



동해 동남한국대지 IODP Expedition 346 Site U1430 코어 퇴적물의 유기물상과 와편모조류 산출특성에 의한 후기 마이오세 고해양환경 복원

김용미^{1,3} · 이상현^{1,2,*} · 김길영³ · 이은미^{2,4}

¹과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과

²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

³한국지질자원연구원 석유해저연구본부

⁴강원대학교 지질·지구물리학과

요 약

동해 동남한국대지에서 IODP Expedition 346이 시추한 Site U1430 코어에서 후기 마이오세 구간의 퇴적물로부터 유기물상(palynofacies) 및 와편모조류 분석을 통해 고해양환경을 해석하였다. 유기물상 분석결과 하부로부터 원양분지(Distal Basin), 원대륙붕(Distal Shelf), 대륙붕~분지 전이환경(Shelf-Basin transition)으로 판단하였다. 이러한 고해양환경 변화는 전 지구적 해수면변동에 의한 것뿐만 아니라, 후기 마이오세동안 동해에 작용한 지구조운동의 영향도 함께 작용한 결과로 추정하였다. 와편모조류 분석 결과 동해와 주변해역에서 대마난류 지시종인 난수종 *Tuberculodinium vancampoe*가 8.12 Ma 시기에 첫 출현하였다. 그러나, 이 시기는 대한해협이 닫힌 15~3.5 Ma 기간에 포함되기 때문에 *T. vancampoe*의 출현은 후기 마이오세동안 Fossa Magna 해협을 통해 유입된 산소 최소층(oxygen minimum zone, OMZ) 난류 수괴일 것으로 해석하였다. 연구지역에서 해양기원 무정형유기물(amorphous organic matter)이 다량 산출된 것은 U1430코어 퇴적물이 퇴적될 당시 동남한국대지가 전체적으로 환원해양환경이었음을 지시한다. 환원해양환경 하에서 저산소(suboxic)환경과 무산소(anoxic)환경이 번갈아 나타남은 일본 혼슈 중부의 Fossa Magna 해협을 통한 OMZ 난류 수괴의 유입여부에 따라 변화한 것으로 판단하였다.

주요어: 유기물상, 와편모조류, 고해양환경, 동남한국대지, IODP Expedition 346

Yongmi Kim, Sangheon Yi, Gil-Young Kim and Eunmi Lee, 2017, Late Miocene paleoceanography of the Eastern South Korea Plateau, East Sea, inferred from the palynofacies and dinoflagellates of U1430 core, IODP Exp. 346. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 5, p. 645-656

ABSTRACT: Analyses in palynofacies and dinoflagellates from Site U1430 core drilled at the Eastern South Korea Plateau (ESKP) in the East Sea by IODP Expedition 346 were carried out to interpret paleoenvironments. From an analysis of the palynofacies, three units of paleoenvironment are recognized in ascending order: Distal Basin, Distal Shelf, and Shelf-Basin transition. We inferred that these marine environmental changes were caused by not only global sea level changes, but also tectonic activities on the East Sea during the late Miocene. *Tuberculodinium vancampoe* that is known as a warm water dinoflagellate and an indicator of the Tsushima Warm Current was first present at 8.12 Ma from the U1430. As the Korea Strait was closed during the 15-3.5 Ma period, the presence of *T. vancampoe* at 8.12 Ma might have been transported by the other gateway such as Fossa Magna Strait. This gateway that was connected to the western Pacific Ocean plays a role to inflow warm water of oxygen minimum zone (OMZ) water to the East Sea. In overall, marine origin amorphous organic matter (AOM) in this study was predominated through the whole section, indicating that the site of the U1430 at ESKP was entirely reduced marine environment. We might assume that suboxic and anoxic conditions occurred alternately under the reduced environments controlled by the influx of OMZ warm water through the Fossa Magna Strait in central Honshu, Japan.

* Corresponding author: +82-42-868-3135, E-mail: shyi@kigam.re.kr

Key words: palynofacies, dinoflagellate, paleoenvironment, Eastern South Korea Plateau, IODP Expedition 346

(Yongmi Kim and Sangheon Yi, Dept. of Petroleum Resources Technology, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea; Sangheon Yi and Eunmi Lee, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Yongmi Kim and Gil-Young Kim, Petroleum and Marine Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Eunmi Lee, Dept. of Geology and Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea)

1. 서 론

동해 울릉분지에서는 석유가스 자원 확보를 위한 탐사가 지난 수십 년 동안 수행되었고, 이들 자료를 이용해 울릉분지의 층서, 퇴적환경, 지질구조를 규명하기 위한 연구들이 수행되어왔다(Yoon and Chough, 1995; KNOC, 2005). 그러나 고생물학자료를 이용한 한국학자들에 의한 동해 전반적인 고해양학적 복원에 집중한 연구는 미흡한 실정이다.

IODP Expedition 346 탐사는 동해의 해류와 아시아 몬순의 변화특성을 파악하기 위해 동해에서 동중국해 일부지역까지 총 9개의 정점에 대해 시추가 이루어졌다. 이번 연구는 그 일환으로 수행하게 되었다.

Tada (1994)는 ODP/DSDP 자료를 이용하여 동해 형성(late Oligocene) 이후 현재까지 동해의 고해양학적 진화과정에 대해 보고한 바 있다. 그러나 대한해협(Korea Strait)을 통한 대마난류(Tsushima Warm Current)의 유입 및 차단 시기와 차단 후에도 나타나는 난류 영향의 증거들에 대하여 현재까지 논란이 있으며, 마이오세기간의 동해 고해양환경 복원 연구는 부족한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 고생물학자료를 이용해 후기 마이오세 기간의 고해양환경복원을 시도하였다.

이번연구에 사용한 유기물상(palynofacies)은 고등식물의 잎, 줄기, 뿌리, 목질부, 화분·포자, 균류, 해성 및 담수성 조류, 박테리아 등으로부터 유래된 다양한 유기물 입자로 구성되며 이들이 분해·이동·퇴적되는 고환경을 반영한다(Traverse, 2005). 따라서 유기물상 분석은 석유탐사에서 근원암 평가 뿐 아니라 고해양환경 복원에도 유용하게 이용되고 있다. 유기질 미화석인 와편모조류(dinoflagellate)는 내구성이 강한 스포로폴레닌(sporopollenin)으로 구성되어 있어서 여러 해양환경 조건에서도 잘 보존되기 때문에 생층서학에서 유용하게 사용되고 있다. 또한 이를 이용한 생층서 자료는 퇴적당시의 고기후 및 고해양

환경 복원에 매우 중요한 역할을 한다(Yi, 2015).

그러므로 이번 연구에서는 동해 동남한국대지에 위치한 Site U1430 코어의 후기 마이오세 기간을 유기물상과 와편모조류분석을 통하여 동해 고해양환경 의미를 고찰하려한다.

2. 연구지역

동해는 동아시아대륙과 일본열도에 둘러싸여 있는 반폐쇄성 연변해(marginal sea)이다(Chough *et al.*, 2000; Chang *et al.*, 2015). 동해의 형성은 중기 올리고세(약 30~28 Ma) 시기에 필리핀해판이 유라시아 대륙판 밑으로 섭입하면서 지금의 일본 분지(Japan Basin) 북동쪽부터 열개되며 시작되었다. 이후 후기 올리고세부터 중기 마이오세(24~16.5 Ma)까지 남서 방향의 신장력이 우세한 동해의 확장이 진행되었다. 중기 마이오세부터 후기 마이오세(16.5~12.5 Ma)에는 필리핀해판이 유라시아판으로 섭입하면서 시계방향으로 일본열도가 회전하고, 남쪽 대한해협은 닫히면서(16~15.5 Ma) 분지가 확장되었다. 후기 마이오세(약 12.5~5.5 Ma)에는 필리핀해판의 보닌 아크(Bonin Arc)와 일본열도가 충돌하여 압축력이 우세해지면서 확장이 둔화되고 현재와 같은 동해가 형성되었다(Chough *et al.*, 2000; Yoon *et al.*, 2014). 특히, 후기 마이오세(8.2~6.3 Ma)에 작용한 횡압력 구조운동은 울릉분지에 습곡대를 형성하고, 용기부는 침식작용을 받게 되어 광범위한 부정합면을 형성하였다고 알려져 있다(Shin, 2000).

동해는 일본 분지(Japan Basin), 야마토 분지(Yamato Basin) 및 울릉 분지(Ulleung Basin)로 구성되며, 이들은 각각 한국 대지(Korea Plateau), 오키 뱅크(Ok Bank), 야마토 해령(Yamato Ridge) 등에 의해 구분된다(그림 1). 또한, 동해는 4개의 해협: 타르타스키 해협(Tartasky Strait, 12 mbsl), 소야해협(Soya Strait, 55 mbsl), 츠가루해협(Tsugaru Strait, 130 mbsl),

대한해협(Korea Strait, 140 mbsl)으로 외해와 연결되어있다(Chough *et al.*, 2000; Chang *et al.*, 2015). 해양학적 특성으로는 북쪽의 타르타스키해협으로부터는 연해주한류가, 남쪽의 대한해협으로는 대마난류가 유입되면서 한류와 난류가 만나 소규모 순환(gyre)이 이루어지는 특징이 있다. 동해 내의 한·난류의 순환 중, 연해주한류(북한한류)와 대마난류가 만나서 아극전선대(subpolar front)를 형성하는데, 이는 대마난류의 세기에 따라 북위 36°~39°의 범위 내에서 이동한다(Hase *et al.*, 1999).

이번 연구지역인 동남한국대지(Eastern South Korea Plateau: ESKP)는 동해의 남서부에 위치하며 동쪽으로는 오키 뱅크와 접하고 서쪽은 한반도의 대륙사면과 만난다. 남쪽은 일본의 대륙사면과 연결되고 북쪽으로는 한국 대지로 둘러싸여 있어서 전체적으로 오목한 형태이며 최대수심은 약 2,000~2,100 m 정도이다(Chough and Barg, 1987; Chough *et al.*, 2000). 또한, 대마 난류의 세 번째 줄기(branch)가 지

나고 북한 한류와 만나 아극전선대를 형성하기 때문에 대마 난류의 세기를 유추하기에 유리한 지역이다(Isoda, 2011).

이번 연구에 사용된 IODP Expedition Site U1430 코어는 울릉분지의 북동쪽, 동남한국대지의 동쪽 사면(37°54.16'N, 131°32.25' E, 수심 1,072 mbsl)에서 획득되었다(그림 1).

3. 시료 및 방법

시추지점 U1430에서는 연속적인 퇴적물을 얻기 위해 Hole U1430A, B, C 3개로 중복하여 시추되었다. U1430은 사출작업 전에 3개의 공(Hole)을 하나의 코어(Spice core)로 연결한 후 시료분할(subsampling)이 이루어졌다. U1430 코어는 총 시추심도가 258 m이며, 승선예비연구 결과(Tada *et al.*, 2015), 암상은 전체적으로 유공충, 구조, 석회질 초미화석 등의 다양한 미화석을 포함한 실트와 점토층으로 구성되어

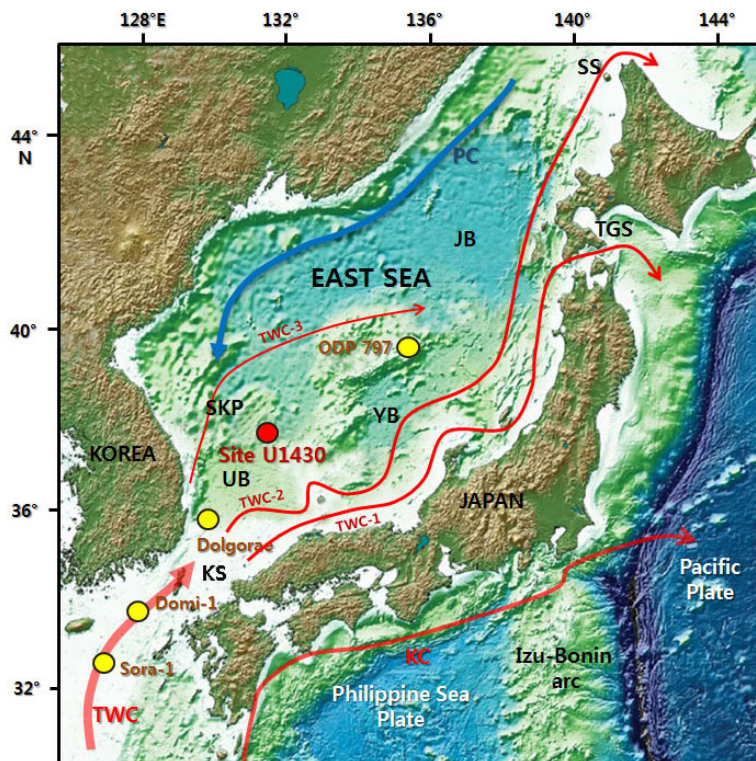


Fig. 1. Physiographic map showing the location of U1430 core (modified from Tada *et al.*, 2015). SKP: South Korea Plateau, UB: Ulleung Basin, YB: Yamato Basin, JB: Japan Basin, KS: Korea Strait, TGS: Tsugaru Strait, SS: Soya Strait, TWC: Tsushima Warm Current, PC: Primorye Cold Current, KC: Kuroshio Current.

있고, XCB (extended core barrel)로 획득되어 시료를 사출하지 않은 최하부 구간은 해록석 사질퇴적층으로 구성되어있다. 이번 분석구간은 전체적으로 구조를 포함한 실트 점토층으로 구성되어있다. 특징적인 구조로는 80~125 mbsf까지 생교란구조(bioturbation structure)와 엽리(lamination)가 혼재하여 나타나고, 125 mbsf 이하 구간에서는 엽리가 대부분 나타난다. 석회질 초미화석, 방산층 및 구조의 시대 지시종 분석 결과, 퇴적시기로는 중기 마이오세(middle Miocene, 약 12.5 Ma)부터 플라이스토세(Pleistocene)까지로 나타났다. 또한, 7.3~5.3 Ma까지는 퇴적률이 매우 낮거나 (3.3 m/m.y.) 퇴적이 중단된 무퇴적구간(Hiatus)이 존재한다.

이번 연구에서는 승선예비연구결과와 연대자료

를 토대로 마이오세 구간(80~258 m)을 1 m 등간격으로 총 176개의 시료를 채취하였으며 유기물상과와 편모조류 분석을 위해 다음과 같이 전처리를 하였다. 동결건조 한 퇴적물 10 g을 50 ml 플라스틱 튜브에 담고, 통계처리용 석송속 포자(*Lycopodium*, 27,637 spores/1 tablet) 2알을 투입하였다. *Lycopodium*은 탄산염물질에 의해 응집되어있기 때문에 시료에 원활히 혼합되도록 하기 위해서 염산반응 전 투입이 권장한다(Mertens *et al.*, 2012). 유기물 상 및 외편모조류 분석은 Moore *et al.* (1991)의 방법을 따라 수행하였다. 퇴적물의 탄산염 광물을 제거하기 위해 35% 염산(HCl) 반응 후 증류수 세척을 하였고, 규산염 광물 제거를 위해 45% 불산(HF)으로 처리 후 또한 증류수 세척을 실시하였다. 염·불산 반응처리가 완

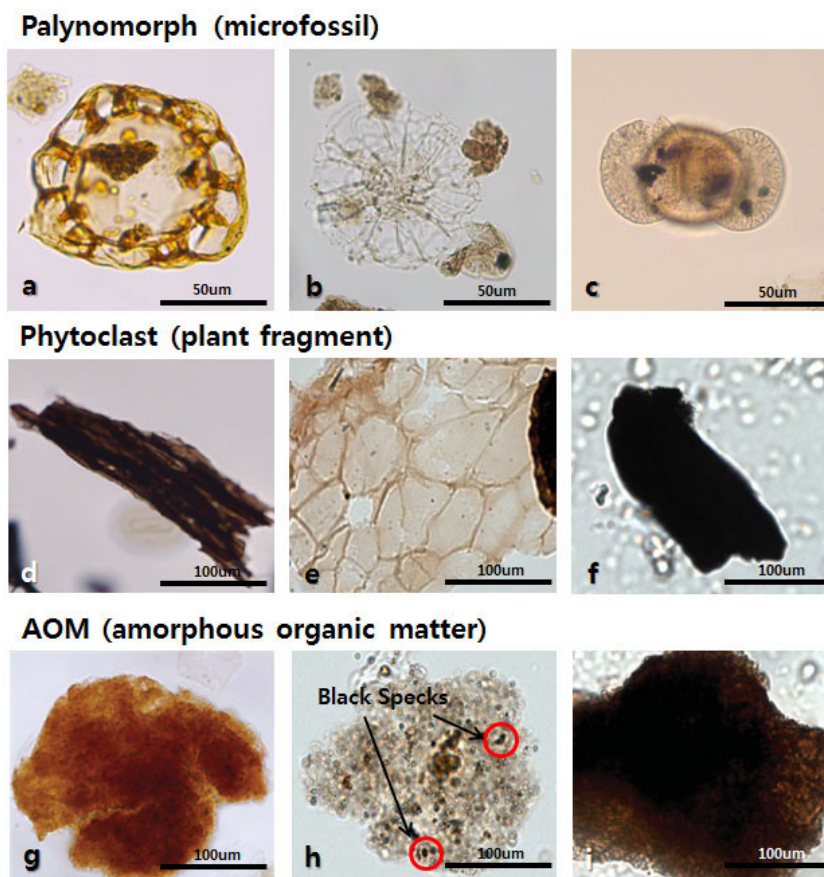


Fig. 2. Palynodebris types used in this study (Obboh *et al.*, 1992). a: Warm water dinoflagellate, *Tuberculodinium vancampoeae*; b: Cold water dinoflagellate, *Nematosphaeropsis labyrinthus*; c: Coniferous pollen, *Pinus*; d: Brown wood; e: Cuticle; f: Black debris; g, i: Terrestrial origin AOM; h: Marine origin AOM with Black Speck (pyritic speck).

이하로 나타났고, phytoclast는 약 25%, palynomorph가 평균 35%로 산출되어 삼각다이어그램의 IV zone에 도시되었다(그림 4와 그림 5).

4.2 와편모조류 분석

U1430 코어에서 유기질 미화석이 비교적 많이 산출된 Unit III(8.5~7.3 Ma, 130~80 mbsf)에서는 총 11속 18종의 와편모조류가 감정되었다(그림 3). 산출된 와편모조류의 종조성을 살펴보면 *Achomosphaera crassipellis*, *Lingulodinium machaerophorum*, *L. filiform*, *Nematosphaeropsis labyrinthus*, *Operculodinium centrocarpum*, *O. israelianum*, *Spiniferites ramosus*, *S. membranaceus*, *S. mirabilis*, *S. elongatus*, *Tuberculodinium vancampoe*가 주요 산출종으로 나타났고, *Impagidinium patulum*, *Melitasphaeridium choanophorum*, *Reticulatosphaera actinocoronata*, *Selenopemphix nephroides*, *S. quanta*가 소수종으로 산출되었다.

이번 연구에서는 선행 연구(Sluijs *et al.*, 2005) 자료를 기반으로 하여 산출 종들을 수괴(water mass) 및 서식환경생태 지시종들의 선정과 추출을 통하여 그룹화 하였고, 깊이에 따라 이들의 산출빈도를 나타내

었다(그림 3). 냉수종은 *N. labyrinthus*, *O. centrocarpum*, *S. elongatus*을 포함하며 0~59%(평균 28.8%)의 산출빈도 범위를 보인다. 난수종은 *O. israelianum*, *T. vancampoe*을 포함하며 산출빈도는 0~22%(평균 5.7%)이다. Unit III에서는 전체적으로 냉수종이 우점으로 나타나지만, Unit IIIa 에서(8.5~7.7 Ma, 130~92 mbsf)에서는 난수종의 산출이 Unit IIIb 보다 상대적으로 많이 산출되었다. 특히, 이번 분석구간 중 8.12 Ma (113 mbsf)에서 *T. vancampoe*가 처음 산출되었으며, Unit III에서 총 81개체가 산출되었다(그림 3과 그림 5).

5. 토 의

5.1 유기물상 특성과 해수면변동과의 상관성 및 퇴적환경

Palynodebris는 일반적으로 phytoclast, palynomorph, AOM로 구성되어 있으며, 현미경상에서 이들의 조합이 보여주는 상을 유기물상(palynofacies)이라고 한다. phytoclast는 형태, 구조 및 조직을 확인할 수 있는 식물파편들로 구성되어 있고, palynomorph는

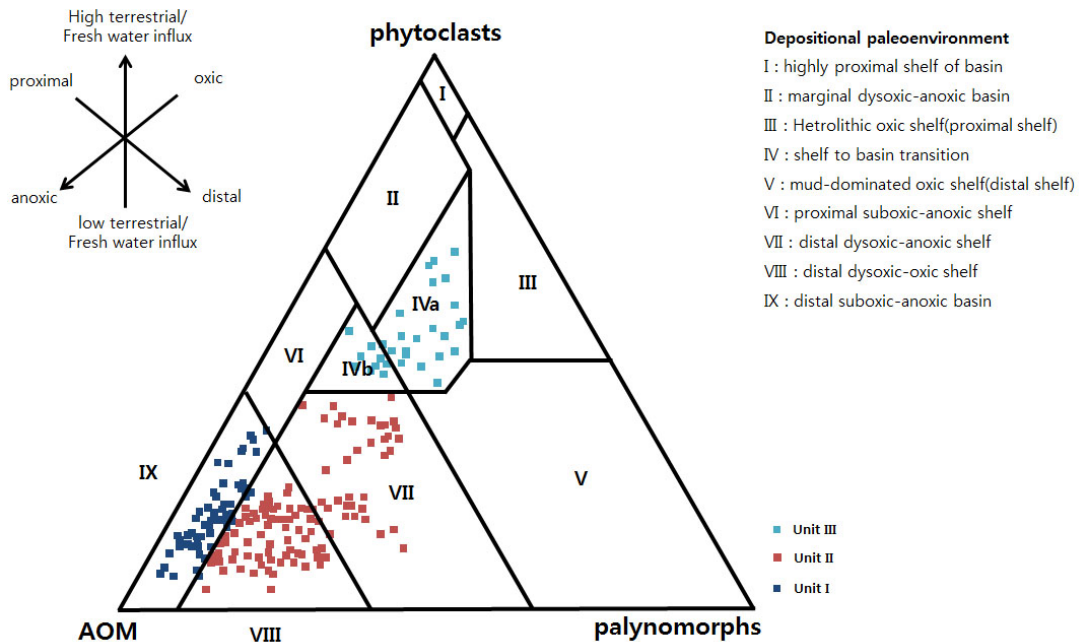


Fig. 4. AOM-Palynomorph-Phytoclast ternary diagram. This diagram plots the relative numerical particle frequency of phytoclasts, AOM and palynomorphs given as % of a total palynodebris assemblage. Each field indicates the difference in relative proximity to the shore and the redox status of the depositional paleoenvironment.

화분·포자와 외편모조류 등과 같은 미화석으로 이루어져 있으며, AOM은 형태와 조직을 판별할 수 없는 육상 또는 해성기원 유기물들을 통칭한다. 특히, AOM은 유기물이 속성작용 또는 열변질 작용을 받아 생성된 것으로 현미경상에서 형태와 조직을 확인할 수 없지만, 색깔과 black speck (그림 2h)의 유무에 따라 육성 또는 해성환경을 구분할 수 있고, 탄화정도에 따라 열변질 정도를 판단할 수 있다(Tyson, 1995).

이번 결과에서는 전체적으로 black speck이 포함된 해성기원 AOM이 50% 이상 산출되었으며 Unit I 과 II에서 압도적으로 많이 산출되었다(그림 5). 따라서 palynomorph보다 유의미한 해석이 가능한 유기물상 분석을 시도하였다. 깊이 별 유기물상 특징에 따라 Tyson (1995)의 삼각다이어그램에 도시하여 환경을 해석한 결과 다음과 같이 크게 3개의 환경으로 나타났다. 하부로부터 원양환경(distal basin; DB), 원대륙붕환경(distal shelf; DS), 대륙붕~원양전이환경(shelf-Basin transition; SBT)으로 점차 변화하였고, 각각을 Unit I, II, III로 명시하였다; Unit I (11.6~11 Ma, 257~229 mbsf): distal basin, Unit II (11~8.5 Ma, 229~130 mbsf): distal shelf, Unit III (8.5~7.3 Ma, 130~80 mbsf): shelf-basin transition (그림 5와 그림 6).

Unit I의 원양환경(DB)에서 Unit II의 원대륙붕 환경(DS)으로 변화함은 해수면의 하강을 의미하며, Unit III은 대륙붕~원양전이환경(SBT)으로 나타난 것으로 보아 8.5 Ma 이후 해수면이 점차 상승하는 것으로 생각된다. 이는 Haq *et al.* (1987)의 전 지구적 해수면변동 곡선에서 10.9 Ma를 기점으로 해수면의 하강과, 8.5 Ma 이후 점차 해수면이 상승하는 것과 대비된다(그림 6).

동해 단협작용은 후기 마이오세(약 13-11.8 Ma)에 서서히 완료되었으며(Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013), 동남한국대지의 탄성과 단면도 상에서도 용기의 증거로 지역적인 습곡구조가 나타난다(Horozal *et al.*, 2017). 이번 분석에는 사용되지 않았으나 XCB 코어로 회수된 시료의 암상에서 해록색 사질퇴적층이 나타나며 인근의 용기된 기반암으로부터 기원되었을 것으로 추정하였다. 이는 그 당시 동남한국대지가 용기하였고, U1430 코어가 위치한 곳은 천해환경이었음을 의미한다(Tada *et al.*, 2015; Horozal *et al.*, 2017). 후기 마이오세(11.8 Ma~) 동해 일부는 여전히 단협작용의 영향을 받는 지역도 있었으나 이번 연구지역인 동남한국대지는 큰 지각변동 없이 느린 침강(74 m/m.y.)만이 있었다(Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013; Horozal *et al.*, 2017). 침강환경에도 불

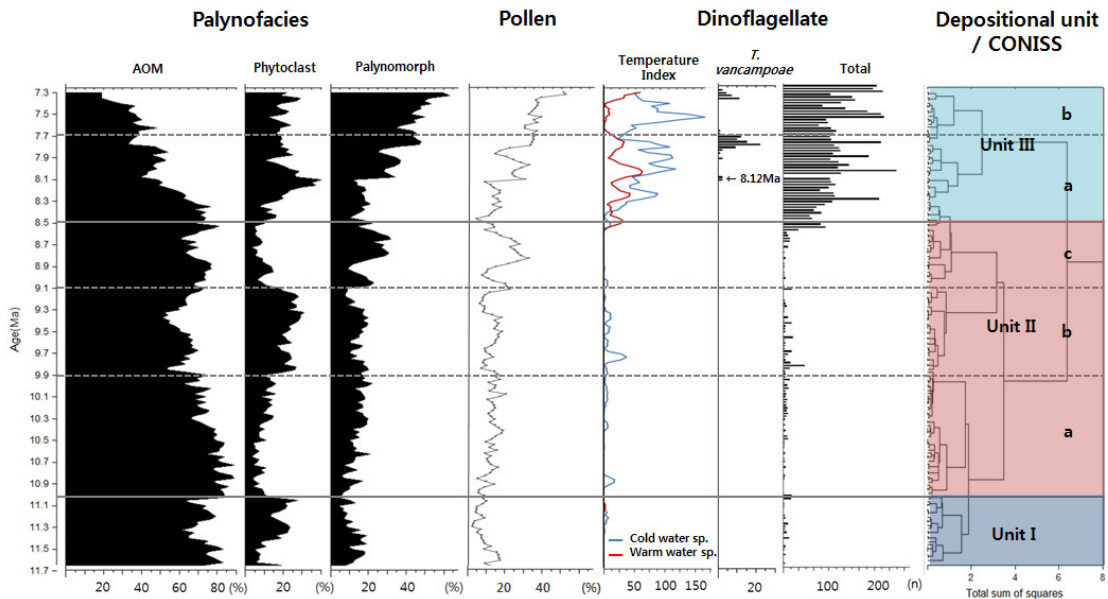


Fig. 5. Palynofacies spectrum and dinoflagellate temperature index with depositional environmental units of the U1430 core.

구하고 Unit I (DB)에서 Unit II (DS)까지의 환경변화는 전 지구적 해수면 변동에 의한 해수면 하강으로 생각되며, Unit III (SBT)의 환경변화는 점차적인 전 지구적 해수면 상승과 함께 동남한국대지의 느린 침강의 영향도 함께 작용했을 것이라고 해석하였다.

5.2 외편모조류 난수종의 산출과 산소 최소층 수괴의 유입 관계성

중기 마이오세(~15 Ma)동안 동해가 서서히 닫혀가면서 현재의 대한 해협이 위치한 지역은 압축성 지구조 운동으로 융기되어 해수면에 노출되었다. 이는 후기 마이오세에 생성되었을 것으로 추정되는 고수로의 발달과 화성암이 관입하여 융기한 증거로 확인되었다(Choi, 1995). 이와 같이 15 Ma 이후 남쪽의 대한해협이 닫힌 후(Tada, 1994; Choi, 1995; Itoh, 2001) 마이오세(~5.3 Ma) 동안 대륙붕 6-2광구의 도

미-1공(Domi-1), 소라-1공(Sora-1)은 외편모조류가 산출되지 않는 육성습지(Swamp)환경으로 보고된 바 있고(Yun *et al.*, 2012), 11-7 Ma 동안 울릉분지 남서부에 위치한 돌고래공(Dolgorae)은 연안환경(near-coastal)이었던 것으로 보고되었다(Byun, 1995; Chung, 2011)(그림 7c-2). 또한, 남쪽의 대한해협이 닫혀있는 상태에서 동해는 북쪽의 해협을 통해 유입되는 연해주 한류(북한 한류)의 영향을 우세하게 받으며 결과적으로는 표층수온이 전체적으로 낮았을 것이다. 이런 해석은 ODP Site 797의 결과와도 잘 대비가 된다(Tada, 1994).

그러나 당시(~8 Ma) 동해의 동쪽인, 현재 혼슈 중부와 Izu-Bonin arc가 tippie junction으로 만나는 지역에 Fossa Magna라는 낮은 지대가 해협의 형태로 존재했었고(Sato, 1995; Takeuchi, 2004), 해수면 변동에 따라 혼슈 동쪽의 따뜻한 아열대 해수의 유

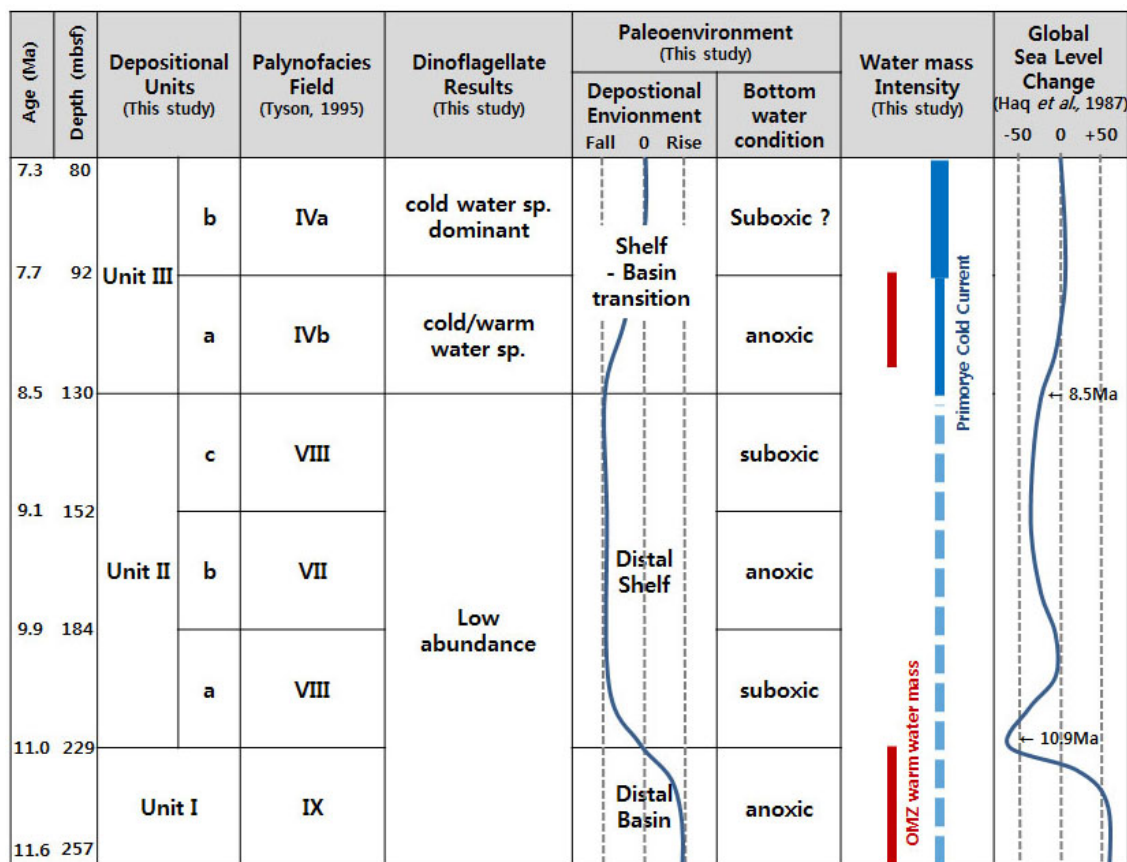


Fig. 6. Late Miocene paleoceanographic environments of the ESKP, East Sea on the basis of palynofacies and dinoflagellate temperature index.

입 또는 차단이 되었을 것이다. 이는 한류가 우세한 저산소 환경의 동해에 간헐적인 난류 유입의 가능성을 의미한다. 특히, 이때 난류는 그 당시 태평양 심층수 상부에 위치하는 온난한 산소 최소층(oxygen minimum zone, OMZ) 수괴로 동해 심층이 무산소 환경으로 변하는데 영향을 주었을 것이다(Woodruff and Savin, 1989; Kennett and Stott, 1991)(그림 7b-2).

외편모조류가 보다 풍부하게 산출된 Unit III에서는 전반적으로 냉수종(*N. labyrinthus*, *O. centroparpum*, *S. elongatus*)이 우세한 가운데, Unit IIIa에서는 난수종(*O. israelianum*, *T. vancampoae*)이 Unit IIIb에 비해 우세하게 나타난다(그림 5). 산출된 난수종 중 특히, *T. vancampoae*는 아열대 해역에서 서식하는 종으로서 동해와 주변해역에서는 대마난류 지시종으로 알려져 있다(Matsuoka *et al.*, 1987; Byun, 1995).

그러나 이번 결과에서는 *T. vancampoae*의 출현시점이 8.12 Ma로 나타났으며(그림 5), 이는 대한해협이 닫힌 15~3.5 Ma 기간에 포함된다(Tada, 1994). 결과적으로 *T. vancampoae*의 출현은 대마난류의 영향이 아닌 동쪽 Fossa Magna해협을 통해 유입된 OMZ 난류 수괴의 영향으로 판단하였다(그림 7c-2).

5.3 저산소와 무산소 환경변화와 해수면변동

해양의 심층환경에서 환원환경은 해수의 온도와 밀도에 따른 성층화와 산소 최소층(OMZ) 수괴의 유입 때 나타난다(Oba *et al.*, 1991; Kitamura and Kimoto, 2006). 외편모조류와 화분·포자가 주요 구성원인 paly-nomorph는 항산성(acid-resistant)의 스포로폴레닌이란 복합 유기 단백질로 이루어져 여러 해양조건에서도 잘 보존되는 것으로 알려져 있다(Traverse, 2005).

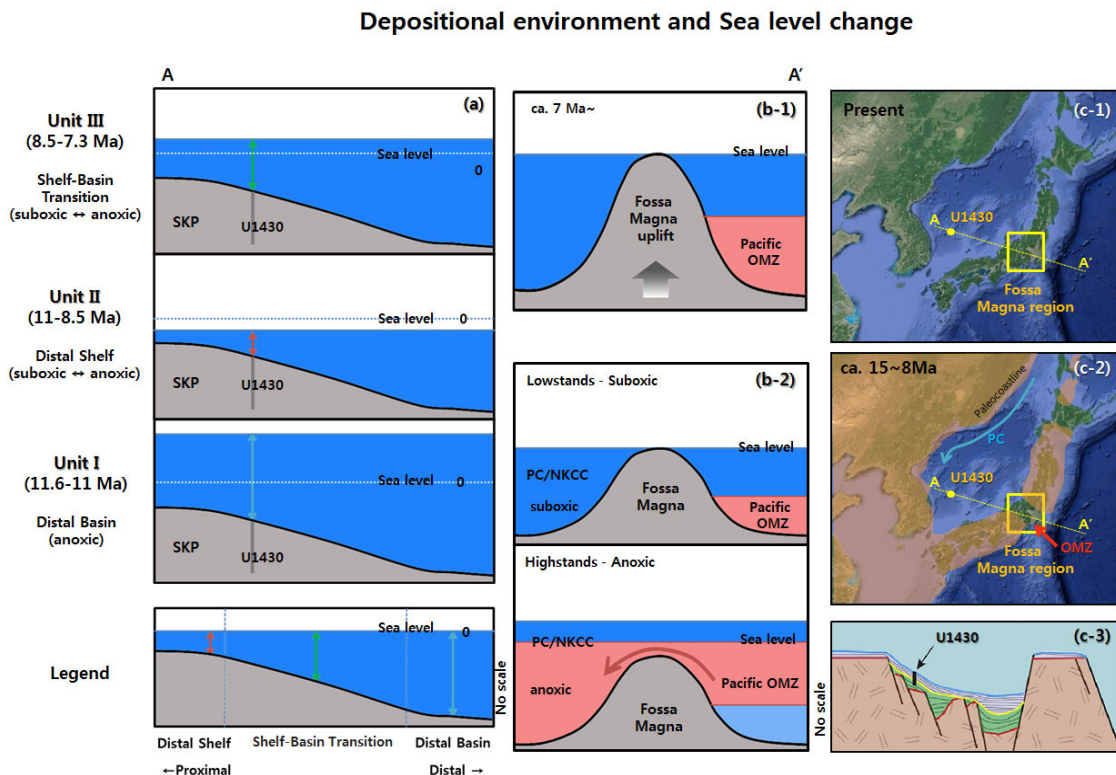


Fig. 7. Schematic illustrations of the paleoenvironmental change of ESKP, East Sea. a: Paleooceanographic environmental changes with units in response to global sea level change and tectonics; Unit I: Distal Basin, Unit II: Distal Shelf, and Unit III: Shelf-Basin transition. b-1: Uplift of the Fossa Magna region began at ca. 7 Ma becoming terrestrial environment at 7 Ma. b-2: Global sea level fluctuations changed the bottom water conditions of the ESKP during the 15-7 Ma, and redox conditions were controlled by inflows of the OMZ warm water. c-1 and c-2: Present- and paleo-coastline of 15-7 Ma (modified from Sato, 1995), respectively. c-3: Seismic-based physiographic map showing the graben bathymetry of the ESKP in which site U1430 is located (modified from Horozal *et al.*, 2017).

반면에 AOM과 Phytoclast는 상대적으로 산화환경에 취약하며, Tyson (1995)의 삼각다이어그램에서도 산소(oxic)환경에서 palynomorph보다 상대적으로 낮은 산출을 보인다. AOM과 palynomorph 산출량에 따른 환경해석에서 AOM과 화분의 산출량을 통해 퇴적물(유기물)의 기원과 퇴적환경을 추측할 수 있다. AOM과 화분이 비례관계로 산출량이 많으면 육지로부터 다량의 퇴적물(유기물) 공급이 있었던 환경으로 추정한다(personal communication, Prof. B. Dale and Prof. K. Matsuoka). 그러나 이번 연구결과에서는 전체적으로 AOM의 산출이 50% 이상으로 나타났고, 하부구간으로 갈수록 AOM의 산출이 최대 90%까지 증가하였다(그림 5). 반면에, 육지로부터의 퇴적물(유기물) 공급량을 지시하는 화분의 산출량은 점차 감소하므로 육지로부터 공급된 결과로 보기는 어렵다. 따라서 이번 분석구간은 환원환경(저산소~무산소 환경) 하에 퇴적되어 유기물의 보존이 양호했던 것으로 추정하였다(그림 5, 6). 이러한 해석은 U1430의 주상도에 기재된 125 mbsf 이하 구간부터 나타나는 엽리 퇴적상과도 잘 일치한다(Tada *et al.*, 2015). 반면, 80~125 mbsf 5, 란구조와 엽리가 혼재하여 나타나는 것은 Unit III 구간과 대비되며, OMZ 유입과 함께 한류영향이 함께 작용한 결과로 추정된다. Unit I, II에서는 AOM의 산출이 독보적으로 많았고, palynomorph의 뚜렷한 변화를 파악하기가 어려워 phytoclast의 산출변화로 저산소(Suboxic)와 무산소(Anoxic) 환경변화를 추정하였다(그림 6). phytoclast의 평균 산출이 10%이상되어 상대적으로 보존이 잘되었다고 판단되는 구간인 Unit I, Unit IIb, Unit IIIa가 무산소 환경으로 해석된다. Unit IIIb는 phytoclast의 평균 산출이 10% 이상이지만 AOM의 산출이 50%이하로 저산소 환경으로 판단하였다.

무산소 환경으로 추정되는 구간 중 외편모조류 난수종의 산출이 비교적 많았던 Unit IIIa에서 앞에 언급한 OMZ 유입과 관계있는 *T. vancampoe*이 나타남에 따라 무산소 환경은 OMZ 난류 수괴의 영향을 받은 것으로 생각된다. Fossa Magna 해협을 통한 OMZ 난류 수괴의 유입은 Haq *et al.* (1987)의 전 지구적 해수면 변동 곡선에서 해수면이 상승했던 기간과 대비되며, 따라서 해수면 변동에 따라 조절되었을 것으로 추정된다(그림 6). Unit IIIb는 전 지구

적 해수면이 상승하는 구간에 해당하지만, 약 8 Ma 부터 시작 된 Fossa Magna 해협의 용기로 7 Ma 이후로는 Fossa Magna 지역은 육성층화 되었고, OMZ 난류 수괴가 차단됨에 따라 저산소 환경화 되었던 것으로 해석 하였다(그림 7b-1) (Sato, 1995; Takeuchi, 2004). Unit IIb는 전 지구적인 해수면이 하강한 시기와 대비되어 Fossa Magna 해협을 통한 OMZ 난류 수괴 유입의 약화로 저산소 환경이었을 가능성이 높지만, 이번 결과에서는 무산소 환경으로 나타났다. 이는 U1430 코어 지점이 동남한국대지 내에서도 오목한 형태의 지구(graben)안에 위치하고 있어(그림 7c-3; Horozal *et al.*, 2017) 지역적인 해저지형 특성에 의해 해수순환이 원활하지 않아 성층화 되어 나타난 결과로 추정된다. 이런 추정은 앞으로 U1430 코어의 다른 분석결과 자료들과 비교분석이 요구된다.

6. 결 론

동해 동남한국대지의 U1430 코어에서 후기 마이오세 구간의 퇴적물로부터 유기물상 및 외편모조류 분석을 통해 고해양환경을 해석하였다. 유기물상 분석결과 전체적으로 해양기원 무정형유기물(AOM)이 다량 산출되었고, 이는 그 당시 동남한국대지의 고해양환경이 환원환경(저산소~무산소 환경)이었음을 의미한다. phytoclast, palynomorph, AOM의 산출 비율 변화에 따라 Tyson (1995)의 삼각다이어그램에 도시하고, 환경을 유추한 결과 하부로부터 Unit I: 원양환경(Distal Basin; DB), Unit II: 원대륙붕환경(Distal Shelf; DS), Unit III: 대륙붕~원양전이환경(Shelf-Basin transition; SBT) 크게 3개의 환경으로 나타났다. 이와 같은 해양환경변화는 Haq *et al.* (1987)의 해수면 변동곡선과 잘 대비되며, 해수면 변화와 함께 동남한국대지에 작용한 느린 침강작용도 함께 작용하여 나타난 결과로 해석하였다.

외편모조류가 보다 풍부하게 산출된 Unit III에서는 전반적으로 냉수종(*N. labyrinthus*, *O. centrocarpum*, *S. elongatus*)이 우세한 가운데, Unit IIIa에서는 난수종(*O. israelianum*, *T. vancampoe*)이 Unit IIIb에 비해 우세하게 나타났다. 산출된 난수종 중 특히, *T. vancampoe*는 대마난류 지시종으로 사용되어 왔으나, 이번 연구에서는 *T. vancampoe*의 출현시점이 8.12 Ma로 대한해협이 닫힌 기간 포함되기 때문에,

이 종의 출현은 대마난류의 영향이 아닌 동쪽 Fossa Magna 해협을 통해 유입된 OMZ 난류 수괴의 영향으로 판단하였다.

Unit I, II에서는 AOM의 산출이 독보적으로 많았고, palynomorph의 뚜렷한 변화를 파악하기가 어려워 phytoclast의 산출변화로 저산소와 무산소 환경변화를 추정한 결과, phytoclast의 평균 산출이 10% 이상 나타나는 Unit I, Unit IIb, Unit IIIa를 무산소환경으로 해석하였다. 저산소환경과 무산소환경이 번갈아 나타남은 전 지구적 해수면 변동과, 일본 혼슈 중부의 지각운동이 함께 작용한 결과 Fossa Magna 해협을 통한 OMZ 수괴의 유입여부에 따라 변화한 것으로 판단하였다. 이는 Unit IIIa의 *T. van-campoae*의 산출과 OMZ 유입과의 연관성으로 확인하였다.

사 사

이 연구는 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원이 지원하는 “국제해저지각시추사업(과제번호: 17-9852)”의 일환으로 수행되었다. 논문의 심사과정에서 많은 조언과 건설적인 비판을 통해 논문의 질적 향상에 많은 도움을 주신 익명 심사위원들께 감사드립니다.

REFERENCES

- Byun, H.S., 1995, Cenozoic dinoflagellate cysts from the Pohang Basin and southern margin of the Ulleung Basin, Korea. Ph.D. Thesis, Chungnam National University, 283 p.
- Chang, K.I., Zhang, C.I., Park, C., Kang, D.J., Ju, S.J., Lee, S.H. and Wimbush, M. eds., 2015, Oceanography of the East Sea (Japan Sea). Springer, 460 p.
- Choi, D.L., 1995, Cenozoic seismic stratigraphy and geologic structures in the southern margin of the Ulleung Basin and its tectonic evolution. Ph.D. Thesis, 127 p.
- Chough, S.K. and Barg, E., 1987, Tectonic history of Ulleung Basin margin, East Sea (Sea of Japan). Geology, 15, 45-48.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000, Marine geology of Korean Seas. Elsevier, New York, 313 p.
- Chung, C.-H., Byun, H., Lee, B.-S., Park, S.-O., Kang, S., Kwon, Y.I., Park, M., Kim, S. and Choi, E., 2011, Biostratigraphy of the Neogene palynomorphs from the Dolgorae wells in the Ulleung Basin, East Sea. Journal of Paleontology Society of Korea, 27(1), 27-35.
- Grimm, E.C., 2011, Tilia 1.7.16 Software. Springfield, IL: Illinois State Museum, Research and Collection Center.
- Hag, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987, Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). Science, 235, 1156-1167.
- Hase, H., Yoon, J.-H. and Koterayama, W., 1999, The current structure of the Tsushima Warm Current along the Japanese Coast. Journal of Oceanography, 55, 217-253.
- Horozal, S., Kim, G.Y., Cukur, D., Bahk, J.J., Buchs, D., Ryu, B.J. and Kim, S.P., 2017, Sedimentary and structural evolution of the Eastern South Korea Plateau (ESKP), East Sea (Japan Sea). Marine and Petroleum Geology, 85, 70-88.
- Isoda, Y., 2011, Climate change and physical process associated with the Tsushima Warm Current. Memoir of Faculty of Fishery, Hokkaido University, 53(2), 2-12.
- Itoh, Y., 2001, A Miocene pull-apart deformation zone at the western margin of the Japan Sea back-arc basin: implications for the back-arc opening mode. Tectonophysics, 334(3), 235-244.
- Kennett, J.P. and Stott, L.D., 1991, Abrupt deep sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene. Nature, 353, 225-229.
- Kim, G.B., Yoon, S.H., Sohn, Y.K. and Kwon, Y.K., 2013, Wave-planation surfaces in the mid-western East Sea (Sea of Japan): indicators of subsidence history and paleogeographic evolution of back-arc basin. Marine Geology, 344, 65-81.
- Kitamura, A. and Kimoto, K., 2006, History of the inflow of the warm Tsushima Current into the Sea of Japan between 3.5 and 0.8 Ma. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 236(3), 355-366.
- Korea National Oil Cooperation (KNOC), 2005, Tectonic evolution and Hydrocarbon Potential in Korea, 36 p.
- Lee, G.H., Yoon, Y.H., Nam, B., Lim, H., Kim, Y.-S., Kim, H.J. and Lee, K., 2011, Structural evolution of the south-western margin of the Ulleung basin, East Sea (Japan sea) and tectonic implications. Tectonophysics, 502, 293-307.
- Matsuoka, K., Bujak, J.P. and Shimazaki, T., 1987, Late Cenozoic dinoflagellate cyst biostratigraphy from the west coast of northern Japan. Micropaleontology, 214-229.
- Mertens, K.N., Price, A.M. and Pospelova, V., 2012, Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments II: further tests of the Lycopodium marker-grain method. Review of Palaeobotany and Palynology, 184, 74-81.
- Moore, P.D., Webb, J.A. and Collinson, M.E., 1991, Pollen Analysis, 2nd edition. Blackwell Science Publisher, Oxford, 216 p.

- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T., 1991, Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, 6, 499-518.
- Oboh, F.E., Salami, M.B. and Chapman, J.L., 1992, Palynological interpretation of the palaeoenvironments of Miocene strata of the well Igbomatoru-1, Niger delta. *Journal of Micropalaeontology*, 11(1), 1-6.
- Sato, H., 1995, The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *Oceanographic Literature Review*, 5(42), 372.
- Shin, K.S., 2000, Sequence Stratigraphy of Tertiary Sedimentary Sequences in the SW Margin of Ulleung Basin, East Sea. Ph.D. thesis, Yonsei University, Seoul, 161 p.
- Sluijs, A., Pross, J. and Brinkhuis, H., 2005, From greenhouse to icehouse; organic-walled dinoflagellate cysts as paleoenvironmental indicators in the Paleogene. *Earth-Science Reviews*, 68(3), 281-315.
- Tada, R., 1994, Paleooceanographic evolution of the Japan Sea, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 108, 487-508.
- Tada, R., Murray, R.W., Alvarez Zarikian, C.A. and Expedition 346 Scientists, 2015, In: *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program*, vol. 346. Integrated Ocean Drilling Program, College Station, TX.
- Takeuchi, A., 2004, Basement-involved tectonics in North Fossa Magna, central Japan. *Earth, planets and space*, 56(12), 1261-1269.
- Traverse, A., 2005, *Sedimentation of organic particles*. Cambridge University Press, 544 p.
- Tyson, R., 1995, *Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies*. Chapman & Hall, 431-462.
- Woodruff, F. and Savin, S.M., 1989, Miocene deepwater oceanography. *Paleoceanography*, 4(1), 87-140.
- Yi, S., 2015, Palynological interpretation of the palaeoenvironments. Annual conference of the Paleontological Society of Korea, Feb. 12, 17 p (in Korean).
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Geological Society of America Bulletin*, 107(1), 83-97.
- Yoon, S.H., Sohn, Y.K. and Chough, S.K., 2014, Tectonic, sedimentary, and volcanic evolution of a back-arc basin in the East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 352, 70-88.
- Yun, H.S., Byun, H.S., Oh, J.Y., Park, M.H. and Lee, M.W., 2012, Stratigraphy and Paleoenvironment of Domi-1 and Sora-1 Wells, Domi Basin. *Economic and Environmental Geology*, 45(4), 407-429 (in Korean with English Abstract).

Received : June 25, 2017
 Revised : August 1, 2017
 Accepted : August 9, 2017