음향기술을 이용한 내수면 주요어종의 음향산란특성과 연직분포

양용수 · 이경훈^{1*} · 황보규² · 이형빈 · 김인옥³ · 김성훈

국립수산과학원 시스템공학과, ¹전남대학교 해양기술학부,

²군산대학교 해양생산학과, ³서해수산연구소 해역산업과

Backscattering strength and vertical distribution of dominant fishes in inland waters by hydroacoustics

Yong-Su YANG, Kyoungsoon LEE^{1*}, Bo-Kyu HWANG², Hyungbeen LEE, In-Ok KIM³ and Seonghun KIM

Fisheries System Engineering Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-902, Korea

¹Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

²Division of Marine Science and Production, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

³Aquaculture Industry Division, West Sea Fisheries Research Institute, Incheon 400-420, Korea

This study is aimed to understand the vertical distribution of fish in the daytime and nighttime using an acoustic survey in Yondam reservoir of Jeollabuk-do, and an acoustical backscattering strength of dominant species, bass (*Micropterus salmoides*) and a bluegill (*Lepomis macrochirus*), which are classified as the ecosystem disturbing species. The results showed that the fish school was distributed in the shallow areas of less than 10 m depth during the period of Aug. and Oct. where it had a strong thermocline, otherwise, it was distributed over 10-times density under stable water temperatures as 13°C in Nov. There was no vertical patchiness difference between daytime and nighttime unlike the typical marine ecosystem. The dominant species were crucian carp, bluegill, bass. The hydroacoustic method can provide the spatial distribution and effective removal ways of the ecosystem disturbing species in inland fisheries.

Keywords: Backscattering strength, Hydroacoustic survey, Yongdam reservoir, Scientific echosounder, Vertical distribution

서론

수산자원의 평가와 관리는 대상 생물자원의 현존량을 추정하는 것이 기본이며, 현재 우리나라에서는 연안 해역의 다양한 어종들이 분포하고 있으므로 어획량 통계에 의한 통계조사법, 난·자치어 조사 등에 의한 통계적 추정, 자원역학적 모델을 이용한 자원변동량의 추정

등의 간접적인 조사기법을 중심으로 하여 조사하고 있으나, 이러한 방법들과 함께 직접적으로 현존량을 추정할 수 있는 음향자원조사법을 적극적으로 활용할 필요가 있다. 특히, 소수 회유성 어종으로 분포하고 있는 북해, 베링해 등 고위도 해역에서는 실제로 과학어군탐지기기를 이용한 음향자원조사법이 자원평가방법으로 적극

*Corresponding author: khlee71@jnu.ac.kr, Tel: 82-61-659-7124, Fax: 82-61-659-7129

적으로 활용되고 있으며, 최근 어종 식별에 관한 연구가 활발하게 진행되면서 음향자원 조사법을 활용한 어류자원의 현존량 추정 연구가 수행되어 그 활용도가 높아지고 있는 실정이다.

수산자원을 구성하고 있는 해양생태계에서는 음향산란층(Sound Scattering Layer, SSL)이 존재하여 다양한 동물플랑크톤, 벡톤, 자치어 등이 분포하여 주간과 야간에 따라 분포 수심이 변화하여 주요 수층에 분포하는 특징을 가진다. 특히, 동물플랑크톤으로 구성되어 있는 음향산란층의 일주기 연직 이동에 영향을 주는 주요 요인은 조도 변화(Haney, 1988), 음향산란층의 구성생물(Ashjian et al., 1998), 조사해역의 환경조건(Holzman and Genin, 2003), 계절의 변화(Pinot and Jansa, 2001) 등을 생각할 수 있으며, 먹이섭이와 포식자로부터의 도피(Gliwicz, 1986; Robertis and Jaffe, 2000), UV 빛으로부터의 도피(Haney, 1988) 등으로 다양한 해양생물의 상승 혹은 하강의 시작과 이동속도 등에 관한 연구가 진행되어 왔다.

이러한 해양생태계의 연직운동변화를 파악하기 위한 방법으로, 과학어탐의 시간경과에 따른 에코그램의 연직이동거리를 측정하여 변동량을 측정하는 방법과 함께, 조사해역의 유속장을 측정하기 위해 일반적으로 사용하는 도플러유향유속계(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)는 해양생물분야에서도 음향산란층의 연직 이동 특성의 분석에 적용하기 시작하는 등 다양한 수중음향장비를 적용하게 되었다. Plueddemann and Pinkel (1989)은 도플러소나(67 kHz)를 이용하여 음향산란층의 주요 산란체에 대한 산란강도와 일주기 연직 속도에 대한 변동을 분석하였으며, 최근에는 해저설치형 ADCP 데이터와 연직이동의 주요 파라미터로서, 해양환경, 빛, 구성생물에 관하여 규명(Ashjian et al., 1998; Jo and Lee, 2010)이 시도되었으며, Luo et al. (2000)는 12 kHz 소나와 153 kHz의 ADCP를 이용하여 음향산란층 내에 존재하고 있는 동물플랑크톤과 중층성 어류의 연직이동속도를 측정하고, 수온 및 산소포화상태인 해양환경과의 관계를 설명하였다. 또한, 음향산란층 내에 분포하는 주요 대상생물인 난바다곤쟁이는 조도 변화에 따라 유영행동 패턴이 크게 변화하는 특성을 가지고 있으므로, 일주 연직 이동의 큰 요인으로 생각되어지고 있다. 이러한 측면에서, ADCP를 이용하여 난바다곤쟁이의 일주기 연직이동속도 측정에 많이 적

용되고 있다(Tarling et al., 2001; Burrows and Taling, 2004). 이와 같이 초음파를 이용한 음향장비는 해양생태계의 이해를 파악하기 위한 주요 방안으로 적용되고 있으며, 음향자원조사에서도 조사해역의 평가를 위한 중요한 파라미터는 조사 대상종의 Target strength (이하 TS)특성으로, 이 값은 교정된 음향시스템에서 수집된 음향자료를 이용하여 대상자원을 판별하기 위한 주요 요소이면서도 음향자료를 생물의 현존량으로 변환하기 위해서 사용되는 값으로 자원량 추정 정확도와 직접적으로 관계하기 때문에 높은 정확도를 가지는 추정근거로 이루어져야 한다.

한편, 최근 음향 자원 조사 방법은 해양생태계를 비롯한 깊은 호수와 저수지와 같은 담수어 환경에서 어류 분포의 정량적인 평가와 대상 어류 이동의 모니터링 및 생태학에 관한 연구에 적용되고 있다(Godlowska and Jelonek, 2006; Jurvelius et al., 2008; Knudsen and Larsson, 2009; Tan et al., 2011). 특히, 큰 규모의 강 및 호수를 대상으로 이러한 음향조사평가방법은 해양생태계를 대상으로 하는 것과 같이 단 시간 내에 넓은 조사 영역에 대해 목표로 하는 수중 생물의 정량적인 평가가 가능하게 되어 생태학적인 이해도가 높은 방법으로 평가된다.

따라서, 본 연구에서는 배스, 블루길이 주로 분포하는 조사수역을 선정하여 음향을 이용한 방법으로 정도 높은 현존량을 추정하기 위한 시도로서, 조사수역 내 분포하는 주요 어류의 주파수별 TS값 체장의존성에 필요한 물리모델을 기반으로 수중생물에 대한 음향산란 이론모델을 이용하여 주요 주파수별 음향산란 특성을 추정하였다. 또한, 음향기술을 이용하여 주·야간 및 계절변화에 따른 시공간분포 및 연직분포특성을 파악하였다.

재료 및 방법

주요 어종의 음향산란이론모델

Clay and Horne (1994)은 Foote (1985)가 어류에 의한 음향산란을 추정하기 위하여 어류음향산란의 대부분을 차지하는 부레에 Kirchhoff-Helmholtz approximation을 적용하여 어류의 체조직과 부레를 유한원통요소로 근사한 Kirchhoff-ray mode model (이하 KRM모델)을 개발하였다. KRM모델은 어류의 체조직을 유체의 유한원통으로 근사시키고, 부레를 기체의 유한원통으로 근사

시커 음향산란강도의 합을 구하여 어류 전체의 음향산란특성을 추정한다. 이 두 요소에 의한 음향산란강도는 주파수, 체형 및 부레 형상, 음파의 입사각, 매질인 해수와 체조직의 밀도 및 음속 등의 함수로 표현되는데, 어류에 의한 음향산란 진폭 $\mathcal{L}_{fish}$ 와 TS (dB)의 관계는 아래 식 (1)과 같다.

$$TS = 10 \log_{10} |\mathcal{L}_{fish}|^2 \quad (1)$$

KRM 모델을 이용하여 음향산란특성을 추정하기 위해서는 어류의 체형자료와 부레의 형상자료를 추출해

야 한다. 음향산란특성 추정에 사용한 생물표본은 조사수역에서 어획된 주요 어획 종을 이용하였는데, 조사수역의 우점종은 붕어, 블루길, 배스로 나타났으며 (Fig. 1), 자연 상태에서의 부레형상을 그대로 유지할 수 있도록 드라이아이스와 메틸알코올을 이용하여 표본 어체를 급속으로 냉동한 후 X선 촬영으로 사진자료를 저장하였다 (Fig. 2). 여기서, Fig. 2에서 상부의 측면사진과 하부의 윗면의 X선 사진은 디지털 화상으로 변환 후, 디지털라이징 프로그램을 이용하여 몸체와 부레의 체형좌표를 추출하였다 (Fig. 3).

Fig. 1. Dominant fishes in the survey area.

Fig. 2. X-ray pictures of dominant fishes in the survey area.

Fig. 3. 3-dimensional coordinates of dominant fishes in the survey area.

한편, 각 어종의 유영 자세각에 대한 평균 TS를 산출하는 데에는 유영 자세각 변동에 대한 자료가 필요한데, 본 연구에서 유영 자세각 변동은 일반적인 어류에 적용하는 평균 -5° , 표준편차 $\pm 15^\circ$ 의 확률밀도함수로 가정하여 모델링을 실시하였다.

음향기술을 이용하여 수층에 분포하는 어종의 분포밀도를 추정하기 위해서는 채집된 표본에 대한 주파수별 음향산란특성을 결정해야만 하는데, 대상생물의 다양한 크기 및 주파수별 음향산란특성을 규명하기 위하여 음향산란이론모델을 적용하여 후방산란강도를 예측하여 조사해역의 에코그램을 분석한다 (Clay and Horne, 1994; Lee et al., 2009; Lee et al., 2010).

조사수역에서는 다양한 어종들이 분포하며 수층별 음향자료로부터 특정어종에 대한 음향신호를 추출하기 위해 조사수역의 우점종에 대한 음향산란특성을 파악해야 한다. 따라서, 음향산란이론 (KRM) 모델을 이용하여 체장에 대한 주로 사용하는 3 주파수 (38, 70, 120 kHz)에 대한 체장별 주파수의 특성을 분석하였다. 이러한 다중 주파수에 의한 분석방법은 종 식별을 위한 방법은 대상 산란체의 평균 체장을 기준으로 하여, 평균 TS의 주파수 차에 대한 값이 에코그램에서 수집한 임의의 체적에 대한 체적후방산란강도 (Volume Backscattering Strength, S_v)의 주파수 차의 값이 동일하다는 것으로 나타낼 수 있으며, 주요 유사한 음향산란특성을 가지는 어류의 경우에는 어종간의 분리가 어렵다는 문제점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 향후 유용하게 사용하는 주파수 분석의 정도를 높이기 위하여 음향산란이론모델에 대한 체장별 음향산란특성을 규명하였으며, 현장에서 조사선박의 소형화 및 센서 부착의 어려움으로 인하여 다양한 주파수를 적용하여 조사하기 어려웠기 때문에 먹이생물과 어류의 음향신호를 확인할 수 있는 단일주파수의 대표적인 주파수대

역인 120 kHz 스플릿 빔 센서를 선박 현측에 부착하여 수행하였다.

현장자료 수집 및 에코그램 분석

시험조사수역에 분포하는 배스 및 블루길의 시공간분포를 조사하기 위하여 음향기법을 이용한 아래의 그림과 같이 음향 조사라인을 설정하여 조사를 수행하였다 (Fig. 4a). 음향조사는 2013년 8월, 10월, 11월까지 3회에 걸쳐 용담호 조사수역에서 120kHz 단일 주파수의 과학어군탐지기 (EK60, Simrad Kongsberg Maritime AS, Norway)를 이용하여 대상 어류의 조사수역에 대한 시공간 분포조사를 실시하였다. 조사를 실시한 후, 후처리분석소프트웨어 (EchoView4.5, Myriax, Australia)를 이용하여 시공간 분포수층에 관한 자료를 분석하였다. 또한, 조사수역의 연직 수층별 수질환경정보를 파악하기 위하여 CTD (OceanSeven-316Plus, Idronaut, Italy)를 이용하여 수층별 수온현황을 측정하였다 (Fig. 4b, 4c).

일반적인 해양생태계는 먹이생물에 의해 주·야간 연직이동을 하게 되고, 1차 이동에 따른 포식자의 2차 이동이 나타나는 현상이 일어나기 때문에 일출 전과 일몰 후의 주요 포식자의 섭이활동이 일어나는 시기에 음향조사를 수행한다. 이러한 이유는 지속적인 회유나 이동을 하는 회유성 어류의 경우는 수층에 분포하는 특징을 가지고 있으므로 수중음향기술을 이용하여 충분한 분포상황을 알 수 있으나, 저착성 및 은둔성 어류의 경우는 섭이활동을 하기 전에는 해저 혹은 수중 구조물에 밀착되어 분포하고 있으므로 현존량이 현저히 낮게 평가된다. 따라서, 용담호 조사수역의 조사라인을 먼저 설정한 후, 과학어군탐지기 (이하 과학어탐)를 이용하여 일몰 후 야간에 수심별 시공간 연직분포조사를 수행하였으며, 다음날 주간에도 야간조사와 같은 방법으로 조

Fig. 4. Informations of the survey area.

사를 실시하여 주·야간 분포상황의 차이를 확인하였다.

한편, 조사수역에서 어류자원의 시공간 연직분포 특성을 파악하기 위하여 과학어탐으로부터 저장된 SV자료를 이용하여 후처리소프트웨어를 이용하여 배경잡음 처리 등 수행한 후 자료 처리를 실시하였으며 (Myriax, 2009), 자료 처리시 비선형적인 수치인 SV를 선형적인 수치인 면적 산란 계수 (Nautical Area Scattering Coefficient, NASC, $m^2/n \cdot mile^2$)로 변환하여, 0.1 n·mile 간격으로 저장되는 EDSU (Elementary Distance Sampling Unit)로 추출된 NASC 값을 어군의 연직분포특성을 나타내는데 지표로써 사용하였다.

Table 1. System parameters, start and end times for each acoustic transect for the acoustic survey

Split beam echosounder	Simrad EK60		
Frequency (kHz)	120		
Pulse duration (ms)	0.512		
Ping interval (s)	0.25		
Transmitted power (W)	500		
Date (YYYYMMDD)	Start time (hh:mm)	End time (hh:mm)	Distance run (n·mile)
20130827	11:10	12:40	7.03
20130827	19:40	21:20	7.46
20131022	11:40	13:20	8.63
20131022	17:50	19:40	8.85
20131121	15:40	16:50	7.52

결과 및 고찰

표본어류의 음향산란이론모델

최근 음향자원조사에 활용되는 어족자원 및 기초 생산자인 동물플랑크톤의 현존량 추정에 적용되는 주요

주파수 38 kHz, 70 kHz 및 120 kHz에 대한 본 연구의 주요 어획 대상 어종인 배스 (*Micropterus salmoides*), 블루길 (*Lepomis macrochirus*), 붕어 (*Carassius auratus*)의 주파수별 유평 자세각에 따른 각 생물표본에 대한 TS패턴은 Fig. 5-7와 같다.

배스의 TS패턴은 낮은 주파수인 38 kHz에서는 다른 주파수에 비해 자세각 변화에 따라 안정된 변화의 양상을 나타내었으나, 120 kHz에서 고주파수의 특성에 의해 70 kHz 주파수 대역보다 복잡한 패턴으로 나타났다. 최대 TS값을 나타낸 자세각은 부레의 축과 체축이 이루는 각도 차이에 따라 38 kHz 및 70 kHz에서는 약 78°(등방향 중심에서 -12°)에서 나타났으며, 120 kHz에서는 약 81°(등방향 중심에서 -9°)로 거의 유사한 패턴을 나타내었다. 한편, 120 kHz 주파수 대역에서 등방향 중심에서 약 +25°부근에 복잡한 패턴 (null)을 나타내었다 (Fig. 5).

블루길의 TS패턴은 낮은 주파수인 38 kHz에서 다른 어종들과 다른 주파수에 비해 자세각 변화에 따라 안정된 변화의 패턴 양상을 나타내었으며, 120 kHz에서 고주파수의 특성에 의해 70 kHz 주파수 대역보다 복잡한 패턴으로 나타났으며, 최대 TS값을 나타낸 자세각은 부레의 축과 체축이 이루는 각도 차이에 따라 38 kHz에서는 약 78°(등방향 중심에서 -12°)에서 나타났으며, 70 kHz 및 120 kHz에서는 각각 82°(등방향 중심에서 -8°), 90°(등방향 중심에서 0°)로 서로 다른 패턴을 나타내었다. 한편, 70 kHz와 120 kHz 주파수 대역에서 등방향 중심에서 약 +10-15°부근에 주파수 특성의 변동을 나타내는 null을 나타내었다 (Fig. 6).

Fig. 5. Backscattering strength characteristics of Bass (*Micropterus salmoides*).

Fig. 6. Backscattering strength characteristics of Bluegill (*Lepomis macrochirus*). Fig. 7. Backscattering strength characteristics of Crusian carp (*Carassius auratus*).

붕어의 TS패턴은 낮은 주파수인 38 kHz에서 다른 어종들과 유사하게 자세각 변화에 따라 안정된 변화의 패턴 양상을 나타내었으며, 다른 어종에 비해서 120 kHz에서 고주파수의 특성에 의해 70 kHz 주파수 대역보다 복잡한 패턴으로 나타났으며, 최대 TS값을 나타낸 자세각은 부레의 축과 체축이 이루는 각도 차이에 따라 38 kHz에서는 약 88° (등방향 중심에서 -2°)에서 나타났으며, 70 kHz 및 120 kHz에서는 92° (등방향 중심에서 +2°)로 서로 유사한 패턴을 나타내었으나, 70 kHz 주파수 대역에서는 등방향 중심에서 +40°부근에서 주파수 특성 변동이 나타났으며, 120 kHz 주파수 대역에서는 등방향 중심으로부터 유영 자세각의 분포범위에 넓은 주파수 변동 특성을 나타내었다 (Fig. 7).

조사수역의 어종상 표본에 대한 주파수별 평균 TS와 체장별 TS함수식은 Table 2와 같다. 표본 체장과 추정치를 비교해보면, 체장의 변화에 따라 TS값의 변화는

수 dB의 차이를 보였으며, 표본 개체에 따라 체형이나 부레의 크기 및 형태가 차이 나기 때문에, 체장이 거의 동일하더라도 TS값에서 개체의 특성이 나타날 수 있다. 한편, 각 생물 표본에 대한 주파수별 TS값을 기준화하여 추정된 TS_{cm} 값은 개체어에 따라 다소 차이를 나타내었으나, 이 값들을 평균하여 추정된 TS와 체장 사이의 관계식은 다음과 같이 추정되었다.

Table 2. Averaged target strength and length dependence of each fish

species	SL (cm)	TL (cm)	20log (TL)	Avg. TS			TS_{cm}		
				38 kHz	70 kHz	120 kHz	38 kHz	70 kHz	120 kHz
Bass	27.5	31.0	29.8	-35.4	-36.1	-37.0	-65.3	-65.9	-66.8
Bluegill	17.5	20.0	26.0	-40.3	-40.6	-41.4	-66.3	-66.6	-67.4
Crusian carp	19.0	23.5	27.4	-40.3	-41.7	-42.6	-67.7	-69.1	-70.0

본 연구의 분석에 사용한 한정된 생물표본의 갯수만으로는 정확한 대상어류의 다양한 체장에 대한 TS-체장 관계식을 추정하기 무리가 있는 것이 사실이다. 따라서, 향후 표본의 갯수를 증가하여 다양한 부레형태에 대한 평균화 작업은 필요할 것으로 판단되며, X선 사진의 화상추출 및 디지털화 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이는 방안과 대상생물의 다양한 크기별 음향산란특성은 현수법 (Kawabata, 2005; Lee, 2005) 혹은 자유유영상태 (Goss et al., 2001)에서의 음향신호를 분석하여 검증할 필요가 있다고 사료된다.

용담호 조사수역의 시공간분포

음향조사는 조사해역에 분포하는 대상생물의 수층별 분포와 시공간분포를 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 조사수역의 기본적인 수심을 파악할 수 있다. 따라서 일정 간격으로 조사라인에 따른 조사와 함께 본 조사에서 얻어진 수심자료를 토대로 조사해역의 수심별 분포를 나타내었다 (Fig. 8). 그 결과, 최대 25 m의 수심분포를 나타내고 있었으며, 조사라인 1-5까지 단면도를 그림과 같이 나타내었다. 최대 수심수역 부근에서는 급격한 수심을 이루고 있으며, 조사수역의 평균 수심은 5-

10m 분포를 나타내고 있다.

과학어탐에 의한 조사수역에서 얻어진 수층별 어류 분포의 대표적인 형태는 아래의 그림과 같이 나타내었다 (Fig. 9). 8월의 조사결과, 수심 10 m 이하의 수심에서 어류분포밀도가 높게 나타났다. 일반적인 해양수층 생태계에서는 야간에는 일몰전후 동물플랑크톤의 연직상향 이동을 시작하는 것과 동시에 섭이활동을 하는 상위 포식자인 어류 등이 해수면 가까운 수층으로 연직상향 이동하여 분포하게 된다. 그러나 수심이 얇은 해역에서는 일반적으로 전 수층에 존재하는 경향이 일반적이다. 본 조사에서도 최대 25 m까지의 수심 분포를 나타내는 수역에서는 거의 어류가 존재하지 않았으나, 수심이 얇은 10 m 이내 수역에서는 높은 어군밀집도를 나타내었다 (Fig. 9). 한편, 8월의 주간조사에서는 평균 분포밀도를 나타내는 어군군집도가 $0.1830 \text{ (m}^2/\text{nm}^2\text{)}$ 로 나타났으며, 8월의 야간조사에서는 $0.1327 \text{ (m}^2/\text{nm}^2\text{)}$ 로 수층별 분포와 함께 평균분포밀도가 유사하게 나타났다.

10월의 조사결과, 8월과 유사하게 최대 25 m까지의 수심 분포를 나타내는 수역에서는 거의 어류가 존재하지 않았으나, 수심이 얇은 10 m 이내 수역에서는 높은 어군밀집도를 나타내었다 (Fig. 11). 한편, 10월의 주간

Fig. 8. Cross-section of depth in survey area.

Fig. 9. An example echogram and survey processing results by hydro-acoustic survey.

Fig. 10. Fish's vertical distribution results by hydro-acoustic survey during August.

Fig. 11. Fish's vertical distribution results by hydro-acoustic survey during October.

조사에서는 평균 분포밀도를 나타내는 어군군집도가 $0.0215 \text{ (m}^2/\text{nm}^2\text{)}$ 로 나타났으며, 10월의 야간조사에서는 $0.0335 \text{ (m}^2/\text{nm}^2\text{)}$ 로 수층별 분포와 함께 평균분포밀도가 유사하게 나타났으나, 8월 조사결과에 비해 낮은 분포를 나타내었다. 또한, 10월에는 표층의 평균 수온이 21°C 정도이며, 수심 15–20 m에서 $10\text{--}20^\circ\text{C}$ 까지 넓은 수온 범위를 나타내었다.

한편, 주간에는 수심 5 m 이심에서 주로 분포하였으나, 야간에는 수심 8 m 부근에서도 어류들이 다소 분포하였다. 따라서 본 조사해역에서는 주·야간 분포상황이 크게 차이가 나지 않는 것으로 판단되어, 11월 조사기간에서는 수온 분포와 함께 주간에만 조사를 수행하였다. 그 결과, 11월의 주간조사에서는 평균 분포밀도를 나타내는 어군군집도가 $10.8622 \text{ (m}^2/\text{nm}^2\text{)}$ 로 아주 높은

어군군집도를 나타내었다. 본 조사기간의 수온범위는 표층에서 수심 25 m까지 상당히 안정된 수괴를 이루고 있는데, 약 13 °C 정도였으며 단일개체로 유영하는 배스와 같은 어류 및 블루길이나 소형어류가 군집하는 형태의 패치형태로 이루는 어류들이 주로 수심 11 m 부근에 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 12).

Fig. 12. Fish's vertical distribution results during November.

본 연구의 조사 기간 동안 수행한 결과를 요약하면, 수온이 높은 8월의 경우에는 평균 0.15 (m²/nm²)의 어군군집도를 나타내었으며, 표층과 저층의 수온이 변동이 큰 불안정된 수괴에는 더욱 낮은 어군군집도 0.03 (m²/nm²)를 나타내었다. 그러나 전 수층의 평균수온 13 °C 정도에서는 배스로 추정되는 어군과 소형어류의 군집형태가 높은 어류들이 상당히 높은 밀도의 어군군집도 10.86 (m²/nm²)로 분포하고 있는 것으로 나타나, 수온이 낮아지며 안정되는 초겨울시기에 용담호의 넓은 호수에서 유입되는 어군으로 추정된다.

또한, 현재까지 포식자인 어류와 주요 먹이생물인 동물플랑크톤을 구분하기 위해서 복수 주파수를 사용하는 주파수차법 (dB differencing법이라고 불림)을 이용하는 연구사례가 많은데, 복수 주파수를 사용하여 어떤 생물종에 대한 음향 반사 특성, 즉, 해당 주파수에 대한 반응 및 특성을 분석하여 이 생물종을 판별하고자 하는 연구가 있다(Knudsen et al., 2006; Rudstam et al., 2006). 그러나, 이러한 다중 주파수를 사용하기 위해 2개 이상의 주파수를 갖추어야 하기 때문에 일반적으로 적은 예산으로 수행되는 담수어 환경에 관련한 연구에는 이 방법을 사용하기 힘든 실정에 있다. 따라서, 시간 변량역치를 이용 (Kang, 2012)하여 1개의 주파수를 사용하여 생체 밀도가 차이가 나는 어류와 플랑크톤을 구

분할 수 있어 다소 적은 예산으로 연구목적을 달성할 수 있는 장점은 있으나, 물리적인 특성이 유사한 어종간의 식별을 하는데 어려움이 있다.

본 조사는 단일주파수만으로 조사하여 조사수역에 분포하는 어종상에 따른 분포밀도 추정은 불가능하였으므로, 기본 어류의 체장별 음향산란특성을 토대로 밀도를 추정할 수밖에 없다. 따라서 본 조사에서 주요 대상 어류로 하는 배스, 블루길 및 붕어의 음향산란특성을 분석하였고, 향후 연구 계획에서는 특정 조사수역에 분포하는 주요 대상종인 배스와 블루길의 음향식별에 에코그램을 추출하기 위하여 저주파대역의 38 kHz 주파수 등 2개 이상의 주파수로 구성된 과학어탐을 추가로 설치하여 조사할 예정이며, 대상어종의 시공간 분포 현황 및 분포 밀도를 분석할 예정이다.

한편, 다양한 어종이 분포하는 수역에서 특정 어종을 목표로 어종간 식별작업을 위해서는 조사수역에서 채집어구와 같은 표본생물의 어종상 분포를 파악하고, 다양한 어종에 대한 주파수특성과 2개 이상의 주파수로 구성된 트랜스듀서를 설치하여 다중주파수기법에 의한 방법의 종합적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 이러한 예측 결과는 시공간 분포시기 및 수괴환경을 고려하여 대상으로 하는 대상어종을 추출할 수 있는 주파수 패턴 분석을 고려한다면, 보다 정도 높은 음향자원평가를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 전라북도 진안군 용담호에 분포하는 생태계 교란 어종인 블루길과 배스의 효율적인 분포 조사와 최종적인 구제 사업의 목표를 위하여 음향조사기법을 이용하여 주·야간 담수 어류의 연직 분포를 파악하였다. 이를 위하여 2013년 8월, 10월, 11월 총 5회에 걸쳐 120 kHz대역 주파수의 음향 정선 조사를 실시하였고, 정점별 CTD를 통해서 환경자료를 취득하여 과학어탐 자료와 환경 자료의 비교·분석을 통해 분석하였다. 조사 수역인 용담호 내에 유영하는 어류의 연직 분포는 수온약층이 강한 8월과 10월의 경우 약 10 m 이내의 얇은 수심에서 분포한 반면, 11월은 표층부터 중층까지 수온 13 °C의 안정된 수괴에서 약 11 m의 특정 수심에서 어군이 10배 정도의 높은 밀도를 나타내었으며, 일반적인 해양생태계와 달리 주·야간 연직 분포가 유사

한 특징을 나타내었다. 조사수역의 우점종은 붕어, 블루길, 배스로 나타났으며, 이러한 음향 기술을 이용한 조사 방법은 내수면 어류의 시·공간적 분포 파악 및 생태계 교란 어종인 블루길과 배스의 효과적인 제거 방안 개발을 위한 기초 자료로 제공될 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 연구용역 (생태계교란 어종의 효과적인 어획방안 연구) 및 수산시험연구사업 (RP-2014-FE-024) 으로 수행되었으며, 현장 조사 수행에 도움을 준 오우석 연구원님과 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ashjian CJ, Smith SL, Flagg CN and Wilson C. 1998. Patterns and occurrence of diel vertical migration of zooplankton biomass in the Mid-Atlantic Bight described by an acoustic Doppler current profiler. *Cont Shelf Res* 18, 831–858 (DOI: 10.1016/s0278-4343(98)00019-3).
- Burrows MT and Tarling G. 2004. Effects of density dependence on diel vertical migration of populations of northern krill: a genetic algorithm model. *Mar Ecol Progr Ser* 277, 209–220 (DOI: 10.3354/meps277209).
- Clay CS and Horne JK. 1994. Acoustical models of fish: The atlantic cod (*Gadus morhua*). *J Acoust Soc Am* 96(3), 1661–1668 (DOI: 10.1121/1.410245).
- De Robertis A and Jaffé JS. 2000. Size-dependent visual predation risk and the timing of vertical migration in zooplankton. *Limnol Oceanogr* 45(8), 1838–1844 (DOI: 10.4319/lo.2000.45.8.1838).
- Foote KG. 1985. Rather-high-frequency sound scattered by swim-bladdered fish. *J Acoust Soc Am* 78, 688–700 (DOI: 10.1121/1.392438).
- Godlewska M and Jelonek M. 2006. Acoustical estimates of fish and zooplankton distribution in the Piaseczno reservoir, Southern Poland. *Aquat Ecol* 40, 211–219 (DOI: 10.1007/s10452-004-3525-0).
- Goss C, Middleton D and Rodhouse P. 2001. Investigations of squid stocks using acoustic survey methods. *Fish Res* 54, 111–121 (DOI: 10.1016/s0165-7836(01)00375-7).
- Gliwicz MZ. 1986. Predation and the evolution of vertical migration in zooplankton. *Nature* 320(24), 746–748 (DOI: 10.1038/320746a0).
- Haney JF. 1988. Diel patterns of zooplankton behavior. *Bull mar sci* 43(3), 583–603.
- Holzman R and Genin A. 2003. Zooplankton by a nocturnal coral-reef fish: Effects of light, flow, and prey density. *Limnol Oceanogr* 48(4), 1367–1375 (DOI: 10.4319/lo.2003.48.4.1367).
- Jo HJ and Lee KH. 2010. Measurement of vertical migration speed of Sound Scattering Layer using an bottom mooring type Acoustic Doppler Current Profiler. *J Kor Soc Fish Tech* 46(4), 449–457 (DOI: 10.3796/KSFT.2010.46.4.449).
- Jurvelius J, Knudsen FR, Balk H, Marjomaki TJ, Peltonen H, Taskinen J, Tuomaala A and Viljanen M. 2008. Echo-sounding can discriminate between fish and macroinvertebrates in fresh water. *Fresh Biol* 53, 912–923 (DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01944.x).
- Kang M. 2012. Acoustic method for discriminating plankton from fish in Lake Dom Helvecio of Brazil using a time varied threshold. *J Kor Soc Fish Tech* 48(4), 495–503 (DOI: 10.3796/ksft.2012.48.4.495).
- Knudsen FR and Larsson P. 2009. Discriminating the diel vertical migration of fish and *Chaoborus flavicans* larvae in a lake using a dual-frequency echo sounder. *Aqua Liv Resour* 22, 273–280 (DOI: 10.1051/alr/2009029).
- Knudsen FR, Larsson P and Jakobsen PJ. 2006. Acoustic scattering from a larval insect (*Chaoborus flavicans*) at six echosounder frequencies: Implication for acoustic estimates of fish abundance. *Fish Res* 79, 84–89 (DOI: 10.1016/j.fishres.2005.11.024).
- Kawabata A. 2005. Target strength measurements of suspended live ommastrephid squid, *Todarodes pacifica*, and its application in density estimations. *Fish Sci* 71, 63–72 (DOI: 10.1111/j.1444-2906.2005.00931.x).
- Lee DJ. 2005. Fish length dependence of acoustic target strength for 12 dominant fish species caught in the Korean waters at 75kHz. *J Kor Soc Fish Tech* 41(4), 296–305 (DOI: 10.3796/ksft.2005.41.4.296).
- Lee KH, Choi JH, Shin JK, Chang DS and Park SW. 2009. Acoustical backscattering strength characteristics and density estimates of Japanese common squid distributed in Yellow Sea. *J Kor Soc Fish Tech* 45(3), 157–164 (DOI: 10.3796/ksft.2009.45.3.157).
- Lee SJ, Lee YW, Kim JI, Oh TY, Hwang BK, Kim BY and Lee KH. 2010. Target strength estimation of dominant species in marine ranching ground of Jeju coastal water by KRM model. *J Kor Soc Fish Tech* 46(2), 157–163 (DOI: 10.3796/ksft.2010.46.2.157).
- Luo J, Ortner PB, Forcucci D and Cummings SR. 2000. Diel vertical migration of zooplankton and mesopelagic fish in the Arabian Sea. *Deep Sea Res* 7, 1451–1473 (DOI: 10.1016/s0967-0645(99)00150-2).
- Myriax. 2009. Echoview. Version 4.70 Myriax Software Pty Ltd,

- Horbart.
- Pinot JM and Jansa J. 2001. Time variability of acoustic backscatter from zooplankton in the Ibiza Channel (western Mediterranean). *Deep Sea Res* 48, 1651–1670 (DOI: 10.1016/s0967-0637(00)00095-9).
- Plueddemann A and Pinkel R. 1989. Characterization of the patterns of diel migration using a Doppler sonar. *Deep Sea Res* 36(4), 509–530 (DOI: 10.1016/0198-0149(89) 90003-4).
- Rudstam LG, Knudsen FR, Balk H, Gal G, Boscarino BT and Axenrot T. 2006. Acoustic characterization of *Mysis relicta* at multiple frequencies. *Can J Fish Aquat Sci* 65, 2769–2779 (DOI: 10.1139/f08-179).
- Tarling GA, Matthews JBL, David P, Guerin O and Buchholz F. 2001. The swarm dynamics of northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) and pteropods (*Cavolinia inflexa*) during vertical migration in the Ligurian Sea observed by an acoustic Doppler current profiler. *Deep Sea Res* 48, 1671–1686 (DOI: 10.1016/s0967-0637(00) 00105-9).
- Tan T, Kang M, Tao J, Li X and Huang D. 2011. Hydroacoustic survey of fish density, spatial distribution, and behavior upstream and downstream of the Changzhou Dam on the Pearl River, China. *Fish Sci* 77, 891–901 (DOI: 10.1007/s12562-011-0400-5).
-
2014. 10. 7 Received
2014. 11. 6 Revised
2014. 11.19 Accepted