

옥천천 (만) 유역 하천과 만입부의 수환경 평가

신재기* · 김동섭¹ · 이혜근¹ · 맹승진¹ · 황순진

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹한국수자원공사 수자원연구소)

An Evaluation of Aquatic Environment in the Okchon Stream-Embayment Watershed, Korea. Shin, Jae-Ki*, Dong-Sup Kim¹, Hye-Keun Lee¹, Sung-Jin Maeng¹ and Soon-Jin Hwang (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea, ¹Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Taejon 305-390, Korea)

An investigation was conducted on the aquatic environment of the Okchon Stream watershed six times from May to September 2002. The results of investigation revealed that variation of environmental factors were quite significant for each stream and reach, showing a significant difference between running water and stagnant water. Aquatic nutrients were relatively low in the upstream, gradually increasing as the influx of treated wastewater into the stream increased. This suggests that the point source definitely affected the nutrient content of the stream. In particular, the variations of SRP and NH₄ were very distinct in the watershed compared to other nutrients. Thus, it can be considered as a major factor in evaluating the effect of treated wastewater. Immediately after the influx of treated wastewater, the average content of SRP rose to 919.3 µg P/l. This was a very effective level in the watershed, suggesting that the percentage of the nutrients in the water was controlled by the content of P. The constant supply of treated wastewater was found to be a critical factor in triggering the increase in chl-*a* in the embayment of the stream. With the proliferation of the blue-green algae, the content of chl-*a* ranged 234.5 ~ 1,692.2 µg/l. The maximum standing crops exceeded 1.0 × 10⁶ cells/ml in August, which was more than 200 times the level for red tide in the freshwater. This result was well reflected in other environmental factors, with 100% of AFDM/TSS reflecting the severity of water pollution by algae. Therefore, the reduction of P and N contents in the treated wastewater is critical in improving the aquatic environment of the stream as well as water quality management for the reservoir.

Key words : watershed, stream, embayment, water quality, eutrophication, nitrogen, phosphorus, wastewater

서 론

하천-저수지 시스템의 유역을 중심으로 볼 때, 하천의 상류는 비오염지역으로써 수질이 청정하나, 하류로 갈수록 불 이용에 대한 배수량의 증가, 도시화에 따른 인구

과밀화 현상 등에 의해 오염원의 규모가 발달하게 된다 (Kennedy and Walker, 1990; UN, 1992; 신 등, 2000). 그 결과, 상류 구간은 희석수 공급을, 중·하류 구간은 오염의 원인을 제공하게 되고, 최종적으로 하구와 저수지의 만입부 (embayment)는 그 영향을 그대로 수반하는 결과를 초래하게 된다 (Thornton *et al.*, 1990; Wetzel, 2001;

* Corresponding author: Tel: 011) 870-6121, Fax: 02) 456-5062, E-mail: jaekishin@hanmail.net

Kalff, 2002). 이러한 물환경 오염의 인과 구조는 하천의 상·하류를 통해 연쇄적으로 발생하고 있고, 그 수준이 기후 환경에 따라 다소 연 변동적 차이는 있으나, 수질 악화는 날이 갈수록 심화되어 저수지 만입부의 부영양화 문제는 더욱 가중되고 있는 실정에 있다(신 등, 1999). 특히, 도시하천과 하수처리장의 배출수 영향은 주된 점오염원으로써 이를 고려한 하천 생태계 관리가 거의 이루어지지 않고 있다는데 크나 큰 문제점이 있다(신 등, 2000; 신 등, 2003a, b). 또한, 이러한 현상은 전국적으로 나타나고 있어 양질의 수자원을 확보하고 관리하는 차원에서 현 시점에 중요한 현안 연구로 볼 수 있다.

우리나라의 경우, 저수지는 유역에 산재된 오염원의 대책 수립이 미흡하여 담수 후 수질의 오염도가 날로 증가하게 되고 오염양상은 무엇보다도 담수조류의 발생량 또는 그 수준과 밀접한 관련성을 보이고 있다(신 등, 1999). 옥천천과 옥천만(대청호 유입부)은 전형적인 하천-저수지 구조를 보이고 있고, 매년 여름철에 남조류의 생물량은 담수적조와 조류예보제의 최고 수준인 대발생 단계를 훨씬 초과한 수질을 야기하고 있는 심각한 상태에 있다(신과 조, 2000). 또한, 이러한 남조류의 대발생은 집중 호우 이후에 저수지 전체로 확산되어 수자원의 가치와 효용성을 하락시키는 주된 요인으로 작용할 수 있다(신 등, 1999).

옥천천과 옥천만의 수환경에 대한 선행 연구는 그리 많지 않았다. 하천에 대한 조사 보고는 거의 전무한 실정에 있고(이, 2002), 만입부에서 남조류의 사멸에 따른 분해 작용이 수질(신과 조, 2000) 및 수중 독소 변화(최 등, 2000)에 미치는 영향과 저질토의 영양염 특성 및 공극수의 조류생장잠재력(신과 조, 2001)을 규명한 연구가 있었을 뿐 매우 미진하였다. 따라서, 본 연구는 대청호 중류부로 유입되는 옥천천 유역을 대상으로 다각적인 수질을 조사하였으며, 특히 하류에 위치한 하수처리장의 배출수가 조류 대증식에 미치는 영향을 평가하여, 향후 하천-저수지 시스템의 수질 관리를 하는데 유용한 기초 자료로 제시하고자 하였다.

조사지 개황

본 연구의 조사지(36° 10'N~36° 26'N, 127° 29'E~127° 53'E)는 우리나라 중부에 위치한 대청호의 유입 지류인 옥천천의 상·하류 구간에 해당한다(Fig. 1). 옥천천의 유로 연장은 29.0km이고, 국가 하천으로 지정되어 있다(건설교통부, 2000). 유역의 총면적은 537.2 km²이

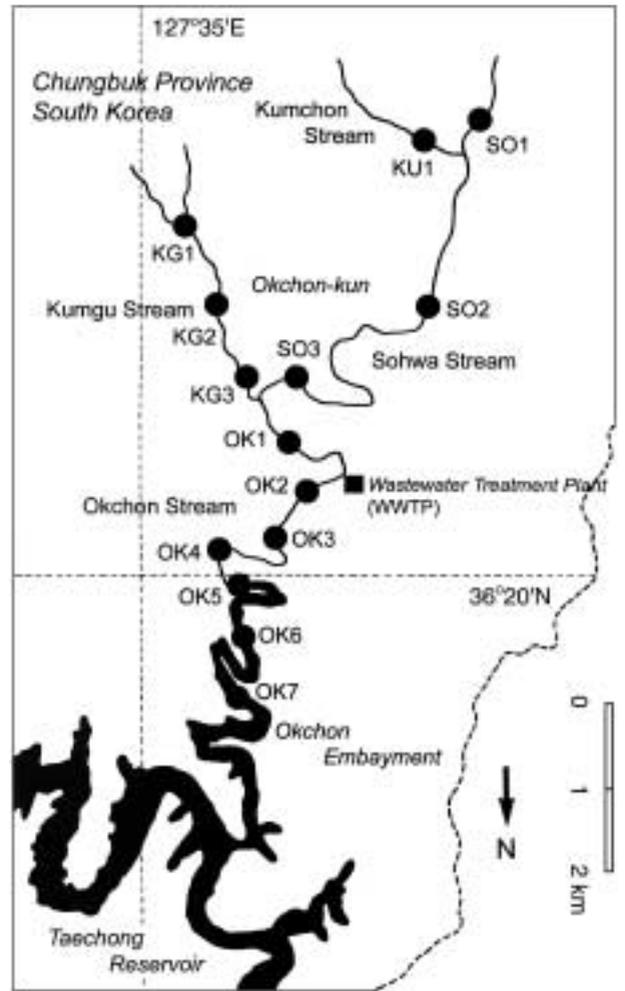


Fig. 1. Map showing sampling stations of the Okchon Stream Watershed.

고, 농경지가 107.3 km² (20.0%), 임야가 350.6 km² (65.3%), 주거지를 포함한 기타 공유지가 79.3 km² (14.7%)을 각각 차지하고 있다. 유역의 총인구는 1읍 8면 행정 구역상에 60.8천명이고, 이 중에서 51%가 읍소재지에 거주하고 있다(옥천군, 2002). 하천의 경사는 완만하고 하상은 돌과 자갈로 덮였으며 부착조류가 번무하는 전형적인 중·소하천에 속한다. 조사지점의 유황은 건기와 우기에 따라 큰 차이를 보이는 평지 하천으로써 여름철 우기를 제외하고는 비교적 유황이 적다.

서화천은 옥천천의 본류로써 상·하류 구간의 천변에 농경지가 넓게 분포하여 있고, 일정 거리를 두고서 중·소형 콘크리트 수중보가 건설되어 있어 다수의 소형 저류지를 형성하고 있다. 저류지는 상류에서 하류로 갈수록 보폭과 수심이 증가하여 그 규모가 크게 발달되어

있다. 금천천은 다른 하천에 비해 유량이 매우 적은 것으로 확인되었고, 상류에는 장용산 자연 휴양림이 조성 개발되어 유역에서 가장 비오염된 지역으로 볼 수 있다.

금구천은 상류에 광활한 농경지와 축사를 포함하는 농촌 주거지가 분산되어 있고, 최종적으로 옥천읍을 관류하는 소도시형 하천이다. 중·하류는 시가지에 인접되어 있고, 하도의 1/3 가량이 직강공사에 의한 하상정비가 되어있다. 특히, 서화천과 합류 직전 지점인 하류에는 고속전철과 고속도로의 교량 가설 및 보수로 인해 건설공사가 한창 진행되고 있었다. 또한, 금구천에 위치한 대다수 소형 수중보의 월류부에는 사상체 부착조류가 육안으로 확인할 정도로 매우 풍부하여 서화천과 금천천에 비해 조류 생물량이 더욱 높음을 알 수 있었다.

옥천천은 서화천과 금구천이 합류되어 이루는 하천이고, 옥천천의 상류부는 두 하천의 중간 성격을 보이고 있다. 반면에, 하류부에는 대청호 유역에서 가장 큰 규모인 옥천하수처리장(1994년 5월 완공)이 위치하고 있고, $18.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 하수처리수를 배출하고 있다. 옥천하수처리장은 표준 활성슬러지 처리(2차처리)와 고속응집조(3차처리)처리를 하고 있고, 생활하수, 분뇨 및 매립장 침출수를 혼합하여 합병처리하는 방식을 사용하고 있다(옥천군, 2002). 옥천천에서 하수처리수의 배출 지점 하류는 8~9월에 단기간 완전 수몰되고 이듬 해까지 대청호의 수위 변동에 따라 하천과 저수지의 비율이 조절되는 곳이다. 저수화 시기에는 유속이 급감하는 하천과 저수지의 전이대 성격을 나타내고, 부유성과 부착성 담수조류의 서식 환경이 전환되는 장소이기도 하다. 또한, OK2~OK6 구간에는 하수 처리수의 영향으로 부패취를 느낄 수 있을 정도로 악취가 심한 곳이다.

옥천천 유역 하천의 공통적 특성은 식물의 생육기인 5월~10월까지 수변에는 벼과와 사초과를 중심으로 한 초본 식물이 만발하여 하천을 뒤덮고 있으며, 홍수기에는 일시적으로 침수를 겪게 된다. 특히, 옥천천 하류에서는 상류보다 침수 기간이 더욱 길어져 이로 인해 더 이상 생장이 불가능한 사멸기를 초래하기도 하였다. 본 연구 기간동안 집중 호우(일 100 mm 이상)는 8월 초순과 하순에 관찰되었다(기상청, 2002; 한국수자원공사, 2002).

재료 및 방법

본 연구는 기초 수환경 인자, 수중 영양염(N·P·Si) 및 생물량을 중심으로 이루어졌다. 조사지점은 서화천 3개 지점(SO1~SO3), 금천천 1개 지점(KU1), 금구천 3

개 지점(KG1~KG3) 및 옥천천 7개 지점(OK1~OK7)으로써 총 14개 지점으로 선택하였고, 조사주기는 강수에 의한 기후적 영향을 고려하여 월 1회 또는 2회로 하였다. 조사시기와 횟수는 2002년 5월~9월로써 총 6회이었다.

하천수의 수온, DO, pH, 전기전도도, TDS (total dissolved solids) 및 탁도는 매번 보정한 YSI 6000 UPG meter로 현장에서 측정하였고, 형광 농도는 Tuner 10 AU meter로 채수 후 측정하였다. 수질 분석을 위한 시료는 각 정점의 하천 중앙에서 표층수를 직접 채수하였고, 만입부는 소형 보트를 이용하였다. 수환경 요인 중 무기영양염은 시료를 Whatman GF/F filter로 여과한 후 사용하였다. NH_4 , NO_3 , NO_2 , SRP (soluble reactive phosphorus) 및 SRSi (soluble reactive silicon) 영양염은 Rump and Krist (1988)와 APHA (1995)의 방법에 따라 분석하였다. 총무기질소(total inorganic nitrogen, TIN)는 NH_4 , NO_3 , NO_2 의 합으로 계산하였다. Chl-*a* 농도는 90% ethanol로 비등 추출하여 665 nm와 750 nm의 흡광도값으로 산정하였다(Nusch, 1980). TSS (total suspended solids)는 전처리된 GF/F에 시료를 여과하고 105°C에서 완전 건조 전후의 무게 차이로 계산하였고, AFDM (ash-free dry matter)은 550°C에서 1~2시간 동안 태운 전후의 무게 차이로 계산하였다(APHA, 1995).

결과 및 고찰

1. 수환경 요인

유역의 상류수역 유입하천을 서화천(SOn), 금천천(KUn) 및 금구천(KGn)으로 보았고, 옥천천은 하수처리장을 기준으로 상류구간(OK1), 하류구간(OK2~OK6) 및 만입부(OK7, 옥천만)로 각각 구분하여 비교하였다. 그 결과를 수환경 항목별로 평균값, 표준편차 및 최대값과 최소값을 요약한 것은 Table 1과 같다.

옥천천 유역에서 조사기간 동안 수온은 14.9~31.0°C 범위이었고, 평균 수온은 23.1°C이었다(Table 1). 유수 하천(SO1~OK6구간)은 수온(평균 22.1°C)이 낮고, 정수 수역(OK7)은 수온(평균 27.7°C)이 높은 경향을 보였다. 또한, KG3와 OK5는 다른 정점에 비해 수온 변동이 다소 컸는데 KG3는 도심 구간의 최하류에 해당하는 곳이고, OK5는 하천 유향과 저수위의 상태에 따라 유수와 정수 시스템이 교차되는 곳이기 때문이다. 특히, OK5는 유수 환경일 때 낮고, 정수 환경에서 높아지는 현상이 두드러졌다.

Table 1. Mean (\pm SD) values of environmental factors in the main stream of the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. Numerics in parenthesis indicate maximum and minimum value, respectively

Factors\Sampling streams	Sohwa	Kumchon	Kumgu	Okchon		
				Upper zone	Lower zone	Embayment
Water temperature ($^{\circ}$ C)	22.0 \pm 3.0 (25.7/15.6)	20.7 \pm 3.4 (25.2/15.1)	21.7 \pm 4.3 (29.8/14.9)	23.3 \pm 3.1 (26.9/17.7)	23.0 \pm 3.4 (31.0/17.2)	27.7 \pm 2.8 (30.1/23.1)
Dissolved oxygen (mg O ₂ /l)	10.0 \pm 1.0 (12.0/8.3)	9.3 \pm 1.3 (11.6/8.1)	10.5 \pm 1.2 (12.3/8.5)	10.4 \pm 1.6 (13.1/8.9)	9.5 \pm 2.3 (16.5/7.1)	15.2 \pm 5.4 (>20.0/9.1)
pH	7.67 \pm 0.29 (8.28/7.17)	7.33 \pm 0.34 (7.75/6.75)	7.78 \pm 0.45 (9.12/7.35)	8.09 \pm 0.36 (8.75/7.77)	7.78 \pm 0.41 (9.17/7.35)	8.60 \pm 1.07 (10.04/7.67)
Conductivity (μ S/cm)	246.0 \pm 30.4 (299.6/194.6)	114.8 \pm 12.1 (126.7/98.5)	242.5 \pm 31.5 (296.1/190.7)	251.5 \pm 26.4 (277.3/219.9)	387.3 \pm 115.7 (589.0/190.6)	198.6 \pm 47.0 (270.2/143.0)
Total dissolved solids (mg/l)	167.6 \pm 22.3 (209.6/131.0)	78.1 \pm 8.7 (87.9/66.1)	165.3 \pm 23.9 (207.5/127.7)	171.0 \pm 20.7 (192.9/146.4)	262.3 \pm 78.7 (394.5/133.3)	135.0 \pm 29.7 (181.0/100.2)
Turbidity (NTU)	3.48 \pm 1.66 (7.22/0.57)	0.77 \pm 0.65 (1.94/0.10)	5.58 \pm 3.98 (15.2/1.45)	7.01 \pm 4.63 (13.30/2.27)	5.52 \pm 3.78 (12.78/0.52)	64.02 \pm 91.94 (226.00/2.61)
Total suspended solids (mg/l)	5.2 \pm 2.2 (10.0/1.0)	1.1 \pm 1.4 (4.0/0.3)	7.4 \pm 6.6 (29.0/1.3)	9.2 \pm 4.7 (15.0/4.0)	9.2 \pm 6.6 (30.5/1.3)	54.7 \pm 71.1 (178.0/4.7)
Ash-free dry matter (mg/l)	3.6 \pm 1.1 (5.0/1.0)	1.0 \pm 1.0 (3.0/0.3)	3.8 \pm 1.3 (6.0/1.3)	4.2 \pm 1.2 (6.0/2.5)	6.4 \pm 5.5 (29.0/1.3)	46.7 \pm 74.3 (178.0/4.3)

DO는 대체적으로 수온과 반대 경향이었고, 구간 하천의 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. 서화천, 금천천 및 금구천의 DO는 8.1~12.3 mg O₂/l 범위가었고, 평균값은 9.9 mg O₂/l이었다 (Table 1). 반면에, 옥천천 상류 OK1은 유입하천과 비슷하였으나, 하류에서는 직선적으로 증가함이 뚜렷하였다. 8월에 OK5에서 16.5 mg O₂/l, OK7에서 17.1 mg O₂/l이었으며, 6월과 9월에는 20 mg O₂/l를 초과하였다 (Table 1). 수온이 높음에도 불구하고 표층 DO의 과포화 현상을 보이는 것은 하류로 갈수록 조류의 광합성이 매우 왕성한 결과로 볼 수 있었다. 또한, OK2는 DO의 평균값이 7.5 mg O₂/l (7.1~8.2 mg O₂/l 범위)로써 전 정점에서 가장 낮았고, OK2를 제외하고는 포화수준 내지는 그 이상이었다. OK2는 하수처리수가 유입되는 지점으로써 미생물의 분해 작용이 활발한 곳으로 볼 수 있었다 (신 등, 2001). 결과적으로, OK7은 OK2에 비해 DO가 2배 더 높아 상·하류간에 큰 차이를 보였다.

pH는 DO의 변동 양상과 유사하였고, 서화천, 금천천 및 금구천의 평균값 (범위)은 각각 7.67 (7.17~8.28), 7.33 (6.75~7.75) 및 7.78 (7.35~9.12)이었다. 옥천천은 상·하류간에 차이가 컸으며, 평균값이 8.20이었고, 최대값은 9월에 OK7에서 10.04이었다 (Table 1).

전기전도도는 서화천, 금천천 및 금구천에서 각각 194.6~299.6 μ S/cm, 98.5~126.7 μ S/cm 및 190.7~296.1 μ S/cm 범위이었고, 평균값은 각각 246.0 μ S/cm, 114.8

μ S/cm 및 242.5 μ S/cm로써 서화천의 SO1과 금구천의 KG3가 조금 높았고, 금천천이 다른 하천에 비해 낮은 값을 보였다 (Table 1). 옥천천은 OK2에서 급격하게 증가하여 OK6까지는 상류하천보다 상회하거나 비슷하였고, OK7까지 지수적으로 감소함이 현저하였다. 옥천천 하류에서 전기전도도의 평균값은 387.3 μ S/cm이었고, OK2와 OK7에서 전기전도도의 평균값 (범위)은 각각 506.8 μ S/cm (400.0~584.0 μ S/cm), 198.6 μ S/cm (143.0~270.2 μ S/cm)이었다 (Table 1).

TDS는 수중 용존물질의 총량을 추정하는 척도로써 전기전도도의 변동과 거의 일치하였다. 서화천과 금구천의 평균값은 166.5 mg/l이었고, 금천천은 78.1 mg/l로써 유역 전 정점 중에서 가장 낮은 값을 보였다 (Table 1). 옥천천의 상류 OK1은 서화천과 금구천의 수준과 비슷하였으나 하류는 그 양상이 달랐다. 하류의 TDS는 하수처리수가 유입되는 부근 (OK2)에서 가장 높아 평균값이 344.8 mg/l (최대값 390.5 mg/l)이었고, OK3~OK6구간은 224.9 mg/l이었으며, 최하류의 OK7에서 135.0 mg/l로써 OK2에 비해 큰 폭 (60.8%)으로 감소하였다 (Table 1).

수중 탁도는 서화천, 금천천, 금구천 및 옥천천에서 범위가 각각 0.57~7.22 NTU, 0.10~1.94 NTU, 1.45~15.2 NTU 및 0.52~226.0 NTU이었고, 평균값은 각각 3.48 NTU, 0.77 NTU, 5.58 NTU 및 25.5 NTU이었다 (Table 1). 탁도는 금구천과 옥천천에서 정점간에 차이가 컸을 뿐만 아니라 변동 폭도 매우 컸다. 서화천은 농경

지 유출수에 의한 영향이 관찰된 반면에, 금구천은 농업 배수, 가끔 물오리의 유영 및 하상정비 공사에 의한 교란수가 복합적으로 작용하여 수심이 얕고 하천 폭이 협소한 상류에서 높은 탁도 값을 나타냈다. 옥천천은 OK1 직전과 OK1~OK2 사이에 교량 건설을 위한 대형 토목 공사가 성행하고 있어 이에 의한 인위적 영향이 컸고, 그 결과 OK1~OK6 구간 유하수가 탁한 현상을 보였다. 반면에 OK7은 평균값과 최대값이 각각 64.02 NTU, 226.0 NTU로써 상류와는 달리 부유성 조류의 대발생에 의한 탁도 폭증이 절대적이었다.

TSS는 TDS와 달리 부유 고형물질의 총량을 평가하는 지표로써 수중 탁도와 관련성이 깊었다. TSS는 탁도의 변동과 거의 유사하였고, 서화천, 금천천보다는 금구천과 옥천천에서 높은 값을 보였다. 또한 서화천은 상·하류간에 큰 차이가 없었고, KG2를 제외한 금구천과 옥천천은 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보였다. 서화천과 금천천은 평균값(범위)이 각각 5.2 mg/l (1.0~10.0 mg/l), 1.1 mg/l (0.3~4.0 mg/l) 이었고, 금구천과 옥천천은 각각 7.4 mg/l (1.3~29.0 mg/l), 24.4 mg/l (1.3~178.0 mg/l) 이었으며, 탁도와 마찬가지로 시기에 따른 변동 폭이 매우 컸다(Table 1). 금구천은 KG1에서 최대 29.0 mg/l (평균 10.8 mg/l)를 보였고, 옥천천은 최하류인 OK7에서 최대 178.0 mg/l (평균 54.7 mg/l)을 기록하였다.

수중 부유물질(TSS) 중 AFDM에 의한 유기물 함량은 금천천에서 평균 농도가 1.0 mg/l로써 유역 하천에서 가장 낮았다. 서화천, 금구천 및 옥천천 OK1~OK2 구간에서 부유성 AFDM의 범위는 1.0~7.3 mg/l 이었고, 평균값은 3.3 mg/l 이었다. AFDM은 OK3에서 평균값이 7.5 mg/l로 증가하기 시작하여 OK7에서 46.7 mg/l로 대폭 증가하였고, 이 지점에서 최대값은 178.0 mg/l 이었다(Table 1). 옥천천 유역에서 부유물질에 대한 유기물이 차지하는 비율은 서화천, 금천천, 금구천, 옥천천 상류 및 하류에서 각각 69.2%, 90.9%, 51.4%, 45.7% 및 77.5% 이었고, 만입부에서 남조류가 대발생한 시기에는 100%를 기록하였다. AFDM은 인위적인 교란이 없거나 부유물질의 양이 적을 때와 하류의 정체구간으로 갈수록 유기물의 비중이 증가함을 알 수 있었다. TSS와 AFDM의 결과로부터, 전술한 금구천의 KG2와 옥천천의 OK7은 무기물과 유기물의 함량 비가 대비되는 현상이라 하겠다. 따라서, OK7 부근에는 유기물의 축적이 상당할 것으로 추정되며 전형적인 조류에 의한 수질오염 영향으로 볼 수 있을 것이다(신과 조, 2000).

2. 수중 N, P 및 Si 영양염

1) 질소 농도

옥천천 유역에서 수중 총무기질소(TIN) 중 NH₄, NO₃ 및 NO₂의 농도가 하천에 따라 큰 차이를 보였고, 점오염원 영향이 절대적이었다. TIN은 서화천, 금천천, 금구천 및 옥천천의 OK1에서 평균값이 761.2 µg N/l 이었고, 금구천에서 832.6 µg N/l 으로 조금 높았을 뿐 변동 폭은 크지 않았다(Fig. 2A, E, I). 반면에 옥천천의 중·하류 구간에서 하수처리수가 유입되는 OK2에서 평균 농도가 2,861.6 µg N/l (639.9~5,302.6 µg N/l 범위)로 증가하였고, 하류로 유하하면서 감소되어 OK7에서 604.6 µg N/l 을 유지하였다(Fig. 2I).

무기질소 중 NH₄는 TIN의 변동 패턴과 유사하였고, 서화천, 금천천, 금구천 및 옥천천의 OK1에서 평균값이 62.6 µg N/l 이었다. NH₄는 OK2에서 평균값이 2,105.3 µg N/l (46.7~4,494.6 µg N/l 범위)로 증가하였고, 하류로 갈수록 지수적으로 감소하였다(Fig. 2J). NO₃는 NH₄와는 달리 OK7을 제외한 유역 하천에서 농도 범위가 503.8~829.2 µg N/l 이었고, 평균값은 675.7 µg N/l 로써 정점간에 큰 차이가 없었다(Fig. 2C, G, K). OK7에서 NO₃가 다른 정점에 비해 다소 낮은 것은 이 지점이 반폐쇄성 정체 수역으로써 NH₄와 함께 수중 조류의 생장에 주요한 질소원으로 이용되었을 것으로 본다. NO₂는 서화천과 금천천, 금구천 및 옥천천에서 평균값(범위)이 각각 11.6 µg N/l (2.8~36.4 µg N/l), 37.9 µg N/l (10.0~82.6 µg N/l) 및 50.5 µg N/l (8.1~290.2 µg N/l)으로써 옥천천이 다른 유입 하천에 비해 1.3~4.4배 정도 높았다(Fig. 2D, H, L). NO₂는 OK2~OK3 구간에서 상대적으로 높았는데, 이 구간은 하절기 고수온, 저산소 환경에서 하수처리수로부터 공급되는 수중 유기물의 분해가 활발할 뿐만 아니라 탈질화 작용이 가능한 지대로 추정되었다.

2) 인과 규소 농도

수중 SRP는 식물의 생장에 N 성분과 함께 중요한 필수 영양염으로 작용하며, 오염수일수록 그 양이 증가하게 된다(신 등, 2000). 옥천천 유역에서 정점별 SRP의 변동은 다른 영양염에 비해 매우 뚜렷하였고, 하수처리수의 영향을 평가함에 있어 절대적인 인자가 될 수 있었다. 서화천, 금천천, 금구천 및 옥천천에서 SRP 농도의 범위는 각각 0~71.8 µg P/l, 0~24.8 µg P/l, 0~141.5 µg P/l 및 0~1,065.8 µg P/l 이었고, 평균값은 각각 17.0 µg P/l, 8.7 µg P/l, 52.5 µg P/l 및 179.5 µg P/l 이었다(Fig. 3A, C, E). 옥천천에서 SRP는 OK2가 평균값이 919.3 µg P/l 로써 영향력이 가장 컸고, 주 공급원으로 두드러졌다. 이

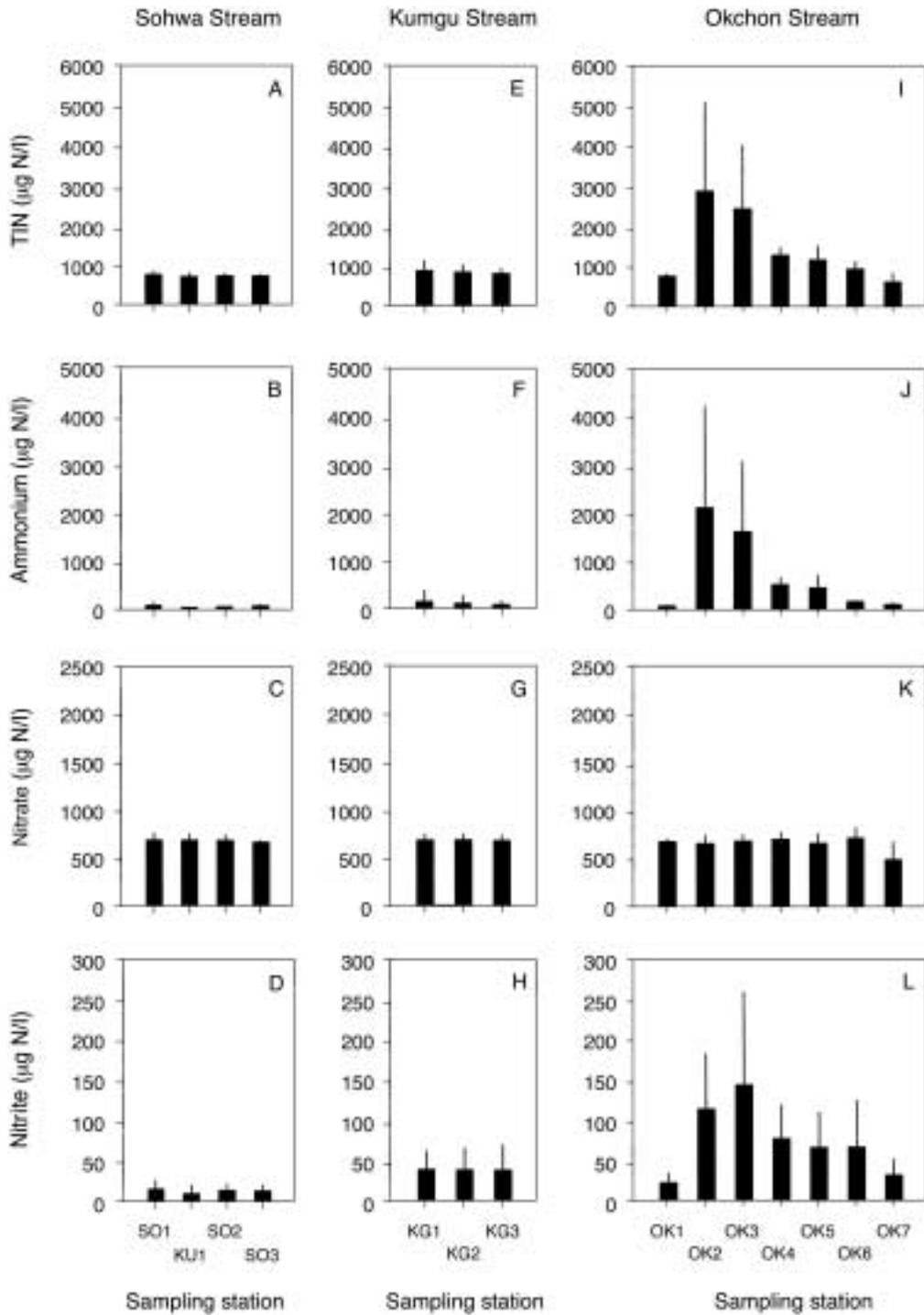


Fig. 2. Spatial distribution of inorganic nitrogen concentration in the stream-reservoir system of the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. Vertical bars indicate standard deviation.

러한 결과는 하수에 포함된 인 성분 뿐만 아니라 처리 방식에도 문제점이 있을 것으로 본다. 우리나라 대부분 중·대형 하수처리장은 하수와 분뇨를 일정 비율로 혼

합 후 합병처리하기 때문에 NH₄ 영향 뿐만 아니라 P 농도 증가에도 상당한 비중이 나타날 것으로 판단된다(신 등, 2000). 이러한 결과는 현지 하천 생태계에서 나타나

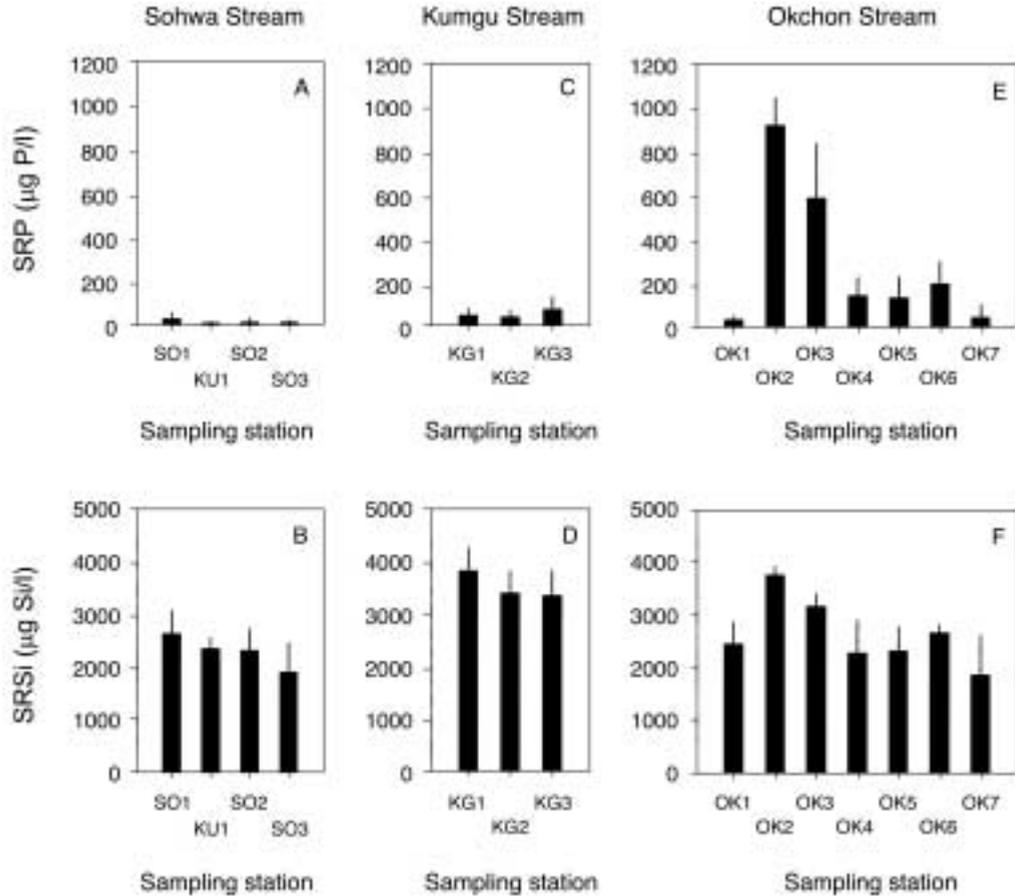


Fig. 3. Spatial distribution of soluble reactive phosphorus (SRP) and soluble reactive silicon (SRSi) concentration in the stream-reservoir system of the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. Vertical bars indicate standard deviation.

는 현상이 이를 뒷받침하고 있으며, 조류생장잠재력측정에 의한 결과에서도 역력하였다(수자원연구소, 2002; 이, 2002).

용존 규산염(SRSi)은 N과 P를 포함한 다른 영양염이 풍부할 때, 수환경에 따라 부유성 및 부착성 단수조류 중 규조류의 성장을 제한하는 주된 영양인자에 해당한다. 옥천천 유역 주요 3개 하천에서 SRSi는 유량이 증가한 시기에 농도가 높았고, 상류에서 하류로 갈수록 감소하는 경향이 현저하였다. SRSi는 서화천과 금천천, 금구천 및 옥천천에서 평균값(범위)이 각각 2,303.2 µg Si/l (956.8 ~ 2,928.6 µg Si/l), 3,522.1 µg Si/l (2,419.9 ~ 4,598.0 µg Si/l) 및 2,413.6 µg Si/l (748.3 ~ 4,058.6 µg Si/l) 이었고, 금구천이 다른 하천에 비해 조금 풍부하였다(Fig. 3B, D, F). 옥천천에서 OK1은 Si의 평균 농도가 2,440.1 µg Si/l이었으나, OK2에서 3,751.3 µg Si/l로 증가하여 하수 처리수는 N·P와 더불어 Si 영양염의 공급원으로도 작

용함을 알 수 있었다. 결과적으로, 옥천천 유역에서 수중 Si의 고갈은 관찰되지 않았고, Si/P 비에 의한 제한성은 평가될 수 있으나 농도로 볼 때, 5~9월 동안 규조류의 성장에 Si 결핍은 드물 것으로 본다.

3. 하천별 제한 영양염 평가

수질 분석 결과를 근거로 한 수중 영양염 제한성 평가는 단순 비교에 불과하나, 식물의 성장에 상대적으로 결핍될 수 있는 인자를 추정하는 방법으로 많이 적용되어 왔다. 옥천천에서 무기 N/P와 Si/P 비율은 시공간적으로 차이가 컸다. 평균값으로 볼 때, SO1~OK1구간 및 OK7에서 그 비율이 각각 2,353.1, 6,091.6 이었고, OK2~OK6구간은 7.3, 14.1이었다(Fig. 4A~F). 서화천과 금구천에서 N/P 비가 낮은 시기는 유량이 증가한 때였고, 옥천천의 OK7은 남조류가 대발생한 기간이었다.

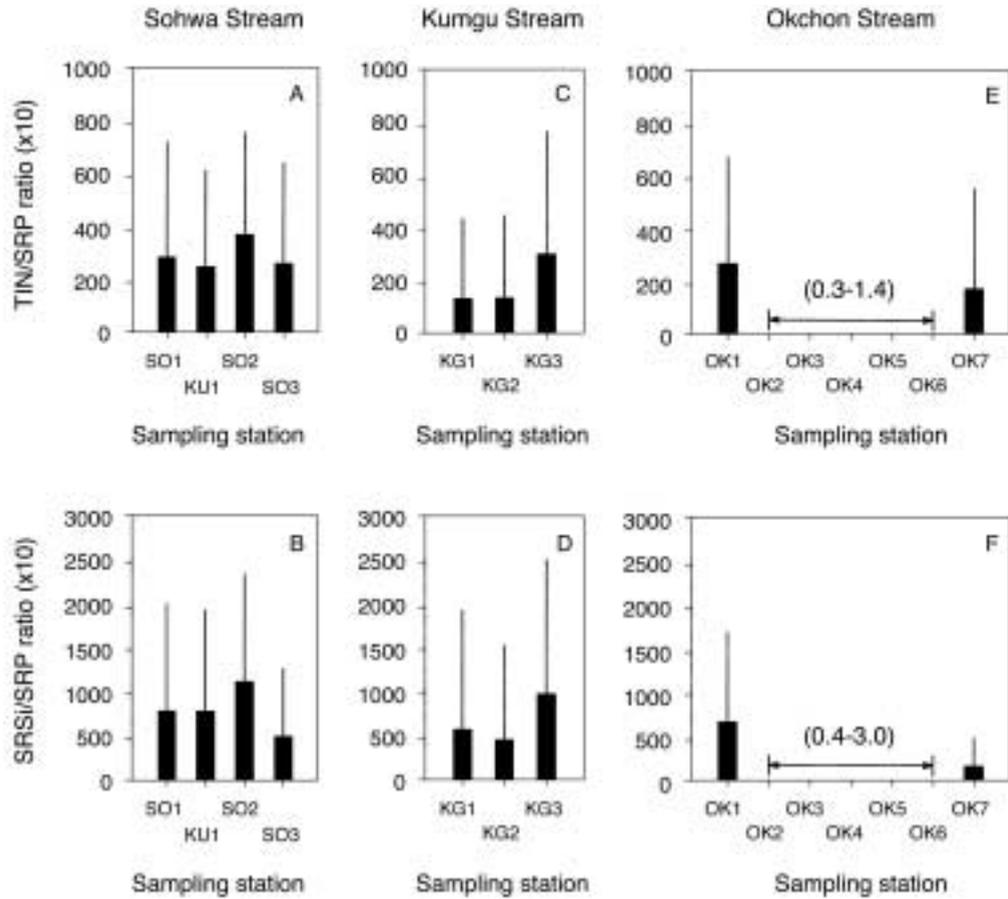


Fig. 4. Spatial distribution of TIN/SRP and SRSi/SRP ratio in the stream-reservoir system of the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. Vertical bars indicate standard deviation.

N/P 비가 10 이하이면 N제한, 20 이상이면 P제한으로 보는 기준 (Porcella and Bishop, 1975)을 적용할 때, 이 시기를 제외하고는 대부분 P 제한성이 강하였다. 반면에 옥천천의 OK2~OK6구간은 N 제한성이 빈번하였고, N 또는 P, P 제한성도 관찰되었다 (Fig. 4E). 특히, 하수처리수가 유입된 직후 구간 (OK2~OK3)은 N 제한성이 강력하였다. 이것은 전술한 바와 마찬가지로 N보다는 P의 농도가 더욱 풍부함을 의미하는 것이며, 용존 유기영양염을 포함할 때, 그 수준은 더욱 증가할 것으로 예상된다 (신 등, 2003b). 따라서, 옥천천에서 N/P 및 Si/P 비율은 유입되는 P의 농도에 의해 그 변동 폭이 결정된다고 볼 수 있었다.

4. 조류 생물량 (chl-a)과 수환경 평가

옥천천 유역에서 OK5와 OK7을 제외한 전 정점에서 부유성 chl-a 농도는 범위가 0.6~21.3 µg/l이었고, 평균

값 7.3 µg/l이었다. 반면에, OK5와 OK7에서 chl-a 농도는 평균값 (범위)이 각각 55.2 µg/l (5.7~234.5 µg/l), 428.4 µg/l (13.1~1,692.2 µg/l)로써 유역 평균값에 비해 각각 7.6배, 58.7배 더 높았다 (Fig. 5A, C, E). 옥천만에서 형광 측정 결과 (Fig. 5F)로부터 알 수 있듯이 생장이 왕성한 조류가 최대 증식되는 시기에 chl-a 농도의 증가를 주도한 조류는 남조류 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Phormidium*속이었고, 현존량은 ml당 1.0×10⁶ 세포를 훨씬 초과하여 담수적조 수준보다 200배를 증가하였다. 또한, chl-a의 생물량으로 본 수체의 영양상태를 평가할 때, 옥천천 유역 하천 중 금천천은 중영양 상태, 서화천, 금구천 및 옥천천 OK1~OK4구간은 중영양~부영양 수준이었고, OK5~OK7구간은 과영양 상태 (>25 µg chl-a/l)이었다 (OECD, 1982). 특히, 정점 OK7은 연중 만성적으로 조류가 대발생하는 곳으로써 상류의 하수처리수 유입과 저토의 축적된 오염 영향을 복합적으로

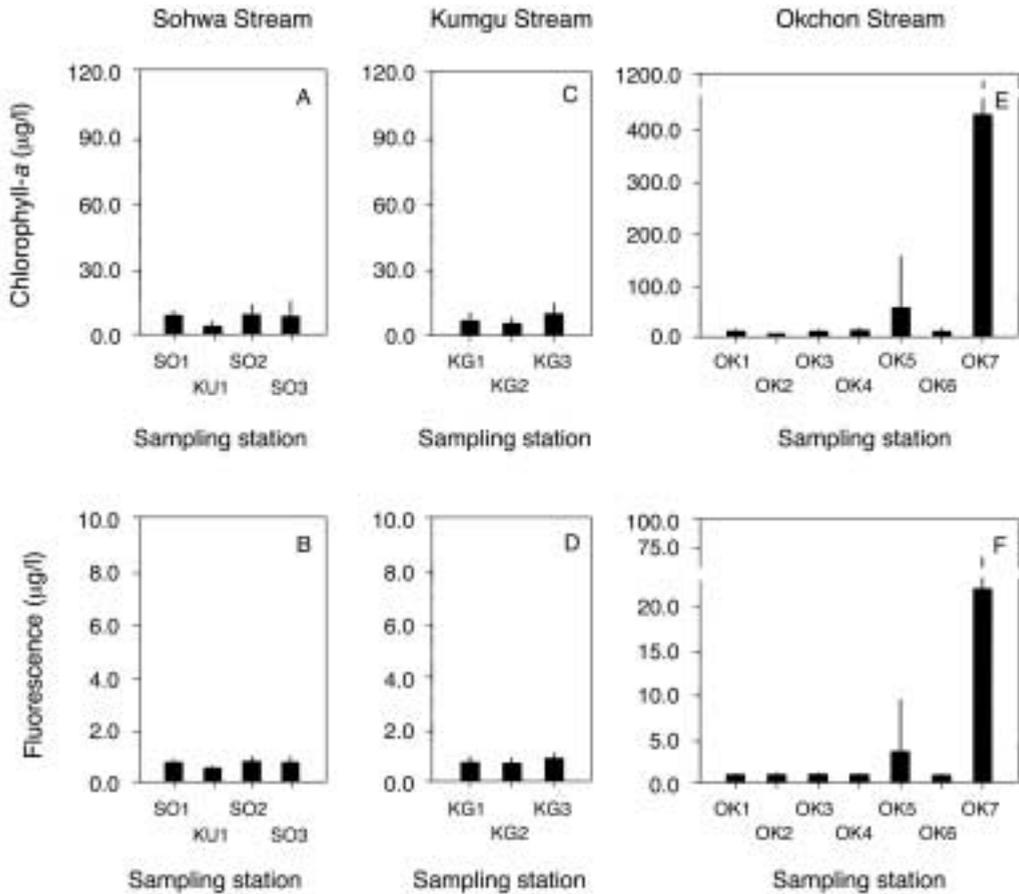


Fig. 5. Spatial distribution of chlorophyll-*a* and Fluorescence concentration in the stream-reservoir system of the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. Vertical bars indicate standard deviation.

받는 특정 정체 만입부(embayment zone)로 볼 수 있었다(신과 조, 2000; 신과 조, 2001).

옥천천의 담수조류 발생 규모로 볼 때, 대청호의 본류에 대한 영향력이 매우 클 것으로 판단되며, 건기보다 우기에 그 현상이 클 것으로 판단된다. 따라서 이에 대한 대책 수립이 시급하며, 유역 관리 차원에서 하수처리수의 P와 N 저감이 선행되어야 옥천천 수환경 개선 뿐만 아니라 대청호 수질관리에 효과가 있을 것으로 기대한다.

적 요

옥천천(만)유역을 대상으로 2002년 5월부터 9월까지 총 6회 수환경을 조사하였다. 환경 요인은 하천과 구간에 따라 차이가 컸고, 유수환경과 정수환경에서 더욱 현저하여 대비가 되었다. 수중 영양염은 상류 하천에서 비

교적 저농도이었으나, 하수처리수 유입 후부터 고농도로 전환되어 점오염원 영향이 절대적이었다. 특히, 유역에서 SRP와 NH₄의 분포는 다른 영양염에 비해 매우 뚜렷하였고, 하수처리수의 영향을 평가함에 있어 가장 중요한 인자가 될 수 있었다. 하수처리수의 유입직 후 정점에서 SRP의 평균 농도는 919.3 µg P/l로써 유역에서 가장 영향력이 컸고, P 농도에 의해 수중 영양염 비율이 조절됨을 알 수 있었다. 하수처리수의 지속적 공급은 하류의 만입부에서 chl-*a* 증가를 유도하는 결정적인 요인으로 볼 수 있었다. 남조류가 대발생한 시기에 만입부에서 chl-*a* 농도는 234.5~1,692.2 µg/l 범위이었고, 8월에 최대 현존량은 ml당 1.0×10⁶ 세포를 훨씬 초과하여 담수적조 수준보다 200배 이상이었다. 이러한 결과는 다른 환경요인에서 잘 반영되었고, 그 중에서 AFDM/TSS 비는 100%로써 조류에 의한 수질오염이 극심함을 잘 반영하였다. 따라서, 하수처리수에 포함된 P와 N 저감이 선행되어야 하천 수환경 개선 뿐만 아니라 저수지 수질

관리에 효과가 있을 것으로 본다.

사 사

본 논문은 2002년도 한국수자원공사 수자원연구소의 연구비(WRRI-WR-02-4)에 의하여 연구되었으며, 연구 지원에 대해 감사드립니다. 또한, 본 논문을 심사해 주신 심사위원회께 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 건설교통부. 2000. 한국하천일람. 정부간행물 발간등록번호 11-1500000-000519-01, 건설교통부 수자원국, 과천. 748p.
- 기상청. 2002. <http://www.kma.go.kr>, 기후자료: 대전 강수량.
- 수자원연구소. 2002. 대청호 수질개선을 위한 소옥천 환경조사. 한국수자원공사, 대전. 439p.
- 신재기, 박경미, 황순진, 조경제. 2001. 경안천과 팔당호에서 총세균수의 분포 및 동태. 한국육수학회지 **34**: 119-125.
- 신재기, 이옥희, 조경제. 2003a. 진양호와 남강의 수질에 대한 algal growth potential test (AGPT) 적용. 한국육수학회지 **36**: 57-65.
- 신재기, 조경제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동. 한국환경생물학회지 **17**: 529-541.
- 신재기, 조경제. 2000. 생물검정에 의한 남조류 *Microcystis*가 수질에 미치는 영향. 한국환경과학회지 **9**: 267-273.
- 신재기, 조경제. 2001. 대청호 저토의 N, P 및 Si 영양염 함량과 조류생장잠재력. 한국육수학회지 **34**: 106-118.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 신재기, 황순진, 조경제. 2003b. 평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가. 한국육수학회지 **36**: 38-47.
- 옥천군. 2002. <http://www.okcheon.chungbuk.kr>, 옥천군정 일반현황 자료편.
- 이순자. 2002. 대청호의 수질오염 특성과 담수조류를 이용한 생물검정. 충북대학교 대학원 석사학위논문. 85p.
- 최일환, 신재기, 임성아. 2000. Cyanobacteria의 분해에 따른 microcystins의 변화. 한국육수학회지 **33**: 9-22.
- 한국수자원공사. 2002. <http://www.kowaco.or.kr>, 다목적댐 기상·수문 자료: 대청호 유역 강수량 자료.
- APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC., USA.
- Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.
- Kennedy, R.H. and W.W. Walker. 1990. Reservoir nutrient dynamics. In: Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. John Wiley & Sons, Inc. pp. 109-131.
- 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. 154p.
- Porcella, D.B. and A.B. Bishop. 1975. Comprehensive management of phosphorus water pollution. Ann. Arbor. Science, Ann. Arbor., Mich. 303p.
- Rump, H.H. and H. Krist. 1988. Laboratory Manual for the Examination of Water, Wastewater, and Soil. VCH Verlagsgesellschaft Publication, New York, USA. 190p.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel, and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. John Wiley & Sons, Inc. 246p.
- UN (United Nations). 1992. Protection of inland waters against eutrophication. New York, ECE/ENWVA/26. 29p.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.

(Received 20 Apr. 2003, Manuscript accepted 30 May 2003)