

펄스 튜브를 이용한 수중 전달 손실 측정에서 간극이 미치는 영향에 대한 고찰

A Study on the Effect of a Gap in Measurement of Underwater Transmission Loss by Pulse Tube

서윤호,[†] 김상렬, 김재승, 변양현,* 서영수**

(Yun-Ho Seo,[†] Sang-Ryul Kim, Jae-Seung Kim, Yang-Heon Byun,* and Youngsoo Seo**)

한국기계연구원 음향소음팀, *화승R&A, **국방과학연구소

(Received September 26, 2014; revised November 9, 2015; accepted April 27, 2015)

초 록: 펄스 튜브를 이용하여 시편의 전달 손실 성능을 측정할 경우, 시편 설치를 위해 필연적으로 시편과 펄스 튜브 내벽 사이에 간극이 존재한다. 본 논문에서는 이와 같은 간극이 전달 손실 측정 결과에 미치는 영향에 대해 평가했다. 평면파에 대해 일정 폭 및 길이를 갖는 간극 전과 후 음압의 비를 구하여 전달 계수를 유도하고 측정 대상 시편의 전달 계수와 조합하여 간극이 포함된 시편의 전달 손실을 구했다. 이와 같은 해석 모델을 이론해가 존재하는 10 mm 두께의 스테인리스 스틸 시편에 적용하여 시험 결과와 비교함으로써 해석 모델의 적절성을 보였다. 마지막으로 해석 모델을 통하여 간극크기 및 시편 전달 손실 성능에 따라 전달 손실 측정에 미치는 영향을 분석했다.

핵심용어: 수중 음향 재료, 펄스 튜브, 전달 계수, 전달 손실, 간극

ABSTRACT: There is a gap between the inner wall of a pulse tube and an underwater acoustic material when the measurement for transmission loss by the pulse tube is carried out. In this paper, the effect, which is caused by the gap, for the measurement of transmission loss is analyzed. Transmission coefficient is derived from the ratio of the pressures between front and rear of the gap. Then, transmission loss for specimen with a gap is obtained by combining the transmission coefficients of the gap and specimen. The results of experiment and simulation for a specimen of stainless steel with 10 mm thickness are compared in order to evaluate the simulation model. Finally, simulations with respect to the gap size and transmission loss of a specimen are performed to analyze and evaluate the effect of the gap in measurement of transmission loss.

Keywords: Underwater acoustic material, Pulse tube, Transmission coefficient, Transmission loss, Gap

PACS numbers: 43.30.Xm

1. 서 론

원형 관 내부에 음향 평면파를 형성시키는 임피던스 튜브는 공기 중 음향 시편의 흡음률을 측정하기 위해 널리 사용되고 있다.^[1] 이와 유사한 원리로 관 내부에 물을 채우고 수중 음향 시편의 특성을 측정하는 임피던스 튜브를 펄스 튜브라 칭하며, 수중 온도 및 압력을 조절하여 실제 환경과 유사한 조건에

서 수중 음향 시편의 특성을 측정하는 방법으로 쓰이고 있다.^[2]

공기 중 임피던스 튜브를 이용한 측정은 음원에서 광대역 랜덤 잡음을 생성하여 관심 주파수 대역에서 음향 성능을 측정하는 반면 펄스 튜브를 이용한 수중 음향 성능 측정에서는 펄스 신호를 발생시켜 음향 성능을 계측한다.^[3] 펄스 신호 또한 랜덤 잡음과 마찬가지로 주파수 영역에서 넓은 대역의 에너지를 가지는 신호이기 때문에 한 번의 시험으로 넓은 범위의 주파수 대역에 대한 수중 음향 성능을 측정할

[†]Corresponding author: Yun-Ho Seo (yhseo@kimm.re.kr)
Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM) 156
Gajeong buk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea
(Tel: 82-42-868-7533, Fax: 82-42-868-7418)

수 있다.

위와 같이 수중 음향 성능 측정 시 시편은 펄스 튜브의 단면과 같이 원형으로 가공하여 펄스 튜브 내부에 설치하게 되는데, 이 때 필연적으로 시편과 펄스 튜브 벽면 사이에 간극이 존재하게 된다. 이상적으로는 간극이 없어야 정확한 음향 성능 측정이 이루어 질 수 있지만, 간극을 너무 좁힐 경우 시편 설치에 과도한 시간이 소모되기 때문에 실제 시험 시 일정 크기 이상의 간극은 반드시 존재해야한다.

이와 같은 간극 영향 문제와 관련하여 Reference [4]는 간극을 유한요소로 모델링하여 측정 결과에서 나타나는 공진 현상을 해석적으로 규명했다. 이와 달리 Reference [5]는 시편 직경에 대해 비교적 비슷한 크기의 간극이 존재할 때 반사 및 전달에 대해 해석했다. 하지만 일반적인 시험 상황인 간극이 시편 직경에 비해 매우 작을 때의 음향 성능 측정에 대해서는 의외지는 않았다.

본 논문에서는 대표적인 수중 음향 성능 중 하나인 전달 손실(Transmission Loss, TL)을 측정할 때, 펄스 튜브 벽면과 시편 사이의 간극이 미치는 영향을 분석한다. 실제 시험 시 시편 중심은 정확하게 펄스 튜브 내경 중심과 일치되도록 설치되지는 않지만, 중심과 일치되어 설치된 것으로 가정하고, 간극을 통한 음향 신호의 전달을 모델링하여 간극에 의한 전달 손실의 변화를 해석적으로 구한다. 그 후 계산된 결과를 펄스 튜브를 이용한 시험 결과와 비교했다. 마지막으로 구축된 해석 모델을 이용하여 다양한 조건에 대한 수치 해석을 통해 실제 음향 성능 측정 시 간극의 영향에 대해 논한다.

II. 수중 전달 손실의 측정

음원에서 발생된 음파가 평면파의 형태로 전파된다고 가정하면, 아래 Fig. 1과 같이 펄스 튜브 내부의 음파가 음향 시편에 도달하고 반사 또는 투과된다. Fig. 1의 음파를 Eq.(1)과 같이 주파수 영역으로 푸리에 변환하여 각 주파수에서의 음향 시편의 전달 손실(TL) 성능을 수치적으로 평가할 수 있다.

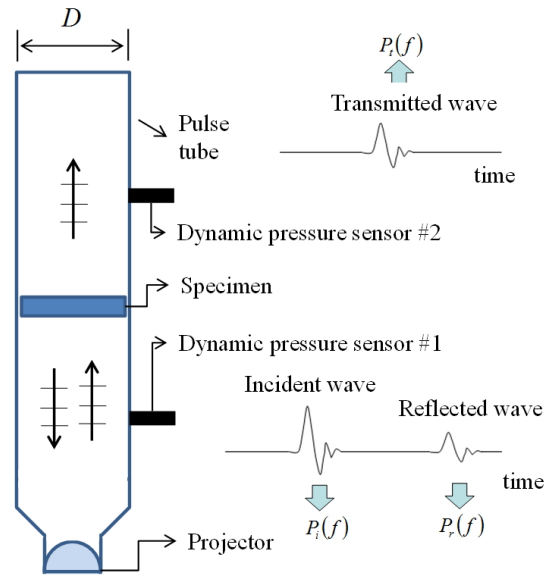


Fig. 1. Concept for measuring transmission loss.

$$TL(f) = -20 \log \left| \frac{P_t(f)}{P_i(f)} \right|. \quad (1)$$

위와 같은 원리로 전달 손실을 측정할 때 필수적으로 필요한 것이 평면파가 전달될 수 있는 펄스 튜브이다. 단면이 원형인 튜브에 대해 아래의 Eq.(2)와 같이 고차 모드전파가 시작되는 한계 주파수는 알려져 있으며^[6] 한계 주파수 이하에 대해서는 펄스 튜브를 통해 평면파가 전달된다.

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

여기서 c_w 는 물에 대한 m/s 단위의 음속을 뜻하며, D 는 m 단위의 펄스 튜브의 내부 직경을 의미한다. 본 시험에서는 최대 관심 주파수가 10 kHz이나 여유치를 더하여 한계 주파수를 12 kHz로 결정했으며, 이에 따라 내부 직경이 70 mm인 펄스 튜브가 설계되었다. Fig. 1의 개념도와 같이 펄스 튜브 하부에 수중 음파를 발생시키는 프로젝터가 설치되었으며, 튜브 벽면에 전파되는 음파를 측정하는 2개의 동압 센서가 설치되었다. 프로젝터에서 발생된 음파는 펄스 튜브 최상단에서 다시 반사가 되기 때문에 동압 센서 2번에서 반사파와 전달파를 충분히 구별할 수 있도록 길이 5m로 펄스 튜브가 설계되었다. Fig. 2는 제작된



Fig. 2. Pulse tube for measurement of transmission loss.

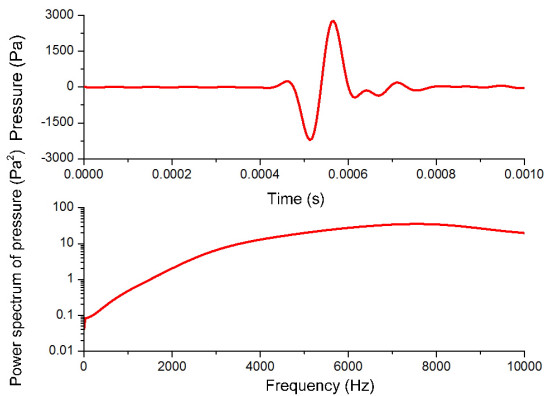


Fig. 3. Incident wave and its spectrum.

펄스 튜브를 보여주고 있다. 프로젝터에서 발생하는 음파는 광대역 주파수 성분을 가지고 있는 임펄스 신호이며 시간 영역에서의 파형과 스펙트럼은 Fig. 3 과 같다.

III. 간극에 대한 전달 계수 모델^[7]

Fig. 4와 같이 고정된 벽 사이에 길이가 l 이고 폭이 β 인 간극이 존재할 경우, z 방향 깊이가 무한대로 가정하면 음원측에서 간극을 통과하여 수음측으로 전파하는 음파를 아래와 같은 단순화를 통해 해석 모델을 유도할 수 있다.

간극 폭 β 가 관심 파장 λ 보다 매우 작으면 간극 음

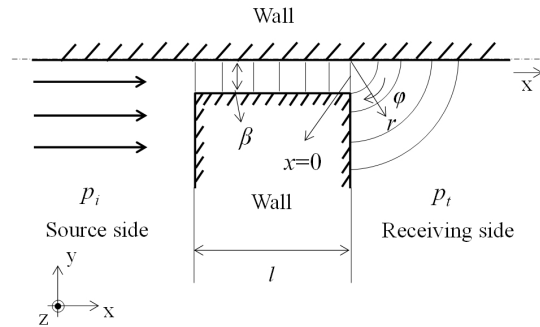


Fig. 4. Schematic representation of wave front with gap.

원측과 수음측에서 모든 변수는 ϕ 에 대해 독립적이라 가정할 수 있으며, 단순화를 위하여 점성의 영향에 의한 감쇠 및 전단 파동은 무시한다. 이로부터 음원측 음향 입사파는 원통형파 형태로 r 방향으로 벽 좌측에서 간극으로 전달되며, 간극에서는 x 방향으로 평면파의 형태로 전파되고, 수음측으로 전파될 때는 다시 r 방향 원통형파의 형태로 전파된다고 간주할 수 있다. 이로부터 해석 모델에서 음파는 r 방향 또는 x 방향 한 방향으로 전파되는 1차원 파동으로 가정할 수 있다.

위 가정으로부터 수음측에서 아래와 같이 1차원 원통 좌표계에서 스칼라 속도 포텐셜 ϕ_t 로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi_t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_t}{\partial r} + k^2 \phi_t = 0, \tag{3}$$

여기서 k 는 r 과 z 방향을 모두 고려한 파수이어야 하나, r 방향 전파만을 가정했기 때문에 r 방향 파수를 의미한다. 위 Eq.(3)을 만족하는 스칼라 속도 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_t(r,t) = NH_0^{(2)}(kr) e^{j\omega t}, \tag{4}$$

Eq.(4)의 N 은 임의의 계수이며 $H_0^{(2)}(kr)$ 은 0 차의 제 2종 한켈 함수를 의미한다. 만약 관심영역을 $kr \ll 1$ 에 한정한다면 한켈 함수는 아래와 같이 근사화할 수 있다.

$$H_0^{(2)}(kr) \approx 1 - \frac{2j}{\pi} \left\{ \ln \left(\frac{kr}{2} \right) + 0.577 \right\}. \quad (5)$$

한편 간극 내부에서는 직교 좌표계에서 x 방향으로 진행되는 평면파에 대한 속도 포텐셜 ϕ_g 은 아래 Eq.(6)과 같이 표현 가능하다.

$$\Phi_g(x,t) = (a \cos kx + b \sin kx) \cos \omega t + (c \cos kx + d \sin kx) \sin \omega t, \quad (6)$$

여기서 a, b, c, d 는 여러 조건에 의해 결정되는 계수이다. 이용되는 조건들 중 연속성 및 파워(에너지) 보존 조건을 유도하기 위해 일반적인 1차원 속도 포텐셜이 갖는 아래 Eq.(7)과 같은 관계를 이용한다.

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad \vec{v} = \nabla \Phi, \quad (7)$$

여기서 p 와 \vec{v} 는 각각 음압 및 입자 속도 벡터이며, ρ 는 매질의 밀도를 의미한다. Eq.(7)의 입자 속도 벡터와 단면적을 이용하여 연속성 조건을 Eq.(8)과 같이 유도할 수 있다. 연속성 조건은 간극 끝단에서의 단면적과 입자 속도의 곱이 수음측 임의의 r 지점에서의 입자 속도와 단면적의 곱이 같아지는 조건이다.

$$\beta [\nabla \Phi_g(x,t)]_{x=0} = \frac{1}{2} \pi r [\nabla \Phi_t(r,t)]. \quad (8)$$

유사한 방법으로 간극 끝단과 수음측에서의 단위 면적당 음향 파워($p^* \vec{v}$)와 면적의 곱이 같다는 조건으로 파워 보존 조건인 Eq.(9)를 유도할 수 있다.

$$Re \left[\beta [p_g^* \vec{v}_g]_{x=0} + \frac{1}{2} \pi r (p_t^* \vec{v}_t) \right] = 0, \quad (9)$$

여기서 p^* 는 p 의 공액 복소수를 의미하며, Eq.(7)을 이용하여 Eq.(9)의 조건을 속도 포텐셜로부터 계산할 수 있다. p_g 과 \vec{v}_g 은 Φ_g 으로부터 계산 가능하며, p_t 와 \vec{v}_t 는 Φ_t 로부터 계산 가능하다. 마지막으로 Eq.(6)의 c 와 d 에 대해서 Eq.(10)과 같이 간극 끝단 효과를 나타내는 α 를 도입하고, Eqs.(7), (8) 및 (9)를 조합해

서 Eq.(6)에 대입하면 Eq.(11)과 같은 간극에 대한 속도 포텐셜을 구할 수 있다.

$$\frac{c}{d} = -\tan(k\alpha), \quad (10)$$

$$\Phi_g(x,t) = d \left[\beta k \cos kx \cos \omega t + \frac{\sin k(x-\alpha)}{\cos k\alpha} \sin \omega t \right]. \quad (11)$$

Eq.(11)과는 별도로 간극이 존재하지 않을 때 벽 좌측으로부터 Fig. 4와 같이 음파가 전달될 때 임의의 크기 M 과 위상 θ 를 갖는 속도 포텐셜 Φ_t 은 Eq.(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_t(x,t) = M \cos k(l+x) \cos(\omega t + \theta). \quad (12)$$

Eqs.(11)과(12)의 관계로부터 Eq.(11)의 미지수 d 및 M 을 구할 수 있다. 유도된 자세한 결과는 Reference [7]에서 확인할 수 있다.

구해진 속도 포텐셜 Eqs.(12)와 (7)로부터 벽 이전 음압 p_t 을 구할 수 있으며, Eqs.(4)와 (7)로부터 벽 이후 r 지점에서의 음압 p_t 을 구할 수 있으므로, 최종적으로 아래와 같은 파워의 비로 전달 계수를 유도할 수 있다.

$$\tau_{gap} = \frac{\left| \frac{\pi r p_t^2 / \rho c_w}{\beta p_t^2 / 4 \rho c_w} \right| = \frac{4 \pi r}{\beta} \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2}{4 K \cos^2 K e} = \frac{\sin^2 K(L+2e)}{2 \cos^2 K e} + K^2 \{1 + \cos K(L+2e) \cos KL\}}{2 \cos^2 K e}, \quad (13)$$

여기서 c_w 는 물에서의 음속을 의미하며, K, L, e 는 각각 아래 Eq.(14)와 같이 정의된 무차원 변수이다. α 는 앞서 언급한 간극의 끝단 효과를 의미하며, Reference [8]에 따라 Eq.(15)와 같이 가정되었다.

$$K = k\beta, \quad L = \frac{l}{\beta}, \quad e = \frac{\alpha}{\beta}, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\pi} \left(\ln \frac{8}{K} - 0.577 \right). \quad (15)$$

IV. 실험과 전달 손실 모델 결과 비교

앞서 유도된 간극에서의 전달 계수를 실험 결과와 비교하기 위해 Fig. 5와 같이 두께 10 mm이고 다양한 직경을 갖는 스테인리스 스틸의 전달 손실을 계산했다.

최대 관심 주파수인 10 kHz에서 스테인리스 스틸의 두께 방향 파장의 길이는 약 500 mm이므로 두께 10 mm에 비해 매우 크기 때문에 스테인리스 스틸은 Fig. 5와 같이 질량만을 갖는 강체로 가정할 수 있다. 스테인리스 스틸에 대해 힘 평형과 속도의 연속성 조건을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (p_{0i} + p_{0r}) - p_{0t} &= -m\omega^2 Y, \\ \frac{p_{0i}}{Z} - \frac{p_{0r}}{Z} &= j\omega Y, \\ \frac{p_{0t}}{Z} &= j\omega Y, \end{aligned} \tag{16}$$

여기서 p_{0i} , p_{0r} , p_{0t} 는 각각 입사파, 반사파, 전달파의 압력을 의미하며, Z 는 매질의 임피던스, ω 는 주파수를 의미하며, m 과 Y 는 각각 스테인리스 스틸의 단위 넓이 당 질량과 변위를 의미한다. 위 Eq.(16)을 조합하면 아래 Eq.(17)과 같이 전달 계수 τ_{SUS} 를 구할 수 있다.

$$\tau_{SUS} = \left| \frac{p_{0t}}{p_{0i}} \right|^2 = \left| \frac{2Z}{2Z + j\omega m} \right|^2. \tag{17}$$

앞서 유도한 간극에 대한 전달 계수 Eq.(13)과 스테인리스 스틸의 전달 계수 Eq.(17)을 단면적 크기에 따

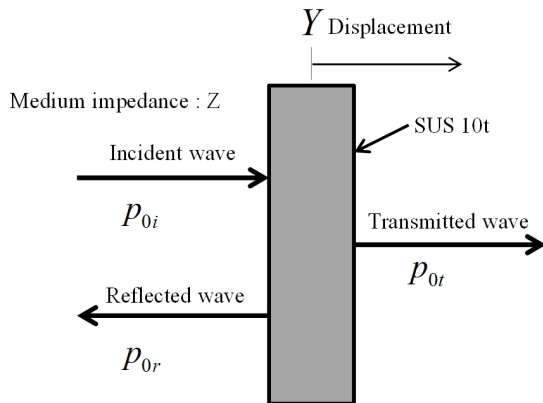


Fig. 5. Schematic representation of stainless steel.

라 가중 평균하면 조합된 전체 전달 계수를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{total} = \frac{\tau_{SUS}S_{SUS} + \tau_{gap}S_{gap}}{S_{total}}, \tag{18}$$

여기서 S_{SUS} 와 S_{gap} 은 각각 스테인리스 스틸과 간극의 단면적을 의미하며, $S_{total} = S_{SUS} + S_{gap}$ 이다. 이로부터 전체 전달 손실은 전체 전달 계수의 역수와 관계있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau_{total}}. \tag{19}$$

아래 Fig. 6은 펄스 튜브의 내경이 71.2 mm일 때 간극 크기에 따른 두께 10 mm 스테인리스 스틸(SUS)의 전달 손실 변화를 해석 모델로부터 계산한 값이다. 여기에서 스테인리스 스틸의 밀도는 7800 kg/m³, 물의 밀도는 1000 kg/m³, 물에서의 음속은 1440 m/s를 각각 이용했다. 그림으로부터 간극 크기가 증가함에 따라 전달 손실은 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이는 III장에서 모델링한 것과 같이 간극을 통해 음압이 누설되어 나타나는 현상 때문이다. 특히 저주파 대역에서는 간극이 존재하지 않을 경우에도 작은 전달 손실을 가지고 있기 때문에 작은 간극의 존재만으로 전달 손실 값이 0이 되는 현상이 발생한다.

Fig. 7은 간극 크기에 따라 계산된 전달 손실과 펄스 튜브를 이용해 측정된 전달 손실을 각각 비교해

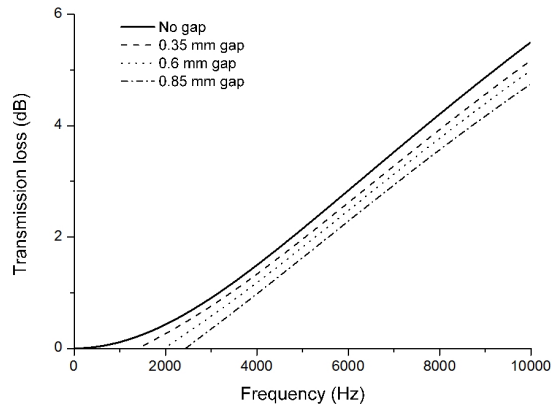


Fig. 6. Transmission loss of SUS for various gaps: simulation results.

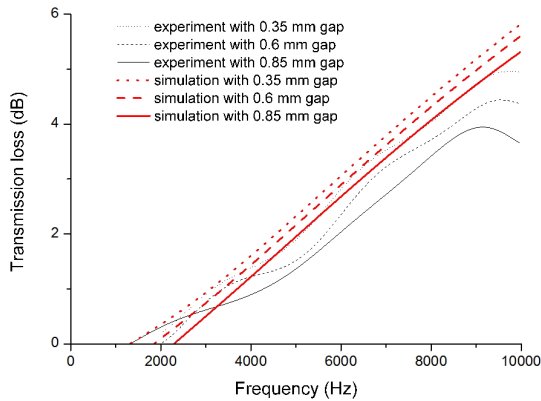


Fig. 7. Transmission loss of SUS for various gaps: experiment and simulation results.

서 보여주고 있다. 계산 결과와 마찬가지로 간극 크기가 증가할수록 전달 손실이 작아지는 것을 실험적으로도 확인할 수 있다. 계산 결과와 실험 결과가 정량적으로 일치하지는 않지만, 간극의 크기에 따라 상대적으로 변화하는 전달 손실을 간극 모델을 통해 예측 가능성을 확인할 수 있다. 실험 결과와 계산 결과의 차이는 물성치의 부정확성 및 펄스 튜브 내부 감쇠 등에 의해 편향 오차가 나타난 것으로 판단된다. 여기에서 계산적으로 매우 작은 전달 손실이 나타나는 저주파 구간은 실험에서 음원 가진이 충분하지 않아 물리적으로 가능하지 않은 음(-)의 전달 손실이 나타나기 때문에 결과에서 제외하였다.

V. 간극에 의한 전달 손실 변화 분석

앞서 실험 결과에서 확인할 수 있듯이 간극의 존재만으로 측정되는 전달 손실 결과가 변화한다. 이와 같이 실험 결과에 영향을 주는 간극 크기는 시편의 전달 손실 성능에 따라 영향을 주는 정도의 차이가 발생한다. 이를 수치적으로 확인하기 위해서 III, IV장에서 기술된 모델을 이용하여 시편 전달 손실 성능에 따른 간극 효과를 평가했다.

Table 1은 계산에 사용된 각 조건들을 표시하고 있다. 간극이 존재하지 않는 기준 시편인 Case #1에 대해 간극의 크기 및 시편 전달 손실 성능에 따른 간극의 영향을 평가하기 위해 변수들이 결정되었다. 여기에서 Case #4와 #5의 경우 인위적으로 높은 전달 손실을 갖는 시편을 가정하기 위해, 실제로는 존재

Table 1. Parameters for case study.

Case #	Density of specimen kg/m ³	Gap mm
1	7800	0
2	7800	0.35
3	7800	0.2
4	15600	0
5	15600	0.2

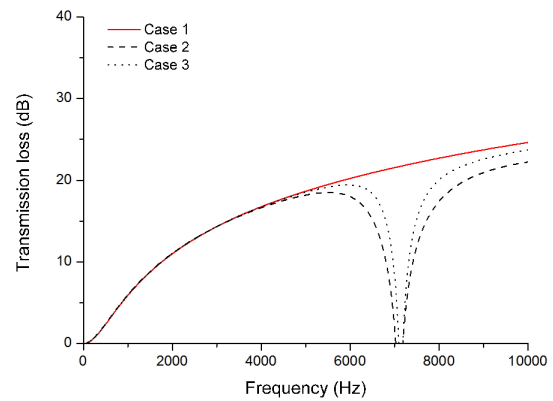


Fig. 8. Transmission loss for various gaps: simulation results (density of specimen: 7800 kg/m³).

하지 않지만 시편의 밀도를 가상으로 높여 사용했다. 공통적으로 사용한 변수는 시편의 길이, 물의 음속, 물의 밀도, 펄스 튜브 내경으로서 각각 100 mm, 1440 m/s, 1000 kg/m³, 71.2 mm를 이용했다.

Fig 8은 Case #1, #2, #3의 전달 손실을 보여준다. 앞서 고려한 10 mm 스테인리스 스틸과는 달리 간극이 존재함에 따라 약 7 kHz에서 전달 손실이 급격히 저하되는 현상이 발생한다. 이는 음파의 전파 방향 간극의 길이인 100 mm가 파장의 반과 일치할 때 공명에 의해 전달 계수가 증가하기 때문이다. 이에 따라 전달 손실이 급격히 낮아진다. 본 연구에서 고려하는 모델에서는 감쇠의 영향을 고려하지 않았기 때문에 공명의 영향이 매우 극적으로 표시되었지만 실제 상황에서는 감쇠 등의 영향으로 인해 Fig. 8과 같이 좁은 주파수 범위에서 전달 손실이 크게 감소되지는 않는다. 하지만, 이와 같은 공명 현상이 나타나는 주파수 부근은 정확한 전달 손실이 측정이 어려울 수 있으므로 실험 전 간극에 따라 전달 계수가 낮게 측정될 수 있는 구간을 확인해야 한다.

Fig. 9는 Case #4와 #5의 전달 손실을 비교한 그림이

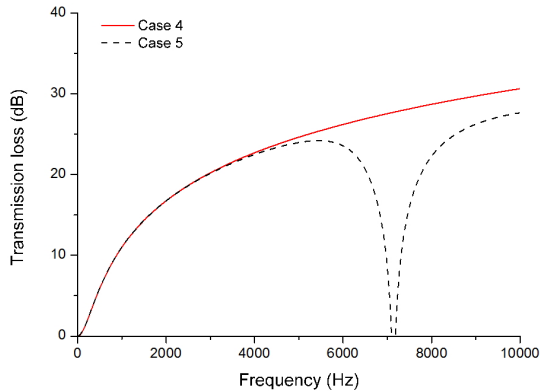


Fig. 9. Transmission loss for various gaps: simulation results (density of specimen : 15600 kg/m³).

다. 간극이 없는 Fig. 8의 Case #1과 Fig. 9의 Case #4를 비교하면 시편의 길이는 변하지 않고 질량만 2배 차이가 나기 때문에 질량 법칙을 따르는 영역인 10kHz에서 약 6 dB의 차이를 확인할 수 있다. 하지만, 간극이 없을 때와 같은 크기의 간극을 고려한 전달 손실의 차이는 10 kHz에 대해 Fig. 8에서, Case #1과 Case #3의 차이인 0.9 dB이고, Fig. 9에서, Case #4와 Case #5의 차이인 2.9 dB이다. 동일한 크기의 간극이기 때문에 간극에 의해 발생하는 전달 계수는 동일하나, 시편 자체의 전달 손실 성능에 따라 간극에 의한 전달 손실 저하 효과가 달라졌다. 이는 높은 전달 손실을 측정할 때 간극에 의한 성능 저하 효과가 증가하는 것을 의미하므로 전달 손실 측정 전에 간극 크기에 대한 충분한 평가가 필요하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 펄스 튜브를 이용한 수중 전달 손실 측정 시 시편과 튜브 벽면 사이의 간극에 의한 전달 손실 측정 결과의 변화를 분석했다. 간극 전과 후의 파위의 비를 구하여 전달 계수를 구하는 모델을 이용했으며, 이론값이 알려진 스테인리스 스틸을 이용하여 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 간극 해석 모델을 검증했다. 구축된 간극 해석 모델을 이용하여 간극에 의해 나타날 수 있는 공명 현상에 대해 논했으며, 간극의 크기 및 시편의 전달 손실 성능에 따른 전달 손실 변화를 평가했다. 펄스 튜브를 이용한 정확한 전달 손실 측정을 위해서는 실험 전에 제

안된 모델을 이용한 간극 크기에 대한 충분한 평가가 이루어져야 하며, 이를 바탕으로 향후 수중 음향 재료에 대한 전달 손실 특성 측정시 오차를 최소화할 수 있으리라 기대된다.

References

1. ASTM E1050-12, *Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system*, 2012.
2. G. A. Sabin, "Acoustic-impedance measurement at high hydrostatic pressures," *J. Acoust. Soc. Am.* **40**, 1345-1353 (1966).
3. Y. H. Seo, S. R. Kim, S. M. Lee, Y. H. Byun and Y. S. Seo, "Development of underwater acoustic performance measurement system using pulse tubes" (in Korean), *Transactions of the KSNVE* **24**, 399-406 (2014).
4. C. Giangreco and C. Audoly, "Measurement of acoustic materials in an impedance tube : influence of the interstice of water around the sample," *J. Phys. Colloques* **51**(C2), 1029-1032 (1990).
5. J. C. Piquette and E. F. Stephen, "Low-frequency echo-reduction and insertion-loss measurements from small passive-material samples under ocean environmental temperatures and hydrostatic pressures," *J. Acoust. Soc. Am.* **110**, 1998-2006 (2001).
6. M. L. Munjal, *Acoustics of Ducts and Mufflers* (John Wiley&Sons, New York, 1987), pp. 8-12.
7. M. C. Gomperts, "The sound insulation of circular and slit-shaped aperture," *ACUSTICA* **14**, 1-16 (1964).
8. M. C. Gomperts, "The sound transmission loss of circular and slit-shaped apertures in walls," *ACUSTICA* **18**, 144-150 (1967).

저자 약력

▶ 서 윤 호 (Yun-Ho Seo)



2003년 2월: 연세대학교 기계공학과 학사
2009년 2월: KAIST 기계공학과 박사
2012년 6월: 현대중공업
2012년 7월 ~ 현재: 한국기계연구원 선임 연구원

▶ 김 상 렬 (SangRyul Kim)



1993년 2월: 부산대학교 기계공학과 학사
1995년 2월: KAIST 기계공학과 석사
2006년 2월: KAIST 기계공학과 박사
1995년 3월 ~ 현재: 한국기계연구원 책임
연구원

▶ 김 재 승 (Jae-Seung Kim)



1976년 2월: 서울대학교 조선공학과 학사
1978년 2월: 서울대학교 조선공학과 석사
1985년 2월: MIT 조선공학 박사
1978년 3월 ~ 현재: 한국기계연구원 책임
연구원

▶ 변 양 현 (Yang-Heon Byun)



1998년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
학사
2000년 2월: 한국해양대학교 해양공학과
석사
2000년 3월 ~ 현재: 화승R&A

▶ 서 영 수 (Youngsoo Seo)



1999년 2월: 부산대학교 기계공학과 학사
2001년 2월: 부산대학교 기계설계공학과
석사
2005년 8월: 부산대학교 기계설계공학과
박사
2006년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소