

## 주행차량에 의한 교량의 동적거동과 음향방사특성

### Sound Radiation from Vibrating Bridges subject to Moving Vehicles

김 상 효\*                      이 용 선\*\*                      장 원 석\*\*\*  
Kim, Sang-Hyo              Lee, Yong-Seon              Jang, Won-Suk

---

#### 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 8 DOFs truck model and a 5-axle 13 DOFs 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.

Although the noise produced by the bridge vibration is not serious in itself, which is below the audible frequency range, it should be considered as an interaction problem between vehicle noise and bridge vibration noise in order to evaluate the traffic noise around the bridge.

---

#### 1. 서 론

급격한 차량증가로 인해 교통량이 많은 간선도로 및 주거지역을 중심으로 발생하고 있는 교통소음은 배출원이 자동차, 열차등으로서 발생 소음도가 클 뿐만 아니라 피해 지역도 광범위하다. 특히 도시고속화도로 등의 확충으로 인한 도심지 고가교량의 진동소음문제는 도로교통소음의 추가적인 요소로서 심각성이 점차 부각되고 있다.

교량에서 발생하는 여러 가지 소음원은 다음과 같이 세 가지의 주소음원으로 구분할 수 있다. 즉, 차량의 주행소음, 차륜과 교량표면의 상호작용에 의한 마찰소음, 그리고 차량에 의한 교량구조물의 진동소음이며, 각각의 상호작용에 의해 전체 소음레벨을 구성하고 있다. 위와 같은 세 가지 소음원 중에서 진동소음은 교량 표면과 맞닿아 있는 공기매질을 압축시켜 공기매질의 밀도를 변화시키는 교량의 진동에 의한 것으로서, 교량 표면을 둘러싸고 있는 공기매질로 음압에너지를 방사하게 된다. 교량에서 방사되는 음압에너지는 노면의 형상, 주행차량의 속도변화, 교량강성의 변화등에 의해 발생하는 교량의 동적응답 특성과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

---

* 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수	02)2123-2804	<a href="mailto:sanghyo@yonsei.ac.kr">sanghyo@yonsei.ac.kr</a>
** 정회원·연세대학교 토목공학과 박사과정	02)2123-2804	<a href="mailto:king2@yonsei.ac.kr">king2@yonsei.ac.kr</a>
*** 연세대학교 토목공학과 석사	02)2123-2804	<a href="mailto:janggavan@yahoo.co.kr">janggavan@yahoo.co.kr</a>

따라서 본 연구에서는 강합성 플레이트 거더교를 대상교량으로 3차원 뼈대요소를 사용하여 동적응답을 분석하고, 분석된 진동응답으로부터 3차원 평판요소를 이용하여 평판의 휨거동에 의해 발생하는 음압을 해석할 수 있도록 모형화하여 주행차량하중을 받는 도로교의 동적거동으로 인해 발생하는 음압레벨분포의 변화를 분석하였다.

## 2. 진동하는 교량표면에서의 음향방사 모형화

대부분의 모든 음원은 표면의 진동에 의해 구조물을 둘러싸고 있는 공기매질로 에너지를 방출한다. 진동에 의해 구조물은 기하학적 형상, 재질, 구성방법에 따라 다양한 음을 방사하게 된다. 그러나 실제의 구조물로부터 방사되는 음의 이론적인 해석과정은 간단하지 않다. 그러나 많은 경우에 있어서 진동하는 구조물로부터 주파수분포를 가진 전체음압을 해석하는 경우가 많기 때문에 수치해석에 의해 음압을 해석하는 방법은 보다 쉽게 적용되어질 수 있다.

평판의 진동성분은 여러 가지 모드에 의해 결정되며, 평판의 휨거동에 의한 변형에너지는 구조물의 주된 진동에너지로서 식 2.1과 같이  $r$ 차 모드에 대한 판의 미소변형에너지를 나타낼 수 있다.

$$dU_r = \frac{Ddxdy}{2} \left\{ \left( \frac{\partial^2 w_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 w_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 w_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 w_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 w_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} \quad (2.1)$$

변위의 향으로 나타내어진 식 2.1을  $r$ 차 모드의 형상함수와  $r$ 차 모드의 요소변위함수로 나타내면 식 2.2와 같다.

$$dU_r = \frac{Ddxdy}{2} \left\{ \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} Q_r^2(t) \quad (2.2)$$

한편, 판요소에서 생성되는 휨변형 에너지와 동일한 길이  $L$ 을 갖고 단면적이  $dxdy$ 인 보요소의 휨변형 에너지는 식 2.3과 같다.

$$dU_r = \frac{Edxdy}{2L} Z_r^2(t) \quad (2.3)$$

여기서,  $Z_r(t)$ 는  $r$ 차 모드에서에서의 보요소의 연직길이방향 변형함수로 평판의 휨변형 에너지로부터  $Z_r(t)$ 의 연직길이방향 속도변형함수를 식 2.4와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_r(t) = h^2 \left\{ \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dot{Q}_r(t) \quad (2.4)$$

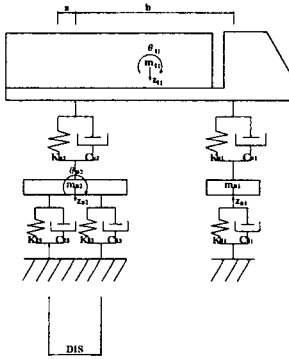
따라서, 변형 에너지에 의해 변환되는  $r$ 차 모드의 표면음압은 다음 식 2.5와 같다.

$$p_{ir}^2(w) = (\rho c)^2 h^4 \left\{ \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial y^2} \right) + 2(1-\nu) \left( \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} w^2 q_r^2 \quad (2.5)$$

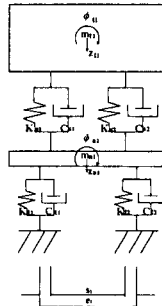
### 3. 주행차량 및 교량의 모형화

#### 3.1 주행차량의 모형화

본 연구에서 사용한 차량은 도로교에서 흔히 볼 수 있는 대표적인 중차량인 3축 덤프트럭과 5축 세미-트레일러를 대상으로 그림 1, 그림 2와 같이 각각 8자유도와 13자유도의 3차원 주행차량모형을 적용하였다.

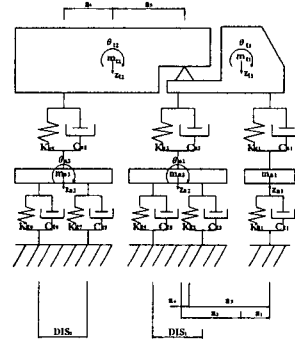


(a) 측면도

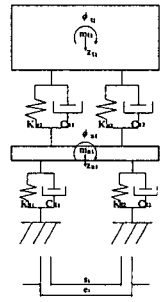


(b) 정면도

그림 1 3차원 3축 덤프트럭 모형



(a) 측면도



(b) 정면도

그림 2 3차원 5축 세미-트레일러 모형

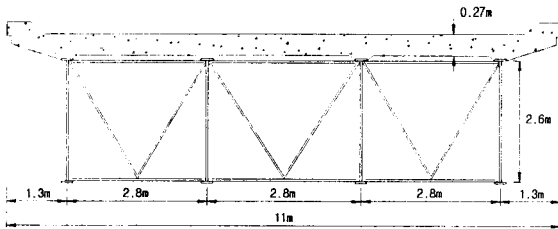


그림 3 대상교량

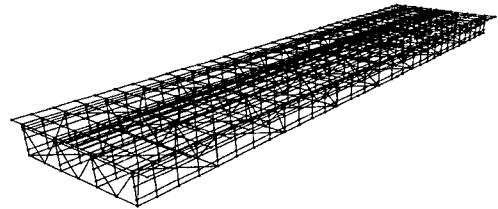


그림 4 대상교량에 대한 3차원 뼈대요소모형

#### 3.2 교량의 모형화

본 연구의 기본 교량은 건설교통부 상부구조 표준도에 나타 내있는 시간장 40m, 교폭 11m, 거더의 높이 2.6m의 단순 강합 성 플레이트 거더교로서 그림 3과 같다.

대상교량은 3차원 뼈대요소를 이용하여 그림 4와 같이 절점 에서 강결된 격자로 모형화하여 주행차량에 의한 동적거동을 정확히 해석할 수 있도록 하였고, 음향방사 해석을 위해 다시 셀요소의 특수한 형태인 평판요소로 재구성하고 식 3.1, 3.2와

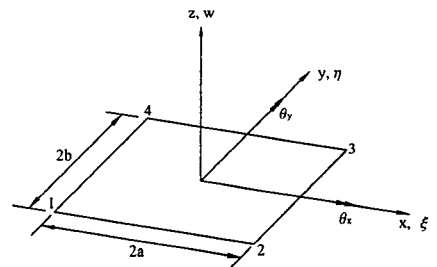


그림 5 평판의 등매개변수 요소

같은 평판의 변형도 함수 행렬을 이용하여 각 절점별 표면음압을 산출하는 기법을 사용하였다.

한편, 음향방사해석을 위해 뼈대요소로부터 재구성되어지는 평판은 그림 5와 같이 처짐, x 및 y방향 회전 변위를 갖는 3자유도 평판의 등매개변수 요소로 나타내고 있다.

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} [N] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \\ \frac{1}{b^2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \\ \frac{2}{ab} \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \eta} \end{bmatrix} [N(\xi, \eta)] \quad (3.1) \quad \dot{\chi} = [B][\dot{w}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

#### 4. 음향방사 프로그램의 검증

본 연구에서 개발된 3차원 음향방사 프로그램의 알고리즘 검증을 위하여, 본 프로그램과 상용프로그램인 SYSNOISE와의 비교·분석을 실시하였다. 프로그램의 검증을 위해 선정한 구조물은 그림 6과 같이 가로 100m, 세로 20m, 두께 50cm의 형상을 갖고 있는 평판구조물로서, 25m 간격마다 힌지와 롤러로 지점조건을 구성하였고 가로방향으로 평판구조물의 중앙 라인을 따라서 25m 간격으로  $F(t) = 20\sin(10t)$ 로 나타나는 하중 20ton, 진동수 10Hz를 가진 5개의 조화하중을 3초간 재하하여, 구조물의 진동으로부터 발생하는 표면음압을 비교·분석하였다.

표 1 본 프로그램과 SYSNOISE의 해석결과 비교  
(53번째 절점)

구 분	본 프로그램	SYSNOISE	오 차
표면음압 실효치 (dB)	68.45	66.22	3.37 %

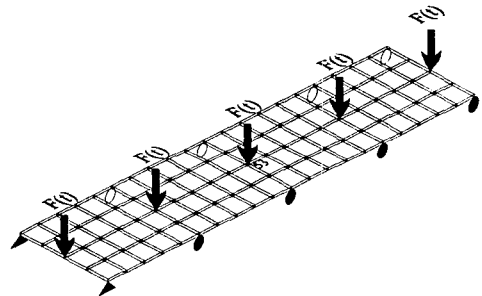
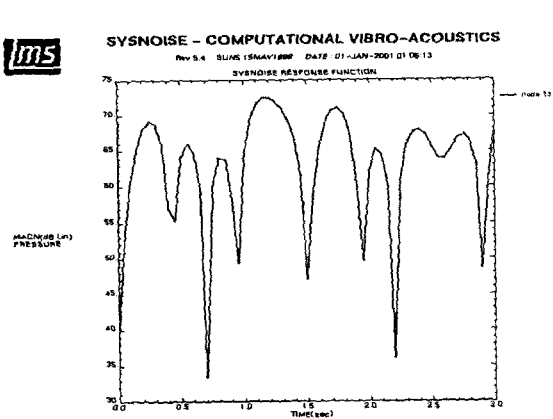


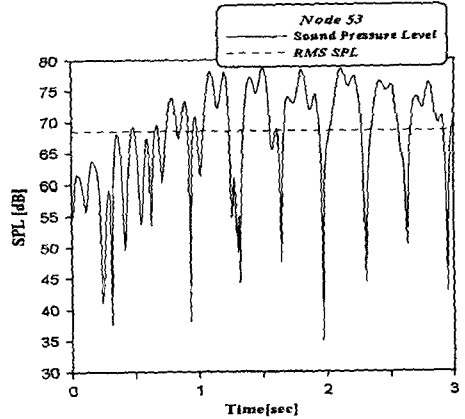
그림 6 검증에 사용된 대상 구조물

먼저, 대상 구조물의 중앙에 해당되는 53번째 절점에서의 시간이력에 따른 음압레벨을 비교하기 위해 본 프로그램으로 해석한 결과와 SYSNOISE로 해석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 두 결과를 비교해보면 정점 위치에서의 소음레벨값이 본 프로그램 해석결과가 약간 크게 나타나고 있지만, 정점을 나타내고 있는 시간대가 두 프로그램이 거의 동일하고, 표 1과 같이 전체 경과시간동안 발생하는 에너지 레벨인 소음레벨의 실효치는 거의 일치하는 것으로 나타났다.

또한 그림 8과 같이 3초일 때의 구조물 전체의 표면음압분포를 살펴보면 비교적 전체 음압레벨 분포도가 비슷하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 사람의 불쾌감을 유발시키는 소음의 에너지 레벨과 거의 일치하고 있어 본 프로그램의 3차원 음향방사 해석 알고리즘은 타당한 것으로 판단된다.

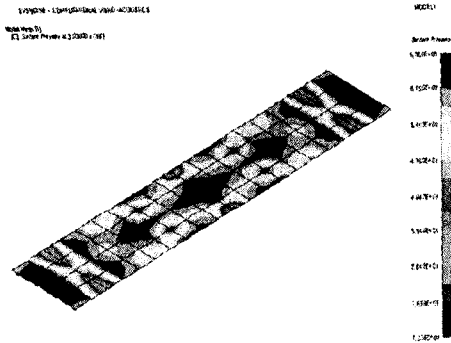


(a) SYSNOISE의 해석결과

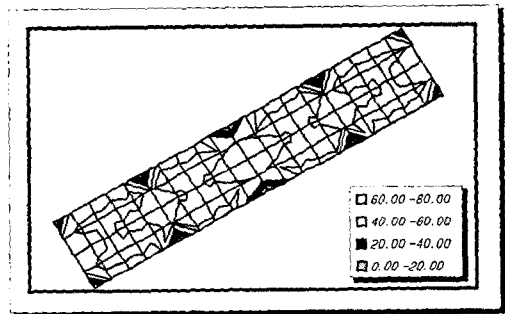


(b) 본 프로그램 해석결과

그림 7 표면음압의 시간이력곡선(절점 53)

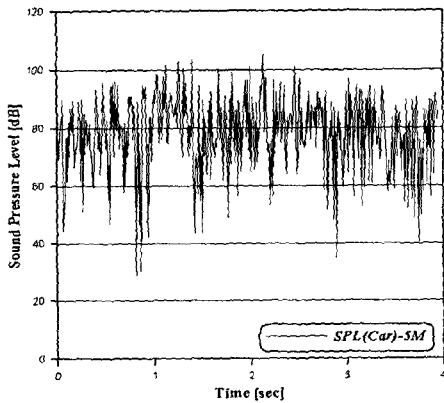


(a) SYSNOISE 해석결과

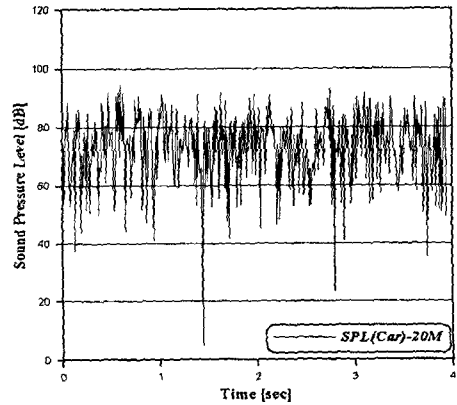


(b) 본 프로그램 해석결과

그림 8 구조물 전체의 표면음압레벨 분포도(3초 경과)



(a) 바닥판 중앙 5m 높이



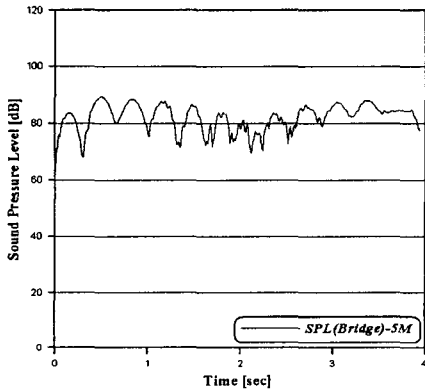
(b) 바닥판 중앙 20m 높이

그림 9 산출 위치에 따른 차량소음모델

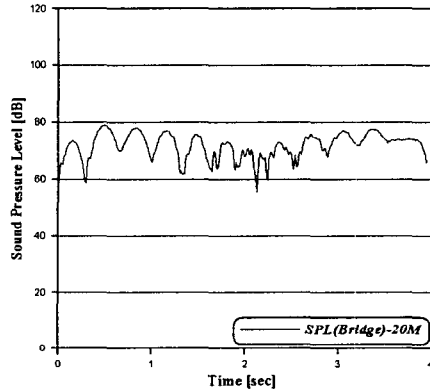
## 5. 교량소음과 차량소음의 연성효과

일반적으로 교량의 진동에 의해 발생하는 소음은 저주파수대역의 소음으로서 가청주파수 영역인 20~20,000Hz 범위에 거의 포함되지 않는다. 즉, 주된 소음주파수 성분이 최소 가청주파수인 20Hz 이하의 성분이기 때문에 교량의 진동소음 자체로서는 큰 문제가 되는 소음은 아니다. 그러나 차량 주행에 의해 교량에서 발생하는 소음 중 주된 소음원으로 알려져 있는 타이어 진동소음이나 차량가속주행소음 및 배기소음 등의 고주파성분의 소음과 교량진동소음이 연성되는 경우, 교량진동소음은 차량소음의 증폭효과를 발생시킨다. 일반적으로 차량에서 발생하는 소음은 발생원이 다양하기 때문에 차량소음을 발생시키는 함수를 유도하기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 그림 9와 같이 차량소음도 검사를 위하여 주행 시험에서 적용되고 있는 소음규제치를 이용하여 소음레벨 및 소음주파수를 랜덤함수를 사용하여 발생시켰다.

교량의 중앙지점으로부터 5m, 20m 만큼 각각 떨어진 곳에서의 교량의 진동소음을 살펴보면 그림 10과 같다.

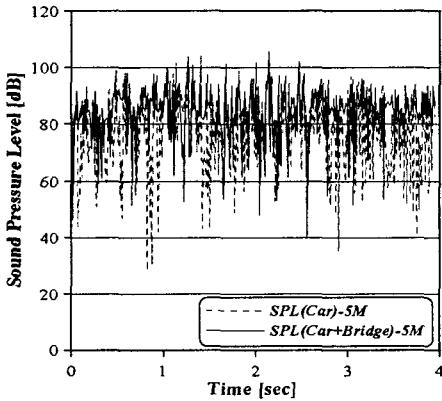


(a) 바닥판 중앙 5m 높이

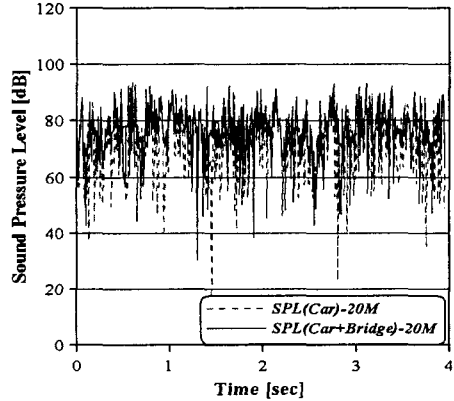


(b) 바닥판 중앙 20m 높이

그림 10 산출 위치에 따른 교량진동소음



(a) 바닥판 중앙 5m 높이



(b) 바닥판 중앙 5m 높이

그림 11 산출 위치에 따른 합성소음레벨

따라서 두 가지 소음원을 합성시킨 소음레벨은 그림 11과 같이 차량소음이 교량소음과 증폭되면서 소음레벨이 3~5dB정도 증가되었다. 차량소음레벨, 교량진동소음레벨 및 합성소음레벨의 실효치를 비교해보면 표 2와 같다.

표 2 각 소음레벨 실효치 비교 (단위 : dB)

구 분	차량 소음레벨	교량진동 소음레벨	합성 소음레벨	증폭 소음레벨
5m 높이	79.61	81.88	84.47	4.86
20m 높이	73.36	71.69	76.70	3.34

## 6. 결 론

본 연구에서는 주행차량에 의한 교량의 동적거동에 의해 발생하는 교량의 진동소음을 해석할 수 있는 3차원 음향방사 해석프로그램을 개발하여, 강합성 플레이트 거더교를 대상으로 하여 주행차량이 교량의 동적거동과 음향방사특성에 미치는 영향을 분석하였다.

차량의 주행으로 발생하는 교량의 동적거동은 여러 가지 매개변수에 의해 영향을 받게 된다. 이 동적거동은 교량의 진동소음을 유발시켜 저주파수 영역의 소음이 공기중으로 방사되며 저주파 영역의 교량 진동소음은 고주파수 영역의 차량소음과 연성되어 차량소음을 증폭시키는 결과를 살펴볼 수 있었다. 따라서 교량의 진동소음은 사람의 가청영역 이하의 소음성분으로서 그 자체로는 큰 문제가 되는 소음은 아니지만 교통소음레벨을 증가시켜 소음공해를 가중시키는 중요한 영향인자임을 알 수 있다.

## 참고 문헌

1. M. C. Junger, D. Feit, "Sound, Structures, and Their Interaction", M.I.T. Press, 2nd, 1986.
2. G. Chertock, "Sound Radiation from Vibrating Surfaces", J. of Acoustical Society of America, Vol.36, pp.1305~1313, 1964.
3. L. H. Chen, D. G. Schweikert, "Sound Radiation from an Arbitrary Body", J. of Acoustical Society of America, Vol.35, pp.1626~1632, 1963.
4. A. Craggs, "An Acoustic Finite Element Approach for Studying Boundary Flexibility and Sound Transmission between Irregular Enclosures", A. Craggs, J. of Sound and vibration, Vol.30, pp.343-357, 1973.
5. S. H. Sung, D. J. Nefske, "A Coupled Structural Acoustic Finite Element Model for Vehicle Interior Noise Analysis", Transactions of the ASME, Vol.106, pp.314~318, 1984.
6. R. Adhikari, H. Yamaguchi, "Active Control of Traffic Induced Noise in a Viaduct : A 2D Vehicle-Bridge-Acoustic Medium Interaction Model", Intl. conference on Motion and Vibration, pp.1-6, 1996.
7. D. Ouis, "Annoyance from Road Traffic Noise : A Review", J. of Environmental Psychology, Vol.21, pp.101-120, 2001.