

## 지하철 진동에 의한 구조물의 거동특성 CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL RESPONSE INDUCED BY SUBWAY OPERATION

김 희철<sup>1)</sup> 이 동근<sup>2)</sup> 정 건영<sup>3)</sup>  
Kim, Heecheul Lee, Dong-Guen Jeong, Keon-Yeong

### ABSTRACT

Noise and vibration induced by subway operation are one of the major factor which annoy residents living near railway tracks. While lateral vibration is a major factor in analyzing seismic effect of the structure, vertical vibration became a major concern in considering the subway induced vibration because relatively smaller energy affects only nearby areas than that of earthquake.

A characteristics of structural response induced by subway operation has been studied with different total height of the building and different number of spans. Also the frame with different span length has been studied. As the numbers of degrees freedom increase the higher mode effect on vertical vibration increases. Accordingly, the total affecting vertical modes are distributive as the numbers of degrees of freedom increase. Though the total degree of freedom increases, only some of the dominant modes actively affects to the vertical response of the structure. A frame with the number of equal spans could be analyzed by replacing the whole frame as one when we want to predict the response of the vertical vibration. Also it has been found that the seperate frame analysis will give little different result when adjacent span is relatively longer than others.

### 1. 서론

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 지가상승으로 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 교통 체증에도 영향을 받지않고 정해진 시간계획에 따라 운행되는 장점으로 인하여 대도시의 서민들에게는 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.

지진으로 인한 진동의 경우에는 구조물에 과다한 응력이 작용함으로써 구조부재에 손상을 입히나 지하철의 운행에 의한 진동의 경우에는 구조물의 피해보다 건물의 사용자들에게 불편감을 조성함으로써 사용성에 큰 영향을 미치게 된다. 지하철의 운행에 따른 소음과 진동의 전달은 지반 위에 놓인 구조물에 영향을 미치게 되며 이러한 영향은 컴퓨터와 같이 진동에 민감한 기계를 사

- 1) 삼성건설 기술연구소 수석연구원  
2) 한국과학기술원 토목공학과 부교수  
3) 삼성건설 기술연구소 주임연구원

용하는 사무실이나 병원의 수술실은 물론 경우에 따라서는 지하철의 운행로선 주변에 거주하는 주민들에게 심각한 불편을 초래하기도 한다. 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 어느정도 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 일반적으로 2차원의 구조해석에서 사용되고 있는 모델을 변형시켜 건물의 높이, 경간수 및 인근경간과의 비에 따른 건물의 연직방향 거동에 대한 특성을 조사하였다.

## 2. 구조요소의 분할

일반적인 구조물에 대한 연직방향의 진동수는 수평방향의 진동수에 비해 훨씬 그 값이 높게 나타난다. 또한 지반을 통하여 전달되는 지하철진동의 주된 진동수 성분은 50 - 100Hz 정도에서 최대값을 가지는데 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.

구조물의 진동은 강성과 질량의 분포에 따라 절대적인 영향을 받는다. 지진에 의한 구조물의 거동해석을 수행할 경우에는 일반적으로 전단건물모델 또는 집중질량을 사용한 모델에 대하여 해석을 이행하는 경우가 대부분이다. 이와 같은 해석모델을 사용하면 구조물의 수평방향 거동을 분석하는데는 별 문제가 없다. 그러나 이러한 모델은 지하철진동과 같은 연직방향 진동에 의한 구조물의 영향을 분석하기에는 문제점을 가지고 있다. 구조물이 연직방향으로 진동할 때 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. 구조물의 연직방향 진동은 보의 휨변형에 의한 진동의 영향을 크게 받게 되므로 이러한 해석모델은 지하철진동에 의한 구조물의 해석에는 적합하지 않음을 알 수 있다.

구조물의 연직방향 진동을 해석하기 위해서 하나의 구조요소를 여러개의 유한요소로 분할하는 방법을 사용하여 모델화하는 경우에 몇 개의 유한요소를 사용하는 것이 가장 효율적인 방법인지를 결정하여야 한다. 실제 구조물은 대개가 3차원으로 구성되어 있으나 간단한 2차원의 구조물을 사용하여 요소의 분할이 진동해석결과에 미치는 영향을 분석한 결과 보의 경우 두개, 기둥의 경우 하나의 요소로 해석하여도 더 많은 요소로 분할한 경우와 진동주기상 거의 같은 결과를 얻을 수 있는 것으로 평가되었다.<sup>1)</sup>

## 3. 구조물의 형태에 따른 거동특성

연직방향의 진동을 조사하기 위해서는 보의 굽부진동을 제대로 표현할 수 있는 해석모델을 사용할 필요가 있다. 그러나 이러한 모델을 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 절점으로 인하여 현실적으로 사용하기에는 많은 어려움이 따른다.

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 CQC등의 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 진

등과 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 중층이상의 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 고정하중을 사용하였으며 경간의 폭은 철근콘크리트조 건물에서 많이 사용되고 6m 로 하였다. 건물의 층고는 1층만 5m 를 사용하였으며 1층을 제외한 층은 3.3m 를 사용하였다.

### 3.1 구조물의 높이에 따른 특성

구조물의 층수가 증가할수록 전체적인 건물의 중량은 자연히 증가하게 된다. 또한 건물이 고층으로 갈수록 전체적인 자유도의 수가 증가하므로 건물의 거동에 영향을 미치는 모드의 수도 증가하게 된다. 따라서 고층건물이수록 상대적으로 저층건물에 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 1에서 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 - 100Hz의 범위보다 훨씬 낮게 나타났다.

본 연구에서 사용된 건물의 감쇄비는 구조물의 지진해석에서 일반적으로 사용되고 있는 5%를 건물 전체에 적용하였다. 그림 1은 전체 층에 대한 보-기둥 접합부와 보 중앙에서의 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 구조물일수록 고차모드의 참여계수가 저층의 구조물에 비하여 상대적으로 많은 것이 직접적인 이유일 것으로 판단된다. 또한 그림 1(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 갖고 변위의 경우에는 최상층의 보 중앙에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 저층에서의 반응이 더 클것으로 생각되는 바와 다른 것으로 지하철의 운행에 의한 반응스펙트럼은 50 - 100Hz 사이에서 최대값을 가지므로 이 구간에서 발생하는 모드의 참여계수가 구조물의 연직방향 주기와 일치하면 상대적으로 큰 반응을 가짐에 기인한 것으로 판단된다.

그림 2는 모드참여계수에 지하철진동에 의한 반응스펙트럼을 곱하여 각 층에서의 속도에 대한 모드분포를 보여준 것이다. 그림 2의 왼편에 나타난 바와 같이 보에서의 반응을 보면 건물 하부

표 1. 모드참여계수에 의한 층별 모드의 수(연직모드의 수)

	5 층	10 층	20 층
80 %	12(6)	15(6)	21(7)
90 %	12(6)	22(11)	40(21)
95 %	14(7)	24(12)	44(22)
100%	30(10)	60(20)	118(42)

에서는 고차모드의 영향이 크나 상부로 올라갈수록 저차모드의 영향이 더 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 오른쪽의 보-기둥 접합부에서의 속도는 전층에 걸쳐 같은 모드 몇몇이 전체적인 속도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 보-기둥 접합부는 보중앙보다 더 높은 모드에서 반응하며 건물의 층수가 높아질수록 분산된 고차모드의 영향이 점점 커지는 현상을 보였다.

### 3.2 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 3.1절에서 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 2에 나타난 바와 같이 경간의 수가 증가할수록 자유도의 증가로 인한 전체적인 연직모드의 분산현상은 층수의 증가 때와 비슷한 현상을 보였다.

경간수에 따른 보-기둥 접합부에서의 각 층별 최대반응은 그림 3(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 3의 (a)와 (b)를 비교해보면 가속도와 속도는 보-기둥 접합부에서의 최대반응이 보에서의 최대반응보다 큰 반면 변위의 크기는 보에서의 반응이 더 큰 것을 알 수 있다. 그림 3(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 감소시키는 영향으로 인한 것으로 판단된다.

그림 4는 경간의 수에 따른 각 층에서의 속도에 대한 모드분포를 나타낸 것으로서 건물의 경간 수가 증가할수록 고차모드에 의한 반응이 증가하는 현상을 뚜렷하게 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 3에서도 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.

표 2. 모드참여계수에 의한 경간 수별 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)

### 3.3 인접경간과의 차이에 따른 특성

본 조사에서는 3.2절에서 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 변위

는 상대적으로 더 크게 나타났다. 이는 보의 상하간 거동이 경간이 길수록 중앙에서의 변위가 변위가 더 큰 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 그림 5에 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 5(a)에서 알 수 있듯이 인접경간과의 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 6에 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.

#### 4. 결론 및 추후연구과제

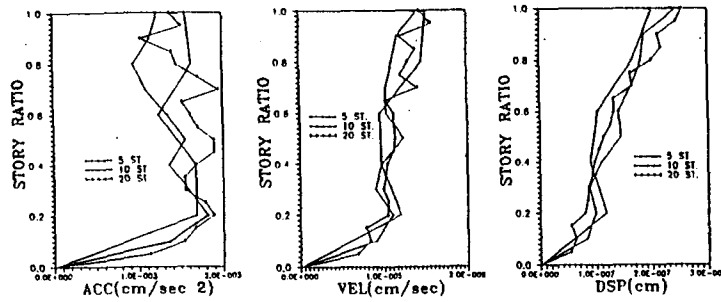
지하철의 운행에 의한 건물의 진동문제는 증가하는 지하철의 노선과 함께 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 이러한 연구의 시작단계로서 지하철진동에 의한 건물의 진동특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 연직진동에 대한 구조물의 반응은 자유도의 수가 증가할수록 전체적인 모드가 분산되므로 고차모드의 영향이 상대적으로 크게 나타난다.
- (2) 속도와 가속도는 보-기둥 접합부에서 최대반응이 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.
- (3) 보-기둥 접합부는 고주파성분이 지배적으로 반응하며 보 하부에서의 반응은 저주파성분이 지배적으로 작용한다.
- (4) 보에서의 반응은 건물하부에서는 고차모드가 많은 영향을 미치나 상층부로 이동할수록 저차모드의 영향이 점점 커지므로 최상층에서 최대값을 가진다.
- (5) 경간의 수가 홀수 또는 짝수에 따라 약간의 차이는 있으나 전체적인 건물의 경간 수가 증가하여도 건물의 반응에는 거의 차이가 없으므로 연직반응에 대한 다경간의 건물은 하나의 경간으로 치환하여 해석하여도 무방할 것으로 판단된다.
- (6) 구조물의 자유도수가 증가하여도 건물의 반응에 대한 영향은 특정한 몇몇개의 모드에 의한 활동이 지배적으로 작용한다.
- (7) 인접한 경간과의 비가 클 경우에는 경간의 폭에 따라 구조물을 분리하여 해석하여도 그 결과에는 큰 차이가 없다.

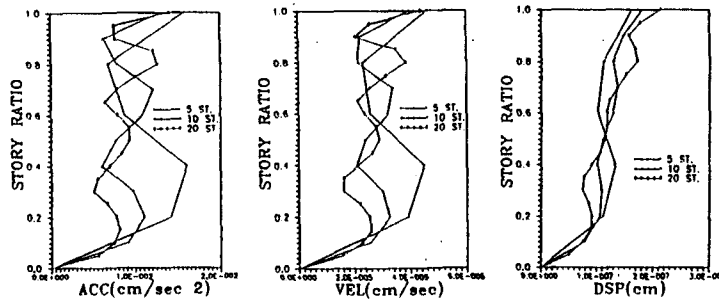
지하철의 운행에 의한 구조물의 진동효과를 보다 효과적으로 해석하기 위해서는 구조물의 연직 방향 거동에 대한 특성에 관하여 보다 다양하고 광범위하게 연구하여야 할 것으로 생각된다. 이러한 연구결과를 바탕으로 현실에 근접할 수 있는 단순해석모델을 개발할 수 있다면 현재로서는 거의 불가능한 해석상의 문제점들을 쉽게 해결할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) 김 희철, 이 동근, 민 경원, "지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석 모델", 한국전산구조 공학회 가을학술발표집, 제 6권 제 2집, 1993
- (2) Wilson, Ibrig and Associates Inc., Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, National Technical Information Service, 1982
- (3) 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
- (4) W. Weaver, P. R. Johnston, Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice Hall Inc., 1987
- (5) B. Bernek and Newman Inc., Control of Wheel/Rail Noise and Vibration, National Technical Information Service, 1983

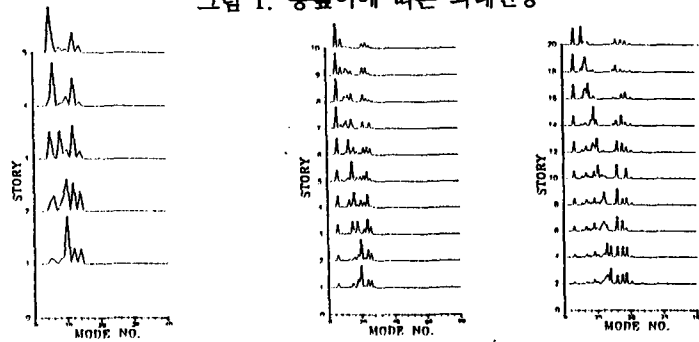


(a) 층높이에 따른 보에서의 최대반응

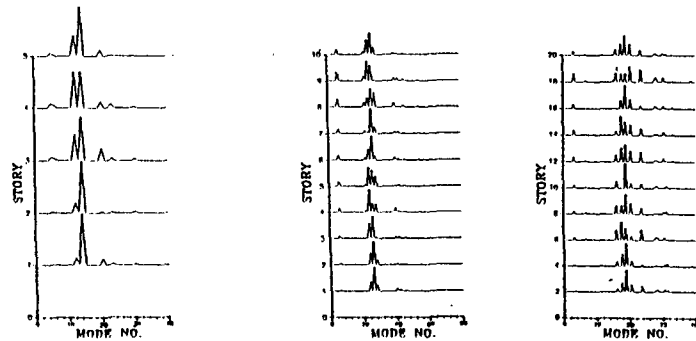


(b) 층높이에 따른 보-기둥 접합부에서의 최대반응

그림 1. 층높이에 따른 최대반응

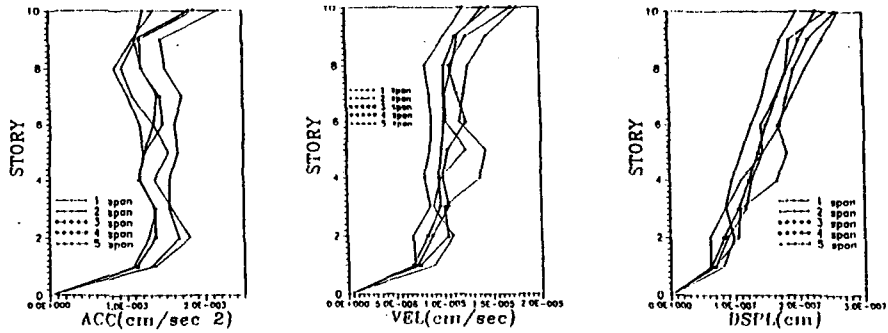


(a) 각층 보의 속도에 대한 모드별 참여도

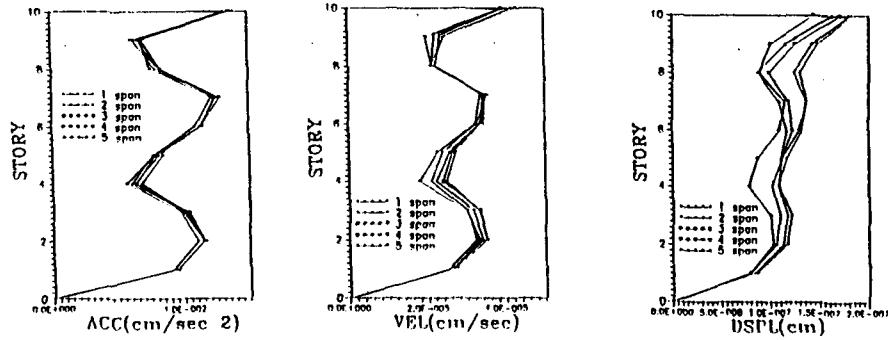


(b) 각층 보-기둥 접합부의 속도에 대한 모드별 참여도

그림 2. 층수별 각 층의 속도에 대한 모드별 참여도

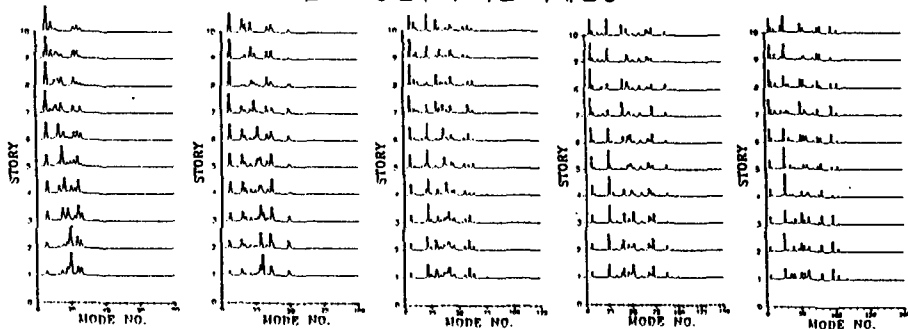


(a) 경간수별 보에서의 최대반응

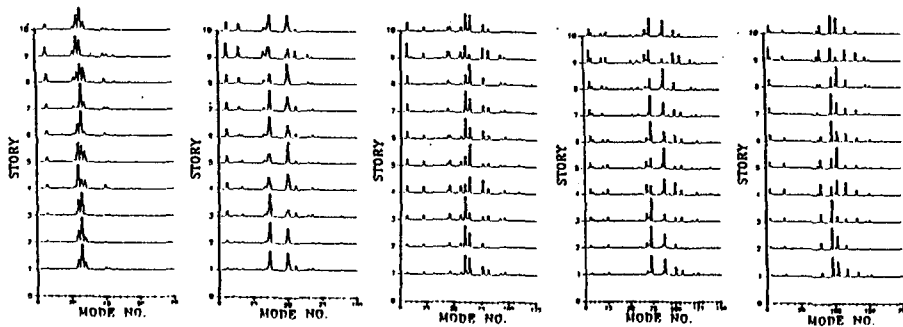


(b) 경간수별 보-기둥 접합부에서의 최대반응

그림 3. 경간수에 따른 최대반응

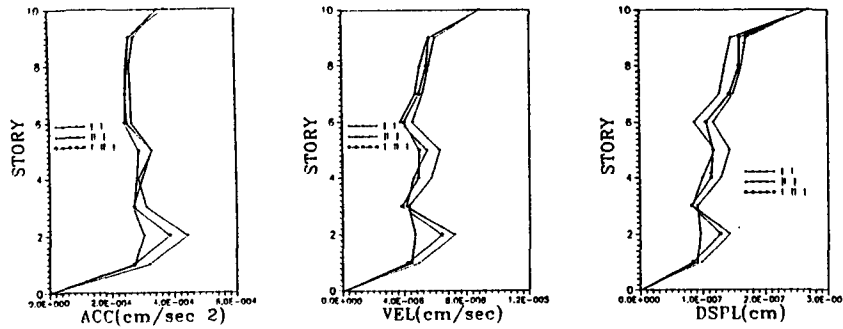


(a) 각층 보의 속도에 대한 모드별 참여도

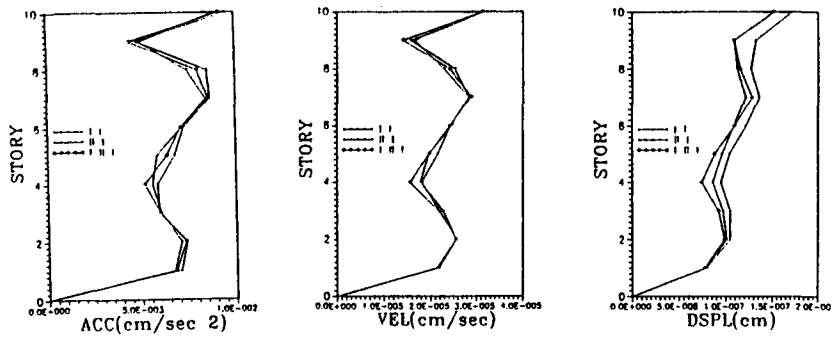


(b) 각층 보-기둥 접합부의 속도에 대한 모드별 참여도

그림 4. 경간수별 각 층의 속도에 대한 모드별 참여도

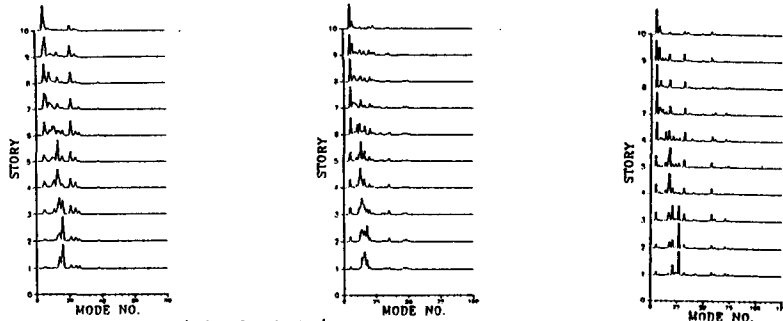


(a) 긴 경간 보에서의 최대반응

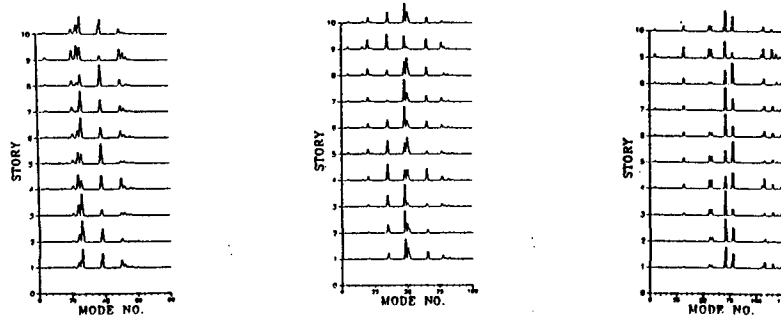


(b) 긴 경간 보-기둥 접합부에서의 최대반응

그림 5. 경간이 긴 골조의 최대반응



(a) 긴 경간 보의 속도에 대한 모드별 참여도



(b) 긴 경간 보-기둥 접합부의 속도에 대한 모드별 참여도

그림 6. 경간이 긴 골조의 속도에 대한 모드별 참여도