

습식 철도차량 바닥구조의 차음성능 연구

이근희*, 조태승*, 정인호*, 이용주**

A study on the transmission loss of floor part in the train

K.H. Lee*, T.S.Cho*, I.H.Jung*, Y.J.Lee**

1. 서론

근래에 들어 철도는 대중의 중요한 교통수단으로 대두되고 있으며 대도시 주변의 신도시 개발과 이로 인한 인구분산에 힘입어 도시간 여객수송 수단으로서의 가치는 점차 높아가고 있다. 이와 함께 인간이 철도차량에서 느끼는 음향문제는 많은 사람들의 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 점을 고려하여 본 자료는 철도차량의 차음문제를 관심있게 살펴보고자 하며 특히, 바닥구조에 대한 차음성능을 집중적으로 살펴보고자 한다.

그러나 철도차량은 종류가 다양하고 운행조건 등과 관련하여 차음성능의 요구수준이 다를 수 있으므로 여기서는 서울시 지하철에 적용을 검토하고 있는 몇 가지 구조에 한하여 그 성능을 측정하고 평가하는 것에 제한하였다. 차음성능은 공기전파음에 대한 차음성능과 바닥충격음에 대한 차음성능을 검토하였다. 차음성능의 측정 결과는 시편간 비교 평가에 국한하며 차량구조 전체로서의 차음효과는 본 연구의 범위를 벗어나므로 언급하지 않는다. 참고로 조사한 바에 의하면 서울시 지하철의 7호선¹⁾의 경우 하부 및 객실 내부의 소음은 각각 108~110 dBA 및 84~85 dBA로 평가되고 있으며 이를 새로운 구조물로 대체하는 경우의 효과는 총합투과손실로 평가한다.

2. 차음성능의 측정 및 평가방법

2-1. 차음성능 측정 및 평가방법

벽체의 차음성능 측정은 국제기준인 ISO 140/3을 비롯하여 미국의 ASTM E 90, 일본의 JIS A1416이 있으며 우리나라는 KS F 2808에 측정방법이 명시되어 있다. 본 시험은 KS 규격에 근거하여 시험하였으며 실험실의 체적은 70m³ 정도였다. 실험실에서의 차음성능 측정방법은 음원실과 수음실의 음압레벨차 및 흡음력 보정에 의하여 구하였으며 시편의 크기는 1.5m x 1.5m로 하였다.

측정 주파수대역은 ISO 및 DIN 규정에 의하면 100Hz-3150Hz까지 1/3 Octave band로 측정하게 되어 있고, KS F 2808 및 ASTM 규격에는 125 Hz-4000Hz까지 1/3 Octave band를 측정하도록 되어 있으나, 본 실험에서는 100Hz-5000Hz까지 1/3 Octave band로 측정하였다.

측정장치는 Norsonic사의 RT 840 analyzer를 사용하였으며 이 경우 투과손실은 다음 식으로 계산된다.

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \text{Log}_{10}(S/A) \text{ (dB)}$$

여기서 TL : 음향투과손실(dB), L_1 : 음원실의 평균음압레벨 (dB), L_2 : 수음실의 평균음압레벨 (dB), S : 시편의 면적 (m²), A : 수음실의 흡음력 (m²) 이다.

차음성능의 평가는 각 나라마다 제각각의 평가기

* KCC 중앙연구소 음향연구실

** 한진중공업(주) 기술연구소

준을 정하여 두고 있는데 대표적인 평가기준으로 미국(ASTM)의 STC 곡선을 들 수 있다. 이는 ISO 및 DIN의 평가방법과 유사하나 평가 주파수가 ISO에서 100-3150Hz를 사용하는 반면에 ASTM에서는 125-4000Hz를 사용하고 있다. 그러나 적용기준의 경우 주택이나 건물에 대한 종류 및 용도별로 기준이 마련되어 있으나 본 자료가 철도차량에 대한 것으로 큰 연관이 없어 생략한다.

결국 본 자료는 철도차량의 외부소음에 대한 실내음 레벨의 감소라는 목적하에 바닥, 벽, 지붕 등의 구조를 가정하여 총합투과손실 개념으로 평가하는데 이용될 수 있으며 바닥구조 만의 자료는 서로를 비교평가하는 정도에서 마감한다.

2-2. 바닥충격음 특성의 측정 및 평가방법

바닥충격음이란 구조물 상부(윗층의 바닥)에 가해진 충격이 구조물을 통해 충격력의 형태로 전파한 다음 아래층의 천정이나 벽에서 방사되는 음을 말하는 것으로 이 바닥충격음에 대한 차단 성능은 상층에서 표준충격원을 사용하여 가진하고 아래층 실내에서 음압레벨을 측정하는 것으로 평가한다. 세계적으로 사용되는 표준충격원은 Tapping Machine으로서 ISO를 비롯하여 유럽과 미국, 일본 등에서 사용하고 있으며 우리나라에서도 이것을 경량충격원으로 택하고 있다. 여기에 추가하여 우리나라와 일본에서는 경자동차용 타이어를 충격원으로 사용하고 있는데 이를 경량충격원에 상대하여 중량충격원이라 한다.

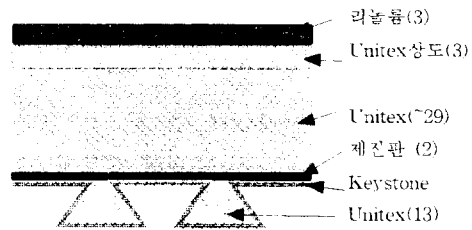
시험은 1.8m x 2.0m x 1.5m의 시험상자를 통하여 실시하였으며 시험은 차음시험에 이용한 시험편(크기: 1.5m x 1.5m)를 그대로 사용하였다.

본 시험의 평가는 차음의 경우에서와 같이 시험종류별 성능의 비교평가에 제한하며 평가척도는 STC 및 L-등급으로 표시하였다. 기본적으로는 ASTM의 IIC 등급으로 표시하였으나 중량충격음의 경우 일본과 우리나라에서만 사용하는 관계로 L-등급을 부가한 것이다.

3. 시험의 내용 및 방법

3-1. 시험대상 구조

시험대상의 구조는 지하철 철도차량에 적용을 검토하고 있는 구조로서 S 회사의 습식몰탈 제품을 구조로 삼았다. 시험체의 구조 단면은 다음의 <그림 3-1>과 같다.



<그림 3-1> 시험체의 구조 단면 개요

그리고 시험체의 구조별 비교표는 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 시험체 구조 비교

| 구분 | 구조개요 | 비고 |
|-----------------|--|-------|
| 구조I 35(+3) | K. plate-U-tex(13) -U-tex(19) -U-tex상도(3) -리놀륨(3) | 1차 제안 |
| 구조II 47(+3) | K. plate-U-tex(13) -U-tex(31) -U-tex상도(3) +리놀륨(3) | 기존습식 |
| 구조III 47(+3) | K.plate-U-tex(13) +G/W제진판(2) -U-tex(29) -U-tex상도(3) -리놀륨(3) | G/W제진 |
| 구조IV 47(+3) | K. plate-U-tex(13) -고무제진판(2) -U-tex(29) -U-tex상도(3) -리놀륨(3) | 고무(下) |
| 구조V 47(+3) | K. plate-U-tex(13) - U-tex(29) -고무제진판(2) -U-tex상도(3) -리놀륨(3) | 고무(上) |

구조체별 특징은 1차 제안구조가 두께 35mm의 습식 제품인데 비하여 나머지 구조는 47mm로 두께를 증가시킨 것이며 구조 II는 단순한 두께 증가인데 비하여 구조 III, IV, V는 제진층을 삽입하고 제진층의 종류를 다르게 적용한 구조의 시험이다. 제진재를 적용한 구조 III, IV, V는 그 종류와 적용방법에 다소 차이가 있는데, 구조 III은 유리면에 합성고무가루를 도포하여 압착한 것이고, 구조 IV와 V는 제진재로 합성고무판을 U-tex의 아래쪽과 위쪽에 각각 적용한 경우이다.

3-2. 시험방법 및 평가계획

연구대상의 시편 5종에 대한 차음성능 시험은 실험실에서의 차음성능 측정방법에 준하여 실시하였으며 시편의 크기는 1.5m x 1.5m로 하였다.

구조별 차음성능은 차음시험의 경우 1/3옥타브 밴드 분석치를 서로 비교하는 것으로 하였으며 단일 평가지수로는 STC 값을 주로 이용한다. 그리고 바닥충격음의 경우 ASTM에 근거하여 IIC 값으로 비교하였으나 중량충격음의 경우 일본과 우리나라만이 채택하고 있어 일본의 L-등급에 의한 평가를 함께 기록하였다.

그리고 성능은 적용기준에 의한 평가는 실시하지 않고 구조별 성능을 서로 비교하여 얼마 만큼의 성능이 개선되는지만 나타냈다.

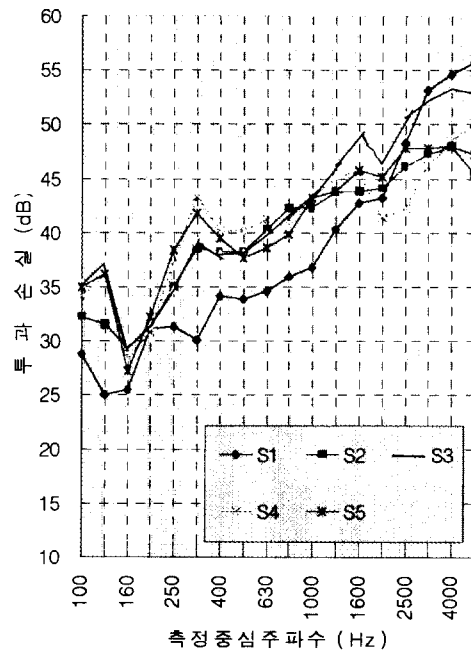
4. 시험결과 및 분석

4-1. 차음시험결과

앞서 설명한 철도차량 바닥구조에 대한 차음시험은 S사에서 제작한 Sample에 대하여 성능을 측정하였으며 그 결과는 다음의 <표 4-1> 및 <그림 4-1>과 같다.

<표 4-1> 철도차량 바닥구조 차음성능 결과

| 주파수 [Hz] | 투 과 손 실 (dB) | | | | |
|------------------|----------------|-------|--------|-------|------|
| | 구조 I | 구조 II | 구조 III | 구조 IV | 구조 V |
| 100 | 28.8 | 32.2 | 35.2 | 34.2 | 35.0 |
| 125 | 25.1 | 31.6 | 37.4 | 36.2 | 36.2 |
| 160 | 25.5 | 29.4 | 29.5 | 28.4 | 27.2 |
| 200 | 31.1 | 31.3 | 31.4 | 30.9 | 32.2 |
| 250 | 31.3 | 35.0 | 34.7 | 37.2 | 38.4 |
| 315 | 30.2 | 38.6 | 39.1 | 43.4 | 41.8 |
| 400 | 34.2 | 38.3 | 38.0 | 40.2 | 39.5 |
| 500 | 33.9 | 38.3 | 38.1 | 40.2 | 37.7 |
| 630 | 34.6 | 40.4 | 39.8 | 41.3 | 38.6 |
| 800 | 36.0 | 42.3 | 41.3 | 41.3 | 39.9 |
| 1000 | 36.8 | 42.4 | 43.2 | 43.3 | 43.3 |
| 1250 | 40.3 | 43.7 | 46.7 | 45.2 | 43.9 |
| 1600 | 42.8 | 43.9 | 48.9 | 45.7 | 45.8 |
| 2000 | 43.2 | 44.1 | 46.5 | 41.4 | 45.2 |
| 2500 | 48.4 | 46.2 | 50.8 | 42.3 | 47.9 |
| 3150 | 53.2 | 47.2 | 52.2 | 46.2 | 47.9 |
| 4000 | 54.6 | 48.0 | 53.4 | 48.6 | 48.0 |
| 5000 | 55.8 | 45.5 | 53.0 | 50.2 | 47.2 |
| 평균 (125-4000) | 37.6 | 40.0 | 41.9 | 40.7 | 40.8 |
| STC | 38 | 42 | 43 | 43 | 43 |



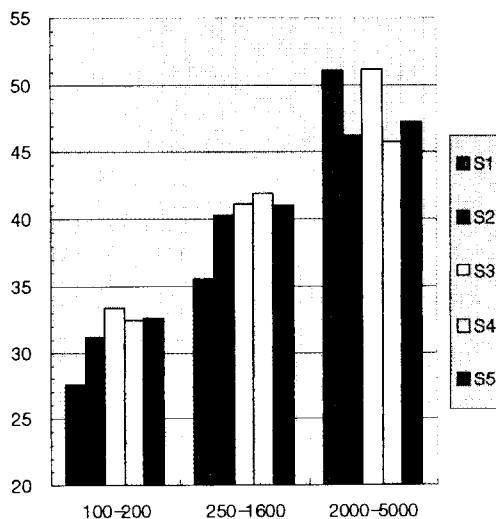
<그림 4-1> 바닥구조 차음성능 측정 결과

4-1-1. 시편 두께 및 제진층 삽입 유무에 의한 차음성능 변화

시편 두께를 35mm에서 47mm로 증가하는 경우 차음량 증가는 아래의 <표 4-2>에서 보는 바와 같이 약 4dB 정도가 된다. 그러나 이를 몇 개의 주파수 대역별로 나누어 살펴보면 2000Hz 이상의 고주파 음역에 있어서는 차음성능이 4-5dB 정도 감소하는 것을 볼 수 있다. 제진층을 삽입하는 경우에도 고음역에서의 차음성능은 거의 개선되지 않고 있으며 유리면 제진재의 경우만 개선효과를 나타낸다.

<표4-2> 두께증가 및 제진층삽입시 차음개선

| 주파수 (Hz) | 투과손실 (dB) | | | | |
|---------------|-----------|------|------|------|------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| 100-200 | 27.6 | 31.1 | 33.4 | 32.4 | 32.7 |
| 250-1600 | 35.6 | 40.3 | 41.1 | 42.0 | 41.0 |
| 2000-5000 | 51.0 | 46.2 | 51.2 | 45.7 | 47.2 |
| 평균 (100-5000) | 38.1 | 39.9 | 42.2 | 40.9 | 40.9 |
| STC | 38 | 42 | 43 | 43 | 43 |



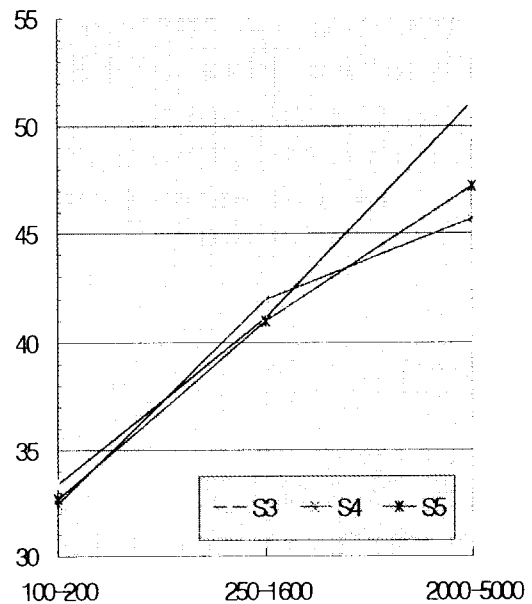
<그림 4-2> 두께증가, 제진층 적용시 차음성능

<그림 4-2>는 저음역, 중음역, 고음역에 대한 차음성능의 변화를 비교한 그림으로서 저음역과 중음역의 변화량이 두께 증가시 차음성능의 개선을 나타낸 반면 고음역의 경우는 또 다른 복잡한 형태임을 볼 수 있다.

4-1-2. 제진재 종류에 의한 차음성능변화

제진재의 종류별 차음효과는 <그림 4-3>에 나타냈는데, 여기서 보면 유리면 제진재는 고음역 차음에, 그리고 합성고무판은 중음역 차음에 효과적임을 알 수 있다. 그리고 고무판을 U-tex 상부와 하부에 적용하는 경우를 비교하면 상부에 적용하는 것은 고음역 차음에 그리고 하부에 적용하는 것은 중음역 차음에 효과적이라 할 수 있다.

그러나 제진층의 의한 차음개선 정도는 저음역 중음역의 걸쳐 1-2dB 수준으로 큰 차이가 없으며 고음역 차음에 있어서 유리면 제진재가 다소 우위를 나타내고 있다고 볼 수 있다.



<그림 4-3> 제진층 종류에 따른 차음량 비교

4-1-3. 차량 바닥구조 차음개선 검토

철도차량 바닥구조의 차음성능은 35mm구조의 경우 STC 38에서 47mm로 두께를 높이는 경우 차음량이 STC 42이상으로 개선된다. Keystone plate 상부에 제진층(2mm)을 삽입하는 경우 1-2dB 정도의 추가 개선을 기대할 수 있다. 제진재 종류에 대하여는 더 많은 시편에 대한 검토가 있어야 되겠지만 유리면 제진재가 다소 유리하다고 할 수 있다.

추가 개선 사항으로는 제진층의 두께를 늘리는 경우와 U-tex의 비중 등을 바꾸는 방안도 생각해 볼 만하다.

4-2. 바닥충격음시험결과

철도차량 습식 바닥구조의 충격음 차단성능은 차음시험을 진행한 동일 시편을 사용하여 측정하였으며 시험결과는 아래의 <표 4-3> 과 같다.

<표 4-3> 철도차량 바닥충격음 시험결과

| 구 분 | | 바닥 충격음 레벨 (dB) | | | | |
|-----|-------|----------------|-------|--------|-------|------|
| | | 구조 I | 구조 II | 구조 III | 구조 IV | 구조 V |
| 경 량 | 평균 | 72.0 | 70.4 | 65.7 | 66.2 | 62.9 |
| | I I C | 28 | 31 | 40 | 37 | 41 |
| | L-등급 | 86 | 83 | 79 | 79 | 79 |
| 중 량 | 평균 | 47.8 | 47.5 | 40.0 | 48.7 | 46.2 |
| | I I C | 58 | 58 | 63 | 57 | 59 |
| | L-등급 | 57 | 59 | 53 | 60 | 59 |

4-2-1. 경량충격음 특성경향 비교

경량충격음 특성과 관련하여 구조체별 특성을 비교하여 보면 구조의 두께가 증가하면서 충격음에 대한 차단성능이 개선되는 것은 물론이고 이 보다는 제진재의 적용 유무 및 종류에 따라 많은

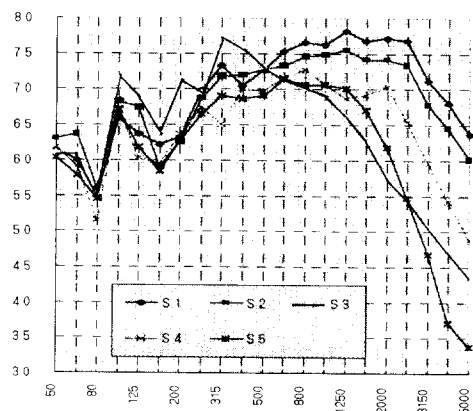
차이를 보이고 있다.

L-등급으로 볼 때 단순히 두께를 35mm에서 47mm로 하는 경우 약 3dB 개선되는 뿐만 아니라 제진재의 적용시 7 dB가 개선된다.

그러나 IIC 곡선에 의한 평가를 보면 제진재 종류에 따라 9 ~ 13dB 까지 개선됨을 볼 수 있다. 이는 제진재 종류에 따라 충격음 차단성능의 개선이 이루어지는 주파수 대역이 서로 다른 것을 의미하며 성능기준 적용시 어떤 평가곡선을 택하느냐 하는 것도 중요한 문제가 될 수 있다는 것을 보여준다.

<표 4-4> 바닥충격음 시험결과(경량)

| 주파수 [Hz] | 바닥 충격음 레벨 (dB) | | | | |
|----------|----------------|-------|--------|-------|------|
| | 구조 I | 구조 II | 구조 III | 구조 IV | 구조 V |
| 63 | 64.4 | 66.7 | 64.6 | 64.0 | 63.0 |
| 125 | 69.0 | 71.2 | 73.9 | 68.6 | 68.7 |
| 250 | 75.2 | 73.9 | 79.1 | 70.5 | 71.6 |
| 500 | 78.0 | 77.5 | 78.9 | 75.4 | 74.7 |
| 1000 | 81.9 | 79.8 | 73.6 | 75.8 | 75.2 |
| 2000 | 81.7 | 78.7 | 64.4 | 73.6 | 68.4 |
| 4000 | 73.4 | 70.0 | 52.7 | 61.0 | 47.4 |
| 평균 | 72.0 | 70.4 | 65.7 | 66.2 | 62.9 |
| I I C | 28 | 31 | 40 | 37 | 41 |
| L-등급 | 86 | 83 | 79 | 79 | 79 |



<그림 4-4> 경량충격음 차단성능비교

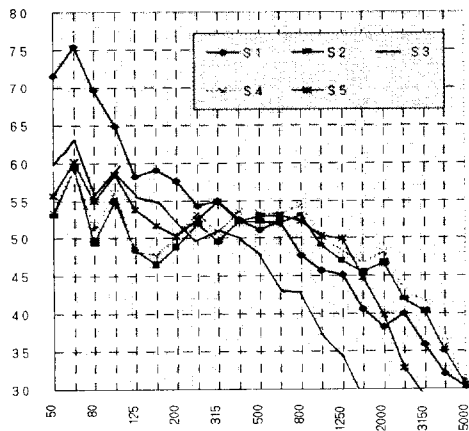
4-2-2. 중량충격음에 대한 차단성능 비교

중량충격음에 대한 차단성능은 두께 증가시에도

그리고 제진재 적용유무에 의해서도 큰 차이를 보이지 않고 있으며 유리면 제진재 적용시 만이 약간의 개선 효과를 보이고 있다. 그리고 두께 증가시 L-등급상으로는 차음성능이 오히려 떨어지며 고무제진판 적용시에도 감소하는 점은 유의할 필요가 있다.

<표 4-5> 바닥충격을 시험결과(중량)

| 주파수 [Hz] | 바닥충격음 레벨 (dB) | | | | |
|----------|---------------|-------|--------|-------|------|
| | 구조 I | 구조 II | 구조 III | 구조 IV | 구조 V |
| 63 | 77.7 | 60.6 | 65.3 | 60.9 | 62.4 |
| 125 | 66.6 | 56.3 | 61.7 | 57.2 | 60.4 |
| 250 | 60.6 | 55.1 | 55.7 | 56.4 | 57.7 |
| 500 | 56.7 | 56.9 | 52.7 | 58.1 | 57.5 |
| 1000 | 51.1 | 55.2 | 44.4 | 56.5 | 46.2 |
| 2000 | 44.4 | 49.9 | 30.3 | 51.2 | 46.2 |
| 4000 | 38.1 | 41.7 | 27.9 | 42.9 | 29.6 |
| 평균 | 47.8 | 47.5 | 40.0 | 48.7 | 46.2 |
| I I C | 58 | 58 | 63 | 57 | 59 |
| L-등급 | 57 | 59 | 53 | 60 | 59 |



<그림 4-5> 중량충격음 차단성능비교

그러나 이러한 것은 구조의 두께나 제진재의 종류 보다는 시편 제작상의 문제와도 상당부분 결부되는 것으로 판단되어 검토를 요한다.

5. 결론

지금까지 살펴본 바의 내용에 의하면 철도차량 습식 바닥구조의 차음성능은 기존의 35mm를 47mm로 하는 경우 약 4dB 정도의 차음개선 효과를 기대할 수 있으며, 제진층을 추가로 도입하는 경우 1~2dB의 추가적인 차음개선을 기대할 수 있다고 결론된다.

바닥충격음에 대한 차단성능은 경량충격음의 경우 두께 증가 및 제진층 적용에 의하여 각각 3dB 및 7dB의 차음개선이 예상된다. 그러나 중량충격음의 경우에는 차음개선 효과가 거의 없으며 오히려 감소하는 경우도 있으므로 보다 구체적인 검토 연구의 필요성이 있다.

이상의 결과를 가지고 종합적인 견지에서 습식구조체의 두께 증가 및 제진재 적용에 의한 효과를 결론지어 보면 대체로 다음과 같다.

첫째, 구조체의 두께 증가에 의하여 공기전파음 및 경량 바닥충격음에 대한 차음성능이 각각 4dB 및 3dB 정도 개선되며 중량 바닥충격음에 대한 차단성능은 개선 효과가 거의 없다.

둘째, 제진재를 적용하는 경우 차음의 경우 1~2dB, 경량 바닥충격음의 경우 4dB 정도 차음개선 효과가 있고, 중량충격음에 대한 차단성능은 주파수별 특성이 다소 변하지만 전체적인 평가로는 차이가 거의 없다.

셋째, 제진재 종류에 따라서 중량충격음 레벨의 경우 주파수 특성이 다르므로 바닥구조 충격음의 특성을 파악할 것을 요한다.

참고 문헌

1. 김선우 : "건축용 벽판(철강재)의 차음특성에 관한 실험적 연구", 학회 논문집, 1995.5
2. 선병택 역 : 소음진동대책 핸드북, 집문사, 1983
3. KCC 연구소, 건축음향, 1995.