사태 및 붕락, 쇄설류 등을 들 수 있다.

실제로 울릉분지에 대한 연구는 그동안 대부분 물리탐사와 고생물학적 연구 그리고 퇴적물을 이용한 고해양학적 연구

등에 중점을 두어왔다. 그러나 최근에는 테프라층서 (tephrostratigraphy), 퇴적상 변화와 관련된 퇴적학적 연구, 그리고 공극수 (interstitial water)의 지화학적 결과를 이용한 퇴적환경 복원작업이 부분적이긴 하지만 조금씩 행해져 왔다 (Bahk *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2005).

특히 이 논문에서는 동해의 남서부 해역 (울릉분지 북서부)에서 채취한 4개의 코어퇴적물을 이용하여 제4기 후기의 테프라층서와 절대연령측정, 퇴적환경 등을 연구하였다. 무엇보다도 이전의 울릉분지 코어퇴적물과 공극수를 이용한 연구에서는 전혀 다루지 않았던 유기물과 메탄가스의 탄소동위원소를 분석함으로써, 보다 정확한 퇴적물의 퇴적환경을 밝힐 수

*한국석유공사 기술실 (Technical Department, Korea National Oil Corporation, Gwanyang-dong 1588-14, Anyang, Gyeonggi-do 431-711, Korea); myongho@knoc.co.kr

**한국지질자원연구원 석유해저자원연구부 (Petroleum and Marine Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

***한국석유공사 신규사업처 (New Ventures Department, Korea National Oil Corporation, Anyang 431-711, Korea)

있었다. 이밖에, 퇴적물 내 함유되어 있는 유기물의 기원, 퇴적물의 성숙 정도, 공기층 가스 기원 등에 대해서도 연구를 하였다.

연구방법

한국지질자원연구원의 탐사선 탐해 II호의 피스톤 코어러를 이용하여 울릉분지 북서부 해역에서 채취한 4개의 코어(01GHP-4, 01GHP-5, 01GHP-6, 01GHP-7)를 연구코어로 이용하였다.

테프라층으로부터는 부석 및 유리질 입자를 채취한 후 분석하였고, 코어퇴적물의 퇴적상, 퇴적물의 특성 등을 기재하였다. AMS 탄소연대측정을 위하여 01GHP-4와 01GHP-6 코어에서 총 8개의 시료를 채취하여 부유성 유공충 종인 *Globigerina bulloides*와 *Neogloboquadrina pachyderma*를 선별한 후 (박명호 외, 2004), 독일의 라이프니츠 연구소 (Leibniz Inst., Kiel)에 의뢰하여 분석하였다. 01GHP-5와 01GHP-7 코어는 공극수와 기타 지화학적 분석을 위하여 현장에서 절개하였고, 01GHP-4와 01GHP-6 코어는 실험실에서 절개하였다. 공기층 가스 분석은 Pimmel and Claypool (2001)이 제안한 방법을 이용하여 시료를 채취하였으며 채취한 시료는 70°C로 30분간 가열한 후 공기층 가스를 주사기로 일정량 채취하여 한국지질자원연구원의 HP GC-5890을 이용하여 실시하였다. 공기층 가스 중 메탄가스의 탄소동위원소분석 ($\delta^{13}C$)은 홋카이도 대학의 GC-MS를 이용하여 결정하였다 (Tsunogai *et al.*, 2000). 가스동위원소비의 검출한계량은 200 pmol이며 표준오차는 0.3‰이다.

공극수 내 염소 이온 (Cl⁻)은 ODP의 공극수 분석방법을 참고로 하여 (Gieskes *et al.*, 1991) 질산은 (AgNO₃)을 이용한 모르(Mohr) 적정방법으로, 황산염 이온 (SO₄²⁻)과 브롬 이

온 (Br⁻)은 Dionex DX-500 IC를 이용하여 분석하였다. 또한 채취된 퇴적물 시료는 원소분석과 열분석을 위하여 냉동건조기로 24시간 동안 건조시키고 분말로 분쇄한 후 Leco사의 CHN-900, SC-132 및 Vinci사의 Rock-Eval 6을 이용하였다. 또한 퇴적물 내 유기물의 동위원소 분석을 위해 3N HCl로 무기탄산염을 제거한 후, 기초과학지원연구원의 안정동위원소 스펙트로미터 (VG prism stable isotope ratio mass spectrometer)를 이용하였다. 탄소동위원소의 분석 재현성은 ±0.2‰이며, 탄소 표준물질로는 ‘V-PDB’를 이용하였다.

결 과

층서와 퇴적물 변화

연구코어에서는 코어 상부에서 하부방향으로 3개의 테프라층이 발견되었으며, 테프라층의 압질 및 유리질의 형태 및 특성, 지화학적 성분, 상하부 퇴적물의 연대측정 등을 이용하여 층서 대비한 결과, 3개의 테프라층은 각각 울릉-오키층 (Ulleung-Oki tephra layer), 아이라-탄자와층 (Aira-Tanzawa ash layer) 및 울릉-야마토층 (Ulleung-Yamato tephra layer) 이었다 (Fig. 2). 또한 4개의 연구코어 모두에서 DLM (Dark Laminated Mud) 층을 확인하였다. Table 1과 같이 방사성 탄소연대 측정결과를 역년으로 변환시켰는데, 이를 위하여 OxCal calibration 프로그램(v3.5)을 이용하였다 (Ramsey, 1998). 이와 같은 역년 변환작업에 의하면, 울릉-오키층은 약 8.1 cal. kyr BC, DLM층은 약 15.2 cal. kyr BC, 아이라-탄자와층은 약 22.8 cal. kyr BC, 울릉-야마토층은 약 30.7 cal. kyr BC 등의 역년 자료를 얻을 수 있었다.

역년 기준으로 했을 때, 코어의 평균 퇴적률은 12.17 cm/kyr (01GHP-5)부터 19.96 cm/kyr (01GHP-6)으로, 대부분의 코어에서 10~20 cm/kyr의 평균퇴적률을 보였다 (Fig. 3). 구간별 퇴적률을 보면, 01GHP-5 코어의 아이라-탄자와층과 울릉-야마토층의 구간에서 6.96 cm/kyr의 최소값을 보였으며, 01GHP-6 코어의 중간구간에서 50.48 cm/kyr의 최대값을 보였다. 또한 코어의 중간구간들은 대부분 MIS(Marine Isotope Stage) 2에 해당하는 시기로, 이 시기 동안 퇴적률이 다른 구간에 비해 상대적으로 증가하였음을 보여주고 있다. 특히 다른 코어에 비해 분지의 내부에 위치한 01GHP-6 코어에서 퇴적률이 크게 증가하였음을 보여주고 있다 (Fig. 3).

퇴적상 변화

연구지역의 코어퇴적물은 울릉분지의 다른 해역에서 관찰된 퇴적상의 특성과 비슷하다 (박명호 외 2002; Park *et al.*, 2005). 코어퇴적물은 주로 이토 퇴적물로 구성되어 있으며, 실트질 모래, 부석, 화산력, 화산재, 유공충 연니 등이 부분적으로 협재되어 있다. 퇴적상의 특성에 따라 코어퇴적물은 Unit I, Unit II 및 Unit III으로 나누어진다. Unit I과 Unit III에서는 생물교란 이토 및 약엽리 이토 등의 반원양성 퇴적물이 상대적으로 우세하게 나타나며, 반면 Unit II에서는

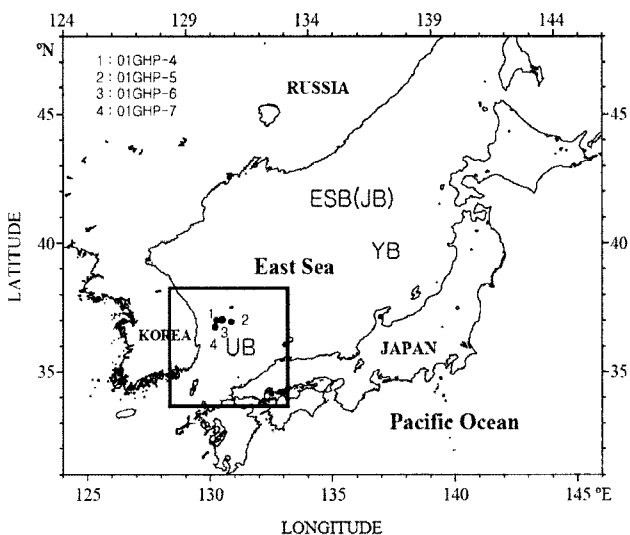


Fig. 1. Location map of coring in the western Ulleung Basin of the East Sea. UB = Ulleung Basin, YB = Yamato Basin, ESB = East Sea Basin (JB = Japan Basin).

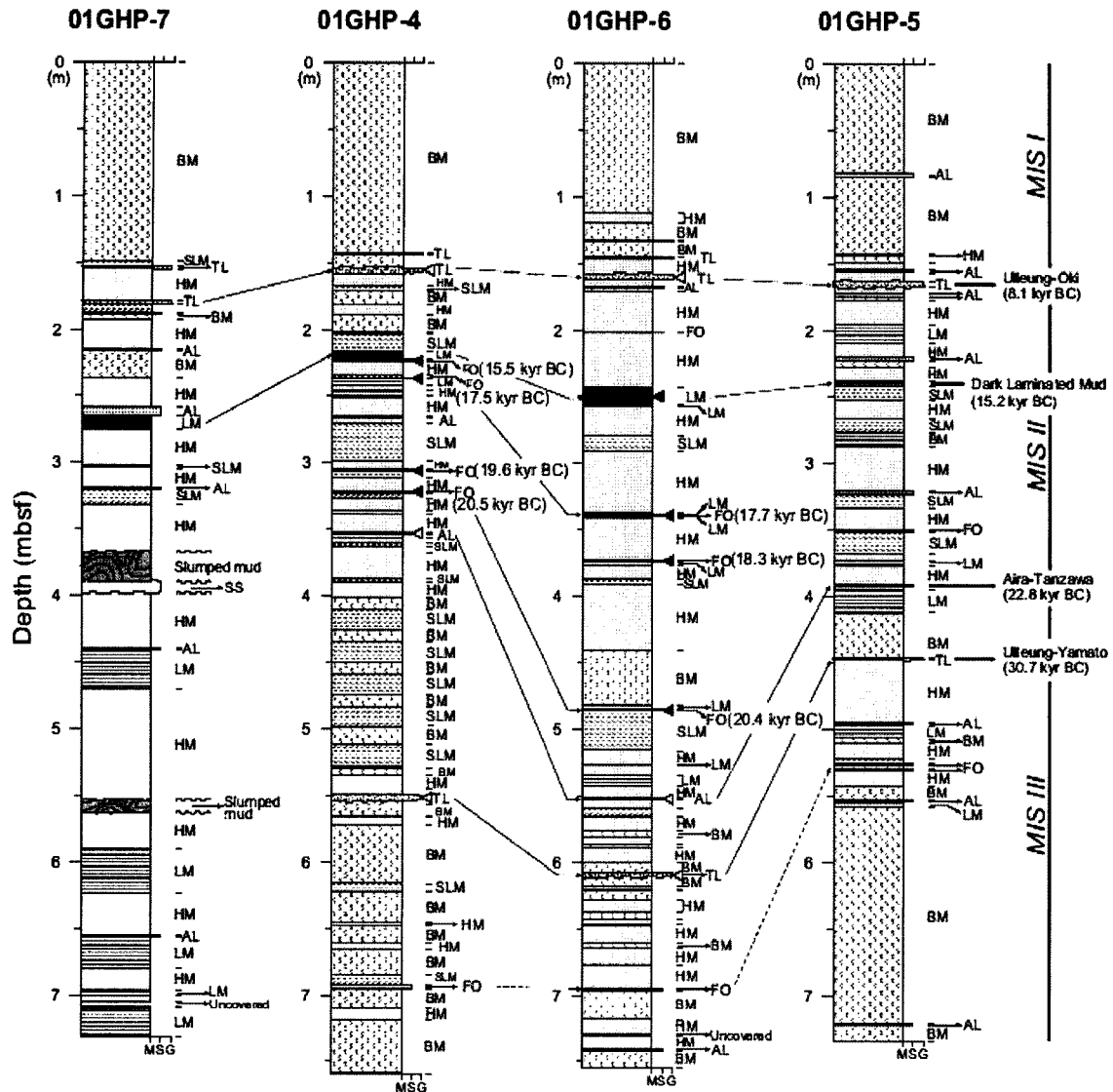


Fig. 2. Description of the cores and stratigraphic correlation using the calibrated ages and tephra layers. *M*, *S*, and *G* indicate mud, sand, and gravel, respectively. *BM* = bioturbated mud, *LM* = laminated mud, *SLM* = slightly laminated mud, *HM* = homogenous mud, *FO* = foraminiferal ooze, *TL* = lapilli layer, *AL* = ash layer, and *MIS* = Marine Isotope Stage.

엽리 이토 및 균질 이토 등의 저탁류성 퇴적물이 우세하게 나타난다. 흥미롭게도, 3개의 테프라층 중에 울릉-오키층은 Unit I/II의 경계부근에, 아이라-탄자와층은 Unit II/III의 경계 부근에 협재되어 나타난다.

공기층 가스 및 동위원소 분석

코어퇴적물에 함유된 공기층 가스의 양은 코어별로 최대 0.5~113.6 μM이다. 공기층 가스의 함량은 매물심도가 증가할수록 점진적으로 증가하며, 공기층 가스의 대부분이 메탄으로 구성되어 있다. 공기층 가스내의 메탄의 탄소동위원소값은 -79.0~-70.1‰의 범위를 가지고 있으면 퇴적물의 심도에 상관없이 일정한 값을 가지고 있다.

공극수 분석

공극수를 분석한 결과에 의하면, Cl⁻와 Br⁻의 농도는 매물심

도와 관련 없이 거의 일정한 값을 보이거나, 황산염의 농도는 매물심도가 커질수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 공기층 가스의 주성분인 메탄의 수직적 변화량과 상반된 결과이다.

열분석

T_{max}는 01GHP-4 코어에서 261~561°C, 01GHP-5 코어에서 309~423°C, 01GHP-6 코어에서 309~423°C, 01GHP-7 코어에서 311~423°C의 범위의 값을 보인다. T_{max} 값이 일부 시료를 제외하고 전체적으로 435°C보다 낮기 때문에, 유기물의 열적 성숙단계는 미성숙단계에 위치한다. 수소지수 (HI)는 01GHP-4 코어에서 47~413 mgHC/gTOC, 01GHP-5 코어에서 7~213 mgHC/gTOC, 01GHP-6 코어에서 80~223 mgHC/gTOC, 01GHP-7 코어에서 13~227 mgHC/gTOC, S₂는 각각 0.26~6.75 mgHC/gRock, 0.01~8.7 mgHC/gRock, 0.3~7.0 mgHC/gRock, 0.03~7.6 mgHC/gRock, 산소지수 (OI)

Table 1. AMS ¹⁴C dating and calibration of four piston cores from the southwestern part of the East Sea. The calibrated ages have 68.2% probability as obtained by the OxCal program.

Core name	Depth (cmbsf)	Lab. number	Radiocarbon age (years BP)*	Cal. age (years BP) 68.2% probability
01GHP-4	154	-	9,300	7,990-8,210
	224	KIA-23962	15,000+70/-60	15,250-15,800
	236	KIA-23959	16,670+90/-80	17,100-17,800
	304	KIA-23961	21,940+130/-120	19,450-19,730
	322	KIA-23960	22,810+140/-130	20,310-20,600
	352	-	25,100+270/-270	22,450-23,050
	551	-	33,000	30,645-30,655
01GHP-5	168	-	9,300	7,990-8,210
	390	-	25,100+270/-270	22,450-23,050
	446	-	33,000	30,645-30,655
01GHP-6	160	-	9,300	7,990-8,210
	250	KIA-23963	14,670+100/-100	14,850-15,450
	340	KIA-23964	16,900+110/-110	17,350-18,050
	372	KIA-23965	17,380+100/-100	17,900-18,650
	484	KIA-23966	19,230+160/-160	20,000-20,800
	552	-	25,100+270/-270	22,450-23,050
	612	-	33,000	30,645-30,655
01GHP-7	178	-	9,300	7,990-8,210

*Data of radiocarbon ages from Machida & Arai (1992), Miyairi *et al.* (2004) and Park *et al.* (2004)

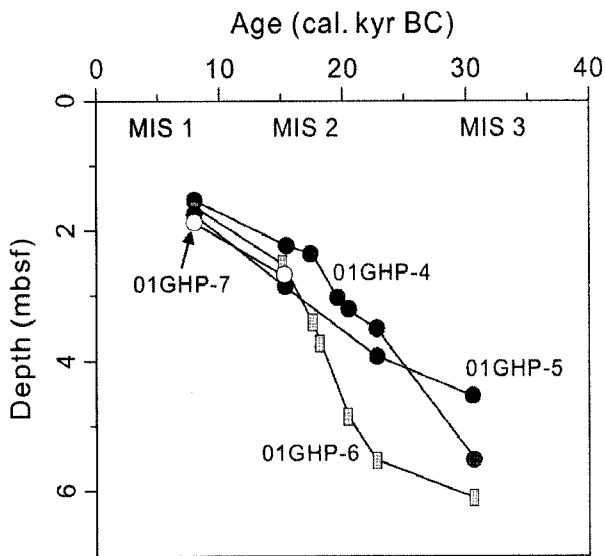


Fig. 3. Relationship between the depths and calibrated ages in the four cores.

는 대부분 160~360 mgCO₂/gTOC의 범위를 가진다. 원소분석 결과와 마찬가지로 HI, S₂ 및 OI 값도 Unit의 경계부근에서 급격히 변화하며, OI는 매몰심도가 커질수록 증가하는 경향을 보인다.

유기물 탄소동위원소 분석

유기물의 탄소동위원소값은 01GHP-5에서는 -23.5~-20.3%,

01GHP-6에서는 -24.6~-20.6%, 01GHP-7에서는 -23.5~-20.3%의 범위를 갖는다. 전반적으로 해저면으로부터 3m까지는 유기물의 탄소동위원소값이 감소하다가 3m 이하에서는 거의 일정한 값을 지닌다.

토 의

코어의 층서와 퇴적물 변화 양상

코어의 층서를 잡기 위하여 코어퇴적물 내에 협재되어 나타나는 수 개의 테프라층과 유공층을 이용한 탄소연대측정을 통하여 전체적인 층서의 윤곽 (framework)을 잡았다. 층서학적 연구결과에 의하면, 세 개의 코어 (01GHP-4, 01GHP-5, 01GHP-6)는 MIS 3의 중간부분부터 MIS 1 (홀로세)까지의 퇴적물로 이루어져 있다. 그러나 01GHP-7 코어는 층서대비가 가능한 층의 결핍, 일부 붕괴된 층의 협재, 탄소연대측정 등의 층서학적 자료의 부족 등으로 인하여 울릉-오키층과 DLM층 구간 이외에는 코어의 전체적인 틀을 잡기가 불가능하였다.

코어의 퇴적물 변화는 대체로 20 cm/kyr 이하의 값을 보여주고 있으나, 구간별로 퇴적률은 매우 심하게 변동하였다. 이는 시기에 따라 코어의 사이트가 단조로운 (monotonous) 퇴적작용에 의해서만 형성되지 않았음을 의미한다. 이는 퇴적상에서도 잘 보여주고 있는데, 테프라층의 형성뿐만 아니라 생물작용에 의해 크게 영향 받은 구간이 있으며, 반면 전혀 이를 감지하기 힘든 구간도 상존하며 교호하여 나타나고

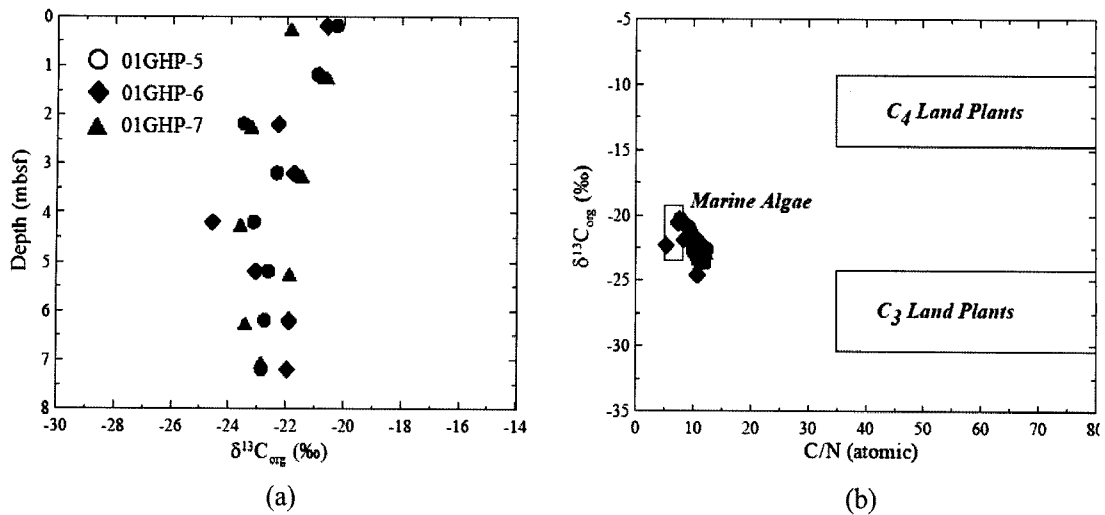


Fig. 4. Relationship between (a) $\delta^{13}C_{org}$ and depth and (b) C/N ratio and $\delta^{13}C_{org}$ in the cores 01GHP-5, 01GHP-6 and 01GHP-7.

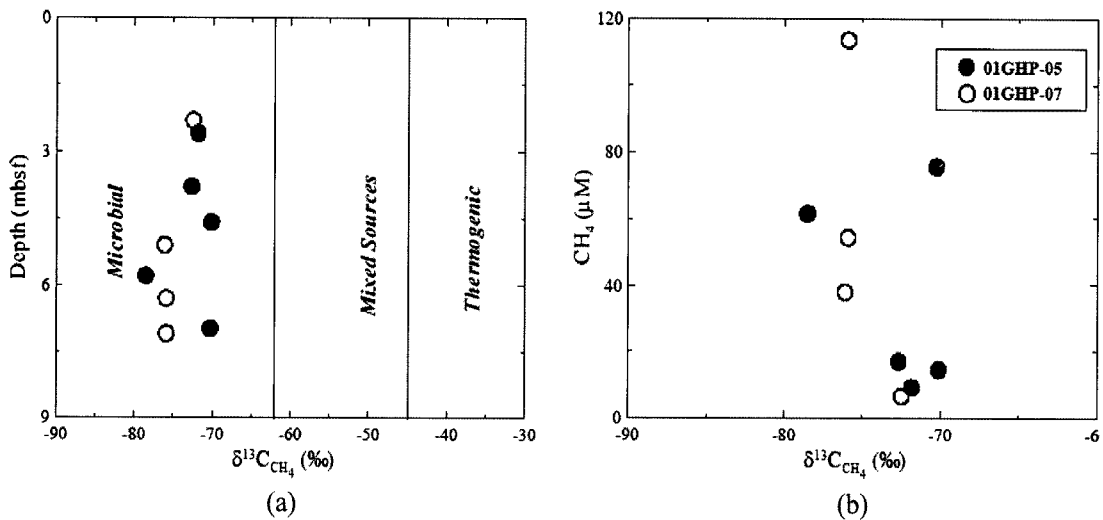


Fig. 5. Relationship between (a) $\delta^{13}C_{CH_4}$ and depth and (b) $\delta^{13}C_{CH_4}$ and CH_4 in the cores.

있다. 이외에, 테프라층의 형성과 관련이 있어 보이는 유공층 연니 (foraminiferal ooze)가 보통 1~2 mm 두께의 박층으로 협재되어 있다 (Fig. 2; 박명호 외, 2004).

지화학적 분석결과의 의미

C/N 비는 퇴적된 유기물 기원이 해양 조류 (marine algae) 또는 육상식물 (land plant) 기원인지를 규명하는 주요 지화학적 지시자로 사용되었다. 왜냐하면 유기물이 해양 조류 기원일 경우 5에서 8의 값을 가지고 있고, 육상식물 기원일 경우에는 20 이상을 가지기 때문이다. 연구지역의 퇴적물 내 유기물의 C/N 비가 전반적으로 5보다는 크고 10보다는 작은 범위를 갖는데, 이러한 결과는 유기물이 육상식물 기원보다는 해양조류 기원이 우세함을 가리킨다. 또한 유기물의 탄소 동위원소값도 동일한 결과를 지시한다. 일반적으로 해양기원 유기물의 탄소동위원소값은 -22‰~-20‰이며, C_3 식물기원의 탄소동위원소값은 -27‰이다 (Jasper and Gagosian, 1990; Meyers, 1994; Rullkötter, 2000). 따라서 측정된 유

기물의 탄소동위원소값은 연구지역의 유기물이 육성 식물기원보다는 해양성 조류 기원임을 지시한다. 또한 측정된 유기물질의 탄소동위원소값과 C/N 비의 관계를 보면, 연구지역의 유기물질이 대부분 해성 조류기원임을 보여주고 있다 (Fig. 4).

코어에서의 Cl^- 와 Br^- 농도의 수직적인 변화는 거의 일정하고 일반적인 해수의 농도 (Cl^- : 543 mM, Br^- : 0.084 mM)와 비슷하다. 이것은 공극수가 해수 기원임을 지시한다. Cl^- 농도의 수직적인 변화량과 반대로, 황산염은 매몰심도가 커지면서 감소한다. 이러한 황산염 농도의 수직적인 변화는 코어퇴적물 내에서 황산염 환원작용 (sulfate reduction)이 일어났음을 의미한다. 일반적으로 무산소환경 (anoxic condition) 하에서 박테리아는 황산염 (SO_4^{2-})을 전자수용체 (electron acceptor)로 이용하여 유기물을 산화시키는 박테리아 황산염 환원작용 (BSR: bacterial sulphate reduction)을 유발시킨다 (Berner, 1984; Canfield and Raiswell, 1991).

황산염이온의 농도가 심도에 따라 감소하는 것과는 반대로

메탄 함량은 증가한다. 이러한 결과는 코어에서 매몰심도가 증가할수록 황산염 환원작용에서 메탄생성단계 (methanogenesis)로 전이하고 있음을 보여준다. 공기층 가스의 분석에 의하면 대부분의 가스는 습성가스보다는 건성가스임을 지지하며, 공기층 가스의 성분과 미생물이 관련된 환원작용을 고려할 때 메탄은 열기원 (thermogenic) 가스보다는 박테리아 (bacteria) 가스로 추정된다.

메탄가스는 열기원과 박테리아기원의 두 가지 기원에 의해 생성되며, 열기원 메탄가스의 탄소동위원소값이 박테리아기원의 값보다 높은 값을 가지고 있다. 일반적으로 열기원 메탄가스의 탄소동위원소값은 -50‰~-20‰의 범위를 가지고 있고 박테리아 기원의 메탄가스의 탄소동위원소값은 -110‰~-50‰의 값을 가지고 있다. 따라서 메탄가스의 탄소동위원소값이 가스의 기원을 규명하는 주요 인자로 사용된다. 연구지역에서 분석한 메탄가스의 탄소동위원소값은 모두 -70‰ 이하의 낮은 값을 가지고 있기 때문에 메탄가스의 기원이 열기원보다는 박테리아기원의 가스임을 지지한다. 또한 박테리아 메탄 생성작용은 두 가지 경로, 즉 이산화탄소 환원작용 (CO₂ reduction)과 아세테이트 효소화작용 (acetate fermentation)이 있다. 이 두 가지의 기작은 메탄가스의 탄소 및 수소동위원소값으로 구분을 할 수 있다 (Whiticar *et al.*, 1986). 일반적으로 이산화탄소 환원작용에 의해 형성된 메탄가스가 아세테이트 효소화작용의 메탄가스보다 탄소 및 수소동위원소값이 낮다. 불행히도 본 연구에서는 메탄가스의 수소동위원소값을 측정하지 못하였지만, 두 기작의 메탄가스의 탄소동위원소 경계값이 -60‰임을 고려할 때 (Whiticar *et al.*, 1986), 연구지역의 메탄가스는 이산화탄소 환원작용의 경로를 따르는 박테리아기원으로 추정된다 (Fig. 5).

결론

1. 유공층의 각을 이용하여 AMS 탄소연대를 측정하였고, OxCal program을 이용하여 역년의 값으로 보정하였다. 코어에서 역년의 나이는 8 cal. kyr BC (홀로세/플라이스토세 경계부근)부터 31 cal. kyr BC (MIS 3 상부)까지 나왔다.
2. 코어의 위치와 시기에 따라 퇴적률은 6.96 cm/kyr에서 최대 50.48 cm/kyr까지 변화였다. 코어별 평균퇴적률은 12.17 cm/kyr부터 19.96 cm/kyr까지 대부분 10~20 cm/kyr의 값을 보여주고 있다. 그러나 퇴적률은 MIS 2 시기에 상대적으로 크게 증가하는 양상을 보인다. 퇴적물의 특징을 보면, MIS 1/3 시기에는 반원양성 퇴적물이, 반면 MIS 2 시기에는 비반원양성 퇴적물이 우세하게 퇴적되었다.
3. 측정된 유기물질의 탄소동위 원소값과 C/N 비를 도식한 결과, 코어의 유기물질은 대부분 해성 조류기원임을 가리킨다.
4. 또한 연구지역의 메탄가스와 메탄가스의 탄소동위원소값의 관계를 보면, 메탄가스가 이산화탄소 환원작용의 경로를 따르는 박테리아기원으로 형성되었음을 보여준다.

사사

울릉분지에서 채취한 4개의 코어를 제공한 한국지질자원연구원과 AMS ¹⁴C 분석을 행한 독일 키일대학 (Kiel Univ.)의 라이프니츠 연구소 (Leibniz Inst.)에 감사드립니다.

참고문헌

- 박명호, 류병재, 김일수, 정태진, 이영주, 유강민, 2002, 울릉분지 남서부 해역의 천부퇴적물에 대한 층서·퇴적학적 연구. *지원환경지질*, 35, 171-177.
- 박명호, 김지훈, 김일수, 류병재, 2004, 울릉분지 북서부 해역에서 채취한 코어퇴적물의 AMS 탄소연대측정과 테프라층서 연구. 2004년도 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, p. 156.
- 박명호, 김지훈, 김일수, 류병재, 송윤구, 2004, 북서부 울릉분지 코어퇴적물의 테프라층서와 유공층연니. *한국고생물학회지*, 20, 115-125.
- Berner, R.A., 1984, Sedimentary pyrite formation: an update. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 605-615.
- Borowski, W.S., Paul, C.K., and Ussler, III., W., 1999, Global and local variations of interstitial sulfate gradients in deep-water, continental margin sediments: Sensitivity to underlying methane and gas hydrates. *Mar. Geol.*, 159, 131-154.
- Canfield, D.E., and Raiswell, R., 1991, Pyrite formation and fossil preservation. In: Allison, P.A. and Briggs, D.E.G. (Eds.), *Topics Geobiol.* Vol. 9. Plenum, New York, p. 337-387.
- Fauville, A., Mayer, B., Frömmichen, R., Friese, K., and Veizer, J., 2004, Chemical and isotopic evidence for accelerated bacterial sulphate reduction in acid mining lakes after addition of organic carbon: laboratory batch experiments. *Chemical Geology*, 204, 325-344.
- Gieskes, J.M., Gamo, T., and Brumsack, H., 1991, Chemical Methods for Interstitial Water Analysis aboard JOIDES Resolution. *Ocean Drill. Progr. Tech. Note* 15.
- 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* 54, 1117-1132.
- Kim, J.H., Ryu, B.J., Cheong, T.J., Lee, Y.J., Park, M.H., Kim, I.S., and Chang, H.W., 2003, Geochemical study on the sediments in the western Ulleung Basin of the East Sea. *International Symposium on Gas Hydrate, Qindao in China*, p. 8-9.
- Machida, H., and Arai, F., 1992, *Atlas of Tephra in and around Japan*. Univ. Tokyo Press, 276 p.
- Meyers, P.A., 1994, Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289-302.
- Meyers, P.H., Sillima, 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.*, 25, 69-78.

- Miyairi, Y., Yoshida, K., Miyazaki, Y., Matsuzaki, H., and Kaneoka, I., 2004, Improved ^{14}C dating of a tephra layer (AT tephra, Japan) using AMS on selected organic fractions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 223/224, 555-559.
- Park, M.-H., Kim, J.-H., Kim, I.-S., Ryu, B.-J., and Yu, K.-M., 2005, Tephrostratigraphy and paleo-environmental implications of late Quaternary sediments and interstitial water in the western Ulleung Basin, East/Japan Sea. *Geo-Marine Letters*, 25, 54-62.
- Kamsey, C.B., 1998, Probability and dating. *Radiocarbon*, 40, 461-474.
- Rullkötter, J., 2000, Organic Matter: The driving for early diagenesis. In: Schulz, H.D. and Zaber, M. (Eds.), *Marine Geochemistry*. Springer, Berlin-Heidelberg, p. 129-172.
- Tsunogai, U., Yoshida, N., Ishibashi, J., and Gamo, T., 2000, Carbon isotopic distribution of methane in deep-sea hydrothermal plume, Myojin Knoll Caldera, Izu-Bonin arc: Implications for microbial methane oxidation in ocean and applications to heat flux estimation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 2439-2452.
- Whiticar, M.J., Faber, E., and Schoell, M., 1986, Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO_2 reduction vs. acetate fermentation-Isotope evidence. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50, 693-709.
-
- (2006. 6. 13. 원고 접수)
(2006. 11. 10. 수정본 채택)