

지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석 모델 MODEL FOR SUBWAY-INDUCED STRUCTURAL VIBRATION

^o김 희철* 이 동근** 민 경원*
Kim, Heecheul Lee, Dong-Geun Min, Kyung-Won

ABSTRACT

Noise and vibration induced by subway operation are one of the major factor that annoying residents living near the railway. In general, lateral vibration was the major concern when we are considering vibration of the building. Since the energy due to earthquake is enormous it affects wide area. However, the vertical vibration became a major concern in considering the vibration induced by subway because relatively smaller energy affects only nearby areas than that of earthquake.

Analysis model of the structure for the vertical vibration should consider the effect of beam vibration. Thus, the model of the structure for the lateral vibration can not be applied. Appropriate analysis model which can consider the inertia force of the beam is necessary when analyzing a structure for the vertical vibration. Modeling technique for the vertical vibration analysis of structures has been studied on this paper. It is recommended to use 2 or more elements for columns and to use 3 or more elements for beams when analyzing structures for vertical vibration induced by subway.

1. 지하철 진동과 구조물

대도시의 교통난을 해소하기 위한 방안의 하나로 지하철이 활용되고 있다. 지하철은 많은 인원을 수송할 수 있으며 지상의 교통체중에도 영향을 받지않고 정해진 시간계획에 따라 운행되므로 도시서민들에게는 꼭 필요한 교통수단이 되고 있다. 그러나 지하철의 운행에 따른 소음 및 진동은 인근 주민들의 불편을 야기시키고 있다. 따라서 지하철의 운행에 따른 소음과 진동의 원인을 알아내고 이에 대한 대책을 마련하여 인근 주민들에게 불편이 없도록 하는 노력이 필요하다.

지하철의 운행에 따른 소음과 진동은 차량과 궤도사이에서 발생하여 궤도 기초와 지하터널 구조물을 통하여 지반에 전달된다. 지반을 통하여 전달된 소음과 진동은 지반위에 놓인 구조물에 영향을 미치게 되며 이 영향은 경우에 따라 인근주민들에게 심각한 불편을 초래하기도 한다. 따라서 지하철운행에 따른 소음과 진동의 발생, 전파 및 영향 등에 대해서 알아볼 필요가 있다.

지하철의 운행에 의하여 발생하는 소음과 진동은 지하철의 운행속도, 차량바퀴와 궤도의 정밀도 등에 의하여 크게 좌우된다. 도심지역의 운행속도를 낮추거나 차량바퀴와 궤도면을 정기점검하고 필요한 경우에는 수리하거나 교체하는 등의 방법으로 소음과 진동의 발생은 크게 감소될 수 있다. 또한 궤도 기초에 방진장치를 설치하여 궤도에서 발생하는 진동의 전파를 막아주는 방법도 상당한 효과를 주고 있다.

대부분의 경우 지하철의 궤도가 지하 수십미터의 깊이에 존재하므로 지하철에서 발생하는 진동과 소음은 지반과 구조물의 진동에 의해서 전달된다. 그러므로 지하철의 운행으로 인한 소음과

* 삼성건설 기술연구소

** 한국과학기술원 토목공학과 부교수

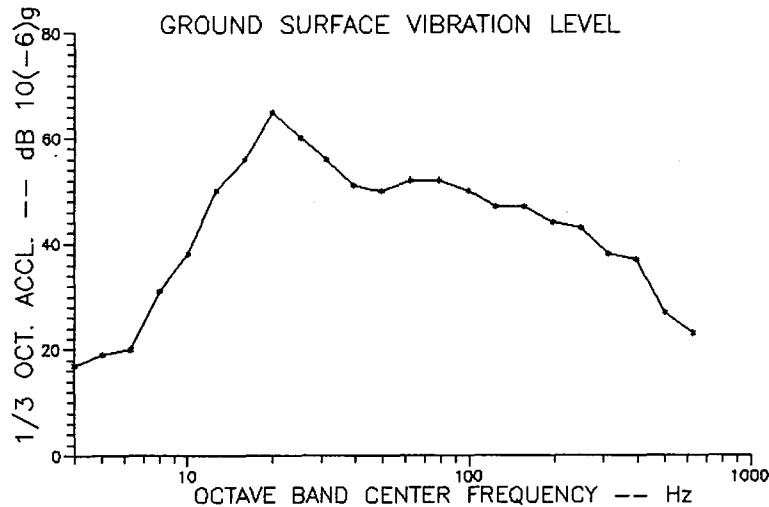


그림 1 지하철 운행에 의한 지표면의 진동크기

진동의 영향을 최소화하기 위해서는 진동이 어떠한 경로를 통하여 어떻게 전달되는지를 알아내는 것이 우선적으로 필요하다.

본 연구에서는 지하철의 운행에 의하여 유발되는 진동에 의해 지반이 진동할 경우 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위한 모델의 개발에 주된 관심을 가지고 있으며 지하철 궤도에서 발생하는 소음 및 진동 또는 지반을 통한 진동의 전달 등은 후속연구과제로 설정해 두고 있다.

2. 지반 진동의 특성

지진이나 지하철 운행 등과 같이 지하에서 발생하는 진동은 지반을 통하여 구조물에 전달된다. 지진은 막대한 에너지를 방출하므로 넓은 지역에 영향을 미치나 지하철의 운행에 따른 진동은 발생하는 에너지의 양이 적으므로 매우 가까운 지역에만 영향을 미치게 된다. 지하에서 발생하는 진동은 실체파(Body-wave)와 표면파(Surface-wave)의 형태로 전파되는데 진동원에서 가까운 지역에서는 연직방향의 진동성분이 크나 진동원으로 부터 멀어질수록 연직성분의 영향은 거의 감소되고 수평성분의 진동만이 주로 영향을 미치게 된다. 따라서 넓은 지역에 영향을 미치는 지진과 같은 진동에 대해서는 주로 수평방향의 진동에 의한 영향을 고려하게 되나 지하철의 운행에 의한 진동과 같이 진동원에서 가까운 지역에서의 구조물을 분석할 때에는 연직성분의 진동에 의한 영향이 더 중요해진다.

대부분의 구조물에 대해서 연직방향의 진동수는 수평방향의 진동수에 비해 훨씬 그 값이 높게 나타난다. 또 지반을 통해 전달되는 진동의 주된 진동수 성분은 그림 1에서 보는 바와 같이 4 - 600Hz 정도의 값을 가지는데⁽¹⁾ 이것은 구조물이 가지는 연직방향 주요 진동모드의 진동수를 포함하거나 이와 매우 가깝게 되는 경우가 많다. 따라서 지하철 진동이 발생하면 구조물의 수평방향 보다 연직방향 진동모드들이 구조물의 진동에 더 큰 영향을 미치게 된다.

3. 진동해석 모델의 특성

구조물의 진동은 강성과 질량의 분포에 따라 절대적인 영향을 받는다. 예를 들어서 그림 2-(a)와 같은 구조물에 대한 지진해석을 수행할 경우에는 그림 2-(b)와 같이 모형화하는 경우가 대부분이다. 이와 같은 해석모형을 사용하면 구조물의 수평방향 거동을 분석하는데는 별다른 문제가 없을 것이다. 그러나 이 모형은 지하철진동과 같은 연직방향 진동에 의한 구조물의 영향을 분석하기에는 한가지 결정적인 문제점을 가지고 있다. 구조물이 연직방향으로 진동할 때에 각 층의 보가 가지는 질량의 영향(관성력)은 양단의 절점으로 집중되어 있으므로 보의 진동특성이 완전히 무시되는 결과를 초래하게 된다. 따라서 기둥의 축방향 변형에 의한 구조물의 진동은 나타낼 수 있으나 보의 휨변형에 의한 구조물의 진동은 완전히 무시된다. 그러나 구조물의 연직방향진동은 보의 휨변형에 의한 진동의 영향을 크게 받게 된다. 따라서 이러한 해석모형은 지하철

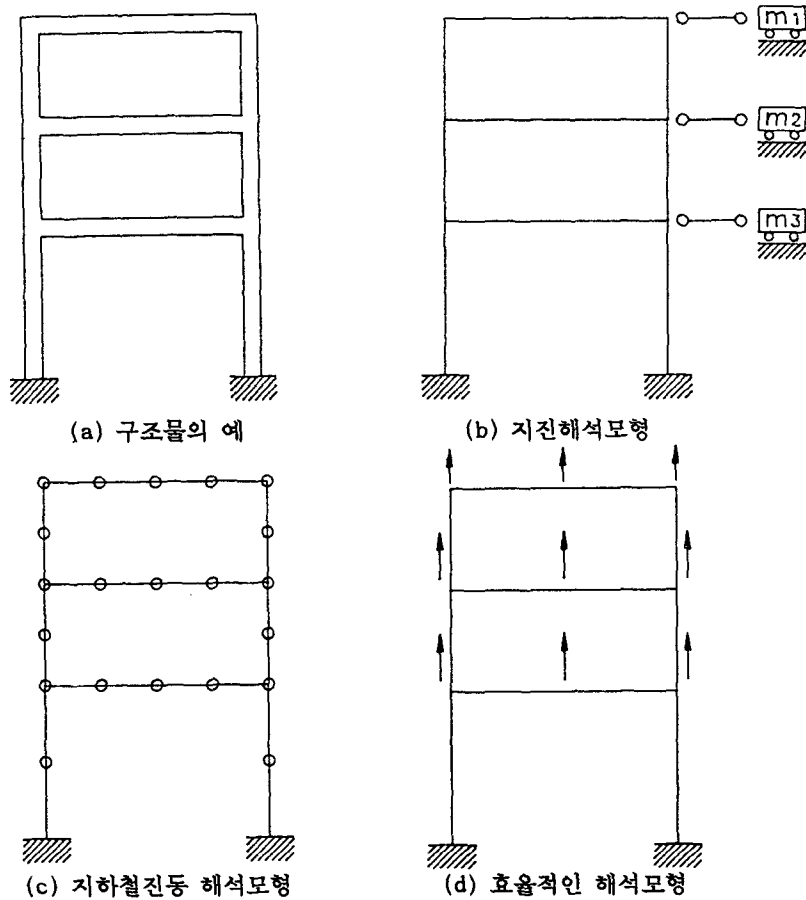


그림 2 구조물의 진동해석 모형화

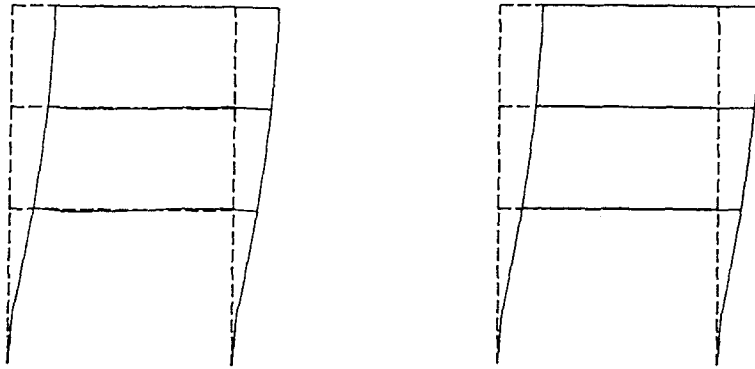
진동에 의한 구조물의 해석에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

보의 진동을 고려하기 위해서는 그림 2-(c)에서 보는 바와 같이 보의 관성력을 제대로 표현할 수 있는 해석모형을 사용할 필요가 있다. 그러나 이러한 모형을 사용할 경우에는 해석에 사용되는 자유도의 수가 급격히 늘어나게 되어 또 다른 문제가 발생하게 된다. 대형구조물은 많은 수의 구조요소로 구성되어 있으며 하나의 구조요소를 많은 수의 유한요소로 모형화하여야 하는 경우에는 지나치게 많은 수의 절점과 유한요소를 사용하게 되므로 현실적으로 사용하기에는 많은 어려움이 따른다. 물론 보의 질량을 균일하게 분포시킨(constant mass) 모형을 사용할 수도 있으나 이러한 경우 보 내의 어떤 특정한 지점에서의 동적거동을 알아낼 수 없는 단점이 있다.

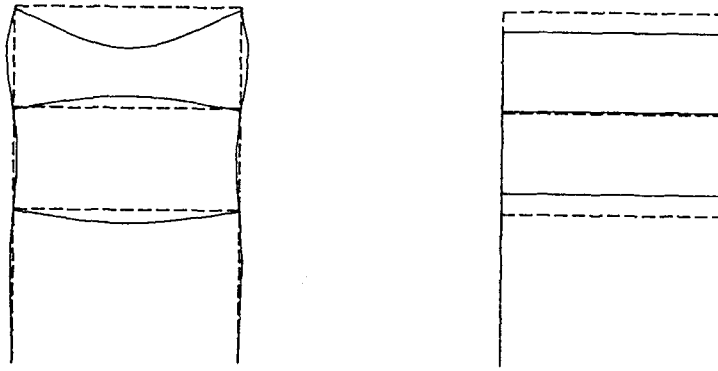
이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 그림 2-(d)와 같이 연직방향의 진동을 해석하기 위해서 필요한 자유도만을 남기고 필요치 않은 자유도는 행렬응축(matrix condensation)기법을 사용하여 소거시킨 해석모형을 사용하는것이 효율적이다. 이때 강성행렬은 정적응축기법(static condensation)을 사용하여 응축시키고 질량행렬은 동적응축기법(dynamic condensation)을 사용하여 응축시키면 된다.

4. 구조요소의 분할

구조물의 연직방향 진동을 해석하기 위해서 하나의 구조요소를 여러개의 유한요소로 분할하는 방법을 사용하여 모형화하는 경우에 몇 개의 유한요소를 사용하여 모형화할 것인지를 생각할 필요가 있다. 실제 구조물은 대개가 3차원으로 구성되어 있으나 여기서는 그림 3-(a)와 같이 간단한 2차원 예제구조물을 사용하여 요소의 분할이 진동해석결과에 미치는 영향을 대략적으로 알아



(a) 보를 분할한 모형의 수평방향 모드 (b) 보를 분할하지 않은 모형의 수평방향모드



(c) 보를 분할한 모형의 수직방향 모드 (d) 보를 분할하지 않은 모형의 수직방향모드

그림 3 보의 분할에 따른 진동모드 형상

보기로 한다.

가) 보의 분할

구조물의 연직방향 진동은 보의 휨변형에 의해 크게 지배된다. 따라서 기둥의 요소를 하나로 제한하고 보에 대해서 여러가지 다른 수의 유한요소를 적용하여 진동해석을 수행하였으며 해석을 통해서 얻어진 진동주기는 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 지진해석에서 중요한 역할을 하는 수평방향 진동모드에 대한 진동주기는 보의 분할에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 표 1에서 보는 바와 같이 보를 분할하지 않은 경우 연직방향의 진동에 대한 진동주기가 지나치게 짧게 나타나고 있으며 하나의 보를 두개 이상의 유한요소로 분할한 경우에는 연직 방향의 진동에 대한 진동주기가 사용된 요소의 수에 큰 관계가 없음을 알 수 있다. 보의 분할이

표 1 보의 분할에 따른 구조물의 진동주기

요소 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
수평방향	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016	0.1016
연직방향	1.3129	0.7306	0.7562	0.7587	0.7590	0.7589	0.7589	0.7588	0.7587	0.7587

구조물의 진동주기에 미치는 영향은 그림 3에 보여진 진동모드 형상을 관찰해 보면 쉽게 이해할 수 있다. 그림 3(a)와 (b)는 기둥의 요소를 3개로 분할하고 보의 요소는 하나로 하였을 경우에 나타나는 첫 번째 연직모드와 수평모드를 나타낸 것이며 그림 3(c)와 (d)는 보의 요소를 10개로 나누었을 경우에 발생하는 첫 번째 연직모드와 수평모드를 나타낸다. 수평방향의 진동모드 형상은 보의 분할에 관계없이 거의 같은 모양을 가지나 보를 분할하지 않았을 때와 분할하였을 때에 나타나는 연직방향의 진동모드 형상은 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 보의 축방향으로 분포된 질량의 영향으로 보가 휘는 현상이 보를 분할하지 않은 해석모형을 통해서서는 제대로 표현되지 못하지만 보를 여러개로 분할하였을 때에는 잘 나타나고 있다.

나) 기둥의 분할

구조물이 연직방향으로 진동할 때에는 보의 휨변형에 의해서 기둥의 휨변형이 유발된다. 따라서 기둥의 질량분포를 고려하기 위하여 하나의 기둥을 여러개의 유한요소로 분할하여 진동해석을 수행하였다. 표 2는 보의 요소를 10개로 제한하고 기둥의 요소 수를 변화시켰을 경우에 발생하는 진동주기를 나타낸 것으로써 이 때 산출된 진동주기는 기둥의 요소 수가 많을수록 수평방향의 주기는 증가하나 반대로 연직방향의 주기는 감소하는 경향이 있다. 그러나 기둥의 분할에 따른 수평방향 및 연직방향의 진동주기는 그 차이가 상대적으로 적으므로 전체적인 구조물의 진동주기에 의한 해석에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

기둥과 보의 분할에 따른 진동주기의 변화는 그림 4에 나타난 바와 같이 기둥의 분할에 따른 진동주기는 기둥을 하나의 요소로 해석하였을 경우와 2개 이상의 요소로 분할한 경우는 약 2배의 차이가 있으나 2개 이상으로 분할하였을 경우는 주기가 거의 같은 것을 알 수 있다. 보의 분할에 따른 진동주기 또한 보를 3개 이상의 요소로 분할할 경우 그 값에 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

다) 보와 기둥의 분할에 따른 속도응답

앞 절에서는 보와 기둥의 분할에 따른 진동주기의 차이를 비교하였으나 실제적으로 지하철의 운행에 의하여 느끼는 사람의 반응은 구조물의 진동속도에 큰 영향을 받는다⁽¹⁾. 그림 1에 보인

표 2 기둥의 분할에 따른 구조물의 진동주기

요소 수	1	2	3
수평방향	0.1016	0.1026	0.1027
연직방향	0.7587	0.7473	0.7466

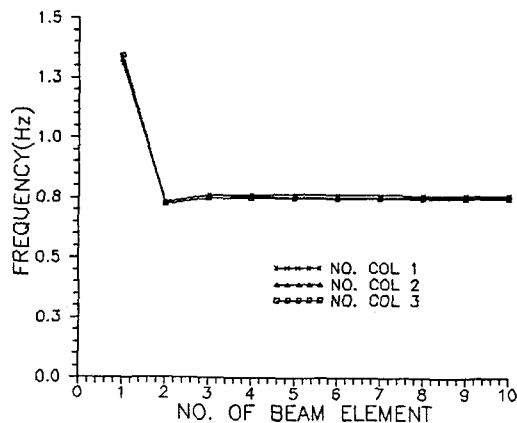


그림 4 요소의 수에 따른 진동주기

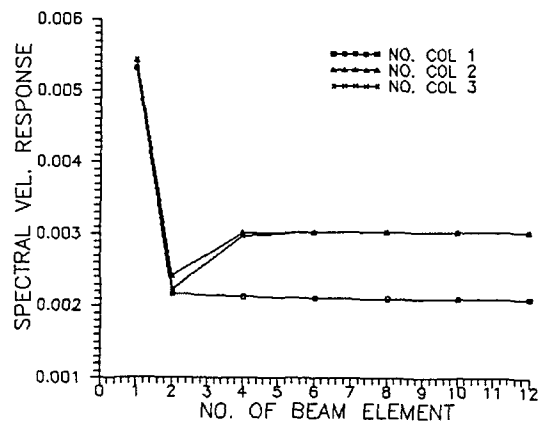


그림 5 요소의 수에 따른 속도

지표면에서의 진동크기를 3층의 철근콘크리트 구조물에 적용하였을 경우 보와 기둥의 분할에 따른 속도를 비교하여 보았다. 그림 5는 기둥과 보의 분할에 따라 3층 바닥에 있는 보 중앙에서의 속도를 나타낸 것으로써 보의 요소를 하나로 하였을 때와 2개 이상의 요소로 나누었을 경우는 2배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 기둥의 요소를 2개 이상으로 하여 해석하였을 경우에는 거의 비슷한 값을 가지나 하나의 기둥으로 해석하였을 경우는 현저한 차이를 보임을 알 수 있다.

5. 결론 및 추후연구과제

간단한 예제구조물의 진동해석을 통하여 지하철 진동이 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위한 해석모델에 관해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 구조물에 대해서 지진해석을 수행할 때와 지하철진동의 영향을 분석할 때는 입력 지반진동의 특성차이로 인하여 구조물의 진동해석에 사용될 해석모형이 상당한 차이를 가지게 된다.
- (2) 연직방향의 진동이 중요한 영향을 미치는 경우에는 연직방향의 진동에 의해서 횡변형이 크게 일어나는 구조요소의 진동주기를 파악하기 위해서는 적어도 2개 이상의 유한요소로 모형화 될 필요가 있다.
- (3) 연직방향의 진동을 조사하기 위한 구조해석의 모델에서 기둥의 요소분할은 건물의 주기에 별 영향을 미치지 않는다.

지하철진동이 구조물에 미치는 영향을 효과적으로 분석하기 위해서는 계속적으로 다음과 같은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

- (1) 삼차원 해석모델을 이용한 요소분할 효과 분석
- (2) 효율적인 행렬응축기법 개발
- (3) 지반을 통한 진동파의 전파특성 해석

참고문헌

- (1) Wilson, Ihrig and Associates, Inc. Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, National Technical Information Service, 1982
- (2) James T. Nelson and Hugh J. Saurenman, State-of-the-Art Review: Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains, National Technical Information Service, 1983
- (3) W. Weaver, P. R. Johnston, Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice Hall Inc., 1987
- (4) B. Bernek and Newman, Inc. Control of Wheel/Rail Noise and Vibration, National Technical Information Service, 1983