

In-situ 소음투과손실 측정 및 검증을 위한 기법 개발

New Method for Measurement and Validation of In-situ Sound Transmission Loss

이화수† · 박홍철* · 윤성호*

Lee Hwa-Soo, Park Hong-Cheol and Yoon Seong-Ho

Key Words: Sound Transmission Loss, Statistical Energy Analysis

ABSTRACT

The sound transmission loss is a key index to evaluate the acoustic performance of a car-body structure at the high frequency range. From this paper, a new validation method for in-situ sound transmission loss is proposed. First, in-situ sound transmission loss is measured by using PU intensity probe on the condition of complete vehicle. Second, validation test, which is consisted of internal, external and total frequency response function test, is performed by using volume acceleration source and microphones. Then, these test results are compared to validate the accuracy of in-situ sound transmission loss. Finally, the test result of in-site method is compared with results of two reverberant room test method and SEA analytical method. The reliability of in-situ method is confirmed by these procedures.

1. 서론

승용차의 엔진투과소음, 타이어소음, 윈드노이즈에 대하여 차체의 소음 차단 성능을 판단하기 위한 주요한 지표로 소음투과손실(sound transmission loss) 값이 널리 이용되고 있다. 흔히, 잔향실-잔향실법이나 잔향실-무향실법으로 차체 각 부위의 소음투과손실을 구하였으나, 이 방법의 경우, 시험을 위해 차체를 절단하거나 또는 추가로 차체 시험 부위를 마련하여야 하고 시험 설치를 위하여 많은 시간과 비용을 필요로 하며 실제 차량과 유사한 경계조건을 재현하는데 어려움이 따랐다. 이에 비하여 in-situ 소음투과손실 시험 방법은 시험이 용이하여 비용 및 시간을 줄일 수 있으나 이로부터 구한 시험 결과의 신뢰성을 검증하는데 어려움이 있었다.

본 연구에서는 in-situ 상태에서 프런트 도어의 소음투과손실을 구하는 방법과 구한 소음투과손실 시험결과를 검증하는 방법을 제시하고자 하였다. 먼저 잔향실-무향실법과 유사한 시험 조건으로 완성차를 구성한 후 in-situ 소음투과손실을 측정하였다. 추가적으로 프런트 도어 내/외부에 음원을 배치하여 각각의 소음전달함수를 측정하였으며 이로부터 재구성한 소음투과손실 결과를 in-situ 소음투과손실 시험 결과와 비교하여 in-situ 방법의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

추가적으로, 잔향실-잔향실법으로 구한 소음투과손실 시험결과와 상용 해석 소프트웨어인 VA One

을 이용하여 구한 해석결과를 in-situ 시험 결과와 비교하였다.

2. 관련 이론

차량의 외부 소음원으로부터 실내 운전석 귀 위치까지의 소음 전달 경로를 고려할 때, 실내의 소음 레벨은 Fig.1 과 같은 경로로 결정된다.

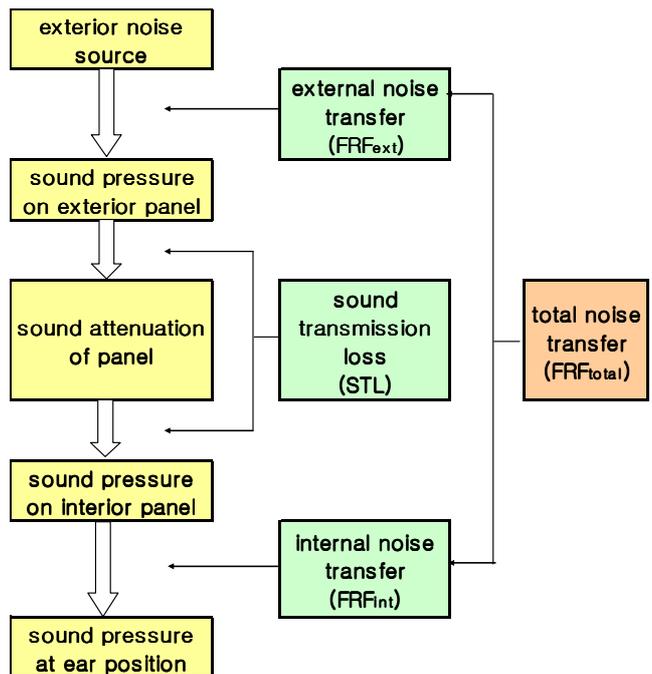


Fig.1 Noise transfer path from external noise source to interior ear position

† 교신저자; 르노삼성자동차

E-mail : hwasoo.lee@renaultsamsungM.com

Tel : (031) 289-7973, Fax : (031) 289-7958

* 르노삼성자동차

답함수(FRF_{ext}) 그리고 전체 주파수 응답함수(FRF_{total})를 각각 Fig.2, Fig.3, Fig.4 와 같이 정의할 때, 외부 소음원으로부터 실내 귀 위치까지의 전체 주파수응답함수는 외부의 주파수응답함수, 관널의 소음투과손실(STL), 내부의 주파수응답함수로 정의될 수 있음을 의미한다.

외부 소음이 실내로 투과되는 경우, 실내 소음은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_3^2 = \underbrace{\left(\frac{P_1}{\dot{Q}}\right)^2}_{FRF_{int}} \times \frac{2\pi c}{\rho} \times \tau \times \underbrace{\frac{P_2^2}{\rho c}}_{\underbrace{W_{trans}}_{\underbrace{W_{inc}}_{\dot{Q}_{trans}^2}}} \times S \quad (1)$$

여기서, P 는 음압, \dot{Q} 는 체적가속도, ρ 는 공기의 밀도, c 는 음속, τ 는 투과계수, S 는 면적, W_{inc}, W_{trans} 는 각각 입사와 투과 음향파위이다.

식(1)의 양변을 \dot{Q}^2 으로 나누고 정리하여 주파수 응답함수로 표현하면 식(2)와 같다. 이는 각각의 주파수응답함수로부터 소음투과손실을 재구성할 수 있음을 의미하며, 재구성된 소음투과손실을 in-situ 방법의 결과와 비교함으로써 그 신뢰성을 검증하는 방법으로 사용될 수 있음을 의미한다.

$$(FRF_{total})_{dB} = (FRF_{int})_{dB} + (FRF_{ext})_{dB} - TL \quad (2)$$

$$+ 10 \log_{10} \left(\frac{2\pi S}{\rho^2} \right) + 10 \log_{10} (2 \times 10^{-5})^2$$

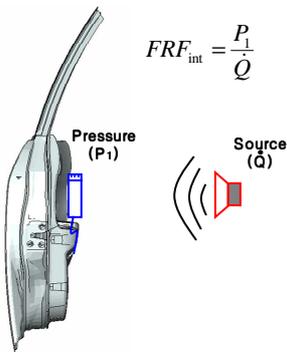


Fig.2 Test setup for internal frequency response function (by using reciprocity theory)

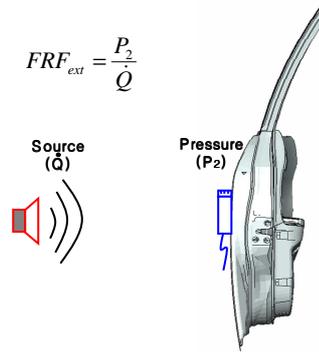


Fig.3 Test setup for external frequency response function

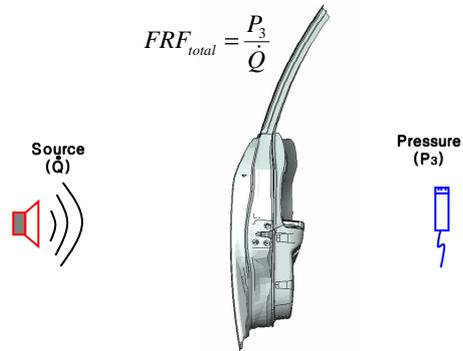


Fig.4 Test setup for total frequency response function

다음으로 in-situ 소음투과손실의 경우, 잔향실-무향실법을 이용하였으며 식(3)과 같이 음원실의 음압 레벨(L_p)과 수음실에서의 음향 인텐시티 레벨(L_I)로부터 소음투과손실(TL)을 구할 수 있다.

$$TL = L_p - L_I - 6 \text{ dB} \quad (3)$$

본 논문에서는 식(2)로부터 구한 소음투과손실을 식(3)으로부터 구한 in-situ 소음투과손실과 비교하여 시험결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

3. 시험방법 및 결과

시험은 차량의 프런트 도어에 대하여 in-situ 소음투과손실 시험과 주파수응답함수로부터 소음투과손실을 검증하는 시험 그리고 두 개의 잔향실법을 이용한 시험으로 나누어 진행하였다.

3.1 In-situ 소음투과손실 시험

완성차 상태에서 소음투과손실을 구하기 위하여 잔향실-무향실법을 이용하였다. 이를 위하여 차량을 무향실에 위치하여 외부를 무향실 조건으로 만들었

으며, 차량 내부 흡음에 크게 기여하여 전/후 좌석을 제거하여 실내를 잔향실과 유사한 조건으로 만들었다.

음원실에 해당하는 차량 내부는 한 개의 반구형 스피커와 두 개의 고주파용 스피커를 배치하여 충분한 음향 파워로 실내를 랜덤 가진하였다.

먼저, 차 실내의 잔향 성능을 체크하기 위하여 실내 음압 레벨을 8 개의 마이크로폰을 랜덤하게 배치하는 방법(discrete points 방법)과 1 개의 마이크로폰을 랜덤하게 회전시키는 방법(space average 방법) 두 가지로 측정하였으며 그 결과는 Fig.5 와 같다. 시험 결과로부터 630Hz 이하의 영역에서는 충분한 잔향장이 형성되지 않았으며 이 이상의 주파수 영역이 in-situ 방법에서 유효한 영역임을 확인할 수 있었다. 또한, 실내 음압 측정을 위한 두 방법을 비교하였을 때, space average 방법이 시험이 용이하고 시험 반복에 따른 재현성이 높은 장점을 가지며 시험결과도 discrete points 방법의 8 채널 평균 결과와 3dB 내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 차실 내부 음압 측정을 위하여 space average 방법으로 시험을 진행하였다.

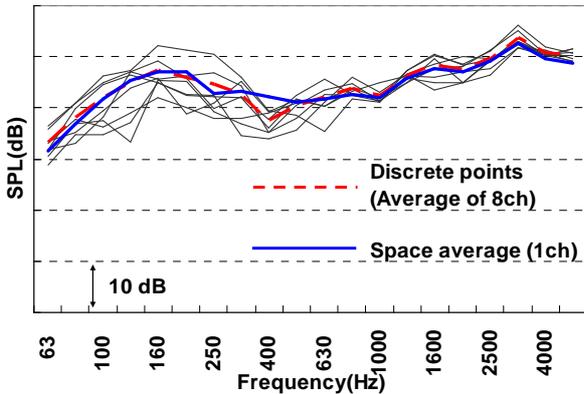


Fig.5 Sound pressure level in cabin (discrete point method vs. space average method)

다음으로 차량 외부의 음향 인텐시티 시험의 경우, 기존의 P-P 인텐시티 프로브에 비하여 측정면 외부의 소음원로부터 기인한 배경소음에 영향을 적게 받으며 센서의 크기가 작아서 활용성이 높은 P-U 인텐시티 프로브를 이용하여 측정하였다[1]. 측정은 프런트 도어를 제외한 나머지 영역을 폴리우레탄 폼과 헤비레이어로 처리하여 관심 영역 이외의 영역으로부터의 소음 에너지 유입을 차단한 경우와 아닌 경우로 나누어 진행하였다. 음향 인텐시티 측정은 ISO 9614-2:1996 에 따라서 시험이 용이하고 시험 시간을 줄일 수 있는 scanning 방법을 이용하였다[2].

시험으로부터 구한 실내 소음 레벨과 외부 인텐시티 레벨을 식(3)에 대입하여 구한 소음투과손실은

Fig.6 과 같다. 소음투과손실이 낮고 회절이 용이한 저주파수 영역에서는 프런트 도어 이외의 부위에 소음 차단 처리를 한 경우와 하지 않은 경우가 차이를 보이나 500Hz 이상 영역에서는 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

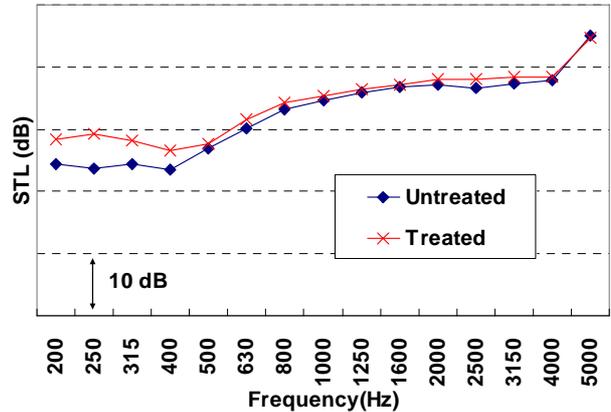


Fig.6 Comparison results of STL btw. untreated condition and treated condition

또한, 프런트 도어를 Fig.7 과 같이 glass(GLS), panel(PNL), upper weather strip(UWS), lower weather strip(LWS)의 4 개 영역으로 나누어 각각의 영역에 대하여 음향 인텐시티 시험을 수행함으로써 각 영역의 소음 차단 성능을 파악하고자 하였다. 시험 시 시험 영역을 제외한 나머지 영역을 동일하게 폴리우레탄 폼과 헤비레이어로 처리하여 타 영역으로부터의 소음 유입을 차단하였다. Fig.8 은 각 부위의 소음투과손실 시험 결과이다. 2kHz 이하 영역에서는 upper weather strip 이 낮은 소음투과손실을 보였으며, 2kHz 이상의 영역에서는 coincidence effect 에 의해서 glass 가 낮은 소음투과손실을 가짐을 알 수 있다. 이는 민감 부위의 소음투과손실을 개선함으로써 해당 주파수 영역에서 프런트 도어의 소음 차단 성능을 향상시킬 수 있음을 의미한다.

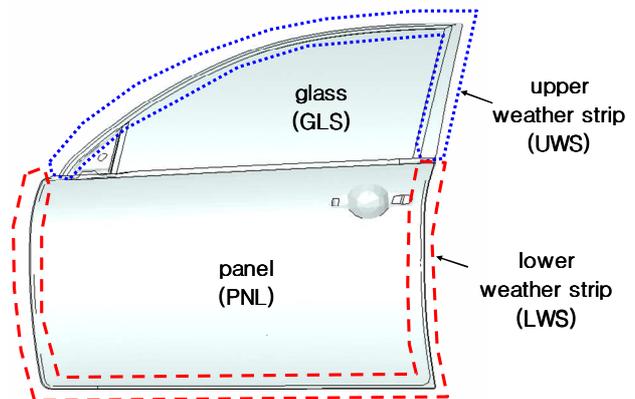


Fig.7 Parts in front door for TL test

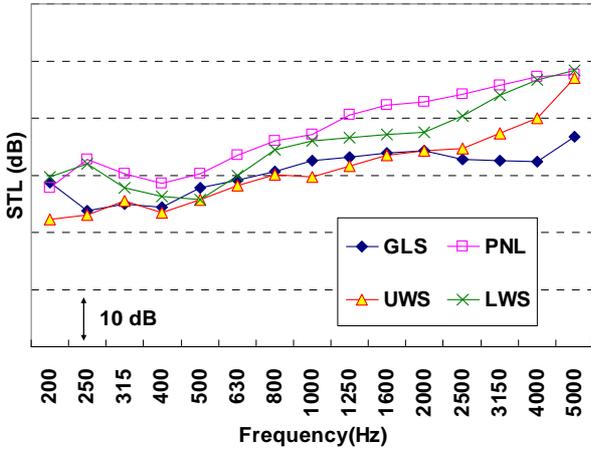


Fig.8 Sound transmission loss of each part in front door

3.2 소음투과손실 검증 시험

2 장에서 기술된 바와 같이 내부 주파수응답함수, 외부 주파수응답함수 그리고 전체 주파수응답함수를 이용하여 식(2)로부터 소음투과손실을 재구성할 수 있다.

먼저, 내부 주파수응답함수의 경우는 내부 판넬로부터 귀 위치까지의 전달함수를 의미하며, 시험 시 reciprocity theory 를 이용하여 Fig.2 와 같이 귀 위치에 volume acceleration source 를 배치하고 내부 판넬에 마이크론을 부착하여 전달함수를 구하였다. 마이크론은 도어 글라스에 4 개 그리고 판넬에 4 개로 총 8 채널을 이용하였다. 시험 시 소음원으로 부터의 직접음을 제외한 반사음을 차단하기 위하여 프런트 도어를 제외한 차량 내부에 50mm 이상의 폴리우레탄 폼을 배치하였다.

다음으로, 외부 주파수응답함수는 외부의 소음원 으로부터 외부 판넬까지의 전달함수를 의미하며, Fig.3 과 같이 외부에 volume acceleration source 를 배치하고 위의 경우와 동일하게 총 8 채널의 마이크론을 도어 외부에 부착하였다.

마지막으로 전체 주파수응답함수의 경우, 외부 소음원 으로부터 내부 귀 위치까지의 전달함수를 의미하며, 외부 주파수응답함수 시험 시와 동일하게 volume acceleration source 를 배치하고 내부 주파수응답함수 시험 시의 source 위치에 1 채널의 마이크론을 배치하여 그 전달함수를 구하였다.

시험을 통해 구한 내부, 외부 그리고 전체 주파수응답함수는 Fig.9 와 같다.

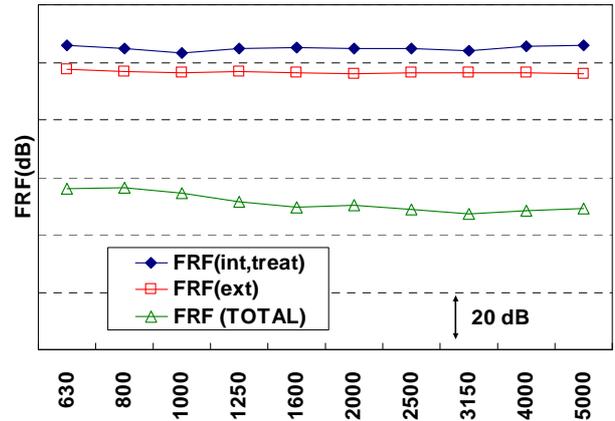


Fig.9 Internal, external and total frequency response function results of front door

In-situ 소음투과손실과 주파수응답함수를 이용하여 식(2)로부터 재구성한 소음투과손실 그리고 Fig.8 의 각 영역의 소음투과손실로부터 계산된 소음투과손실을 비교한 결과는 Fig.10 과 같다. 각각의 결과를 비교하면 넓은 주파수 영역에서 3dB 내에서 거의 유사한 결과를 보임을 알 수 있으며 이로부터 in-situ 소음투과손실 시험결과가 신뢰할 만한 수준임을 확인할 수 있다.

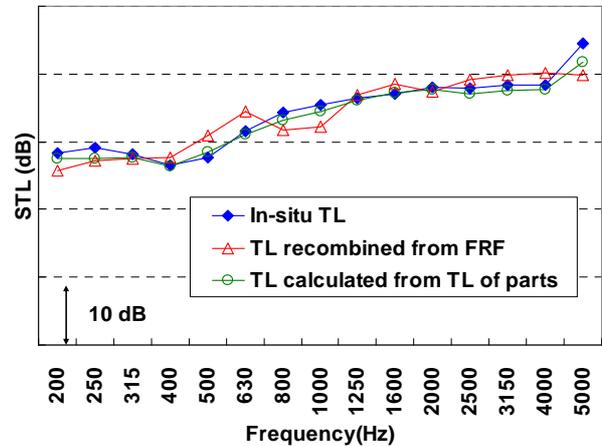


Fig.10 Comparison results of sound transmission loss

3.3 두 개의 잔향실법을 이용한 소음투과손실 시험

다음으로는 구조체의 소음투과손실 관련 국제 표준인 ASTM E90 에 따라서 두 개의 잔향실법을 이용하여 소음투과손실 시험을 수행하였다[3]. Fig.11 은 두 개의 잔향실 사이에 프런트 도어가 설치된 모습이다.

시험은 음원실을 스피커를 이용하여 랜덤 가진하고 음원실과 수음실 각각에 두 개의 마이크론을

배치하여 각 실의 소음 레벨을 측정하였다.

Fig.12 는 in-situ 방법과 두 개의 잔향실법으로 측정된 소음투과손실을 비교한 결과이다. 630Hz 이상의 영역에서는 3dB 내에서 두 방법이 유사한 결과를 보이지만, 그 이하의 저주파수 영역에서는 결과가 차이를 보임을 알 수 있다. in-situ 시험 방법의 경우, 잔향실로 이용되는 차 실내 공간의 체적이 충분하지 않으므로 저주파수 영역에서 충분한 잔향공간이 형성되지 않으므로 이로 인한 오차로 결과가 차이를 보이는 것으로 사료된다.



Fig. 11 Test setup of front door for two reverberant room method

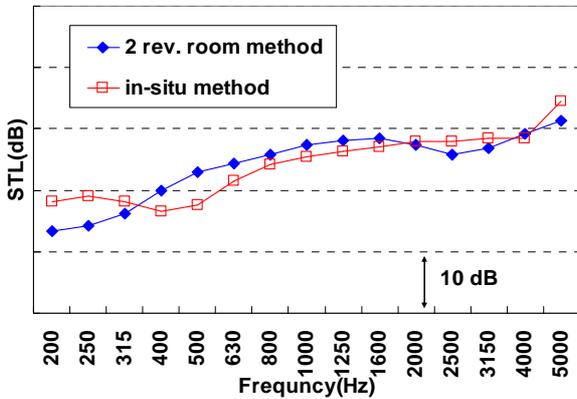


Fig.12 Comparison results of between two reverberant room method and in-situ method

4. 통계적 에너지 기법(SEA) 해석

다음으로는 지금까지의 시험적인 방법과는 달리 해석적인 방법을 이용하여 프런트 도어의 소음투과손실을 예측하고자 하였다. 해석적인 방법의 경우 차량 개발 초기 단계인 디자인 단계에서 차체 각 부위의 소음투과손실을 예측할 수 있으므로 선행적인 대책 마련이 가능하고 시험에 필요한 비용 및 시간을 줄일 수 있는 장점을 가진다.

본 논문에서는 소음투과손실 해석 결과를 시험 결과와 비교하여 해석 모델의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

이를 위하여 통계적인 에너지 기법[4]을 이용한 상용화된 해석 소프트웨어인 VA One 2007 의 AutoSEA 모듈을 이용하였다. 또한, 통계적 에너지 기법에서 중요한 인자인 각 판넬의 손실계수는 상용 소프트웨어인 SEA-XP 를 이용하여 구한 시험 결과를 이용하였다[5].

해석적인 방법의 경우, 3.3 절의 두 개의 잔향실을 이용하는 방법과 동일하게 해석 모델을 구성하였으며 Fig.13 과 같다. 음원실과 수음실은 “ acoustic cavity ” 로 모델링 하였으며, 음원실의 스피커는 “ user defined power ” 를 이용하였다. 도어 판넬의 경우, 내/외 차체 판넬 뿐만 아니라 내부의 트림까지도 “ plate ” 를 이용하여 상세 모델링 하였다. Weather strip 의 경우 가늘고 긴 “ plate ” 로 모델링하여 고무의 물성치를 입력하였다.

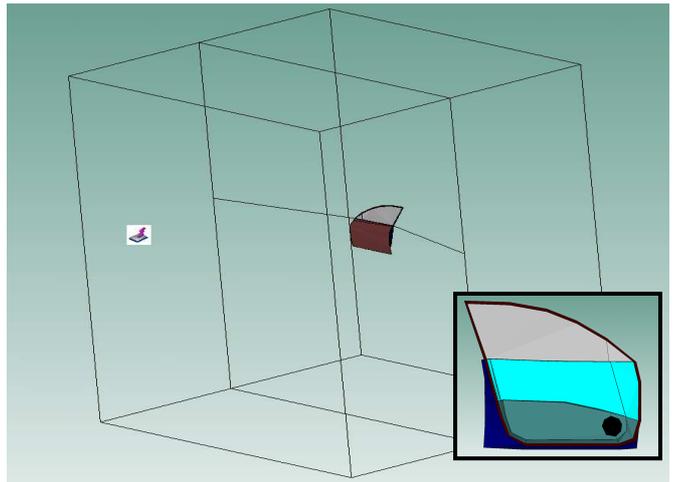


Fig.13 SEA model for TL analysis of front door

해석적인 방법을 이용해 구한 소음투과손실 결과를 시험적인 방법들로 구한 소음투과손실과 비교하였으며 이는 Fig.14 와 같다. 해석적인 방법의 경우, 두 개의 잔향실법으로부터 구한 시험결과와 3dB 내에서 거의 유사한 값을 가지며 in-situ 방법의 시험결과와는 500Hz 이하의 저주파수 영역을 제외한 나머지 영역에서 유사한 결과를 보였다.

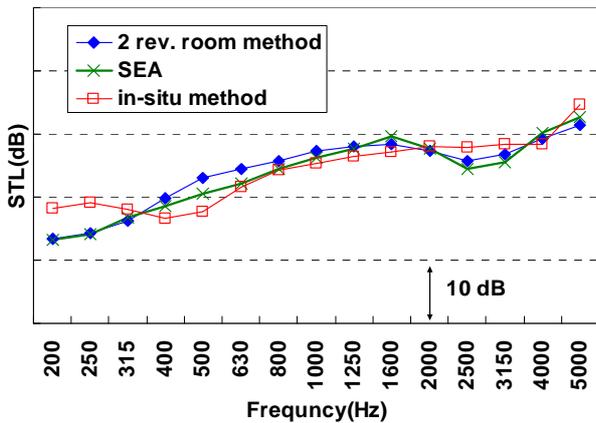


Fig.14 Comparison results of between CAE and test results

5. 결론

소음투과손실을 구하기 위한 시험방법들 중에서 시험 시간이나 비용 측면 유리한 in-situ 방법의 신뢰성을 검증하기 위한 새로운 기법을 제시하였으며, 이를 프런트 도어의 소음투과손실 시험에 적용하였다. In-situ 시험과 검증 시험의 결과를 비교함으로써 3dB 내에서 잘 일치함을 알 수 있었으며, 이로부터 in-situ 시험 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

다음으로는 in-situ 시험 결과를 두 개의 잔향실법으로 구한 소음투과손실과 비교하였으며, 630Hz 이상의 영역에서는 두 방법이 3dB 내에서 유사한 결과를 보임을 알 수 있었다. In-situ 방법의 경우, 음원실로 이용되는 차량 실내 공간이 저주파수 영역에서 충분한 잔향 공간이 되지 않으므로 이러한 결과가 나타난 것으로 사료된다.

마지막으로 통계적인 에너지 기법을 이용하여 프런트 도어의 해석 모델을 구성하였으며 이로부터 소음투과손실을 예측하였다. 해석과 시험 결과들과 비교하여 해석적인 기법이 두 개의 잔향실법의 시험결과와 3dB 내에서 일치함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Finn Jacobsen and Hans-Elias de Bree, "A comparison of two different sound intensity measurement principles", Acoustical Society of America, 2005, 118, pp. 1510-1517
- (2) ISO 9614-2 Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity - Part 2: Measurement by scanning (1996)
- (3) ASTM E90 Standard Test Method for Laboratory

Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements

- (4) Richard H. Lyon and Richard G. Dejong, "Theory and Application of Statistical Energy analysis", Butterworth-Heinemann, pp. 118-121
- (5) D. A. Bies and S. Hamid, "In Situ Determination of Loss and Coupling Loss Factors by the Power Injection Method", Journal of Sound and Vibration, 1980, 70(2), pp. 187-204