

잔향실 성능 검증 및 향상 연구

A Study on the Improvement of Reverberation Room's Performance

김성훈† · 주원호* · 김동해* · 배종국*
Sung-Hoon Kim, Won-Ho Joo, Dong-Hae Kim, Jong-Guk Bae

Key Words : Reverberation room(잔향실), Sound Transmission(투과손실), International Standard(국제규격)

ABSTRACT

Recently, two reverberation rooms were built up of 300mm thick concrete walls in non-parallel pentagonal shape to measure the sound absorption, transmission, radiation, and impact insulation of acoustical materials, panels, doors, etc. Various acoustic tests, including the sound transmission test, were carried out to investigate their acoustic performances. In order to improve the performance, several modifications on these acoustical parameters, such as the acoustic mode, the position of specimen, the formation of diffuse field, the location of sound source, and flanking transmission, have been conducted. Through a series of tests, the reverberation rooms have been effectively improved so that it could perform a variety of acoustic tests with the international standard. And then, it is expected to be very helpful in developing the low noise design technology for ships.

1. 서론

대형 복합 구조물의 저소음화를 위해서는 다양한 내장재에 대한 음향성능 즉, 흡음성능, 차음성능, 방사효율 및 충격소음성능 등을 정확하게 파악하는 것이 필요하다. 이를 위해서 300mm 두께의 부정형 5 각형 콘크리트 구조의 잔향실(소음실: 100.8m³, 수음실:160.4m³)을 구조진동시험동 내에 건축하였다.

본 연구에서는 설치된 잔향실의 음향성능을 파악하고 국제규격(ASTM, ISO)과의 적합성 여부를 판단하기 위하여 먼저 ASTM E1289-97의 표준시편(0.62mm Galvanized steel sheet)을 설치한 후 배경소음, 내부 흡음률, 실내/외 음압차이 및 투과손실 등의 계측을 수행하였다. 표준시편에 대한 측정 결과 잔향실의 기본적인 성능은 만족하지만 165Hz 이하의 저주파수 영역에서 차음 성능이 과도하게 측정되었고 500Hz 이상의 고주파수 영역에서는 ASTM의 하한 기준치 이하의 투과손실 값이 계측이 되는 문제점이 발견되었다.

이러한 문제의 원인으로서는 저주파수 대역의 음장공명모드 존재, 시편설치 위치에 따른 터널 효과(tunneling effect)의 존재, 잔향실법에 의한 차음성능 계측방법의 오류, 신호선용 구멍, 외벽의 구조적 결함, 시편틈새 등에 의한 측로손실의 존재, 확산음장 구현의 부족, 소음원실의 음향파워 부족 등이 거론되어 각각에 대한 검증실험을 수행

하였고 표준시편에 대한 ASTM의 결과에 보다 더 부합될 수 있도록 일련의 성능향상 시험을 수행하였다.

2. 잔향실 주요제원 및 국제 음향규격

ASTM, ISO[1,2]에서 규정하고 있는 잔향실에 대한 국제 음향규격에 따라서 잔향실을 신축하고 계측 방법 및 절차를 정리하였다. 잔향실 내부 체적, 흡음면적, 온도변화, 소음원 직접음 영향, 마이크로폰 배치, 측정 주파수, 계측시간, 배경소음, 시편면적, 측로손실(Flanking noise)에 대해 Table 1에 나타낸 규정에 따라 설계 및 평가하였다.

신축된 잔향실은 건축 부재 혹은 선박용 내장재료의 공기음 차단 특성, 흡음율 측정 및 흡차음재의 복합 구조에 대한 특성 연구를 위한 시설로 잔향 조건을 만족하고 시편이 설치되는 공통면을 갖는 소음실과 수음실로 이루어진다. 잔향시간 및 투과손실을 계측하기 위해 확산 음장용 마이크로폰과 소음계 및 분석시스템, 회전봉, 무지향성 스피커를 사용하였다. 신축된 잔향실의 주요 제원과 설치완료후 모습을 Table 2와 Figure 1에 각각 나타내었다.

Table 1 잔향실에 대한 국제 음향규격

ASTM E90-02	Measurement of Transmission Loss of Building Partitions and Elements
ASTM E336-97	Measurement of Airborne Sound Insulation in Buildings
ISO 140-1	Requirements of Laboratory Test Facilities with Suppressed Flanking Transmission
ISO 140-3	Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements

† 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실
E-mail : shkim74@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-3943, Fax : (052) 230-3367

* 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

Table 2 잔향실의 주요제원

구분	제작사항	비고
적용기준	KS, ISO	
내부체적	소음실 : 100.8 m ³ 수음실 : 160.4 m ³	5 각형 부정형 구조
내부면적	소음실 : 128.7 m ² 수음실 : 173.6 m ²	시편 설치부 포함
시편 설치부	차음성능 시험 : 4.26 m x 2.4 m(H)	10.22 m ² / 실내설치형
	충격시험 : 4.0 m x 2.5 m	10.00 m ²

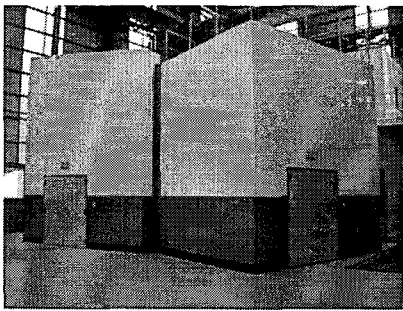


Figure 1 신축 잔향실

3. 국제규격과의 적합성 시험

3.1 배경소음 (Background Noise)

잔향실에서의 배경소음은 ASTM 이나 ISO 의 규약에서 특정한 배경소음 수준을 명시하기 보다는 투과손실 시험에서 측정된 각 옥타브밴드의 음압수준과 배경소음과의 차이에 따른 보정값을 적용하며 상세한 내용을 Table 3 에 표시하였다. 실제 시편을 설치하여 수음실의 배경소음과 음압레벨을 비교했을 경우 차음성능이 매우 높은 시편의 경우 3.15kHz 이상의 고주파수 영역에서 배경소음과 측정된 신호와의 차이값이 15dB(ISO) 또는 10dB(ASTM)보다 작게 나타날 경우에 Table 3 에 나타낸 바와같이 측정값을 보정하여 사용하여야 한다.

3.2 흡음률

잔향시간 및 흡음계수를 검토한 결과 Figure 2 과 같이 흡음계수의 측면에서는 ASTM 의 권장치를 전 주파수 영역에서 만족하고 있다. 그러나, ISO 의 잔향시간에 대한 요구조건 [2]과 같이 잔향시간을 크게 단축시킬 경우 스피커에 의한 직접음 영향이 커지고 잔향음장 구현에 어려움이 예상되므로 본 연구에서는 ASTM 에서 제시하는 잔향시간 및 흡음계수에 대한 권장치만 고려하였다.

Table 3 배경소음에 대한 보정 방법(ISO, ASTM)

$L_{sb}-L_b$	L
15(10)dB 이상	No correction
6(5)~15(10)dB	$10 \times \log_{10}(10^{L_{sb}/10}-10^{L_b/10})$
6(5)dB 이하	$L_{sb} - 1.3(2) \text{ dB}$
괄호밖 : ISO, 괄호안 : ASTM	
L : Adjusted signal level, dB	
L_{sb} : Level of signal and background combined, dB	
L_b : Background noise level, dB	

3.3 잔향실 실내/외 음압차이

잔향실 내/외부간 누음 검증을 위해 수음실 내부를 음향 가진하고 실내/외부간 음압레벨을 측정하여 그 차이를 비교하였다. 설계 요구조건과 비교한 결과 실내/외 음압차가 저주파수에서는 만족스럽지만 500 Hz 이상의 주파수영역에서는 만족스럽지 못한 결과를 보였다. 이러한 원인으로서는 잔향실 도어의 틈새를 통한 누음 현상에 의한 것으로 판단되어 이에 대한 대책을 실시하였다.

3.4 표준시편에 대한 차음성능

표준시편에 대한 차음성능 시험결과는 Figure 3 과 같다. ASTM 의 결과와 비교하면 200Hz 이하에서는 많은 변동성을 보이면서 상한선을 초과하나 그 이상에서는 전반적으로 하한선과 유사하거나 낮게 나타나는 경향을 보여주었다. 그리고 500Hz~1600Hz 주파수 대역은 그 하한선 아래로 벗어나는 실정이었다.

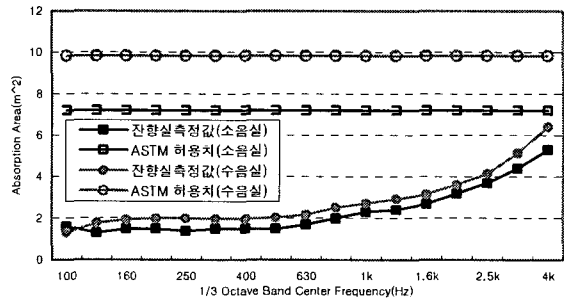


Figure 2 잔향시간 및 흡음계수 평가(ASTM)

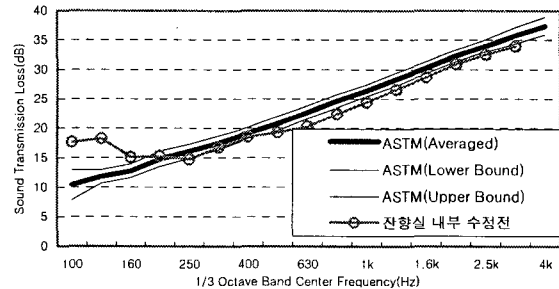


Figure 3 표준시편에 대한 투과손실 측정결과

4. 잔향실 음향성능 향상

4.1 확산판 설치

저주파수 영역에서 과도한 잔향시간 및 공명모드를 줄이기 위한 방법으로 확산판 설치 또는 저주파수용 흡음재를 설치하는 것이 일반적인 방법이며 본 연구에서는 확산판을 수음실 천정에 Figure 4 와 같이 설치하였고 확산판의 위치와 개수는 ISO 140-1 에 언급된 바와 같이 반복적인 실험을 통해 결정되었다. 확산판 설치후 투과손실 측정 결과를 Figure 5 에 나타내었으며 200Hz 와 125Hz 에서 ASTM 의 결과에 보다 근접함을 확인할 수 있었고 저주파수 영역에서의 잔향시간 계측값이 확산판 설치 전보다 줄어드는 현상을 보임으로써 공명모드의 영향을 줄이는 역할을 하는 것으로 판단된다.

4.2 수음실 음장모드 측정

200Hz 이하의 저주파수 대역은 잔향실의 기하학적인 형상에 의해 결정되는 음장모드에 직결되므로 먼저 개선책을 강구하기 전에 수음실에 형성되는 음장모드의 특성을 파악할 필요가 있다. 이에 Figure 6 에 보인 바와 같이 64 채널 마이크로폰 어레이 시스템을 구축하여 음장모드 계측을 수행하였다. 200Hz 이하의 음장모드에 대한 3 차원 분석결과를 Figure 7 에 나타내었으며 이러한 시험을 통해 제어해야 할 주요 모드와 모드형상에 대해 보다 정확하게 파악할 수 있었다.

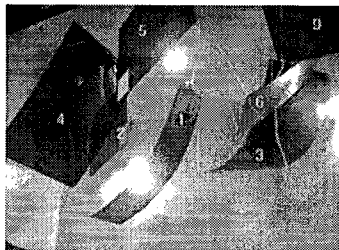


Figure 4 수음실에 확산판 설치

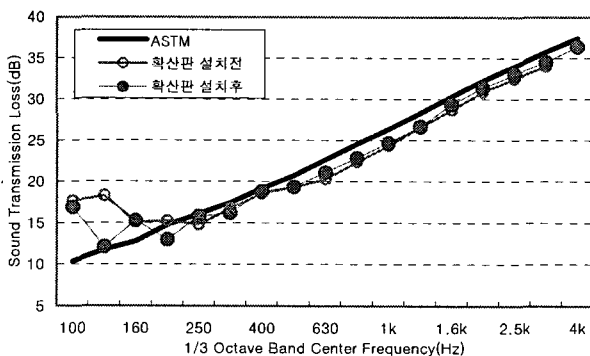


Figure 5 확산판 설치전후 투과손실 결과비교

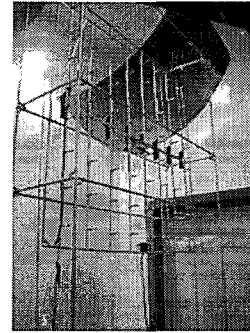


Figure 6 64 채널 마이크로폰 어레이 시스템

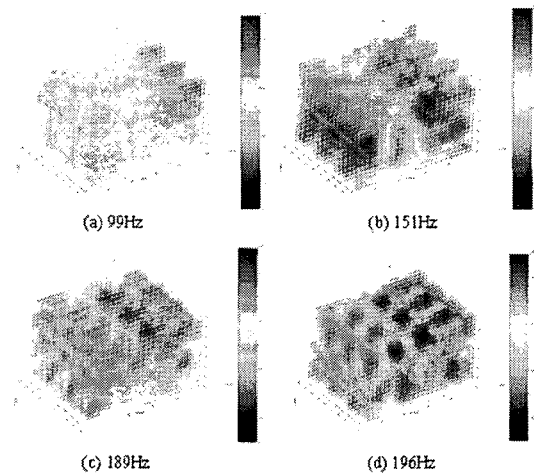


Figure 7 수음실의 주요 음장모드

4.3 잔향실 측로손실 특성 평가

잔향실법을 사용한 투과손실 계측은 시편 자체를 투과하는 직접음을 이용하는 음향인텐시티법보다 잔향실의 구조적인 특성에 크게 지배된다. 특히 계측 신호선의 도출용 구멍, 시편 주위 틈새에 의한 누음, 잔향실 벽체 자체의 구조적인 결함에 의한 측로손실에 의해 차음성능이 낮게 평가될 수 있다. 따라서 잔향실의 측로손실특성을 정량적으로 파악하여 투과손실 실험에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

잔향실 측면 하부에는 계측 신호선을 위한 홀(hole)이 있고 홀을 막지 않은 경우, 스폰지로 막은 경우, 플라스틱 마개 하나, 플라스틱 마개 두개를 사용한 경우에 대해 홀을 투과하여 나오는 음에 대한 음향 인텐시티를 계측하였다. 실험결과 플라스틱 마개 1 개를 삽입한 경우와 2 개를 삽입한 경우 음향 인텐시티의 차이가 많이 남을 알 수 있었고 2 개 삽입 시 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다. 위의 차폐방법의 조합에 따라 표준시편의 차음성능의 변화를 Figure 8 에 나타내었다. 결론적으로 누음의 차이는 있으나 이러한 결과들이 시편의 차음성능에는 거의 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다.

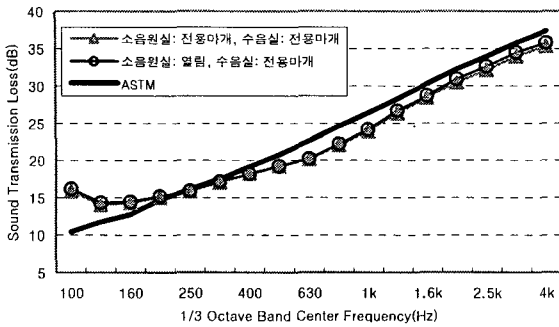


Figure 8 신호선 홀의 차폐 방법에 따른 투과손실

ASTM의 표준시편 설치 시 폭이 1.2m인 시편을 직각 앵글로 연결하여 설치하게 되는데 시편간의 틈새에 의한 누음이 발생하는 지를 파악하기 위해 음향 인텐시티 계측을 수행하였고 그 결과 틈새 근처에서 누음에 의해 특별히 음향 인텐시티의 분포가 변하지는 않는 것으로 파악되었다. 또한 시편간의 틈새에 대한 투과손실 기여도를 조사하기 위해 시편틈새를 테이프로 막은 전/후에 잔향실법에 의한 투과손실 계측을 수행하였고 그 결과를 Figure 9에 나타내었다. 테이핑 전/후에 누음으로 직접적인 영향을 받는 중/고 주파수 영역에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이에 따라 시편틈새가 차음성능에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.

잔향실의 도어 및 벽체를 통한 누음에 대한 계측을 음향 인텐시티법을 이용하여 수행하였다. Figure 10에는 도어에 대한 투과손실 계측치를 표시하였고 계측 신뢰구간에 있는 도어의 투과손실은 잔향실 설계사양보다 작게 평가되어 주위 틈새에 대한 실리콘 작업을 수행하여 개선하였다. 벽체에 대한 투과손실 계측결과는 음압에 비해 음향 인텐시티가 낮아서 신뢰도가 떨어진다.

4.4 잔향실법과 음향 인텐시티법에 의한 투과손실 계측 결과 비교

음향 인텐시티법을 사용하여 측정한 pressure-residual intensity를 Figure 11에 나타내었다. ISO 15186-2에 의하면 pressure-residual intensity는 흡음형 시편인 경우는 7 이하, 반사형 시편인 경우는 9.5 이하이면 음향 인텐시티 계측조건이 된다. 그 결과 잔향실 도어를 열어둔 상태에서 계측면 후방에 흡음판을 설치하였을 때의 pressure-residual intensity 조건은 200Hz 이상에서는 신뢰할 수 있는 결과를 주는 것으로 측정되었고 이때 차음성능을 잔향실법의 결과와 함께 Figure 12에 나타내었다. 계측 결과 200Hz 이하의 저주파수 대역에서는 잔향실법이,

200Hz~1kHz의 중주파수 대역에서는 유사한 결과를 보이고 있으며 고주파수에서는 음향 인텐시티법이 ASTM 표준 투과손실에 더욱 유사하게 계측되었다. 따라서 잔향실법과 음향인텐시티법을 사용한 투과손실 결과가 상호 유사한 결과를 보이고 있으므로 잔향실법을 사용한 계측방법에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

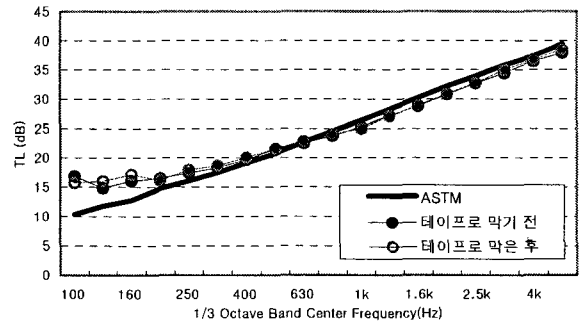


Figure 9 표준시편 틈새막음 전후의 투과손실 비교

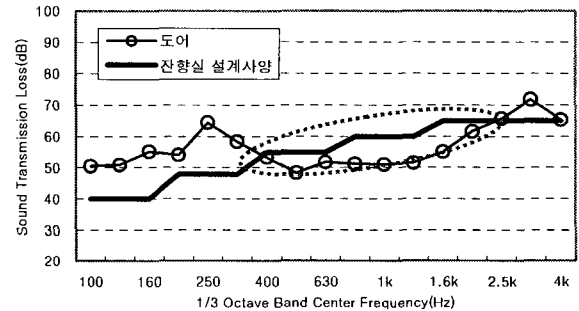


Figure 10 잔향실 도어의 투과손실

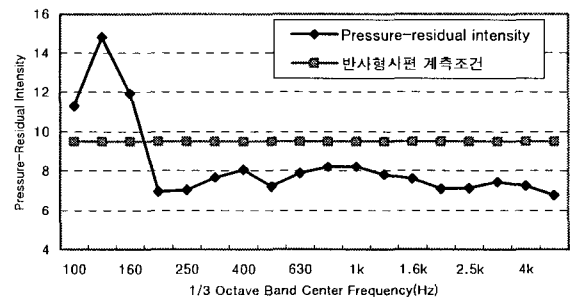


Figure 11 Pressure-residual intensity 측정 결과

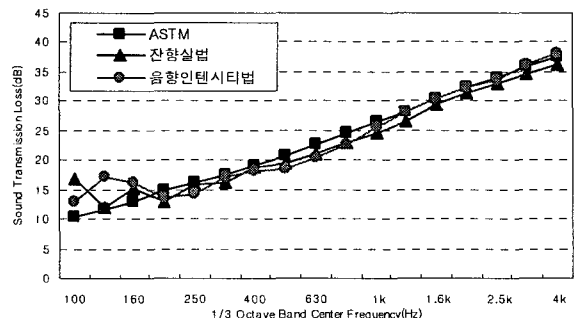


Figure 12 잔향실법과 인텐시티법 투과손실 결과비교

4.5 시편설치 위치에 따른 투과손실 변화

시편 설치위치 변경에 따른 투과손실의 변화를 파악하기 위해 시편 설치위치를 초기에 중앙부에서 소음실방향, 수음실방향 순서로 변경하면서 시험을 수행하였다. 시편 설치위치 변화는 Figure 13 과 같으며 시험결과는 Figure 14 에 나타내었다. 시편 설치위치가 중앙부에서 수음실 방향 또는 소음원실 방향으로 이동하면서 200Hz 이하의 주파수 영역을 제외한 영역에서는 투과손실의 값이 증가되어 ASTM 의 기준치에 보다 더 근접하게 되었다. 하지만 200Hz 이하의 저주파수 대역에서는 여전히 ASTM 의 기준치에 비해 초과하고 있다. 이러한 현상은 시편 설치부의 터널효과에 의한 것으로 파악되며 시편을 중앙위치에 설치하는 것이 시편의 차음성능을 가장 크게 왜곡시키는 현상[3]을 확인할 수 있었으며 이후의 실험에서는 시편의 위치를 수음실에 밀착시켜 투과손실 실험을 수행하였다.

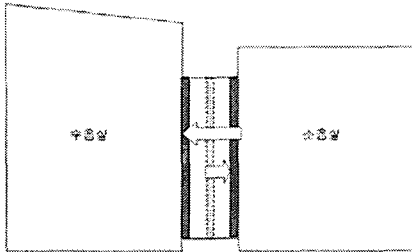


Figure 13 시편위치 변화

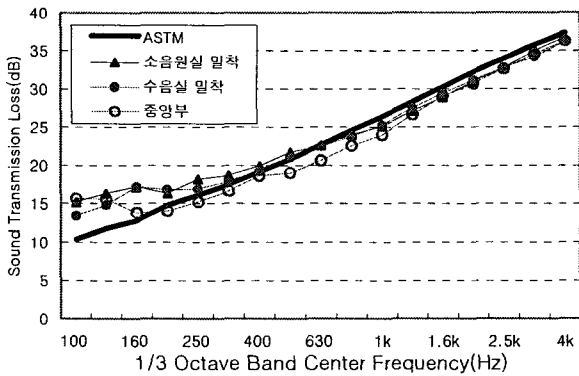


Figure 14 시편위치 변경시 투과손실 결과

4.6 소음원실 확산성능 향상 실험

측로손실의 제거, 수음실의 확산판의 재배치, 시편 설치위치의 변경 등으로 상당한 개선효과가 있었지만 200Hz 이하의 저주파수 영역에서는 여전히 음장모드에 의해 차음성능이 크게 평가되는 경향이 있다. 이에 소음원실에 확산판을 추가로 설치하여 투과손실의 변화정도를 파악하고자 하였다. 표준시편이 수음실에 밀착되어 있는 상태에서 시험을 수행한 결과를 Figure 15 에 나타내었고

200Hz 이하의 저주파수 영역에서 ASTM 기준 투과손실에 더욱 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 투과손실 계측을 위한 잔향실의 성능향상을 위해 소음원실에도 보다 완벽한 확산음장의 구현이 필요함을 의미한다. 따라서 저주파수 영역에서의 확산음장 구현을 위해 수음실과 소음실에 확산판을 추가로 설치하면 ASTM 투과손실 값에 더욱 근접한 향상된 값을 얻을 것이라 판단한다.

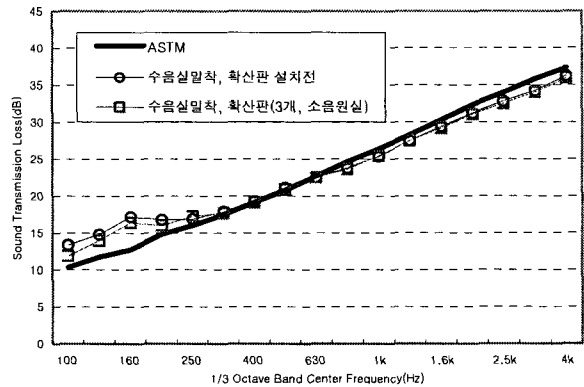


Figure 15 소음원실 확산판 설치전/후 투과손실

5. 결론

본 연구에서는 잔향실을 신축하여 각종 차음재의 투과손실 계측을 위한 기본 구조 및 음향특성에 대한 국제규격과의 적합성 여부와 표준시편에 대한 ASTM 의 결과에 보다 더 부합될 수 있도록 일련의 성능향상 시험을 수행하였다. 이를 통해 잔향실을 이용한 국제규격에 따른 내장재의 음향 시험을 수행할 수 있게 되었으며 향후 선박 저소음화 기술개발을 위해 크게 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) ASTM E 90-97, 1997, Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements, American Society for Testing and Materials
- (2) ISO 140-1, 1997, Acoustics-Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements
- (3) Bong-Ki Kim, 2004, Tunneling effect in sound transmission loss determination: Theoretical approach, The Journal of the Acoustical Society of America