

남양호에서 다변수 메트릭 모델 적용 및 평가

한 정 호 · 안 광 국*

(충남대학교 생명과학과)

Applications and Assessments of a Multimetric Model to Namyang Reservoir. Han, Jung-Ho and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The purpose of this study was to evaluate fish metric attributes using a model of Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA) and apply the model to the dataset sampled from six sites of Namyang Reservoir during October 2005~May 2006. The model was composed of 11 metrics and the metric attributes were made of physical, chemical and biological parameters. Trophic composition's metrics showed that tolerant species (M_3 , 80%) and omnivore species (M_4 , 92%) dominated the fish fauna, indicating a biological degradation in the aquatic ecosystem. The metric of M_7 , relative proportions of exotic species, also showed greater than 8% of the total, indicating an ecological disturbance. The average value of LEHA model was 24.3 (n=12) in the reservoir, indicating a "poor condition" by the criteria of An and Han (2007). Spatial variation based on the model values was low (range: 21~26), and temporal variation occurred due to a monsoon rainfall. Electrical conductivity (EC) and trophic state index of chlorophyll-*a* [TSI(CHL)] was greater in the premonsoon than the post-monsoon.

Key words : Multi-metric model, fish, Namyang reservoir, health assessment, water quality

서 론

남양호는 아산호와 더불어 평택지구 다목적 농업개발 사업의 일환으로, 호수 연안 일대에 2,285 ha의 농경지가 형성되어 주로 농업용수 공급을 목적으로 1974년 5월에 준공된 인공호이다. 남양호는 농경지의 수량 확보에 큰 역할을 하고 있으나, 하천에 댐을 축조하여 만들어진 인공호이기 때문에 댐 건설 전에 비하여 수 체류시간이 증가하여 수질 악화가 가속화되는 것으로 보고되고 있다 (이와 조, 1995). 특히 주변 수계로부터 유입되는 점오염원과 비점원오염원의 영향이 커서 총인(TP) 및 총질소(TN)에 의거할 때 부영양호로 판정되고 있으나 호수 내

로 유입되는 영양염류 및 각종 유해 화학물질에 대한 관리가 미비한 실정이다(김, 1998). 따라서 남양호 수계의 수질 관리 및 유지정도에 따라 생태계 건강성이 크게 변화될 것으로 예상되는 바 과학적이고, 체계적인 생태계 관리 대책 마련이 시급히 요구된다.

최근 우리나라는 수생태계의 효율적인 관리를 위해 기존의 이화학적 척도 이외에도 생물학적 건강성 평가 기법 개발에 관심이 높아지고 있다. 이런 일환으로서 부착조류(황 등, 2006), 저서무척추동물(원 등, 2006) 및 어류(안 등, 2006)를 이용한 생태 건강성 평가 기법이 환경부에 의해 개발된 바 있다. 특히 안 등(2001a)은 우리나라 하천에 적합한 건강성 평가 모델 개발을 한 후, 대전천(안과 김, 2005), 유등천(안 등, 2005), 갑천(배와 안,

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

2006)과 같은 도심 하천 및 평창강(안 등, 2001b), 유구천(안과 신, 2005; 안과 이, 2006), 초강(안과 최, 2006)등의 산간 계류형 하천에 적용·평가하여 우수생태계의 건강성 평가에 실효를 거두고 있다. 한편, 정수생태계(Lentic Ecosystem)의 총체적인 건강성 평가는 최근 안과 한(2007)에 의해 개발된 LEHA(Lentic Ecosystem Health Assessment) 모델을 정수생태계인 대청호에 적용한 바 있으나 그 외에 정수생태계의 건강성 평가는 전무한 실정이다. 따라서 호수나 인공호와 같은 정수생태계에서도 효율적인 수계관리를 위하여 총체적인 생물 평가기법의 도입이 시급한 실정이며, 이를 활용한 국내 정수생태계의 생태 DB시스템 구축이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 남양호의 정수생태계 건강성을 평가하기 위하여 LEHA 모델을 적용하여 생태계 건강성을 도출하였고, 이런 결과를 수질분석, 서식지분석 및 어류의 다양한 길드분석과 비교 평가하였다. 본 연구에서 얻어진 자료는 향후 남양호의 수계 관리 및 생태계 보전에 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 조사 시기

본 연구에서는 어류 조사를 위하여 남양호의 6개 지점을 선정하였다. 현장조사 시기는 2005년 10월에서 2006년 5월까지 2회에 걸쳐서 수행되었고, 수체의 계절적 변화 양상을 파악하기 위하여 갈수기와 풍수기로 구분하여 어류 조사를 실시하였다. 조사지점은 총 6개 지점으로 주요 유입 지류와 각 지점에 존재하는 점오염원 및 주변의 생태교란 특성을 고려하여 선정하였으며, 세부 조사 대상 지점은 다음과 같다(Fig. 1).

- S1: 경기도 화성시 장안면 구문천리
- S2: 경기도 화성시 장안면 독정리
- S3: 경기도 화성시 장안면 장안리
- S4: 경기도 평택시 포승면 흥원리
- S5: 경기도 평택시 포승면 원정리
- S6: 경기도 화성시 장안면 장안리

2. 조사 방법

본 연구에서는 남양호의 생태 건강성을 도출하기 위하여 U.S. EPA (1998)의 정수생태계 평가 기법(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)을 기반으로

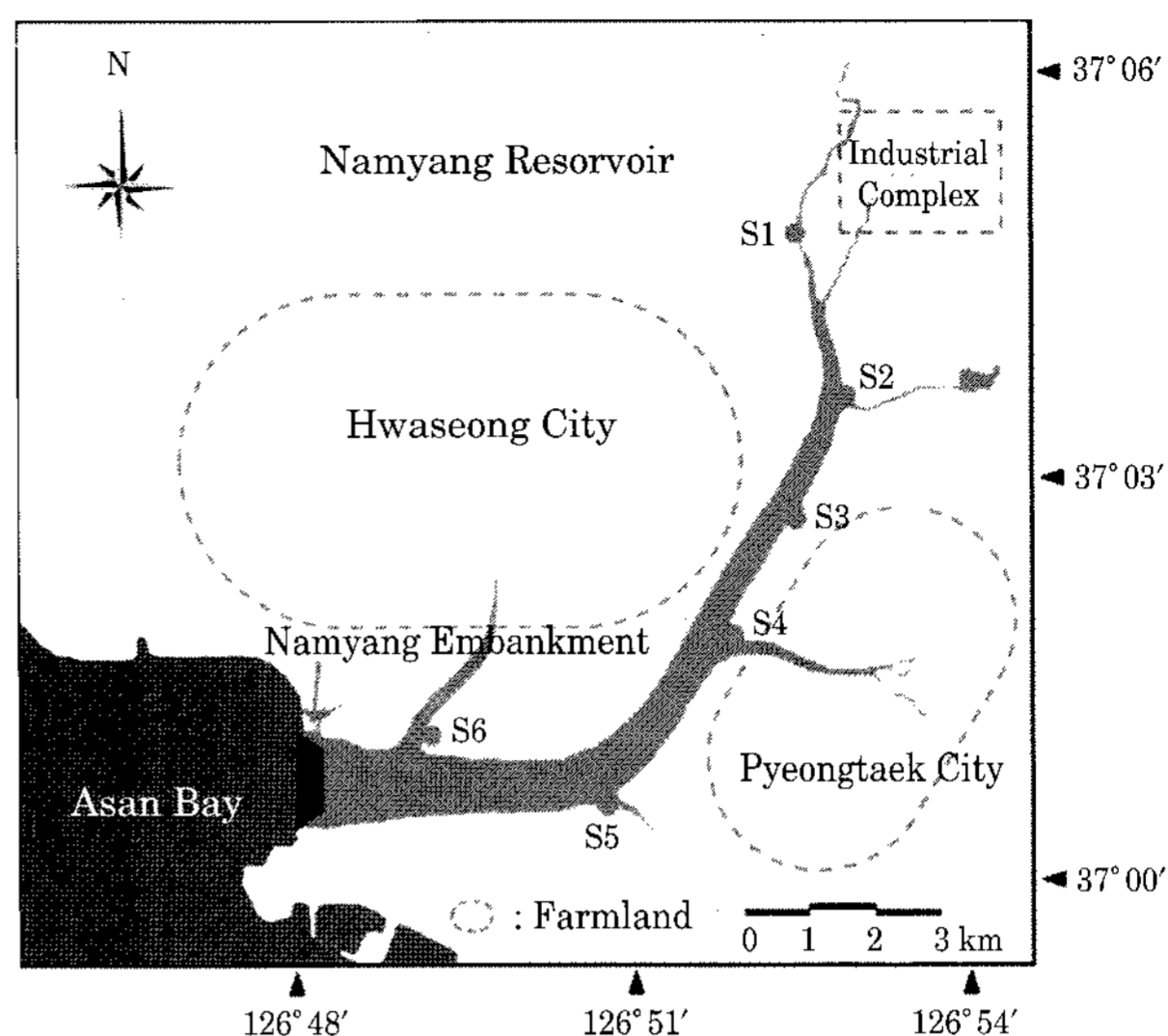


Fig. 1. The map showing the sampling site in Namyang Reservoir.

하여 우리나라에 맞게 수정·보완한 안과 한(2007)의 LEHA 모델 조사 기법을 따랐다. 본 평가 기법의 적용을 위해 어류 채집 지점의 수심은 3~4m 미만의 수심이 얇은 호소의 연안부(Littoral zone)에서 실시하였고, 어류 채집 도구로는 투망(망목 5×5 mm) 및 족대(망목 4×4 mm)를 이용하였다. 수심이 얇은 연안부 수초 지역에서는 족대, 하천이 유입되는 곳의 연안부 및 연안대의 개방된 구간에서는 투망을 이용하였다. 채집 소요시간은 60분으로 제한하였으며, 투망 투척 횟수는 투망의 전개 면적(1.5 m×1.5 m×3.14)을 고려하여 각 지점 당 30회 이상 투척하였다. 채집구간은 각 조사지점 연안대의 100 m 구간 내에서 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류의 동정은 김과 박(2002), 김과 강(1993), 김(1997), 최(1994)에 의거하여 동정하였다. 동정이 확실치 않은 종의 경우 10% 포르말린 용액에 고정한 후 실험실로 운반하여 분류하였다. 목록의 작성은 총 개체수를 근거로 하여 작성하였다. 비정상어종의 외형적 감별은 U.S. EPA (1993)에 따라 기형(Deformity, D), 지느러미 짓무름(Erosion, E), 조직손상(Lesion, L) 및 종양(Tumors, T) 등으로 구분하여 분석하였다.

3. 서식지 변수 분석 및 이화학적 변수 분석

물리적 서식지 평가 방법은 호소 연안부에 분포하고 있는 수생식물의 피도(Vegetation coverage)를 적용하여 평가하는 방법으로 미국 환경부(U.S. EPA, 1994)에서 청

정 호소 프로그램과 환경모니터링 및 평가 프로그램에서 제시되어진 잠재적 대형수생식물 메트릭(Crowder and Painter, 1991)을 적용하였다. 수생 식물은 조류(Phytoplankton)와 직접적인 영양물질 경쟁을 하지 않으나 영양물질이 유입됨에 따라 성장이 촉진되고, 그 수가 증가하는 경향을 보인다(Orth and Moore, 1983; Harper, 1992). 또한, Harper and Stewart (1987)가 스코틀랜드의 3개 호소를 대상으로 호수의 부영양화와 갈대 식물의 밀도에 대한 연구에서도 갈대 식물이 부양양화됨에 따라 광합성 효율이 증가한다는 결과가 보고된 바 있다. 따라서 이런 특성을 반영한 잠재적 대형수생식물 메트릭을 생태 건강성 평가 항목으로 적용하였으며, 이를 바탕으로 호수 연안대의 수생 식물의 피도를 측정하여 호수 부영양도를 평가하였다.

한편, 남양호 수계의 이화학적 수질 상태는 YSI model 6600을 이용하여 표층부(수심 10~30 cm)에서 측정하였으며, 측정된 항목은 수온, 전기전도도, 용존산소(DO), 수소이온농도(pH), 탁도(Turbidity), 염분도(Salinity)를 측정하였다. 전기전도도는 현장의 온도 하에서 측정된 전기전도도 값을 25°C로 온도를 보정하여 전기전도도 값을 산정하였으며, 엽록소-a(Chlorophyll-a)는 현장에서 시료를 채취한 후 아이스박스에 담아 당일 실험실로 운반 후 수질오염공정시험법(환경부, 2000)에 따라 측정하였다. 엽록소-a의 농도 측정은 에탄올 추출법을 이용하였으며, 분광광도계(Beckman Model DU-65)를 이용하여 흡광도를 측정 후 엽록소-a의 농도를 산정하였다. 산정된 엽록소-a 수치는 Carlson(1977)의 부영양도 지수(Trophic State Index, TSI)를 적용하여 TSI(Chl-a) 값을 산출하여 평가하였다.

4. 평가 모델 적용 및 메트릭 분석

남양호의 생태 건강성을 평가하는 데 사용한 평가 모델은 안과 한(2007)에 의하여 수정 개발된 LEHA 모델의 11개 메트릭(Metric, M)을 적용하였다. 본 모델에 이용된 생물학적 메트릭은 영양단계 구조를 반영하는 항목으로 잡식종(Omnivore species, O), 충식종(Insectivore species, I), 육식종(Carnivore species, C)이 포함되었고, 수질오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종(Sensitive species, SS), 반대로 수질오염도에 따라 상대적인 비율이 증가하는 내성종(Tolerant species, TS), 그리고 두 범주의 중간에 해당하는 중간종(Intermediate species, IS)의 메트릭이 선정되었다. 또한, 물리적 서식지 특성을 반영하기 위한 메트릭으로 수생식물 피도를 적용하여 평가하였

고, 화학적 특성을 반영하기 위한 메트릭으로 전기전도도(Electric conductivity at 25°C) 및 엽록소-a를 이용한 Trophic State Index (TSI, Carlson, 1977)를 메트릭으로 적용하였다. LEHA 모델의 메트릭 수 및 각 메트릭 속성은 안과 한(2007)에 의해 자세히 기술되어 있다.

5. LEHA 모델 등급

본 연구에서 적용된 LEHA 모델 등급은 안과 한(2007)의 5등급 체제를 이용하여 생태 건강성을 평가하였다. 각 조사 지점의 LEHA 모델 등급은 각 메트릭(Metric, M)에 1, 3, 5의 값을 부여하였으며, 총 11개 조사 메트릭 점수를 합산하여 등급을 산정하였다. 1등급은 53~55(최적상태), 2등급은 43~47(양호상태), 3등급은 35~39(보통상태), 4등급은 23~29(악화상태), 그리고 5등급은 17이하(최악상태)로 대별하여 생태 건강성을 평가하였다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 총 11과 20종이 채집되었으며 조사 시기별 종수의 차이(1차: 14종, 2차: 17종)는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 20년 전에 조사한 최(1985)의 23종의 어류와 비교해 볼 때 종수의 일부 감소만 보였다(Table 2). 조사 시기별 종 조성 분석에 따르면, 풍수기인 1차 조사에 비하여 갈수기인 2차 조사에서 종수는 약 1.2배, 개체수는 약 1.3배 이상 증가하여 종과 개체수가 풍수기에 비해 높게 채집되었다. 이는 갈수기인 5월이 각종 어류의 산란시기에 해당하므로 수심이 얕은 지역이나 유입지류와 호수가 만나는 지역으로 이동하여 서식하는 특성을 가지고 있으며(최, 2005), 대부분의 우리나라 담수어류가 호수보다 하천에 적응한 종들이기 때문에 산란기가 되면 대부분의 어종이 산란 장소로 하천의 흐르는 물을 선택한다는 특징과 일치하였다(홍과 손, 2003). 어종별 풍부도 분석에 따르면, 참붕어, 떡납줄갱이, 흰줄납줄개 및 치리가 개체수 측면에서 각각 15% 이상 상회하는 주요 우점종으로 나타났다. 종 풍부도 측면에서 20년 전의 남양호 자료(최, 1985)와 비교해 볼 때, 채집된 한국 고유종은 6종 576개체(20.8%)에서 5종 728개체(26.7%)로 나타나 종수는 감소하였으나 개체수에서는 비교적 높은 빈도를 보였다. 전(1980)의 연구보고에 따르면, 고유종의 존재는 해당 지역의 생물상을 특징짓는 기준이 되며, 최 등(2000)의 연구에 따르면, 고유종은 서식지의 수

환경 상태가 악화되면 급격히 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고하고 있다. 반면에 외래종은 초기 남양호에 서식하지 않았던 배스(*Micropterus salmoides*), 떡붕어(*Carassius cuvieri*) 등의 2종이 새롭게 출현하였으며, 상대 풍부도가 8%로 확인되었다. 이와 같은 현상은 유속이 빠르고 수량이 부족한 유수역보다는 수량이 풍부하고, 물이 정체된 정수역이 외래어종이 선호하는 서식지이기 때문에 댐의 건설로 정수역 수계가 확대 될수록 외래어종의 자원량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 두 차례에 걸친 조사에서 천연기념물과 보호종은 채집되지 않았다(Table 1).

내성도(Tolerance guilds)길드 분석에 따르면, 민감종은 28개체(1%), 중간종은 521개체(19%), 내성종은 2,177개체(80%)로 나타나 내성종이 월등한 우세 현상을 보였다. U.S. EPA(1991)의 기존연구에 따르면, 내성종의 개체수 및 종수는 유기물 오염, 서식지 파괴 등과 같은 서식지의 물리·화학적 질의 하강에 따라 어종의 풍부도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다. 따라서 남양호 수계에 물리적 서식지 교란 및 이·화학적 수질 오염이 심각한 것으로 나타났다. 내성종 중 22%가 참붕어(*Pseudorasbora parva*)였으며, 중간종은 흰줄납줄개(*Rhodeus ocellatus*)가 89%, 민감종은 빙어(*Hypomesus nipponensis*)

Table 1. Fish fauna and the various guilds of trophic level, tolerance in Namyang Reservoir.

Species	Tol G	Tro G	1st survey						2nd survey						TNI	Choi (1985)*
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6		
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	O	80	23	29	30	35	60	45	17	68	50	36	10	483	14
<i>Rhodeus notatus</i>	TS	O	170	73	1				8		18	12	143	45	470	
<i>Rhodeus ocellatus</i>	IS	O							76	22	33	93	237		461	2
† <i>Hemiculter eigenmanni</i>	TS	O	5	25	5	20	7	110		23	38	70	74	77	454	559
† <i>Rhodeus uyekii</i>	TS	O	100		4	34	25	60							223	
† <i>Carassius cuvieri</i>	TS	O	7	5	4			9	51	47	10	23	16	44	216	
<i>Carassius auratus</i>	TS	O		7	4	15	16	70	5	7	3	13	31	13	184	1608
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	TS	H	100					5							105	
<i>Misgurnus mizolepis</i>	TS	H	3		3			4	15		2	3	4		34	2
<i>Hypomesus nipponensis</i>	SS	H		2	2			21			1				26	
† <i>Odontobutis interrupta</i>	IS	C	2					3	3		10	3	3	2	26	
† <i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	O		1		12	6		2				1		22	12
<i>Aphyocypris chinensis</i>	IS	O	1						2		1				4	
<i>Cyprinus carpio</i>	TS	O									1		3		4	6
† <i>Microphysogobio yaluensis</i>	IS	O	3												3	1
<i>Pseudogobio esocinus</i>	IS	I	1						2						3	1
<i>Macropodus ocellatus</i>	IS	I												2	2	3
<i>Hamibarbus labeo</i>	SS	I												2	2	
† <i>Micropterus salmoides</i>	TS	C									2				2	
<i>Zacco platypus</i>	TS	O							2						2	20
<i>Periophthalmus modestus</i>	TS	I														9
† <i>Abbottina springeri</i>	IS	O														1
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	IS	O														8
<i>Channa argus</i>	TS	C														1
<i>Anguilla japonica</i>	IS	C														4
<i>Mugil cephalus</i>	TS	H														114
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	IS	C														191
† <i>Squalidus gracilis majimae</i>	TS	I														2
<i>Synechogobius hasta</i>	IS	C														188
<i>Trachidermus fasciatus</i>	IS	I														1
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	IS	O														21
† <i>Acheilognathus gracilis</i>	IS	O														1
Total number of species			11	7	8	5	7	8	10	5	12	8	10	8	20	23
Total number of individual			472	136	52	111	96	338	208	116	186	267	548	193	2726	2769

Tol G=Tolerance Guild, Tro G=Trophic Guild, TNI=Total Number of Individuals, SS=Sensitive Species, IS= Intermediate Species, TS=Tolerant Species, O=Omnivores, I=Insectivores, C=Carnivores, H=Herbivores, †: Korean endemic species, ‡: Exotic species, *: This paper was written by Korean

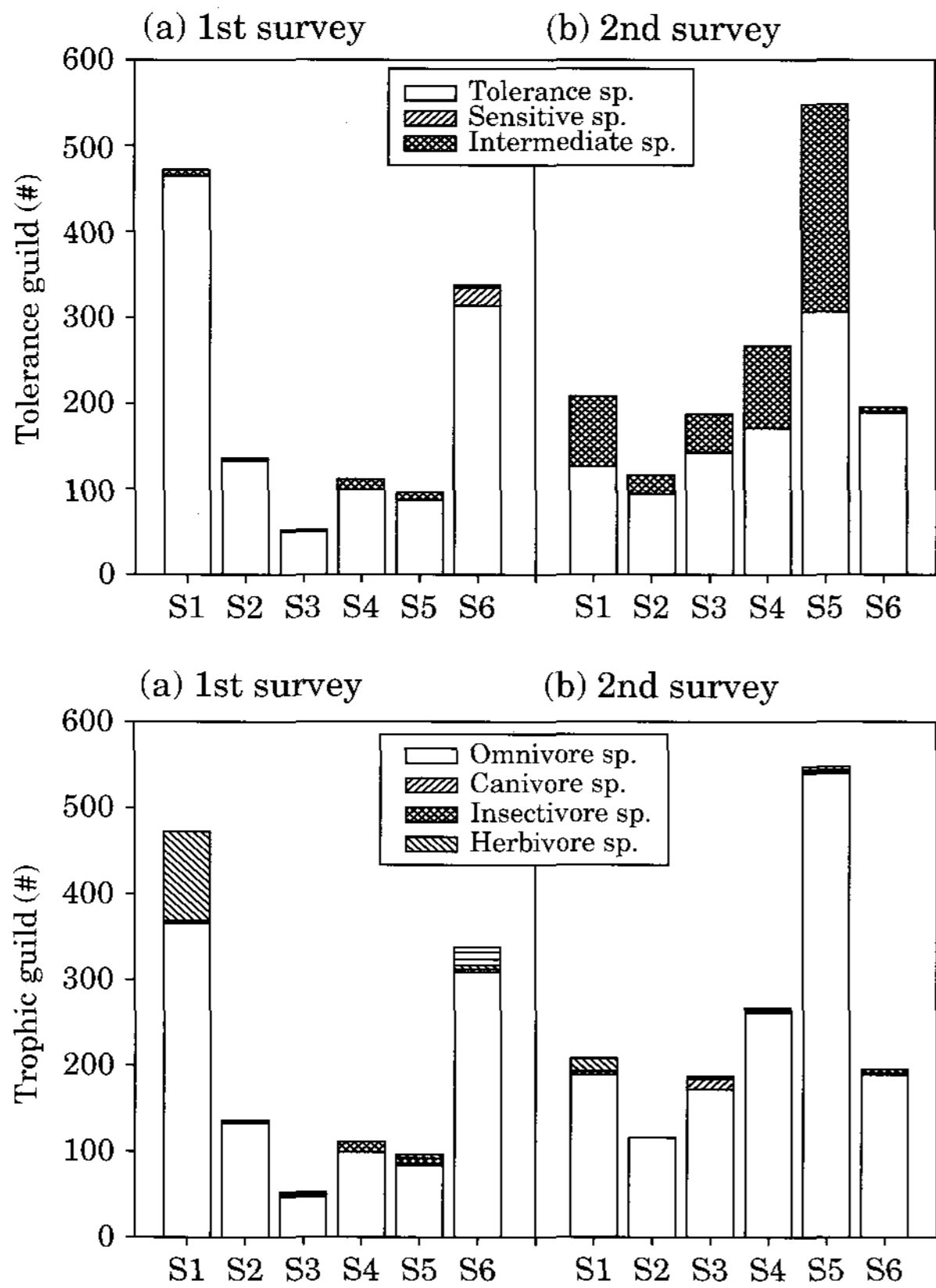


Fig. 2. The relations of mean LEHA (Lentic Ecosystem Health Assessment) values to relative individuals of trophic guilds and tolerance guilds.

nensis)가 93%로 각각의 대표어종으로 나타났다. 정수 생태 건강성 점수 산정에서 20% 이상이면 최하점인 1점을 기록하는 내성 지표종 메트릭에서 1, 2차 조사 시 전 지점 모두 1점을 기록하여 내성 지표종 메트릭이 상당히 취약한 것으로 나타났으며, 특히 S1은 총 채집개체 중 99%가 내성종으로 나타났다. 정수생태 건강성 평가 모델의 메트릭 별 분석에서도 내성 지표종 메트릭은 평균 1을 기록하여 11개의 메트릭(평균 2.2) 중 가장 낮은 평균 값을 보였다(Table 1, Fig. 2).

한편, 트로픽 길드(Trophic guilds) 분석에 따르면, 잡식종이 2,504개체(92%), 충식종이 29개체(1%), 육식종이 28개체(1%)의 구성비를 보여 잡식종 우점현상을 보였다(Fig. 2). Karr(1981)와 Ohio EPA(1989)에서 잡식종은 유기물 오염도가 증가할수록 상대 풍부도가 증가하는 특성을 보인다고 보고한 바 있으며, Drenner et al.(1996)도 잉어(Cyprinus carpio)와 같이 침전된 유기물을 섭식하는 잡식종의 증가와 영양염류부하 사이에 밀접한 관계가 있어 부영양화된 호수에서 잡식종이 우점현상을 보인다

고 보고한 바 있다. 이런 잡식종의 우점현상은 현재 남양호 수계에 유기물에 의한 오염이 심각한 상태임은 단적으로 반영하고 있다. 계절별 섭식구조 특성을 살펴보면, 갈수기인 2차 조사에서 잡식종의 상대 풍부도는 97%로 나타났고, 풍수기인 1차 조사에서는 잡식종 상대 풍부도가 86%로 나타나 갈수기에 비교적 심각한 유기물 오염이 존재하고 있음을 시사하고 있다. 이는 갈수기가 풍수기에 비해 수체 내 유기물의 농축량이 상대적으로 높기 때문에 사료된다. 섭식구조별 각각의 대표종으로는 잡식종에서 참붕어가 19.3%, 충식종에서 밀어(Rhinogobius brunneus)가 76%, 육식종에서 얼룩동사리(Odontobutis interrupta)가 93%를 차지하여 각각의 대표종으로 나타났다. 이러한 내성종과 잡식종의 우점현상은 불법적인 어로행위와 주변 농경지의 농업용수의 유입으로 인한 호소의 부영양화가 생태계 내의 교란에 크게 영향을 준 것으로 사료된다.

외래종의 상대 풍부도 메트릭은 풍수기인 1차 조사에서 평균 2.3, 2차 조사에서는 1점을 보여 외래종의 상대 풍부도가 갈수기에 높아진 것으로 나타났다. 또한 1차 조사에서는 S1~S3까지 지점에서 외래종이 출현한 반면, 2차 조사에서는 모든 지점에서 출현하였다. 남양호에서 외래종은 떡붕어가 216개체, 배스가 2개체 채집되어 총 2종 218개체가 출현하였다. 이 중 떡붕어는 비교적 대형종으로서 강한 잡식성을 보일 뿐만 아니라, 국내 토산 어류와 먹이 경쟁을 가지고 있어 수서생물이 비교적 적은 남양호에서 생태계를 교란에 영향을 줄 것으로 예상된다(Table 2).

개체 건강도는 수체 내 다양한 오염물질로 인하여 어류의 외형적 변이를 판단하는 메트릭으로서 정수생태 건강성 평가 점수산정 시 1차 조사에서 평균 4.6, 2차 조사에서 평균 4.5를 기록하였다. 지점별 개체 건강도는 풍수기인 1차 조사에서는 S1(L)과 S6(D)에서 각각 1개체의 이상개체가 출현하였고, 갈수기인 2차 조사에서는 S4에서 1개체(D), S5에서 3개체(L, E), S6에서 1개체(L)의 이상개체가 출현하였다. 이는 갈수기 때 남양호의 수체가 풍수기에 비하여 오염물질의 농도가 상대적으로 높기 때문인 것으로 사료된다.

호소 연안대의 서식지 특성을 반영한 메트릭으로서 수생식물의 피도를 나타내는 수변 식피율은 풍수기인 1차 조사에서 지점별로 90~95%로 전 지점에서 매우 높은 식피율을 보여 메트릭 값 평균 1(n=6)로 낮은 점수를 나타냈다. 이에 비하여 갈수기인 2차 조사에서는 15~70%로 메트릭 값 평균 3.3(n=6)으로 풍수기인 1차 조사에 비해 높게 낮으며, 지점별로 상류 지점에 비하여 하류지점인 S5와 S6에서 높은 비율로 나타났다(Table 2). 1, 2

Table 2. The lentic ecosystem health assessment (LEHA), based on the 11 metric models in the Namyang Reservoir.

Sampling site	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	LEHA score (Criteria)	
1st Survey	S1	10(5)	0(1)	98.5(1)	77.2(1)	0.2(1)	465(5)	1.5(1)	0.2(3)	90(1)	275.2(3)	48.3(3)	25(P)
	S2	6(5)	1(1)	97.7(1)	97.7(1)	0.8(1)	131(5)	3.7(1)	0(5)	95(1)	275.4(3)	48.6(3)	27(P)
	S3	7(5)	1(1)	95.8(1)	89.6(1)	0(1)	48(1)	7.7(1)	0(5)	90(1)	250(3)	51.3(1)	21(P~VP)
	S4	5(3)	0(1)	89.2(1)	89.2(1)	10.8(1)	111(3)	0(5)	0(5)	95(1)	254.4(3)	50.2(1)	25(P)
	S5	7(3)	0(1)	90.6(1)	86.5(1)	6.3(1)	96(3)	0(5)	0(5)	95(1)	325.4(3)	50.4(1)	25(P)
	S6	7(3)	1(1)	92.7(1)	91.2(1)	0(1)	329(5)	2.7(1)	0.3(3)	95(1)	332.1(3)	50.1(1)	21(P~VP)
2nd Survey	S1	9(5)	0(1)	47.8(1)	87.9(1)	2.6(1)	157(5)	24.5(1)	0(5)	35(3)	834(1)	42.1(3)	27(P)
	S2	4(3)	0(1)	68.1(1)	100(1)	0(1)	69(3)	40.5(1)	0(5)	50(3)	1255(1)	43.3(3)	23(P)
	S3	10(5)	1(1)	74.3(1)	92.6(1)	0(1)	175(5)	6.4(1)	0(5)	15(5)	1113(1)	43.7(3)	29(P)
	S4	7(3)	0(1)	60.7(1)	97.5(1)	0(1)	244(5)	8.6(1)	0.4(3)	30(5)	1098(1)	45.5(3)	25(P)
	S5	9(5)	0(1)	54.7(1)	98.5(1)	0.2(1)	532(5)	2.9(1)	0.6(3)	80(1)	1141(1)	44.3(3)	23(P)
	S6	7(3)	1(1)	96(1)	96(1)	2.7(1)	151(3)	22.6(1)	0.7(3)	70(3)	1124(1)	43.1(3)	21(P~VP)

Biological parameters=M₁~M₈ (M₁~M₃: Species composition, M₄, M₅: Trophic composition, M₆~M₈: Fish abundance and individual health), Physical habitat parameters=M₉, Chemical parameters=M₁₀, M₁₁.

Table 3. Environmental parameters in Namyang Reservoir during the studying period.

Parameters	1st survey (Oct, 2005)						2nd survey (May, 2006)					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Temperature (°C)	18.8	18.5	20	19.3	19.6	19.9	20	18.9	18.9	18.5	17.5	18.7
pH	7.0	6.8	7.5	6.7	6.6	6.8	9.5	8.8	8.7	8.4	8.4	8.5
DO (mg L ⁻¹)	8.3	9	11.3	6.3	7.6	6.7	16.3	12.3	10.3	9.7	10.8	10.8
EC (μs cm ⁻¹)	314	315	280	285	362	368	834	1255	1113	1098	1141	1124
Salinity (ppt)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6
Turbidity (NTU)	46	35	38.7	30.6	29.6	30.5	21.7	26.6	28.7	14.4	15.3	12.3
Vegetation coverage (%)	90	95	90	95	95	95	35	50	15	30	80	70
Chl- <i>a</i> (μg m ⁻³)	63.4	68.6	128.8	99.3	104.2	97.2	14.9	19.5	21.6	33.4	24.8	18.7
TSI(Chl- <i>a</i>)	48.3	48.6	51.3	50.2	50.4	50.1	42.1	43.3	43.7	45.5	44.3	43.1

차 조사의 결과에 따르면, 호소 내 영양물질의 증가로 인하여 수생식물의 피도가 높아진 것으로 사료된다(Barko *et al.*, 1992). 시기별 수변 식피율은 장마 후인 1차 조사 시기가 수체 안정기인 2차 조사 시기에 비해 높은 비율로 나타난 것을 볼 수 있다. 이처럼 남양호가 다른 인공 호에 비하여 영양염의 비율이 높은 원인은 주변 농경지로부터 농업용수의 유입 때문인 것으로 사료된다.

남양호의 화학적 수질 평가 결과에 따르면, EC는 1차 조사에서 250~332.1 μs cm⁻¹의 변이를 보여 평균 3, 2차 조사에서는 834~1,255 μs cm⁻¹의 변이를 보여 평균 1점으로 나타났다. 부영양화도 지수(Trophic State Index, TSI)는 1차 조사에서 지점별로 48.3~51.3로 변동하여 평균 1.7로, S1에서 가장 낮은 값을 보였으며, S3에서 가장 높게 나타났다. 2차 조사에서는 지점별로 42.1~45.5로 변동하여 평균 3으로, S1에서 가장 낮은 값을 보였고, S4에서 가장 높은 값을 보였다(Table 3).

남양호에서 1·2차 조사에 의거한 생태건강도 모델의

평균값은 각각 24 (n=6) “악화상태”와 24.6 (n=6) “악화상태”로 나타나 2회에 걸친 조사 결과 24.3 “악화상태”로 나타났다. 지점별 모델 값은 S1에서 26으로 가장 높게 나타났고, S6에서 21로 가장 낮게 나타났으며, S1, S6을 제외한 나머지 지점에서는 25로 나타났다(Fig. 3). 각 메트릭별 분석결과에 따르면, M₁(총 본토종수)과 M₆(총 개체수)은 3~5 범위의 메트릭 값으로 높게 나타났지만 수질 및 서식지 교란 등을 판단할 수 있는 M₂(민감종수)와 M₅(총식종 개체빈도)의 모델 메트릭 값은 1점으로서 수환경의 악화특성을 보여 생태 건강도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 수질 저하 및 오염에 생존율이 높아 상대풍부도가 증가하는 M₃(내성종 개체빈도)와 어류서식지의 물리·화학적 질적 저하에 따라 상대풍부도가 증가하는 M₄(잡식종 개체빈도)의 모델 메트릭 값은 낮게 나타났다. 외래종의 영향을 반영하는 M₇(외래종 개체빈도)의 메트릭 값도 낮은 값을 나타냈는데 이는 외래종인 떡붕어, 배스가 다수 출현하여 낮은 점수를 보였다. 또한,

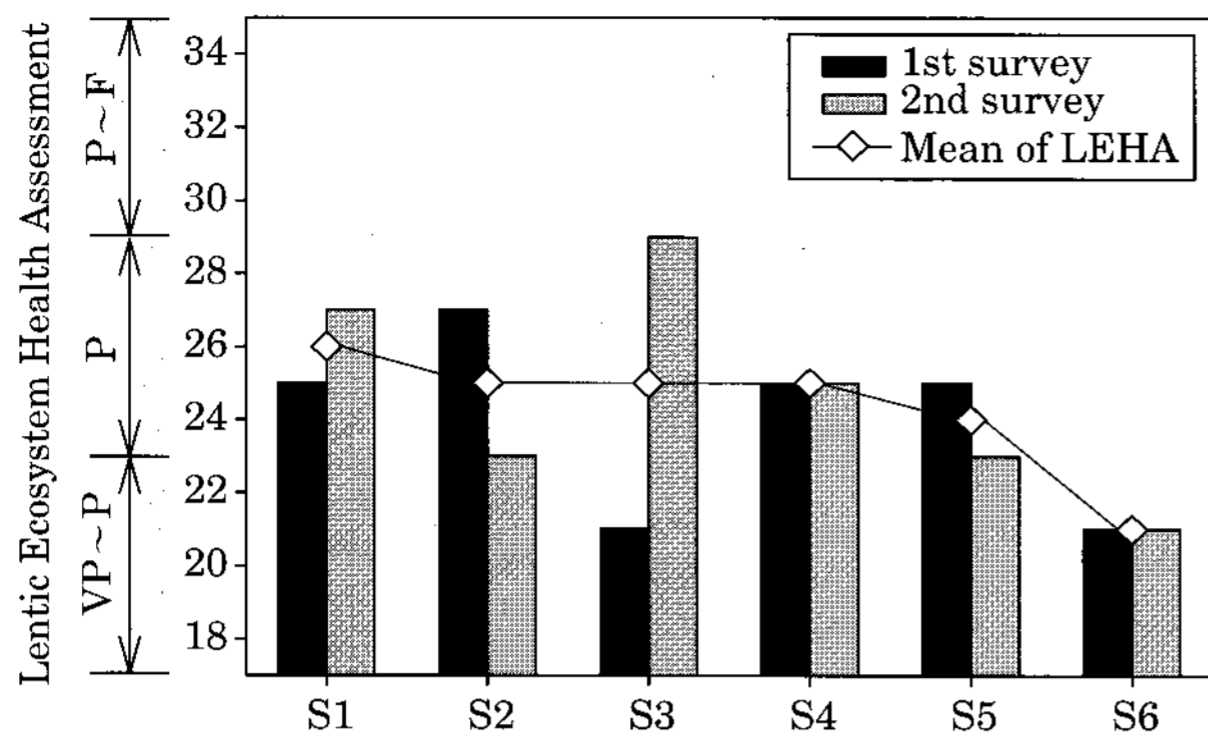


Fig. 3. The lentic ecosystem health assessments (LEHA) in Namyang Reservoir.

개체의 건강 상태를 나타내는 M_8 (비정상종의 개체빈도) 과 물리적 서식지 특성을 나타내는 M_9 (수생식물의 피도), 이화학적 수질 특성을 나타내는 M_{10} (전기전도도), 호수의 부영양도를 판단하는 M_{11} (TSI지수)도 비교적 낮은 점수를 나타냈다. 남양호는 생태지표종의 분포 특성과 섭식구조 단순화로 인하여 내성종과 잡식종의 우점현상이 나타났고, 특히 서식지의 질적 저하와 오염부하의 증가에 따라 상대 풍부도가 증가하는 외래종의 우점현상으로 생태계가 크게 교란되어 이로 인하여 생태 건강성 값이 크게 악화된 것으로 사료된다. 수변식피율도 전 지점에서 높게 나타나는데 이는 주변 농경지에서 발생한 영양염이 호수 내로 유입된 것으로 추정해 볼 수 있다. 전기전도도 및 부영양화지수인 TSI (Chl-a)에서도 복합적인 원인에 의해 급격히 증가한 것으로 나타났다. 이는 호수 주변의 어로행위와 주변농경지의 비료 과잉에 의한 것으로 호수의 부영양화가 생태계 교란을 일으켜 남양호 생태건강성이 악화된 것으로 사료된다.

결론

우리나라에서는 최근까지도 다변수 모델을 이용한 정수생태계의 건강성 평가 방법이 전무한 실정이라서 수자원의 효율적, 친환경적 관리를 위하여 각종 정수생태계 평가 기법 및 모델의 개발이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서 적용한 정수생태 건강성 평가(LEHA) 모델은 인공호 현재의 건강성에 관하여 세부적인 진단이 가능하며, 호수나 인공호의 생태복원시 취약한 문제점은 보다 신속하게 파악할 수 있기 때문에 호수 생태계 복원의 시간절약과 비용절감의 효과를 가져 올 수 있다. 또한, 효율적인 호수관리에 있어서 정확한 목표설정이 가능하기 때

문에 복원 후 목표에의 도달 여부까지도 확인이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

LEHA 모델을 적용한 남양호는 생태적 측면에서 영양염류에 의한 유기물 오염과 이로 인한 잡식종, 내성종, 외래종의 출현 비율이 증가하여 생태 건강성이 크게 악화된 것으로 나타났다. 이를 위해 주변 농경지에서 호수로 유입되는 유입수를 차단하고, 불법적인 어로행위에 대한 정부차원의 제도적 장치를 마련하여 영양염류에 의한 유기물 오염과 잡식종, 내성종, 외래종의 출현 비율을 감소시켜야 할 것이다. 특히, 떡붕어와 배스와 같은 외래종이 전 지점에서 출현하여 남양호의 건강성을 악화시키는 원인이 되었다. 하지만 수생태계에 완전히 정착한 외래종을 완전히 퇴치 한다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 이들의 자연 자원량 조절을 위한 정부 차원에서 매입 사업이나, 또는 식품 이용기술 개발이나 산업적인 가치가 있는 가공원료를 개발하는 등의 자원 활용 방안을 수립하여 외래종을 감소시켜야 할 것이다.

본 연구 대상인 남양호의 생태건강성 평가에 의하면 남양호는 그 목적에 비추어 볼 때, 농업용수로 사용하는 데 큰 문제는 없지만, 생태학적 측면에서 볼 때 시급한 대책 마련이 필요하다. 수체 내에 서식하는 생물을 기반으로 하는 생물학적 평가와 생물의 서식지의 질을 가늠하는 물리적 서식지 평가 그리고 수체의 현 상태를 반영하는 화학적 수질 평가가 함께 병행된다면 보다 나은 친환경적인 호수 관리를 할 수 있을 것이다.

적요

본 연구에서는 어류 매트릭 속성을 이용한 우리나라의 정수생태계 건강성평가 모델을 적용하기 위하여 국내 인공호인 남양호를 대상으로 2005년 10월과 2006년 5월 2차례에 걸쳐 생태 건강성 평가를 실시하였다. LEHA 모델은 생물학적 변수, 물리적 변수, 화학적 변수를 포함한 총 11개의 매트릭으로 구성되어 있다. 상기 변수의 시공간적인 분석을 위해 남양호의 상류부에서 하류부까지 6개의 지점을 선정하였다. 남양호의 생태 건강성 평가 결과 내성종(M_3)이 80%로 나타났으며, 잡식종(M_4)이 92%로 나타나 섭식구조의 단순화로 인하여 내성종과 잡식종의 우점현상을 보였으며, 특히 외래종의 상대 풍부도(M_7)가 8%로 나타나 생태계가 교란되어 생태건강성이 크게 악화된 것으로 나타났다. 상기 LEHA 다변수 모델을 이용한 남양호의 생태 건강성 평가 결과, 생태 건강성 지수의 평균값은 24.3(n=12)으로서 안과 한(2007)의 등급에

의거하였을 때 “악화상태”로 나타났다. 지점별 LEHA 모델값은 21~26의 변이를 보여 낮은 건강성을 갖는 것으로 나타났으며, 장마철 집중강우에 의하여 시간적인 변이가 발생되었다. 전기전도도와 엽록소- a 를 이용한 부영양화지수(TSI)는 장마 후보다 장마 전에 더 높게 나타났다.

사 사

본 연구는 “Eco-STAR Project 수생태복원사업”의 일환으로 일부 수행되었음.

인 용 문 헌

- 김익수. 1997. 한국동식물도감 동물편(담수어류). 교육부.
- 김익수, 강종언. 1993. 원색 한국 어류도감. 아카데미서적. 352p.
- 김익수, 박종영. 2002. 원색도감 한국의 민물고기. 교학사.
- 김재윤. 1998. 우리나라 인공호의 부영양화 평가 및 예측에 관한 연구. 한국환경과학회지 7(4): 441-449.
- 배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 갑천 생태계 평가. 한국육수학회지 39(2): 198-208.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지 38(3): 361-371.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. 한국육수학회지 38(1): 54-62.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001a. 생물보전지수(Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천 수계의 평가. 환경생물 19(4): 261-269.
- 안광국, 이의행. 2006. 어류의 군집 메트릭 모델을 이용한 유구천의 생태 건강도 평가. 한국육수학회지 39(3): 310-319.
- 안광국, 이재연, 배대열, 김자현, 황순진, 원두희, 이재관, 김창수. 2006. 우리나라 주요하천 수계에서 다변수 모델을 이용한 생태학적 수환경 평가. 환경생물 22(5): 796-804.
- 안광국, 이재연, 장하나. 2005. 유등천에서의 생태학적 건강도 평가 및 수질양상. 한국육수학회지 38(3): 341-351.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001b. 생물보전지수 및 서식지 평가 지수를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국육수학회지 34(3): 153-165.
- 안광국, 최지웅. 2006. 초강의 통합적 생태건강성 평가. 한국육수학회지 39(3): 320-330.
- 안광국, 한정호. 2007. 정수생태계 건강성 평가를 위한 다변수 메트릭 모델 개발. 한국육수학회지 40(1): 72-81.
- 원두희, 전영철, 권순직, 황순진, 안광국, 이재관. 2006. 저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용. 한국물환경학회지 22(5): 768-783.
- 이재용, 조규송. 1995. 남양호 동물플랑크톤의 출현과 분포. 한국육수학회지 28(3): 271-278.
- 전상린. 1980. 한국산 담수어의 분포에 관하여. 중앙대박사학위논문. 서울.
- 최기철. 1985. 경기의 자연 담수어편. 경기도교육위원회. 236p.
- 최기철. 1994. 우리민물고기 백가지. 현암사. 532p.
- 최재석. 2005. 춘천호의 어류상과 군집구조. 한국환경생물학회지 23(2): 173-183.
- 최준길, 변화근, 석형근. 2000. 원주천의 어류군집동태. 한국육수학회지 33(3): 274-281.
- 홍영표, 손영목. 2003. 외래어종 베스, *Micropterus salmoides* 를 포함하는 군집의 중간 Association에 관한 연구. 한국어류학회지 15(1): 61-68.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법. 환경부고시 제99-208호.
- 황순진, 김난영, 원두희, 안광국, 이재관, 김창수. 2006. 돌말(Epilithic Diatom) 지수를 이용한 국내 주요 하천(금강, 영산강, 섬진강)의 생물학적 수질평가. 한국물환경학회지 22(5): 784-795.
- Barko, J.W., H.L. Eakin and D.G. McFarland. 1992. Interrelationships between macrophyte growth and sediment nutrient availability. Abstracts, NALMS 12th Annual International Symposium. North American Lake Management Society, Madison, WI.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 22: 361-369.
- Crowder, A. and D.S. Painter. 1991. Submerged macrophytes in Lake Ontario: Current knowledge, importance, threats to stability, and needed studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48: 1539-1545.
- Drenner, R.W., J.D. Smith and S.T. Threlkeld. 1996. Lake trophic state and the limnological effects of omnivorous fish. *Hydrobiologia* 319: 213-223.
- Harper, D.M. 1992. Eutrophication of Freshwaters. Chapman and Hall. pp. 120-123.
- Harper, D.M. and W.D.P. Stewart. 1987. The effects of land use upon water chemistry, particularly nutrient enrichment, in shallow lowland lakes: comparative studies of three lochs in Scotland. *Hydrobiologia* 148: 211-229.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* 6: 21-27.
- Ohio EPA. 1989. Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol. III, Standardized biological field sampling and laboratory method for assessing fish and macroinvertebrate communities. U.S.A.
- Orth, R.J. and J.W. Moore. 1983. Chesapeake Bay: An unprecedented decline in submerged aquatic vegetation. *Science* 222: 51-53.

U.S. EPA. 1991. Technical support document for water quality-based toxic control. EPA 505-2-90-001. U.S. EPA, Office of Water, Washington, D.C., U.S.A.

U.S. EPA. 1994. Environmental Monitoring and Assessment Program: Integrated quality assurance project plan for the Surface Waters Resource Group, 1994 activities, Rev. 2.00. EPA 600/X-91/080. U.S. Environmental Pro-

tection Agency, Las Vegas, NV.

U.S. EPA. 1998. Lake and Reservoir Bioassessment and Bio-criteria. EPA 841-B-98-007. U.S. EPA, Office of Water, Washington, D.C., U.S.A.

(Manuscript received 14 May 2008,
Revision accepted 31 May 2008)