

# 경량전철 교량 상부구조의 열차주행에 대한 진동 및 소음 분석

## The Estimation of Structural-Borne Noise and Vibration of the Bridge under the Passage of the Light Rail Transit

김성일<sup>†</sup> · 여인호\* · 정원석\* · 김성춘\*\*

Sung-Il Kim · In-Ho Yeo · Won-Seok Chung · Sung-Choon Kim

### Abstract

During the passage of the train, the railway bridge undergoes vibration and noise. The noise of railway bridge can be occurred from various sources. The wheel-rail contact, noise from machinery parts, structural-borne noise, pantograph noise and aerodynamic noise of the train work in combination. Running train is one of the most important factors for railway bridge vibration. The repeated forces with equidistant axles cause the magnification of dynamic responses which relates with maintenance of the track structure and structure-borne noises. The noise problem is one of the most important issues in services of light rail transit system which usually passes through towns. In the present study, The vibration and noise of the LRT bridge will be investigated with utilizing dynamics responses from moving train as input data for noise analysis.

**Keywords** : Railway Bridge, Moving Load Analysis, Vibration, Structural-Borne Noise

철도교량, 이동하중해석, 진동, 구조소음

## 1. 서론

주행열차하중은 철도교량 진동 발생의 가장 주요한 요인이자, 일정간격으로 반복되는 축하중은 동적응답의 증폭과 더불어 궤도의 유지관리 등과도 밀접한 관계에 있으며, 구조물의 방사소음을 유발하고 있다. 이동 열차하중에 의한 동적해석은 철도교량 연구에 있어 중요한 부분을 차지하며 공진 및 처짐, 가속도 등 각 응답의 동적성능 평가에 대한 많은 연구가 수행되어왔다[1,2]. 반면, 열차하중에 의한 진동과 이에 따라 발생하는 구조물 방사소음을 연계한 연구는 많지 않으며, 일본 등에서 실험적 연구를 통해 수행한 사례가 있다[3].

특히, 도심지를 주로 통과하는 경량전철의 경우 소음은 경량전철 운행에 있어 매우 중요한 요소이다.

철도교량에서 발생하는 소음원은 매우 다양하다. 휠-레일 접촉, 기기에 의한 소음, 구조물 방사소음, 집진계 소음, 차량 공력 소음 등이 복합적으로 작용하게 된다. 경량전철의 경우 중저속 주행에 의해 상대적으로 진동에 의한 구조물 방사소음이 적을 수 있으나, 도심지 통과 등은 민감한 사안이므로 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 이동열차하중해석에 의한 교량의 동적응답을 입력원으로 활용해 진동에 의해 발생하는 구조소음에 대한 분석을 수행하여 경량전철에서 발생하는 진동 및 소음 발생 양상을 분석하고자 한다.

## 2. 철도 소음

### 2.1 철도교량의 소음특성

열차운행에 의해 발생하는 소음 발생 특성을 기술하면 Fig. 1과 같으며 이러한 소음은 차량이나 궤도 또는 궤도를

<sup>†</sup> 책임저자 : 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부

E-mail : sikim@krti.re.kr

TEL : (031)460-5354 / FAX : (031)460-5359

\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부

\*\* (주)에이브이티

지지는 노반구조물별로 각각 소음을 발생시키는 영향요소가 있다.

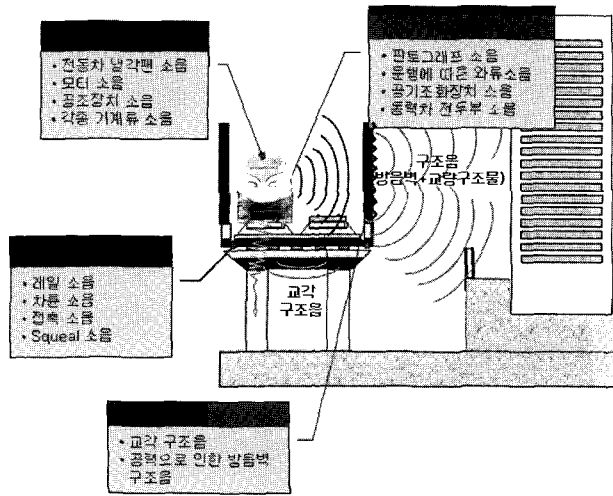


Fig. 1. Noise of railway

일본 신칸센에서 소음원들이 혼합되어 이루어진 철도소음에 대한 소음원별 음압레벨을 추정한 사례는 다음과 같다[4].

Table 1. Example of noise level of Japanese Shinkan-sen(25m 표준 측정점, 속도 270km/h, 슬래브케도, 콘크리트교가교)

음원별 소음	음압레벨 (db(A))
전동음	71~73
구조물음	65~70
집전계음	77~78
차량공력음	77
레 일	81~82

각각 소음원별로 각기 다른 주파수 특성을 갖고 있으며, 이 중 본 연구의 대상은 구조소음으로서, 고가교 등에서 발생하는 구조음은 전동음과 마찬가지로 차륜/레일 간에 작용

하는 가진력이 원인이 되며, 이 진동은 레일로부터 도상 또는 상판을 경유하여 구조물에 전달되며 이렇게 전달된 진동은 구조물 표면이 음원이 되어 방사하게 되는 것이 일반적이다.

본 과업의 대상으로 하는 구조음은 열차속도의 1~2승에 비례하여 증가하며 주로 125Hz 이하의 저주파 성분이 지배하는 것으로 알려져 있다. 철도청 발간자료 [4]에 의하면 교량 형식별로 Fig. 2와 같이 소음레벨을 나눌 수 있다.

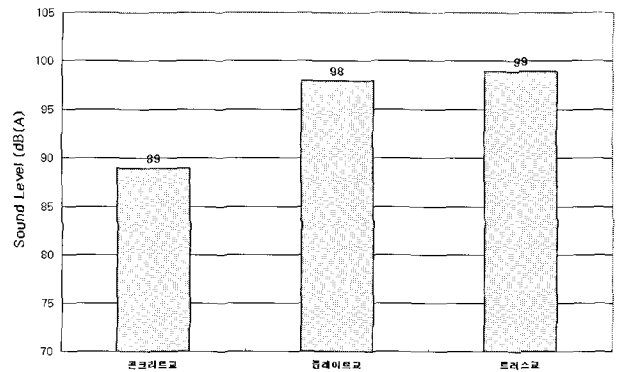


Fig. 2. Noise Level according to materials of the bridge

## 2.2 소음진동 규제기준

『소음·진동규제법』(법률 제4295호, 2002.12.30)은 환경소음을 규제하기 위한 소음·진동관련 개별법이다[5]. 소음·진동규제법에서는 소음·진동업무와 관련된 용어의 정의와 공장소음, 건설소음, 교통소음, 생활소음에 대한 규제 및 소음과 관련하여 방지시설을 할 수 있는 업체의 등록 등에 관해서 규정하고 있다. 최근까지 철도소음 기준이라는 단어를 『소음·진동규제법』에서 찾아볼 수 없었으나 1994년 11월 21일 총리령 제472호로 철도소음한도(기준)가 Table 2와 같이 공포되어 2000년 1월 1일 시행되며, 공포일 이후

Table 2. Standard for Noise Level of Korean Railway

대상 지역	구 분	한 도			
		2000.1.1 ~ 2009.12.31		2010. 1.1 부터	
		주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역 중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경 보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50m 이내지역	소 음 (Leq [dB(A)])	70	65	70	60
상업지역, 공업지역, 농림지역, 준농림지역 및 준도시지역 중 취락지구 및 운동·휴양지구 외의 지역 미고시 지역	소 음 (Leq [dB(A)])	75	70	75	65

준공(이전, 변경)되는 철도는 2010년 1월 1일부터 한도를 공포일로부터 적용하기로 되어 있다. 여기서 평가량은 대부분의 외국기준과 마찬가지로 소음에너지를 시간적으로 평균하여 대수변환한 등가소음도( $L_{eq}$ )를 사용한다.

등가소음도는 변동소음의 평가법으로 소음에너지를 시간적으로 평균하여 대수변환한 것이다.

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_i}{10}} dt \right) \text{ [dB(A)]} \quad (1)$$

여기서,  $L_i$  는  $i$ 번째의 소음레벨이다.

### 3. 주행열차하중에 대한 진동해석

철도교량의 열차 주행하중에 대한 동적해석을 위하여 다음과 같은 유한요소를 사용하여 모델링하였다. 바닥판의 모델링에는 4절점 Mindlin 판요소를 사용하였으며, 거더 및 가로보의 모델링에는 공간뼈대요소를 사용하였다. 전단변형을 고려할 수 있는 Timoshenko 보 요소로서 요소 당 2개의 절점과 절점 당 6개의 자유도를 갖는 요소이다. 바닥판과 거더의 연결은 강결요소를 이용하였다. 이와 같은 유한요소를 이용하여 Fig. 4와 같은 경량전철용 PSC U형 거더 교량에 대한 수치모델을 구성하였다[6].

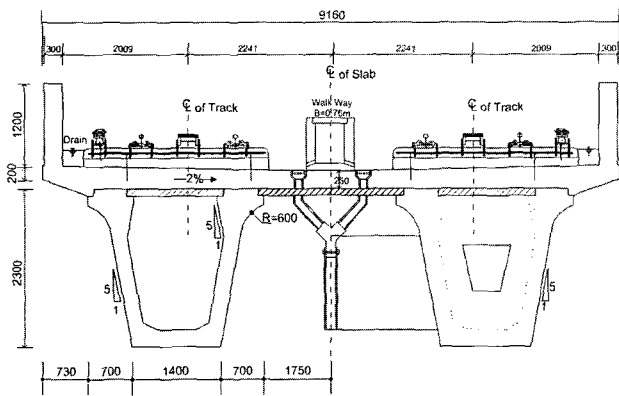


Fig. 4. Cross section of PSC U-type girder

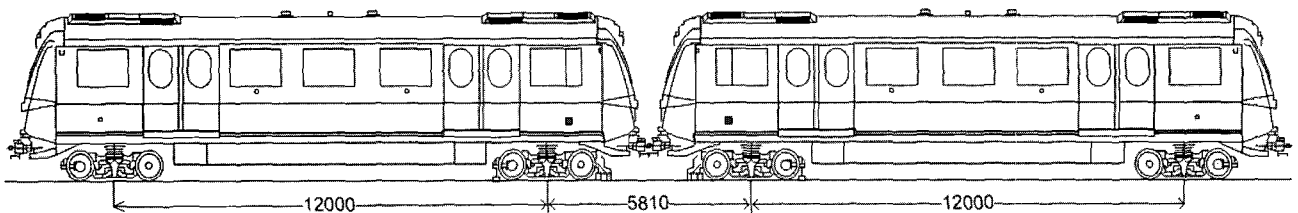


Fig. 5. Axle distance of LRT

교량의 운동방정식은 일반적인 유한요소법 정식화 과정에 따라 다음과 같이 구성된다[1].

$$[M]_B \{ \ddot{u} \}_B + [C]_B \{ \dot{u} \}_B + [K]_B \{ u \}_B = \{ F_t \} \quad (2)$$

여기서,  $[M]_B$ 는 교량의 질량행렬,  $[K]_B$ 는 강성행렬,  $[C]_B$ 는 감쇠행렬이며  $\{F_t\}$ 는 교량에 작용하는 열차의 하중 벡터이다.

위의 운동방정식은 열차가 진행하는 때 시간간격에 Newmark- $\beta$  방법에 의하여 계산한다. 교량의 고유진동수를 구하기 위한 자유진동해석은 부공간 반복법(Sub-Space Iteration Method)을 이용하여 구한다.

또한 강제진동해석인 이동하중해석에 사용된 차량모델은 용인경량전철 구간을 운행할 차량으로서 Table 3의 AW4기준[7]을 적용하여 이동집중하중 연행 모델(Constant Forces)에 의한 동적해석을 수행하였다.

경량전철의 주행은 시간경과에 따라 일정한 속도로 주행하면서 교량 상판의 레일 중심을 따라 작용하는 것으로 하였으며, 설계속도인 80km/h까지 5km/h 간격으로 주행열차 동적해석을 수행하였다. Table 3은 기준별 경량전철의 차량하중 및 축하중을 나타내며, Fig. 5는 축중배치도를 나타낸다.

Table 3. Axle Loads of LRT

구분	하중상태	차량중량 (kgf)	축중량 (tonf)	비율
AW0	공차	24,000	6.0	57.3%
AW1	AW0 + 승객 41	26,542	6.6	63.4%
AW2	AW0 + 승객 164	34,168	8.5	81.6%
AW3	AW0 + 승객 226	38,012	9.5	90.8%
AW4	AW0 + 승객 288	41,856	10.5	100

본 연구에서는 교량의 감쇠는 Rayleigh 댐핑을 이용해 고려하였으며, Eurocode에서 제시한 가장 엄격한 값을 적용하여 PSC U형 거더 교량에 대하여 1.0%의 감쇠비를 적용하였다.

자유진동해석을 수행하여 지배적인 첫 번째 휨 고유진동수를 구하면 특정 축 간격을 가진 열차하중에 대한 공진 및 공진소멸을 예상할 수 있는 열차 속도를 구할 수 있다.

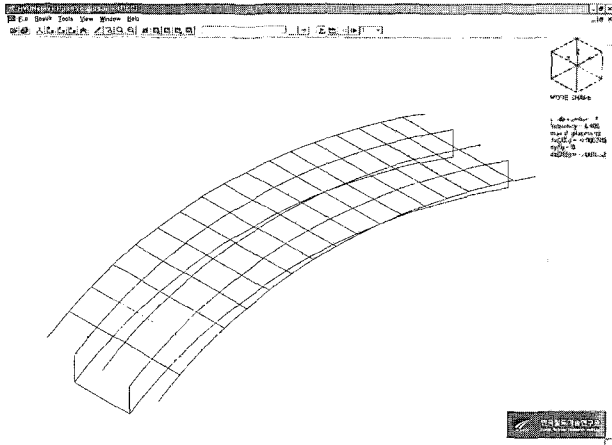


Fig. 6. The 1st bending frequency of PSC U-type girder

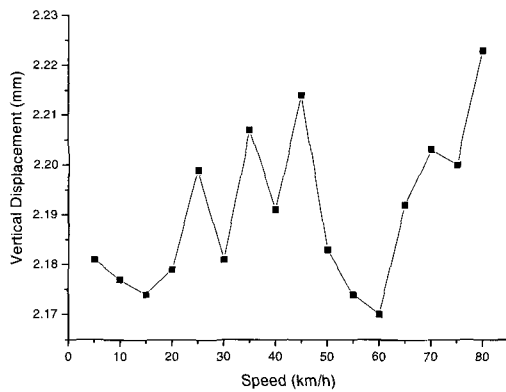
철도교량의 경우 첫 번째 휨 고유진동수가 전체 모드의 대부분을 지배하며, 설계속도 내의 임계속도 등을 고려할 때에도 첫 번째 휨 고유진동수가 가장 중요한 요소이다. 해석 결과 첫 번째 휨 고유진동수는 Fig. 6과 같이 4.41Hz로 나타났다.

이를 이용하여 임계속도를 구하면 약 279.6km/h로 이는 설계속도를 크게 초과한 수치임을 알 수 있다. 즉, 운행 중 공진의 발생 가능성은 없는 것으로 나타났다.

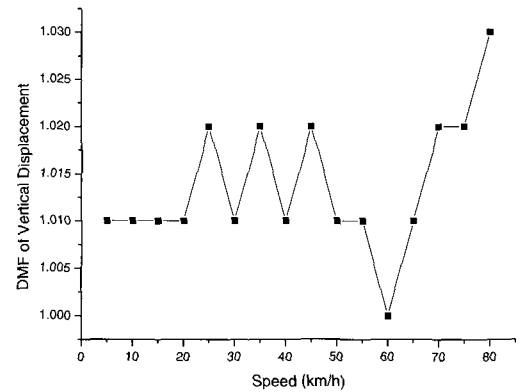
Fig. 7은 경량전철 주행에 의한 PSC U형 거더 교량의 응답을 나타낸 것으로, 각각 중앙부 최대치짐, 충격계수, 상부 슬래브의 수직가속도, 거더의 속도(velocity) 응답을 나타낸다. 경량전철의 최고속도가 80km/h로 제한되는 이유로 최대 치짐 2.22mm, 최대충격계수 1.03, 상판의 수직가속도 0.02g 등 소요의 성능기준을 충분히 만족하는 안정적인 동적응답이 나타나고 있다.

#### 4. 진동에 의한 소음방사 해석

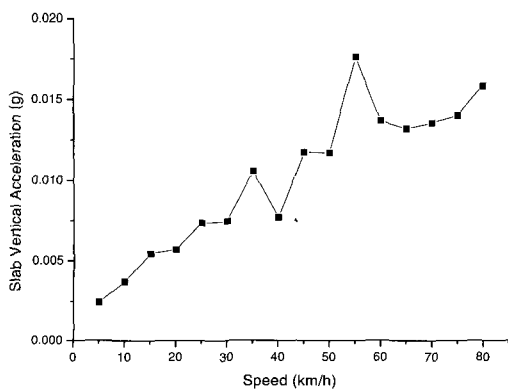
진동에 의해 소음이 방사되는 구조음을 예측하기 위해서는 구조물의 진동특성과 방사특성을 이해해야 한다. 특히, 교량 구조물에 발생하는 소음은 열차 운행에 따른 진동의 영향으로 교량 표면에서 소음이 발생된다. 일반적으로 이러한 진동에 기인하여 발생하는 소음을 수치해석적인 방법으로는 유한



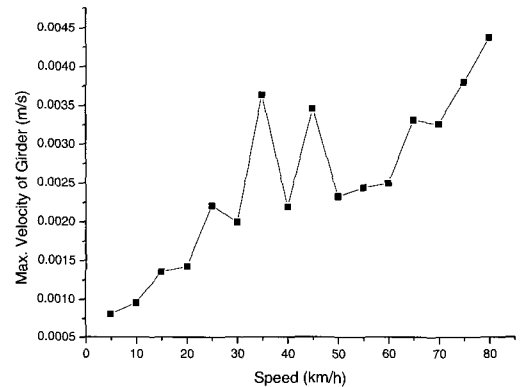
(a) Maximum vertical displacements of the girder



(b) Dynamic magnification factor



(c) Maximum vertical accelerations of the slab



(d) Maximum vertical velocities of the girder

Fig. 7. Dynamic responses of the bridge according to the speed of LRT

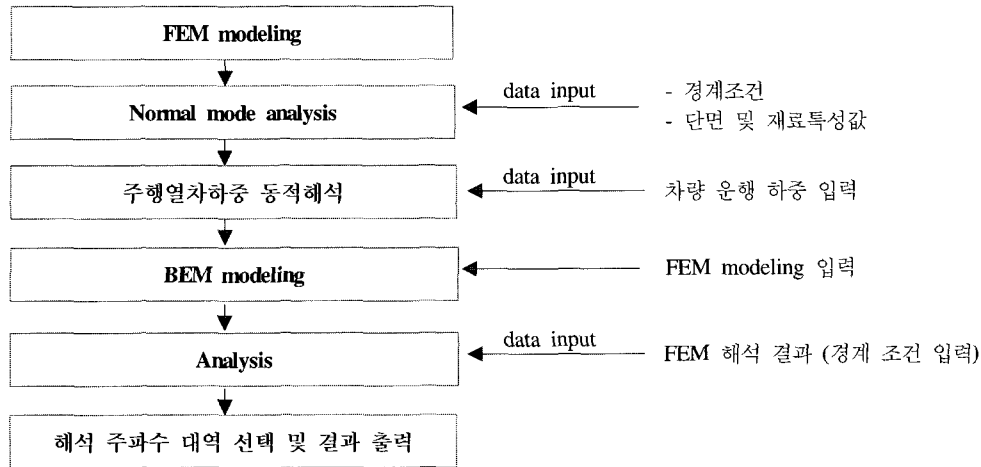


Fig. 8. Flowchart for analysis

요소법(FEM)과 경계요소법(BEM) 및 통계적 에너지 해석 기법(SEA) 등이 있으며 구조물의 진동-소음 연성 문제의 경우에 있어서 진동해석을 FEM과 SEA으로, 공기 중에서의 방사소음 현상은 BEM으로 예측하고 있다[8].

경계요소해석의 사전단계로 유한요소해석은 상용 프로그램인 ANSYS로 수행하였다 4절점 쉘요소를 이용한 고유진동수 해석결과 첫번째 모드는 4.36Hz로 이동하중해석에 사용된 개발프로그램과 오차는 약 1.1%로 거의 나타나지 않았다.

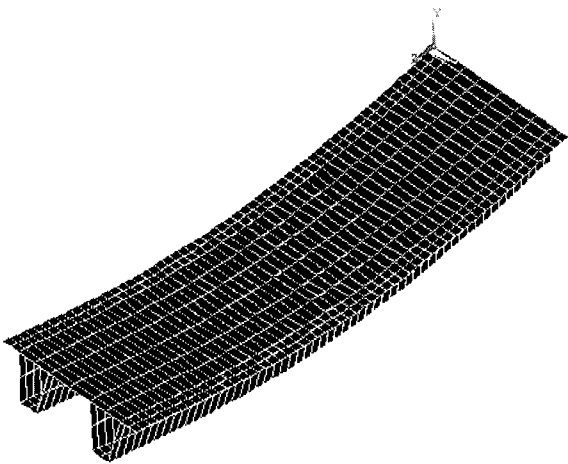


Fig. 9. The 1st mode shape of PSC U-type girder (ANSYS)

일반적으로 철도운행에 따른 교량에 영향을 미치는 진동 주파수대역은 바퀴통과와 침목통과에 의한 진동주파수가 최대 35Hz 부근임을 감안할 때에 교량의 모드는 3차 모드까지 고려하였다. 주파수 응답해석은 앞 절의 이동하중 해석에 의한 시간간격별 응답을 이용하여 수행하였다.

본 연구에서의 소음은 구조물을 통해 전달되어 구조물의 표면에서 방사되는 고체진달음을 예측한 것이다. 특히 고체진달음은 구조물의 굽힘파에 의해 주로 에너지가 전달된 후, 표면의 방사특성에 의해 음으로 바뀌는 현상으로 굽힘파의 특성상 진동속도와 연관이 된다.

이러한 취지로 본 소음방사 해석은 모드 해석과 가진원의 주파수 특성을 파악하여 주요 주파수대역에서 음장 해석을 수행하였다.

교량 구조물의 방사특성을 경계요소해석 상용 프로그램인 SYSNOISE로 수행했으며, 구조물의 경계면요소의 분할은 4절점 쉘요소를 사용하여 ANSYS에서 모델링하였다. 이때 요소의 크기 또한 최대관심주파수과장의 1/6보다 작도록 하였으며, 경계면의 속도경계조건은 유한요소해석 프로그램을 이용하여 각 절점의 주행열차하중 동적해석의 응답치를 이용하였다.

운행속도는 Fig. 7에서와 같이 이동하중 해석 시 교량에서 최대 응답이 발생하는 속도로 80km/h 주행 시의 응답을 이용하였다. 운행 차량 길이를 고려한 교량 통과 시간은 대상 교량의 경간이 30m이므로 약 2.7초이며, 이로 인해 PSC U형 거더 교량의 최대 음압도는 열차 운행 시간 1초이다. 일반적으로 경계요소해석 프로그램에서는 특정주파수 대역에서의 구조물 표면의 진동으로 방사소음을 해석한다.

본 연구에서는 구조물의 고유진동수와 가진원의 주요 주파수대역을 고려하여 해석주파수대역을 산정하였으며, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 표면의 진동값을 산출한 후 경계요소해석 프로그램에 입력하여 방사소음을 도출하였다. 각 해석모델의 수음점은 Fig. 10과 같으며, 교량 상부와 측면 그리고 교량 하부를 각각 산정하여 구하였다.

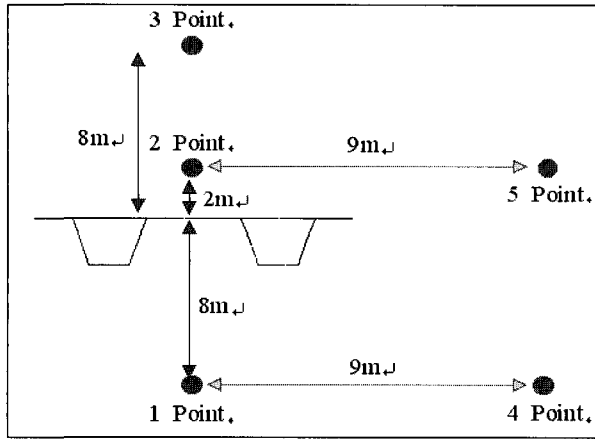


Fig. 10. Estimation point for noise analysis

Table 4는 음장해석 결과 가장 높은 음압도의 비교를 나타낸다. Fig. 11은 차량 운행 시간별 각 위치에 대한 1~

100Hz 대역의 음압을 합산한 음압도이다.

Table 4. Maximum noise level for each point

운행시간 [sec]	교량 하부		교량상부		
	1 point	4 point	2 point	3 point	5 point
0	59.8	56.5	73.1	67.7	62.2
1	66.8	61.5	76.5	73.6	61.8
2	61.3	56.6	73.2	68.0	61.3
3	66.8	56.5	61.5	67.7	62.2

차량이 교량의 중앙부를 통과하는 시간인 1초가 최대 음압도이며, 직하면(1 point) 지점에서는 59.8~66.8dB, 교량 상부(2 point) 지점에서는 61.5~76.5dB 응답 결과로 해석되었다. Fig. 12는 최대 음압도인 차량 운행시간 1초에 해석모델의 1~100Hz 음압을 합산하여 도식화(sound contour map)한 것이다.

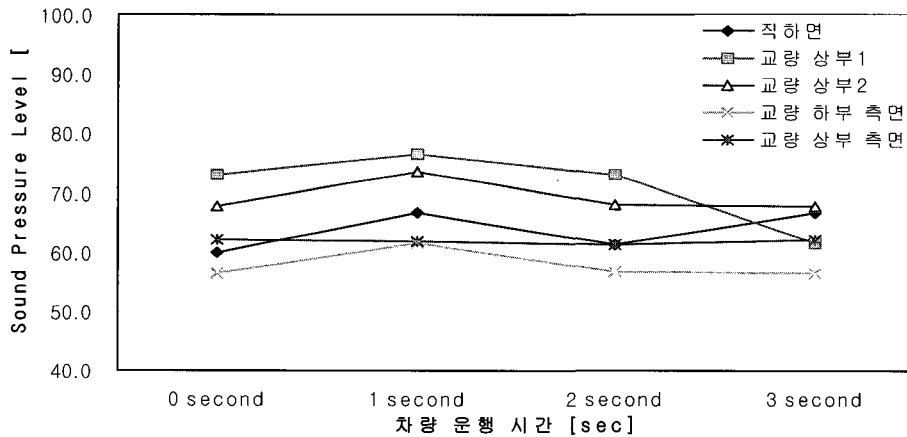


Fig. 11. Sound pressure level according to the passage time

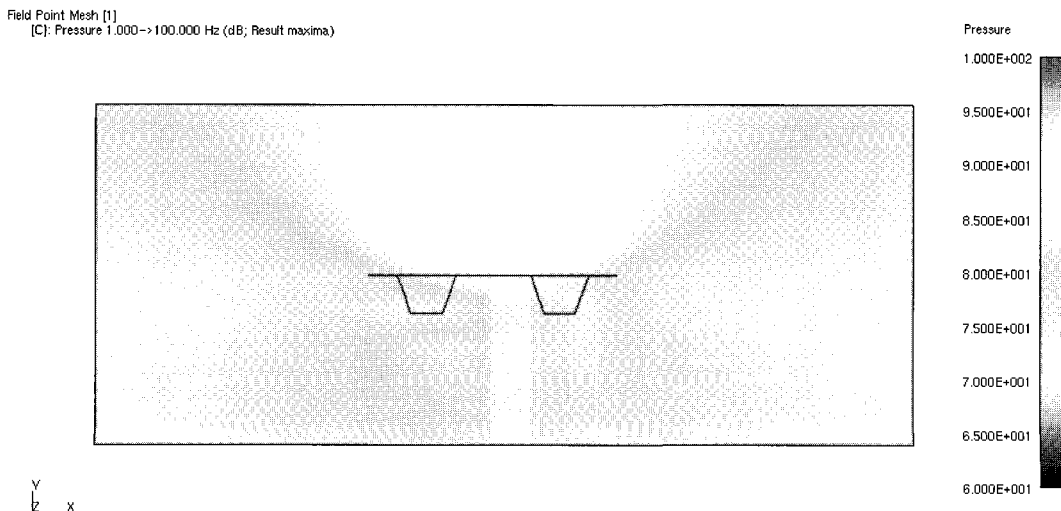


Fig. 12. Maximum noise point of the bridge (교량 중앙부, 1~100Hz 음압레벨 최대 음압도)

## 5. 결 론

본 연구는 철도교량에서 가장 지배적인 하중인 이동열차 하중에 의한 진동해석을 수행하고 그 결과를 입력데이터로 적용하여 음장해석을 수행하여 진동에 의한 구조소음 발생을 분석하였다.

대상 교량의 설계속도가 80km/h 이내의 비교적 저속이라는 특성에서 PSC U형 거더 교량은 주행 경량전철 하중에 대하여 매우 안정적인 동적거동을 나타내고 있다. 최대속도 80km/h의 경량전철 주행하중에 의한 교량의 동적응답 결과를 입력원으로 사용한 음장해석결과 최대 66.8dB의 구조소음 응답 결과가 나타났다.

현재 시행 중인 철도연변 소음한도 환경기준에 의하면 주거지역에서의 소음한도 기준은 주간 70dB 이하, 야간 60dB 이하로 규정되어 있다. 이 규정은 1시간 동안 연속 측정하여 자동 연산기록한 등가소음도(Leq)에 의한 규정이다.

본 연구에서 수행된 구조소음에 대한 음장해석은 순간소음 발생 결과이므로 위의 환경기준과 직접적인 비교는 어려우나, 순간소음임에도 불구하고 대상 구조인 PSC U형 거더 교량의 경우 교량 상부에서 9m 떨어진 수음점에서 최대 63dB 이하, 교량 하부에서 9m 떨어진 수음점에서 62dB 이하의 값을 보여 소음발생 측면에서 안정적인 결과라고 판단된다.

## 참고문헌

1. 김성일, 정원석, 최은수 (2005), “공진소멸 현상을 이용한 기존선 철도교량의 시간최적화를 위한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제8권, 제2호, pp128-136
2. Y.B. Yang, J.D. Yau & L.C. Hsu, “Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds”, Engineering Structures, 19(11), 1997, pp.936-944
3. 조선규 외 (2005), 철도교 적용 콘크리트 충전 원형강관 거더의 휨성능 및 T형 perfobond 리브 전단연결재의 피로평가에 관한 연구, (사)한국강구조학회
4. 철도청 (2001), 철도 소음·진동 총람, 철도청
5. 환경부, 소음진동규제법(환경기술개발 및 지원에 관한 법률), 환경부, 2000
6. 김성일 (2000), 고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석, 박사학위논문, 서울대학교
7. 용인경전철 주식회사 (2005), “설계기준 : Vol.2-Part1-Sec.1 : 토목설계”.
8. 강준수, 김정태, 김관주 (1996), “평판구조물의 진동 및 음향반사 : 통계적 접근”, 한국소음진동공학회 1996년도 추계학술대회 논문집, pp.113-117.