

배기소음기의 음향해석 및 설계시스템 개발

황 원 곁¹⁾ · 이 유 엽^{*1)} · 김 기 세²⁾ · 홍 석 기³⁾ · 박 동 철⁴⁾ · 정 승 균⁴⁾

전남대학교 기계시스템공학부¹⁾ · 전남대학교 자동차연구소¹⁾ · 담양대학 자동차과²⁾ · 전남대학교 대학원³⁾ · 현대·기아자동차⁴⁾

Development of an Analysis and Design System of Exhaust Mufflers

Wongul Hwang¹⁾ · Youyub Lee^{*1)} · Kisei Kim²⁾ · Seokki Hong³⁾ · Dongchul Park⁴⁾ · Seunggyoon Jung⁴⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Chonnam University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾Department of Automobile, Damyang College, Cholanamdo 517-802, Korea

³⁾Graduate School, Chonnam University, Gwangju 500-757, Korea

⁴⁾R&D Div. for Hyundai & KIA Motors Corp., 772-1 Jandeok-dong, Hwaseong, Gyeonggi-do 445-850, Korea

(Received 19 February 2003 / Accepted 21 April 2003)

Abstract : A PC-based analysis and design system of exhaust muffler is described. It makes use of software packages such as Sysnoise and STAR-CD to calculate transmission loss(TL) and back pressure. The system is applied to redesign a main muffler of passenger car to improve its performance. The effects of design parameters on acoustic and pressure loss characteristics are examined. Taguchi method is used to determine optimal combination of parameters which affects muffler performances such as TL and back pressure. Three models are chosen and compared in laboratory bench test and engine dynamometer test to prove their performances.

Key words : Muffler(소음기), Transmission loss(투과손실), Back pressure(배압), Taguchi method(다구찌 방법), Table of orthogonal arrays(직교배열표)

1. 서 론

자동차의 배기 소음을 줄이기 위한 소음기의 설계목표는 엔진효율저하를 최소화하면서 소음감소를 최대화하는 것이다. 즉 음향에너지의 전달 및 방출을 제어하는 것인데, 이때 사용되는 소음기는 작동원리에 따라 반사형과 흡음형의 두 가지 형태로 나뉜다. 현재는 이들의 특성을 조합한 복합적인 구조의 소음기가 널리 사용되고 있다.

일반적으로 소음기의 소음성능예측에는 전달행렬법이 많이 사용되고 있는데 소음기 벽면에서 음에너지의 전달이나 손실이 없다고 가정한다.¹⁻³⁾ 그

러나 소음기의 기하학적 형상이 복잡해지고 진동치가 특정한 상한치를 넘는 경우에는 평면파 이론에 근거한 소음감소 특성해석이 불가능하며 수치해석법을 통한 음파방정식의 해가 필요하게 되었다.^{4,5)}

수치해석 소프트웨어를 사용하더라도 새로운 모델에 대한 반복작업을 피하고 후처리 작업시간을 단축하며 종합적으로 관리할 수 있는 시스템이 요구된다. 본 연구에서 개발된 시스템은 현장에 있는 PC를 제품의 설계 및 해석을 위한 기본 플랫폼으로 하고, 이러한 PC들을 고성능 컴퓨터에 연결하여 효율적으로 제품설계를 할 수 있는 시스템이며, GUI 환경을 이용한 상호 인터페이스 모듈을 갖춘 소프트웨어이다. 음향해석과 유동해석에는 SYSNOISE, STAR-CD, 및 FLUENT와 같은 기존의 상용 S/W들

*To whom correspondence should be addressed.
yylee@chonnam.ac.kr

과 연관시켜 효율적인 해석을 수행함으로써, 설계자가 구상하는 소음기의 소음감소 특성을 파악하여 소음기의 형상구현을 용이하게 하고, 개발기간을 단축시키는 데 목적이 있다.

2. 소음기 설계관리 프로그램

2.1 소음 및 유동해석

소음기는 엔진내부 실린더의 압축과정에서 발생하는 압력맥동 성분과 형상변화에 의하여 발생된 맥동성분들이 소음기를 통과하면서 압력을 평균화시켜 소음을 저감시키는 역할을 한다.

Fig. 1과 같은 머플러의 압력과 속도를 사단자 정수로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_n \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

머플러의 양단에서 반향되는 투과음파가 없는 상태를 가정할 때 투과손실은 아래와 같이 계산된다.

$$TL = 20 \log \left(\frac{1}{2} \left| A_{11} + \frac{A_{12}}{\rho c} + A_{21} \rho c + A_{22} \right| \right) \quad (2.2)$$

배압은 배기가스 토출시 흐름을 방해하고 소음기 토출구에서 음을 방사시키는 주요한 원인이 된다. 배기가스가 토출되는 시점에서 난류 에너지를 적게 가질 수 있다면, 즉, 머플러내부가 배기가스의 흐름을 원활하게 하는 구조를 이루면 성능이 좋은 소음기를 얻을 수 있다. 그래서 배기 토출구의 배압이 높으면 성능측면에서 불리하므로 소음기 내부구조나 토출구의 위치를 최적화하여 배압을 조절하여야 한다.

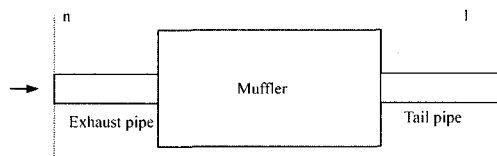


Fig. 1 Muffler

2.2 프로그램 개요

본 시스템은 소음기의 설계시점에서부터 사용자의 최종결정에 이르는 일련의 과정을 작업 순서에

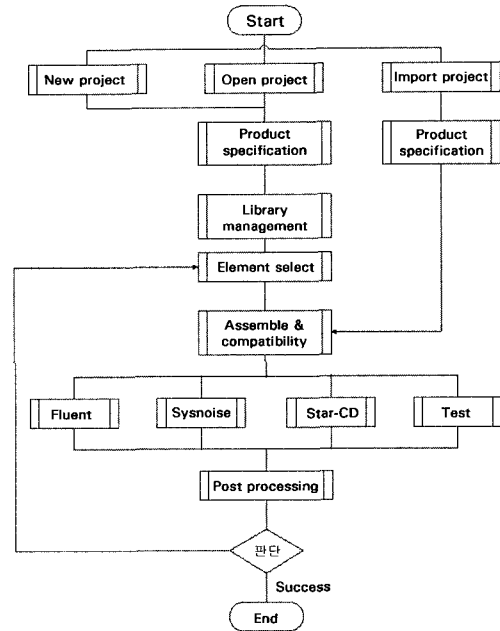


Fig. 2 Flowchart of the program

따라 진행되는 트리형식의 메뉴를 채택함으로써 작업의 편리성을 도모하였다. Fig. 2는 프로그램의 전체적인 흐름도이다. 소음기의 기하학적 정보를 Window의 대화창에서 입력받아 I-DEAS상에서 유한요소모델을 생성하여 소음기의 투과손실과 유동해석을 수행하고, 이 결과를 현장의 설계자가 쉽게 활용할 수 있도록 하였다.

라이브러리의 부품들을 선택하여 3차원 모델링 소프트웨어를 위한 I-DEAS의 배치작업 파일을 생성하여 하나의 모델로 일괄처리 하게 된다. 작업의 결과인 매쉬 데이터를 SYSNOISE 또는 STAR-CD와 연계하여 작업한다. 투과손실(TL) 해석결과와 실험 결과를 비교하여 윈도우 메타파일로 출력하여 보고서를 작성할 수 있게 하였다.

2.3 프로그램 구조

프로그램은 크게 프로젝트, 라이브러리, 인터페이스, 결과로 구분된다. 프로젝트 모듈은 새로운 프로젝트 작성 및 외부에서 데이터를 가져 올 수 있는 부분으로 세분되며, 라이브러리 모듈은 I-DEAS의 라이브러리와 이미지파일, 모델의 타입, 요소 등을 연결지어 놓은 파일을 관리하며, 라이브러리 정보

에는 단순한 연결 정보뿐만 아니라 해당 요소들에 대한 모델명, 종류 및 설명도 함께 추가된다. 라이브러리 모듈에서는 I-DEAS의 라이브러리 기능을 이용하여 위하여 I-DEAS용 스크립트 파일인 PRG파일을 이용한다.

소음기 해석에 있어 먼저 소음기를 구성요소 별로 나누었다. 즉 소음기 내부 격벽 위치, 파이프내 홀 등으로 구분하여 모델링하고 FEA 해석을 수행한다. 3차원 해석은 전처리 작업을 위한 프로그램 파일을 생성하고 해석을 위한 Command 파일을 생성하는 그룹으로 나뉘며, 해석결과로 산출된 전달행렬로 투과손실을 구한다.

인터페이스 모듈은 FTP와 텔넷을 이용하여 외부와 접속하는 루틴으로 구성되어 있다. 이를 이용하여 Remote 컴퓨터의 솔버 어플리케이션에 접속하여 해석하고, 다시 그 결과를 FTP를 이용하여 가져올 수 있다. 결과모듈은 이러한 해석결과들을 화면 또는 윈도우메타파일로 만들어 문서작성의 소스로 제공한다.

2.4 소음기요소 데이터베이스

소음기 구성요소가 소음 및 배압에 미치는 영향을 고찰하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 요소를 분류, 선정하고 각 요소에 대한 정보를 수집하였다. 즉 단순팽창형, 삽입형, 편심형, 역류형, 천공형 등에 대하여 각각에 대한 소음 및 배압특성 해석을 수행하고 각 요소의 치수를 변경하여 이들의 결과를 프로그램내에 입력시켜 데이터 베이스화 하여 설계에 이용할 수 있도록 하였다. 예를 들어 천공형의 경우 입.출구관의 삽입된 길이 변화, 천공 길이 변화, 격벽 홀의 위치 변화에 따른 소음 및 배압 특성 변화를 쉽게 파악할 수 있도록 하여 데이터화 하였다. 각 구성 요소에 대한 내용은 Table 1과 같다.

3. 소음기의 재설계

소음기개발은 많은 경우 투과손실과 유동손실을 실험에 의하여 측정하고 이 결과를 바탕으로 시행착오법으로 진행하여 왔다. 따라서 해석과 실험을 비교, 평가하여 체계적으로 개발할 수 있는 환경이 필요하다. 본 연구에서는 개발된 프로그램을 이용

Table 1 Basic muffler elements

Element	Shape
단순 팽창형	
삽입형	
편심형	
역류형	
천공형	

하여 승용차용 소음기의 성능개선을 시도하였다. 소음기의 투과손실과 유동손실을 예측하고, 실험계 획법을 이용하여 소음기의 내부구조를 변경하여 성능개선을 시도하였다. 마지막으로 개선안을 실제 제작하여 효과를 실험을 통해 확인하였다.

3.1 실험장치

소음기의 소음성능(TL)을 측정하기 위한 실험장치의 개략도는 다음과 같다. 실험장치는 크게 신호 발생부, 측정 및 분석부 그리고 소음기로 나누었다. 신호 발생부는 B&K3550내의 신호 발생기, 증폭기

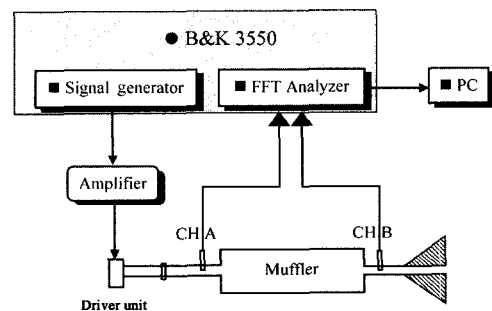


Fig. 3 Test setup

및 드라이브 유닛으로 구성되어 있다.

신호 발생기에서 발생한 음원의 주파수 대역은 0~6.4kHz 백색잡음이고, 정격주파수 대역은 120~6000Hz이다. 그리고 소음기의 입·출구부에 설치된 1/2 inch 콘덴서형 마이크로폰을 통해 측정된 신호를 B&K3550로 주파수 분석을 행하였다. 주파수 대역은 실제 해석적인 측면에서 의미가 있는 0~2 kHz에 걸쳐 분석을 행하였으며, 분석결과를 PC에서 후처리하여 TL을 계산하였다.

3.2 재설계

자동차에서 배기계, 특히 소음기는 실내외소음 및 차량 동력성능에도 중요한 역할을 한다. 즉 차량의 가속성능, 실내 저주파 부밍소음과 범규와 관련된 차외소음에 크게 영향을 미치므로, 차량의 상품성 측면의 목표달성과 강화되는 국내외 소음규제를 만족시키기 위해서는 소음기의 성능이 개선되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 개발된 설계해석 시스템을 승용차용 주소음기에 적용하여 해석하고 재설계를 통한 개선안을 제시하여 소음기 설계 및 해석도구로서의 유용성을 검증하였다.

기존소음기의 구조는 Fig. 4와 같고 Fig. 5에 기존 소음기에 대한 투과손실 실험 및 해석 결과를 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 600Hz의 피크를 제외하고는 전체적인 경향이 비교적 일치함을 알 수 있다. 따라서 해석결과를 이용하여 개선안을 도출하고 그 개선 여부를 샘플제작과 실험을 통해 확인하였다.

소음기 성능을 개선하고자 외부형태는 고정시키고 소음기 내부구조를 변경시켰는데 그 변경된

구성요소는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 소음기 본체 내부 입구관의 홀 개수, 출구측 격벽의 위치, 출구측 격벽의 홀의 분포 모양, 그리고 입구측 홀의 분포모양을 선정하였다. 이 4가지 인자에 대해 Table 2와 같이 각 인자당 3수준으로 설정하고, 다구찌 실험계

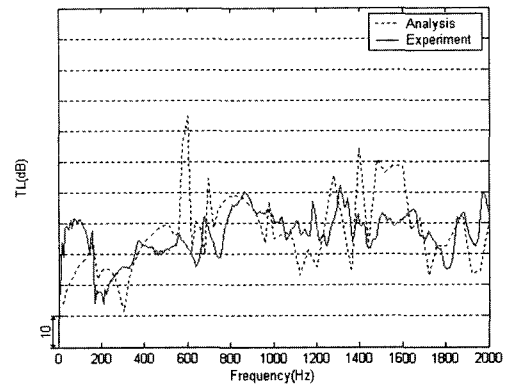


Fig. 5 TL of test muffler

Table 2 Orthogonal arrays of control factors

	인자1	인자2	인자3	인자4
	입구관 천공수	격벽의 위치	출구격벽홀(Φ5×25)	입구격벽홀(Φ5×59)
1수준	6열	125mm		
2수준	8열	145mm		
3수준	10열	165mm		

Table 3 Orthogonal arrays

번호	열번호			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

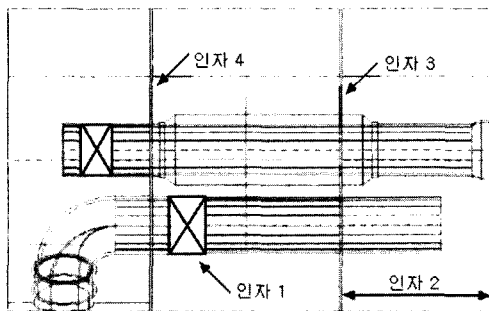


Fig. 4 Shape of test muffler and design parameters

획법에 따라 Table 3과 같이 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 구성하였다.

기존모델은 인자1에 2수준, 인자2에 2수준, 인자3에 2수준, 인자4에 3수준인 M_2223이다. Table 1에 따라 총 9가지에 대한 소음기의 소음 및 배압특성을 해석하고, 소음 및 배압에 대하여 인자별 S/N비를 구한 결과는 Fig. 6, 7과 같다.

여기서 S/N비의 경우 선택된 인자가 소음 또는 배압에 얼마만큼 민감하게 영향을 미치는지를 판단하는 기준이 된다. 한편 인자 3, 4는 소음기 내부에 형성된 칸막이 즉 격벽에 진공홀에 대한 분포 모양에 따른 영향도를 파악하기 위함인데 소음 설계시 중요한 인자중에 하나이다.

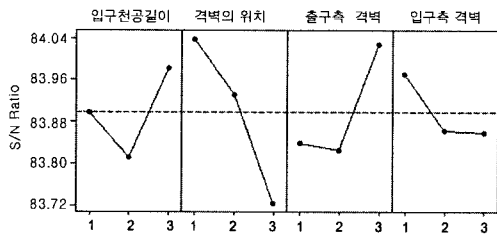


Fig. 6 Main effects plot for S/N ratios(TL)

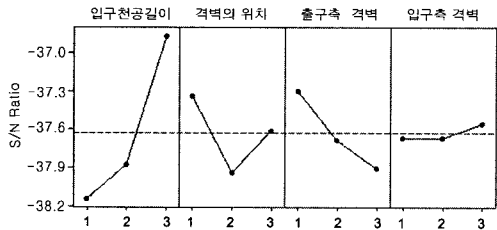


Fig. 7 Main effects plot for S/N ratios(Back Pressure)

Table 4 Analysis result of TL and back pressure

번호	열번호				TL (700Hz)	배압 (kPa)
	1	2	3	4		
기존모델	2	2	2	3	15,489	74.8
TL모델	3	1	3	1	16,573	70.1
배압모델	3	1	1	3	15,719	69.5

3.3 소음기 개선사항

인자별 S/N비로부터 TL최적모델 M_3131과 배압 최적모델 M_3113에 대한 계산결과는 Table 5와 같다. Table에서 TL(700Hz)는 실내 소음에 직접적인 영향을 줄 수 있는 700Hz까지의 TL곡선의 면적이

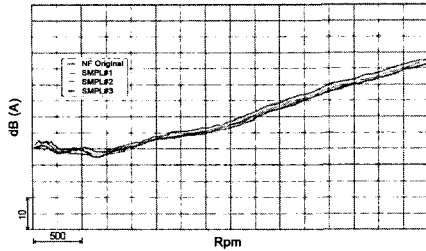
고, 배압은 소음기 입·출구의 압력손실이다. TL최적모델인 M_3131경우 700Hz까지의 소음측면에서 TL이 증가하여 개선효과가 기대되며, 배압 또한 기존모델보다 4.7kPa 정도 감소함을 알 수 있다. 한편 배압 최적모델인 M_3113의 배압은 69.5Kpa로서 기존모델보다 5.3kPa 개선되었고 TL도 기존모델과 비교하여 동등이상의 성능을 나타내고 있다. 추가적으로 M_3113과 구조가 비슷한 M_3213의 경우 배압은 Table 5에서와 같이 69Kpa로 개선되었고 소음성능도 기존소음기와 거의 동등하게 유지됨을 알 수 있다. 따라서 Table 3에서 해석상 소음성능이 개선되고, 배압성능이 개선될 수 있으리라고 기대되는 모델을 3개 선정하였는데, 이 3개 모델과 기존 모델의 비교는 Table 5와 같으며 이 3가지 개선안을 제작하여 실험을 통해 확인하였다.

Table 5 Sample model

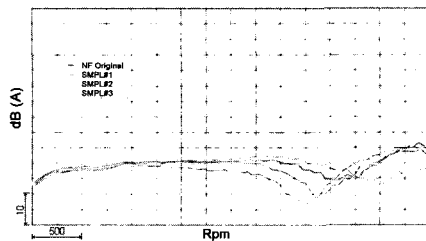
모델명	TL (700Hz)	배압 (Kpa)
기존모델(M_2223)	15,489	74.8
Sample#1(M_3131)	16,573	70.1
Sample#2(M_3213)	15,703	69.0
Sample#3(M_3113)	15,719	69.5

3.4 실험 확인

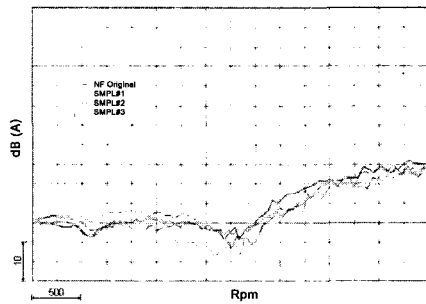
앞서 제시된 3가지 샘플을 배기계에 장착하여 엔진다이아모 상에서 성능을 확인하였다. 운전 조건은 엔진회전수 1000~5000rpm에서 일정가속 하였고 마이크로폰의 위치는 Tail pipe에서 45°방향, 50cm 떨어진곳에 설치하고 배압측정 위치는 UCC(Underfloor Catalytic Converter)후 100mm 이다. Fig. 8은 개선안 및 기존 소음기에 대한 소음실험 결과인데 먼저 2차 성분을 보면 소음최적 모델인 M_3131이 3750rpm영역에서 약10dB(A)의개선 효과가 있었고, 4차 6차의 경우 M_3213이 우수하나 실내 소음 및 차외소음을 고려할 때 즉 2차 성분을 고려할 때 M_3131의 개선효과가 가장 우수하다. 배압특성의 경우 3가지 샘플 모두 5000rpm 기준으로 기존모델과 오차 범위내(±2kPa)에서 동등한 수준으로 나와 성능상에는 차이가 없다. 따라서 소음개선 효과를 고려할 때 모델 M_3131을 선정하는 것이 타당하다고 사료된다.



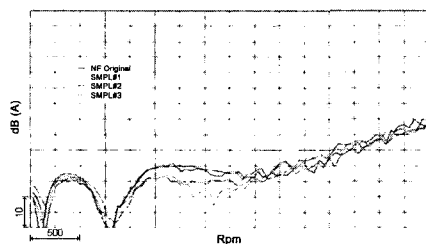
(a) Overall



(b) 2nd order



(c) 4th order



(d) 6th order

Fig. 8 SPL(A) according to rpm

4. 결론

본 연구에서는 현장에서 쉽게 활용할 수 있는 소음기 해석 및 설계프로그램을 개발하였다. 3차원 요소에 대한 프로그램 파일 및 Command 파일 작성 프로그램을 이용하여 기존 상용프로그램에 반복되는 작업을 단축할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 형

상이 복잡한 소음기의 FEA 해석을 수행할 때 전체를 모델링하는 시간과 노력을 각 요소별로 구분하여 해석을 수행함으로써 설계시간을 단축할 수 있었다.

개발된 프로그램을 이용해 소음기의 설계 및 해석 도구로서의 유용성을 검증하기 위해 승용차용 소음기에 적용하였다. 소음기의 특성을 해석하고, 실험계획법을 이용하여 소음기의 구성 요소를 변경하여 소음기를 재설계하고 성능개선을 시도하였다. 해석과 실험을 통하여 실제 소음기를 변경, 제작하여 적용한 결과 특정영역에서 소음 저감 효과를 확인하였다.

본 시스템을 소음기의 설계에 적용한다면 소음기 설계에 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2000년도 전남대학교 연구년 교수연구비에 의하여 연구되었음.

References

- 1) S. K. Youn, E. S. Lee, "Prediction of Transmission Loss of Elliptic Expansion Chamber with Mean Flow by 3-Dimensional Finite Element Method," Journal of KSNVE, Vol.3, No.3, pp.271-278, 1993.
- 2) J. G. Ih, "Acoustic Analysis and Design of Exhaust Mufflers:I. Operating Principles Associated with Structures," Journal of KSAE, Vol.16, No.4, pp.37-50, 1994.
- 3) J. G. Ih, "Acoustic Analysis and Design of Exhaust Mufflers: II. Expressions of Acoustical Performance," Journal of KSAE, Vol.16, No.5, pp.10-19, 1994.
- 4) J. Y. Jung, W. J. Kim, B. R. Cho, "Characteristics of Noise Attenuation with the Variation of Flow Condition and Hole Shape of Perforated Intruding Tubes in Muffler," Journal of KSPE, Vol.16, No.10, pp.87-93, 1999.
- 5) A. Genard, "Comparing Finite Element Method and Boundary Element Method with Experiments," SYSNOISE Application Note 27, 1994.

- 6) S. K. Oh, J. Y. Mo, M. S. Huh, "A Study on the Analysis and Improvement of the Acoustic Characteristics of the Muffler with Complex Geometry," *Journal of KSNVE*, Vol.6, No.6, pp.755-762, 1996.
- 7) S. W. Kang, Y. H. Kim, "Transmission Loss Measurement of Silencer with Two Microphones and Its Error Analysis," *Journal of KSNVE*, Vol.2, No.3, pp.181-192, 1992.
- 8) A.F. Seybert, "Application of the Boundary Elements Method to Acoustic Cavity Response and Muffler Analysis," *Journal of Vibration & Acoustics*, Vol.109, pp.15-21, 1987.
- 9) Numerical Integration Technologies N.V., *SYSNOISE R5.0 Theoretical Manual*, LMS, 1993.
- 10) M. L. Munjal, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, John Wiley & Sons Inc., 1987.
- 11) J. E. Oh, K. J. Cha, K. T. Lee, C. G. Chin, "Design of Muffler using Taguchi Method and Experimental Design," *Journal of KSAE*, Vol. 7, No.5, pp.121-129, 1999.