

환경진동의 전달경로 대책

°이 성 호*, 이 주 원*, 정 갑 철**

A Plan on Propagation Process of Environment Vibration

°H. S. LEE, J. W. LEE, G. C. Jeong

ABSTRACT

This study introduces the basic concepts of the vibration reducing methods and presents a case study of 'A' apartment construction site which located nearby railroad. The site is only 60m away from the railroad. Therefore much noise and vibration damages could be expected during train or any other transportation's passing. Especially, the first and second floor may suffer much vibration with the low frequency radiation noise from the walls and floors.

This study estimates the noise level of indoor area by measuring the vibration of indoor walls and floors. From this result, vibration barrier, as a method to reduce the noise level which exceeds proper standard value, was attempted to protect vibration transmit from the railroad.

1. 서 론

건설공사, 공장기계 및 교통기관 등에 의해서 지반내에 전달되는 진동, 즉 환경진동은 그의 특징으로부터 충격적 진동과 정상적 진동으로 나눌 수 있다. 이러한 진동을 지반내에서 차단하기 위해서는 현재까지 다양한 직간접적인 대책방안이 제안되고 있다. 그중에 대표적인 방법으로서 지중방진벽을 들 수 있다. 이 경우 방진벽의 구성재료로는 강판, slag, PC벽체 등이 있고, 연결재료로서는 발포스티로폼, 발포우레탄, 가스쿠션 등이 제안되고 있다.

본 논문에서는 진동저감 대책법의 기초개념을 간단히 소개하고 철로 가까이에 현재 시공중에 있는 A아파트 현장의 진동저감 대책 사례를 소개하고자 한다. 현장은 약 60 m 이격된 거리에 철로가 위치해 있어 기차 및 전철, 화물차 통과시 이로

인해 철로변과 가까이 있는 동에 소음과 진동의 피해가 있을것으로 판단된다. 특히 1, 2층의 저층 세대에선 진동전달로 인한 실내 벽체나 바닥으로부터 저주파 방사소음이 우려되는 바, 실내 벽체 및 바닥의 진동을 측정하여 향후 실내에서 예상되는 소음도를 예측하고 이로부터 관련기준값을 상회하는 소음도에 대한 저감방안으로 부지 경계선에 방진벽을 설치하여 철로에 인접된 아파트 세대로의 진동전달을 차단시키고자 하였다.

2. 관련규제기준

1) 미국운송협회(American Public Transit Association ; APTA)가 권장하고 있는 철도진동에 의해 발생한 지반진동에 의해 건물 내부에 발생하는 소음의 허용한도

* 정희원, (주)대우건설 기술연구소 주임연구원

** 정희원, (주)대우건설 기술연구소 책임연구원

Table 1 철도진동에 의한 발생 소음 허용한도

지 역	일과성 지반소음의 허용 최대치(설계 목표치)			비 고
	단독 주택	다세대 주택	호텔, 모텔 등	
인구희박 주거지역	30	35	40	단위 dB(A)
일반 주거지역	35	40	45	
인구밀집 주거지역	35	40	45	
상업활동 지역	40	45	50	
공장지대/ 도로변 지역	40	45	55	

2) 일본의 실내소음에 관한 건물, 용도별 적용등급

Table 2 실내소음의 적용등급

건축물	소음등급			소음레벨[dB(A)]		
	특 급	1 급	2 급	특 급	1 급	2 급
공동주택 (거실)	N-25	N-30	N-35	30	35	40
사무소 (사무실)	N-35	N-40	N-45	40	45	50
단독주택 (침실)	N-25	N-30	N-35	30	35	40

상기의 표에 따라 철도운영에 의한 실내 소음도를 40dB(A) 미만이 되도록 하는 것을 목표로 검토하였다.

3. 현장측정개요

철도운영으로 인한 공해진동 및 소음이 우려되는 현장의 위치도를 Fig. 1에 도시하였다. 그림에 표시한 측정위치세대는 철로변과 가장 가깝게 위치한 곳으로서 약 60M 이격되어 있고, 철로변과 아파트현장 사이에는 6M 높이의 방음벽이 설치될 예정이며 그 하부로 콘크리트 옹벽 설치가 계획되어 있었다. 본 검토에서는 콘크리트 옹벽면에 진동 절연재를 부착함으로써 방진벽의 역할을 수행 할 수 있도록 하였다.

공해진동 방지대책 전 실태조사를 위해 표시한 세대 실내의 벽체나 바닥진동, 침실소음 등을 비롯하여 세대외부의 소음을 측정하였다. 측정당시의 상황은 아파트 각 동이 3-4층 정도의 골조만이 세워졌기 때문에 실내 창호나 방음벽은 전혀 안된 상황이었다. 측정시간은 현장작업이 종료된 18:00 부터 시작하여 24:00까지 행하였으며, 1대의 차량이 운행될 때 측정위치 모두를 DAT Recorder를 이용하여 동시에 측정하였다. 차량이 현장을 지나가는 시간동안의 최대 진동도 및 소음도를 취득하여 분석에 사용하였다. Fig. 2에 측정위치를 표시하였다.

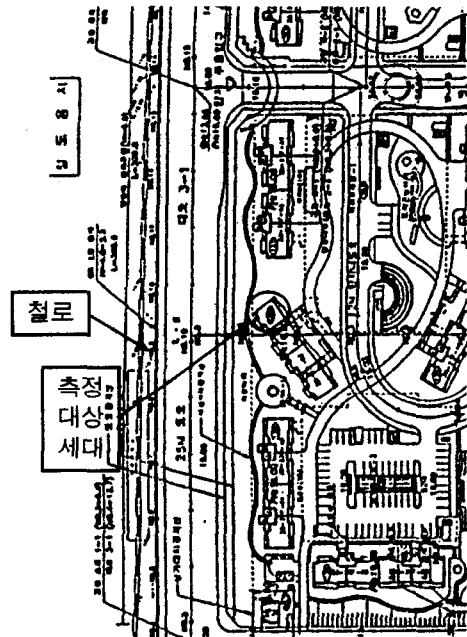


Fig. 1 현장 위치도

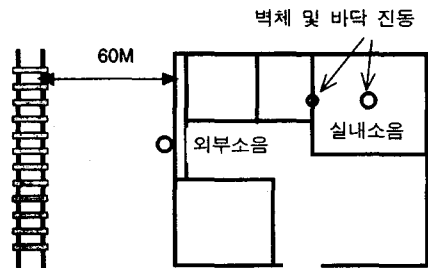


Fig. 2 측정 위치도

4. 철도진동 및 소음실태

4개의 선로로 운행되는 새마을 및 무궁화 등의 기차 상하행선, 전철 1호선 상하행선, 화물차 등을 여러 번 반복측정하고, 또한 동시에 운행되는 경우도 발생되므로 여러 가지의 경우에 대해서 측정분석한 데이터에 대해서 최대값을 Table 3과 Table 4에 나열하였다. 표기상 편이를 위해 No. 1, 2등으로 각 예를 구분하였다.

Table 3 외부소음 측정결과

No.	주행 차종	소음도 [dB(A)]
1	전철 하행, 기차 하행, 화물차	72.6
2	화물차	66.2
3	기차 상행	70.2
4	화물차	65.1
5	화물차 - 고속 진행	79.7
6	기차 상행, 전철 상행	67.6
7	화물차, 기차 하행	80.1
8	화물차, 전철 상행	65.9
9	기차 상행 - 엔진가속시	70.6
10	전철 상하행	63.8

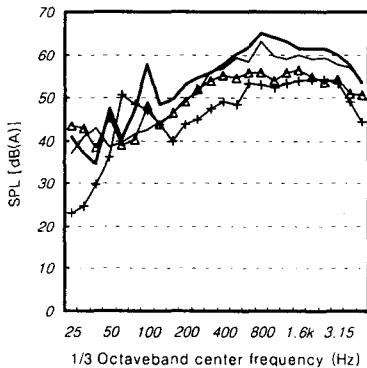


Fig. 3 외부소음의 주파수 특성

대표적인 10가지의 경우에 대해서 본 결과 전철 운행시에 소음도가 대체적으로 낮았고 기차와 화

물차 등이 동시에 여러 대 운행될 경우 소음이 상당히 높았는데 전체적으로는 최소 65dB에서 80dB 정도의 소음도를 보였다.

Table 4 실내벽체 및 바닥진동 측정결과

No.	벽체진동 [dB]	바닥진동 [dB]
1	62.7	62.1
2	56.8	58.7
3	48.4	51.5
4	49.8	47.3
5	62.2	47.8
6	49.3	46.6
7	71.7	67.5
8	51.6	53.0
9	68.7	64.7
10	50.8	56.2

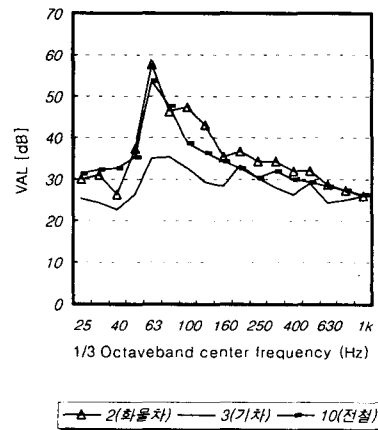


Fig. 4 실내 바닥 진동의 주파수 특성

철도진동에 의한 벽체진동이나 바닥진동의 영향을 검토한 결과 Table 4와 같은 경향을 보였으며 그에 따른 주파수 특성은 Fig. 4에 보이고 있듯이 화물차나 기차가 비정상적으로 운행시, 즉 아주 느린 속도로 서서히 지나가거나 멈추었다가 다시 엔진가속과 함께 급출발하는 경우 등에는 특정 주파수대역에서 상대적으로 높은 진동레벨을 나타내고 있으나, 정상적인 속도로 건물 전면을 지나가고 있

는 경우에는 벽체나 바닥면의 모드특성과 어울린 주파수특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 실내소음도에 끼치는 기여도 검토시 건물 구조물의 진동에 의한 방사소음이 주(主)라 가정한다면 이러한 주파수 특성을 고려하여 진동절연 대책을 계획하여 할 것이다.

5. 실내소음도 예측

문제 대상 A아파트의 준공 후 실내에 미치는 철도진동 및 소음공해에 의한 실내소음도를 미리 예측하여 기준값을 상회하는 정도를 파악하여 방진벽설계에 참조하고자 하였다.

실내에 미치는 소음은 지반진동과 구조진동을 통해 실내바닥 및 벽체로부터 방사되는 고체전달음과 창호를 통해 실내로 전달되는 공기전달음으로 구별할 수 있으며 각각의 소음도를 별도로 계산하여 최종적으로 합산한 소음도를 실내소음도라 정하였다.

먼저, 고체전달음을 고려해보면 건물의 진동레벨과 지반소음레벨의 근사적 상관관계식은 다음과 같다.

$$L_p = L_a - 20 \log(f) + 36 \quad (1)$$

- L_p ; 건물내부 지반소음레벨 [dB]
- L_a ; 건물바닥슬래브의 가속도레벨 [dB]
- f ; 진동의 중심주파수 [Hz]

위의 식으로부터 계산한 결과를 다음 Table 5, 6에 정리하였다.

은행 차종별 실내에서의 소음도를 예측해 본 결과 최대 약 50dB(A)정도를 보였으며, 이는 일본의 실내소음에 관한 적용등급 N-35(40dB(A), 2급)를 기준으로 할 때 약 10dB(A)정도의 저감량을 요한다고 볼 수 있다. 따라서, 실내에서의 소음도가 40dB(A) 미만으로 감소되기 위해서는 대상지점에서의 진동감소량이 10-13dB 정도 요구되는 것으로 평가된다.

Table 5 실내소음도 예측-(1)

No.	바닥진동 [dB]	진동 중심주파수 [Hz]	지반진동에 의한 방사소음 [dB]	지반진동에 의한 방사소음 [dB(A)] (a)
1	62.1	100	58.1	39.1
2	58.7	63	58.7	35.7
3	51.5	80	49.4	27.4
4	47.3	80	45.2	23.2
5	47.8	80	45.7	25.7
6	46.6	80	44.5	24.5
7	67.5	100	63.5	46.5
8	53.0	80	50.9	30.9
9	64.7	80	62.6	42.6
10	56.2	63	56.2	33.2

Table 6 실내소음도 예측-(2)

No.	방음벽 및 창호의 차음량을 고려한 실내소음(공기전달음) [dB(A)] (b)	예측 실내소음도 [dB(A)] (a)+(b)
1	37.4	41
2	31.0	37
3	35.0	36
4	29.9	31
5	44.5	45
6	32.4	33
7	44.9	49
8	30.7	34
9	35.4	43
10	28.6	35

6. 진동방지 대책방안

6.1 개요

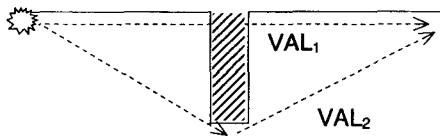
철도진동에의 방지대책으로는 Table 7에서 나열

한 것처럼 진동원 대책, 전파경로 대책, 수신점에서의 대책으로 나눌 수 있다. 이 중에서 현장 여건으로볼 때 적용할 수 있는 경우는 전파경로상의 대책으로 방음벽 설치를 위한 지중 옹벽에 방진벽을 시공하는 것을 채택할 수 있다.

Table 7 철도진동 방지대책의 예

진동원 대책	<ul style="list-style-type: none"> - 궤도구조의 개량 - 터널중량의 보완 - 방진궤도공법의 적용 (Ballast Mat, EPS Mat, Floating Slab 등) - 운행방법의 검토
전파경로 대책	<ul style="list-style-type: none"> - 거리감쇠 - 방진벽 - 지중防振孔 - 지중방진벽
수진점 대책	<ul style="list-style-type: none"> - 건물대책(구조부/주변부/내부)

6.2 방진벽의 진동차단 효과



VAL₁; 방진벽 재질에 의한 차단효과
VAL₂; 방진벽 깊이에 의한 차단효과

Fig. 5 방진벽 효과

$$IL(\text{Insertion Loss}) = VAL_{\text{대책전}} - VAL_{\text{대책후}} \quad (2)$$

$$VAL_{\text{대책후}} = 10 \log(10^{VAL_1/10} + 10^{VAL_2/10}) \quad (3)$$

6.3 방진벽 형상 설계

- 1) 파장 $\lambda = c/f = 300/100 = 3$ (m)
 - 극한 조건으로서 견고한 점토(실트) 300m/s의 진동 전달속도 선정
 - 철도진동의 피크(Peak) 주파수 100Hz 대입

- 2) 방진벽의 폭 $d = \lambda/20 = 0.15$ (m)
- 3) 방진벽의 깊이 h는 Fig. 9로부터 구하면 다음과 같다.

	진폭비	진동저감량 [dB]	h/λ	방진벽 깊이 [m]
가	1/3	10	1/2	1.5
나	1/4	12	1	3

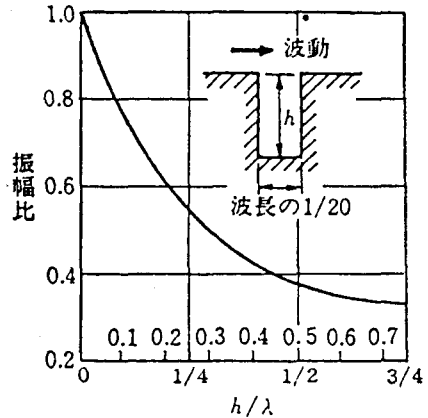


Fig. 6 방진벽 깊이와 진폭비

6.4 진동절연층

지반진동 차단 구조물은 진동원과 수신 구조물 사이의 지반 내에 흙 및 암반과는 응력과 저항 특성(acoustic impedance)이 상이한 재료를 이용한 이질 매질층을 인공적으로 형성함으로써, 진동과의 간섭(interference), 산란(scattering), 흡진(absorb), 반사(reflection) 현상을 이용하여 수신 구조물쪽으로 전달되는 지반진동과 에너지를 감소시키는 방진 구조물을 총칭한다. 이는 파동의 전달매체가 지반이기 때문에 특성 임피던스($\alpha = \rho c$ (밀도×전달속도)가 다른 층을 설치함으로써 경계의 반사로 투과에너지를 감소시키는 효과를 볼 수 있다.

진동절연층으로써 사용되는 재료로는 발포폴리에틸렌, 경질발포스티렌, 연질발포스티렌 등이 있으며, Fig. 7에서와 같이 I, II의 경계층에 들어가는 파동의 진폭에 대한 III의 투과진폭의 비를 변위파동전달율 τ 라고 하며 이를 이용하여 진동저감량을 구하면 Table 8과 같다.

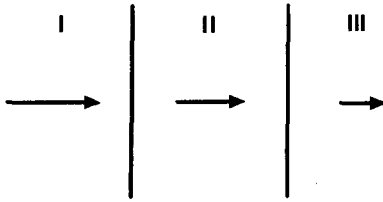


Fig. 7 진동절연 3층 모델

Table 8 재질별 폭에 따른 진동저감량 (dB)

폭	재질 발포폴리에틸렌	경질발포스틸렌	연질발포스틸렌
50 mm	6	6	7
100 mm	8	6	9
150 mm	10	7	14

계산예) 연질발포스틸렌 $\rho=25 \text{ kg/m}^3$, $c=80 \text{ m/s}$,
 $\alpha=2 \times 10^3 \text{ kg/m}^2\text{s}$

$$\alpha_{12} = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} = \frac{25 \times 80}{1800 \times 300} = 0.0037$$

$$\alpha_{23} = \frac{\rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} = \frac{2400 \times 1900}{25 \times 80} = 2280$$

$$\frac{\omega H}{c_2} = \frac{2\pi f H}{c_2} = \frac{2\pi \times 100 \times 0.15}{80} = 1.18$$

(H ; 절연층의 폭, f ; 진동주파수)

$$\tau = 4\alpha / [(1 + \alpha_{12})^2 (1 + \alpha_{23})^2 + (1 - \alpha_{12})^2 (1 - \alpha_{23})^2 - 2(1 - \alpha_{12}^2)(1 - \alpha_{23}^2) \cos \frac{2\omega H}{c_2}]^{1/2}$$

$$20 \log \tau \approx 14 \text{ (dB)}$$

Table 8을 살펴보면 진동절연재 중 연질발포스틸렌의 효과가 가장 큰 것으로 나타났으며, 그의 절연층 폭은 150mm 정도 되면 약 14dB 감소되는 것으로 예상되었다.

6.5 방진벽 형상 및 재질에 의한 진동저감 효과

전 절에서 언급한 방진벽의 형상과 재질에 의한 진동저감량을 합산하여 최종적인 진동저감 효과를 산정해보면 다음과 같다. 재질은 연질발포스틸렌을 사용하며 그 폭은 150mm로 정하여 14dB 저감량을 예상하며, 형상적으로 진동 진폭비를 1/4정도

감소시키기 위해 방진벽 깊이를 3m로 정하여 이로부터 12dB의 저감량을 예측할 수 있다. 따라서 식 (3)에 의해서 계산을 해보면 최종적으로 약 10dB의 진동저감량이 구해진다.

6.6 방진벽 효과에 따른 실내소음도 예측

방진벽 효과에 따른 진동저감량 10dB를 고려하여 실내에 미치는 고체전달음 및 공기전달음을 합성한 총합 실내소음도를 계산하면 다음과 같다.

Table 9 방진벽 대책 전후의 예상 소음도 비교

No.	방진벽 대책 전 실내소음도 [dB(A)]	방진벽 대책 후 실내소음도 [dB(A)]
1	41	36
2	37	30
3	36	31
4	31	27
5	45	41
6	33	29
7	49	44
8	34	28
9	43	39
10	35	28

이상과 같은 대책방안대로 설계할 경우 아파트 실내에서 철도진동에 의한 실내소음도는 40dB(A) 미만으로 예상을 할 수 있다. 그러나, 이는 이론상의 예측일 뿐 실제로는 많은 다른 요인들이 작용을 끼칠 것이라 생각되므로 쉽게 판단을 내리기는 힘들다.

7. 진동절연 대책에 의한 실 효과

상기와 같은 방안에 의하여 방진벽을 설치하고 대책 전 측정하였던 동일한 장소에서 실내진동 및 소음도를 측정하여 비교검토하였다. Table 10에 방진벽 대책 후의 측정결과를 정리하였고, Fig. 8에 기차가 운행되는 대표적인 경우의 실내 바닥진동 주파수특성을 도시하였다.

Table 10 방진벽 대책 후 측정결과

주행차종	외부소음 [dB(A)]	바닥진동 [dB]	내부소음 [dB(A)]
전철	68.8	43.2	40.6
전철	73.5	50.1	44.9
기차	66.1	48.9	44.3
기차	71.9	49.7	46.8
전철, 기차	70.2	49.6	48.4
전철, 기차 - 엔진가속시	70.0	55.9	54.7

※ 외부 방음벽 미설치

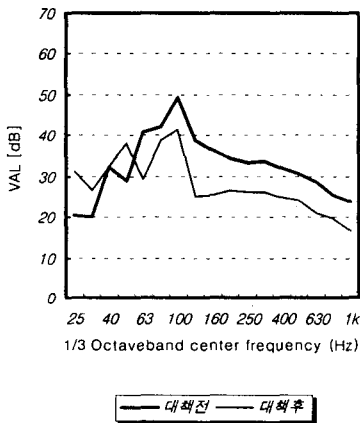


Fig. 8 방진벽 대책 전후의 실내바닥진동 주파수특성 비교 (기차 운행시)

방진벽이 설치되고 대상 아파트에 내부샤시가 설치되어 있으나, 방음벽 및 외부샤시가 설치되지 않은 관계로 공기전파음이 실내 소음에 많은 영향을 미치고 있다. 그러나, 실내의 표면진동이 대책 전에 비해 3~12 dB 정도 저감되고 있어 향후의 실내 예상소음도는 40 dB(A) 미만이 될 것으로 판단된다.

8. 결 론

환경진동에 대한 지반내에서의 진동전달 대책법에 관련된 진동저감 메카니즘에 대해서 본 논문에서 간략히 설명하였고, 최근에 실시한 A현장의 진동저감대책 사례를 들었다. 이 사례를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 열차운행에 따른 실내 벽체 및 바닥의 진동을 측정하여 향후 실내에서 예상되는 소음도를 예측하면 최대 50dB(A)가 예상되며, 실내소음 권장치인 40 dB(A)를 만족시키기 위하여 부지 경계선에 설치될 방음벽 옹벽과 더불어 방진벽을 설치하였다.

2. 방진벽은 깊이 3m, 폭 0.15m에 연질의 발포스틸렌(밀도 25 kg/m³)를 설치하였으며, 방진벽 설치 후 기차 운행시 실내 바닥진동을 측정한 결과 대책전 46.6 ~ 67.5 dB에서 대책후 43.2 ~ 55.9 dB로 최대 12 dB의 진동 감소를 보였다.

3. 따라서 향후 철로변에 위치한 아파트 세대에서의 실내소음도는 방음벽이 설치된다면 실내권장치인 40dB(A)를 만족할 것으로 예상된다.

4. 최근의 국내외에서 실시된 저감대책 사례를 보면 방진벽이 주를 이루고 있으며, 적용된 방진벽의 재료로는 경질재료부터 연질재료까지 다양하다. 또한 적용재료는 진동발생원의 특성, 지반조건, 시공조건등을 고려해서 선택되고 있다. 그러나 현재까지 결정적인 진동차단법이 확립되어 있지 않기 때문에 이 분야의 연구가 계속적으로 진행되어 효과적이고 실용적인 대책법의 연구개발이 요망된다.

9. 참 고 문 헌

1. 소음진동공학회, 소음진동편람, 1995
2. 일본건축학회, 실무적 소음대책지침 응용편, 1987
3. 牟川 満, 환경진동의 전달경로 대책, 소음제어 vol. 24 No. 6, 2000
4. Noise and Vibration Control, LEO L. BERA NEK, 1971