

펄스 튜브를 이용한 수중 음향 성능 측정 시스템 개발

Development of Underwater Acoustic Performance Measurement System Using Pulse Tubes

서 윤 호† · 김 상 렬* · 이 성 민* · 변 양 현** · 서 영 수***

Yun-Ho Seo, SangRyul Kim, Sung-Min Lee, Yang-Heon Byun and Youngsoo Seo

(Received March 13, 2014 ; Revised April 28, 2014 ; Accepted May 12, 2014)

Key Words : Underwater Acoustic Material(수중 음향 재료), Pulse Tube(펄스 튜브), Impedance Tube(임피던스 튜브), Echo Reduction(반향음 감소), Transmission Loss(전달 손실)

ABSTRACT

Underwater acoustic materials are installed in order to reduce reflection, transmission and radiation of an underwater structure. The acoustic performance of the materials should be evaluated in accurately-controlled environment in terms of temperature and static pressure. In this paper, two pulse tubes, which are equipped with temperature and pressure controllers, are designed and developed to evaluate echo reduction(ER) and transmission loss(TL) of underwater acoustic materials. The procedures of the evaluation are suggested and the validation is carried out by comparing theoretical values to experimental results for a simple stainless steel specimen and free surface. In result, it is validated that developed pulse tubes are able to measure ER and TL with 2 dB tolerance.

1. 서 론

수중에 위치하는 구조물은 자체 진동에 의해 소음을 발생시키기도 하며, 외부 소음이 구조물에 반사시켜 소음을 방사하기도 한다. 이와 같은 수중 구조물이 발생시키는 소음 문제를 해결하기 위해서 여러 종류의 수중 음향 코팅재가 개발되어 사용되고 있다. 수중 음향 코팅재는 구조물 표면에 부착되어 구조물이 발생시키는 소음을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 구조물 내부로 전달되는 소음 또한 제어할 수 있다. 일반적으로 위와 같은 특성을 위해서는 물과

유사한 특성 임피던스(characteristic impedance)를 갖는 천연고무, 합성고무, 폴리우레탄과 같은 점탄성 재료가 주로 사용되고 있다. 이 경우 기본적으로 점탄성 재료들은 온도 및 압력 변화에 따라 그 특성이 급격히 변하는 성질을 가지고 있기 때문에 수중 음향 시험의 정확한 특성을 평가하기 위해서는 정밀하게 온도 및 압력의 조절이 가능한 환경에서의 시험을 필수적이라 할 수 있다.

온도 및 압력이 조절되는 환경하에서 음향 성능 시험은 일반적으로 두 가지 방법을 이용하여 수행될 수 있다. 하나는 압력 챔버(pressure chamber)를 이용하는 방법으로 물의 온도와 압력을 조절할 수 있

† Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM)

E-mail : yhseo@kimm.re.kr

Tel : +82-42-868-7533, Fax : +82-42-868-7440

* Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM)

** Hwaseung R&A

*** Member, Agency for Defense Development

A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

는 챔버 내부에 흡음재를 설치하고 성능 측정 대상이 되는 시편을 중앙에 설치한다⁽¹⁾. 시편 한편에 음향 발생 장치를 설치하고, 시편 좌/우에 각각 수음 장치(hydrophone)를 설치하여 시편에 전달된 소음이 반사하거나 투과되는 양을 평가할 수 있다. 이와 같은 방법은 넓은 시편에 대한 음향 성능을 전체적으로 평가할 수 있는 장점이 있지만, 대형 압력 챔버 및 음향 발생 장치 제작에 많은 비용에 소요되는 단점이 있다. 다른 방법인 펄스 튜브를 이용하는 방법은 물이 채워진 긴 관 한편에 음향 발생 장치를 설치하고 평면파로 전파하도록 하여 관 내부에 설치된 시편에 대한 음향 성능을 평가하는 방법이다⁽²⁾. 위 방법은 시험 장치의 제작에 비교적 작은 비용이 소요되나 시편의 크기가 작아야 하기 때문에 불균일한 시편에 대해서는 정확한 음향 성능 특성을 평가하기 어려운 단점이 있다.

이 연구에서는 시험 장치 제작에 편의성이 있는 펄스 튜브를 이용하여 수중 음향 시편에 대한 반향음 감소(echo reduction, ER) 및 전달 손실(transmission loss, TL) 성능을 평가하는 시스템을 개발했다. 관 내부의 음향 전파가 평면파 형태가 되도록 펄스 튜브의 기본 설계가 진행되었으며, 이에 따라 10 kHz와 30 kHz까지 측정이 가능한 두 개의 펄스 튜브가 제작되었다. 펄스 튜브의 수중 환경을 실제와 유사하게 만들기 위해 온도 조절 장치와 압력 조절 장치가 구비되어 있으며, 자동 시험 데이터 획득 및 처리 시스템이 구축되었다. 측정 시스템뿐만 아니라 반향음 감소를 좀 더 정밀하게 측정하는 방법이 새로이 제안되었으며, 이론값이 존재하는 시편에 대해 수중 음향 성능을 측정하여 개발된 시스템의 측정 성능을 검증했다.

2. 음향 성능 측정 시스템 설계

2.1 반향음 감소 및 전달 손실

Fig. 1과 같이 음향원(source)에서 발생한 음파가 펄스 튜브 내부에서 평면파의 형태로 전파된다고 가정하면, 음향 시편에 입사된 음파는 반사, 흡수 또는 전달된다. 이 경우 음파를 측정하는 동압 센서 1번에서 입사파와 반사파를 측정할 수 있으며, 동압 센서 2번에서는 전달파를 측정할 수 있다. 위와 같은 각 음파를 식(1)과 같이 주파수 영역으로 푸리에 변환(Fourier transform)하면 각 주파수에서의 음향

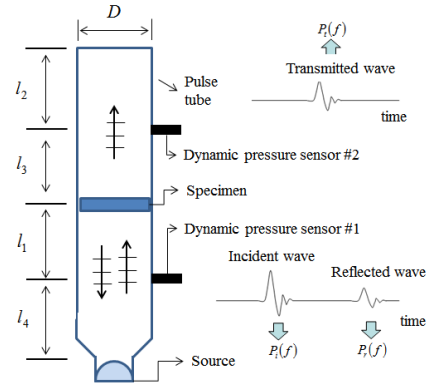


Fig. 1 Schematic diagram of pulse tube

시편의 반사 성능을 나타내는 반향음 감소(ER) 및 전달 성능을 나타내는 전달 손실(TL)로 각각 정의할 수 있다. 이하 이 논문에서 음향 성능이라 함은 반향음 감소와 전달 손실을 의미한다.

$$ER(f) = -20 \log \frac{P_r(f)}{P_i(f)}$$

$$TL(f) = -20 \log \frac{P_t(f)}{P_i(f)}$$
(1)

여기에서 $P_i(f)$, $P_r(f)$ 와 $P_t(f)$ 는 각각 입사파, 반사파, 전달파 음파의 푸리에 변환이다.

2.2 설계 변수 결정 및 센서 선택

이 논문의 목적은 1~10 kHz 및 10~30 kHz의 측정 주파수 영역을 갖고 최대 측정 불확도 ± 2 dB로 반향음 감소와 전달 손실 측정이 가능한 펄스 튜브 개발이며 이를 각각 저주파 튜브 및 고주파 튜브로 칭한다. 이 때 펄스 튜브의 주요 설계 변수는 Fig. 1에 표시된 튜브 내부 직경(D) 및 음파를 측정하는 동압 센서(dynamic pressure sensor)와 시편 또는 튜브 끝단 사이 거리(l_1 , l_2) 등이다. 이외에 튜브 벽면의 두께 및 센서 홀더 등 부수적인 설계 변수가 존재하며 각각의 설계 변수의 결정은 아래와 같은 과정을 통해 이루어졌다.

(1) 펄스 튜브 직경

펄스 튜브를 이용한 수중 음향 성능 측정은 펄스 튜브 내부가 물로 채워져 있으며, 이 때 음파가 평면파로 전달되는 것을 기본 전제로 한다. 따라서 원

형관의 고차 모드 전파가 시작되는 아래와 같은 한계 주파수 이하에서만 음향 성능 측정이 가능하다⁽³⁾. 즉, 펄스 튜브의 측정 최대 주파수가 펄스 튜브 내부 직경에 의해 결정된다.

$$f_{\max} \approx \frac{c_w}{1.7D} \quad (2)$$

여기에서 D 는 펄스 튜브의 내부직경을 의미하며, c_w 는 물속에서의 음속(1450 m/s)을 의미한다. 이 연구에서는 최대 목표 주파수가 각각 10 kHz와 30 kHz이므로 직경은 각각 85 mm, 28 mm이하로 설계되어야 한다.

(2) 동압 센서 위치

Fig. 1에 표시된 동압 센서 1번과 시편 사이 거리 (l_1) 그리고 동압 센서 2번과 튜브 끝단 사이 거리 (l_2)는 펄스 튜브에서 측정 가능한 주파수의 최소값 (f_{\min})과 관련 있다. Fig. 2와 같이 주파수가 f_{\min} (주기가 T_{\max})인 펄스 하나를 고려할 때, 입사파와 반사파의 시간 간격(T_d)은 다음과 같이 표현 된다.

$$T_d = \frac{2l_1}{c_w} \quad (3)$$

여기에서 입사파와 반사파가 분리 가능하기 위해서는 T_{\max} 가 T_d 보다 작아야 하므로 최종적으로 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$l_1 \text{ or } l_2 > \frac{c_w}{2f_{\min}} \quad (4)$$

각 펄스 튜브의 측정 최저 주파수는 목표 값이 1 kHz와 10 kHz이므로 l_1 과 l_2 는 각각 725 mm와 72.5 mm 이상이어야 한다.

또한, l_3 는 음향원 및 시편에 의해 발생된 음파의 근접장 효과(near-field effect)가 사라지고 평면파만 전파될 수 있도록 튜브 직경의 3배이상 이 되어야 한다⁽⁴⁾.

(3) 튜브 벽면 두께

펄스 튜브 내부에서 평면파가 전파될 때, 튜브 벽면의 유연성(flexibility)과 상호 작용이 생기면 주파수에 따라 음속이 변하는 분산(dispersion) 현상이 발생하게 되며 이는 음향 신호의 왜곡이 초래하여

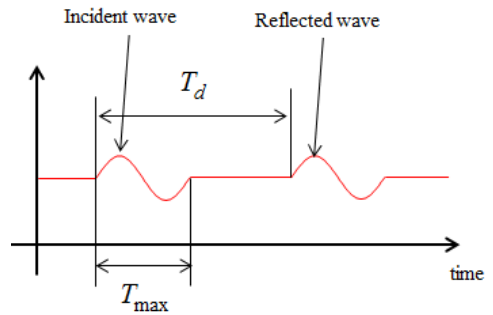


Fig. 2 Incident and reflected waves

정확한 음향 성능 측정을 할 수 없게 한다. 즉, 펄스 튜브 벽면 두께는 관심 주파수 영역에 대해 충분히 강하계(stiff) 설계되어야 한다. 참고문헌⁽⁵⁾에 따르면 벽면 두께가 튜브 내부 직경의 절반 이상이면 분산 현상이 거의 나타나지 않는다. 따라서 각각의 튜브에 대해 안전율을 고려하여 벽면 두께를 직경의 60% 이상으로 설계했다.

(4) 센서 및 센서 홀더(holder)

각 튜브의 음향 신호를 생성하는 음향원(source)는 Table 1과 같은 모델이 사용되었으며 Fig. 1과 같이 펄스 튜브 최하단에 설치되었다. 이들은 관심 주파수 영역에서 충분한 음향 가진이 가능한 특성들을 각각 가지고 있다.

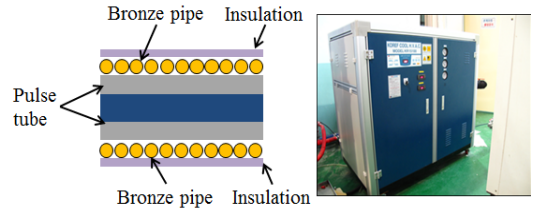
또한, 펄스 튜브 내부의 음파 신호를 측정하는 동압 센서를 각 2개씩 튜브 벽면에 설치하여 입사파 및 전달파를 측정하고 음향 성능을 계산한다. 이 펄스 튜브의 최대 관심 주파수인 30 kHz에서 음파 파장 길이는 약 50 mm이므로 이를 유효하게 측정하기 위해 센서 직경이 파장 대비 약 1/10이 되도록 센서를 선택했다. Table 2는 선택된 동압 센서의 제원을 표시하고 있으며, 이 논문의 관심 주파수 영역, 온도 및 정압 범위에서 사용이 가능한 센서임을 확인할 수 있다.

위 동압 센서는 튜브 벽면의 진동이 압력 신호로 나타나는 경우가 발생할 수 있는데, 이는 측정하고자 하는 값이 아니기 때문에 Fig. 3과 같이 동압 센서 설치부분에 진동 절연이 되고 압력에 대한 밀봉(sealing)이 가능하도록 분리 구조로 설계하고 오링(o-ring)을 추가적으로 설치했다.

수중 음향 성능은 온도 및 압력(정압)에 따라 크게

Table 1 Acoustic source specifications

	Low frequency pulse tube	High frequency pulse tube
Manufacturer	Neptune sonar	B&K
Model	T204	8104
Sensitivity	-150 dB re 1 V/ μ Pa	-205 dB re 1 V/ μ Pa
Temperature range	-5 °C to 70 °C	-30 °C to 120 °C
Maximum pressure	15 MPa	4 MPa



(a) Insulation (b) Controller

Fig. 4 Design for temperature control

Table 2 Dynamic pressure sensor specifications

Manufacturer	PCB
Model	112A22
Sensitivity	14.5 mV/kPa
Temperature range	-73 °C to 135 °C
Maximum pressure	3450 kPa
Acceleration sensitivity	< 0.0014 kPa/(m/s ²)
Resonance frequency	> 250 kHz
Minimum frequency	0.5 Hz
Diameter	5.54 mm

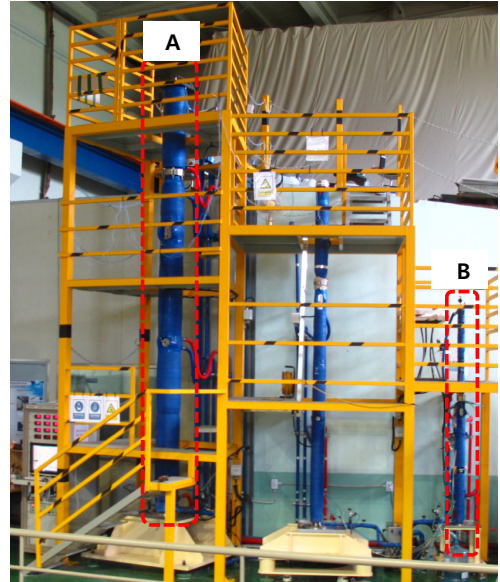


Fig. 5 Underwater acoustic performance measurement system; A: low frequency pulse tube; B: High frequency pulse tube

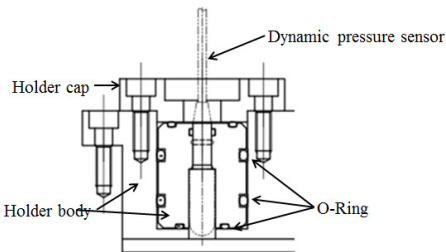


Fig. 3 Holder for dynamic pressure sensors

달라지는 특성을 가지고 있기 때문에 펄스 튜브 내부 물의 온도 및 압력을 조정하고 일정하게 유지하는 장치가 필요하다. 온도 조정을 위해 펄스 튜브 외부에 Fig. 4와 같이 냉각수가 흐를 수 있는 동관을 감고 이를 온도 조정 장치에 연결했다. 또한 동관 외부를 단열재로 마감하여 온도 조절 후 유지가 효과적으로 이루어지도록 설계했다. 압력 조절을 위해서는 펄스 튜브 내부와 압력 펌프를 연결하고 밸브를 설치하였다. Fig. 5는 개발된 수중 음향 성능 측정 장치를 보여주고 있으며, Table 3은 위 설계 변수들의 조건을 고려하여 설계된 펄스 튜브의 제원을 보여주고 있다.

Table 3 Specifications of pulse tubes

	Low frequency pulse tube	High frequency pulse tube
Inner diameter(D)	70 mm	25 mm
Wall thickness	50 mm	15 mm
Length	l_1+l_3	1230 mm
	l_2	1770 mm
	l_4	2000 mm
Frequency range	1~10 kHz	10~30 kHz
Temperature range	2~30 °C	
Static pressure range	0~34 bar	

3. 음향 성능 평가 방법

3.1 음향 신호 생성

이 논문의 목적인 반향음 감소와 전달 손실을 측정하기 위해서는 음향원(source)에서 특정 음향 신호를 발생시켜야 한다. 이 경우 사용할 수 있는 방법은 두 가지로서 하나는 일정 주파수를 갖는 정현파를 짧은 시간(반사파와 겹치기 않도록 조정)동안 발생시키는 방법이 있다. 이러한 신호를 톤버스트(tone burst) 신호라 칭하며, 이를 사용하는 경우 단일 주파수에 대해 에너지가 큰 신호를 발생시킬 수 있는 반면, 여러 주파수 대역에 대한 시험을 할 경우 반복적인 시험이 필요하다. 다른 방법은 광대역 주파수 성분을 갖는 펄스 신호를 발생시켜 사용하는 방법으로서 여러 주파수 대역에 대한 시험을 한번에 효율적으로 수행할 수 있다. 이전 연구를 통하여 톤버스트와 아래 식으로 표현되는 Haversine 펄스를 이용한 시험 결과가 일치한다는 것이 확인되었다⁽⁶⁾.

$$P_i(t) = \frac{1 - \cos(2\pi f_e t)}{2} \tag{5}$$

이 시험 장치에서는 관심 주파수 영역을 고려하여 저주파 튜브에서는 $f_e=10$ kHz, 고주파 튜브에서는 $f_e=30$ kHz의 Haversine 펄스 신호를 이용하여 시험을 진행한다. 비록 생성 신호는 Fig. 6과 같은 Haversine 펄스이지만 음향원의 동적 응답으로 인해 발생하는 음파는 다른 형태를 띠며 이를 주파수 분석하면 Fig. 7과 같이 관심 주파수 대역에서 충분한 음향 가진이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

3.2 반향음 감소와 전달 손실 측정 절차

앞서 정의된 반향음 감소(ER) 및 전달 손실(TL)은 기본적으로 동압 센서에서 측정된 입사파, 반사파 및 전달파를 주파수 영역에서 계산함으로써 음향 성능을 얻을 수 있다. 하지만 동압 센서들에서 측정된 신호는 여러 실험의 불확실성이 포함된 신호이기 때문에 30회 신호를 반복적으로 취득하여 이를 시간 영역에서 평균하여 입사, 반사 및 전달파를 얻을 수 있다.

여기에서 Fig. 8(a)와 같이 동압 센서 1번의 신호를

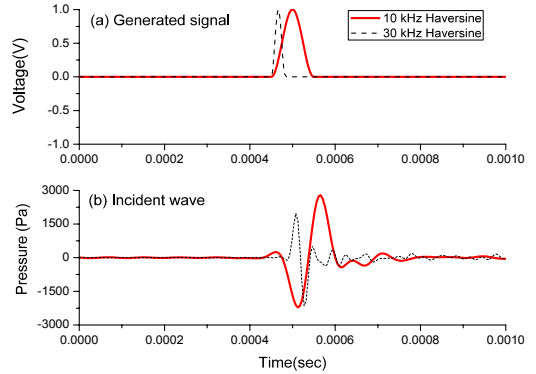


Fig. 6 Generated signals and incident waves

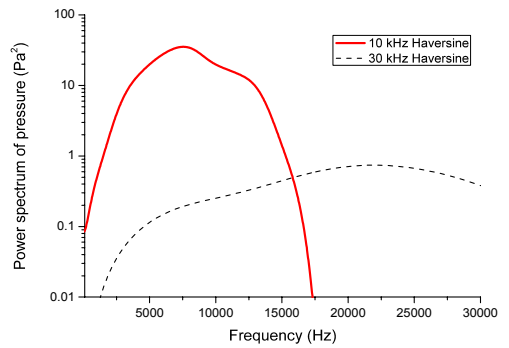


Fig. 7 Spectrum of incident wave

살펴보면 음향원에서 발생시킨 펄스 신호 이후에 잡음 성분이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 위 잡음 성분은 동압 센서가 음향원으로부터 충분한 거리(내부 직경의 3배이상)만큼 이격되어 있기 때문에 근접장 효과가 아닌 것으로 판단되며 음향원의 잔류 진동이 튜브 벽면으로 전달된 신호로 보인다. Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 반사파 성분이 위 잡음과 섞여서 신호의 왜곡이 발생했으며, 이는 결과적으로 정밀한 반향음 감소 성능 시험 측정을 방해하기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다.

이 연구에서는 펄스 튜브 내부에 음향 시편을 넣고 시험하기 이전에 Fig. 8(b)와 같이 음향 시편 없이 빈 펄스 튜브에 대해 동압 센서 1번의 신호를 취득하여 이를 시편 시험 결과에서 감하여 반사파를 취득하는 방법을 사용했다.

Fig. 8(c)에서 확인할 수 있듯이 반사파가 나타나는 부근에 잡음이 크게 감소했으며, 이를 이용하면 명확한 반사파 확인이 가능할 뿐만 아니라 왜곡되지

않은 반사파 취득으로 정밀한 반향음 감소 측정이 가능하다.

전달 손실의 경우 빈튜브 시험 결과를 이용한 보상이 불가능할 뿐만 아니라 전달과가 나타나는 부분은

잡음의 영향이 작기 때문에 Fig. 8(d)와 같이 동압센서 2번에서 측정된 신호를 그대로 사용한다.

일반적으로 푸리에 변환 전에 스펙트럼 누설을 하여 사용한다. 이 시험에서는 정상 상태 신호가 아닌 줄이기 위해 시간 신호에 창문(윈도우) 함수를 곱하고 펄스 신호를 사용하기 때문에 taper cosine 함수를 창문 함수로 이용했다.

Fig. 9는 반향음 감소와 전달 손실 측정 및 신호 처리 절차를 도식적으로 보여주고 있다.

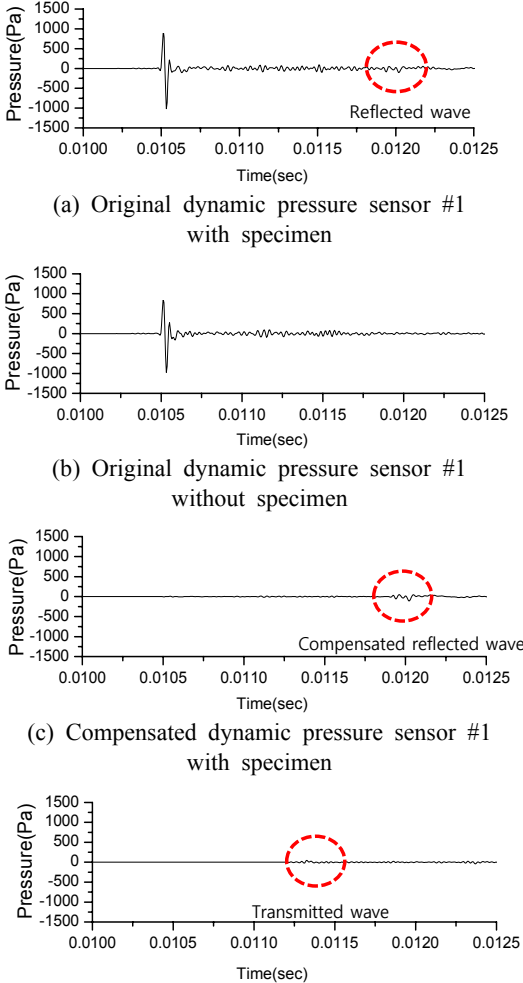


Fig. 8 Compensation of dynamic pressure waves

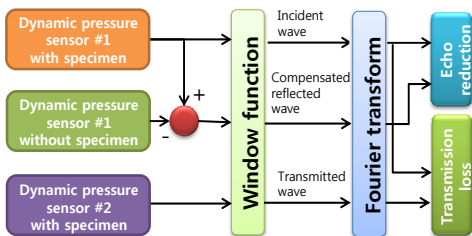


Fig. 9 Processing procedure for ER and TL

4. 수중 음향 성능 측정 시스템 검증

개발된 수중 음향 성능 측정 시스템을 검증하기 위해서 각각의 튜브에 대해 3가지 조건에서 시험을 실시했다. 우선 튜브 내부에 평면파 형태로 음파가 전파되는지를 확인하기 위해서 시편이 설치되지 않은 상태에서의 전달 손실을 측정 했다. 평면파로 전파가 된다면 전달 손실 값은 전 주파수 범위에서 0 dB이어야 한다. 추가적으로 이론값이 알려진 자유 표면(free surface)에 대한 반향음 감소 측정을 실시했다. 자유 표면이란 펄스 튜브 내부의 물을 채우고 최상단 덮개를 열어 물과 공기가 만나는 지점으로 임피던스 차이에 의해 완전 반사(위상은 반대)가 일어나 반향음 감소 값은 전 주파수 범위에서 0 dB가 된다. 더불어 이론치 계산이 가능한 스테인리스 스틸(SUS) 두께 10 mm 시편에서의 전달 손실을 각각 측정했다.

Figs. 10~15는 위 3 조건에 대한 이론값과 시험 결과값을 보여주고 있다. 비교 결과를 살펴보면 저

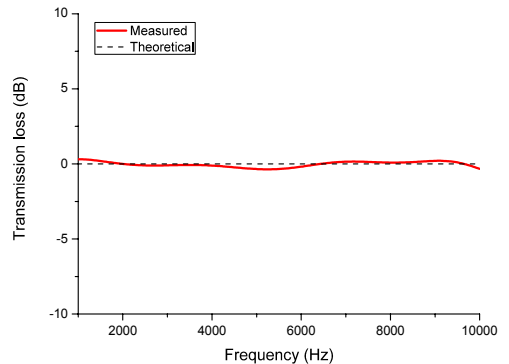


Fig. 10 TL without a specimen in low frequency pulse tube

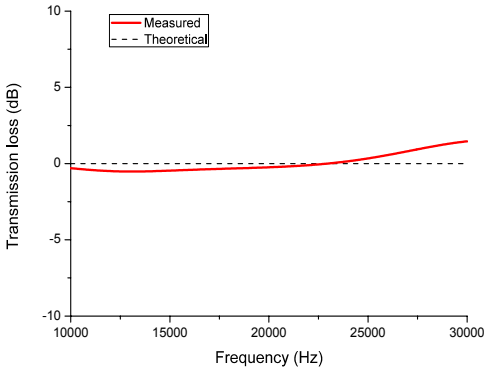


Fig. 11 TL without a specimen in high frequency pulse tube

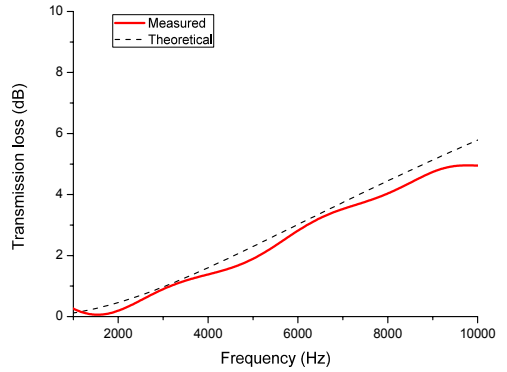


Fig. 14 TL for SUS 10t in low frequency pulse tube

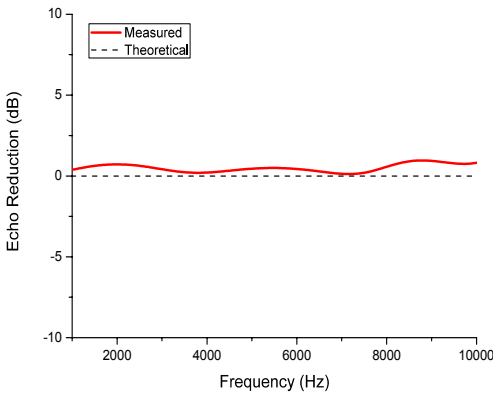


Fig. 12 ER for free surface in low frequency pulse tube

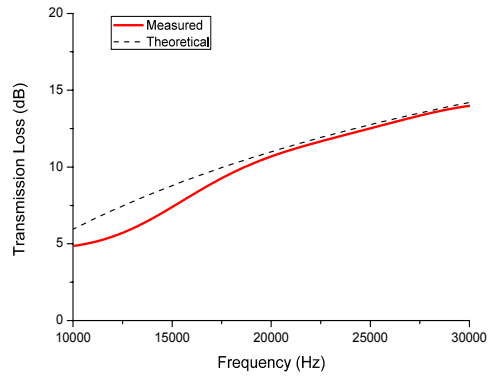


Fig. 15 TL for SUS 10t in high frequency pulse tube

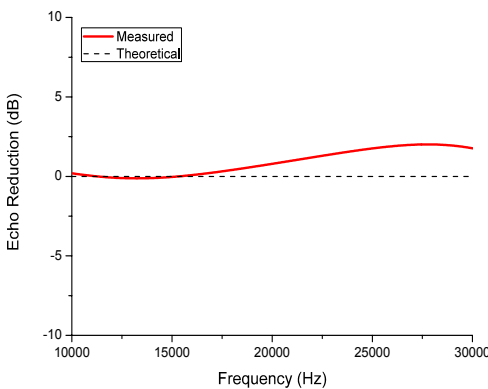


Fig. 13 ER for free surface in high frequency pulse tube

주파 펄스 튜브에서의 시험은 이론치와 실험치 오차가 ± 1 dB 이내로 일치하고 있으며, 고주파 펄스

튜브에서는 오차가 ± 2 dB 이내로 일치하고 있다. 고주파 펄스 튜브는 펄스 튜브 장치의 작은 크기로 인해 주변 진동 및 환경의 영향을 더 받아 저주파 튜브에 비해 측정 결과의 불확도가 큰 것으로 추정된다. 하지만, 이는 이 연구에서 목적으로 하는 음향 성능 측정 오차 내에 존재하기 때문에 만족할만한 측정 성능을 보이는 것으로 판단된다.

6. 결 론

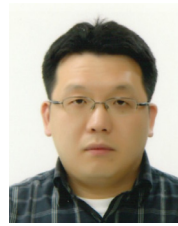
이 논문에서 수중 음향 시편에 대한 반향음 감소 및 전달 손실 성능을 평가하는 통합 시스템이 개발되었다. 관 내부에서 평면파가 형성되어 전달되고, 온도 및 압력 조절이 가능하도록 펄스 튜브를 설계/제작했다. 효율적인 시험을 위해 음향원으로 펄스 신호를 이용했으며, 정밀한 성능 측정을 위해 반사파의 잡음을 제거하는 방법을 제안했다. 개발된 장

치의 성능 검증을 위하여 이론치가 알려진 3가지 조건에 대해 시험을 실시하여 저주파 펄스 튜브에 대해 최대 ± 1 dB, 고주파 펄스 튜브에 대해 ± 2 dB 오차로 측정이 가능함을 보였다. 향후 개발된 시험 시스템 및 시험 방법을 통하여 실제 수중 환경하에서 다양한 음향 시편에 대한 정밀한 수중 음향 성능 평가가 가능하리라 기대된다.

References

- (1) Humphrey, V. F., Robinson, S. P., Smith, J. D., Martin, M. J., Beamiss, G. A., Hayman, G. and Carrol, N. L., 2008, Acoustic Characterization of Panel Materials Under Simulated Ocean Conditions Using a Parametric Array Source, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 123, No. 2, pp. 803~814.
- (2) Piquette, J. C. and Stephen, E. F., 2001, Low-frequency Echo-reduction and Insertion-loss Measurements from Small Passive-material Samples Under Ocean Environmental Temperatures and Hydrostatic Pressures, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 110, No. 4, pp. 1998~2006.
- (3) Munjal, M. L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) ASTM E1050-12, 2012, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System.
- (5) Easwaran, V. and Munjal, M. L., 1995, A Note on the Effect of Wall Compliance on Lowest-order Mode Propagation in Fluid-filled/submerged Impedance Tube, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 97, No. 6, pp. 3494~3501.

- (6) Lee, S. H., Kim, J. S., Kim, H. S., Kim, B. K. and Kim, S. R., 2011, Measurement of Underwater Acoustic Properties Using Impulse Signal, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 283~284.



Yun-Ho Seo received his Ph.D. from the department of mechanical engineering at Korea Advanced Institute of Science and Technology in 2009. He is working at Korea Institute of Machinery and Materials. His research interests include noise/vibration control and diagnosis of machinery.



Yang-Heon Byun is currently a senior researcher at Hwaseung R&A. He received the B.S. degree, M.S. degree in Ocean Engineering from Korea Maritime and Ocean University, Korea in 1998 and 2000, respectively. His research interests are in underwater acoustics.



Youngsoo Seo is currently a senior researcher at Agency for Defense Development(ADD). He received the B.S degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Busan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.