중국 Changzhou댐의 방수로 운용에 따른 어류밀도와 분포에 관한 음향조사

Xichang Tan · 강명희^{1*} · Jiangping Tao² · Xinhui Li and Daoming Huang²

중국 진주강 수산연구소, ¹Myriax Software Pty Ltd, ²중국 수력생태연구소

A Hydroacoustic Survey Analyzing Fish Populations and Their Distribution Upstream and Downstream of Changzhou Dam, China, Based on Spillway Conditions

Xichang Tan, Myounghee Kang^{1*}, Jiangping Tao², Xinhui Li and Daoming Huang²

Pearl River Fishery Research Institute, Chinese Academic of Fishery Science, Guangzhou 510380

¹Myriax Software Pty Ltd, Hobart, Tasmania, Australia 7000

²Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources & Chinese Academy of Science, Wuhan, 430079

Hydroacoustic surveys were performed to clarify the density and spatial distribution of fish upstream and downstream of Changzhou Dam in the Pearl River, China, with regard to the condition of the spillways. Fish were densely distributed in the forebay of the upstream dam and the average fish density was 0.22 individuals/m³ under open spillways on 24 June 2010, but when the spillways were closed on 25 June 2010, the fish in the upstream dam dispersed and the average fish density decreased to 0.007 individuals/m³. Meanwhile, the average fish density in the downstream region was 0.28 individuals/m³ before the spillway was opened on 24 May 2010, but it decreased to 0.08 individuals/m³ on 26 June, just after the spillway was closed. The vertical distribution of fish upstream of the dam was not consistent. The target strength (TS) of fish upstream of the dam was larger than that of fish in the downstream region, although the distribution of TS was similar between the upstream and downstream regions. Therefore, we concluded that while numerous fish could swim to the upstream region while the spillways were open, closed spillways obstructed fish migrating upward from the downstream region.

Key words: Acoustic, Fish population, Fish spatial distribution, Dam

서 론

진주강은 중국 남쪽에서 가장 큰 강으로 Xi Jiang강, Bei Jiang강, Dong Jiang강의 3개의 지류로 이루어져 있으며, 모든 지류들은 중국 남해 쪽으로 흘러 내려간다. 진주강의 길이는 2,218 km이고, 저수장 면적은 450,000 km²이며, 평균 연간 배수량은 3.3×10^{11} m³이다. 진주강은 계절별 물의 흐름(flow)이 다르며, 여름 동안에는 상승 흐름을 보이고 봄과 겨울에는 하강 흐름을 보인다. 진주강의 수온은 계절에 따라 다르지만 대체로 10-35°C의 범위에 있다. 진주강의 어류는 한때 321여종까지 이른 적이 있으며, 이 중에서 208여종은 담수어이며, 113여종은 강어귀에 서식하는 어종이다. Changzhou댐은 2003년에 공사가 시작되어 2006년에 완공되었으며, 중국 Guangxi Zhuang자치구 Wu Zhou시에 있는 Xi Jiang강의 주류에 걸쳐 있다(Fig. 1). Changzhou댐은 Xi Jiang강을 가로질러 3.47 km로 뻗어 있고,

높이가 34.6 m이다. 또한, 2개의 발전소가 있으며 15개의 터빈을 전부 가동할 경우 630 MW의 전기를 생산할 수 있으며, 41개의 방수로가 있다. 홍수 기간 동안 방수량이 22,000 m³/s에 이르면 Changzhou댐의 방수로를 개방하여 홍수방지를 위하여 방출시킨다. Changzhou댐은 중국 남해에 가장 가까운 Xi Jiang강에 최초로 건설되었으며, 댐 하류지역은 진주강에서 상업적 가치가 높은 어종이 서식지로 이용하고 있으므로 생태적으로 아주 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 이러한 지리적인 중요성에도 불구하고 Changzhou댐의 어류밀도와 분포에 관한 연구가 수행되지 않았으며, 현재까지 이용 가능한 정보는 지역 어민의 인터뷰에서 어획량에 대한 설문조사로 얻어진 자료가 전부에 불과한 실정이다(Li et al., 2008).

진주강의 생태연구자들이 가장 우려하는 점은 댐이 어류의 이동을 막는 사실이다. 진주강에서 상업적으로 중요한 어종은 청어(*Mylopharyngodon piceus*), 초어(*Ctenopharyngodon idellus*), 백련어(*Hypophthalmichthys molitrix*), 대두어(*Aristichthys nobilis*)이다. 이들 어종은 산란을 하기 위해서 강

*Corresponding author: size100@hotmail.com

상류 쪽으로 유영해야 하고, 치어는 초기 성장을 위해서 강 하구 쪽으로 내려와야 한다. 따라서, 홍수 기간 중 방수로가 열릴 때만 어류가 상류 쪽으로 유영하는 것으로 추측할 수 있다. 이 댐의 방수로로는 상류와 하류의 수심차이 변화를 고려하여 개방일수를 결정하는데, 2007년에서 2009년까지 방수로의 개방일은 매년 10일 정도밖에 되지 않았다. 이러한 기간으로는 방수로가 개방될 때 대다수의 어류가 상류 쪽으로 이동하기에 충분하다고 할 수 없다. 댐이 건축될 당시에 겨우 한 개의 어류이동통로가 만들어졌지만, 이 또한 제대로 사용되지 않고 있는 실정이다. 양쯔강의 Gezhouba댐의 어류이동에 관한 최근 연구에서는 선박로크(ship locks)가 어류 이동을 위한 채널로 사용될 수 없다는 결과를 나타내었다(Tao et al., 2010). 따라서, 방수로를 통과하여 상류 쪽으로 이동하는 어류에 관한 정보는 수산연구와 댐의 효과적인 관리를 위해서 매우 중요하며, 방수로의 운용(본 연구에서 방수로의 “운용”이라고 함은 방수로의 개방 혹은 차단을 의미)에 따른 댐의 상류와 하류지역에서 어류 밀도와 공간적인 분포를 이해하는 것은 시급한 과제라 할 수 있다.

수중음향조사는 지난 수십 년에 걸쳐 음향장비의 보급과 활발한 이용을 통해 효과적이며 강요하지 않는(non-obtrusive) 방법으로 인식되어 어류이동의 모니터링에도 이용하게 되었다. 또한 음향기술로 깊은 호수와 저수지와 같은 담수어 환경에서 생태시스템을 파악한 연구사례가 많아지고 있다(Thorne and Johnson, 1993; Steig and Iverson, 1998). 기존의 얕은 수심을 대상으로 이용하는 넷샘플링 방법(자망, 트랩, 정치망 등)은 어류의 행동과 공간 분포에 관한 세밀한 특징을 추출하기 어렵다. 이에 반해, 저수지에서 수중 음향의 응용은 어류의 양과 분포를 파악하기 위해서 보편적으로 실행되었지만, 댐의 운용에 초점을 둔 연구는 적다(Steig and Iverson, 1998). Steig와 Iverson(1998)은 터빈의 사용 유무에 따라 Rock Island댐의 어류의 행동이 다름을 밝혔다. 중국에서도 수중 음향조사는 내수면 환경에서 어류 자원조사를 위해 점차적으로 이용되어 왔다. 예를 들면, 중국 철갑상어의 어종식별(Tao et al., 2009), 세 협곡의 저수지 상부에서의 어류분포(Tan et al., 2008), Qinghai호수에서 알몸 잉어(*Gymnocypris przewalskii*)의 시·공간적 분포(Chen et al., 2009) 등의 연구사례가 있다. 그러나 진주강에서 수중음향조사는 두 개의 산란장에서의 *Megalobrama hoffmanni*종의 산란어군을 관찰한 사례만이 있을 뿐이다(Tan et al., 2009). 따라서, 진주강 특히 Changzhou댐에서 어류 밀도와 생태학적인 모니터링을 위한 수중음향조사가 시급히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 필요성에 의해 수중음향조사와 자망 샘플링을 병행하여 댐 상류와 하류지역의 어류 밀도와 공간적 분포를 분석하기 위하여 본 연구가 수행되었다. 본 연구는 방수로의 운용을 고려한 Changzhou댐의 상류와 하류 지역에서 어류의 밀도와 공간적인 분포를 파악하는 것을 목적으로 하며, 어류 이동을 위한 효과적인 방수로 운용, 어류이동을 위한 댐의 장애에 관한 과학적인 평가, 진주강에서 어류 자원을 평가하기 위한 방법론의 개발에 유용한 정보를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

실험수역

Changzhou댐 상류지역에서의 실험수역은 길이 4 km, 폭 1.7-3 km, 평균 수심 12.4 m로 구성되었다(Fig. 1). 댐 하류지역에서 2009년 12월에 설치된 어류 보호지역을 Fig. 1에 표시하였다. Changzhou댐 하류지역에서 2010년 5월 23일에서 25일까지 첫번째 수중 음향조사를 실시하였으며, 이때의 방수량은 11,200 m³/s로 아주 적었다. 두번째 음향조사는 댐 상류와 하류지역을 대상으로 2010년 6월 24일에서 26일까지 어류 밀도의 변동을 파악하기 위하여 실행되었고, 이 때 댐의 방수량은 22,400 m³/s로 비교적 적었다. 댐 상류와 하류지역의 수심에 관한 데이터는 Guangxi Zhuang 자치구 Wu Zhou 채널당국의 웹사이트(Wu Zhou Channel Authority, 2011)를 이용하여 수집하였다.

샘플링 조사

넷샘플링은 2010년 5월 6일 동안에 조사 수역의 어부에게 요청하여 표층식 자망을 이용해서 오후 3시-7시에 실시되었으며, 80 mm의 망목크기의 자망을 사용하여 강을 가로질러 설치하였다. 표류식 자망으로 부어류를 대상으로 하였지만, 수심이 비교적 얕아서 강바닥 가까이까지 어획이 가능한 경우가 있었다. Changzhou댐 하류지역에서 자망 샘플링을 총 3회 실시하였으며, 총 96마리를 어획하였다. 어획된 모든 샘플은 어종을 식별한 후에 자와 전자식 저울을 이용하여 체장(cm)과 체중(g)을 측정하였다.

수중음향조사

수중음향조사는 원형 스프리트빔 120 kHz 송수파기(7°빔 각도)가 장착된 SIMRAD EY60 휴대용 어군탐지기를 사용하였으며, 펄스폭은 64 µs, 펄스간격은 128 µs였다. 송수파기는 조사선의 왼쪽 앞쪽에 수심 0.5 m에 설치되었다. 이 EY60 어군탐지기는 윈도우 XP시스템에 ER60 소프트웨어를 가동한 컴퓨터와 연결하여 데이터를 저장하였으며, 이 컴퓨터는 Garmin GPS와 연결되었다. 선체 길이 25 m의 조사선을 이용하여 선박속도는 평균적으로 7-8 knots를 유지하여 운행하였다. 총 저장된 음향 데이터는 11 GB로서 537구획을 가졌으며, 각 구획은 약 300 m의 길이를 가졌다. 모든 데이터는 낮 동안에 기록되었는데, 이는 야간 항해에 따른 위험을 고려했기 때문이다. 음향 조사는 지그재그 항로를 따라 실시하였으며, 적용범위의 정도(degree of coverage)는 Aglen (1983)이 고안한 계산식을 이용하였다. 적용범위의 정도는 (1)식과 같이 조사 해역의 면적의 제공근과 항적라인의 비로 정의된다.

$$\text{Degree of coverage} = N / \sqrt{A} \quad (1)$$

여기서, N은 조사 해역내의 전체의 항적라인(nmi)이며, A는

조사해역의 면적(nmi^2)이다. Aglen (1983)는 이 적용범위의 정도와 이에 해당되는 생물량의 변동계수와와의 관계가 부적상관임을 나타냈다. 즉, 적용범위의 정도가 높을수록 생물량의 변동계수는 낮음을 보였다. 따라서, 음향조사의 설계 시 높은 적용범위의 정도를 고려하는 것은 중요하다. 본 조사의 지그재그 항로의 적용범위 정도는 7.1-16.2의 값을 가지며, 이는 Aglen (1983)에 의해서 보인 결과값보다 상당히 높은 값을 확인하였다.

데이터 분석

EY60 어군탐지기로부터의 데이터 파일은 Echoview(Myriax, version 4.90)을 이용하여 직접 입력되었다. 조사선의 움직임으로 인하여 해수표면 근처에서 상당한 잡음이 발견되었으며, 수심 0.8 m 혹은 1 m에 직선을 그어서 이 선위에 존재하는 플랑크톤 같은 에코 혹은 잡음으로 간주된 에코신호는 데이터 샘플에서 제외시켰다. 그러나 어떤 잡음은 해수 중간수심에도 보였으며, 이들 에코는 수동적으로 선택하여 부정 영역(Bad region)으로 정의하여 데이터 분석에서 배제되었다. 강바닥 라인은 Echoview 내의 Best bottom candidate 알고리즘(Myriax, 2010)을 사용하여 정의했으며, 수정이 필요할 경우만 수동적으로 편집하였다. 따라서 해수표면 주변에 잡음으로 여겨지는 에코 및 강바닥 라인 아래의 에코 신호와 부정 데이터로 정의된 것은 데이터 분석에서 삭제되었다.

본 연구에서는 어류 밀도를 평가하기 위해서 피쉬트랙(fish tracks) 탐지를 실시하였다. 이 피쉬트랙기법은 단일 목표탐지(single target detection) 에코그램에서 실행되기 때문에 먼저 단일 목표탐지 에코그램을 만들 필요가 있다. Echoview내에 여러 단일 목표탐지 방법이 있으며, 이들 탐지 방법은 다양한 어군탐지기의 알고리즘을 근거로 개발된 것이다. 그 중에서 단일 목표탐지 스플릿빔 방법2(single target detection split beam method 2, Soule et al., 1997)는 Simrad EK60 어군 탐지기의 알고리즘을 근거로 하여 만들어졌으며, 이 방법은 EY60 어군탐지기의 split beam 데이터를 사용하여 단일목표를 탐지하기에도 적합하다. 단일목표탐지 스플릿빔 방법 2를 이용하여, 탐지에 사용된 설정 파라메타는 Table 1과 같다.

피쉬트랙기법은 일반적으로 어류의 체계적인 움직임의 패턴을 보기 위해서 단일목표 그룹(개체어의 연속적인 에코)을 식별하는데 사용된다. 이 기법으로 그룹화된 목표는 공간상에서 한 개의 개체로 취급된다. Echoview의 α - β 피쉬트랙 알고리즘은 Blackman (1986)에 의해서 발표된 고정된 계수 필터 방법을 이용한 것이다. 본 연구에 사용된 피쉬트랙의 설정 계수는 Table 2와 같다. 탐지된 피쉬트랙은 comma-separated values 형식으로 추출하여 어류밀도 등의 분석에 이용되었다. 추출된 피쉬트랙은 4일간(6월 24일과 6월 25일, 5월 24일과 6월 26일)의 음향데이터를 중점으로 분석하였으며, 이는 이 기간에 댐의 상류와 하류지역의 방수로 운영이 각각 다르기 때문에 선택되었다.

댐 상류와 하류지역의 어류에 대한 음향반사강도(Target strength, TS)의 분포를 독립적으로 분석하였다. 또한, 2010년

6월 24일 실시한 음향조사데이터를 이용하여 댐 상류지역에서 8트랙젝트 라인을 기초로 해서 수심 2 m간격으로 어류의 수직적인 분포를 살펴보았다. 이 수직분포의 조사 해역의 위치는 Fig. 1에 삼각점으로 표시하였다. 댐 상류와 하류지역에서의 어류 공간적 분포특성은 Surfer 소프트웨어(Golden software, version 8)의 최소 곡률격자방법(minimum curvature gridding method)을 사용하여 분석하였다.

방수로 운용

2010년 1월-10월까지 Changzhou댐 상류와 하류지역의 수심 차이를 Fig. 2에 도식하였다. 2010년 봄에는 비정상적으로 가뭄이 들어서 진주강에서 홍수가 많이 일어나지 않았다. 따라서, 방수로는 2010년 6월 21일부터 24일까지 4일 동안만 개방되었다. 이 기간을 고려하여 음향데이터를 선택하였으며, 방수로의 운용에 의한 어류의 밀도와 공간적인 분포를 파악하였다. 따라서 6월 24일의 음향데이터를 선택하였는데, 이는 방수로가 개방되었기 때문이며, 방수로가 차단된 6월 25일의 음향데이터는 6월 24일 데이터와 비교하기 위해서 사용되었다. 이 두 개의 데이터세트는 댐 상류지역에서 수집되었다. 댐의 하류지역에서는 5월 24일과 6월 26일의 다른 두 개의 음향데이터를 이용하였다. 이는 방수로를 개방하기 훨씬 전인 5월 24일에 데이터를 수집했고, 방수로를 차단한 직후인 6월 26일에 데이터를 수집했기 때문이다.

Table 1. The setting parameters of single target detection using acoustic data from the 200 kHz echosounder

Parameter name	Value
TS threshold	-70 dB
Pulse length determination level	-6 dB
Minimum normalized pulse length	0.4
Maximum normalized pulse length	1.4
Maximum beam compensation	10 dB
Maximum standard deviation of minor-axis angles	0.6
Maximum standard deviation of major-axis angles	0.6

Table 2. Setting parameters for detecting fish tracks using acoustic data from the 200 kHz echosounder

Category	Parameter name	Value
Tracking detection	Alpha for major and minor axes and range	0.7
	Beta for major and minor axes and range	0.5
Target gates	Exclusion distance for major and minor axes and range	2 m
Weights	Major axis	20%
	Minor axis	20%
	Range	60%
Track acceptance	Minimum number of single targets	3
	Minimum number of pings	3
	Maximum gap between single targets	2

Table 3. Mean and standard deviation of body length and body weight, and the proportion of fish species

Fish species	Percentage caught (%)	Body length (cm)	Body weight (g)
<i>Megalobrama hoffmanni</i>	70	33.8±3.4	513.0±166.2
<i>Cyprinus carpio</i>	9	36.4±18.8	1541.1±1291.1
<i>Garra orientalis Nichols</i>	7	•	178.4
<i>Squaliobarus curriculus</i>	7	•	179.8
<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	2	•	46.8
<i>Osteochilus salsbutyi</i>	2	13.3±2.5	44.0±35.8
<i>Cirrhinia molitorella</i>	1	19.0	89.2
<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	1	15.0	29.3

The mark of • represents no information.

Table 4. The average fish density upstream and downstream of the Changzhou Dam based on the condition of spillways

Upstream			Downstream		
Date	Average density (individuals/m ³)	Spillways	Date	Average density (individuals/m ³)	Spillways
24 June 2010	0.022	open	24 May 2010	0.28	Before opening
25 June 2010	0.007	close	26 June 2010	0.08	After closing

결 과

자망 샘플링

총3회에 걸쳐서 실시한 자망 샘플링으로 96마리를 어획하였다. 어획된 어종의 체장과 체중의 평균과 표준편차와 어종별 어획비율은 Table 3에 나타내었다. 상업적으로 가장 중요한 어종인 *Megalobrama hoffmanni* 은 자망 샘플링에서 70%가 어획되었으며, 가장 높은 어획비율을 차지하였다. 이 어종의 평균 체장과 체중은 33.8 cm와 513 g으로 이스라엘잉어(*Cyprinus carpio*)를 제외한 다른 어종과 비교할때 비교적 큰 것으로 보인다. 어획된 모든 어류의 평균 체장과 체중은 23.5 cm, 327.7 g이었다.

어류밀도

에코그램 분석으로부터 어류들은 어군을 형성하기 보다는 많은 개체로서 구성되었음을 알 수 있었으며, Fig. 3은 피쉬트랙으로 탐지된 많은 단일목표, 즉 개체어의 예를 나타낸 것이다. 이 피쉬트랙은 빙내의 개체어의 위치와 움직임에 관한 정보를 제공한다. 이차원 그래프(Fig. 3C)와 피쉬트랙의 3차원 시각화(Fig. 3D)는 빙 내에서 피쉬트랙의 방위와 수심의 정보를 정확하게 묘사할 수 있고 추출(export)도 가능하다.

방수로가 개방된 2010년 6월 24일에 Changzhou댐 상류지역의 어류 밀도는 0.22 individuals/m³이고, 최대밀도는 0.71 individuals/m³이었고, 상류지역에서 많은 수의 어류가 댐에 근접하여 분포하였다. 댐의 방수로가 2010년 6월 25일에 차단되었을 때는 어류가 갑자기 흩어져 분포하였고 그 평균밀도

는 0.007 individuals/m³로 급격히 떨어지고, 최대 밀도는 0.03 individuals/m³으로 나타났다. 2010년 5월 24일에 Changzhou댐 하류지역의 평균 어류밀도는 0.28 individuals/m³이고, 최대밀도는 1.57 individuals/m³이었으며, 많은 어류는 보호지역(Figs. 1, 5)에 분포함을 알 수 있었다. 2010년 6월 26일에 하류지역의 평균 어류밀도는 0.08 individuals/m³이고, 최대 밀도는 0.27 individuals/m³이었다. 댐 상류와 하류지역의 어류밀도를 비교해 볼 때, 6월 26일 하류지역 어류밀도가 6월 25일 상류지역 어류밀도보다 약 10배 높은 것으로 나타났다. 방수로의 운용에 따른 댐 상류와 하류지역의 평균밀도를 정리 · 요약한 것은 Table 4에 나타내었다.

어류의 공간적 분포

댐의 상류지역에서는 어류가 공간적으로 균등하게 분포하지 않았다(Fig. 4A). 어류는 댐 오른쪽 근접한 곳에서 많이 관찰되었으며, 2010년 6월 24일에 방수로가 작동할 동안에 평균밀도는 0.22 individuals/m³이었다. 적은 수의 어류가 왼쪽 강가에서 관찰되었는데 이 지역은 개방영역으로 댐으로부터 상당히 떨어진 거리에 위치하였다. 대다수의 어류는 오른쪽 영역에 분포하였다. 6월 25일의 어류를 6월 24일의 어류밀도와 비교해보면, 거의 대부분의 어류가 하룻밤 사이에 사라졌음을 알 수 있었다. Fig. 4A 와 4B를 근거로 해서 6월 24일과 25일에서 공간적 분포의 특징은 방수로의 운용에 기인하는 것임을 분명히 알 수 있었다.

댐 하류지역의 어류는 공간적으로 일정하게 분포되지 않았다(Fig. 5). 2010년 5월 24일 어류 보호지역에서 많은 어류가 관찰되었으며, 오른쪽편의 강가를 따라 특히 111° 19' N

Fig. 1. Map of river system in the upstream and downstream of the Changzhou Dam in the Pearl River, China. The mark of black triangle represents the location of vertical distribution survey. a: fish conservation zone and b: the center of the fish conservation zone.

Fig. 2. Difference of water levels between the upstream and downstream of Changzhou Dam during January through October 2010.

와 $111^{\circ} 22' N$ 사이에 보다 높은 밀도가 발견되었다(Fig. 5A). 2010년 6월 26일은 댐의 아래쪽에 약간의 높은 밀도가 관찰되었지만, 대부분의 어류는 하류지역에 전체적으로 균등하게 분포

함을 알 수 있었다(Fig. 5B).

TS분포와 수직적인 분포

댐 상류지역의 어류 평균 TS는 -52.9 dB이고, 표준편차는 6.8 dB이며, TS의 총 샘플수는 39,449였다(Fig. 6A). 댐 하류지역의 어류 평균 TS는 -60.2 dB이고, 표준편차는 6.2 dB으로 총 샘플수는 33,297였다(Fig. 6B). 댐 상류지역의 어류는 수직적으로, 즉 수심별로 균일하지 않게 분포함을 알 수 있었다. 트랜젝트라인 1-4에서 많은 어류가 수심 4-8 m 사이에 분포함을 보였으나, 트랜젝트 5-8 사이에는 대부분의 어류가 7-13 m에 분포함을 알 수 있었다(Fig. 7).

고 찰

본 연구는 수중음향조사방법이 Changzhou댐 상류와 하류 지역의 어류 밀도와 공간적인 분포에 관련한 귀중한 정보를 제공할 수 있음을 시사하였다. 이 음향조사방법은 댐 관리자와 설계자에게 진주강의 담수어 환경에서 효과적이고 적절한 어류보호지역을 선택할 수 있도록 도움을 주는 도구로 사용될 수 있다. 진주강은 심각하게 남획되었으므로 어류의 보호가 특히 산란과

Fig. 3. Fish tracks in the Changzhou Dam on 25 June 2010. The SV echogram (A), single target detection echogram (B), 2D projections graph (C) and 3D single targets (D) in the beam (C) from two fish tracks circled in brown in (B). Four graphs in 2D projections such as minor-axis distance vs. major-axis distance, major-axis distance vs. ping number, beam-axis distance vs. major-axis distance and beam-axis distance vs. ping number are exceedingly beneficial to find the position and movement of the fish in the beam precisely. 3D visualization can provide easier understanding of the change of location of fish. The purple colored region on the SV and single target echograms is defined as a bad region which is excluded from further analysis. The green line at the bottom of the figure is defined as the river bottom. Note that weak signals in the SV echogram do not appear on the single target echogram.

성장 시기에 절실히 요구된다.

Changzhou댐 상류와 하류지역의 어류밀도와 분포는 방수로의 운용에 따라 달랐으며, 2010년 6월 24일 방수로가 개방될 때 보다 높은 밀도의 어류가 댐 상류지역의 오른쪽 강가에서 관찰되었다. 이것으로 어류가 방수로를 통과하여 상류 쪽으로 이동했다는 결론을 내릴 수 있었다. 상류지역의 댐 앞쪽 어류밀도는 방수로가 닫힌 후에 현저하게 줄어들어 어류가 상류 쪽으로 계속적인 이동이 가능하지 못함을 보였다. 따라서 닫힌 방수로의

댐은 어류가 하류에서 상류 쪽으로 이동하는 것을 방해하는 것을 명확하게 알 수 있었다.

방수로가 개방된 6월 21일부터 24일까지의 4일 동안에 어류는 상류 쪽으로 유영하여 댐 상류지역의 오른쪽 강가에 분포하는 것으로 추측할 수 있었다. 6월 24일과 25일의 어류 밀도차이를 근거로 이 기간 동안에 상류 쪽으로 유영한 어류의 총수를 추정한 결과는 4.5백만 마리로 산정되었다. 방수로를 통과하는 어류는 매 초당 43마리로 계산되었으며, 이와 같은 방식을 이용한

Fig. 4. Fish spatial distributions in the upstream Changzhou Dam on 24 June 2010 (A) while the dam spillways were opening and on 25 June 2010 (B) when the spillways were closed. Note that different density scales are used. The horizontal bar in dark gray on the top of (A) and (B) indicates the dam. Two arrows in (A) and (B) mark the spillways.

2010년 5월 24일 댐 하류지역의 어류밀도는 대략적으로 134.9 백만 마리로 추정할 수 있었다. 이는 방수 기간 동안 댐 하류에서 10.7%의 어류만이 방수로를 통과하여 상류 쪽으로 이동하였음을 보여 주었다. 이러한 가정과 추정은 어류자원보호와 생태관리의 관점에서 방수로를 개방하는 일수와 개방 주기를 절대적으로 증가시켜야 함을 제한한다. 이는 1년에 단 한 번의 방수로 운용으로는 진주강에서 어류의 이동이 충분히 이루어지지 못하기 때문이다.

수평적인 빔 방식(Horizontal beaming)은 담수어 환경에서 어류자원을 평가하는데 중요한 요소로 활용되어지고 있다(Kubecka and Wittingerova, 2003; Djemali et al., 2008). Changzhou댐 상류지역의 수문학(hydrology) 특징은 조사 기간 동안 하류지역의 특징과 유사함을 보였다. 특히 수심에 따라 수온은 크게 차이가 나지 않음을 보였으며, 이 조사영역에서는 앞서 언급한 수평적인 빔 방식을 사용하기에 적합한 환경으로 생각된다. 이 방식은 강을 가로질러서 어류의 밀도와 행동을 이해하는데, 특히 방수로를 통과하여 지나가는 어류를 정확하게 모니터링 할 수 있으므로 아주 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

일반적으로 넷샘플링은 음향조사에 있어서 지상 검증자료(ground truth)로 이용되어지고 있다. 음향데이터만을 사용해서는 어종과 체장 등의 정보를 얻기가 어렵기 때문이다. 하지만, 조사대상으로 하는 어종의 어군, 개체어의 특징(기하학적인 특징, TS를 포함한 주파수적인 특성, 개체어의 생태학적인 특성)에 관한 정보가 어종별로 조사되어 데이터베이스화 되어 있다면 넷샘플링에 의존하지 않고 음향조사만으로도 어종 식별이 가능하며, 생태학적인 정보를 수집할 수 있다. 이와 같은 특징을 토대로 어종 식별에 관한 연구는 이미 많이 진행되어

져 왔다(Coetzee, 2000; Lawson et al., 2001; Kang et al., 2002; Henderson and Horne, 2007). 특히 주파수 특성을 이용한 복수 주파수기술 혹은 dB difference를 이용하여 플랑크톤 혹은 크릴과 같은 종과 어류를 분류시키며, 같은 종에서 연령을 식별할 수 있게 되었다(Kang et al., 2002; Kang et al., 2006). 어류의 생물·생태학적인 특징 중에서 체장정보가 매우 중요시 되는 경우가 많다. 이는 어떤 체장범위 이상의 어류만을 어획하므로 수산자원의 지속을 도모할 수 있는 하나의 수법으로 활용되기 때문이다. 일반적으로 넷샘플링은 비교적 시간과 노력을 많이 소요하므로, 앞에서 언급한 음향조사만으로 어종과 체장 등의 정보를 수집하려는 연구가 수행되어져 왔다. 여기서, 체장정보는 음향정보인 TS와 체장식으로 부터 산출될 수 있다(Simmonds and Maclellan, 2005). 복수 어종의 환경 가운데에서 가장 보편적으로 사용되는 TS-체장 관계식은 Love (1977)로부터 산출된 식으로 $TS=19.4 \log(L)-0.9 \log(f)-63.7$ 이다. 여기서 L은 체장, f는 주파수를 말한다. 위의 식을 이용하여 Changzhou댐 상류와 하류지역의 평균TS -52.9 dB와 -60.2 dB를 각각 체장으로 환산하면, 4.5 cm와 1.9 cm 이다. 그렇지만, 자망 샘플링 조사에서 얻어진 체장의 최소값이 13.3 cm이므로, 이 값은 타당하지 않음을 알 수 있었다. 한편, Frouzova et al. (2005)은 송어(*Salmo trutta*), 영국농어(*Perca fluviatilis*), 돔(*Abramis brama*), roach(*Rutilus rutilus*), 잉어(*Cyprinus carpio*), bleak(*Alburnus alburnus*)을 대상으로 한 수조 실험을 통하여 평균 TS와 체장식을 구하였다. 이 TS-체장 관계식은 $TS=20.45 \log(L)-96.13$ 으로, 여기서 L은 체장을 말한다. 이 식을 이용하여, 본 연구에서의 댐 상류와 하류지역의 평균TS-52.9 dB와 -60.2 dB를 각각 체장으로 환산하면, 28.4 cm와 13.0 cm 이다. 이 체장이 Love식의 체장보다는 자망 샘플링으로 어획된 체장과 가깝다. 하지만, 댐

Fig. 5. Fish spatial distributions in the downstream of Changzhou Dam on 24 May 2010 (A) which is before opening the spillways and 26 June 2010 (B) which is after closing the spillways. Note that different density scales are used.

하류지역에서 실시한 자망 샘플링으로 어획된 평균 체장은 23.5 cm이므로, 하류지역의 TS로 환산된 체장이 자망으로 부터의 체장보다 적음을 알 수 있다. 일반적으로 TS는 어류의 유영자세에 따른 변동이 크다고 알려져 있다(Simmonds and Macleannan, 2005). 본 연구에서 조사한 TS는 어류의 유영자세의 정보를 고려하지 않았으므로, 이를 보충할 실험 혹은 조사가 필요하다. 또한, 본 연구에서 실시한 자망 샘플링은 댐 하류지역에서 단지 3 회만으로 그쳤으며, 본 실험 수역을 대표하는 어류가 어획되었다고 보기 어렵다고 생각된다. 이번 조사는 Changzhou댐에서 처음으로 실시한 수증음향조사이며, 자망 샘플링도 열악한 환경 가운데 겨우 수행된 것이었다. 수증음향조사의 이해도가 높아짐에 따라 조사환경도 개선되리라 기대한다. 실제로 조사수역을 대표하는 보다 정량적인 어획평가가 가능한 넷샘플링을 사용할 계획은 가지고 있다. 따라서, 진주강의 중요한 어종을 대상으로 *in situ* TS를 측정하고, ground truth를 병행하여 이 강의 환경에 보다 적합한 TS-체장 식을 구하여 최종적으로 TS값으로부터 정

확한 체장정보를 얻고자 한다. 주요 어종별 TS-체장식의 정보가 구축된다면 장래에 음향조사의 TS정보만으로도 체장 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 중국과학기술(No. 2005DIB3J023)로부터 재정지원을 받았으며, 농업과학조사를 위한 특별기금을 사용하여 수행하였습니다. Guangxi Zhuang 자치구의 Wuzhou Detachment, Fengkai Detachment, Guangdong Fishing Administrative Brigade의 공동참여로 이 연구가 완수되었습니다. 저자들은 또한 Yong-Zhen Li 교수와 Xi-Yong Hu, Li-Na Dong 학생의 큰 도움에 이 자리를 빌려 감사를 표합니다. 본 논문이 보다 향상될 수 있도록 조언해 주신 심사위원님들과 편집위원님들에게 감사를 드립니다.

Fig. 6. Target strength distributions upstream of the Changzhou Dam on June 24 2010 (A) and downstream of the dam on June 26 2010 (B).

Fig. 7. Vertical distributions of fish at different stratum in the open-water area where is in the upstream and in front of the Changzhou Dam.

참고문헌

- Aglen A. 1983. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied. *FAO Fish Rep* 300, 293-298.
- Blackman SS. 1986. Multiple-target tracking with radar applications, Artech House Press, Dedham, U.S.A., 1-464.
- Chen DQ, Zhang X and Tan XC. 2009. Hydroacoustic study of spatial and temporal distribution of *Gymnocypris przewalskii* in Qinghai Lake, China *Environ Biol Fish* 84, 231-239.
- Coetzee J. 2000. Use of a shoal analysis and patch estimation system (SHAPES) to characterise sardine schools. *Aquat Living resour* 13, 1-10.
- Djemali I, Toujani R and Guillard J. 2008. Hydroacoustic fish biomass assessment in man-made lakes in Tunisia: Horizontal beaming importance and diel effect. *Aquat Ecology* 43, 1121-1131.
- Frouzova J, Kubecka J, Balk H and Frouz J. 2005. Target strength of European freshwater fish and its dependence on fish body parameters. *Fish Res* 75, 86-96.
- Henderson MJ and Horne JK. 2007. Comparison of in situ, ex situ, and backscatter model estimates of Pacific hake (*Merluccius productus*) target strength. *Can J Fish Aquat Sci* 64, 1781-1794.
- Kang M, Furusawa M and Miyashita K. 2002. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. *ICES J Mar Sci* 59, 794-804.
- Kang M, Honda S and Oshima T. 2006. Age characteristics of walleye pollock school echoes. *ICES J Mar Sci* 63, 1465-1476.
- Kubecka J and Wittingerova M. 2003. Horizontal beaming as a crucial component of acoustic fish stock assessment in freshwater reservoirs. *Aquat Living resour* 16, 325-331.
- Lawson GL, Barange M and Fréon P. 2001. Species identification of pelagic fish schools on the South African continental shelf using acoustic descriptors and ancillary information. *ICES J Mar Sci* 58, 275-287.
- Li YF, Li XH and Tan XC. 2008. Fisheries resources of the Zhaoqing section the Pearl River. *Chinese J Reservoir fishery* 28, 80-83.
- Love RH. 1977. Target strength of a fish at any aspect. *J Acoust Soc Am* 1397-1403.
- Myriax. 2010. Help file 4.90.33 for Echoview. <http://support>.

- echoview.com/WebHelp/Echoview.htm on March 9.
- Simmonds EJ and Maclellan DN. 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. 2nd edn. Blackwell Science Press, Oxford, U.K., 1-437.
- Soule M, Barange M, Solli H and Hampton I. 1997. Performance of a new phase algorithm for discriminating between single and overlapping echoes in a split-beam echo sounder. ICES J Mar Sci 54, 934-938.
- Steig TW and Iverson TK. 1998. Acoustic monitoring of salmonid density, target strength, and trajectories at two dams on the Columbia River, using a split-beam scanning system. Fish Res 35, 43-53.
- Tan XC, Chang JB, Tao JP and Li XH. 2008. Survey on fish distribution in the forequarter of the three gorge reservoir using EY60 split-beam echosounder. Chinese J Ecological Sci 27, 329-334.
- Tan XC, Li XH and Chang JB. 2009. Observation of the Spawning Aggregation of *Megalobrama hoffmanni* in the Pearl River. J Fresh Ecology 24, 293-299.
- Tao JP, Gao Y and Qao Y. 2010. Hydroacoustic observation of fish behavior and spatial patterns in the ship lock and adjacent areas of the Gezhouba Dam, Yangtze River. Acta Ecologica Sinica 30, 233-239.
- Tao JP, Qiao Y and Tan XC. 2009. Species identification of Chinese sturgeon using acoustic descriptors and ascertaining their spatial distribution in the spawning ground of Gezhouba Dam. Chinese Sci Bull 54, 3972-3980.
- Thorne RE and Johnson GE. 1993. A review of hydroacoustic studies for estimation of salmon downriver migration past hydroelectric facilities on the Columbia and Snake Rivers in the 1980s. Rev Fish Sci 1, 27-56.
- Wu Zhou Channel Authority. 2011. Water level data at the Changzhou dam. <http://wzhd.gxgh.cn> on March 9.

2011년 3월 7일 접수

2011년 5월 23일 수정

2011년 7월 15일 수리