

# 건물을 통과하는 도로의 방진설계 연구

## A Study on the Vibration Isolation Design of Road Passing through Building

맹 주 원\*· 권 태 철 \*· 이 성 춘 \*· 홍 감 표\*\*

Ju-Won Maeng, Tae-Chul Kwon, Seong-Choon Lee and Kap-Pyo Hong

**Key Words :** Floating Slab(플로팅 슬래브), FE Analysis(유한요소해석), Moving Load(이동하중), Traffic Vibration(도로교통진동), Road Passing through Building(건물관통도로), Actual Running Vehicle Test(실차실험)

### ABSTRACT

This study is performed in order to determine a method to solve vibration-borne problems by isolating the vibration that is generated by vehicles in case a road passes through a building and also to verify its applicability and effect both theoretically and experimentally.

### 1. 서 론

최근 대도시로의 인구 집중과 자동차의 급격한 증가로 대도시의 교통은 서울, 지방 할 것 없이 포화 상태를 이루고 있어 도심 도로망 및 지하철의 확충이 절실히 요구된다. 그러나 대도시 지가의 상승으로 도심 도로의 총 건설비 중에서 토지 보상비가 차지하는 비중이 80% 이상을 상회하고 있어 도심 도로 건설에 막대한 비용이 소요된다.

외국에서는 이러한 문제점을 해결하고 지가가 비싼 대도시의 토지를 효율적으로 활용하기 위하여 도로가 건물을 관통하는 것을 허용하고 있다. 우리나라에서도 건설교통부에서 2000년 7월 1일부터 대도시 지역 건물을 관통하거나 건물 일부와 지하를 지나가는 도로 및 철도 건설이 가능해지는 것을 포함하여 입체적 도시 계획이 시행 되는 것을 골자로 한 “도시계획시설 설치기준·결정기준 개정안”을 마련하여 대도시 도심 지역의 건물을 관통하거나 또는 건물의 일부, 옥상 및 지하를 지나가는 도로·철도의 건설을 가능하게 하였다. 그런데 이와 같이 도로나 철도가 건물을 관통하면 자동차나 열차의 주행에 의한 진동이 건물에 전달되므로 필히 이에 대한 해결책이 뒤따라야 한다.

본 논문은 도로나 철도가 건물을 통과하는 경우

자동차나 열차 주행 시 발생하는 진동이 건물로 전달되는 것을 차단하기 위한 방법을 모색하고, 그 방안의 유용성 및 효과를 이론적, 실험적으로 검증하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서 진동 차단하기 위하여 제시한 방법은 도로의 구조를 플로팅 슬래브로 하는 것이다.

### 2. 자동차 주행 중 진동해석

#### 2.1 개요

자동차에 의한 진동은 차체에서 발생한 진동이 타이어를 통하여 노면으로 전달되는 진동과 타이어와 노면의 상호 작용에 의하여 발생하는 진동으로 대별된다. 가진력의 크기는 차량 중량, 주행 속도, 노면 상태, 지반 상태 등에 따라 영향을 받고, 그 중 노면, 지반 상태 등 도로 구조가 미치는 영향이 가장 큰 것으로 알려져 있다. 그리고 주행 속도가 10km/h 증가하면 진동의 발생이 2~3dB 증가하는 것으로 알려져 있다.

이에 따라 자동차가 건물 또는 지반을 통과 할 때, 별도의 방진 시공이 되지 않는 경우와 플로팅 슬래브 시공을 한 경우에 대하여 건물의 진동을 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 해석하였다.

해석 대상은 지반과 철근 콘크리트 구조인 아파트 그리고 철골 구조 모델의 경우로 하였고 자동차(1.5톤 트럭)가 40, 50, 60km/h 로 주행 하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

해석모델은 대상 구조물의 주요 구조체를 근사 모형으로 모델링 하고 그 중간층 부위로 자동차가 관통하는 경우로 가정하여 3 차원 유한요소모델로

\* 엔에스브이 기술연구소

E-mail : nsvr3@nsv.co.kr

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

\*\* 연세대학교 건축도시공학부

해석하였으며, 하중 조건은 자동차의 바퀴 각각에 작용하는 하중이 자동차의 주행 속도로 이동 하는 이동하중으로 가정하였다.

해석 결과는 자동차가 주행할 경우에 플로팅 슬래브 시공이 된 경우와 되지 않은 경우에 대하여 바닥판의 진동 응답 현상을 파악하였다

## 2.2 지반 모델

### (1) 유한요소모델

플로팅 슬래브 시공이 되지 않은 경우는 유한요소모델의 요소(element)로 solid(슬래브, 지반)를 사용하였다. 플로팅 슬래브가 시공된 경우 에는 상기 모델에서 발포 우레탄 매트가 설치되는 부위의 요소의 재료 물성 값을 매트의 것으로 대체하여 해석하였다. 유한요소모델에 사용된 재료 물성값은 Table 1 과 같고 Fig. 1 에 유한요소모델을 나타내었다.

Table 1 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

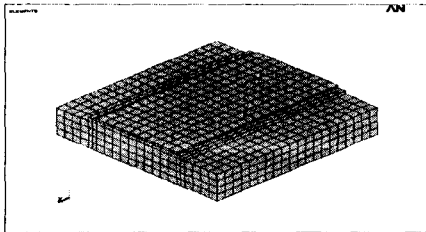


Fig. 1 FE model of Soil structure

경계 조건은 플로팅 슬래브의 영향을 받지 않는 것으로 가정할 수 있는 해석 모델의 최 외부 절점(node) 들이 고정(fixed)되어 있는 것으로 하였다. 그리고 나머지 절점들은 모두 6 자유도를 갖는 것으로 하였다. 하중조건으로는 자동차의 각 바퀴 중량이 자동차 주행 속도로 이동하는 하중으로 해석하였다. 자동차의 총 중량은 3,000kg 이다.

### (2) 해석 결과

자동차가 지반 위를 주행할 때 각 경우 별 진동 값을 종합하면 Table 2, Fig. 2 와 같다.

Table 2 FE analysis result of soil structure model

Velocity (km/h)	Before floating slab				After floating slab				Remarks
	Peak Amplitude		Peak Amplitude		Peak Amplitude		Peak Amplitude		
	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	(dB)	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	(dB)	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	
40	28	378.8	88.6	28	154.0	80.9			
50	28	454.4	90.1	28	184.8	82.3			
60	28	545.4	91.7	28	221.8	83.9			

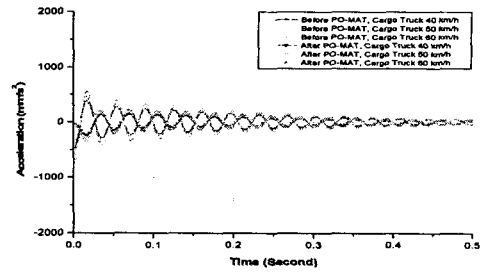


Fig. 2 Comparison of estimated vibration acceleration before and after floating slab construction

해석 결과로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 플로팅 슬래브 시공을 하지 않은 경우 동일 조건에서 자동차 속도가 10 km/h 증가하면 VAL이 1.5 dB 씩 증가한다
- ② 발생 진동의 주요 주파수는 28 Hz 로 일정하다. 이것으로 자동차 주행 시 진동은 대부분 지반의 고유 진동 특성에 의하여 결정되는 것임을 알 수 있다.
- ③ 해석 결과 플로팅 슬래브 시공을 한 경우 8 dB 의 진동 저감 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 발생 진도의 약 2/3 가 차단되고 나머지 1/3 만 주변으로 전파됨을 의미한다.

## 2.3 철근 콘크리트 구조 모델

### (1) 유한요소모델

철근 콘크리트 구조 모델은 대표적인 철근 콘크리트 구조 건물인 아파트를 그 모델로 하였다. 대상 건물은 실제 건축 중인 아파트로 하였고, 이 아파트의 지하 주차장 부분을 모델링하여 해석하였다. 플로팅 슬래브 시공이 되지 않은 경우는 유한요소모델의 요소로 beam(보와 기둥)과 solid(슬래브, 방진재)를 사용하였다. 그리고 플로팅 슬래브 시공을 한 경우는 실차 실험 시 자동차 주행로 상에 발포 우레탄 매트와 콘크리트 슬래브를 추가하여 해석모델로 삼았다. 상부 콘크리트 슬래브 두께는 150mm, 폴리우레탄 매트 50mm 와 바닥 슬래브 200mm 로 모델링하였다.

Fig. 3 에 유한요소모델을 나타내었다.

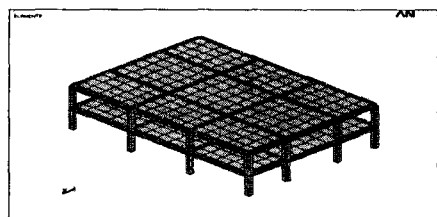


Fig. 3 FE model of concrete Rahmen structure

경계 조건은 해석 모델의 기둥 하부를 고정된 것으로 하였다. 그리고 여타 절점들은 모두 6 자유도를 갖는 것으로 하였으며 하중 조건은 지반 모델의 경우와 동일하다.

(2) 해석 결과

철근 콘크리트 구조 건물 위로 자동차가 주행할 때 각 경우 별 진동값을 종합하면 Table 3, Fig. 4 와 같다.

Table 3 FE analysis result of concrete Rahmen structure

Velocity (km/h)	Before floating slab			After floating slab			Remarks
	Peak Amplitude			Peak Amplitude			
	Frequency (Hz)	Acceleration		Frequency (Hz)	Acceleration		
		(mm/s <sup>2</sup> )	(dB)		(mm/s <sup>2</sup> )	(dB)	
40	15.6	1,001.6	97.0	15.6	271.2	85.7	
50	15.6	1,191.9	98.5	15.6	322.7	87.2	
60	15.6	1,418.4	100.0	15.6	384.0	88.7	

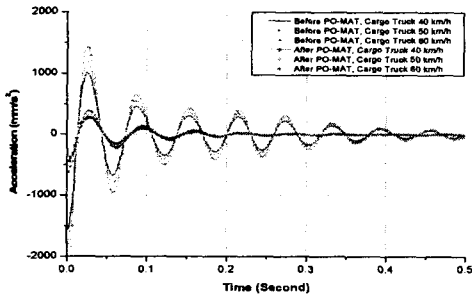


Fig. 4 Comparison of estimated vibration acceleration before and after floating slab construction

해석 결과로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 자동차 속도가 10 km/h 증가될 때 마다 진동의 크기는 1.5dB 씩 증가한다.
- ② 자동차가 주행할 때도 진동의 주파수는 변하지 않는다. 따라서 자동차 주행 시 진동은 건물의 진동응답 특성이 좌우함을 알 수 있다.
- ③ 플로팅 슬래브 설치 전과 후 진동 저감량은 약 11dB 로 지반 모델보다 크다. 따라서 플로팅 슬래브 방법은 건물 진동 차단에 더욱 효과적임을 알 수 있다.

2.4 철골 구조 모델

(1) 유한요소모델

본 논문에서는 실제로 도로가 통과하는 건물은 대부분 철골 구조의 건물일 것이므로 철골 구조 모델에 대하여 자동차 주행 시 진동을 해석하였다.

본 모델은 현재 신축 중인 지상 4 층의 철골 사무소 빌딩으로 유한요소모델에 사용된 요소는 shell(슬래브), beam(보와 기둥)이다. 지상 3 층에 플로팅 슬래브가 시공된 경우 발포 우레탄 매트는 solid(방진재)를 사용하였다.

슬래브 및 플로팅 슬래브의 상세 형상은 철근 콘크리트 구조와 동일하다. Fig. 5 에 유한요소모델을 나타 내었다.

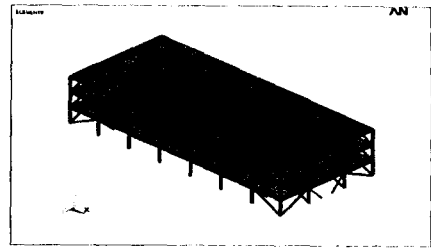


Fig. 5 FE model of steel structure

경계 조건은 해석 모델의 기둥 하부를 고정된 것으로 하였다. 그리고 여타 절점들은 모두 6 자유도를 갖는 것으로 하였으며 하중 조건은 지반 모델의 경우와 동일하다.

(2) 해석 결과

철골 구조 건물 위로 자동차가 주행할 때 각 경우 별 진동값을 종합하면 Table 4, Fig. 6 과 같다.

Table 4 FE analysis result of steel structure model

Velocity (km/h)	Before floating slab			After floating slab			Remarks
	Peak Amplitude			Peak Amplitude			
	Frequency (Hz)	Acceleration		Frequency (Hz)	Acceleration		
		(mm/s <sup>2</sup> )	(dB)		(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	

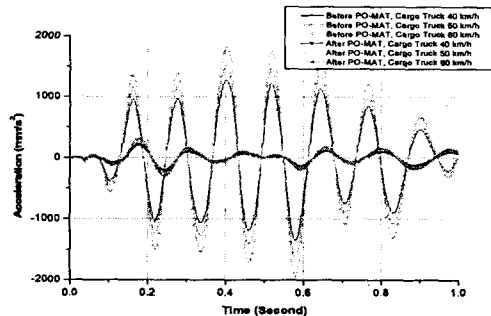


Fig. 6 Comparison of estimated vibration acceleration before and after floating slab construction

해석 결과로부터 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 동일 조건에서 자동차 속도가 10 km/h 증가하면 진동레벨이 약 2dB 씩 증가한다.
- ② 발생 진동의 주요 주파수는 플로팅 슬래브 시공 전은 8.2 Hz 였으나 플로팅 슬래브 시공 후에는 6.3 Hz 로 감소되었다. 이것은 플로팅 슬래브에 의해 고유 진동수가 감소 됨을 알 수 있다.

③ 해석 결과 플로팅 슬래브 시공을 할 경우 약 15 dB의 진동 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

### 2.5 안락한계 기준비교

이론 해석 결과 플로팅 슬래브 시공을 하기 전 진동은 Fig. 7에서 보듯이 지반의 경우를 제외하고는 모두 24시간 안락 한계를 크게 상회한다. 여기에서 진동값은 가장 진동이 높은 경우인 자동차 60km/h 주행 시의 진동이다. 플로팅슬래브 시공 후 건물 진동은 Fig. 8에서와 같이 모두 24시간 안락 한계 이하로 저감되었다.

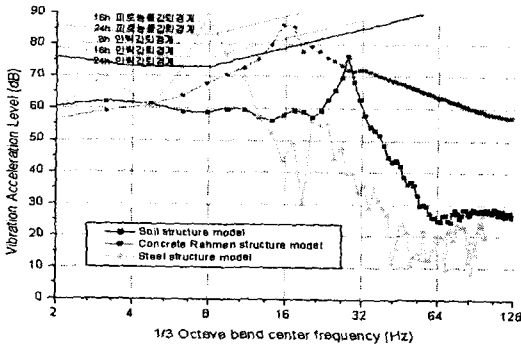


Fig. 7 Building vibration before floating slab construction

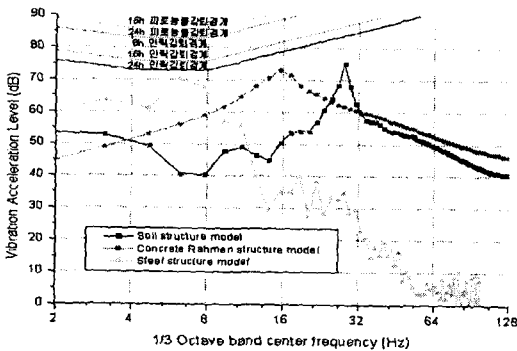


Fig. 8 Building vibration after floating slab construction

## 3. 실차 실험

### 3.1 일반 사항

#### (1) 실험 방법

실차 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 먼저 진동 가속도계(Accelerometer)를 측정 지점에 접착제로 견고하게 부착한 후 실험 구간 위로 자동차가 실험 속도로 주행하여 자동차 주행 중 측정 지점의 진동값을 FFT Analyzer에 기록한다.

자동차의 주행 속도 40, 50, 60km/h에 대하여 실험을 반복하고 진동 신호를 시간 대역과 주파수

대역으로 분석하여 측정된 진동 값을 이론 해석 값과 비교한다.

#### (2) 측정 시스템

실차 실험에 사용한 진동 측정 장비의 구성은 Fig. 9와 같다.

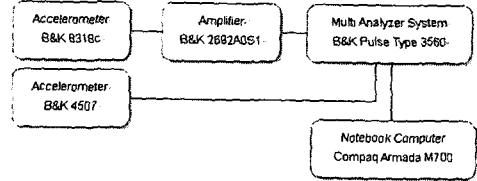


Fig. 9 Measurement system

#### (3) 측정 지점

측정 지점은 플로팅 슬래브의 방진 효과를 가장 잘 확인할 수 있고, 이론 해석 값과 비교할 수 있는 지점을 선택해야 하는데, 본 논문에서는 자동차가 주행하는 지점과 가장 가까운 지점을 측정점으로 하였다. 그리고 철근 콘크리트 구조 모델의 경우 건물 아래층 천정의 진동을 측정하였다.

### 3.2 철근 콘크리트 구조 모델 실험결과

실제 건물에서 플로팅 슬래브의 진동 차단 효과를 검증하기 위하여 대표적인 철근 콘크리트 구조 건물인 아파트에서 실차 실험을 수행하였다. 실험은 아파트 지하 주차장에 별도의 방진 대책이 없는 상태에서 자동차가 주행할 때 진동을 측정하고, 동일 부위를 플로팅 슬래브 시공을 하여 동일 조건으로 자동차가 주행할 때 진동을 측정하여 비교하였다.

측정 지점은 플로팅 슬래브의 진동차단 효과가 가장 잘 나타나는 점인 주행로 바로 하부 슬래브로 하였다.

#### (1) 실험 모형 및 측정 지점

실험 모형 및 진동 측정 위치를 각각 Fig. 10에 나타내었다.

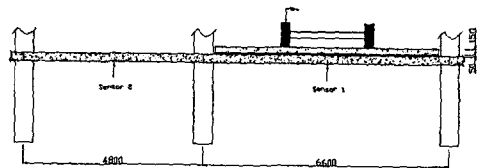


Fig. 10 Measurement points of concrete Rahmen structure model

(2) 측정 결과

철근 콘크리트 구조 모델에서 자동차 주행 시 가진점에서 플로팅 슬래브 시공을 하지 않은 부위와 시공한 부위의 진동 측정 결과를 비교하면 Table 5 와 같다.

Table 5 Comparison of vibration acceleration before and after floating slab construction (concrete Rahmen structure model)

Velocity (km/h)	Before floating slab				After floating slab				Remarks		
	Frequency domain		Time domain		Frequency domain		Time domain				
	Hz	mm/s <sup>2</sup>	dB	mm/s <sup>2</sup>	dB	mm/s <sup>2</sup>	dB				
40	1	18	504.0	94.0	860.0	98.7	14	173.0	84.8	283.0	89.0
	2	18	511.0	94.2	867.0	98.8	14	171.0	84.6	294.0	89.4
	3	16	509.0	94.1	856.0	98.6	14	169.0	84.6	285.0	89.1
	Avg.					98.7					89.2
50	1	18	523.0	94.4	880.0	98.9	14	174.0	84.8	289.0	89.2
	2	18	516.0	94.3	895.0	99.0	14	178.0	85.0	296.0	89.4
	3	18	524.0	94.4	890.0	99.0	14	179.0	85.0	304.0	89.6
	Avg.					99.0					89.4
60	1	18	532.0	94.5	921.0	99.3	14	189.0	85.5	319.0	90.1
	2	18	549.0	94.8	916.0	99.2	14	184.0	85.3	306.0	89.7
	3	18	547.0	94.8	919.0	99.3	14	185.0	85.4	308.0	89.8
	Avg.					99.3					89.8

Table 5 의 값 중 각 주행 상태 별 평균값을 Fig. 11 에 나타내었다.

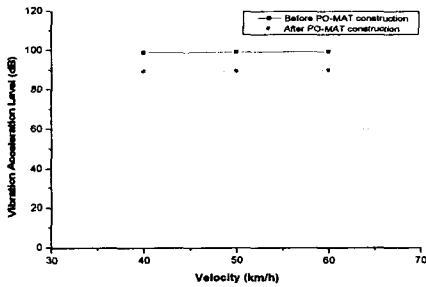


Fig. 11 Comparison of VAL before and after floating slab construction (concrete Rahmen structure model)

(3) 측정 결과 검토

철근 콘크리트 구조 모델에 대한 실험결과 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 진동의 크기는 플로팅 슬래브 시공전과 후 대략 가진점에서는 10 dB 감소한다. 이는 지반의 경우에 비하여 진동 감소폭이 아주 큰데, 철근 콘크리트 구조 모델의 경우 외부 진동에 의한 진동의 응답이 비교적 크기 때문으로 판단된다.
- ② 진동의 주파수 특성을 보면 주행조건과 관계 없이 주요 진동 성분의 주파수가 거의 일정하다. 이는 자동차 주행 시 발생하는 건물의 진동은 자동차의 가진력 특성 보다는 건물의 진동 응답 특성이 전체 진동을 지배하기 때문으로 판단된다.
- ③ 가진점에서 진동의 주요 주파수는 매트 시공 전에는 18 Hz 였으나, 시공 후에는 14 Hz 로 낮아졌다. 이는 구조체에 비하여 고유 진동수가 아주

낮은 플로팅 슬래브의 진동 특성이 반영된 것으로 판단된다.

④ 플로팅 슬래브 시공 전에 가진점의 진동은 자동차의 주행 속도와 관계없이 크기가 거의 일정한데 이는 바닥 상태가 아주 양호하여 주행속도에 따른 가진력의 차이가 없기 때문으로 판단된다.

4. 이론해석 결과와 실험 결과의 비교

이론 해석에서 철근 콘크리트 구조 모델은 이론 해석 결과와 실험 결과를 비교 검증하기 위하여 실험 대상 모델과 동일한 모델로 하고 동일한 조건에서 자동차 주행 중 진동을 해석한 것이다. 이와 같이 이론 해석 결과와 실험결과를 비교하여 그 결과가 서로 부합할 때 이론 해석의 타당성이 입증되고, 설계 단계에서 동일한 해석 방법으로 차량 주행 중 진동의 발생을 예측할 수 있고, 이를 바탕으로 건물의 구조 안전성을 판단할 수 있다.

4.1 철근 콘크리트 구조 모델

(1) 플로팅 슬래브 시공 전

철근 콘크리트 구조 모델에 대하여 자동차가 플로팅 슬래브 시공이 되지 않은 노면을 주행할 때 진동 값을 이론적으로 해석한 값과 실험으로 측정된 값을 비교하면 Table 6, Fig. 12 와 같다.

Table 6 Comparison of FE analysis and experimental data (before floating slab construction)

Velocity (km/h)	FE Analysis				Experiment			Remarks
	Peak Amplitude		RMS Amplitude		RMS Amplitude			
	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	(dB)	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	(dB)		
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		

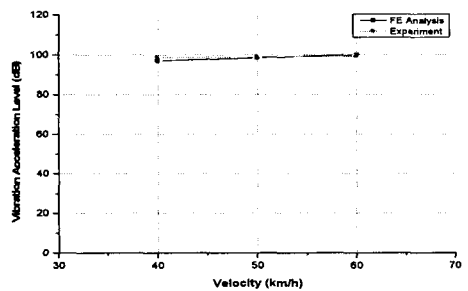


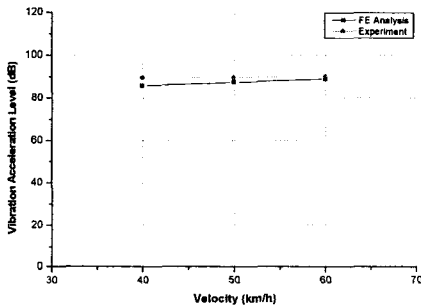
Fig. 12 Comparison of FE analysis and experimental data (before floating slab construction)

**(2) 플로팅 슬래브 시공 후**

철근 콘크리트 구조 모델에 대하여 자동차가 플로팅 슬래브 시공이 된 노면을 주행할 때 진동값을 이론적으로 해석한 값과 실험으로 측정된 값을 비교하면 Table 7, Fig. 13 과 같다.

**Table 7** Comparison of FE analysis and experimental data (after floating slab construction)

Velocity (km/h)	FE Analysis				Experiment				Remarks
	Peak Amplitude		RMS Amplitude		Peak Amplitude		RMS Amplitude		
	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	(dB)	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	(dB)	Frequency (Hz)	Acceleration (mm/s <sup>2</sup> )	
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. 13** Comparison of FE analysis and experimental data (after floating slab construction)

**4.2 진동해석과 실험결과 비교 검토**

이론 해석값과 실차 실험을 통하여 측정된 실험값을 비교하면 다음 사항을 알 수 있다.

- ① 실험값과 이론 해석값은 대략 2~4dB 정도 차이가 나고 이론 해석값이 대체로 높게 나타난다. 이는 휴한요소해석의 일반적 경향으로 이론 해석값과 실험값 이 잘 부합함을 알 수 있다.
- ② 지반 모델의 경우 이론 해석값과 실험값 모두 속도의 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 부합하므로 실제 건물에서 휴한요소법을 이용한 이론 해석만으로도 충분히 실제와 부합하는 결론을 도출해 낼 수 있을 것으로 판단된다.
- ④ 실험값은 이론 해석값보다 낮으므로 실험값 또한 안락 한계 이하이다.

**5. 결 론**

본 연구를 통하여 다음 사항을 알 수 있었다.

1. 이론 해석 결과 자동차 주행에 의한 진동은 지반, 철근 콘크리트 구조, 철골 구조 모델 순으로 증가 한다.
2. 자동차의 주행 속도가 10km/h 증가함에 따라 발생 진동은 대략 2dB 씩 증가한다.
3. 철근 콘크리트 구조와 철골 구조 모델은 별도의 방진 대책이 없을 경우 자동차 주행 진동이 24 시간 안락 한계를 크게 상회한다.
4. 자동차 진동 방진 대책으로 노면을 플로팅 슬래브로 시공할 경우 철근 콘크리트 구조 모델은 10dB, 철골 구조 모델은 15dB 감소하고 이 경우 24 시간 안락 한계 이하로 진동이 저감된다.
5. 철근 콘크리트 구조모델에 대하여 실제 자동차 주행 실험을 한 결과 이론 해석값과 2~4dB 차이로 잘 부합 한다.
6. 발포 우레탄 매트를 이용한 플로팅 슬래브 방식의 노면 구조는 차량 진동 저감에 유효한 방법이고, 이와 같이 노면이 시공될 경우 건물을 직접 관통하는 도로를 만들더라도 자동차 진동이 건물에 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

**후 기**

이 논문은 건설교통부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2000 년도 건설기술연구개발사업의 연구 결과를 바탕으로 작성 되었음.

**참고문헌**

- (1) 건설교통부령 제 257 호, 2000, 8.18 “도시 계획 시설 기준에 관한 규칙 개정령 안”.
- (2) 전호민, 1997 “철도 인접구조물의 진동예측모형에 관한 연구”, 연세대학교 박사학위논문.
- (3) 양신추 등, 2001, “열차주행에 대한 방진 슬래브 궤도의 진동해석기법 개발”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1028~1033.
- (4) X. Sheng, C. J. C. Jones and M. Petyt, 1999, “Ground Vibration Generated by a Load Moving along a Railway Track”, *Journal of Sound and Vibration*, 228(1), pp. 129~156.
- (5) K. H. Chua, T. Balendra and K. W. LO, 1992, “Groundborne Vibration Due to Trains in Tunnels”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp. 445~460.
- (6) 일본건축학회, 1991, “uidelines for the evaluation of habitability to building vibration”.