

지하철 터널구간에서의 지반진동 상세해석 Detailed Analysis of Ground Vibration in Subway Tunnel

이원화* 황선근** 조성호*** 고학송****
Lee, il-wha Hwang, seon-keun Job, sung-ho Ko, huck-song

ABSTRACT

Recently, ground-borne noise and vibration generated by underground transit system has been recognized as an important environmental problem. This study reviews several of the improved procedures that have been used to predict ground-borne vibration. At first, ground stiffness profile is examined by SASW test which is the most reasonable surface wave test. It is very important to acquire the exact ground stiffness profile at ground response analysis. At second, the train loading to act roadbed is calculated by using the real measured phase angle data. In finite element analysis, averaged acceleration method, infinite element, Rayleigh damping and 2-dimensional wave propagation analysis is performed.

1. 서론

열차 주행시 발생하는 진동은 레도로부터 선로구조물 및 지반을 통하여 인접구조물로 전달된다. 이러한 진동이 커지면 선로구조물에 과대한 응력 및 변위가 유발하고 주민들의 생활에 불편을 주게 된다. 도시를 통과하는 지하철에 있어서 이러한 진동영향은 더욱 크게 나타나는데 그에 따른 민원을 사전에 예방하기 위해서는 지하철 건설 시에 적절한 방진대책을 수립하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 지하철 터널구간에서 열차에 의한 지반진동을 평가할 경우, 평가전파의 정확성을 보다 향상시키고자 다양한 기법들을 사용하여 지반진동에 대한 상세해석을 수행하였다.

2. 열차하중의 산정

열차 진동이 지표면에 도달하였을 때의 진동크기와 특성을 평가하기 위하여, 지하권 하중을 선정하였다. 터널을 통과하는 열차하중은 차량과 레도의 모형을 통하여 선정하였다. 열차하중은 이동하중(quasi-static load)과 조도성분하중(roughness load)의 조합으로 구하였는데, 이동하중이란 열차운행시 차체와 레도의 접촉강성에 의한 변위를 고려하여 등가 정하중으로 표현한 하중이며, 조도성분하중이란 레도의 노면조도(roughness)로 인하여 발생하는 차량-레도의 상호작용으로 인하여 추가적으로 레도에 계해지는 하중을 의미하는데, 최종적으로 지반에 전달되는 열차하중은 이동하중과 조도성분하중을 합한 하중이 된다. 표 1은 열차하중의 성분인 이동하중과 조도하중을 산정하기 위하여 사용된 차량 및 레도의 제원을 제시하고 있다. 열차편성은 제어차, 구동차, 부수차 등 모두 8개의 차량이 연결되어 있고, 80km/h의 속도로 운행하는 것으로 고려하였다.

* 한국철도기술연구원 레도보육연구본부 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 레도보육연구본부 책임연구원, 정회원
*** 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수, 정회원
**** 한국철도기술연구원 레도보육연구본부 연구원, 정회원

표 1. 하중산정을 위한 차량 및 레일 계원

변수		입력 자료	
차 량	축중 : 최대승객하중 200ton/량 고려	제어차 (T_c)	$11,875 \times 10^3 \times 9.8$ N
	차륜질량	구동차 (M_1, M_2)	$14,125 \times 10^3 \times 9.8$ N
		부수차 (T_1, T_2)	$11,375 \times 10^3 \times 9.8$ N
차륜과 레일사이의 강성	제어차 및 부수차 = 1363 kg 구동차 = 1800 (kg)		
차량편성	$T_c + M_1 + M_2 + T_1 + T_2 + M_1 + M_2 + T_c$ 총 8 량		
레 일	단위길이당 질량	60 kg/m	
	탄성계수	2.06×10^{11} N/m ²	
	관성질량	3.09×10^{-5} m ⁴	
레일 패드	단위길이당 강성	8.17×10^7 N/m	
	재료감쇠계수	0.1	
PC 침목	단위길이당 질량	600kg/m	
크크리트 도상	단위길이당 강성	3.97×10^7 N/m	
	재료감쇠비 계수	0.18	

열차의 연행하중을 구하기 위하여, 우선적으로 1개 차륜에 대한 이동축중을 구하고, 이를 시간영역에서 선형조합하였다. 1개 차륜에 대한 이동축중의 선형조합은 차륜 및 대차간격과 열차의 운행속도를 고려하여 수행되었다. 그림 1에 선형조합된 8량의 열차에 대한 이동축중을 도시하였다. 조도하중은 궤도의 어드미턴스(admittance, 특정주파수에 대하여 단위하중이 작용할 때의 변위응답)와 레일의 거칠기로부터 지반에 작용되는 선형스펙트럼 진폭을 산정하고, 실제 열차진동 측정기록으로부터 위상각 성분을 조합하여 산정하였다. 최종적으로 8량의 열차하중 재하에 대한 열차진동 시간이력은 그림 1의 이동축중의 시간이력과 그림 3의 조도성분하중의 시간이력을 조합한 그림 4와 같이 표현되며, 열차하중에 대한 시간이력을 지하철 진동 영향평가를 위한 유한요소해석의 입력 하중으로 사용하였다.

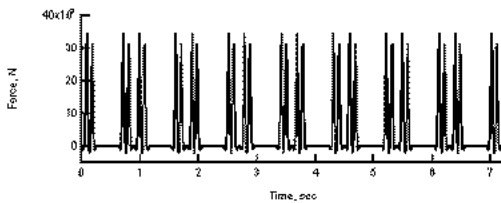


그림 1. 이동하중의 시간이력

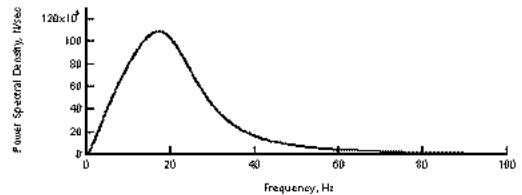


그림 2. 조도하중의 파워스펙트럼밀도

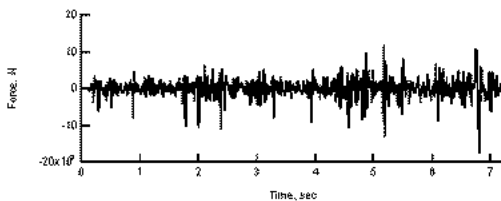


그림 3. 조도하중의 시간이력

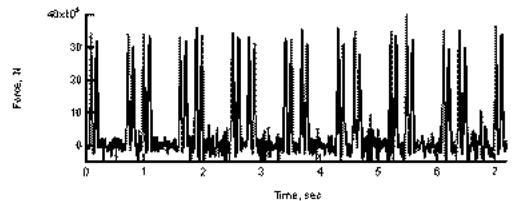


그림 4. 이동축중과 조도성분하중의 조합

3. SASW 실험결과

파 전파해석의 정확도 향상을 위하여 시험구간 지반의 진단강성구조를 결정하기 위한 SASW 실험을 수행하였으며 그 결과를 표 2에 정리하였다. SASW시험을 통하여 지반의 층별 강성을 정확히 파악할 수 있으며 시험결과는 유한요소해석에 그대로 반영된다. 지반은 10개층으로 구분하였으며, 지반 강성은 대체적으로 깊이에 따라 강성이 증가하는 자연지반상태이다.

표 2. 시험지반의 SASW시험 결과

층번호	심도(m)	진단파속도 m/sec	포아송비	단위중량 kg/m ³	영단성계수 N/m ²	감쇠비
1	0 ~ 1	150	0.333	1700	1.020×10^8	0.05
2	1 ~ 2	218	0.333	1700	2.154×10^8	0.05
3	2 ~ 8	175	0.333	1700	1.388×10^8	0.05
4	8 ~ 12	220	0.333	1700	2.194×10^8	0.05
5	12 ~ 14	220	0.333	1700	2.194×10^8	0.05
6	14 ~ 15	220	0.333	1700	2.194×10^8	0.05
7	15 ~ 20	335	0.333	1700	5.080×10^8	0.05
8	20 ~ 25	450	0.333	1700	9.180×10^8	0.05
9	25 ~ 30	530	0.222	2200	1.508×10^9	0.05
10	30 ~ 40	759	0.222	2200	3.101×10^9	0.05

4. 열차하중에 의한 지반진동 해석

심도 20~30m에 위치한 지하철 터널을 시속 80km/h로 주행하는 8량의 열차하중이 터널 바닥에 가해졌을 때, 열차하중에 대한 지반의 응답을 구하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS의 직접적분법을 사용하였으며, 지하철 열차하중에 대한 지반의 입자 가속도, 입자속도와 같은 지반응답을 지표면의 여러 위치에서 계산하였다.

4.1 해석모델

열차주행하중에 의한 지표면에서의 지반진동을 예측하기 위하여 범용유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 해석의 정확도를 높이기 위하여 직접적분법을 이용하였으며 모델의 유측경계면과 저면은 프로그램에서 제공되는 무한요소를 적용하였다. 해석시간을 줄이기 위하여 대칭모델이 사용되었으며, 해석시간간격은 0.0039초, 총 해석시간은 약 1초간 해석이 수행되었다. 요소의 크기는 50×50cm를 사용하였는데 이는 터널에서의 열차주행하중에 의한 지반의 팽월주파수가 약 1001Hz 미만이기 때문에 팽월주파수값과 지반의 강성도를 고려하여 요소의 크기를 결정하였다. 하중은 대차에서 제거되는 2개 바퀴를 고려하여 제거하였다. 터널의 위치는 지표면에서 약 20~30m에 위치하며 30m이하부터는 기반암층(연암)으로 모델링하였다. 기반암 상부의 지반은 탄성파탐사에서 얻어진 진단탄성계수값을 적용하여 사용하였으며 탱핑값은 매일리탱핑값을 적용하였고 포아송비는 0.33으로 가정하였다.

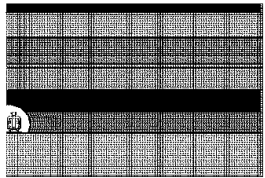


그림 5. 응답해석을 위한 지반모델(10 layers)

4.2 지반응답해석 결과

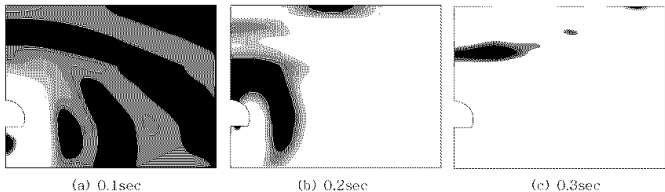


그림 6. 시간별 수직방향 속도분포

터널 바닥에 가해진 열차하중에 대한 지반의 진동속도 분포는 그림 6에 도시한 바와 같다. 그림에서 0.1초, 0.2초, 0.3초 일 때의 진동속도가 전파해나가는 것을 보여주고 있으며, 전단응력 및 전단변형률의 경우 열차하중이 가해지는 터널바닥과 터널의 어깨 부분에 응력이 집중되는 사실을 확인할 수 있다. 또한, 지층에 따라 응력분포가 확연히 차이가 나는 것을 볼 수 있으며, 탄성과 파동전파에 있어서 지반 층상구조의 중요성을 간접적으로 알 수 있었다.

지하철 열차진동의 가속도 성분이 지반의 영향에 따라 어떻게 증폭되는지를 확인하기 위하여 터널 바닥의 중심부와 터널천단 상부 지표면에서의 지반가속도를 비교하였다. 그림 7에는 가속도 시간이력의 푸리에 변환인 선형진폭스펙트럼을 보여주고 있다.

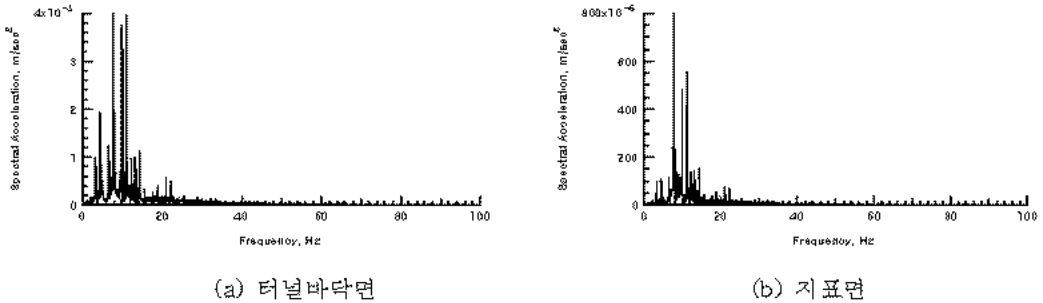


그림 7. 지반가속도의 선형스펙트럼

유한요소해석에 의하여 계산한 지표면 여러 지점에서의 진동크기는 환경부 생활진동규제기준을 모두 만족하였다. 또한, 그림 8에는 터널 천단 상부의 지표면 지점에서부터 5, 10, 20, 40m 지점에서 해석된 진동특성을 주파수 영역에서 도시하였다. 그림에서와 같이, 지하철 진동으로 인한 지표면에서의 진동은 각 주파수별 허용진동기준보다 작은 것으로 판단된다.

5. 결론

터널구간에서 열차하중에 대한 지반진동영향 평가를 위하여 상세해석을 수행하였다. 상세해석을 위하여 해석지반에 대한 표면파시험을 수행하여 지반강성주상도를 작성하였고 열차진동 측정기록으로부터 위상각 성분을 추출하여 열차하중 산정시 사용하였다. 해석은 직접적분법중 평균가속도법을 사용하여 해석의 정확도를 높였으며, 무한요소와 레일리담핑값이 사용되었다. 열차이동하중에 대한 지반의 응답은 2차원적으로 검토하여 진동치를 평가하였고 지반층상구조에 따른 진동의 전파특성 검토하였다. 지표면에서의 계산된 진동수준은 환경부 생활진동 규제 기준을 만족하는 것으로 확인하였다.

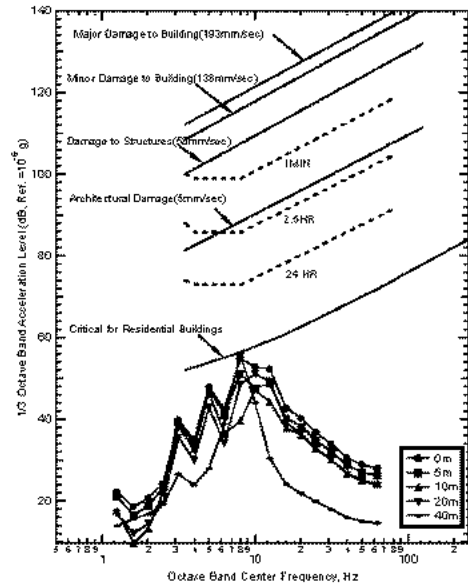


그림 8. 주파수 분포특성에 따른 구조물 허용진동기준

참고문헌

1. ABAQUS User Manual Ver. 5.7, Finite element software package, Hibbit Karlsson & Sorenson, Inc.
2. 조성호, 강태호 (2000), "지반의 전단파속도 토모그래피 영상을 구하기 위한 Multi-Channel Tomographic SASW (MTSASW) 기법", 대한토목학회 가을학술발표회논문집, pp.387-390