

<Review>
유기질 미화석을 이용한 서북극해 고해양환경
변화 연구에 대한 고찰

김소영 · 남승일*
극지연구소 극지기후연구부

요 약

현재 북극은 지구온난화에 의해 급격한 환경 변화를 겪고 있다. 가장 특징적인 양상은 지난 30년 동안 위성을 통해 관측한 북극해 해빙 면적과 두께가 현저하게 감소하고 있는 현상이다. 북극의 대기-해양 순환의 급격한 변동에 기인한 이러한 해빙 감소 현상은 북극 해양 환경뿐만 아니라 전 지구 기후 변화 기작에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 특히, 서북극해에서의 해빙 분포변화는 Beaufort Gyre와 Transpolar Drift와 같은 주요 해류 순환에 영향을 줌으로써 해빙의 이동량과 방향을 조절할 뿐만 아니라, 북극해에서 북대서양으로 유출되는 해빙 및 담수의 양과 주변 지역의 기후 환경 변화에도 큰 영향을 미친다. 그러나 해양퇴적물을 이용한 서북극해 해빙 환경의 장·단주기 변동에 대한 분석 자료는 아직까지 많이 부족하기 때문에, 기후변화 예측 모델링 연구에 충분히 활용되지 못하고 있다. 과거 육상 기후 환경(예: 과거 식생 분포, 강수량 변화) 및 표층 해수 지표(예: 해양 표층 수온, 염분, 해양 생산성, 해빙 면적)를 반영하는 해양퇴적물내의 식물포자 및 화분, 외편모조류 시스트와 같은 유기질 미화석은 서북극해 고기후 환경 변화 역사를 복원하는데 중요한 환경지시자로 이용될 수 있다. 향후 서북극해 해빙환경 변화에 대한 유기질 미화석 기록을 보다 정밀하고 체계적으로 분석하기 위하여 광범위한 조사 해역을 선정하여 유기질 미화석 분포도를 작성하고 주요 환경지표 자료를 체계적으로 구축하는 작업이 필요하다. 동시에 유기질 미화석 분석을 통해 획득된 고환경 자료를 계량 분석할 수 있는 통계분석 방법의 신뢰도를 높이는 작업도 함께 병행되어야 한다.

주요어: 북극해, 해빙분포, 해양퇴적물, 고환경, 유기질 미화석

So-Young Kim and Seung-II Nam, 2011, A brief review of palynological studies The western Arctic paleoenvironmental changes. Journal of the Geological Society of Korea. v. 47, no. 5, p. 547-560

ABSTRACT: Recently, the Arctic environments have experienced dramatic and rapid changes. The most remarkable feature can be observed in the Arctic sea ice coverage, which shows rapid changes in its extent and thickness according to satellite observation during the last three decades. Recent rapid reduction in the sea ice extent is related to a major shift in the Arctic atmospheric and oceanic circulations, which plays a crucial role in regulating the global earth's climate. Of particular interest is the sea ice changes in the western Arctic, which is considered as a key parameter in past climate changes in Arctic and subarctic regions. They control the intensity and direction of sea ice drifts in the Beaufort Gyre and Transpolar Drift areas, and consequently regulate sea-ice and freshwater exports toward the North Atlantic. However, records of the past sea ice changes in the western Arctic especially on centennial to millennial scales have not been well-computed in climate models due to the rarity of suitable marine sedimentary records. Remnants of microscopic organisms in marine sediments such as spore, pollen and dinoflagellate cysts have been suggested as a useful tool for reconstructing paleoclimate changes in the western Arctic, inferring the past terrestrial environment and sea surface conditions such as sea surface temperature, sea surface salinity and the sea ice extent. In order to provide more complete and spatially extensive records of past sea ice conditions in the western Arctic, the spatial distribution of organic microfossil data sets and the accuracy of the environmental data need to be developed. This will enhance the reliability of the transfer function applied, which has been generally quite limited in the Arctic region.

Key words: Arctic Ocean, sea ice extent, marine sediments, paleoenvironment, palynology

(So-Young Kim and Seung-II Nam, Division of Polar Climate Research, Korea Polar Research Institute, Songdo Techno Park, 7-50, Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea)

* Corresponding author: +82-32-260-6227, E-mail: sinam@kopri.re.kr

1. 서 론

대기 중 온실가스 농도가 급격히 증가함에 따라 지구 기후 환경에 미치는 영향이 가장 먼저 뚜렷하게 나타나는 지역은 북극이다. 극지 증폭(polar amplification) 현상으로 알려진 이러한 북극 환경변화 징후들 중에서 북극해 해빙(sea ice)의 두께와 면적이 급격하게 감소하는 현상에 많은 기후학자들이 주목하고 있다(e.g., Holland and Bitz, 2003; Stroeve *et al.*, 2007; Parkinson and Cavalieri, 2008; Perovich *et al.*, 2008). 북극의 해빙 면적은 계절에 따라 큰 변화폭을 보이며, 1979년 이후 관측된 위성자료에 의하면 매년 9월 중순경에 가장 넓은 면적이 감소한다(ACIA, 2004; Serreze *et al.*, 2007). 1979-2002년 동안 9월의 북극 해빙 면적은 평균 약 8% 감소(Stroeve *et al.*, 2005)한 반면, 1996-2006년 동안 여름철의 해빙 면적은 약 18~22% 급격하게 감소하였다(Stroeve *et al.*, 2007). 특히 지난 2007년 9월 16일에는 가장 넓은 면적인 약 40%의 북극해 얼음이 녹아 사라졌다(Comiso *et al.*, 2008; Stroeve *et al.*, 2008). 북극해 얼음 면적은 2008년 9월 역대 두 번째로 감소하였고, 2009년과 2010년 그리고 2011년 여름까지 지속적인 감소 현상을 보이고 있다. 해빙 감소가 가장 급격히 일어나고 있는 서북극해 해빙 면적과 규모의 장·단주기 변동 기록은 북극해에서 일어났던 과거의 기후 환경 변화를 이해하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다(de Vernal *et al.*, 2005, 2008; Ledu *et al.*, 2008). 그 이유는 서북극해의 표층수 순환시스템이 북극진동(Arctic Oscillation)에 매우 민감하게 반응하므로 북극진동에 의해 표층해류 순환시스템이 바뀌면서 북대서양으로 유출되는 얼음량에 상당한 영향을 미치기 때문이다(Steele and Boyd, 1998; Kwok, 2000). 기존 연구에 따르면, 북극의 해빙 감소 현상은 북대서양/북극진동(North Atlantic/Arctic Oscillation) 지표의 겨울 평균 값이 양의 값을 보이는 시기에 발생하는 경향을 보인다(Hu *et al.*, 2002; Rigor and Wallace, 2004). 또한, 홀로세 동안의 서북극해 유빙(ice-drift) 변화 기록에 따르면, 해빙 기원지가 수천 년을 주기로 바뀌는 양상을 보이는데, 이는 북극진동 주기에 따라 서북극해 해류순환이 변화하기 때문인 것으로 나타났다(Darby *et al.*, 2001; Darby and Bischof, 2004). 이와같이 서북극해 해양 및 해빙 환경이 전

지구 기후변화에 미치는 중요한 역할에도 불구하고, 그 장·단주기적 변동에 대한 분석 자료는 미래 기후변화를 예측하는 모의실험 연구에 충분히 활용되지 못하고 있다.

최근 들어, 과거 해양 환경을 복원하기 위하여 해양퇴적물에 보존된 다양한 종류의 프록시들이 이용되고 있다. 그 예로는 와편모조류 시스템(de Vernal *et al.*, 2005; McKay *et al.*, 2008), 부유성 및 저서성 유공충(이상현 외, 2007; Wollenburg *et al.*, 2004), 유공충을 이용한 안정동위원소(Spielhagen *et al.*, 2004), 해빙과 함께 떠내려 와서 쌓인 퇴적물(Darby *et al.*, 2009), 녹점토(Vogt and Knies, 2008), 인편모충류(Backman *et al.*, 2009)와 구조류가 생산하는 유기 생물지표인 IP25(Andrews *et al.*, 2009) 등이 있다. 이러한 해양 및 육상 고환경 지시자 중 하나인 유기질 미화석은 퇴적물 속에서 화석화되어 남겨진 식물포자 및 화분, 그리고 플랑크톤과 같은 다양한 동·식물의 구성조직이다. 이들은 주로 키틴질(chitin)이나 포분질(sporopollenin) 같은 유기 합성물로 이루어진 불활성 화학성분으로 구성되어 있기 때문에 퇴적환경에서 발생하는 다양한 물리·화학적 자극에 대해 매우 강한 내구성을 갖는다(Taylor, 1987). 또한 유기질 미화석은 그 크기가 미세(5-500 μm)하기 때문에, 적은 양의 시료에서도 비교적 많은 양의 다양한 종이 산출된다. 따라서 통계학적으로 유용한 고환경 자료를 도출시킬 수 있는 프록시로 알려져 있다.

해양퇴적물에서 가장 높은 빈도로 관찰되는 유기질 미화석 중 하나인 식물포자와 화분은 일반적으로 대륙 주변부 해양퇴적물에서 높은 산출량을 보이며, 외해로 나갈수록 급격하게 감소한다. 따라서 해양퇴적물의 화분과 포자의 플럭스(flux)는 풍화작용이나 강수에 의해 육상에서 해양으로 유입되는 물질의 운반기작(transport mechanisms)에 대한 정보를 제공한다. 또한 해양퇴적물 속에서 관찰되는 화분의 산출량과 종조성 자료를 이용하여 과거 육상 식생환경을 복원할 수 있다(e.g., Hooghiemstra and Agwu, 1986; Dupont and Wypytta, 2003). 한편 와편모조류 시스템은 종 다양도가 높고 퇴적물 내에서 보존성이 높아서 고해양 환경 연구에 유용한 프록시로 알려져 있다(de Vernal *et al.*, 2001; Mudie *et al.*, 2001). 기존 연구에 따르면, 고위도 해역의 퇴적물에서 탄산질과 규산질 미화석 기록은 연속적이지 못하고 다

양성도 낮게 나타나는 반면(e.g., Eldholm *et al.*, 1989), 와편모조류 시스트는 빙하기와 간빙기 퇴적물에서 연속적으로 산출되는 동시에 높은 다양성을 보인다(de Vernal and Mudie, 1989). 특히, 대부분의 와편모조류는 광합성 활동을 위해 해양 유광층에 서식하기 때문에 이들의 분포는 표층 수온과 염분뿐만 아니라 해빙 환경에도 민감하다(e.g., Matthiessen *et al.*, 2005; de Vernal and Marret, 2007). 이와 같이, 북극 고환경변화를 이해할 수 있는 중요한 프록시로서 와편모조류 시스트의 유용성이 밝혀짐에 따라, 북극의 현생 퇴적물에서의 와편모조류 군집 분포와 표층 해수 지표 간의 상관성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 동안 북극 해양퇴적물을 이용한 와편모조류 시스트 연구를 살펴보면, 와편모조류의 종 발생 과정, 종 다양성 및 군집 분포가 북극의 해양 표층 수온과 염분, 해빙 분포 면적, 해양생산성 및 영양염과 밀접한 연관성을 나타낸다. 이러한 연구들을 통해 얻은 와편모조류 시스트 분석 자료는 여름철 표층 수온과 염분, 해빙 분포 면적과 지속 기간 등 과거 북극의 해양 표층 환경을 복원하는데 중요한 정보가 되었다(e.g., McKay *et al.*, 2008). 그러나 아직까지도 해양퇴적물을 이용한 북극해 고해양 환경 연구는 육상 고환경 연구와 비교할 때 여전히 부족한 실정이다. 특히 서북극 해빙과 관련된 해양 환경 변화를 보다 장기적이고 고해상으로 복원할 수 있는 해양퇴적물 기록이 절실히 요구된다(Kaufman *et al.*, 2004).

본 논문은 지금까지 수행된 유기질 미화석을 이용한 서북극해 고기후 환경 연구결과를 살펴보고, 유기질 미화석 분석 자료가 북극 해빙 환경을 비롯한 다양한 고기후·고해양 연구에 어떻게 이용되는지를 고찰하고자 한다.

2. 주변 환경

5대양 중 가장 작은 대양인 북극해는 전체 면적의 52.9%가 수심이 매우 얇은 대륙붕으로 둘러 싸여있다(Jacobsson, 2002). 대규모 빙하의 작용에 의해 형성된 북극해의 대륙붕 환경은 북극해 전체의 지질·물리·화학·생물학적 과정에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 북극해는 북극해 중앙을 가로지르는 로모노소프(Lomonosov) 해령을 중심으로 분리된 두

개의 심해 분지, 즉 유라시아(Eurasia) 분지와 아메라시아(Amerasia) 분지에 의해 동북극해와 서북극해로 구분된다. 특히 서북극해는 알파(Alpha)-멘델레프(Mendeleev) 해령을 중심으로 나뉘는 캐나다(Canadia) 분지와 마카로프(Makarov) 분지, 동 시베리아해와 척치해 및 캐나다 북극해 제도(Canadian Arctic Archipelago)를 포함한다(그림 1). 서북극해에서는 배링해협(수심 약 50 m)을 통해 북태평양 수괴와 제한적인 해수교환이 이루어진다. 배링해협을 통해 서북극해로 유입되는 비교적 따뜻하고 염분이 낮은 북태평양 표층수는 저염분의 표층수 및 해빙과 함께 서북극해 해양환경에 중요한 역할을 한다. 또한 북태평양과 서북극해 간의 제한적인 해수교환은 북극해의 중층수 순환에도 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Jones, 2001).

서북극해의 수층(water column) 구조는 차갑고 염분이 낮은 혼합층(0-30 m)과 역수온약층(inverse thermocline)의 특성을 보이는 강한 염분약층(30-200 m), 비교적 따뜻한 대서양수층(200-800 m)과 심층수괴(800 m 이하)로 구성된다(McKay *et al.*, 2008). 염분도가 비교적 낮은 표층수는 주변 대륙의 대규모 강으로부터 유입되는 담수와 여름철 해빙이 녹으면서 방출되는 담수의 영향을 크게 받는다(Aagaard *et al.*, 1981). 서북극해 염분약층 내 아표층수는 해빙이 형성될 때 방출되는 해수와 북태평양 및 북대서양 기원의 해수가 혼합되어 형성된다(McKay *et al.*, 2008). 수심이 얇고, 표층수 염분이 낮은 대륙붕 환경에서 주로 분포하는 해빙은 서북극해에서 바람과 표층해류 운동에 따라 크게 두 가지 이동 경로를 갖는다. 하나는 캐나다 분지를 중심으로 시계방향으로 움직이는 Beaufort Gyre이고, 다른 하나는 동 시베리아 해안에서부터 북극 중앙해역을 가로질러 북대서양으로 향하는 Transpolar Drift이다(그림 1). 유빙(drift ice)의 속도는 Beaufort Gyre와 비교했을 때 Transpolar Drift에서 상대적으로 더 빠르게 나타나는 경향을 보인다. 이러한 해류 순환 시스템은 북극 진동과도 밀접한 관계가 있다. 즉, 음의 북극진동 기간에는 Beaufort Gyre가 확장되면서 표층수 순환에 영향을 주며, 양의 북극진동 기간에는 Beaufort Gyre가 수축되면서 Transpolar Drift가 서북극해의 동쪽으로 확장된다(McKay *et al.*, 2008). 이러한 해류순환의 변동은 서북극 척치해의 해빙 분포 변화뿐만

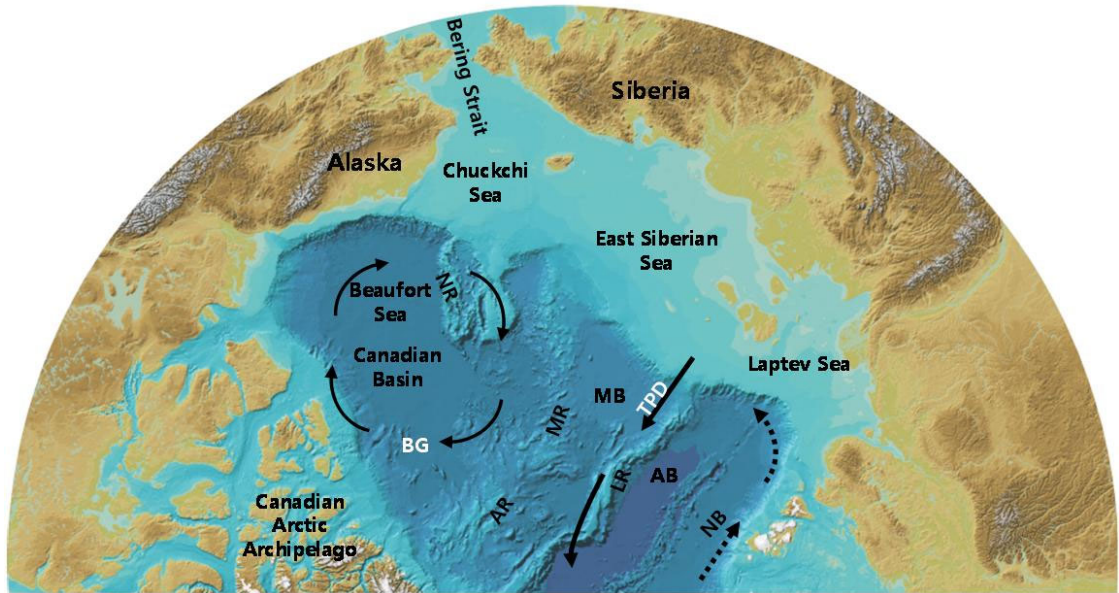


Fig. 1. Map of the Arctic Ocean (from The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean): LR, MR, AR, and NR are Lomonosov, Mendeleev, Alpha, and Northwind ridges, respectively. MB, AB and NB are Makarov, Amundsen and Nansen Basins, respectively. Arrows show major circulation features: Beaufort Gyre (BG), Transpolar Drift (TPD), and Atlantic water inflow (dashed arrows for subsurface current).

아니라 저염분의 표층수가 Transpolar Drift에 의해 북대서양으로 유출되는데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Comiso, 2002). 북극해에서 북대서양으로 유출되는 저염의 표층수량의 변화는 북대서양 심층수 형성뿐 아니라 전 지구적인 열염분순환 시스템에도 중요한 영향을 미친다.

3. 서북극 주변 육상 고환경 복원 연구

해양퇴적물 내 식물포자 및 화분 그리고 재동된 육상기원 유기질 미화석의 총 농도는 인접 육상으로부터 해양으로 유입되는 타지성 물질에 대한 추적자로 이용되어 왔다. 특히, 식물포자 및 화분과 와편모조류 시스트 간의 상대적 비율(spore · pollen/dinoflagellate cysts)은 유기물 플릭스의 기원을 추정하는데 이용되며, 비율 값이 0에 가까울수록 유기물의 기원지가 육지와 멀리 떨어진 것으로 해석된다(de Vernal and Giroux, 1991). 이러한 해양퇴적물 속의 식물 파편이나 화분 화석은 서북극 해역 주변의 과거 육상 기후환경 변화에 대한 중요한 정보를 제공한다. 서북극해 동쪽의 척치해 대륙붕에 인접한

알래스카(Alaska) 해역에서 획득한 퇴적물 자료(McKay *et al.*, 2008)에 따르면, 화분 및 육상기원 유기질 미화석은 하부 퇴적층(Unit 2)에서 매우 높은 산출량을 보이다가, 홀로세에 해당하는 상부 퇴적층에서 지속적으로 감소한다(그림 2). 이와 같이 화분 및 육상기원 유기질 미화석 산출량이 지속적으로 감소한 것은 홀로세 전기와 중기 동안 서북극해로 유입되는 육상 기원 유기물질의 양이 상당히 감소하였음을 의미한다. 지난 빙하기 이후 서북극해 퇴적물 내 존재하는 육상기원 유기물질의 양이 감소하는 경향은 랍테프해(Laptev Sea; Mueller-Lupp *et al.*, 2000)와 카라해(Kara Sea; Kang *et al.*, 2007)에서도 보고된 바 있다. 이러한 결과는, 홀로세 전기 해수면이 상승하면서 해양에서 육상기원 유기물질이 퇴적되는 위치가 육지 쪽으로 이동하였기 때문이다.

비록 화분 기록이 북극 지역의 과거 식생분포나 육상 환경에 대한 중요한 정보를 제공하지만, 고환경 자료를 제공할 수 있는 퇴적물 기록은 마지막 최대 빙하기의 침식작용으로 인해 잘 보존되어 있지 않기 때문에 홀로세 이전 시기에 대한 자료는 현재 까지도 매우 적다(이상현 외, 2007; e.g., Fyles *et al.*,

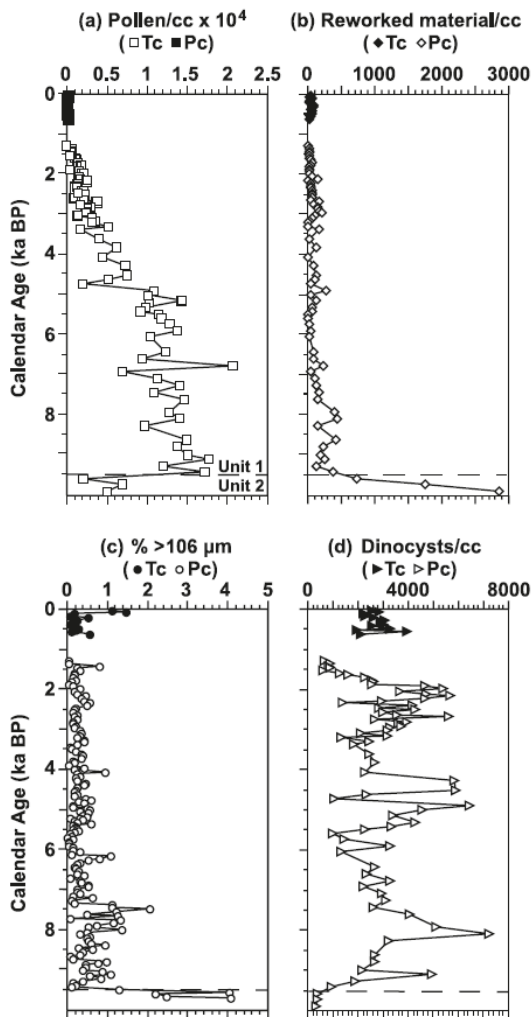


Fig. 2. Down core concentrations of (a) pollen, (b) reworked material, (c) coarse-grained material (i.e., >106 μm size fraction), and (d) dinocysts. The horizontal broken line indicates the contact between units 1 and 2. Trigger core (Tc) data are shown by the solid symbols and piston core (Pc) data by the open symbols (From McKay *et al.*, 2008).

1994; Andrei *et al.*, 2003). 현재 북극 육상 환경에서 식생 분포선의 위치는 여름철 7°C 평균 등온선에 의해 결정되는데, 이 식생 분포선 위치의 과거 변동기록은 해빙환경을 비롯한 북극 고기후를 이해하는데 중요하다. 현재, 영구 해빙(perennial sea ice) 분포선에 인접한 서북극해 연안에는 식생이 전혀 존재하지 않으며, 삼림은 계절적으로 얼음이 형성되는 지역의 남쪽에서만 분포하는 것으로 알려져 있다(Polyak

et al., 2010). 그러나 척치해 대륙붕 남서 해역에서 획득한 코어퇴적물의 화분 분석 자료에 따르면, 과거 플라이오세(약 5~2 Ma) 동안 북극은 현재보다 훨씬 따뜻한 기후였으며, 서북극해 인근 연안 육상에는 다양한 식생의 삼림(e.g., 전나무, 시베리아 소나무, 박달나무, 침엽수 등)이 분포했던 것으로 보인다(Gusev *et al.*, 2009). 이와 유사한 북극육상의 온난 기후 기록이, 알래스카 지역 구빅층(Gubik Formation)에서 약 3~2 Ma 시기에(Brigham-Grette and Carter, 1992), 그리고 추코트카(Chukotka) 반도 페초브스카야 시대(Pestovskaya Suite)의 플라이오세~플라이스토세 초기의 퇴적물에서도 발견되었다(Petrov, 1966). 이후, 서북극해 주변 육상은 툰드라에서 툰드라 삼림 환경으로 변했으며, 약 2.5~2 Ma 동안 현재와 같이 툰드라가 광범위하게 분포하는 식생환경으로 완전히 변화되었다(Brigham-Grette and Carter, 1992). Gusev *et al.* (2009)의 포자와 화분 분석 자료에 따르면, 서북극해 연안의 육상기후의 온난화 양상은 홀로세 초기에서 후기 동안 점진적으로 쇠퇴하였던 것으로 나타났다(그림 3).

4. 서북극해 고해양 환경변화 복원 연구

북극해 해역의 해저퇴적물에는 과거부터 현재까지 해빙환경 변화에 대한 정보가 광범위하고 정밀하게 기록되어 있는 것으로 알려져 있다(Polyak *et al.*, 2010). 이러한 북극해 저층퇴적물 속의 외편모조류 시스템은 다양한 물리·화학·생물적 작용을 통해 해빙환경 변화를 직·간접적으로 반영하는 중요한 환경변화 프록시이다(de Vernal *et al.*, 2005 and reference therein). 외편모조류 시스템은 해빙 환경에 매우 민감하여 다양한 통계 분석 방법을 통해, 과거 해빙의 면적과 시기 그리고 계절적인 해빙 분포 기간을 유추하는데 이용될 수 있다(e.g., de Vernal *et al.*, 2005, 2008; Stickley *et al.*, 2009; Caissie *et al.*, 2010).

외편모조류 시스템을 이용하여 고해양 환경을 복원하기 위해서는, 일차적으로 해양표층환경 지표와 외편모조류 시스템 분포 간의 상관성을 계량화하는 작업이 선행되어야 한다. 외편모조류 시스템 분석 자료를 이용한 계량적 접근 연구(quantitative approach)는 초기에는 주로 문헌자료에 의존하여 수행되었다. 초기에 수행되었던 연구 결과들을 통해

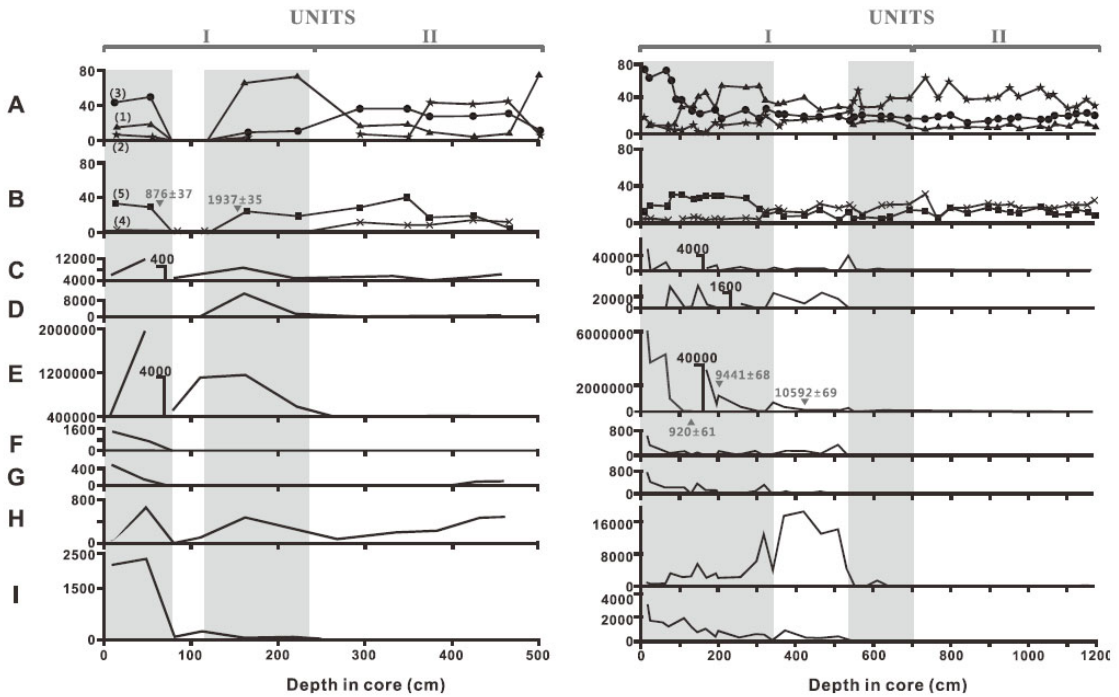


Fig. 3. Distribution of biostratigraphic data in Borehole 1 and 2: A~B - spores and pollen (%): 1 - herbs, 2 - gymnosperms, 3 - spores, 4 - small leaved trees, 5 - small-leaved shrubs; C~E - diatoms (number/g sediment): C - redeposited, D - freshwater, E - marine; F~I - aquatic palynomorphs: F - acritarchs, G - organic linings of foraminifers, H - green algae, I - dinoflagellate cysts. ¹⁴C ages are indicated with triangles. Vertical shadings show subunits in Unit I (From Gusev *et al.*, 2009).

와편모조류 시스트 자료로부터 겨울철과 여름철의 표층 수온 및 염분에 대한 회귀 분석 값 등이 제시되었다(Edwards *et al.*, 1991; Mudie, 1992). 1990년 후반부터는 와편모조류 시스트 분석을 위한 실험실 전처리 과정 및 종 동정에 대한 표준화 작업을 진행하는 동시에 방대한 양의 데이터베이스를 구축하였다(e.g., de Vernal *et al.*, 1997). 이를 바탕으로 여러 가지 해양환경지표와 와편모조류 시스트 분포 간의 연관성을 동시에 계량화하는 Best Analogue 방법(Guiot, 1990)이 개발되었다. 그 결과, 와편모조류 시스트 자료로부터 지난 제 4기 동안 북대서양(e.g., de Vernal *et al.*, 2001; Levac *et al.*, 2001), 북극과 아북극해(e.g., de Vernal *et al.*, 2005), 북태평양 북동해역(e.g., Marret *et al.*, 2001a) 및 남반구 해역(e.g., Marret *et al.*, 2001b)의 해양 표층 수온과 염분 및 해빙 분포 변화를 계량적으로 복원하였다. 최근 와편모조류 시스트를 이용한 서북극해의 과거 해양표층환경 복원 연구는 주로 Modern Analogue Technique (MAT; Guiot

and de Vernal, 2007)과 3Pbase software (Guiot and Goeury, 1996)를 통해 수행되고 있다. 와편모조류 시스트의 현생종과 화석종 분포 간의 유사성에 기반을 둔 MAT는 다수의 해양환경 지표를 동시에 복원하는 가장 신뢰도 높은 통계 분석 프로그램 중 하나로 평가된다(Guiot and de Vernal, 2007).

de Vernal *et al.* (2005)은 서북극해 1,054 정점에서 획득한 표층퇴적물의 와편모조류 시스트 자료와 해빙 분포 자료를 이용하여 와편모조류 시스트 종 조성과 해빙 분포 간의 상관성에 대한 통계분석을 수행하였다(그림 4). 그 결과를 바탕으로, 척치해 대륙붕에서 획득된 두 개의 코어퇴적물 시료에서 추출한 와편모조류 시스트를 프록시로 이용하여 서북극해 해빙 환경 변화를 복원하였다. 연구 결과에 의하면, 코어퇴적물의 와편모조류 시스트 군집은 *O. centrocarpum*과 *P. dalei* 종이 우점한다. 한편, *O. centrocarpum*은 코어 상부로 갈수록 감소하는 반면, *P. dalei*은 증가하는 특징을 보인다(그림 5a). 특히 와편

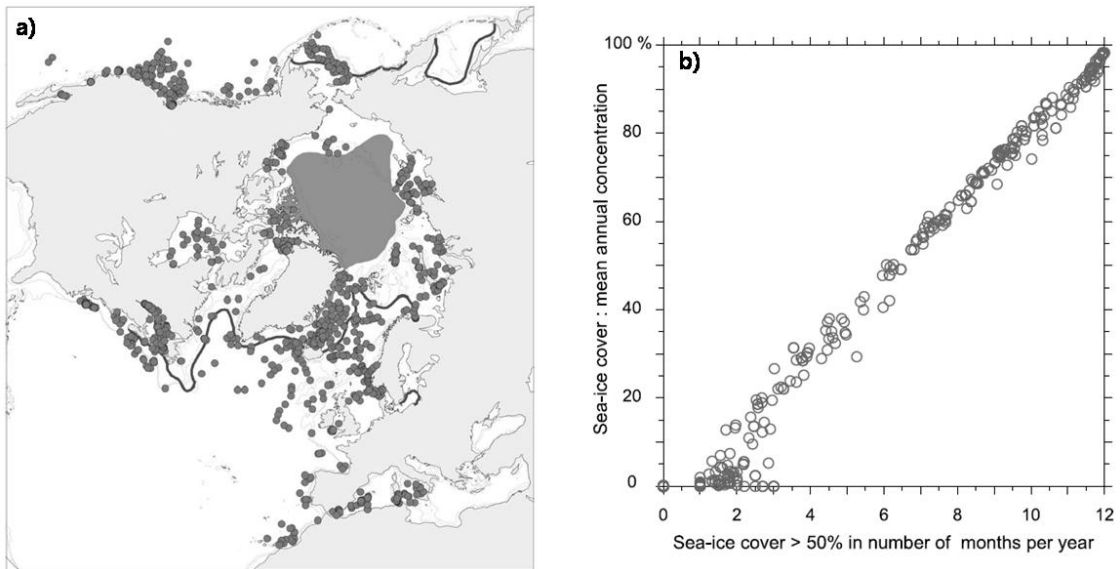


Fig. 4. a) Location of surface sediment samples used to develop the reference dinoflagellate cyst database (n=1054). The database includes assemblages for 516 sites characterized by seasonal sea ice, about half of them corresponding to more than 6 months per year of sea ice. b) Sea ice cover data in the reference database used for estimating sea surface condition from dinoflagellate cyst assemblages. The number of sites is 1054, many of which from arctic and subarctic seas being representative of dense sea ice cover (From de Vernal *et al.*, 2005)

모조류 시스템 자료와 MAT 분석을 이용하여 해수 표층 환경 지표에 대한 계량적 복원 작업을 수행한 결과, 과거 서북극해의 표층 수온은 4~7°C 범위 그리고 염분은 25~30‰ 범위였던 것으로 추정된다. 또한 홀로세 동안 서북극 적치해 주변은 계절적으로 해빙이 존재하지는 않았으며, 해빙 분포 기간도 년 중 2~12개월의 범위로 상당한 변동 폭을 보인다(그림 5b).

McKay *et al.* (2008)은 북반구 고위도 해역(북대서양, 북태평양, 북극해 및 아북극해)의 외편모조류 시스템 표층 분포자료와 World Ocean Atlas (<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/woa01dat.html>) 및 National Snow and Ice Data Center (http://nsidc.org/data/docs/noaa/g00799_arctic_southern_sea_ice)에서 제공되는 해수·해빙 환경지표 자료를 이용하여 홀로세 동안의 서북극해 해양 표층환경 변화를 고해상으로 복원한 바 있다. 연구결과에 의하면, 알라스카 적치해 동부의 코어퇴적물에서는 일반적으로 적치해와 북극 및 아북극해 현생 퇴적물에서 흔히 관찰되는 외편모조류 시스템 종(e.g., *P. dalei*, *Brigantidinium* spp., *O. centrocarpum*, *Islandinium*

minutum)이 전체의 90%를 차지하는 것으로 나타났다(그림 6). 코어퇴적물 전체에서 뚜렷하게 관찰되는 이들 주요 종들의 상대적 산출비율의 변화는 홀로세 동안 연구해역의 표층환경이 상당한 변화를 겪었음을 반영한다. 특히, 약 5,500년 전 낮은 수온 환경에서 분포하는 *I. minutum* 종이 감소하는 반면, 상대적으로 높은 수온 환경에서 분포하는 *P. dalei* 종이 증가하는 양상은 홀로세 중기에 들어서면서 적치해 동부의 표층수 수온이 증가하였음을 나타낸다(그림 7). 또한, 홀로세 동안 서북극 적치해 대륙붕 해역의 해빙 형성 기간은 연중 5.5~9개월, 여름철 표층 염분은 22~30‰, 여름 표층 수온은 3~7.5°C 범위로 추정되었다. 특징적으로, 약 7,500, 5,000과 2,000년 전에 해빙 면적이 감소하고, 표층 염분과 수온이 증가한 기록이 관찰되었는데, 이는 서북극해 상층부의 강한 수괴 혼합 작용과 연관이 있는 것으로 추정된다(그림 8).

5. 향후 서북극해 기후환경변화 연구

북극은 지난 30여 년 동안 급격한 환경 변화를 겪

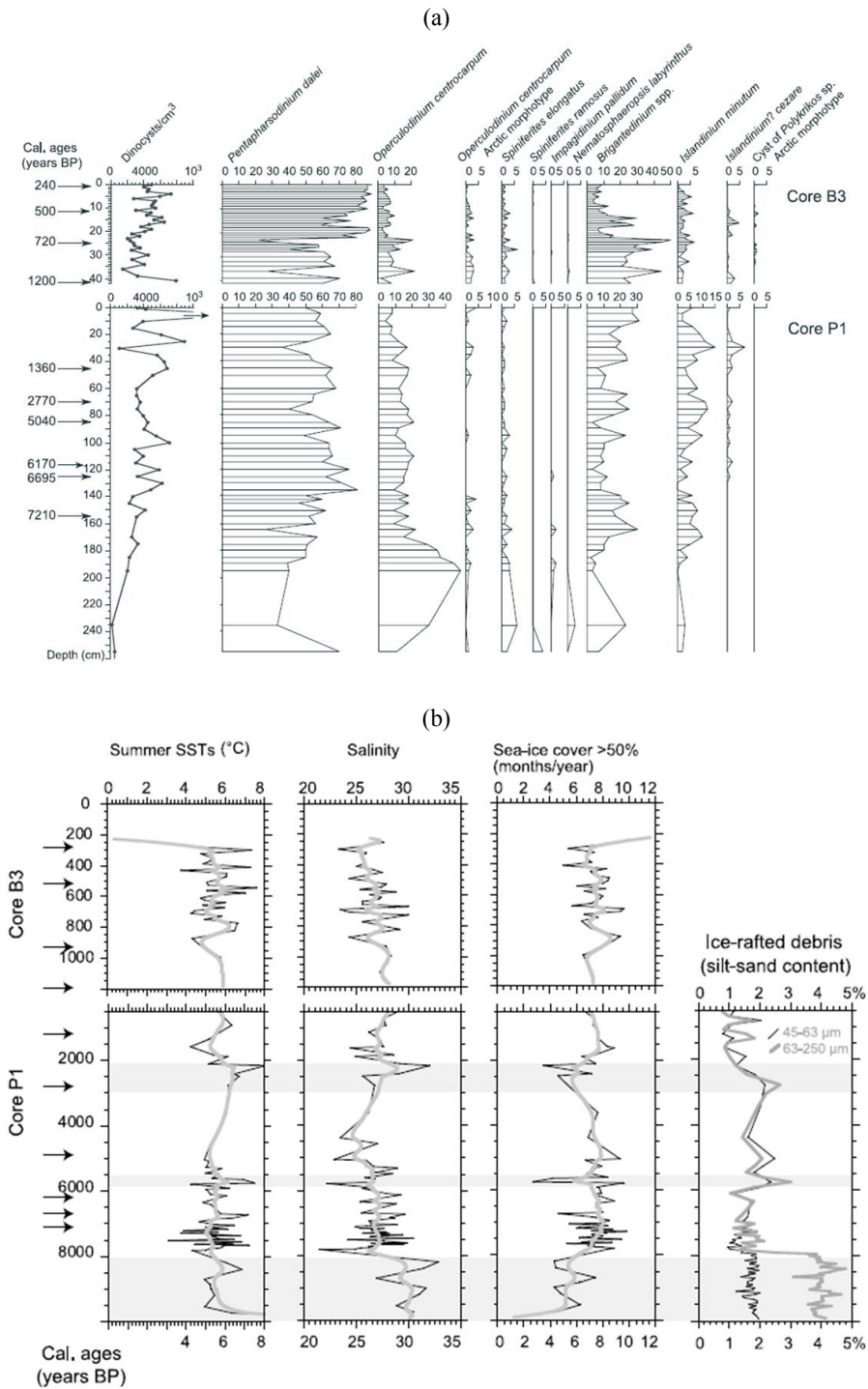


Fig. 5. a) Diagram of dinoflagellate cyst concentrations and percentages in sediment cores from the Chukchi Sea shelf. b) Estimates of sea surface conditions based on dinoflagellate cyst assemblages. At the right the silt and sand fraction in percentage against the dry weight is shown as a complementary indication of summer ice melt. The vertical scale is the calibrated age, as interpolated from age control points shown by arrows for the interval spanning the last 7,200 years (From de Vernal *et al.*, 2005)

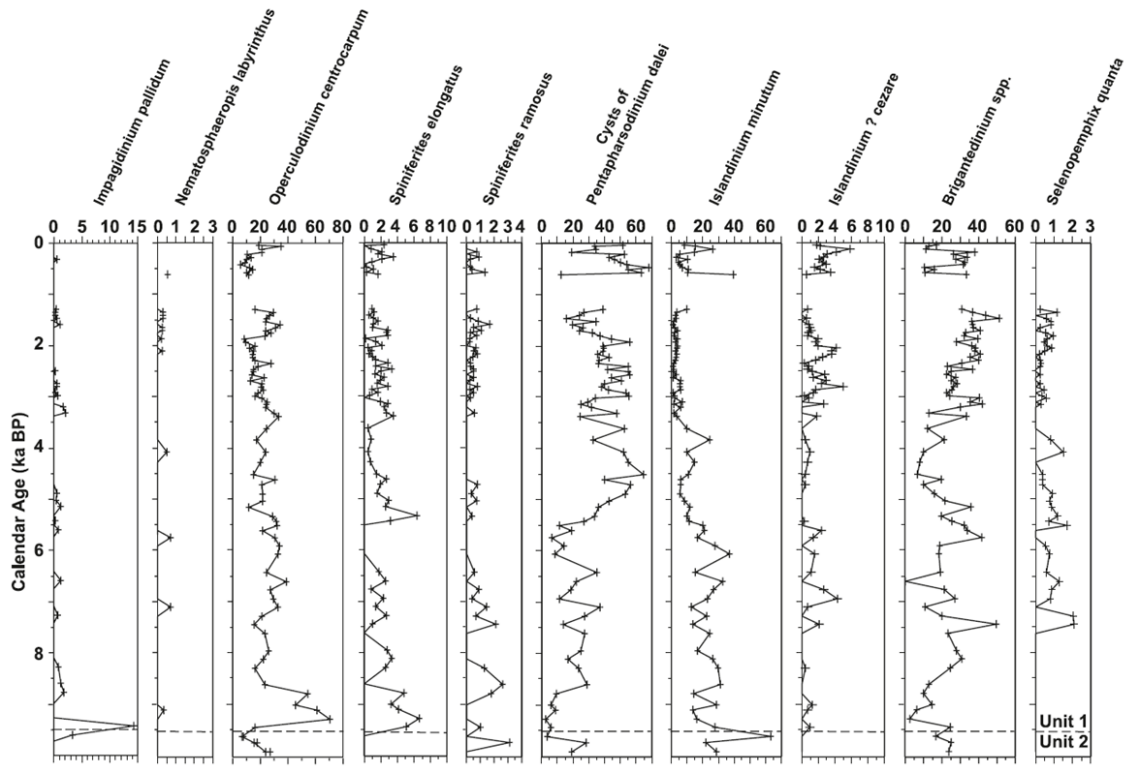


Fig. 6. Percentages of dinoflagellate cyst taxa from the eastern Chukchi Sea. The horizontal broken line indicates the contact between units 1 and 2 (From McKay *et al.*, 2008)

어 왔으며(e.g., Serreze *et al.*, 2000; Comiso and Parkinson, 2004), 특히 해빙 면적과 두께의 감소는 현재 매우 빠른 속도로 진행되고 있다(Comiso, 2002; Rigor and Wallace, 2004; Meier *et al.*, 2005; Comiso *et al.*, 2008). 그러나 이러한 최근의 급격한 북극 환경 변화가 자연적 발생에 따른 결과인지, 인간 활동에 의한 결과인지에 대한 논쟁은 과학계 내에서 아직까지 계속되고 있다. 지난 70년 대 후기에 있었던 북극의 대기와 해양 순환의 대규모 변동과 해빙 감소는 북극 진동 양상기와 시기적으로 일치한다(Walsh *et al.*, 1996; Thompson and Wallace, 1998). 이러한 현상은 당시 서북극 부포트(Beaufort) 해역에 형성되는 북극 고기압(Arctic High)이 약화되면서 Beaufort Gyre가 수축되고, Transpolar Drift가 시베리아 대륙에서 북극해 중앙역으로 확장·이동한 것과 밀접한 연관이 있는 것으로 나타났다(Polyak *et al.*, 2010). 이는 상대적으로 오래되고 두꺼운 얼음이 북극에서 빠져나가는 동시에, 대기 순환이 강화되어 북극으로

따뜻한 공기가 유입됨으로써 북극의 얼음이 유실 현상이 가속화 된 결과로 해석될 수 있다(Meier *et al.*, 2005). 그러나 1990년 후반에 북극진동이 중립 모드로 되돌아 간 후에도 북극의 해빙은 지속적으로 급감하였다. 따라서 현재의 북극의 얼음 유실 현상은 자연적인 온난화 과정과 함께 인간 활동에 의한 표층 대기 온도의 증가도 동시에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다(Overland and Wang, 2005). 이러한 북극의 급격한 기후 변화에 대한 인간 활동의 영향과 기작을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 이 해역에서 시추된 퇴적물 코어에 기록된 과거 해양·해빙 환경 변화 역사를 고해상으로 복원하는 작업이 필요하다. 또한 홀로세 동안 서북극 부포트해와 베핀 만(Baffin Bay) 북부의 Lancaster Sound 해역의 퇴적물에는 수천 년 주기의 급격한 서북극해 환경변화 사건이 기록되어 있기 때문에(Rochon *et al.*, 2006; Ledu *et al.*, 2008), 향후 이들 주변 해역의 퇴적물에 대한 추가적인 후속 연구가 필요하다. 특히 화분과 와편모조류

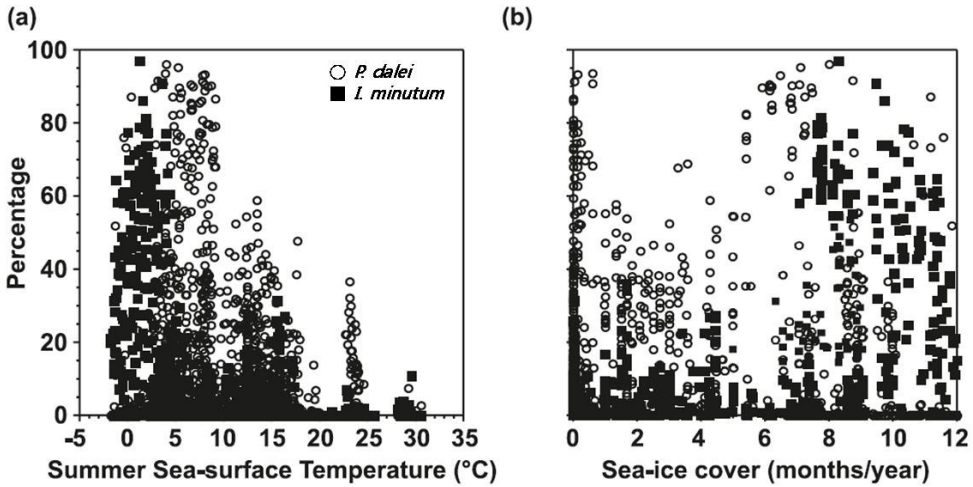


Fig. 7. Relationship between the percentages of *Pentapharsodinium dalei* and *Islandinium minutum* and (a) summer sea-surface temperature and (b) sea-ice cover at the 1189 modern sites in the reference dinoflagellate cyst data base (From McKay *et al.*, 2008).

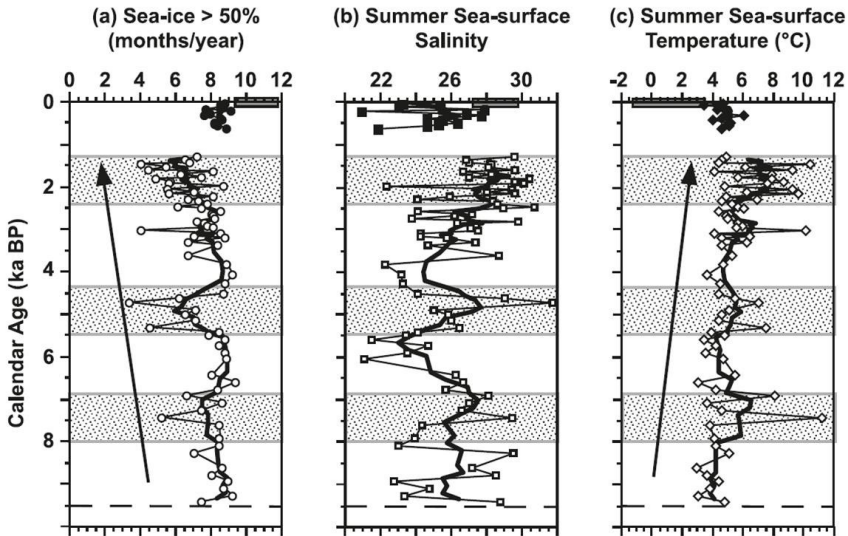


Fig. 8. Reconstructions of Holocene (a) sea-ice cover, (b) summer sea-surface salinity (SSS), and (c) summer sea-surface temperature (SST) for cores from the eastern Chukchi Sea. Trigger core data are shown by the solid symbols and piston core data by the open symbols. Modern sea surface conditions are shown by the thick bar on the x axis (modern range). The shaded zones indicate times of relatively low sea ice, higher summer SSS, and high SST (From McKay *et al.*, 2008).

시스트와 같은 해빙환경에 민감하게 반응하는 육상·해양 기원의 유기질 미화석 연구는 검증된 통계 분석 작업과 병행할 때, 과거의 해빙 면적과 계절에 따른 해빙 분포 기간 등을 추정하는데 중요한 역할을 할 수 있다. 이를 위해서는 서북극해에서의 유기질 미화석 데이터 세트와 환경 지표 자료를 충분히 확

보하는 작업이 필요하다.

6. 결론

북극해의 가장 뚜렷한 환경변화의 특징 중 하나인 해빙은 계절에 따라 수축과 확장을 반복하면서

북반구 고위도 지역의 대기와 해양 시스템 상호작용에 영향을 미치는 중요한 기후조절 요인이다. 특히 빙하와 해빙 같은 북극의 얼음 환경변화는 서북극해에서 해양-대기-육상 환경과 밀접한 상호작용 아래에 있다. 서북극 해역은 북극 고기압(Arctic High)과 아이슬란드 저기압(Icelandic Low) 간의 기압차 변동으로 발생하는 북극진동의 직접적인 영향을 받기 때문에, 기후학적으로 가장 중요한 연구 지역 중 하나이다. 따라서 전 지구적 기후환경 변화 기작을 이해하기 위해서는 과거 서북극해 얼음 분포, 면적, 규모 및 형성 시기에 대한 고해상도의 분석 자료의 확보가 반드시 필요하다.

해양퇴적물 속의 육상·해양 기원 유기질 미화석 기록은 해빙을 비롯한 과거 북극의 해양환경 변화에 대한 정보를 제공하는 중요한 고기후 지시자로서 활용될 수 있다. 따라서 현재 진행되고 있는 지구온난화에 의한 기후변화를 이해하고 미래 기후변화 예측이나 기후모델링 연구에 필요한 자료로서 그 연구가치가 크다. 향후 서북극해에서 시추된 퇴적물에 보존되어 있는 유기질 미화석 기록 및 환경 지표에 대한 표준화된 자료의 확보와 함께 신뢰도 높은 통계 분석 방법의 개발이 지속적으로 수행된다면, 서북극해의 과거 해빙·해양 환경의 변화양상을 보다 고해상도로 추적할 수 있을 것이다. 또한 이를 통해 지구 온난화에 의한 북극의 급격한 기후 변화가 전 지구 기후환경에 미치는 영향과 그 기작을 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 교육과학부의 지원을 받아 극지연구소에서 수행 중인 K-Polar 프로그램인 '서북극해 지구 온난화 규명을 위한 노스윈드-덴델레프해령 해역의 고해양환경변화 정밀복원연구' 연구사업(PP11070)의 지원을 받아 수행되었다. 본 논문을 심사해주시고 좋은 제언을 해주신 두 분의 심사위원께 감사드린다.

참고문헌

이상현, 남승일, Stein, R., 2007, 북극해 스발바드 북부 대륙붕의 홀로세 퇴적물에 함유된 유기질 미화석 연구. 지질학회지, 43(3), 297-310.

- Aagaard, K., Coachman, L.K., and Carmack, E., 1981, On the halocline in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Research*, 28, 529-545.
- Andrei, A., Andreev, A.A., Tarasov, P.E., Siebert, C., Ebel, T., Klimanov, V.A., Melles, M., Bobrov, A.A., Dereviagin, A. Yu., Lubinski, D.J., Hubberten, H.W., 2003, Late Pleistocene and Holocene vegetation and climate on the northern Taymyr Peninsula, Arctic Russia. *Boreas*, 32, 485-505.
- Andrews, J.T., Darby, D., Eberl, D., Jennings, A.E., Moros, M., Ogilvie, A., 2009, A robust, multisite Holocene history of drift ice off northern Iceland: implications for North Atlantic climate. *The Holocene*, 19, 71-78.
- Arctic Climate Impact Assessment (ACIA), 2004, *Impact of a warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, 140 p.
- Backman, J., Fornaciari, E., Rio, D., 2009, Biochronology and paleoceanography of the late Pleistocene and Holocene calcareous nannofossil abundances across the Arctic Basin. *Marine Micropaleontology*, 72, 86-98.
- Brigham-Grette, J., Carter, L.D., 1992, Pliocene marine transgressions of northern Alaska: circumarctic correlations and paleoclimatic interpretations. *Arctic*, 45, 74-89.
- Caissie, B.E., Brigham-Grette, J., Lawrence, K., Herbert, T., Cook, M.S., 2010, Last Glacial Maximum to Holocene sea surface conditions at Umnak Plateau, Bering Sea, as inferred from diatom, alkenone, and stable isotope records. *Paleoceanography*, 25, PA1206.
- Comiso, J.C., 2002, A rapidly declining Arctic perennial ice cover. *Geophysical Research Letters*, 29, No. 1956.
- Comiso, J.C., Parkinson, C.L., 2004, Satellite-observed changes in the Arctic. *Physics Today*, 57, 38-44.
- Comiso, J.C., Parkinson, C.L., Gersten, R., Stock, L., 2008, Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, 35, No. L01703, doi: 10.1029/2007GL031972.
- Darby, D.A., Bischof, J., Cutter, G., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Dwyer, G., 2001, New record shows pronounced changes in Arctic Ocean circulation and climate. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 82, 601.
- Darby, D.A., Bischof, J.F., 2004, A Holocene record of changing Arctic Ocean ice drift analogous to the effects of the Arctic Oscillation. *Paleoceanography*, 19, No. PA1027.
- Darby, D.A., Ortiz, J.D., Polyak, L., Lund, S., Jakobsson, M., Woodgate, R.A., 2009, The role of currents and sea ice in both slowly deposited central Arctic and rapidly deposited Chukchi - Alaskan margin sediments. *Global Planetary Change*, 68, 58-72.

- de Vernal, A., Giroux, L., 1991, Distribution of organic-walled microfossils in recent sediments from the estuary and Gulf of St Lawrence. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 113, 189-199.
- de Vernal, A., Henry, M., Matthiessen, J., Mudie, P.J., Rochon, A., Boessenkool, K.P., Eynaud, F., Grøsfjeld, K., Guiot, J., Hamel, D., Harland, R., Head, M.J., Kunz-Pirring, M., Levac, E., Loucheur, V., Peyron, O., Pospelova, V., Radi, T., Turon, J.L., Voronina, E., 2001, Dinoflagellate cyst assemblages as tracers of sea-surface conditions in the northern North Atlantic, Arctic and sub-Arctic seas: The new "n=677" database and application for quantitative paleoceanographical reconstruction. *Journal of Quaternary Science*, 16, 681-699.
- de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Darby, D.A., 2005, Variability of sea ice cover in the Chukchi Sea (western Arctic Ocean) during the Holocene. *Paleoceanography*, 20(4), 18.
- de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Solignac, S., Radi, T., Rochon, A., 2008, Reconstructing sea ice conditions in the Arctic and Subarctic prior to human observations. American Geophysical Union. In E. deWeaver (eds.), *Arctic Sea Ice Decline: Observations, Projections, Mechanisms and Implications AGU Monograph Series*, 180, 27-45.
- de Vernal, A., Marret, F., 2007, Organic-Walled Dinoflagellate Cysts: Tracers of Sea-Surface Conditions. *Developments in Marine Geology*, 1, 371-408.
- de Vernal, A., Mudie, P.J. 1989, Late Pliocene to Holocene palynostratigraphy at ODP Site 645, Baffin Bay. In S.P. Srivastava, M.A. Arthur, B. Clement (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 106. Ocean Drilling Program: College Station, TX; 401-422.
- de Vernal, A., Rochon, A., Turon, J.L., Matthiessen, J., 1997, Organic-walled dinoflagellate cysts: Palynological tracers of sea-surface conditions in middle to high latitude marine environments. *GEOBIOS*, 30, 905-920.
- Dupont, L., Wyputta, U., 2003, Reconstructing pathways of aeolian pollen transport to the marine sediments along the coastline of SW Africa. *Quaternary Science Reviews*, 22(2-4), 157-174.
- Edwards, L.E., Mudie, P.J., de Vernal, A., 1991, Pliocene paleoclimatic reconstruction using dinoflagellate cysts: Comparison of methods. *Quaternary Science Reviews*, 10(2-3), 259.
- Eldholm, O., Thiede, J., Taylor, E., 1989, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 104: Ocean Drilling Program: College station, TX; 1067-1118
- Fyles, J.G., Hills, L.V., Mathews Jr., J.V., Barendregt, R.W., Baker, J., Irving, E., Jetté, H., 1994, Ballast Brook and Beaufort formations (Late Tertiary) on northern Banks Island, Arctic Canada. *Quaternary International*, 22/23, 141-171.
- Guiot, J., 1990, Methodology of the Last Climatic Cycle reconstruction in France from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 80(1), 49-69.
- Guiot, J., de Vernal, A., 2007, Transfer functions: methods for quantitative paleoceanography based on microfossils. In C. Hillaire-Marcel and A. de Vernal (eds.), *Proxies in Late Cenozoic paleoceanography*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 523-563.
- Guiot, J., Goeury, C., 1996, PPPbase, a software for statistical analysis of paleoecological data. *Dendrochronologia*, 14, 295-300.
- Gusev, E.A., Andreeva, I.A., Anikina, N.Y., Bondarenko, S.A., Derevyanko, L.G., Iosifidi, A.G., Klyuvitkina, T.S., Litvinenko, I.V., Petrova, V.I., Polyakova, E.I., Popov, V.V., Stepanova, A.Y., 2009, Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: New results from shallow drilling and seismic-reflection profiling. *Global and Planetary Change*, 68, 115-131.
- Holland, M.M., Bitz, C.M., 2003, Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dynamics*, 21(3-4), 221-232.
- Hooghiemstra, H., Agwu, C.O.C., 1986, Distribution of palynomorphs in marine sediments: a record for seasonal wind patterns over NW Africa and adjacent Atlantic. *Geologische Rundschau*, 75(1), 81-95.
- Hu, A.X., Rooth, C., Bleck, R., Deser, C., 2002, NAO influence on sea ice extent in the Eurasian coastal region. *Geophysical Research Letters*, 29(22), 2053-2057.
- Jakobsson, M., 2002, Hypsometry and volume of the Arctic Ocean and its constituent seas. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3, 5.
- Jones, E.P., 2001, Circulation in the Arctic Ocean. *Polar Research*, 20, 139-146.
- Kang, H.S., Won, E.J., Shin, K.H., Yoon, H.I., 2007, Organic carbon and nitrogen composition in the sediment of the Kara Sea, Arctic Ocean during the Last Glacial Maximum to Holocene times. *Geophysical Research Letters*, 34, No. L12607.
- Kaufman, D., Ager, T.A., Anderson, N.J., Anderson, P.M., Andrews, J.T., 2004, Holocene thermal maximum in the western Arctic (0-180°W). *Quaternary Science Reviews*, 23, 529-560.
- Kwok, R., 2000, Recent changes in Arctic Ocean sea ice motion associated with the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 27, 775-778.
- Ledu, D., Rochon, A., de Vernal, A., St-Onge, G., 2008, Palynological evidence of Holocene climate change in the eastern Arctic: a possible shift in the Arctic Oscillation

- at millennial time scale. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1363-1375.
- Levac, E., de Vernal, A., Blake, W., Jr., 2001, Sea-surface conditions in northernmost Baffin Bay during the Holocene: palynological evidence. *Journal of Quaternary Science*, 16, 353-363.
- Marret, F., de Vernal, A., Benderra, F., Harland, R., 2001a, Late Quaternary sea-surface conditions at DSDP Hole 594 in the southwest Pacific Ocean based on dinoflagellate cyst assemblages. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 739-751.
- Marret, F., de Vernal, A., Pedersen, T.F., & McDonald, D., 2001b, Middle Pleistocene to Holocene palynostratigraphy of Ocean Drilling Program Site 887 in the Gulf of Alaska, northeastern North Pacific. *Canadian Journal of Earth Science*, 38(3), 373-386.
- Matthiessen, J., de Vernal, A., Head, M., Okolodkov, Y., Zonneveld, K., Harland, R., 2005, Modern organic-walled dinoflagellate cysts in Arctic marine environments and their (paleo-) environmental significance. *Palaeontologische Zeitschrift*, 79, 3-51.
- McKay, J.L., de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Not, C., Polyak, L., Darby, D., 2008, Holocene fluctuations in Arctic sea-ice cover: dinocyst-based reconstructions for the eastern Chukchi Sea. *Canadian Journal of Earth Science*, 45, 1377-1397.
- Meier, W., Stroeve, J., Fetterer, F., and Knowles, K., 2005, Reductions in Arctic sea ice cover no longer limited to summer. *Transactions of the American Geophysical Union*, 86, 326-327.
- Mudie, P.J., 1992, Circum-arctic Quaternary and Neogene marine palynofloras: Paleocology and statistical analysis. In M.J. Head and J.H. Wrenn (eds.), *Neogene and Quaternary Dinoflagellate Cysts and Acritarchs*, 347-390, American Association of Stratigraphy and Palynology Foundation. College Station, Tex.
- Mudie, P.J., Harland, R., Matthiessen, J., de Vernal, A., 2001, Dinoflagellate cysts and high latitude Quaternary paleoenvironmental reconstructions: An introduction. *Journal of Quaternary Science*, 16, 595-602.
- Mueller-Lupp, T., Bauch, H.A., Erlenkeuser, H., Hefter, J., Kassens, H., Thiede, J., 2000, Changes in the deposition of terrestrial organic matter on the Laptev Sea shelf during the Holocene: evidence from stable carbon isotopes. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 563-568.
- Overland, J.E., Wang, M., 2005, The Arctic climate paradox: the recent decrease of the Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 32, No. L06701.
- Parkinson, C.L., Cavalieri, D.J., 2008, Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *Journal of Geophysical Research*, 113(C7), C07003.
- Perovich, D.K., Richter-Menge, J.A., Jones, K.F., Light, B., 2008, Sunlight, water and ice: extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007. *Geophysical Research Letters*, 35, L11501.
- Petrov, O.M., 1966, Stratigraphy and mollusk fauna from Chukotka Peninsula Quaternary deposits. *GIN RAS Proceedings*, 155, p. 252. Moscow.
- Polyak, L., Alley, R.B., Andrews, J.T., Brigham-Grette, J., Cronin, T.M., Darby, D.A., Dyke, A.S., Fitzpatrick, J.J., Funder, S., Holland, M., Jennings, A.E., Miller, G.H., O'Regan, M., Savelle, J., Serreze, M., St. John, K., White, J.W.C., Wolff, E., 2010, History of sea ice in the Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 29, 1757-1778.
- Rigor, I.G., Wallace, J.M., 2004, Variations in the age of Arctic sea-ice and summer sea ice extent. *Geophysical Research Letters*, 31, No. L09401.
- Rochon, A., Scott, D.B., Schell, T.M., Blasco, S., Bennett, R.J., Mudie, P.J., 2006, Evolution of sea Surface Conditions During the Holocene: Comparison Between Eastern (Baffin Bay and Hudson Strait) and Western (Beaufort Sea) Canadian Arctic. *American Geophysical Union, Fall Meeting*.
- Serreze, M.C., Holland, M.M., Stroeve, J., 2007, Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science*, 315, 1533-1536.
- Serreze, M.C., Walsh, J.E., Chapin, F.S. III, Osterkamp, T., Dyrugerov, M., Romanovsky, V., 2000, Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*, 46, 159-207.
- Spielhagen, R.F., Baumann, K.H., Erlenkeuser, H., Nowaczyk, N.R., Nørgaard-Pedersen, N., Vogt, C., Weiel, D., 2004, Arctic Ocean deep sea record of northern Eurasian ice sheet history. *Quaternary Science Reviews*, 23, 1455-1483.
- Steele, M., Boyd, T., 1998, Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 103, 10419-10435.
- Stickley, C.E., St. John, K., Koç, N., Jordan, R., Passchier, S., Pearce, B., Kearns, L.E., 2009, Evidence for middle Eocene Arctic sea ice from diatoms and ice-rafted debris. *Nature*, 460, 376-380.
- Stroeve, J., Holland, M., Meier, W., Scambos, T., Serreze, M., 2007, Arctic sea ice decline: faster than forecast. *Geophysical Research Letters*, 34, L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
- Stroeve, J., Serreze, M., Drobot, S., Gearheard, M., Holland, M., Maslanik, W., Meier, W., Scambos, T., 2008, Arctic sea ice extent plummets in 2007. *Eos Trans. AGU*, 89(2), doi:10.1029/2008EO020001.
- Stroeve, J., Serreze, M.C., Fetterer, F., Arbetter, T., Meier,

- W., Maslanik, J., Knowles, K., 2005, Tracking the Arctic's shrinking ice cover: another extreme September minimum in 2004. *Geophysical Research Letters*, 32(4), 501-505.
- Taylor, F.J.R., 1987, Ecology of dinoflagellates. In F.J.R. Taylor (eds.), *The biology of dinoflagellates*, Oxford, Blackwell Scientific, 399-529 p.
- Thompson, D.W., Wallace, J.M., 1998, The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 25, 1297-1300.
- Vogt, C., Knies, J., 2008, Sediment dynamics in the Eurasian Arctic Ocean during the last deglaciation and the clay mineral group smectite perspective. *Marine Geology*, 250, 211-222.
- Walsh, J.E., Chapman, W.L., Shy, T.L., 1996, Recent decrease of sea level pressure in the Central Arctic. *Journal of Climate*, 9, 480-486.
- Wollenburg, J.E., Knies, J., Mackensen, A., 2004, High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 204, 209-238.
-
- 투 고 일 : 2011년 7월 25일
심 사 일 : 2011년 7월 26일
심사완료일 : 2011년 9월 28일