

한강 지류 토지 이용 특성과 하천 내의 미지형에 따른 탈질량과 조절 인자

Denitrification Rates in Tributaries of the Han River in Relation to Landuse Patterns and Microtopology

김 영 주* / 권 민 정** / 강 호 정***

Young Joo Kim* / Min Jung Kwon** / Hojeong Kang***

요약 : 하천 생태계는 질소 제거를 포함해 수질 개선 등의 중요한 기능을 수행한다. 하지만 산업화 이후에 가속화된 토지이용특성 변화는 이와 같은 하천의 생태적 기능을 저하시키는 원인으로 작용한다. 본 연구에서는 하천 주변의 토지이용특성과 각 하천의 미지형에 따른 하천의 탈질량 및 이의 조절인자에 대해 알아보고자 토지 이용 특성에 따라 한강의 5차 하천 10 곳을 선정하고 각 하천을 하변, 저토, 중간사주의 두부와 미부 네 개의 미지형으로 구분하여 현장 탈질량과 토양의 이화학적 특성을 분석하였다. 측정 결과 농경 하천, 도심 하천, 산림 하천에서의 탈질량은 각각 289.62 ± 70.69 , 157.01 ± 37.06 , 31.38 ± 18.65 mg N_2O-N $m^{-2} d^{-1}$ 으로 나타났다. 미지형에 따라서는 유의한 차이를 보이지 않았으나 하변에서 가장 높고 중간사주 두부보다 미부에서 약간 높은 경향을 보였다. 탈질량을 결정하는 환경요인으로는 수온, 토양의 미사와 점토 함량, 무기 질소와 탄소원이 있었고, 이들 모두 탈질량과 양의 상관관계를 보였다. 본 연구를 통해 유역 내의 토지 이용특성이 하천의 중요한 기능 중 하나인 질소 제거능에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 미지형간의 상관성을 고려하여 탈질량을 실측한 결과는 생태적 기능을 고려한 하천 관리 및 복원 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 탈질량, 토지이용특성, 하천, 저토, 하변

Abstract : Stream ecosystems carry out significant functions such as water purification, especially denitrification. However, rapid landuse change since industrialization has altered ecological functions of streams. In this study, we aimed to investigate denitrification rates and their determinant factors in streams with different landuse patterns, and how denitrification rates vary with microtopology within streams. Ten fifth streams of each landuse were selected, and each stream was divided into four microtopological sites within streams - riparian zone, subsoil, and both head and tail parts of sand bars. *In situ* denitrification rates and physicochemical properties of soil were examined. Denitrification rates of agricultural, urban, and forest streams were 289.62 ± 70.69 , 157.01 ± 37.06 , 31.38 ± 18.65 mg N_2O-N $m^{-2} d^{-1}$ respectively. There were no significant differences in denitrification rates depending on microtopology, but the rates in riparian zone were the highest, and the rates in the head parts of sandbars were lower than those of tail parts. The determinant factors for denitrification rates included water temperature, silt and clay contents of soil, inorganic nitrogen, and organic carbon, and these factors all showed positive correlations with denitrification rates. Through this study, we find that landuse pattern in watershed region affects denitrification rates that is one of considerable functions of streams. In addition, estimation of denitrification rates taking into account for microtopology would contribute to developing ecological management and restoration strategy of streams.

Keywords : Denitrification rate, landuse patterns, streams, subsoil, riparian zone

+ Corresponding author : hj_kang@yonsei.ac.kr

* 정회원, 한국건설기술연구원, E-mail: yjee@kict.re.kr

** 비회원, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부, E-mail: minjung_kwon@yonsei.ac.kr

*** 정회원, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부, E-mail: hj_kang@yonsei.ac.kr

1. 서 론

하천 생태계는 수생물 서식처로서 생물적인 요소와 함께 환경적인 요소 간의 상호작용을 통해 기능적인 연속성을 지닌다. 특히, 수리적인 역동성으로 인해 형성되는 육상 생태계와 수 생태계 전이대는 물질순환의 통로로서 수질개선과 같은 중요한 기능을 수행 하는 것으로 알려져 있다 (Junk et al., 1989, Gregory et al., 1991, Brunke and Gonser, 1997). 그러나 1960년대 이후부터 우리나라는 하천의 생태적인 상호작용을 고려하지 않는 수변 토지이용특성의 급격한 변화와 함께 비생태적이고 획일적인 정비가 이루어졌으며 (안수한, 1995), 이와 같은 인간 위주의 간섭은 우리나라 하천 고유의 구조를 변화 시키며, 생태계의 기능을 반감시키는 원인으로 작용하고 있다 (김종원과 이윤경, 2002).

수변 지역의 도심지 또는 농경지로의 토지이용 특성 변화는 과도한 영양염류를 방출하며, 이는 하변과 하상의 정화능을 초과함으로써 하천 수체 내의 오염물질 농도를 증가 시킨다. 또한 토지이용 특성 변화로 인한 물리적 구조의 변경은 수리적 흐름을 단절시키며, 미생물 정화능 및 생물 다양성 감소와 같은 빈도 높고 강한 인위적 교란을 초래한다 (Allan and Castillo, 2007). 토지이용특성이 하천의 정화능에 미치는 영향에 대한 국외 연구는 대부분 질소 제거 기작에 초점을 두고 있다 (Birgand, 2007). 농경지 비료 및 도심지 하폐수로 인해 질소가 하천으로 과다 유입될 경우 부영양화가 발생하여 환경문제를 야기하기 때문이다 (Carpenter et al., 1998). 특히 하천의 탈질 미생물은 탈질과정을 거쳐 질산염을 대기 중으로 방출하고 하천 생태계에서 영구히 제거하기 때문에 질소로 인한 하천오염을 제어 할 수 있어 주목 받고 있다 (Martin et al., 1999, Allan and Castillo, 2007). 하지만 기존의 연구들은 주로 농촌이나 자연 하천의 탈질량에 대한 내용들이 주를 이루고 있고, 도심 하천 내에서 토지 이용도 차이에 대한 연구는 제한적이다 (Kaushal et al.,

2008). 또한 한 하천 내에서 미지형, 즉 하변, 저토, 중간사주의 두부와 미부 등에서 일어나는 탈질량 차이에 대한 연구는 매우 미비하다. 국내의 경우 하천 내에서 탈질량을 실측한 연구는 전무하며, 이와 같은 질소 제거 기능을 평가하기 보다는 BOD 및 총질소에 대한 수질 측정과 배출량 현황 분석에 기반 한 하천 관리가 주를 이루고 있다 (한강수계관리위원회, 2006, 김갑수, 2007). 따라서 실질적으로 하천의 수변환경에 따른 제거능을 평가하고 질소 제거 기작을 제한하는 요소를 밝혀낸다면 하천의 생태적 기능을 고려한 관리를 가능케 할 것이다.

본 연구에서는 국내의 한강 지류 중 대표적인 세 가지 유형 (산림, 농경, 도심)에 해당하는 하천을 선정하여 이 지역에서 일어나는 탈질량을 실측하고 그 조절인자를 추정하여 보았다. 또한 각 하천 내에서 하변과 하상을 대표할 수 있는 4개의 미지형적 지점을 선정하여 이들 사이의 탈질량 차이를 살펴보는 것을 연구 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지 및 시료 채취

본 연구에서는 서울특별시를 중심으로 14 km 반경 내에 있는 제 1지류 및 제 2지류 중 5차 하천을 대상으로 하였다. 구간 수변의 토지 이용도에 따라서 적합한 하천 구간 총 10 곳 (한강 상류에서부터 유입하는 지류 순서로 홍릉천, 왕숙천, 용암천, 성내천, 탄천, 양재천, 안양천, 창릉천 상류, 창릉천 하류, 굴포천)을 선정하였고(Table 1), 각 하천에서 4개의 미지형을 구분하여 연구를 진행하였다. 이 4개의 지점은 하변, 저토, 중간사주의 두부, 중간사주의 미부로 식생 유무 및 하천 수의 이동에 차이가 있는 지점이다.

선정된 4 곳에서 2 반복으로 현장 탈질 측정을 통해 기체 샘플을 채취 하였고, 이화학적 및 생물학적 분석을 위해 각 지점 별 토양을 2 반복으로 채취 하였으며, 하변을 제외한 지점의 물 시료를

Table 1. Landuse classification of the study sites. Area with percentage in parenthesis.

Study site		Reach watershed designated landuse km ² (%)				
		Forest	Agricultural	Urban	Water area	Total
Forest	Chang-Reung Up	2.38 (76)	0.34 (11)	0.34 (11)	0.09 (3)	3.14 (100)
	Yong-Am	2.17 (69)	0.67 (21)	0.19 (6)	0.12 (4)	3.14 (100)
Urban	An-Yang	0.00 (0)	0.00 (0)	2.93 (93)	0.21 (7)	3.14
	Yang-Jae	0.20 (6)	0.00 (0)	2.77 (88)	0.18 (6)	3.14 (100)
	Sung-Nae	0.20 (6)	0.20 (6)	2.57 (82)	0.17 (5)	3.14 (100)
	Tan	0.34 (11)	0.00 (0)	2.30 (73)	0.50 (16)	3.14 (100)
Agricultural	Gul-Po	0.02 (1)	2.66 (85)	0.28 (9)	0.18 (6)	3.14 (100)
	Chang-Reung Down	0.71 (23)	2.01 (64)	0.10 (3)	0.32 (10)	3.14 (100)
	Hong-Reung	0.64 (20)	1.88 (60)	0.47 (15)	0.15 (5)	3.14 (100)
	Wang-Suk	1.06 (34)	1.65 (53)	0.17 (6)	0.25 (8)	3.14 (100)

폴리에틸렌 소재의 용기에 채취하였다. 모든 시료는 아이스박스를 이용하여 실험실로 이동시킨 후 분석 완료 때 까지 4°C 냉장보관 하였다. 시료채취는 2009년 7월 말에서 8월 초에 걸쳐 모두 완료하였다.

2.2 측정 방법

각 지점에서 현장 탈질량을 측정 하고, 채취한 토양 시료의 토성 (Soil texture)을 분석하였으며, 토양의 수분 및 유기물 함량, pH, 용존유기탄소 (DOC : Dissolved Organic Carbon), 암모니아성 질소 (NH₄⁺-N), 질산성 질소 (NO₃⁻-N)의 농도를 측정하였다. 또한, 채취한 물 시료의 용존유기탄소 및 음이온 (NO₃⁻-N, Cl⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻), 양이온 (NH₄⁺-N, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) 함량을 분석하였다.

본 실험에서는 탈질량 측정을 위해 아세틸렌저해법 (acetylene blocking method)을 사용하였다.

직경 5.8 cm 높이 45 cm의 PVC 재질의 chamber를 제작해 토양에 15 cm 깊이로 고정시켰다. 탈질은 하천 깊이 5 cm 이내에서 90 % 이상이 나타나는 것으로 보고되고 있으나 (Inwood et al., 2007, Groffman et al., 2009), 아세틸렌 및 N₂O의 확산 및 방출을 방지하기 위해서 충분한 깊이(15 cm)로 결정하였다. 주사기를 이용하여 토양 표면 높이에 있는 septa에 아세틸렌 기체를 주입하였다. 주입한 아세틸렌 기체는 chamber 내에서 토양을 제외한 공간 부피의 20 %를 주입하였고, N₂O 측정을 위한 기체 채취는 초기 아세틸렌 기체가 혼합되는 30 분 후를 시작점으로 하여 60분 간격으로 0 분, 60 분, 120 분, 180 분, 240 분에 주사기를 이용하여 이루어졌으며, 채취한 기체는 10 ml의 진공 vial에 옮겨 담았다. 채취한 기체 시료를 아이스박스에 담아 실험실로 운반하였고, ECD detector가 장착된 가스크로마토그

래피 (GC, Gas Chromatography) (CP3800, Varian)를 이용하여 N₂O 농도를 측정하였으며, N₂O 발생률은 mg N₂O-N m⁻² d⁻¹로 나타내었다.

3. 결과 및 토의

물리적 환경 요소 중 지온과 수온은 각각 21.0~38.0°C, 22.5~28.5°C의 범위를 보였고 (Table 2, 3) 지온에 비해 수온의 변화 범위가 작게 나타난 것은 물의 열용량이 크기 때문으로 판단된다. 토지이용 특성에 따라서는 산림 하천에서 온도가 가장 낮고, 도심 하천에서 높은 경향을 보였으며 (Table 2, *P*<0.05), 이와 같은 결과는 주변 식생에 의해 형성되는 그들의 비율과 인위적인 활동으로 인해 발생하는 열의 영향으로 보인다 (Moore, 2005; Kaye, 2006). 토성 분석 결과에 따르면 상류부에 위치한 산림 하천에서 자갈의 비율이 높은 반면, 도심과 농경 하천은 주변 공사

현장 및 농경지에서 유실되어 퇴적한 것으로 보이는 미사와 점토의 비율이 상대적으로 높았다 (Table 2, *P*<0.05) (Hancock, 2002). 또한 현재 하변을 복원중인 성내천 토양의 경우는 식생 형성을 위한 비료가 주를 이루면서 미사가 28.7 %, 점토가 23.2 %로 가장 높은 비율을 보였다. 화학적인 환경 요소로 pH는 평균적으로는 7 내외의 값을 보였으나 다른 지역에 비해 농경 하천에서 높은 값을 보였으며 (Table 2, *P*<0.05), 특히 굴포천 구간 토양 시료는 pH 8~10 내외로 가장 높은 값을 보였다. 이는 주변 농경지에서 사용하는 과도한 알칼리성 비료의 영향에 의한 것으로 판단된다.

하천수의 전기전도도는 도심지의 하·폐수 및 농경지로부터 유입된 과량의 영양염류의 영향으로 도심 하천과 농경 하천에서 가장 높게 나타났으며 (Table 3, *P*<0.05), 탈질에 관여된 NH₄⁺-N, NO₃⁻-N와 유기 탄소 농도도 같은 경향을 보였다

Table 2. Physico-chemical characteristics of soil (Mean with S.E.). Data labeled with different letters represents significant difference at *P*<0.05 (one-way ANOVA)

Characteristics	Landuse categories			
	Forested	Urban	Agricultural	
Temperature (°C)	24.8 ± 0.9 ^a	28.4 ± 0.7 ^b	26.3 ± 0.7 ^{ab}	
Water content (%)	13.78 ± 1.41 ^a	21.65 ± 1.70 ^b	14.75 ± 1.17 ^a	
Organic matter content(%)	0.65 ± 0.08	2.13 ± 0.53	1.76 ± 0.31	
pH	7.27 ± 0.07 ^a	7.14 ± 0.09 ^a	7.77 ± 0.15 ^b	
Dissolved organic carbon (µg g ⁻¹ dry-soil)	20.53 ± 3.56	7.14 ± 0.09 ^a	35.44 ± 5.99	
NO ₃ ⁻ -N (µg g ⁻¹ dry-soil)	0.21 ± 0.04 ^a	0.49 ± 0.19 ^{ab}	0.52 ± 0.08 ^b	
NH ₄ ⁺ -N (µg g ⁻¹ dry-soil)	13.82 ± 1.11 ^a	23.26 ± 2.07 ^b	17.16 ± 1.31 ^a	
Gravel content (%)	55.35 ± 3.56 ^a	28.33 ± 5.82 ^b	48.04 ± 5.36 ^a	
Soil texture	Sand (%)	93.73 ± 0.35	88.16 ± 2.73	90.79 ± 1.14
	Silt (%)	0.76 ± 0.12 ^a	3.40 ± 1.70 ^{ab}	2.09 ± 0.65 ^b
	Clay (%)	5.64 ± 0.29 ^a	8.42 ± 1.05 ^b	7.12 ± 0.54 ^{ab}

Table 3. Water chemical characteristics (Mean with S.E.). Data labeled with different letters denotes significant difference at $P < 0.05$ (one-way ANOVA)

Characteristics	Landuse category		
	Forested	Urban	Agricultural
Temperature (°C)	24.3 ± 0.5 ^a	26.3 ± 0.3 ^b	25.3 ± 0.2 ^a
pH	7.42 ± 0.16	7.78 ± 0.10	7.91 ± 0.15
Conductivity ($\mu\text{s cm}^{-1}$)	174.17 ± 13.72 ^a	340.42 ± 22.62 ^b	313.00 ± 15.61 ^b
Dissolved organic carbon (mg L ⁻¹)	1.74 ± 0.10 ^a	3.49 ± 0.29 ^b	2.82 ± 0.35 ^b
NO ₂ ⁻ -N (mg L ⁻¹)	0.31 ± 0.02 ^a	0.59 ± 0.05 ^b	0.46 ± 0.05 ^b
NO ₃ ⁻ -N (mg L ⁻¹)	2.46 ± 0.23 ^a	3.37 ± 0.19 ^b	3.15 ± 0.12 ^b
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	12.83 ± 1.54 ^a	40.82 ± 3.50 ^c	21.40 ± 2.14 ^b
PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	1.25 ± 0.04 ^a	1.83 ± 0.08 ^b	1.77 ± 0.16 ^{ab}
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	17.10 ± 1.12 ^a	32.96 ± 2.44 ^b	31.33 ± 1.47 ^b
NH ₄ ⁺ -N (mg L ⁻¹)	0.33 ± 0.12 ^a	1.78 ± 0.33 ^b	1.01 ± 0.43 ^{ab}
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	8.75 ± 0.39 ^a	27.88 ± 2.64 ^c	17.56 ± 1.79 ^b
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	3.03 ± 0.29 ^a	5.34 ± 0.17 ^b	4.92 ± 0.18 ^b
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	20.98 ± 1.91 ^a	31.40 ± 1.10 ^b	32.21 ± 1.12 ^b

(Table 3, $P < 0.05$). 마그네슘 이온을 제외한 모든 이온 농도는 도심과 농경 하천에서 세계 하천 평균값보다 3 배 이상 높았으며, 특히 도시의 염소 이온 농도는 세계 하천 평균인 7.8 mg L⁻¹의 5배 정도로 측정되었다 (Allan and Castillo, 2007). 이처럼 도심 하천에서의 염소 농도가 특히 높은 것은 하수에 함유된 염화나트륨 (NaCl)의 영향으로 사료된다.

토지이용특성이 하천 생태계의 탈질에 미치는 영향을 살펴보기 위해 하천에 존재하는 다양한 미지형을 고려하여 탈질량을 측정 하였다. 통계 처리 시 탈질량이 정규분포를 따르지 않는다고 판단하여 로그 형태를 취하여 Fig. 1 과 같이 제시하였다. 각 미지형 별 탈질량의 평균값은 산림 하천과 농경 하천의 경우, 하변에서 가장 높은 값을 보였고 저토, 중간사주의 미부, 중간사주의 두부의 순으로 나타났다. 도심 하천의 경우도 비슷한 경향을 보였으나, 중간사주의 미부가 저토보다 높

은 값을 보였다 (Fig. 1).

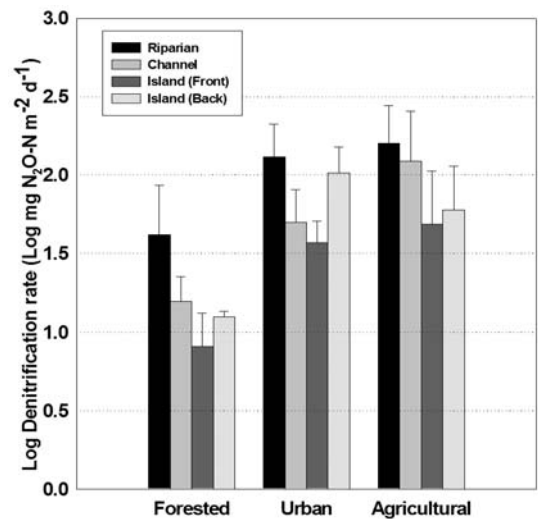


Figure 1. Log-transformed denitrification rates classified by land use and geomorphic characteristics (Mean with S.E.)

모든 지역의 하변에서 가장 높은 탈질량을 보이는 것은 하변의 식생에서 유래한 유기 탄소와 수변에서의 인위적인 활동으로 발생된 영양염류의 공급이 가장 직접적으로 영향을 미쳤기 때문으로 보인다. 즉 오염부하량이 하변에 가장 집중되었기 때문에 탈질량 또한 가장 높았던 것으로 판단된다. 하지만 이를 뒷받침할 수 있는 자료 분석이 부족한 실정으로 미지형별로 공급되는 질소공급량을 분석하여 질소공급량 대비 탈질량을 분석하였다면 미지형별 질소순환을 확인할 수 있었을 것이라 판단된다. 이외에 설명할 수 있는 원인은 지표수-지하수 간의 상호작용으로 수로와 접하고 있는 세 지점 중 중간사주의 두부는 지표수가 down-welling 되는 지역인 반면, 중간사주의 미부와 저토는 지표층수 유출의 영향이 더 큰 지역일 것으로 예상된다. 따라서 중간사주의 미부와 저토에서 탈질량이 더 높은 값을 보이는 것은 중간사주 및 지표층을 따라 흐르는 지표수-지하수 혼합대에서의 체류시간 증가로 인해 형성되는 혐기적 환경과 지하수에 축적된 영양염류의 영향이 지표수의 영향 요소보다 상대적으로 컸기 때문으로 추정된다 (Hester and Doyle, 2008).

토지이용특성별 탈질량을 산정한 결과 농경 하천이 $289.62 \pm 70.69 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타냈고, 다음으로 도심, 산림 하천의 순으로 157.01 ± 37.06 , $31.38 \pm 18.65 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 값을 나타냈다. 이는 같은

방법으로 측정을 실시한 선행 연구에서 농경, 도심 하천의 현장 탈질량이 $154, 3.3\text{--}57.6 \text{ mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 나타난 것과 비교해 볼 때 산림 하천을 제외하고 상당히 높은 값이며 (Torre et al, 1992, Zhu et al., 2005), 실험실 조건에서 측정된 결과 (농경, 도심, 산림 각각 75, 23, 15 $\text{mg N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) 에 비해서도 4배 이상의 높은 값이다 (Inwood et al , 2005).

탈질량에 미치는 인자를 추정하기 위해 상관관계 분석을 수행한 결과 전기전도도, 수온, 미사와 점토 함량, 무기 질소, 탄소원이 모두 양의 상관관계를 보였으며 토양 내 모래함량은 음의 상관관계를 보였다 (Table 4). 이는 기존에 알려진 바와 같이 탈질량은 탈질 미생물의 활동에 영향을 주는 요인에 크게 의존적임을 의미한다. 즉, 무기 질소는 탈질과정의 최종전자수용체, 유기탄소는 미생물의 탄소원으로 작용하기 때문에 이들의 농도가 높을수록 탈질 미생물의 활성이 높아지고 탈질량이 높아졌음을 추측할 수 있다. 또한 탈질미생물은 혐기조건에서만 질산성질소를 최종전자수용체로 이용하므로 토양의 수분함량, 미사·점토의 함량이 증가할수록 토양의 혐기조건이 증가, 탈질량이 증가할 수 있는 것이다. 이와 반대로 토양 내 자갈 및 모래의 함유량이 증가할수록 토양 내 공극이 증가. 호기성 환경이 증가하고 탈질량이 감소할 수밖에 없는 것이다.

Table 4. Spearman's correlation coefficient among environmental factors and denitrification processes at the entire site samples. Only significant values are presented.

	Environmental factors (correlation coefficient)			
	Positive	w ^a EC (0.386**)	w ^a Temp (0.552**)	Silt (0.463**)
	NH ₄ ⁺ -N (0.386**)	wNO ₂ ⁻ -N (0.410**)	Organic matter (0.493**)	DOC (0.402**)
Negative	Sand (-0.465**)			

^a : Factors labeled with the letter 'w' indicate chemical properties of water samples.

* : Asterisks show the significance of correlation ($P < 0.05^*$, $P < 0.01^{**}$)

토지이용특성에 따라 탈질량은 도심지역과 농경지역이 산림지역보다 높은 탈질량을 보였으며 도심지역과 농경지역간에는 통계적으로 유의미한 차이가 없었다. 도심지역과 농경지역간에 탈질량 차이가 발생하지 않은 원인에 대해 추측해보고자 각 지역별 토양 및 하천수의 이화학적 특성을 비교분석해 봤을 때(Table 2, 3) 토양 및 하천수의 용존유기탄소는 탈질 미생물이 쉽게 이용할 수 있는 탄소형태인 만큼 탈질량과 같이 농경지와 도심간에 유의한 차이를 발견할 수 없었다. 이와 달리 토양의 유기물 함량은 탈질량이 가장 높은 농경지역보다 도심지역에서 더 높은 값을 보였는데, 이는 분석결과와 유기물이 탈질미생물이 쉽게 이용할 수 있는 탄소 형태와 그렇지 않은 형태를 모두 포함하기 때문으로 보인다. 다시 말해 도심의 유기물질량은 다른 토지이용보다 공급량이 많으며 미생물이 분해하기 힘든 형태의 유기물질도 다량 포함할 가능성이 높다는 의미이다. 그러나 탈질미생물이 쉽게 이용할 수 없는 형태의 탄소도 장기적으로 미생물의 탄소 공급원으로 이용될 수 있기 때문에 토양의 유기물함량을 탈질량에 영향을 미치는 요인으로 고려해야 한다. 또한 도심 하천과 농경 하천에서는 높은 탈질량에도 불구하고 많은 양의 질소와 영양염류 유입에 의해 수체 내의 질소 농도가 산림 하천에서보다 높았다. 질소의 농도가 증가할수록 탈질량 또한 증가하지만 유역 전체 내에서 토지 이용도의 변화가 하천 수체내의 질소 양에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알게 되었다. 또한 한 지역 내에서도 탄소원 공급이 풍부한 하천이 탈질 기능면에서 매우 중요하기 때문에 하천의 생태적인 기능을 고려한 하천 보존이 이루어져야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 한국과학재단의 도약연구(과제번호 2011-0029802), 선도연구센터사업(과제번호 2011-0030843) 및 환경부의 Eco-STAR Project(과제번호 08-III-12)의 지원

으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김갑수. 한강 생태계 조사연구 : 요약보고서. 서울특별시 환경국 수질과. 서울시정개발연구원. 2007.
- 김종원, 이윤경. 하천습지의 관리기본계획에 대한 생태학적 접근. 한국생태학회 심포지엄. 2002.
- 안수한. 한국의 하천. 민음사. 1995.
- 한강수계관리위원회, 국립환경과학원 한강물환경연구소. 한강유역통합관리시스템 갱신 및 운영 2년차 보고서. 한강수계관리위원회. 2006.
- Allan, J. D., and Castillo, M. M. Stream ecology: structure and function of running waters (2nd edition). Springer. Dordrecht, The Netherlands. 2007.
- Birgand, F. Nitrogen Removal in Streams of Agricultural Catchments—A Literature Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Vol. 37, pp. 381. 2007.
- Brunke, M., and Gonser, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. Freshwater Biology, Vol. 37, pp. 1-33. 1997.
- Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., Smith, V. H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. Ecological Applications, Vol. 8, pp. 559-568. 1998.
- Gregory, S. V., Swanson, F. J., McKee, W. A., Cummins, K. W. An ecosystem perspective of riparian zones. Bioscience, Vol. 41, pp. 540-551. 1991.
- Groffman, P. M., Butterbach-Bahl, K., Fulweiler, R. W., Gold, A. J., Morse, J. L., Stander, E. K., Tague, C., Tonitto, C., Vidon, P. Challenges to incorporating spatially and

- temporally explicit phenomena (hotspots and hot moments) in denitrification models. pp. 49-77. Springer. 2009.
- Hancock, P. J. Human impacts on the stream-groundwater exchange zone. *Environmental Management*, Vol. 29, pp. 763-781. 2002.
- Hester, E. T., and Doyle, M. W. In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange. *Water Resources Research*, Vol. 44, pp. 17. 2008.
- Inwood, S., Tank, J., Bernot, M. Factors Controlling Sediment Denitrification in Midwestern Streams of Varying Land Use. *Microbial Ecology*, Vol. 53, pp. 247-258. 2007.
- Inwood, S. E., Tank, J. L., Bernot, M. J. Patterns of denitrification associated with land use in 9 midwestern headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society*, Vol. 24, pp. 227-245. 2005.
- Junk, J. W., Bayley, P. B., Sparks, R. E. The flood pulse concept in river floodplain systems. *Canadian Special Publications of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 106, pp. 110-127. 1989.
- Kaushal, S. S., Groffman, P. M., Mayer, P. M., Striz, E., Gold, A. J. Effects of stream restoration on denitrification in an urbanizing watershed. *Ecological Applications*, Vol. 18(3), pp. 789-804. 2008.
- Kaye, J. P., Groffman, P. M., Grimm, N. B., Baker, L. A., Pouyat, R. V. A distinct urban biogeochemistry? *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 21, pp. 192. 2006.
- Martin, T. L., Kaushik, N. K., Trevors, J. T., Whiteley, H. R. Review: Denitrification in temperate climate riparian zones. *Water Air and Soil Pollution*, Vol. 111, pp. 171-186. 1999.
- Moore, R. Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41, pp. 813. 2005.
- Torre, M., Rebillard, J. P., Ayphassorho, H., Labroue, L., and Helmer, C. In situ assessment of denitrification in running waters: example of the Charente river. *Annales de limnologie*, Vol. 28(3), pp. 263-271. 1992.
- Zhu, W.-X., Dillard, N. D., Grimm, N. B. Urban nitrogen biogeochemistry: status and processes in green retention basins. *Biogeochemistry*, Vol. 71, pp. 177-196. 2005.
- 논문접수일 : 2011년 12월 09일
- 심사의뢰일 : 2011년 12월 12일
- 심사완료일 : 2012년 02월 24일