

# 고주파 다주파 음향시스템을 이용한 동물성 플랑크톤의 크기별 생물량 추정

황 보 규  
부경대학교 산업개발연구소

## Zooplankton Biomass and Size Estimation Using a Multi-frequency Acoustic System

Bo-kyu HWANG  
RCOID, Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University,  
Busan 608-737, Korea

High- and multi-frequency acoustic systems can measure a zooplankton patch successively and estimate the spatial distribution and abundance of zooplankton according to size using a multi-frequency inversion (MFI) method. This study measured zooplankton distribution to a depth of 150m using a multi-frequency acoustic system (TAPS-6), installed on a CTD system with a fluorometer and analyzed it using the MFI method. Simultaneously, zooplankton samples were collected by north pacific standard (NORPAC) net to confirm the species composition. The results showed that the combined method is valuable for estimating the zooplankton profile in detail and investigating the relationship between the zooplankton and phytoplankton profiles.

Key words: Multi-frequency acoustic system, Multi-frequency inversion method, Zooplankton acoustics

### 서 론

식물플랑크톤은 대기이산화탄소의 90% 이상을 흡수하는 환경 조절자이며, 동물성 플랑크톤은 어류 등의 수중생물의 먹이로서 그 분포나 생물량의 변화는 자원변동이나 어장의 이동과 관련한 중요한 정보가 된다. 최근, 해양환경의 보존과 수산자원의 관리에 대한 필요성과 관심이 높아져, 플랑크톤의 현존량을 계측하기 위해 다양한 방법과 기술들이 응용되고 있다 (Thomas and Kirsch, 2000).

초기의 어군탐지기와 같은 수중음향시스템은 매우 단순한 구조로 어군의 수심이나 존재에 대한 정보밖에 제공할 수 없었다. 그러나 19세기 후반, 음향계측 시스템과 음향이론의 급속한 발전으로 어류의 분포밀도까지 구할 수 있게 되어, 수산생물의 자원량 조사에서는 빼놓을 수 없는 수단이 되었다. 또한, 최근에는 남극 크릴자원의 정기적인 조사뿐만 아니라 연안의 소형 동물성 플랑크톤의 생물량 조사를 위해서도 적극적으로 이용되고 있으며, 기존의 계량어군탐지기를 이용하거나 음향도플러 유속계 (Acoustic doppler current profiler, ADCP)를 응용한 연구 뿐만 아니라, 동물성 플랑크톤 계측을 위해 설계된 전용 고주파 시스템 등이 사용되고 있다.

동물 플랑크톤 음향 계측법에는 두 가지 큰 특징이 있는데, 먼저 첫번째는 음향반사강도 (Target strength, 이하 TS)를 수중생물의 음향산란 이론모델을 이용하여 추정하는 것이다. 이것은 대상으로 하는 생물의 크기가 너무 작기 때문에 음향산란

특성을 실측하는 것이 매우 어려울 뿐만 아니라 측정을 위해 생물을 제어하는 것 역시 거의 불가능하기 때문이다. 그리고 두 번째로는 음향 시스템의 고주파화와 다주파화를 들 수 있다. 일반적으로 소형의 동물성 플랑크톤을 계측하기 위해서는 사용주파수의 파장 ( $\lambda$ )과 대상생물의 체장 ( $L$ )이  $L = \lambda$ 로 표현되는 한계주파수보다 높은 주파수를 사용해야 하기 때문에, 체장이 수 mm의 동물성 플랑크톤을 계측하기 위해서는 MHz 대역의 고주파수가 사용되어야 한다. 또한, 동물성 플랑크톤의 분포는 생물종, 형태나 체장 분포 등이 매우 다양하기 때문에, 보다 정확하게 생물량을 추정하기 위해서는 광대역에 대한 음향산란의 주파수 특성을 이용하기 위해 복수 주파수를 사용하는 것이 특징이다.

1960년대 후반, McNaught (1968)에 의해 다주파가 도입되어 획기적인 전환기를 맞이하였다. 다주파 계측으로 동물성 플랑크톤의 생물량을 추정하는 다주파 인버스 (Multi-frequency inversion, 이하 MFI)법은 동물성 플랑크톤의 음향산란의 주파수 특성을 이용하여 동물성 플랑크톤의 크기별 생물량 분포를 구하는 방법으로, Holliday (1977)에 의해 본격적인 추정방법으로서 발전되어 왔다. 이 MFI법은 현재 동물성 플랑크톤 음향계측에 있어서 가장 발전된 기술로서 (Greenlaw and Johnson, 1983; Kristensen and Dalen, 1986; Holliday and Pieper, 1989), 아직 국내에서는 시스템의 도입 및 활용이 이루어지고 있지 않지만, 동물성 플랑크톤의 생태학적 연구 등에 유용한 정보를 제공할 수 있는 기술로서 기대된다.

본 연구에서는 다주파 동물성 플랑크톤 계측 시스템

\*Corresponding author: bokyuhwang@naver.com

(TAPS-6: BAE Systems, Sandiego, CA)을 CTD장치에 설치하여 동물성 플랑크톤의 음향산란의 연직분포를 측정하고, 이와 동시에 북태평양 표준 플랑크톤 (이하 NORPAC)네트를 이용해 동일 수심에 대해 채집하여 얻은 생물학적 정보를 얻어, MFI법에 의한 동물성 플랑크톤의 체장별 생물량 계측을 실시하고 이를 검토하였다.

### 재료 및 방법

#### 다주파 플랑크톤 음향계측 시스템

본 연구에서 사용한 다주파 플랑크톤 음향계측 시스템 TAPS-6 및 사양을 Fig. 1과 Table 1에 나타낸다. 이 시스템은 21개의 주파수를 가진 MAPS (Pieper et al., 1990)로부터 발전

된 모델로서 (Pieper et al., 2001; Holliday et al., 2003), 주파수는 265 kHz에서 3 MHz까지의 6개의 주파수로 구성되어 있으며, 원통형 구조에 집중적으로 배열되어 있다. 계측 가능한 동물성 플랑크톤의 크기는 등가구반경 (Equivalent sphere radius, 이하 ESR)으로 환산하면 약 0.05 mm에서 4 mm 정도가 된다 (Roman et al., 2001).

TAPS-6의 계측모드는 크게 Cast mode와 Sounder mode의 2가지로 나눌 수 있다. Cast mode는 CTD장치와 같은 현수장치에 설치하여 관측지점에서의 동물성 플랑크톤 분포의 수직 Profile을 연속적으로 측정할 수 있다. 또한 CTD장치에 설치된 다양한 계측장치와 동시에 측정함으로써, 해양환경 변동과 동물성 플랑크톤의 수직분포와의 관계를 규명하는데 사용

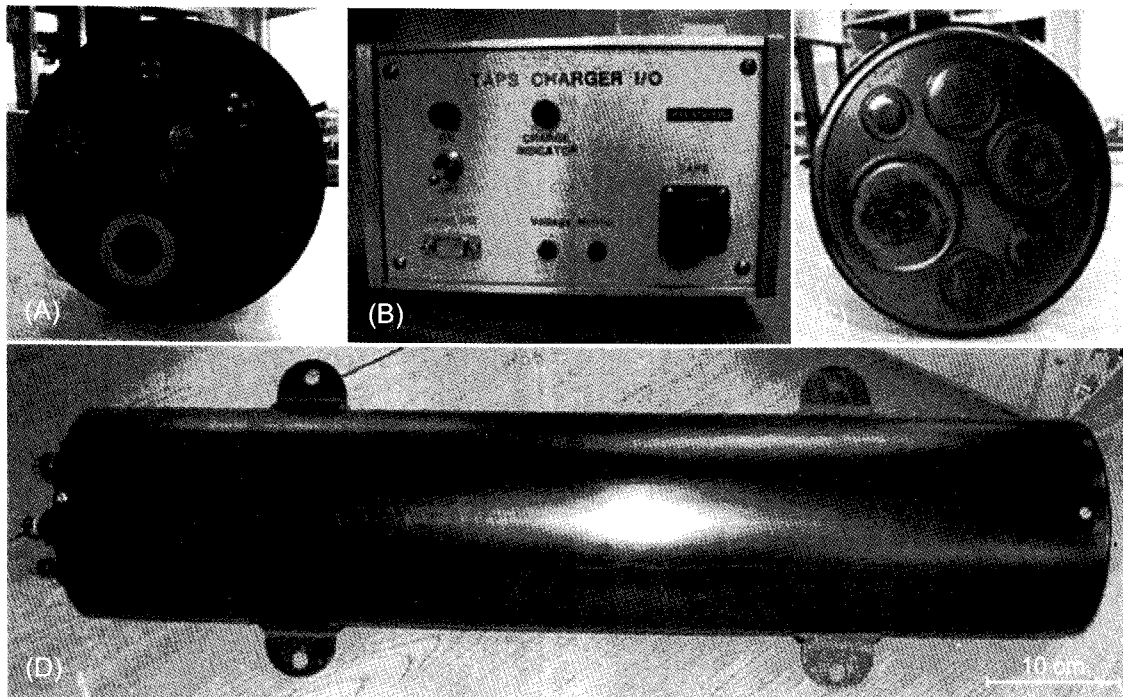


Fig. 1. Multi-frequency acoustic measurement system (TAPS-6, Tracor acoustic profiling systems). (A) is the rear face where depth sensor, temperature sensor, and several port are arrayed, (B) is the charger and I/O box, (C) is front face where six transducers are arrayed, and (D) is side view of TAPS-6.

Table 1. Specifications of multi-frequency acoustic measurement system (TAPS-6) to measure zooplankton abundance

Frequencies	265, 420, 700, 1,100, 1,850, 3,000 kHz
Beam width	5.7, 5.8, 6.1, 4.5, 4.6, 4.2°
Pulse width	336 $\mu$ s
Internal memory	2 Mbytes (30,000 samples)
Internal battery	NiCad (life about 8 hr)
Case size and weight	150 mm dia.×700 mm long, 16 kg
Survey modes	Cast or Instrument mode(observe ca.1.5 m, 2 L) Sounder mode (max. 35.4 m, min. transmitting interval 60 sec)
Calibration mode (optional)	Transmitting interval (0.5 sec), Sampling rate (98 $\mu$ sec)
Sensors	Depth, Temperature, 2 external sensors
Analysis	Matlab program

할 수 있다. 계측은 송수파기로부터 약 1.5 mm가 떨어진 위치의 약 2 liter의 체적으로부터 체적산란강도 (Volume back scattering strength, 이하 SV)를 측정한다.

Sounder mode는 일반어군탐지기와 유사한 계측모드로서 해저면이나 부이에 고정하여 동물성 플랑크톤의 시간적 변동을 계측할 수 있는데, 송신주기는 최단의 경우가 1분이며, 탐지범위는 35.75 m이다. 그리고, 음향센서 이외에는 수온센서와 압력센서를 가지고 있어 독립적으로 사용할 수 있다.

#### 다주파 인버스 (Multi-frequency inversion, MFI) 법

MFI법은 복수의 주파수를 이용하여 거의 동일한 체적으로부터 SV를 측정하고, 동물성 플랑크톤의 음향산란에 대한 이론모형을 이용하여 반사강도 (Target strength, 이하 TS)를 구해, 동물성 플랑크톤의 크기별 생물량 분포를 구하는 방법이다. 단일주파수를 이용할 경우, SV와 TS, 단위 체적당 밀도( $n$ )의 관계는 다음과 같다.

$$S_v = nT_s \quad (1)$$

여기서,  $S_v$ 는 SV의 선형치이고,  $T_s$ 는 TS의 선형치이다. 그러나, 다주파를 이용할 경우, 식 (1)은 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$S_v(f_i) = \sum_{j=1}^J T_s(f_i, L_j) n(L_j) \quad (i=1,2,3-J) \quad (2)$$

여기서,  $S_v(f_i)$ 는 전체주파수  $I$ 에서  $i$ 번째 주파수 ( $f_i$ )로 측정된 SV,  $n(L_j)$ 는 전체 체급수  $J$ 중의  $j$ 번째 체장급 ( $L_j$ )의 밀도, 그리고,  $T_s(f_i, L_j)$ 는 체장급  $L_j$ 의 주파수  $f_i$ 에 대한 TS이다. 이때,  $n(L_j)$ 를 추정하기 위해서, 다주파 시스템을 이용하여  $S_v(f_i)$ 를 측정하고, 측정되는 동물성 플랑크톤의 TS를 적절한 이론 모델로부터 계산한다. 이 때, 사용주파수의 총수와 추정하고자 하는 체장급의 수가 같을 경우,  $n(L_j)$ 는 단순한 역행렬을 계산하여 구할 수 있다. 그러나, 다주파로 측정된 SV는 계측오차를 가지게 되고, 이론모델로부터 계산한 TS는 실제의 동물성 플랑크톤과 조금의 차이를 가지게 된다. 또한, 사용한 주파수보다 더 많은 체급수로 해석하게 됨으로써 ( $J > I$ ), 이 두 값의 차가 최소가 되도록 최소 제곱법을 이용하여 추정한다. 따라서, 식 (2)의 SV벡터를  $S$ , TS행렬을  $T$ , 분포밀도 벡터를  $D$ 라고 하면

$$(S - TD)^2 = \text{Minimum} \quad (3)$$

가 된다. 위 식을  $e$ 에 대하여 미분하면

$$\frac{\partial}{\partial D} (S - TD)^2 = 0 \quad (4)$$

이고, 이 식을  $e$ 에 대해 정리하면

$$D = (T^T T)^{-1} T^T S \quad (5)$$

가 된다. 그러나, 구하고자 하는  $D$ 의 값은 음의 값이 될 수

없으므로, 정확도를 높이기 위해 비부최소제곱법 (Non-negative least square, 이하 NNLS)을 사용한다. 또한, 과소결정 (Under-determination)의 상황에서 가지게 되는 다수해 중에서 최적해를 구하기 위해서, 주로 Levenberg-Marquardt parameter가 사용된다 (Greenlaw and Johnson, 1983).

#### 수중생물의 음향산란 이론모형을 이용한 동물성 플랑크톤의 TS추정

수산자원추정을 위한 어류의 TS는 다양한 어종에 대한 실험과 이론모형에 의한 연구 (Furusawa, 1988; Clay and Horne, 1994)를 통하여 그 특징의 많은 부분이 규명되었다. 최근, 자원으로 이용하고 있는 동물성 플랑크톤인 크릴 새우의 경우에는 TS패턴까지도 측정할 수 있게 되었다 (Amakasu and Furusawa, 2006). 그러나, 연안해역에서 흔하게 볼 수 있는 요각류와 같은 소형 동물 플랑크톤의 경우, MHz대역의 스프릿트빔 시스템의 개발 (Hwang and Furusawa, 2006)에 의해 자연 상태에서 TS측정 가능성이 높아졌으나, 추가 보완의 연구가 필요한 실정이다. MFI법에 의해, 소형 동물성 플랑크톤의 생물량을 음향계측방법으로 분석할 때, 주요 대상 동물성 플랑크톤의 TS는 생물-물리적 파라미터를 이용하는 음향산란의 이론모형에 의존하므로, 높은 정확도의 추정결과를 얻기 위해서는 동물성 플랑크톤의 이론모형은 대상 플랑크톤의 음향산란특성을 보다 정확하게 추정할 수 있는 모델을 사용해야 한다 (Greenlaw and Johnson, 1988).

연안의 소형 동물성 플랑크톤의 TS추정에는 동물성 플랑크톤의 형태를 구형으로 근사하여 음향산란특성을 추정하는 유체구 모델 (Fluid sphere model) (Anderson, 1950)을 많이 이용하여 왔는데, 이 모델은 비교적 간단하고, Copepod와 같은 구형에 가까운 종에 대해 적합하다. 또한, 최근에는 동물성 플랑크톤의 형태를 엄밀하게 근사시킨 DWBA (Distorted wave born approximation) 모델 (Chu et al., 1993; Stanton et al., 1993, 1998)이 새우류나 Copepod 등의 요각류의 생물량 추정에 이용되고 있다.

본 연구에서는 유체구 모델로부터 발전된 저차수 유체구 모델 (Truncated fluid sphere model) (Holliday and Pieper, 1984)을 이용하였다. 이 모델은 동물성 플랑크톤의 형태가 완전한 원형이 아니므로, 유체구 모델의 고차수의 진동모드는 일어나지 않는 것으로 보고, 진동모드의 차수를 2차까지 고려한 모델이다. 이 모델은 생물체의 형태에 의한 음향산란의 지향특성을 고려하지 않으므로 동물 플랑크톤의 형태를 엄밀히 근사할 필요가 없어 간단히 사용할 수 있다. 한편, 유체구 모델을 이용하여 동물성 플랑크톤의 TS를 추정할 경우에는 동물성 플랑크톤과 매질 (해수) 사이의 밀도비 ( $g$ )와 음속비 ( $h$ )가 필요한데, 본 연구에서는  $g=1.12$ ,  $h=1.09$  (Holliday and Pieper, 1984)를 이용하였다.

다주파 음향계측 및 플랑크톤 네트에 의한 생물 채집 계량어군탐지기를 이용한 어류자원조사는 정선 (Survey

line)에 몇 개의 관측점을 정하여, 계량어군탐지기로 측정된 어군을 트롤어구 등을 이용하여, 대상 어류의 종조성 및 체장 조성 등의 자료를 얻고 있으며, 이를 토대로 보다 넓은 해역에 대한 음향조사를 실시하여 조사해역의 현존량을 산출하게 된다 (Simmonds and MacLennan, 2005). 생물 채집과 음향을 이용한 광역조사를 조합한 어류자원조사는 일반화되어 정기적으로 이루어지고 있으며, 그 유용성도 확인되었다. 음향을 이용한 동물성 플랑크톤의 생물량 조사에서도 봉고 네트나 다층플랑크톤 네트 등을 이용하고 있다.

Costello et al. (1999)은 다주파로 계측한 대상생물이 플랑크톤 펌프에 채집될 수 있도록 제작하여 체장별 생물량을 비교하는 방법으로 MFI법을 검증하였으며, Hwang and Furusawa (2007)는 텅스텐 카바이드의 구를 가지고 동물성 플랑크톤의 근사산란체군을 제작하여 MFI법을 검토하고, 그 유용성을 확인하였다. 이와 같이, 대상생물을 채집하여 MFI법에 의한 추정결과인 크기별 생물량을 검증하기 위해서는 그 대상이 거의 일치해야 하기 때문에, 플랑크톤 네트로는 어려움이 있다 (Holliday and Pieper, 1995). 따라서, 해역의 종 분포 만을 확인하는 것이라면, 연안의 플랑크톤 조사에 널리 사용되는 네트와 동시에 계측하거나, 비교적 단순한 플랑크톤 네트를 이용하여 음향계측의 대상에 대한 생물학적 정보를 얻는 것이 유용할 것이다.

앞에서 소개한 바와 같이, 본 연구에 사용한 다주파 시스템은 초고주파수의 제한된 탐지거리로 인하여, CTD장치 등에 설치하여 투하계측을 실시하고 조사 정점에 대한 고분해능의 동물성 플랑크톤의 수심별 분포를 얻어낸다. 측정방식의 관점에서 본다면, 북태평양 표준 플랑크톤 (NORPAC) 네트는 수직으로 투하하여 인망하면서 채집을 하는 네트로써, 수주 전체에 대한 생물종과 생물량을 파악할 수 있기 때문에, 동일한 샘플링 형태를 가진다고 할 수 있다. 또한, 연안의 플랑크톤 조사에 가장 널리 보급되어 있는 네트로, 그 운용 역시 매우

간단하다. 따라서, 본 연구에서는 다주파 시스템을 설치한 CTD장치와 NORPAC네트의 동일한 수심까지 조사를 실시하고 분석하였다.

Fig. 2는 현장실험의 위치를 나타낸다. 다주파 시스템과 NORPAC네트에 의한 동시조사는 2004년 8월에 동경해양대학교 실습선 SEIYO호 (G/T 170 ton)를 이용하여 Sagami만에 실시하였다. 다주파 시스템은 CTD장치에 수평으로 설치하고, 수심은 각각 150 m로 실시하였다. 다주파 시스템의 송신주기는 일정하기 때문에, CTD장치의 투하속도가 심도방향의 샘플링 간격을 좌우하게 된다. 따라서, 투하속도를 15 cm/s-30 cm/s로 느리게 하여 음향계측의 수심에 대한 분해능을 높였다. 그리고, 가능한 한 음향계측과 동일한 대상을 채집하기 위하여 선미에서 CTD장치에 의한 음향계측이 실시되는 동안, 현측에서는 NORPAC네트를 이용한 생물채집을 실시하였다. 음향계측수심은 다주파 시스템 자체의 수심 data와 CTD에 의한 수심 data를 비교하여 상호 보정하였다.

## 결 과

저차수 유체구 모델을 이용하여 추정된 동물성 플랑크톤의 ESR별 TS는 Fig. 3과 같다. ESR이 0.2 mm 이하에서는 대부분이 체장인 ESR과 주파수에 의해서 TS가 급격히 변화하는 레일리 산란영역으로, 주파수 상호간의 TS차가 적기 때문에, 진주파수에 동일하게 영향을 미치는 주변잡음이나 시스템 자체의 잡음에 의해 크게 영향을 받을 것으로 생각된다. 그러나, 0.2 mm 이상에서는 ESR에 대한 주파수특성이 매우 뚜렷하고, 주파수차의 조합이 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. 결국, 동물성 플랑크톤의 크기에 따른 6개 주파수의 다양한 TS 조합이 만들어지고, 이 특성을 이용하여 크기별 생물량을 결정할 수 있다.

다주파 시스템으로 측정된 조사해역의 수심별 SV 분포는

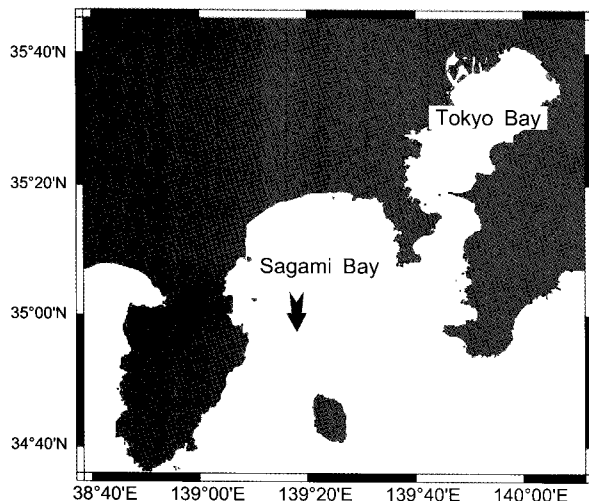


Fig. 2. Field experiment site in Sagami Bay, Japan.

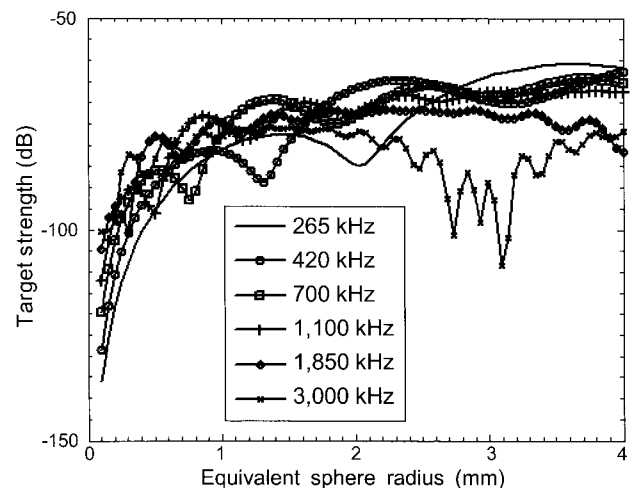


Fig. 3. Target strength for six frequencies on the length range from 0.05 mm to 4 mm estimated by truncated fluid sphere model.

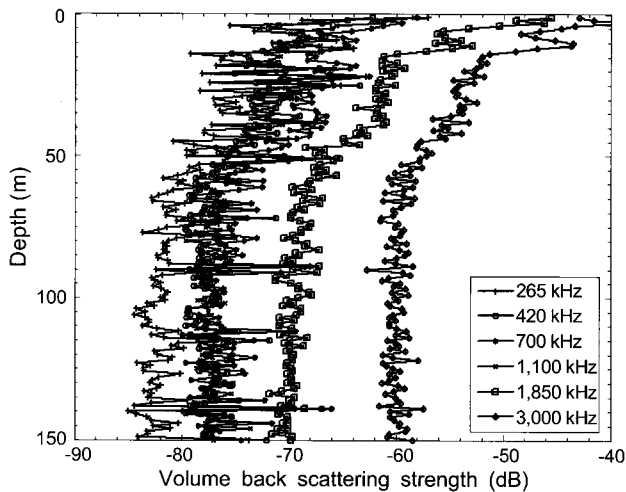


Fig. 4. Volume back scattering strength (SV) profiles for six frequencies of multi-frequency system at Sagami bay in August 2004.

Fig. 4와 같다. SV는 전체적으로 수면 가까이에서 매우 높고 수심 약 20 m까지 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 20 m 이하에서는 수심에 대한 변화가 크지 않았다. 또한, 3 MHz의 경우는 20 m 이하에서 수심별 레벨 변화가 크지 않았던 것에 비하여, 상대적으로 낮은 주파수들에서는 큰 변화를 보였다. 265 kHz나 420 kHz의 경우, 수심 약 20 m, 40 m, 50 m, 그리고 90 m에서는 약 10 dB 정도 급격하게 상승하는 경향을 보였는데, 이것은 그 수심에 얽힌 수층으로 형성되어 있는 동물 플랑크톤에 의한 음향산란의 영향으로 생각된다. 또한, 이들 수심에서 각각의 주파수에 대해 레벨의 변화가 다르게 나타나는 것은 음향산란에 기여한 생물들이 가지는 음향산란의 주파수 특성에 의한 것으로 추정할 수 있으며 (Fig. 3 참조), MFI법에서는 이러한 다주파에 대한 특성을 이용하여 크기별 생물량을 결정하게 된다.

NORPAC네트로 채집하여 구한 동물성 플랑크톤의 종별 구성비는 Fig. 5와 같다. 주요 우점종은 요각류 (Copepods)가 45.9%, 투각류 (Cladocereans)가 30.4%였다. 그리고, 자포동물 (Cnidaria), 유형류 (Larvaceans), 모약동물 (Chaetognaths) 순으로 비율이 높으며, 연체동물 (Mollusca), 크릴류 (Eupausia) 등이 약 1% 정도를 차지하였다.

다주파 시스템으로 측정된 심도별 SV를 이용하여, MFI법으로 추정된 동물성 플랑크톤의 수심 ESR별 생물체적밀도 (Bio-volume)는 Fig. 6과 같다. 왼쪽 그림은 수심별 수온분포, 가운데는 수심별 총생물체적밀도, 오른쪽은 수심별 ESR별 생물체적밀도이다. 수온분포는 수면에서 약 20 m까지 25°C의 표면 혼합층을 형성하고 있으며, 수심이 깊어지면서 수온이 내려가는 형태를 나타내었다.

한편, 총생물체적밀도는 전체적으로 수심이 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 특정 심도에서 급하게 상승하는 형태를 보였는데, 이 심도들은 Fig. 4에 나타난 SV가 급격하게

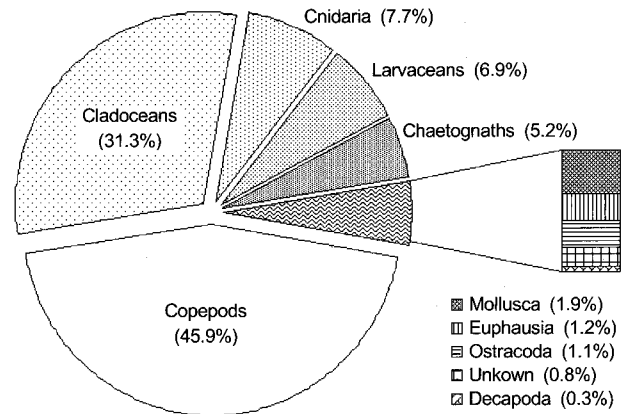


Fig. 5. Composition ratio of species estimated by NORPAC net at Sagami Bay in August 2004.

상승한 심도와 동일한 것을 알 수 있다. 또한, 오른쪽 그림인 ESR별 생물체적밀도를 보면, ESR이 0.5 mm, 1.2 mm, 1.4 mm, 2 mm 정도인 생물이 전 수심에 걸쳐서 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 그 생물량 역시 수심 20 m 이상에서는 집중되고, 수심이 깊어짐에 따라 낮아지는 경향을 보였다.

Fig. 7은 CTD장치의 형광광도계와 다주파 시스템으로 측정된 클로로필과 동물성 플랑크톤의 수심별 분포 나타낸 것이다. 형광광도계의 측정값은 체수교정을 통하여 클로로필a의 양을 추정할 수 있으나, 본 연구에서는 교정을 수행하지 않았다. 그러나, 형광광도계의 값은 식물플랑크톤의 상대적인 대소를 나타내기에는 충분하다고 사료된다. 클로로필은 표면 혼합층이 형성된 약 20 m 이하에서부터 약 50 m까지 두껍고 높은 수층을 형성하고 있는 것을 알 수 있다. 이에 대해, 동물성 플랑크톤의 생물체적밀도는 동일 수층에 대해 다수의 급격한 피크형태를 보이면서 높은 값을 나타내었다. 50 m 수층 이하에서는 생물량의 큰 변화는 없었으나, 몇 개의 피크치를 나타내었다.

## 고찰

수중음향기술은 어류와 같은 수산생물 뿐만 아니라 다른 수중생물의 생물량이나 그 크기를 계측하는 데에 매우 유용한 방법이다. 또한, 다주파를 이용하는 계측방법은 다른 방법들에 비해 심도에 대한 분해능이 높을 뿐만 아니라 대상 생물에 체장 분포의 추정이 가능하다. 따라서, 다양한 형태와 체장을 가진 종이 혼재하여 군집하고 있는 동물성 플랑크톤의 분포에 대한 생물량을 추정하는 데에는 더욱 유용할 것으로 판단된다.

다주파 시스템을 이용하여 동물성 플랑크톤의 체장별 생물량을 추정할 때에는 동물성 플랑크톤의 음향산란을 추정하기 위한 이론 모델이나 파라미터가 추정된 생물량의 정확도에 직접적으로 관계하기 때문에 매우 중요하다. 본 연구에서는 NORPAC네트로 의한 생물체적 결과, 형태가 비교적 구형에 가까운 요각류와 투각류에 의한 분포가 약 75%를 차지하였기

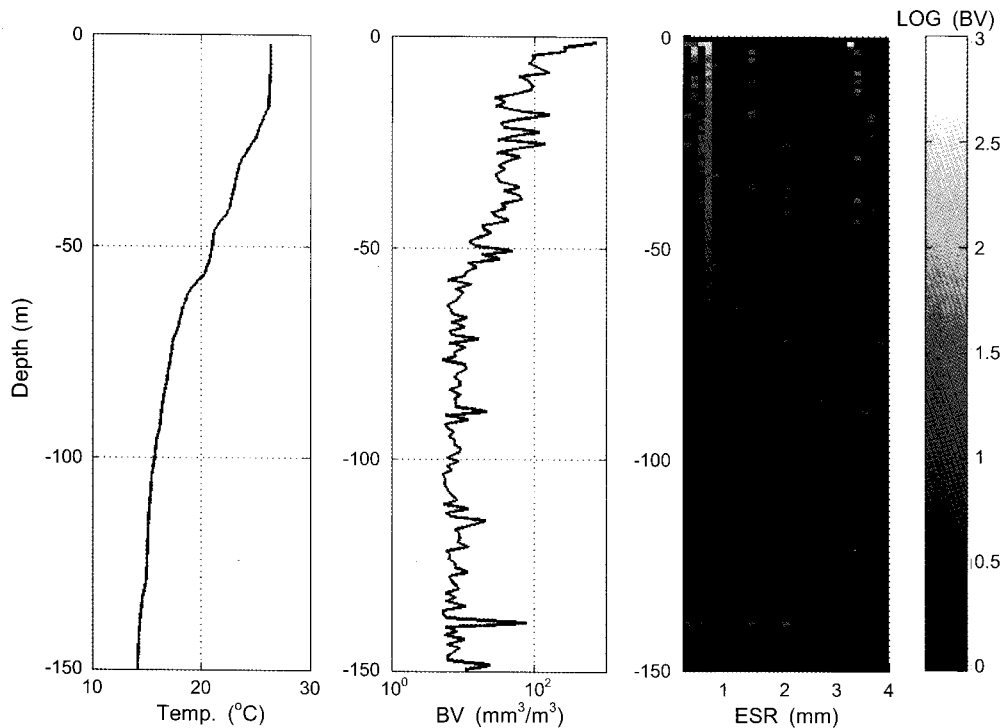


Fig. 6. Bio-volume (BV) profile by equivalent sphere radius (ESR) measured by multi-frequency acoustic system at Sagami bay in August 2004.

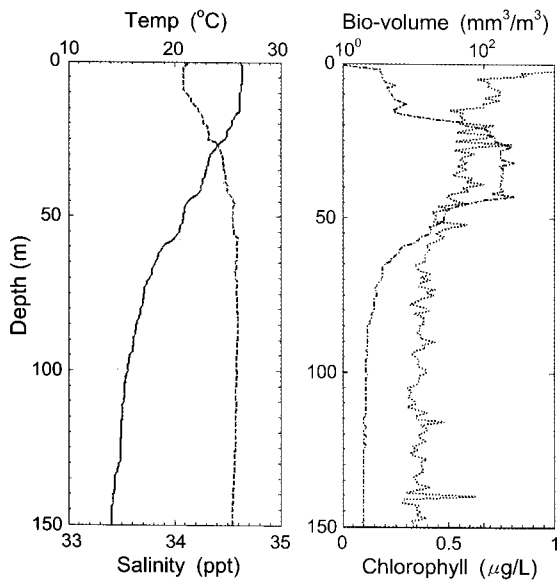


Fig. 7. Water temperature (Temp., solid line), salinity (dash line), and chlorophyll (dash-dotted line) profile measured by CTD and, Bio-volume (dotted line) profile of zooplankton profile measured by multi-frequency acoustic system at Sagami bay in August 2004. The bio-volume shows high values in the layer where the chlorophyll values are high.

때문에 TS를 추정하기 위해 사용된 저차수 유체구 모델에 의한 추정은 적절한 것으로 생각된다. 또한, 사용된 음속비와

밀도비는 요각류 등의 갑각의 탄성에 의한 음향산란을 고려한 값으로 최근에 보고된 다른 연구 결과들에 비해 다소 높으므로, 최근, 동물성 플랑크톤의 음향 파라미터에 대한 연구결과를 활용하여 추정결과를 향상시킬 필요가 있다.

음향시스템을 설치한 CTD장치의 투하시, 해상의 파도나 투하에 의해 발생한 기포, 수면가까이의 수중부유물 등은 음향계측에서 큰 잡음으로 작용한다. 따라서, 수면으로부터 약 3 m까지는 측정이 불가능하므로, 측정 결과에서는 제외되어야 하며, CTD장치에 설치할 때에도 이러한 영향을 고려할 필요가 있다.

음향을 이용하여 동물성 플랑크톤의 생물량을 보다 정확하게 추정하기 위해서는 동물성 플랑크톤의 음향산란모델에 대한 연구뿐만 아니라, 실측을 통한 음향특성의 규명이 필요하며, 또한, 동물성 플랑크톤의 음향계측에 영향을 줄 수 있는 수중의 기포나 다른 부유물들에 의한 영향에 대해서도 다양한 연구도 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 하나의 관측점에 대해 계측을 실시한 단편적인 결과로서, 대상해역의 다수의 관측점을 설정하여, 네트에 의한 채집과 다주파 시스템에 의한 계측을 연속적으로 측정한다면, 조사해역의 동물성 플랑크톤 분포에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 다양한 해양 환경 센서들과 동시에 관측을 수행함으로써, 해양환경 변화에 따른 동물성 플랑크톤의 분포의 상호 관련성 등과 같은 연구에도 유용한

방법으로서 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고 문헌

- Amakasu, K. and M. Furusawa. 2006. The target strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) measured by the split-beam method in a small tank at 70 kHz. ICES J. Mar. Sci., 63, 36-45.
- Anderson, V.C. 1950. Sound scattering from fluid sphere. J. Acoust. Soc. Am., 22, 426-431.
- Chu, D., K.G. Foote and T.K. Stanton. 1993. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. J. Acoust. Soc. Am., 93, 2985-2988.
- Costello, J.H., R.E. Pieper and D.V. Holliday. 1989. Comparison of acoustic and pump sampling techniques for the analysis of zooplankton distributions. J. Plankton Res., 11, 703-709.
- Furusawa, M. 1995. Review on plankton measurements by acoustic methods. J. Mar. Acoust. Soc. Jap., 22, 162-169.
- Greenlaw, C.F. and R.K. Johnson. 1983. Multiple-frequency acoustical estimation. Biol. Oceanogr., 2, 227-252.
- Holliday, D.V. 1977. Extracting bio-physical information: from the acoustic signature of marine organisms, In Oceanic Sound Scattering Prediction. Anderson, N. R. and B.J. Zahuranc, eds. Plenum Publishing Corp., New York, 619-624.
- Holliday, D.V. and R.E. Pieper. 1984. Acoustic measurements of zooplankton distribution in the sea. J. Cons. Int. Explor. Mer., 41, 226-238.
- Holliday, D.V. and R.E. Pieper. 1989. Estimation zooplankton size and distribution with multifrequency acoustic technology. J. Cons. Int. Explor. Mer., 46, 52-61.
- Holliday, D.V., P.L. Donaghay, C.F. Greenlaw, D.E. McGehee, M.M. McManus, J.M. Sullivan and J.L. Miksis. 2003. Advances in defining fine- and micro-scale pattern in marine plankton. Aquat. Living Resour., 16, 131-136.
- Hwang, B.K. and M. Furusawa. 2006. Measurements of target strength by ultra high frequency split-beam echosounder. Nippon Suisan Gakkaishi, 72, 41-49.
- Kristensen, A. and J. Dalen. 1986. Acoustical estimation of size distribution and abundance of zooplankton. J. Acoust. Soc. Am., 80, 601-611.
- McGehee, D.E., R.L. O'Driscoll and L.V. Martin Traykovski. 1998. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. Deep-Sea Res., 45, 1273-1294.
- Pieper, R.E., D.V. Holliday and G.S. Kleppel. 1990. Quantitative zooplankton distribution from multi-frequency acoustics. J. Plankton Res., 12, 433-441.
- Pieper, R.E., D.E. McGehee, C.F. Greenlaw and D.V. Holliday. 2001. Acoustically measured seasonal patterns of zooplankton in the Arabian Sea. Deep-Sea Res., 48, 1325-1343.
- Roman, M.R., D.V. Holliday and L.P. Sanford. 2001. Temporal and spatial patterns of zooplankton in the Chesapeake Bay turbidity maximum. Mar. Ecol. Prog. Ser., 213, 215-227.
- Simmonds, J. and D. MacLennan. 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. 2nd ed. Blackwell Science, Oxford.

2007년 12월 14일 접수

2008년 2월 13일 수리