

# 감쇠계수를 이용한 Wave-Guide형 노반구조의 방진성능 평가

## Vibration reduction Efficiency of the Wave-Guide typed Roadbed Structures using the Attenuation Coefficient

이일화\*                      황선근\*\*                      조성호\*\*\*  
Lee, Il-Wha                  Seon-Keun Hwang                  Sung-Ho Joh

### ABSTRACT

The ground vibration which is induced by train leads defect and crack of neighborhood structure. Consequently, in order to reduce the train vibration, it is need to appropriate countermeasure. Wave-guide typed roadbed induce the train vibration to a channel wave forms using the difference of the track layer's stiffness. Therefore train vibration is restrictively attenuated along the longitudinal direction of the track. 5 kind of wave-guide typed roadbed structure is selected in this paper. A finite element, time history, linear spectrum, transfer function and damping ratio analysis are performed to evaluate the vibration reduction efficiency as the wave-guide roadbed.

## 1. 서 론

콘크리트궤도의 노반은 궤도 바로 아래에 접해 있기 때문에 상부의 하중과 충격을 주변 지반으로 그대로 전달하게 된다. 따라서 도심지 통과구간에서 열차 주행에 의한 지반진동의 전파는 흔들림, 균열 등을 야기시켜 구조물의 사용성 및 안전성에 영향을 미치기 때문에 환경공해 방지 및 인접 구조물의 안전 측면에서 간과할 수 없는 문제이다. 본 논문에서는 열차주행으로 인해 발생하는 지반진동의 전파를 억제하고 일정한 방향으로 유도(wave-guide)하여 감쇠시킴으로써 방진노반의 성능을 극대화하는 노반구조를 감쇠계수를 이용하여 검토하고자 한다. Wave-guide 개념은 열차 진동으로 발생하는 응력파를 노반의 강성구조 대비를 이용하여 channel wave 형태로 유도하는 것으로서, 이로 인하여 열차 진동이 궤도 진행방향의 노반에 국한되도록 하여 열차진동의 전파를 감쇠시키고자 하는 개념이다.

## 2. Wave-Guide 개념에 기초한 노반구조의 제안

### 2.1 Channel Wave의 지층 전파

채널파(Channel Wave)는 주변매질의 속도보다 낮은 속도를 갖는 지층에서 발생하는 파동으로 저속도 층에 제한되어 전파하며, Guide-Wave라고도 불린다. 채널파는 주로 박층에서 생성되는데, 여기서 박층이란 파동원의 파장보다 작은 두께의 층을 말한다. 이중 P파와 SV파의 반사에 의해 생성되는 파동을 Rayleigh channel wave라고 하며, SH파의 반사에 의해서 생성되는 파동은 Love channel wave라고 한다.

그림.1은 SH파의 일반적인 전파 양상과 저속도층내 SH파에 의해 생성되는 Love channel wave를 보여준다. 그림.1에서 볼 수 있듯이 박층 내에서 발생한 SH파는 일정한 각도 이하이고, 경계와 만나면 거의 모두 반사되어 새로운 형태의 파군을 이루게 된다. 이 파군이 형성되는 원인은 아주 작은 위상차를 갖는 파동이 모여 서로 간섭을 일으키기 때문이다. 대개 Love

\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 정희원  
E-mail : iwlee@krri.re.kr

TEL : (031)460-5326 FAX : (031)460-5319

\*\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 정희원

\*\*\* 중앙대학교 토목공학과 정교수 정희원

channel wave의 속도는 이 파군의 속도 즉, 군속도(group velocity)에 의해서 측정된다. 일반적으로 채널파의 생성은 지반층의 폭과 그의 일관성, 발생원의 주파수, 지반층과 콘크리트층 또는 암반층과의 물성대조 및 배열상태, 발생원과 수신기 사이의 거리 등과 상관되고 있으며, 이중 현실적으로 가장 핵심적인 요인은 층의 구조라 할 수 있겠다. 또한 Love channel wave는 발생원으로부터 멀어짐에 따라 파형이 늘어지는 분산(dispersion)이 그 특징이며, 위상속도가 군속도보다 빠르면 정상분산(normal dispersion), 반대의 경우는 역분산(inverse dispersion)이라고 한다. 또한, 불연속부를 만나면 짧은 파장의 채널파는 전파하고 긴 파장의 채널파는 반사하는 양상을 보인다.

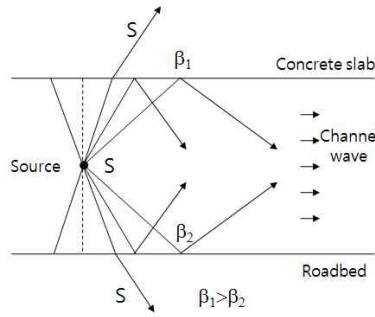


그림 1. Shear wave propagation in the roadbed structure

## 2.2 Wave-Guide 개념에 기초한 노반구조

열차에 의해 발생하는 진동은 궤도와 지지 구조물인 노반으로 전파한다. 이런 진동은 주변건물에 안전적인 측면과 환경공해 등을 유발하게 된다. 이런 이유에서 발생하는 진동을 주변 건물로의 전파를 방지하기 위하여 여러 가지 방진공법들이 개발되고 있다. Wave-Guide 개념에 기초한 노반도 이런 방진공법의 일종으로 볼 수 있다. 상기 노반은 강성도(stiffness)가 서로 다른 노반의 재료를 잘 조합하여 최적의 응력과 전달저항(acoustic impedance)을 도출하여 열차 진동의 인근 지반 확산을 방지하는 것이다. 즉, 강성도가 서로 다른 여러 층으로 노반구조를 형성하며 열차 진동이 노반 내에 갇힌 상태로 궤도 진행 방향으로 전파되도록 유도하고자 하는 것이다.

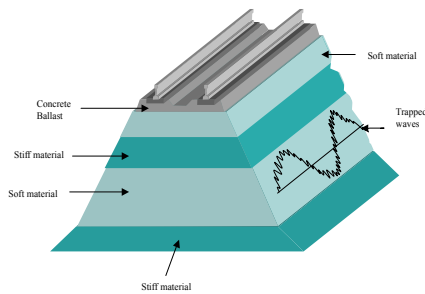


그림 2. Wave-guide type Roadbed structure

Wave-Guide 개념에 기초한 철도노반의 구조를 개발하기 위한 여러가지 모형실험을 수행하기 위하여 5개의 서로 다른 모형을 제작하였다. 5개의 모형중에 4개의 모형은 똑같은 크기의 콘크리트 슬래브를 사용하였고, 다른 하나는 폭에 있어서 나머지와 다르다. 그리고 각기 다른 노반의 조건을 만들어서 본 연구의 핵심인 Wave-Guide 개념에 기초한 철도노반을 검토하기 위하여 같은 조건하에서 실험을 수행하였다. 특히 콘크리트 슬래브를 다져진 자연 노반위에 올려 놓은 모형과 지중에 channel 모양의 구조물을 매설하여 만들어진 모형사이에서 channel wave 생성에 의한 진동의 전파 영향을 비교

분석하고자 한다.

### 3. Wave-Guide 노반구조의 선정

Wave-guide형 노반구조의 성능평가를 위하여 사용한 철도노반 모형은 모두 다섯 가지로서 Table. 1에 제시된 바와 같다. Table. 1의 다섯 가지 모형은 wave-guide 기능이 없는 노반에 대하여 wave-guide 기능을 가지고 있는 노반의 기능을 상대적으로 평가하기 위한 것으로서, EPS, 모래, 콘크리트 channel box를 이용하여 wave-guide 기능을 구현한 것이다. 이와 더불어, 현재 고속전철의 표준노반으로 사용되고 있는 콘크리트 슬래브 표준단면을 50% 축소하고 방진고무를 설치한 경우에 대해서도 비교평가를 위하여 실험계획에 포함하였다. 콘크리트 슬래브는 50cm×300cm×8cm 크기로 모든 모형에 동일하게 사용되었다. 모형1 ~ 모형4는 지반을 1m×4m× 0.5m 굴착하였고 모형5는 지반 굴착을 2m×4m×0.5m로 하였다. 양질의 흙을 사용하여 핸드컴팩터를 사용하여 다짐하였다.

표 1. Wave-guide Roadbed model for evaluation

철도 노반 모형	구조 형식
모형 1	wave-guide 기능이 없는 노반
모형 2	EPS를 이용한 wave-guide형 노반
모형 3	모래를 이용한 wave-guide형 노반
모형 4	콘크리트 channel box를 이용한 wave-guide형 노반
모형 5	방진고무를 설치한 콘크리트 노반

#### ① Model 1

자연지반의 굴착하고 3층의 다짐층으로 나누어서 각 층마다 4회씩 왕복하여 다져서 그 위에 콘크리트 슬래브를 거치하였다.

#### ② Model 2

노반면에서 25cm까지는 양질의 흙으로 핸드 컴팩터를 이용하여 다지고 그 위에 EPS (Expanded polystyrene)를 25cm두께로 놓고 콘크리트 슬래브를 거치하였다.

#### ③ Model 3

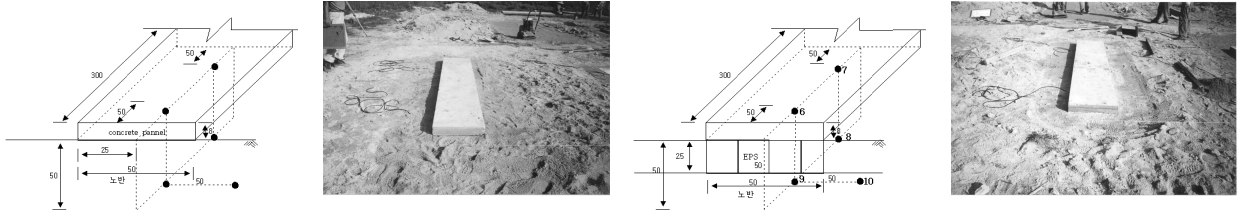
노반면에서 25cm까지 40cm두께로 3mm체를 통과한 입경이 고른 모래를 사용하여 노반을 만들어서 핸드컴팩터를 이용하여 다짐을 하였다. 또한 다짐한 모래가 측방으로 흘러내리지 않도록 EPS를 이용하여 지탱하게 하였다. 그리고 다져진 모래 위에 흙으로 다질 때 흙과 모래가 서로 섞이지 않도록 부직포를 이용하였다. 그 위에 25cm정도의 양질의 흙으로 다시 노반을 다져서 콘크리트 슬래브를 거치하였다.

#### ④ Model 4

콘크리트 channel box를 매설하고 콘크리트 channel box 내부를 양질의 흙으로 다져서 그 위에 콘크리트 슬래브를 거치하였다. 모형 4에서는 속도계의 매설 위치가 콘크리트 channel box밖에 3개를 매설하여 본 연구에서 제안한 wave-guide 개념에 입각한 모형이라 할 수 있겠다.

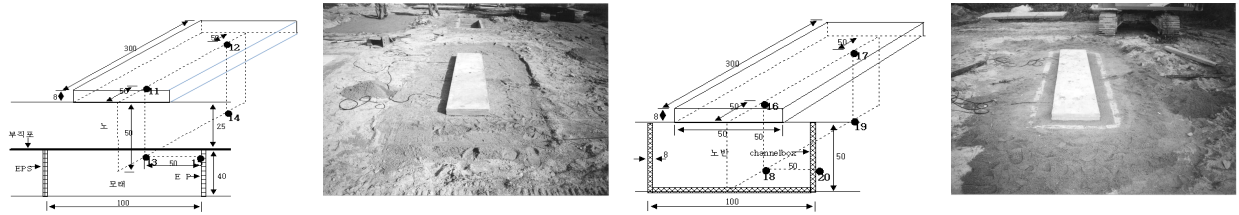
#### ⑤ Model 5

양질의 흙으로 3개의 층으로 나누어서 각 층마다 4회씩 핸드컴팩터로 다짐 작업을 하였다. 다짐후 콘크리트층을 설치하고 슬래브와의 사이에 진도를 감쇠하기 위한 방진고무를 설치하였다.



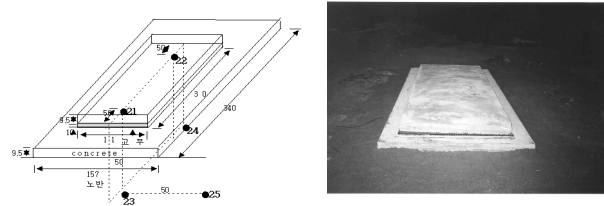
(a) Model 1

(b) Model 2



(c) Model 3

(d) Model 4



(e) Model 5

그림 3. Test Model

#### 4. 노반구조의 모형실험

모형실험의 목적은 열차진동의 진동주파수 대역을 포함하는 0~200 Hz 범위의 응력파가 노반표면에 가해졌을 때, 철도 노반 모형의 응답특성을 평가하여 가장 효과적인 진동차단감쇠 노반구조를 얻고자 하는 것이다. 노반표면에 응력파를 발생시키기 위한 발진원으로는 50cm의 높이에서 무게 534g, 직경 50mm 쇠 구슬을 자유 낙하시켜서 사용하였으며, 발진원에 의하여 발생한 응력파가 노반 내부로 전파되어 가는 특성은 노반 내부에 설치되어 있는 다섯 개의 속도계로 측정하였다. 본 실험을 위하여 사용한 속도계는 공진주파수 4.5Hz, 저항 380Ω의 사양을 가지고 있는 속도계이고, 이 속도계의 주파수 특성은 직접 보정하여 사용하였다.

각 철도노반 모형에 대하여 진동전파 특성을 파악하기 위한 일련의 실험은 표 2에 나열한 것과 같이 모두 세 가지 종류의 진동측정을 수행하였다. 각 실험으로부터 측정된 자료는 일련의 해석과정을 통하여 지반의 최대입자속도, 주파수별 입자속도, 평균감쇠계수 등의 형태로 각 철도노반 모형의 진동 특성을 평가하였다.

표 2. Coefficients for Vibration evaluation

성능평가 실험	진동평가변수
시간이력곡선	•최대 입자속도
선형스펙트럼	•One-Third Octave Band의 중심 주파수에 대한 Spectral Particle Velocity
전달함수	•One-Third Octave Band의 중심 주파수에 대한 Spectral Magnitude
감쇠계수	•Average Attenuation Coefficient, $\alpha$

## 5. 감쇠계수를 이용한 방진효과의 평가

방진 또는 차진을 목적으로 제안된 새로운 노반구조의 기능을 평가하는 하나의 척도로 진동에너지의 감쇠정도를 정량화하는 것이 가능하다면 객관적인 평가기준이 될 있다. 이러한 측면에서 본 논문에서 제안한 wave-guide형 노반구조 모형의 방진 또는 차진 성능을 감쇠계수(attenuation coefficient,  $\alpha$ )의 형태로 평가하였다. 철도노반 모형의 표면에서 쇠 구슬의 충격으로 발생한 응력파는 횡방향, 종방향, 방사방향 등 모든 방향으로 전파되어 가지만, 그 중에서 수직 아래 방향으로 전파되어 가는 응력파에 중점을 두어 평가하였다. 즉, 발진원이 가해진 지점의 수직 아래 방향이라고 하면, 1번, 3번 속도계가 이루는 축선이 될 것이고, 본 논문에서는 1번, 3번 속도계에서 측정된 입자속도의 크기를 비교하여 감쇠계수를 주파수별로 계산하였다.

일반적으로 발진원에서  $r_1, r_2$  만큼 떨어진 곳에서 측정된 체적파의 크기가  $A_1, A_2$ 라고 하였을 때, 감쇠계수,  $\alpha$ 는 다음 식에 의해서 결정되어 진다.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{r_2}{r_1}\right)}{r_1 - r_2} \quad \text{식 1}$$

여기서,  $\alpha$  : 감쇠계수 (1/m)

$A_1, A_2$  :  $r_1, r_2$  지점에서 결정된 주파수에 따른 최대 진폭

$r_1, r_2$  : 발진원에서부터 떨어진 거리  $r_1, r_2$

따라서, 본 연구에서는 1번 속도계가 위치한 곳이  $r_1$  만큼 떨어진 곳이고, 3번 속도계가 위치한 곳은  $r_2$  만큼 떨어진 곳이 된다. 그리고, 두 측정지점에서의 주파수별 최대진폭은  $A_1/A_2$ 이 된다. 따라서,  $r_1 = 8\text{cm}$ ,  $r_2 = 58\text{cm}$ , 그리고,  $A_1/A_2 = f(f, r_1, r_2)$ 을 적용하면, 감쇠계수는 식 3에 의해서 용이하게 계산할 수 있고, Fig. 11에 제시된 바와 같다. 그리고, 각 노반 모형에 따라 평균 감쇠계수를 계산하면, Table.8에 요약하였다. 평균감쇠계수는 wave-guide형 노반구조인 모형 2번의 값이 가장 크고, 다음으로 4번이 큰 것으로 나타났는데, 이는 앞 절에서 기타 방식으로 조사한 것과 동일한 연구결과이다. 또한, 노반구조 모형 3번이 가장 떨어지는 것으로 나타난 것도 전달함수에 의한 조사결과와 동일한 결과라고 할 수 있다.

지반 또는 구조물의 에너지 감쇠능력을 평가하는 정량적인 평가기준인 시스템의 감쇠계수의 비교에 의하면, wave-guide형 노반이 wave-guide 기능이 없는 노반보다 더욱 에너지 감쇠능력이 뛰어난 것으로 나타났다. 단, wave-guide형 노반 모형 3번의 경우는 예외로서 에너지 감쇠능력이 현저히 작은 것으로 나타났다.

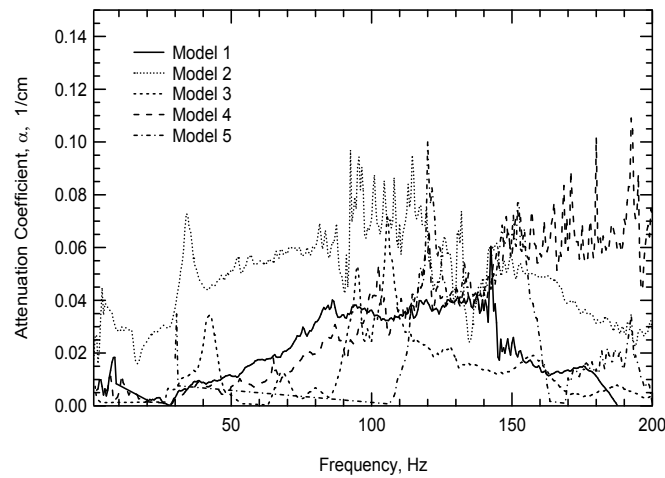


그림 4. Average Attenuation Coefficient( $\alpha$ ) to obtain from measured data at Geophone 3 and Geophone 1

표 3. Average Attenuation Coefficient each model

모형 No.	Average Attenuation Coefficient, $\alpha$ , 1/cm
1	0.0220
2	0.0488
3	0.0150
4	0.0359
5	0.0334

## 6. 결론

본 연구는 콘크리트 슬래브레도에서 열차운행으로 인한 지반진동의 감쇠를 위하여 wave-guide 개념을 이용한 슬래브 하부노반구조의 진동저감특성을 평가하기 위하여 현장모형 실험을 수행하였다. 평가대상은 Wave-guide 기능이 없는 노반과 EPS, 모래, 콘크리트 channel box, 방진노반이며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 감쇠계수에 대한 평가 결과, 주파수 대역 전체에 있어서 EPS를 사용한 노반구조가 가장 우수한 Wave-guide 기능을 보여주고 있다. 고무를 이용한 방진노반구조에서는 모든 주파수 대역에서 방진효과는 있으나 Wave-guide 기능이 거의 나타나지 않았다.
- 2) Wave-guide 형 노반의 기능성이 확인되었으며, 특히 고주파 영역에서 진동감쇠 효과가 두드러짐을 알 수 있었다. 저주파 영역에서는 파장의 크기로 인하여 효과가 낮은 것으로 나타났지만, 구성요소의 치수를 변화시켜 저주파 진동이 적절히 구속될 수 있도록 한다면, 저주파의 진동에 대해서도 wave-guide 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Das, S.P. and Mitra, M (1998). "Hybrid method for Love wave dispersion in vertically Inhomogeneous media", Pure and applied Geophysics, 15, pp.523-538.
2. Kausel, E. and Peek, R. (1982). "Dynamic loads in the interior of layered stratum: An explicit solution." Bull. Seismol. soc. Am., Vol. 75, No. 5, pp. 1459-1508.
3. Thomsom, W.T.(1950). "Transmission of elastic waves through a stratified soil medium." J. of Appl. Phys. Vol. 21, pp. 89-93.
4. 이일화, 조성호 (2004), "반무한체와 다층구조 지반에서 러브파 및 레일레이파의 위상속도 분산특성", 한국지반공학회 논문집, 제20권, 1호, 한국지반공학회, pp.61-73