

공학석사 학위논문

항적의 미세 기포에 의해 산란된 신호의  
모의와 실험적 연구

*Simulation and Experimental Investigation  
of Reverbed Signal Due to Microbubbles  
within Ship Wake*

지도교수 김 재 수

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김 정 해



공학석사 학위논문

항적의 미세 기포에 의해 산란된 신호의  
모의와 실험적 연구

*Simulation and Experimental Investigation  
of Reverbed Signal Due to Microbubbles  
within Ship Wake*

지도교수 김 재 수

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김 정 해

本 論文을 金貞海의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 : 공학박사 서 영 교



위 원 : 공학박사 김 재 수



위 원 : 공학박사 김 우 식



2007년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

김 정 해

# 목 차

목차 .....	I
그림 목차 .....	II
Abstract .....	III
<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 .....	5
<b>2. 음향학적 모델 .....</b>	<b>6</b>
2.1. 항적 모델 .....	6
2.1.1. 항적의 기하학적 형상 .....	6
2.1.2. 항적에 의한 체적 산란강도 .....	8
2.1.3. 항적에 의한 해수면 산란강도 .....	10
2.2. 음향학적 모델의 개요 .....	12
2.3. 음향학적 모델의 모의 수치 실험 .....	20
<b>3. 운동학적 모델 .....</b>	<b>27</b>
3.1. 좌표계의 설정 .....	27
3.2. 오일러 변환 .....	28
<b>4. 항적에 의한 음향 산란 해상 실험 .....</b>	<b>30</b>
4.1. 실험 환경 및 장비의 구성 .....	30
4.2. 자료의 획득 및 분석 .....	32
<b>5. 결론 .....</b>	<b>38</b>
<b>6. 참고 문헌 .....</b>	<b>39</b>

# 그림 목차

그림 2.1	항적의 기하학적 형상 .....	6
그림 2.2	기포에 의한 해수면 산란 기작 .....	10
그림 2.3	체적 복반사에 대한 방사된 체적 .....	14
그림 2.4	solid angle에 대한 개념도 .....	15
그림 2.5	Spatial division of reverberation field .....	20
그림 2.6	체적 복반사의 계산 .....	21
그림 2.7	해수면 복반사 계산 .....	21
그림 2.8	수치적 방법에 의해 구한 체적과 해수면 복반사 준위 .....	22
그림 2.9	해석적 식을 이용해 구한 체적 복반사 준위 .....	23
그림 2.10	시간에 따른 체적과 해수면 복반사 준위 .....	24
그림 2.11	모의 음원 신호 .....	24
그림 2.12	모의된 수신 신호 .....	25
그림 2.13	시간에 따른 모의 잔향 신호 .....	26
그림 2.14	모의 잔향 신호를 이용해 구한 복반사 준위 .....	26
그림 3.1	좌표계 .....	27
그림 3.2	음원의 이동 .....	29
그림 4.1	실험 해역 및 환경 .....	30
그림 4.2	센서 거치대 .....	31
그림 4.3	실험 장비의 구성 .....	31
그림 4.4	주변 소음 .....	32
그림 4.5	항적이 존재 하지 않을 때의 수신 신호 .....	32
그림 4.6	항적이 존재 하지 않을 때의 수신 신호 .....	33
그림 4.7	주변 소음의 스펙트럼 준위 .....	34
그림 4.8	항적 발생 전 수신 신호의 스펙트럼 준위 .....	34
그림 4.9	항적 발생 후 수신 신호의 스펙트럼 준위 .....	35
그림 4.10	항적 존재시의 복반사 준위와 주변 소음 준위 .....	36
그림 4.11	모의 수치 모델의 결과와 실험 결과의 비교 .....	37

# Simulation and Experimental Investigation of Reverbered Signal Due to Microbubbles within Ship Wake

by

*Jung Hae Kim*

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, a reverberation model simulating the signal scattered by microbubbles within the ship wake is developed and compared with the experimental data. In order to calculate the scattering strength, the bubble radius and corresponding bubble population are considered.

We show that the experimental results can be simulated with the developed model using a set of acoustic parameters. Finally, the discussions and future research directions are given.



# 1. 서론

## 1.1. 연구의 목적 및 필요성

항적(wake)이란, 수상 또는 수중 운동체가 지나간 자취를 말하며, 이는 크게 수상함에 의한 기포항적과 수중함, 즉 잠수함에 의한 난류 항적으로 나뉜다. 수상함의 항적에 의해 생성된 많은 양의 기포들은 큰 음향 단면(acoustical cross section)으로 인해 음파의 잔향을 일으킨다.

잔향음이란 소나(SONAR, SOund NAVigation and Ranging) 운용시 방출된 음파가 표적에 도달하기 전 해양의 다양한 불 균질한 매질이나 경계면에 부딪혀 산란되고, 반사되어 음원으로부터 재 방사되어 되돌아오는 신호를 말하며, 모든 산란체로부터 되돌아오는 신호의 시간에 따른 총합을 복반사(reverberation)라 한다. 이러한 반향 신호는 오탐 확률을 높여 탐지거리를 상대적으로 낮추는 역할을 하게 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 공진현상이 발생하면 기포의 진폭은 최대가 되며 입사음파로부터는 최대 에너지가 유출된다. 이 에너지의 일부분은 진동하는 기포에 의해 모든 방향으로 분산되며, 나머지 부분은 기포 내 열의 전도와 주위 해수의 점성 및 기포 표면의 표면장력에 의해 열로 변환된다[1].

본 논문에서는 이러한 수상함의 항적을 소나로 탐지하기 위해 항적에 일정 시간 잔존하여 음향산란을 일으키는 기포들의 음향 산란의 기작을 규명하고, 그 음향학적인 특성을 파악하여 모델링 하는데 그 목적이 있다.

## 1.2. 연구의 내용 및 방법

항적에 의해 발생하는 기포 중 200 $\mu\text{m}$ 이상의 큰 기포의 경우 10초 이내에 해수면으로 상승하여 소멸하고, 그보다 작은 기포들은 주파수 범위 10~400kHz에서 강한 공진을 나타내게 되는데, 이때의 기포의 반경과 공진 주파수와의 관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$f_R = (2\pi a)^{-1} \sqrt{3\gamma P_0 / \rho_w} \quad (1.1)$$

여기에서  $a$ 는 기포 반경,  $P_0$ 는 정수압,  $\gamma$ 는 비열비(공기의 경우 1.4),  $\rho_w$ 는 물의 밀도이다.

수심 0 ( $P_0 = 1$ 기압) 인 해수면에서의 공기( $\gamma = 1.4$ )에 대한 위의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$f_R = \frac{326}{a} \quad (1.2)$$

수심  $d$ 에서 기포의 공진 주파수는 다음과 같이 표현 할 수 있다[1].

$$f_R = \frac{326}{a} \sqrt{1 + 0.03d} \quad (1.3)$$

기포의 진동은 소산단면(extinction cross section)에 의해 결정되는 입사 음파에 의한 모든 방향으로 음파가 산란되는 재 방사에 의한 간섭현상으로 볼 수 있다. 공진주파수  $f_r$ 에서 반경이  $a$ 인 기포인 경우, 주파수  $f$ 에서의 소산단면을 감쇄계수  $\delta$ 로 표시하면 다음과 같이 표현된다[1].

$$\sigma_e = \frac{4\pi a^2 \delta / k_r a}{(f_r^2 / f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (1.5)$$

여기에서  $k_r a = 2\pi a / \lambda_r$  이다.

또한 흡음단면(absorption cross section)은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_a = \frac{4\pi a^2 (\delta / k_r a - 1)}{(f_r^2 / f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (1.6)$$

마지막으로 산란단면(scattering cross section)은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma_s = \frac{4\pi a^2}{(f_r^2 / f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (1.7)$$

그래서 최종적인 소산, 산란 그리고 흡음 단면의 관계는 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s \quad (1.8)$$

이 단면들은 공진주파수에서 최대가 되며 주파수가 공진으로부터 멀어질수록 급격히 감소한다[1].

본 논문에서는 복반사 준위를 구하는 음향학적 이론에 기포의 산란단면을 이용한 산란강도 식을 적용하여 기포에 의한 복반사 준위를 시뮬레이션해 보고, 실험을 통해 항적의 존재유무에 따른 잔향 신호를 측정하고 분석하여 이를 시뮬레이션 결과와 비교해 보았다.

### 1.3. 논문의 구성

본 논문은 선박의 항적에 의해 발생하는 기포에 의한 잔향신호 모의에 관한 연구로 총 5개의 장으로 구성 되어 있다.

1장에서는 연구의 개괄적인 내용과 연구의 목적 및 필요성에 관해 정리한다. 2장에서는 항적의 기하학적 형상 및 항적에 의한 체적 산란강도와 해수면 산란강도에 대해 알아보고, 음향학적 모델의 개요와 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 3장에서는 운동학적 모델의 기본적인 이론에 관해 간단히 살펴본다. 마지막으로 4장에서는 해상 실험을 통해 획득한 항적의 존재 유무에 따른 수신신호의 변화에 관한 자료를 분석하고, 이에 관해 논의 한다.

## 2. 음향학적 모델

### 2.1. 항적 모델

#### 2.1.1. 항적의 기하학적 형상

항적의 기하학적 형상은 선박의 종류와 속도에 의해 결정 된다. 항적의 대표적인 형상으로는 Kelvin 항적이 있는데, 이는 항해하는 선박의 후미에 표면장력파의 형태로 나타나며, 주로 V자 모양으로 반각이 약  $19.5^\circ$ 로 알려져 있다.

Kelvin 항적은 두 가지 파로 구성되는데, 선박으로 부터 퍼져나가는 발산파(divergent wave)와 그 뒤를 따르는 횡파(transverse wave)가 그것이다. 발산파는 큰 선수파로 시작되고, 선수 양쪽에 이를 뒤따르는 비스듬한 파도들이 차례로 사다리꼴을 이루며 퍼져나간다. 배의 양쪽으로 퍼져나가는 발산파 사이에는 횡파가 발생한다. 횡파의 파정(crest)은 선체 근처에서는 배의 진행 방향에 수직하나, 발산파에 접근함에 따라 뒤로 굽으면서 결국 그것과 합쳐진다[3].

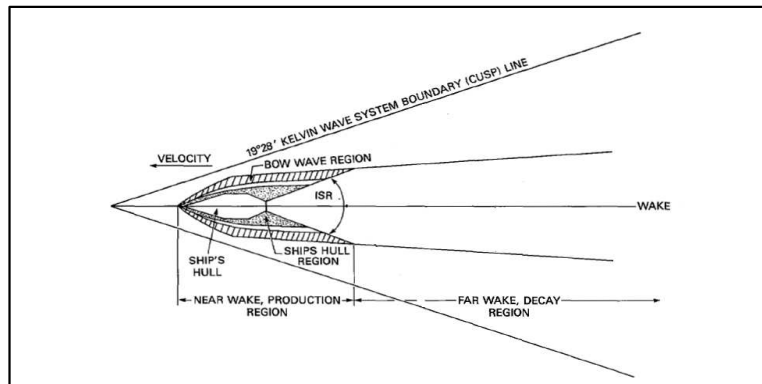


그림 2.1 항적의 기하학적 형상[4]

그림 2.1은 항적의 기하학적 형상에 관해 나타내고 있는데, 여기서 보이는 Near wake영역은 선박의 이동으로 인해 선수파가 깨짐으로서 주로 발생하는 기포와 난류에 의한 영역이라고 할 수 있다. 여기에 포함되는 Ship hull region은 선박의 선체(hull)표면과의 마찰력 때문에 선체부근 난류 경계층에서 공기 혼입(air entrainment)으로 인해 발생 하며, Bow wave region은 선박의 선수에 의한 파의 깨짐(breaking)으로 인해 발생한다. 또한 ISR(Initial Spreading Region)은 선박의 프로펠러에 의해 발생하며, 큰 발산 각을 가진다. Far wake 영역은 항적이 감소(decay)되는 영역으로 주로 작은 해수면 거칠기의 형태로만 나타난다.

## 2.1.2. 항적에 의한 체적 산란강도

해수의 체적내의 산란체들은 음파의 산란에 큰 영향을 미치며, 이는 표적의 탐지에 장애요소가 된다. 이러한 체적 산란체들에 의한 체적산란강도 (volume scattering strength)는 선박의 항적에 의한 영향이 없는 경우 주로 해상 풍에 의한 생성된 미세 공기방울이나 해수중의 부유물에 큰 영향을 받는다고 알려져 있지만, 선박의 항적에 의해 생성된 많은 양의 기포들이 존재할 경우, 이들에 의한 공진현상에 큰 영향을 받게 된다.

수상함의 항적에 의해 생성된 많은 양의 기포들은 해수면 아래에 기포층을 형성 하고, 이렇게 형성된 기포 층에는 수많은 크기의 공기방울들이 존재하게 된다. 이들 중 비교적 큰 크기의 공기방울들은 해수면으로 떠올라 사라지게 되고, 작은 크기의 공기방울들은 해수에 용해되지만 크기가 약 8~200 $\mu\text{m}$  정도인 중간크기의 공기방울들은 해수 중에 수분이상 존재하며, 이는 음파의 잔향에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 단위체적 1 $\text{m}^3$  에 각각의 산란단면이  $\sigma_s$ 인 n개의 기포를 포함(bubble/ $\text{m}^3$ )하는 산란강도는 다음과 같이 표현된다[1].

$$S_v = 10\log\frac{n\sigma_s}{4\pi} = 10\log\frac{na^2}{(f_r^2/f^2 - 1) + \delta^2} \quad (2.1)$$

여기에서 기포의 반경  $a$ 는 m 단위이며,  $f_r$ 은 공진 주파수,  $\delta$ 는 감쇠 상수로 세 가지 요소로 구성된다. 이는 각각 다음과 같다[5].

$$\delta = \delta_{\text{th}} + \delta_{\text{rad}} + \delta_{\text{vis}} \quad (2.2)$$



여기서  $\delta_{th}$ 는 열전도성(thermal conductivity)에 의한 감쇠 상수,  $\delta_{rad}$ 는 산란에 의한 감쇠 상수,  $\delta_{vis}$ 는 점성률(viscosity)에 의한 감쇠 상수로 아래와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\delta_{th} = 3(\gamma - 1) \left[ \frac{X(\sinh X + \sin X) - 2(\cosh X - \cos X)}{X^2(\cosh X - \cos X) + 3(\gamma - 1)X(\sinh X - \sin X)} \right] \quad (2.3)$$

$$\delta_{rad} = \rho R_0^3 \omega^3 / 3\eta P_0 c \quad (2.4)$$

$$\delta_{vis} = 4\omega\mu / 3\eta P_0 \quad (2.5)$$

여기서  $X$ 는  $R_0(2\omega/D_1)^{\frac{1}{2}}$ ,  $\eta$ 는  $\gamma(1 + \delta_{th}^2)^{-1} \left[ 1 + 3 \frac{(\gamma - 1)}{X} \left( \frac{\sinh X - \sin X}{\cosh X - \cos X} \right) \right]^{-1}$ 로 각각 계산 할 수 있으며,  $P_0$ 는 유체의 정역학적 압력(hydrostatic pressure in liquid),  $\gamma$ 는 기체의 비열비(ratio of specific heats of the gas),  $\rho$ ,  $c$ ,  $\mu$ 는 각각 해수의 밀도(density), 음속(speed of sound), 점성(viscosity)을 나타내며,  $D_1$ 은 계수(constant)로  $0.2cm^2/sec$ ,  $R_0$ 는 기포의 반경(radius of bubble),  $\omega$ 는 각주파수(angular frequency)를 나타낸다.

### 2.1.3. 항적에 의한 해수면 산란강도

해수면의 경우 시 공간적인 변화가 심하므로 해수면에서의 음파 간섭현상을 설명 하는데 많은 어려움이 따른다.

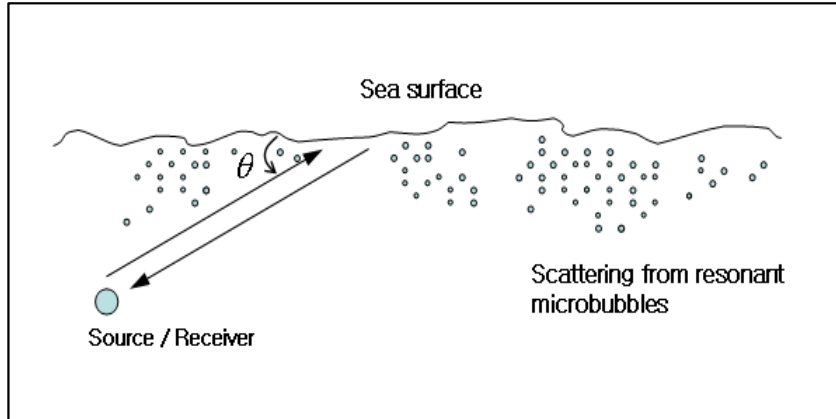


그림 5.2 기포에 의한 해수면 산란 기작

해수면 복반사는 해수면의 거칠기와 해수면 아래에 존재하는 기포에 의한 산란에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 해수면 산란강도(sea surface scattering strength)는 주로 음파의 해수면에 대한 입사각도, 음원의 주파수, 그리고 바람에 의한 해수면의 거칠기에 따라 변화한다고 알려져 있으며, 또한 항적에 의한 많은 공기 방울이 해수면에 존재할 경우 해수면 산란강도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$S_A = 10\log(10^{S_s/10} + 10^{S_B/10}) \quad (2.6)$$

식(2.2)에서  $S_s$  는 Chapman-Harris의 해수면 산란강도에 관한 실험식으로 다음과 같은 식으로 나타 낼 수 있다[7].

$$S_s = 3.3 \log_{10} \left( \frac{\theta}{30} \right) - 42.4 \log_{10} \beta + 2.6 \quad (2.7)$$

여기서  $\beta = 158(vf^{1/3})^{-0.58}$  이고,  $v$ 는 풍속,  $f$ 는 사용 주파수를 나타낸다.

또한,  $S_B$ 는 기포에 의한 산란강도를 나타낸 식으로, 식(2.1)과 같으며 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$S_B = 10 \log \frac{n\sigma_s}{4\pi} = 10 \log \frac{na^2}{(f_r^2/f^2 - 1) + \delta^2} \quad (2.8)$$

여기에서 기포의 반경  $a$ 는 cm 단위이다.

해수면 산란강도는 무지향성 음원 또는 원하는 방향에서의 잔향음을 측정할 수 있는 방향성 음원에 의하여 측정될 수 있으며, 저주파, 작은 수평 입사각에서는 주파수에 강한 의존성을 나타내며 고주파, 큰 수평 입사각에서는 주파수에 의한 영향이 약한 것으로 알려져 있다[7].

## 2.2. 음향학적 모델의 개요

본 논문의 복반사 모델에서는 해양을 여러 개의 셀로 나누고, 다수의 산란체가 각 셀에 균등하게 분포해 있다는 가정 하에, 각 셀에서의 산란강도를 모두 구하여 시간별로 합하는 방법으로 전체의 복반사 준위를 계산한다.

체적 복반사의 경우에는 수면 아래 40m에 센서가 있다고 가정하고, 센서가 해수면 쪽인 상향을 향하여 음파를 입사할 때 해수면에 도달하기 전의 체적과 해수면에서 반사 되어 다시 되돌아오는 체적의 잔향준위를 기포의 영향에 의한 산란강도의 식을 이용하여 모의 하였고, 해수면 복반사의 경우에는 음파가 해수면에 입사될 때, 해수면을 따르는 수평거리에서의 잔향준위를 Chapman-Harris의 해수면 산란강도에 관한 실험식과 기포에 의한 해수면 산란강도를 더한 식을 이용하여 각각 계산 하였다.

복반사 준위의 계산 과정을 좀 더 자세히 살펴보면, 음원으로부터 1m거리에서의 음의 세기(intensity)  $I_0$ 는 음원준위(source level)와 다음과 같은 관계가 있다.

$$SL = 10 \log \frac{I_0}{I_{ref}} \quad (2.9)$$

임의의 거리  $r$ 에서의 음의 세기와 음원으로부터 단위거리에서의 음의 세기  $I_0$ 의 관계는 다음과 같다.

$$I = I_i = I_0 \cdot (\theta, \varphi) \cdot \left( \frac{r_{ref}}{r} \right)^2 \quad (2.10)$$

여기에서  $b(\theta, \varphi)$ 는 송신 빔 패턴(transmitting beam pattern)을 나타낸다.

$dV$  만큼의 체적으로부터 복반사 된 음의 세기를  $dI_r$  이라 하면,

$$dI_r = I_i \cdot s_v \cdot dV = I_0 \cdot b(\theta, \varphi) \cdot \frac{r_{ref}^2}{r^2} \cdot s_v \cdot dV \quad (2.11)$$

$b(\theta, \varphi)$ 는 송신기의 방향성,  $s_v$ 는 체적 산란 계수(volume scattering coefficient)이고 다음과 같이 정의된다.

$$s_v = \frac{I_r/\text{unit volume}}{I_i} \quad (2.12)$$

그리고 체적 산란강도(volume scattering strength)  $S_v$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$S_v = 10 \log s_v = 10 \log \left( \frac{I_r/\text{unit volume}}{I_i} \right) \quad (2.13)$$

여기서 체적 산란강도를 단위체적( $1\text{m}^3$ )에  $n$ 개의 기포(bubble/ $\text{m}^3$ )를 포함하는 산란강도로 바꾸어 주면 다음과 같이 된다.

$$S_v = 10 \log \frac{n\sigma_s}{4\pi} = 10 \log \frac{na^2}{(f_r^2/f^2 - 1)^2 + \delta^2} \quad (2.14)$$

$dV$ 에 의한 수신기(receiver) 위치에서 음향의 세기(intensity)는

$$dI_{rev} = dI_i \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \varphi) \quad (2.15)$$

$$= I_0 \cdot b(\theta, \varphi) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot s_v \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \varphi) \cdot dV$$

여기에서  $b'(\theta, \varphi)$ 는 수신기의 방향성 (receiver beam pattern)을 나타낸다.

전체 체적에 대한 수신기에서의 세기(intensity)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_{rev} = \int dI_{rev} = \int I_0 \frac{b \cdot b'}{r^4} \cdot s_v \cdot dV = I_0 s_v \int \frac{b \cdot b'}{r^4} dV \quad (2.16)$$

여기에서  $dV$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dV = \frac{c\tau}{2} r^2 d\Omega \quad (2.17)$$

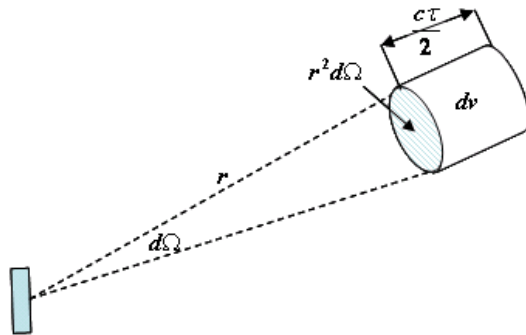


그림 2.3 체적 복반사에 대한 방사된 체적

여기서  $\Omega_e$ 는 Solid angle을 나타내는데, Solid angle이란, 공간에서 어떠한 면적이 차지하는 각도를 나타내며, 다음과 같이 정의 된다.

$$\Omega_e = \frac{A}{r^2} \quad (2.18)$$

무지향성 음원(omnidirectional source)인 경우 구의 표면적은  $4\pi r^2$  이므로  $\Omega_e$ 는  $4\pi$ 가 된다.

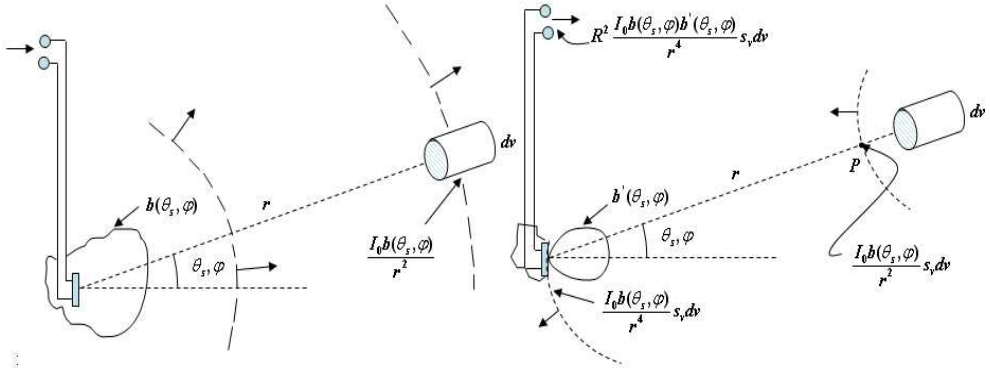


그림 2.4 solid angle에 대한 개념도

예를 들어 그림 2.4와 같이 구좌표계인 경우 Solid angle은 다음과 같이 표현된다.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{1}{r^2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} r d\theta \cdot r \cos\theta \cdot d\varphi \quad (2.19)$$

Solid angle의 개념을 사용하여, 식(2.12)에 식(2.13)을 대입하면,

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_v c \tau}{2r^2} \int b b' d\Omega \quad (2.20)$$

여기에서 빔 폭의 등가 Solid angle  $\Omega_e$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\Omega_e = \int bb' d\Omega \quad (2.21)$$

식(2.17)을 사용하면 체적 복반사음의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_v c \tau}{2r^4} \Omega_e r^2 \quad (2.22)$$

체적 복반사 준위(volume reverberation level)  $RL_v$ 은

$$\begin{aligned} RL_v &= 10 \log \left( \frac{I_0 s_v c \tau}{2r^4} \Omega_e r^2 \right) \\ &= 10 \log \frac{I_0}{I_{ref}} - 10 \log \frac{r^4}{r_{ref}^4} + 10 \log s_v r_{ref}^3 + 10 \log \left( \frac{c \tau \Omega_e r^2}{2r_{ref}^3} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

이고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$RL_v = SL - 2TL + S_v + 10 \log V \quad (2.24)$$

여기에서 기포에 대한 산란강도 식을 적용하면 최종적으로 기포에 대한 체적 복반사 준위는 다음과 같이 표현된다.

$$RL_v = SL - 2TL + 10 \log \left( \frac{na^2}{(f_r^2/f^2 - 1)^2 + \delta^2} \right) + 10 \log \left( \frac{c \tau \Omega_e}{2} \right) \quad (2.25)$$

해수면 복반사의 경우는 앞에서의 식(2.7)에서  $dV$  대신에  $dA$ 를 사용하여, 수신기에서의 음향의 세기(intensity)를 구하게 된다. 즉,



$$\begin{aligned}
dI_{rev} &= dI_i \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \varphi) \\
&= I_0 \cdot b(\theta, \varphi) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot s_A \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \varphi) \cdot dA
\end{aligned}
\tag{2.26}$$

여기에서  $s_A$ 는 해수면에서의 산란 계수(scattering coefficient)를 나타내고, 이를 계산하기 위해 Chapman & Harris의 해수면 산란강도 실험식에 기포에 의한 산란강도 식을 접목하여 최종 해수면 산란강도를 구하면 다음과 같다[6].

$$S_A = 10\log(10^{S_s/10} + 10^{S_B/10}) \tag{2.27}$$

$S_s$ 는 Chapman-Harris의 해수면 산란강도에 관한 실험식으로 다음과 같은 식으로 나타 낼 수 있다.

$$S_s = 3.3\log_{10}\left(\frac{\theta}{30}\right) - 42.4\log_{10}\beta + 2.6 \tag{2.28}$$

여기서  $\beta = 158(vf^{1/3})^{-0.58}$  이고,  $v$ 는 풍속,  $f$ 는 사용 주파수를 나타낸다.

또한,  $S_B$ 는 기포에 의한 산란강도를 나타 낸 식으로, 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$S_B = 10\log\frac{n\sigma_s}{4\pi} = 10\log\frac{na^2}{(f_r^2/f^2 - 1) + \delta^2} \tag{2.29}$$

여기에서 기포의 반경  $a$ 는 cm 단위이다.

해수면의 모든 영역에 의한 수신기 위치에서의 음파의 세기(intensity)는,

$$I_{rev} = \int dI_{rev} = \frac{I_0 s_A}{r^4} \int b \cdot b' dA \quad (2.30)$$

여기에서, Differential ensonified area  $dA$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$dA = \frac{c\tau}{2} r d\varphi \quad (2.31)$$

$\varphi$ 는 Horizontal angle을 나타낸다.

식(2.27)을 식(2.26)에 대입하면,

$$I_{rev} = \frac{I_0 s_A}{r^4} \frac{c\tau}{2} r \int_0^{2\pi} b(\theta, \varphi) b'(0, \varphi) d\varphi \quad (2.32)$$

여기에서, 소나의 방향이 수평방향에 가깝다고 가정하면 식(2.28)의 적분은 다음과 같이 Equivalent beam width  $\varphi_e$ 와 같다.

$$\varphi_e = \int b(0, \varphi) b'(0, \varphi) d\varphi \quad (2.33)$$

이는 Beam pattern이 1인 경우로 환산한 유효 Beam width와 같다. 만약 무지향성 음원(omnidirectional source)라고 한다면  $\varphi_e = 2\pi$ 가 된다.

식(2.26)를 사용하면, 해수면 복반사의 세기는

$$I_{rev} = \frac{I_0}{r^4} \cdot s_A \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot r \cdot \varphi_e \quad (2.34)$$

해수면 복반사 준위  $RL_s$ 은

$$\begin{aligned}
 RL_s &= 10\log\left(\frac{I_0 s_A c\tau}{2r^4} \varphi_e r\right) \\
 &= 10\log\frac{I_0}{I_{ref}} - 10\log\frac{r^4}{r_{ref}^4} + 10\log s_A + 10\log\left(\frac{c\tau\varphi_e r}{2}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

결국 해수면 복반사 준위는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$RL_s = SL - 2TL + S_A + 10\log A
 \tag{2.36}$$

여기에서,  $A$ 는 입사 면적(insonified area)이고,  $\varphi_e$ 는 유효 수평각 (equivalent azimuthal angle),  $S_A$ 는 해수면의 산란강도(scattering strength)이다[1].

### 2.3. 음향학적 모델의 모의 수치실험

2.2절에서 설명한 음향학적 모델(acoustical model)의 알고리즘을 이용하여, 모의 수치실험을 수행하였다. 실험 조건은 수면아래 40m에 센서가 존재하고, 이 센서는 상향을 향하여 음파를 입사한다고 가정할 때, 각 셀에서의 기포의 의한 산란강도를 고려하여 잔향 준위를 계산 하였다.

본 모델에서 잔향음을 계산하기 위해 쓰인 기본 가정으로는 다음과 같다.

- 1) 기포에 의한 음향학적 산란만이 고려되었다.
- 2) 다중경로에 의한 산란은 무시 되었다.
- 3) 산란체로 작용하는 기포는 공간상에 균등하게 분포 한다.
- 4) 일정한 크기와 양의 기포가 가정 되었다.

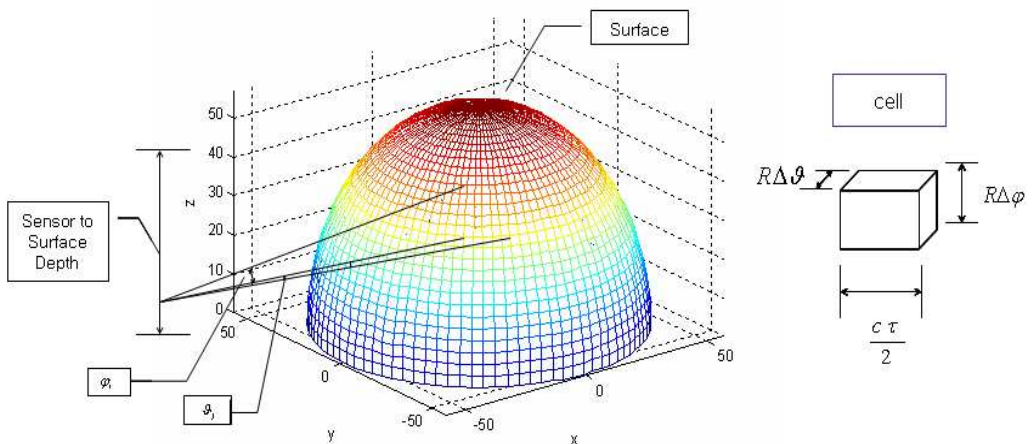


그림 2.5 Spatial division of reverberation field

그림 2.5는 반구(hemisphere)의 형태로 음파가 입사된다고 가정할 때 잔향 영역에서 각 셀(cell)의 공간상의 분할을 나타내며, 이러한 전체 외형은 다시 해수면과 체적에 기인하는 두 가지 종류의 셀로 분리 될 수 있다. 각

셀의 위치는 셀의 중심으로 부터의 거리와 수직 방위각(elevation angle)  $\varphi$  및 수평 방위각(azimuth angle)  $\vartheta$ 에 의해 결정되고, 셀의 크기는 수직 방위각과 수평 방위각의 증가율과 거리  $R$ , 송신 펄스 길이  $\tau$ , 음속  $c$ 에 의해 결정 된다.

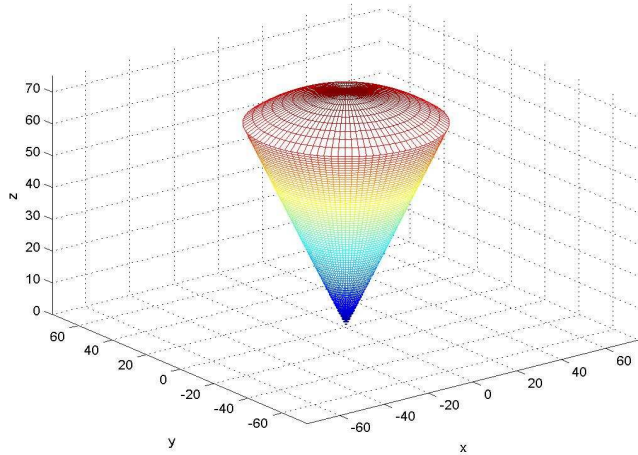


그림 2.6 체적 복반사의 계산

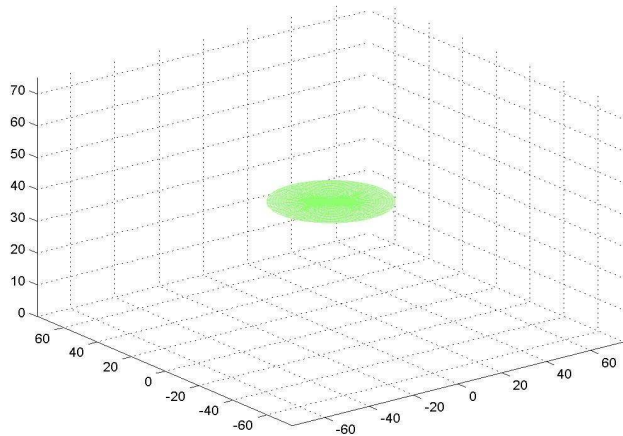


그림 2.7 해수면 복반사 계산

위의 그림 2.6과 2.7은 각각 체적 복반사와 해수면 복반사의 적분을 나타낸다. 그림에서 체적의 경우 음파가 콘(corn)모양의 30°의 빔(beam) 각도로 해수면을 향해 입사 될 때 해수면까지의 체적과 해수면에서 반사 되어 되돌아오는 체적의 복반사를 각 셀에서의 산란강도를 모두 고려하여 적분하고, 해수면의 경우는 해수면을 따르는 수평거리에 따라 각 셀에서의 산란강도를 모두 고려하여 적분한다.

이러한 적분 과정을 거쳐 거리에 따른 복반사 준위를 시뮬레이션한 결과는 다음과 같다.

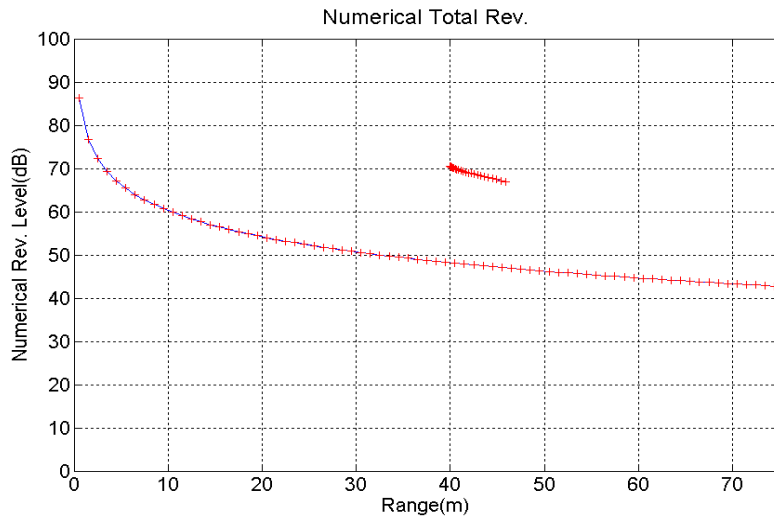


그림 2.8 수치적 방법에 의해 구한 체적과 해수면 복반사 준위

그림 2.8은 수치적(numerical) 방법에 의해 구한 체적과 해수면 복반사 준위로 그림에서 해수면이 존재하는 40m부터 해수면 복반사 준위가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

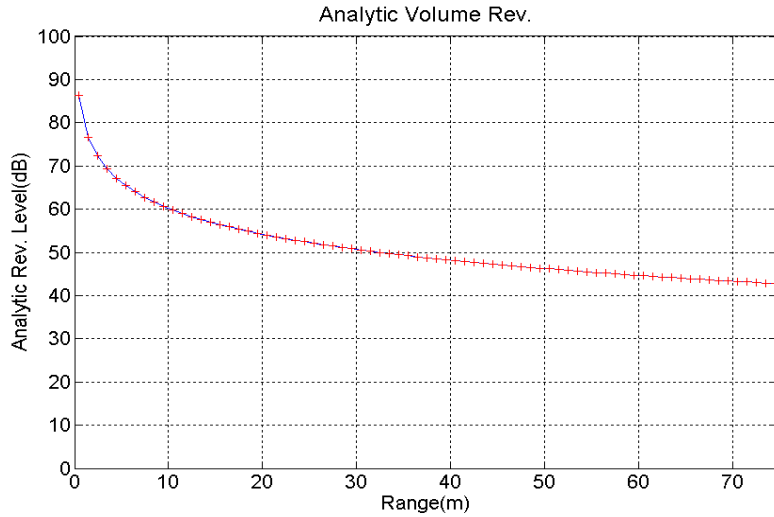


그림 2.9 해석적 식을 이용해 구한 체적 복반사 준위

그림 2.9는 수치적으로 구한 복반사 준위의 결과를 검증해보기 위해 다음의 해석적 식(analytic formula)을 이용해 구한 체적 복반사 준위이다.

$$RL_v = SL - 2TL + S_v + 10\log V \quad (2.33)$$

$$V = \frac{c\tau}{2} \Omega_e r^2 : \text{Reverberating Volume}$$

$$S_v = 10\log s_v : \text{Volume Scattering Strength}$$

그림 2.8과 2.9를 비교해보면 수치적인 방법에 의해 구한 체적 복반사 준위와 해석적 방법에 의해 구한 체적 복반사 준위가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

위에서 거리에 따라 모의한 복반사 준위를 시간에 관해 발생시키기 위해 거리를 음속으로 나누어 각 지점에서의 시간을 역산한 후 그 시간에 관해 복반사 준위를 그려보면 그림 2.10과 같이 된다.

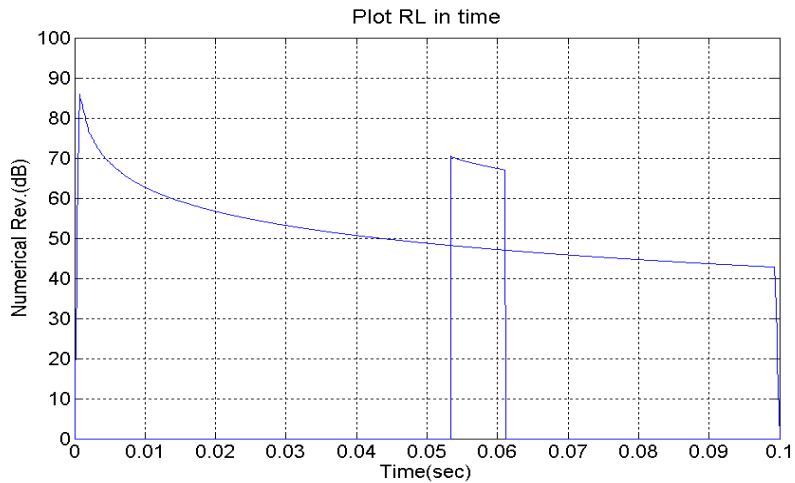


그림 2.10 시간에 따른 체적과 해수면 복사사 준위

그림에서 해수면이 존재하는 40m에 대응하는 시간이 약 0.053초 인 것을 확인할 수 있다.

시간에 따른 복사사 준위를 모의하기 위한 또 다른 방법은 시간에 따른 잔향신호를 모의한 후 이를 dB scale로 변환 해 주는 것이다.

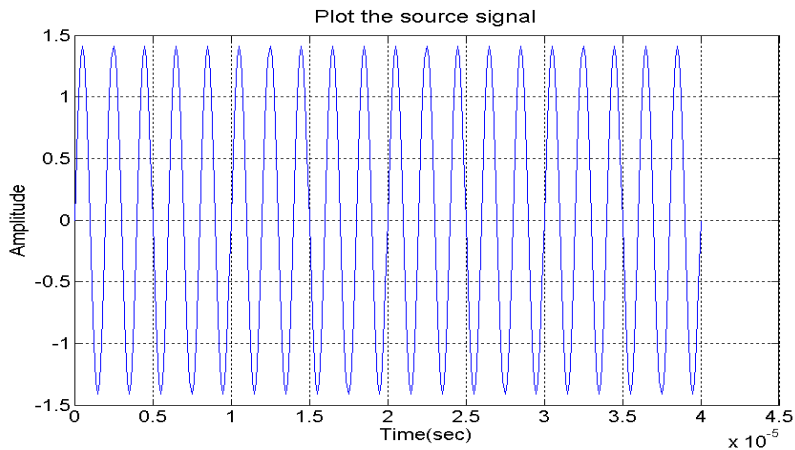


그림 2.11 모의 음원 신호



시간에 따른 수신 신호를 모의하기 위해 음원의 파형을 그림 2.11과 같이 모의 한 후 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 이용하여 주파수 영역의 스펙트럼으로 바꿔주고 주파수 영역의 전달 함수를 곱해주어 수신 신호를 모의한다. 그리고 역 푸리에 변환(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)을 통해 주파수 영역의 신호를 시간 영역의 신호로 변환해 주는 방법을 이용 하였다.

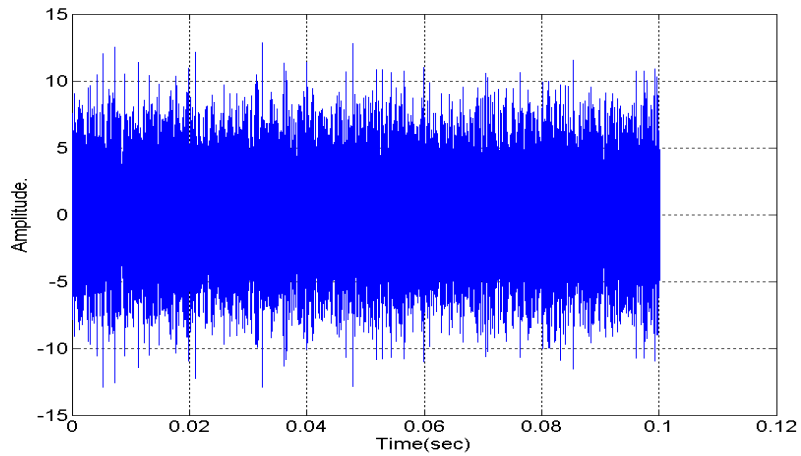


그림 2.12 모의된 수신 신호

위의 방법을 통해 모의된 수신신호에 앞서 계산한 시간에 따른 복반사 준위를 곱해 주면 시간에 따른 잔향 신호를 모의 할 수 있다.

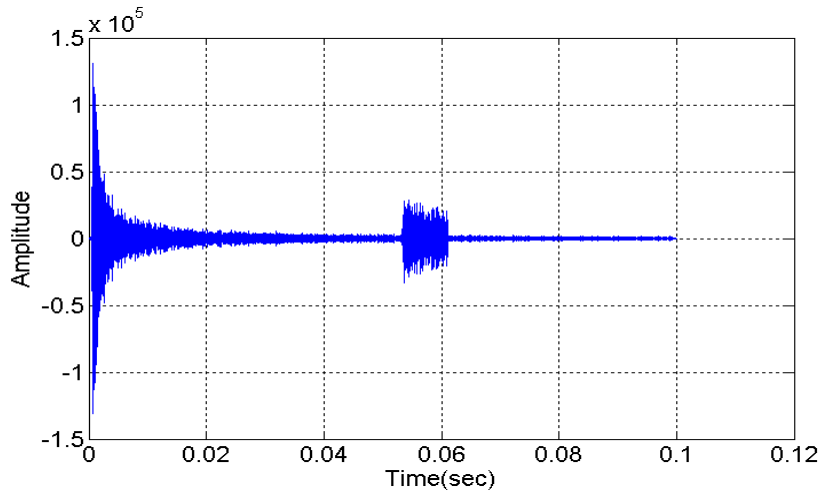


그림 2.13 시간에 따른 모의 잔향 신호

그림 2.13은 시간에 따른 잔향 신호를 모의한 것 이다. 이 신호를 dB scale로 변환해 주면 시간에 따른 복반사 준위를 모의 할 수 있으며 그 결과는 그림 2.14와 같다.

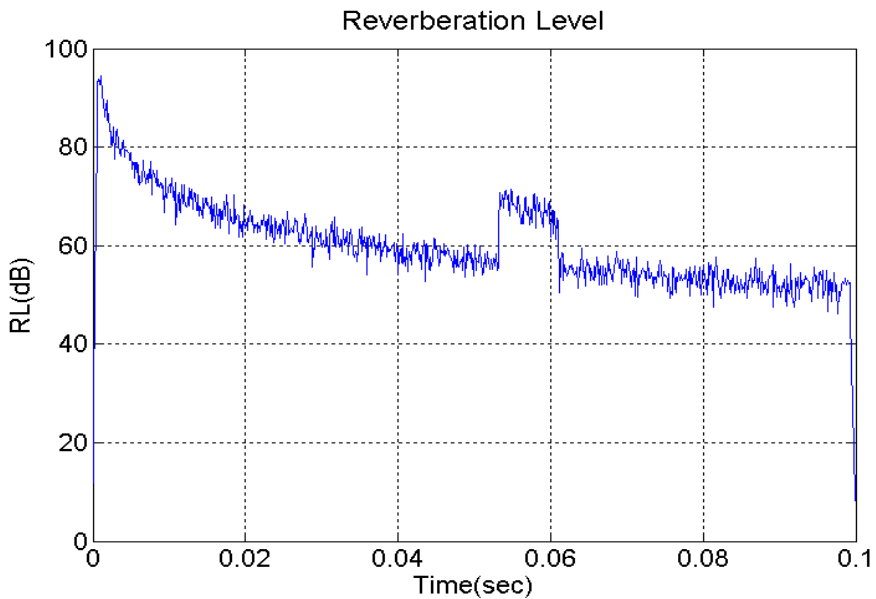


그림 2.14 모의 잔향신호를 이용해 구한 복반사 준위

### 3. 운동학적 모델

#### 3.1. 좌표계의 설정

운동학적 모델(kinematic model)의 좌표계는 아래의 그림3.1과 같이 전체 좌표계와 음원의 국부 좌표계로 나뉘어져 있다. 음원은 전체 좌표계를 기준으로 운동하고 있으며, 음원의 좌표계 변환에 관한 식은 다음의 3.2절에서 설명할 것이다.

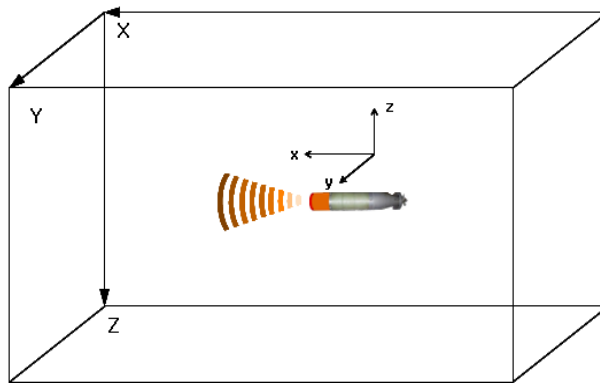


그림 3.1 좌표계

### 3.2. 오일러 변환

음원의 운동은 표적이 고정된 상태에서 음원이 기하학적 중심축을 기준으로 회전하는 방법으로 표적은 고정된 채 음원만 운동하므로 표적의 운동에 비해 해석시간이 단축되고, 수치계산의 오차가 축소되는 단점이 있다.

음원의 회전 알고리즘으로는 오일러 변환(euler transform)이 있다. 오일러 변환은 3차원 직교좌표를 사용한 공간상의 회전변환 방법으로 식은 다음과 같다[8].

$$[T_R]_x^\alpha = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{vmatrix} \quad (3.1)$$

$$[T_R]_y^\phi = \begin{vmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

$$[T_R]_z^\theta = \begin{vmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.3)$$

$$[T_R]_{ARB} = [T_R]_x^\alpha [T_R]_y^\phi [T_R]_z^\theta \quad (3.4)$$

식(3.1)~식(3.3)은 각각 x, y, z축에 대한 회전 변환 행렬이다. 이를 식(3.4)와 같이 행렬 연산을 하면 표적의 기하학적 중심축을 기준으로 음원을 3차원 직교좌표 공간상의 임의의 위치로 회전변환 할 수 있다.

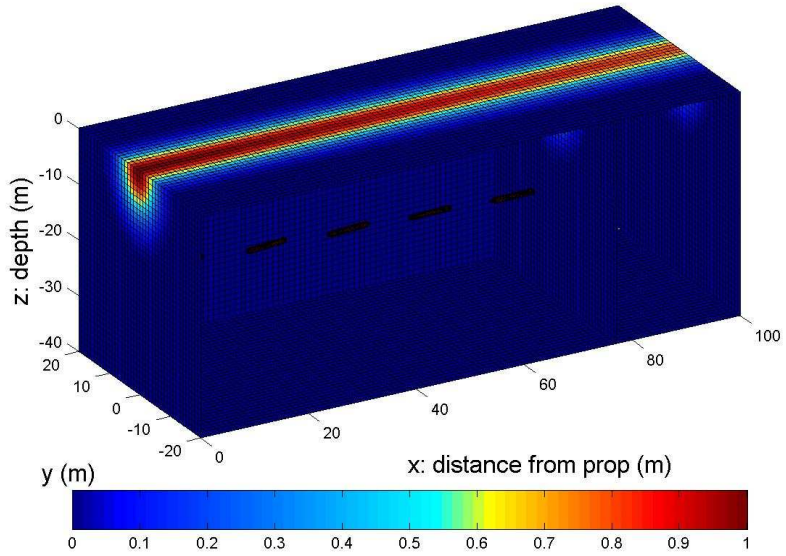


그림 3.2 음원의 이동

그림 3.2는 프로그램 상에서 음원이 표적의 기하학적 중심축을 기준으로 회전하는 것을 보여주고 있다. 여기서 음원은 x축으로  $-15^\circ$  간격, y축으로  $0.2^\circ$  간격, z축을 기준으로  $-0.2^\circ$  간격으로 회전하고 있다.

## 4. 항적에 의한 음향 산란 해상 실험

### 4.1. 실험 환경 및 장비의 구성

본 장에서는 2006년 12월 1일 한국해양대학교 방파제 내에 실시한 실험에서 획득한 잔향 신호의 자료를 이용하여, 항적의 존재 유무에 따른 수신 신호의 변화를 분석 하였다.

실험은 두 개의 센서를 이용하여 각각 송신과 수신을 하였고, 항적이 존재하지 않을 때 측정된 수신 신호와 항적이 존재할 때 항적의 미세 기포에 의해 산란된 신호를 각각 측정 하였다. 실험 해역은 그림 4.1과 같이 수심 약 4m의 조류의 흐름이 없고 파도가 잔잔한 방파제 내였으며, 그림 4.2와 같이 특별 제작된 센서 거치대를 이용하여 해저 면에 송, 수신 센서를 고정 시킨 후 먼저 주변 소음을 측정 하고 항적이 존재 하지 않을 때의 수신 신호와 소형 모터보트를 이용하여 항적을 발생 시킨 후의 수신 신호를 각각 측정하는 방법으로 실험을 실시하였다.

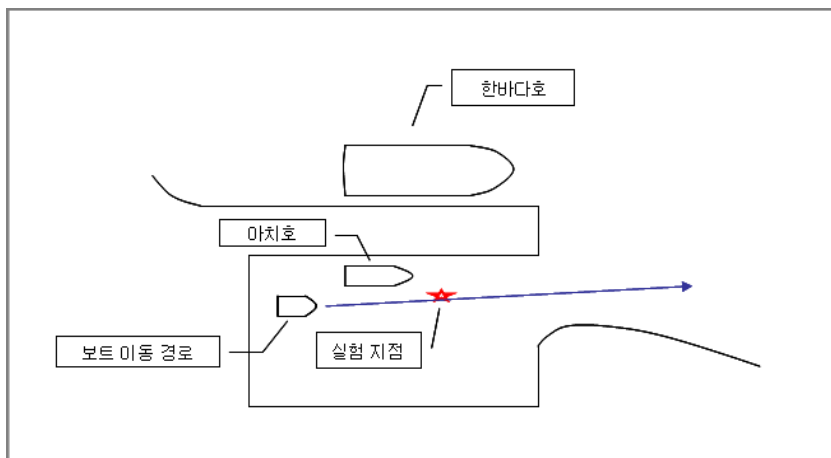


그림 4.1 실험 해역 및 환경

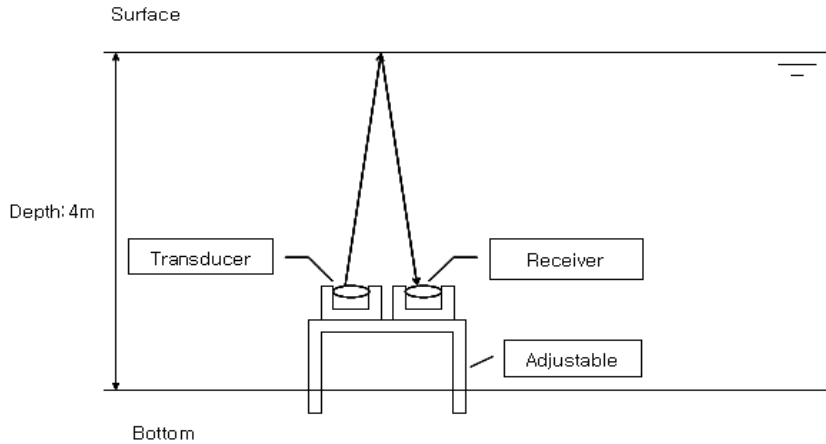


그림 4.2 센서 거치대

실험장비로는 그림 4.3과 같이 송, 수신 센서와 신호 발생기, 그리고 송, 수신 신호의 파형을 확인하기 위한 오실로스코프 및 수신신호의 필터링 역할과 수신신호 증폭의 기능을 수행 할 수 있는 아날로그필터 그리고 데이터 저장의 기능을 하는 NI scope가 사용 되었다.

그리고 실험 전 수심과, 실험 장비까지의 거리를 감안하여 센서 케이블의 길이를 충분히 길게 연장 하여, 물에 닿지 않도록 몰딩 하는 작업을 하였다.

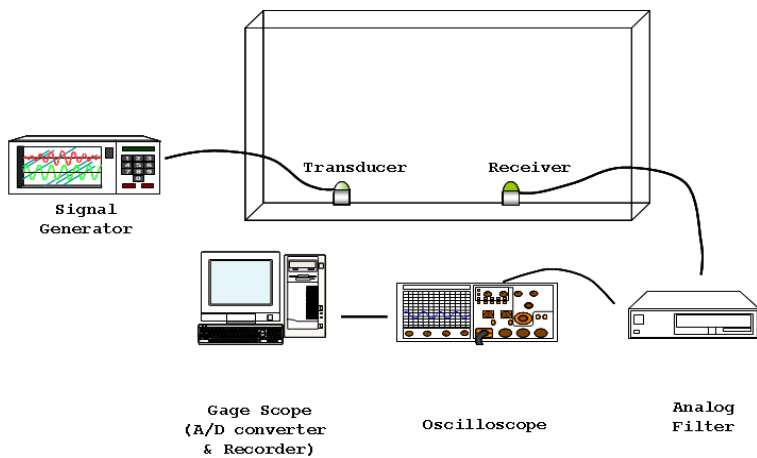


그림 4.3 실험 장비의 구성

## 4.2. 자료의 획득 및 분석

본 절에서는 실험을 통해 획득한 신호의 데이터를 분석해 보았다.

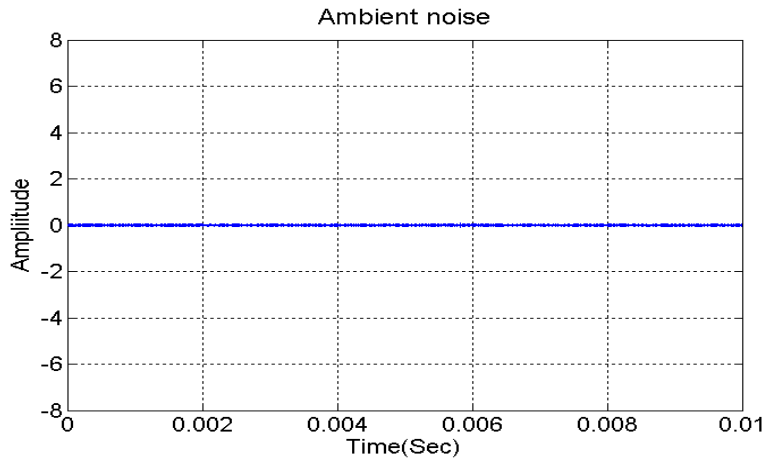


그림 4.4 주변 소음

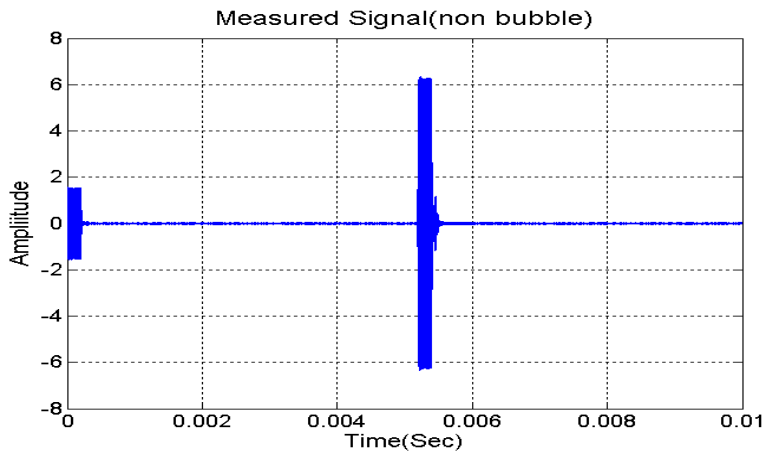


그림 4.5 항적이 존재하지 않을 때의 수신 신호



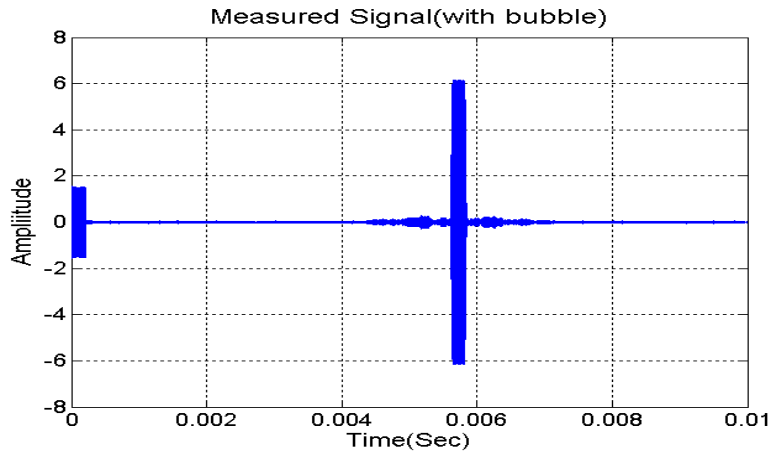


그림 4.6 항적이 존재할 때의 수신 신호

그림 4.4~4.6은 각각 해상 실험에서 획득한 시간에 따른 수신 신호로 위  
 에서부터 주변 소음(ambient noise), 항적이 존재 하지 않을 때의 수신 신  
 호, 항적이 존재 할 때의 수신 신호를 나타낸다. 그림에서 항적에 의한 기포  
 가 존재 하지 않을 경우에는 해수면에 의해 반사된 신호가 먼저 수신 되지  
 만, 항적이 존재할 경우에는 해수면에서 반사 되어온 신호보다 기포에 의해  
 산란된 신호가 먼저 수신됨을 확인 할 수 있다. 그리고 이때 그림 4.5와  
 4.6에서의 수신신호 도달시간의 차이는 항적 발생 전의 수신 신호는 오전에  
 측정한 반면 항적 발생 후의 수신 신호는 오후에 측정하였기 때문에 시간차  
 로 인한 수심의 변화 때문이다.

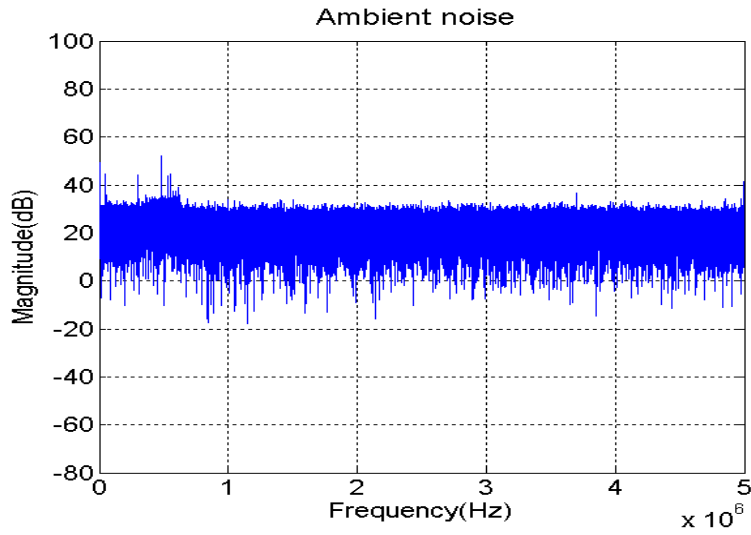


그림 4.7 주변 소음의 스펙트럼 준위

그림 4.7은 송신을 하지 않은 상태에서 측정된 주변 소음 신호를 고속 푸리에 변환을 이용해 주파수 영역으로 바꿔 준 다음 평균을 취해 dB scale로 변환 해준 스펙트럼 준위이다.

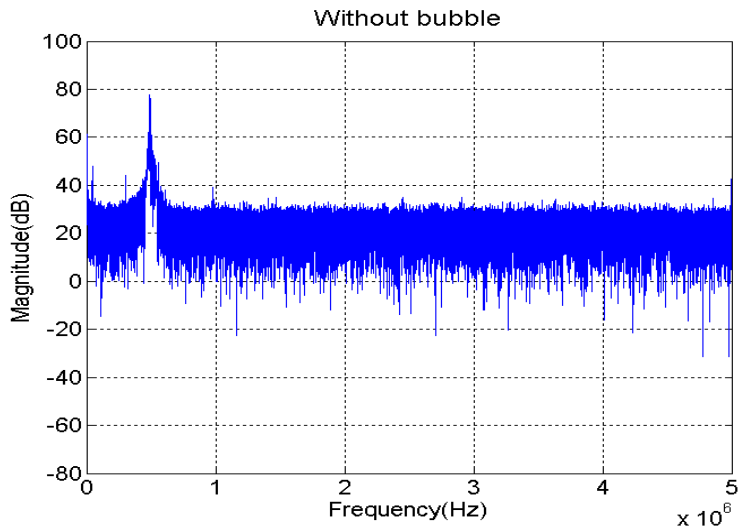


그림 4.8 항적 발생 전 수신 신호의 스펙트럼 준위

그리고 그림4.8은 항적이 존재 하지 않을 때 수신된 신호를 역시 고속 푸리에 변환을 이용해 주파수 영역으로 바꿔 준 다음 평균을 취해 dB scale로 변환 해준 스펙트럼 준위이다. 실험 시에 중심주파수 490kHz를 사용하였기 때문에 490kHz에서 주빔(main lobe)이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

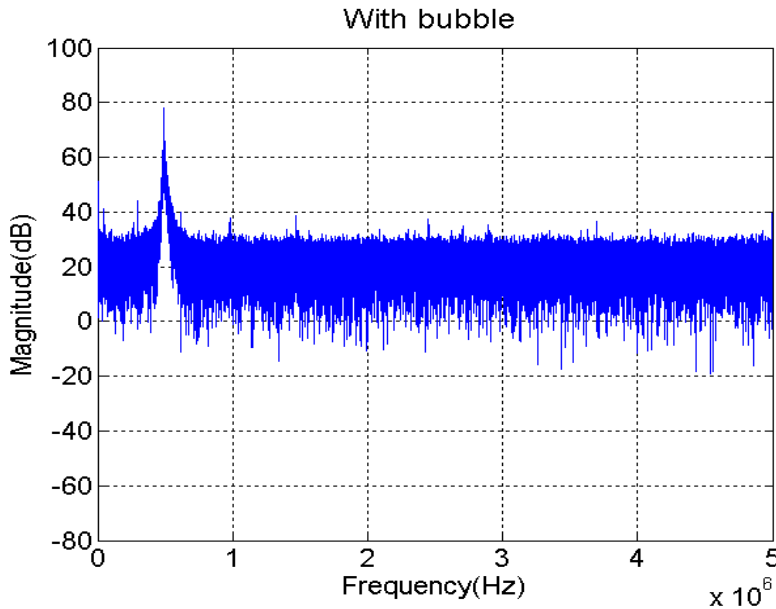


그림 4.9 항적 발생 후 수신 신호의 스펙트럼 준위

그림4.9는 항적 발생 후에 수신된 신호 평균 스펙트럼 준위로 역시 490kHz에서 주빔(main lobe)이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

해상실험에서 측정한 잔향신호의 데이터와 기포에 의한 산란강도 식을 적용해 시뮬레이션한 복반사 모델의 결과를 비교해 보기 위해 먼저 해상 실험에서 측정한 항적의 기포에 의해 산란된 신호의 복반사 준위와 실험 당시 해역의 주변 소음 준위를 같이 그려 주면 그림 4.10과 같이 된다.

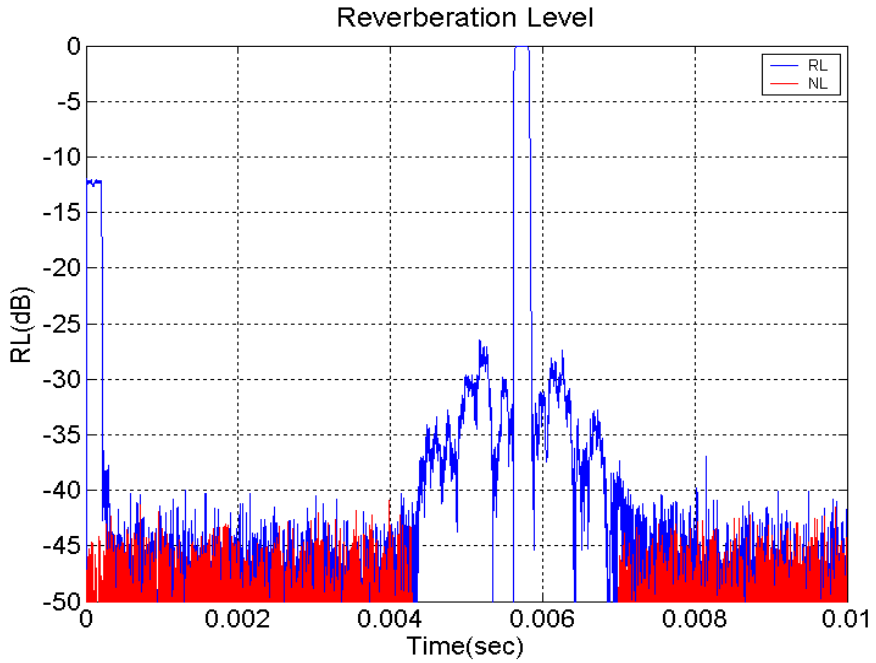


그림 4.10 항적 존재시의 복반사 준위와 주변 소음 준위

그림에서 해수면 반사 신호의 앞, 뒤로 주변 소음 준위보다 크게 기포에 의해 산란된 신호의 복반사 준위가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

최종적으로 앞에서 구한 실험 신호의 복반사 준위와 모의 수치모델에서 구한 복반사 준위를 비교해 보면 그림 4.11과 같이 된다.

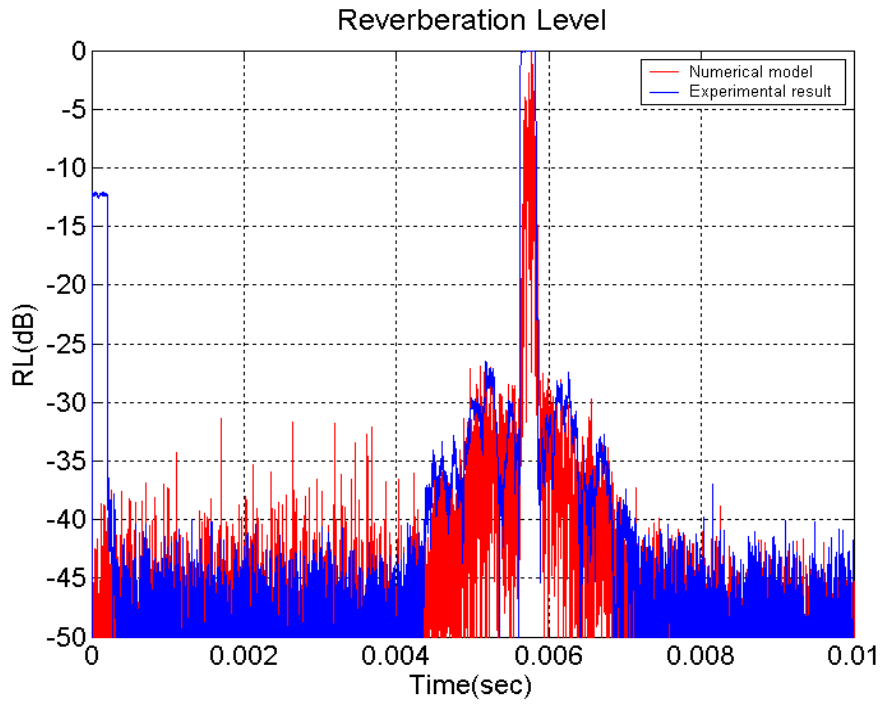


그림 4.11 모의 수치 모델의 결과와 실험 결과의 비교

위의 그림에서 해상 실험으로 획득한 신호의 복반사 준위와 모의 수치 모델의 복반사 준위가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

항적에 의해 생성된 많은 양의 기포들은 해수면 아래 기포 층을 형성하게 되고, 이는 음파의 산란에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 항적의 기포에 의한 복반사 예측 모델을 모의하기 위해 기존의 복반사 준위를 구하는 음향학적 이론식에 기포에 의한 산란강도의 식을 적용하였고, 해상 실험을 통해 항적 존재 시 기포에 의해 산란된 신호의 데이터를 획득하고 분석하여 이를 모의 수치 결과와 비교해 보았다.

실험 결과 항적에 의한 기포가 존재 하지 않을 경우에는 해수면에서 반사된 신호가 가장 먼저 수신 되었으나, 항적에 의한 기포가 존재할 경우 기포에 의해 산란된 신호가 해수면 반사 신호 보다 먼저 수신됨을 확인 할 수 있었다. 그리고 복반사 준위 비교 결과 실험을 통해 획득한 잔향신호의 복반사 준위가 모델링 결과와 잘 일치함을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서 시뮬레이션한 모델은 기포의 반경 및 개수를 가정하여 계산 하였으므로 향후 선박의 종류와 속도에 따른 항적의 기하학적 형상과 이에 따른 기포 층의 분포, 항적에 의해 발생하는 기포 중 음파의 산란에 영향을 미치는 기포의 반경 및 개체군(population)등에 관한 실측 자료를 획득하여 잔향 모델의 산란강도 식에 적용하는 연구가 진행 되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill, New York 1983.
- [2] M. V. Trevorrow, S. Vagles, and D. M. Farmer, "Acoustical measurement of microbubble within ship wakes," J. Acoust. Soc. Am. **95**, 1922-1930, 1994.
- [3] J. K. E. Tunaley, "The simulation of the SAR image of a ship wake," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **29**, 149-156, 1991.
- [4] R. D. Peltzer, W. D. Garrett, P. M. Smith, "A remote sensing study of a surface ship wake," IEEE Oceans, **17**, 277-286, 1985.
- [5] A. I. ELLER, " Damping constants of pulsating bubbles," J. Acoust. Soc. Am. **47**, 1469-1470, 1970.
- [6] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 3rd ed., Wiley, 1982.
- [7] P. C. Etter, Underwater Acoustic Modeling, 2nd ed., E & FN SPON, 1996
- [8] 최영호, "수중물체에 대한 음향 표적강도의 수치해석과 실험적 검증", 석사 학위논문, 한국해양대학교, 2005