

우리나라 주요 인공호의 투명도에 대한 수질 및 수중 부유물 영향 분석

공 건 화 · 이 재 훈 · 안 광 국*

(충남대학교 생명시스템과학대학)

The Analysis of Water Quality and Suspended Solids Effects against Transparency of Major Artificial Reservoirs in Korea. Kong, Keon-Hwa, Jae Hoon Lee and Kwang-Guk An* (College of Biological Sciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

This study was carried out to comparatively identify characteristics of turbid water influence in Imha Reservoir, Soyang Reservoir, and Daecheong Reservoir in Korea. We used 3 years dataset from 2002 to 2004 and analyzed seasonal water quality characteristics, particular parameters in association with turbidity, and light transparency to figure out the trends. All parameters to be used in the study were total phosphate (TP), total nitrogen (TN), chlorophyll-*a* (Chl), suspended solids (SS), Secchi depth (SD), conductivity, and vertical light extinction coefficient (K_d), euphotic zone (Z_{eu}), and critical depth (Z_p). All parameters depend on season and watershed. Suspended solids from Soyang Reservoir were usually caused by TP, mainly related to living wastes and agricultures in upper stream. Daecheong Reservoir was influenced by organic matters related to large phytoplankton biomass in summer and inorganic suspended solids by nutrients in the winter. However, in case of Imha Reservoir, turbid water, consisted in silt and clay through heavy precipitation remained in the waterbody to decrease water transparency along with TP and caused the light limitation in winter. Overall results suggest that it was necessary to establish various management programs because the reasons occurring turbidity were varied according to the reservoir circumstances.

Key words : turbid water, water quality, precipitation, reservoir management

서 론

우리나라 4대강 유역의 중·상류부에는 인공다목적댐을 건설하여 음용수 공급을 하고 있으며, 특히 하절기에는 방류량 조절을 통해 하류지역 홍수피해 경감에 기여하고 있다(김, 2003; 한국수자원공사, 2003). 인공호에서는 연도별, 계절별 수리수문학적 특성, 광투과도 및 부영양화와 같은 수질 특성은 수체마다 제각기 다른 상이한

양상을 보이고 있으며(Kent *et al.*, 2002), 내부부하(Internal loading) 또는 외부로부터 인(Phosphorus, P), 질소(Nitrogen, N)의 유입으로 인해 식물플랑크톤 생산량 증가와 광투과도의 감소를 야기하고 있다(김 등, 2007). 특히 우리나라 인공호 댐들은 하절기 홍수와 같은 요인에 의해 상류의 토사가 쓸려 인공호로 유입되면서 탁수가 발생되고(Shin *et al.*, 2004), 이로 인해 식물플랑크톤의 광제한 효과(Light limitation) 및 수처리(Water treatment)에 지장을 주어 생태계와 경제적인 장애요인으로 작용하

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

고 있다(Horne and Goldman, 1994; 한국수자원공사, 2003). 또한 유역으로부터 유입된 탁수는 어류의 아가미 장애, 삼투조절 방해, 면역력 감소 등을 유발하고 무척추동물의 섭식활동을 방해하여 생태계 물질순환 및 먹이연쇄 등에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Sigler *et al.*, 1984; Hellawell, 1986).

우리나라 인공호의 연구에 따르면, 하절기의 집중강우는 무기현탁물(Inorganic solids)의 급격한 증가를 가져오고, 이는 투명도 감소 및 엽록소-총인의 경험적 모델에 큰 변이를 가져다주는 것으로 알려져 있고, 특히 몬순기에는 유입 하천의 제방침식 및 호수 내 제방의 침식에 의해 토사가 유입되며 고농도의 비휘발성 부유물(NVSS)이 발생되고 있다(An and Jones, 2000; An and Kim, 2003). 본 연구대상 호수 중의 하나인 임하호는 최근 상시적인 탁수문제가 보고되고 있으며, 이는 몬순특성에 의한 수계 침식 및 비점오염원으로부터의 부유물의 증가와 연관된 것으로 추정된다(안 등, 2006). 또한 토양특성에 의해 일라이트나 카올리나이트와 같은 높은 점토광물에 의한 지질학적 영향도 받고 있는 것으로 알려져 있다(김 등, 2007b). 일반적으로 호수 및 상류 하천 내의 점토나 실트같은 미세한 입자는 범람원에 침적되고(Vanoni, 1975), 미세한 입자는 인(P)을 함유하며(Schreiber and Rausch, 1979; Duffy *et al.*, 1987) 용존 유기산(Marzolf, 1981) 및 다른 영양염류나 오염물질(Pita and Hyne, 1974)에 대해 높은 흡착력을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 장마 이후 낙동강 수계의 인공호 댐들에서 엽록소 농도의 급격한 증가는 이전 하절기의 무기성 부유물의 농도 증가와 연관된 것으로도 보고되고 있다(박 등, 2005; 안 등, 2006). 소양호는 초기에 빈영양 상태에서 1980년대 후반 부영양 상태로 전환되었고, 생활하수 및 가축폐수가 수체 내 인(P)의 주요 공급원으로 보고된 바 있다(김 등, 1989; 김 등, 1995). 특히 최근 소양호 주변의 경사가 가파른 지역에 위치한 고랭지 채소밭 등에서 강우기 때 고탁수가 소양호에 유입되는 것으로 알려져 있는데, 상류부에서 유입된 탁수는 호수 내로 유입되면서 상층수보다 중층으로 유입되고 중층부의 투명도 감소는 광 투과도를 감소시켜 식물플랑크톤 생산력뿐만 아니라 수생식물들이 성장할 유광층이 약아져 결국 저서동물과 어류의 감소를 가져오는 것으로 보고되고 있다(김과 정, 2007). 대청호는 상류유역에는 옥천, 보은, 무주 등 생활 오염원과 축산 점오염원과 산림, 경작지에 의한 비점오염원에 의해 부영양화현상이 심화되는 것으로 보고되었다(권 등, 2002). 무기성 부유물농도는 대청호의 경우 집중강우 시 높은 침투 농도를 보이며, 탁수와 함께 다량의 인(P)이 호수

내로 유입되는 것으로 나타났다(정과 박, 2005). 따라서 상기의 다양한 연구에서와 같이 각 호수가 가지고 있는 특징이 서로 상이하기 때문에 수중 부유물에 의한 영향 및 원인에 대한 연구를 위해서는 수계가 가지는 특징에 대한 비교 분석이 필요하다. 특히 부유물 농도 증가에 의한 수체 내의 광투과도 영향 및 수질변화에 대한 수체간의 비교연구는 미미한 실정이다.

본 연구는 각기 다른 수계에 위치하는 3개의 인공호에서 연별, 계절별 수질 특성을 파악하고, 부유물의 영향에 따른 타 수질 변수의 변화양상을 분석하였다. 또한 이에 따른 수체의 광소멸계수(Vertical light extinction coefficient, K_d) 변이, 투명도의 값에 의한 광 투과도 변화 및 엽록소 변화 분석을 통해 호수 수체 간을 비교 평가하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 임하호, 대청호, 소양호를 대상으로 2002년 1월부터 2004년 12월까지 3년 동안 측정된 환경부의 월별 수질측정자료(물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr>)를 이용하여, 호수의 특성을 규명하였다. 자료분석에 이용된 수질변수는 총인(Total phosphorus, TP), 총질소(Total nitrogen, TN), 엽록소농도(Chlorophyll-*a*, Chl), 부유물농도(Suspended solids, SS), 투명도(Secchi depth, SD), 전기전도도(Conductivity)를 포함하였다. 또한 수체의 수직광소멸계수(K_d), 유광대의 수심(Euphotic zone, Z_{eu}), 임계수심(Critical depth, Z_p)의 값의 산정은 Kalf (2002)의 방법에 의거하였으며, 수식은 다음과 같다.

$$K_d = 1.7/Z_{SD} \quad (Z_{SD} = \text{투명도의 수심})$$

$$Z_{eu} = \ln 100/K_d = 4.6/K_d$$

$$Z_p = 7.8/K_d$$

수집된 자료는 우리나라 수리수문학적 반응의 특성에 의한 수계별 공간적 수질변이를 위해 본류를 댐에서부터의 먼 거리를 기준으로 상류에 위치하는 유수대(Riverine zone, 1), 중류에 위치하는 전이대(Transition zone, 2), 하류부의 댐축에 위치하는 정수대(Lacustrine zone, 3)로 구분하여 낙동강 수계는 임하댐($I_1 \sim I_3$), 한강수계는 소양댐($S_1 \sim S_3$), 금강수계는 대청댐($D_1 \sim D_3$)을 대상으로 지점별로 구분하여 수질특성을 분석하였고, 세부지점은 다음과 같다(Fig. 1).

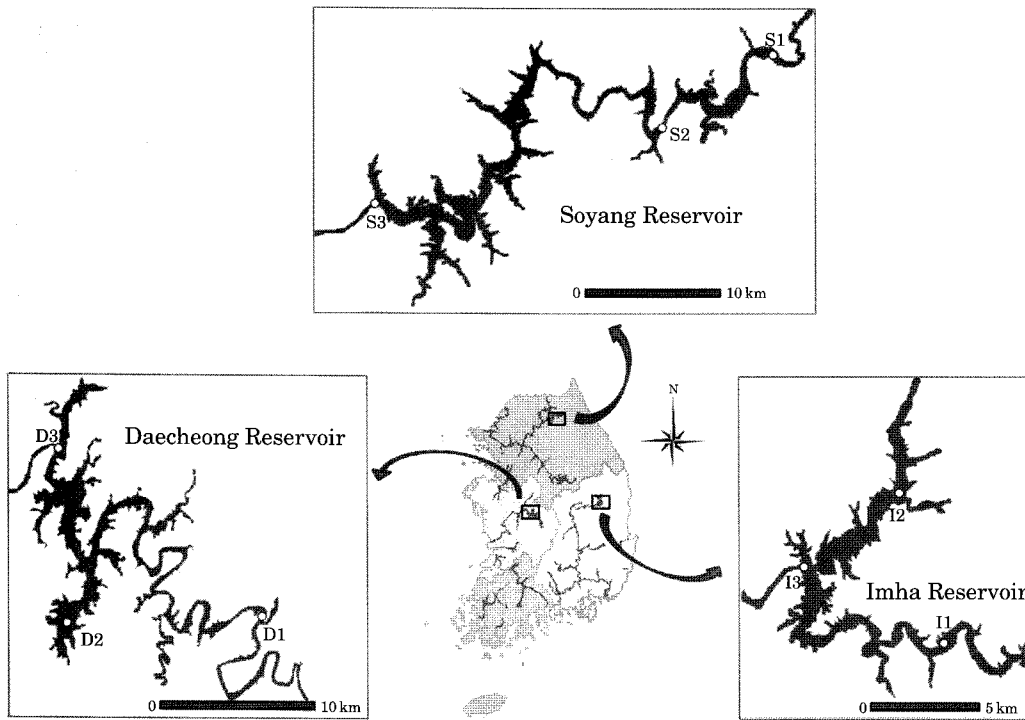


Fig. 1. A map of the investigation sites located in Imha Reservoir, Soyang Reservoir, and Daechong Reservoir.

임하호(I, 낙동강수계)

- I₁: 경북 안동시 길안면 지례리
- I₂: 경북 안동시 임동면 중평리
- I₃: 경북 안동시 임하면 천전리

소양호(S, 한강 수계)

- S₁: 강원도 인제군 남면 부평리
- S₂: 강원도 인제군 남면 상수내리
- S₃: 강원도 춘천시 신북읍 천전리

대청호(D, 금강 수계)

- D₁: 충북 옥천군 안내면 장계리
- D₂: 대전광역시 동구 추동
- D₃: 충북 청원군 문의면 덕유리

결과 및 고찰

1. 일반적 수질 특성

본 연구기간 동안 월별 강우분포의 분석에 따르면, 3개의 인공호수에서 강우는 하절기에 연평균 강우의 65~70%가 집중되는 것으로 나타났다(Fig. 2). 임하호, 소양호, 대청호의 평균 강우량은 각각 969, 922 및 1,065 mm의

강우량을 보였다. 강우 집중시기 동안 전기전도도는 임하호에서 167~258 $\mu\text{S cm}^{-1}$, 소양호와 대청호에서 각각 90~140 및 61~76 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 나타나서 임하호는 2개의 호수에 비해 약 2~3배의 높은 값을 보였다. 총질소(TN)는 임하호에서 5월 평균값 1.76 mg L^{-1} 로서 강우초기인 7월에 약 2배인 2.280 mg L^{-1} 로 상승하였다(Fig. 2). 소양호에서 TN의 평균값은 1.457 mg L^{-1} 로서, 큰 변화를 보이지 않았고 장마 후기에는 상승한 뒤 겨울철에 감소현상을 보였는데, 이는 임하호와 유사한 경향성을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 2). 한편, 대청호에서 TN농도는 D₂에서 평균값 1.835에서 11월 2.590 mg L^{-1} 로 값이 급격히 증가하는 양상을 보였는데 이것은 대청호 유역 가장 큰 오염부하량을 차지하는 축산폐수(권 등, 2002)에 의한 영향으로 사료되었다. 총인(TP)농도는 임하호에서 하절기(8월)에 60 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 큰 상승폭을 보이는데, 이는 평균값(38 $\mu\text{g L}^{-1}$)의 약 1.5배에 도달하였는데(Fig. 2) 이런 현상은 집중 강우로 인해 호수 내로 유입된 점토입자에 흡착된 인의 영향으로 사료되었다(김 등, 1989; 김과 김, 2004; 사 등, 2004). 소양호는 S₂에서 강우와 함께 총인(TN)이 증가하여 9월에 최대치를 보였는데, 이는 생활하수, 가축폐수와 고령지 농업의 영향에 의한 총인(TP) 농도의 증가(김 등, 1995;

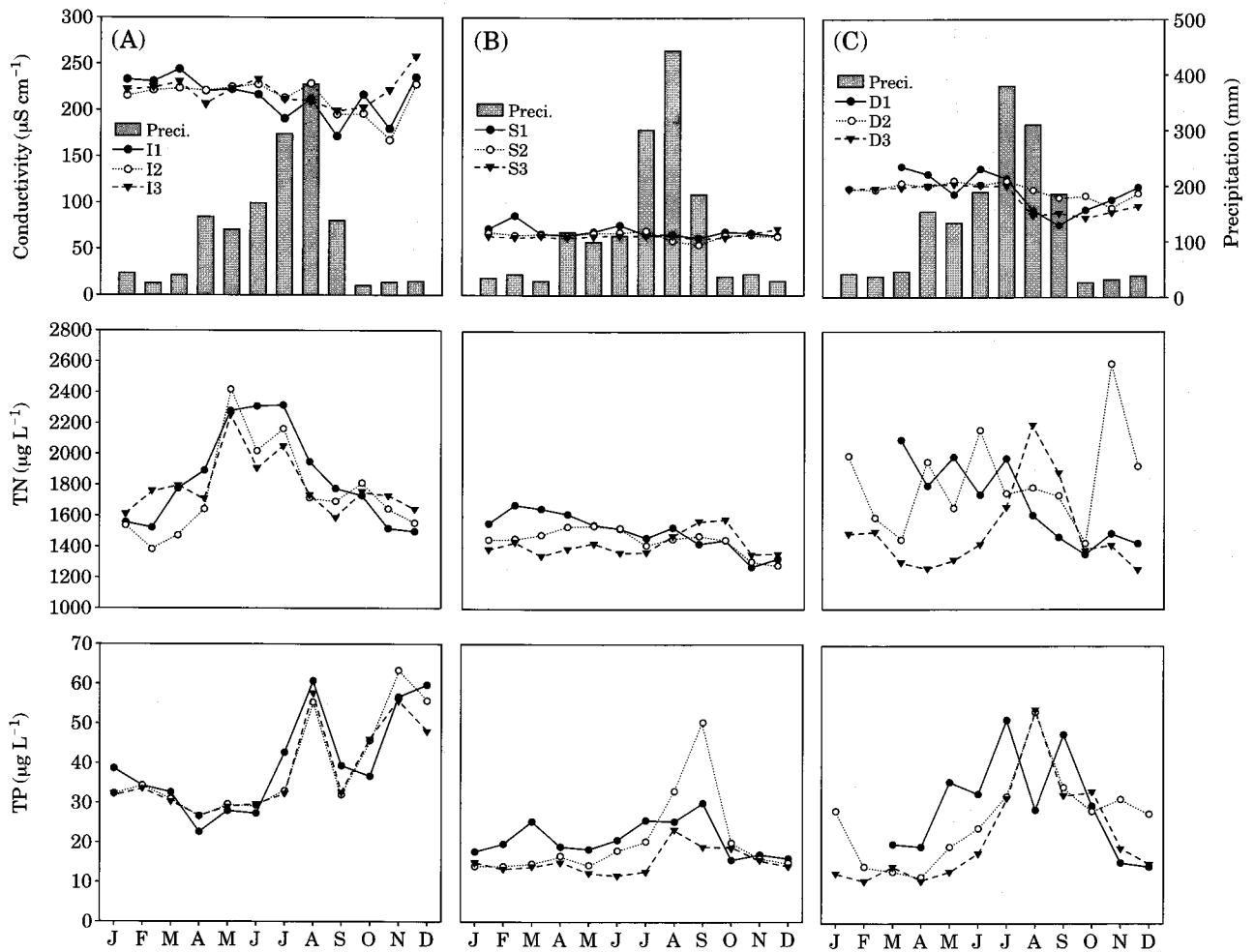


Fig. 2. Monthly fluctuations of conductivity, precipitation, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in Imha Reservoir (A), Soyang Reservoir (B), and Daechong Reservoir (C).

김과 정, 2007)로서 강우의 영향인 것으로 나타났다. 대청호에서는 임하호와 마찬가지로 하절기(8월) 총인의 평균값은 $54 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 강우 이전(2~5월)에 비해 약 2배의 증가 값을 보였다. 이런 결과는 인공댐 내의 이온변화 및 영양염 농도변화는 강우사상과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 특히 총인의 증가는 장마기에 외부로부터 유입된 외부기원 유기물에 의해 영향을 받는 것으로 사료되었다

2. 부유물농도와 밀접한 수질변수 특성

3개의 각각 다른 인공호에서 탁수에 영향을 주는 부유물(SS), 엽록소(Chl), 투명도(SD)의 계절변이는 Fig. 3과 같다. SS의 경우 임하댐이 유수대(I1)에서 5월 평균 값 7.6 mg L^{-1} 의 약 2배인 최대치(16.4 mg L^{-1})를 보인 뒤 동절기에 접어들수록 서서히 증가하여, 투명도 감소를 가

져왔다. 한편, 소양호와 대청호는 겨울철에 SS가 감소하여 임하호와는 완전히 다른 양상을 보였다(Fig. 3). 임하호, 소양호, 대청호의 정수대에서 Chl의 평균값은 각각 2.4 , 2.4 , $9.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 였고, 상류의 유수대에서는 13.3 , 4.9 , $25.4 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 보여 소양호를 제외하고는 상·하류 간의 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 3). 대청호의 이전 연구(박, 2005)에서 강우기의 엽록소농도가 급격히 증가하여 9월부터 감소한다는 연구 결과와는 다르게 8월 이후 증가하여 10월에 유수대(D₁)에서는 최고치($25.4 \mu\text{g L}^{-1}$)에 도달했다(Fig. 3). 대청호에서 엽록소농도는 총인에 의하여 조절되는 것으로 나타났으며(김 등, 1989; 김 등, 1995; 배 등, 2007) 댐축을 따라 상류부에서 하류부로 내려올수록 감소하는 양상을 보였다. 또한 투명도(SD)는 Chl과 반대로 정수대에서 최대치로 나타나 유수대로부터 유입되는 영양물질 및 부유물은 전이대와 정수대를 거치며 점점 침

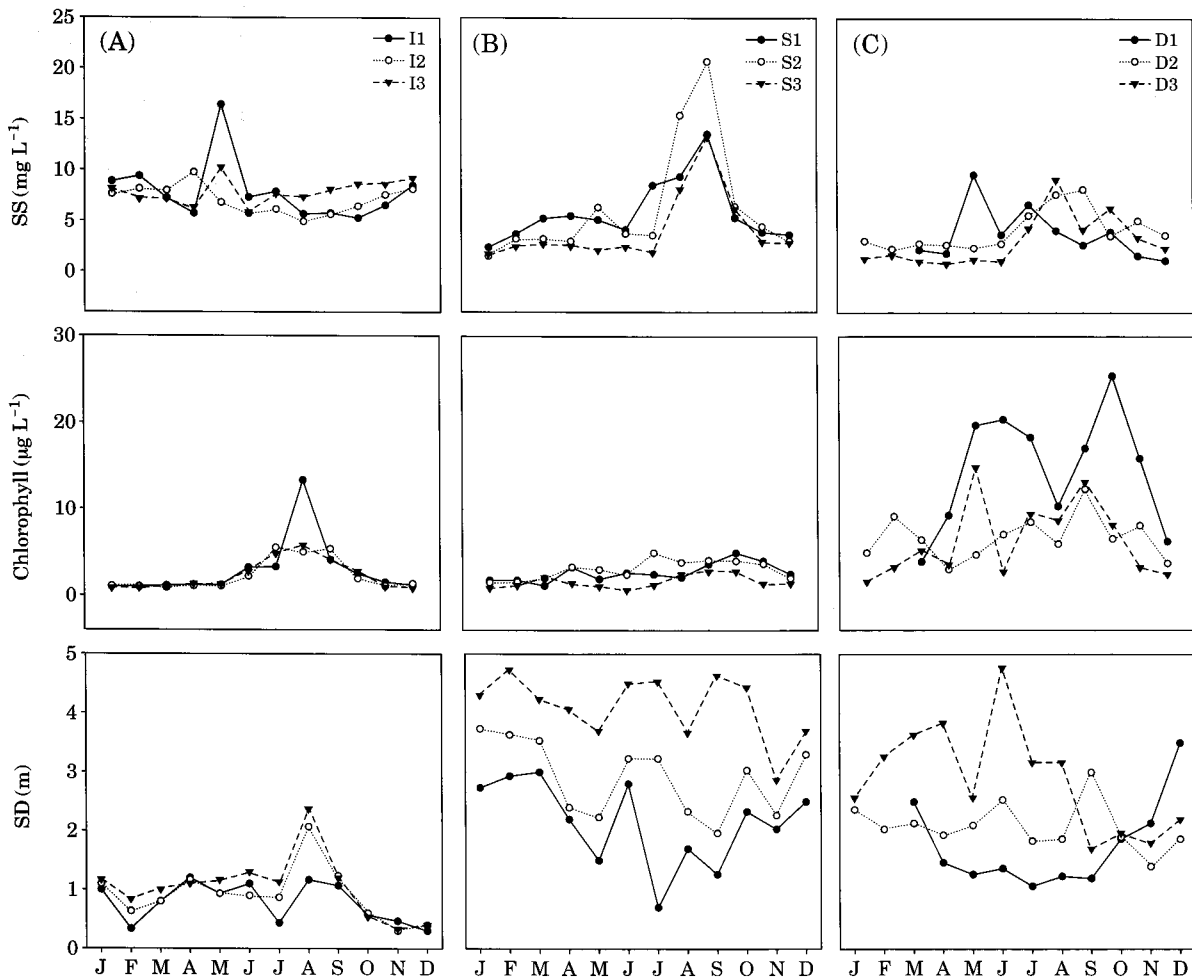


Fig. 3. Monthly fluctuations of suspended solids (SS, mg L⁻¹), chlorophyll-a (Chl, µg L⁻¹) and Secchi depth (SD, m) in Imha Reservoir (A), Soyang Reservoir (B) and Dacheong Reservoir (C).

전하여 정수대에서 낮아지기 때문으로 사료되었다(Kent *et al.*, 2002). 또한 TP과 TN가 수 내의 부영양화를 야기시켜 유수대에서 가장 투명도가 감소하는 것으로 사료되었다(Kent *et al.*, 2002). 대청호와 소양호의 경우 강우량이 높고 엽록소가 번성하는 7~9월 동안 투명도는 감소하였고, 겨울철에서 투명도가 증가한 반면, 임하호는 겨울철에도 투명도가 낮아지는 패턴을 보였다. 이는 2002년과 2003년 7, 8월 발생한 태풍 ‘매미’와 ‘루사’의 영향으로 발생한 고탁수가 저수지 상류부에서 침출류로 유입되면서 중류부에서 저층바닥으로 분리되어 하류까지 이동하는 도중 발생한 탁수의 장기간 체류에 따른 전도현상(박 등, 2005)에 의한 것으로 사료되며, 또한 댐 주변에 미세한 점토로 이루어져 있는 지질의 영향을 받아(Harper, 1992; 김과 김, 2004; 사 등, 2004; 김 등, 2007) 강우가 소멸된 겨울에도 투명도가 회복되지 않은 것으로 사

료되었다. 임하호에서 최대 강우를 보인 8월에 투명도 또한 최대값을 가지는 것은 박 등(2005)이 제시한 바와 같이 강우기(8~9월)에 투명도는 감소하는 양상을 보인다는 이전 연구와는 일치하지 않았다. 대청호에 대한 정 등(2007)의 탁수에 대한 논문에 따르면, 호수 내 탁도를 유발하는 주요 광물은 조암광물이며 상류하천으로부터 유입되어 탁수가 발생하였고 탁도와 총부유물은 상류, 중류, 하류에서 측정지점에 상관없이 모두 선형관계를 갖는다고 발표했으나, 본 연구에서 탁도와 총부유물은 상류에서만 역상관관계($r = -0.43, p = 0.01$)를 보이는 것으로 나타났다. 특히 수체 내 투명도 값이 감소할 때 Chl의 값이 아주 낮거나, 증가양상을 보이지 않는 것은 식물플랑크톤의 수체 내 영향이 미미하며, 무기성 부유물에 의해 주로 영향을 받는 것으로 사료된다(안 등, 2006).

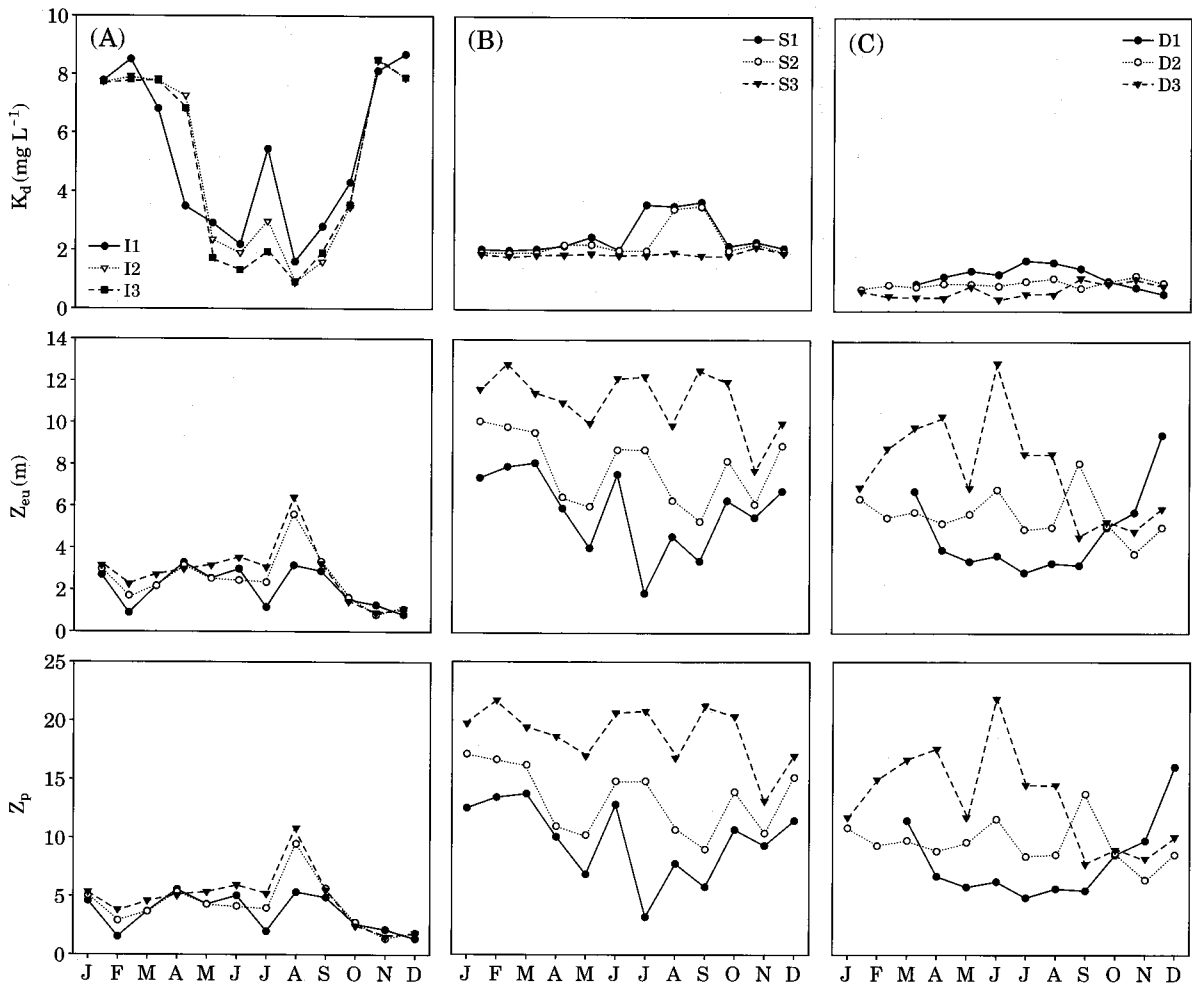


Fig. 4. Monthly fluctuations of vertical light attenuation coefficient (K_d), euphotic depth (Z_{eu}) and critical depth (Z_p) in Imha Reservoir (A), Soyang Reservoir (B) and Daecheong Reservoir.

3. 투명도 및 광투과도 지수의 계절적 변동

탁도 발생에 따른 3개 수체 내의 수직광소멸계수(K_d), 유광대수심(Z_{eu}) 및 임계수심(Z_p)은 다음과 같다(Fig. 4). K_d 는 임하호에서 'W'형의 패턴을 보이며 겨울철 평균값 5 m^{-1} 에서 8.5 m^{-1} 까지 값이 상승하는데 이것은 같은 시기 1.1 m^{-1} 값을 갖는 대청댐의 약 8배에 달하는 값으로 투명도의 증가와 역상관 관계를 보였다. 본 연구대상인 3개의 인공호 중 대청댐에서 K_d 의 평균값은 0.9 m^{-1} (범위: $0.7\sim 1.7\text{ m}^{-1}$)로 수체 내 광투과율이 가장 뛰어난 것으로 나타났다. Z_{eu} 와 Z_p 의 패턴은 K_d 와 유사한 패턴을 보였다.

4. 수질변수의 상관성 분석

임하댐은 투명도-엽록소농도-광소멸계수와의 상관성 분석에서 소양댐, 대청댐과 뚜렷한 차이를 보였다. 임하

댐에서 투명도(SD)는 Chl과 정 상관관계($r=0.424, p<0.01$)를 보인 반면 K_d 와는 역 상관관계($r=-0.676, p<0.01$)를 보였으며, K_d 값이 0.5를 넘는 광제한효과(Light limitation)를 보이는 것으로 사료되었다. 또한, Chl과 K_d 값이 역 상관관계($r=-0.771, p<0.01$)를 보이는 것은 수체 내 빛의 차단에 의한 Chl의 감소를 유도하는 것으로 사료 되었다(Fig. 5). 소양호의 경우 Chl과 K_d 는 정 상관관계를($r=0.489, p<0.01$), 총인과 투명도($r=-0.557, p<0.01$)는 역 상관관계를 보였다. 소양호에서 발생한 부유물은 주로 엽록소농도에 의한 것이며 이는 결국 K_d 값과 정 상관관계를 보이며 수 내의 빛을 차단하여 투명도를 떨어뜨리는 것으로 사료된다(Fig. 6). 대청호는 엽록소농도와 TP의 증가와 정 상관관계($r=0.551, p<0.01$)를 보이며 엽록소농도의 증가는 TP의 증가로 이어져 유기성 부유물에 의한 SD의 감소를 유발시키는 것으로 사료되

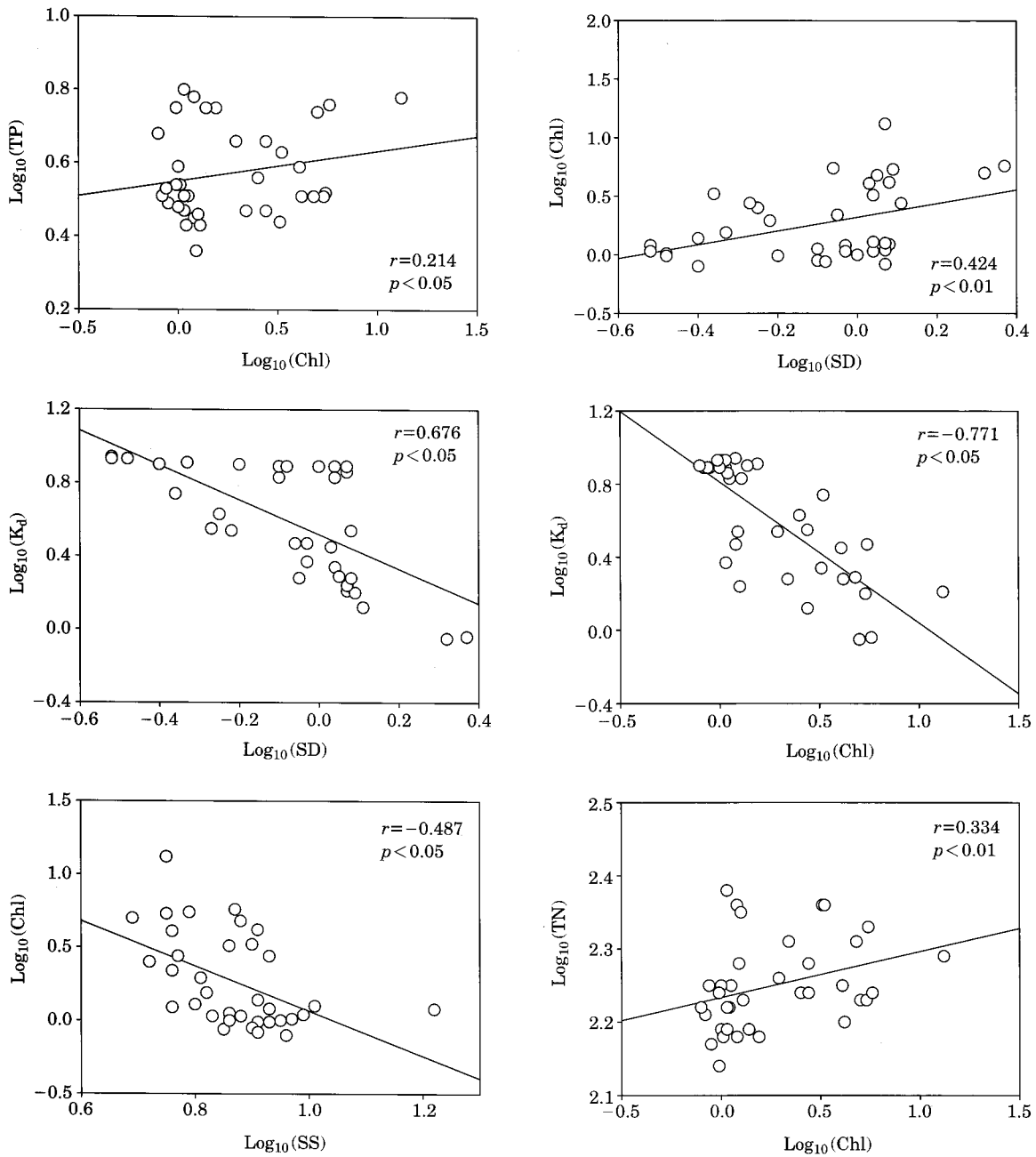


Fig. 5. Empirical relations in the trophic parameters and vertical light attenuation coefficient (K_d) in Imha Reservoir.

었다(Fig. 7).

5. 부유물 및 광투과성 특성

임하호와 대청호에서 발생된 탁도의 패턴이 유사한 것으로 나타났다. 여름철에는 강우기의 영향으로 발생된 유기성 부유물의 영향을 받았으며 겨울철에는 수체 내에서

발생한 영양염류에 의한 무기성 부유물의 영향인 것으로 사료된 반면 소양호는 강우기에도 영양염류의 영향으로 발생한 무기성 부유물의 영향을 받아 탁수가 발생된 것으로 사료되었다(Fig. 8). 임하호의 경우 2002년 9월부터 2003년 4월, 2003년 11월부터 2004년 4월 동안 K_d 값이 상승하였는데 이 시기의 SS, TP, Chl의 변화와 비교한 결과 K_d 값과 SS가 함께 증가하는 동안 Chl의 농도는 장

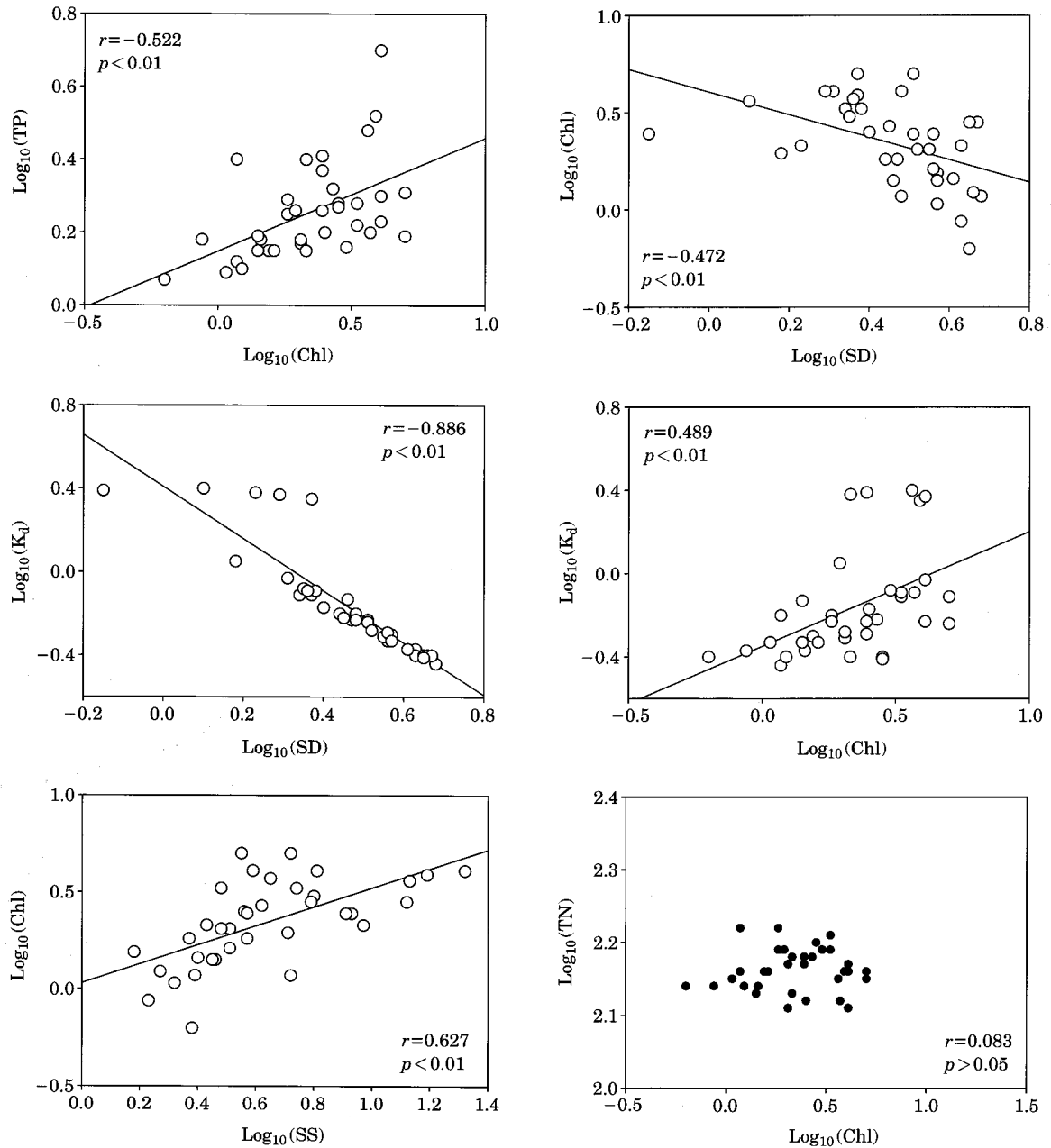


Fig. 6. Empirical relations in the trophic parameters and vertical light attenuation coefficient (K_d) in Soyang Reservoir.

시간 낮은 값을 유지했으며 TP의 값 또한 증가하지 않았다. 결국, 임하호에서 3년에 걸쳐 발생한 2번의 겨울철 장기간 탁수는 호수 내에서 발생한 무기성 부유물에 의한 것으로 사료되며 여름철 SS, Chl, TP의 값이 함께 증가하는 것은 강우시기 동안 발생한 SS은 유기성 부유물에 의한 것으로 사료된다. 소양호의 경우 SS와 TP가 유사한 패턴을 보이며 수 내의 TP에 의해 조절되는 SS인 것으로 사료되었다. 2002년 8~9월 동안 K_d , SS, TP의

값이 큰 폭으로 증가하고 Chl 값이 감소하는 것은 여름철 집중 강우의 영향으로 인근 고랭지밭에서 유입된 영양염류에 의해 SS가 생성된 것으로 사료되었다. 대청호의 경우 2002년 11월과 2004년 10월 K_d 값이 상승폭을 보였는데, 이 시기의 SS, TP, Chl의 값 모두 감소패턴을 보이는 것은 수 내의 유기물질보다는 무기성 부유물에 의해 발생한 것으로 보인다. 한편, 2003년 8월 모든 측정 값이 증가한 것은 여름철 호우로 인해 발생된 유기성 부

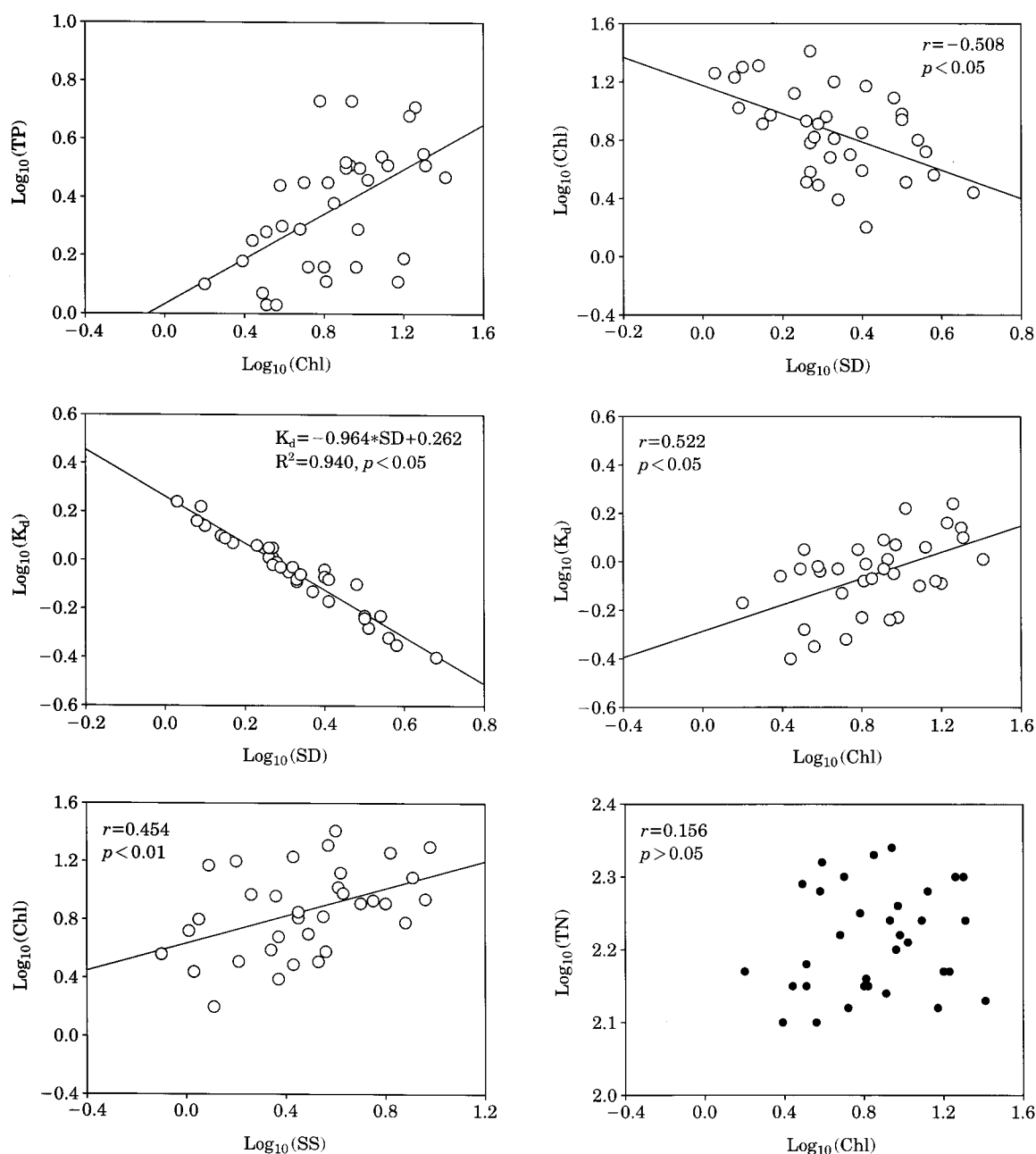


Fig. 7. Empirical relations in the trophic parameters and vertical light attenuation coefficient (K_d) in Daecheong Reservoir.

유물에 의해 발생된 것으로 사료되었다.

결론

본 연구에 따르면 하절기의 집중강우는 소양호와 대청호 수계의 전기전도도, 투명도의 감소를 유발하며 영양염

류 중 총인의 증가를 가져온다. 임하호의 총질소는 5월 부유물 증가의 원인이 되고 겨울철 발생한 총인의 증가는 겨울철 호소 내 부영양화를 장기화시켜 약 7개월 동안 투명도 값이 감소한 뒤 다시 회복되지 않는 결과를 가져왔다. 임하호는 투명도와 엽록소농도가 정 상관관계를, 수직 광소멸계수와 투명도 값이 역 상관관계를 보였으며 수직 광소멸계수가 0.5를 넘어 수계 내의 빛 차단

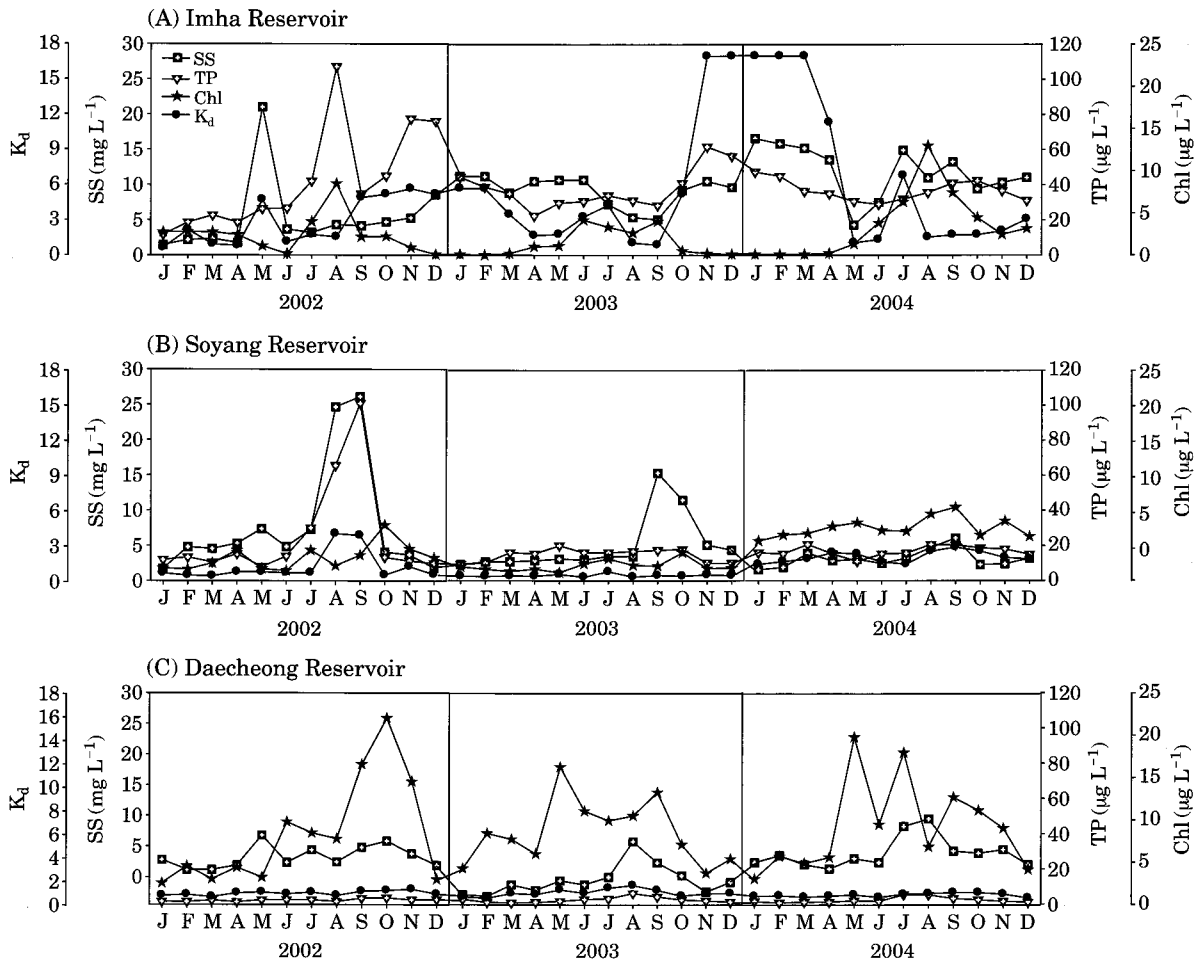


Fig. 8. Monthly fluctuations of Chl, TP, SS, SS and K_d in Imha Reservoir (A), Soyang Reservoir (B), and Daechong Reservoir (C) from 2002~2004.

에 의한 엽록소농도의 감소와 동시에 투명도가 증가하는 결과를 가져온 것으로 설명된다. 소양호의 경우 유수대에서 정수대로 갈수록 투명도가 증가 값을 갖는 것이 뚜렷이 나타났으며 수직 광소멸계수 또한 오직 상류에서 강우시기 동안 증가 패턴을 보일 뿐 임하호에 비해 심각한 고탁수의 발생은 발견되지 않았다. 소양호의 경우 엽록소농도에 의한 수직 광소멸계수의 증가관계가 가장 크게 나타났으며 총인과 투명도 또한 역 상관관계를 보여 소양호에서 발생한 부유물은 주로 엽록소농도에 의한 유기성 부유물이며 이는 수직 광소멸계수를 증가시켜 투명도를 떨어뜨리는 것으로 나타났다. 대청호는 2개의 다른 호수에 비해 가장 수체 내의 빛 투과도가 뛰어나며 하절기에 전기전도도와 투명도는 감소하였고 총질소, 총인, 부유물은 증가하였다. 또한 강우 뒤 9월 엽록소 농도가 증가하는 패턴을 보여 탁수와 관련된 모든 수질요소들이

계절적 특징을 반영하는 것으로 나타났다. 대청호에서 발생한 탁수는 총질소와 엽록소 농도, 총인과 관련성을 가지며 주로 유기성 부유물에 의해 발생한 것으로 설명된다.

호소생태계에서 탁수는 매우 중요한 호소 수질평가의 지표이며 호소의 생산력에 큰 영향을 미친다. 우리나라 주요 인공호에서 발생하는 탁수는 주로 여름철에 유기성 부유물에 의해 조절되며 겨울철에는 환경적 요인 등의 무기성 부유물에 의해 조절되는 것으로 사료되었다. 이와 같이 수체에 유입되는 부유물의 종류와 양은 호소의 부영양화 정도를 결정하는 1차적인 요소로서, 인공호 내의 영양염류의 농도는 강우 및 유입수의 증감에 의해 영향을 받았다. 따라서 수체가 안정되는 장마후기에 1차 생산력이 급격히 증가되기에 이 기간 동안 효율적이고 체계적인 수질관리가 요구된다.

인 용 문 헌

권영호, 한선임, 이준배. 2002. 대청호 유역 오염부하량 산정. 한국상하수도학회지 **16**(5): 581-595.

김범철, 정성민. 2007. 소양호의 탁수발생 실태와 환경학적 영향. 대한환경공학회지 **29**(11): 1185-1190.

김범철, 조규승, 허우명, 김동섭. 1989. 소양호 부영양화의 연변화 추이. 한국육수학회지 **22**(3): 151-158.

김범철, 허우명, 황길순, 김동섭, 최광순. 1995. 소양호에서 인의 존재 형태별 분포에 관하여. 한국육수학회지 **28**(2): 151-157.

김윤희, 김범철. 2004. 대형댐에서 부유물질의 중층이동과 모델링. 한국생물과학협회 학술발표대회 초록집 **8**: 31.

김자현, 서진원, 나영언, 안광국. 2007. 용담댐 건설후 하류부하천 생태계의 탁수영향 평가. 한국육수학회지 **40**(1): 130-142.

김재윤. 2003. 총인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가. 한국환경과학회지 **12**(7): 689-695.

김정진, 정용식, 김정곤, 이상욱, 김영훈. 2007b. 강우 강도에 따른 임하댐 및 안동댐 유입하천의 탁도 변화와 탁도유발물질의 광물학적 특성 연구. 한국광물학회지 **20**(3): 213-222.

박정원, 이경탁, 최재신, 김한순. 2005. 임하댐의 탁수 형성후 식물플랑크톤 군집 동태. 한국육수학회지 **38**(3): 429-434.

박종근. 2005. 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가. 한국육수학회지 **38**(3): 382-392.

배대열, 양은찬, 정승현, 이재훈, 안광국. 2007. 대청호에서 종적구배에 따른 영양 염류 및 엽록소의 역동성. 한국육수학회지 **40**(2): 285-292.

사승환, T. Masusa and Y. Hosoi. 2004. 농업유역으로부터 유출되는 부유물질의 특성과 부영양화에 미치는 잠재적 영향 평가. 한국생물과학협회 학술발표대회 초록집 **8**: 32.

안광국, 박선재, 최성도, 박종석. 2006. 안동호와 임하호에서 관측한 장기 수질자료의 비교 분석. 한국육수학회지 **39**(1): 21-31.

정세웅, 박재호. 2005. 대청호 유역의 수질평가를 위한 종합수질지수의 적용. 한국육수학회지 **21**(5): 470-476.

정세웅, 이홍수, 윤성완, 예령, 이준호, 추창오. 2007. 홍수시 대청호 유역에 발생하는 탁수의 물리적 특성. 한국물환경학회지 **23**(6): 934-944.

한국수자원공사. 2003. 다목적댐 운영 종합보고서.

An, K.-G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake

fish farms. *Water, Air, and Soil Pollution*. **149**: 27-49.

An, K.-G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.

Duffy, P.D., J.D. Schreiber, D.C. McClurkin and L.L. McDowell. 1978. Aqueous and sediment-phase phosphorus yields from five southern pine watersheds. *Journal of Environmental Quality* **7**: 45-50.

Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwaters. Chapman and Hall.

Hellawell, J.M. 1986. Biological indicator of freshwater pollution and environmental management. Elsevier Applied Science Publishers LTD p. 78-79.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology 2nd edition. McGraw-Hill p. 592.

Kalff, J. 2002. Limnology. Prentice Hall. New Jersey, p. 148-153.

Kent, W.T., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 2002. Reservoir limnology, Shingwang, p. 66-169.

Marzolf, G.R. 1981. Some aspects of zooplankton existence in surface water impoundments. Stenfan (ed). American Society of Civil Engineers, p. 1392-1399.

Pita, F.W. and N.J. Hyne. 1974. The depositional environment of zinc, lead and cadmium in reservoir sediments. *Water Research* **9**: 701-706.

Schreiber, J.D. and D.L. Rausch. 1979. Suspended sediment-phosphorus relationships for the inflow and outflow of a flood detention reservoir. *Journal of Environmental Quality* **8**: 510-514.

Shin, J.-K., S.-A. Jeong, I.-H. Choi and S.-J. Hwang. 2004. Dynamics of turbid water in a Korean reservoir with selective withdrawal discharges. *Korean Journal of Limnology* **37**: 423-430.

Sigler, J.W., T.C. Bjornn and F.H. Everst. 1984. Effects of chronic turbidity on density and growth of steelheads and coho salmon. *Transactions of American Fisheries Society* **113**: 142-150.

Vanoni, V.A. 1975. Sedimentation engineering (ed). ASCE manuals and reportson engineering practice No. 54. American Society of Civil Engineers.

(Manuscript received 13 May 2009,
Revision accepted 9 June 2009)