

# 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<sup>†</sup> · 박영원\* · 채장범\*\* · 장한기\*\*\*  
J. K. Lee, Y. W. Park, J. B. Chai and H. K. Jang

(2003년 6월 18일 접수 : 2004년 1월 26일 심사완료)

**Key Words** : Two Microphones Method(두 음향 탐측자법), Transmission Loss(전달손실), Taguchi Method(다구찌 방법), Optimal Design(최적설계), Cost 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.

### 기 호 설 명

$A_i(x)$  : 정적변수  
 $H_{12}, H_{13}, H_{34}$  : 전달함수  
 $n_e$  : 유효반복수  
 $t$  : 신뢰구간의 폭  
 $T_\pi$  : 전달계수  
 $V_e$  : 표본분산(산포)  
 $\mu$  : 모평균값

### 1. 서 론

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 원인으로서 가속시 흡기 밸브의 개폐에 의한 저주파수 대역의 흡기소음을 들 수 있는데 이에 대한 흡기소음의 저소음화 기법<sup>(1,2)</sup>과 개념설계 방법들<sup>(3~5)</sup>이 진행되어 왔었다.

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<sup>(6)</sup>에 적용하여 시스템에 필연

† 책임저자 : 정희원, GM Daewoo Auto & Technology  
아주대학교 대학원 시스템공학과  
E-mail : jongkyu.b.lee@gmdat.com  
Tel : (032) 520-4567, Fax : (032) 520-4623

\* 아주대학교 시스템공학과

\*\* 정희원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

\*\*\* 정희원, 고등기술연구원 제품기술연구센터

적으로 따르는 외란에 대해서 강건한 시스템을 구축하려는 연구들<sup>(6,7)</sup>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.

## 2. 흡기계의 음향학적 설계

### 2.1 전달손실의 계산

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 상용로그를 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 랜덤 신호를 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)

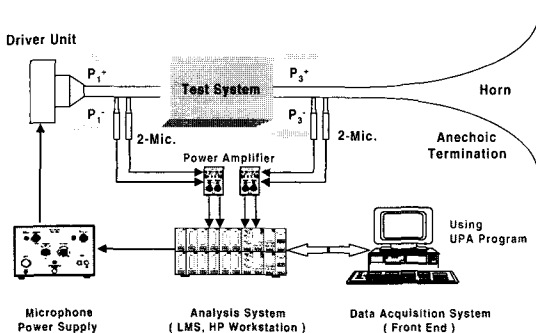


Fig. 1 Schematic diagram of transmission loss

$p_1, p_2, p_3, p_4$  : 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

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

$$p_1 = p_1^+ + p_1^- \tag{1}$$

입자속도(particle velocity)는

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

마이크로폰 2에서의 총 음압(total pressure)과 입자속도는

$$p_2 = p_1^+ e^{-jks} + p_1^- e^{jks} \tag{2}$$

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

식(1) ×  $e^{jks}$  - 식(2)를 하면,

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

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

$$p_1^- = \frac{p_2 - p_1 e^{-jks}}{e^{jks} - e^{-jks}} \tag{3}$$

마찬가지로 마이크로폰 3에서의 총 음압과 마이크로폰 4에서의 총 음압으로부터

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

$$p_3^- = \frac{p_4 - p_3 e^{-jks}}{e^{jks} - e^{-jks}} \tag{4}$$

(끝단이 무반사단인 경우  $p_3^- = 0$  이 됨)

여기서, 전달손실은 입사파에만 관여하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 TL &= 10 \log_{10} \left| \frac{p_1^+}{p_3^+} \right|^2 = 10 \log_{10} \frac{1}{T_\pi} \\
 &= 10 \log_{10} \left| \frac{p_1 e^{jks} - p_2}{p_3 e^{jks} - p_4} \right|^2 \\
 &= 20 \log_{10} \left| \frac{e^{jks} - \frac{p_2}{p_1}}{\frac{p_3}{p_1} \left( e^{jks} - \frac{p_4}{p_3} \right)} \right| \\
 &= 20 \log_{10} \left| \frac{e^{jks} - H_{12}}{H_{13} (e^{jks} - H_{34})} \right| \quad (5)
 \end{aligned}$$

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

### 2.2 전달손실의 측정

본 시험에서는 자동차 주소음원의 하나인 흡기소음이 1000 Hz 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

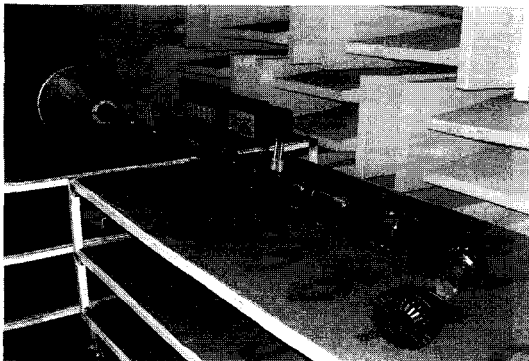


Fig. 2 Photograph of transmission loss test

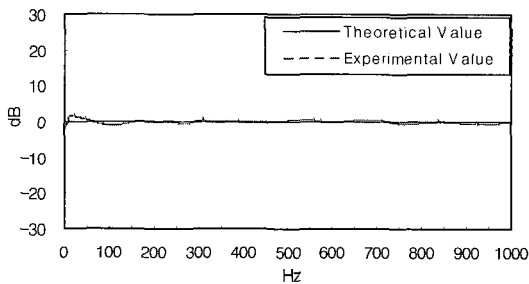


Fig. 3 Validation of experimental equipment

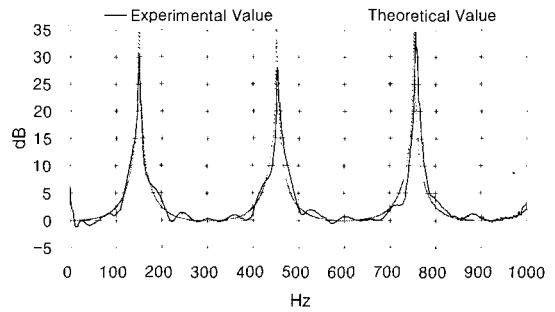


Fig. 4 Transmission loss of side branch resonator

(bandpass filter)를 사용하여 0 Hz에서 1000 Hz 이내의 소음만을 통과시킨 후 이를 증폭시켜 소음을 발생시켰다.

그리고 음향요소 끝단에는 무반사단을 설치하였으며 무반사단 내부에도 흡음재를 부착하였다. 두 마이크로폰 사이의 간격은 각각 4 cm의 간격을 두고 설치하였으며, 이를 잡아주기 위하여 마이크로폰 홀더를 사용하였다. 그러나 무반사단을 설치하였어도 실제로는 반사파가 존재하므로 정확한 실험을 위하여 출구 단에도 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. 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 결과를 볼 수 있다.

또한 Fig. 4는 분기관(side branch) 공명기를 적용하였을때의 전달손실 값을 비교한 것인데, 실험값이 이론값을 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. 이로부터, 본 성능평가 장비가 전달손실을 측정함에 있어 신뢰성이 있는 장비라고 할 수 있겠다.

## 3. 흡기계의 최적설계

### 3.1 손실함수(Cost Function)의 정의

제품개발의 강건설계 기법으로 알려진 다구찌기법은 통제불가능한 잡음인자의 영향하에서도 성능특성치(performance characteristic)의 분산이 작고, 평균

이 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.

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (6)$$

여기서,  $m$ 은 제품의 특성목표값이고,  $y$ 는 제품의 실제목표값을 나타내며,  $k$ 는 비례상수를 의미한다.

본 연구에서는 0~1000 Hz의 전달손실의 전체적인 값(overall value)을 특성값으로 하는 망대특성의 S/N비를 식 (7)과 같이 계산하고 이 S/N비에 따라 인자들의 최적수준 조합을 결정하였다.

$$SN_i = -10 \text{Log} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \\ = -10 \text{Log}(\text{MSD}_i) \quad (7)$$

여기서,  $\text{MSD}_i$ 는  $i$ 번째 행의 평균제곱편차(mean squared derivation)를 의미한다.

### 3.2 직교배열표(Orthogonal Array Table)

본 연구에서는 흡기계의 최적사양을 산출하기 위해 우선 현재 시스템을 대상으로 패키징과 가격 및 성능을 고려하여 설계가능한 범위를 정하였다.

그런 다음 Table 1과 같이 단순화된 2수준의 실험 인자들에 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  $L_{16}2^{15}$ 이

Table 1 Control factors and levels(2-level)

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

Table 2 Control factors and levels(3-level)

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

고, 3수준은 교호작용을 구하지 않고, 주로 인자만 배치하는  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 혼합직교배열표를 사용하였고, 두 경우 모두 스피커의 형태(저주파용의 box형과 고주파용의 horn형)를 잡음인자로 선정하였다. 스피커의 형태를 제어인자가 아닌 잡음인자로 선정한 이유는 차량마다 엔진의 주요 가진 음원(source)이 다르기 때문에 이 요소를 각각 저주파수와 고주파수 형태의 잡음으로 간주하였다.

### 3.3 정규성 검토(Normality Test)

흡기계의 전달손실에 대한 시험이 어느 정도의 안정성과 신뢰성을 지니고 있는지를 보기 위해 시험 데이터들의 정규성(normality) 그림을 그려보면 Fig. 5와 Fig. 6의 그림을 얻을 수 있다. 그림들은 각각 2수준과 3수준 데이터들에 대한 정규성 검토를 Anderson-Darling Test를 이용하여 수행한 결과이다.

결과를 보면 P-value가 각각 0.288(2수준), 0.280(3수준)을 나타내고 있는데, 여기서 P-value는 가설검정에서 귀무가설(H1: 정규성을 따르지 않는다)을 기각하기 위한 최소의 유의수준으로 이 값이 모두

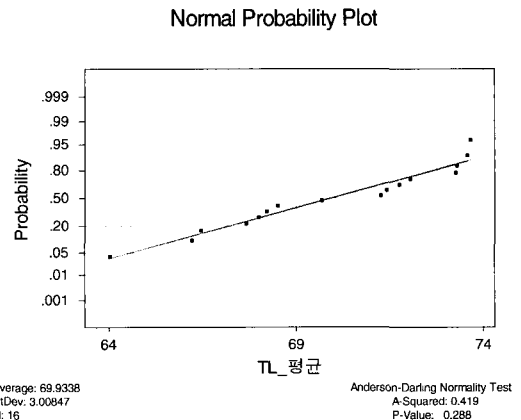


Fig. 5 Test for normality(2-level)

Normal Probability Plot

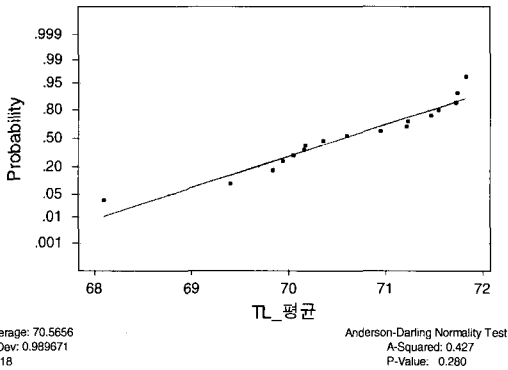


Fig. 6 Test for normality(3-level)

0.05보다 큰 값을 나타내므로 본 데이터들은 정규성을 띄고 있다고 할 수 있겠다.

3.4 분산분석표(ANOVA)

앞서 언급한 직교배열표들을 가지고 전달손실 시험을 수행하는데, 이때 제품의 특성을 나타내는 특성값은 전달손실의 전체적인 값을 기준으로 하였다. 그런 다음 측정된 전달손실 값들을 가지고 각 요인들이 통계적으로 어느 정도 유의한지를 알아보기 위해 S/N 비를 산출한 후 분산분석을 수행하였다.

다음의 Table 3과 Table 4는 각각의 경우(2수준과 3수준)의 분산분석표를 나타낸 것이다. 여기서 오차

Table 3 ANOVA of control factors(2-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		

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		

(e)는 누적기여율 80~90 % 달성시 나머지 요인들의 영향을 의미하고, 변동량(S)은 이들 요인들의 수준 합계를 말하며, F검정은 일반적인 가설 검정의 통계치로 F(자유도, e의 자유도, α)의 형태로 나타난다.

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.

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

3.5 주효과 분석(Main Effect Analysis)

각각의 인자들이 성능 특성치에 어느정도의 효과를 나타내는지 보기 위해 Fig. 7~8과 같이 인자들에 대한 주효과 분석을 수행하였다. 주효과 분석결과 상부 확산기(upper diffuser)의 위치가 에어크리너 박스

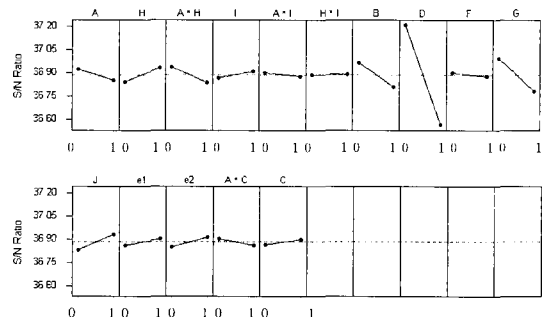


Fig. 7 Main effects plot for S/N ratios(2-level)

상단부위에 있고, 지름(수준)이 작을수록 좋은 성능(높은 전달손실)을 나타내었고, 입구 삽입관(inlet insert pipe)의 지름(수준)이 작고, 다공성 호스(porous hose)의 길이가 길며, 기공도(porosity)의 주파수가 높을수록 좋은 성능을 나타내었다.

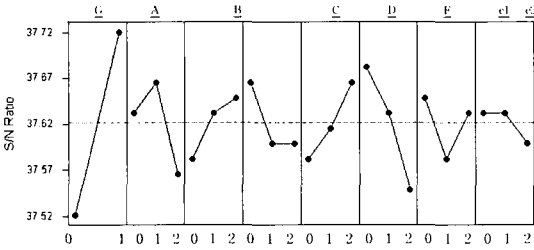


Fig. 8 Main effects plot for S/N ratios(3-level)

3.6 인자간 기여율

Pareto Chart for TL

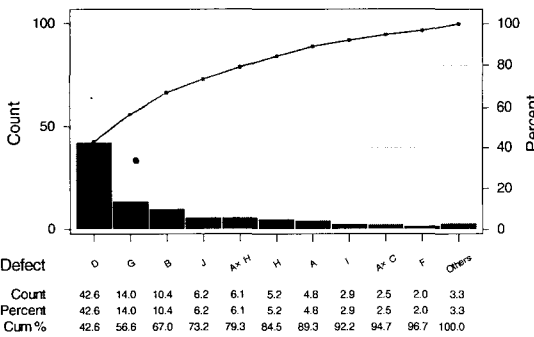


Fig. 9 Pareto chart for experimental factors (2-level)

Pareto Chart for factor

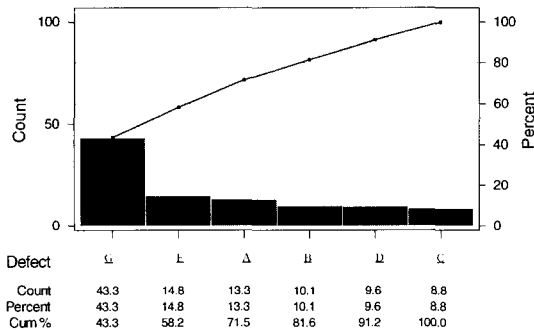


Fig. 10 Pareto chart for experimental factors (3-level)

Fig. 9와 Fig. 10은 각각의 수준에 대한 인자간의 기여율을 파레토 차트로 나타낸 것이다. 여기서 2수준의 경우 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 B<sub>0</sub>, D<sub>0</sub>, G<sub>0</sub>, J<sub>1</sub>, A<sub>0</sub>H<sub>0</sub> 이고 나머지 인자의 조합은 C<sub>1</sub>, F<sub>0</sub>, H<sub>1</sub>, I<sub>1</sub>로 하였다. 그리고, 3수준에 대한 파레토 차트결과 유의한 요소로 A, B, D, F, G를 들 수 있는데, 이들의 조합은 A<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, F<sub>0</sub>, G<sub>1</sub> 이고 나머지 인자의 조합은 C<sub>0</sub>로 하였다.

3.7 최적조건에서의 모평균값과 신뢰구간의 추정

일반적인 다구찌방법의 최적설계에서는 분산분석표와 주효과 분석의 결과로 얻은 최적수준조합의 조건하에서 측정된 성능 특성치(전달손실 값)가 과연 재현성(reproducibility)이 있는가를 확인 실험하는 것이 중요하다. 이를 확인하는 첫 단계로 우선 실험값을 통계적 신뢰구간 예측값과 비교 검토하기 위해 점추정치(모평균값)를 구한다. 그리고 그 추정치에 통계적으로 유의한 신뢰구간을 정하기 위해 우선 2수준에서의 최적인자에 대해 신뢰구간의 폭을 구하면

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

여기서 유효반복수 ( $n_e$ )를 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

$$\begin{aligned} \mu &= B_0 + D_0 + G_0 + J_1 + A_0H_0 - 4T \\ &= 74.93 \pm 1.189(\text{dB}) \end{aligned} \tag{8}$$

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

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

$$\begin{aligned} \mu &= \underline{A}_1 + \underline{F}_0 + \underline{G}_1 - 2T \\ &= 77.58 + 1.35(\text{dB}) \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4. 결과 및 고찰

각각의 조건에서의 전달손실을 보면 base에 비해 optimal 사양의 전달손실이 전주파수 대역에서 상당한 개선효과를 보이고 있는데, 이것을 주파수별로 구분하여 그 원인을 추정하면 다음과 같다.

우선 Fig. 11에서 나타나는 100 Hz이하의 전달손

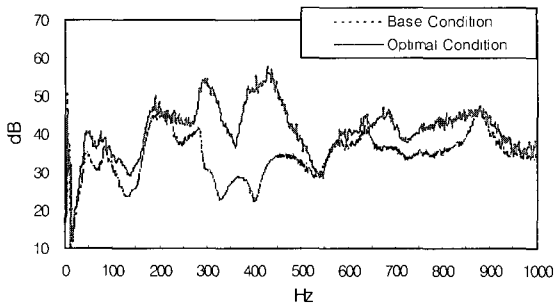


Fig. 11 Comparison of transmission loss(2-level)

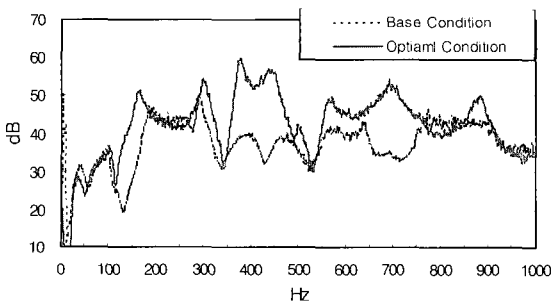


Fig. 12 Comparison of transmission loss(3-level)

Table 5 Comparison of overall and prediction value at optimal condition

Test condition	Prediction 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

실 증가는 H/Resonator의 특성치(characteristic)<sup>(1)</sup>에 의한 것이고, 100~200 Hz의 주파수대역의 전달손실 증가 효과는 입구 삽입관의 지름과 상부 확산기<sup>(3)</sup>에 의한 것이며, 300~500 Hz의 전달손실 증가는 입구단의 스노클 재질<sup>(2)</sup>과 에어클리너 박스의 용량, 그리고 분기관(side branch)의 길이<sup>(3)</sup>에 의한 것으로 추정되며, 550~850 Hz의 전달손실 증가는 다공성 호스의 길이와 기공도<sup>(2)</sup>에 의한 것으로 판단된다.

참고로 Fig. 11과 Fig. 12는 horn형 스피커를 이용하여 시험한 결과를 나타낸 것이며, 각각의 상태는 base 사양이 2수준의 경우  $A_0 C_0 D_1 F_0 G_0 H_1 I_0 J_0$ 의 수준 조합이고, 3수준의 경우는  $A_1 B_1 C_2 D_2 H_2 G_0$ 의 수준 조합이다.

Table 5는 2수준과 3수준의 최적수준조합으로부터 추정된 점추정값이 측정된 전달손실(box형과 horn형의 전달손실 평균값 이용)을 어느정도 잘 대변하고 있는지를 평가하기 위해 optimal 상태에서의 전체적인 값(overall value)과 점추정값을 비교한 것이다. Table 5를 보면 각각의 점추정값들이 측정된 전달손실 값들에 매우 근접해 있어 최적조건의 재현성이 충분히 있을뿐더러 점추정값이 측정값을 잘 대변하고 있다고 판단된다.

#### 5. 결론

(1) 유의한 요인들로부터 얻어지는 최적수준조합(수율:망대특성)은 2수준의 경우  $A_0 C_0 D_0 G_0 H_0 J_1$  으로 이루어지는데, 이때 스노클 재질(snorkel material, D 인자)이 흡기계의 전달손실에 가장 민감하게 나타났다. 3수준의 경우는  $A_1 F_0 G_1$ 으로 이루어지는데, 이 경우에는 다공성 호스(porous hose)의 길이(G인자)가 흡기계의 전달 손실에 가장 민감함을 알 수 있었다.

(2) 기존설계 대비 다구찌 방법을 적용한 최적수준 조합의 optimal 사양의 전달손실 값이 base 사양에 비해 전체적인 값(overall value) 측면에서 약 8 dB정도의 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 특히 300~500 Hz의 주파수 대역은 20~30 dB 정도의 매우 큰 효과를 얻을 수 있었다.

## 6. 참고 문헌

- (1) Nishio, Y., Kohama, T. and Osamu Kuroda., 1991, "New Approach to Low-Noise Air Intake System Development," SAE Paper 911042, pp. 25~37.
- (2) 이장명, 안성수, 2001, "자동차 흡기소음 저감을 위한 다공질관의 적용," 한국소음진동공학회논문집 제 11 권, 제 1 호, pp. 29~35.
- (3) Munjal, M. L., 1987, "Acoustics of Ducts and Mufflers", John Wiley & Sons.
- (4) Chung, J. Y. and Blaser, D. A., 1980, "Transfer Function Method of Measuring in Duct Acoust. Soc. Am, 68, pp. 907~921.
- (5) Kim, Y. H. and Kang, S. W., 1991, "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.
- (6) 박성현, 1995, "현대실험계획법, 민영사.
- (7) Chen, W., Allen, J. K., Tsui, K. L. and Mistree, F., 1996, "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.
- (8) 오재웅, 이규태, 박능서, 이정우, 1998, "흡기계의 저소음화 기법개발에 관한 연구," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 229~234.