

강건설계와 열합병법을 이용한 세분화한 흡기계 저소음 최적설계

The Robust Design with Column Merging Method for the Optimal Design of Low Noise Intake System

오재응[†] · 차경준* · 한정순** · 박영선*** · 진정언****

Jae-Eung Oh, Kyung-Joon Cha, Jeong-Soon Han, Young-Sun Park and Chung-Un Chin

(2002년 5월 8일 접수 ; 2002년 9월 17일 심사완료)

Key Words : Taguchi Method(다구찌 기법), Column Merging Method(열합병법), Robust Design(강건설계), SN Ratio(SN 비), Intake System(흡기계)

ABSTRACT

This paper proposes an optimal design to improve the performance of the intake system by reducing the noise. We adapt the Taguchi method and column merging method for the above design. At the first stage of the design, the length and radius of each component of the current intake system are selected as control factors. Then the L_{18} table of orthogonal array is used to get the effective main factors. At the second stage, the L_{16} table of orthogonal array and the column merging method is combined to analyze subdivided significant factors. We know that the robust design with the column merging method provides better design for noise of intake system than the robust design itself.

1. 서 론

최근 자동차의 소음저감에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 자동차의 배기계와 흡기계에서 발생하는 소음은 승차감을 저해할 뿐만 아니라 환경소음의 원인이 되고 있다. 또한 자동차의 보급이 일반화됨에 따라 자동차의 정숙성은 고품질차의 주요조건이 되고 있다. 그 중 흡기계의 소음은 중요한 연구대상이 되고 있다.

흡기 소음은 일반적으로 500 Hz이내의 저주파소음

으로 그 자체로서 뿐만 아니라 차실 내로 전달되어 부밍음의 원인이 되는 등 승차감을 저해하는 요인이 되고 있다. 흡기소음에 대한 대책은 엔진룸 설계 후 시행착오적으로 이루어져 공시단축과 경비절감 등에서 매우 불합리할 뿐만 아니라 무리한 소음저감대책은 악영향을 미치는 결과를 초래하기도 한다. 그러나, 전달행렬 기법(transfer matrix method), 음향 유한요소해석법(acoustic FEM) 등의 다양한 해석기법과 시뮬레이터를 이용한 실험기법들이 Oh등(1995, 1996)에 의해 제안되면서 기존의 흡기 소음저감대책에 대한 불합리성이 많이 개선되고 있다.

그러나 이 또한 기존의 경험에 의존하는 시행착오적 요소를 벗어나지 못해 많은 시간과 비용이 소요되고 있다. 따라서 Hwang 등(1994), Kim(1999), Lee 등(1995) 그리고 Mishima 등(1998)은 적은 노력과 비용을 가지고 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 강건설계를 이용한 다구찌기법을 성공적으로 활용한 바 있다.

본 연구에서는 흡기계(H사 1500 cc DOHC 엔진)

† 책임저자, 정희원, 한양대학교 자동차공학과
E-mail : jeoh@email.hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2294-8294, Fax : (02) 2299-3153

* 한양대학교 수학과

** 한양대학교 응용수학과

*** 한양대학교 응용수학과

**** 한양대학교 수학과

를 대상으로 소음저감특성을 평가하고 나타난 문제점을 파악하여 강건설계와 다구찌기법을 도입함으로써, 상대적으로 소음저감 성능이 낮은 주파수영역을 보완하고자 허용되는 경계조건 내에서 흡기계의 설계변수 사양의 최적조건을 고려한 후에 전달행렬법과 최적화기법을 적용한 소프트웨어를 통해 흡기계의 저소음 최적화기법을 제안하고자 한다. 또한 가장 영향이 있는 인자를 더욱 세분화하는 방법을 제시하였고, 세분화분석을 실시하여 제한조건 내에서 인자들의 비선형적인 최적조건을 찾을 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 설계이론 및 조건

2.1 시뮬레이터 해석 이론

(1) 전달 행렬법

전달행렬법(transfer matrix method)은 전기계에서 사용하고 있는 임피던스 개념을 도입하여 음향의 전달특성을 모델링하는 방법으로서 행렬의 계산이 간단하고 임의의 형태로 조합된 음향계에 적용할 수 있어 많이 활용되고 있다. 또한 Craggs(1976)는 음향계를 각 요소별로 모델링하여 전체 계를 구성함으로써 설계변경이 용이한 장점을 강조하였다.

전달행렬법에서 사용되는 두개의 상태변수는 음향 요소양면의 음압 p 와 입자속도 v 를 사용하고 양면의 조건에 따라 4극 전달행렬계수(four-pole parameter)를 구할 수 있으며 식 (1)과 같이 표현된다.

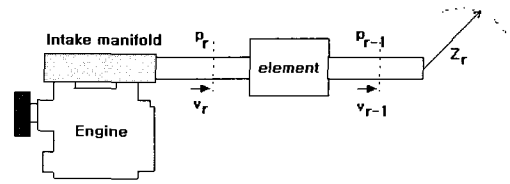
$$\begin{Bmatrix} p_r \\ v_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Transfer matrix} \\ 2 \times 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_{r-1} \\ v_{r-1} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\{p_r, v_r\}^T$ 는 입구점 r 에서의 상태벡터이고 $\{p_{r-1}, v_{r-1}\}^T$ 는 출구점 $r-1$ 에서의 상태벡터이다. Fig.1은 전달행렬법에 대한 개략적인 개념도이며, 여기서 Z_g 는 음원 임피던스(source impedance)이고, Z_r 은 방사 임피던스(radiation impedance)이다.

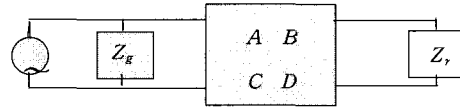
식 (1)로부터 진행음압을 유도하여 전달손실(transmission loss: TL)을 구하는 데 이용된다. TL를 구하는 방법은 식 (2)와 같다.

(2) 전달손실

음향요소의 소음특성 및 저감성을 평가하기 위하여 TL이 주로 사용된다. 이는 음향요소만의 에너지 손실을 표현하는 것으로서 음향요소의 입출구 사이의 음압비를 dB로 나타낸다. 또한 음향요소에 입사된 음



(a) Basic model of an acoustic system



(b) Electrical-acoustic analogy system

Fig.1 Physical model and impedance analogy of an acoustic system

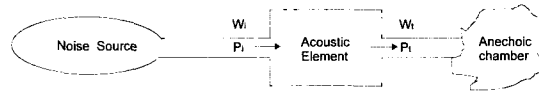


Fig.2 Definition of transmission loss

압과 통과된 음압과의 비를 의미하고 음향요소끝단에는 반사파의 영향을 제거하기 위하여 두 음향 탐측자법(two microphone methods)을 사용한다.

Young 등(1975), Munjal(1987)은 TL을 입구측 에너지(w_i), 출구측 에너지(w_r), 입구측 진행음압(p_1^+) 그리고 출구측 진행음압(p_2^-)과의 관계로서 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$TL(\text{dB}) = 10 \log_{10} |w_i / w_r| = 20 \log_{10} |p_1^+ / p_2^-| \quad (2)$$

이로부터 구한 TL 값이 이론적 흡기계 해석에 이용되는 측정기준이 되며, Fig.2는 전달손실 측정의 개략도이다.

2.2 실험 이론

(1) 흡기소음의 특성

흡기소음은 흡기밸브의 개폐에 따른 압력변동에 의해 생성되며 다음과 같은 주파수특성을 갖는다.

$$f(\text{Hz}) = n \times \text{rpm} \times (\text{cyc}/2) \times (1/60), \quad (3)$$

여기서, f 는 결과주파수이고, n 은 조화 차수, rpm은 엔진 회전수, cyc 실린더 개수이다.

식 (3)을 이용하여 관심영역을 구할 수가 있다. 예를 들어, 자동차의 경우에 운전 rpm이 700~6000

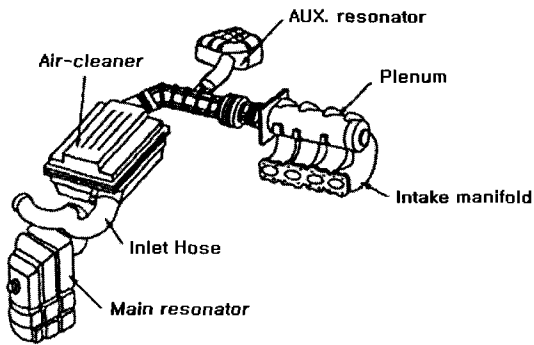


Fig. 3 Overview of an intake system

rpm이므로 4기통 엔진에서의 소음 주파수발생영역은 23~200 Hz가 됨을 알 수 있다. 아래의 Fig. 3은 본 연구대상인 흡기계의 실제모형이다.

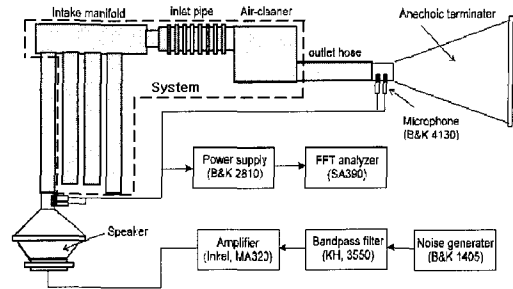
(2) 두 음향 탐촉자법

두 음향 탐촉자법(two-microphone method)은 관 내의 반사파와 입사파를 분리할 수 있는 방법으로서 전달손실을 비롯한 덕트내의 제반음향특성을 정확하고 신속하게 측정할 수 있는 방법이다. Oh등(1996), 김양한 등(1991), Sahasrabudhe 등(1991)은 전달손실을 Fig. 4의 (b)와 같이 두개의 마이크로폰을 사용하여 식 (4)와 같이 표현하였다.

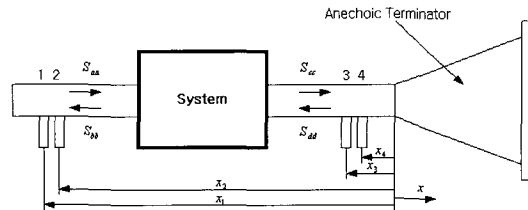
$$TL(dB) = 10 \log_{10} S_{aa}/S_{cc} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_{aa}(f) &= [S_{11}(f) + S_{22}(f) - 2C_{12}(f) \cos k(x_1 - x_2) \\ &\quad + 2Q_{12} \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \\ S_{bb}(f) &= [S_{11}(f) + S_{22}(f) - 2C_{12}(f) \cos k(x_1 - x_2) \\ &\quad - 2Q_{12} \sin k(x_1 - x_2)] / 4 \sin^2 k(x_1 - x_2) \\ S_{cc}(f) &= [S_{33}(f) + S_{44}(f) - 2C_{34}(f) \cos k(x_3 - x_4) \\ &\quad + 2Q_{34} \sin k(x_3 - x_4)] / 4 \sin^2 k(x_3 - x_4) \\ S_{dd}(f) &= [S_{33}(f) + S_{44}(f) - 2C_{34}(f) \cos k(x_3 - x_4) \\ &\quad - 2Q_{34} \sin k(x_3 - x_4)] / 4 \sin^2 k(x_3 - x_4) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, S_{aa} 는 입구단의 입사스펙트럼이고, S_{bb} 는 입구단의 반사스펙트럼, S_{cc} 는 출구단의 입사스펙트럼, S_{dd} 는 출구단의 반사스펙트럼이다. 이들은 각 마이크로폰의 위치에서의 자기상관 스펙트럼인 $S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}$ 과 상호상관 스펙트럼인 $S_{12}(f) (= C_{12}(f) + jQ_{12}(f)), S_{34}(f) (= C_{34}(f) + jQ_{34}(f))$ 를 통하여 구해진다. 출구단에서는 반사파의 완전한 분리를 위하여 출구단에 무반사단(anechoic terminator)을 설치하였다.



(a) Block diagram of the experimental set-up



(b) Transmission loss measurement using the two-microphone method

Fig. 4 Experimental setup

Fig. 4는 전체실험의 계략도이다. 계략도와 같이 실험을 한 후 측정된 값을 식 (5)를 이용하여 S_{aa} 와 S_{cc} 를 구한 뒤 식 (4)에 대입하면 실험치를 구할 수 있다. 이렇게 구한 실험치는 흡기계 성능평가를 위해 사용기준이 된다.

2.3 흡기계 성능평가 및 설계조건

(1) 흡기계의 성능평가

본 연구에서 사용된 흡기계 성능평가 소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위해서 Fig. 4와 같은 흡기계의 TL 값을 실험을 통하여 구할 수 있다.

Fig. 5를 보면 실험치와 흡기계 성능평가 소프트웨어의 예측값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 흡기계 성능평가 소프트웨어가 흡기계의 성능을 잘 예측함을 알 수 있으므로 이용된 해석소프트웨어의 신뢰성이 있다고 판단할 수 있다.

(2) 설계조건

본 연구에서의 설계변수의 변경한계는 기존의 흡기계가 갖고 있는 압력손실의 약 5% 이내의 범위에서 변경될 수 있도록 함으로서 효율에 미치는 영향을 최소화하였다. 일반적으로 원 관에서의 압력손실은 식 (6)과 같이 표현된다.

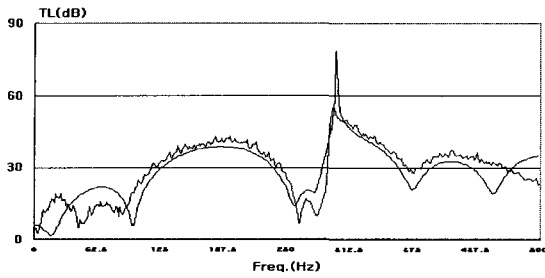


Fig. 5 Transmission loss of intake system (experiment : _____, prediction : _____)

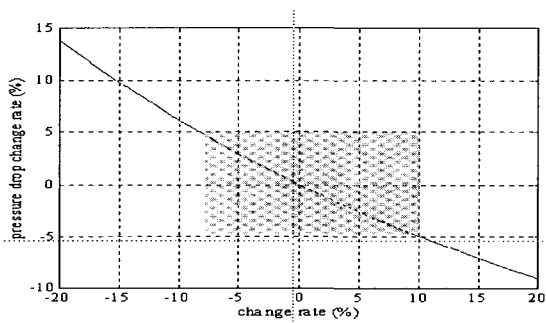


Fig. 6 Change rate of pressure drop by change rate of specifications

$$\Delta p = f \cdot (L/D) \cdot (V^2/2g) \quad (6)$$

여기서 Δp 는 압력 손실, f 는 관내의 마찰계수, L 은 관의 길이, D 는 관의 직경, V 는 평균 유속, g 는 중력가속도를 나타낸다.

Fig. 6은 실제 흡기계의 압력손실특성을 요소의 길이와 직경의 변화에 따른 영향도(%)를 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 길이와 직경은 압력손실에 서로 상반된 영향을 보여주고 있으며, 압력손실에 대한 5%의 변화는 길이와 직경의 약 10% 범위의 변화량이 허용될 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 흡기계가 가질 수 있는 최대사양 변화량의 제한을 기존의 10% 범위 이내로 제한하였다.

(3) 설계 구속조건

최적화를 위한 목적함수(target function)에 의하여 결정된 최적조건에 따라 구속조건을 정리하면 식 (7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Target function : } g(x) &= \sum_{f=0}^{500} TL(f, x) \\ \text{Subject To : (unit : m)} & \end{aligned} \quad (7)$$

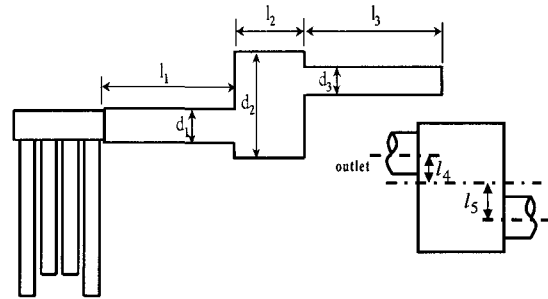


Fig. 7 Simplified model of intake system

- 0.220 ≤ A/C diameter ≤ 0.242 : A
 - 0.480 ≤ outlet tube length ≤ 0.720 : B
 - 0.052 ≤ outlet tube diameter ≤ 0.078 : C
 - 0.126 ≤ A/C length ≤ 0.154 : D
 - 0.600 ≤ inlet tube length ≤ 0.900 : E
 - 0.052 ≤ inlet tube diameter ≤ 0.078 : F
 - 0.050 ≤ offset length of inlet ≤ 0.070 : G
 - 0.050 ≤ offset length of inlet ≤ 0.070 : H
- (8)

위 식 (6)의 목적함수 $g(x)$ 는 실험에서의 출력결과를 0~500 Hz까지 전달손실의 오버올(overall) 값으로 구하였다. 여기서 식 (8)은 제어인자들을 조절할 수 있는 범위를 나타낸 것이다.

3. 설계이론 및 분석결과

3.1 실험대상 및 설계대상

(1) 설계인자 및 수준

흡기계를 구성하는 요소인 메니폴드, 플리넘, 에어 크리너, 파이프, 공명기 중 메니폴드, 플리넘은 엔진 성능을 고려하여 설계가 이루어져 있으므로 설계인자에서 제외하였다. 그리고, 공명기는 기본적인 흡기계의 구성이 이루어진 뒤에 설계가 이루어지므로 설계인자에서 역시 제외하였다.

Fig. 7은 흡기계의 성능평가를 위해 Fig. 3을 단순화한 것이며, 설계변수와 수준은 Table 1에서 제시된 바와 같다.

현재사양은 굵은 글씨체로 표시하였고, 설계변수 A의 경우는 클수록 좋으므로 현재사양보다 증가된 값을 수준으로 설정하였다.

(2) 다구찌(Taguchi) 기법

신호 대 잡음의 비(signal to noise ratio: SN비)는 통신공학분야에서 품질특성을 다룰 때 사용하는 개념

Table 1 Control factors and levels
(Unit : m)

Control factor		Level			
		1	2	3	
A	a/c diameter	d_2	0.22	0.242	×
B	Outlet tube length	l_1	0.48	0.60	0.72
C	Outlet tube diameter	d_1	0.052	0.065	0.078
D	a/c length	l_2	0.126	0.14	0.154
E	Inlet tube length	l_3	0.60	0.75	0.90
F	Inlet tube diameter	d_3	0.052	0.065	0.078
G	Offset length of inlet	l_4	0.05	0.06	0.07
H	Offset length of outlet	l_5	0.05	0.06	0.07

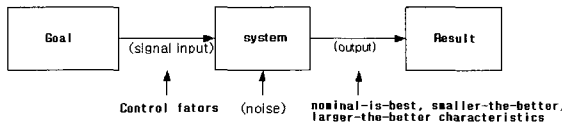


Fig. 8 Concept of SN ratio

이다. Fig. 8에서와 같이 신호가 시스템을 통과해서 출력될 때 이를 방해하는 잡음(noise)이 출력에 어느 정도 영향을 미치는가를 상대적으로 계산한 값으로서, 본 실험에서는 측정값이 클수록 소음제거에 이상적이므로 망대특성을 적용하여 SN비를 이용하여 분석하였다.

Taguchi(1991a, 1991b)는 식 (9)와 같이 SN비의 개념을 품질관리를 위한 파라미터설계에 응용하였다. 그리하여 어떤 제품을 계획하여 생산할 때 신호입력을 제어 가능한 인자(controllable factor), 시스템을 생산공정 그리고 잡음을 제어불가능인자(uncontrollable factor), 그리고 출력을 제품으로 간주하였다.

$$\begin{aligned}
 SN비 &= \frac{\text{신호입력이 출력에 기여한 양}}{\text{잡음이 출력에 나쁘게 기여한 양}} \\
 &= \frac{\text{신호입력의 힘(power of signal)}}{\text{잡음의 힘(power of noise)}} \\
 &= \frac{\mu^2 \text{의 추정치}}{\sigma^2 \text{의 추정치}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

또한, 본 논문에서 적용한 망대특성은 손실함수 $L(y) = k(1/y^2)$ 를 이용하여 SN비를 계산하였다. 손실함수의 기대값인 기대손실은 $E(L(y)) = kE(1/y^2)$ 이며, n 개의 관찰치 y_1, y_2, \dots, y_n 에 대한 $E(1/y^2)$ 의 추정값은 다음 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\widehat{E(1/y^2)} = (1/n) \sum_{i=1}^n (1/y_i^2) \quad (10)$$

그리고, 제품 n 개의 관찰치에 대하여 $\widehat{\sigma^2}$ 은 다음 식 (11)과 같이 계산된다.

$$s^2 = \widehat{\sigma^2} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1) \quad (11)$$

또한, 데시벨(dB) 단위의 SN비는 식 (12)로 표현할 수 있다.

$$SN비 = -10 \log (1/n) \sum_{i=1}^n (1/y_i^2) \text{ (dB)} \quad (12)$$

3.2 강건설계를 이용한 직교배열표의 파라미터 설계

강건설계에서 Cochran 과 Cox(1957)가 제안한 직교배열표와 Taguchi(1991a, 1991b)가 제안한 다구저 실험계획법을 적용하여 파라미터 설계를 하였다. Table 2는 앞의 Table 1에서 설명한 실험인자와 수준에 맞는 Box등(1978), Bendell 등(1989)에 의해 응용된 혼합직교배열표 $L_{18}(2 \times 3^7)$ 모델을 사용하여 파라미터를 설계한 것이다.

내측배열에는 Table 1에서 설명한 제어인자들(A, B, C, D, E, F, G, H)을 배치했고 외측배열에는 비 제어인자들(U : 온도, V : 습도, W : 소음)을 배치하였다. 분산분석시 성능 특성치 y_{ij} (실험번호: $i=1, 2, \dots, 18$, 반복수: $j=1, \dots, 4$)에 대해 분석하지 않고 y_{ij} 들로부터 유도된 SN비를 새로운 특성치로 하여 분석하였다.

또한, 이러한 경우 Mishima 등(1998), Oh 등(1995)과 같이 본 연구에서도 SN비를 식 (12)에서 설명한 것과 동일한 망대 특성치로 하였다.

3.3 열합병법(column merging method)

Cochran과 Cox(1957)에 의해 그리고 Taguchi (1991c) 등이 응용한 열합병법은 2수준열 만으로 이루어진 표준직교배열에서 4수준 열을 만들고, 3수준 열만으로도 이루어진 표준직교배열에서 9수준 열을 만들며, 2수준과 3수준이 있는 표준직교배열에서 6수준 열을 만드는 데 사용하는 방법이다.

2수준 열을 갖는 표준직교배열에서 4수준 열을 만들기 위해서 임의의 두 열과 그 두 열의 교호작용이

Table 2 Parameter design for L_{18}

		Inner array($L_{18}(2 \times 3^7)$)								Outer array($L_4(2^3)$)					
Factorial		A	B	C	D	E	F	G	H	Overall				SN ratio	
Factor		Orthogonal array								Exp. num.				Noncontrol factor	
Level	1									1 2 3 4					U
	2									0 1 0 1					
3	0 1 1 0				W										
No.	Col.	1	2	3		4	5	6	7	8	y11	y12	y13	y14	
1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	y11	y12	y13	y14	S/N1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	y21	y22	y23	y24	S/N2	
3	1	2	3	3	3	3	3	3	3	y31	y32	y33	y34	S/N3	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	y41	y42	y43	y44	S/N4	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	1	y51	y52	y53	y54	S/N5	
6	1	3	3	3	1	1	2	2	2	y61	y62	y63	y64	S/N6	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	3	y71	y72	y73	y74	S/N7	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	3	y81	y82	y83	y84	S/N8	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2	y91	y92	y93	y94	S/N9	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	y101	y102	y103	y104	S/N10	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	y111	y112	y113	y114	S/N11	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3	y121	y122	y123	y124	S/N12	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	2	y131	y132	y133	y134	S/N13	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3	y141	y142	y143	y144	S/N14	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1	y151	y152	y153	y154	S/N15	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	2	y161	y162	y163	y164	S/N16	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3	y171	y172	y173	y174	S/N17	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	1	y181	y182	y183	y184	S/N18	

나타내는 열을 합병하여야 한다. 예를 들어, L_8 에서 1과 2열의 교호작용은 3열에서 나타나므로 이들 3열을 합병하여 4수준 열 1개를 얻는다. 합병된 3열은 각각 자유도를 1개씩 가지며 4수준 열 1개를 얻기 위해서는 이들 자유도가 3개가 필요하다.

열 a, b, c (교호작용 $a \times b$ 가 c 에 나타난다)로써 4수준 열을 만들 경우, 다음과 같은 과정을 따른다.

(i) abc 라는 새로운 열을 만든다.

a 와 b 열의 (1,1)조합에 대해 abc 열에 1이라 한다.

a 와 b 열의 (1,2)조합에 대해 abc 열에 2이라 한다.

a 와 b 열의 (2,1)조합에 대해 abc 열에 3이라 한다.

a 와 b 열의 (2,2)조합에 대해 abc 열에 4이라 한다.

(ii) a, b, c 열을 직교배열에서 제외한다. 즉, 이들 열은 다른 인자나 교호작용을 추정하기 위해 사용할 수 없다.

Table 3은 L_8 에서 1, 2, 3열을 합병하여 4수준 열을 얻은 결과를 보여 주고있다. 얻어진 배열은 균형성과 직교성이 있음을 알 수 있으며, 이로써 4수준인자 1개와 2수준인자 4개까지 사용할 수 있다. 또한

Table 3 Column merging method from L_8

(a) L_8 array (b) Modified L_8 arrays

No.	Col.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
Factor	a	b	ab	c	ac	bc	abc

No.	Col.				
	(1-2-3)	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	4	1	2	2	1
8	4	2	1	1	2
Factor	Merging	c	ac	bc	abc

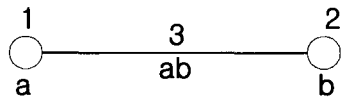


Fig. 9 Line and dot diagram

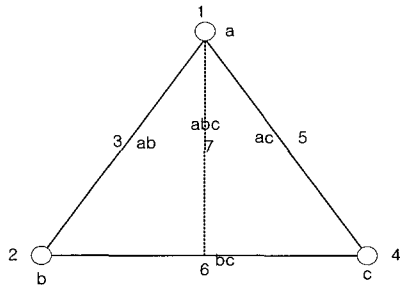


Fig. 10 Closed triangular

Fig. 9는 2수준 직교배열의 선점도에서 4수준 인자는 두 점과 이를 잇는 선으로 나타낸 것이다.

상기한 열합병 과정은 2수준 열만 있는 배열 이외의 직교배열에 대해서도 일반화시킬 수 있다. 즉, 3수준 열이 있는 표준직교배열에서 9수준 열을 얻기 위해서는 4개의 열을 합병하여 위와 같은 과정을 따르면 된다. 이 때 4열은 두 열과 이 두 열의 교호작용이 나타나는 열을 선택한다.

3.4 열합병법을 이용한 직교배열표

본 논문에서는 세분화 분석에 변형 L_{16} 을 적용하였는데, 변형은 다음과 같은 과정으로 유도되었다.

Fig. 10과 같이 2수준계에서 단허진 삼각형(삼각형에 다시 하나의 정점과 대변과의 교호작용을 추가한 것)을 사용함으로써 2수준의 7열(3개의 정점, 3개의 변, 1개의 수직선)대신에 자유도 7인 8수준의 1열이 다음과 같이 들어가게 된다.

L_{16} 의 하나의 삼각형에 정점 1에서 대변 6에 수직 선을 내리면 7열이 된다. 즉, 선점도에 추가한 그림과 같은 닫힌 삼각형의 3개 정점 1, 2, 4열의 2수준, (1, 2)의 8가지조합에 8수준의 인자를 넣으면 Table 4과 같은 결과를 얻게된다. 이러한 경우에, L_{16} 가운데서 1, 2, 4열 외에 3, 5, 6, 7의 4열도 제거할 필요가 있다. 이와 같이 하여 $L_{16}(2^{15})$ 이 $L_{16}(8 \times 2^8)$ 으로 바뀐 결과가 된다. 따라서 새로운 직교 배열표 $L_{16}(8 \times 2^8)$ 은 Table 5와 같이 된다.

Table 4 Modified 8 level

1 col.	2 col.	3 col.		A
1	1	1	⇒	1
1	1	2	⇒	2
1	2	1	⇒	3
1	2	2	⇒	4
2	1	1	⇒	5
2	1	2	⇒	6
2	2	1	⇒	7
2	2	2	⇒	8

Table 5 Orthogonal arrays of $L_{16}(8 \times 2^8)$

No.	1~7	8	9	10	11	12	13	14	15	Exp.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	y1
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	y2
3	2	1	1	1	1	2	2	2	2	y3
4	2	2	2	2	2	1	1	1	1	y4
5	3	1	1	2	2	1	1	2	2	y5
6	3	2	2	1	1	2	2	1	1	y6
7	4	1	1	2	2	2	2	1	1	y7
8	4	2	2	1	1	1	1	2	2	y8
9	5	1	2	1	2	1	2	1	2	y9
10	5	2	1	2	1	2	1	2	1	y10
11	6	1	2	1	2	2	1	2	1	y11
12	6	2	1	2	1	1	2	1	2	y12
13	7	1	2	2	1	1	2	2	1	y13
14	7	2	1	1	2	2	1	1	2	y14
15	8	1	2	2	1	2	1	1	2	y15
16	8	2	1	1	2	1	2	2	1	y16

3.5 L_{18} 직교배열표를 이용한 설계 및 분석

앞에서 정의한 설계변수들과 수준을 평가하기 위해서는 $2^1 \times 3^7$ 의 조건을 만족하는 실험을 수행해야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표를 이용하여 Table 2와 같은 인자의 수준으로 배치를 하여 실험을 수행하면 각각의 실험결과에 대한 특성치를 얻을 수 있다. Mason 등(1989), Park(1994) 그리고 Wang 등(1999)은 이러한 특성치를 0~500 Hz까지의 전달손실의 오버올(overall) 값으로 하여 SN비를 구함으로써 해결하였는데, 여기서도 SN비를 이용하여 분석하였으며 그 결과는 Table 6과 같다.

Table 6 ANOVA table for SN data

Source	DF	Anova SS	Mean square	F-Value	Pr>F
A	1	10.32144050	10.62144050	88.47	0.0111
B	2	124.51581111	62.25790556	518.59	0.0019
C	2	9.82287211	4.91143606	40.91	0.0239
D	2	6.05609011	3.02804506	25.22	0.0381
E	2	14.21538211	7.10769106	59.20	0.0166
F	2	9.77792011	4.88896006	40.72	0.0240
G	2	0.38767811	0.19383906	1.61	0.3825
H	2	1.76161478	0.88080739	7.34	0.1199
Model	15	177.15880894	11.81058726	98.38	0.0101
Error	2	0.240404533	0.02500339		
Total	17	177.39891428			
R-square	C.V	Root MSE	SN Mean		
0.998647	0.954991	0.34648617	36.28161111		

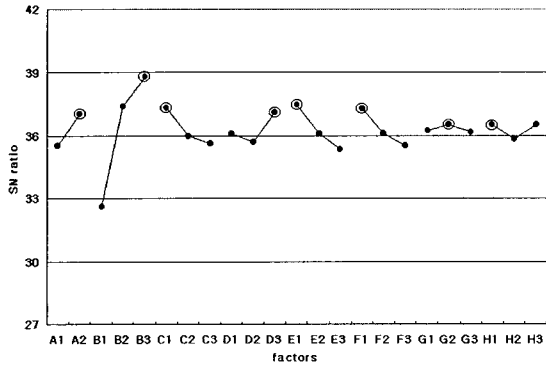


Fig. 11 SN ratio versus control factors (optimal value : ○)

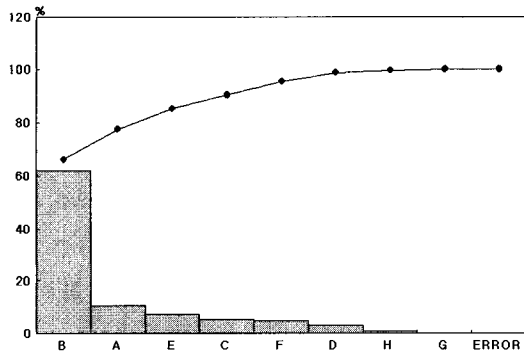


Fig. 12 Pareto for mean square

Table 7 Optimum Specification of a intake system

	Outlet pipe	Air-cleaner	Inlet pipe
Length	0.720	0.154	0.600
Diameter	0.052	0.242	0.052

Table 6을 살펴보면, R^2 가 0.998647로서 전체적으로 신뢰성이 높은 것을 알 수 있으며 교호작용이 없는 것으로 분석된다. 세부적으로 B인자의 p-value가 유의수준 0.01이하이며, A, C, D, E, F인자는 유의수준 0.05이하로 나타났다. 따라서 B인자가 가장 유의하다는 것을 알 수가 있다.

제공평균을 이용하여 각 변수와 수준별 요인효과도 결과는 Fig. 11과 같다. 그 결과를 살펴보면, 최적수준은 A2B3C1D3E1F1G2H1이고, 특성치에 민감한 설계변수는 A(a/c의 직경), B(출력관 길이), C(출력관 직경), D(a/c의 길이), E(입력관의 길이), F(입력관 직경)임을 알 수 있다.

Fig. 12는 제공평균에 대한 파레토(Pareto)그림으로서 B인자가 다른 인자보다 매우 영향이 있다는 결과를 나타내주고 있다. 또한, 전체적인 주인자의 경향을 보면 누적영향도가 B인자에서 완만하게 100%로 수렴함으로써 B인자가 유의수준 내에서 가장 강하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

Table 7은 가장 유의하지 않은 인자 G, H를 제외한 주인자의 최적화 결과이다.

위에서 구한 최적조건(A2B3C1D3E1F1; G, H는 현행수준)을 적용하여 흡기계 성능평가 소프트웨어로 재해석을 수행한 결과는 Fig. 13과 같으며, TL의 오버 레벨이 현재의 설계보다 7.049 dB 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

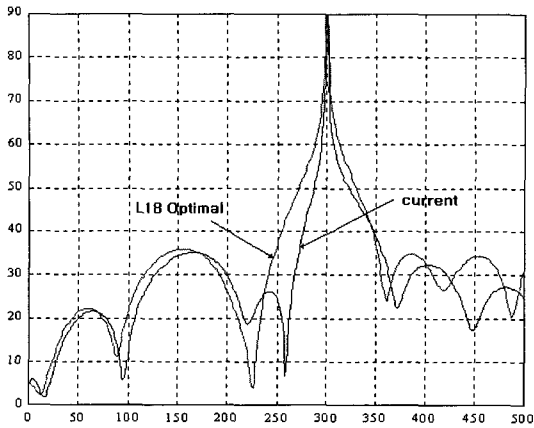


Fig. 13 Comparison between current and L_{18} optimal design

3.6 변형 L_{16} 직교배열표를 이용한 세분화 설계

L_{18} 직교배열표를 이용한 분석에서 B인자가 전체의 70% 이상 유의하게 작용하고 있으므로 B인자를 세분화하여 정확한 분석이 요구된다. 본 논문에서는 Table 8과 같이 B인자를 8수준으로 세분화하였다. 분석에서 사용된 변형 L_{16} 직교배열표는 열합병법(column merging method)으로 유도한 Table 5의 직교배열표를 이용하였고, 각 인자에 대한 수준은 Table 8에서 제시된 바와 같다.

Table 8 Levels of modified L_{16}

Control factor		Level
A	a/c diameter	0.220, 0.242
B	Outlet tube length	0.48, 0.5143, 0.5486, 0.5829, 0.6171, 0.6514, 0.6857, 0.72
C	Outlet tube diameter	0.052, 0.065
D	a/c length	0.126, 0.154
E	Inlet tube length	0.600, 0.750
F	Inlet tube diameter	0.052, 0.065

먼저, Table 9와 같이 파라미터를 설계한 후 실험을 실시하였는데, 총 실험은 16번하였고, B인자는 8수준, A, C, D, E, F인자의 수준은 L_{18} 직교배열표 분석시 값이 큰 2개의 수준을 설정하였고, G, H는 유의하지 않아 현행수준을 유지하였다.

Table 9를 이용한 실험의 분산분석결과는 Table 10과 같다. R^2 가 0.980642로서 변형 L_{16} 설계에서도 B인자가 유의하다는 결과를 보여주고 있다(p-value = 0.0161). 또한, A인자 역시 유의한 결과를 보였으나(p-value = 0.0196), 그밖에 C, D, E, F인자들은 유의하지 않았다.(p-value > 0.05)

Fig. 14는 변형 L_{16} 을 이용한 요인효과도이다. 여기서의 최적값은 L_{18} 설계의 실험과 다르게 B의 수준 내(B7)에서 존재하였고, 변형 L_{16} 에서도 L_{18} 설계와 마찬가지로 B인자가 전체적으로 영향력이 큰 것으로

Table 9 Parameter design using modified L_{16}

Exp. No.	Control factor									Noncontrol factor				SN ratio
	1~7	8	9	10	11	12	13	14	15	1	1	2	2	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	1	2	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	y1	y1	y1	y1	SN1
2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	y2	y2	y2	y2	SN2
3	2	1	1	1	1	2	2	2	2	y3	y3	y3	y3	SN3
4	2	2	2	2	2	1	1	1	1	y4	y4	y4	y4	SN4
5	3	1	1	2	2	1	1	2	2	y5	y5	y5	y5	SN5
6	3	2	2	1	1	2	2	1	1	y6	y6	y6	y6	SN6
7	4	1	1	2	2	2	2	1	1	y7	y7	y7	y7	SN7
8	4	2	2	1	1	1	1	2	2	y8	y8	y8	y8	SN8
9	5	1	2	1	2	1	2	1	2	y9	y9	y9	y9	SN9
10	5	2	1	2	1	2	1	2	1	y10	y10	y10	y10	SN10
11	6	1	2	1	2	2	1	2	1	y11	y11	y11	y11	SN11
12	6	2	1	2	1	1	2	1	2	y12	y12	y12	y12	SN12
13	7	1	2	2	1	1	2	2	1	y13	y13	y13	y13	SN13
14	7	2	1	1	2	2	1	1	2	y14	y14	y14	y14	SN14
15	8	1	2	2	1	2	1	1	2	y15	y15	y15	y15	SN15
16	8	2	1	1	2	1	2	2	1	y16	y16	y16	y16	SN16
Factor	B	A	C	D	E	F								

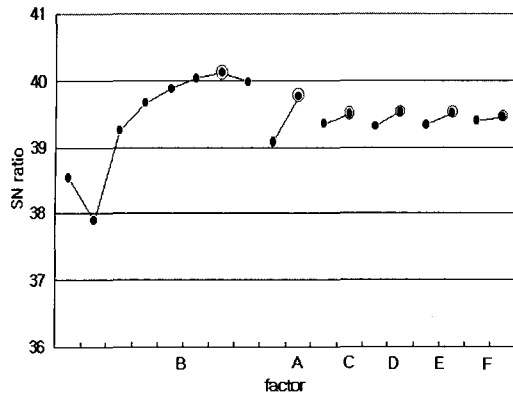


Fig. 14 SN ratio versus control factors for Modified L_{16} (optimal value : ○)

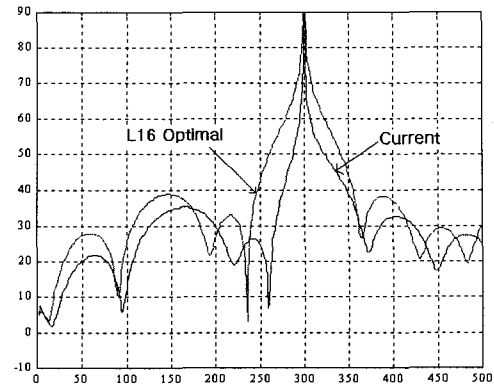


Fig. 16 Simulation results of transmission loss from current and modified L_{16}

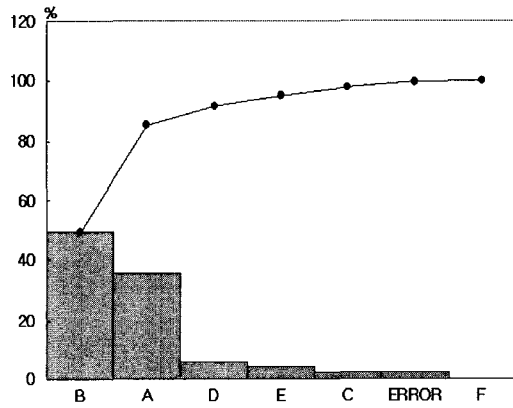


Fig. 15 Pareto diagram of mean square of main factors and error

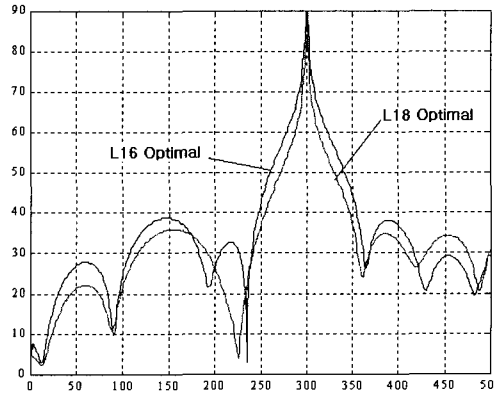


Fig. 17 Simulation results of transmission loss from L_{18} and modified L_{16}

Table 10 ANOVA for modified L_{16}

Source	DF	Anova SS	Mean square	F-Value	Pr>F
A	7	9.04794904	1.29256415	17.38	0.0196
B	1	1.80015889	1.80015889	24.21	0.0161
C	1	0.08664192	0.08664192	1.17	0.3594
D	1	0.21846276	0.21846276	2.94	0.1850
E	1	0.14066250	0.14066250	1.89	0.2627
F	1	0.00656910	0.00656910	0.09	0.7857
Model	13	11.30044422	0.94170368	12.66	0.0298
Error	2	0.22306847	0.07435616		
Total	15	11.52351269			
R-square	C.V	Root MSE	SN Mean		
0.980642	0.691810	0.27268325	39.415925		

나타났다. 또한 A인자의 영향력도 존재하였으나, C, D, E, F인자들은 영향을 미치지 못했으며 최적수준은 A2B7C2D2E2F2 이었다.

Fig. 15는 전체적인 영향정도를 보여주는 파레토그램으로서, 위의 Fig. 14를 더욱 명확하게 설명하고 있다. 변형 L_{16} 에서는 B와 A인자가 전체적으로 영향도가 가장 큰 것으로 나타났다.

Fig. 16은 현행수준과 변형 L_{16} 의 최적수준의 오버울을 비교한 것이다. 확연히 L_{16} 설계의 최적치가 큰 것을 알 수 있다.

아래의 Fig. 17은 L_{18} 과 변형 L_{16} 의 최적 조건에서의 오버울 결과를 비교한 것이다. L_{18} 최적 조건보다 변형 L_{16} 의 최적조건의 오버울 값이 전체적으로 높다는 것을 알 수 있다.

Table 11은 현행조건의 L_{18} 과 변형 L_{16} 의 최적설계의 오버울과 SN비를 나타낸 것이다. 현행조건에 비해 L_{18} 은 7.049 dB증가하였으며, 변형 L_{16} 은 13.1571 dB 상승 효과가 있었다. 또한, Fig. 18은 현행조건의 실험값과 변형 L_{16} 의 최적설계의 실험값을 비교한 것이다. 확연히 변형 L_{16} 의 최적설계 값이 큰 것을 알 수가 있다.

Table 11 Comparing before and after modification

Condition	Overall(dB)	SN ratio
Current	93.5337	39.4193
L_{18} optimal	100.5827	40.0504
L_{16} optimal	106.7908	40.5706

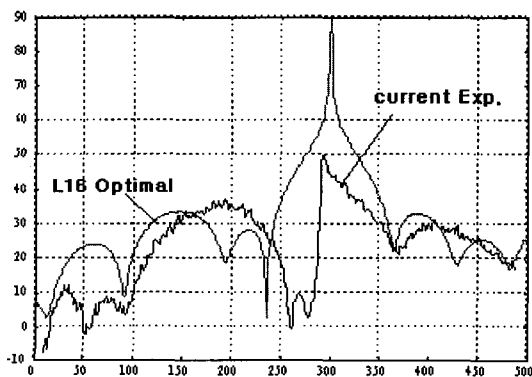


Fig. 18 Simulation results of transmission loss from modified L_{16} and current exp.

4. 결 론

본 연구에서의 최적화 수행은 3수준의 혼합 직교배열모듈과 변형 L_{16} 직교배열모듈을 사용하였다. 실험설계는 우선 L_{18} 직교배열표를 이용하여 주 인자들을 해석하였고, 그 중에서 가장 유의한 인자(B)를 열합병법을 이용하여 세분화된 분석을 실시하여 기존 연구보다 좀 더 근접된 최적조건을 찾을 수 있었다.

실험에 있어서 흡기계의 압력손실에 대한 경계조건의 폭을 잡았으나 그 범위 내에 이론적 최적값이 존재하지 않았다. 그렇기 때문에 최적치에 더욱 근접하기 위해서는 경계조건의 범위를 크게 해야 할 것으로 생각된다. 만약 경계조건을 크게 잡아 경계조건 내에 최적치가 존재하여 일반적인 최적화 기법의 결과와 다구찌기법에 의한 결과에 차이가 있더라도, 그 차이는 미미할 뿐만 아니라 최적화 기법에 의하여 설계변수를 최적화하는 것보다 다구찌기법을 이용함으로써 시간을 크게 단축시킬 수 있을 것이다. 또한 주요인자들의 전체적인 영향도를 알 수 있어 좀더 정확한 최적조건을 찾을 수 있다고 사료된다.

본 연구를 통하여 흡기계를 대상으로 저소음화 연구를 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 기존 설계와 최적화 설계를 비교해 보면 전달손실의 오버울(overall) 값이 현행조건에 비해 L_{18} 은 7.049 dB증가하였으며, 변형 L_{16} 은 13.1571 dB 향상된 흡기계를 설계할 수 있었다.

(2) 실험치를 직접 최적화에 적용하는 것보다 SN비를 적용하여 최적설계를 하는 것이 자료의 신뢰도 측면에서 더 좋은 결과를 가져온다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) A(a/c의 직경), B(출력관 길이), C(출력관 직경), E(입력관의 길이), F(입력관 직경) 등의 설계변수들이 흡기계의 전달손실에 민감하였다. 그 중에서도 B(출력관 길이)가 흡기계 전달손실에 가장 영향을 미치는 것을 알았다.

(4) 최적화 기법만을 이용한 것보다는 다구찌법에 의한 설계변수를 최적화 기법에 적용함으로써 시간을 단축시켜 보다 개선된 흡기계의 저소음화 기법을 제안할 수 있었다.

(5) 열합병법을 통해 좀 더 정밀한 최적조건을 찾을 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Bendell, A., Disney, J. and Pridmore, A., 1989, Taguchi Methods : Applications in World Industry, Springer-verlag, New York.
- (2) Box, G. E. P., Hunter, W. G. and Hunter, J. S., 1978, Statistics for Experiments, Wiley&Sons, New York.
- (3) Cochran, W. G. & Cox, G. M., 1957, Experimental Designs, Wiley&Sons, New York.
- (4) Craggs, A., 1976, A Finite Element Approach for Damped Acoustic Systems : An Application to Evaluate the Performance of Reactive Mufflers, Journal of Sound and Vibration, Vol. 48, p. 377.
- (5) Hwang, W. J., Park, G. J. and Lee, W. I., 1994, Structural Optimization Post Processing Using Taguchi Method, JSME, Series A, Volume 37, No. 2, pp. 166~172.
- (6) Kim, J. K., 1999, Optimum Design of a Heat-exchanger-fan Casing of Clothe Using the Taguchi Method, KSME International Journal, Vol. 13, No.12, pp. 962~972.
- (7) Lee, K. H., Eom, I. S., Park, G. J. and Lee, W. I., 1995, Robust Design for Unconstrained Optimization Using Taguchi Method, AIAA Journal, Vol. 34, No. 5, pp. 1059~1063.
- (8) Mason, R. L., Gunst, R. F. and Hess, J. L., 1989, Statistical Design and Analysis of Experiments, Wiley&Sons, New York.
- (9) Mishima, Nozomu, Ishii, Kosuke, and Mori, Kazuo, 1998, Robustness Estimation for Machine Tool Designs Using Taguchi Method, SOURCE Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 64, pp. 1502~1506.
- (10) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Ducts and Muffler, Wiley, New York.
- (11) Oh, J. E., Han, K. H. and Lee, J. C., 1995, Analysis and Advance for Performance of the Muffler of a Passenger Car, Proc. of Spring Conference, 726~732(in Korea).
- (12) Oh, J. E., Han, K. H. and Son, D. Y., 1996, The Design Technique for Low-noise Intake System of Vehicle, Proc. of Autumn Conference, Korean Society of Automotive Engineering, p. 317.
- (13) Oh, J. E., Lee, K. T. and Lee, J. C., 1996, Development of the Software for Analysis and Improvement of a Passenger Car's Muffler, Journal of Automotive Engineering, Korean Association of Automotive Engineering, Vol. 4, No. 6, p. 133.
- (14) Oh, S. K., Mo, J. Y., Huh, M. S., 1996, A Study on the Analysis and Improvement of the Acoustic Characteristics of the Muffler of a Passenger Car, Korea of Sound and Vibration, pp. 755~762(in Korea).
- (15) Park, S. K., 1994, Application of Quality Engineering for Energy Efficiency of Compressor, The 12th Annual Taguchi Symposium, Rochester, New York, pp. 199~211.
- (16) Sahasrabudhe, A. D. Anantha R, S. and Munjal, M. L., 1991, Matrix Condensation and Transfer matrix Techniques in The 3-D Analysis of Expansion Chamber Muffler, Japan of Sound and Vibration, Vol. 143, No.7, pp. 371~394.
- (17) Taguchi, G., 1991a, Quality Engineering of Development and Design, Korea Standard Association, Translated to Korean.
- (18) Taguchi, G., 1991b, Experimental Designs for Quality Engineering, Korea Standard Association, Translated to Korean.
- (19) Taguchi, G., 1991c, Case Studies of Quality Engineering-america and Europe, Korea Standard Association, Translated to Korean.
- (20) Wang, H. T., Liu, Z. J., Chen, S. X. and Yang, J. P., 1999, Application of Taguchi Method to Robust Design of BLDC Motor Performance, SOURCE IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 5, pp. 3700~3702.
- (21) Young, C. J. and Crocker, M. J., 1975, Prediction of Transmission Loss in Mufflers by the Finite Element Method, The Acoustical Society of America, Vol. 57, No.1, pp. 144~148.
- (22) Lee, J. M., Kim, K. M., Sohn, D. G., Lee, J. H. and Hwang, Y. H., 2001, A Research on Characteristics of Semi-active Muffler Using Difference of Transmission Paths, 한국소음진동공학회지, 제 10 권 제 3 호, pp. 401~407.
- (23) Oh, J. E., Joe, Y. G. and Lee, K. T., 2001, Development of Low Noise Intake System Using Taguchi Method, 한국소음진동공학회지, 제 11 권 제 2 호, pp. 234~240.