저심도 철도 시스템에서의 열차 및 차량의 이동하중에 의한 동적거동에 관한 연구

Dynamic Analysis for Low Depth Track System Under Train and Car Moving Loads

김자연* · 사공명** · 조국환***

Kim, Ja-Yeon · Sagong, Myung · Cho, Kook-Hwan

Abstract

As a low depth light rail system is getting issued recently, It is important to understand dynamic effects from train and car moving loads. In this study, Numerical analyses were performed to evaluate ground surface vibrations from train and car operations on low depth track system using LUSAS which is finite-element analysis program. The dynamic serviceability of a building is evaluated using analysis results. The evaluated vibratory acceleration under the moving loads of car and train at the depth of 1.0 m is 0.0042 g, 3.0 m is 0.0037 g and the value of 0.00048 g at the depth of 5.0 m. The research results show that low depth train system can be used with low vibration effect by comparing with the maximum allowable criteria of 0.102 g.

Key words : Low depth light rail system, Moving load, Dynamic analysis, Vibration acceleration, Propagation of vibration, reduced vibration

요 지

최근 저심도 경량전철 시스템 사업이 대두됨에 따라, 열차 및 차량 이동하중에 따른 동적거동에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 유한요소 프로그램인 LUSAS 을 이용하여 열차와 차량이 운행하고 있을 때 지표면에서의 진동 가속도값을 산정하였다. 이 수치를 사용하여 건물에 대한 진동 사용성을 평가하였다. 차량과 열차의 이동하중으로 발생하는 진동 가속도는 1 m 심도일 때 0.0042 g, 3 m 심도일 때 0.0037 g, 5 m 심도일 때 0.00048 g로써 건물의 최소 기준치인 0.102 g에 비해 매우 작은 것으로 나타났다. 이에 심도에 따른 열차주행 진동영향은 매우 적은 것으로 사료된다.

핵심용어 : 저심도 경량전철, 이동하중, 동적 거동, 진동가속도, 진동전파, 진동감쇠

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리나라에 지하철이 도입된 이후 지하철 심도가 점점 깊어져 고심도화 됨에 따라 공사비가 증대되고 다른 대중교통과의 환승에 시민들이 불편을 겪는 실정 이다. 이에 공사비를 줄이고 다른 대중교통과의 환승 연계가 보다 편리한 저심도 경량전철 시스템에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 저심도 경량전철 시스템이 지표면에 근접하여 운행함에 따라 도심지 내 열차 및 차량 이동하중에 따른 상시진동을 유발할 수 있는 시설물에 대한 지반진동의 예측과 대책의 마련이 필요하다.

본 연구에서는 도로하부에 열차가 동시에 교차 운행하는 교통시설물이 심도 1 m, 3 m와 5 m에 각각 위치 할 때 지표면에서의 진동 가속도 값을 산정하여 그 값을 국제표준화 기구(ISO)의 기준과 비교함으로써 저심도 경량전철 시스템의 심도에 따른 진동문제를 파악하고자 한다.

1.2 저심도 철도 시스템

1.2.1 저심도 철도 시스템 개요

저심도 철도시스템은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 열차가 운행하는 터널 상부를 도로와 연계하여 운행한다. 저심도 철도시스템은 철도/도로간 환승을 용이하게 해주고 이동시간을

*서울과학기술대학교 철도전문대학원 석사과정(E-mail : kji9474@seoultech.ac.kr)

MS Candidate, Department of Rail Construction Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology

**철도기술연구원 교통신기술연구실

Korea Railroad Research Institute, Emerging Transportation Technology Research Division

***교신저자. 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수(Tel: +82-2-970-6584, Fax: +82-2-973-5866, E-mail: khcho@seoultech.ac.kr)

Corresponding Author: Member. Professor, Department of Rail Construction Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science and Technology

단축해 주어 시민에게 좀 더 편안한 교통수단을 제공한다.

뿐만 아니라 심도가 얕고 터널상부를 도로와 직접 연계하여 사용하기 때문에 Table 1에서 나타나듯 도심지 내 지하철 시공비용 대비 저심도 철도시스템이 공사비를 낮출 수 있는 저비용의 철도시스템이다. 또한 저심도 경전철 시스템곡선 반경 및 최대 종단경사에서 일반 지하철보다 유연한 적용이 가능하다.

Table 1. Construction Cost Comparison in Railroad System

교통시스템	본선(억원/km)	정거장(억원/km)
저심도 철도시스템	164	7.9
지하철	500	250

Fig. 1. Schematic Diagram of Low Depth Track System

1.2.2 저심도 철도 시스템 적용사례

저심도 철도 시스템은 지상고가 수준의 사업비로 지하 경전철을 건설할 수 있다. 국내에서는 광주도시철도 2호선 1, 2단계(순환선) 36.8 km 구간에 저심도 철도 시스템을 적용하였다. Fig. 2는 광주 저심도 철도 시스템의 설계 단면을 도시한 것이다.

Fig. 2. Domestic Application Cases of Low Depth Track System in Gwang Ju

국외의 경우에는 영국 런던에서 1898년에 Millenium Underground Rail을 건설하였고 유사사례로 미국 뉴욕에서는 Arcade Railway를 건설하였다. Fig. 3은 영국런던과 미국 브로드웨이에 건설된 저심도 철도시스템 적용사례를 도시한 것이다.

2. 진 동

2.1 교통진동의 특성

교통진동의 주된 발생원으로는 도로상을 주행하는 차량과

(a) Millenium Underground Rail (UK)

(b) Springvail Road and Rail Grade Separation (USA)

Fig. 3. Application Cases of Low Depth Track System in Other Countries

철도운행을 들 수 있다. 도로 주행 차량으로 인한 진동은 노면에 가해지는 충격이 지반을 통해 전파되는 것을 측정하게 된다. 도로주행차량으로 인한 피해는 진동보다 소음부분이 큰 비중을 차지하게 된다.

그러나 철도운행으로 인한 진동은 차량 운행에 따른 진동과 유사하나, 차량 자체가 매우 길기 때문에 그로 인한 진동도 상대적으로 오래 지속(일반적으로 1-2분)된다는 점에서 그 특성상의 차이가 있으며, 선(線) 진동 원으로서 열차의 전 구간에 걸쳐 진동이 동시에 발생한다. 즉, 열차의 경우 모든 바퀴들이 진동원으로 작용하기 때문에 장주기의 진동을 발생시키게 되며, 각 차축에 대하여 동일하게 큰 중량을 갖는 차량이 가장 큰 진동을 유발하게 된다.

열차의 운행에 따라 발생하는 표면파는 열차 길이의 반 이하 거리 영역에서는 기하학적인감쇠가 없으며, 모든 감쇠는 재료적인 감쇠에 의한 것이다. 따라서 진동수준은 거리의 증가에 따라 서서히 감소하게 되나, 기차로부터 200~300 m 거리에서도 인지가 가능한 경우도 있다. 열차 운행속도의 감소에 따른 진동수준의 감소는 70 km/h 이하의 속도에서만 의미를 가지며, 그 이상의 속도에서는 속도의 변화에 따른 차이가 크게 없다.

진동수준이 낮을 경우에는 진동속도가 더욱 중요한 변수로서 고려되며, 이 때 지배 주파수는 진동원의 메커니즘과 전달매질의 특성을 근거로 예측되어 적용될 수도 있다. 거리에 따른 진동의 감소는 기하학적 감쇠와 재료적 감쇠라는 2가지 현상에 의해 발생한다. 한 사이클의 변형을 통하여 발생하는 에너지의 손실은 재료의 변형특성에 따른 함수이므로 재료감

쇠라 칭하며, 전파거리에 따른 로그 스케일에 비례하는 특성을 갖고 있다(Kim and Jung, 2002).

기하학적 감쇠는 식 (1)에 나타난 바와 같이 두 거리 R_1 과 R_2 에서의 관계를 통하여 표현된다. 이 때, 최대 진동속도 U_1' 은 알고 있는 값이고, U_2' 는 모르는 값이다.

$$U_2' = U_1' \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^n \quad (1)$$

여기서, 지수 n 은 파의 종류에 따른 함수로서, 모든 방향(구상)으로 전파되는 체적파의 경우 지중에서는 1, 표면에서는 2이며, Rayleigh파의 경우는 1/2이다.

다른 관점에서 보면, 이 지수는 진동 에너지가 전달될 때 전파면에서의 단위면적당 에너지의 감소를 나타낸다. 기하학적 감쇠 외에 진동파(Wave)는 진동의 각 사이클 또는 파장(λ)과 관련된 마찰에 의해서도 에너지 손실이 발생한다. 한 사이클의 변형을 통하여 발생하는 이러한 이력에너지의 손실은 재료의 변형특성에 따른 함수이므로 재료감쇠라 칭하며, 전파거리에 따른 로그 스케일에 비례하는 특성을 갖고 있다.

$$U_2' = U_1' e^{-a(R_2 - R_1)} \quad (2)$$

Fig. 4에서와 같이 감쇠성분을 조합하여 곡선으로도 표시할 수 있으며, 레일리파의 경우 $n=1/2$ 이므로 식 (2)는 식 (3)과 같은 관계를 갖는다.

$$U_2' = U_1' \sqrt{R_1/R_2} e^{-a(R_2 - R_1)} \quad (3)$$

Fig. 4. Reduced Vibration Velocity According to the Distance (Kim and Jung, 2002)

Fig. 5. Wave propagation in the Uniform Semi-Infinite Soil (Woods, 1968)

주파수가 높은 파는 동일한 거리를 이동할 때 보다 많은 사이클의 운동을 수반하므로 a 값은 지배 주파수에 따라 변화하게 된다. 재료감쇠는 사이클 당의 거리가 아닌 에너지 손실의 함수이다. 주파수에 대한 의존성은 지배 주파수가 동일한 파형에서 거리에 따라 감소되는 이유이다. 저주파수 성분은 더 적은 사이클을 가지고 전파되며, 이에 비례하여 더 적은량의 에너지 손실을 나타낸다. Fig. 5는 거리에 따른 진동속도의 감소를 보여준다.

2.2 진동의 단위 및 평가 인자

① 변위진폭

변위의 최대진폭을 A_0 로 표시할 때, 눈으로 보는 진동의 변위량은 $2A_0$ 이다.

Fig. 6는 진동파가 Sine 곡선의 양상을 가질 때 최대진폭과 진동의 변위량을 나타낸 것이다.

Fig. 6. Sine Vibration

② 진동속도(Velocity)

단위시간당의 변위량으로 그 표시 기호는 V , 단위는 m/s ($kine=cm/s$)이며, 최대치(피크치) V_m 은 다음식과 같다.

$$V_m = A_0 \omega (m/s) \quad (4)$$

③ 진동가속도(Acceleration)

단위시간당의 속도 변위량으로 그 표시 기호는 A , 단위는 m/s^2 ($gal=cm/s^2$, $g=9.8 m/s^2$)이 사용되며 진동가속도의 최대치는 다음식과 같다.

$$A_m = A_0 \omega^2 (m/s^2) \quad (5)$$

④ 진동가속도 레벨(Vibration Acceleration Level: VAL)

진동의 물리량을 dB로 나타낸 것으로

$$VAL = 20 \log \frac{A_{rms}}{A_r} \quad (6)$$

여기서, A_{rms} 는 측정대상 진동의 가속도 실효치(m/s^2), A_r 은 기준진동의 가속도 실효치($1 gal$ 이나 $10^{-5} m/s^2$ 이 사용되나 공해진동에서는 후자가 많이 쓰임)이며 진동가속도 실효치는 A_{rms} 는 다음식과 같다.

$$A_{rms} = A = \frac{A_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

여기서, A_m 은 진동가속도 진폭 혹은 가속도 피크치(m/s^2)이다.

⑤ 진동레벨(Vibration Level: VL)

1~90 Hz 범위의 주파수대역별 진동가속도레벨에 주파수대역별 인체의 진동감각특성(수직 또는 수평감각)을 보정한 후의 값들을 dB로 합산한 것이다.

$$VL = VAL + W_n \text{ dB(V) 또는 dB(H)} \quad (8)$$

여기서, W_n 은 주파수대역별 인체감각에 대한 보정치이다. 또한 진동의 강도를 진동속도로 나타내는 경우, 진동속도레벨은 다음식과 같다.

$$VL = 20 \log \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (9)$$

여기서 V 는 진동속도이며 V_0 는 기준속도로서 보통 10^{-8} m/s 를 사용하고 있다(Yun, 1996).

2.3 진동해석의 수치해석접근

실험 또는 경험적인 방법이 특정위치에서 지반진동을 정확하게 평가할 수 있다. 반면 수치해석의 경우 진동에 영향을 주는 모든 인자들을 상세히 프로그램에 입력 할 수 없어 진동 전달 경로를 통한 상세 메커니즘 등을 설명할 수가 없다.

Yang *et al.*(2003)은 2.5차원 유한/무한 요소법(2.5D)을 이용하여 3차원 이동하중효과가 고려될 필요가 있는 층상지반에서 열차운행으로 기인한 파동전파를 조사하였다. 완전한 수치적인 접근방법이 매우 제한적이기 때문에 Wu *et al.*(2004)은 탄성 지지보에 이동하중의 해석적 모델 개발과 조화집중하중(Harmonic Point Load)을 받는 반무한 지반의 Green함수에 근거한 3차원 모델링을 이용하여 철도교에 발생하는 열차운행으로 기인한 지반진동을 다루었다(Lee, 2002).

2.4 진동 사용성 기준

진동문제를 다루는데 있어 중요한 부분의 하나는 바로 적합한 척도를 사용하는 것이다. 특성화는 시간 영역과 주파수 영역 모두에 적용될 수 있고, 주파수영역에 적용하여 특성을 반영한다. 진동량의 단위인 cm , cm/s , cm/s^2 등은 선형적 척도로서 건축물에 대하여는 이러한 척도가 잘 적용될 수 있다. 주파수 성분에 따른 진동 사용성 기준(Frequency-Dependent

Fig. 7. Comparison of Comfort Limit with Allowable Deflection Limit

Comfort Limit)과 철도교설계기준(Korea Rail Network Authority, 2004)의 허용처짐값으로부터 계산된 가속도, 변위 성분과의 비교는 Fig. 7과 같다. 진동신호가 조화운동을 하는 것으로 가정한 상태에서 허용처짐값의 동적 가속도성분을 계산하여 도식한 것이다(Jeon *et al.*, 2008).

Table 2에 정리된 독일 DIN 4150은 주파수 성분에 따른 건물에 대한 진동속도 기준치이다.

Table 3은 ISO(International Standardization for Organization)에서 책정한 진동허용기준이다.

진동 허용규제 대상은 사람, 건물, 기계, 정밀기기로 나누어 상세기준을 제시하고 있으나 본 논문에서는 건물에 대한 기

Table 2. Germany DIN 4150 Part-3

구분	기초의 진동속도에 대한 기준치 (cm/s)		
	<10 Hz	10-50 Hz	50-100 Hz
1 상업용 또는 산업용 건물	2	2 - 4	4 - 5
2 주거용 건물	0.5	0.5 - 1.5	1.5 - 2
3 진동 예민 구조물 (법적보존 가치가 취해진 건물)	0.3	0.3 - 0.8	0.8 - 1

Table 3. ISO Allowable Standard of Vibration (Building)

대상	건물		
내용	건물진동의 영향	일반, 특수고층 건물 및 해양구조물	
평가 규격	ISO DP 4866 (1982) ISO 2631/DADI (1982)	ISO 6897 (1984)	
주파수 범위(Hz)	1 - 80	0.063 - 1	
진동 기준치	a=0.102g- 1.02g이하	일반건물	0.5Hz : 3.5g
		건물 내 정밀작업	0.5Hz : 2g

Table 4. Comparison of Building Damage According to the Vibration Velocity

진동치 (cm/sec)	Sweden	Canada	U.S.A	Germany	ASCE
40	큰 균열 발생	피해 발생	큰 균열 발생	피해 발생	구조물 위험
30	균열이 발생		가벼운 피해		
15	미세한 균열				
10	요주의	요주의	요주의	피해 발생	10.35Hz의 구조물 주의
5	눈에 보이는 피해 없음		안전		10.35Hz의 기계안전 한계
0.5		안전	안전	극히 가벼운 피해	
0.2	인체에는 잘 느껴지나 구조물에는 피해 없음				
0.04	일반적으로 많은 사람이 진동을 느낌				
0.01	대단히 민감한 사람만이 진동을 느낌				
0.005>	인체에는 감각이 없다.				

준만을 표시하였다.

Table 4는 진동속도에 따른 건물의 피해정도를 각국의 기준치에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

3. 동적거동 해석 및 검토

본 연구에서는 유한요소 프로그램인 LUSAS를 이용하여 터널 안에서 경량전철 두 대가 교차로 운행하고 지표면에 차량이 운행하고 있을 때 지표면에서의 진동 가속도값을 산정하여 건물에 대한 진동 사용성을 평가하고자 한다.

3.1 지반-구조물상호작용

지반 위 또는 지중에 구조물이 존재할 때, 지진 시에 구조물과 지반의 접촉면에 있어서의 힘이 평형 및 변위의 적합 조건에 따라 구조물과 지반은 상호 영향을 미친다. 즉, 지반이 구조물에 대하여 영향을 미치는 것 외에, 구조물도 지반에 대하여 작용을 미친다. 그 결과, 구조물과의 접촉면 및 그 근처 지반의 움직임은, 구조물이 존재하지 않는 경우와는 다르게, 구조물의 움직임을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우와는 다른 현상으로 나타난다. 이와 같은 현상을 구조물과 지반의 동적 상호작용이라고 한다. 이들 상호작용에는 다음의 2 가지가 있다.

① 구조물의 관성력에 의해 지반에 변형률을 발생시키는 경우(관성효과; Inertia Interaction).

② 구조물의 강성에 의해 지반의 변형률을 구속시키는 경우(기하학적 구속효과; Kinetic Interaction).

위의 2 가지의 어느 경우에 있어서도, 지반에서 구조물에 입사한 진동에너지의 일부 또는 전부가 지반에 반사되는 것으로 흔히들 이해되어 진다. 즉, 동적상호작용이라고 하는 것은 지반과 구조물의 상호간에 에너지를 주고받는 것에 지나지 않는 것이라고 할 수 있다(Hwang *et al.*, 2001).

지층이 연약하면 구조물을 지지하는 지반과 구조물사이에 상호작용이 발생하게 되어 단단한 지반에서와는 다른 거동을 보이게 된다. 따라서 연약지반을 포함한 지반에서는 지반-구조물 상호작용의 영향이 반드시 고려되어야 한다(Park *et al.*, 2005).

지반-구조물 상호작용을 적용하기 위해서는 기초부의 등가 강성계수를 산정하여 고유진동수를 파악하고 감쇠계수를 산정한 후 모델링된 구조물과 지반에 물성을 입력한 후 시간이력해석을 수행하여야 한다.

본 논문에서는 지반을 스프링으로 가정하는 대신 지반을 조성하고 Mohr-Coulomb의 탄소성(Elasto-Plastic)매질로 가정하였으며 초기응력을 설정하고 LUSAS프로그램을 이용하여 고유치해석을 함으로써 고유진동수를 파악하였다.

3.2 해석 대상단면 및 경계조건

경량전철이 터널 내에서 교차 운행하고 지표에서 차량이 주행할 때 심도별 지표면에서의 진동가속도 값을 산정하여 진동 사용성을 평가하기 위해 LUSAS를 이용하여 3D이동하중해석(3D Moving Load)을 수행하였다.

모델은 Fig. 8과 같이 모델의 전체 폭(B)은 107.6 m, 전체 길이(L)은 55 m, 전체높이는 심도별로 각각 다르게 설정하였다.

전체모델의 폭은 터널의 형상, 지질 및 초기응력 상태에 의존하며 터널에 의한 영향이 미치지 않는 범위까지 설정해야 한다(KR, 2012). 모델의 폭을 조정해가며 수치해석을 시행해본 결과 진동가속도의 값이 구조물에서 약 40 m 떨어진 지점부터 값이 일정한 값에 수렴해 가는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 구조물 좌우로 각각 약 6.5D를 적용하여 해석하였다. 열차하중으로 인한 응력과 진동속도는 깊이가 3m이상인 경우 최대 85%감소효과가 있다(Kim, 2007). 따라서 터널하부 깊이는 5 m로 모델링하였다.

Fig. 8. Location of Surveying Point in the Load Moving Direction and Surface

Table 5. Model Properties for Layers

구분	E (MPa)	ν (Poisson's ratio)	γ_d (ton/m ³)	ϕ
구조물	30e3	0.2	2.5	-
레일	210e3	0.3	7.85	-
표층/중간층	55	0.26	2.34	-
기층/보조기층	55	0.29	2.32	30
노상/노체	55	0.35	1.9	30
원지반	18	0.3	1.5	30

저심도 철도시스템에 적용되는 열차길이는 5량 1편성으로 총길이 32 m이다. 지표면의 차량이 이동하여 구조물상부를 지나갈 때 구조물안의 경량전철과 교차해야 하므로 구조물의 길이는 열차길이와 열차속도를 감안하여 구조물의 길이를 산정하였다. 이는 열차의 이동하중에 대한 진동영향이 구조물에 충분히 반영될 수 있도록 설정하였다.

경량전철의 무게는 동력객차 48t, 부수전동차 33t으로 동력객차와 부수전동차 4개를 구조물 안에서 이동시키고, 차량하중은 도로교 설계기준인 DB-24을 사용하여 총 무게 43.2ton을 지표면에서 이동시켰다. 지표면과 구조물 내에서 열차와 자동차의 이동속도는 열차의 경우 저심도 경량전철의 설계속도 60 km/h로, 차량하중은 일반도로 편도 2차로 이상 속도규정인 80 km/h를 적용하였다.

심도별 진동가속도 값을 산정하기 위하여 구조물 상단 토피고는 1 m, 3 m, 5 m로 나누어 모델링하였다. 도로 하부는 도로 설계기준에 따라 각각의 대표 물성값을 입력하였다. 해석에 사용된 상세한 물성 값은 Table 5에 정리하였다. 터널은 탄성체(Elastic)매질로 가정하여 Shell요소로 모델링 하였다. 주변지반은 Mohr-Coulomb의 탄소성(Elasto-Plastic)매질로 가정하였다. 입체요소의 절점은 Equivalenced 되어 모든 응답 값들이 공유되도록 모델링되었다. 모델링의 바닥부와 측벽부는 열차운행과 차량운행으로 인하여 진동이 경계조건에 의해 반사되는 영향을 최소화시키기 위하여 무한경계를 적용하였다.

또한 열차하중으로 인한 지반이 다져짐으로 인한 진동영향은 해석하기 매우 복잡하므로 열차 하중이 구조물 안으로 한번 교차 이동했을 때의 진동값을 추출하여 비교하였다.

3.3 감쇠 조건

동적해석 수행 시 경계면에서의 진동 흡수와 달리 해석영역 내에서 지반운동의 형상에 따른 기하학적인 감쇠(Geometric Damping), 매질의 역학적 특성에 의한 재료감쇠(Material Damping)에 의해 열차운행으로 인한 진동 진폭이 감소하는 현상을 적절히 고려할 필요가 있다. 기하학적인 감쇠는 응력파가 구형으로 전파됨으로 인한 진폭 감소현상으로 일반적으로 해석프로그램 내에서 별도의 설정 없이 감쇠효과가 반영 된다. 그러나 매질의 역학적 특성에 의한 재료의 감쇠 현상은 진동이 전파되면서 열 또는 마찰 등에 따라 발생하는 에너지 손실현상을 고려하지 않으면 매질 내에서 자유

진동(Free Vibration)이 발생하게 되고 진동의 전파거리에 따른 감쇠 현상을 고려할 수 없기 때문에 합리적인 해석결과를 얻을 수 없다. 전파거리에 따른 감쇠현상은 매질의 공학적 특성에 따라 그 크기가 달라지며 일반적으로 강성이 큰 암반 매질을 통과하는 경우가 연약한 지반을 통과하는 경우에 비해 감쇠가 작다. 또한 매질이 같은 경우에도 지반운동의 주파수에 따라 감쇠정도가 달라진다. 따라서 연속체역학에 근거한 동적해석 수행 시 시스템의 자유진동을 감쇠시키고 거리에 따른 감쇠현상을 고려하기 위해 일반적으로 레일리 감쇠비(Layleigh Damping Ratio)가 사용되며, 본 해석에서는 지반에서 가장 일반적으로 사용되는 값인 레일리 감쇠비 5%를 적용하여 수치해석을 수행하였다(Psarropoulos *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2011).

3.4 해석 절차

해석 절차는 모델링 후 정적해석을 통해 모델에 대한 검증을 수행하고 고유치 해석 후 이동하중에 대한 해석을 수행하였다.

고유치 해석 시 먼저 Eigenvalue Controls를 정의하고 해석을 수행한 후 결과를 출력하여 고유진동수 및 진동모드 형상을 도시하게 된다. 그 후 이동하중 해석 시 하중이동 경로를 먼저 설정한 후 이동하중을 위한 Modal Force History를 생성하고, 이동하중의 Parameter를 정의한 후 결과를 출력하여 진동 가속 값을 검토하였다(Kang *et al.*, 2011).

3.5 동적거동 해석결과 및 분석

열차이동하중과 차량이동하중에 따른 지표면에서의 진동특성을 파악하기 위하여 1 m, 3 m와 5 m의 3개의 심도로 나누어 모델링하여 해석을 수행하였다.

측점위치는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 구조물 양쪽에서 50 m씩 떨어진 두 지점을 각각 측점 1번과 6번으로 선정하였고, 측점 2번과 5번은 차량하중이 타기 시작하는 지점으로, 구조물과 모델링 끝단(측점1,6번)의 가운데 지점이다. 측점 3번과 4번은 구조물 양 끝단에서 지표면으로 수직으로 올라온 지점을 선정하였다.

가속도 값은 자동차와 경전철이 함께 운행할 때 가장 큰 값을 추출하여 정리하고, 각 경우에 대한 자동차와 열차의 가속도 값을 정리하였다.

지표면에서의 진동가속도 산정위치에 따른 시간별 진동가속도는 Fig. 9, Fig. 11, Fig. 13에 나타내었고 거리별 최대 진동가속도는 Fig. 10, Fig. 12, Fig. 14에 그래프로 도시하였다.

심도가 1 m, 3 m와 5 m인 경우 가속도에 영향을 주는 인자별로 Table 7, 8, 9에 정리하였다. 그리고 각 산정 위치별 최대 진동가속도결과를 Table 9에 정리하였다. Table 7, 8, 9를 살펴보면 자동차 영향으로 인한 가속도 값은 일정하고 열차영향으로 인한 가속도 값이 심도에 따라 변화하는 것을 알 수 있다.

측점위치가 지표면이므로 산정된 최대가속도의 값은 자동차로 인한 가속도 값과 열차의 영향으로 인한 가속도 값을

합한 값보다 더 큰 값이 추출되었다. 자동차영향으로 인한 가속도 값은 심도에 상관없이 항상 일정하고 열차의 경우 지표로 가속도 값이 전파될 때 재료적 감쇠효과로 인하여 심도에 따른 가속도의 값이 달라짐을 알 수 있다. 각각의 가속도 값을 합한 값보다, 동시에 운행될 서로의 상호영향으로 인해 가속도가 증폭되어 큰 가속도 값이 추출되는 것으로 사료된다.

심도 1m와 심도 3m의 경우 열차영향으로 인한 가속도값이 지배적이지만 심도 5m의 경우 심도가 깊어짐에 따라 열차의 영향이 줄어들어 측정위치 1,2과 측정위치 5,6의 값의 차이가 매우 미비한 것을 알 수 있다.

심도 1m, 3m, 5m인 경우 Fig. 10, Fig. 12, Fig. 14에서 보듯이 구조물 상단 지표면(측정위치 4번)에서 가장 큰 값이 발생하였고 구조물에서 50m씩 떨어진 지점인 측정위치 1번에서 가장 작은 값이 발생하였다.

Fig. 9. Vibratory Acceleration at the Depth of 1 m by Time

Fig. 10. MAX Vibratory Acceleration at the Depth of 1 m by Distance

Fig. 11. Vibratory Acceleration at the Depth of 3 m by Time

측정위치 1과 3번 혹은 측정위치 4번과 6번의 차이도 심도 1m인 경우가 가장 큰 것을 알 수 있다. 지표에서 각 측정지점에 대한 진동가속도 값을 비교해보면 심도 1m일 때 최대 0.002816 g의 진동가속도가 감쇠되었다. 이는 열차이동으로 인한 진동가속도 값이 지표면으로 전파됨에 따라 재료 감쇠의 폭이 다르기 때문으로 사료된다.

열차이동으로 인한 진동가속도 값이 다짐정도가 다른 여러 층의 토공을 지나 지표면으로 전파되면서 기하학적 감쇠보다 재료적 감쇠에 더 지배적인 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 9, Fig. 11, Fig. 13는 동적해석 후 측정 위치에 대하여 최대값이 산정되는 노드에서 시간에 따른 진동가속도 값의 그래프를 6가지 경우에 대하여 하나의 그래프에 도시하였다.

Fig. 12. MAX Vibratory Acceleration at the Depth of 3 m by Distance

Fig. 13. Vibratory Acceleration at the Depth of 5 m by Time

Fig. 14. MAX Vibratory Acceleration at the Depth of 5 m by Distance

Table 6. Standard of Velocity Acceleration and Vibratory Acceleration

• Velocity acceleration	- 상업 및 산업용 건물 : 1.0 cm/s - 주거용 건물 : 0.5 cm/s - 진동에 민감한 구조물 : 0.2 cm/s
• Vibratory acceleration	- 건물 : 0.1 g

거리에 따른 진동가속도의 값은 심도가 다르고 산정되는 진동가속도의 값이 달라도 그래프의 모양은 비슷한 것을 알 수 있다. 구조물을 중심으로 양쪽이 대칭양상을 보이는 것은 진동 원으로부터 멀어짐에 따라 진동의 감쇠로 인하여 진동 가속도 값이 줄어드는 것을 알 수 있다.

시간에 따른 진동가속도의 값은 심도가 같은 경우에는 거의 비슷한 경향을 나타낼 수 있다. 이는 진동가속도 산정위치가 지표면이고 통과하는 토사층의 특성에 따라 재료감쇠비가 정해지게 되고 같은 심도에서는 진동 가속도 값은 달라도 같은 재료 감쇠비를 갖기 때문이라고 사료된다.

일반적으로 지하철 운행 시 발생하는 진동수는 9~14 Hz 정도이고(Kang, 2011) 저심도 경량전철의 설계속도 60 km/h로 해석 시 지표면에서 약 17 Hz~19 Hz의 진동수가 발생하였다. 2.4절에 정리한 진동 규정(Table 2~Table 4)을 고려하여 가장 엄격한 기준을 적용하면 아래와 같이 할 수 있다.

그 결과 심도가 1 m일 때 최대 진동가속도는 0.00138~0.00421 g, 심도가 3 m일 때 최대 진동가속도는 0.00115~0.0037 g, 심도가 5 m일 때 최대 진동가속도는 0.000328~0.00482 g로 건물에 진동영향을 주는 최소기준인 0.1g보다 낮게 검토되어 지표면에서의 구조물의 진동가속도에 대한 영향은 매우 작은 것으로 사료된다.

Table 7. Vibratory Acceleration at the Depth of 1.0 m (unit : g)

Measuring point	MAX Vibratory acceleration		
	Car	Train	Max vibratory acceleration
1	0.000221	0.001186	0.001407
2	0.000313	0.002034	0.002347
3	0.000440	0.003771	0.004211
4	0.000400	0.003799	0.004199
5	0.000297	0.002101	0.002398
6	0.000154	0.001229	0.001383

Table 8. Vibratory Acceleration at the Depth of 3.0 m (unit : g)

Measuring point	MAX Vibratory acceleration		
	Car	Train	Max vibratory acceleration
1	0.000221	0.001011	0.001232
2	0.000313	0.001846	0.002159
3	0.00044	0.003281	0.003721
4	0.0004	0.003316	0.003716
5	0.000297	0.001895	0.002192
6	0.000154	0.000998	0.001152

Table 9. Vibratory Acceleration at the Depth of 5.0 m (unit : g)

Measuring point	MAX Vibratory acceleration		
	Car	Train	Max vibratory acceleration
1	0.000221	0.0001955	0.0004165
2	0.000313	0.0004124	0.0007254
3	0.00044	0.000415	0.000855
4	0.0004	0.000448	0.000848
5	0.000297	0.000407	0.000704
6	0.000154	0.000244	0.000398

Table 10. MAX Vibratory Acceleration at the Depth (unit : g)

Measuring point	MAX Vibratory acceleration at the depth			Standard	Comparison
	1 m	3 m	5 m		
1	0.00182	0.00150	0.00033	0.1	Stable
2	0.00319	0.00199	0.000402		Stable
3	0.00511	0.00313	0.000468		Stable
4	0.00499	0.0032	0.00049		Stable
5	0.00357	0.00242	0.00039		Stable
6	0.00215	0.00159	0.00032		Stable

하지만 경량전철 운행에 따른 지표면에서의 실측 진동가속도 데이터 값이 미비한 실정이고 수치해석에 적용된 구조물 상부 지반구성은 도로다짐기준에 따라 적용한 것으로 층별로 E값의 변화가 없고 암질과 같은 감쇠에 영향을 주는 요소(Shin, 2009)들은 해석에서 제외되었다. 이에 관한 연계 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 저심도 철도 시스템을 적용하여 지하터널에서의 경량전철의 교차운행과 지상에서의 차량운행에 따른 심도별 진동 사용성 평가를 위하여 유한요소 프로그램인 LUSAS를 사용하여 동적해석을 실시하였다. 구조물 상부 지반구성은 도로다짐기준에 따라 적용한 것으로 층별로 E값의 변화가 없고 암질과 같은 감쇠에 영향을 주는 요소들은 해석에서 제외되었다.

- 1) 차량운행과 지하 터널에서의 열차 운행에 대한 진동가속도 값을 심도별로 살펴보면 다음과 같다. 심도 1 m 일 때 지표면에서의 최대 진동가속도 값은 0.00421 g이고 최소 진동가속도 값은 0.00138이다. 심도 3 m 일 때 지표면에서의 최대 진동가속도 값은 0.0037 g이고 최소 진동가속도 값은 0.00115 g이다. 그리고 심도 5 m 일 때 지표면에서의 최대 진동가속도 값은 0.0049 g이고 최소 진동가속도 값은 0.00032 g이다.
- 2) 구조물로부터 거리가 멀어지고, 지표면에서의 심도가 깊어질수록 열차로 인한 진동가속도의 값이 점차 줄어듦을 알 수 있다. 이는 거리에 따른 감쇠의 영향으로 사료된다.

- 3) 각각의 심도별 측정위치에서의 최대 진동가속도는 심도 1 m일 때 측정위치 3번에서 0.0042 g의 값이 산정됨을 알 수 있다. 이 값은 기준 진동가속도 0.1 g을 충분히 만족한다.
- 4) 저심도 경량전철 시스템은 심도 1~5 m사이 터널에서 열차 운행에 따른 지표면에서의 진동가속도로 인한 문제는 없는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 저심도 지하철도기술 개발 사업의 일환으로 시행되었습니다.

References

- Deutsches Institut Fur Normung E.V. (1991) DIN DIN 4150-2.
- Hwang, S.-C. Oh, B.-H., and Park, S.-J. (2001) Ground Vibration and Seismic Design(V-1), *Korean Geotechnical Society*, Vol. 17-8.
- ISO (1997) ISO 2631 Mechanical vibration and shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body vibration.
- Jeon, B.G., Kim, N.-S., and Kim, S.-I. (2008) Estimation of Stiffness Limit for Railway Bridge Vibration Serviceability, *Journal of the Korea Society for Rail*, Vol. 11-5 pp. 489-498.
- Kang, B.S. (2011) A Study on 3D Evaluation and Reduction Method for Vibration of Track-Roadbed due to Railway Load, *Journal of the Korea Society for Railway*, Vol. 14-1 pp. 39-48.
- Kim, D.R. (2007) A Study on the Deformation Behavior Characteristics of the Underground Pipe under the Influence of External Load, *A master's thesis of the HANYANG*
- Kim, H.-J., Park, J.-H., and Shin, Y.-S. (2005) Dynamic Analysis of Tunnel Structures Considering Soil-Structure Interaction, *Journal of The Korean Society of Safety*, Vol. 20-1.
- Kim, T.-S. and Jung, H.-H. (2002) Study regarding architecture damage evaluation by vibration, A study report, *National Environmental Dispute Resolution Commission*
- Kim, Y.-M., Jeong, S.-S. Kim, K.-Y., and Lee, Y.-H. (2011) A Study on the Dynamic Behavior of Vertical Shaft in Multi-Layered Soil, *Journal of the KSCE*, Vol. 31-4C pp. 109-116.
- Korea Rail Network Authority (2004) Railway Bridge Design Standard, *Ministry of Construction & Transportation*.
- Lee, J.-H. (2007) Department of Civil & Environmental Engineering, *A Doctor's thesis of the KISIT*.
- Lee, M.-S., Kang, Y.-J., Kim, J.-H., and Shin, J.-H. (2011) Dynamic Analysis for Two plate Girder Railway Bridge Considering Real High Speed Train Loads, *Journal of the Korea Society for Railway*, pp. 960-964.
- Psarropoulos, P.N., Klonaris, G., and Gazetas, G. (2005) Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 795-809.
- Reiher, H. and Meister, F.J. (1931) Human Sensitivity to Vibration, *Forsch. auf dem Geb. des Ingen*, Vol. 2-11, pp. 381-386.
- Shin, H.-C. (2009) Assessment of the Ground-borne Vibration Induced by Urban Rapid Transit in Tunnels, *A Doctor's thesis of the SEOULTECH*.
- The Report of the Tunnel analysis (2012) *Korea Rail Network Authority*.
- The Traffic Law (2011) Administrative Law.
- Wood, R.D., Barnett, N.E., and Sagesser, R. (1974) Holography-A New tool for soil Dynamics, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.100, No.GT11, pp. 1231-1247.
- Wu, Y.S. and Yang, Y.B. (2004) A semi-analytical approach for analyzing ground vibrations caused by trains moving over elevated bridges, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, pp. 949-962.
- Yang, Y.B., Hung, H.H., and Chang, D.W. (2003) Train-induced wave propagation in layered soil using finite/infinite element simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 263-279.
- Yun, J.-O (1996) Study regarding an answer characteristic of a structure regarding ground vibration., *A Master's thesis of the KHU*.

© Received February 18, 2013

© Revised March 4, 2013

© Accepted April 5, 2013