BSPN17130 - 007 - 13

네오디뮴 동위원소를 이용한 북극해 퇴적물 기원지 변화 복원: 플라이스토세 중/후기 북극해 빙하 양상에 대한 고찰

The variation in the sediment provenance of the Arctic Ocean: implications for middle to late Pleistocene glacial history in the Arctic Ocean

KOPRI 극지연구소

2018. 11. 15

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

한국연구재단 귀하

본 보고서를 “네오디뮴 동위원소를 이용한 북극해 퇴적물 기원지 변화 복원: 플라이스토세 중/후기 북극해 빙하 양상에 대한 고찰” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

KOPRI
극지연구소

2018. 11. 15

연 구 책 임 자 : 장 광 철

이공분야 학문후속세대양성사업 결과보고서

세부 사업명		박사후국내연수(추경)	과제번호	2017R1A6A3A01076729
연구수행기간		2017.11.1.~2018.10.31.	제출일자	2018.11.15.(목)
연구 과제명	국 문	네오디뮴 동위원소를 이용한 북극해 퇴적물 기원지 변화 복원: 플라이스토세 중/후기 북극해 빙하 양상에 대한 고찰		
	영 문	The variation in the sediment provenance of the Arctic Ocean: implications for middle to late Pleistocene glacial history in the Arctic Ocean		

1. 당초 연구목적 및 배경

- 북극해 지역은 해빙(解氷) 또는 대륙 빙상 등과 같은 ice의 성장 및 후퇴 과정에 따라, ice albedo feedback(Curry et al., 1995), 해양-대기 간의 열교환(Overland and Pease, 1982), 북극해 심층수 형성(Schlosser et al., 1991) 등에 영향을 끼치며 전 지구적 기후 시스템에 매우 중요한 역할을 한다.

- 때문에, 북극해 해빙 역사를 비롯한 고해양환경변화 연구는 전 지구적 기후변화의 역사서를 해석하는 것과 같으며, 지구온난화로 대변되는 현재의 기후 변화를 심도 있게 이해하고 미래 기후 변화를 예측하는데 필수불가결이다.

- 북극해 해빙 또는 대륙 빙상의 성장 및 후퇴 과정은 주로 빙하기원 쇄설성 퇴적물(ice-rafted debris, IRD)의 유입 사건 혹은 부유성 유공충의 산소 동위원소 비의 대비를 통해 주로 복원되었으나(Darby et al., 2006; Knies et al., 2007; Poore et al., 1999; Stein et al., 1994a, 1994b), 이러한 방법들은 상대적으로 근거리에서 일어난 빙하 후퇴 과정만을 복원할 수 있거나, 퇴적속도가 느린 지역에서는 활용이 제한되고 융해된 얼음의 기원지 파악이 불가능해 추가적인 자료 해석을 요구한다는 단점이 있다.

- 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하는 지시자로서 **네오디뮴 동위원소 비**($^{143}Nd/^{144}Nd$, ε_{Nd} ;ε_{Nd}은 표준시료인 CHUR의 $^{143}Nd/^{144}Nd$에 대한 상대값임)를 활용하였다. 이 지시자는 생물활동이나 속성과정, 그리고 풍화과정에서의 동위원소 분별작용이 거의 없어 모암의 동위원소 비가 퇴적물에 그대로 전달되기에 퇴적물 기원지 추적에 매우 용이하다 (Hemming et al., 1998; Jang et al., 2017; Pimentel et al., 2001; Roy et al., 2007). 북극해 퇴적물 기원지 추적은 해당 지역의 해빙 및 대륙 빙상의 성장 및 후퇴 과정과 큰 연관성이 있다.

- 예를 들어, **북아메리카**를 이루는 주요 지괴(ε_{Nd} ~ -13)는 **시베리아** 지역의 지괴(ε_{Nd} ~ -5)에 비해 상대적으로 낮은 네오디뮴 동위원소 비를 가지기에 퇴적물 내의 네오디뮴 동위원소 비를 분석한다면, **두 지역에서 성장한 대륙 빙상의 상대적인 거동을 유추**할 수 있으며, 더불어 오늘날 북극해 지역의 화두 중 하나인, **동시베리아 지역 거대빙하의 형성 시기**에 대한 실마리를 제공할 수 있을 것으로 여겨진다.

– 본 연구에서는, 2015년 「아라온」 호 제 6차 북극해 탐사 동안 북극해 Chukchi Borderland 지역에서 획득한 ARA06C-04JPC 퇴적물 코어를 대상으로 쇄설성 네오디뮴 동위원소 비를 분석하였다 (그림 1). 해당 코어는 북극해 최장 길이 코어로서, 과거 **플라이스토세 중/후기** 북아메리카와 유라시아 대륙 및 동시베리아 대륙붕에 발달된 대륙 빙하의 거동을 복원하는 데 매우 적합하다.

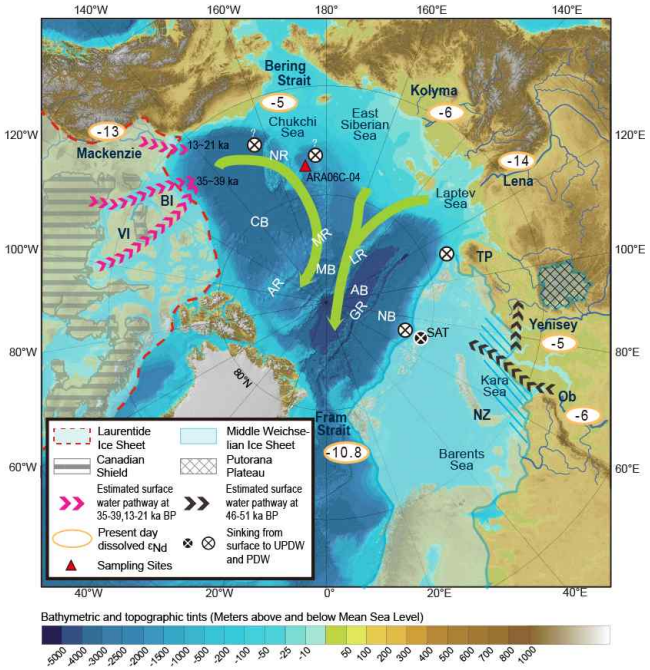

그림 1. 샘플링 지역 (ARA06C-04; 붉은 삼각형). 타원안의 숫자는 각 대륙으로부터 유출되는 강물의 대표적인 ε_{Nd} 값을 나타낸다. 그림 출처: Jang et al. (2013) in *Earth Planet. Sci. Lett.* 를 일부 수정.

2. 당초 연구내용, 범위 및 방법

– 본 연구에서는 과거 플라이스토세 중/후기 빙하기와 간빙기 동안 북극해 주변 대륙에 발달했던 빙하의 확장과 후퇴에 따른 북극해의 기후환경변화를 네오디뮴 동위원소 비를 이용한 해저퇴적물의 기원지 복원을 목표로, 아래와 같은 세부 계획을 당초 수립하였다.

시기	연구목표	평가 착안점
약 1개월	예비 자료 확보 및 시료선별	- 층서 모델 확립 및 XRF 데이터 확보 - 분석 시료 선별
약 3개월	분석 프로토콜 구축	- 자생성분 분리 - 쇄설성분 용해 - 네오디뮴 분리 - 네오디뮴 동위원소 비 분석
약 4개월	북극해 시추 코어의 네오디뮴 동위원소 비 분석	- 북아메리카 및 시베리아 대륙으로 대표되는 기원지 변화 복원
약 4개월	북극해 빙하 양상 유추	- 기원지 변화와 대륙 빙하 발달과의 연관성 평가 - 플라이스토세 중/후기 북극해 주변 대륙 빙하 발달과정 복원 - 논문화 작업

3. 연구내용 및 결과

가. 예비 자료 확보 및 시료 선별

- Line scanning 자료 및 X-ray fluorescence (XRF) 분석 결과, 북극해 퇴적물의 전형적인 층서 구조인 갈색층(Brown or B layer)-회색층(Gray layer)의 교호와 함께 칼슘이 풍부한 흰색-분홍색 빛깔의 탄산염 및 돌로마이트 층(W or PW layer)이 삽입층으로서 반복적으로 관찰되는 것을 확인할 수 있었다 (그림 2).

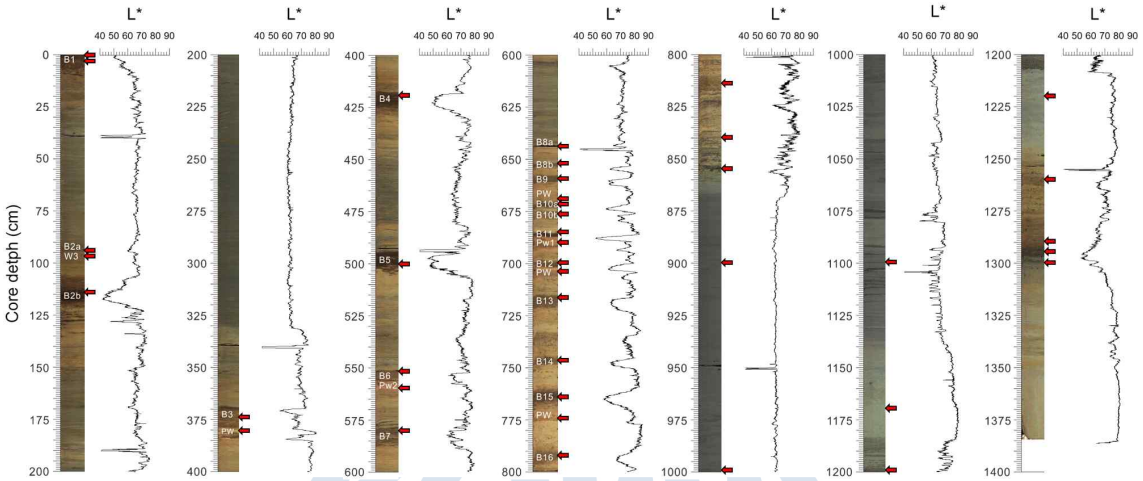

그림 2. ARA06C-04JPC 코어퇴적물의 line scan images 및 L* 값 비교. 갈색층과 회색층의 교호하에 간헐적인 탄산염층이 삽입층으로 나타나는 것이 특징적이다. L*값은 퇴적코어의 밝기도를 나타내며, 북극해 퇴적물 간의 층서를 비교하기에 용이한 지표이다. 본 코어에서는 이러한 결과를 바탕으로 기존 문서들에서 보고된 B1부터 B16층, 그리고 W3, PW층 등을 확정할 수 있었다. B16층 이하에서도 갈색층이 관찰되었으나, 이들에 대한 코드네임 (e.g. B17 등)은 부여하지 않았다. 코어 하부의 매우 두꺼운 회색층이 특징적이다. 붉은 화살표는 선별된 시료 위치를 가리킴.

- 북극해 퇴적물의 갈색층은 일반적으로 간빙기 퇴적물로, 회색층은 빙하기의 것으로 여겨지는데, 이는 간빙기 시기 대륙붕 지역으로부터 유입되는 망간(Mn) 함유량과 관련이 깊다 (Jakobsson et al., 2001; März et al., 2011). 이러한 배경 하에, 본 코어의 갈색층들을 기존 북극해 코어의 퇴적층인 B1-B16층 등과 비견하였고 (그림 2), 이는 다시 연대 모델의 기초자료로서 활용되었다. 함께 관찰되는 W 및 PW층은 역시 기존 층서모델과 비교되었는데 (그림 2), 이 탄산염 층들은 캐나다 군도(Archipelago)지역의 Bank/Victoria 섬에서 유입되는 것으로 알려져 있으며 로렌타이드 유빙에 의한 퇴적의 강력한 증거로서 활용된다 (Adler et al., 2009; Jang et al., 2013; Stein et al., 2010).

- 분석 시료는 갈색층 및 탄산염 층에서 주로 선별되었고, 추가적으로 9미터 이하에서 관찰되는 두터운 회색층에서 역시 시료가 선택되었다 (총 40개). 예상되는 시료의 연대 범위는 약 50만년으로 Marine Isotope Stage (MIS) 13이 이에 해당한다 (그림 3).

나. 분석 프로토콜 구축

- 모든 실험은 극지연구소 내 청정실험실에서 진행되었다. 우선, 0.02M hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid를 활용하여 시료 내 자생(authigenic)성분을 제거하

는 과정을 거쳤고, 이후 남겨진 쇄설성 퇴적물을 Bayon et al. (2009)에 소개된 알칼리 용융법을 이용하여 용해시켰다. Column chromatography법(TRU 및 Ln 레진 사용)을 통해 용해물로부터 순수한 네오디뮴만을 분리하였고 (e.g. Jang et al., 2018), 극지 연구소 내 열이온화질량분석기(TIMS)를 활용하여 네오디뮴 동위원소 비를 성공적으로 분석할 수 있었다. 암석 표준 시료인 BHVO-1과 JB-2를 통해 동일 실험을 진행했을 때의, $^{143}Nd/^{144}Nd$은 각각 0.512980 ± 0.000010 (2σ, n =2), 0.513090 ±0.000009 (2σ, n =2)으로 기존 보고된 문헌 값과 오차범위 내에서 일치했다.

다. 북극해 시추 코어의 네오디뮴 동위원소 비 분석

- ARA06C-04JPC 코어에서 분석된 네오디뮴 동위원소 비는 평균 ε_{Nd} = -9.0 ± 3.1 (1σ)을 나타냈다 (그림 3). 이 값은 북아메리카의 주요 지괴와 시베리아 지역의 주요 지괴에서 분석된 ε_{Nd}의 중간 값으로서, Chukchi Borderland에 위치한 현 코어가 북아메리카 및 척치/시베리아 모두로부터 퇴적물을 공급받고 있음을 의미한다. 최대 -17.4까지 떨어지는 unradiogenic ε_{Nd} 피크들 (여기서는 trough의 의미로 사용)은 대부분 탄산염 층에서 획득된 시료들로서 (그림 3의 노란별 표시), 해당 퇴적물들이 북미 지역에서 유래되었음을 재차 강조하였다. 전반적으로 회색층에서의 ε_{Nd} 값들은 갈색층에 비해 값이 높았으며, 이는 빙하기에 시베리아 지역으로부터 퇴적물 유입이 상대적으로 우세하였음을 시사한다.

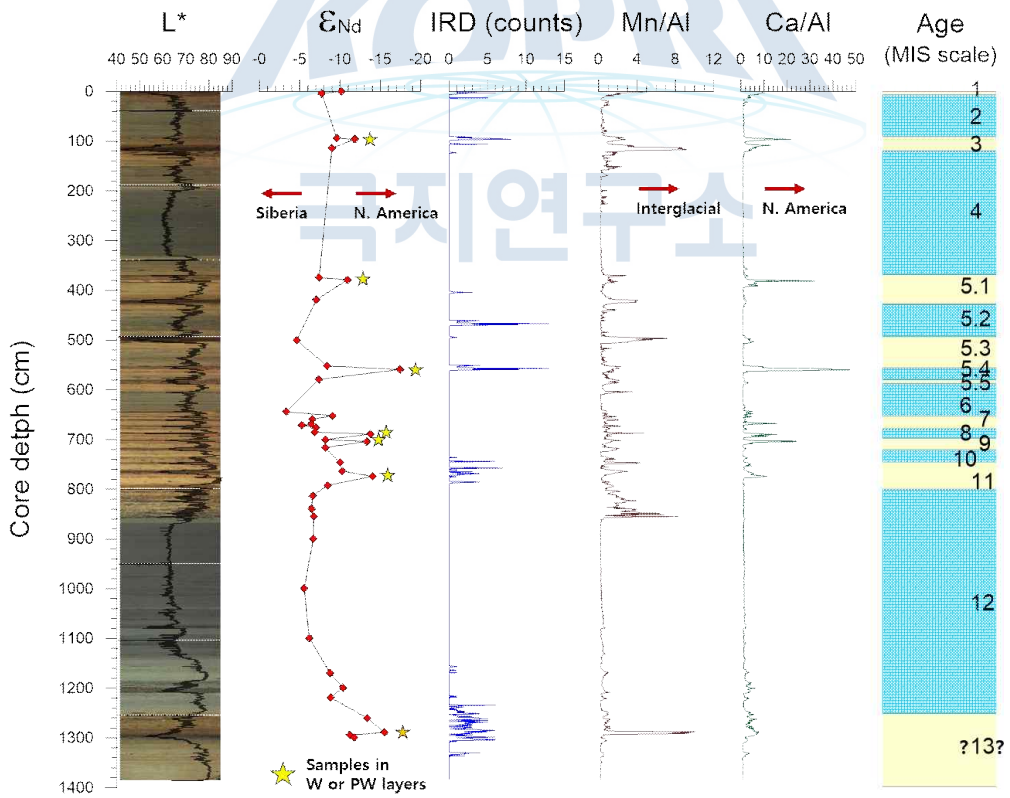

그림 3. 네오디뮴 동위원소 비 분석 결과 (붉은 다이아몬드)와 L* (검은선), IRD counts (파란선) 및 XRF 자료 (Mn/Al : 갈색선, Ca/Al : 녹색선) 간의 비교. ε_{Nd} 값은 -17.4에서 -3.3에 이르기까지 넓은 범위에 걸쳐 나타났으며, 대부분의 unradiogenic peak 들은 탄산염 층에서 관찰됨 (노란별). 단, 주황별은 기존에 보고되지 않은 탄산염층. 층서 모델을 기반으로 한 연대모델이 함께 표기되었음.

라. 북극해 빙하양상 유추

- Chukchi Borderland 지역은 시간에 따른 퇴적물 유입 양상의 변화가 매우 크다. 빙하기에는 상대적으로 척치/동시베리아 지역으로부터의 퇴적물 유입이 원활한 반면, 해빙기 혹은 간빙기 시기는 이벤트적인 로렌타이드 유빙에 의한 퇴적이 특징적이다.

- 탄산염 층 혹은 높은 Ca/Al 비를 보이는 퇴적층에서 획득한 시료는 대부분 낮은 ε_{Nd} 값들을 보였는데 (그림 3), 이는 앞서 밝혔듯이 **로렌타이드 유빙에 의한 퇴적**을 가리킨다 (e.g. Bazhenova et al., 2017; Jang et al. 2013). 이러한 기록은 후기 MIS 5.4 와 후기 MIS 8을 제외하고는 주로 간빙기 시기(**MIS 3, 5.1, 7, 9, 11 및 13**)에만 나타나는데, 이는 당시 로렌타이드 유빙이 Chukchi Borderland 지역까지 충분히 도달할 수 있을 만큼 **해빙 영역이 축소**되었음을 시사한다.

- 반면, 대부분의 빙하기에는 로렌타이드 빙상이 계속적으로 성장하는 과정에서 유빙이 생성되었다 하더라도, 코어 지역까지 도달할 수 없었을 정도로 **영구해빙(perennial sea ice)이 확장**하였을 것으로 여겨진다.

- **후기 MIS 5.4와 8** 시기의 경우는 낮은 ε_{Nd} 값을 고려하였을 때 일반적인 빙하기에 비해 **해빙영역이 축소**되었음을 예상할 수 있는데, 실제 해당 시기 퇴적코어에서 높은 생물교란작용(bioturbation)의 흔적이 관찰된다는 것을 보면(not shown) 퇴적 당시 북극해가 상대적으로 따뜻하였음을 짐작할 수 있다.

- 탄산염 층에서 분석된 ε_{Nd} 결과를 제외하더라도 빙하기 퇴적물의 ε_{Nd} 값은 간빙기의 것에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타내는데 (e.g. **MIS 6 및 12**; 그림 3), 이는 빙하기 시기 북아메리카 퇴적물의 유입이 감소함과 동시에 **척치해 혹은 동시베리아해에 성장한 해빙 혹은 거대빙하가** 코어 지역까지 퇴적물을 운반하며 나타난 결과로 여겨진다. 영구해빙의 존재를 고려하였을 때, 서시베리아 지역으로부터의 퇴적물 유입은 미미했을 것으로 여겨진다.

4. 향후 연구결과의 기대효과 및 활용 방안

- 극지연구소에서 확립된 쇄설성 네오디뮴 동위원소 비 분석 프로토콜은 다양한 연구 지역 (e.g. 인도양)에서 퇴적물 기원지 유추를 토대로 한 고환경 연구 (e.g. 몬순변화)에 적용될 수 있는 여지가 있으며, 기술 홍보를 통해 국내 다양한 연구진들과의 협업을 기대할 수 있음.

- 본 연구에서 복원된 주변 대륙 빙하 및 해빙의 거동 관련 기록은, 현재까지 보고된 서북극해 최장 기록으로서 향후 미래기후 예측 모델링 등에 활용될 가능성이 다분함.

- 서북극해 지역 선도적인 고환경 연구를 통해, 향후 국제공동해저시추프로그램 (2023년 이후 추진예정) 등과 같은 거대지구과학 프로그램에 참여 기회 확대.

- 내년 상반기 저널 투고 및 학회 발표 예정.

5. 참고문헌

Adler, R.E., Polyak, L., Ortiz, J.D., Kaufman, D.S., Channell, J.E., Xuan, C., Grottoli, A.G., Sellén, E. and Crawford, K.A., 2009. Sediment record from the western Arctic Ocean with an improved Late Quaternary age resolution: HOTRAX core HLY0503-8JPC, Mendeleev Ridge. Global and Planetary Change, 68(1), 18-29.

Bayon, G., Barrat, J.A., Etoubleau, J., Benoit, M., Bollinger, C., Révillon, S., 2009a. Determination of rare earth elements, Sc, Y, Zr, Ba, Hf and Th in geological samples by ICP-MS after Tm addition and alkaline fusion. Geostand. Geoanal. Res. 33, 51-62.

Bazhenova, E., Fagel, N. and Stein, R., 2017. North American origin of "pink-white" layers at the Mendeleev Ridge (Arctic Ocean): New insights from lead and neodymium isotope composition of detrital sediment component. Marine Geology, 386, 44-55.

Jakobsson, M., Løvlie, R., Al-Hanbali, H., Arnold, E., Backman, J. and Mörth, M., 2000. Manganese and color cycles in Arctic Ocean sediments constrain Pleistocene chronology. Geology, 28(1), 23-26.

Curry, J.A., Schramm, J.L., Ebert, E.E., 1995. Sea ice-albedo climate feedback mechanism. J. Climate 8, 240-247.

Darby, D.A., Polyak, L., Bauch, H.A., 2006. Past glacial and interglacial conditions in the Arctic Ocean and marginal seas—a review. Prog. Oceanogr. 71, 129-144.

Hemming, S., Broecker, W., Sharp, W., Bond, G., Gwiazda, R., McManus, J., Klas, M., Hajdas, I., 1998. Provenance of Heinrich layers in core V28-82, northeastern Atlantic: $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of ice-rafted hornblende, Pb isotopes in feldspar grains, and Nd-Sr-Pb isotopes in the fine sediment fraction. Earth Planet. Sci. Lett. 164, 317-333.

Jang, K., Han, Y., Huh, Y., Nam, S.-I., Stein, R., Mackensen, A., Matthiessen, J., 2013. Glacial freshwater discharge events recorded by authigenic neodymium isotopes in sediments from the Mendeleev Ridge, western Arctic Ocean. Earth Planet. Sci. Lett. 369-370, 148-157.

Jang, K., Huh, Y., Han, Y., 2017. Authigenic Nd isotope record of North Pacific Intermediate Water formation and boundary exchange on the Bering Slope. Quat. Sci. Rev., 156: 150-163.

Jang, K., Huh, Y. and Han, Y., 2018. Diagenetic overprint on authigenic Nd isotope records: A case study of the Bering Slope. Earth and Planetary Science Letters, 498, 247-256.

KOPRI 극지연구소

Knies, J., Matthiessen, J., Mackensen, A., Stein, R., Vogt, C., Frederichs, T., Nam, S.-I., 2007. Effects of Arctic freshwater forcing on thermohaline circulation during the Pleistocene. Geology 35, 1075-1078.

März, C., Stratmann, A., Matthießen, J., Meinhardt, A.K., Eckert, S., Schnetger, B., Vogt, C., Stein, R. and Brumsack, H.J., 2011. Manganese-rich brown layers in Arctic Ocean sediments: composition, formation mechanisms, and diagenetic overprint. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(23), 7668-7687.

Overland, J.E., Pease, C.H., 1982. Cyclone climatology of the Bering Sea and its relation to sea ice extent. Mon. Weather Rev. 110, 5-13.

Pimentel, M., Dardenne, M., Fuck, R., Viana, M., Junges, S., Fischel, D., Seer, H., Dantas, E., 2001. Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasılia Belt, central Brazil. J. S. Am. Earth Sci. 14, 571-585.

Poore, R.Z., Osterman, L., Curry, W.B., Phillips, R.L., 1999. Late Pleistocene and Holocene meltwater events in the western Arctic Ocean. Geology 27, 759-762.

Roy, M., van de Flierdt, T., Hemming, S.R., Goldstein, S.L., 2007. $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of hornblende grains and bulk Sm/Nd isotopes of circum-Antarctic glacio-marine sediments: Implications for sediment provenance in the southern ocean. Chem. Geol. 244, 507-519.

Stein, R., Nam, S.I.I., Schubert, C., Vogt, C., Futterer, D., Heinemeier, J., 1994a. The Last Deglaciation Event in the Eastern Central Arctic Ocean. Science 264, 692-696.

Stein, R., Schubert, C., Vogt, C., Fütterer, D., 1994b. Stable isotope stratigraphy, sedimentation rates, and salinity changes in the Latest Pleistocene to Holocene eastern central Arctic Ocean. Mar. Geol. 119, 333-355.

Stein, R., Matthiessen, J., Niessen, F., Krylov, A., Nam, S.I. and Bazhenova, E., 2010. Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean). Polarforschung, 79(2), 97-121.

Schlosser, P., Bönisch, G., Rhein, M., Bayer, R., 1991. Reduction of deepwater formation in the Greenland Sea during the 1980s: Evidence from tracer data. Science 251, 1054-1056.

KOPRI 극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

KOPRI
극지연구소