

철도연변 지반진동 예측기법 및 전산프로그램 개발

Development of Analysis Method and Computer Program for Train-induced Ground Vibration

황 선 근*¹ Hwang, Seon-Keun
엄 기 영*² Eum, Kyee-Young
고 태 훈*³ JKoh, Tae-Hoon
이 중 재*⁴ Lee, Jong-Jae

Abstract

Recently, environmental vibration by train operation has been getting such an attention that the ISO puts it into the environmental vibration regulation. However, the reasonable and efficient countermeasures against such a kind of vibration is not well established, especially in residential areas near the railroad. Therefore, it is very important to estimate the ground vibration induced by the train operation for the design and construction of track supporting structures as well as structures near the track.

In this study a model estimating dynamic load on track due to train operation and analysis technique of propagation of ground vibration were developed. Furthermore, the estimated vibration from this model was compared with the actual measurement data in the field and found to be reasonably acceptable.

요 지

최근 대중교통 및 물류 운송 수단으로써 철도의 중요성이 부각되면서 부수적으로 발생하는 열차하중에 의한 환경진동은 국제표준화기구(ISO)의 기준에 반영될 정도로 관심의 대상이 되었다. 하지만 도심지의 시설물 또는 진동원 주위의 주거지역 조성 시, 이에 대한 체계적이고 합리적인 대책은 미흡한 실정이다. 따라서 현재까지 설계 및 시공 시에 주요 인자로 취급되지 않았던 동적 열차하중에 대한 지반진동의 예측과 저감대책의 마련이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 열차하중에 의한 철도연변의 지반진동을 분석/예측하기 위한 열차주행에 의한 하중산정 모델과 이에 의한 토공구간에서의 진동의 지중 전달과정 해석기술 및 전산프로그램을 개발하고 그에 따른 해석치와 실측치를 비교 검증하였다.

Keywords : Train-induced ground vibration, PSD(power spectral density), Infinite element, Frequency response function

*1 정회원, 한국철도기술연구원 시설전기연구본부 책임연구원

*2 정회원, 한국철도기술연구원 시설전기연구본부 선임연구원

*3 정회원, 한국철도기술연구원 시설전기연구본부 연구원

*4 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

1. 서론

통상적으로 열차하중에 의한 진동의 전파경로는 열차 →선로구조물(또는 노반) →지반 →인접구조물로 전파하며, 이들 사이의 복잡한 상호작용과 간섭효과 때문에 철도 연변의 지반진동은 복잡한 동특성을 갖는다. 그러므로 열차하중에 의한 철도연변의 지반진동을 분석/예측하기 위해서는 열차주행에 의한 하중의 평가 및 모델링과 이에 의한 진동의 지중 전달과정 해석기술 및 전산프로그램의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 토공구간의 열차하중 산정과 진동전파 해석 및 지반진동 예측프로그램의 개발에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 지반진동전파

열차운행 시 인근주민과 구조물에 피해를 주는 연변진동을 예측/평가하고 필요한 경우에 이를 저감시키기 위해서는 진동원으로부터 수신부까지의 진동전달 경로를 파악하고 진동특성을 분석하는 것이 무엇보다도 중요하다. 이를 위해서는 열차하중의 정확한 산정과 함께 지반의 동적 거동을 정확히 해석할 수 있는 진동전파 해석기술의 개발과 더불어 진동저감기술에 대한 효과 분석 및 검증이 필요하다.

기본적으로 지반진동 해석에서는 지반의 재료적 특성과 기하학적 반무한성이라는 중요한 특징을 고려해야 한다. 지반의 비균질성과 비선형성은 유한요소법을 사용하면 적절히 모형화할 수 있다. 그러나, 무한영역에 대한 유한요소법의 사용은 경계조건에서의 진동의 반사 때문에 문제가 많으므로 지반진동 해석 시에는 반무한 지반으로의 진동의 방사를 효과적으로 고려하기 위한 수치적 방법의 개발 위주로 연구되어 왔다. 대표적인 반무한영역의 모형화 방법으로는 전달경계법, 경계해방법, 경계요소법 및 무한요소법 등이 있다.

근역(near field region)을 유한요소로 모형화하고, 원역(far field region)을 무한요소 또는 경계요소로 나타내는 무한요소법과 경계요소법은 비교적 최근에 개발된 방법이다. 무한요소법은 반무한 영역으로 전파하는 진동의 형상함수를 사용하여 유한요소법에서와 유사한 개념으로 무한요소의 질량 및 강성행렬을 구성하므로 유한요소와의 결합이 매우 용이하다. [(윤정방의 3인 1997 a, b) (P. Bettess, 1992)]

지반-구조물 상호작용계는 일반 구조물계와는 달리 반

무한지반으로의 에너지 방사를 고려해야 한다. 지반-구조물 상호작용계에서의 이러한 에너지방사는 근역에서 원역으로의 진동전파에 의해 이루어지며, 이러한 현상을 방사감쇠(radiational damping)라고 한다.

진동원이 균일 반무한 지반의 지표에 놓일 때 지표로 전달되는 진동에너지의 약 67%는 표면파의 형태로 전파된다. 그리고, 진동원이 지표하부에 놓인 경우라도 일차적으로 체적파 형태로 층상지반의 지표로 수직상승한 진동에너지는 지표면을 만나 표면파로 바뀌어 전파되는데, 이러한 표면파 에너지는 내부 경로를 통하여 지표부근의 수신구조물 쪽으로 직접 전파되는 체적파에 비하여 파 에너지 감쇠율이 낮으므로 지표면 진동파의 대부분은 표면파에 의한 것이라고 간주할 수 있다. 즉, 진동원에서 어느 정도 이상 떨어진 지표부근 지점에서 발생하는 지반진동파 에너지는 사실상 표면파에 의한 것이라고 간주해도 무방하다. 따라서 지반진동의 저감은 바로 표면파 에너지의 전달을 저감하는 것이 핵심이다.

이론적으로 기하학적 감쇠는 보통 진동원의 형태에 따라 점진동원(point source)과 선진동원(line source)으로 나누어서 판단한다. 이를 전달형태별로 정리하면 표 1

표 1. 기하학적 감쇠

진동원의 위치	파의 종류		점진동원	선진동원
	하중의 종류			
지표면	표면파		$\frac{1}{\sqrt{r}}$	1
	체적파	지표면 전달	$\frac{1}{r^2}$	$\frac{1}{r}$
		지중전달	$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{\sqrt{r}}$
지중	지중전달		$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{\sqrt{r}}$

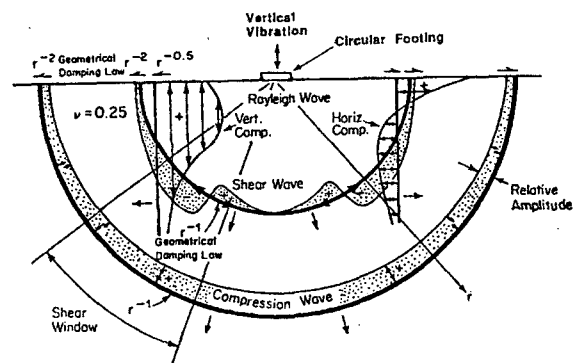


그림 1. 균일 반무한지반에서의 파전파 (Woods, 1968 ; Richart, Woods and Halls, 1970)

(T. Gutowski, C. Dym 1976)과 같으며, 점진동원일 경우에 그림으로 나타내면 그림 1과 같다. [(Kramer 1996) (Richart, Hall, Woods, 1970)]

본 연구에서는 토공구간에서의 지반진동전파해석을 위하여 근역지반을 유한요소로, 원역지반을 2차원 무한요소를 사용하여 모형화하였다. 이때 진동원으로 사용한 하중(line source)은 열차주행에 의해 하부바닥면으로 전달되는 등가평면하중이다. (Chua, Balendra, Lo, 1992)

3. 지반의 모형화

지반에 대한 가정사항은 다음과 같다.

- 지반은 다수의 수평층으로 되어있다
- 각 층은 균일한 재료로 구성되어 있다.
- 각 층 내부에서는 동탄성계수가 일정하다.

또한 진동의 지반전파를 해석하기 위하여 지반을 그림 2와 같이 지반을 크게 근역(내부영역)과 원역(반무한지반)으로 나누었다. 또한, 근역은 유한요소(finite element)를 사용하며, 반무한지반으로 구성된 외부영역은 2차원 수평무한요소(horizontal infinite element), 수직무한요소(vertical infinite element), 그리고 모서리무한요소(right corner infinite element, left corner infinite element)를 사용하여 모형화하였다. [(윤정방 외 2인, 1997 b) (Bettess, 1992)]

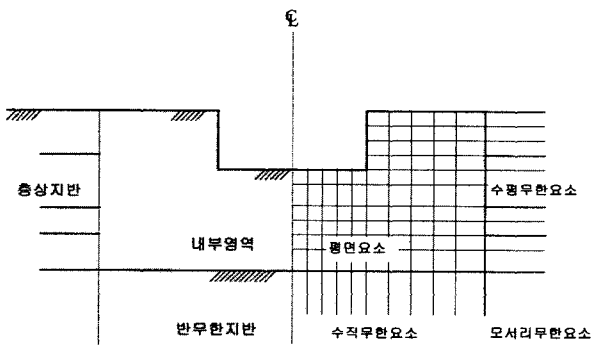


그림 2. 지반-구조물의 모형화

4. 수치해석

본 연구에서는 토공구간에 대해서 열차하중의 산정과 진동의 지반전파에 대한 수치해석을 실시하였다.

4.1 차량과 궤도의 모형화

토공구간에서의 열차하중 산정을 위하여 차량과 궤도

의 모형화를 그림 3과 같이 바퀴와 레일이 Hertz이론에 의한 접촉 강성으로 연결되어 있는 것으로 보고 차량은 2질량으로 모형화하였으며 궤도는 2중보 연속지지 모형으로 나타내었다. 따라서 접촉강성이 연결된 부분을 기준으로 차량과 궤도로 나누어서 고려하였으며 차량과 궤도의 상호작용력은 접촉강성에 의한 변위와 궤도의 노면조도를 고려한 적합조건에 의해 구하였다. 또한 연행하중효과를 고려하기 위하여 차량의 1개 차륜에 대하여 열차하중을 산정한 후, 각 차륜당 작용하는 하중의 선형합 등을 사용하였다. (Chua, Balendra, Lo, 1992)

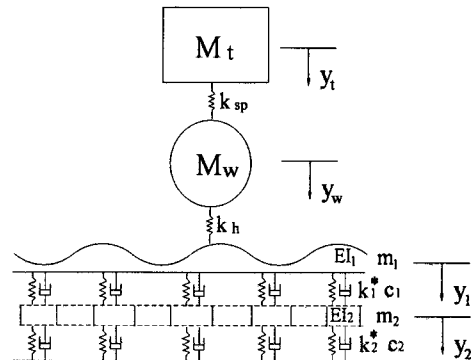


그림 3. 2중보 연속지지 모형을 사용한 차량-궤도시스템

4.2 열차하중 산정

토공구간에 작용하는 열차하중의 산정을 위해 통과 차량은 2질량 모형으로, 궤도는 2중보 연속지지모형으로 각각 모형화하였으며, 해석에 사용한 차량은 경인선(1호선)으로써 열차 1량은 1개의 차체, 2개의 대차(bogie), 4개의 차륜으로 구성되며, 통과차량 10량을 그림 4와 같은 축간격으로 통과속도 72km/hr로 재하하였다. 이는 통과시간 10초를 근간으로 산정한 속도이다. 해석에 사용한 차량의 편성 및 차량과 궤도의 제원은 표 2에 나타난 바와 같다. 열차하중을 이동축중과 조도성분하중으로 나누어 각각의 하중을 구한 후, 두 하중을 합하여 최종적으로 지반에 전달

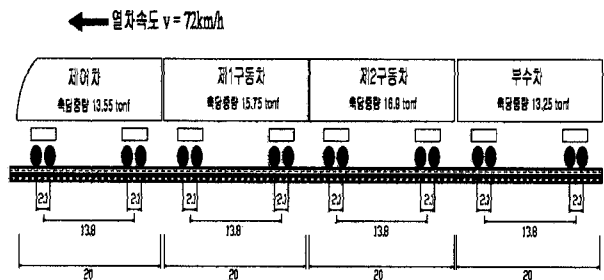


그림 4. 열차하중의 재하

표 2. 열차 및 궤도의 제원

	입력변수	입력자료	
차량	차량편성	Tc + M + M + T + M + M + T + M + M + Tc	
	축중 (F _a)	제어차(Tc)	13.55e3×9.8[N]
		제1구동차(M)	15.75e3×9.8[N]
		제2구동차(M)	16.9 e3×9.8[N]
		부수차(T)	13.25e3×9.8[N]
차륜질량 (M _w)	1000.0 [kg]		
	Hertzian강성 (k _n)	1.4e ⁹ [N/m]	
레일	단위길이당 질량 (m _l)	60.8 [kg/m]	
	탄성계수 (E _l)	2.06e ¹¹ [N/m ²]	
	관성질량 (I _l)	3.09e ⁻⁵ [m ⁴]	
레일패드	단위길이당 강성 (k _r)	8.17e ⁷ [N/m]	
	재료감쇠 계수 (η _l)	0.1	
침목	단위길이당 질량 (m ₂)	500 [kg/m]	
	탄성계수 (E ₂)	0.0 [N/m ²]	
	관성질량 (I ₂)	0.0 [m ⁴]	
자갈도상	단위길이당 강성 (k ₂)	3.69e ⁷ [N/m]	
	재료감쇠 계수 (η ₂)	0.15	

되는 하중을 구하였다.

4.2.1 이동축중에 의한 열차하중의 산정

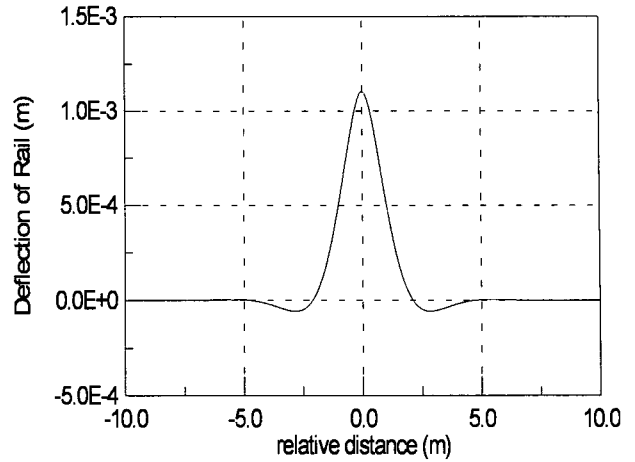
그림 5에서는 1개의 차륜이 통과했을 때, 이동축중에 대한 궤도 각 부분계의 전체 변위응답을 차륜의 위치를 기준으로 한 상대거리에 대해 나타내었다. 침목의 변위응답이 레일의 변위응답 보다 작게 나오며, 이는 레일패드 및 레일의 자체 강성 및 감쇠에 의해 레일의 변위와 지반에 전달되는 하중의 감소를 의미한다.

앞에서 구한 하나의 차륜에 대한 변위응답을 좌표변환 ($r = x - vt$)에 의해 상대좌표(r)에 대한 변위응답을 시계열의 변위응답으로 바꾸고 연행하중을 고려하기 위해 그림 6에 나타낸 바와 같이 1개 차륜에 대하여 구한 이동축중을 시간영역에서 선형조합함으로써 10량의 통과에 대해 고려하였다.

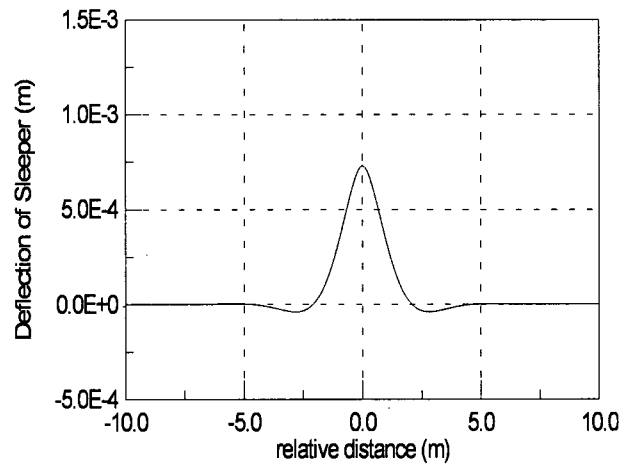
그림 7은 10량의 열차를 재하하였을 때 궤도 각 부분에 대해서 주파수응답을 나타내었다.

주파수 성분이 대부분 10Hz 미만의 영역에서 나타나며 피크가 일정한 간격으로 나타난다. 이것은 차륜의 통과주기에 따른 것으로 판단되며, 또한 축간 거리 2.1m인 대차에서의 차륜의 통과주기는 9.5Hz이다.

이동축중에 의한 궤도의 변위 주파수응답을 사용하여 하부구조물에 작용하는 하중의 PSD(power spectral density)를 구하였다. 열차하중은 궤도의 응답을 통해 지반에 전달된다. 본 연구에서는 궤도모형으로 2중보 연속지지모형



(가) 레일



(나) 침목

그림 5. 이동축중에 의한 궤도의 변위응답 (차륜1개에 대하여)

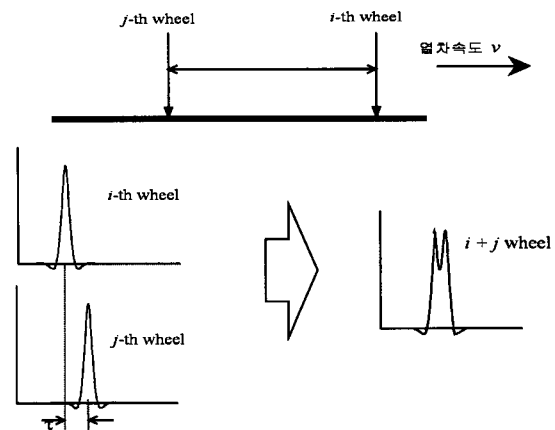
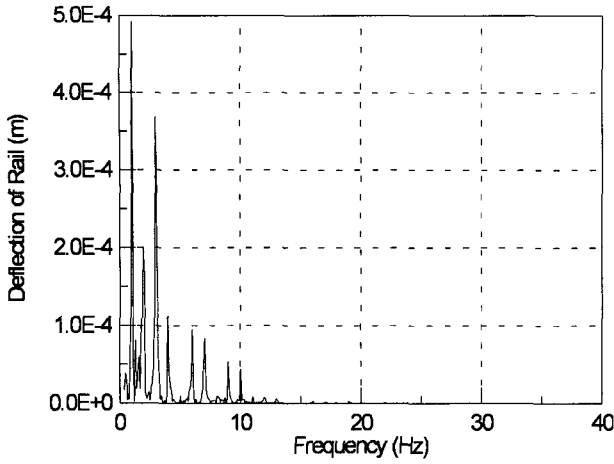
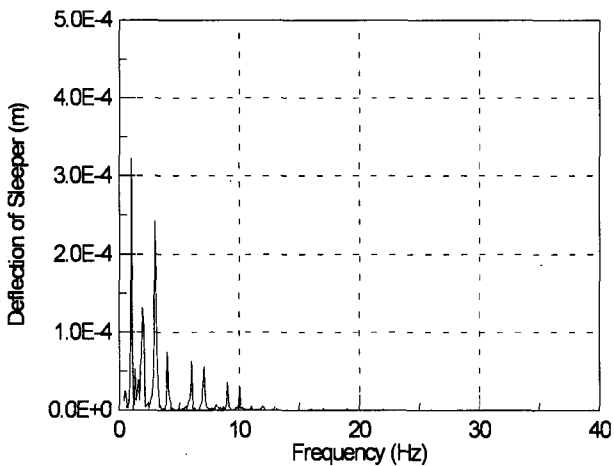


그림 6. 선형조합에 의한 이동축중의 산정

을 이용하였으며, 레일에 작용하는 하중은 레일패드를 통해 침목으로, 침목에 작용하는 하중은 자갈도상을 통해 노반으로 전달된다. 따라서 앞에서 구한 침목의 처짐과 자갈도상의 물성치(스프링계수, 감쇠계수)를 이용하여 노반



(가) 레일



(나) 침목

그림 7. 이동축중에 의한 궤도의 주파수 응답 (10량, 통과시간 10초)

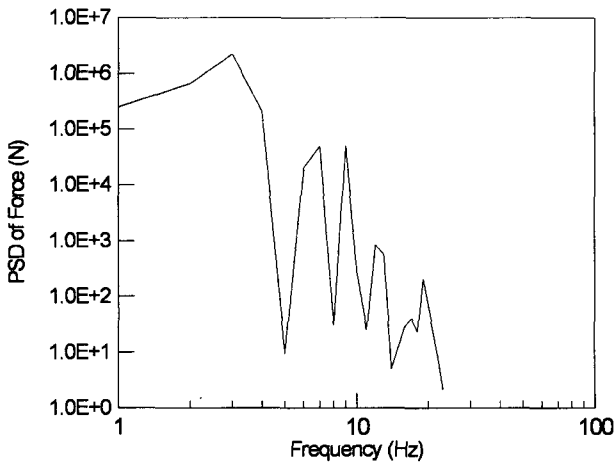


그림 8. 이동축중에 의한 등가평면하중의 PSD

에 전달되는 하중의 PSD를 구할 수 있다. 이때의 하중은 노반 상의 한 점에 떨어지는 하중이고, 이 하중을 Balendra의 방법을 이용하여 등가평면하중으로 구한다.

이동축중에 의한 등가의 평면하중은 그림 8에 나타난

바와 같다. 통과차량 10량에 대하여 여러 차륜의 통과주기에 의해 여러 주파수 값에서 극대값들이 나타나며, 10Hz 미만의 저주파 영역에서 지배적임을 알 수 있다.

4.2.2 조도성분하중에 의한 열차하중의 산정

2중보 연속지지모형의 지배방정식으로부터 유도된 궤도계의 주파수에 따른 어드미턴스(admittance, $A(\omega)$) $= \frac{X(\omega)}{F(\omega)}$, 입력하중과 출력변위의 관계를 나타내는 시스템의 전달함수 즉, 특정주파수에 대하여 단위하중이 작용할 때의 변위응답)의 변화를 살펴보기 위해 그림 9에 상대거리 $r = 0$ 일 때의 어드미턴스를 나타내었다. 전체적으로 지반진동과 관련된 100Hz 미만의 구간에서는 레일의 어드미턴스 값이 크게 나타나고 첫번째 피크주파수의 위치는 레일과 침목 둘 다 대략 50Hz 근처에서 나타난다. 주파수에 따른 어드미턴스의 변화폭은 레일이 크고, 상대거리의 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인다.

궤도의 어드미턴스와 레일조도의 PSD로부터 조도성분하중에 의한 궤도 변위의 PSD를 구할 수 있다. 그림 10에 나타난 바와 같이 조도성분하중에 의한 궤도변위의 PSD는 70Hz미만의 구간에서 레일의 응답이 크고, 대략 70~135Hz 구간에서는 침목의 응답이 크게 나타났으며, 주된 공진주파수는 30Hz 근방에 존재하는 것을 알 수 있다.

이동축중의 경우와 동일한 방법으로 궤도의 등가강성과 감쇠를 사용하여 바닥면에 전달되는 조도성분하중의 PSD를 구한 후 등가평면하중을 산정할 수 있다. 조도성분하중에 의해 바닥면에 전달되는 하중의 PSD는 그림 11에서 보인 바와 같이 30Hz 근처에서 최대값을 가지며, 고주파로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 보였다.

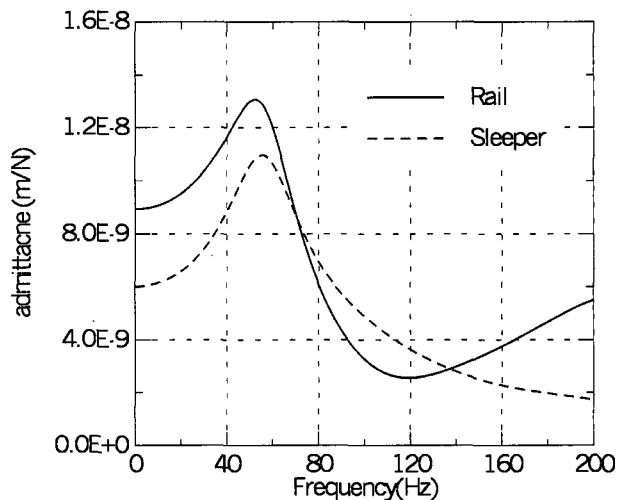


그림 9. 주파수에 따른 궤도의 어드미턴스 (상대거리 $r = 0$ 일때)

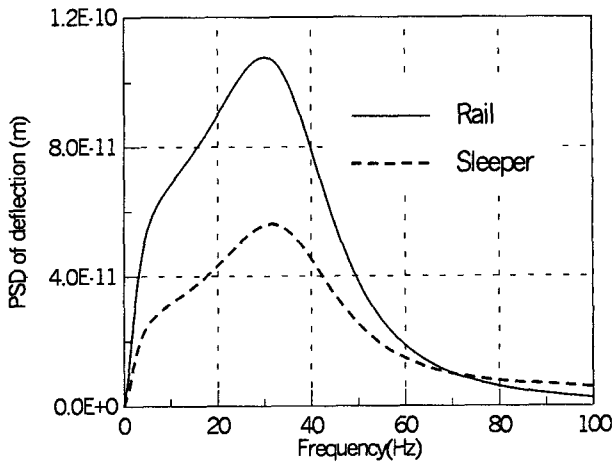


그림 10. 조도성분하중에 의한 궤도변위의 PSD

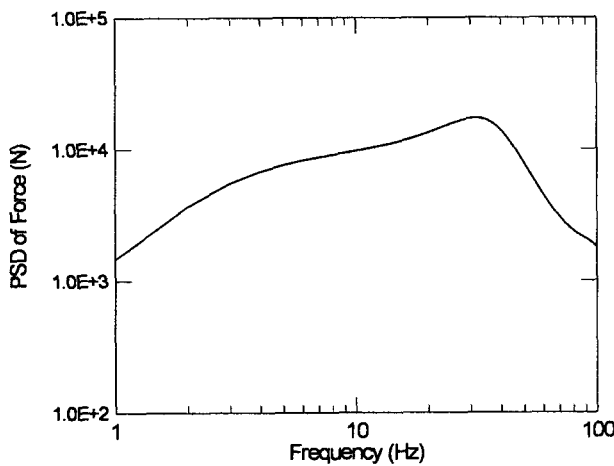


그림 11. 조도성분하중에 의한 등가평면하중의 PSD

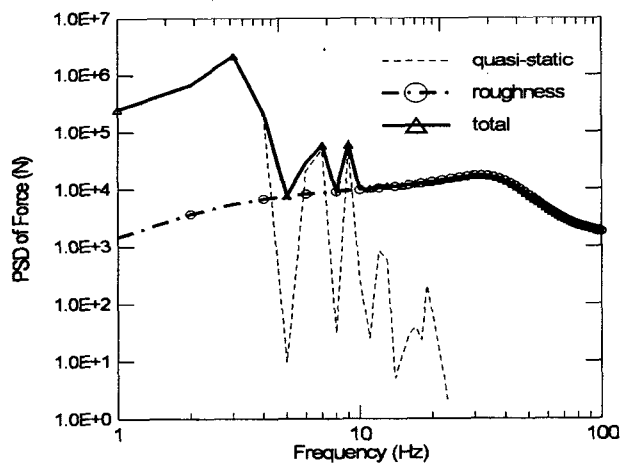


그림 12. 바닥면으로 전달되는 등가평면 열차하중의 PSD

이동축중과 조도성분하중에 의한 등가평면하중을 더하면, 최종적으로 바닥면에 전달되는 열차하중에 의한 등가평면하중의 PSD를 구할 수 있다. 그림 12에 나타낸 바와 같이, 이동축중에 의한 영향은 10Hz미만의 저주파영역에서

지배적으로 나타나며, 고주파로 갈수록 조도성분하중의 영향이 크게 나타난다. 그러나 100Hz이상의 영역에서는 조도성분하중도 급격히 감소하여 주된 주파수가 지반진동과 관련된 100Hz 미만의 영역에서 나타남을 알 수 있다.

4.3 지반진동전파 해석 예

앞에서 구한 토공구간에서의 열차하중을 이용하여 진동의 지반전파해석을 수행하였다.

열차하중이 주파수 영역에서 PSD로 구해졌으므로 진동의 지반전파 해석에서는 먼저 지반가속도의 주파수 응답함수를 구하고 이를 이용하여 지반의 가속도 응답에 대한 PSD를 구하게 된다.

지반진동의 해석절차 및 열차하중의 PSD와 지반가속도의 주파수 응답함수, 지반 가속도응답의 PSD사이의 관계는 표 3에 나타내었다.

경인선(개봉 - 오류구간, 정척레일(50kgN), PC침목) 통과차량(1000계 교직류전동차10량)에 대한 등가평면하중 해석결과를 입력자료로 이용하여 해석을 수행한 후, 진동측정 결과(1999, 한국철도기술연구원)와 진동기준(Saurenman, Nelson, Wilson, 1982)을 비교했다.

진동의 지반전파 해석을 위해 해석대상구간을 SASW (spectral analysis of surface wave) 해석자료를 근간으로 그림 13과 같이 6개의 층으로 구성되어 있으며, 여기서 사용한 지반의 물성치는 표 4에 보였다.

지반진동의 수직성분에 대한 해석을 위해 수평성분의

표 3. 지반진동의 해석절차

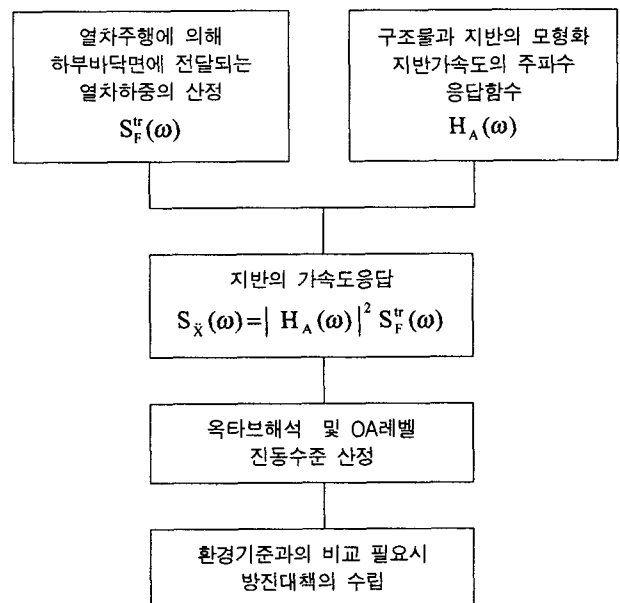


표 4. 지반의 물성치

구분 지층	심도 (m)	단위중량 (t/m ³)	포아송비 (ν)	감쇠비	전단파 속도 (m/sec)
Layer 1	0~0.8	2.00	0.333	0.05	240
Layer 2	0.8~2.0	1.90	0.333	0.08	180
Layer 3	2.0~2.8	1.80	0.333	0.08	150
Layer 4	2.8~8.0	1.85	0.333	0.08	170
Layer 5	8.0~10.0	2.05	0.333	0.05	270
Rock	10.0 ~	2.20	0.250	0.05	510

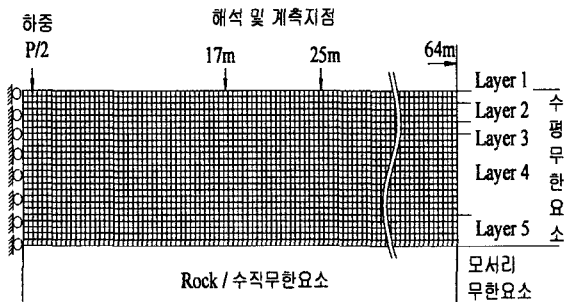
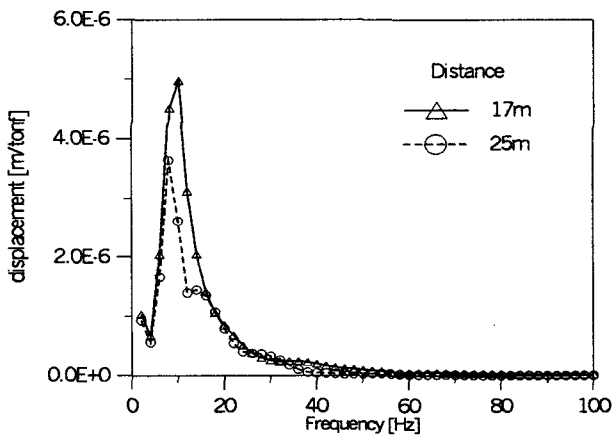
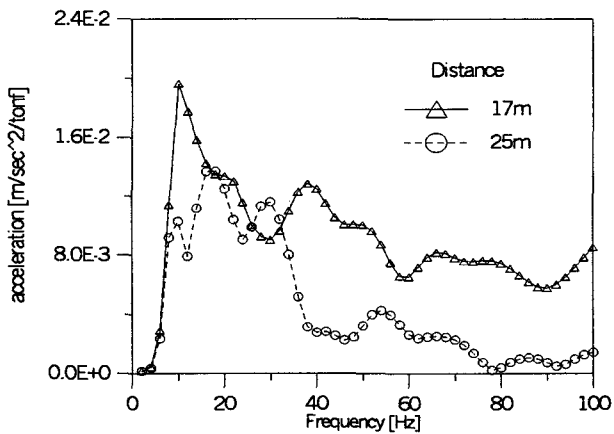


그림 13. 해석대상구간의 모형화



(가) 변위 주파수응답함수

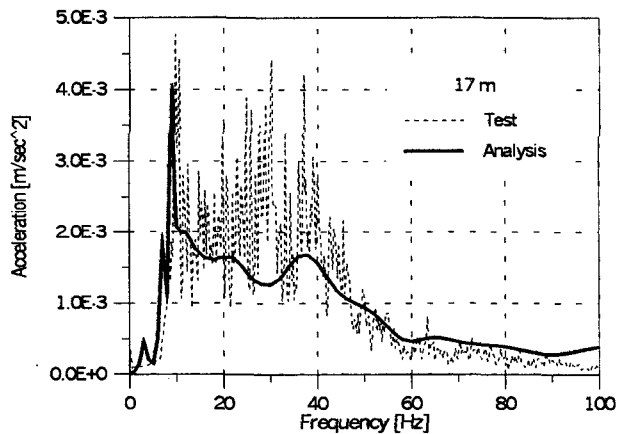


(나) 가속도 주파수응답함수
그림 14. 지반의 주파수 응답함수

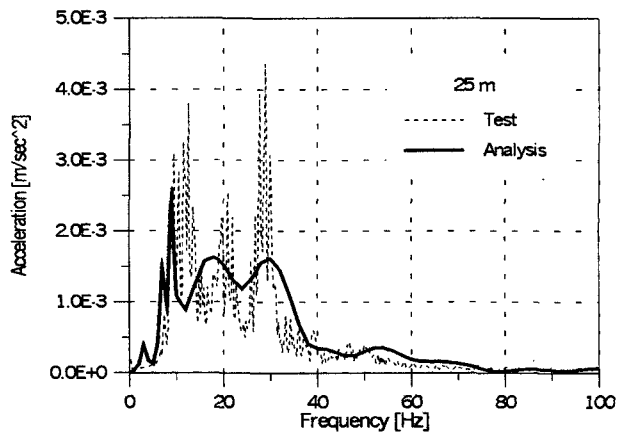
자유도를 구속하여 레일과 지반을 대칭으로 모형화하였으며, 이때 지반의 주파수 응답을 구하기 위해 사용한 하중(F)은 단위하중의 1/2에 해당하는 하중을 레일간격을 두고 각각 재하하였다. 지반모형에 사용한 유한요소의 크기는 최대 해석주파수(100Hz)를 고려한 지반의 공간과장의 1/4이하(0.4m)로 하였으며, 원역으로 발산하는 진동전파를 고려하기 위해 사용된 체적파와 표면파의 개수는 각각 2개, 5개이다.

토공구간에 작용하는 열차하중에 대해, 레일로부터 각각 17, 25m 떨어진 지표면의 변위와 가속도에 대한 주파수 응답함수를 그림 14에 나타내었다.

전반적으로 지반의 변위와 가속도에 대한 주파수 응답함수는 전주파수영역에서 감소하는 경향을 보인다. 변위 주파수응답함수의 경우에는 주된 공진주파수가 10Hz부근에서 크게 일어나며 주파수가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보인다. 가속도주파수 응답함수의 경우에도 10Hz부근에서 최대값을 가지나, 여러 주파수 대역에서 peak값을 가진다.



(가) 17m

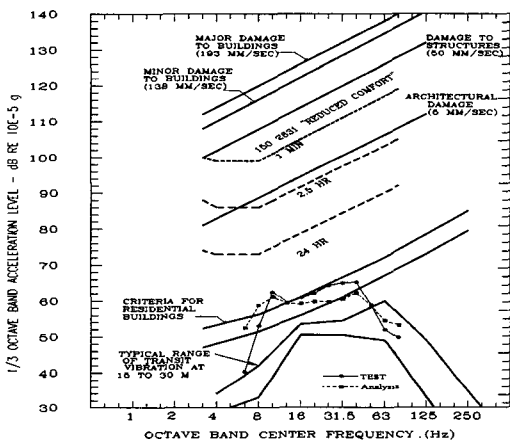


(나) 25m
그림 15. 지반진동 해석결과

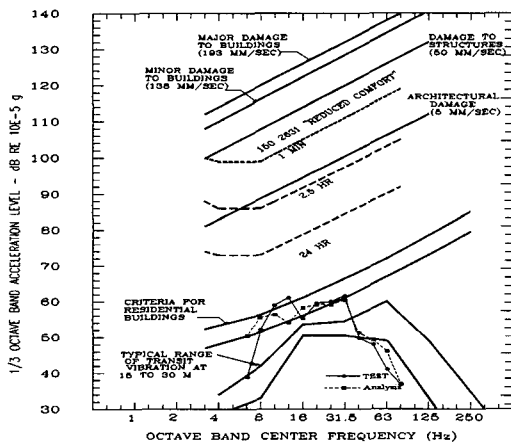
지반가속도의 주파수 응답과 열차하중의 PSD를 이용하여 지반의 가속도 응답의 PSD를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 지반가속도의 주파수응답을 계산하였다. 그림 15에서는 레일로부터 17m와 25m 떨어진 지점에서의 지반진동 해석결과를 계측결과와 함께 나타내었다.

전반적으로 해석결과가 계측결과보다 다소 낮은 값을 보인다. 이는 열차하중의 PSD가 조도성분에 대하여 다소 낮게 산정되었고, 지반의 주파수 응답함수가 10Hz 부근에서 큰 peak값을 가지는 반면 다른 주파수 대역에서는 다소 작은 값을 가지기 때문인 것으로 판단된다 추후 역해석 (inversion analysis) 등을 통한 입력자료의 수정과 프로그램의 수정/보완에 관한 연구가 추가적으로 필요하다.

지반진동 해석결과를 Nelson과 Saurenman(1982)이 제시한 열차주행 시 지반진동에 따른 사람과 건물에 대한 여러 진동기준과 비교하여 그림 16에 나타내었다. 전반적으로 계측결과와 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.



(가) 17m 지점



(나) 25m 지점

그림 16. 환경기준과의 비교

5. 결론

(1) 열차주행에 의한 하중의 평가와 모델링

토공구간의 열차하중 산정을 위해 열차하중을 이동축중과 조도성분하중으로 나누어 해석을 수행하였다. 진동의 지반전파해석을 위한 등가의 평면하중 산정, 2차원 지반진동 전파해석/계측결과 비교와 Octave band 해석을 통한 환경진동 기준과 비교하였다. 이동축중에 의한 영향은 10Hz 미만의 저주파영역에서 지배적으로 나타나며, 고주파로 갈수록 조도성분하중의 영향이 크게 나타나지만 100Hz 이상의 영역에서는 조도성분하중도 급격히 감소하여 주된 주파수가 지반진동과 관련된 100Hz 미만의 영역에서 나타났다.

(2) 지반진동 예측 프로그램의 개발

레일로부터 17m와 25m 떨어진 지점에서의 지반진동 해석결과를 계측결과와 비교한 결과, 전반적으로 해석결과가 계측결과보다 다소 낮은 값을 보였다. 수치해석으로 구한 1/3 Octave band 해석결과를 Nelson과 Saurenman이 제시한 열차주행 시 지반진동에 따른 사람과 건물에 대한 여러 진동기준 및 계측결과와 비교한 결과, 전반적으로 계측결과와 비슷한 수준을 보였다.

참고문헌

1. 윤정방, 김두기, 양신추, 오우영(1997), "교량구간에서의 열차하중산정 및 진동의 지반전파해석", 대한토목학회논문집, 제 17권 제 1-4호
2. 윤정방, 이동근, 정진상, 김두기(1997), "지하철 운행하중에 대한 인접구조물의 진동해석", 대한토목학회논문집, 제 17권 제 1-1호
3. P.Bettess(1992), Infinite Elements, Penschaw Press.
4. Steven L. Kramer(1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall.
5. F.E.Richart, J.R.Hall and R.D.Woods(1970), Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall
6. K.H.Chua, T.Balendra and K.W.Lo(1992), "Groundborne Vibrations due to Trains in Tunnels", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 445-460.
7. F.E. Richart, R.D. Woods and J.R. Hall, Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, 1970
8. Saurenman, H. J., Nelson, J. T. and Wilson, G. P., Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, Report No. USTM-MA-06-0099-82-1, Wilson, Ihlrig & Associates, 1982.8.
9. T.Gutowski, C.Dym, "Propagation of Ground Vibration : A Review", Journal of Sound and Vibration, 1976, 49(2), pp 179-193

(접수일자 1999. 11. 18)