

두 음향 탐측자법과 다구찌방법을 이용한 흡기계의 최적설계에 관한 연구

Study on the Optimal Design of an Intake System Using
the Two Microphones Method and the Taguchi Method

°이종규*, 박영원**, 채장범***, 장한기****

J. K. Lee, Y. W. Park, J. B. Chai, H. K. Jang

Key words : Two Microphone Method(두 음향 탐측자법), Transmission Loss(전달손실),
Taguchi Method(다구찌 방법), Optimal Design(최적설계), Loss Function(손실함수)

ABSTRACT

In this paper, the experimental design of an intake system was studied using the two microphones method and the taguchi method. The transmission loss was utilized to represent the performance of noise reduction for the intake system which was estimated by measuring sound power at inlet and outlet with two microphones, respectively. Two microphones method used in this paper was followed by wave decomposition theory. The robust designing parameters of an intake system were extracted by adapting a cost function with the taguchi method, which optimized the process. Finally the effectiveness of the propose method was validated with the experimental data.

I. 서론

최근 우리의 생활수준 향상과 더불어 소음에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 자동차분야에서도 이전의 연비향상이나 출력성능 위주에서 자동차 실내에서의 정숙성을 추구하는 환경친화적 제품 생산으로 바뀌고 있는 추세이다. 현재 자동차소음의 주된 원인으로서의 가속시 흡기밸브의 개폐에 의한 저주파수 대역의 흡기소음을 들 수 있는데 이에 대한 흡기소음의 저소음화 기법⁽¹⁾과 개념설계 방법들⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾이 진행되어 왔다.

그러나 기존의 설계방식으로는 패키징과 성능을 고려한 동시공학적 측면을 반영하지 못할뿐더러 주변의 외란에 대해서도 강건하지 못한 시스템 특성을 보이고 있는 것이 현실이다.

이에 90년대 후반에 들어서는 흡기계의 단품별 특성을 통계적 최적화기법⁽⁷⁾에 적용하여 시스템에 필연적으로 따르는 외란에 대해서 강건한 시스템을 구축하려는 연구들⁽⁵⁾⁽⁶⁾이 뒤따르고 있다.

본 연구에서는 흡기계의 단품성능을 나타내는 전달손실(TL, transmission loss)을 두개의 음향 탐측자법을 이용하여 구하고, 통계적 최적화기법인 다구찌방법(taguchi method)을 사용하여 차량실내의 소음을 저감하기 위한 흡기계의 최적설계(optimal design)를 수행하였다.

* : GM Daewoo Auto & Technology
아주대학교 시스템공학과 대학원

** : 아주대학교 시스템공학과

*** : 아주대학교 기계 및 산업공학부

**** : 고등기술연구원 제품기술연구센터

II. 본 론

1. 흡기계의 음향학적 설계

1.1 전달손실의 계산

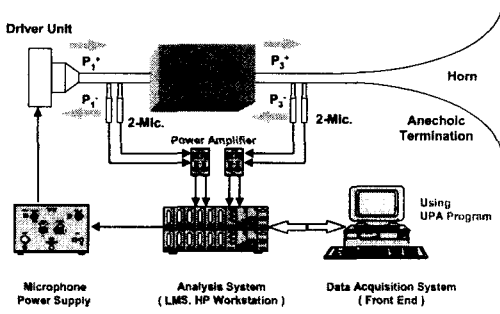


Fig.1 Schematic diagram of transmission loss

일반적으로 덕트시스템의 음향요소인 흡기계에 대한 성능을 평가하는 방법으로써 시스템의 특성을 정확히 알 수 있을뿐더러 이론치와 실험치를 비교하기 용이한 전달손실을 사용하고 있다. 전달손실은 출구단에 무반사장치를 설치한 상태에서 감쇠량을 얻고자하는 소음요소의 상류층과 하류층에서의 음향파위를 계산하거나 측정하여 그 차이점에 사용로그를 취한후 10배를 해준 값을 의미한다. 위의 Fig.1은 전달손실을 구하기 위한 개략적인 도식을 나타내고 있다.

여기서 전달손실을 구하기 위해 우선 시스템의 양쪽에 직관을 연결하고, 한쪽 관에 스피커를 연결하여 랜덤신호를 주었다. 이때 관내 평면파(plane wave) 진행에 대해 각각의 입사파(incident wave)와 반사파(reflect wave)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_1^+(x, t) = A_1(x) e^{j(\omega t - kx)}$$

$$p_1^-(x, t) = A_2(x) e^{j(\omega t + kx)}$$

where, $k = \frac{\omega}{c}$ = 파수(wave number)

p_1, p_2, p_3, p_4 : 각 지점에서의 측정 음압

p_1^+, p_3^+ : 입사 음압(incident pressure)

p_1^-, p_3^- : 반사 음압(reflect pressure)

s : 두 마이크로폰 사이의 거리

$A_1(x), A_2(x)$: 정적변수(static variable)

마찬가지로

$$p_3^+(x, t) = A_3(x) e^{j(\omega t - kx)}$$

$$p_3^-(x, t) = A_4(x) e^{j(\omega t + kx)}$$

마이크로폰 1에서의 총 음압(total pressure)은

$$p_1 = p_1^+ + p_1^- \quad (1-1)$$

입자속도(particle velocity)는

$$v_1 = \frac{1}{\rho c} (p_1^+ + p_1^-), \quad \rho = \text{밀도}$$

마이크로폰 2에서의 총 음압(total pressure)과

입자속도는

$$p_2 = p_1^+ e^{-jks} + p_1^- e^{jks} \quad (1-2)$$

$$v_2 = \frac{1}{\rho c} (p_1^+ e^{-jks} - p_1^- e^{jks})$$

식(1-1) × e^{jks} - 식(1-2)를 하면,

$$p_1 e^{jks} - p_2 = p_1^+ (e^{jks} - e^{-jks})$$

$$p_1^+ = \frac{p_1 e^{jks} - p_2}{e^{jks} - e^{-jks}},$$

$$p_1^- = \frac{p_2 - p_1 e^{-jks}}{e^{jks} - e^{-jks}} \quad (1-3)$$

마찬가지로 마이크로폰 3에서의 총 음압과 마이크로폰 4에서의 총 음압으로부터

$$p_3^+ = \frac{p_3 e^{jks} - p_4}{e^{jks} - e^{-jks}},$$

$$p_3^- = \frac{p_4 - p_3 e^{-jks}}{e^{jks} - e^{-jks}} \quad (1-4)$$

(끝단이 무반사단인 경우 $p_3^- = 0$ 이 됨)

여기서, 전달손실은 입사파에만 관여하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TL = 10 \log_{10} \left| \frac{p_1^+}{p_3^+} \right|^2 = 10 \log_{10} \frac{1}{T_x}$$

(T_x : transmission coefficient)

$$= 10 \log_{10} \left| \frac{p_1 e^{jks} - p_2}{p_3 e^{jks} - p_4} \right|^2$$

$$= 20 \log_{10} \left| \frac{e^{jks} - \frac{p_2}{p_1}}{\frac{p_3}{p_1} (e^{jks} - \frac{p_4}{p_3})} \right|$$

$$= 20 \log_{10} \left| \frac{e^{jks} - H_{12}}{H_{13} (e^{jks} - H_{34})} \right| \quad (1-5)$$

$$\text{where, } H_{12} = \frac{p_2}{p_1}, H_{13} = \frac{p_3}{p_1}, H_{34} = \frac{p_4}{p_3}$$

1.2 전달손실의 측정



Fig.2 Photograph of transmission loss test

본 시험에서는 자동차 주소음원의 하나인 흡기 소음이 1000Hz 이내의 중저주파 소음의 특성을 가지므로 이를 재생시키기 위해 Fig.2와 같이 가진 소음원을 랜덤 발생기를 통해 백색잡음을 발생시켰고, LMS Cada-X(data acquisition system)내의 밴드통과 필터(bandpass filter)를 사용하여 0Hz에서 1000Hz 이내의 소음만을 통과시킨 후 이를 증폭시켜 소음을 발생시켰다.

그리고 음향요소 끝단에는 무반사단을 설치하였으며 무반사단 내부에도 흡음재를 부착하였다. 두 마이크로폰 사이의 간격은 각각 4cm의 간격을 두고 설치하였으며, 이를 잡아주기 위하여 마이크로폰 홀더를 사용하였다. 그러나 무반사단을 설치하였어도 실제로는 반사파가 존재하므로 정확한 실험을 위하여 시스템 하부에도 각각 두개의 마이크로폰을 사용하여 반사파를 배제하고자 하였다. 측정주파수 대역은 관내 평면파영역 ($0 < f < f_{cut-off}$)으로 제한하였으며, 마이크로폰의 간격은 $s < \frac{c}{2f_{max}}$ 의 조건에 따라 결정하였다.

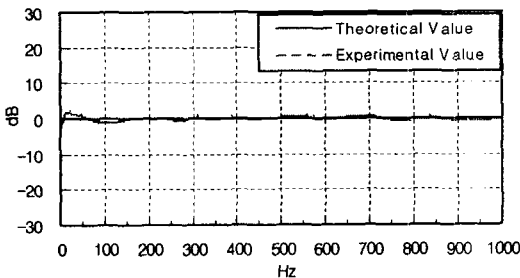


Fig.3 Validation of experimental equipment

Fig.3은 흡기계의 성능평가 장비에 대한 신뢰성 검증을 위해 두 음향 탐측자법을 이용하여 제작한

지그에 직관(straight pipe)을 삽입하여 이에 대한 전달손실값을 구한 것이다. 실험을 수행한 값이 이론값(TL=0)과 거의 일치하는 결과로부터, 본 성능평가 장비가 신뢰성이 있다고 할 수 있겠다.

2. 흡기계의 최적설계

2.1 다구찌 손실함수

제품개발의 강건설계 기법으로 알려진 다구찌기법은 통제불가능한 잡음인자의 영향하에서도 성능특성치(performance characteristic)의 분산이 작고, 평균이 목표값에 근접하도록 하는 제어인자(설계변수)의 조건을 찾는 것이다. 이때 성능특성치가 제품의 목표값으로부터 멀어질수록 제품의 품질손실이 크게되는 손실함수(cost function)를 정의함으로써 외란에 강건한 설계인자들을 설계할 수 있다. 일반적으로 손실함수는 아래와 같이 정의된다.

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2-1)$$

여기서, m은 제품의 특성목표값이고, y는 제품의 실제목표값을 나타내며, k는 비례상수를 의미한다. 본 연구에서는 0-1000Hz의 전달손실 overall value를 특성값으로 하는 망대특성의 S/N비를 식(2-2)와 같이 계산하고 이 S/N비에 따라 인자들의 최적수준 조합을 결정하였다.

$$SN_i = -10 \text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_j^2} \right] \\ = -10 \text{Log}(MSD_i) \quad (2-2)$$

여기서, MSD_i 는 i번째 행의 평균제곱편차(Mean Squared Derivation)를 의미한다.

2.2 직교배열표(orthogonal array table)

본 연구에서는 흡기계의 최적사양을 산출하기 위해 우선 현재 시스템을 대상으로 Table 1과 같이 단순화된 2수준의 실험인자들에 대한 주효과와 교호작용을 사전에 점검한 후, 이를 통해 얻어진 결과를 토대로 Table 2와 같이 3수준의 실험인자들에 대해 중요한 인자들을 찾고자 하였다. 이때 사용된 직교배열표는 2수준이 $L_{16}2^{15}$ 이고, 3수준은 교호작용을 구하지 않고, 주로 인자만 배치하는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 혼합직교배열표를 사용하였고, 두 경우 모두 스피커의 형태(box형과 horn형)를 잡음인자로 선정하였다.

Table 1 Control factors and levels(2-level)

Control factor	Level	
	0	1
A Resonator 유무	유	무
B S/B length	228mm(375Hz)	184mm(466Hz)
C A/C Box volume	5.5L	6.5L
D Snorkel material	PP+porous	PP
F Diffuser 유무	유(157 or 85mm)	무
G Diffuser position	A/C Box upper	A/C Box lower
H Resonator volume	2.5L(83Hz)	1.9L(83Hz)
I Resonator position	A/C Box와 Snorkel 사이	A/C Box LH side에
J Snorkel length	390mm	450mm

Table 2 Control factors and levels(3-level)

Control factor	Level		
	0	1	2
G Woven hose length	150mm	270mm	
A Woven hose porosity	100Hz	350Hz	600Hz
B Upper diffuser length	80mm	120mm	135mm
C Upper diffuser diameter	25mm	30mm	40mm
D S/B diameter	25mm	30mm	36mm
E Inlet insert pipe diameter	30mm	40mm	50mm

2.3 분산분석표(ANOVA)

앞서 언급한 직교배열표들을 가지고 전달손실 시험을 수행하는데, 이때 제품의 특성을 나타내는 특성값은 전달손실의 overall value를 기준으로 하였다. 측정된 전달손실 값들을 가지고 각 요인들이 통계적으로 어느 정도 유의한지를 알아보기 위해 S/N비를 산출한 후 분산분석을 수행하였다. Table 3과 Table 4는 각각의 경우의 분산분석표를 나타낸다.

Table 3 ANOVA of control factors(3-level)

Factor	DOF	S	V	F-value
A	1	1.35	1.35	pooled
H	1	1.62	1.62	pooled
A×H	1	2.24	2.24	3.48
I	1	0.49	0.49	pooled
A×I	1	0.13	0.13	pooled
H×I	1	0.00	0.00	pooled
B	1	6.38	6.38	9.92
D	1	107.61	107.61	167.25
F	1	0.23	0.23	pooled
G	1	11.65	11.65	18.11
J	1	2.29	2.29	3.56
e	1	0.51	0.51	pooled
e	1	0.78	0.78	pooled
A×C	1	0.36	0.36	pooled
C	1	0.18	0.18	pooled
(e)	2	1.29	0.64	
Total	15	135.82		

위의 분산분석표 F검정 결과 2수준에서는 B, D, G의 인자들이 유의한 것으로 나타났고, A×H, J인자는 유의수준 5%에서는 유의치 않으나 F-value의 값이 3이상이므로 약간의 유의성이 있다고 판단되며 그 외의 나머지 A, C, F, H, I, A×I, H×I, A×C 인자들은 모두 유의하지 않은 것으로 나타나므로 오차항에 풀링(pooling)하여 계산하였다.

Table 4 ANOVA of control factors(3-level)

Factor	DOF	S	V	F-value
G	1	13.66	13.66	134.79
A	1	1.30	1.30	12.79
B	1	0.75	0.75	7.36
C	1	0.13	0.13	1.31
D	1	0.67	0.67	6.63
F	1	1.58	1.58	15.63
e	1	0.02	0.02	0.21
e	1	0.18	0.18	1.79
(e)	2	0.20	0.10	
Total	8	18.30		

또한 3수준에서는 C인자를 제외한 나머지 모든 인자들이 유의한 것으로 나타났으므로 C인자만 오차항에 풀링하여 계산하였다.

2.4 주인자 분석(main effect analysis)

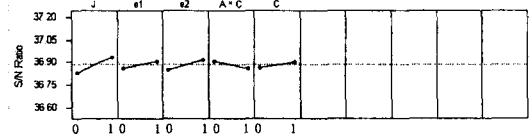
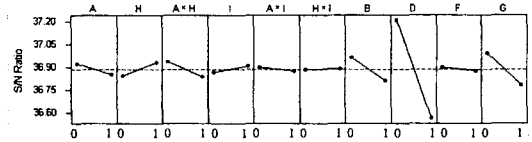


Fig.4 Main effects plot for S/N ratios(2-level)

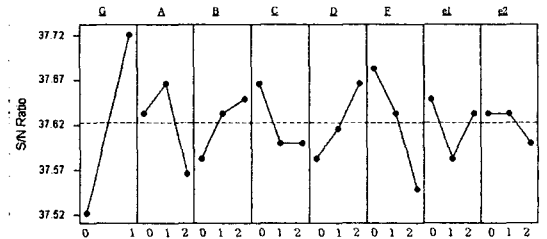


Fig.5 Main effects plot for S/N ratios(3-level)

주인자 분석에서 상부 확산기(upper diffuser)나 입구 삽입관(inlet insert pipe)의 지름(수준)이 작을수록 좋은 성능(높은 전달손실)을 나타내었고, 다공성 호스(porous hose)의 길이가 길고, 기공도(porosity)의 주파수가 높을수록 좋은 성능을 나타내었다.

2.5 인자간 기여율

2수준에 대한 인자간의 기여율을 나타내는 파레토 차트결과 전체 요인중에서 누적기여율이 80% 정도를 점유하는 요인들을 유의한 것으로 택하였다. 따라서 이에 속하는 유의한 요소는 B, D, G, J,

A×H를 들 수 있는데, 이들의 조합은 B₀, D₀, G₀, J₁, A₀H₀ 이고 나머지 인자의 조합은 C₁, F₀, H₁, I₁로 하였다.

그리고, 3수준에 대한 파레토 차트결과는 유의한 요소로 A, B, D, E, G를 들 수 있는데, 이들의 조합은 A₁, B₂, D₂, E₀, G₁ 이고 나머지 인자의 조합은 C₀로 하였다.

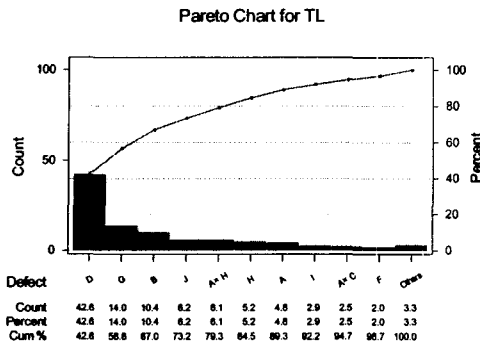


Fig.6 Pareto chart for experimental factors(2-level)

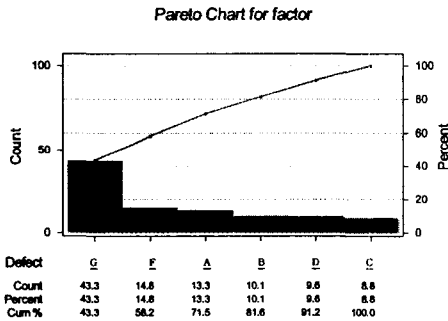


Fig.7 Pareto chart for experimental factors(3-level)

2.6 최적조건에서의 모평균값과 신뢰구간의 추정

앞의 분산분석표와 주인자 분석의 결과로 얻은 최적수준조합의 전달손실 값에 대한 점추정치(모평균값)를 추정하고, 그 추정치에 통계적으로 유의한 신뢰구간을 정하기 위해 우선 2수준에서의 최적인자에 대해 신뢰구간의 폭을 구하면

$$t = (10:0.025) \times \sqrt{\frac{V_e}{n_e}}$$

n_e : 유효반복수

(effective number of replication)

이 되는데, 여기서 유효반복수를 구하면

$$n_e = 1/(1/8 + 1/8 + 1/8 + 1/8 + 1/4 - 4 \times (1/16)) = 2$$

그러므로, $t = (2.228) \times \sqrt{(0.56/2)} = 1.18$ 이 되고,

최적값의 모평균값과 95% 신뢰구간은

$$\begin{aligned} \mu &= B_0 + D_0 + G_0 + J_1 + A_0 H_0 - 4T \\ &= 74.93 \pm 1.189(\text{dB}) \end{aligned} \quad (2-3)$$

동일한 방법으로 3수준에서의 최적인자에 대해 신뢰구간의 폭을 구하면

$$t = (3:0.025) \times \sqrt{\frac{V_e}{n_e}}$$

$$n_e = 1/(1/6 + 1/6 + 1/9 - 2 \times (1/18)) = 3$$

그러므로, $t = (3.182) \times \sqrt{(0.54/3)} = 1.35$ 이 된다.

그런데 여기서 인자 B와 D의 경우 분산분석표 결과로는 유의하지만 모평균값에 이를 포함시키느냐 안시키느냐에 따라 SN비에 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있는데 이는 B, C, D가 실제로는 유의하지 않다는 것을 의미한다. 그러므로 최적값의 모평균값과 신뢰구간의 계산에 인자 B와 D를 제외하고 계산을 하면 다음과 같이 최적값의 모평균값과 95% 신뢰구간을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu &= A_1 + E_0 + G_1 - 2T \\ &= 77.58 \pm 1.35(\text{dB}) \end{aligned} \quad (2-4)$$

3. 결과 및 고찰

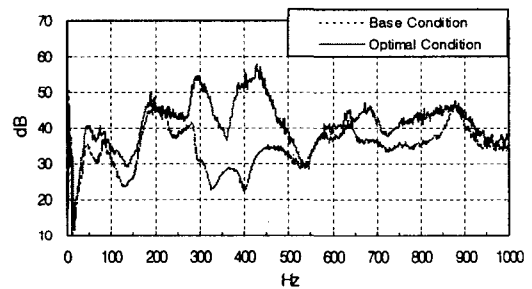


Fig.8 Comparison of transmission loss(2-level)

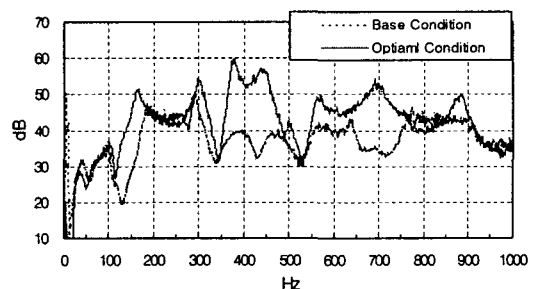


Fig.9 Comparison of transmission loss(3-level)

각각의 전달손실을 보면 base에 비해 optimal 사양의 전달손실이 주파수 대역에서 상당한 개선 효과를 보이고 있는데, 이것을 주파수별로 구분하여 그 원인을 추정하면 다음과 같다.

우선 Fig.8에서 나타나는 100Hz이하의 전달손실 증가는 H/Resonator의 특성치(characteristic)에 의한 것이고, 100-200Hz의 주파수대역의 전달손실 증가 효과는 입구 삽입관(inlet insert pipe)의 지름과 상부 확산기(upper diffuser)에 의한 것이며, 300-500Hz의 전달손실 증가는 입구단의 스노클 재질(snorkel material)과 에어클리너 박스의 용량, 그리고 분기관(side branch)의 길이에 의한 것으로 추정되며, 550-850Hz의 전달손실 증가는 다공성 호스(porous hose)의 길이와 기공도(porosity)에 의한 것으로 판단된다. 참고로 base 사양의 조건은 2수준의 경우 $A_0C_0D_1F_0G_0H_1I_0J_0$ 의 수준조합이고, 3수준의 경우는 $A_1B_1C_2D_2H_2G_0$ 의 수준조합이다.

Table 5 Comparison of overall and deduction value at optimal condition

Test Condition	Deduction Value(dB)	Overall Value (dB)
2-Level Base	-	67.68
2-Level Optimal	74.93	75.67
3-Level Base	-	70.28
3-Level Optimal	77.58	78.00

2수준과 3수준의 최적수준조합으로부터 추정된 점 추정값이 측정된 전달손실을 어느정도 잘 대변하고 있는지를 평가하기 위해 optimal 상태에서의 overall value와 점추정값을 비교해보면 각각의 점추정값들이 측정된 전달손실 값들에 매우 근접해 있어 최적조건의 재현성이 충분히 있을뿐더러 점추정값이 측정값을 잘 대변하고 있다고 판단된다.

III. 결론

- 1) 유의한 요인들로부터 얻어지는 최적수준조합 (수율:망대특성)은 2수준의 경우 $A_0C_0D_0G_0H_0J_1$

으로 이루어지는데, 이때 스노클 재질(snorkel material, D인자)이 흡기계의 전달손실에 가장 민감하게 나타났다, 3수준의 경우는 $A_1E_0G_1$ 으로 이루어지는데, 이 경우에는 다공성 호스(porous hose)의 길이(G인자)가 흡기계의 전달손실에 가장 민감함을 알 수 있었다.

- 2) 기존설계 대비 다루치 방법을 적용한 최적수준 조합의 optimal 사양의 전달손실 값이 base 사양에 비해 overall value 측면에서 약 8dB정도의 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 특히 300Hz-500Hz의 주파수 대역은 20-30dB정도의 매우 큰 효과를 얻을 수 있었다.

IV. 참고문헌

1. Y. Nishio, T. Kohama, and Osamu Kuroda, "New Approach to Low-Noise Air Intake System Development", SAE Paper 911042, pp.25-37, 1991.
2. M. L. Munjal, "Acoustics of Ducts and Mufflers", John Wiley & Sons, 1987.
3. J. Y. Chung, D. A. Blaser, "Transfer Function Method of Measuring in Duct Acoust. Soc. Am., 68, pp. 907-921, 1980.
4. Y. H. Kim, S. W. Kang, "Transmission Loss and Measurement of Silencer with Two Microphones and Its Error Analysis", Proc. Korea. Soc. for Noise and Vib. Eng., Nov., pp. 85-90, 1991.
5. W. Chen, J. K. Allen, K. L. Tsui, F. Mistree, "A Procedure for Robust Design : Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors", Journal of Mechanical design, Transactions of the ASME, Vol. 118, pp.478-485, 1996.
6. 오재웅, 이규태, 박능서, 이정우, "흡기계의 저소음화 기법개발에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 229-234, 1998.
7. 박성현, "현대실험계획법, 민영사, 1995.