

대청호 내 실시간 수질측정자료를 이용한 CCME WQI의 적용

임병진 · 홍지영 · 연인성[†]

국립환경과학원

Application of Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) in Daecheong Reservoir using Automatic Water Quality Monitoring Data

Byungjin Lim · Jiyoung Hong · Insung Yeon[†]

National Institute of Environmental Research

(Received 11 May 2010, Revised 23 June 2010, Accepted 28 June 2010)

Abstract

Water quality index (WQI) can be a great tool that allows experts to translate large amount of complex water quality data into a format more easily understood by the public and policy makers. Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) can be calculated with the three factors (Scope: F_1 , Frequency: F_2 , Amplitude: F_3). After all, the WQI for a specific site is produced as a number between 0 to 100; the scale is also divided into five categories, i.e., Excellent, Good, Fair, Marginal and Poor. The WQI was found to be highly related to Chl-a, pH, temperature among the collected items. When the more input parameters were used, the range of variation generally became smaller. F_3 among the factors of WQI was influenced by algae. It showed a similar variation tendency between WQI and algal bloom in 2008.

keywords : Chl-a, Daecheong reservoir, Monitoring, Water quality index

1. 서론

과거 수질오염 사고를 계기로 전국 주요 상수원 및 오염 사고 취약지역 등의 수질 상태를 연속적으로 자동측정하고, 상시 감시할 필요성이 대두되었다. 이에 따라 수질관리 업무를 효율적이고 능동적으로 수행하고, 수질 오염사고 발생 시 신속한 대응조치를 할 수 있는 조기경보체계 구축을 위하여 수질자동측정망을 설치·운영하고 있다.

그러나 수질 측정자료에 대한 일반적인 수질평가 보고서는 항목간 수체간의 복잡한 통계학적 요약으로 구성되어 있어, 수질 전문가에게 가치 있는 정보의 유형이 되지만 비전문가에게는 활용도가 낮고 접근이 어려울 수밖에 없다. 수질평가지수(Water Quality Index, WQI)는 일반국민 및 정책결정권자가 이해하기 쉽도록 수질의 상태를 나타내기 위해서 방대한 수질자료를 간단한 등급(점수)으로 간소화할 수 있는 도구로 활용될 수 있다(Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001a).

캐나다 정부는 환경상태에 대한 대중적이고 신뢰성 있는 정보를 국민에게 제공하기 위하여 수질 및 대기, 온실가스에 대한 국가지표표를 정해 Canadian Environmental Sustainability Indicators (CESI) 보고서에 나타낸 바 있다. 그 중

수질지표는 하천과 호수의 수질 기준을 초과한 정도에 대해 점수화하는 수질평가지수(Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index, CCME WQI)를 사용하고 있다(Environment Canada, 2005, 2006, 2007, 2008). 국내에서는 이인선 등(1988), 최지용과 신은성(1997), 정세웅과 박재호(2005), 이호범 등(2005), 국립환경과학원(2009b), 임병진 등(2010)이 수질평가지수를 산정한바 있다.

CCME WQI는 측정소 여건에 따라서 지수산정식의 항목 및 기준 결정이 가능하며 계산이 쉽다. 또한 각 지역 및 하천의 이용 목적에 따라서 항목들이 결정되며, 선정된 개별 항목들에 대해 측정된 값들이 수질기준에 도달한 횟수와 도달 정도로 WQI값을 결정하게 된다(국립환경과학원, 2008b, 2009a). 현재 국내의 하천과 호수에서 운영되는 자동측정망도 설치 목적에 따라 측정 항목이 상이하기 때문에 측정 가능한 항목을 이용한 CCME WQI는 효과적으로 활용될 수 있다.

대청호는 댐 완공 이후 김동근 등(1984)에 의해 부영양화 현상이 최초로 보고된 이래, 거의 매년 비슷한 시기에 부영양화 현상이 나타나고 있다. 또한 저수를 시작한 후, 총질소 및 총인의 농도가 계속적으로 증가하는 추세에 있다고 보고되었다(김명운 등, 1995). 전 세계적으로 부영양화에 대한 현장 평가 및 평가기법에 대한 연구는 1960년대 이후 다각도로 진행되어 왔다(이순철 등, 2008). 본 연구에서는 여름철에 남조류가 대발생하는 호수에 대한 CCME

[†] To whom correspondence should be addressed. isyeon@korea.kr

WQI의 활용성을 살펴보고자 대청호 유역을 선정하고, 유역 내의 측정소에서 선정된 WQI와 수질항목간의 상관관계를 분석하여 CCME WQI의 산정 결과가 조류발생과 어떤 관계를 갖는지 검토하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 자료

CCME WQI를 통해 부영양한 호수의 수질을 평가하기 위해서 선정된 대청호 수질자동측정소의 위치는 Fig. 1과 같으며, 일반항목(수온, pH, DO, EC), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 총인(TP), 엽록소-a(Chl-a), 물벼룩에 의한 생물독성지수가 실시간으로 측정되고 있다.

수질자동측정망의 시료가 하천에서는 수면하 10 cm 이상의 지점에서, 호소에서는 1 m 이상에서 채수되고 있다. 저수지의 수질 상태를 종합적으로 분석하기 위해서는 수심별로 분석할 필요가 있으나, 수표면에 주로 발생하는 조류에 관한 분석에 있어서는 수질자동측정망의 활용성이 매우 높다 할 수 있다.

연구에 사용된 자료는 5분단위로 측정된 자료 중 담당 전문가들에 의해서 수집상황별 상태코드 및 측정기기의 물리적 측정범위가 고려되어진 후, 비정상 자료의 선별이 이루어졌다. 5분 단위의 정상 자료들을 통해 시간 대표값이 추출되었으며, 기기의 점검 등으로 인해 일부 손실된 구간은 선형보간으로 완성되었다.

현장에서 취득 가능한 수질항목을 이용하여 WQI를 산정할 때, 각 항목의 자료가 수질평가지수에 어떠한 영향을 미치는지 분석할 필요가 있다. 효과적인 상시 수질평가를 위해서는 궁극적으로 WQI의 산정에 적절한 항목을 선택해야 할 것이다. 또한 적용되는 수질항목 수에 따른 영향도 동시에 고려되어야 한다.

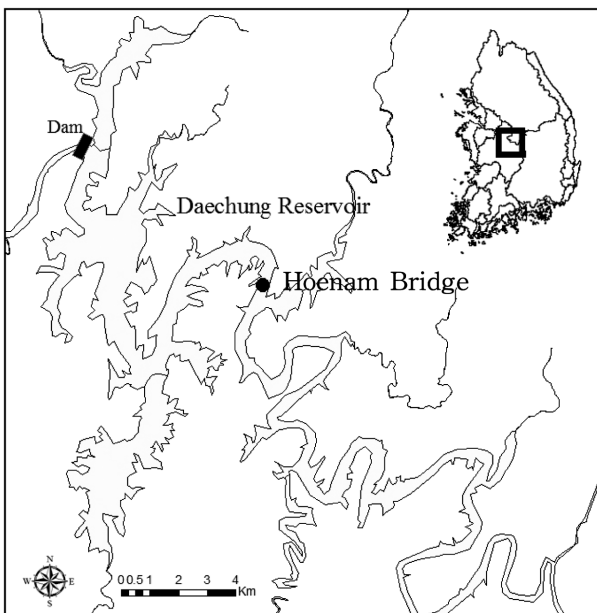


Fig. 1. Map of the study site in the Daechung reservoir.

이번 연구에서는 CCME 방식의 WQI를 산정하기 위해 수질항목의 개수를 5, 7, 9, 10개로 변화시켜가며 항목수에 따른 영향을 분석하였다. 수질항목의 적용은 일반항목(수온, pH, DO, EC)과 TOC를 포함한 5개부터 TN과 TP를 추가하여 7개, 생물독성지수(좌, 우)를 추가하여 9개, 마지막으로 Chl-a를 추가하여 10개까지 증가시켰다. 항목수 증가에 따른 영향뿐만 아니라, 추가되는 항목이 WQI에 미치는 영향도 비교·분석하고자 하였다.

2.2. 이론 및 분석방법

CCME WQI는 수질기준의 초과 항목수, 초과 측정치 개수, 초과하는 정도를 고려한 식 (1)~(6)을 이용하여 산출된다(CCME, 2001a; Lumb et al., 2006).

$$CCME\ WQI = 100 - \frac{\sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2)}}{1.732} \quad (1)$$

각 인자(F_1, F_2, F_3)는 0에서 100사이의 범위에 있으며, 다음으로부터 얻어질 수 있다.

F_1 (Scope)은 측정된 수질 항목 전체에서 수질 기준값을 만족하지 않는 항목의 비율을 나타낸다.

$$F_1 = \frac{\text{수질 기준값을 만족하지 않는 항목의 개수}}{\text{측정항목의 총 개수}} \times 100 \quad (2)$$

F_2 (Frequency)는 항목의 측정값이 수질 기준값을 만족하지 않는 발생 빈도수의 비율을 나타낸다.

$$F_2 = \frac{\text{수질 기준값을 만족하지 않는 측정횟수}}{\text{측정값의 총 개수}} \times 100 \quad (3)$$

F_3 (Amplitude)은 수질 항목이 측정값을 만족하지 않는 정도를 나타내며 3단계를 거쳐 계산되어진다.

$$F_3 = \frac{nse}{(0.01 \times nse) + 0.01} \quad (4)$$

nse (normalized sum of excursions)는 개별 수질 변수들이 초과한 값들을 모두 합한 후, 측정값의 총 개수로 나누어 산정한다.

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursion_i}{\text{측정값의 총 개수}} \quad (5)$$

$excursion$ 은 개별 수질 변수들이 수질 기준값을 초과(혹은 미달)하는 크기로 부터 계산되어지는 서브지수로 다음과 같다.

$$excursion_i = \frac{\text{개별 변수의 초과값}_i}{\text{개별 변수의 수질기준}_i} - 1 \text{ 혹은}$$

Table 1. General description of CCME WQI

Category	CCME WQI value	Description
Excellent	95-100	Water quality is protected with a virtual absence of threat or impairment; conditions very close to natural or pristine levels.
Good	80-94	Water quality is protected with only a minor degree of threat or impairment; conditions rarely depart from natural or desirable levels.
Fair	65-79	Water quality is usually protected but occasionally threatened or impaired; conditions sometimes depart from natural or desirable levels.
Marginal	45-64	Water quality is frequently threatened or impaired; conditions often depart from natural or desirable levels.
Poor	0-44	Water quality is almost always threatened or impaired; conditions usually depart from natural or desirable levels.

* Canadian council of ministers of the environment (2001b).

$$excursion_i = \frac{\text{개별 변수의 수질기준}_i}{\text{개별 변수의 미달값}_i} - 1 \quad (6)$$

CCME WQI는 수질상태를 아주 좋음 (95-100), 좋음 (80-94), 보통 (65-79), 약간 나쁨 (45-64), 나쁨 (0-44)의 범위로 분류한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. CCME WQI와 각 수질 항목과의 관계 분석

2008년 대청호 수질자동측정소의 실시간 5분측정 자료 중 유효자료를 대상으로 시간별 수질평가지수를 산정하였으며, 1년간 수질평가지수의 변화 추이를 분석하였다. 분석에는 수온, pH, DO, EC, TOC, TN, TP, 생물독성지수(좌, 우), Chl-a 등 호수 수질변화와 직간접적으로 연관된 총 10개 수질항목을 이용하였다.

CCME WQI의 산정에는 최소한 4회 이상 측정된 4개 항목이 필요하며, 항목이나 시료의 최대 개수에 대해서는 정의되지 않았다. 유의성 있는 결과를 산출하기 위해서는 각각의 지역 특성을 반영한 적절한 수질 항목의 선정이 필수적이며, 적정 기준값에 도달하지 않은 항목은 지역에 따라 다를 것이다. 특정지역의 수질을 표현하기 위해서 어떤 항

목을 얼마나 많이 지수산정식에 포함시킬 것인지는 사용자의 주관적인 판단에 의존하게 된다(CCME, 2001b). 최근의 민감도 분석에 따르면 안정적인 WQI 값을 산출하기 위해서 10개의 항목을 사용하는 것이 적당하다고 보고되었다(Painter and Waltho, 2005). 대청호에서 자동측정 되고 있는 10개의 수질 항목별 매시간당 5분자료 12개를 이용하여 (총 120개) 시간별 WQI를 산정하였다. 산정된 WQI와 각 수질항목간의 상관관계를 분석하고, 월별 상관계수를 Table 2에 나타내었다.

CCME WQI와 10개의 수질 측정 항목간의 상관성을 비교해 본 결과, 월별로는 7월부터 9월까지 상관성이 높게 나타난 반면에 나머지 월에는 일부 항목을 제외하고 대체로 낮은 상관성을 보였다. 1, 2월에는 물벼룩 독성지수(TOX-L)가 비교적 큰 상관성을 보였으며, 7월에는 TN과 TP가 각각 0.42, -0.46, 수온 -0.61, pH -0.63, DO -0.66, TOC -0.76, Chl-a -0.77로 상관성이 매우 컸다. 호우와 높은 수온의 영향으로 여름철에 CCME WQI와 수질항목간의 상관계수는 Chl-a가 최고 -0.85, 수온이 최고 -0.83, TOC가 최고 -0.76, DO가 최고 -0.66, pH가 최고 -0.63로 높은 상관성을 보였다.

항목별 수질농도가 증가함에 따라 CCME WQI 값은 감소하였으며, 이는 수질이 악화됨을 입증하고 있다. 특히

Table 2. The correlation coefficient (CC) between CCME WQI and water quality parameters

Parameter Month	Temp.	pH	EC	DO	TOC	TN	TP	TOX-L	TOX-R	Chl-a
Jan.	0.00	0.12	-0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.39	0.12	0.11
Feb.	0.19	-0.07	0.01	0.00	0.18	-0.04	0.05	-0.49	-0.13	0.00
Mar.	0.05	0.11	-0.03	-0.10	-0.14	-0.06	-0.05	0.08	-0.21	-0.02
Apr.	0.20	0.09	0.29	-0.23	0.12	0.09	-0.22	0.26	0.31	0.04
May	-0.19	-0.16	-0.16	0.05	0.09	0.08	0.17	0.14	0.21	0.03
Jun.	-0.12	-0.21	-0.12	-0.12	0.12	0.10	0.01	0.04	-0.08	0.03
Jul.	-0.61	-0.63	0.32	-0.66	-0.76	0.42	-0.46	0.06	0.22	-0.77
Aug.	-0.65	-0.52	-0.49	-0.60	-0.26	0.39	-0.23	0.18	-0.10	-0.85
Sep.	-0.83	-0.60	-0.42	-0.39	-0.25	0.57	0.36	0.24	-0.20	-0.07
Oct.	-0.11	-0.05	0.15	-0.05	-0.23	-0.07	-0.04	0.04	0.00	-0.17
Nov.	0.06	-0.01	0.07	-0.09	0.02	0.04	0.03	0.05	0.31	-0.04
Dec.	-0.19	0.22	-0.12	0.15	-0.30	0.06	0.03	-0.10	-0.11	-0.23
Annual	-0.60	-0.73	-0.26	-0.21	-0.47	0.39	-0.30	0.04	-0.04	-0.77

Chl-a와의 상관성이 높게 나타난 CCME WQI는 조류 발생에 따른 수질변화를 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

12월 자료들은 급격한 수온 하강으로 인해서 이상치로 처리된 자료들이 비교적 많았으며, 분석에 어려움이 있었다. WQI의 계산을 위해서는 연속성 있는 자료가 필요하며, 향후 선형 보간 외에 다양한 방법이 검토되어야 할 것이다.

연간 평균으로 비교해 보았을 때, 대청호 수질 자동측정 자료로 산정된 CCME WQI와 TN은 양의 상관성을 보였으나, 수온을 비롯한 대부분의 항목은 음의 상관성을 나타내었다. CCME WQI는 여러 측정소에 동일한 항목과 동일한 기준을 적용했을 때에 상대적 평가가 가능한 장점이 있다. 그러나 경보 등을 위해 특정 항목이나 특정 시기의 측정소별 특성을 고려해야만 하는 경우라면, 이번 연구 결과를 통해서 알 수 있듯이 추후에 항목별 가중치도 검토할 필요성이 있다.

3.2. Chl-a와 Case별 CCME WQI와의 관계 분석

대청호 수질자동측정소의 2008년 자료를 이용하여 수질 항목의 수를 변화해가며 CCME WQI를 산정하였다. 5개 항목(수온, pH, EC, DO, TOC)이 사용된 경우를 Case I, 7개 항목(수온, pH, EC, DO, TOC, TN, TP)이 사용된 경우를 Case II, 9개 항목(수온, pH, EC, DO, TOC, TN, TP, TOX-L, TOX-R)이 사용된 경우를 Case III, 10개 항목(수온, pH, EC, DO, TOC, TN, TP, TOX-L, TOX-R, Chl-a)이 사용된 경우를 Case IV로 구분하였다.

적용 수질항목이 5개부터 10개까지 변화되었을 경우, 대청호 측정소를 대상으로 작성된 CCME WQI는 Fig. 2와 같으며, 조류 발생의 조기예측을 위해서 CCME WQI가 호소 수질 모니터링에 활용성이 있는지 분석해 보았다.

2008년도 6월에 대청댐에서는 지점에 따라 규조류, 녹조류, 남조류가 활발한 증식을 보였고, 특히 7, 8월에는 남조류가 급증하면서 Chl-a 농도가 연중최고 평균농도가 되었

다(국립환경과학원, 2008a). Table 2의 결과에서와 같이 Fig. 2에서도 Chl-a가 CCME WQI와 변화 성향이 유사한 것으로 나타났다.

Chl-a가 추가되어 10개 항목이 사용된 Case IV의 경우에는 특히 여름철에 조류 대발생의 영향으로 WQI가 하락한 것으로 분석되었다. WQI가 68.77로써 최소값을 보였던 2008년 8월 9일 8시에는 초과 항목 비율인 F_1 이 30, 초과 발생 빈도수인 F_2 가 30, 초과하는 정도인 F_3 가 34로 계산되어 모든 인자가 큰 값을 보였다. 이 시기 또한 조류의 대발생이 일어났던 기간으로 Fig. 3에서 보는 바와같이 F_3 는 Fig. 2의 Chl-a에 큰 영향을 받고 있었으며, 여름철 대청호에서는 조류의 경보가 많이 발생된 시점이었기 때문에 판단된다. 저수지의 조류가 CCME WQI에도 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

수질평가를 위한 지수와 수질변화와의 영향을 분석해 본 결과 하계에는 Chl-a 농도가 호소 수질변화에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. Chl-a 예측을 위해 CCME WQI의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

수질 항목수의 증가에 따른 영향을 검토하기 위해서 적용된 항목수별로 WQI 산정 결과를 분석한 결과, 산정된 WQI의 범위는 Case I의 경우에 66.67~100, Case II의 경우에 76.16~100, Case III의 경우에 76.20~100, Case IV의 경우에 68.77~100으로 최소값은 달랐으나, 최대값은 100으로 동일하였다(Table 3). 5개, 7개, 9개로 WQI에 사용된 항목수가 증가할수록 최소값은 커지고, 표준편차는 작아지는 것으로 나타났다. 이것은 초과되는 항목에 비해 상대적으로 전체 항목수가 많기 때문에 기인된 것이며, 결과적으로 초과 항목비율인 F_1 의 감소가 주된 요인으로 판단된다. 다만, Chl-a가 포함된 Case IV의 경우에는 조류 대발생의 영향으로 최소값이 상대적으로 작았다.

Table 3에 나타난 바와 같이 조류의 변화를 직간접적으로 파악할 수 있는 Chl-a와 CCME WQI와의 상관계수를 통해

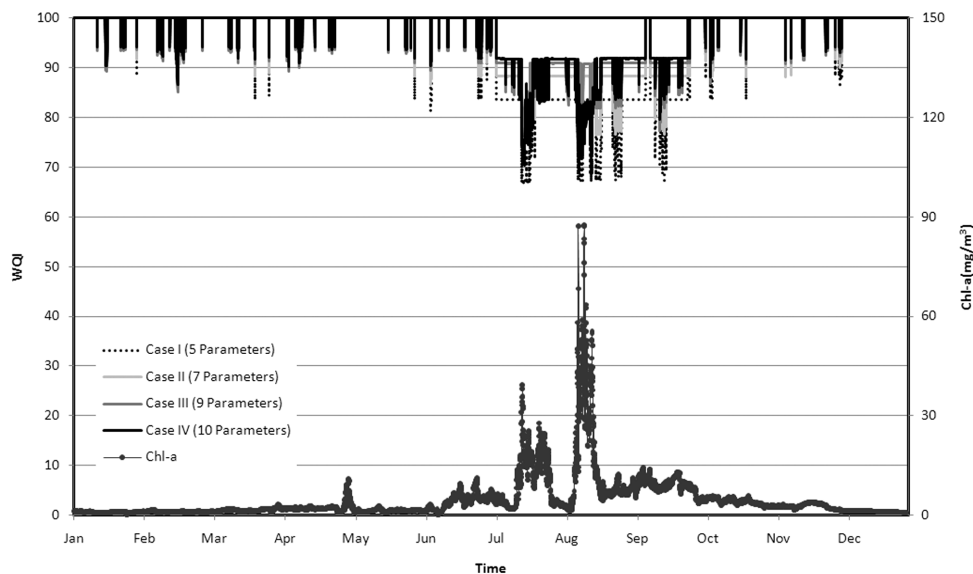


Fig. 2. Hourly fluctuation of Chl-a concentration and CCME WQI.

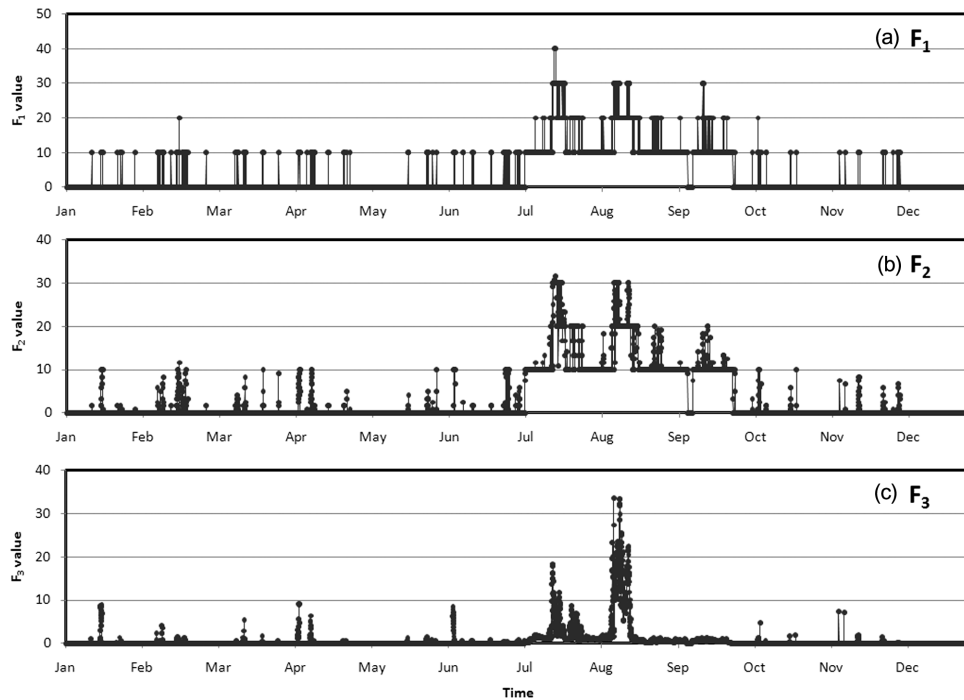


Fig. 3. The values of factors (F_1 , F_2 , F_3) which are used for CCME WQI.

Table 3. The characteristics of CCME WQI using different numbers of parameters

Statistics	Number of parameters			
	5 (Case I)	7 (Case II)	9 (Case III)	10 (Case IV)
Minimum	66.67	76.16	76.20	68.77
Mean	95.78	98.98	97.41	97.24
Maximum	100.00	100.00	100.00	100.00
Standard deviation	8.01	5.73	4.58	5.31
CC	-0.62	-0.62	-0.59	-0.77

* Case I parameters : Temp., pH, EC, DO, TOC
 * Case II parameters : Temp., pH, EC, DO, TOC, TN, TP
 * Case III parameters : Temp., pH, EC, DO, TOC, TN, TP, TOX-L, TOX-R
 * Case IV parameters : Temp., pH, EC, DO, TOC, TN, TP, TOX-L, TOX-R, Chl-a
 * CC : The correlation coefficient between CCME WQI and Chl-a in each case

서 변화성향에 대한 관계를 분석하였다. 5개 인자를 사용한 Case I의 상관계수는 -0.62, 7개 인자를 사용한 Case II의 경우 -0.62, 9개 인자를 사용한 Case III의 경우 -0.59, 10개 인자를 사용한 Case IV의 경우 -0.77로 분석되었다.

분석 결과를 통해서 대청호 측정소를 대상으로 산정된 WQI가 Chl-a와 상당한 상관성이 있음을 알 수 있었으며, 하계에 조류가 호소 수질변화에 큰 영향을 미치는 것으로 분석된다. 또한 WQI의 계산에 Chl-a가 포함되지 않은 경우에도 상당한 상관성을 보여 WQI는 조류 예측에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후, WQI의 산정에 있어 댐의 유입량 및 방류량을 추가하여 강우와 탁수 등에 의한 영향을 고려한다면, 조류 예측과 관련하여 보다 유용한 결과가 기대된다.

4. 결론

2008년 대청호에서 측정된 수질자동측정 자료를 이용하

여, CCME 방식을 활용한 WQI를 산정하였으며, Chl-a와의 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 5분 자료 12개를 통해 시간 대표 WQI를 산정한 결과, 여름철에 Chl-a, 수온, pH 등과 큰 상관성을 보여 WQI와 조류 발생간의 연관성이 높은 것으로 분석되었다. WQI의 계산 인자 중 하나인 F_3 가 Chl-a에 큰 영향을 받고 있었으며, WQI는 조류 대발생이 일어났던 시기의 수질변화 양상을 잘 반영하는 것으로 나타났다.
- 2) 적용된 수질항목이 많을수록 대체로 WQI의 변동폭이 작은 것으로 나타났으며, 최대값은 100으로 동일하였으나, 사용된 항목이 5개부터 9개까지 점차 증가함에 따라 최소값 또한 증가되는 것으로 분석되었다.
- 3) CCME WQI와 Chl-a와의 관계는 WQI의 입력 인자가 5개 일 때 -0.62, 7개 -0.62, 9개 -0.59, 10개 -0.77의 상관관계를 보였으며, 하계에 조류가 호소 수질변화에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. WQI의 계산 결과에서는 Chl-a가 포함되지 않은 경우에도 상당한 상관성을 보여

서 WQI는 조류예측에 활용성이 있을 것으로 판단된다.

우리나라 하천·호소에 설치된 자동측정망은 목적별로 분류되어 다양한 항목이 측정되고 있으며, 지역적 특성에 따라 고려되는 정보의 기준범위 또한 다르다. 한국형 WQI는 다양한 측정 자료를 일반 국민 및 정책 관리자가 쉽게 이해하고 물관리 정책에 반영되도록 지수화 하는 것이다. CCME WQI 방식은 실시간 측정자료의 정보공개를 위해 연구 중인 한국형 WQI 개발에 좋은 방향 제시가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립환경과학원(2008a). 2008년 대청호 조류예보제 시행결과. NIER-NO-2008-103-1053.
- 국립환경과학원(2008b). 수질자동측정망 데이터 공개 시스템 구축(I).
- 국립환경과학원(2009a). 수질자동측정망 데이터 공개 시스템 구축(II).
- 국립환경과학원(2009b). 수질자동측정망 수질평가지수 산정 방법 연구(II). NIER-NO-2009-56 -1112.
- 김동근, 서윤수, 송준상, 이문호, 최재덕, 박건현, 최광수(1984). 대청호 부영양화에 관한 종합연구. 국립환경연구소.
- 김명운, 김민호, 조장천, 김상종(1995). Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화. 한국육수학회지, **28**, pp. 1-9.
- 이순철, 한정호, 안광국(2008). 상류댐 건설에 따른 대청호 부영양화에 대한 기능 변화. 한국하천호수학회지, **41**(3), pp. 348-359.
- 이인선, 이길철, 신상철, 정동일, 신훈근(1988). 수질평가 지수산정에 관한 연구. 수질보전 한국물환경학회지, **4**(1), pp. 26-36.
- 이호범, 이중기, 신대윤(2005). 하천 수질의 오염도평가 방법의 비교 연구. 한국환경보건학회지, **31**(5), pp. 398-403.
- 임병진, 연인성, 홍은영, 홍지영, 김현욱(2010). 수질 자동측정 자료를 이용한 CCME WQI의 적용. 춘계 학술연구발표회 논문집, 대한환경공학회, pp. 202.
- 정세용, 박재호(2005). 대청호 유역의 수질평가를 위한 종합 수질지수의 적용. 수질보전 한국물환경학회지, **21**(5), pp. 470-476.
- 최지용, 신은성(1997). 하천수질관리를 위한 종합수질지표의 개발과 적용. 수질보전 한국물환경학회지, **13**(4), pp. 415-425.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2001a). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0. Technical Report, in *Canadian Environmental Quality Guidelines*. 1999. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Canada.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2001b). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0. User's Manual, in *Canadian Environmental Quality Guidelines*. 1999. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, Canada.
- Environment Canada (2005). *Canadian Environmental Sustainability Indicators*, Gatineau, Quebec, Canada.
- Environment Canada (2006). *Canadian Environmental Sustainability Indicators*, Gatineau, Quebec, Canada.
- Environment Canada (2007). *Canadian Environmental Sustainability Indicators*, Gatineau, Quebec, Canada.
- Environment Canada (2008). *Canadian Environmental Sustainability Indicators*, Gatineau, Quebec, Canada.
- Lumb, A. and Halliwell, D., and Sharma, T. (2006). Application of CCME Water Quality Index to Monitor Water Quality : A Case of the Mackenzie River Basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, **113**, pp. 411-429.
- Painter, S. and Waltho, J. (2005). *Test Driving the Canadian Water Quality Index*. Ecosystem Health Division, Environmental Conservation Branch, Ontario Region, Environment Canada.