

## 잔향시간 측정 오차의 차음손실에 대한 영향

### Effect of the measurement error of reverberation time on the STL

신 성 환\*, 이 정 권\*, 강 현 주\*\*  
Sung-Hwan Shin, Jeong-Guon Ih, Hyun-Ju Kang

**Key Words** : Reverberation Time (잔향시간), Sound Transmission Loss (STL: 차음손실)

#### **ABSTRACT**

In room acoustics, reverberation time (RT) is the most important and general factor that represents character of room or inner space. However, RT, especially in low frequency range, can have the different value according to the measuring points and methods. This study comprehends the cause of error occurring dominantly in low frequency range when RT is measured and examines that the each error of RT measured in the cabin and reverberation chamber having different properties, influences what extent on sound transmission loss (STL)

#### 1. 서 론

차음 성능 예측을 위해 사용되는 잔향시간은 실내 공간의 특징을 나타내는 요소 중 가장 대표적인 객관적 지표이다. 잔향시간 측정을 위하여 이론적으로는 Sabine의 잔향공식[1]이, 실 측정에 의한 계산을 위해서는 역적분법 (inversely integrated tone burst method)이 가장 널리 사용되고 있다[2,3]. 이러한 방법을 통해서 구한 잔향시간을 보면, 공간의 실용적이나 측정 위치에 따라 차이가 나타남을 확인할 수 있으며, 특히 고주파수 영역보다는 저주파수 영역에서 그 차이가 크게 발생한다. 일반적으로 이런 이유는 저주파수 영역에서 발생하는 공간내부의 음향모드 영향이 위치에 따라 크게 작용하기 때문으로 알려져 있다[4]. 현재 잔향시간 측정 시 발생하는 각 주파수에서의 차이를 보정하기 위해서, 여러

위치에서 측정한 잔향시간을 평균하여 대표값으로 사용하고 있지만, 실제 잔향시간에서 발생하는 차이가 공간의 특성에 따라 차음 성능 예측에 어느 정도 영향을 주는지에 대한 연구는 미진한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 실용적이 크고, 흡음이 거의 없는 잔향실 (reverberation chamber)과 이와는 반대로 실용적이 작고 흡음 특성이 강한 공간 (cabin)에서 위치에 따른 잔향시간을 측정하고, 저주파수에서 발생하는 오차와 BEM 해석을 통해서 얻은 음향모드사이의 관계를 알아본다. 그리고 측정된 잔향시간을 이용하여 각 공간, 잔향실과 선실에서 차음 성능에 어느 정도 영향이 있는지를 파악한다.

#### 2. 잔향시간과 음향모드

잔향시간 측정을 위해 대상이 되는 공간은 한국기계연구원(KIMM)의 대 잔향실과 배의 선실이다. 잔향실은 실용적이 넓고 흡음이 거의 없는 대표적인 공간이고, 이와는 반대로 배의 선실은 실용적이 작고 흡음이 큰

\* 한국과학기술원 (KAIST)

E-mail : ihih@sorak.kaist.ac.kr, soul@cais.kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-5035, Fax : (042) 869-8220

\*\* 한국기계연구원 (KIMM)

대표적인 공간이라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용된 잔향실의 용적은 225 m<sup>3</sup> 이고, 선실의 용적은 23.4 m<sup>3</sup> 이다.

먼저 잔향실에 대한 잔향시간을 서로 다른 여섯 위치에서 측정하였다. 그림 1은 측정 위치와 각 위치에서의 잔향시간 측정 결과를 나타낸 것이다. 500Hz 이상의 주파수 영역에서는 위치에 따른 차이가 거의 나타나지 않지만, 잔향실이라는 특수 환경임에도 불구하고 그 이하의 주파수 영역, 특히 160Hz 이하에서는 위치에 따라서 최대 28%의 상대오차를 나타내고 있음을 알 수 있다.

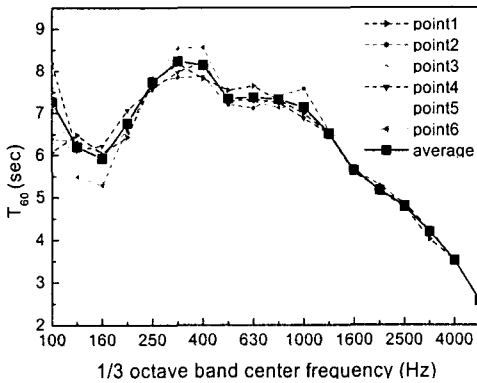


그림 1. 잔향실의 측정 위치와 잔향시간

다음으로 선실에 대한 잔향시간은 네 개의 다른 위치에서 측정하였다. 그림 2는 선실 내부에서의 측정 위치와 각 위치에서의 잔향시간을 나타낸 것이다. 잔향실의 잔향시간에 비해서 현저히 낮은 잔향시간을 갖고 있어 위에서 언급한 두 공간의 흡음에 대한 상대성에 대해서 큰 문제가 없음을 확인할 수 있다. 선실의 경우 역시 1kHz 이상의 주파수 범위에서는 위치에 따른 잔향시간의 차이가 거의 없지만, 500Hz 이하의 주파수 범위, 특히 125Hz를 중심주파수로 갖는 1/3 옥타브 밴드에서는 90% 이상의 상대오차가 발생함을 확인할 수 있다.

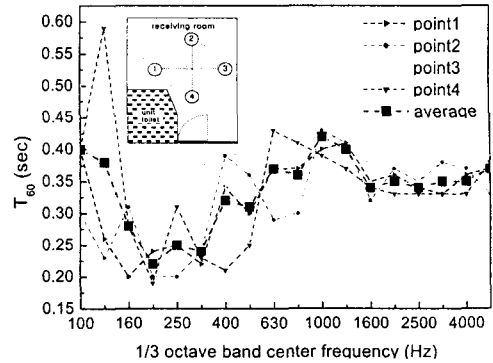


그림 2. 선실의 잔향측정 위치와 잔향시간

이와 같이 실용적이 작고 흡음이 큰 공간의 저주파 영역에서 잔향시간의 차이가 크게 나타나는 원인은 공간내부에서 발생하는 음향모드의 영향이 가장 크다고 할 수 있다. 이를 확인하기 위해서 선실의 잔향시간 측정 위치와 동일한 위치에서의 음압을 실제 측정하고, BEM을 이용하여 공간 내부의 음향모드를 계산하였다. 음향모드 측정을 위한 BEM 모델은 그림 3과 같이 삼각형 이차모델 (Quadratic triangle)을 사용하고, 2258개의 절점 (node point)와 1128개의 요소 (element)로 계산하였고, 유효주파수는 500Hz까지, 주파수 해상도는 1Hz이다.

그림 4는 선실 내부 음압의 실 측정 결과이고, 그림 5는 BEM을 이용한 음향모드 계산 결과를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보듯이 그림 4의 음압 측정 결과에서 차이가 크게 나타난 부분에 음향모드의 주요한 성분들이 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 111Hz와 168Hz에서 발생하는 음향모드가 실 측정에서 125Hz와 160Hz를 중심주파수로 갖는 1/3 옥타브 밴드 영역에서 나타나는 위치에 따른 음압 차이에 중요한 역할을 할 것임을 쉽게 예측할 수 있다. 또한 그림 2에서 위치에 따라 측정된 잔향시간을 보면 125Hz, 160Hz, 400Hz를 중심주파수로 갖는 1/3 옥타브 밴드 영역이 저주파수 범위의 다른 영역에 비해 비교적 큰 차이를 보이고 있는데, 그림 4의 이 대역들에서 측정 결과를 보면 음압의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 실내 음장에 따른 저주파수 영

역, 특히 Schroeder의 차단주파수 (Schroeder's cut-off frequency)[5]:

$$f_c = \sqrt{\frac{c^3 T_{60}}{4 \ln 10 V}} \quad (1)$$

에 의한 약 274Hz 이하의 주파수 범위에서는 실내 음장에서 발생하는 음향모드에 의한 영향이 지배적이기 때문에 측정 위치에 따라 음압의 차이가 크게 발생할 수 있고, 이런 현상에 의해서 각 위치에서의 잔향시간의 측정에도 영향 줄 수 있음을 의미한다. 따라서 임의의 공간을 대표할 잔향시간 측정을 위해 여러 위치의 잔향시간을 평균한 값을 사용할 경우, 저주파수 영역에서는 음향모드의 영향과 함께 측정 위치에 대한 고려가 절대적으로 필요함을 알 수 있다.

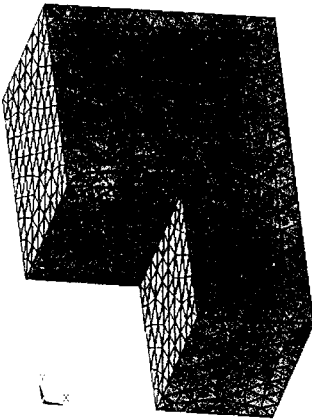


그림 3. 음향모드 계산을 위한 선실의 BEM 모델

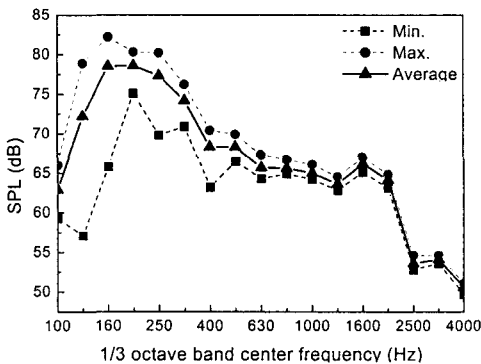


그림 4. 선실 내부의 음압 측정

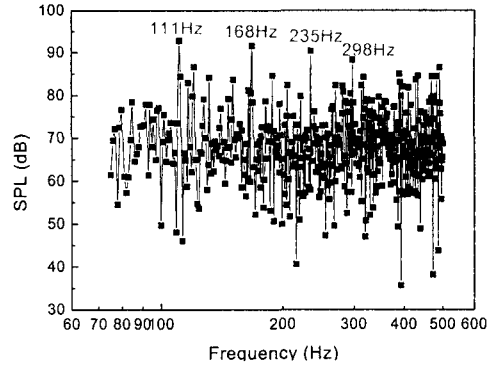


그림 5. BEM을 이용한 음향모드 계산 결과

### 3. 차음 성능 예측과 잔향시간

잔향시간에서 발생하는 오차가 실제 이 값을 이용하는 차음 성능 예측에 어느 정도 영향을 주는지를 알아보기 위해서 차음손실 (transmission loss) 을 고려해 보도록 한다. 차음손실의 측정을 위해서 사용되는 식은 아래와 같다.

$$STL = L_{p,source} - L_{p,receiver} + 10 \log \left( \frac{A}{S'} \right) \quad (2)$$

여기에서 A 는 시편의 면적이고,  $S' = \frac{55.3V}{cT_{60}}$  은 등가 흡음 면적이다.

그림 6 은 잔향실에서 측정된 잔향시간의 평균값과 편차를 나타낸 것이고, 그림 7 은 이를 이용하여 식 (2) 의 좌변 세번째 항, 차음 손실의 보정항을 계산한 결과로, 두 그림을 비교해 보면 잔향시간 1 초의 변화가 차음손실에서는 약 0.5dB 의 차이를 나타내고 있다. 이를 기준으로 하면 잔향실과 같이 실용적이 크고 흡음이 거의 없는 공간에서는, 실제 잔향시간 측정 시 위치에 따라 나타날 수 있는 편차가 2 초라고 하더라도 차음손실에서는 약 1dB 의 차이를 보이기 때문에 잔향시간의 오차에 크게 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

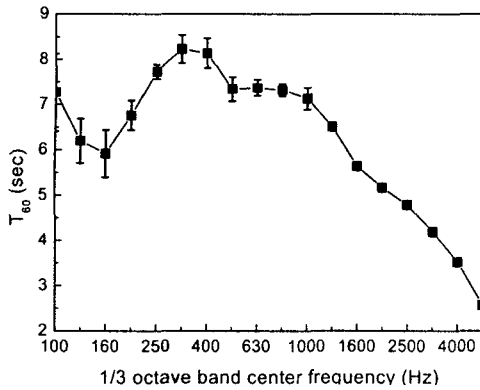


그림 6. 잔향실에서 측정된 잔향시간 및 편차

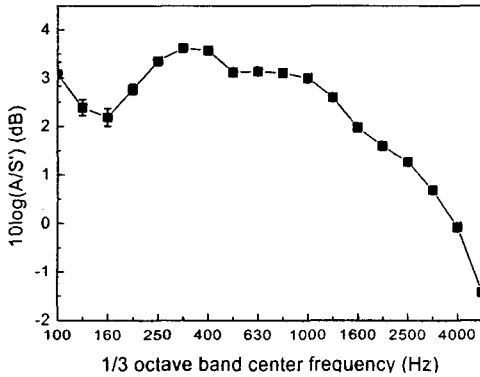


그림 7. 잔향실의 잔향시간에 대한 차음손실 보정항

그러나 그림 8 과 그림 9 의 선실에서 측정된 잔향 시간과 이를 이용해서 구한 차음손실 보정항을 보면 상당히 다른 결과를 얻을 수 있다. 선실의 경우 100Hz 와 200Hz 사이의 잔향시간은 약 0.2 초의 차이를 보이지만 그림 9 에서 차음성능에 대한 영향은 약 3dB 를 보이고 있다. 특히 125Hz 를 중심주파수로 갖는 1/3 옥타브 밴드에서의 잔향시간은 위치에 따른 차이가 최대 0.15 초이므로, 차음성능에서는 약 2dB 까지의 차이를 나타낼 수 있다.

이와 같은 결과는 선실처럼 실용적이 작고, 흡음이 큰 공간, 즉 1 초 이하의 잔향시간을 갖는 공간에서는 잔향시간에서 나타나는 약간의 오차가 차음성능 예측에는 매우 민감하게 변화한다는 것을 알 수 있다. 따라서 차음성능 예측을 위해 잔향시간을 측정할 경우, 특히

저주파수 영역에서는 음장내의 음향모드 및 측정 시 발생하는 오차의 범위에 대해서 충분히 고려하는 것이 필요하다.

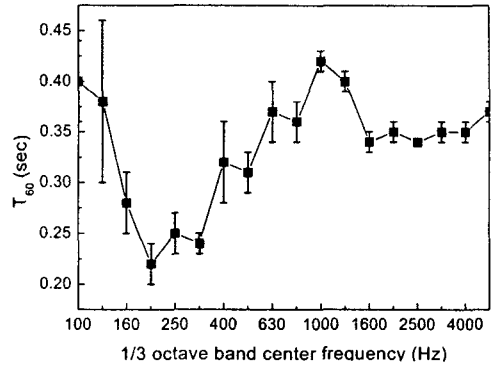


그림 8. 선실에서 측정된 잔향시간 및 편차

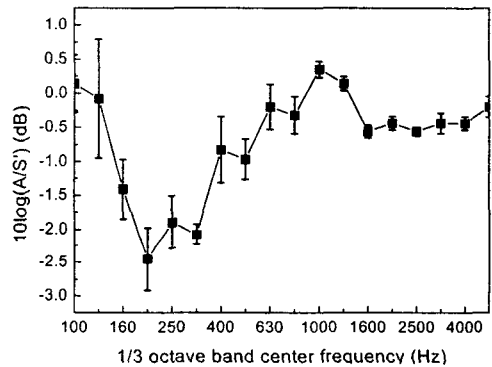


그림 9. 선실의 잔향시간에 대한 차음손실 보정항

#### 4. 결론

잔향시간 계산을 위해 사용되는 일반적인 잔향공식은 Sabine 의 잔향식이고, 측정을 위해 이용되는 방법은 역적분법이다. 이러한 잔향시간 측정에서 고주파수 영역의 값은 측정 위치나 방법에 따라서 큰 차이가 발생하지 않지만, 저주파수 영역, 특히 Schroeder 의 차단주파수 이하 영역에서는 측정 위치와 방법에 따라서 2 배 이상의 차이까지도 발생하는데 이는 측정 위치에 따라 내부 공간의 음향모드에 의한 영향이 크게 작

용하기 때문이다. 이러한 현상은 잔향실처럼 실용적이 넓고 흡음이 거의 없는 공간에서는 큰 문제를 발생시키지 않지만, 실용적이 작고, 흡음 특성이 강한 공간에서 차음 성능을 예측할 경우 매우 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 후자의 특성이 강한 선실에서 차음성능을 평가한 결과 0.2 초의 차이가 실제 차음성능에는 3dB 이상의 큰 차이를 보이는 것을 확인하였다. 따라서 차음 성능 예측을 위해서 잔향시간을 측정할 경우, 각 위치에 따른 잔향시간 편차를 함께 고려하는 것이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] L. E. Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*, 3<sup>rd</sup>. ed., John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 317 ~ 319.
- [2] A. Kulowski, "Relationship between impulse response and other types of room acoustical responses", *Applied Acoustics*, **15**, pp. 3 ~ 10, 1982.
- [3] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time", *J. Acoust. Soc. Am.*, **37**, pp. 409 ~ 412, 1965.
- [4] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 3<sup>rd</sup> ed., Elsevier Applied Science, New York, 1991.
- [5] L. Cremer, H. A. Muller and T. J. Schultz, *Principles and Applications of Room Acoustics*, Vol. 2, Elsevier Applied Science, New York, pp.375~380, 1978.