

후기 플라이스토세 몽골 흡수굴 호수 탄산염 퇴적물의 환경/기후학적 의미

최현구^{1,2,*} · 정공수¹ · 임재수^{2,*} · 김주용² · 남욱현² · 양동윤² · 이광식³ · 이진영²

¹충남대학교 지질환경과학과
²한국지질자원연구원 국토지질연구본부
³한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

아시아 내륙에 위치한 몽골 흡수굴 호수의 과거 환경변화와 그 요인을 추적하기 위해서 호수퇴적물의 연대 측정, 탄산염 함량, 산소/탄소 동위원소 분석 등을 실시하였다. 과거 약 30,000년 동안 퇴적된 호수퇴적층은 연대 측정 결과와 입도 및 동위원소 값들의 특성을 고려하여 홀로세층(0~6 cm), 해빙기층(6~12 cm), 그리고 최후빙하기층(12~118 cm)으로 구분하였다. 홀로세 기간 동안 호수 중앙부에는 탄산염 침전이 일어나지 않은 것으로 보이며, 이것은 흡수굴 호수의 환경이 수문학적으로 열린 상태(open-basin lake)였음을 지시한다. 탄산염 침전량이 약 33~40%에 이르는 최후빙하기층의 산소/탄소 동위원소 값은 각각 -9.8~-8.2‰과 0.2~2.5‰ 사이의 변화를 보이며, 이 값들은 대체로 탄산염 함량이 증가할 때 부화되는 경향을 보였다. 후기 플라이스토세 동안 나타나는 두 동위원소 값들의 높은 상관관계($R^2=0.529$)는 탄산염이 침전되는 당시의 호수가 수문학적으로 폐쇄된 상태(closed-basin lake)였음을 의미한다. 두 동위원소의 수천 년 규모의 장주기 변화와 그 위에 중첩된 수백 년 빈도의 단주기 변동은 탄산염 함량의 거동과 유사하다. 이것은 두 동위원소의 변화가 유입수량과 증발량의 비로 표현될 수 있는 과거 수문 변화, 즉 수위 변화와 관련되어 있음을 시사한다. 따라서 이번 연구 결과는 후기 플라이스토세 동안에 내륙 고산지역에서의 천 년~수백 년 빈도의 수문 변동이 있었으며, 이러한 수문 변동이 고위도에서의 기후변화 및 아시아 몬순 기후변화와 결부되어 있을 가능성을 시사한다고 할 수 있다.

주요어: 호수 탄산염 퇴적물, 산소/탄소 동위원소, 흡수굴 호수, 고기후/고환경

Hyeon Goo Choe, Gong Soo Chung, Jaesoo Lim, Ju-Yong Kim, Wook-Hyun Nahm, Dong-Yoon Yang, Kwang-Sik Lee and Jin-Young Lee, 2014, Environmental/climatic implications of Hovsgul Lake carbonate sediments, Mongolia, during the late Pleistocene and Holocene. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 50, no. 4, p. 441-455

ABSTRACT: To trace past environmental change and climatic variability in Lake Hovsgul Lake, northwestern Mongolia, we performed C^{14} age dating, analyses of carbonate content and oxygen/carbon isotope, and grain size analysis using the lake sediments. Based on the results of the geochemical analyses, the lake sediment core covering past 30,000 years was divided into three units: Holocene (0~6 cm), deglacial (6~12 cm), and last glacial (12~118 cm). During the Holocene, there had been no carbonate precipitation in the central part of Lake Hovsgul, suggesting an open lake system during the Holocene. The lake sediments deposited during the last glacial period showed about 33~40% of carbonate content and their oxygen and carbon isotopes composition varied between -9.8~-8.2‰ and 0.2~2.5‰, respectively. The moderate correlation between the two isotope values ($R^2=0.529$) suggests that the lake environment during the glacial period was under a hydrologically closed system. Short-term variability superimposed on long-term change on millennial timescales in the oxygen isotope values was very similar to that observed in the carbon isotope values. These changes in the isotopic values of oxygen and carbon in the lake had been controlled by the freshwater input and evaporation, in other words, hydrological change related to the lake level. This study suggests that the hydrological variability on millennial to centennial scales in the interior of Asian continent during the late Pleistocene was related to the climate change in high-latitude regions and Asian summer/winter monsoon changes.

Key words: lake carbonate sediments, oxygen/carbon isotopes, Lake Hovsgol, paleoclimate/paleoenvironment

* Corresponding author: +82-42-868-3477, E-mail: limjs@kigam.re.kr

(Hyeon Goo Choe and Gong Soo Chung, Department of Geology and Earth Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea; Jaesoo Lim, Ju-Yong Kim, Wook-Hyun Nahm, Dong-Yoon Yang, Jin-Young Lee, Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea; Kwang-Sik Lee, Division of Earth and Environmental Science, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-806, Republic of Korea)

1. 서론

1.1 과거 환경/기후학적 기록체로서의 흡수굴 호수

미래 예측의 측면에서 현재의 기후 특성과 미래의 기후 변동성을 이해하기 위해서는 과거의 수만 년에서 수천 년 단위로 변하는 장주기 변화와 수백 년에서 수십 년에 이르는 단주기 기후 변동의 거동과 원인을 파악하는 것이 매우 중요하다. 또한 이런 기후 변동은 위도와 고도를 포함한 위치 특성에도 큰 관련이 있다. 따라서 과거 기후 및 환경 복원 연구는 극지역으로부터 적도지역에 이르는 다양한 지역에서 기후의 흔적을 나타내는 여러 환경/기후 지시자 (environmental/climatic proxy or indicator) 연구를 통하여 진행되고 있다. 예를 들어 극지역의 빙하 코어를 활용한 동위원소 및 미량가스 연구(Stuiver *et al.*, 1995; Grootes and Stuiver, 1997; Ahn and Brook, 2008), 호수퇴적물 속에 포함된 층서, 화분, 구조, 개형층, 탄산염 연구(Brinchat *et al.*, 2000; Fedotov *et al.*, 2004; Chun and Cheong, 2005; Nara *et al.*, 2005; Kim and Cheong, 2007; Ryu *et al.*, 2008; Prokopenko and Bonvento, 2009; Kashiwaya *et al.*, 2010; Shin and Cheong, 2010; Li *et al.*, 2012), 중국의 황토고원 퇴적물 연구(Xiao *et al.*, 1995; An *et al.*, 2005), 동굴생성물의 지화학 연구(Wang *et al.*, 2001; Jo *et al.*, 2011), 해양 퇴적물 속의 각종 지화학 연구(Linsley, 1996; Dannenmann *et al.*, 2003; Khim *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2009) 등이 있다. 이 가운데 호수퇴적물은 호수 주변 지역의 과거 기후변화 정보를 다양한 시간규모로 제공할 수 있기에 자주 연구되어 왔다.

기후변화와 관련해서 호수 환경의 반응은 호수의 수문변화 형태로 나타난다. 수문변화는 호수의 수위 증가 또는 감소를 야기하면서 호수 유역의 지형과 생태계 변화뿐만이 아닌 호수물의 화학적 특성 또한 변화게 만든다. 특히 이번 연구 대상 지역인 몽골 북서부의 흡수굴 호수는 표면 면적과 집수유역 면적과의 비가 1:1.7정도로 상당히 작은 호수여서 이 지역의 수문변화에 매우 민감하다. 흡수굴 호수

에서 연간 표층 유출은 호수 체적(lake volume)의 0.1% 정도로 낮아 호수물의 체류시간은 상당히 길다. 또한 이중 78%가 증발에 의해서 유실되는 것으로 보고되었다(Prokopenko and Bonvento, 2009). 이처럼 흡수굴 호수에 유입된 물은 호수에 상당시간 남아있으면서 그 당시의 기후변화에 민감하게 반응하게 된다.

이러한 흡수굴 호수의 수문학적 특징 때문에 지금까지 많은 연구자들은 흡수굴 호수 퇴적물 속에 존재하는 여러 환경/기후 지시자를 활용하여 아시아 내륙의 고지대에서의 환경변화 특성을 규명하기 위한 연구를 수행해왔다. 이러한 연구는 중력시추코어를 이용한 최후빙하기와 홀로세 기간을 다루는 상대적으로 짧은 시기의 환경연구(Chun and Cheong, 2005; Kim and Cheong, 2007; Ryu *et al.*, 2008; Shin and Cheong, 2010)와 국제 시추프로젝트를 중심으로 한 빙기-간빙기 사이클에 관한 상대적으로 긴 환경변화를 다루는 연구(Nara *et al.*, 2005; Prokopenko *et al.*, 2005, 2007, 2009; Hovsgol Drilling Watanabe *et al.*, 2007; Kashiwaya *et al.*, 2010)로 나뉜다. 이러한 연구들은 대부분 흡수굴 퇴적물의 층서적 특징으로 빙기 때의 탄산염층, 해빙기 때의 엽층리층이 뚜렷한 탄산염층, 그리고 간빙기에 해당하는 구조를 많이 포함한 점토층의 반복을 보여주었으며, 주로 빙기-간빙기 규모의 환경변화 복원과 변동원인 규명에 초점이 맞추어져 있었지만, 짧은 시간 규모의 수문학적 변동성에 대한 연구는 충분히 이루어지지 않았다.

1.2 환경지시자로서의 호수 탄산염 동위원소 연구

과거 호수 환경 변화와 그 지역의 기후변화를 이해하기 위해서 호수퇴적물에 남겨진 자생 탄산염 (authigenic carbonate)의 산소/탄소 동위원소 값들이 활용되어왔다(Talbot, 1990; Li and Ku, 1997; Leng and Marshall, 2004; Prokopenko and Bonvento, 2009). 상대적으로 큰 폐쇄형 호수에서는 대체적으로 증발에 의해서 호수의 수위 또는 유량이 조절되

며, 일반적으로 높은 산소동위원소 값($\delta^{18}\text{O}$)을 가진 퇴적물을 포함한다. 반대로 개방형 호수에서의 산소동위원소 변화는 온도 또는 강수의 동위원소 성분의 영향을 받아, 연년 또는 계절적으로 특정한 정보를 제공하는 것으로 여겨진다(Leng and Marshall, 2004). 자생 탄산염 탄소동위원소 값은 침전시의 호수의 총무기용존탄소의 동위원소 값을 보여주며, 총무기용존탄소의 동위원소 값은 유입수의 탄소동위원소 성분, 대기와의 이산화탄소 교환, 그리고 호수 안의 수생식물에 의한 광합성 등의 여러 요인들에 의해서

조절된다(Li and Ku, 1997; Leng and Marshall, 2004). 따라서 과거 탄산염 산소/탄소동위원소 값은 기후변화와 관련된 일련의 단주기성 환경적 프로세스를 추적하기에 유용한 지시자로 사용될 수 있다.

특히 수천 년의 장주기적인 관점에서 볼 때 탄산염 산소/탄소 동위원소의 상관관계는 과거 호수의 수문학적 특성을 지시한다. 이 두 동위원소의 상관관계, 즉 동일변동성(corvariance)의 정도는 과거 호수의 수문 상태가 탄산염이 형성되는 당시의 호수가 열린 분지(open-basin)인지 닫힌 분지(closed-basin)



Fig. 1. Sampling sites in Lake Hovsgol, Mongolia (from google map). Star indicates the coring site of HDP08-1d (this study) and circles show the sampling sites of carbonate-bearing riverine sediments (Prokopenko and Bonvento, 2009).

Table 1. Results of AMS ^{14}C dating and calibrated dates for core HDP08-1d from the Lake Hovsgol.

Depth (cm)	^{14}C age, 1σ (yr BP)	Calibrated age ^a , 2σ (cal. yr BP)	Lab. code
1	4,610±20	5,430±20*	NZA 34670
4	10,920±30	12,780±130*	NZA 34678
16	20,490±85	24,520±380*	NZA 34671
60	31,820±330	36,080±810	NZA 34679
106	24,560±140	29,310±490*	NZA 34680

^aCalibrated with Radiocarbon Calibration Program (CALIB REV 5.0.2.) (Stuiver and Reimer, 1993; Reimer *et al.*, 2009).

*represents the points used for establishing the preliminary age control (please see Fig. 2).

인지를 나타내는 단서를 제공한다(Talbot, 1990). 즉 개방성 호수에서 형성된 탄산염에서는 두 동위원소의 극히 낮은 상관관계를 볼 수 있으며, 폐쇄성 호수에서는 호수의 체적이 증가(감소)할 때 두 동위원소의 값이 같이 감소(증가)하는 높은 상관관계를 확인할 수 있다(Talbot, 1990). 특히 폐쇄성 호수에서, 이러한 두 동위원소의 상관관계는 수문변화, 증기 교환(vapor exchange), 호수 생산성, 호수의 총이산화탄소 농도 등에 의해서 영향을 받는 것으로 제안되었다(Li and Ku, 1997). 이렇듯 호수의 자생 탄산염 산소/탄소 동위원소 값들은 개별적으로 또는 서로의 상관관계를 통해서 호수의 과거 수문특성과 이러한 수문특성을 야기한 과거 기후변화를 이해할 수 있는 유용한 정보를 제공해준다.

흡수굴 호수의 과거 시추코어 연구들에 의하면 기후/수문/수위 변화에 따라 반복적으로 상당히 많은 양의 탄산염이 침전되었다. 이러한 탄산염 함유량 변동으로부터 Kashiwaya *et al.* (2010)은 증발과 관련된 흡수굴 호수의 수위 변화를 추적하였으며, 탄산염 산소/탄소 동위원소 값들의 변화로부터 Prokopenko and Bonvento (2009)은 약 1 Ma 동안의 빙기-간빙기 시간 규모의 수문변화를 복원하였다. 특히 탄산염이 많이 침전되는 빙기 때는 높은 퇴적률을 보여 주기 때문에, 이 기간 동안의 고분해능 탄산염 연구는 아시아 내륙 고지대에서의 수천 년 시간 규모는 물론이고 수백 년 스케일의 단주기성 기후 및 수문 변화와 그것들의 원인을 파악하는데 큰 도움을 줄 것으로 기대된다. 이번 연구에서는 흡수굴 호수의 고해상도 탄산염 안정동위원소 분석을 통해서 과거 흡수굴의 환경변화를 복원하여 그 변화의 특성과 요인을 살펴보는 것을 목적으로 하였다.

2. 연구지역 및 분석방법

2.1 흡수굴 호수의 지형 및 기후 특성

흡수굴 호수(그림 1)는 몽골의 북서쪽에 위치하고 있으며, 지구조적으로는 바이칼호를 포함하는 열곡대에 위치한 호수로서 주위에 3000 m가 넘는 높은 산들로 둘러싸여 있다. 흡수굴 호수 집수구역의 지질은 북쪽면과 남동쪽면은 화강암, 유문암, 변성편암, 규장질 화산암 등이 우세하며 남서쪽은 캄브리아기 탄산염암(석회암, 돌로마이트)과 처어트가 분포하고 있다. 동쪽은 플라이오세 현무암이 넓은 범위로 분포하고 있다. 호수에 근접한 북쪽 사면은 제4기 충적층과 풍성 퇴적층으로 덮여 있다(Prokopenko and Bonvento, 2009). 호수는 해발 1,645 m에 위치하며, 현재 호수의 최고 깊이는 262 m이며 평균 깊이는 139 m이다. 호수의 동서방향의 폭은 20~40 km에 이르며 호안선의 둘레의 길이는 약 414 km이다. 유역면적은 5,130 km²로서 호수 면적의 약 1.7배 해당된다. 흡수굴 호수의 유일한 배출구(outlet)는 호수 남단에 위치한 이지린강(Egerin River)이며, 이 강물은 해발고도 455 m 높이의 바이칼 호수로 유입된다. 주위의 높은 산지로 인해 지형적으로 낮은 분지에 발달한 흡수굴 호수는 대체로 1월부터 4-5월까지 결빙되어 있다. 흡수굴 호수는 대표적인 빈영양 호이며, 염분이 높은 것이 특징인데 물은 CaCO₃에 대해 거의 포화상태이며, Hatgal Bay와 같은 호수 남부에 위치한 수심이 낮은 호안지역에서는 현재도 탄산염 퇴적물이 집적되고 있는 것으로 보고되었다(Ryu *et al.*, 2008; Prokopenko and Bonvento, 2009). 이번 연구에서는 호수의 중앙부에 해당하는 수심 약 235 m 지점(50°56'52.1" N, 100°25'27.8" E; 그림 1)

에서 중력시추에 의해 회수된 총 길이 118 cm의 시추코어(HDP-08 core1d)를 사용하였다.

2.2 연구방법

시추코어의 퇴적연대는 호수퇴적물의 총유기물 (n = 5)을 대상으로 방사성탄소연대측정을 실시하여 얻었다(New Zealand의 GNS laboratory). 무기탄산염 산소 및 탄소 동위원소는 호수 퇴적물을 건조시킨 후 분말화 된 시료를 활용하여 탄산염이 없는 표층을 제외한 전층에서 2 cm 간격으로 65개의 시료가 측정되었다. 이를 위하여 CO₂ 포집 전처리 장치를 이용하여 시료당 20 mg을 103%의 인산(H₃PO₄) 5 ml와 반응시켜 CO₂가스를 포집하였으며, 포집된 CO₂가스는 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소질량분석기(VG OPTIMA)를 이용하여 산소 및 탄소동위원소 비를 분석하였다. 표준시료는 NBS-18과 NBS-19를 사용하였으며 분석오차는 0.2‰ 이내이다. 탄산염 함량은 Kashiwaya *et al.* (2010)에 의해 사용된 HCl-soluble component 계산법으로 구하였다. 무게를 알고 있는 시료를 염산용액에 중탕시켜서 녹아 없어지는 양의 무게를 측정함으로써 탄산염의 총량을 추정하였다. 입도 분석은 전체 구간에 걸쳐 2 cm 간격으로 시료 약 300 mg을 준비하여

각각 과산화수소(H₂O₂)와 1 M 염산(HCl)과 반응시켜 유기물과 탄산염을 제거한 후, 원심분리기를 이용하여 증류수로 2~3회를 반복하여 세척하였다. 이러한 전처리를 거친 시료를 대상으로 입도분석기(Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Ltd., Worcestershire, UK)를 활용하여 시료의 입도분포 및 구성성분(점토, 실트, 모래)의 함량 등을 측정하였다.

3. 결 과

3.1 퇴적층서, 입도 및 연대측정결과

그림 2에 제시된 바와 같이 방사성탄소 연대측정 결과는 중력시추코어(HDP08-1d)의 호수퇴적물이 과거 약 3만 년 전부터 형성되기 시작하였음을 알려준다(표 1, 그림 2). 입도분석 결과의 큰 특징은 퇴적물의 깊이가 얇아짐에 따라 모래 함량은 약 20%에서 3%로 낮아지고, 실트 함량이 약 70%에서 90%까지 크게 증가하는 경향이라고 할 수 있다. 이 시추코어 퇴적물은 연대측정결과와 입도분석 결과에 의해서 크게 3개의 단위(Unit)로 나뉜다. 표층에서 심도 6 cm까지를 포함하는 최상부층(Unit 1)은 홀로세에 해당되며 규질의 미세 실트 입자로 구성되어 있다. 그 아래로 6~12 cm 까지는 해빙기층(Unit 2)으로 희미

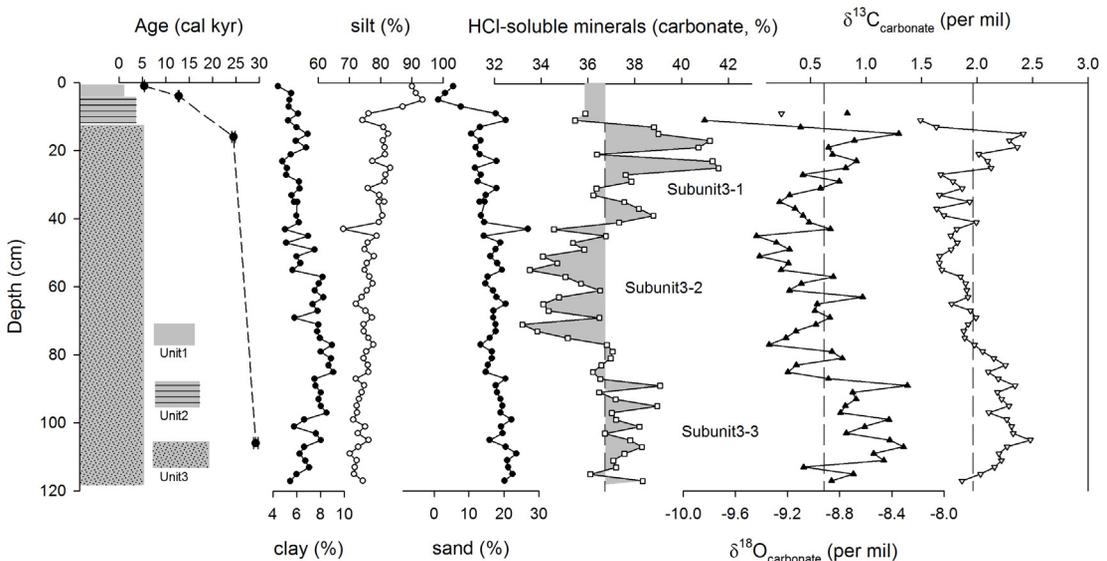


Fig. 2. Simplified lithology, radiocarbon dating results, grain size, carbonate content (HCl-soluble component, %), and stable isotope records of carbonate ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) for core HDP08-1d. Legend: Unit 1, diatomaceous and carbonate-free silt; Unit2, laminated sandy silt; Unit3, calcareous sandy silt.

한 엽층리(fine lamination)가 발달되어 있으며 급격한 모래 함량의 증가가 두드러진다. 수심 12~118 cm 구간은 최후빙하기층(Unit 3)에 해당되며 홀로세층에 비해 높은 모래 함량을 보이는 석회질 실트 입자들로 구성되어 있다. 퇴적물은 최후빙하기층에서 가장 높은 값을 보이며, 홀로세층에서는 극히 낮은 값을 나타내었다.

3.2 탄산염 함량 및 산소/탄소 동위원소 분석 결과

홀로세 및 해빙기에 해당되는 Unit 1과 Unit 2에서는 탄산염 함량이 희박하거나 없어서 측정이 되지 않았지만, 최후빙하기층(Unit 3) 동안에는 33~42%의 높은 값을 보였다. 특히 최후빙기층의 탄산염 함유량은 약 37%를 기준으로 증가와 감소를 보이는 세 부분(Subunits 3-1~3-3)으로 나눌 수 있으며 장주기적 변동을 보인다. 이러한 탄산염을 대상으로 한 동위원소 분석 결과를 보면, 탄소 및 산소 동위원소 값은 탄산염 함유량과 비슷한 경향으로 변하고 있음을 알 수 있다. 탄소 동위원소 값은 평균값 약 2‰을 기준으로 세 부분으로 나눌 수 있었다. Subunit 3-3에서는 평균 이상의 값을 보이며 최고치는 약 2.5‰이다. Subunit 3-2에서는 1.5~2.0‰의 범위로 평균 이하의 값을 보이며, Subunit 3-1에서는 다시 평균 이상의 값을 보인다. 산소 동위원소 값은 탄소 동위

원소 값보다 더 큰 폭의 변화를 보이지만, 대체적으로 평균값 -8.9‰을 중심으로 서로 비슷한 양상의 변화를 보였다. 특히 탄소 및 산소 동위원소의 상관관계를 보면, 그림 3과 같이 크게 해빙기와 빙하기로 두 부분으로 구분되며, 빙하기 내의 상관계수는 약 0.529의 값을 보인다.

4. 토 의

4.1 흡수굴 호수의 층서 변화의 의미

본 연구의 중력시추코어는 크게 세 부분, 즉 높은 탄산염 함유량을 보이는 조립질의 탄산염층(Unit 3), 희미한 엽층리가 보이는 낮은 함유량의 탄산염층(Unit 2), 그리고 탄산염이 없는 규질의 세립 실트층(Unit 1)으로 나뉘어진다(그림 2). 이러한 연속적인 층서 변화는 과거 흡수굴 시추코어 연구에서 보고된 층서 변화와 잘 부합된다(Chun and Cheong, 2005; Nara *et al.*, 2005; Kim and Cheong, 2007; Ryu *et al.*, 2008; Shin and Cheong, 2010). Prokopenko and Bonvento (2009)은 과거 약 백만년 동안 퇴적된 81 m 시추코어(HDP04)의 층서적 특징으로서 빙기 때의 탄산염층, 해빙기 때의 엽리가 뚜렷한 탄산염층, 그리고 간빙기에 해당하는 구조성 점토층의 교호를 제안하였다. 그리고 이러한 층서적 사이클이

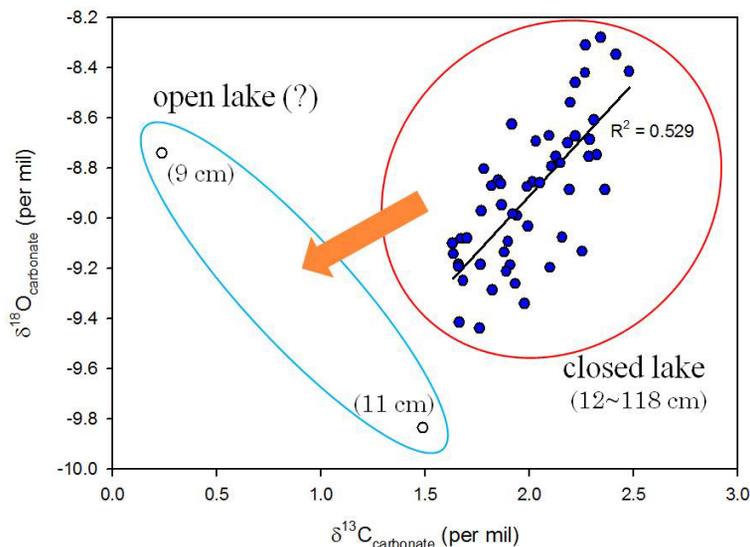


Fig. 3. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ correlation plot for deglacial and glacial periods in Hovsgol Lake sediments (core HDP08-1d). The high correlation coefficient during the last glacial period is shown.

81 m의 시추코어 속에 적어도 10회 퇴적기록으로 남아 있음을 보고하였다.

그러나 연대측정 자료가 부족한 이번 연구에서 보다 구체적인 퇴적상 변화를 보이는 층준의 정확한 시기를 추정하기 위해서는 여러 가정들이 필요하다. 먼저 흡수퇴적물 속에 포함된 유기물을 연대측정에 사용하는 경우에는 old carbon effect를 고려해야만 한다. 흡수굴 호수에서 나타나는 old carbon effect는 호수주위의 오래된 단구 및 고토양 퇴적물 등의 유입과 관련이 있다(Watanabe *et al.*, 2009). 이러한 old carbon의 영향은 여러 지점에서 얻어진 호수 표층 퇴적물의 연대측정 결과 비교를 통해서 추정될 수 있는데, 예를 들어 흡수굴 호수의 표층 퇴적물들의 연대는 약 600-2500 ^{14}C yr BP의 범위를 나타내는 것으로 보고되었다(Prokopenko *et al.*, 2007). 또한 동일한 깊이에서 채취된 식물편 연대와 퇴적물 연대의 비교를 통해서 약 400-4000년의 old carbon effect가 있음이 제시되었다(Watanabe *et al.*, 2007; Watanabe *et al.*, 2009).

또한 과거 여러 연구결과에 의하면 해빙기의 층서적인 특징을 엽층리의 존재로 보고 있다. 예를 들어 Prokopenko and Bonvento (2009)는 흡수굴 호수의 중앙부에서 회수된 중력시추코어의 연대와 층서변화를 기반으로 대략적으로 엽층리를 나타내는 탄산염 퇴적물의 산출시작을 최종빙하기가 끝나는 시점인 해빙기로 간주하였으며, 또한 엽층리가 끝나고 탄산염이 없는 구조성 점토퇴적물의 퇴적시작을 홀로세의 시작으로 보았다. 이러한 층서적 변화는 호수 수위와 관련이 있어서 탄산염 함유량의 변동과 깊은 관련이 있는 것으로 보고되었다(Kashiwaya *et al.*, 2010). 또한 흡수굴 호수 분지 외곽의 천호성 퇴적상을 보이는 층서의 연대측정 결과로부터 약 15,400년 전에 호수의 수위가 현재와 비교할 때 100 m 보다 낮았음을 제안하였다(Prokopenko *et al.*, 2005). 이러한 빙기-간빙기 사이의 층서변화와 관련된 높은 수위의 변화는 흡수굴 호수의 급격한 환경변화를 해석하는데 중요한 단서가 될 것이다.

이러한 old carbon effect와 호수 분지의 층서적 특징을 기반으로 HDP08-1d 시추코어의 대략적인 퇴적연대를 추정해보면 탄산염이 없는 0~6 cm 구간은 홀로세에 해당되는 것으로 보인다. 해빙기는 아마도 희미한 엽층리를 보이면서 낮은 탄산염을 가지며

산소/탄소 동위원소 값들이 급격한 변화를 보이는 6~12 cm 구간일 것이다. 그리고 최후빙하기층은 높은 탄산염 함량과 탄소/산소 동위원소값들이 수백 년에서 수천 년 규모의 변동을 보이는 12 cm 이하로 추정된다. 특히 이러한 층서적 변화는 퇴적물 변화를 수반하는 것으로 보인다. 퇴적물은 최종빙하기층에서 가장 높은 값을 보이며, 홀로세층에서는 극히 낮은 값을 나타낸다. 이는 호수 수위가 높은 간빙기 보다 호수 수위가 낮은 빙기 때에 더 많은 퇴적물이 호수 중앙부까지 이동되거나 침전되었음을 의미한다. 결론적으로 이번 연구 대상 시추코어는 연대측정결과와 탄산염 함유 정도와 퇴적구조를 근거로 할 때 가장 최근에 나타난 최후빙하기-해빙기-간빙기에 해당하는 층서적 기록을 보여주는 것으로 판단된다.

4.2 흡수굴 호수의 탄산염 퇴적물의 특성 및 변동 요인

4.2.1 탄산염 함량 및 변동의 의미

본 연구에서 분석한 흡수굴 호수 퇴적물의 큰 특징 중 하나는 이전 연구결과와 같이 층서적으로 변하는 탄산염의 양이라고 할 수 있다(Prokopenko and Bonvento, 2009; Kashiwaya *et al.*, 2010). 간빙기에 해당하는 홀로세 퇴적층에서는 탄산염이 거의 없지만, 해빙기와 최후빙하기 퇴적물에는 높은 탄산염 함량(약 34-45 wt.%)이 관찰된다. 이렇게 높은 수치의 탄산염 퇴적물은 두 가지 기원 즉 호수 주위의 석회암에서 분리되어 유수나 바람에 의해서 운반된 쇄설성 기원과 호수 내에서 침전된 자생 기원을 생각할 수 있다. 흡수굴 중앙부 호수퇴적물 속의 탄산염 기원을 구분하기 위해서 Prokopenko and Bonvento (2009)는 호수로 유입되는 탄산염을 포함하는 하천 퇴적물의 동위원소 분석을 실시하여 호수퇴적물의 탄산염 동위원소 값과 비교하였다. 두 지역에서의 동위원소 값들은 상당히 상이한 값을 보이므로 Prokopenko and Bonvento (2009)은 호수퇴적물의 탄산염의 기원을 쇄설성이 아닌 자생기원으로 해석하였다. 그림 4는 HDP08-1d 시료의 동위원소 분석결과와 Prokopenko and Bonvento (2009)에서 측정한 하천 퇴적물의 동위원소 분석결과를 서로 비교한 것이다. 하천퇴적물에 포함된 쇄설성 탄산염의 동위원소 값들은 HDP08-1d 시료의 동위원소 값들에 비해서 상당히 넓은 범위의 값을 보였으며, 산소 동위원소 값은 평균 -10.53‰, 탄소 동위원소 값은 평균 -0.06‰의 값을 보였다. 그

림 4에서 알 수 있듯이, HDP08-1d 호수퇴적물 속에 포함된 탄산염 산소 동위원소 평균값 -8.9% 과 탄소 동위원소 평균값 2% 은 쇄설기원 동위원소 평균값 들은 비교할 때 상당한 차이를 보인다. 또한 과거 흡수굴 호수에서 극한 저수위 퇴적환경에서 생성된 탄산염과 올라이트, 1~5 cm 두께의 탄산염 교질물의 산소/탄소 동위원소 값의 범위가 각각 $-6.19\sim-6.49\%$ 과 $4.8\sim6.91\%$ 이었다는 보고를 참고하면(Prokopenko and Bonvento, 2009), HDP08-1d 시추코어 속의 탄산염은 쇄설성 기원을 배제할 수는 없지만 대부분 자생기원임을 알 수 있다.

따라서 이러한 자생적 침전에 의해서 형성된 탄산염 함량의 변화는 자생 탄산염 형성에 영향을 주는 흡수굴 호수에서의 환경 변화의 결과라고 할 수 있다. 비슷한 연구로, Kashiwaya *et al.* (2010)은 지난 약 백만년 동안 형성된 흡수굴 호수퇴적물(core HDP04)을 대상으로 빙기-간빙기 시간 규모의 탄산염 함량 변동이 장주기적 증발량 변화에 기인한 호수 수위의 변동과 관련되어 있다고 제안하였다. 앞에서 흡수굴 호수의 여러 특징을 기술하였지만, 이 호수는 현재도 탄산염에 거의 포화상태이며, 호수의 남쪽 낮은 수심의 연안지역에서는 현재도 탄산염 침전이 일어나고 있다(Prokopenko and Bonvento, 2009). 이러한 호수의 탄산염 침전 가능성은 강수량

의 감소와 상대적 증발량의 증가가 확인한 빙기에는 더 뚜렷해질 것이다. 따라서 빙기에는 호수 수위 감소에 따라 탄산염 침전이 호수유역 전체로 확대되어 활발하게 일어나며, 반대로 간빙기에는 산악 빙하의 녹은 물의 유입과 더불어 강수량의 증가로 인해 호수 수위가 올라가기에 탄산염 침전이 호수의 중앙에서는 거의 일어나지 않았을 것으로 추정된다. 따라서 탄산염 함유량과 증발량 관련 기후변화에 있어서 이번 연구는, 첫째로 수만 년 시간 스케일의 빙기-간빙기 관점에서 후기 플라이스토세의 고염분성-저수위 호수 환경에서 홀로세의 저염분성-고수위 호수 환경으로의 변화를 뚜렷이 보여준다. 둘째로 수천 년 시간 스케일의 관점에서, 과거 후기 플라이스토세 동안 탄산염 함유량의 변동 즉 증발량 변동과 관련된 큰 기후변화가 그림 2에서 볼 수 있듯이 3차례(Subunits 1-3) 있었으며, 또한 이러한 subunit들이 수백 년 스케일의 변동성으로 중첩되어 나타남을 보여준다.

4.2.2 산소/탄소 동위원소 값의 상관관계 및 호수 환경 변화

그림 3에서 볼 수 있듯이 흡수굴 호수의 탄산염 산소/탄소 동위원소 값의 상관관계는 뚜렷한 변화를 보이는데 이것은 과거 호수의 수문학적 특성을 지시한다고 할 수 있다. 수천 년의 장주기적인 관점에서

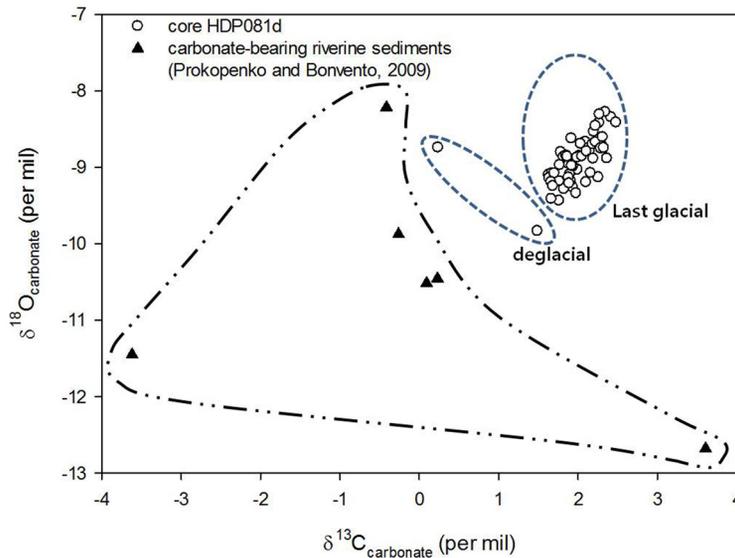


Fig. 4. $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ plot for comparison between Hovsgol Lake sediments (core HDP08-1d) and carbonate-bearing riverine sediments (Prokopenko and Bonvento, 2009).

Table 2. Grain size, carbonate content (HCl-soluble component, %), and stable isotope records of carbonate ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) for core HDP08-1d.

Depth (cm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonate}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carbonate}}$ (‰)	Median grain size (μm)	HCl-soluble component (%)
1			15.81	
3			14.71	
5			13.96	
7			13.34	30.96
9	-8.74	0.24	14.02	35.86
11	-9.84	1.49	16.88	35.42
13	-9.10	1.63	14.31	38.80
15	-8.35	2.42	12.38	38.98
17	-8.69	2.29	14.22	41.19
19	-8.89	2.36	12.49	40.69
21	-8.86	2.02	13.95	36.36
23	-8.67	2.10	15.89	41.30
25	-8.75	2.13	13.82	41.55
27	-9.08	1.67	13.43	37.58
29	-8.80	1.78	12.11	37.83
31	-8.95	1.87	15.45	36.34
33	-9.18	1.66	13.62	36.21
35	-9.26	1.93	13.14	37.52
37	-9.14	1.64	12.28	38.15
39	-9.08	1.70	11.36	38.77
41	-9.03	1.99	12.56	37.31
43	-8.87	1.82	12.25	34.52
45	-9.44	1.76	11.60	36.74
47	-9.29	1.82	14.66	35.33
49	-9.19	1.77	12.88	35.81
51	-9.42	1.67	13.42	34.05
53	-9.19	1.66	13.64	34.66
55	-9.25	1.68	14.83	33.49
57	-8.85	1.85	12.26	35.02
59	-9.09	1.90	11.89	35.67
61	-9.19	1.91	13.03	36.49
63	-8.62	1.92	12.35	34.73
65	-8.97	1.77	14.30	34.07
67	-8.99	1.94	12.98	34.30
69	-8.88	1.99	13.36	36.47
71	-8.98	1.92	13.15	33.18
73	-9.14	1.88	13.98	33.81
75	-9.21	1.89	12.44	35.12
77	-9.34	1.98	10.97	36.78
79	-8.86	2.05	13.10	37.03

Table 2. continued.

Depth (cm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{carbonate}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{carbonate}}$ (‰)	Median grain size (μm)	HCl-soluble component (%)
81	-8.78	2.15	11.70	36.94
83	2.26	2.26	11.59	36.54
85	2.10	2.10	11.41	36.19
87	2.19	2.19	14.89	36.50
89	2.34	2.34	14.13	39.06
91	2.18	2.18	13.48	36.46
93	2.22	2.22	13.41	37.16
95	2.29	2.29	13.39	38.93
97	2.11	2.11	12.82	37.00
99	2.27	2.27	17.42	37.17
101	2.31	2.31	15.27	38.18
103	2.32	2.32	14.23	36.70
105	2.48	2.48	12.18	37.78
107	2.27	2.27	15.93	38.28
109	2.20	2.20	18.46	37.54
111	2.22	2.22	16.03	37.06
113	2.16	2.16	14.90	37.17
115	2.03	2.03	18.46	36.08
117	1.86	1.86	18.36	38.31

볼 때 산소/탄소 동위원소의 상관관계는 과거 호수의 수문학적 특성, 즉 당시의 호수가 열린 분지인지 닫힌 분지인지를 나타내는 단서를 제공한다(Talbot, 1990). 이번 연구에서 보이는 후기플라이스토세 동안의 높은 상관계수($R^2=0.529$)는 이 당시 호수의 수문 상태가 폐쇄성 호수였음을 시사하며, 비록 해빙기 때에는 시료 수가 제한되어 상관성을 논할 수는 없지만 개방성 호수로의 전이가 일어나고 있음을 두 동위원소의 상관관계의 변화에서 유추할 수 있다(그림 3). 이러한 상관관계 해석은 과거 흡수굴 호수퇴적물의 구조 연구의 결과에 의해서 뒷받침 될 수 있다. Ryu *et al.* (2008)은 후기 플라이스토세 층에서 구조화석이 발견되지 않은 점을 당시의 낮은 수온과 폐쇄 조건의 높은 염도 때문일 것으로 추측하였다. 반면 해빙기에는 온도상승에 의한 호수 수위 상승으로 흡수굴 호수의 생태조건이 호전되었으며, 홀로세에는 구조가 생존하기에 좋은 개방호수 환경으로 전이되었다고 제안하였다.

특히 후기 플라이스토세 동안의 두 동위원소의 높은 상관관계는 두 동위원소 값의 변화가 동일요인에

의해서 영향을 크게 받았음을 의미한다고 할 수 있다. 여러 호수의 동위원소의 변동패턴의 분석 연구 결과에 의하면, 폐쇄성 호수에서는 호수의 체적이 증가할 때 두 동위원소의 값이 같이 감소하고 호수의 체적이 감소할 때 두 동위원소의 값이 증가하는 이른바 동일변동성을 보인다고 제안하였다(Talbot, 1990; Li and Ku, 1994). 그림 2에서 볼 수 있듯이 흡수굴 호수에서 복원된 두 동위원소의 값들의 수천 년 시간 규모의 장주기적 변화가 증발량 변화에 의한 호수 수위의 변화를 지시하는 탄산염 함량과 유사한 관계를 보이므로 두 동위원소의 주된 변동은 아마도 흡수굴 호수의 체적변화의 영향이라고 할 수 있을 것이다.

4.2.3 산소 및 탄소 동위원소 값의 단주기적 변동의 수문학적 의미

앞에서 기술하였듯이 산소 및 탄소 동위원소의 장주기 변동은 탄산염 함량 변동과 관련되어 있고, 이들의 변동은 주로 증발량과 관련된 장주기적 호수 수위의 변화와 관련이 있음을 제안하였다. 그러나 수백 년 시간 규모로 보다 상세히 이들의 변동을 들

여다보면 여러 면에서 다른 양상을 관찰할 수 있다. 이것은 각각의 변동에 영향을 미친 기후학적/환경학적 요소가 다르기 때문일 것이다.

첫째로 주어진 조건에서의 상대적 증발량의 강도를 나타내는 탄산염 함유량과 달리 호수 탄산염의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 그 당시의 호수물의 동위원소 성분을 나타낸다. 특히 폐쇄형 호수에서 호수물의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 수문변화 즉 유입수의 특성과 증발의 영향을 주로 받게 된다. 유입수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 기존 호수물의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 많은 차이가 나는 경우에는 유입수에 의한 희석효과가 더 뚜렷하게 나타나게 된다. 반대로 증발은 선행적으로 호수의 산소동위원소에 영향을 준다. 즉 가벼운 ^{16}O 가 쉽게 증발하기에 호수에는 무거운 ^{18}O 가 남게 되어 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 증가하게 된다(Li and Ku, 1994; Leng *et al.*, 2007).

현재 흡수굴 호수의 여름 강수는 전체강수 가운데 약 68%를 차지하고 있으며, 몽골 울란바토르 지역에서 나타나는 여름강수의 산소동위원소 값은 약 -2에서 -12‰ 사이의 값을 가지며, 겨울철 강수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 약 -20에서 -30‰ 사이의 상당히 낮은 값을 가지고 있다(Prokopenko and Bonvento, 2009). 반면에 최후빙기 시기에는 상대적으로 여름강수가 줄었을 것이라고 생각되고 또한 빙기 때의 강수는 가벼운 산소를 더 많이 가지고 있기에 과거 최후빙기 동안의 흡수굴 호수의 유입수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 아마도 현재 강수에서 나타나는 $\delta^{18}\text{O}$ 값보다는 훨씬 낮았을 것으로 생각된다. 또한 흡수굴 호수에서의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 탄산염 함유량과의 유사한 변동을 고려하면, 본 연구에서 획득한 후기 최후빙하기 기간의 $\delta^{18}\text{O}$ 값들의 변동은 상대적으로 낮은 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 갖는 유입수의 희석효과와 증발에 의한 $\delta^{18}\text{O}$ 증대 효과의 상호작용 결과라고 할 수 있을 것이다.

둘째로, 폐쇄성 호수에서의 $\delta^{13}\text{C}$ 값 변화의 원인은 산소동위원소 보다 다소 복잡하다. 보통 호수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 호수 수위의 증가 또는 감소(증발)에 따라 변하게 된다. 강이나 호수로 유입되는 무기용존탄소는 식물들의 부식과 토양화에 의해 만들어지는 토양 속의 이산화탄소와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 토양 속 확산영향을 고려하면, C3식물이 우점하는 지역에서의 토양 속 이산화탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 약 -23‰을 보이고 C4식물이 우점하는 곳에서는 약 -10‰을 보인다(Schulte *et al.*, 2011). 흡수굴 호수를

둘러싸고 있는 지역은 낮은 기온으로 인해서 C4식물이 자랄 수 없는 곳이기 때문에 C3식물이 압도적으로 많다(Brincat *et al.*, 2000; Prokopenko *et al.*, 2009). 비록 흡수굴 호수 서쪽에 석회암지역이 일부 분포하지만, 전체적으로는 C3식물의 영향을 받은 토양 기원의 무기용존탄소가 우세할 것으로 생각되기에 담수로 유입되는 무기용존탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 상당히 낮다고 할 수 있다. 호수 체적의 감소는 유입수(담수)의 감소를 의미하므로 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 상대적으로 작은 유입수 유량의 감소는 호수물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 상대적인 증가를 야기한다. 또한 강한 증발은 호수물의 이산화탄소증기압을 높여서 상대적으로 가벼운 호수의 ^{12}C 가 대기중으로 이동하게 되어 호수물에는 무거운 ^{13}C 가 남게 되어 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 증가하게 된다. 마지막으로 호수 체적의 급격한 감소는 호수의 수온약층 상하의 활발한 혼합효과를 발생시켜 영양분이 저층에서 유광층으로 공급되는 효과를 일으켜 표층 생산성 상승 효과를 야기한다. 이러한 수중 식물의 선택적인 ^{12}C 소모는 상대적으로 무거운 ^{13}C 가 호수 물에 집적되는 결과를 낳는다(Li and Ku, 1994). 따라서 흡수굴 호수의 탄산염 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 장기적으로는 탄산염 함유량과 비슷한 호수 수위의 변화에 반응하면서(이 부분은 산소동위원소의 반응과 같다), 이산화탄소 대기교환과 호수 생산성에 따라 단주기적으로 중첩되어 변했을 것으로 추정된다.

4.3 과거 흡수굴에서의 후기 플라이스토세 호수 환경 및 기후 변화

이번 연구에서 제안된 흡수굴 호수에서 후기 플라이스토세 동안 환경변화의 큰 특징은 수백 년에서 수천 년에 이르는 뚜렷한 기후 변동성이라고 할 수 있다. 그림 5는 이러한 특징을 잘 설명해 준다. 천년~수백 년 빈도 기후 변동을 도시하기 위해서 산소동위원소 값들 중에서 피크에 해당되는 지점에 순차적으로 숫자를 표시하였다. 약 3만년에서 약 2만년에 걸쳐 약 12개 정도의 피크가 발견되기에 이러한 피크들은 적어도 천년~수백 년 빈도 기후 변동을 나타낸다고 할 수 있다. 이것은 과거 후기 플라이스토세 동안에 흡수굴 호수유역에서 있었던 담수유입과 증발량 변화에 따른 호수의 수문변화 즉 호수 수위의 변화를 나타낸다고 할 수 있다. 비슷한 후기 플라이스토세 동안의 호수 수위 변화는 이전의 연구에서

도 보고되었다. 호수의 중앙부인 수심 약 250 m 지점에서 회수된 HS-7 시추코어 퇴적물 속에 포함된 개형층 연구에 따르면 홀로세 동안에는 개형층이 발견되지 않았고, 후기 플라이스토세에 해당되는 빙기

에는 다량의 개형층이 산출되었는데, 특히 후기 플라이스토세 기간에 걸쳐 두 종의 변화가 흡수굴 호수 환경 변화를 나타낸다고 보고되었다(Kim and Cheong, 2007). 그리고 다양한 수심에 걸쳐서 분포

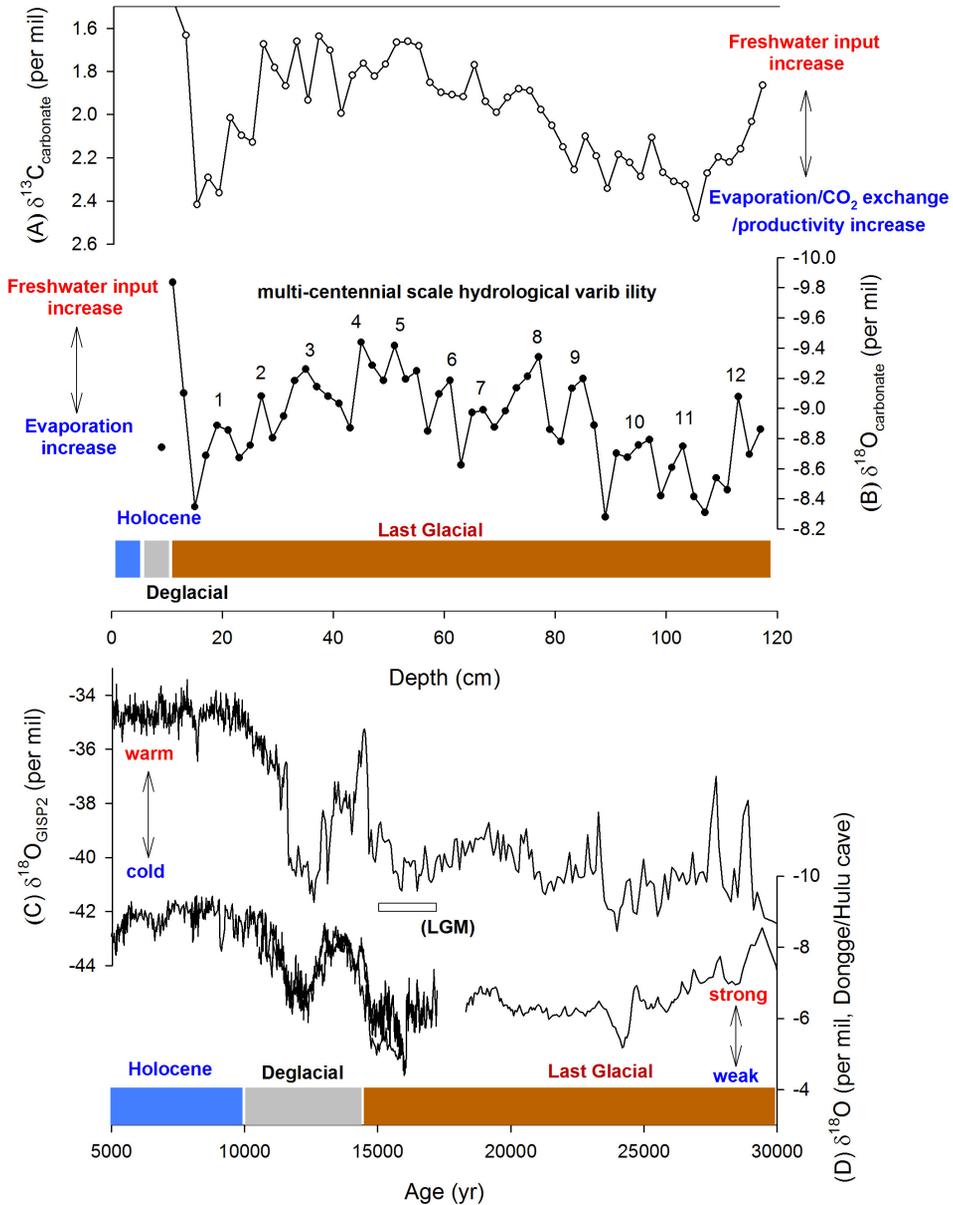


Fig. 5. (A) simplified climatic/environmental implication for changes in $\delta^{13}\text{C}$ values of carbonate in Hovsgol Lake sediments (core HDP08-1d). (B) simplified climatic/environmental implication for changes in $\delta^{18}\text{O}$ values of carbonate in Hovsgol Lake sediments (core HDP08-1d). (C) high-latitude climate index reconstructed from $\delta^{18}\text{O}$ values in Greenland ice cores (Stuiver *et al.*, 1995; Grootes and Stuiver, 1997) showing significant millennial- to centennial-scale climatic variability during the late Pleistocene. (D) Asian summer monsoon index reconstructed from $\delta^{18}\text{O}$ values of stalagmites in Hulu and Dongge caves, south China (Wang *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2005).

하는 종(*Cytherissa lacustris*)과 얇은 민물에서 서식 하는 종(*Limnocythere inopinata*)의 상대적인 변화에 근거해서 호수의 수위 변화를 추측하였다. 이번 연구에서 밝혀진 천년~수백 년 빈도의 호수 수위 변화와 개형층 연구 결과를 직접적으로 비교할 수는 없지만, 이 두 연구 결과에 따르면 후기 플라이스토세 동안에 내륙 고산지역에서의 호수환경이 상당히 가변적이었으며, 고염분성-저수위 상태와 저염분성-고수위 상태를 오가는 빈번한 교차가 있었을 것으로 추측된다. 또한 이번 연구결과는 이러한 호수 환경 변화가 천년~수백 년 빈도를 갖는 수문 변동에 의한 것임을 보여준다고 할 수 있다.

흡수굴 호수를 둘러싼 유역의 과거 기후변화는 여름 복사량과 동아시아 몬순의 변화, 고위도 및 북대서양의 기후변화, 그리고 대기순환 변화(Fedotov *et al.*, 2004; Murakami *et al.*, 2010) 등에 의해서 영향을 받았을 것이라고 보고되었다. 그림 5는 최후빙하기를 포함하는 후기 플라이스토세 동안의 고위도의 기후 변화와 동아시아 몬순의 변화를 보여준다. 북반구의 고위도 기후변화는 그린란드 빙상코어의 산소 동위원소 값의 변동으로부터 복원되었으며(Stuiver *et al.*, 1995; Grootes and Stuiver, 1997), 동아시아 몬순의 과거 변동은 Dongge Cave와 Hulu Cave에서 회수된 석순의 산소동위원소 값들의 변동으로부터 복원되었다(Wang *et al.*, 2001, 2005). 그림 5에서 볼 수 있듯이 고위도 기후변화와 동아시아 몬순의 변화의 지지자들은 수백 년에서 수천 년에 이르는 서로 비슷한 변동성을 보인다. 그러나 연대측정 자료의 부족으로 이번 연구에서 확인된 흡수굴 호수유역의 천년~수백 년 빈도 수문변동을 고위도의 기후변화 또는 동아시아 몬순의 영향이라는 관점에서 구체적인 해석을 할 수는 없었다. 향후 보다 정확한 연대측정 자료가 뒷받침 된다면, 이번 연구에서 제시된 탄산염 동위원소 값의 변동이 내륙의 고해상도 기후변화 연구에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

몽골 흡수굴 호수의 과거 환경변화 추적을 위해서 호수퇴적물에 대한 연대측정, 탄산염의 함량 및 산소/탄소 동위원소 분석 등을 실시하였다. 연대측정 결과 HDP08-1d 시추코어는 과거 약 3만년에 걸

쳐서 퇴적되었으며, 홀로세층(0~6 cm), 해빙기층(6~12 cm), 그리고 약 33~40%에 이르는 높은 탄산염 함량을 보이는 최후빙기층(12~112 cm)으로 구분된다.

홀로세 때는 호수 중앙부에 탄산염 침전이 일어나지 않은 것으로 보이며, 구조 등이 생존하기에 적합한 수문학적으로 열린 상태(open-basin lake)였을 것으로 추측된다. 최후빙기 동안에는 많은 탄산염이 침전되었는데, 이러한 탄산염의 산소/탄소 동위원소 값은 각각 -9.8~-8.2‰과 0.2~2.5‰ 사이에서 서로 비슷한 패턴으로 변했다. 특히 최후빙기 동안 나타나는 두 동위원소 값들의 높은 상관관계($R^2=0.529$)는 탄산염이 침전되는 그 당시의 호수가 수문학적으로 폐쇄된 상태였음을 의미한다.

후기 플라이스토세 동안 두 동위원소의 수천 년 규모의 장기적 변화는 탄산염 함량 변화와 유사한 패턴을 보였으며, 이것은 두 동위원소의 변화가 증발량과 유입수량의 비로 표현될 수 있는 과거 수문 변화 즉 수위 변화와 관련되어 있음을 시사한다고 할 수 있다. 그러나 이들의 수백 년 시간 규모의 단기적 변동을 살펴보면 여러 면에서 다른 양상을 관찰할 수 있다. 이것은 각각이 지시하는 기후학적/환경학적 정보가 다르기 때문일 것이다. $\delta^{18}\text{O}$ 의 값은 유입수의 희석효과와 증발에 의한 $\delta^{18}\text{O}$ 증대 효과의 상호작용 결과를 나타내지만, 이와 달리 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 호수 수위의 변화에 반응하면서, 또한 이산화탄소 대기교환과 호수 생산성의 영향을 받아서 변했을 것으로 생각된다. 따라서 유입수와 증발에 선형적으로 반응하는 탄산염 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 보다 정확한 수위 변화를 제시할 수 있기에, 호수 수문 변화 복원을 위한 보다 좋은 지지자가 될 것으로 생각된다. 이번 연구 결과는 후기 플라이스토세 동안에 내륙 고산지역에서의 호수의 수문 환경이 상당히 가변적이었으며, 고위도 또는 아시아 몬순 기후변화와 결부된 천년~수백 년 빈도의 수문 변동이 있었을 가능성을 보여준다.

사 사

이 논문을 심사해 주시고 유익한 조언을 주신 편집위원님, 서울대학교 이용일 교수님, 강원대학교 정대교 교수님 그리고 익명의 심사위원님께 감사드립니다. 이 연구는 한국지질자원연구원 제4기 지질연구실의 기본사업 과제의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J. and Brook, E.J., 2008, Atmospheric CO₂ and climate change on millennial time scales during the last glacial period. *Science*, 322, 83-85, doi: 10.1126/science.1160832.
- An, Z.S., Huang, Y., Liu, W., Guo, Z., Steven, C., Li, L., Warren P., Ning, Y., Cai, Y., Zhou, W., Lin, B., Zhang, Q., Cao, Y., Qiang, X., Chang, H. and Wu, Z., 2005, Multiple expansion of C₄ plant biomass in East Asia since 7 Ma coupled with strengthened monsoon circulation. *Geology*, 33, 705-708.
- Brinchat, D., Yamada, K., Ishiwatari, R., Uemura, H. and Naraoka, H., 2000, Molecular-isotopic stratigraphy of long-chain n-alkanes in Lake Baikal Holocene and glacial age sediments. *Organic Geochemistry*, 31, 287-294.
- Chun, J.-H. and Cheong, D., 2005, Paleoclimatic implications of Late Quaternary core sediments from the southern part of the Lake Hovsgol, Mongolia. *Journal of the Geological Society of Korea*, 41, 511-522 (in Korean with English abstract).
- Dannenmann, S.D., Linsley, B.K., Oppo, D.W., Rosenthal, Y. and Beaufort, L., 2003, East Asian monsoon forcing of suborbital variability in the Sulu Sea during Marine Isotope Stage 3: Link to Northern Hemisphere climate. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, doi: 10.1029/2002GC000390.
- Fedotov, A.P., Chebykin, E.P., Yu, S.M., Vorobyova, S.S., Yu, O.E., Golobokova, L.P., Pogodaeva, T.V., Zheleznyakova, T.O., Grachev, M.A., Tomurhuu, D., Oyunchimeg, T., Narantsetseg, T., Tomurtogoo, O., Dolgikh, P.T., Arsenyuk, M.I. and Batist, M.D., 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, 245-257.
- Grootes, P. M. and Stuiver, M., 1997, Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 103- to 105-year time resolution. *Journal of Geophysical Research*, 102, 26455-26470.
- Hovsgol Drilling Project Group, 2007, Structure of bottom sediments in Lake Hovsgol: geological and climate controls. *Russian Geology and Geophysics*, 48, 863-885.
- Jo, K., Woo, K.S., Lim, H.S., Cheng, H., Edwards, R.L., Wang, Y., Jiang, X., Kim, R., Lee, J.I., Yoon, H.I. and Yoo, K.-C., 2011, Holocene and Eemian climatic optima in the Korean Peninsula based on textural and carbon isotopic records from the stalagmite of the Daeya Cave, South Korea Original Research Article. *Quaternary Science Reviews*, 30, 1218-1231.
- Kashiwaya, K., Ochiai, S., Sumino, G., Tsukamoto, T., Szyniszewska, A., Yamamoto, M., Sakaguchi, A., Hasebe, N., Sakai, H., Watanabe, T. and Kawai, T., 2010, Climato-hydrological fluctuations printed in long lacustrine records in Lake Hovsgol, Mongolia. *Quaternary International*, 219, 178-187.
- Khim, B.K., Park, Y.H., Bahk, J.J., Jin, J.H. and Lee, G.H., 2008, Spatial and temporal variation of geochemical properties and paleoceanographic implications in the South Korea Plateau (East Sea) during the late Quaternary. *Quaternary International*, 176-177, 46-61.
- Kim, B. and Cheong, D., 2007, Interpretation of Late Quaternary paleoenvironmental change inferred from ostracods in central Lake Hovsgol sediments, Mongolia, *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 43-54 (in Korean with English abstract).
- Leng, M.J. and Marshall, J.D., 2004, Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. *Quaternary Science Reviews*, 23, 811-831.
- Li, H.-C. and Ku, T.-L., 1997, $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ covariance as a paleohydrological indicator for closed-basin lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 133, 69-80.
- Li, X., Liu, W. and Xu, L., 2012, Carbon isotopes in surface-sediment carbonates of modern Lake Qinghai (Qinghai-Tibet Plateau): Implications for lake evolution in arid areas. *Chemical Geology*, 300-301, 88-96.
- Linsley, B.K., 1996, Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150,000 years. *Nature*, 380, 234-237.
- Murakami, T., Katsuta, N., Yamamoto, K., Takamatsu, N., Takano, M., Oda, T., Matsumoto, G., Horiuchi, K. and Kawai, T., 2010, A 27-kyr record of environmental change in central Asia inferred from the sediment record of Lake Hovsgol, northwest Mongolia, *Journal of Paleolimnology*, 43, 369-383.
- Nara, F., Tani, Y., Soma, Y., Soma, M., Naraoka, H., Watanabe, T., Horiuchi, K., Kawai, T., Oda, T. and Nakanura, T., 2005, Response of phytoplankton productivity to climate change recorded by sedimentary photosynthetic pigments and other biological indicators in Lake Hovsgol (Mongolia) for the last 23,000 years. *Quaternary International*, 136, 71-81.
- Prokopenko, A.A., Khursevich, G.K., Bezrukova, E.V., Kuzmin, M.I., Boes, X., Williams, D.F., Fedenya, S.A., Kulagina, N.V., Letunova, P.P. and Abzaeva, A.A., 2007, Paleoenvironmental proxy records from Lake Hovsgol, Mongolia, and a synthesis of Holocene climate change in the Lake Baikal watershed. *Quaternary Research*, 68, 2-17.

- Prokopenko, A.A., Kuzmin, M.I., Williams, D.F., Gelety, V.F., Kalmychkov, G.V., Gvozdkov, 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, 59-69.
- Prokopenko, A.A. and Bonvento, V.J., 2009, Carbonate stable isotope signals in the 1-Ma sedimentary record of the HDP-04 drill core from Lake Hovsgol, NW Mongolia. *Quaternary International*, 205, 53-64.
- Prokopenko, A.A., Khursevich, G.K., Kuzmin, M.I. and Kawai, T., 2009, Productivity cycles in Lake Hovsgol, NW Mongolia, during the last 1Ma and the age model of the HDP-04 drill core record. *Quaternary International*, 205, 111-125.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C.B., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E., 2009, INTCAL09 AND MARINE09 RADIOCARBON AGE CALIBRATION CURVES, 0-50,000 YEARS CAL BP. *Radiocarbon*, 51, 1111-1150.
- Ryu, E., Kim, J.C., Nahm, W.-H., Yang, D.-Y. and Kim, J.-Y., 2008, Characteristics of diatoms in the Lake Hovsgol, Mongolia during the Late Quaternary and their relationship with paleoenvironmental change, *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 47-62 (in Korean with English abstract).
- Schulte, P., Geldern, R., Freitag, H., Karim, A., Négrel, P., Petelet-Giraud, E., Probst, A., Probst, J.-L. and Telmer, K., 2011, Applications of stable water and carbon isotopes in watershed research: Weathering, carbon cycling, and water balances, *Earth-Science Reviews*, 109, 20-31.
- Shin, S. and Cheong, D., 2010, Paleoclimatic interpretation of the Late Quaternary by sedimentary facies modelling of the bottom sediments in Lake Hovsgol of northern Mongolia. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 345-356 (in Korean with English abstract).
- Stuiver, M. and Reimer, P.J., 1993, Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program, *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- Stuiver, M., Grootes, P. M. and Braziunas, T.F., 1995, The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes. *Quaternary Research*, 44, 341-354.
- Talbot, M.R., 1990, A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotope ratios in primary lacustrine carbonates. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 80, 261-279.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Chen, C.-C. and Dorale, J.A., 2001, A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294, 2345-2348.
- Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M.J., Dykoski, C.A. and Li, X., 2005, The Holocene Asian Monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308, 854-857.
- Watanabe, T., Nakamura, T. and Kawai, T., 2007, Radiocarbon dating of sediments from large continental lakes (Lakes Baikal, Hovsgol and Erhel). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 259, 565-570.
- Watanabe, T., Nakamura, T., Nara, F., Kakegawa, T., Horiuchi, K., Senda, R., Oda, T., Nishimura, M., Matsumoto, G. and Kawai, T., 2009, High-time resolution AMS ^{14}C data sets for Lake Baikal and Lake Hovsgol sediment cores: Changes in radiocarbon age and sedimentation rates during the transition from the last glacial to the Holocene. *Quaternary International*, 205, 12-20.
- Xiao, J.L., Porter, S.C., An, Z.S., Kumai, H. and Yoshikawa, S., 1995, Grain size of quartz as an indicator winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 yrs. *Quaternary Research*, 43, 22-29.
- Yu, H., Liu, Z., Berné, S., Jia, G., Xiong, Y., Dickens, G.R., Wei, X., Liu, J.P. and Chen, F., 2009, Variations in temperature and salinity of the surface water above the middle Okinawa Trough during the past 37 kyr. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 281, 154-164.

투 고 일 : 2014년 3월 25일

심 사 일 : 2014년 3월 26일

심사완료일 : 2014년 8월 28일