

우리나라 인공호 관리를 위한 다변수 수질평가 모델의 개발 및 적용

이 현 준 · 안 광 국*

(충남대학교 생명시스템과학대학)

The Development and Application of Multi-metric Water Quality Assessment Model for Reservoir Managements in Korea. Lee, Hyun-Joon and Kwang-Guk An* (College of Biological Sciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The purpose of this study was to develop a Multi-metric Water Quality Assessment (MWQA) model and apply it to dataset sampled from Paldang and Daechung reservoir in 2008. The various water dataset used to this study included 5 year data sets (2003~2007) in Korean reservoirs which were obtained from the Ministry of Environment, Korea. In this study, suggested MWQA model has 4 metrics that were composed of 4 parameters such as chemical, physical, biological, and hydrological variables. And, each of the variables attributed total phosphorus (TP) concentration in water, secchi depth (SD) measure in water, chlorophyll-*a* (Chl-*a*) concentration in water and the ratio of inflow of water into lakes and efflux of water from lakes, input/output (I/O). First, we established the criteria for trophic boundaries. The boundary between oligotrophic and mesotrophic categories was defined by the lower third of the cumulative distribution of the values. The mesotrophic-eutrophic boundary was defined by the upper third of the distribution. Second, each metric was given by a point-oligo=1, meso=3, eu=5. And then, obtained total score from each metric was divided 5 grade-Excellent, Good, Fair, Poor, and Very poor. As the results of applying the proposed MWQA model, the Paldang reservoir obtained "Fair" or "Poor" grade and Daechung reservoir obtained "Excellent" or "Good" grade. The suggested MWQA model through these procedures will enable to manage efficiently the reservoir. And, more studies such as metric numbers and attributes should be done for the accurate application of the new model.

Key words : trophic state, multi-metric, chlorophyll, phosphorus, secchi depth

서 론

오늘날 인구증가, 도시화 및 산업발달에 따른 용수수요의 증가와 수질오염으로 인한 이용 가능한 수량의 감소로 인해 많은 나라에서 물 기근을 겪고 있는 실정이다 (Barnes and Mann, 1991; Wetzel, 1999). 특히, 우리나라

의 경우는 산업의 고도화와 인구증가에 따라 용수수요가 급격히 증가하고 있을 뿐만 아니라 강수량의 2/3가 6~9 월경인 주로 여름에 집중되기 때문에 하천수만으로는 식수, 생활용수, 농업용수 등의 수자원을 해결할 수 없어 인공호를 조성하여 수자원의 확보에 노력하고 있다. 또한, 한 해 동안 우리나라에 내리는 물의 총량은 약 1,240 억 m³이며, 이 중 평균이용량은 337억 m³으로써 27% 수

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

준(한국수자원공사, 2008)에 머물고 있기 때문에, 용수의 이용률 향상 및 효율적 수자원 관리 기법 개발이 절실히 요구된다. 그러나 인공 댐 및 하구언의 건설로 인해 수계 생태의 이화학적 환경의 변화와 유역의 무분별한 개발로 인한 호수 유역의 교란과 축산폐수나 농경지 등에 대한 관리 소홀로 인한 인, 질소 부하량의 증가는 수질을 악화시키며 부영양화를 일으키고 있다(정 등, 1994; 김 등, 2001). 호수의 부영양화는 일반적으로 무기 영양염류의 유입량 증가에 의해 호수 내 식물의 생산력 또는 현존량이 증가하는 현상(Welch and Lindell, 1992)으로 정의되며, 이는 호수 수질악화의 가장 일반적인 현상으로 알려져 있다. 그렇기 때문에, 이를 관리하기 위해서는 무엇보다 호수의 현재 영양 단계의 이해가 중요함은 주지의 사실이며, 따라서 이것을 위한 여러 방법들이 다양하게 연구되어 왔다(Carlson, 1977; EPA, 1979; Forsberg and Riding, 1980; OECD, 1982; Yoshimi, 1987).

육수학자들은 호수 및 인공호의 효율적 관리를 위해 호수 수체의 영양상태(trophic state)를 빈영양(oligo trophic), 중영양(mesotrophic), 부영양(eutrophic) 등으로 구분하였고(Canfield *et al.*, 1983), 또한 최근에는 단계를 좀더 세분화 하려는 노력으로 빈-중영양(Oligo-meso trophic), 중-부영양(Meso-eutrophic) 등의 몇 개 항목을 추가하기도 하였다(Lee *et al.*, 1981). 하지만 이런 분류들은 수질을 단일변수로 평가하기 때문에, 이용되는 변수에 따라 다양한 평가 결과가 도출되는 문제점이 존재하여 이에 대한 평가의 모호성 및 한계성을 인식하게 되었다. 따라서 이러한 수질평가의 어려움을 보완하기 위해서 호수의 영양상태를 수치상으로 표현할 수 있는 다변수 모델에 의한 계량화의 필요성이 대두되었다.

일반적으로 호수의 부영양화는 대부분의 호수에서 제한영양염인 인의 유입 증가에 의해서 일어난다(Harper, 1992). 하지만, 호수에서 일어나는 다양한 현상들은 수리수문학적, 물리·화학적 및 생물학적인 다양한 요소들이 상호 동적 및 복합적으로 작용하여 나타난다. 그렇기 때문에, 서로 다른 요소들이 독립적으로 같은 상태를 유발하고, 같은 결과를 초래할 수 있다. 예를 들면, 호수 내에서 식물플랑크톤 농도의 감소는 영양염류의 유입이 감소되어 나타날 수도 있지만, 비슷한 결과가 동물들의 포식 활동에 의해서도 나타날 수 있다.

결국, 인 유입농도 등과 같은 단일 지표에 기초한 영양상태의 구분은 중요한 호수의 측면을 간과하거나, 올바르게 판단하지 못할 위험이 있다고 할 수 있다. 그러나 복수의 지표를 사용하여 영양상태를 결정하는 경우에도 각각의 변수에 대한 적당한 보정이 필수적일 뿐만 아니라,

이들 자료들 중 일부가 빠져있거나, 빈약한 경우에 활용하기 곤란한 단점이 있다. 아울러, 이러한 지표들은 모든 변수들이 독립적으로 충분히 확보되지 않은 경우에는 다른 변수에 관해서 그 변화를 추정하거나 미래의 상황을 예측하는 역할을 하기 어렵다. 이러한 어려움에 대해 각 지표 사이의 상관관계를 바탕으로 총인 농도나 엽록소 등의 단 하나의 변수를 활용하는 방법도 고려된다. 이러한 접근법은 하나의 변수만을 측정하는 것으로 충분하기 때문에 전 과정을 확실히 단순화시킬 수 있다.

우선, 부영양화가 일어나면 식물플랑크톤의 현존량이 증가하고 투명도가 감소하게 되며, 성층화 된 시기에는 저층에서의 식물플랑크톤의 부패로 용존산소의 농도가 감소하거나 고갈되는 특징이 나타나게 된다. 특히, 부영양화 정도는 수체 내 총인(Total phosphorus, TP)의 농도, 투명도(Secchi depth, SD), 엽록소 *a* (Chlorophyll, Chl-*a*)의 농도와 밀접한 관계를 가지고 있다(Carlson, 1977). 따라서 일반적으로 호수의 부영양화 진행과정과 영양상태(trophic state)를 파악하기 위해서 총인(TP)의 농도, 투명도(SD) 및 엽록소 *a* (Chl-*a*)의 농도의 복수 지표를 이용한 영양상태지수(trophic state index, TSI)를 자주 활용하고 있다(Carlson, 1977; Walker, 1979; Aizaki *et al.*, 1981).

한편, 국내에서도 호수에서 이러한 영양상태지수를 이용하여 부영양화를 평가하려는 여러 연구가 진행되어왔다. Carlson의 영양상태지수를 이용하여 박 등(2004)은 금오지, 허 등(2004)은 화진포호를 평가하였고, 유 등(2005)은 용담호를 Aizaki의 영양상태지수로 평가하였으며, 김과 오(2007)는 군산 소재 저수지를 Carlson과 Walker의 영양상태지수로 부영양화 정도를 평가하였다. 이 밖에도, 부영양화 정도 평가에서 이와 같은 영양상태지수는 오늘날까지도 주로 활용되고 있다.

하지만, 이들 연구의 대부분이 선행연구의 영양상태지수에 대한 단순 적용으로 그치고 있을 뿐만 아니라 하나의 조사지점에 대한 영양상태지수의 값이 총인(TP)의 농도, 투명도(SD) 및 엽록소 *a* (Chl-*a*)의 농도 지수들의 상호간에 큰 차이를 보일 가능성이 존재하는 등, 지수 적용에 대한 문제점이 있었다. 또한, 기존의 부영양화 정도 평가를 위한 개별지표 영양상태기준의 범위 역시 외국의 기준을 그대로 따르고 있기 때문에 우리나라의 특성에 맞는 영양상태지수의 개발에는 미흡한 점이 있었다.

본 연구에서는 국내 인공호의 영양상태를 평가할 수 있는 새로운 기준의 제안을 위해 호수의 영양상태에 영향을 줄 수 있는 다변수 수질평가 모델(Multi-metric Water Quality Assessment, MWQA) 즉, 화학적, 물리적,

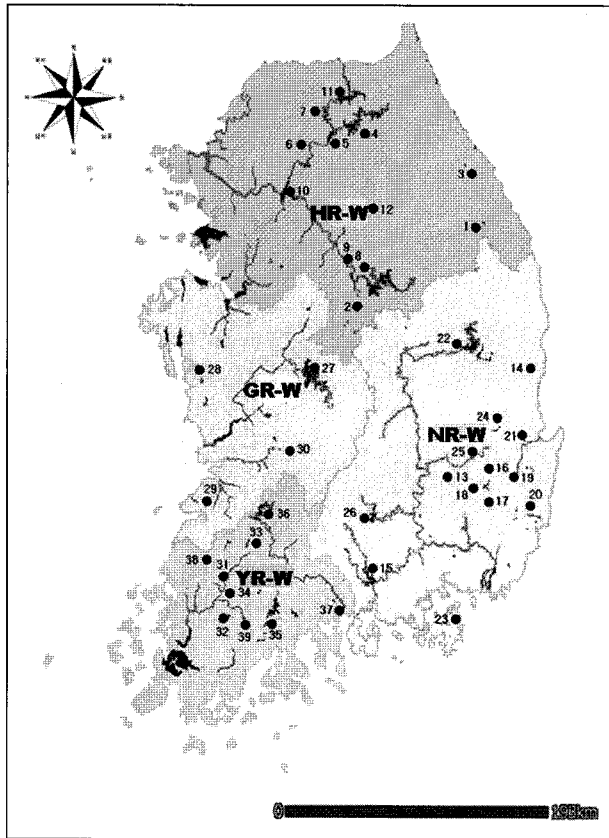


Fig. 1. Sites of 39 reservoirs analyzed for the multi-metric model analysis (HR-W: Han-River Water system, NG-W: Nakdong-River Water system, GR-W: Geum-River Water system, YR-W: Yeongsan-River Water system).

생물학적 그리고 수리 수문학적 변수를 이용한 총체적 호소 평가 기법을 개발하고자 하였다. 또한, 개발된 모델을 2개의 각각 다른 호수에 적용하여 모델에 대한 평가와 검정을 실시하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상 호소 및 자료

호소 수질 측정자료 및 댐별 수문자료는 한강수계 12곳, 낙동강수계 14곳, 금강수계 4곳, 영산강수계 9곳으로 총 4개 수계 39개의 국내 인공호(Fig. 1)를 대상으로 하였으며, 기간은 2003년 1월부터 2007년 12월까지 최근 5년간의 월별로 측정된 자료를 취합하였다. 특히, 댐 수문자료의 경우 유입량과 유출량의 일별 측정 자료를 합산하여 월별자료로 이용하였다.

세부적인 수계별 연구대상 호소는 다음과 같다(괄호속 번호는 Fig. 1의 호소 지점을 표시함).

- 1) 한강수계: 광동댐 (1), 괴산댐 (2), 달방댐 (3), 소양댐 (4), 의암댐 (5), 청평댐 (6), 춘천댐 (7), 충주댐 (8), 충주 조정지댐 (9), 팔당댐 (10), 화천댐 (11), 횡성댐 (12)
- 2) 낙동강수계: 가창댐 (13), 구천댐 (14), 남강댐 (15), 대곡댐 (16), 대암댐 (17), 밀양댐 (18), 사연댐 (19), 선암댐 (20), 안계댐 (21), 안동댐 (22), 연초댐 (23), 영천댐 (24), 운문댐 (25), 합천댐 (26)
- 3) 금강수계: 대청댐 (27), 보령댐 (28), 부안댐 (29), 용담댐 (30)
- 4) 영산강수계: 광주댐 (31), 나주댐 (32), 담양댐 (33), 동북댐 (34), 보성강댐 (35), 섬진강댐 (36), 수어댐 (37), 장성댐 (38), 장흥댐 (39)

2. 연구과정 및 방법

대상 호소의 이화학적 수질자료 분석을 위해 환경부의 환경통계포털, 한국수자원공사, 한국 대담회, 물 환경 정보시스템 및 국가 수자원관리 종합정보시스템(WAMIS) 등으로부터 우리나라 2003년 1월부터 2007년 12월까지의 최근 5년간 총 4개 수계 39개의 대상호소의 측정 자료를 획득하였다.

이 가운데 수질자료의 분석을 통해 화학적(Chemical) 특성, 물리적(Physical) 특성, 생물학적(Biological) 특성 그리고 수리 수문학적(Hydrological) 특성을 대표하며, 호소의 영양단계평가에 적합한 수질변수를 선정하여 새로운 평가 모델의 다변수 메트릭(M)으로 이용하고자 하였다. 따라서 획득한 자료들에서 주로 수위(water level), 총인(TP), 총 질소(TN), 투명도(SD), 클로로필 *a* (Chl-*a*)의 수치를 중점적으로 고려하였으며, 댐의 수문자료는 국가 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)을 통해 획득한 유입량과 유출량의 측정치를 바탕으로, 유입 및 유출량의 비율(input/output ratio, I/O ratio)로써 계산하여 참고하였다.

결과 및 고찰

1. 화학적 변수의 수질 특성

호소의 수질에 영향을 미칠 수 있는 화학적 특성 요인으로는 수소이온 농도(pH), 용존산소량(Dissolved oxygen, DO), 생물학적 산소요구량(Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand,

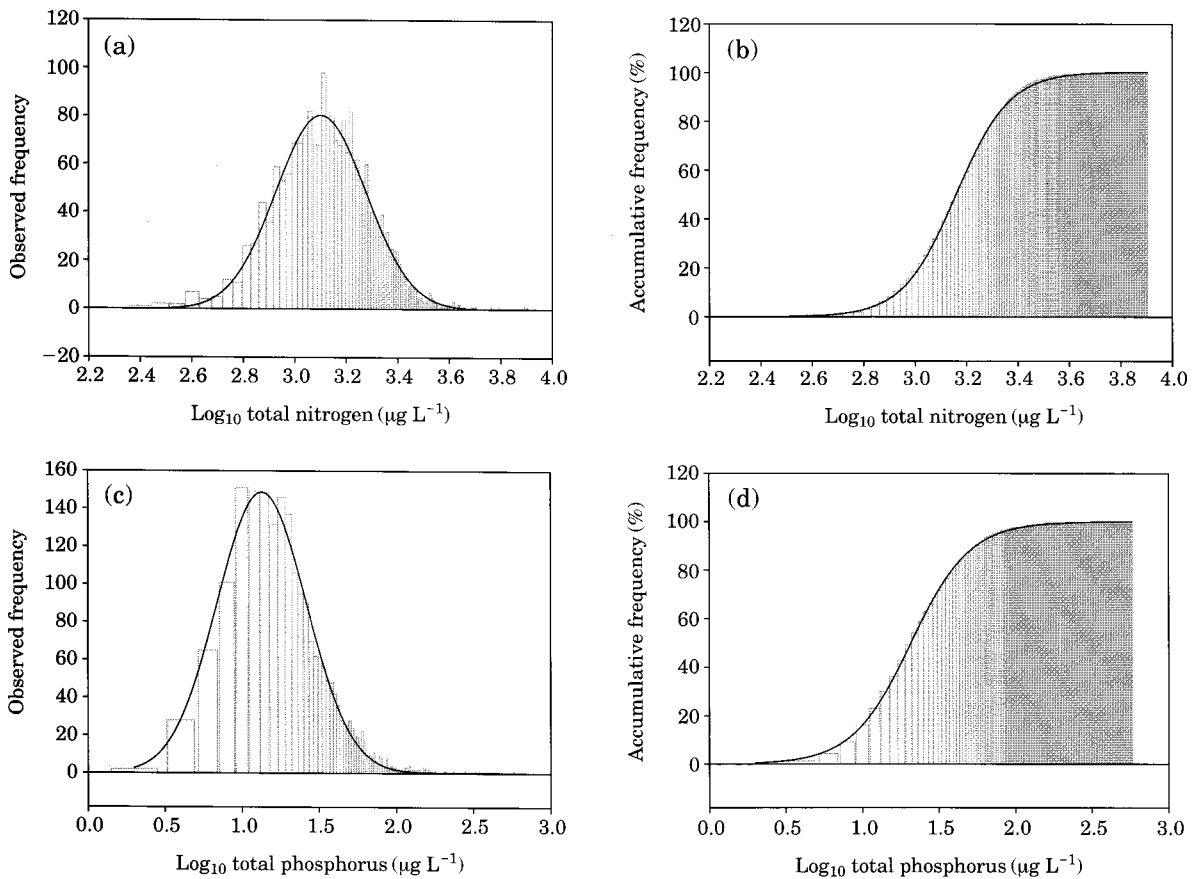


Fig. 2. Observed frequency diagram and cumulative frequency diagram (Total nitrogen: n=2,212, interval of data=50 µg L⁻¹; Total phosphorus: n=2,152, interval of data=2 µg L⁻¹).

COD) 그리고 영양염류인 총 질소(Total nitrogen, TN)와 총 인(Total phosphorus, TP) 등을 들 수 있다. 이 가운데 수체 내 질소(Nitrogen, N)와 인(Phosphorus, P)의 경우는 호소에서 부영양화의 주된 요인이 되고 있는 조류의 생장에 있어 근본적이고 제한적인 요인(limiting factor)으로 알려져 왔다. 따라서 본 연구에서 호소의 영양단계를 판단하기 위해 총 질소(TN)와 총 인(TP)은 적합한 지표로 이용될 수 있을 것이라고 생각하여 여러 화학적 수질변수 가운데 먼저, 총 질소(TN)와 총 인(TP)의 수치에 주목을 하였다.

우선, 획득한 자료를 바탕으로 알아본 우리나라 인공호에서의 총 질소(TN)의 분포범위는 최소 약 235 µg L⁻¹에서 최대 7,974 µg L⁻¹ 정도로 나타났으며, 이 들의 값을 정렬하여 여러 차례 수치에 대한 구간 설정의 과정을 반복한 후 구간별 빈도를 계량하고, 빈도분포 양상의 분석을 위해 로그-변환(Log transformation)하여 정규분포곡선과 누적빈도분포곡선으로 나타내어 확인하였다. 또한, 총 인(TP)의 경우에는 최소 2 µg L⁻¹에서 최대 577 µg L⁻¹

의 분포 범위를 나타냈으며, 마찬가지로 구간 설정을 통해 빈도를 계량하여 빈도분포 양상을 정규분포곡선과 누적빈도분포곡선으로 나타내어 확인하였다(Fig. 2).

한편, 호소 생태계 내에서 질소(N)와 인(P)과 같은 영양염류는 그것의 감소와 증가 정도에 따라 생리학적 수준에서의 생물량, 일차 생산력 그리고 종조성에 영향을 미치게 된다(Borchardt, 1996). 따라서 조류의 생장에 제한요인이 무엇으로 작용하는지를 추정해 보는 것은 새롭게 개발될 수질평가 모델의 메트릭 선정에서 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 이러한 영양염의 제한요인을 추정해보기 위하여 총 질소(TN)와 총 인(TP)의 농도를 이용하여 N/P ratio 값을 알아보는 방법이 고려될 수 있다. 우리나라 환경부의 호소 수질 기준에 따르면, 보통 N/P ratio 값에 대한 근거는 이 수치가 7 미만일 경우에는 총 인(TP)의 기준을 적용하지 않고(질소가 제한요인), 반대로 16 이상일 경우에는 총 질소(TN)의 기준을 적용하지 않는다(인이 제한요인). 그리고 7 이상 16 미만일 경우에는 영양상태가 높은 항목을 기준으로 하고 있다. 이에 따

라, 우리나라 인공호에 적합한 수질평가 모델을 개발하기 위하여, 앞서 이용된 우리나라 인공호 5년간의 전 자료를 통해 우리나라 호소에서의 N/P ratio 값을 계산하고 제한 요인을 알아보았다.

그 결과, 우리나라 인공호에서의 N/P ratio는 대부분 200 미만이었지만 최소 1.36에서 최대 1,193.50 정도까지 다양하게 분포하고 있었으며, 전체의 96.84%가 16 이상으로 제한염류는 총 인(TP)이 대부분의 경우라고 볼 수 있었다. 따라서 화학적 요인의 매트릭을 선정함에 있어 총 질소(TN)보다 총 인(TP)의 수치를 비중을 두었다.

2. 물리적 변수의 수질 특성

호소의 수질에 영향을 미칠 수 있는 물리적 특성 요인에 대표적으로 투명도(Secchi depth, SD)의 수질변수를 주로 이용하고 있다. 이전의 연구들에서 보통 수체 내 조류의 농도가 증가하면 반대로 투명도(SD)는 감소하게 된다고 알려졌다. 이와 같은 사실을 근거로, 본 연구에서도 호소 평가의 물리적 특성 요인으로 투명도(SD) 자료를 중점적으로 분석하였다.

그 결과, 획득한 5년간 우리나라 호소의 측정 자료를 바탕으로 투명도(SD)는 90% 이상의 대부분이 5m 미만의 수치를 보였으며 최소 0.2m에서 최대 8.9m의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 한편, 이 값을 정렬하여 마찬가지로 구간별 빈도를 계량하여 빈도분포 양상을 정규분포곡선과 누적빈도분포곡선으로 나타내어 확인하였다(Fig. 3).

3. 생물학적 변수의 수질 특성

호소의 수질에 영향을 미칠 수 있는 생물학적 특성 요인으로 주로 엽록소 *a* (Chl-*a*)의 수질 변수를 이용하고 있다. 영양단계에 변화를 가져올 수 있는 조류는 보통 식물플랑크톤으로 대별되는데, 이런 식물플랑크톤의 현존량의 파악에서는 엽록소 *a* (Chl-*a*)의 자료를 바탕으로 자료 분석이 이루어진다. 엽록소 *a* (Chl-*a*)는 모든 광합성 생물에 공통적으로 함유되어 있으며 광합성을 위한 빛 에너지를 포집한다. 물론, 엽록소 *a* (Chl-*a*) 이외에 *b*, *c*, *d* 등도 존재하지만 식물플랑크톤의 종류에 따라서는 그 중 어느 것을 함유하지 않은 것이 있으므로 엽록소 *a* (Chl-*a*)를 광합성 생물의 생물량 지표로 활용하는 경우가 많다.

따라서 본 연구에서도 생물학적 특성 지표로써 엽록소 *a* (Chl-*a*)를 선정하였고, 수치의 구간별 빈도분포 양상을 정규분포곡선과 누적빈도분포곡선으로 나타내어 확인하였다(Fig. 3). 그 결과, 획득한 우리나라의 호소자료에서는 대부분 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 미만의 수치를 나타냈으며 최소 0.1

$\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 일부분 $95.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지의 분포 범위를 보이고 있다.

4. 수리 수문학적 변수의 수질 특성

호소의 수질에 영향을 미칠 수 있는 요인에서 수리 수문학적 특성으로, 공간적 또는 지형적 특성과 더불어 수위, 수심, 강수량, 유입량, 유출량 등이 고려될 수 있다. 외국과 달리 우리나라는, 하절기에 일어나는 집중강우현상으로 인한 호소의 수리 수문학적 변동이 호소의 전체적인 수질에 영향을 미칠 수 있다.

기존 우리나라 연구자들에 의하면 수체 내 수질 특성은 하절기 강우 특성에 큰 영향을 받는 것으로 알려졌다. 특히, 연 강수량의 2/3가 집중되는 하절기 집중강우현상은 유역으로부터 급격한 유량증가를 가져오고 수체에 음적, 양적 변화를 야기시키는 것으로 보고되어 있다(An and Kim, 2003). 또한, 이와 같은 현상으로 인해 호소로 흘러들어온 물이 성층화를 형성하고 수 체류 시간을 얼마나 갖는가에 따라 호소의 수질에도 영향을 미칠 수 있을 것이다. 따라서 호소의 유입량(input)과 유출량(output)의 관계양상을 분석해보는 방법도 수리 수문학적 특성의 반영에서 큰 의미를 가질 수 있을 것이라 사료된다.

한편, 유입량과 유출량 자료의 경우, 매일 변동량이 측정되기 때문에 다른 수질변수와는 다르게 월 평균 측정량 자료를 이용하지 않았고, 일별 측정량 자료를 합산해 월별 총 유입량과 유출량의 자료로 만들어 유입 및 유출량의 비율(input/output, I/O)로써 계산하여 분석에 사용하였다.

그 결과, 획득한 5년간 우리나라 호소의 측정 자료를 바탕으로 유입 및 유출량의 비율(I/O)은 대부분이 1을 중심으로 좌우 분포하였으며, 최소 0.03에서 일부분 최대 63.06까지의 범위를 나타냈다. 유입량과 유출량의 비율이 1에 가깝다는 것은 유입되는 양과 유출량이 같다는 의미로 이보다 값이 커질수록 유입된 물이 나가지 못하고 정체되어 수질에 악영향을 미친다고 분석할 수 있다. 한편, 마찬가지로 수치의 구간별 빈도분포 양상을 정규분포곡선과 누적빈도분포곡선으로 나타내어 확인하였다(Fig. 3).

5. 다변수 수질평가 모델 (Multi-metric Water Quality Assessment, MWQA)의 개발

우리나라 인공호에서 영양단계 평가모델의 개발을 위해서 본 연구에서는 앞서 분석한 우리나라의 5년간의 수질자료를 바탕으로 최종적인 평가의 매트릭을 선정하였다. 첫째, 화학적 특성을 대변하는 총 인(TP)의 농도, 둘

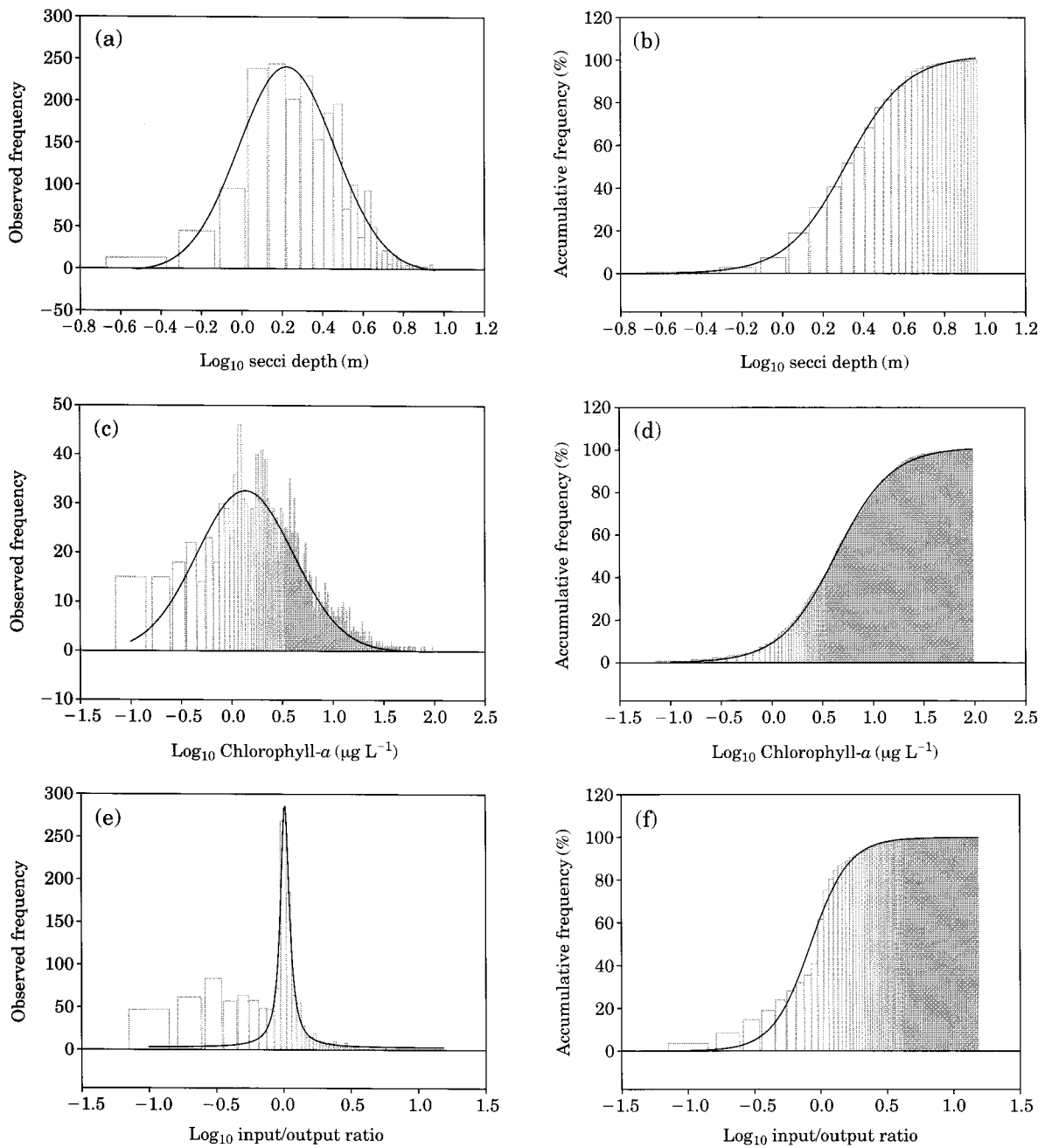


Fig. 3. Observed frequency diagram and cumulative frequency diagram (Secci depth: $n=2,064$, interval of data=0.3 m; Chlorophyll-a: $n=2,172$, interval of data=0.1 $\mu\text{g L}^{-1}$; Input/Output ratio: $n=1,316$, interval of data=0.1).

제, 물리적 특성을 대변하는 투명도(SD), 셋째, 생물학적 특성을 대변하는 엽록소 a (Chl- a)의 농도, 마지막으로 수리 수문학적 특성을 대변하는 유입량과 유출량의 비율(I/O)의 총 4가지 수질변수가 그 대상이 되었다.

우선, 3가지 영양단계를 정의하기 위해서 이전의 많은 연구자들에 의해 이용된 영양상태기준 설정방법 (Dodds *et al.*, 1998)을 통해 매트릭으로 선정한 각각의 수질변수

의 빈도 분포를 이용하여 영양상태를 판단하는 비교적 간단한 접근방법을 사용하였다. 앞서 분석된 수질변수 값의 빈도분포를 자료의 총 수(n)로부터 3등분하여 작은 값부터 빈영양(oligotrophic category), 중영양(mesotrophic category), 부영양(eutrophic category)의 세 범주로 나누었다. 이와 같은 방법을 이용하여 우리나라 호소자료를 바탕으로 새롭게 설정된 영양단계기준을 제안하였다

Table 1. Suggested criteria for trophic classification of lakes from frequency distribution data value in Korea.

Trophic state index	Oligotrophic state	Mesotrophic state	Eutrophic state	n
Total phosphorus ($\mu\text{g L}^{-1}$)	< 16	16~30	> 30	2152
Secchi depth (m)	> 2.7	1.6~2.7	< 1.6	2064
Chlorophyll- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)	< 2.7	2.7~6.7	> 6.7	2172
Input/Output ratio	< 0.73	0.73~1.02	> 1.02	1316

Table 2. The multi-metric model and the scoring criteria.

Model metrics	Metric component	Scoring criteria		
		5 (>67%)	3 (33~67%)	1 (<33%)
Chemical variables	M ₁ Total phosphorus ($\mu\text{g L}^{-1}$)	< 16	16~30	> 30
Physical variables	M ₂ Secchi depth (m)	> 2.7	1.6~2.7	< 1.6
Biological variables	M ₃ Chlorophyll <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)	< 2.7	2.7~6.7	> 6.7
Hydrological variables	M ₄ Ratio of Input/Output	< 0.73	0.73~1.02	> 1.02

(Table 1). 그리고 이 새로운 기준안에 따른 영양상태의 점수를 빈영양(oligotrophic)=5, 중영양(mesotrophic)=3, 부영양(eutrophic)=1로 부여하였다(Table 2).

한편, 이용된 최종 메트릭은 M₁ 총 인(TP), M₂ 투명도(SD), M₃ 엽록소 *a* (Chl-*a*), M₄ 유입량과 유출량의 비율(I/O)의 총 4가지 항목이었으며 각각의 메트릭별 획득한 점수의 총합에 따라 호소의 수질 등급을 평가하고자 하였다. 따라서 모델 값에 따른 호소 수질 등급은 최적상태(Excellent, Ex), 양호상태(Good, G), 보통상태(Fair, F), 악화상태(Poor, P) 및 최악상태(Very poor, Vp)의 5등급으로 대별하였다. 이에 따라 가능한 총 점수의 경우의 수를 고려하여 총점 20~18은 최적상태(Excellent, Ex)로 제시하였으며 16~14는 양호상태(Good, G), 12~10은 보통상태(Fair, F), 8~6은 악화상태(Poor, P), 그리고 모든 메트릭에서 최저점수를 획득한 4점을 최악상태(Very poor, Vp)로 제안하고자 하였다. 이와 같은 방법을 거쳐 국내 호소의 영양상태에 따른 등급을 설정하고 수치상으로 계량화하는 이화학적 수질평가 모델을 구축하였다.

6. 다변수 수질평가 모델의 검증

우리나라의 대형 인공호자료를 바탕으로 본 연구에서 새롭게 제시한 영양단계의 기준안과 여러 연구자에 의해 제시된 기존의 영양단계 기준안을 항목별로 비교해 보고자 하였다. 한편, 유입량과 유출량의 비율(I/O)의 경우, 기존의 기준이 존재하지 않아서 직접적인 비교는 불가능하며, 해당 항목은 다음 단계에서 대상 호소의 적용을 통해 전체적인 평가의 결과로써 효용성을 검증하였다.

기준안 비교결과 전체적인 범위의 분포 양상은 기존의

연구 범위와 큰 차이를 보이지 않았으며 약간의 차이를 보이는 투명도(SD)의 경우, 우리나라 호소의 환경적, 지형적 특성 때문이라고 사료된다. 투명도(SD)는 분명히 식물플랑크톤의 농도와 반비례하지만 이의 감소 요인이 반드시 식물플랑크톤 때문만은 아니다. 투명도(SD)는 수체에 입사광의 감소와 관련이 있는데, 식물플랑크톤의 분포 밀도가 깊이 방향으로 일정하지 않은 경우, 또는 생물 사체량이 많은 경우 반드시 지수함수로 변화하지 않음에 주의하여야 할 것이다. 또한, 우리나라 호소의 경우 주로 여름에 호우가 집중되며 대부분 대도시 부근에 위치하기 때문에 주변으로부터 부유물질의 빈번한 유입이 일어날 가능성이 크다고 할 수 있다.

7. 다변수 평가모델의 호수 적용 사례

본 연구를 통해 개발된 새로운 수질평가 모델의 검증을 위해 실제 우리나라 인공호 두 곳을 임의 선정하여 영양단계의 평가를 실시하였다. 대상은 한강수계의 팔당호와 금강수계의 대청호로 선정하였으며 2008년 1월부터 12월까지 1년 동안의 항목별 월 평균자료를 이용하였다. 그리고 평가 결과의 분석을 통해 새로운 모델의 검증과 효용성을 판단해 보고자 하였다.

1) 팔당호에 대한 수질평가

팔당호는 한강 본류의 다목적댐으로 서울 및 수도권 지역에 물을 공급하는 취수원이며 유량조절에 의한 한강의 범람방지에 기여하고 있다. 1973년 12월에 준공되어 현재 35년 이상 우리나라 2000만 명 이상의 국민에게 수돗물 공급원으로써 활용되고 있는 팔당댐은 그 호소의

Table 3. Seasonal values of model variables at the dam site of Paldang and Daechung reservoir in 2008.

Y/M	TP ($\mu\text{g L}^{-1}$)		SD (m)		Chl- α ($\mu\text{g L}^{-1}$)		I/O ratio	
	P	D	P	D	P	D	P	D
2008/01	30	10	1.1	3.4	30.1	2.7	1.16	0.61
2008/02	15	10	1.8	4.2	14.4	2.3	1.10	0.48
2008/03	27	9	1.4	4.5	23	4.2	1.25	0.40
2008/04	43	9	1.2	3.7	22.8	4.2	1.22	0.20
2008/05	45	7	1.6	4.4	11.6	1.4	0.99	0.13
2008/06	55	8	1.6	6.6	14.7	1.6	1.49	0.15
2008/07	80	8	0.6	5.6	11.9	2.5	1.29	0.38
2008/08	74	8	0.7	5.4	4.7	2.5	1.11	0.50
2008/09	43	14	1.1	3.2	8.8	6.9	1.16	0.21
2008/10	44	20	1.6	4	16.2	5.2	1.34	0.32
2008/11	26	11	1.5	3.2	21.6	6.9	0.99	0.28
2008/12	26	8	2.2	3.1	14.1	4.7	0.80	0.18

*P=Paldang reservoir, D=Daechung reservoir

Table 4. The evaluation result of trophic state at Paldang and Daechung reservoir (Dam site) in 2008-based on New Model.

Metric	The Model Scores-based on 4 metric parameters																						
	Paldang reservoir												Daechung reservoir										
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
M ₁ Total phosphorus (TP)	3	5	3	1	1	1	1	1	1	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5
M ₂ Secchi depth (SD)	1	3	1	1	3	3	1	1	1	3	1	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
M ₃ Chlorophyll- α (Chl- α)	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	5	3	3	5	5	5	5	1	3	1	3
M ₄ Input/Output ratio (I/O)	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	8	12	8	6	8	6	6	8	6	8	8	12	18	20	18	18	20	20	20	16	16	16	18
Total	P	F	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	G	G	G	Ex
	Monthly mean=8 (Poor)												Monthly mean=18.3 (Excellent)										

*Ex=Excellent, G=Good, F=Fair, P=Poor, Vp=Very poor

수질 관리에 있어 다른 어느 지역보다 중요성을 가진다고 할 수 있다. 따라서 팔당호의 2008년 1월부터 12월까지 1년 동안의 수질 측정 자료를 바탕으로 새롭게 개발된 수질평가 모델을 적용하여 팔당호의 수질등급을 평가해보고자 하였다. 수집된 측정 자료는 Table 3에 제시하였고, 아울러 이를 바탕으로 새로운 평가모델에 의한 평가를 실시하였다. 결과에 따르면 2008년 팔당호의 수질등급은 모델 지수 값을 각각 6~12의 범위로 하며 전반적으로 보통(Fair) 및 악화(Poor) 상태를 나타내고 있다 (Table 4).

또한, 팔당호의 평가 자료를 바탕으로 새롭게 제안된 수질평가 모델에 대한 효용성을 판단해 보았다. 호소 영양 상태를 대별함에 있어 영양염류인 질소(N)와 인(P)의 중요성은 계속해서 언급되었다. 특히, 질소(N)와 인(P)의 농도비율인 N/P ratio는 수체 내 조류의 생물량과 조류 종의 천이를 예측하거나 조류 성장에 대한 영양염 제한을

나타내는 간접적인 지표로 활용되고 있다(Smith, 1983; Fujimoto and Sudo, 1997; Seppala *et al.*, 1999). 또한, 선행 연구들에서는 빈영양호보다 부영양호에서 TN/TP가 낮으며 영양상태의 증가와 더불어 수체 내 TN/TP가 감소하게 되었음이 보고되었다(Forsberg *et al.*, 1978; Welch and Lindell, 1992). 따라서 본 연구에서도 이러한 TN/TP의 비율과 부영양화의 관계를 통해서 평가모델의 검정을 실시해보았다.

그 결과, 2008년 팔당호에서 월별 N/P ratio의 변화양상과 새로운 모델에 의해 얻어진 점수의 변화양상이 어느 정도 유사함을 알 수 있다(Fig. 4). 이는 선행 연구의 TN/TP의 비율에 따른 부영양화의 관계와 일치하며, 이러한 분석결과를 바탕으로 새롭게 개발된 영양상태 평가 모델은 팔당호에서 비교적 안정적으로 적용될 수 있는 모델이라고 사료된다.

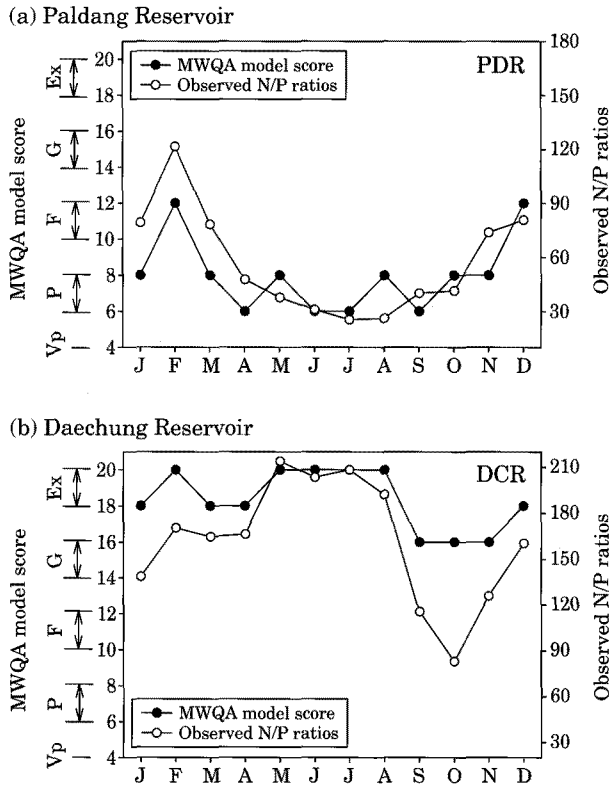


Fig. 4. Monthly variation of MWQA model score and N/P ratio at Paldang and Daechung reservoir in 2008.

2) 대청댐에 대한 수질평가

새 모델에 대한 보다 정확한 판단을 위하여 추가로 금강수계의 대청호를 선정하여 팔당호와 동일한 방법으로 수질에 대한 영양단계의 평가를 실시하였다. 대청호는 1980년 12월에 준공되어 현재 30년 가까이 충남, 충북을 비롯한 대전권의 400만의 국민에게 상수원으로써의 역할을 하고 있다. 또한, 인근 유역의 홍수피해를 크게 줄이고, 청주지구·금강하류지구·만경강지구에 농업용수를 공급하는 한편, 대전·청주·공주·부여·논산·장항·군산·전주·익산 등에 생활용수·공업용수를 공급해 오고 있어 중부권에서 그 중요성은 이루 말할 수 없이 크다고 할 수 있다.

우선, 대청호의 2008년 1월부터 2008년 12월까지 1년 동안 월별 수질 측정 자료를 수집하였고(Table 3), 아울러 이 자료를 바탕으로 새 모델에 의한 수질평가를 실시하였다. 평가 결과에 따르면 2008년 대청댐의 수질 등급은 모델 지수 값을 각각 16~20의 범위로 하며 전반적으로 최적(Excellent) 및 좋음(Good)상태로 나타났다(Table 4).

한편, 대청댐의 평가 자료를 통한 새로운 수질평가 모델의 효용성을 판단해 보기 위해 마찬가지로 TN/TP의

비율과 부영양화의 관계를 통해서 평가모델의 검정을 실시하였으며 그 결과, 팔당댐의 평가 자료와 마찬가지로 2008년 대청댐에서 월별 N/P ratio의 변화양상과 새로운 모델에 의해 얻어진 점수의 변화양상이 어느 정도 유사함을 알 수 있다(Fig. 4). 따라서 이러한 분석결과를 바탕으로 새롭게 개발된 영양상태 평가모델은 대청호에서도 비교적 안정적으로 적용될 수 있는 모델이라고 사료된다.

8. MWQA 모델을 이용한 수질평가의 기대효과

본 연구를 통해 제시한 항목별 평가 기준에서 알 수 있듯이 선행연구자들에 의한 기존의 항목별 기준과 크게 상이하지 않기 때문에 이를 우리나라 호소에 적용하기에 큰 무리가 없으리라 보이며, 아울러 실제로 팔당댐과 대청댐에 적용하여 수행한 모델의 검정 결과, 특별한 오류가 발생하지 않았다. 이에 따라 본 연구에서 개발한 새로운 수질평가 기법은 비교적 평가 등급 5단계 구분의 용이함으로 우리나라 호소에 어느 정도 안정적으로 적용 가능할 것이라고 사료된다.

일반적으로 수자원의 가치를 결정하는 수질항목 중 가장 보편적인 중요성을 가지는 것은 유기물의 함량이며 이런 유기물은 수체 내 여러 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 그렇기 때문에 새로운 수질 평가 모델을 개발함에 있어 수체의 수리 수문학적 특성을 비롯해 각종 이화학적 특성이 고려되었다. 그리고 이러한 항목을 각각 평가 모델의 매트릭으로 선정하여 호소의 평가에 있어 복수의 측정지표가 활용될 수 있도록 하였다. 이러한 복수 지표를 활용한 다변수 평가 모델은 호소의 영양 단계를 평가함에 있어 보다 정확한 판단을 가능하게 할 것으로 생각되며, 모델의 검정 결과 비교적 안정적인 적용 가능성을 나타내었으므로 보다 효과적인 호소의 관리에 도움을 줄 수 있을 것이라 사료된다.

특히, 본 연구를 통해 개발된 새로운 이화학적 수질 평가모델은 모델의 속성이 국내호소를 기반으로 하였기 때문에 국내 호소의 수질 판정에 있어 지금까지 외국 지표의 혼용으로 인해 있었던 어려움을 다소 완화시켜 줄 것으로 기대된다. 또한 이 수질평가 모델은 대상의 많은 적용을 통해 향후 보정에 대한 연구가 더 이루어진다면 국내 인공호의 영양상태를 확인하고 국가 수자원의 효율적 관리에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 국내 인공호 4대 수계 39곳을 선정하여

2003년 1월부터 2007년 12월까지 5년간의 수질 측정 자료를 바탕으로 우리나라에 적합한 다변수 수질평가 모델을 개발하고, 그 모델을 이용하여 2008년 1년간의 자료를 통해 팔당호와 대청호의 수질평가를 실시하였다. 개발된 다변수 수질평가 모델은 4개의 수질변수를 각각 부영양, 중영양, 빈영양의 3단계로 나누어 점수를 부여하고, 수질변수별 획득점수를 총합하여 총점으로 계량화하였으며, 총점을 구간별로 5등급으로 나누어 최종 수질등급을 부여하였다. 새롭게 제안된 수질평가 모델의 적용 결과, 팔당호는 전반적으로 보통(Fair) 및 악화(Poor) 상태로 나타났다, 대청호는 최적(Excellent) 및 좋음(Good) 상태로 나타났다.

일반적으로 수자원의 가치를 결정하는 수질항목 중 가장 보편적인 중요성을 가지는 것은 유기물의 함량이며 이런 유기물은 수체 내 여러 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 그렇기 때문에 새로운 수질평가 모델을 개발함에 있어 수체의 수리 수문학적 특성을 비롯해 물리적 특성, 화학적 특성, 생물학적 특성 등의 각종 이화학적 특성이 고려되었으며, 이러한 항목을 각각 평가 모델의 4가지 메트릭으로 선정하여 호소의 평가에 있어 복수의 측정지표가 활용될 수 있도록 하였다. 이러한 복수 지표를 활용해 개발된 다변수 수질평가 모델은 호소의 영양 단계를 평가함에 있어 보다 정확한 판단을 가능하게 할 것이며, 효과적인 호소의 관리에 도움을 줄 수 있을 것이라 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project [과제명: 호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발(08-IV-11)]의 일환으로 수행되었으며, 이용된 수질자료는 환경부의 수질측정망 자료 및 한국수자원공사의 국가 수자원관리 종합정보시스템의 댐 유입수 및 방류수 자료를 이용하였기에 이에 대한 감사를 포함.

인 용 문 헌

- 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수. 2001. 국내 주요 호소의 육수학적 조사(4):주암호. 한국육수학회지 **24**(1): 30-44.
- 김범철, 안태석, 조규송. 1998. 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교 연구. 한국육수학회지 **21**: 151-163.
- 김종구, 오승철. 2007. 군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가. 한국환경과학회지 **16**(3): 357-367.
- 김좌관. 1995. 수질오염개론. 동화기술, p. 193-220.
- 김재윤. 2003. 총 인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가. 한국환경과학회지 **12**: 689-695.
- 백순기, 김전희. 1998. 동북호에 있어서 수질변동 특성 및 영양 상태 분석. 동신대학교 환경연구소 논문집 **3**(1): 1-17.
- 박재충, 박정원, 김대현, 신재기, 이희무. 2005. 안동호의 수역별 영양 상태와 평가 방법 간 상관성 비교. 한국육수학회지 **38**(1): 95-104.
- 변의복. 1998. 국내 대형인공호의 영양상태지수에 관한 연구. 충북대학교 석사학위논문.
- 신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태. 한국육수학회지 **35**(3): 181-186.
- 안광국, 한정호. 2007. 정수 생태계 건강성 평가를 위한 다변수 메트릭 모델 개발. 한국육수학회지 **40**(1): 72-81.
- 안광국, 김자현, 배대열, 이재연. 2005. 해부학적 건강도 평가 기법 및 생물학적 다변수 모델 평가 기법을 이용한 하천 평가. 2005 대한상하수도학회, 한국물환경학회 공동 추계 학술발표회 논문집, C-1-5.
- 이상현, 신용식, 장남익, 김종민, 김현구, 조영관, 정 진. 2006. 섬진강, 영산강수계 주요 호소의 수질 동향과 영양상태 조사. 한국육수학회지 **39**(3): 296-309.
- 이영자. 2005. 대청호의 부영양화 평가모형 해석. 한밭대학교 석사학위논문.
- 정세웅, 박재호, 김유경, 윤성완. 2007. 대청호 부영양화 모의를 위한 CE-QUAL-W2 모델의 적용. 수질보전 한국물환경학회지 **23**(1): 52-63.
- 정 준, 김한순, 김용재. 1994. 낙동강 하구댐의 식물플랑크톤 군집구조. 한국육수학회지 **27**(1): 33-46.
- 최광현, 황순진, 김호섭, 한명수. 2003. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화. 한국육수학회지 **26**(2): 139-149.
- 최형섭, 조인철, 변중환, 문병현, 허중수. 2003. 합천호 수질 및 영양단계에 대한 평가. 한국환경농학회지 **22**(1): 1-6.
- Aizaki, M. 1981. Application of modified Carlson's trophic state index to Japanese lakes and its relationship to other parameters related to trophic state. *Natl. Envir. Study in Jap.* **26**: 13-31.
- An, K.G., J.K. Kim and S.J. Lee. 2008. Reservoir trophic state and empirical model analysis, based on nutrients, transparency and chlorophyll-a along with their relations among the parameters. *Korean J. Environ. Biol.* **26**: 252-263.
- 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.
- Armstrong, R.A. 1994. Grazing limitation and nutrient limitation in marine ecosystems: Steady state solutions of an ecosystem model with multiple food chains. *Lim-*

- nology and Oceanography* **39**: 597-608.
- Barnes, R.S.K and K.M. Mann. 1991. *Fundamentals of Aquatic Ecology*. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Borchardt, M.A. 1996. Nutrients. p. 184-227. *In: Algal Ecology* (Stevenson, R.J., M.L. Bothwell and R.L. Low, eds.). Academic Press, New York.
- Canfield, D.E., K.A. Langeland, M.J. Maceina, W.T. Haller and J.V. Shireman. 1983. Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Science* **40**: 1713-1718.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Carpenter, S.R., J.F. Kitchell, J.R. Hodgson, P.A. Cochran, J.J. Elser, M.M. Elser, D.M. Lodge, D. Kretchmer, X. He and C.N. von Ende. 1987. Regulation of lake primary productivity by food web structure. *Ecology* **68**: 1863-1876.
- Dodds, W.K. 2007. Trophic state, eutrophication and nutrient criteria in streams. *Trends in Ecology and Evolution* **22**: 669-675.
- Dodds, W.K., J.R. Jones and E.B. Welch. 1998. Suggested classification of stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen and phosphorus. *Wat. Res.* **32**: 1455-1462.
- EPA. 1979. Quantitative techniques the assessment of lake quality. EPA 440/5-79-015.
- Forsberg, O., S.-O. Ryding, A. Forsberg and A. Claesson. 1978. Water chemical analyses and/or algal assay. Sewage effluent and polluted lake water studies. *Mitt. Internat. Verein. Limnology* **21**: 252-363.
- Forsberg, O. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Archiv Fur Hydrobiologie* **89**: 189-207.
- Fujimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures. *Limnology and Oceanography* **42**: 250-256.
- Harper, D. 1992. Eutrophication of freshwater; principles, problems and restoration. Chapman and Hall, London. p. 329.
- Kivi, K., S. Kaitala, H. Kuosa, J. Kuparinen, E. Leskinen, R. Lignell, B. Marcussen and T. Tamminen. 1993. Nutrient limitation and grazing control of the Baltic plankton community during annual succession. *Limnology and Oceanography* **38**: 893-905.
- Lee, G.F., R.A. Jones and W. Rast. 1981. Alternative approach to trophic State classification for water quality management. Occasional Paper, 66pp.
- Lee, H.S., S.W. Chung, J.K. Choi and S.I. Shin. 2008. Evaluation of trophic state of a small-scale pond in ecological park. *Journal of Korean Society on Water Quality* **24**: 741-749.
- Lee, J.H., J.G. Park and E.J. Kim. 2002. Trophic states and phytoplankton compositions of dam lakes in Korea. *Algae* **17**: 275-281.
- OECD. 1982. Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control. OECD, Paris, France. 154pp.
- Reckhow, K.H. and S.C. Chapa. 1983. Engineering approach for lake management. *Ann Arbor Science* **1**: 189-200.
- Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lake. *Science* **195**: 260-262.
- Seppala, J., T. Tamminen and S. Kaitala. 1999. Experimental evaluation of nutrient limitation of phytoplankton communities in the Gulf of Riga. *J. Mar. Syst.* **23**: 107-126.
- Sin, Y., L.W. Ichard and I.C. Anderson. 1999. Spatial and temporal characteristics of nutrient and phyto plankton dynamics in the York river estuary, Virginia: Analyses of long-term data. *Estuaries* **22**: 260-275.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.
- U.S. EPA. 1976 Water quality criteria research of the U.S. Environmental Protection Agency. Proceeding of an EPA sponsored symposium. EPA-600(3-76-079): 185.
- U.S. EPA. An approach to a relative trophic index system for Work. Pap. 24, Pacific Northwest Envir. Res. Lab. Covallis, 1974.
- Vollenweider, R.A. 1968. The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors. Tech. Rep. OECD. Paris. DAS/CSI/68. **27**: 1-182.
- Walker, W.W. 1979. Use of Hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lakes. *Water Resource Research* **15**: 1463-1470.
- Welch, E.B. and T. Lindell. 1992. Nutrient limitation. p. 34-135. *In: Ecological Effect of Wastewater*, 2nd. Chapman & Hall Press, London.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*, 3rd Eds. Academic Press, California.
- Yoshimi, H. 1987. Simultaneous construction of single parameter and multiparameter trophic states indices. *Water Research* **15**: 1505-1511.

(Manuscript received 29 April 2009,
Revision accepted 6 June 2009)