

저심도 철도시스템의 구조물 주변 지반조건에 따른 진동특성 연구

Analysis for vibration characteristics of Low Depth Track System under various ground conditions of structure surrounding

김태식*, 김대상**, 사공명**, 조국환†

Kim Tae Sik*, Kim Dae Sang**, Sagong Myung**, Cho Kook Hwan†

Abstract As a project of low depth light rail system has been approved recently, It is important to understand dynamic effects from train moving loads. In this study, analyses were performed divided by two ground conditions around underground structure; sandy soil, N-value 25 and soft clay, N-value 1~2 at the depth of 2.5m. Evaluation on vibratory acceleration was performed by applying rail load by using the LUSAS IMD PLUS which is finite element program. The output of vibratory acceleration measurements under the moving loads of light rail having the speeds of about 60km/h shows that vibration is more greatly reduced at the soil, N-value 25 than soft clay, N-value 1~2.

Keywords : Low Depth Light Rail System, Dynamic Analysis, Propagation of Vibration, Reduced Vibration

초록 최근 저심도 경량전철 시스템 사업이 승인됨에 따라, 도심지 내 열차 이동하중에 따른 동적 거동에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 심도 2.5m 일 때 지하구조물의 주변지반이 N 값 25 의 사질토 지반과 N 값 1~2 인 연약한 점토지반으로 나누어 해석하였다. 이에 따른 진동가속도를 유한요소 프로그램인 LUSAS IMD PLUS 를 이용하여 열차하중을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 약 60km/h 로 주행하는 경량전철로 인해 발생하는 진동가속도를 산출한 결과 N 값 1~2 의 연약한 지반보다 N 값이 25 인 견고한 지반에서 지중에서 발생한 진동이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다.

주요어 : 저심도 경량전철, 동적거동, 진동전파, 진동감쇠

1. 서론

우리나라에 지하철이 도입된 이후 지하철 심도가 점점 깊어져 고심도화 됨에 따라 공사비가 증대되고 다른 대중교통과의 환승에 시민들이 불편을 겪는 실정이다. 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 이동하중에 따른 상시 진동을 유발할 수 있는 시설물에 대한 지반진동의 예측과 대책의 마련이 필요하다[1].

본 연구에서는 도로하부에 열차가 운행하는 교통시설물이 심도 3m에 위치하고 구조물 주변 지반의 조건이 도로하부의 잘 다져진 지반에 구조물이 설치되어 열차가 운행할 때, 연약 지반상에 말뚝을 설치하여 구조물을 설치하여 열차가 운행하는 지반조건이 상이한 케이스를 비교하여 지반조건에 따른 지표면에서의 진동전파특성을 파악하고자 한다.

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

** 철도기술연구원 선임연구원, 공학박사

2. 진동특성

2.1 교통진동의 특성

철도운행으로 인한 진동은 차량 운행에 따른 진동과 유사하나, 차량 자체가 매우 길기 때문에 그로 인한 진동도 상대적으로 오래 지속(일반적으로 1-2 분)된다는 점에서 차량진동과 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 열차가 가장 큰 진동을 유발하게 된다. 열차의 운행에 따라 발생하는 표면파는 열차 길이의 반 이하 거리 영역에서는 기하학적인 감쇠가 없으며, 모든 감쇠는 재료적인 감쇠에 의한 것이다. 따라서 진동수준은 거리의 증가에 따라 서서히 감소하게 되나, 열차로부터 200~300m 거리에서도 인지가 가능한 경우도 있다. 열차 운행속도의 감소에 따른 진동수준의 감소는 70km/h 이하의 속도에서만 의미를 가지며, 그 이상의 속도에서는 속도의 변화에 따른 차이가 크게 없다[2].

2.2 진동해석의 수치해석접근

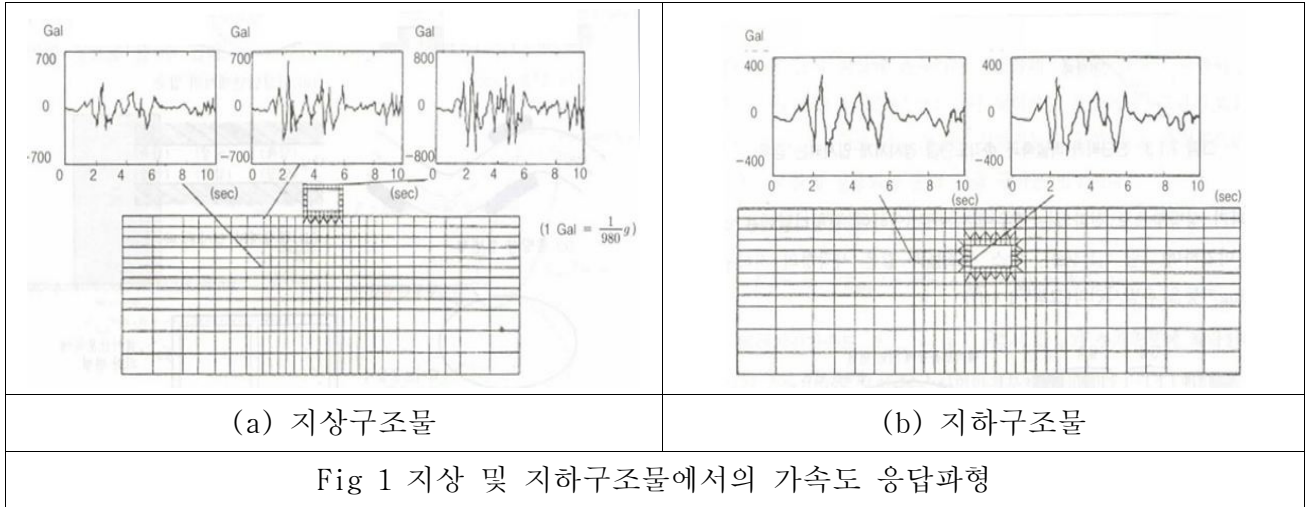
실험 또는 경험적인 방법이 특정위치에서 지반진동을 정확하게 평가할 수 있다. 반면 수치해석의 경우 진동에 영향을 주는 모든 인자들을 상세히 프로그램에 입력 할 수 없어 진동 전달 경로를 통한 상세 메커니즘 등을 설명할 수가 없다.

Yang [3]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 [4]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[5].

2.3 지하구조물의 진동특성

지하구조물의 진동특성은 일반적으로 지상구조물의 진동특성과 상이한 값을 보인다. 지상구조물은 진동이 일어나면 지표면의 진동유형 그대로 발생하는 것이 아니라 지상구조물의 질량, 강성, 및 감쇠특성에 의하여 거동이 달라진다. 특히 지상구조물의 질량에 의한 관성력도 지상구조물의 거동에 주요요소로 작용한다.

반면에 지하구조물은 지중에 있기 때문에 대부분의 경우 지반운동에 순응하여 구조물이 진동하는 연유로 큰 증폭현상이 나타나지 않는다. 지하구조물을 주변이 지반으로 둘러싸여 있기 때문에 발산감쇠(Radiation damping)가 크다. 지상구조물에는 재료감쇠(Material damping)만이 존재하나 지하구조물에서는 두 감쇠작용이 같이 일어난다. 이를 이중감쇠(Double damping)이라고 이로 인해 지하구조물이 주변지반에 대해 상대적인 진동을 일으켰다 하더라도 쉽게 소멸됨을 알 수 있다.



지상구조물과 지하구조물의 가속도 응답파형을 분석해보면 지상구조물의 파형은 지표면과 가르게 거동함을 보여주나, 지하구조물은 주변지반의 파형과 거의 흡사한 것을 알 수 있다[6].

3. 동적 거동 해석 및 검토

본 연구에서는 유한요소 프로그램인 LUSAS를 이용하여 터널 안에서 경량전철 두 대가 교차로 운행하고 있을 때 지표면에서의 진동 가속도 값을 산정하여 구조물 주변 지반 조건이 상이할 때 지반의 요건에 따른 진동 전파 특성을 평가하고자 한다.

3.1 지반-구조물상호작용

지층이 연약하면 구조물을 지지하는 지반과 구조물 사이에 상호작용이 발생하게 되어 단단한 지반에서와는 다른 거동을 보이게 된다. 따라서 연약지반을 포함한 지반에서는 지반-구조물 상호작용의 영향이 반드시 고려되어야 한다[7]. 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. 본 논문에서는 지반을 스프링으로 가정하는 대신 지반을 조성하고 Mohr-Coulomb의 탄소성(Elasto-Plastic)매질로 가정하였으며 초기응력을 설정하고 LUSAS프로그램을 이용하여 고유치 해석을 함으로써 고유진동수를 파악하였다.

3.2 해석 대상 단면 및 경계조건

경량전철이 터널 내에서 교차 운행하고 지표에서 차량이 주행할 때 지반요건 별 지표면에서의 진동가속도 값을 산정하여 지반의 조건에 따른 전파 특성을 평가하기 위해 LUSAS를 이용하여 3D 이동하중해석(3D Moving Load)을 수행하였다. 전체모델의 폭은 터널의 형상, 지질 및 초기응력 상태에 의존하며 터널에 의한 영향이 미치지 않는 범위까지 설정해야 한다[8]. 본 연구에서는 구조물 좌우로 각각 약 50m를 적용

하여 해석하였다. 열차하중으로 인한 응력과 진동속도는 깊이가 3m이상인 경우 최대 85%감소효과가 있다 [9]. 따라서 터널하부 깊이는 5m로 모델링 하였다.

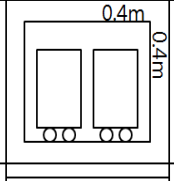
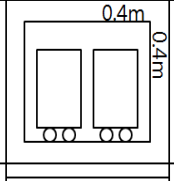
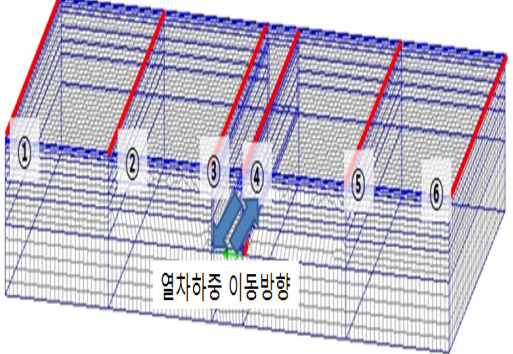
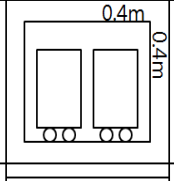
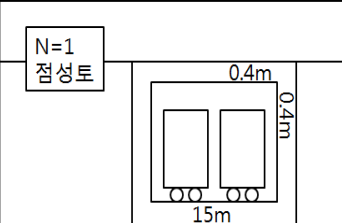
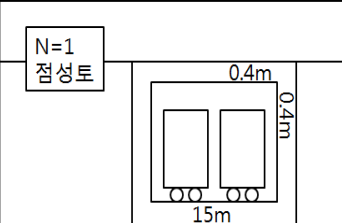
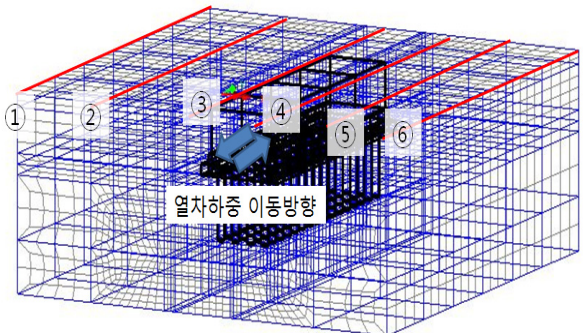
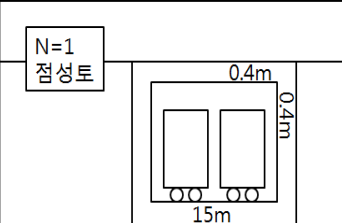
저심도 철도시스템에 적용되는 열차길이는 5량 1편성으로 총 길이 32m이다. 지표면의 차량이 이동하여 구조물상부를 지나갈 때 구조물 안의 경량전철과 교차해야 하므로 구조물의 길이는 열차길이와 열차속도를 감안하여 구조물의 길이를 산정하였다. 이는 열차의 이동하중에 대한 진동영향이 구조물에 충분히 반영될 수 있도록 설정하였다.

경량전철의 무게는 동력객차 48t, 부수전동차 33t으로 동력객차와 부수전동차 4개를 구조물 안에서 이동시켰다. 지표면과 구조물 내에서 열차와 자동차의 이동속도는 열차의 경우 저심도 경량전철의 설계속도 60km/h로, 차량하중은 일반도로 편도 2차로 이상 속도규정인 80km/h를 적용하였다. 구조물과 말뚝은 탄성체(Elastic)매질로 가정하여 Shell요소로 모델링 하였다. 주변 지반모델은 Mohr-Coulomb의 탄소성(Elasto-Plastic)매질로 가정하였다. 입체요소의 절점은 Equivalenced 되어 모든 응답 값들이 공유되도록 모델링 되었다. 모델링의 바닥부와 측벽부는 열차운행과 차량운행으로 인하여 진동이 경계조건에 의해 반사되는 영향을 최소화시키기 위하여 무한경계를 적용하였다. 구조물 주변지반은 다짐이 잘 이루어진 도로하부에 구조물을 설치하는 경우 CASE 1과 N치가 1-2 정도인 연약한 점토지반에 말뚝을 박아 구조물을 설치하는 조건 CASE 2으로 나누어 해석하였다. 해석에 사용된 상세한 물성 값은 Table 2에 정리하였다.

고유치 해석 시 먼저 Eigenvalue Controls을 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[10]

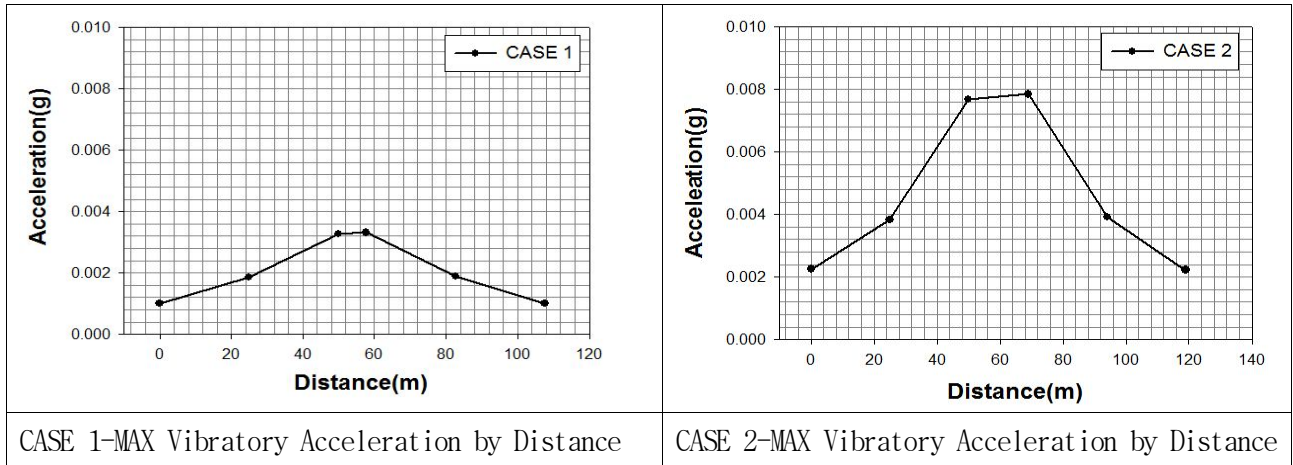
Table. 2 Model Properties for Layers

구분	E(MPa)	Poisson's ratio	kN/m ³	Internal friction angle
구조물	3000	0.2	25	-
말뚝	2420	0.2	19.25	-
레일	21000	0.3	78.5	-
표층/중간층	55	0.26	23.4	-
기층/보조기층	55	0.29	23.2	30
노상/노체	55	0.35	19	30
원지반	18	0.3	15	30
점토지반	3	0.4	16.5	-

<table border="1"> <tr> <td>포장층(표층+중간층+보조기층+동상방지층)</td> <td rowspan="4">2.5m</td> </tr> <tr> <td>노상</td> </tr> <tr> <td>상부노체</td> </tr> <tr> <td>하부노체</td> </tr> <tr> <td>  </td> <td>5.1m</td> </tr> <tr> <td>원지반</td> <td>5m</td> </tr> </table>	포장층(표층+중간층+보조기층+동상방지층)	2.5m	노상	상부노체	하부노체		5.1m	원지반	5m	
포장층(표층+중간층+보조기층+동상방지층)	2.5m									
노상										
상부노체										
하부노체										
	5.1m									
원지반	5m									
<p>CASE 1 - The Location of Measuring Point</p>	<p>CASE 2 - Measuring Point in the Load Moving Direction and Surface at the Depth of 2.5m</p>									
<table border="1"> <tr> <td>N=1 점성토</td> <td>2.5m</td> </tr> <tr> <td>  </td> <td>8.4m</td> </tr> <tr> <td>N=1 점성토</td> <td>16m</td> </tr> <tr> <td>원지반</td> <td>5m</td> </tr> </table>	N=1 점성토	2.5m		8.4m	N=1 점성토	16m	원지반	5m		
N=1 점성토	2.5m									
	8.4m									
N=1 점성토	16m									
원지반	5m									
<p>CASE 2 - The Location of Measuring Point</p>	<p>CASE 2 - Measuring Point in the Load Moving Direction and Surface at the Depth of 2.5m</p>									
<p>Fig 1 Surveying point in the load moving direction and surface</p>										

3.3 동적 거동 해석 결과 및 분석

열차이동하중에 대한 지표면에서의 진동특성을 파악하기 위해 구조물 양 끝 단에서 지표면으로 수직으로 올라온 지점(측점3,4번) 구조물에서 모델링 끝단(측점 1,6번)까지는 각각 50m씩 떨어져 있고, 25m씩 떨어진 지점이 각각 측점 2,5번이다.



지표면에서의 진동가속도 산정위치에 따른 거리별 진동가속도는 구조물 주변지반이 잘 다져진 사질토 지반은 Fig2에, 구조물 주변이 N치가 1인 연약 점토일 때 Fig 3에 그래프로 도시하였다. 측점위치가 지표면이므로 열차로 인해 발생된 진동가속도 값이 지표로 전파될 때 감쇠효과로 인해 측점별로 가속도의 값이 달라짐을 알 수 있다. 주변 지반과 상관없이 구조물 상단 지표면(측점위치 4번)에서 가장 큰 값이 발생하였고, 구조물에서 50m씩 떨어진 지점인 측점위치 1번에서 가장 작은 값이 발생하였다.

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 감쇠효과로 인하여 진동가속도 값이 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 진동가속도 산정 위치가 지표면이고 통과하는 토사층의 특성에 따라 재료 감쇠비가 정해지게 되어 진동가속도 응답 값은 다르지만 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

CASE 1과 CASE 2의 차이점은 진동 가속도값의 응답크기이다. 전파거리에 따른 감쇠형상은 매질의 공학적 특성에 따라 그 크기가 달라지며, 지하구조물을 통과하는 열차진동가속도 값은 발산감쇠, 재료적 감쇠의 영향을 모두 받아 이중감쇠효과를 가지게 되므로, 매우 작은 진동 가속도값이 응답함을 알 수 있다. 그러나 CASE 1과 CASE 2의 값이 약 2.5배 차이가 나는 것은 열차가 구조물을 통과하면서 장주기 성분의 진동을 발생시키고 연약지반의 고유주기와 비슷한 진동성분이 증폭됨으로 인한 현상인 것으로 판단된다. 하지만 경량전철운행에 따른 지표면에서의 실측 진동가속도 데이터 값이 미비한 실정이고 수치해석에 적용된 구조물 주변 지반 구성은 CASE 1의 경우 도로다짐기준에 따라 적용하였고, 층별로 E값의 변화가 없고, CASE 2의 경우에도 층별 E값의 변화가 없고 암질과 같은 감쇠에 영향을 주는 요소[12]들은 해석에서 제외되었다. 이에 관한 연계연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 저심도 철도시스템을 적용 시에 구조물 주변 지반요건에 따라 열차의 운행에 따른 지표면에서의 진동 전파특성 평가를 위하여 유한요소 프로그램인 LUSAS를 사용하여 동적 해석을 실시하였다. 구조물 주변 지반의 E값은 일정하고, 암질과 같은 감쇠에 영향을 주는 요소들은 해석에서 제외되었다.

1) 심도 2.5m에 위치한 구조물에 열차가 교차 운행시 CASE 1, 잘다져진 지반인 경우 지표면에서의 최대진동가속도 값은 0.0032g, 최소진동가속도 값은 0.00098g로 측정되었다. 그리고 CASE 2, 연약한 지반인 경우 최대진동가속도 값은 0.0078g, 최소진동가속도 값은 0.0022g로 측정되었다

2) 지하구조물은 이중감쇠효과로 인해 그 진동값이 지표에서는 매우 작은값이 측정된다. 그러나 CASE 1과 CASE 2의 경우 그 응답값이 약 2.5배 차이가 나고 이는 연약지반을 통과하면서 열차운행으로 인한 진동성분 중 연약지반의 고유주기와 비슷한 진동특성이 증폭됨으로 인한 현상인 것으로 판단된다. 암질과 같은 감쇠에 영향을 주는 요소들은 해석에서 제외되었고, 이에 관한 연계연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Kim Ja Yeon, Sagong Myung, Cho Kook Hwan(2013) , Dynamic Analysis for Low Depth Track System Under Train and Car Moving Loads, Journal of KOSHAM Vol. 13, No. 4 (Aug. 2013), pp. 067~075
- [2] Kim, T.-S. and Jung, H.-H. (2002) Study regarding architecture damage evaluation by vibration, A study report, National Environmental Dispute Resolution Commission
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Lee, J.-H. (2007) Department of Civil & Environmental Engineering, A Doctor's thesis of the KISIT.
- [6] Korean Geotechnical Society(2008) Seismic Design of Geotechnical Structures, Goomibook
- [7] Hwang, S.-C. Oh, B.-H., and Park, S.-J. (2001) Ground Vibration and Seismic Design(V-1), Korean Geotechnical Society, Vol. 17-8.
- [8] Korea Rail Network Authority (2004) Railway Bridge Design Standard, Ministry of Construction & Transportation.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Shin, H.-C. (2009) Assessment of the Ground-borne Vibration Induced by Urban Rapid Transit in Tunnels, A Doctor's thesis of the SEOULTECH.