

<논 문>

지반의 진동전달식 산정에 관한 연구

A Study on the Calculation of Vibration Transfer Formula for Ground Vibration

홍 갑 표* · 전 호 민**

Hong, Kap-Pyo and Chun, Ho-Min

(1998년 2월 20일 접수 : 1998년 8월 22일 심사완료)

Key Words : Ground Vibration(지반진동), Vibration Transfer(진동전달), Traffic Vibration(교통진동)

ABSTRACT

Noise and vibration due to railway traffic are major causes of environmental pollution in the city. In course of judging, assessing and coping with the problem, it becomes imperative to predict the vibration level induced by railway traffic passing through downtown in the city. The vibration due to railway traffic is transferred to the neighbouring buildings through the ground. In this study, as a method predicting vibration level of the buildings near railway, a vibration transfer formula is suggested. This formula is used to calculate vibration level occurring at the bottom of the neighbouring buildings, which are located at a certain distance from railway.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

국내에서 철도는 매우 중요한 운송수단이 되고 있다. 현재 고속철도가 시공중이며 고속철도가 운행되는 2000년대에는 철도가 차지하는 비중이 더욱 증가하게 될 것이다.

생활수준이 향상됨에 따라 소음·진동에 대한 국민들의 인식수준이 높아지고 적극적으로 대응하게 되면서 철도진동에 대한 민원이 증가하고 있다. 도심지를 통과하는 고속철도 차량의 주행하중에 의한 진동은 도심에서 소음, 진동의 주요 원인이 될 것으로 판단된다.

본 연구는 구조물 및 인간에 미치는 영향을 평가할 수 있는 토대를 마련하기 위하여 열차가 통과할 때 일정거리 떨어진 곳에 위치한 철도 인접건물 하부에서 발생할 수 있는 진동레벨을 산정할 수 있는 진동전달식을 제시하는 데 그 목적이 있다.

1.2 연구범위 및 제한사항

열차주행하중에 의한 궤도 인접지반의 진동량을 실측하고 실측자료를 회귀분석하여 지반진동 전달식을 제안하고자 한다. 본 연구의 제한사항은 다음과 같다.

- (1) 진동레벨 산정시 대상으로 하는 진동은 수직방향의 가속도로 한다.
- (2) 열차 선로하부는 자갈도상으로 한다.
- (3) 지반진동 전달식에서 지층의 두께는 영향을 미치지 않는 것으로 가정한다.
- (4) 진동측정실험을 실시하는 지층의 분포는 고르

* 정회원, 연세대학교 공과대학 건축공학과

** 연세대학교 대학원 건축공학과

다고 가정한다.

1.3 연구내용 및 방법

지반진동 전달식을 산정하기 위하여 경부선 병점역의 지반을 대상으로 하였다. 병점역의 지반에 대한 측정점의 위치는 4개소로 하였으며 열차의 속도는 스피드건을 이용하여 측정하였다. 가속도계를 이용한 자료의 획득은 실시간처리 동적신호분석기인 SA390을 이용하여 자료를 저장하였다.

1.4 연구동향

1976년 Gutowski와 Dym⁽¹⁾이 지반진동전달식을 주파수를 고려하지 않은 진동식으로 표현하였으며 기하감쇠와 재료감쇠로 구분하여 제시하였다.

1977년 Koch⁽²⁾는 열차속도 220 km/h로 운행되는 열차에 대한 측정결과를 정리하여 제시하였다.

1979년 Dawn과 Stanworth⁽³⁾는 진동전달은 일반적인 지반에서 압축파 속도 1,000 m/s, 전단파 속도 200 m/s, 표면파(Rayleigh) 속도 35 m/s로 나타나고 있다고 하였다. 같은 해 Verhas⁽⁴⁾는 열차주행으로 지반에 전파되는 에너지는 저주파수가 지배하고 있다고 하였다.

1996년 Madshus, Bessason과 Harvik⁽⁶⁾은 지반표면에 가해지는 열차하중에 의한 지반의 진동전달은 Rayleigh 표면파에 의하여 에너지가 전달된다고 하였다.

국내에서는 열차주행하중에 의한 지반에 대한 실험 연구는 이온길⁽²¹⁾에 의하여 연구되었다. 1991년 이온길은 주행열차로 인한 주변지반의 진동을 측정하여 지반진동전달식을 제안하였다.

2. 지반의 동적 특성

지반의 진동전달식을 산정하는 데 필요한 데이터는 지반 감쇠, 지반진동원의 진동전달모형, 지반전달파의 특성 등이다. 이 가운데 지반의 거리에 따른 감쇠는 기하감쇠, 재료감쇠에 의해 표현된다.

가장 간단한 형태의 거리에 따른 감쇠식은 식 (1)과 같다.

$$W_2 = W_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-a(r_2 - r_1)} \quad (1)$$

여기서,

$n = 1/2$: 표면파(Rayleigh wave)

W_1 : r_1 떨어진 곳에서의 진폭

W_2 : r_2 떨어진 곳에서의 진폭

a : 거리감쇠계수(1/m)

r_1 : 진폭을 알고 있는 곳까지의 거리 (m)

r_2 : 진폭을 모르고 있는 곳까지의 거리 (m)

$n = 1$: 무한탄성체 실체파(body wave)

$n = 2$: 반무한탄성체 지표면파(surface wave)

3. 지반 진동전달 실측

진동전달 실측은 국내에서 운행중인 열차가 통과하는 역을 선택의 기준으로 한다. 운행하는 열차 가운데 비둘기호만 하루 2회 정차하고 새마을호, 무궁화호, 통일호 등은 정상적인 속도로 역을 통과하기 때문에 경부선인 병점역을 측정대상으로 선택하였다. 측정을 실시한 장소는 Fig. 1과 Fig. 2에서 알 수 있듯이 병점역 플랫폼을 벗어난 지역을 대상으로 하였다.

3.1 측정장비

주행열차의 동하중에 의한 침묵 및 지반의 응답을 측정하기 위하여 동적신호분석기를 이용하여 분석을 실시하고 진동응답은 가속도계를 이용하여 측정하였다.

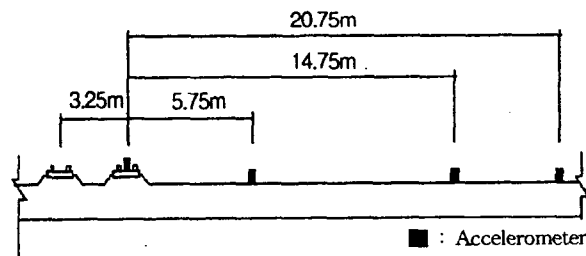


Fig. 1 Measurement point (cross section)

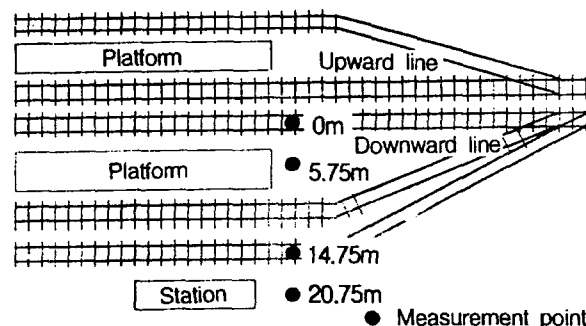


Fig. 2 Measurement point (plane)

열차의 속도는 속도측정기인 스피드건을 사용하여 상행선 및 하행선의 열차 종류별로 속도를 측정하였다. 가속도계를 올려놓을 수 있는 받침대는 강철을 소재로 하여 자체 제작하고 크기는 Gutowski와 Dym의 연구에서 제안한 것을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

3.2 측정방법

본 연구의 실험에서 사용된 동적신호분석기는 측정자료를 기록하여 두면 필요시 시간영역 및 주파수 영역에서 진동해석을 실시할 수 있다. 거리에 따른 지반의 진동측정은 4가지의 종류로 구분된다. 하행선의 경우, 침목의 중앙부, 14.75 m, 20.75 m의 위치에서 측정한 것과 5.75 m, 14.75 m, 20.75 m에서 측정한 두 종류가 있다. 상행선의 경우 3.25 m, 18.75 m, 24.75 m의 경우와 9.75 m, 18.75 m, 24.75 m의 두 종류가 있다.

3.3 진동측정결과 및 분석

동적신호분석기를 이용하여 측정한 진동은 열차가 역에 진입할 때부터 통과한 후 까지의 시간을 포함하여 저장하였다. 본 연구에서는 sampling개수를 512로 하고 line수를 200으로 하였다. 지반진동의 주파수대역이 일반적으로 500 Hz 미만이기 때문에 유효주파수 500 Hz 까지로 하여 sampling개수를 산정한 것이다. 따라서 초당 1,280개의 데이터를 획득할 수 있으며, 640 Hz 주파수영역까지는 신뢰할 수 있는 분석이다.

측정은 상행선과 하행선을 구분하여 실시하였다. 상행선으로 열차가 주행할 때는 거리에 따른 감쇠를 파악하였으며 하행선으로 열차가 통과할 때는 침목에 작용하는 진동 및 거리에 따른 진동을 측정하였다. Table 1은 열차의 속도와 객차량 및 측정거리를 나타낸 것이다.

(1) 시간영역에 대한 분석

Fig. 3은 실측한 열차하중에 대한 가속도응답을 시간이력으로서 나타내었다. 각 그림의 침목에 대한 가속도응답에서 열차 차량의 수를 파악할 수 있는데, 최대응답이 반복되는 부분이 측정위치의 침목을 차량이 통과할 때이다. 시간이력에 대한 분석을 통해 시간이력에 따른 최대값을 파악하여, 주파수영역에서의 크기를 짐작할 수 있다.

가속도응답 측정값은 침목의 위치에서 가장 크게 나타났으며, 진동원으로부터 떨어진 거리가 증가할수록 가속도응답이 작아지는 경향을 나타내었다. 이는 거리에 따른 기하감쇠와 재료감쇠에 의하여 줄

Table 1 Specification of passing trains and measurement distance

	Train Specification	Measurement distance
Upward line	U-106-16 ^{a)}	0, 18.75, 24.75 m
	U-112-13	0, 18.75, 24.75 m
	U-102-09	0, 18.75, 24.75 m
	U-108-10	9.75, 18.75, 24.75 m
	U-102-10	0, 18.75, 24.75 m
	U-105-10	0, 18.75, 24.75 m
	U-109-08	0, 18.75, 24.75 m
	U-110-06	0, 18.75, 24.75 m
	U-111-12	0, 18.75, 24.75 m
	U-108-10	9.75, 18.75, 24.75 m
	U-110-08	9.75, 18.75, 24.75 m
	U-102-16	9.75, 18.75, 24.75 m
U-110-11	0, 18.75, 24.75 m	
Downward line	D-118-16 ^{b)}	0, 14.75, 20.75 m
	D-105-16	0, 14.75, 20.75 m
	D-117-16	5.75, 14.75, 20.75 m
	D-105-14	5.75, 14.75, 20.75 m
	D-105-10	0, 14.75, 20.75 m
	D-108-10	0, 14.75, 20.75 m
	D-113-08	0, 14.75, 20.75 m
	D-098-14	0, 14.75, 20.75 m
	D-108-09	0, 14.75, 20.75 m
	D-113-09	0, 14.75, 20.75 m
	D-108-09	0, 14.75, 20.75 m
	D-106-16	0, 14.75, 20.75 m
	D-090-12	0, 14.75, 20.75 m
	D-109-13	5.75, 14.75, 20.75 m

a)U-106-16:Upward-Velocity(km/h)-No. of train
 b)D-118-16:Downward-Velocity(km/h)-No. of train

어드는 것이다. 또한 시간이력에서 알 수 있듯이 진동응답의 최대값이 거리가 진동원으로부터 멀어질수록 둔화되는 현상을 볼 수 있다. 이는 고주파수 성분이 진동이 전달되는 과정에서 저감되어 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

(2) 주파수영역에 대한 분석

Fig. 4는 실측한 열차하중에 대한 진동가속도의 주파수 특성을 나타내고 있다. 침목에 작용하는 열차하중에 의한 진동가속도는 고주파수영역에서 지배적임을 알 수 있다. 침목에 대한 가속도응답을 푸

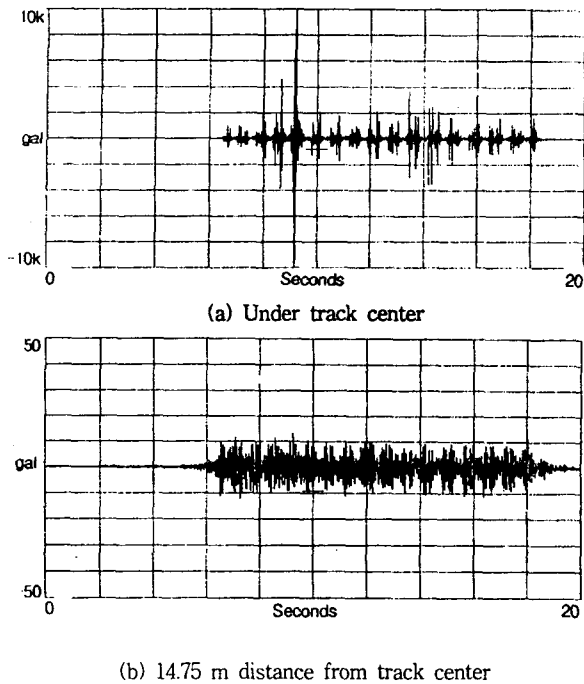


Fig. 3 Time history of acceleration response for downward line (D-118-16)

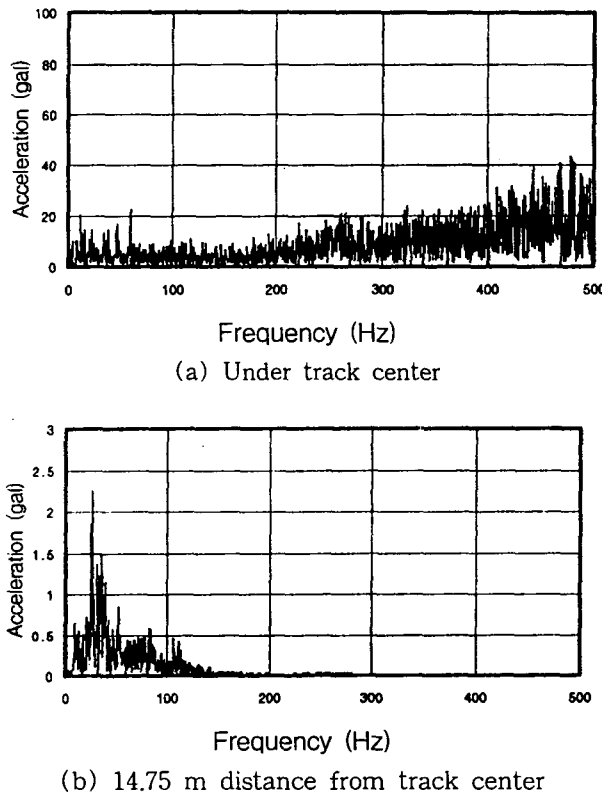


Fig. 4 Frequency response for downward line (D-118-16)

Table 2 Sleeper and wheel pass-by frequency

Train type	Mean velocity (km/h)	Sleeper interval (m)	Wheel interval (m)	Sleeper pass frequency (Hz)	Wheel pass frequency (Hz)
A	109	0.6	15.6	50.4	1.94
B	107	0.6	14.2	49.5	2.09
C	104	0.6	14.2	48.1	2.03

A : Saemaoul Line, B : Mugungwha Line
C : Tongil Line

리에 변환(Fourier transform)하여 나타내면 고주파수영역에서 크기가 큰 것을 알 수 있다.

지반의 지배주파수영역은 10~30 Hz사이에 존재함을 알 수 있다. 그러나 50 Hz 부근에서도 최대값이 나타나는 데 이는 침목통과주파수에 의하여 나타나는 것이다. Heckel⁽⁷⁾이 제안한 식에 의하여 침목통과 주파수와 차륜통과 주파수를 구하면 다음 Table 2와 같다.

4. 지반 진동전달식 산정

4.1 지반물성치

병점역 지반의 시추주상도를 보면 지표면에서 아래쪽으로 퇴적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층, 연암층의 순서로 지층이 형성되어 있다.⁽²⁰⁾

4개의 시추공에서 나온 표준관입시험의 결과를 이용하여 지층의 전단파속도를 산정하였다. 병점역 육교 하부의 표준관입시험 N값은 지하 1.5 m에서 8~24값을 나타내었다. 따라서 가장 최상층에 있는 퇴적토층의 N값을 8로 하였다. 산정식은 Imai의 전단파속도 산정식을 사용하였으며 다음 식 (2)와 같다.⁽¹⁹⁾

$$V_s = 91 \times N^{0.337} \text{ (m/sec)} \quad (2)$$

여기서,

N : 표준관입시험치

식 (2)에 의해 계산된 전단파 속도는 183 m/sec이다. M. Heckel에 의하면 Rayleigh파의 속도는 전단파 속도의 0.87~0.95배 정도로 나타나서 Rayleigh파의 속도는 159~174 m/sec의 범위를 나타낸다.⁽⁷⁾ 압축파 속도는 식 (3)에 나타난 여러 계수들의 상관관계를 이용하여 구하였으며, 프아송비(Poisson's ratio)를 0.33으로 가정하였을 때 318 ~ 348 m/sec로 나타났다.

$$V_c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu)(1-2\nu)}}$$

$$V_c = f\lambda, \quad E = 2(1+\nu)G, \quad (3)$$

$$\left(\frac{V_s}{V_c}\right)^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$$

여기서,

- V_s : 전단파속도 (m/sec)
- V_c : 압축파속도 (m/sec)
- E : 탄성계수 (N/m²),
- G : 전단탄성계수 (N/m²)
- ν : 프와송비 (Poisson's ratio)
- λ : 파장 (m)
- f : 가진력의 주파수 (Hz)

4.2 지반진동전달식

(1) 지반응답에 대한 결과

실측된 지반의 응답을 1/3 옥타브밴드의 주파수영역에 나타내어 거리에 따른 진동저감량을 산정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 대표적인 위치에 대한 가속도응답을 dB (기준치 10⁻⁶ m/sec²)로 나타내었다. 여기서, g는 중력가속도(9.8 m/sec²)를 나타낸다.

Fig. 5는 상행선의 침목과 진동원에서 14.75 m, 20.75 m 떨어진 위치에서의 응답을 나타낸다. 진동원에서 떨어진 거리가 증가함에 따라 진동레벨이 크게 저감되는 것을 알 수 있다. 특히 침목에서는 고주파수영역에서 큰 진동레벨을 나타내나 떨어진 거리가 증가함에 따라 저주파수영역의 진동레벨에 비해 저감 폭이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 하행선의 진동원에서 9.75 m, 18.75 m, 24.75 m 떨어진 위치에서의 응답을 나타내고 있다. 저주파수영역과 고주파수영역에서 떨어진 거리에 따

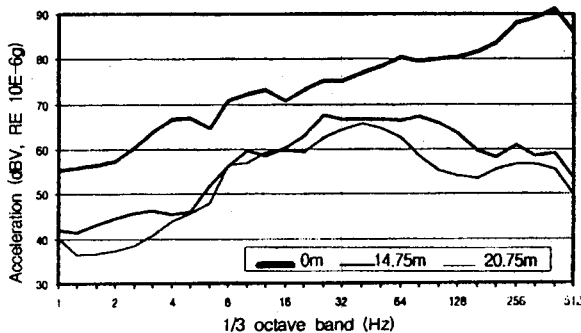


Fig. 5 Frequency response for downward line (D-118-16)

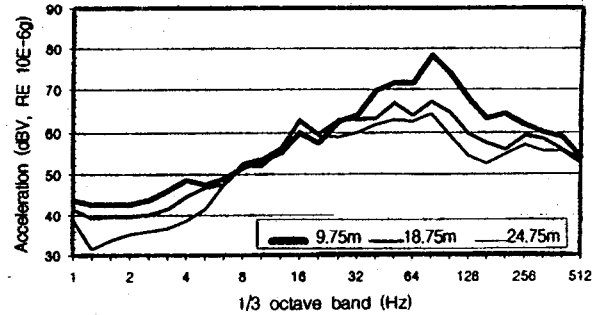


Fig. 6 Frequency response for upward line (U-108-10)

라 모두 진동레벨이 저감되는 양상을 나타내었다. 그러나 8~30 Hz 사이에서는 진동레벨의 저감폭이 크지 않았다. 이는 지반의 고유주파수 대역이 위치하는 영역이기 때문에 저감폭이 크지 않은 것으로 판단된다.

Table 3과 Table 4는 가속도응답을 정리하여 보인 것이다. 각 거리에 따른 진동레벨은 각 주파수에

Table 3 Overall vibration level for upward line

Direction	Train	Response for distance from track center (dBV)			
		3.25m	9.75m	18.75m	24.75m
Upward line	U-108-10*		80.41	73.37	71.03
	U-102-09	83.44		73.09	72.17
	U-102-16		78.69	73.2	72.17
	U-108-10		79.78	74.78	73.50
	U-110-08		79.64	74.68	73.29
	U-109-08	84.68		74.96	73.27

* U-108-10 : Upward-Velocity(km/h)-No. of train

Table 4 Overall vibration level for downward line

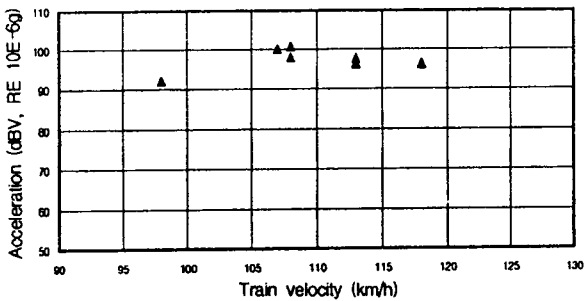
Direction	Train	Response for distance from track center (dBV)			
		Track center	5.75m	14.75m	20.75m
Downward line	D-105-14*		83.76	75.68	72.34
	D-117-16		78.17	75.63	73.49
	D-118-16	96.28		76.61	73.07
	D-098-14	97.27		74.68	71.43
	D-102-10	85.37		75.9	73.7
	D-107-09	99.97		74.7	72.72
	D-108-09	97.93		73.85	71.64
	D-113-08	96.38		75.52	72.91
	D-113-09	97.5		75.1	72.75
	D-108-10	100.72		76.56	74.17
	D-090-12	100.93		75.34	72.34
	D-109-13		79.6	74.13	71.9

*D-105-14 : Downward-Velocity(km/h)-No. of train

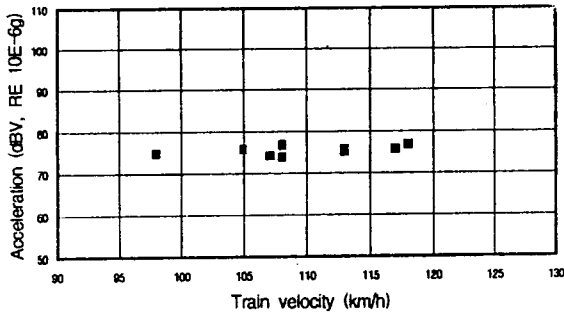
대한 전체 진동레벨인 overall 진동레벨을 사용하였다⁽¹⁵⁾. 진동원으로부터 가까운 거리에서의 가속도응답이 진동원 위치에서의 응답에 비해 크게 응답이 떨어진 것을 볼 수 있고 거리가 멀어짐에 따라 상대적인 진동저감량도 감소함을 알 수 있다.

속도에 따른 지반가속도 응답을 비교하였다. 연구의 제한사항에서 언급하였듯이 본 연구의 열차 속도 하부는 자갈도상으로 되어 있다. 비교 결과, 100 ~ 120 km/h의 속도로 주행하는 열차에 대한 지반가속도응답은 비슷한 진동레벨을 나타내었다.

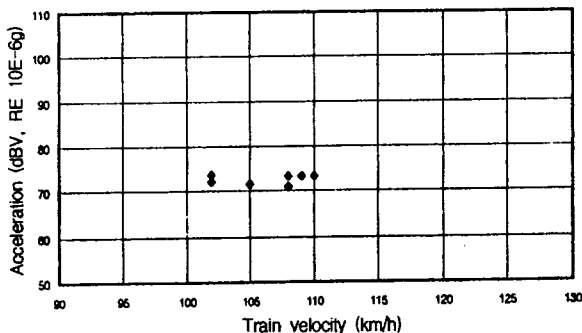
Fig. 7에 0 m, 14.75 m, 24.75 m에 대한 속도에 따른 응답을 나타내었다.



(a) Under track center



(b) 14.75m distance from track center



(c) 24.75m distance from track center

Fig. 7 Acceleration response vs. train velocity

(2) 지반 진동전달 제안식

속도 100~120 km/h의 열차에 대한 가속도응답을 거리에 따라 측정된 값을 회귀분석하여 지반전달식을 곡선적합(curve fitting)에 의해 구하였다. 유도된 식은 식 (4)와 같으며 회귀분석결과는 Table 5에 나타내었다.

$$A_x = A_0 - 17.92 \log(1+x) \quad (\text{dBV}) \quad (4)$$

여기서,

A_x : x만큼 떨어진 위치에서

지반진동레벨(overall) (dBV)

A_0 : 침목하부의 가속도응답 (dBV)

실측자료에서 구한 값은 $A_0 = 96.98$ dBV

x : 진동원에서 대상건물까지의 거리 (m)

회귀분석에 의해 구한 지반진동 저감식은 상관계수가 0.98을 나타내어 실측에 의한 결과를 정확히 반영해 주는 식이다. Fig. 8은 실측된 응답과 제안식을 비교하여 나타낸 것이다.

(3) 기타 지반전달식과의 비교

본 연구에서 제안한 지반진동전달식과 Gutowski⁽¹¹⁾, Crandall⁽¹⁾, 일본의 철도청식⁽²¹⁾, 및 국내에서 제안된 이온길의 식⁽²¹⁾과 비교하였다. 단, Crandall의 식은

Table 5 Regression analysis result of ground vibration transfer

Regression Analysis Statistics			
Multiple correlation coeff.	0.9802	Determination coeff.	0.9608
Adjusted determination coeff.	0.9600	Standard error	1.6713
Case of data	51		

Analysis of variance

	D.O.F.*	Sum of square	Mean square
Regression coefficient	1	3360.1513	3360.1513
Residual	49	136.8751	2.7933
Total	50	3497.0264	
	Coefficient	Standard error	t
Y intercept	96.9833	0.5817	166.7235
X1	-17.9237	0.5167	-34.6828

* D.O.F. : Degree of freedom

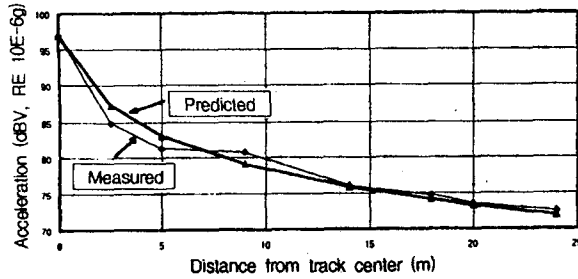


Fig. 8 Comparison between measured and predicted acceleration level

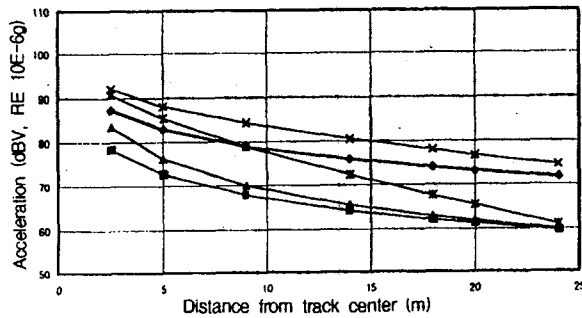


Fig. 9 Comparison with several Ground vibration transfer formula

주파수 60 Hz에 대한 것이다.

Gutowski식에서 거리감쇠계수는 $\alpha = 0.1(m^{-1})$ 을 사용하였으며, Crandall식에서 손실계수는 $\eta = 0.3$, 지반의 Rayleigh파 속도는 4.1에서 산정한 174 m/s를 사용하였다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 본 연구의 제안식의 경향이 다른 연구자들의 결과와 비슷한 경향을 나타낼 수 있다. 그러나 본 연구대상 지반과 기타 연구자들의 지반은 서로 차이가 있기 때문에 이를 직접 비교하는 것은 무리라고 생각한다.

5. 결 론

주행하는 열차의 동하중이 지반을 통해 전달되는 진동레벨을 실험에 의해 측정·분석하여 지반의 진동전달식으로 제시하였으며 이 연구의 결론은 다음과 같다.

산류토, 퇴적토, 화강풍화토에 대한 진동전달식을 실측된 자료를 토대로 제시하였다. 병점역의 지반에 대한 진동전달식을 산정한 결과 진동전달식은 진동원과 가까운 거리에서는 급속히 진동레벨이 떨어지나 그 이후는 진동레벨의 기울기가 완만해지는 것

으로 나타났다. 회귀분석에 의하여 구한 진동전달식은 다음과 같다.

$$A_x = A_0 - 17.92 \log(1+x) \quad (\text{dBV})$$

이 연구에서는 철도지반 진동레벨을 병점역 한 지역에서만 측정하였지만 다양한 지역에 대한 추가측정을 통하여 보다 일반적인 지반진동전달식을 보완하는 연구가 향후 연구과제라 할 수 있겠다.

참 고 문 헌

- (1) T. G. Gutowski and C. L. Dym, 1976, "Propagation of Ground Vibration: a Review," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 49, No. 2, pp. 179~193.
- (2) H. W. Koch, 1977, "Propagation of Vibrations and Structure-Borne Sound Caused by Trains running at a Maximum Speed of 250 km/h," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 51, No. 3, pp. 441~442.
- (3) T. M. Dawn and C. G. Stanworth, 1979, "Ground vibrations from passing trains," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 66, No. 3, pp. 355~362.
- (4) H. P. Verhas, 1979, "Prediction of the Propagation of Train-induced Ground Vibration," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 66, No. 3, pp. 371~376.
- (5) H. J. Saurenman, J. T. Nelson and G. P. Wilson, 1982, Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, U.S. Department of Transportation, Report No. DOT-TSC-UMTA-81-72, Washington, D.C.
- (6) C. Madshus, B. Bessason and L. Harvik, 1996, "Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 193, No. 1, pp. 195~203.
- (7) M. Heckel, 1996, "Structure-Borne Sound and Vibration from Rail Traffic," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 193, No. 1, pp. 175~184.
- (8) C. J. C. Jones and J. R. Block, 1996, "Prediction of Ground Vibration from Freight Trains," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.

- 193, No. 1, pp. 205~213.
- (9) B. M. Das, 1992, Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT.
- (10) T. G. Gutowski, L. E. Wittig and C. L. Dym, 1978, "Some Aspects of the Ground Vibration Problem," Noise Control Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 94~101.
- (11) T. Fujikake, 1987, "The Production of Ground Vibrations by Railway Trains," Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, No. 3, pp. 585~589.
- (12) 關谷堅二, 1996, "地盤の振動計測方法," 地盤工學會, Vol. 44, No. 9, pp. 9~12.
- (13) 鈴木清美, 杉本隆男, 1996, "都内建設事および道路交通に伴う地盤振動の傾向," 地盤工學會, Vol. 44, No. 9, pp. 17~20.
- (14) 日本工業規格 : 振動レベル計 (JI C 1510), 1976
- (15) 日本工業規格 : 振動レベル測定法 (JIS Z 8735), 1981
- (16) 長瀧慶明, 橋詰尚慶, 1996, "地盤内振動の伝搬特性とその対策," 地盤工學會, Vol. 44, No. 9, pp. 5~8.
- (17) 竹官宏和, 1996, "環境振動における盤内の波動伝播と振動対策," 地盤工學會, Vol. 44, No. 9, pp. 1~4.
- (18) 차일환, 옥정권, 1994, 소음진동공학, 문운당.
- (19) 한국고속철도건설공단, 1997. 3. 남서울역사 지반조사보고서.
- (20) 과학기술처, 1996. 12, 교량터널 및 복합건축구조물의 진동저감 신공법개발 -교통하중을 중심으로-.
- (21) 이은길, 1991, 철도구조물의 진동특성에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문.
- (22) 이기홍, 1988. 2, "열차 고속주행에 따른 연선의 지반 진동," 철도기술정보, 제9권, pp. 1~6.
- (23) 이기홍, 1988. 12, "신간선의 연선진동," 철도기술정보, 제 14 권, pp. 1~9.