

열차 하중에 의한 지하철 구조물의 진동 특성에 관한 연구

A Study on the Vibration Characteristics of Subway Structure by Train Load

박 성 우^{1)*} 박 승 수²⁾ 황 인 백³⁾
Park, Sung Woo Park, Seung Su Hwang, In Baek

Abstract

In this study, the vibration analysis of the underground box structures induced train movement is studied. In order to perform these analysis, dynamic data, which was measured when subway is in service, are gained by attaching accelerometers on the structure such as lower beam, lateral wall and upper slab. Also, accelerometers are attached on the lower beams and side walls of the gravel ballast and concrete ballast sections in order to compare vibration due to ballast materials. The vibration results of upper slabs and lower beams reveal that the vibration on the upper slabs is greater than the lower beams. Also, the results of the crack gauge on the upper slab show that crack width dose not change due to vibration, These means that the effect of the vibration on the structure is very limited. In order to evaluate the vibration of the structure, acceleration unit is converted to velocity unit comparing with the existing velocity data gained from the platforms.

Keywords : Box structure, Subway, Train, Vibration

1. 서론

지하철 구조물은 준공 이후 20~30년이 경과되어 노후화가 진행 중인 구조물로서 사회적으로 안전에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 지하철의 진동은 지하구조 특성상 지상구조물에 비하여 진동으로 인한 영향이 크지 않는 것으로 알려져 있어(한국터널공학회, 2007) 지하구조물의 진동에 대한 관심은 상대적으로 높지 않았다.

인체는 진동을 감지하는 수준은 0.05cm/s로서 구조물보다 민감하여 그동안 지하철 진동에 대한 문제는 주로 주변 인접지반의 진동으로 인한 인체의 진동 감지 문제에 대한 연구가 주로 수행되어 왔다(서정범 등, 2008; 허영 등, 1996; 정상욱 등 1997).

정밀안전진단 시에도 진동시험은 선택과업으로서 시험에 대한 중요성이 부각되지 않는 실정이며 진동시험을 실시하더라도 시간 및 공간의 제약으로 승강장 플랫폼에서 시험을 수행하는 것이 일반적으로 지하철 본선구조물 진동에 대한 시험이 거의 이루어지지 않았다.

그러나, 최근에는 열차진동으로 인하여 지하철 운행 중

에 콘크리트나 보수모르터가 박락되는 경우가 종종 보고되고 있으며 수십년 동안 균열보수를 실시하여도 새로운 균열이 지속적으로 조사되어 열차 진행에 따른 진동으로 균열이 발생하거나 폭이 확대될 가능성이 대두되고 등 지하철의 진동에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지하철 본선의 진동에 대한 기초적인 거동을 파악하기 위하여 열차가 최고 속도에 다다른 본선에 센서를 설치하여 도상 종류, 부재의 종류, 레일의 상태에 따른 지하철 구조물의 진동특성을 분석하였다. 이러한 시도는 추후 정밀안전진단 시 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 진동 기준

2.1 국내진동기준

국내 진동관련 기준으로는 생활진동 규제기준으로서 소음진동관리법 시행규칙에 따라 Table 1과 같이 제안하고 있다.

1) 정회원, 한국시설안전공단 과장
2) 정회원, 한국시설안전공단 대리
3) 정회원, 한국시설안전공단 부장

* Corresponding author : sungwoo@kistec.or.kr 031-910-4096

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Limit of Vibratory levels

Type of area	Day time (06:00~22:00)	Mid night time (22:00~06:00)
residential area, green land area, green belt area, school zone, hospitals, library	~65 dB(V)	~ 60 dB(V)
other area	~70 dB(V)	~ 65 dB(V)

$Y = 20 \log X + 91$; X = particle velocity(cm/s) Y는 dB(V)

Table 2 Allowable vibration of structures due to blast

Type of structure	Allowable particle velocity
cultural structures	0.3cm/s
mason or wood ceiling structures	1.0cm/s
masonry structures with concrete foundation and slab	2.0cm/s
small size concrete structures	3.0cm/s
a high-rise building made of concrete or steel-frame	5.0cm/s

이러한 생활진동 규준은 인체의 반응에 근거한 기준이므로 구조물의 진동규준으로 적용하기에는 무리가 있다.

구조물의 진동규준으로는 터널설계기준에 제시되고 있는 터널 공사 시 구조물의 손상기준 및 발파진동 허용치가 있으며 그 내용은 Table 2와 같다.

이상과 같이 생활진동 규준과 발파에 의한 구조물의 진동 규준은 국내에도 규정하고 있으나 상시 진동으로 인한 구조물의 손상을 제어하기 위한 허용 진동치는 제시되지 않고 있다.

2.2 국외진동규준

2.2.1 독일

DIN 4150-part3에서는 일시진동에 대하여 일반적인 건물에 대하여 주파수대역별로 2~5 cm/s의 허용치를 제시하고 있으며 진동에 예민한 구조물은 0.3~1cm/s의 허용치를 제시하고 있다 상시진동에 대해서는 0.5cm/s의 허용치를 제시하고 있다.

2.2.2 미국

미광무국에서는 발파진동에 대하여 최대진동속도의 크기는 5.0cm/s는 안전한계, 13.9cm/s는 경미한 피해, 19.4cm/s는 상당한 피해의 한계로 정의하였다.

2.2.3 캐나다

캐나다의 Edward등은 10cm/s 이하의 진동속도에서는 피해가 일어나지 않으며 10~12cm/s에서는 건물의 피해가 우려된다고 하였으며, 안전율을 고려하여 진동속도의 허용한계는 5cm/s가 적당하다고 보고하였다.

2.3 진동규준에 대한 평가

국내의 진동 규준은 지하철의 열차진행에 따른 진동평가를 수행하기에 적절한 기준치를 제시하지 않고 있으며 외국의 진동 규준도 대부분 발파에 의한 구조물의 거시적인 피해를 근거로 허용치를 제시하고 있다. 독일의 경우, 상시 진동에 대해서는 발파진동과 같은 일시적인 진동보다 엄격한 허용기준을 제시하고 있다.

3. 개착식 박스 구조물의 열차 진동 시험

3.1 열차 진동 시험

3.1.1 현장조건

대상 구조물은 준공된 후 20년이 넘는 구조물로서 심야시간을 제외하고는 열차가 지속적으로 운행되고 있는 공용중인 지하철이다. 대상 구간은 전 구간 개착식 박스형식의 지하구조물로서 상부 건축물의 진동으로 인하여 과거에 민원이 발생했던 구간이다. 또한, 해당 구간은 직선 및 곡선부가 혼재되어 있고, 도상형태도 자갈도상과 콘크리트 도상이 모두 존재하고 있어 곡선 및 직선 주행에 따른 동적응답과 레일의 도상 상태에 따른 분석이 가능한 구간이다. 이에 따라 특징적인 3개의 단면을 선정하여 동해석을 실시하였으며 각각의 단면에 대한 특징은 Table 3과 같으며 그 단면은 Fig. 1~3과 같다.

3.1.2 진동 측정방법

진동시험은 1g 가속도 센서를 이용하였으며 50Hz~100Hz의 분해능으로 시간이력을 측정하였다. 측정방법

Table 3 Type of the cross sections for vibration test

Type	Overburden height	R(Radius of curvature)	Ballast material	Abrasion of rail
Type 1	5m	300m	concrete	Yes
Type 2	5m	straight line	concrete	No
Type 3	4m	250m	gravels	No

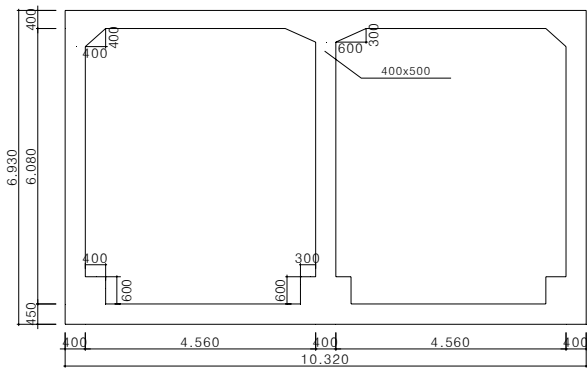


Fig. 1 The Cross Section of Type 1

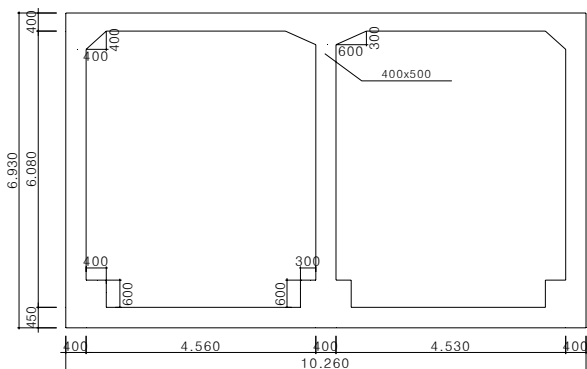


Fig. 2 The Cross Section of Type 2

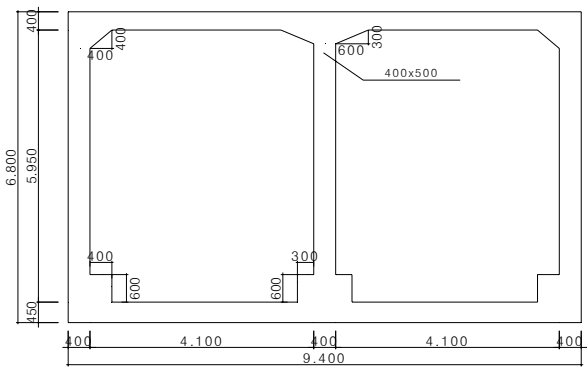
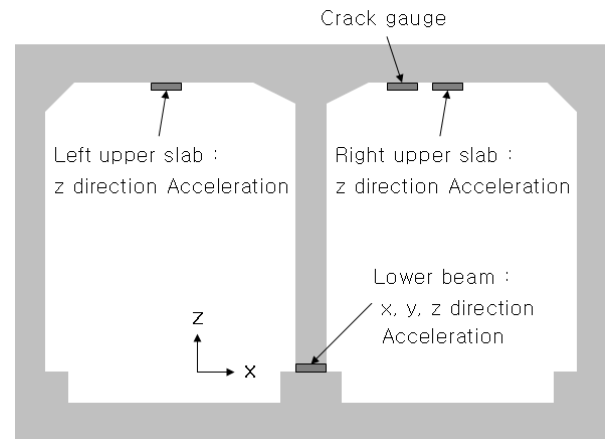
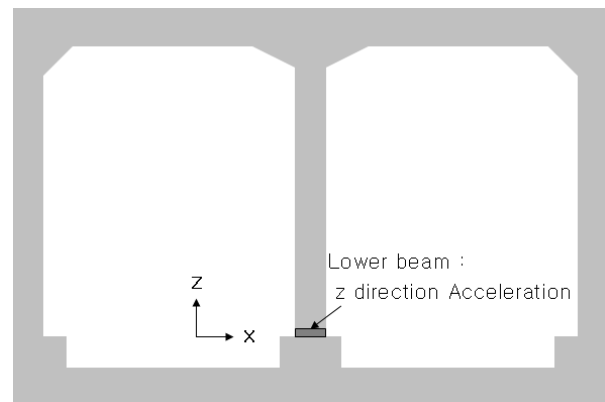


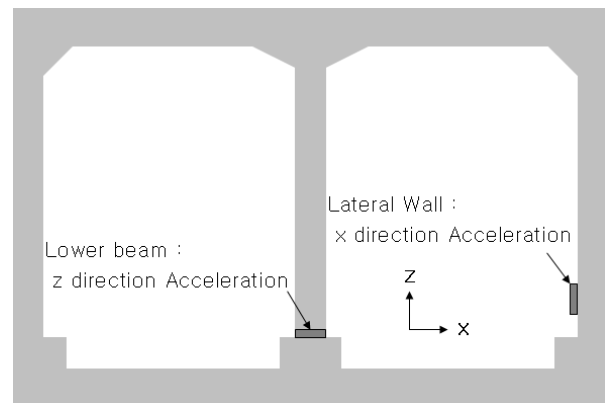
Fig. 3 The Cross Section of Type 3



(a) Type 1 section



(b) Type 2 section



(c) Type 3 section

Fig. 4 Location of the sensor

은 공용 중에 현장접근의 어려움이 있어 열차가 운행하지 않은 심야시간에 센서를 부착하고 열차가 운행되기 전에 데이터로고에서 신호를 받을 수 있도록 하여 20여시간 동안의 진동 데이터를 축적하는 방식을 취하였다.

진동 시험 위치는 Type 1 단면의 경우 각 위치별 응답을 파악하기 위해 하부보, 상부슬래브에 센서를 부착하였으며, Type 2 및 3은 도상 및 레일의 상태에 따른 진동 응답을 파악하기 위하여 하부보 1개소에 구조물 중력방

향축의 가속도센서를 부착하였다.

센서 부착 위치는 Fig. 4와 같다. Type 1의 단면 주변에는 좌측선의 경우 레일에 용접이음부가 있어 충격이 예상되고 우측선 레일은 양호한 상태이다. Type 2의 단면은 우측선의 레일이 마모된 상태이며 좌측선의 레일상태는 양호하다. Type 3은 동일한 단면을 사용하나 도상의

종류가 다른 2개의 위치를 선택하여 콘크리트 도상과 자갈도상에 대해 각각 1개에 대한 진동측정을 수행하였다.

3.2 시험 결과 분석

3.2.1 레일상태 및 부재별 위치에 따른 해석결과 분석

Type 1의 하부보에 위치한 가속도계는 3축센서로서 좌측선의 열차 진행에 따른 진동측정 결과는 Fig. 5와 같다. Z방향 가속도는 최대 0.53mm/s²으로서 X및 Y방향과 비교할 때 진동의 크기가 탁월한 것으로 분석되었다. 이는 지하철 박스 구조물이 횡단면 상의 거동에 따라 설계가 이루어지고 있고 각종 하중에 대하여 구조물의 변위가 발생하는 방향도 각 부재의 수직방향이기 때문이다. 교량 정밀안전진단 시에도 주거터의 수직방향으로 진동이 탁월하기 때문에 수직방향의 가속도를 측정해오고 있다. 지하철 진동과 관련된 앞선 연구(김희철 등 1995)에 따르면 지하철 측벽 및 기둥의 진동의 경우 Fig. 4(c)의 x방향의 가속도가 z방향의 가속도보다 2~3배 큰 것으로 분석되었다. 이는 x 방향이 측벽과 기둥에 있어서는 주부재의 수직방향이기 때문으로 판단된다.

Type 1의 위치에 따른 진동측정 결과는 Fig. 6과 가진 위치인 레일과 가까운 하부보가 상부슬래브보다 진동이 큰 것으로 분석되었다.

좌측선의 경우 Fig. 7과 같은 레일이음부가 존재하고 레일간의 이격도 상대적으로 크다고 판단하여 이음부에 의한 진동이 클 것으로 예상된 반면 우측선으로 열차가 진행할 경우에는 레일상태가 양호하여 상대적으로 진동

의 크기가 작을 것으로 예상되었다. 실험결과, Fig. 8은 열차하중의 가진원과 가까운 하부보의 응답으로서 좌우측 열차의 진행에 따른 응답이 큰 차이를 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 좌측선 레일의 이음부 주변이 매끄럽지 못해 레일에 가해진 충격으로 인해 진동이 발생하기 때문으로 판단된다. 또한, Fig. 8(a)의 응답을 보면 10개의 파형군을 이루고 있는 것을 확인할 수 있는데 이는 열차가 10량으로 이루어져 있으므로 바퀴가 이음부를 통과할 때 비교적 큰폭의 진동이 발생하였기 때문으로 판단된다. 반면에 이음부가 없는 우측선으로 열차가 진행할 경우 그 진폭이 크지않을 뿐더러 10개의 파형군을 형성하는 경향도 크지 않음을 볼 수 있다. 우측 상부슬래브의 응답을 나타낸 Fig. 9의 경우 진동의 변화에 큰 차이는 없지만 좌측선에 열차가 진입할 때의 응답이 더 큰 것으로

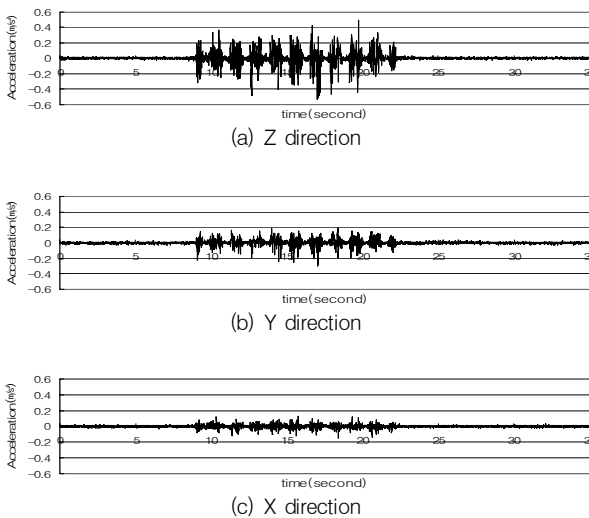


Fig. 5 Response of acceleration at lower beam

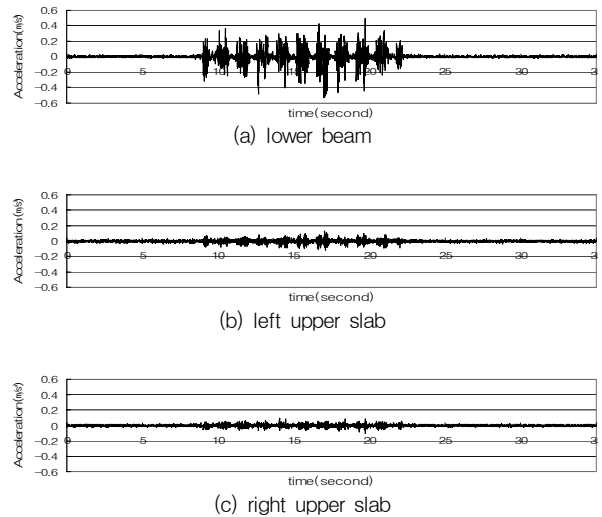
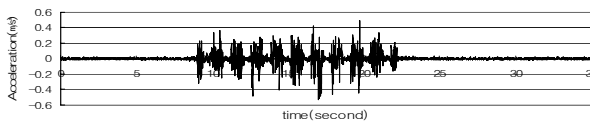


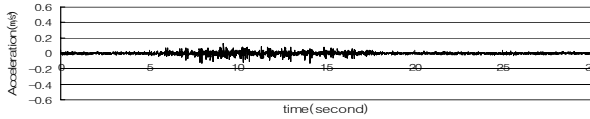
Fig. 6 Response of acceleration at Type



Fig. 7 A joint of rail

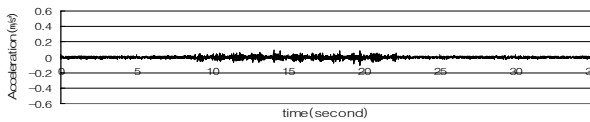


(a) Moving train at left line

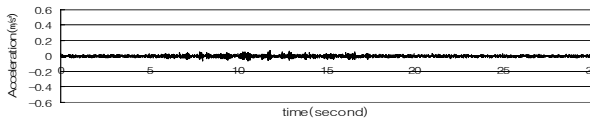


(b) Moving train at right line

Fig. 8 Comparison of exciting location(lower beam)

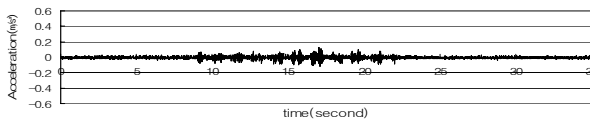


(a) Moving train at left line

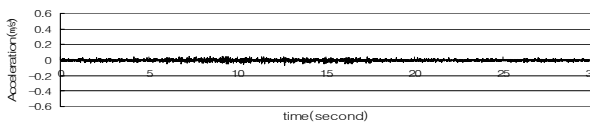


(b) Moving train at right line

Fig. 9 Comparison of exciting location(right upper slab)



(a) Moving train at left line

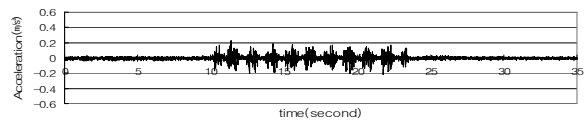


(b) Moving train at right line

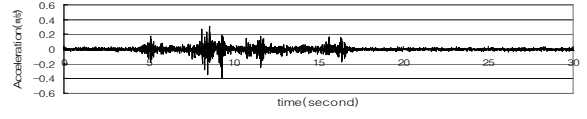
Fig. 10 Comparison of exciting location(left upper slab)

분석되었는데, 이는 가진원과 거리보다는 레일의 마모 상태에 더 큰 영향을 받았다는 것을 의미한다.

Type 2는 도상의 상태에 따른 분석내용으로서 좌측선의 도상 상태는 양호하고 우측선의 도상은 마모가 되어 다소 불량한 상태이다. Fig. 11은 Type 2 단면의 열차 진행 위치에 따른 가속도 응답을 나타낸 것이다. 우측선으로 열차가 진행할 때 보다 큰 가속도 응답을 얻었으며 이는 도상의 마모 때문인 것으로 판단되며, 좌측선으로 열차가 진행할 때의 가속도 응답이 도상 및 레일 상태가 양호한 Type 1의 우측선보다 응답이 더 크게 나타난 것은 측점위치에서 10m 떨어진 위치에 레일 이음부가 있기



(a) Moving train at left line



(b) Moving train at right line

Fig. 11 Comparison of exciting location(lower beam-Type 2)

Table 4 Type of the cross sections for vibration test

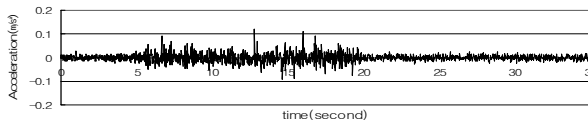
Section Type	sensor direction	Moving train direction	Moving train direction	Peak acceleration (m/s ²)
Type 1	lower beam	x	left line	0.144
		y	left line	0.304
		z	left line	0.532
	right upper slab	z	left line	0.089
			right line	0.071
left upper slab	z	left line	0.127	
		right line	0.069	
Type 2	lower beam	z	left line	0.228
		z	right line	0.386

때문으로 분석된다.

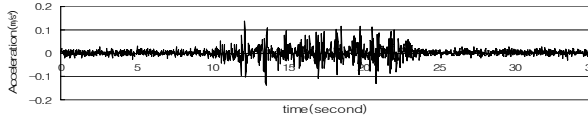
Type 1의 레일상태 및 부착위치에 따른 가속도 응답을 요약하면 Table 4와 같다.

3.2.2 도상의 종류에 따른 해석결과 분석

Type 3 단면에 대해서는 도상의 형태에 따라 분석을 수행하였다. 일반적으로 콘크리트 도상 자갈도상 보다 진동이 더 큰 것으로 알려져 있으므로 이에 대한 정량적인 분석을 수행하고자 본 시험을 실시하였다. 해당 단면은 자갈도상 구간과 콘크리트 도상 구간으로 나누어져 있어 경계부에 데이터로거를 설치하고 자갈도상 구간에 하부보 및 측벽 각 1개소, 콘크리트 도상 구간에 하부보 및 측벽 각 1개소에 가속도계를 부착하여 신호를 분석하였다. Fig. 12는 자갈도상과 콘크리트 도상의 하부보에서의 열차진행에 따른 응답이고 Fig. 13은 측벽에서의 응답이다. 결과에 따르면 콘크리트 도상(0.138%)이 자갈도상(0.119%)에 비하여 진동이 약간 큰 것으로 분석되었으나 예상했던 수준만큼 진동의 차이가 두드러지지 않았다. 주파수분석을 실시한 결과 Fig. 14와 같이 자갈도상에는 탁월주파수가 두드러지지 않은 반면에 콘크리트 도

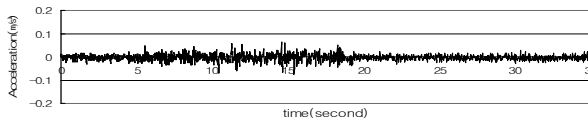


(a) gravel ballast

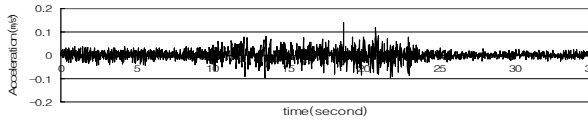


(b) concrete ballast

Fig. 12 Response comparing ballast material(lower beam)

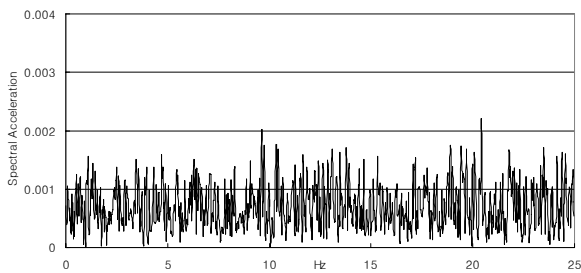


(a) gravel ballast

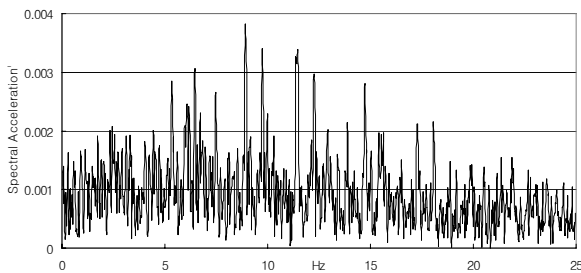


(b) concrete ballast

Fig. 13 Response comparing ballast material(lateral wall)



(a) gravel ballast



(b) concrete ballast

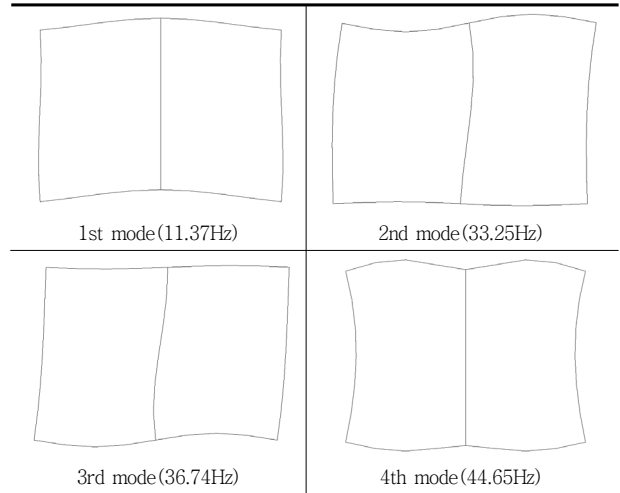
Fig. 14 FFT Analysis comparing ballast material(lower beam)

상은 7~20Hz 이내에 탁월주파수가 두드러져 콘크리트 진동이 다소 심한 것으로 분석되었다. 그러나, 현장 실험 여건, 레일의 상태, 곡물, 구조물의 상태 등의 다른 요인이 있어 도상의 종류에 따른 절대적인 비교가 어려우므로

Table 5 Boundary condition for mode shape analysis

case number	Boundary conditions	Subgrade reaction modulus
1	hinge-roller	-
2	elastic link	20,000 kN/m ³
3	elastic link	200,000 kN/m ³

Table 6 mode shape (case 1)



도상의 차이에 따른 진동의 정량적인 분석은 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.3 주파수 분석

대표적인 단면인 Type 1 단면에 대하여 고유진동수 해석을 수행하였다. 이 때, 지하구조물의 특성상 지반과 구조물과의 경계는 스프링으로 모형화하는데 스프링의 유무 및 강도에 따라 고유진동수가 달라 질 수 있으므로 Table 5와 같이 경계조건의 변화에 따라 해석을 실시하였다.

경계조건 변화에 따른 mode shape은 Table 6~Table 8과 같다.

주변지반에 대한 경계조건의 차이가 있을 수 있으나 1차모드는 22~61Hz로 비교적 고주파임을 알 수 있다. Type 1의 하부보의 실측응답에 대한 FFT 분석을 수행한 결과 첫 번째 피크치는 5~14Hz에 위치하고 있으나 피크치가 두드러지지 않는 특성이 있어 주파수 특성을 파악하기에는 다소 무리가 따르고 50Hz 이상의 고주파에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다. 추후 연구 시에는 이를 감안하여 분해능 200Hz 이상으로 설정하고 고주파 성분에 대한 보다 세밀한 분석을 통하여 구조물의 고유 주파수 분석 및 주변지반의 상태를 파악하는

Table 7 mode shape (case 2)

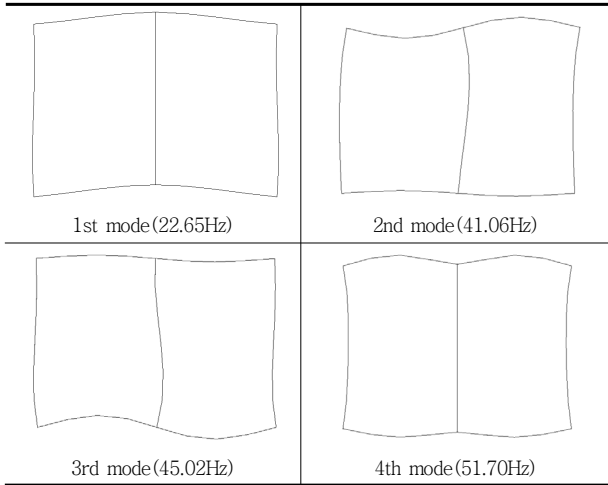
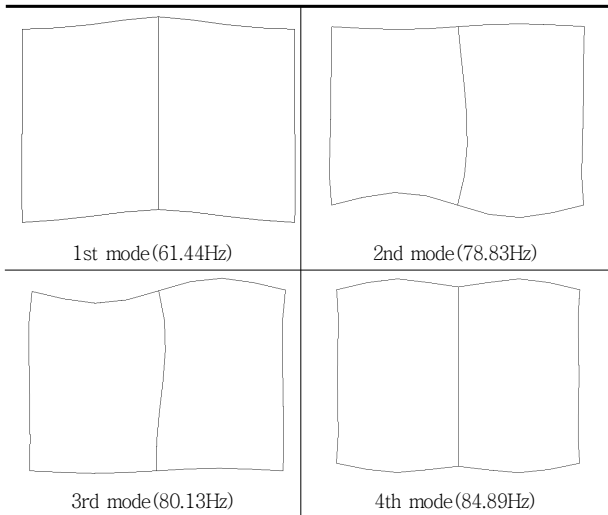


Table 8 mode shape (case 3)



것이 필요하다고 판단된다.

3.2.4 속도 분석

속도 분석은 측정된 가속도를 분석하여 속도이력 곡선을 작성하였다. Type 1의 측정 부위에 따른 속도이력곡선은 Fig. 15와 같다. Fig. 15에 따르면 하부보에서 최대 속도는 0.099 cm/s로 분석되었고 상부슬래브는 0.01 cm/s 이내로 분석되었다.

기존의 진동시험방법에 대한 고찰을 위하여 기존 측정 방법에 의한 결과와 본 연구를 통해 측정된 결과를 비교하였다. Table 7은 기존의 진동 측정방법으로 20개 각기 다른 역사의 지하철 승강장 플랫폼에서 열차가 진입할 때의 최대 진동속도를 각 2회 측정한 결과이다. 각 역사 구조물마다 구조적인 특성이 다소 차이가 있으나 궤도와의

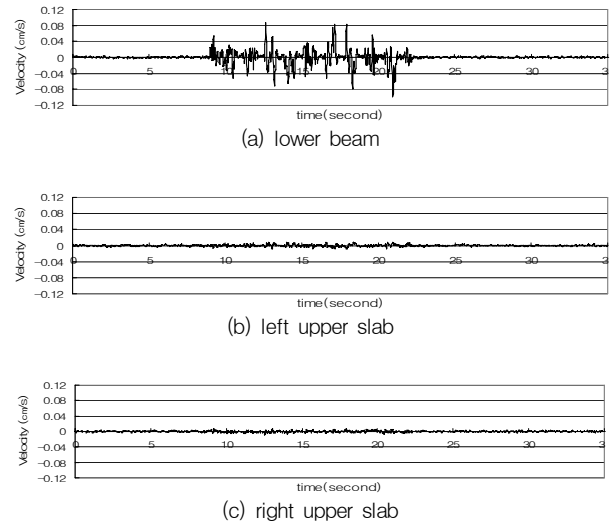


Fig. 15 Velocity at Type 1

Table 9 Peak velocity at platforms

Location	Peak velocity (cm/s)	Location	Peak velocity (cm/s)
A platform-1	0.0617	A platform-2	0.0240
B platform-1	0.0457	B platform-2	0.0032
C platform-1	0.0023	C platform-2	0.0110
D platform-1	0.0041	D platform-2	0.0028
E platform-1	0.0155	E platform-2	0.0191
F platform-1	0.0056	F platform-2	0.0043
G platform-1	0.0102	G platform-2	0.0107
H platform-1	0.0427	H platform-2	0.0178
I platform-1	0.0098	I platform-2	0.0059
J platform-1	0.0074	J platform-2	0.0076
K platform-1	0.0170	K platform-2	0.0031
L platform-1	0.0079	L platform-2	0.0138
M platform-1	0.0126	M platform-2	0.0042
N platform-1	0.0079	N platform-2	0.0071
O platform-1	0.0068	O platform-2	0.0051
P platform-1	0.0015	P platform-2	0.0030
Q platform-1	0.0120	Q platform-2	0.0052
R platform-1	0.0065	R platform-2	0.0060
S platform-1	0.0275	S platform-2	0.0130
T platform-1	0.0417	T platform-2	0.0151

거리는 일정하게 유지할 필요가 있으므로 플랫폼 끝단에서 약 1m 떨어진 위치에 속도센서를 설치하여 열차가 진입할 때의 응답을 측정하였다. 측정결과 최대치가 0.0617cm/s로서 본 연구를 통하여 본선의 주부재에 측정된 진동속도 값보다 작은 것을 알 수 있다. 또한, 승강장에서 측정된 값의 상당수가 0.01cm/s 이하로 분석되어 진동규준과 비교할 때 매우 작은 값을 보이고 있어 기존

Table 10 Peak velocity at Type 1

Location	lower beam	Left upper	right upper
Peak velocity (cm/s)	0.986	0.0919	0.0896

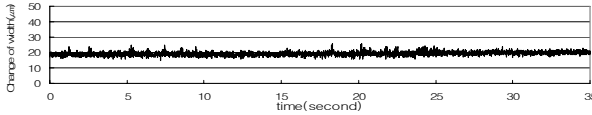


Fig. 16 Change of crack width at upper slab

의 측정방법으로 지하철 구조물의 진동에 대한 영향을 검토하기에는 다소 부족한 점이 있으므로 진동측정방법을 개선할 필요가 있다고 판단된다.

3.2.5 균열 분석

Type 1의 우측 상부슬래브의 횡방향 균열에 균열계이지를 설치하여 응답을 분석하였다. Fig. 5와 같이 왼쪽라인으로 열차가 진행할 때 균열계이지의 응답은 Fig 16과 같다. 그림으로부터 균열계이지의 균열폭 변화량은 거의 없는 것으로 분석되었다. 이는 지하철로 인한 진동이 상부슬래브의 균열폭 거동에는 아무런 영향을 미치지 않는 결과로서 추가적인 연구를 통하여 보다 다양하게 분석할 필요가 있으나 본 연구의 결과만으로 판단할 때, 진동과 상부슬래브에 발생한 균열과는 상관관계가 거의 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

지하철 구조물에 대한 기존의 점검이나 정밀안전진단에서는 열차로 인한 구조물의 진동 측정을 승강장 플랫폼에서 수행하여 본구조물의 진동에 대한 영향 평가가 어려웠다. 금번 연구에서는 열차운행 중에 본선의 진동을 측정함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열차로 인한 진동은 하부보 등 궤도와 가까운 위치에서 진동속도는 0.098cm/sec로서 진동레벨 70dB을

초과하는 결과를 얻었으나 상부슬래브는 0.01cm/s 이하로서 진동에 의한 영향이 미미한 것으로 분석되었다.

- (2) 상부슬래브의 균열은 진동에 의한 폭 변화가 거의 없는 것으로 분석되어 진동과 상부슬래브의 균열과는 상관관계가 크지 않는 것으로 분석되었다.
- (3) 금번 실험결과에 따르면 콘크리트 도상이 자갈도상에 비하여 진동에 대한 영향이 큰 것으로 분석되었으나 보다 정량적인 결과를 도출하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

추후 연구에서는 균열계이지 수를 보다 다양화하고 가속도계의 측정분해능을 높여 진동특성과 균열과의 관계를 보다 명확하게 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김하근, 윤세철, 서동열, 발파진동소음, 서우, 서울, 2005, pp.197-219.
2. 김희철, 신효근, “지하철 운행에 의한 중량터널의 진동”, 한국전산구조공학회, 봄학술발표회논문집, 1995, pp.114-121.
3. 서정범, 박용석, 홍성철, “지하철 운행에 의한 건축물 진동 평가”, 한국산학기술학회논문지, 제9권 5호, 2008, pp.1107-1112
4. 임홍철, 김지연, “지반진동으로 인한 R/C 구조물의 손상에 관한 연구”, 한국구조물진단학회논문집, 제6권 제2호, 2002, pp.195-202.
5. 정상욱, 이상훈, 박상규, “지하철 전동차에서의 전진진동 특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, 1997, pp.354-361.
6. 한국터널공학회, 터널설계기준, 씨아이알, 서울, 2007, pp.74-74.
7. 한국터널공학회, 터널의 이론과 실무, 구미서관, 서울, 2007, pp.205-211.
8. 허영, 이승수, 김희철, 신한철, 이인세, “지하철진동 예측식의 사용성 판단을 위한 실측값과 예측값의 비교”, 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, 1996, pp.80-85.

(접수일자 : 2011년 1월 4일)

(수정일자 : 2011년 5월 8일)

(심사완료일자 : 2011년 5월 13일)

요 지

본 연구에서는 열차 진행에 따른 진동이 지하철 박스구조물에 미치는 영향에 대해서 분석을 수행하였다. 이를 위하여 지하철 본선에 센서를 설치하고 지하철이 운행 시간대의 열차진동 데이터를 획득하였다. 센서의 위치는 하부보, 측벽, 상부슬래브에 설치하였고, 자갈도상부와 콘크리트도상부의 하부보와 측벽에 각각 센서를 부착하여 부재의 위치 및 도상의 종류에 따른 진동의 영향을 분석하였다. 하부보와 상부슬래브의 동적응답을 분석한 결과 하부보의 진동속도에 비하여 상부슬래브의 진동속도는 작은 것으로 분석되었고, 상부슬래브 균열의 폭에 대한 변화도 없는 것으로 분석되어 진동의 영향이 상부슬래브까지 미치지 않는 것으로 분석되었다. 자갈도상과 콘크리트도상의 위치에서 하부보와 측벽의 가속도를 비교한 결과 콘크리트 도상의 약간 큰 것으로 나타났으나 그 차가 크지 않아 도상의 차이에 따른 정량적인 분석은 추후에 추가적인 연구를 통하여 분석하여야 할 것으로 판단된다. 구조물의 진동을 평가하기 위해서 가속도 이력을 속도이력으로 변환하여 기존의 승강장에서 수집된 진동 속도 데이터와 비교하였으며, 승강장보다는 본선의 진동속도가 더 빠른 것을 확인할 수 있었다. 금번 연구를 통하여 정밀안전 시에 지하철의 진동을 측정하여 구조물의 평가를 처음으로 시도하였으며 추후 연구에서는 측정 분해능을 보다 세밀하게 하고 측정 개소를 다양화하여 보다 세밀한 분석을 수행하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 열차, 진동, 지하철, 박스구조물
