

## 팔당호의 질소거동과 수지

이장호<sup>†</sup> · 박혜경 · 이 규 · 김은미\*

국립환경과학원 한강물환경연구소

\*한강유역환경청 측정분석과

## The Nitrogen Behavior and Budget in Lake Paldang

Jangho Lee<sup>†</sup> · Hae-Kyung Park · Kyoo Lee · Eunmi Kim\*

Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

\*Han River Basin Environmental Office

(Received 2 September 2009, Revised 10 November 2009, Accepted 24 November 2009)

### Abstract

We studied the nitrogen behavior and budget of Lake Paldang from March to December 2008. The particulate nitrogen (PN) concentrations ranged from 7 to 13% of the total nitrogen concentration (TN) in the stream inflows, the downstream outflow, and the lake water. The nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub>-N) concentration ranged from 67 to 78% of the TN. In the three rivers of Lake Paldang, Gyeongan River (In3 site) had the highest average of the TN, 5.037 mgN/L, but North Han River (In2 site) had the lowest average TN, 1.683 mgN/L. South Han River (In1 site) had the average TN of 2.399 mgN/L. In the dam discharge, TN showed the average 2.063 mgN/L. In the lake water, L4 site (Gyeongan River area) had the highest average TN, 3.781 mgN/L, but L3 site (North Han River) had the lowest average TN, 1.587 mgN/L. Total input of nitrogen loads to Lake Paldang was about 30,875 ton/year in 2008. Inflow rivers contributed 30,643 ton/year (South Han River: 18,111 ton/year (59%), North Han River: 11,333 ton/year (37%), and Gyeongan River: 1,199 ton/year (4%)). The atmospheric deposition had 135 ton/year, the nitrogen release from the bottom sediments had 88 ton/year, and macrophytes had 9 ton/year. Total output of nitrogen loads from Lake Paldang was about 31,256 ton/year. The downstream from dam contributed 29,877 ton/year, and the sediment deposition was 1,379 ton/year.

**keywords** : Lake Paldang, Nitrogen behavior, Nitrogen budget, Nitrogen loads

## 1. 서론

수도권 상수원인 팔당호는 남한강, 북한강, 경안천의 합류수역에 댐을 건설하여 만들어진 인공호다. 그리고 평균 수심 6.5 m로 알고, 연 평균 체류시간은 5.3일로 짧아 유역의 강우와 오염물질 부하에 수질이 직접적인 영향을 받는 하천형 호수다(공동수와 정동일, 1999). 팔당호는 현재 질소나 인과 같은 영양염류의 농도가 부영양 기준을 초과하는 고농도를 보이고 있다(한강물환경연구소, 2006, 2009). 팔당호의 TN/TP 비는 2006년 평균 24이며(한강물환경연구소, 2006), 40 이상의 높은 비를 보이는 경우도 있어(박혜경 등, 2004, 2008) 인에 비해 질소농도가 매우 높다. 이런 현상은 팔당호뿐만 아니라 우리나라의 인공댐호에서 일반적으로 나타나고 있으며 이에 따라 인은 우리나라 호수 수질의 주 관리대상인 식물플랑크톤 증식의 제한인자로 여기지고 있고, 결과적으로 수중의 인 농도 저감을 위한 많은 연구와 노력이 있어왔으나(김범철과 김윤희, 2004; 김범철 등,

2007; 김석구 등, 2006; 허우명 등, 2004) 질소에 대한 연구는 상대적으로 적었다.

질소는 생물체의 단백질과 핵산 등을 구성하는 주요 물질이지만(Horne and Goldman, 1994), 수체에서의 높은 질소농도는 수중 식물플랑크톤나 부착조류의 증식을 촉진하여 부영양화를 일으키고, 상수원수의 경우에는 건강위해성을 유발하고, 농업용수의 경우는 작물의 웃자람을 유발하는 등 용수의 질을 떨어뜨리고 수생생물의 서식에 영향을 줄 수 있다(엄미정 등, 2008; Trolle et al., 2008). 따라서 팔당호 수질관리를 위해서는 인과 더불어 질소의 제어가 중요하며 질소를 제어하기 위해서는 질소의 존재형태별, 시기별, 주요지점별, 수심별 농도를 포함하는 질소거동을 파악하고, 호수로의 유입가능한 주요 경로와 호수 밖으로 유출가능한 주요 경로 및 각 경로별 기여 정도를 파악하는 질소수지 산정 연구가 필요하다.

2004년에 팔당호에서 수행된 질소순환과 거동에 관한 연구 결과에 따르면(한강물환경연구소, 2004), 하천에 의한 유입과 댐에 의한 방류만으로 간단히 추정된 질소 수지에서 유입하천에 의해 연간 54,013 ton의 질소가 팔당호로 유입되었고, 댐방류에 의해 44,563 ton의 질소가 호외로 유

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
ficedula01@korea.kr

출되었다. 하천에 의한 유입과 댐 방류에 의한 유출 경로 외에 추가 경로를 포함한 연구사례들이 있는데, 호수면적 (15 ha)이 작고, 빈영양호에 속하는 Mirror 호수(미국, 뉴햄프셔)의 질소수지 결과를 보면, 유입요소로서 강우에 의한 유입이 총 유입부하량의 약 47%, 유출요소로서 침강(sedimentation)에 의한 유출이 총 유출부하량의 약 48%로 높은 비율을 나타냈고, Mendota 호수(미국, 위스콘신)의 경우, 강우에 의해 21.6%가 유입되었고, outflow와 탈질화 등을 제외한 침강 등의 경로에 의해 약 58.6%가 유출되었다(Wetzel, 2001). 우리나라의 경우, 체류시간이 긴 호수형 호수인 충주호와 소양호를 대상으로 한 연구에서는 강우에 의한 유입 기여는 약 0.39%와 0.35%로 낮았고, 침강에 의한 유출은 약 7%와 45% 비율로 각각 기여하였다(한강물환경연구소, 2007a). 이처럼 각 호수의 유역현황과 수리수문학적 특성에 따라 질소수지의 유입 및 유출요소의 기여율이 다양하게 나타난다. 따라서 수질관리를 위한 질소수지 산정은 다양한 유입경로와 유출경로를 포함하여 그 기여율을 파악하는 것이 중요하다. 이에 본 연구의 질소수지 산정에서는 유입하천, 대기강하물, 용출, 수생식물 고사체에 의한 유입요소와 댐방류 및 침강에 의한 유출요소를 고려하여 질소수지를 산정하였다. 질소거동에 있어서도 결빙기(1월과 2월)를 제외한 전 기간 동안 매일 조사를 실시하여 시기별 질소농도 변화를 연속적으로 파악하고자 하였다. 또한 이러한 연구결과가 팔당호 질소 오염원 관리 측면에서 가지는 의의를 살펴보았다.

## 2. 연구방법

질소거동은 유입·방류수 및 호 내의 존재형태별 농도, 시기별, 수심별 농도 변화로 나누어 조사하였고, 질소수지는 먼저 물수지를 산정한 후 Input과 Output 요소별로 부하량을 산정하여 구하였다.

### 2.1. 조사지점 및 조사기간

조사지역인 팔당호의 경계 구분은 다음과 같다(Fig. 1). 남한강은 양평군 양덕리 양덕나루 부근을 경계로 하였고, 북한강은 청평댐, 경안천은 서하교 부근을 경계로 하였다. 유입수(In) 조사는 남한강(이포대교, In1), 북한강(청평대교, In2), 경안천(서하교, In3)에서 실시하였다. 호 내 수역별 조사는 대표지점 4개를 선정하여 실시하였다. 3개 유입하천이 만나는 합류수역 지점(댐앞 부근, L1), 남한강 수역 지점(아신리 부근, L2), 북한강 수역 지점(삼봉리 부근, L3), 경안천 수역 지점(광동교 부근, L4)을 선정하였다. 그리고 댐 방류수(O)도 포함하여 조사하였다. 조사는 2008년 3월부터 12월까지 실시하였다. 호 내 수역별 지점은 월 1회씩 조사하였고, 유입수와 방류수는 격주로 조사하였다. 호 내 조사는 수심 5 m 이내 지점은 표층과 하층을 조사하였고, 5 m 이상 지점은 상, 중, 하층을 조사하였으며(댐앞 지점의 경우 0, 2, 5, 10, 20 m), 유입하천과 댐 방류수는 표층수를 조사하였다.

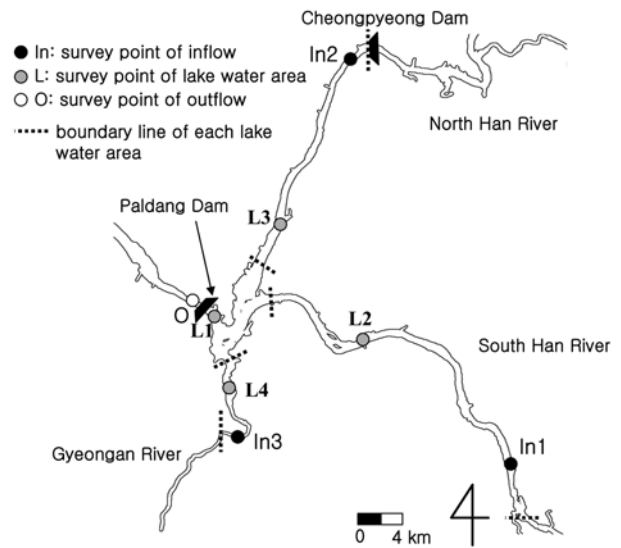


Fig. 1. Study area and the locations of survey sites.

### 2.2. 조사방법

조사항목으로 총질소(TN), 용존총질소(DTN), 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), 아질산성 질소( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), 암모니아성 질소( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), 용존유기질소(DON), 입자성 질소(PN)를 선정하였다. DTN(카드뮴구리환원법)은 AACS-V 수질자동분석기(BL Tec)로 분석하였고,  $\text{NO}_3\text{-N}$ (카드뮴구리환원법),  $\text{NO}_2\text{-N}$ (흡광광도법(Diazotiaztion법)),  $\text{NH}_4\text{-N}$ (Salicylate법)은 AQ2 자동분석기(BL Tec)로 분석하였다. DON 농도는 DTN에서  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$  농도를 뺀 값으로 구하였다. 호수의 PN은 대부분 PON이 차지하기 때문에 본 연구에서는 GF/F 필터(지름 25 mm)로 여과한 고형물질을 건조 후 CHN analyzer로 분석한 PON 농도를 PN 농도로 간주하였다. 그리고 TN은 DTN 농도와 PN 농도의 합으로 구하였다. 식물플랑크톤 기원의 질소농도는 플랑크톤 네트로 농축하여 채취한 시료를 동결건조하고 CHN분석기로 분석한 후 건조중량당 C/N비를 계산한 후 농도로 환산하였다. 동물플랑크톤 기원 질소농도는 biomass( $\mu\text{gC/L}$ )와 C/N비를 구한 후 계산하였다. 침강량 조사는 매월 호 내 조사지점의 저층에 침강병을 설치하여 1주간 방치 후 회수하여 침강물을 분석하였다. 퇴적물의 용출량 조사는 계절별로 실시하였고, 호 내 조사지점에서 계절별로 채취한 퇴적물을 아크릴 반응조에 담아 실험실에서 현장과 동일한 조건(심층수 사용, 현장 수온 및 용존산소농도 유지)에서 퇴적물로부터 용출되는 양을 측정하였다(이규 등, 2009). 물수지에서 수위, 유입량, 방류량 등은 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)과 한강수력발전처(hangang.khnp.co.kr) 웹자료를 이용하였다. 각 하천별 유입량으로 북한강은 청평댐 방류량을 유입량으로 간주하였고, 경안천은 팔당댐 총유입량의 2%를 할당하였다(한강물환경연구소, 2007b). 남한강은 팔당댐 총유입량에서 북한강 유입량과 경안천 유입량을 뺀 나머지 유입량으로 산정하였다. 방류수는 팔당댐 방류량으로 산정하였다. 이들 자료를 가지고 일일 유량자료를 구축하여 질소부하량 산정에 이용하였다. 강우량은 기상청 양평관측소의 자료를 참고하였다.

질소부하량은 물수지에서 산정한 수역별 저수량과 수역별 면적을 고려하여 일단위로 산정하였다. 수역별 면적은 Arcview 프로그램(ESRI, 1999)을 사용하여 1:5000 수치지형도의 하천 layer에서 구분하여 구하였다. 침강량은 수위-수표면적 공식을 이용하여 각 수역별로 침강병 설치 수심의 수표면적을 고려하여 산정하였다. 용출량도 수역별 저층면적을 고려하여 산정하였다. 대기강하 질소량은 팔당호 내에서 측정된 자료가 없기 때문에 가장 가까운 지점인 이천지점에서 측정된 자료를 활용하였다(국립환경과학원, 2008). 퇴적물로부터 양분을 주로 흡수하는 수생식물(정수/부엽/침수)의 고사체 분해에 의한 질소 유입은 한강물환경연구소(2009) 조사결과를 참고하였다. 결빙기인 1월과 2월의 질소부하량은 해빙된 후 3월 첫 조사의 농도 값을 이용하여 1월과 2월의 유량값을 고려하여 산정하였다. 질소 수치식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\Delta N = (I_{\text{known}} - O_{\text{known}}) + (I_{\text{unknown}} - O_{\text{unknown}}) \quad (1)$$

$\Delta N$  : 호 내에서의 증감(12/31일의 호 내 질소량 - 1/1일의 호 내 질소량)

$I_{\text{known}}$  : 유입하천 + 대기강하물 + 용출 + 수생식물 고사체

$I_{\text{unknown}}$  : 기타 경로(질소고정, 재부유 등)에 의한 유입

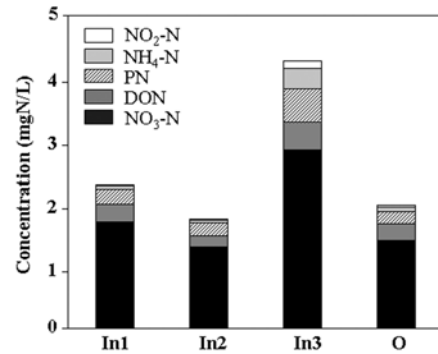
$O_{\text{known}}$  : 댐방류 + 침강

$O_{\text{unknown}}$  : 기타 경로(탈질 등)에 의한 유출

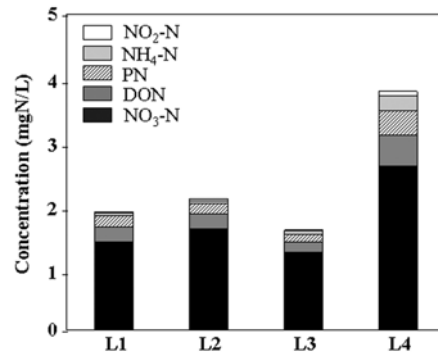
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유입·방류수 및 호 내의 질소 존재형태별 농도

팔당호 유입하천 중 경안천 서하교 지점(In3)에서 TN의 조사기간 평균 농도는 5.037 mgN/L로 가장 높았고, 남한강 이포대교 지점(In1)은 2.399 mgN/L, 북한강 청평대교 지점(In2)은 1.683 mgN/L였다(Fig. 2(a)). 호 내 수역도 유입하천의 영향을 그대로 받아 경안천 수역(L4)이 3.781 mgN/L로 가장 높았고, 남한강 수역(L2)은 2.077 mgN/L, 북한강 수역(L3)은 1.587 mgN/L를 나타냈다(Fig. 2(b)). 이들 세 수역이 합쳐지는 댐 앞 합류수역(L1)은 1.876 mgN/L를 나타냈고 최종적으로 댐 방류수(O)는 2.063 mgN/L의 TN 농도를 나타냈다. 경안천 유역(467 km<sup>2</sup>)은 3개 유입 하천 중 유역 면적이 가장 작고, 유입유량 또한 팔당호 전체 유입유량의 약 2%만을 차지하는 반면, 유역면적당 인구수(555 명/km<sup>2</sup>)와 주거지 등의 대지면적 비율(3.1%)은 높아 그만큼 오염원이 경안천 수체에 미치는 영향이 크다고 볼 수 있다(Table 1). 따라서 3개 유입하천 중 가장 높은 질소농



(a) Inflows and outflow



(b) Lake water

Fig. 2. The average concentration of nitrogen forms in inflows, outflow, and lake water (2008).

도를 보인다고 판단된다.

질소 존재형태별 농도 비율을 보면, 유입·방류수의 NO<sub>3</sub>-N은 TN의 67~73%를 차지하였고, DON은 10~14%를 차지하였다. PN은 10~13%, NH<sub>4</sub>-N은 3~8%, NO<sub>2</sub>-N은 1~3%를 차지하였다. 호 내 수역에서도 NO<sub>3</sub>-N은 TN의 69~78%를 차지하였고, DON은 11~13%, PN은 7~10%, NH<sub>4</sub>-N은 2~6%, NO<sub>2</sub>-N은 1~2% 범위를 차지하였다. 수체에서 질소가 NO<sub>3</sub>-N 형태로 가장 많이 존재하는 이유는 NO<sub>3</sub>-N의 경우, 수용성으로 물에 잘 녹아 토양에서 용탈이 잘 일어나고, 수체 내에서 활발한 질산화 작용(호기성 조건)에 의해 쉽게 생성될 수 있기 때문이다(Horne and Goldman, 1994). 그리고 대기강하물에 의한 유입 형태는 많은 부분 NO<sub>3</sub>-N 형태로 유입되는데 팔당호와 가장 가까운 산성강하물 측정 지점인 이천지점의 경우, 습성강하물 중 NO<sub>3</sub>-N은 2008년도 한 해 동안 1.91 g/m<sup>2</sup>/yr, NH<sub>4</sub>-N은 1.20 g/m<sup>2</sup>/yr이 대기에서 유입되었고, 건성강하물의 월평균농도로 보면 NO<sub>3</sub>-N은 5.14 μg/m<sup>2</sup>, NH<sub>4</sub>-N은 2.44 μg/m<sup>2</sup>으로 NO<sub>3</sub>-N가 NH<sub>4</sub>-N보다 1.5배 이상 더 많이 유입됨을 알 수 있다(국립환경과학원, 2008).

Table 1. Watershed area, inflow, population, and land use in three inflow rivers of Lake Paldang

River	Basin area (km <sup>2</sup> )	Inflow (CMS)	Population (1000 persons)	Unit population (person/km <sup>2</sup> )	Agricultural area (%)	Forest area (%)	Building area (%)
South Han River	11,796	237.4 (52.9%)	1,386	118	14.7	75.5	1.2
North Han River	6,418	202.6 (45.1%)	470	73	8.4	83.5	0.7
Gyeongan River	467	9.0 (2%)	259	555	16.1	65.9	3.1

Reference : HRERC, 2009.

3.2. 질소 존재형태별 농도의 계절변화

호 내의 NO<sub>3</sub>-N은 3월에 1.256~4.031 mgN/L의 농도를 보였다가 이후 6월까지 농도가 낮아졌다. 7월과 8월 들어 농도가 증가했다가 9월 들어 감소한 후 12월에 1.436~5.936 mgN/L범위까지 증가하였다(Fig. 3(a)). 이러한 경향은 경안천 수역 지점(L4)에서 더욱 두드러졌다. 일반적으로 호 내의 질소 공급은 주로 유입하천을 통해 이루어지는데(Wetzel, 2001), 팔당호 유입하천의 NO<sub>3</sub>-N 농도 또한 호 내와 비슷한 변동 패턴을 보였다(Fig. 3(d)). 특히, 경안천(In3)은 6월~8월의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 증가하였는데, 이는 여름철 강우에 의해 유역의 오염원으로부터 질소가 다량 유입된 것과 관련이 있는 것으로 판단된다(Fig. 4).

하지만 여름철 경안천 수역(L4)과 남한강 수역(L2)의 NO<sub>3</sub>-N 농도는 각각의 유입하천 농도와 비교했을 때 6월에 감소폭이 컸고, 7월과 8월로 갈수록 감소폭이 줄었다(Table 2). 일반적으로 호수의 NO<sub>3</sub>-N은 겨울과 초봄에 높은 농도를 보이다가 늦봄과 여름에 식물플랑크톤의 성장에 따른 NO<sub>3</sub>-N의 흡수가 증가하면서 농도가 낮아지는 것으로 알려져 있다(Horne and Goldman, 1994). 팔당호에서 월별 식물

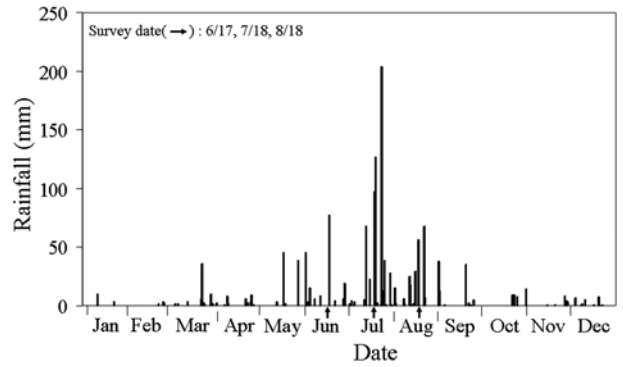


Fig. 4. Rainfall of Lake Paldang in 2008.

플랑크톤 기원의 평균 질소농도를 보면, 6월이 0.088~0.514 mgN/L로 7월(0.040~0.215 mgN/L)과 8월(0.034~0.082 mgN/L)에 비해 높은 값을 보였다(Fig. 5). 특히, 경안천 수역(L4)과 남한강 수역(L2)에서 그 차이가 더 컸다. 따라서 6월에는 식물플랑크톤의 성장에 따른 NO<sub>3</sub>-N 흡수가 증가하면서 호 내의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 낮아진 반면, 집중강우로 인해 강우량과 유입·방류량이 증가하고(Fig. 6(a)) 체류시간이 짧아

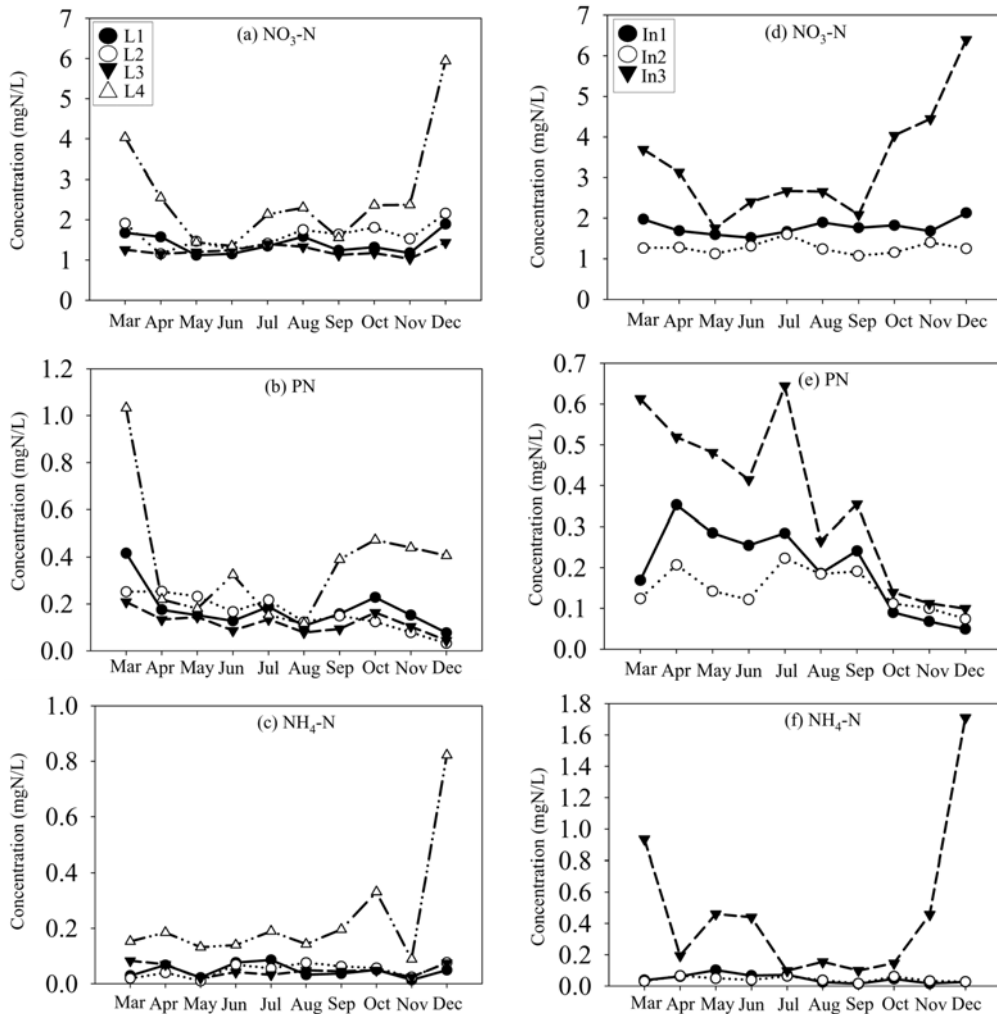
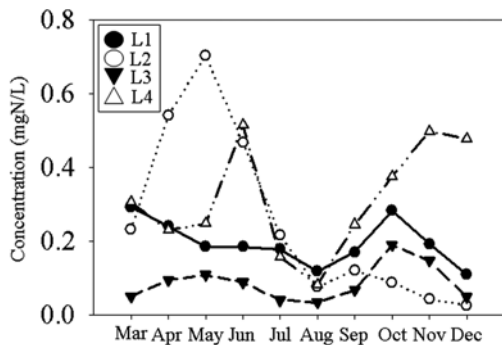


Fig. 3. The temporal changes of NO<sub>3</sub>-N, PN, and NH<sub>4</sub>-N in lake water ((a), (b), and (c)) and inflow rivers ((d), (e), and (f)) of Lake Paldang (2008).

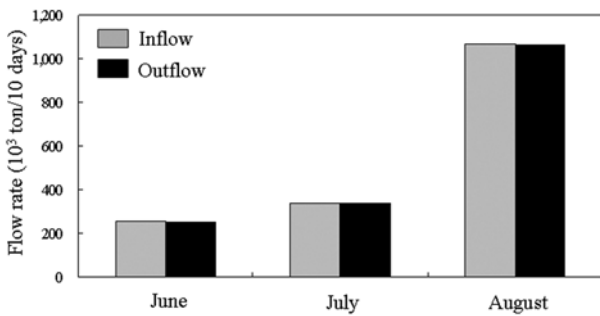
**Table 2.** The difference of NO<sub>3</sub>-N concentrations (mgN/L) between inflow river and lake water during the summer season (June to August), 2008

Site	June	July	August
In1	1.519	1.671	1.893
In2	1.311	1.599	1.241
In3	2.402	2.670	2.654
L2	1.255	1.407	1.753
L3	1.243	1.399	1.330
L4	1.346	2.134	2.300
Δ <sub>S</sub>	-0.264 (17.4%)	-0.264 (15.8%)	-0.140 (7.4%)
Δ <sub>N</sub>	-0.067 (5.1%)	-0.199 (12.5%)	0.089 (7.1%)
Δ <sub>K</sub>	-1.056 (44.0%)	-0.536 (20.1%)	-0.354 (13.3%)

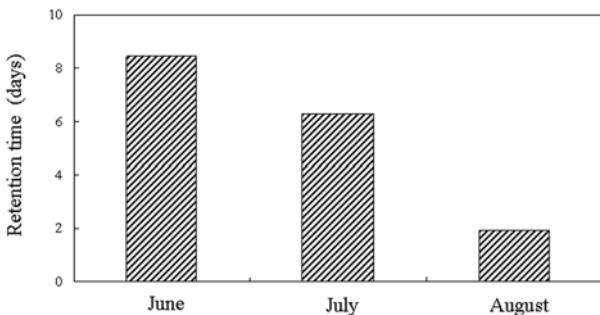
Δ: the difference of NO<sub>3</sub>-N concentrations between the inflow river and the lake water in each river, Δ<sub>S</sub>: South Han River, Δ<sub>N</sub>: North Han River, Δ<sub>K</sub>: Gyeongang River, %: Δ/In × 100



**Fig. 5.** The temporal changes of nitrogen concentration derived from phytoplankton biomass (2008).



(a) Flow rate of inflow and outflow



(b) Hydraulic retention time

**Fig. 6.** Flow rate and hydraulic retention time of Lake Paldang during 10 days before the survey date from June to August in 2008.

지는(Fig. 6(b)) 7월과 8월에는 식물플랑크톤이 호 내에서 성장하지 못하고 대부분 짧은 시간에 하류로 방류되어 호 내 현존량이 급감함에 따라 호 내에서 식물플랑크톤에 의한 NO<sub>3</sub>-N 흡수량이 감소하고 이에 따라 수체의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 6월에 비해 상대적으로 높은 값을 보인 것으로 판단된다.

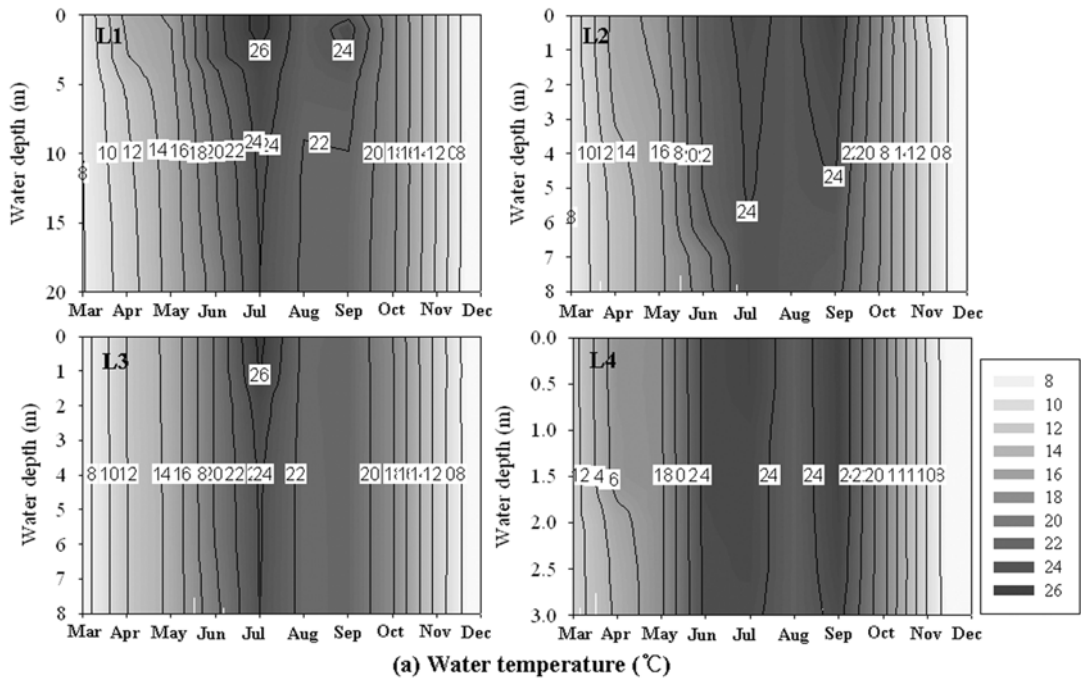
PN의 경우(Fig. 3(b)), 3월에 0.209~1.032 mgN/L 범위의 농도를 보인 후 감소하다가 가을철인 9월(0.093~0.390 mgN/L)과 10월(0.124~0.473 mgN/L)에 다소 증가한 후 11월(0.078~0.440 mgN/L)과 12월(0.032~0.406 mgN/L)에 다시 감소하는 경향을 보였다. 특히, PN은 NO<sub>3</sub>-N과 달리 8월에 감소하는 경향이 두드러졌으며, 경안천 수역(L4)의 경우, 6월의 NO<sub>3</sub>-N은 감소했지만 PN은 오히려 증가하는 경향을 보였다. 즉, 여름철과 겨울철의 NO<sub>3</sub>-N 농도변화와 반대경향 보인다고 볼 수 있다. PN은 수체 내 식물플랑크톤과 같은 생물로부터 기인하는 내부 기원성 PN과 집중 강우기에 유입하천으로 흘러 내려와서 호 내로 들어오는 외부 기원성 PN으로 나눌 수 있다. NO<sub>3</sub>-N의 계절적 변동에서 언급했듯이 여름철에는 강우량과 유입·방류량이 증가하고 체류시간이 짧아져 식물플랑크톤이 안정적으로 증식할 수 없기 때문에 식물플랑크톤 기원 PN이 감소할 수밖에 없다. 그리고 외부 기원성 PN의 경우, 집중 강우기에 호 내로 유입되지만 팔당호의 경우, 여름시기의 짧은 체류시간으로 인해 바로 호 밖으로 방류될 가능성이 높다.

늦가을과 겨울철에도 호 내 수체의 PN 농도가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 식물플랑크톤 기원 질소농도의 계절적 분포와 일치하는 경향을 나타내었다(Fig. 5). 즉 수온이 낮아지면서 팔당호 내 식물플랑크톤의 증식이 억제되어 식물플랑크톤 기원 PN의 농도가 감소하는 것으로 추정되며 이런 결과로 보아 팔당호에서 PN의 주요 기원은 호 내 식물플랑크톤 1차생산에 의한 유기태 질소(PON)인 것으로 판단된다.

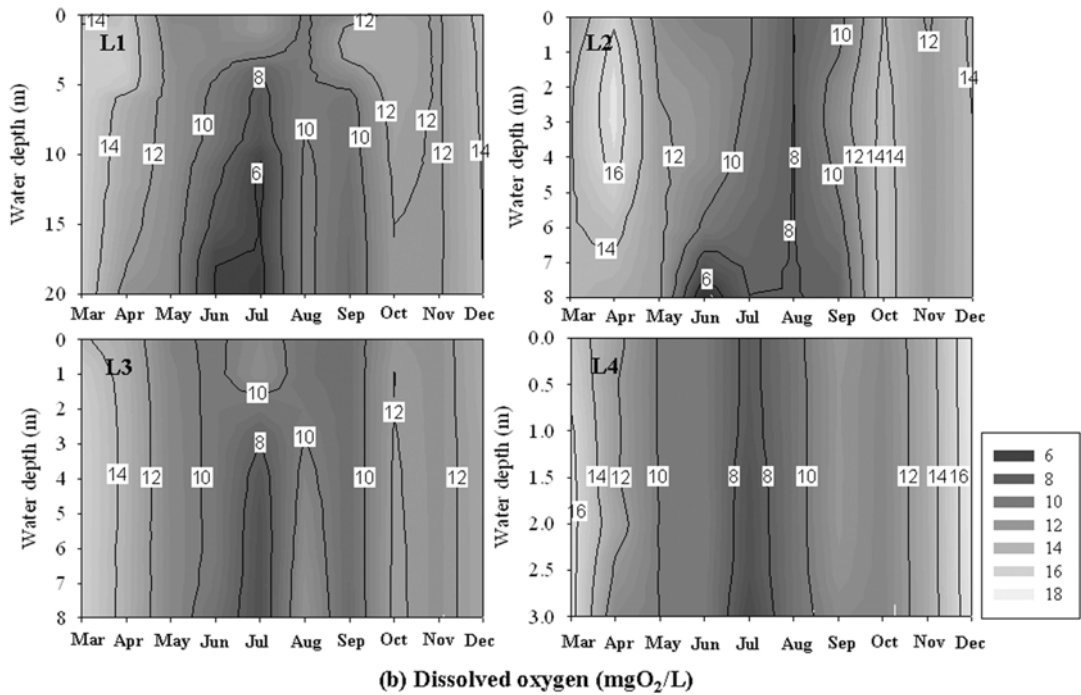
NH<sub>4</sub>-N은 경안천 수역(L4)에서 3월부터 9월까지 0.132~0.196 mgN/L의 농도범위로 변동폭이 작다가 10월(0.331 mgN/L)과 12월(0.822 mgN/L)에 증가하였다(Fig. 3(c)). 나머지 수역은 3월부터 12월까지 농도가 0.010~0.086 mgN/L으로 낮았다. 가을과 겨울철 경안천 수역에서 NH<sub>4</sub>-N 농도의 갑작스런 증가는 경안천 유입천 조사지점(In3)의 결과와도 일치하고 있다(Fig. 3(f)). 따라서 이 시기에 경안천 유역의 오염원으로부터 유입이 이루어졌다고 추측할 수 있다.

### 3.3. 수심별 질소농도 분포

수심별 농도 분포 조사를 통해 호수 수체 내 질소거동의 역동성을 파악할 수 있는데, 이러한 역동성은 수심별 수온 변화와 관련한 성층현상과 호기성 또는 혐기성 조건을 좌우하는 용존산소 분포 상태와 관련되어 있다(Horne and Goldman, 1994). 팔당호는 수심이 얇고, 체류시간이 짧아 뚜렷한 성층현상이 없는 호수로 알려져 있다(공동수와 정동일, 1999). 2008년도 수심별 수온분포를 보면 뚜렷한 증감 패턴이 나타나지 않고, 일반적으로 성층현상이 잘 일어



(a) Water temperature (°C)



(b) Dissolved oxygen (mgO<sub>2</sub>/L)

Fig. 7. Vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen in Lake Paldang (2008).

나는 여름철(6월~8월)조차도 팔당호에서는 뚜렷한 증감을 나타내지는 않았다(Fig. 7(a)). 또한 Fig. 7(b)에 나타난 것처럼 저층의 용존 산소농도 또한 무(無)산소나 빈(貧)산소 수준이 아니기 때문에 혐기성 조건하에서 일어나는 NO<sub>3</sub>-N의 탈질화나 암모니아로의 변환이 거의 없다고 볼 수 있다. 이는 팔당호 수체의 수심별 질소 거동이 그 만큼 단순하다는 것을 의미한다.

NO<sub>3</sub>-N의 경우, 경안천 수역(L4)은 수심에 따라 농도가 거의 차이를 보이지 않았다(Fig. 8(a)). 평균 수심 20 m로

가장 깊은 합류 수역(L1)에서도 여름철(6월~8월) 수심별 질소농도 범위는 6월이 1.055~1.237 mgN/L, 7월이 1.176~1.410 mgN/L, 8월이 1.483~1.747 mgN/L로 수심별 변동폭이 작았다.

NH<sub>4</sub>-N의 경우(Fig. 8(b)), 합류 수역(L1)에서 여름철 중 6월의 저층 농도가 0.202 mgN/L로 다른 수심에 비해 3~10배 이상의 높은 농도를 보였다. 남한강 수역(L2)도 6월의 저층 농도가 0.202 mgN/L로 6~12배 이상의 높은 농도를 보였다. 하지만 앞서 밝혔듯이 여름철에 팔당호는 뚜렷한

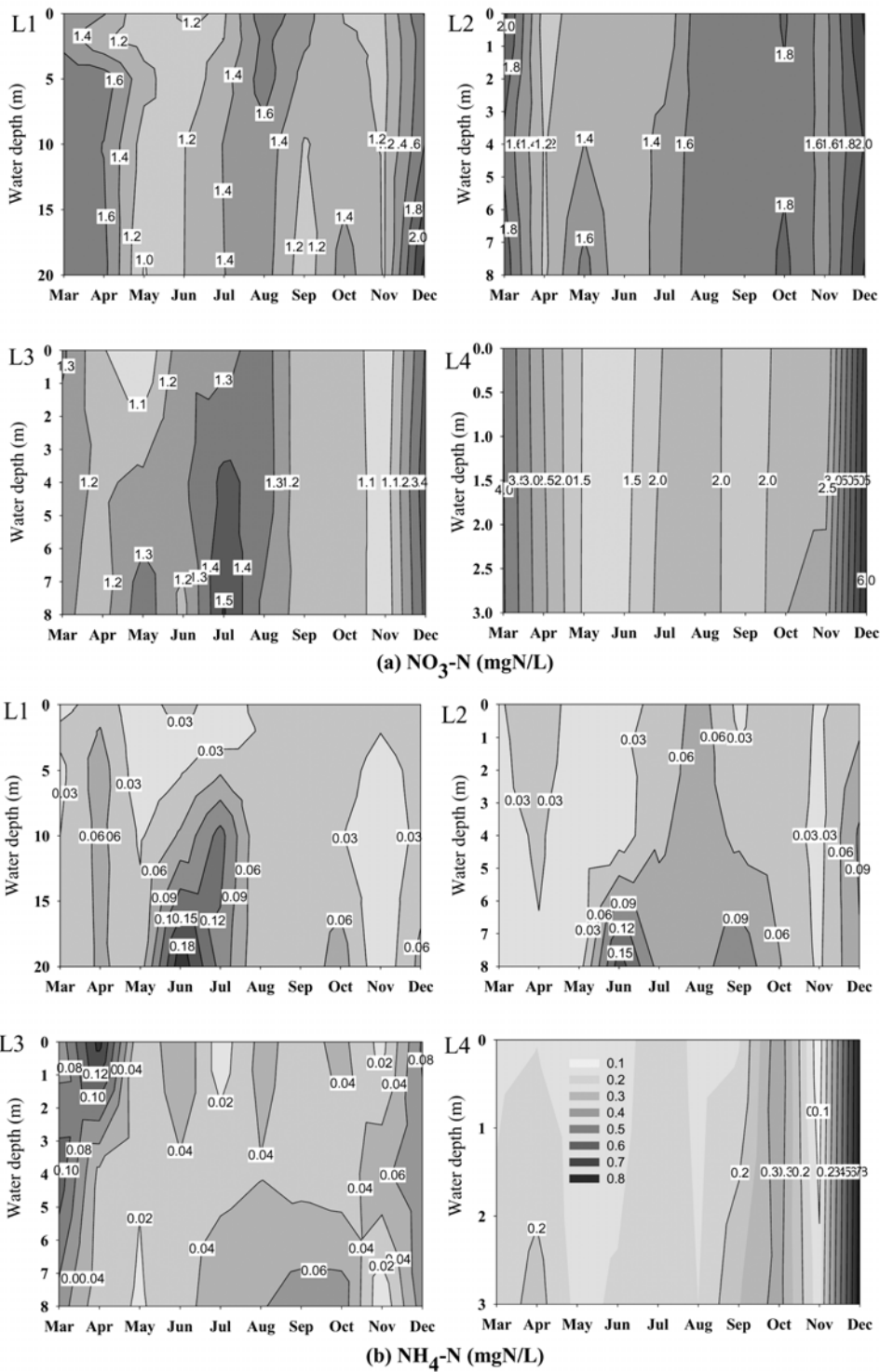


Fig. 8. Vertical distribution of NO<sub>3</sub>-N and NH<sub>4</sub>-N concentration in Lake Paldang (2008).

성층현상이 없을 뿐만 아니라 저층의 용존산소 농도 또한 무(無)산소나 빈(貧)산소 수준이 아니기 때문에 혐기성 조건하에서 일어나는 NO<sub>3</sub>-N의 탈질화나 암모니아로의 변환이 거의 없다고 볼 수 있다. 따라서 6월에 저층에서의 NH<sub>4</sub>-N의 증가는 퇴적물로부터의 용출 때문일 가능성이 높다. 각 수역별로 채취한 퇴적물에서 NH<sub>4</sub>-N 용출속도를 산정한 결과를 보면, 6월에 54.6~115.8 mgN/m<sup>2</sup>/day 범위의

높은 값을 보였다가 9월에 -10.3~22.4 mgN/m<sup>2</sup>/day 범위로 상당히 낮아졌다(Table 3). 이규 등(2009)에 따르면 팔당호에서 NH<sub>4</sub>-N의 용출속도에 영향을 주는 요인은 간극수의 NH<sub>4</sub>-N 농도와 퇴적물 중의 silt와 sand 비율인 것으로 나타났다며, 수온은 통계적으로 유의한 상관을 보이지 않았다. 팔당호의 퇴적물 입도분석 결과를 보면 집중강우기 전인 6월에는 4개 수역의 clay, silt, sand의 평균 비율이 각각

**Table 3.** The release rate (mgN/m<sup>2</sup>/day) of NH<sub>4</sub>-N from the sediment in Lake Paldang (2008)

Month	NH <sub>4</sub> -N			
	L1	L2	L3	L4
Apr	71.0	2.4	1.4	168.9
Jun	104.1	75.2	54.6	115.8
Sep	0.1	22.4	21.2	-10.3
Nov	-0.9	22.1	9.9	41.7

Reference : Lee et al., 2009.

4%, 68%, 28%였다가 집중강우기 후인 9월에는 3%, 49%, 48%로 clay와 silt는 감소한 반면 sand의 비율은 증가하였다(이규 등, 2009). 따라서 수체가 상대적으로 안정되어 있고(Fig. 6), clay와 silt의 비율이 상대적으로 높은 6월에 팔당호 내 전 수역의 퇴적물로부터의 NH<sub>4</sub>-N 용출이 상대적으로 높은 값을 보였다가 집중강우기를 거치면서 퇴적물이 교란을 받아 sand 비율이 많아지면서 용출이 줄어드는 것으로 판단된다.

**3.4. 팔당호의 질소수지**

2008년 한 해 동안 팔당호 수체로 들어온 질소(Input)는 총 30,875톤으로 유입하천에서 30,643톤, 대기강하물에서 135톤, 퇴적물에서 수체로의 용출이 88톤, 수생식물(정수식물, 부엽식물, 침수식물)에 의한 수체 내 유입이 9톤을 차지하였다(Fig. 9; Table 4). 반면, 팔당호 내 수체에서 빠져나간 질소(Output)는 총 31,256톤이었다. 댐 방류로 29,877톤, 침강에 의해 1,379톤이 빠져 나갔다. 이들 경로 가운데 유입하천과 댐 방류를 통해 각각 99%와 96%가 들어오고 나갔다. 남한강으로부터 18,111 ton/year (59%)가 유입되었고, 북한강은 11,333 ton/year (37%), 경안천은 1,199 ton/year (4%)를 차지하였다(Fig. 10(b)).

유입하천으로부터의 TN 부하량의 89%는 용존 형태로 유입되었고(Fig. 10(c)), 특히 NO<sub>3</sub>-N 부하량이 75%를 차지하였다(Fig. 10(d)). NO<sub>3</sub>-N의 경우, 수용성으로 물에 잘 녹아

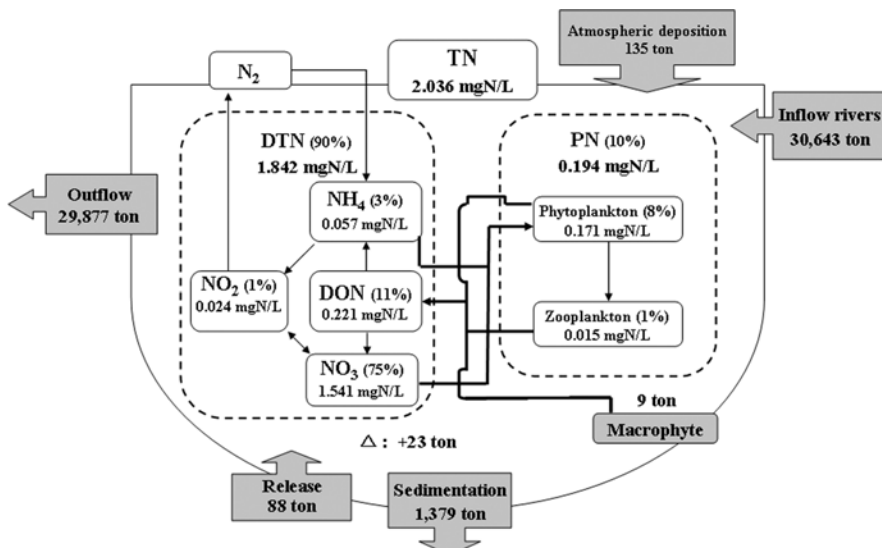
**Table 4.** Estimated nitrogen budget of Lake Paldang (2008)

Sources		Ton/year	
I <sub>known</sub>	Inflow rivers	South Han River	18,111
		North Han River	11,333
		Gyeongan River	1,199
		Subtotal	30,643
	Atmospheric deposition	135	
O <sub>known</sub>	Release from sediment	88	
	Macrophyte	9	
	Total	30,875	
O <sub>known</sub>	Outflow from dam	29,877	
	Sedimentation	1,379	
	Total	31,256	
I <sub>known</sub> - O <sub>known</sub>		-381	
ΔN		23	
I <sub>unknown</sub> - O <sub>unknown</sub>		404	

ΔN = (I<sub>known</sub> - O<sub>known</sub>) + (I<sub>unknown</sub> - O<sub>unknown</sub>); ΔN: the difference between the TN load of Dec. 31 and the TN load of Jan. 1 in the lake water area; I<sub>known</sub> means input sources (inflow rivers, atmospheric deposition, release from sediment, and macrophyte) having the estimated TN loads; I<sub>unknown</sub>: other input sources; O<sub>known</sub> means output sources (outflow from dam and sedimentation) having the estimated TN loads; O<sub>unknown</sub>: other output sources.

토양에서 용탈이 잘 일어나기 때문에 팔당호로의 질소 부하량 저감을 위해서는 농경지 같은 비점오염원 관리가 중요하다고 판단된다. NH<sub>4</sub>-N 부하량과 PN 부하량은 TN 부하량의 3%와 11%로 적은 비율을 차지하였다(Fig. 10(e), (f)). 시기별로 보면, 집중 강우기인 7월과 8월에 전체적으로 높은 부하량을 나타냈다. 특히 NH<sub>4</sub>-N과 PN의 경우, NO<sub>3</sub>-N과 달리 40% 이상이 7월에 집중하여 발생하였다. 이런 결과로 볼 때 NH<sub>4</sub>-N이나 입자성 형태의 질소는 집중 강우 시 초기 강우에 주로 유입되는 것으로 보이며 따라서 NH<sub>4</sub>-N과 PN은 집중 강우기를 중심으로 부하량 관리가 필요한 형태라고 판단된다.

2008년 팔당호의 총질소 유입(Input) 부하량과 유출



**Fig. 9.** Nitrogen behavior and budget in Lake Paldang (2008).



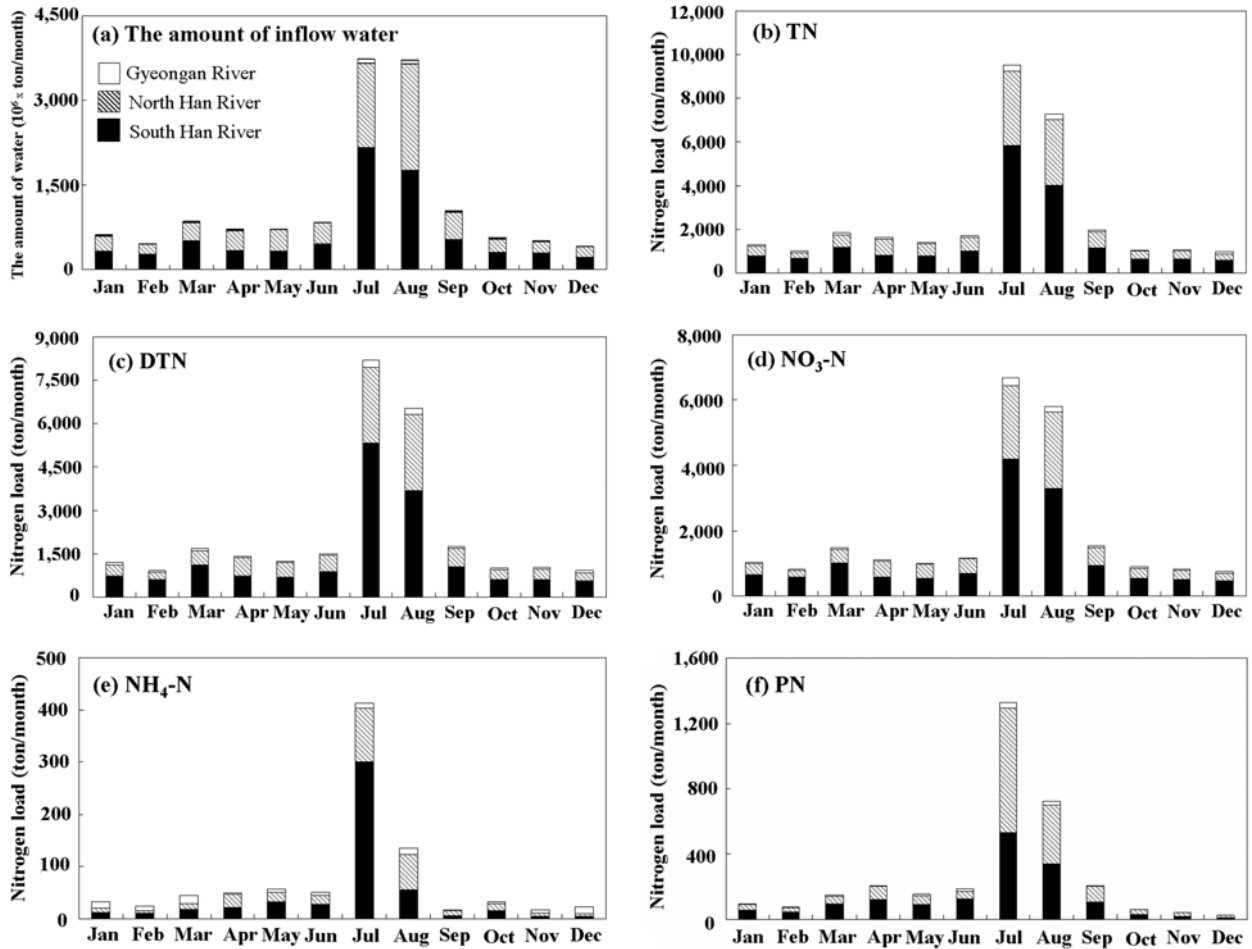


Fig. 10. The amount of inflow water and nitrogen loads of inflow rivers (2008).

(Output) 부하량 차이는 약 -381톤이었다. 본 연구에서는 유입, 유출 경로가 분명한 요소만을 가지고 추산한 것이기 때문에 질소고정이나 재부유, 탈질작용 등의 기작에 의한 결과를 반영하지 못하였다. 연초와 연말의 팔당호 질소농도를 비교하여 호 내의 질소변화량을 산정한 결과 약 23톤 증가하였다. 여기에 앞서 밝힌 질소 유입과 유출 부하량 차이 값인 381톤을 더한 총 404톤이 호 내로 유입되는 경로에 의해 추가 설명되어야 할 unknown load 값에 해당한다고 볼 수 있다.

2008년 팔당호의 질소수지에서 유입(Input)은 대부분 하천을 통해 이루어졌다. 팔당호는 수표면적에 대한 유역면적의 비가 618로 매우 크기 때문에 호수의 수질이 유역의 강우와 오염물질의 배출에 크게 영향을 받을 수밖에 없다(공동수와 정동일, 1999). 이들 유역의 오염원은 유입하천을 통해 호 내로 지속적으로 들어오게 된다. 따라서 팔당호의 질소부하량 관리는 유역의 오염원 관리에 초점이 맞추어져야 할 것으로 판단된다. 특히, 질소 유입부하량의 59%를 차지하는 남한강 유역의 오염원 관리가 필요하다. 남한강 유역(11,796 km<sup>2</sup>)은 3개 유입 하천 중 유역 면적이 가장 넓고, 유입유량 또한 팔당호 전체 유입유량의 52.9%를 차지하기 때문에 남한강 유역에서 도시화로 인한 토지이용 강도가 증가할 경우, 오염원의 영향이 커짐으로써 현재의

질소부하량보다 더 심각한 영향을 미칠 가능성이 있다. 또한 북한강은 남한강에 비해 유역 면적(6,418 km<sup>2</sup>)은 1/2 정도로 작지만, 질소 유입부하량이 37%를 차지하기 때문에 북한강 유역의 오염원 관리도 남한강 유역과 함께 이루어져야 할 것이다.

유입하천에 의한 유입부하량의 약 55%는 홍수기인 7월과 8월에 집중되어 발생하였다(Fig. 10(a), (b)). 따라서 계절별로 보면, 홍수기에 유역의 비점오염원으로부터의 오염물질 유입을 저감하는 방안마련이 필요할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구는 팔당호의 영양염류 중 질소 관리를 위한 기초 연구로서 질소의 존재형태별, 시기별, 지점별, 수심별 농도를 포함하는 호내 질소거동을 파악하였고, 2008년 연간 질소수지를 산정하였다. 팔당호의 유입수, 방류수, 호 내의 질소는 대부분 용존 형태(DTN)로 존재하였고, 이 가운데 NO<sub>3</sub>-N이 많은 부분을 차지하였다. 2008년 팔당호의 총질소 유입부하의 99% 이상은 유입하천에 의해 이루어졌다. 즉, 유역의 오염원에서 기원한 질소가 하천을 통해 호 내로 지속적으로 유입되었다고 볼 수 있다. 질소농도에서는 경안천이 남한강이나 북한강보다 2배 이상 높은 농도를 보

였지만, 총질소 부하량에서는 유입유량의 반 이상을 차지하는 남한강이 59%로 가장 많은 부하량을 차지하였고, 북한강(37%), 경안천(4%) 순이었다. 따라서 팔당호의 질소 오염 부하량 관리는 유역의 오염원 관리에 초점이 맞추어져야 하며 특히, 질소 유입부하량의 59%와 37%를 각각 차지하는 남한강과 북한강 유역의 오염원 관리가 우선되어야 할 것으로 판단된다. 또한 유입하천을 통한 질소 유입부하량의 약 55%가 홍수기인 7월과 8월에 집중되어 발생하기 때문에 홍수기에 유역으로부터의 오염물질 유입을 저감하는 방안마련이 필요할 것이다.

## 사 사

본 연구는 2008년도 한강수계 환경기초조사사업 중 「수계별 호소환경 및 생태조사」 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 공동수, 정동일(1999). 하천형 인공호(팔당호)의 수환경특성 및 수질관리. *The 6th International Symposium on Environmental Issues and Alternatives for 21C*, pp. 41-83.
- 국립환경과학원(2008). 산성강하물 모니터링과 생태계영향 조사 (V).
- 김법철, 김윤희(2004). 아시아 문순지역의 대형댐(소양호)에서의 인순환과 2차원모델의 적용. *한국육수학회지*, **37**(2), pp. 205-212.
- 김법철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구(2007). 국내호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 512-517.
- 김석구, 이미경, 안재환, 강성원, 김영임(2006). 호소퇴적물로부터 인 용출 저감을 위한 in-situ 처리. *대한환경공학회지*, **28**(5), pp. 563-572.
- 박혜경, 변명섭, 김은경, 이현주, 전명진, 정동일(2004). 팔당호 상류 유입하천의 수질 및 식물플랑크톤 분포 패턴. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 615-624.
- 박혜경, 변명섭, 최명재, 김용진(2008). 남한강 하류수역에서 식물플랑크톤 증식의 영향인자 및 수중유기물 기원. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(5), pp. 556-562.
- 엄미정, 문영훈, 안병구, 신용규(2008). 전북지역 농업용 하천유역의 수질과 부하량 특성. *한국환경농학회지*, **27**(2), pp. 111-119.
- 이규, 최명재, 박혜경, 이장호(2009). 팔당호와 청평호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(5), pp. 742-749.
- 한강물환경연구소(2004). 수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름 조사(I). 한강수계관리위원회.
- 한강물환경연구소(2006). 남한강 수계 호수의 수중생태계 구조 조사. 한강수계관리위원회.
- 한강물환경연구소(2007a). 수중생태계 물질순환 및 에너지 흐름 조사 최종보고서. 한강수계관리위원회.
- 한강물환경연구소(2007b). 수역별 수질/수량 관측망 운영 및 평가. 한강수계관리위원회.
- 한강물환경연구소(HRERC)(2009). 수계별 호소환경 및 생태 조사(I). 한강수계관리위원회.
- 허우명, 권상용, 김법철(2004). 횡성호의 육수학적 조사와 인 부하. *한국육수학회지*, **37**(4), pp. 411-422.
- ESRI (1999). ArcView 3.2. Environmental System Research Institute Inc., USA.
- Horne, A. J. and Goldman, C. R. (1994). *Limnology*, McGraw-Hill, Inc., USA.
- Trolle, D., Jorgensen, T. B., and Jeppesen, E. (2008). Predicting the effects of reduced external nitrogen loading on the nitrogen dynamics and ecological state of deep Lake Ravn, Denmark, using the DYRESM-CAEDYM model. *Limnologica*, **38**, pp. 220-232.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology*, Elsevier, USA.