

# 소형수조에서 음향재료의 반향음감소와 투과손실 측정시스템 구성

## Measurement System for Performance Evaluation of Acoustic Materials in a Small Water Tank

신 미 루\*, 조 정 홍\*, 이 경 택\*, 김 재 수\*, 전 재 진\*\*, 함 일 배\*\*, 강 창 기\*\*\*  
(Mi-Ru Shin\*, Jung-Hong Cho\*, Kyung-Teak Lee\*, Jea-Soo Kim\*,  
Jae-Jin Jeon\*\*, Il-Bea Ham\*\*, Chang-Gi Kang\*\*\*)

\*한국해양대학교 해양공학과, \*\*국방과학연구소, \*\*\* (주)화승알앤에이  
(접수일자: 2010년 12월 2일; 수정일자: 2011년 1월 31일; 채택일자: 2011년 2월 17일)

본 논문은 반향음과 투과음을 감소시키기 위한 평판형 음향재료의 성능평가 장치를 제작하고 측정시스템을 구성하며 표준표적을 이용한 검증을 통해 신뢰성을 확보하는 데 목적이 있다. 반향음감소와 투과손실 측정은 신호간섭이 없도록 대형수조에 실시되는 것이 일반적이지만, 본 논문에서는 신호간섭을 고려해야 하는 소형수조에서 최저 30 kHz까지 측정이 가능한 측정시스템을 구성하였다. 이를 위해 신호모의를 통해 신호간섭이 없는 최적의 기하학적 배치를 도출하였으며, 획득한 신호를 시간영역과 주파수영역의 총 네 가지 방법으로 ER과 TL을 도출하는 신호처리 알고리즘을 확립하였다. 마지막으로 대형수조에서의 전파손실 실측실험을 통해 측정시스템을 보정하고 알루미늄 판과 스티로폼을 표준표적으로 사용한 측정결과를 Brekhovskikh Layer Model과 비교하여 측정시스템 검증을 수행하였다.

**핵심용어:** 반향음감소, 투과손실

**투고분야:** 음향 재료 분야 (16.4)

Since the detection probability is critically dependent on the target strength (TS) in active sonar and on the radiated noise level (RNL) in passive sonar, the acoustic materials for echo reduction (ER) and transmission loss (TL) are widely used for the stealth of underwater targets. In this paper, a measurement system based on the small water tank, for the frequency range of greater than 30 kHz, is developed and verified using reference targets. In order to design the water tank and the geometry of test samples, a program is developed to calculate the arrival time of interfering signals due to the reflection from water tank walls and also due to the diffraction from the edge of the test samples. Considering all the interfering signals, an optimal experimental configuration for water tank and test samples is designed and used throughout the experiment. Next, the signal processing algorithms to estimate ER and TL are developed based on the measured propagation loss reflecting the geometric spreading characteristics of the transducer. Finally, a set of reference targets such as aluminium plate and perfectly reflecting plate are used in a small water tank to verify the developed measurement system.

**Keywords:** Echo Reduction, Transmission Loss

**ASK subject classification:** Acoustic Material (16.4)

### I. 서론

수중표적은 기계소음, 유체소음, 추진소음과 같은 수중방사소음 (underwater radiated noise)을 감소시킴으

로써 수동소나에 의한 피탐지확률을 감소시킬 수 있으나, 수중표적의 탐지에는 능동소나와 수동소나 두 가지 형태의 소나를 함께 사용하는 것이 일반적이므로 피탐지확률의 효과적인 감소를 위해서는 음향표적강도 (acoustic target strength)를 줄일 수 있는 방안도 요구된다. 선진국에서는 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 부착형 음향재료를 이용한 수중방사소음 및 음향표적강도의 감소기

책임저자: 김 재 수 (jskim@hhu.ac.kr)  
606-791 부산광역시 영도구 동삼동 1번지 한국해양대학교 해양공학과  
(전화: 051-410-4325; 팩스: 051-403-4320)

술이 적용단계에 있다. 음향표적강도를 감소시키는 무반향 코팅재 기술은 2차 세계대전 기간에 Alberich라는 코드명으로 독일에서 시작되었고 10 kHz에서 18 kHz까지 약 15 %의 반향음을 감소시켰다. 미국은 2차 세계대전 후반기에 Alberich 무반향 타일을 모방하여 코팅재 개발을 시작하여 1970년대에 이르러 무반향 타일의 재료 합성과 성능의 이론적 해석 및 계측에 대한 진전을 이루었다. 구 소련에서는 1970년대부터 기술적용이 이루어졌으며 최근 사용하고 있는 두께 100 mm의 음향재료는 Akula급 잠수함의 소음을 약 10 dB에서 20 dB 정도 줄이는 것으로 알려져 있다 [1]. 수중에서 반향음과 투과음을 감소시킬 수 있는 기술 및 음향재료 개발은 1980년대 후반 이후 급속히 확산되었으나 핵심기술의 도입은 불가능한 실정 이므로 독자기술개발이 요구되며, 이를 위해 음향재료의 성능을 정량적으로 측정할 수 있는 측정시스템의 구축이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 수중에서 최저 30 kHz까지의 주파수에 대해 반향음과 투과음을 감소시키는 음향재료의 음향성능 평가를 위한 측정시스템을 구성하였으며, 30 kHz와 50 kHz에서 표준표적을 이용한 검증은 수행하였다. 반향음감소 (ER, Echo Reduction)와 투과손실 (TL, Transmission Loss) 측정은 회절 및 반사에 의한 신호간섭이 없도록 대형수조에서 사용하여 실시하는 것이 일반적이지만 [2], 본 논문에서는 길이×폭×수심이 각각 0.8 m×0.5 m×0.5 m인 소형수조에서의 측정시스템을 구축하였다. 동일한 실험환경에서 소형수조는 대형수조에 비해 신호간섭이 발생할 가능성이 높으므로 측정시스템 구축 시 반드시 신호간섭의 영향을 고려해야 한다. 반면에 측정 시 요구되는 음향재료의 크기가 작으므로 송·수신기와 음향재료 간 기하학적 배치 및 조정이 용이하여 측정에 소요되는 시간을 단축할 수 있다. 또한 1970년대 후반 이후 정형화된 대형수조에서의 ER과 TL 측정방법들 [3-6]을 참고할 경우, 신호간섭이 없는 크기의 대형수조의 제작을 통한 성능평가의 실시는 비용 대비 효율성 측면에서 실현 가능성이 낮고 상대적으로 소형수조에서의 측정시스템은 활용 및 구현 가능성이 높기 때문이다. 이를 위해 반향음감소와 투과손실의 음향학적 정의를 바탕으로 신호간섭을 최소화 하여 ER과 TL을 측정할 수 있는 기하학적 배치를 모델링을 통하여 계산하고 측정시스템을 설계·제작하였다. 또한 MATLAB을 이용한 ER과 TL 산출 신호처리 방안을 개발하고 실측실험을 통한 전파손실 (PL, propagation loss) 보정을 실시하였으며, 알루미늄과 스티로폼을 표준표적으로 사용하여 측

정방안 검증을 수행하였다.

## II. ER과 TL 정의 및 시험장치 설계

### 2.1. 반향음감소 (ER, Echo Reduction)

ER은 반향음의 음향에너지 감소량을 나타내는 수치로서, 이론적으로 물과 음향재료의 임피던스 비와 파수에 의한 식으로 표현할 수 있으며 [7], 평면파 확산의 정의에 의하여 식 (1)과 같이 표현된다 [8].

$$ER = 20\log\left(\frac{\text{Incident sound pressure}}{\text{Reflected sound pressure}}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 입사음과 반향음은 평면파로 가정하며, ER은 균일한 음향재료에 음파가 수직으로 입사할 때 입사음과 반향음의 음압의 비로써 나타내어진다.

$$PL = SL - DL - TL_1 + TS - TL_2 \quad (2)$$

$$TS = PL - SL + TL_1 + TL_2 \quad (3)$$

식 (2)의 소나방정식에서 표적이 음원의 빔 패턴 중심 선 상에 수직으로 위치할 때 지향손실  $DL$  (directivity loss)이 '0'이므로 표적강도  $TS$  (target strength)에 대해 정리하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.  $PL$  (pressure level)과  $SL$  (source level)은 각각 음압준위와 음원준위를 나타낸다.  $TL$  (transmission loss)은 전달손실이며,  $TL_1$ 과  $TL_2$ 는 각각 음원에서 음향재료까지의 전달손실, 반사 후 음향재료에서 수신기까지의 전달손실을 의미한다. 본 논문에서 투과손실과의 혼동을 방지하기 위해 이후 전달손실  $TL$ 을 전파손실이라 지칭하여  $PL$ 로 표기한다. 표적강도  $TS$  (target strength)는 입사평면파의 세기와 음향반사중심으로부터 단위거리에서 반사되는 음파의 세기의 비율로 정의되며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다 [9].

$$TS = 10\log(I_r/I_o) \quad (4)$$

$I_o$ 는 표적으로 입사하는 입사음의 세기이며,  $I_r$ 은 표적인 음향재료 중심으로부터 단위거리만큼 떨어진 지점에서의 반향음의 세기를 나타낸다. 반향음감소를 목적으로 하는 음향재료의 ER은 반향음감소 코팅재 유무에 따른 반향음의 차이 즉, 표적강도의 차이와 같기 때문에 수신된 신호의 음압준위 차이로 표현할 수 있다.

### 2.2. 투과손실 (TL, Transmission Loss)

투과손실을 목적으로 하는 음향재료의 TL은 투과손실 코팅재 유무에 따른 투과음의 음향에너지의 비로써 ER과 마찬가지로 물과 음향재료의 임피던스 비와 파수로써 나타낼 수 있으며 [7], 평면파 확산의 정의에 의하여 식 (5)와 같이 표현된다 [8].

$$TL = -10\log(I_t/I_o) \tag{5}$$

여기에서  $I_o$ 는 입사음의 세기,  $I_t$ 는 투과음의 세기를 나타낸다. ER 계산과 마찬가지로 입사음과 투과음은 평면파로 가정한다. TL은 동일한 기하학적 배치에서 음향재료의 부착 유무에 따라 수신된 신호를 비교하기 때문에 식 (2)에서 음원준위와 지향손실이 동일하다. 또한 음향재료의 두께에 따라 달라지는 전파손실은 신호처리 과정에서 실험값을 통해 보정하기 때문에 식 (2)의 소나방정식으로부터 투과손실 코팅재 유무에 따른 투과음 음압준위의 차이로 표현할 수 있으며, 이는 곧 투과손실 코팅재 부착 여부에 따른 표적강도의 차이와 같다.

### III. 측정시스템 구성

음향재료의 ER과 TL은 음향재료 유무에 따른 음파의 세기의 비로 구할 수 있으며, 각각 그림 1 (a)과 (b)의 기하학적 배치 및 장비 구성으로 이루어진다.

#### 3.1. 신호간섭 최소화 모델링 기반의 기하학적 배치

정확한 ER과 TL 측정을 위해 수조 벽면 반사음과 음향재료 경계면 회절음이 분석에 필요한 수신신호와 간섭을 일으키지 않도록 송·수신기와 음향재료의 기하학적 배치가 이루어져야 한다. 기하학적 배치는 송신신호의 주파수와 사용 파장 수에 따라 송·수신기와 음향재료의 기하학적 배치를 변화시키며 결정한다. 이를 위해 길이 × 높이 × 폭이 각각 0.80 m × 0.70 m × 0.50 m인 음향수조의 크기를 고려하여 중심주파수가 30 kHz와 50 kHz인 TC2115와 TC2116를 사용할 경우에 대해서 ER과 TL을 측정할 때, 수조 벽면 반사음과 음향재료 경계면 회절음이 분석에 필요한 수신신호와 간섭을 일으키지 않도록 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 사이드로브에 의한 영향을 고려하여 송신기의 빔패턴보다 5°에서 10°의 여유각도를 주었으며, 한 변이 0.30 m인 음향재료를 가정하였다. 송신기의 구동특성을 고려하지 않은 이상적인 사

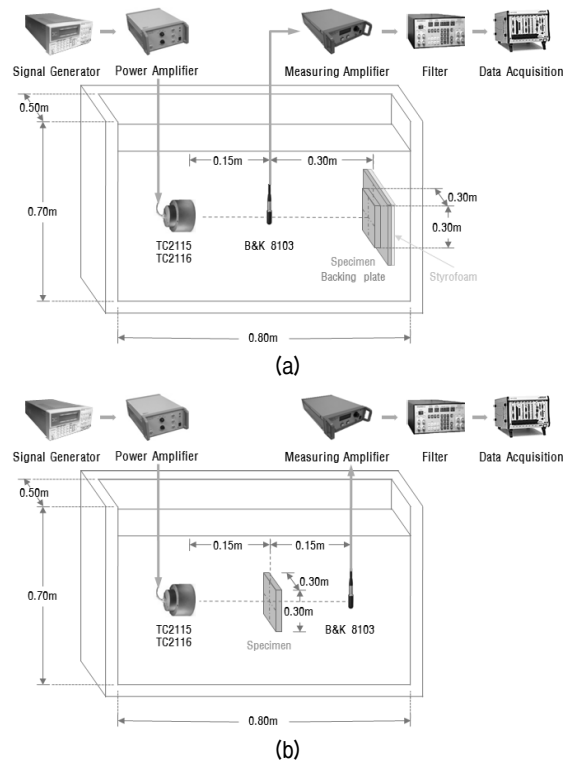


그림 1. 기하학적 배치도 (a) ER 측정 모식도 (b) TL 측정 모식도  
Fig. 1. Geometrical plan. (a) Key map of ER measurement (b) Key map of TL measurement.

인파를 가정하였으며, 신호간섭이 없도록 송신기로부터 음향재료와 수신기의 상호거리를 변화시키며 사용 파장 수를 한파장부터 증가시키며 획득할 수 있는 파장이 최대한 기하학적 배치를 결정하였다.

그림 1은 위의 신호간섭 최소화 모델링 결과이며, (a)는 스티로폼이 음향재료가 부착되는 대상이 수밀된 경우를 가정하여, 구조물 내부에 공기층이 형성된 환경과 유사하도록 설정한 것이다.

그림 1의 (a)와 같은 기하학적 배치 시 음향재료에 반사되어 수신되는 신호를 측정할 때, 전파경로 상에 위치한 수신기에 의한 음압의 세기변화를 고려할 수 있다. 이를 실험적으로 검증하기 위해 그림 1의 (a)와 동일한 기하학적 배치에서 음향재료를 대신하여 수신기를 배치하고 전파경로 상의 수신기의 유무에 따른 신호를 획득하였다. 이 결과 수신기의 유무에 따른 수신신호의 음압의 세기와 위상에는 변화가 없음을 확인하였다.

#### 3.2. 신호처리 알고리즘

ER과 TL 성능평가는 30 kHz와 50 kHz에서 지속파 (continuous wave)를 사용하였으며, 각각 1파장에서 7파장까지 획득하였다.

3.2.1. 상호상관 (cross-correlation) 수행

ER과 TL 성능평가 결과는 음향재료 유무에 따라 획득한 수신신호의 상호상관 (cross-correlation)을 수행함으로써 얻을 수 있다. 이 때, 수신신호 간의 상호상관 수행의 결과로써 상호상관계수 (cross-correlation coefficient)가 최대가 되는 시점을 찾는다.

3.2.2. 주파수영역 분석 수행

3.2.1의 상호상관을 사용한 분석방법을 ER과 TL에 적용하여 수행한 결과를 나타낸 것이 그림 2와 그림 3과 같다. 그림 2와 그림 3의 상하에 위치한 시간영역 신호는 음향재료의 유무에 따른 수신신호이며, 세로선은 각각 음향재료 유무에 따라 분석할 수신신호의 영역을 나타낸다. 이는 음향재료 부착 여부에 따른 기하학적 배치와 음향재료의 두께에 따른 수신시간의 차이를 계산하여 분석에 필요한 반향음 또는 투과음을 불필요한 신호와 구분하는 기준이 된다. 이 때, 분석에 사용할 영역은 획득한 파장이 공간에서 차지하는 길이를 시간으로 환산한 것과 동일한 길이를 갖고, 그림 2와 그림 3의 (a), (b)와 같이 음향재료 부착 전후의 수신신호에서 세로축 두 실선의

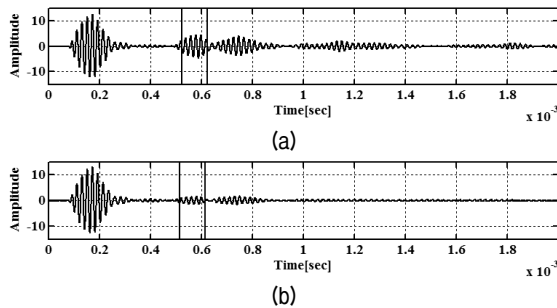


그림 2. Cross-correlation 결과 (ER) (a) 음향재료 부착 전 (b) 음향재료 부착 후  
 Fig. 2. Cross-correlation result (ER). (a) without the acoustic material (b) with the acoustic material.

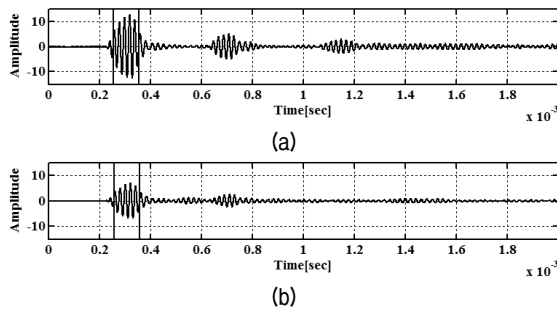


그림 3. Cross-correlation 결과 (TL) (a) 음향재료 부착 전 (b) 음향재료 부착 후  
 Fig. 3. Cross-correlation result (TL). (a) without the acoustic material (b) with the acoustic material.

사이에 해당하는 영역의 에너지 합을 비교하여 상호상관 계수가 최대인 부분을 찾는다.

주파수영역에서는 송신신호의 중심주파수에서 ER과 TL 비교하는 분석방법과 중심주파수 기준의 주파수밴드 에너지 합을 비교하는 분석방법을 사용하며, 각 분석방법을 ER과 TL에 대해 나타낸 것이 그림 4와 그림 5의 첫 번째와 세 번째 그림으로 나타나 있다. 중심주파수를 기준으로 한 주파수밴드 에너지 합 비교는 사용자가 임의로 설정한 주파수밴드에 대한 에너지 합을 비교하며, 설정한 주파수에서의 각 파장별 또는 획득한 모든 파장의 평균의 변화경향을 볼 수 있다.

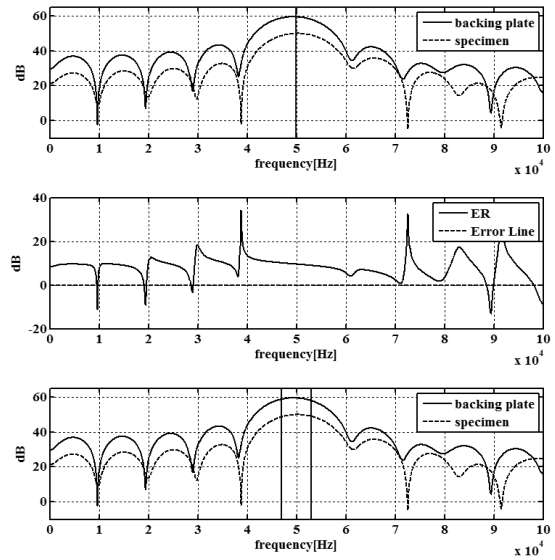


그림 4. 주파수영역 분석 (ER)  
 Fig. 4. Frequency domain analysis (ER).

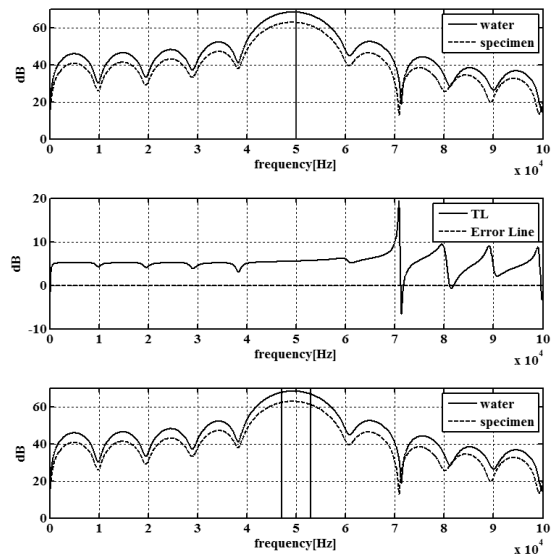


그림 5. 주파수영역 분석 (TL)  
 Fig. 5. Frequency domain analysis (TL).

그림 4와 그림 5의 두 번째 그림은 획득한 신호의 모든 주파수영역에서의 ER과 TL을 나타낸 것으로, 중심주파수를 기준으로 ER과 TL이 어떠한 경향을 보이는지 확인하기 위한 것이다. 획득한 1파장에서 7파장에 대하여 위의 과정을 반복하여 중심주파수에서의 파장별 ER과 TL 평균과 중심주파수를 중심으로 사용자가 설정한 주파수 밴드에서의 파장별 ER과 TL 평균을 얻을 수 있다.

### 3.3. 측정시스템의 전파손실 보정

ER 측정 시 음향재료 부착 유무에 따른 반향음은 음향재료의 두께의 왕복거리만큼의 전파거리 차이가 발생하며 TL 측정 시에도 음향재료 두께만큼의 전파거리 차이가 존재하기 때문에 음향재료 두께에 따른 신호처리 과정의 전파손실 보정 및 실측데이터를 이용한 보정이 요구된다. 또한 송·수신기와 음향재료의 길이방향 배치가 0.5 m 이내에서 이루어져 근거리 음장 (near field)으로 볼 수 있으며 [10], 따라서 실측데이터를 이용한 거리에 따른 전파손실 감쇄 영향을 보정하는 과정이 필요하다. 따라서 대형수조에서의 실측데이터의 획득은 이론적인 구형확산과의 비교를 수행하고 정확한 전파손실을 적용하여 신뢰성 있는 ER과 TL 결과를 도출하는데 목적이 있다.

#### 3.3.1. 대형수조 실측실험

그림 6은 전파손실 실측실험방안을 나타낸 것이다. 실측실험은 50 kHz의 CW신호를 사용하여 수신기를 송신기로부터 0.01 m에서 0.90 m까지 0.01 m 간격으로 이동시키며 측정하였다.

그림 7은 획득한 10종류의 파장을 거리별로 계산하고 실측데이터의 진폭 변동에 의한 부분적인 증감 영향을 줄이기 위하여 5포인트 이동평균 한 결과를 나타낸다.

각 지점별 전파손실의 차이가 존재하나 실측실험의 결과가 구형확산 전파손실이나 원통형확산과 일치하지 않는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.3.2. 소형수조에서의 실측실험 전파손실 검증

실측실험 전파손실 결과의 검증을 위해 두께 0.02 m인 음향재료를 사용하여 소형수조에서의 TL 측정을 실시하였다. 동일한 음향재료를 사용할 경우, 전파손실은 기하학적 배치에 따른 변화를 보일 것이므로 송신기로부터 수신기까지의 거리가 0.30 m인 경우와 음향재료의 두께만큼 수신기를 뒤로 이동시킨 0.32 m 거리에 대하여 TL

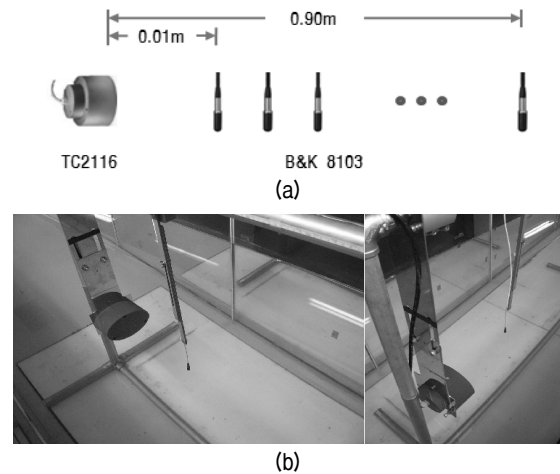


그림 6. 전파손실 측정방안 (a) 측정 모식도 (b) 실험 사진  
Fig. 6. Evaluation method of propagation loss (PL). (a) Key map of measurement (b) Figure of experiment.

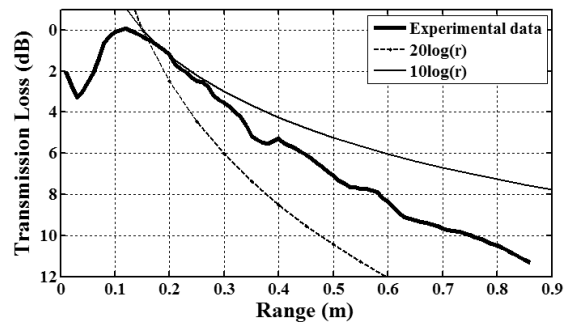


그림 7. 전파손실 실측데이터  
Fig. 7. Experimental data of propagation loss (PL).

측정을 수행하였다. 그림 7의 실측데이터로부터 0.30 m와 0.32 m 거리의 전파손실은 각각 3.6 dB와 4.0 dB 이므로, 0.02 m 거리의 전파손실은 0.4 dB이다. 실측실험 전파손실 검증은 아래와 같은 순서로 수행된다.

- 1) 0.32 m 거리에서 음향재료가 없는 신호 획득
- 2) 0.32 m 거리에서 음향재료를 투과한 신호 획득
- 3) 0.30 m 거리에서 음향재료가 없는 신호 획득
- 4) 0.30 m 거리에서 음향재료를 투과한 신호 획득
- 5) 거리별 측정에 대한 각각의 TL 산출

TL 측정 시 송신기와 음향재료의 거리는 0.15 m이고 송신기와 수신기의 거리는 순서에 따라 0.30 m와 0.32 m이며, 0.02 m 두께의 우레탄 재질 2종 3가지 음향재료를 검증용으로 사용하였다. 대형수조에서 실측을 통해 획득한 전파손실을 검증하기 위해 소형수조에서 수행한 실험의 결과가 표 1에 나타나 있다.

표 1. 소형수조에서의 전파손실 검증실험 결과  
 Table 1. Experimental data of propagation loss (PL) for verification at the small water tank.

단위 : dB		재료 1	재료 2	재료 3
case I	물 0.30 m & 음향재료 0.32 m	5.8	6.0	3.6
case II	물 0.32 m & 음향재료 0.32 m	5.4	5.6	3.2
	case I - case II	0.4	0.4	0.4

두께가 동일한 세 가지의 음향재료에 대하여 데이터를 획득하고 분석한 결과, 음향재료의 종류에 관계없이 두께에 해당하는 0.02 m 거리를 전파하는데 발생하는 전파손실 약 0.4 dB이며 이는 실측데이터로부터 예측한 값과 일치한다.

#### IV. 측정시스템 검증

본 장에서는 구성된 측정시스템을 알루미늄과 스티로폼을 이용해 검증하게 된다. 알루미늄은 두께 0.003 m의 직사각형 판이며 실측데이터와 정확한 물성을 바탕으로 한 모델링의 ER과 TL을 비교하기 위해 사용되었다. 기포층으로 구성된 스티로폼은 수중에서 공기층과 같은 역할을 하므로 ER과 TL 측정을 통하여 전반사를 가정한 결과와의 유사성을 비교하기 위해 사용하였다.

공기는 물에 비해 임피던스가 약 3700분의 1로써 수중에서는 공기를 진공으로 처리하여 모델링을 하거나 해석을 하는 것이 관행으로 되어있다. 그러나 수중에서 순수한 공기층을 형성하는 비용 및 제작의 어려움을 고려하여 공기에 근접한 음향특성을 가지고 있는 스티로폼을 공기층으로 가정하였다. 실제로 스티로폼의 밀도는 0.015 g/m<sup>3</sup>에서 0.025 g/m<sup>3</sup>이며 이는 20 °C에서 물의 밀도인 0.00121 g/m<sup>3</sup>보다는 크지만 물의 밀도인 1,000 g/m<sup>3</sup>보다는 매우 작다.

두 매질을 아래첨자로 표현한 각 매질의 밀도와 음속을  $\rho_1, c_1, \rho_2, c_2$ 라고 할 때, 반사계수  $\mu_r$ 은 식 (6)과 같이 쓸 수 있다. 여기에서  $m$ 과  $n$ 은 각각 밀도의 비  $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ 와 음속의 비  $\frac{c_1}{c_2}$ 이며  $\theta$ 가  $\frac{\pi}{2}$ 인 직각입사 (normal incidence)를 가정하면 위의 수치에 의해 수중에서 스티로폼의 반사계수는 -0.96으로 수중에서 공기층으로 입사할 경우의 반사계수 -1과 유사해진다.

$$\mu_r = \frac{m \sin\theta - (n^2 - \cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}}{m \sin\theta + (n^2 - \cos^2\theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

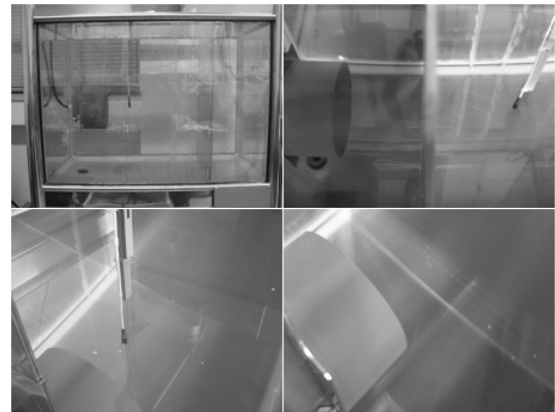


그림 8. 알루미늄 판의 ER과 TL 측정  
 Fig. 8. ER and TL measurement of Aluminium plate.

#### 4.1. 알루미늄 판의 ER과 TL 측정

알루미늄의 ER과 TL 측정은 실측데이터와 모델링 간의 상호비교를 통하여 측정시스템의 신뢰성을 확보하는데 목적이 있다. 이를 위해 실측데이터에서의 ER과 TL 획득신호의 진폭의 비를 비교하고 ‘Brekhovskikh Layer Model’의 이론을 바탕으로 MATLAB 코드로 구현한 프로그램을 사용하여 모델링에서의 반사계수와 투과계수를 산출한다. 실측데이터와 모델링에서 각각 비교된 비율을 상호비교 함으로써 측정시스템의 신뢰성을 검증한다. 실험에는 두께가 0.003 m이고 가로 × 세로가 각각 0.50 m × 0.70 m인 알루미늄 판을 사용하였으며, ER과 TL 측정 방안은 음향재료를 대상으로 한 ER과 TL 측정방안과 동일하다. 그림 8은 알루미늄 판의 ER과 TL 측정과정이다.

##### 4.1.1. Brekhovskikh Layer Model

반사계수 ( $V$ )와 투과계수 ( $D$ )는 인접한 층간의 진폭과 관련된 식으로 정의할 수 있다. 인접한 층간의 진폭과 관련된 식이라 함은, 파의 진행방향과 평행한 방향의 속도 성분  $v_x$ , 수직인 방향의 속도 성분  $v_z$ , 층의 두께  $d$ , 그리고 밀도  $\rho$ 와 각속도  $\omega$ , 층의 수직방향에 대한 파의 입사각 (incident angle)  $\theta$ 에 의하여 아래의 식 (7) 및 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다 [11].

$$V = \frac{\phi''}{\phi} = \frac{M_{32} - Z_1 M_{33} + (M_{22} - Z_1 M_{23}) Z_{n+1}}{M_{32} - Z_1 M_{33} - (M_{22} - Z_1 M_{23}) Z_{n+1}} \quad (7)$$

$$D = \frac{\rho_1 \phi'''}{\rho_{n+1} \phi} = \frac{2Z_1}{(M_{22} - Z_1 M_{23}) Z_{n+1} - M_{32} + Z_1 M_{33}} \quad (8)$$

여기에서  $Z$ 는 각속도  $\omega$ 와 각 층의 밀도  $\rho$ , 그리고 파가 진행함에 따라 변하는 층의 수직방향에 대한 파의 입

사각  $\theta$ 로 표현되며, 아래첨자는  $n+1$ 번째 층에서의 값을 나타낸다. 최초 경계층 전파 후 마지막 경계층 전파까지의 결과를 산출할 때, 각 경계층을 나타내는  $n$ 개의 행렬의 연산에 의해 아래와 같은 행렬이 만들어진다.

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix}$$

$M$ 은  $n+1$ 개 층에 의해 형성된  $n$ 개의 경계층의 경계 조건의 계산결과로서 각 경계층 간 연산의 결과인 위 행렬의 곱으로 나타내며, 아래첨자는  $M_{ab} = A_{ab} - \frac{A_{a1}A_{4b}}{A_{41}}$ 의 결과를 나타낸다.

위의 식은 각 층에 대한 감쇄가 고려되지 않은 것이므로, 위의 식을 사용한 결과에 대하여 투과 및 반사된 파의 에너지 합은 최초 입사한 파의 에너지와 같아야 한다. 위의 식을 사용하여 402 kHz에 대한 입사각에 따른 투과계수를 나타낸 것이 아래 그림 9의 실선이며, 실험값은 점선으로 나타나있다.

그림 10은 투과계수와 반사계수 식을 적용하여 재현한 것이며, 각도방향 분해능에 따른 차이가 있지만 그림 9와

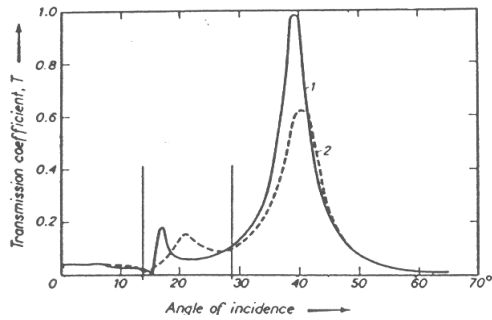


그림 9. 402 kHz에서의 Brekhovskikh Layer Model [11]  
Fig. 9. Brekhovskikh Layer Model at 402 kHz [11].

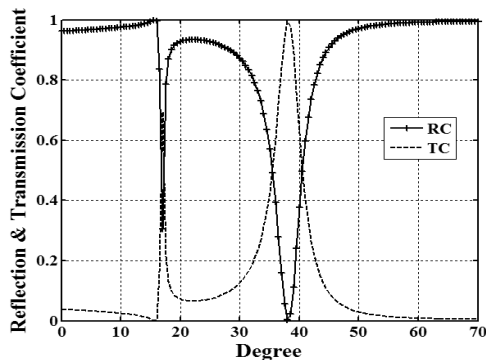


그림 10. 402 kHz에서의 모델링 결과  
Fig. 10. Result of modeling at 402 kHz.

경향이 유사한 것을 확인할 수 있다.

모델링 조건의 실험환경은 세 개의 층으로 구성되며 각 층은 음파의 전파순서에 따라 ‘물-알루미늄-물’이 된다. 입력 파라미터인 물과 알루미늄에 대한 층의 두께 ( $d$ ), 밀도 ( $\rho$ ), 파의 진행방향과 평행한 방향의 속도 ( $v_x$ ), 수직인 방향의 속도 ( $v_z$ )가 표 2에 나타나있다.

Brekhovskikh Layer Model은 인접한 두 층의 경계면에서의 상호관계에 의하여 반사 및 투과계수가 결정되기 때문에 제 1층과 3층의 두께가 0인 것은 파가 입사되는 층과 투과하여 나가는 층이 acoustic-half-space임을 의미한다. 그림 11는 실험결과와 비교하기 위하여 실험에 사용된 주파수 30 kHz와 50 kHz에 대한 각도별 반사계수, 투과계수를 나타낸 것이다. 실험은 송신기와 수신기가 알루미늄 판의 법선벡터 상에 위치하므로 사용되는 입사각은  $0^\circ$ 이다. 입사각이  $0^\circ$ 일 때 반사계수와 투과계수는 30 kHz에서 0.20과 0.80이며, 50 kHz에서 0.41과 0.59이다.

표 2. Brekhovskikh Layer Model 입력 파라미터  
Table 2. Input parameters of Brekhovskikh Layer Model.

입력변수	제 1층	제 2층	제 3층	단위 Layer	
	물	알루미늄	물		
$d$	d	0	0.003	0	$m$
$\rho$	rho	1000	2700	1000	$kg/m^3$
$v_x$	cc	1509	6000	1509	$m/s$
$v_z$	cs	0	3100	0	$m/s$

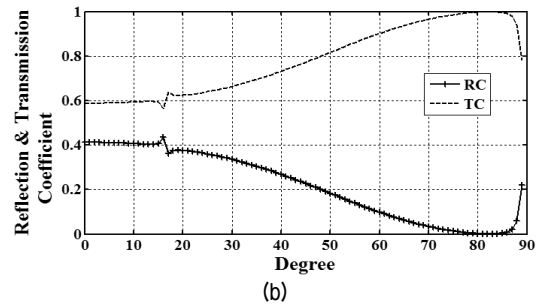
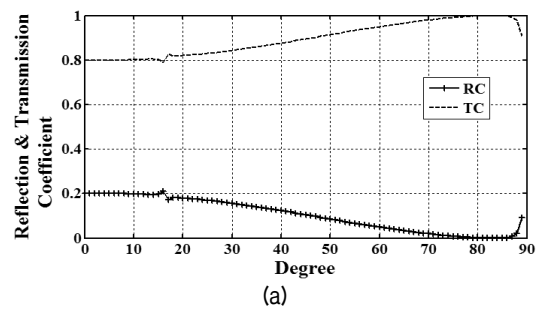


그림 11. 반사계수 (RC)와 투과계수 (TC) (a) 30 kHz (b) 50 kHz  
Fig. 11. Reflection coefficient (RC) and Transmission coefficient (TC). (a) 30 kHz (b) 50 kHz.

4.1.2. 측정결과

획득한 반사 및 투과신호를 이용하여 투과계수와 반사계수를 구하기 위해 서로 다른 전파거리를 보정하는 과정이 필요하다. 그림 1의 기하학적 배치도에서 음향재료가 없는 경우가 음향재료를 부착한 경우의 비교 기준이 되므로, 송신신호는 ER 측정 시 시편에 반사되어 수신되기까지 0.75 m의 거리를 진행하고 TL 측정시 0.30 m의 거리를 진행한다. 단, 알루미늄 판의 TL 측정 시 송신기와 수신기의 거리는 그림 1과 같은 0.30 m가 아닌 0.35 m로 측정되었으므로 ER과 TL 측정 시 음파의 전파거리 차이는 0.400 m이며, TL 측정 시 투과하는 알루미늄 판의 두께를 제외하면 실제로 수중 전파거리 차이는 0.397 m가 된다. 알루미늄 판의 TL 측정 시 송신기와 수신기의 거리를 조절한 것은 음향수조에 알루미늄 판을 삽입할 때 송·수신기에 미치는 물리적인 접촉을 피하기 위한 것이다. 실측실험 데이터를 바탕으로 0.397 m에 해당하는 전파손실을 구하면 6.1 dB이며, 이는 시간영역에서의 2.01배 증폭과 같다. ER 측정 시 전파거리가 TL 측정 시 보다 길기 때문에 ER 신호의 시간영역 진폭에 2.01배 증폭하여 TL 신호의 시간영역 진폭과 비교한다.

위의 과정을 거쳐 50 kHz에서 측정된 ER과 TL 송·수신 신호를 실제 측정된 파장들 중 대표적인 5파장에 대하여 나타낸 것이 그림 12이다. 그림 12 (a)의 실선은 실험으로 획득한 수신신호이며 점선은 실측된 수신신호를 2.01배 증폭한 신호이다.

5파장에서의 ER과 TL의 진폭은 각각 4.5 V와 7.0 V이며, 이를 ER과 TL의 진폭의 합을 100으로 환산하면 39 대 61의 비율이 된다. 표 3은 ER과 TL 측정 시 각 파장별 진폭과 ER과 TL 진폭의 합을 100으로 환산한 경우의 반사, 투과신호의 진폭 비를 나타낸 것이다.

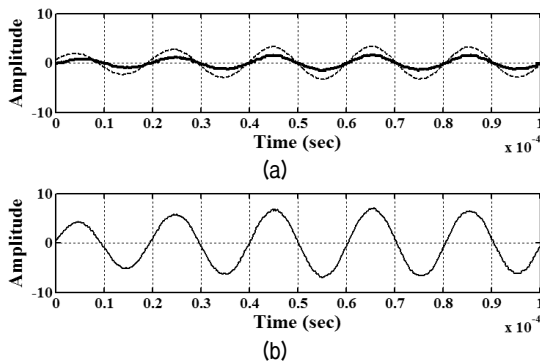


그림 12. 50 kHz에서 알루미늄 판의 진폭 (a) ER 진폭 (b) TL 진폭

Fig. 12. Amplitude of received signal by Aluminium plate (50 kHz). (a) Amplitude of ER (b) Amplitude of TL.

Brekhovskikh Layer Model을 이용한 결과는 41 대 59 로 투과가 우세한 경향을 나타냈으며, 표 3에서 TL 진폭과 2.01배 증폭된 ER 진폭의 비가 Brekhovskikh Layer Model을 이용해 계산된 경향과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 동일한 방법으로 30 kHz에서 동일 재료를 대상으로 위의 과정을 반복 수행하여 30 kHz 및 50 kHz에서의 알루미늄 판을 이용한 반사와 투과의 비를 파장별로 평균하여 나타낸 것이 표 4이다. 표 4에서 ER과 TL 측정으로 획득한 수신신호의 진폭을 '진폭'에 표시하였다. ER의 진폭은 실제 획득한 수신신호의 진폭을 표 3과 같이 보정하여 나타내어진 값이며, ER과 TL에서 각각 획득한 진폭의 합에 대한 비율을 '비율'에 나타내었다. 실측데이터에서 얻어진 반사 대 투과 비율과 Layer Model에서 얻어진 반사계수와 투과계수를 30 kHz와 50 kHz에서 각각 비교하였다.

30 kHz에서는 50 kHz에서의 결과에 비해 Brekhovskikh Layer Model과 차이가 커져 약 4 %의 차이를 보이고 있으나, ER 진폭이 0.2 V 증가할 경우 Brekhovskikh Layer Model과 동일한 결과를 나타낼 수 있다. 즉, 50 kHz에 비해 ER과 TL 진폭의 합이 작아 작은 진폭변화에도 비율의 차이가 커질 수 밖에 없기 때문이다. 결론적으로 30 kHz와 50 kHz의 실험을 통한 진폭비 비교결과는 Brekhovskikh Layer Model과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

표 3. 50 kHz에서 알루미늄 판의 ER과 TL 진폭 비 측정결과  
Table 3. Amplitude ratio of ER vs. TL by Aluminium plate (50 kHz).

단위 : V	ER		TL	진폭 비	
	보정 전	보정 후		반사	투과
1	1.2	2.5	3.1	45	55
2	1.9	3.9	5.0	44	56
3	2.1	4.2	5.9	42	58
4	2.3	4.5	6.9	39	61
5	2.3	4.5	7.0	39	61
6	2.2	4.5	7.1	39	61
7	2.4	4.9	7.0	41	59

표 4. 30 kHz와 50 kHz에서 알루미늄 판의 반사·투과비 측정결과  
Table 4. Reflection and Transmission ratio by Aluminium plate (30 kHz, 50 kHz).

진폭	비율	30 kHz			50 kHz				
		ER	RC	Layer Model	진폭	비율	Layer Model		
1.73	24	ER	RC	20	4.52	40	ER	RC	41
5.53	76	TL	TC	80	6.78	60	TL	TC	59



표 5. 50 kHz에서 스티로폼 ER, TL 측정결과  
Table 5. ER and TL by Styrofoam (50 kHz).

단위 : dB	ER		TL
	1차 측정	2차 측정	
파장			
1	1.1	1.3	35.1
2	0.3	0.4	42.3
3	0.9	1.0	40.0
4	0.8	1.0	41.9
5	0.7	0.9	41.6
6	0.7	0.9	42.3
7	0.6	0.9	43.6
8	-	-	48.3
9	-	-	43.7
10	-	-	45.8
평균	0.7	0.9	42.5

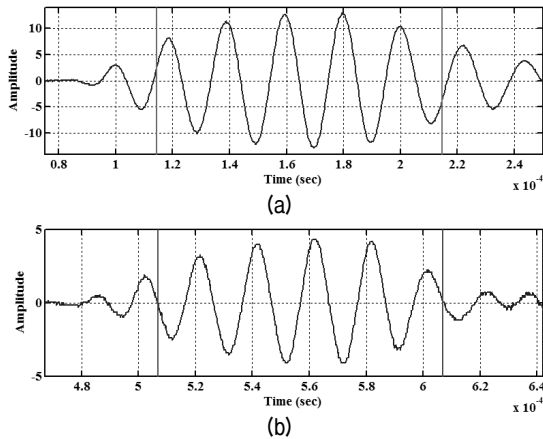


그림 13. 50 kHz에서 스티로폼의 ER 신호 (a) 송신 후 직접 수신  
(b) 스티로폼 반사 후 수신  
Fig. 13. ER signal by styrofoam at 50 kHz. (a) Direct received signal (b) Reflected signal by styrofoam.

#### 4.2. 스티로폼의 ER과 TL 측정

스티로폼의 ER과 TL 측정은 0.03 m 두께의 스티로폼을 0.003 m 두께의 알루미늄 판의 전면에 부착하여 50 kHz에서 수행하였다. 실험방법과 분석방법은 알루미늄 판을 이용한 검증과 동일하며 측정결과는 표 5와 같다.

스티로폼의 ER 측정결과는 1파장을 제외하고 모두 1.0 dB 이하를 나타내며 3파장부터는 각 파장에 따른 값이 일정한 것을 확인할 수 있다. TL 측정결과도 파장에 따라 차이는 있으나 1파장을 제외하고 40.0 dB 이상의 값을 갖는다. 각 파장별 TL이 35.1 dB에서 45.8 dB의 값을 갖는 것은 투과손실이 커 신호대잡음비 (signal to noise ratio)를 충분히 확보하지 못하기 때문으로 보인다. 스티로폼은 내부에 밀폐된 기포가 형성되어 있기 때문에 이론적으로 수중에서는 공기층과 유사하며, 따라서 반사가

투과에 비해 우세한 전반사 경향이 보여야 한다.

표 5의 측정결과는 반사가 투과에 비해 우세한 특성을 보여주고 있으며, 스티로폼의 ER 측정결과 중 5파장에 대한 신호를 나타낸 그림 13을 통해 스티로폼에 반사된 신호의 위상이 180° 역전되었음을 알 수 있다. 이로써 스티로폼이 soft boundary의 조건으로써 수중에서 공기층과 유사한 성질을 보이는 것을 확인하였다.

### V. 결론

본 논문에서는 수중에서 반향음과 투과음을 감소시키는 음향재료의 ER과 TL 성능을 정량적으로 측정하기 위한 장치를 제작하고 측정시스템을 구성하였으며, 표준표적을 이용하여 검증을 수행하였다. 이를 위해 이론적으로 ER과 TL을 정의하고 신호간섭 최소화 모델링을 통해 송·수신기 및 음향재료 간의 기하학적 배치를 결정하였으며, 획득한 수신신호의 ER과 TL 분석을 위해 상호상관법을 적용하여 시간영역과 주파수영역에서 총 네 가지 방법으로 분석 및 교차검증을 수행하였다. 그리고 실제 실험환경과 동일한 조건의 전파손실을 적용하기 위해 실제 실험을 수행하였고, 알루미늄 판의 ER과 TL 결과를 Brekhovskikh Layer Model과 비교하여 결과가 일치함을 확인하였으며, 수중에서 전반사로 가정할 수 있는 스티로폼을 이용하여 측정시스템을 검증하였다. 위의 측정방안 확립과 표준표적을 이용한 검증을 통하여 Brekhovskikh Layer Model 등 이론과 일치함을 확인하였고 측정시스템의 신뢰성을 확보하였다. 그러나 본 논문에서는 소형수조에서의 결과를 다루었기 때문에 간섭과 회절 및 반사에 의한 신호간섭을 고려하여 사용파장 등 실험환경이 제약된 측면이 있다. 향후 연구에서는 간섭과 회절 및 반사에 의한 신호간섭을 배제할 수 있는 규모의 실험이 수행되어 본 논문에서 다루어진 소형수조에서의 측정시스템의 확장 및 검증에 관한 연구가 필요할 것으로 보인다.

### 참고 문헌

1. Stan Zimmerman, *Submarine Technology for the 21st Century*, Trafford Publishing, Victoria, 1990.
2. 정우진, 한승진, 김원호, 신구균, 전재진, "소나 돔 음향창 시편 투과손실 측정/분석 방법 고찰," *한국소음진동공학회논문집*, 16권 7호, 729-738쪽, 2006.
3. E. E. Mikeska and J. A. Behrens, "Evaluation of transducer window materials," *J. Acoust. Soc., Am.* vol. 59, no. 6, pp. 1294-1298, 1976.

4. D. H. Trivett and A. Z. Robinson, "Modified Prony method approach to echo-reduction measurements," *J. Acoust. Soc., Am.*, vol. 70, no. 4, pp. 1166-1175, 1981.
5. Anthony J. Rudgers and Christine A. Solvoid, "Apparatus-independent acoustical-material characteristics," *J. Acoust. Soc., Am.*, vol. 76, no. 3, pp. 926-934, 1984.
6. J. C. Piquette, "Technique for detecting the presence of finite sample-size effect in transmitted-wave measurement made on multilayer underwater acoustic panels," *J. Acoust. Soc., Am.*, vol. 90, no. 5, pp. 2831-1361, 1991.
7. R. J. Bobber, *Underwater Electroacoustic Measurements*, Chap.6, pp. 287-294, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., 1970.
8. Victor F. Humphrey, Stephen P. Robinson, John D. Smith, Michael J. Martin, Graham A. Beamiss, Gary Hayman and Nicholas L. Carroll, "Acoustic characterization of panel materials under simulated ocean conditions using a parametric array source," *J. Acoust. Soc., Am.*, vol. 124, no. 2, pp. 803-814, 2008.
9. R. J. Urlick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., Chap.9, pp. 291-293, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983.
10. R. J. Bobber, *Underwater Electroacoustic Measurements*, Chap.6, pp. 24-26, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., 1970.
11. L. M. Brekhovskikh, *Waves in Layered Media*, Chap.1, pp. 1-78, Academic Press, Inc., New York, 1960.

---

**저자 약력**

---

● **신 미 루 (Mi-Ru Shin)**

2008년 8월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학사)  
 2010년 8월: 한국해양대학교 해양공학과 (공학석사)  
 2010년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 (박사과정)  
 2011년 1월 ~ 현재: 아이에스테크놀로지(주) 센서시스템연구소 SONAR연구팀 연구원

● **조 정 홍 (Jung-Hong Cho)**

2005년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학부 (공학사)  
 2007년 2월: 한국해양대학교 해양개발공학과 (공학석사)  
 2007년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 (박사과정)

● **이 경 택 (Kyung-Teak Lee)**

1986년 3월: 해군사관학교 전자공학과 (공학사)  
 1992년 2월: 미해군대학원(Naval Postgraduate School) 수중음향학과 (공학석사)  
 2005년 2월 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 (박사과정)

● **김 재 수 (Jea-Soo Kim)**

1981년 2월: 서울대학교 조선공학과 (공학사)  
 1984년 5월: 미국 University of Florida, 해양공학 (공학석사)  
 1989년 5월: 미국 MIT, 해양공학, 수중음향 (공학박사)  
 1990년 ~ 1991년: 국방과학연구소 선임연구원  
 1999년 8월 ~ 2001년 2월: 미국 Scripps 해양연구소 Visiting Scientist  
 2009년 2월 ~ 2010년 2월: 미국 San Diego Visiting Scientist  
 1991년 ~ 현재: 한국해양대학교 해양공학과 교수

● **전 재 진 (Jae-Jin Jeon)**

1982년 2월: 연세대학교 기계공학과 (공학사)  
 1984년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)  
 1987년 8월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)  
 1987년 8월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

● **함 일 배 (Il-Bea Ham)**

1980년 9월: 고려대학교 기계공학과 (공학사)  
 1992년 2월: 부산대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)  
 1998년 2월: 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 (공학박사)  
 2002년 6월 ~ 2003년 6월: 미국 해군대학원(NPS) Visiting Professor  
 1982년 9월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원

● **강 창 기 (Chang-Gi Kang)**

~ 현재: (주)화승알앤에이 상무이사