북반구에서 확인된 최종빙기 이래 단주기성 기후변화의 증거 -북대서양 지역과 한반도를 포함한 동북아시아 자료의 비교/종합-

박정재

서울대학교 지리학과 및 국토문제연구소
(2015년 1월 19일 접수, 2015년 2월 24일 수정, 2015년 2월 26일 게재 확정)

Centennial- to Millennial-scale Climate Change Since the Last Glacial: the review of related studies from the North Atlantic, East Asia, and Korea

Jungjae Park

Department of Geography and Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University
(Received 19 January 2015, Revised 24 February 2015, Accepted 26 February 2015)

Abstract : Centennial- to millennial-scale climate change since the last glacial needs to be revealed to improve the overall predictability of future environmental change. Special attention has been paid to short-term climate oscillations because they usually occurred rapidly enough to cause noticeable change in the average expected lifespan of human. Recently, short-term climate change during the late last glacial was successfully reconstructed from Hanon maar paleolake in Jeju island. In this study, centennial- to millennial-scale climate signals transferred via atmospheric teleconnection were detected for the first time in South Korea. Possible future presence of abrupt climate shifts such as Younger Dryas or 8.2 ka event would not seriously influence the Korean peninsula, especially not Jeju island, due to the Kuroshio warm currents. The study of climate variabilities in Korea could provide essential paleoclimatic information for the entire East Asian monsoon region since the climate of the Korean peninsula is driven significantly by coupled land-atmosphere-ocean dynamics.

Key Words : climate change, millennial-scale, last glacial, Korean peninsula, East Asia

주요어 : 기후변화, 천년 주기, 최종빙기, 한반도, 동아시아

1. 서론

최종 빙기에 뚜렷하게 나타났던 천년 혹은 백년 주기의 (단주기성) 기후변화는 미래에도 축소된 형

태로 재현될 가능성이 높기 때문에 많은 학자들의 관심을 끌고 있다. 최종빙기 기후변화의 주된 특징은 급작스럽게 나타나는 기온 상승 혹은 하강이며 그 원인을 밝히기 위해 다양한 가설들이 제시

되고 있다. 그 중 가장 많은 지지를 얻고 있는 가설은 대서양에서의 해수 흐름의 변화가 이 시기의 천년 주기 기후변화를 이끌었다는 주장이다. 소위 열염순환이라 불리는 대서양 해수 흐름은 북대서양에 존재하는 빙하의 용해로 바다로 유입된 민물이 해수의 염도와 온도에 영향을 미치면서 강화되기도 약해지기도 하는데, 대기 및 해수의 순환은 이러한 변화가 유발하는 기후 변화의 신호를 지구 전역에 전달한다는 것이다. 한편, 용빙으로 인한 민물 유입으로 심해 해수순환이 약화되면 북대서양은 차가워지는 반면, 북쪽으로 전달되지 못한 열에너지로 인해 남대서양은 상대적으로 따뜻해진다. 이와 같은 이유로 과거 북대서양과 남대서양의 기후는 마치 시소와 같이 서로 상반되는 모습으로 나타나곤 했다(Broecker, 1994). 최근에는 열염순환이라는 용어대신 대서양자오선순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)라는 단어가 자주 사용된다.

무엇보다도 천년 혹은 백년 주기의 과거 기후변화가 주목을 받는 이유는 그 변화들이 인간의 생애 동안 인지가 가능할 정도로 단기간에 일어난다는 점에 있다. 홀로신 초기에 있었던 8.2ka event의 경우, 그린랜드에서는 20년이 채 안되는 기간에 온도가 3.3°C 정도나 낮아졌다(Kobashi *et al.*, 2007). 해수 흐름의 변화로 파생되는 갑작스러운 기후 한랭화는 이를 소재로 영화가 제작된 적이 있을 정도로 이제는 일반인들에게도 낯설지 않은 가설이다. 즉, 지구온난화가 지속되어 민물이 북대서양으로 많이 유입되면 해수의 순환에 문제가 생겨 단기간 동안 소규모 빙하기가 도래한다는 가설인데, 온난화가 미래의 지구환경에 미칠 파장을 예측할 때 빠지지 않고 등장하고 있다. 이러한 천년 혹은 백년 주기 기후변화는 대체로 AMOC의 속도변화에서 비롯된 것이므로 북대서양에서 가장 뚜렷하게 나타나지만, 전지구의 대기 원격상관(atmospheric

teleconnection) 탓에 동아시아나 남반구에서도 그 영향이 관찰된다.

한반도를 포함한 동북아시아 지역의 경우에도, 플라이스토신 후기 북대서양의 기후변화 경향이 편서풍을 통해 전달됨에 따라(Porter and An, 1995), 두 지역 간 상당히 유사한 기후 변화 양상이 존재했다는 것이 동굴 석순의 산소동위원소 분석 결과를 통해 이미 입증된 바 있다(Wang *et al.*, 2001). 중국의 석순 자료는 현재 전세계의 과거 기후변화와 동아시아 몬순 변화를 논할 때 중요한 위치를 차지한다(예, Wang *et al.*, 2001; Dykoski *et al.*, 2005). 또한 중국 지린성의 마르(maar)호들(예, Stebich *et al.*, 2009)과 일본의 비와(Biwa)호(예, Hayashi *et al.*, 2010; Kigoshi *et al.*, 2014) 및 쓰기즈(Suigetsu)호(예, Nakagawa *et al.*, 2003; 2005) 등에서 생산된 고해상도의 퇴적물 프록시 자료들은 최종 빙기와 홀로신 기간의 동아시아 기후환경 변화를 보여주는 핵심적인 고환경 정보를 제공한다. 반면, 한반도 지역의 고환경 자료는 이들 두나라에 비해 극히 부족하며 특히 최종 빙기의 고환경 자료는 거의 없다. 중국과 일본 학자들이 각기 자국에서 많은 연구결과물을 생산하고 있지만, 한반도 자료의 상대적인 빈곤은 최종 빙기 동북아 기후변화의 전체적인 복원에 걸림돌이 되고 있다.

다행히 최근 제주도의 마르인 하논에서 최종 빙기 후기 기후변화의 고해상도 복원이 성공적으로 이루어졌으며, 이 연구에서 최종 빙기 때 대기 원격상관에 의해 천년 주기뿐 아니라 백년 주기의 북대서양의 기후 신호가 한반도로 전달되었다는 점이 처음으로 확인되었다(Park *et al.*, 2014a; 2014b). 또한 하논 퇴적물에서는 최종 빙기 최성기(Last Glacial Maximum, LGM) 이후로 동아시아의 육상 퇴적물에서 확인되는 기후변화(북대서양 기후 신호)와 해상 퇴적물에서 확인되는 기후변화(적도 서태평양 기후 신호)가 혼합된 형태로 나타

났다(Park and Park, 2015). 하노 마르호가 제주도의 남단에 위치한 관계로, LGM이 끝난 후부터 쿠로시오 난류를 타고 전달되는 적도 서태평양의 기후(해수 온도)에 강한 영향을 받았기 때문이다. 하노자료는 최종 빙기 자료가 빈약하고 육상과 해양의 접이지대에 위치한 한반도에서 산출되었다는 점에서 동북아의 고기후 변화를 논할 때 중요한 의미를 갖고 있다.

본 논문에서는 북반구에서 그동안 생산된 최종 빙기와 홀로신 초기의 고기후 및 고환경 연구를 정리하고, 한반도와 동아시아에 존재했던 단주기성의 기후변화와 환경변화를 확인하여 미래에 유사한 기후변화가 일어났을 때 발생할 수 있는 상황을 유추하고자 한다. 국지적인 고기후 자료의 축적이 중요한 이유를 논하는 것도 본 논문의 집필 목적이다.

2. 플라이스토신 후기의 천년 주기 기후 변화

빙기와 간빙기가 교차해서 나타나는 원인은 주로 지구 공전궤도의 변화, 자전축 기울기의 변화, 세차와 같은 지구의 운동 궤도 요소 변화로 설명된다. 한편, 최종빙기에는 다수의 천년 주기 기후변화가 특징적으로 나타나는데, 이는 AMOC의 강도 변화와 관련있는 것으로 여겨지고 있다. AMOC 변동과 연관성이 커서 빠지지 않고 등장하는 가설이 양극지역의 시소 현상(Bipolar seesaw)이다. 북대서양으로 빙하에서 녹은 민물이 유입되면서 AMOC의 강도가 약해진 상태가 오랜 기간 지속되면, 북쪽으로 전달되어야 할 열에너지가 남반구에 쌓이게 되면서 북반구와 남반구의 기후변화가 반대로 나타난다는 가설로 이미 빙하 코어 및 북대서양 해양 퇴적물 분석결과와 기후 모

델링 결과를 통해 입증되고 있다(예, Vidal *et al.*, 1999; Kanfoush *et al.*, 2000; Raisbeck *et al.*, 2007). AMOC의 변동은 또한 북대서양 해양퇴적물 분석을 통해 확인된 하인리히 이벤트(Heinrich (H) event) 그리고 그린랜드 빙하 코어 분석을 통해 확인된 댄스가드-외쉬거 이벤트(Dansgaard-Oeschger(DO) event)와도 연관성을 갖는다. 과거 마지막 빙기 동안 상대적으로 더 추웠던 시기(아빙기, stadials)에 북대서양의 빙산이 보다 남쪽까지 흘러 내려와 녹으면서 빙산 속에 갇혀있던 조립질의 광물(Ice Rafted Debris, IRD)이 해저에 가라앉곤 했는데, 퇴적물 속에 포함된 조립질의 연대를 측정해 보니 그린랜드 코어의 산소동위원소 분석결과 온도가 낮았을 것으로 예상되는 시기와 유사했다(Bond *et al.*, 1992; Bond and Lotti, 1995) (Figure 1). 이러한 하인리히 이벤트가 추웠던 시기를 지시하는 용어라면, 댄스가드-외쉬거(온난) 이벤트는 마지막 빙하기내 상대적으로 따뜻했던 시기(아간빙기, interstadials)를 주로 지시하는 용어로 그린랜드 빙하의 $\delta^{18}O$ 값이 뚜렷하게 높았던 시기들을 가리킨다(Figure 1).

북대서양의 심해퇴적물 분석 결과, 마지막 빙기 중에 적어도 6 번의 갑작스러운 한랭기, 소위 하인리히 이벤트(H1-H6)라 불리는 시기가 존재했었다는 사실이 확인되었다. 이 시기에는 대형 빙산들이 북대서양으로 흘러들어가면서 엄청난 양의 민물이 공급되었는데, 당시 북대서양의 열염순환에 매우 중요한 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 댄스가드-외쉬거 이벤트는 과거 최종 빙기 중에 나타났던 온도의 상승/하강 주기로, 최종 빙기에 대략 25번에 걸쳐 발생했음이 그린랜드 빙하코어 분석결과 밝혀졌다. 1470년 정도의 주기를 갖고 발생한다는 가설이 제시된 바(Bond *et al.*, 1997; 2001) 있으나 이에 대해 동의하지 않는 학자들도 있다(Ditlevsen *et al.*, 2005). 댄스가드-외쉬거 이

Figure 1. Comparison of (a) sedimentary lithic grain numbers from Deep Sea Drilling Project (DSDP) site 609 (Bond *et al.*, 1992) and (b) oxygen isotope record from North Greenland Ice Core Project (NGRIP) ice core (North Greenland Ice Core Project Members, 2004). H=Heinrich event; DO=Dansgaard-Oeschger event.

벤트가 시작되면 온도는 빠르게 상승하지만 온도의 하강은 상대적으로 긴 시간에 걸쳐 일어난다. 하인리히 이벤트와 댄스가드-외쉬거 이벤트의 발생원인은 아직 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 북대서양으로의 만물 유입에 따른 AMOC의 강도 변화가 직접적인 원인으로 추정되고 있으나 일사량의 변화, 온실가스 농도 변화, 해빙의 상태 변화 등도 중요한 역할을 했을 것으로 여겨지고 있다. 중요한 것은 이러한 이벤트를 최초로 촉발한 인자가 무엇이든 간에 초기의 변화는 매우 미미했을 것이라는 점이다. 촉발 이후 다양한 피드백이 연관되면서 비로소 뚜렷한 기후변화로 발현되었을 가능성이 크다.

중국이나 일본의 고기후 학계에서는 이미 90년대 중반부터 하인리히 이벤트와 댄스가드-외쉬거 이벤트에 대한 관심을 갖고 있었다(Porter and An,

1995; Wang *et al.*, 1999; Tada *et al.*, 1999). 중국의 뤼스평원 지역에서는 고토양-뤼스 연구를 통해 이러한 이벤트들이 북대서양과 중국 중부 내륙에서 동시에 존재했음이 밝혀졌고 최종 빙기때 북대서양의 기후가 대기 상부 편서풍을 통해 동아시아로 전달되었다는 가설이 정립된 바 있다(Porter and An, 1995). 또한 중국 동북부와 일본의 호수 퇴적물 분석(Nakagawa *et al.*, 2003; Stebich *et al.*, 2009; Hayashi *et al.*, 2010; Takahara *et al.*, 2010)과 동중국해, 북중국해, 그리고 동해 등지에서 시추된 해양퇴적물 분석 결과들(Ijiri *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2005; Harada *et al.*, 2008; Kubota *et al.*, 2010)에서도 북대서양 및 동아시아 기후 변화 간의 시기적 유사성이 확인되었다. 그러나 무엇보다도 확실한 두 지역 간 대기 원격상관의 증거는 중국 동굴의 석순 자료에서 찾아 볼 수

Figure 2. Comparison between oxygen isotopic records of the last glacial period from Hulu cave stalagmites called MSL, MSD, and PD (Wang *et al.*, 2001) (a) and from NGRIP ice core (b).

있다. Wang *et al.* (2001)은 Hulu cave의 석순 산소 동위원소 자료와 그린랜드 빙하 코어의 산소동위원소 자료의 직접적인 비교를 통해 주요한 기후 이벤트들 대부분이 양 지역에서 비슷한 시기에 존재했다는 사실을 명확하게 밝혀냈다(Figure 2).

우리나라의 경우 극히 최근 들어서야 하인리히 이벤트 혹은 댄스가드-외쉬거 이벤트에 대한 연구가 발표되었는데, 석순 자료(Jo *et al.*, 2010), 동해 심해 퇴적물 자료(Lim *et al.*, 2011), 고호소 퇴적물 자료(Park *et al.*, 2014a; Park *et al.*, 2014b; Park and Park, 2015) 등에서 천년 주기의 기후 이벤트들이 일부 확인되고 있다. Jo *et al.* (2010)은 DO 이벤트 20, 21, 22번을 강원도 관음굴 석순에서 확인하였고, Park *et al.* (2014a)은 제주도의 하논 마르호 퇴적물 분석을 통해 H 이벤트 1, 2, 3번 그리고 DO 이벤트 3, 4번의 존재를 확인하였다(Figure 3). 한편, Lim *et al.* (2011)은 동해 울릉분지의 심해 퇴적물에서 관찰되는 퇴빙기(Last Deglacial

period) 시기의 환경변화를 DO 이벤트와 연관 지었다. 최근 들어 이러한 기후 이벤트들에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이긴 하나 여전히 일본이나 중국에 비해 관련 연구결과가 많이 부족한 상황이다.

최근 우리나라에서 발표된 연구성대로, 석순의 산소동위원소 자료로부터 과거 55만 년 전부터 지금까지의 동아시아 몬순 변화를 복원한 논문은 주목할 만하다(Jo *et al.*, 2014). 습윤했던 간빙기 때에는 석순의 성장이 활발했던 반면, 건조했던 빙하기 때에는 성장이 느렸으며, 열대수렴대의 이동이 남반구와 북반구의 몬순 강도를 결정함에 따라 북반구와 남반구 중위도 지역 석순들이 정반대의 경향을 띠었다는 것이 이 연구의 요지이다. 궤도(orbital) 주기의 ITCZ 이동을 그 원인으로 지목했으므로 AMOC의 변화가 주된 원인이라 할 수 있는 천년 주기의 기후변화와는 그 메커니즘이 다르다고 볼 수 있다.

Figure 3. Comparison between $\delta^{18}\text{O}$ records of NGRIP ice core and Hulu cave stalagmites between 32.5 and 6.9 ka (a) and the Hanon sediments proxy data (b) (Park *et al.*, 2014a)

3. 만빙기(Late Glacial period)와 홀로신 초기의 주요 기후 이벤트

만빙기는 대체로 16,000–11,000 BP를 가리키며 LGM 시기가 끝나고 북반구의 빙상들이 녹기

시작하는 시점부터 홀로신이 시작되는 시점까지를 의미한다. 만빙기와 이어지는 홀로신 초기에 특히 북반구 지역에서 뚜렷하게 나타났던 천년 주기의 기후 변화로는 빌링-알레뢰드(Bølling-Allerød, BA), 영거드라이어스(Younger Dryas, YD), 프리보

리얼 이벤트(Preboreal Oscillation, PBO), 8.2ka 이벤트 등이 있다. 또한 BA 시기 동안에는 북반구에서 백년 주기의 비교적 뚜렷한 기후변화가 존재했던 것으로 보고되고 있다.

우선 BA 시기는 대략 14,700 BP부터 YD 시기가 시작되기 전인 12,800 BP까지의 기간으로 두 번의 아간빙기(벨링과 알레외드)로 이루어진 전체적으로 온난했던 시기이다. LGM 이후로 북반구 하계 복사량 증가에 따라 기온이 천천히 상승하다가 올디스트드라이어스(Oldest Dryas) 시기에 기온이 하강했고 이후 북대서양 지역을 중심으로 14,700 BP 경에 갑자기 온도가 급하게 상승하게 되는데 이 때가 벨링기의 시작 시점이다. 전술한 바와 같이 BA 시기 동안에는 백년 주기의 기후변화가 나타났으며, 전세계 학자들은 이 변화들을 각기 다르게 구분하여 혼란을 가져오고 있다(Litt and Stebich, 1999; Hughen *et al.*, 1996; Thornally *et al.*, 2010). 한랭한 올디스트드라이어스 시기 이후로 온난한 벨링기, 한랭한 올더드라이어스기(Older Dryas), 온난한 알레외드가 순차적으로 나타났으며, 벨링기와 알레외드기 중에 또다른 한랭기(Inter-Bølling Cold Period, Inter-Allerød Cold Period)들이 존재했었다고 보는 것이 일반적이다.

YD 시기는 온난했던 알레외드기가 끝나고 도래한 아빙기이다. 영거드라이어스에서 드라이어스라는 이름은 고산 툰드라의 야생식물 명에서 따온 것으로 과거 만빙기의 추웠던 시기들을 지시한다. BA 시기 내 아빙기들과 달리 상당히 오랜 기간(12,800–11,700 BP) 지속되었으며 북반구 전역에 걸쳐 그 여파도 컸다. 특히 인간이 농경을 하게된 경위를 YD 시기의 급속한 기후 한랭화에서 찾는 학자들이 있다(Wright and Thorpe, 2003). 즉, BA 시기에 온난해지면서 주변에 먹을 것이 풍부해졌고 이로 인해 수렵채집민의 정주가 가능하게 되었지만, 곧이어 한랭한 YD 시기가 닥치면서 야생식

물의 생산성에 대한 예측이 어려워짐에 따라 식량의 안정적인 공급을 위해 농경을 시작하게 되었다는 가설이다. 그 과정이 어려웠던 간에 분명한 사실은 YD의 기후 변화는 매우 뚜렷하고 비교적 장기간에 걸쳐 지속되어 북반구 전역의 (인간을 포함한) 생물들에게 큰 영향을 미쳤다는 점이다. YD의 발생은 만빙기 온도의 상승과 함께 빙하가 빠르게 녹았고 이때 북대서양으로 유입된 민물로 인해 AMOC이 약해졌다는 가설로 보통 설명된다. 이는 현재 빠르게 진행되고 있는 지구온난화가 YD와 같은 한랭화로 반전될 가능성도 충분히 존재함을 시사한다. 한편, 대략 11,300 BP 경에 존재했던 것으로 추정되는 PBO는 YD에 비해 강도가 약해 대부분 북대서양 인근에서 생산된 자료에서만 확인되고 있으며 동아시아 자료에서는 명확하게 드러나지 않는다.

8.2ka 이벤트는 홀로신 기간에 나타났던 천년 주기의 기후 변화 중 가장 뚜렷했던 기후한랭화 시기로 최근들어 특히 많은 학자들의 관심을 끌고 있다. 홀로신 기간 중에 존재했던 천년 주기의 기후 냉량화 시기들은 본드 이벤트(Bond event)로 자주 불리는데, 이 이벤트들은 최종 빙기의 DO (cold) 이벤트들과 유사한 성격을 갖는다. 8.2ka 이벤트는 빠르게 융해되던 로렌타이드 빙상 전면에 존재했던 빙하호(Lake Agassiz)로부터 한꺼번에 민물이 유출되면서 발생했다고 보고 있으며, 200–400년 정도 지속된 것으로 추정된다. 이후 북반구 대부분의 지역이 홀로신 기후 최적기(Holocene Climate Optimum)에 들어서게 된다. 8.2ka 이벤트에 대한 관심이 높은 이유는 홀로신 중에 발생했다고 믿기 힘들 정도로 기온의 감소폭이 상당했기 때문이다. 홀로신은 이전의 최종 빙기에 비해 기후가 상대적으로 온난하고 안정적이었던 시기로 인식된다. 홀로신 말기의 소빙기도 빙기 때의 이벤트들과 비교할 때 기후변화라고 부르기가 어색할 정

도로 소규모의 변화에 불과했다. 그러나 YD와 유사한 과정을 통해 발생한 8.2ka 이벤트는 홀로신 중의 기후 변화임에도 북대서양 지역에 상당한 기온 저하를 가져왔다(Alley *et al.*, 1997; Tinner and Lotter, 2001; Ellison *et al.*, 2006; Thomas *et al.*, 2007). 따라서 이 이벤트에 대한 자료는 향후 지구 온난화에 의해 가속화되고 있는 용빙이 일으킬 지도 모르는 환경변화를 예측하는 데 있어 가장 중요한 정보가 될 가능성이 높다.

한편, 동북아시아 지역의 만빙기 기후변화는 북대서양 지역보다는 정도가 약했지만 여러 프록시 자료에서 뚜렷하게 드러날 만큼 그 영향이 광범위했던 것으로 추정되고 있다. 중국 북동부의 마르호 퇴적물 분석결과(Schettler *et al.*, 2006; Parplies *et al.*, 2008; Stebich *et al.*, 2009), 일본의 호수퇴적물 분석결과(Nakagawa *et al.*, 2003; 2005) 등에서 BA와 YD 등의 주요 기후변화들이 관찰된다. 특히 중국 Hulu cave의 석순 산소동위원소 자료(Wang *et al.*, 2001)는 만빙기 시기 그린랜드와 동아시아 간의 기후 상관 관계가 존재했음을 명확하게 보여주고 있다. 이 자료에서는 BA, YD뿐 아니라 북대서양에서 BA 기간 중에 백년 주기로 발생했던 아빙기들의 존재도 확인된다. 동북아의 해양 퇴적물 분석 결과들에서도 BA와 YD가 관찰되지만, 해수의 영향으로 육상퇴적물 분석 자료에 비해 불분명하게 나타난다(예, Xu *et al.*, 2013).

우리나라의 경우, 제주도 하는 마르호 퇴적물 분석결과에서 처음으로 YD와 BA가 확인되었으며 이 퇴적물에서는 그린랜드 빙하코어에서 보이는 BA의 백년 주기 아빙기들 또한(Park *et al.*, 2014b) 관찰되었다(Figure 4). 동 퇴적물 분석자료에서는 PBO도 함께 확인되었는데, PBO가 중국의 Hulu 석순 자료에서조차 뚜렷하게 나타나지 않는 북반구 기후 이벤트였음을 고려할 때, 하는 퇴적물의 프록시 자료들이 전체적으로 과거 기후변화를 매

우 민감하게 반영하고 있음을 알 수 있다. 이에 하는 퇴적물의 최근 분석 결과와 그 결과가 지시하는 바를 요약하고 최종 빙기 후기와 만빙기 시기의 제주도 그리고 한반도의 기후를 결정했던 요인들을 살펴보고자 한다.

4. 제주도 고기후 그리고 AMOC 변화 및 적도 서태평양 해수온도

제주도 남단 서귀포 인근에 위치한 하는 마르호의 바닥에는 10m 이상의 퇴적물이 쌓여 있다. 이 퇴적물에는 과거 수만년 전의 동북아 기후변화 및 환경변화 정보가 고스란히 담겨 있다. 최종 빙기에는 지금보다 대략 120m 낮았던 해수면 탓에 지금과는 달리 제주도도 거대한 동북아 대륙 내에 포함되어 있었으며, 따라서 한반도의 기후변화와 전반적으로 유사한 변화를 겪었다. 반면 만빙기에 접어들면서 해수면이 상승함에 따라 제주도는 한반도와 분리되고 동시에 남부 지역은 쿠로시오 난류의 직접적인 영향을 받게 된다. 만빙기 이후부터는 제주도 남부 지역이 해수의 영향을 크게 받기 시작하여 이 지역의 기후변화의 추이는 전체 한반도 지역의 변화 추이와는 사뭇 달랐을 것으로 추정된다. Park *et al.* (2014a)의 연구결과를 보면, 최종 빙기때 북대서양 AMOC의 변화에 따른 천년 주기의 기후 이벤트들이 제주도에서도 존재했음을 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 이러한 이벤트들은 중국의 양쯔강 하류 Hulu 동굴의 석순 자료에서도 뚜렷하게 확인된다. 따라서 만빙기 이전에는 북대서양 해수 순환과 관련있는 기후변화 신호가 상부편서풍을 매개로 동북아로 전달되면서 한반도 전체가 북대서양 기후변화에 크게 영향을 받았음을 의미한다. 반면, 만빙기 이후에는 서귀포 지역의 기후가 AMOC 변화 외에 적도 서태평양

Figure 4. Comparison between $\delta^{18}\text{O}$ records of NGRIP ice core and Hulu cave stalagmites during the Late Glacial period and the Hanon multi-proxy data (Park *et al.*, 2014b)

해수온도의 변화에도 민감하게 반응했던 것으로 보인다(Park and Park, 2015).

퇴빙기 시기에 적도 서태평양 해수온도는 세차 주기에 따른 북반구 일사량 상승에 의해 지속적으로 상승하는 경향을 띠었으나, 흥미롭게도 남극 지역의 기후와 연동되어 변화했다고 알려져 있다(Lea *et al.*, 2000; Partin *et al.*, 2007). Park and Park(2015)은 하느 퇴적물자료, 동북아 해양 퇴적물 분석자료, 보르네오섬의 석순 동위원소 자료, 그린랜드 및 남극 빙하 동위원소 자료 등을 서로 비교하여 쿠로시오 난류가 북서태평양 지역의 기후에 미치는 영향을 위도별로 살펴보면, 제주도 남부 지역이 특히 만빙기에 (남극 기후와 관련이 있어 보이는) 적도 서태평양의 해수온도 변화의 영향을 받았다고 주장하였다(Figure 5). 제주도의 다른 퇴적물 분석 논문에서도 비록 만빙기가 아니라 홀로신을 대상으로 했지만 이와 비슷한 논의가 전개된 바 있다(Lim and Fujiki, 2011). 바다에 면해 있는 제주 남부 지역의 퇴빙기 기후는 쿠로시오 난류 탓에 적도 서태평양 지역의 해수온도 변화에 크게 좌우되었던 것으로 보인다.

참고로 북서태평양 지역의 홀로신 기후변화를 언급할 때 빠지지 않고 등장하는 것이 ENSO이다. 엘니뇨가 강할 때는 적도 서태평양의 해수 온도가 낮아져 동아시아 겨울 몬순이 약해지는 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2000). 이 가설이 옳다면 해수 온도가 낮아질 때 동북아의 겨울 몬순이 약해지면서 제주도 그리고 한반도의 연강수량이 증가하게 될 것이다. 그러나 역으로 낮은 해수 온도로 제주도 남부는 비교적 건조해질 가능성도 존재한다. 제주도 남부 지역은 이와 같이 대기의 순환과 해수의 순환에 의한 영향을 동시에 직접 받게 되므로 프록시 자료의 해석이 쉽지 않다. 유사한 이유로 타이완섬의 퇴적물 분석 결과 또한 해석이 까다로워 대다수 연구에서 상당히 복잡한 논의 과

정을 거치고 있다(예, Selvaraj *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2012). 여하튼 타이완 자료들과 제주도 자료들이 비슷한 연구결과를 보여주는 것으로 볼 때, 제주 남부 지역은 홀로신 기간 중에 적도 서태평양 해수 온도에 큰 영향을 받았다고 보는 것이 타당할 듯 하며 만빙기 때 또한 별반 다르지 않았을 것으로 사료된다.

Park and Park(2015)의 연구결과에 따르면, 하느에서 LGM 시기의 연평균 기온은 대략 8.5℃였으며 현재보다 8℃ 정도 낮았던 것으로 추정된다. 비슷한 연구방법을 통해 산출된 일본의 LGM 기온(Nakagawa *et al.*, 2002; Tarasov *et al.*, 2011)과 비교할 때 큰 차이가 없다. 이와 같은 LGM 시기의 낮은 연평균 기온은 제주도 지역이 이 시기에 한반도와 마찬가지로 전적으로 북반구 대륙성 기후 하에 있었다는 것을 시사한다. 반면 BA에서 YD 시기로 전이되면서 나타난 기온 하강은 1.5℃에 불과했다. 그린랜드 빙하 코어 자료에서 확인되는 기온 하강과 비교할 때(Alley, 2000) 매우 작은 수치이며, 이는 만빙기에 접어들면서 제주 남부가 완연히 해양의 영향 하에 들어갔다는 것을 보여준다. YD와 유사한 한랭 이벤트인 8.2ka 이벤트의 경우, 그 존재가 미약하게 드러나긴 하나(Park and Park, 2015), 주변 환경의 변화를 크게 일으킬 정도의 충격은 아니었으며 이 또한 바다에 인접한 하느의 위치적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 분석자료를 통해, 만약 향후 YD 혹은 8.2ka 이벤트와 같은 유사 이벤트가 북대서양에서 다시 발생한다 하더라도, 한반도 특히 제주도가 받게 될 영향은 쿠로시오 난류로 인해 북대서양 지역과 비교할 때 상대적으로 미미할 것이라는 추정이 가능하다.

과거 동북아 지역의 기후변화가 북반구 전체의 기후변화와 유사했으리라는 가정은 유효하다. 그러나 한반도 지역, 특히 제주도와 한반도 남부는

Figure 5. Comparison among deglacial $\delta^{18}\text{O}$ records of NGRIP ice core (a), mean annual temperatures reconstructed from Hanon pollen records (Park and Park, 2015) (b), SST (dotlines) and values smoothed every 5 datapoints (thicklines) in the Northern ECS (Kubota *et al.*, 2010) (c) and Okinawa Trough (Sun *et al.*, 2005) (d), $\delta^{18}\text{O}$ records of Borneo stalagmites (Partin *et al.*, 2007) (e), and $\delta^{18}\text{O}$ records of EPICA Dronning Maud Land ice core (Barbante *et al.*, 2006) (f).

해류의 영향을 직접 받으므로, 이곳에서는 북반구의 평균적인 기후변화와는 다른 방향의 변화가 나타날 수 있다. 반도라는 지리적 특성으로 우리나라의 향후 기후를 예측하기 위해서는 지구의 세차 주기에 따른 북반구 일사량 변화, AMOC 변화, 쿠로시오 난류의 세기, 적도 서태평양 해수 온도 변화, ENSO 변화, 동아시아 하계 및 동계몬순 변화, ITCZ의 이동 등등 대기 및 해양 순환에

관계있는 여러 복잡한 인자들을 함께 고려해야 한다. 이러한 복잡성 때문에 난류의 영향을 받는 한반도 남부와 그렇지 않은 한반도 중북부 내륙 간의 과거 (특히 홀로신) 기후변화가 상이했을 가능성이 있다. 확실하게 단정짓기에는 자료가 부족하나, 실제로 홀로신 후기에 한반도 고산습지의 고식생 자료들(Jang, 2010)와 제주도 오름의 고식생 자료(Lim and Fujiki, 2011; Lee *et al.*, 2011)는 서로 다

Figure 6. Selected pollen taxa from Yongneup in Mt. Daeam, Gangwon-do (Jang, 2010) (a) and from Moolyoungari in Jeju island (Lee *et al.*, 2011) (b). Note the changes in selected taxa at ca. 1800 cal yr BP.

른 기후변화를 지시한다(Figure 6). 식생 복원 자료만 놓고 봤을 때, 대략 1,800 BP 이후로 제주 남부는 확연하게 온난습윤해지는 경향을 띠지만(서어나무 등의 수목식생 급증) 한반도 내륙의 기후는 그렇지 않다(전나무 및 소나무 식생의 확대와 서어나무 및 참나무 식생의 감소). 한반도와 같이 크지 않은 지역에서 전체적인 기후변화 추이가 지역별로 다르게 나타난다는 점은 학술적으로 흥미로운 주제이다. 국지적인 프록시 자료를 최대한 많이 확보하는 것이 미래의 기후변화에 효과적으로

대비할 수 있는 점이라는 사실을 이와 같은 실례를 통해서 확인할 수 있다.

5. 결론

현재 전세계 고환경 학자들은 최종 빙기와 홀로세에 존재했던 천년 주기의 기후변화(하인리히 이벤트, 댄스가드-외쉬거 이벤트, 뵐링-알레뢰드 시기, 영거드라이어스 시기, 8.2ka 이벤트, 본

드 이벤트 등)를 지역별로 확인하고 그 발생 원인을 밝히기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 미래에 도래할 지도 모르는 급작스러운 기후한랭화와 이것이 파생시킬 환경변화에 대처할 수 있도록 과거 전례에 대한 정보를 충분히 축적할 필요가 있기 때문이다. 우리의 인접 국가들인 중국이나 일본은 이러한 이벤트들에 대한 연구가 오래전부터 활발하게 이루어져 오고 있지만, 그에 비해 우리나라에서는 전체적인 고환경 연구의 부진으로 특히 고해상도의 정밀한 분석 결과를 요하는 천년 혹은 백년 주기의 과거 기후 변화 연구는 매우 드문 실정이다.

지금부터라도 최근 하논에서 생산된 자료를 기반으로 더욱 다양한 고해상도의 고환경/고기후 자료를 확보하여 우리나라의 단주기 기후변화에 대한 정보를 구축해야 할 것으로 생각한다. 본문에서 언급한 바와 같이 이러한 단주기 기후변화는 한반도와 같이 협소한 지역 내에서도 국지적으로 전혀 다르게 나타났을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 한반도 전역에서 인간의 영향이 크게 미치지 않은 습지 퇴적물 혹은 동굴 석순 시료를 최대한 찾고 이들을 대상으로 정밀한 분석을 수행해야 미래의 환경 변화 대처에 실질적인 도움이 될 수 있는 자료를 확보할 수 있을 것이다. 또한 산출된 결과로부터 (동북아 내륙 및 일본 그리고 북서태평양의 여타 고환경 정보들과의 심층적인 비교를 통해) 지역별/시기별로 특징적인 단주기 기후변화가 나타난 과정을 논리적으로 추론해야 한다. 우리나라의 단주기 기후변화에 대한 연구는 그 자체만으로도 우리에게 중요한 의미를 갖지만, 대륙성 기후와 해양성 기후가 모두 두드러지게 나타나는 한반도의 지리적 위치로 인해, 대기순환과 해양순환의 영향을 함께 받는 동아시아 전체의 고기후변화 퍼즐을 완성하는 데 있어 핵심 정보를 제공할 수 있다는 점에 더 큰 의의가 있다.

사사

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 작성되었습니다 (NRF-2012S1A5A8022554).

참고문헌

- Alley, R. B., 2000, The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland, *Quaternary Science Reviews*, 19, 213-226.
- Alley, R. B., Mayewski, P. A., Sowers, T., Stuiver, M., Taylor, K., and Clark, P. U., 1997, Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago, *Geology*, 25, 483-486.
- Barbante, C., Barnola, J.-M., Becagli, S., Beer, J., Bigler, M., Boutron, C., Blunier, T., Castellano, E., Cattani, O., and Chappellaz, J., 2006, One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica, *Nature*, 444, 195-198.
- Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Jantschik, R., Clasen, S., and Simet, C., 1992, Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period, *Nature*, 360, 245-249.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., and Bonani, G., 2001, Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene, *Science*, 294, 2130-2136.
- Bond, G. and Lotti, R., 1995, Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the Last Glaciation, *Science*, 267, 1005-1010.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., and

- Bonani, G., 1997, A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates, *Science*, 278, 1257-1266.
- Broecker, W. S., 1994, Massive iceberg discharges as triggers for global climate change, *Nature*, 372, 421-424.
- Chen, H. F., Wen, S. Y., Song, S. R., Yang, T. N., Lee, T. Q., Lin, S. F., Hsu, S. C., Wei, K. Y., Chang, P. Y., and Yu, P. S., 2012, Strengthening of paleo-typhoon and autumn rainfall in Taiwan corresponding to the Southern Oscillation at late Holocene, *Journal of Quaternary Science*, 27, 964-972.
- Ditlevsen, P. D., Kristensen, M. S., and Andersen, K. K., 2005, The recurrence time of Dansgaard-Oeschger events and limits on the possible periodic component, *Journal of Climate*, 18, 2594-2603.
- Dykoski, C. A., Edwards, R. L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z., and Revenaugh, J., 2005, A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China, *Earth and Planetary Science Letters*, 233, 71-86.
- Ellison, C. R., Chapman, M. R., and Hall, I. R., 2006, Surface and deep ocean interactions during the cold climate event 8200 years ago, *Science*, 312, 1929-1932.
- Harada, N., Sato, M., and Sakamoto, T., 2008, Freshwater impacts recorded in tetraunsaturated alkenones and alkenone sea surface temperatures from the Okhotsk Sea across millennial-scale cycles, *Paleoceanography*, 23, PA3201.
- Hayashi, R., Takahara, H., Hayashida, A., and Takemura, K., 2010, Millennial-scale vegetation changes during the last 40,000 yr based on a pollen record from Lake Biwa, Japan, *Quaternary Research*, 74, 91-99.
- Ijiri, A., Wang, L., Oba, T., Kawahata, H., Huang, C.-Y., and Huang, C.-Y., 2005, Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42,000 years, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219, 239-261.
- Jang, B.-O., 2010, Palynological study and development and differentiation of cool-temperate forests in the southern region of DMZ in the Korean peninsula, Ph.D. dissertation, University of Ulsan, 163pp (in Korean).
- Jo, K.-N., Woo, K. S., Cheng, H., Edwards, L. R., Wang, Y., Kim, R., and Jiang, X., 2010, Textural and carbon isotopic evidence of monsoonal changes recorded in a composite-type speleothem from Korea since MIS 5a, *Quaternary Research*, 74, 100-112.
- Jo, K.-N., Woo, K. S., Yi, S., Yang, D. Y., Lim, H. S., Wang, Y., Cheng, H., and Edwards, R. L., 2014, Mid-latitude interhemispheric hydrologic seesaw over the past 550,000 years, *Nature*, 508, 378-382.
- Kanfoush, S. L., Hodell, D. A., Charles, C. D., Guilderson, T. P., Mortyn, P. G., and Ninnemann, U. S., 2000, Millennial-scale instability of the Antarctic ice sheet during the last glaciation, *Science*, 288, 1815-1819.
- Kigoshi, T., Kumon, F., Hayashi, R., Kuriyama, M., Yamada, K., and Takemura, K., 2014, Climate changes for the past 52 ka clarified by total organic carbon concentrations and pollen composition in Lake Biwa, Japan, *Quaternary International*, 333, 2-12.
- Kobashi, T., Severinghaus, J. P., Brook, E. J., Barnola, J.-M., and Grachev, A. M., 2007, Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice, *Quaternary Science Reviews*, 26, 1212-1222.
- Kubota, Y., Kimoto, K., Tada, R., Oda, H., Yokoyama, Y., and Matsuzaki, H., 2010, Variations of East

- Asian summer monsoon since the last deglaciation based on Mg/Ca and oxygen isotope of planktic foraminifera in the northern East China Sea, *Paleoceanography*, 25, PA4205.
- Lea, D. W., Pak, D. K., and Spero, H. J., 2000, Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations, *Science*, 289, 1719-1724.
- Lee, C.-S., Kang, S.-J., Choi, K.-R., 2011, Vegetational history of the Mulyeongari fen by pollen analysis in Jeju Island, Korea, *Journal of the Environmental Sciences*, 20, 341-350 (in Korean).
- Li, T., Liu, Z., Hall, M. A., Berne, S., Saito, Y., Ceng, S., and Cheng, Z., 2001, Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 176, 133-146.
- Lim, D., Xu, Z., Choi, J., Kim, S., Kim, E., Kang, S., and Jung, H., 2011, Paleoclimatographic changes in the Ulleung Basin, East (Japan) Sea, during the last 20,000 years: evidence from variations in element composition of core sediments, *Progress in Oceanography*, 88, 101-115.
- Lim, J. and Fujiki, T., 2011, Vegetation and climate variability in East Asia driven by low-latitude oceanic forcing during the middle to late Holocene, *Quaternary Science Reviews*, 30, 2487-2497.
- Litt, T. and Stebich, M., 1999, Bio-and chronostratigraphy of the lateglacial in the Eifel region, Germany, *Quaternary International*, 61, 5-16.
- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P. E., Gotanda, K., and Sawai, Y., 2005, Pollen/event stratigraphy of the varved sediment of Lake Suigetsu, central Japan from 15,701 to 10,217 SG vyr BP (Suigetsu varve years before present): description, interpretation, and correlation with other regions, *Quaternary Science Reviews*, 24, 1691-1701.
- Nakagawa, T., Kitagawa, H., Yasuda, Y., Tarasov, P. E., Nishida, K., Gotanda, K., and Sawai, Y., 2003, Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the last termination, *Science*, 299, 688-691.
- Nakagawa, T., Tarasov, P. E., Nishida, K., Gotanda, K., and Yasuda, Y., 2002, Quantitative pollen-based climate reconstruction in central Japan: application to surface and Late Quaternary spectra, *Quaternary Science Reviews*, 21, 2099-2113.
- North Greenland Ice Core Project Members, 2004, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature*, 41, 147-151.
- Park, J., Lim, H. S., Lim, J., Yu, K. B., and Choi, J., 2014a, Orbital-and millennial-scale climate and vegetation changes between 32.5 and 6.9 k cal a BP from Hanon Maar paleolake on Jeju Island, South Korea, *Journal of Quaternary Science*, 29, 570-580.
- Park, J., Lim, H. S., Lim, J., and Park, Y.-H., 2014b, High-resolution multi-proxy evidence for millennial-and centennial-scale climate oscillations during the last deglaciation in Jeju Island, South Korea, *Quaternary Science Reviews*, 105, 112-125.
- Park, J. and Park, J., 2015, Pollen-based temperature reconstructions from Jeju island, South Korea and its implication for coastal climate of East Asia during the late Pleistocene and early Holocene, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 417, 445-457.
- Parplies, J., Lücke, A., Vos, H., Mingram, J., Stebich, M., Radtke, U., Han, J., and Schleser, G. H., 2008, Late glacial environment and climate development in northeastern China derived from geochemical and isotopic investigations of the

- varved sediment record from Lake Sihailongwan (Jilin Province), *Journal of Paleolimnology*, 40, 471-487.
- Partin, J. W., Cobb, K. M., Adkins, J. F., Clark, B., and Fernandez, D. P., 2007, Millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum, *Nature*, 449, 452-455.
- Porter, S. C. and Zhisheng, A., 1995, Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation, *Nature*, 375, 305-308.
- Raisbeck, G., Yiou, F., Jouzel, J., and Stocker, T., 2007, Direct north-south synchronization of abrupt climate change record in ice cores using Beryllium 10, *Climate of the Past*, 3, 541-547.
- Hughen, K. A., Overpeck, J. T., Peterson, L. C., and Trumbore, S., 1996, Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation, *Nature*, 380, 51-54.
- Schettler, G., Liu, Q., Mingram, J., Stebich, M., and Dulski, P., 2006, East-Asian monsoon variability between 15000 and 2000 cal. yr BP recorded in varved sediments of Lake Sihailongwan (northeastern China, Long Gang volcanic field), *The Holocene*, 16, 1043-1057.
- Selvaraj, K., Wei, K.-Y., Liu, K.-K., and Kao, S.-J., 2012, Late Holocene monsoon climate of northeastern Taiwan inferred from elemental (C, N) and isotopic ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) data in lake sediments, *Quaternary Science Reviews*, 37, 48-60.
- Stebich, M., Mingram, J., Han, J., and Liu, J., 2009, Late Pleistocene spread of (cool-) temperate forests in Northeast China and climate changes synchronous with the North Atlantic region, *Global and Planetary Change*, 65, 56-70.
- Sun, Y., Oppo, D. W., Xiang, R., Liu, W., and Gao, S., 2005, Last deglaciation in the Okinawa Trough: Subtropical northwest Pacific link to Northern Hemisphere and tropical climate, *Paleoceanography*, 20, PA4005.
- Tada, R., Irino, T., and Koizumi, I., 1999, Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in Late Quaternary sediments of the Japan Sea, *Paleoceanography*, 14, 236-247.
- Takahara, H., Igarashi, Y., Hayashi, R., Kumon, F., Liew, P.-M., Yamamoto, M., Kawai, S., Oba, T., and Irino, T., 2010, Millennial-scale variability in vegetation records from the East Asian Islands: Taiwan, Japan and Sakhalin, *Quaternary Science Reviews*, 29, 2900-2917.
- Tarasov, P. E., Nakagawa, T., Demske, D., Österle, H., Igarashi, Y., Kitagawa, J., Mokhova, L., Bazarova, V., Okuda, M., and Gotanda, K., 2011, Progress in the reconstruction of Quaternary climate dynamics in the Northwest Pacific: A new modern analogue reference dataset and its application to the 430-kyr pollen record from Lake Biwa, *Earth-Science Reviews*, 108, 64-79.
- Thomas, E. R., Wolff, E. W., Mulvaney, R., Steffensen, J. P., Johnsen, S. J., Arrowsmith, C., White, J. W., Vaughn, B., and Popp, T., 2007, The 8.2 ka event from Greenland ice cores, *Quaternary Science Reviews*, 26, 70-81.
- Thornalley, D. J., McCave, I. N., and Elderfield, H., 2010, Freshwater input and abrupt deglacial climate change in the North Atlantic, *Paleoceanography*, 25, PA1201.
- Tinner, W. and Lotter, A. F., 2001, Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka, *Geology*, 29, 551-554.
- Vidal, L., Schneider, R., Marchal, O., Bickert, T., Stocker, T., and Wefer, G., 1999, Link between the North and South Atlantic during the Heinrich events of the last glacial period, *Climate Dynamics*, 15, 909-919.
- Wang, B., Wu, R., and Fu, X., 2000, Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate?, *Journal of Climate*, 13, 1517-

- 1536.
- Wang, L., Sarnthein, M., Erlenkeuser, H., Grimalt, J., Grootes, P., Heilig, S., Ivanova, E., Kienast, M., Pelejero, C., and Pflaumann, U., 1999, East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea, *Marine Geology*, 156, 245-284.
- Wang, Y.-J., Cheng, H., Edwards, R. L., An, Z., Wu, J., Shen, C.-C., and Dorale, J. A., 2001, A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China, *Science*, 294, 2345-2348.
- Wright, H. E. and Thorpe, J., 2003, Climate change and the origin of agriculture in the Near East, in: Mackay, A., Battarbee, R., Birks, J., and Oldfield, F. (eds.), *Global Change in the Holocene*, Hodder Arnold, 49-62.
- Xu, D., Lu, H., Wu, N., Liu, Z., Li, T., Shen, C., and Wang, L., 2013, Asynchronous marine-terrestrial signals of the last deglacial warming in East Asia associated with low-and high-latitude climate changes, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 9657-9662.

책임 편집: 허인혜

영문 교열: 이은걸