

## 유전자 알고리즘을 이용한 회전식 압축기 머플러 토출구의 위상 최적설계

### Topology Optimization of Muffler Hole of Rotary Compressor using GA

이제원\* • Altay Dikec\* • 왕세명\*\* • 권병하\*\*\* • 황인수\*\*\*

Jeawon Lee, Altay Dikec, Semyung Wang, Byoung-ha Kwon, Insoo Hwang

#### ABSTRACT

The object of this research is limited to the reduction of compression process noise only among the main sources of compressor noise such as motor noise, compression process noise, and valve port flow noise. Thus the research is focused on the wave motion rather than the particle motion of sound wave travels. A muffler is a commonly used device to reduce the compression process noise, generated by the pressure pulsations caused by the cyclic compression process. In this research, the acoustic characteristics of the muffler are analyzed by using the normal gradient integral equation proposed by Wu and Wan. Moreover, a commercial code SYSNOISE developed by indirect variational boundary integral equation is also used to validate the results. For the noise reduction, the topology optimization technique using a genetic algorithm is used. The number, size and position of the muffler holes are considered as design variables. Compared with original design, the optimized design has very improved acoustic characteristics. Both numerical and experimental analyses are used to evaluate new design.

#### 1. 서 론

여러 가전 제품 중에서도 냉장고나 냉동고, 에어컨과 같이 간헐적인 작동을 반복하는 제품의 경우에는 특히 작동 시의 소음에 대한 소비자의 불만이 자주 야기되게 된다. 더구나 이러한 제품들은 대개 야간에도 작동이 계속되어야 하므로, 외국과 달리 침실과 주방의 거리가 가까운 일본이나 국내에서는 가전 제품의 작동 소음이 심각한 불만 요인으로 작용한다. 압축기는 이러한 가전 제품들의 주요한 소음원으로서, 모터의 작동 소음이나 고압 냉매의 유동 소음, 진동으로 인한 구조물의 소음과 같이 여러 가지 원인이 존재한다. 압축기의 소음 저감을 위해 사용되는 여러 가지 요소 중에서 가장 대표적인 것이 바로 압축기 내부의 머플러이다.

본 연구에서는 현재 (주) 캐리어에서 생산되고 있는 회전식 압축기를 대상으로 하여, 압축기의 여러 가지 주요 소음원 중에서 구조 진동의 영향이나 유동의 영향 등을 배제하고, 머플러의 음향학적 특성만을 고려하여 압축기 소음을 저감하고자 하였다. 회전식 압축기에 사용되는 머플러는 단층의 격벽식 구조를 가지는 원통형의 박판 구조물로서, 그림 1 에 보인 바와 같이 실린더 상부의 모터 베어링과 함께 머플러 내부에 개방형 음장을 형성하게 된다. 실린더에서 고압으로 압축된 냉매는 실린더의 토출 밸브와 토출구를 통해 머플러 내로 유입되고, 다시 이 냉매는 머플러의 토출구를 통해 압축기 내부로 유출된다. 이 과정에서 머플러 내부의 음장이 가지는 형상이나 머플러 토출구의 개수, 크기 및 위치 등에 따라 머플러의 음향학적 특성이 변하게 된다. 본 연구에서는 이러한 머플러 토출구의 개수와 위치를 결정하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용한 위상 최적 설계를 수행하였다.

\* 정회원, 광주과학기술원 기전공학과 대학원

E-mail : jwlee@kjist.ac.kr

Tel : (062) 970-2429, Fax : (062) 970-2384

\*\* 정회원, 광주과학기술원 기전공학과

\*\*\* 캐리어 주식회사

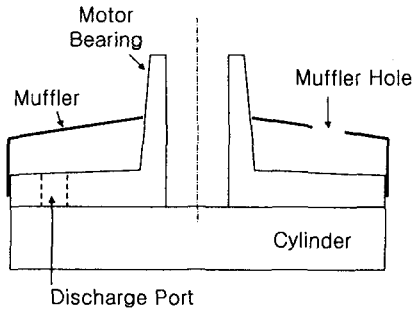


Fig. 1. Schematic diagram for the muffler with motor bearing

압축기 머플러는 박판을 가지는 격벽식 구조물로서 개방형 음장을 구성하고 있으므로, 일반적인 직접 경계요소법을 이용해서는 해석을 하기 어렵다. 물론 매우 세밀하게 요소를 나눈다면 해석이 가능할 수 있지만, 이럴 경우 지나치게 많은 해석 시간이 요구되는 단점이 있다. 따라서 많은 연구자들이 소음 해석을 비롯한 많은 분야에서 이러한 문제를 해결하기 위하여 연구해 왔다.

다영역 경계 요소법(multi-domain BEM)[1]은 이론적으로 박판 구조물의 소음 해석을 위한 가장 간단한 방법이다. 그러나 상대적으로 가상 평면이 넓은 경우에는 계산 효율이 매우 떨어지는 단점이 있다. 반면에 법선 도함수 적분식(normal derivative integral equation)[2]은 개념적으로는 다영역 경계 요소법과 마찬가지로 가상 평면을 구축하지만, 압력과 속도의 연속성을 이용하여 적분 과정에서는 이를 고려하지 않게 된다. 결국 박판 구조물 부분만을 이산화 함으로써 해석을 한다는 차이가 있다. 간접 변분법(Indirect variational method)[3]을 이용하는 경우에도 박판 구조물의 음향 해석이 가능하다.

소음 분야에서의 최적 설계에 관한 연구는 구조 분야에 비해 상대적으로 활발하지는 못했다. Kane 과 Mao[4]는 이산화된 헬름홀츠 방정식에 미분을 취함으로써 민감도 식을 유도하였으며, Smith 와 Bernhard[5]는 이산화된 경계 적분식에 유한 차분법을 이용하여 형상 변화에 따른 설계 민감도를 구하였다. Koopmann 등[6]은 주어진 구조물의 기하학적 형상 하에서 속도의 변화에 따른 음향 파워의 설계 민감도 식을 유도하였다. N. Vlahopoulos[7]와 J.P. Coytte[8]등은 일반적인 경계 적분식을 이용하여 구조물로부터 방사 소

음에 대한 크기 설계 민감도식을 유도하였다. Koo[9]등은 일차원 파동 방정식을 이용하여 정규화된 경계 적분식을 이용하여 형상 설계 민감도 식을 유도하였으며, Wang 과 Lee[10]는 연속체법을 이용한 소음의 크기 설계 민감도 식을 유도하였다. 박판구조물의 최적 설계에 관한 연구는 Lee 와 Wang[11]에 의해 제안된 형상 설계 민감도 식이 현재까지는 유일한 연구이다.

본 연구에서는 머플러 토출구의 개수와 위치 등을 결정하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용한 위상 최적 설계를 수행하였으며, 이 때 법선 도함수 적분식을 해석식으로 사용하였다.

## 2. 기본 수식 및 개념

### 2.1. 위상 최적 설계

Topology(위상)라는 단어는 그리스어의 *topo*에서 온 단어로서 위치나 장소, 공간, 영역 등을 의미한다. 구조물의 위상, 다시 말해서 물질의 분포나 구조 요소의 배치 등은 구조물의 최적성에 매우 지대한 영향을 미치게 된다. 따라서 제품의 설계 초기 단계에서 가능한 한 최적의 위상, 즉 레이아웃을 결정하는 것이 매우 중요하다. 전통적으로 위상 최적 설계 분야의 대부분의 연구는 선형 탄성 구조물의 컴플라이언스를 최소화하거나 최대화하는 것이었다. 그러던 것이 근래에 와서 여러 분야에 응용되면서 그 이용이 확산되고 있다.

그동안 진행되었던 대부분의 위상 설계에 관한 연구는 기본적으로 민감도를 이용하여 최적의 위상을 찾는 것이었다. 그러나 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 굳이 유전자 알고리즘을 사용한 이유는 3장에서 좀 더 자세히 다루었다.

### 2.2. 법선 도함수 적분식

법선 속도  $v_n$ 으로 진동하는 박판으로부터 방사되는 소음은 법선 도함수 적분식[2]을 이용하여 구할 수 있다.

$$\int_S \frac{\partial G(x, y)}{\partial \mathbf{n}} \mu dS = \int_S (\nabla G \cdot \mathbf{n}) \mu dS = p(x) \quad (1)$$

식(1)에서,  $G(x,y)$ 는 Green function 으로서, 평면상의 한 점  $y$  와 수음점  $x$  의 거리  $R$  의 함수이다. 또,  $\mu$  는 박판 양면의 음압 차,  $\mu \equiv p^+ - p^-$  를 의미하며 jump of pressure 나 double layer potential 로 불린다. 이때 수음점  $x$  가 박판 평면상에 존재하는 경우에는 다음과 같은 형태의 법선 도함수 적분식(2)을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(x)}{\partial \mathbf{n}_x} &= -j\omega\rho v_n(x) \\ &= \int_S \{(\mathbf{n}_x \times \nabla_x G) \cdot (\mathbf{n} \times \nabla \mu) + k^2(\mathbf{n}_x \cdot \mathbf{n})G\mu\} dS \end{aligned} \quad (2)$$

결국 박판 평면상의 각 점에 대하여 법선방향 진동 속도  $v_n$  을 알고 있을 경우, 식(2)로 부터 double layer potential  $\mu$  를 계산할 수 있으며, 이 값을 식(1)에 대입함으로써 임의의 점  $x$  에서의 압력  $p(x)$  를 구할 수 있다. 식(1)과 (2)를 수치적으로 해석하기 위해서는 평면  $S$  를 보간 함수를 이용하여 이산화하여야 한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}(x) &= \mathbf{M}_e \boldsymbol{\mu} \\ -j\omega\rho v_n &= \mathbf{M} \boldsymbol{\mu} \end{aligned} \quad (3) \quad (4)$$

식(3)은 식(1)의 이산화 행렬식이다. 여기에 서  $p(x)$ 는 수음점  $x$  에서의 음압을 의미하며,  $\mathbf{M}_e$  는 기여 행렬(contribution matrix or vector), 그리고  $\boldsymbol{\mu}$  는 박판 평면상의 각 절점에서의 double layer potential 로 구성된 열벡터이다. 식(4)는 식(2)의 행렬식이며, 박판의 법선방향 진동 속도  $v_n$  과 시스템 행렬(system matrix)  $\mathbf{M}$  으로 이루어져 있다

### 2.3. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘[12]은 수학적인 모델링이 어렵거나 복잡한 실제의 문제에 자연세계의 진화 과정을 모방하여 적용함으로써 최적점을 찾는 방법이다. 자연세계에서는 다량의 유전자(genes)로 구성된 염색체(chromosome)들이 모여서 유전형(genotype)을 결정하며, 이 유전형의 특성에 따라 각 개체가 진화하게 된다.

이러한 진화 과정을 공학적인 문제에 적용하는 경우, 각각의 설계 변수를 유전자로 생각하

여 이 설계 변수들을 조합함으로써 염색체를 구성하고, 이 염색체들을 이용하여 개체를 결정하게 된다. 유전자 알고리즘은 설정된 개체군 내에서 각 개체의 특성을 파악한 후 우성 염색체만을 선별하여 다음 세대를 구성하고, 다시 이 세대의 개체에 대한 해석을 수행하는 방식으로 진화를 시킨다. 이러한 진화 과정은 다음과 같이 간략하게 정리할 수 있다.

- (1) Begin with a population of individuals generated at random.
- (2) Determine the fitness of each individual in the current population.
- (3) Select parents for the next generation with a probability proportional to their fitness.
- (4) Mate the selected parents to produce offspring to populate the new generation.
- (5) Repeat item (2)–(4).

새로운 세대를 구성하기 위한 염색체의 선별은 교배, 돌연변이와 같은 연산자를 사용하게 된다. 돌연변이는 자칫 우성 염색체 만을 선별적으로 선택하는 과정에서 각 개체가 일반성을 상실하여 광역 최적점(global optimum point)이 아닌 지역 최적점(local optimum point)을 찾는 것을 방지하기 위한 것이다.

### 3. 머플러 토출구 위상 최적 설계 문제의 특성

본 연구에는 머플러의 진동은 없다고 가정하고 순수하게 음향학적인 특성만을 해석하였다. 따라서 사용된 머플러의 최적 설계 문제는 음향학적인 측면만을 고려하였으므로 일단의 정수형 문제로 정의될 수 있다. 일반적인 구조물의 위상 최적 설계는 재료의 밀도나 강성에 대한 크기 설계 민감도를 이용하여 최적 설계를 수행하게 된다. 이때 제거 되는 요소는 실제로는 존재하고 있지만 그 강성이나 밀도가 다른 요소에 비해 상대적으로 매우 작아서 없는 것으로 생각되어지는 것이다. 그러나 머플러 음향 해석의 경우에는 요소의 존재 여부가 중요할 뿐 그 요소의 기계적 특성, 예를 들어 강성이나 밀도 두께 등은 영향이 없다. 이것은 해석에 사용되는 식(3)과 (4)가 요소의 위치와 주파수에만 관계되어 있다는 것으로도 확인할 수

있다. 따라서 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 위상 최적 설계를 수행하였다. 이때 유전자(설계변수)는 요소가 있으면 1, 없으면 0으로 하였다.

유전자 알고리즘을 이용할 때 가장 문제가 되는 것은 바로 개체의 특성 해석에 요구되는 계산 시간이 엄청나다. 더구나 음향 해석의 경우에는 한 개체에 대한 해석에만도 상당한 시간이 소요된다. 그러나 이러한 단점은 박판 구조물의 위상 설계의 경우에는 크게 문제가 되지 않는다. 박판 음향 문제에 있어서, 대부분의 계산 시간은 해석 행렬을 생성하는 부분에서 요구된다. 행렬의 생성은 그림 2에 보인 바와 같이 우선 각 요소에 대해 지역 행렬(local matrix)을 계산하고, 이 정보를 이용하여 각 요소와 절점에 따라 광역 행렬(global matrix)을 구성하게 된다. 본 연구에서는 자체 개발 프로그램을 이용하여 음향 해석을 수행하였으므로 행렬을 구성하는 모든 정보를 이미 알고 있는 상태이다. 따라서 모든 설계 영역의 요소가 모두 존재한다고 가정한 후 일단 한번 지역 행렬의 정보를 도출하고 나면, 그 다음부터는 동일한 지역 행렬을 이용하여 각 개체에 적합한 광역 행렬을 쉽게 구성할 수 있다.

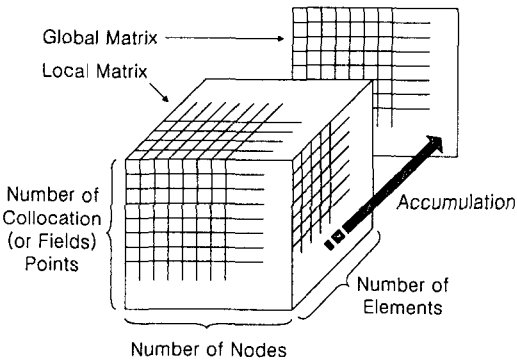


Fig. 2. Concept diagram for the construction of global matrix

본 연구에서는 머플러의 토출구가 위치할 수 있는 머플러 상부면을 설계 영역으로 설정하여, 초기에 모든 영역이 닫혀있는 경우, 즉 토출구가 없는 경우를 가정하고 모든 요소에 대한 지역 행렬 정보를 구성하였다. 그리고 나서 무작위로 일부 요소를 제거함으로써 토출구를 생성하였

다. 각 개체의 광역 행렬은 제거된 요소의 정보를 제외한 나머지 요소 정보만을 이용하여 구축하였다.

#### 4. 머플러 토출구의 위상 최적설계

우선 현재 사용되고 있는 기본 머플러 설계의 음향 특성을 해석하기 위해, 그림 3에 보인 바와 같이, 모두 2839개의 경계 요소와 2869개의 절점으로 구성된 머플러의 수치 모델을 개발하였다. 이 모델은 상부에 두개의 토출구를 가지고 있으며 하부에는 하나의 실린더 토출부(머플러 입장에서 흡입구)를 가지고 있다.

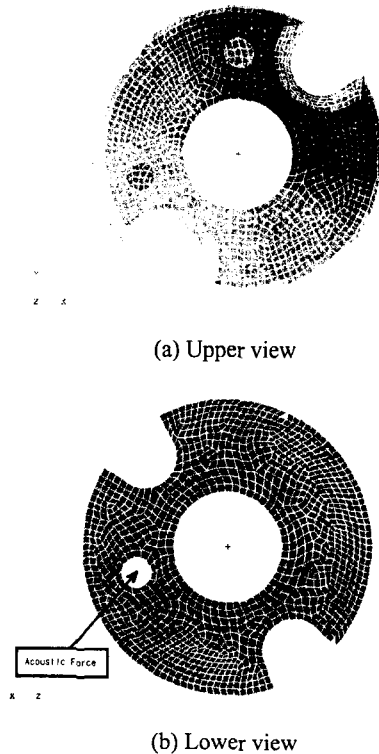


Fig. 3. Numerical model of the muffler cavity

주어진 모델의 해석 결과를 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 무향실에서 스피커를 이용해 음파를 생성하고, 머플러를 지나 토출되는 음압을 측정하였다. 그림 4에 보인 것과 같이, 스피커에서 발생된 음파는 관을 통해 머플러로 유입된다. 머플러 흡입단에서의 진행파는 2-

microphone 방법[13]을 이용하여 계산하였으며, 이 값을 이용하여 머플러 상단에서 측정된 음압을 나눔으로써 전달 함수를 계산하였다.

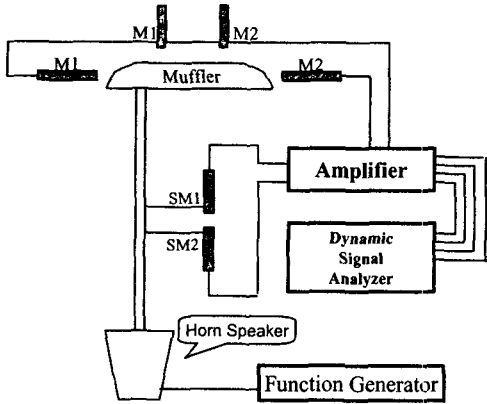


Fig. 4. Experimental setup

그림 5 에는 해석 결과와 실험 결과를 보였다. 비교 결과를 통해 해석 결과가 실험 결과와 상당히 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 이때 관심 주파수는 1kHz 부터 1.5kHz 까지로 하였다. 이것은 그 동안의 실험과 경험을 통해 실제 머플러가 냉매 상태에서 작동할 때 700~800Hz 대역에서 머플러의 흡에 따른 특성 변화를 보이는 것을 확인하였는데, 공기와 냉매의 음속 차이를 고려할 때 이 주파수 대역은 바로 그림 5 에 보인 첫번째 peak 에 해당되기 때문이다.

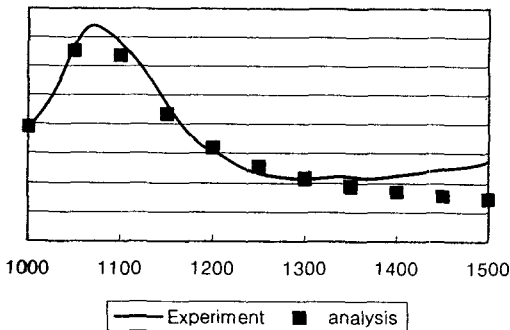


Fig. 5. Comparisons of the analysis and experiment

머플러 토출구의 위상 최적설계는 머플러 상부에 위치한 요소들의 존재 여부를 설계 변수로 하여 관심 주파수 대역내의 최고 음압을 낮추는 것을 목적함수로 하였다. 이때 기본 머플러를 참

고로 하여, 제거되는 요소들의 면적의 합이 전체 설계 영역의 10%을 넘지 않도록 구속 조건을 설정하였다. 이것은 토출구의 면적 변화가 음향 특성 외에 유동의 특성에까지 큰 변화를 초래함으로써 압축기의 효율에 영향을 미치는 것을 최소화하기 위한 것이다.

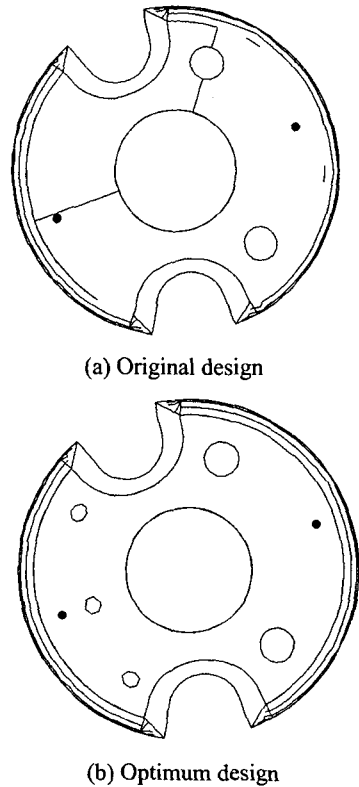


Fig. 6. Optimum topology of the muffler hole (• is a field point)

그림 6에는 머플러의 기본 설계 모델과 위상 최적설계를 통해 도출된 설계 모델을 보였다. 제안된 최적 모델의 성능을 확인하기 위하여 그림 6 에 표시된 field point에 대해 해석을 수행하였으며 그 결과를 그림 7에 보였다. 해석 결과로부터, 제안된 설계 모델의 경우에는 기본 머플러가 가지고 있었던 첫번째 peak이 완전히 사라졌다는 것을 알 수 있었다. 최적 모델이 가지는 토출구의 전체 면적은 기본 머플러와 비교해서 약간의 증가가 있었으나 그 차이는 매우 작았다. 결국 동일한 면적의 토출구를 그림 6과 같이 배치하는 경우, 최소한

관심 주파수 대역 내에서는 머플러가 음향학적으로 가지는 첫번째 peak을 완전히 없앨 수 있음을 확인하였다.

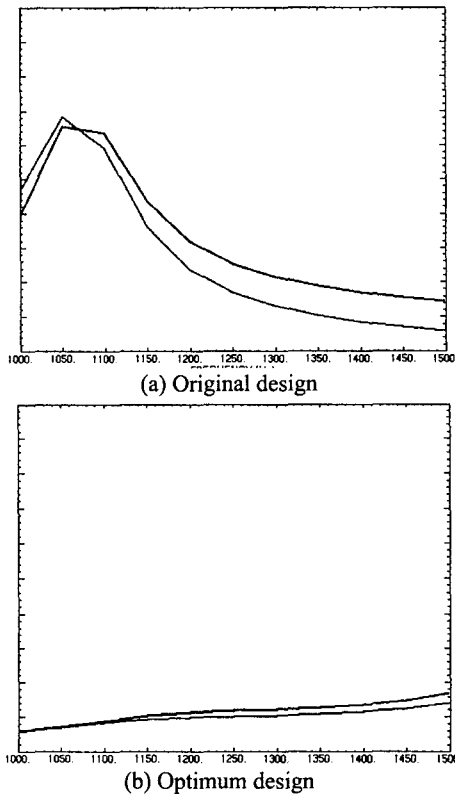


Fig. 7. Acoustic pressures of the original design and optimum design

## 5. 결 론

본 연구를 통해 법선 도함수 적분법과 유전자 알고리즘을 이용한 음향학적 위상 최적 설계 방법이 제안되었으며, 실제 머플러에 제안된 방법을 적용함으로써 매우 향상된 성능의 설계를 도출할 수 있었다. 그러나 제안된 방법은 순수하게 머플러의 음향학적 특성에만 기초하고 있으므로 머플러가 가지는 또 하나의 매우 중요한 특성인 유동을 고려하지 않았다. 따라서 실제로 제안된 설계가 압축기에 적용될 경우에 대한 고찰이 필요하며, 경우에 따라 유동 효과까지 고려한 위상 설계에 대한 연구가 필요하다고 하겠다.

## 후 기

이 연구는 한국 과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기 전자 부품 및 시스템 연구 센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Seybert A.F., Cheng C.Y.R., Wu T.W., 1991, "A multidomain boundary element solution for silencer and muffler performance prediction", *Journal of Sound and Vibration*, **151**, 119-129
- (2) Wu T.W., Wan G.C., 1992, "Numerical modeling of acoustic radiation and scattering from thin bodies using a Cauchy principal integral equation", *J. Acoust. Soc. Am.*, **92**, 2900-2906
- (3) Wu X.F., Pierce A.D., Ginsberg J.H., 1987, "Variational method for computing surface acoustic pressure on vibrating bodies, applied to transversely oscillating disks", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **OE-12**, 412-418
- (4) Kane J.H., Mao S., Everstine G.C., 1991, "A boundary element formulation for acoustic shape sensitivity analysis", *J. Acoust. Soc. Am.*, **90**, 561-573
- (5) Smith D. C., Bernhard R. J., 1992, "Computation of acoustic shape sensitivity using a boundary element method", *Journal of vibration and acoustics*, **114**, 127-132
- (6) Salagame R.R., Belegundu A.D., Koopmann G.H., 1995, "Acoustical sensitivity of acoustic power radiated from plate", *Journal of Vibration and Acoustics*, **117**, 43-48
- (7) N. Vlahopoulos, 1992, "Boundary element formulation for acoustic sensitivities with respect to structural variables and acoustic impedance," 2<sup>nd</sup> International Congress on Recent Developments in Air- and Structure- borne Sound and Vibration, Auburn University, March.
- (8) J.P. Coytte, H. Wynendaele, M. Chargin, 1993, "Evaluation of Global Acoustic Sensitivities using a Combined Finite Element/Boundary Element Formulation," *Noise-con 93(INCE/USA)*, May 2-5.
- (9) B.U. Koo, J.G. Ih, B.C. Lee, 1998, "Acoustic shape sensitivity analysis using the boundary integral equation," *J. Acoust. Soc. Am.*, **104**, 2851-2860.
- (10) Wang S., Lee J., 2001, "Acoustic Design Sensitivity Analysis and Optimization for Reduced Exterior Noise", *AIAA Journal*, **39**, 574-580
- (11) Lee J., Wang S., 2001, "Shape design sensitivity analysis for the radiated noise from thin-body", *Proceedings of 8th ICSV, Hong Kong, China*, 2159-2166
- (12) Goldberg D., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley publishing company, Inc.
- (13) Munjal M.L., 1987, *Acoustics of Ducts and Muffler with application to exhaust and ventilation system design*, John Wiley & Sons.