

# 이동차량하중에 의해 발생하는 교량진동음압의 매개변수 분석

## Parameter Analysis of Sound Radiation for Bridges Under Moving Vehicles

이 용 선\* · 김 상 효\*\*

Lee, Yong-Seon · Kim, Sang-Hyo

---

### ABSTRACT

An acoustic finite element model of a bridge is developed to evaluate the noise generated by the traffic-induced vibration of the bridge. The dynamic response of a multi-girder bridge, modeled by a 3-dimensional frame element model, is analyzed with a 3-axle(8DOF) truck model and a 5-axle(13DOF) semi-trailer. The flat plate element is used to analyze the acoustic pressure due to the fluid-structure interactions between the vibrating surface and contiguous acoustic fluid medium. The radiation fields of noise with a specified distribution of vibrating velocity and pressure on the structural surface are also computed using the Kirchhoff-Helmholtz integral. In an attempt to illustrate the influence of the structural vibration noise of a bridge to total noise level around the bridge, the random function is used to generate the vehicle noise source including the engine noise and the rolling noise interacting between the road and tire. Among the diverse parameters affecting the dynamic response of bridge, the vehicle velocity, the vehicle weight, the spatial distribution of the road surface roughness, the stiffness degradation of the bridge and the variation of the air temperature changing the air density are found to be the main factors that increase the level of vibration noise. Consequently, The amplification rate of noise increases with the traveling speed and the vehicle weight.

---

### 1. 서 론

최근의 산업화 및 경제발전과 더불어 소음공해문제는 산업현장 등 여러 분야에서 많은 관심을 기울이고 있다. 소음은 작업효율과 생산성을 저하시키는 경제적인 피해뿐만 아니라 쾌적하고 안락한 생활공간을 추구하는 현대인들의 정신적 건강을 해치는 요인으로 작용하고 있다. 특히 중차량의 증가와 간선도로나 도시고속화도로 등의 확충으로 인한 도심지 고가교량의 진동소음문제는 도로교통소음의 추가적인 요소로서 그 심각성이 점차 부각되고 있다. 특히 도로변 주거지역의 소음도는 주·야간 모두 환경기준을 초과하는 곳이 대부분이다. 이러한 소음도는 교량의 기하학적 형상, 교량의 재질 등에 따라 다양한 분포를 나타낸다.

구조물과 연성된 음장에 대한 이론을 기본으로 구조물의 진동으로 인한 음향방사는 토목분야에까지 적용 범위가 확대되고 있다.

\* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후연구원 E-mail: king2@yonsei.ac.kr

\*\* 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 E-mail: sanghyo@yonsei.ac.kr

Adhikari와 Yamaguchi (1996)은 고가교를 주행하는 차량으로 인한 진동소음을 해석할 수 있는 차량-음매질-교량의 2차원 유한요소해석모형을 통해 진동소음의 시간에 따른 소음원의 주파수대역을 분석하는 방법에 대해 제시하였다. 그러나 이러한 연구는 구조물에서 방사되는 음향예측에 대한 것이며, 점차 경량화되고 장대화되고 있는 교량진동이 소음레벨에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 차량과 교량의 상호작용에 의해 발생하는 교량구조물의 동적응답을 분석하고, 교량의 진동에 의한 음향방사특성을 해석할 수 있는 3차원 음향방사해석프로그램을 개발하였다. 개발된 모형을 이용하여 매개변수에 따른 음압레벨분포의 변화를 상호 비교·분석하여 교량진동이 전체 소음레벨에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

## 2. 음향방사모형

구조물이 작용하중에 의해 진동하고 있는 동안 진동에너지는 구조물에 저장되며, 진동하고 있는 평판에 있어서는 휨 변형에너지가 주된 진동에너지이며 위치에너지 및 운동에너지로 구성되어 있는 휨 변형에너지는 공기매질로 에너지를 전달한다. 공기매질은 부피탄성체이기 때문에 구조물표면의 진동은 공기매질을 번갈아가며 압축·팽창시키게 된다. 이러한 평판의 진동은 여러 가지 모드에 의해 결정되며 평판의 휨거동에 의한 변형에너지는 구조물의 주된 진동에너지이며 이것은 식 (1)과 같이  $r$ 차 모드에 대한 판의 미소변형에너지로 표현된다.

$$dU_r = \frac{D_{axay}}{2} \left\{ \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} Q_r^2(l) \quad (1)$$

여기서  $L$ 는 평판의 휨강성계수이며,  $\nu$ 는 포아송비이다.

평판두께  $h$ 를 갖는 요소에서 생성되는 휨변형에너지와 동일한 길이  $L$ 을 갖고 단면적이  $axay$ 인 보요소의 길이방향 운동에 의해 축적되는 휨 변형에너지는 같다고 가정하고 길이방향 변형합수를 유도하여 도함수의 해를 구함으로써 식 (2)와 같이 판의 속도를 구할 수 있다.

$$V_r(t) = h^2 \left\{ \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dot{Q}_r(t) \quad (2)$$

진동하고 있는 평판은 표면에 접해 있는 공기압지를 속도  $V_r(t)$ 로 운동시키게 되므로, 판에 저장되어 있는 변형에너지에 의해 변환되는  $r$  차 모드의 표면음압은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$p_{in}^2(w) = (\rho c)^2 h^4 \left\{ \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dot{Q}_r(t) \quad (3)$$

여기서,  $p_{in}$ 은  $i$ 번째 요소의  $r$  차 모드에서 발생하는 음압,  $q_r$ 은  $r$ 차 모드의 변위진폭벡터,  $\omega$ 는 가진하중 주파수를 의미하고  $\rho c$ 는 공기매질의 임피던스를 의미한다.

또한 구조물진동에 의해 공기중으로 방사되는 음압을 산출하는 데는 식(4)의 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식을 이용한다. 이 식은 구조물의 표면 음원으로부터 방사되는 구면파의 진폭과 위상을 표현하고 있는 자유공간 그린함수와 도함수를 포함하고 있으며, 공기매질을 통해 전파되어지는 음압을 계산한다.

$$\hat{p}(X) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[ \frac{\partial G(X|X_s)}{\partial n_s} p(X_s) - G(X|X_s) \frac{\partial p(X_s)}{\partial n_s} \right] dS \quad (4)$$

여기서,  $G$ 와  $\partial G/\partial n_s$ 는 자유공간 그린함수와 그 도함수이다.

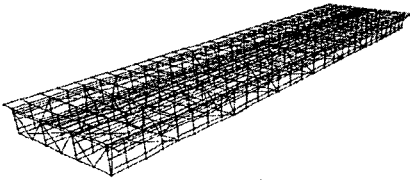
### 3. 주행차량 및 교량의 모형화

#### 3.1 주행차량의 모형화

본 연구에서 사용한 차량은 도로교에서 흔히 볼 수 있는 대표적인 중차량인 3축 덤프트럭과 5축 트랙터-트레일러를 대상으로 Lagrange 방정식을 이용하여 각각 8자유도와 13자유도의 3차원 주행차량모형을 적용하였다. (김상호, 1997, 2003; Wang, et al., 1992)

#### 3.2 교량의 모형화

본 연구의 대상교량은 지간장 40m, 교폭 11m, 거더의 높이 2.6m의 단순 강합성 플레이트 거더교로 3차원 뼈대요소를 이용하여 그림 1과 같이 절점에서 강결된 격자로 모형화하여 주행차량에 의한 동적거동을 정확히 해석할 수 있도록 하였고, 음향방사 해석을 위해 다시 셀요소의 특수한 형태인 평판요소로 재구성하여, 식 (5)와 같은 평판요소의 형상함수행렬과 변형도함수행렬을 이용해 속도변위를 유도하여 각 절점별 표면응압을 산출하는 기법을 사용하였다. 한편, 음향방사해석을 위해 뼈대요소로부터 재구성되어지는 평판은 처짐,  $x$  및  $y$ 방향 회전변위를 갖는 3자유도 평판의 등매개변수 요소를 사용하여 모형화하였다.



$$\dot{\mathbf{x}} = [B][\dot{\mathbf{w}}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \\ \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \\ \frac{2}{ab} \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \end{bmatrix} [N(\xi, \eta)] \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{w}}}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{w}}}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{w}}}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

그림 1 대상교량에 대한 3차원 뼈대요소모형

#### 3.3 차량과 교량의 상호작용력

교량과 차량사이의 상호작용력  $F(t)$ 는 타이어 스프링 강성( $K_{ii}$ )과 상대변위, 타이어 감쇠계수( $C_{ti}$ )와 상대속도의 함수로 식(6)과 같이 표현된다.

$$F_{ii}(t) = K_{ii} \cdot u_{ii} + C_{ti} \cdot \dot{u}_{ii} \quad (6)$$

여기서,  $u_{ii}$ 는 차량과 교량사이의 상대변위이고,  $\dot{u}_{ii}$ 는 시간에 대한 변위의 미분으로 상대속도를 나타낸다.

#### 3.4 노면형상의 모형화

노면의 형상을 모형화하기 위해 본 논문에서 사용한 지수 스펙트럴밀도함수는 Robson등이 여러 가지 도로 상태에 대하여 제안한 값을 사용하여 식 (7)을 이용하여 노면조도를 발생시켰다.

$$X(s) = \sum_{n=1}^N \sqrt{4\Phi_{xx}(k_n)} \Delta k \cos(2\pi k_n s - \theta_n) \quad (7)$$

여기서,  $\Phi_{xx}(k_n)$ 는 지수 스펙트럴밀도( $m^2/\text{cycle/m}$ ),  $k_n$ 는 파수이며,  $s$ 는 거리, 즉  $V \cdot t$ 를 나타낸다.

### 4. 매개변수 분석

본 절에서는 앞에서 소개한 이론들을 바탕으로 교량의 동적거동과 진동소음을 발생시키는 매개변수 분석을 수행하였다. 그 수치적인 예로 공기매질 온도차에 의한 밀도변화에 따른 음향방사특성을 분석하고 차량의 주행속도, 차량 제하방법, 차량의 중량변화 등의 매개변수에 대해 분석하였다.

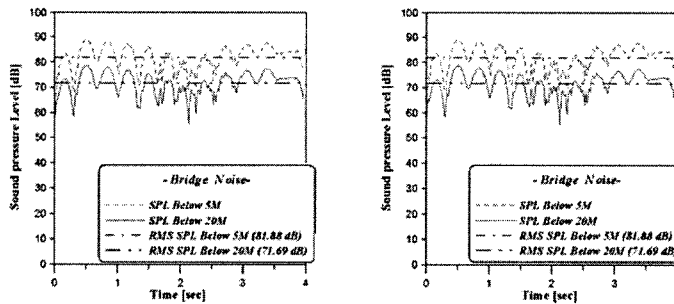
#### 4.1. 공기매질의 온도차에 의한 공기밀도변화와 음향방사특성

공기의 밀도는 음의 전달매체인 공기매질의 특성을 결정하는 요소로서 대기압에 비례하고 공기온도에 반비례하는 특성을 보이고 있다. 본 논문에서는 일반적으로 대기압 하에서 온도에 따른 밀도를 계산하는 식으로서 샤를의 법칙으로부터 유도된 식 (8)과 같은 밀도식을 이용하였다.

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{101325}{(287.05 \times (\text{centigrade} + 273.15))} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (8)$$

여기서, P는 압력으로서 1기압에 해당되는 101325 Pa이다.

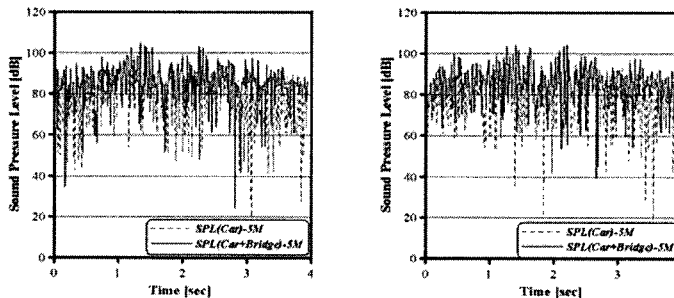
따라서 본 연구에서는 -20℃에 해당되는 밀도와 30℃에 해당되는 밀도의 2가지 경우에 대해서 교량에서 방사되는 음압을 비교·분석하였다. 그림 2는 -20℃와 30℃에서 온도차로 인한 밀도 변화에 의해 각각의 방사음압레벨 및 음압레벨 실효치를 보여주고 있다.



(a) -20℃인 경우

(b) 30℃인 경우

그림 2 온도변화에 따른 방사음압레벨과 실효치



(a) -20℃인 경우

(b) 30℃인 경우

그림 3 온도변화에 따른 차량음압레벨과 합성음압레벨 (5m)

한편, 구조물 진동소음과 차량소음이 연성되었을 경우는 그림 3과 같다. 온도변화에 따른 밀도의 영향은 구조물 자체 소음레벨에는 영향을 거의 미치지 않았지만, 차량소음과 연성되었을 경우는 표 1과 같이 5m, 20m 높이에서 -20℃인 경우가 30℃인 경우보다 차량소음레벨을 각각 0.61dB, 0.23dB 만큼 증가시킨다는 것을 알 수 있다.

표 1. 공기온도에 따른 각 소음레벨 실효치 (dB)

평가 위치	온도	차량소음레벨	교량소음레벨	합성소음레벨	차량소음 증폭치
5m 높이	-20℃	80.04	81.88	84.86	4.82
	30℃	80.47	81.88	84.68	4.21
20m 높이	-20℃	74.29	71.69	76.90	2.61
	30℃	74.53	71.69	76.91	2.38

#### 4.2. 매개변수에 따른 음향방사특성 비교·분석

본 연구에서는 교량의 동적거동과 소음레벨과의 관계를 살펴보기 위해 3축 덤프트럭 차량을 1차선에 제한시킨 후 매우 양호인 노면조건 상태에서 40km/h의 정속으로 주행시킨 경우를 기준으로 하여 소음레벨의 에너지 레벨을 나타내는 소음레벨 실효치에 대해서, 연직속도의 에너지 크기를 나타낼 수 있는 연직속도성분 실효치를 그림 4와 같이 나타내어 비교하였다.

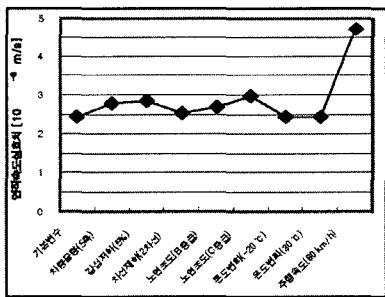


그림 4. 매개변수에 따른 연직속도 실효치

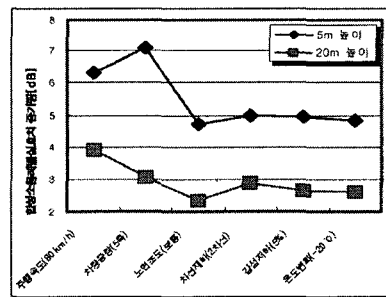


그림 5. 매개변수에 따른 합성소음레벨 실효치의 증가량

동적응답에 영향을 주는 여러 가지 매개변수 중에서 연직속도의 실효치는 다른 매개변수에 의해서는 큰 변화를 보이고 있지 않으나 주행차량의 속도가 80km/h로 증가할 때는 매우 큰 증가를 보이고 있다. 한편, 교량의 진동소음과 차량소음이 연성된 합성소음레벨의 증가치를 살펴보면 그림 5와 같이 여러 가지 매개변수 중에서 주행차량의 속도와 차량장량의 변화에 따라 증폭되어지는 소음레벨 실효치가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

주행차량이 교량의 동적거동과 음향방사특성에 미치는 영향에 대한 매개변수 분석결과는 다음과 같다. 차

량의 대형화에 따라 중량이 증가할수록 교량진동에 의한 소음레벨은 1~2dB 정도 증가하는 수준이며, 차량 소음과 연성된 소음레벨은 2~7dB 정도 증폭되었다. 차량의 주행속도가 증가하면서 교량진동에 의한 소음레벨의 증가효과는 4.7~5.6dB 수준이며, 차량소음과 연성된 소음레벨은 1.3~1.7dB 정도 증폭되는 것을 볼 수 있다. 이 두가지 매개변수가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 차량소음이 방사될 때 공기밀도에 의해 영향을 받는데, 공기밀도는 온도에 반비례하기 때문에 증폭효과의 차이가 발생하고, 증폭효과는 거리가 멀수록 작게 나타났다.

### 참고문헌

- 김상효 (1997), 차량하중에 의한 교량의 동적응답특성, 한국전산구조공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp.337-347.
- 김상효 (2003), 교량의 진동소음과 주행차량소음의 연성효과에 의한 음향방사, 제23권, 제3A호, pp.429-438.
- Chen, L. H. and Schweikert, D. G. (1963) Sound Radiation from an Arbitrary Body, J. of Acoustical Society of America, Vol.35, pp.1626-1632.
- Chertock, G. (1964) Sound Radiation from Vibrating Surfaces, J. of Acoustical Society of America, Vol.36, pp.1305-1313.
- Craggs, A. (1973) An Acoustic Finite Element Approach for Studying Boundary Flexibility and Sound Transmission between Irregular Enclosures, J. of Sound and vibration, Vol.30, pp.343-357.
- Junger, M. C. and Feit, D. (1986) Sound, Structures and Their Interaction, M.I.T. Press, 2nd.
- Ouis, D. (2001) Annoyance from Road Traffic Noise : A Review, J. of Environmental Psychology, Vol.21, pp.101-120.
- Yang, T. Y. (1986), Finite element structural analysis.
- Wang, T. L., Huang, D. and Shahawy, M. (1992) Dynamic Response of Multigirder Bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.118, No.8, pp. 2222-2238.