경량전철 교량 상부구조의 주행열차하중에 의한 진동 및 소음 분석
Investigation of the Bridge Vibration and Noise under Passage of the Light Rail Train

김성일* 여인호** 이인규** 김성춘***
Kim, Sungil Yeo, Inho Rhee, Inkyu Kim, Sungchoon

ABSTRACT

Running train is one of the most main factor 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. The noise of railway bridges can be divided into the noise from track-vehicle system and structure-borne noises. 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.

---

1. 서론

주행열차하중은 철도교량 진동 발생의 가장 주요한 요인이다. 일정간격으로 반복되는 축하중은 동적 응답의 증폭과 더불어 궤도의 유지관리 등과도 밀접한 관계에 있으며, 구조물의 방사소음을 유발하고 있다. 도심지를 주로 통과하는 경량전철의 경우 이러한 소음은 경량전철 운행에 있어 매우 중요한 요소이다. 철도교량에서 발생하는 소음은 차량주행에 의한 궤도에서의 소음발생과 교량 구조물 자체의 진동특성에 의한 구조소음 등으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이동열차하중해석에 의한 교량의 동적응답을 입력원으로 활용해 진동에 의해 발생되는 구조소음에 대한 분석을 수행하여 경량전철에서 발생하는 진동 및 소음 발생 양상을 분석하고자 한다.

2. 철도 소음

2.1 철도교의 소음특성

철도 열차운행에 의해 발생하는 소음 발생 특성을 기술하면 그림 1과 같으며 이러한 소음은 차량이나 궤도 또는 궤도를 지지하는 노반구조물별로 각각 소음을 발생시키는 영향요소가 있다.

---

* 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, E-mail : sikim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5354 FAX : (031)460-5359
* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부
* (주)에이브이티

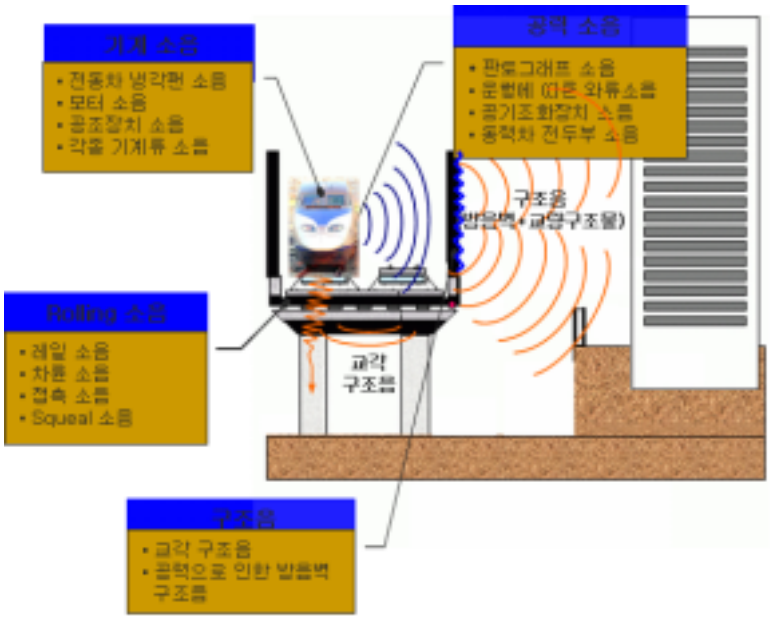

그림 1. 철도 소음발생 경로도

또한 각각의 소음은 철도별로 각기 다른 주파수 특성을 갖고 있으며, 이 중 본 논문의 대상은 구조소음으로서, 고가교 등에서 발생하는 구조음은 전동음과 마찬가지로 차륜/레일 간에 작용하는 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 [철도소음진동 총람, 2001]에 의하면 교량 형식별로 그림 2와 같이 소음레벨을 나눌 수 있다.

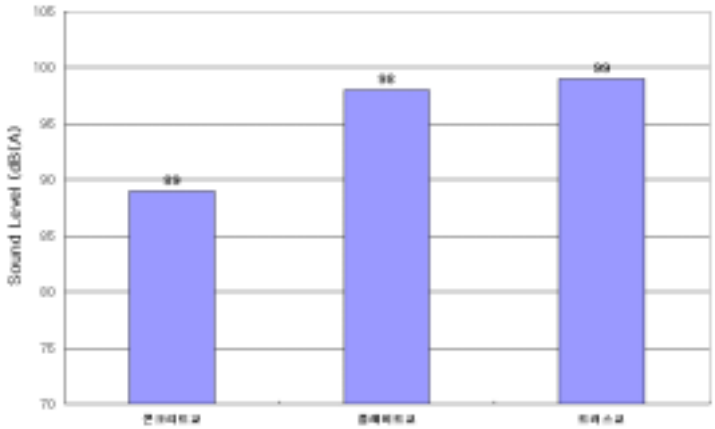

그림 2. 교량 종류별 소음 레벨

2.2 소음진동 규제기준

『소음・진동규제법』(법률 제4295호, 2002.12.30)은 환경소음을 규제하기 위한 소음・진동관련 개별법이다. 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 표 1과 같이 공포되어 2000년 1월 1일 시행되며, 공포일 이후 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.

표 1. 철도연변 소음・진동 환경기준

대상 지역	구 분	한 도			
		2000.1.1 ~ 2009.12.31		2010. 1.1 부터	
		주 간 (06:00~22:00)	야 간 (22:00~06:00)	주 간 (06:00~22:00)	야 간 (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

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 그림 3과 같은 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 그림 4와 같은 경량전철용 PSC U형 거더 철도교량에 대한 수치모델을 구성하였다. 교량의 운동방정식은 일반적인 유한요소법 정식화 과정에 따라 다음과 같이 구성된다.

$$[M]_B\{\ddot{u}\}_B+[C]_B\{\dot{u}\}_B+[K]_B\{u\}_B=\{F_t\} \qquad (1)$$

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

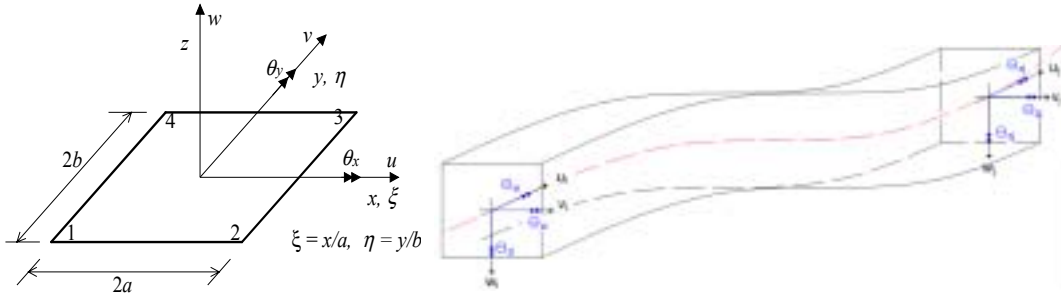

그림 3. 교량모델링에 사용된 판요소와 공간뼈대요소

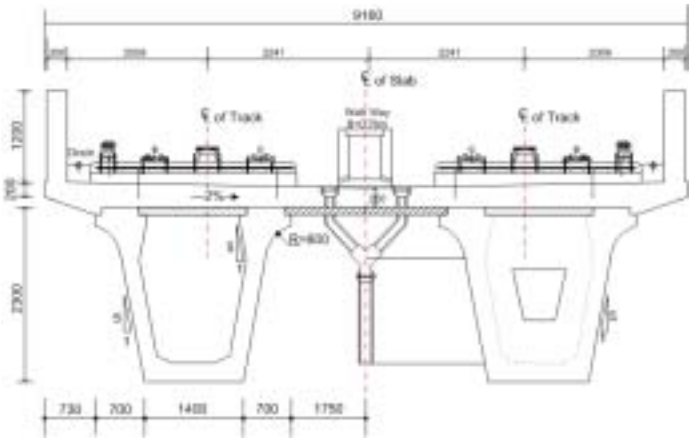

그림 4. 대상교량(PSC U형 거더) 의 단면도

위의 운동방정식은 열차가 진행하는 매 시간간격에 Newmark-β 방법에 의하여 계산한다. 교량의 고유진동수를 구하기 위한 자유진동해석은 부공간 반복법(Sub-Space Iteration Method)을 이용하여 구한다. 또한 강제진동해석에 사용된 차량모델은 용인경량전철 구간을 운행할 차량으로서 표 2의 AW4기준을 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. 표 2는 기준별 경량전철의 차량하중 및 축하중을 나타내며, 그림 5는 축중배치도를 나타낸다.

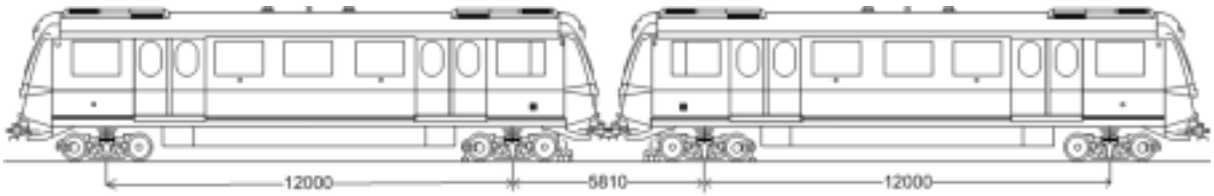

그림 5 경량전철 2량 편성 축중배치도

표 2 대상 경량전철 하중

구분	하중상태	차량중량 (kgf)	축중량 (tonf)	비율
AW0	공차	24,000	6.0	57.3%
AW1	AW0 + 41 Passengers (seated)	26,542	6.6	63.4%
AW2	AW0 + 164 Passengers (4 p/m^2)	34,168	8.5	81.6%
AW3	AW0 + 226 Passengers (6 p/m^2)	38,012	9.5	90.8%
AW4	**AW0 + 288 Passengers (8 p/m^2)**	**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. 철도교량의 경우 첫 번째 휨 고유진동수가 전체 모드의 대부분을 지배하며, 설계속도 내의 임계속도 등을 고려할 때에도 첫 번째 휨 고유진동수가 가장 중요한 요소이다. 해석결과 첫 번째 휨 고유진동수는 4.41Hz로 나타났으며 이를 이용하여 임계속도를 구하면

약 279.6km/h로 이는 설계속도를 크게 벗어난 수치임을 알 수 있다.

그림 6은 경량전철 주행에 의한 PSC U형 거더 교량의 응답을 나타낸 것으로, 각각 중앙부 최대처짐, 충격계수, 상부슬래브의 수직가속도, 거더의 속도(velocity)응답을 나타낸다. 경량전철의 최고속도가 80km/h로 제한되는 이유로 최대처짐 2.22mm, 최대충격계수 1.03, 상판의 수직가속도 0.02g 등 소요의 성능기준을 충분히 만족하는 안정적인 동적응답이 나타나고 있다.

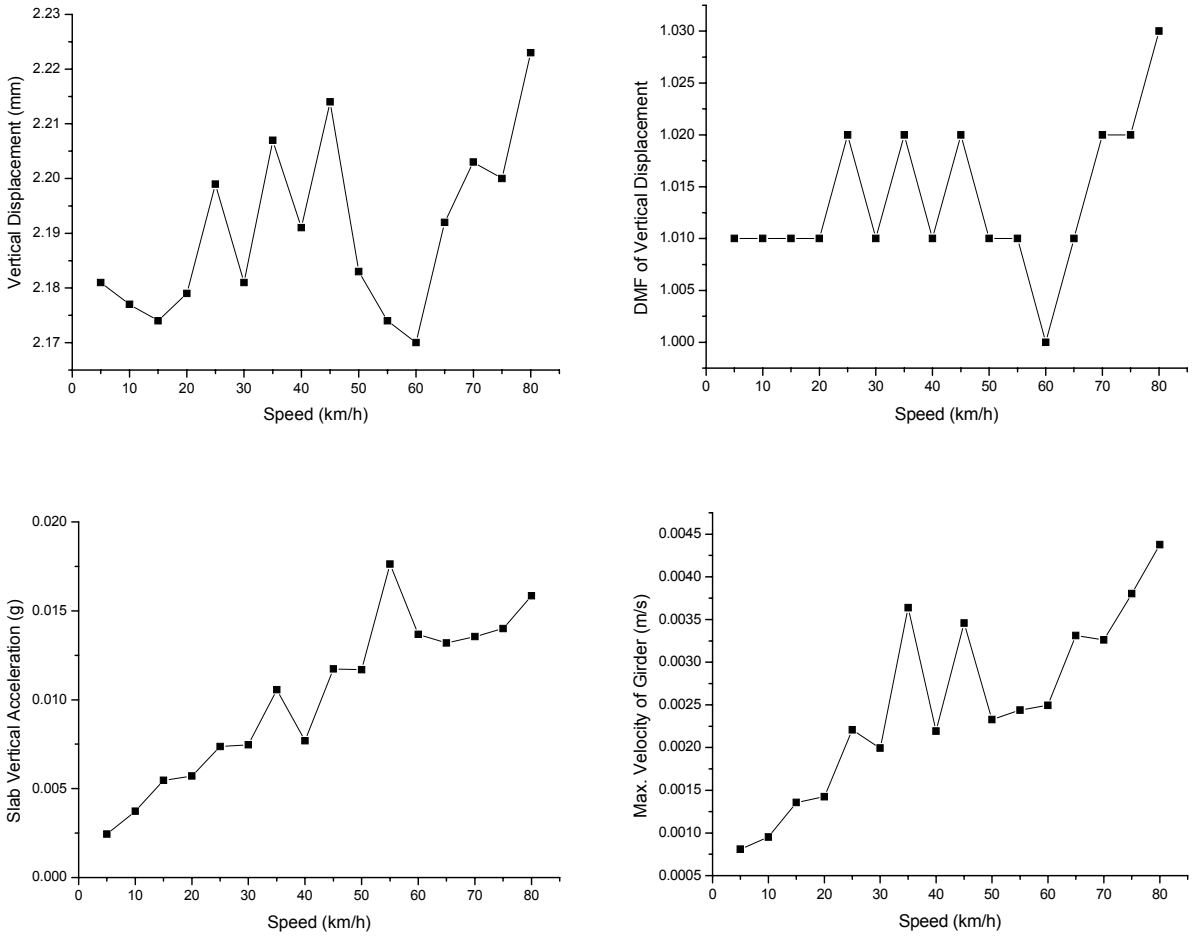

그림 6. PSC U형 거더 교량의 경량전철 주행에 의한 동적응답

4. 진동에 의한 소음방사 해석

진동에 의해 소음이 방사되는 구조음을 예측하기 위해서는 구조물의 동특성과 방사특성을 이해해야 한다. 특히, 교량 구조물에 발생되는 소음은 열차 운행에 따른 진동의 영향으로 교량 표면에서 소음이 발생된다. 일반적으로 이러한 진동에 기인하여 발생되는 소음을 수치해석적인 방법으로는 유한요소법(FEM)과 경계요소법(BEM) 및 통계적 에너지 해석기법(SEA) 등이 있으며 구조물의 진동-소음 연성 문제의 경우에 있어서 진동해석을 FEM과 SEA으로, 공기 중에서의 방사소음 현상은 BEM으로 예측하고 있다. 본 연구에서의 소음은 구조물을 통해 전달되어 구조물의 표면에서 방사되는 고체전달음을 예측한 것이다. 특히 고체전달음은 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 프로그램인 SYSNOISE로 수행했으며, 구조물의 경계면요소의 분할은 4절점 쉘요소를 사용하여 ANSYS에서 모델링하였다. 이때 요소의 크기 또한 최대관심주파수파장의 1/6보다 작도록 하였으며, 경계면의 속도경계조건은 유한요소해석 프로그램을 이용하여 각 절점의 주행열차하중 동적해석의 응답치를 이

용하였다.

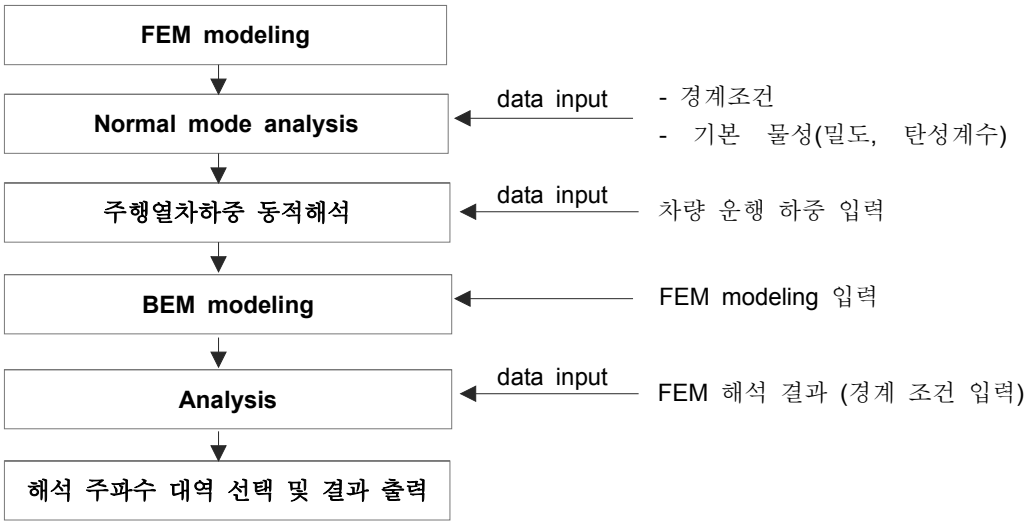

그림 7 해석 과정 순서도

운행속도는 운행에 따른 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 교량은 최대 소음도는 열차 운행 시간 1초이다. 일반적으로 경계요소해석 프로그램에서는 특정 주파수 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 그림 8과 같으며, 교량 상부와 교량 측면 그리고 교량 하부를 각각 산정하여 구하였다. 표 3은 음장해석 결과 가장 높은 소음도의 비교를 나타낸다. 그림 9는 차량 운행 시간별 각 위치에 대한 1~100Hz의 All-pass 소음도이다. 주요 관심 지점인 직하면의 소음도는 최대 66.8dB로 나타났다.

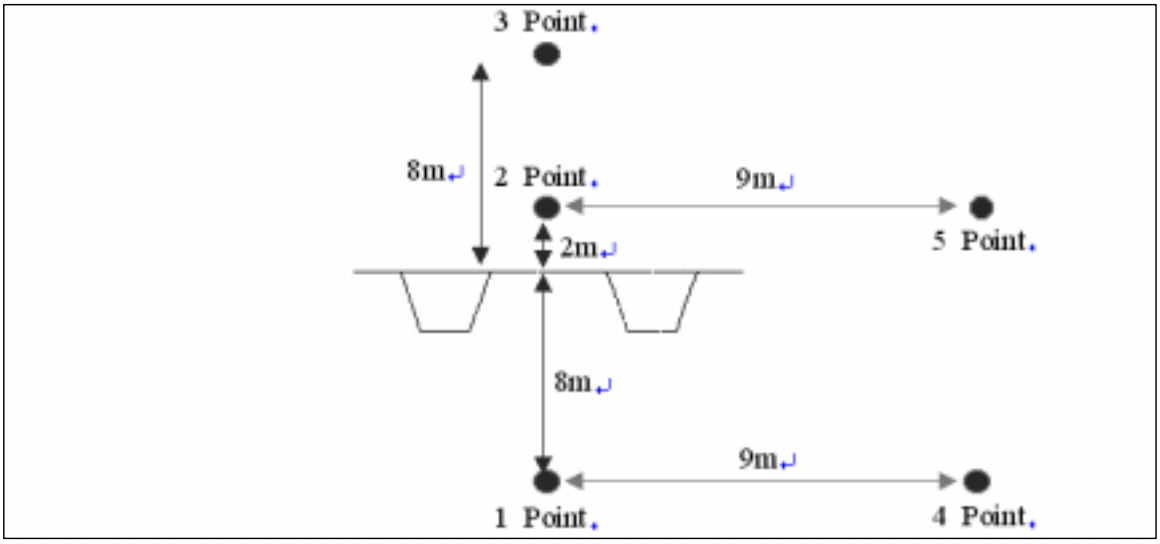

그림 8. 해석모델의 수음점

표 3. 각 위치별 방사 최대소음도

(단위 : dB)

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

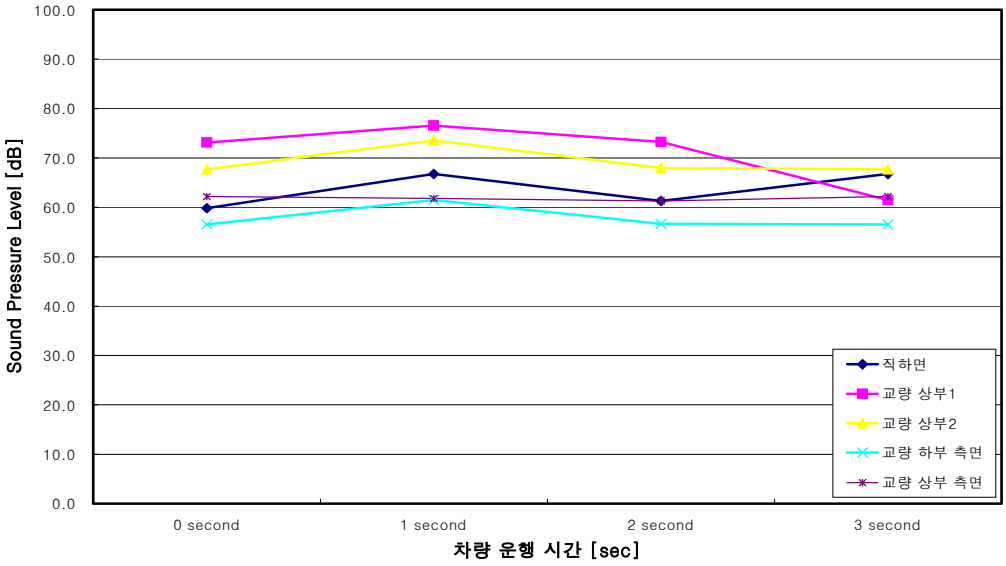

그림 9. 운행 시간별 위치 소음도 비교

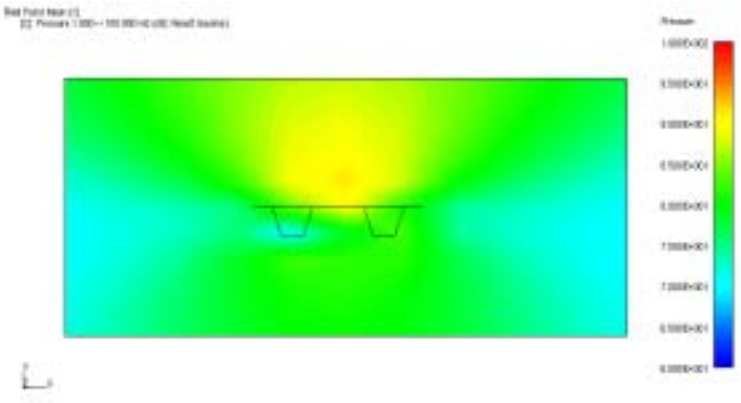

그림 10. 해석모델의 최대 수음점 (교량 직하부, 50Hz 기준)

5. 결론

대상 교량의 설계속도가 80km/h 이내의 비교적 저속이라는 특성에서 PSC U형 거더 교량은 주행 경

량전철 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 연산/기록한 등가소음도(L_{eq})에 의한 규정이다. 본 연구에서 수행된 구조소음에 대한 음장해석은 순간소음 발생 결과이므로 위의 환경기준과 직접적인 비교는 어려우나, 대상 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. 한국철도시설공단(2004), □□철도설계기준(철도교편)□□, 한국철도시설공단
2. 용인경전철 주식회사 (2005), “설계기준 : Vol.2-Part1-Sec.1 : 토목설계”.
3. 강준수, 김정태, 김관주 (1996), “평판구조물의 진동 및 음향반사 : 통계적 접근”, 한국소음진동공학회 1996년도 추계학술대회 논문집, pp.113-117.
4. 철도청 (2001), 철도 소음・진동 총람, 철도청
5. 환경부, 소음진동규제법(환경기술개발 및 지원에 관한 법률), 환경부, 2000