

# 원자력발전소 주변 표층해역에 출현하는 해양생물의 계절별 음향산란 분포

민은비 · 강태종 · 손영태<sup>1</sup> · 황두진<sup>2\*</sup>

전남대학교 수산과학과 학생, <sup>1</sup>(주)지오시스템리서치 책임연구원, <sup>2</sup>전남대학교 해양생산관리학과 교수

## Seasonal distribution of marine organisms in the surface layer around nuclear power plants using acoustic

Eun-Bi MIN, Tae-Jong KANG, Yeongtae SON<sup>1</sup> and Doo-Jin HWANG<sup>2\*</sup>

*Student, Department of Fisheries Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

*<sup>1</sup>Researcher, Department of ocean information analysis, Geosystem Research Corporation, Seoul 04092, Korea*

*<sup>2</sup>Professor, School of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

In this study, the seasonal distribution was surveyed using acoustic in the coastal waters around nuclear power plants. Acoustic surveys were conducted in June, September, December 2022, and March 2023 in the coastal waters of Uljin-gun. According to the results of this study, zooplankton were distributed at the depths from 0 m to 50 m in the waters around nuclear power plants. Zooplankton appeared in summer (June), autumn (September), and spring (March). In the survey area, fish were distributed at the depths from 25 m to 190 m, appearing in the summer (June), autumn (September), winter (December) and spring (March). The SV of zooplankton appearing in the survey area ranged from -98.0 dB to -78.0 dB, and it exhibited a one-class in the frequency distribution of SV. The SV of fish appearing in the survey area ranged from -36.0 dB to -35.0 dB and -98.0 dB to -53.0 dB, and it exhibited two-class in the frequency distribution of SV.

Keywords: Acoustic, Zooplankton, Appearance frequency, SV, NASC

### 서론

국내 원자력발전소는 가압경수로와 가압중수로 유형의 원자로를 가동하고 있으며(IAEA, 2022), 원자로 발전 시 발생하는 열은 냉각 시스템의 취·배수구를 통해

해수를 순환하여 냉각하고 있다(IAEA, 2023). 그러나 해수를 순환하는 냉각 시스템의 취·배수구에서 어류나 동물플랑크톤이 다량으로 유입됨으로써 순환수 펌프의 정지가 발생하여 원자로 또는 터빈이 자동 정지한 사례

Received 17 October 2023; Revised 16 January 2024; Accepted 25 January 2024

\*Corresponding author: djhwang@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7126, Fax: +82-61-659-7129

Copyright © 2024 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

가 있다. 원자력발전소에서 1978~2022년 동안 발생한 해양생물의 유입으로 인하여 발생한 사고는 총 28건이었다. 원자력발전소 내 취수구에 유입된 해양생물은 멸치류(Engraulidae), 해파리류(Scyphozoa), 난바다곤쟁이류(Euphausiids), 살파류(Salpidae)로 보고되었으며, 주로 3~8월 중에 출현하였다(OPIS, 2023). 원자력발전소의 안전과 경제적 손실을 최소화하고 효율적인 운영을 위하여 취수구 주변 해역에 출현하는 해양생물의 어종상을 파악할 필요가 있다. 또한, 냉각 시스템의 취·배수구를 순환한 동물플랑크톤은 사망률이 높아 주변 해역 해양생태계에서 먹이사슬 구조와 다양성에 영향을 미칠 수 있다(Choi et al., 2012; Lee et al., 2018).

우리나라에서는 음향을 이용하여 수산자원 계측(Hwang et al., 2002), 자원량 추정(Lee et al., 2012, Seo et al., 2016, Park et al., 2022), 어류 행동(Yoon et al., 2014), 어류 군집(Hwang et al., 2015, Park et al., 2018), 어류와 동물플랑크톤의 관계(Han et al., 2017)에 대한 연구와 조사해역인 울진 연안의 음향산란층에 대한 연구가 수행된 바가 있고(Hwang et al., 2005), 음향을 이용하여 살파(Wiebe et al., 2010), 노무라입깃해파리(Yoon et al., 2015), 난바다곤쟁이(Kim et al., 2018) 등에 대해 현장에서 Target Strength (MacLennan et al., 2002)를 계측하여 동물플랑크톤의 음향산란 특성을 조사한 연구가 있다.

본 연구는 원자력발전소 인근 해역에서 어류, 동물플랑크톤, 해파리, 살파 등을 대상으로 계절별 수평분포,

분포 수심, 이동 경로 등을 파악하기 위해 과학어군탐지기를 이용한 기초 연구를 수행하였다.

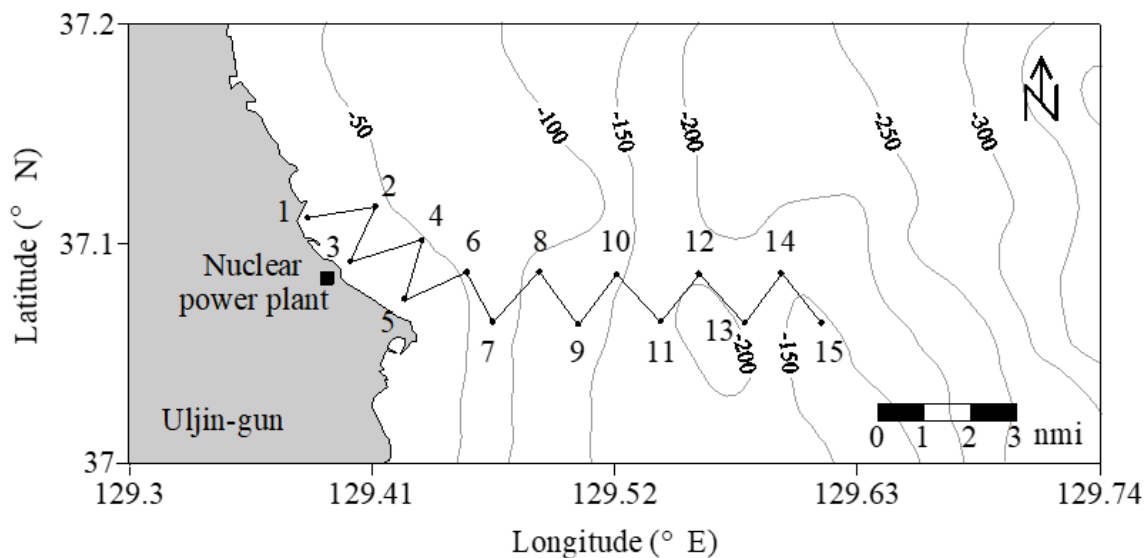
## 재료 및 방법

### 조사해역 및 조사장비

우리나라 동해 중부 경상북도 울진군 연안 해역에서 과학어군탐지기(EK 80, SIMRAD, Norway)를 이용하여 2022년 6월(하계), 9월(추계), 12월(동계), 2023년 3월(춘계)에 음향조사를 실시하였다. 조사해역의 정점은 15개로 정선 길이는 41,446 m이다(Fig. 1). 음향조사에 사용된 과학어군탐지기는 Table 1에 나타난 바와 같이 EK80 (SIMRAD, Norway)으로 주파수는 200 kHz이고 Split beam방식이며 펄스 유형은 Continuous wave, 펄스 폭은 0.512 s, 1초에 1 ping, 선속 5.1 m/s (10 knot)로 데이터를 수집하였다. 과학어군탐지기(EK 80)는 구형 보정 절차에 의해 보정하였다(Demer et al., 2015). 수집

**Table 1. System parameters of scientific echo sounder (EK 80, Simrad) for acoustic survey**

Item	Specifications
Frequency	200 kHz
Beam type	Split beam
Pulse type	Continuous Wave
Power	105 W
Pulse width	0.512 s
Ping rate	1 ping/s



**Fig. 1. The map of transect line for acoustic survey around nuclear power plants (\* : Survey point, —: Survey line).**

한 음향자료는 Echoview (Echoview V 10.0)를 이용하여 처리하였다.

**음향자료 처리방법**

수집한 음향자료는 동물플랑크톤과 어군의 신호를 나타내기 위해 Echoview (Echoview V 10.0) 소프트웨어로 처리하였다. 음향 데이터는 플랫폼을 기반으로 일시와 위경도, 에코 신호가 동시에 입력 및 저장한다. 수집한 Raw SV(체적 후방 산란 강도)는 음향 기기에 대한 Impulse noise와 전기 기기에 대한 Transient noise를 처리한 후 표층과 해저를 식별하고 조사해역의 수심 100 m 이상에서 나타나는 TVG (Time varied gain) 노이즈는 Data generator 연산자의 Time varied gain 보정 기능으로 상쇄하였다(Simmonds and MacLennan, 2005). 수중 탐지한 동물플랑크톤과 어류의 계절별 출현 분포를 파악하고자 동물플랑크톤은 정점 1번에서 5번 사이 표층에서 부유하는 특성에 따라 수심 0~50 m에 대한 SV를 추출하고 어류는 정점 6번에서 13번 사이 수심 50~250 m인 경사면과 깊은 골의 저층에서 높은 음향산란강도가 나타난 어군에 대한 SV를 추출하였다.

동물플랑크톤은 생태학적으로 어류와 같이 부레나 뼈

를 구성하지 않지만, 종과 모양, 구조, 크기에 따라 다양하고 띠 모양의 군을 형성하여 어군보다 TS (Target strength, 음향강도)와 SV (Backscattering strength, 후방산란 강도)가 낮은 특성을 가진다. 에코그램에서 나타나는 동물플랑크톤의 음향산란 형태는 수층에 흩어지거나 퍼져있고 난바다곤쟁이류 등은 일주 수직 운동을 행동하기도 하지만 대부분 동물플랑크톤은 해류를 따라 수평적으로 이동한다(Simmonds and MacLennan, 2005). 본 연구에서는 동물플랑크톤과 어류의 출현 분포를 파악하기 위해 수중 단위 체적 후방 산란 강도와 면적 후방산란 계수를 식 (1)~식 (4)로 구한다(MacLennan et al, 2022).

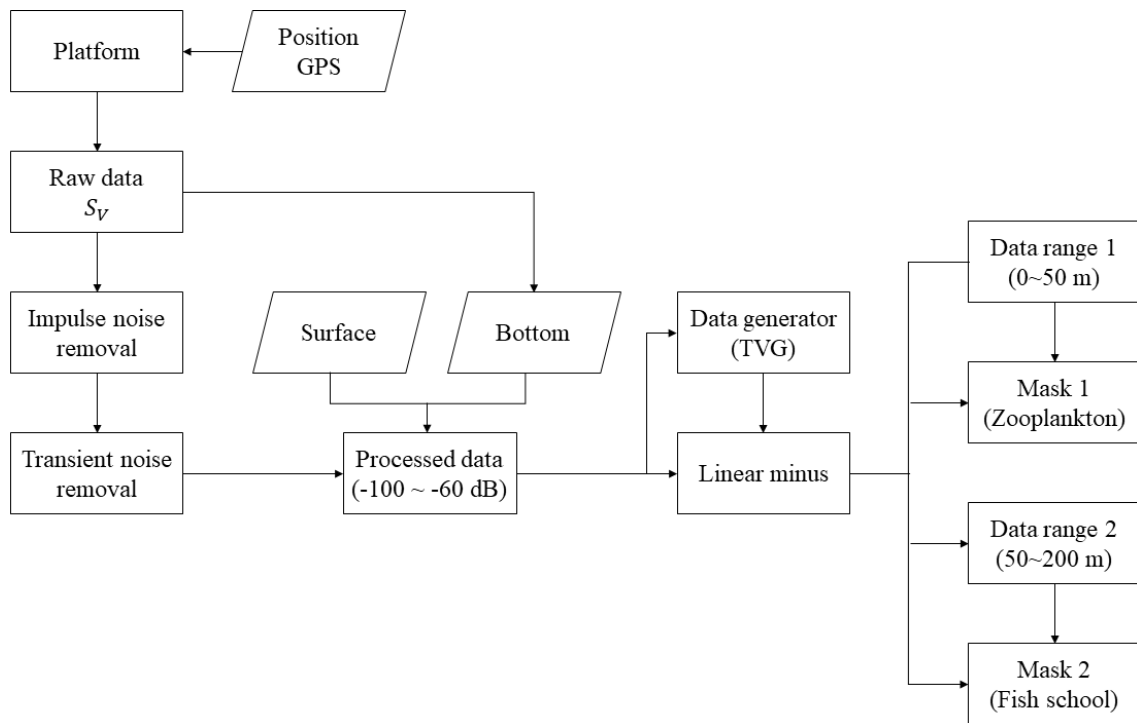
$$s_V = \sum \sigma_{bs} / V \tag{1}$$

$$S_V = 10 \log s_V \tag{2}$$

$$s_a = \int_{r1}^{r2} S_V dr \tag{3}$$

$$NASC = 4\pi 1852^2 s_a \tag{4}$$

SV (Volume backscattering coefficient, m<sup>-1</sup>)는 한 번 길이가 1 m인 정육면체 내 음파가 탐지한 생물의  $\sigma_b$ 를



**Fig. 2. Flowchart for processing acoustic signals of zooplankton and fish school.**

총 합한 것으로 로그함수를 취해 SV (Volume backscattering strength,  $dB \text{ re } 1 \text{ m}^{-1}$ )로 음향 에너지의 세기를 나타낸다. SA (Area backscattering coefficient,  $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ )는 전체 수심  $r_1 \sim r_2$  m에 대한 sV이고, NASC (Nautical area scattering coefficient,  $\text{m}^2 \cdot \text{nmi}^{-2}$ )는 음향 조사한 거리를 nmi 단위로 적분하여 수심  $r_1 \sim r_2$  m인 체적에 대한 해양 생물의 음향 밀도로 본 연구에서 동물플랑크톤의 NASC는 거리 0.5 nmi로 적분하고 수심 0~50 m로 구하였다. 수집한 음향 데이터에서 뚜렷한 경향이 나타난 수심이 0~50 m이고 정점 1번~5번 간에 출현한 동물플랑크

톤과 수심 150~250 m이고 정점 10번~11번에서 출현한 어류의 SV plot을 표본으로 추출하여 상관성을 파악하고자 한다.

### 결과 및 고찰

#### 해양생물의 계절별 에코그램

에코그램의 가로축은 조사진행 방향으로 정점이고 세로축은 수심으로 간격 50 m씩 표기하였으며, SV의 범위는 -100~20 dB이다. 조사해역의 수심은 정점 1번~7번인 연안이 0~70 m이며 연안으로부터 왕돌초 상부 후포퇴까지

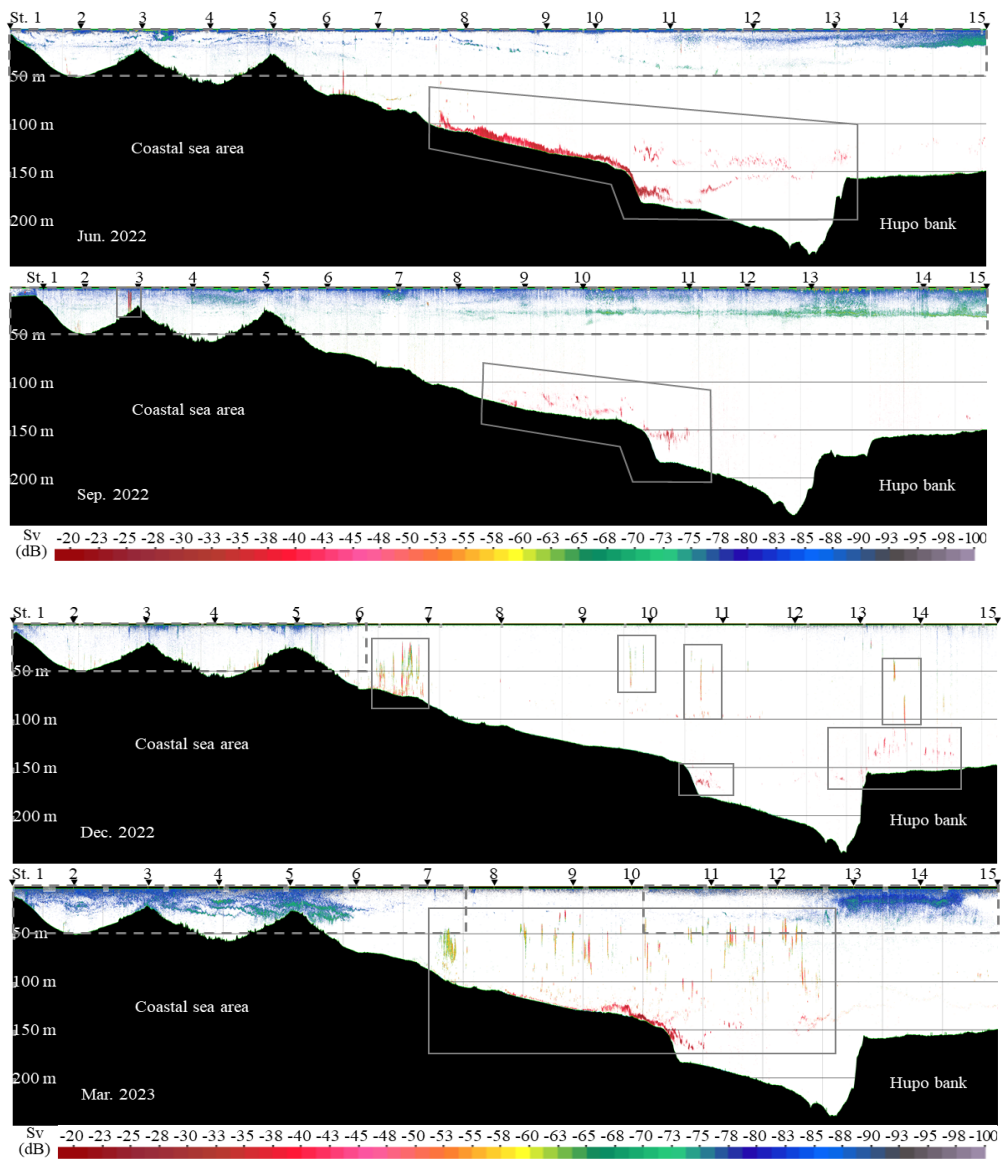


Fig. 3. Echogram of acoustic surveys conducted in June, September, December 2022, and March 2023 (Dotted lines: zooplankton, solid lines: fish school).

해역인 정점 10번~15번은 0~250 m로 수심이 깊어진다.

해저는 조사해역의 연안부터 왕돌초의 상부 후포퇴까지 탐지되었다. 하계(6월)의 경우 동물플랑크톤은 주로 수심 0~50 m인 표층에서 낮은 음향산란으로 나타났다. 어류는 정점 7번에서 11번까지 경사면의 해저에서 높은 음향산란을 갖는 저층 어군이 나타났고 출현 수심층은 40~190 m이며, 정점 11번부터 13번까지는 수심 110~180 m로 중·저층에서 출현하였다. 추계(9월)의 경우 하계(6월)과 유사하게 조사정선의 전표층인 수심 0~50 m에서 낮은 음향산란이 관찰되었고, 어류는 정점 3번에서 중·저층 어군, 정점 8번에서 11번까지 경사면의 해저에서 저층 어군이 출현하였다. 동계(12월)의 경우 하계(6월)과 추계(9월)에 비해 동물플랑크톤의 출현이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 동물플랑크톤의 음향산란은 연안 해역에서 관찰되었으며, 어류는 정점 6번과 7번 사이, 10번, 11번, 13번과 14번 사이 중·저층 어군이 간간하게 나타났다. 춘계(3월)의 경우 하·추·동계와 유사한 표층에서 동물플랑크톤의 음향산란이 관찰되었고, 어류는 정점 7번에서 13번까지 수심 25~120 m에서 간간하게 중·저층 어군과 정점 10번 경사면의 해저에서 저층어군이 출현하였다.

울진 후포해역에 분포하는 어종은 춘·하·추·동계에 출가시횃대, 고무꺼정어, 물미거지, 벌레문치가 출현하였고, 춘계에 청어, 대구, 하계에 대구, 미거지, 칠성갈치, 추계에 멸치, 대구횃대, 미거지, 칠성갈치, 도루묵, 동계에 청어, 노랑볼락, 물메기가 출현하여 보고된 바가 있다(Choi et al., 2012). 또한, 조사해역 내 동물플랑크톤은 춘·하·추·동계에 요각류, 척새류가 출현하였고, 춘계에 난바다곤쟁이류, 하계에 모악류, 단각류, 지각류, 동계에 모악류, 단각류, 해파리류가 표층에서 관측된 결과

가 있다(NIFS, 2022).

### 동물플랑크톤과 어류의 계절별 SV 출현빈도

조사해역에서 수집한 에코그램 자료로부터 출현한 동물플랑크톤과 어류의 체적산란강도 SV를 파악하였다(Fig. 3). 일반적으로 어류는 동물플랑크톤, 해파리 등에 비해 상대적으로 TS가 높고, 밀집되어 있는 경우 체적산란강도 SV도 높게 나타난다.

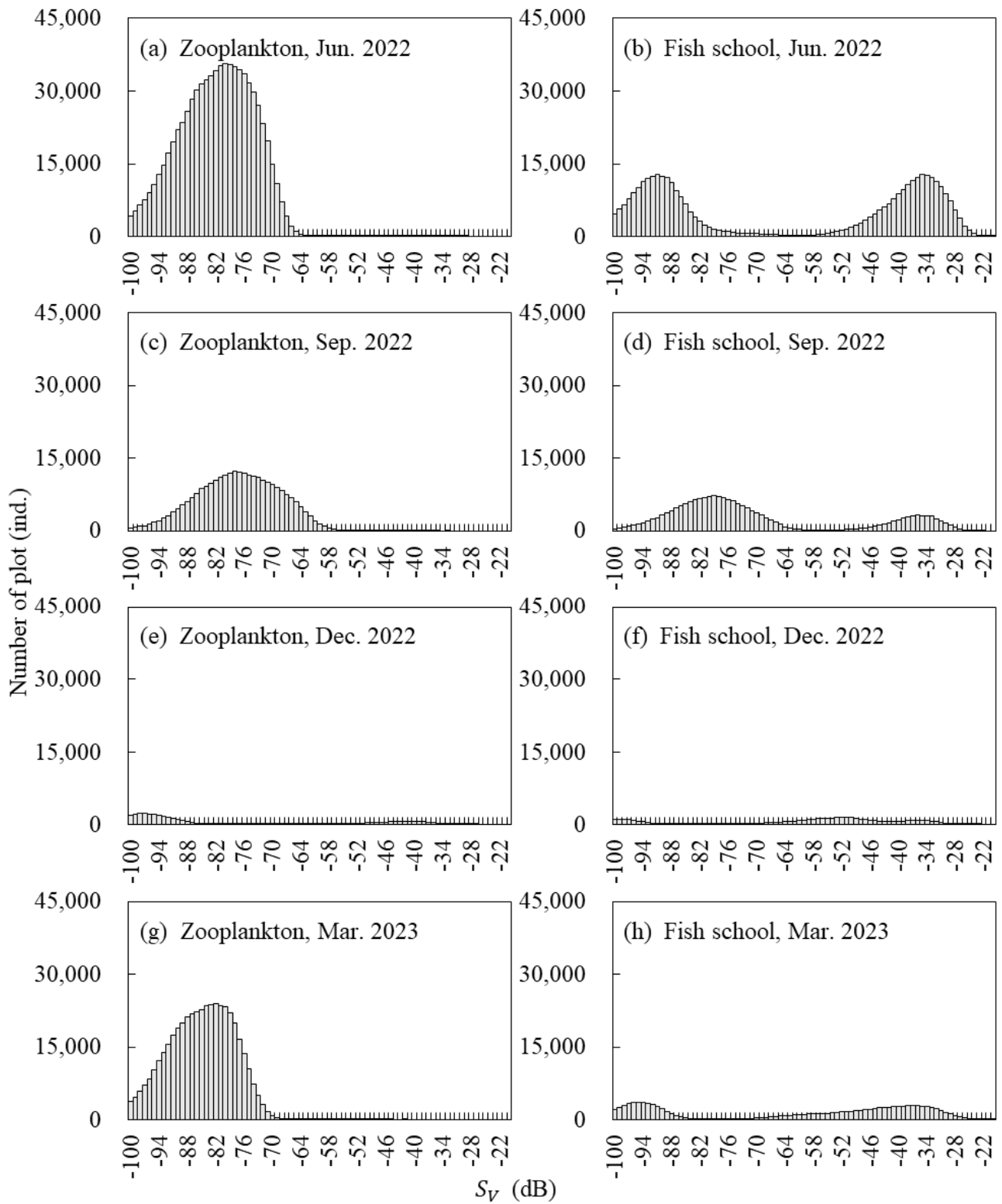
여기서는 조사해역에서 출현한 생물인 어류와 동물플랑크톤의 SV를 빈도분포로 음향 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 4의 (a)를 보면 하계(6월)에는 동물플랑크톤은 SV가 -80.0 dB를 중심으로 분포하였고, Fig. 4의 (b)에서 하계(6월)에 어류는 SV가 -91.0 dB, -35.0 dB를 중심으로 2개의 분포를 나타내었다. Fig. 4의 (c)는 추계(9월)에 출현한 동물플랑크톤의 SV로 -78.0 dB를 중심으로 1개의 계급군이 분포하였고, Fig. 4의 (d)는 추계(9월)에 출현한 어류의 SV로 -79.0 dB와 -36.0 dB가 중심인 2개의 계급군으로 분포하였다. Fig. 4의 (e)는 하계(12월)에 출현한 동물플랑크톤의 SV로 -97.0 dB가 중심인 1개의 계급군이 분포하였고, Fig. 4의 (f)에서는 하계(12월)에 출현한 어류의 SV로 -53.0 dB와 -98.0 dB가 중심인 2개의 계급군이 나타났다. Fig. 4의 (g)는 춘계(3월)에 출현한 동물플랑크톤의 SV로 -82.0 dB이 중심인 1개의 계급군이 분포하였고, Fig. 4의 (h)는 춘계(3월)에 출현한 어류의 SV로 -94.0 dB와 -36.0 dB이 중심인 2개의 계급군이 나타났다.

월별 동물플랑크톤과 어류의 SV 출현 빈도량을 기술 통계를 실시하였다(Table 2). 동물플랑크톤의 월별 표준편차는 하계(6월)에 8.0이고 추계(9월)에 8.6, 동계(12

Table 2. Descriptive statistics of zooplankton and fish school that appeared in June, September, December 2022, and March 2023

Month& Year	Classification of echo	N	Min. (dB)	Max. (dB)	Mean (dB)	Mode (dB)	$\sigma(X)$	$V(X)$	S(X)	K(X)
Jun. 2022	Zooplankton	751,565	-100.0	-29.5	-81.9	-80.0	8.0	64.4	0.4	2.0
	Fish school	370,578	-100.0	-21.0	-62.5	-91.0, -35.0	27.0	729.6	-0.1	-1.8
Sep. 2022	Zooplankton	277,640	-100.0	-33.3	-77.6	-78.0	8.6	74.6	0.0	-0.1
	Fish school	189,872	-100.0	-22.8	-70.4	-79.0	19.4	377.2	0.9	-0.5
Dec. 2022	Zooplankton	38,751	-100.0	-27.8	-76.0	-97.0	23.6	556.8	0.6	-1.4
	Fish school	46,519	-100.0	-23.4	-57.5	-53.0	19.2	370.5	-0.9	0.0
Mar. 2023	Zooplankton	443,761	-100.0	-43.0	-85.3	-82.0	6.6	43.4	0.0	-0.3
	Fish school	115,365	-100.0	-21.0	-61.4	-94.0	24.5	602.7	-0.4	-1.5

§  $V(X)$ : Variance,  $\sigma(X)$ : Standard deviation, S(X): Skewness, K(X): Kurtosis.



**Fig. 4.** SV frequency of zooplankton and fish school that appeared in June, September, December 2022, and March 2023 (a, c, e, g: depth 0 m to 50 m of st. 1~st. 5, b, d, f, h: depth 150 m to 250 m on slope of st. 10~st. 11).

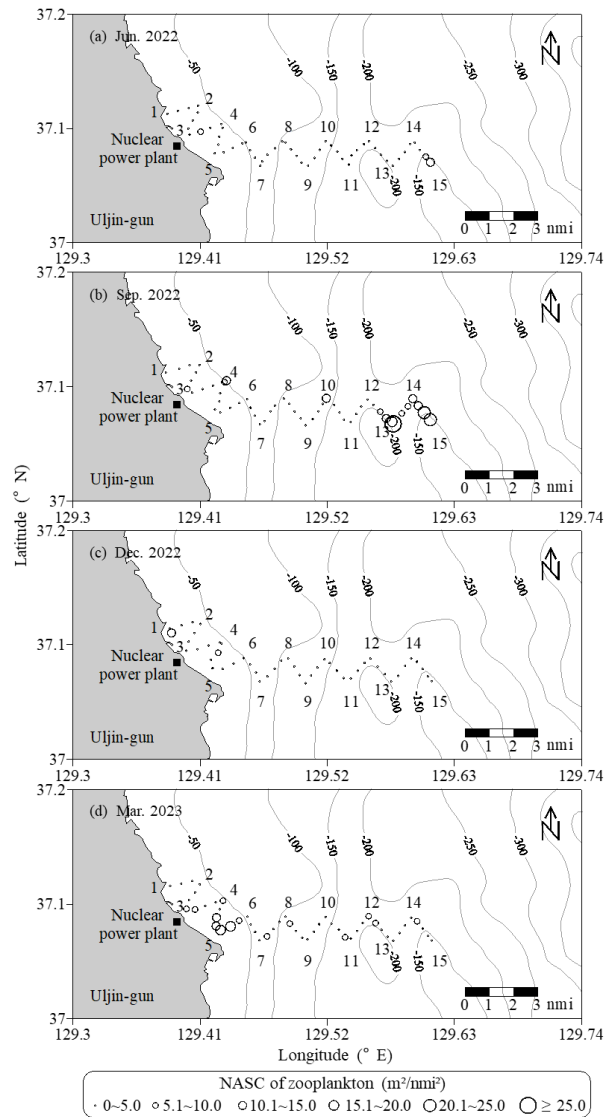
월에 23.6, 춘계(3월)에 6.6으로 하계와 추계, 춘계는 동계에 비해 낮은 표준편차로 1개의 계급군이 분포하며 이는 단일어종에 대한 출현으로 보인다(a, c, g in Fig. 4). 어군의 월별 표준편차는 하계(6월)에 27.0, 추계(9월)에 19.4, 동계(12월)에 19.2, 춘계(3월)에 24.5로 나타났고 이는 2개 이상의 계급군이 분포하고 있으며 2개 이상의 어종이 출현하는 것으로 보인다(b, d, f, h in Fig. 4). 또한, 본 조사해역은 하계(6월), 추계(9월), 춘계(3월)에 수심 0~50 m에서 동물플랑크톤이 출현하였으며, 겨울에는 출현량이 적었다

**동물플랑크톤의 계절별 지리적 수평 분포**

일반적으로 동물플랑크톤은 TS가 낮으며, 군을 이루는 특성을 가지고 있지만 상대적으로 어류 등에 비해 SV가 낮고, 넓게 분포하는 특성을 가진다. 조사해역에서 이러한 특성을 지닌 음향산란층을 대상으로 면적음향산란계수(NASC)를 이용하여 동물플랑크톤을 대상으로 지리적 수평 분포를 나타내었다(Fig. 5). 하계(6월)는 전체적으로 0~5.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>의 밀도가 분포하고, 정점 3번에서 5.1~10.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 정점 14~15번 사이에 5.1~15.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>로 연안 해역과 외해역 왕돌초의 상부 후포퇴 부근에서 밀도가 높았다. 추계(9월)도 주로 0~5.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>의 밀도가 분포하였으나 정점 3번, 4번, 12~14번에서 5.1~10.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 정점 4번, 10번에서 10.1~15.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 점 14~15번에서 10.1~15.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>와 20.1~25.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 정점 13번에서 10.1~15.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>와 15.1~20.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 25.1 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup> 이상으로 외해역 왕돌초의 상부 후포퇴 부근에서 고밀도가 나타났다. 동계(12월)에는 전체적으로 0~5.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>의 밀도가 고루 분포하나, 정점 4번~5번에서 5.1~10.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 정점 1번에서 10.1~15.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>가 나타나 연안 해역에서 밀도가 높았다. 춘계(3월)도 주로 0~5.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>의 밀도가 분포하였으나 정점 3번~4번, 8번~14번에서 5.1~10.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>, 정점 5번에서 10.1~20.0 m<sup>2</sup>·nmi<sup>-2</sup>으로 연안 해역에 고밀도가 나타났다.

**결론**

원전 주변 표층해역에 출현하는 해양생물의 음향모니터링을 위해 과학어군탐지기를 이용하여 동물플랑크톤과 어류의 계절별 출현분포 조사를 수행하였다.



**Fig. 5. NASC distribution of zooplankton detected at a depth of 0 m to 50 m in June, September, December 2022, and March 2023.**

동물플랑크톤은 연안부터 왕돌초의 상부 후포퇴까지 수심 0~50 m에 출현하였고 어류는 조사해역의 경사면과 깊은 골 사이 중·저층 어군으로 출현하였다. 조사해역에서 출현한 동물플랑크톤의 SV는 -98.0~78.0 dB이었고, SV의 출현빈도분포에서 1개의 계급군으로 분포하였다.

조사해역에서 출현한 어류의 SV는 -36.0~-35.0 dB와 -98.0~-53.0 dB이었고, SV의 출현빈도분포에서 2개의 계급군으로 분포하였다. 하계와 추계, 춘계 동물플랑

크톤의 SV 분포를 보면(a, c, g in Fig. 4), 동물플랑크톤은 낮은 음향산란강도가 출현한 것을 알 수 있었는데 이는 동물플랑크톤이 어류에 비해 상대적으로 개체가 작고 밀집하여 분포하며 생체조직이 젤라틴질로 구성된 생태학적 특성이 있어 SV가 낮은 범위 내에서 탐지되고 출현빈도량이 높은 것으로 보인다. 반면 어류는 부레나 뼈에서 반사하는 산란이 동물플랑크톤에 비해 상대적으로 높은 음향산란강도로 나타난다. 그리고 어류 서식층에서도 낮은 음향산란강도가 나타났는데 이는 차·자어와 같은 소형유형생물이나 여러 어종이 혼합하여 밀집한 것으로 추정한다. 그리고 동계에 탐지한 SV 출현빈도량이 춘·하·추계에 비해 낮는데 이는 낮은 수온의 영향으로 보인다.

수심 0~50 m에 출현한 동물플랑크톤의 NASC를 보면 하계와 추계에는 외해역 왕돌초의 상부 후포퇴 부근에서 높은 NASC를 나타냈고 춘계에는 연안 해역에 높은 NASC가 분포하였다. 이는 연중 수온이 높아지는 4~8월에 쿠로시오 해류의 순환으로 춘·하·추계에 동물플랑크톤의 밀도가 높은 것으로 보인다. 그리고 선행 연구인 2003년 울진 연안 해역 음향산란층에서 동물플랑크톤의 음향신호는 동·춘계(3월)에 외해에서 출현하였고 춘·하계(6월)에는 연안에서 출현하여 계절별 수온 특성에 의하여 연안 해역으로 해양생물이 접근하였다(Hwang et al., 2005). 그리고 원전 내 냉각 시스템의 취·배수구로 순환하는 해수는 열을 냉각하므로, 배수되는 해수는 상대적으로 수온이 높다. 동물플랑크톤의 경우 고수온에서 분포하므로 취·배수구 주변 해역의 지속적인 관찰이 필요하다고 생각한다.

본 연구에서는 동물플랑크톤이 작은 개체로 밀집하여 분포하는 생태학적 특성을 고려하여 현장 측정된 단위 체적산란강도(SV)의 출현빈도로 음향산란 분포를 파악하고 수온에 의한 계절적 출현 특성을 알 수 있었으며, 향후 원자로 냉각시스템의 취·배수구로 접근하는 해양생물을 실시간 음향모니터링으로 탐지하여 대응할 수 있도록 기초자료로 제공한다.

## 사 사

“본 연구는 한국수력원자력(주) “원자력발전소 주변 해양생물 실시간 모니터링 및 경보 시스템 구축 사업”의 지원을 받아 수행되었습니다.”

## References

- Choi KH, Han MH, Kang CK, Park JM, Choi JH, Park JH, Sohn MH, Baeck GW, Choy EJ and Lee CI. 2012. Seasonal variations in species composition of fish assemblage collected by trammel net in coastal waters of the East Sea. *J Korean Soc Fish Technol*, 48, 415-427. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.4.415>.
- Demer DA, Berger L, Bernasconi M, Bethke E, Boswell K, Chu D, Domokos R, Dunford A, Fässler S, Gauthier S, Hufnagle LT, Jech JM, Bouffant N, Lebourges-Dhaussy A, Lurton X, Macaulay GJ, Perrot Y, Ryan T, Parker-Stetter S, Stienessen S, Weber T and Williamson N. 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Cooperative Research Report 326, 75-76. <https://doi.org/10.25607/OBP-185>.
- Han IS, Oh WS, Yoon EA, Suh YS, Lee KH and Shin HH. 2017. The relationship between fish and zooplankton in south-western region of the East Sea using hydroacoustics. *J Korean Soc Fish Technol* 53, 376-385. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2017.53.4.376>.
- Hwang DJ, Shin HH and Kang DH. 2002. Studies on fish distribution characteristics using a scientific echo sounder in the yellow sea. *Bull Korean Soc Fish Technol*, 38, 140-148.
- Hwang DJ, Kim DE, Jeong SB, Chae JH and Cho KR. 2005. Distribution of the deep scattering layer around uljin coastal area. *J Kor Soc* 38, 205-213.
- Hwang BK, Lee YW, Jo HS, Oh JK, Kang MH. 2015. Visual census and hydro-acoustic survey of demersal fish aggregations in Ulju small scale marine ranching area (MRA), Korea. *J Kor Soc Fish Technol* 51, 16-25. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.1.016>.
- IAEA. 2022. Nuclear power reactors in the world. Reference data series No. 2, 39-40.
- IAEA. 2023. Country nuclear power profiles. Non-serial publications, 1-1.
- Kim PK, Han IW, Oh WS, Choi YM, Yoon SH, Lee HB and Lee KH. 2018. Biomass estimate of euphausiids euphausia sp. using the two-frequency difference method. *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 305-312. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0305>.
- Lee JB, Oh TY, Yeon IJ, Kim BY, Shin HO, Hwang BK, Lee KH and Lee YW. 2012. Estimation of demersal fish



- biomass using hydroacoustic and catch data in the marine ranching area (MRA) of Jeju. *J Korean Soc Fish Technol* 48, 128-36. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.2.128>.
- Lee KH. 2018. Impact analysis on marine environment characteristics and plant hot waste water discharge system in Uljin coastal area. Master Thesis, Pukyong National University, Korea, 1-2.
- MacLennan DN, Fernandes PG and Dalen J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. *ICES Journal of Marine Science* 59, 365-369. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1158>.
- NIFS. 2022. NIFS Serial Oceanographic Observation, Korea oceanographic data center. Accessed 25 Jan 2024.
- OPIS. 2023. Status of accidents and failures in nuclear power plants. Nuclear event evaluation database. Accessed 1 June 2023.
- Park GC, Han IS, Oh WS, Oh SY and Lee KH. 2022. Analysis on the estimating of fishery resources using hydro-acoustics. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 58, 223-229. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2022.58.3.223>.
- Park JS, Hwang KS, Park JS and Kang MH. 2018. Study on the spatial distribution and aggregation characteristics of fisheries resources in the East Sea, West Sea and South Sea of the South Korea in spring and autumn using a hydroacoustic method. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 54, 146-156. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2018.54.2.146>.
- Seo YI, Oh TY, Cha HK, Lee KH, Yoon EA, Hwang BK, Lee YW and Kim BY. 2016. Hydroacoustic survey on distribution and density of fisheries resources in the Marado coastal area of Jeju, Korea. *J Korean Soc Fish Technol* 52, 209-219. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.3.209>.
- Simmonds EJ. and MacLennan DN. 2005. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*, Second Edition. Blackwell Publishing, Oxford, 118-119, 262-266.
- Wiebe PH, Chu D, Kaartvedt S, Hundt A, Melle W, Ona E, and Batta-Lona P. 2010. The acoustic properties of *Salpa thompsoni*. *ICES Journal of Marine Science* 67, 583-593. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp263>.
- Yoon EA, Hwang DJ, Kim HS, Lee SJ and Lee KS. 2014. Acoustic observation of the behavior of fish in an artificial reef. *J Kor Soc Fish Tech* 50, 124-130. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2014.50.2.124>.
- Yoon EA, Hwana DJ and Shin HH. 2015. In situ behavioral and acoustic characteristics of the large jellyfish *Nemopliema nomurai* by target tracking. *J Kor Soc Fish Technol* 51, 272-278. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.2.272>.