

호소형 및 하천형 댐 호의 육수학적 특성과 조류발생과의 상관관계

김종민^{1,2} · 허성남² · 노혜란² · 양희정² · 한명수^{1*}

(¹한양대학교 자연과학대학 생명과학과, ²국립환경연구원 한강물환경연구소)

Relationship between Limnological Characteristics and Algal Bloom in Lake-type and River-type Reservoirs, Korea. Kim, Jongmin^{1,2}, Seongnam Heo², Hyeran Noh², Heejeong Yang² and Myung-Soo Han^{1*} (¹Department of Life Science, Hanyang Univ. Seoul 133-791, Korea, ²National Institute of Environmental Research, Han-river environment research laboratory, Gyeonggi-do 476-823, Korea)

This paper aimed to analyze the relationship between algal bloom patterns and hydrological, limnological data which were collected from major reservoirs in Korea for 8 years (1990~1997). Water temperature of river-type reservoirs showed wider seasonal fluctuations than that of lake-type. pH of lake-type reservoirs was low in winter season but high in summer season. In contrast, river-type reservoirs showed high pH in spring and autumn seasons as well, and very low in summer season. COD of lake-type reservoirs and Paldang reservoir was lower (2~3 mg/L) than that of Geumgang and Nagdonggang reservoirs (6~9 mg/L). Dissolved oxygen (DO) of river-type reservoirs was higher than that of lake-type reservoirs. Seasonal fluctuation pattern of DO saturation in river-type reservoirs was high (80~100%) and remained relatively constant whereas lake-type reservoirs showed the highest level (93%) in late spring or early summer, which gradually decreased entering winter season (46~66%). And monthly variation of DO saturation showed inverse proportion to water volume in lake-type reservoirs. Nutrients concentration in river-type lake is higher than lake-type. Seasonal fluctuation of nutrients (T-N, T-P) in lake-type reservoirs was relatively small than that of river-type reservoirs. Annual mean N/P mass ratio of lake-type reservoirs was higher than that of river-type. Transparency tended to related with the suspended solid concentration in river-type reservoirs. Algal bloom of lake-type and river-type reservoirs occurred at any time except rainfall and winter periods. And it dominated in summer and early autumn, respectively. Algal bloom of river-type reservoirs was higher than that of lake-type. Relationship between rainfall and chlorophyll-a in lake-type reservoirs was relatively high, however river-type reservoirs showed insignificant.

Key words : river-type reservoir, lake-type reservoir, rainfall, algal bloom, hydrological factors

* Corresponding author: Tel: 02) 2290-0956, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: hanms@hanyang.ac.kr

서 론

우리나라의 경우 대부분의 호수는 이수의 목적으로 하도를 차단하거나 변형하여 생성된 댐 호로 이루어져 있다. 댐 호의 기후는 자연호수가 산재하는 지역보다 따뜻한 경향을 보이기 때문에 평균 수온이 높고, 작물 재배기간이 길며, 강우량은 증발량에 비해 적거나 거의 비슷한 수준을 나타낸다(Wetzel, 1990). 또한 많은 자연호수에 비해 댐 호의 유역면적은 호수 표면적보다 매우 넓은데 그 이유는 대부분의 댐 호가 강의 계곡 또는 배수구역의 하류에 형성되기 때문이며 따라서 유역면적에 대한 저수지 표면적비(DA/SA)가 크므로 그만큼 부영양화가 쉽게 진행될 수 있는 요소를 가지고 있다고 볼 수 있다(Fee, 1979; 김과 홍, 1992; 류 등, 2000). 즉, 댐 호의 유역으로부터 막대한 양의 용존성 또는 입자성 물질 부하에 따른 질소와 인의 유입은 부영양화 정도에 매우 중요하다(Shindler and Fee, 1974; Bloesch *et al.*, 1977; OECD, 1982).

이러한 인공호수들은 모두 하천의 흐름을 막거나 산골짜기의 어귀를 막아서 조성된 댐 호로서 호수의 형태적 특성에 따라 곁가지형 호수, 하천형 호수, 하구형 호수, 저수지형 호수 등 4가지 유형으로 구분하기도 하고(김과 홍, 1992), 유입량이 크고 유로를 차단하여 형성된 하천형 댐 호와 유입량은 적으나 하도의 경사가 깊은 곳에 댐을 축조하여 형성된 호소형 댐 호 2개 유형으로 크게 구분을 하기도 한다(공 1992), 후자의 분류에 의하면 일반적으로 하천형은 수심이 얇고 유입·유출량이 저수량에 비해 상대적으로 큼에 따라, 수온이나 용존산소의 수직분포가 거의 일정하여 성층의 발달이 미약하고, 짧은 체류시간으로 인해 유역의 강우와 오염물질의 부하에 직접적인 영향을 받는데 반해 호소형은 체류시간이 길고 성층현상이 뚜렷하여 자연호와 유사한 생태학적 특성을 가지는 것으로 알려져 있다(공, 1997).

댐 호에 대한 연구는 대부분 수문학적 요소가 부영양화의 발생 및 진행과정에 미치는 영향 또는 조류증식 영향인자의 규명 등에 관한 것이다(Thornton *et al.*, 1990; 김 등, 2002a, b; 이 등, 2002; 허 등, 1998; 허 등, 1992; 김 등, 1999; 이 등, 1999; 한 등, 1993, 1995, 1999; Han *et al.*, 2002; 김 등, 1999; An *et al.*, 2001). 특히 류 등(1995)은 팔당호내 경안천 수역에서의 조류발생요인을 수생식물과 동물성 플랑크톤의 동태 및 분류와의 혼합도와 밀접한 관계를 갖는다고 보고하였으며, 임 등(1999) 및 정 등(1998)은 팔당호에서의 조류 발생 정도

가 남·북한강 상류에 위치한 대형 댐으로부터의 방류량에 의해, 한 등(1995)은 체류시간에 의해 크게 영향을 받는다고 하였다. 이와 같이 호수의 수문학적 요인과 조류발생과의 연관성에 관한 연구가 집중적으로 수행된 결과, 호소형의 경우 집중 강우 이후에 상대적으로 높은 클로로필 *a* 농도가 일반적으로 관찰된 바 있으며(김, 미 발표자료), 하천형 중 팔당호의 경우 우기에 강우량이 증가할수록 클로로필 *a* 농도는 감소하는 경향이 밝혀졌다(김 등, 2002a; 한 등, 2000; Hong *et al.*, 2002). 이러한 현상은 조류발생과정 및 발생 패턴이 호수의 수문학적 특성(호소형 또는 하천형)에 따라 현저한 차이를 나타내고 있음을 암시한다. 즉, 서로 다른 특징을 지닌 호수에 대한 비교 연구를 통하여 부영양화 정도, 계절별 조류종 천이, 초식성 및 육식성 포식자에 의한 섭식효과, 유역의 형태와 관리방법 등과 같은 호소 생태계 기능에 대한 이해는 물론, 호수 환경에 영향을 미치는 요인에 대한 검토가 가능하다(Horne and Goldman, 1994; Fukushima, 1995). 그럼에도 불구하고, 국내 주요 호수에 대한 수문학적 특성과 조류발생에 관한 호수 유형별 비교·연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 공(1997)의 분류기준에 의하여 조사대상 호수를 호소형과 하천형으로 크게 분류하고(금강하구연과 낙동강하구연의 경우 해수의 역류방지를 주 목적으로 하고 있어 하천형으로 일반화하여 분류하기에는 무리한 점이 있으나 비교하고자 하는 호수가 같은 수계의 상·하류에 위치하고 있고 [대청호와 금강하구연, 안동호와 낙동강하구연], 각 하구연이 하천형 호수의 성격을 많이 띠고 있으므로(공, 1997) 하천형으로 분류), 이들의 환경인자와 수문학적 인자의 장기적 변화 패턴을 비교·분석하여, 이들이 조류 발생과정 및 패턴에 미치는 영향을 각 유형별로 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사수역의 특성

Table 1에 조사수역의 수문학적 특성을 정리하였다. 소양강은 총 유로연장 166.2km로서 한강수계를 형성하는 북한강의 최대 지류이며 오대산(해발 1,653m) 부근에서 발원하여 남으로 흘러 내려가다가 춘천시 동북방에서 북한강과 합류한다. 이 한강수계의 상류에 위치한 소양호는 1973년에 준공된 다목적 댐의 건설로 형성된 호수로 자연 유하량을 풍수기에 저수하여 갈수기에 서서히 유하시킬 수 있는 수량조절능력을 갖추고 있으며,

Table 1. Dimensional and morphometric characteristics in Soyang (SY), Daecheong (DC), Andong (AD), Paldang (PD), Geumgang (GG) and Nagdonggang (ND) reservoir, Korea

	SY	DC	AD	PD	GG	ND
Height of Dam (m)	123.0	72.0	83.0	28.0	16.6	8.0
Length of Dam (m)	530.0	495.0	612.0	574.0	1,814.0	2,230.0
Water level (EL, m)						
Flooding level	198.0	80.0	162.5	29.5	—	—
Average water level	193.5	76.5	160.0	25.2	1.0	1.0
Low level	150.0	60.0	130.0	25.0	1.0	1.0
Drainage basin area(km ²)	2,703.0	4,134.0	1,584.0	23,618.0	9,828.0	23,560.0
Surface area (km ²)	70.0	64.3	52.0	38.2	36.5	38.6
Mean depth (m)	41.4	23.2	24.0	6.5	3.8	3.4
Max water volume (10 ⁶ m ³)	2,900.0	1,490.0	1,248.0	244.0	138.5	130.3
Drainage basin area/Surface area	38.6	64.3	30.5	618.3	269.3	610.4

유역면적 총 2,703 km², 총 저수량 29억톤, 평균수심 41.4 m인 대규모 호수로서 전형적인 호소형 호수로 알려져 있다. 한강 수계의 제일 하류 쪽에 위치한 팔당호는 1973년 남·북한강과 경안천이 합류하는 지점에 발전을 목적으로 댐을 축조하여 형성된 호수로서 유역면적 23,618 km², 저수량 244백만톤, 평균수심 약 6.5 m이다. 육수학적 특성은 수문 조작의 영향을 많이 받으며 체류시간이 짧고 성층의 발달이 미약한 대표적인 하천형 호수이다.

금강은 유역면적이 전국토의 약 10%에 해당하는 9,886 km²이고 유로연장은 401 km로서 소백산맥에서 발원하여 대청댐의 상류구간에서 노령산맥을 관류, 하행하고 있다. 따라서 금강 상류부에는 협곡을 이룬 곳이 많으며 대청댐 이하 하류구간은 1/5,000~1/8,000의 완만한 구배를 보이고 있다. 대청호는 금강 하구로부터 150 km 상류지점인 대전시 동북방 16 km 지점에 높이 72 m, 길이 495 m의 댐을 건설하여 조성된 인공호로서 총 저수용량 14억9천만 m³인 대형호수이다. 금강하류에 위치하여 충청남도, 충청북도의 약 절반과 전라북도의 약 1/4, 그리고 경기도, 경상북도 일부를 포함하는 광대한 유역을 가지는 금강하구언은 1983년 11월 착공하여 1990년 11월에 완공하였으나 담수화는 1994년 9월부터 시작되었다. 하구언은 콘크리트 중력식 댐으로 뚝 연장 1,814 m, 총 저수량은 138백만 m³이다.

낙동강은 우리나라 동남부를 관류하는 유로연장 512 km, 유역면적 23,326 km²의 대 하천으로 유역 내 부산, 대구 등 주요도시와 김해평야를 비롯한 곡창지대가 형성되어 있으며 낙동강 하구로부터 약 340 km 상류에 위치하는 안동댐은 높이 83 m, 길이 612 m, 저수용량 12억 4천8백만 m³으로 시설용량 9만 kW의 국내최초 양수겸

용발전소를 갖추고 있으며, 유역면적 1,584 km²로서 낙동강 유역 전체면적의 6.6%를 차지하고 있다. 낙동강 수계 하류에 조성된 낙동강하구언은 갈수기에 해수역류로 발생하는 부산, 울산, 마산 등 주요 산업도시의 용수공급 장애와 15,000 ha에 이르는 김해평야의 염해를 방지하기 위하여 건설한 길이 2,230 m의 하구둑으로 계획 방류량 18,300 m³/sec, 저수위 해발 0.5 m, 총 저수량 130백만 m³의 규모로서 1990년 6월 완공되었다.

2. 수리·수문

본 연구는 한강, 낙동강 및 금강 수계 상·하류에 위치한 댐 호를 대상으로 하였으며, 체류시간이 60일 이상이거나 겨울철 순환기의 평균 클로로필 *a* 농도에 비해 성층기의 클로로필 *a* 농도가 높은 경우를 호소형으로 분류하였고(소양호, 안동호, 대청호), 그 외의 경우(해수의 역류방지 등을 주 목적으로 하는 금강하구언 및 낙동강하구언 포함) 하천형으로 분류하였다(팔당호, 낙동강하구언, 금강하구언) (공, 1997). 이들의 수위변동, 유입량 및 방류량, 유역 강우량 등과 같은 수리·수문 자료는 수문조사년보(건설교통부, 1990~1997), 기상연보(기상청, 1980~1997), 각 호수의 댐 관리연보(한국수자원공사, 1990~1997) 및 한강수력발전처 팔당댐 수계자료를 이용하였다(소양호, 팔당호는 '98년도 자료 포함). 소양호, 대청호 및 안동호의 저수용량은 각 호수의 수위자료를「수위-저수용량 관계식」(한국수자원공사)에 대입하여 산출하였다. 금강하구언의 경우 농업기반공사에서 제시한 댐 내용적표에서 관계식을 구하였고, 팔당호는 공(1992)이 제안한「수위-저수면적-저수용량 관계식」을 이용하였다. 단, 낙동강하구언은 수위(해발) 1.0 m를 중심으로 수위변동폭이 약 0.5 m 이내로 거의 일정하

며(댐 관리소 자체적으로 0.75 m~1.25 m 이내로 수위를 유지하도록 하고있음), 해수의 역류방지를 주목적으로 수문을 조작하고 유량을 조절하기 때문에 거의 하천과 같은 성격을 띠고 있어 수위-저수용량 관계식이 제시되어있지 않았다. 따라서 낙동강하구언은 유효저수량이 매월 항상 일정한 용량을 유지한다고 간주하고 저수용량 자료로 이용하였다.

3. 수질

소양호, 대청호, 안동호, 금강하구언, 낙동강하구언의 이화학적 수질측정자료는 환경부의 수질모니터링 자료를 이용하였다. 동 자료는 '90년부터 '97년까지의 자료(소양호는 '98년 자료 포함)로서 '90~'92년의 경우 4월,

6월, 8월, 10월에 월 1회, '93~'97년까지는 매월 1회 측정되었다. 팔당호는 국립환경연구원 한강물환경연구소에서 '90~'98년까지 매월 1회 조사된 자료를 이용하였다. 시료의 채수는 각 호수의 댐 앞에서 수행되었으며 채수지점은 Fig. 1과 같다. 분석 목적에 따라 매년 해당 월에 대한 측정자료를 산술평균하였고, 이를 각 댐 호의 조사항목에 대한 월별 대표값으로 활용하였다.

조사항목은 수온, pH, DO, 전기전도도, COD, SS, 총인, 총질소, 투명도, 클로로필 *a*이며 이들 중 수온, pH, DO 및 전도도는 현장 수질측정계기인 'Surveyor 4' (Hydrolab, 1995) 등을 이용하여 현장에서 측정되었다. 투명도는 투명도판(지름 30 cm, 백색원판)으로 측정되었으며, COD, SS 및 영양염류는 수질오염공정시험방법(환경부, 1995)

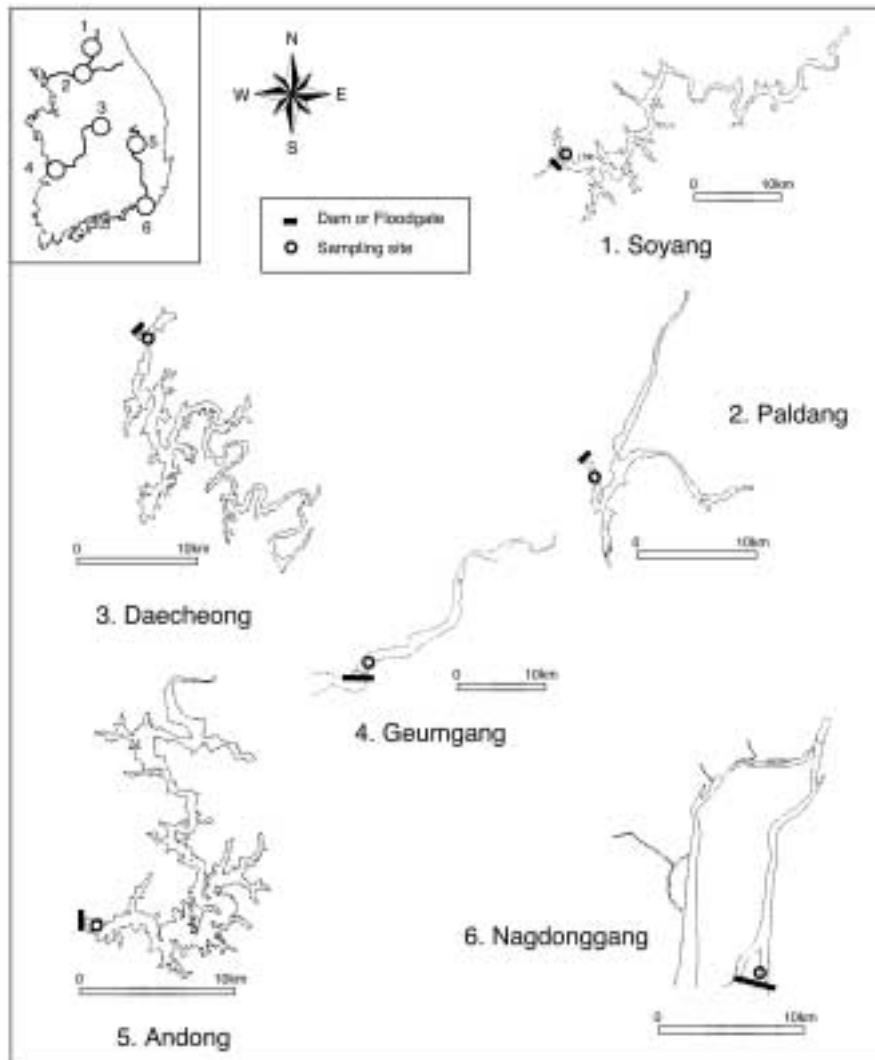


Fig. 1. Location of dam (■) and sampling sites (○).

에 따라, COD는 망간법을, 총질소와 총인은 각각 자외선 흡광광도법과 아스코르빈산 환원법을 이용하여 분석되었다. 클로로필 *a*는 GF/C 여과지로 시료 적당량을 여과 후 90% 아세톤으로 암냉소에서 24시간 동안 엽록소를 추출하여 663, 645, 630 그리고 750 nm의 파장에서 흡광광도계 (Carry 1E, Varian)로 흡광도를 측정하여 계산된 것이다. 용존산소 포화도는 수증기압의 변동을 무시하고 Mortimer (1981)가 제안한 다음과 같은 포화 용존산소 농도 산출식을 이용하여 실측 용존산소 농도와와의 비를 백분율로 구하였다.

$$\ln C = 7.7117 - 1.31403 \ln (T + 45.93)$$

C : Dissolved oxygen saturation concentration (mg/L)

T : Water temperature (°C)

결 과

1. 수온, pH, COD 및 DO포화도

각 댐 호의 수온은 하천형이 호소형보다 계절별 변화 폭이 큰 것으로 (호소형 약 14~18°C, 하천형 약 23~25°C) 나타났다 (Fig. 2). 하천형의 경우 가장 혹한기로 알려져 있는 1~2월의 수온이 가장 낮은 분포 (1.4~4.8°C, 1월)를 보이고 있으나 호소형에서는 2~3월경에 가장 낮은 온도분포 (3.6~4.8°C, 2월)를 보였다. pH는 호소형의 경우 겨울철에 낮고 (호수별로 6.6~7.0 범위) 여름철인 8월경 상대적으로 높은 수준 (호수별로 7.2~7.9 범위)을 보였으나, 하천형에서는 대부분 봄철과 가을철에는 높은 수준을 그리고 여름철인 7월경에는 가장 낮은 수준을 나타냈다. 평균치로 볼 때 하천형 댐 호 (평균 7.8)가 호소형 댐 호 (평균 7.2)보다 높은 수준을 보였다. COD 농도의 계절별 변화 폭은 호소형 3개 댐 호 및 팔당호에서 1 mg/L 내외로 2~3 mg/L 정도의 계절별 변동 폭을 나타냈던 금강하구연 및 낙동강하구연에 비해 상대적으로 작았으며 연평균 농도도 낮게 나타나 하구연과는 뚜렷한 차이를 보였다. 용존산소 농도의 경우 호소형은 최저 5.1 mg/L (안동호 11월)에서 최고 12.0 mg/L (안동호 3월)까지 변하였으며 하천형은 최저 6.5 mg/L (금강하구연 7월)에서 최고 12.9 mg/L (팔당호 1, 2월)까지 변하였다. 일반적으로 하천형이 호소형보다 높은 값을 보였다. 용존산소 포화도의 계절별 변화패턴을 보면, 하천형에서의 용존산소포화도는 거의 전 시기에 걸쳐 80~100% 정도의 포화도를 나타낸 반면, 호소형은 1월

의 약 60~80%에서 4월경 (대청호, 안동호) 및 6월경 (소양호) 93% 정도까지 증가하였으나 이후 점차 감소하여 11~12월에는 안동호 46% (11월), 대청호 및 소양호는 58~66% (12월)로 최저치를 보였다 (Fig. 2). 즉, 하천형 댐 호에서 용존산소포화도는 높고, 계절별 변화는 비교적 안정된 현상을 보인 반면, 호소형의 경우 늦봄~초여름까지 증가추세를 보이다가 그 이후 겨울철까지 감소하는 패턴을 나타냈다. 호소형 댐 호에서의 이러한 변화 패턴은 수문학적 요소인 각 호수 저수량의 계절적 변화와 반비례하는 경향을 보였으며 (Fig. 3), 용존산소포화도와 저수량과의 회귀분석결과 (소양호: $r = -0.35$ $r^2 = 0.12$ $p < 0.01$, 대청호: $r = -0.5$ $r^2 = 0.25$ $p < 0.01$, 안동호: $r = -0.26$ $r^2 = 0.07$ $p < 0.05$) 도 유의성이 있는 것으로 나타났다.

2. 영양염류, N/P ratio, 투명도 및 부유물질

호소형에서 총 질소 농도는 하천형에 비해 농도도 낮고 (연평균 1.616 mg/L) 계절별 변화 폭도 넓지 않았으나, 하천형에서는 농도도 높고 (연평균 2.910 mg/L) 계절별로 큰 차이를 보였으며, 팔당호보다는 금강하구연 및 낙동강하구연에서 더 크게 나타났다 (Fig. 4). 장기적으로 볼 때 소양호는 '95년을 정점으로 감소추세를 보였으며, 대청호는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 안동호에서는 매년 큰 변화 없이 일정한 수준을 유지하였다. 팔당호는 매년 약한 증가추세를 보였으며, 금강하구연과 낙동강하구연은 모두 '95년 초부터 이전보다 농도가 높은 경향을 보였다. 6개 호수 모두 총질소 농도의 계절적 변화패턴과 강우량의 변화양상과는 연관성이 관찰되지 않았다. 총인 농도는 호소형에서는 낮고 (연평균 0.019 mg/L) 하천형에서 높은 수준 (연평균 0.089 mg/L)을 보였으며, 소양호, 대청호 및 팔당호의 총인 농도변화는 강우량에 의해 영향을 받는 것으로 판단되었다 (Fig. 5).

각 호수의 월별 영양염류 농도와 클로로필 *a* 농도는 관련성이 관찰되지 않았으나 (Figs. 4-5), 각 호수의 연도별 평균치로 상관도를 분석하면 총 질소 농도는 클로로필 *a* 농도변화를 약 33% ($r^2 = 0.33$ $p < 0.01$), 총 인은 약 70% ($r^2 = 0.70$, $p < 0.01$) 정도 설명할 수 있는 것으로 나타났다 (Fig. 6). 연 평균치로 본 N/P 질량비는 호소형에서는 높고 ('93~'97 평균 90 : 소양호 120, 대청호 62, 안동호 88), 하천형 댐 호에서는 낮았으며 ('93~'97 평균 42 : 팔당호 57, 금강하구연 28, 낙동강하구연 41), 역시 클로로필 *a* 농도변화를 약 47% ($r^2 = 0.47$, $p = 0.01$) 정도 설명할 수 있었다.

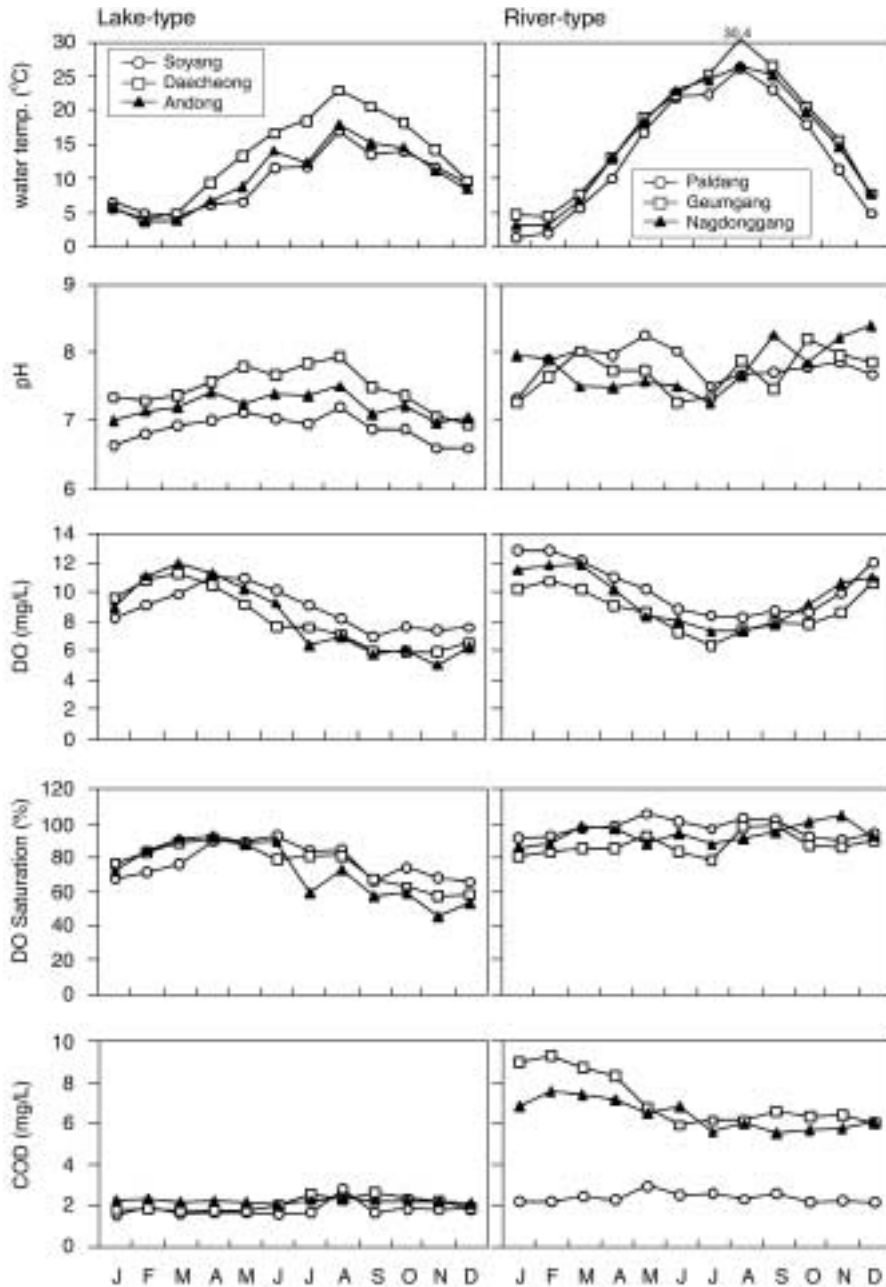


Fig. 2. Seasonal fluctuation of water temperature, pH, DO, DO saturation and COD of 6 reservoirs in Korea. The data of each month shows mean value from 1990 to 1997.

투명도와 부유물질 농도의 상관관계를 살펴보면 호소형 3개 호수 중 소양호가 $r^2 = 0.298$ ($p < 0.01$) 정도의 관련성을 나타내었으나 대청호 ($p = 0.084$) 및 안동호 ($p = 0.063$)에서는 거의 관련성이 없는 것으로 나타난 반면, 하천형 3개 호수의 투명도는 부유물질 농도에 의존하는 경향을 보였다(팔당호 $r^2 = 0.43$ $p < 0.01$, 금강하구연 $r^2 = 0.102$ $p < 0.05$, 낙동강하구연 $r^2 = 0.43$ $p < 0.01$) (Fig. 7).

3. 강우량과 조류발생과의 관계

호수 내 조류 생물량을 정량적으로 나타내는 클로로필 *a* 농도는 호소형의 경우 최저 0.3 mg/m^3 (소양호, 대청호)에서 최고 36.8 mg/m^3 (대청호)까지 변화하였다 (Figs. 4, 5). 하천형은 최저 0.8 mg/m^3 (금강하구연)에서 최고 144.0 mg/m^3 (낙동강하구연)의 변화를 보이고 있어,

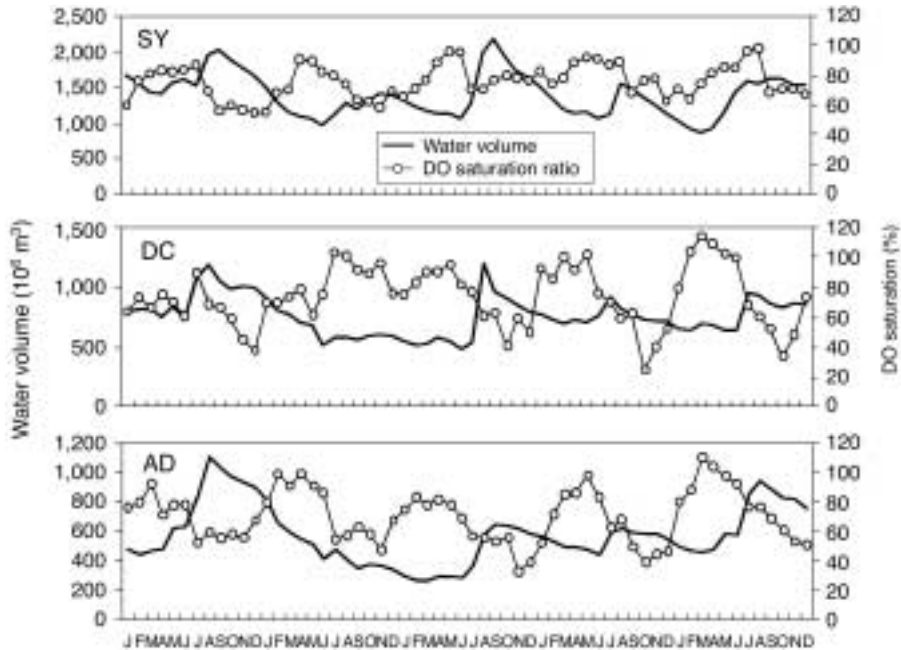


Fig. 3. Annual fluctuation of DO saturation and water volume in lake-type reservoirs from 1993 to 1997, Korea (SY: Soyang, DC: Daechong, AD: Andong).

하천형 댐 호에서 훨씬 높은 조류발생 정도를 나타냈다. 특히, 호소형은 여름부터 초가을 동안에 최대의 algal bloom이 관찰되고 이후 감소하는 경향을 보였다. 즉, '93년부터 '97년까지 각 호수의 계절별 클로로필 a 농도 변화와 강우량의 월별 변화패턴을 보면 (Figs. 4, 5), 소양호에서는 대부분 7~9월경에 연중 높은 수준의 클로로필 a 농도를 나타냈으며 (7, 8, 9월 평균 7.0 mg/L, 기타 월 3.4 mg/L), 이 시기는 1994년을 제외하고는 강우가 집중되는 시기이거나 바로 이후였다. 대청호 및 안동호에서도 강우기 또는 바로 이후에 높은 농도가 관찰되었다.

반면, 팔당호에서의 연중 클로로필 a 농도 변동을 살펴보면 월별 변화 폭이 크고 소양호나 대청호 및 안동호에 비해 상대적으로 높은 수준의 클로로필 a 농도를 나타냈으며 조사기간 동안 장마초기인 6월과 겨울철인 12월을 제외하고는 약 15 mg/m³ 이상을 나타냈다. 금강하구연은 1994년 9월 이후부터 수문을 닫아 담수화가 시작되었으며 (농업진흥공사 1997), algal bloom의 발생은 이 시기 이후부터 관찰되었다. '95년 이후부터 경향을 살펴보면 팔당호의 경우와 유사하게 장마시기인 6, 7월과 겨울철인 11, 12, 1월을 제외하고는 약 40 mg/m³ 이상의 클로로필 a 농도를 나타냈다. 낙동강하구연에서는 5, 6, 7월에 클로로필 a 농도 감소 경향이 뚜렷하게 관찰되었으며, 이외의 시기에는 약 60 mg/m³ 이상의 조

류 발생이 연중 불규칙하게 관찰되었다. 이와 같이 낙동강하구연은 항상 높은 조류 발생량을 나타냈으나 강우 시기에 현저하게 감소되는 경향을 보였으며, 금강하구연과 팔당호는 다소의 차이는 있지만 강우시기와 겨울철에 조류 발생이 제한되고 있음이 밝혀졌다.

강우량과 클로로필 a와의 상관도 분석결과를 보면 호소형 3개 댐 호 모두 강우량이 증가함에 따라 클로로필 a 농도도 증가하는 경향을 보였으나 (소양호 r² = 0.77, p < 0.01; 대청호 r² = 0.35, p < 0.05; 안동호 r² = 0.35, p < 0.05), 하천형 댐 호의 경우 강우량과의 상관도는 서로 유의성이 없거나 감소하는 경향 (팔당호 r² = 0.06, p = 0.46; 금강하구연 r² = 0.06, p = 0.43; 낙동강하구연 r² = 0.34, p < 0.05)을 보이는 것으로 나타났다 (Fig. 8).

고 찰

하천형 댐 호가 호소형 댐 호보다 약 3~10배의 높은 조류발생량이 관찰되었다. 하천형 댐 호에서 이렇게 조류 발생량이 높은 원인에 대해서는 영양염류 농도, 체류 시간, 성층 형성, 수온 및 빛의 조건과 같은 환경인자에 의한 영향을 고려해 볼 수 있다. 하천형 댐 호의 체류시간은 호소형에 비해 매우 짧고 성층이 거의 형성되지 않아 영양물질이 수체내에 고르게 혼합되어 분포하며,

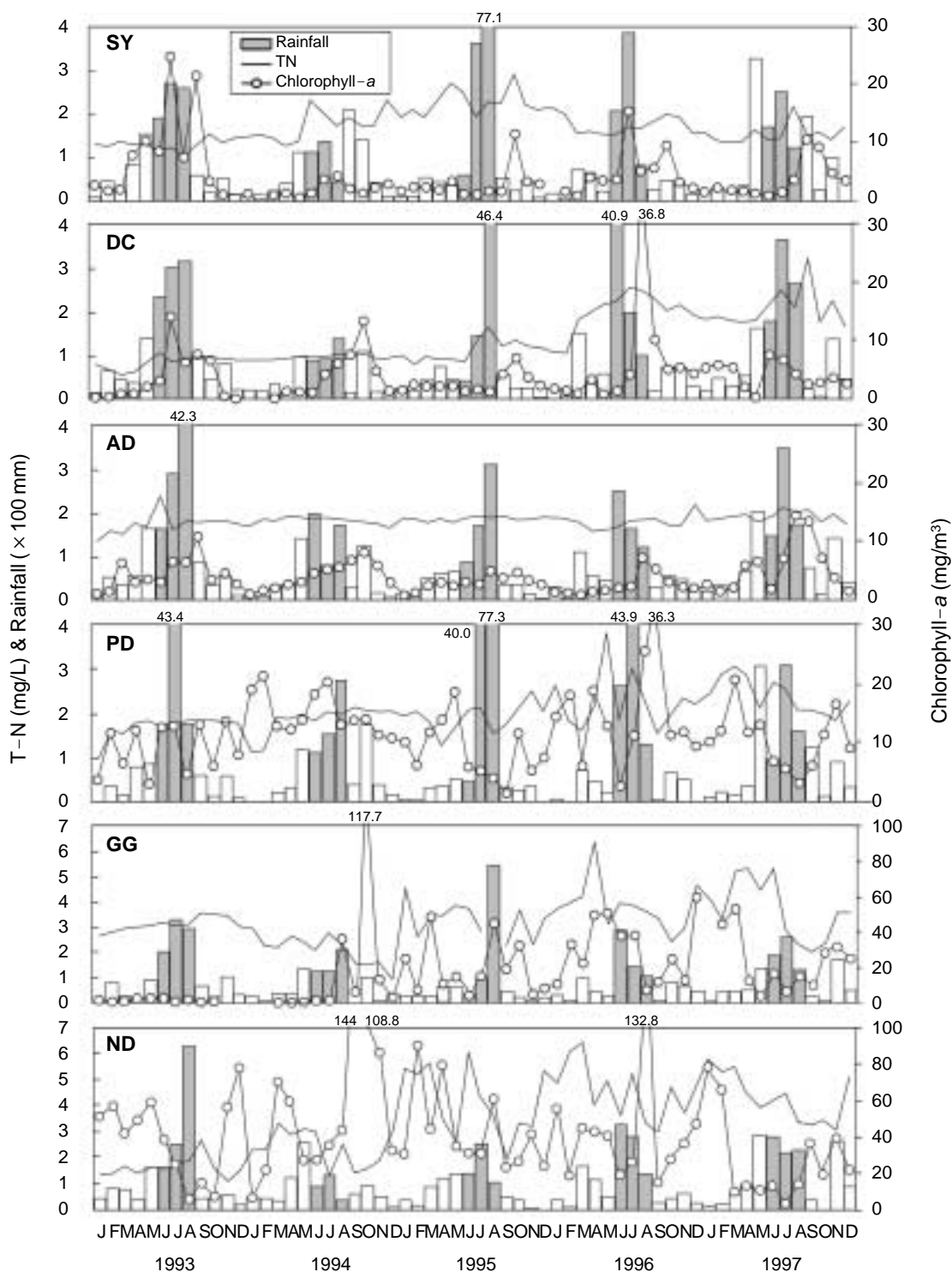


Fig. 4. Annual fluctuation of T-N, chlorophyll-*a* and rainfall in Soyang (SY), Daecheong (DC), Andong (AD), Paldang (PD), Geumgang (GG) and Nagdonggang (ND) reservoir, Korea from 1993 to 1997 (□: June to August).

하천형의 투명도는 호소형보다 부유물질에 의한 영향을 상대적으로 많이 받으므로 이 높은 부유물질 농도는 빛

의 수체 투과율을 감소시킨다. 이상과 같이 체류시간, 성층화 그리고 빛의 투과정도는 상대적으로 호소형보다

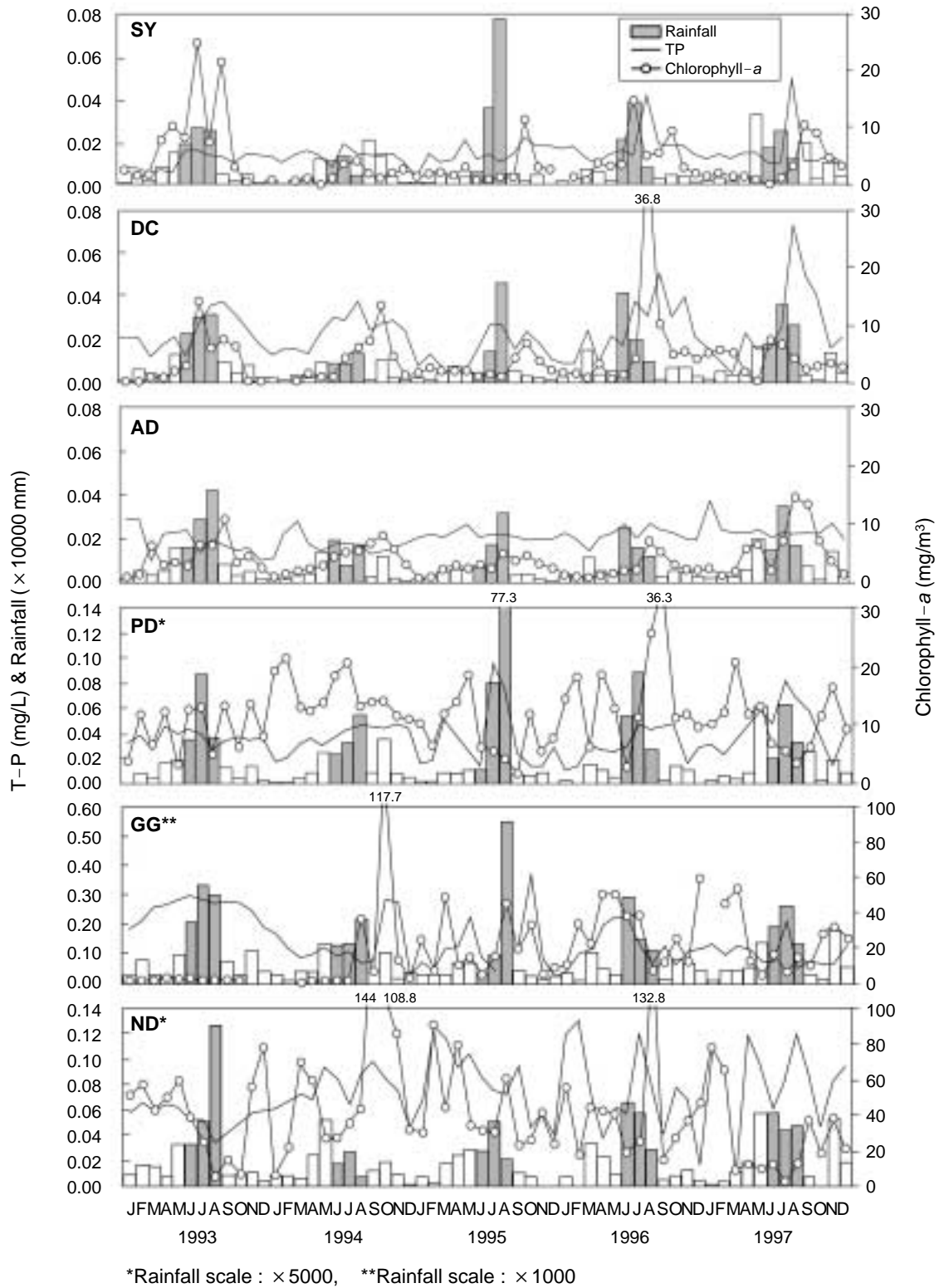


Fig. 5. Annual fluctuation of T-P, chlorophyll-*a* and rainfall in Soyang (SY), Daecheong (DC), Andong (AD), Paldang (PD), Geumgang (GG) and Nagdonggang (ND) reservoir, Korea from 1993 to 1997 (□: June to August).

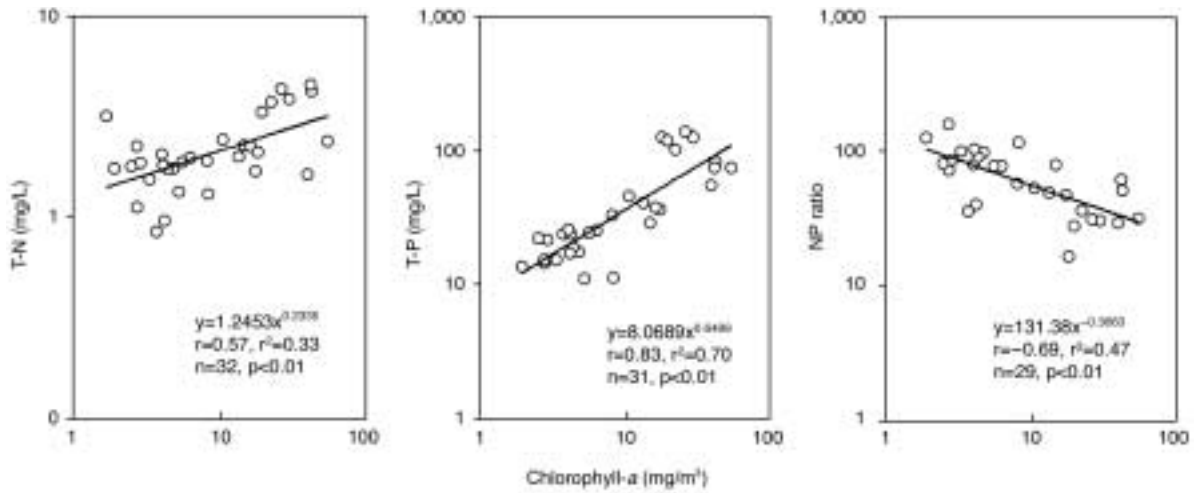


Fig. 6. Relationship between T-N, T-P, N/P ratio and chlorophyll-a in 6 reservoirs (annual mean data from 1993 to 1997).

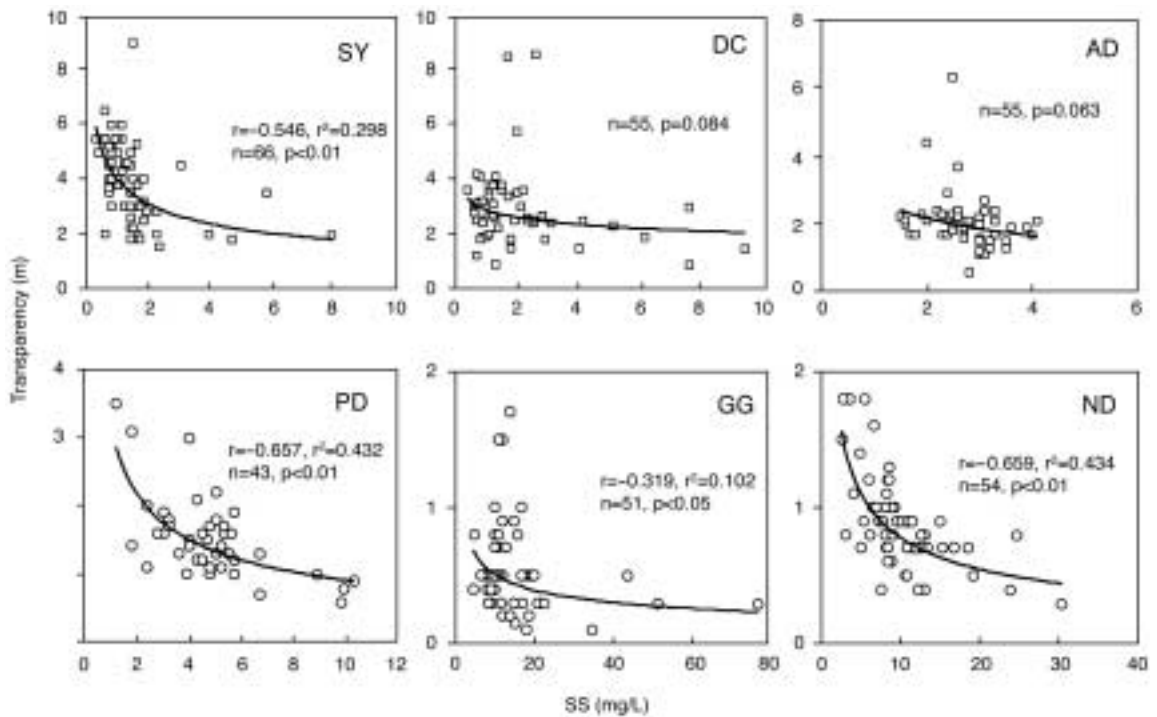


Fig. 7. Relationship between suspended solids and transparency in Soyang (SY), Daecheong (DC), Andong (AD), Paldang (PD), Geumgang (GG) and Nagdonggang (ND) reservoir, Korea, during the 1993 to 1997.

하천형 댐 호에서 조류발생을 억제시키는 요인으로 작용한다. 그러나 이러한 짧은 체류시간, 혼합된 수체 그리고 다량의 부유물질에 의한 빛의 투과도 저하에도 불구하고 하천형 댐 호의 클로로필 a 농도가 높게 나타났다. Fig. 6의 연평균 인 농도와 연평균 클로로필 a 농도와의

관계에서 밝혀졌듯이 영양염의 증가에 따라 조류발생량은 비례하여 증가되었다. 이는 영양염이 무엇보다도 먼저 조류성장에 영향을 미쳤기 때문일 것으로 판단된다. 즉, 하천형은 호소형에 비해 영양염류 농도가 높으므로 (약 2~4배) 이것의 농도에 비례하여 algal biomass는

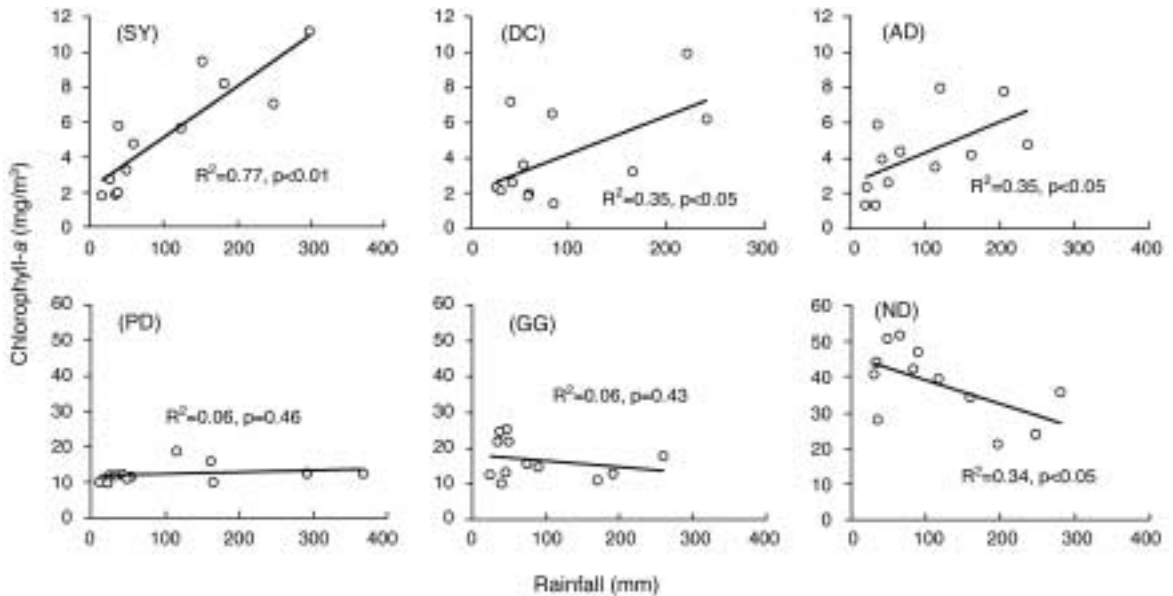


Fig. 8. Relationship between the seasonal mean chlorophyll-*a* concentration and rainfall in Soyang (SY), Daecheong (DC), Andong (AD), Paldang (PD), Geumgang (GG) and Nagdonggang (ND) reservoir, Korea. The data shows the mean value of each month from 1990 to 1997.

증가한다.

호소형 댐 호인 소양호, 대청호 및 안동호에서는 강우가 많은 여름철에 algal bloom이 발생하고, 하천형 댐 호인 팔당호, 금강하구연 및 낙동강 하구연에서는 강우기와 겨울철 일부기간을 제외한 거의 전 계절에 걸쳐 불규칙적인 algal bloom이 빈번하게 발생하는 경향을 보였는데, 이와 같이 댐 호의 유형에 따라 algal bloom 시기가 다른 이유는 다음과 같이 사료된다.

호소형 댐 호에서 여름철에 algal bloom의 발생 원인이 될 수 있는 ① 강우 유입에 따른 인 유입량의 증가 ② 수온상승에 따른 성층형성, ③ 체류시간의 증가 그리고 ④ 일조량 및 수온의 증가에 대하여 고찰하고자 한다. 첫 번째 요인인 강우에 의한 인 유입량 증가는 다수의 논문에서 이미 보고된 바 있으며(공, 1992; 김 등, 1997; 허 등, 1998; 김 등, 2001), 호소형 댐 호인 소양호와 대청호 조사결과에서도 강우가 유입되는 시기(주로 여름철)에 총인 농도가 증가하는 경향을 보였다(N/P 질량비로 볼 때 총질소는 호소형 또는 하천형 모두 총인에 비해 충분한 양이 존재하므로 총인 농도만 고려하였음). 그리고 영양염류 농도와 클로로필 *a* 농도가 서로 비례관계에 있다는 사실은 기존 문헌에서 이미 밝혀졌고(Sakamoto, 1966; Lund, 1970), 본 논문에서 분석된 6개 호수의 연평균 자료에서도 총인 농도와 클로로필 *a* 농도는 유의성 있는 결과가 도출된 바 있어($r^2 = 0.7$ $p <$

0.01), 유입량 증가에 의한 총인 농도 증가는 algal bloom 발생 요인 중 하나로 판단된다. 두 번째 성층형성과 관련하여, 수체의 혼합층 깊이는 빛과 영양염을 공급받아야 하는 식물플랑크톤의 성장과 소멸에 매우 중요한 요소로 작용하며(Jassby and Powell, 1975; Hesselin and Quay, 1973), 깊고 성층화된 호수의 경우 총인 농도가 0.015 ~ 0.020 mg/L 이상이면 남조류가 느리게 증식하여 높은 밀도를 이루는 것으로 알려져 있다(Happer, 1992). 또한 표층 혼합층의 깊이(Z_m)와 유광층의 깊이(Z_p)가 같거나($Z_m = Z_p$), 혼합층의 깊이가 더 클 경우($Z_m > Z_p$) 표층 혼합층에서 생물량이 집적되는 경향을 보인다(Thornton *et al.*, 1990). 따라서 호소형 댐 호에서는 하절기 수온의 증가와 함께 성층이 형성되며(김 등 2002b), 이것은 algal bloom을 야기시키는 요인이 된다. 세 번째 요인은 체류시간의 증가인데 일반적으로 체류시간의 증가는 조류의 성장을 촉진시킨다고 보고되고 있으나(한 등, 1995), 호소형 댐 호인 소양호, 대청호 및 안동호에 대한 계절별 체류시간을 살펴보면 여름철에 유입량의 증가로 체류시간은 오히려 감소하는 경향을 보였다(김, 미발표자료). 따라서 여름철에 호소형 댐 호에서 발생하는 algal bloom과 체류시간의 영향은 서로 관련이 없는 것으로 판단된다. 네 번째 요인인 여름철 일조량과 수온의 증가가 조류의 광합성률을 높여 성장을 촉진시킨다는 결과는 일반적으로 보고된 사실이다

(Wetzel, 1982; 한 등, 1999; Hong *et al.*, 2002).

그러나 안동호의 경우 강우량(유입량)과 총인 농도와 관련성이 거의 관찰되지 않았음에도 불구하고 소양호 및 대청호와 마찬가지로 여름에서 초가을에 걸쳐 algal bloom이 관찰된 바 있다(Fig. 5). 따라서 안동호에서 유입량의 증가가 algal bloom을 발생시키는 trigger 역할을 하였다고 판단하기 어려우며, '93~'97년간의 총인 농도 변화가 소양호는 0.004~0.050 mg/L(평균 0.014 mg/L), 대청호는 0.004~0.073 mg/L(평균 0.023 mg/L)의 범위를 보이고 있는 반면, 안동호는 0.010~0.037 mg/L(평균 0.021 mg/L) 정도로 변동폭이 좁고 항상 일정수준이상의 농도를 나타내므로, 총인 농도의 증가에 의한 영향보다는 일조량의 증가와 수온증가에 의한 성층 형성이 여름철 algal bloom 발생에 중요한 영향을 미친 것으로 추정된다. 이상과 같은 4가지 요인 중 어떠한 것이 algal bloom에 가장 효과적인지, 한가지 요인에 의해 조류발생이 촉진되는지 혹은 여러 가지 환경요인이 복합적으로 조류발생을 촉진하는지에 대해서는 추후의 연구과제가 될 것이다.

하천형 댐 호에서 여름철 강우기 및 겨울철 일부기간을 제외한 거의 전 계절에 걸쳐 불규칙적인 algal bloom이 발생하는 이유는 조류발생이 유입량 또는 방류량에 의해 조절될 수 있기 때문이다. 하천형 댐 호에서는 일정수위를 유지하기 위해 유입량의 증감에 따라 수시로 방류량을 조절하므로 유입량과 방류량이 거의 같은 수문학적 특징을 보인다(한강수력발전처, 2000; 한국수자원공사, 1990~1997). 따라서 강우에 의한 유입량 증가는 수체 교환율을 증가시키며, 특히 여름철 폭우시 하천형 댐 호는 거의 하천과 같은 특징을 나타낸다. 이 경우 유역으로부터 algal bloom 형성에 충분한 양의 높은 영양염류가 호수내 유입되나 동시에 방류되는 수문학적 특징에 의해 algal bloom은 제한을 받게된다. 실제로 팔당호의 경우 2000년 7, 8, 9월의 클로로필 *a* 농도와 유입량(팔당호에서 강우량의 변화는 유입량의 변화를 77% ($P < 0.01$) 설명할 수 있었음: 매월 조사자료)과의 회귀분석결과 유입량의 변화는 그때의 클로로필 *a* 농도변화를 63% ($p < 0.01$)정도 설명할 수 있었고 역의 상관성을 나타냈다(김 등 2002a; Hong *et al.* 2002). 그럼에도 불구하고 한 등(1995)은 팔당호에서 체류시간의 증가가 조류발생량을 증가시킨다고 보고한 바 있다. 따라서 팔당호의 경우는 방류량의 변화에 따라 체류시간의 증가가 이루어질 때는 언제든지 조류의 발생이 급격하게 촉진될 수 있을 것으로 사료된다.

N/P 질량비는 빈영양호에서는 높고 부영양호에서는

낮은데 그 이유는 빈영양호에 유입되는 영양염류의 경우 질소에 비해 인의 함량이 매우 적은 자연상태에 가까운 비율로 유입되나, 중영양호 또는 부영양호에서는 낮은 N/P 비를 갖는 다양한 유입원(토양의 비료 등 비점오염원 등)으로부터 영양염류가 유입되기 때문이다(Downing and McCauley, 1992; Fosberg *et al.*, 1978). 이 N/P 질량비가 하천형보다 호소형에서 높은 경향을 보이는 것은 상대적으로 넓은 유역면적을 갖는 하천형이 호소형에 비해 비점 오염원으로부터의 인 성분 유입량이 많기 때문이며(연평균 총인 농도: 호소형 평균 0.019 mg/L, 하천형 중 팔당호 0.037, 금강하구연 0.145, 낙동강하구연 0.085), 대부분의 하천형 댐 호가 높은 부영양화 수준을 나타내는 이유를 설명한다. 한 등(1993)은 팔당호에서 '88년부터 '92년까지 N/P 비는 현저한 감소추세를 보였고 이러한 추세가 계속된다면 팔당호의 1차 생산력이 질소에 의해 제한될 가능성을 제시한 바 있으나, 시기적으로 '90년도에는 대홍수로 인하여 유역으로부터 인 성분의 유입량이 급증함에 따라 N/P비의 급격한 감소를 야기한 것으로 판단되며, '91년 이후 팔당호의 N/P 비는 다시 증가추세를 보이다가 '97년부터 일정수준을 유지하는 경향을 보인 바 있다(김 등, 2002a).

하천형이 호소형보다 높은 수준의 COD 및 영양염류 농도를 보였고, 계절별 변화폭도 큰 것으로 나타났는데, 이것은 하천형 댐 호가 대부분 하천의 중·하류에 위치하여 넓은 유역면적을 가짐에 따라 상대적으로 더 많은 오염원에 노출될 수 있는 기회가 많기 때문이다. 실제로 팔당호 상류유역(소양호 및 춘천호 상류지역 제외)과 소양호(춘천호 포함) 상류유역의 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 및 비점오염원에 의한 오염부하량(BOD 기준) 발생현황을 보면 팔당호 유역은 총 326.9 ton/day이었고, 소양강 유역은 26.9 ton/day가 발생되었음이 보고되었다(정부합동, 1998). 또한 금강 상류 대청호 유역의 오염부하량도(BOD 기준) 44.7 ton/day 정도이었으나 하류의 금강하구연 유역은 371.6 ton/day로 매우 높다고 보고된 바 있다. 낙동강 상류 안동댐 유역 오염부하량도 22.1 ton/day이었으나 하류의 낙동강하구연은 953.9 ton/day로 큰 차이를 보였다(환경처, 1994). 아울러 댐 호의 DA/SA 비(유역면적/수표면적)로 판단할 때, 소양호, 대청호, 안동호와 같은 호소형에서는 이 비율이 30.5~64.3 정도이었으나, 팔당호, 금강하구연, 낙동강하구연과 같은 하천형의 경우 269.3~618.3으로 매우 높게 나타나고 있어(Table 1), 그만큼 하류에 위치한 하천형 댐 호에서의 오염 가능성은 더 높은 것으로 평가된다.

호소형 댐 호에서 용존산소포화도의 계절적 변화추이

가 하천형과 다른 패턴을 보이는 이유가 저수용량의 변화와 관련이 있을 것이라는 추정은 이들 두 요소(저수용량 및 용존산소포화도)의 회귀분석 결과에 근거한 것으로, 이에 대하여 김 등(2002b)은 소양호에서 늦봄~여름철까지 표층(epilimnion)에서 과포화상태가 지속되었으나 9월 이후 11월까지 표층부에 형성된 성층의 폭이 넓어지면서 용존산소포화도는 감소하는 경향을 보였다고 보고한 바 있다. 즉, 여름철 이후 가을~겨울철에 접어들면서 광합성 저하와 표층 수온의 하강으로 인한 밀도변화로 표층 혼합수심이 넓어지면서, 상·하 혼합되어 상대적인 산소농도의 저하가 비롯되었을 것으로 생각된다. 따라서 수온의 계절적인 변화와 bloom dynamic이 용존산소 포화도 변화의 주요 요인으로 평가된다.

수온의 계절별 변화패턴은 호수 유형(하천형 또는 호소형)별로 차이를 보이고 있는데 이것은 최대 열용량(maximum heat content)의 차이에서 비롯되며, 주로 호수의 평균수심에 좌우되는 것으로 알려져 있다(Horne et al., 1994). 즉, 최대 열용량이 큰 깊은 호수의 경우(평균수심: 소양호 41.4 m, 대청호 23.2 m, 안동호 24 m, 팔당호 6.5 m, 금강하구연 3.8 m, 낙동강하구연 3.4 m) 수층은 쉽게 데워지거나 차가워지지 않으므로 기온의 상승·강하 속도와 수온의 상승·강하 속도가 수체의 용량에 따라 차이를 보인다. 따라서 저수용량이 큰 호소형 댐 호의 경우 하천형에 비해 수온의 계절적인 변동폭이 작았던 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 호소형과 하천형으로 크게 구분할 수 있는 주요 댐 호의 8년간 수질 및 수문조사자료를 이용하여(1990~1998) 조류발생 패턴과 수문학적 요인과의 관계를 분석하고자 하였다.

각 댐 호의 수온은 하천형이 호소형보다 계절별 변화폭이 큰 것으로 나타났다. pH는 호소형의 경우 겨울철에 낮고 여름철에 상대적으로 높은 수준을 보였으나, 하천형에서는 대부분 봄철과 가을철에 높고 여름철에 낮은 수준을 나타냈다. COD 농도는 호소형 3개 댐 호 및 하천형 댐 호인 팔당호에서 낮고(1 mg/L 내외), 금강하구연 및 낙동강하구연에서는 높았다(2~3 mg/L). 용존산소 농도는 하천형이 호소형보다 높은 값을 보였다. 용존산소포화도의 계절별 변화패턴은 하천형 댐 호의 경우 높은 수준(80~100%)을 유지하면서 계절별 변화폭도 그리 크지 않은 반면, 호소형에서는 늦봄~초여름경 최

고치(93%)를 보이다가 겨울철까지 천천히 감소(46~66%)하는 패턴을 나타냈으며, 각 호수 저수량의 계절적 변화와 반비례하는 경향을 보였다. 총 질소와 총 인 농도는 호소형에서 낮았으며, 호소형은 계절별로 큰 변화가 관찰되지 않은 반면 하천형에서는 상대적으로 유입부하량이 많고 변동폭도 큰 것으로 나타났다. 하천형 호수에서도 팔당호는 금강하구연이나 낙동강하구연보다 매우 낮은 수준을 나타냈다. 연 평균치로 본 N/P 질량비는 호소형에서는 높고, 하천형에서는 낮았다. 투명도와 부유물질 농도의 상관관계로 판단할 때 하천형에서의 투명도는 부유물질 농도에 의존하는 경향을 보였다. 클로로필 *a*의 연평균 농도로 보았을 때 하천형에서 훨씬 높은 조류발생 패턴을 보였다. 계절별로 보면 호소형은 강우기가 끝난 늦여름에서 초가을 동안에 높은 수준을 보였으나, 하천형에서는 강우기와 겨울철을 제외하고는 불규칙하게 연중 조류발생이 관찰되었다. 호소형에서 강우와 클로로필 *a* 농도와의 정의 상관관계가 밝혀졌으며, 하천형에서는 유의성이 없었다.

인 용 문 헌

- 건설교통부. 1990-1997(8). 수문조사연보.
 공동수. 1992. 팔당호의 육수생태학적 연구. 고려대학교 박사 학위논문.
 기상청. 1980-1997. 기상연보.
 김범철, 최광순, 심수용. 1997. 비점 오염원으로부터의 인의 홍수유출. 하천·호소의 수질보전과 유역관리에 관한 한·일 공동 세미나 주제발표논문. 국립환경연구원/일본 국제협력사업단. 서울.
 김범철, 황길순, 김동섭. 1999. 소양호의 1차생산과 유기탄소 수치. 한국육수학회지 32: 200-206.
 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내 주요호수의 육수학적 조사(3): 진양호. 한국육수학회지 32: 111-126.
 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수. 2001. 국내 주요호수의 육수학적 조사(4): 주암호. 한국육수학회지 34: 30-44.
 김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 정완중, 임연택. 2002a. 팔당호 수질의 계절별 변화특성 및 장기추세. 한국물환경학회지 18: 67-76.
 김종민, 박준대, 노혜란, 한명수. 2002b. 소양호와 팔당호 수질의 수지 및 계절적 변화. 한국육수학회지 35: 10-20.
 김좌관, 홍유희. 1992. 국내 인공댐호의 물리적 환경인자에 의한 호수특성 고찰에 관한 연구. 한국환경과학회지 1: 49-57.
 농어촌진흥공사. 1997. 금강호 하구둑 유지관리보고서.

- 류재근, 안태석, 이덕길, 박혜경, 공동수, 김종민, 박준대. 2000. 정책결정자를 위한 부영양화 관리방안. 국립환경연구원.
- 류홍일, 공동수, 천세억, 박혜경, 손영환, 류재근, 김종민. 1995. 호소내 오염하천 유입부의 식물에 의한 정화처리 연구(I). 국립환경연구원 한강수질검사소.
- 이요상, 강병수, 신재기. 1999. 옥정호의 수질 및 담수조류 변화. 한국육수학회지 **32**: 189-199.
- 이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 변화추이 및 상·하류 이질성 분석. 한국육수학회지 **35**: 36-44.
- 임병진, 정원화, 변명섭, 최성현, 방규철, 황승률, 김상훈, 허성남, 박준대, 박지형, 전선욱, 김병훈, 정재욱, 이정봉, 김종택, 류재근. 1999. 호수 내 조류 대 발생에 대한 수면제어 기술에 관한 연구(II). 국립환경연구원 한강수질검사소.
- 정부합동. 1998. 맑은 한강-새천년의 대계.
- 정원화, 김정현, 공동수, 김성수, 최성현, 황동진, 임병진, 허성남, 박준대, 황승률, 노혜란, 이상협, 전선욱, 서정미, 김병훈, 정재욱, 이정봉, 김종택. 1998. 호수 내 조류 대 발생에 대한 수면제어기술에 관한 연구(I). 국립환경연구원 한강수질검사소.
- 한강수력발전처. 2000. 팔당댐 수계자료. 한국전력공사.
- 한국수자원공사. 1990~1997. 낙동강하구언 댐관리연보.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재. 한국육수학회지 **26**: 141-149.
- 한명수, 어운열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집구조의 변화. 한국육수학회지 **28**(3): 335-344.
- 한명수, 이동석, 유재근, 박용철, 유광일. 1999. 팔당호의 생태학적 연구 3. 식물플랑크톤의 일차 생산력과 광합성 모델 parameters. 한국육수학회지 **32**(1): 8-15.
- 한명수, 홍성수, 어운열. 2002. 팔당호의 생태학적 연구 4. 경안천 하류의 영양염 및 입자태 유기물 거동과 식물플랑크톤의 천이. 한국육수학회지 **35**(1): 1-9.
- 환경부. 1990-1997. 호소수 수질모니터링 자료.
- 환경처. 1994. 전국호소환경현황조사 및 주요호소 영향권역 설정 최종보고서.
- 허우명, 김범철, 김윤희, 최광순. 1998. 소양호유역에서 비점오염원의 호수유출과 오염수괴의 호수내 이동. 한국육수학회지 **31**(1): 1-8.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중. 1992. 소양호유역과 가두리로 부터의 인 부하량 및 인수지. 한국육수학회지 **25**: 207-214.
- 홍성수. 2001. 수도권 상수원 수질과 부영양화에 관한 환경생태적 연구. 한양대학교 석사학위논문, 서울.
- An, K., J. Seo, and S. Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung reservoir. *Korean J. Limnol.* **34**: 327-336.
- Bloesch, J.P., P. Stadelman, and H. Buhner. 1977. Primary production and sedimentation in the euphotic zone of two Swiss lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 511-526
- Downing, J.A. and E. McCauley. 1992. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **37**(5): 936-945
- Fee, E.J. 1979. A relation between lake mophometry & primary productivity & its use in interpreting whole-lake eutrophication experiment. *Limnol. Oceanogr.* **24**: 401-406.
- Fosberg, C., S. Ryding, A. Claessen, and A. Fosberg. 1978. Water chemical analysis and/or algal assay?-sewage effluent and polluted water studies. *Mitteilungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie.* **21**: 352-363.
- Fukushima, T. 1995. Carrying capacity of four East Asian lakes: a comparative study. Korea-Japan symposium for development of water treatment system. National Institute of Environmental Research. Seoul.
- Hesslein, A.H.M. and P. Quay. 1973. Vertical eddy diffusion studies in the thermocline of a small stratified lake. *J. Fish. Res. Bd. Canada.* **30**: 1491-1500.
- Hong, S.-S., S.-W. Bang, Y.-A. Kim, and M.-S. Han. 2002. Effects of rainfall on the hydrological conditions and phytoplankton community structure in the riverine zone of the Paldang reservoir, Korea. *J. of freshwater Ecology.* **17**: 507-520.
- Horne, A.J., C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill. Singapore.
- Jassby, A.D. and T. Powell. 1975. Vertical patterns of eddy diffusion during stratification in Castle Lake, California. *Limnol. Oceanogr.* **20**: 530-543.
- Kimmel, B.L., O.T. Lind, and L.J. Paulson. 1990. Reservoir primary Production In: *Reservoir Limnology : Ecological perspectives* (K.W. Thornton, B.L. Kimmel and F.E. Payne), Wiley interscience. New York.
- Lund, J.W.G. 1970. Primary production. *Water treatment and examination.* **19**: 332-358.
- Mortimer, C.F. 1981. The oxygen content of air-saturated freshwater over ranges of temperature and atmospheric pressure of limnological interest. *Mitteilungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie.* **21**: 1-23.
- OECD. 1982. *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control*. OECD. Paris.
- Sakamoto, M. 1966. Primary production by the phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence upon lake depth. *Archiv für Hydrobiologie.* **62**: 1-28.

Schindler, D.W. and E.J. Fee. 1974. Experimental Lakes Area: Whole lake experiments in eutrophication. *J. Fish Res. Bd. Canada* **31**: 973-983.

Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*. Saunders College Publishing.

Wetzel, R.G. 1990. *Reservoir ecosystems: conclusions and*

speculations In: Reservoir Limnology : Ecological perspectives (K.W. Thornton, B.L. Kimmel and F.E. Payne), Wiley interscience. New York.

(Received 20 Mar. 2003, Manuscript accepted 25 May 2003)

※ 응용곤충그림 (땅콩)

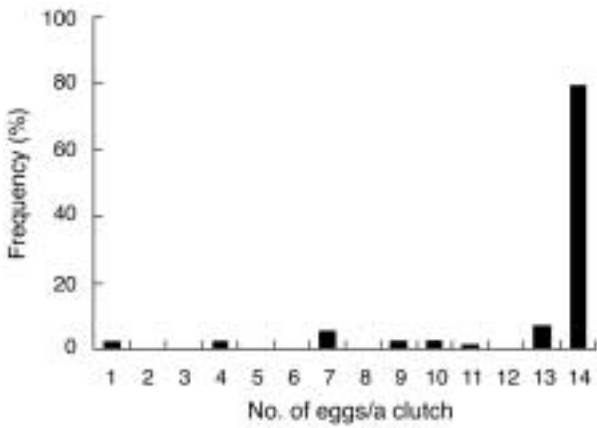


Fig. 1. Number of eggs oviposited per clutch.