

## 금강 중·하류의 오염양상과 수질평가

임 창 수 · 신 재 기<sup>1\*</sup> · 조 경 제<sup>2</sup>

(청운대학교 토목환경공학과, 홍성 350-800, <sup>1</sup>한국수자원공사 수자원연구소, 대전 305-390, <sup>2</sup>인제대학교 환경시스템학부, 김해 621-749)

The Trend and Assessment of Water Pollution from Midstream to Downstream of the Kum River. *Rim, Chang-Soo, Jae-Ki Shin<sup>1\*</sup> and Kyung-Je Cho<sup>2</sup>* (Department of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Hongsung, 350-800, <sup>1</sup>Water Resources Research Institute, KOWACO, Taejon, 305-390 and <sup>2</sup>Division of Environmental Science and Engineering, Inje University, Kimhae, 621-749, Korea)

In order to understand the trend and assessment of water pollution, seasonal water quality was determined in the main river and the tributaries from midstream to downstream of the Kum River from March 1998 to June 1999. Among environmental factors, the variation of nitrogen, phosphorus and chlorophyll-a was distinctive on an aspect of increase and decrease relatively to others, and particularly the impact of inorganic N · P inflowing into the main river was observed to be more significant at the Kapchon, Mihochon and Soksongchon among the tributaries. Water quality was highly related to hydrologic factor, and it was more deteriorated when water discharge maintains for a long time below normal flow or relatively at low condition of minimum and drought flow. These phenomena were remarkable from December to March of the next year. NH<sub>4</sub> and SRP were decreased dramatically flowing toward the lower part of the river and chl-a was increased exponentially. While, the variations of NO<sub>3</sub> and BOD<sub>5</sub> were regular from midstream to downstream and there was no significant difference between the stations. Limiting nutrient for phytoplankton growth seemed to be P than N because the ratio of TN/TP or DIN/SRP was relatively high as 42 or 544 in the main river, respectively. The main river and tributaries were ranked to be third grade, based on the assessment of BOD as an indirect indicator of organics, but particularly Kapchon was ranked to be over fifth grade. In addition, the inflow of high N · P nutrients from tributaries including Kapchon and Mihochon seemed to be major factor of the development of water pollution of the Kum River. On the other hand, persistent bloom of phytoplankton in lower part of the river was observed. As a conclusion, management of water quality for main source of pollution is urgent.

**Key words :** Chlorophyll-a, Discharge, Eutrophication, Kum River, Nitrogen, Phosphorus, Water quality assessment

### 서 론

하천의 부영양화 또는 영양염 증가에 따른 수질오염

의 직·간접적인 영향은 무엇보다도 자연경관의 저하와 수자원의 효율적인 이용 측면에서 환경문제 중 중요한 부분으로 대두되었고, 자연적인 현상보다는 인간활동 범위의 확대와 생활수준의 향상으로 인한 인위적인 오염

\* Corresponding author: Tel: 011) 870-6121, Fax: 042-860-0375, E-mail: jaeki@kowaco.or.kr

이 대부분을 차지하여 그에 대한 관심이 커졌다(UN, 1992). 경제·산업발전과 더불어 도시가 발달하고 인구가 집중되어 물의 사용량이 급증되는 만큼 다양한 오폐수가 증가하게 되었다. 이로 인해 N·P를 비롯한 유기물 오염은 날이 갈수록 더욱 심각해지고 있다. 수질오염은 단순하게 수질 그 자체만이 악화되는 것이 아니라 외부로부터 과도한 영양염의 유입으로 인해 식물플랑크톤의 번무로 자생 유기물이 증가하고 1차 생산성이 높아져 수중생태계에서 물질순환의 균형이 파괴되는 현상을 의미한다(OECD, 1992).

우리나라의 수질오염은 하수관거 체계의 구조적 문제와 기존에 하·폐수처리시설이 충분하지 못하여 제대로 처리되지 못하고 하천으로 곧바로 유입되는 오폐수의 양이 많아 부영양화를 더욱 가속화시키는 인위적인 요인이 지배적이며 이와 더불어 강우의 편중에 의한 자연적인 요인도 기여하는 바가 크다. 하절기에 집중되어 있는 강수량의 대부분은 하상계수가 커 단시간에 연안으로 유출되므로써 이 시기를 제외하고는 유량이 극히 부족하다(신, 1998). 유량의 절대적 부족으로 갈수현상이 장기간 심화되고 이때 특히 하천의 자정작용이 원활하지 못해 수질관리가 더욱 어려운 실정이다.

금강은 남한에서 중앙부 서쪽에 위치하여 한강과 낙동강 다음으로 제 3의 하천유역에 해당하며(금환청, 1997), 최상류부에 용담호가 건설중에 있고 중류부에 대청호가 위치하고 있어 수자원의 이용가치가 매우 큰 편에 속한다. 주요지류는 상류로부터 남대천을 포함하여 23개의 여러 계천이 본류에 유입되고 있으나 지류의 유역면적으로 볼 때 미호천을 제외하고는 대부분 본류의 3~6% 정도에 불과한 소하천으로 볼 수 있고 오염의 부하가 비교적 큰 지류는 대청호의 댐하류에 위치하고 있다(금환청, 1997).

중·하류의 수질은 중류부에 대전광역시를 포함한 중소도시 및 농촌지역으로부터 유입되는 각종 오폐수의 영향이 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 하천의 하구에 배수갑문이 축조되어 유량이 부족한 시기에는 부여~강경부터 그 하류에는 반호수의 수문상태를 보이고 있다(신과 조, 1999). 외부로부터 부하되는 유·무기물 농도가 높을 뿐만 아니라 정체성이 강한 하류부(PUY~HAG)에서 내부생성 chl-a의 평균농도가 60 µg/l 수준으로 매우 악화된 상태를 보이고 있다(신과 조, 1999; 유 등, 1999). 이러한 양상에 대한 저감대책 수립이 무엇보다도 시급한 것으로 판단되며 수질악화에 대한 근원과 결과적 현상을 본류와 지류를 구분하여 파악함으로써 오염양상을 보다 면밀하게 규명하고 수질관리에 대

한 방향성 제시가 요구되고 있다.

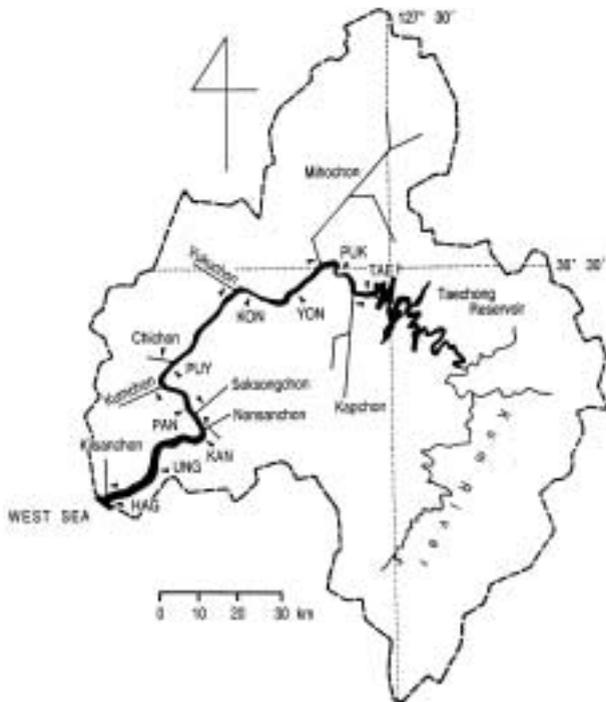
금강 중·하류에서 수질에 관한 연구는 다른 대하천 수계에 비해 그리 많지가 않다. 유 등(1999)은 하구의 수문을 닫은 1년 후인 95년~96년에 걸쳐 본류의 주요 6개 지점에서 계절별로 4회 조사하여 부영양화 현상을 설명하였고, 신과 조(1999)는 최근 98년~99년에 월호 모니터링으로 하구 저수지의 오염도를 평가한 바 있다. 그 외 한국수자원공사와 농어촌진흥공사에서 환경조사의 일환으로 조사된 일부 보고서가 있다.

담수의 부영양화에 관한 연구는 우리나라에서 1980년대 후반부터 관심이 증가되어 여러 호소와 하천을 대상으로 접근되었으며 특히 정수환경인 호소에 관한 연구가 많았다. 반면에 오염이 극심하여 점오염원 역할을 하는 도시하천에서 비롯되는 대하천의 수질에 관한 연구는 사회적 문제로 대두되고 있는 낙동강을 제외하고는 비교적 적다(신, 1998). 따라서 본 연구는 다양한 오염원에 노출된 하천인 금강에서 오염물질의 영향과 변동양상을 파악하기 위하여 중류부터 하구에서 수문을 포함한 주요 수질을 분석하였고 특히 N·P 및 chl-a를 중심으로 수환경을 평가하여 향후 수질관리에 대한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

대청댐 하류의 금강 중·하류에서 수질환경 조사를 위한 지점은 하구로부터 상류 약 135 km 지점에 위치한 대청호 조정지댐부터 하구둑까지 유입지점을 적절하게 고려하여 유하거리에 따라 선택하였다(Fig. 1). 본류구간은 대청호 조정지댐 상류부(TAE), 부강(PUK), 금남교(YON), 공주교(KON), 백제교(PUY), 반조원(PAN), 황산대교(KAN), 웅포대교(UNG) 및 최종적으로 하천수가 연안으로 방류되는 지점인 하구둑(HAG)의 9개 지점으로 하였고, 지류는 대전광역시와 청주시 등의 중소도시를 관류하거나 유역으로 두고있는 갑천과 미호천을 포함하여 유구천, 지천, 금천, 석성천, 논산천 및 길산천의 8개 지점으로 총 17개 지점에서 조사하였다(Fig. 1). 지류의 조사지점은 본류에 합류되기 직전 지점을 선택하여 본류에 미치는 지류의 영향을 최대한 고려하였다.

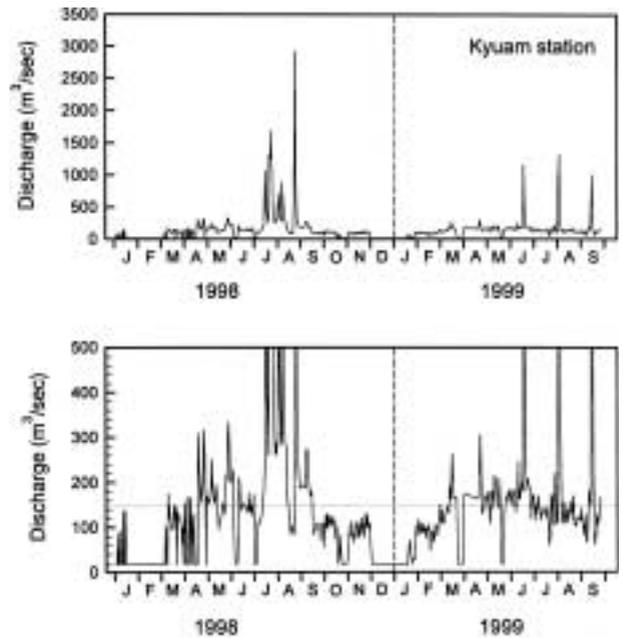
수문자료는 한국수문연보 및 유량연보(건교부, 1979~97)와 금강수위월보(금홍통, 1998~99)의 자료를 활용하였다. 수질조사 항목 중 수온과 DO는 DO meter(YSI 58 또는 59)로, pH, 전기전도도 및 투명도는 각각 Orion 230A meter, Conductometer LF191, Win 및 Secchi 원판(지름 0.25 m)으로 현장에서 측정하였다. 분석시료는



**Fig. 1.** Sampling locations for the water quality surveys in the Kum River. The estuarine barrage or water-gates were constructed on the river mouth from December 5, 1983 to November 20, 1990. Water impoundment began in August 30, 1994.

Van Dorn 채수기로 표층 (0.5 m 수심)에서 채수하였다. 시료용기는 4 l 플라스틱병을 사용하였고 아이스박스를 이용하여 실험실로 옮겼다. 운반한 시료는 항목에 따라 즉시 분석하거나 냉동(-20~-70°C)보관 후 2주 이내에 정량하였다. 수질은 Rump and Krist (1988), APHA (1992) 및 환경처 (1993)의 분석법에 따라 측정하였다. 각종 유기물 분석은 시료를 그대로 사용하였으나 무기영양염(NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, SRP 및 SRSi)은 Whatman GF/C filter로 여과한 후 분석하였다. 유기질소는 TN에서 DIN(NH<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)의 차이로 산출하였고 유기인 농도는 TP에서 SRP 농도를 뺀 값으로 보았다. TSS는 시료를 0.45 μm membrane filter에 여과하여 105°C에서 2시간 이상 건조시킨 후 여과 전·후 무게의 차이로 계산하였고, BOD<sub>5</sub>는 Winkler azid법으로 매번 보정한 BOD probe (YSI model 5730)를 사용하여 초기농도와 5일 후 최종농도의 차이로 구하였다. Chl-a 농도는 시료를 GF/C 여과지로 여과한 후 90% 에탄올을 용매로 사용하여 비등 추출하였고 분광광도계로 665 nm와 750 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다 (Nusch, 1980).

본 연구는 금강 중·하류에서 유입지천의 영향에 따



**Fig. 2.** The daily variation of water discharge at Kyuam monitoring station of the Kum River from January 1998 to September 1999. Dotted line in the lower graph indicate average discharge (145 m<sup>3</sup>/s).

른 부영양화 양상과 오염특성을 파악하기 위하여 1998년 3월 10일, 6월 21일, 9월 18일, 12월 27일, 1999년 1월 27일, 3월 9일, 4월 13일 및 6월 7일에 걸쳐 총 8회 조사하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 수문환경

본 조사기간 이전에 해당하는 79~97년 (19년간)의 수문자료를 요약한 것은 Table 1과 같다. 이 기간에 풍수량, 평수량, 저수량 및 갈수량은 각각 2,505 m<sup>3</sup>/s, 115 m<sup>3</sup>/s, 95 m<sup>3</sup>/s 및 59 m<sup>3</sup>/s로 계산되었고 평균 유량은 145 m<sup>3</sup>/s였다. 또한 유량의 최대값과 최소값의 차이로서 표현되는 하상계수는 84였다.

금강에서 유량 변동은 연중을 통해 계절적 편차가 매우 컸고 다른 계절에 비해 유량이 급격하게 증가한 시기는 6월~9월로서 이 시기에 강우가 집중되었다 (Fig. 2). 98년 1월~99년 9월 사이에 규암 (PUY부근)에서 관측된 일 유량의 범위는 18~2,924 m<sup>3</sup>/s로서 평균값은 145 m<sup>3</sup>/s였고 하상계수는 162이었다. 또한 평균 유량은 19년 자료의 평균값과 비슷하였고 평수량 이상의 수준에 해당하였다. 최대 유량을 보인 시기는 98년 7월말경이었

**Table 1.** Summary of water discharge analysis at Kyuam monitoring station of the Kum River from 1979 to 1997.(Unit : m<sup>3</sup>/s)

Years\ Conditions	Drought flow (Q355)	Minimum flow (Q275)	Normal flow (Q185)	Flood flow (Q95)	Coefficient of river regime (Max/Min)	Yearly average discharge
1979~1997	59.1±41.8	95.2±51.5	114.7±78.7	2,504.7±1,241.1	83.5±46.0	145.1±94.9

References : 1. Ministry of Construction and Transportation. 1979~1997. Hydrological annual report in Korea.

2. Ministry of Construction and Transportation. 1996~1997. Discharge annual report in Korea.

**Table 2.** Average values of environmental factors in the main river and the tributary of the Kum River from March 1998 to June 1999. N = 8. ±Standard deviation.

Factors	Main river	Tributary
Temperature (°C)	12.6±1.4	12.6±1.7
Dissolved oxygen (mg O <sub>2</sub> /l)	12.3±1.2	11.2±1.9
pH	7.6±0.5	7.3±0.4
Conductivity (µS/cm)	218.3±46.4	260.7±119.6
Transparency (m)	0.9±0.2	-
Total suspended solids (mg dw/l)	16.2±5.4	23.3±15.3
Discharge (m <sup>3</sup> /s)	97.3±53.2	-
Chlorophyll-a (µg/l)	35.4±21.0	18.1±16.2
Total nitrogen (mg N/l)	3.82±0.74	5.07±2.90
Organic nitrogen (mg N/l)	2.02±0.37	2.51±1.20
Dissolved inorganic nitrogen (mg N/l)	1.81±0.37	2.56±1.70
Ammonium (mg N/l)	0.89±0.44	1.69±1.68
Nitrate (mg N/l)	0.92±0.07	0.87±0.08
Total phosphorus (µg P/l)	147.3±58.7	291.6±273.0
Organic phosphorus (µg P/l)	94.2±32.9	144.5±99.1
Soluble reactive phosphorus (µg P/l)	53.1±37.5	147.1±148.2
Soluble reactive silicon (mg Si/l)	1.2±0.3	2.2±0.8
TN/TP ratio	41.8±32.6	34.4±25.7
DIN/SRP ratio	544.2±691.2	508.0±1,096.2
SRSi/SRP ratio	322.8±745.5	291.6±676.3
Biological oxygen demand (mg O <sub>2</sub> /l)	3.6±1.0	5.6±5.0

다. 수문 경향은 하계에 변동 폭이 컸고 불규칙적이었으며 동계로 갈수록 강설 시기를 제외하고는 <20 m<sup>3</sup>/s로 급감하여 하계보다 변화 폭이 적었다(Fig. 2). 수질환경을 조사한 시기에 유량은 18~162 m<sup>3</sup>/s 범위였고 평균값은 97 m<sup>3</sup>/s로서 저수량~평수량의 중간 수준이었다(Table 2). 하천의 수문 변동은 기후의 상황과 유역의 배수패턴에 의해 좌우되며(Chapman, 1992), 평수량 이하의 유량이 장기화될수록 하류지역에서 chl-a 농도가 급격하게 증가되어 수질이 악화되는 시기로 볼 수 있었고 하천의 수질은 수문학적 영향(Reynolds, 1988; Pace *et al.*, 1992; Basu and Pick, 1996)도 큰 것으로 관찰되었다.

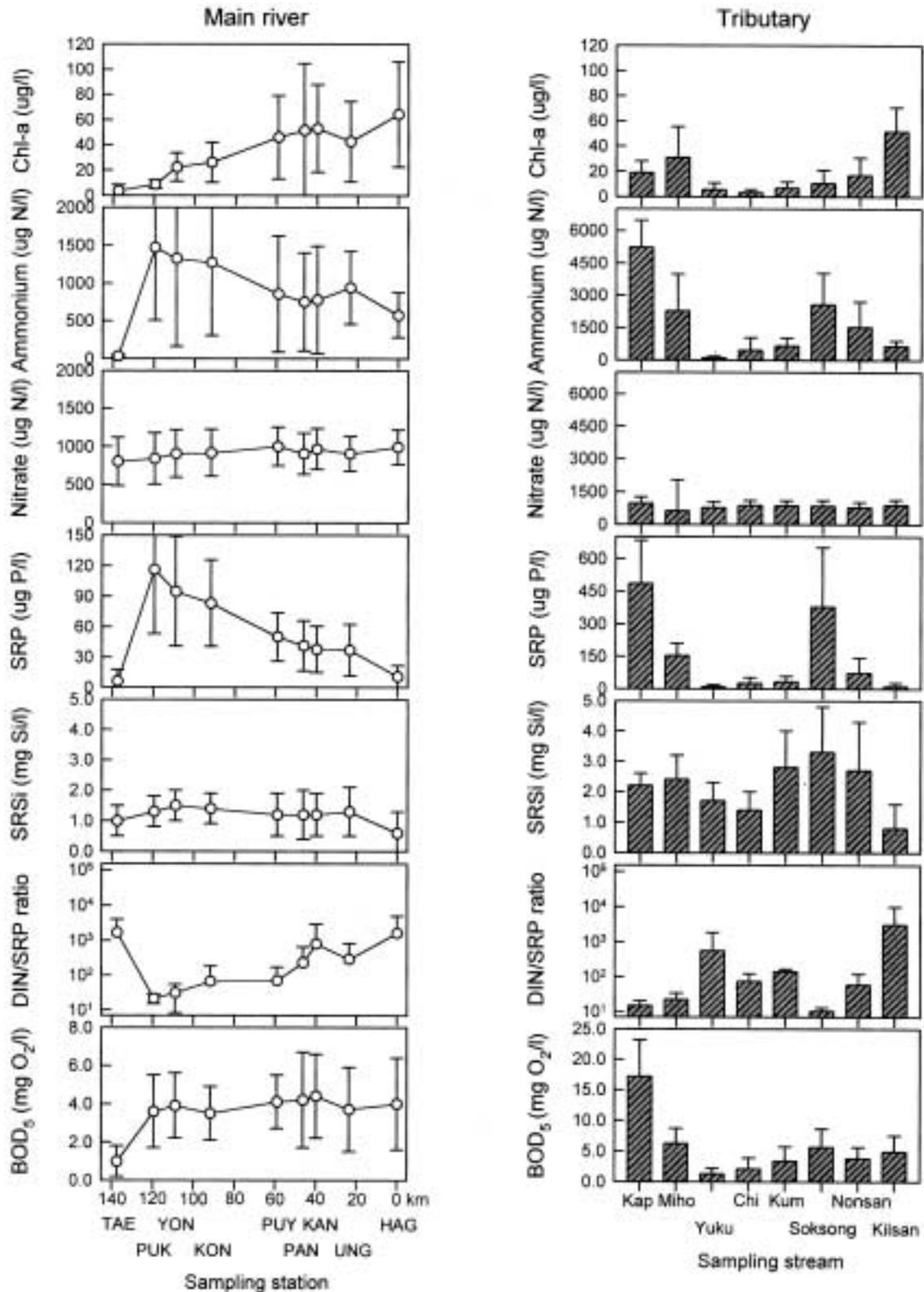
## 2. 수질환경

### 1) 수온, DO, pH 및 전기전도도

측정 항목 중 수온은 전형적인 계절적 특성이 잘 반영되어 조사기간 동안 본류에서 최대 및 최소가 HAG에서 관찰되어 98년 9월에 26.5°C로 가장 높았고 99년 1월에 4.2°C로 가장 낮았으며 본류의 평균 수온은 12.6°C였다(Table 2). 지류에서 수온은 98년 6월에 논산천에서 27.1°C로 가장 높았고 98년 12월에 유구천에서 4.1°C로서 가장 낮았으며 지류의 평균 수온은 12.6°C로 본류의 평균 수온과 비슷하였다(Table 2). 또한 본류와 지류에서 각 정점별 수온의 차이는 다른 항목에 비해 크지 않았다.

DO의 변동은 온도에 의한 수중 DO 포화도의 영향이 커 전반적으로 수온이 상승할 때 낮고 수온이 하강할 때 높아 수온과 반비례하는 경향을 보이는 일반적인 양상을 보였다. DO는 PAN에서 99년 3월에 18.3 mg O<sub>2</sub>/l로서 가장 높았고 TAE에서 98년 9월에 6.1 mg O<sub>2</sub>/l로서 가장 낮았으며 본류의 평균값은 12.3 mg O<sub>2</sub>/l였다(Table 2). 본류에서 DO의 변동은 하류로 갈수록 큰 폭으로 증가함이 현저하였고 DO가 급격하게 증가된 것은 무엇보다도 수중에서 식물플랑크톤(chl-a)의 왕성한 광합성의 영향으로 볼 수 있었다. 반면에 중·하류에서 DO 차가 크지 않은 경우는 하천수의 유하량에 영향을 받아 수문 요인과 관련성이 큰 것으로 추정되었다. 지류에서 DO 분포는 길산천에서 99년 1월에 16.3 mg O<sub>2</sub>/l로서 가장 높았고 99년 6월에 갑천에서 4.7 mg O<sub>2</sub>/l로서 가장 낮았으며 지류의 평균농도는 11.2 mg O<sub>2</sub>/l이었다(Table 2). 지류에서 DO의 변동 및 분포는 본류로 유입되는 수질의 오염도를 간접적으로 평가할 수 있었으며 시기별로 종합해 보면 지류의 평균값보다 낮거나 비슷한 수준의 지류는 갑천, 미호천, 석성천 및 논산천이 해당하였다.

pH는 본류에서 6.5~9.5 범위로서 평균값은 7.6이었다(Table 2). 중류보다 하류로 갈수록 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였고 계절적으로 볼 때 99년 3월에 PAN~HAG에서 9.3~9.5로 가장 높았고 99년 4월에 HAG를



**Fig. 3.** Spatial distribution of chlorophyll-a, inorganic nitrogen, phosphorus, silicon, biological oxygen demand concentration and DIN/SRP ratio in the main river and the tributaries of the Kum River from March 1998 to June 1999. N = 8.

제외한 지점에서 6.7~7.0 범위로 비교적 낮았다. 지류에서 pH의 분포는 6.3~9.0 범위로서 평균값은 7.3이었다 (Table 2). 평균값으로 볼 때 갑천이 6.8 (6.3~7.2 범위)로서 비교적 낮았고 길산천이 8.1 (7.1~9.0 범위)로서 가장 높았다. 그 외 지류는 7.0~7.4 범위를 보였다. pH의 변동은 평수량 이하의 시기에 DO의 증감과 관련성이 커 식물플랑크톤의 생물량 변동과도 연관이 있는 것으로 나타났다. 반면에 pH의 감소는 DO와 마찬가지로 수문요인의 영향을 받아 다른 시기보다도 유량이 증가한 시기에 그 값이 가장 낮았다.

전기전도도는 본류에서 65~370  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위로서 평균값은 218  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었다 (Table 2). 전기전도도의 평균값은 TAE에서 103  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 비교적 낮았고 갑천이 합류한 뒤 PUK에서 198  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 약 2배 증가하였으며 YON~HAG에서는 246~259  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위로서 큰 차이가 없었다. 반면에 지류는 본류와 달리 차이가 뚜렷하였다. 갑천과 미호천은 평균값이 각각 441  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 와 439  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 높았고 석성천, 길산천, 논산천 및 금천이 201~261  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위였으며 유구천과 지천은 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이하로 낮았다.

## 2) TSS와 투명도

TSS는 본류구간에서 0.2~89.0 mg dw/l 범위로서 TAE에서 가장 낮았고 YON에서 가장 높았으며 평균값은 16.2 mg dw/l였다. 유입지천에서 TSS의 분포는 평균농도가 미호천이 50.5 mg dw/l로서 월등히 높았고 길산천, 갑천 및 석성천이 27.4~34.8 mg dw/l 범위였다. 그 외 다른 지류는 4.0~17.0 mg dw/l 범위로서 금천에서 높았고 유구천이 가장 낮았다. TSS의 변동은 다른 시기에 비해 유량이 증가한 99년 4월에 비교적 높았다. 또한 YON~PUY가 PAN~HAG보다도 chl-a 농도는 낮은 반면 TSS는 다소 높은 경향을 보였는데 이는 무엇보다도 지류의 영향과 이 구간에서 하상정비에 따른 토사의 증가가 주된 원인으로 확인되었고 지류에서 미호천, 석성천 및 길산천의 높은 농도도 이와 동일한 영향으로 볼 수 있었다. 이러한 영향을 제외한 경우로 PAN~HAG구간에서 HAG로 갈수록 조금씩 증가하는 경향은 식물플랑크톤을 포함한 생물량의 증가에 따른 결과로 해석되었다.

투명도는 현장의 측정수심을 고려하여 본류의 TAE~YON구간과 유입지류를 제외한 KON~HAG구간에서만 조사하였다. 조사결과에서 0.4~1.6 m 범위로 변화 폭이 컸고 하류로 갈수록 감소하는 경향이 뚜렷하였으며 평균값은 0.9 m였다. 다른 지점보다도 KON~PUY에서 최대 및 최소의 차이가 컸는데 이는 생물량의 증가요인도

고려될 수 있으나 인위적인 물의 혼탁에 따른 TSS의 증가 영향도 컸던 것으로 볼 수 있었다. 반면에 하류의 HAG로 갈수록 투명도가 급감할 뿐만 아니라 그 차이도 적어 중류와는 달리 무생물 요인의 증가보다 만성적인 식물플랑크톤 현존량의 증가(신과 조, 1999)가 주된 요인으로 작용하였다.

## 3) BOD<sub>5</sub>

BOD<sub>5</sub>는 본류에서 조사시기에 따라 정점간에 편차가 다소 컸고 평균값이 3.6 mg O<sub>2</sub>/l였다 (Table 2). 그 변동양상은 TAE에서 평균농도가 1.0 mg O<sub>2</sub>/l였으나 갑천과 합류하고난 직후부터 급격하게 증가하여 PUK에서 평균이 3.6 mg O<sub>2</sub>/l였다 (Fig. 3). 또한 BOD<sub>5</sub>는 PUK 이후부터 HAG까지 큰 차이가 없었고 전반적으로 일정한 경향을 보였다. 이 구간에서의 BOD<sub>5</sub>의 범위는 1.0~4.4 mg O<sub>2</sub>/l였고 평균 농도는 3.9 mg O<sub>2</sub>/l였다. BOD<sub>5</sub>는 조사 지천간에 차이가 컸고 평균값이 5.6 mg O<sub>2</sub>/l였다 (Table 2). 지류에서 분포는 갑천이 평균농도가 17.2 mg O<sub>2</sub>/l로서 가장 컸고 다음으로 미호천, 석성천, 길산천, 논산천 및 금천의 순으로 평균값이 각각 6.2 mg O<sub>2</sub>/l, 5.6 mg O<sub>2</sub>/l, 4.9 mg O<sub>2</sub>/l, 3.8 mg O<sub>2</sub>/l 및 3.4 mg O<sub>2</sub>/l였으며 유구천이 1.3 mg O<sub>2</sub>/l로서 가장 낮았다 (Fig. 3). BOD<sub>5</sub> 농도가 최고인 갑천은 최저인 유구천보다 약 13배정도 더 높아 갑천의 유기물 부하가 본류에 미칠 수 있는 영향이 매우 컸다.

## 3. N · P 및 Si 영양염

### 1) 질소

본류 구간에서 질소 성분 중 TN의 농도 범위는 0.6~5.9 mg N/l로서 평균값은 3.8 mg N/l였다 (Table 2). 유기질소와 무기질소의 평균 농도는 각각 2.0 mg N/l, 1.8 mg N/l였으며 TN 중에 차지하는 비율은 유기질소가 53%였고 무기질소가 47%였다 (Table 2). 중·하류 구간에서 유기질소와 무기질소의 변동양상을 보면 유기질소의 경우 큰 차이는 없었으나 하류로 갈수록 다소 증가한 반면에 무기질소는 크게 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 3).

TN과 무기질소 중 NH<sub>4</sub>가 본류에서 차지하는 비율은 각각 24%, 50%였다 (Table 2). 본류의 NH<sub>4</sub>는 평균농도가 891  $\mu\text{g N/l}$ 이었고, TAE에서 평균 38  $\mu\text{g N/l}$ 로 시작하여 갑천으로부터 유입되는 고농도 (평균 5,231  $\mu\text{g N/l}$ )에 의해 PUK에서 평균이 1,476  $\mu\text{g N/l}$ 로서 TAE의 38배 수준으로 급격하게 증가하였다. 이후 하류의 PAN까지 평균 752  $\mu\text{g N/l}$ 수준으로 감소하였으며 UNG에서 940  $\mu\text{g N/l}$ 로서 조금의 증가가 있었으나 HAG에서 평균 577  $\mu\text{g N/l}$ 로 다시 큰 폭으로 감소하는 경향이 뚜렷하였다 (Fig.

3).  $\text{NH}_4$ 는 계절적으로 볼 때 12~3월이 비교적 높았고 6월과 9월이 비교적 낮았던 결과로 보아 본류의 유량 증가 영향이 컸던 것으로 볼 수 있었다. UNG에서 큰 차이는 아니지만 이전 조사지점보다도 다소 높은 농도를 나타낸 것은 본 조사를 통해 파악되지 않은 또다른 영향인자가 있었던 것으로 판단되었다. 특히 이 구간은 정체성이 강하고 수심이 어느 정도 유지되는 하천의 하류부에 해당한다. 낙동강 하류에서 조사된 조와 신(1997)의 선행 결과와 유사하였는데 하상에 과다하게 축적된 유기물의 분해로 인한 저토의 영향으로 보고되어 향후 이에대한 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 본다.

중·하류에서  $\text{NO}_3$ 의 변동은 본류의 평균값이 916  $\mu\text{g N/l}$ 였고 TN과 무기질소에 대해 각각 24%, 50%를 차지하였다.  $\text{NH}_4$ 와는 달리 지류의 영향이 적었고 중·하류에서 유하거리에 따른 정점별 농도는 PUY에서 평균농도가 1,000  $\mu\text{g N/l}$ 로서 약간 높았으나 일정한 경향을 보였다(Fig. 3).

유입지류에서 TN의 농도는 2.1~13.9 mg N/l 범위로서 평균값은 5.1 mg N/l였다(Table 2). TN 중 유기질소와 무기질소의 평균농도는 각각 2.5 mg N/l, 2.6 mg N/l였고, 유기질소는 49%였고 무기질소는 51%였다(Table 2). 지류에서 유기질소와 무기질소의 구성비에 따라 평균농도에서 유기질소는 갑천(4,972  $\mu\text{g N/l}$ ) > 미호천(3,394  $\mu\text{g N/l}$ ) > 길산천(2,565  $\mu\text{g N/l}$ ) > 석성천(2,350  $\mu\text{g N/l}$ ) > 금천(1,949  $\mu\text{g N/l}$ ) > 논산천(1,872  $\mu\text{g N/l}$ ) > 지천(1,637  $\mu\text{g N/l}$ ) 및 유구천(1,196  $\mu\text{g N/l}$ ) 순이었고, 무기질소는 갑천(6,205  $\mu\text{g N/l}$ ) > 석성천(3,897  $\mu\text{g N/l}$ ) > 미호천(3,150  $\mu\text{g N/l}$ ) > 논산천(2,311  $\mu\text{g N/l}$ ) > 금천(1,532  $\mu\text{g N/l}$ ) > 길산천(1,355  $\mu\text{g N/l}$ ) > 지천(1,330  $\mu\text{g N/l}$ ) 및 유구천(873  $\mu\text{g N/l}$ ) 순으로 적었다.

지류의  $\text{NH}_4$ 는 TN과 무기질소에서 각각 33%, 65%를 차지하였다(Table 2). 지류에서  $\text{NH}_4$ 의 분포로 볼 때, 갑천에서 평균농도가 5,231  $\mu\text{g N/l}$ 으로 가장 높았고, 그 다음으로 석성천, 미호천 및 논산천이 각각 2,579  $\mu\text{g N/l}$ , 2,274  $\mu\text{g N/l}$  및 1,535  $\mu\text{g N/l}$ 이었으며 유구천은 평균농도가 111  $\mu\text{g N/l}$ 로서 가장 낮았다(Fig. 3). 평균농도로 볼 때 가장 높았던 갑천과 최저를 보인 유구천과의 비교에서 갑천이 유구천보다 평균 47배 더 높아 그 차이가 매우 컸다(Fig. 3). 반면에 지류에서  $\text{NO}_3$ 는 평균값이 872  $\mu\text{g N/l}$ 였고 TN과 무기질소에 대해 차지하는 비율은 각각 18%, 35%였다.  $\text{NH}_4$ 와는 달리 조사시기 및 정점별 차이는 적었고 거의 일정한 수준을 보였다(Fig. 3). 따라서  $\text{NO}_3$ 가 본류에 미치는 영향은 그리 크지 않았다.

## 2) 인

SRP는 다른 영양염 인자에 비해 변동 양상이 뚜렷하였고  $\text{NH}_4$ 와 유사한 경향을 보였다. TP에 대한 SRP는 평균값으로 36%를 차지하였고 그 비율이 중류에서 높고 하류로 갈수록 현저하게 감소하였다. 중·하류에서 SRP는 TAE에서 평균농도가 7  $\mu\text{g P/l}$ 로서 매우 낮았고 갑천이 유입된 직후인 PUK에서 평균값이 117  $\mu\text{g P/l}$ 로서 매우 큰 폭(약 17배)으로 증가하였다. 이후 하류로 유하하면서 지속적으로 감소하여 HAG에서는 평균농도가 11  $\mu\text{g P/l}$  수준으로 낮아졌다(Fig. 3). 일반적으로 SRP는 담수에서 식물플랑크톤의 현존량을 결정하는 중요한 제한인자로 잘 알려져 있다(신, 1998). 따라서 하류로 유하하면서 감소한 것은 식물플랑크톤의 생물량 증가와 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다.

지류에서 SRP는 다른 영양염 인자보다 분포가 현저하였고  $\text{NH}_4$ 와 유사한 경향을 보였다. SRP는 TP의 평균값에 대해 50%를 차지하였고 갑천이 가장 높아 평균농도가 486  $\mu\text{g P/l}$ 였고 석성천, 미호천 및 논산천의 순으로 각각 평균농도가 379  $\mu\text{g P/l}$ , 153  $\mu\text{g P/l}$  및 74  $\mu\text{g P/l}$ 를 나타냈다(Fig. 3). SRP의 농도가 가장 낮았던 유구천과 갑천의 비교에서 갑천이 평균적으로 47배 더 높아 본류로 유입되는 SRP의 영향이 매우 컸다. 또한 본류의 부영양화는  $\text{NH}_4$ 와 SRP의 수준에 의해 좌우되므로 이에 대한 저감대책 마련이 시급한 것으로 판단된다. 그 단적인 예로 오염부하가 상대적으로 큰 도시를 관류하는 계천으로부터 유입되는 N·P의 증가량에 비례하여 chl-a가 지속적으로 증가하는데 원인을 들 수 있다.

## 3) 규소

SRSi는 부영양화의 근원이 되는 영양염은 아니나 계절에 따라 N·P와 더불어 식물플랑크톤의 생물량을 결정하는 또다른 중요한 요인으로 작용할 수 있다(Takano and Hino, 1996). SRSi는 중하류에서 0~2.4 mg Si/l 범위로서 평균값은 1.2 mg Si/l였다(Table 2). TAE에서 1.0 mg Si/l, YON에서 1.5 mg Si/l 및 HAG에서 0.6 mg Si/l로서 YON을 기준으로 점진적인 증감양상이 관찰되었다(Fig. 3). 지류에서 SRSi는 0~5.1 mg Si/l 범위로서 평균이 2.2 mg Si/l였다(Table 2). 지류의 농도는 본류보다 높아 그 영향이 매우 컸다. 또한 SRSi는 토양에 근간이 되는 인자로서 증감의 변동 중 증가요인은 유역의 토지이용에 의한 비점오염원의 영향이 크며 전술한 바와 같이 하천정비 등에 의한 인위적인 교란도 중요한 요인으로 볼 수 있었고 감소요인은 저층으로의 침강과 식물플랑크톤의 흡수 및 이용(Takano and Hino, 1996)이 상당한

부분을 차지할 것으로 판단된다.

#### 4. Chl-a

Chl-a 농도는 중류에서 하류로 갈수록 지속적으로 증가하는 양상이 뚜렷하였다(Fig. 3). TAE에서 평균값이 3.9 µg/l 농도로 낮았으나 하류로 갈수록 높아져 KAN에서 평균이 53.0 µg/l였고 HAG에서 64.4 µg/l로서 TAE보다 17배 정도 증가한 수준이었다(Fig. 3). 하류로 갈수록 chl-a의 증가는 무엇보다도 NH<sub>4</sub>와 SRP가 감소한데 원인을 둘 수가 있으며 실제로 N·P양이 감소한 만큼 chl-a가 증가하였다. 따라서 금강의 중·하류 구간에서 식물플랑크톤의 생장은 이들 무기 N·P의 농도가 중요한 요인으로 볼 수 있었다. 지류에서 chl-a 농도는 0.5~74.7 µg/l 범위로서 평균값은 18.1 µg/l였다(Table 2). Chl-a 분포는 유구천, 지천 및 금천의 평균이 각각 5.7 µg/l, 3.4 µg/l 및 6.9 µg/l로서 비교적 낮았고, 미호천과 길산천이 각각 30.9 µg/l, 51.7 µg/l로서 높았으며 갑천과 논산천은 각각 18.8 µg/l, 16.9 µg/l로서 그 중간 수준에 해당하였다(Fig. 3).

#### 5. 제한 영양염

수중에서 식물플랑크톤의 생장에 대한 제한영양염의 판정은 일반적으로 화학적 수질분석에 의한 상대 비율과 AGP (algal growth potential) 측정이나 NEB (nutrient enrichment bioassay)와 같은 생물검정의 결과로서 평가될 수 있다(Miller *et al.*, 1974; Goldman, 1978). N과 P의 상대적인 풍부성은 식물플랑크톤 군집의 양과 조성에 중요한 영향을 미치게 되며(Smith, 1986; McCauley *et al.*, 1989), N/P 비율은 물의 영양상태와 밀접한 관련성이 있어 수질이 오염될수록 그 비율이 감소하고 오염이 덜할수록 증가하는 경향을 보이며 P에 비해 상대적으로 N의 함량이 매우 클 때 그 값이 낮다(Downing and McCauley, 1992).

본류에서 무기 N/P비의 경향을 보면 갑천이 유입된 직후의 PUK에서 평균이 22로 가장 낮았고 하류로 갈수록 급격하게 증가하는 경향이 뚜렷하여 최하류인 HAG에서는 그 비율이 1,660으로서 PUK에 비해 77배나 증가하였다(Fig. 3). 이것은 중류에서 하류로 갈수록 N 성분보다 상대적으로 P 성분이 더욱 큰 폭으로 감소하는 경향을 뒷받침한다. N/P비가 <10이면 N제한, >20 이상이면 P제한으로 보는 Porcella와 Bishop (1975)에 따르면 중·하류에서 N/P비는 >500으로서 비교적 크기 때문에 식물플랑크톤의 생장에 대한 제한인자는 P가 중요하게 작용할 것으로 추정되었다. 반면에 지류에서

N/P비의 분포는 석성천, 갑천 및 미호천이 가장 작아 평균이 각각 10, 15 및 22였고 유구천과 길산천이 각각 559와 3,183로서 매우 컸다(Fig. 3). 결과적으로 전술한 오염도에 따른 N/P비는 상반되는 경향을 나타냈다(Downing and McCauley, 1992). 또한 TN/TP의 비로 볼 때 그 비율이 본류와 지류가 각각 42, 34로서 갑천(15)과 석성천(12)을 제외한 모든 지점에서 17 이상(Downing and McCauley, 1992)에 해당하여 영양염의 제한성은 무기 N·P의 결과와 동일하였다.

#### 6. 수질평가

중·하류에서 부영양화의 평가항목인 BOD<sub>5</sub>, chl-a, 투명도, TN 및 TP로서 수질을 평가하였다(Vollenweider, 1968; USEPA, 1976; Carlson, 1977; Forsberg and Ryding, 1980; OECD, 1982; 환경처, 1994). 그 결과 본류와 지류의 수질은 여러 평가기준을 통해 대부분 부영양화된 것으로 나타났다(Table 2, 3). BOD<sub>5</sub>는 환경처(1994)의 수질평가 기준으로 볼 때 본류는 PUK~HAG구간에서 평균적으로 III급수에 해당하였다. TAE~HAG에서 유입되는 순으로 볼 때 주요 지류는 갑천이 V급수 이상, 미호천은 IV급수, 유구천과 지천은 II급수, 금천, 석성천, 논산천 및 길산천은 III급수에 해당하여 평균 수질은 II~V급수(평균 III급수) 범위로 그 차이가 매우 컸고 오염의 영향이 뚜렷하였다. 투명도는 KON~HAG구간에서 Secchi 수심의 평균값이 1 m 이하로서 물이 매우 혼탁한 상태를 보였다. 1~100 범위에서 10등급으로 구분한 Carlson(1977)의 영양지수에 의하면 본류는 그 값이 62로서 수질이 매우 악화되었다.

Chl-a는 식물플랑크톤의 현존량 뿐만 아니라 부영양화 상태를 평가하는 지표가 된다. 연평균 농도가 >25 µg/l을 부영양(eutrophic), >75 µg/l을 과영양(hypertrophic)으로 평가하는 Vollenweider와 Kerekes(OECD, 1982)의 기준에 따르면 PUK~HAG에서 전 정점이 상당히 부영양화된 수준으로 볼 수가 있었다. 특히 HAG의 경우는 과영양 수준에 가까운 수질상태를 보였다(신과 조, 1999). 반면에 지류는 chl-a로 볼 때 미호천이 가장 부영양화된 수준으로 볼 수가 있었고 길산천은 과영양상태였다(Fig. 2). 미호천에서 chl-a가 높은 것은 다른 지류에 비해 소유역 면적이 가장 넓고 유로연장이 길다. 따라서 조사지점의 상류에서 식물플랑크톤이 풍부한 영양염을 섭취 후 하류로 유하하면서 어느 정도 생장이 활발하였던 것으로 추정된다. 또한 길산천은 HAG와 인접한 곳으로서 강수 시기와 하구의 수문개폐 시기를 제외하고는 반 호수적 수문특성에 따른 영향으로 유입되

**Table 3.** Water quality assessment by several criteria with average value in the main river and the tributary from midstream to downstream of the Kum River.

Criteria\Variables	BOD		Chl-a		Secchi		TN		TP	
	M	T	M	T	M	T	M	T	M	T
USEPA (1976)	-	-	E	E	E	-	-	-	E	E
Carlson (1977)	-	-	E	E	E	-	-	-	E	E
Rast and Lee (1978)	-	-	E	E	E	-	-	-	E	E
Forsberg and Ryding (1980)	-	-	E	E	H	-	H	H	H	H
OECD (1982)	-	-	E	E	E	-	E	E	E	E
Ministry of Environment, Korea (1994)	3	2~5	-	-	-	-	-	-	-	-

BOD: biological oxygen demand, Chl-a: chlorophyll-a, TN: total nitrogen and TP: total phosphorus. M: Main river, T: Tributary. E: eutrophic, H: hypertrophic.

는 영양염의 이용도가 컸던 것으로 생각된다.

TN과 TP 농도가 각각 600~1,500 µg N/l, 393~6,100 µg N/l, 25~100 µg P/l, 16~390 µg P/l를 부영양, >1,500 µg N/l, >6,100 µg N/l, >100 µg P/l, 750~1,200 µg P/l를 과영양으로 보는 기준 (Forsberg and Ryding, 1980; OECD, 1982)에 따르면 본류와 지류의 수질은 부영양 또는 과영양상태로 평가되었다 (Table 2).

금강 중·하류의 수질악화는 지류의 점오염원으로부터 고농도의 N·P 영양염이 유입되는데 원인을 들 수가 있으며 특히 저수기~갈수기에 본류의 하류에서 장기간 식물플랑크톤이 만성적으로 대발생하는 등 전형적인 수질오염 양상을 보이고 있었다. 따라서 금강은 향후 물 이용이 더욱 증가할 것으로 전망되고 있어, 이에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 사료된다 (신과 조, 1999). 또한 현 시점에서 부영양화에 대한 수질관리 뿐만 아니라 하천생태계의 건강성 유지를 위해 지속적인 환경생태학적 조사가 필요할 것으로 판단된다.

## 적 요

금강 중·하류의 본류와 지류에서 수질오염의 특성과 변동양상을 파악하기 위하여 1998년 3월부터 1999년 6월까지 총 8회 조사하였다. 환경요인 중 질소, 인 및 chl-a의 변동이 다른 요인에 비해 증감양상이 뚜렷하였고 특히 무기 N·P의 영향은 지류 중 갑천, 미호천 및 석성천이 가장 큰 것으로 관찰되었다. 수질은 수문요인 과도 관련성이 높아 평수량이하의 유량이 장기화되거나 비교적 유량이 적은 저수기~갈수기에 급격하게 악화되었고 계절적으로 12월~3월에 현저하였다. 중·하류에서 NH<sub>4</sub>와 SRP는 하류로 유하하면서 급격하게 감소 (1,476→577 µg N/l, 117→11 µg P/l)하였고 chl-a는 지속적으로 증가 (9.0→64.4 µg/l)하는 경향이 뚜렷하였다. 반

면에 NO<sub>3</sub>와 BOD<sub>5</sub>는 정점간에 큰 차이가 없었고 일정하였다. 식물플랑크톤의 생장에 대한 제한영양염은 N·P 농도의 변화 뿐만 아니라 TN/TP 또는 DIN/SRP비가 본류에서 각각 42와 544로서 비교적 높아 N보다는 P가 제한인자로 볼 수 있었다. 유기물의 간접적인 지표인 BOD<sub>5</sub> 평가에서 본류 및 지류가 III급수로 판정되었으나 특히 갑천의 경우는 V급수 이상이였다. 그 외 chl-a, 투명도, TN 및 TP로서 수질을 평가한 결과 전반적으로 부영양 수준을 초과한 것으로 나타났다. 금강 중·하류에서 수질오염의 전개양상은 갑천과 미호천을 포함한 지류로부터 높은 N·P 영양염의 유입 영향이 주된 요인으로 볼 수 있었고 반면에 하류에는 만성적인 식물플랑크톤의 번무가 관찰되어 이에 대한 주요 오염원의 수질 관리가 시급하였다.

## 사 사

본 연구는 1999년도 청운대학교 학술연구조성 및 산학협동연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 인 용 문 헌

- 건교부 (건설교통부). 1979~97. 한국수문연보, 유량연보.  
 금홍통 (금강홍수통제소). 1998~99. 금강수위월보.  
 금환청 (금강환경관리청). 1997. '96 금강 중권역 수질오염원 현황. 210pp.  
 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위 논문, 202pp.  
 신재기, 조경제. 1999. 금강 하구저수지의 수질오염도. 한국환경생물학회 추계학술발표회 초록집.  
 유선재, 김중구, 권태연, 이석모. 1999. 금강의 부영양화 현상에 관한 연구. 한국환경과학회지 8: 155-160.

- 조경제, 신재기. 1997. 낙동강 중·하류에서 무기 N·P 영양염의 변동. 한국육수학회지 **30**: 85-95.
- 환경처. 1993. 수질오염공정시험방법, 도서출판 동화기술. pp. 17-314.
- 환경처. 1994. 수환경정책 자료집 I (행정자료편) · II (정책기초자료편), 환경처 수질보전국 수질정책과.
- APHA, AWWA, WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Basu, B.K. and F.R. Pick. 1996. Factors regulating phytoplankton and zooplankton biomass in temperate rivers. *Limnol. Oceanogr.* **41**: 1572-1577.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Chapman, D. 1992. Water quality assessments—A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. UNESCO/WHO/UNEP, Chapman & Hall. 585pp.
- Dillon, P.J. and F.H. Rigler. 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **19**: 767-773.
- Downing, J.A. and E. McCauley. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **37**: 936-945.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Goldman, C.R. 1978. The use of natural phytoplankton populations in bioassay. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 364-371.
- McCauley, E., J.A. Downing and S. Watson. 1989. Sigmoid relationships between nutrients and chlorophyll among lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **46**: 1171-1175.
- Miller, W.E., T.E. Maloney and J.C. Greene. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Wat. Res.* **8**: 667-679.
- Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol. Beih (Ergebn. Limnol.)*. **14**: 14-36.
- OECD. 1982. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France. 154pp.
- Pace, M.L., S.E.G. Findlay and D. Lints. 1992. Zooplankton in advective environments: The Hudson River community and a comparative analysis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **49**: 1060-1069.
- Porcella, D.B. and A.B. Bishop. 1975. Comprehensive management of phosphorus water pollution. Ann Arbor Science, Ann Arbor, Mich. 303pp.
- Rast, W. and G.F. Lee. 1978. Summary analysis of the North American (US portion) OECD eutrophication project: Nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices. Ecological Research Series, No. EPA-600/3-78-008, US Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Corvallis, Oregon, USA. 454pp.
- Reynolds, C.S. 1988. Potamoplankton: paradigms, paradoxes and prognoses, In Round, F.E. (ed.), Algae and the aquatic environment. Biopress. pp. 285-311.
- Rump, H.H. and H. Krist. 1988. Laboratory manual for the examination of water, wastewater, and Soil. VCH Verlagsgesellschaft, Publ, New York, NY (USA). 190pp.
- Smith, V.H. 1986. Light and nutrient effects on the relative biomass of blue-green algae in lake phytoplankton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **43**: 148-153.
- Takano, K. and S. Hino. 1996. The effect of silicon concentration on replacement of dominant diatom species in a silicon-rich lake. *Jpn. J. Limnol.* **57**: 153-162.
- UN (United Nations). 1992. Protection of inland waters against eutrophication. New York, ECE/ENVWA/26. 29 pp.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1976. Water quality criteria research of the US E.P.A., Proceedings of an EPA sponsored symposium, EPA-600 (3-76-079): 185.
- Vollenweider, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen phosphorus as factors in eutrophication. OECD Paris. DAS/CSI/68.27.