

철도인접지역 건물에 대한 진동전달율의 영향성 평가

Transmissibility Effect Evaluation of Buildings Near Railroad Areas

김 지 현*
Kim, Ji-Hyeon

윤 성 원**
Yoon, Sung-Won

요 약

건물설계단계에서 신축예정건물의 열차진동영향평가를 위하여 국내의 4개의 열차진동 가속도응답 계측치와 진동전달율(Transmissibility)값을 이용한 이론치를 비교하여 TR값의 적용성을 제시하였다. 이 TR 방법을 통하여 철도인접지역 위치한 신축 예정지반을 선정하고 지반진동 계측을 실시하였다. 계측한 지반의 가진진동수와 수직가속도응답과 신축 예정건물의 바닥슬래브를 MIDAS로 해석한 고유진동수를 통해 진동전달율을 산정한 후 신축건물의 진동예측을 실시하였다. TR을 적용한 가속도응답 예측치를 열차진동 가속도응답 계측치와 비교한 결과 3.61% ~ 37.1% 오차범위에서 있는 것을 확인하였다. 또한 KTX, 경의선, 시멘트 열차 주행 시 지반의 가진진동수는 7.19~10.61Hz 사이에 선명한 피크를 확인 할 수 있다.

Abstract

For train vibration influence assessment of newly constructed buildings in building design levels, 4 train measured vibration acceleration responses were used to compare with TR theory values and suitability of TR values was proposed. Through this TR method, construction planned grounds located near railroad areas were selected and ground vibration measurement was conducted. Through natural frequency by MIDAS, vertical acceleration response, and ground frequency from measured vibration response, TR was calculated and vibration prediction was conducted. As a result of comparing acceleration response estimate applying TR and measured value of train vibration acceleration response, it was found that it was in 3.61% ~ 37.1% of margin of error. Clear peak of 7.19~10.61Hz in KTX, Gyeonguisun, and cement train were confirmed.

키워드 : 교통하중, 진동전달, 수직진동, 진동전달율

Keywords : Traffic Load, Vibration Transfer, Vertical Vibration, Transmissibility

1. 서 론

전 세계적으로 대도시인 경우 인구 및 교통량이 증가하고 있다. 또한 지역의 균형개발 및 도시 교통의 혼잡을 막기 위해서 철도, 지하철 등 교통망이 확충되고 주변에 건물이 집중적으로 지어지고 있다. 이러한 지역에서 진동발생이 증가하고, 열차진동이 지반을 통해 철도변 주민과 인접건물에 전달되며 거주자의 사용성 문제가 발생하고 있다.

철도진동으로 인한 인접건물의 진동영향에 대한 연구로서 1993년에 신중서⁴⁾는 고속철도에서의 진동 대책으로 진동원과 전파경로 및 수진부에서의 방진 방법을 제안하였다. 1996년 허영⁵⁾은 지하철운행에 따른 진동의 예측식을 제안하고 실측값과 비교하여 예측식을 적용하기 위한 사용성을 검증하였다. 1998년 전호민⁶⁾은 철근콘크리트 건물의 각 층에 대한 수직진동레벨을 건물하부 지반에 입력되는 수직진동레벨에 대한 비로 나타내는 증폭계수를 산정하여 향후 건물에 대한 수직진동을 예측할 수 있는 방법을 연구하였다. 2000년 홍갑표의 3인⁷⁾은 지반-구조물 상호작용을 고려해 교통하중이 가해지는 건축물의 진동예측에 관한 연구를 수행하였다. 2001년 김

* 서울과학기술대학교 대학원 건축학과 석사과정

** 교신저자, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
Tel: 02-970-6587 Fax:02-979-6587
E-mail : swyoon@seoultech.ac.kr

문성⁸⁾은 철도진동에 전달되는 수직진동 동특성을 파악하였다.

그러나 이들의 연구는 설계단계에서 신축예정부지에 건설될 구조물에 대한 철도진동의 영향을 지반과 구조물의 상호작용을 고려하여 비교적 간단히 예측하기에는 어려움이 있었다. 따라서 2004년 일본 건축학회⁹⁾의 “건축물의 진동에 관한 거주성능 평가지침 개정판”에서는 철도진동과 같은 교통진동의 응답 예측시에는 바닥슬래브의 응답을 예측하기 위하여 지반의 가진진동수와 바닥슬래브의 고유진동수에서 추정된 증폭률을 산정하고 이 값을 지반 가속도의 최대치에 곱하여 바닥슬래브의 응답치를 평가할 것을 권장하고 있다. 또한 2004년에 古賀 稔章¹⁰⁾는 교통진동을 받는 구조물의 진동 특성을 진동 전달률(Transmissibility)을 이용하여 진동예측치를 제시하였다.

따라서 이 논문에서는 1997년의 전호민¹⁾ 박사 학위논문과 2002년 이동호²⁾ 석사학위논문의 진동계측 데이터를 이용하였다. 진동전달률(Transmissibility)을 사용하여 철도진동이 인접건물 바닥슬래브의 수직진동에 대한 이론 진동예측치를 산정하고, 이 이론치를 진동계측치와 비교하여 진동 전달율을 이용한 진동평가법의 적용성을 확인하였다. 또한 실제로 철도인접지역 지반의 진동계측을 실시하여 지반의 가진진동수와 가속도응답을 평가하였다. 이 결과를 신축 예정 건물의 바닥슬래브 고유진동수의 해석치를 이용하여 진동전달률에 적용시켜, 신축건물의 열차진동 평가를 하였다. 또한 여러 가지 열차 진동원의 가진진동수를 분석하였다.

2. 선행 열차진동 계측

2.1 대상건물의 특징

실제 철도인접건물을 계측한 논문 중 1997년 전호민¹⁾ 박사학위논문과 2002년 이동호²⁾ 석사학위논문의 진동계측 데이터를 이용하였으며, 건물 특징을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 기존 연구의 계측한 건물 특징^{1),2)}

	A건물 ¹⁾	B건물 ²⁾	C건물 ²⁾
위치	서울시 영등포구	서울시 은평구	서울시 동대문구
구조	철근 콘크리트	철근 콘크리트	철근 콘크리트
규모	5층	지하 1층 지상 4층	지하 1층 지상 2층
용도	사무소	사무소	교회시설
진동원	지하철	새마을호	무궁화호
건물 위치	상행: 9m 하행: 5m	상·하행 11m	상행: 21.2m 하행: 16.7m

2.2 계측방법 및 해석

계측 방법으로는 건물과 인접한 지반에 가속도계를 설치하였으며 건물에는 1층과 2층 보 위의 슬래브 중앙에 설치하고 열차 운행 시 진동을 4곳에서 동시에 측정하였다.²⁾ 기존 연구에서 계측한 고유진동수와 가속도 값은 <표 2>에 나타내었다.

<표 2> 선행열차진동의 계측치^{1),2)}

	고유진동수 (Hz)			가속도 응답 (gal)		
	지반	1층	2층	지반	1층	2층
A건물 (상행선)	37.46	20.17	19.94	9.61	5.37	6.87
A건물 (하행선)	71.06	46.03	29.69	11.64	6.05	3.47
B건물	60.20	32.19	23.34	13.21	6.85	3.07
C건물	48.45	22.64	23.09	20.18	4.02	4.97

3. 이론 해석

3.1 진동전달률(Transmissibility) 이론³⁾

조화하중이 작용하는 질량-스프링-감쇠기 시스템을 나타내었고 바닥으로 전달되는 하중의 최대값의 비인 전달률(Transmissibility)로서 식(1)과 같다.

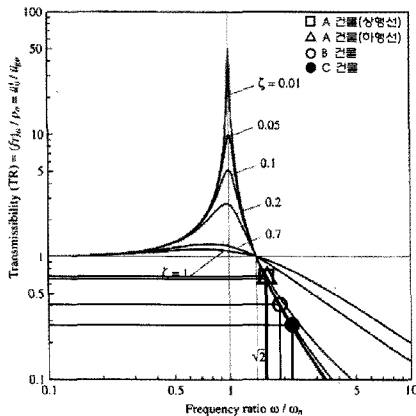
$$TR = \left\{ \frac{1 + [2\zeta(w/w_n)]^2}{[1 - (w/w_n)^2]^2 + [2\zeta(w/w_n)]^2} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

전달률은 여러 값의 감쇠비 ζ 에 대해서 진동수비 w/w_n 의 함수로서, 감쇠가 모든 가진 진동수 범위에서 운동의 진폭을 낮추는 역할을 하지만, 전달되

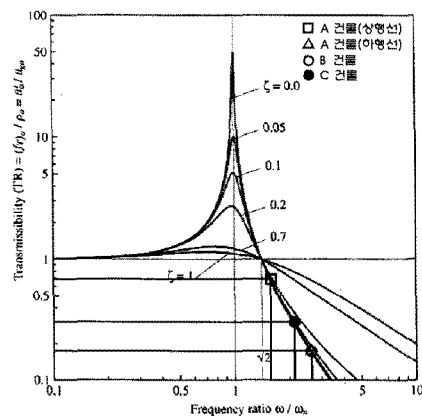
는 하중에 있어서는 $w/w_n < \sqrt{2}$ 일 때만 감소는 전달되는 하중의 크기를 감소시킨다. 전달하중이 가진 하중보다 작게 하려면 $w/w_n > \sqrt{2}$ 가 만족할 수 있도록 지지 시스템의 강성이나 고유진동수가 충분히 작아야 한다.³⁾

3.2 계측치와 TR해석치 비교

계측한 지반의 가진진동수와 건물의 바닥슬래브 고유진동수 값을 이용하여 진동수 비를 산정하고, 감쇠율은 0.05을 적용시켰다. TR은 식 (1)에 대입하여 각 건물의 지반과 1층, 지반과 2층의 진동전달률 값을 산정하였다. <그림 1>, <그림 2>는 진동전달률 선도로서 지반-1층, 지반-2층의 진동수비와 진동전달률을 나타내었다.



<그림 1> 지반-1층 진동수 비와 진동전달률(TR)



<그림 2> 지반-2층 진동수 비와 진동전달률(TR)

<표 3>에서는 실제 가속도 값과 TR을 적용한 가속도 값을 상대오차를 통해 비교하였다.

<표 3> 기존 열차진동의 TR에 의한 진동 전달률

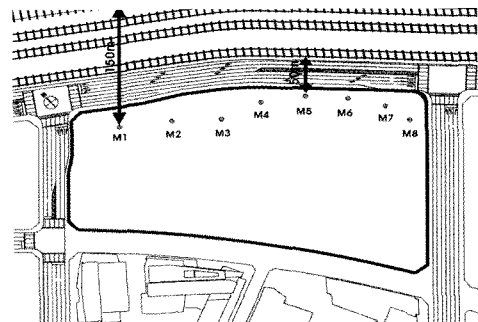
	계측 가속도 응답 (gal)		TR적용한 가속도 응답 (gal)		상대오차 (%)	
	1층	2층	1층	2층	1층	2층
A건물 (상행선)	5.37	6.87	6.63	6.63	19.0	3.61
A건물 (하행선)	6.05	3.47	7.68	2.53	21.2	37.1
B건물	6.85	3.07	5.42	2.38	26.4	29.0
C건물	4.02	4.97	5.65	6.05	28.8	17.9

선행 열차진동의 실제 계측한 데이터와 진동 전달률을 적용한 가속도를 비교한 결과 최소 3.61% ~ 최대 37.1% 상대오차범위를 확인하였다.

4. 신축예정 지반의 진동평가

4.1 실험방법

서울 소재의 신축예정 부지에 철도진동이 전달되는 특성을 파악하기 위해서 철로레일과 가까운 설계도면상 중요 기둥위치에 M1~M8까지 8포인트를 정하였다. 진동원의 종류(KTX, 화차, 경의선)에 따라 계측을 실시하였다. <그림 3>에서 열차 진동원에서 M1~M8포인트의 거리는 각각 50~150m 떨어진 위치로서, 정확한 지반진동을 측정하기 위해서 가속도계를 올려놓을 수 있는 받침대를 사용하였다. 가속도계 받침대의 크기는 지름은 15.5cm, 두께는 2.1cm의 강철로 제작하였다. 주된 진동원을 파악하기 위해서 예비 측정한 8개소의 계측데이터 중 가장 진동이 큰 네 곳을 M4~M7 선정하였다. 본 진동계측은 수직가속도 X3을 사용하여 계측을 실시하였다.

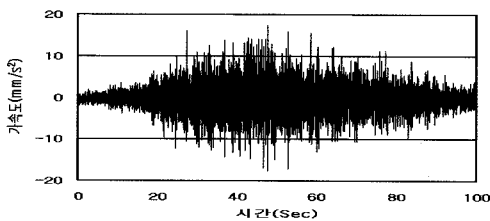


<그림 3> 철도인접지역 신축예정지반 계측위치

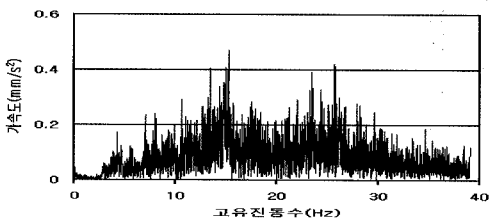
4.2 실험결과

1) 계측데이터

지반 계측은 100 Hz로 100초간 데이터를 기록하였다. 지반 M4위치에서 회차(18량)인 경우 최대 가속도는 $17.29mm/s^2$ 을 알 수 있다. 신축예정건물 부지에 제일 근접한 회차 열차시의 지반의 가진진동수는 10Hz~30Hz의 광대역의 파워스펙트럼의 형상인 관계로 명확한 가진진동수를 결정하기 어려웠다. 이 이유는 회차의 운행속도가 10km/h 이하의 저속이고 이 기간에 다른 열차가 동시에 운행하는 관계로 여러 진동원이 혼합되기 때문이다. 따라서 회차(18량)시 지반의 가진진동수는 10Hz~30Hz의 중앙값인 20 Hz를 사용하기로 한다. <그림 4>와 <그림 5>는 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

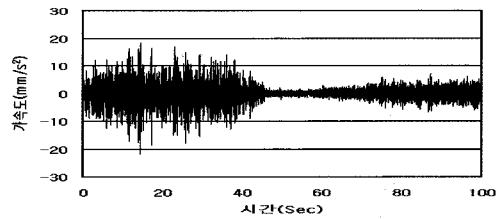


<그림 4> M4 시계열파형(회차 18량)

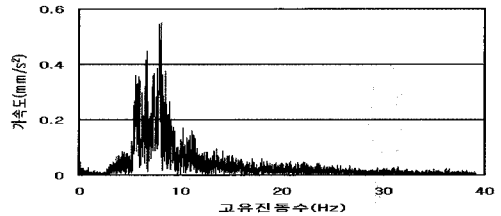


<그림 5> M4 파워스펙트럼(회차 18량)

지반 M4위치에서 시멘트열차(8량)인 경우 최대 가속도는 $17.09mm/s^2$ 을 알 수 있다. 지반 가진진동수는 8.09Hz이다. <그림 6>과 <그림 7>은 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

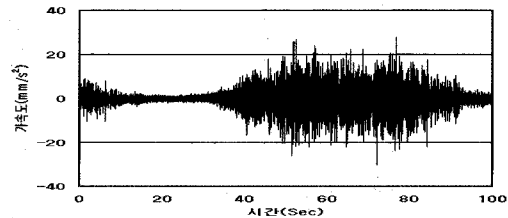


<그림 6> M4 시계열파형(시멘트열차 8량)

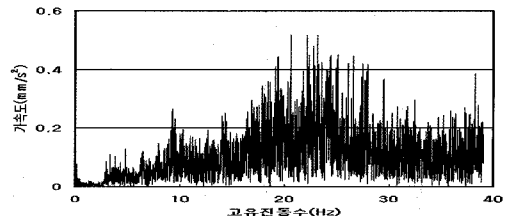


<그림 7> M4 파워스펙트럼(시멘트열차 8량)

지반 M5위치에서 회차(9량)인 경우 최대 가속도는 $27.24mm/s^2$ 을 알 수 있다. 지반 가진진동수는 광대역이므로 20Hz로 한다. <그림 8>과 <그림 9>는 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

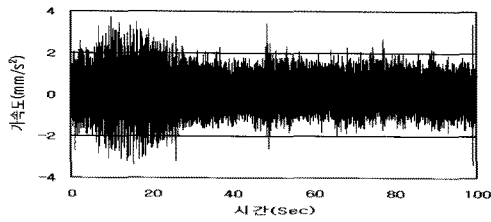


<그림 8> M5 시계열파형(회차 9량)

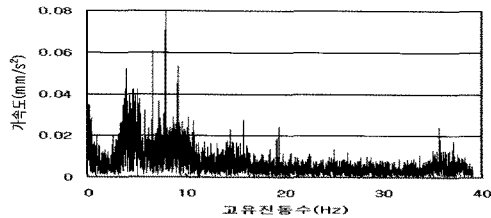


<그림 9> M5 파워스펙트럼(회차 9량)

지반 M5위치에서 경의선인 경우 최대 가속도는 $3.80mm/s^2$ 을 알 수 있다. 지반 가진진동수는 9.81Hz이다. <그림 10>과 <그림 11>은 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

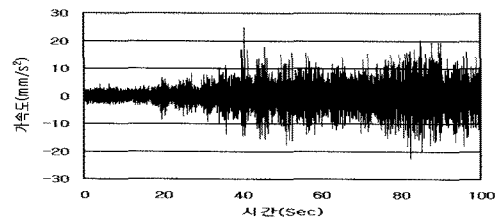


〈그림 10〉 M5 시계열파형(경의선)

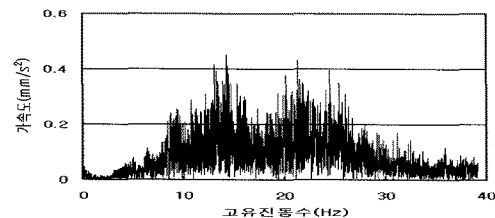


〈그림 11〉 M5 파워스펙트럼(경의선)

지반 M6위치에서 경의선+회차(18량)인 경우 최대 가속도는 $24.77mm/s^2$ 을 알 수 있다. 지반 가진진동수는 광대역이므로 20Hz로 한다. 〈그림 12〉와 〈그림 13〉은 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

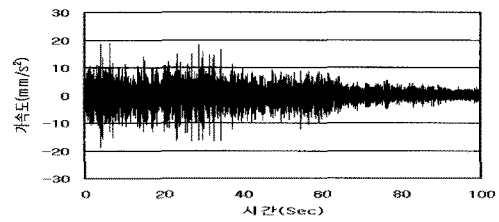


〈그림 12〉 M6 시계열파형(경의선+회차18량)

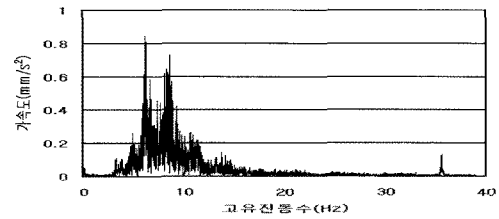


〈그림 13〉 M6 파워스펙트럼(경의선+회차18량)

지반 M6위치에서 시멘트(18량)인 경우 최대 가속도는 $18.76mm/s^2$ 을 알 수 있다. 지반 가진진동수는 6.21Hz이다. 〈그림 14〉와 〈그림 15〉는 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

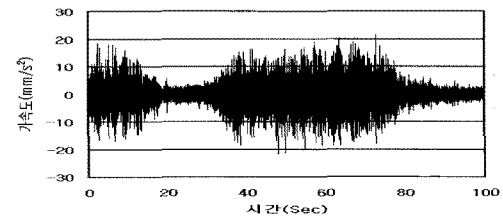


〈그림 14〉 M6 시계열파형(시멘트 18량)

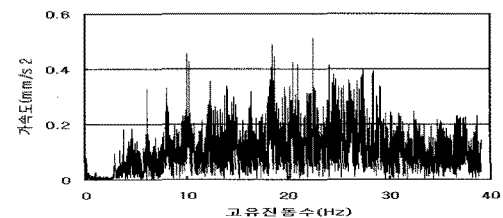


〈그림 15〉 M6 파워스펙트럼(시멘트 18량)

지반 M7위치에서 회차-1(9량)인 경우 최대 가속도는 $21.16mm/s^2$ 을 알 수 있다. 지반 가진진동수는 광대역이므로 20Hz로 한다. 〈그림 16〉과 〈그림 17〉은 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.

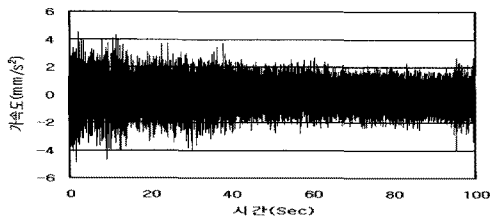


〈그림 16〉 M7 시계열파형(회차-1 9량)

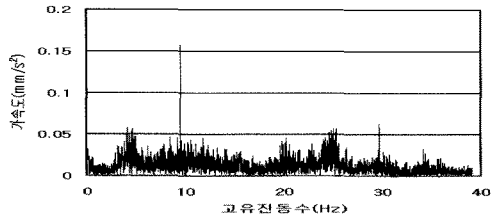


〈그림 17〉 M7 파워스펙트럼(회차-1 9량)

지반 M7위치에서 시멘트-1(18량)인 경우 X3의 최대 가속도 $4.47mm/s^2$ 을 알 수 있다. X3 지반 가진진동수는 9.54Hz이다. 〈그림 18〉과 〈그림 19〉는 수직방향의 시계열파형 및 파워스펙트럼이다.



〈그림 18〉 M7 시계열파형(시멘트-1 18량)



〈그림 19〉 M7 파워스펙트럼(시멘트-1 18량)

2) 최대가속도 및 고유진동수

열차와 가장 근접한 M5 위치에서 열차진동의 영향이 가장 크게 지반에서 계측되었으며, 이때의 최대가속도는 27.24 mm/s^2 를 나타내었다. 이때의 진동원은 회차(9량)의 대지에 가장 인접한 선로로 운행 할 때이다.

진동계측에서는 KTX 운행시 지반의 고유진동수는 M4, M5에서 7.92Hz ~ 8.44Hz, 경의선 운행시에는 M4~M6 3개소에서 지반의 가진진동수는 7.19Hz ~ 10.61Hz, 시멘트 열차 운행시에는 M4, M6, M7 3개소에서 지반의 가진진동수는 6.21Hz ~ 9.54Hz 범위에 있는 것을 확인하였다. 이와 같이 기존의 열차진동시 지반의 가진진동수는 진동원에 따라 6.21Hz ~ 10.61Hz의 범위에 있는 것을 알 수 있었다. 열차진동의 가진진동수는 일반적으로 열차의 종류, 운행속도에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 일반적인 열차진동시 지반의 가진진동수는 8Hz ~ 12Hz 사이로 알려져 있으며⁹⁾, 이와 근접한 경향을 보였다. 각 위치에서 진동원에 따른 고유진동수와 최대가속도를 <표 4>에 정리하였다.

〈표 4〉 지반의 가진진동수 및 가속도 응답

계측 위치	진동원	고유진동수 (Hz)	최대가속도 (mm/s^2)
M 4	KTX	8.44	3.80
	경의선	7.19	11.01
	시멘트 (8량)	8.09	17.09
	회차 (18량)	20.00	17.29
M 5	회차 (9량)	20.00	27.24
	KTX	7.92	3.74
	경의선	9.81	3.80
	KTX+경의선	-	11.68
M 6	경의선+회차(18량)	20.00	24.77
	경의선	10.61	4.67
	시멘트 (18량)	6.21	18.76
M 7	시멘트-1 (18량)	9.54	4.47
	시멘트-2 (9량)	-	15.29
	회차-1 (9량)	20.00	21.16
	회차-2 (9량)	20.00	8.61

4.3 신축예정건물의 바닥슬래브 해석

4.3.1 신축예정건물의 구조시스템 및 해석방법

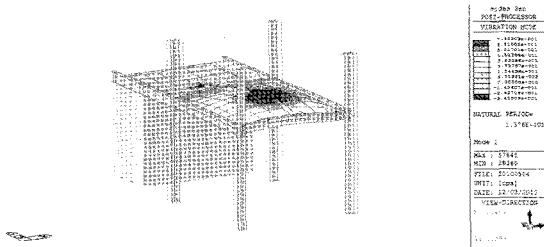
신축예정건물의 구조방식은 철골-철근콘크리트 구조이다. M4, M5 기본모듈은 $8.4\text{m} \times 11.4\text{m}$, $8.4\text{m} \times 13.5\text{m}$ 이고 최대스팬은 13.5m이다. M6, M7 기본모듈은 $6.6\text{m} \times 21.0\text{m}$, $9.9\text{m} \times 21.0\text{m}$ 이고 최대스팬은 21.0m이다. M4~M7의 1층, 4층 바닥판 두께는 200mm이며, 기둥은 $400 \times 400\text{mm}$ 와 $800 \times 800\text{mm}$ 이다. <표 5>에 신축예정건물의 사용재료 설계기준강도를 나타내었다. 해석방법으로는 일부분을 잘라내어 모델링하는 방법을 사용하였다. 해석 모형은 기둥과 보는 Beam요소, 슬래브는 Plate요소로 모델링하였다. 고차진동모드의 특성을 정확히 반영하기 위해서 30개의 모드를 사용하여 해석하였다.

〈표 5〉 신축예정건물의 사용재료 설계기준강도

재 료	설계기준강도
콘크리트	KS F 4009 : $f_{ck} = 24\text{MPa}$ $f_{ck} = 30\text{MPa}$
철 근	KS D 3504 SD400 : $f_y = 400\text{MPa}$ KS D 3540 SD500 : $f_y = 500\text{MPa}$
철 골	KS D 3515 SM490 : $F_y = 325\text{MPa}$

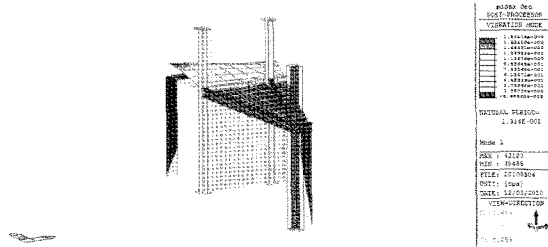
4.3.2 신축예정건물 바닥슬래브 고유치해석결과

고유치 해석 시 대상 바닥판에 직접적인 영향을 주는 수직방향(Z방향)만 고려하였다. M4에서 MIDAS 해석한 결과 수직방향의 1층 바닥진동수는 8.18Hz이고, 4층 바닥진동수는 7.77Hz이다. <그림20>은 M4 1층 바닥의 수직방향 1차 고유모드형상이다.



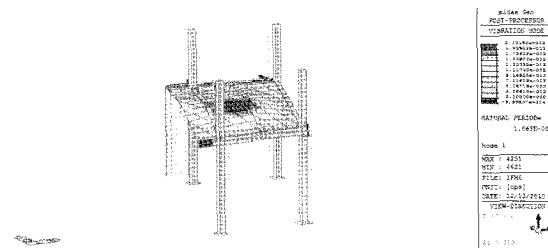
<그림 20> M4 1층의 바닥 고유모드(Mode1)

M5에서 MIDAS 해석한 결과 수직방향의 1층 바닥진동수는 7.61Hz이고, 4층 바닥진동수는 6.88Hz이다. <그림 21>은 M5 1층 바닥의 수직방향 1차 고유모드형상이다.



<그림 21> M5 1층의 바닥 고유모드(Mode1)

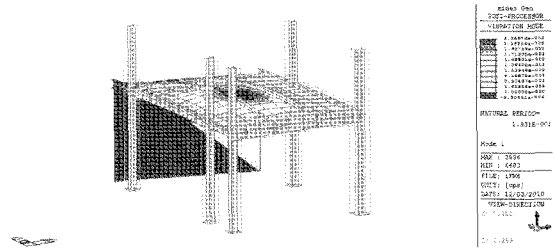
M6에서 MIDAS 해석한 결과 수직방향의 1층 바닥진동수는 6.02Hz이고, 4층 바닥진동수는 5.74Hz이다. <그림 22>는 M6 1층 바닥의 수직방향 1차 고유모드형상이다.



<그림 22> M6 1층의 바닥 고유모드(Mode1)

M7에서 MIDAS 해석한 결과 수직방향의 1층 바닥

진동수는 7.51Hz이고, 4층 바닥진동수는 6.41Hz이다. <그림 23>은 M7 1층 바닥의 수직방향 1차 고유모드형상이다.



<그림 23> M7 1층의 바닥 고유모드(Mode1)

<표 6> 신축예정건물 바닥슬래브 고유진동수

	바닥 고유진동수(Hz)	
	1층	4층
M 4	8.18	7.77
M 5	7.61	6.88
M 6	6.02	5.74
M 7	7.51	6.41

4.4 신축예정건물 진동평가

신축예정지반 고유진동수와 MIDAS 해석한 바닥슬래브 고유진동수 값을 이용하여 진동수 비를 정하고, TR선도에서 감쇠율 0.05을 적용시켰다. 진동수비를 이용하여 각 위치에 지반과 1층, 지반과 4층 진동전달률을 산정하였다.

신축예정건물 M4-M7위치한 1층, 4층의 바닥슬래브 예상 가속도는 <표 7>에 나타내었다. <표 7>에서 가속도응답은 지반 최대가속도에 TR값을 곱하여 산정하였다. <표 7>에 의하면 지반의 최대가속도는 M5 위치에서 회차(9량)시 27.24 mm/s²가 발생하였다. 그러나 진동전달률(TR) 적용한 신축건물의 최대 응답가속도는 M4 위치에 있는 시멘트(8량) 시 1층 바닥슬래브에서 162.35mm/s²가 발생하였다. 이 이유는 시멘트(8량) M4 위치에 있는 1층 바닥슬래브의 고유진동수가 8.18Hz이고, M4 지반의 고유진동수가 8.09Hz인 관계로 진동전달률(TR)이 9.50인 반면에 M5의 진동전달률(TR)은 0.18이기 때문이다. 이와 같이 신축예정 건물의 최대응답가속도는 지반가속도

의 절대적인 크기에만 관련되는 것이 아니고, 지반과 바닥슬래브의 고유진동수비에 의해 결정되는 진동전달률에 더욱 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

〈표 7〉 신축예정 건물의 진동예측평가

계측 위치	진동원	지반 최대가속도 (mm/s^2)	TR		가속도 응답(mm/s^2)	
			1층	4층	1층	4층
M 4	회차(18량)	17.29	0.20	0.18	3.45	3.11
	시멘트 (8량)	17.09	9.50	7.63	162.35	130.39
	KTX	3.80	8.10	5.07	30.78	19.26
	경의선	11.01	3.88	0.92	42.71	10.12
M 5	회차 (9량)	27.24	0.18	0.14	4.90	3.81
	경의선	3.80	2.39	0.98	9.08	3.72
	KTX	3.74	7.63	2.93	28.53	10.95
M 6	경의선 +회차(18량)	24.77	0.10	0.09	2.47	2.22
	시멘트 (18량)	18.76	8.40	5.07	157.58	95.11
	경의선	4.67	0.48	0.42	2.24	1.96
M 7	회차-1 (9량)	21.16	0.17	0.11	3.59	2.32
	시멘트-1 (18량)	4.47	1.61	0.84	7.19	3.75
	회차-2 (9량)	8.61	0.17	0.11	1.46	0.94

5. 결 론

1) 건물설계단계에서 신축예정건물 진동평가를 위해서 진동전달률을 적용하였고 진동전달률의 타당성을 확인하기 위해서 선행열차진동연구 데이터를 이용하였다. TR을 적용한 가속도응답을 선행열차진동연구 계측한 가속도응답과 비교한 결과 3.61% ~ 37.1% 오차범위에 있는 것을 확인하였다.

2) KTX, 경의선, 시멘트 열차 주행에서는 주행속도가 빠른 관계로 지반의 가진진동수가 7.19~10.61Hz 사이에 선명한 피크를 확인 할 수 있다. 그러나 회차하는 열차는 10km/h 이하로 서행하는 관계로 지반의 파워스펙트럼은 10.00~30.00Hz 광대역의 형상을 확인할 수 있었다.

3) 신축예정 건물의 최대응답가속도는 지반가속

도의 절대적인 크기에만 관련되는 것이 아니고, 지반과 바닥슬래브의 고유진동수비에 의해 결정되는 진동전달률에 더욱 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 전호민, 철도 인접건물의 진동예측모형에 관한 연구, 연세대학교 대학원 건축공학과 박사학위 논문, 1997
2. 이동훈, 철도 인접 건축물의 수직 진동 동특성 변화에 관한 연구, 연세대학교 대학원 건축공학과, 2002
3. Anil K. Chopra, 김재관, 구조동역학(개정 2판), 피어슨 에듀케이션코리아, pp.123-127, 2004
4. 신중서, “고속철도에서의 진동 및 그 대책”, 소음진동, Vol.3, No.2, pp.103-111, 1993
5. 허영, 김희철, “지하철 운행에 의한 소음의 예측식 제안”, 한국소음진동공학회 제7권, 제2호, pp.293~300, 1997
6. 전호민, “건축물의 수직진동 증폭계수 산정에 관한 기초연구”, 대한건축학회 논문집 구조계 제14권 제5호, pp.293-301, 1998
7. 홍갑표외 3인, “지반-구조물 상호작용을 고려한 교통하중에 의한 건축물 수직진동 전달 예측에 관한 연구”, 대한건축학회, pp.27-34, 2000
8. 김성문, “철도진동에 대한 바닥구조의 진동응답 특성 및 방진설계에 의한 진동 저감효과에 관한 연구”, 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 2001
9. 日本建築学会, “建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説”, 日本建築学会 VOL001, pp.46~48, 2004
10. 古賀 稔章, 浅野 照雄, “交通振動を受けた構造物の振動性について”, 日本建築学会大会学術講演便概集, 21468, pp.935-936, 2004

▶접수일자 : 2010년 12월 24일

▶심사 완료일자 : 2011년 1월 19일

▶게재 확정일자 : 2011년 2월 16일