

열차하중에 의한 지중구조물의
소음진동감소를 위한 차단벽사용에 관한 연구
A Study on Using Infilled Trenches for Vibration Reduction
of Underground Structures by Train Loading

○권기준* · 정대열** · 고철수*** · 김용길*** · 황성호***

Kijun Kwon, Deayul Jeong, Cheolsoo Ko, Yonggil Kim, Seongho Hwang

Key Words : Infilled Trenches(차단벽), Underground(지중), Train Loading (열차하중)

ABSTRACT

Installing vibration isolation in structures, such as structures adjacent to subways, may be delicate because of the proximity with the vibration source or because of the wave propagation path. This paper discusses on method that install isolation pads on underground walls as a part of the vibration mitigation system, and also on its efficiency.

The proposed method is proven to affect significantly the distribution of acceleration in the neighborhood of the structure and to reduce efficiently the maximum amplitude of the vibration. It is also seen that installing isolating pads until the depth of the foundations and deeper is more efficient than installing such device separately from the structure.

This study being limited to the comparison of installation methods, further studies considering the thickness, stiffness and other parameters should be required.

1. 서 론

도시의 비대화와 더불어 지상교통의 정체를 해결할 수 있는 방법으로서 전철과 지하철의 역할이 중요해지고 있다. 이와 더불어서 역사를 중심으로 한 역세권의 발달은 철로 주변 구조물이 진동소음에 노출되도록 하여 민원발생의 소지가 증가하고 있다. 철로주변에 건설되는 구조물에 대한 소음 진동을 저감하기 위한 노력이 많은 연구자들에 의해 연구되어 지고, 그 결과가 실제 시공되어지고 있다. 소음진동을 저감하기 위한 방안으로는 진동원, 전파경로, 그리고 수신부에서의 대책으로 크게 나뉘어진다. 진동원에서의 방진 대책으로는 진동원이 되는 차량, 궤도 및 선로 구조물을 저

진동구조물로 시공하는 것을 들 수 있다. 고속주행이 이루어지는 선로를 장대레일로 시공하는 이유도 연결부에서 발생하는 소음진동을 줄이기 위한 방법중의 하나이다. 특별한 경우에 레일과 타이플레이트 사이에 고무패드를 설치하고 Floating Slab을 타설하여 자갈도상과 목침부를 부설하는 방법이 사용되고 있으며, 터널구조체의 외벽에 가압코르크판을 부착하고 아스팔트 슈트로 처리한 예도 있다⁽¹⁾. 진동원으로부터 구조물까지 진동이 전파되는 경로상의 방진대책으로는 진동원으로부터 구조물의 위치를 멀리하여 기하감쇠를 유발하는 방법이 있으나 이는 부지조건에 따라서는 적용할 수 없다. 부지의 위치가 정해져 있는 상황에서는 진동이 전파되어 지는 매질의 성질을 바꾸는 방법이 요구되는데, 방진구 또는 방진벽을 사용하여 진동을 차단하는 방법을 사용할 수 있다^(1,2). 이 때 방진구나 방진벽은 진행하는 진동파를 반사시키는 역할과 함께 방진구조물을 지나온 파

* 공학박사, 국립한경대학교 부교수

** 공학박사, 토목구조기술사, 에메랄드소프트 대표

*** (주)유일엔시스 기술연구소

동의 간섭현상을 이용하여 진폭을 감소시키게 된다. 구조물에 가해지는 진동에 대해 구조물의 응답을 줄이기 위한 방안 즉, 수진부대책으로는 지반을 개량하거나 건물자체를 증량화하는 방법, 탄성받침을 사용하는 방법, 에너지 흡수용 감쇠기들의 사용하는 방법 등이 있다.

철로 주변의 진동저감을 위한 많은 대책에도 불구하고 지하철에 인접한 지하구조물의 경우에는 적용할 수 있는 방법 자체가 매우 한정되게 된다. 지하층이 깊은 경우에는 구조물에 영향을 미칠 수 있도록 방진구의 깊이를 충분히 깊게 시공하는 것이 사실상 방진구를 설치할 수 있는 충분한 여유공간을 확보하는 것 또한 쉽지 않다. 탄성받침을 사용하여 구조물을 격리시키는 방법 또한 외벽이 지반과 일체로 운동을 하므로 효과를 볼 수 없게 된다. 따라서 지하철에 인접한 지하구조물의 진동저감을 위해서 시공성과 경제성을 고려하여 볼 때 구조물의 기초시공으로부터 지하벽체시공에 이르기까지 벽체에 차단벽을 부착하거나 벽체와 얼마간 떨어지게 차단벽을 시공하는 방법을 고려해 볼 수 있다.

본 연구에서는 지하철에 인접한 부지에 건설되는 구조물을 대상으로 하여, 지하철에서부터 전파되는 진동에 의한 구조물의 응답레벨을 감소시키기 위한 방법으로서 차단벽을 지하벽을 따라서 설치하였을 때의 방진효율에 대해 알아본다.

2. 점성 경계요소법

지반진동을 해석하는 데 있어서 가장 중요한 내용중의 하나가 지반의 무한성을 잘 반영될 수 있도록 진동이 외부영역으로 전파되어 나가도록 묘사하는 것이다. 이를 위해서 일반적으로 구조물과 진동원에 가까운 영역은 유한요소로 모델링하고 외부지반은 에너지가 외부로 전달될 수 있는 경계로 모형화한다. 외부경계를 나타내는 방법으로는 경계요소법, 점성경계법, 전달경계법, 무한요소법 등이 있다. 본 연구에서는 점성경계요소를 사용하여 외부영역을 모델링한다.

Lysmer와 Kulemeyer는 무한계를 유한계로 근사하는 방법으로 점성경계조건을 개발하였으며⁽³⁾, 이 방법은 유한요소법에 아주 쉽게 적용된다. 조화 탄성파를 거의 완벽히 흡수할 수 있는 경계조건이 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma = \rho V_p \dot{w} \quad (1)$$

$$\tau = \rho V_s \dot{u} \quad (2)$$

여기서 σ 와 τ 는 각각 축방향응력과 전단응력이고, \dot{w} 와

\dot{u} 는 각각 수직방향과 접선방향 속도, ρ 는 밀도, V_p 와 V_s 는 각각 매질의 P-파와 S-파 속도이다. 여기서 속도 \dot{w} 와 \dot{u} 는 식(1)과 식(2)에서와 같이 형상함수를 사용하여 나타낼 수 있다.

위 식은 진동수에 무관하므로 조화 또는 비조화파를 모두 흡수할 수 있으며, 이를 표준점성경계(Standard Viscous Boundary)라 한다.

점성경계의 감쇠행렬을 가상일의 원리를 적용하여 구한다. 점성경계요소 내의 평형조건식으로부터 감쇠행렬을 다음 식으로 정리할 수 있다.

직교방향에 대해서

$$C = \rho V_p \int N^T N dS \quad (3)$$

접선방향에 대해서

$$C = \rho V_s \int N^T N dS \quad (4)$$

위에서 구한 감쇠행렬은 파동이 외부로 전파되어나가는 에너지에 해당하는 크기의 양을 소산시킴으로써 유한요소와 결합하여 지반의 무한성을 묘사하게 된다.

3. 열차하중 산정

열차하중은 준정적하중과 조도하중을 결합하여 입력하중으로 사용한다. 이중보 모형에서 침묵에 작용하는 파워 스펙트럼 밀도함수는 다음식과 같이 구해진다⁽⁴⁾.

$$\hat{y}_{st}(\omega) = \hat{y}_{sr}(\omega) + \hat{y}_{sq}(\omega) \quad (5)$$

식(5)에서 오른쪽 항의 첫 번째 항은 차륜과 레일의 상호작용력에 의한 파워스펙트럼밀도함수로부터 식(6)으로 얻어진다.

$$\hat{y}_{sr}(\omega) = \left| \frac{-\omega^2 m_w k_s'}{(k_r' + k_s' - m_s \omega^2)(-\omega^2 m_w - \omega^2 m_r + k_r)} \right|^2 \cdot \hat{y}_{wr}(\omega) \quad (6)$$

차륜과 레일의 상호작용력은 Kraemer⁽⁴⁾가 제안한 값을 사용하였으며 식(7)과 같다.

$$\hat{y}_{w/r}(\omega) = 10^{(L_v - f_c)/10} \cdot V_{ref}^2 / \omega^2 \quad (7)$$

$V_{ref}: 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

$L_v: 10 \log v - 10 \log(0.33 + 7.81f/v + 22.9f^2/v^2) + 102 \text{ (dB)}$

$f_c: 10 \log(0.0575 AvT) \text{ (dB)}$

A : 진동저감률 (100Hz 이하에서는 10dB/m)

v : 열차속도 (m/sec)

T : 열차통과시간 (sec)

식(1)에서 우변의 두 번째 항인 침묵에 대한 준정적하중의 영향은 식(8)와 같이 레일의 준정적하중에 대한 파워스펙트럼 밀도함수로부터 유도할 수 있다.

$$\hat{y}_{sq}(\omega) = \left| \frac{k_r'}{k_r' + k_x' - m_s \omega^2} \right|^2 \cdot \hat{y}_{rq}(\omega) \quad (8)$$

위의 방법으로 구한 열차하중은 Fig.1과 같이 나타난다. 그림에서 열차하중은 40Hz정도에서 급격히 감소하므로 해석 범위를 100Hz로 한정한다.

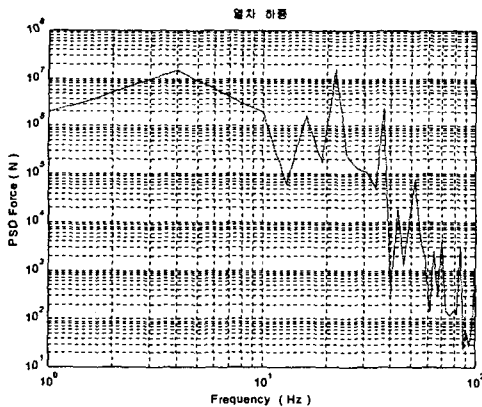


Fig. 1 Train Loading

4. 해석방법

4.1 해석 모델

해석에 고려되는 지반은 깊이가 각각 4.5m, 6.5m인 층적토와 풍화토가 연암위에 놓여져 있는 경우이며, 해석상 연암은 깊이가 무한하다고 가정한다. 대상건물은 분당선 지하철 터널구조물로부터 수평으로 16m 떨어져 있으며 좌우폭 8m이고 지하4층으로서 깊이 15.5m에서 기초가 시공되고 있다. 지하철구조물은 풍화토와 연암층을 관통하며 좌우폭 10m이고 상단과 하단은 지표로부터 11m, 20m에 각각 위

치한다. 구조물의 지상층은 지하층에 대해 중량체로 작용하여 응답을 줄여줄 것으로 판단되므로 해석의 편의를 위하여 해석모델은 지하층만을 모델링 하였으며 Fig.2에 나타난 바와 같다.

해석에 사용된 매질의 물성치는 Table 1.에 나타내져 있으며 이 값은 지하철관련 설계자료 및 토질시험에 의한 자료를 적용하였고 방진재는 EPP 패드로서 두께50mm에 대한 내용이다.

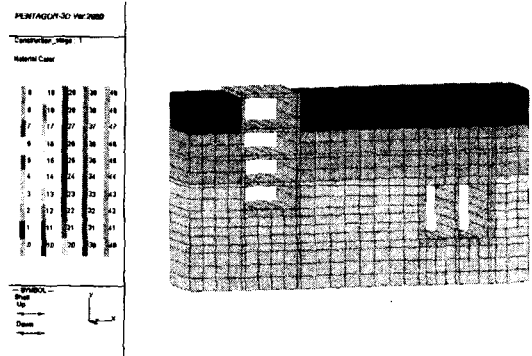


Fig. 2 Modeling of Soil-Structure

Table 1. Material Properties

	Alluvial Soil	Weathered Rock	Soft Rock	Concrete	EPP Pad (50t)
Young's modulus E (kN/m ²)	1.96e4	4.17e4	9.81e ⁵	2.3e7	163
Poisson Ratio (ν)	0.35	0.3	0.2	0.167	0.1
Bulk modulus K (kN/m ²)	2.18e4	3.48e4	6.54e ⁵	1.15e7	67.9
Shear modulus G (kN/m ²)	7.26e3	1.60e4	3.92e ⁵	9.85e6	74.1
Density ρ (ton/m ³)	2.0	2.0	2.45	2.4	0.012
Internal Friction Angle φ (°)	30	32	40	40	-
Cohesion C (kN/m ²)	29.43	19.62	392.4	10	-
Damping Rate ξ (%)	3	4	5	5	9

4.2 해석 변수

본 연구는 지하철운행으로 인한 인접구조물에 미치는 진동의 영향을 줄이는 방안으로서 차단벽을 설치하는 경우의 효율에 대해서 알아보는 것이 목적이므로 차단벽을 설치하지 않은 경우를 기준으로 하여 차단벽의 위치와 깊이에 대한 변화에 따라서 응답특성을 알아보았다. 차단벽의 깊이는 구조물의 기초와 같은 경우, 구조물의 기초보다 1.2m, 2.4m 더 깊게 설치한 3가지 경우를 해석하였다. 또한 차단벽의 위치에 따른 응답내용을 알아보기 위해 구조물의 벽체로부터 50cm 이격시킨 후 기초깊이, 기초보다 1.2m 더 깊은 경우 2가지를 해석하여 비교하여 보았다.

5. 해석 결과

지하철에 인접한 구조물의 지하층에서의 응답을 해석하였을 때 차단벽이 설치되지 않았을 때 나타나는 10Hz 대역에서의 가속도분포도가 Fig. 3에 나타나있으며, Fig. 4는 방진벽이 기초깊이까지 시공되어졌을 때 대하여 같은 주파수 대역에서의 응답이다. 이들 그림에서 방진벽의 설치가 이루어진 경우 Acoustic Impedance 변화되고 그 결과로 파의 간섭현상 등으로 가속도분포양상이 변화하는 것을 볼 수 있다.

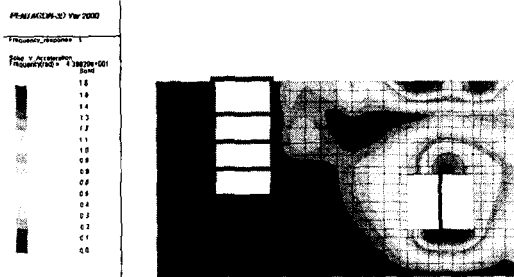


Fig. 3 Vibration Wave Before Equipments

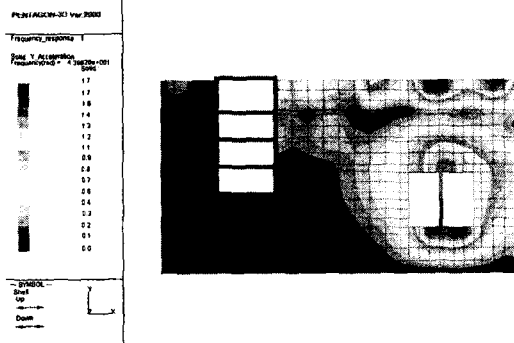


Fig. 4 Vibration Wave After Equipments

Fig.5에서부터 Fig.8까지는 해석이 이루어진 전체주파수대역에서 차단재의 설치방법에 따른 가속도응답을 지하1층에서부터 지하4층까지에 대해서 각각 나타내고 있다. 해석결과를 보면 전체주파수영역에 걸쳐서 양상의 차이는 있지만 피크에서의 값은 차단재를 설치한 경우가 적게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

응답의 중요한 주파수 대역은 7Hz와 21Hz 대역임을 알 수가 있다. 인체에 영향을 미치는 진동수대역이 15Hz이하이므로 그 이하에서 나타나는 피크인 7Hz에서의 최고값이 Table 2에 비교되어있다. 이 결과에서는 차단재의 이격에 따라서는 그 차이가 크게 나타나지 않았으나, 차단재의 매입깊이가 증가함에 따라서 응답의 감소에 영향이 나타나는 것으로 확인되었다.

본 연구에 나타난 결과의 양상은 특정부지형태에 대해서 나타나는 것이며 일반적인 부지의 층상형태, 진동원으로부터의 거리, 구조물의 특성등과 같은 많은 변수를 고려하기 위해서는 더 많은 연구가 진행될 필요가 있다고 사료된다.

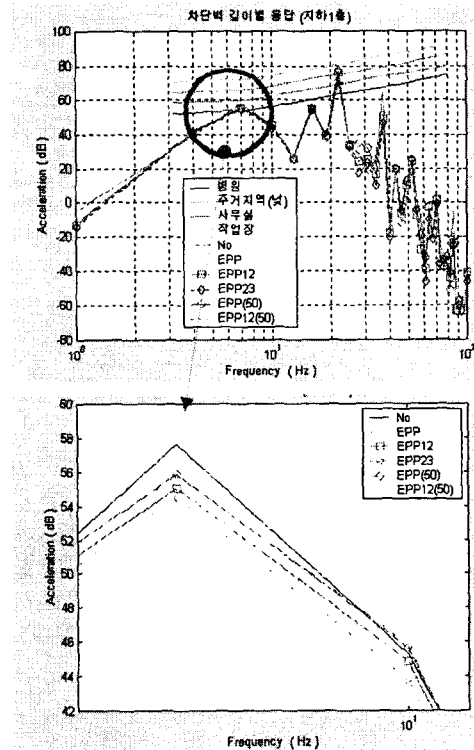


Fig. 5 Frequency Response of 1st Underground

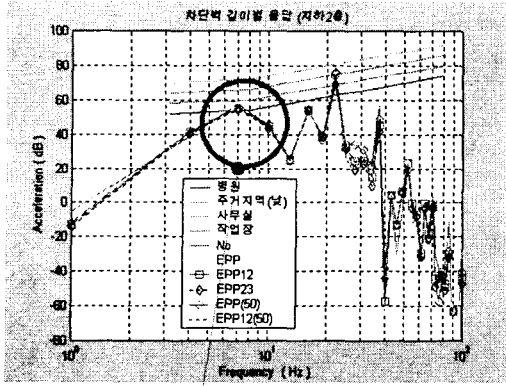


Fig. 6 Frequency Response of 2nd Underground

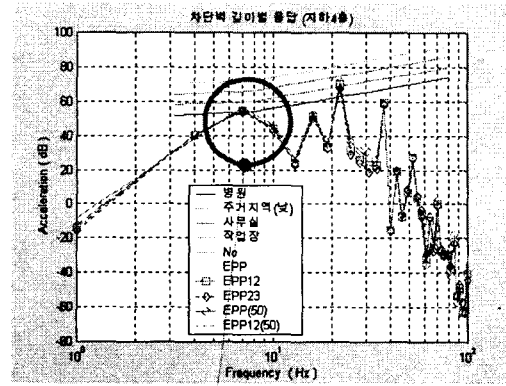


Fig. 8 Frequency Response of 4th Underground

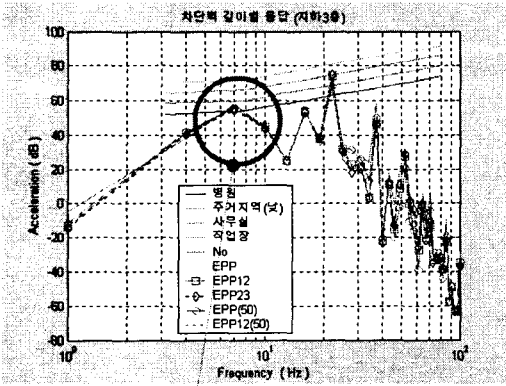


Fig. 7 Frequency Response of 3rd Underground

Table 2. Peak Acceleration at 7Hz Frequency

	7Hz Peak Acceleration (dB)			
	1st	2nd	3rd	4th
Before Equipment	57.7	57.6	57.5	56.5
Bottom	55.8	55.7	55.8	55.2
1.2m Depth	55.1	55.1	55.1	54.5
2.4m Depth	54.6	54.5	54.6	54.1
Bottom 0.5m Gap	55.7	55.7	55.9	55.2
1.2m Depth 0.5m Gap	55.2	55.2	55.3	54.6

6. 결 론

본 연구에서는 지하철에 인접한 구조물과 같이 진동원 및 전파경로상의 방진대책을 실시하기 어려운 경우에 대하여 수진부의 방진대책의 일환으로서 지하벽체에 차단재를 설치하는 방법에 대하여 그 효율성을 알아보았다. 방진재가 설치되면 구조물주변의 가속도분포가 확연하게 바뀌는 것을 볼수가 있으며, 피크에서의 진동값이 감소하는 결과를 보인다.

결과에 따르면 방진재의 설치방법으로는 구조물로부터 방진재를 이격시켜 설치하는 방법보다는 방진재를 구조물의 기초아래 깊이까지 설치하는 방법이 효율적으로 나타났다.

본 연구는 방진재의 설치방법에 대한 비교만 이루어졌으며 방진재의 두께, 강성, 등에 대해서도 계속 연구할 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 신종서, 이희현, 양신추(1993), "고속철도에서의 진동 및 그 대책,"한국소음진동공학회지 제3권 제2호, pp.103-111.
- (2) 한국지반공학회(1997), 진동 및 내진설계 지반공학시리즈 8, 구미서관.
- (3) Lysmer, J., and Kuhlemeyer, R. L. (1969), Finite Dynamic Model for Infinite Media, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.95, pp.859-877.
- (4) K.H.Chua, T. Balendra and W.Lo, "Groundborne Vibrations due to Trains in Tunnels" Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 21, pp.445~460, 1992