

다층 인슐레이션의 차음성능에 대한 실험적 연구

Experimental Research for Air-borne Noise Reduction of a Multi-layered Insulation

○고 강 호*, 김 영 호**, 국 형 석*
Kang-Ho Ko, Young-Ho Kim and Hyungseok Kook

ABSTRACT

This paper discusses an experimental method for measuring the insertion loss (IL) performance of multi-layered insulations that are used in vehicles. Instead of two adjacent reverberation chambers which are generally used to measure the transmission loss (TL) of the large sound isolation materials, air-borne sound insulation tester was utilized to determine the IL and articulation index (AI) of standardized insulation materials. In comparison to reverberation chamber method, air-borne sound insulation tester method is more space-saving, more time-saving and more simple to the automotive acoustics. From the empirical results, it is found that the performances of insulation materials are closely connected with density of polyurethane foam, thickness of heavy layer, thickness of polyurethane foam, and application ratio to panel area.

1. 서론

자동차 소음에 있어서 엔진 소음이나 타이어 소음등과 같이 직접 차실내에 투과하여 들어오는 소음을 공기전파소음(air-borne noise)이라 하여 구조기인소음(structure-borne noise)과 구분하여 부르고 있다. 이러한 공기전파소음은 구조기인소음에 비하여 비교적 높은 주파수 성분으로 이루어져 있기 때문에 사람의 귀에 거슬릴 뿐만 아니라, 차량 실내소음의 음질(sound quality)을 결정하는 중요한 요소가 된다. 따라서 차실내로 유입되는 공기전파소음을 저감시키기 위하여 각종 차음재나 흡음재가 사용되고 있다.

특히 차량에 있어서 중량 감소에 의한 연비효율

향상 및 주행성능 향상, 그리고 차음이나 흡음에 의한 차실내의 정숙성 향상 등이 동시에 요구되고 있다. 그러나 차량에 사용되는 흡/차음재의 중량과 소음저감 효과는 밀접한 연관성이 있으나, 차량의 중량 및 비용의 절감 측면에서는 서로 상충되는 요소가 된다. 따라서 제한된 비용과 중량 내에서 최대의 음향학적 효과를 얻기 위하여 차음과 흡음 성능의 최적화에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그리고 소재 차원에서 흡/차음재의 음향특성에 대한 이론적인 연구와 성능을 평가하기 위한 측정 기법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.^{(1),(2)}

이와 더불어 자동차에 적용되는 넓은 면적을 차지하는 복잡한 형태의 차음재나 대시 패널(dash panel), 도어, 유리창과 같은 차체 부품들(parts)의 공기전파소음에 대한 차음효과를 효과적으로 측정하고 규명하는 것 또한 자동차를 개발하는데 있어

* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

** 대우자동차 기술연구소

서 매우 중요한 분야가 되고 있다. 흡음재의 음향 특성을 평가하기 위한 효과적인 다양한 측정 방법이 알려져 있는 것과는 달리 차음재의 차음 특성을 효과적으로 평가하는 방법은 많지 않은 실정이다. 보통 잔향실법이 많이 이용되고 있는데,⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ 인접한 두 개의 잔향실 사이에 시편을 장착하여 차음 성능을 측정하므로 시험 준비에 상당한 노력이 요구되는 어려운 점이 있다. 따라서 자동차의 소음을 개선하는데 있어서 잔향실법과 비교하여 공간적인 측면과 비용적인 측면, 그리고 차량 음향학적인 측면에서 보다 적당한 방법을 찾기 위한 연구들이 진행되고 있다.^{(6),(7)}

따라서 본 연구에서는 차음성능 시험기(air-borne sound insulation tester)를 이용하여 일정 크기(0.8 m × 0.8 m)를 갖는 시편의 차음성능을 실험적으로 측정하였다. 차량의 차음재로 많이 사용되는 폴리우레탄 폼(polyurethane foam, PU foam)의 밀도와 두께, 그리고 헤비 레이어(heavy layer, HL)의 두께에 따른 삽입 손실을 측정하였다. 또한 차음재가 적용되는 면적의 비율에 따른 차음성능의 차이도 함께 측정하였으며, 차음재의 면밀도(area density)와 투과된 소음의 음질을 AI 를 사용하여 차음성능을 평가함으로써 차음효과를 수치화 하였다.

2. 차음 성능 시험

2.1 삽입 손실

차음재의 차음 성능은 투과손실(transmission loss, TL), 삽입손실(insertion loss, IL), 그리고 소음감소(noise reduction, NR) 등을 사용하여 나타낼 수 있다. 이 중 투과손실은 Fig. 1 에 나타나 있는 것과 같이 투과음의 세기(I_t)와 입사음의 세기(I_i)의 비로 나타낼 수 있으며, 다음 식으로 표현된다.

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{I_i}{I_t} \right) \quad (1)$$

투과손실을 측정하고자 하는 시편의 크기가 클 경우, 인접한 두 개의 잔향실 사이에 위치한 개구부에 차음재를 붙여서 두 잔향실 사이의 음압 수준 차이를 측정하여 다음식으로 구할 수 있다.

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A_2} \right) \quad (2)$$

여기서 L_1 과 L_2 는 각각 음원이 있는 잔향실(source room)과 음원이 없는 잔향실(receiving room)의 평균 음압 수준, S 는 차음재의 면적, A_2 는 음원이 없는 잔향실의 수음력(sound absorption)을 의미한다. 이 방법은 차음재 차체의 차음 성능을 정확하게 측정할 수 있지만, 시험 장비와 설비, 그리고 차음재의 크기와 장착과정과 같은 측정 준비 측면

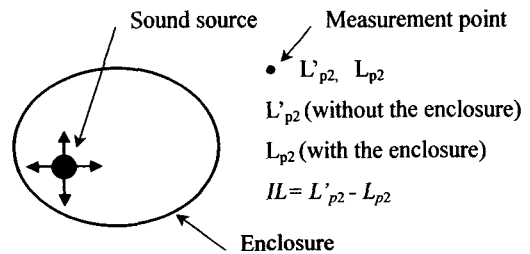
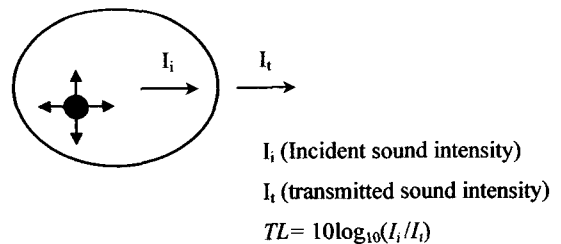


Fig. 1 Schematic illustration of the difference between TL and IL.

에서 단점이 있다.

반면에 삽입손실은 차음재의 부착효과를 직접 평가하는 실질적인 방법으로 차음재의 감음 성능을 나타내는데 일반적으로 사용된다. Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 삽입손실은 음원을 둘러싸고 있는 차음재와 같은 엔클로저(enclosure)가 있을 때의 음압 수준과 엔클로저가 없을 때의 음압 수준의 차이로써, 다음 식으로 표현된다.

$$IL = L'_{p2} - L_{p2} \quad (3)$$

여기서, L'_{p2} 는 차음재가 없을 때의 음압 수준이고, L_{p2} 는 차음재가 있을 때의 음압 수준을 나타낸다.

2.2 차음성능 측정기

이러한 삽입손실의 정의에 의하여 차음재의 차음성능을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 삽입손실 측정기를 사용하였다. 삽입손실 측정기는 크게 두 부분으로 이루어져 있는데, 아래 부분은 16개의 라우드 스피크 유닛으로 이루어진 음원에 의하여 소음(white noise)을 발생시키는 부분이고, 윗부분은 투과된 소음의 음압을 측정하는 곳으로써 음의 반사를 막기 위하여 웨지(wedge)가 부착된 무향실이다. 이 두 부분 사이에 일정한 크기(0.8 m × 0.8 m)의 차음재 시편이 장착되는데, 차음재가 장착되기 전후의 음압 수준을 측정하여 삽입손실을 측정할 수 있다. 이와 같이 삽입손실 측정기는 구조가 간단할 뿐만 아니라, 크기도 비교적 작기 때문에 효과적으로 차음성능을 측정할 수 있는 장점이 있다.

그러나 이 측정기는 수음실(reception chamber) 부분에 부착되어 있는 웨지의 크기에 제한이 있기 때문에 저주파 영역에서는 실험 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 저주파 영역에서의

정확도를 개선하기 위하여 Fig.3에 나타나 있는 것과 같이 차음성능 측정기의 수음실 대신 대형(12 m × 9 m × 5 m) 차량용 반무향실(semi-anechoic chamber)을 사용하였다. 이 차량용 반무향실의 차단 주파수(cut-off frequency)는 약 60 Hz 이므로, 삽입손실 측정기에 비하여 저주파수 영역에서의 정확도를 개선할 수 있는 이점이 있다. 이때 소음의 측정 위치는 차음재로부터 1 m 떨어진 지점으로 선정하였고, 측정 위치에 따른 음압의 차이를 보정하기 위하여 4 곳에서 측정한 음압을 평균하여 사용하였다.

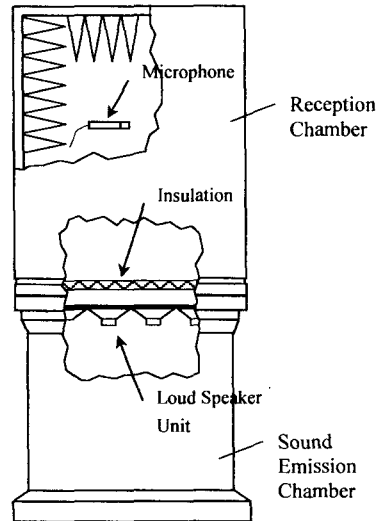


Fig. 2 Diagram of an air-borne sound insulation tester.

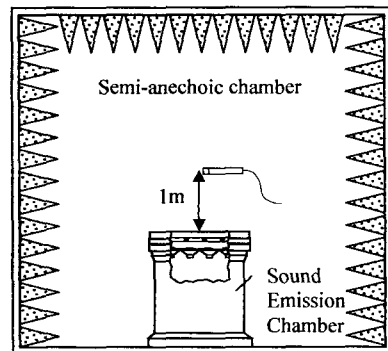


Fig. 3 Diagram of test setup in anechoic chamber.

3. 차음성능의 측정 결과

Table 1에 나타나 있는 15개의 차음재 시편에 대한 삽입손실을 1/3 옥타브 밴드별로 각각 측정하였다. 또한 투과음에 대한 AI(articulation index)를 측정함으로써 각 차음재의 차음 특성을 음질과 면밀도를 사용하여 정량화 하였다. 이를 이용하여 폴리우레탄 폼의 밀도와 두께, 그리고 헤비 레이어의 두께에 따른 차음특성을 각각 분석하였다. 또한 폴리우레탄 폼의 종류에 따른 차음특성을 분석하였고, 차음재가 적용되는 면적의 비율에 따른 차음효과도 분석하였다.

Table 1. Mechanical properties and dimensions of 15 test samples.

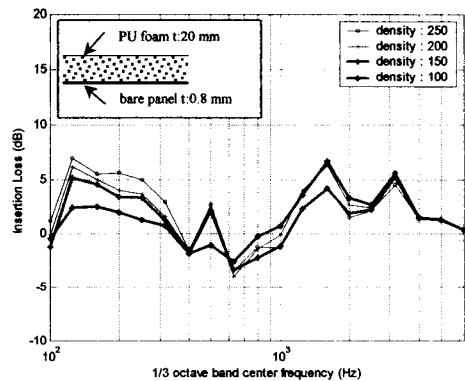
No.	Foam Type	Foam Density (kg/m ³)	HL Thickness (mm)	Foam Thickness (mm)
#1	PU foam	250	-	20
#2	↑	200	-	↑
#3	↑	150	-	↑
#4	↑	100	-	↑
#5	↑	↑	1	↑
#6	↑	↑	2	↑
#7	↑	↑	3	↑
#8	↑	↑	4	↑
#9	↑	↑	2	15
#10	↑	↑	↑	10
#11	D/foam	100	↑	20
#12	PU foam	200	↑	↑
#13 ⁽¹⁾	↑	100	↑	↑
#14 ⁽²⁾	↑	↑	↑	↑
#15 ⁽³⁾	↑	↑	↑	↑

주) Application ratio : (1) 75 %, (2) 50 %, (3) 25 %

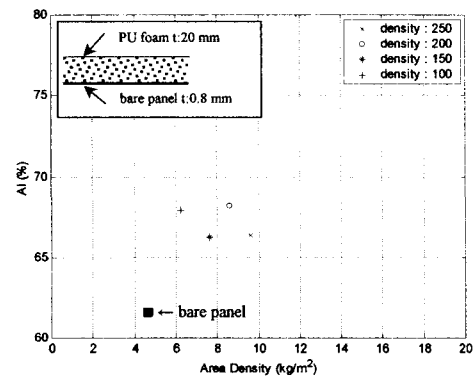
3.1 PU 폼의 밀도에 따른 차음성능

Fig. 4에 나타나 있는 것과 같이 0.8 mm 두께의 철판에 부착되어 있는 폴리우레탄 폼의 밀도를 100 kg/m³에서 250 kg/m³까지 변화시켰을 때의 삽입손실과 AI 값을 측정하였다. 1/3 옥타브 밴드의 중

심 주파수가 400 Hz 아래의 영역에서는 밀도가 높을수록 차음효과가 좋게 나타났으며, 중심 주파수가 630 Hz 이상의 영역에서는 상반된 결과가 나타났다. 저주파 영역과 고주파 영역에서의 차음성능이 서로 역전됨에 따라 전구간에서의 AI 값은 밀도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 폴리우레탄 폼을 차음재로 적용할 경우 패널만 있는 경우에 비하여 약 5% 이상의 AI 값을 상승시킬 수 있음을 볼 수 있다. 따라서 차음성능과 중량을 고려해 볼 때 밀도가 200 kg/m³인 폴리우레탄 폼의 특성이 가장 좋은 것으로 판단할 수 있다.



(a) Insertion loss

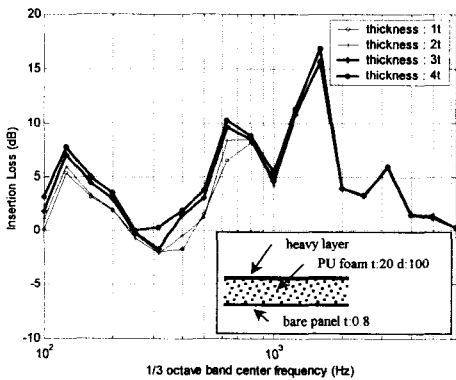


(b) Articulation index

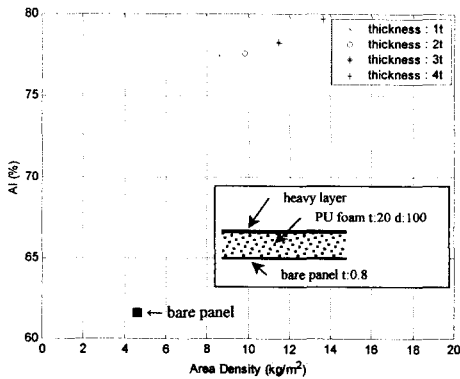
Fig. 4 Comparison of insulation performances related to PU form density.

3.2 HL의 두께에 따른 차음성능

Fig. 5는 폴리우레탄 폼의 위에 부착되는 헤비 레이어의 각각의 두께에 따른 차음성능을 보여주고 있다. 헤비 레이어의 두께를 1 mm 부터 4 mm 까지 변화시켰을 때, 전체 관심주파수 영역에서 헤비 레이어의 두께가 두꺼울수록 삽입손실과 AI 값 모두가 크게 나타나지만 현저한 차이는 나타나지 않음을 볼 수 있다. 그러나 헤비 레이어가 적용되면 헤비 레이어가 적용되지 않았을 때에 비하여 AI 값이 약 15 % 이상 크게 상승됨을 볼 수 있는데, 이것으로 보아 헤비 레이어가 차음효과에 상당한 기여를 하고 있음을 알 수 있다.



(a) Insertion loss

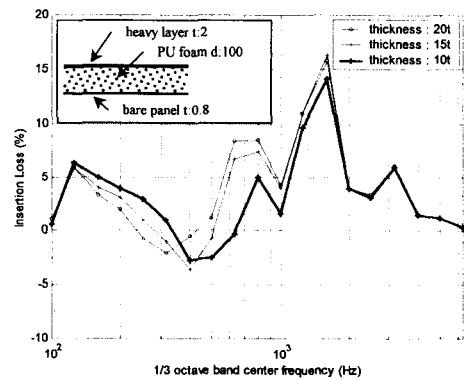


(b) Articulation index

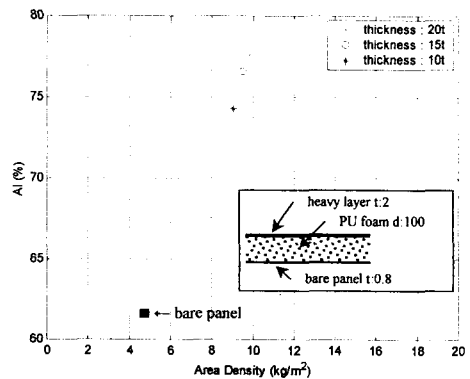
Fig. 5 Comparison of insulation performances related to heavy layer thickness.

3.3 PU 폼의 두께에 따른 차음성능

Fig. 6은 폴리우레탄 폼의 두께에 따른 차음성능을 나타내고 있다. 1/3 옥타브 밴드의 중심 주파수가 400 Hz 아래의 영역에서는 폼의 두께가 얇을수록 삽입손실이 크게 나타나고 있으나, 그 차이는 크지 않은 편이다. 그러나 중심 주파수가 400 Hz 이상의 영역에서는 폼의 두께가 두꺼울수록 삽입손실이 크게 나타나고 있으며, 또한 그 차이가 상당히 크게 나타나고 있다. 그리고 전체적인 AI 값은 폴리우레탄 폼의 두께가 두꺼울수록 큰 값을 나타내고 있으므로, 두께를 증가시키므로써 전체 중량의 큰 증가 없이 차음성능을 효과적으로 높일 수 있음을 알 수 있다.



(a) Insertion loss

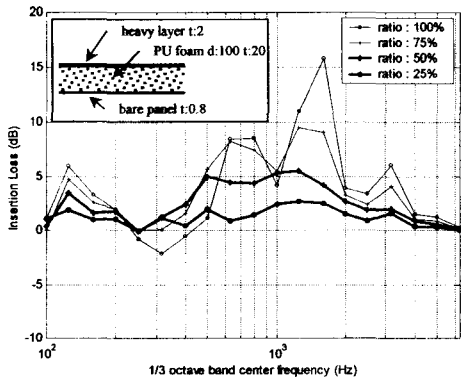


(b) Articulation index

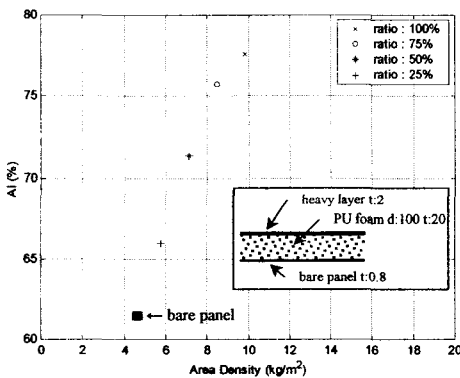
Fig. 6 Comparison of insulation performances related to thickness of PU foam.

3.4 차음재의 면적비에 따른 차음성능

Fig. 7 은 차음재가 패널에 적용되는 면적비에 따른 차음성능을 나타내고 있다. 차음재가 적용되는 면적이 클수록 전체 주파수 영역에서 삽입손실이 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그리고 AI 값을 비교하여 볼 때, 차음재의 적용비율이 25% 증가함에 따라 AI 값이 약 5% 정도 상승할 만큼 차음특성이 현저하게 변하는 것을 볼 수 있다. 따라서 좋은 차음효과를 얻기 위해서는 차음하고자 하는 전체 부위에 차음재를 적용하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다.



(a) Insertion loss

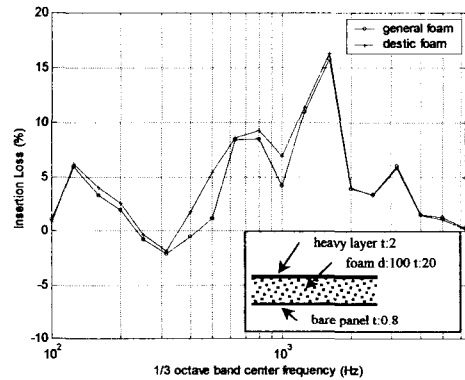


(b) Articulation index

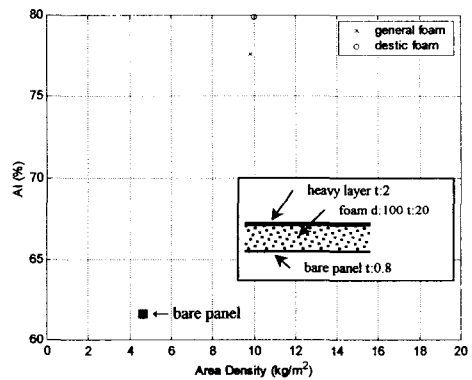
Fig. 7 Comparison of insulation performances related to application ratio of insulation to panel area.

3.5 차음재의 종류에 따른 차음성능

Fig. 8 은 차음재의 폼의 종류에 따른 차음효과를 보여주고 있다. 일반 폴리우레탄 폼에 비하여 데스틱 폼(destic foam)이 300 Hz ~ 1.6 kHz 영역에서 차음성능이 좀더 좋게 나타나고 있다. 또한 AI 값을 비교해볼 때 데스틱 폼이 Table 1 에 나타나 있는 15 개의 전체 시편 중 가장 큰 값을 가질 뿐만 아니라, 일반 폴리우레탄 폼과 동일한 밀도를 가지기 때문에 중량 측면에서 비교하였을 때 차이가 없음을 알 수 있다



(a) Insertion loss



(b) Articulation index

Fig. 8 Comparison of insulation performances related to types of PU foam.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 가지 차음재의 삽입손실을 측정함으로써 각 차음재의 차음성능을 비교하였다. 또한 소음의 음질을 평가하는데 사용되는 AI 가 차음재의 특성을 정량화 하는데 이용될 수 있음을 확인하였다. 잔향실을 이용하여 투과손실을 구하는 방법 대신에 차음성능 시험기를 이용하여 삽입손실을 측정함으로써 차량에 적용되고 있는 차음재의 특성을 효과적으로 구하였다.

페닐과 폴리우레탄 폼, 그리고 헤비 레이어로 구성된 차음재 시편의 차음특성을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 폴리우레탄 폼의 밀도는 차음해야 할 소음의 주파수 성분을 고려하여 선정되어야 한다.
- 2) 헤비 레이어에 의한 차음효과는 매우 크게 나타나며, 전체 중량을 고려하여 헤비 레이어의 두께가 선정되어야 한다.
- 3) 폴리우레탄 폼은 두께가 두꺼울수록 차음효과가 크게 나타나고, 폼의 두께에 의한 중량상승 효과가 비교적 작게 나타난다.
- 4) 차음재가 적용되는 면적의 비율은 차음효과에 크게 영향을 미치므로 가능한 전체 면적에 차음재를 적용하여야 한다.

참고 문헌

- (1) T. M. Kawenski, 1993, "Measurement of airborne noise reduction of production door components on a buck", SAE Paper 931269.
- (2) S. R. Sorenson, 1995, "Investigation of different techniques for quantifying automotive panel noise radiation", SAE Paper 951267
- (3) ISO standard 140-3 : 1995, Acoustics - Measurement of sound insulation building and building elements- Part 3 : Laboratory measurement of airborne sound insulation of building elements.
- (4) ASTM E90-96, 1996, "Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements", ASTM, Philadelphia, PA 19428.
- (5) SAE J1400, "Laboratory measurement of the airborne sound barrier performance of automotive materials and assemblies".
- (6) A. Chappuis, 1991, "A method for measuring the sound-insulation effect of large-area flat and molded parts", Unikeller Conference.
- (7) A. Chappuis, 1993, "Small size devices for accurate acoustical measurements of materials and parts used in automobiles", SAE Paper 931266.
- (8) M. P. Norton, 1989, Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers, Cambridge University Press.