

아시아 몬순 기후지역에 위치한 대형 인공호에서 기포형태로의 메탄(CH₄) 가스 배출량

김기용 · 정성민 · 최영순¹ · Stefan Peiffer² · Klaus-Holger Knorr³ · 김범철*

강원대학교 환경융합학부, ¹한강물환경연구소 유역환경연구과, ²바이로이트대학교 수문학과, ³뮌스터대학교 생태수문 생지화학과

Methane Gas Emission from an Artificial Reservoir under Asian Monsoon Climate Conditions, with a Focus on the Ebullition Pathway. Kim, Kiyong (0000-0001-9585-7995), Sungmin Jung (0000-0002-9177-9026), Youngsoon Choi¹ (0000-0003-4738-4315), Stefan Peiffer² (0000-0002-8326-0240), Klaus Holger Knorr³ (0000-0003-4175-0214) and Bomchul Kim* (0000-0003-1687-221X) (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea; ¹Watershed Environment Research Department, Han-River Environment Research Center, Gyeonggi-do 12585, Republic of Korea; ²Hydrology department, University of Bayreuth, Bayreuth 95447, Germany; ³Ecohydrology and Biogeochemistry Group, University of Munster, Munster 3424, Germany)

Abstract The role played by reservoirs in the biogeochemical cycles of elements is a subject of ongoing debate. Recent research has revealed that reservoirs emit significant levels of greenhouse gases. To assess the importance of reservoirs in monsoon climate areas as a source of methane gas into the atmosphere, we investigated variations in organic carbon (OC) input into the reservoir, oxic state changes, and finally the amount of methane emitted (focusing on the ebullition pathway) in Lake Soyang, which is the largest reservoir in South Korea. Total organic carbon (TOC) concentrations were higher during summer after two years of heavy rainfall. The sedimentation rates of particulate organic carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON) were higher in the epilimnion and hypolimnion than the metalimnion, indicating that autochthonous and allochthonous carbon made separate contributions to the TOC. During stratification, oxygen depletion occurred in the hypolimnion due to the decomposition of organic matter. Under these conditions, H₂S and CH₄ can be released from sediment. The methane emissions from the reservoir were much higher than from other natural lakes. However, the temporal and spatial variations of methane ebullition were huge, and were clearly dependent on many factors. Therefore, more research via a well-organized field campaign is needed to investigate methane emissions.

Key words: methane, reservoir, monsoon, GHG, carbon

서 론

Manuscript received 6 February 2017, revised 28 March 2018,
revision accepted 10 April 2018
* Corresponding author: Tel: +82-33-252-4443, Fax: +82-33-259-5563,
E-mail: bomchul@kangwon.ac.kr

육지의 담수는 대기 중 온실가스 생성에 기여하는 하나
의 큰 기원(source) 중 하나이다(Bastviken *et al.*, 2011). 그
중에서도 최근 호수의 온실가스 배출에 관한 중요성이 부

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

각되면서 해당 연구가 증가하는 추세이다(Bastviken *et al.*, 2004; Encinas Fernández *et al.*, 2014). 호수에서 방출되는 온실가스의 대부분은 호수로 유입된 유기물이 분해되는 과정에서 발생한다. 호수 저질 속의 유기물이 분해될 때, 유기물 산화에 필요한 산소가 충분한 환경에서는 이산화탄소(CO₂)가 최종 반응산물로 생성되어 배출되고, 산소의 양이 제한되는 저질 환경에서는 유기물 분해과정에 이용 가능한 전자 수용체(electron acceptor)의 양에 따라 최종산물로 메탄(CH₄)도 생성되어 배출될 수 있다(Wetzel, 2001; Maeck *et al.*, 2014). CO₂와 CH₄ 가스는 둘 모두 온실가스이지만 CH₄은 CO₂의 약 20배에 해당하는 강력한 온실가스 기여도를 가지고 있기 때문에 저질 속 무산소 상태의 증가는 온실가스 배출로 야기되는 기후 변화에 더 큰 영향을 줄 수 있다(Maeck *et al.*, 2013). 현재까지 많은 연구들은 주로 크기가 작고 부영양한 자연호만을 대상으로 메탄생성량을 측정하여 정량하였다(Bastviken *et al.*, 2004; Bastviken *et al.*, 2010). 이와 같은 이유로 크기가 큰 인공호들에서 조사된 메탄 발생 연구는 상대적으로 매우 드문 실정이며 특히 국내에서는 많은 연구가 이루어지지 않았다. 그러나 최근 인공호에서 발생하는 메탄 방출량에 대한 관심이 높아지면서 해당 연구가 늘어나고 있다(St. Louis *et al.*, 2000; DelSontro *et al.*, 2001).

강줄기 하류에 건설된 댐은 강물을 따라 이동하는 부유입자의 이동을 제한하고 체류시간을 늘려 높은 퇴적물을 야기시켜 많은 양의 퇴적물(영양염류 및 탄소)을 댐 안에 저장한다(Kunz *et al.*, 2011; Baker, 2013). 이와 같이 댐은 해당 유역에서 강으로 유입된 유기 탄소의 많은 양을 저장하여 바다로 가는 양을 제한한다. 댐 안에 저장된 내부기원(autochthonous) 또는 외부기원(allochthonous) 탄소는 그 기원에 관계없이 댐 수체 내의 무산소상태 빈도가 늘어나면 유기탄소의 혐기성 분해과정에서 메탄이 생성되어 대기 방출될 위험이 높아진다(Fearnside 2005; Kemenes *et al.*, 2007; DelSontro *et al.*, 2010; Maeck *et al.*, 2013). 메탄 발생의 대부분이 기포 형태로 배출됨에도 불구하고 현재까지 보고된 메탄 배출량 연구들에서 기포형태로 방출되는 메탄에 관한 정보는 부족한 실정이다(Bastviken *et al.*, 2004). 기포형태로의 배출 형태(ebullition)는 얇은 수심의 환경에서 발생이 잦은데 이는 메탄의 재산화(re-oxidation) 가능성이 얇은 수심으로 인해 제한되기 때문이다. 대형 인공호는 수심이 깊어 메탄의 재산화 기작이 메탄 배출량을 제한하지만 경우에 따라 강줄기 하류에 댐의 건설로 형성된 인공호의 수심이 각 정점별로 다르고 퇴적의 경향 또한 상이하기 때문에 호수 내 정점에 따른 메탄 배출량의 정확한 평가가 필요하다.

소양호의 경우 주 유입수인 소양강 유입부 지역의 수심은 댐 앞의 수심과 비교하였을 때 매우 얇고 상류유역으로부터 유입되어 퇴적되는 양도 하류 댐 지역보다 상대적으로 많다. 이 때문에 여름철 수온성층으로 인해 표층으로부터 심층으로의 산소 공급이 제한되고 저질로 유입된 많은 양의 유기물이 빠르게 산화되면서 산소의 소비가 많아져 심층 무산소상태의 환경이 만들어진다. 이때, 유기물 분해과정의 최종산물로 CO₂가 아닌 CH₄ 가스가 발생할 수 있으며, 실제로 여름 성층시의 소양호 상류지역의 수표면에서 기포발생이 다수 관찰되었다. 본 연구에서는 한 해 동안 소양호 내로 유입하는 유기탄소의 양의 시간적 변화와 호수 내에서 침강하는 유기탄소의 양을 알아보고 이후 유기탄소가 혐기성 환경에서 분해되어 기포형태로 배출되는 CH₄의 양을 측정했다.

재료 및 방법

1. 연구지점

본 연구의 대상인 소양호는 북한강 상류지역에 위치한 대형 인공호로 1973년 전력생산, 홍수조절 및 각종 용수 공급의 목적으로 건설되었다(Jung *et al.*, 2016). 소양호는 음용수 공급원으로 수질 관리에 있어서 매우 중요한 의미를 가진다. 소양호의 최대 수심 110~120 m, 최장길이 약 60 km, 평균 너비는 0.5 km로 우리나라에 건설된 인공호 중 가장 많은 약 29억 톤의 물을 저장한다(Lee *et al.*, 2013). 소양호는 대형 인공호의 전형적인 모양인 나뭇가지 모양(dendritic)을 하고 있고 유역 대부분이 산지 지형으로 둘러 싸여 있어서 바람에 의한 혼합이 잘 생기지 않는 호수이다(Fig. 1; Kim *et al.*, 2000). 소양호는 북한강 상류의 소양강줄기 하류에 댐을 지어 형성된 호수로 유입수가 유입하는 지역과 하류 댐이 위치하는 지역은 수심 및 수질의 변화가 상이한 호수이다. 토지이용은 산림이 90% 이상을 차지하고 있으며 상류지역에는 일부 농업지역도 포함한다(Kim *et al.*, 2016). 소양호로 유입되는 대부분의 오염물질 및 부유물들은 주 유입수인 소양강을 통해 유입한다. 우리나라는 아시아 몬순 기후지역에 위치하기 때문에 많은 양의 강우가 여름철에 집중되며 같은 시기에 많은 양의 유역기원 물질들이 소양강을 통해 호수 안으로 유입한다. 소양호는 온난일순환호(warmmonimictic lake)로 여름철 온도 차로 형성된 수층 간의 밀도차에 의해 성층시기(stratification)를 가지며 겨울철엔 수층 간의 온도 차가 없어지면서 수층 전체가 혼합된다. 호수의 영양상태는 영양염류, 클로로필 *a* (chlorophyll-*a*) 농도, 투명도를 통해 평가

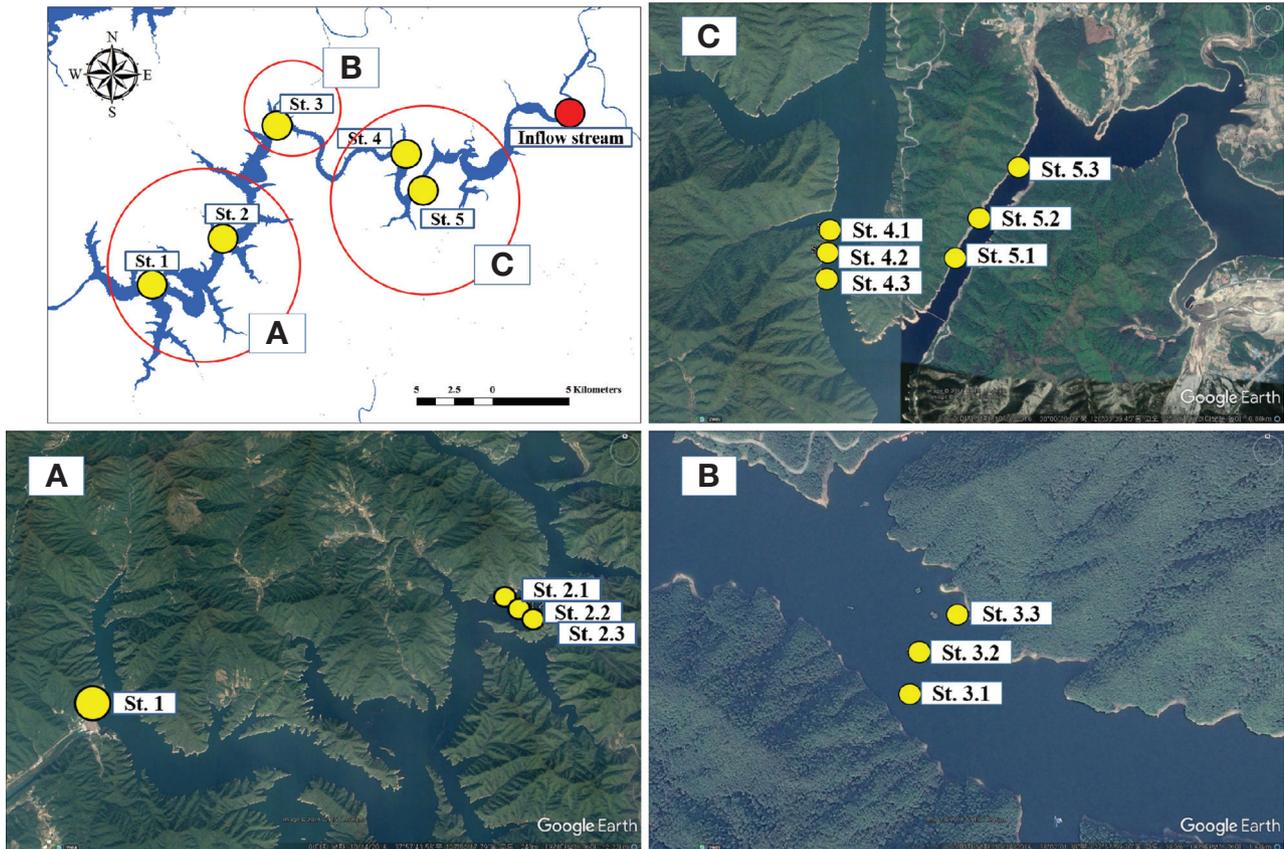


Fig. 1. A map of study site (Lake Soyang) and satellite images of stations (A: Station 1 and 2, B: Station 3, C: Station 4 and 5).

했을 때 빈영양호와 가까운 상태이다(Kim *et al.*, 2001).

2. 연구방법

소양호의 수체와 저질의 산화 상태를 분석하기 위해 수체의 용존산소와 저질의 산화환원전위 (oxidation redox potential, ORP)를 측정하였다. 수체의 용존산소는 LDO (luminescent dissolved oxygen) 측정기 (HQ40d, HACH RANGE Co., USA)를 사용하여 현장에서 측정하였고 호수 물 시료와 저질 시료 (Petite Ponar grab sampler, Wild Co., USA)의 산화환원전위는 ORP 측정기 (HI 9126, Hanna Co., USA)를 이용하여 현장 측정하였다. 소양호 저질의 ORP 수직분포 측정을 위해 저질 코어 채집기 (UWITEC-Corer, UWITEC Co., Austria)를 통해 채취한 코어 중 2개를 선택하여 각 코어 시료를 층별 2cm 간격으로 자른 후 각 저질 층의 ORP와 pH를 측정하였다. 코어 시료 상층수 시료는 현미경관찰에 사용되었다. 소양호로 유입하는 유입수 (소양강)의 유기탄소 농도와 소양호 유입수 유량자료는 환경부 공개 자료 (www.wamis.co.kr, 물환경정보시스템)를 사용하였다. 호수 내에서 침강하는 유기탄소와 유기질소의

양은 여름철 강우 후 세디먼트 트랩 (sediment trap)을 이용해 채취한 시료를 통해 계산하였다. Trap은 총 3개의 수심 (25m, 50m, 75m)에 설치하였다.

호수로부터 발생하는 기포 포집은 과거 선행된 연구에서 이용한 채집기를 바탕으로 하여 직접 제작한 기포 포집기를 사용하여 채취하였다 (Huttunen *et al.*, 2001). 정점 1부터 5까지 예비조사 후 가장 많은 가스가 포집된 지점인 정점 4와 5 사이에서 추가적으로 가스 포집 실험을 실시하였다 (Fig. 1). 포집기로 포집한 기체는 연구실로 옮긴 후 GC/FID (SRI Instrument 8610, USA) 분석기를 이용하여 CO₂와 CH₄의 양을 분석하였다. 채집된 기체 속의 메탄의 양은 1기압일 때를 가정하여 포집 당시 대기 온도를 이용하여 계산하였다.

결과 및 고찰

1. 성층현상과 심층의 산소고갈

정점 1에서 측정된 2014년 한 해 동안 측정된 소양호의

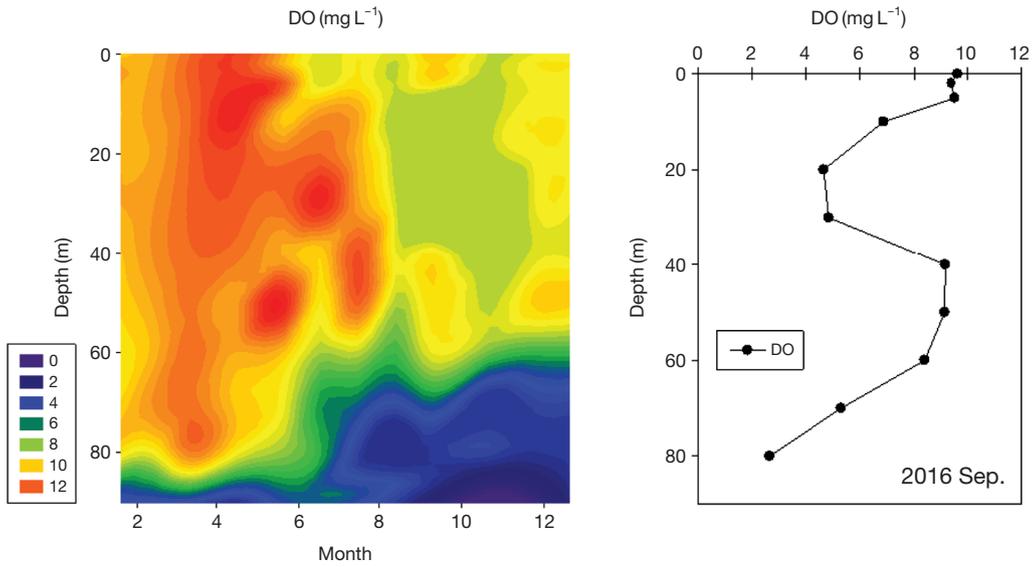


Fig. 2. Contour map of DO variation at Station 1 in Lake Soyang during a whole year (2014) and the vertical DO profile on September, 2014.

용존산소 농도는 전 수층에서 1.7 mg L⁻¹에서 13.2 mg L⁻¹의 범위를 보였다(Fig. 2). 여름철 호수 성층시기를 제외하고는 호수의 수층 간의 용존산소 농도는 비슷한 범위를 보였다. 9월 호수 성층시기에는 20 m와 80 m에서 산소 농도가 각각 4.7 mg L⁻¹, 2.7 mg L⁻¹으로 다른 수층 값보다 작았다(Fig. 2).

중층 산소고갈 (metalimnetic oxygen depletion)은 이미 세계 여러 호수에서 보고된 바 있으며 그 이유는 다양하게 알려져 있다(Wetzel, 2001). 소양호의 경우는 여름철 유역 상류에 집중강우가 내린 후, 유입수를 통해 많은 양의 유기원물질들이 호수로 유입될 때 중층으로 유입된 유기물질 중 난분해성(recalcitrant) 유기물은 심수층(hypolimnion)으로 가라앉는 반면에 생분해성(labile) 유기물이 빠른 속도로 분해되면서 호수 중층의 산소를 급격히 소비하기 때문에 사료된다(Lee *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2016). 심층 산소가 고갈되었을 때 소양호 심층수에서 측정된 ORP값은 90 mV였다. 소양호 심층수의 혐기성 상태(anoxic state)는 선행된 연구에서 이미 많이 관측된 바 있다(Lee *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2016). 호수 성층 시작 시기에(6월) 측정된 호수 저질의 ORP 수직분포는 정점 1에서는 6 cm 이하의 깊이부터, 정점 5에서는 4 cm 이하의 깊이부터 -100 mV보다 낮은 값을 보였다(Fig. 3).

호수 저질의 혐기성 상태에서는 저질 속 유기물이 분해될 때 산소 대신에 사용되는 전자 수용체의 종류에 따라 여러 가지 반응산물이 만들어질 수 있는데 조사된 소양호 저질 환경에서는 전자 수용체의 종류에 따라 황화수

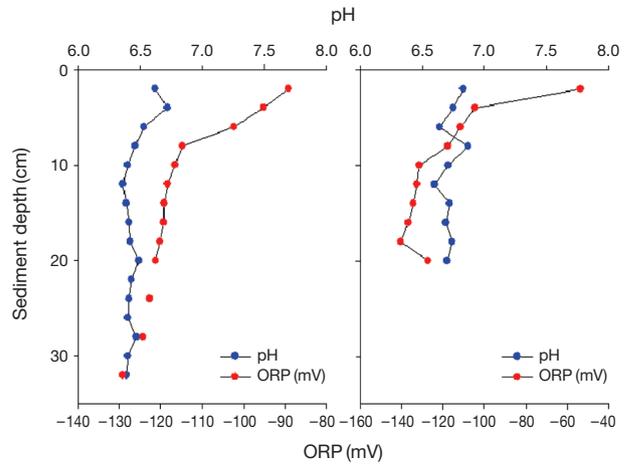


Fig. 3. Vertical profiles of pH and oxidation redox potential (ORP) in the sediment cores from station 1 and 5.

소(H₂S)나 CH₄ 등이 호수로 방출될 수 있다(Wetzel, 2001; Kim *et al.*, 2016). 특히 메탄은 황화수소의 이동상 역할을 하는 동시에 대기로 방출될 시에는 온실가스의 양 또한 증가시킬 것으로 사료된다(Duncan, 2015).

2. 유기탄소의 유입량과 침강량

2013년과 2014년 측정된 호수로 유입하는 주 유입수의 총 유기탄소농도(total organic carbon; TOC)는 각각 0.6~1.7 mgC L⁻¹와 0.7~2.1 mgC L⁻¹의 범위를 보였다. 두 해 모두 여름철에 유입수의 TOC 농도가 연중 가장 높

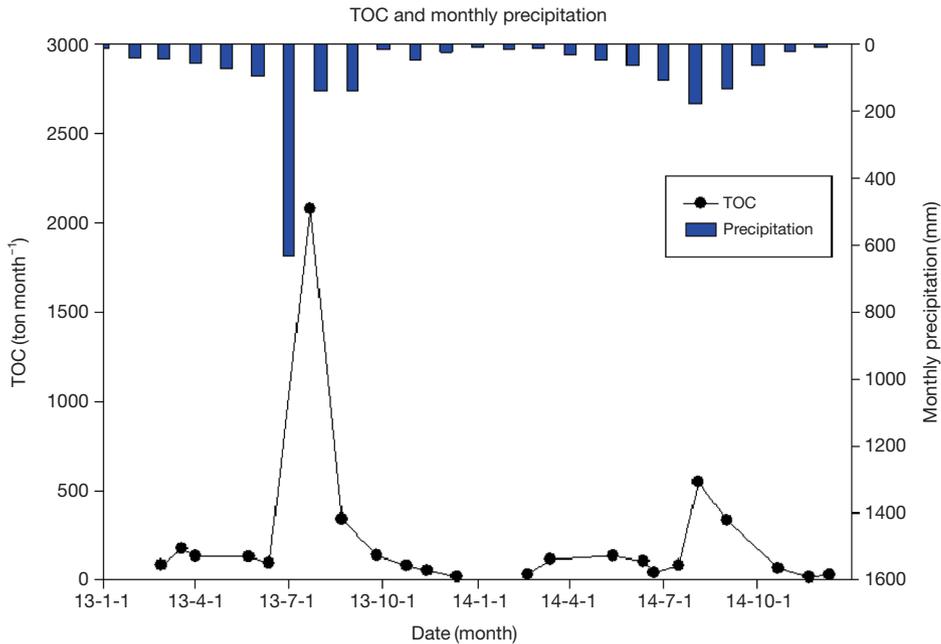


Fig. 4. Temporal variations of total organic carbon (TOC) input to the lake and monthly precipitation data from WAMIS for two years (2013~2014).

았다. 이는 여름철 강우 후의 많은 외부기원 유기물이 호수로 유입되어 나타난 결과로 사료된다. 이미 우리나라를 포함한 아시아 몬순 기후지역에서 선행된 많은 연구에서 여름철 강우 후의 많은 양의 외부기원 유기물이 호수 내로 유입한다고 보고한 바 있다(Kim *et al.*, 2000; Kim and Jung, 2007; Goldsmith *et al.*, 2008; Hu and Huhang, 2014). 그러나 호수로 유입하는 유기탄소의 양은 2013년과 2014년에 큰 차이를 보였는데 이는 2014년 기록적인 가뭄으로 인해 호수로 유입하는 유입수의 유량이 낮아졌기 때문이다(Fig. 4). 2013년의 TOC 유입량도 과거 문헌과 비교하였을 때 낮아진 값을 보였는데 이 역시 당시 강우강도와 강우량이 본 연구시기의 측정된 강우량과 강도보다 높았기 때문으로 사료된다(Kim *et al.*, 2000).

강우 후 호수로 유입한 입자성 유기질소와 유기탄소의 침강량을 여러 선행 연구에서 사용했던 세디먼트 트랩을 이용하여 측정하였다(Goto *et al.*, 2016). 측정 결과, 호수 표층과 심층에서 많은 양의 유기탄소와 유기질소가 호수 내로 침강했다. 호수의 심층부와 상층부에서 각각 높은 유기탄소와 유기질소의 침강량을 보였다(Table 1). 호수 상층의 침강된 유기탄소와 질소는 소양호 유입수의 유입 수심이나 이전 연구된 호수에서 보고된 결과를 미루어 보아 외부기원 유기물보다는 내부기원 유기물(동, 식물플랑크톤)의 영향으로 사료된다(Bonk *et al.*, 2015). 또한 호수 저질

Table 1. Sedimentation rates of PON and POC in the three water layers (25, 55, 85 m) after summer monsoon rainfalls.

Depth (m)	PON (mg m ⁻² d ⁻¹)	POC (mg m ⁻² d ⁻¹)	PON (g m ⁻² y ⁻¹)	POC (g m ⁻² y ⁻¹)
25	95.4	995.4	34.8	363.3
55	40.7	372.0	14.8	135.8
85	77.7	641.7	28.4	234.2

상층수를 현미경으로 분석한 결과 플랑크톤 세포를 관찰할 수 있었고, 대부분의 조류세포가 크기가 큰 규조류였고, 일부 동물플랑크톤 세포도 관찰되었다.

3. 호수의 메탄 방출량(methane ebullition)

측정된 메탄 방출량은 지점에 따라 크게 달랐다. 정점 1, 2, 3에 설치했던 메탄 포집기들에서는 하루 이상의 설치시간을 가졌지만 가스가 포집되지 않았다. 유입수(소양강)의 유입지역과 가까운 정점 4와 5에서는 가스 포집이 가능했다. 자연호에서 선행된 연구에서 수심이 깊은 호수의 경우 메탄이 저질에서 발생한 후 호수 표면을 거쳐 대기로 이동하기까지의 거리가 길어져 메탄의 재산화 과정을 통해 메탄 발생이 제한된다고 보고한 바 있다(Bastviken *et al.*, 2004). 그러나 정점 2와 3의 얕은 지점인 연안대에서도 메탄 발생이 없었는데 이는 호수의 유입부는 매년 많은 양

Table 2. Amounts of captured gases in gas samplers from station 2 to 5.

Site	Date	Water depth (m)	Deployed span	Amount of gas (mL)
st.2-1		8		0
st.2-2	2014-05-26	60	2 days	0
st.2-3		12		0
st.3-1		12		0
st.3-2	2014-05-28	45	2 days	0
st.3-3		53		0
st.3-4		33		0
st.4-1		23		830
st.4-2	2014-06-02	20	7 days	720
st.4-3		21		1,640
st.5-1		13		150
st.5-2	2014-06-09	10	93 hours	damaged
st.5-3		16		1,150

의 산림쇄설물들(woody debris)이 쌓여 메탄 생성의 전구 물질이 많은 데 반해 호수의 댐 쪽은(정점 2와 3) 외부로부터 들어오는 유기물이 적고 호수의 잦은 수위변화로 인해 호수와 접한 면에 식물이 발달하지 못해 유기 탄소의 유입이 적어 메탄 발생이 제한된 것으로 사료된다. 그러나 보다 확실한 원인 규명을 위해서는 탄소 동위원소나 실내 저질배양실험이 필요하다. 정점 4의 경우 7시간 동안 설치된 포집기 3개에서 각각 830, 720, 1640 mL의 가스가 포집되었으며 이 중 메탄 가스의 양의 전체 포집된 가스의 약 30~50% 정도를 차지했다. 각각의 포집기에 포집된 가스의 양은 포집기별로도 큰 차이를 보였다(Table 2). 가스 형태로의 배출(ebullition)은 발생 기작이 매우 산발적이며 일정한 시공간적 발생 분포를 보이지 않았는데 이 때문에 많은 연구에서 기포형태로의 배출을 측정함에 있어 어려움을 보고한 바 있다(Ostrovsky *et al.*, 2008; DelSontro *et al.*, 2011; Wehrli, 2011).

위의 결과를 바탕으로 호수의 유입부 지점이 가스 발생의 주요지점(hot spot)임을 확인한 후 St. 4와 5(유입부의 유입부 지역)를 중심으로 추가적 실험을 하였다. 김 등에 의하면 퇴적되는 많은 양의 낙엽이 메탄 가스의 기원으로 사료된다고 보고한 바 있다(김범철, unpublished). 그러나 현재 호수 자동 측정망 시스템이나 시료 채취 후 POC를 분석하는 과정에서 2 mm 이상의 물질은 분석 이전에 제거되기 때문에 호수로 유입되어 이용되는 탄소량이 과소평가되고 있다. 추가실험에서 측정된 호수에서 발생한 메탄량을 탄소량으로 환산하여 선행된 연구와 비교하였을 때 더 많은 양의 탄소가 ebullition의 경로를 통해 호수에서 대

Table 3. Estimated carbon emission from Lake Soyang and the other lakes (references) as ebullition pathway and references.

Sources	Lake	Area (ha)	Ebullition (mgC mg ⁻² y ⁻¹)
Bastviken <i>et al.</i> 2004	Brown	32.9	1,428
	Crampton	25.8	841
	East Long	2.3	2,649
	Hummingbird	0.8	1,152
	Morris	5.9	16,284
	North Gate	0.3	896
	Paul	1.7	2,680
Huttunen <i>et al.</i> 2003	Roach	45.0	4,452
	Postilampi	3.0	6,750
	Kevätön	407.0	983
Casper <i>et al.</i> 2000	Priest Pot	1.0	54,312
This Study	Soyang	4500	317,755 (±600,844)

기 중으로 방출되었음을 확인하였다(Table 3). 이처럼 호수의 메탄 가스 발생연구는 온실가스 발생원으로서의 중요성 뿐 아니라 호수 내의 탄소순환 연구에 있어서도 중요한 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 몬순 기후지역에 위치한 대형 인공호(소양호)로 유입하는 유기탄소의 양의 시간적 변화와 호수로 유입 후의 침강하는 탄소의 양을 계산하였다. 또한 이렇게 침강한 유기물이 침층 혐기성 분해 후 발생하는 메탄의 양을 측정하였다. 조사 결과 몬순 강우의 영향으로 여름철 많은 양의 유기탄소가 유입수를 통해 호수로 유입하는 사실을 확인하였고, 침강하는 유기탄소 양 또한 상당함을 확인할 수 있었다. 또한 유기탄소의 순환 및 온실가스 방출 연구에 중요한 부분인 메탄 방출량을 측정한 결과 그 양이 이미 조사된 다른 호수와 비교했을 때 더 많은 양의 탄소가 메탄의 형태로 배출됨을 알 수 있었다. 향후 온실가스 저장소(inventory) 대상 선정에 있어서도 인공호의 중요성을 무시할 수 없음을 확인했다. 그러나 호수의 메탄 발생량을 정량하기 위해 메탄 기포 발생의 산발적인 특성을 고려하고 시공간적 발생의 특징을 연구하는 것은 향후 필수적이다. 더욱이 현재 우리나라 호수를 대상으로 한 메탄가스 발생의 연구는 극히 드물기 때문에 더 많은 관심이 필요하다.

사 사

본 연구는 한국연구재단과 독일연구재단(DFG)의 한·독 IRTG 공동연구 (TERRECO-IRTG), 2015 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 (산림을 통한 산림지역 비점오염관리방안 연구), 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비 (관리번호-520170222)의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Baker, J. 2013. Algal Nutrient Limitation throughout the Little Bear River Watershed. *Natural Resources and Environmental Issues* **18**(7): 54-60.
- Bastviken, D., J. Cole, M. Pace and L. Tranvik. 2004. Methane Emissions from Lakes: Dependence of Lake Characteristics, Two Regional Assessments, and a Global Estimate. *Global Biogeochemical Cycles* **18**(4): 1-12.
- Bastviken, D., A.L. Santoro, H. Marotta, L.Q. Pinho, D.F. Calheiros, P. Crill and A. Enrich-Prast. 2010. Methane Emissions from Pantanal, South America, during the Low Water Season: Toward More Comprehensive Sampling. *Environmental Science & Technology* **44**(14): 5450-5455.
- Bastviken, D., L. Tranvik, J.A. Downing, P.M. Crill and A. Enrich-Prast. 2011. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science* **331**(6013): 50.
- Bonk, A., W. Tylmann, B. Amann, D. Enters and M. Grosjean. 2015. Modern Limnology and Varve-Formation Processes in Lake Zabinskie, Northeastern Poland: Comprehensive Process Studies as a Key to Understand the Sediment Record. *Journal of Limnology* **74**(2): 358-370.
- Casper, P., S.C. Maberly, G.H. Hall and B.J. Finlay. 2000. Fluxes of Methane and Carbon Dioxide from a Small Productive Lake to the Atmosphere. *Biogeochemistry* **49**(1): 1-19.
- DelSontro, T., M.J. Kunz, T. Kempfer, A. Wuest, B. Wehrli and D.B. Senn. 2011. Spatial Heterogeneity of Methane Ebullition in a Large Tropical Reservoir. *Environmental Science & Technology* **45**(23): 9866-9873.
- DelSontro, T., D.F. McGinnis, S. Sobek, I. Ostrovsky and B. Wehrli. 2010. Extreme Methane Emissions from a Swiss Hydropower Reservoir: Contribution from Bubbling Sediments. *Environmental Science & Technology* **44**(7): 2419-2425.
- Duncan, I.J. 2015. Does Methane Pose Significant Health and Public Safety Hazards? - A Review. *Environmental Geosciences* **22**(3): 85-96.
- Encinas, F., J.F. Peeters and H. Hofmann. 2014. Importance of the Autumn Overturn and Anoxic Conditions in the Hypolimnion for the Annual Methane Emissions from a Temperate Lake. *Environmental Science and Technology* **48**(13): 7297-7304.
- Fearnside, P.M. 2005. Do Hydroelectric Dams Mitigate Global Warming? The Case of Brazil's Curu?-Una Dam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **10**(4): 675-691.
- Goldsmith, S.T., A.E. Carey, W.B. Lyons, S. Kao, T. Lee and J. Chen. 2008. Extreme Storm Events, Landscape Denudation, and Carbon Sequestration: Typhoon Mindulle, Choshui River, Taiwan. *Geology* **36**(6): 483-486.
- Goto, N., K. Hisamatsu, C. Yoshimizu and S. Ban. 2016. Effectiveness of Preservatives and Poisons on Sediment Trap Material in Freshwater Environments. *Limnology* **17**(1): 87-94.
- Hu, H. and G. Huang. 2014. Monitoring of Non-Point Source Pollutions from an Agriculture Watershed in South China. *Water*, 3828-3840. doi:10.3390/w6123828
- Huttunen, J.T., J. Alm, A. Liikanen, S. Juutinen, T. Larmola, T. Hammar, J. Silvola and P.J. Martikainen. 2003. Fluxes of Methane, Carbon Dioxide and Nitrous Oxide in Boreal Lakes and Potential Anthropogenic Effects on the Aquatic Greenhouse Gas Emissions. *Chemosphere* **52**(3): 609-621.
- Huttunen, J.T., K.M. Lappalainen, E. Saarijärvi, T. Väisänen and P.J. Martikainen. 2001. A Novel Sediment Gas Sampler and a Subsurface Gas Collector Used for Measurement of the Ebullition of Methane and Carbon Dioxide from a Eutrophied Lake. *Science of the Total Environment* **266**(1-3): 153-158.
- Jung, S., M. Shin, J. Kim, J. Eum, Y. Lee, J. Lee, Y. Choi, K. You, J. Owen and B. Kim. 2016. The Effects of Asian Summer Monsoon on Algal Blooms in Reservoirs. *Inland Waters* **6**(3): 406-413.
- Kemenes, A., B.R. Forsberg and J.M. Melack. 2007. Methane Release below a Tropical Hydroelectric Dam. *Geophysical Research Letters* **34**(12). Wiley Online Library.
- Kim, B., K. Choi, C. Kim, U.H. Lee and Y.H. Kim. 2000. Effects of the Summer Monsoon on the Distribution and Loading of Organic Carbon in a Deep Reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Research* **34**(14): 3495-3504.
- Kim, B. and S. Jung. 2007. Turbid Storm Runoffs in Lake Soyang and Their Environmental Effect. *Korean Society of Environmental Engineers, Special Issue* **29**(11): 1185-1190.
- Kim, B., J. Park, G. Hwang, M. Jun and K. Choi. 2001. Eutrophication of Reservoirs in South Korea. *Limnology* **2**(3): 223-229.
- Kim, K., B. Kim, K. Knorr, J. Eum, Y. Choi, S. Jung and S. Peiffer. 2016. Potential Effects of Sediment Processes on Water Quality of an Artificial Reservoir in the Asian Monsoon Region. *Inland Waters* **6**(3): 423-435.
- Kunz, M.J., A. Wuest, B. Wehrli, J. Landert and D.B. Senn. 2011. Impact of a Large Tropical Reservoir on Riverine

- Transport of Sediment, Carbon, and Nutrients to Downstream Wetlands. *Water Resources Research* **47**(12). Wiley Online Library.
- Lee, J., J. Kim, J.S. Owen, Y. Choi, K. Shin, S. Jung and B. Kim. 2013. Variation in Carbon and Nitrogen Stable Isotopes in POM and Zooplankton in a Deep Reservoir and Relationship to Hydrological Characteristics. *Journal of Freshwater Ecology* **28**(1): 47-62.
- Louis, V.L. St, C.A. Kelly, É. Duchemin, J.W.M. Rudd and D.M. Rosenberg. 2000. Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate Reservoirs Are Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere, and Their Surface Areas Have Increased to the Point Where They Should Be Included in Global Inventories of anthropogenic emissions of greenhouse gases. *BioScience* **50**(9): 766-775.
- Maeck, A., H. Hofmann and A. Lorke. 2014. Pumping Methane out of Aquatic Sediments - Ebullition Forcing Mechanisms in an Impounded River. *Biogeosciences* **11**(11): 2925-2938.
- Maeck, A., T. Delsontro, D.F. McGinnis, H. Fischer, S. Flury, M. Schmidt, P. Fietzek and A. Lorke. 2013. Sediment Trapping by Dams Creates Methane Emission Hot Spots. *Environmental Science and Technology* **47**(15): 8130-8137.
- Ostrovsky, I., D.F. McGinnis, L. Lapidus and W. Eckert. 2008. Quantifying Gas Ebullition with Echosounder: The Role of Methane Transport by Bubbles in a Medium-Sized Lake. *Limnology and Oceanography Methods* **6**: 105-118.
- Wehrli, B. 2011. Climate Science: Renewable but Not Carbon-Free. *Nature Geoscience* **4**(9): 585-586.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3rd edition. Academic Press, SanDiego (CA), USA.
- <http://www.wamis.go.kr>. (Water Management Information System) 2016.9.15 Accessed.
- <http://www.google.com/earth>. (google earth) 2016.10.14. Accessed