

工學碩士 學位論文

지하철진동 및 고체음을 저감시키기
위한 경제적인 방안에 대한 연구

慶州大學校 大學院

土木工學科

劉明相

2006年 12月

지하철진동 및 고체음을 저감시키기 위한 경제적인 방안에 대한 연구

指導教授 姜 普 淳

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 12月

慶州大學校 大學院

土木工學科

劉 明 相

劉明相의 碩士學位論文을 認准함

審查委員長 _____ 印

審查委員 _____ 印

審查委員 _____ 印

慶州大學校 大學院

2006年 12月

목 차

제 1 장 서 론	1
1. 서 론	1
1.1 개요	1
제 2 장 지반진동	2
2.1 지반진동의 기본원리	2
2.1.1. 진동의 정의	2
2.1.2. 파동의 전파	3
2.1.3. 진동의 단위	6
(1) 기본적 단위	6
(2) 가속도레벨(VAL)	7
(3) 진동레벨(VL)	8
2.1.4. 지하철주행에 의한 지반진동	8
2.2 지하철 주행에 따른 지반진동 예측모델	9
2.2.1 Kurzweil 예측모델	11
2.2.2 Ungar 예측모델	12
2.3 지반진동의 계측	14
2.3.1 개 요	14
2.3.2 진동측정기구	14
2.3.3 암진동에 의한 보정	15
2.3.4 진동의 주파수 분석	16
제 3 장 지반진동의 차단공법	18
3.1 지반진동의 차단대책	18
3.1.1 기본원리	18
3.2 기존의 지반진동 차단공법	19
3.2.1 Open Trench	20
(1) 주동차단(Active Isolation)	20
(2) 수동차단(Passive Isolation)	22
3.2.2 지중방진벽	23
(1) 단층방진벽	23
(2) 다층방진벽	24

(3) 주열식방진공	24
(4) 연성·경량재충진 방진벽	25
(5) Gas Cushion Screen	27
3.2.3 방진궤도의 종류	28
3.2.3.1 진동의 계측용어 및 지시단위	28
3.2.3.2 궤도의 진동모델	29
3.2.3.3 궤도의 진동 특성	33
3.2.3.4 열차주행에 따른 진동전달특성 분석	35
제4장 영향 평가를 위한 기준	37
4.1 감지진동	37
4.1.1 국제표준화기구 ISO 2631	37
4.1.2 미국표준 ANSI S3.29-1983	38
4.1.3 한국의 진동 기준	38
4.1.4 감지 진동 연구사례	39
제5장 진동 소음 저감을 위한 대책(I)	40
5.1 진동원 대책	40
5.2 전파 경로 대책	41
(1) 지역적인 방법	41
(2) 인위적인 방법	41
5.3 수진부 대책	42
5.4 국내외의 진동 소음 저감 대책 및 보강공사 사례	42
5.4.1 Floating slab system	42
5.4.2 고무패드, slab mat 시공 사례	43
제6장 진동 소음 저감을 위한 대책(II)	44
6.1 진동 분석 결과	44
6.2 지하철진동저감대책 제안 안	44
6.2.1 지하철속도에 대한 저감대책	44
6.2.2 수진부 대책에 대한 방법	45
6.2.3 Floating slab system에 의한 대책방법	45
제7장 결 론	46
ABSTRACT	50

제 1 장 서 론

1. 서 론

1.1 개요

지하철의 경우에는 대도시의 교통난 해소에 큰 역할을 하고 있고 대중교통 수단으로서 아주 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 현재 고속전철이 건설되고 있고 인구가 많은 대도시에서는 지하철이 신설 또는 증설되고 있다. 그러나 지하철의 주행으로 생활 환경상의 여러 가지 문제점들이 발생하고 있으며, 과거와는 달리 궤도가 생활공간인 건물과 인접하여 건설되고 있으므로 궤도에서 발생되는 소음 및 진동의 문제가 매우 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 이 중 지반을 통해 전달되는 진동은 약 200Hz이하의 저주파 영역에 집중되어 있는데, 궤도에서 주위로 전파되어 궤도 인근에 거주하는 사람들과 건물에 피해를 주고 있다.

본 논문은 지하철 운행으로 인한 진동이 인접한 빌딩 및 주변에 미치는 영향을 최소화하기 위해 일반적인 고체음 및 소음진동에 관해 여러 가지 해결방안을 제시하고 그 방법에 대한 평가와 그 대안을 제시하는데 그 목적이 있다.

제 2 장 지반진동

2.1 지반진동의 기본원리

2.1.1. 진동의 정의

진동이란 구조물이나 지반 등이 동적인 외력의 영향을 받아 운동적 평형위치로부터 시간의 경과와 함께 반복위치가 변화되는 현상을 말한다. 또, 진동계라 함은 구조물이나 지반 등의 복잡한 진동문제를 한 개의 진동모델로 단순화 시킨 것을 말한다.

일정한 시간적 변동 등을 반복하는 진동 중에서 가장 기본적인 진동을 조화 진동이라 하며, 대개 정현(sine)의 함수로 표현하며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$z = A \sin(\omega t - \phi) \quad (2.1)$$

위 식은 시간의 함수로 표현하면 그림 2.1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A 는 평형위치로부터 최대 변위를 말하며, 진폭(single amplitude)으로 표현되며, $2A$ 는 peak-to-peak 변위(double amplitude)로 표현된다.

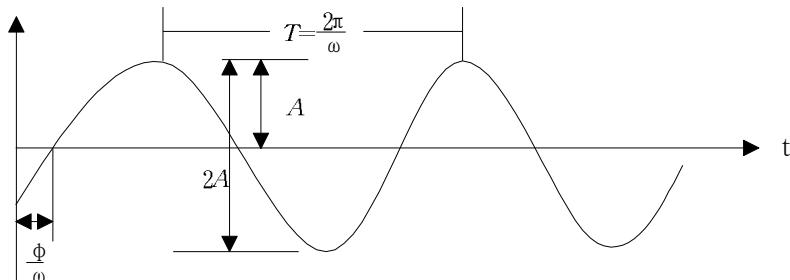


그림2.1 진동의 기본파형

각속도 ω (rad/sec)는 2π 시간 사이에 z 가 몇 회 같은 상태로 되돌아오는가를 나타내므로 원진동수(circular frequency) 또는 각주파수로 불리운다.

ϕ (rad)는 위상각이고, 1초간 반복되는 사이클(cycle)수를 진동수 또는 주파수(f)라고 하고 Hertz(Hz)로 나타내기도 한다. 주파수(Hz)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.2)$$

동일 상태가 재현될 때의 시간을 진동의 주기(T)라고 부르고, 주파수(f)와 주기(T)와의 관계는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.3)$$

시간적으로 변동하는 진동현상을 표현하는 데에는 범위(식2.1)외에 다음과 같이 속도와 가속도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\text{속도} = \frac{dz}{dt} = v = \omega A \cos(\omega t - \phi) \quad (2.4)$$

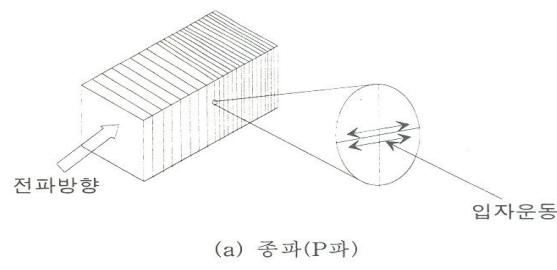
$$\text{가속도} = \frac{d^2z}{dt^2} = a = -\omega^2 A \sin(\omega t - \phi) \quad (2.5)$$

2.1.2 파동의 전파

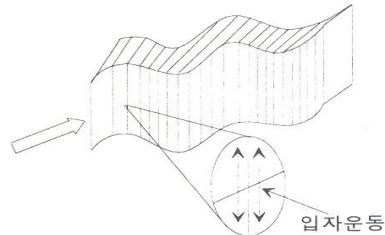
진동의 발생원은 다양하므로 진동공해의 피해도 극히 넓은 범위에 영향을 준다. 일반적으로 공장 등의 기계진동, 건설작업에 따른 진동 및 교통기관에 따른 진동 등 크게 세 가지로 구분한다. 이 진동원으로부터 발생하는 진동은 지반을 거쳐서 구조물에 전해지고, 지층에서 반사, 굴절을 반복하면서 전해져서 피해대상을 흔들어서 장해의 발생 원인이 된다.

진동공해는 미소진폭의 파동이 매체로 하는 지반을 전파하는 경우, 지반은 결코 탄성체가 아니지만, 미소진폭의 범위에서 논하는 한도에서 등방·등질의 완전한 탄성체로 간주하는 정도에는 지장이 없다. 이 지반을 전파하는 파동에서는 전파의 파형으로부터 실체파, 표면파의 2종류가 있다. 이 파동 중

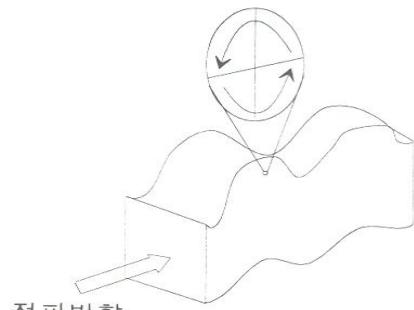
에서 종파(P파), 횡파(S파)를 실체파라고 하고, 표면파와는 다르게 전파하는 형태를 보이고 있다. 표면파에서 파동의 전파 형태에 따라서 Rayleigh파, Love파가 있다. 그럼 2.2는 파동의 종류에 따라서 입자의 운동과 지반의 변형을 비교하였다.



(a) 종파(P파)



(b) 횡파(S파)



(c) Rayleigh파



(d) Love 파

그림2.2 파의 종류에 따른 입자의 운동과 지반의 변형

그림 2.3은 지표면에서의 원형의 기초에 상·하 진동을 가할 경우 시간이 지남에 따라 파동의 도달위치와 그때의 진폭의 분포를 보여주고 있다.

P파는 지반의 밀도변화를 동반하는 파동이고, 연직(Z축)방향의 진폭의 분포가 크다. S파의 경우 z축파의 $20\sim50^\circ$ 범위에 진폭의 범위가 크다. 또, Rayleigh파는 수직방향 및 수평방향의 진폭의 분포가 다르고, P파 및 S파에 비하여 크고, 파동의 전 에너지에 대한 비율도 크다. 또, 실체파는 표면에서 진동원과 거리 γ 의 제곱에 반비례하며 매질에서는 γ 에 반비례하고, Rayleigh파는 $1/\sqrt{\gamma}$ 의 비율로 진폭이 감소한다. 즉, 실체파는 표면파에 비해서 감쇠가 크고, 진원으로부터 멀어질수록 표면파가 미치는 영향이 크다. 따라서 Rayleigh파는 지

반의 흙의 성질이나 지층형태에 따라서 주파수의 영역 혹은 탁월 주파수 등이 다르다.

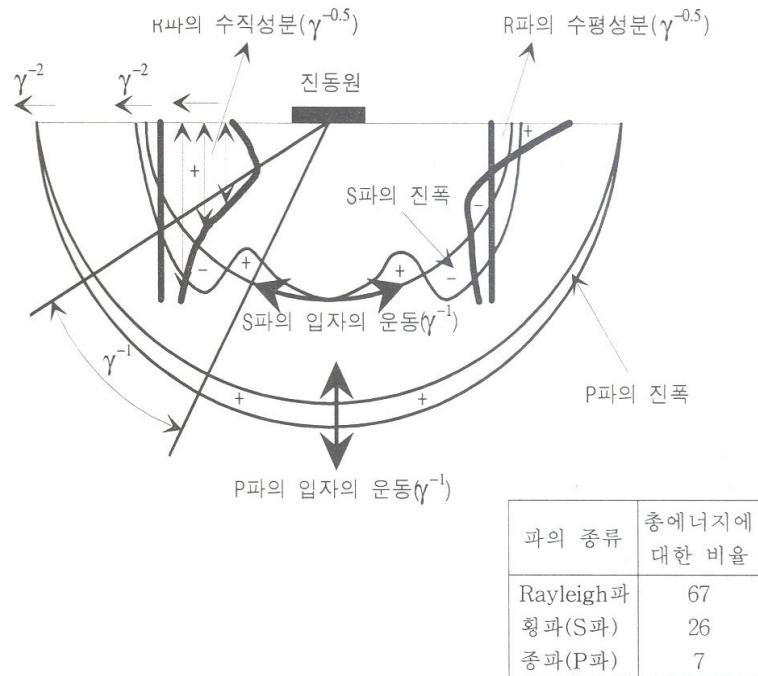


그림2.3 반무한탄성체에서 파동의 전파(Woods, 1968)

2.1.3 진동의 단위

(1) 기본적 단위

진동의 강도 혹은 크기는, 변위, 가속도로 표현되고 그 단위로는 변위는 Cm, 속도는 cm/sec(kine), 가속도는 cm/sec²(gal)등이 사용된다. 취급하는 진동의 크기에 따라서 편의상 표 2.1에서 보는 바와 같이 각종의 단위로 사용된다.

종 별	기 본 적 단위	그 외의 단위
변 위	cm	$\mu = 10^{-3} mm = 10^{-4} cm$ $mm = 10^{-1} cm$ $m = 10^{-2} cm$
속도	cm/sec	$mm/sec = 10^{-1} cm/sec$ $km/sec = 1 cm/sec$ $m/sec = 10^2 cm/sec$
가속도	cm/sec^2	$gal = 1 cm/sec^2$ $G = 980 cm/sec^2 \approx 1,000 gal$ $m/sec^2 = 10^2 cm/sec^2$

표2.1 진동량의 단위

(2) 가속도레벨(VAL)

기본적 단위계는 직선척도에서 숫자로서는 알기 쉬우나 인간의 감각에 관계하는 양은, 그 양이 2배가 되어도 인간이 느끼는 감각의 합은 2배가 되지 않으므로, 진동문제에 있어서 dB가 공식적으로 채용되고 있다.

가속도레벨은 진동가속도를 dB단위로 표시하고 있고, 다음 식 2.6과 같이 정의된다.

$$\text{가속도레벨 } VAL = 20 \log_{10} \frac{A}{A_0} (dB) \quad (2.6)$$

A : 측정치의 가속도 (m/s^2)

A_0 : 기준치 $(10^{-5} m/s^2)$

여기서, 가속도레벨은 대수 표시이기 때문에 가속도가 2배가 되어도 가속도레벨은 2배가 되지 않고, 가속도레벨은 $20 \log_{10} 2 \approx 6dB$ 정도 증가한다.

(3) 진동레벨(VL)

식 (2.6)에서 정의된 가속도레벨은 인체감각 등에는 관계가 되지 않는 물리량의 표시이나, 진동의 인체 또는 건물 등에 영향을 미치는 진동수에 의존하고, 또 연직진동과 수평진동은 느끼는 정도가 다른 것으로 알려져 있으므로, ISO(국제표준화기구)의 인체의 진동에 대한 진동감각의 보정을 가한 것이 진동레벨(보정가속도레벨)이라 한다.

연직진동에 있어서 진동레벨을 정의하면 식(2.6)에 대해서 a_0 를 다음에서 보는바와 같이 주파수 대역마다 보정한 것이 된다.

$$1 \leq f \leq 4 \quad A_0 = 2 \times 10^{-5} \times f^{-2} m/sec^2 \quad (2.7)$$

$$4 \leq f \leq 8 \quad A_0 = 10^{-5} m/sec^2$$

$$8 \leq f \leq 90 \quad A_0 = 0.125 \times 10^{-5} \times f m/sec^2$$

2.1.4 지하철주행에 의한 지반진동

지하철주행에 따라서 발생하는 진동에는 2개의 요인이 복합된다. 우선 열차가 주행함에 따라서 그 자중이 궤도를 통해서 충격적으로 지반에 재하 되는 것이고, 이것은 차축간격, 복수차량의 연결에 따라서 결정되는 주기적재하가 되는 것이다. 그 위에 구동motor 등의 조화진동이 가해진다. 열차주행은 주기변동을 함께 갖춘 이동재하문제로써 특징된다. 그것은, 무한히 멀리부터 다가와서 관측점을 통해서 무한히 멀리 가는 상황에서 일반적으로 초기조건을 수반하지 않는다.

이동하중에 대한 연구는 1950년대에 시작해서 탄성파이론이 도입되었고, 해석대상을 모델화, 정식화하여 2차원 평면문제, 3차원 평면문제로써 취급하고 있다. Eason(1965)은 일정한 힘이 등속도로 이동하는 상황을 정식화 하였다.

2.2 지하철 주행에 따른 지반진동 예측모델

전철주행에 의한 터널 내 진동은 주로 전철 하부구조에 연결되는 바퀴와 레일 간의 상호작용에 기인하고 있다. 이를 4자유도 진동계 모델로 이론화 하여 그림 2.5와 같이 나타내었고, 이론계산에 의하여 식으로 나타내었다.

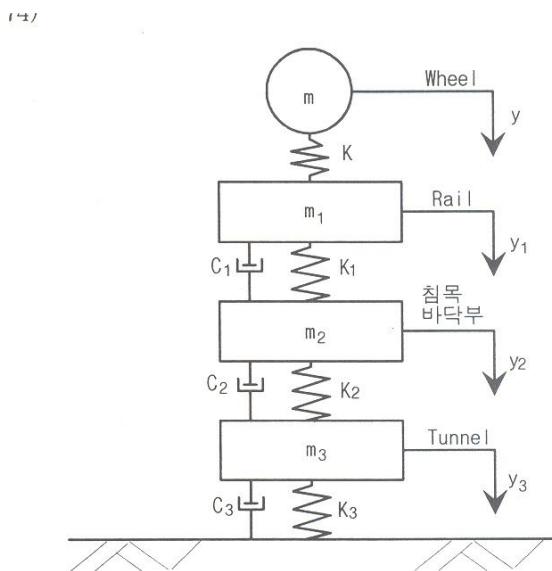


그림2.4 터널 내 고속전철 진동모델

여기서, $K_1 = \text{Rail} \text{지지스프링상수} (\text{kg}/\text{cm}^2)$

$K_2 = \text{침목및바닥지지부스프링상수} (\text{kg}/\text{cm}^2)$

$K_3 = \text{Tunnel} \text{지지스프링상수} (\text{kg}/\text{cm}^2)$

$I = \text{Rail} \text{의 단면} 2 \text{차} \text{모멘트} (\text{cm}^4)$

$m_1 = \text{Rail} \text{의 질량} (\text{kg}/\text{cm})$

$m_2 = \text{침목 및 바닥부 질량} (\text{kg}/\text{cm})$

$m_3 = \text{Tunnel} \text{질량} (\text{kg}/\text{cm}^2)$

$$m \frac{d^2 t}{dt^2} + K(y - y_1) = 0 \quad (2.8)$$

$$m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + K(y_1 - y) + C \frac{d(y_1 - y)}{dt} + C_1 \frac{d(y_1 - y_2)}{dt} + K_1(y_1 - y_2) = 0$$

$$(2.9)$$

$$m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + C_1 \frac{d(y_2 - y_1)}{dt} + K_1(y_2 - y_1) + C_2 \frac{d(y_2 - y_3)}{dt} + K_2(y_2 - y_3) = 0$$

$$(2.10)$$

$$m_3 \frac{d^2 y_3}{dt^2} + C_2 \frac{d(y_3 - y_2)}{dt} + K_2(y_3 - y_2) + C_3 \frac{dy_3}{dt} + K_3 y_3 = 0$$

$$(2.11)$$

위의 방정식을 계산하여 정리하면 터널의 진동가속도 레벨을 식(2.12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 y_3}{dt^2} \propto \frac{K_1^{0.3} K_2^{0.5} K_3^{0.04}}{I^{0.2} m_2^{0.3} m_3^{0.8}} \quad (2.12)$$

여기서, Tunnel의 K_3 , m_3 및 Rail의 I가 일정하다고 가정하면, 진동가속도 레벨을 다음의 식 3.13과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$\frac{d^2 y_3}{dt^2} \propto \frac{K_1^{0.3} K_2^{0.5}}{m_2^{0.3}} \quad (2.13)$$

2.1.1 Kurzweil 예측모델

도시를 통과하는 철도시스템에서 궤도와 열차간의 상호작용에 의해 발생된 진동은 터널 구조체와 지반을 통해 인접한 건물로 전달되며 건물의 벽체와 바닥을 통하여 전달된 진동은 또 다른 소음을 발생시키는 원인이 되기도 한다. Kurzweil 예측모델(1979)은 인접한 건물에 지반으로 전달되는 지반진동 스펙트럼 평가방법이다.

Kurzweil 예측모델은 열차속도 60Km/hr를 기준으로 각종 인자들을 10개로 정리하여 보정한 것으로 비교적 상관성이 높은 결과를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. 표 2.2는 Kurzweil이 제시하고 있는 각종 인자별 보정치를 정리한 것이다.

No	인자의 내용	보정치 범위(dB)	비 고
1	축하중(Axial Load)	+2~+4	
2	차체 현수구조(Carbody Suspension)	-	
3	탄성바퀴(Resilient Wheel)	-4~-10	40~250Hz 범위
4	차량하부구조의 질량(Unsprung Mass)	-6	
5	바퀴와 레일의 마모정도 (Wheel & Rail Condition)	+3~+10	
6	특수트랙작업(Special Track Work)	+10~+15	Track crossover and turnout
7	레일 고정장치(Rail Fastner)	-3	
8	부상 슬라브(Floating Slab)	-10~-28	
9	발라스트 매트(Ballast Mat)	-	
10	터널구조(Tunnel Construction)	표2.3참조	
11	열차구조(Train Speed)	열차속도 16.6(V/60)	V=환산속도

표2.2 Kurzweil의 예측모델 진동 보정값

표2.3은 Kurzweil 예측모델 진동보정 인자 중에서 터널구조별 진동 보정값을 나타낸 것이다.

Subway structure	Relative Vibration Level(dB)
Cast iron or steel single tunnel	+4
Concrete single tunnel or box	+2
Double box	0
Triple Box	-2
Station	-4

표2.3 터널구조별 진동 보정 값

2.2.2 Ungar 예측모델

Ungar의 예측모델(1975)은 지하철 주행에 따른 지반진동이 빌딩 내에서 소음으로 전환되는 사례를 제시하고 있는 것으로서 폭넓은 자료의 비교 고찰이라는 측면에서 아래와 같이 검토하였다.

표 2.4는 각종 인자별 기본 진동보정을 나타내며, 표 2.5는 레일의 상태별 보정값을 나타낸 것이다.

No	인자의 내용	보정치(dB)	비 고
1	터널벽 두께 (Tunnel Wall Thickness)	$C_1 = 4 \log(0.6/t)$	
2	레일 강성지지도 (Rail Fasteners)	$C_2 = 5 \log(K/3 \times 10^7)$	$K = 7 \times 10^7 (N/m)$
3	레일의 마모정도 및 연결부 상태 (Track Roughness and Joint)	표 2.5 참조	
4	열차속도 (Train Speed)	$C_4 = 16.6 \log(V/56)$	
5	대상 빌딩의 상태 (Receiving Building Type)	$C_5 = 5$ (구조물) $C_5 = 0$ (지반지점)	

표2.4 ungar 예측모델의 각종 인자별 진동 보정값

Wheel Condition	Welded			Jointed	
	Normally	Ground	Corrugated	Normally or Ground	Corrugated
Normally Worn (Cast-Iron Tread Brakes)	0	-1	5	2	5
Normally Worn (Composition Tread Brakes)	-5	-7	4	0	4
With Flats	4	4	7	5	7
Trued or New	-7	-9	4	-1	4

표2.5 레일의 상태별 보정 값

2.3 지반진동의 계측

2.3.1 개요

일반적으로 지반의 진동현상은 지진 등의 특별한 경우를 제외하면 모두 미소하고, 진동매체로써의 지반과 그 구조물 및 진원의 성질에 따라 좌우 되기 때문에 그 특성은 매우 복잡하다. 이를 위해 지반의 진동계측은 목적으로 하는 진동현상에 대응해서 측정기기 사용으로 분류되고, 측정 data의 처리방법 등도 다르다.

지반의 진동계측방법을 형식별로 분류하면 다음과 같다.

- (1) 지진관측
- (2) 진동공해측정
- (3) 지반조사수단으로써의 진동계측

(1)의 지진관측은 내진공학상의 외력으로써 관성력이 구해지고, 강진계에 따라서 진동의 가속도를 측정한다. (2)의 진동공해 측정은 공장·사업장진동, 도로·교통진동, 철도진동, 건설작업진동 등 진동의 발생원별로 세분되나, 시민생활에 어떤 형태의 지장을 초래할 수 있는 진동을 대상으로 하고, 보통 진동 공해계를 사용한 진동레벨로 평가된다. (3)의 지반조사수단으로써의 진동계측은 많은 인공진원에 의한 연약지반을 대상으로 하기 위한 특별한 기구가 사용되고, 주로 도달시간으로부터 지반의 진동전달속도를 구해서 지반구조 등을 검토·평가한다.

2.3.2 진동측정기구

일반적으로 진동의 측정은 그림 2.5의 측정계에서 행하여진다. 즉, 진동이 감지되면 pick-up에 의해 전기적으로 변환·증폭해서 기록된다. 또, 필요

에 따라서 해석기 또는 computer에서 기록파형을 해석하여 처리한다.

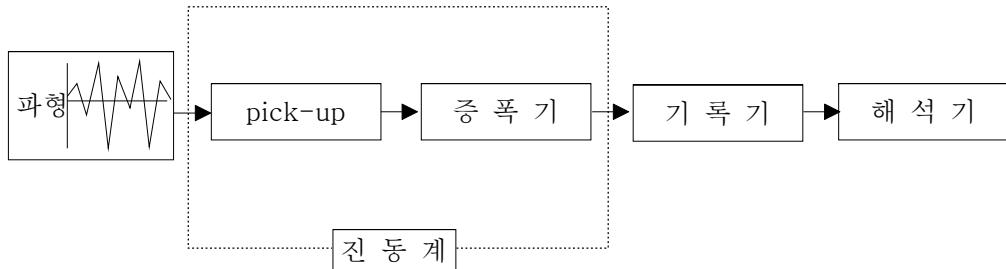


그림 2.5 진동의 측정계

일반적으로 「진동계」라 불리는 것은 pick-up과 증폭기를 조합한 부분이다. pick-up은 「진동을 검출하는 장치」가 되고, 여기에서 검출한 상대운동을 전기량으로 변환하는 변환부로 구성된다.

pick-up으로 부터의 전기출력은 일반적으로 작어서 기록기를 직접적으로 작동시킬 수 없기 때문에 이 미소한 전기신호를 증폭기에서 증폭하는 기능을 한다.

최근에는 filter기능이나 기록기로의 출력용량을 조정하는 기능을 갖춘 signal conditioner가 보급되고 있다.

기록기의 종류에는 기록지상에 파형을 나타낸 Penoscillograph, 전자 Oscillograph, Brown관상에 파형을 사출하는 Cincross Scope, Memory Scope 및 원파형을 직접 자기테이프에 기록하는 Data Recorder 등이 있다. 최근에는 Data Recorder도 아날로그 방식에는 없는 computer와 함께 digital방식의 고성능 장치가 사용되는 것외에 직접 computer에 들어오는 방식도 있다.

2.3.3 암진동에 의한 보정

특정의 진동원으로부터의 진동만을 측정할 경우에는 암진동의 영향에 대한 주의가 필요하다. 암진동(Background Vibration)이란, 어느 장소에 있

어서 특정의 진동을 대상으로 한 경우에 대상의 진동이 없을 때 그 장소에 있어서의 진동이다.

암진동의 보정은 대상의 진동이 있을 때의 진동레벨이 암진동만 있을 때보다 10dB이상 높게 되면, 그 값은 대상 진동의 레벨이라고 할 수 있다. 그러나 그 차이가 10dB미만의 경우는 표 2.6에 따라 보정하여 진동레벨을 보정한다.

진동이 있을 때와 암진동일 때의 레벨의 차(dB)	3	4	5	6	7	8	9
보정치	-3	-2			-1		

표 2.6 암진동의 영향에 대한 보정값

예를 들어, 암진동이 65dB의 장소에서 어느 기계를 운전해서 70dB의 지시값을 얻으면 지시값의 차가 5dB이므로, 그 기계만의 진동레벨을 표 3.1로부터 보정치를 -2dB로 읽어서 $70-2=68$ dB로 추정된다.

2.3.4 진동의 주파수 분석

진동현상의 분석방법으로써 진폭의 크기 또는 평균치 등으로 분석하는 것 외에는 진동의 또 하나 중요한 표현방법으로써 어느 주파수 성분에서 구성되어 있는가를 보일 필요가 있다. 이 시간영역을 주파수 영역으로 변환해서 분석하는 것이 주파수 분석이다. computer가 보급되기 전에는 전용의 주파수 분석기가 사용되었으나 최근에는 Digital data의 고속fourier교환(FFT)에 의한 주파수분석도 많이 사용되고 있다.

진동현상의 주파수 분석표시는 그 진동이 여러 가지 주파수에 따라서 구성된 것을 표시한 것으로써, 최대치를 보인 주파수가 탁월주파수(Predominant)이다.

이 분석의 중심을 이루는 주파수교환(FFT)수법은 이 반대의 주파수 영역으로부터 시간영역에 변환(FFT)과 함께 과형처리수법으로써 Filter처리 또는 파의 생성, 주파수 응답, 그 과형의 상호관계 등의 해석에 이용되고 있다.

진동공해의 분야에서는 주파수 축을 Octave 또는 1/3Octave Band폭의 주파수 Band로 나누어서 각 Band의 중심 주파수마다에 2Band내의 가속도레벨을 구한다.

인체가 진동을 감지하는 경우는 각 Band의 진동을 하나씩 감지하지 않고, 그것 등의 합성된 전체를 하나의 진동으로써 감지한다. 그 합성한 전체의 진동의 가속도레벨을 over all 레벨(OA 레벨)이라고 한다. 일반적으로 보여진 가속도레벨은 over all 레벨이다.

한편, 합성레벨 $L_1 + L_2 (L_1 > L_2)$ 을 구하기 위한 가속도레벨의 합은 간단하게 식(2.14)에서 구할 수 있다. 여기서, 보정값(α)는 식 (2.15)에서 ΔL 을 구하고 표 2.7에 나타난 관계에 의하여 얻을 수 있다.

$$L = L_1 + \alpha \quad (2.14)$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 (> 0) \quad (2.15)$$

ΔL	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
보정값(α)	3		2					1			0	

표2.7 가속도레벨 합의 보정값

제 3 장 지반진동의 차단공법

3.1 지반진동의 차단대책

3.1.1 기본원리

건설작업진중, 기계진동이나 도로진동, 철도진동에 의한 지반진동으로 많은 피해가 발생하고 있고, 그것에 대한 방지대책이 필연적으로 요구되고 있다.

이런 형태의 지반진동을 경감, 차단하는 방법으로는 다음과 같다.

- (1) 진동원에서 지반진동의 전파를 차단한다.
- (2) 진동의 전파를 전달 경로상에서 차단한다.
- (3) 진동을 받는 층에서 차단대책을 마련한다.

이상의 3가지 고려방안이 있다. 본 논문에서는 전달 경로 상에서 지반진동차단 방법과 방진궤도설계 방법을 취급한다.

그림3.1은 trench 또는 방진벽에 의한 지반진동의 전파상황을 표현한 것이다.

진원으로부터 발생한 파동은 지반을 전파하면서 감쇠하고, 만일 전파경로의 도중에 trench나 방진벽이 설치되어 있으면, 벽면에서 반사현상이 이루어진다.

따라서 장벽의 전면이나 자연 상태의 지반에 비해서 높은 진동레벨(진폭)이 존재하게 된다. trench의 경우에는 장벽 가운데를 투과하는 파동은 없고, trench의 하부방향과 trench의 주변을 회절하는 회절파의 영향이 trench의 뒷면방향에 존재하게 된다. 장벽에 차단재료를 설치하는 경우에도 이 경우와 같은 모양으로 차단재료를 투과하는 파동의 영향에 따라서 그 지반진동의 효과가 저하한다.

위에 상술한 것과 같이 파동은 장벽에 따라서 투과량이 저하되고 동시에

회절파도 장벽의 배면에 영향을 미친다.

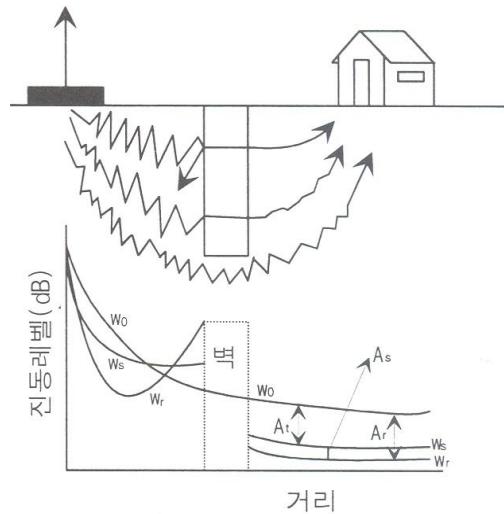


그림3.1

A_r : trench에 의해 차단된 진동레벨

A_s : 차단재료를 투과하는 진동레벨

A_t : 방진벽에 의해 차단된 진동레벨

W_0 : trench 시공전의 진동레벨

W_r : trench 시공후의 진동레벨

W_s : 방진벽 설치후의 진동레벨

3.2 기존의 지반진동 차단공법

진동을 차단하기 위한 방진벽을 설계함에 있어서, 방진벽 형식에 따른 벽의 깊이, 연장, 설치위치, 벽재료 및 두께 등의 방진벽에 관계되는 구체적인 사항을 결정하는 것이 중요하다. 어떤 벽의 형식을 선정에는 그 효과는 물론 많은 경우 시공성이나 그 밖의 요인에 의해서 결정된다.

지중에 설치하는 방진벽의 형식으로는 단층방진벽, 다층방진벽, 주열식 방진

공의 3종류 형식이 있다. 이러한 형식은 현장에서의 시공성, 피해정도 등에 따라서 결정되므로, 우선 이들 3종류의 방진벽 형식을 바탕으로 한 기준의 지반진동 차단공법을 정리하여 보기로 한다.

3.2.1 Open Trench

Open Trench에 의한 지반진동의 차단방법은 Wood(1968)에 의해 실험이 실시되었고, 이 방법은 주동차단(Active Isolation)과 수동차단(Passive Isolation)으로 분류할 수 있다.

(1) 주동차단(Active Isolation)

진원으로부터 방사되는 파동에너지의 감소를 위해 진동의 근원이나 주위에 장벽으로 open trench를 설치하는 것으로 진원에서의 차단이라고 할 수 있다. Wood(1968)의 실험에 의하여 저감의 효과가 입증되었으며 진동차단효과는 식 3.1과 같이 진폭감쇄계수(Amplitude Reduction Factor)를 기준으로 평가된다.

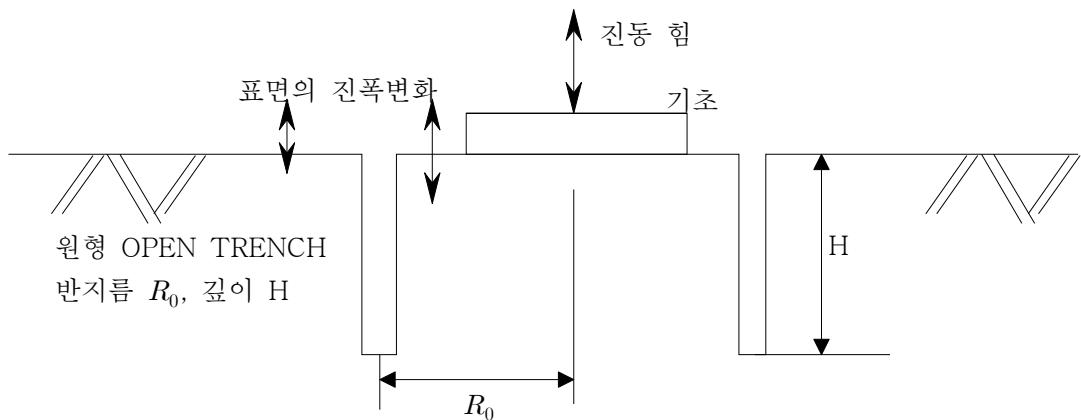


그림3.2 open trench를 사용한 주동차단(Active Isolation)

$$\text{진폭감쇠계수} = \frac{\text{차단벽 설치후 진폭의 크기}}{\text{차단벽 설치전 진폭의 크기}} \quad (3.1)$$

방진벽의 각도를 θ 라 하고 Rayleigh파의 파장을 λ_R 이라 하면 실험결과 다음과 같은 사항을 할 수 있었다.

진폭감쇠계수를 0.25이하로 하기 위해서는 방진벽의 각도(θ)가 $90^\circ \sim 360^\circ$ 인 경우 필요한 open trench를 최소 $H/\lambda_R = 0.6$ 이상으로 하여야 한다.

방진벽과 진동원과의 거리(H/λ_R)를 $0.222 \sim 0.910$ 이 되게 하고, 방진벽의 깊이(H/λ_R)를 $0.22 \sim 1.82$ 로 실험하였다. 그 결과 open trench에 의해 지반진동이 차단된 지역은 진원으로부터 적어도 $10\lambda_R$ 까지 임을 알 수 있었다. 그리고 그림 3.7에서 보는 바와 같이 지반진동 저감 대상구역이 양쪽 끝에서 45° 보다 안쪽에 있어야 함을 알 수 있다. 따라서 방진벽의 각(θ)이 90° 보다 작은 partial circle open trench는 지반진동을 효과적으로 차단하지 못함을 알 수 있었다.

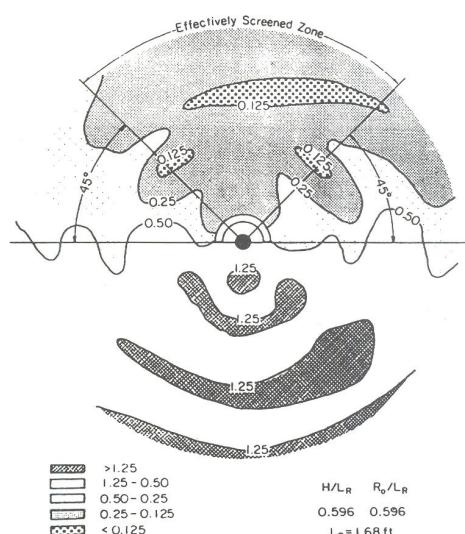


그림3.3 진폭감쇠계수 contour diagram(Active Isolation)

(2) 수동차단(Passive Isolation)

진동의 진원으로부터 멀리 떨어진 지점에 설치하나, 진동의 진폭이 감소되어야만 하는 장소 가까운 곳에 open trench를 설치하는 일정한 거리에서의 차단이다.

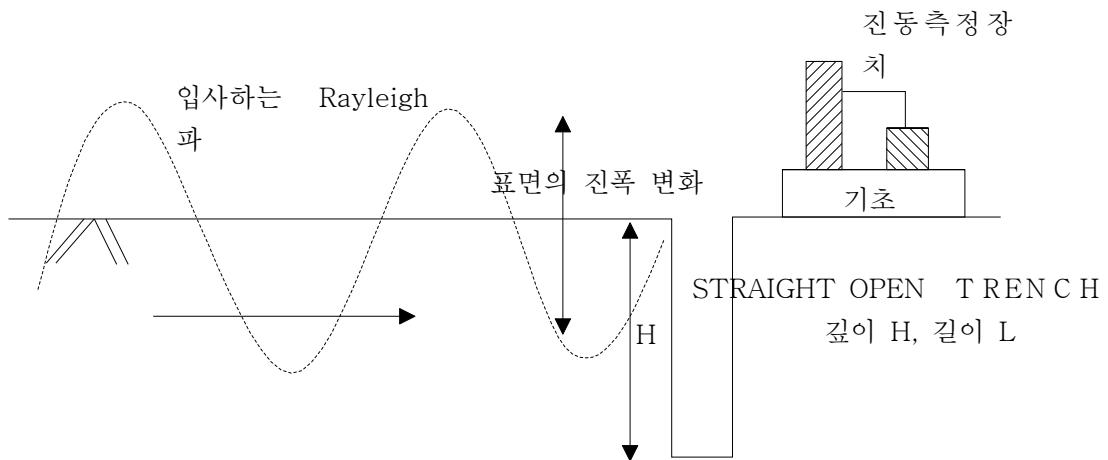


그림3.4 open trench 사용한 수동차단(Passive Isolation)

수동차단실험에서 진폭감쇠계수를 0.25이하로 하기 위해서는 진동원으로부터 면 거리에 큰 방진벽을 설치하여야 한다. 그림 3.8에서 보는 바와 같이 지반진동에너지의 확대 또는 'focusing'은 open trench의 앞이나 측면에서 표면파의 반사와 회절에 의해서 발생함을 알 수 있다. 그리고 open trench폭의 변화는 지반진동 차단의 효과에 거의 영향이 없음을 알 수 있었다.

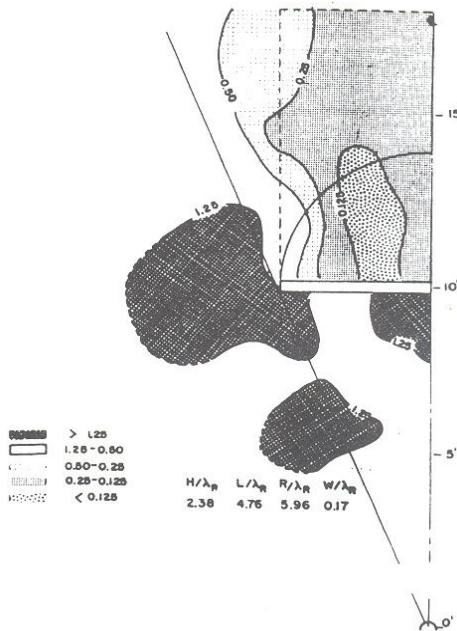


그림3.5 진폭감쇠계수 contour diagram(Passive Isolation)

3.2.2 지중방진벽

지중방진벽에 의해서 지반진동을 차단하는 방법은 차단재료로 무엇을 사용하는가에 따라 여러 가지로 나눌 수 있고, 각각의 공법을 설명하면 다음과 같다.

(1) 단층방진벽

단층의 방진벽으로써 콘크리트 혹은 발포우레탄이나 발포스티로폼 등의 재료를 사용한 경우는 비교적 지중의 3~5m의 낮은 장소에서 지하수가 없는 경우 등 제한된 조건에서 사용된다.

일반적으로 콘크리트벽의 차단에는 그다지 크지 않는 것으로 알려져 있는 반면 발포우레탄벽의 차단효과는 상당히 좋은 것으로 알려져 있다. 3m정도의 얕은 설치심도는 회절파에 의한 영향은 차단재료의 차이에 의한 투과파보다 차단효과에 미치는 영향이 지배적임이 알려져 있다.

(2) 다층방진벽

다층방진벽은 여러 종류의 차단재료를 사용하여서 여러 가지의 층구성 또는 층구조의 상태를 고려한 것이다. 지금까지 고려된 층구성으로는 그림 3.10에 표시한 것이 콘크리트+발포우레탄+콘크리트, 콘크리트+폴리스티렌+콘크리트 또는 콘크리트+trench+콘크리트 등의 샌드위치 형태로 여러 종류가 고려되고 있다.

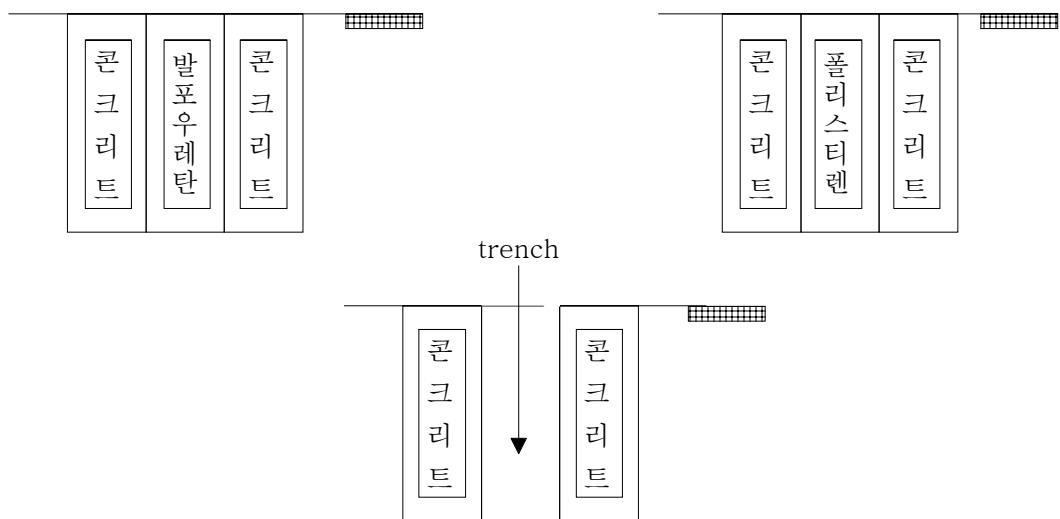


그림3.6 다층방진벽의 종류

(3) 주열식방진공

방진벽을 설치하는 심도가 비교적 깊고, 시공의 공간도 확보하기 어려운 장소에서 PVC 및 강판 케이싱을 소정의 깊이까지 수직으로 천공하고 빙공간 상태로 유지시키는 방법이다.

주열식으로 방진공을 설치하는 경우에는 기둥의 설치간격에 의해서 지반진동의 차단효과가 결정되고 기둥의 열수에 의해서도 차단효과가 결정된다.

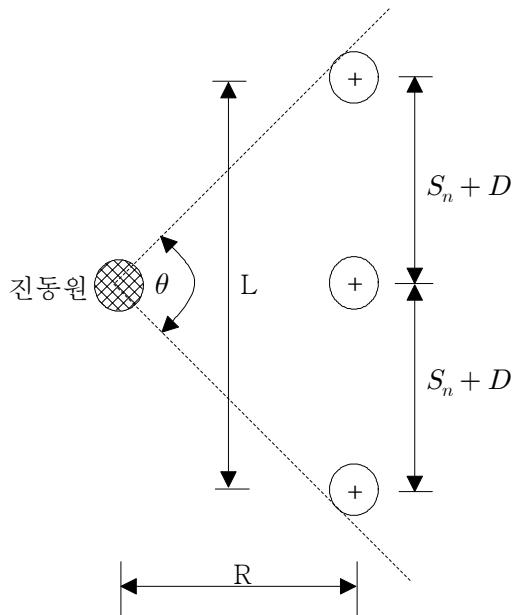


그림3.7 주열식 방진공

여기서, L : 방진공 주열의 길이

R : 진동원과 방진공간의 길이

D : 방진공의 직경

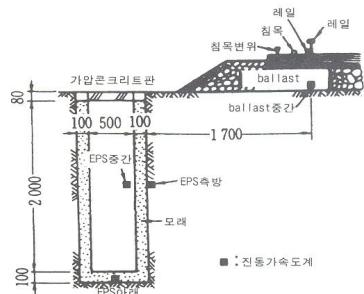
S_n : 방진공의 순간격

λ_R : 표면파의 파장

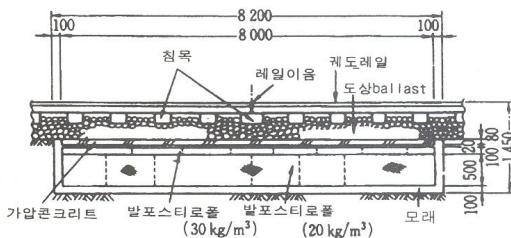
(4) 연성 · 경량재충진 방진벽

open trench의 시공깊이의 제약이나 유지관리상의 문제를 해결하는 대안으로써, EPS등 연성 · 경량재를 open trench내에 충진하여 유지관리의 문제를 해소하기 위하여 사용하는 방법이다.

早川, 松井(1996)등은 EPS block을 이용하여 그림 3.12와 같이 교통진동을 차단하기 위하여 지중방진벽과 mat의 형태로 실험하였다.



(a) EPS Block 지중방진벽 사례



(b) EPS Block 방진 mat

그림3.8 EPS Block에 의한 지반진동 차단

실험결과 EPS 지중방진벽에 의한 진동경감량은 지중벽 근방에서 5dB정도가 되고, 경감효과가 인정되는 한계거리는 지중벽 깊이의 2.5배 정도가 된다. 방진 mat로 써의 방진경감량은 자동차 주행실험에서는 4~10dB정도, 열차주행실험에서는 약 6dB이 된다. EPS Block에 의한 진동경감량의 평가는 파동투과이론에 의해서 4~200Hz의 광범위한 진동수영역에서 가능하다고 하였다.

그러나 EPS Block에 의한 방진대책은 부력에 의한 영향으로 차단재료의 밀도에 대한 고려가 이뤄져야 할 것이다.

(5) Gas Cushion Screen

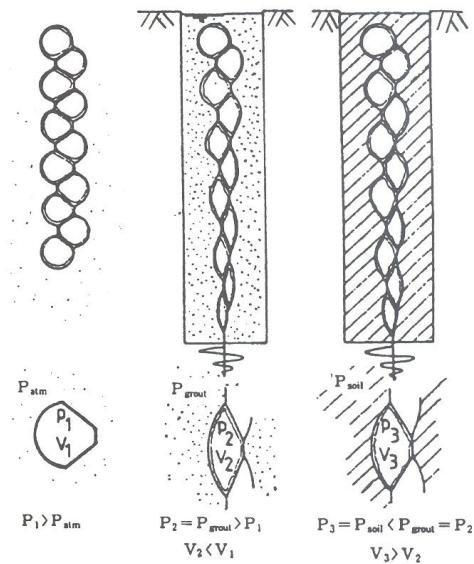
이 공법은 Massarsch and Ersson(1985)등에 의하여 최초로 제안되어 현재 유럽국가에서 적용사례가 많이 제시되고 있다.

이 방법은 연성의 Gas를 주입시켜 flexible한 쿠션을 만들어서 낮은 투과비(impedance)를 가진 영구적인 연직장벽을 만드는 것이다. 이 공법은 초기에 기간과 비용이 많이 드는 비실용성과 설치조건이 연약지반으로 제한된 단점이 있었으나, 점차 이 단점을 보완하는 방법이 개발되어 효과적인 지반진동 차단 공법을 사용되고 있다.

그림3.9은 Gas Cushion Screen의 원리를 나타낸 것이다. 그림3.9(a)에서 먼저 Gas Cushion은 수평으로 위치한 연성의 tube로 구성되어 있고, 연직방향으로 겹쳐져 있다. Gas Cushion은 얇고 유연한 플라스틱 조각으로 제조되었고, 이것은 얇은 metal foil로 둘러싸인 2층의 폴리에틸렌 필름으로 구성되어 있으며, 벨브를 통하여 부풀려진다. 그런 후 그림3.9(b)에서와 같이 Gas가 주입된 튜브는 slurry-filled trench에 설치되는데 이는 튜브외측에 작용하는 외부압력이 내부압력과 균형을 이룬다는 기본적 원리에 근거를 두고 있다. Cushion에 주입된 주입압력은 trench의 액체압력(bentonite slurry) 또는 설치 후 각각의 깊이에 작용하는 토압보다 작아야 한다. Gas Cushion은 부력으로 인하여 높은 일시적인 상향의 힘을 받게 되므로, anchor 또는 screen 아래 끝단에서 무거운 하중에 의하여 이 힘을 감소시켜야 한다.

마지막으로 그림3.9(c)에서 보는 바와 같이 Gas Cushion Screen의 설치 후에 bentonite slurry는 self-hardening cement/bentonite grout로 교체되어 이것은 차수벽과 같은 역할을 한다.

Gas Cushion Screen의 설치 후에 Screen의 위쪽에 trench 표면은 온도를 차단하기 위하여 styrofoam 덮개 또는 plastic cement/bentonite 덮개에 의해 적절히 보호되어야 한다.



(a) PHASE A (b) PHASE B (c) PHASE C

그림3.9 Gas Cushion Screen의 원리(de cock and Legrand,1990)

3.2.3 방진궤도의 종류

궤도는 크게 다음의 두 가지로 구분된다.

- 자갈 도상궤도(ballast track)
- 콘크리트 도상궤도(concrete track)

3.2.3.1 진동의 계측용어 및 지시단위

- 진동 수 : 1초 동안의 Cycle 수. $f_n(H_z, \text{cps})$
- 변위 진폭 : 변위의 최대진폭을 A_0 로 표시한다
- 속도 진폭 : 단위시간당의 변위의 변화량

$$v = A_0 \omega (\text{m/s}, \text{cm/s}, \text{mm/s})$$

- 가속도 진폭 : 단위시간당의 속도의 변화량

$$a = A_0 \omega^2 (\text{m/s}^2, \text{cm/s}^2 = \text{gal}, G = 9.8 \text{m/s}^2, \text{mm/s}^2)$$

$$1gal = 0.01m/s^2 = 1cm/s^2, 1G = 980gal = 9.8m/s^2$$

■ 진동가속도레벨(VAL) $20gol - \frac{a}{a_0} (dB)$

a : 측정대상 진동의 가속도 실효치 (m/s^2)

a_0 : 기준진동의 가속도 실효치 ($10^{-5} m/s^2$)

3.2.3.2 궤도의 진동모델

아래 그림은 철도에 사용되는 가장 간단한 진동모델이다. 이 모델에 의한 지반에서의 진동량을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\ddot{y} \propto \frac{k_1^{0.3} \times k_2^{0.5} \times k_3^{0.04}}{I^{0.2} \times m_2^{0.3} \times m_3^{0.8}}$$

여기서, \ddot{y} : 터널바닥에서의 진동가속도 (cm/s^2)

k_1 : Rail 및 지지스프링상수 ($Kg/cm/cm$)

k_2 : 자갈도상 또는 지하철구체의 스프링상수 ($Kg/cm/cm$)

I : Rail의 단면 2차 모멘트 (cm^4)

m_2 : 침목 및 자갈도상의 질량 또는 콘크리트도상의 질량 (Kg)

m_3 : 지하철구조체 ($Tunnel$)의 질량 (Kg)

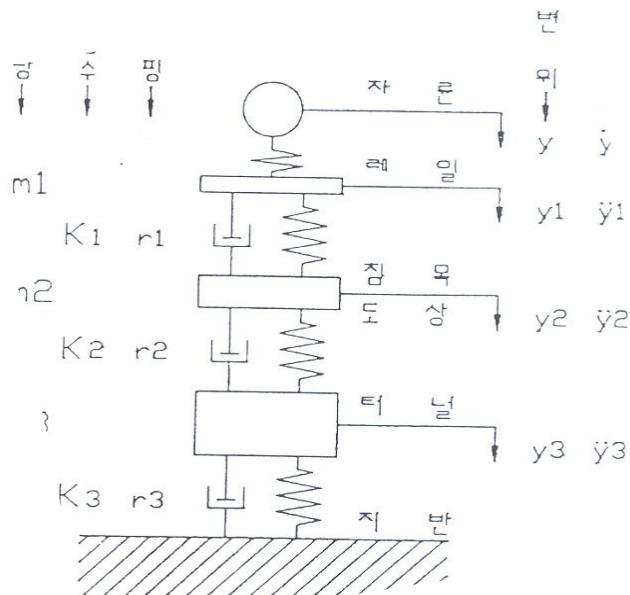


그림3.10 지하철의 진동 모델

위의 그림에서 볼 수 있듯이 진동모델은 “레일(m_1) - 스프링(k_1) - 침목 및 자갈도상 또는 콘크리트도상(m_2) - 스프링2(k_2) - 지하철 구체(m_3) - 스프링3(k_3) - 지반”으로 연결되는 4 자유도계로 구성할 수 있는데 동일한 지점에서는 k_3 ,와 m_3 가 일정하므로 다음과 같은 간단한 식이 성립된다.

$$\ddot{y} \propto \frac{k_1^{0.3} \times k_2^{0.5}}{I^{0.2} \times m_2^{0.3}}$$

이식을 이용하여 대표적인 궤도에서의 진동 가속도를 계산하면 다음과 같다.

■ 콘크리트도상 \ddot{y}_1

$$k_1 = 50 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$m_2 = 7\text{Kg/cm}(\text{두께 } 25\text{cm})$$

$$k_2 = 1000\text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$\ddot{y}_1 \propto 564$$

■ 자갈도상 \ddot{y}_2

$$k_1 = 100 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$k_2 = 100 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$m_2 = 3.7 \text{Kg/cm}(\text{두께 } 25\text{cm})$$

$$\ddot{y}_2 \propto 266$$

■ 방진침목1 \ddot{y}_3

$$k_1 = 100 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$k_2 = 37 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$m_2 = 1.4 \text{Kg/cm}(80\text{kg}/57\text{cm})$$

$$\ddot{y}_3 \propto 195.7$$

■ 방진침목1 \ddot{y}_4

$$k_1 = 50 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$k_2 = 15 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$m_2 = 1.4 \text{Kg/cm}$$

$$\ddot{y}_4 \propto 112$$

■ 자갈도상매트(Ballast Mat) \ddot{y}_5

$$k_1 = 100 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$k_2 = 14 \text{ton/cm}/57\text{cm}$$

$$m_2 = 6 \text{Kg/cm}$$

$$\ddot{y}_5 \propto 86.3$$

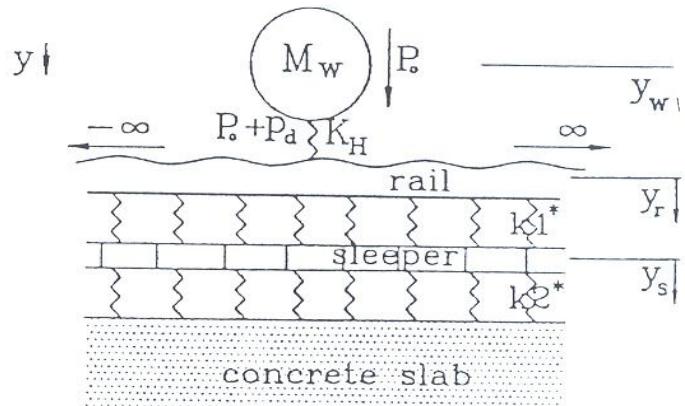
콘크리트 도상을 기준으로 하여 각 궤도별 터널 바닥에서의 진동을 계산하면 다음과 같다.

- $\frac{\text{자갈도상궤도}}{\text{콘크리트도상궤도}} = \frac{266}{564} = 0.476 \text{dB}$
- $\frac{PL_4 \text{방진침목궤도}}{\text{콘크리트도상궤도}} = \frac{195.7}{564} = 0.359 \text{dB}$
- $\frac{PL_3 \text{방진침목궤도}}{\text{콘크리트도상궤도}} = \frac{112}{564} = 0.213 \text{dB}$
- $\frac{BallastMat\text{궤도}}{\text{콘크리트도상궤도}} = \frac{863}{564} = 0.1516 \text{dB}$

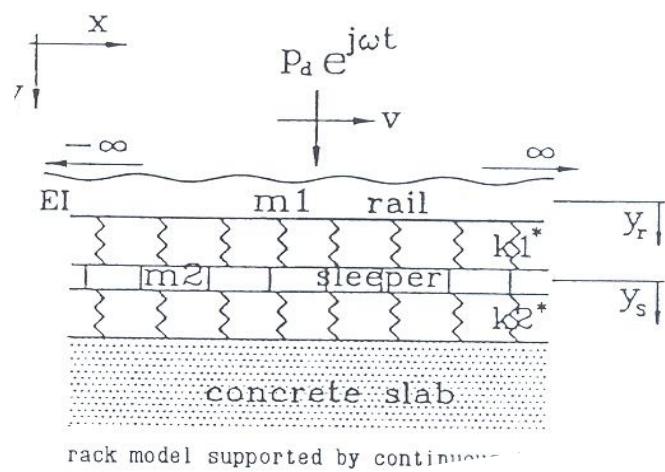
이처럼 철도에서 발생하는 진동을 줄이는 방법으로는 k_1 , k_2 을 작게 하거나 단면모멘트와 m_2 를 크게 하는 방법이 있을 수 있다. 즉, 이 방법은 레일상의 스프링상수를 변화하게 할 수는 없으므로 침목의 스프링상수를 낮추거나 레일과 지반 사이의 중량을 크게 함으로써 지반의 진동을 줄일 수 있다. 또는 레일의 단면적을 크게 하여 단면의 2차 모멘트를 크게 할 수도 있지만 이는 사실상 불가능하므로 레일과 지반 사이에 방진궤도를 설치하여 이러한 목적을 충분히 달성하기 위해서는 방진궤도의 구조설정과 함께 방진재의 동적특성을 파악하는 것이 매우 중요한 일이다.

3.2.3.3 케도의 진동 특성.

케도로부터 지반으로 전파되는 진동은 넓은 주파수 영역에 걸쳐 존재하지만 200Hz이상의 고주파수영역의 진동은 지반을 통과하면서 빠르게 감쇠 되므로 주위의 건물에는 거의 전파되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 지반진동에 관계되는 200Hz이하의 수직방향 진동해석에 적합한 케도모델로서 아래 그림의 (a)와 같은 연속지지모델(Continuously Supported Model)을 사용하기로 하였다. 연속지지모델에서는 레일을 연속보로 간주할 뿐만 아니라 침목도 굽힘강성과 전단 강성이 무시된 균일한 연속체로 본다. 실제의 케도는 아래 그림의 (b)와 같이 침목이 일정한 간격을 두고 레일을 지지하고 있기 때문에 인접한 두 침목을 지지점으로 하는 레일의 굽힘에 의한 공진현상(Pined-Pined Resonance)이 발생할 수 있는데, 연속지지모델은 침목을 균일한 연속체로 보기 때문에 이 공진현상의 나타날 수가 없다. 그러나 이 공진현상이 발생되는 주파수는 800Hz 정도로서 지반진동과 관련된 200Hz 보다 훨씬 높은 주파수이므로 영향이 없을 것으로 생각된다. 케도계에서 진동발생원인은 2.절에서 분류한 것처럼 크게 두 가지로서, 바퀴와 레일사이의 불균일성에 의해 발생하는 힘과 주기적으로 배치되어 있는 바퀴들이 레일을 통과함으로써 생기는 힘이 있다. 이와 같이 케도계의 가진력은 일반적인 진동계에서와 달리 바퀴의 움직임으로 인해 계의 내부에서 발생하고 주파수에 따른 힘의 크기도 계의 동특성과 관련되어 나타난다. 따라서 케도계의 해석에 있어서는 가진력을 결정하는 것이 케도계의 힘전달율을 구하는 것만큼 중요한 일이다. 여기서 접촉력을 결정하기 위하여 바퀴 및 레일마모에 의한 불균일성을 정현파로 가정하였고, 불균일성의 크기는 케도계에 작용하는 하중특성을 고려하여 주파수의 증가에 따라 감소하는 근사식으로 나타내었다.



(a) a track model supported by continuous two layers



track model supported by continuous two layers

그림3.11 지하철에 사용되는 진동모델

(a)의 모델에서 열차를 바퀴질량만으로 나타낸 것은, 바퀴위에 놓여 있는 열차 차량의 고유진동수가 수 Hz이하의 낮은 주파수이므로 바퀴-궤도계의 진동과 분리하여 해석 할 수 있기 때문이다. 바퀴와 레일사이에 있는 강성은 접촉력에 의해 바퀴와 레일에 부분적으로 변형이 생긴다는 것을 나타내는 것이다.

이 접촉강성은 Hertz의 이론에 의하면 비선형 스프링이지만, 동하중이 정하중에 비하여 작을 경우에는 선형화 할 수 있다.

3.2.3.4 열차주행에 따른 진동전달특성 분석

콘크리트 궤도에 대한 동적 모델을 구성하고 궤도계에서 지반으로 전달되는 진동전달 특성을 파악하기 위해 모형 궤도를 제작하여 실험한 결과를 비교·분석하면 다음과 같다.

- 이동하는 열차에 의해 발생되고 궤도를 통해 전달되는 힘은 34~37kN의 크기를 가지며, 열차의 주행속도가 60km/h 까지 증가하여도 그 크기에는 거의 변화가 없다.
레일 및 침목의 정적 처짐은 강성이 증가할수록 감소하는데 속도의 영향은 거의 받지 않는다.
- 동적 접촉력의 크기는 레일의 불균일성의 크기에 비례하는데, 레일의 불균일성의 크기는 파수(Waves Number)의 약 4승 정도로 감소하는 것으로 알려져 있고 속도가 증가함에 따라 동적 접촉력의 피크위치는 거의 변화가 없지만 크기는 증가함을 알 수 있다.
- 방진패드의 손실계수에 의한 영향은 열차하중에 의한 진동특성에는 거의 나타나지 않고 동적 접촉력에 의한 진동특성 중 피크주파수 주위에서 나타난다. 이때 마방진패드의 손실계수는 주로 첫 번째 피크에 영향을 주고, 레일패드의 손실계수는 주로 두 번째 피크에 영향을 미치는데 방진패드의 영향이 뚜렷함을 알 수 있었다.
- 궤도계의 전반적인 진동특성을 보면, 레일패드 보다는 방진패드의 강성에

의한 영향이 많으며, 레일의 처짐 한계를 만족하는 범위 내에서 방진패드의
강성을 작게 할수록 진동특성에는 대체로 바람직한 진동특성을 나타내지만
200Hz 이상의 주파수 영역에서는 오히려 동적 접촉력이 증가하여 레일의 마
모 및 소음에 악영향을 미칠 것으로 보인다.

- 실제시스템의 진동특성과 유사하도록 모형궤도장치를 구성하여 실험한 결과, 레일의 유한한 길이와 레일끝단에서 발생하는 에너지의 반사에 의한 모드가 발생하여 무한 길이로 가정한 궤도에서의 동적모델결과와 잘 일치하지 않았다. 따라서 모형궤도장치를 이용할 때에는 되도록 레일의 길이를 짧게 하던가, 레일의 끝단에 에너지의 반사를 막을 수 있는 에너지 흡수 장치를 설치해서 무한길이 보(Beam)의 효과를 보이도록 해야 함을 알 수 있다.

제4장 영향 평가를 위한 기준

지하철로부터의 낮은 주파수 소음과 진동은 주민들과 이들이 거주하는 건물들에 여러 영향을 미칠 수 있다. 기차로부터 발생하는 진동의 영향은 다음 4가지 종류로 나눌 수 있다.

- (1) 감지진동에 의한 시달림.
- (2) 민감한 장비의 작동 방해
- (3) 구조물의 손상.
- (4) 가청음향

4.1 감지진동

최근 광범위하게 사용되며 기준이 되는 인체진동 기준은 국제표준기구 ISO2631 이었다. 이 기준은 전신진동에 인간노출의 평가에 대하여 여러 가지를 규정하고 있으며, 각 나라 규격은 이것을 기초로 하여 각 나라별 사용성에 따라 바꿔 사용하고 있다. 미국 국가표준 ANSI S3.29-1983은 본질적으로 ISO2631 part2와 같이 건물진동에 인간노출의 가이드라인을 제공하고 있으며, 일본 및 우리나라로 이 기준에 의한 공해진동을 측정하고 있다.

4.1.1 국제표준화기구 ISO 2631

ISO 2631은 ‘전신진동에 인간노출의 평가’라는 제목하에 네 부분으로 구성되어 있다. 지하철 진동에 의한 건물진동의 영향에 대한 내용은 주로 ISO 2631 part2에서 설명하고 있다.

이것은 1~80Hz의 주파수 범위에서 여러 건물 용도에 따른 진동 허용한계를 나타내고 있다. 수직방향, 수평방향의 허용한계와 또 수직, 수평 진동에 대한 인간의 감도가 다르기 때문에 수직, 수평 진동에 대한 가장 낮은 한계치의 결합으로 구성된 결합표준이 포함되어 있다.

4.1.2 미국표준 ANSI S3.29-1983

미국표준 ANSI S3.29 “빌딩진동에 인간노출의 평가에 대한 가이드”를 규정하고 있는데 앞서 설명한 국제표준화기구(ISO 2631)의 규격과 매우 유사하다.

감지할 수 있는 진동 평가를 위한 한 개의 서술값을 계산하기 위해 ANSI S3.29에서는 저주파 필터의 주파수 응답곡선을 제시하고 있다. 이것은 제안된 ANSI 표준에서 규정되지 않은 방향으로의 인체진동에 대한 복합응답 기초곡선을 기본으로 하여 조금 매끄럽게 만든 곡선이다.

4.1.3 한국의 진동 기준

소음진동규제법상의 진동배출허용기준은 주로 공장시설의 진동과 건설작업의 진동에 대하여 규정하고 있으며, 그 레벨은 60dB(V)이하로 하고 시간대별 및 지역에 따라 보정치를 가산하도록 되어 있다. 전용주거지역에서 밤 시간대(22:00~06:00)에는 5dB 보정을 하여 55dB(V)로 규제하고 있다. 철도차량 및 지하철진동에 관한 기준은 없으나 밤 시간대에 55dB(V)를 적용하면 국제규격과 차이가 없을 것이라 사료된다.

진동레벨의 표시는 감각보정회(수직)를 통하여 측정된 가속도레벨 단위는 dB(V)로 표시한다. 가속도레벨의 정의는 $dB(V)=20\log a/a_0$ 의 수식에 따르고 여기서 a는 가속도(단위: m/s^2)이며, a_0 는 기준가속도로 $10^{-5}m/s^2$ 으로 하고 있다. 진동레벨을 측정하는 진동계와 진동계의 감각보정회로에 관한 사항은 KS C 1507에 규정되어 있다. 이것은 ISO 2631의 수직, 수평방향의 보정특성과 같은 것이다.

4.1.4 감지 진동 연구사례

최근 Nelson 과 Saurenman은 통과 열차로부터 발생하는 진동에 대한 지역주민 불만의 평가를 기초로 하여 주택에서 48~53dB가 최대 수용범위임을 제안 했다. ANSI 표준의 기준보다 단지 수 데시벨 낮은 진동임에도 불구하고 이 데이터는 이 작은 차이가 중요하다는 것을 지적하고 있다.

제5장 진동 소음 저감을 위한 대책(I)

지하철에서 관측되는 진동은 차륜 \Rightarrow 궤도 \Rightarrow 구조물 \Rightarrow 기초 \Rightarrow 지반 \Rightarrow 건물로 전파하여 가고 이들의 요소가 복잡하게 관계되고 있다. 지하철에서 발생하는 진동을 허용치 이하로 억제하기 위한 방진 대책이 효과적이기 위해서는 진동의 원인이 되는 차량, 궤도 및 선로 구조물을 저진동 구조로 하고 진동의 전파 경로가 되는 지반에 대해서는 흡진재 또는 방진재를 설치하며, 진동의 영향을 받는 구조물에 대해서는 진동 격리 또는 진동차단 대책 등을 강구해야 한다.

5.1 진동원 대책

방진대책이 효과적이기 위해서는 진동 원인에 대한 대책이 가장 중요하다. 철도차량, 궤도 및 선로 구조물에 대한 방진 대책으로 표 5.1과 같은 것이 있다.

Ballast track	Slab track	natural frequency
Under sleeper pad	Elastic rail fastner	$\sim 30\text{Hz}$
Ballast mat	Slab mat	$15\sim 30\text{Hz}$
Floating slab	Floating slab	$7\sim 15\text{Hz}$

표5.1 궤도 및 선로 구조물에 대한 방진대책

이러한 방진궤도의 원리는 다음과 같다.

- 침목의 스프링상수를 낮추는 방법.
- 레일과 지반 사이의 중량을 크게 하는 방법.
- 레일의 단면적을 크게 하여 레일의 단면2차모멘트를 크게 하는 방법.

차량으로부터의 진동은 궤도 부분에 있어서 레일, 침목, 궤도 Slab로 전파되어 전달된다. 궤도구조의 스프링을 연하게 하는 공법은 구조물에의 가진력을 감

소시키는 효과가 기대된다. 그 방법으로서, 레일연결장치, 침목, 도상 및 궤도 slab 각각의 경계부분에 방진 재료를 삽입하는 방법이 많이 사용된다.

유동질량 시스템에서 유동질량의 관성은 주기에서 진동을 감소시킨다. 이들 운동은 비교적 부드러우면서 탄력성 있는 진동을 감소시킨다.

새로운 철로의 설계에 많이 쓰여 지는 두 가지 설계는 가벼운 두께의 연속슬래브와 불연속 유동 슬래브이다. 연속성유동슬래브는 지하도 배면에 있는 우묵한 곳에 설치되고, 불연속 유동 슬래브는 프리캐스트 블록으로 구성되고 탄력성이 있는 패드위에 지지된다. 종방향과 횡방향 안정은 슬래브 단면사이와 면에 위치한 미리 재하된 탄성블럭에 의해 제공되어 진다.

독일에서 개발된 Floating slab 시스템은 탄선 spring 받침으로 지지되고 진동감소도 25dB이상의 효과를 나타내고 있다.

5.2 전파 경로 대책

지하철도에 의해 발생되는 진동이 지반을 전파할 경우 거리 감쇠로 인한 전파 거리가 증대됨에 따라 감소하고, 전파 매체에 따라 반사, 굴절, 간섭 작용 등을 일으켜 진동의 크기가 변하게 된다. 전파 경로상 대책을 분류하면 다음과 같다.

(1) 자역적인 방법

방진대책 중 가장간단하고 효과적인 방법은 진동원과 구조물의 거리를 길게 하는 것이다. 거리가 멀어지면 거리 및 지반 감쇠효과에 따라 진동은 줄어 들지만 일단계획된 건설공사의 위치를 바꾸는 것은 사실상 불가능하므로 적용 가능성은 크지 않다.

(2) 인위적인 방법

인위적인 방법은 진동이 전파될 때 반사, 굴절, 간섭 등에 의하여 진폭을 감소시키는 방법으로 위에 서술한 방진구나 방진벽을 설치하고 지반을 개량하는

방법 등이 있다.

5.3 수진부 대책

건물에 전달되는 진동이 주파수 영역이 넓고 불규칙해도 일반적으로 건물내부의 진동은 주파수 영역이 협소하고 규칙적인 것으로 간주 되고 있다. 따라서 건물의 방진방법으로 전달되는 주파수 영역이 협소하여 이에 의한 공진이 문제시 될 때에는 건물의 고유진동수를 변화 시켜주는 것이 유효하다.

기초파일 밑의 빌딩이나 기둥의 기초 혹은 상부, 그리고 구조적인 연결이 다른 지점에 격리 패드를 삽입 시크는 것은 소음과 진동으로부터 선택된 빌딩이나 빌딩안의 주역을 보호하는 데 도움을 줄 수 있다.

lead-asbestos 패드는 1915년부터 지하철의 소음과 진동을 격리시키는데 중요한 방법임이 알려져 있으며, 10dB정도의 상당한 진동 격리 효과를 나타내었다. 1964년 아래로 영국에서는 열차 시스템으로 인한 소음과 진동을 격리시키기 위해 건물의 기초에 탄성지지 패드를 사용해 왔다.

빌딩 격리 설계의 모든 경우에 있어 모든 주요한 진동전파 경로의 차단이나 효과적인 격리를 제공하는 것에 대한 주의가 요구된다.

5.4 국내외의 진동 소음 저감 대책 및 보강공사 사례

5.4.1 Floating slab system

최근 저주파 진동에 대해서도 유효한 방진 대책으로 floating slab 케도를 사용하고 있다.

-spring-mass system 계와 고무지지재를 이용한 시공 사례
이 시스템은 열차가 지나가면서 레일과 바퀴의 마찰로 인하여 생기는 진동을 spring Element로 흡수하여 터널 구조체로 전달되지 않도록 하며, 설치후의 효과로 25~30dB까지 방진 효과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

고무지지재를 사용한 floating slab 시스템은 신간선이나 북대서양 철도에 사용되기도 하였다. 이 궤도는 지지탄성을 유연화 시킨 것 외에 궤도의 질량도 상당히 크게 한 것으로 터널 내에서 진동 저감을 위해 사용되었다.

5.4.2 고무패드, slab mat 시공 사례

TGV의 경우 방진 대책을 위해 60Kg/m 급 중량 레일과 중량 콘크리트 침목을 사용하고 도상 두께를 30Cm로 하였으며 9mm 고무패드를 레일과 침목사이에 설치하였다. (재래선의 경우 25Cm와 도상 두께 4.5mm의 고무 패드를 이용하였다.) 그리고 터널의 경우 터널 단면의 중량을 증가시켜 진동 레벨은 5~18dB 감소 시켰다.

우리나라의 경우에는 지하철1호선에서 남대문과 동대문의 문화재 통과 구간에서 방진 대책을 실시하였다. 문화재에 대한 열차진동의 영향을 감소시키기 위해 장대 레일을 사용하고, 레일의 타이플레이트와 침목 사이에 6mm 고무패드를 설치하고 floating slab type의 궤도 구조 개념을 도입하여 본체 구조 바닥에 50mm의 가압 콜크층을 설치한 후, 철근 콘크리트 floating slab를 타설하여 자갈도상과 목침목을 부설하였다. 본 구조체 외부 벽체에도 역시 50mm의 가압 콜크판을 부착하고 아스팔트 쉬트 처리를 하였다.

제6장 진동 소음 저감을 위한 대책(Ⅱ)

6.1 진동 분석 결과

지반진동은 차종, 열차속도, 구조물 등이 거의 같아도 측정하는 장소에 따라 현격한 차이가 있어 최대 진동속도로 비교하면 10배 정도의 범위에 분포 한다. 이것은 지반에 의해 매우 진동받기 쉬운 곳과 그렇지 않은 곳이 있다는 것을 의미하고 있다. 연약한 지반에서는 장주기의 진동이 탁월한 것에 비해 견고한 지반에서는 변위가 크고, 견고한 지반에서는 가속도가 크게 되는 경향이 있다.

6.2 지하철진동저감대책 제안 안

진동소음 저감을 위한 대책에 대해서는 상기 제시한 여러 가지 대책 방안을 제시하였고 국내외의 시공 사례도 소개 하였다.

민원지역 구간에는 Ballast mat가 방진재로 사용되었음에도 불구하고 방진효과가 없이 방진 공해를 유발하여 민원이 발생하고 있다.

특히, 민원이 발생한 지역은 지반이 연약하고 건축된 주거지 건물도 진동 소음 영향을 전혀 고려치 않고 설계 시공되었으므로 이러한 여러 가지 복합적인 요인들을 감안하여 민원에 대처 할 수 있는 대책을 다각적인 면에서 고려해야 할 것이다.

6.2.1 지하철속도에 대한 저감대책

치하철 주행속도 감속운행과 감시 모니터링 시스템에 의한 대책으로 해결 될 수 있다면 이는 방지대책 공법상 시간적, 경제적으로 아주 좋은 대책이라 할 수 있다.

일반적으로 지반진동특성은 차륜 \Rightarrow 궤도 \Rightarrow 구조물 \Rightarrow 기초 \Rightarrow 지반 \Rightarrow 건물로 전파되는 진동의 주파수 특성에 크게 관계된다. 이러한 주파수 특성은 전

철 속도에 따라 다르고 또 충격도 열차 속도에 따라 달라지므로 전철이 고속으로 주행하게 되면 크게 된다.

일반적인 문헌에 의하면 속도저감에 따른 지반 진동 저감도는 진동원에 대해 10dB 정도 감소 시킬 수 있다고 본다. 만약 지하철이 30~40Km/h의 속도로 운행한다면 10dB정도의 진동저감 효과는 기대 할 수 있을 것이다.

6.2.2 수진부 대책에 대한 방법

민원 대상주거지역의 건물에 대해 건물의 중량을 증대시켜 건물의 고유진동을 충분히 낮춰주는 방법이나, 방진고무, pad spring 탄성지지를 하여 건물의 고유 진동수를 변화시켜주는 방법이 있다.

6.2.3 Floating slab system에 의한 대책방법

이 시스템은 국내에 시험사례를 제외하고는 직접적으로 시공된 사례는 없지만, 이와 비슷한 개념으로 남대문과 동대문의 문화재를 보호하기 위해 고무패드 위에 floating slab를 탑설 한 시공 사례는 있다. 이 공법에 의하면 25~30dB 에 달하는 방진 효과를 얻을 수 있으므로 매우 타당한 대책이라고 할 수 있다.

제7장 결 론

일반적으로 진동저감을 위해서 사용되는 방법은 진동원에서의 대책, 진동전파 경로에서의 대책 및 수진점에서의 대책으로 구분된다.

1. 이 중 진동전파경로에서의 대책이란 방진벽 또는 방진구에 의한 것이 대표적이며 그라우팅에 의한 방법역시 적용되고 있다.
2. 수진점대책의 경우, 구조물에 기초분리 장치를 사용하는 것이 대표적인 방법으로 높은 수준의 설계기술이 요구된다.
3. 지하철 운행 시 발생하는 진동 및 2차 소음을 줄이기 위해서는 진동원인 터널내의 궤도구조에서의 방진대책이 가장 정확하다.
4. 동적하중을 저감시켜주기 위한 여러 가지 방진궤도의 기본적 원리는 궤도나 레일의 스프링상수를 작게 하거나 레일의 단면2차 모멘트와 중량을 키워 궤도의 동적 특성을 바꾸는 것이다.

이를 위해 일반적으로 사용하는 방법은 침목의 중량을 키워 궤도의 동적 특성을 바꾸는 것이다. 이를 위해 일반적으로 사용하는 방법은 침목의 스프링상수를 낮추거나 레일과 지반사이의 중량을 크게 함으로써 지반의 진동을 줄이는 것이다.

5. 대부분 경우 중에서 가장효과적인 방법은 레일과 구조물의 바닥사이에 방진궤도를 설치하는 것으로 이러한 방진궤도를 설치할 경우에 충분한 방진효과를 얻기 위해서는 적절한 방진궤도 구조의 선정과 함께 방진재 동적 특성의 정확한 파악이 매우 중요하다.

참 고 문 헌

한국지반공학회, 진동 및 내진설계, 구미서관(1997), pp161 ~ 195

LG건설주식회사, 철도진동 및 소음 저감대책-수원민자역사 신축공사(1998)

한국소음진동공학회, 지하철에 의한 지반진동 실태조사와 진동저감 대책(1993)

한국소음진동공학회 도심지 환경소음·진동저감대책 세미나, 지하철운행에 의한 진동 예측 및 대책(1999)

소음진동규제법

한국 공업규격 KS C 1507

일본 공업규격 JIS C 1510

김성택, 소음진동편람, 동화기술(1991)

ANSI S3. 29-1983, American National Standard Guide to the Evaluation of human Exposure to Vibration in Buildings(1983)

ISO 2631-2, International Standard Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2:Continuous and shock-induced vibration in buildings.

Ahmad, S. and Ai-Hussaini.M, "Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-Filled Trenchs" Jour. Geotechnical Engineering, ASCE Vol.117(1991)

Bender. E. K(1996). "Predictions of subway-induced noise and vibration in Buildings near WMATA: BBN Report #1823, Phase I.

Howarth, H. V. C. and Griffin, M. J.(1988)."Human Response to Simulated intermittent Railway-Induced Building Vibration". Jour. Sound

and Vibration, Vol.120, No.2, pp.413~420

Kurzwoil, L. G.(1979). "Ground-Borne Noise and Vibration from Underground Rail System", Jour. Sound and Vibration, Vol.66, No.3, pp.363~370

Ungar, E. E. and Bender, E. K.(1975)."Vibrations Produced in Buildings by Passage of Subway Trains: Parameter Estimation for Preliminary Design, Inter-Noise75, pp.491~498

Woods, R. D.(1968)."Screening of Surface Waves in Soils", Jour. Soil Mechanics Foundations Div., ASCE, Vol.94, No.SM4, pp.951~979.

McConnel, K. G.(1995). Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., pp.261~360. Massarsch, K.R.(1991)."Ground Vibration Isolation Using Gas Cushion", Proc. the Second international Conference on Recent Advances in Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, No.11.6, pp.1461~1470

The study reduction of subway vibration and noise for effective method.

Yoo, myeung sang

Department of Civil Engineering
The Graduate School
Gyeongju University

(Supervised by Professor Kang, Bo-Soon)

Train induced vibration and the resulting wave propagation through soil toward the neighborhood are investigated by using constructive method. The method is based on the phenomenon that the waves below a certain frequency do not propagate in a given soil layer above a bedrock. Typical track types are considered; track on flat ground, embankment and open-cut.

The result of this study can be summarized as follows:

1. The wave propagation induced by train's passage has been analyzed by assuming impulse loading and steady state harmonic loading of certain frequencies on surface track, embankment and open-cut tracks.
2. The material of tracks and constructive method proved effective for reducing the response of a track on flat soil, embankment for all considered conditions and open-cut.
3. The most effective method of reducing vibration and wave propagation is that finding the dynamic-specific of the material.