

식물에 의한 호수생태계 건강성 평가법에 대한 고찰

정연숙* · 이경은

(강원대학교 생명과학과)

Review of a Plant-Based Health Assessment Methods for Lake Ecosystems. *Choung, Yeonsook* and Kyungeun Lee (Department of Biological Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)*

It is a global trend that the water management policy is shifting from a water quality-oriented assessment to the aquatic ecosystem-based assessment. The majority of aquatic ecosystem assessment systems were developed solely based on physico-chemical factors (e.g., water quality and bed structure) and a limited number of organisms (e.g., plankton and benthic organisms). Only a few systems use plants for a health assessment, although plants are sensitive indicators reflecting long-term disturbances and alterations in water regimes. The development of an assessment system is underway to evaluate and manage lakes as ecosystem units in the Korean Ministry of Environment. We reviewed the existing multivariate health assessment methods of other leading countries, and discussed their applicability to Korean lakes. The application of multivariate assessment methods is costly and time consuming, in addition to the correlation problem among variables. However, a single variable is not available at this moment, and the multivariate method is an appropriate system due to its multidimensional evaluation and cumulative data generation. We, therefore, discussed multivariate assessment methods in three steps: selecting metrics, scoring metrics and assessing indices. In the step of selecting metrics, the best available metrics are species-related variables, such as composition and abundance, as well as richness and diversity. Indicator species, such as sensitive species, are the most frequently used in other countries, but their system of classification in Korea is not yet complete. In terms of scoring metrics, the lack of reference lakes with little anthropogenic impact make this step difficult, and therefore, the use of relative scores among the investigated lakes is a suitable alternative. Overall, in spite of several limitations, the development of a plant-based multivariate assessment method in Korea is possible using mostly field research data. Later, it could be improved based on qualitative metrics on plant species, and with the emergence of further survey data.

Key words : lake ecosystem, health assessment method, vascular plant, integrity, reference lake

* Corresponding author: Tel: +82-33-250-8529, Fax: +82-33-251-3990, E-mail: yschoung@kangwon.ac.kr

서 론

우리나라는 그동안 수체의 평가와 관리에 있어서 수질의 중요성을 강조해 왔다. 사람을 위한 물 공급 측면에서 수질이 매우 중요했을 뿐만 아니라 수체를 생태계로 이해하기보다 물공급원으로 인식해왔기 때문이다. 그러나 선진적인 물 관리 정책은 수질평가 중심에서 수생태계 건강성 평가로 전환되는 추세이다. 미국이나 유럽에서는 수질정책의 기본적인 개념으로 수체의 건강성을 제시하며 (Davis and Simon, 1995), 수질기준의 정책 목표 내에 생물 요인들과 관련된 기준을 두고 있다 (Kim, 2009).

우리나라도 수체를 수생태계로 바라 보는 인식으로 바뀌고 있다. 우리나라 호수생태계는 수자원 공급용으로 축조된 저수지가 대부분이어서 생물을 수용할 물리적 입지가 부적절한 곳이 많다. 뿐만 아니라 물리적 훼손 등 인위적 교란이 증가하여 수질이 좋음에도 불구하고 생물상의 건강성은 낮은 곳이 많다. 따라서 수질 외에 생물의 현존량과 다양성 등을 포괄하는 통합적 생태계 건강성 평가가 필요한 시점이다 (Kim, 2009). Karr and Dudley (1981)는 “교란되지 않은 생태계의 생물군집이 고유의 종 구성, 다양성 및 기능을 유지하는 능력”을 생물학적 온전성 (biological integrity)으로 정의한 바 있다. 이 논문에서는 이 정의를 건강성의 정의로 대치하여 사용하고자 한다.

생태계 중 수계생태계의 건강성을 이해하고, 사라져가고 훼손되어 가는 수계생태계를 관리하기 위해서 생물학적 건강성의 정도를 평가하는 시도가 이뤄지고 있다. 지표 항목을 정하여 호수를 평가하거나 조사하는 것은 미국 (eg. Gernes and Helgen, 1999; Nichols *et al.*, 2000; Mack, 2001a; Rothrock *et al.*, 2008)과 유럽의 여러 나라 (Cardoso *et al.*, 2005)에서 수행하고 있다. 나라와 지역에 따라 평가항목이나 항목의 수는 차이가 있다. 미국은 맑은물법 (Clean Water Act)에 의해서 수체의 기능과 질을 반드시 평가하게 되어 있다 (Mack, 2001a). 그럼에도 호수는 다른 수계에 비해서 환경 지표나 평가법의 개발이 늦으며 (Rothrock *et al.*, 2008), 상대적으로 하천 (eg. Barbour *et al.*, 1999)이나 습지 (eg. U.S EPA, 2002)에서 평가법이 잘 발달되어 있다. 최근에 건강성 평가 과정은 빨리 평가할 수 있고, 비용 대비 효과가 크고, 정밀하고, 재현 가능한 환경 지표를 개발하는 추세이다 (Barbour *et al.*, 1999; Rothrock *et al.*, 2008).

유럽은 WFD (Water Framework Directive)의 프로젝트인 REBECCA (Relationships between ecological and chemical status of surface waters, EU FP6 project on

lakes, 2004~2007)의 연구에 20개 국가가 참여하여 5,000개 이상의 호수 데이터를 이용해서 호수의 생물, 화학적 특징을 찾는 시도를 하고 있다.

생물학적 지표로써 어류, 곤충, 무척추동물 등이 많이 사용되고 있다. 이에 비해 식물은 지질이나 지하수, 토양 등의 차이를 설명하는 주요한 지표로써 오래 전부터 사용되어 왔지만 (Miller *et al.*, 2006), 호수나 하천 등 수계의 건강성의 척도로써 사용되기 시작한 것은 오래되지 않았다 (Mack *et al.*, 2000; Miller *et al.*, 2006). 식물은 좋은 지표가 될 특성을 갖고 있어 최근 널리 이용되고 있다 (eg. U.S. EPA, 1998, 2002; Gernes and Helgen, 1999; Nichols *et al.*, 2000; Herman *et al.*, 2001; Mack, 2001a; Miller *et al.*, 2006; Rothrock *et al.*, 2008). 식물은 수계를 생육지로 하는 뚜렷한 종 군이 있으며, 종 수가 비교적 많기는 하지만 현장에서 특별한 도구나 장치가 없이 종 수준으로 동정하는 것이 가능하다. 또한 이동성이 없어 연중 생육기 내 분포하므로 조사하기 쉽다. 뿐만 아니라 수계의 물리적, 화학적, 생물학적 변화에 민감하게 반응하며, 특히 퇴적물의 축적, 부영양화, 수문학적 변화에 민감한 것으로 보고되었다 (Miller *et al.*, 2006).

국내에서 개발된 수생태계 평가기법으로는 Cho (1997)와 Kim and Park (1999)의 하천의 자연도 평가, National Institute of Environmental Research (2010)의 하천생태계의 건강성 평가법이 있는데, 대부분 하천에 관한 연구 결과이다. 호수의 건강성 평가에 대해서는 현재 환경부의 수생태복원사업단에서 전국의 호수와 저수지를 생태계로써 평가하고 관리할 목적으로 생태계의 평가 기법을 마련 중에 있다.

본 논문은 우리나라 호수생태계에 적합한 평가기법 중 특히 식물을 대상으로 하는 평가하는 방법을 개발하기 위한 전 단계로서, 기 개발된 국외의 평가기법을 고찰하여 우리나라에 적용가능성을 검토하는 것이 목적이다. 건강성 평가기법의 개발과정은 적합한 평가지표를 발굴해서 선정하고, 선정된 지표를 점수화하며, 이를 종합해서 특정 생태계 또는 군집의 건강성 지수로 결정하는 세 단계를 거치므로, 이 과정을 단계 별로 검토하고 마지막으로 적용가능성을 고찰한다.

평가지표의 선정

현장에서 측정하거나 평가하고 실험실에서 분석한 각종 변수들은 일련의 분석과정을 거쳐서 서식지로서의 호수의 상태와 상관성 있는 변수, 즉 평가지표 (metric)로

추출해야 한다. Karr and Chu (1999)는 평가지표를 “사람의 활동에 의해서 영향을 받으며 측정 가능한 생물학적 구조와 과정”으로 정의했다. 평가지표는 양적 평가지표와 질적 평가지표로 나눌 수 있다. 양적 평가지표는 풍부도, 생물량, 피도 등 종의 수도(abundance)를 사용하는 지표이며, 질적 평가지표는 지표종(민감종, 내성종)이나 식물종 평가 지수(floristic quality assessment index, FQAI)와 같이 특정 식물의 존재 가치를 질적으로 평가한 지표를 말한다. 나라와 지역마다 사용하는 지표가 다르고, 소수 또는 다수의 지표 조합으로 호수나 습지를 평가하고 있다. 소수의 지표를 사용하는 곳은 질적 평가지표인 식물종 평가 지수나 지표종을 핵심지표로 흔히 사용한다(eg. Swink and Wilhelm, 1994; Herman *et al.*, 2001; Lopez and Fennessy, 2002).

FQAI는 미국 시카고에서 식물군집의 질적 수준을 평가하기 위해 Swink and Wilhelm (1979)가 처음 만들었고, 후에 Wilhelm and Ladd (1988)와 Wilhelm and Masters (1995)가 보완하였다. 이 지수는 누구나 정확한 식물학적 기술을 사용할 수 있도록 식물의 질(quality)에 대한 주관성을 배제하고 객관적인 기준으로 만들어졌다. 자연군집의 질이 구성 종의 교란에 대한 내성 또는 특정 서식지에 대한 충성도(또는 적합도)에 의해서 영향을 받기는 하지만, 식물 종의 생태학적 가치에 따라 객관적으로 평가될 수 있다는 것이다(Andreas *et al.*, 2004). 계산된 지수는 어떤 지역의 자연도를 평가하는 데 이용될 수 있다(Elifritz and Fennessy, 2005). 미국의 미시간(Herman *et al.* 1997, 2001), 미주리(Ladd, 1993), 온타리오(Oldham *et al.*, 1995), 북부 오하이오(Andreas and Lichvar, 1995), 일리노이(Taft *et al.*, 1997), 위스콘신(Nichols, 1998; Wisconsin Floristic Quality Assessment, 2002), 북부 다코타(Northern Great Plains Floristic Quality Assessment Panel, 2001) 등의 지역에서 사용되고 있다(Andreas *et al.*, 2004).

한편, 유럽의 여러 국가에서는 식물종 평가 지수와 비슷한 개념으로 지표종을 선발하여 사용한다. 영국, 독일, 스웨덴에서는 식물이 수체의 인의 농도에 반응하는 정도에 따라 지표종을 선발하고, 독일은 민감종, 내성종 그리고 중간종의 상대 풍부도를 바탕으로 하는 지표를 사용한다(Penning *et al.*, 2008). 스웨덴에서는 모든 종에 인의 농도 구배에 따라 지표값을 설정하여 그 값을 계산하여 사용한다. 영국에서도 수체의 부영양화에 대해 긍정적으로 반응하는 종(impact species)과 부정적으로 반응하는 종(reference species)으로 구분하여 이용한다(Penning *et al.*, 2008).

소수의 지표로 호수를 평가하는 것은 쉽고 빠르며 비용이 적게 드는 장점이 있다. 그러나 인위적 영향의 정도와 방향이 다르고, 상호작용하는 다양한 속성 중 한 가지로 평가하는 것은 한계가 있다. 따라서 측정하고 평가할 수 있는 많은 속성 중에서 비용 대비 효과가 크며 평가하고자 하는 생태계의 건강성을 가장 잘 설명할 수 있는 좋은 지표를 선발하는 일이 중요하다. 그래서 여러 개 또는 모든 지표의 결과를 통합해서 이용하는 다변수평가법을 많이 사용하는 추세이다(Nichols *et al.*, 2000; Mack, 2001a; U.S. EPA, 2002; Miller *et al.*, 2006; Rothrock *et al.*, 2008).

평가지표의 선발과정에는 평가지표와 호수의 서식지 평가 등과의 상관성을 입증하는 통계적 과정을 거쳐야 한다. 몇몇 연구에서 이 과정을 거쳐 채택한 평가지표를 제시하였다(Table 1). 연구장소의 특징에 따라서 선정한 평가지표가 차이를 보이지만, 출현한 총 식물종수나 수생 식물(예, 침수식물, 정수식물, 부엽식물군)의 출현종수를 흔히 사용하고 있다. 특히 교란에 민감한 종이거나 내성을 가진 종의 수, 외래종의 수는 거의 모든 평가지표에서 공통적으로 사용하고 있다. 그리고 식물종 평가 지수를 지역에 맞게 변형하여 다른 평가지표들과 함께 사용하기도 한다. 이외에 양적 평가지표로 우점도 지수, 특정 종군의 피도, 생물량 등도 사용하며, 식물이 생육하는 최대 수심과 식생분포면적도 사용한다. 유럽에서 사용하는 평가지표도 국가 별로 차이를 보이는데, EU의 Water Frame Directive는 종조성과 수도(composition/abundance), 종 풍부도와 다양성(richness/diversity), 민감성과 내성(sensitivity/tolerance) 및 기능(functional metrics)의 네 요소는 포함하도록 권유하고 있다(Cardoso *et al.*, 2005).

평가지표의 점수화

평가지표를 정한 후에는 각 지표에 점수를 부여해야 한다. 이때 각 지표가 호수의 질 저하에 대해서 어떻게 반응하는지 그 방향을 가설로 정해야 한다. 문헌상의 가설을 검토한 결과(Table 2), 총 식물종수는 감소하며, 특정 종군 중 수생식물이나 민감종수 및 목본종수는 감소한다고 한다. 반면, 내성종수, 외래종수 및 천이초기종수는 증가한다. 또한 양적으로도 수생식물의 상대 풍부도는 감소하는 반면, 천이 초기종, 목본수종, 외래종은 증가하게 된다(U.S. EPA, 1998; Mack, 2001a; Miller *et al.*, 2006; Rothrock *et al.*, 2008). 생태계의 질 저하 시에 부영양화가 되는 경우가 많으므로 일차생산력은 증가하는

Table 1. Frequently used plant metrics for the wetlands health assessment. Numbers indicate eleven referred literature, and the adopted metrics in the literature are shaded.

Metrics	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I. Species composition (richness)											
Total number of species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Number of annual species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Number of <i>Carex</i> species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Number of Woody species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
II. Tolerance (richness or abundance)											
Tolerant species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sensitive species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Exotic species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
III. Guild structure (richness or abundance)											
Aquatic species richness	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Obligate wetland species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Emergent species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Floating species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Submerged species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pioneer or weed species	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
IV. Other											
Littoral area vegetated	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Species diversity	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Dominance index	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Floristic quality assessment index (FQAI)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Maximum depth of plant growth	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Sources: 1. Simon *et al.*, 2001; 2. Nichols *et al.*, 2000; 3. INDR, 2007; 4. U.S. EPA, 1998; 5. Hatzember *et al.*, 2004; 6. Rothrock *et al.*, 2008; 7. Miller *et al.*, 2006; 8. Wilcox *et al.*, 2002; 9. Mack, 2007; 10. Gernes and Helgen, 2002; 11. Ferreira *et al.*, 2005. Sources 1~5 from lakes; 6~10 from wetlands and 11 from rivers.

것으로 가정했다. 그런데 U.S. EPA (1998)는 식물 총 종 수, 수생식물종과 목본수종의 상대수도, 우점종 비율, 식생분포면적 비율 및 생물량을 기준 호수의 조건과 비교할 것을 제안하였다. 기준 호수란 인위적 영향을 거의 받지 않은 원 자연의 구조와 기능을 유지하고 있는 곳으로 정의할 수 있을 것이다.

우리나라는 석호를 제외하면 자연호수가 거의 존재하지 않고 댐으로 조성한 인공호이거나 저수지로 조성된 곳이 대부분이다. 석호도 해수 유입의 조절이나 수변부의 매립 등 물리 구조가 변형되고 부영양화의 영향을 많이 받고 있다 (Seo, 2012). 따라서 인위적 영향을 받지 않은

곳으로 추정되는 기준 호수의 개념을 적용하기 어렵다. Nichols *et al.* (2000)은 조사한 수체 중 상대화된 값을 적용하는 것이 타당하다고 제안했는데 이 경우는 많은 수의 수체를 조사해야 한다.

각 평가지표의 반응에 대해서 가설을 설정한 후에는 그에 따라 일정 등급으로 나누고 점수를 부여한다. 등급은 기준 호수의 조건이나 상대적으로 교란을 받지 않은 곳 또는 상대적으로 가장 건강하다고 판단되는 곳의 상태를 기준으로 일정범위로 나누거나 연구장소의 특징에 따라 구분한다. 만약 일부 평가지표가 수체의 크기에 영향을 받는다면 수체의 크기를 x축으로 하고 평가지표를

Table 2. Hypothesized change of plant metrics with decreasing habitat quality for the wetlands health assessment.

Metrics	Hypothesized change with decreasing habitat quality
Species diversity	
Total number of species	Decrease ^{1,2} , reference condition ³
Specific species	
Number of aquatic species or ratio	Decrease ^{1,3,4}
Number of sensitive species or ratio	Decrease ^{1,2}
Number of tolerant species or ratio	Increase ^{1,2,3,4}
Number of exotic species or ratio	Increase ^{1,3,4}
Number of pioneer species or ratio	Increase ^{3,4}
Number of woody species or ratio	Decrease ⁴
Community structure	
Relative abundance of aquatic species	Decrease ¹ , reference condition ²
Relative abundance of pioneer species	Increase ^{1,3}
Relative abundance of woody species	Increase ¹ , reference condition ²
Relative abundance of exotic species	Increase ¹
Dominance species ratio	Reference condition ³
Vegetation cover (% of littoral zone)	Reference condition ³
Maximum depth of plant growth	Reduced under enrichment, deeper under acidification ³
Community function	
Primary productivity	Increase ²
Biomass	Reference condition ³

1: Rothrock *et al.*, 2008; 2: Mack 2001a; 3: U.S. EPA, 1998; 4: Miller *et al.*, 2006

y축으로 하는 그래프를 그려 그에 따라 점수를 부여함으로써 크기의 영향을 완화할 수 있다 (e.g. Simon *et al.*, 2001; Rothrock *et al.*, 2008). 다수의 연구에서 평가지표를 3등급으로 구분하고 1, 3, 5점을 부여하였다 (e.g. Karr *et al.*, 1986; Simon *et al.*, 2001; Gernes and Helgen, 2002; Wilcox *et al.*, 2002; Ferreira *et al.*, 2005; Rothrock *et al.*, 2008). 이와 달리 Mack (2001a)은 4등급으로 구분하고 0, 3, 7, 10점을 부여했다. 이들은 평가지표의 수가 10개이고 각 평가지표별 최고 점수가 10점이어서 합계가 100점이 되므로 수체를 비교하기 용이하다고 주장하였다. Nichols *et al.* (2000)은 각 평가지표를 10등급으로 구분하고 평가지표당 최고 점수를 10점으로 하였다.

다변수 건강성 평가 지수의 결정과 검증

각 평가지표의 합이 특정 수체의 종합 점수 또는 지수 (index)가 된다. 평가지표 별로 가중치를 주거나, 가중치 없이 평가 지수를 단순 합산할 수 있을 것이다. 식물에 의한 수체의 건강성 지수를 연구한 문헌에서는 각 평가지표의 해당 점수를 합산한 총 점수를 사용했으며 가중치를 주지 않았다. 예를 들어 Rothrock *et al.* (2008)은 11개 평가지표 합 55점이 최고 점수가 되며 이를 Plant Index of Biotic Integrity (PIBI)로 칭하였다. 반면 Mack (2001a)은

10개 평가지표의 합을 최대값 100으로 하고 Vegetation Index of Biological Integrity (VIBI)로 지칭했다. 한편 Nichols *et al.* (2000)은 평가지표 7개, 70점을 최대값으로 하고 이는 Aquatic Macrophyte Community Index (AMCI)로 칭한다. 기존 문헌에서 사용한 지표 중에서는 상관성을 보이는 지표들이 있다. 만약 상관성이 있는 지표들을 배제한다면 소수의 변수만을 선택해야 할 것이다. 주관성의 논란을 야기할 수 있는 가중치 대신, 상관성이 있더라도 중요한 다수의 변수를 포함하는 것이 가중치의 효과를 주는 것이라 생각한다.

수체 별로 계산된 건강성 지수가 수체의 건강성을 담보하는지 검증이 필요하다. 이 과정에서는 별도로 평가한 교란지수 또는 서식지 지수와의 상관성을 분석하여 경향이 일치하면 건강성 지수가 서식지의 생태적 건강성을 설명하는 것으로 판단한다. Lopez and Fennessy (2002)는 미국 오하이오의 습지에서 세 단계로 간단하게 평가하는 1~24점 범위의 교란지수를 제시한 바 있다. 첫 단계는 습지 주변이 자연성 높은 숲이나 자연초지, 목밭이나 목장, 농경지 또는 도시로 둘러싸여 있는지 여부를 평가하며, 둘째 단계는 습지와 주변 사이의 완충지대 유무 및 유형을 평가하고, 마지막 단계는 사람에 의한 수리수문 변경 유무에 따라 평가한다. Gernes and Helgen (1999)는 미국 미네소타에서 습지의 교란정도 평가에서 교란 유형 (교란없음, 농경의 영향 및 태풍)을 높은 점수로 비중을

둔 반면, 이외의 교란 요인, 즉 수리수문 변경과 기타 영향, 과거의 알려진 영향 및 습지 바로 주변 완충지역의 질은 상대적으로 낮은 점수를 부여해서 수체의 교란정도를 평가했다. 또한 Calislie *et al.* (1999)는 미국 메사츨세츠 해안습지에서, Rankin (1989)은 오하이오의 하천에서 교란정도를 평가하는 다변수 측정법을 개발했다.

Rankin (1989)에 의해 개발된 Qualitative Habitat Evaluation Index (QHED)는 후에 Mack (2001b)이 Ohio Rapid Assessment Method (ORAM ver 5.0)를 만드는 토대가 되었다. ORAM 5.0에서 수체 평가의 주요 평가지표는 6종류이다. 습지 크기, 주변 토지이용과 완충지대, 수리수문, 서식지 변경과 개발, 특정 습지 생물군의 유무와 마지막으로 습지식생군집, 외래생물 및 미지형을 고려했다. Miller *et al.* (2006)은 미국 펜실베이니아 상류 습지에서 서식지의 교란요인으로 수리수문 변경, 퇴적, 생물학적 산소요구량, 오염원에 의한 저해, 식생변화, 부영양화, 산성화, 탁도, 수온변화를 조사하고 적정 평가지표를 추출했다. 한편, 미국 전역에 분포하는 909개 호수에 대한 조사 계획에서는 물리, 화학 및 생물학적인 기초 조사를 한 후, 마지막 단계에서 호수 전체에 대한 평가를 현장에서 하도록 되어 있다. 호수 주변의 주요 토지이용, 수변의 토지 피복 유형, 수질 관리 방법, 영양상태, 조류 번성도 등이 주요 평가항목이다.

적용가능성

건강성 평가기법의 개발단계를 지표 선정, 지표의 점수화 및 지수의 결정과 검증의 세 단계로 구분하여 제시하였다. 우리나라에서 개발 시 가장 어려운 단계는 첫 단계인 지표 선정이다. 앞에서 제시했듯이 나라와 연구자에 따라서 소수 또는 다수의 질적 및 양적지표를 병행하여 이용한다. 우리나라의 경우 단수보다 다수의 지표를 사용하는 다변수법을 검토하는 것이 타당할 것이다. FQAI와 같이 단일 지표로 사용할 만한 지표가 현재 없기 때문이다. 다변수법을 적용할 경우 시간이나 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라, 많이 사용하는 변수 간에 상관성이 높아서 값이 중복 적용되는 단점이 있다. 그럼에도 다수의 조사자 간의 차이를 완화하며 다면평가의 효과가 있고, 지표 항목 간의 비중을 반영하여 가중치를 줄 수 있는 장점이 있다. 부가적으로 이 조사를 통해 기초 데이터를 축적하며 동시에 수체의 생태적 변화를 장기 모니터링하는 효과도 얻을 수 있다.

EU의 Water Frame Directive에서 지표로 권유하는

항목은 종조성과 수도, 종 풍부도와 다양성, 민감성과 내성 및 기능의 네 요소이다 (Cardoso *et al.*, 2005). 이들 네 요소는 연구자에 따라서 다양하게 세분할 수 있는 다수의 지표들을 아우르는 대표 요소이므로 우리나라에서 이들 지표의 적용가능성을 검토해 본다. 첫째 항목인 종조성과 수도는 출현하는 식물 종별 피도 등의 양적 척도를 조사해서 사용할 수 있다. 피도 외의 양적 척도로 생물량이나 개체수 등을 고려할 수 있으나 생물량을 측정하기 위해서는 수확을 해야 하므로 파괴적인 방법이며 개체수를 세는 것은 벼과나 사초과의 식물이 많은 습지의 특성상 시간이 지나치게 많이 소요된다. 또한 식물 종 별로 개체 크기의 차가 매우 크므로 좋은 척도가 아니다. 이외의 양적 척도로 식생의 분포면적이나 식물이 생육하는 최대 수심을 사용할 수 있다. 예를 들어 정수식물의 분포면적은 비교적 측정하기 쉬우며, 침수식물의 분포면적은 정확한 측정이 어렵기는 하지만 침수식물이 수체 교란의 주요 지표식물이므로 (Seo, 2012) 포함하는 것이 좋다. 식물이 생육하는 최대 수심은 수체의 수질이나 물리적 여건의 좋은 지표이나 이를 측정하기 위해서는 배가 필요하므로 조사비용이 많이 필요하다. 침수식물의 분포면적을 포함한다면 최대 수심이 침수식물의 면적과 상관성이 있을 것이다. 이런 경우는 제외해도 될 것이다.

이 항목에서 FQAI 같은 질적 평가지표는 매우 좋은 척도이다. 이를 개발하기 위해서는 측정된 기초 데이터가 있어야 하고 개별 종의 생태를 평가할 수 있는 전문가 그룹이 있어야 하므로 현재는 개발하기 어려운 상태이다. 차후에 여건에 되면 개발해서 지표로 추가해야 할 것이다. 현재로서는 멸종위기종, 특산식물, 희귀식물 등의 종 정보를 대체 지표로 활용가능 할 것이다.

두 번째 항목인 종 풍부도와 다양성은 가장 빈번히 사용하는 지표이다. 출현하는 총 식물 종 수, 습지식물이나 수생식물 같은 특정 식물종의 수, 멸종위기 종의 수, 특산식물 종의 수, 외래종의 수 등을 지표로 사용할 수 있다. 호수나 하천 같은 습지에는 다른 생태계에 비해 벼과나 사초과와 같이 동정이 어려운 종이 많이 출현하므로 전체 식물종 수의 지표는 오동정의 문제가 특히 결과에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 실제 호수 평가 시 잘 훈련된 조사자들이 투입되어야 한다. 만약 오동정이 평가에 영향을 미친다면 전체 식물상에 대한 대체 지표를 고려할 필요가 있다.

습지식물이나 수생식물 같은 특정 식물종은 현재 Choung *et al.* (2012)에 의해 우리나라에 분포하는 전체 관속식물(자생종과 귀화종 총 4,049 분류군)을 대상으로 습지 출현빈도, 습지의 습한 정도, 식물의 수생형태에 따

라 구분되어 있으므로 이를 사용할 수 있을 것이다. 습지 출현빈도에 따라서는 5개 유형, 절대습지식물 (obligate wetland plant), 임의습지식물 (facultative wetland plant), 양생식물 (facultative plant), 임의육상식물 (facultative upland plant) 및 절대육상식물 (obligate upland plant)으로 구분되어 있다. 습지의 습한 정도 (degree of wetness)에 따라서는 습생식물 (hygrophyte)과 수생식물 (aquatic macrophyte)로 구분되어 있고, 수생식물은 수생형태에 따라 다시 정수식물 (emergent macrophyte), 부엽식물 (floating-leaf macrophyte), 부유식물 (floating macrophyte) 및 침수식물 (submerged macrophyte)로 구분되어 있다.

세 번째 항목인 민감성과 내성은 매우 중요하여 많은 연구에서 지표로 사용된다. 현재 우리나라에서 정량적인 연구는 Seo (2012)에 의해 밝혀진 지표종(부영양화 민감습지종과 내성습지종)이 거의 유일할 것이다. 그런데 이 연구는 우리나라의 전체 습지종인 479종(Choung *et al.*, 2012) 모두를 검토한 것이 아니라, 이 연구에서 조사된 습지종 111종 중에서 선발하였기 때문에 나머지 종에 대한 추가 검토가 필요하다. 민감종과 내성종을 선발하는 기준이 정립되어 있으므로 계속 검토를 할 수 있다. 또한 이 연구는 부영양화에 대한 지표종이므로 다른 요인에 대한 종의 반응도 지속적으로 연구할 필요가 있다.

네 번째 항목은 기능이다. 생태계의 기능으로 생산력이나 물질 순환 등의 항목을 고려할 수 있으나 기능을 측정하기 위해서는 시간이나 비용이 많이 들기 때문에 사실상 거의 지표로 사용하지 않고 있다. 같은 이유로 우리나라에서도 짧은 시일 내에 적용하기는 어려울 것이다.

지표 선정과 점수화 단계 이후, 어려운 것은 지수 결정과 검증단계이다. 평가된 지수가 수체의 건강성을 담보하는지 검토할 기초자료가 부족하기 때문이다. 현재 상황으로는 수체의 수질, 수위변동에 의한 수위 차이, 호안의 자연도, 연안대 및 호안의 기질, 경사도 등의 자료를 이용해서 서식지 지수를 만들고 이 지수와 상관성 분석을 하는 방법을 고려할 수 밖에 없다. 그런데 수체 관리가 환경부, 수자원공사, 농어촌공사 등 여러 기관으로 나뉘어 있고 데이터베이스화 되어 있지 않아서 기초 자료를 확보하기에 어려움이 있다.

적 요

물관리 정책이 수질평가 중심에서 수생태계 건강성 평가로 전환되고 있는 것은 세계적인 추세이다. 현재까지 수체의 평가기법은 수질이나 하상구조와 같은 물리화학

적 요소 및 플랑크톤, 저서동물과 같은 일부 생물의 평가에 국한되어 개발되어 왔다. 식물은 호수의 물리, 화학 및 생물 변화를 민감하게 반영하는 지표인데 개발이 늦었다. 환경부에서는 전국의 호수와 저수지를 생태계로써 평가하고 관리할 목적으로 생태계의 평가 기법을 마련 중에 있다. 이 연구사업의 일환으로 식물을 이용하여 우리나라 호수생태계에 적합한 건강성 평가기법을 개발하기 위해서 기개발된 국외의 평가기법 중 주로 다변수법을 주로 고찰하였다. 다변수법의 적용은 시간과 비용이 많이 소요되고 변수 간의 상관성 등의 한계점이 있다. 그러나 현재 단일 변수로 쓸 만한 지표가 개발되어 있지 않으며 다변수법은 다면평가와 데이터 축적의 장점이 크다. 다변수법을 세 단계, 즉 평가지표의 선정, 점수화, 평가지수의 결정과 검증단계로 나누어 검토하였다. 평가지표 선정단계에서 가장 적용가능한 지표는 종조성과 수도 및 종 풍부도와 다양성 관련 지표들이다. 국외에서 대부분 포함하는 지표종은 아직 개발이 불완전해서 우리나라에서 적용하기에 한계가 있다. 다수 조사자가 참여할 경우 식물상에 대한 오동정이 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 이 점의 사전 고려가 필요하다. 지표의 점수화 단계도 한계가 있다. 우리나라에 인위적 교란이 거의 없는 기준 호수가 없기 때문에 대안으로 다수의 호수를 조사하고, 조사된 호수의 지표값을 상대화하여 적용해야 한다. 같은 이유로 지수에 대한 검증과정도 어렵다. 종합할 때, 여러 가지 한계가 있지만 현장에서 조사 가능한 지표를 이용하여 식물을 이용한 호수 건강성의 다변수평가체계를 구축하는 것은 가능하다. 추후, 식물종의 질적 가치에 대한 지표를 추가하고 보다 많은 호수 조사의 결과가 누적되면 수준 높은 평가체제로 발전시킬 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 수생태복원사업단 Eco-STAR project의 일환으로 수행되고 있는 “호수생태계 통합적 건강성 평가기법 개발(EW42-08-10)” 연구과제의 지원으로 수행되었기에 이에 감사합니다.

인 용 문 헌

Andreas, B.K. and R.W. Lichvar. 1995. Floristic index for establishing assessment standards: a case study for Northern Ohio. Technical Report WRP-DE-8, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg,

- MS., USA.
- Andreas, B.K., J.J. Mack and J.S. McCormac. 2004. Floristic Quality Assessment Index (FQAI) for vascular plants and mosses for the State of Ohio. Ohio Environmental Protection Agency, Division of Surface Water, Wetland Ecology Group, Columbus, Ohio, USA.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for Use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, Second Edition. EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water; Washington, D.C., USA.
- Brooks, R.P., D.H. Wardrop and J.A. Bishop. 2004. Assessing wetland condition on a watershed basis in the Mid-Atlantic region using synoptic land cover maps. *Environmental Monitoring and Assessment* **94**: 9-22.
- Calislie, B.K., A.L. Hicks, J.P. Smith, S.R. Garcia and B.G. Largay. 1999. Plants and aquatic invertebrates as indicators of wetland biological integrity in Waquoit Bay watershed, Cape Code. *Environmental Cape Code* **2**: 30-60.
- Cardoso, A.C., A.G. Solimini and G. Premazzi. 2005. Report on harmonisation of freshwater biological methods. European Commission.
- Cho, Y.-H. 1997. A study on evaluation method of stream naturalness for ecological restoration of stream corridors. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* **25**(2): 73-81.
- Choung, Y., W.T. Lee, K.-H. Cho, K.Y. Joo, B.M. Min, J.-O. Hyun and K.S. Lee. 2012. Categorizing vascular plant species occurring in wetland ecosystems of the Korean Peninsula. Center for Aquatic Ecosystem Restoration, Chuncheon, Korea.
- Elifritz, B.F. and M.S. Fennessy. 2005. A comparison of natural and constructed wetlands using the floristic quality assessment index. Annual report. Olentangy River wetland Research Park.
- Fennessy, M.S., M. Gray, R.D. Lopez and J. Mack. 1998. An ecological assessment of wetlands using reference sites. Final Report to U.S. EPA, State of Ohio Environmental Protection Agency, Columbus, Ohio, USA.
- Ferreira, M.T., P.M. Rodríguez-González, F.C. Aguiar and A. Albuquerque. 2005. Assessing biotic integrity Iberian rivers: Development of a multimetric plant index. *Ecological Indicators* **5**: 137-149.
- Gernes, M.C. and J.C. Helgen. 1999. Indexes of biotic integrity (IBI) for wetlands: vegetation and invertebrate IMI's. Final Report to U.S. EPA, Assistance number CD995525-01. Minnesota Pollution Control Agency, St. Paul, USA.
- Gernes, M.C. and J.C. Helgen. 2002. Indexes of biological integrity (IBI) for large depressional wetlands in Minnesota. Report to U.S. EPA, Assistance number CD-995525-01. Minnesota Pollution Control Agency. St. Paul, USA.
- Hatzenbeler, G.R., J.M. Kampa, M.J. Jennings and E.E. Emmons. 2004. A comparison of fish and aquatic plant assemblages to assess ecological health of small Wisconsin lakes. *Lake and Reservoir Management* **20**(3): 211-218.
- Herman, K.D., L.A. Masters, M.R. Penskar, A.A. Reznicek, G.S. Wilhelm and W.M. Brodowicz. 1997. Floristic quality assessment: development and application in the State of Michigan (USA). *Natural Areas Journal* **17**(3): 265-279.
- Herman, K.D., L.A. Masters, M.R. Penskar, A.A. Reznicek, G.S. Wilhelm, W.W. Brodovich and K.P. Gardiner. 2001. Floristic quality assessment with wetland categories and examples of computer applications for the State of Michigan-Revised (2nd). Michigan Department of Natural Resources, Wildlife, Natural Heritage Program.
- Indiana Department of Natural Resources. 2007. Tier II Aquatic vegetation survey protocol.
- Karr, J.R. and D.R. Dudley. 1981. Ecological perspectives on water quality goals. *Environmental Management* **5**: 55-68.
- Karr, J.R. and W.E. Chu. 1999. Restoring life in running waters: better biological monitoring. Island Press, Washington, D.C., USA.
- Karr, J.R., K.D. Fausch, P.L. Angermeier, P.R. Yant and I.J. Schlosser. 1986. Assessing biological integrity in running waters: a method and its rationale. Illinois Natural History Survey. Special Publication 5, Urbana, USA.
- Kim, B. 2009. Evaluation of ecological integrity in lake ecosystem (2nd). Center for Aquatic Ecosystem Restoration, Chuncheon, Korea.
- Kim, D.-C. and I.-S. Park. 1999. A study on the evaluation criteria of stream naturalness for ecological environment restoration of stream corridors. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* **17**(3): 123-134.
- Ladd, D.M. 1993. Coefficients of conservatism for Missouri vascular flora. The Nature Conservancy. St. Louis, Missouri, USA.
- Lopez, R.D. and M.S. Fennessy. 2002. Testing the floristic quality assessment index as an indicator of wetland condition. *Ecological Application* **12**: 487-497.
- Mack, J.J. 2001a. Vegetation index of biotic integrity (VIBI) for wetlands: ecoregional, hydrogeomorphic, and plant community comparisons with preliminary wetland

- aquatic life use designations. Final Report to U.S. EPA Grant No. CD985875-01. Vol. 1.
- Mack, J.J. 2001b. Ohio rapid assessment method for wetlands. Manual for using version 5.0. Ohio EPA Technical Wetland/2001-1-1. Ohio Environmental Protection Agency, Division of Surface Water, 401 Wetland Ecology Unit.
- Mack, J.J. 2007. Developing a wetland IBI with statewide application after multiple testing iterations. *Ecological Indicators* **7**: 864-881.
- Mack, J.J., M. Micacchion, L.D. Augusta and G.R. Sablak. 2000. Vegetation indices of biotic integrity (VIBI) for wetlands and calibration of the Ohio rapid assessment method for wetlands (ver. 5). Final Report to U.S. Environmental Protection Agency. Ohio Environmental Protection Agency, Wetland Ecology Unit.
- Miller, S.J., D.H. Wardrop, W.M. Mahaney and R.P. Brooks. 2006. A plant-based index of biological integrity (IBI) for headwater wetland in central Pennsylvania. *Ecological Indicators* **6**: 290-312.
- National Institute of Environmental Research. 2010. Summary report of the survey and health assessment for the aquatic ecosystems. National Institute of Environmental Research.
- Nichols, S.A. 1998. Floristic quality assessment of Wisconsin lake plant communities with example applications. *Journal of Lake and Reservoir Management* **15**: 133-141.
- Nichols, S., S. Weber and B. Shaw. 2000. A proposed aquatic plant community biotic index for Wisconsin lakes. *Environmental Management* **26**(5): 491-502.
- Northern Great Plains Floristic Quality Assessment Panel. 2001. Floristic quality assessment for plant communities of North Dakota, South Dakota (excluding the Black Hills), and adjacent grasslands. Northern Prairie Wildlife Research, Jamestown, North Dakota, USA. <http://www.npwrc.usgs.gov/resource/2001/fqa/>.
- Oldham, M.J., W.D. Bakowsky and D.A. Sutherland. 1995. Floristic quality assessment system for southern Ontario. Natural Heritage Information Centre, Ontario Ministry of Natural Resources, Peterborough, Ontario, USA.
- Penning, W.E., M. Mjelde, B. Dudley, S. Hellsten, J. Hanganu, A. Kolada, M. Van den Berg, S. Poikane, G. Phillips, N. Willby and F. Ecke. 2008. Classifying aquatic macrophytes as indicators of eutrophication in European lakes. *Aquatic Ecology* **42**: 237-251.
- Rankin, E.T. 1989. The qualitative habitat evaluation index (QHED): rationale, methods, and application. Ecological Assessment Section, Ohio Environmental Protection Agency, USA.
- Rothrock, P.E., T.P. Simon and P.M. Stewart. 2008. Development, calibration, and validation of a littoral zone plant index of biotic integrity (PIBI) for lacustrine wetlands. *Ecological Indicators* **8**: 79-88.
- Seo, A. 2012. Classifying wetland plant species as indicators of eutrophication in lakes of Korea. Mater thesis. Kangwon National University, Chuncheon, Korea.
- Simon, T.P., P.M. Stewart and P.E. Rothrock. 2001. Development of multimetric indices of biotic integrity for riverine and palustrine wetland plant communities along Southern Lake Michigan. *Aquatic Ecosystem Health and Management* **4**: 293-309.
- Swink, F. and G. Wilhelm. 1979. Plants of the Chicago region. Morton Arboretum, Lisle, Illinois, USA.
- Swink, F. and G. Wilhelm. 1994. Plants of the Chicago region. 4th edition. Indiana Academy of Sciences, Indianapolis, USA.
- Taft, J.B., G.S. Wilhelm, D.M. Ladd and L.A. Masters. 1997. Floristic quality assessment for vegetation in Illinois, a method for assessing vegetation integrity. *Erigenia* **15**: 3-95.
- U.S. EPA. 1998. Lake and reservoir bioassessment and bio-criteria. Technical Guidance Document EPA 841-B-98-007.
- U.S. EPA. 2002. Methods for evaluating wetland condition: Developing metrics and indexes of biological integrity. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency. EPA-822-R-02-016.
- Wilcox, D.A., J.E. Meeker, P.L. Hudson, B.J. Armitage, M. Glen Black and D.G. Uzarski. 2002. Hydrologic variability and the application of index of biotic integrity metrics to wetlands: a great lakes evaluation. *Wetlands* **22**(3): 588-615.
- Wilhelm, G. and D. Ladd. 1988. Natural areas assessment in the Chicago region. Transactions of the 53rd North American Wildlife & Natural Resources Conference. p. 361-375.
- Wilhelm, G.S. and L.A. Masters. 1995. Floristic quality assessment in the Chicago region and application computer programs. Morton Arboretum, Lisle, Illinois.
- Wisconsin Floristic Quality Assessment. 2002. <http://www.botany.wisc.edu/wisflora/WFQA.html>.

(Manuscript received 30 January 2013,
Revised 28 February 2013
Revision accepted 21 March 2013)