

지하철 진동에 의한 건축구조물의 진동특성

Dynamic Response of Building Structures Induced by Subway Operation

김 희 철*
Kim, Hee-Cheul
이 동 근**
Lee, Dong-Geun
민 경 원***
Min, Kyung-Won

.....

요 약

지하철의 운행에 의한 소음과 진동은 운행로 주위의 주민을 괴롭히는 중요한 요소의 하나이다. 일반적인 건물의 진동은 횡방향의 진동을 많이 고려하고 있으나 지하철의 운행에 의한 건물의 진동은 수직방향의 진동을 주요하게 다루어야 한다.

수직방향의 진동을 고려하기 위한 구조물은 보의 진동이 고려된 모델이어야 한다. 따라서 구조물의 수평방향 진동을 고려하기 위하여 사용된 모델은 수직방향의 진동을 고려하기 위한 모델과 같이 사용될 수 없다. 건물의 수직진동을 고려한 해석을 수행하기 위해서는 보의 관성력을 충분히 고려할 수 있는 모델이 사용되어야 한다. 본 논문에서는 지하철의 운행에 의한 구조물의 수직방향진동을 고려하기 위한 구조물의 해석 모델기법에 대하여 연구한 결과 기둥의 경우 하나이상 보의 경우 두개 이상의 요소로 나누어 해석하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

Abstract

Noise and vibration induced by subway operation are one of the major factor that annoy residents living near the subway tracks. In general, lateral vibration is the major concern when we are considering vibration of a building. However, the vertical vibration is the major concern in considering the vibration induced by the subway operation.

Analysis model for the vertical vibration of the structure should consider the effect of beam vibration. Thus, the same model used for the lateral vibration analysis can not be used for an analysis of vertical vibration of the structure. 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 one or more elements for columns and to use two or more elements for beams when analyzing structures for vertical vibration induced by subway operation.

.....

* 삼성건설 기술연구소 수석연구원
** 한국과학기술원 토목공학과 부교수
*** 인천대학 건축공학과 전임강사

이 논문에 대한 토론을 1995년 9월 30일까지 본 학회에 보내 주시면 1996년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 지하철 진동과 구조물

대도시의 인구증가와 함께 도시의 규모는 점점 팽창하고 있으며 이에 따른 주변의 위성도시 또한 증가하고 있다. 인구의 증가에 따른 차량의 증가는 대도시의 도로가 더 이상 수용할 수 없는 한계에 도달하였으며 대도시의 자가상승으로 인하여 도로증설 또한 거의 불가능한 상태이다. 이러한 상황에서 대도시의 교통난을 해결할 수 있는 가장 효율적인 방법중의 하나는 지하철과 같은 대중교통수단을 더욱 발전시키는 것이다. 지하철은 많은 인원을 수송할 수 있으며 지상의 교통체증에도 영향을 받지 않고 정해진 시간계획에 따라 운행되는 장점으로 인하여 대도시의 시민들에게는 꼭 필요한 교통수단이 되고 있으며 앞으로 그 활용범위는 점점 확대될 것으로 예상된다. 그러나 지하철의 운행에 따른 소음과 진동은 인근 지역의 주민들에게 또 다른 공해요소로 작용하고 있다. 따라서 지하철의 운행에 따른 소음과 진동의 원인을 분석하여 이에 대한 대책을 미리 마련하는 것이 지하철의 증설에 따라 야기될 수 있는 주민들의 불편을 방지하는 가장 경제적인 방법이 될 것이다.

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 진동

과 소음은 지반과 구조물의 진동에 의해서 전달된다. 그러므로 지하철의 운행으로 인한 소음과 진동의 영향을 최소화하기 위해서는 진동이 어떠한 경로를 통하여 어떻게 전달되는지를 알아내는 것이 우선적으로 필요하다.

지진으로 인한 진동의 경우에는 구조물에 과다한 응력이 작용함으로써 구조부재에 손상을 입히나 지하철의 운행에 의한 진동의 경우에는 구조물의 피해보다 건물의 사용자들에게 불쾌감을 조성함으로써 사용성에 큰 영향을 미치게 된다. 지하철의 운행에 따른 소음과 진동의 전달은 지반위에 놓인 구조물에 영향을 미치게 되며 이러한 영향은 컴퓨터와 같이 진동에 민감한 기계를 사용하는 사무실이나 병원의 수술실은 더욱 심각한 반응을 보이게 된다. 따라서 지하철운행에 따른 소음과 진동의 발생은 건물의 설계 시점부터 적극적으로 반영되어 이에 대한 대책이 수립되어야 할 것이다.

이미 운행중인 지하철 주변에 건물을 신축하는 경우 및 기존 구조물 주변에 새로운 지하철노선이 증설될 경우에는 지하철의 운행에 의한 건물의 거동을 예측하여 이에 대한 대책을 수립할 필요가 있다. 이러한 대상건물이 저층일 경우 기존의 상용 프로그램을 이용하면 연직진동에 대한 해석을 이행할 수 있으나 중층 이상의 구조물일 경우에는 해석을 이행하는데 막대한 시간이 소요되며 어느 정도 규모 이상의 구조물에 기존의 해석모델을 사용할 경우 초대형컴퓨터를 이용하지 않으면 전체적인 해석이 거의 불가능하게 된다. 그러나 기존에 사용하고 있는 건물의 해석모델을 변형시킴으로써 원래의 값에 근사한 값을 유도할 수 있다면 실제적으로 매우 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 근사값의 유도는 건물의 형태에 따라 다르게 발생하는 연직진동에 대한 구조물의 거동특성에 대한 충분한 조사가 수반되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 지하철의 운행에 의하여 유발되는 진동에 의해 지반이 진동할 경우 구조물에 미치는 영향을 적절하게 분석하기 위한 모델의 개발에 주된 관심을 가지고 일반적으로 2차원의 구조해석에서 사용되고 있는 모델을 변형시켜 건물의 높이, 경간수 및 인근경간과의 비에 따른 건물의 연직방향 거동에 대한 특성을 조사하였다.

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 진동성이 크나 진동원으로 부터 멀리질수록 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. 그림 1은 현재 운행중인 국내의 지하철 노선 주위에서 측정된 진동에 대한 스펙트럼으로써 지반을 통해 전달되는 진동의 주된 진동수 성분은 4-600Hz 정도의 값을 가지는데, 이것은 구조물이 가지는 연직방향 주요 진동모드의 진동수를 포함하거나 이와 매우 가깝게 되는 경우가 많다. 따라서 지하철 진동이 발생하면 구조물의 수평방향보다 연직방향 진동모드들이 구조물의 진동에 더 큰 영향을 미치게 된다.

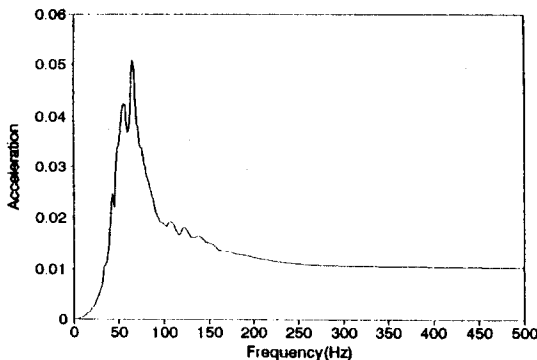


그림 1. 지하철 운행에 의한 지표면의 진동크기

일반적인 구조물에 대한 연직방향의 진동수는 수평방향의 진동수에 비해 훨씬 그 값이 높게 나타난다. 또한 지반을 통하여 전달되는 지하철진동의 주된 진동수 성분은 일반적으로 50-100Hz 범위에서 크게 나타나는데 이것은 구조물이 가지는 연직방향 주요 진동모드의 진동수를 포함하거나 이와 매우 가깝게 되는 경우가 많다. 따라서 지하철의 운행으로 인한 구조물의 거동은 수평방향보다 연직방향이 더 큰 영향을 미치게 된다.

3. 진동해석 모델의 특성

구조물의 진동은 강성과 질량의 분포에 따라 절대적인 영향을 받는다. 지진에 의한 구조물의 거동해석을 수행할 경우에는 일반적으로 전단건물 모델 또는 집중질량을 사용한 모델에 대하여 해석을 이행하는 경우가 대부분이다. 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.

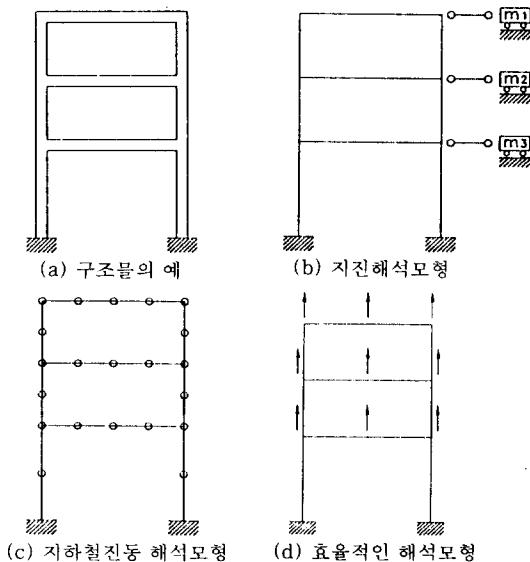


그림 2. 구조물의 진동해석 모형화

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 지하철진동에 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 위해서는 그림 2(d)와 같이 연직방향의 진동을 해석하기 위해서 필요한 자유도만을 남기고 필요치 않은 자유도는 행렬축축(matrix condensation)기법을 사용하여 소거시킨 해석모형을 사용하는 것이 효율적이다.

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 알아보기로 한다.

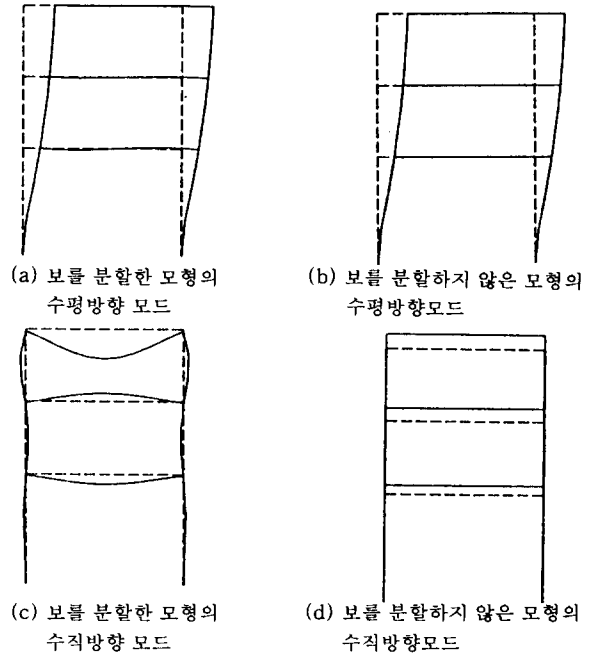


그림 3. 보의 분할에 따른 진동모드 형상

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 연직방향의 진동에 대한 진동주기가 사용된 요소의 수에 큰 관계가 없음을 알 수 있다. 보의 분할이 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 발

생하는 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 통해서 제대로 표현되지 못하지만 보를 여러개로 분할하였을 때에는 잘 나타나고 있다.

표 1. 보의 분할에 따른 구조물의 진동주기
단위(sec)

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

나) 기둥의 분할

구조물의 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 것으로서 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 연직진동주기의 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 연직진동주기 또한 보를 3개 이상의 요소로

표 2. 기둥의 분할에 따른 구조물의 진동주기
단위(sec)

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

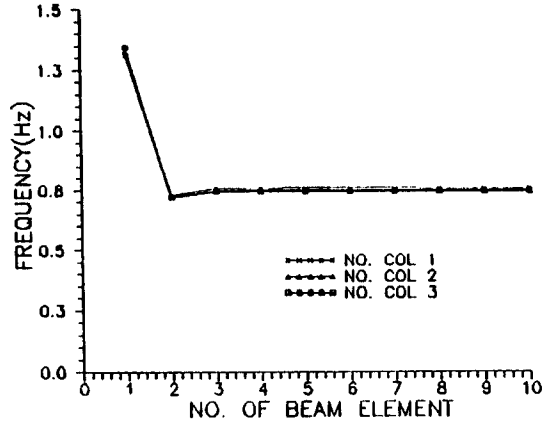


그림 4. 보의 요소수에 따른 진동주기

분할할 경우 그 값에 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

다) 보와 기둥의 분할에 따른 속도응답

앞 절에서는 보와 기둥의 분할에 진동주기의 차이를 비교하였으나 실제적으로 지하철의 운행에 의하여 느끼는 사람의 반응은 구조물의 진동속도에 큰 영향을 받는다.⁽¹⁾ 그림 1에 보인 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 타나낸 것으로서 보의 요소를 하나로 하였을 때와 2개 이상의 요소로 나누었을 경우는 2배 정도의 차이가 있

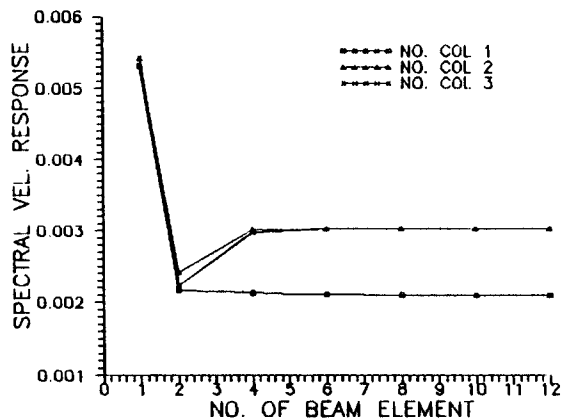


그림 5. 보의 요소수에 따른 속도

음을 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. 구조물의 형태에 따른 거동특성

수평진동에 대한 구조물의 해석에 사용되는 일반적인 모델은 각 층에 집중질량이 작용하는 것으로 가정하여 간단하게 해석하며 특수한 구조물을 제외하고는 대부분 처음의 몇개 모드만을 선택하여 모드중첩법, SRSS, 또는 CQC 등의 방법으로 최대반응을 구한다. 그러나 연직진동은 수평진동보다 고차의 모드에서 그 첫번째 모드가 발생하며 이러한 현상은 대상 구조물의 자유도가 증가할수록 더욱 크게 나타난다. 따라서 지진에 대한 구조물의 해석과 같은 방법으로 단순화된 모델을 사용할 경우에는 특정한 층에서의 반응을 구할 수 없는 단점이 있다. 또 일반적으로 건물의 부분적 진동방지에서 사용하고 있는 부분진동에 대한 해석을 이행할 경우에는 부분진동에 의한 건물전체의 영향을 파악할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 지하철 진동과 같은 연직의 진동에 대한 구조물의 해석을 위하여 전체 구조물의 해석을 위한 모델에 보를 두개의 요소로 나누어 해석을 수행하였다.

연직진동에 의한 구조물의 거동특성은 지진과 같은 수평하중에 의한 진동과 달리 구조물의 높이에 따라 거동특성이 다르게 나타난다. 또한 경간의 수 및 인접한 보의 길이에 대한 비례에 따라 그 영향이 다르게 발생하므로 각각의 경우에 따른 구조물의 거동을 조사하였다. 저층 건물의 경우 앞서 기술한 바와 같이 상용프로그램을 사용하여도 해석에 별 어려움이 없으므로 본 연구에서는 중층 이상의 구조물에 대한 거동특성을 건물의 높이, 경간수 및 인접한 경간과의 비가 현저한 경우로 분류하여 조사하였다.

본 조사에서 사용된 구조물은 5층, 10층 및 20층의 철근콘크리트조이며 보와 기둥은 주어진 하중상태에 적합한 실질적인 크기를 사용하였다. 또한 보에서의 하중은 일반적인 사무실건물용 고정하

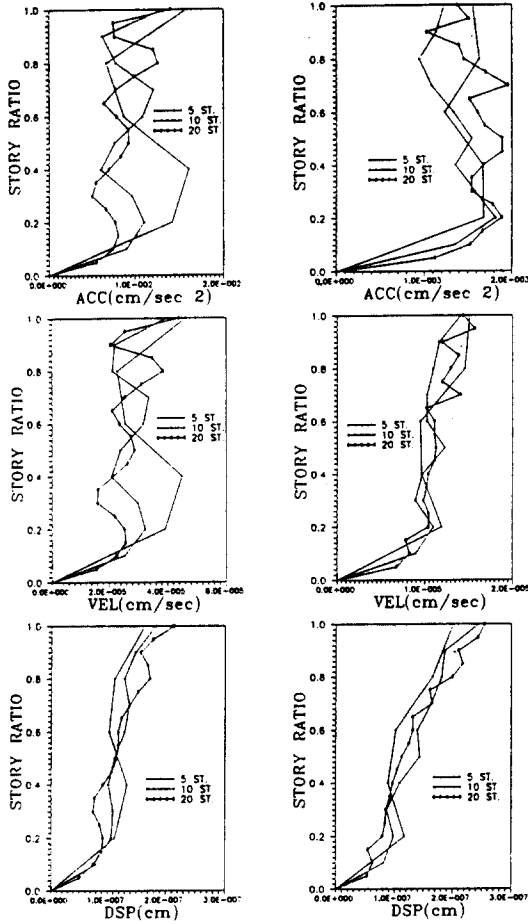
중을 사용하였으며 경간의 폭은 철근콘크리트조 건물에서 많이 사용되고 있는 6m로 하였다. 건물의 층고는 1층만 5m를 사용하였으며 1층을 제외한 층은 3.3m를 사용하였다.

5.1 구조물의 높이에 따른 특성

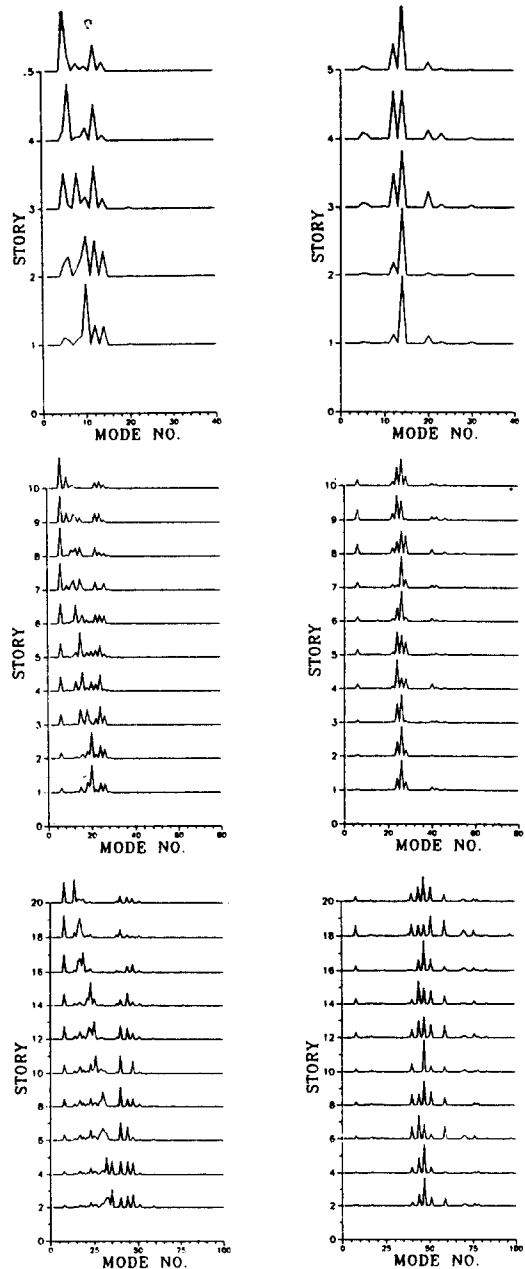
구조물의 층수가 증가할수록 전체적인 건물의 중량은 자연히 증가하게 된다. 또한 거물이 고층으로 갈수록 전체적인 자유도의 수가 증가하므로 건물의 거동에 영향을 미치는 모드의 수도 증가하게 된다. 따라서 고층건물일수록 상대적으로 저층 건물에 비하여 고차모드의 영향이 커짐을 쉽게 짐작할 수 있다. 각각의 경우에 80%, 90%, 95% 이상 및 100%의 연직모드를 포함하기 위한 모드수를 모드참여계수를 기준으로 살펴보면 표 3에서 보는 바와 같이 5층 건물의 경우 초기 12개의 모드 중 괄호안에 명시된 6개의 연직모드가 전체 연직모드의 90% 이상을 차지하는 반면 10층과 20층의 경우 각각 초기 22개 및 40개의 모드중 11개 및 21개의 모드가 전체 연직모드의 80% 이상을 차지한다. 이와 같이 고층으로 갈수록 전체 연직모드를 포함하기 위해서는 보다 많은 모드를 포함시켜야 함을 알 수 있다.

건물의 층수가 증가할수록 첫번째 연직방향의 모드는 상대적으로 고차에서 발생하며 고유주기가 훨씬 길어진다. 첫번째 연직모드는 5층, 10층, 20층의 경우 각각 5, 6, 8번째에서 발생하며 그 주기는 0.0907초, 0.1169초 및 0.1479초로 나타났다. 또한 첫번째 연직모드에 대한 고유진동수는 11.0Hz, 8.6Hz 및 6.8Hz로써 지하철의 운행에 의한 반응스펙트럼상에서의 최대치가 발생하는 50-100 Hz의 범위보다 훨씬 낮게 나타났다.

본 연구에서 사용된 건물의 감쇄비는 구조물의 지진해석에서 일반적으로 사용되고 있는 5%를 건물 전체에 적용하였다. 그림 6은 전체 층에 대한 보 중앙 및 보-기둥 접합부에서의 가속도, 속도 및 변위를 나타낸 것으로써 전체적인 경향은 거의 비슷하나 저층의 경우 초기 몇개의 모드만 영향을 미치므로 저층부에서 고층부로 향할수록 곡선의 변화가 심하지 않으나 고층 건물일수록 전체적인 곡선이 많이 변하는 것을 알 수 있다. 이는 고층의



은 50-100Hz 사이에서 최대값을 가지므로 이 구간에서 발생하는 모드의 참여계수가 구조물의 연직 방향 주기와 일치하면 상대적으로 큰 반응을 가짐에 기인한 것으로 판단된다.



구조물일수록 고차모드의 참여계수가 저층의 구조물에 비하여 상대적으로 많은 것이 직접적인 이유일 것으로 판단된다. 또한 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 저층건물 보-기둥 접합부에서의 가속도와 속도는 하부에서 큰 값을 가짐을 주목하여야 한다.

건물의 최대반응은 가속도, 속도, 변위에 따라 최대반응의 발생위치가 다르게 나타났으나 가속도와 속도는 상부층의 보-기둥 접합부에서 최대값을 갖으며 변위의 경우에는 최상층의 보 중앙에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 저층에서의 반응이 더 클것으로 생각되는 바와 다른 것으로 지하철의 운행에 의한 반응스펙트럼

그림 7은 모드참여계수에 지하철진동에 의한 반응스펙트럼을 곱하여 각 층에서의 속도에 대한 모드분포를 보여준 것이다. 그림 7의 왼편에 나타난 바와 같이 보에서의 반응을 보면 건물 하부에서는 고차모드의 영향이 크나 상부로 올라갈수록 저차모드의 영향이 더 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 오른편의 보-기둥 접합부에서의 속도는 전층에 걸쳐 같은 모드 몇몇이 전체적인 속도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 보-기둥 접합부는 보 중앙보다 더 높은 모드에서 반응하며 건물의 층수가 높아질수록 분산된 고차모드의 영향이 점점 커지는 현상을 보였다.

표 3. 층수별 모드참여계수에 의한 모드의 수

	5 층	10 층	20 층
80 %	12 (6)	15 (6)	21 (7)
90 %	12 (6)	22 (11)	20 (21)
95 %	14 (7)	23 (12)	44 (22)
100 %	30 (10)	60 (20)	118 (42)

5.2 구조물의 경간 수에 따른 특성

지진과 같은 수평방향의 하중에 의한 구조물의 반응은 경간의 수가 증가할수록 횡방향의 강성이 증가하므로 이에 따른 반응의 크기가 더욱 감소하리라는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 그러나 본 조사는 연직방향의 하중에 의한 반응을 조사하는 것이므로 경간의 수가 증가한다고 하여도 수평방향에서의 반응과는 다른 성질을 가질 것으로 예측되어 5.1절에서 사용한 10층의 철근콘크리트 구조물에 대하여 경간의 수만을 증가시킴으로써 그 반응을 조사하여 보았다.

건물의 층수를 높인 결과와는 달리 건물의 경간 수는 증가하여도 첫번째 연직모드가 발생하는 모드는 변하지 않고 6번째 모드에서 발생하였다. 첫번째 연직모드에 대한 고유진동수는 8.56Hz에서 6.83Hz로 경간의 수가 5배로 증가하여도 20% 밖에 차이가 없으나 경간의 수가 증가할수록 첫번째 연직모드에 대한 고유진동수는 상대적으로 적은 차이를 보였다. 표 4에 나타난 바와 같이 경간의 수가 증가할수록 자유도의 증가로 인한 전체적인 연직모드의 분산현상은 층수의 증가때와 비슷한 현상을 보였다.

경간수에 따른 보-기둥 접합부에서의 각 층별 최대반응은 그림 8(b)에 나타난 바와 같이 경간의 수가 변하여도 최대반응에는 변화가 거의 없으므로 하나의 선으로 표시하여도 무리가 없을 것이다. 보에서의 최대반응도 약간의 차이는 있으나 전반적인 경향이 비슷하므로 대표적인 식으로 유도될 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그림 8의 (a)와 (b)를 비교해보면 가속도와 속도는 보-기둥 접합부에서의 최대반응이 보에서의 최대

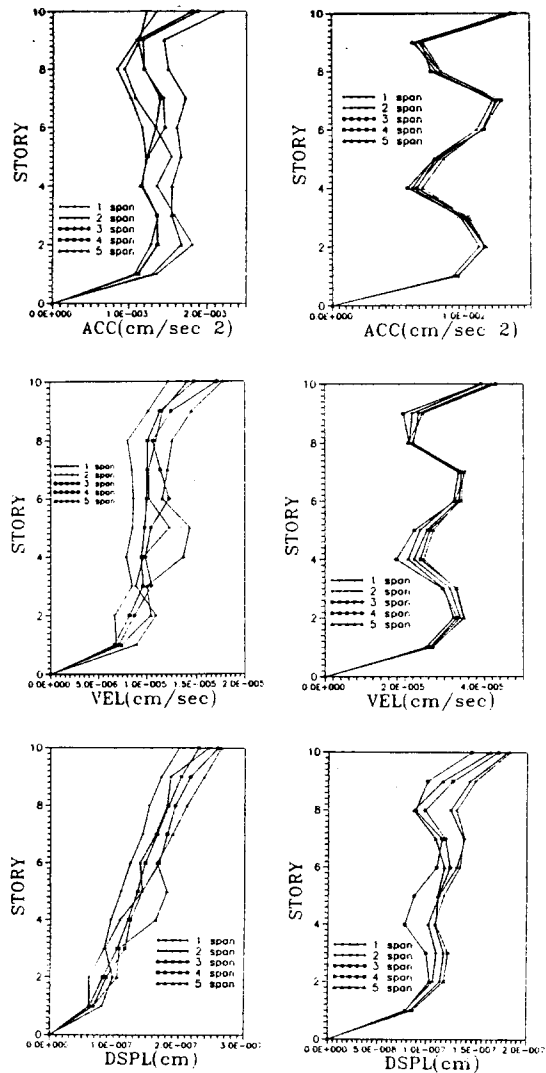


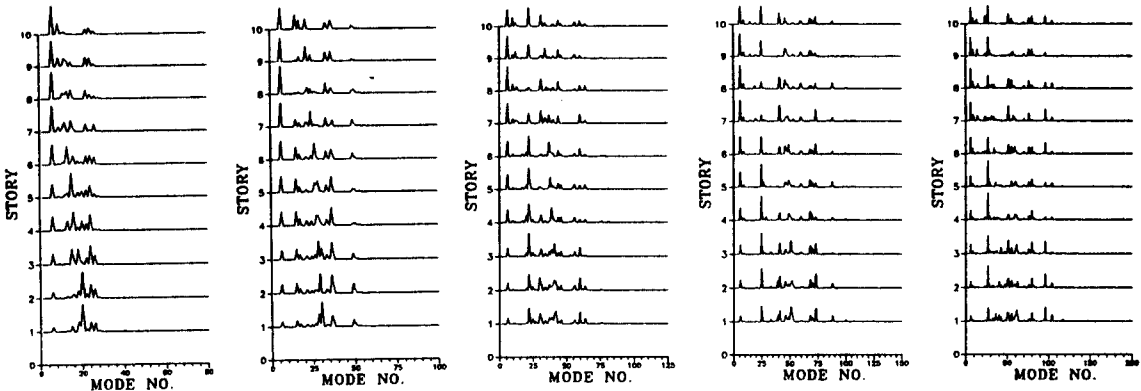
표 4. 경간수별 모드참여계수에 의한 연직모드의 수

경간수	1	2	3	4	5
80 %	15 (6)	15 (2)	22 (8)	21 (5)	27 (10)
90 %	22 (11)	28 (9)	31 (13)	41 (14)	47 (20)
95 %	24 (12)	36 (14)	55 (28)	68 (30)	80 (41)
100 %	60 (20)	82 (30)	140 (46)	180 (52)	220 (63)

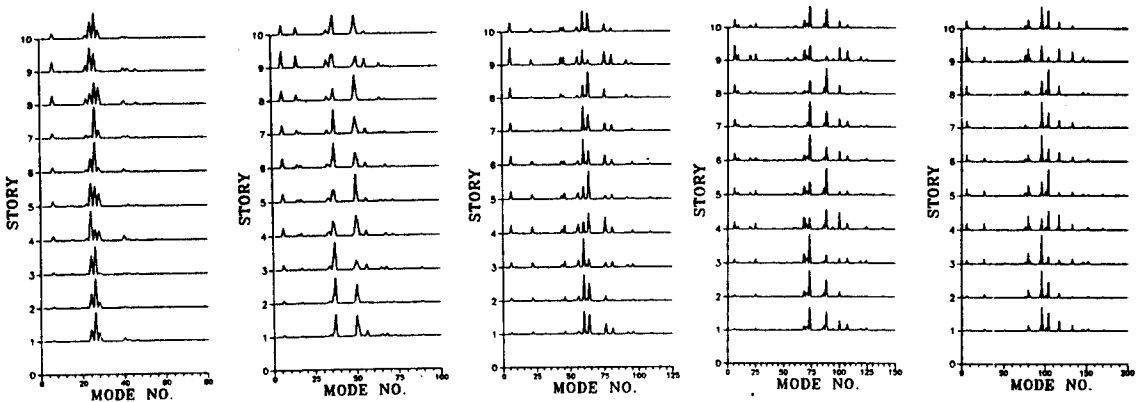
반응보다 큰 반면 변위의 크기는 보에서의 반응이 더 큰 것을 알 수 있다. 그림 8(a)에서 발견된 한 가지 재미있는 사항은 보에서의 최대반응이 경간의 수가 홀수일 때와 짝수일 때에 따라 다르게 발생한다는 사실이다. 그림에서 보는 바와 같이 경간의 수가 홀수일 때의 반응은 짝수일 때의 반응보다 크게 나타난다. 이러한 현상은 보가 짝수인 경우 대칭의 거동으로 인하여 전체적인 에너지의 상승효과가 있으나 홀수의 경우 중앙의 보는 다른 두개의 보와 다르게 거동함으로써 에너지를 감소

시키는 영향으로 인한 것으로 판단된다.

그림 9는 경간의 수에 따른 각 층에서의 속도에 대한 모드분포를 나타낸 것으로써 건물의 경간수가 증가할수록 고차모드에 의한 반응이 증가하는 현상을 뚜렷하게 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 8에서도 알 수 있다. 경간의 수가 적을수록 보에서의 반응곡선은 경간의 수가 많은 골조에 비해 부드러운 곡선을 이룸으로써 고차모드에 의한 영향이 상대적으로 적음이 그 원인으로 판단된다. 층수별 비교에서와 같이 보-기둥 접합점에서의 속도는 보 중앙에서의 속도보다 고주파성분에 대한 반응이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 건물의 상부로 갈수록 저주파성분의 영향이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났으며 경간의 수가 증가하여도 특정한 몇개의 모드가 전체적인 반응의 대부분을 차지하는 것을 알 수 있다.



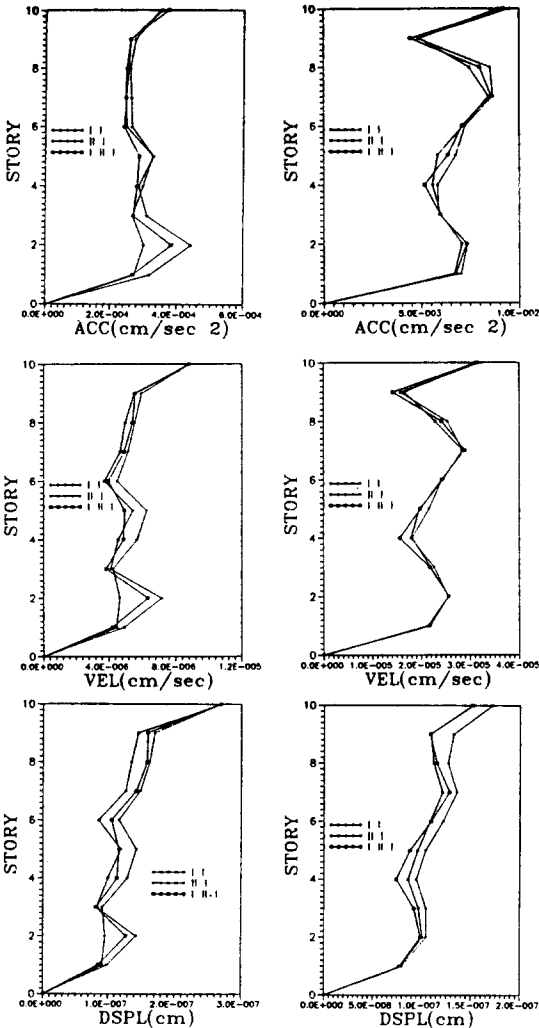
(a) 각종 보의 속도에 대한 모드별 참여도



(b) 각종 보-기둥 접합부의 속도에 대한 모드별 참여도

5.3 인접경간과의 차이에 따른 특성

본 조사에서는 5.2절에서 사용된 10층 구조물에 대하여 1경간 구조물의 경간을 12m로 증가시키고 2경간의 구조물은 6m와 12m의 경간을 사용하였다. 3경간의 구조물은 6m 경간이 가운데에 있고 양쪽에 12m의 경간이 있는 구조물을 그 대상으로 선택하였다. 경간의 차이가 2배인 10층의 구조물을 비교해 볼 때 보-기둥 접합부에서의 최대반응은 거의 차이가 없으나 보에서의 반응은 많은 차이가 있었다.



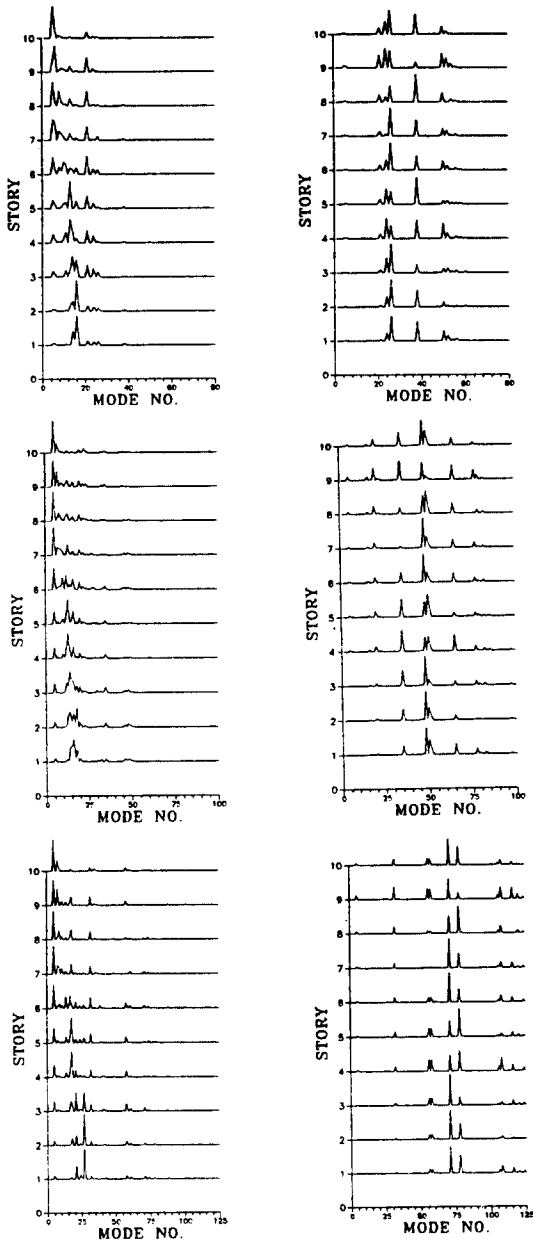
경간이 넓은 구조물의 가속도와 속도는 경간이 좁은 건물에 비하여 최대반응값이 적으나 변위는 상대적으로 더 크게 나타났다. 이는 보의 상하간 거동이 경간이 길수록 중앙에서의 변위가 더 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 그림 10에 보인 바와 같이 경간이 넓은 구조물의 경우 인접 경간의 폭에 관계없이 보 또는 보-기둥 접합부 어디에서나 거의 하나의 곡선으로 표현할 수 있을 정도로 비슷한 반응을 가지는 것을 알 수 있다. 경간이 넓은 구조물의 경우 지진과 같은 수평하중에 의한 구조물의 반응에서 나타나는 최상층에서의 위핑(whipping)현상이 발생하는 것도 특이하다고 할 수 있다. 그림 10(a)에서 알 수 있듯이 인접 경간과의 비가 큰 건물의 경우 2층에서의 최대속도 및 가속도가 특히 크게 발생하는 것도 주목해야 할 현상이다.

경간이 넓은 건물의 경우 경간이 좁은 구조물에 비하여 속도에 영향을 주는 모드의 수가 훨씬 적은 것으로 나타났다. 그림 11에 보인 바와 같이 하나 혹은 두개의 특별한 모드가 전체적인 속도에 큰 영향을 미치고 있으며 이러한 현상은 경간의 수가 많을수록 더욱 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 보-기둥 접합부에서의 반응속도는 경간이 좁은 구조물에 비하여 전체적으로 고차모드에 의한 효과가 더 크게 나타났으나 보에서의 반응속도는 고차모드에 의한 참여계수가 줄면서 저차모드에 의한 효과가 더욱 커진 것을 알 수 있다.

6. 결론 및 추후연구과제

지하철의 운행에 의한 건물의 진동문제는 증가하는 지하철의 노선과 함께 계속적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 이러한 연구의 시작단계로서 간단한 예제구조물의 진동해석을 통하여 지하철 진동이 구조물에 미치는 영향을 분석하기 위한 해석모델 및 지하철진동에 의한 건물의 진동특성을 조사한 결과 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 모형화될

필요가 있다.

(3) 연직방향의 진동을 조사하기 위한 구조해석의 모델에서 기둥의 요소분할은 건물의 주기에 별 영향을 미치지 않는다.

(4) 연직진동에 대한 구조물의 반응은 자유도의 수가 증가할수록 전체적인 모드가 분산되므로 고차모드의 영향이 상대적으로 크게 나타난다.

(5) 속도와 가속도는 보-기둥 접합부에서 최대 반응이 나타나지만 변위의 경우에는 보의 중앙에서 최대반응을 나타내므로 연직방향의 진동에 의한 구조물의 해석 시에 보요소는 항상 2개 이상의 요소로 분리시켜야 실제값에 더욱 가까운 값을 얻을 수 있다.

(6) 보-기둥 접합부는 고주파성분이 지배적으로 반응하며 보 하부에서의 반응은 저주파성분이 지배적으로 작용한다.

(7) 보에서의 반응은 건물하부에서는 고차모드가 많은 영향을 미치나 상층부로 이동할수록 저차모드의 영향이 점점 커지므로 최상층에서 최대값을 가진다.

(8) 경간의 수가 홀수 또는 짝수에 따라 약간의 차이는 있으나 전체적인 건물의 경간 수가 증가하여도 건물의 반응에는 거의 차이가 없으므로 연직 반응에 대한 다경간의 건물은 하나의 경간으로 치환하여 해석하여도 무방할 것으로 판단된다.

(9) 구조물의 자유도수가 증가하여도 건물의 반응에 대한 영향은 특정한 몇몇개의 모드에 의한 활동이 지배적으로 작용한다.

(10) 인접한 경간과의 비가 클 경우에는 경간의 폭에 따라 구조물을 분리하여 해석하여도 그 결과에는 큰 차이가 없다.

지하철의 운행에 의한 구조물의 진동효과를 보다 효과적으로 해석하기 위해서는 구조물의 연직방향 거동에 대한 특성에 관하여 보다 다양하고 광범위하게 연구하여야 할 것으로 생각된다. 이러한 연구결과를 바탕으로 현실에 근접할 수 있는 단순해석모델을 개발할 수 있다면 현재로서는 거의 불가능한 해석상의 문제점들을 쉽게 해결할 수 있을 것이며, 지하철진동이 구조물에 미치는 영향을 효과적으로 분석하기 위해서는 계속적으로 다음과 같은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다

다.

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

감사의 글

본 논문은 건설부의 '94 건설기술연구개발사업 지원대상 과제 지원비에 의하여 연구되었으므로 이에 감사를 드립니다.

参 考 文 献

- 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 Newmanf Inc., Control of Wheel/Rail Noise and Vibration, National Technical Information Service, 1983.
- 5. 김희철, 이동근, 민경원, "지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석 모델", 한국전산구조공학회 가을 학술발표집, 제6권 제2집, 1993. 10.
- 6. 민경원, 이동근, 김희철, "지하철운행에 의한 구조물진동의 해석기법", 대한건축학회 가을 학술발표집, 1993. 10.
- 7. 김희철, 이동근, 정건영, "지하철 진동에 의한 구조물의 거동특성", 한국전산구조공학회 봄 학술발표집, 제7권 제1집, 1994. 4.

(접수일자 : 1994. 4. 19)