

# 건물을 통과하는 도로의 진동저감을 위한 방진설계 및 방진재 개발

## Development of Ventilation Isolation Design and Material for Vibration Reduction of Road Passing through Buildings

이중석†·이장현\*·김대현\*·윤은중\*\*  
J. W. Oh, J. S. Lee, J. H. Lee, S. C. Lee

**Key Words** : Ventilation reduction(진동저감), Polyurethane(폴리우레탄), Compression set(영구압축 출음율), Ground Vibration (지반진동), Structural Vibration(구조진동), 투과손실(Transmission Loss) VAL(Vibration Acceleration Level 진동가속도레벨)

### ABSTRACT

철도 및 도로교통에 의한 건축구조물의 진동, 소음을 저감시킬 수 있는 PO-MAT(Polyurethane Mat) 제품과 다양한 건축물의 진동, 소음이 전달되는 상황에 적용되어 방진효과를 정확하게 예측하는데 사용될 수 있는 설계안을 개발하였다. 개발된 제품은 다공질의 폴리우레탄 탄성체의 조직으로 도로 및 철도의 교통진동의 방진과 연구실, 기계실, 공조실 등의 Floating Floor System 및 건축기초의 내진용으로 사용되고, 실제구조물에 적용하여 진동저감과 충격흡수, 소음저감 효과가 탁월함을 확인하였다.

### 1. 서론

주요도시는 교통망의 포화상태로 지하철 또는 도로의 확충에 따른 건물의 관통 또는 부분 통과, 지하 통과하는 경우가 증가하여 기존 건물과 간섭성에 따라 소음진동과 관련된 많은 문제가 발생하고 있다. 따라서 철도 및 도로교통에 의한 건축구조물의 진동, 소음을 저감시킬 수 있는 제품과 다양한 건축물의 진동, 소음이 전달되는 상황에 적용되어 방진효과를 정확하게 예측하는데 사용될 수 있는 설계(안) 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

현재 건축물의 소음진동 저감하거나 철도 및 도로교통에서 발생하는 진동을 차단하기 위해 많은 제품이 개발되어 있다. 국내의 경우 폴리우레탄 제품이 일부 생산되고 있으나 품질이 좋지 않아 적용실적이 많지 않으며, 주로 사용되는 제품은 대표적으로 동일고무의 고무를 이용한 제품이다. 또한 국외에서는 폴란드 Getzner사의 폴리우레탄 제품이 생산되어 국내에도 많은 양이 수입되고 있다.

철도 및 지하철이나 철도의 방진설계와 관련된 연구는 양

신추 (2001)[1], 황선근(2000)[2], 허영(1999)[3] 등에 의해서 철도진동의 예측 및 해석에 대한 연구가 진행되었으며, 철도 인접 구조물의 진동특성에 대한 연구는 전호민(1997)[4], 김정태(1999)[5] 등에 의해 진행되었다. 국외에서도 X. Sheng (2000)[8]에 의해 철도에 의한 지반진동에 대한 연구가 이루어 졌으며, 그 외에도 철도, 도로교통에 의한 진동에 대하여 많은 연구[9~11]가 이루어 졌다.

본 논문은 폴리우레탄 재질의 방진제품의 개발에 관한 논문으로 방진설계는 맹주원(2003)[12]에 의한 연구를 적용하였으며, 개발된 양산품을 건물에 적용하여 철도 및 교통에 의한 진동이 효과적으로 저감되는 것을 확인하였다. 또한 제품의 수명을 결정하는 가장 중요한 인자인 영구압축출음율이 5% 이하로 세계 최고의 제품과 동등한 성능임을 확인하였다.

### 2. 건축구조물의 방진재의 개발

#### 2.1 방진설계 개요

철도, 도로교통 진동에 의한 건축구조물의 진동, 소음제어의 설계(안)은 차량이 통과하는 부분을 전체 이중바닥 구조로 적용하는 방안으로 콘크리트 슬래브와 이중바닥 사이에 PO-MAT를 설치하는 형태이다. 개발된 설계안에 대해 다양한 종류의 진동원을 실증 실험을 실시하여 득한 Data를

† (주)엔에스브이 기술연구소

E-mail : nsv@chol.com

Tel : (032) 816-7992, Fax : (032) 816-7993

\* (주)엔에스브이 기술연구소

\*\* (주)엔에스브이

토대로 유한요소해석 Program을 사용하여 체계적인 방진표준설계(안)을 독자적으로 개발하여 건축구조물에 전달되는 진동에 대하여 적절한 대책 설계가 가능하게 되었다.

### 2.2 PO-MAT 방진재 개발

개발된 PO-MAT 방진재는 다공질의 폴리우레탄 탄성체의 조직으로 도로 및 철도의 교통진동의 방진과 연구실, 기계실, 공조실등의 Floating Floor System 및 건축기초의 내진용으로 사용되며 진동저감과 충격흡수, 소음저감에 탁월한 효과를 가진 제품으로 Fig.1과 과 같고, 제품모델의 사양은 Table 1.과 같으며 다음과 같은 특징이 있다.

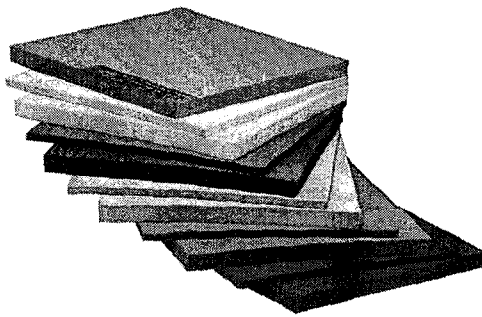


Fig. 1. PO-MAT

- 1) 단면내부에 미세하고 균일한 공기층이 형성되어 균일한 탄성계수를 가진 동적하중의 적용성이 광범위한 방진재
- 2) 고도의 발포기술로 건축구조물의 진동 및 소음 방지능력이 우수하다.
- 3) 하중의 균일 분포시킴으로 집중하중에 의한 Slab의 균열, 휨 등의 현상과 공기발생을 방지
- 4) PO-MAT의 두께 및 밀도를 조정하여 스프링상수를 조정할 수 있어 진동 및 소음에 방지대책의 적용이 용이
- 5) 내구성이 우수하여 진동, 소음 방진성능이 반영구적이다.
- 6) 시공성이 우수하고 성능대비 가격이 저렴하다.

Table 1. Specification of PO-MAT

Model	Thickness [mm]	Color	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Rated Load [N/mm <sup>2</sup> ]	Rated Def. [mm]	Size [mm]
A12/A25	12 t, 25 t, 50 t	Green	150±10	0.007	4.0/8.2	500x1,000 1,000x1,000
B12/B25		Yellow	220±10	0.024	3.6/7.5	
C12/C25		Blue	300±10	0.052	3.3/6.8	
D12/D25		Pink	400±10	0.1	3.0/6.0	
E12/E25		Brown	500±10	0.2	2.8/5.8	
F12/F25		Red	600±10	0.4	2.5/5.2	

### 2.3 제품의 내구성 평가

PO-MAT 제품의 신뢰성을 제고시키기 위해서는 적합한 시험방법에 의한 장기내구성시험자료의 확보가 필수적이다. 일반적으로 고분자재료는 일정한 크기의 변형 하에서는 모듈러스의 점차적인 감소 즉, 응력완화현상이 일어나게 되어 구조재료로서의 성능이 저하된다. 실험적으로는 일정한 압축 변형을 가하고 시간에 따른 하중의 감소를 측정하는 응력완화거동시험을 수행하여 장기내구성을 예측하였다.

구조재료로 사용되는 고분자재료의 장시간에 걸친 기계적 물성의 변화를 파악하기 위해 요구되는 시간범위가 매우 크기 때문에 현실적으로 동일한 조건에서의 장기내구특성을 측정하기란 불가능하다. 따라서 시간-온도 중첩원리(time-temperature superposition, TTS)원리를 이용하면, 실질적으로 측정 가능한 시간 범위 내에서 측정온도를 바꾸어 측정하게 되면 최소한의 측정시간동안에 주어진 온도에서 장기간의 기계적물성의 변화를 예측할 수 있다. 즉, 온도가 높아질수록 응력완화에 필요한 시간은 짧아지게 되며, 이와 같은 온도와 시간의 등가성은 다음과 같은 식으로 나타내지게된다.

$$\tau_T = a_T \cdot \tau_{T_0}$$

$$\Rightarrow \log \tau_T = \log a_T + \log \tau_{T_0} \quad (1)$$

여기서,  $\tau_T$  는 온도 T에서의 응력완화시간,  $\tau_{T_0}$ 는 기준 온도  $T_0$ 에서의 응력완화시간을 나타낸다. 시험온도가 높아질수록 응력완화가 일어나는 데 필요한 시간은 짧아지므로, 시험온도가 기준온도보다 크면 이동계수  $a_T$ 는 1보다 큰 값을, 시험온도가 기준온도보다 낮게 되면  $a_T$ 는 1보다 큰 값을 가지게 된다. 따라서, 서로 다른 온도에서 각각 측정 한 실험결과를 기준온도의 결과에 대해서  $a_T$  만큼 수평으로 이동시켜 모든 실험결과를 서로 중첩시킴으로써 시간 축이 log scale로 나타나는 마스터곡선을 얻을 수 있게 된다.

이와 같은 온도와 시간에 따른 응력완화현상은 응력완화가 일어나는 메커니즘과 시험온도범위에 따라 식(2)와 같은 WLF 식이나 식(3)과 같은 아레니우스식으로 나타내어질 수 있다. 즉, 고분자사슬의, 응력완화거동이 순수하게 시간에 따른 고분자사슬의 점탄성적인 변화만을 수반하거나 기준온도가 유리전이온도 근방일 경우에는 다음과 같은 WLF식으로 잘 나타내어지며,

$$\text{WLF equation: } \log a_T = - \frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (2)$$

만약, 시간에 따른 응력완화거동이 복잡한 물리적, 화학적 변화를 수반하거나, 기준온도가 유리전이온도로부터 매우 차이가 나게 되는 경우에는 식(3)과 같은 아레니우스식으로

나타내어 질 수 있게 된다.

$$a_T = \exp \Delta \frac{H}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \quad (3)$$

이들 식에서,  $T_0$  는 기준온도,  $\Delta H$ (J/mol)는 응력완화가 일어나는데 필요한 활성화에너지,  $C_1, C_2$ 는 WLF상수, 그리고,  $R$  은 기체상수를 나타낸다.

PO-MAT의 내구성을 예측하기 위한 실험으로써 일정한 압축변형 하에서의 응력완화거동을 측정하였으며, 응력완화거동의 메커니즘을 유추하여 보았으며 실험측정 결과는 Table 2.와 같이 제품 전체적으로 수명이 600년 이상이 됨을 확인하였다.

Table 2. Lifetime of PO-MAT

Sample	Color	Density [(kg/m <sup>3</sup> )]	Lifetime(at 20°C) [year]
A	GREEN	150	612
B	YELLOW	220	630
C	BLUE	300	644
D	PINK	400	652
E	BROWN	500	660
F	RED	600	675

### 2.4 제품성능 비교

개발된 방진재 PO-MAT은 국내의 고무제품에 비하여 아주 우수한 성능을 가지고 있고, 국외의 우수한 제품과도 동등한 성능을 가지고 있으며 항목별 특징은 아래의 Table 3.와 같다.

Table 3. Property of PO-MAT

구분	PO-MAT	Rubber pad	국외제품
재질	Polyurethane	Rubber	Polyurethane
방진성능(dB)	10 ~ 15	3 ~ 5	10 ~ 15
단면형상	균일한 기포구조 균일한 탄성계수	불균일한 Cell구조 불균일한 탄성계수	PO-MAT와 동일
내구수명	600년 이상 (실험적 입증)	30 ~ 50년 (실험적 입증)	600년 이상
동적특성	압력 및 가진주파수가 클수록 동적 탄성계수가 감소	압력 및 가진주파수가 클수록 동적 탄성계수가 증가	PO-MAT와 동일
탄성변형률(%)	40 ~ 50	15 ~ 20	40 ~ 50
사용온도범위	-20°C~80°C	-10°C~80°C	-20°C~70°C
시공성	경량, 양호	중량, 보통	경량, 양호
제품가격	수입제품의 50~60%	PO-MAT의 80%	PO-MAT의 1.5~1.6배

### 3. PO-MAT 방진설계의 적용

#### 3.1 철골구조물에서의 진동저감

##### 3.1.1 철골구조물 모델링

실제로 도로가 통과하는 건물은 대부분 철골 구조이므로 철골 구조 모델에 대하여 자동차 주행 시 진동을 해석하였다. 해석에 적용한 모델은 지상 4층의 철골 사무소 빌딩으로 지상3층에 플로팅 슬래브가 시공된 경우 발포 우레탄 매트 solid를 사용하였으며, 유한요소 모델은 Fig. 2와 같다.

또한 경계 조건은 해석 모델의 기둥 하부를 고정된 것으로 하였고 다른 절점들은 모두 6자유도를 갖는 것으로 하였으며 해석에 적용된 구조물의 물성치는 table 4.과 같다.

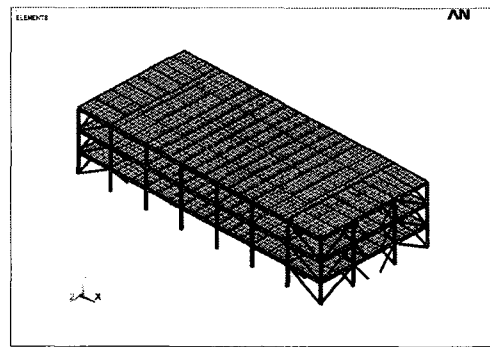


Fig. 2 FE model of steel structure

Table 4 Material properties of soil structure FE model

Materials	Modulus of elasticity (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Damping Ratio (%)
Reinforced Concrete	25	0.15	2,400	0.2
PO-MAT (C25)	0.0003	0.3	300	10
Soil	0.0294	0.3	2,000	15

해석 결과 철골 구조 건물 위로 자동차가 주행할 때 각 경우 속도에 따른 진동 가속도를 정리하면 Table 4, Fig. 3.과 같다.

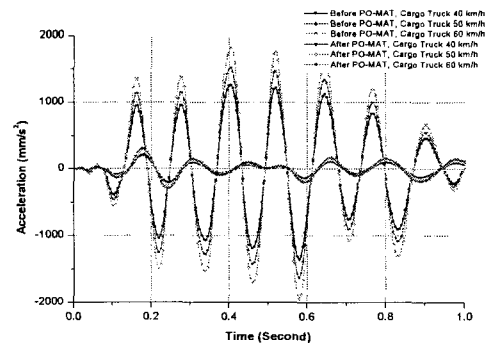


Fig. 3 Vibration acceleration with and without PO-MAT

Table 5. FE analysis result of steel structure model

Velocity (km/h)	Before floating slab			After floating slab			Remarks
	Peak Amplitude			Peak Amplitude			
	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> ) (dB)		Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> ) (dB)		
40	8.2	1,266	99.0	6.3	213.9	83.6	
50	8.2	1,518	100.6	6.3	256.7	85.2	
60	8.2	1,819	102.0	6.3	307.8	86.8	

진동해석 결과 동일 조건에서 자동차 속도가 10 km/h 증가 하면 진동레벨이 약 2dB 씩 증가하며, 발생 진동의 주요 주파수는 플로팅 슬래브 시공 전은 8.2 Hz였으나 플로팅 슬래브 시공 후는 6.3 Hz로 감소되었다. 이것은 플로팅 슬래브에 의해 고유 진동수가 감소 됨을 알 수 있다. 또한 플로팅 슬래브 시공을 할 경우 약 15 dB의 진동 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

### 3.1.2 철골구조물에서의 진동저감 성능시험

철근 콘크리트구조 모델의 해석결과를 검증하기 위해 해석모델과 동일한 건물에 PO-MAT를 시공하여 진동의 저감 성능을 검증하였으며 Fig. 4와 같이 자동차 주행할 경우 PO-MAT 설치 전 후의 진동가속도를 측정하여 이론 해석결과와 비교분석하였다.

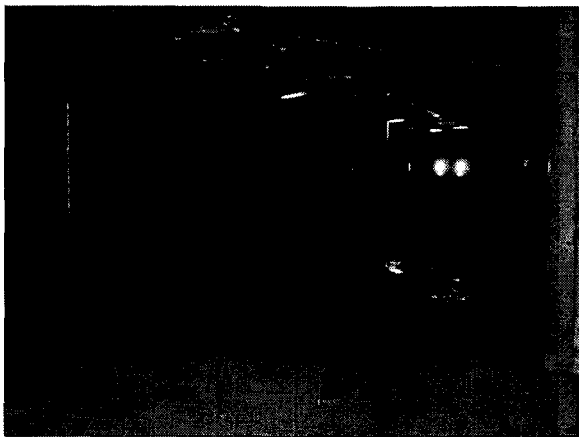


Fig. 4. Vehicle Running Test

구조물에 대하여 자동차가 Po-Mat 시공 전 및 후의 노면을 주행할 때 이론적으로 해석한 진동가속도와 실험에 의해 측정된 진동가속도를 비교한 결과는 Table 5, 및 Fig. 5와 같다.

이론 해석 결과 실차 실험을 통하여 측정된 실험 결과를 비교 분석하여 다음과 같다.

- 1) 실험 결과와 이론 해석 결과는 대략 2~4dB 정도 차이가 나고 이론 해석 결과가 대체로 높게 나타난다. 이는 휴한 요소해석의 일반적 경향으로 이론 해석값과 실험값 거의 유사함을 알 수 있다.

- 2) 지반 모델의 경우 이론 해석값과 실험값 모두 속도 의 증가에 따른 진동의 증가가 그다지 크지 않은데 비하여 철근 콘크리트 구조 모델의 경우 주행 속도 증가에 따라 진동의 증가가 뚜렷하였다.
- 3) 이론 해석값과 실제 실험값이 비교적 잘 부합 하므로 실제 건물에서 유한요소법을 이용한 이론 해석만으로도 충분히 실제와 부합하는 결론을 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Vibration acceleration data of FE analysis and experimental

Vibration Isolation System	Speed of Vehicle (km/h)	Analysis			Measured		
		Peak Amplitude			RMS Amplitude		
		Frequency [Hz]	Acceleration [mm/s <sup>2</sup> ] [dB]		Frequency [Hz]	Acceleration [mm/s <sup>2</sup> ] [dB]	
Without PO-Mat	40	15.6	1,001.6	97.0	16 - 18	861	98.7
	50	15.6	1,191.9	98.5	18	888.3	99.0
	60	15.6	1,418.4	100.0	18	918.7	99.3
With PO-Mat	40	15.6	271.2	85.7	14	287.3	89.2
	50	15.6	322.7	87.2	14	296.3	89.4
	60	15.6	384.0	88.7	14	311.0	89.8

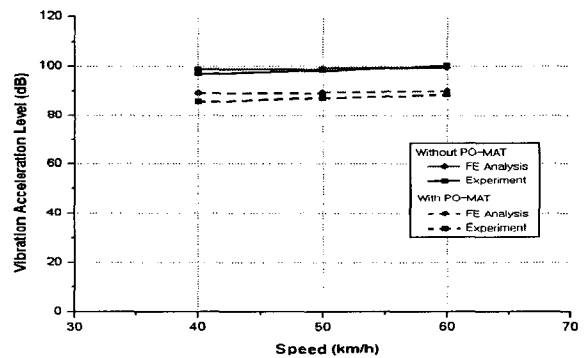


Fig. 5 VAL of analysis and experimental

### 3.2 건축물에서 발생하는 진동의 저감

건축물에서 발생하는 진동은 교통뿐만 아니라, 스포츠센터와 같이 운동 시에도 충격 하중에 의해 발생하게 된다. 이러한 진동은 주변의 공간에 전달되어 인체에 영향을 주게 된다. 따라서 발생된 진동을 저감하고 다른 공간으로 전달되는 것을 차단하여야 하며, 이와 같은 경우에서도 방진설계를 적용하여 이중바닥구조에 PO-MAT를 시공하면 효과적으로 진동을 차단할 수 있다.

설치예로서 스포츠클럽(Tower Palace III)의 체력 단련장 바닥에 설치한 경우로 아래의 Fig. 6.의 건물 4층에 시공하여 진동을 저감하였을 뿐만 아니라 3층으로 전달되는 진동을 효과적으로 차단하였다.

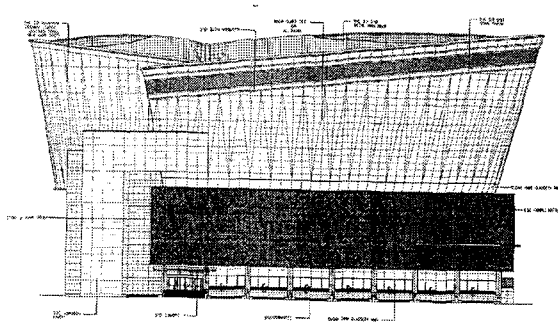


Fig. 6. Tower Palace III Sports club

아래의 Fig. 7과 8은 PO-MAT 설치 전후의 4층에서의 진동가속도를 측정된 그래프로 설치 전 VAL이 83~91dB 정도이며 설치 후 75~81dB로 8~10dB 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 소음을 발생시키는 고주파 영역에서 방진효과가 증가함을 알 수 있다.

이외에도 현대 I valley 건물(경부선, 1호선전철 통과) 및 ACTS 테크노타운(지하철통과)에 시공하여 철도 및 전철에 의해 전달되는 진동이 효과적으로 저감되는 것을 확인하였다. 또한 한라공고 평택공장의 기계설비 방진 및 삼성화재 서초프로젝트의 설비방진에 시공되었다.

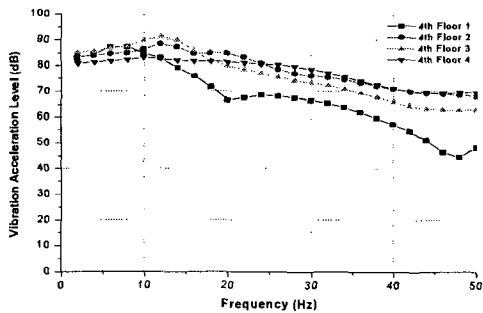


Fig. 7. VAL without PO-MAT (at 4<sup>th</sup> floor)

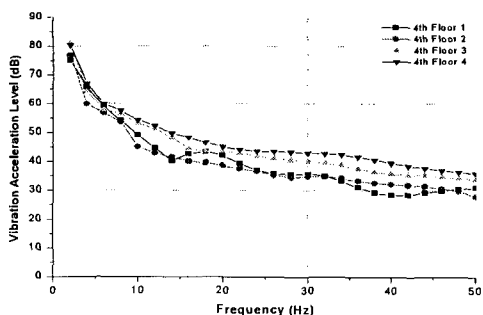


Fig. 8. VAL with PO-MAT (at 4<sup>th</sup> floor)

#### 4. PO-MAT 시공 슬래브의 소음 저감 효과

##### 4.1 건물에서의 구조 전달음

건물에서의 진동은 건물의 벽체 또는 Floor등에 진동을 발생시켜 방사소음을 유발하는 구조전달음(구조소음)에 가장 큰 영향을 미치는 진동은 굴곡파 진동이다. 굴곡파 진동에 의한 구조전달음은 콘크리트 건물에서 100Hz 부근의 진동이 가장 큰 구조 소음을 유발하고, 실제로 구조소음을 측정하여 보면 125Hz 또는 250Hz 성분의 주파수 성분이 아주 뚜렷하게 나타난다.

진동에 의한 구조 전달음의 크기는 진동의 속도진폭의 제곱에 비례하고 이것의 음향 파워 레벨은 다음 식과 같이 음향 출력으로 계산된다.

$$PWL = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (dB) \quad (4)$$

여기서,  $W$ : 음향파워 ( $W$ ) 이고,

$W_0$ : 기준음향파워 ( $1 \times 10^{-12} W$ ) 이다.

구조 전달음에서 음향 출력은 진폭의 제곱에 비례하므로 음향 출력 레벨은 다음과 같이 계산된다.

$$PWL = 10 \log \frac{W}{W_0} \propto 10 \log v^2 \propto 20 \log v \quad (5)$$

방진을 할 경우 진동 전달음(Transmission Loss, TR)은 방진을 하기전과 하고 난 뒤의 진동 진폭의 비이므로 방진에 의한 구조 전달음의 감소효과는 다음과 같다.

$$\Delta PWL = 20 \log (TR \times v) = 20 \log v + 20 \log TR \quad (6)$$

즉 방진에 의한 감음 효과는  $20 \log TR$  이 된다.

따라서 구조 전달음의 대책으로는 천연 고무, 합성고무 등의 점탄성 재료를 이용하여 진동의 전달 경로를 차단하는 방법이 적용되며 가장 보편적으로 이중바닥구조이고 시공 방법은 비교적 탄성계수가 높은 고무(합성고무 포함) 마운트를 부분적으로 배치하는 방법과 탄성계수가 낮은 발포 고무 패드를 바닥 전면에서 펴고 그 위에 콘크리트를 타설하는 방법 등이 있다. 이들 방법들은 사용 재료와 시공 방법에만 차이가 있고 방음 효과는 전체적으로 우수하다.

##### 4.2 플로팅 슬래브의 소음 저감 효과

본 연구에서 진동 차단 방안으로 제시된 이중바닥구조의 경우 그 기본 구조가 뜬바닥구조(Floating Floor System)와 동일하고, 고유 진동수가 8Hz 가량이 된다. 이 고유 진동수를 가진 방진 시스템이 구조 전달음에서 문제가 되는 63, 125, 250 Hz에서의 진동 전달률 및 소음 저감 효과는 다음

Table. 6과 같으며, 63 Hz 음에 대하여 구조소음 감소량은 40 dB가 되고, 그 이상의 주파수 음에서는 이보다 더 크게 감소되므로 플로팅 슬래브의 진동에 의한 구조 전달음은 최소한 40 dB가 감소될 것으로 판단되고 진동에 기인한 소음 문제는 거의 완벽하게 해결될 수 있다.

Table 6. Noise Reduction Effect of Floating Slab

항목	주파수(Hz)			비고
	63	125	250	
고유 진동수 ( $f_n$ , Hz)	8			
주파수 비( $r$ )	8	16	32	$f/f_n$
전달률(TR)	0.01	0.004	0.001	$1/(r^2 - 1)$
소음저감효과 (dB)	-40	-48	-60	$20\log TR$

### 5. 결론

철도 및 도로교통에 의해 발생하는 진동이 건물로 전달되는 것을 차단하기 위한 방진설계(안) 및 방진재(PO-MAT)를 개발하였으며, 차량이 통과하는 철골건축물 및 인근에 철도가 통과하는 건축물 그리고 스포츠센터의 체력 단련장에 설치하여 진동저감 효과를 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 건축물 내부 및 외부에서 발생하는 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있는 방진설계(안) 및 방진재를 개발하였다.

둘째, 차량이 통과하는 건축물 및 스포츠센터에 적용하여 성능시험을 수행하였으며, 진동가속도레벨이 8~10dB 이상 저감됨을 확인하였다.

셋째, 자동차 진동 방진 대책으로 노면을 플로팅 슬래브로 시공할 경우 진동가속도, 레벨이 철근 콘크리트 구조 모델은 10dB, 철골 구조 모델은 15dB 저감됨을 확인하였다.

넷째, 건축물의 진동에 의한 구조전달음이 250 Hz에서 60 dB이상 감소되며, 저주파수에서도 40dB이상 감소됨을 확인하였다.

따라서 PO-MAT(발포 우레탄 매트)를 이용한 플로팅 슬래브 방식의 노면 구조 및 건축구조는 차량 진동 저감 및 기계장비의 진동저감에 효과적인 방법이며, 구조물의 소음저감에도 효과가 클 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 건설기술연구개발사업의 연구 결과를 바탕으로 작성 되었으며, 개발 제품에 대하여 우수하게 평가하여 기술상을 주신 소음진동학회에 진심으로 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) 양신추, 강윤석, 임주환, '열차주행에 대한 방진 슬래브 레도의 진동해석기법 개발', 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 2001, pp. 1028-1033.
- (2) 황선근, 엄기영, 고태훈, 이종재, "철도연변 지반진동 예측기법 및 전산프로그램 개발", 한국지반공학회 논문집 제16권 제1호, 2000, pp. 203-210.
- (3) 허영, "지하철 운행에 의한 진동 예측 및 대책", 한국소음진동공학회 도심지 환경소음-진동 저감대책 세미나, 1999, pp. 77-98.
- (4) 전호민, 철도 인접구조물의 진동예측모형에 관한 연구, 연세대학교 박사학위논문, 1997.
- (5) 김정태, 손정곤, "지하철 차량기지 건축구조물의 진동 특성", 한국소음진동공학회지 제9권 제3호, 1999, pp. 431-435.
- (6) 윤일성, 송오섭, "이동하는 동적하중을 받는 탄성보의 진동해석", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 1997, pp. 408-413.
- (7) 한국소음진동공학회, 소음진동편람, 1995, pp.366~369
- (8) X. Sheng, C. J. C. Jones and M. Petyt, "Ground Vibration Generated by a Load Moving along a Railway Track", *Journal of Sound and Vibration*, 228(1), 1999, pp. 129-156.
- (9) W. Zhai and Z. Cai, "Dynamic Interaction between a Lumped Mass Vehicle and a Discretely Supported Continuous Rail Track", *Computer & Structures*, 63(5), 1997, pp. 987-997.
- (10) R. T. Wang and J. S. Lin, "Vibration of Multi-Span Timoshenko Frames due to Moving Loads", *Journal of Sound and Vibration*, 212(3), 1998, pp. 417-434.