

## 교량 접속부 특성을 고려한 선하역사의 진동 해석

# Vibration Analysis of an Elevated Railroad Station Considering Station-Bridge Connection Characteristics

Sanghyun Choi<sup>a,1</sup>, Soonjung Kwon<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 437-763, Republic of Korea

<sup>b</sup> Railroad Convergence Technology Center, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 437-763, Republic of Korea

### ABSTRACT

Since the vibration induced by a train is transferred directly to a station via a roadbed structure, the elevated station is particularly vulnerable to noise and vibration. To establish more appropriate measures to reduce vibration, the structural behavior and damping characteristics depending on the structural type and the composition of a elevated station should be identified, because the noise inside the station is mainly structure borne noise by the vibration of a station structure. In this paper, the vibration characteristic changes depending on mechanical connection types between an elevated station and a connected bridge are analyzed. The finite element model for Daecheon Station is constructed for the purpose of this study, and the analysis is performed using ABAQUS. The analyses are conducted for with and without bridge connections, and for the bridge connections, ramen and bearing types are considered in the analysis.

### KEYWORDS

elevated station  
connected bridge  
bearing  
vibration  
interaction

선하역사는 역사 건물의 상부에 위치한 노반구조물을 통하여 열차 운행으로 인한 진동이 직접 역사 구조물로 전달되므로 소음·진동에 취약한 구조이다. 선하역사 내부의 소음은 주로 구조물의 진동으로 인하여 발생하는 고체소음이므로 보다 효율적인 진동 저감 대책의 수립을 위해서는 역사의 구조 형식, 부재 및 재료 등의 구성 요소에 따른 구조적 거동 및 감쇠 특성의 파악이 중요하다. 이 논문에서는 선하역사와 인접 교량과의 접속부의 역학적 특성에 따른 진동 특성 변화에 대한 검토 결과를 제시하였다. 해석 대상 역사는 대천역이며, ABAQUS로 유한요소해석을 수행하였다. 접속부 특성은 접속 교량이 있는 경우와 없는 경우, 그리고 있는 경우 라멘식과 받침형식으로 구분하여 검토를 수행하였다.

선하역사  
접속교량  
받침  
진동  
상호작용

© 2014 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-70-8855-1654. Fax. 82-31-462-8205.  
Email. sjkwon21@hanmail.net

1 Tel. 82-70-8855-1654. Email. schoi@ut.ac.kr

**ARTICLE HISTORY**  
Received Jun. 16, 2014  
Revised Jun. 22, 2014  
Accepted Jun. 30, 2014

## 1. 서론

최근 철도부지 확보의 어려움으로 철도의 입체화가 진행되면서 선하역사의 건설이 증가하는 추세이다(Fig. 1). 선하역사는 선로하부의 유휴공간을 활용하여 역사를 건축하는 방식으로, 부지면적을 최소화하고 여객동선을 단축할 수 있어 경제적이거나, 차량-궤도에서 발생하는 하중 및 진동이 직접적으로 역사 구조물로 전달되므로 소음·진동에 매우 취약한 구조이다(Jang et al., 2010; Kim et al., 2008). 특히 도시와 같은 인구 밀집 지역에 위치한 선하역사의 경우 공간 활용에 대한 요구가 증가하고, 역사 내 정온시설의 입점이 늘어남에 따라 고도의 진동 제어 대책이 더욱 필요한 상황이다. 선하역사에 발생하는 소음은 Fig. 2와 같이 대부분 차량, 궤도에서 발생되어 상부선로 및 접속교량을 통해 기둥, 슬래브, 벽체 등 역사의 주요 부재로 전달되는 진동으로 인하여 발생하는 고체소음(structure borne noise)으로 역사의 구조형식에 따라 다양한 메커니즘이 존재할 수 있으므로, 보다 효율적인 진동 저감 대책의 수립을 위해서는 역사의 구조 형식, 부재 및 재료 등의 구성 요소에 따른 구조적 거동 및 감쇠 특성의 파악이 중요하다. 특히 선하역사의 진동을 발생시키는 주요 원인인 열차의 중량과 역사와 연결되어 있는 접속교량의 존재를 감안할 때 역사의 진동 특성을 보다 정확히 파악하기 위해서는 역사와 교량의 상호작용을 고려한 진동해석이 수행되어야 한다.

선하역사의 진동과 관련하여 현재까지 발표된 연구 결과는 대부분 접속교량과의 상호작용을 고려하지 않고 열차 통과로 인한 역사구조물의 진동에만 초점을 맞추어 수행되었다. Jang et al.(2010)은 플로팅 슬래브궤도를 적용한 선하역사의 진동 해석을 수행하였다. 진동 해석은 자갈궤도와 플로팅 슬래브궤도의 경우에 대하여 수행하였으며, 차량-궤도의 상호작용 해석 결과를 역사에 시계열 하중으로 작용시키는 방식으로 해석을 수행하였으나, 접속 교량의 영향에 대한 검토는 해석에 고려하지 않았다. Lee et al.(2011)은 비록 선상역사이나 철도역사에 대한 해석을 통하여 지반에 대한 방진대책 효과를 검토하였다. 운행 열차로는 지하철, 무궁화, 새마을 및 화물 열차를 고려하였으며, 하부 지반의 모델링을 포함한 해석을 수행하였다. Park(2011)은 선로가 설치된 상부 교량과 역사 간에 설치되는 받침의 변화에 따른 선하역사 내 진동 및 소음 저감 효과를 검토하였다. Gerb 시스템이 적용된 천안아산역, EQS가 적용된 신경주역 및 강결구조의 오송역사에서 진동가속도 및 소음 측정 결과를 비교하였으나, 동일 역사에 대하여 받침의 변화에 따른 진동 특성에 대한 해석은 수행하지 않았다.

해외의 경우도 대부분 접속교량을 제외한 역사에 대한 모델만으로 진동 해석을 수행하였다. Pamanikabud et al.(2003)은 열차 운행 속도, 가속 및 감속률, 건물까지의 거리 등의 파라미터와 측정 결과를 이용하여 플랫폼과 인접건물의 소음 예측을 위한 회귀분석식을 제시하였다. 비록 역사의 진동에 대한 해석을 수행하지 않았으나, 열차의 통과로 인한 소음 뿐 아니라 열차의 시동 및 제동으로 인한 소음도 중요한 인자임을 제시하였다. Zhang et al.(2007)는 선하역사의 대합실의 진동을 해석하고 불쾌감에 대한 분석을 수행하였다. Ju et al.(2009)은 열차 운행으로 인하여 발생하는 응답의 지배주파수에 대한 연구를 수행하고, 진동의 크기는 열차의 속도와 축간격으로 결정되는 지배주파수에 의하여 크게 영향을 받는 것을 제시하였다. Wang et al.(2013)은 열차, 궤도 및 역사의 상호작용을 고려한 해석을 수행하고 플랫폼에서의 진동 특성을 분석하였다. Yang et al.(2013)은 선하역사에서의 진동 측정 결과 및 특성을 제시하였다. 측정된 역사 진동은 플랫폼 하부 슬래브의 수직 진동이 최고, 천정 아치에서의 가로방향 진동이 최소로 나타났다. 또한, 열차의 속도 변화 또는 가진 주파수에 따라 진동이 증폭될 수 있는 것으로 나타났다.

이 연구에서는 선하역사의 진동에 미치는 접속교량의 영향을 궤도, 교량 및 역사의 상호작용을 고려한 해석을 통하여 분석하였다. 해석 대상은 장항선의 대천역사이며, 대표 단면을 2차원으로 모델링하여 해석을 수행하였다. 열차 하중은 실제 상황을 고려하여 새마을, 무궁화 및 화물 열차로 하였으며, 접속 교량이 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 해석을 수행하였다. 해석은 접속 교량이 있는 경우 라멘식 연결과 받침이 적용된 교량식 연결의 경우를 고려하였으며, 라멘식 연결은 타 역사의 경우를 참조하여 단면을 결정하였다. 해석에 고려된 받침은 힌지, 탄성받침 및 EQS 받침(Park et al., 2011)이며, 접속된 교량의 경간을 고려하여 받침의 역학적 특성을 결정하였다. 진동 해석은 ABAQUS를 이용하여 수행하였으며, 다양한 접속부 특성에 따른 진동의 변화를 접속 교량 및 역사의 주요 부분에서 비교 검토하였다.

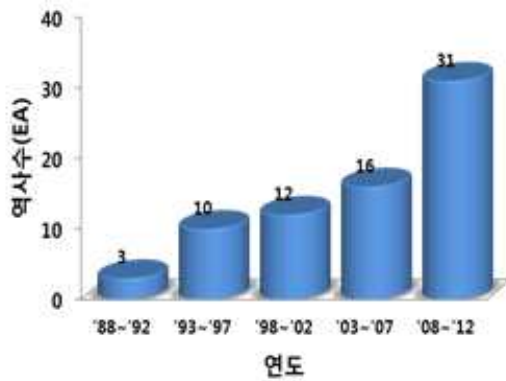


Fig. 1. Construction trends of elevated stations

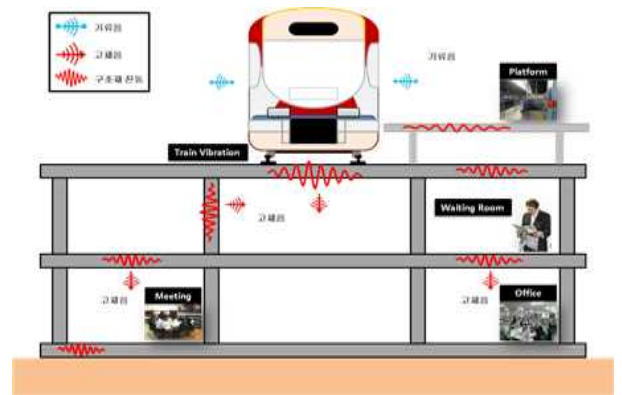


Fig. 2. Vibration of elevated stations

## 2. 교량-역사 접속부, 궤도 및 역사 특성

### 2.1 받침의 역학적 특성

교량-역사 접속부에 적용된 받침의 종류는 Fig. 3과 같은 힌지받침, 탄성받침 및 EQS 받침이다. 힌지받침은 회전만을 허용하는 것으로 하였다. 탄성받침은 저감쇠 적층고무받침으로 적용하였으며, 수직 및 수평방향 탄성계수는 각각 1,019 kN/m과 4.30 kN/m를 적용하였다. EQS 받침의 수평방향 거동은 그림 4와 같은 쌍선형형태의 하중-변위 곡선을 갖는 것으로 고려하였으며, 수직 및 수평방향 탄성계수는 각각 854 kN/m와  $k_{ti}=123$  kN/m 및  $k_{td}=1.65$  kN/m를 적용하였다. 최대 수직하중은 탄성받침 및 EQS 공히 1,993 kN으로 적용하였다. 회전의 경우 탄성받침 및 EQS받침 모두 허용하지 않는 것으로 가정하였다.



(a) 힌지받침



(b) 탄성받침



(c) EQS 받침

Fig. 3. Bearings applied to dynamic analysis

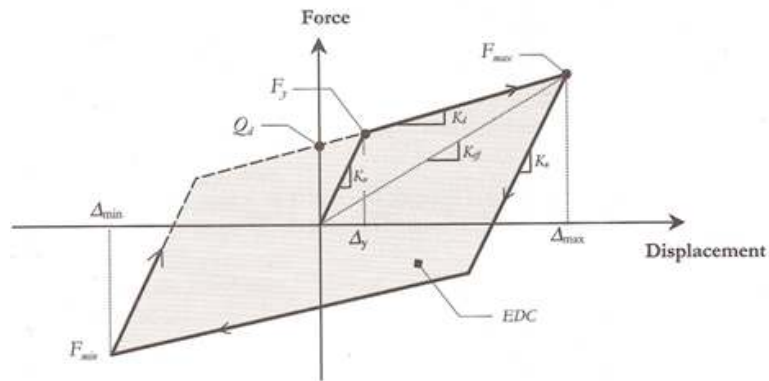


Fig. 4. Load-displacement relationship for EQS bearing

### 2.2 대천역의 구조물, 궤도 및 교량접속부 특징

대천역은 선로구조물 하부에 지상 2층 지하 1층으로 구성된 선하역사로 역사의 길이는 122m, 폭은 32m이다. 일반적으로 교량과 역사의 접속부는 라멘 형식과 교량 형식으로 구분할 수 있으며, 대천역(Fig. 5)의 경우 구조형식은 라멘형식, 접속부는 교량 형식이다. 역사의 좌우로 접속되는 교량은 PSC빔교로 경간은 25m이다. 궤도는 자갈도상궤도이며, 새마을, 무궁화 및 화물열차가 운행 중이다.

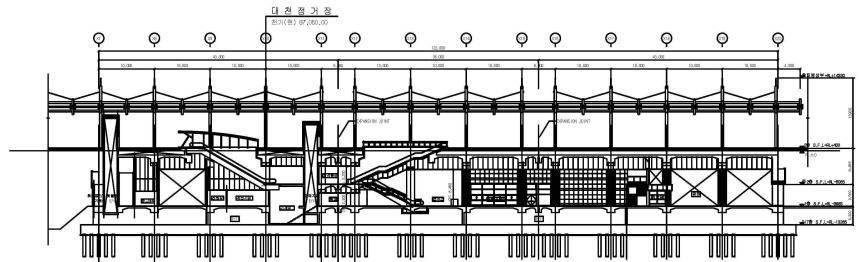


Fig. 5. Daecheon station

### 3. 유한요소 해석

#### 3.1 해석 모델

유한요소 수치해석은 선하역사만의 모델과 선하역사와 접속교량이 있는 해석모델(Fig. 6)에 대하여 별도로 수행하였다. 접속교량이 있는 모델의 경우 라멘식 교량과 받침식 교량에 대하여 별도의 모델링을 하였고, 받침식 교량의 경우 힌지, 탄성받침 및 EQS 받침을 적용하여 Table 1과 같이 총 5가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석 모델은 대표 단면에 대하여 2차원으로 모델링하였으며, 지하층의 외부 벽체는 지반스프링계수를 이용하여 모델링하였다. 적용 열차하중은 새마을, 무궁화, 화물열차이며, 새마을 및 무궁화의 경우 역사 통과시 최대 속도인 130km/hr, 화물열차는 80km/hr로 통과하는 것으로 가정하였다. 레일은 60K, 레일 하부의 경우 체결구(e-clip), 패드 및 자갈도상의 역학적 특성을 고려한 등가선형스프링으로 모델링하였다. 등가선형스프링값은 cho et al.(2013)의 계산값을 참조하여 수직방향 95.8MN/m 및 종방향 9.0 MN/m을 적용하였다. 시간이력해석은 0.0025초 간격으로 10개의 모드를 이용한 모드중첩법을 이용하여 수행하였으며, 역사 및 교량에 대한 감쇠비는 통상적인 값인 5%를 적용하였다.

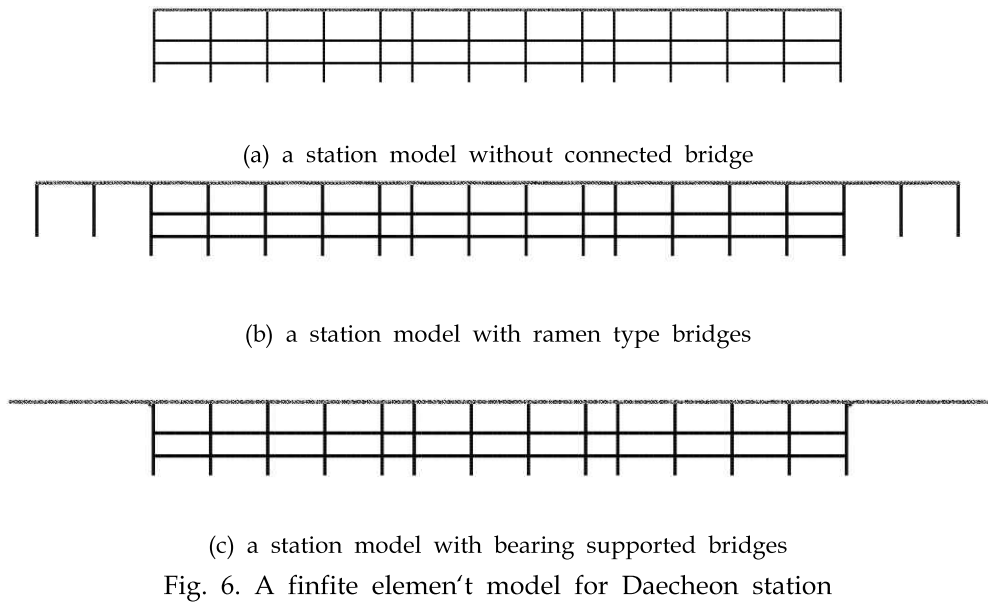


Fig. 6. A finite element model for Daecheon station

Table 1. Finite element model cases

model case	station	connected bridge	ramen bridge	bearing type
1	○			
2	○	○	○	
3	○	○		hinge
4	○	○		elastomeric
5	○	○		EQS

### 3.2 해석 결과

Fig. 7 및 Fig. 8은 역사 최상부에서 산정한 가속도에 대한 시간영역 및 주파수영역 비교 결과이다. 그림에서 역사만을 모델링한 Case 1이 가장 큰 응답을 나타낸 것을 알 수 있으며, 라멘 교량의 경우도 비교적 큰 진동이 발생한 것을 알 수 있다. 힌지받침의 경우 탄성받침이나 EQS와 대등하거나 작은 진동이 발생하였다. 이는 탄성받침과 EQS받침의 회전변위를 무시하고 해석하였고 이들 받침들이 교량의 응답 감소에 초점을 맞추었기 때문으로, 실제 힌지의 경우 다른 받침보다 교량에서 보다 큰 응답 발생하였다.

Table 2. Summary of analysis results

Classification		Case 1 (station only)	with connected bridge			
			Case 2 w/ ramen	Case 3 w/ hinge	Case 4 w/ elastomeric	Case 5 w/ EQS
$f_1$ (Hz)	bridge mode	-	-	1.657	3.559	3.539
	station mode	1.280	1.492	5.627	2.103	2.099
$a_{max}$ (g)	Semaetul	0.082	0.061	0.049	0.049	0.049
	Mugunghwa	0.108	0.080	0.069	0.079	0.079
	freight	0.050	0.034	0.029	0.030	0.030

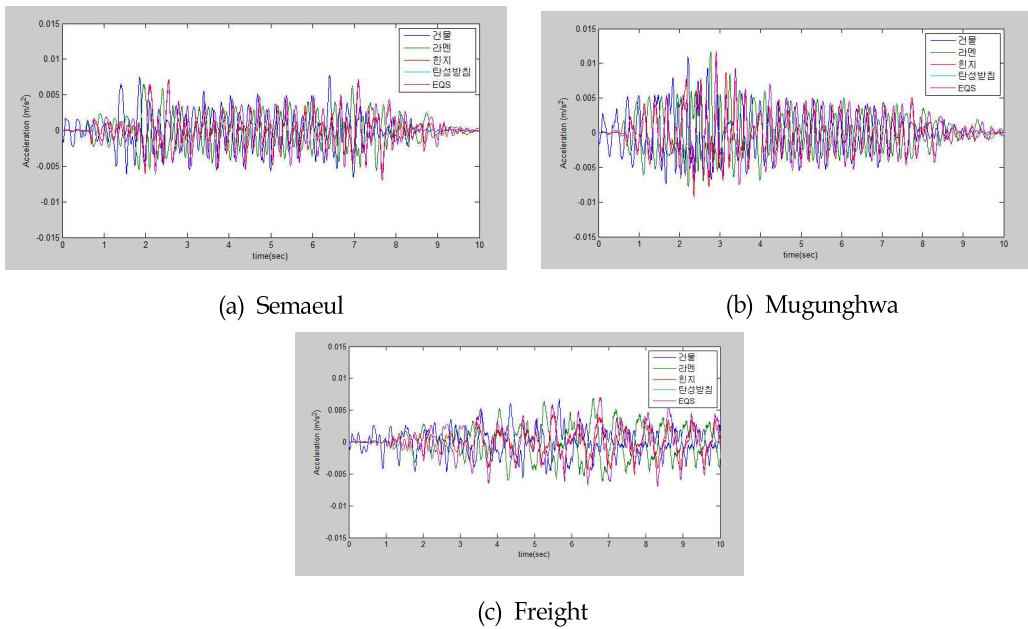


Fig. 7. Time domain acceleration response due to moving train load

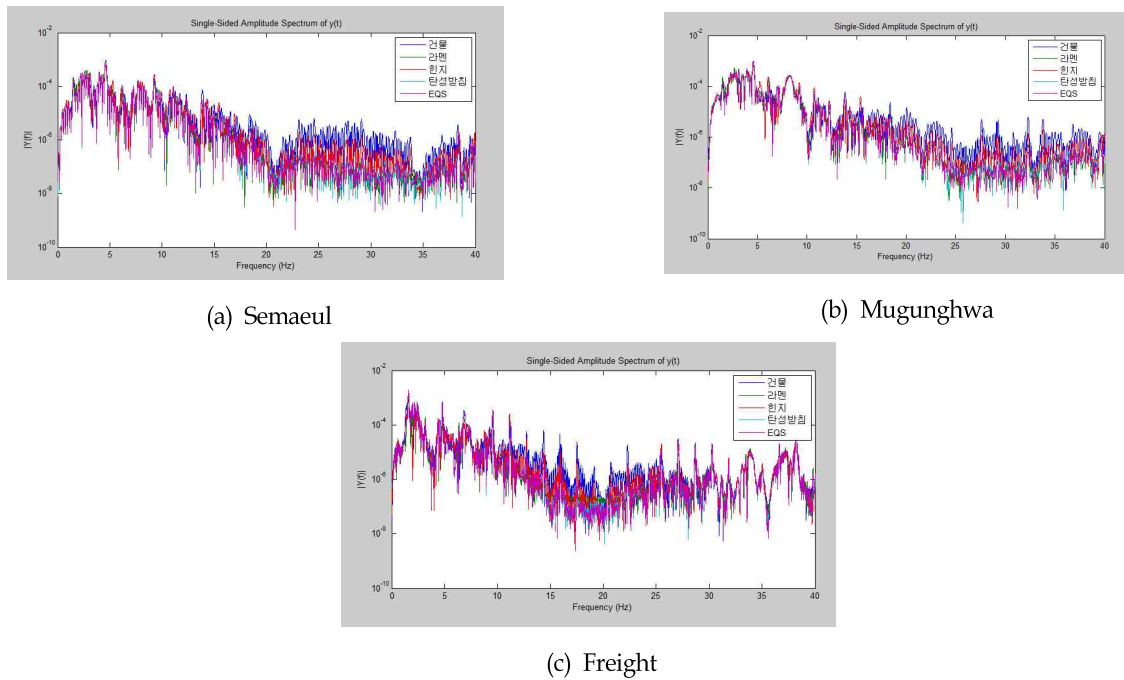


Fig. 8. Frequency domain acceleration response due to moving train load



Fig. 9. Mode shapes

각 경우별 해석결과는 Table 2에 정리하였다. Table에서  $f_1$ 은 침투 고유주파수를 의미하며,  $a_{max}$ 는 가속도의 최대값을 의미한다. 참고로 접촉교량이 있는 경우 Fig. 9(a) 및 (b)와 같은 교량모드와 역사모드가 발생하므로 관련 모드 중 침투값으로 비교하였다. 역사모드의 경우 역사만의 모델이 가장 작은 값을 나타냈으며, 힌지받침이 가장 큰 값을 나타냈다. 이러한 결과는 힌지받침이 횡방향에 대한 구속이 가장 크기 때문으로 판단된다. 교량모드의 경우 힌지받침이 가장 작은 값을 나타냈으며, 탄성받침과 EQS는 유사한 값이 나타났다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 선하역사의 진동에 미치는 접촉교량의 영향을 궤도, 교량 및 역사의 상호작용을 고려한 해석을 통하여 분석하였다. 유한요소 수치해석은 선하역사만의 모델과 선하역사와 접촉교량이 있는 해석모델에 대하여 별도로 수행하였다. 접촉교량이 있는 모델의 경우 라멘식 교량과 받침식 교량에 대하여 별도의 모델링을 하였고, 받침식 교량의 경우 힌지, 탄성받침 및 EQS 받침을 적용하여 총 5가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석 대상 역사는 장항선 대천역 사이이며, 진동 해석은 ABAQUS를 이용하여 실제 열차 운행상황을 고려하여 새마을, 무궁화 및 화물 하중을 이동하중으로 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 해석 모델의 선하역사에 대한 침투 고유주파수는 선하역사, 접촉교량이 라멘, EQS, 탄성, 힌지받침으로 모델링 한 순서로 작게 나타났다.

(2) 가속도의 최대값은 무궁화, 새마을, 화물열차의 순으로 모든 해석경우에 동일한 양상으로 크게 나타났다. 동일한 전동차가 견인하는 무궁화와 화물열차의 경우 동일한 속도에서는 객차보다 축중이 더 무거운 화차를 견인하는 화물열차의 가속도값이 크게 나타나야 함에도 무궁화의 가속도 값이 크게 나타난 이유는 해석 시 새마을 및 무궁화의 경우 역사 통과시 최대 속도인 130km/hr, 화물열차는 80km/hr로 통과하는 것으로 가정하였기 때문으로 판단된다.

(3) 접촉교량의 연결부가 강철인 라멘으로 연결한 경우보다 힌지받침, 탄성받침, EQS받침으로 해석한 경우의 가속도 최대값이 작게 나타났다. 여기서 힌지받침에 비하여 진동저감 효과가 큰 탄성받침과 EQS받침의 응답이 크게 나타난 이유는 탄성받침과 EQS받침의 회전을 무시하였고 교량의 응답 감소에 초점을 맞추었기 때문으로 판단된다.

(4) 접촉교량의 상호작용을 고려하여 해석한 경우의 가속도의 최대값이(0.069g ~ 0.080g)로 선하역사만 해석한 경우(0.108g)의 가속도 최대값의 약 70% 크기로 해석 결과가 크게 차이가 났다. 따라서 선하역사에 적용될 방진장치 설계 시 본 연구 분석결과를 반영하여 교량-역사 접촉부를 고려한 구조해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

(5) 선하역사의 소음·진동은 차량, 궤도에서 발생되어 상부선로 및 접촉교량을 통해 기둥, 슬래브, 벽체 등 역사의 주요 부재로 전달되는 진동으로 인하여 발생하는 고체소음으로, 선하역사의 소음·진동을 감쇠하기 위해서는 향후 진동전달경로에 적용 가능한 방진장치에 대한 추가 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

이 연구는 2013년도 국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업 “역사 구조물 소음/진동 저감기술 개발” 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

Cho, J.-R., Kim, D.-S., Kim, Y.J., Kwark, J.-W., Jang, S.Y. (2013). “Three dimensional model for dynamic moving load analysis of a PSC-I girder railway bridge.” Journal of the Korean Society for Railway, Vol.16, No.4, pp.286-297.

- Jang, S.Y., Cho, H.-H., Yang, S.C. (2010). "Vibration analysis of station under railway lines with floating slab track." Proceedings of 2010 Spring Conference, Korean Society for Railway, pp.1719-1724.
- Ju, S.H., Lin, H.T., Huang, J.Y. (2009). "Dominant frequencies of train-induced vibrations." Journal of Sound and Vibration, Vol.319, pp.247-259.
- Kim, J.H., Youn, S.H. (2008). "The review of floating slab tracks for vibration reduction of railway station." Korean Journal of Environmental Engineers, Vol.30, No.6, pp.581-586.
- Lee, T.-K., Park, W.K., Kim, B.-S. (2011). "The prediction of vibration reduction due to vibration isolating countermeasure at railway station." Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol., 13, No.1, pp.11-16.
- Park, T.-H., Park, H.-S., Kim, H.-B., Choi, J.-H. (2011). "A study on the characteristics of vibration reduction type disk bearing in station of rapid transit railway." Proceedings of Korea Society for Railway.
- Pamanikabud, P., Paoprayoon, S. (2003). "Predicting mass rapid transit noise levels on an elevated station." Journal of Environmental Management, Vol.67, pp.353-362.
- Wang, T., Wei, Q. (2013). "Vibration characteristics of the platform in high-speed railway elevated station." Telkomnika, Vol.11, No.3, pp.1383-1392.
- Yang, N., Guo, T., Sun G. (2013). "Train-induced vibration on elevated railway station." Journal of Central South University, Vol.20, pp.3745-3753.
- Zhang, N., Xia, H. (2007). "Comfort analysis of the new Guangzhou Railway Station." Proceedings of the Second International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement, pp.1434-1440.