Korean J. Limnol. 41 (Special issue) : 42~49 (2008)

신구저수지의 수질특성 및 LEHA 어류모델을 이용한 생태건강도 평가

이재연 · 이상재 · 한정호 · 이의행 · 최지웅 · 황순진[1] · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, [1]건국대학교 환경과학과)

Waterquality Characteristics and Ecosystem Health Assessments Using a LEHA Fish Model in Shingu Reservoir. ***Lee, Jae-Yon, Sang-Jae Lee, Jung-Ho Han, Eui-Hang Lee, Ji-Woong Choi, Soon-Jin Hwang[1] and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; [1]Department of Environmental Sicence, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)***

For this study, we collected fishes of four times at the four site during June 2006~September 2007. In the result, the tolerance and omnivore species like a *Carassius auratus* and *Pseudorasbora parva* were largely dominated over all, and the sensitive species was not appeared at all except S4 in Shingu reservoir. This reservoir was appeared the simplified of trophic guild was shown in Shingu reservoir. Demonstrating that the omnivore species was occupied 78% of whole. According to the water chemistry dataset obtained from the Korea Rural community & Agriculture corporation during 2002~2005, the Shingu reservoir showed severe eutrophication and water pollution, therefore the increase of primary production and frequent algal blooms had been occurred. On the other hand, ecosystem health of reservoir was appeared "Fair~Poor", and we judged that eutrophication and water pollution were due to this. Consequently, we thought that interception of nutrients and organic matters from the farmland and village and management of reservoir would be need, after this.

Key words : ecosystem health, fish, agricultural reservoir, eutrophication

서 론

일반적으로 수심이 얕은 호수는 깊은 호수보다 영양염류(N, P) 부하 및 조류에 의한 1차 생산력이 더 큰 것으로 보고된 바 있다(Vollenweider, 1968; 환경부, 2007). 현재 우리나라에서 농업용 저수지는 전국적으로 18,000여개가 분포하고 있으며, 대부분은 생성연도가 오래되고 평균수심이 10 m 이하로서 최근 부영양화 현상이 더욱 가속화되는 것으로 알려져 있다(이 등, 2003; Hwang *et al.*, 2003). 수심이 얕은 농업용 저수지의 수질악화는 인근에 형성되어 있는 마을과 농경지로부터 유입되는 생활하수 및 영양염류(N, P)가 주요 원인으로 작용하고 있으며, 이로 인하여 저수지내 1차 생산력이 급격히 증가하고 수층내 용존산소 고갈 및 빈번한 수화현상(algal bloom)이 나타나고 있다(최와 김, 2002; 농업기반공사, 2005). 특히 여름철 발생하는 수화현상의 대부분은 남조류에 의한 것으로 이들 남조류의 수화현상은 저수지 내 생태계 먹이사슬의 교란, 시 · 후각적 불쾌감의 증대, 관개용수로서의 질적 저하를 유발하고 있다(국립환경연구원, 1999).

최근까지의 농업용 저수지와 같은 정수생태계의 연구들에 따르면, 수체의 수질특성 및 건강성 평가지표로서

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

이화학적 척도인 용존산소량(DO), 화학적 산소요구량(COD), 영양염(TN, TP) 및 1차 생산력(Chl-*a*) 등이 주요 지표로 활용되어 왔다. 최근 환경부는 기존의 이화학적 기준만을 이용한 하천 수생태계의 건강성 평가를 탈피하여, 이화학적 평가 뿐 아니라 생물학적인 평가기준을 마련하여(환경부, 2007) 생태계의 총체적인 평가기준안을 마련하였다. 그러나 현재까지 농업용 저수지와 같은 정체수역을 평가하기 위한 구체적인 평가기준안은 마련되어 있지 않은 상태며, 국내에서 수행된 정수생태계의 생태학적 건강성 평가 연구는 거의 전무한 실정이다(안과 한, 2007). 이미 미국과 같은 환경선진국에서는 정부 주도하에 호소생태계의 총체적인 평가와 진단이 가능한 다양한 평가 프로그램을 사용하여 그에 맞는 다변수 정수생태계 평가모델 개발을 완료하였으며(U.S. EPA, 1994), 저수지와 같은 호소생태계를 총체적으로 평가하는 관리기법으로 자연호 및 인공호의 생물평가 및 생물기준안(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)을 마련하여 지속적인 정수생태계의 건강성 평가 및 모니터링을 실시하여 생태계의 효율적 관리에 실효를 거두고 있다(US EPA, 1998). 우리나라에서는 최근, 안과 한(2007)에 의하여 어류를 이용한 대청호 정수생태계 건강성 평가 모델(Lentic Ecosystem Health Assessment Medel, LEHA model)이 개발되었으나, 지금까지 농업용 저수지와 같은 수체를 대상으로 한 모델적용 및 평가는 이루어지지 않은 상태이며, 따라서 현재 우리나라의 농업용 저수지의 생태건강도에 대한 자료는 매우 빈약하다.

신구저수지는 충청남도 서천군에 위치하고 있으며 수표면적은 0.1 km^2, 저수량은 3.88×10^5 톤(김 등, 2004)으로 여름철 수화현상(Algal bloom)이 빈번하게 일어나고 있는 얕은(평균수심 : 4 m, 최대수심 : 7 m) 농업용 저수지이다. 저수지 인근유역은 농경지와 야산으로 이루어져 있으며, 저수지 물은 인근 농경지의 관개용수로 사용되고 있다. 윤 등(2006)은 신구저수지에서 어류군집 특성 및 종조성에 대해 기술한 바 있으나, 생태건강도 평가에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

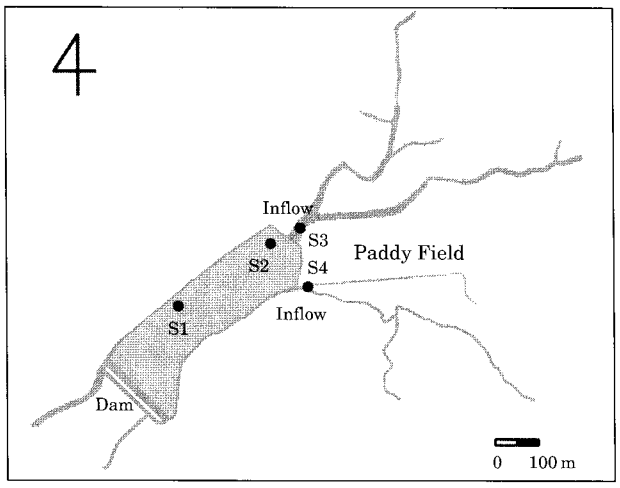

Fig. 1. The map showing the sampling site in Shingu Reservoir.

본 연구는 농업용 저수지인 신구저수지의 수질특성을 분석하고, 정수생태계 건강성평가 모델인 LEHA 모델을 이용한 생태건강도 평가를 실시하여, 농업용 저수지와 같은 소규모 정수생태계의 효율적인 관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사시기 및 지점

본 연구는 2006년 6월부터 2007년 9월까지 총 4회의 어류조사를 실시하였다. 본 연구를 위해 저수지 내 호소특성을 보이는 2개 지점(S1, S2)과 저수지내로 유입되는 유입천 2개 지점(S3, S4)을 선정하였다(Fig. 1). S1과 S2는 저수지 내부에 위치하여 호소특성을 그대로 반영하는 지점이었고, S3는 저수지로 유입되는 유입천 지점이나 저수지 유량상승에 의해 저수지의 특성을 잘 반영하는 지점이었다. S4는 저수지내로 유입되는 또 다른 유입천에 위치한 지점이었으나 S3과는 달리 저수지 수위상승에 의한 영향이 크게 미치지 않는 지점으로 선정하였다.

2. 이화학적 수질

전기전도도(Conductivity)는 다항목 수질측정기(YSI Sonde 6600)를 이용하여 측정하였으며, 25°C로 보정된 값을 측정결과로 사용하였다. 엽록소 *a* (Chlorophyll-*a*, Chl-*a*) 농도 측정에 에탄올 추출법(Sartory and Grobbelaar, 1984)을 이용하였으며, 분광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU-530 Model)를 이용하여 흡광도를 측정하여 아래 식을 통하여 엽록소 *a*의 농도를 계산하였다.

$$\text{Chl-}a\ (\mu g\ L^{-1}) = \frac{[13.7(OD_{649}-OD_{750})-5.76(OD_{649}-OD_{750})]V}{V*10}$$

또한 신구저수지의 장기간 수질특성 분석은 2002년부터 2005년까지 한국농촌공사에서 측정한 수질자료(농업기반공사, 2001~2005)를 이용하였다. 사용된 수질항목은

Table 1. The Lentic Ecosystem Health Assessment Model (LEHA Model), based on the physical, chemical, and biological metrics.

Category	Metric component	Scoring criteria		
		5	3	1
Species composition	M_1 Total # of native species	>67%	33~67%	<33%
	M_2 Number of sensitive species	>67%	33~67%	<33%
	M_3 % individuals as tolerant species	<5%	5~20%	>20%
Trophic composition	M_4 % individuals as omnivores	<20%	20~45%	>45%
	M_5 % individuals as insectivores	<20%	20~45%	>45%
Fish abundance & individual health	M_6 Total individual number	>67%	33~67%	<33%
	M_7 % individuals as exotics	0%	0~1%	>1%
	M_8 % individuals with anomalies	0%	0~1%	>1%
Chemical conditions	M_9 Conductivity ($\mu s\ cm^{-1}$)	<81	81~385	>385
	M_{10} Tropic state index (Chlorophyll-*a*)	<40	40~50	>50

전기전도도(Conductivitiy, EC), 용존산소(Dissolved oxygen, DO), 영양염(Total nitrogen, TN; Total phosphrous, TP), 화학적 산소요구량(Chemical oxygen demand, COD), 부유물(Suspended solid, SS), 엽록소-*a* (Chlorophyll-*a*, Chl-*a*)의 총 7개 항목이었으며, 본 수질자료의 시간별 변이 추이를 토대로 신구저수지의 수질경향성을 분석하였다.

3. 어류채집 및 저수지 건강도 평가

1) 어류채집

어류채집은 미환경부의 정수생태계 평가 기법(Lake and Reservior Bioassessment and Biocriteria) (U.S. EPA, 1998)에 기초로 하는 안과 한(2007)의 방법에 따라 실시하였다. 어류채집은 수심이 3~4 m 미만인 얕은 저수지의 연안부(Littoral Zone)에서 실시하였으며, 수심이 얕은 수초 근처에서는 족대(Mesh size: 4×4 mm), 호소 연안대의 개방된 구간에서는 투망(Mesh size: 5×5 mm)을 각각 이용하였다. 어류채집은 지점별로 50분간 실시하였으며, 채집구간은 저수지 규모를 감안하여 조사지점별로 50 m 구간 내에서 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 김과 박(2002), 김(1997)에 의거하여 동정하였다.

2) 정수생태계 평가모델 (LEHA model) 적용 및 생태건강도 평가

신구저수지에서의 생태건강도 평가는 안과 한(2007)의 LEHA 어류에 의거하였고, 기본적인 모델은 생물통합지수(Index of Biological Integrity)에 기반을 두었다. LHEA 어류모델의 메트릭은 총 11개였으나, 본 연구에서는 신구저수지의 규모와 식생분포율을 감안하여 최초 LEHA 모델의 수변 식피율 메트릭을 제외하고 10개 메트릭을 적용하였다(Table 1). 신구저수지의 생태건강도는 LEHA 모델에 근거하여 평가되었으며, M_1~M_8은 기존 하천건강성 평가모델인 IBI (Index of Biological Integrity) 모델에 기본을 둔 메트릭이며, M_9~M_{10}은 정수생태계 특성을 반영하고자 안과 한(2007)에 의해 새롭게 개발된 메트릭이다.

본 연구에 이용된 LEHA 모델 등급은 총 5개 범주로 구분하였으며(Table 2), 등급별 적용기준 값은 11개 메트릭으로 환산된 기존 LEHA 모델의 기준에서 10개 메트

Table 2. The criteria of Lentic Ecosystem Health Assessment Index (LEHA).

Rank	Criteria of LEHA	LEHA	Characteristics
I	Excellent	46~50	Comparable to pristine conditions, exceptional assemblage of species.
II	Good	36~40	Decreased species richness, intolerant species in particular; Sensitive species present
III	Fair	26~30	Intolerant and sensitive species absent; skewed trophic structure
IV	Poor	16~20	Top carnivores and many expected species are absent or rare; omnivore and tolerant species are general
V	Very poor	≤10	Few species and individuals present; tolerant species dominated; diseased fish frequently

Table 3. Fish fauna at the Shingu reservoir.

Species name	Tolerance guild	Trophic guild	S1				S2				S3				S4				Total				
			P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	Total
Carassius auratus	T	O	40	3			5				11				18	10	13		74	13	13		100
Carassius cuvieri	T	O	2	1															2	1			3
Cobitis lutheri	I	I	4								3					1			7	1			8
Cyprinus carpio	T	O	1								1						1		2		1		3
Hemiculter eigenmanni	T	O					11				2								13				13
Misgurnus anguillicaudatus	T	H			19	27												2			19	29	48
Misgurnus mizolepis	T	H				5												7				12	12
Oryzias sinensis	I	F	2	4	3	6											2	2	2	4	5	8	19
Pseudobagrus fulvidraco	I	C	1	8			1									1			2	9			11
Pseudorasbora parva	T	O	15		3	1	5				9				11	9	1	8	40	9	4	9	62
Rhinogobius brunneus	I	I	35	8	22	8	1				12				5		3	1	53	8	25	9	95
Rhynchocypris oxycephalus	S	O				6				5												6	6
Silurus asotus	T	C	1																1				1
Total # of individuals			101	24	47	53	23	0	0	5	38	0	0	0	34	21	20	20	196	45	67	73	381
Total # of species			9	5	4	6	5	0	0	1	6	0	0	0	3	4	5	5	10	7	5	6	13

릭 모델에 맞게 수정하여 적용하였다. 등급산정은 각 메트릭별로 1, 3, 5의 모델값을 부여하여 총 10개 메트릭 점수를 합산하여 산정하였고, 46~50은 최적상태(Excellent), 36~40은 양호상태(Good), 26~30은 보통상태(Fair), 16~20은 악화상태(Poor), 10 이하는 극히 악화된 상태(Very poor)로 구분하였다.

결과 및 고찰

1. 저수지의 이화학적 특성

2002년부터 2005년까지 수질분석결과 신구저수지는 부영양화 현상과 수질오염이 심각한 것으로 나타나고 있었다(Fig. 2). 전기전도도(EC)는 측정기간 동안 평균 219.3 μs cm^{-1}로 수질오염이 상당히 진행된 대표적인 인공호인 대청호에서 보여진 평균 108~120 μs cm^{-1}(안과한, 2007)보다도 2배 정도 높은 값을 나타내고 있었다. 용존산소(DO)는 기간 동안 4.2~12 mg L^{-1} 변이를 보이고 있었으며 계절에 따른 변이 폭이 크게 나타나고 있었다. 생물화학적 산소요구량(COD)는 평균 9.5 mg L^{-1}으로 환경부에서 공시하고 있는 호소수질환경 기준에 따르면, 6등급에 해당하는 수치를 보였으며, 겨울을 제외한 나머진 전 계절에서 8 mg L^{-1} 이상의 값을 지속적으로 나타내고 있었다. 부유물(SS)은 평균 11.5 mg L^{-1}로서 호소수질환경기준에서는 양호한 상태로 나타나고 있었다. 그러나 계절별로 큰 변이폭을 보이고 있었으며, 여름철 강우에 의한 상승효과가 크게 나타나고 있었다. 또한 2002년에서 2005년으로 갈수록 하락추세를 나타내고 있었다. 영양염(TN, TP) 값은 매우 높게 나타나고 있었으며, 총질소(TN), 총인(TP) 모두 호소수질환경기준에서 매우 악화된 상태로 판명되었다. TN : TP비는 조사기간 동안 모두 17 이상으로 나타나 본 연구대상 저수지에서는 인 제한효과가 매우 크게 나타나고 있는 것으로 판명되었다. 엽록소 *a*(Chl-*a*) 값은 높은 인 수치에 의해 매우 높은 값을 형성하고 있었으며, 연중 수화현상(Algal bloom)이 지속적으로 일어나고 있는 것으로 나타났다.

2. 어류 분포

총 4차례의 조사결과, 신구저수지에서는 13종 381개체가 출현하였으며, 붕어(*Carassius auratus*), 밀어(*Rhino-*

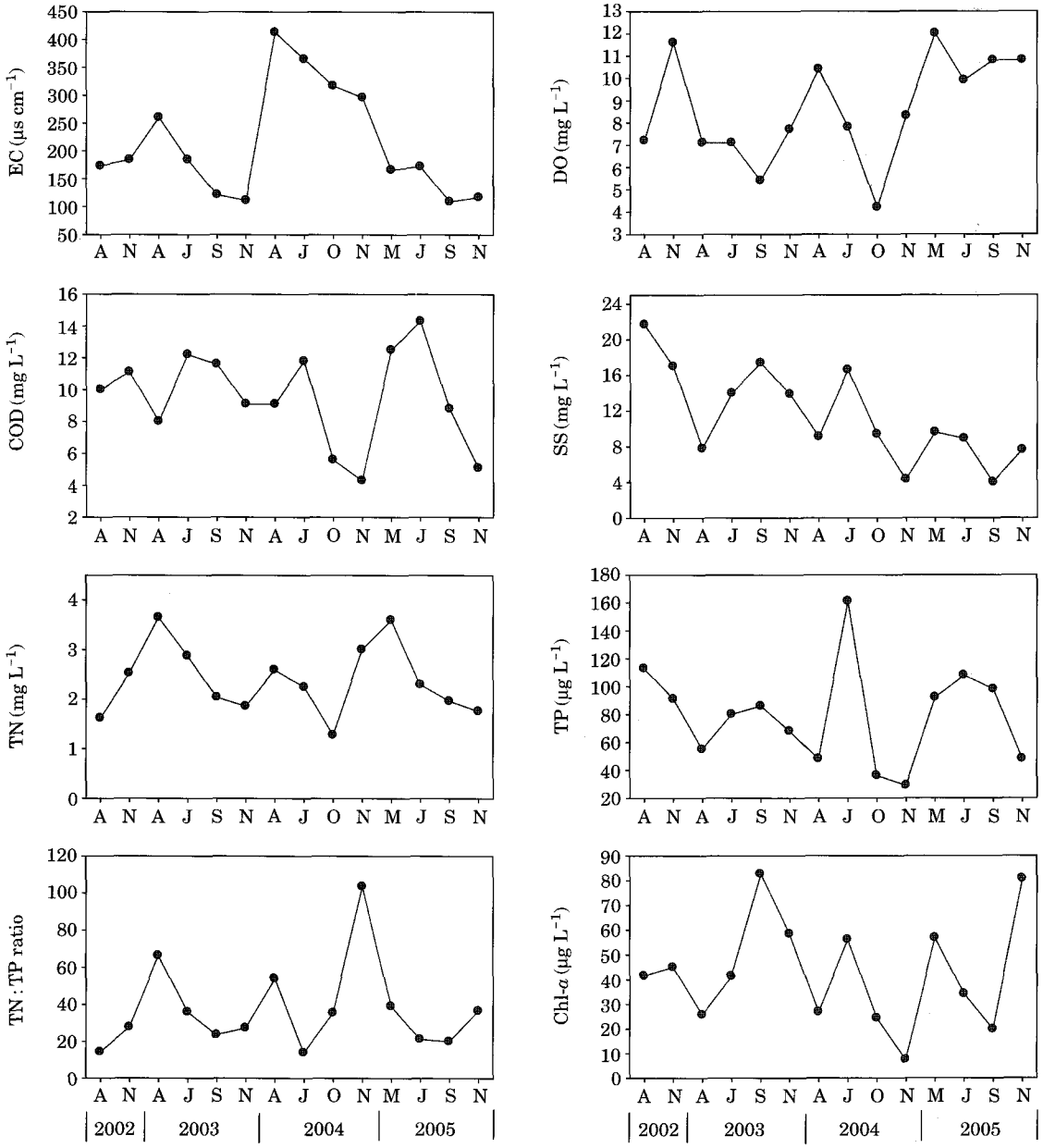

Fig. 2. The variations of water chemical factors during 2002~2005.

gobius brunneus), 참붕어 (*Pseudorasbora parva*)가 가장 우점하는 종으로 나타났다 (Fig. 3). 우점종인 붕어, 참붕어는 모두 내성종이었으며, 전체 내성종은 13종 381개체 중, 8종 242개체를 차지하고 있었다. 이는 전체의 78%에 해당하는 것으로 나타나 현재 저수지의 부영양화와 수질 오염 정도가 매우 심각한 상태임을 간접 시사하였다. 지점별로는 저수지 내에 위치한 지점 (S1)에서 주요 분포를 보이고 있었으며, 반면 유입천에 위치한 지점 (S3, S4)에서는 비교적 내성종 출현빈도가 낮게 나타나고 있었다 (Fig. 4). 그러나 각 지점별 출현 내성종 출현비율은 전 지점에서 평균 60% 이상으로 저수지의 전체적인 내성종 우점현상이 큰 것으로 나타났다. 전 조사지점에서 민감종은 산간계류천의 영향을 받고 있는 S4에서만 출현하고 있었으며, 나머지 지점에서는 총 4차례의 조사동안 민감종은 전혀 출현하지 않았다.

이전 연구결과 (윤 등, 2006)에서도 일반적으로 농업용

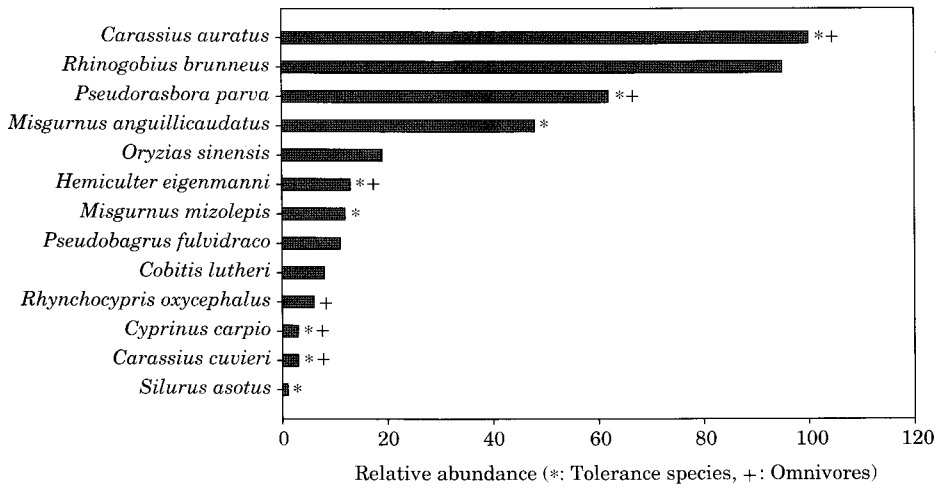

Fig. 3. Relative abundance of a collected fish fauna.

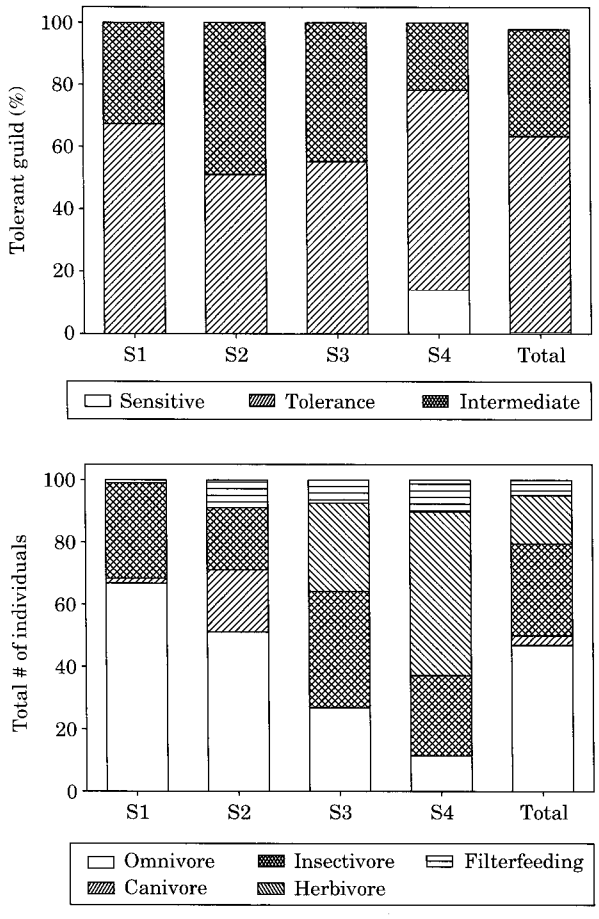

Fig. 4. Tolerant and trophic guild in Shingu reservoir.

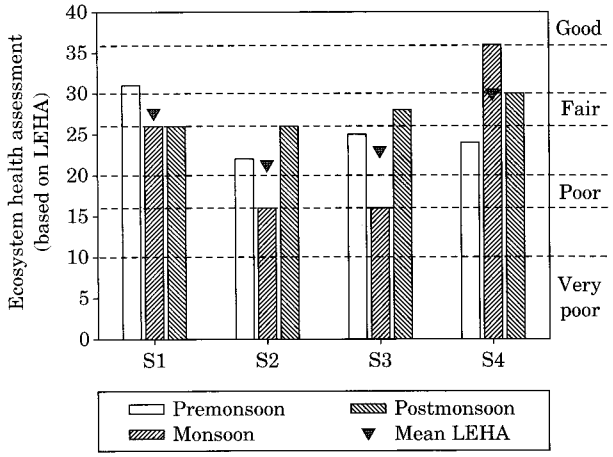

Fig. 5. Ecosystem Health based on LEHA model.

저수지에서 잡식성종이 크게 우점하는 현상을 보인다는 보고한 바 있듯, 신구저수지에서도 잡식성종이 평균 약 50%로 가장 많은 우점현상을 보이고 있었으며, 충식성, 초식성 순의 우점 비율을 나타내고 있었다(Fig. 4). 지점별로 잡식성종은 S1에서 S4로 갈수록 비율이 줄어들고 있었다. 저수지내 지점인 S1과 S2에서는 50% 이상을 보였으나 유입천 지점인 S3과 S4에서는 30%의 출현비율을 나타냈다. 이는 저수지내 다량의 유기물과 영양염의 집중으로 인하여 잡식성종의 비율이 크게 증가하고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 하천특성이 가장 크게 작용하고 있는 S4에서는 10% 미만으로 나타나 저수지내 지점과 큰 대조를 이루었다. 일반 하천과는 달리 신구저수지에서는 충식성종의 비율이 비교적 높게 나타나고 있었는데, 이는 저수지내 갑각류(새우류)를 포함한 대형무척추동물의 서식 비율이 크게 작용한 것으로 판단되었다. 한

편 S3과 S4에서만 초식종이 출현하였는데, 이는 미꾸라지(*Misgurnus mizolepis*)와 미꾸리(*Misgurnus anguillicaudatus*)의 다량 출현에 의한 비율 증가로 인한 것이었으며, 유입천 부근에 위치한 지리적인 특성으로 인하여 두 어종의 서식이 용이하였기 때문으로 사료되었다.

3. LEHA 모델에 의한 저수지의 생태건강도 평가

LEHA 모델에 의거한 신구저수지의 생태건강도는 "보통에서 악화상태(Fair~Poor)"로 나타났다. S1과 S4는 각각 평균 28점과 30점으로 "보통(Fair)상태"로 나타났으며, S2와 S3은 각각 평균 21점과 23점으로 "보통에서 악화상태(Fair~Poor)"로 나타났다(Fig. 5). S1은 평균 지수와 계절별 지수에 따른 변이는 크지 않은 것으로 나타났으나, S2~S4 계절별 약간의 값의 변이를 보였다. 이는 농업용 저수지의 특성상 장마전기 인근 농경지의 관개용수로의 이용으로 인하여 S2~S4의 저수량이 급격히 감소하였으며, 이로 인해 생태건강도 지수에 큰 영향을 미친 것으로 판단되었다. 실제 조사 기간 중 장마전기에 S2~S4의 저수량이 급격히 감소하였으며 이에 따라 대상지점에서의 어류채집이 전혀 이루어지지 않음으로써 생태건강도 지수는 매우 낮은 점수로 평가되었다.

한편 이전의 농업용 저수지의 생태건강도 평가에 대한 연구는 전무한 실정으로 현재 신구저수지의 타 저수지에 대한 상대적인 생태건강도는 비교 불가능한 상태였으며, LHEA 모델을 이용한 인공호 평가사례(안과 한, 2007)와 비교하였을 때 생태건강도는 유의한 상태로 나타나고 있었다. 향후 농업용 저수지를 대상으로 한 생태건강도 평가의 지속적인 실시로 우리나라 농업용 저수지의 생태건강도에 대한 평균적인 자료 제시가 필요할 것으로 판단되었다.

적 요

본 연구에서는 2006년 6월부터 2007년 9월까지 신구저수지의 4개 지점을 선정하여 총 4차례의 어류조사를 실시하였다. 조사결과 붕어와 참붕어 등 내성종이면서 잡식성종이 크게 우점하는 것으로 나타났으며, 민감종은 유입천 지점에 위치한 S4를 제외하고 전혀 출현하지 않았다. 잡식성종은 전체의 78%를 차지하여, 트로픽길드의 단순화 현상이 나타나는 것으로 판단되었다. 저수지의 생태건강도는 평균 "보통에서 악화상태(Fair~Poor)"로 나타나고 있었으며, 저수지의 부영양화와 수질오염이 생태건강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 따라서 저수지로의 영양염과 생활하수의 유입 차단이 필요한 것으로 판단되었으며, 향후 지속적인 관리가 필요한 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 "생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발"(306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

국립환경연구원. 1999. 호소내 조류 대 발생에 대한 수면제어 기술에 관한연구(II). 팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발.

김익수, 박종영. 2002. 원색도감 한국의 민물고기. 교학사.

김익수. 1997. 한국동식물도감 동물편(담수어류), 교육부.

김호섭, 황순진. 2004. 얕은 부영양 저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. 육수지 **37**(2): 180-192.

농업기반공사. 2001~2005. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.

농업기반공사. 2005. 효율적인 농업용 저수지 용수확보 및 이용방안 연구. 농어촌연구원.

안광국, 한정호. 2007. 정수 생태계 건강성 평가를 위한 다변수 메트릭 모델 개발. 육수지 **40**(1): 72-81.

윤주덕, 장민호, 김명철, 남귀숙, 황순진, 주기재. 2006. 농업용 저수지의 어류군집 특성. 육수지 **39**(1): 131-137.

이재수, 김영철, 황길순. 2003. 장마 전, 후의 농업용 저수지 퇴적물의 변화분석. 대한토목학회 **23**(4): 359-368.

최선화, 김호일. 2002. 우리나라 수자원과 농업용수 수질오염 실태. 농어촌과 환경 **12**(1): 93-103.

환경부. 2007. 수생태 건강성 회복을 위한 하천복원 모델과 기준, 조사계획 수립 연구 최종보고서(III): 수생태 건강성 조사계획 수립 및 지침.

Hwang, S.J., C.G. Yoon and S.K. Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy & Environment* **1**: 43-52.

Sartory, D.P. and J.U. Grobbelaar. 1984. Extraction of chlorophyll *a* from freshwater hytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia* **114**: 177-187.

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 Protection Agency, Las Vegas, NV.

U.S. EPA. 1998. Lake and Reservior Bioassessment and Biocriteria. EPA 841-B-98-007. U.S. EPA, Office of Water, Washington, D.C., USA.

Vollenweider, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lake and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphotus as factors in eutrophication. Thechnical Report DAS/CSI/68.27. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.

(Manuscript received 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)