

저서성 유공충 *Oridorsalis umbonatus*의 산출 상태에 기록된 후기 올리고세 북대서양 심층수의 강화

이호준^{1,2} · 조경남^{1,2,*} · 임재수³

¹강원대학교 지질지구물리학과

²강원대학교 크리티컬존선도연구실

³한국지질자원연구원 지질환경연구본부

요 약

올리고세의 시작과 함께 발생된 남극 대륙빙하의 형성, 해류 시스템 변화, 고생물 멸종 등 일련의 사건들은 현재까지 지질학자들로부터 매우 주요한 관심을 받아왔다. 하지만 이에 반해 에오세-올리고세 전이기(Eocene-Oligocene transition; EOT) 이후 올리고세 대부분의 기간 동안 발생된 고기후-고해양학적 변화에 대해서는 아직까지도 연구가 미흡한 상태이다. 특히, 후기 올리고세 온난화(late Oligocene warming; LOW)는 올리고세 동안 발생된 고기후-고해양학적 변화에 있어 가장 큰 규모의 사건 중 하나로 인식되고 있지만, 이 시기에 발생한 구체적인 변화 요소에 대한 이해는 매우 부족한 실정이다. 이번 연구는 IODP Expedition 342를 통해 북대서양 J-Anomaly Ridge에서 획득한 시추코어 퇴적물을 이용해 후기 올리고세 온난화 동안 어떤 고해양학적 변화가 발생되었는지 알아보기 위해 수행되었다. 연구지역은 북대서양 심층수(North Atlantic deep water; NADW)에 의해 직접적으로 영향을 받고 있기 때문에 과거 NADW의 변화를 연구하기에 적합한 곳으로 잘 알려져 있다. 고지자기 층서모형을 이용해 산출된 퇴적물의 연대는 약 26.0~26.5 Ma로 LOW의 초반부에 해당되는 시기이다. 이 퇴적물 시료로부터 산출되는 저서성 유공충의 한 종인 *Oridorsalis umbonatus*의 각질 크기 자료와 입도 분석 결과는 서로 매우 유사한 변화경향성을 보여주는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 해당 시추코어 퇴적물은 총 3개의 구간(Unit 1, 2, 3)으로 나누어지며, 그 중 Unit 2는 가장 큰 각질의 *O. umbonatus*가 산출되는 동시에 퇴적물 입자 크기도 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 *O. umbonatus*의 개체수 역시 Unit 2에서 가장 높은 것으로 나타났다. *O. umbonatus*의 개체수, 각질 크기 변화, 입도 변화는 산소농도와 심층수 순환 강도의 프록시로 활용될 수 있기 때문에 이번 연구에서는 Unit 2가 퇴적된 시기 동안 NADW의 세기가 가장 강했던 것으로 해석하였다. 이와 같이 LOW 초기 동안 발생된 NADW의 강화는 기존 북대서양 저위도 지역의 *Cibicidoides* spp. 산소 및 탄소안정동위원소 자료를 통해서도 확인할 수 있다. 이번 연구의 결과는 LOW의 시작 원인이 NADW의 강화와 같은 고해양학적 변화와 연관되어 있다는 기존 연구결과를 지지하는 새로운 증거를 제시해준다.

주요어: IODP Expedition 342, 후기 올리고세 온난화, 저서성 유공충, 입도, 북대서양 심층수

Hojun Lee, Kyoung-nam Jo and Jaesoo Lim, 2018, The strengthening of North Atlantic Deep Water during the late Oligocene based on the benthic foraminiferal species *Oridorsalis umbonatus*. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 5, p. 489-499

ABSTRACT: A series of geological events such as the formation of the Antarctic continental ice sheets, the changes in ocean circulation and a mass extinction after the onset of Oligocene has been studied as major concerns by various researches. However, paleoclimatic and paleoceanographic changes during the most period of Oligocene since the Eocene-Oligocene transition (EOT) still remains unclear. Especially, although the late Oligocene warming (LOW) has been assessed as the largest period in the paleoceanographic changes, the detailed understanding on the changed components is very low. The purpose of this study is the reconstruction of the paleoceanographic history during the late Oligocene using core sediments from IODP Expedition 342 Site U1406 performed in J-Anomaly Ridge in North Atlantic. Because North Atlantic deep water (NADW) has flowed southward through the study area since the early Oligocene, this area has been considered to an important location for studies on the changes

* Corresponding author: +82-33-250-8555, E-mail: kjo@kangwon.ac.kr

of NADW. The core sediment analyzed in this study were deposited from about 26.0 to 26.5 Ma as evidenced by both of onboard and shore-based paleomagnetic data, and this is corresponded to the earliest period of LOW. The sediment profile can be divided into three Units (Unit 1, 2 & 3) based on the changes in both of total number and test size of *Oridorsalis umbonatus* as well as grain size data of clastic sediments. Unit 2 represents largest values in these three data. Because the total number, test size of *O. umbonatus* and grain size can be proxy records on the oxygen concentration and circulation intensity of deep water, we interpreted that Unit 2 had been deposited during the period of relatively strengthened NADW. Previous *Cibicidoides* spp. stable isotope results from the low latitude region of the North Atlantic also support our interpretation that is the intensified formation of NADW during the identical period. In conclusion, our results present a new evidence for the previous ideas that the causes on LOW are directly related to the changes in NADW.

Key words: IODP Expedition 342, late Oligocene warming, benthic foraminifera, grain size, North Atlantic Deep Water

(Hojun Lee, Kyoung-nam Jo, Division of Geology and Geophysics & Critical zone Frontier Research Laboratory (CFRL), Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; Jaesoo Lim, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

1. 서 론

올리고세(Oligocene: 23.0~33.9 Ma)는 신생대 첫 남극 대륙 빙하생성, 약 80 m의 해수면 변동 및 1 km의 탄산염보상심도(carbonate compensation depth; CCD) 하강 등 다양한 고기후·고해양학적 변화가 발생한 시기로 지금까지 활발한 연구가 진행되어오고 있다(e.g., Kennett, 1977; DeConto and Pollard, 2003; Coxall *et al.*, 2005; Miller *et al.*, 2009; Pälike *et al.*, 2012). 뿐만 아니라 지구조적 변동에 의해 현재와 유사하게 발달된 해류시스템은 올리고세 고해양학적 연구의 중요성을 더욱 높이는 이유이다(Katz *et al.*, 2011; Borrelli *et al.*, 2014). 그 중 특히 북반구의 기후변화 뿐 만 아니라 전 지구적인 열 순환에 큰 영향을 미칠 수 있는 북대서양 심층수(North Atlantic Deep Water; NADW)는 올리고세 동안 형성된 것으로 잘 알려져 있다(Wright and Miller, 1993; Via and Thomas, 2006; Scher and Martin, 2008).

하지만 그럼에도 불구하고 아직까지 올리고세 동안의 고해양 변화는 많은 부분들이 의문점으로 남아 있는데, 그 중 후기 올리고세 온난화(late Oligocene warming; LOW) 시기는 올리고세 전체에서도 에오세-올리고세 전이기(Eocene-Oligocene transition; EOT)를 제외하고 가장 큰 규모의 변화가 발생한 것으로 알려져 있는 시기이다(Zachos *et al.*, 2001). 약 24.0~26.8 Ma 동안 0.5% 이상의 산소동위원소 값($\delta^{18}\text{O}$) 감소를 보이는 이 사건은 올리고세 전반에 걸친 고해양 변화 중 매우 뚜렷하게 나타나는 큰 변화임

에도 불구하고 아직까지 활발한 연구가 진행되지 않았다. 또한 그 발생 원인에 대해서도 서로 다른 가설들이 존재하여 현재까지 해결되지 않은 고해양 사건 중 하나로 남아있다.

현재까지 LOW에 관한 연구는 매우 제한적으로 수행되었는데, Pekar *et al.* (2006)과 Hauptvogel *et al.* (2017)는 위도 차이에 따른 분지 별 산소동위원소 비 변동의 차이를 통해 LOW 동안 NADW가 강화되었다고 제안한 바 있다. 그들은 강화된 NADW의 영향으로 저위도 및 중위도 지역에서는 온난화가 발생하였지만, 남극에서는 궤도 변화에 따른 빙하기-간빙기 주기의 빙하 확장과 쇠퇴만 반복되었을 뿐 온난화는 일어나지 않았다고 주장하였다. 하지만 이와 다르게 Lagabriele *et al.* (2009)은 약 29~22 Ma 동안 지구조적인 운동에 의해 Drake Passage가 부분적으로 닫히면서 NADW의 생성이 감소되었고 그 결과 북반구가 추워지고 화학적 풍화에 의한 대기 중 CO_2 소모가 감소되어 LOW가 발생하였다고 제안하였다.

올리고세 고해양 연구에 있어서는 분지 별 자료의 해상도도 문제점으로 여겨진다. 하나의 시추코어에서 올리고세 전 기간 동안의 고해양 변화에 대한 고해상도 기록이 복원된 것은 태평양에 위치한 ODP Site 1218의 경우가 유일하다(Pälike *et al.*, 2006b). 특히 북대서양의 경우 올리고세 동안의 기록이 거의 남아있지 않으며, 현재까지 복원된 기록들도 상대적으로 저해상도 자료이거나 혹은 일부 저위도 지역에서만 한정적으로 복원된 자료들이다(Zachos *et al.*,

2001; Pálike *et al.*, 2006a; Cramer *et al.*, 2009). 이러한 문제점으로 인해 올리고세는 아직까지 전 해양분지 사이의 상호대비가 명확히 이루어지지 않은 시기 중 하나로 남아있다.

2012년 6월 북대서양 Newfoundland sediment drift 연구를 목적으로 실시된 IODP Expedition 342는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 실시되었다. 따라서 이번 연구는 IODP Expedition 342에서 채취한 해양퇴적물 시료의 평균 입도와 저서성 유공충의 한 종인 *Oridorsalis umbonatus*의 개체수 및 각질 크기 변화를 이용하여 후기 올리고세 북대서양 고해양 기록을 복원하고 이를 통해 NADW의 변동과 LOW의 관련성을 해석하는데 연구의 목적이 있다.

2. 연구지역

이 연구에서 분석한 시추코어는 IODP Expedition

342의 Site U1406으로 북대서양 J-Anomaly Ridge의 남서쪽(위도 40°20.9992'N, 경도 51°38.9994'W)에 위치하고 있으며(그림 1), 현재 수심은 3,814 mbsl (meters below sea level), 과거 약 50 Ma 당시의 수심은 3,300 mbsl로 보고되어있다(Tucholke and Vogt, 1979). 이는 IODP Expedition 342를 통해 J-Anomaly Ridge에서 획득한 시추코어(U1403~U1406) 중 가장 얕은 수심에 속한다. 또한 연구지역은 후기 올리고세 동안의 CCD 깊이(약 4.5 km)보다 약 1 km정도 상부에 위치해 있기 때문에 각질이 탄산염암으로 이루어진 유공충을 이용한 연구를 진행하기 적합한 지역으로 판단된다(Pálike *et al.*, 2012). 연구지역의 표층으로는 강한 흐름을 보이는 멕시코만류(Gulf stream)가 흐르는 반면, 심층부에서는 deep western boundary current (DWBC)가 흐르는 조건을 갖추고 있다(그림 1). DWBC에 의해 형성된 sediment drift의 영향으로 원양성 환경임에도 불구하고 신생대 팔레오기(Paleogene)

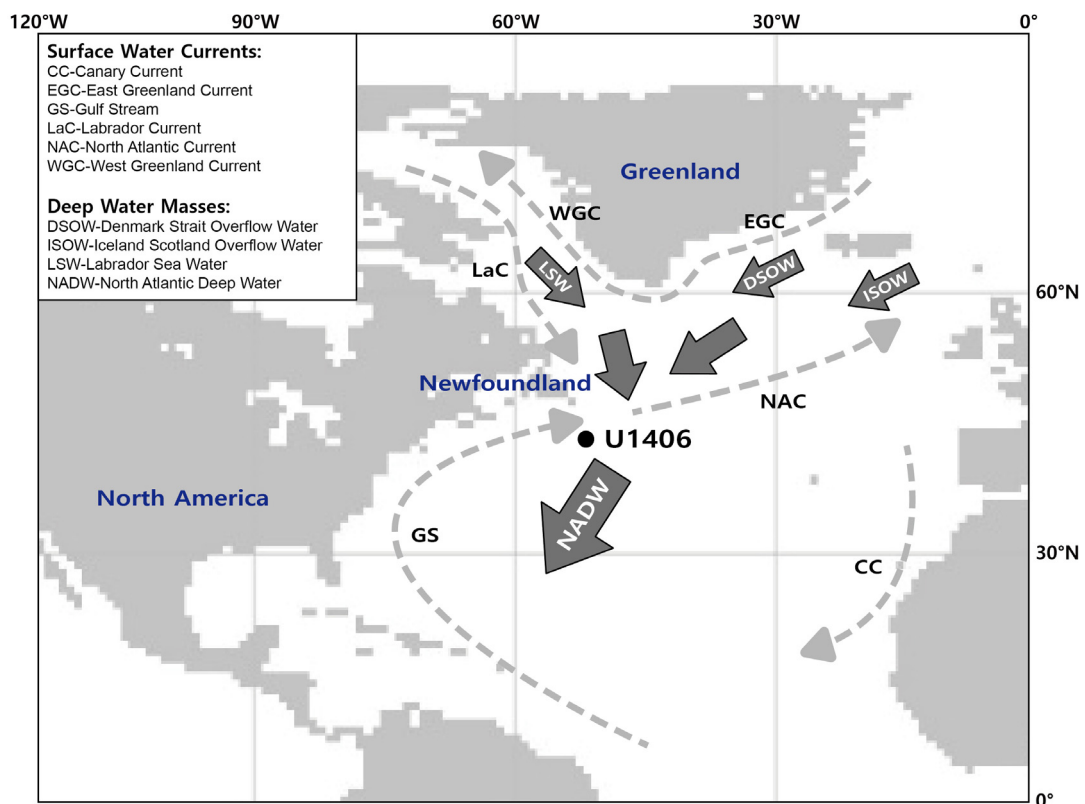


Fig. 1. The core site of IODP Expedition 342 U1406 in present-day world map. This map was created by using the open source software Gplates (<https://gplates.org>). Flow directions of surface water currents and deep water masses are marked on the map (Voelker *et al.*, 2015).

동안 다른 해양분지에 비하여 매우 높은 퇴적율(최대 약 10 cm/kyr)로 퇴적되었다. Sediment drift 지역은 탄산염이 풍부한 퇴적물(carbonate-rich sediment)로 이루어진 해양 퇴적분지에 비하여 유공충 각질의 재결정작용(recrystallization) 혹은 과성장(overgrowth) 등 탄산염 숙성작용의 영향을 상대적으로 적게 받을 수 있는 지역으로 알려져 있다(Pearson *et al.*, 2001; Sexton *et al.*, 2006). 또한 올리고세 이후 강해진 NADW

의 영향으로 네오기(Neogene) 퇴적층이 두껍게 퇴적되지 않아 팔레오기(Paleogene) 북대서양의 고해양 변화에 대한 고해상도 연구에 유리한 지역으로 평가되어왔다(Expedition 342 scientists, 2012).

3. 연구방법

이번 연구에 이용된 시료는 IODP Expedition 342 Site U1406에서 획득한 퇴적물로, 연속적인 퇴적물 기록을 얻기 위하여 총 3개의 시추공(hole A, B and C)에서 코어 퇴적물이 회수되었다. 그 중 본 연구에서는 CSF-A (core depth below sea floor)의 코어 심도를 기준으로, 각각 U1406A의 132.14~136.34 m (4.2 m) 구간, U1406B의 128.64~131.48 m (2.84 m) 구간, U1406C의 139.22~143.20 m (3.98 m) 구간이 접합(splice) 자료 산출을 위해 이용되었다. 승선예비연구결과(onboard-data)에 따르면, 전체적으로 퇴적물은 하부 약 220 m 아래에는 초미화석 백악(nannofossil chalk)으로 구성되어있고, 그 위로는 대부분이 초미화석 연니(nannofossil ooze)와 점토로 이루어져 있다(Expedition 342 Scientists, 2012). 이번 연구에서 이용된 구간 역시 초미화석 연니로 이루어져 있으며, 흑백 색지수(lightness)의 변화를 보인다(그림 2). 승선연구 중 저해상도로 측정된 탄산칼슘 중량퍼센트(weight percent)의 변화와 흑백 색지수의 변화가 유사한 것으로 보아 연구대상 코어 퇴적물의 흑백 색지수는 주로 탄산칼슘의 함량에 따라 조절되는 것으로 생각된다(Balsam *et al.*, 1999). 시료분할(subsampling)은 각 공에서 얻은 코어들을 하나로 이은 전체 코어(spliced core) 중 138.96~150.97 mcd (metres composite depth below sea floor) 구간에서 실시되어 4 cm의 간격으로 총 298개의 분할 시료(subsample)를 확보하였다.

이번 연구에 적용된 연대는 Geological Time Scale 2012 (GTS 2012) 고지자기 층서를 기준으로 하였다(Gradstein *et al.*, 2012). 퇴적물에 기록된 고지자기 역전 경계(C9n/C9r, C8r/C9n, C8n.2n/C8r)를 기준으로 각 구간 별 퇴적율(각각 0.66 cm/kyr과 2.99 cm/kyr)을 계산하여 298개의 시료에 대한 선형보간(linear interpolation)을 실시해 산출하였다(그림 3). 그 결과, 연대는 약 26.03~26.46 Ma로 나타났으며, 이는 LOW의 초기에 해당하는 시기이다(그림

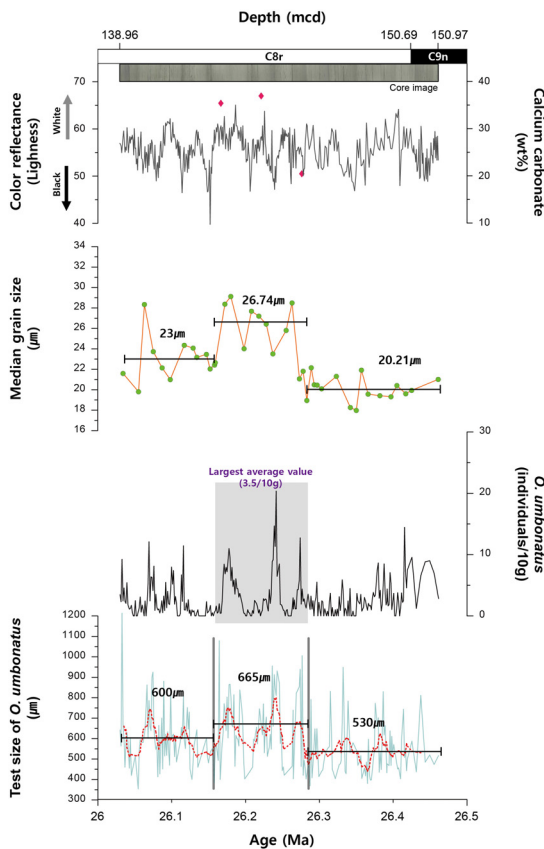


Fig. 2. Profiles of the number and test size of *O. umbonatus*, and median grain size from the core site during the late Oligocene. Also shown are the onboard data (color reflectance, calcium carbonate (rhombuses) and a core image) (Expedition 342 scientists, 2012). Note the depth scale and paleomagnetic polarity reversals on top. Test size of *O. umbonatus* is divided into three stages based on the average values (vertical lines). Dashed line in test size of *O. umbonatus* indicates a moving average for data. The highest average number of *O. umbonatus* is 3.5/10 g between 26.174 and 26.274 Ma, marked by gray bar. The changes of median grain size show the largest average value of 26.74 μm from 26.172 to 26.263 Ma.

4). 하지만 실제 퇴적율은 각 시료에 따라 다소 차이를 보일 수 있기 때문에 본 연구에서는 시추코어의 깊이와 고지자기 층서를 이와 함께 표기하였다.

고해양학적 변화를 해석하기 위하여 확보한 퇴적물 시료에서 산출되는 다양한 저서성 유공충 중 *O. umbonatus*를 이용하였다(그림 5; Kaiho *et al.*, 2006). 해당 종의 개체수와 함께 각의 크기(test size)를 파악하기 위해 전처리 과정으로 체질(wet sieving)을 실시하였다. 40°C에서 48시간 동안 완전히 건조시킨 시료에 대하여 63 μm 크기의 체(sieve)에 총 2회의 습식체질(wet-sieving)과 1회의 건식체질(dry-sieving)을 각각 실시하였다. 그 후 >250 μm 입자에서 *O. umbonatus*만을 선택적으로 골라내어 개체수를 확인하고 NIS-Elements 소프트웨어를 활용하여 실체현미경 하에서 각질의 최대 장축 길이를 측정하였다(그림 5).

연구지역의 수력학적 에너지에 따른 퇴적물 입도 변화를 파악하기 위하여 하부부터 상부까지 총 40개의 시료에 대하여 입도분석을 실시하였다. 약 1 g의 시료를 30% 과산화수소수에 24시간 동안 실온 반응시킨 후, 중탕기를 이용하여 80°C에서 약 2시간 동안 추가 반응을 시켜 분석 전 퇴적물 내 유기물을 제거하였다. 유기물이 완전히 제거된 후에는 추가적인

로 시료 내 탄산염 입자를 제거하기 위하여 10% 염산을 이용해 동일한 방법으로 반응시켰다. 전처리가 완료된 시료는 한국지질자원연구원에 설치되어 있는 입도분석기(Master Sizer 2000)를 이용하여 입도분석을 실시하였다.

4. 연구결과

4.1 *Oridorsalis umbonatus*의 개체수

연구지역의 >250 μm 입자에서 확인되는 저서성 유공충 중 이번 연구에 활용된 종인 *O. umbonatus*는 총 298개 중 245개의 시료에서 산출되었다. 해당 종의 개체수 변화를 합리적으로 파악하고 비교 및 해석하기 위해 이를 시료의 단위무게 10 g 당 산출되는 개수로 나타냈다(그림 2). 그 결과 *O. umbonatus*의 전체평균 개수는 2.7개로 평균 15개인 >250 μm 층 저서성 유공충의 수(benthic foraminiferal number; BFN)에서 약 1/5 가량을 차지하고 있다. *O. umbonatus* 종의 단위무게 당 개체수는 최대 약 20개/10g부터 최소 0.4개/10 g까지 전반적으로 크고 작은 변화들을 보이지만, 143.3~146.32 mcd (26.174~

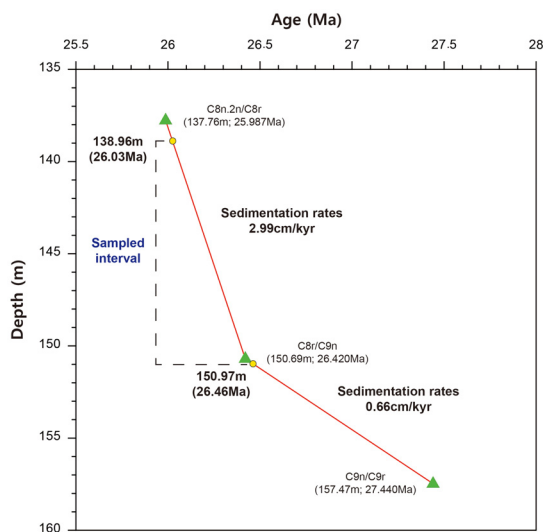


Fig. 3. Age/depth curve fit based on the magnetostratigraphic ages of GTS 2012 (modified from Expedition 342 scientists, 2012; Gradstein *et al.*, 2012). Sampled interval is from 138.96 to 150.97 m.

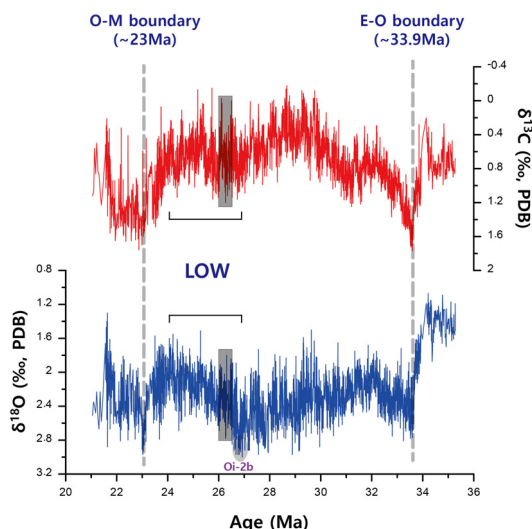


Fig. 4. Carbon and oxygen stable isotope records from ODP Site 1218 in equatorial Pacific during the Oligocene (Pälike *et al.*, 2006b). Dashed lines indicate Eocene-Oligocene boundary (33.9 Ma) and Oligocene-Miocene boundary (23 Ma), respectively. Late Oligocene warming (LOW) was initiated at 26.8 Ma (one of the Oligocene cold events; Oi-2b) and terminated at about 24 Ma. Our core sample is from 26.03 to 26.46 Ma (gray bars).

26.274 Ma) 구간에서 평균 약 3.5개/10 g로 전 구간에 걸쳐 가장 높은 값을 보인다.

4.2 *Oridorsalis umbonatus* 각질의 크기(test size)

*O. umbonatus*가 산출되는 245개의 시료 중 각질의 크기를 측정할 수 있을 정도로 화석의 보존이 비교적 잘 되어있는 시료는 219개로, 측정 결과 각질 크기는 약 1200 μm 부터 350 μm 까지 큰 변동률을 보이며, 전체 평균 크기는 약 590 μm 로 나타났다. 하지만 미화석을 이용한 해저 시추코어 퇴적물 연구의 특성상 하나의 시추코어 자료가 분지 전체를 대표하지 못할 가능성이 존재하기 때문에 고해상도의 미세한 변화보다는 장주기적인 관점에서의 변화를 파악하고자 이동평균값을 활용해 *O. umbonatus* 각질 크기의 변화를 파악하였다. 각질의 크기 변화는 최하부부터 평균크기가 각각 약 530 μm 인 구간(146.44~150.97 mcd; 26.278~26.461 Ma), 약 665 μm 인 구간(143.14~146.4 mcd; 26.168~26.277 Ma), 약 600 μm 인 구간(138.96~143.06 mcd; 26.030~26.166 Ma)으로 나뉜다(그림 2). 평균 약 600 μm 크기를 보이는 구간은 530 μm 로 각질의 평균 크기가 가장 큰 구간과 665 μm 로 각질의 평균 크기가 가장 작은 구간 사이의 중간 값에 위치하는 것을 알 수 있다.

4.3 입도분석결과

총 40개의 시료에 대한 입도분석을 실시한 결과 연구지역 퇴적물은 평균 약 84.7% 이상의 실트 입자(63~3.9 μm), 약 7.7% 이상의 점토 입자(<3.9 μm), 약 5.8% 이상의 사질 입자(>63 μm)로 구성되어 있다. 기존 태평양 분지 대륙사면 지역에서의 입도분

석 결과에 따르면 연구지역과는 다르게 실트 입자의 함량(약 25%)에 비해 점토 입자의 함량(약 70%)이 더 높다(Schlange *et al.*, 1976). 이는 태평양이 boundary current의 영향을 받지 않아 상대적으로 더 안정적인 환경이기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 연구지역은 연안에 비하여 상대적으로 안정적인 원양성 환경임에도 불구하고 boundary current의 영향을 받기 때문에 실트 입자의 함량이 상대적으로 더 높게 나타나는 것으로 생각되며, 이는 연구지역의 입도분석 결과가 boundary current의 수력학적 에너지 변화를 잘 반영할 수 있음을 보여준다.

입자크기의 중앙 값(median grain size)은 17.98~29.13 μm 의 범위를 가지며, 평균 중앙값은 약 22.58 μm 로 나타났다(그림 2). 연구시기 동안의 전반적인 입도변화는 뚜렷한 경향성을 보이는데, 최하부 146.28~150.97 mcd (26.273~26.461 Ma) 구간에서 평균 약 20.21 μm 로 가장 낮은 중앙값을 보인 후 143.26~145.99 mcd (26.172~26.263 Ma) 구간에서 입도가 증가해 평균 약 26.74 μm 로 연구시기 중 가장 높은 중앙값을 보인다. 또한 입도분석 결과는 *O. umbonatus* 각질 크기의 변화와 마찬가지로, 최상부 구간인 139.08~142.86 mcd (26.034~26.159 Ma)에서 두 구간 사이 중앙값의 평균인 약 23 μm 의 평균 중앙값을 보인다.

5. 토 의

5.1 심층수 순환의 세기와 용존산소농도의 변화

O. umbonatus 각질의 크기와 입도분석 결과를 바탕으로 하부로부터 상부까지 Unit 1 (약 146.5~151 mcd), Unit 2 (약 143.1~146.5 mcd), Unit 3 (약 139~

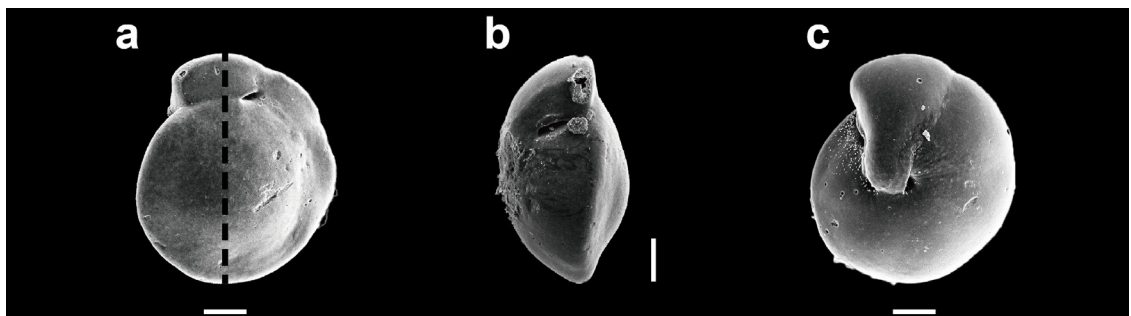


Fig. 5. SEM images of the benthic foraminiferal species *Oridorsalis umbonatus*. (a) Spiral view. Dashed line indicates the criteria for the maximum diameter of the single largest specimen of *O. umbonatus*. (b) Apertural view. (c) Umbilical view. Scale bars (white bars) indicate 100 μm .

143.1 mcd)로 나누었다(그림 6). *O. umbonatus*의 개체수 역시 Unit 2에서 가장 높은 평균값을 보인다. 하지만 입도자료와 *O. umbonatus* 각질의 크기 변화와는 다르게 Unit 1과 Unit 3에서의 평균값이 역전되어 나타나는데, 이는 >250 μm 의 퇴적물에서만 실시된 제한적 종 분류로 인하여 발생된 차이일 가능성이 있다. 혹은 저서성 유공충의 개체수가 공급되

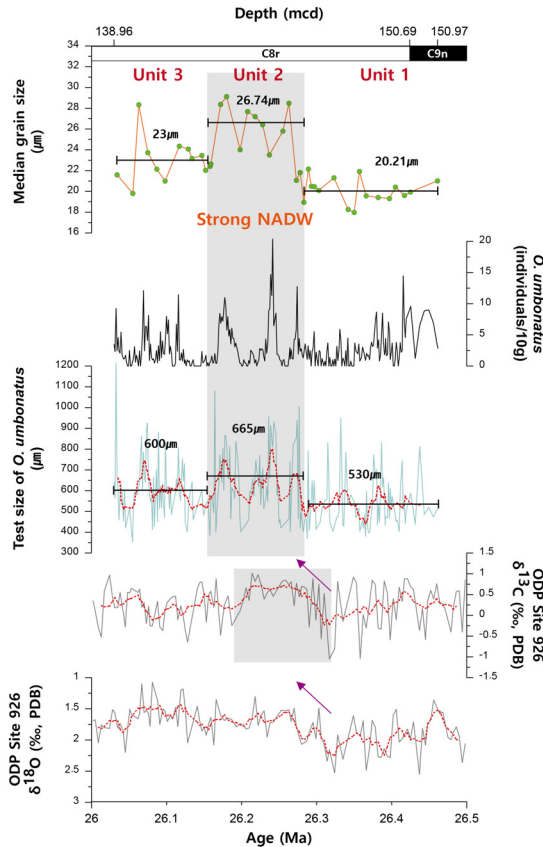


Fig. 6. Comparison between data in this study and stable isotope records from ODP Site 926 (Pälike *et al.*, 2006a). Dashed lines in profiles indicate a moving average for the respective data. Note that the results in this study are divided into three units (Unit 1 to 3). Unit 2 (about 26.16–26.28 Ma) shows the highest values in all data and is interpreted as the period of the strong NADW, marked by gray bar. Oxygen isotope data decreased at about 26.31 Ma and carbon isotope data increased at the same time (arrows), which is similar timing with the increase in Unit 2. Especially, carbon isotope data lasted for about 100kyr after the increase (gray box), which is almost equal duration to that of Unit 2 in this study. Detail explanations about the comparison between them are in text.

는 유기물의 함량 등 다양한 요인에 의해서도 민감하게 반응할 수 있기 때문에 각질 크기와 퇴적물 입도를 동시에 조절한 요인과는 다른 원인에 의해 영향 받았을 수 있다(Gooday and Rathburn, 1999; Van der Zwaan *et al.*, 1999; Geslin *et al.*, 2004). 따라서 이번연구에서는 *O. umbonatus*의 개체수 변화 중 가장 높은 값을 보이는 Unit 2에 초점을 맞춰 토의했다.

*O. umbonatus*는 나선형(trochospiral)의 각 형태를 보이는 저서성 유공충의 한 종류로 퇴적물의 표면부에서 서식(epifauna)하며, 전 세계 해양 분지에서 넓게 산출되는 종이다(e.g., Ohkushi *et al.*, 2000). 북대서양에서 산출되는 *O. umbonatus*는 상대적으로 낮은 영양분과 높은 염도 및 산소농도가 특징인 NADW의 지시종으로써 보고된 바 있으며(Murray, 1988; Boltovskoy *et al.*, 1992), 이는 *O. umbonatus*의 개체수 변화가 NADW의 생성 혹은 강도 변화를 지시하는 프록시로 활용될 수 있음을 제시한다.

O. umbonatus 종이 선호하는 산소농도는 연구결과에 따라 다르게 보고되어 아직까지 명확히 밝혀지지 않았다(Ohkushi *et al.*, 2000). Kaiho (1999)는 주로 저산소 환경에서 서식한다고 보고하였고, Rathburn and Corliss (1994)는 저산소 환경이지만 유기물 공급 역시 제한적인 환경을 선호한다고 보고하였다. 하지만 이들과 반대로 Mackensen *et al.* (1995)은 *O. umbonatus*가 산소가 충분히 잘 공급되는 환경에서 주로 산출된다고 주장하였다. 이와 같은 선행연구결과들 사이의 불일치는 해당 종의 개체수 변화라는 단일 프록시(proxy)를 통한 수괴 변화의 파악 및 환경 해석에 있어 어려움을 준다.

따라서 NADW의 세기 변화와 함께 이와 관련된 심해저의 산소농도 변화를 추적하기 위해 이번 연구에서는 퇴적물의 입도 자료와 *O. umbonatus* 각질의 크기를 함께 활용하였다(그림 6). 심층수의 세기가 강할수록 높아지는 수력학적 에너지에 의하여 연구 지역에는 상대적으로 더 큰 실트질 입자가 우세하게 퇴적될 것으로 예상된다. 연구지역과 상당히 유사한 특징을 보이는 South Iceland basin 내 Gardar drift에서의 기존 연구 결과는 홀로세 동안 drift 퇴적물이 북대서양 심층수 순환의 주기적인 세기 변화에 따라 약 6 μm 의 입도 차를 보인다고 보고하였다(Bianchi and McCave, 1999). 이와 마찬가지로, 연구지역인 J-Anomaly Ridge 역시 북대서양 고위도 지역(Norwegian-

Greenland sea)에서 유래한 NADW의 영향을 직접적으로 받는 지역이기 때문에 선행연구결과와 유사하게 NADW의 세기 변화에 따른 입도 차이를 보일 것으로 생각된다(Whitworth and Nowlin, 1987; Henrich *et al.*, 2002; Expedition 342 Scientists, 2012).

연구지역과 같이 심심이 매우 깊은 곳은 주로 심층 해류의 순환에 의해 산소가 공급되는데(Gooday, 2003), 이는 연구지역으로 유입되는 NADW의 세기가 더 강해질수록 산소 농도가 더 높아질 수 있음을 의미한다. *O. umbonatus*는 산소농도가 높은 환경일수록 더 큰 각질을 형성하며 성장한다고 알려져 있다(Kaiho *et al.*, 2006). 이번 연구결과에서는 입자크기와 *O. umbonatus*의 각질 크기 모두 Unit 2에서 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 결과적으로 NADW의 생성과 공급이 Unit 2 동안 가장 활발했고 그에 따라 심층수의 유속이 가장 빨랐음을 의미한다(그림 6). 아울러, Unit 2에서 나타난 *O. umbonatus*의 개체수 증가는 상대적으로 산소농도가 더 높은 환경을 지시할 수 있다는 선행연구결과와 일치하는 결과이다(Mackensen *et al.*, 1995).

Unit 1은 *O. umbonatus* 각질의 크기와 입자크기가 가장 작아 연구시기 중 NADW의 공급이 가장 약했을 시기로 판단된다(그림 6). 이 뿐만 아니라 두 자료는 모두 Unit 3 동안 Unit 1과 Unit 2 사이의 평균 값을 보이는데, 이를 통해 NADW의 세기가 후기 올리고세 동안 증가와 감소를 반복하며 점진적으로 변화하였을 가능성을 고려해볼 수 있다.

5.2 선행연구결과와의 대비

이번 연구 결과에 따른 후기 올리고세 NADW의 세기 변화를 확인하고 그 변화가 주변 환경에 미친 영향을 알아보기 위하여 북대서양 저위도 지역의 ODP Site 926에서 획득한 저서성 유공충의 탄소 및 산소동위원소 비 자료를 본 연구 결과와 대비하였다(그림 6). ODP Site 926은 북대서양 Ceara Rise에 위치하고 있으며, 남반구에서 생성되는 Antarctic bottom water(AABW)와 북반구에서 생성되는 NADW가 서로 혼합되는 지역으로 심층수의 세기 변화를 파악하기에 적합한 지역으로 여겨지는 곳이다(Curry *et al.*, 1995). 하지만 두 자료의 연대모델이 각각 서로 다르기 때문에 이번 토의에서는 상세한 대비보다는 Unit 별로 전반적으로 나타나는 큰 변화를 토대로

해석했다.

먼저 ODP Site 926에서의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 약 26.31 Ma를 기준으로 약 0.5‰의 감소를 보인다(그림 6). 저서성 유공충 각질 내 $\delta^{18}\text{O}$ 는 수괴의 온도, 염도 및 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값에 의해 조절될 수 있다. 하지만 오늘날 해양에서 NADW와 AABW 사이의 염도 차이는 약 0.3‰로, 이는 $\delta^{18}\text{O}$ 로 환산했을 시 약 0.1‰ 정도의 미묘한 차이를 나타낸다(Pekar and Christie-Blick, 2008). 또한 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화가 빙하 증감에 따른 해수 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화를 반영하는 것이라면 같은 시기에 다른 해양 분지에서도 이와 동일한 변화를 보여야 하지만, 태평양 자료(Pälike *et al.*, 2006b)는 해당 시기에 유사한 변화를 나타내고 있지 않기 때문에 빙하에 의한 변동 가능성은 매우 적을 것으로 판단된다.

앞서 소개했듯이 선행연구결과는 후기 올리고세 동안 상대적으로 온도가 높은 심층수인 NADW가 저위도 지역으로 활발히 유입되면서 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 점차 감소하였다고 제안하였다(Pekar *et al.*, 2006; Hauptvogel *et al.*, 2017). ODP Site 926 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 감소하는 시기는 NADW의 세기가 증가한 것으로 생각되는 Unit 2의 시작시기와 유사하게 나타난다(그림 6). 이와 같이 서로 다른 프록시 사이에 나타나는 변화경향의 유사성은 Unit 2 동안에 NADW가 강화되었다는 이번 연구 결과를 지지해줄 수 있다. 하지만 $\delta^{18}\text{O}$ 의 변화는 Unit 2에서의 변화와 다르게 이후에도 지속적으로 낮은 값을 보인다. 이는 Unit 2에서 나타나는 물리적인 변화는 NADW가 생성 및 공급되는 양의 증가 혹은 유속의 증가를 나타내는 지표인 반면, $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화는 수괴의 온도 변화를 우선적으로 지시하는 지표이기 때문에 발생한 차이로 판단된다. 즉, NADW의 유입이 상대적으로 더 활발해지기 시작한 시기는 서로 다른 프록시들 사이에서 유사한 변화로 나타날 수 있지만, 그 후의 프록시 자료는 서로 다른 변화 요인에 의해 영향 받았을 가능성이 있다.

ODP Site 926의 $\delta^{13}\text{C}$ 자료는 이번 연구결과와 거의 동일한 변화 양상을 보이는데, 특히 Unit 2와 일치한다고 생각되는 시기에서는 $\delta^{13}\text{C}$ 역시 $\delta^{18}\text{O}$ 의 변화와 함께 1‰ 이상의 증가를 보이며 약 100,000년 동안 그 값이 유지된다(그림 6). 따라서 ODP Site 926의 $\delta^{13}\text{C}$ 변화와 NADW의 생성, 유속 등의 변화 사이에 서로 밀접한 연관이 있는 것으로 해석된다. $\delta^{13}\text{C}$ 변화와 NADW 사이의 상관관계에 대해서 고려

해볼 수 있는 몇 가지 가능성이 존재하는데, 먼저 육상 환경에서의 생물권 변화이다. 기존 연구는 강화된 NADW의 영향으로 해양에서 대기로의 열 공급이 증가하게 되면 대륙의 대부분을 포함하고 있는 북반구가 온난해지고, 그 결과 강수량이 증가할 수 있다고 제안하였다(Elsworth *et al.*, 2017). 강수량의 증가로 육상기원 식생이 번성하게 되면 해수 내 용존무기탄소(dissolved inorganic carbon; DIC)의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가될 수 있다(Ravelo and Hillaire-Marcel, 2007). 즉, 이번 연구결과와 ODP Site 926에서의 $\delta^{13}\text{C}$ 변화 사이의 일치는 Unit 2 시기 동안 상대적으로 더 활발해진 NADW의 생성이 북반구 대륙을 식생 성장에 더 유리한 조건으로 변화시켰을 가능성을 제시한다. 이와 관련된 또 다른 가능성으로는 생산성의 변화가 있다. 해양의 표층생산성이 높아지면 광합성을 하는 미생물에 의해 ^{12}C 가 활발히 사용되면서 상대적으로 해수 내 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가된다(Ravelo and Hillaire-Marcel, 2007). 앞서 언급했듯이 NADW의 증가는 북반구의 강수를 증가시킬 수 있고, 그 영향으로 대륙지각에서의 풍화 역시 활발해질 수 있다(Elsworth *et al.*, 2017). 이 과정에서 더욱 풍부해진 풍화산물은 영양분으로써 해양으로 유입되게 되고 이는 표층생산성을 증가시킬 수 있다. 멕시코 만류의 영향을 받는 대륙사면인 Cape Hatteras에서의 연구결과는 강수의 증가가 질산염과 함께 광합성 생물에 꼭 필요한 엽록소 *a* (chlorophyll *a*)를 증가시킬 수 있음을 보여주고 있다(Willey and Cahoon, 1991).

마지막 가능성으로는 유속에 따른 유기물 산화율의 차이가 있다. 해수 속 산소농도의 증가로 인하여 해저로 공급된 유기물의 산화가 활발해지면 주변 해수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 감소된다. 하지만 Unit 2의 변화가 지시하는 방향대로 NADW의 생성만큼이나 유속이 증가하게 된다면 단위체적 당 해수에서 유기물이 산화될 수 있는 양은 상대적으로 더 적어질 수 있을 것이다. 반면에 상대적으로 유속이 느린 Unit 1에서는 NADW가 저위도 지역까지 천천히 순환하면서 해저에 공급된 유기물을 충분히 산화시켜 해수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 감소되었을 것으로 생각된다. 하지만 산화에 의한 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변화는 해수의 산소농도뿐만 아니라 해저로 공급되는 유기물의 양에 의해서도 크게 조절될 수 있기 때문에 이를 명확히 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 현재까지의

증거만으로는 NADW와 해양 및 육상 생물권 변화 사이의 직접적인 인과관계를 확인할 수 없지만, 이번 연구결과는 LOW가 시작되는 시기에 수십 만 년 시간 규모에서 북대서양 심층수 순환의 강화가 발생되었음을 지시하며 이러한 변화는 NADW의 강화가 LOW의 원인이었을 가능성을 지시한다. 하지만, 이 가능성을 좀 더 명확히 확인하기 위해서는 LOW 전 기간, 특히 LOW 최고조 시기의 추가적인 자료를 통한 해석이 필요하다.

6. 결 론

IODP Expedition 342를 통해 북대서양 중위도 지역의 J-Anomaly Ridge에서 획득한 시추코어 퇴적물에서 저서성 유공충 중 한 종인 *Oridorsalis umbonatus*의 각질 크기를 측정하고 퇴적물에 대한 입도분석을 실시하여 후기 올리고세 동안 발생한 NADW의 변화에 대해 조사하였다. 퇴적 연대는 고지자기 층서를 기준으로 퇴적율을 계산해 산출하였다. 시추코어의 최상단의 연대는 약 26 Ma, 최하단의 연대는 약 26.5 Ma로 계산되었으며, 이 시기는 LOW의 초기에 해당된다. *O. umbonatus*의 각질은 산소농도가 높은 환경일수록 크기가 커지는 것으로 보고되었는데, 측정 결과 연구지역에서는 약 26.17~26.28 Ma 동안 가장 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 당시 산소농도가 높은 심층수인 NADW의 생성이 활발해졌음을 의미한다. 원양성 환경에서의 퇴적물 입자 크기는 해류 세기의 변화에 따라 달라질 수 있는데, *O. umbonatus*의 각질 크기가 가장 큰 시기 동안에 퇴적물 입자크기 역시 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 이번 연구 결과를 토대로 NADW는 LOW의 초기 동안 점진적으로 생성이 활발해지고 그 세기가 증가되었던 것으로 해석된다. 이에 더해 북대서양 저위도 지역의 안정동위원소 자료는 NADW의 강화를 지지해준다. 하지만 NADW와 북반구 환경 변화 사이의 관계를 보다 면밀히 확인하기 위해서는 향후 연구지역에서의 고해상도 안정동위원소 분석이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의

재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업(No. NRF-2015R1A4A1041105)과 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 신진연구자지원사업(장기적 한반도 온난화 평가를 위한 Eemian 간빙기 기후변화 복원(No. NRF-2016R1C1B2016525))의 일환으로 작성되었다.

REFERENCES

- Balsama, W.L., Deatonb, B.C. and Damutha, J.E., 1999, Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores. *Marine Geology*, 161, p. 141-153.
- Bianchi, G.G. and McCave, I.N., 1999, Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, 397, p. 515-517.
- Boltovskoy, E., Watanabe, S., Totah, V.I. and Vera Ocampo, J., 1992, Cenozoic benthic bathyal foraminifers of DSDP Site 548 (North Atlantic). *Micropaleontology*, 38(2), p. 138-207.
- Borrelli, C., Cramer, B.S. and Katz, M.E., 2014, Bipolar Atlantic deepwater circulation in the middle-late Eocene: Effects of Southern Ocean gateway openings. *Paleoceanography*, 29, doi:10.1002/2012PA002444.
- Coxall, H.K., Wilson, P.A., Pälike, H., Lear, C.H. and Backman, J., 2005, Rapid stepwise onset of Antarctic glaciation and deeper calcite compensation in the Pacific Ocean. *Nature*, 433, 53.
- Cramer, B.S., Toggweiler, J.R., Wright, J.D., Katz, M.E. and Miller, K.G., 2009, Ocean overturning since the Late Cretaceous: Inferences from a new benthic foraminiferal isotope compilation. *Paleoceanography*, 24, PA4216, doi:10.1029/2008PA001683
- Curry, W.B., Shackleton, N.J. and Richter, C., 1995, LEG 154 introduction. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 154.
- DeConto, R.M. and Pollard, D., 2003, Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421, doi: 10.1038/nature01290
- Elsworth, G., Galbraith, E., Halverson, G. and Yang, S., 2017, Enhanced weathering and CO₂ drawdown caused by latest Eocene strengthening of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature geoscience*, 10, doi:10.1038/NGEO2888.
- Expedition 342 Scientists, 2012, Paleogene Newfoundland sediment drifts. *IODP Preliminary. Report 342*, doi: 10.2204/iodp.pr.342.2012.
- Geslin, E., Heinz, P., Jorissen, F. and Hemleben, C., 2004, Migratory responses of deep-sea benthic foraminifera to variable oxygen conditions: laboratory investigations. *Marine Micropaleontology*, 53, p. 227-243.
- Gooday, A.J., 2003, Benthic foraminifera (protista) as tools in deep-water palaeoceanography: Environmental influences on faunal characteristics. *Advances in Marine Biology*, 46, p. 1-90.
- Gooday, A.J. and Rathburn, A.E., 1999, Temporal variability in living deep-sea benthic foraminifera: a review. *Earth Science Review*, 46, p. 187-212.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M. and Ogg, G., 2012, *The geologic time scale 2012*. Elsevier.
- Hauptvogel, D.W., Pekar, S.F. and Pincay, V., 2017, Evidence for a heavily glaciated Antarctica during the Late Oligocene "warming" (27.8-24.5 Ma): Stable isotope records from ODP Site 690. *Paleoceanography*, 32(4), p. 384-396.
- Henrich, R., Baumann, K.H., Huber, R. and Meggers, H., 2002, Carbonate preservation records of the past 3 Myr in the Norwegian-Greenland Sea and the northern North Atlantic: implications for the history of NADW production. *Marine Geology*, 184, p. 17-39.
- Kaiho, K., 1999, Effect of organic carbon flux and dissolved oxygen on the benthic foraminiferal oxygen index (BFOI). *Marine micropaleontology*, 37, p. 67-76.
- Kaiho, K., Takeda, K., Petrizzo, M.R. and Zachos, J.C., 2006, Anomalous shifts in tropical Pacific planktonic and benthic foraminiferal test size during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, p. 456-464.
- Katz, M.E., Cramer, B.S., Toggweiler, J.R., Esmay, G., Liu, C., Miller, K.G., Rosenthal, Y., Wade, B.S. and Wright, J.D., 2011, Impact of Antarctic Circumpolar Current development on late Paleogene ocean structure. *Science* 332, 1076-1079, doi: 10.1126/science.1202122.
- Kennett, J.P., 1977, Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic oceans and their impact on global paleoceanography. *Journal of Geophysical Research*, 82, p. 3843-3859.
- Lagabriele, Y., Goddérès, Y., Donnadieu, Y., Malavieille, J. and Suarez, M., 2009, The tectonic history of Drake Passage and its possible impacts on global climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, p. 197-211.
- Mackensen, A., Schmiedl, G., Harloff, J. and Giese, M., 1995, Deep-sea foraminifera in the South Atlantic Ocean: Ecology and assemblage generation. *Micropaleontology*, 41(4), p. 342-358.
- Miller, K.G., Wright, J.D., Katz, M.E., Wade, B.S., Browning, J.V., Cramer, B.S. and Rosenthal, Y., 2009, Climate threshold at the Eocene-Oligocene transition: Antarctic ice sheet influence on ocean circulation. *in* Koeberl, C. and Montanari, A., eds., *The Late Eocene Earth-Hothouse, Icehouse, and Impacts: Geological*

- Society of America Special Paper, 452, p. 169-178, doi:10.1130/2009.2452(11).
- Murray, J.W., 1988, Neogene bottom water-masses and benthic foraminifera in the NE Atlantic Ocean. *Journal of the Geological Society, London*, 145, p. 125-132.
- Ohkushi, K., Thomas, E. and Kawahata, H., 2000, Abyssal benthic foraminifera from the northwestern Pacific (Shatsky Rise) during the last 298 kyr. *Marine Micropaleontology*, 38, p. 1-12.
- Pälike, H., Frazier, J. and Zachos, J.C., 2006a, Extended orbitally forced palaeoclimatic records from the equatorial Atlantic Ceara Rise. *Quaternary Science Reviews*, 25, p. 3138-3149.
- Pälike, H., Lyle, M.W., Nishi, H., Raffi, I., Ridgwell, A., Gamage, K., Klaus, A., Acton, G., Anderson, L., Backman, J., Baldauf, J., Beltran, C., Bohaty, S.M., Bown, P., Busch, W., Channell, J.E.T., Chun, C.O.J., Delaney, M., Dewangan, P., Jones, T.D., Edgar, K.M., Evans, H., Fitch, P., Foster, G.L., Gussone, N., Hasegawa, H., Hathorne, E.C., Hayashi, H., Herrle, J.O., Holbourn, A., Hovan, S., Hyeong, K., Iijima, K., Ito, T., Kamikuri, S., Kimoto, K., Kuroda, J., Leon-Rodriguez, L., Malinverno, A., Moore Jr, T.C., Murphy, B.H., Murphy, D.P., Nakamura, H., Ogane, K., Ohneiser, C., Richter, C., Robinson, R., Rohling, E.J., Romero, O., Sawada, K., Scher, H., Schneider, L., Sluijs, A., Takata, H., Tian, J., Tsujimoto, A., Wade, B.S., Westerhold, T., Wilkens, R., Williams, T., Wilson, P.A., Yamamoto, Y., Yamamoto, S., Yamazaki, T. and Zeebe, R.E., 2012, A Cenozoic record of the equatorial Pacific carbonate compensation depth. *Nature*, 488, p. 1-12.
- Pälike, H., Norris, R.D., Herrle, J.O., Wilson, P.A., Coxall, H.K., Lear, C.H., Shackleton, N.J., Tripathi, A.K. and Wade, B.S., 2006b, The heartbeat of the Oligocene climate system. *Science*, 314, p. 1-12.
- Pearson, P.N., Ditchfield, P.W., Singano, J., Harcourt-Brown, K.G., Nicholas, C.J., Olsson, R.K., Shackleton, N.J. and Hall, M.A., 2001, Warm tropical sea surface temperatures in the Late Cretaceous and Eocene epochs. *Nature*, 413(4), p. 481-487.
- Pekar, S.F. and Christie-Blick, N., 2008, Resolving apparent conflicts between oceanographic and Antarctic climate records and evidence for a decrease in pCO_2 during the Oligocene through early Miocene (34-16 Ma). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 260, p. 41-49.
- Pekar, S.F., DeConto, R.M. and Harwood, D.M., 2006, Resolving a late Oligocene conundrum: Deep-sea warming and Antarctic glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 231, 29-40, doi:10.1016/j.palaeo.2005.07.024.
- Rathburn, A.E. and Corliss, B.H., 1994, The ecology of living (stained) benthic foraminifera from the Sulu Sea. *Paleoceanography*, 9, p. 87-150.
- Ravelo, A.C. and Hillaire-Marcel, C., 2007, The use of oxygen and carbon isotopes of foraminifera in Paleocceanography. In: Hillaire-Marcel, C., de Vernal, A. (Eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleocceanography*. Elsevier, Amsterdam, p. 735-760.
- Scher, H.D. and Martin, E.E., 2008, Oligocene deep water export from the North Atlantic and the development of the Antarctic Circumpolar Current examined with neodymium isotopes. *Paleoceanography*, 23, doi:10.1029/2006PA001400.
- Schlanger, S.O., Jackson, E.D., et al., 1976, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. 33, Washington (U.S. Government Printing Office).
- Sexton, P.F., Wilson, P.A. and Norris, R.D., 2006, Testing the Cenozoic multisite composite $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ curves: New monospecific Eocene records from a single locality, Demerara Rise (Ocean Drilling Program Leg 207). *Paleoceanography*, 21, doi:10.1029/2005PA001253.
- Tucholke, B.E. and Vogt, P.R., 1979, Western North Atlantic: sedimentary evolution and aspects of tectonic history. In: Tucholke, B.E., Vogt, P.R., et al., *Initial Reports of DSDP, 43*: Washington, DC (U.S. Govt. Printing Office), p. 791-825. doi:10.2973/dsdp.proc.43.140.1979.
- Van der Zwaan, G.J., Duijnste, I.A.P., Dulk, M.D., Ernst, S.R., Jannink, N.T. and Kouwenhoven, T.J., 1999, Benthic foraminifera: proxies or problems? A review of paleoecological concepts. *Earth Science Reviews*, 46, p. 213-236.
- Via, R.K. and Thomas, D.J., 2006, Evolution of Atlantic thermohaline circulation: Early Oligocene onset of deep-water production in the North Atlantic. *Geology*, 34, p. 441-444.
- Voelker, A.H.L., Colman, A., Olack, G., Wanick, J.J. and Hodell, D., 2015, Oxygen and hydrogen isotope signatures of Northeast Atlantic water masses. *Deep-Sea Research II*, 116, p. 89-106.
- Whitworth, T. and Nowlin, W.D., 1987, Water masses and currents of the Southern Ocean at the Greenwich Meridian. *Journal of geophysical research*, 92, p. 6462-6476.
- Willey, J.D. and Cahoon, L.B., 1991, Enhancement of chlorophyll *a* production in Gulf Stream surface seawater by rainwater nitrate. *Marine Chemistry*, 34, p. 63-75.
- Wright, J.D. and Miller, K.G., 1993, Southern Ocean influences on late Eocene to Miocene deepwater circulation. *The Antarctic Paleoenvironment*, 60, P. 1-25.
- Zachos, J.C., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. and Billups, K., 2001, Trends, rhythms and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292, 686-693.

Received : August 22, 2018

Revised : September 27, 2018

Accepted : October 2, 2018