

아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태

신 윤 근* · 전 상 호¹

(상지대학교 환경공학과, ¹강원대학교 환경과학과)

Ecological Studies on the Asan Reservoir. 1. Physicochemical characteristics and Trophic Status. Shin, Yoon Keun * and Jun, Sangho¹ (Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea. ¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

To evaluate the eutrophication status of the Asan Reservoir in Korea, physicochemical parameters were analyzed for samples of 19 sampling stations collected in the period from March to November in 1997. Water temperature was in the range of 8.3~35.3°C, with thermocline appearing in summer. Dissolved oxygen also showed similar verticle variation to temperature. Secchi depth was very shallow with a range of 0.1~1 m. Suspended solids ranged from 11.3 mg/l to 2143.3 mg/l, and seemed to be affected by the amount of rainfall and the standing stocks of phytoplankton. Nutrient concentrations were higher in tributaries, and decreased with downflow. Nutrients were low in the summer and early autumn when algal blooms occur, and high in the early spring and winter. The Trophic State Index showed that the Asan Reservoir is in a hypertrophic condition.

Key words : Asan Reservoir, physicochemical characteristics, TSI, eutrophication

서 론

담수의 수질은 유역의 상류에서는 청정하나 하류로 내려오면서 악화하는 양상을 보인다. 하류로 갈수록 수질이 악화되는 것은 경제성장과 도시화에 따른 인구의 집중현상과 생활수준의 향상에 따른 물 사용량의 증가로 인해 각종 오수와 산업화에 따른 폐수가 유입되면서 일어난다. 수질오염의 문제를 해결하기 위해 하수종말처리장 건설 등 환경기초시설을 확충하는데 막대한 비용을 투입하지만 수질은 좀처럼 개선되지 않고 오염은 날로 심화되는 양상을 보이고 있다(신 등, 1999; 신과 조, 2000; 임 등, 2000).

식물플랑크톤의 성장에 영향을 미치는 환경요인으로

는 빛, 온도, 영양염의 농도, 유광층 아래로 퇴적, 동물플랑크톤에 의한 섭식 등으로 생태계로부터 제거되는 과정을 들 수 있다. 특히 영양염이 유입되어 생태계 내에 축적되어 조류나 식물성 플랑크톤이 과다하게 하여 부영양화 된다.

호수의 부영양화는 대부분의 호수에서 제한 영양염인 인의 유입 증가에 의해 일어난다(Harper, 1992). 호수가 부영양화 되면 식물플랑크톤의 현존량이 증가하고 투명도가 감소하게 되며, 성층화 된 시기에는 저층에서의 식물플랑크톤의 부패로 용존산소의 농도가 감소하거나 고갈되는 특징이 나타난다. 부영양화 정도는 총인 농도, 투명도, 엽록소 *a*의 농도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 이들의 관계를 이용하여 호수의 영양상태를 분류하고자 하는 노력이 많이 있었다(Carlson, 1977; EPA,

* Corresponding author: Tel: 033) 730-0441, Fax: 033) 730-0403, E-mail: ykshin@mail.sangji.ac.kr

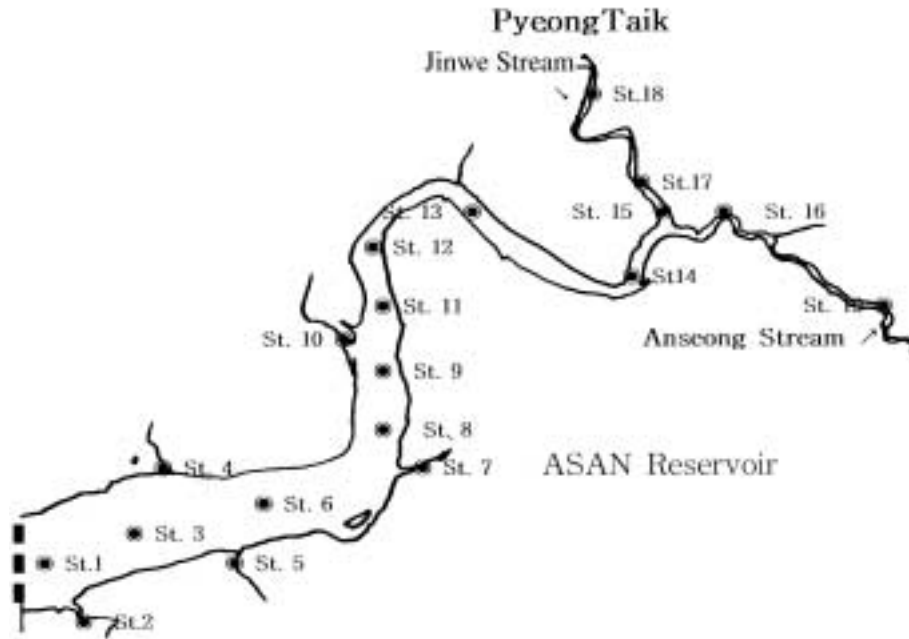


Fig. 1. Map showing the sampling station in the Asan Reservoir.

1979; Forsberg and Riding, 1980; OECD, 1982).

조사대상지역인 아산호는 안성천 하류에 위치하며, 1973년 12월에 준공된 우리나라 최초의 방조제로, 독연장 2,564 m이며 총 저수량은 1억4,200만 m³이다. 아산호로 유입되는 안성천은 유역면적 1,634 km²으로 경기도 및 충청북도 일부를 포함하고 있으며 넓은 경작지와 수원시, 평택시 등 대도시가 있어 인위적인 오염원들에 의해 부영양화가 우려되는 곳으로 1995년 환경부 전국 호소현황조사에 아산호의 영양상태는 부영양화 된 것으로 보고된 바 있다. 하지만 아산호에 대한 이전의 연구는 홍 등 (1976)의 육수학적 연구가 있을 뿐이다. 아산호는 하상에 쌓인 퇴적물을 제거하여 수심을 깊게 하는 준설작업의 수행으로 인해 호수 환경에 상당한 변화가 있을 것으로 예측되고 있다.

본 연구는 아산호의 생태학적인 특성을 이해하고자 시도되었고 식물플랑크톤의 종조성과 현존량에 영향을 미치는 아산호의 이화학적 특성을 조사하였고 이를 기초로 영양상태를 평가하였다.

재료 및 방법

1. 조사정점 및 조사시기

조사지점은 총 19개로 상류로 유입되는 안성천과 진

위천을 포함하여 아산호로 유입되는 소규모 지천들의 영향을 파악하고자 각 지천에 1개에서 2개의 정점을 설정하고 호수 중심에 비슷한 간격으로 10개의 정점을 선정하는 등 지역적 특성을 고려하여 조사하였다 (Fig. 1). 식물플랑크톤의 조사시기는 계절특성을 고려하여 1997년 3월, 6월, 9월, 11월에 조사하였고 장마 등과 연관된 호수 환경 변화를 좀더 이해하기 위해 7월에 추가 조사하였다.

2. 시료의 분석방법

수온과 용존산소농도 (DO)는 현장에서 DO meter (YSI model 58)로, 투명도는 30 cm 지름의 Secchi disc를 사용하여 측정하였다. 고형부유물질 양은 GF/C 여과지로 여과하여 여과 전후의 무게 차로 구하였으며, 총인과 인산염 인은 ascorbic acid법으로 측정하였다. 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소는 Standard Methods 4110에 의해 이온크로마토그래피 (DX-120, DIONEX)로 측정하였다. 엽록소 a의 양은 acetone 추출법으로 엽록소를 추출하고 파장별 흡광도를 측정하여 Lorenzen (1967)이 제안한 식으로 계산하였다. 규산염 규소 (SiO₂)는 시료를 여과 후 몰리브덴산 암모늄을 사용하여 410 nm에서 흡광도를 측정하였다. 모든 분석은 Standard Methods (APHA, 1992)의 방법을 따라 실시하였다.

Table 1. Physicochemical factors of the Asan Reservoir. (Mean ± Standard deviation)

Month	Mar.	Jun.	Jul.	Sep.	Nov.	Min.	Max.
Temp (°C)	10.9±1.5	24.2±1.5	32.2±2.3	27.6±1.0	11.7±0.4	8.3	35.3
D.O. (mg/l)	12.28±0.88	4.68±1.12	14.53±5.44	10.75±2.70	7.31±2.74	0.09	19.9
Secchi Depth (m)	0.64±0.13	0.34±0.23	0.30±0.10	0.37±0.09	0.44±0.21	0.1	100
S.S. (mg/l)		305±40	42±1	29±1	27±1	11.3	2143.3
NH ₄ -N (mg/l)	1.67±0.34	0.55±0.22	0.10±0.11	0.10±0.14	0.76±0.46	ND	2.35
NO ₂ -N (mg/l)	ND	0.41±0.31	0.22±0.06	0.19±0.14	0.61±0.27	ND	1.10
NO ₃ -N (mg/l)	0.77±0.96	1.23±0.52	1.44±0.36	0.79±0.38	0.71±0.45	ND	2.68
PO ₄ -P(mg/l)	0.31±0.19	0.06±0.03	0.04±0.04	0.01±0.03	0.20±0.15	ND	0.74
TP (mg/l)	0.41±0.22	0.23±0.13	0.19±0.08	0.14±0.07	0.35±0.28	0.01	0.95
SiO ₂ (mg/l)	8.65±1.99	8.53±4.99	7.96±0.86	6.42±3.23	6.68±4.17	0.80	16.54
Chl. <i>a</i> (µg/l)	104.1±65.9	42.4±19.3	176.4±121.7	339.4±171.2	49.3±29.5	8.8	798.6

3. 영양상태 판정기준

부영양화지수(Trophic State Index)는 Carlson (1977)이 다음과 같이 제안한 식으로 계산하였다.

$$TSI(SD) = 10 \times [6 - \ln SD / \ln 2]$$

$$TSI(CHL) = 10 \times [6 - (2.04 - 0.68 \ln CHL) / \ln 2]$$

$$TSI(TP) = 10 \times [6 - \ln (48/TP) / \ln 2]$$

결과 및 고찰

1. 이화학적 특성

아산호의 이화학적 특성은 Table 1에 요약하였다. 수온은 3월에 평균 기온이 가장 낮고 7월에 가장 높으며, 공간적으로 상류와 지천에서는 높고 하류로 내려갈수록 온도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 수온의 수직분포는 3월, 11월에는 수직변화가 크지 않으나 6월의 일부정점과 7월과 9월에는 표층과 저층에서의 수온 차이가 커서 성층화 된 것을 볼 수 있다(Fig. 2). 아산호가 비록 수심이 낮음에도 불구하고 여름철에는 성층화로 인해 수괴의 상하 혼합이 방해받고 있는 것으로 보이고, 상류보다 하류에서 수온이 낮은 것은 하류부분이 수심이 깊어 상대적으로 외부 온도 변화에 대한 영향을 수심이 낮은 지역보다 덜 받는 것과 관련이 있는 것으로 보인다.

용존 산소의 수직분포양상이 수온의 성층화 현상을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 녹조현상이 생긴 7월과 9월의 표층에서 용존 산소의 농도가 매우 높는데 이것은 광합성에 따른 산소의 과포화 때문으로 여겨진다. 3월과 11월에는 용존 산소의 수직분포가 크지 않았으나 6월, 7월, 9월의 용존 산소의 수직분포는 저층에서 낮은 농도의 값을 나타냈다(Fig. 2). 여름철 성층 현상은 용존 산소의 수직분포에 영향을 주는 것으로 나타났는데 수직

혼합이 방해받는 상황에서 식물플랑크톤의 대 번식 후 사멸한 것들이 침전되면서 박테리아에 의해 분해되며 산소를 소비하기 때문으로 여겨진다.

11월의 용존 산소의 농도는 매우 독특한 공간 분포를 나타내는데 지천인 정점 4, 정점 7, 정점 10, 상류지역의 정점 14, 15, 16에서는 인접한 정점들에 비해 용존 산소의 농도가 낮았다. 이런 특성은 아산호로 유입되는 지천들이 유기 오염물질에 의해 오염된 상태로 유입되고 있는 것으로 보인다. 수심이 4m인 정점 7에서 표층과 1m 수심에서 용존 산소의 농도가 각각 2.50 mg/l, 2.35 mg/l로 낮는데 2m에서 4.02 mg/l, 3m에서 6.06 mg/l, 4m에서는 6.11 mg/l로 증가하여 유기물에 의해 오염된 지천의 물이 표면을 따라 유입되고 있음을 시사하고 있다. 이런 경향은 정점 10에서도 나타났다. 표층이 1m 수층보다 약간 높은 경향을 보이는데 대기에서 확산되어 들어오는 산소에 의한 영향으로 판단된다. 정점 14, 15, 16에서 낮게 나타나는 것은 진위천과 안성천에서 들어온 유기물들이 정체된 호수로 유입되면서 이 수역에 정체되어 축적되면서 분해작용이 일어나는 것과 관련이 있는 것으로 여겨진다.

Secchi disc로 측정된 투명도는 0.10~1.00 m의 범위로 매우 탁한 것으로 나타났으며 7월에 투명도가 가장 낮았고 3월에 가장 높았다(Table 1). 부유물질(suspended solids)의 농도는 11.3~2143.3 mg/l의 범위로 나타났다(Table 1). 6월 조사하던 때에 136.5 mm의 집중호우가 내려(기상대 자료) 그 영향으로 정점 5에서 2143.3 mg/l, 정점 16에서 1725.0 mg/l의 매우 높은 값을 나타내었고 각 지류(정점 4, 7, 17)에서도 100 mg/l 이상의 높은 값을 나타냈다. 부유물질 농도는 6월에 가장 높고 11월에 낮게 나타났다. 투명도는 부유물질에 의해 영향을 받는데 6월에 경우는 집중호우로 인한 탁류의 유입이 가장 큰 이유로 보이나 7월과 9월에는 녹조현상이 발생

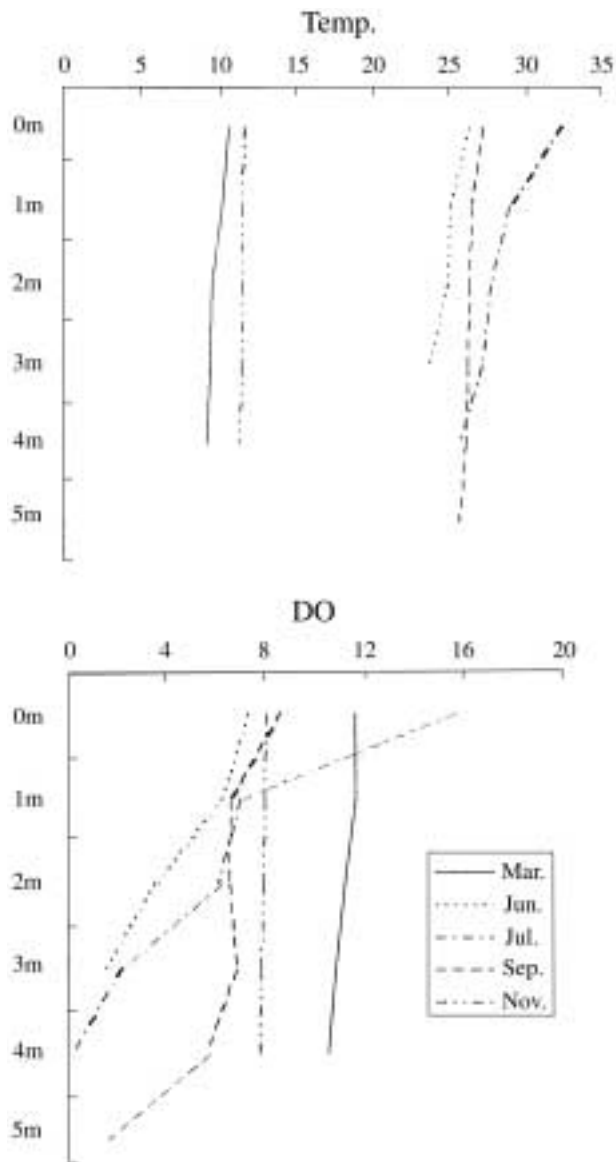


Fig. 2. Vertical distribution of temperature (°C) and DO (mg/l) at station 6 in the Asan Reservoir.

하여 식물플랑크톤 생물량의 차이에 의해 지역적인 차이를 나타내는 것으로 생각된다. 특히 아산호 중간부분에서 녹조현상으로 인해 부유물질의 농도가 높아지고 투명도가 낮아진 것으로 판단된다. 정점 19에서 높은 농도를 나타내는 것은 조사지역이 교각을 건설하고 있는 현장과 붙어있어 공사로 인한 토사의 유입과 관련이 있는 것으로 사료된다. 아산호의 투명도가 상당부분 식물플랑크톤의 현존량에 의해 영향을 받는 것으로 여겨지나 폭우나 공사로 인해 유입되는 무기물입자들의 농도에 의해서 영향을 받기 때문에 장마철에는 부영양화 지

표로 사용하는데 한계가 있다고 판단된다.

암모니아성 질소는 3월에 가장 높고 7월과 9월에 가장 낮았으며, 아질산성 질소는 3월에 가장 낮고 11월에 가장 높았고, 질산성 질소는 7월에 최대 11월에 최소치를 보였다 (Table 1). 홍 등 (1976)의 11월 결과와 비교할 때 암모니아성 질소는 11배, 아질산성 질소는 20배 높았으나 질산성 질소는 오히려 0.7배로 낮았다. 아산 남방제 결과 (이와 부, 1998)와 비교하면 비슷한 수준이었다. 한강하류의 결과 (한 등, 1997)와 비교할 때 모든 항목에서 높게 나타났다.

인산염 인의 농도는 ND~0.74 mg/l의 범위를 나타냈다 (Table 1). 이 결과는 한 등 (1997)의 한강 결과의 0.019~0.280 mg/l보다 약 2.6배 높은 값이었다. 월별 평균농도는 3월에 최대 9월에 최소로 나타났다. 공간분포는 상류지점과 지천에서 높게 나타나며 하류로 갈수록 낮아졌다. 아산호에서 늦가을 (10~11월)에 조사한 홍 등 (1976)의 결과 (0.038 ± 0.0069 mg/l)와 비교할 때 본 연구의 11월 평균농도는 약 5배 정도 높았고 아산 남방제의 결과 (이와 부, 1998)와 비교할 때 다소 높은 수준이었다. 총인은 0.01~0.95 mg/l의 범위를 나타냈다. 9월에 최소, 3월에 최대값을 나타내 인산염 인과 같은 경향을 보였다. 공간적인 분포양상을 보면 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 지류들에서 다소 높은 경향을 보였다.

규산염 규소는 0.80~16.54 mg/l의 범위로 6월에 최대 9월에 최소치를 보였다 (Table 1). 규산염의 변화는 다른 영양염의 변화에 비해 녹조현상에 크게 영향을 받지 않은 것은 녹조 현상을 일으키는 원인 생물들이 규조류보다는 cyanobacteria와 녹조류인 것과 관련이 있는 것으로 보인다 (신과 김, 2002).

영양염의 공간 분포는 상류에서 하류로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 지류들에서 다소 높은 경향을 보였다. 이것은 아산호로 유입되는 영양염의 주 공급원이 안성천과 진위천이며 기타 소규모 지천을 통해서도 유입되고 있음을 의미한다. 특히 인의 경우에 분명하게 나타나고 있다. 6월에는 강우의 영향으로 호수 중심부의 정점에서의 공간 분포는 상류에서 낮고 하류로 내려 갈수록 감소하는 경향을 보였으며 지천에서 높은 농도의 총인이 유입되고 있음을 보여주고 있다 (Fig. 3). 인산염은 식물플랑크톤에 의해 이용되어 하류로 갈수록 농도가 낮아지는 것으로 판단된다. 계절적으로는 식물플랑크톤이 대발생 하여 녹조현상을 나타낸 7월과 9월에 영양염의 농도가 낮아져서 식물플랑크톤의 이용에 따라 감소하였다가 겨울철에 다시 증가하는 경향을 보이는 것은

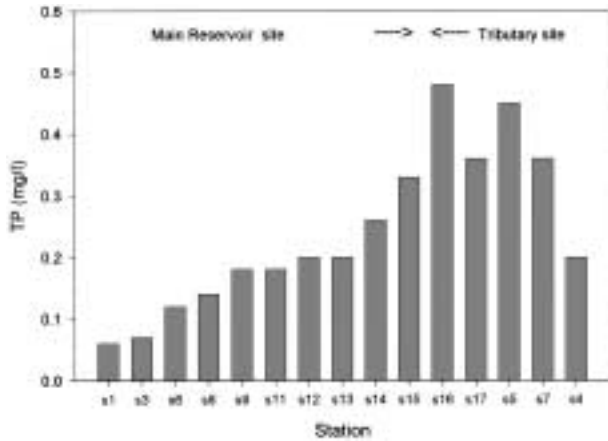


Fig. 3. Spatial distribution of TP concentration (mg/l) in June, 1997.

로 나타났다.

엽록소 a의 농도는 8.8~798.6 µg/l의 범위의 값을 보였다 (Table 1). 3월의 경우 104.1±65.9 µg/l로 상류에서는 100 µg/l 이상의 매우 높은 농도를 보이고 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 6월에는 42.4±19.3 µg/l로 3월에 비해 낮은 수준을 보였는데 정점 6에서 정점 14까지의 부분이 다른 수역보다 다소 높게 나타났다. 7월에는 176.4±121.7 µg/l로 녹조현상이 생기면서 아산호 중간부분에서 매우 높게 나타났고 일부에서는 녹조현상이 나타나지 않았다. 9월에는 전 수역에서 녹조현상이 발생하여 339.4±171.2 µg/l의 매우 높은 농도를 보였다. 11월에는 9월에 비해 상당히 낮아져 49.3±29.5 µg/l로 정점 8에서 정점 13까지의 호수 중앙부분에서는 70 µg/l 이상으로 높았다. 이 결과는 낙동강 하구언을 막은 이후에 부영양화로 고통받는 낙동강에서 엽록소 a의 변화를 연구한 조와 신(1995)의 결과의 최대값 270 µg/l와 비교할 때 3배, 평균농도의 최대값 131.8±74.7 µg/l에 비해서는 2.6배 높은 것이었다. 대청호에서의 오 등(1995)의 결과(최대 44.62 µg/l, 평균 14.42 µg/l)에 비해서는 10배 이상 차이가 났다. 신과 조(2000)의 금강 하구호에서의 결과(최대 212.9 µg/l, 평균 73.2 µg/l)에 비해서는 높은 수준이었다. 연평균 >75 µg/l 이상을 과영양상태로 평가하는 OECD (1982)의 기준에 의하면 본 연구 수역은 과영양상태로 나타났다.

2. 부영양화도 지수를 이용한 영양상태 평가

아산호의 TSI (SD)는 평균 66.7~78.3, TSI (CHL)는 66.1~86.6, TSI (TP)는 66.1~88.5, TSI (TN)은 53.3~

Table 2. Result of trophic status index calculated by Carlson's equation and comparison of the TSI data of KME (1994) and this study (1997).

Month\TSI	TSI (SD)	TSI (TP)	TSI (CHL)
March	66.7	88.5	74.2
June	78.0	80.6	66.1
July	78.3	78.9	78.7
September	74.7	66.1	86.6
November	73.8	87.1	66.7
Average	74.3	80.2	74.5
94' TSI data (KME)	57.3	87.1	66.9

66.5의 범위를 나타냈다 (Table 2). Kratzer and Brezonik (1981)은 영양상태를 5단계로 나누어 20 이하는 극빈영양, 30~40은 빈영양, 45~50은 중영양, 53~60은 부영양, 70 이상은 과영양상태라고 나누었다. 이 기준에 의하면 아산호는 대부분 과영양상태에 있는 것으로 평가할 수 있다. Havens (2000)은 TSI를 통해 식물플랑크톤 제한요인 및 seston의 조성을 유추하는 시도를 하였는데 TSI (CHL)이 TSI (TP)보다 작다면 인이 아닌 다른 요인이 조류의 성장을 제한한다고 유추할 수 있으며 TSI (CHL)이 TSI (SD)보다 훨씬 적다면 호수내 seston 중 아주 작은 무생물적 입자들의 구성비가 높으며 이 경우 빛이 제한 요소가 될 것이라고 하였다. 3월, 6월, 11월에는 TSI (CHL)이 TSI (TP)에 비해 현저하게 낮아 인이 아닌 다른 요인에 의하여 제한 받고 있는 것으로 여겨진다. 6월에 경우 TSI (SD)에 비해 TSI (CHL)이 낮아 무생물적 입자들에 의해 영향을 받는 것으로 나타났는데 강우로 인해 무기성 부유물질의 유입이 증가한 것과 잘 일치하고 있다. 94년에 조사된 아산호의 결과(환경부, 1995)와 비교할 때 TSI (SD)와 TSI (CHL)은 증가하였으나 TSI (TP)는 감소한 것으로 나타났다 (Table 2). 이것은 94년보다 97년도가 인이 아닌 영양염에 의해 식물플랑크톤의 성장이 제한 받고 있는 것으로 여겨진다.

적 요

본 연구는 1997년 3월부터 11월까지 아산호 19개 정점에서 부영양화 정도를 평가하기 위하여 이화학적 환경요인을 조사하였다. 수온은 8.3~35.3°C의 범위였고 여름철에 수온 약층이 형성되는 것으로 나왔으며 용존 산소량도 같은 경향을 보였다. 투명도는 0.1~1 m의 범위로 매우 낮았으며 SS는 11.3~2143.3 mg/l의 범위로 강우량과 식물플랑크톤의 현존량에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 영양염 농도는 지천에서 높고 하류로

갈수록 낮아지는 경향을 보였으며 계절적으로는 녹조현상이 일어난 여름과 초가을에 낮았고 초봄과 겨울에는 높았다. Carlson 의한 부양양화도(Trophic State Index)를 가지고 판정한 아산호의 영양상태는 과영양 상태이었다.

인 용 문 헌

- 신윤근, 김영길. 2002. 아산호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤 군집 구조. 한국육수학회지 **35**(3): 187-197.
- 신재기, 조경제. 2000. 금강 하구호에서 수질의 계절변동과 오염도. 한국육수학회지 **33**(3): 251-259.
- 신재기, 조경제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤 변동. 한국환경생물학회지 **17**: 529-541.
- 오광철, 오희목, 이진환, 맹주선. 1995. 대청호 식물플랑크톤의 일주기성 수직이동. 한국육수학회지 **28**(4): 437-446.
- 이석구, 부성민. 1998. 아산 남방제에서 식물플랑크톤의 계절 변화. 한국육수학회지 **31**(3): 181-185.
- 조경제, 신재기. 1995. 낙동강 중하류의 염록소 *a* 분포와 변동. 한국육수학회지 **28**(4): 421-426.
- 임창수, 신재기, 조경제. 2000. 금강 중·하류에서 오염 양상과 수질평가. 한국육수학회지 **33**(3): 251-259.
- 한영희, 이진환, 장만. 1997. 한강하류의 환경학적 연구 I. 수질. 한국육수학회지 **30**(3): 181-192.
- 홍은환, 조현영, 나규환. 1976. 아산호의 육수학적 연구. 한국육수학회지 **9**(1):55-59.
- 환경부. 1995. 全國湖沼環境現況調査 및 主要湖沼影響圈域 設定(2次) 보고서 p. 283~345.
- APHA. 1992. Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 18th edition.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- EPA, 1979. Quantitative techniques the assessment of lake quality. EPA 440/5-79-015.
- Forsberg, C. and S. O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 swedish waste-receiving lakes. *Archiv fur Hydrobiologie.* **89**: 189-207.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwater. Principles, problems and restoration. Chapman and Hall, London. pp. 329
- Havens, K.E. 2000. Using Trophic Index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *Korean J. Limnol.* **33**(3): 187-196.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin.* **17**: 713-715.
- OECD. 1982. Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control. OECD, Paris.
- Watanabe, T. 1962. On the Biotic Index of Water Pollution based upon the species Number of Bacillariophyceae in the Tokoro River in Hokkaido (in Japanese). *Jap. Jour. Ecol.*, **12**:216-222.

(Received 10 Jun. 2002, Manuscript accepted 23 Aug. 2002)