

공학석사 학위논문

항적에 의한 음향산란신호의  
실험적 연구

*Experimental Investigation of Reverbered Signal Due to  
Microbubbles within Ship Wake*

지도교수 김 재 수

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

이 재 훈

本 論 文 을 李 在 薰 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로  
認 准 함.

위원장      공학박사      최 상 문



위 원      공학박사      김 우 식



위 원      공학박사      김 재 수



2008년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

이 재 훈

# Experimental Investigation Of Reverbed Signal Due To Microbubbles Within Ship Wake

by

*Jae Hoon LEE*

Department of Ocean Development Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## Abstract

Microbubbles are created in copious quantities in the wakes of ocean vessels and, because of their large acoustical cross sections, are responsible for the scattering acoustical signature of the wake.

The acoustic characteristics of the suspended microbubbles can be used to detect and track the ship wake.

In this thesis, we show that the experimental result performed at Korea Maritime University. It was calculated the volume scattering strength via experimental data. We can investigate the motion and distribution of bubble plume within ship wake via volume scattering strength.

# 목 차

목차 .....	I
그림 목차 .....	II
표 목차 .....	IV
Abstract .....	V
<b>1. 서론 .....</b>	<b>1</b>
1.1. 연구의 목적 및 필요성 .....	1
1.2. 연구의 내용 및 방법 .....	3
1.3. 논문의 구성 .....	4
<b>2. 항적에 의한 음향산란특성 .....</b>	<b>5</b>
2.1. 체적산란강도 .....	5
2.2. Wavelet 변환에 의한 난류 유동 특성 .....	10
<b>3. 항적에 의한 음향산란 해상실험 .....</b>	<b>13</b>
3.1. 실험환경 .....	13
3.2. 실험 장비의 구성 .....	16
3.3. 실험조건 및 방법 .....	17
<b>4. 실험결과 분석 .....</b>	<b>19</b>
4.1. 체적산란강도 .....	19
4.1.1. 분석방법 .....	19
4.1.2. 분석결과 .....	23
4.2. Wavelet 변환에 의한 난류 유동 특성 .....	39
4.2.1. 분석방법 .....	39
4.2.2. 분석결과 .....	41
<b>5. 결론 .....</b>	<b>47</b>
<b>참고 문헌 .....</b>	<b>48</b>

# 그림 목차

그림 2.1	체적 복반사에 대한 방사된 체적 .....	7
그림 2.2	Solid Angle에 대한 개념도 .....	8
그림 2.3	웨이블릿 .....	10
그림 2.4	푸리에 변환과 웨이블릿 변환의 분해능 비교 .....	11
그림 2.5	본 논문에서 사용된 기저함수의 파동형태 .....	12
그림 3.1	해상실험을 실시한 한국해양대학교 앞바다 .....	13
그림 3.2	한국해양대학교 앞바다 .....	14
그림 3.3	항적 발생 수단으로 사용된 해양대 소속 ‘아치호’ .....	14
그림 3.4	실험 장비 구성도 .....	16
그림 3.5	간이형 송수신장치 .....	16
그림 3.6	해상실험 개념도 I .....	17
그림 3.7	해상실험 개념도 II .....	18
그림 3.8	항적 촬영 사진 .....	18
그림 4.1	주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 0m 궤적에서 항적 발생 1분 후에 수신된 신호 .....	19
그림 4.2	주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 5m 궤적에서 항적 발생 1분 후에 수신된 신호 .....	19
그림 4.3	그림 4.1 신호의 체적 산란강도 .....	20
그림 4.4	항적 발생 전의 체적 산란강도 .....	21
그림 4.5	항적 발생 20초 후의 체적 산란강도 .....	21
그림 4.6	항적 발생 40초 후의 체적 산란강도 .....	21
그림 4.7	항적 발생 60초 후의 체적 산란강도 .....	21
그림 4.8	주파수 430kHz, 배의 속도 9knots인 경우의 체적 산란강도 .....	23
그림 4.9	주파수 430kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도 .....	27
그림 4.10	주파수 450kHz, 배의 속도 9knots인 경우의 체적 산란강도 .....	29
그림 4.11	주파수 450kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도 .....	32
그림 4.12	주파수 470kHz, 배의 속도 9knots인 경우의 체적 산란강도 .....	34
그림 4.13	주파수 470kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도 .....	36
그림 4.14	430kHz에서 항적 발생 전에 수신된 신호 .....	39

그림 4.15 웨이블릿 변환에 사용된 기저함수 .....	39
그림 4.16 웨이블릿 변환을 통해 분석된 그림 4.14 신호의 주파수 특성 .....	40
그림 4.17 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 0m인 경우의 주파수 특성 .....	42
그림 4.18 주파수 470kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 0m인 경우의 주파수 특성 .....	43
그림 4.19 주파수 470kHz, 배의 속도 12knots, 배의 궤적 0m인 경우의 주파수 특성 .....	44
그림 4.20 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 5m인 경우의 주파수 특성 .....	46

# 표 목차

표 3.1 아치호 제원표 .....	15
---------------------	----

# 1. 서 론

## 1.1. 연구의 목적 및 필요성

수상 또는 수중 운동체의 이동에 의해 운동체의 후방에는 기포를 포함한 난류가 형성되는데[1][2], 이를 항적(wake)이라고 정의한다. 항적에는 크게 수상함에 의한 기포항적과 수중함, 즉 잠수함에 의한 난류 항적으로 나뉜다. 수상함에 의한 기포항적은 기포들의 큰 음향단면(acoustical cross section)으로 인해 강한 음파의 잔향을 일으켜 음향학적으로 큰 특성을 지닌다 [3][4].

해양에는 다양한 형태의 불균질한 매질과 경계면이 존재하고, 이러한 불균질성은 그 체적과 경계면에서 음향에너지의 일부 또는 전부를 반사하거나 산란시키게 되는데[5][6][7], 이렇게 산란된 신호를 잔향음이라 하고, 모든 잔향음들의 합을 복반사(reverberation)라 한다. 이러한 잔향음들은 대부분의 경우 주변소음보다 크기 때문에 능동소나의 신호대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)를 떨어뜨려 탐지확률을 낮추게 된다.

항적에 의한 기포들은 추진기 공동현상(propeller cavitation), 선박의 선수 및 선미파, 선체 부근 난류 경계층에서의 공기 혼입(air entrainment)에 의해 주로 발생하게 되는데, 이렇게 생성된 기포에 음파가 부딪치면, 기포는 압축되고 입사음파는 약해지게 된다. 입사음파에 대한 기포의 응답은 음파의 주파수 및 기포의 크기에 좌우된다. 입사 음파에 의하여 기포에서는 공진현상이 발생할 수 있는데[2], 공진현상이 발생하면 기포의 진폭은 최대가 되며 입사음파로부터는 최대 에너지가 방출된다. 이 에너지의 일부는 진동하는 기포에 의해 모든 방향으로 분산되며, 나머지 부분은 기포 내 열의



전도와 주위 해수의 점성 및 기포 표면의 표면장력에 의해 열로 변환된다 [8].

본 논문에서는 수상함의 항적을 탐지하기 위해 항적에 일정시간 잔존하는 기포들의 음향산란특성을 연구하고 실험을 통해 규명하는데 그 목적이 있다.

## 1.2. 연구의 내용 및 방법

음향학적 이론에 기초하여 복반사음 준위와 체적 산란강도를 구하는 방법을 연구한다. 또한 해상실험을 통해 항적내에 존재하는 기포에 의해 산란된 음향신호를 획득하여 복반사음 준위를 구하고 이를 다시 역산하여 기포의 체적 산란강도를 계산한다. 역산을 통해 계산된 체적 산란강도를 이용하여 수중의 2차원 단면에서의 기포군(Bubble Plume)의 시공간적인 분포와 움직임을 규명한다. 또한 Wavelet 변환을 통해 시간-주파수 특성을 분석하여 항적에 의해 발생하는 난류의 유동 특성을 확인한다.

### 1.3. 논문의 구성

본 논문은 선박에 의해 발생하는 항적내에 존재하는 기포의 음향학적 특성에 관한 연구로 총 5개의 장으로 구성되어 있다.

1장에서는 연구의 개괄적인 내용과 연구의 목적 및 필요성, 그리고 연구의 내용 및 방법에 관해 정리하고 2장에서는 음향학적 이론에 기초한 복반사음 준위와 체적 산란강도에 대해 알아본다. 또한 시간-주파수 분석을 위해 사용된 Wavelet 변환에 대해 이론적인 원리를 알아본다. 3장에서는 항적에 의한 음향산란신호의 획득을 위한 해상실험에 있어서 기본적인 실험환경과 장비의 구성, 그리고 실험내용 및 방법 등에 관해 설명한다. 4장에서는 실험결과 분석에 있어서 분석방법을 설명하고, 실제 분석된 결과를 검토한다. 마지막으로 5장에서는 실험결과를 요약하고 분석된 실험결과가 나타내는 의미에 관해 논의한다.

## 2. 항적에 의한 음향산란특성

### 2.1. 체적 산란강도

복반사음은 산란되는 대상에 따라 해수의 체적 중에 분포된 산란체에 의한 체적 복반사음(Volume Reverberation), 해수면에 의한 해수면 복반사음(Sea Surface Reverberation), 해저면에 의한 해저면 복반사음(Sea Bottom Reverberation)으로 분류할 수 있다. 그 중에서 본 논문의 주요 관심 대상인 체적 복반사음 준위는 다음과 같은 단계로 계산될 수 있다.

먼저 음원으로부터 1m거리에서의 음의 세기(Intensity)  $I_0$ 는 음원준위(SL, Source Level)와 식 (2.1)과 같은 관계가 있다.

$$SL = 10 \log \frac{I_0}{I_{ref}} \quad (2.1)$$

임의의 거리  $r$ 에서의 음의 세기와 음원으로부터 단위거리에서의 음의 세기  $I_0$ 의 관계는 식 (2.2)와 같다.

$$I = I_i = I_0 \cdot \mathcal{K}(\theta, \phi) \cdot \left( \frac{r_{ref}}{r} \right)^2 \quad (2.2)$$

여기에서  $\mathcal{K}(\theta, \phi)$ 는 송신 빔 패턴(Transmitting Beam Pattern)을 나타낸다.  $dV$ 만큼의 체적으로부터 복반사된 음의 세기를  $dI_{rev}$ 이라 하면 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dI_r = I_i \cdot s_v \cdot dV = I_0 \cdot b(\theta, \phi) \cdot \frac{r_{ref}^2}{r^2} \cdot s_v \cdot dV \quad (2.3)$$

여기에서  $s_v$ 는 체적 산란 계수(Volume Scattering Coefficient)이고 식 (2.4)와 같이 정의된다.

$$s_v = \frac{I_r / \text{unit volume}}{I_i} \quad (2.4)$$

그리고 체적 산란강도(Volume Scattering Strength)  $S_v$ 는 식 (2.5)와 같이 표현된다.

$$S_v = 10 \log s_v = 10 \log \left( \frac{I_r / \text{unit volume}}{I_i} \right) \quad (2.5)$$

$S_v$ 는 주파수와 산란체의 단위 부피당 밀도에 따라 달라지므로 지역, 계절, 시간 등의 함수가 된다. 미소체적 에 의한 수신기(Receiver) 위치에서의 음향의 세기  $dI_r$ 는 식 (2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dI_{rev} &= dI_r \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi) \\ &= I_0 \cdot b(\theta, \phi) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot s_v \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi) \cdot dV \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기에서  $b'(\theta, \phi)$ 은 수신기의 빔 패턴(Receiver Beam Pattern)을 나타낸다. 또한 전체 체적에 대한 수신기에서의 음향의 세기는 식 (2.7)과 같이 나타

낼 수 있다.

$$I_{rev} = \int dI_{rev} = \int I_0 \frac{b \cdot b'}{r^4} \cdot s_v \cdot dV = I_0 s_v \int \frac{b \cdot b'}{r^4} dV \quad (2.7)$$

여기에서  $dV$ 는 식 (2.8)과 같이 쓸 수 있다.

$$dV = \frac{c\tau}{2} r^2 d\Omega \quad (2.8)$$

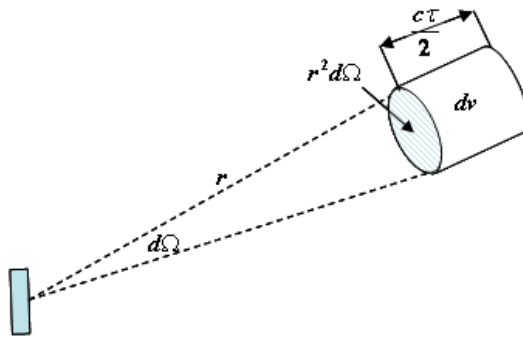


그림 2.1 체적 복반사에 대한 방사된 체적[1]

여기에서  $\Omega$ 는 Solid Angle을 나타내는데, Solid Angle이란, 공간에서 어떠한 면적이 차지하는 각도를 나타내며, 식 (2.9)와 같이 정의된다.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2.9)$$

여기에서  $r$ 은 구의 반경,  $A$ 는 면적이다. 무지향성 음원(Omni-directional

Source)인 경우 구의 표면적은  $4\pi r^2$  이므로  $\Omega$ 는  $4\pi$ 가 된다.

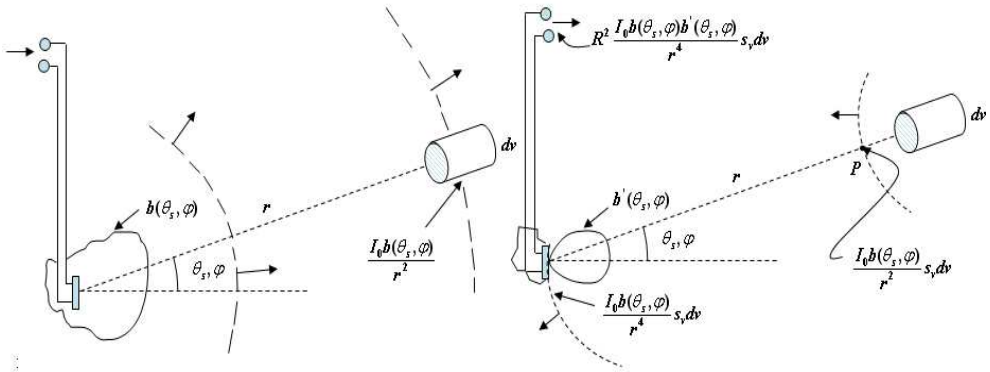


그림 2.2 Solid Angle에 대한 개념도[1]

예를 들어 그림 2.2와 같이 구좌표계인 경우 Solid Angle은 식 (2.10)과 같이 표현된다.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{1}{r^2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r d\theta \cdot r \cos\theta \cdot d\phi \quad (2.10)$$

Solid Angle의 개념을 사용하여, 식 (2.7)에 식 (2.8)을 대입하면 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_{\nu} c \tau}{2 r^2} \int b b' d\Omega \quad (2.11)$$

여기에서 유효빔폭에 대한 Solid Angle  $\Omega_e$ 는 식 (2.12)와 같이 정의한다.

$$\Omega_e = \int b b' d\Omega \quad (2.12)$$

따라서, 식 (2.11)과 식 (2.12)를 이용하여 체적 복반사음의 세기를 식 (2.13)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_v c \tau}{2 r^4} \Omega_e r^2 \quad (2.13)$$

체적 복반사음 준위(Volume Reverberation Level)  $RL_v$  는 식 (2.14)와 같이 나타낼 수 있고,

$$\begin{aligned} RL_v &= 10 \log \left( \frac{I_0 s_v c \tau}{2 r^4} \Omega_e r^2 \right) \\ &= 10 \log \frac{I_0}{I_{ref}} - 10 \log \frac{r^4}{r_{ref}^4} + 10 \log s_v r_{ref}^3 + 10 \log \left( \frac{c \tau \Omega_e r^2}{2 r_{ref}^3} \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

또한, 식 (2.15)와 같이 표현할 수 있다.

$$RL_v = SL - 2TL + S_v + 10 \log \left( \frac{c \tau}{2} \Omega_e r^2 \right) \quad (2.15)$$



## 2.2. Wavelet 변환에 의한 난류 유동 특성

Fourier 변환은 시간 변화에 대한 주파수 특성 분석이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이에 대한 대안으로 흔히 사용되는 기법이 웨이블릿 변환이다. 웨이블릿이란 그림 2.3과 같이 효율적으로 한정된 구간에서 지속되며 그 평균값이 0인 파동형태로 정의된다. 웨이블릿 변환의 원리는 기저함수의 크기(곧 주파수)을 변화시키면서 기저함수와 입력신호의 correlation 을 통해 시간-주파수 특성을 분석하는 것이다. 여기에서 기저함수의 크기를 변화시킬 수 있기 때문에 다분해능(multiresolution)의 시간-주파수 분석이 가능하다. 그림 2.4 는 푸리에 변환과 웨이블릿 변환의 분해능을 비교한 그림이다. 푸리에 변환은 시간, 주파수 모두 일정한 분해능으로 분석하는 반면 웨이블릿 변환은 주파수 특성에 따라 각각 다른 분해능으로 신호를 분석한다.

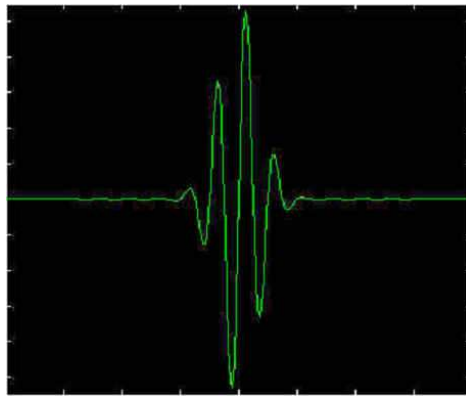


그림 2.3 웨이블릿



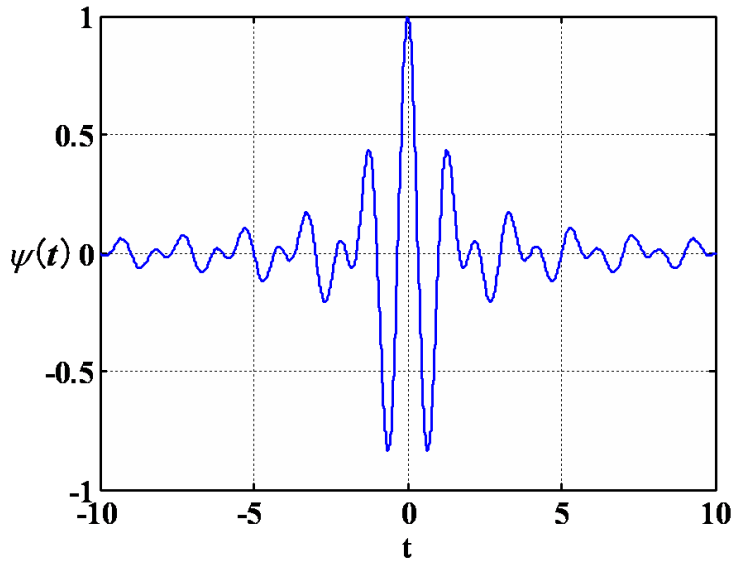


그림 2.5 본 논문에서 사용된 기저함수의 파동형태

### 3. 항적에 의한 음향산란 해상실험

#### 3.1. 실험환경

수상선에 의해 발생하는 기포 항적에 대한 음향신호를 획득하기 위해 2007년 9월 11일부터 13일까지 3일간 부산광역시 한국해양대학교(이하 해양대) 앞 해상에서 해상실험을 실시하였다. 그림 3.1 은 해양대 앞바다의 실험위치를 나타내고 있다. 그림 3.2 는 실제 실험장소를 촬영한 사진으로써 사진에서 보이는 방파제에서 약 60m 떨어진 지점에 센서를 설치하였다. 그림 3.3 은 항적 발생 수단으로 사용된 해양대 소속의 선박 ‘아치호’로서 그에 대한 제원이 표 3.1 에 나타나있다.



그림 3.1 해상실험을 실시한 한국해양대학교 앞바다



그림 3.2 한국해양대학교 앞바다



그림 3.3 항적 발생 수단으로 사용된 해양대 소속 '아치호'

표 3.1 아치호 제원표 [참고: 해양대 홈페이지]

구분	아치호
용도(type)	탐사 및 통선
재질	FRP
길이(LOA)	18.50m
길이(LBP)	17.21m
폭(Breadth)	4.70m
깊이(Depth)	2.20m
흘수(Draft)	0.85m
총톤수(Gross T.)	26.00t

또한, ‘아치호’는 프로펠러가 양측으로 2개 달려있고, 수면으로부터 1.2m 아래에, 배의 중심으로부터 양쪽으로 1.5m씩 떨어져 있다. 따라서 프로펠러간의 거리는 3m이고, 회전방향은 배의 측면에서 중심을 향하여 회전한다.

### 3.2. 실험 장비의 구성

그림 3.4에 실험 장비의 구성을 나타내었다. 신호 발생기(Signal Generator)에서 만들어진 신호는 송신증폭기(Power Amplifier)를 거쳐 해저면 바닥에 고정된 간이형 송수신장치에 설치된 송신기를 통해 해수면을 향해 송신된다. 해수면 부근에서 반사되어 수신기에 수신된 신호는 필터와 수신증폭기(Preamplifier)를 거쳐 신호 획득 장비에 저장된다. 그림 3.5는 해저 바닥에 고정되는 간이형 송수신장치이다. 그림에서 보이는 원안에 송수신 센서가 설치되었다.

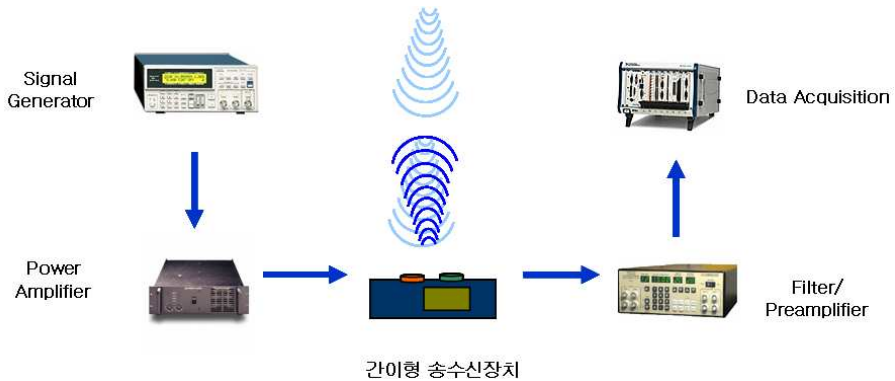


그림 3.4 실험 장비 구성도

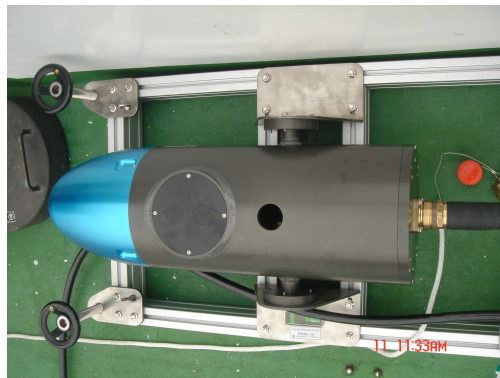


그림 3.5 간이형 송수신장치

### 3.3. 실험조건 및 방법

그림 3.6과 3.7에 실험에 대한 개념도를 나타내었다. 그림 3.7에 보이는 긴 화살표가 ‘아치호’의 궤적이다. 즉, 센서의 수직 위를 지나갈 때를 0m라 했을 때, 수평거리로 5m 간격으로 20m까지 궤적을 그려 각각의 항적에 대한 음향 산란신호를 획득하였다. 배의 속도는 9, 12 knots의 두 가지의 속도에 대해 실험을 수행했으며, 음원 신호는 주파수 430, 450, 470 kHz에 대해 200  $\mu$ sec 길이의 펄스 신호를 사용하여 배가 센서 위를 지나는 순간부터 항적이 소멸될 때까지 10초 간격으로 신호를 획득하였다. 그림 3.8은 ‘아치호’에 의해 항적이 만들어지는 모습을 촬영한 사진이다.

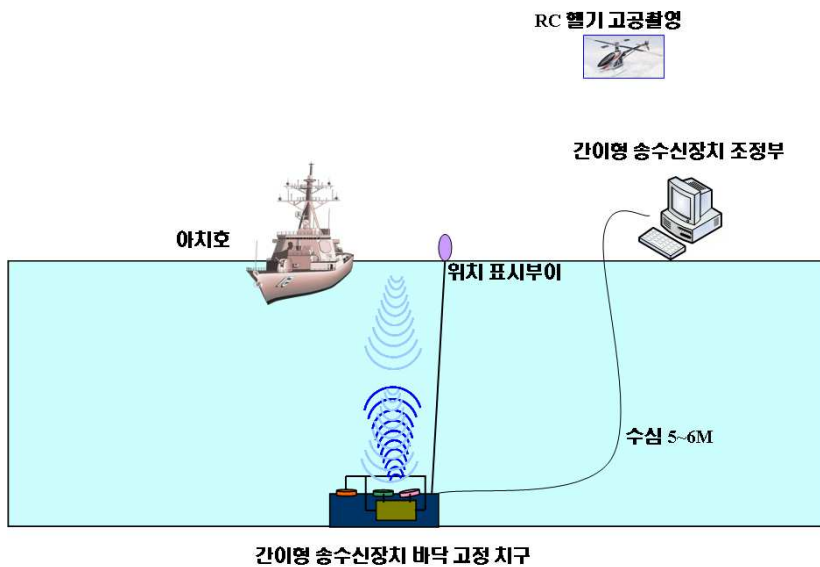


그림 3.6 해상실험 개념도 I



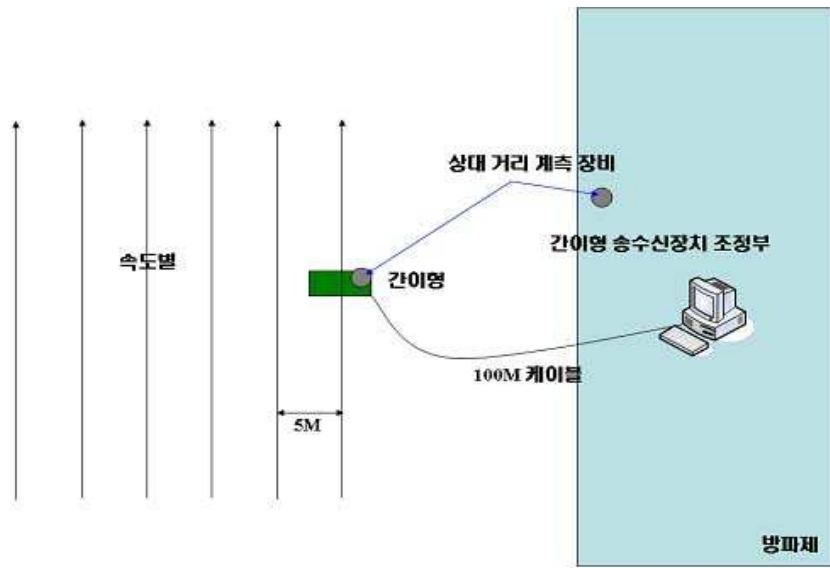


그림 3.7 해상실험 개념도 II



그림 3.8 항적 촬영 사진

## 4. 실험결과 분석

### 4.1. 체적산란강도

#### 4.1.1. 분석방법

주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 배가 센서의 수직 위를 지나갈 때(이하 0m 궤적)에 200  $\mu\text{sec}$  길이의 펄스신호를 송신하여 산란된 신호를 10초 간격으로 획득하였고, 항적 발생 후 1분 후에 획득한 신호를 그림 4.1에 나타내었다. 그림에서 갈색 점선으로 표시된 부분은 송수신 센서를 나란히 설치하였기 때문에 송신 센서에서 수신 센서로 직접 전달된 신호이고, 가장 큰 진폭을 보이는 녹색 점선 부분은 해수면에서 반사되어 수신된 신호이다. 그리고 빨간색 점선 부분이 주요 관심 대상인 해수 내에 존재하는 기포에 의한 산란 신호이다. 또한 그림 4.2는 그림 4.1과 같은 조건에서 배가 센서에서 수평거리 5m 옆을 지나갈 때(이하 5m 궤적)에 수신된 신호이다.

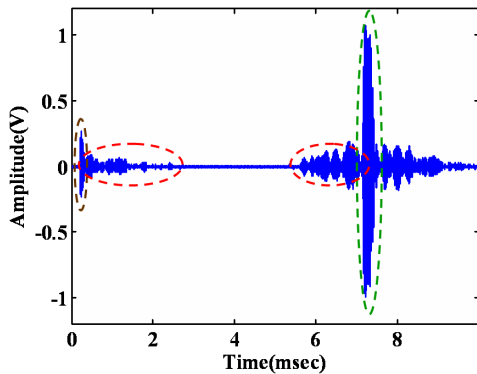


그림 4.1 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 0m 궤적에서 항적 발생 1분 후에 수신된 신호

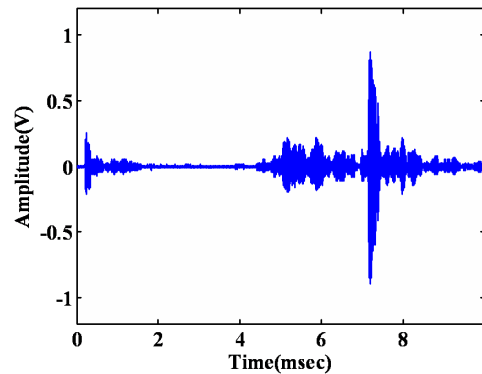


그림 4.2 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 5m 궤적에서 항적 발생 1분 후에 수신된 신호

체적 복반사음 준위를 구하는 식 (2.15)를 이용하여 그림 4.1 신호의 체적 산란강도를 계산하여 그림 4.3에 나타내었다. 시간상으로 신호가 해수면에 한 번 반사되어 들어오는 부분까지만 계산하였다.

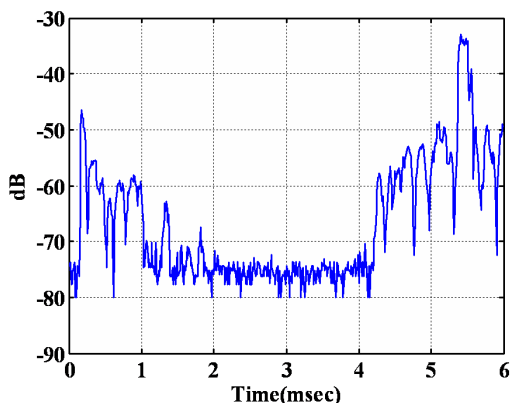


그림 4.3 그림 4.1 신호의 체적 산란강도

여기에서 시간에 대한 산란강도는 바꾸어 말하면 센서로부터의 거리에 대한 산란강도, 즉 수심에 대한 산란강도라 할 수 있다. 따라서 그림 4.3의 시간에 대한 산란강도는 특정 궤적에서의 수심에 대한 산란강도로 나타낼 수 있다. 이러한 원리로 모든 궤적(0~20m)에 대한 산란강도를 계산하여 각 궤적과 수심에 대한 체적 산란강도로 나타낼 수 있는데 그림 4.4 ~ 4.7이 그 예이다. 그림 4.4는 주파수 430kHz의 송신 신호를 이용하여 배의 속도가 9knots 일 때 항적 발생 직전의 수신 신호에서 체적 산란강도를 계산하여 나타낸 그림이다.  $x$  축은 0~20m까지의 각각의 배의 궤적을 나타내며,  $y$  축은 수심을 나타낸다. 그림 윗부분에 보이는 붉은색 띠가 해수면을 나타내는데, 해수면에서의 산란강도가 가장 크기 때문에 당연한 결과라 할 수 있다. 그림 4.4와 같은 조건에서 항적 발생 20, 40, 60초 후에 수신된 신호에서 체적 산란강도를 계산하여 나타낸 그림이 그림 4.5 ~ 4.7이다. 그림 4.4와 그림 4.5를 비교해보면 항적이 존재할 때와 그렇지 않을 때의 차이가 분명히 드러난다. 그림 4.4에서는 해수면 이

외에는 별다른 산란체가 발견되지 않지만, 그림 4.5의 경우에는 해수면 아래로 기포군이 형성되어 산란체로서의 역할을 하는 것을 알 수 있다. 그리고 시간이 지날수록 기포군이 바닥쪽으로 내려오면서 넓게 확산 되는 것을 그림 4.6과 그림 4.7을 통해 알 수 있다.

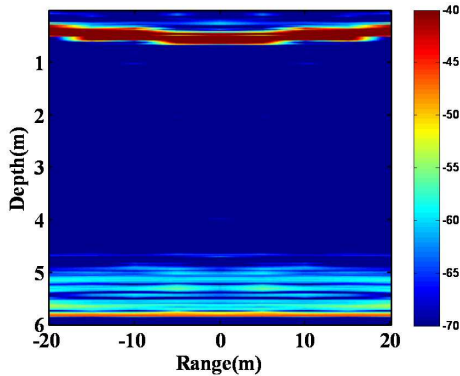


그림 4.4 항적 발생 직전의 체적 산란강도

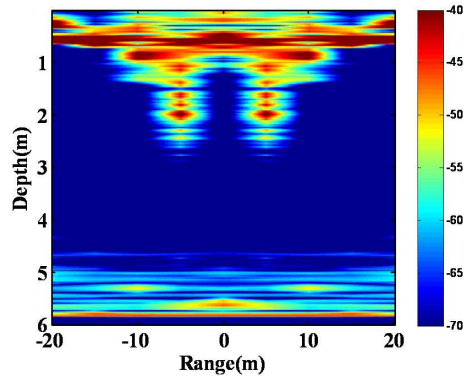


그림 4.5 항적 발생 20초 후의 체적 산란강도

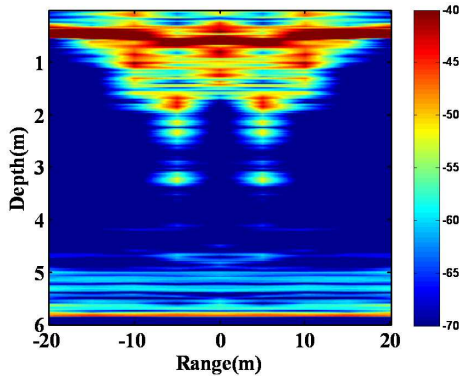


그림 4.6 항적 발생 40초 후의 체적 산란강도

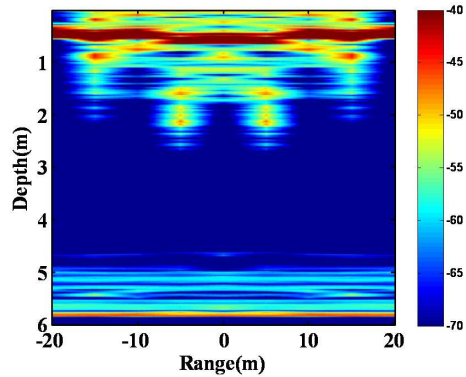


그림 4.7 항적 발생 60초 후의 체적 산란강도

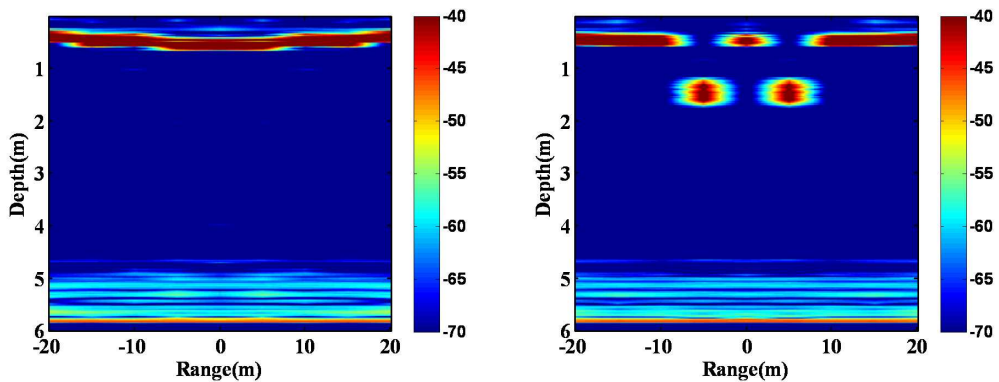
앞에서 언급한 방법으로 기포항적에 의해 산란된 음향신호를 이용하여 체적 산란강도를 계산하였으며, 각각의 궤적과 수심에 대한 산란강도로 표현하여 시간에 대한 기포군의 형상 변화를 관찰하였다.

송신 신호의 주파수는 430, 450, 470kHz를 사용하였고, 배의 속도는 9, 12knots로 하여 센서로부터의 수평거리가 0 ~ 20m(또는 25m) 범위에서 5m 간격으로 궤적을 그려 항적을 생성하였다. 그리고 기포군이 모두 소멸되었다고 판단될 때까지(약 3~7분) 음향산란신호를 획득하였다.

### 4.1.2. 분석결과

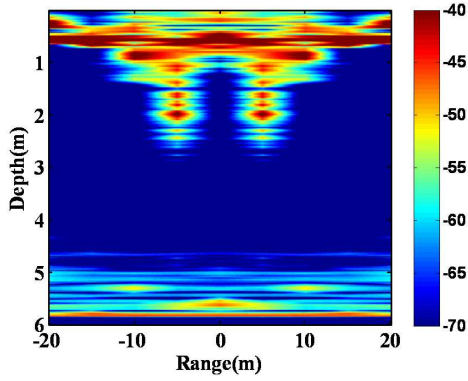
송신 주파수 430, 450, 470kHz에 대하여 배의 속도가 9, 12knots일 때, 즉 6가지 경우에 대해서 실험결과를 정리하였다. 첫 번째 경우인 430kHz, 9knots에서는 기포군의 분포와 변화를 세밀하게 묘사하기 위해 항적 발생 후 3분까지 10초 간격으로 음향산란신호의 체적 산란강도를 나타내었다. 그 외의 경우에는 20초 간격으로 약 4분까지 획득한 음향산란신호의 체적 산란강도를 나타내었다.

그림 4.8은 첫 번째 경우인 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots에서의 음향산란신호로부터 계산된 체적 산란강도이다. 항적 발생 전에는 해수면 이외의 산란체가 발견되지 않지만, 항적이 발생되고 난 후에는 기포항적이 강한 산란체의 역할을 하는 것을 알 수 있다. 해수면 근처에서 발생된 기포항적은 시간이 지날수록 점점 확산되면서 해저면 방향으로 하강한다. 또한 시간에 따라 확산되고 소멸되면서 산란강도도 약해진다.

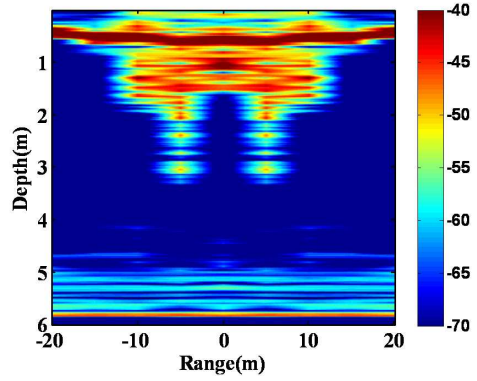


① 항적 발생 전

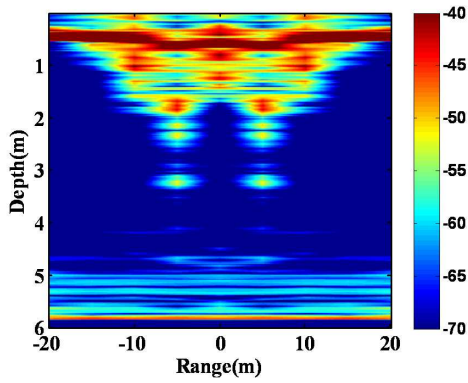
② 항적 발생 10초 후



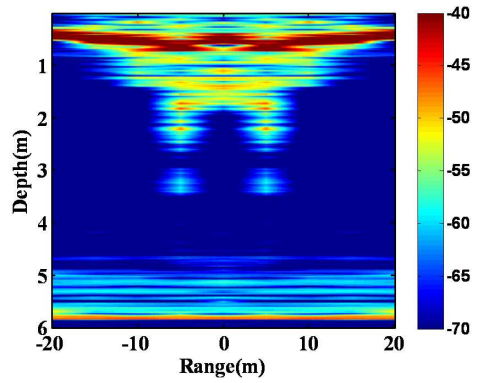
③ 항적 발생 20초 후



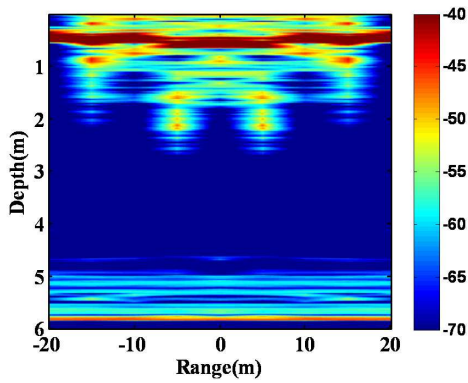
④ 항적 발생 30초 후



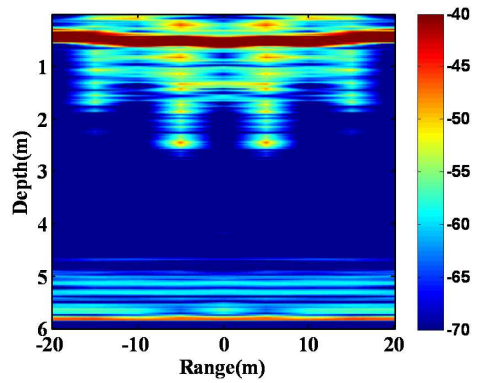
⑤ 항적 발생 40초 후



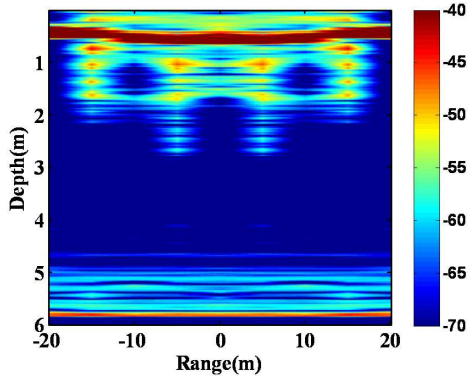
⑥ 항적 발생 50초 후



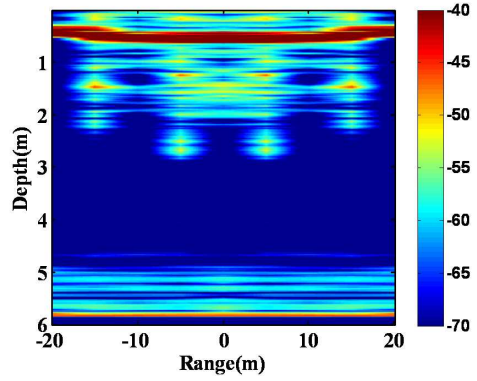
⑦ 항적 발생 60초 후



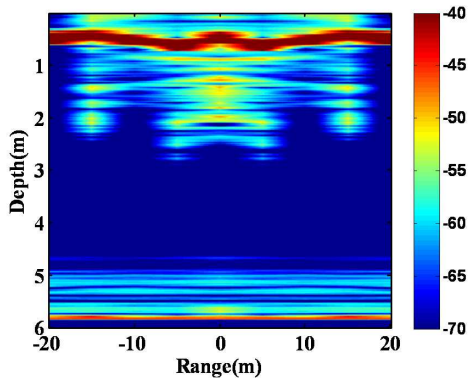
⑧ 항적 발생 70초 후



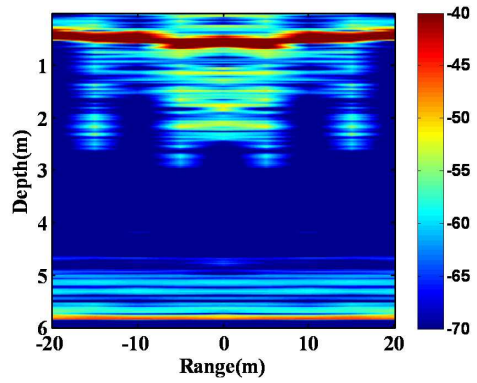
⑨ 항적 발생 80초 후



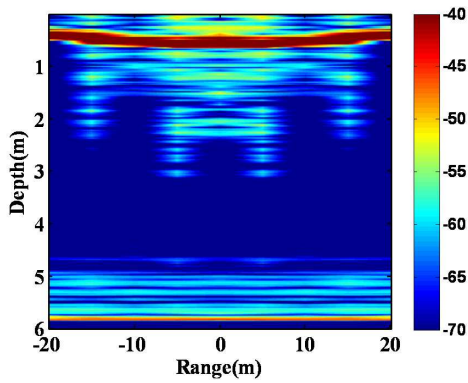
⑩ 항적 발생 90초 후



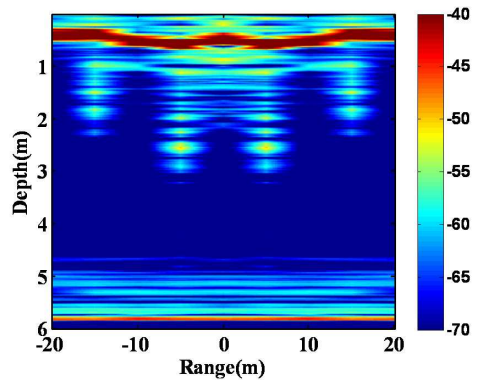
⑪ 항적 발생 100초 후



⑫ 항적 발생 110초 후

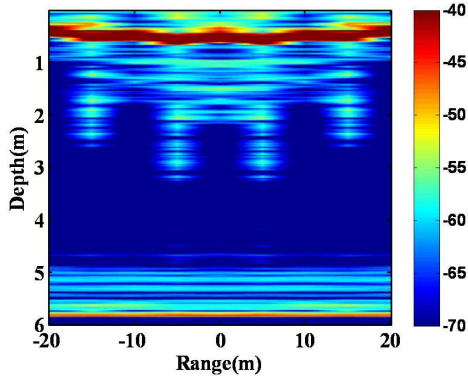


⑬ 항적 발생 120초 후

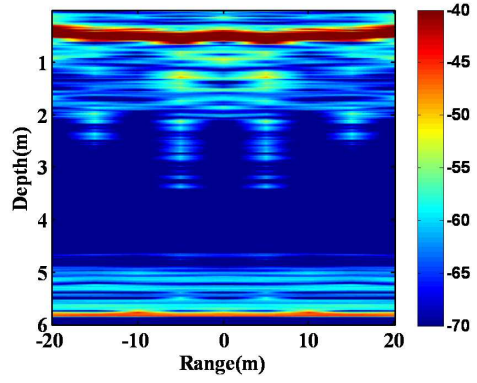


⑭ 항적 발생 130초 후

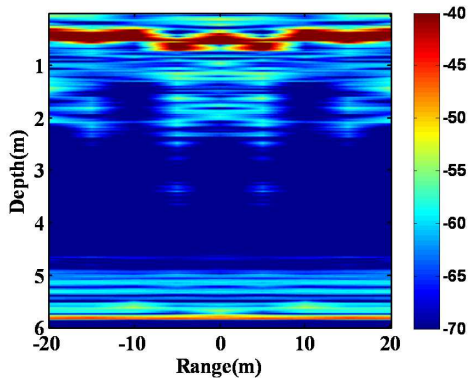




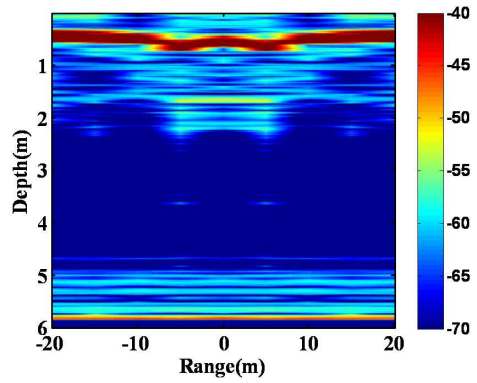
⑮ 항적 발생 140초 후



⑯ 항적 발생 150초 후



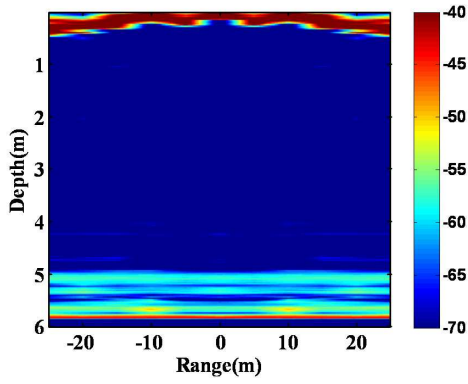
⑰ 항적 발생 160초 후



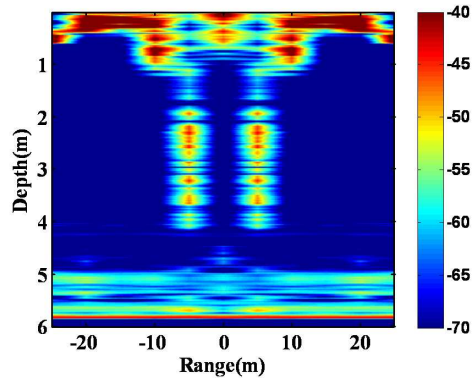
⑱ 항적 발생 170초 후

그림 4.8 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots인 경우의 체적 산란강도

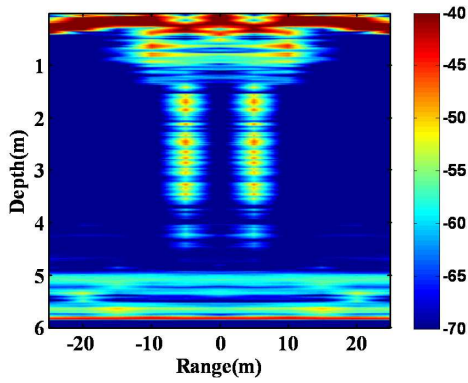
두 번째 환경인 주파수 430kHz, 배의 속도 12knots에서의 음향산란신호를 통해 계산된 체적 산란강도를 그림 4.9에 나타내었다.



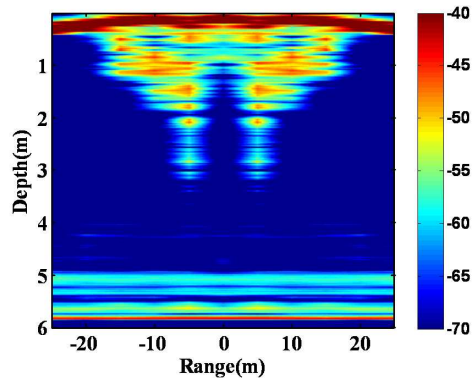
① 항적 발생 전



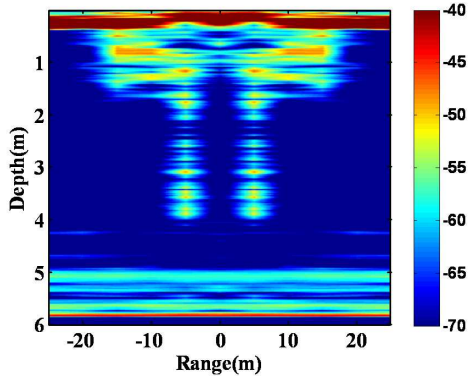
② 항적 발생 20초 후



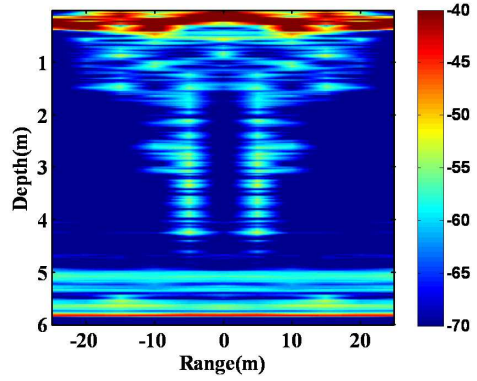
③ 항적 발생 40초 후



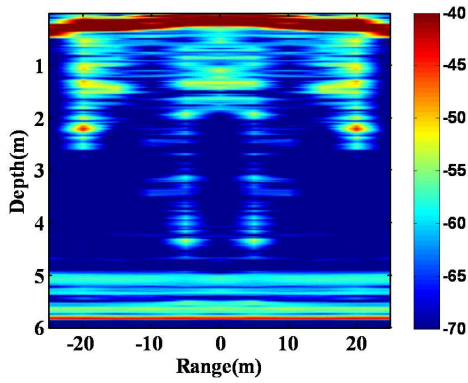
④ 항적 발생 60초 후



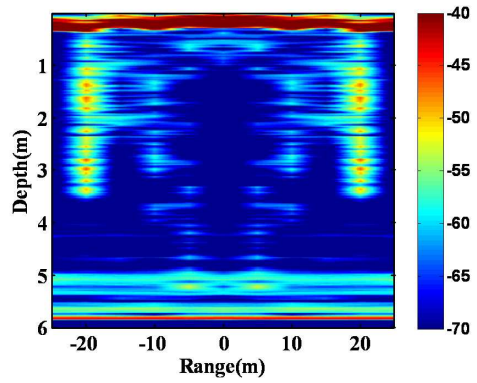
⑤ 항적 발생 80초 후



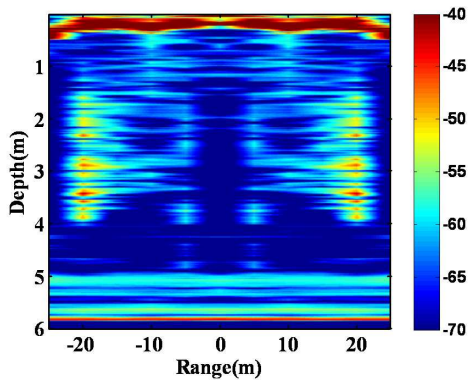
⑥ 항적 발생 100초 후



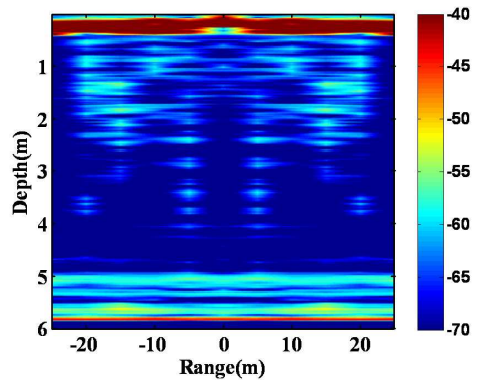
⑦ 항적 발생 120초 후



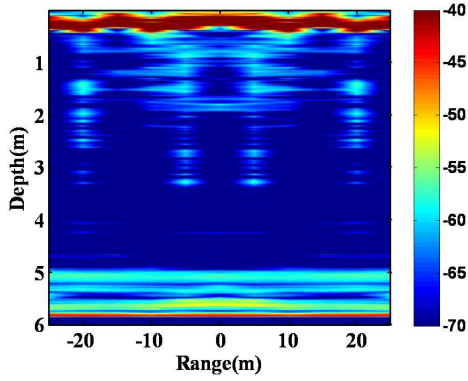
⑧ 항적 발생 140초 후



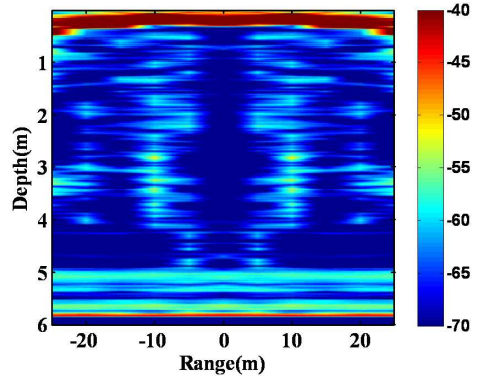
⑨ 항적 발생 160초 후



⑩ 항적 발생 180초 후



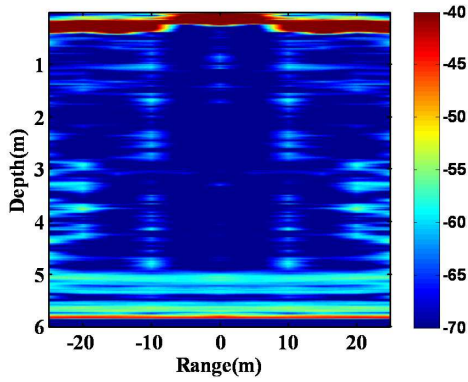
⑪ 항적 발생 200초 후



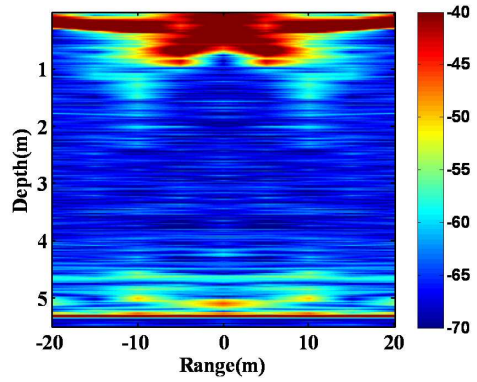
⑫ 항적 발생 220초 후

그림 4.9 주파수 430kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도

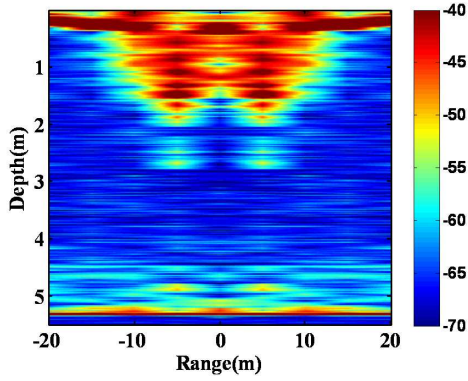
주파수 450kHz, 배의 속도 9knots인 환경에서의 체적 산란강도는 그림 4.10과 같다.



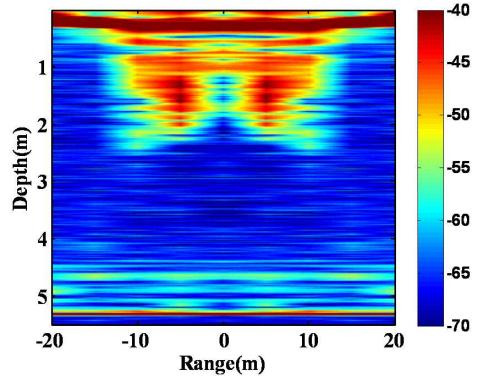
① 항적 발생 전



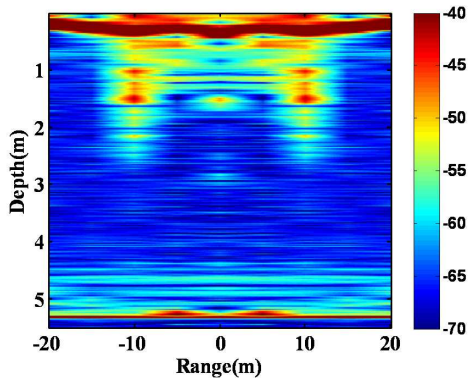
② 항적 발생 20초 후



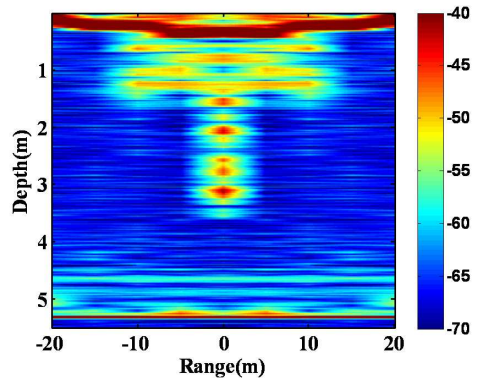
③ 항적 발생 40초 후



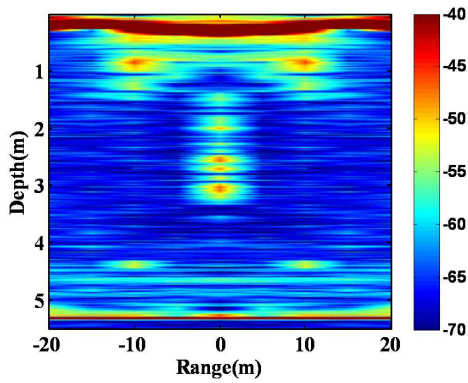
④ 항적 발생 60초 후



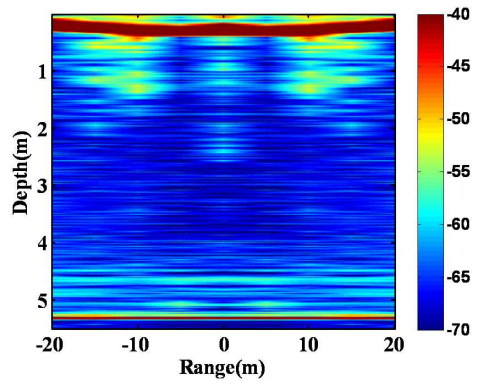
⑤ 항적 발생 80초 후



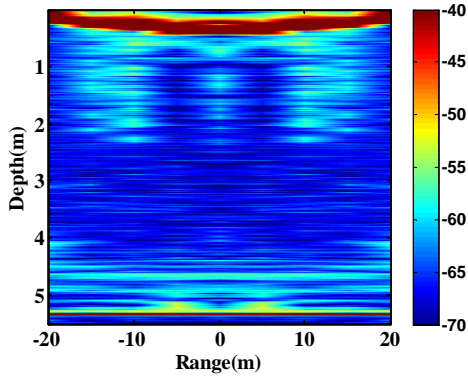
⑥ 항적 발생 100초 후



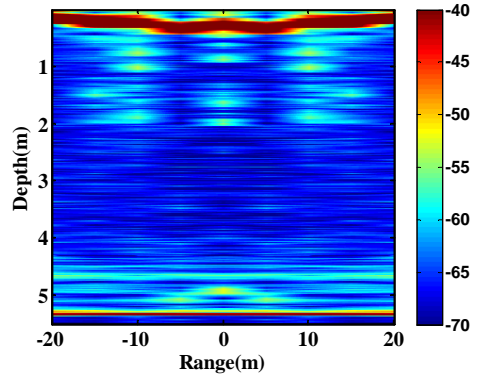
⑦ 항적 발생 120초 후



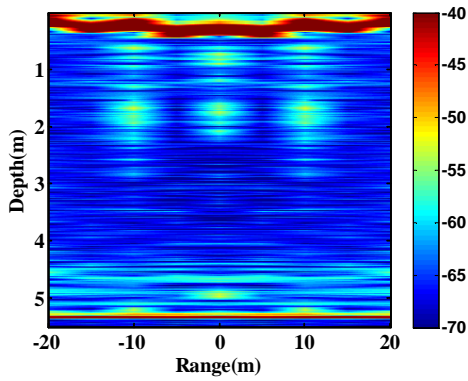
⑧ 항적 발생 140초 후



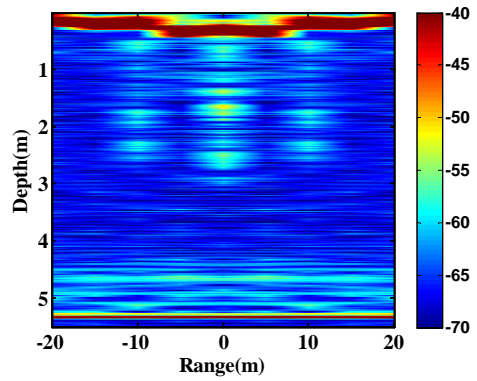
⑨ 항적 발생 160초 후



⑩ 항적 발생 180초 후



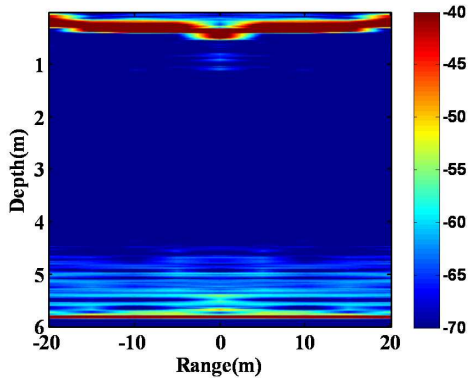
⑪ 항적 발생 200초 후



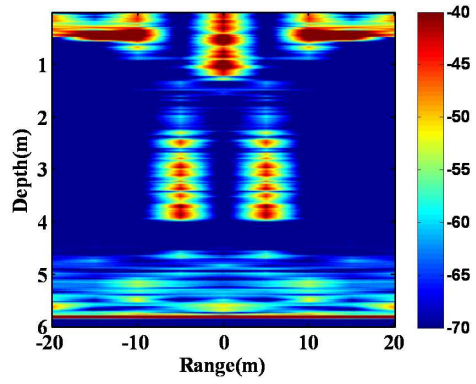
⑫ 항적 발생 220초 후

그림 4.10 주파수 450kHz, 배의 속도 9knots인 경우의 체적 산란강도

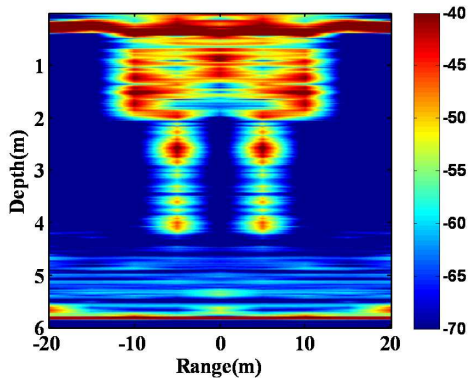
주파수 450kHz, 배의 속도 12knots에서의 체적 산란강도를 그림 4.11에 나타내었다.



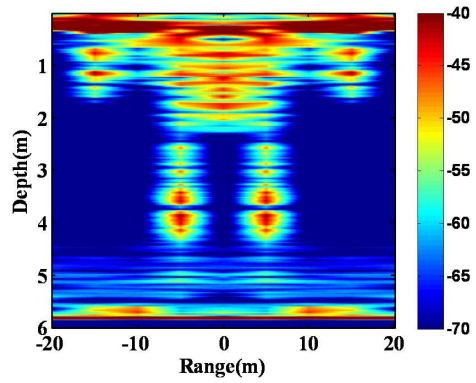
① 항적 발생 전



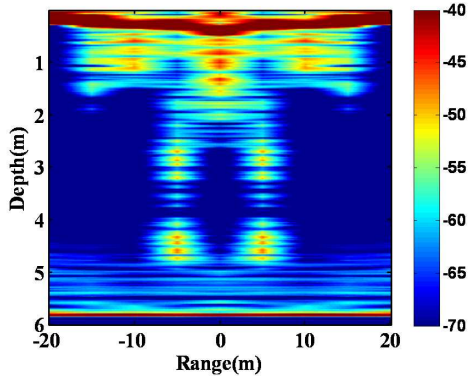
② 항적 발생 20초 후



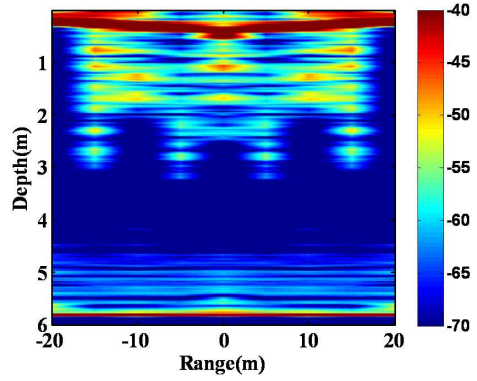
③ 항적 발생 40초 후



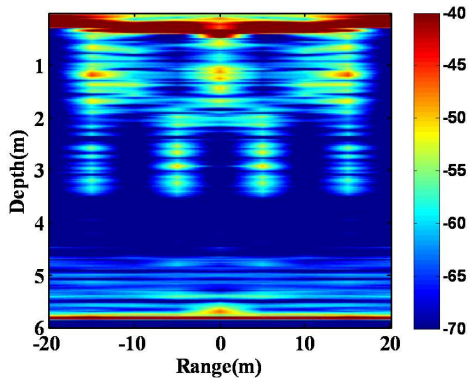
④ 항적 발생 60초 후



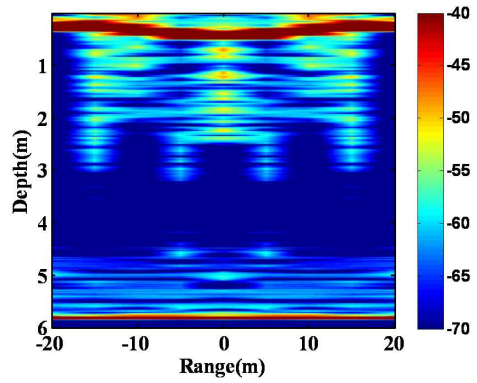
⑤ 항적 발생 80초 후



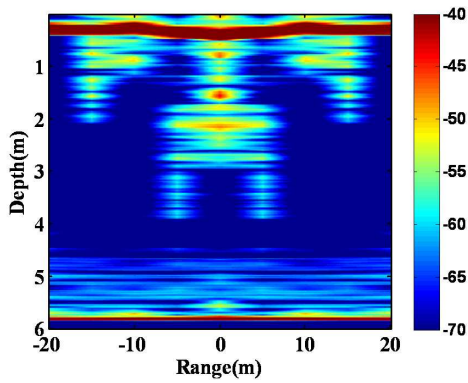
⑥ 항적 발생 100초 후



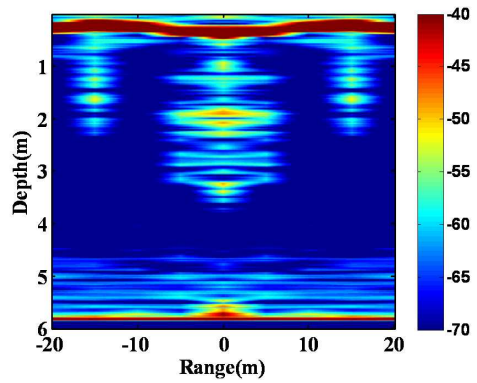
⑦ 항적 발생 120초 후



⑧ 항적 발생 140초 후



⑨ 항적 발생 160초 후

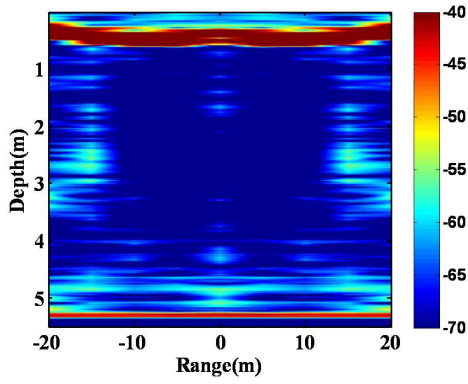


⑩ 항적 발생 180초 후

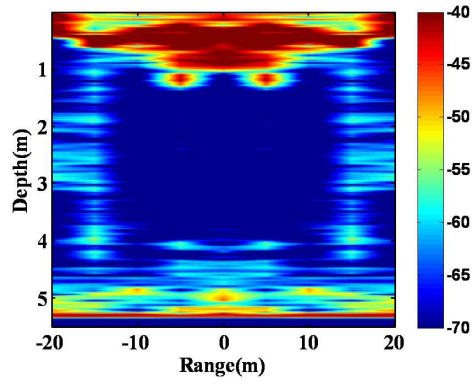
그림 4.11 주파수 450kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도



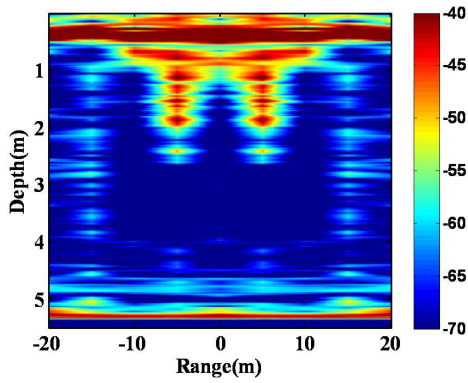
주파수 470kHz, 배의 속도 9knots인 환경에서의 체적 산란강도는 그림 4.12와 같다.



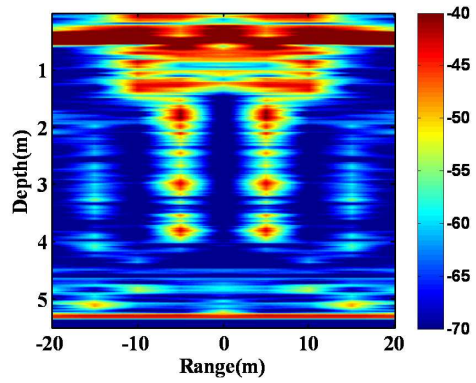
① 항적 발생 전



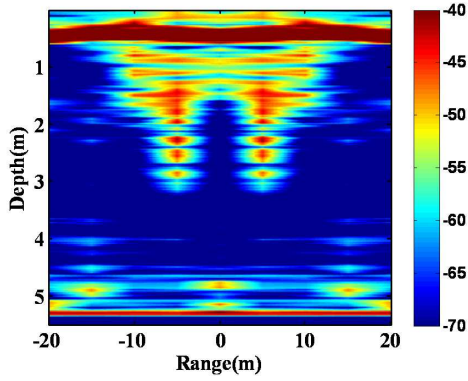
② 항적 발생 20초 후



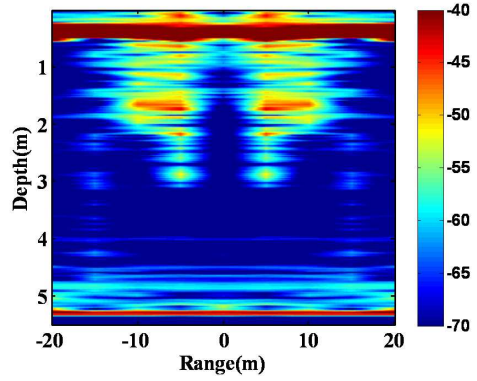
③ 항적 발생 40초 후



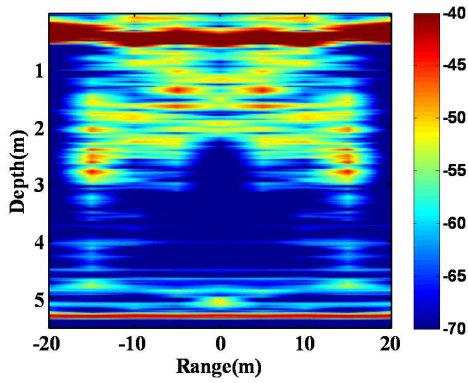
④ 항적 발생 60초 후



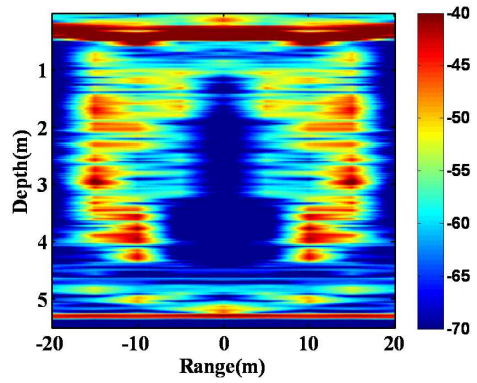
⑤ 항적 발생 80초 후



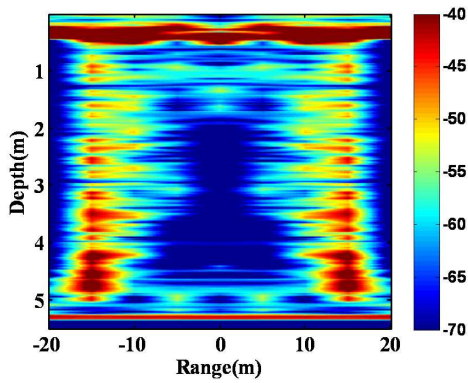
⑥ 항적 발생 100초 후



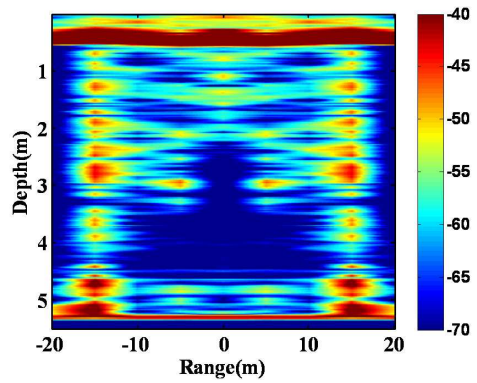
⑦ 항적 발생 120초 후



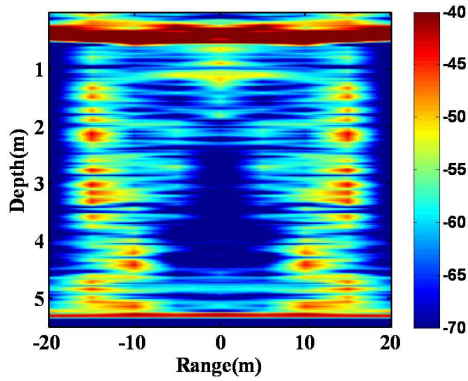
⑧ 항적 발생 140초 후



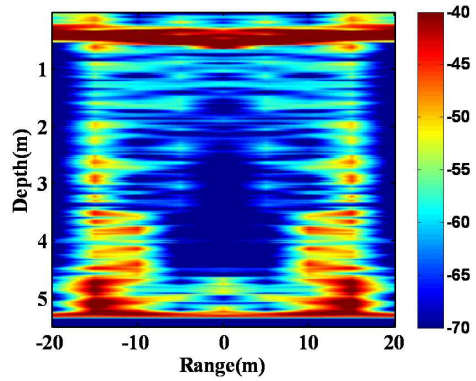
⑨ 항적 발생 160초 후



⑩ 항적 발생 180초 후



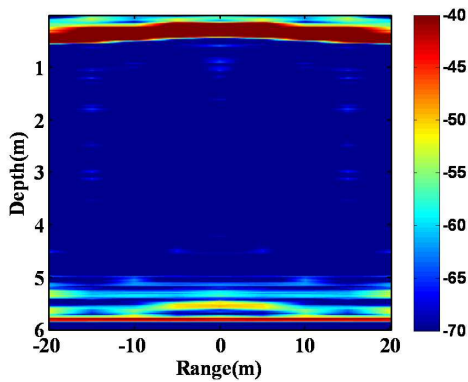
⑪ 항적 발생 200초 후



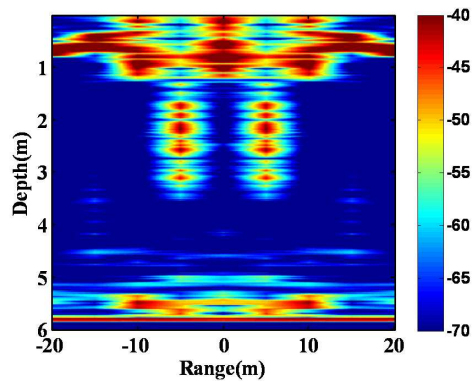
⑫ 항적 발생 220초 후

그림 4.12 주파수 470kHz, 배의 속도 9knots인 경우의 체적 산란강도

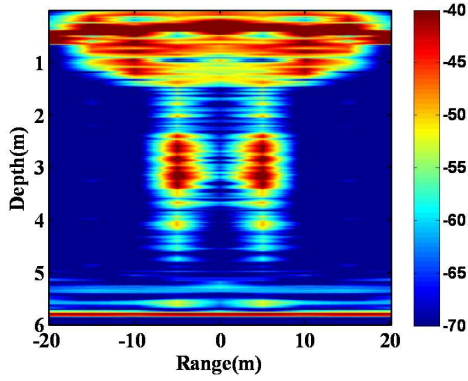
주파수 470kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도는 그림 4.13과 같다.



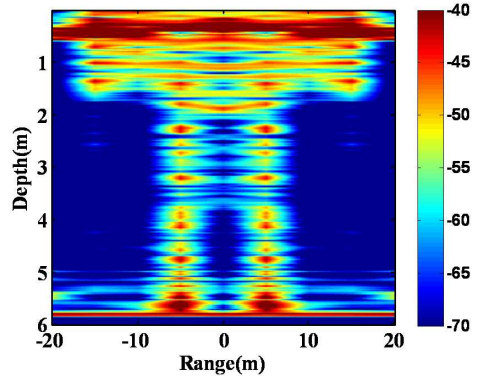
① 항적 발생 전



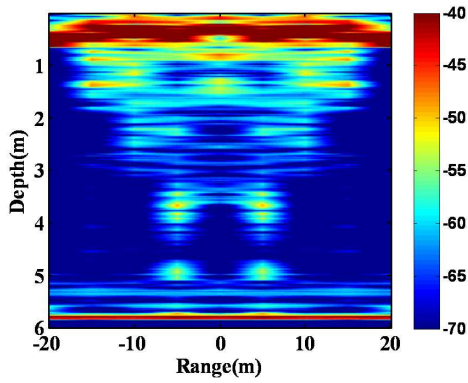
② 항적 발생 20초 후



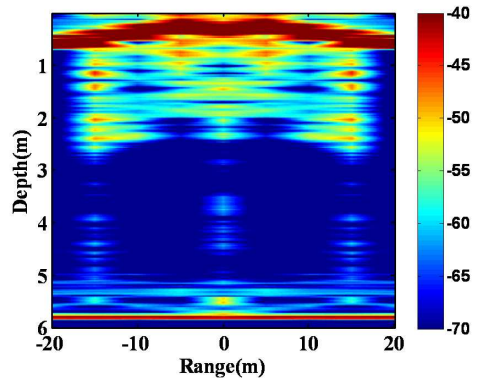
③ 항적 발생 40초 후



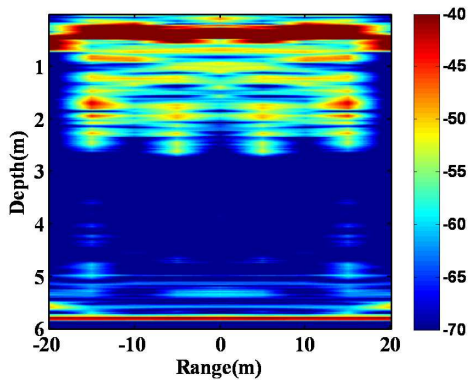
④ 항적 발생 60초 후



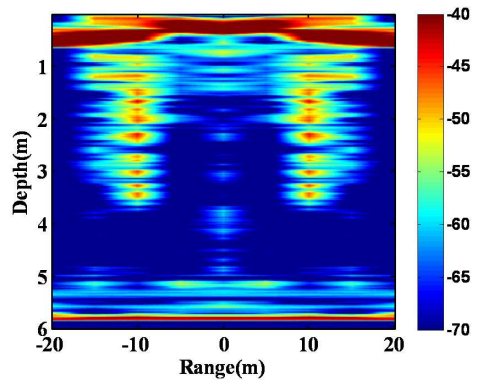
⑤ 항적 발생 80초 후



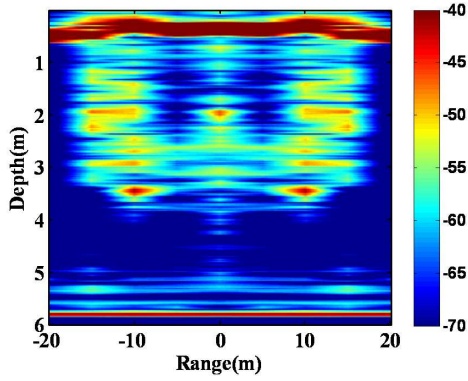
⑥ 항적 발생 100초 후



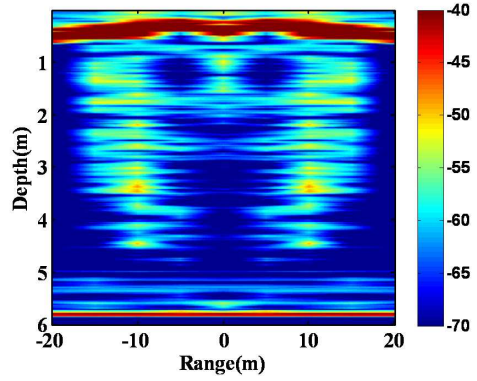
⑦ 항적 발생 120초 후



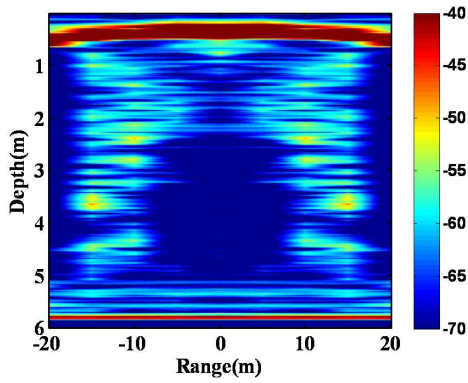
⑧ 항적 발생 140초 후



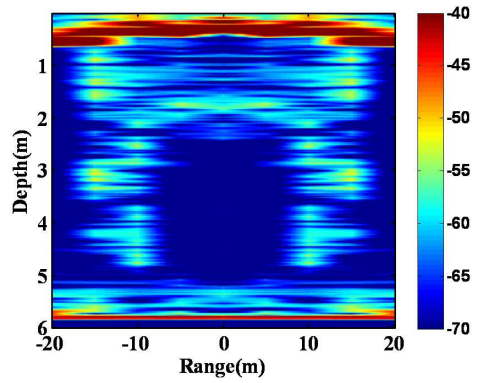
⑨ 항적 발생 160초 후



⑩ 항적 발생 180초 후



⑪ 항적 발생 200초 후



⑫ 항적 발생 220초 후

그림 4.13 주파수 470kHz, 배의 속도 12knots인 경우의 체적 산란강도

## 4.2. Wavelet 변환에 의한 난류 유동 특성

### 4.2.1. 분석방법

그림 4.14는 송신주파수 430kHz에서 항적이 없을 때의 수신신호이다. 또한 그림 4.15는 본 논문에서 Wavelet 변환에 사용된 기저함수이다. 두 신호를 식 (2.18)과 같이 곱하여 시간에 대한 적분을 취하면 그림 4.16에 나타난 바와 같이 시간-주파수특성을 분석할 수 있다. 그림 4.16에서 x축은 시간에 음파의 속도를 곱하여 거리로 환산한 값이고, y축은 kHz 단위의 주파수이다. 430kHz의 송신신호를 수신하는 과정에서 100kHz로 modulation 했기 때문에 90~110kHz 범위에서 분석하였다. 항적이 발생된 후 시간이 지남에 따라 획득된 신호를 이와 같은 방법으로 분석하여 관찰하면 난류의 유동 특성을 확인할 수 있을 것으로 생각되어 wavelet 변환을 통한 분석을 시도하였다.

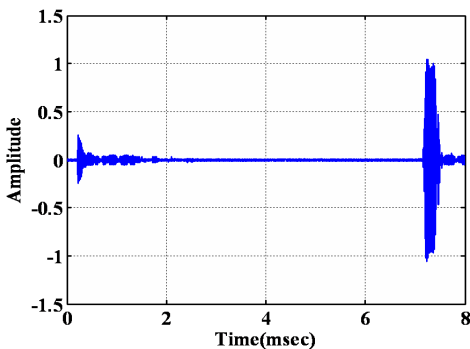


그림 4.14 430kHz에서 항적 발생 전에 수신된 신호

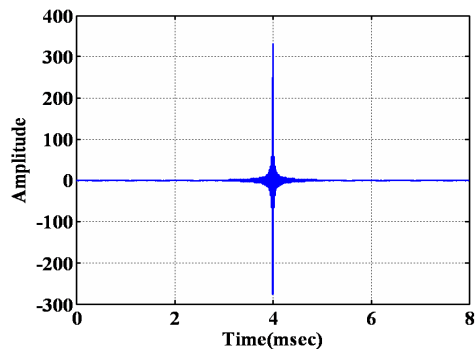


그림 4.15 웨이블릿 변환에 사용된 기저함수

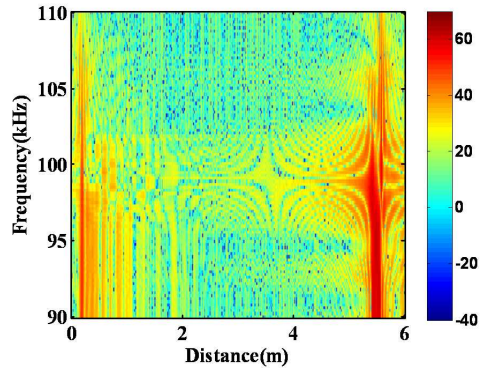
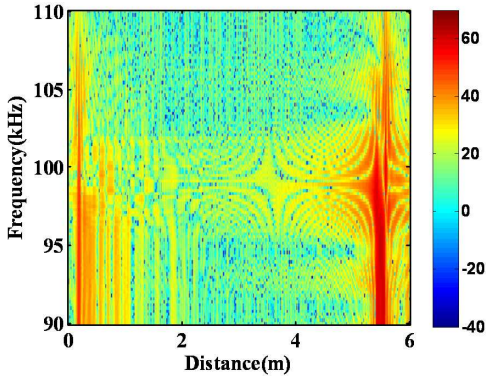


그림 4.16 웨이블릿 변환을 통해 분석된  
그림 4.14 신호의 주파수 특성

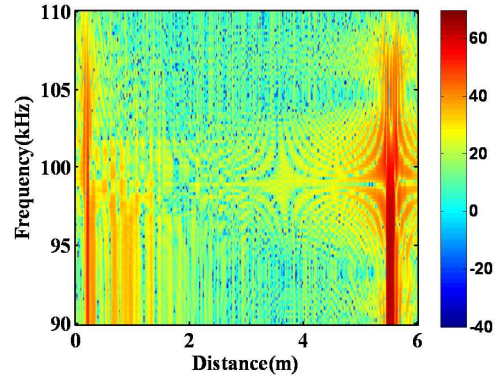
## 4.2.2. 분석결과

그림 4.17은 송신주파수 430kHz, 배의 속도 9knots에서 배가 0m 궤적을 진행할 때 각 시간별로 획득한 신호의 주파수 특성을 분석한 그림이다. 0m 지점이 송수신 센서의 위치이고 6m 부근에 진한 빨간색으로 나타나는 부분이 해수면이다. 난류 유동에 의한 도플러 효과로 주파수 변화를 확인할 수 있을 것으로 기대했으나 결과적으로 주파수 변화를 전혀 확인할 수 없었다.

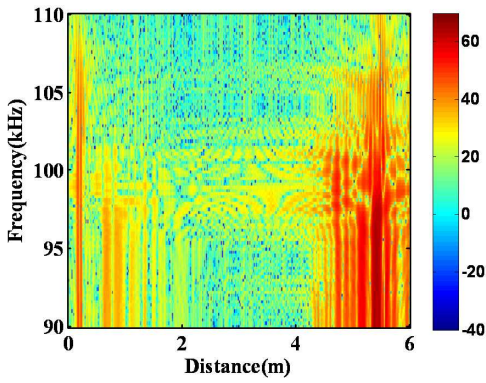




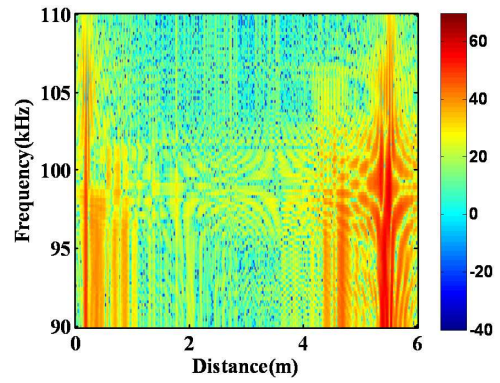
① 항적 발생 전



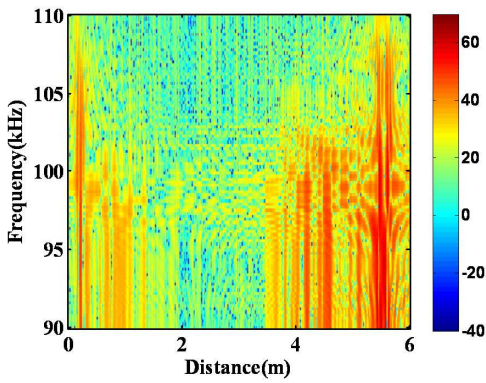
② 항적 발생 10초 후



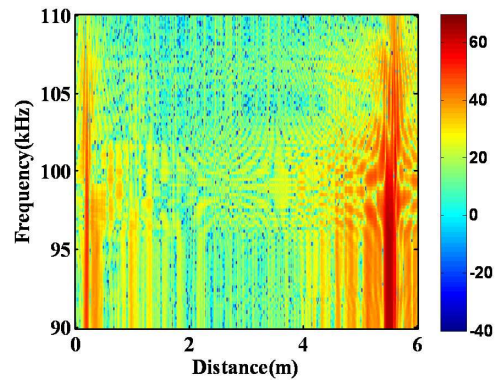
③ 항적 발생 40초 후



④ 항적 발생 1분 10초 후



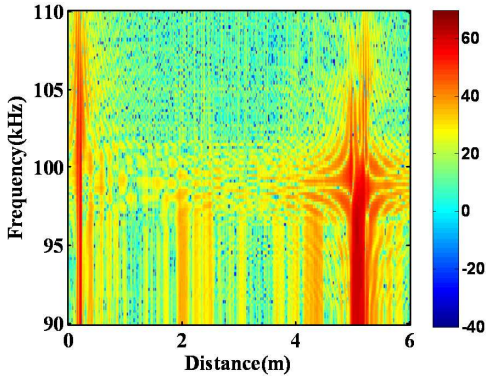
⑤ 항적 발생 1분 40초 후



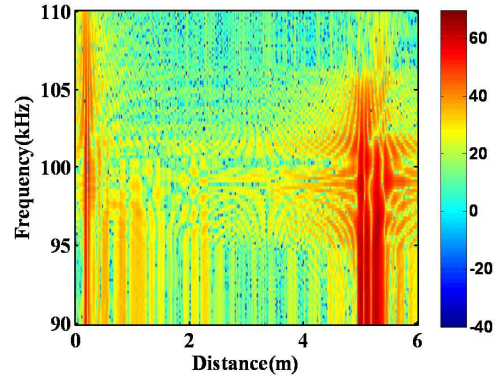
⑥ 항적 발생 2분 10초 후

그림 4.17 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 0m인 경우의 주파수 특성

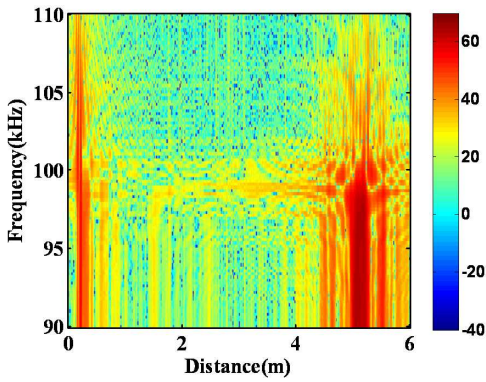
그림 4.18은 그림 4.17의 조건에서 주파수를 변화시켜 송신주파수 470kHz, 배의 속도 9knots, 0m 궤적에서의 신호를 분석한 그림이다. 4.17과 같이 주파수 변화에 대한 정보를 전혀 획득할 수 없다.



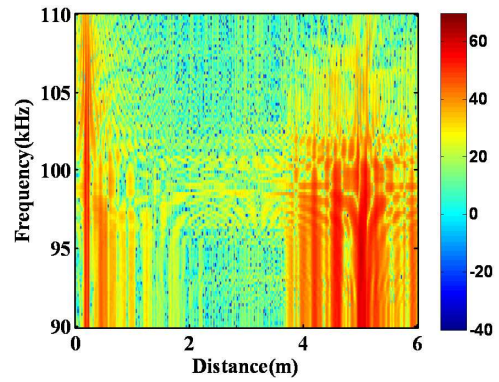
① 항적 발생 전



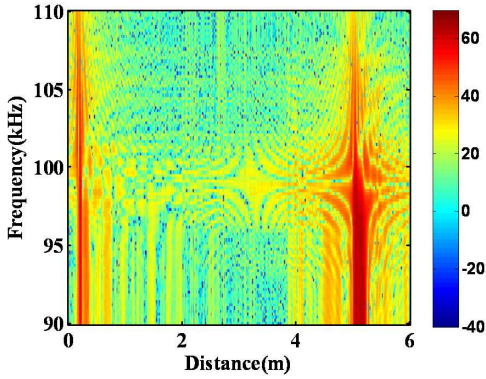
② 항적 발생 10초 후



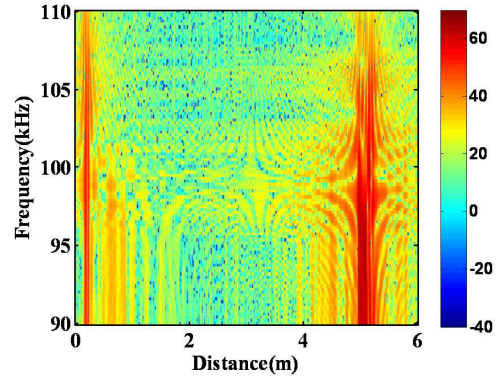
③ 항적 발생 40초 후



④ 항적 발생 1분 10초 후



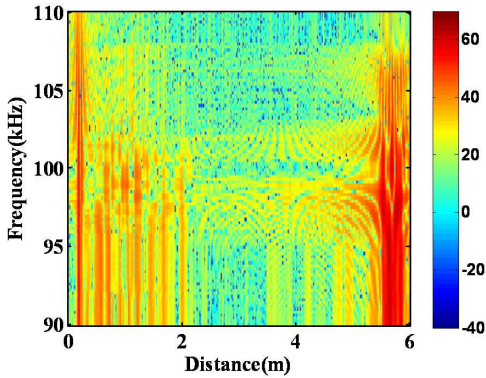
⑤ 항적 발생 1분 40초 후



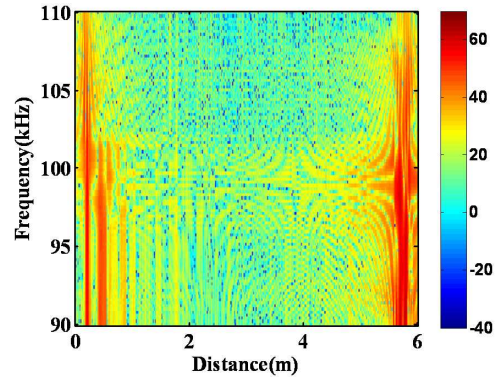
⑥ 항적 발생 2분 10초 후

그림 4.18 주파수 470kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 0m인 경우의 주파수 특성

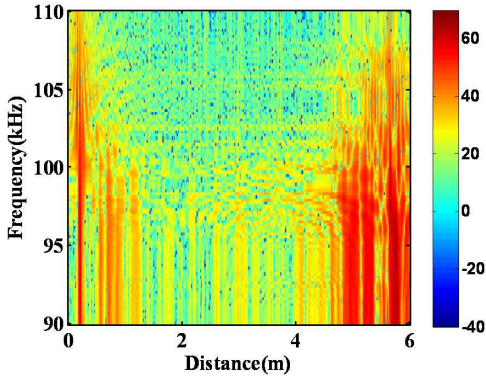
그림 4.19는 그림 4.18과 배의 속도차이에 따른 결과를 비교하기 위해 송신주파수 470kHz, 배의 속도 12knots에서의 신호를 분석한 결과이다. 이전의 결과와 마찬가지로 주파수 변화를 확인할 수 없다.



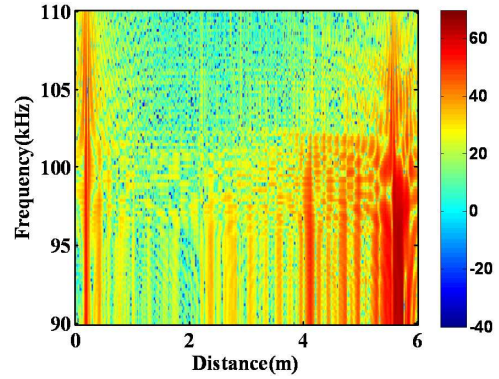
① 항적 발생 전



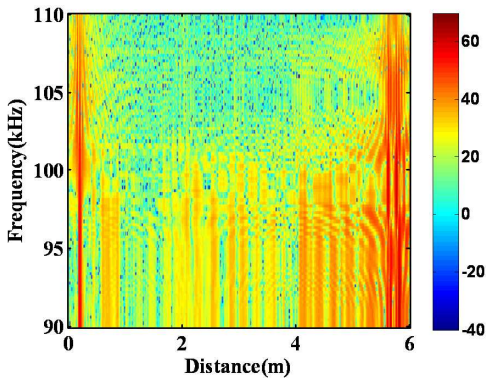
② 항적 발생 10초 후



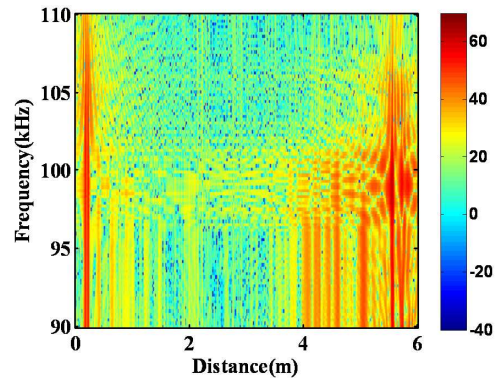
③ 항적 발생 40초 후



④ 항적 발생 1분 10초 후



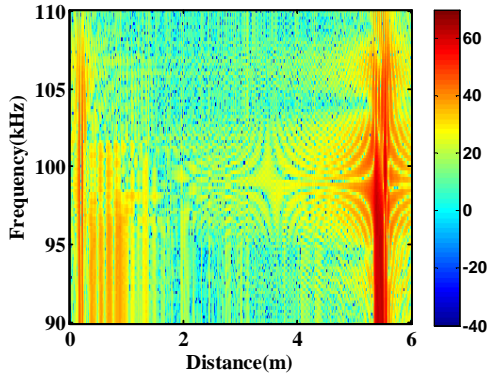
⑤ 항적 발생 1분 40초 후



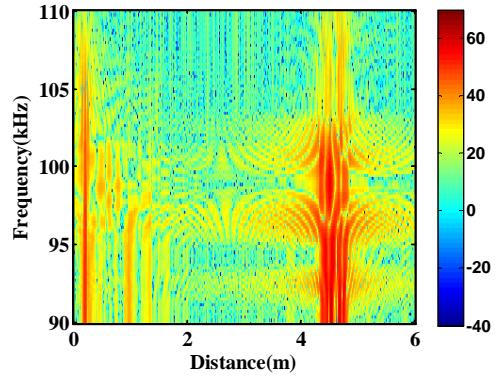
⑥ 항적 발생 2분 10초 후

그림 4.19 주파수 470kHz, 배의 속도 12knots, 배의 궤적 0m인 경우의 주파수 특성

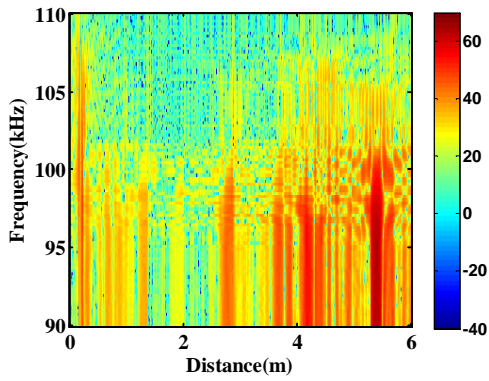
그림 4.20은 그림 4.17과 배의 궤적에 따른 결과를 비교하기 위해 송신주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 5m 일 때의 신호를 분석한 결과이다. 그림 4.17과 특별한 차이를 발견할 수 없다.



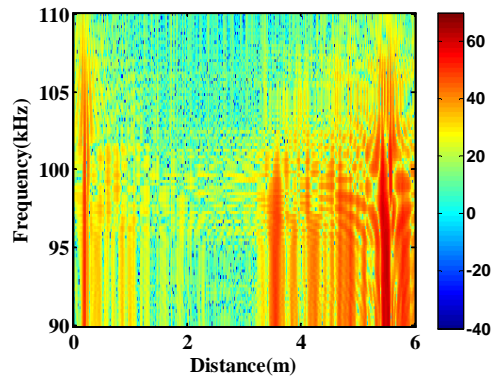
① 항적 발생 전



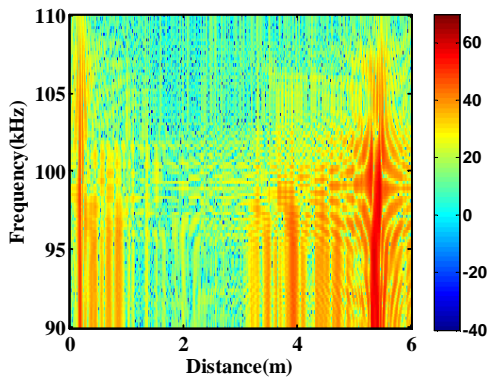
② 항적 발생 10초 후



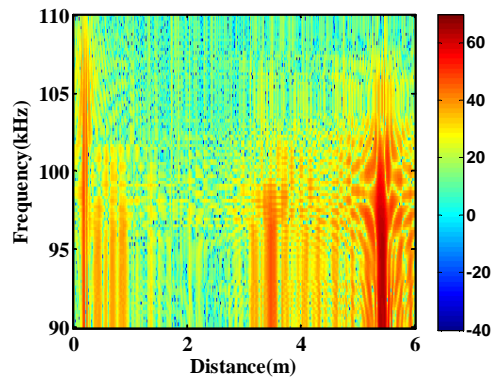
③ 항적 발생 40초 후



④ 항적 발생 1분 10초 후



⑤ 항적 발생 1분 40초 후



⑥ 항적 발생 2분 10초 후

그림 4.20 주파수 430kHz, 배의 속도 9knots, 배의 궤적 5m인 경우의 주파수 특성

## 5. 결론

선박에 의해 생성된 항적 내에는 많은 양의 기포들이 해수면 아래에 층을 이루어 존재하고, 이는 음파의 산란에 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 이러한 기포군의 음향 산란특성을 실험을 통해 연구하였다.

산란강도는 곧 기포군의 밀도를 나타내기 때문에, 먼저 음향학적 이론에 기초하여 복반사음 준위와 체적 산란강도의 계산방법을 검토하였다. 그리고 실제 해상실험을 통하여 항적 내에 존재하는 기포군에 의한 음향산란신호를 획득하였다. 실험은 주파수 430, 450, 470kHz의 송신 신호를 이용하여 배의 속도가 9, 12knots인 경우에 대하여 센서로부터의 수평거리가 20~25m 되는 지점까지 5m 간격으로 항적을 생성하며 수행하였고 획득된 음향산란신호를 이용하여 복반사음 준위와 체적 산란강도를 계산하였다. 계산된 산란강도를 통해 수중의 2차원 단면에서의 기포군의 시공간적 거동을 확인하였다.

또한 획득된 음향산란신호를 바탕으로 Wavelet 변환을 이용하여 시간-주파수 특성 분석을 통한 도플러 효과로부터 항적에 의한 난류의 유동 특성을 확인하려고 시도하였다. 그러나 주파수 분해능이 낮아 주파수 변화량을 확인할 수는 없었다. 따라서 주파수 분해능을 높여 미세한 주파수 변화량을 정량적으로 파악할 수 있는 분석방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] Svein Vagle and Holly Burch, "Acoustical measurements of the sound-speed profile in the bubbly wake formed by a small motor boat," J. Acoust. Soc. Am. **117** (1), 153-163, 2005.
- [2] Mark V. Trevorrow, Svein Vagle and David M. Farmer, "Acoustical measurements of microbubbles within ship wakes," J. Acoust. Soc. Am. **95** (4), 1922-1930, 1994.
- [3] Lev A. Ostrovsky, A. M. Sutin, Irina A. Soustova, A. L. Matveyev, A. I. Potapov and Zigmund Kluzek, "Nonlinear scattering of acoustic waves by natural and artificially generated subsurface bubble layers in sea," J. Acoust. Soc. Am. **113** (2), 741-749, 2003.
- [4] Peter H. Dahl, "On bistatic sea surface scattering: Field measurements and modeling," J. Acoust. Soc. Am. **105** (4), 2155-2169, 1999.
- [5] Peter H. Dahl and George Kapodistrias, "Scattering from a single bubble near a roughened air-water interface: Laboratory measurements and modeling," J. Acoust. Soc. Am. **113** (1), 94-101, 2003.
- [6] E. Y. T. Kuo, "Sea surface scattering and propagation loss: Review, update, and new predictions," IEEE J. Ocean. Eng. **13**, 229-234, 1988.
- [7] Suzanne T. McDaniel, "Sea Surface reverberation: A review," J. Acoust. Soc.

Am. 94 (4), 1905-1922, 1993.

[8] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill, New York  
1983.