

〈논 문〉

# 다구찌법을 이용한 자동차 흡기계의 저소음화에 대한 연구

## Development of Low Noise Intake System using Taguchi Method

오 재 응\* · 조 용 구\*\* · 이 규 태\*\*\*

Jae-Eung Oh, Yong-Goo Joe and Kyu-Tae Lee

(2000년 8월 31일 접수 : 2001년 3월 3일 심사완료)

**Key Words** : Intake System(흡기계), Taguchi Method(다구찌법), Design of Experiments(실험계획법), Larger the better Characteristic(망대특성), Table of Orthogonal Array(직교배열표)

### ABSTRACT

Recently, the regulations from the government and the concerns of people be raised to the interest in exhaust and intake noise of passenger car as much as other vehicles. In these demands, performance prediction software was developed in this paper. In this study, Robust design was used for improving the noise reduction capacity of intake system with the performance prediction software. On the basis of the existing design, length and radius of each component that was thought to be effective to the performance of intake system was selected. At first, factors are arranged by using L18 table of orthogonal array and then optimum value can be obtained by modified L16 table of orthogonal array.

### 1. 서 론

자동차는 생활수준의 향상으로 인해 교통수단으로의 역할뿐만 아니라 주거환경으로서의 정숙성과 안락한 승차감이 요구되고 있으며 점차 심화되어 가는 소음규제 강화로 인해 소음 저감은 차량의 중요한 연구 대상이 되어가고 있다. 소음환경기준이 낮 시간 도로변 지역의 기준치가 65~75 dB로 제한됨으로써 이에 대응하는 차량의 저소음화 기법이 요구되고 있다.

자동차 소음의 주요 요인은 엔진 소음이며 그 중 흡기 소음은 흡기밸브에서부터 전달되는 자동차 주소음임은 물론 운전시 승차감을 저해하는 주요인으로 연구대상이 되고 있다.

흡기 소음은 500 Hz 이하의 저주파 대역의 소음이 주를 이룸으로서 차 실내의 부밍음을 형성하여 운전자에게 불쾌감을 주기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.<sup>(2~4)</sup>

흡기계의 설계는 대부분이 엔진 설계 후에 이루어지기 때문에 타 부품의 위치에 의해 설계가 제한되므로 최적 설계에 어려움이 있다. 흡기계 설계에서도 엔진 성능에 영향을 미치는 요소가 우선적으로 개발되고 그 이후에 흡기 소음에 대한 개선이 이루어졌다. 또한 이러한 여건에서의 흡기 소음성능 개선방법도 시행착오적으로 이루어져 최적값을 찾는 데에 상당한 어려움이 있으며 많은 시간과 경비를 들여 실험을 하지만 최적값에 도달하기 위한 판단 근거가 마련되지 않아 파라미터 설계에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 이러한 한계를 극복하고자 통계적인 방법을 이용한 최적화 기법이 필요하게 되었다.<sup>(5,6)</sup>

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 흡기계를 대상으로 소음 저감 특성에서 나타난 문제점을 파악하고 이를 개선하기 위

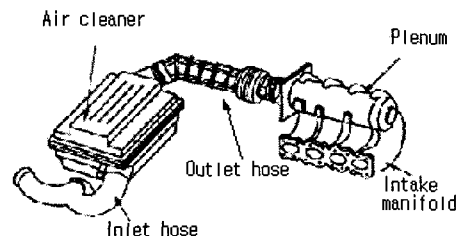


Fig. 1 Overview of a intake system

\* 한양대학교 기계공학부  
E-mail : jeoh@ihanyang.ac.kr  
Tel : (02) 2295-7424, Fax : (02) 2299-3153  
\*\* 한양대학교 대학원 자동차공학과  
\*\*\* 조선대학교 기계공학부

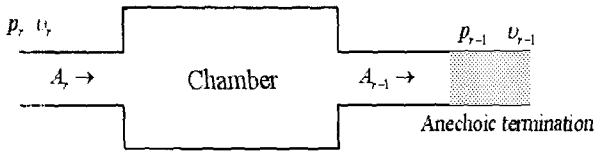


Fig. 2 Transfer matrix model of an acoustic system

해 강건설계법을 사용하여 상대적으로 소음 저감 성능이 낮은 주파수 영역의 소음 저감 특성을 개선하고자 한다. 이를 위해 설계시 허용되는 경계조건 내에서 흡기계의 설계변수 값을 결정한 후에 전달행렬법과 강건설계 기법을 적용한 최대 소음성능의 흡기계를 개발하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 흡기소음의 주파수 특성

흡기 소음은 흡기 밸브의 개폐에 따른 압력 변동에 의해 생성되며 식 (1)과 같은 주파수 특성을 갖는다.

$$f(\text{Hz}) = n \text{ rpm} \frac{\text{cyl.}}{2} \frac{1}{60} \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 결과 주파수이고,  $n$ 은 조화 차수,  $\text{rpm}$ 은 엔진 회전수,  $\text{cyl.}$ 은 실린더 개수이다.

### 2.2 전달 행렬법

전달행렬법은 전기계에서 사용하고 있는 임피던스 개념을 도입하여 음향의 전달특성을 모델링하는 방법으로서 행렬의 계산이 간단하고 임의의 형태로 조합된 음향계에 적용할 수 있어 많이 이용되고 있다. 또한 음향계를 각 요소별로 모델링하여 전체계를 구성하므로 설계 변경이 용이한 방법이다<sup>(7)</sup>.

전달행렬법에서 사용되는 두개의 상태변수는 음향 요소 양측 각각의 음압 와 입자속도를 사용하고 양변의 조건에 따라 전달행렬계수(four-pole parameter)를 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} p_r \\ v_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Transfer Matrices} \\ 2 \times 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{r-1} \\ v_{r-1} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\{p_r, v_r\}^T$ 는 입구점  $r$ 에서의 상태 벡터이고  $\{p_{r-1}, v_{r-1}\}^T$ 는 출구점  $r-1$ 에서의 상태 벡터이다. Fig. 2는 전달행렬법에 대한 개략적인 개념도이다.

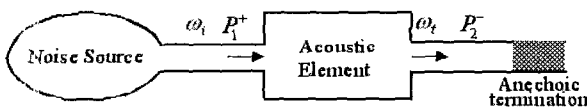


Fig. 3 Diagram of transmission loss

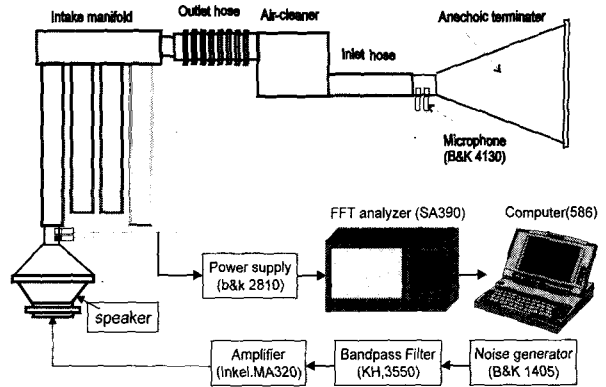


Fig. 4 Experimental setup

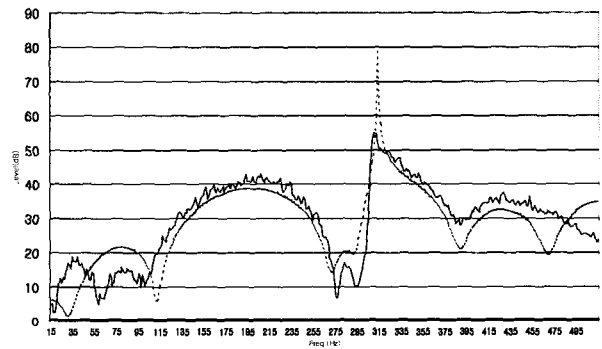


Fig. 5 Transmission Loss of intake system (experiment : -, prediction : --)

### 2.3 전달 손실

전달손실은 음향요소만의 에너지 손실을 표현하는 것으로서 음향 요소 입출구 사이의 음압비를 다음의 식 (3)과 같이 dB단위로 나타낸다. 즉, 음향 요소에 입사된 음압과 통과된 음압과의 비를 말하며, 음향 요소 끝단에는 반사파의 영향을 제거하기 위하여 두 음향 탐촉자법(two-microphone methods)을 사용한다.

$$TL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left| \frac{w_i}{w_t} \right| = 20 \log_{10} \left| \frac{P_1^+}{P_2^-} \right| \quad (3)$$

여기서,  $w_i$ 는 입구측 에너지이고,  $w_t$ 는 출구측 에너지,  $P_1^+$ 는 입구측 진행 음압,  $P_2^-$ 는 출구측 진행 음압이다. Fig. 3은 전달손실 측정의 개략도이다.

### 2.3 두 음향 탐촉자법

두 음향 탐촉자법은 관내의 반사파와 입사파를 분리할 수 있는 방법으로서 전달손실은 Fig. 4와 같이 두개의 마이크로폰을 사용하여 식 (4)와 같이 표현 될 수 있다.

$$TL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left| \frac{S_{aa}}{S_{cc}} \right| \quad (4)$$

여기서,  $S_{aa}$ 는 입구단의 입사스펙트럼이고  $S_{cc}$ 는 출구단의 입사스펙트럼이다.

반사파의 완전한 분리를 위하여 출구단에 무반사단을 설치하였다.

### 2.4 흡기계의 성능 평가

본 연구에서 사용된 흡기계 성능 평가 소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위해서 Fig. 1과 같은 흡기계의 전달 손실(transmission loss)을 실험을 통하여 구한 것과 이론값을 비교하였다.

Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이 흡기계 성능 평가 소프트웨어가 흡기계의 성능을 잘 예측하고 있음을 알 수 있으므로 이용된 해석 소프트웨어가 최적화 기법 및 강건설계법에 적용할 수 있음을 검증하였다.

### 2.5 강건설계와 S/N 비

강건설계법은 기본적으로 품질이라는 개념을 가지고 모든 제품의 성능을 평가한다. 품질이라고 하는 것은 제품이 출하된 후에 발생하는 세 가지 손실(기능의 산포에 의한 손실, 사용 코스트, 폐해 항목에 의한 손실)의 합으로 정의한다. 그리고 이에 따른 손실함수를 사용하여 S/N비를 유도해 낸다<sup>(8-10)</sup>. 측정값이  $y$ 이고 목표값이  $m$ 이고 제품의 품질을 목표치로부터의 이탈의 정도를 고려하여 정의된 손실함수  $L(y)$ 는 식 (5)와 같다.

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (5)$$

이렇게 유도된 손실 함수와 강건설계에서 제시하는 S/N비는 Table 1과 같다.

인자를 결정한 후 실험배치를 직교적으로 구성함으로써 중복되는 실험이 없이 효과적인 분산분석을 하여 각 인자의 변동효과를 평가할 수 있는 지표인 S/N비에 따라 인자들의 최적 수준을 결정할 수 있다.

#### (1) 강건설계의 수행과정

본 연구에서 강건설계의 수행과정은 다음과 같다.

- 1) 특성치의 선택
- 2) 실험 인자의 선택
- 3) 직교배열표 선정 :  $L_{18}^{(10)}$  직교배열표를 선택
- 4) 실험 결과값과 S/N비 산출
- 5) 분산분석과 요인분석
- 6) 주인자 검출 후 주인자의 7수준배열 : 주인자를 변형  $L_{16}^{(8)}$  직교배열표의 7수준열에 배치

Table 1 Class of quality characteristics

	Loss function	S/N ratio
망목 특성	$L(y) = K(y - m)^2$	$10 \log \left[ \frac{(\bar{y})^2 - \frac{V}{n}}{V} \right]$
망대 특성	$L(y) = k \left( \frac{1}{y^2} \right)$	$-10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$
망소 특성	$L(y) = Ky^2$	$-10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$

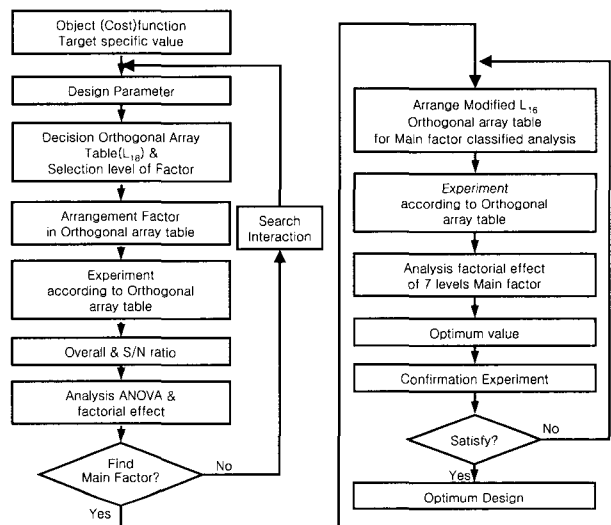


Fig. 6 Flow chart of robust design

7) 16개의 실험 결과값과 S/N비 산출

8) 분산분석과 요인분석

9) 주인자 범위 내의 최적값 도출

이들의 과정을 흐름도로 나타내면 다음의 Fig. 6과 같다.

### 2.6 $L_{18}$ 직교배열에 의한 설계

#### (1) 인자 및 수준

흡기계를 구성하는 요소인 메니폴드, 플레넘, 에어크리너, 에어호스, 공명기중에서 메니폴드와 플레넘은 엔진 성능을 고려하여 설계가 이루어져 있으므로 설계 인자에서 제외하였고, 공명기는 기본적인 흡기계의 구성이 이루어진 뒤에 설계가 이루어지므로 설계 인자에서 제외하였다.

Fig. 7은 흡기계의 성능 평가를 위해 Fig. 1을 단순화한 그림이며, 각 설계 변수와 수준은 Table 2와 같다.

현재 사양은 굵게 표시 되어있고, 설계 변수 A의 경우는 클수록 좋으므로 현 수준에 대하여 증가된 값만으로 수준을 선정하였다.

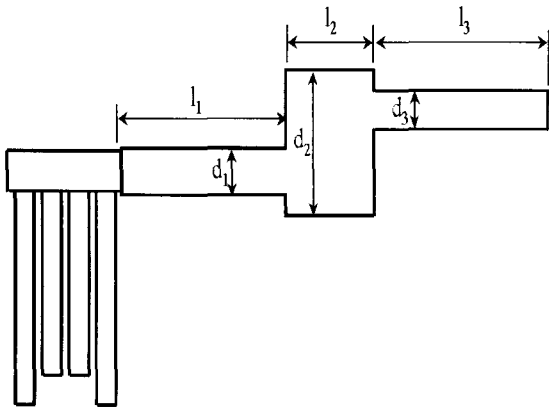


Fig. 7 Simplified model of intake system

Table 2 Control factors and levels(unit :m)

Control factor		Level		
		1	2	3
A(a/c직경)	$d_2$	<b>0.22</b>	0.242	
B(출력관길이)	$l_1$	0.48	<b>0.60</b>	0.72
C(출력관직경)	$d_1$	0.052	<b>0.065</b>	0.078
D(a/c길이)	$l_2$	0.126	<b>0.14</b>	0.154
E(입력관길이)	$l_3$	0.60	<b>0.75</b>	0.90
F(입력관직경)	$d_3$	0.052	<b>0.065</b>	0.078

Table 3  $L_{18}(2^13^7)$  orthogonal array table

Experiment No.	Factor						Data
	A	B	C	D	E	F	
1	0	0	0	0	0	0	$J_1$
2	0	0	1	1	1	1	$J_2$
3	0	0	2	2	2	2	$J_3$
4	0	1	0	0	1	1	$J_4$
5	0	1	1	1	2	2	$J_5$
6	0	1	2	2	0	0	$J_6$
7	0	2	0	1	0	2	$J_7$
8	0	2	1	2	1	0	$J_8$
9	0	2	2	0	2	1	$J_9$
10	1	0	0	2	2	1	$J_{10}$
11	1	0	1	0	0	2	$J_{11}$
12	1	0	2	1	1	0	$J_{12}$
13	1	1	0	1	2	0	$J_{13}$
14	1	1	1	2	0	1	$J_{14}$
15	1	1	2	0	1	2	$J_{15}$
16	1	2	0	2	1	2	$J_{16}$
17	1	2	1	0	2	0	$J_{17}$
18	1	2	2	1	0	1	$J_{18}$

(2) 직교 배열표

앞에서 정의한 설계 변수들과 수준을 평가하기 위해서는  $(2^1 3^7)$ 의 조건을 만족하는 실험을 수행해야 한다. 본 연구에서는 설계에 사용된 인자가 6개이므로 직교배열표에서 쓰인 열은 2수준인자 1개, 3수준인자 5개이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서  $L_{18}(2^13^7)$  직교 배열표를 이용하여 Table 3과 같이 배치를 하여 실험을 수행하면 각각의 실험 결과에 대한 특성치를 얻을 수 있고, 이 특성치로부터 S/N비를 구한 결과는 Table 4와 같다.

여기서, 특성치는 0~500 Hz까지의 전달 손실(transmission loss) overall값으로 하였다.

Table 4에서 구한 S/N비를 이용하여 분산 분석을 수행한 결과는 Table 5에 나타났다.

Table 4 Characteristic value and S/N ratio

Exp. No.	Overall of TL	S/N ratio	Exp. No.	Overall of TL	S/N ratio
1	32.58	30.26	10	31.69	30.02
2	37.86	31.56	11	39.71	31.98
3	38.91	31.80	12	35.59	31.03
4	45.79	33.21	13	40.18	32.08
5	39.42	31.91	14	49.05	33.81
6	45.37	33.13	15	49.39	33.87
7	50.24	34.02	16	51.17	34.18
8	45.04	33.07	17	40.61	32.17
9	41.46	32.35	18	50.05	33.99

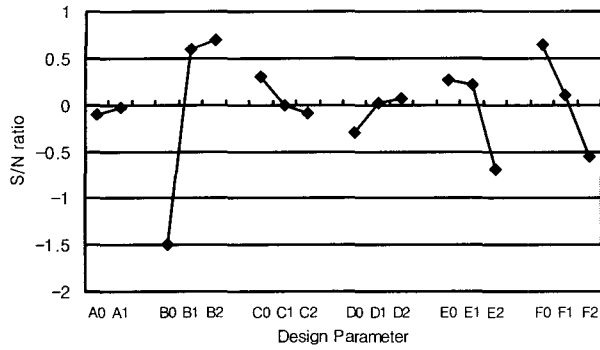
Table 5 ANOVA table

Source	DF	SS	Mean square	F-value
A	1	0.024562	0.024562	0.26
B	2	18.324883	9.162441	95.54
C	2	0.530591	0.265295	2.77
D	2	0.463280	0.231640	2.42
E	2	3.476664	1.738332	18.13
F	2	4.282543	2.141271	22.33
Total	17	27.782547		
$R^2$	0.99310	S/N mean	32.46983	

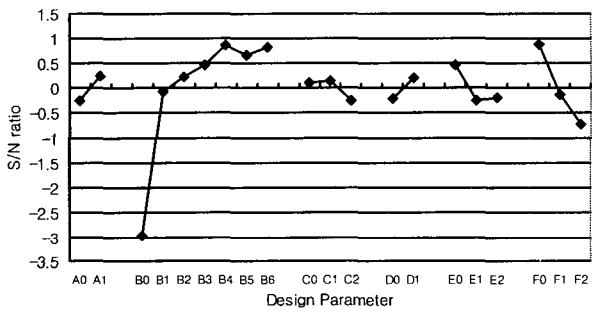
Table 5에서  $R^2 = \frac{S_A + S_B + S_C + S_D + S_E + S_F}{S_T}$  로서 전체변동에서 오차인자를 제외한 제어인자와 전체변동에 대한 비이고 SS는 제곱합(sum of square)이며, mean square는 분산값을 나타낸다.

**Table 6** Overall level comparison of current & optimum spec. of  $L_{18}$  result

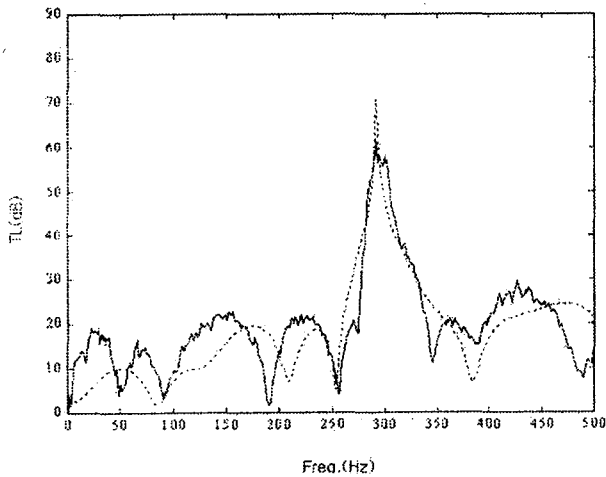
Spec.	Current spec.	Optimum spec. ( $L_{18}$ )
Overall level(dB)	46.2824	50.2914



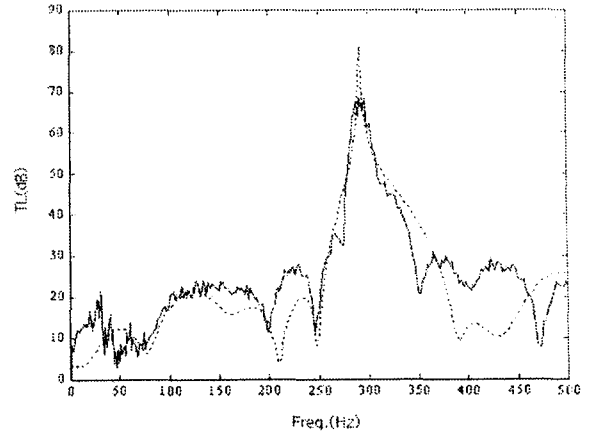
**Fig. 8** S/N ratio versus design parameter( $L_{18}$ )



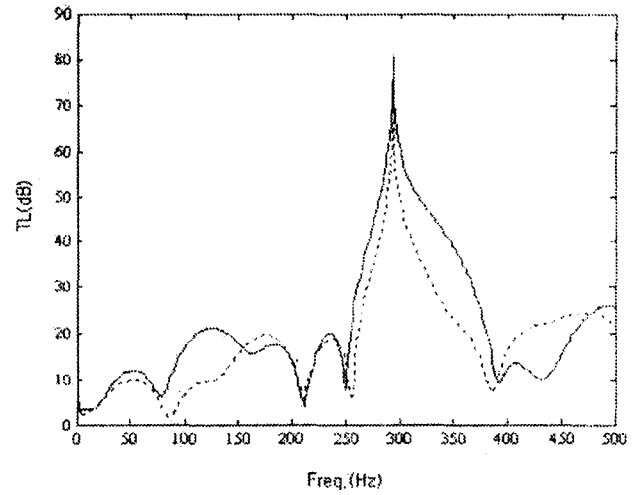
**Fig. 9** S/N ratio versus design parameter Modified  $L_{16}$



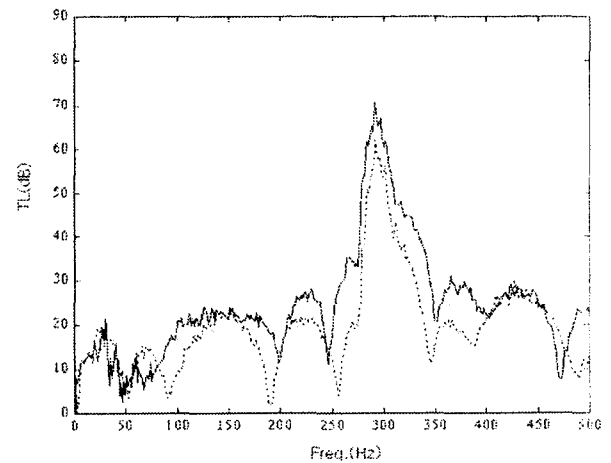
**Fig. 10** TL of current intake system  
(-- : Simulation, — : Experiment)



**Fig. 11** TL of optimum intake system  
(-- : Simulation, — : Experiment)



**Fig. 12** TL of current and optimum intake system via simulation  
(-- : Simulation, — : Experiment)



**Fig. 13** TL of current intake system(-- : Simulation, — : Experiment)

Table 7 Control factors and levels

Control factor		Level		
		0	1	2
A(a/c직경)	d <sub>2</sub>	0.22	0.242	
C(출력관직경)	d <sub>1</sub>	0.052	0.065	0.078
D(a/c길이)	l <sub>2</sub>	0.126	0.154	
E(입력관길이)	l <sub>3</sub>	0.60	0.75	0.90
F(입력관직경)	d <sub>3</sub>	0.052	0.065	0.078

Control factor		Level						
		0	1	2	3	4	5	6
F(출력관길이)	l <sub>1</sub>	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72

분산분석 결과를 이용하여 각 변수의 요인별 분석도를 그려보면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에 의해 각 변수별 최적수준을 구하면 A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>0</sub>D<sub>2</sub>E<sub>1</sub>F<sub>0</sub>이고 특성치에 민감한 설계 변수는 B(출력관 길이), E(입력관 길이), F(입력관 반경)임을 알 수 있다. 이들 최적 설계변수를 이용하여 TL을 구하면 Table 6과 같이 TL의 overall 레벨이 현재의 설계보다 4.01 dB 향상된 결과를 얻었다.

2.7 L<sub>16</sub> 변형 직교배열에 의한 설계

(1) 인자 및 수준

L<sub>16</sub> 변형직교배열표는 7수준의 인자가 있으므로 주인자를 더욱 세분화하여 분석할 수 있다.

L<sub>16</sub> 실험에서 주인자가 B인자로 판명되었으므로 B인자를 7수준으로 세분화하여 각 인자의 수준을 Table 7과 같이 구성하였다.

한 사양은 굵은 표시로 되어 있고 F-value가 높은 C, E, F 인자는 3수준으로 상대적으로 낮은 A, D 인자는 2수준으로 구성하여 인자를 분석하였다.

(2) 직교 배열표

제어인자의 수준에 대한 배치를 Table 7과 같이 변형 L<sub>16</sub> 직교배열표에 배치하여 실험을 실시하였다. 설계인자는 모두 6개이므로 6개인자를 사용할 수 있는 변형 L<sub>16</sub> 직교배열표의 모든 열을 사용하였다.

Table 8의 변형 L<sub>16</sub> 배열표를 이용하여 분산분석을 실시하면 Table 9와 같이 나타난다.

ANOVA 분석 (8)(9)에서 F-value를 보면 B인자가 가장 유의한 인자임을 확인할 수 있으며 이를 통한 요인분석 도는 Fig. 9와 같이 나타난다.

Fig. 9의 분석결과 B인자 중 B<sub>4</sub>값이 가장 유의하게 나옴을 알 수 있다. 그러므로 최적값은 A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>D<sub>1</sub>E<sub>0</sub>F<sub>0</sub>가 되

Table 8 Modified L<sub>16</sub>(2<sup>3</sup>3<sup>7</sup>) orthogonal array table

Experiment No.	Factor						Data
	A	B	E	F	C	D	
1	0	0	0	0	0	0	Y <sub>1</sub>
2	0	0	1	1	1	1	Y <sub>2</sub>
3	0	1	0	0	1	1	Y <sub>3</sub>
4	0	1	1	1	0	0	Y <sub>4</sub>
5	0	2	0	1	0	1	Y <sub>5</sub>
6	0	2	1	0	1	0	Y <sub>6</sub>
7	0	3	0	1	1	0	Y <sub>7</sub>
8	0	3	1	0	0	1	Y <sub>8</sub>
9	1	0	0	0	0	0	Y <sub>9</sub>
10	1	0	2	2	2	1	Y <sub>10</sub>
11	1	4	0	0	2	1	Y <sub>11</sub>
12	1	4	2	2	0	0	Y <sub>12</sub>
13	1	5	0	2	0	1	Y <sub>13</sub>
14	1	5	2	0	2	0	Y <sub>14</sub>
15	1	6	0	2	2	0	Y <sub>15</sub>
16	1	6	2	0	0	1	Y <sub>16</sub>

Table 9 Characteristic value and S/N ratio

Exp. No	Overall of TL	S/N ratio	Exp. No	Overall of TL	S/N ratio
1	32.09	30.13	9	35.00	30.88
2	37.90	31.57	10	36.85	31.33
3	41.33	32.32	11	47.25	33.49
4	41.83	32.43	12	45.51	33.16
5	45.75	33.21	13	51.42	34.22
6	40.47	32.14	14	39.81	32.00
7	45.59	33.18	15	50.39	34.05
8	42.97	32.66	16	42.31	32.53

Table 10 ANOVA table

Source	DF	SS	Mean square	F-value
A	1	0.754750	0.754750	1.91
B	6	12.789886	2.131648	32.32
C	2	0.134004	0.067002	0.34
D	1	0.457134	0.457134	1.16
E	2	0.586211	0.293105	1.48
F	2	3.505134	1.752567	8.86
Total	15	18.62290		
R <sup>2</sup>		0.97875	S/N mean	32.456657

**Table 11** Optimum specification of the intake system

	Outlet pipe	Air-cleaner	Inlet pipe
Length	0.64	0.154	0.90
Diameter	0.052	0.242	0.052

**Table 12** Comparison of optimum value for current & optimum spec. of modified  $L_{16}$  result

Spec.	Current spec.	Optimum spec. (Modified $L_{16}$ )
Overall level(dB)	46.2824	53.3954

며 B인자, C인자를 제외한 나머지인자는 모두  $L_{18}$ 의 값과 같게 나왔다. C인자의 경우 차이가 미약하고 원래 유의하지 않은 인자이기 때문에 최적값의 변화에 영향을 주지 않으므로 0수준과 1수준의 성능차이는 발생되지 않는다. 이들을 이용한 최적설계치는 Table 11과 같다.

현재사양과 변형  $L_{16}$ 에서 구한 최적사양에 대해 시뮬레이션과 실험을 통한 비교결과 Fig. 10, Fig. 11과 같으며, Table 12와 같이 TL의 overall 레벨이 현재의 설계보다 7.11 dB 향상된 결과를 얻게 되어  $L_{18}$ 보다 3.1 dB 향상된 overall 레벨을 얻었다.

### 3. 결론

흡기계의 저소음화를 위한 강건설계기법의 적용을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 기존사양에 비해 강건설계에 의한 전달 손실의 overall 값이 7.11 dB 향상된 흡기계를 설계하였다.

(2) B(출력관 길이), E(입력관 길이), F(입력관 반경) 설계 변수들이 흡기계의 전달 손실성능의 주요인자로 나타났다.

(3)  $L_{18}$  직교배열표에 의한 실험 후 변형  $L_{16}$  직교배열표에 의한 세분화 최적설계를 통하여 더욱 향상된 최적값을 찾아 내었다.

### 후 기

이 논문은 2000년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음.

### 참 고 문 헌

- (1) Munjal M. L., 1997, "Plane Wave Analysis of Side Inlet/Outlet Chamber Mufflers With Mean Flow", Applied Acoustics, pp. 165~175.
- (2) 한양대학교 연구보고서, 1998, "저소음.고효율 흡기계의 최적 설계 기법개발 및 음질 개선에 관한 연구", pp. 1~3.
- (3) Yoshitaka Nishio and Tokio kohama, 1991, "New Approach to Low-Noise Air Intake System Development", SAE 911042, pp. 25~37.
- (4) 오재응, 한광희, 홍정혁, 1997, "자동차 흡기소음평가 시뮬레이터 개발 및 이를 이용한 소음저감 성능 개선", 대한기계학회논문집(A) 제 22 권 제 2 호, pp. 391~398.
- (5) 박성근, 김진동, 1997, "회전형 압축기용 저소음 머플러 개발을 위한 다구찌 기법의 적용", 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B., pp. 91~95.
- (6) Park, S. K., 1994, "Application of Quality Engineering for Energy Efficiency of Compressor", The 12th Annual Taguchi Symposium, Rochester, New York, pp. 199~211.
- (7) Munjal M. L., 1987, "Acoustics of Ducts and Mufflers", John Wiley & Sons.
- (8) 박성현, 1995, "현대실험계획법", 민영사.
- (9) 이우선, 1998, "최신실험설계", 영풍문고.
- (10) 田口玄一, 1991, "품질설계를 위한 실험계획법", 한국공업표준협회.
- (11) John W. Parsons, 1993, "Reduction of Exhaust and Air Induction System Noise by a Predictive Method", SAE 931338, pp. 611~618.