

지화학적 방법을 이용한 울릉분지 코어퇴적물의 층서와 퇴적환경 연구

박명호^{1*}, 김지훈², 류병재², 이성숙¹, 한상근¹

¹한국석유공사 기술실 석유지질팀, myongho@knoc.co.kr

²한국지질자원연구원 석유해저자원연구부

요약 : 동해 울릉분지 북서부해역에서 채취한 코어퇴적물을 이용하여 울릉분지의 제4기 후기 층서와 퇴적환경을 연구하였다. 이를 위하여 테프라층서, 탄소연대측정, 퇴적상, 퇴적물의 암질, 퇴적물과 공극수의 원소성분 등을 분석하였다. 퇴적상을 기준으로 코어퇴적물은 Unit I, Unit II 및 Unit III으로 나누어지며, Unit의 경계부근에서는 주로 화산력으로 구성된 2매의 향암질 또는 조면암질 테프라층과 주로 화산재로 구성된 1매의 유문암질 테프라층이 협재되어 나타난다. 이들 테프라층에는 울릉도에서 기원한 울릉-오키층(Unit I/II 경계, 약 8.1 cal. kyr BC)과 울릉-야마토층(약 30.7 cal. kyr BC), 일본에서 기원한 아이라-탄자와층(Unit II/III 경계, 약 22.8 cal. kyr BC)이 있다. Unit II의 중간부근에서 발견되는 DLM(Dark Laminated Mud) 층에는 망간보다는 철이 상대적으로 풍부하고, 철은 주로 구상집적체의 황화철로 발견되는데, 이들 광물은 정체환경 동안 물의 순환이 약화된 시기에 무산소환경에서 형성되었다. 퇴적물 내 유기물은 해양성 기원으로, 열적 성숙단계가 대부분 미성숙단계에 놓여 있다. Termination I 전에 급격하게 총유기탄소(TOC)의 함량이 증가함을 보여주는데, 이는 빙기에서 간빙기로 변하는 시기에 해수면 변동과 관련이 있는 것으로 보인다. 공극수와 공기층 가스의 분석에 의하면, 황산염(SO_4^{2-}) 농도는 매몰심도와 함께 증가하고, 반대로 공기층 가스의 주성분인 메탄(CH_4)의 농도는 감소한다. 이는 미생물학적인 활동과 관련된 황산염 환원작용이 코어 상부에서 일어났으며, 점차 메탄생성단계(methanogenesis)로 전이가 일어났음을 의미한다.

1. 서론

동해의 남서부 해역에 위치한 울릉분지는 동해의 다른 심해분지들과 마찬가지로 제4기 초기 이후로 고해양학적 변화에 의해 크게 영향을 받아왔다. 특히 분지의 주변부나 해곡들은 대규모 사면붕괴(slope failure)나 기타 관련된 퇴적과정들(예: 사면사태 및 붕락, 쇄설류 등)에 의해 줄곧 영향을 받아왔다(Lee et al., 1996).

실제, 울릉분지에 대한 연구는 그동안 대부분 물리탐사와 고생물학적 연구 그리고 퇴적물을 이용한 고해양학적 연구 등에 중점을 두었으며, 천부퇴적물과 퇴적물 내 공극수의 지화학적 특성에 대한 연구는 드문 편이었다(예: Kim et al., 2003). 이 논문에서는 울릉분지 북서부해역에서 채취한 천부퇴적물을 이용하여 제4기 후기의 테프라층서와 절대연령측정, 퇴적환경 등을 연구하였다. 특히 공극수의 지화학적 분석을 통하여 유기물의 기원, 퇴적물의 성숙 정도와 퇴적환경, 퇴적물의 공기층 가스 기원, 공극수의 지화학적 특성과 환원작용단계 등을 밝히고자 하였다.

2. 연구방법

한국지질자원연구원의 탐사선 탐해 II호의 피스톤 코어를 이용하여 울릉분지 북서부해역에서 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 코어에서 8개의 시료를 채취하여 유공충을 선별한 후, 독일의 라이프니츠연구소(Leibniz Inst., Kiel)에 의뢰하여 분석하였다. 01GHP-5와 01GHP-7 코어는 공극수와 기타 지화학 분석을 위하여 현장에서 절개하였고, 01GHP-4와 01GHP-6 코어는 실험실에서 절개하였다. 공기층 가스 분석은 HP GC-5890을 이용하였다. 공극수 내 염소 이온(Cl^-)은 질산은(AgNO_3)을 이용한 모르(Mohr) 적정방법으로, 황산염 이온(SO_4^{2-})과 브롬 이온(Br^-)은 Dionex DX-500 IC를 이용하여 분석하였다. 또한 채취된 퇴적물 시료는 원소분석과 열분석을 위하여 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 스

펙트로메터 (VG prism stable isotope ratio mass spectrometer)'를 이용하였다. 탄소동위원소의 분석 재현성은 $\pm 0.2 \text{ ‰}$ 이며, 탄소 표준물질로는 'V-PDB'를 이용하였다.

3. 결 과

(a) 층서와 퇴적률 변화: 연구코어에서는 코어 상부에서 하부방향으로 3매의 테프라층이 발견되었으며, 테프라층의 암질 및 유리질의 형태 및 특성, 지화학적 성분, 상하부 퇴적물의 연대측정 등을 이용하여 층서 대비한 결과, 3매의 테프라층은 각각 울릉-오키층(약 $9.3 \text{ }^{14}\text{C ka}$), 아이라-탄자와층(약 $25.1 \text{ }^{14}\text{C ka}$) 및 울릉-야마토층(약 $33 \text{ }^{14}\text{C ka}$)이었다. 특히 01GHP-6 코어의 DLM(Dark Laminated Mud) 층을 연대 측정한 결과, 그 연대가 약 $14.7 \text{ }^{14}\text{C ka}$ 이었다. DLM 층은 01GHP-6 코어 이외에 01GHP-5와 01GHP-7 코어에서도 확인되었다. 상기한 방사성 탄소연대를 역년으로 변환시켰는데, 이를 위하여 OxCal calibration 프로그램(v3.5)을 이용하였으며(Ramsey, 1998), 그 결과는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같다. 역년 기준으로 했을 때, 코어의 평균 퇴적률은 17.61 cm/kyr (01GHP-4)~ 19.96 cm/kyr (01GHP-6)이었다. 특히 01GHP-6 코어의 마지막빙하기 중에 퇴적률이 크게 증가하였다(최대 53.3 cm/kyr).

(b) 퇴적상 변화 유형: 연구지역의 코어퇴적물은 울릉분지의 다른 해역에서 관찰된 퇴적상의 특성과 비슷하다(박명호 외 2002; Park et al., 2003). 코어퇴적물은 주로 이토 퇴적물로 구성되어 있으며, 실트질 모래, 부석, 화산력, 화산재, 유공충연니 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 엽리 이토 및 균질 이토 등의 저탁류성 퇴적물이 우세하게 나타난다. 흥미롭게도, 3매의 테프라층 중에 울릉-오키층(약 8.1 cal. kyr BC)은 Unit I/II의 경계부근에, 아이라-탄자와층(약 22.8 cal. kyr BC)은 Unit II/III의 경계부근에 협재되어 나타난다.

(c) 공기층 가스과 공극수 분석: 코어퇴적물에 함유된 공기층 가스의 양은 코어별로 최대 $0.5\sim 113.6 \text{ } \mu\text{M}$ 이다. 공기층 가스의 함량은 매물심도가 증가할

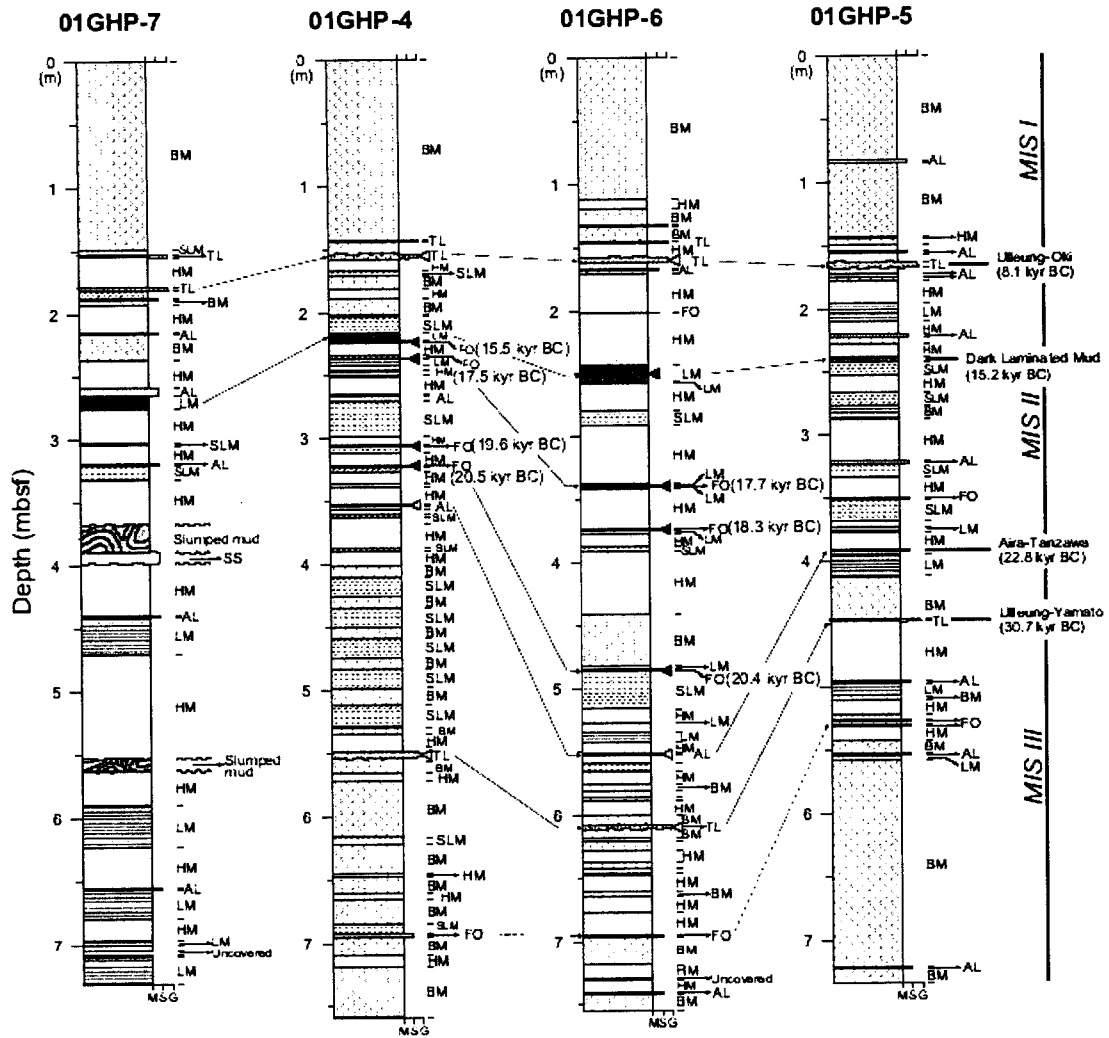


Fig. 1. Description of the cores and stratigraphic correlation using the calibrated ages and tephra layers. *M*, *S*, and *G* indicate mud, sand, and gravel, respectively. *BM* = bioturbated mud, *LM* = laminated mud, *SLM* = slightly laminated mud, *HM* = homogenous mud, *FO* = foraminiferal ooze, *TL* = lapilli layer, *AL* = ash layer, and *MIS* = Marine Isotope Stage.

수록 점진적으로 증가하며, 공기층 가스의 대부분은 메탄으로 구성되어 있다. 공극수를 분석한 결과에 의하면, Cl^- 와 Br^- 의 농도는 매몰심도와 관련 없이 거의 일정한 값을 보이나, 황산염의 농도는 매몰심도가 커질수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 공기층 가스의 주성분인 메탄의 수직적 변화량과 상반된 결과이다.

(d) 원소분석: TC는 01GHP-04 코어에서 0.5~6.3%, 01GHP-5 코어에서 0.3~5.0%, 01GHP-6 코어에서 0.8~4.1%, 01GHP-7 코어에서 1.9~7.9%,

TOC는 0.2~4.7%, 0.1~4.1%, 0.4~3.2%, 0.2~3.3%로, TN는 0.4~0.5%, 0.0~0.4%, 0.2~0.4%, 0.0~0.4%, TS은 0.3~3.1%, 0.1~2.1%, 0.2~2.1%, 0.0~1.9%의 함량을 각각 보인다. TOC와 TN은 Unit I에서 상대적으로 높은 값을 보이고, TS 함량은 매물심도가 커질수록 증가한다. 퇴적물의 원소분석 값은 전체적으로 Unit의 경계구간에서 특징적으로 변한다.

(e) 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, S_2 는 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)는 대부분 160~360 mgCO₂/gTOC의 범위를 가진다. 원소분석 결과와 마찬가지로 HI, S_2 및 OI 값도 Unit의 경계부근에서 급격히 변하며, OI는 매물심도가 커질수록 증가하는 경향을 보인다.

5. 토 론

퇴적물 내 유기물의 C/N 비가 전반적으로 5보다는 크고 10보다는 작은 범위를 갖는데, 이러한 결과는 유기물이 육성식물 기원보다는 해양조류 기원이 우세함을 가리킨다. 대부분의 C/S 비에서도 유사한 결과를 얻었다. 또한 Unit II/III에서 유기물의 퇴적환경이 정체환경이었으나, 매물심도가 작아지면서 일반적인 해양환경으로 변하였음을 보여준다.

열분석 결과, 코어퇴적물 내 유기물은 대부분 케로젠 타입 III의 진화경로에 위치하며, T_{max} 가 435°C보다 낮은 미성숙단계에 있다. 이러한 결과는 유기물이 육성식물 기원임을 지시하는 것으로서, 상기한 C/N 비나 C/S 비에서 보여주었던 결과와 상반된다. 그러나 코어퇴적물 내 유기물의 탄소동위원소 값($\delta^{13}C$)이 대부분 -20~-25 ‰에 놓이므로, 연구지역의 유기물은 육성보다는 해성 기원이 우세함을 알 수 있다(Fig. 2). 따라서 위에서 언급한, 상반된 분석결과는 유기물이 퇴적된 이후 미생물의 재동에 의한 강한 산화작용

때문일 수 있다(Meyers et al., 1996). 코어퇴적물 내 유기물은 퇴적 후 충분한 숙성작용을 받지 못한 미성숙단계에 있으며, 유기물이 침강하는 동안 또는 퇴적 후에 강한 산화작용을 받아 상대적으로 OI 값이 증가한 것으로 추정된다.

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 환원작용이 일어났음을 의미한다. 황산염이온의 농도가 심도에 따라 감소하는 것과는 반대로 메탄 함량은 증가한다. 이러한 결과는 코어에서 매몰심도가 증가할수록 황산염 환원작용에서 메탄생성단계로 전이하고 있음을 보여준다.

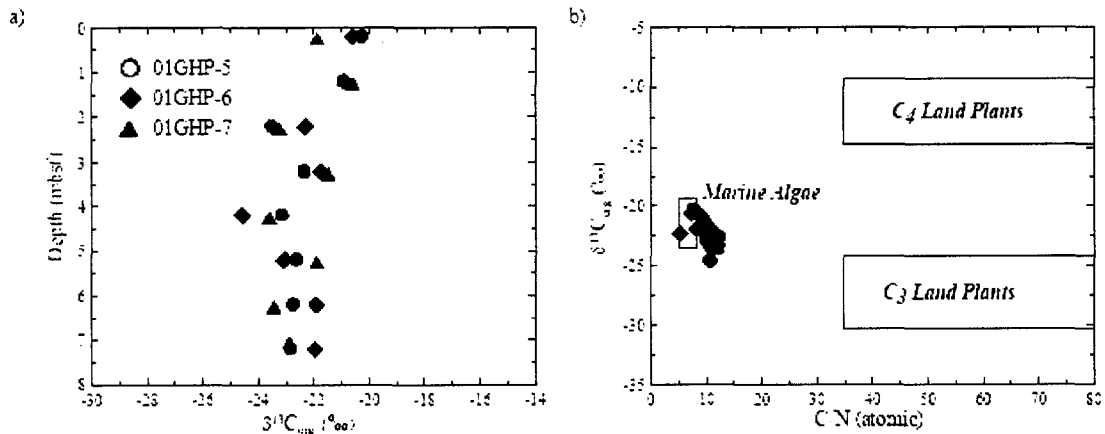


Fig. 2. Relations between (a) $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and depth and (b) C/N ratio and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in the cores 01GHP-5, 01GHP-6 and 01GHP-7.

6. 참고 문헌

- 박명호, 류병재, 김일수, 정태진, 이영주, 유강민 (2002): 울릉분지 남서부 해역의 천부퇴적물에 대한 층서·퇴적학적 연구. 자원환경지질, 35: 171-177.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lee, H.J., Chough, S.K. and Yoon, S.H. (1996): Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea). *Sedimentary Geology*, 104: 39-51.
- Meyers, P.H., 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.*, 25: 69-78.
- Park, M.H., Kim, I.S. and Ryu, B.J. (2003): Framboidal pyrites in late Quaternary core sediments of the East Sea and their paleoenvironmental implications. *Geosciences J.*, 7: 209-215.
- Ramsey, C.B. (1998): Probability and dating. *Radiocarbon*, 40: 461-474.