

과거 해수 순환을 지시하는 해수기원 네오디뮴 동위원소 비 기록

허영숙* · 장광철

서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

Authigenic Neodymium Isotope Record of Past Ocean Circulation

Youngsook Huh* and Kwangchul Jang

School of Earth and Environmental Sciences, College of Natural Sciences, Seoul National University,
Daehak-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-747, Korea

요약: 해수의 순환이 지구표면의 열 분배 및 궤도함수주기와 천년주기의 기후변화와 밀접한 관계가 있음이 알려지면서 과거 해수의 흐름을 지시할 수 있는 지시자의 개발이 관심을 끌고 있다. 이 논평에서는 해수 자생성 네오디뮴 동위원소 비를 해수순환의 지시자로 활용하는 원리와 분석방법 그리고 두 가지 적용사례를 소개한다. 먼저 지난 빙하기-간빙기와 아빙기-아간빙기에 걸쳐 북대서양심층수 세기의 변화를 명확히 볼 수 있는 예를 소개한다. 다음으로는 북극해에서 담수의 유입과 해수순환을 재구성한 예를 보인다.

핵심어: 네오디뮴 동위원소, 해수순환, 자생성, 북대서양심층수

Abstract: Proxies for paleo-circulation are drawing much interest with the recognition that ocean circulation plays an important part in the redistribution of heat and climate change on orbital and millennial timescales. In this review, we will introduce how neodymium isotope ratios of the authigenic fraction of marine sediments can be used as a proxy for ocean circulation along with analytical methods and two case studies. The first case study shows how the North Atlantic Deep Water (NADW) has varied over the glacial-interglacial and stadial-interstadial periods. The second case study shows how the freshwater budget and water circulation within the Arctic Ocean can be reconstructed for the last glacial period.

Keywords: Neodymium isotopes, Ocean circulation, Authigenic, NADW

서 론

과거 해수순환을 왜 알아야 하는가?

현재의 전지구적 해수순환은 다음과 같이 단순화시켜 볼 수 있다. 저위도로부터 운반되어 온 염도가 높은 물이 북대서양에서 차가워지면서 침강해 북대서양 심층수(NADW: North Atlantic Deep Water)를 형성하고, 남극 빙봉에서 얼음이 얼면서 차고 높은 밀도의 물이 침강해 남극저층수(AABW: Antarctic Bottom Water)를 형성한다. 이 둘이 섞인 물은 주남극해류

(ACC: Antarctic Circumpolar Current)를 떠나 대서양, 인도양, 태평양으로 심층수의 형태로 이동하며 중층수/표층수의 형태로 되돌아온다. 이 중 적은 양은 북태평양에서 북극해로 유입되어 다시 북대서양으로 연결된다. 이러한 해수의 순환은 지구 표면의 열 분배를 결정하고 지역에 따른 온도와 강수/증발의 균형에 영향을 준다. 뿐만 아니라 북대서양심층수와 남빙양 또는 태평양의 심층수는 탄소나 영양염의 함량이 달라, 심층수의 형성을 비롯한 해수순환의 변화는 해양의 탄소저장능력에 영향을 미친다(Piotrowski *et al.*, 2012).

그러면 과거에도 해수의 순환이 이와 같았을까? 아마도 다양한 시간스케일에서 상당한 변화가 있었던

*Corresponding author
Tel: 02-880-9167
E-mail: yhuh@snu.ac.kr

것으로 추정된다. 수십 년 시간스케일에서 보면, 1980년대 그린란드 주변에 심층수 형성이 약해졌다는 기록이 있고(Schlosser *et al.*, 1991), 빙하기-간빙기 시간스케일에서도 북대서양심층수의 약화가 다양한 지시자에 의해 복원된 바 있다. 이러한 해수순환의 변화는 기후와 밀접한 관련이 있을 것으로 예상되며 앞으로의 기후변화 예측에 중요한 실마리가 될 것이다.

과거 해수순환의 지시자

오늘날 전지구적 해수순환은 주요 수괴(water mass)에 특징적인 지시자의 분포를 통해 쉽게 알 수 있다. 예를 들어, 북대서양심층수는 남극저층수에 비해 영양염의 농도가 낮고 염도가 높아 잘 구별된다. 이런 정보를 과거에 대해 알아내려면 수괴를 구별할 수 있는 지시자와 이것이 변질되지 않고 기록되는 매질이 필수적이다. 이제까지 과거 해수순환을 복원하는 데 주로 사용된 것은 저서성 유공충이라는 매질에 기록된 영양염과 관련된 지시자-안정탄소동위원소 비($\delta^{13}\text{C}$)나 카드뮴 대 칼슘의 비율(Cd/Ca)-들이었다(Boyle, 1995; Curry and Oppo, 2005). Charles and Fairbanks(1992) 등의 연구팀은 최후최대빙하기(LGM: Last Glacial Maximum) 동안 관찰되는 남빙양 저서성 유공충의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 감소가 북대서양 심층수 형성의 약화를 의미함을 제시한 바 있다. 하지만 저서성 유공충의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 수괴의 혼합을 비롯한 해수순환의 변화 외에도 수괴의 고유한 영양염류의 함량, 생물생산성의 변화(Mackensen *et al.*, 1993), 지역적 대기-해양 이산화탄소 교환에 수반되는 탄소 동위원소 분별작용의 차이(Lynch-Stieglitz *et al.*, 1995), 유공충의 용해(McCorkle *et al.*, 1995), 심해수의 방해석 포화도 변화(Marchitto *et al.*, 2000) 등에 의해서도 영향을 받으므로 해석에 이견이 있을 수 있다. 과거 해수순환의 재구성에는 해저퇴적물에 기록된 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 비도 활용되는데 이는 프로탁티늄과 토륨의 입자에 대한 친화도 차이를 이용하는 지시자로서, 오늘날 북대서양 해수(~ 0.06)와 남빙양 해수(~ 0.15)간의 값의 차이를 바탕으로 한다. 그러나 최후최대빙하기 동안에는 그 변화의 정도가 비교적 작게 나타나 $\delta^{13}\text{C}$ 결과와는 상반된다(McManus *et al.*, 2004). 이런 모순되는 결과는 위에 열거한 $\delta^{13}\text{C}$ 에 영향을 미치는 2차적인 요인들과 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 에 영향을 주는 해저 대륙 주변부에서의 포집과 오판(opal) 생산량(Marchal *et al.*, 2000)에 의한 것인 듯하며 이 두 지시자의 활용

에 있어 2차 요인의 효과제한이 선행되어야 함을 시사한다(Keigwin and Boyle, 2008).

네오디뮴 동위원소 소개

Goldstein and Hemming이 논평을 발표한 2003년에만 해도 사마륨-네오디뮴(Sm-Nd)을 비롯한 장수명 방사성 동위원소 시스템은 주로 연대학, 화성 암석학, 맨틀 지구화학, 맨틀과 대륙의 진화 연구에 사용되었고 해양학, 고해양학, 고기후 연구에 있어서는 일반적이지 않았다고 저자들은 서론에서 이야기하고 있다. 그러나 10년 만에 그 상황은 많이 바뀌어서 Sm-Nd 시스템을 사용한 고해양학 연구가 연간 수십 편 이상 발표되고 있다. 2010년에는 “고해양학에서의 네오디뮴 동위원소”라는 제목으로 *Quaternary Science Reviews* 저널에 특별호가 발간되기도 했다(van de Flierdt and Frank, 2010).

반감기와 표기법: 네오디뮴은 7개의 안정 동위원소가 있는데 이중 ^{143}Nd 동위원소는 약 12%이며 같은 희토류원소인 사마륨의 동위원소 ^{147}Sm 이 1060억년(106 byr)의 반감기로 알파 붕괴하여 생긴다(Steiger and Jäger, 1977). 따라서 Sm/Nd 원소 비가 높고 연대가 오래된 암석은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 비가 높고, Sm/Nd 원소 비가 낮고 연대가 오래되지 않은 암석은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 비가 낮다. 그러나 ^{147}Sm 의 붕괴에 의한 ^{143}Nd 의 생성기간이 길고, 이로 인해 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소 비의 변화는 크지 않아서, 관심시료 내 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소 비의 변화는 다음의 식과 같이 간편하게 콘드라이트(chondrite)의 값에 대한 차이를 이용하여 엡실론(ϵ_{Nd}) 단위로 표시한다.

$$\epsilon_{\text{Nd}} = \left[\frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}}{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}} \right] \times 10^4$$

여기서 CHUR(Chondritic Uniform Reservoir)는 콘드라이트의 평균값을 의미하는데 현재는 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$ 이다(Jacobsen and Wasserburg, 1980). 맨틀의 용융 시 Nd은 Sm에 비해 마그마를 선호하기에 대륙지각은 맨틀보다 낮은 초기 Sm/Nd 비를 갖는다. 시간이 흘러 Sm의 알파붕괴가 진행됨에 따라 대륙지각의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 맨틀이나 지구 전체에 비해 낮아지게 되고 북대서양을 둘러싼 오래된 대륙은 -30까지의 낮은 ϵ_{Nd} 값을 보인다. 반면, 맨

들의 용융으로 생기는 중앙해령현무암(MORB)이나 해양섬현무암(OIB)은 상대적으로 높은 초기 Sm/Nd 비를 가지며 양의 ϵ_{Nd} 값을 나타낸다. 시간이 흐르면서 맨틀암석과 대륙암석의 동위원소 비 차이가 커지고 대륙암석은 다양한 연령을 가지므로, 해수의 ϵ_{Nd} 은 주변 지괴의 분포에 따라 특징적인 값을 가지며 기원과 운반에 관한 추적자로 사용될 수 있다.

해양에서의 유입-유출과 체류기간: 네오디뮴은 주로 대륙지각이 풍화되면서 녹은 침 또는 부유물의 형태로 강 또는 대기를 통해 해수로 유입되며, 해수에서는 약 15-45 pmol kg⁻¹의 낮은 농도로 존재한다. 비교적 용해도가 낮은 Nd은 해수 체류시간이 200-1000년 (Tachikawa *et al.*, 1999)으로 해양간 혼합시간(약 1500년, Broecker and Peng, 1982)에 비해 짧고, 그

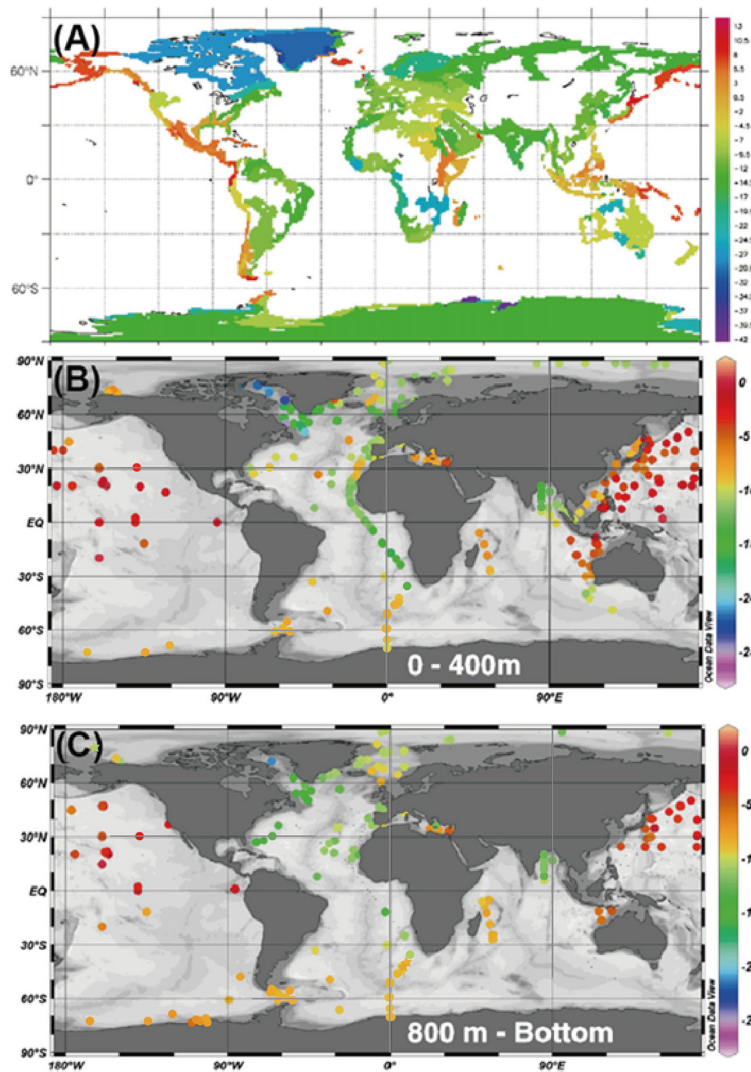


Fig. 1. Neodymium isotopic composition (ϵ_{Nd}) of (A) continental crust, (B) seawater averaged between the surface and 400 m depth and (C) seawater averaged between 800 m depth and the bottom. The stars in (C) indicate measurements of authigenic Fe-Mn oxides for important locations discussed in the text. Higher ϵ_{Nd} is in red and lower values are in purple, but notice the difference in scale between the crust and seawater. Seawater ϵ_{Nd} has high correlation to the crustal ϵ_{Nd} value. Slightly modified from (A) Arsouze *et al.* (2007) and (B), (C) Lacan *et al.* (2012). Additional data from Rutberg *et al.* (2000), Singh *et al.* (2012), Stichel *et al.* (2012), Jang *et al.* (2013), Rickli *et al.* (2014) and Garcia-Solsona *et al.* (2014).

결과 수괴의 Nd 동위원소 비는 주변 지괴에 따라 지역적인 차이를 보인다(Fig. 1). 또한, Nd는 원자량이 크고(142-150 amu) 하나의 산화수(+3)로만 존재하여 산소나 탄소와 같이 질량이 작은 안정동위원소들에 비해 화학적, 생물학적 질량 분별작용이 적고, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 그나마도 질량분석기 분석 시 교정된다. 따라서 해수순환의 측면에서 ϵ_{Nd} 값은 수괴의 기원과 물리적인 해수의 혼합에 의해서만 변하며, 수괴가 이동하는 동안 동위원소 비가 상이한 다른 유입원이 없는 이상 원래의 동위원소 비는 일정하게 유지되는 보존적 추적자의 역할을 한다. 물론 모든 지시자들이 그렇듯 현실은 이렇게 단순하지 않아 실제 ϵ_{Nd} 값을 수괴의 지시자로 적용할 때에는 고려해야 할 요인들이 있다. 해저 대륙주변부에서의 입자성 Nd와 용존 Nd의 교환(Lacan and Jeandel, 2005; Wilson *et al.*, 2012)이라던가 Nd 유입원의 변화(Rempfer *et al.*, 2012)가 그것이다.

현재 해양에서의 ϵ_{Nd} 값 분포: 해수의 Nd 농도가 매우 낮아 직접적 측정이 어려웠던 1980년대 초반, 철-망간 각과 단괴의 분석을 통해 해양의 ϵ_{Nd} 값 분포를 알 수 있었고(Piegras *et al.*, 1979; Goldstein and O'Nions, 1981; Elderfield *et al.*, 1981), 오늘날 분석기술의 발달로 해수의 직접적 측정을 통해 보완되고 있다. 해수의 ϵ_{Nd} 값은 래브라도 해(Labrador Sea)의 <-20에서 태평양의 ~0에 이르기까지 다양하며 주변 지괴의 ϵ_{Nd} 값을 반영한다(Fig. 1)(Lacan *et al.*, 2012). 원생대(Proterozoic)나 시생대(Archean) 대륙지각에 의해 둘러싸인 북대서양은($\epsilon_{\text{Nd}}=-10 \sim -13$) 환태평양 화산대로 둘러싸인 태평양($\epsilon_{\text{Nd}}=0 \sim -2$)에 비해 그 값이 낮은 경향을 보인다(Fig. 1). 그리고 인도양이나 남극해는 이 둘 사이의 값을 보인다(Frank, 2002). 심층수를 직접 분석한 경우도 마찬가지로 지리적 추세가 발견되었고, 더불어 표층이나 중층수에서는 수괴에 따라 다른 값들이 관측되었다(Goldstein and Hemming, 2003). 모델에 의해서도 대륙주변부에서 먼 심층수에서는 ϵ_{Nd} 값이 수괴의 추적자임을 확인할 수 있다(Jones *et al.*, 2008).

해수 자생성분의 네오디뮴 동위원소 비 분석

해저 퇴적물 코어에서 과거 해수순환에 관한 정보를 복원하려면 먼저 당시 해수로부터 침전된 해수자

생성분을 쇄설성 퇴적물로부터 선택적으로 녹여내고 이 성분의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비를 분석하는 방법을 취한다. 그밖에도 해수의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비의 변화는 유공충 및 유공충의 철-망간 산화물 코팅, 물고기 치아와 산호 등에 기록되며 과거 해수순환을 복원하는데 활용된다.

기록 매질

네오디뮴은 해수에서 탄산 배위체의 형태로 존재하다가(Cantrell and Byrne, 1987) 양전하를 띠는 비정질 철 수산화물의 표면에 흡착되어(Koschinsky and Hein, 2003) 철-망간 코팅에서 주로 발견된다(Tachikawa *et al.*, 2013).

철-망간 단괴: 철-망간 단괴는 철과 망간 침전 시 Nd를 비롯한 산화수 +3가의 희토류 원소를 풍부하게 포함하는 특성이 있어 과거 해수의 ϵ_{Nd} 값을 기록하는 저장소로서 초창기 네오디뮴 동위원소 연구에 많이 활용되었다(O'Nions *et al.*, 1978; Piegras *et al.*, 1979). 철-망간 단괴는 성장 속도가 극히 느려(1-15 mm/백만 년) 수백만 년 시간스케일의 기록을 얻을 수 있다는 장점이 있지만 짧은 시간스케일의 해수순환 변화를 관찰하기에는 적합하지 않다. 철-망간 단괴의 ϵ_{Nd} 값을 이용한 대표적 연구결과는 북반구빙결(Northern Hemisphere Glaciation) 이후 대서양 자오선 역전순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation)이 약화되었다는 것이다(Frank, 2002에 논평되어 있음).

해저퇴적물의 철-망간 코팅 또는 산재성(disseminated) 철-망간 산화물: 이것은 초기 속성작용 중 심층수와 해저퇴적층 경계에서 형성되는 물질로 당시 해수의 ϵ_{Nd} 값을 기록한다. 때문에, 지역의 퇴적 속도에 따라 빙하기-간빙기 또는 천년단위 변화까지 구별할 수 있는 초고해상도 자료의 획득이 가능하다. 기본적으로는 순차적 추출법을 사용하여 철-망간 산화물을 환원시키는데 퇴적물의 조성에 따라 구체적인 시약에는 약간의 차이가 있다(Table 1)(Bayon *et al.*, 2002; Piotrowski *et al.*, 2004; Gutjahr *et al.*, 2007; Jang *et al.*, 2013). Palmer and Elderfield(1986) 이후 발전된 이 테크닉은 분석 장비의 발달에 따라 그 활용이 점차 확대되었지만, 쇄설성 퇴적물 중 불안정한 성분(예를 들어 화산기원물질)과 해수에 유입되기 전 대륙수계에서 생성된 철-망간 코팅에 의해 편향된 결과를 얻을 수 있다는 불안 요소를 내포하고 있다(Kraft *et al.*, 2013). 따라서 해저퇴적물의 자생성 철

Table 1. Sequential extraction method used in the literature for obtaining the authigenic Fe-Mn oxide leachates

Fraction	Bayon <i>et al.</i> (2002)		Piotrowski <i>et al.</i> (2004)		Gutjahr <i>et al.</i> (2007)		Jang <i>et al.</i> (2013)	
	Reagent	T (°C) / Time (h)	Reagent	T (°C) / Time (h)	Reagent	T (°C) / Time (h)	Reagent	T (°C) / Time (h)
Carbonate	10% Acetic acid	25 / 3	1 M Buffered acetic acid	25 / *	1 M Buffered acetic acid	25 / *	1 M Buffered acetic acid	25 / *
Fe-Mn oxide	1 M Hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid	80 / 3	0.02 M Hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid	25 / -	0.05 M Hydroxylamine hydrochloride (pH 4) in 15% acetic acid	25 / 3	0.02 M Hydroxylamine hydrochloride (pH 4.5) in 25% acetic acid	25 / 3

*Until reaction is complete

-Not specified in the original literature

-망간 산화물을 분석할 경우 자료의 신뢰성을 위해 생물기원 매질의 ϵ_{Nd} 값을 교차 분석하거나 쇄설성 퇴적물과 자생성분의 ϵ_{Nd} 값이나 희토류 원소를 동시 분석하여 그 상관성을 조사하곤 한다(Kraft *et al.*, 2013; Roberts *et al.*, 2010).

물고기 치아, 유공충, 산호 등으로 대표되는 생물 기원 매질: 해수에서 직접 형성되기 때문에 해저퇴적물로부터 자생성분을 추출할 때 발생하는 불안정 성분 에 의한 오염과 대륙 수계에서 형성되어 해수로 유입된 철-망간 성분에 의한 편향으로부터 자유롭다는 장점이 있어 오늘날 자주 활용된다.

물고기 치아는(Martin and Haley, 2000) 초기 속 성장작용 중 심층수와 해저퇴적층의 경계에서 물고기 치아의 주성분인 수산화인회석이 수산화플루오르인회석으로 재빠르게 변화하는 과정에서 심층수의 ϵ_{Nd} 를 기록한다. 이러한 성질은 이 매질이 실제 물고기의 서식 깊이와 무관하게 하부 해수층의 성분을 기록하고 공극수 등에 의한 편향에서 자유로움을 의미한다.

유공충의 탄산염 껍질은 서식깊이의 해수의 ϵ_{Nd} 값을 기록했던 것이 사후 해저로 가라앉는 동안 계속적인 해수와의 교환이 일어나 실상은 심층수의 ϵ_{Nd} 값을 기록한다(Roberts *et al.*, 2012; Tachikawa *et al.*, 2014). 최근 미시적 분석에 의하면 퇴적된 유공충 껍질에서 Nd는 주로 방해석 껍질에 붙어있는 철-망간 수산화물이나 탄산염 층 내에 형성된 망간탄산염에 있다(Roberts *et al.*, 2012; Tachikawa *et al.*, 2013). 또한, 다단계의 화학적 분리를 거친 유공충 탄산염의 ϵ_{Nd} 값과 쇄설물만 제거하고 철-망간 코팅은 남아있는 유공충의 ϵ_{Nd} 값은 분석오차 범위 내에서 같다(Roberts *et al.*, 2012; Kraft *et al.*, 2013; Tachikawa *et al.*,

2014). 따라서 현 추세는 굳이 복잡한 화학적 프로토콜을 거쳐 유공충의 탄산염 성분만을 분리하여 분석하는 것이 아니라 퇴적된 유공충 껍질에서 쇄설성 성분만을 물리적으로 제거하고 분석하는 것이다. 장점은 유공충이 다양한 해양환경에 흔해서 고해상도로 플라이오-플라이스토세의 연속적 변화를 복원하기에 적합하며 유공충에서 분석하는 다른 고해양 지시자와 직접 비교가 가능하다는 것이다. 단점은 유공충이 충분히 발견되지 않는 지역이라면 분석에 필요한 양을 확보하기가 어렵다는 것이다.

거품돌산호(scleractinian coral)는 초를 형성하지 않는 심해 산호로서 중층수의 ϵ_{Nd} 를 기록하는데, 장점은 동일 샘플을 U-Th법으로 연대측정 할 수 있다는 것이고 연대에 대한 해상도는 수십-수백 년 수준이다. 단점은 Nd 농도가 낮으므로 물리·화학적 분리와 분석에 어려움이 있다는 점이다(van de Flierdt *et al.*, 2010; Robinson *et al.*, 2014).

여러 매질에서 서로 다른 추출법을 통해 얻은 고해양 기록을 살펴보면 서로 일관된 결과를 보여주는 경우도 있고 그렇지 못한 경우도 있다. 예를 들어, 심해유공충과 해저퇴적물의 철-망간 코팅 그리고 물고기 치아가 같은 결과를 보여준 예가 있는가 하면(Klevenz *et al.*, 2008; Martin *et al.*, 2010) 상당히 다른 경우도 있었다(Roberts *et al.*, 2010). 따라서 연구지역에 따라 그 퇴적물의 구성요소에 맞는 추출 방법을 확인하여 사용하여야 한다.

퇴적물의 자생성분 추출 및 ϵ_{Nd} 분석방법

우선 건조된 퇴적물 시료 0.5-1 g에서 탄산염 부분을 아세트산(CH₃COOH)을 이용해 제거한다. 그 후

아세트산에 용해된 하이드록실아민 하이드로클로라이드($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$) 용액을 이용해 철-망간 산화물을 추출한다. 이온크로마토그래피법을 이용해 다른 매질 원소들로부터 Nd를 분리하는데, 보통 Tru-Spec 레진(Eichrom 사)으로 먼저 희토류원소를 다른 이온들로부터 분리하고, 다시 Ln 레진(Eichrom 사)을 이용하여 희토류원소 중 Nd를 분리한다. 철이 높은 농도로 존재하는 경우, 위의 두 레진 이전에 양이온교환 레진을 이용하여 이를 사전에 제거하기도 한다. 동위원소 비 분석은 열이온화 질량분석기(TIMs, Thermal Ionization Mass Spectrometer) 또는 다중검출기 유도 결합 플라즈마 질량분석기(MC-ICPMS, Multiple Collector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)를 이용한다. 분석 속도가 빠른 MC-ICPMS가 많이 이용되는 추세이지만, 해수 혹은 산호와 같이 Nd 농도가 극히 낮은(10 ppb 이하) 샘플은 NdO^+ 상태로 TIMs를 이용하는데 이 경우 15-20 ng Nd만으로도 분석이 가능하며(Crocket *et al.*, 2014 Porcelli *et al.*, 2009) 수 ng Nd에 대한 분석도 가능해지고 있다(Harvey and Baxter, 2009). 보통 ϵ_{Nd} 에 대한 분석의 정밀도는 0.2-0.3 (2σ) 정도이다.

과거 기록의 예

해수자생성분의 ϵ_{Nd} 값을 통해 과거 수괴 변화의 기록을 얻은 연구를 두 가지 소개하려고 한다. 첫째는 최후빙하기 동안 북대서양심층수의 세기 변화를 보인 것이고, 둘째는 역시 최후빙하기 동안 북극해의 담수 유입을 보인 것이다.

북대서양심층수의 세기 변화

남대서양과 남빙양 사이에 있는 케이프 분지(Cape Basin) 코어에서 자생성 퇴적물의 ϵ_{Nd} 값을 분석한 일련의 연구는 기후 변화와 대서양 자오선 역전순환의 관계를 논할 수 있게 하였다. 이곳에서 Rutberg *et al.*(2000)은 약 7만 년 전까지의 ϵ_{Nd} 값을 케도함수의 영향을 볼 수 있을 정도인 수천 년의 해상도로 복원하였다. 이후 Piotrowski *et al.*(2004)에서 최후최대빙하기까지를 천년주기를 살펴볼 수 있을 정도인 수백 년의 해상도로 보강하였고 Piotrowski *et al.*(2005)에서는 근처 다른 코어 기록과 접합시켜서 과거 약 10만 년 전 간빙기로까지 고해상도의 기록을 확장했다(Fig. 2). Piotrowski *et al.*(2012)에서는 2만 년 전까

지의 기록에 대해 유공층을 교차분석해서 해저퇴적물 자생성분 ϵ_{Nd} 값 기록의 정당성을 확인하였다.

남빙양의 케이프 분지는 현재 북대서양심층수와 남빙양수가 만나는 지점에 있으며, 이곳 해수의 ϵ_{Nd} 값 변화는 남빙양수($\epsilon_{\text{Nd}} = -7 \sim -9$)와 북대서양심층수($\epsilon_{\text{Nd}} = \sim -14$)의 상대적 세기로 해석할 수 있다. 이 기록에 의하면 남대서양 심층수의 ϵ_{Nd} 값은 그린란드 빙하코어의 산소동위원소 비, 즉 북반구 기후변화와 밀접한 관계가 있다. 따뜻한 시기에는 북대서양심층수가 강했고 추운 시기에는 약했다(Fig. 2). 안정탄소동위원소비와 네오디뮴 동위원소 비를 결합한 연구에서 Piotrowski *et al.*(2005)는 최후빙하기가 시작될 때 대륙빙하가 먼저 성장하였고 해양의 탄소 저장량이 증가한 후 대서양 자오선 역전순환이 약해졌으며, 반대로 최후최대빙하기가 끝날 때는 먼저 대륙빙하가 후퇴하고 해양의 탄소 저장량이 변한 후 대서양 자오선 역전순환이 다시 강해졌다는 주장을 펼쳤다. 즉 기후변화가 해수순환의 변화를 초래한 것인지 해수순환의 변화가 기후변화를 초래하지 않았다는 것이다. 반면, 최후빙하기 동안 있었던 천년 변화 중 일부의 경우 해수순환의 변화가 기후변화를 유발했을 가능성이 있다. Pena and Goldstein(2014)은 케이프 분지에서 네오디뮴 동위원소 비 연구를 약 1백만 년 전인 중기플라이스토세변화기(MPT: Mid-Pleistocene Transition)로 확장하였다. MPT는 빙하기-간빙기의 주기가 4만년에서 10만년으로 바뀐 과도기로 특별히 케도함수의 주기에 변화가 없었음에도 기후변화의 주기와 진폭이 변하여서 고기후 학자들의 관심을 끌고 있다. MPT 이전에는 빙하기와 간빙기의 ϵ_{Nd} 값이 큰 차이를 보이지 않았으나 MPT 이후에는 빙하기의 높은 ϵ_{Nd} 값과 간빙기의 낮은 ϵ_{Nd} 값의 경향성이 반복적으로 나타나기 시작했음을 보였다(Pena and Goldstein, 2014). 즉, MPT 이전에는 빙하기에도 북대서양심층수가 간빙기와 변함없이 케이프 분지까지 도달했는데, MPT 이후에는 북대서양심층수가 간빙기에만 케이프 분지에 도달하고 빙하기에는 매우 약해진다는 것이다.

북극해 담수 유입

북극해에는 대서양과 태평양 해수를 비롯하여 전 세계 강물의 10%의 유입이 있다. 또한, 주요 수괴로서 해빙수(meltwater)를 배제할 수 없다. 북극해는 전 지구적 기후변화에 중요한 곳으로 알려져 있는데, 이

는 북극해수의 주요 유출구인 북대서양에서의 심층수 형성에 북극해수가 큰 영향을 미칠 것으로 예상되기 때문이다. 오늘날 북극해의 표층수 순환은 해빙의 이동 경로를 통해 알 수 있는데, 서북극해 지역을 시계 방향으로 순환하는 보퍼트 환류(Beaufort Gyre)와 동북극해 지역의 표층수를 로모노소프(Lomonosov) 해령을 따라 운반하는 북극횡단해류(Transpolar Drift)가 그것이며, 이들의 상대적 세기는 시기에 따라 변화한 것으로 빙하쇄설층을 비롯한 다양한 연구를 통해 알려져 있다(Bischof and Darby, 1997; Darby *et al.*, 2006; Rella and Uchida, 2011). 북극해의 멘델레예프(Mendeleev) 해령은 이 둘의 경계부근에 위치하고 있어 과거 이 두 흐름의 상대적 세기 변화를 가늠할 수 있는 위치이다. 이곳에서 분석된 퇴적물 해수자생 성분의 ϵ_{Nd} 값 기록에서 몇 차례의 두드러진 피크가 관찰되었다(Fig. 2). 이는 서북극해로 유입되는 해수,

강물, 해빙수 등을 비롯한 수괴들의 변화, 혹은 이러한 수괴들의 경로 변화를 암시한다.

두 차례의 ϵ_{Nd} 값의 감소가 35-39 ka, 13-21 ka에 일어났는데(Fig. 2), ϵ_{Nd} 값의 감소에 영향을 줄 수 있는 수괴는 맥켄지(Mackenzie)강 혹은 레나(Lena)강이다. 35-39 ka에는 높은 무기탄소 함량이 관찰되므로 캐나다 북부 지역으로부터 유래하였을 것이다. 로렌타이드(Laurentide) 빙상이 후퇴하면서 쏟아진 담수가 노출된 대륙붕의 풍화를 촉진하며 낮은 ϵ_{Nd} 을 유발한 것으로 추정된다. 이 수괴가 멘델레예프 해령 지역의 심해에 도달했다는 것은 보퍼트해 혹은 동시베리아 지역에 형성된 해빙에 의한 염수폐기(brine rejection)가 표층수의 침강을 유발하였음을 의미한다. 또한, 함께 분석된 부유성 유공충의 산소 동위원소 비의 감소는 로렌타이드 기원의 담수가 멘델레예프 해령 지역 까지 도달하였음을 가리키며, 당시 보퍼트환류가 현

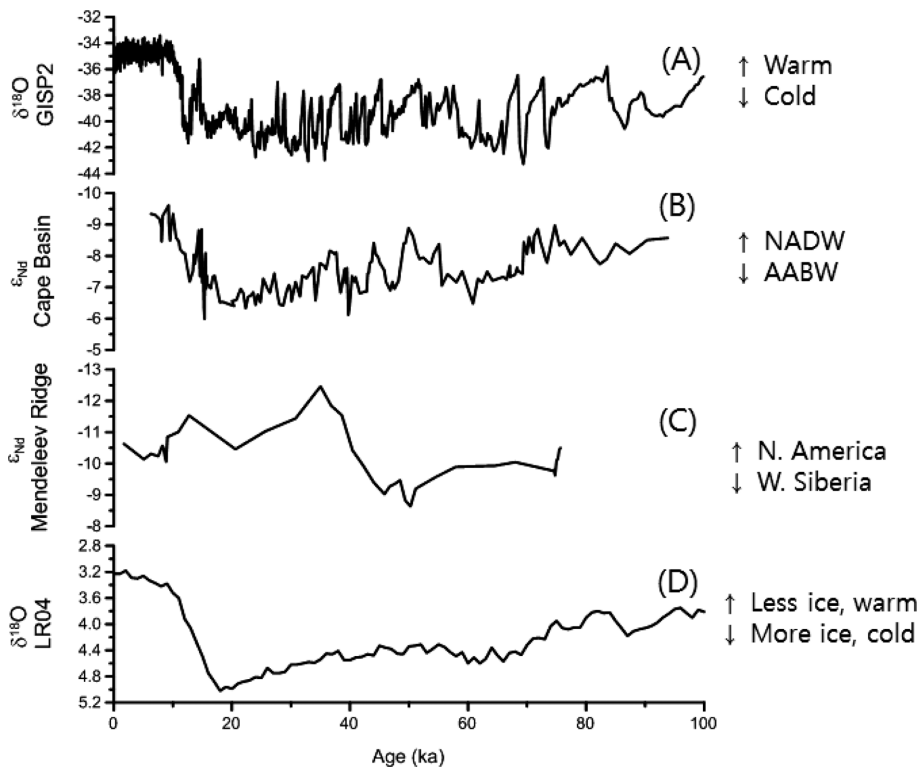


Fig. 2. (A) The oxygen isotope ratio of Greenland ice core as an indicator of Northern Hemisphere climate change. (B) The authigenic neodymium isotope ratio of Cape Basin cores representing the strength of the North Atlantic Deep Water versus Antarctic Bottom Water. Data from Piotrowski *et al.* (2005). (C) The authigenic neodymium isotope ratio of the Mendeleev Ridge core showing periods of meltwater input to the Arctic Ocean. Data from Jang *et al.* (2013). (D) The stacked record of oxygen isotope ratio of benthic foraminifera from Lisiecki and Raymo (2005).

재와 비슷하거나 동북극해 쪽으로 확대되었음을 시사한다. 반면, 13-21 ka에는 무기탄소의 함량이 현재와 비슷하다. 시기적으로 볼 때 하인리히 이벤트 1 (Heinrich Event 1, 16.8 ka)이나 북극 빙하쇄설퇴적층 AL2, 또는 영거 드라이아스(Younger Dryas) 시기에 빙하호인 아가씨(Agassiz) 호가 북극으로 쏟아져 나온 것과 일치하는 듯이 보이지만 연대의 불확실성 때문에 정확히 말할 수는 없다.

한 차례 ϵ_{Nd} 값의 증가가 있었던 46-51 ka 당시, 높은 ϵ_{Nd} 값을 갖는 유입원에는 태평양 해수, 동시베리아 지역의 콜리마(Kolyma)강, 서시베리아 지역의 오브(Ob)와 예니세이(Yenisey)강이 있지만, 이 중 서시베리아 지역의 두 강이 가장 유력하다. 당시의 낮은 해수면을 고려할 때 수심이 낮은 베링해협을 통한 태평양 해수의 유입은 미비하였을 것이고, 현재 북극해로 유입되는 Nd 총량의 15% 정도를 기여하는 콜리마 강의 영향력이 크게 변하지도 않았을 것이다. 특히, 65-50 ka의 빙기 동안 바렌츠해(Barents Sea), 카라해(Kara Sea), 그리고 랫테브해(Laptev Sea) 서부를 뒤덮은 빙상(Spielhagen *et al.*, 2004; Svendsen *et al.*, 2004)은 북극해로 들어오는 오브강과 예니세이강과 같은 담수 진로를 차단하였을 것으로 보인다. 넓게 확장된 빙하는 댐의 역할을 하여 담수 호수(icedammed lake)를 형성하고, 이 호수는 빙하기 동안 격렬한 풍화를 겪은 높은 ϵ_{Nd} 값의 Nd를 비축하고 있었을 것이다. 빙하에 의해 형성된 호수의 존재와 방출은 빙하쇄설층을 통해 이미 연구된 바 있으며 (Spielhagen *et al.*, 2004; Svendsen *et al.*, 2004), 방출시기 중 하나인 52 ka는 멘텔레예프 해령 코어의 ϵ_{Nd} 값의 증가 시기와 거의 일치한다. 이렇게 방출된 막대한 양의 담수는 바렌츠해와 카라해에 넓게 분포한 해빙과 빙하에 의해 염수폐기되어 동북극해의 하층부까지 도달했을 것으로 예상되며(Haley *et al.*, 2008), 표층수의 형태로도 멘텔레예프 해령 지역까지 도달한 후 염수폐기에 의해 하층부에 도달하였을 것이다. 즉, 55-50 ka 기간에는 북극횡단해류가 서북극해 지역까지 확장되어 멘텔레예프 해령에까지 그 영향을 미친 것으로 보인다. 북극해 코어들의 경우 방사성탄소연대의 저장기연령(reservoir age)에 불확실성이 있어 대서양코어와의 단순 비교에 무리가 있기는 하지만, 북극해에 담수가 유입된 시기와 북반구 기후 변화나 북대서양심층수 세기 변화와 특별한 관련성을 찾을 수 없었다(Fig. 2). 또한, 여러 가정이 필요하지

만 대략적인 네오디뮴 동위원소 비를 이용한 수지(mass balance)를 따져 보았을 때 북극해에 유입된 담수는 심층수 형성으로 제거되므로 북대서양으로 직접 유출되어 북대서양심층수의 염도에 영향을 미치지 못했을 것으로 보인다(Jang *et al.*, 2013).

미래 연구 방향

본 논평에서는 자생성 네오디뮴 동위원소 비 기록으로 본 과거 북대서양심층수의 세기 변화와 북극해 담수 형성의 예를 소개하였다. 분석상의 문제점이라면 자생성분을 추출할 때 다른 쇄설성분이 함께 추출되지 않도록 주의하는 것인데, 지역에 따라 그리고 퇴적환경변화에 따라 퇴적물의 성격이 매우 다르므로 주의해서 시료의 농도나 반응조건 등을 조절해야한다. 또, 생물기원의 물고기 치어나 유공층으로 재확인하고 추가로 회토류원소의 패턴이나 스트론튬 동위원소 비를 분석하는 등의 세심한 확인이 필요하다.

해석의 문제도 있는데, 유공층 그리고 해수층에서 침강하는 퇴적물을 수집한(sediment trap) 시료와 해수시료의 ϵ_{Nd} 값을 비교분석하여 이제는 철-망간 산화물이 어떤 과정을 통해서 어느 깊이에서 생성되며 따라서 ϵ_{Nd} 값이 어떤 수괴의 값을 반영하는 지는 규명되었다. 하지만 여전히 대륙주변부 등 입자가 많은 지역에서의 입자성 Nd와 용존 Nd의 교환은 그 중요성은 인정되지만 전체 해수의 ϵ_{Nd} 값에 얼마나 영향을 미치는지에 대해서는 아직 합의되지 않은 상황이다.

네오디뮴 동위원소 비 기록을 이용해 과거 해수 순환을 연구함에 있어 앞으로의 추세는 연대해상도를 높이는 방향이다. 전지구적으로 59-27 ka 기간은 극심한 기후변화가 있어 매우 불안정했는데 이것이 캘리포니아 마진에서는 해저 용존 산소 함량의 변화로 나타난다. 그 이유가 이곳 중층수의 기원이 남빙양중층수에서 북태평양중층수로 변하기 때문이라는 가설이 있는데 Murphy and Thomas(2010)는 천년-백년 시간스케일의 ϵ_{Nd} 값 변화를 복원하여 이 가설을 반박할 수 있었다. 아빙기-아간빙기에 따라 심해유공층의 ϵ_{Nd} 값이 체계적으로 변하는 모습이 보이지 않았기 때문이다. Gutjahr *et al.*(2010)은 하인리히 이벤트 4가 있었던 시기의 서대서양 심해 ϵ_{Nd} 값 변화를 고해상도로 복원하였다. 하인리히 이벤트 때 북대서양으로 방출된 빙산이 녹아 염도가 감소되어 북대서양심층수의 형성이 저해되었다는 가설이 유력했는데, 퇴적물

의 자생성분의 ϵ_{Nd} 값 기록에서 하인리히 이벤트가 있기 수천 년 전에 이미 북대서양의 시그널이 사라져 버린 것을 보여 남극의 변화가 대서양 해수 순환의 변화에 큰 영향을 주었음을 시사했다. 해수순환과 천 년주기 기후변화의 연관성과 선후관계의 규명에 앞으로 자생성 네오디뮴 동위원소 비가 유용하게 활용될 것이다.

사 사

이 논문은 한국해양연구원부설극지연구소 주요사업 “서북극권 해역 가스하이드레이트 특성 및 고해양환경변화 복원연구(PE140620)” 및 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2013-029107)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- Arsouze, T., Dutay, J.-C., Lacan, F. and Jeandel, C., 2007, Modeling the neodymium isotopic composition with a global ocean circulation model. *Chemical Geology*, 239, 165-177.
- Bayon, G., German, C.R., Boella, R.M., Milton, J.A., Taylor, R.N. and Nesbitt, R.W., 2002, An improved method for extracting marine sediment fractions and its application to Sr and Nd isotopic analysis. *Chemical Geology*, 187, 179-199.
- Bischof, J. and Darby, D.A., 1997, Mid- to Late Pleistocene ice drift in the western Arctic Ocean: Evidence for a different circulation in the past. *Science*, 277, 74-78.
- Boyle, E.A., 1995, Limits on benthic foraminiferal chemical analyses as precise measures of environmental properties. *Journal of Foraminiferal Research*, 25, 4-13.
- Broecker, W.S. and Peng, T.-H., 1982, *Tracers in the Sea*. LDGO Press, Palisades, N. Y., 689p.
- Cantrell, K.J. and Byrne, R.H., 1987, Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 597-605.
- Charles, C.D. and Fairbanks, R.G., 1992, Evidence from Southern Ocean sediments for the effect of North Atlantic deep-water flux on climate. *Nature*, 355, 417-419.
- Crocket, K.C., Lambelet, M., van de Flierdt, T., Rehkämper, M. and Robinson, L.F., 2014, Measurement of fossil deep-sea coral Nd isotopic compositions and concentrations by TIMS as NdO^+ , with evaluation of cleaning protocols. *Chemical Geology*, 374-375.
- Curry, W. and Oppo, D., 2005, Glacial water mass geometry and the distribution of $\delta^{13}C$ of ΣCO_2 in the western Atlantic Ocean. *Paleoceanography*, 20, doi:10.1029/2004PA001021.
- Darby, D.A., Polyak, L. and Bauch, H.A., 2006, Past glacial and interglacial conditions in the Arctic Ocean and marginal seas - a review. *Progress in Oceanography*, 71, 129-144.
- Elderfield, H., Hawkesworth, C.J., Greaves, M.J. and Calvert, S.E., 1981, Rare-earth element geochemistry of oceanic ferromanganese nodules and associated sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 513-528.
- Frank, M., 2002, Radiogenic isotopes: Tracers of past ocean circulation and erosional input. *Reviews of Geophysics*, 40, doi:10.1029/2000RG000094.
- Garcia-Solsona, E., Jeandel, C., Labatut, M., Lacan, F., Vance, D., Chavagnac, V. and Pradoux, C., 2014, Rare earth elements and Nd isotopes tracing water mass mixing and particle-seawater interactions in the SE Atlantic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 125, 351-372.
- Goldstein, S.L. and Hemming, S.R., 2003, Long-lived isotopic tracers in oceanography, paleoceanography, and ice-sheet dynamics. In: *Treatise on Geochemistry* (Elderfield, H. (ed.)), Elsevier, Oxford, 453-489.
- Goldstein, S.J. and O'Nions, R.K., 1981, Nd and Sr isotopic relationships in pelagic clays and ferromanganese deposits. *Nature*, 292, 324-327.
- Gutjahr, M., Frank, M., Stirling, C.H., Klemm, V., van de Flierdt, T. and Halliday, A.N., 2007, Reliable extraction of a deepwater trace metal isotope signal from Fe-Mn oxyhydroxide coatings of marine sediments. *Chemical Geology*, 242, 351-370.
- Gutjahr, M., Hoogakker, B.A.A., Frank, M. and McCave, I.N., 2010, Changes in North Atlantic Deep Water strength and bottom water masses during Marine Isotope Stage 3 (45-35 ka BP). *Quaternary Science Reviews*, 29, 2451-2461.
- Haley, B.A., Frank, M., Spielhagen, R.F. and Fietzke, J., 2008, Radiogenic isotope record of Arctic Ocean circulation and weathering inputs of the past 15 million years. *Paleoceanography*, 23, doi:10.1029/2007PA001486.
- Harvey, J. and Baxter, E.F., 2009, An improved method for TIMS high precision neodymium isotope analysis of very small aliquots (1-10 ng). *Chemical Geology*, 258, 251-257.
- Jacobsen, S.B. and Wasserburg, G.J., 1980, Sm-Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 50, 139-155.
- Jang, K., Han, Y., Huh, Y., Nam, S.-I., Stein, R., Mackensen, A. and Matthiessen, J., 2013, Glacial freshwater discharge events recorded by authigenic neodymium isotopes in sediments from the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 369-370, 148-157.
- Jones, K.M., Khatiwala, S.P., Goldstein, S.L., Hemming, S.R. and van de Flierdt, T., 2008, Modeling the distribu-

- tion of Nd isotopes in the oceans using an ocean general circulation model. *Earth and Planetary Science Letters*, 272, 610-619.
- Keigwin, L.D. and Boyle, E.A., 2008, Did North Atlantic overturning halt 17,000 years ago? *Paleoceanography*, 23, doi:10.1029/2007PA001500.
- Klevenz, V., Vance, D., Schmidt, D.N. and Mezger, K., 2008, Neodymium isotopes in benthic foraminifera: Core-top systematics and a down-core record from the Neogene south Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*, 265, 571-587.
- Koschinsky, A. and Hein, J.R., 2003, Acquisition of elements from seawater by ferromanganese crusts: Solid phase associations and seawater speciation. *Marine Geology*, 198, 331-351.
- Kraft, S., Frank, M., Hathorne, E.C. and Weldeab, S., 2013, Assessment of seawater Nd isotope signatures extracted from foraminiferal shells and authigenic phases of Gulf of Guinea sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 121, 414-435.
- Lacan, F. and Jeandel, C., 2005, Neodymium isotopes as a new tool for quantifying exchange fluxes at the continent-ocean interface. *Earth and Planetary Science Letters*, 232, 245-257.
- Lacan, F., Tachikawa, K. and Jeandel, C., 2012, Neodymium isotopic composition of the oceans: A compilation of seawater data. *Chemical Geology*, 300-301, 177-184.
- Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E., 2005, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20, doi:10.1029/3004PA001071.
- Lynch-Stieglitz, J., Stocker, T.F., Broecker, W.S. and Fairbanks, R.G., 1995, The influence of air-sea exchange on the isotopic composition of oceanic carbon: Observations and modeling. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 653-665.
- Mackensen, A., Hubberten, H.W., Bickert, T., Fischer, G. and Fütterer, D., 1993, The $\delta^{13}\text{C}$ in benthic foraminiferal tests of *Fontbotia wuellerstorfi* (Schwager) relative to the $\delta^{13}\text{C}$ of dissolved inorganic carbon in southern ocean deepwater: implications for glacial ocean circulation models. *Paleoceanography*, 8, 587-610.
- Marchal, O., François, R., Stocker, T.F. and Joos, F., 2000, Ocean thermohaline circulation and sedimentary $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ ratio. *Paleoceanography*, 15, 625-641.
- Marchitto, T.M., Jr, Curry, W.B. and Oppo, D.W., 2000, Zinc concentrations in benthic foraminifera reflect seawater chemistry. *Paleoceanography*, 15, 299-306.
- Martin, E.E. and Haley, B.A., 2000, Fossil fish teeth as proxies for seawater Sr and Nd isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 835-847.
- Martin, E.E., Blair, S.W., Kamenov, G.D., Scher, H.D., Bourbon, E., Basak, C. and Newkirk, D.N., 2010, Extraction of Nd isotopes from bulk deep sea sediments for paleoceanographic studies on Cenozoic time scales. *Chemical Geology*, 269, 414-431.
- McCorkle, D.C., Martin, P.A., Lea, D.W. and Klinkhammer, G.P., 1995, Evidence of a dissolution effect on benthic foraminiferal shell chemistry: $\delta^{13}\text{C}$, Cd/Ca, Ba/Ca, and Sr/Ca results from the Ontong Java Plateau. *Paleoceanography*, 10, 699-714.
- McManus, J.F., François, R., Gherardi, J.-M., Keigwin, L.D. and Brown-Leger, S., 2004, Collapse and rapid resurrection of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, 428, 834-837.
- Murphy, D.P. and Thomas, D.J., 2010, The negligible role of intermediate water circulation in stadial-interstadial oxygenation variations along the southern California margin: Evidence from Nd isotopes. *Quaternary Science Reviews*, 29, 2442-2450.
- O'Nions, K.R., Carter, S.R., Cohen, R.S., Euensen, N.M. and Hamilton, P.J., 1978, Pb Nd and Sr isotopes in oceanic ferromanganese deposits and ocean floor basalts. *Nature*, 273, 435-438.
- Palmer, M.R. and Elderfield, H., 1986, Rare earth elements and neodymium isotopes in ferromanganese oxide coatings of Cenozoic foraminifera from the Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 409-417.
- Pena, L.D. and Goldstein, S.L., 2014, Thermohaline circulation crisis and impacts during the mid-Pleistocene transition. *Science Express*, doi:10.1126/science.1249770.
- Piepgras, D.J., Wasserburg, G.J. and Dasch, E.J., 1979, The isotopic composition of Nd in different ocean masses. *Earth and Planetary Science Letters*, 45, 223-236.
- Piotrowski, A.M., Goldstein, S.L., Hemming, S.R. and Fairbanks, R.G., 2004, Intensification and variability of ocean thermohaline circulation through the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 225, 205-220.
- Piotrowski, A.M., Goldstein, S.L., Hemming, S.R. and Fairbanks, R.G., 2005, Temporal relationships of carbon cycling and ocean circulation at glacial boundaries. *Science*, 307, 1933-1938.
- Piotrowski, A.M., Galy, A., Nicholl, J.A.L., Roberts, N., Wilson, D.J., Clegg, J.A. and Yu, J., 2012, Reconstructing deglacial North and South Atlantic deep water sourcing using foraminiferal Nd isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 357-358, 289-297.
- Porcelli, D., Andersson, P.S., Baskaran, M., Frank, M., Björk, G. and Semiletov, I., 2009, The distribution of neodymium isotopes in Arctic Ocean basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 2645-2659.
- Rella, S.F. and Uchida, M., 2011, Sedimentary organic matter and carbonate variations in the Chukchi Borderland in association with ice sheet and ocean-atmosphere dynamics over the last 155 kyr. *Biogeosciences*, 8, 3545-3553.
- Rempfer, J., Stocker, T.F., Joos, F. and Dutay, J., 2012, Sensitivity of Nd isotopic composition in seawater to changes

- in Nd sources and paleoceanographic implications. *Journal of Geophysical Research*, 117, doi:10.1029/2012JC008161.
- Rickli, J., Gutjahr, M., Vance, D., Fischer-Godde, M., Hillenbrand, C.-D. and Kuhn, G., 2014, Neodymium and hafnium boundary contributions to seawater along the West Antarctic continental margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 99-110.
- Roberts, N., Piotrowski, A.M., McManus, J.F. and Keigwin, L., 2010, Synchronous delacial overturning and water mass source changes. *Science*, 327, 75-78.
- Roberts, N.L., Piotrowski, A.M., Elderfield, H., Eglinton, T.I. and Lomas, M.W., 2012, Rare earth element association with foraminifera. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 94, 57-71.
- Robinson, L.F., Adkins, J.F., Frank, N., Gagnon, A.C., Prouty, N.G., Roark, E.B. and van de Flierdt, T., 2014, The geochemistry of deep-sea coral skeletons: A review of vital effects and applications for palaeoceanography. *Deep-Sea Research II*, 99, 184-198.
- Rutberg, R.L., Hemming, S.R. and Goldstein, S.L., 2000, Reduced North Atlantic Deep Water flux to the glacial Southern Ocean inferred from neodymium isotope ratios. *Nature*, 405, 935-938.
- Schlosser, P., Bullister, J.L. and Bayer, R., 1991, Studies of deep water formation and circulation in the Weddell Sea using natural anthropogenic tracers. *Marine Chemistry*, 35, 97-122.
- Singh, S.P., Singh, S.K., Goswami, V., Bhushan, R. and Rai, V.K., 2012, Spatial distribution of dissolved neodymium and ϵ_{Nd} in the Bay of Bengal: Role of particulate matter and mixing of water masses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 94, 38-56.
- Spielhagen, R.F., Baumann, K.-H., Erlenkeuser, H., Nowaczyk, N.R., Norgaard-Pedersen, N., Vogt, C. and Weiel, D., 2004, Arctic Ocean deep-sea record of northern Eurasian ice sheet history. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1455-1483.
- Steiger, R.H. and Jäger, E., 1977, Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359-362.
- Stichel, T., Frank, M., Rickli, J. and Haley, B.A., 2012, The hafnium and neodymium isotope composition of seawater in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 317-318, 282-294.
- Svendsen, J.I., Alexanderson, H., Astakhov, V.I. and etc, 2004, Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1229-1271.
- Tachikawa, K., Jeandel, C. and Roy-Barman, M., 1999, A new approach to the Nd residence time in the ocean: the role of atmospheric inputs. *Earth and Planetary Science Letters*, 170, 433-446.
- Tachikawa, K., Toyofuku, T., Basile-Doelsch, I. and Delhaye, T., 2013, Microscale neodymium distribution in sedimentary planktonic foraminiferal tests and associated mineral phases. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 100, 11-23.
- Tachikawa, K., Piotrowski, A.M. and Bayon, G., 2014, Neodymium associated with foraminiferal carbonate as a recorder of seawater isotopic signatures. *Quaternary Science Reviews*, 88, 1-13.
- van de Flierdt, T. and Frank, M., 2010, Neodymium isotopes in paleoceanography. *Quaternary Science Reviews*, 29, 2439-2441.
- van de Flierdt, T., Robinson, L.F. and Adkins, J.F., 2010, Deep-sea coral aragonite as a recorder for the neodymium isotopic composition of seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 6014-6032.
- Wilson, D.J., Piotrowski, A.M., Galy, A. and McCave, I.N., 2012, A boundary exchange influence on deglacial neodymium isotope records from the deep western Indian Ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 341-344, 35-47.

2014년 6월 30일 접수
 2014년 6월 30일 심사개시
 2014년 8월 1일 채택