

## 영산강과 섬진강 수계의 질소 분포와 유기질소 분해속도

김지혜 · 김범철<sup>†</sup> · 신명선 · 김재구 · 정성민 · 이윤경 · 박주현\*

강원대학교 환경학과

\*국립환경과학원

### The Distribution of Nitrogen and the Decomposition Rate of Organic Nitrogen in the Youngsan River and the Sumjin River, Korea

Jihye Kim · Bomchul Kim<sup>†</sup> · Myoungsun Shin · Jaiku Kim · Sungmin Jung · Yunkyoung Lee · Juhyun Park\*

Department of Environmental Science, Kangwon National University

\*National Institute of Environmental Research

(Received 10 July 2008, Revised 19 November 2008, Accepted 3 January 2009)

#### Abstract

The distribution of organic nitrogen and its decomposition rate were studied in the Youngsan River and the Sumjin River system in Korea. Samples were conducted seasonally in June, August, December of 2006, and February of 2007. Collected samples were incubated for 20 days in a dark chamber (20±1°C) and analyzed the changes of nitrogen form (particulate organic nitrogen, dissolved organic nitrogen, ammonia, nitrite, and nitrate). The mean total nitrogen (TN) concentration in the Youngsan River and the Sumjin River were 2.62 mgN·L<sup>-1</sup> and 1.53 mgN·L<sup>-1</sup>, respectively. TN comprised of 65% DIN and 35% ON. The decomposition coefficients of organic nitrogen were also determined by two different fitting models. The decomposition rates of nitrogen species (TON, LPON, LDON, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ranged from 0.024 to 1.043 day<sup>-1</sup> in the Youngsan River and 0.008 to 0.693 day<sup>-1</sup> in the Sumjin River, respectively. The result of this study can give a guide to the selection of parameters in the calibration processes of water quality models.

**keywords** : Decomposition, Organic nitrogen, Sumjin River, Youngsan River

### 1. 서론

수계에서 질소는 인과 함께 조류의 성장을 제한하는 대표적인 영양염류로, 질산화와 탈질과정을 거치며 자연계 내에서 순환한다(Horne and Goldman, 2001). 대기 중에 존재하는 질소가스(N<sub>2</sub>)는 질소고정 박테리아나 일부 남세균에 의해 고정되어 수계로 유입되기도 하고, 암모니아는 각종 생활오수, 산업폐수, 축산폐수, 동물의 배설물 등에 많이 포함되어있다. 수중에서 질소화합물은 용존 질소가스를 제외하고 유기질소, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소를 합하여 총 질소로 나타내고 있다(Wetzel, 2001). 하수나 축산폐수에 포함된 질소화합물은 주로 암모니아성 질소와 유기질소 형태이며, 일반적으로 하천과 호수에서는 질산성 질소의 형태로 존재하게 된다.

질소화합물은 존재형태에 따라 용존 및 입자상으로 구분할 수 있으며, 분해특성에 따라서는 생분해성과 난분해성으로 구분할 수 있다(Grady et al., 1999). 생분해성 유기질소는 아미노산, 핵산 등과 같은 물질로 구성되어 박테리아에 의해 쉽게 분해되고 즉시 이용된다. 그러나 리그닌 등과

같은 분해가 어려운 난분해성 유기질소는 수체 내에 약 70~80%를 차지한다(Haslam, 1998; Larson and Hufnal, 1980). 유기물의 분해속도는 이러한 난분해성의 비율에 따라 결정된다.

일반적으로 자연계에서 유기질소의 분해속도는 유기탄소보다 빠르고 유기인보다는 느리게 진행된다(Wetzel, 1995; Wetzel and Manny, 1972). 따라서 유기물의 부식질화가 진행되면 C/N 원자비는 커지는 경향을 보인다. 식물플랑크톤이나 조류와 같이 생분해성이 높은 저분자 물질이 우세한 경우 C/N 원자비는 10/1이하로 낮은 반면, 상대적으로 외부로부터 유입되어 난분해성의 비율이 높은 경우(주로 육상기원) C/N 원자비는 20/1이상으로 커진다(Meyer, 1986). 용존유기물의 C/N 원자비는 해양 표수층에서 약 14/1정도 되고, 육상으로부터 유입되는 유기물의 영향을 받는 하천수계에서 평균 26/1 정도로 보고되고 있다(Hansell and Carlson, 2002). 따라서 C/N 원자비는 유기물기원에 관한 중요한 지표가 된다(Wetzel, 2001).

유기물 분해속도 계수는 수질모델의 중요한 입력 자료인데, 대상 수계나 모델의 특성에 따라 달라질 수 있다. 그러나 많은 수질 모델에서는 유기물의 분해 속도를 유기탄소, 유기질소, 유기인을 구분하지 않고 동일한 분해속도계수를 적용하고 있다. QUAL2E 모델의 경우 4가지 형태의 질소

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

bkim@kangwon.ac.kr

**Table 1.** Land use properties in the watersheds of two study rivers

River	Population (Ca)	Watershed area (km <sup>2</sup> )	Land use (%)				Population density (Ca/km <sup>2</sup> )
			Residential	Forest	Agriculture	Others	
Youngsan river	1,725,070	3,530	6	53	35	5	489
Sumjin river	319,614	4,914	5	73	19	3	65

Source : WAMIS

농도를 고려하고 있으며, 질산화과정에서는 암모니아성질소가 아질산성질소로 산화되는 암모니아 산화속도계수와 아질산성질소가 질산성질소로 산화되는 아질산성 산화속도계수를 입력하여야 한다. 혐기성 조건에서 발생할 수 있는 탈질산화 과정은 WASP 모델에서는 고려하는 반면, QUAL2E 모델에서는 이를 고려하지 않는다. WASP 모델의 경우에는 암모니아성질소, 질산성질소, 유기질소 등 3가지 형태의 질소 농도를 모의하며, 암모니아성질소에서 질산성질소로 전환되는 질산화속도계수가 입력되어야 한다. 이처럼 각 모델의 특성에 따라 입력자료와 조건이 다르다.

최근 들어 수질오염총량제와 연계하여 4대강 수계를 중심으로 유기물 분해속도 관련 연구가 진행되고 있다. 낙동강 분류를 주요 대상으로 하여 유기물관련 분해속도 모델 계수연구가 수행된 바 있다(국립환경과학원, 2003, 2004). 금강 수계를 대상으로 유기탄소 분해속도가 보고되었고(장창원 등, 2008), 영산강과 섬진강 수계에서는 유기인의 분해속도에 관한 연구가 보고된 바 있다(Islam et al., 2008).

수질모델의 반응계수를 결정하는 방법으로서 대개 현장의 측정자료와 모델결과를 비교함으로써 보정하는 방법을

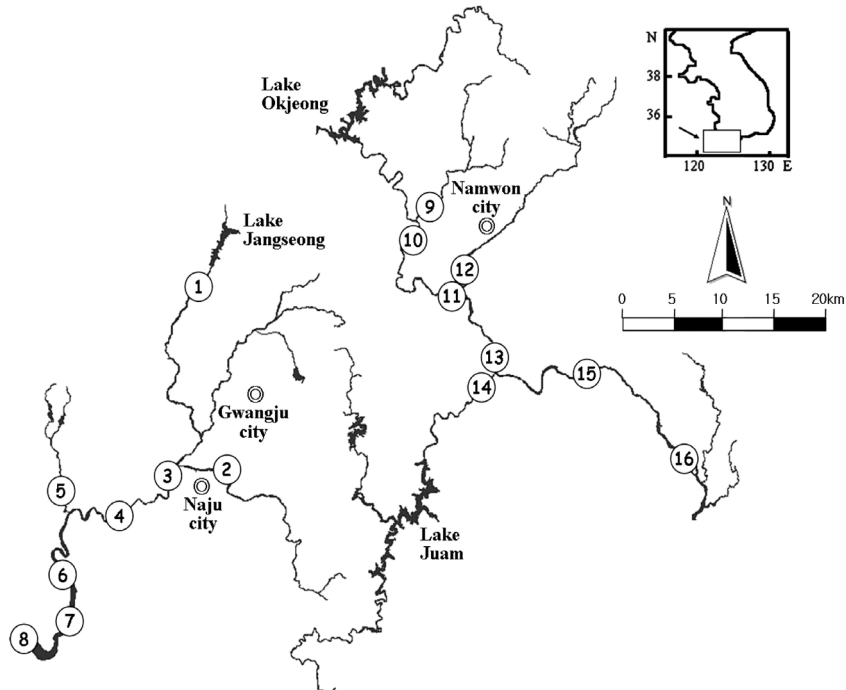
사용한다. 그러나 자연상태에서는 대부분의 생화학적 과정이 정상상태에 가깝다(Wetzel, 2001). 즉, 유기물의 분해속도와 광합성에 의한 유기물 생성속도가 동일하여 유기물의 농도는 늘 일정한 수준을 보이는 것이다. 그 외에도 동물 플랑크톤의 섭식, 입자상 유기물의 침강, 등이 분해와 동시에 일어나고 있으므로 이러한 경우에 유기물의 분해속도계수의 보정에는 불확실성이 커질 수 있다. 따라서 모델계수의 불확실성을 줄이기 위해서는 좀 더 통제된 환경조건하에서 측정을 하는 것이 바람직하다.

본 연구의 목적은 광합성, 침강, 동물의 섭식 과정을 배제한 조건에서 유기질소의 정상별 분해속도를 산정하는데 있으며, 연구결과는 수질모델의 매개변수 선정을 위한 기초자료로 활용가능하며 모의 결과의 불확실성을 줄이는데 기여할 수 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상지역

영산강 수계의 유역면적은 3,530 km<sup>2</sup>이고 하천연장은 143



**Fig. 1.** Map of the sampling sites in the Youngsan river (site no. 1-8) and the Sumjin river (site no. 9-16). Sampling sites are as following; 1 = Hwangryong, 2 = Jiseok, 3 = Naju, 4 = Youngsanpo, 5 = Hampyeong, 6 = Muan, 7 = Lake Youngsan 2, 8 = Lake Youngsan 1, 9 = Osu, 10 = Jeokseong, 11 = Namwon, 12 = Yo, 13 = Gokseong, 14 = Boseong, 15 = Gurye and 16 = Hadong.

km에 이른다. 황룡강, 지석천, 고막원천, 함평천등의 지류가 영산강 분류로 합류되고 그 밖에도 많은 지류가 있다. 영산강의 중류에 위치한 나주지점(3)은 황룡강(1)과 지석천(2) 및 광주시 하수가 유입하는 광주천의 직접적인 영향을 받고 있으며, 나주시의 하수가 유입하는 나주천의 영향도 받고 있다(Fig. 1). 황룡강 지점(1)은 장성댐 방류의 직접적인 영향을 받는 지점으로서 다른 조사지점과 비교하여 유속이 빠른 편이다. 무안지점(6)은 함평천(5)의 영향을 받고 있다.

섬진강 수계의 유역면적은 4,914 km<sup>2</sup>이고 하천연장이 225 km에 이른다. 지류하천인 순창천, 옥과천, 요천, 보성천 등이 분류로 합류하여 광양만으로 유입된다. 섬진강 유역의 면적은 영산강 수계보다 크지만 인구밀도는 약 8배 적고 대부분 산림으로 이루어져 있다(Table 1).

## 2.2. 유기질소 분석

조사는 2006년 6월부터 2007년 2월까지 각 수계별로 실시하였으며, 질소의 계절별 변동을 파악하기 위하여 계절별로 총 4회 채수하였다. 각 지점에서 시료 약 20 L를 polyethylene 병에 채수하였으며, 채수된 시료를 실험실로 옮긴 후 동물플랑크톤의 영향을 배제하기 위하여 플랑크톤 네트(200 μm)를 이용하여 제거하였다. 여과된 시료는 항온암실(20±1°C)에서 보관하며, 20일만에 걸쳐 유기질소 분해실험을 실시하였다. 생분해성 유기물은 대부분 2일 이내에 분해가 일어나므로(Wetzel, 2001) 초기 유기질소 분해 속도는 하루간격으로 3일 동안 채취하였고, 이후 10일간은 2~3일 간격, 그리고 10일 이후에는 5일 간격으로 시료를 채취하여 총질소(TN), 아질산성 질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), 질산성 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 용존 유기질소(DON) 그리고 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)를 측정하였다.

TN은 여과하지 않은 시료를 사용하여 측정하였고 DTN은 GF/F로 여과한 시료를 persulfate digestion법을 사용하여 분해시킨 후 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>를 분석함으로써 측정하였다(APHA et al., 1998). NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>는 시료를 GF/F로 여과한 후 카드뮴환원법을 이용하여 자동분석기(Skalar-100)로 분석하였다.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 여과한 시료를 인도페놀법으로 측정하였다(APHA et al., 1998).

## 2.3. 분해속도계수 산정

수중에 존재하는 유기질소는 시간이 지남에 따라 가수분해되어 무기질소로 전환된다. 일반적으로 유기물의 분해 과정은 유기물의 구성성분과 조건에 따라 달라진다. 본 연구에서는 2가지 서로 다른 분해경로를 모델링하여 분해속도를 계산하였다.

질소의 존재 형태는 TON, PON, DON, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 그리고 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>로 구분하여 분해속도 계수를 산정하였다. 특히 DON과 PON는 생분해성(labile)과 난분해성(recalcitrant)으로 구분하였다. 그러나 난분해성 유기물의 분해 속도계수(kRPON, kRDON)는 단기간 내에 측정이 불가능하며, 농도 변화가 거의 없는 것으로 보고하고 있어(Ogura, 1972; Servais et al., 1987), 이에 대한 분해속도는 무시하였다.

모델 계수는 Runge-Kutta 법을 이용한 numerical integration 방법을 사용하여 최소자승법으로 도출하였다. 그리고 각 수계별, 지점별, 계절별 유기질소농도 및 분해속도의 차이를 비교하기 위하여 t-test, one-way ANOVA test를 하였다(SPSS v8.01).

Model 1은 유기질소를 구분하지 않고 총 유기질소가 무기질소인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 분해된다는 가정으로 모델은 식(1)과 같다.

$$TON \xrightarrow{k_{TON}} NH_4^+, NO_3^- \quad (1)$$

$$\frac{d(TON)}{dt} = -k_{TON}(TON)$$

Model 2는 생분해성 유기질소를 LPON과 LDON으로 나누어서 분해속도 계수를 산정하였다. 유기질소를 PON과 DON으로 나누고 20일 후 남아있는 양을 RPON과 RDON

**Table 2.** Station number and address of the Youngsan river and the Sumjin river

River	Address
Youngsan river	1 Yeongcheon-ri, Jangseong-eup, Jangseong-gun, Jeollanam-do
	2 Suwol-ri, Nampyeong-eup, Naju-si, Jeollanam-do
	3 Samdo-dong, Naju-si, Jeollanam-do
	4 Jinpo-dong, Naju-si, Jeollanam-do
	5 Hagya-ri, Eomda-myeong, Muan-gun, Jeollanam-do
	6 Myeongsan-ri, Mongtan-myeon, Muan-gun, Jeollanam-do
	7 Geumgang-ri, Seoho-myeon, Yeongam-gun, Jeollanam-do
	8 Ogam-dong, Mokpo-si, Jeollanam-do
Sumjin river	9 Seoho-ri, Donggue-myeon, Sunchang-gun, Jeollabuk-do
	10 Gowon-ri, Jeokseong-myeon, Sunchang-gun, Jeollabuk-do
	11 Hado-ri, Geumji-myeon, Namwon-si, Jeollabuk-do
	12 Changsan-ri, Geumji-myeon, Namwon-si, Jeollabuk-do
	13 Amnok-ri, Ogok-myeon, Gokseong-gun, Jeollanam-do
	14 Yubong-ri, Jukgok-myeon, Gokseong-gun, Jeollanam-do
	15 Songjeong-ri, Toji-myeon, Gurye-gun, Jeollanam-do
	16 Eupnae-dong, Hadong-eup, Hadong-gun, Gyeongsangnam-do

으로 간주하고 초기농도 값에서 빼주어 LPON과 LDON으로 계산하였다. LPON이 RDON으로 분해되는 양은 거의 없거나 아주 작은 것으로 가정하고 무시하였다. LPON은 LDON으로 분해되어 최종적으로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 분해되며 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &LPON \xrightarrow{k_{LPON}} LDON \xrightarrow{k_{LDON}} NH_4^+ \xrightarrow{k_{NH_4}} NO_2^- \xrightarrow{k_{NO_2}} NO_3^- \\
 &\frac{d(LPON)}{dt} = -k_{LPON}(LPON) \quad (2) \\
 &\frac{d(LDON)}{dt} = k_{LPON}(LPON) - k_{LDON}(LDON) \\
 &\frac{d(NH_4^+)}{dt} = k_{LDON}(LDON) - k_{NH_4}(NH_4^+) \\
 &\frac{d(NO_2^-)}{dt} = k_{NH_4}(NH_4^+) - k_{NO_2}(NO_2^-) \\
 &\frac{d(NO_3^-)}{dt} = k_{NO_2}(NO_2^-)
 \end{aligned}$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 질소의 분포

영산강과 섬진강 수계의 TN은 각각 1.54~7.24, 1.01~3.11

mgN·L<sup>-1</sup>의 범위로서 영산강에서 질소농도가 높았다. OECD (1982) 기준에 따르면 부영양한 하천으로 분류된다. 그러나 금강 수계의 평균 TN은 3.27~12.21 mgN·L<sup>-1</sup> 범위이며(국립환경과학원, 2006), 낙동강 수계의 TN은 2.3~8.8 mgN·L<sup>-1</sup> 범위로서(국립환경과학원, 2004) 국내의 타 수계와 비교할 때 영산강과 섬진강수계의 질소농도는 상대적으로 낮은 수준이었다.

영산강과 섬진강 수계의 평균 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 1.29(± 1.77) mgN·L<sup>-1</sup>로 온대기후대에 속하는 하천의 평균 농도인 0.20 mgN·L<sup>-1</sup>보다 약 8배 이상 더 높았다(Malcolm and Durham, 1976). 그리고 잉글랜드의 River Dee에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 0.1~1.5 mgN·L<sup>-1</sup>였고(Stutter et al., 2008), 미국 전체 하천에서의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 0.05~0.5 mgN·L<sup>-1</sup>로 우리나라가 높은 값을 나타냈다(McElroy et al., 1976). 또한 일본의 한 산림지역에서는 3년 동안 TN 평균농도가 0.772 mgN·L<sup>-1</sup>였고(Kunimatsu et al., 2006), 교토시의 북쪽에 위치한 Kamo River와 Takano River는 강우시 약 0.5~1.9 mgN·L<sup>-1</sup>로 나타났다(Fujii et al., 2006). 이러한 특성을 보면 국내 하천수계의 질소농도는 외국보다 높다고 볼 수 있다.

영산강 수계에서 TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 그리고 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 지점별 변이는 하류로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 나주지점(3)에서의 TN 농도는 3.52 mgN·L<sup>-1</sup>로 높게 나타났고, 하류의 하구연2 지점(8)에서는 2.48 mgN·L<sup>-1</sup>로 가장 낮은 농도를 나타내었다(Fig. 2). 나주지점(3)은 광주시와 나주시의 생활하수가 유입하는 지점으로 질소농도가 높게 나타났다

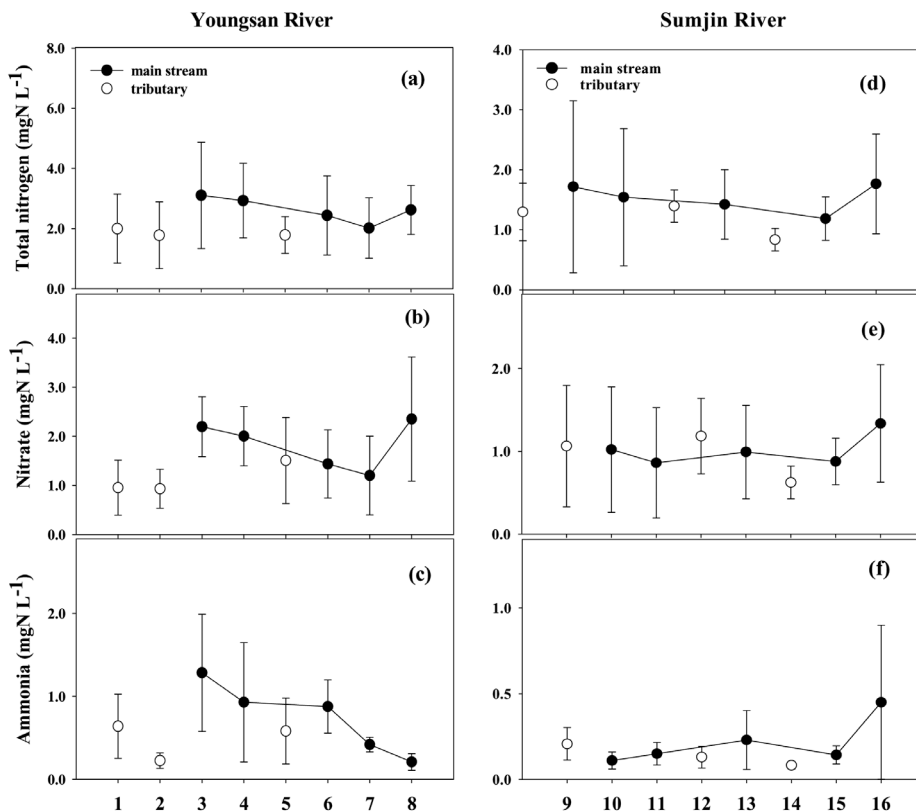


Fig. 2. The longitudinal variation of total nitrogen, nitrate and ammonia concentrations in the Youngsan river and the Sumjin river (points are medians and bars indicate standard deviations).

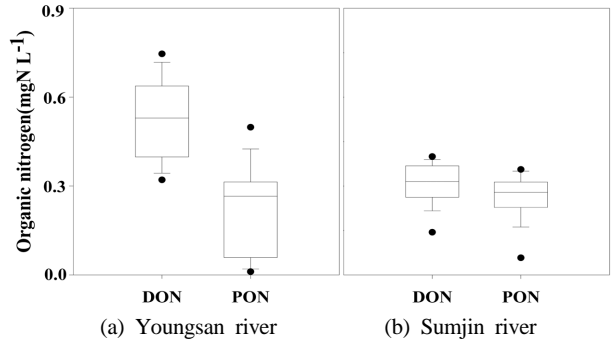
(오강호와 고영구, 2003; 조기안 등, 1999).

반면, 섬진강 수계는 영산강 수계와는 달리 유입되는 오염원이 적어 상대적으로 질소의 농도가 낮게 나타났으며, 지점간의 차이도 크지 않았다(one-way ANOVA,  $p > 0.05$ ). TN의 경우 상류지점에서 하류지점까지  $0.99 \sim 2.18 \text{ mgN} \cdot \text{L}^{-1}$ 를 보였으며,  $\text{NH}_4^+$ 는  $0.11 \sim 0.65 \text{ mgN} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 상·하류간의 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2).  $\text{NH}_4^+$ 의 농도는 영산강수계가 섬진강 수계에 비해 약 4~5배 높은 것으로 나타났는데(Fig. 2), 이는 나주지점(3)의 상류에서 영산강으로 유입하는 광주광역시와 나주시의 도시하수 때문인 것으로 생각된다.

영산강 수계와 섬진강 수계의 유량은 8월에 가장 높은 값을 나타냈고, 질소농도의 계절적 변이는 8월 조사에서 낮고, 6월 조사에서 높게 나타났(one-way ANOVA,  $p < 0.005$ )(Table 3). 특히 도시하수에서 많이 유출되는  $\text{NH}_4^+$ 는 유량이 많았던 8월에 낮은 농도를 나타냈는데, 이는 강우에 의해 희석되었기 때문으로 사료된다.

**3.2. 유기질소와 무기질소의 구성**

하천에서 DIN은 조류들이 이용하기에 가장 좋은 형태로서 영산강과 섬진강 수계의 DIN/TN비율은 평균 66, 73%로 나타났고, 우리나라 북한강 상류의 춘천, 의암 그리고 청평댐에서도 82%정도로서 TN에 대한 DIN의 비율이 높게 나타났(국립환경과학원, 2007). 그러나 미국 동부지역의 하천에 대한 조사에서는 TN의 평균 38%가 무기질소이고 위스콘신주내 호수들이 27~49%(Omernik, 1977)로 우리나라보다 비율이 낮았다.



**Fig. 3.** The comparison of DON and PON in the Youngsan river (a) and the Sumjin river (b), (lines are averages and bars indicate 5%, 95% percentiles).

유기질소 중에서 DON이 차지하는 비율은 영산강 수계가 64%로 대부분 용존 형태로 존재하며, 섬진강 수계에서는 36%로 입자형태가 더 많이 존재하였다(Fig. 3). 국외의 Michigan주에 있는 Wintergreen 호수와 Augusta Creek강에서 DON이 PON보다 약 2~3배 높게 나타났(Wetzel, 2001). 영산강 수계의 DON농도는 섬진강 수계에 비해 약 2~3배 높은 농도를 보인 반면 PON은 비슷한 농도를 나타냈다(Fig. 3). 또한 값은 스위스 Lucerne 호수에서의 PON( $0.07 \sim 0.39 \text{ mgN} \cdot \text{L}^{-1}$ )과 DON( $0.08 \sim 0.18 \text{ mgN} \cdot \text{L}^{-1}$ )보다 높은 농도 범위이다(Kerner and Spitzzy, 2001).

영산강과 섬진강 수계에서의 LPON/PON함량은 평균 68, 61%로 대부분 LPON형태로 존재하였으며, LDON/DON함량은 평균 62, 41%로 영산강 수계에서는 대부분 LDON 형

**Table 3.** The seasonal variation of TN,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  concentration in the Youngsan river and the Sumjin river (unit:  $\text{mgN} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Site	Jun. 14, 2006			Aug. 14, 2006			Dec. 2, 2006			Feb. 3, 2007		
	TN	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	TN	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	TN	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	TN	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$
1	3.38	1.35	0.77	0.57	0.13	0.09	2.03	1.23	0.99	2.01	1.11	0.78
2	3.44	1.52	0.17	1.16	0.78	0.14	1.26	0.87	0.24	1.25	0.58	0.35
3	5.74	2.66	2.33	2.47	2.79	1.09	2.55	1.66	0.87	2.21	1.68	0.85
4	4.78	2.37	2.22	2.11	2.17	0.49	2.37	2.37	0.69	2.45	1.11	0.54
5	2.56	2.73	0.48	1.33	1.02	0.11	1.99	1.53	0.96	1.26	0.75	0.86
6	4.40	2.21	1.34	1.74	1.35	0.68	1.96	1.66	0.79	1.65	0.54	0.78
7	3.52	2.39	0.49	1.4	0.67	0.31	1.69	0.77	0.52	1.54	0.98	0.45
8	3.83	2.49	0.16	2.15	3.94	0.12	2.36	2.11	0.21	2.14	0.87	0.35
Mean	3.96	2.21	0.94	1.62	1.61	0.37	1.95	1.53	0.66	1.81	0.95	0.62
Median	3.68	2.38	0.55	1.57	1.19	0.23	2.00	1.60	0.74	1.83	0.93	0.66
S.D.	0.99	0.51	0.85	0.62	1.27	0.35	0.37	0.56	0.31	0.45	0.37	0.22
9	1.99	2.15	0.15	0.95	0.66	0.11	1.24	0.87	0.32	1.01	0.58	0.25
10	3.86	2.11	0.17	0.87	0.61	0.19	1.03	0.95	0.12	1.11	0.42	0.05
11	3.25	1.86	0.16	0.85	0.48	0.19	0.95	0.57	0.19	1.12	0.54	0.24
12	1.61	1.76	0.07	1.38	1.12	0.11	1.57	1.21	0.22	1.02	0.65	0.12
13	2.18	1.82	0.19	0.95	0.65	0.07	1.57	0.96	0.33	0.99	0.56	0.42
14	0.97	0.89	0.05	0.83	0.56	0.09	0.97	0.63	0.18	0.57	0.42	0.09
15	1.63	1.25	0.17	0.89	0.57	0.08	1.33	0.82	0.2	0.89	0.87	0.12
16	1.24	1.24	0.06	1.17	0.76	0.18	2.96	2.36	0.99	1.69	0.99	0.65
Mean	2.09	1.63	0.12	0.99	0.68	0.10	1.45	1.05	0.30	1.05	0.63	0.24
Median	1.81	1.78	0.13	0.92	0.63	0.10	1.29	0.91	0.21	1.02	0.57	0.18
S.D.	0.99	0.45	0.05	0.19	0.20	0.01	0.66	0.57	0.29	0.31	0.20	0.20

**Table 4.** Percentage of labile and recalcitrant form of PON and DON in the Youngsan river and the Sumjin river

Site	PON		DON	
	LPON (%)	RPON (%)	LDON (%)	RDON (%)
Youngsan river	68	32	61	39
Sumjin river	62	38	41	59

태이지만, 섬진강 수계에서는 RDON 형태가 더 많았다. LPON과 LDON의 함량은 지점간에 유의적인 차이를 나타내지 않았다(one-way ANOVA,  $p>0.05$ )(Table 4).

**3.3. 유기질소 분해속도**

영산강과 섬진강의 TON 분해속도는 각각 0.086, 0.074  $\text{day}^{-1}$ 로 영산강 수계에서 빠른 분해속도를 나타냈다(t-test,  $p<0.05$ )(Table 5). 영산강 수계는 광주광역시와 나주시로부터 도시하수가 유입되기 때문에 수체내 높은 인과 질소를 함유한 유기물로 인해 미생물이 빠르게 성장하여 분해속도가 빠르게 나타난 것으로 보인다(Goldman et al., 1987; Vadstein and Olsen, 1989).

영산강과 섬진강의 평균 LPON의 분해속도는 0.024, 0.008  $\text{day}^{-1}$ 로서 영산강 수계에서 빠른 분해속도를 보였다(t-test,  $p<0.05$ )(Table 6). 또한 LDON 분해속도는 0.137, 0.079  $\text{day}^{-1}$ 로서 영산강 수계에서 섬진강보다 빠른 분해속도를 보였다(t-test,  $p<0.05$ ). 이는 분해하기 쉬운 LDON의 함량이 영산강 수계에서 더 높다는 것을 의미한다.

본 연구의 결과를 낙동강 수계에서 측정된 LPON

(0.027~0.059  $\text{day}^{-1}$ ) 분해속도와 LDON(0.046~0.118  $\text{day}^{-1}$ ) 분해속도를 비교했을 때(국립환경과학원, 2004; 권헌각 등, 2005), 영산강 수계와 유사한 분해속도를 나타냈으나, 섬진강은 느린 분해속도를 나타냈다. 대표적인 호수수질모델인 CE-QUAL-W2에서는 LPOM 분해속도의 기본값을 0.08  $\text{day}^{-1}$ , LDOM 분해속도의 기본값을 0.1  $\text{day}^{-1}$ 로 제시하고 있다. 이를 본 결과와 비교하면 LPOM은 약간 낮은 반면 LDOM은 유사한 값을 보인다.

영산강 수계의  $\text{NH}_4^+$ 와  $\text{NO}_2^-$ 의 산화속도는 0.20~0.75, 0.57~1.60  $\text{day}^{-1}$ 로서 섬진강 수계에 비해 빠르게 나타났다고(t-test,  $p<0.05$ ). 그러나 각각의 수계내에서는 조사 지점별로는 유의적인 차이를 나타내지 않았다(one-way ANOVA,  $p>0.05$ ).  $\text{NO}_2^-$  산화속도는  $\text{NH}_4^+$  산화속도에 비해 약 2~3 배 빠른 것으로 나타났다(Table 7).

대표적인 하천모델인 QUAL2E의  $\text{NH}_4^+$ 와  $\text{NO}_2^-$  산화속도는 각각 0~10  $\text{day}^{-1}$ 범위를 제시하고 있으며, 이는 본 연구결과와 비교하여 매우 넓은 범위이다. 낙동강 수계를 대상으로 한  $\text{NH}_4^+$ 의 산화속도는 0.104  $\text{day}^{-1}$ 로서(국립환경과학원, 2004), 이는 본 연구결과와의 값과 비교해서 매우 낮았다.

**4. 결론**

영산강과 섬진강 수계 TN농도를 비교한 결과 영산강은 1.54~7.24  $\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$  범위였고, 섬진강은 1.01~3.11  $\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ 로서 영산강 수계에서 높게 나타났다. 영산강과 섬진강 수계의 평균  $\text{NO}_3^-$ 는 1.29( $\pm 1.77$ )  $\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ 로서 외국의 하천들에 비하여 상당히 높은 수준이었다. 영산강 수계에서 질소

**Table 5.** The distribution of TON decomposition rate ( $k_{TON}$ ,  $\text{day}^{-1}$ ) in the Youngsan river and the Sumjin river

Site	Jun. 14, 2006	Aug. 14, 2006	Dec. 2, 2006	Feb. 3, 2007
1	-	0.024	0.022	0.043
2	-	0.032	0.041	0.194
3	0.130	0.150	0.099	0.130
4	0.113	0.123	0.086	0.113
5	0.025	0.027	0.051	0.025
6	0.157	0.136	0.121	0.157
7	-	0.026	0.012	0.110
8	0.037	0.037	0.054	0.113
Mean	0.092	0.069	0.061	0.111
Median	0.103	0.037	0.054	0.113
S.D.	0.058	0.056	0.038	0.055
9	0.058	0.057	0.060	0.058
10	0.073	0.063	0.049	0.073
11	0.048	0.052	0.032	0.043
12	0.096	0.082	0.061	0.157
13	0.104	0.099	0.076	0.100
14	0.065	0.066	0.059	0.065
15	0.094	0.089	0.086	0.183
16	0.076	0.074	0.088	0.076
Mean	0.077	0.073	0.064	0.094
Median	0.076	0.073	0.061	0.076
S.D.	0.020	0.016	0.019	0.050

**Table 6.** The distribution of LPON decomposition rate ( $k_{LPON}$ , day<sup>-1</sup>) and LDON decomposition rate ( $k_{LDON}$ , day<sup>-1</sup>) in the Youngsan river and the Sumjin river

Site	Jun. 14, 2006		Aug. 14, 2006		Dec. 2, 2006		Feb. 3, 2007	
	$k_{LPON}$	$k_{LDON}$	$k_{LPON}$	$k_{LDON}$	$k_{LPON}$	$k_{LDON}$	$k_{LPON}$	$k_{LDON}$
1	0.034	0.123	0.024	0.131	0.017	0.128	0.027	0.125
2	0.029	0.125	0.017	0.119	0.011	0.112	0.026	0.131
3	0.014	0.111	0.032	0.127	0.031	0.121	0.029	0.139
4	0.021	0.137	0.028	-	0.035	0.151	0.011	0.113
5	0.030	0.122	0.030	0.141	0.013	0.115	0.017	0.136
6	0.009	0.110	0.020	0.119	0.033	0.153	0.035	0.143
7	0.015	0.113	0.025	-	0.030	0.132	0.045	0.169
8	0.021	-	0.018	0.111	0.027	0.139	0.039	0.153
Mean	0.022	0.120	0.024	0.125	0.025	0.131	0.029	0.139
Median	0.021	0.121	0.024	0.125	0.027	0.131	0.029	0.139
S.D.	0.009	0.010	0.006	0.011	0.010	0.015	0.011	0.017
9	0.009	0.072	0.005	0.074	0.010	0.068	0.009	0.075
10	0.009	0.068	0.009	0.073	0.012	-	0.011	0.078
11	0.011	0.081	0.010	0.078	0.008	0.083	0.013	0.083
12	0.009	0.083	0.008	0.085	0.010	0.071	0.008	0.078
13	0.008	0.088	0.014	0.093	0.007	0.081	0.015	0.083
14	0.010	0.071	0.007	0.062	0.009	0.089	0.008	0.076
15	0.014	0.063	0.011	0.062	0.005	0.074	0.011	0.077
16	0.019	0.091	0.008	0.089	0.011	0.089	0.012	0.081
Mean	0.011	0.077	0.009	0.077	0.009	0.079	0.011	0.079
Median	0.010	0.077	0.009	0.077	0.009	0.080	0.011	0.078
S.D.	0.004	0.010	0.003	0.012	0.002	0.008	0.002	0.003

**Table 7.** The distribution of Ammonia decomposition rate ( $k_{NH3}$ , day<sup>-1</sup>) and Nitrite decomposition rate ( $k_{NO2}$ , day<sup>-1</sup>) in the Youngsan river and the Sumjin river

Site	Jun. 14, 2006		Aug. 14, 2006		Dec. 2, 2006		Feb. 3, 2007	
	$k_{NH3}$	$k_{NO2}$	$k_{NH3}$	$k_{NO2}$	$k_{NH3}$	$k_{NO2}$	$k_{NH3}$	$k_{NO2}$
1	0.60	0.50	0.52	0.90	0.72	0.89	0.24	0.75
2	0.75	0.90	0.74	0.98	0.69	1.25	0.56	0.98
3	0.35	1.15	0.36	1.16	0.35	1.23	0.25	1.24
4	0.20	0.70	0.23	0.90	0.32	1.01	0.29	0.99
5	0.70	0.60	0.69	0.69	0.75	0.99	0.35	0.85
6	0.30	1.60	0.32	1.80	0.28	1.92	0.24	1.24
7	0.35	0.55	0.33	0.57	0.43	0.58	0.21	0.54
8	1.10	1.50	1.00	1.60	1.11	1.58	0.99	1.25
Mean	0.54	0.94	0.52	1.08	0.58	1.18	0.39	0.98
Median	0.54	0.90	0.52	0.98	0.58	1.18	0.29	0.98
S.D.	0.30	0.43	0.27	0.43	0.29	0.42	0.27	0.26
9	0.40	0.92	0.41	0.92	0.53	1.25	0.35	0.85
10	0.28	0.50	0.27	0.35	0.25	0.53	0.21	0.35
11	0.12	0.63	0.13	0.85	0.31	0.79	0.11	0.65
12	0.32	0.60	0.32	0.36	0.23	0.35	0.21	0.24
13	0.15	0.57	0.28	0.65	0.25	0.59	0.12	0.56
14	0.70	0.87	0.42	1.20	0.81	1.53	0.54	0.87
15	0.16	0.35	0.17	0.39	0.20	0.38	0.15	0.58
16	0.25	1.02	0.26	1.06	0.52	1.23	0.25	0.87
Mean	0.25	0.60	0.28	0.72	0.39	0.83	0.24	0.62
Median	0.25	0.60	0.28	0.72	0.31	0.79	0.21	0.62
S.D.	0.22	0.29	0.10	0.33	0.21	0.45	0.14	0.24

농도는 상류의 광주시와 나주시 생활하수가 유입하는 지점에서 높게 나타났으며, 하류로 갈수록 감소하였다. 섬진강 수계는 유입되는 오염원이 적어 상대적으로 질소의 농도가 낮았으며, 지점간의 차이도 크지 않았다.

영산강과 섬진강의 질소의 구성을 보면 영산강에서 평균 DIN/TN비율은 66%이고, 섬진강에서 약 73%로 나타났다. 유기질소 중에서 DON이 차지하는 비율은 영산강 수계가 64%로 대부분 용존 형태로 존재하며, 섬진강 수계에서는 36%로 입자형태가 더 많이 존재하였다. 영산강은 도시하수에 의한 영향으로 이분해성 유기질소가 많은 반면, 섬진강은 삼림으로 이루어져 있는 지역으로 난분해성 유기물의 비율이 높았다. 이러한 결과는 유기질소 분해속도에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

영산강 수계의 TON 분해속도는  $0.086 \text{ day}^{-1}$ 로서 섬진강 수계의  $0.074 \text{ day}^{-1}$ 보다 높았으며, 이분해성 유기질소(LPON, LDON)도 영산강 수계에서 높은 분해속도를 보였다. 낙동강수계에서 측정된 LPON과 LDON 분해속도와 비교했을 때 영산강 수계는 비슷한 분해속도를 나타냈으나, 섬진강은 낮은 분해속도를 나타냈다.

호수 수질모델인 CE-QUAL-W2 모델에서 제시하는 기본 값과 비교할 때 LPOM의 분해속도는 약간 낮은 반면 LDOM은 유사한 값을 보였다. 본 연구의 결과로 볼 때 수질모델 보정과정에서 유기질소분해속도계수는 수계의 특성을 고려하여 다르게 적용해야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 국립환경과학원(2003). 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 연구 보고서 I, 환경부.
- 국립환경과학원(2004). 낙동강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 연구 보고서 II, 환경부.
- 국립환경과학원(2006). 금강수계 수중생태계 수질모델인자 조사 연구 보고서, 환경부.
- 국립환경과학원(2007). 한강수계(북한강 수계 및 한강분류) 수중생태계 수질모델인자 조사 연구 보고서, 환경부.
- 권현각, 윤영산, 유재정, 이철구, 김문수, 이상협, 신찬기 (2006). 수질오염 및 모델링 ; 낙동강 본류에 대한 유기질소 분해속도 조사. *추계학술연구발표회 논문집*, 대한환경공학회, pp. 1090-1095.
- 오강호, 고영구(2003). 광주광역시 하천수의 수질 및 오염. *한국환경과학회지*, **12**, pp. 287-297.
- 장창원, 김재구, 김동환, 김범철, 박주현(2008). 금강수계에서 수중 유기탄소의 분포와 분해속도. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(2), pp. 174-179.
- 조기안, 안병권, 홍순강, 정동욱(1999). 영산강하류의 계절 변화에 따른 수질특성과 유기인산염의 분해율에 관한 연구 I. *한국환경과학회지*, **8**, pp. 691-697.
- APHA, AWWA and WEF (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater* 20th ed. APHA, Washington DC.
- Fujii, S., Moriya, M., Songprasert, P., and Ihara, H. (2006). Estimation of annual pollutant loadings in two small catchments and examination of their differences caused by regional properties. *Water Science and Technology*, **53**(2), pp. 33-44.
- Goldman, J. C., Caron, D. A., and Dennett, M. R. (1987). Regulation of gross growth efficiency and ammonium regeneration in bacteria by substrate C:N ratio. *Limnology and Oceanography*, **32**, pp. 1239-1252.
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T., and Lim, H. C. (1999). *Biological Wastewater Treatment*, Marcel Dekker, Inc., NY.
- Hansell, D. A. and Carlson, C. A. (2002). *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*, San Diego, CA.
- Haslam, P. L. (1998). BAL standardization and measurement of a cellular components. *Europe Reserch Review*, **8**, pp. 1066-1071.
- Horne, A. J. and Goldman, C. R. (2001). *Limnology*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, NY.
- Islam, J. M., Kim, B., Han, J., Kim, J., Jung, Y., Shin, M., and Park, J. (2008). Organic Phosphorus Decomposition rates in the Youngsan River and the Sumjin River, Korea. *Journal of Korean Society on Water Quality*, **24**(3), pp. 354-364.
- Kerner, M. and Spitzzy, A. (2001). Nitrate regeneration coupled to degradation of different size fractions of DON by the picoplankton in the Elbe Estuary. *Microbial Ecology*, **41**, pp. 69-81.
- Kunimatsu, T., Otomori, T., Osaka, K., Hamabata, E., and Komai, Y. (2006). Evaluation of nutrient loads from a mountain forest including storm runoff loads. *Water Science and Technology*, **53**(2), pp. 79-91.
- Larson, R. A. and Hufnal, J. M. (1980). Oxidative polymerization of dissolved phenols by soluble and insoluble inorganic species. *Limnology and Oceanography*, **25**, pp. 505-512.
- Malcolm, R. L. and Durhum, W. H. (1976). Organic Carbon and Nitrogen Concentrations and Annual Organic Carbon Load of Six Selected Rivers of the United States. *USGS Water Supply Paper*, 1817-F.
- McElroy, M. B., Yung, Y. L., and Nier, A. O. (1976). Isotopic Composition of Nitrogen-Implications for Past History of Mars Atmosphere. *Science*, **194**(4260), pp. 70-72.
- Meyer, J. L. (1986). Dissolved organic carbon dynamics in two subtropical blackwater rivers. *Arch. Hydrobiol.*, **108**, pp. 119-134.
- OECD (1982). *Eutrophication of water: Monitoring, Assessment and Control. Organization for Economic Co-operation and Development*, Paris, France. pp. 154.
- Ogura, N. (1972). Rate and extent of decomposition of dissolved organic matter in surface seawater. *Marine Biology*, **13**, pp. 89-93.
- Omernik, J. M. (1977). *Non-point source-stream nutrient level relationships: A nationwide study*. USEPA. 600/3-77-105 Corvallis, OR.
- Servais, P., Billem, G., and Hascoet, M. C. (1987). Determination of the Biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters. *Water Research*, **21**(4), pp. 519-536.
- Stutter, M. I., Langan, S. J., and Cooper, R. J. (2008). Spatial and temporal dynamics of stream water particulate and dissolved N, P and C forms along a catchment transect, NE Scotland. *Journal of Hydrology*, **350**, pp. 187-202.



- Vadstein, O. and Olsen, Y. (1989). Chemical composition and phosphate uptake kinetics of limnetic bacterial communities cultures in chemostats under phosphorus limitation. *Limnology and Oceanography*, **34**, pp. 939-946.
- Wetzel, R. G. (1995). Death, detritus, and energy flow in aquatic ecosystems. *Freshwater Biology*, **33**, pp. 83-89.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd Edition, Academic Press, San Diego, California 92101-4495, USA.
- Wetzel, R. G. and Manny, B. A. (1972). Decomposition of dissolved organic carbon and nitrogen compounds from leaves in an experimental hard-water stream. *Limnology and Oceanography*, **17**, pp. 927-931.