

안동호의 수역별 영양상태와 평가방법간 상관성 비교

박재총^{1,*} · 박정원² · 김대현 · 신재기³ · 이희무¹

(한국수자원공사 안동댐관리단, ¹안동대학교 생물학과
²경북대학교 생물학과, ³한국수자원공사 수자원연구원)

A Comparative Study of Trophic State in Lake Andong, Korea. Park, Jae-Chung^{1,*}, Jung-Won Park², Dae-Hyun Kim, Jae-Ki Shin³ and Hee-Moo Lee¹ (Andong Dam Office, KOWACO, Andong 760-360, Korea; ¹Department of Biology, Andong National University, Andong 760-749, Korea; ²Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea; ³Korea Institute of Water and Environment Korea Water Resources Corporation KOWACO Taejon 305-730, Korea)

Using TSI, TSI_m and LTSI, we compared physico-chemical water quality and trophic state of 5 stations in Lake Andong from June 2002 to June 2003 and examined the correlation of them. It is difficult to evaluate trophic state of waters by each parameter, TP, Chl-*a* and SD, because TSI and TSI_m in each section show different results, oligo-, meso- and eutrophic state. But three methods, TSI, TSI_m and LTSI, show the same result that trophic degree lows as it goes to a lower area of the lake. The correlation among them is closer in the upper shallow waters than in the lower deep waters. The reciprocal application of trophic state indices is possible because the coefficient of mean correlation ranges 0.9117 to 0.9909. In conclusion, it seems that LTSI reflects a characteristic of water quality in each section better than TSI, TSI_m and is very effective to simplify trophic state evaluation and minimize researcher's subjectivity.

Key words : Lake Andong, TSI, TSI_m, LTSI, trophic state, correlation

서 론

국내의 호수에 대한 부영양화 (eutrophication) 판정은 Vollenweider (1968)의 분류기준을 기본으로 채택하고 있으며 수중 생물의 제한 영양인자를 고려하여 총질소 (TN)와 총인 (TP)의 비율이 7 이하일 때는 질소 제한성이 강하므로 총인율, 16 이상일 경우에는 인 제한성이 강하므로 총질소 기준의 적용을 배제하고 있다 (환경부, 1994).

실제 수역에서의 영양염 비율은 여러 요인에 의해 변

을 띠는데 비해 수체의 영양상태는 연속적인 개념이다 (Carlson, 1977). 호수의 수질관리에서 대상 수역의 현재 영양상태가 어느 정도인지 또는 현재의 영양상태가 수역 이용에 바람직한지에 대한 평가의 척도로 영양단계 (trophic state)를 이용하는 것은 일반화되어 있다 (이와 김, 1996; 허 등, 1999, 2000; 이 등, 2002; Heo *et al.*, 2002; 서 등, 2003; 김과 황, 2004; 박 등, 2004; 이, 2004).

영양상태를 판정하는 기준에는 여러 연구자에 의해 제안된 다양한 분류기준들이 있으나 공통적으로 TP (total phosphorus), Chl-*a* (chlorophyll *a*) 및 SD (Secchi disc transparency)를 이용하고 있다 (Vollenweider, 1968; U. S. EPA, 1976; Carlson, 1977; Forsberg and Ryding,

* Corresponding author: Tel: 054) 850-4215, Fax: 054) 850-4236, E-mail: jaechung@kowaco.or.kr

1980; OECD, 1980; Aizaki *et al.*, 1981; Yang and Dickman, 1993).

국내 호수의 영양단계 평가에서 이와 김 (1996)은 낙동강 수계 6개 댐을 LTSI로, 허 등 (1999, 2000)은 7개의 동해안 석호를 하계 평균치를 이용하는 TSI로, 안동호를 Forsberg and Ryding과 EPA로, 이 등 (2002)은 10개 댐을 LTSI로, Heo *et al.* (2002)은 안동호를 TSI로, 서 등 (2003)은 운문호를 TSI와 TSI_m으로 평가하였으며 이 등 (2003)은 박실지와 정양지를 OECD 기준으로, 박 등 (2004)은 금오지를 TSI와 Forsberg and Ryding의 기준을 적용하여 영양단계를 평가하였다.

이와 같이 호수의 영양상태 평가는 많은 연구자들이 EPA, Forsberg and Ryding, LTSI, OECD, TSI 및 TSI_m 등의 기준에 따라 하계의 평균치 또는 겨울을 포함한 연평균치 및 최대치 (최소치)를 각각 사용하여 해당 수역을 판정하고 있다. 그러나 채택한 평가방법에 따라 동일 수역에서 상반된 판정이 도출되기도 하지만 둘 이상 사용했을 때 평가방법간의 비교 연구에 관한 보고는 없는 실정이다. 또한 홍수조절과 이수를 위한 대부분의 댐이 여름철 풍수기에 많은 수량을 저수하였다가 평·갈수기에는 장기간에 걸쳐 일정 수량을 방류하여 안정된 수위를 유지하므로 수문상황에 따른 시기별 영양상태와 동일 호수 내에서 유하거리에 따른 수역별 영양상태에 관한 비교 연구도 필요하다고 본다.

본 연구는 안동호를 일정 구간으로 세분하여 개별 수역에서의 물리·화학적 수질특성을 기초로 여러 연구자들이 일반적으로 사용하고 있는 TSI, TSI_m 및 LTSI를 적용하여 수역별 영양상태를 평가하고, 안동호의 영양상태 변동을 고찰함과 동시에 세 평가방법간의 상관성을 비교하고자 수행하였다.

재료 및 방법

본 연구의 대상지인 안동댐은 1976년에 건설된 우리나라의 대표적인 다목적댐으로 저수용량 1,248 × 10⁶ m³, 수면적 51.5 km², 최대수심 67 m, 평균수심 24 m, 체류시간은 0.85년이며 만수시 저수지 길이가 43.5 km에 달하는 대형 호수이다. 유역면적은 1,584 km²로 임야가 1,292 km² (81.6%), 농경지는 145 km² (9.1%)이고 인구는 77,454명이며 연평균 강수량은 1,139 mm이다 (한국수자원공사, 2003).

본 연구에서는 낙동강 본류가 안동호로 유입되는 유입지점 (Seobu station)과 호소수가 방류구를 통해 하류로

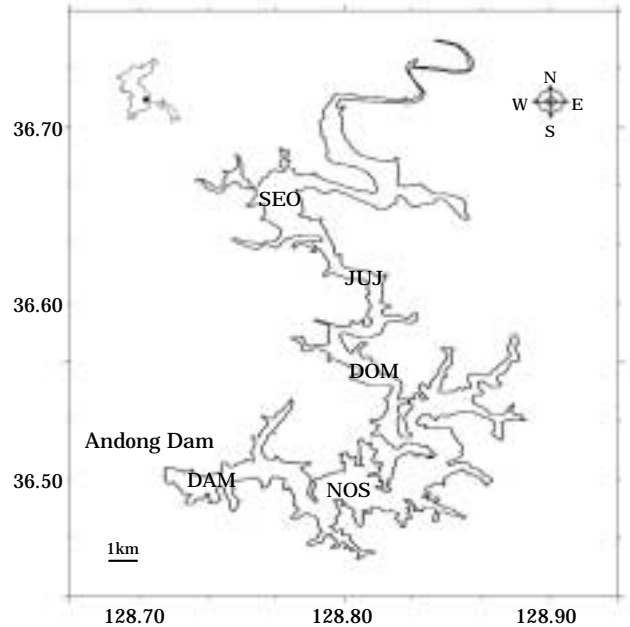


Fig. 1. Map showing sampling stations of Lake Andong.

Table 1. Morphological characteristics of study stations in Lake Andong.

Station name	Distance from dam barrage	Max. depth (m)
DAM (Dam)	0.5 km	67
NOS (Nosan)	8 km	45
DOM (Domok)	18 km	28
JUJ (Jujin)	23 km	23
SEO (Seobu)	28 km	12

유출되는 댐축지점 (Dam station)을 기준으로 5~10 km의 간격으로 분할하여 5개 지점을 선정하고 2002년 6월부터 2003년 6월까지 홍수기인 8월, 동절기인 11, 12월과 2003년 2월을 제외하고 매월 2회 (월 초와 중순)씩 총 21회 조사를 수행하였다 (Table 1, Fig. 1).

수온, pH와 탁도는 Multi-probe (YSI 6600)를 이용하여 현장에서 측정하였으며 투명도 측정에는 직경 30 cm의 백색 Secchi disc를 사용하였다. 수질분석용 시료는 1 L bottle을 이용하여 수심 30 cm에서 직접 채수하여 실험실에서 분석하였으며, Chl-*a* (chlorophyll *a*)는 여과하여 아세톤으로 24시간 추출한 후 흡광도로 산출하였고 TN (total nitrogen)은 자외선 흡광도법, TP (total phosphorus)는 아스코르빈산환원법으로 분석 (Cary 300-C, Varian Co.)하였다 (환경부, 1998). 강우량은 안동댐 유역

에 설치된 무인 우량국 9개소의 일 자료를 이용하였다 (한국수자원공사, 2003).

영양상태 평가를 위해 각 지점별 TP, Chl-*a* 및 SD를 사용하여 TSI (TP), TSI (Chl) 및 TSI (SD)와 TSI_m (TP), TSI_m (Chl) 및 TSI_m (SD)를 계산하고 각 항목의 평균값으로 영양상태를 최종 판정하였으며 (Aizaki *et al.*, 1981; Kratzer and Brezonik, 1981), LTSI는 Yang and Dickman (1993)이 제안한 식으로 산출하여 평가하였다. 평가방법간의 상관분석은 SPSS 11.0을 이용하여 $p < 0.0001$ 유의수준에서 수행하고 상관계수 (r)를 구하였으며 5개 지점과 전체 평균에 대하여 각각 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 수체의 물리·화학적 변화

조사지점별 수온은 최고값, 최저값, 평균값이 각각 28.2°C (7월, JUJ), 2.1°C (1월, JUJ), 16.9°C로 나타나 8월에 최고 기온과 수온을 보이는 우리나라의 경향과는 조금 달랐다 (Fig. 2A). 이는 2002년 8월 초의 장마와 집중호우에 의한 많은 강우의 영향으로 판단된다 (An, 2001). pH는 최고값, 최저값, 평균값이 각각 10.6 (9월, JUJ), 6.7 (12월, DAM), 8.7의 분포로 9월 초에 평균 10.2로 최고값을 보였다. 이후 점차 감소하여 12월에 평균 7.3으로 최저값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였으며, Chl-*a*와는 낮은 상관 ($r = 0.3772$)을 보인 반면 수온과는 높은 상관 ($r = 0.8153$)을 보였다 (Figs. 2A, 2B, 3C).

강우량은 1,618.7 mm였으며 6~9월에 1,138.6 mm (70.3%)를 기록하여 우리나라의 전형적인 강우 pattern을 보였다 (Fig. 2C). 탁도 (turbidity)는 상류에서 높고 하류에서 낮았으며 최대값, 최소값, 평균값은 각각 SEO에서 43.1 NTU (4월), NOS에서 5.9 NTU (2월), 15 NTU였으며, 1~3월은 10 NTU 미만으로 청수기 (clean-water phase)에 해당하였다. 전 지점에서 20 NTU를 초과한 경우는 6월 (평균 21.9 NTU)과 10월 (평균 23.5 NTU)로 조사되어 초여름까지는 강우에 의해, 홍수기 이후에는 발생 조류의 수면 집괴현상에 의해 표층부의 탁도가 상승하는 것으로 판단된다 (Harper, 1992; 신 등, 2003). 홍수기에 안동호로 유입되는 최대 탁도는 약 590 NTU로서, 고탁도를 포함한 유입수는 수심이 얇은 상류 유입지점 (SEO, JUJ)에서 전 수층을 교란시키지만 중류부 (DOM)부터는 중층으로 밀도류를 형성하면서 하류로 이동하는 양상을 보이므로 (미발표) 상·하류간 표층의 탁도는 뚜렷한 차

이를 나타내었다 (Fig. 2D).

2. 영양상태 평가 항목의 변화

TN은 중류부에서 3,102 $\mu\text{g L}^{-1}$ (9월, DOM)로 최대값, 하류부에서 606 $\mu\text{g L}^{-1}$ (10월, NOS)로 최소값을 보였고 평균값은 1,607 $\mu\text{g L}^{-1}$ 였다. 각 지점의 평균값은 유입부에서 1,794 $\mu\text{g L}^{-1}$ (SEO)로 최대, 하류부가 1,399 $\mu\text{g L}^{-1}$ (NOS), 1,502 $\mu\text{g L}^{-1}$ (DAM)로 상류부에서 높고 하류부에서 낮았다 (Fig. 3A).

TP는 최대값, 최소값, 평균값이 각각 51 $\mu\text{g L}^{-1}$ (9월, DOM), 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ (10월, SEO)와 11 $\mu\text{g L}^{-1}$ 였으며 10~1월에는 4~9 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위로 낮았으나 강우기인 6~9월에는 증가하는 경향을 보였다. 집중호우와 태풍 직후인 8월과 9월은 전 조사지점에서 11~51 $\mu\text{g L}^{-1}$ (평균 30 $\mu\text{g L}^{-1}$)의 범위까지 증가하였으며 강우량과는 양의 상관 ($r = 0.5945$)을 보여 강우시 유역에서 유입되는 인 부하량의 영향이 큼을 시사했다 (Heo *et al.*, 2003). 각 지점별 TP의 연평균값은 NOS가 9 $\mu\text{g L}^{-1}$ (최소), DAM, DOM, JUJ에서 각각 11 $\mu\text{g L}^{-1}$, SEO는 13 $\mu\text{g L}^{-1}$ (최대)를 보였다 (Fig. 3B).

Chl-*a*의 연평균값은 DAM에서 상류방향 (NOS → DOM → JUJ → SEO)으로 각각 3.9, 4.9, 8.8, 12.0 및 11.1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로서 하천의 유입부에 가깝고 수심이 얇은 상류수역에서 조류 발생이 활발하였으며 (Fig. 3C), 지점별 최고값도 각각 16.6, 18.5, 22.4, 54.5 및 41.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 상류지점에서 높았다 (Vollenweider and Kerekes, 1980; Harper, 1992). Chl-*a*의 최소값은 집중호우와 장마 직후인 8월에 NOS에서 0.8 $\mu\text{g L}^{-1}$ 였으며, 이것은 대 유량의 고탁수 유입과 수체교란, 투명도 감소에 따른 광투과도 저하에 기인한 것으로 판단된다 (Horne and Goldman, 1994). 9월 초에는 상류지점부터 최대 54.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ (JUJ)까지 증가한 후 중·하류지점도 점차 증가하는 경향을 보였다. 안동호에서 조류는 여름철 장마기 이후 중류지점 (DOM)을 기점으로 상류에서 발생량이 증가하기 시작하여 하류지점까지 확대되지만 10월 이후에는 점차 감소하는 경향을 보이며 강우량과는 낮은 음의 상관을 보였다 (Figs. 2C, 3C).

투명도 (SD)는 하류부인 NOS에서 최대 8.0 m (6월)였으며, 이것은 안동호에서 측정된 최대값으로 이 시기에 높은 값을 보인 것은 무강우 (0 mm), 낮은 Chl-*a* (2.6 $\mu\text{g L}^{-1}$)와 저탁도 (9.5 NTU)에 기인한 것으로 보인다. 최소 투명도는 최상류부인 SEO에서 0.5 m (4월)였으며, 조류 발생 (평균 Chl-*a* 4.9~5.1 $\mu\text{g L}^{-1}$)보다는 봄철 강우 (4월

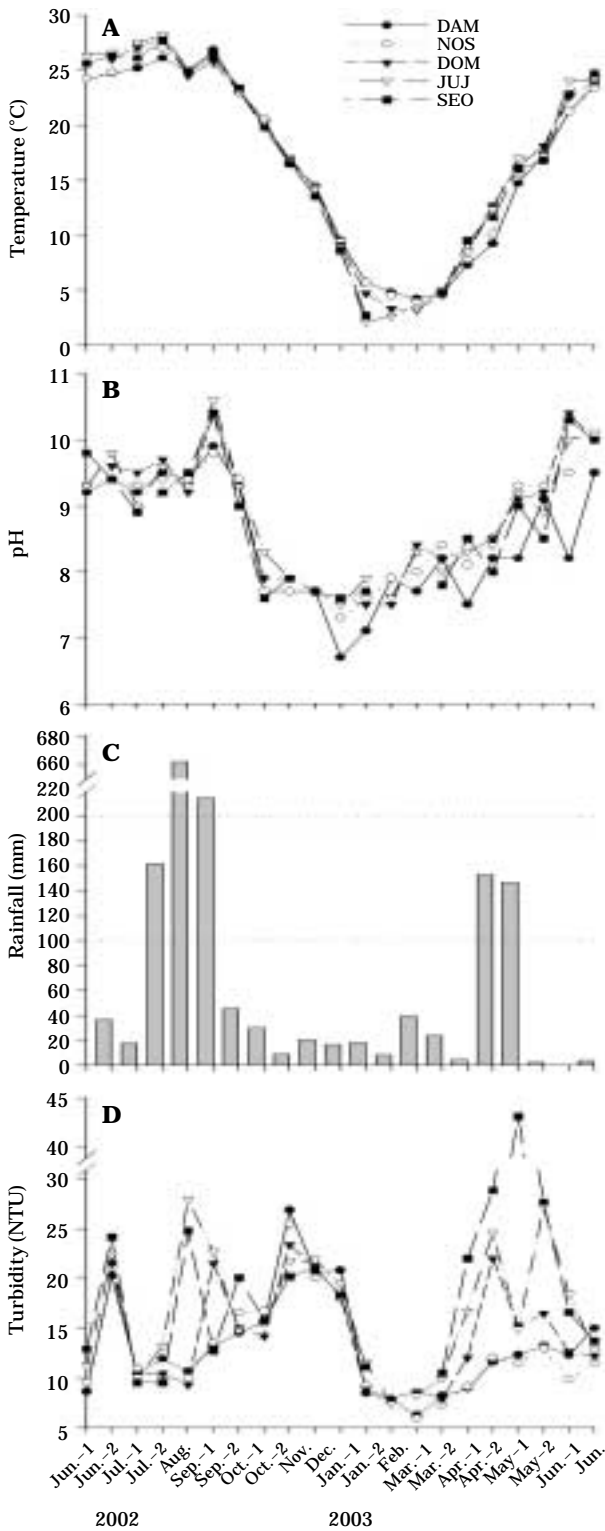


Fig. 2. Temporal variations of physico-chemical parameters in Lake Andong from June 2002 to June 2003.

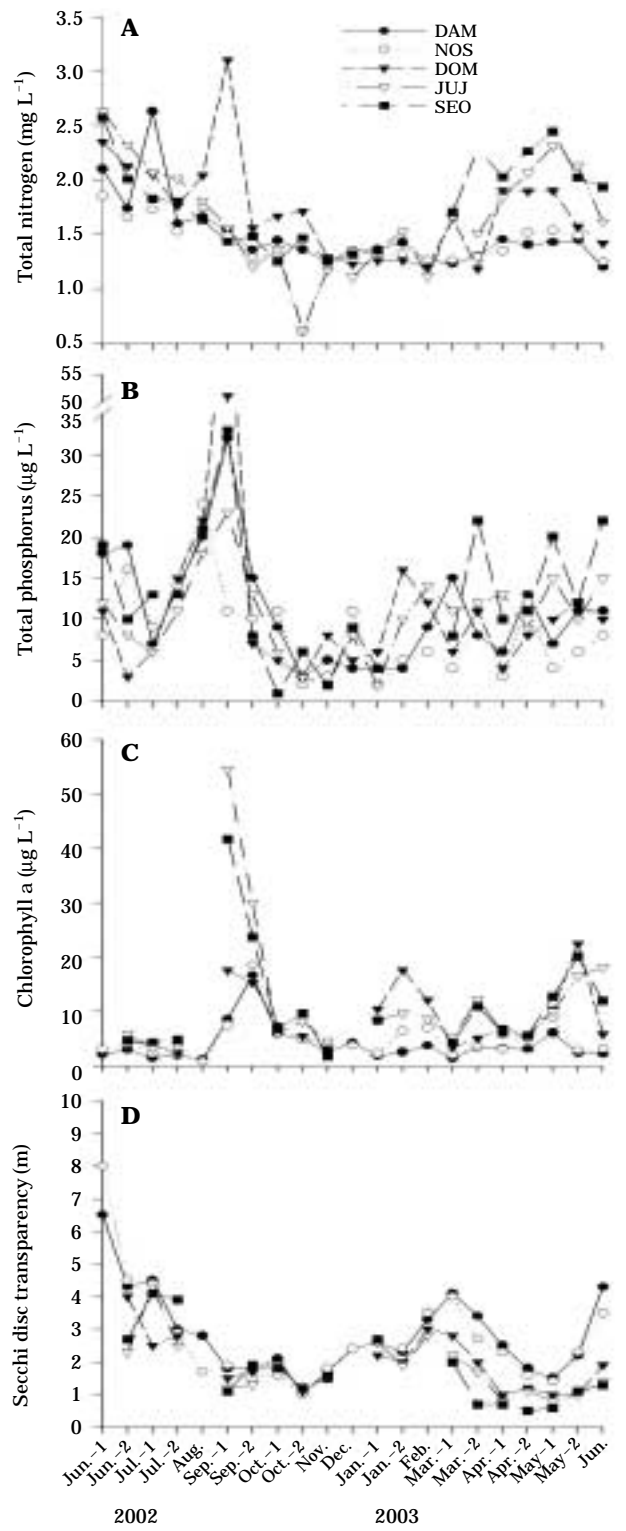


Fig. 3. Temporal variations of total nitrogen, total phosphorus, chlorophyll *a* and Secchi disc transparency in Lake Andong from June 2002 to June 2003.

Table 2. Trophic state mean values (\pm SD) of TSI, TSI_m and LTSI at each station in Lake Andong.

Sampling stations	TSI				TSI _m				LTSI
	TP	Chl	SD	Average	TP	Chl	SD	Average	
DAM	36.3 \pm 9.1	41.7 \pm 6.3	46.2 \pm 6.4	41.4 \pm 4.3	38.7 \pm 8.0	39.3 \pm 7.0	49.3 \pm 7.6	42.4 \pm 4.6	3.47 \pm 1.4
NOS	32.2 \pm 9.9	44.0 \pm 6.5	47.1 \pm 7.0	41.1 \pm 4.5	35.2 \pm 8.6	41.7 \pm 7.2	50.3 \pm 8.3	42.4 \pm 4.7	3.48 \pm 1.3
DOM	35.2 \pm 9.7	50.0 \pm 6.5	51.5 \pm 6.0	44.3 \pm 6.5	37.8 \pm 8.4	48.4 \pm 7.2	55.5 \pm 7.2	46.1 \pm 6.3	4.87 \pm 1.7
JUJ	35.8 \pm 9.5	51.9 \pm 7.2	52.9 \pm 6.6	45.7 \pm 6.4	38.3 \pm 8.3	50.6 \pm 8.0	57.2 \pm 7.8	47.6 \pm 6.5	5.31 \pm 2.0
SEO	37.2 \pm 12.4	51.3 \pm 7.6	54.8 \pm 9.3	46.7 \pm 7.5	39.5 \pm 10.8	49.9 \pm 8.5	59.4 \pm 11.0	48.6 \pm 7.5	5.50 \pm 2.3

초 153 mm, 4월 중순 147 mm)에 의한 고탁수 유입 때문으로 판단된다. 각 지점별 연평균 투명도는 상류에서 낮고 하류로 진행하면서 높아지는 경향을 보여 유입수 중의 탁도와 함께 조류 발생량이 수중 투명도에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다(Fig. 3D).

3. TSI에 의한 영양도 평가

TSI (TP)는 빈영양 79회 (73.1%), 중영양 26회 (24.1%) 및 부영양 3회 (2.8%)로 조사되었다 (n = 108). 연평균 TSI (TP)는 32.2~37.2의 범위로 안동호 전체 수역이 TSI (TP) 40 이하인 빈영양상태였으며, DAM이 36.3, NOS가 32.2 (최소), DOM이 35.3, JUJ가 35.8 및 최상류인 SEO가 37.2 (최대)를 보였다 (Table 2, Fig. 4A).

TSI (Chl)은 빈영양 18회 (18.2%), 중영양 60회 (60.6%) 및 부영양 21회 (21.2%)였고 (n = 99), 연평균은 41.7~51.9의 범위로 전 조사지점에서 중영양상태를 보였다. 각 지점별로는 DAM이 41.7 (최소), NOS가 44.0, DOM이 50.0, JUJ가 51.9 (최대) 및 SEO가 51.3으로 안동호 전체 지점이 53 이하인 중영양상태로 나타나 TSI (TP)의 빈영양상태와는 상이한 결과를 보였다 (Table 2, Fig. 4B).

TSI (SD)는 빈영양 12회 (12.1%), 중영양 53회 (53.5%) 및 부영양 34회 (34.4%)였다 (n = 99). 5개 지점의 연평균은 46.2~54.8의 범위로 최상류 지점인 SEO에서 54.8로서 부영양상태였고, 나머지 지점은 중영양상태에 속하였으나 중·상류 지점인 DOM과 JUJ는 각각 51.5, 52.9로서 부영양에 근접하는 중부영양상태 (mesoeutrophic)로 나타나 TP, Chl-a 및 SD에 대한 개별 TSI는 각각 빈-중-(중)부영양상태로 일관된 결과를 보이지 않았다 (Table 2, Fig. 4C).

시기별 TSI (TP, Chl, SD)의 평균값은 3~6월 (44.4~49.8 범위)과 9월 (50.2~55.2 범위)에 중·상류수역에서 중-부영양 (meso-eutrophic)상태를 보여 봄~초여름 강우에 의한 투명도 감소와 장마, 태풍 이후의 급격한 조류

발생이 안동호의 영양상태 판정에 중요한 역할을 하는 것으로 조사되었다 (Figs. 2C, 2D). Heo *et al.* (2002)은 DAM의 평균 TSI가 1996년 57 (부영양상태)에서 1997~2000년에는 54~46의 범위로 다소 감소하였다고 보고하였으며, 본 연구에서는 연평균 및 하계 (6~8월)의 평균값이 각각 43.9 (41.1~46.7 범위), 39.6 (35.0~42.3 범위)을 보여 안동호의 TSI는 점차 낮아지고 있음이 입증되었다 (Table 2).

4. TSI_m에 의한 영양도 평가

TSI_m (TP), TSI_m (Chl) 및 TSI_m (SD)를 이용한 영양도 평가 (Aizaki *et al.*, 1981)에서 TSI_m (TP)는 빈영양 61회 (56.5%), 중영양 42회 (38.9%) 및 부영양 5회 (4.6%)였다 (n = 108). 각 지점별로 35.2~39.5의 범위로서 TSI (TP)와 마찬가지로 전체 수역이 빈영양상태였으며, DAM은 38.7, NOS는 35.2 (최소), DOM은 37.8, JUJ는 38.3이었고 최상류인 SEO는 39.5로 최대값을 보였다 (Table 2, Fig. 5A).

각 지점에 대한 TSI_m (TP)의 연평균값을 TSI (TP)와 비교한 결과, TSI_m (TP)가 2.3~3.0의 범위에서 증가하였다. TSI (TP)의 값이 가장 작은 NOS는 3.0 (32.2 → 35.2) 증가한 반면에 가장 큰 SEO는 2.3 (37.2 → 39.5) 증가하여 TSI가 작을수록 TSI_m은 크게 증가하는 경향을 보였다 (Table 2, Figs. 4A, 5A).

TSI_m (Chl)은 빈영양 27회 (27.3%), 중영양 43회 (43.4%) 및 부영양 29회 (29.3%)였다 (n = 99). 5개 지점의 연평균 TSI_m (Chl)은 41.7~50.6의 범위로서 DAM, NOS, DOM 및 SEO는 중영양상태였고, JUJ는 50.6으로 부영양상태로 볼 수 있었다 (Table 2, Fig. 5B).

본 연구에서는 TSI의 평가범위를 다소 넓게 적용하여 50 < TSI < 53의 범위도 중영양상태라 판정하였으나 Kratzer and Brezonik (1981)의 분류기준을 엄격히 적용하면 중영양상태로 판정한 JUJ와 SEO는 중부 (mesoeu)

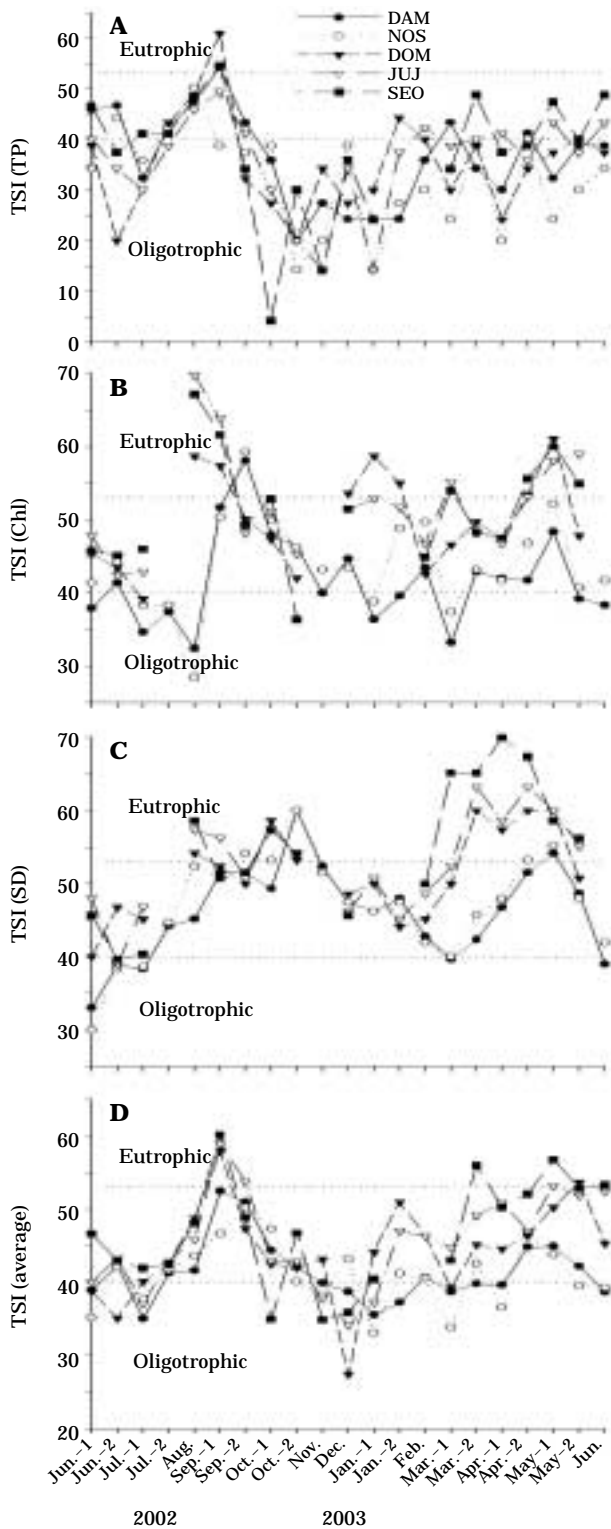


Fig. 4. Trophic state evaluations by TSI at each station in Lake Andong. A: TSI (TP), B: TSI (Chl *a*), C: TSI (SD) and D: TSI (average), respectively.

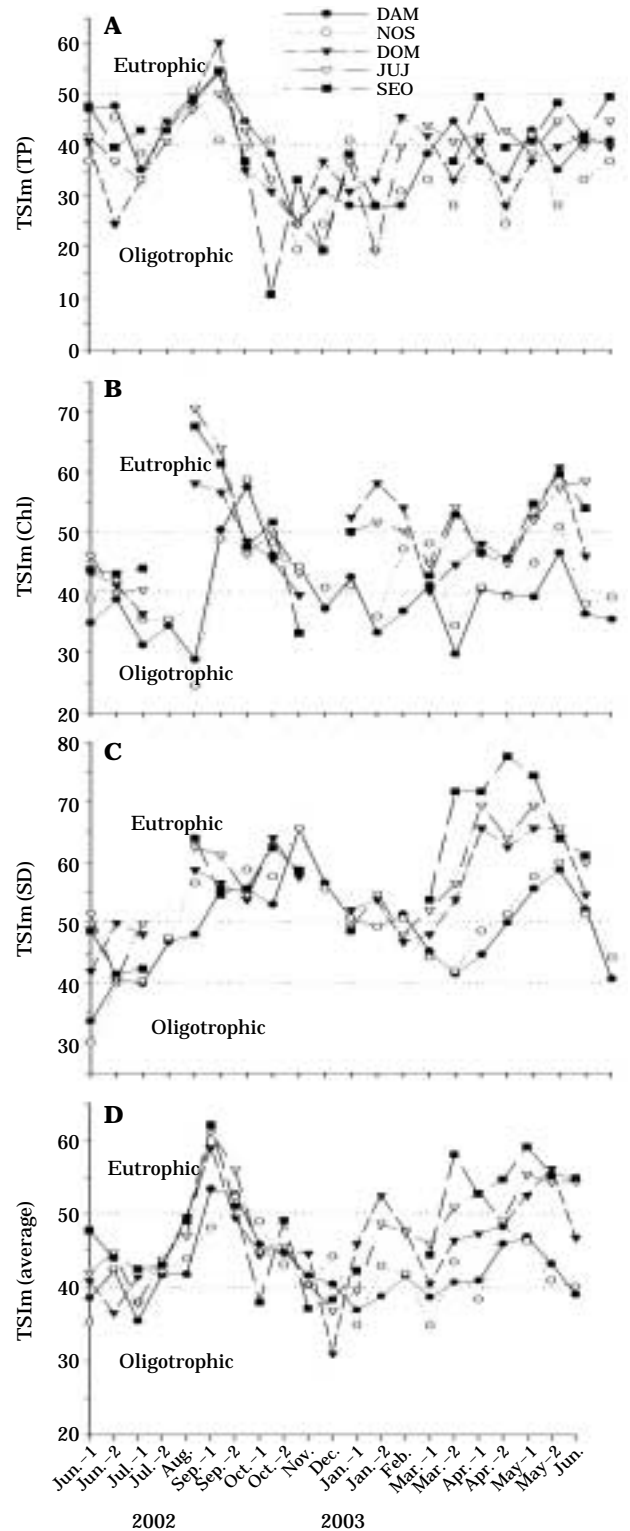


Fig. 5. Trophic state evaluations by TSIm at each station in Lake Andong. A: TSIm (TP), B: TSIm (Chl *a*), C: TSIm (SD) and D: TSIm (average), respectively.

영양상태에 해당되므로 TSI_m과는 큰 차이가 없었다. 조사지점별 연평균값은 DAM이 39.3(최소), NOS가 41.7, DOM이 48.4, JUJ가 50.6(최대), 최상류인 SEO가 49.9로서 TSI_m(TP)가 TSI(TP)보다 증가하는 것과는 반대로 TSI_m(Chl)은 TSI(Chl)보다 감소하는 경향을 보였다(Table 2, Figs. 4B, 5B).

TSI_m(Chl)은 TSI(Chl)에 비해 지점에 따라 1.3~2.4의 범위까지 감소하였으며 TSI_m(TP)와 마찬가지로 값이 작을수록 크게, 값이 클수록 작게 감소하는 경향을 보였다.

TSI_m(SD)는 빈영양 4회(4.0%), 중영양 28회(28.3%) 및 부영양 67회(67.7%)였으며(n=99), 5개 지점의 연평균 TSI_m(SD)는 49.3~59.4의 범위로서 DAM의 49.3(중영양)을 제외한 나머지 지점(NOS, DOM, JUJ, SEO)은 50 이상으로 부영양상태로 나타나 TSI(SD)와는 차이가 있었으며, TSI_m(TP)와 같이 TSI_m(SD)도 TSI(SD)보다 증가하였으며 3.1~4.6의 범위로 값이 클수록 증가폭도 컸다(Table 2, Figs. 4C, 5C).

TP, Chl-a 및 SD에 대한 개별 TSI_m도 TSI와 마찬가지로 각각 빈영양-중영양-부영양상태로 일관된 결과를 보이지 않았다. TSI_m(TP), TSI_m(Chl) 및 TSI_m(SD)의 평균값을 이용한 평가에서도 TSI와 같이 안동호는 중영양상태로 판정되었으며, TSI_m이 TSI에 비해 전반적으로 증가하는 경향은 TSI_m(TP), TSI_m(SD)와 같으나 증가폭은 1.0~1.9의 범위로서 TSI_m의 값이 클수록 증가폭도 컸다(Table 2, Figs. 4D, 5D).

5. LTSI에 의한 영양도 평가

LTSI(Lake Trophic Status Index, Yang and Dickman, 1993)는 빈영양 4회(4.0%), 중영양 70회(70.7%) 및 부영양 25회(25.3%)였으며(n=99), TSI의 평균 27.8%, 63.9%, 8.3%, TSI_m의 평균 17.6%, 63.0%, 19.4%와는 차이를 보였다(Fig. 6).

각 지점별 LTSI는 DAM이 3.47(중영양), NOS가 3.48(중영양), DOM이 4.87(중부영양), JUJ가 5.31(중부영양) 및 SEO가 5.50(부영양)으로서 TSI, TSI_m과 마찬가지로 수역별 영양상태가 유입부에서 하류로 진행할수록 평가값이 감소하는 경향은 같았으나(Table 2), TSI와 TSI_m의 평균값은 전 지점에서 중영양상태로 평가된 반면 LTSI는 하류로 진행할수록 부(eu-) → 중부(mesoeu-) → 중(meso-)영양상태로 평가되어 세부 수역의 수질상황을 잘 반영하였다(Figs. 6, 10). 이 등(2002)은 1998년 2~10월까지 댐축지점(DAM)의 평균 LTSI가 4.2(3.0~5.6 범

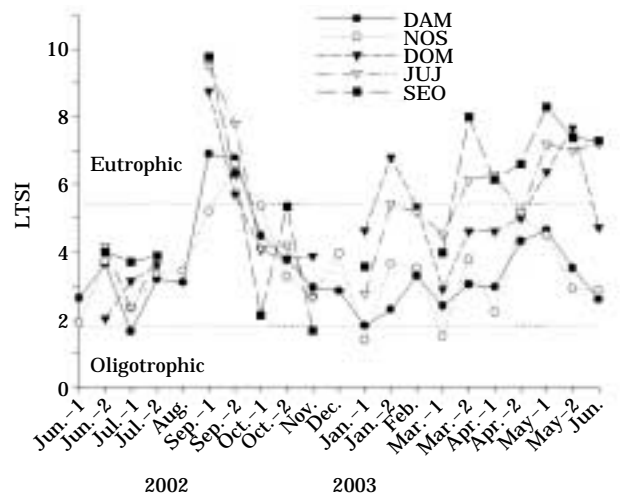


Fig. 6. Trophic state evaluations by LTSI at each station in Lake Andong.

위)로서 중영양상태(3.01~4.20)라고 평가하였으나, 본 연구에서는 연평균값이 3.47(1.65~6.90 범위)로 평가되어 TSI와 마찬가지로 안동호의 영양상태는 개선된 것으로 판단된다.

6. 호수 영양상태지수간 상관성 평가

TSI와 TSI_m의 상관성은 상류지점에서 높고 하류지점에서는 상대적으로 낮았으며 5개 지점의 평균은 r=0.9909를 보였다(Fig. 7).

상류부의 JUJ가 r=0.9951로 가장 높은 상관성을 보였고 최상류에 위치한 SEO가 0.9945, 중류부에 위치한 DOM이 0.9944, 하류부인 NOS가 0.9861, DAM이 0.9836으로 수질변동이 큰 호수 상류부에서 상관도가 높고 하류로 진행하면서 상대적으로 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 7).

TSI와 TSI_m의 3개 항목에 대한 개별평가는 각각 상이한 결과를 나타내므로 그 평균값으로 영양상태를 판정하였으며(Figs. 4D, 5D), 그 값이 지점에 따라 TSI_m이 TSI보다 1.0~1.9의 범위로 증가하고 TSI가 클수록 TSI_m의 증가폭이 커지는 결과를 보였지만, 두 방법은 r=0.9836~0.9951의 범위로서 거의 동일한 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 다만, TSI는 영양상태를 5개의 그룹으로 세분하지만 TSI_m은 3개로 구분하므로(Aizaki et al., 1981; Kratzer and Brezonik, 1981) 목적에 따라 두 방법을 보완적으로 사용함이 타당할 것으로 보인다.

LTSI를 TSI와 상관성을 평가한 결과에서도 TSI/TSI_m

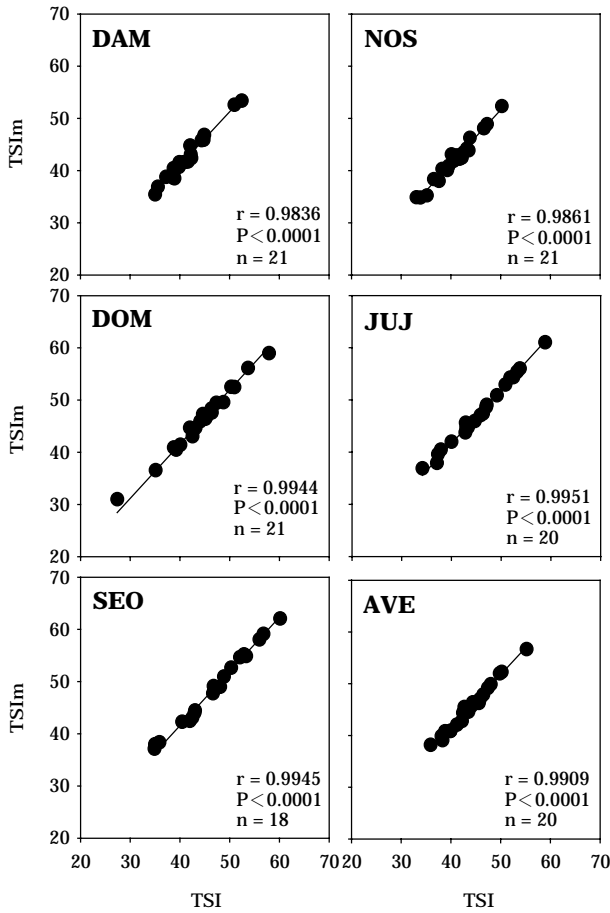


Fig. 7. Regression analyses of TSI, TSI_m at each station in Lake Andong.

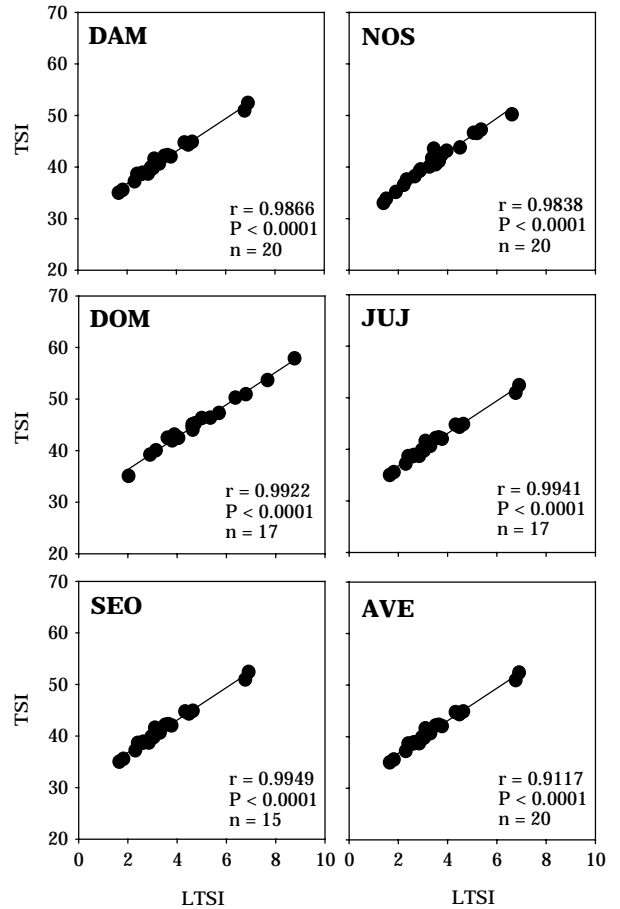


Fig. 8. Regression analyses of LTSI, TSI at each station in Lake Andong.

과 유사한 경향을 보였다. TSI/TSI_m은 JUJ에서 0.9951로 최고의 상관을 보였으나 TSI/LTSI는 최하류인 SEO에서 0.9949로 최고, NOS가 0.9838로 최저를 보여 하천 성향이 강한 상류부에서 높고 호수성향이 강한 하류부에서 낮았으며 전이대인 중류부에서 중간값을 보이는 결과는 동일하였다. 상류지점부터 최하류부인 DAM까지의 각 지점별 상관은 0.9949 (최대, SEO), 0.9941 (JUJ), 0.9922 (DOM), 0.9838 (최소, NOS) 및 0.9866 (DAM)으로 평균 0.9117의 상관을 보였다 (Fig. 8).

TSI_m과 LTSI와의 상관성 비교에서는 SEO가 0.9948로 최고를 보여 TSI/LTSI의 결과와 같았고 최저는 NOS가 0.9861로서 역시 같았으며 하천성향이 강한 상류부가 높고 호수성향이 강한 하류부에서 낮아 3가지 방법에 대한 상관성의 경향은 동일하였다. 5개 지점의 평균 상관은 $r = 0.9374$ 로 TSI/LTSI의 0.9117보다는 높고 TSI/TSI_m의 0.9909보다는 낮았으며 각 지점별 상관은 0.9948 (최대,

SEO), 0.9941 (JUJ), 0.9910 (DOM), 0.9861 (최소, NOS) 및 0.9889 (DAM)를 보였다 (Fig. 9).

안동호의 유입부로부터 댐까지의 종적인 구배는 상류부인 SEO와 JUJ는 강우시 하천을 통해 유입된 고탁수와 수체교란 및 오염부하의 직접적인 영향을 받아 여름철 조류발생이 빈번하고 수질변화가 큰 하천성향이 강한 수역 (riverine zone)이고 중류부에 위치한 DOM은 상류에서 유입된 고탁도가 침전되고 유속이 감소하는 전이대 (transition zone)이며 하류부에 위치한 NOS와 DAM은 조류 발생량이 적고 유속에 의한 수체교란이 없어 연중 안정된 수질상태를 유지하는 완전한 호수성향 (lacustrine zone)의 수역이다 (Gordon and Bekel, 1985).

투명도 (SD)를 기준으로 호수의 영양상태를 평가하는 TSI와 Chl-*a*를 기준으로 한 TSI_m은 SD, Chl-*a* 및 TP 농도에 대한 개별적인 평가 뿐만 아니라 3개 항목의 평균을 사용하여 호수의 영양상태를 연속적인 개념에서 중

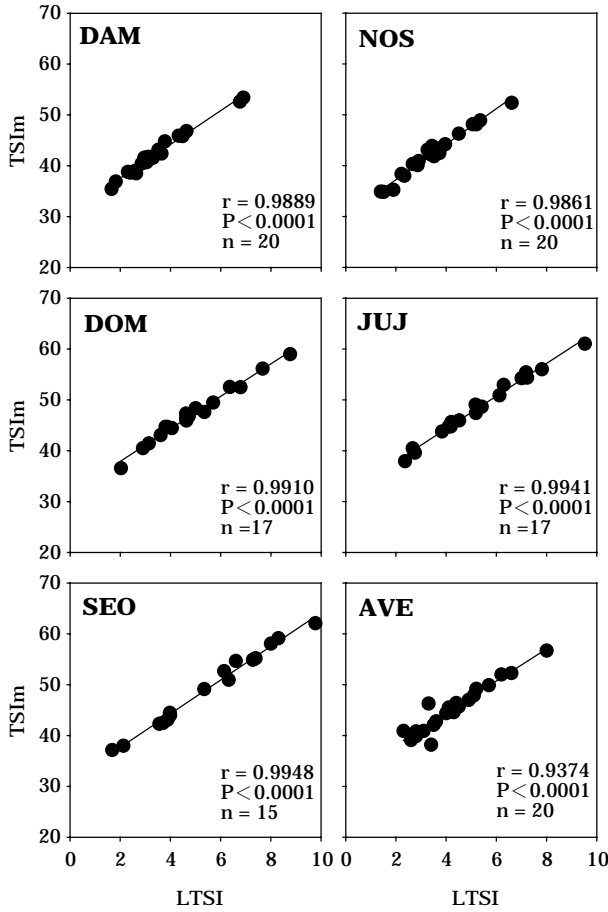


Fig. 9. Regression analyses of LTSI, TSIIm at each station in Lake Andong.

합 평가할 수 있다는 장점이 있다(Carlson, 1977; Aizaki et al., 1981).

그러나 TSI와 TSIIm에 의한 영양상태는 개별 항목에 대한 판정 결과가 상이하게 나타나므로 3개 항목에 대한 평균값을 적용해야 하는 번거로움이 있으며, 유입수에 의한 수체교란과 탁도의 영향이 크고 오염부하에 의한 조류발생이 빈번한 상류수역과 연중 안정적인 수질성향을 보이며 수심이 깊은 하류수역간의 차이가 뚜렷하지 않아 동일 호수 내에서 수역간의 비교 평가에는 미흡한 것으로 조사되었다(Fig. 10).

Multi-parameter index인 LTSI는 TSI, TSIIm에 비해 호수의 수역별 육수학적 특성을 잘 반영하였으며 3개 항목(TP, Chl-a, SD)을 동시에 사용하므로 평가방법이 간단하다. 또한 호수의 영양상태를 7개 그룹으로 세분하여 판정하므로(Aizaki et al., 1981) 타 방법에 비해 연구자의 주관적 평가를 감소시키고 해당 호수에 대한 상세한 정

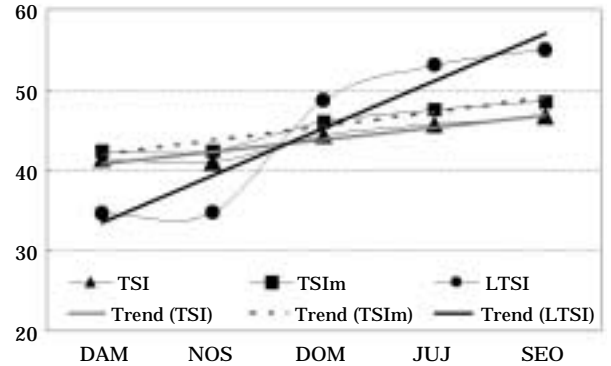


Fig. 10. Comparison among TSI, TSIIm and LTSI using an annual mean values at each station in Lake Andong (10×LTSI).

보를 취득할 수 있는 장점이 인정된다. 또한 TSI, TSIIm 과도 좋은 상관성이 입증되므로 호수의 영양상태 평가와 판정에는 LTSI가 효과적이며 결측된 항목이 있는 경우나 보조적인 수단으로써 TSI와 TSIIm을 병행하여 이용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

적 요

안동호를 5~10 km 구간으로 분할한 5개 지점에 대하여 2002년 6월부터 2003년 6월(13개월)까지 총 21회에 걸쳐 지점별 물리·화학적 수질특성과 TSI, TSIIm, LTSI로 수체의 영양상태 평가 및 평가방법간의 상관성을 비교 분석하였다. TSI와 TSIIm은 평가항목(TP, Chl-a, SD)에 따라 지점별로 빈영양-중영양-부영양상태로 다양한 결과를 보여 개별 항목으로 수역의 영양상태를 평가하는 것은 곤란하였으나 댐 저수지의 상류에서 하류로 진행하면서 영양도가 낮아지는 결과는 세 평가방법이 동일하였다. 평가방법 간의 상관성은 수심이 깊고 연중 안정된 수질상태를 보이는 하류보다 수심이 얕고 수질변동 폭이 큰 상류수역에서 상대적으로 높았으며, 영양지수의 평균값에 의한 상관은 r = 0.9117~0.9909 범위로 조사되어 상호 보완적인 적용은 가능한 것으로 나타났다. LTSI는 TSI와 TSIIm에 비해 댐 저수지의 구간별 수질특성을 잘 반영하였으며 영양상태 평가의 간편성과 주관적인 평가 오류의 최소화에 보다 효과적이라 사료된다.

감사의 글

본 연구의 현장조사와 수질분석에 도움을 주신 故 김

잡배님께 감사드리며 삼가 명복을 빕니다.

인 용 문 헌

- 김호섭, 황순진. 2004. 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석-엽록소 *a*와 수심을 중심으로. *한국육수학회지* **37**: 213-226.
- 박제철, 김동섭, 이승환. 2004. 금오지의 수환경 및 부영양화 평가. *한국물환경학회지* **13**: 389-401.
- 서정관, 유재경, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 운문호의 식물플랑크톤 군집동태와 영양단계 평가. *Algae*, **18**: 135-143.
- 신재기, 강창근, 황순진. 2003. 팔당호에서 수중 탁도의 일변동과 고탁수의 입자 분포. *한국육수학회지* **36**: 257-268.
- 이경락, 최재신, 김한순. 2003. 박실지와 정양지의 식물플랑크톤 군집의 계절 변동. *Algae*, **18**: 273-280.
- 이정호, 김용재. 1996. 낙동강 수계 댐호의 부착규조 및 영양단계 평가. *한국육수학회지* **14**: 18-28.
- 이정호, 박종근, 김은정. 2002. 국내 주요 호수의 식물플랑크톤 종조성 및 영양단계 평가. *Algae*, **17**: 275-281.
- 한국수자원공사. 2003. 안동다목적댐 관리연보. 302p.
- 환경부. 1994. 환경정책자료집 I. 343p.
- 환경부. 1998. 수질오염공정시험법. 동화기술. 134p.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해안 석호의 부영양화 평가. *한국육수학회지* **32**: 141-151.
- 허우명, 권상용, 김범철, 박주현. 2000. 안동호 수질의 장기적인 변동. *한국육수학회지* **33**: 260-266.
- An, K.-G. 2001. Seasonal patterns of reservoir thermal structure and water column mixis and their modifications by interflow current. *Korea J. Limnol.* **34**: 9-19.
- Aizaki, M., A. Otsuki, T. Fukushima, T. Kawai, M. Hosomi and K. Muraoka. 1981. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese and its relationships to other parameters related to trophic stage. *Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Stud.* **23**: 13-31 (in Japanese)
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. and Oceanogr.* **22**: 361-369.
- Forsberg, C. and S. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Archiv für Hydrobiologie* **89**: 189-207.
- Gordon, J.A. and R.M. Bekel II. 1985. Suspended sediment characteristics of Lake Cumberland, Kentucky. pp. 259-264. In Proc. N. Am. Lake Mgt. Soc. 1984.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwaters-Principles, problems and restoration. Chapman & Hall, London, 327p.
- Heo, W.-M., S.Y. Kwon and B.C. Kim. 2002. Long-term variations of trophic state and phosphorus loading in Lake Andong, Korea. *Koan J. Limnol.* **35**: 249-256.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc. 576p.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin* **17**: 713-717.
- U.S. EPA. 1976. Water Quality Criteria Research of the U.S. Environmental Protection Agency, Proceeding of an EPA Sponsors Symposium, EPA-600 (3-76-079): 185
- Vollenweider, R.A. 1968. Scientific Fundamental of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as factors in Eutrophication. OECD, Paris, Technical Report DAS/CSI/68.27. 159p.
- Vollenweider, R.A. and J. Kerekes. 1980. OECD Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters. Synthesis Report.
- Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatoms as indicators of lake trophic status in central Ontario, Canada. *Diatom Research* **8**: 179-193.

(Manuscript received 10 December 2004,
Revision accepted 25 February 2005)