

## 금강호의 장기 수질 변화요인 분석: 철새배설물에 의한 TP부하의 중요성

정용훈 · 김현수 · 양재삼<sup>†</sup>  
군산대학교 해양학과

### Statistical Analyses of Long-Term Water Quality Variation in the Geumgang-Reservoir: Focused on the TP Load by Migrating Birds Excrement

Yong Hoon Jeong, Hyun Soo Kim and Jae Sam Yang<sup>†</sup>

Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

#### 요 약

금강호의 시-공간적인 수질변화와 이러한 변화에 영향을 주는 요인을 알아보기 위해 강경과 하구언에서 2001년 8월부터 2008년 7월까지 보고된 수질자료(COD, SS, Chl-*a*, TN, TDN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, TP, TDP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)를 통계적으로 비교 분석하였다. 통계분석으로는 평균비교, 요인분석, 중회귀분석 등을 수행하였으며 TP에 관하여 물질수지를 계산하였다. 조사기간 동안 금강호 내에서 각 수질항목들의 시간적인 변화를 평균농도변화로서 살펴보면 2002년에 비하여 2007년에 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 60%, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>는 24%, 그리고 TDP는 52% 감소한 반면, TP와 Chl-*a*는 각각 99%, 423% 증가하였다. 공간적으로는 강경이 하구언보다 질소계열과 인계열의 농도가 높은 반면, Chl-*a*는 반대경향을 보였다. 금강호 내에서 수질에 영향을 미치는 가장 중요한 요인들을 판단하기 위하여 요인분석을 수행한 결과, “질소계열(TN, TDN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)과 인계열(TP, TDP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)의 계절적인 변화”가 전체분석 자료의 49%를 설명할 수 있는 것으로 나타나 가장 중요한 수질요인으로 분석되었다. 이중 금강호에서 최근 농도가 증가하고 있는 TP와 이로 인한 Chl-*a*의 변화에 대한 중회귀분석결과, TP의 농도변화에 가장 큰 영향을 미치는 항목은 계절적으로 풍수기에는 SS, 갈수기에는 Chl-*a*인 것으로 밝혀졌다. 이는 풍수기에는 강물에 포함된 입자성인에 의한 TP의 유입이, 갈수기에는 식물플랑크톤의 성장에 의한 TP의 소모가 TP의 농도변화에 영향을 준다고 해석되었다. 반면 Chl-*a*의 농도는 풍수기에는 COD가, 갈수기에는 TP가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타남으로서 풍수기에는 상류측에서 물리적으로 유입된 식물플랑크톤의 영향이 하류측에 직접된 것으로 판단되며, 갈수기의 Chl-*a*의 농도변화는 TP의 농도에 의해 결정됨을 보였다. 결과적으로 금강호에서 TP는 지속적으로 증가하고 있고, 계절적으로 갈수기에 Chl-*a*의 증가에 중요한 인자인 것으로 나타났다. 이러한 TP의 호수 내 유출입량을 정량적으로 파악하기 위해 계절적으로 풍수기와 갈수기로 구분하여 물질수지를 계산한 결과, 풍수기 동안 가장 중요한 공급원은 강물에 의한 유입량(38%)이었고, 대부분은 이외의 기타공급원(Other Sources)이 60%를 차지하였으며 퇴적물로부터 공급량은 1% 정도로 미미하였다. 그 반면, 갈수기 동안에는 강물과 기타 공급원에 인한 부하량이 각각 48%와 47%로 유사하게 차지하였고, 퇴적물로부터의 공급량은 5%로 증가하였다. 수질이 악화되는 갈수기인 경우 기타 공급원 중 특히 철새로 인한 공급량은 유입 TP공급량의 최대 8%, 기타 공급원의 최대 21%를 차지하는 것으로 추산되었다.

**Abstract** – Spatio-temporal variations of long-term water qualities (COD, SS, Chl-*a*, N-related nutrients (TN, TDN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), P-related nutrients (TP, TDP, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)) at two stations (St. SD, St. GG) in the Geumgang Reservoir were investigated from August 2001 to July 2008. Statistical methods such as t-test, factor analysis, and multi-regression analysis were applied to the water quality data in the reservoir as well as mass balances on TP. From the temporal comparisons of the water qualities between 2002 and 2007, average concentrations of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, and TDP gradually decreased down by 60%, 24%, 52% in 2007. However, those of TP and Chl-*a*

<sup>†</sup>Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

increased to 99% and 423% during the period. From the spatial comparisons between the two stations, St. GG showed higher concentrations for all of the N- and P-related nutrients than in St. SD, while opposite result for the Chl-*a*. The factor analysis showed that “the seasonal variations of N- and P-related nutrients” were the two dominant factors occupying 49% of total variances of water qualities. Based on this result, multi-regression analysis executed for the two most influential parameters (TP and Chl-*a*) focusing on the seasonal variations of these parameters: SS and Chl-*a* has contributed decisively to the concentrations of TP during the wet and dry season, respectively. On the other hand, COD and TP has been important for the Chl-*a* during the wet and dry season, respectively. From the established mass balances of TP loadings in the Geumgang Reservoir, Other Sources (60%) occupied the greatest contribution and Fluvial Input (38%) and Sediment (1%) during the wet season. However, both Fluvial Water (48%) and Other Sources (47%) supplied comparable amount of inputs and Sediment (5%) showed significantly increased input during the dry seasons. Recently especially during the dry winter seasons, migrating bird’s excretion was estimated to contribute up to 8% of total TP input and 21% of Other Sources.

**Keywords:** The geumgang reservoir(금강호), Water quality(수질), Chl-*a*(엽록소-*a*), TP(총인), Migrating birds excrement(철새배설물)

## 1. 서 론

1994년 9월 금강하구둑 수문이 반영구적으로 폐쇄된 후 하구둑 안쪽에는 인공 담수호가 조성 되었다. 이 후 금강호의 수질은 부영양화가 빠르게 진행되었으며, 그 이유로서 첫째, 갑천, 미호천, 논산천으로부터 유입되는 영양염류의 농도가 매우 높아 수계의 수질관리에 대한 필요성이 제기되었다(유 등[1999], 임 등[2000]). 두 번째로는 금강호의 상류로부터 유입되는 토사에 대한 문제가 지적되었다(농업기반공사[2004]). 이러한 지적에도 불구하고 2001년 5월 새만금 사업 정부조치계획에서는 새만금호의 제염 및 수질개선을 위한 대책으로 금강호 도입수로 설치 계획을 제시하였다. 금강호 도입수로는 금강하구둑 상류 4 km 지점에서 새만금호 유입부인 만경강 하류지점을 수로로 연결하여, 금강호 물을 새만금호 유입부로 도수하기 위한 시설이다. 이는 금강의 수질이 양호해서라기보다는 금강의 잉여 수량을 새만금 내부 탈염 등에 사용해 보려고 하는 교육지책이다. 한편, 새만금 내부간척을 위한 용도로써 금강호에 퇴적된 토사를 사용하려는 시도 또한 있다. 이는 새만금 간척지 내부의 용도를 단순한 농경지에서 산업용지로 전환하고자 할 때 수 억톤에 육박하는 성토재가 필요하기 때문에, 군산항을 대대적으로 준설하면서 성토재를 공급하고 이때 금강호수의 준설도 함께 고려되고 있는 실정이다. 이렇게 금강하구에 관한 여러 가지 개발의 필요성이 제기되고 있음에도 불구하고 금강호수의 수질에 관한 해석이 상류에서 유입하는 도시 오염원과 부유물질에 의하여 발생한다고 하는 원시적인 분석 수준에 머물러 있으므로 이 지역의 개발과 이로 인한 수질예측에 문제가 있을 것으로 보인다. 따라서 이 지점에서 강경과 금강하구둑에서 측정된 장기수질 관측자료를 바탕으로 현재 금강호의 수질을 분석하고, 오염부하 현황을 정확하게 이해함으로써 금강호의 장기적인 수질을 예측하려는 데 가치가 있다고 본다.

## 2. 연구지역 개괄 및 연구방법

금강은 우리나라 중서부에 위치하고 있으며, 전라북도 장수군 장수읍에서 발원하여 전라북도와 충청남북도 사이를 통과하여 금강하구둑을 거쳐 서해로 유입되는 유로 연장 412 km, 유역면적 9,886 km<sup>2</sup>에 이르는 우리나라 5대 하천 중의 하나이다. 1994년 금강하구둑 건설이후 조성된 금강호는 겨울에 철새가 다수 도래하여 유명한 철새도래지로서 기능하고 있다(국립환경과학원 [2007]).

금강호 지역의 장기적인 수질 변화를 이해하기 위해 금강물환경연구소와 금강유역환경청에서 측정된 강경정점(GG)과 하구둑정점(SD) 두 곳에서 2001년 8월부터 2008년 7월까지 매월 1회씩 관측된 자료를 분석하였다(Fig. 1). 분석에 사용된 항목은 수온, COD, SS, TN, TP, 용존총인(TDP), 총용존질소(TDN), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, 엽록소-*a*(Chl-*a*)이다. 그밖에 보조자료로서 기상청의 강우량 자료, 한국수문조사연보(건설교통부, 2001~2006년; 국토해양부, 2007~2008년)의 유량 자료, 한국농어촌공사 금강사업단의 금강하구둑 담수 방출량 자료를 사용하였다. 이들 자료를 이용하여 금강

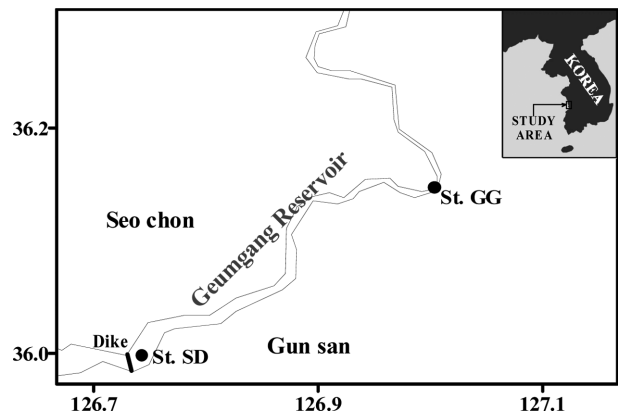


Fig. 1. Study stations in the Geum River.

호의 수질 특성을 평가하기 위해 몇 가지 통계분석을 실시하였다.

먼저 금강호 상류로부터 유입되는 수질이 금강호 내에서 어떻게 변화하는지 알아보기 위해 모든 항목에 대해 대응-T검정을 실시하였다. 그 다음 금강호의 수질에 영향을 미치는 요인을 분석하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 금강호의 수질에 영향을 미치는 환경 요인을 순차적으로 평가하였다. 요인분석 시 요인의 추출은 각 변수간의 상관행렬을 이용하였고, 최초요인을 추출한 뒤 회전시키지 않는 요인행렬로부터 몇 개의 요인을 추출하기 위하여 고유치가 최소 1.0 이상의 요인을 추출하였다. 요인이 해당되는 변수를 설명해주는 의미를 가진 요인 부하량을 산출한 뒤, 여러 요인이 비슷한 요인 부하량을 나타낼 경우 변수들이 어떤 요인에 높게 작용하는지를 알아보기 위하여 요인축을 회전시켰다. 요인회전 방법은 여러 종류가 있으나 직각회전방식 중에서 각 요인은 다른 요인과 상호 독립적이면서 하나의 요인에 높게 적재되는 변수의 수를 줄여서 요인을 해석하는데 중점을 주는 Varimax 방식을 적용하였다. 요인분석 이후 관측된 자료를 풍수기와 갈수기로 나누어 각 항목들간의 상관성을 분석하였다. 통계 분석은 SPSS(ver., 12.0)를 이용하였으며, 자세한 분석방법은 다변량데이터의 통계분석(노 [1999]), SPSSWIN을 이용한 통계분석(정과 최 [1999]), 통계분석론(허[2001])을 따랐다.

또한 간단한 박스모델을 이용하여 금강호 내 물질수지를 산정하였다. 이러한 일련의 과정을 통하여 금강호의 수질을 결정하는 인자를 추출하고, 각 항목들 사이의 상관관계를 도출하였으며, 마지막으로 간단한 수치모델로서 계절별 금강호의 수질에 대한 물질대사를 완성하여 중요 오염부하에 대한 상대적인 중요성을 추론하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 강수량, 방류량 특성

조사기간(2001년 8월~2008년 7월)에 해당하는 금강호의 월 누적강수량(Fig. 2)과 하구둑 방출량과 강수량에 대한 상관그래프를 도시하였다(Fig. 3). 강수량은 군산 기상대의 강수량을 사용하였으며, 방류량은 한국농어촌공사 금강사업단의 자료를 인용하였다. 강

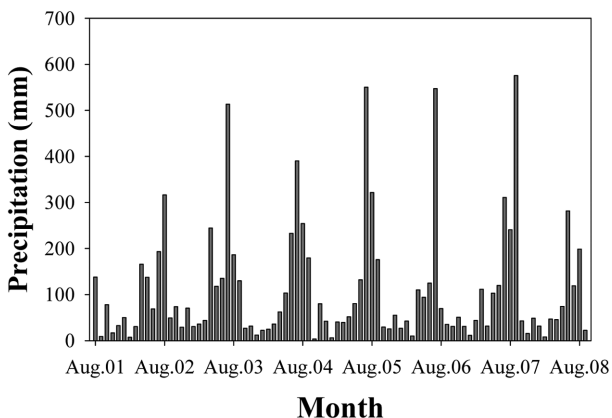


Fig. 2. Monthly accumulated precipitation from 2001 to 2008.

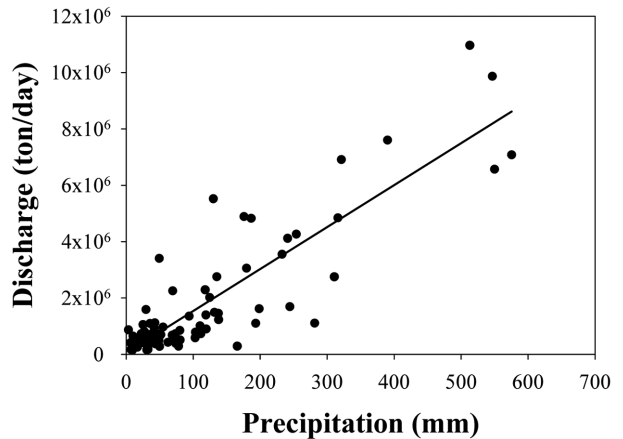


Fig. 3. The relationship between precipitation and discharged volume from the Geumgang Reservoir.

수량과 방류량은 여름철에 높고 겨울철에 낮은 값이 관측되는 계절적인 경향을 뚜렷하게 보였다. 강수량과 방류량의 결정계수는 0.76로 나타났다.

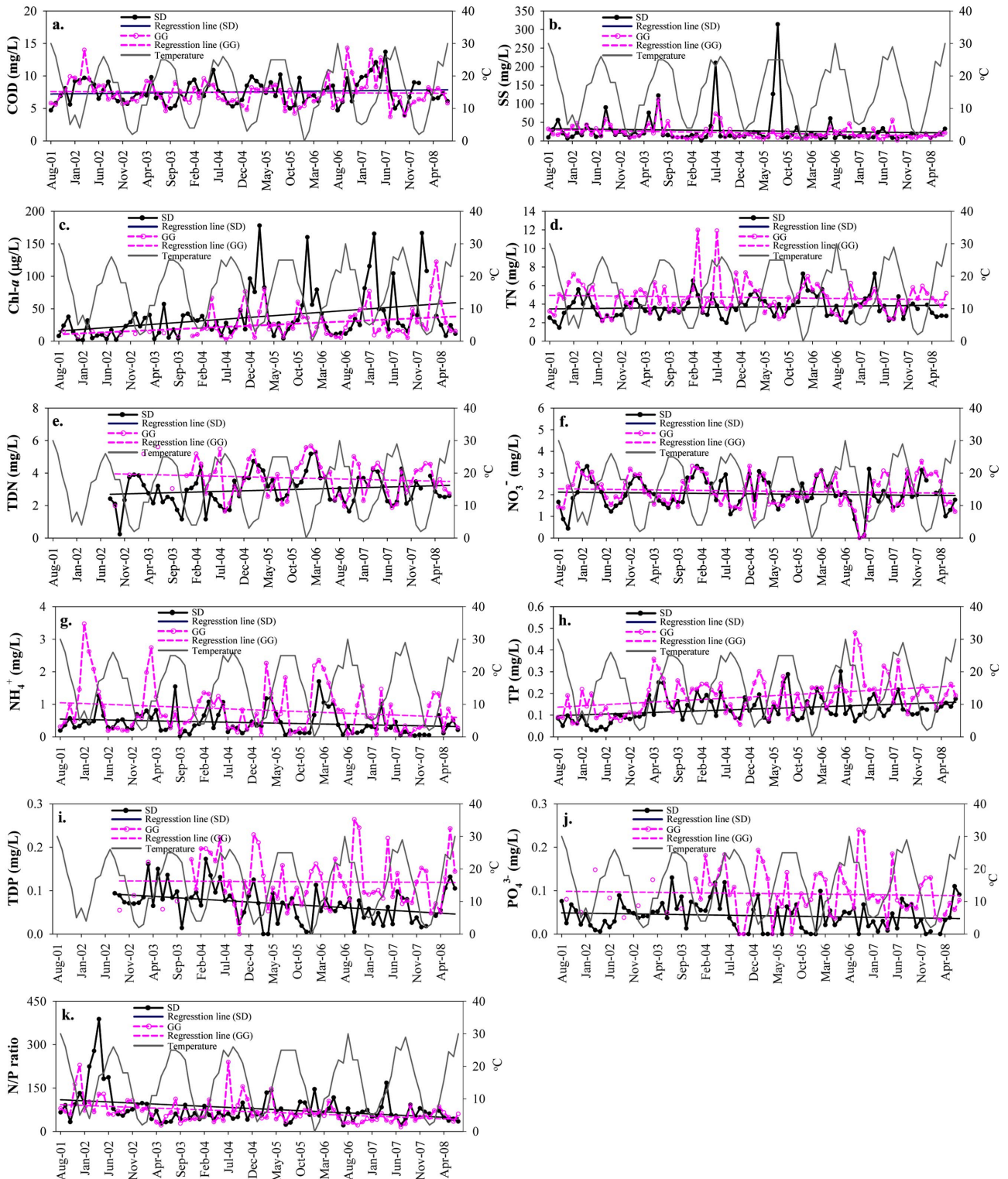
#### 3.2 수질 특성

조사기간 동안 강경과 하구언정점에서 관측된 수질자료들의 시간적인 변화는 다음과 같다.

COD는 강경정점과 하구언정점에서 비슷한 농도분포를 보였다. 하지만 강경정점에 비해 상대적으로 하구언정점에서 2001년 이후 시간이 경과하면서 점차 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4a).

SS는 계절적으로 여름철에 가장 높은 농도를 보였다(one-way ANOVA,  $\alpha=0.05$ ). 여름철에 높은 농도를 보이는 이유는 집중강우로 인한 유속의 증가와 저층부유물질에 기인한 것으로 사료되며, 특히 하구언정점에서 여름철에 간헐적으로 매우 높은 농도가 관측되었다. 강경정점과 하구언정점에서 SS는 시간이 경과하면서 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4b).

Chl-a는 계절적으로 겨울철에 가장 높은 농도를 보였다(one-way ANOVA,  $\alpha=0.05$ ). 이러한 원인은 겨울철에 유량이 적고, 금강하구로 방류되는 방류량이 적어짐에 따라 상대적으로 금강호 내 물의 체류시간이 증가되어 수피가 안정되어졌기 때문으로 판단된다. 이러한 수피의 안정은 상대적으로 호 내 투명도를 개선시키고, 영양염과 식물플랑크톤의 접촉을 용이하게 함으로써 결과적으로 식물플랑크톤의 증가를 유발했을 것으로 판단된다. 금강호에서 겨울철에 식물플랑크톤의 대변식은 주로 저온성 규조류인 *Stephanodiscus*로서 이들의 증가로 인해 Chl-a의 농도도 증가한다는 보고가 있으며(신과 조[2000]), 금강하구언과 매우 인접한 금강하구에서 조사한 김 등[2004]의 결과에서도 동계에 *Stephanodiscus*가 가장 우점하였다. 또한 금강과 유사하게 하구언을 가지고 있는 낙동강에서도 겨울철에 *Stephanodiscus*가 크게 증가하여 Chl-a의 농도를 증가시킨다는 보고가 있다(Kim et al.[2008]). 2001년 초기에는 강경정점과 하구언정점에서 Chl-a의 농도분포가 비슷한 경향을 보



**Fig. 4.** Long-term variations of each parameter from St. SD and St. GG station in the Geum River.

였지만, 치층 시간이 경과하면서 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히 금강호에서 급격한 증가현상을 보였다(Fig. 4c).

질소 성분(TN, TDN,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )은 여름철과 가을철에 비교적 낮은 농도를 보였다(one-way ANOVA,  $\alpha=0.05$ ; Fig. 4d, e, f, g).

이는 강수량 증가로 인한 유량의 증가에 따른 희석효과로 판단된다. 시간이 경과함에 따라 질소 성분 중  $\text{NH}_4^+$ 는 2001년 이후 시간이 경과하면서 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4g).

인 성분(TP, TDP,  $\text{PO}_4^{3-}$ )은 계절변화가 뚜렷하지 않지만, TP의

경우 여름철과 겨울철이 높게 나타나고, 가을철이 가장 낮은 농도를 보였고(one-way ANOVA,  $\alpha=0.05$ ), 2001년 이후 시간이 경과하면서 점차 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4h).  $PO_4^{3-}$ 는 다른 영양염들과 달리 상대적으로 겨울철에 낮은 농도를 보였다(one-way ANOVA,  $\alpha=0.05$ ). 그리고  $PO_4^{3-}$ 와 TDP의 경우에는 시간이 경과하면서 하구언정점에서 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4i, j).

N/P는 계절적인 경향을 뚜렷하게 보이지는 않았지만 2001년 이후 시간이 경과하면서 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4k). N/P의 감소원인으로는 TN 농도의 감소보다는 TP의 농도가 점점 증가하기 때문으로 사료된다.

조사 항목들 중  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ 는 식물플랑크톤의 성장에 우선적으로 사용되는 영양염들로 알려져 있으며(Daucherz *et al.*[1991]; Horne and Goldman[1994]; Mitamura *et al.*[1995]), 조사 기간 동안 이들 영양염들이 점차 감소하는 것은 Chl-*a*의 증가와 관련되어 있을 것으로 판단된다. 실제 강경점정과 하구언정점에서 관측된 Chl-*a*,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ 의 농도를 사용하여 식물플랑크톤에 의해 소모된  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ 의 양을 계산해 보았다. 먼저 금강호로 유출입하는 Chl-*a*,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ 의 양(유입농도 × 유입유량) - (출입농도 × 출입유량)을 구한 다음, Chl-*a*의 양을 탄소량으로 전환(C: Chl-*a* = 65, P-limited; Lynn *et al.*[2000])하고, 전환된 탄소량에 Redfield 비율(C:P=41.03, C:N=5.68; 중량비율)을 적용하여 식물플랑크톤이 소모한  $NH_4^+$ 와  $PO_4^{3-}$ 의 양을 계산하였다. 계산결과 조사 기간 동안 금강 상류로부터 금강호로 유입된  $NH_4^+$ 와  $PO_4^{3-}$ 의 90%와 121%가 식물플랑크톤에 의해 소모된 것으로 추정된다.

강경정점에서 하구언정점으로 오는 동안 수질변화의 특성을 알기 위해 대응-T검정을 실시한 내용이 Table 1에 있다. 대응-T검정에 의하면 TP, TN,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ , TDP, TDN는 강경지역에서 유입되는 수질의 농도가 금강호지역보다 높았다. 그렇지만 Chl-*a*는 하구언정점에서 강경점정보다 훨씬 높은 농도를 보였고, COD, SS, N/P, 질산염은 통계적으로 그 차이가 유의하지 않았다.

### 3.3 요인분석

금강호 내 수질 특성을 알아보기 위해 2001년 8월부터 2008년

7월까지 측정된 자료를 바탕으로 수온, COD, SS, TN, TP, TDN, TDP,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ , N/P, Chl-*a*, 강수량, 유량을 이용하여 요인분석을 실시하였다(Table 2). 요인분석 결과를 해석하는 여러 방법 중 본 연구에서는 고유치를 가지고 분석하였다. 그리고 고유치가 1이상이 되는 4개 요인을 추출하였다. 요인 1의 기여율은 31.12%, 요인 2의 기여율은 17.80%, 요인 3의 기여율은 13.70%, 요인 4의 기여율은 9.41%로서, 위의 4가지 요인들로 전체수질의 72.03%를 설명할 수 있다. 그리고 최초인자 부하량을 분석한 결과로부터 요인 적재량이 어떤 요인에 높게 적재되어 있는지의 여부를 판단하기 위하여 Varimax법으로 회전시켜 요인과 수질 변수와의 관계를 보다 정확하게 설명할 수 있는 결과를 Table 2에 나타냈다.

요인 1과 2는 질소, 인 계열 영양염 그리고 수온에 대해 적재되어 있는 값이 가장 크며, 요인 3은 Chl-*a*와 유량에 적재되어 있는 값이 가장 크게 나타났다. 요인 4는 SS, 강수량, COD에 적재되어 있는 값이 크게 나타났다. 전체요인 중 가장 큰 비율(48.9%)을 차지하는 요인 1과 2는 ‘계절적인 인과 질소의 변화’로 추정되며, 요인 3은 ‘수리학적 변화에 따른 생물활동의 변화’, 요인 4는 ‘강우에 따른 유기물과 토사량의 변화’로 판단되었다.

### 3.4 중회귀분석

본 연구에서 조사된 모든 항목들 중 2001년부터 2008년까지 금강호에서 지속적으로 증가하는 경향을 보였던 Chl-*a*와 TP에 대하여 중회귀분석을 수행하였다. 중회귀는 분석 항목들의 계절적인 변화를 고려하여 관측된 자료들을 풍수기(4월~9월)와 갈수기(10월~3월)로 나누어 분석하였으며, 수온, COD, SS, TN, TP,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ , Chl-*a* 등의 수질항목을 사용하여 수행하였다.

조사기간 동안 풍수기와 갈수기에 TP와 Chl-*a*에 대한 중회귀 분석 결과는 다음과 같다.

풍수기:

$$TP = 0.158 + (-0.002 \times \text{수온}) + (0.0002 \times \text{COD}) + (0.0004 \times \text{SS}) + (0.007 \times \text{TN}) + (-0.014 \times \text{NO}_3^-) + (-0.049 \times \text{NH}_4^+) + (0.125 \times \text{PO}_4^{3-}) + (0.0004 \times \text{Chl-}a) \quad (1)$$

Table 1. Comparison between St. SD and St. GG station by the paired T-test

Parameters	Mean±SD		Paired T-test		
	St. SD	St. GG	t-value	Degree of freedom	p-value
COD (mg/L)	7.6±1.8	7.5±2.1	0.340	83	0.644
SS (mg/L)	27.1±43.6	21.4±17.7	1.278	83	0.205
Chl- <i>a</i> (µg/L)	38.4±39.7	26.9±23.7	3.067	64	0.002
TN (mg/L)	3.686±1.145	4.705±1.708	-5.775	85	0.000
TDN (mg/L)	3.003±0.910	3.684±1.092	-5.151	60	0.000
$NO_3^-$ (mg/L)	2.032±0.700	2.165±0.741	-1.887	83	0.035
$NH_4^+$ (mg/L)	0.430±0.361	0.823±0.723	-5.687	83	0.000
TP (mg/L)	0.129±0.056	0.186±0.081	-6.352	83	0.000
TDP (mg/L)	0.069±0.040	0.120±0.059	-7.315	60	0.000
$PO_4^{3-}$ (mg/L)	0.042±0.032	0.093±0.054	-7.570	64	0.000
N/P	35.47±25.12	30.33±18.19	1.835	83	0.067

**Table 2.** Eigen values and cumulative percentages of factors from the factor analysis (left) and the Rotated factor matrix extracted from the factor analysis (right)

Factor	Eigen value	% of variance	Cumulative%	Parameters	1	2	3	4
1	<b>4.355</b>	<b>31.12</b>	<b>31.12</b>	TN	<b>0.856</b>	-0.265	-0.178	0.103
2	<b>2.492</b>	<b>17.80</b>	<b>48.92</b>	TDN	<b>0.796</b>	-0.184	-0.244	-0.037
3	<b>1.918</b>	<b>13.70</b>	<b>62.62</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0.729</b>	0.027	0.210	-0.098
4	<b>1.318</b>	<b>9.41</b>	<b>72.03</b>	Temp	<b>-0.649</b>	-0.108	0.511	0.265
5	0.929	6.63	78.66	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.645</b>	0.187	-0.044	0.003
6	0.714	5.10	83.76	TDP	0.069	<b>0.872</b>	0.344	-0.011
7	0.504	3.60	87.36	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.015	<b>0.773</b>	0.440	0.048
8	0.450	3.21	90.57	N/P	0.527	<b>-0.751</b>	0.131	-0.247
9	0.424	3.03	93.60	TP	0.059	<b>0.630</b>	-0.279	0.591
10	0.330	2.36	95.96	Chl- <i>a</i>	0.210	-0.094	<b>-0.849</b>	-0.010
11	0.223	1.60	97.56	Flow rate	0.108	0.306	<b>0.617</b>	0.070
12	0.205	1.46	99.02	SS	-0.117	0.078	0.119	<b>0.829</b>
13	0.100	0.71	99.73	Precipitation	-0.232	0.163	0.460	<b>0.687</b>
14	0.040	0.27	100.00	COD	0.229	-0.051	-0.436	<b>0.536</b>

$$\text{Chl-}a = -22.076 + (0.555 \times \text{수온}) + (4.286 \times \text{COD}) + (-0.089 \times \text{SS}) + (1.132 \times \text{TN}) + (68.921 \times \text{TP}) + (-1.367 \times \text{NO}_3^-) + (-5.068 \times \text{NH}_4^+) + (-153.077 \times \text{PO}_4^{3-}) \quad (2)$$

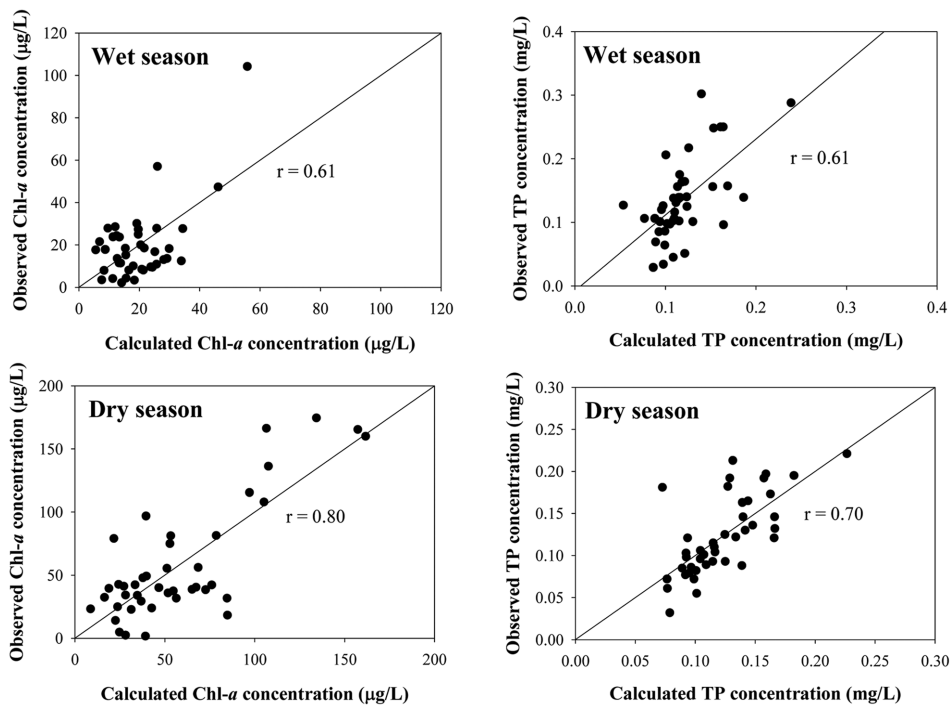
갈수기:

$$\text{TP} = 0.024 + (0.001 \times \text{수온}) + (0.001 \times \text{COD}) + (-0.001 \times \text{SS}) + (0.003 \times \text{TN}) + (0.007 \times \text{NO}_3^-) + (0.029 \times \text{NH}_4^+) + (0.677 \times \text{PO}_4^{3-}) + (0.001 \times \text{Chl-}a) \quad (3)$$

$$\text{Chl-}a = 8.177 + (-2.245 \times \text{수온}) + (2.847 \times \text{COD}) + (1.502 \times \text{SS}) + (3.725 \times \text{TN}) + (471.388 \times \text{TP}) + (-6.575 \times \text{NO}_3^-) + (-40.666 \times \text{NH}_4^+) + (-556.762 \times \text{PO}_4^{3-}) \quad (4)$$

중회귀 방정식을 이용한 계산값과 관측값을 비교한 결과 풍수기보다 갈수기에 더 좋은 상관계수를 보였다(Fig. 5).

중회귀분석을 통해 얻어진 풍수기와 갈수기에 TP와 Chl-*a*의 방정식에서 어떤 항목들이 상대적으로 중요한 영향을 주는지 분석하였다. 분석은 관측된 각 수질항목들의 풍수기와 갈수기의 평균과 표준편차를 이용하여 분석하였다. 예를 들어 풍수기에 TP의 중회귀 방정식에서 각 수질항목들의 평균값을 넣으면 TP의 농도는 0.119 mg/L가 되고, 여기에서 다른 항목들은 그대로 평균값을 사용하고 수온만 평균±표준편차 값을 넣으면 TP의 농도는 0.108~0.130 mg/L로 변하게 된다. 따라서 수온의 변화는 평균 TP의 농



**Fig. 5.** Relationships of the observed and the calculated values of TP and Chl-*a* in the Geumgang Reservoir by multi-regression analysis.

도에 ±9.4% 영향을 주게 된다. 이러한 방법으로 풍수기와 갈수기에 TP와 Chl-*a*의 농도에 영향을 주는 수질항목들을 조사한 결과, TP는 풍수기에 SS (±20.5%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (±15.1%) > 수온 (±9.4%) > TN (±6.5%) > Chl-*a* (±6.3%) > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (±5.8%) > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (±3.5%) > COD (±0.4%), 갈수기에는 Chl-*a* (±25.7%) > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (±15.8%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (±8.7%) > SS (±6.1%) > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (±4.7%) > 수온 (±3.5%) > TN (±2.4%) > COD (±1.1%) 순으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 금강호에서 TP의 농도에 가장 큰 영향을 주는 항목은 풍수기에는 SS이고, 갈수기에는 Chl-*a*인 것으로 판단되며, 이러한 결과로부터 호 내 TP는 풍수기에는 강물에 포함된 입자성에 의한 유입이 중요하며, 갈수기에는 식물플랑크톤의 흡수에 의한 TP의 변화가 호 내 TP의 농도를 결정하는 것으로 판단된다.

Chl-*a*의 농도에 영향을 주는 항목들은 풍수기에는 COD (±43.7%) > SS (±27.3%) > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (±26.3%) > TP (±23.0%) > 수온 (±14.7%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (±9.6%) > TN (±6.4%) > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (±3.5%), 갈수기에는 TP (±38.4%) > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (±27.7%) > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (±25.5%) > 수온 (±23.8%)

> SS (±23.5%) > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (±9.4%) > COD (±8.5%) > TN (±7.2%) 순으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 Chl-*a*의 농도에 가장 큰 영향을 미치는 항목으로는 풍수기의 경우 COD, 갈수기에는 TP로 판단되며, 이러한 결과들은 풍수기의 경우 상류로부터 유입된 유기물질에 의해서 호 내의 Chl-*a*가 영향을 받으며(Gómiak *et al.*[2002]; Boonphakdee *et al.*[2008]), 갈수기에는 호 내 TP의 농도가 Chl-*a*의 농도에 영향을 주는 것으로 판단된다.

### 3.5 상관분석

금강호에서 관측된 각 항목들을 이용하여 요인분석을 실시한 결과에 의하면 ‘계절적인 인과 질소의 변화’가 수질에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 따라서 계절적으로 각 항목들 간의 상관성을 알아보기 위해 관측된 자료들을 풍수기(4월~9월)와 갈수기(10월~3월)로 나누어 상관분석을 실시하였다(Table 3).

유량과 강수량을 제외한 대부분의 항목들은 수온과 음의 상관관계를 보였으며, 특히 갈수기에 이러한 관계가 더욱 뚜렷하게 나

**Table 3.** Correlation matrix between the water quality parameters in the Geumgang Reservoir

	Wet Season (Apr. ~ Sep.)												
	COD	SS	TN	TP	Chl- <i>a</i>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	TDN	TDP	N/P	F <sub>a</sub>	P <sup>b</sup>
Temp.	-0.308*	0.082	-0.477**	-0.008	0.006	-0.327*	-0.461**	0.075	-0.384*	0.021	-0.313*	0.241	0.171
COD		0.280	0.383*	0.253	0.475**	-0.002	0.128	-0.142	0.102	-0.272	-0.094	-0.107	0.041
SS			-0.019	0.475**	-0.039	0.059	-0.194	0.140	-0.239	0.079	-0.174	0.390*	0.483**
TN				-0.085	0.151	0.636**	0.431**	-0.261	0.724**	-0.378*	0.393**	-0.169	-0.160
TP					0.155	-0.032	-0.329*	0.468**	-0.304	0.342	-0.572**	0.540**	0.517**
Chl- <i>a</i>						-0.143	-0.089	-0.284	0.102	-0.439*	-0.178	-0.168	-0.164
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>							0.271	0.065	0.373*	-0.065	0.340*	0.077	0.111
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>								-0.171	0.319	-0.138	0.298	-0.317*	-0.288
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>									-0.400*	0.833**	-0.464**	0.459**	0.384*
TDN										-0.559**	0.764**	-0.155	-0.142
TDP											-0.604**	0.305	0.209
N/P												-0.319*	-0.324*
F <sub>a</sub>													0.818**

	Dry Season (Oct. ~ Mar.)												
	COD	SS	TN	TP	Chl- <i>a</i>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	TDN	TDP	N/P	F <sub>a</sub>	P <sup>b</sup>
Temp.	-0.463**	0.017	-0.658**	-0.404**	-0.379*	-0.547**	-0.372*	-0.095	-0.619**	-0.244	-0.104	0.410**	0.150
COD		0.222	0.295	0.266	0.433**	0.190	0.146	-0.115	0.274	-0.055	0.099	-0.601**	0.064
SS			-0.165	0.043	0.320*	-0.113	0.081	-0.017	0.199	-0.162	-0.114	-0.262	0.198
TN				0.327*	0.219	0.467**	0.555**	-0.094	0.718**	0.043	0.333*	-0.219	-0.173
TP					0.458**	0.274	0.309*	0.257	0.402*	0.481**	-0.634**	0.062	0.086
Chl- <i>a</i>						0.129	-0.116	-0.311*	0.311	-0.282	-0.295	-0.116	0.034
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>							0.252	0.048	0.320	0.235	0.169	-0.094	-0.250
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>								0.340*	0.678**	0.380*	0.085	-0.118	0.187
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>									-0.032	0.831**	-0.292	0.082	-0.016
TDN										0.149	0.222	-0.437*	-0.092
TDP											-0.426*	0.105	-0.023
N/P												-0.344*	-0.229
F <sub>a</sub>													0.059

<sup>a</sup>: Flow rate, <sup>b</sup>: Precipitation, \*: P < 0.05, \*\*: P < 0.01

타났다. Chl-*a*는 풍수기에는 COD와 양의 상관관계, TDP와는 음의 상관관계를 보였고, 갈수기에는 COD, SS, TP, TDN과 양의 상관관계, 수온, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와는 음의 상관관계를 보였다. TN은 수온과 음의 상관관계를, 용존질소계열의 항목들과는 양의 상관관계를 보였고, 이러한 관계는 풍수기와 갈수기 모두 유사하게 나타났다.

풍수기에 TP와 SS, 유량, 강수량이 유의한 양의 상관관계를 보이고, SS가 유량 및 강수량과 유의한 양의 상관관계를 보이고 있는 것으로 보아, 풍수기에 TP의 주요 공급이 집중 강우 시 금강상류와 주변 농경지로부터 이루어지고 있음을 알 수 있다(Haygarth *et al.*[2006]; Mhamdi *et al.*[2007]; Withers and Jarvie[2008]). 그러나 갈수기에는 TP와 SS, 유량, 강수량이 유의한 상관관계를 보이지 않고 있다. 이러한 결과들은 갈수기에 금강호 내 TP의 공급원이 풍수기와는 다르다는 것을 암시해 준다.

### 3.6 인의 물질수지(Mass balance)

금강호에서 TP는 2001년 ~ 2008년까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 요인분석의 결과에서도 호 내에서 TP의 변화가 금강호의 수질에 중요한 영향을 미치고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 금강호 내에서 TP의 정량적인 이동량을 이해하는 것이 필요할 것으로 판단되어 간단한 박스모델을 사용하여 물질수지를 계산하였다. 박스모델에 사용된 자료는 2001년 ~ 2008년까지 관측된 자료를 사용하였다. 물질수지에 사용된 모델은 금강호를 정상상태로 가정하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\text{Retention} = \text{Input} - \text{Output} + \text{Release} - \text{Sedimentation} + \text{Other sources} \quad (5)$$

Retention : 금강호 내에서 체류되어 있는 양

Input : 강물에 의한 유입량

Output : 호 내에서 방류되는 양

Release : 퇴적물에서 상층수로 용출되는 양

Sedimentation : 금강호 내에서 침전되는 양

Other sources : 이외의 공급원

본 모델은 연간 강수량의 변화를 고려하여 1년을 풍수기(4월 ~ 9월)와 갈수기(10월 ~ 3월)로 나누어 적용하였다. 물질수지는 시기별로 다른 물의 체류시간을 고려하여 체류시간 단위 내의 수지를 기준으로 각각 산정하였다. 금강호에서 풍수기 동안 물의 체류시간은 3.9일이고, 갈수기에는 19.4일로 계산되었다. 물의 평균 체류시간은 금강호의 부피를 방출량으로 나누어 산출하였다. 물질수지에 사용된 각 변수들 중 Retention은 금강호 내의 TP의 농도에 금강호의 부피를 곱하여 계산하였다. 강물에 의한 유입량(Input)과 호 내에서 배출되는 양(Output)은 강경정점과 하구연정점에서 측정된 TP의 농도에 유량을 곱하여 계산하였다. 이때 유입유량 자료는 공주유량을 사용하였고, 유출유량 자료는 하구연 방출량 자료를 사용하였다. 퇴적물로부터 용출되는 TP의 양(Release)은 금강호에서 측정된 김과 임[1997]의 용출량을 인용하였다. 금강호 내에서 TP가 침전되는 양(Sedimentation)은 연간 퇴적량(농어촌진

**Table 4.** Comparison between the estimated mass balances for two different seasons

Variable	Wet Season (Apr. ~ Sep.)		Dry Season (Oct. ~ Mar.)	
	TP (ton)	Loading* (%)	TP (ton)	Loading* (%)
Input	13.1	38.2	20.8	48.1
Output	13.6	-	14.3	-
Retention	13.6	-	14.4	-
Release	0.5	1.4	2.1	4.8
Sedimentation	7.0	-	14.6	-
Other Sources	20.7	60.4	20.4	47.1

\*Loading means the contribution of variable for total load (Input+Release+Other Sources)

홍공사[1996])을 바탕으로 풍수기와 갈수기의 호 내 부유물질 양과 퇴적물 내 인의 함량(이 등[2005])을 이용하여 산출하였다. Other sources는 각 항목들의 차이로 산출하였다. Table 4에 제시한 값들은 2001년 ~ 2008년까지 풍수기와 갈수기의 평균값이고, Loading은 전체 유입 부하량(Input + Release + Other Sources)에 대한 각 유입 부하들의 백분율을 의미한다.

물질수지 계산결과를 보면, 갈수기에 Retention 되는 TP의 양이 풍수기 보다 높았다. Input과 Output 양에서도 풍수기에는 호 내에서 유출되고, 갈수기에는 호 내로 유입되는 것으로 계산되어, 갈수기 동안 TP가 더욱 호 내에 많이 축적되고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 결과들은 Sedimentation 계산 결과에서도 알 수 있다. Other sources의 양은 풍수기에는 호 내 TP의 60.4%로 나타났다으며, 갈수기에는 TP의 47.1%를 차지하고 있어 금강호 내의 전체 부하의 대부분을 차지하고 있다. 여기에서 주목해야 할 부분은 갈수기에는 풍수기와는 달리 집중 호우로 인해 농지에 살포된 비료의 유입이나, 지하수면의 증가에 따른 지하수의 추가유입량이 적음에도 불구하고 TP의 Other sources 비율이 높게 나타난다는 것이다. 그럼 갈수기 동안 어떤 추가적인 공급원을 생각할 수 있을까? 갈수기 동안 금강호 내로 유입되는 공급원으로는 논산 등 인근 도시에서 유입되는 도시하수와 금강호의 특색인 겨울철새 등을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 공급원들 중 겨울철새에 대하여 중점적으로 고찰하고자 한다.

### 3.7 금강호에서 TP 부하량과 철새의 영향

1994년 금강하구연 완공 이후 어느 정도 해양수질이 담수수질로 완전히 전환되었다고 판단되는 2001년부터 2008년까지 금강호의 장기적인 수질변화를 알아본 결과, 가장 우려되는 부분은 TP와 Chl-*a*의 농도가 시간이 경과함에 따라 지속적으로 증가한다는 점이다. 특히 흔히 담수에서 녹조현상이라고 하는 식물플랑크톤의 과다한 성장은 금강 물을 상수나 공업용수로 사용할 때 크게 방해가 될 수 있다. 이를 가장 잘 나타내는 지표인 Chl-*a*의 농도는 이번 금강호의 수질자료를 분석하여 본 결과 풍수기에는 COD, TDP와 상관관계를 갖고, 갈수기에는 수온, COD, SS, TP, TDN과 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 특히, 이들 관계 중 Chl-*a*와



COD에 대해 더 자세히 분석하여 보았다. Chl-*a* 농도를 탄소량으로 전환(C: Chl-*a* = 65, P-limited; Lynn *et al.*[2000])하고, COD의 농도도 탄소량으로 전환(COD O<sub>2</sub> mg/L = (12/32)×회수율(60%) C mg/L)하여 비교하여 보면, 풍수기에 Chl-*a*로 계산된 탄소량은 134 ton, COD로 계산된 탄소량은 511 ton으로 추정된다. 그러나 갈수기에는 Chl-*a*로 계산된 탄소량이 429 ton으로 COD로 계산된 탄소량(553 ton)의 약 78%를 차지하여, 갈수기의 COD의 대부분은 Chl-*a*에서 기원한 것으로 판단할 수 있다. 또한 갈수기에 식물플랑크톤(Chl-*a*)에 함유된 TP는 10.5 ton으로 금강호에서 갈수기 동안 체류되어 있는 TP(Retention)의 양에 73%로 평가되어, 금강호 내에서 갈수기 동안 식물플랑크톤에 포함된 탄소와 인이 차지하고 있는 비율이 유사하다는 것을 알 수 있다. 동일한 방법으로 금강호 내에서 풍수기 동안 식물플랑크톤에 포함된 탄소와 인의 비율을 계산하면 26%, 24%로 추정된다. 이러한 결과들은 풍수기에 비해 갈수기 동안에 TP의 많은 부분이 식물플랑크톤에 함유되어 있다는 것을 의미한다. 갈수기는 풍수기 동안 보다 체류시간이 상대적으로 길어 수위가 안정되고, 그 만큼 식물플랑크톤에 의한 영양염 소모가 더 활발하게 진행되었을 것이라는 것은 매우 일반적인 현상이다. 그러나 금강호 내에서 동일한 갈수기 동안에 Chl-*a*의 농도 변화를 보면, 최근 몇 년 동안 동계에 Chl-*a*의 농도가 유입수 보다 훨씬 높게 관측되는 것을 볼 수 있다. 하지만 유입수(강경)의 영양염들의 장기적인 변화를 보면 Chl-*a*의 급격한 농도 증가시기에 뚜렷한 변화는 관찰되지 않는다. 그렇다면 최근에 갈수기 동안 금강호 내로 강물을 통한 영양염의 공급 이외에 추가 공급원이 존재하는 것은 아닐까?

금강호 내로 유입되는 TP의 부하는 상관분석의 결과로부터 유추할 수 있듯이 풍수기에는 강수량에 의해 좌우되는 것으로 판단할 수 있으나, 갈수기에는 강수량과 유량과 상관성이 없는 것으로 나타나 풍수기와는 다른 유입 기원이 존재한다는 것을 유추할 수 있다. 금강호 내 퇴적물의 유기물 함량과 TP의 함량은 금강 상류지역들 보다 높은 수치를 보이지만(국립환경과학원 금강물환경연구소[2006]), 영산호에서 측정된 결과(국립환경과학원 영산강물환경연구소[2006])들은 하구호로부터 상류까지 점차 퇴적물 내 TP의 함량이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 금강호가 금강 상류지역들과는 다르게 다른 TP의 공급원이 있음을 판단할 수 있다.

최근 금강호에 도래하는 철새의 수는 폭발적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며(Fig. 6), 2007년 금강호에서 관찰된 철새의 개체수는 747,987 개체로 영산호(1,470 개체), 낙동강 하류(16,992 개체)보다 수십 ~ 수백 배 많은 개체가 도래하였다(국립환경과학원[2006, 2007]). 금강호에서 관찰된 철새 중 가장 우점종은 가창오리로 2001년부터 도래 개체수가 증가하여 2007년 조사 시에는 전체 철새 개체군의 98.9%를 차지하는 것으로 나타났다(국립환경과학원[2006, 2007]). 가창오리의 섭식 활동은 월동지역 주변의 농경지에서 야간에 낚알을 섭취하고 주간에는 금강호 수면에서 휴식을 취하는 것으로 알려져 있다(강과 조[1996]). 따라서 이러한

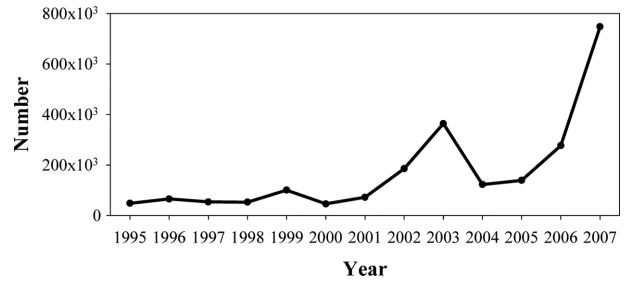


Fig. 6. Number of migrating bird's in each years.

Table 5. TN and TP loads by migrating bird's excretion

Excretion		Biomass (g)
TN (kg/ton(biomass)/day)	TP (kg/ton(biomass)/day)	
1.5	0.54	360-551

철새의 섭식활동 후 철새배설물이 금강호에 어떠한 영향을 미치는지 계산해 보았다.

가창오리의 생체량은 360~551 g 이며(강과 조[1996]), 오리류가 하루에 배출하는 배설물에 포함된 TN은 1.5 kg/ton(biomass)/day, TP는 0.54 kg/ton(biomass)/day 이다(Table 5; Fleming and Fraser [2001]). 조사된 자료를 바탕으로 2001년부터 2007년까지 금강호에서 갈수기 체류시간 동안 철새에 의한 TP 부하량은 0.34~3.57 ton로 추정할 수 있다. 이러한 부하량은 갈수기 동안 금강호 내로 유입되는 전체 TP 부하의 1.2~8.0%를 차지하였다. 특히 철새에 의한 TP 부하량은 Other Sources의 최대 20.7%(2007년)을 차지하고 있는 것으로 나타나 갈수기 동안 금강호 내 TP의 중요한 공급원으로써의 가능성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

부영양화된 호 내에서 외부로부터 유입되는 TP의 부하에 대한 철새의 기여는 몇몇 연구자들에 의해서 수행되었다(Manny *et al.* [1994]; Marion *et al.*[1994]; Scherer *et al.*[1995]; Ronicke *et al.*

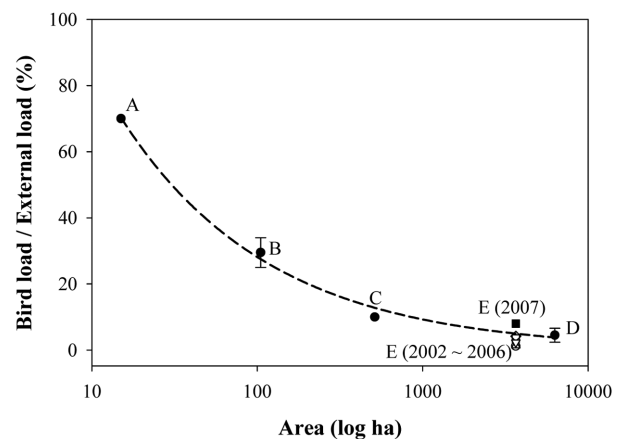


Fig. 7. Contribution of bird TP load to external TP load in the Geumgang Reservoir and other lakes. A: Manny *et al.*[1994], B: Scherer *et al.*[1995], C: Ronicke *et al.*[2008], D: Marion *et al.* [1994], E (2002) ~ E (2007): this study.

[2008]), 이들의 결과를 수집하여 분석한 결과, 호 내로 유입되는 TP의 부하는 호수의 면적이 작을수록 철새에 의한 TP 부하가 상대적으로 중요하며, 호수의 면적이 커짐에 따라 철새에 의한 TP의 부하는 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 7). 본 연구의 물질수지 계산에 의하면 금강호 내로 유입되는 TP의 부하에 대한 철새의 TP 부하 비율은 점차 증가하고 있는 경향을 보였으며, 특히 최근에 철새에 의한 TP의 부하 비율이 Fig. 7에서 제시한 호수 면적과 철새의 TP 부하 대한 회귀곡선 값보다 높은 값을 보였다. 따라서 갈수기 동안 금강호에서 철새의 배설물은 전체 TP 부하에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 이로 인한 퇴적물 내 TP의 농도도 장기간에 걸쳐 금강호의 TP 부하에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술진흥원의 연구비 지원(F20811408-H140000110, D10201110H330000130)에 의해 수행되었습니다. 자료 분석에 도움을 준 군산대학교 화학해양학실험실 석구들의 노고에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 강희영, 조삼래, 1996, “가창오리 *Anas formosa*의 월동생태 및 월동지에서의 환경수용력에 관한 연구”, 한국조류학회지, 3, 33-41.
- [2] 건설교통부, 2001~2006, 한국수문조사연보.
- [3] 국립환경과학원, 2006, 철새이동경로 및 조류 보호 관리방안 연구보고서, 101 pp.
- [4] 국립환경과학원, 2007, 2007년도 겨울철 조류 동시 센서스, 458 pp.
- [5] 국립환경과학원 금강물환경연구소, 2006, 수중 및 퇴적물 내 N, P 존재형태 및 미량유해물질의 조사분석 2차년도 최종 보고서, 188 pp.
- [6] 국립환경과학원 영산강물환경연구소, 2006, 영산호 수질개선 타당성 조사 최종보고서, 879 pp.
- [7] 국토해양부, 2007~2008, 한국수문조사연보.
- [8] 김태웅, 임봉수, 1997, “금강하구호 sediments로부터 수질오염물질 용출특성에 관한 연구”, 한국수질보전학회지, 13, 245-253.
- [9] 김형섭, 김영길, 양재삼, 이원호, 2004, “곰소만과 금강하구역에서 광합성 섬모류 *Mesodinium rubrum*(=*Myrionecta rubra*) 개체군의 변동 특성”, 한국해양학회지, ‘바다’, 9, 164-172.
- [10] 노형진, 1999, 다변량데이터의 통계분석, 석정, 661 pp.
- [11] 농어촌진흥공사, 1996, 금강(II)지구 수문조사 보고서.
- [12] 농업기반공사, 2004, 금강호 하상조사 측량용역 보고서.
- [13] 신재기, 조경제, 2000, “금강 하구호에서 수질의 계절변동과 오염도”, 한국육수학회지, 33, 251-259.
- [14] 양동윤, 김주용, 이진영, 이창범, 정혜경, 2000, “금강유역의 침식과 하상변동과의 관계”, 지질공학, 10, 52-74.
- [15] 유선재, 김중구, 권태연, 이석모, 1999, “금강의 부영양화 현상에 관한 연구”, 한국환경과학회지, 8, 155-160.
- [16] 이상득, 이길영, 박정규, 2005, “금강호 퇴적물의 이화학적 특성에 관한 연구”, 환경관리학회지, 189-197.
- [17] 임창수, 신재기, 조경제, 2000, “금강 중-하류에서 오염양상과 수질평가”, 한국육수학회지, 33, 51-60.
- [18] 정충영, 최이규, 1999, SPSSWIN을 이용한 통계분석, 무역경영사, 518 pp.
- [19] 허만형, 2001, 통계분석론, 법무사, 728 pp.
- [20] Boonphakdee, T., Kassi, A., Fujiwara, T. and Sawangwong, P., 2008, “Combined stable carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in the Bangpakong River Estuary, Thailand”, EnvironmentAsia, Vol. 1, 28-36.
- [21] Dauchez, S., Quéguiner, B., Tréguer, P. and Zeyons, C., 1991, “A comparative study of nitrogen and carbon uptake by phytoplankton in a coastal eutrophic ecosystem (Bay of Brest, France)”, Oceanol. Acta, Vol. 14, 87-95.
- [22] Fleming, R. and Fraser, H., 2001, The impact of waterfowl on water quality - literature review, Ridgetown College-University of Guelph, Ridgetown, Ontario, Canada.
- [23] Gómiak, A., Zielinski, P., Jekatierynczuk-Rudczyk, E., Grabowska M. and Suchowolec, T., 2002, “The role of dissolved organic carbon in a shallow lowland reservoir ecosystem - a long-term study”, Acta Hydrochim. Hydrobiol., 30, 179-189.
- [24] Kim, M.C., La, G.H., Kim, H.W., Jeong, K.S., Kim, D.K. and Joo, G.J., 2008, “The Effect of water temperature on proliferation of *Stephanodiscus* sp. in vitro from the Nakdong River, South Korea”, Korean J. Limnol., Vol. 41, 26-33.
- [25] Haygarth, P.M., Bilotta, G.S., Bol, R., Brazier, R.E., Butler, P.J., Freer, J., Gimbert, L.J., Granger, S.J., Krueger, T., Macleod, C.J.A., Naden, P., Old, G., Quinton, J.N., Smith, B. and Worsfold, P., 2006, “Processes affecting transfer of sediment and colloids, with associated phosphorus, from intensively farmed grasslands: an overview of key issues”, Hydrol. Process., Vol. 20, 4407-4413.
- [26] Horne, A.J. and Goldman, C.R., 1994, Goldman, Limnology, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc., New York.
- [27] Lynn, S.G., Kilham, S.S., Kreeger, D.A. and Interlandi, S.J., 2002, “Effect of nutrient availability on the biochemical and elemental stoichiometry in the freshwater diatom *Stephanodiscus minutulus* (Bacillariophyceae)”, J. Phycol., Vol. 36, 510-522.
- [28] Manny, B.A., Johnson, W.C. and Wetzel, R.G., 1994, “Nutrient additions by waterfowl to lakes and reservoirs: predicting their effects on productivity and water quality”, Hydrobiologia, Vol. 279/280, 121-132.
- [29] Marion, L., Clergeau, P., Brient, L. and Bertru, G., 1994, “The importance of avian-contributed nitrogen (N) and phosphorus (P) to Lake Grand-Lieu, France”, Hydrobiologia, Vol. 279/280, 133-147.
- [30] Mhamdi, B.A., Azzouzi, A., Mhamdi, M.A. and Sime-Ngando, T., 2007, “Dynamics of the relative nitrogen and phosphorus concentrations in a reservoir situated in a semi-arid zone (Sahela,

- Morocco)", *Water Resour. Manage.*, Vol. 21, 983-995.
- [31] Mitamura, O., Saijo, Y., Hino, K. and Barbosa, F.A.R., 1995, "The significance of regenerated nitrogen for phytoplankton productivity in the Rio Doce Valley Lakes, Brazil", *Arch. Hydrobiol.*, Vol. 134, 179-194.
- [32] Scherer, N.M., Gibbons, H.L., Stoops, K.B. and Muller, M., 1995, "Phosphorus loading of an urban lake by bird droppings", *Lake and Reserv. Manage.*, Vol. 11, 317-327.
- [33] Ronicke, H., Doerffer, R., Siewers, H., Buttner, O., Lindenschmidt, K.E., Herzsprung, P., Beyer, M. and Rupp, H., 2008, "Phosphorus input by nordic geese to the eutrophic Lake Arendsee, Germany. *Fundam*", *Appl. Limol./Arch. Hydrobiol.*, Vol. 172, 111-119.
- [34] Withers, P.J.A. and Jarvie, H.P., 2008, "Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review", *Sci. Total Environ.*, Vol. 400, 379-395.
- 
- 2009년 8월 10일 원고접수  
2010년 11월 22일 심사완료  
2010년 11월 23일 수정본 채택