사구주변에서 시간에 따라 배출되는 아산화질소량 측정 실험 및 분석 Measurement and Analysis of Nitrous Oxide Emissions over Time around a Dune in the Experimental Flume

안명희¹ · 김영선^{1,*} · 지운^{1,2} · 구정은¹ · 고종민³ · 배인혁² · 강호정³

Myeonghui Ahn¹ · Youngsun Kim^{1,*} · Un Ji^{1,2} · Jungeun Gu¹ · Jongmin Ko³ · Inhyeok Bae² · Hojeong Kang³

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부

²스마트시티·건설융합, 과학기술연합대학원대학교

³연세대학교 사회환경시스템공학부 건설환경공학과

¹Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Smart City and Construction Engineering, Korea University of Science and Technology

³School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

(Received February 19, 2019; Revised April 23, 2019; Accepted April 23, 2019)

Abstract : In this study, the amount of nitrous oxide (N₂O) emissions from the vicinity of a dune was measured to investigate the effects of the bedform on N₂O emissions. N₂O emissions over time around a dune were analyzed and the correlation between N₂O emissions and water quality were evaluated. As a result, N₂O emissions at the dune crest were 2.8 times higher than that in the flat bed and N₂O emissions at the hill and slopes were 2.2 times and 3.8 times higher than those in the flat bed, respectively. Also, it was confirmed that N₂O emissions at the different locations of the dune increased or decreased over time after the supply of the discharge. N₂O emissions measured at the hill of the dune were the largest, which were increased from 2.97 to 13.9 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$. N₂O emissions have tended to be increased in the hills, crests and slopes of the dune and be decreased in the flat bed. This study can be used as a fundamental data to evaluate the potential greenhouse gas emissions in the river system indirectly.

Key Words : Hyporheic Zone, Greenhouse Gas, Nitrous Oxide, Bedform, Dune

요약 : 본 연구에서는 하천에서 하상형태가 아산화질소(N₂O) 배출에 미치는 영향을 파악하기 위해 사구주변에서 배출되는 아산화질소량 측정 실험을 수행하였다. 실험을 통해 사구주변에서 시간에 따른 N₂O 배출량을 측정하였고, N₂O 배출량과 수질자료와 상관관계를 분석하였다. 분석 결과를 통해 사구의 마루에서 배출된 N₂O 배출량은 평탄한 곳보다 2.8배 더 많이 배출된 것으로 나타났으며, 사구의 언덕과 비탈에서는 평탄한 곳보다 각각 2.2배, 3.8배로 N₂O가 더 많이 배출되는 것으로 나타났다. 또한, 유량 공급 후 시간이 경과함에 따라 사구 주변 위치별 N₂O 배출량이 증가 혹은 감소하는 것을 확인하였다. 그 결과로, 사구의 언덕에서 측정된 N₂O 배출량은 2.97 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 에서 13.9 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 로 가장 크게 증가하였다. 전반적으로 사구의 언덕과 마루, 비탈에서 N₂O 배출량은 증가하였고, 평탄한 부분은 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 연구 결과는 향후 하천 시스템에서 발생하는 잠재적 온실가스를 간접적으로 평가하기 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것이다.

주제어 : 혼합대, 온실가스, 아산화질소, 하상형태, 사구

1. 서론

그동안 기후변화로 인한 자연재해에 대응하기 위한 대책 마련의 필요성이 강조되어 왔던 것에 비해 하천의 수리적, 생태환경적 변화에 대한 연구는 매우 한정적으로 수행되어 왔다. 그러나 최근 들어, 하천이 잠재적 온실가스 배출원이라는 다양한 연구 결과들이 보고되면서 하천 시스템이 기후변화에 미치는 영향에 대해 전 세계적으로 관심이 대두되고 있다.

하천에서는 이미 상당한 양의 아산화질소(Nitrous Oxide, N₂O)가 배출되고 있는 것으로 추정되며,¹⁾ 이러한 N₂O는 이산화탄소(Carbon Dioxide, CO₂)에 비해 지구온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)가 약 265배 높기 때문에²⁾ 온실가스 배출원으로 잠재력이 상당할 것으로 예상된다.

하천이 잠재적 온실가스 배출원으로 된 배경에는 농업 및 축산업, 산업 활동 등과 같은 인위적 요인이 작용했기 때문이다.³⁾ 농경지, 축사, 산림 등에서 하천으로 유입된 유기물 및 영양염류는 대부분 질소산화물이며, 흡착과 침전 과정을 거쳐 하상에 퇴적되고 하천의 유속 증가 혹은 생물교란 등으로 인해 다시 하천수에 머무르게 된다.⁴⁾ 이러한 질소산화물의 부하가 증가하면 하천에서 자연스럽게 유지되던 질소순환의 균형이 깨지고,^{5,6)} 이로 인해 하천에서 직·간접적으로 N₂O 배출을 촉진시킨다.^{7,8)} 미국에서는 72곳의 하천에 질산염을 투입하여 총 53곳에서 N₂O가 배출되는 것을 확인한 바 있다.¹⁾ 이러한 N₂O는 탈질작용에서 비롯된 것임을 언급하였으며, 하상형태 및 토지이용도와 하천의 N₂O 발생량 간의 관계를 분석한 연구결과가 제시되었다.⁹⁾ 그밖

* Corresponding author E-mail: youngsunkim@kict.re.kr Tel: 031-910-0695 Fax: 031-910-0757

에 하천에서 배출되는 N_2O 에 대한 연구는 유역 규모의 현장 연구^{1,10,12)}와 수치모의 연구^{9,13)} 등이 있으며, 이러한 연구들을 통해 하천에서 배출되는 N_2O 가 더 이상 무시할 수 없을 정도의 상당한 양으로 예측된다. 최근 연구결과에 따르면, 하천과 강에서 발생하는 N_2O 는 전 세계 인위적 N_2O 배출량의 약 10~15% 정도를 차지하는 것으로 나타났다.^{1,4)} N_2O 는 지구온난화 지수가 높아 배출량을 저감할 경우 온실가스 배출량 저감 효과가 매우 크므로¹⁴⁾ 하천 시스템에서 배출되는 N_2O 메커니즘 분석 및 실험은 하천 시스템에서 배출되는 N_2O 저감 및 하천 복원 등에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

하천수와 지하수의 교환이 이루어지는 혼합대(hyporheic zone)는 미생물의 활동을 통한 질산염 제거 및 유기탄소 변환 등 하천수의 질소와 탄소 순환에 핵심적인 역할을 한다.¹⁵⁾ 혼합대 흐름의 메커니즘은 하천의 지형과 유량에 영향을 받으며, 그 중에서도 하상형태가 혼합대 흐름에 미치는 영향이 가장 크다.¹⁶⁾ 또한, 하상토 입도분포에 따라 혼합대 흐름에서 발생하는 물리적, 화학적 특성을 분석한 연구 결과, 하상토가 하천 시스템의 생지화학적 특성에 중요한 변수라는 것이 확인되었다.¹⁷⁾ 미국에서는 콜롬비아 강의 수위 변화에 따른 혼합대 흐름 메커니즘 분석을 수행하였고, 수위에 따라 혼합대에서 활동하는 미생물들의 이동성이 다르다는 것을 확인한 바 있다.¹⁵⁾ 혼합대 흐름의 체류시간은 하천의 지형학적 특성을 고려하여 통제할 수 있다.^{9,18)} 이러한 혼합대 흐름 특성을 고려하여 하천에서 하상형태에 따른 N_2O 배출량 측정 연구가 수행된 바 있으며, 혼합대 흐름의 체류시간과 미생물들의 이동 경로는 하상형태에 영향을 받고, 이로 인해 N_2O 배출량의 차이가 발생한 것으로 나타났다.⁹⁾ 이와 같은 연구 결과는 하천 지형학적 분야에서 매우 중요한 결과로써 하천에서 배출되는 온실가스를 자연적으로 저감할 수 있는 가능성을 보여준다. 즉, 혼합대 흐름에서 서식하는 미생물들이 하천수에 용존된 질산염을 분해할 수 있는 체류시간을 하상형태로부터 확보된다면 탈질화를 방지하여 N_2O 배출량을 저감할 수 있다. 이처럼 지표수-지하수 혼합대 흐름은 하천 시스템의 질소순환에 중요한 역할을 하고 있으며, 하천환경 및 수생태계 유

지·관리적 측면에서도 큰 기여를 하고 있다. 기후변화에 적응할 수 있는 하천 시스템의 다양한 자연 기반 솔루션을 제시하고 하천환경 및 수생태계 등의 변화를 정확히 인지하기 위해서는 보다 과학적이고 정량적인 관점의 다양한 연구들이 수행될 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 하천 시스템에서 하상형태에 따른 N_2O 배출 메커니즘을 규명하기 위해 사구주변에서 N_2O 배출량을 측정하는 실험을 수행하였다. 실험을 통해 사구주변에서 시간 경과에 따른 N_2O 배출량 변화추이를 확인하였으며, 사구와 평탄한 하상에 따라 배출되는 N_2O 배출량을 분석하였다. 또한, 수질자료와 N_2O 배출량과의 상관관계를 분석하여 생지화화학적 측면에서 하상형태에 따른 N_2O 배출량을 해석하였다.

2. 하상에서 배출되는 아산화질소 배출량 측정 실험

2.1. 실험개요

본 실험은 경상북도 안동시에 위치한 한국건설기술연구원(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, KICT) 안동하천실험센터(River Experiment Center, REC) 실험수로에서 진행하였다. 실험수로는 Fig. 1과 같이 길이 37 m, 높이 1.2 m, 폭 1.0 m인 순환식 수로이며, 2018년 6월 19일(화)부터 22일(금)까지 실험을 수행하였다. 수로 중앙 10 m 구간에는 상류단 및 하류단과 0.3 m의 높이차가 있고, 수로 중앙 10 m 구간에 모래질의 하상을 포설하였다. 사질토에는 암모니아성 질소(NH_4-N) 2.25 mg/kg와 질산성질소(NO_3-N) 0.36 mg/kg의 매우 낮은 유기물을 함유하고 있는 것으로 파악되었다.

이처럼 실험수로의 토양 유기물 함량이 매우 낮고, 외부로부터의 유기물 유입도 차단된 조건 하에서 하상형태와 N_2O 배출량의 상관관계를 보다 명확히 규명하기 위해, 실험 시작 5일 전에 미리 요소비료((주)풍농, 46% N) 0.5 kg N/m^2 를 1회 분시한 후, 약 5~10 cm 깊이로 토양과 균일하게 섞어주었다. 그런 다음, 수로 중앙에 길이 1.0 m, 높이

Fig. 1. Schematic diagram of experiment flume.

0.15 m인 사구(dune)를 만들고, 사구주변에 챔버를 설치하여 N₂O 배출량을 측정하였다. 실험이 수행되는 기간 동안의 기온은 현장에서 실측하였고, 강수량, 습도, 풍속 등의 기타 기상정보는 안동하천실험센터에서 약 13 km 떨어진 거리에 위치한 안동기상대의 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS) 자료를 활용하였다.

2.2. 수리조건 및 하상형태

지금까지 하상형태가 혼합대 흐름에 미치는 영향을 파악하기 위해 많은 실험 연구가 진행되어 왔다. 실내 실험수로에서 유속 16.7 cm/s, 평균 수심 9.8 cm인 조건으로 사구의 높이와 길이에 따른 혼합대 흐름 실험이 수행되었고,¹⁹⁾ 사구의 높이 0.03 m, 길이 0.5 m인 사구를 형성하여 평균 수심 0.12 m, 유량 6 L/s 조건에서 혼합대 흐름 실험이 수행된 바 있다.²⁰⁾ 특히, 사구 길이를 1 m로 동일하게 하고 높이를 각각 3 cm, 6 cm, 9 cm인 사구를 형성하여 사구 높이에 따른 N₂O 배출량 측정 실험도 수행된 바 있다.²¹⁾ 이에 따라, 본 실험에서는 기존 연구에서 수행된 수리조건 및 사구의 높이와 길이를 참고하여, 사구주변에서 배출되는 N₂O량을 측정하기 위해 길이 1 m, 높이 0.15 m의 사구를 만들고 72시간 동안 0.018 m³/s의 유량을 공급하였다. 위어에서 월류 수심을 측정하여 식 (1)과 (2)를 통해 유량을 산정하였다. 접근유속은 평균 5.795 m/s로 측정되었으며, 사구에서 상류방향으로 약 2 m 떨어진 위치에서 1차원 미소유속계(KENEK VO1000RSM)를 이용하여 유속을 측정하였다.

$$Q = Ch^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

$$C = 81.2 + \frac{0.24}{h} + \left(8.4 + \frac{12}{\sqrt{D}}\right) \left(\frac{h}{B} - 0.09\right)^2 \quad (2)$$

여기서, Q는 유량(m³/s), C는 유량계수, h는 월류수심(m), D는 위어 높이(m), B는 수로 폭(m)이다.

하상토 입도분포는 하상재료의 특성을 파악하기 위한 기초자료로 지표수-지하수 혼합대 흐름의 체류시간 및 이동경로 등을 해석하기 위한 중요한 자료로 활용된다.¹⁶⁾ 따라서, 수로 내에 하상토 입도분포 분석을 위해 실험 전에 하상토를 채취하여 건조한 후 체분석을 수행하였다. 하상토 입도분포 분석결과, 0.053 mm에서 5.6 mm 범위의 입경이 존재하며 대부분 모래로 구성되어 있고 약 10% 정도의 잔자갈이 섞여있는 입도분포로 나타났다. 중앙입경 d₅₀은 0.3 mm이고, d₁₀과 d₃₀, d₆₀은 각각 0.127 mm, 0.215 mm, 0.4 mm로 확인되었다(Fig. 2).

2.3. 아산화질소 배출량 및 수질 측정

자연하천의 하상형태 중 하나인 사구와 혼합대 흐름이 수문학적·생지화학적·기상학적으로 N₂O 배출에 미치는 영향을 파악하기 위해, 공기의 유입이 없는 PVC 챔버 (지름

Fig. 2. Grain-size distribution curve of bed materials.

5.5 cm, 높이 45 cm)를 사구주변에 설치하여 N₂O 배출량을 측정하였다. 챔버는 Fig. 3과 같이 사구로부터 상류방향과 하류방향의 평탄한 곳과 사구의 언덕과 비탈 그리고 사구 마루(crest)에 토양 상층부로부터 5 cm 깊이에 약 25 cm 간격으로 설치하였다. 실험이 진행되는 동안 하상 변화를 최소화하기 위해 수로 내 흐름과 하상의 교란이 발생하지 않는 수리 조건으로 실험을 수행하였고, 유속과 챔버의 직경 등을 고려했을 때 챔버로 인한 흐름 및 하상의 교란은 발생하지 않았다.

N₂O 포집은 챔버에 10 ml 주사기(syringe)를 주입하여 각 지점에서 하루에 두 번, 3회씩 반복(0, 20분, 40분) 포집한 후, 이를 다시 10 ml 유리 바이알(vial)에 옮겨 보관하는 방식으로 진행하였다. 바이알에 포집된 기체는 가스 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC)(Varian CP-3900)로 분석하였다. 토양 온도는 사구 중앙 표토(0~5 cm)에서 N₂O 포집과 동일한 시간에 3회씩 반복(0, 20분, 40분) 측정(CENTER 300)하였다.

실험이 수행되는 기간 동안 수로 내에서 순환되고 있는 수질 분석을 위해, 현장 실측용 수질분석장비(HANNA, HI 9828, Ver. 2.1)로 수온, pH, 용존산소(Dissolved Oxygen, DO) 등을 일일 3회(9:00 AM, 13:00 PM, 18:00 PM) 측정하였다. 이와 동시에, 현장 측정이 어려운 NH₄-N, NO₃-N, 총 질소(Total Nitrogen, TN)의 분석을 위해 멸균 채수병에 시료 2 L를 채수하여 분석이 진행될 때까지 4°C에서 냉장 보관하였다.

3. 결과 및 고찰

실험이 진행된 2018년 6월 19일(화)부터 22일(금) 동안 안동기상대 AWS의 실시간 측정 자료를 분석한 결과, 평균 기온 22.9°C(최저 15.3°C, 최고 31.1°C), 평균 습도 63.8%, 강수량은 0 mm인 것으로 나타났다. 하천실험센터 내 순환 수로에서 실측한 대기 온도는 15.1~32.8°C로 안동기상대 AWS와 유사한 기온 분포를 보였으며, 평균 온도는 안동기상대 AWS보다 약 2.4°C 높은 25.3°C인 것으로 나타났다.

Fig. 3. N_2O flux measurement chamber installed around the dune in the flume.

3.1. 수리량 측정 결과

실험이 수행되는 동안 수심은 29.6 ~ 31.0 cm, 유속은 3.4 ~ 7.6 cm/s로 큰 변화 없이 일정한 범위를 유지하였다. 유량은 위어의 월류 수심을 통해 산정하였으며, 약 72시간 동안 0.0156 ~ 0.0235 m^3/s 범위의 유량을 유지하였다. Table 1은 실험이 진행되는 동안 약 2~3시간 간격으로 측정된 수위와 유속 그리고 위어의 월류 수심 통해 산정한 유량을 일 평균하여 나타낸 것이다. 평균적으로 수심 30.15 cm, 유속 5.795 cm/s, 유량 0.018 m^3/s 조건에서 실험이 수행되었다.

유량을 공급하기 전에 사구의 길이와 높이는 각각 1 m, 0.15 m로 성형하였으나, 순환수로 내에 유량을 공급하여 흐름이 안정화되는 동안 사구의 길이와 높이는 각각 1.23 m, 0.13 m로 자연적으로 변형되었다.

3.2. 수질 분석 결과

일평균 대기 온도가 20.9 ~ 24.2°C로 증가함에 따라 순환수로 내 일평균 수온 역시 21.1 ~ 22.6°C로 변화하며 유의미한 상관관계($R^2 = 0.62$)를 보였다. 실험 초기 용존산소량(DO)은 8.73 mg/L로 측정되었고, 실험 종료 시점에는 10.0 mg/L까지 증가하였다. 이는 순환수로 내 외부로부터 유기물 유입이 차단된 조건 하에서, 실험이 진행되는 기간 동안 3.0 ~ 7.6 cm/s 유속으로(Table 1) 물이 순환되어 산소 투과량이 증가했기 때문인 것으로 분석된다. NH_4-N 과 NO_3-N 은 시간이 지남에 따라 각각 0.44 mg/L에서 0.25 mg/L, 2.65 mg/L에서 2.52 mg/L로 서서히 감소하는 경향을 보였다

(Table 2). 수중에서 NH_4-N 과 NO_3-N 은 수온, pH와 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다.²²⁻²⁴⁾ 본 연구에서는 NO_3-N 과 수온과 매우 높은 상관관계($R^2 = 0.96$)를 보였다. TN은 6월 21일을 제외하고, NH_4-N , NO_3-N 과 마찬가지로 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 수온($R^2 = 0.56$), pH ($R^2 = 0.64$)와 모두 높은 상관관계를 보였다. 「환경정책기본법」시행령 제2조(환경기준) 별표(2018)²⁵⁾에 제시된 하천수 수질환경기준에 따라 순환수로의 수질 분석 결과를 종합해 보면, $DO \geq 7.5$, $COD < 2.0$, $TP \leq 0.02$ 로 간단한 정수처리 후 생활용수로 사용할 수 있는 매우 좋은 등급(1a)인 것으로 도출되었다. 이러한 결과가 도출된 이유는 실험 기간 동안 강우사상이 없어서 순환수로에 대한 부가적인 습식침적(wet deposition)이 없고 지하수나 지표수 등의 유입이 차단되었기 때문이다. 질소시비 전 순환수로의 토양 유기물 함량이 매우 낮았고 본 실험 중에 투입된 요소비료가 유일한 질소 유입원임을 고려했을 때, 앞서 서술한 바와 같이 순환수로 내 물이 일정한 유속으로 순환되어 산소 투과량이 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

3.3. 사구의 아산화질소 배출량

사구의 N_2O 배출량은 위치에 따라 상이한 배출 분포를 나타냈으며, 유량이 공급되는 상류지점에서 하류지점으로 갈수록 N_2O 배출량은 점차 감소하는 경향을 보였다. 2018년 6월 19일부터 22일까지 사구로부터 상류측의 평탄하상(A)과 사구의 언덕(B), 사구의 마루(C), 사구의 비탈(D), 하류측의 평탄하상(E)에서 측정된 평균 N_2O 배출량은 각각

Table 1. Measured water depth, velocity and discharge during the experiment

Date (DD/MM/YY)	Water Depth (cm)	Velocity (cm/s)	Discharge (m^3/s)
19.06.18	30.2±0.32	5.22±0.35	0.018±0.001
20.06.18	30.4±0.37	6.09±1.26	0.019±0.002
21.06.18	30.0±0.22	6.09±0.29	0.018±0.001
22.06.18	30.0±0.07	5.78±0.07	0.017±0.000

Table 2. Water quality analysis of surface water

Date (DD/MM/YY)	pH	Temp. (°C)	DO ¹ (mg/L)	COD ² (mg/L)	EC ³ ($\mu m/cm$)	TN ⁴ (mg/L)	NH_4-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	TP ⁵ (mg/L)
19.06.18	8.65	21.1	8.73	0.45	244	3.04	0.44	2.65	0.02
20.06.18	8.55	22.0	10.1	0.97	245	2.80	0.34	2.49	0.02
21.06.18	8.70	22.6	9.94	1.06	240	6.99	0.32	2.32	0.02
22.06.18	8.59	21.7	10.0	1.58	237	2.03	0.25	2.52	0.01

¹Dissolved Oxygen; ²Chemical Oxygen Demand; ³Electrical Conductivity; ⁴Total Nitrogen; ⁵Total Phosphorous

5.41, 7.83, 10.3, 14.0, 3.64 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 로 사구의 마루(C)와 사구의 비탈(D)에서 높은 배출량을 보였다(Table 3). C지점보다 D지점에서 높은 N_2O 배출량을 나타낸 이유는 지표 내 측면 흐름(lateral flow)의 영향에서 비롯된 것으로 추정되지만, 보다 정확한 분석을 위해서는 지표 내 유수 이동에 대한 추가 실험이 필요하다. A, E지점은 하상 변화가 없는 평탄한 지점으로, 시간이 경과함에 따라 N_2O 배출량은 6.50 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 에서 2.78 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 로 2.59 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 에서 0.40 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 로 각각 57.2%, 84.6%씩 감소하는 것으로 나타났다. 반면, C와 D지점의 N_2O 배출량은 시간이 지날수록 증가하는 경향을 보였으며, 마지막 측정 시점의 배출량은 각각 12.3 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$, 12.8 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 로 초기 배출량보다 2.2배, 1.2배씩 더 많은 배출량을 기록하였다(Fig. 4).

수체 내 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 N_2O 는 양의 상관관계를 보이거나,^{1,25)} $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 감소함에 따라 N_2O 가 증가하는 음의 상관관계를 나타내는 것으로 알려져 있다.²⁰⁾ 본 연구에서도 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 N_2O 가 음의 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다($R^2 = <0, 0.45, 0.22, 0.73, 0.38$, 지점 순서대로). 특히, D지점에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 N_2O 가 매우 높은 음의 상관관계($R^2 = 0.73$)를 나타내어 사구 내부의 탈질작용(denitrification)에 의한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 감소가 N_2O 배출 증가로 이어진 것으로 분석된다. 이러한 연구 결과는 실제 혼합대에서 탈질작용에 의해 증가된 N_2O 배출량을 측정된 실험 연구를 통해서도 입증될 수 있다.^{1,21,26)} 본 연구에서 진행한 실험은 지하수의 유입이 없는 인공 수로에서 진행되어 시간의 흐름에 따른 혼합대에서의 N_2O 배출량의 변화를 알 수 없었지만, 탈질작용으로 증가된 N_2O 는 약 12시간 경과하면 N_2 로 배출되어 N_2O 는 0에 가까운 값에 이르는 것으로 나타났다.²¹⁾

4. 결론

본 연구에서는 하천 시스템에서 하상형태에 따른 N_2O 배출량의 특성을 파악하기 위해 사구주변에서 배출되는 N_2O 배출량 측정 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 통해 시간이 경과함에 따라 N_2O 배출량이 2.59 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 에서 18.3 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$ 로 점점 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 경향은 사구의 마루(C)와 사구의 비탈(D) 지점에서 더욱 두드러지게 나타났다. 시간변화에 따른 N_2O 배출량의 증가는 사구 내 탈질작용에서 비롯된 것으로 판단되며, 이는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도의 감소와 N_2O 배출량의 증가가 매우 높은 음의 상관관계($R^2 = 0.73$)를 나타낸 결과를 통해서도 예상할 수 있다. 또한, 평탄한 지점보다 사구의 언덕과 비탈 그리고 마루에서 비교적 높은 N_2O 배출량을 나타났으며, 마루지점(10.3 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$) 보다는 사구의 비탈부분(14.0 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$)에서 더 높은 N_2O 가 배출되었다. 그동안 하천 내 토양의 탈질작용과 사구의 높이 변화에 따른 N_2O 배출량의 차이에 대한 연구들은 많이 수행되었지만, 본 연구에서처럼 사구주변에서 N_2O 배출량의 차이에 대한 연구는 거의 없었다. 본 연구 결과에서도 알 수 있듯이 사구와 평탄한 지점간의 평균 N_2O 배출량의 차이는 최소 1.8에서 최대 3.8배까지 차이를 보였으며, 수체의 물리적 변화에 따라 N_2O 의 배출 분포가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 실험을 통해 사구주변에서 N_2O 배출량이 상이하다는 결과를 도출하였으며, 향후 하상형태와 수리조건, 하상토 입도분포 등을 고려하여 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 실험을 통해 보다 많은 데이터를 구축한다면 하상형태와 N_2O 배출량의 상관관계를 규명할 수 있을

Table 3. N_2O emissions from the dune at the River Experiment Center

Date (DD/MM/YY)	Point A ($\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$)	Point B ($\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$)	Point C ($\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$)	Point D ($\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$)	Point E ($\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$)
19,06,18	6,50±5,62	2,97±4,22	5,71±3,54	10,4±1,60	2,59±0,00
20,06,18	5,49±11,9	2,71±6,63	13,3±26,0	10,1±5,35	3,97±7,62
21,06,18	6,14±5,22	9,80±12,0	10,0±10,3	18,3±10,5	5,27±2,95
22,06,18	2,78±3,27	13,9±9,38	12,3±13,4	12,8±10,2	0,40±2,20

Fig. 4. N_2O fluxes measured from five different points of the dune in 2018.

것이며, 현장 적용까지 확장하여 실제 하천의 하상형태에 따른 N_2O 배출의 메커니즘을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

지금까지 하천은 농업이나 자연식생토(Soils under natural vegetation)에 비해 N_2O 배출원으로 크게 두드러지지 않았다. 그러나 최근 들어 하천에서 잠재적인 온실가스가 배출되고 있다는 많은 연구가 진행되면서 하천 시스템에서 배출되는 온실가스에 대한 중요성이 점점 강조되고 있다. 이러한 측면에서, 국내 하천의 N_2O 배출량 실측 자료의 확보가 필요하며 국내 N_2O 배출량 중 실제 하천에서 배출되는 N_2O 차지하는 비중을 산정해야 할 필요성이 있다. 이와 더불어, 본 연구 결과는 국가적, 사회적으로 끊임없이 이슈가 되고 있는 기후변화 적응에 기여할 수 있는 기초연구 결과로 향후 하천 시스템의 유지관리 및 하천환경, 생태서식지 평가 등의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(NRF-2017 R1A2B4007131), 본 연구를 위한 실험은 한국건설기술연구원의 안동하천실험센터에서 수행됨.

KSEE

Reference

1. Beaulieu, J. J., Tank, J. L., Hamilton, S. K., Wollheim, W. M., Hall, R. O., Mulholland, P. J. and Dodds, W. K., "Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**(1), 214~219(2011).
2. Intergovernmental Panel on Climate Change, "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," *Cambridge University Press*, 73. (2013).
3. Reeder, W. J., Quick, A. M., Farrell, T. B., Benner, S. G., Feris, K. P., Marzadri, A., and Tonina, D., "Hyporheic source and sink of nitrous oxide," *Water Resour. Res.*, **54**, 5001~5016(2018).
4. Oh, H. S., Huh, I. A. and Choi J. H., "Fluorescence Analysis of Dissolved Organic Matter Released from Sediment of Yeongsan River," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(9), 350~358(2018).
5. Hill, A. R. and D. J. Lymburner., "Hyporheic zone chemistry and stream-subsurface exchange in two groundwater-fed streams," *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **55**(2), 495~506(1998).
6. Wagenschein, D. and Rode, M., "Modelling the impact of river morphology on nitrogen retention-A case study of the Weisse Elster River (Germany)," *Ecol. Model.*, **211**(1-2), 224~232(2008).
7. Davodson, A. E., "The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860," *Nat. Geosci.*, **2**(9), 659~662(2009).
8. McMahon, P. B. and K. F. Dennehy, "N₂O emissions from a nitrogen-enriched river," *Environ. Sci. Technol.*, **33**(1), 21~25(1999).
9. Marzadri, A., Tonina, D., Bellin, A. and Tank, J. L., "A hydrologic model demonstrates nitrous oxide emissions depend on streambed morphology," *Res. Lett.*, **41**(15), 5484~5491(2014).
10. Beaulieu, J. J., Arango, C. P., Hamilton, S. K. and Tank, J. L., "The production and emission of nitrous oxide from headwater in the Midwestern United States," *Glob. Change Biol.*, **14**(4), 878~894(2008).
11. Zarnetske, J.-P., Haggerty, R., Wondzell, S.-M. and Baker, M.-A., "Dynamics of nitrate production and removal as a function of residence time in the hyporheic zone," *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, **116**(G1), 1~12 (2011).
12. Zarnetske, J.-P., Haggerty, R., Wondzell, S.-M., Bokil, V.-A. and González-Pinzón, R., "Coupled transport and reaction kinetics control on the nitrate sources-sink function of hyporheic zones," *Water Resour. Res.*, **48**(11), 1~15 (2012).
13. Marzadri, A., Tonina, D. and Bellin, A., "A semianalytical three-dimensional process-based model for hyporheic nitrogen dynamics in gravel bed rivers," *Water Resour. Res.*, **47**(11), 1~14(2011).
14. Song, H. O., Ko, J. C., Choi, S. H. and Kim, D. H. "Investigation of N₂O Emission and Reduction Effect from MSW Incineration Plant," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(12), 672~678(2017).
15. Stegen, J. C., Fredrickson, J. K., Wilkins, M. J., Konopka, A. E., Nelson, W. C., Arntzen, E. V., and Kennedy, D. W., "Groundwater-surface water mixing shifts ecological assembly processes and stimulates organic carbon turnover," *Nature Communication*, 7:11237(2016).
16. Buffington, J. M. and Tonina D., "Hyporheic exchange in mountain rivers II: Effects of channel morphology on mechanics, scales, and rates of exchange," *Geography Compass*, **3**(3), 1038~1062(2009).
17. Hou, Z., Nelson, W. C., Stegen, J. C., Murray, C. J., Arntzen, E., Crump, A. R. and Zachara, J. M., "Geochemical and microbial community attributes in relation to hyporheic zone geological facies," *Scientific reports*, **7**(1), 12006(2017).
18. Elliott, A. H. and Brooks, N. H., "Transfer of nonsorbing solutes to a streambed with bedforms: Theory," *Water Resour. Res.*, **33**(1), 123~136(1997).
19. Stonedahl, S. H., Harvey, J. W., Wörman, A., Salehin, M. and Packman, A. I., "A multiscale model for integrating hyporheic exchange from ripples to meanders," *Water Resour. Res.*, **46**(12), 1~14(2010).
20. Zhou, T. and Endreny, T. A., "Reshaping of the hyporheic zone beneath river restoration structures: Flume and hydrodynamic experiments," *Water Resour. Res.*, **49**(8), 5009~5020(2013).

21. Quick, A. M., Reeder, W. J., Farrell, T. B., Tonina, D., Feris, K. P. and Benner, S. G., "Controls on nitrous oxide emissions from the hyporheic zones of streams," *Environ. Sci. Technol.*, **50**(21), 11491~11500(2016).
22. Quirós, R., "The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes," *Limnetica*, **22**(1-2), 37~50(2003).
23. Sajuni N. R., Ahmad A. L. and Vadivelu V. M., "Effect of Filter Media Characteristics, pH and Temperature on the Ammonia Removal in the Wastewater," *J. Appl. Sci.*, **10**(12), 1146~1150(2010).
24. Sudduth E. B., Perakis, S. S. and Bernhardt, E. S., "Nitrate in watersheds: Straight from soils to streams" *J. Geophys. Res., Biogeosci.*, **118**, 291~302(2013).
25. Ministry of Environment. 2018. Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy. Article 2 (Environmental Standards).
26. Baulch, H. M., Schiff, S. L., Maranger, R. and Dillon, P. J., "Nitrogen enrichment and the emission of nitrous oxide from streams," *Global Biogeochemical Cycles*, **25**, 1~15 (2011).