

선실의 음향학적 특성을 고려한 잔향시간 평가

최재웅*

Reverberation time evaluation considering the acoustical characteristics of a cabin

Choi Jae-woong*

ABSTRACT

Reverberation time is the well known theory and widely used in commercial apparatus to get reverberation time. However large fluctuation in low frequency region occurs in a small cabin due to superposition of a few modes. This paper investigates this phenomena in terms of modal density in frequency domain and suggests a method to get lower limit of reverberation time using the integration of the time-SPL diagram. The suggestion is confirmed by simulation and shows reasonable results to get lower limit of reverberation time and maximum absorbing power in the cabin.

1. 서론

건축 음향 및 선박의 차음 특성 측정 등에 이르는 광범위한 분야에서 이용되고 있는 잔향 시간의 측정은 잘 알려져 있는 이론⁽¹⁾으로서 ISO에 측정 방법^(2,3)이 기술되어 있고, 이를 이용한 상용 제품들이 출시되어 활용되고 있다. 음장 가진음으로는 백색 음, pink 음 또는 충격음을 활용하고 있으며, 가진 방법으로는 계속 가진 후 음을 급 정지하는 방법(INM, interrupted noise method)과, 충격음(IRM, impulse response method)을 이용하는 방법 등이 있으나, 후자의 경우는 참고용으로 활용하도록 권하고 있다. 이는 충격음에 의한 음장 가진 효과가 떨어지기 때문이다.

잔향 시간의 적용 분야는 흡차음재의 개발을 위해 ISO에 규정하는 대형 잔향실에서의 잔향 시간 추정을 통한 차음 성능 평가 및 등가 흡음력 측정 등이다. 이 경우에는 INM 방법이 물리적인 의미를 갖는 것으로 판단된다. 그러나 회의실등과 같이 화자의 소리를 청자가 듣는 형태의 음 해석에서는 직접음과 반사음의 형태에 관한 연구가 중요한 것으로 판단된다.

따라서 충격음을 이용하여 직접음 및 반사음의 정도를 연구하며, 이를 잔향시간으로 변환하는 IRM를 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

최근의 선박 소음 규제에서는 DNV⁽⁴⁾에서 규정하고 있듯이 특수선 및 여객선과 같은 선실의 벽면의 차음지수를 실 선박에서 측정할 것을 요구하고 있다. 이에 따라 ISO에 정의 되어 있는 차음지수 측정용 실 선박에 적용하여야 하는데, 이를 위해서는 등가의 음압 레벨 및 잔향 시간 추정이 이루어져야 한다. 일반적인 선실의 규모는 20~30m³의 체적을 갖는 경우가 대부분으로 선실의 음압 레벨은 저주파 영역에서 공간 상의 변화가 크게 나타나는 현상을 발견할 수 있으며, 이러한 현상은 저 모우드 밀도로 인한 현상으로 이해할 수 있다. 따라서 잔향 시간 측정의 경우에도 저주파 대역의 측정 정도가 감소하는 현상이 나타난다.

본 논문에서는 이러한 현상들을 고찰하고, 이러한 현상에 의해 기존의 잔향 시간 평가에 미치는 영향을 검토 하였다. 또한 이를 근거로 잔향 시간의 최소 한계값을 구하는 방법을 제안 하였다.

*: 삼성중공업, 조선/플랜트 연구소

2. 잔향 시간의 정의 및 계산법

2.1 잔향 관계식⁽¹⁾

여기서 잔향 시간에 관계된 용어들의 공통 인식을 위해 참고문헌 1에 기술되어 있는 잔향 시간에 관한 기본 관계식을 소개하면, 폐쇄된 공간의 음향 에너지의 지배 방정식은 에너지 보존의 법칙 및 Sabine의 에너지 감소 관계식을 이용하여 다음과 같이 정리된다.

$$V \frac{d\bar{w}}{dt} + \frac{c}{4} A_s \bar{w} = -\bar{\rho} \quad (1)$$

여기서 V 는 밀폐 공간의 체적을 의미하고, c 는 음파의 속도, A_s 는 Sabine의 흡음 파워, \bar{w} 는 에너지, $\bar{\rho}$ 는 음향 파워를 의미한다. 식(1)의 해는 식(2)와 같이 초기 에너지 \bar{w}_{ini} 와, 특성감쇠시간 τ 를 이용하여 결정된다.

$$\bar{w}(t) = \bar{w}_{ini} e^{-t/\tau} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{4V}{cA_s} \quad (3)$$

그런데 잔향시간은 음압 레벨이 60dB 감소 되기까지의 시간을 T_{60} 으로 표현하므로, $\bar{w}_{ini} / \bar{w} = 10^6$ 이 되는 시간을 의미한다. 따라서

$$T_{60} = (6 \ln 10) \tau = 13.82 \tau \quad (4)$$

와 같이 정의된다.

2.2 잔향 시간 계산법⁽²⁾

INM의 경우는 잔향 시간 추정에는 시간-음압 레벨의 선도가 시간에 따라 필요 이상으로 변화하는 성질을 제어하기 위하여 상용 제품의 경우 시간-음압 레벨 선도에는 moving average를 통한 방법(linear or exponential averaging)을 활용하고 있으며, 이 신호를 1차식으로 커브피팅하여 잔향시간을 얻고 있다. 이는 시간-에너지 선도의 분산을 최소화 하는 최적화 과정으로 볼 수 있다. 이렇게 구한 잔향 시간에 존재하는 오차 성분을 제거하기 위하여 시간-음압 레벨을 평균화 하거나 계산된 잔향 시간을 평균화 하는 방법이 있을 수 있으나, 전자가 중요한 것으로 ISO에 규정되어 있다. 또한 IRM의 경우에는

backward integration method를 이용한 시간-음압 레벨 선도를 구하고, 이 신호를 1차식으로 커브피팅하여 잔향시간을 얻고 있다.

3 선실 음장의 특성을 고려한 잔향 시간 추정

3.1 일반 실내 공간의 모우드 및 음압 레벨 특성

실내 공간의 음장 특성은 공진 모우드의 조합에 의하여 구할 수 있으며, 이들 모우드 성분은 음장의 체적, 표면적 및 가장자리의 길이에 의해 다음과 같이 결정할 수 있음이 알려져 있다.

$$N(\omega) \approx \frac{1}{6} \frac{V}{\pi^2} \left(\frac{\omega}{c}\right)^3 + \frac{1}{16} \frac{S}{\pi} \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 + \frac{1}{16} \frac{L}{\pi} \left(\frac{\omega}{c}\right) + \frac{1}{8} \quad (5)$$

이로부터 흡차음재의 성능 측정을 위해 사용되는 20 0m' 정도의 체적을 갖는 잔향실의 경우, 우측의 첫 항으로 기술이 가능하며, 일반 상선의 선실과 같이 20 ~ 30m' 정도의 체적인 경우는 표면적 및 가장자리의 길이 정보를 모두 포함하여야 함을 알 수 있다.

백색 잡음으로 음장을 가진하는 경우 위식과 같은 모우드 조합으로 이루어지는 음장을 얻을 수 있으며, 이때 음장의 한 지점에서 음압 레벨을 측정하는 경우에 주파수 응답의 굴곡이 존재함을 Schroeder 등^(3,4)이 유도 하였다. 이 유도에서는 확산 음장에 존재하는 주파수 영역의 응답 변동에 관한 특성을 구하기 위하여, 0.2Hz 간격의 주파수 간격을 갖는 모우드 성분을 중첩하였다. 따라서 확산 음장의 특성이 고려된 형태의 음장에 관한 연구를 수행한 것으로 볼 수 있다. 그들의 결과에 따르면 음압 레벨의 산과 산 사이의 간격은 다음과 같다.

$$\langle \Delta f_{max} \rangle = (3.91 \pm 0.04) / T_{60} \quad (6)$$

따라서 주파수 영역에서의 최소한의 굴곡에 대한 분해능을 얻기 위해서는 최소 $\Delta f_{max} / 2$ 이 되어야 함을 알 수 있다. 따라서 이에 따른 시간 데이터의 길이 T_L 은

$$T_L = \frac{2}{\Delta f_{max}} = \frac{2T_{60}}{3.91 \pm 0.04} \quad (7)$$

이 됨을 알 수 있다.

이들을 정리하면 실내 음장의 모우드 분석을 주파수 영역과 관련 지어 분석할 경우에는 반드시 위와 같은 시간 데이터의 길이를 이용하여 주파수 분석 또는 필터링하여야 함을 의미한다. 따라서 잔향시간 추정에서 광대역 가진 후에 각 주파수 대역 별 신호를 필터링하여 추정하는 경우에는 위에서 설정한 시간 길이를 갖는 데이터를 이용하여야 만족할 만한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이 시간 동안에 일어나는 음압 레벨의 감소정도는 식 (2) 및 식 (7)로부터 식 (8)과 같이 계산된다.

$$10 \log \left(\frac{e^{-t_r/\tau}}{e^{-t_s/\tau}} \right) = 10 \log \left(e^{(t_s - t_r)/\tau} \right) \approx -31dB \quad (8)$$

여기서 t_s 는 신호가 감소하는 시작 시간을 의미하고, t_r 는 잔향시간 계산을 위한 시간 데이터의 종료 시간을 의미한다. 결국 확산 음장의 경우에 최소 30dB 정도의 감쇄가 이루어지는 데이터를 이용하는 경우에 신호처리 관점에서 합리적이라 판단된다. 따라서 ISO⁹³에 규정하고 있는 T_{90} 은 확산 음장의 경우에 합리적으로 적용 가능함을 알 수 있으며 T_{90} 의 경우에는 BT 값이 충분히 큰 경우에 적용 하는 것이 바람직한 결과를 나타낼 것으로 판단된다. 한편 음압 레벨의 분산은

$$\sigma \approx 5.57(1 + 0.238T_{90}f_s)^{-0.7} dB \quad (9)$$

으로 표현 됨을 유도 하였다. 여기서 f_s 는 주파수 대역 폭을 의미한다.

3.2 선실의 잔향 특성

앞 서의 실내 공간에 적용되는 일반 관계식을 이용하여, 일반적인 선실에서 특성을 정리하면 다음 표와 같다. 우선 잔향 시간은 0.2 ~ 1.0초(일반적인 생활공간의 잔향시간은 평균 0.5초)정도이므로 Schroeder cutoff frequency 및 1/3 옥타브 밴드의 관심 최저 중심 주파수인 100Hz 대역에서 3dB bandwidth에 존재하는 고유 모우드의 수는 표1과 같이 0.17 ~ 0.21개가 된다. 따라서 광대역 가진을 이용한 주파수 대역 별 잔향시간 추정을 수행하는 경우 저주파 대역에 기여하는 모우드의 수가 적게 되어

시간-에너지 레벨 선도의 분산이 크게 될 가능성이 있다.

표 1 음장의 특성 비교(1/3octave band)

Item	Cabin	Reverb. room
Volume, m ³	25 ~ 30	200~250
reverberation time, T_{90} (sec)	0.2 ~ 1.0	5-10
3dB bandwidth $(\Delta f)_{3dB}$ (Hz)	11 ~ 2.	0.44 ~ 0.22
Schroeder frequency, Hz	165 ~ 400	~ 80
# of mode within 100Hz band	1.6 ~ 1.9	12.5

즉 선실의 가장 큰 특징이라면, 기하학적 형상에 의한 모우드 밀도의 감소에 있다. 예를 들어 100 Hz 중심 주파수의 모우드 기여도는 위에 표에서 보듯이 약 1.6 ~ 1.9개 정도 이므로, 잔향 시간 추정을 위한 시간-에너지 선도의 형태가 지수함수적으로 감소하는 현상과 1개 또는 2개 정도의 모드 중첩에 의한 비팅 현상 등이 조합되어 나타날 것이다. 따라서 1차식으로의 커브피팅 하는 경우 단일 모우드 성분의 경우는 매우 엄밀한 의미의 잔향 시간 측정이 가능하나, 2개 모우드에 의한 비팅의 경우에는 심각한 오차가 나타날 수 있음을 알 수 있다.

4. 잔향 시간의 최소 한계 값

앞 서의 잔향 시간 추정법은 시간-음압 레벨 선도를 직접 구하거나, backward integration 방법을 통하여 구하고 이들을 1차식으로 모델링하는 방법을 이용하였다. 따라서 시간-음압 레벨 선도의 형태에서 모우드 밀도로 인한 왜곡이 있는 경우, 예측된 잔향시간이 심하게 왜곡되는 현상이 발생하였다. 이러한 단점을 방지하기 위한 방법으로 시간-음압 레벨 선도를 적분하는 방법을 도입해 보자.

$$\int_0^T w(t)dt = \int_0^T w_{min} e^{-t/\tau} dt \quad (10)$$

이를 time-SPL(t) 선도로 표현하는 경우 위식은 다음과 같이 정리된다.

$$\int_0^{T_r} SPL(t)dt = \int_0^{T_r} (at + b)dt \quad (11)$$

여기서 a는 1차식으로 감소하는 기울기를 의미하며, 잔향시간과는 $-60/a$ 의 관계를 갖고, b는 offset을 의미한다. 따라서 위의 적분 관계식을 3장에서 살펴본 바와 같이 확산 음장의 음압 레벨의 변동 현상을 고려할 수 있도록 T_{60} 의 시간 영역에서 적분하고 이때 적분 시작점의 SPL 값을 0으로 설정하면 항상 $b=0$ 으로 둘 수 있다. 따라서 좌변의 값을 W라 두는 경우 잔향시간은 다음과 같이 정리된다.

$$T_{60} = -\frac{30}{W} T_r^2 \quad (12)$$

즉 time-SPL(t) 선도의 적분값과 적분을 수행하는 시간 영역의 길이로 결정되는 잔향시간을 유도할 수 있다. 따라서 적분의 특성 상 랜덤 오차 성분은 급격히 감소할 것이고, 이에 따라 추정된 잔향시간의 분산도 적을 것으로 추정할 수 있다.

이 방법을 impulse response method에 적용하는 경우에는 $t=0$ sec이 아닌 일정 시간이 지난 후에 최대 값에 도달하는 SPL(t)의 특성이 나타나므로 주의 를 요한다. 이 경우에는 적분 구간의 시작점을 SPL의 최대값으로 시작하여 적용할 수 있다. 그러나 이 시작점의 위치에 대한 제약조건은 없으며, 사용자가 원하는 위치를 설정하고, 이를 SPL(t)=0dB가 되도록 설정한 후 적분하면 된다.

식 (12)에 물리적 의미를 부여하기 위하여 W 값을 살펴보자. 즉 W 값은 time-SPL(t)의 적분값이므로 만일 원하는 적분 구간의 최대값을 0dB 로 설정하는 경우

$$SPL(t) \leq 0, \quad 0 \leq t \leq T_r$$

$$\left| \int_0^{T_r} SPL(t) \right| \geq W_{true} \quad (13)$$

를 만족하게 되어

$$T_{60, estimated} \leq T_{60, true} \quad (14)$$

의 관계가 만족하게 된다. 따라서 이상과 같은 방법으로 얻은 잔향시간의 값은 잔향 시간의 최소 한계값으로 볼 수 있다. 그런데 등가 흡음력은

$$\bar{\alpha} = \frac{56.3V}{cST_{60}} \quad (15)$$

으로 표현되므로 잔향 시간의 최소 한계값은 최대 등가 흡음력을 의미하게 됨을 알 수 있다.

5. 모사실험

5.1 신호 생성 법

잔향 시간 추정법을 위한 신호 생성은 경계 요소법을 이용한 음장 해석이나, 가상 음원법을 적용할 수 있으나, 여기서는 고유 모우드 중첩법을 적용한다. 이를 위해 모우드 밀도 식을 적용할 수 있는 직육면체의 공간을 고려한다. 이 경우에 감쇠를 포함하는 응답의 형태를 1차 진동계의 식으로부터 유추할 수 있다.

$$x = A_0 e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \psi) \quad (16)$$

이 식을 음장의 감쇠 에너지와 연관 지어 생각하면

$$\tau = \frac{4V}{cA_s}$$

$$A_s = \bar{\alpha} \cdot S \quad (17)$$

이 됨을 알 수 있으며, 따라서

$$e^{-t/\tau} \approx e^{-\zeta \omega_n t}$$

$$\zeta = \frac{c \bar{\alpha} S}{8V \omega_n} \quad (18)$$

의 관계가 만족되어 잔향이 발생하는 음압은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$p(t) \approx \sum_{n=1}^N A_0(\omega_n) e^{-t/\tau(\omega_n)} \cdot \sin \left[\sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{1}{2\tau(\omega_n)} \right)^2} t - \psi(\omega_n) \right] \quad (19)$$

여기서 각 고유 모드 성분은 정육면체의 길이, 폭, 높이에 의해 식(5)로 주어지는 값으로 결정된다.

5.2 모사실험 결과

모사실험은 길이 5m, 폭 2.5m, 높이 2.5m의 직육면체의 공간을 고려하였다. 식 (5)에 주어진 방법으로 고유 모우드를 추정하고, 이를 식 (19)에 적용하였다. 이때 각 모우드의 크기는 0에서 1 사이의 균일 분포를 갖는 랜덤 수를 이용하였으며, 각 모우드의 초기 위상은 $\pm \pi$ 범위에 존재하는 균일분포의 랜덤 수로 가정하였다. 관심 주파수의 범위는 3530Hz 까지 하여 1/3 옥타브 대역의 3150Hz의 중심주파수 까지 고려할 수 있도록 하였다. 모사실험에 사용된 잔향 시간은 0.5초인 경우로 하였다.

그림 1은 이로부터 생성된 잔향신호의 time-SPL(t) 선도를 나타낸다. 이 신호는 interrupted noise method를 적용하는 경우에 얻을 수 있는 신호로 생각할 수 있다.

그림 2는 이 신호를 각각의 주파수 대역으로 구분하여 얻은 잔향 시간을 나타낸 것으로, 그림 1의 신호를 주파수 영역에서 필터링하여 시간 영역으로 역 변환한 time-SPL(t) 신호를 이용하여 얻은 결과이다. 실선은 최소자승법을 이용한 curve fitting을 적용한 결과이고, 점선은 backward integration method를 이용하여 적분한 신호에 최소자승법을 이용한 curve fitting을 적용한 결과이며, \circ 는 에너지 적분법을 통하여 얻은 잔향 시간의 하한값을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 잔향 시간의 한계값은 참값인 0.5sec 이하에서 존재하며, 기존의 2가지 방법은 참값을 중심으로 변화하고 있으며 특히 저주파 대역에서 높은 변화가 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 3에서 볼 수 있는 모우드 밀도의 분포에서 알 수 있듯이 저주파 대역에서의 모우드 기여도가 매우 낮기 때문이다.

그림 2에서 발견할 수 있는 또 다른 특징으로는 특정 주파수 영역에서는 한계값보다 낮은 예측값이 발견되는데, 이는 잘 못 예측된 값으로 인정할 수 있다. 그러나 이 값의 오차 정도가 높게 예측된 값에 비하여 항상 큰 값을 갖지는 않으나, 잔향 시간의 하한값으로 대체하면 오차를 줄일 수 있다.

6. 결론

잔향시간에 관한 연구 결과 및 상용 제품이 많이 활

용되고 있으나, 이 방법의 적용은 비교적 큰 잔향 공간에서 정도 높은 예측이 가능하며, 선실과 같은 좁은 공간에서의 잔향 시간 예측은 예측된 잔향시간의 변화량이 크게 나타난다. 본 연구에서는 예측된 잔향 시간 값의 정확도를 추정할 수 있는 방법론이 제시 되지 못한 실정에서, 기본적인 하한값 설정에 관한 연구를 수행 하였다. 이를 적용한 모사실험의 경우 참값의 이하에 존재하는 하한 값 산정이 가능함을 알 수 있었다. 따라서 추정된 잔향시간을 음장의 흡음 특성 분석을 위한 데이터로 활용하고자 하는 경우 이 하한값을 활용한다면, 최대 흡음력의 조건을 기술할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Pierce A.D., 1989, Acoustics: An introduction to its physical principles and applications, Acoustical Society of America, Chap. 6
- (2) ISO 354, 1985, Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room
- (3) ISO 3382, 1997, Acoustics-Measurement of the reverberant time of rooms with reference to other acoustical parameters
- (4) Det Norske Veritas Classification AS, 1995, Tentative Rules for Classification of Ships : Comfort Class, Part 5 Chapter 12, July
- (5) Schroeder M.R. and Kuttruff K.H., 1962, "On frequency response curves in rooms, comparison of experimental, theoretical, and Monte Carlo results for the average frequency spacing between maxima," J. Acoust. Soc. Am., Vol 34, No. 1, Jan., pp76-80
- (6) Schroeder M.R., 1969, "Effects of frequency and space averaging on the transmission responses of multimode media," J. Acoust. Soc. Am., Vol.46, No.2(1), pp277-283.

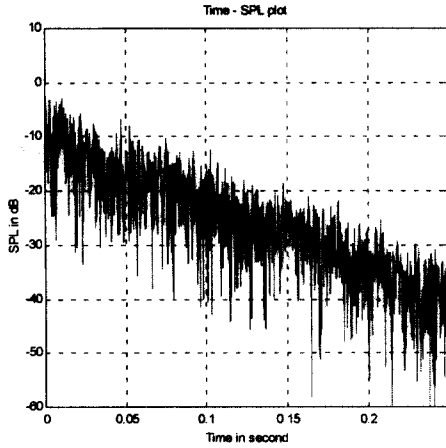


그림 1 생성된 시간-음압 레벨 선도 (선실의 길이 5 m, 폭 2.5m, 높이 2.5m, 잔향시간은 모든 주파수에서 0.5sec)

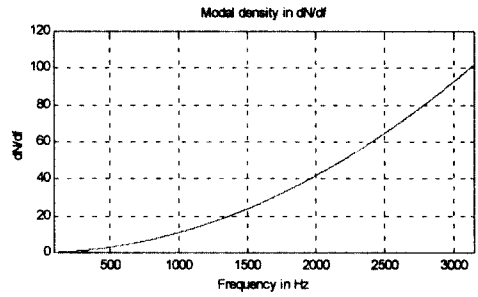
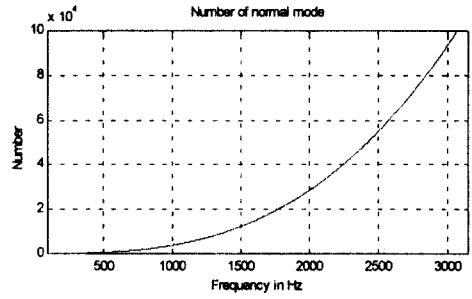


그림 3 모사실험 모델의 모우드 밀도 선도

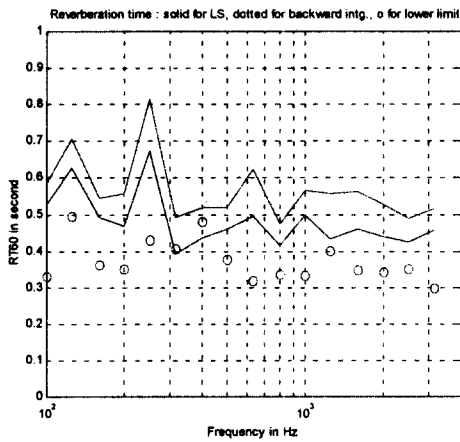


그림 2 추정된 잔향 시간 (실선 : 최소자승법, 점선 : backward integration 및 최소자승법, o : 에너지 적분법)