

수중 초음파를 이용한 적조 플랑크톤의 후방산란 특성

Characteristics of Backscattering of Harmful Algae Using Underwater Ultrasound

김 은 혜*, 복 태 훈*, 나 정 열*, 팽 동 국**
(Eunhye Kim*, Tae-hoon Bok*, Jungyul Na*, Dong-Guk Paeng**)

한양대학교 해양환경과학과*, 제주대학교 해양산업공학**
(접수일자: 2005년 7월 21일; 채택일자: 2005년 8월 23일)

수중 초음파 (5, 10, 15 MHz)를 사용하여 적조 플랑크톤 *Cochlodinium polykrikoides* (식물 플랑크톤, 편모조류)의 후방산란 특성을 파악하기 위한 음향 실험을 실시하였다. 적조 산란체의 적조주의보 (300 cells/ml) 보다 적은 양의 개체 수 변화를 탐지하였고, 개체군 밀도와 후방 산란신호와의 상관관계를 시간영역에서와 주파수 영역에서 확인하였다. 또한, fluid-sphere model[1]을 이용한 이론적인 체적 산란강도를 계산하여 실제 체적 산란강도와 비교한 결과가 잘 일치하였다.

핵심용어: 적조 플랑크톤, 수중 초음파, 개체군 밀도, 체적 산란강도

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

Laboratory measurements were performed in a uni-algae medium *Cochlodinium polykrikoides* (Phytoplankton, dinoflagellates) using an Underwater Ultrasound (5~15 MHz) to study Characteristics of Acoustic Backscattering of Harmful algae.

In an effort to detect the harmful algal scatterers with population density of less than 300 cells/ml that corresponds to the precaution stage of red tide, backscattered signals from various scatterer-density samples were obtained and analyzed. Correlations between volume backscattering strength (Sv) and population density (cells/ml) of scatterers in the medium have been investigated. Comparison of Volume Backscattering Strengths calculated with the fluid-sphere model [1] and the measured values showed an agreement.

Keywords: Harmful algae, Underwater Ultrasound, Population density (cells/ml), Volume scattering strength, Fluid-sphere model

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.2)

I. 서론

적조 (Red tide, Harmful algal blooms)란 해양 내 플랑크톤의 이상증식 및 집적현상으로 우리나라 해역에 매년 출현하여 심각한 피해를 발생시킨다[2-3]. 적조를 일으키는 플랑크톤의 후방산란 특성 파악은 음향을 이용한 적조 산란체 (Harmful algal scatterer)의 개체군 밀도 (population density, cells/ml)를 추정하는 기초적 연구가 된다.

이제까지 해양 내에 존재하는 플랑크톤 음향조사는 주

산란체인 동물 플랑크톤 중심으로 대부분 100~1,000 kHz 주파수 대역을 음원으로 연구되어 왔다. 동물 플랑크톤 연구는 해양 내에 존재하는 주요 종의 주파수에 따른 음향산란 특성 및 플랑크톤 군집의 영향을 고려한 분류학상의 산란 특성 차이를 규명하여 실제 해양에서 음향을 이용하여 종 구분과 개체군 밀도 추정이 시도되고 있으나[4-7] 동물 플랑크톤보다 상대적으로 크기가 작지만 우리나라 해역의 심각한 피해를 야기하는 적조 플랑크톤에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다[8].

특히 적조 산란체의 등가 구형 반경 (equivalent spherical radius)이 약 10~20 μ m 인 것을 고려하면, 적조 플랑크톤의 체적산란 연구를 위한 음원의 주파수는 수 MHz 이상이 되어야 하며, 또한 주파수 5 MHz에서

책임저자: 김 은 혜 (ehkim@ihanyang.ac.kr)
경기도 안산시 상록구 사1동 1271번지 한양대학교
해양환경과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-4154, 팩스: 031-406-6458)

표 1. 적조예보 종류 및 발령기준

Table 1. Standard of HABs Forecast in Korea (NFRDI).

Description	scale	Density (cells/ ml)
Precaution	· 2 to 5 km in radius · Apprehension to Fisheries Loss	Flagellates :
		<i>Chattonella</i> sp. > 50
		<i>Cochlodinium polykrikoides</i> > 300
		<i>Gymnodinium mikimotoi</i> > 1,000
		<i>Gymnodium</i> sp. > 500
		etc. > 30,000
		Diatoms > 50,000
Warning	· Above 5 km in radius · Possibility of Fisheries Damages	Flagellates :
		<i>Chattonella</i> sp. > 100
		<i>Cochlodinium polykrikoides</i> > 1,000
		<i>Gymnodinium mikimotoi</i> > 3,000
		<i>Gymnodium</i> sp. > 2,000
		etc. > 50,000
		Diatoms > 100,000
Cancellation	When the water qualities are recovered to the normal Below the standard of HABs forecast	

약 0.2 mm 크기의 동물 플랑크톤 후방산란강도가 약 -110 dB일 때[7], 같은 주파수에서 적조 플랑크톤의 후방 산란강도 예측 값은 약 -140 dB로 매우 작다. 따라서 적조 플랑크톤의 후방산란 특성 파악을 위해 수중 초음파를 이용한 약산란체 (weak scatterers)의 후방산란 신호 획득장치가 필요하다.

수중 초음파를 이용해 적조 산란체의 개체군 밀도를 추정하는 방법은 체적 산란강도의 양적인 측정에 기초를 두고 있다[4]. 산란체가 음원의 파장보다 매우 작을 때 체적 산란강도는 음원 주파수, 산란체의 크기, 산란체와 해수의 밀도비(g/ml) 및 음속비, 산란체의 개체군 밀도에 관한 함수로 정의된다[1, 4, 8]. 적조 플랑크톤은 약산란체로 체적 산란강도에 영향을 미치는 해수와의 밀도비 및 음속비의 차이의 변동은 매우 작기 때문에[9], 체적 산란강도의 가장 큰 변동 요인은 산란체의 크기 및 주파수, 플랑크톤 개체군 밀도이다. 적조 산란체의 크기 변화는 군체 형성에 의한 것으로 실험에 사용한 적조 플랑크톤은 최대 4개체까지 군체를 이루는 것이 관측되었으나, 대 부분 단독 개체로 존재하고 있는 비율이 크기 때문에 적조 산란체의 평균 구형 반경은 단독 개체의 구형 반경과 같은 것으로 계산되었다. 음향신호로부터 적조 산란체의 개체군 밀도를 추정하기 위한 기초적인 가정으로 산란체가 랜덤분포 된 체적의 총 산란 강도는 각각의 산란체에 의한 산란 강도의 총 합과 같으며 약산란체 (weak scatterers)임을 고려하여 다중 산란의 효과는 무시하였다.

최근에 우리나라 해역에서 일어나는 적조는 주로 단일 종 (*Cochlodinium polykrikoides*)에 의한 것으로 시, 공간적 변동의 다양화, 광역화, 고밀도화, 장기화되기 때문에[2], 적조 발생에 대한 조기 발견과 단기간에 시·공

간적 변동상황을 실시간 모니터링 할 수 있는 방법이 필요하다.

음향을 이용한 적조 플랑크톤의 실시간, 연속 관측방법을 제안하기 위해 수중 초음파를 사용하여 적조 산란체의 음향학적 산란특성을 파악하는 실험을 하였다 조기 경보를 위한 적조주의보 (표 1) 미만의 개체 수 변화를 탐지하며 후방산란 신호와 적조 산란체의 개체군 밀도와 의 상관성을 확인하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1 체적 산란

플랑크톤 개체수의 음향학적인 추정방법은 체적 산란 강도의 양적인 측정에 기초를 두고 있다. 체적 산란강도는 다음과 같이 정의된다[4].

$$S_v = 10 \log \left(\frac{I_s}{I_i} \right) \tag{1}$$

I_s : 산란체가 포함된 단위 체적의 측정 산란강도

I_i : 체적에 입사 된 강도

S_v : 체적 산란 강도 (dB)

S_v 는 소나 방정식에서 수신기로 측정된 전압에 의해 얻어진다[10]. 이 방정식은 트랜스듀서의 음향학적인 특성, 송신기의 지향특성, 확산과 흡수에 의한 전달 손실 등을 고려한 보정이 필요하다.

S_v 와 관련된 측정값으로 체적 후방산란 단면적 σ_v 가

있다. 이것은 단위 체적 당 상대적인 산란강도의 선형적인 값으로 S_v 와 관련된 식은 다음과 같다(식 2).

$$S_v = 10 \log \left(\frac{\sigma_v}{4\pi} \right) \quad (2)$$

σ_v 의 단위는 m^2 이다. 체적 산란의 기초적인 가정은 산란체가 랜덤분포 된 체적의 총 산란 강도의 평균은 개개의 산란체에 의한 산란 강도의 총 합과 같다는 것이다.

개개의 상대적인 산란강도는 산란 단면적 σ 로 표현되며 특정한 단위 체적의 후방산란 단면적은 산란체를 포함하고 있는 개개의 후방산란 단면적의 합의 평균과 같다.

2.2 산란 모델

적조 산란체는 해수와 유사한 임피던스를 갖는 약산란체 (weak scatterers)이며, 크기는 약 길이 30~40 μm , 폭 20~30 μm 으로 형태는 타원형 혹은 구형에 가깝다 (그림 1(a)). 적조 산란체는 단독 혹은 군체를 이루어 산란체의 등가 구형 반경의 변동성이 크다(그림 1(b)). 음향실험을 위해 배양된 적조 산란체는 최대 4개체까지 군체를 형성하는 것으로 관찰되었으며, 1개~4개까지 군체를 형성 시 등가 구형 반경 (equivalent spherical radius)을 계산하면 약 12~19 μm 였다. 현미경으로 관찰 시 적조 산란체 대부분 단일 세포로 이루어졌으므로 적조 산란체의 등가 구형 반경은 12 μm 로 결정하였다.

적조 산란체의 등가 구형 반경이 12 μm 일 때 약 20 MHz 까지는 파장에 비해 작기에 레일리 산란체 (Rayleigh scatterers, $ka < 1$)로 간주할 수 있다. 레일리 산란체일 경우에 후방 산란강도는 주파수의 4제곱에 비례하고 일정한 주파수에서는 체적 산란강도는 산란체의 크기 및 해수와 산란체의 밀도(density, g/cm^3)비

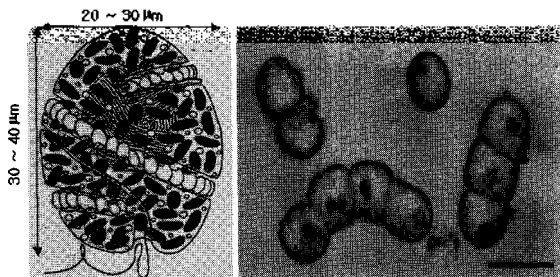


그림 1. 유해 적조 산란체 *Cochlodinium polykrikoides* a. 한 개의 세포 도식화 b. 적조 산란체 군체형상에 따른 크기의 변화(11)
Figure 1. Harmful algal scatterer *Cochlodinium polykrikoides* : a. Diagram with details of one cell ; b. Chain of Harmful algal scatterer. Scale bar = 40 μm (11).

와 음속 (sound speed, m/s)비의 함수로 결정된다. 이 중 대부분의 플랑크톤의 밀도비와 음속비는 큰 변화가 없기에 일반적인 플랑크톤의 밀도비와 음속비 $g=1.040$, $h=1.010$ 을 사용하였다 [4, 9]. Fluid-sphere model 을 이용한 이론적인 한 개체의 적조 생물로 인한 산란강도는 주로 그 산란체의 크기, 즉 평균 구형 반지름의 6제곱에 비례한다고 할 수 있다(식3).

$$\sigma_{bs}(f, a) = 4\pi k^4 a^6 \left(\frac{1 - gh^2}{3gh^2} + \frac{1 - g}{1 + 2g} \right)^2 \quad (3)$$

- a : the radius of the sphere
- $g = g_1/g_0$: the ratio of density of scatterer to medium
- g_0 : density of medium, g_1 : density of scatterer
- $h = h_1/h_0$: the ratio of sound speed of scatterer to medium
- h_0 : sound speed of medium, h_1 : sound speed of scatterer
- f : the frequency of the incident sound
- $k = 2\pi f/c$ (c : speed of sound in the medium)

그림 2는 식 3을 이용하여 계산한 후방산란 단면적 (Backscattering cross section)이 주파수 f 와 산란체의 등가 구형 반경 a 에 따라 변화하는 양상을 나타낸 것이다. 등가 구형 반경 a 의 변화는 적조생물의 군체에 결합 수에 의한 크기에 의한 것이며 주파수 f 는 실험에 사용한 주파수 대역이다.

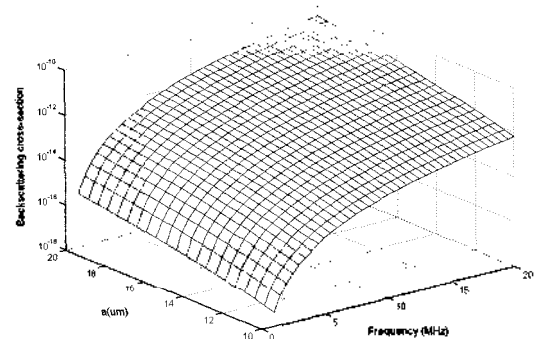


그림 2. 밀도 음속비가 각각 $g=1.040$, $h=1.010$ 일 때 평균 구형 반경 12~19 (μm)에 따른 적조생물의 후방산란 단면적, $\sigma_{bs}(m^2)$
Figure 2. Backscattering cross section, $\sigma_{bs}(m^2)$, Harmful algae vs. equivalent sphere radius $a(\mu m)$, and frequency f (MHz). Density and sound speed contrasts are $g=1.040$ and $h=1.010$ respectively.

이론적으로 계산된 단일 적조생물의 후방산란 단면적에 현미경으로 계수한 단위 체적 내에 존재하는 적조생물의 개체 수 N 를 곱하여 다음과 같은 후방산란 단면적의 총 합으로 나타낼 수 있다.

$$\langle \sigma_v(f, a) \rangle = N \sigma_{bs}(f, a) \tag{4}$$

크기 a 인 산란체로 음파가 입사 될 때의 음파 산란이 $\sigma_{bs}(f, a)$, 적조생물의 단위체적 내 개체군 밀도 (cells/ml)가 N 일 때 체적에 존재하는 적조 산란체에 의한 산란의 총 합은 $\langle \sigma_v(f, a) \rangle$ 와 같다. 식 4를 식 5에 대입하면 체적 산란강도로 환산할 수 있다.

$$S_v = 10 \log \left[\frac{\langle \sigma_v(f, a) \rangle}{4\pi} \right] = 10 \log \left[\frac{N \sigma_{bs}(f, a)}{4\pi} \right] \tag{5}$$

III. 실험방법

적조 생물의 음향산란 특성 파악을 위해 적조 산란체의 후방 산란강도를 측정하였다. 음향실험을 위한 적조 산란체는 한국 해양연구원 미생물연구실에서 제공한 seed를 이용하여 배양하였으며, 적조생물의 개체군 밀도 (cells/ml)를 알기 위한 세포의 계수는 현미경을 이용한 정량분석방법을 사용하였다.

음향실험에 필요한 적조생물의 밀도는 국립수산과학

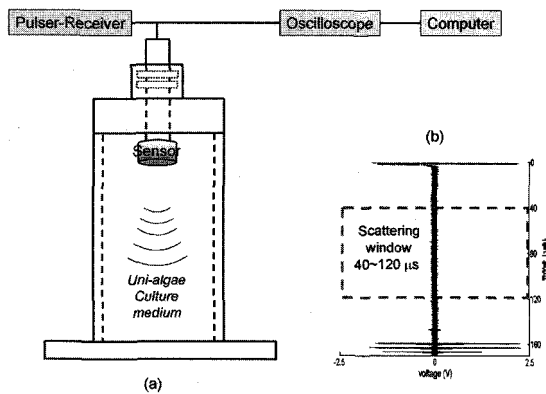


그림 3. 실험 모식도(a) 및 산란 체적 (scattering window) 결정(b)
 Figure 3. Experimental configurations for the measurements of backscattered signals for harmful algal scatterer culture medium (a). Selection for sound volume scattering phenomenon analysis (b).

표 2. 산란신호를 획득하기 위한 실험개요

Table 2. Experimental parameters used to collect the scatterer signals.

적조생물 밀도 (cells/ml)	주파수	펄스길이	비고
200 cells/ml	5, 10, 15 MHz	5 MHz	300 cells/ml => 적조 주의보
300 cells/ml		=> 0.8 μs	
500 cells/ml		10 MHz	1000 cells/ml => 적조 경보
700 cells/ml		=> 0.4 μs	
1000 cells/ml		15 MHz	
		=> 0.25 μs	

원 (NFRDI)의 적조예보 종류 및 발령기준을 고려하여 적조주의보 300 cells/ml와 적조경보 1000 cells/ml를 기준으로 밀도를 결정하였다 (표1, 2). 실험에 필요한 적조생물의 밀도는 1000 cells/ml 이상의 적조 경보 수준의 적조 산란체 매질을 희석하여 현미경으로 밀도를 관찰한 후 실험에 사용하였다. 적조생물의 밀도는 실험 전 5회, 실험 후 5회 씩 현미경으로 계수하여 평균 값을 체적 당 개체 수, 개체군 밀도 cells/ml로 환산하였다.

그림 3은 유해 적조 플랑크톤 후방산란 특성 측정을 위해 구성한 실험 장치도이다. 수조는 초음파 트랜스듀서의 빔폭 (표 3)과 실험에 필요한 적조 산란체의 밀도 및 양을 고려하여 지름 50 mm, 높이 200 mm의 아크릴 원통형 수조로 제작하였다.

산란 체적은 센서면으로부터 최소 초점거리 (Focal length)인 40 μs부터 아크릴 수조 바닥에 의한 강한 신호가 들어오는 160 μs 이전 약 120 μs까지 80 μs의 신호를 획득하였다. 산란체의 위치에 따른 센서의 원거리 음장 조건을 만족하지 못했으나 산란신호는 최소 초점 거리(Focal length) 이상에서 측정하였다(표 3).

실험에 사용된 트랜스듀서의 중심 주파수는 5, 10, 15 MHz 이고 펄스길이는 각각 0.8, 0.4, 0.25 μs이다 초음파 트랜스듀서를 적조 산란체를 채운 수조 속에 그림 3과 같이 고정시키고 Pulsar/Receiver (PANAMETRICS 500PR)를 이용하여 gain을 60 dB 증폭하여 구동한 후 후방 산란신호를 연속 50 pings 반복 측정하고 오실로스코프 (Lecroy LT322)에서 신호 및 파워 스펙트럼 준위를 확인하였다.

50 pings 이상의 평균은 트랜스듀서의 빔 폭내에 움직이는 산란체를 고려한 것이며, 획득 신호는 오실로스코프에서 200 MHz 샘플링으로 A/D 하여 컴퓨터에 저장하였다. 체적 산란강도는 수신 신호를 Matlab에서 대역 통과 필터 한 후 계산하였다.

IV. 실험결과

그림 4는 적조 산란체의 후방산란 특성을 알기 위해 주파수 5 MHz를 이용하여 적조 산란체 개체 수 증가에 따른 후방산란 신호와 스펙트럼 준위의 변동을 나타낸 것이다. 그림 4 (a)는 각각의 밀도에 따라 50 회 반복 송수신한 시계열 신호에서 대표적인 한 ping의 신호를 산란체적 (scattering window) 40~120 μs 중 10 μs 만 선택하여 나타낸 것이다. 밀도 0 은 필터(GF/F, 0.45 μm) 된 해수이며 적조 산란체 개체군 밀도가 200 cells/ml 부터 적조경보 기준인 1000 cells/ml까지 후방산란 신호의 변화를 순차적으로 나열하였다. 시계열 신호상의 변동의 폭은 그림 4의 (c)에 전체 산란체적 40 ~ 120 μs 에서의 총 50회 반복 측정된 후방산란신호의 평균 제곱근 (Root Mean Square) 음압과 편차를 계산하였다. 평균 제곱근 음압은 밀도에 따라 해수일 때 약 1.5 mV에서 1000 cell/ml 시 2.5 mV까지 선형적으로 증가함을 보이며 편차 역시 밀도가 높을수록 크게 나타났다. 스펙트럼 준위에서는 사용 음원 주파수의 중심주파수 5 MHz보다

1 MHz 낮은 4 MHz에서 피크가 이동되어 나타났는데 이는 적조 산란체가 매우 작은 산란을 일으키기 때문에 송신 신호와 수신신호를 증폭하는 과정에서 생긴 주파수 이동으로 생각된다. 스펙트럼 준위의 최대 값은 밀도 증가에 따라 확연한 차이가 생기지만 밀도가 500 cells/ml 과 700 cells/ml 경우에서는 차이가 없었다(그림 4 (b)). 스펙트럼의 최대 값은 해수에 비해 적조 주의보 300 cells/ml 일 때 약 4 dB 높게 측정되었으며 적조 주의보 보다 적보 경보 1000 cells/ml 일 때 약 4 dB 차이가 났다 (그림 4(d)). 음원 주파수 10 MHz에서도 5 MHz와 동일하게 측정되었으나 중심 주파수가 신호 증폭에 따른 오차가 없이 10 MHz에서 잘 나타났으며 평균 제곱근 음압은 해수에서 최대 밀도까지 0.6 mV, 스펙트럼 준위는 약 4 dB 차이로 5 MHz 보다 변동 폭이 작았다. 그러나 밀도에 대한 신호의 증가 경향은 다른 주파수보다 잘 구별되었다. 가장 높은 주파수 15 MHz에서 측정된 후방산란신호의 스펙트럼 준위의 피크는 중심주파수 보다 3 MHz 이동된 12 MHz에서 나타났는데 또한 약 13 MHz에서 스펙트럼 준위가 심하게 변형되었다. 중심 주파수를 12 MHz로 가정한 피크의 변동 폭은 최대 5 dB, 평균 제곱근 음압은 0.9 mV 차이가 나타났다.

표 3. 실험에 사용한 트랜스듀서의 특성
Table 3. Characteristics of transducers used in the experiments.

Frequency (MHz)	Diameter (cm)	Beam Width ² (degree)	Near Field Distance (cm)	Focal Length(PTF) ³ Min/Max (cm)
¹ A308S-SU/ 5	1.9	0.93	30.3	2.54 / 24
¹ A315S-SU/10	1.9	0.47	60.6	2.54 / 39
¹ A313S-SU/15	0.6	1.0	10	1.27 / 8

¹ Manufacture : Panametrics
² Beam angle spread between -6 dB points
³ Minimum and Maximum point target focal (PTF) distance limits

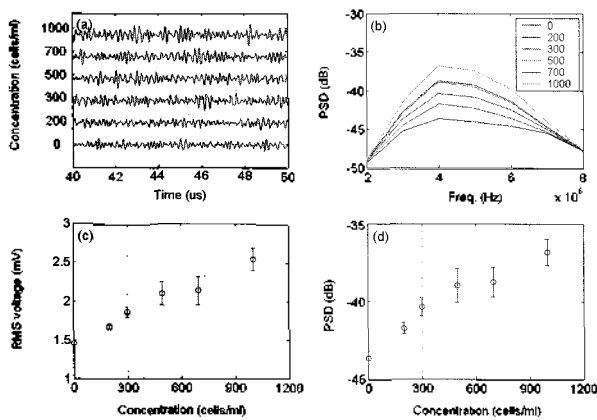


그림 4. 음원 주파수 5 MHz를 사용한 해수와 적조 산란체 밀도 증가에 따른 실험 신호 비교 (a) 시계열, (b) 스펙트럼, (c) 평균 제곱근 음압, (d) 파워 스펙트럼의 피크

Figure 4. Comparison of measured signals for various harmful algae concentrations using a 5 MHz transducer. (a) time series (b) spectrum (c) RMS voltage (d) peak of power spectrum.

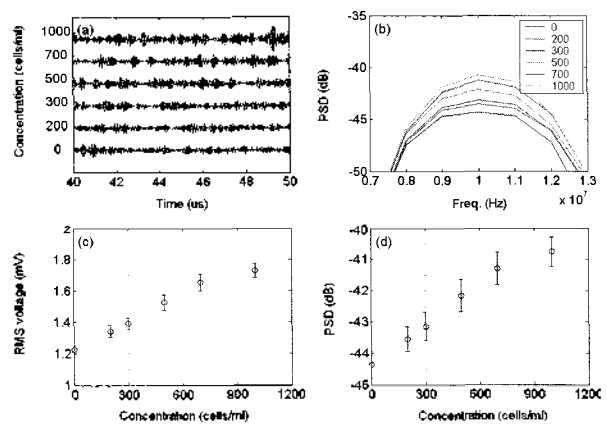


그림 5. 음원 주파수 10 MHz를 사용한 해수와 적조 산란체 밀도 증가에 따른 실험 신호 비교 (a) 시계열, (b) 스펙트럼, (c) 평균 제곱근 음압, (d) 파워 스펙트럼의 피크

Figure 5. Comparison of measured signals for various harmful algae concentrations using a 10 MHz transducer. (a) time series (b) spectrum (c) RMS voltage (d) peak of power spectrum.

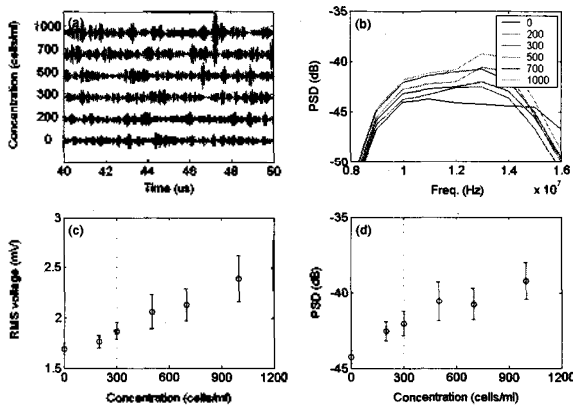


그림 6. 음원 주파수 15 MHz를 사용한 해수과 적조 산란체 밀도 증가에 따른 실측 신호 비교 (a) 시계열, (b) 스펙트럼, (c) 평균 제곱근 음압, (d) 파워 스펙트럼의 피크

Figure 6. Comparison of measured signals for various harmful algae concentrations using a 15 MHz transducer. (a) time series (b) spectrum (c) RMS voltage (d) peak of power spectrum.

란신호의 진폭은 Rayleigh분포를 따른다.

그림 4~6의 세 주파수에서 밀도별로 측정된 산란신호는 트랜스듀서의 상대적인 입사강도 (incident intensity) 및 빔 폭 (beam width)을 보정하여 체적 산란강도를 구하였다 (그림 8, 표 3). 유해 적조 플랑크톤 산란신호는

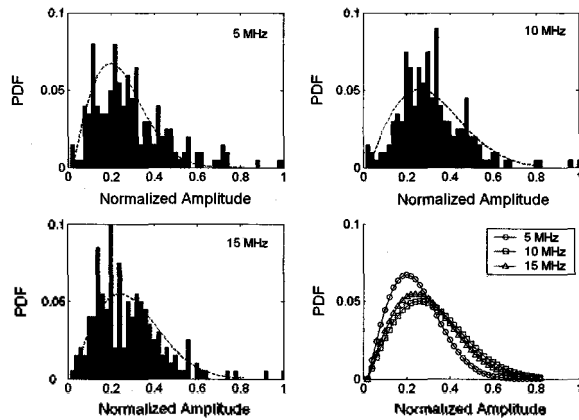


그림 7. 주파수에 따른 후방 산란신호 진폭의 확률 밀도함수 변화

Figure 7. Probability density functions of the amplitude of back-scattered signal for three type frequency.

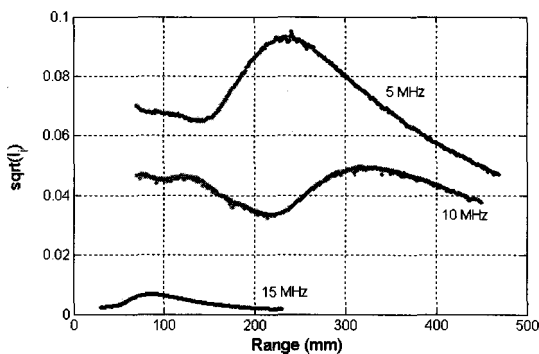


그림 8. 거리에 따른 세 주파수의 상대적인 입사강도 (I)

Figure 8. The relative transmitted intensity for the three different frequency of the various range (mm).

주파수 5, 10, 15 MHz에 따라 밀도별로 각각 50 ping 씩 획득한 후 체적 산란강도를 계산하여 Fluid-sphere model 산란강도와 비교하였다 (그림 9). 개체군 최소 밀도 200 cells/ml에서는 체적 산란강도 실측 값이 이론 값보다 약간 높게 측정되었으나, 그 외의 밀도에서는 fluid-sphere model을 이용한 이론적인 체적 산란강도를 계산하여 실측 체적 산란강도와 비교한 결과가 잘 일치하였다. 주파수에 따른 체적 산란강도의 증가는 개체군 밀도 300 cells/ml 이상일 때 5 와 10 MHz는 약 12~13 dB, 10 와 15 MHz는 7~8 dB씩 일정하게 증가함을 보인다. 이것은 주파수의 네 제곱에 비례하여 증가하는 값이다. 모든 주파수에서 적조주의보 300 cells/ml 이하에서는 주파수에 따른 산란강도의 기울기가 급변하는 양상을 보이며 적조주의보 밀도 이하에서도 적조 산란체의 증가에 민감하게 증가한다. 300 cells/ml 미만에서 체적 산란강도로 적조 산란체의 개체군 밀도 추정의 정확성을 제시할 수 있다.

같은 주파수에서 밀도에 따른 체적 산란강도의 증가는 각각의 주파수에서 200 과 1000 cells/ml 사이 최대 5 dB 차이를 나타냈다. 또한, 밀도의 증가에 따라 실측 체적 산란강도의 편차도 증가했다. 밀도의 증가에 따라서 산란신호의 음압의 증가를 확인하였으며, 이것은 곧 주파수 영역에서의 파워 스펙트럼 준위와 같은 경향을 나타냄을 보였다.

해수신호와 적조 주의보 전의 약 300 cells/ml 미만에서도 미약하지만 적조 산란체의 산란에 대한 영향을 볼 수 있었으며 (그림 9) 이 결과는 조기탐지 방법으로 음향을 이용하는 것이 적용 가능함을 확인하였다.

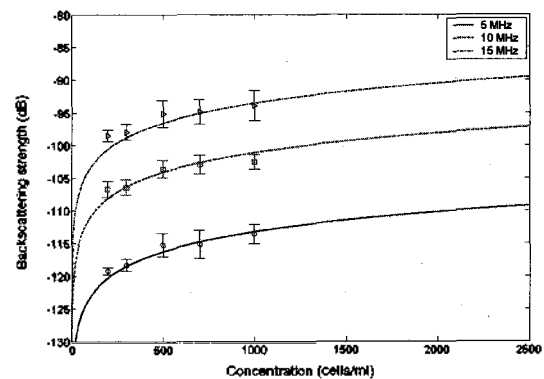


그림 9. 적조생물 밀도의 증가에 따른 측정 체적 산란강도(원, 사각형, 삼각형 각각 5, 10, 15 MHz)와 이론적으로 계산한 체적 산란강도(선)

Figure 9. Predicted volume scattering strength, Sv. (lines) vs. measured Sv. (circle, square, triangle : 5, 10, 15 MHz respectively) for Cochlodinium polykrikoides.

V. 결론

수중 초음파 (5, 10, 15 MHz)를 이용하여 적조 플랑크톤의 음향학적 산란특성을 파악하는 연구를 수행하였다. 적조 산란체의 개체군 밀도 변화에 따른 각각의 체적 산란신호를 획득하여 분석하였다. 적조 산란체의 적조주의 보(300 cells/ml) 보다 적은 양의 개체 수 변화를 탐지하였고, 개체군 밀도와 후방 산란신호와의 상관관계를 시간영역에서와 주파수 영역에서 확인하였다. 또한, fluid-sphere model을 이용한 이론적인 체적 산란강도를 계산하여 실측 체적 산란강도와 비교한 결과가 잘 일치하였다. 이 결과는 음향조사로 적조 산란체의 개체 수를 추정할 수 있으며 동시에 실시간 연속 관측과 조기 경보가 가능함을 제시한다. 앞으로 실제 해양에 존재하는 적조 산란체의 균체크기의 변동성에 따른 해상실험 및 공기방울 및 입자성 부유물질의 영향을 고려한 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해방제기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 적조 생물 seed를 제공해 준 해양연구원 극지연구소 임정환 박사님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. R. K. Johnson, "Sound scattering from a fluid sphere revisited (applied to marine organisms)", *J. Acoust. Soc. Am.*, **61**, 375-377, 1977.
2. 김학균, 정창수, 임월애, 이창규, 김숙양, 윤성환, 조용철, 이삼근, "한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과 변천", *한국수산학회지*, **34** (6), 691-696, 2001.
3. 이창규, 김형철, 이삼근, 정창수, 김학균, 임월애, "남해안 연안에서 적조생물, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gyrodinium impudicum*, *Gymnodinium catenatum*의 출현상황과 온도, 염분, 조도 및 영양염류에 따른 성장특성", *J. Korean Fish. Soc.* **34** (5), 536-544, 2001.
4. C. F. Greenlaw, "Acoustical estimation of zooplankton populations," *Limnol. Oceanogr.*, **24** (2), 226-242, 1979.
5. D. V. Holliday and R. E. Pieper, "Volume scattering strength and zooplankton distributions at acoustic frequencies between 0.5 and 3 MHz," *J. Acoust. Soc. Am.* **67** (1), 135-146, 1980.
6. 박경주, 김은혜, 강돈혁, 나정열, "천해 체적 산란강도의 수직분포

변동성," *한국음향학회지*, **22** (1), 69-77, 2003.

7. T. Stanton, D. Chu, and P. H. Wiebe, "Acoustic scattering characteristics of several zooplankton groups," *ICES J. Mar. Sci.*, **53**, 289-295, 1996.
8. S. Blanc, "Acoustical behaviour of phytoplanktonic algae," *Acoustics letters*, **23** (9), 175-182, 2000.
9. H. Medwin and C. Clay, "Fundamentals of Acoustical Oceanography," Academic Press, 1998.
10. R. J. Urick, *Principle of Underwater Sound*, McGraw-Hill, New York, 1983
11. C.-H. Kim, H. -J. Cho, J. -B. Shin, C.-H. Moon, and K. Matsuoka, "Regeneration from hyaline cysts of *Cochlodinium polykrikoides* (Gymnodiniales, Dinophyceae), a red tide organism along the Korean coast," *Phycologia*, **41** (6), 667-669, 2002.

저자 약력

• 김은혜 (Eunhye Kim)

한국음향학회지 제23권 제1E호 참조

• 북태훈 (Tae-hoon Bok)



2004년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
2004년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 석사과정
*주관심분야: 수중음파 산란

• 나정열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제24권 제2호 참조

• 팽동국 (Dong-Guk Paeng)

한국음향학회지 제24권 제5호 참조