

# 강건설계에서 크리깅기법을 적용한 저소음 흡기계 설계

차 경 준, 박 영 선, 류 제 선, 진 정 언  
한양대학교 수학과

## The kriging method with robust design for low noise intake system.

Kyungjoon Cha, Youngsun Park, Jeseon Ryu, Chungun Chin  
Dept. of Mathematics, Hanyang University

Keywords: kriging, robust design, Taguchi method

### ABSTRACT

We propose an optimal design to improve the muffler's capacity by reducing the noise of the intake system by adapting kriging method with the robust design.

For the first stage of a design, the length and radius of each component of the current muffler system are selected as control factors. Then, the  $L_{18}$  table of orthogonal arrays is adapted to extract the effective main factors. As the second stage, the  $L_{18}$  table of orthogonal arrays using kriging method is adapted to take the significant factors into consideration.

As an optimal design, the  $L_{18}$  table of orthogonal arrays with main effects is proposed and the kriging method is adapted for more efficient design. The kriging method improves the performance of intake system.

## 1. 서 론

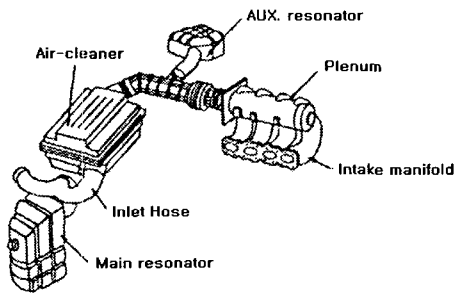
자동차의 배기계와 흡기계에서 발생하는 소음은 승차감을 저해할 뿐만 아니라 환경소음의 원인이 되고 있다. 또한 자동차의 보급이 일반화됨에 따라 자동차의 정숙성은 고품질 차의 주요조건이 되고 있으며, 그중 흡기계 소음은 중요한 연구대상이 되고 있다.

흡기소음은 일반적으로 500Hz이내의 저주파

소음으로 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. 또한 엔진성능에 미치는 영향과 엔진룸 내에 있는 타 부품과의 위치에 따른 공간적 제약에 따라 최적

화한 설계가 어려운 실정이다. 그러나, 전달행렬 기법(transfer matrix method), 음향 유한요소해석법(acoustic FEM) 등의 다양한 해석 기법과 시뮬레이터 등을 이용한 실험기법들이 제안되면서 기존의 흡기 소음 저감대책에 대한 불합리성이 많이 개선되고 있다[5, 14-17, 19].

하지만 이 또한 기존의 경험에 의존하는 시행착오적 요소를 벗어나지 못해 많은 시간과 비용이 들고있다. 따라서, 최근 적은 노력과 비용을 가지고 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 강건설계를 이용한 다구찌기법(Taguchi method)이 많이 활용되고 있다[7, 8, 10, 13, 22-24].



<Figure 1> Overview of an intake system

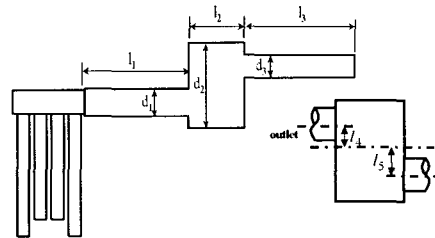
본 연구에서는 <Figure 1>과 같은 흡기계(H사 1500cc DOHC 엔진)를 대상으로 소음 저감특성을 평가하고, 여기서 나타난 문제점을 개선하기 위해 강건설계(Robust Design)에서 크리깅기법(kriging method)을 도입함으로써 강건설계에서 적용하기에 비효율적인 비선형적 최적화 문제를 해결 하고자 하였다. 즉, 강건설계(Robust Design)를 이용하여 먼저 흡기계의 설계인자 중 가장 영향 있는 인자를 선별한 후, 공간적으로 상호 연관된 데이터를 예측하는데 유용하게 사용되고 있는 크리깅기법을 적용하여 유의한 인

자를 더욱 세분화함으로써 제한조건 내에서 인자들의 비선형적인 최적조건을 찾을 수 있도록 접근하였다[3].

## 2. 실험설계

### 2.1 실험대상 및 설계대상

흡기계를 구성하는 요소인 메니폴드, 플리넘, 에어크리너, 파이프, 공명기 중 메니폴드, 플리넘은 엔진성능을 고려하여 설계가 이루어져 있으므로 설계인자에서 제외하였다. 그리고, 공명기는 기본적인 흡기계의 구성이 이루어진 뒤에 설계가 이루어지므로 설계인자에서 제외하였다.



<Figure 2> Simplified model

<Table 1> Control factors and levels

Control factor		level(unit : m )			
		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	$l_1$	0.05	0.06	0.07
H	offset length of outlet	$l_5$	0.05	0.06	0.07

<Figure 2>는 흡기계의 성능평가를 위해 <Figure 1>을 단순화한 그림이며, 각 설계 변수와 수준은 <Table 1>에서 제시된 바와 같다. 현재사양은 굵은 글씨체로 표시하였고, 설계변수 A의 경우는 클수록 좋으므로 현재 사양보다 증가된 값을 수준으로 설정하였다.

## 2.2 다구찌기법 설계

파라미터 설계는 강건설계에서 중요한 직교배열표와 다구찌 실험계획법을 적용하였다. <Table 2>는 앞의 <Table 1>에서 설명한 실험인자와 수준에 맞는 혼합 직교배열표  $L_{18}(2 \times 3^7)$  모형을 사용하여 설계한 것이다 [1, 2, 4, 11].

내측배열에는 <Table 1>에서 설명한 제어인자(A, B, C, D, E, F, G, H)를 배치하였고, 외측배열에는 비 제어인자(U:온도, V:습도, W:소음)를 배치하였다. 분산분석 시 성능특성치  $y_{ij}$ (실험번호:  $i = 1, 2, \dots, 18$  반복수:  $j = 1, \dots, 4$ )에 대해서 분석하지 않고,  $y_{ij}$ 들로부터 구한 SN비를 계산하여 SN비를 새로운 특성치로 삼아 분석을 실시하였다. 여기서 사용한 특성치  $y_{ij}$ 는 전달손실(Transmission loss)이고, 전달손실은 음향요소의 소음특성 및 저감성능을 평가하기 위하여 사용된다. 이는 음향요소만의 에너지손실을 표현하는 것으로서 음향요소의 입출구 사이의 음압비를 dB로 나타낸다.

이 실험에서는 배출가스가 원활히 배출되어야 소음이 줄기 때문에 측정값이 클수록 소음제거에 이상적이므로 망대특성을 적용한 SN비를 이용하였다[14-16].

## 2.3 크리깅기법(Kriging method)

크리깅은 보간, 예측, Smoothing, 최적화 등을 모두 포함하고 있는 기법으로써 기존의 보간법이나 예측 기법으로 사용되어 왔던 것보다 효율적이다.

크리깅 모형(Kriging model)은 다음과 같은 선형모형(linear model)과 오차항(departure)의 합으로 모델링(modeling) 되어진다 [6, 9, 12].

$$y(x) = f(x) + Z(x). \quad (1)$$

여기에서  $y(x)$ 는 관심 있는 미지의 함수이고,  $f(x)$ 는  $x$ 의 알려진 선형함수이며,  $Z(x)$ 는 평균이 0, 분산이  $\sigma^2$ , 공분산이 0이 아닌 확률과정의 실현값이다. 위 식 (1)에서  $f(x)$ 는 반응표면법(response surface method)에서의 회귀모형(regression model)과 비슷한 형태를 가지며, 설계공간에서 전역적 모형(global model)을 제공한다.

대부분의 경우에서, 식 (2)와 같이  $f(x)$ 는 상수항  $\beta$ 로 대체되기도 한다[20, 21].

$$y(x) = \beta + Z(x) \quad (2)$$

여기에서,  $\beta$ 는  $n_s$ 개의 관측된 반응값에 기초되어 추정되어지는 미지의 상수이고,  $Z(x)$ 는 전역적 모형으로부터 생성된 지역적 편의(local deviation)를 나타내고 있으며, 이로 인하여 크리깅 모형이  $n_s$ 개의 데이터를 보간(interpolation)하게 된다.

아래 식 (3)과 같이  $Z(x)$ 의 공분산 행렬(covariance matrix)은

$$\begin{aligned} &Cov[Z(x^i), Z(x^j)] \\ &= \sigma^2 R[R(x^i), x^j]), \quad i=1, \dots, n_s \end{aligned} \quad (3)$$

으로 표현될 수 있으며, 이때,  $R$ 은 상관행렬이고,  $R(\cdot, \cdot)$ 은  $n_s$ 개의 샘플링 된 데이터

<Table 2> Parameter design using  $L_{18} (2^1 \times 3^7)$  orthogonal array.

구 분		내측배열( $L_{18}(2 \times 3^7)$ )								외측배열( $L_9(2^3)$ )											
요인배치		A	B	C	D	E	F	G	H	원태이터				SN비							
인자이름		주인자 배치								실험번호				비제어인자							
수준	1 2 3									1	2	3	4		5	6	7	8	1	2	3
	열번호 실험번호									1	2	3	4	5	6	7	8	0	0	1	1
		0	0	1	1					0	1	0	1	V							
		0	1	1	0					0	1	1	0	W							
1		1	1	1	1	1	1	1	1	y11	y12	y13	y14	SN1							
2		1	1	2	2	2	2	2	2	y21	y22	y23	y24	SN2							
3		1	1	3	3	3	3	3	3	y31	y32	y33	y34	SN3							
4		1	2	1	1	2	2	3	3	y41	y42	y43	y44	SN4							
5		1	2	2	2	3	3	1	1	y51	y52	y53	y54	SN5							
6		1	2	3	3	1	1	2	2	y61	y62	y63	y64	SN6							
7		1	3	1	2	1	3	2	3	y71	y72	y73	y74	SN7							
8		1	3	2	3	2	1	3	1	y81	y82	y83	y84	SN8							
9		1	3	3	1	3	2	1	2	y91	y92	y93	y94	SN9							
10		2	1	1	3	3	2	2	1	y101	y102	y103	y104	SN10							
11		2	1	2	1	1	3	3	2	y111	y112	y113	y114	SN11							
12		2	1	3	2	2	1	1	3	y121	y122	y123	y124	SN12							
13		2	2	1	2	3	1	3	2	y131	y132	y133	y134	SN13							
14		2	2	2	3	1	2	1	3	y141	y142	y143	y144	SN14							
15		2	2	3	1	2	3	2	1	y151	y152	y153	y154	SN15							
16		2	3	1	3	2	3	1	2	y161	y162	y163	y164	SN16							
17		2	3	2	1	3	1	2	3	y171	y172	y173	y174	SN17							
18		2	3	3	2	1	2	3	1	y181	y182	y183	y184	SN18							

$x^i$ 와  $x^j$ 사이에서의 상관함수이다. 따라서,  $R$ 은 대각이 모두 1인 ( $n_s \times n_s$ ) 대칭이며 양정치 행렬(positive definite)이다. 그리고 상관함수  $R(x^i, x^j)$ 는 <Table 3>에서와 같이 사용자에 의해 결정된다.

<Table 3>과 같이 모든 상관함수에서  $n_{db}$ 는 설계변수의 수이고,  $\theta_k$ 는 모형에 적합하도록 사용되어지는 미지의 상관계수이며,  $d_k = |x_i^k - x_j^k|$ 는 설계 점  $x^i$ 와  $x^j$ 의  $k$ 번째 요소사이에서의 거리이다.

본 논문에서는 스칼라 상관계수를 사용하였으며, <Table 3>의 Gaussian 모형을 적용하였다. 따라서 상관함수는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(x^i, x^j) = \exp[-\theta \sum_{k=1}^{n_s} |x_k^i - x_k^j|^2]. \quad (4)$$

$\theta$  값이 추정되는 과정은 아래와 같다. 즉, 다른 관심 있는 항목으로 관측된 지점  $x^1, \dots, x^{n_s}$ 와 추정하려는 지점  $x$ 에서의 반응 값 사이에서의 상관벡터  $\gamma(x)$ 는 식 (5)와 같다.

$$\gamma(x) = R(x, x^{(i)}) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}) \dots, R(x, x^{(n_s)})] \quad (5)$$

식 (1)은 추정되어야 할 참값을 의미하고 있으며, 추정되는 DACE(Design Analysis of Computer Experiments) 모형은 다음 식 (6)으로서 정의되며,

$$\hat{y}(x) = E(y(x) | y(x)^{(1)}, \dots, y(x)^{(n_s)}) \quad (6)$$

여기서  $E(\cdot)$ 는 기대값이고,  $E(A|B)$ 는 정보  $B$ 가 주어졌을 때  $A$ 의 조건부 기대값이다.  $y(x^{(1)}), \dots, y(x^{(n_s)})$ 는  $n_s$ 개의 관측된 반응값이고,  $y(x)$ 는 추정하기 위한 진정

<Table 3> Summary of correlation function

Name	Correlation Function
Exponential	$\prod_{k=1}^{n_{df}} \exp(-\theta_k  d_k )$
Gaussian	$\prod_{k=1}^{n_{df}} \exp(-\theta_k  d_k ^2)$
Cubic spline	$\prod_{k=1}^{n_{df}} \begin{cases} 1 - 6(\theta_k  d_k )^2 + 6(\theta_k  d_k )^3 & , \theta_k  d_k  < 1/2 \\ 2(1 - \theta_k  d_k )^3 & , 1/2 \leq \theta_k  d_k  < 1 \\ 0 & , \theta_k  d_k  \geq 1 \end{cases}$
Matern linear function	$\prod_{k=1}^{n_{df}} [(1 + \theta_k  d_k ) \exp(-\theta_k  d_k )]$
Matern cubic function	$\prod_{k=1}^{n_{df}} [(1 + \theta_k  d_k  + \theta_k^2  d_k ^2/3) \exp(-\theta_k  d_k )]$

한 반응값이며,  $\hat{y}(x)$ 의 실제 추정량이다.

이제, 식 (6)에 대한 분석방법으로서 크리깅기법을 적용해 보자. 입력값  $s = \{s_1, \dots, s_n\}$ 와 데이터  $y_s = \{y(s_1), \dots, y(s_n)\}$ 이 주어져 있을 때, 시도되지 않은 입력값  $x$ 에서의 반응값  $y(x)$ 의 선형 예측모형

$$\hat{y}(x) = c'(x)y_s \tag{7}$$

를 고려해보자. 이때  $y_s$ 를 대응하는 확률값  $Y_s = [Y(s_1), \dots, Y(s_n)]'$ 으로  $\hat{y}(x)$ 를 랜덤하다고 가정하자. 최소분산 불편추정량은  $E[c'(x)Y_s] = E[Y(x)]$ 을 최소화하도록  $n \times 1$  벡터  $c(x)$ 를 선택함으로써 얻어진다. 즉,

$$\begin{aligned} MSE[\hat{y}(x)] &= E[c'(x)Y_s - Y(x)]^2 \\ &= (c'(x)F\beta - f(x)\beta)^2 \\ &+ \sigma^2 [c'(x), -1] \begin{bmatrix} R & r(x) \\ r'(x) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(x) \\ -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

이고, 이때 제한조건은  $F'c(x) = f(x)$ 이

다.  $MSE$ 의 제한조건  $F'c(x) = f(x)$ 와 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)  $\lambda(x)$ 에 대하여  $Rc(x) - r(x) - F\lambda(x) = 0$ 을 이용하면

$$\begin{bmatrix} 0 & F' \\ F & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\lambda(x) \\ c(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x) \\ r(x) \end{bmatrix} \tag{9}$$

을 얻는다. 따라서,  $Y(x)$ 의 BLP(Best Linear Predictor)는

$$\hat{Y}(x) = f(x)\hat{\beta} + r'(x)R^{-1}(Y_s - F\hat{\beta}) \tag{10}$$

로 얻어지고, 여기서  $\hat{\beta} = (F'R^{-1}F)^{-1} \cdot F'R^{-1}Y_s$ 은  $\beta$ 의 일반화된 최소제곱추정량이다. 식 (10)의 우변에 있는 두 항은 상호연관성이 없으며, 첫 번째 항은 전역적인 회귀모형으로, 그리고 두 번째 항은 잔차를 부드럽게 연결하는 보간선으로 해석되어질 수 있다. 그러므로 최적값은 다음의 두 관계로 보여질 수 있다. 즉, 일반화된 최소제곱 예측값을 얻은 다음 회귀모형이 없는 것처럼 잔차를 보간(interpolation)하게 된다.

Gaussian. 과정을 가정해보면, 우도함수는 회귀모형에 있어  $\beta$ 와 확률과정의 분산  $\sigma^2$ , 그리고 상관관계모수(correlation parameter)가 주어졌을 때,  $\beta$ 의 최대우도 추정량(MLE)는 일반화된 최소제곱 추정량이며,  $\sigma^2$ 의 MLE는 아래 식 (11)과 같다.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} (y_s - F\hat{\beta})R^{-1}(y_s - F\hat{\beta}). \quad (11)$$

$\hat{\beta}$ 와  $\hat{\sigma}^2$ 의 이러한 정의로부터 문제는  $(\det R)^{1/n} \hat{\sigma}^2$ 을 최소화하는데 있으며, 이는 상관계수(correlation coefficient)와 데이터에만 의존하는 함수이다[3, 20].

### 3. 분석결과

#### 3.1 $L_{18}$ 직교배열표를 이용한 설계 및 분석

앞에서 정의한 설계변수들과 수준을 평가하기 위해서는  $2^1 \times 3^7$ 의 조건을 만족하는 실험을 수행해야 한다. 이러한 조건을 만족

시키기 위해서  $L_{18}(2^1 \times 3^7)$  직교배열표를 이용하여 <Table 2>와 같은 인자의 수준으로 배치를 하여 실험을 수행하면 각각의 실험 결과에 대한 특성치를 얻을 수 있다.

특성치는 0~500Hz까지의 전달손실(Transmission loss)의 오버올(overall) 값으로 하여 SN비를 구하면 된다. 여기서, SN비를 분산분석을 한 결과는 <Table 4>와 같다[11, 18, 24, 25].

그 결과,  $R^2$ 가 0.998647로서 전체적으로 신뢰성이 높은 것을 알 수 있고, 세부적으로 B인자의 p-value가 유의수준 0.01이하이며, A, C, D, E, F인자는 유의수준 0.05이하인 것을 알 수 있다. 따라서 B인자가 가장 유의하다고 하겠다.

이미 발표된 연구결과에 의하면 흡기계에서의 교호작용은 인자간 상호작용이 미미하고 독립적이어서 고려하지 않았다[16].

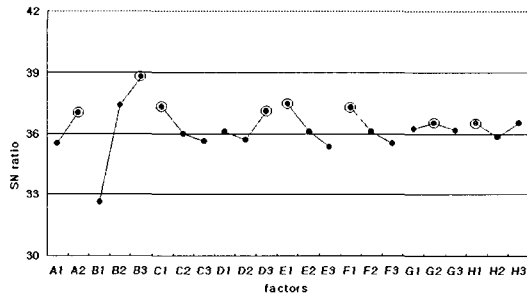
Mean square를 이용하여 각 변수와 수준별 요인효과도를 보면 <Figure 3>과 같다.

각 변수별 최적수준을 살펴보면  $A_2B_3C_1D_3E_1F_1G_2H_1$ 이고, SN비에 민감한 설계변수는 A(a/c의 직경), B(출력관 길이), C(출력관 직

<Table 4> 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		

경), D(a/c의 길이), E(입력관의 길이), F(입력관 직경)임을 알 수 있다.

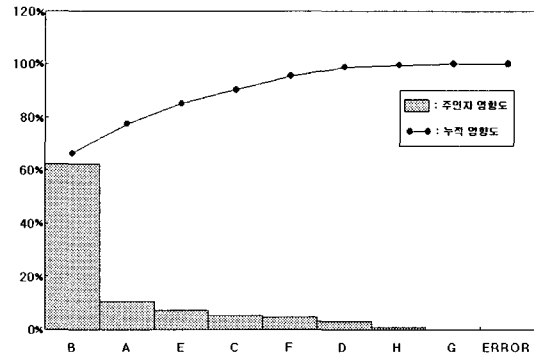


<Figure 3> SN ratio versus control factors (optimal value : ○)

<Figure 4>는 Mean square에 대한 파레토그림을 나타내고 있으며, 여기서 B인자가 다른 인자보다 매우 영향이 있다는 결과를 보여주고 있다. 또한 전체적인 주인자의 경향은 누적영향도 <Figure 4>와 같이 B인자에서 완만하게 100%로 접근하므로써 B인자가 유의수준 내에서 가장 강하게 작용한다는 것을 알 수가 있다.

그리고 유의하지 않은 인자 G, H를 제외한 주인자의 최적화 결과는 <Table 5>와 같다.

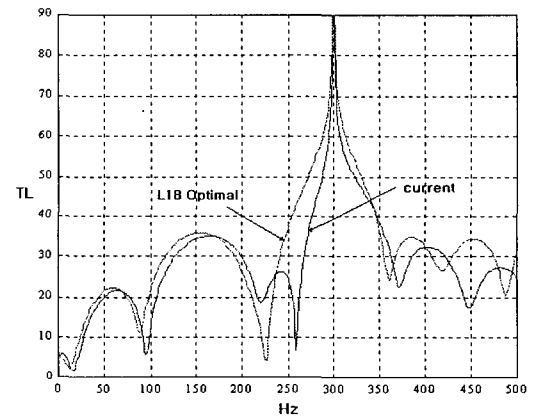
위에서 구한 외적 조건 (A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>D<sub>3</sub>E<sub>1</sub>F<sub>1</sub>)을 적용(G, H인자는 현행수준)하여 흡기계 성능평가 소프트웨어(Oh, J.E., Han, K.H., and Son, D.Y., 1996)로 재해석을 수행한 결과는 <Figure 5>와 같으며, TL의 오버올 레벨이 현재의 설계보다 7.049(dB) 향상된 결과를 얻었다.



<Figure 4> Pareto diagram for mean squares

<Table 5> Optimum specification of an intake system

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

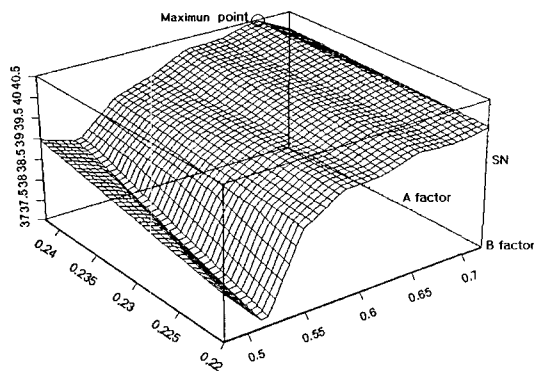


<Figure 5> Comparison between current and L<sub>18</sub> optimal designs(simulation)

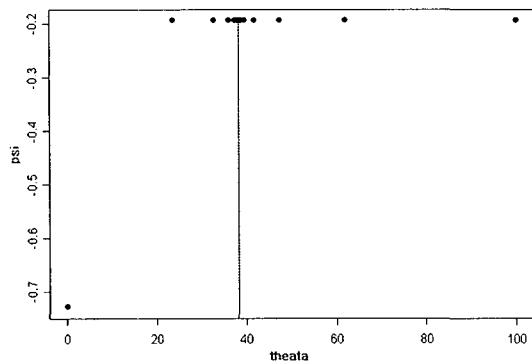
### 3.2 크리깅 기법(Kriging method)을 이용한 설계 및 분석

L<sub>18</sub> 직교배열표를 이용한 분석에서 B인자가 전체의 70%이상 유의하게 작용하고 있으므로 B인자를 세분화한 정확한 분석이 요구

된다. 본 연구에서는 B, A인자를 세분화하기 위해 크리깅 기법(kriging method)을 적용하였다. 다음 C, D, E, F, G, H는 유의하지 않아 현행수준을 유지하였고, 세분화는 인자수준의 최대값과 최소값을 균등하게 30구간으로 분리하여 추정하였다.



<Figure 6> Interpolation graph using kriging method

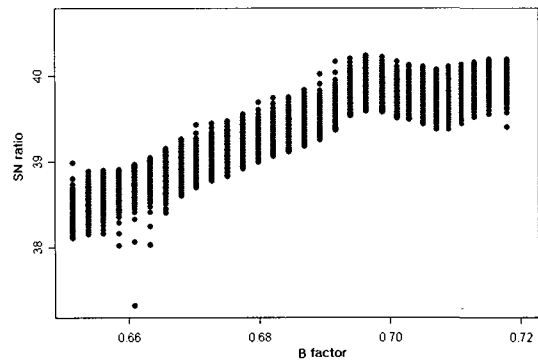


<Figure 7> Maximum likelihood function

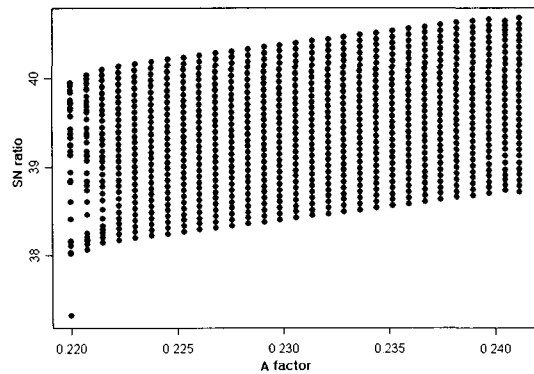
<Figure 6>은 A인자와 B인자에 대한 SN비를 추정(estimation)한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 B인자의 마지막 수준 부근에서 최대값이 결정되는 것을 알 수 있으나, 정확히 마지막 수준이 최대값이 아님을 알 수 있다.

<Figure 7>은 최대우도함수(Maximum Likelihood function)에 의해  $\theta$ 가 수렴하는 것을 보여주고 있고, 여기서 수렴된  $\theta$ 는 38.19666으로 계산되었다.

<Figure 8>은 B인자에 대한 수준별 SN비를 나타낸 요인분석도이다. 위 그림에서도 알 수 있듯이 다구찌 기법적용의 결과처럼 마지막 수준에서 최대값을 가지지 않고, 수준이내에서 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 <Figure 9>은 A인자에 대한 요인 분석도이다. 여기에서는 다구찌기법 적용의 결과와 같이 마지막 수준이 최대값을 갖는 것으로 분석되었다.



<Figure 8> SN ratio versus B factor



<Figure 9> SN ratio versus A factor



<Table 6>은 현행조건,  $L_{18}$  그리고 크리깅기법의 오버올과 SN비를 비교한 것이다. 그 결과, 현행조건에 비해  $L_{18}$ 은 7.049(dB), 크리깅기법은 14.259(dB)이 증가되었다.

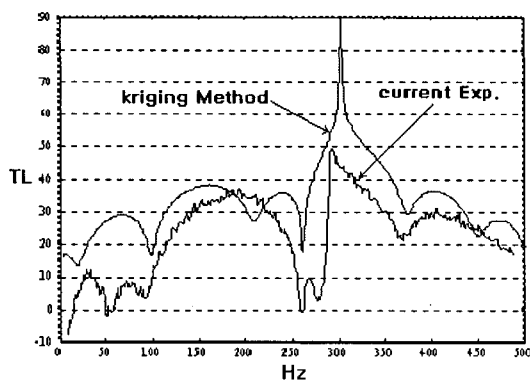
<Table 6> Comparing before and after

Condition	Overall(dB)	SN ratio
Current	93.5337	39.4193
$L_{18}$ optimal	100.5827	40.0504
Kriging Method	107.7927	40.6518

<Table 7>은 B인자와 A인자의 최적수준을 나타낸 것이다. 그 결과를 살펴보면, 최적수준의 값이 강건설계에서와 같이 설정한 수준들 내에서 최적수준이 나오는 것이 아니라, 설정한 수준 외에서도 최적수준을 결정할 수 있다.

<Table 7> Optimum specification of an intake system

Condition	B	A
Current	0.6868828	0.2404828



<Figure 10> Simulation results of transmission loss from kriging method and current exp.

<Figure 10>는 실험치와 크리깅기법을 비교한 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 확연히 증가됨을 알 수 있다.

### 4. 결론

최적화 수행을 위하여 3수준의 혼합 직교 배열모듈과 크리깅 기법을 사용하였다. 실험 설계는 먼저  $L_{18}$  직교배열표를 이용하여 주 인자들을 해석한 후, 그 중 가장 유의한 인자(B)를 크리깅 기법을 이용하여 세분화된 분석을 실시하여 좀 더 유의한 최적조건을 찾을 수 있었다.

본 실험에 있어서 다구찌기법을 이용함으로써 시간을 크게 단축시킬 수 있었다. 또한, 관심있는 인자에 대하여 비선형적 최적화문제의 경우 크리깅기법을 이용하여 좀더 정확한 최적조건을 찾을 수 있었다.

본 논문에서 흡기계의 저소음화 기법의 제안을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 설계에서는 크리깅 기법이라는 새로운 기법을 도입하였다. 이 기법은 기존의 최적화 기법과는 달리 통계적 이론을 바탕으로 상관성이 강하고 비선형적인 문제를 해결하는데 사용될 수 있다. 따라서, 좀 더 이론적으로 명확한 체계적인 방법을 도입함으로써 최적설계에 대한 새로운 방법을 제안하였다.
- 2) 실험치를 직접 최적화에 적용하는 것보다 SN비를 적용하여 최적설계를 하는 것이 자료의 신뢰도 측면에서 더 좋은 결과를 가져온다는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 다구찌기법에 의한 설계변수를 최적화에 적용함으로써 시간을 단축시킬 수 있었고, 그 결과, 보다 개선된 흡기계의 저소음화 기법을 제안할 수 있었다. 또한 비선형적 문

제를 크리깅 기법으로 해결할 수 있었다.

4) A(a/c의 직경), B(출력관 길이), C(출력관 직경), E(입력관의 길이), F(입력관 직경) 설계 변수들이 흡기계의 전달 손실에 민감하였으며, 그 중에서도 B(출력관 길이)가 흡기계 전달 손실에 가장 영향을 미치는 것을 알았다.

5) 기존 설계와 최적화 설계를 비교해 보면 전달손실의 오버올(overall) 값이 현행조건에 비해  $L_{18}$ 은 7.049(dB) 증가하였고, 크리깅 기법은 14.259(dB) 향상된 흡기계를 설계할 수 있었다.

## 감사의 글

Simulator와 데이터 그리고 많은 조언을 아끼지 않은 한양대학교 기계공학부 소음진동연구실에 감사 드립니다.

## References

- [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] Chung, H.S. and Alons, J.J., 2000, Comparison of approximation models with merit functions for design optimization , *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization September 6-8, 2000/ Long Beach, CA, AIAA-2000-4754, pp.381 ~ 391.
- [4] Cochran, W.G. and Cox., G.M., 1957, *Experimental Designs*, Wiley&Sons, New York.
- [5] 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, pp.377-392.
- [6] Cressie, N., 1991, *Statistics for spatial data*, John Wiley & sons, New York, pp.1~143.
- [7] Hwang, W.J., Park, G.J. and Lee, W.I., 1994, "Structural Optimization Post Processing Using Taguchi Method", *JSME, Series A*, Vol. 37, No. 2. pp.166-172.
- [8] 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.
- [9] Krige, D.G., 1951, A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand , *Journal of the chemical, metallurgical and mining society of South Africa*, Vol.52, pp.119~139.
- [10] 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.
- [11] Mason, R.L., Gunst, R.F., and Hess, J.L., 1989, *Statistical Design and Analysis of Experiments*, Wiley&Sons, New York.
- [12] Matheron, G., 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, Vol.58, pp.1246~1266.

- [13] 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.
- [14] Munjal, N.L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, Wiley&Sons, New York.
- [15] 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*, pp.726-732(in Korea).
- [16] 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*, pp. 317-322(in Korea).
- [17] 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, pp. 133-143(in Korea).
- [18] Park, S.K., 1994, "Application of Quality Engineering for Energy Efficiency of Compressor", *The 12th Annual Taguchi Symposium*, Rochester, New York, pp. 199-211.
- [19] 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.
- [20] Sacks, et al., 1989, Design and Analysis of Computer Experiments , *Statistical Science*, Vol.4, No.4, pp.409~435.
- [21] Simpson, T.W., 1998, *A Concept Exploration Method for Product Family Design*, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.
- [22] Taguchi, G., 1991a., *Quality Engineering of Development and Design*, Korea Standard Association, Translated to Korean.
- [23] Taguchi, G., 1991b, *Experimental Designs for Quality Engineering*, Korea Standard Association, Translated to Korean.
- [24] Taguchi, G., 1991c, *Case Studies of Quality Engineering-America and Europe*, Korea Standard Association, Translated to Korean.
- [25] Wang, H.T., Liu, Z.J., Chen, S.X., 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.
- [26] Young, Cheng. 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.