

펄스튜브를 이용한 음향성능 측정 결과의 불확도 추정

Estimation of Uncertainty for Acoustic Performance Measurement Using the Pulse Tube

이성민[†] · 김재승* · 김상렬* · 서운호*

Sung-Min Lee, Jae-Seung Kim, SangRyul Kim, Yun-Ho Seo

* 한국기계연구원 (발표자 연락처 : 042-868-7683, lsmin@kimm.re.kr)

3. 수학적 모델

1. 서 론

잠수함과 같은 수중함의 경우, 함의 수중방사소음을 저감하고 적으로부터의 은밀성 확보를 위하여 다양한 종류의 수중방음재가 사용되고 있으며, 다양한 종류의 실험을 통해 수중방음재의 성능을 확인하고 있다. 수중방음재의 음향성능은 그 사용목적에 따라 반향음저감(ER, echo reduction), 전달손실(TL, transmission loss) 등이 성능지표로 사용되고 있다. 해당 성능에 대한 측정 및 평가는 최근 관내 평면파 진행특성을 가진 펄스튜브를 활용한 가압상태에서의 음향성능 측정방법이 적용되고 있다. 본 논문에서는 펄스튜브를 활용한 음향성능 측정시스템에서의 불확도를 확인하고자 한다.

2. 음향성능 측정시스템의 원리 및 측정 방법

실험은 그림 1과 같이 소음원(Projector)이 설치된 펄스튜브에 시편을 설치하여 온도와 압력 조건을 유지한 상태에서 시편에 의해 반사하거나, 시편을 투과하는 음파를 측정한다. 이때 센서 1에서는 입사파와 반사파를 측정하고, 센서 2에서는 전달파를 측정하여 시편의 ER 및 TL 성능을 측정하게 된다.

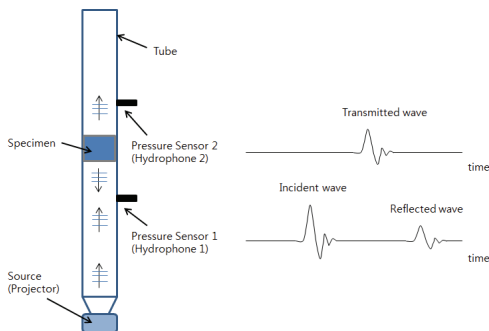


그림 1. 펄스튜브를 이용한 음향성능 측정 개략도

$$ER = L_I - L_R = 20 \log_{10} \frac{p_I}{p_0} - 20 \log_{10} \frac{p_R}{p_0}$$

$$TL = L_I - L_T = 20 \log_{10} \frac{p_I}{p_0} - 20 \log_{10} \frac{p_T}{p_0}$$

여기서, ER : 반향음 감소 (dB), TL : 전달 손실 (dB)
 L_I : 입사 음압 레벨 (dB), L_R : 반사 음압 레벨 (dB),
 L_T : 전달 음압 레벨 (dB)
 p_I : 입사 음압 (Pa), p_R : 반사 음압 (Pa),
 p_T : 전달 음압 (Pa), p_0 : 기준 음압 1 μ Pa

4. 요인별 표준불확도

가. 동압센서 민감도 오차 (dB ref. 1 μ Pa)

반향음 감소는 같은 동압센서 신호로 그 비를 계산하기 때문에 민감도 오차는 결과에 영향을 주지 않는다. 하지만, 전달 손실 측정에서는 다른 동압센서의 측정 결과를 이용하기 때문에 민감도 오차를 고려해야 한다. 민감도 오차는 직사각형 확률분포로 가정하여 아래와 같이 표준불확도를 추정할 수 있다.

$$u(L_{B1}) : 1.21/2/\sqrt{3} = 3.5 \times 10^{-1} \text{ dB}$$

나. 음압 레벨 측정 장비(주파수 분석기)의 분해능 (dB ref. 1 μ Pa)

음압 레벨 측정 장비의 지시 분해능은 0.1 dB이기 때문에 표준불확도를 아래와 같이 추정할 수 있다.

$$u(L_{B2}) : 0.05/\sqrt{3} = 2.89 \times 10^{-2} \text{ dB}$$

다. 신호 처리 구간 설정 (dB ref. 1 μ Pa)

ER 및 TL 성능은 주파수 분석을 통해 계산되며 주파수 분석을 위해서는 일정한 시간의 신호를 푸리에 변환을 실시해야 한다. 이 때 주파수 분석을 위해 사용하

는 신호의 길이에 따라 주파수 분석 결과의 변화가 발생하기 때문에 이에 대한 불확도 추정이 필요하다. 임의의 시험 결과에 대해 반복적으로 구간 크기를 달리하여 신호 처리를 실시하였고 이 때 계산되는 음압 레벨 크기의 변화를 관찰하여 표준불확도를 표 1과 같이 추정하였다.

표 1 신호 처리 구간에 따른 표준불확도

단위: dB ref. 1 μPa				
주파수 (Hz)	신호 처리 구간에 따른 음압 레벨 변화 (dB)	확률 분포	표준불확도 $u(L_B)$	자유도 $\nu(L_B)$
3 000	0	직사각형	0	∞
10 000	0.1		2.89×10^{-2}	
30 000	1.3		3.75×10^{-1}	

라. 통계적 표준불확도

시편 설치 상태 및 시험 환경(온도 및 압력의 변화)에 따라 시편 성능의 변화가 있기 때문에 총 12회의 반복 시험을 통한 통계적 방법으로 A형 표준불확도를 추정했다.

표 2 통계적 표준 불확도

단위: dB ref. 1 μPa						
주파수 (Hz)	측정 평균 입사 음압 레벨	표준불확도 $u(L_{pR})$	측정 평균 입사 음압 레벨	표준불확도 $u(L_{pR})$	측정 평균 입사 음압 레벨	표준불확도 $u(L_{pT})$
3 000	127.65	1.51×10^{-2}	121.5	8.73×10^{-2}	117.9	4.94×10^{-2}
10 000	132.5	1.67×10^{-2}	115.7	4.41×10^{-1}	108.4	7.98×10^{-2}
30 000	115.6	1.74×10^{-2}	102.0	2.21×10^{-1}	88.76	1.50×10^{-1}

5. 합성표준불확도

반향음 감소와 전달손실의 합성표준불확도는 4장의 표준불확도 추정값을 이용하여 아래와 같이 계산하였다.

$$u_c^2(ER) = \{u^2(L_{pR}) + u^2(L_{B2}) + u^2(L_{B3})\} + \{u^2(L_{pR}) + u^2(L_{B2}) + u^2(L_{B3})\}$$

$$u_c^2(IL) = \{u^2(L_{pR}) + u^2(L_{B2}) + u^2(L_{B3})\} + \{u^2(L_{pR}) + u^2(L_{B2}) + u^2(L_{B3})\}$$

표 3 반향음 감소 합성표준불확도

단위: dB ref. 1 μPa					
주파수 Hz	$u(L_{pR})$ dB	$u(L_{B2})$ dB	$u(L_{B3})$ dB	$u(L_{B2})$ dB	$u_c(ER)$ dB
3 000	1.51×10^{-2}	8.73×10^{-2}	2.89×10^{-2}	0	9.36×10^{-2}
10 000	1.67×10^{-2}	4.41×10^{-1}		2.89×10^{-2}	4.45×10^{-1}
30 000	1.74×10^{-2}	2.21×10^{-1}		3.75×10^{-1}	5.86×10^{-1}

표 4 전달 손실 합성표준불확도

단위: dB ref. 1 μPa						
주파수 Hz	$u(L_{pR})$ dB	$u(L_{pT})$ dB	$u(L_{B1})$ dB	$u(L_{B2})$ dB	$u(L_{B3})$ dB	$u_c(L_{IL})$ dB
3 000	1.51×10^{-2}	4.94×10^{-2}	3.50×10^{-1}	2.89×10^{-2}	0	4.99×10^{-1}
10 000	1.67×10^{-2}	7.98×10^{-2}			2.89×10^{-2}	5.05×10^{-1}
30 000	1.74×10^{-2}	1.50×10^{-1}			3.75×10^{-1}	7.42×10^{-1}

7. 확장불확도

표 2와 3에서 주파수별 유효자유도가 11 이상으로 매우 크므로 신뢰수준 약 95 %에서 k=2를 사용하여 확장불확도를 산출 하였다.

$$U = k u_c(L_p)$$

표 5 반향음 감소의 합성표준불확도, 확장불확도

단위: dB ref. 1 μPa		
주파수 Hz	합성표준불확도 dB	확장불확도 dB
3 000	9.76×10^{-2}	1.95×10^{-1}
10 000	4.45×10^{-1}	8.90×10^{-1}
30 000	5.76×10^{-1}	1.15×10^0

표 6 전달 손실의 합성표준불확도, 확장불확도

단위: dB ref. 1 μPa		
주파수 Hz	합성표준불확도 dB	확장불확도 dB
3 000	4.99×10^{-1}	9.98×10^{-1}
10 000	5.05×10^{-1}	1.01×10^0
30 000	7.42×10^{-1}	1.48×10^0

8. 측정결과

위에서 설명한 불확도 추정 방법을 통해 펄스 튜브를 이용한 시험의 최종 측정 결과를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

표 6 반향음 감소의 측정결과 보고

주파수 Hz	반향음 감소 dB
3 000	6.2 ± 0.2 (신뢰수준 약 95 %에서 k = 2)
10 000	16.8 ± 0.9 (신뢰수준 약 95 %에서 k = 2)
30 000	13.6 ± 1.2 (신뢰수준 약 95 %에서 k = 2)

표 7 전달 손실의 측정결과 보고

주파수 Hz	전달 손실 dB
3 000	9.8 ± 1.0 (신뢰수준 약 95 %에서 k = 2)
10 000	24.1 ± 1.1 (신뢰수준 약 95 %에서 k = 2)
30 000	26.8 ± 1.5 (신뢰수준 약 95 %에서 k = 2)

참 고 문 헌

- [1] 이성현, 김재승, 김현실, 김봉기, 김상렬, "임펄스 신호를 이용한 음향재료의 수중 음향특성 측정," 한국소음진동공학회 2011년 춘계학술대회 논문집, pp.283~284, 2011