

군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가

김종구·오승철*
군산대학교 토목환경공학부
(2007년 2월 6일 접수; 2007년 3월 7일 채택)

Characteristics of Water Quality and Evaluation of Eutrophication for Reservoirs in Kunsan

Jong-Gu Kim and Seung-Chul O*

School of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

**Environment and Hygiene Department Kunsan city, Kunsan 573-703, Korea*

(Manuscript received 6 February, 2006; accepted 7 March, 2007)

Recently, eutrophication of lake and reservoir has become serious problem to man who want use that water for several purpose. In order to solve the eutrophication problem, the trophic state of that eutrophic lake and reservoir should be measured properly. For the purpose of this, various method to indicate the trophic state of lake and reservoir was developed by many researchers. This research was conducted to evaluate characteristics and eutrophication of water quality for small scale reservoir in Kunsan. On-site investigation to 5 reservoirs and laboratory experiment were carried out during four seasons from November, 2003 to July, 2004. Twelve items measured field and a laboratory. Measured data was analyzed to quantitative method by multivariate approach and eutrophication index. The result is summarized as following. 1) Showing the characteristics of water quality for reservoir in Kunsan, Okgu reservoir and Oknua reservoir was exceeded 4 grades of agricultural water standard in TP, TN and COD. This means that eutrophication was gone much, therefore, water-purity control of reservoir need. While, Mije reservoir that is used to Kunsan citizens' recreation was good in water quality. But, water quality exceeded 4 grades of agricultural water standard sometimes. 2) As a results of correlation analysis between variables of water quality, Interrelation between variables which is connected with eutrophication was expressed good relationship as above 0.600 in correlation coefficients. The correlation coefficient(r) between COD and chlorophyll-a, total phosphorus and chlorophyll-a, total nitrogen and chlorophyll-a were 0.750, 0.720 and 0.600 respectively. Therefore, Change of water quality can grasp according to eutrophication progress degree. 3) If do evaluate to eutrophication by quantitative method which is proposed by OECD, US-EPA and Forsberg & Ryding, in the case of chlorophyll a, Okgu, Oknua and Daewi reservoir was eutrophic state and Mije and Geumgul reservoir was mesotrophic state. But, estimation by TN and TP showed highly eutrophic state (hypereutrophic) in all reservoirs. 4) If do evaluate by eutrophication index which is Carlson's TSI, revised carlson TSI and Walker's index, in the case of chlorophyll a, TSI values of Okgu, Oknua and Daewi reservoir is eutrophic state more than 50 and Mije and Geumgul reservoir was mesotrophic state as range of 40~50 in TSI value. But, in the case of TP as nutrients, all reservoirs showed highly eutrophic state which was exceed to 70 in TSI value. According to above results, the water quality for small scale reservoirs in Kunsan is progressing by trophic state. therefore, for continuous use as agriculture water, we had better do establishment of management plan about water quality.

Key Words : Reservoir, Eutrophication, Carlson's TSI, Revised Carlson TSI, Walker's Index

Corresponding Author : Jong-Gu Kim, Department of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea
Phone: +82-63-469-1874
E-mail: kjg466@kunsan.ac.kr

1. 서론

우리가 사용하는 물은 생활용수, 공업용수 및 농업용수로 이용되고 있으며, 이 중 농업용수가 60%,

생활용수가 17%, 공업배수가 10%, 유지용수가 14%로 수자원의 많은 부분이 농업용수로 이용되고 있다. 최근 인구의 증가 및 공업의 발달로 인하여 생활용수와 공업용수의 사용량이 날로 증대하고 있는 반면, 농지의 축소로 농업용수의 비율은 줄어가고 있는 실정이다. 그러나 아직도 농업용수의 사용비율은 절대적으로 높은 비율을 가지고 있다.

생활용수는 사람의 생명과 직결되는 중요한 수자원으로 수원의 수질이 절대적으로 양호해야 하며, 이들 수자원은 하천의 상류에 댐을 조성하여 공급하거나, 수질이 양호한 하천의 상류수를 대부분 이용하고 있다. 그러나 농업용수는 대부분이 상대적으로 오염에 취약한 저지대에 위치하고 있다.

우리나라의 농업용수의 경우 국가하천이나 지방하천을 직접 이용하거나, 농업용수 공급을 목적으로 하구인공호를 건설하여 하천 하류부의 많은 농지에 농업용수를 계획적으로 공급하고 있다. 그러나 이러한 혜택도 받지 못하는 농지의 경우 주변 계곡을 막아 소규모 저수지를 조성하여 용수를 공급하는 형태를 취하고 있다.

하구나 인공호의 경우 수량이 많고 국가사업의 일환으로 막대한 자금을 투입하여 조성되었기 때문에 국가기관에서 수량과 수질을 관리하고 있으나, 각 지방에 산재해 있는 소규모 저수지의 경우 수량은 물론이고 수질에 대한 조사조차 거의 없는 실정으로 수질관리를 위한 절대적인 조사가 필요한 실정이다.

이들 저수지는 대부분 계절적인 강우에 의해 한정된 집수를 하고 있는 상태로 원만한 수질관리가 사실상 이루어지지 않고 있으며, 오히려 축산업, 농업배수로부터 발생하는 오염물질에 의해 상당히 부영양화가 진행되고 있고, 심할 경우 농업용수로서의 수질도 가지지 못할 상황에 올 수도 있다. 저수지에서 문제가 되는 수질오염은 부영양화로 인한 물의 질 저하이다.

호수의 부영양화는 수체내로 식물이 성장하는데 필요한 영양물질 및 유기물이 많이 유입되어 호수의 수질과 생태계가 변화되어 호수 생산력 증대와 호수의 체적이 줄어드는 현상으로서 유역특성과 호수의 물리적인 구조에 따라 매우 복잡한 양상을 띤다. 부영양화는 호수수질의 변화에 일차적인 원인이 있으나 궁극적으로는 조류의 대량번식과 이에 관련된 2차적인 여러 가지 현상으로 나타나고, 조류의 대발생은 수중 용존산소를 과대하게 소비하여 다른 생물의 성장을 방해한다. 호수의 부영양화가 진행되면 조류의 대규모 발생과 수질악화, 불쾌한 냄새와 맛의 문제, 물고기의 사멸 등 나쁜 영향을 유발하고

이러한 영향은 수자원의 이용을 심각하게 방해한다.

부영양화로부터 호소수질을 관리하기 위하여 과거 육수학자들은 부영양화 판정을 위한 여러 기법을 적용하였다. 최초로 적용된 기법은 호소수의 수질인자 및 생물상의 변화를 이용한 정성적 평가를 시도하였고, 좀 더 부영양화 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 부영양화 관련인자를 이용한 복수항목에 의한 수질평가가 시도되어 Eral E. Shannon and Patrick L. Brezonik¹⁾에 의하여 부영양화 평가에 있어 다변수적 접근을 시도하였고, EPA²⁾, W. Rast et.al.³⁾, Forsberg & Ryding⁴⁾, OECD⁵⁾ 등에 의해 여러 부영양화 기준이 제시되었다. 그러나 이들 방법은 부영양화 정도를 크게 구분하는 방법으로 부영양화의 진행정도를 정확하게 파악하는데 문제가 있었다. 그래서 부영양화 정도의 진행과정을 정량적으로 파악하기 위해 영양상태지수(TSI, trophic State Index)가 개발되었으며, Carlson지수⁶⁾를 비롯한 Sakamoto⁷⁾에 의해 수정된 carlson 지수, William W. Walker⁸⁾에 의해 개발된 Walker's index, Donald B. Porcella et. al.⁹⁾에 의해 제시된 LEI(Lake evaluation index) 등 많은 지수가 개발되었다.

호수의 수질관리를 위한 외국의 부영양화와 부영양도지수에 관련된 연구를 보면, P. J. Dillon and F. H. Rigler¹⁰⁾는 호수에서 인과 클로로필과의 관계를 연구하였고, David C. Lasenby¹¹⁾는 14개의 남부 온타리오 호수에서 산소결핍에 대해 연구하였으며, P. J. Dillon¹²⁾는 온타리오 카메룬호수에서 인수지를 통하여 호수부영양화 정도에 대한 회석의 중요성을 설명하였다. Val H. smith¹³⁾은 호수에서의 생산성과 영양염 결핍에 관하여 연구하였다. E. E. Prepas¹⁴⁾는 서부 캐나다의 호수에서 인산염과 클로로필과의 관계를 평가하였고, Val H. smith¹⁵⁾는 조류현존량의 질소 및 인에 대한 의존성에 대해 경험적 연구와 이론적 분석을 행하였다. Dainel E. Canfield et. al.¹⁶⁾은 호수에서의 대형식물에 의한 영양상태분류에 대하여 연구하였고, J. S. Bays and T. L. Crisman¹⁷⁾은 플로리다호수에서 동물성플랑크톤과 영양상태와의 관계를 연구하였다.

국내의 부영양화 및 영양상태지수(TSI)에 연구로는 국립환경연구원¹⁸⁾에서 삼교호의 부영양화 현상에 관한 조사를 비롯하여 김 등¹⁹⁾의 호소수의 부영양화 현상에 관한 연구, 김승호²⁰⁾의 전남지방 인공호수에 대한 부영양화 조사연구가 있고, 장재길²¹⁾은 대청호에 대한 TSI 적용에 관해 연구를 통해 대청호에 맞는 TSI를 제시하였으며, 김규광²²⁾은 인공호수에서의 영양염류와 염록소와의 관계를 연구하여 부영양화지수를 제시하고 다양한 호수모델을 적용

하여 부영양화를 평가하였다. 김 등²³⁾의 한강수계 인공호 부영양화에 관하여 연구하였으며, 류 등²⁴⁾은 영산호 부영양화 방지를 위한 연구를, 류재근²⁵⁾은 호소 부영양화 방지기술에 관한 연구를 실시하여 부영양화 방지방법을 제시하였고, 최문술²⁶⁾은 전북 소재 저수지에 대한 부영양화 연구에서 부영양화 관련인자의 농도를 분석하였다. 그러나 이들 조사는 대부분 인공저수지 중에서 규모가 큰 호소를 대상으로 주로 연구하였으며, 지방에 소재한 소규모 저수지에 대한 연구는 상당히 부족한 실정이다.

본 연구대상지역인 군산은 일제시대에 우리나라 최대의 곡창지대인 만경, 김제평야 옆에 위치한 도시로써 곡물수탈의 위하여 군산항을 조성하여 형성된 도시이다. 현재 군산시는 인구 30만의 중·소규모 도시로 시 외곽에는 거의 농지로 활용되고 있는 지역으로 소규모 저수지가 6개 위치하고 있다. 만경과 김제평야 농지의 경우 금강의 물을 끌어들이 수로를 통하여 공급되는 시스템으로 비교적 안정된 농업용수를 공급받는 지역이나, 군산시 주변 농지의 경우 일부는 수로를 통하여 금강수를 이용하고 있으나, 그러지 못한 지역은 소규모 저수지에 의존하여 농사를 짓고 있는 실정이다.

저수지의 수자원 공급은 거의 빗물에 의존하고 있으며 대부분이 오래전에 조성되었기 때문에 유역의 수문학적 정보가 거의 없는 상황이다. 일부 저수지의 경우 부영양화의 진행으로 갈수기에는 물의 질이 저하되어 농업용수로써의 사용에도 문제가 발생하기도 한다.

따라서 저수지의 수질에 관한 기본적인 조사를 통하여 수질관리를 위한 기본자료의 도출과 관리방안을 모색할 필요가 있다.

본 연구의 대상저수지는 군산시 소재 소규모 인공저수지로서 저수지의 수질상태를 파악하고 관리대책 수립을 위하여 저수지의 계절별 수질특성을 조사하고, 부영양화 평가기법으로 부영양화정도를 평가하여 저수지 수질관리를 위한 기본자료로 이용하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1. 부영양화 평가

수체내에서 부영양화의 발생여부와 진행정도를 평가하는 것은 부영양화의 예측 및 대책수립에 있어 필수적인 단계로써 이들 부영양화 평가 자료는 가장 기초적인 자료로 사용된다. 부영양화의 정확한 평가를 위해서는 다양한 수질항목에 대한 측정자료의 수집이 중요한 요소이며, 수집된 자료의 분석 및 해석 또한 중요한 요소이다.

부영양화 평가방법은 수집된 자료의 해석 방법에 따라 정성적 평가방법, 정량적 평가방법 그리고 부영양화 지수에 의한 평가방법으로 구분할 수 있으며, 이는 부영양화와 상관관계가 높은 주요 수질인자를 이용하여 호수의 상태를 평가하는 방법으로 육수학자들에 의하여 오래전부터 시도되어 왔다. 이러한 방법으로 호수의 영양상태를 빈영양(Oligotrophic), 중영양(Mesotrophic), 부영양(Eutrophic)상태로 구분하였다. 그러나 이것으로는 호수의 영양상태를 적절하게 나타낼 수 없을 뿐 만 아니라 영양상태가 판정된 호소에 대하여 그에 맞는 대책을 수립하는데도 어려움이 초래하게 되었다. 따라서 영양상태의 정도를 숫자적으로 나타낼 수 있는 계량화 작업이 시도되었으며, 이를 통하여 부영양화지수가 개발되었다.

2.2.1. 정성적 평가방법

부영양화 현상이 발생한 수체의 경우 영양염 농도의 증가, 수색변화, 투명도저하, 저수층의 혐기성화 등의 현상을 유발하며, 수체내 남조류와 같은 식물성플랑크톤 농도의 증가 등 생물학적 특성이 변화한다. 수리수문학적으로 이와 같은 부영양화는 수심이 얇고, 폭이 넓은 평지의 호수에서 발생하기 쉽다. 이에 비하여 빈영양호는 영양염의 농도가 낮으며 수색은 청색이고 투명도가 높은 특성을 보인다. 생물상에 있어서는 식물성 플랑크톤의 농도도 비교적 낮으며 갑각류가 많이 존재하나 전체적으로 동물의 수가 빈약하고 저서생물의 종류와 양은 풍부하며, 수리수문학적 측면에서 보면 대부분 수심이 깊고 폭이 좁은 수체이다.

이상과 같은 부영양화와 빈영양호의 특징을 기초로 하여 다수의 전문가가 부영양화의 발생여부 및 진행정도를 평가한 결과를 종합적으로 부영양화를 평가하는 방법을 부영양화의 정성적인 평가방법이라고 한다. 부영양화의 정성적인 평가 방법은 부영양화에 수반되어 나타나는 재변화와 재특성을 모두 포함하고 있어 이론적으로는 정확한 평가라고 할 수 있지만, 연구자의 주관이 개입되기 쉬우며 부영양화의 진행정도에 대한 정확한 양적 판단이 어렵고 번잡하다는 단점이 있다.

2.2.2. 부영양화 지수에 의한 평가 방법

부영양화 지수라 함은 부영양화의 발생여부 및 진행정도를 0에서부터 100사이의 단일의 연속적인 수치로 표시하는 부영양화 평가 방법이다. 단일 항목에 의한 부영양화 평가 방법은 측정이 간단하고, 복수 항목에 의한 부영양화 평가 방법은 수체의 여러 특성 중에서 종합적으로 고려할 수 있다는 것이 장점이라고 했다. 부영양화 지수에 의한 평가 방법은 부영양화의 진행정도를 연속적인 수치로 표현함

으로써 훨씬 구체적으로 표현할 수 있다.

부영양화 지수는 Carlson에 의하여 최초로 고안되었으며 투명도, 클로로필 a, 총인 등에 관한 부영양화 지수가 각각 개별 되었으며 Carlson의 부영양화 지수에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

2.2.2.1. Carlson 부영양화 지수⁶⁾

Carlson은 투명도와 클로로필 a의 농도, 총인의 농도 중 어느 한 항목만을 측정하여도 부영양화 지수를 표현할 수 있도록 투명도, 클로로필 a, 총인에 관한 부영양화 지수를 각각 작성하였다. 부영양화 지수 작성시에 식물성 플랑크톤이 투명도에 영향을 주는 유일한 요소이고, 투명도가 64m일 때 부영양화 지수가 0이 된다는 가정하에 부영양화 지수를 산정하였다. 이와 같은 투명도와 클로로필 a, 투명도와 총인과의 상관관계를 이용하여 Carlson이 작성한 부영양화 지수는 다음과 같다.

$$TSI(SD) = 10 \left[6 - \frac{\ln(SD)}{\ln 2} \right]$$

$$TSI(Chl) = 10 \left[6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln(Chl)}{\ln 2} \right]$$

$$TSI(TP) = 10 \left[6 - \frac{\ln(48/TP)}{\ln 2} \right]$$

일반적으로 부영양화지수가 40이하이면 빈영양호, 40~50이면 중영양호, 부영양화 지수가 50이상이면 부영양호로 구분할 수 있다.

2.2.2.2. 수정 Carlson 지수(RTSI, Revised Carlson TSI)⁷⁾

相崎守弘(1981)등은 1977년부터 1980년까지 일본의 26개 조화형 호소군에 대한 조사결과를 토대로 Carlson의 TSI에 수정을 시도하였다. 즉, 엽록소 a 농도 0.1mg/m³을 지수의 최소치의 기준으로 하고 1000mg/m³을 최대치의 기준으로 하여(실제 경우에도 400을 넘지 않음) 다음식을 수정 Carlson지수의 기본식으로 개발하였다.

$$RTSI(Chl) = 10 \left[2.46 + \frac{\ln Chl}{\ln 2.5} \right]$$

$$RTSI(SD) = 10 \left[2.46 + \frac{(3.69 - 1.53 \ln SD)}{\ln 2.5} \right]$$

$$RTSI(TP) = 10 \left[2.46 + \frac{(-1.23 + 1.15 \ln TP)}{\ln 2.5} \right]$$

2.2.2.3. Walker's Index⁸⁾

W.W.Walker는 24개의 Coneticut주 호수, US-NES의 일부자료, 13개의 Canadian 호수에 대한 조사결과를 바탕으로 새로운 지수를 제안하였다.

즉, 엽록소 a 농도가 0.25mg/m³일 때를 영양상태 지수값 0으로 하고 그 농도가 2배가 될 때마다 10씩

증가하도록 하여 다음의 식을 제안하고 있다.

$$I_B = 20.0 + 33.2 \ln Chl$$

$$I_P = -15.6 + 46.1 \log TP$$

$$I_T = 75.3 + 44.8 \ln \left(\frac{1}{SD} - \alpha \right)$$

여기서, α : 입자물질외의 요소에 의한 감쇄계수 (m⁻¹)

Walker's index에 의한 부영양화 판정은 빈영양호 < 25~30 < 중영양호 < 40~45 < 부영양호 < 65~70 < 과영양호로 구분하고 있다.

3. 연구내용 및 방법

3.1. 대상구역의 특성

본 조사지역인 군산시는 전라북도 북부 서해안지역에 위치하고 있으며, 면적 376.37km²으로 우리나라 총면적의 0.4%, 전라북도 총면적의 4.6%를 차지하고 있다. 군산시 서쪽으로는 새만금 간척매립사업이 진행중에 있고 남쪽과 동쪽에는 만경, 김제평야와 인접해 있으며, 북쪽으로는 금강의 하류인 금강하구언이 위치하고 있다.

전라북도 일원에 소재하고 있는 저수지는 2,296개에 이르며, 이 중 저수량이 5,000,000톤이 넘는 저수지는 섬진호를 비롯하여 10개에 이른다²⁶⁾. 이들 저수지도 국내 대부분의 저수지와 마찬가지로 부영양화가 상당히 진행되어 수자원으로써의 가치를 점차 잃어가고 있는 상황이다.

군산시 유역에 위치한 저수지는 총 5개가 있으며, 옥구평야와 주변 농경지의 농업용수를 공급하기 위해 조성된 유효저수용량 12,993톤의 옥구저수지, 군산시 미성동 서남부에서 옥서면과의 경계에 위치한 유효저수용량 2,875톤의 옥녀저수지, 군산시 미룡동에 위치하고 있으며 주변 농경지의 농업용수를 공급하며, 군산시민의 휴양지로 이용되는 유효저수용량 3,918톤의 미제저수지, 유효저수용량 2,090톤의 금굴저수지 및 유효저수용량 1,139톤의 대위저수지가 있다. 이들 중 대위저수지를 제외한 나머지 저수지는 주변에 오염원이 없는 저수지이며, 대위저수지만 소규모 오염원이 존재한다.

3.2. 시료채취 및 분석방법

군산시 유역 소재 저수지의 수질을 평가하기 위하여 2003년 11월부터 2004년 7월까지 계절별로 5개 저수지에서 수질을 대표하는 2개 내지 3개 정점을 선정하여 표층수를 채수하였다.(Fig. 1)

시료채취 시기는 가능한 한 강우의 영향을 배제하기 위하여 강우가 끝나고 7일후에 시료를 채취하

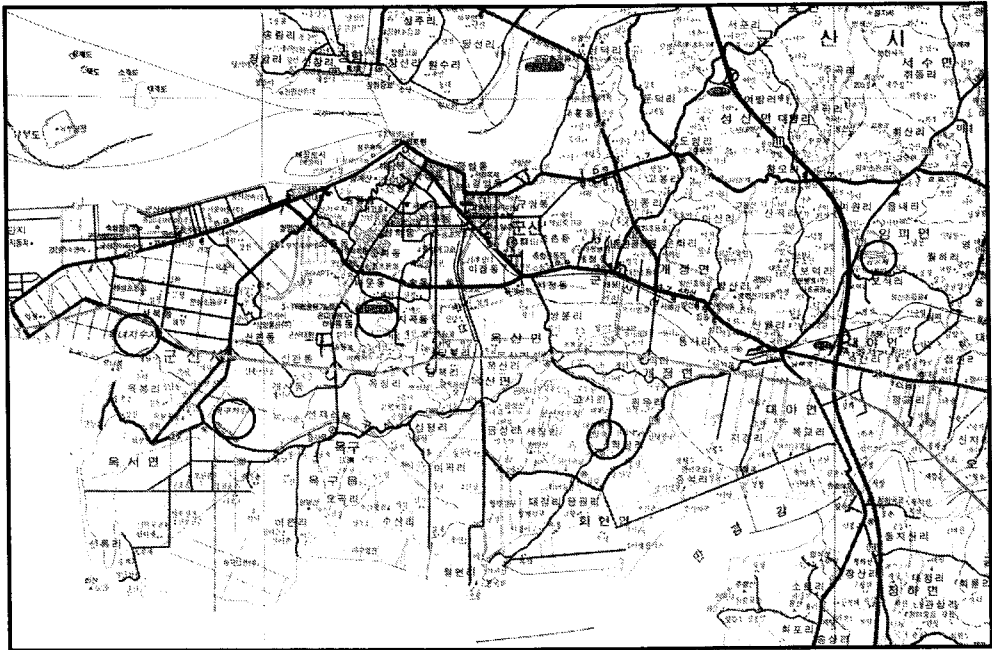


Fig. 1. Survey point for reservoir in Kunsan city.

였다.

수질분석은 시료채취와 동시에 봉상온도계로 수온을 측정하고, 용존산소를 고정하였으며, 나머지 항목은 냉장보관하여 빠른시간에 실험실로 운반하여 분석을 실시하였다.

측정항목은 일반항목으로 수온(Temperature), pH, 용존산소(DO), 총부유물질(TSS), 휘발성부유물질(VSS), 화학적산소요구량(COD)을 조사하였고, 영양염류로는 암모니아질소(Ammonium), 아질산성질소(Nitrite), 질산성질소(Nitrate), 총질소(Total Nitrogen), 용존무기인(DIP), 총인(Total phosphorus)을 분석하였다. 호수의 생산성을 나타내는 조류의 양은 Chlorophyll-a로 나타내었으며 Strick & parson이 제안한 방법으로 분석하여 총 13개 항목을 조사하였다. 분석방법으로는 환경오염공정시험방법²⁷⁾ 및 그에 준하는 실험법으로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 저수지 수질특성

군산시 소재 저수지의 수질특성을 알아보기 위하여 2003년 11월부터 2004년 7월까지 계절별로 조사하였다. 저수지 수질에 대한 연 평균 범위 및 평균을 Table 1에 나타내었다.

저수지의 수질특성을 보면, 수소이온농도는 옥구와 옥너저수지에서 연평균 8.26과 8.57을 나타내어

부영양화에 의한 조류성장에 의한 pH의 증가가 뚜렷하게 나타났고, 다른 저수지에서는 7.48~7.87의 값을 보였다. 용존산소는 옥구와 옥너저수지에서 연평균 11.38mg/l과 11.22mg/l로 다른 저수지에 비하여 높았다. 유기물량의 척도인 화학적산소요구량은 옥구와 옥너저수지에서 평균 14.71mg/l과 11.60mg/l로써 호수수질환경기준 V급수인 10mg/l 이하와 농업용수 수질기준치인 COD 10mg/l를 모두 상회하였다. 대위저수지에서는 평균 9.75mg/l로서 V급수(8~10mg/l)의 수질을 나타내었고, 다른 저수지는 IV급수(6~8mg/l)로 나타났다. 총부유물질의 농도는 전체 저수지에서 평균 2.7~9.5mg/l의 범위로 호수수질환경기준 II~III급수를 보였다.

조류 성장과 밀접한 관련이 있는 영양염류인 총질소와 총인을 보면, 총질소의 경우 모든 저수지에서 호수수질환경기준에서 제시한 농업용수 3급수 수질기준치인 1.5mg/l를 모두 상회하는 높은 질소 농도를 나타내었고, 총인은 미제저수지가 IV급수(0.05~0.1mg/l), 금굴저수지가 V급수(0.1~0.15mg/l)이고 나머지 저수지는 V급수인 0.15mg/l를 모두 상회하는 높은 농도를 나타내었다.

조류의 양을 나타내는 Chl.a의 농도도 옥구와 옥너저수지에서 평균 19.24mg/m³과 12.84mg/m³로 높게 나타나 부영양화와 관련하여 조류의 증식에 따른 수질인자의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알

Table 1. Range and mean values of water quality constituents during 2000-2002 for each reservoirs in Kunsan

Item		Okgu	Mije	Oknua	Geumgul	Daewi
pH	Range	7.83~8.86	7.32~7.86	8.05~9.20	7.02~7.92	7.34~9.12
	Mean	8.26	7.64	8.57	7.48	7.87
DO (mg/L)	Range	6.73~14.43	4.60~14.31	7.43~14.22	4.70~13.61	6.00~12.76
	Mean	11.38	10.02	11.22	10.26	10.22
COD (mg/L)	Range	4.36~37.19	4.52~12.53	4.24~20.02	4.35~12.04	4.56~13.94
	Mean	14.71	7.00	11.60	7.62	9.75
DIN (mg/L)	Range	0.083~2.599	0.048~1.143	0.113~0.977	0.152~1.331	0.124~2.162
	Mean	0.829	0.415	0.503	0.669	0.661
T-N (mg/L)	Range	1.256~25.549	0.846~6.690	1.815~5.953	1.340~7.691	1.098~11.273
	Mean	6.192	3.769	3.772	4.463	4.440
DIP (mg/L)	Range	0.000~0.308	0.000~0.124	0.000~0.102	0.000~0.124	0.000~0.075
	Mean	0.087	0.041	0.039	0.055	0.014
T-P (mg/L)	Range	0.036~4.269	0.007~0.200	0.029~0.355	0.019~0.200	0.058~0.337
	Mean	0.652	0.092	0.197	0.117	0.187
Chl-a (mg/m ³)	Range	5.97~67.96	1.42~47.21	3.02~22.30	1.60~15.92	4.94~27.90
	Mean	19.24	6.96	12.84	5.58	15.65
TSS (mg/L)	Range	1.2~16.6	0.6~5.4	4.6~15.5	1.4~14.0	6.6~13.6
	Mean	7.7	2.7	8.6	4.1	9.5

Table 2. N/P ration for each reservoirs in Kunsan

Reservoir \ Season	Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual mean
Okgu	1.76	21.63	0.80	1913.07	484.31
Mije	1.35	16.03	-	87.48	34.96
Oknua	2.35	15.70	-	-	9.03
Geumgul	4.31	10.47	-	538.87	184.55
Daewi	2.72	-	-	-	2.72

수 있다. 대위저수지의 경우에는 Chl.a과 함께 COD 및 TSS에서 높은 농도를 나타내어, 조류성장과 유기물량의 증가 및 부유물질량의 증가가 일치하는 것으로 나타났다.

저수지에서의 조류의 성장을 제한하는 인자를 살펴보기 위하여 N/P 비를 계산하여 Table 2에 나타내었다. Redfield가 제안한 C:N:P=106:16:1를 기준으로 보면, N/P가 16이상이면 인이 제한인자가 되고, 16 이하이면 질소가 제한인자로 작용한다. 인의 농도가 없는 경우에는 N/P비가 계산되지 않아 인이 제한인자임을 알 수 있다. 계산 결과를 보면, 춘계에는 질소가 제한인자로 작용하다가 하계로 가면서 비율이 16에 근접하다가 추계와 동계에는 인의 농도가 급격히 감소하여 인이 제한인자로 작용하는 변화 특성을 나타내었다.

4.2. 수질항목간의 상관관계

호소 환경에서의 영양염류인 질소는 총질소를 기

준으로 영양상태를 판정하는데, 이는 총질소의 한 성분인 유기질소가 가수분해 및 미생물의 작용으로 인하여 무기질소로 전환되며, 변환된 무기질소는 광합성작용에 의하여 조류를 생성하고, 사멸된 조류는 유기질소로 순환되는 특성을 가진다. 따라서 호소환경의 수질문제인 부영양화를 관리하기 위해서는 총질소를 기준으로 호소수질환경을 관리해야 한다. 인의 경우도 질소와 마찬가지로 순환하는 물질로써 총인을 기준으로 수질환경기준을 정하고 있다. 따라서 호소환경관리에 있어 가장 중요한 사항은 영양염류에 기인하는 부영양화이므로 영양염류를 관리하는 것이 중요하다. 이처럼 수질인자들 중 서로 순환하면서 일정한 상관성을 가지며 변동하는데, 특히 유기물질과 엽록소 그리고 영양염류 간에는 밀접한 상관성이 있는 것으로 알려져 있다.

수질인자간의 관련성을 평가하기 위하여 13개 수질항목에 대한 단순상관분석을 실시한 결과를 Table

3에 나타내었다. 수질인자 중 부영양화와 관계되는 인자인 엽록소 a(Chl.a)와 총질소(TN), 총인(TP)간의 상관도를 Fig. 2에 나타내었다.

본 조사에서 영양염류와 클로로필 a 그리고 유기물농도의 관계를 보면, 유기물량의 간접적인 지표인 COD가 Chl.a, TP, TN과 양의 좋은 상관성을 가

Table 3. Correlation matrix among 12 variables

	Temp.	pH	TSS	VSS	DO	COD	Chl.a	DIP	TP	NH3	NO2	NO3	DIN	TN
Temp.														
pH	-0.229													
TSS	-0.498	0.515												
VSS	0.322	0.291	0.686											
DO	0.116	-0.025	-0.225	0.012										
COD	0.116	0.423	0.033	-0.094	0.027									
Chl-a	0.348	0.363	0.143	0.168	0.044	0.757								
DIP	0.233	0.261	0.098	0.244	0.085	-0.095	0.066							
TP	0.347	0.268	-0.100	0.094	0.047	0.696	0.720	0.255						
NH ₃ -N	0.431	-0.192	-0.133	-0.214	0.399	0.017	-0.140	-0.270	-0.188					
NO ₂ -N	0.541	-0.164	-0.225	-0.087	-0.125	-0.260	-0.157	0.308	-0.088	-0.009				
NO ₃ -N	0.807	-0.023	-0.250	-0.008	0.034	0.532	0.615	0.096	0.670	-0.176	0.182			
DIN	0.839	-0.097	-0.301	-0.096	0.181	0.531	0.556	-0.002	0.594	0.199	0.190	0.930		
TN	0.685	-0.014	-0.305	-0.117	0.206	0.647	0.602	0.031	0.724	0.091	0.090	0.82	0.902	

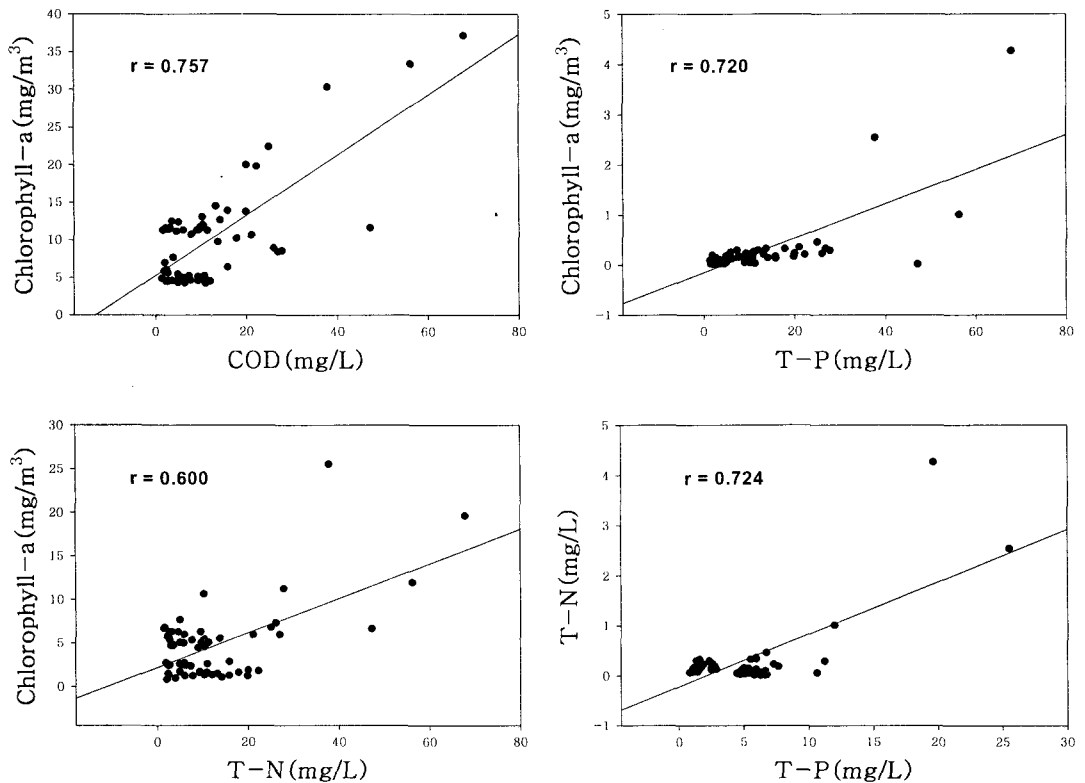


Fig. 2. Relationship among Total nitrogen, Total phosphorus, Chlorophyll a and COD.

지고 있으며, 식물플랑크톤의 나타내는 Chl.a는 성장 제한인자로 작용하는 영양염류인 TP, TN, DIN 및 질산과 좋은 상관성을 나타내고 있어, 식물플랑크톤의 성장이 저수지내 영양염의 농도와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 또한 총질소의 경우 COD, Chl.a, TP와 좋은 상관성을 가지며, 특히 DIN과 질산질소와는 0.8이상의 아주 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다.

이들 인자간의 상관식 및 상관계수를 보면, 클로로필 a와 COD에서는 $[Chl.a] = 5.279 + 0.400[COD]$ ($r=0.757$), 클로로필 a와 총인에서는 $[Chl.a] = -0.150 + 0.034[TP]$ ($r=0.720$), 클로로필 a와 총질소에서는 $[Chl.a] = 2.205 + 0.198[TP]$ ($r=0.600$)로 나타났다.

COD의 경우 외래성COD와 내부COD가 있으며, 수계 주변에 오염원이 존재할 경우 외래성COD가 존재할 수 있어 식물플랑크톤에 의해 나타나는 내부COD를 정확하게 평가할 수 없다. 그러나 주변 오염원이 없는 경우 COD변화의 주요 요인은 식물플랑크톤 성장에 따른 내부COD에 의존하는 경향이 있다. 본 연구대상 저수지의 경우 대부분이 빗물에 의존하는 저수지로서 주변오염원이 없기 때문에 COD의 변동이 식물플랑크톤의 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

영양염류인 총질소와 총인의 경우 조류 성장의 제한인자로 작용하는 수질인자로 식물플랑크톤과 밀접한 관련성을 가진다. 그러나 부영양화가 진행된 단계에서는 이러한 영양염류의 농도가 과다하게 존재하게 되어 영양염류에 대한 상관도가 떨어지는 경향을 가진다. 본 조사에서도 상관성이 나타났으나, COD보다는 낮은 상관도를 보였다. 특히 질소의 경우 상관계수 0.60으로 다른 인자에 비해 낮았는데, 이는 수계에 존재하는 총질소의 농도가 총인보다 월등히 높은 농도 수준을 가지기 때문인 것으로 판단된다.

총질소에 대한 총인과 용존무기질소와의 상관식을 보면, $[TN] = -0.2149 + 0.1046[TP]$ ($r=0.724$)와 $[TN] = 0.0397 + 0.1257[DIN]$ ($r=0.902$)로 나타나 상당히 높은 상관성을 나타내었다.

4.3. 부영양화 평가

4.3.1. 정량적 방법에 의한 부영양화 평가

정성적 부영양화평가 방법은 부영양화 현상에서 나타나는 생물상의 변화나 외관상의 수질의 변화로써 추정하는 방법 정확한 양적판단이 어렵다. 이를 보완하기 위하여 부영양화와 관련 깊은 수질인자의 농도로써 평가하는 정량적 방법이 제시되었다.

정량적 방법에는 단일수질항목으로 평가하는 방

법과 복수의 여러 수질항목을 이용하는 방법이 있다. 본 조사에서 얻어진 수질인자 중 부영양화 관련 인자인 chlorophyll-a, 총인, 총질소를 이용하여 US-EPA²⁾와 OECD⁵⁾ 및 Forsberg & Ryding⁴⁾에 의해 제시된 복수항목의 기준에 의하여 부영양화 정도를 평가해 보았다. Table 4는 클로로필 a, 총질소, 총인에 대한 저수지별, 월별 평균농도와 연평균농도를 나타낸 것이다.

클로로필의 농도에 의해 판정해 보면, Forsberg & Ryding 기준으로 옥구, 옥녀 및 대위저수지가 하계와 추계에 부영양상태이고, 미제와 금굴저수지는 대부분이 중영양상태이나 일부 계절에 부영양상태가 나타났다. EPA 기준으로는 미제와 금굴저수지를 제외한 저수지에서 부영양상태로 나타났다. OECD에서 제시한 기준에 의한 평가에서 미제와 금굴저수지는 중영양상태였고, 나머지 저수지는 부영양상태였다. 총인 농도에 의해 판정해 보면, Forsberg & Ryding 기준으로 전 저수지에서 동계를 제외한 계절에 과영양상태를 보였으며, 동계는 부영양으로 나타났다. OECD에서 제시한 기준에 의한 평가에서 미제저수지만 부영양상태이고, 나머지 저수지는 과영양상태로 나타났다. 총질소 농도에 의해 판정해 보면, Forsberg & Ryding 기준과 EPA기준으로 전 저수지에서 과영양상태로 나타났다.

4.3.2. 부영양화 지수에 의한 평가

군산 소재 저수지에 대한 수질의 영양상태를 판정하기 위하여 계절별 수질조사 자료를 이용하여 호소의 영양상태 판정에 이용되는 Carlson지수⁶⁾와 수정 보완된 수정 Carlson's 지수⁷⁾ 그리고 Walker's index⁸⁾에 대한 영양상태 지수를 계산하였다. 지수계산에 이용된 자료는 부영양화와 관계가 깊은 클로로필 a와 총인 자료를 이용하였으며, 계산된 저수지별 평균 부영양화지수를 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다.

Carlson 지수에 의한 부영양화 정도를 평가하면, Chl.a의 의한 지수값은 미제저수지와 금굴저수지가 40이하로 중영양상태에 해당하였고, 나머지 저수지는 55~59의 지수값으로 부영양상태로 나타났다. 그러나 총인에 의한 지수값은 전 저수지에서 70 이상의 지수값을 보여 부영양 단계를 훨씬 초과하는 상태를 나타내었다.

수정 Carlson 지수에 의한 부영양화 정도를 평가하면, Carlson에 의한 지수결과와 거의 유사하였다. Chl.a의 의한 지수값은 미제저수지와 금굴저수지가 각각 45, 43으로 중영양상태에 해당하였고, 나머지 저수지는 52~56의 지수값으로 부영양상태로 나타났다. 그러나 총인에 의한 지수값은 전 저수지에서 70 이상의 지수값을 보여 부영양 단계를 훨씬 초과

군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가

Table 4. The concentration of water quality constituent concerned eutrophication for reservoirs in Kunsan

Reservoir	Season	Chl-a(mg/m ³)	T-P(mg/m ³)	T-N(mg/m ³)
Okgu	Spring	8.83	265.20	2023.69
	Summer	111.96	2072.44	15994.16
	Autumn	11.26	218.85	1416.67
	Winter	10.07	49.59	5333.06
	Annual Mean	35.53	651.52	6191.89
	Max Chl.a	67.96		
Mije	Spring	7.13	156.18	2150.28
	Summer	3.44	113.16	5728.66
	Autumn	2.74	77.40	1196.69
	Winter	14.52	20.09	5999.69
	Annual Mean	6.96	91.71	3768.83
	Max Chl.a	47.21		
Oknua	Spring	8.71	182.70	2561.71
	Summer	17.44	341.71	5755.00
	Autumn	21.18	221.35	1863.59
	Winter	4.02	41.90	4908.84
	Annual Mean	12.84	196.91	3772.29
	Max Chl.a	22.30		
Geungul	Spring	3.22	168.93	2625.01
	Summer	6.16	165.68	6031.56
	Autumn	13.14	108.85	2108.01
	Winter	2.33	22.23	6302.70
	Annual Mean	6.21	116.42	4266.82
	Max Chl.a	15.92		
Daewi	Spring	8.79	239.67	1570.06
	Summer	26.99	286.98	8191.33
	Autumn	16.64	162.87	1209.50
	Winter	10.17	59.28	6787.53
	Annual Mean	15.65	187.20	4439.60
	Max Chl.a	27.90		

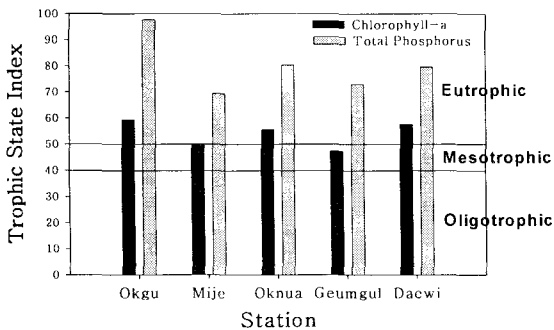


Fig. 3. Distribution of trophic state index by carlson's at reservoirs in Kunsan.

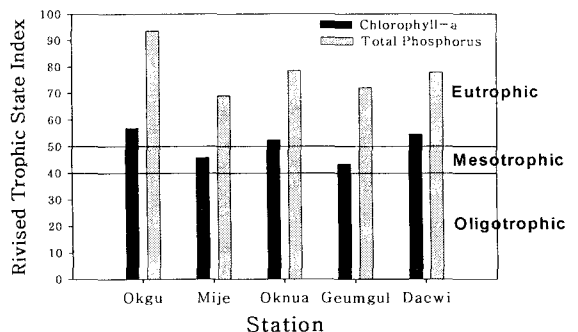


Fig. 4. Distribution of revised trophic state index by sakamoto at reservoirs in Kunsan.

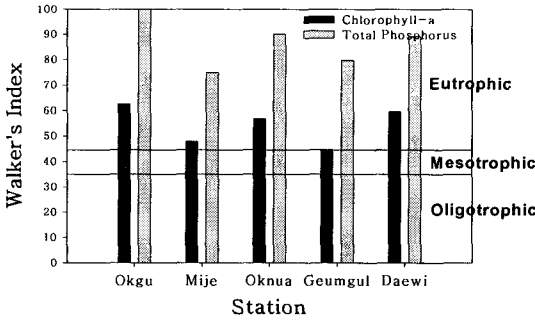


Fig. 5. Distribution of Walker's index at reservoirs in Kunsan.

하는 상태를 나타내었다.

Walker's index에 의한 부영양화 정도를 평가하면, Chl.a의 의한 지수값은 미제저수지와 금굴저수지가 각각 44, 47으로 중영양상태에 해당하였고, 나머지 저수지는 56~62의 지수값으로 부영양상태로 나타났다. 그러나 총인에 의한 지수값은 전 저수지에서 70 이상의 지수값을 보였고, 옥구저수지의 경우 100을 초과하여 지수에서 설정된 최대 총인의 농도보다 높은 농도가 검출되었다.

전 지수 값에서 나타났듯이 미제저수지와 금굴저수지는 아직 오염이 심화되지 않은 상태로 중영양상태의 수준을 나타내었고, 수질의 악화를 방지하기 위한 지속적인 조사와 수질관리 방안을 수립할 필요가 있다. 그러나 옥구저수지와 옥너저수지, 대위저수지의 경우 부영양화 상태로 접어든 수준으로 수질관리를 위한 대책수립이 절실하였다. 특히 부영양화 인자 중 주요인자인 총인의 농도에 있어 상당히 높은 농도와 지수값을 보여 이에 대한 대책수립을 세우는 것이 좋을 것으로 판단된다.

5. 결론

군산유역에 소재하는 저수지에 대한 수질특성 및 부영양화 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 군산 소재 저수지의 수질특성을 보면, 옥구저수지와 옥너저수지에서 유기물질을 나타내는 COD와 영양염류인 총질소와 총인농도에서 호소수질환경기준에서 제시된 농업용수인 수질등급Ⅳ을 초과하는 농도수준을 나타내어 상당히 부영양화가 진행되어 저수지 수질관리를 필요하였다. 반면 군산시민의 위락지로 이용하는 미제저수지는 상대적으로 오염도가 낮았으나, 일부 계절에는 수질등급Ⅳ를 초과하는 농도를 보여 지속적인 수질관리를 위한 대책수립이 필요하다.

2) 수질인자간의 상관관계 분석한 결과 부영양화와 관계있는 수질인자인 엽록소와 총인, 총질소간에

서 유의성이 있는 좋은 상관성을 나타내어 부영양화 진행에 따른 관련 수질인자간의 변동을 파악할 수 있다.

3) 정량적 방법에 의한 부영양화 평가에서 클로로필의 농도로는 옥구, 옥너 및 대위저수지가 부영양상태이고, 미제와 금굴저수지는 중영양상태로 나타났다. 총인과 총질소 농도로는 전 저수지에서 과영양상태를 보여주어 영양염류의 농도가 상당히 높음을 알 수 있다.

4) Carlson's index(TSI), Revised Carlson's index(RTSI), Walker's index가 제한한 부영양화 지수에 의한 평가에서 클로로필 농도로는 옥구, 옥너, 대위저수지가 부영양상태이고, 미제와 금굴저수지는 중영양상태로 나타났으나, 총인농도에 의한 평가에서는 전 저수지가 지수 70을 초과하여 높은 부영양상태를 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 군산 소재 농업용수로 이용되는 소규모 저수지의 수질은 상당히 부영양화가 진행되었으며, 농업수자원으로써의 지속적인 사용을 위하여 저수지 수질관리를 위한 대책수립과 아울러 지속적인 수질감시가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 군산대학교 수산과학연구소 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- 1) Earl E. S., Patrick L. B., 1972, Eutrophication analysis: A multivariate approach, J. Sanitary Eng. Div., SA1, 37-57.
- 2) US-EPA, 1974, Manual of Methods for Chemical Analysis of Water and Waste, EPA-625-6-74-003, 197-215.
- 3) Rast W., Lee G.R., 1978, Summary analysis of the north american OECD eutrophication projects : Nutrient loading-lake response relationships and trophic state indices., U.S.EPA, EPA0600/ 3-78-008, Corvallis, Ore.
- 4) Forsberg C., Ryding S. O., 1980, Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 swedish waste-receiving lakes. Archives of Hydrobiology, Bd. 89, 189-207.
- 5) OECD, 1982, Eutrophication of water-monitoring, assesment, and Control.
- 6) Carlson R. E., 1997, A Trophic state index for lakes, Limnol. Oceanogr., 22(2), 361-369.
- 7) 相崎守弘, 大槻晃, 福鳥武彦, 河合崇欣, 細見正明,

- 村岡治, 1981, 修正カルソン富營養化狀態指標の日本湖沼への適用とその他の水質項目との關係-湖沼の富營養化狀態指標に關する基礎研究 國立公害研究所研究報告 第23號, 13-31.
- 8) Walker W. W., Jr., 1979, Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lakes, *Water Resource Research*, 15(6), 1463-1470.
 - 9) Donald B. P., Spencer A. P., David P. L., 1980, Index to evaluate lake restoration, *J. Environ. Eng. Div.*, EE6, 1151-1169.
 - 10) Dillon P. J., Rigler F. H., 1974, The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 19(5), 767-773.
 - 11) David C. L., 1975, Development of oxygen deficits in 14 southern Ontario lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 20(6), 993-999.
 - 12) Dillon P. J., 1975, The phosphorus budget of cameron lake, Ontario: The importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 20(1), 28-39.
 - 13) Val H. Smith, 1979, Nutrient dependence of primary productivity in lakes, *Limnol. Oceanogr.*, 24(6), 1051-1064.
 - 14) Prepas E. E., Trew D. O., 1983, Evaluation of the phosphorus-chlorophyll relationship for lakes off the precambrian shield in western canada, *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, Vol. 40, 27-35.
 - 15) Val H. S., 1982, The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis, *Limnol. Oceanogr.*, 27(6), 1101-1112.
 - 16) Daniel E. Canfield Jr., Kenneth A. L., Michael J. M., William T. H., Jerome V. S., 1983, Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes, Canada, *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 40, 1713-1718.
 - 17) Bays J. S., Crisman T. L., 1983, Zooplankton and trophic state relationships in Florida lakes, Canada, *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, 40, 1813-1819.
 - 18) 국립환경연구원, 1982, 삼교호의 부영양화 현상에 관한 조사보고, 1-2.
 - 19) 김동근, 이문호, 안준상, 서윤수, 1982, 호소수의 부영양화 현상에 관한 조사연구, 국립환경연구소보, 4, 147-154.
 - 20) 김승호, 1985, 전남지방의 일부 인공호수의 부영양화에 관한 조사연구, 한국환경위생학회지, 11(1), 15-28.
 - 21) 장재길, 1992, 대청호에 대한 Trophic State System의 적용에 관한 조사연구, 서울대학교 보건대학원, 보건학 석사학위논문, 1-4.
 - 22) 김규광, 1988, 인공호수에 대한 영양염류와 엽록소a 농도의 상관성 및 부영양화 검토, 서울대학교, 보건학 석사학위논문, 1-2.
 - 23) 김범철, 안태석, 조규송, 1988, 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교 연구, *Kor. J. Limnology*, 21(3), 151-163.
 - 24) 류일광, 이치영, 강영식, 김관천, 1989, 영산호의 부영양화방지를 위한 질소, 인의 배출원단위에 관한 조사연구, 한국환경위생학회지, 15(2), 51-58.
 - 25) 류재근, 1992, 호소 부영양화 방지기술의 현황과 전망, *대한위생학회지*, 7(1), 35-44.
 - 26) 최문술, 1993, 전북소재 저수지의 부영양화에 관한 비교연구, *해양개발연구*, 5(1), 26-31.
 - 27) 김복현, 오양환, 홍중순, 목동우, 김재건, 이경호, 1999, 수질환경오염공정시험법, 동화기술, 145-261.