

환경 변화에 따른 몽골 북부 풍성 퇴적층 발달 과정

홍성찬* · 성영배**

Episodic Aeolian Deposit Formation Related to Paleo-environment in Northern Mongolia

Seongchan Hong* · Yeong Bae Seong**

요약 : 풍성 퇴적층은 전지구적으로 널리 분포하며 제4기 빙기-간빙기의 반복적인 기후 변화를 잘 기록하고 있어 기후 복원을 위한 중요한 대리 자료이다. 풍성 퇴적층은 다른 대리 자료에서는 복원할 수 없는 풍속 등 바람 에너지의 변화를 기록하고 있으며 특히 퇴적물의 입도 및 대자율 특성은 과거 기후의 영향에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 현지 답사를 통해 채취한 5개 지점의 풍성층 시료에 대해 연대측정과 입도 분석 및 대자율 측정을 실시하여 퇴적 당시 풍성 환경의 변화 가능성에 대해 논의해 보고자 한다. 본 연구는 몽골 북부 지역에 분포하는 풍성 퇴적층의 발달과정을 통해 이 지역의 환경 변화를 밝히고자 하였다. 몽골 울란바토르에서 북쪽 러시아 국경 인근의 수흐바타르 사이의 약 300km 길이의 넓은 지역에 걸쳐 사구 혹은 피스와 같은 풍성 퇴적층이 두껍게 나타난다. 이 지역은 몽골 북부의 대규모 하천인 오르혼 강과 셀렝게 강이 흐르며 형성된 최대 폭 15km의 넓은 범람원이 나타나 풍성 물질의 공급이 원활한 지역으로 하천에 의해 이동, 퇴적된 모래와 실트가 계절에 따른 강한 바람에 의해 재이동되어 퇴적된 지형으로 판단된다. 이 풍성층의 퇴적 시기는 18-27ka와 0-5ka의 두 시기로 크게 구분되며 각각 건조도 증가와 식생 정착에 따른 영향을 받은 것으로 보인다.

주요어 : OSL 연대측정, 입도 분석, 대자율, 시베리아 고기압, 기후 변화

Abstract : Aeolian deposits are widely distributed globally and important proxies for paleo-climate reconstruction, recording the climatic changes at Quaternary. Aeolian deposits inform changes in wind energy, such as wind speed, which is not easy to be reconstructed directly from other proxy data. The grain size and magnetic susceptibility of the deposits are known to be sensitive indicators of climatic change. In this study, age dating, grain size analysis, and magnetic susceptibility measurements were conducted on samples collected from five locations to elucidate the changes in the aeolian environment at the time of deposition. This study documents environmental changes in northern Mongolia by examining the development of aeolian deposits. There are thick aeolian deposits, resembling loess or loess-like sediments in ~300 km wide area between Ulaanbaatar and the northern Russian border near Sukhbaatar. This area has a wide floodplain with a maximum width of 15 km, formed by the Orkhon and Selenge rivers, which are major rivers in northern Mongolia. The floodplain facilitates the efficient supply and deposition of aeolian material. The sand and silt, transported and deposited through river processes, are subject to be in motion by seasonal strong winds, leading to their re-mobilization and re-deposition in the landscape. The timing of aeolian deposit is distinguished into two phases: 18-27ka and 0-5ka, with each period appearing to be influenced by an increase in aridity and vegetation cover.

Key Words : OSL dating, Grain size analysis, Magnetic susceptibility, Siberian High, Climate change

* 한국교육원대학교 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Korea National University of Education), schong@knue.ac.kr

** 고려대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Korea University), ybseong@korea.ac.kr

1. 서론

시베리아 고기압은 동아시아, 나아가 전지구적인 기후에 영향을 주는 주요 기단으로 세력이 왕성한 북반구 겨울철에는 그 중심이 몽골 북부와 바이칼 호수 지역에 위치한다. 시베리아 고기압이 미치는 전세계적인 영향 정도와 직접적인 영향권인 동아시아 지역에 거주하는 인구 규모를 고려하였을 때 시베리아 고기압의 중심 주변 지역의 기후 변화에 대한 연구는 매우 중요하다.

동아시아 지역의 여름과 겨울 계절풍의 강도는 서로 반대로 변화하며 겨울 계절풍이 강할 때 건기가 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있다(An *et al.*, 1991; Li *et al.*, 1988). 이와 달리, 일부의 연구에서는 겨울 계절풍과 건조 기후의 연관성이 나타나지 않는다는 증거가 보고되고 있다(Feng *et al.*, 1998, 2004, 2005, 2006; Gasse *et al.*, 1991; Porter and An, 1995).

현재 동아시아 여름 계절풍의 서쪽 한계는 몽골 동쪽의 중국과의 국경 인근으로 알려져 있지만(An, 2000; Chen *et al.*, 2008; Herzschuh, 2006; Wang and Feng, 2013), 제4기 동안 여름 계절풍의 한계선 변화에 대해서는 여전히 논쟁으로 남아있다(Shi, 2002; Rudaya *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2013).

몽골과 남시베리아 지역의 많은 고기후학적 연구는 대부분 호수퇴적층을 통해 이루어지고 있다(Feng *et al.*, 2004, 2005, 2013; Gunin *et al.*, 2013). 하지만 몽골 북부 지역은 호수가 몽골 남부의 고비 지역이나 서부 알타이 지역에 비해 적어 호수퇴적층만을 이용해 고기후를 복원하는데 어려움이 있다. 반면 몽골 북부 지역은 몽골의 타 지역에 비해 상대적으로 풍성 퇴적층이 잘 발달되어 있다. 풍성 퇴적층은 퇴적 당시의 풍향과 풍속을 포함하는 바람장(wind regime)의 변화와 이에 따른 풍성 퇴적물의 이동 과정에 대한 변화를 유추할 수 있다는 장점이 있지만 이를 활용한 연구는 중국 황토 고원(Chinese loess plateau; An *et al.*, 1991; Hovan *et al.*, 1989; Liu and Ding, 1998)에서 집중적으로 진행던데 비해 몽골 북부 지역에서는 제한적이며, 일부 러시아 연구자들의 결과물을 제외하면 최근에 이르러 연구가 본격적으로 시작되었다(Dash and Tumurbatar, 2000; Dordschgotov, 1992; Feng *et al.*, 2007; Grunert *et al.*, 2000; Grunert and Lehmkuhl, 2004; Ma *et al.*, 2013).

본 연구에서는 몽골 북부 지역에 분포하는 풍성 퇴적층

에 대한 연대측정과 층서학적 조사를 통해 플라이스토세 후기부터 홀로세에 이르는 기간 동안 풍성 환경 변화를 복원하고자 하였다. 이를 위해 총 5개 지역의 퇴적층에서 OSL 연대측정(optically stimulated luminescence dating)과 입도 분석(grain size analysis), 대자율(magnetic susceptibility) 측정을 수행하였다.

2. 연구 지역 개관 및 시료 채취 지점

몽골은 중앙아시아의 동북부에 위치하며, 동경 87°45'-119°56', 북위 41°34'-52°09'에 위치한 지역이다. 몽골의 남부 지역은 고비 사막으로 알려진 건조 지역이 나타나며 동부는 저기복의 넓은 평지가 나타난다. 서부의 알타이(Altai) 산맥과 중앙부의 항가이(Khangai) 산맥의 고지대가 나타나며 북부의 헨티(Khentei), 북서부의 사안(Sayan) 산맥이 편서풍을 막아 이들 산맥의 비그늘에 해당하는 몽골 지역은 강수량이 제한적이다.

몽골의 일반적인 기후는 연교차가 큰 대륙성 기후의 특성이 매우 강하게 나타나며 지역별로도 기온과 강수량에서 큰 차이를 보인다. 연평균기온(mean annual temperature)은 북부(-10°C)와 남부(10°C) 사이에 약 20°C의 차이를 보이며 북부는 습윤-아습윤(humid or semi-humid) 환경인데 비해, 중부는 건조(arid), 남부는 건조-극건조(arid to hyper-arid) 환경이 나타난다. 겨울철은 시베리아 고기압으로부터 서북서 방향의 바람이 영향을 크게 미치며 강설이 동반되기도 한다. 강설량은 매우 적지만 낮은 기온으로 인해 적설(snow cover)은 북부 지역은 120-150일간, 동부 스텝 지역은 70-120일, 남부 고비 지역은 30-60일간 유지된다(Batima *et al.*, 2005). 연강수량의 85% 정도는 4월부터 9월 사이에 나타나며 특히, 7월에서 8월 사이에 가장 많은 강수량이 집중된다(Batima *et al.*, 2005).

이 지역의 식생 역시 기후대의 분포 특성에 따라 남북의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 몽골 북부와 중앙부의 고산지역을 중심으로 침엽수 중심의 타이가(taiga) 식생이 나타나며 점차 남쪽으로 오면서 침엽수와 낙엽활엽수가 혼재된 식생(light taiga)이 나타난다. 중앙부의 저지대에서는 스텝과 스텝-삼림 혼재 식생(forest-steppe)이 주로 나타나며 남부 지역으로 올수록 스텝-사막(steppe-desert), 사막이 순서대로 나타난다(Gunin and Vostokova, 2005; Hilbig,

1995; Wesche *et al.*, 2016).

다양한 지형과 기후 및 식생이 나타나는 몽골은 크게 다음과 같이 5개의 지역으로 나눌 수 있다(Klinge and Sauer, 2019). 가장 먼저, 몽골 동부 스텝 지역은 아습윤-아건조 기후가 나타나는 지역으로, 다수의 습지가 분포하는, 넓고 평탄한 분지로 이루어져 있다. 두 번째, 몽골 남부의 고비 지역은 아건조-건조한 기후가 나타나는 지역으로 이 지역에서는 높은 산과 넓은 분지에 스텝 혹은 사막 식생이 나타난다. 세 번째, 몽골 서부의 몽골-알타이 지역은 아습윤-건조 환경으로 빙하가 남아 있는 고산, 대규모 호수가 분포하는 스텝, 스텝-삼림 혼재 식생이 주로 나타난다. 네 번째, 몽골 중앙부의 항가이 산맥 지역은 아습윤-아건조 환경의 지역으로 높은 산과 산간 분지에 스텝 식생이 주로 나타나는 지역이다. 마지막은 흙스골(Khuvsgul) 호수 지역에서 헨티 산맥 지역을 아우르는 몽골 북부 지역으로 저구릉성 산지와 소규모 계곡을 따라 타이가와 스텝이 나타나는 습윤-아습윤 지역이다.

연구 지역은 이 중 몽골 북부 지역에 해당한다. 몽골 울란바토르에서 몽골과 러시아 국경 인근의 수흐바타르 사이의 약 300km 거리의 지역은 몽골 중부 항가이 산맥에서 기원한 오르혼(Orkhon) 강과 셀렝게(Selenge) 강, 헨티 산맥에서 기원한 하라(Kharra) 강에 의해 형성된, 넓은 저기

복 지대가 분포하고 있다. 남북 혹은 남서-북동 방향의 산지 사이에 위치한 이 지역은 범람원이 넓게 발달해 있으며 여기에서 기원한 풍성 퇴적층이 인근 하안단구와 산록부를 따라 두껍게 쌓여 있어 'Baikal-Ulaanbaatar loess covered corridor'(Feng, 2001; Khosbayar, 1989)로 불리기도 한다. 반복적인 겨울 계절풍과 여름 계절풍의 영향을 받은 중국 황토고원의 풍성 퇴적층과 달리 이 지역의 풍성 퇴적층은 여름 몬순의 영향을 거의 받지 않는 것으로 알려져 있어(Feng *et al.*, 2007) 시베리아 고기압의 변화에 의한 겨울 몬순의 강도 변화만을 온전하게 복원할 수 있다는 장점이 있다.

현지 답사를 통해 연구 지역 중 풍성 퇴적층이 뚜렷하게 발달한 총 5개 지점을 선정하여 시료를 채취하였다(그림 1). 가장 남쪽의 시료 채취 지점은 울란바토르와 다르항의 중간에 위치하는 바양골(Bayangol, BYG, 그림 2) 지역의 약 4m 두께의 퇴적층 노두로 깊이 1.5m까지는 어두운 색으로 발달한 유기물층과 밝은 색의 풍성 퇴적층이 반복적으로 발달하며 깊이 1.5-2m 구간에서는 단단한 탄산염층이 발달해 있는 특징을 볼 수 있다. 깊이 2m 이하의 구간에서는 고화가 진행된 모래층으로 구성되어 있다. 이 퇴적층에서는 10cm 간격으로 입도 분석 및 대자율 측정용 시료를 채취하였으며 퇴적상을 고려하여 총 9점의 OSL 연대측정용 시료를 채취하였다.

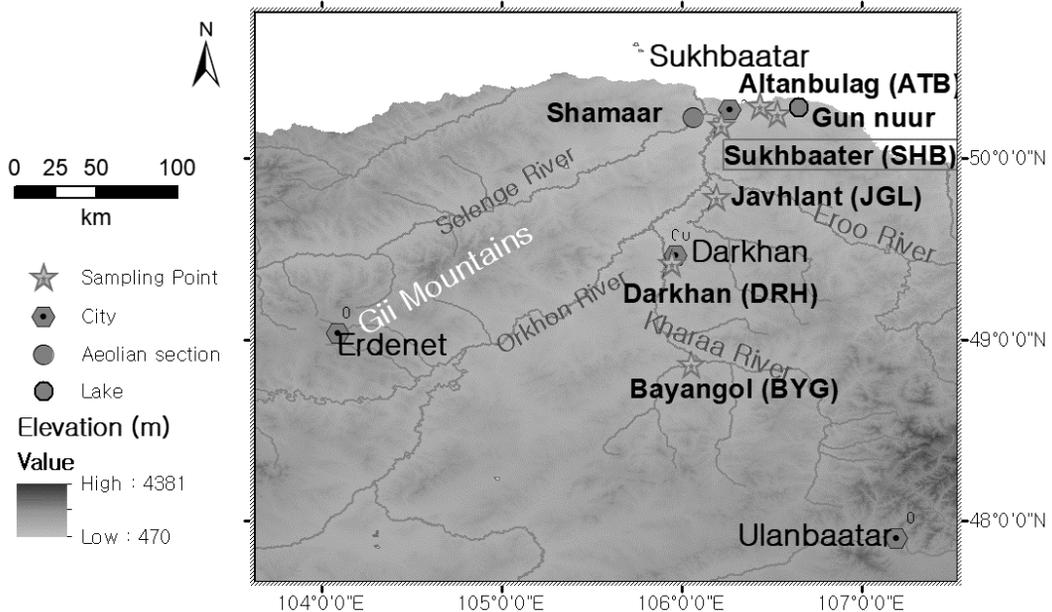


그림 1. 연구지역 및 시료 채취 지점

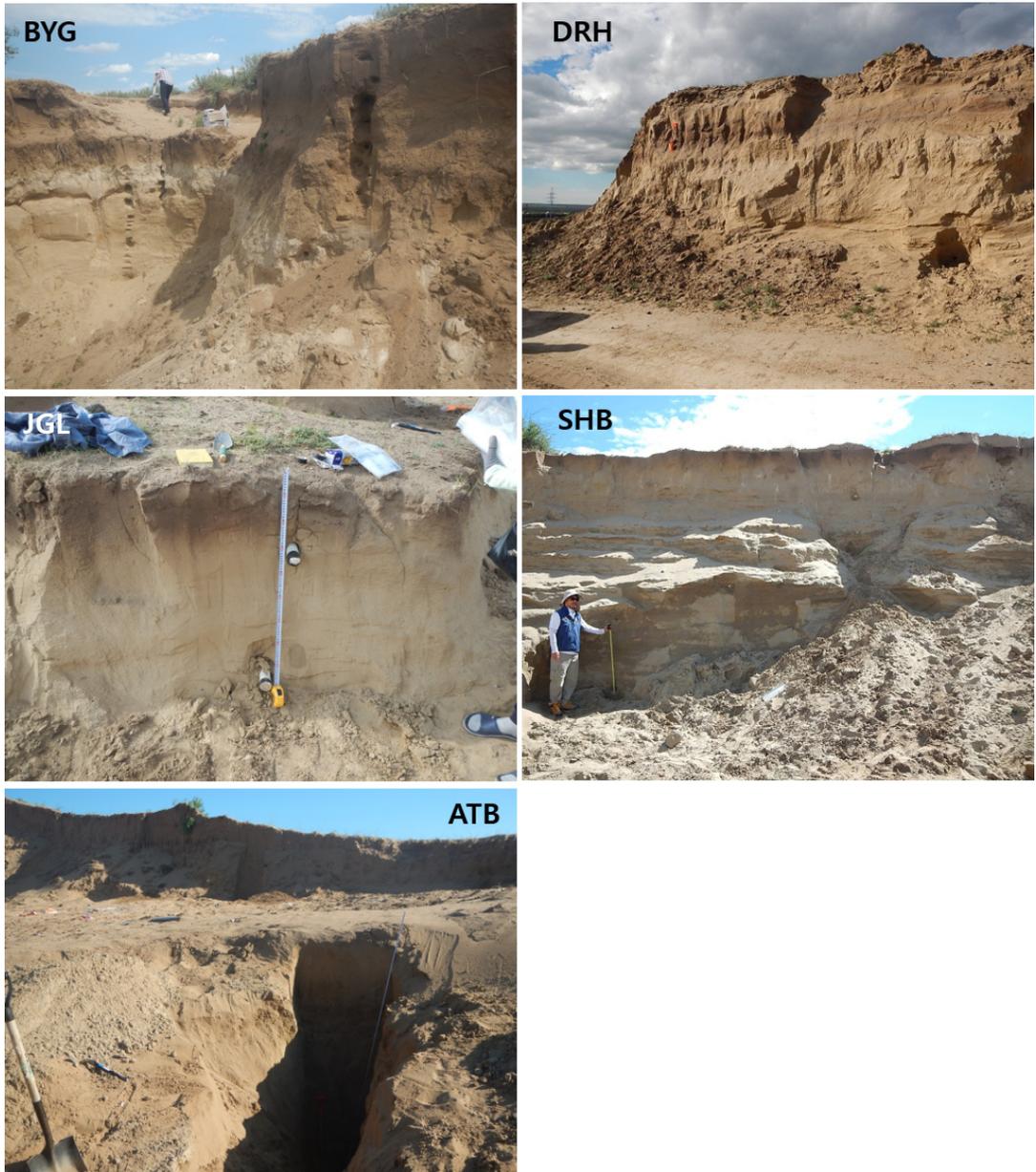


그림 2. 시료 채취 지점의 퇴적층 노두

두 번째 지점은 다르항(Darkhan, DRH, 그림 2) 인근에 위치한 약 5.5m 두께의 퇴적층으로 모래로 이루어진 본 연구의 다른 시료 채취지점 퇴적층과 달리 세사(fine sand) 혹은 실트(silt) 함유량이 높은 특징을 가지고 있다. 이 퇴적층에서는 깊이 1m 지점을 중심으로 1~2매의 유기물층이 나타나며 이 유기물층과 기반암은 연결되는 최하단의 모래

층을 제외하고는 뚜렷한 층서가 확인되지 않는다. 이 퇴적층에서는 20cm 간격으로 입도 분석 및 대자율 측정용 시료를 채취하였고 총 7점의 OSL 연대측정 시료를 채취하였다.

세 번째 지점은 다르항과 수흐바타르 사이에 위치한 자블란트(Javkhlant, JGL) 지역에 분포하는 1.5m 두께의 퇴적층으로 얇은 퇴적층 두께에도 불구하고 뚜렷한 2매의 유

기물층이 확인되는 것이 특징이다. 이 퇴적층에서 10cm 간격으로 입도 분석 및 대자율 측정용 시료를 채취하고 총 5점의 OSL 연대측정용 시료를 채취하였다.

네 번째 지점은 수흐바타르 시 남쪽 지역에 분포한 두께 약 5.5m의 퇴적층(Sukhbaatar, SHB, 그림 2)으로 상부 1m 내에 나타나는 각각 1매의 두꺼운 유기물층과 탄산염층을 제외하면 동질적인 모래로 구성된 퇴적층이다. 이 퇴적층에서는 50cm 간격으로 입도 분석용 시료를 채취하고 총 5점의 OSL 연대측정용 시료를 채취하였다. 이 퇴적층에서는 대자율 측정을 생략하였다.

마지막 지점은 수흐바타르 시 동쪽, 수흐바타르와 알탄 불락 사이에 분포하는 두께 5m내외의 퇴적층(Altanbulag, ATB, 그림 2)으로 이 퇴적층의 기저에는 왕자갈(Cobble) 크기의 아원력·아각력이 나타나는 점이 다른 시료 채취 지점의 퇴적층과 구분되는 특징이다. 깊이 약 2m 지점에서 두꺼운 유기물층이 1매 존재하며, 두께가 제각기 다른 탄산염층은 각각 깊이 0.5-1m, 2.5-2.7m, 4-4.1m 구간에 나타나 본 연구의 시료 채취 지점 중 가장 다양한 퇴적상 변화를 보이고 있다. 이 퇴적층에서는 10cm 간격으로 입도 분석 및 대자율 측정용 시료를 채취하고 총 11점의 OSL 연대측정용 시료를 채취하였다.

시료 채취 지점들은 현재 하천과의 비고 및 거리를 고려하였을 때 이들 퇴적물은 하천에 의해 퇴적되기는 어려운 것으로 판단되며 바람이 유일한 매개체로 작용한 것으로 판단된다. 입도가 인근의 범람원과 유사하거나 작은 크기의 입자로 구성되어 있지만 대부분 모래 크기인 점으로 미루어 보아 이동거리는 멀지 않고 인근의 범람원에서 이동해온 것으로 보인다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 OSL 연대측정을 통해 퇴적층의 형성시기를 파악하였다. OSL 연대측정은 무기광물이 주변에서 방출되는 자연방사선에 의해 광물 내에 축적된 에너지가 빛과 같은 외부 자극에 의해 빛의 형태로 방출되는 현상을 이용하여 광물이 마지막으로 햇빛 혹은 열에 노출된 이후로의 시간을 측정하는 방법으로 지형학, 지질학, 고고학 등의 분야에서 널리 사용되는 연대측정법 중 하나이다. OSL 연대측정은 대상 광물이 이동·퇴적되는 과정에서 햇빛에 충

분히 노출되어 기존에 축적된 루미네선스 신호를 잃어버리는 과정(beaching)이 연대측정 결과의 신뢰도에 큰 영향을 주게 되는데 본 연구에서 대상으로 하고 있는 풍성 퇴적층은 우수 혹은 파랑에 의한 퇴적층에 비해 기존 신호 제거 과정이 훨씬 효율적으로 발생하는 것으로 알려져 있다.

OSL 연대측정은 주로 석영 혹은 장석을 대상 광물로 이용하는데 본 연구에서는 가장 흔히 일반적인 대상 광물인 석영을 이용하였다. 석영을 대상으로 하는 OSL 연대측정은 장석을 이용할 경우에 비해 연대측정 가능 범위가 낮다는 단점이 있지만 발생하는 루미네선스 신호의 특성이 잘 정의되어 있어 연대 산출 과정이 단순하고 연대 결과의 신뢰도 또한 장석에 비해 높다는 장점이 있다.

채취한 퇴적물 시료는 빛에 노출되지 않은 상태로 암실로 옮겨 90-250 μ m의 입자를 분리한 다음, 10%의 HCl과 10%의 H₂O₂를 이용하여 탄산염과 유기물을 제거하였다. 48%의 HF를 이용하여 석영을 제외한 광물을 제거한 후 순수한 석영을 대상으로 OSL 연대측정을 시행하였다.

OSL 연대측정은 크게 마지막으로 햇빛에 노출된 이후 광물 내 축적된 방사선량(등가선량, Equivalent dose)과 대상 광물의 주변에서 방출되는 단위 시간당 방사선량(연간선량, Dose rate)을 이용하여 계산된다. 등가선량 측정은 한국기초과학지원연구원에 설치, 운용되고 있는 Automated TL/OSL reader(risø DA-20)를 이용하였으며 단일시료재현법(Single aliquot regenerated dose protocol; Murray and Wintle, 2003)을 통해 결정하였다. 연간선량은 고분해능 감마스펙트rometer를 이용하여 주변 퇴적층 내 ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th와 같은 방사성 동위원소의 함량을 측정한 다음, 이들의 붕괴 과정에서 방출되는 방사선량과 우주선(cosmic ray)량을 합산하여 산출하였다. 본 연구에서 각 방사성 동위원소에서 기인하는 방사선량은 Adamiec and Aitken (1998)이 제시한 전환 계수(conversion factor)에 따라 계산하였으며 우주선량은 Prescott and Hutton(1994)가 제시한 방법에 따라 시료의 깊이, 시료 채취 지점의 위도와 경도를 고려하여 계산하였다.

입도 분석은 레이저 회절 방식을 이용한 입도분석기(HELOS, Sympatec)를 이용해 각 시료별로 3회 반복하여 측정하였다. 측정 결과는 Gradistat 9.1(Blott and Pye, 2001)을 이용해 중앙값(median or D₅₀)을 산출하였다.

대자율은 이중 주파수 센서(MS2B, Bartington)를 이용해 각 시료별로 3회 측정하여 평균값을 산출한 후 시료 질량을 이용하여 보정하였다.

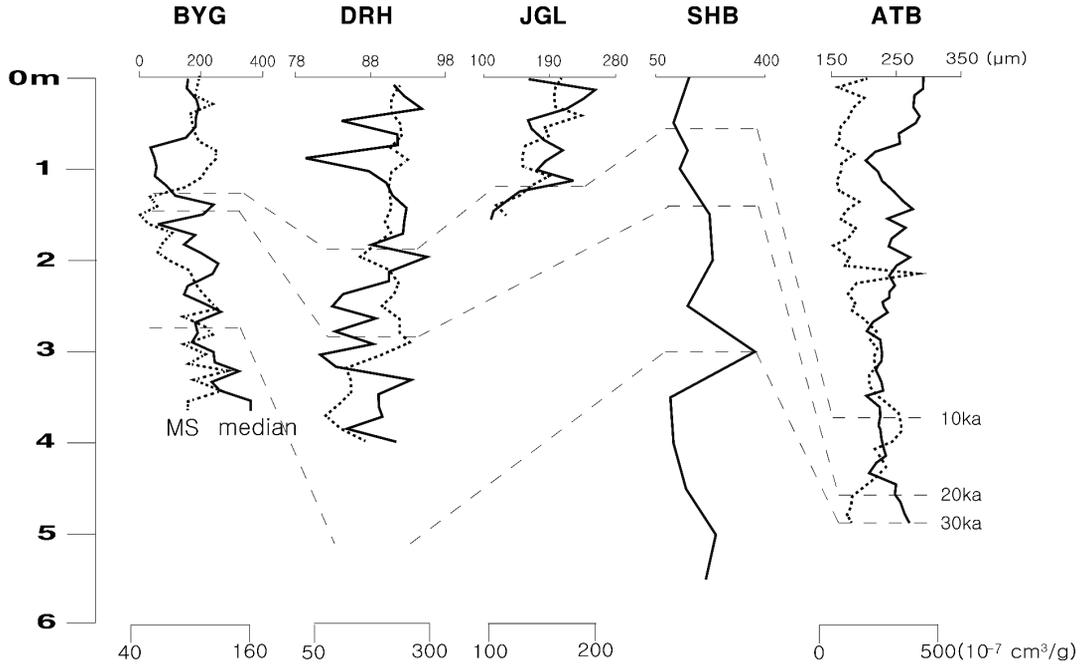


그림 4. 입도 분석 및 대자율 측정 결과

적층은 대체적으로 63.5-125 μ m의 극세사가 주를 이루고 있고 0-20%의 조사(coarse sand)와 5-20%의 실트가 포함되어 있다. 전체 퇴적층 중 깊이 3m 지점이 평균 350 μ m로 가장 조립한 것으로 확인되었으며 그 외의 지점은 대부분 100-250 μ m의 평균 입자 크기로 확인되었다.

마지막 ATB 퇴적층은 29.6 \pm 2.2, 0.2 \pm 0.1ka의 연대 결과를 보인다. 이 퇴적층의 입도 특성은 전체 퇴적층에서 평균 250 μ m 크기로 비교적 동질적인 것으로 확인되었다. 깊이 3.7m 구간을 경계로 그 아래 구간에서는 상부로 올수록 대자율 측정값이 높아지지만 3.7m에서 지표로 가까울수록 다시 낮아지는 형태로 나타났다.

5. 토의

1) 몽골 북부 지역의 고기후 변화

Owen *et al.*(1997, 1998)은 몽골 남부 고비 사막에 위치한 선상지에서 토양 형성 과정을 관찰한 결과 40-23ka 동안 습윤한 환경이 지속되었으며 22-15ka 동안은 서늘한 기후

조건에서 영구동토층이 발달하였다가 13-10ka 사이에 융해된 것을 확인하였다. Komatsu *et al.*(2001)과 Yu *et al.*(2019)은 몽골 남부 Orog nuur의 호수 퇴적층을 분석한 결과 35-24ka의 시기(=Marine Isotope Stage 3) 동안은 습윤한 환경이 유지되었으나 24-11ka사이의 시기 동안은 여러 번의 건조기가 반복되는 기후를 확인하였다.

몽골 서부 지역에 위치한 Bajan Nuur 호수의 수위 변동을 복원한 연구(Naumann and Walther, 2000) 또한 40ka 전에 현 호수위 대비 75-80m 높은 수위를 보였으며 이후 13.2ka까지 지속적으로 낮아진 것으로 나타났다.

이와 유사한 시기에 몽골을 포함한 중앙아시아 전역에서 습윤한 환경이 있었음을 보여주는 자료는 Gaxun Nuur basin(Wünnemann *et al.*, 2007), Kanas basin(Xu *et al.*, 2009), Wulagai lake (Yu *et al.*, 2014)와 같은 호수퇴적물 뿐만 아니라 Tengger 사구퇴적층(Lehmkuhl and Haselein, 2000), Shaamar 퇴적층(Feng *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2013)과 같은 풍성 퇴적층을 통해서도 확인된다. 이러한 습윤 환경은 항가이 산맥의 빙하 성장으로 나타나기도 하였다 (Lehmkuhl *et al.*, 2018; Rother *et al.*, 2014).

Orog nuur에서 24-11ka 사이에 나타난 건조 환경 역시 Luanhaizi Lake(Mischke *et al.*, 2005), 내몽골 지역의 Wul-

iangsu lake(Yu *et al.*, 2019)와 같이 몽골과 중국 서부를 포함하는 지역 일대에 걸쳐 확인된다.

플라이스토세 말기의 기후 변화 외 홀로세의 기후 변화도 역시 다양한 자료를 통해 확인할 수 있다. 특히 홉스골 호수의 수위를 대상으로 한 연구가 다양한 연구자에 의해 진행되었으며 공통적으로 지난 빙기 이후 홀로세 초기까지 강수량 증가(Prokopenko *et al.*, 2005) 혹은 기온 상승에 따른 빙하 용빙수의 유입(Fedotov *et al.*, 2004)으로 인해 지속적인 수위 상승이 있었던 것으로 추정하고 있으며 최고 수위는 현 호수 수위보다 6m 높았던 것으로 판단하기도 하였다(Orkhonselenge *et al.*, 2013).

연구 지역 인근의 Gun nuur 호수(그림 1)에서도 호수 퇴적층 내 화분(Feng *et al.*, 2013), 지화학 분석(Wang *et al.*, 2004), 구조(Feng *et al.*, 2005) 등의 다양한 프록시 자료를 이용해 과거 환경을 복원하였다. 높은 탄산염 함량이 나타나는 10.5-8.5ka의 홀로세 초기에 지금보다 높은 호수 수위가 확인되어 이 시기에 한랭 건조한 환경에서 온난 습윤한 환경으로 전환되었을 것으로 추정하거나(Wang *et al.*, 2004), 8.5ka 이후로 증발산량이 증가하여 호수위가 감소된 것으로 보았다(Zhang *et al.*, 2012). 홀로세 후기에 이르

러 높은 대자율이 나타나는 4.0-3.5, 3.0-2.3, 1.8-1.5 ka의 시기에 습윤한 환경을 보였으며, 그에 따른 높은 식생 밀도, 토양 침식량 감소로 인한 호수 퇴적층의 퇴적 속도 감소 등이 관찰되기도 하였다(Wang *et al.*, 2004).

연구지역 인근 Shamaar 지역의 풍성 퇴적층(그림 1) 내에 존재하는 고토양에 대한 분석을 통해 홀로세 초기(16.3-9.7 ka) 동안 온난 습윤한 환경이었다가(Feng *et al.*, 2005; 2007), 그 이후 3.1 ka까지 건조기가 지속된 것으로 해석하였다(Wang and Feng, 2013). Ma *et al.*(2013)은 이들과 같은 지점에서 화분 분석을 통해 15-12ka 사이에 기온은 증가한 반면, 습도가 감소하는 환경이 지속되었으며, 지난 3ka 이후로 타이가 식생이 나타나는 한랭 습윤한 환경이 나타난 것으로 해석하였다.

역시 연구지역 인근 헤티산맥 지역 토탄층의 화분, 구조, 지화학 분석을 통해 8.4ka까지의 홀로세 초기 동안 건조하였으며, 홀로세 중기는 전체적으로 습윤한 환경 중에 일시적(6.4-5.8ka) 건조 환경이 있었으며 2.8ka 이후 다시 습윤한 환경으로 변환된 것으로 추정되기도 하였다(Fukumoto *et al.*, 2012).

표 1 플라이스토세 후기 몽골 주변 지역의 기후 변화 선행 연구 결과

Area	Period (ka)	Condition	Reference
Gobi (South Mongolia)	23-40	Humid	Owen <i>et al.</i> (1997)
	15-22	Cool (permafrost developed)	Owen <i>et al.</i> (1998)
	10-13	Warm (permafrost degradation)	
Orog Nuur (Khangai-Gobi)	24-35	Humid	Yu <i>et al.</i> (2019)
	11-24	Cool and Dry	
Bajan Nuur (West Mongolia)	13,2-40	Dry (Lake shrank)	Naumann and Walther(2000)
Khentey Mt.	30-59 (MIS3)	Cool and Wet	Khandsuren <i>et al.</i> (2019)
	11-30 (MIS2)	Cold and Dry	
Khangai Mt.	32-40 (MIS3a)	Cool and Wet	Lehmkuhl <i>et al.</i> (2018)
	(MIS2)	Cold and Dry	
Uvs Nuur	(MIS2)	Cold and Dry	Grunert <i>et al.</i> (2000)
Baikal (Kotokel)	22-24	Coldest and Driest	Tarasov <i>et al.</i> (2019)
South Siberia	25-30 (MIS3)	2-4°C MAT Colder 200-400 mm lower precipitation than present	Chlachula(2003)
	19-21	9-10°C MAT Colder 250 mm lower precipitation than present	
Northern Eurasia	~18 (LGM)	1-15°C Colder 50-750mm Lower precipitation than today	Tarasov <i>et al.</i> (1999)

2) 시기별 퇴적률, 입도 및 대자율 변화

OSL 연대측정 결과, 전체 퇴적층은 약 45ka 이후로 형성된 것으로 확인되며 ATB 퇴적층을 제외한 나머지 4개 지점

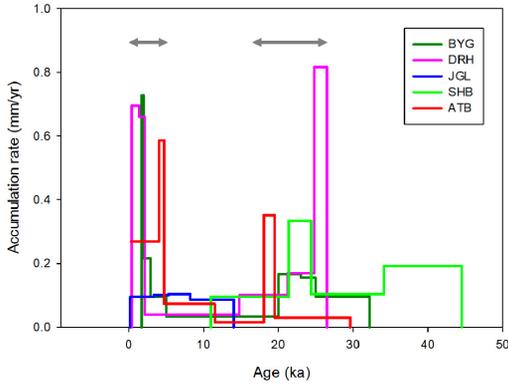


그림 5 시기별 퇴적률 변화

의 퇴적층은 비교적 유사한 깊이-연대의 관계를 보인다. 시기별 퇴적률을 확인하기 위해 OSL 시료 채취 지점간의 깊이 차를 연대차로 나누어 퇴적률을 계산하였다. 그 결과 지점에 따라 약간의 시기 차이가 확인되지만 대략적으로 27-18ka와 5-0ka 사이에 뚜렷하게 높은 퇴적률이 확인되어 45ka 이후 현재까지 크게 두 번의 풍성 퇴적층 성장기가 있었음을 확인할 수 있다(그림 5).

입도 분석 결과와 대자율 측정 결과는 퇴적층에 따라 평균입자의 크기 및 대자율 측정값이 상이하기 때문에 시기별 변화를 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 각 지점 퇴적층 시료의 입도와 대자율 측정값의 평균값과 표준편차를 이용하여 표준화하여 도시하였다(그림 6). 표준화된 입도 분석 결과에 따르면 약 15-5ka 사이는 비교적 낮은 값을 보여 대체적으로 세립질 퇴적물로 구성되어 있으며 45-0ka의 전체 시기 중 이 시기를 제외한 시기는 상대적으로 조립질의 퇴적물이 공급된 것으로 확인되었다. 풍속이 강할수록 입자 크기가 큰 물질이 이동할 수 있다는 점을 고려하면

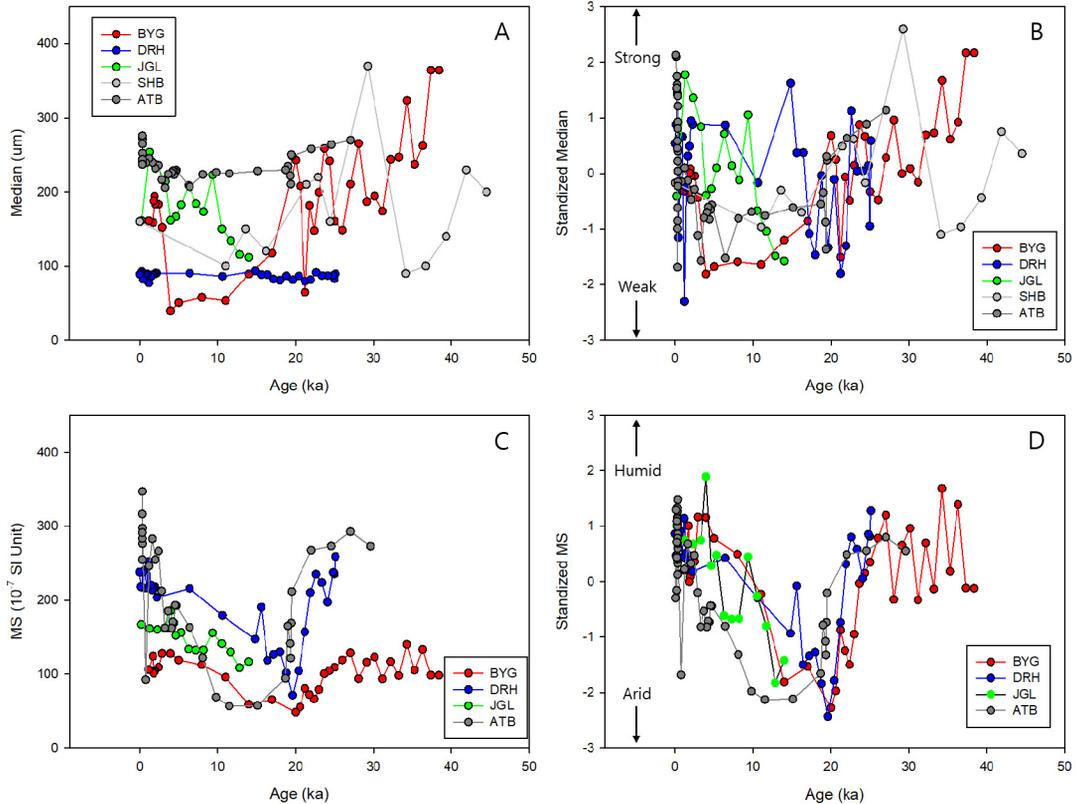


그림 6. 입도 분석 결과(A : 측정된 중앙값, B : 표준화된 중앙값)와 대자율 측정 결과(C : 측정값, D : 표준화된 값)

15-5ka 시기에 상대적으로 약한 풍속이 나타났던 것으로 해석할 수 있다. 대자울을 살펴보면 20-10ka의 시기에 상대적으로 낮은 값을 보인다. 일반적으로 높은 대자울값은 상대적으로 습윤한 환경을 지시하고 낮은 대자울값은 건조한 환경을 지시한다는 점을 감안하여 연구 지역의 대자울 측정값을 해석하면 45ka 이후로 비교적 습윤한 환경을 유지하다가 20ka 이후 건조화되고 10ka 이후 다시 습윤한 환경으로 전환되었음을 알 수 있다.

3) 기후 변화에 따른 풍성 퇴적층의 발달 과정

연구 지역의 풍성 퇴적층의 발달과정을 시기별 입도 및 대자울 변화와 기존 연구 결과를 고려하여 퇴적 당시의 환경을 추정하면 27ka 이전 시기는 상대적으로 습윤한 환경에서 하천을 통해 공급된 퇴적물이 범람원을 형성하였던 것으로 추정할 수 있다. 27ka 이후 점차 건조해지면서 강한 풍속으로 이전에 쌓였던 범람원의 퇴적물이 주변으로 이동, 퇴적되기 시작하였으며 이런 과정은 18ka까지 지속된

것으로 추정된다. 18ka 이후에는 건조한 환경이 지속되었지만 이전에 비해 비교적 풍속이 약해져 이전과 같이 활발한 풍성 퇴적층 발달은 진행되지 않은 것으로 보인다. 습윤한 기후로 전환되기 시작한 10ka 이후로도 여전히 풍속이 낮아 효과적인 풍성 퇴적층의 발달은 발생하지 않았으며 5ka 이후에 이르러서야 습윤한 환경과 강한 풍속 조건에서 풍성 퇴적층이 다시 발달할 수 있었던 것으로 추정할 수 있다. 이 시기의 풍성 퇴적층 발달은 습윤환경에서 발생한다는 점에서 그 이전(27-18ka)의 건조 환경 아래에서의 풍성 퇴적층 과정과는 차이가 있다. 27-18ka 시기에는 강한 풍속과 건조도가 증가하는 환경에서 공급되는 풍성 퇴적물 양이 늘어난 것에 비해 5-0ka 시기는 화분 분석 결과에서 이 지역이 습윤해지며 타이가 식생 정착이 확인되는 시기 (Ma *et al.*, 2013)로, 상대적으로 습윤한 환경에서 식생이 지표면을 피복하고 이 식생의 트랩 효과로 인한 것일 가능성이 높다. 특히 5개 퇴적층에서 확인되는 유기물층이 대부분 5ka 이후에 집중적으로 형성된 것은 당시 식생 밀도와 연관성이 높을 것으로 판단된다.

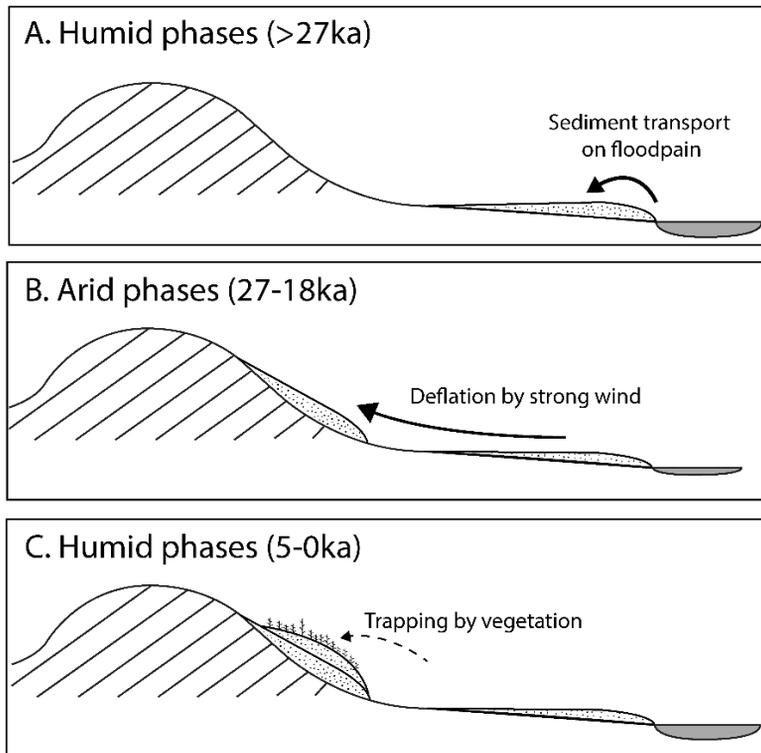


그림 7. 풍성 퇴적층 발달 과정 모식도(Modified Grunert and Lehmkuhl, 2004)

6. 결론

몽골 북부 지역에 분포하는 5개 지점의 퇴적층을 대상으로 OSL 연대측정을 통한 퇴적률을 파악한 결과 45ka 이후 현재까지 기간 중 27-18ka와 5-0ka 두 번의 집중적인 퇴적 시기가 있었던 것으로 확인되었다. 입도 분석을 통해 퇴적 당시의 풍속을 추정하면 이 두 시기는 공통적으로 강한 풍속 환경이었던 것으로 해석된다. 대자율을 통해 습윤/건조도를 파악하면 첫 번째 풍성층 형성시기인 27-18ka의 시기는 이전의 습윤한 환경에서 건조한 환경으로 전환되던 시기이며, 두 번째 풍성층 형성시기인 지난 5ka 이후 현재까지의 시기는 그 이전에 비해 상대적으로 습윤한 환경인 것으로 파악되었다. 이 지역의 고기후에 관한 기존 연구 결과를 고려하면 27ka 이전의 습윤한 환경에서 강우 혹은 용빙수를 통해 다량의 퇴적물이 범람원으로 공급되고 27-18ka 시기 동안 건조화되며 바람에 의한 퇴적물의 이동이 가속화되었을 것으로 추정된다. 반면 18-5ka 시기 동안에는 건조하지만 상대적으로 풍속이 약해지며 이전보다 풍성 퇴적층 발달이 정체된 것으로 보인다. 지난 5ka 이후로 다시 습윤한 환경에서 식생이 정착하게 되면서, 그로 인한 풍성 퇴적물의 트랩 작용이 효과적으로 일어날 수 있는 환경에서 두 번째 풍성 퇴적층 형성기가 나타난 것으로 추정된다.

본 연구에서는 OSL 연대측정 외 입도 분석과 대자율 측정과 같이 기초적인 분석만을 수행하여 상세한 고기후 변화 과정과 원인을 충분히 파악하지 못하였다는 한계를 가진다. 후회 연구에서는 퇴적층 내 발달해 있는 유기물층과 탄산염층의 형성 과정에 대해 보다 상세한 연구를 통해 객관적이고 종합적인 고기후 변화와 지형 발달 과정의 관계를 파악해 볼 필요가 있으며, 나아가 시베리아 고기압의 중심부인 본 연구 지역과 주변부에 해당하는 우리나라의 기후 변화의 연관성에 관해 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- Adamiec, G. and Aitken, M. J., 1998, Dose-rate conversion factors: update, *Ancient TL*, 16(2), 37-50.
- An, Z. S., Kukla, G. J., Porter, S. C. and Xiao, J. L., 1991, Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 yr, *Quaternary Research*, 36, 29-36.
- An, Z., 2000, The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate, *Quaternary Science Reviews*, 19(1-5), 171-187.
- Batima, P., Natsagdorj, L., Gombluudev, P. and Erdenetsetseg, B., 2005, Observed climate change in Mongolia, *Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change Working Paper*, 12, 1-26.
- Blott, S. J. and Pye, K., 2001, GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Chen, F., Yu, Z., Yang, M., Ito, E., Wang, S., Madsen, D. B., Huang, X., Zhao, Y., Sato, T., Birks, H. J. B. and Boomer, I., 2008, Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history, *Quaternary Science Reviews*, 27(3-4), 351-364.
- Chlachula, J., 2003, The Siberian loess record and its significance for reconstruction of Pleistocene climate change in North-central Asia, *Quaternary Science Reviews*, 22(18-19), 1879-1906.
- Dash, D. and Tumurbaatar, E., 2000, Spatial differentiations of the Buurug Del Els landscape, *Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen Reihe A, Geologie und Paläontologie*, 205, 9-13.
- Dordschgotov, D., 1992, *Soils of Mongolia. Genesis, Systematics, Geography, Resources and Land Use*, Fak. der Bodenleitung, Moscow.
- Fedotov, A. P., Chebykin, E. P., Semenov, M. Y., Vorobyova, S. S., Osipov, E. Y., Golobokova, L. P., Pogodaeva, T. V., Zheleznyakova, T. O., Grachev, M. A., Tomurhuu, D. and Oyunchimeg, T., 2004, Changes in the volume and salinity of Lake Khubsugul (Mongolia) in response to global climate changes in the upper Pleistocene and the Holocene, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 209(1-4), 245-257.
- Feng, Z. D., 2001, Gobi dynamics in the Northern Mongolian Plateau during the past 20,000+ yr: preliminary results, *Quaternary International*, 76, 77-83.
- Feng, Z. D., An, C. B. and Wang, H. B., 2006, Holocene climatic and environmental changes in the arid and semi-arid areas of China: a review. *The Holocene*,

- 16(1), 119-130.
- Feng, Z. D., An, C. B., Tang, L. Y. and Jull, A. J. T., 2004, Stratigraphic evidence of a Megahumid climate between 10,000 and 4000 years BP in the western part of the Chinese Loess Plateau, *Global and Planetary Change*, 43(3-4), 145-155.
- Feng, Z. D., Chen, F. H., Tang, L. Y. and Kang, J. C., 1998, East Asian monsoon climates and Gobi dynamics in marine isotope stages 4 and 3, *Catena*, 33(1), 29-46.
- Feng, Z. D., Ma, Y. Z., Zhang, H. C., Narantsetseg, T. and Zhang, X. S., 2013, Holocene climate variations retrieved from Gun Nuur lake-sediment core in the northern Mongolian Plateau, *The Holocene*, 23(12), 1721-1730.
- Feng, Z. D., Wang, W. G., Guo, L. L., Khosbayar, P., Narantsetseg, T., Jull, A. J. T., An, C. B., Li, X. Q., Zhang, H. C. and Ma, Y. Z., 2005, Lacustrine and eolian records of Holocene climate changes in the Mongolian Plateau: preliminary results, *Quaternary International*, 136(1), 25-32.
- Feng, Z. D., Zhai, X. W., Ma, Y. Z., Huang, C. Q., Wang, W. G., Zhang, H. C., Khosbayar, P., Narantsetseg, T., Liu, K. B. and Rutter, N. W., 2007, Eolian environmental changes in the Northern Mongolian Plateau during the past~35,000 yr, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 245(3-4), 505-517.
- Fukumoto, Y., Kashima, K., Orkhonselenge, A. and Ganzorig, U., 2012, Holocene environmental changes in Northern Mongolia inferred from diatom and pollen records of peat sediment, *Quaternary International*, 254, 83-91.
- Gasse, F., Arnold, M., Fontes, J. C., Fort, M., Gibert, E., Huc, A., Bingyan, L., Yuanfang, L., Qing, L., Melieres, F. and Van Campo, E., 1991, A 13,000-year climate record from western Tibet, *Nature*, 353(6346), 742-745.
- Grunert, J. and Lehmkuhl, F., 2004, Aeolian sedimentation in arid and semi-arid environments of Western Mongolia, in Smykatz-Kloss, W. (ed.), *Paleoecology of Quaternary drylands*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Grunert, J., Lehmkuhl, F. and Walther, M., 2000, Paleoclimatic evolution of the Uvs Nuur basin and adjacent areas (Western Mongolia), *Quaternary International*, 65, 171-192.
- Gunin, P. and Vostokova, E., 2005, *Ecosystems of Mongolia: Atlas*, Russian Academy of Sciences, Mongolian Academy of Sciences, Moscow.
- Gunin, P. D., Vostokova, E. A., Dorofeyuk, N. I., Tarasov, P. E. and Black, C. C. eds., 2013, *Vegetation Dynamics of Mongolia (Vol. 26)*, Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- Herzschuh, U., 2006, Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years, *Quaternary Science Reviews*, 25(1-2), 163-178.
- Hillbig, W., 1995, *Vegetation of Mongolia*, SPB Academic Publishing, Amsterdam.
- Hovan, S. A., Rea, D. K., Pisias, N. G. and Shackleton, N. J., 1989, A direct link between the China loess and marine $\delta^{18}O$ records: aeolian flux to the north Pacific, *Nature*, 340(6231), 296-298.
- Khandsuren, P., Seong, Y. B., Oh, J. S., Rhee, H. H., Sandag, K. and Yu, B. Y., 2019, Late Quaternary glacial history of Khentey Mountains, Central Mongolia, *Boreas*, 48(3), 779-799.
- Khosbayar, P., 1989, *Map of Geological Complexes of Mongolia, 1: 500,000*, Moscow (in Russian).
- Klinge, M. and Sauer, D., 2019, Spatial pattern of late glacial and Holocene climatic and environmental development in Western Mongolia - a critical review and synthesis, *Quaternary Science Reviews*, 210, 26-50.
- Lehmkuhl, F. and Haselein, F., 2000, Quaternary paleoenvironmental change on the Tibetan Plateau and adjacent areas (Western China and Western Mongolia), *Quaternary International*, 65, 121-145.
- Lehmkuhl, F., Nottebaum, V. and Hülle, D., 2018, Aspects of late quaternary geomorphological development in the Khangai Mountains and the Gobi Altai Mountains (Mongolia), *Geomorphology*, 312, 24-39.
- Li, J. J., Feng, Z.-D. and Tang, L. Y., 1988, Late quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 125-135.
- Liu, T. and Ding, Z., 1998, Chinese loess and the paleomonsoon, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1), 111-145.
- Ma, Y., Liu, K. B., Feng, Z., Meng, H., Sang, Y., Wang, W.

- and Zhang, H., 2013, Vegetation changes and associated climate variations during the past~ 38,000 years reconstructed from the Shaamar eolian-paleosol section, Northern Mongolia, *Quaternary International*, 311, 25-35.
- Mischke, S., Herzschuh, U., Zhang, C., Bloemendal, J. and Riedel, F., 2005, A late quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China): lake level and salinity changes inferred from sediment properties and ostracod assemblages, *Global and Planetary Change*, 46(1-4), 337-359.
- Murray, A. S. and Wintle, A. G., 2003, The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability, *Radiation Measurements*, 37(4-5), 377-381.
- Naumann, S. and Walther, M., 2000, Mid-Holocene lake-level fluctuations of Bayan Nuur (North-west Mongolia), *Marburger Geographische Schriften*, 135, 15-27.
- Orkhonselenge, A., Krivonogov, S. K., Mino, K., Kashiwaya, K., Safonova, I. Y., Yamamoto, M., Kashima, K., Nakamura, T. and Kim, J. Y., 2013, Holocene sedimentary records from Lake Borsog, Eastern shore of Lake Khuvsgul, Mongolia, and their paleoenvironmental implications, *Quaternary International*, 290, 95-109.
- Owen, L. A., Richards, B., Rhodes, E. J., Cunningham, W. D., Windley, B. F., Badamgarav, J. and Dorjnamjaa, D., 1998, Relic permafrost structures in the Gobi of Mongolia: age and significance, *Journal of Quaternary Science*, 13(6), 539-547.
- Owen, L. A., Windley, B. F., Cunningham, W. D., Badamgarav, J. and Dorjnamjaa, D., 1997, Quaternary alluvial fans in the Gobi of southern Mongolia: evidence for neotectonics and climate change, *Journal of Quaternary Science*, 12(3), 239-252.
- Porter, S. C. and An, Z. S., 1995, Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation, *Nature*, 375, 305-308.
- Prescott, J. R. and Hutton, J. T., 1994, Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations, *Radiation Measurements*, 23(2-3), 497-500.
- Prokopenko, A. A., Kuzmin, M. I., Williams, D. F., Gelety, V. F., Kalmychkov, G. V., Gvozdokov, A. N. and Solotchin, P. A., 2005, Basin-wide sedimentation changes and deglacial lake-level rise in the Hovsgol basin, NW Mongolia, *Quaternary International*, 136(1), 59-69.
- Rother, H., Lehmkuhl, F., Fink, D. and Nottebaum, V., 2014, Surface exposure dating reveals MIS-3 glacial maximum in the Khangai Mountains of Mongolia, *Quaternary Research*, 82(2), 297-308.
- Rudaya, N., Tarasov, P., Dorofeyuk, N., Solovieva, N., Kalugin, I., Andreev, A., Daryin, A., Diekmann, B., Riedel, F., Tserendash, N. and Wagner, M., 2009, Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: a step towards better understanding climate dynamics in Central Asia, *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 540-554.
- Shi, Y., 2002, Characteristics of late quaternary monsoonal glaciation on the Tibetan Plateau and in East Asia, *Quaternary International*, 97, 79-91.
- Tarasov, P. E., Ilyashuk, B. P., Leipe, C., Müller, S., Plessen, B., Hoelzmann, P., Kostrova, S. S., Bezrukova, E. V. and Meyer, H., 2019, Insight into the Last Glacial maximum climate and environments of the Baikal region, *Boreas*, 48(2), 488-506.
- Tarasov, P. E., Peyron, O., Guiot, J., Brewer, S., Volkova, V. S., Bezusko, L. G., Dorofeyuk, N. I., Kvavadze, E. V., Osipova, I. M. and Panova, N. K., 1999, Last Glacial maximum climate of the former Soviet Union and Mongolia reconstructed from pollen and plant macrofossil data, *Climate Dynamics*, 15(3), 227-240.
- Tian, F., Herzschuh, U., Dallmeyer, A., Xu, Q., Mischke, S. and Biskabom, B. K., 2013, Environmental variability in the monsoon-westerlies transition zone during the last 1200 years: lake sediment analyses from central Mongolia and supra-regional synthesis, *Quaternary Science Reviews*, 73, 31-47.
- Wang, W. and Feng, Z., 2013, Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: a synthesis of climatic records, *Earth-Science Reviews*, 122, 38-57.

- Wang, W., Feng, Z., Lee, X., Zhang, H., Ma, Y., An, C. and Guo, L., 2004, Holocene abrupt climate shifts recorded in Gun Nuur lake core, northern Mongolia, *Chinese Science Bulletin*, 49(5), 520-526.
- Wesche, K., Ambarlı, D., Kamp, J., Török, P., Treiber, J. and Dengler, J., 2016, The Palaearctic steppe biome: a new synthesis, *Biodiversity and Conservation*, 25(12), 2197-2231.
- Wünnemann, B., Hartmann, K., Janssen, M. and Hucai, C. Z., 2007, Responses of Chinese desert lakes to climate instability during the past 45,000 years, *Developments in Quaternary Sciences*, 9, 11-24.
- Xu, X., Yang, J., Dong, G., Wang, L. and Miller, L., 2009, OSL dating of glacier extent during the Last Glacial and the Kanas Lake basin formation in Kanas River valley, Altai Mountains, China, *Geomorphology*, 112(3-4), 306-317.
- Yu, K., Lehmkuhl, F., Schlütz, F., Diekmann, B., Mischke, S., Grunert, J., Murad, W., Nottebaum, V., Stauch, G. and Zeeden, C., 2019, Late quaternary environments in the Gobi Desert of Mongolia: vegetation, hydrological, and palaeoclimate evolution, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 514, 77-91.
- Yu, Z., Liu, X., Wang, Y., Chi, Z., Wang, X. and Lan, H., 2014, A 48, 5-ka climate record from Wulagai Lake in Inner Mongolia, Northeast China, *Quaternary International*, 333, 13-19.
- Zhang, C., Zhang, W., Feng, Z., Mischke, S., Gao, X., Gao, D. and Sun, F., 2012, Holocene hydrological and climatic change on the northern Mongolian Plateau based on multi-proxy records from Lake Gun Nuur, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 323, 75-86.
- 교신: 홍성찬, 28173, 충청북도 청주시 흥덕구 강내면 태성탑연로 250 한국교원대학교 지리교육과(이메일: schong@knue.ac.kr, 전화: 043-230-3568)
- Corresponding Author : Seongchan Hong, 28173, Department of Geography Education, Korea National University of Education, 250, Taeseongtabyeon-ro, Gangnae-myeon, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea(email: schong@knue.ac.kr, phone: +82-43-230-3568)
- 최초투고일 2023. 11. 29
수정일 2023. 12. 6
최종접수일 2023. 12. 8