

경계요소법과 레이저 진동센서를 이용한 구조방사소음 예측시스템 구축

A structure-borne noise prediction based on the Boundary Element Method with a Laser Doppler Vibrometer

김정선* · 김대성* · 경용수* · 왕세명†

Jungseon Kim, Daesung Kim, Yongsoo Kyong, Semyung Wang

Key Words : Boundary Element Method(경계요소법), Laser Doppler Vibrometer, LDV(레이저 진동 측정 센서), Helmholtz Integral Equation (HIE).

ABSTRACT

Predicting the noise radiated from vibrating structures is important in the automotive, aerospace, construction equipment, and defense industries. In this paper, a numerical implementation of the boundary element method in solving the Helmholtz integral equation for radiated noise prediction is presented. To predict the noise emitted by vibrating structure, the developed code can use the results from a structure analysis performed by a multi-purpose structural finite element code like ANSYS and directly measured data by non-contact vibration sensor like Laser Doppler Vibrometer. To verify the accuracy of developed code, two kinds of verification are performed. Firstly, the computer code used the harmonic analysis results of ANSYS in simple model and try to match with SYSNOISE. After matching with simulation results, the code compared with the result from SYSNOISE which used the velocity data from the LDV measurement with different number of points. The performance of the developed code for vibro-acoustic noise prediction is presented using the experimental results of the non-contact sensor

1. 서 론

가정주과수 대역에서 구조물의 진동현상에 의해 발생하는 구조방사 소음은 냉장고, 세탁기 등의 작은 동적 구조물뿐만 아니라 자동차나 선박과 같은 대형 동적 구조물에서도 소음 발생의 주요 원인이 되기 때문에 이에 대한 해석이 대단히 중요하다. 내부 소스의 가진에 의한 구조물의 진동에너지가 구조물을 구성하는 각종 구조 요소들로 전달되어 다시 소리에너지의 형태로 변환되어 매질을 통해 외부로 방사되기 때문이다. 진동 특성에 의해 발생하는 소음현상은 구조물의 형상 변경 및 전달 경로제어를 통해 소음의 경향을 바꿀 수 있다. 하지만, 이러한 구조방사 소음을 공기기인 소음과 구조 기인 소음이 모두 포함되어 측정되는 마이크로폰 측정으로 규명하는 것에는 많은 어려움이 있다. 구조물의 진동 특성으로부터 기인된 구조소음을 규명하기 위해서는 구조물 표면의 진동을 측정하여 이를 바탕으로 경계요소법을 이용하여 해석하는 방법이 있다. 하지만, 이러한 방법들을 적용하려면, 구조물 표면의 충분한 진동 정보를 얻기 위해 여러 개의 진동 센서가 필요하다. 구조물의 크기가 커짐에 따라 필요한 센서의 개수는 기하급수적으로 늘어남은 물론이며, 여러 개의 진동 센서 질량의 영향으로 진동 왜곡 등의 문제점들이 발생한다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 광주과학기술원에서 개발한 비접촉식 진동 센서인 레이저 진동 측정기를 이용한 구조물의 표면 진동 정보로부터 구조방사소음이 예측 가능한 컴퓨터 코드를 개발하였다. 그림 1 은 비 접촉 식 진동 센서인 레이저 진동 측정기를 보여주고 있다.



그림 1. 비접촉식 Laser Doppler Vibrometer

기존 접촉식 진동 센서의 문제점을 보완한 레이저 도플러 진동 측정기는 속도를 갖는 물체로부터 반사되는 레이저의 천이된 주파수를 이용하여 측정 점의 속도를 측정하는 비접촉식 장비이므로 센서 부착이 어려운 열악한 환경과 여러 개 센서 부착에 대한 불편함 해결 할 수 있다.

본 논문에서는 음향 해석 방법 중 직접법을 적용한 방사소음 예측에 주안점을 두었으며, 2 장에서는 BEM 코드 개발을 위한 기본적인 이론과 수치해석적 과정을 설명하고자 한다. 3 장에서는 ANSYS로부터의 하모닉 해석 결과를 속도 경계조건으로 준 후, SYSNOISE 와 개발된 BEM 코드와의 결과 비교를 통해 개발 된 BEM 코드의 정확성을 검증하였다. 또한, LDV 로부터 진동 하는 구조물의 진동을 측정 후, 그 측정 값을 속도 경계조건으로 주어 BEM 코드와 SYSNOISE 와의 결과 비교 통해 코드

† 광주과학기술원 기전공학과 교수

E-mail : smwang@gist.ac.kr

TEL : 82-62-970-2390, FAX : 82-62-970-2384

* 광주과학기술원

의 정확성을 검증 하고, 비접촉식 센서(LDV)를 사용하여 측정된 구조 진동 값을 적용한 구조방사소음 해석결과 비교를 통해 구조방사소음을 규명하였다.

2. 관계 이론

2.1 Helmholtz Integral Equation 의 기본 이론

경계요소법은 수치해석적인 음향 예측기법으로 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 특히, 유한요소법과는 달리 대상 영역의 경계면 만을 이산화함으로써 모델링에 소요되는 시간과 노력을 절약할 수 있으므로 음향문제 해석에 있어서 효율적인 방법이라 할 수 있다. 본 논문 에서는 음향 문제 중에서 주 관심 분야인 외부 방사 문제에 대해 3 차원 문제 해석을 위한 이론을 다루었다. 그림 2 는 일반적인 구조방사소음 발생 원리를 설명하고 있다.

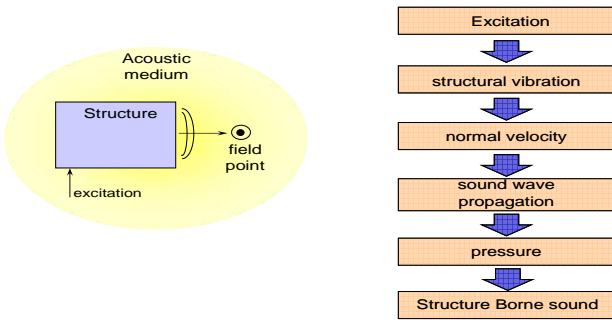


그림 2. 구조방사 소음 발생 원리.

그림 2 와 같이, 구조진동에 의해 발생하는 음향 파동 전파특성은 음향 내부의 점에서 정의된 적분 방정식과 경계 면에서의 해를 이용하여 음향 안의 모든 점에서의 해를 구할 수 있음을 설명할 수 있다. 즉, 가진에 의해 발생한 구조 진동의 수직 속도 성분과 음파의 전파 특성으로부터 음향 안의 음압을 예측함으로써 해서 구조방사소음을 얻을 수 있게 된다.

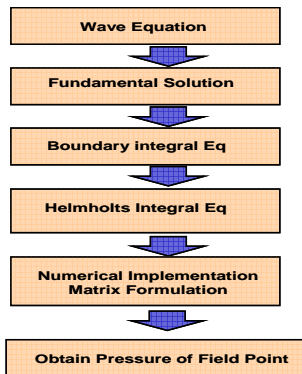


그림 3. 음향 경계요소법 적용 과정.

그림 3 은 음향에서의 음향 예측을 위한 음향 경계요소법의 적용 과정을 보여주고 있다. 우선, 음파의 전파현상을 지배하는 세가지 물리 량인 음압, 밀도, 입자속도의 상관관계로부터 유도된 선형오일러 방정식, 상태방정식, 연속성 방정식으로부터 식(1)과 같이 경계요소법의 지배방정식인 음파 방정식을 얻을 수 있다. [7]

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

$$p = P e^{j\omega t}, \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (2)$$

시간 조화 음압 함수와 파수의 성질을 나타내는 식(2)로부터 식(3)과 같은 Helmholtz Equation을 얻는다.

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3)$$

$$\nabla^2 G + k^2 G = \delta \quad (4)$$

식(3)으로부터 Dirac Delta 함수를 만족하는 기본해(G)에 대한 방정식을 유도하면 식(4)을 얻을 수 있게 되고 식(3)과 식(4)와의 연립방정식을 풀기 위해 두 식에 각각 기본해 G와 음압 P를 곱하여 주고,

$$G \nabla^2 p + G k^2 p = 0 \quad (5)$$

$$p \nabla^2 G + p k^2 G = \delta(\hat{x}) \quad (6)$$

(5)와 (6)의 연립 방정식을 풀면어 식(7)을 얻고,

$$p(\nabla^2 G) - G(\nabla^2 p) = p\delta \quad (7)$$

음향 체적 V안의 모든 점을 고려하기 위해 적분방정식으로 바꾸어 주면 식(8)을 얻으며,

$$\int_V [p(\nabla^2 G) - G(\nabla^2 p)] dV = 0 \quad (8)$$

식(8)에 그린의 제2법칙을 적용하여 체적 적분을 면적분으로 바꾸면,

$$\int_S [p(\nabla G \cdot \mathbf{n}) - G(\nabla p \cdot \mathbf{n})] dS = 0 \quad (9)$$

식(9)의 경계 적분 방정식을 도메인 내부의 한 점, 무한한 크기의 음향 전체, 그리고 해석 음향 내부 진동하는 구조물의 표면적에 대한 적분 방정식으로 유도한 후 그 결과를 정리하면, 식 (10)과 같은

Helmholtz Integral Equation 이 정의 된다. [1]

$$\int_S [p(Y)(\nabla G \cdot \mathbf{n}) - G \cdot (\nabla p(Y) \cdot \mathbf{n})] dS(Y) = p(X) \quad (10)$$

2.2 Numerical Implementation

앞 절에서 정의된, Helmholtz Integral Equation 에 경계면 이산화 과정을 통해 실제 음장 안의 예측 점에서의 음압을 계산하기 위해서는 많은 수치해석적 과정들이 필요하다. 이 절을 통해 음향 경계 요소법 코드 개발을 위한 과정들을 설명하고자 한다.

우선, 식(10)에 선형오일러방정식인 식(11)을 적용하면, 식(12)와 같은 일반적인 HIE를 얻을 수 있다.

$$\nabla P = -i\omega\rho_0 v_n \quad (11)$$

$$\int_S \left[p(Y) \frac{\partial G(X, Y)}{\partial n} + i\omega\rho v_n(Y) G(x, Y) \right] dS(Y) = c(X) p(X) \quad (12)$$

전체 면적에 S에 대한 적분은 식(13)과 같이 각 요소의 합으로 표현 될수 있다.

$$\sum_m \int_{S_m} p_m(Y) \cdot \partial_n G dS(Y) - c(X) p(X) = -i\omega\rho \sum_m \int_{S_m} V_{nm}(Y) \cdot G dS(Y) \quad (13)$$

식(13)에 대해 식(14)과 같은 이산화 과정을 적용하고, 두개 합의 형식으로 정리하면 식(15)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} p_m(\xi) &= \sum_{\alpha} N_{\alpha}(\xi) \cdot p_{m\alpha} \\ V_m(\xi) &= \sum_{\alpha} N_{\alpha}(\xi) \cdot V_{m\alpha} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_m \sum_{\alpha} p_{m\alpha} \int_{S_m} N_{\alpha}(\xi) \cdot \partial_n G J(\xi) d\xi - c(X) p(X) \\ = -i\omega\rho \sum_m \sum_{\alpha} V_{m\alpha} \int_{S_m} N_{\alpha}(\xi) \cdot G J(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (15)$$

아래첨자 m은 요소의 수를 의미하고, α 는 각 요소를 구성하는 절점의 정보를 의미한다.

식(15)를 진동하는 구조물의 표면특성에 따라 결정 되는 C(x)를 고려하여, 표면에서의 음압과 속도 정보를 결정하는 행렬 및 벡터식으로 정리하는 과정을 식(16)~(19)에서 보여주고 있다.

$$\sum_m \sum_{\alpha} p_{m\alpha} \alpha_{mj}^{\alpha} - p_j \left[1 + \sum_m C_{mj} \right] = -i\omega\rho \sum_m \sum_{\alpha} V_{m\alpha} b_{mj}^{\alpha} \quad (16)$$

$$\sum_k \hat{A}_{jk} p_k - \left[1 + \sum_m C_{mj} \right] p_j = \sum_k B_{jk} V_k \quad \& \quad A_{jk} = \hat{A}_{jk} - \left(1 + \sum_m C_{mj} \right) \delta_{jk} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} \mathbf{p}^s = \mathbf{B} \mathbf{v}_n^s \quad (18)$$

$$\mathbf{p}^s = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{v}_n^s = \mathbf{C} \mathbf{v}_n^s \quad (19)$$

음장에서의 음압을 예측하기 위한 행렬 및 벡터식을 식(20)과(21)에서 간단히 정리하였다.

$$\sum_m \sum_{\alpha} p_{m\alpha} \mathbf{A}_{mj}^{\alpha} + i\omega\rho \sum_m \sum_{\alpha} V_{m\alpha} \mathbf{B}_{mj}^{\alpha} = p(X) \quad (20)$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}_e \mathbf{p}^s + \mathbf{B}_e \mathbf{v}_n^s = \mathbf{A}_e \mathbf{C} \mathbf{v}_n^s + \mathbf{B}_e \mathbf{v}_n^s = (\mathbf{A}_e \mathbf{C} + \mathbf{B}_e) \mathbf{v}_n^s \quad (21)$$

여기서 \mathbf{P}^s 와 \mathbf{V}^s 는 각각 경계 면의 음압과 속도벡터이고, \mathbf{P} 는 음장의 음압 벡터이다. 또한, \mathbf{A} 와 \mathbf{B} 는 경계 면에 대한 쌍극음원행렬과 단극음원행렬이며, \mathbf{A}_e 와 \mathbf{B}_e 는 음장점에 대한 쌍극음원행렬과 단극음원행렬을 의미한다. 이러한 이론들을 바탕으로 다음 절에서 구조방사소음예측 코드 개발에 대한 설명을 하고자 한다. [1],[5],[7]

2.3 BEM Code Development

경계요소법의 이론들을 바탕으로 그림 4는 코드의 구조음향예측 절차를 보여주고 있다.

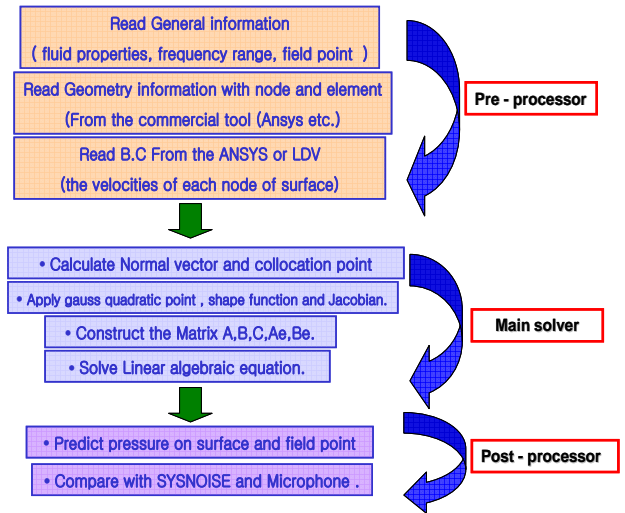


그림 4. 코드의 연산 절차.

그림 4에서와 같이, 코드는 크게 전처리 과정, 주 연산과정 그리고 후처리 과정으로 나뉘어진다.

전처리 기능에서는 1)입력 파일로부터 해석을 위한 관심 주파수와 주파수 범위, 매질의 평균 밀도와 평균전파속도, 예측점의 좌표와 개수를 읽고, 2) ANSYS에서 만든 구조물의 노드와 요소의 정보를 읽으며, 3) ANSYS의 해석 결과 또는 LDV의 측정 데이터를 읽어 해석을 위한 관심주파수에 따른 속도경계조건을 생성하는 과정을 담고 있다.

메인 연산 과정으로는 1) 구조물의 요소 및 노드 정보와 미분형상함수를 적용하여 각 요소에 대한 수직 벡터를 구하고 이로부터 자코비안을 구한다. 2) 진동하는 표면 위에서의 음압을 구하기 위해 Collocation point를 설정하고, 3) 전처리 과정

에서 주어진 해석을 위한 기본 정보를 적용하여 구조물 표면에서의 행렬성분을 구하고, 4) 음장에서의 예측을 위한 행렬성분을 구하여 5) 행렬 연산을 통해 구조물 표면 또는 음장에서의 음압을 예측한다.

후처리 과정에서는 1) 예측 음장에서의 음압 값을 구하고, 가장 상용화 된 음압 예측 프로그램인 SYSNOISE 와의 음압을 비교하는 과정을 담고 있다. 이러한 코드 개발을 통해, 비접촉식 진동센서인 레이저 진동 측정기를 이용한 구조물의 진동 측정으로부터 구조방사소음 예측을 위한 일련의 과정들을 한번에 수행 할 수 있는 시스템을 구축하였다.

3. BEM 코드의 정확성 검증

3.1 FE 해석 결과를 통한 정확성 검증.

간단한 모델에 대한 ANSYS 하모닉 해석 결과를 개발한 음향경계요소 코드와 SYSNOISE 에 경계조건으로 넣어서 구조 방사소음을 예측하여 비교해 보았다. 그림 5 는 간단한 FE 모델을 보여주고 있다.

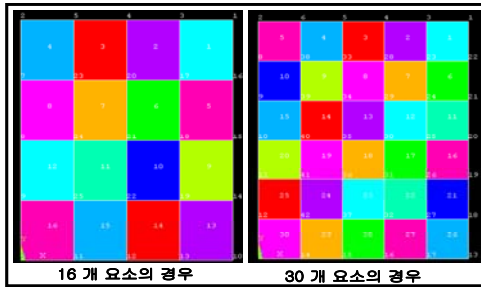


그림 5. FE 모델

그림 5 와 같은 16 개와 30 개의 요소 수에 따른 하모닉 해석 결과를 BEM CODE 와 SYSNOISE 에 속도경계조건으로 주어서 구조물 중앙으로부터 10cm 떨어진 위치에 예측 점을 두고 방사소음 예측결과를 비교하였다. 그림 6 과 그림 7 은 두 경우에 대한 소음을 비교한 결과들이다.

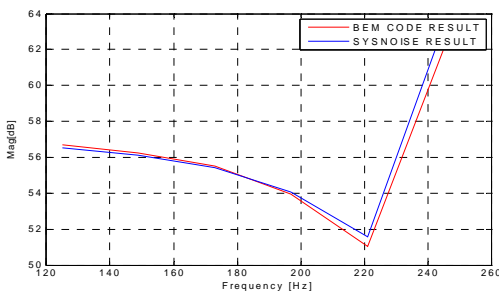


그림 6. 16 개 요소에 대한 구조소음 비교.

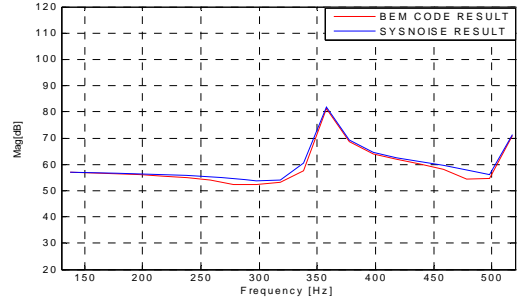


그림 7. 30 개 요소에 대한 구조소음 비교.

그림 6 과 그림 7 에서 알 수 있듯이, 두 값들의 차이는 0.5dB 이하였으며, 상용 프로그램 회사만이 가지고 있는 기술 반영을 고려할 때 매우 근접한 값을 예상할 수 있다. FE 해석 결과를 적용한 구조방사소음 비교를 통해 BEM 코드의 정확성을 확인 할 수 있었다.

3.2 LDV 실험결과를 통한 정확성 검증.

비접촉식 진동센서를 이용한 진동 실험 결과로부터 직접법을 적용한 구조방사소음 예측을 위해서는 단히 구조물의 구성이 필수 적이며, 이러한 시스템을 구축하기 위해서 그림 8 과 같은 BOX 모델을 제작하여 실험에 적용하였다.

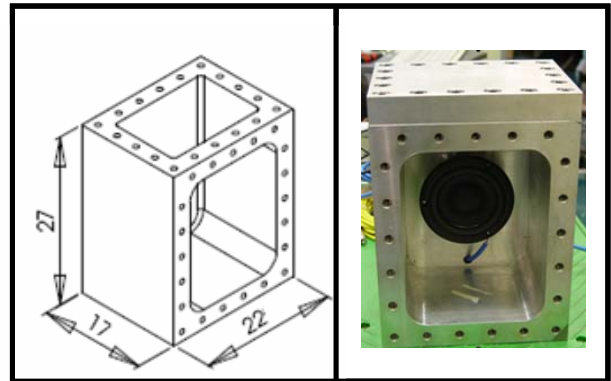


그림 8. 알루미늄 박스 구조물과 가진 원

그림 8 과 같이 구조 방사소음의 규명을 위해 22×17×27cm 의 크기와 3cm 의 두께를 갖는 알루미늄 박스를 제작하고 앞쪽에는 두께 0.5mm 의 얇은 철판을 볼트로 체결하였다. 앞 면의 얇은 철판을 제외한 나머지 면에서의 진동발생을 방지하기 위해 3cm 의 두꺼운 두께로 제작하였다. 알루미늄 박스 안쪽에 스피커를 설치하여 화이트 랜덤 신호로 박스 내부에서 가진 하면서 그림 9 와 같이 LDV 를 이용하여 진동 실험을 진행하였다.[6]

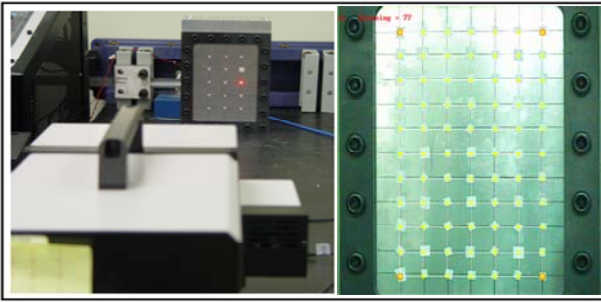


그림 9. LDV 를 이용한 박스 모델의 진동 측정

그림 9 는 그림 8 의 알루미늄 박스 모델을 스피커로 가진 하면서 앞쪽 철판 표면의 진동을 LDV 를 이용하여 측정한 실험이다. 오른쪽 그림과 같이 77 개의 지점에서 진동을 측정하고, 그 결과를 BEM 코드와 SYSNOISE 에 속도경계조건으로 주어 각 측정 점에 따른 두 결과들을 비교해 보았다. 그림 10 과 그림 11 은 측정 점 77 개에 따른 구조방사음향을 주파수 대역 별로 예측하여 비교한 결과이다.

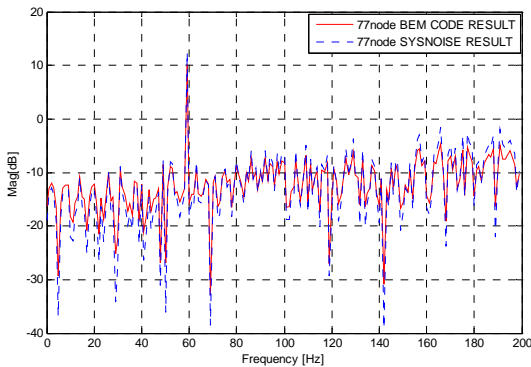


그림 10. 200hz 까지 77 점 측정 점에 대한 결과 비교

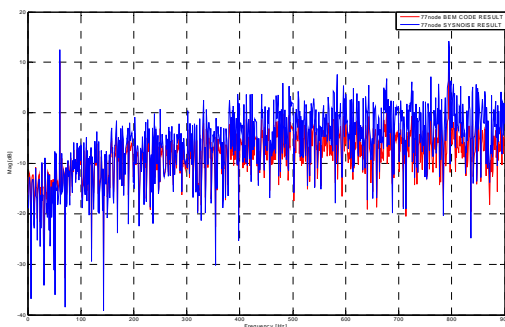


그림 11. 900hz 까지 77 점 측정 점에 대한 결과 비교

그림 10 은 200hz 까지의 결과를 그림 11 은 900hz 까지의 결과를 보여주고 있으며, 붉은색 실선은 BEM CODE 에서의 구조방사 소음예측 결과이고, 파란색 점선은 SYSNOISE 에서의 구조방

사소음 예측 결과를 나타내고 있다. 그림 10 과 그림 11 로부터, 레이저 진동 측정 장비를 이용하여 측정한 결과를 적용 시, 개발한 BEM CODE 와 SYSNOISE 와의 결과가 거의 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들로부터, 개발된 BEM CODE 에 레이저 진동 측정기와 같은 비접촉식 센서의 실험 결과를 적용하여 구조방사소음 예측 시 결과의 정확성을 규명할 수 있었다.

4. 결론

구조 진동에 의해 발생하는 구조방사소음을 예측하기 위해, 비접촉식 진동 센서로부터 얻은 충분한 진동정보와 음향경계요소해석 코드 개발을 통해 해결하였다. 이러한 비접촉식 진동센서를 적용한 구조방사소음 예측 시스템 구축을 통해, 접촉식 진동센서사용에 따른 진동왜곡, 여러 개의 센서의 필요성, 진동 측정이 불가능한 환경발생 등의 문제점들을 해결하고, 충분한 진동 정보로부터 쉽고 정확한 방법으로 구조방사소음 예측이 가능해졌다.

참고문헌

- (1) T. W. Wu, E. U, 2000, Boundary Element Acoustics, WITpress, Boston.
- (2) J. Trevelyan, 1994, Boundary Element for Engineers, Computational Mechanics. Inc, Massachusetts.
- (3) James H. KANE, 1994, Boundary Element Analysis, Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
- (4) N. Vlahopoulos, 1994, "A Numerical structure-Borne noise prediction scheme based on the boundary element method, Computers & Structures. Vol 50, No 1, pp.97~109.
- (5) 이제원, 2003, "Design Optimization and sensitivity analysis for acoustic radiation and scattering from a thin body", 광주과학기술원 박사학위논문.
- (6) Rene Visser, 2003, "Acoustic Source Localization based on Pressure and Particle Velocity Measurements", Internoise, pp. 665 ~ 670.
- (7) 김양한, 2006, 음향학 강의, 청문, 파주.
- (8) 라종필 등, 2002, "모드형상분석을 위한 연속 스캐닝 레이저 도플러 진동 측정기", 춘계학술대회 논문집, KSNVE, pp.272~280