

한국형 부영양화지수에 의한 영산강의 부영양화특성

Characteristics of the Eutrophication of Yeongsan River by using the Korea Trophic State Index(TSI_{KO})

박성천*, 오창열**, 김종오***, 이우범****, 박수호*****

Sung Chun Park, Chang Yeol Oh, Jong O Kim, Pil Jeong Gwak

요 지

우리나라는 2012년에 4대강 사업을 통하여 수자원확보를 통한 가뭄대응전략으로 16개의 대형보가 건설되었고 영산강에는 승촌보와 죽산보 2개의 보가 건설되었다. 보의 건설로 흐름은 급격히 감소하여 정체구역의 수역이 확장되면서 여름에서 초가을까지 녹조현상은 매년 지속적으로 발생하고 있으며, 최근 국민들은 안전한 농산물의 안정적인 생산에 요구가 집중함에 따라 농업용수질 오염문제가 범국가적 문제로 대두되고 있고, 그 중요도 및 심각성이 점차 커져가고 있다(한강유역환경청, 2007). 많은 량의 물을 농업용수로 사용하고 있는 영산강의 녹조현상 및 수질개선이 절실하다. 따라서 본 연구에서는 영산강의 승촌보와 죽산보의 건설과 수질오염총량관리제의 시행에 따른 부영양화특성의 변화를 파악하기 위하여 환경부, 국립환경과학원(2006)에서 개발한 한국형 부영양화지수(TSI_{KO}) 평가법을 이용하여 영산강유역의 12개 주요지점에 대하여 수집한 자료를 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 분리하고, 다시 4대강 사업의 영향을 검토하기 위하여 2013년을 전후하여 분리하였으며, 계절별 수질인자 COD, T-P, Chl-a 값을 이용하여 계절별 TSI_{KO}를 산정하여 영양상태를 4개의 등급으로 구분하여 부영양화특성을 파악하였다.

핵심용어 : 한국형 부영양화지수, 영산강, 부영양화현상, 수질개선

1. 서 론

우리나라는 전 세계적으로 기후변화가 진행되는 가운데 4계절의 온대기후에서 2계절의 아열대기후로 바뀌고 있는 추세에 있다. 기후변화로 인하여 가뭄과 홍수, 폭염, 폭우 등의 극심한 기상현상이 증가될 것으로 전망되는 가운데 수자원, 식수오염 등의 사회적 갈등이 증가될 것으로 예상되며, 홍수 증가나 가뭄 빈발, 식수 부족, 수질 악화, 생태계 악화 등의 물에 의한 피해는 국가발전의 걸림돌이 될 수도 있을 뿐만 아니라 우리 삶의 질을 위협한다는 점에서 더욱 주목할 만하다.

우리나라는 기후변화에 대응하기 위하여 2010년~2012년에 4대강 사업을 통하여 수자원 확보 및 가뭄대응전략으로 16개의 대형 보를 건설하였으나 폐쇄성 수역의 확장으로 물의 체류시간이 길어지고 정체수역의 범위가 확대되면서 녹조현상을 유발시키고 있으며, 부영양화된 정체수역에서

* 정회원 · (주)상원 부설연구소 소장 · E-mail : psc3135@gmail.com
** 정회원 · 영산강홍수통제소 시설연구소 · E-mail : new2020@korea.kr
*** 목포대학교 사범대학 환경교육학과 교수 · E-mail : jongokim@mokpo.ac.kr
**** 전남대학교 환경시스템공학과 교수 · E-mail : woolee@jnu.ac.kr
***** 전남대학교 환경시스템공학과 공학박사 · E-mail : pshwork@naver.com

과잉조류의 번식을 가져와 매년 녹조현상으로 급격한 수질악화와 수처리의 문제점을 대두시키고 있다.

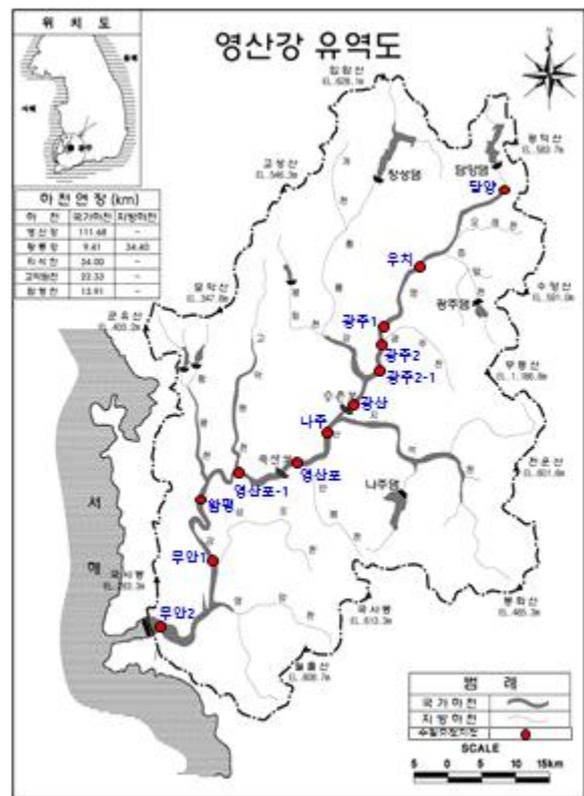
폐쇄성 수역에서의 부영양화 현상은 부영양화 물질이 축적됨으로서 발생하는 자연현상의 하나이나 수온이 높게 유지되는 여름과 초가을에 부영양화현상은 비번하게 발생되어 물의 이용에 영향을 미치는 경우가 많다. 일반적으로 질소 0.2ppm 이상, 인 0.015ppm 이상이 부영양화의 기준으로 적용되고 있다. 또한 조류에 반드시 함유되어 있는 Chl-a를 측정하여 10ppb($\mu\text{g}/\ell$) 이상이면 부영양화가 일어나고 있다고 판정한다.

본 연구에서는 4대강사업과 수질오염총량관리제의 시행에 의한 영산강의 부영양화특성의 변화를 파악하기 위하여 환경부, 국립환경과학원(2006)에서 개발한 한국형 부영양화지수(TSI_{Ko}) 평가법을 이용하여 영산강유역의 12개 주요지점을 선정하고, 계절적 영향에 따른 하천 지점별 부영양화 지수를 산정하기 위하여 수집한 자료를 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 분리하고, 다시 4대강 사업과 수질오염총량관리제의 영향을 검토하기 위하여 2013년을 전후하여 분리하였으며, 계절별 수질인자 COD, T-P, Chl-a 값을 이용하여 월별 TSI_{Ko}를 산정하여 영양상태를 4개의 등급으로 구분하여 부영양화특성을 파악하여 제시하였다.

2. 대상지점 및 연구방법

2.1 대상지점 및 자료

본 연구의 대상지점은 영산강수계로 우리나라 4대강의 하나이며. 그림 1과 환경부 수질측정망 조사지점 중 영산강 본류의 12개 지점을 대상지점으로 선정하였다. 한국형 부영양화 지수(TSI_{Ko})를 이용하여 부영양화특성을 파악하기 위하여 지점별로 수집한 COD, Chl-a, T-P 등의 수질자료는 환경부 수질측정망자료(물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr>) 2006년부터 2016년 자료로 평균 11개년의 월 자료를 확보하였다. 수집한 자료는 4대강 사업과 수질오염총량관리제의 영향을 검토하기 위하여 2013년을 전후하여 이전의 7개년(2006년~2012년) 자료와 이후의 4개년(2013년~2016년) 자료로 분리하였으며, 계절적 영향에 따른 하천 지점별 부영양화 지수를 산정하기 위하여 수집한 자료를 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 분리하여 수집하였다.



<그림 1> 본 연구의 영산강 수질측정지점 위치

2.3 부영양화 지수(TSI)와 한국형 부영양화 지수(TSI_{Ko})

호소의 부영양화를 평가하기 위한 노력은 전 세계적으로 많은 연구자들에 의해 추진되어 왔으

며, 많은 나라에서 호소의 부영양화 평가에 Carlson(1977)지수, Forsberg and Ryding(1980) 및 OECD(1982)등이 제안한 방법들을 활용하고 있다.

호소의 부영양화 여부를 판정하는 방법은 국가와 지역에 따라, 학자에 따라 기준이 달라서 불일치하는 경우가 많이 발생하는 문제점이 있어서 객관적 판단이 불가능하였다. 이를 해소하기 위하여 부영양화를 정량적으로 평가하는 지수(TSI; Trophic State Index)가 미국에서 Carlson(1977)에 의해 처음 제안 되었다. 미국에서 제안된 TSI지수는 지표항목으로서 투명도를 기준으로 만들어 졌다. 특히 Carlson(1977)의 호수 영양상태 지수 (TSI)는 호소 부영양화도를 평가하는데 가장 널리 이용되고 있는 지수로서 투명도(SD), 표층 총인(TP) 및 표층 Chl.a농도를 중심으로 0부터 100까지 범위에서 부영양화 정도를 평가한다.

그러나 자연성이 다양한 외국의 자연호를 대상으로 개발한 TSI는 국내의 인공호에 적용성이 떨어지므로 국내의 호소자료를 분석하여 환경부와 국립환경과학원(2006)은 한국형 부영양화지수(TSI_{KO})를 개발하였다.

이 방법은 평가 지표항목으로 COD, Chl-a, T-P 등의 각 항목의 확률분포함수를 비교하여 적용하는 방법으로 호소의 부영양화를 우리나라의 호소수질현황에 따라 상대평가 기법에 의해 평가하는 의미를 가지며 또한 비모수적 기법의 의미도 내포하고 있다. 호소의 절대평가를 위해서는 이후 지수를 영양단계로 나누는 기준을 정한다. 이러한 방법으로 도출된 COD, T-P, Chl-a의 부영양화지수는 다음 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$TSI_{KO}(COD) = 5.8 + 64.4 \log(COD \text{ mg/L}) \dots\dots\dots (1)$$

$$TSI_{KO}(T-P) = 114.6 + 43.3 \log(T-P \text{ mg/L}) \dots\dots\dots (2)$$

$$TSI_{KO}(Chl-a) = 12.2 + 38.6 \log(Chl-a \text{ mg/m}^3) \dots\dots\dots (3)$$

상기한 3가지 TSI_{KO}식을 종합할 때에는 외부기원 유기물의 지표인 COD에 50%의 가중치를 주고, 내부생성 유기물에 50%의 가중치를 주어 종합 TSI_{KO}를 계산한다. 내부생성유기물의 지표는 조류의 밀도지표인 Chl-a이며 T-P는 조류의 밀도를 좌우하는 지표이므로 이 두 가지에 각각 25%의 가중치를 주어 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$\text{종합 } TSI_{KO} = 0.5 TSI_{KO}(COD) + 0.25 TSI_{KO}(Chl-a) + 0.25 TSI_{KO}(T-P) \dots\dots\dots (4)$$

또한, 위 식 (3-4)의 결과를 바탕으로 4단계의 부영양화를 구분하여, 호소의 영양 상태를 판정하면, <표 3-24>와 같이 호소의 영양 상태를 평가할 수 있음.

<표 1> 한국형 부영양화지수(TSI_{KO})의 구분

부영양화도 구분	TSI _{KO}
과영양 (Hypertrophic)	TSI _{KO} > 70
부영양 (Mesotrophic)	50 < TSI _{KO} ≤ 70
중영양 (Eutrophic)	30 < TSI _{KO} ≤ 50
빈영양 (Oligotrophic)	TSI _{KO} ≤ 30

3. 결과 및 고찰

월별 수질자료를 식(1), (2), (3) 그리고, (4)에 각각 적용하여 월별 TSI_{KO}를 계산하여 다시 월별 종합 TSI_{KO}를 계절별로 평균값을 산정하여 계절별 한국형 부영양화 지수를 산정하고 <표 1>의 기준에 따라 영양상태를 4개의 구분으로 <표 2>에서와 같이 나타내었다.

<표 2>에서와 같이 담양지점의 2013년 이전의 종합 TSI_{KO}는 가을 45.868에서 봄 51.284의 분포를 보이며, 중영양에서 부영양 상태를 나타내고 있으나 2013년 이후의 종합 TSI_{KO}는 가을 47.980

<표 2> 영산강유역 주요지점별 TSI_{K0}의 분석결과

지점	계절	(a) 평균 TSI _{K0}				(b) 영양상태 분포도				(c) 계절특성
		이전	영양상태	이후	영양상태	이전	영양상태	이후	영양상태	
담양	봄	51.284	부영양	54.586	부영양	Damyang From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 2.33% Eutrophic, 46.51% Mesotrophic, 49.16% Hypertrophic		Damyang From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 47.92% Mesotrophic, 52.08% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	48.788	중영양	49.789	중영양					
	가을	45.868	중영양	47.980	중영양					
	겨울	49.769	중영양	49.902	중영양					
우치	봄	63.819	부영양	65.753	부영양	Wochi From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 9.30% Eutrophic, 25.58% Mesotrophic, 65.12% Hypertrophic		Wochi From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 4.17% Eutrophic, 14.58% Mesotrophic, 81.25% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	59.972	부영양	62.729	부영양					
	가을	53.235	부영양	56.718	부영양					
	겨울	52.943	부영양	51.516	부영양					
광주1	봄	64.391	부영양	71.125	과영양	Gwangju1 From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 13.95% Eutrophic, 13.95% Mesotrophic, 72.09% Hypertrophic		Gwangju1 From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 72.92% Mesotrophic, 27.08% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	60.655	부영양	66.808	부영양					
	가을	56.284	부영양	62.728	부영양					
	겨울	57.705	부영양	59.011	부영양					
광주2	봄	72.328	과영양	70.464	과영양	Gwangju2 From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 2.33% Eutrophic, 65.12% Mesotrophic, 32.56% Hypertrophic		Gwangju2 From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 2.08% Eutrophic, 66.67% Mesotrophic, 31.25% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	64.913	부영양	69.812	부영양					
	가을	62.911	부영양	62.587	부영양					
	겨울	65.962	부영양	61.938	부영양					
광주2-1	봄	75.312	과영양	74.077	과영양	Gwangju2-1 From 2007 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 1.37% Eutrophic, 52.05% Mesotrophic, 46.58% Hypertrophic		Gwangju2-1 From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 2.08% Eutrophic, 33.33% Mesotrophic, 64.58% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	69.522	부영양	74.932	과영양					
	가을	63.940	부영양	70.336	과영양					
	겨울	68.662	부영양	64.162	부영양					
광산	봄	77.708	과영양	74.212	과영양	Gwangsan From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 4.71% Eutrophic, 37.65% Mesotrophic, 57.65% Hypertrophic		Gwangsan From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 47.92% Mesotrophic, 52.08% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	68.846	부영양	71.853	과영양					
	가을	65.223	부영양	68.020	부영양					
	겨울	71.196	과영양	66.064	부영양					
나주	봄	71.926	과영양	71.090	과영양	Naju From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 2.33% Eutrophic, 63.95% Mesotrophic, 33.72% Hypertrophic		Naju From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 52.08% Mesotrophic, 47.92% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	65.656	부영양	73.012	과영양					
	가을	63.414	부영양	68.834	부영양					
	겨울	67.284	부영양	67.530	부영양					
영산포	봄	68.873	부영양	68.901	부영양	Yeongsanpo From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 6.98% Eutrophic, 66.28% Mesotrophic, 26.74% Hypertrophic		Yeongsanpo From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 58.33% Mesotrophic, 41.67% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	66.243	부영양	74.913	과영양					
	가을	61.239	부영양	67.352	부영양					
	겨울	65.788	부영양	68.795	부영양					
영산포-1	봄	77.786	과영양	67.574	부영양	Yeongsanpo-1 From 2007 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 1.39% Eutrophic, 37.50% Mesotrophic, 61.11% Hypertrophic		Yeongsanpo-1 From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 66.67% Mesotrophic, 33.33% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	72.410	과영양	70.284	과영양					
	가을	67.059	부영양	64.982	부영양					
	겨울	74.431	과영양	69.709	부영양					
함평	봄	70.047	과영양	66.728	부영양	Hampyeong From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 3.49% Eutrophic, 55.81% Mesotrophic, 40.70% Hypertrophic		Hampyeong From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 70.83% Mesotrophic, 29.17% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	66.980	부영양	69.810	부영양					
	가을	63.867	부영양	64.062	부영양					
	겨울	72.862	과영양	68.477	부영양					
무안1	봄	62.557	부영양	63.692	부영양	Muan1 From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 6.98% Eutrophic, 79.07% Mesotrophic, 13.95% Hypertrophic		Muan1 From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 0.00% Eutrophic, 81.25% Mesotrophic, 18.75% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	62.132	부영양	69.944	부영양					
	가을	58.563	부영양	64.585	부영양					
	겨울	66.323	부영양	67.178	부영양					
무안2	봄	57.715	부영양	51.024	부영양	Muan2 From 2006 To 2012: 0.00% Oligotrophic, 8.14% Eutrophic, 90.70% Mesotrophic, 1.16% Hypertrophic		Muan2 From 2013 To 2016: 0.00% Oligotrophic, 4.17% Eutrophic, 72.92% Mesotrophic, 22.92% Hypertrophic		TSIKO From 2006 To 2012 From 2013 To 2016 Spring Summer Autumn Winter Seasons
	여름	61.943	부영양	59.516	부영양					
	가을	55.878	부영양	55.440	부영양					
	겨울	54.176	부영양	55.614	부영양					

에서 봄 54.584의 분포를 보이며, 중영양에서 부영양 상태를 나타내고 있다, 이로서 영산강의 상류는 2013년 이전보다 다소 수질이 악화되고 있으며, 영산강의 중상류부인 우치와 광주1 지점의 2013년 이전은 4계절 모두 부영양상태를 나타내고 있으나, 2013년 이후의 광주1 지점의 봄계절에 과영양상태로 악화되었다. 영산강의 중류부인 광주2, 광주2-1, 광산, 나주 영산포, 영산포-1, 합평지점은 계절별로 종합 TSI_{KO}가 61.239에서 77.786까지 분포하며 부영양상태에서 과영양상태를 나타내고 영산강의 최하류 구간인 무안1과 무안2는 계절별로 종합 TSI_{KO}가 54.178에서 66.323의 범위를 나타내며 부영양상태를 나타내고 있다.

<표 2>의 (b)의 영양상태 분포도에서와 같이 이전의 영양상태 분포가 이후에 다소 악화 되는 상태를 확인할 수 있으며, 이는 승촌보와 죽산보의 건설에 따른 유속의 감소로 체류시간이 크게 증가함에 따라 영양염류가 많이 증가하였기 때문으로 분석되며, <표 2>의 (c)의 계절특성을 살펴보면 이후의 여름과 가을의 종합 TSI_{KO}가 이전보다 크게 나타나는 것은 호수에서는 홍수기 농경지에서 대량 배출되는 인이 주원인으로 주로 여름철에 발생하나 하천에서는 하수가 주원인으로 갈수기에 문제가 될 수 있다는 일반론을 고려할 때 영산강의 하천은 호수의 특성으로 변화하였음을 확인하여 준다. 그리고 겨울철에 종합 TSI_{KO}가 이전보다 이후에 감소한 이유는 2012년부터 가동한 광주광역시외의 총인시설에 의해 인을 삭감함에 따라 수질이 다소 개선되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 4대강 사업에 의한 영산강의 승촌보와 죽산보의 건설과 수질오염총량관리제의 시행에 따른 광주광역시외의 총인시설에 따라 영산강의 부영양화특성의 변화를 파악하기 위하여 환경부, 국립환경과학원(2006)에서 개발한 한국형 부영양화지수(TSI_{KO}) 평가법을 이용하여 영산강유역의 12개 주요지점에 대하여 부영양화특성을 파악하였다. 2013년 전후를 분석한 결과, 영양상태의 분포는 7개 지점에서 영양상태가 증가되었으며, 3개 지점은 유사하고 2개 지점은 감소하여 전반적으로 영양상태는 증가된 것으로 분석되었다. 또한 이후의 여름과 가을의 종합 TSI_{KO}가 이전보다 크게 나타나고 있어 영산강은 하천에서 호수의 특성으로 변화하고 있으며, 겨울철에 종합 TSI_{KO}가 이전보다 이후에 감소한 이유는 2012년부터 가동한 광주광역시외의 총인시설에 의해 인을 삭감함에 따라 수질이 다소 개선되고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구과제는 환경부지정 전남녹색환경지원센터의 연구비지원에 의해 수행한 연구과제입니다.

참고 문헌

1. 국립환경과학원(2014), 수계오염총량관리기술지침
2. 광주발전연구원 (2014), 아름다운 물의 도시 광주 조성방안 연구.
3. 환경부, 국립환경과학원(2006) 물환경종합평가방법 개발 조사연구 최종보고서(부양화조사 및 평가체계 연구)
4. 김응석 심규범 김상단 최현일(2012), 한국형 부양화지수를 이용한 저수지 수질평가, 한국물환경학회지 제28권 제1호, 28 1 , 2012.
5. 이윤경(2014), 한국 호수의 수질 지표 개발 연구.
6. 환경부 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/main/mainContent.do>).