대한기계학회논문집 A권, 제30권 제4호, pp. 465~472, 2006

〈 기술논문 〉

크리깅을 이용한 자동차 흡기계의 소음 저감에 대한 최적 설계

심현진* · 류제선** · 차경준*** · 오재응†

(2005년 7월 8일 접수, 2006년 2월 10일 심사완료)

The Optimal Design for Noise Reduction of the Intake System in Automobile Using Kriging Model

Hyoun-Jin Sim, Je-Seon Ryu, Kyung-Joon Cha and Jae-Eung Oh

Key Words : Intake System(흡기계), Kriging(크리깅), Noise(소음)

Abstract

Recently, the regulations of the government and the concerns of people have rise to the interest in noise pollution levels as compared to other vehicles. In this area, many researchers have studied to reduce this noise in the field of automotive engineering. This paper proposes an optimal design scheme to reduce the noise of the intake system by adapting Kriging with two meta-heuristic techniques. For this, as a measuring tool for the performance of the intake system, the performance prediction software, was used. Then, the length and radius of each component of the current intake system are selected as input variables and the orthogonal arrays is adapted as a space-filling design. With these simulated data, we can estimate a correlation parameter in Kriging by solving the nonlinear problem with a genetic algorithm and find an optimal level for the intake system by optimizing Kriging estimated with simulated annealing. We notice that this optimal design scheme gives noticeable results and is a preferable way to analyze the intake system. Therefore, an optimal design for the intake system is proposed by reducing the noise of its system.

1. 서 론

최근 자동차는 운송수단의 단계를 넘어 생활수준의 향상으로 움직이는 생활 공간의 역할까지 수행하고 있다. 또한 환경 소음 측면에서 국내외적으로 소음에 대한 규제가 강화되고 있어 자동차의 품질 확보가 주요 조건이 되고 있다.

자동차 소음의 주요 원인 중 엔진 소음에 대한 비중이 커지고 그 중에서도 엔진 구동 중 발생되는 흡기계 소음은 실내소음 및 차외소음을 저해하는 요인으로 연구대상이 되고 있다. 일반적으로 자동차 흡기계의 주요 역할은 엔진 내 연소에 필요한 신선한 공기를 공급하는 것이 주요 목적이며, 이러한 과정에서 엔진 구동 시 발생되는 공기 전달음으로 가속시 특히, 500 Hz 이하에서 나타나는 저주파 대역이며 엔진룸에서 발생하여 차음재를 통과, 차실내의 부밍음이 되어 불쾌감을 주기 때문에 이에 대한 대책이 중요하다.

흡기소음에 대한 대책은 엔진룸 설계 후 시행착오적으로 이루어져 공시단축과 경비절감 등에서 매우 불합리할 뿐만 아니라 무리한 소음저감 대책은 악영향을 미치는 결과를 초래하기도 한다. 그러나 전달 행렬 법(transfer matrix method), 음향 유한요소 해석 법(Acoustic FEM) 등의 다양한 해석기법과 시뮬레이터를 이용한 실험기법들이 제안되면서 기존의 흡기 소음저감대책에 대한 불합리성이 많이 개선되고 있다. 그러나 이 또한 기존의 경험에 의존하는 시행착오적 요소를 벗어나지 못해 많은 시간과 비용이 소요되고 있다.

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0452 FAX : (02)2299-3153
* 한양대학교 기계공학과
** 한양대학교 최적설계신기술연구센터
*** 한양대학교 수학과

본 연구에서는 전달 손실을 특성치로 하여 흡기계의 소음 저감 특성을 평가하고, 현 설계관점에서 직교 배열표를 이용한 실험설계 방법과 크리깅 방법을 도입함으로서, 허용되는 경계조건에서 흡기계의 설계 사양 제한 조건을 고려하여 소음저감성능을 높이는 인자들의 비선형적인 최적조건을 찾고자 한다.

본 연구에서 사용된 최적화 기법인 크리깅은 남아프리카 공화국의 광산 기술자였던 D.G. Krige의 이름을 본 따 이름 지어졌으며, 그는 1950년대에 샘플링된 광물질 등급에 기초된 분포로부터 최적의 광물질 등급 분포를 결정하기 위한 경험적 방법을 개발했다. 크리깅의 개념은 먼 거리에 있는 정보보다 가까운 거리에 있는 정보에 더 연관성이 크다는 것이다. 이런 개념을 통해, 크리깅은 시스템적인 예측오차가 없으며, 최소예측분산을 갖게 된다. 이러한 과정을 통하여 데이터를 추정하기 때문에 크리깅은 데이터에 의존하며, 데이터를 부드럽게 연결하는 근사적추정방법인 것이다.

최근에, 크리깅은 전산실험(Design and Analysis of Computer Experiments; DACE) 모형에서 적용되고 있으며, 다분야통합최적설계(multidisciplinary optimal design) 등 공학 분야에 널리 사용되고 있다.

2. 실험대상 및 실험설계 대상

Fig. 1은 본 연구대상인 흡기계의 실제 모형이다. 자동차의 흡기계를 구성하는 요소인 매니폴드, 플리넘, 에어크리너, 파이프, 공명기 중 매니폴드, 플리넘은 엔진성능을 고려하여 실험설계가 이루어져 있으므로 설계인자에서 제외하였다. 파라미터 설계는 강건 설계에서 중요한 직교 배열표와 다구찌 실험계획법을 적용하였다.

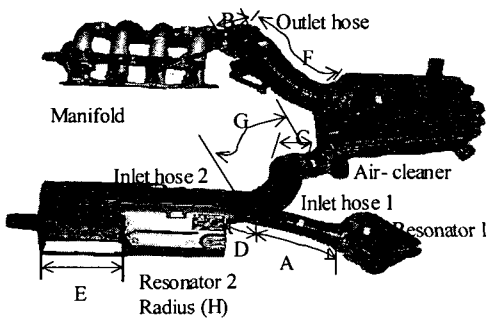

Fig. 1 Overview of intake system

각 설계변수와 수준은 Table 1에서 제시된 바와 같다. 설계변수 A의 경우는 클수록 좋으므로 현재 사양보다 증가된 값을 수준으로 설정하였다. 파라미터 설계는 강건 설계에서 중요한 직교 배열표와 실험계획법을 적용하였다. Table 2는 Table 1에서 설명한 실험인자와 수준에 맞는 혼합

Table 1 Control factors and level

Control Factor Level		Level		
		0	1	2
A	Reso. 1 neck length	0.42	0.32	
B	Outlet hose diameter	0.045	0.065	0.085
C	Inlet hose 1 diameter	0.044	0.056	0.068
D	Position of Reso. 1 between A/C and outlet	0.1	0.05	0
E	F.A.D length	0.065	0.075	0.085
F	Outlet hose length	0.210	0.260	0.310
G	Inlet hose 1 length	0.158	0.208	0.258
H	Reso. 2 neck radius	0.02	0.03	0.04

Table 2 Parameter design using orthogonal array

Factor	A	B	C	D	E	F	G	H	TL
No	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	TL1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	TL2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	TL3
4	1	2	1	1	2	2	3	3	TL4
5	1	2	2	2	3	3	1	1	TL5
6	1	2	3	3	1	1	2	2	TL6
7	1	3	1	2	1	3	2	3	TL7
8	1	3	2	3	2	1	3	1	TL8
9	1	3	3	1	3	2	1	2	TL9
10	2	1	1	3	3	2	2	1	TL10
11	2	1	2	1	1	3	3	2	TL11
12	2	1	3	2	2	1	1	3	TL12
13	2	2	1	2	3	1	3	2	TL13
14	2	2	2	3	1	2	1	3	TL14
15	2	2	3	1	2	3	2	1	TL15
16	2	3	1	3	2	3	1	2	TL16
17	2	3	2	1	3	1	2	3	TL17
18	2	3	3	2	1	2	3	1	TL18

직교배열표 모형을 사용하여 설계한 것이다. 배열에는 Table 1에서 설명한 제어인자(A, B, C, D, E, F, G, H)를 배치하였다. 크리깅 추정값 산출 시에는 구한 TL를 계산하여 새로운 특성치로 삼아 분석을 실시하였다. 여기서 사용한 특성치는 전달손실(TL)이고, 전달손실은 음향요소의 소음특성 및 저감성능을 평가하기 위하여 사용된다. 이는 음향요소만의 에너지손실을 표현하는 것으로서 음향요소의 입출구 사이의 음압비를 dB로 나타낸다. 현재의 TL값은 34.83dB이다. 본 실험에서는 TL값이 커져야 소음이 줄기 때문에 측정값이 클수록 소음 제거에 이상적이다.

3. 크리깅 기법

본 장에서는 자동차 흡기계의 소음을 줄이고자 하는 데에 목적이 있는 바, 이에 적용하기 위한 크리깅 방법의 수학적 모형과 크리깅 추정량 산출방법에 대하여 살펴보고, 이에 대한 산출과정을 정리한다. 또한, 크리깅 추정량을 산출하기 위한 방법으로서 메타 휴리스틱 방법(김여근 등, 1997)인 유전자 알고리즘과 담금질 모사기법을 적용하였다.

3.1 수학적 모형

컴퓨터 실험에서 관측값은 입력값 $\boldsymbol{x}$의 여러 가지 선택에 따라 그 모형을 수행함으로써 반응함수 $\boldsymbol{y}$로서 생성된다. 즉, 주어진 입력 변수 $\boldsymbol{X}$에 대하여 수치적으로 미분연산자를 이용하여 반응변수 $\boldsymbol{Y}$에 대한 예측값을 얻을 수 있다.

Sacks 등은 전산실험에서의 모형을 다음과 같은 선형모형(linear model)과 잔차(departure)의 합으로 표현하였다. 즉,

$$\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + \delta(\boldsymbol{x}) \qquad (1)$$

여기에서 $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{x})$는 관심 있는 미지의 함수이며, $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$는 $\boldsymbol{x}$의 선형함수(linear function)이고 $\delta(\boldsymbol{x})$는 평균이 0, 분산이 σ^2, 공분산이 0이 아닌 확률 과정의 실현값이다. 식 (1)의 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$는 반응 표면(response surface)에서의 다항 모형(polynomial model)과 비슷한 형태를 가지며, 설계공간(design space)에서 전역적(global)인 모형이다. 또한, $\delta(\boldsymbol{x})$는 전역적 모형으로부터 나온 지역적 편차(localized deviation)를 표현하고 있으며, 이로 인하여 전산실험 모형은 n개의 추출된 데이터 점을 보간하고, 부드럽게 연결하는 모형이 된다.

3.2 상관함수

식 (1)에서의 $\delta(\boldsymbol{x})$의 공분산 행렬은

$Cov[\delta(\boldsymbol{x}^i), \delta(\boldsymbol{x}^j)] = \sigma^2 \boldsymbol{R}[R(\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{x}^j)]$ 으로 표현될 수 있으며, 이때 $\boldsymbol{R}$은 상관행렬(correlation matrix)이고 $R(\cdot, \cdot)$은 n개의 추출된 데이터 점들 중 두 점 $\boldsymbol{x}^i$와 $\boldsymbol{x}^j$ 사이에서의 상관함수(correlation function)이다. 따라서, $\boldsymbol{R}$은 대각이 모두 1인 $(n \times n)$ 대칭이며, 양정치 행렬(positive definite matrix)이 되도록 상관함수에 대하여 제안된 특정 모형들이 있으며, 사용자에 의해 결정된다 (Sacks 등, 1989; Mitchell 등, 1992). 여기에서, n_{dv}는 설계 변수(design variable)의 개수이며, Θ_k는 모형에 적합하도록 사용되어지는 미지의 상관계수이고, $d_k = |\boldsymbol{x}_{k^i} - \boldsymbol{x}_{k^j}|$는 두 점 $\boldsymbol{x}^i$와 $\boldsymbol{x}^j$의 k번째 요소 사이에서의 거리이다.

또 다른 관심있는 용어로서 관측된 지점 $\boldsymbol{x}^1, \cdots, \boldsymbol{x}^n$와 추정하려는 지점 $\boldsymbol{x}^0$에서의 반응값 사이에서의 상관벡터 $\boldsymbol{r}(\boldsymbol{x}^0)$가 있으며, 이는 $\boldsymbol{r}(\boldsymbol{x}^0) = [R(\boldsymbol{x}^0, \boldsymbol{x}^1), \cdots, R(\boldsymbol{x}^0, \boldsymbol{x}^n)]$으로 표현되어진다.

3.3 크리깅 추정량

식 (1)은 미지의 추정되어야 할 참값을 의미하고 있으며, 계산되어지는(즉, 가정되어지는) 모형은 $\hat{y}(\boldsymbol{x}^0) = E[y(\boldsymbol{x}^0) | y(\boldsymbol{x}^1), \cdots, y(\boldsymbol{x}^n)]$로서 정의된다. $y(\boldsymbol{x}^1), \cdots, y(\boldsymbol{x}^n)$는 n개의 관측된 반응값이고 $y(\boldsymbol{x}^0)$는 추정하기 위한 지점 $\boldsymbol{x}^0$에서의 반응값이며, $\hat{y}(\boldsymbol{x}^0)$는 $y(\boldsymbol{x}^0)$의 추정량이다. 설계 변수 $\boldsymbol{x} = \{\boldsymbol{x}^1, \cdots, \boldsymbol{x}^n\}$와 반응값 $\boldsymbol{y}_x = \{y(\boldsymbol{x}^1), \cdots, y(\boldsymbol{x}^n)\}$이 주어져 있을 때, 관측되지 않은 입력값 $\boldsymbol{x}^0$에서의 반응값 $y(\boldsymbol{x}^0)$의 선형 예측 모형

$$\hat{y}(\boldsymbol{x}^0) = \boldsymbol{c}'(\boldsymbol{x}^0)\boldsymbol{y}_x \qquad (2)$$

를 고려해 보자. 이때, $\hat{y}(\boldsymbol{x}^0)$를 확률적(random)이라고 가정하며, 확률 과정에 대하여 예측값의 평균제곱 오차를 최소화하는 과정을 고려한다. 즉, $\hat{y}(\boldsymbol{x}^0)$의 평균 제곱 오차

$$MSE[\hat{y}(\boldsymbol{x}^0)] = E[\boldsymbol{c}(\boldsymbol{x}^0)\boldsymbol{y}_x - y(\boldsymbol{x}^0)]^2 \qquad (3)$$

을 최소화하도록 $n\times 1$ 벡터 $c(x^0)$를 선택함으로써 얻어진다. 이제, 임의의 k에 대해,

$f'(x^0) = [f_1(x^0), \cdots, f_k(x^0)]$,

그리고

$$F = \begin{pmatrix} f'(x^1) \\ \vdots \\ f'(x^n) \end{pmatrix},$$

이라 하면, 식 (2)에 의하여 식 (3)은

$$E[c'(x^0)y_x - y(x^0)]^2 = (c'(x^0)F\beta - f'(x^0)\beta)^2 + \sigma^2[1 + c'(x^0)Rc(x^0) - 2c'(x^0)r(x^0)]$$

이 되고, 불편 제한 조건은

$$F'c(x^0) = f(x^0) \tag{4}$$

이므로,

$$MSE[\hat{y}(x^0)] = \sigma^2[1 + c'(x^0)Rc(x^0) - 2c'(x^0)r(x^0)]$$

이다. 식 (4)와 라그랑지 승수 $\mu(x^0)$을 이용하여

$$\sigma^2[1 + c'(x^0)Rc(x^0) - 2c'(x^0)r(x^0)] - \mu(x^0)(F'c(x^0) - f(x^0))$$

를 최소화하도록 $c(x^0)$에 관하여 편미분하면

$$Rc(x^0) - r(x^0) - \mu(x^0)F = 0$$

이며, 이를 행렬로 표현하면

$$\begin{bmatrix} 0 & F' \\ F & R \end{bmatrix}\begin{pmatrix} -\mu(x^0) \\ c(x^0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x^0) \\ r(x^0) \end{pmatrix}$$

이다.

따라서, $y(x^0)$의 최량 선형 비편향 추정량 $\hat{y}(x^0)$는

$$\hat{y}(x^0) = f'(x^0)\hat{\beta} + r'(x^0)R^{-1}(y_x - F\hat{\beta}) \tag{5}$$

이다. 여기서 $\hat{\beta} = (F'R^{-1}F)^{-1}F'R^{-1}y_x$은 회귀 계수 β의 일반화된 최소 제곱 추정량이다. 식 (5)에서의 두 항은 상호 연관되어 있지 않으며, 두 번째 항은 잔차의 부드러운 면으로 해석되어질 수 있다. 그러므로 최적값은 다음의 두 관계로 보여질 수 있다. 즉, 일반화된 최소제곱 예측값을 얻은 다음 회귀모형이 없는 것처럼 잔차를 보간하게 된다. 마지막으로 상관인자 θ_k를 결정함으로써 최종적인 크리깅 모형을 결정할 수 있다. θ_k는 어떠한 값을 취하든지 각 실험점들을 보간하는 크리깅 모형을 얻어낼 수는 있지만 가장 적합한 크리깅 모형은 최대우도 추정법 (maximum likelihood estimation) 과정을 통해 결정하게 된다. (Booker 등, 1996)

3.4 최대우도 추정법

최대 우도 추정법은 각 데이터 점에서의 오차가 정규분포를 따른다고 가정할 수 있는 경우, 이러한 오차들을 최소화 할 수 있는 인자들을 결정할 때 사용되는 추정법으로서, n개의 실험점들을 이용하여 특정 인자 θ를 결정하고자 할 경우에는 다음과 같이 우도함수(likelihood function)을 얻어낼 수 있다. 즉, 우도함수는 $L(x^1,\cdots,x^n;\theta) = f(x^1;\theta)\cdots f(x^n;\theta)$이고, 여기서, $f(\cdot)$는 정규 분포의 확률 밀도 함수를 나타내고 있으며 우도함수가 클수록 확률적으로 보다 나은 모형을 얻어낼 수가 있다. 크리깅의 경우에는 다음과 같은 우도함수를 얻을 수 있다.

$$L(x^1,\cdots,x^n;\beta,\sigma^2) = \frac{\exp\left(-\frac{(y-f\beta)'R^{-1}(y-f\beta)}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{\sigma^{2n}|R|}} \tag{6}$$

식 (6)을 최대화시키는 β와 분산 σ^2의 추정값은 일반화된 최소제곱법(generalized least square method)을 사용하여 유도해 낼 수가 있다. 이와 같이 유도된 β의 추정값은 $\hat{\beta}$을 적용하고 σ^2의 추정값은 다음과 같이 산출할 수 있다. 즉, σ^2의 최대우도 추정량을 산출하기 위해 식 (6)을 σ^2에 관해 편미분하여 정리하면, σ^2의 최대우도 추정량 $\hat{\sigma^2}$은

$$\hat{\sigma^2} = \frac{(y-f\hat{\beta})'R^{-1}(y-f\hat{\beta})}{n} \tag{7}$$

이다. 미지의 상관인자인 Θ_k, $k = 1, 2, \cdots, n_{dv}$는 식 (6)의 분모항을 최소화시키는 값으로 최적화 문제를 통해 결정된다. 즉 식 (7)을 식 (6)에 대입하면, $\Theta = (\Theta_1, \Theta_2, \cdots, \Theta_{n_{dv}}) \in R^{dv}$에 대하여,

$$\phi(\Theta) = -\sigma^2 \times |R|^{1/n} \tag{8}$$

을 최대화하는 문제와 같다. 이때, 모든 k에 대하여 $\Theta_k > 0$이다.

3.5 유전자알고리즘을 적용한 상관함수의 계수

본 연구에서는 유전자 알고리즘 방법을 사용하

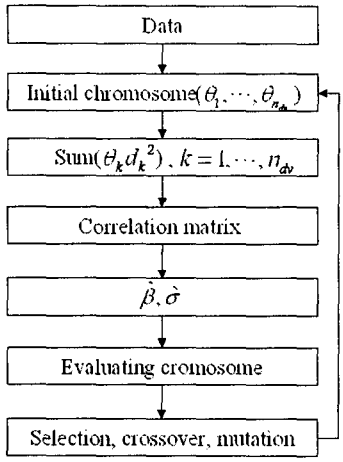

Fig. 2 A flow chart of genetic algorithm for estimating Gaussian correlation function coefficient

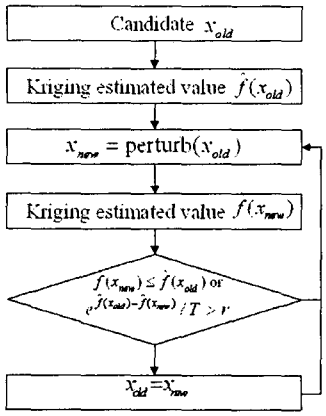

Fig. 3 A flow chart of simulated annealing for finding the optimal level

여 식 (8)의 최적화 문제를 해결하였다.

우선, 상관함수의 계수를 추정하기 위하여 반변이도 모형 추정 방법과는 달리 데이터로부터 직접적으로 산출한다. 최적의 상관계수를 결정하기 위해 초기 염색체 모집단을 구성한다. 각 염색체는 데이터에서의 설계변수의 개수 n_{dv}에 대하여 $(\theta_1, \cdots, \theta_{n_{dv}})$와 같이 구성되며, 염색체 후보는 염색체의 수 m개만큼 생성된다. 이때, 상관계수의 선택범위가 결정되어 있어야 하며, 범위내 난수를 후보 염색체로서 구성한다.

다음으로 반복계산의 수 gen이 결정되면, 두 개의 지점 $\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{x}^j$, $i, j = 1, 2, \cdots, n$에서의 k번째 원소 $\boldsymbol{x}_k^i$와 $\boldsymbol{x}_k^j$에 대하여 거리 d_k를 산출하고, 후보 염색체와의 곱 $\theta_k d_k$을 계산한다. 모든 k에 대하여 $\sum\theta_k d_k$을 산출하면, 상관행렬 $\boldsymbol{R}$의 (i, j)번째 원소를 구할 수 있다. 위와 같이, 모든 점에 대하여 두 개의 지점별 거리를 구할 수 있고, 따라서 상관행렬 $\boldsymbol{R}$을 산출할 수 있다. 이제, 식 (8)의 목적함수 $\phi(\theta)$를 최대화하는 $\theta = (\theta_1, \cdots, \theta_{n_{dv}})$를 얻기 위해 일반화된 회귀계수$\hat{\beta}$을 산출하고, 이를 통해 식 (7)에서의$\hat{\sigma^2}$를 산출한다. 다음으로 목적 함수 $\phi(\theta)$ 의 값을 산출하게 된다. 이 과정이 염색체를 평가하는 과정이다.

선택과 교배, 그리고 돌연변이 과정은 좋은 형질의 염색체는 그대로 선택하고 나머지는 확률적으로 확률바퀴방법을 적용하였으며, 확률바퀴방법에 따라 선택된 유전자에 대하여는 산술적 교배 방법을, 그리고 돌연변이 연산자로는 균등 돌연변이 연산을 시행하였다. 이러한 계산은 주어진 횟수에 따라 반복 계산되며, 평가과정에서 목적함수가 향상되면 이를 계속해서 업그레이드 하여 최종 결과값으로 리턴시킨다. 이에 대한 수행과정은 Fig. 2과 같다.

3.6 최적수준 탐색에서의 담금질 모사 기법 적용

3.5절에서 최적의 상관계수를 산출하면, 이를 통해 최적의 상관행렬의 함수 $\boldsymbol{R}$을 결정하고, 이를 통해 임의의 새로운 지점과 관측지점과의 상관벡터 $\boldsymbol{r}$을 결정하며, 크리깅 추정량을 산출한다. 샘플링된 지점으로부터 최적의 상관계수를 결정하여 Fig. 2의 프로세스를 통해 상관함수 $\boldsymbol{R}$이 산출된다. 다음으로, 새로운 지점 $\boldsymbol{x}$를 결정한다. $\boldsymbol{x}$는 설계공간에서 임의의 점으로 선택하고, 새로운 지점과 관측지점과의 상관벡터 $\boldsymbol{r}$을 결정할 수 있으며, 데이터와 상관함수 $\boldsymbol{R}$로부터 크리깅 추정량을 산출하게 된다.

온도 스케줄링 과정에서 초기온도 T와 최저온도 Tmin 그리고 온도 변화율 Tr을 결정한다. Tr은 온도의 하강 속도를 의미하며, 보통 0.95와 0.99에서 결정된다. 내부루프 L은 1로 결정하였는데, 이는 온도 스케줄링 과정에서 온도의 하강 수준을 약하게 하여, 충분한 회수의 수행을 함으

로써 내부루프의 과정은 생략하는 의미가 된다.

다음으로, 초기값 $\boldsymbol{x}$주변에 있는 $\boldsymbol{y}$의 값을 선택하는데, $\boldsymbol{x}$의 각 원소 x_i, $i = 1, \cdots, n_{dv}$에 대하여 y_i는 평균이 x_i이고, 분산은 설계 변수 영역 내에서의 일양 분포(uniform distribution)의 분산으로 하는 정규분포를 따른 난수를 발생시킴으로써 결정되도록 하였다.

즉, $y_k = x_k + rnorm(0, (b_k - a_k)^2/12)$, 여기에서 y_k는 $\boldsymbol{y}$의 k번째 요소이고, x_k는 $\boldsymbol{x}$의 k번째 요소이며, a_k와 b_k는 k번째 설계변수 영역의 최소값과 최대값이다.

또한 $rnorm(\mu, \sigma^2)$는 평균이 μ, 분산이 σ^2인 정규분포를 따르는 난수이다. 따라서, 새로운 값 $\boldsymbol{y}$에서도 마찬가지로, 샘플링된 지점 사이에서의 상관함수 벡터 $\boldsymbol{r}$을 산출하고, 크리깅 추정량을 산출하게 된다. 마지막으로, 두 점 $\boldsymbol{x}$와 $\boldsymbol{y}$에서의 크리깅 추정값을 비교하고, 새로운 점이 크거나, 볼쯔만 확률값이 임의의 난수보다 클 때(즉, 확률적으로), 새로운 값은 기존의 값 x로 대체된다. 이러한 과정을 통해 실험에서의 최적수준을 얻게 된다. 이에 대한 수행과정은 Fig. 3와 같다.(Metropolis 등, 1953, 윤여근 등, 1997).

4. 분석결과

4.1 흡기계 데이터에서의 상관함수 추정

수학적 함수에서의 최적화를 적용 시와 같이 최적의 상관 계수 $\theta = (\theta_1, \cdots, \theta_n)$을 결정하기 위해 유전자알고리즘을 적용할 때의 염색체의 수는 $m = 50$, 그리고 세대수 $gen = 1000$으로 하였고, 식 (8)에서의 목적함수 $\phi(\theta)$를 최대화하도록 하였다. 선택 과정에서는 (0, 1)에서의 난수 r을 발생시킨 후, $[20 \times r]$ 개수는 우수한 형질의 염색체를 그대로 유전시키고, 나머지는 확률적으로 선택하도록 하였다. 여기에서 [·]은 · 를 넘지 않는 최대 정수이다. 교배 연산자의 가중치는 $a = 0.2$, 교배율 $p_c = 0.05$, 그리고 돌연변이율은 $p_e = 0.1$로 하였다.

Fig. 4 는 흡기계 데이터에서의 상관함수의 계수 추정에서의 세대별 진화과정을 보여주고 있다. 이를 통해 최적의 상관계수는 Table 3과 같은 결과를 얻었으며, 목적함수 $\phi(\theta)$의 값은 -0.3118

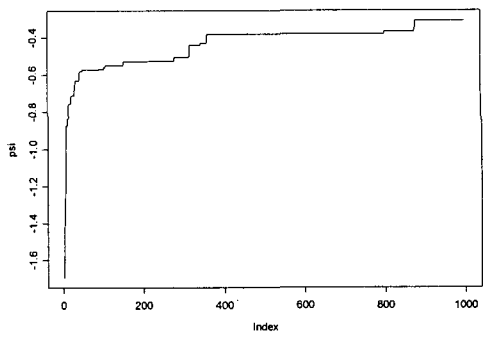

Fig. 4 The evolutionary process of objective function values as the generation is increased

Table 3 An optimal correlation parameter

	A	B	C	D
Correlation Parameter	0.0425	0.2789	0.0921	0.0037
	E	F	G	H
Correlation Parameter	0.0106	0.0055	0.0124	0.1077

Table 4 An optimal level of the intake system

	A	B	C	D
optimal level	0.7401	0.0716	0.3257	1.3058
	E	F	G	H
optimal level	0.5845	1.2823	1.6117	1.9806

이었다.

4.2 담금질 모사기법을 적용한 저소음 흡기계 인자의 선택

위에서 결정된 상관함수의 계수를 이용하여 식 (5)에서의 크리깅 산출식과 담금질 모사기법을 적용하여 흡기계에서의 최적수준을 산출하면 아래의 Table 4와 같다. 담금질 모사기법을 적용시 초기온도 T는 1, 그리고 온도 하강율은 많은 수행과정을 반복하기 위해 Tr은 0.9999, 최저온도 Tmin은 10-6으로 하였다.

위에서 구한 최적수준을 적용하여 흡기계 성능평가 소프트웨어로 재해석을 위해 실제 TL값을 산출한다. 본 연구에서 사용된 흡기계 성능평가 소프트웨어의 신뢰성을 검증하기 위해서 흡기계의 TL값을 실험을 통하여 구할 수 있다. 수행한 결과는 Fig. 5 과 같으며, TL의 오버올 레벨이

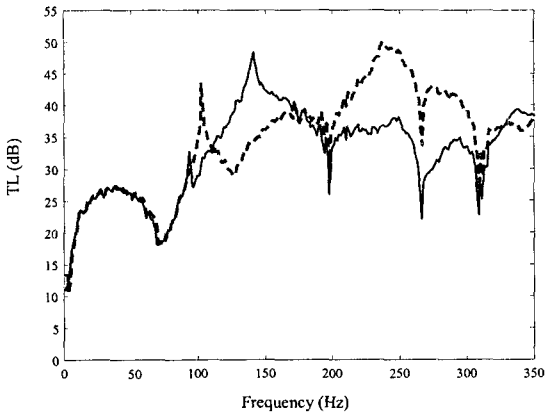

Fig. 5 Simulation results of transmission loss from Kriging method and current exp. (solid line: original value, doted line: optimum value)

현재의 실험설계보다 5.5dB 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

최적화 수행을 위하여 실험설계는 먼저 직교배열표를 이용하여 주요 인자들을 해석한 후, 크리깅 추정량을 산출하여 유의한 최적조건을 찾을 수 있었다.

본 논문에서 흡기계의 저소음화 최적화 기법을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 본 설계에서는 크리깅 방법을 도입하였다. 이 방법은 기존의 최적화 방법과는 달리 통계적 이론을 바탕으로 상관성이 강하고 비선형적인 문제를 해결하는 데에 사용될 수 있다. 따라서 좀 더 이론적으로 명확한 방법을 도입함으로서 최적설계에 대한 새로운 방법을 제안하였다.

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

(3) 흡기계 최적설계문제에서 상관함수의 계수의 최적값을 적용하여 최적수준을 결정한 결과 흡기계의 TL값은 현재의 설계보다 5.5dB 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

향후 보완해야 할 점으로는 최적화의 목적함수로 현재 이 시스템에서 관심 스펙트럼 대역 내에서 TL의 평균량으로 정하였지만, 소음원에 따라 일정 스펙트럼 대역을 설정하고 특정 주파수 영역의 TL을 증가시키는 방향으로 접근하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Kim, Y.G., Youn, B. S. and Lee, S.B., 1997, "Meta-Heuristic Methods," Young-Gi co.

(2) Cha, K. J., Park, Y. S., Ryu, J. S., Jin, J. U., 2002, "The Kriging Method with Robust Design for Low Noise Intake System," *The Korean Society for Quality Management*, Vol. 30, No. 1, pp. 133~143.

(3) Bacchi, B. and Kottegoda, N.T., 1995, "Indentification and Calibration of Spatial Correlation Patterns of Rain Fall Journal of Hydrology," Vol. 165, pp. 311~348.

(4) Booker, A.J., 1996, "Case Studies in Design and Analysis of Computer Experiments. Proceedongs of the Section on Physical and Engineering Sciences," *American Statistical Association.*

(5) Booker. "Multi-level Design Optimization: A Boeing/IBM/Rice Collaborative Project. 1996 Final Report," ISSTECH -96-031, The Boeing Company, Seattle, WA.

(6) Chambers, L., 1994, "Practical Handbook of Genetic Algorithm," CRC Press.

(7) Chen, W., Jin, R. and Simpson, T.W., 2002, "Comparative Studies of Meta-Modeling Techniques Under Multiple Modeling Criteria. 8th ALAA /USAF /NASA/ISSMO Symposium on Multidiscriplinary Analysis and Optimization," AIAA-2000-4801.

(8) Davis, L.. 1991, "Handbook of Genetic Algorithm," Van Nostrand Reinhold.

(9) Deceneiere, E., Fouquet, C. and Meyer, F., 1998, "Applications of Kriging to Image Sequence Cooling," *Singnal processing; Image communication*, Vol. 13, pp. 227~249.

(10) Guinta, A.A.,, 1997, "Aircraft Multidisciplinary Design Optimization Using Design of Experiments Theory and Response Surface Modeling, Ph. D. Dissertation and MAD Center Report No. 97-05-01," Department of Aerospace and Ocean Engineering, Virginia, Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.

(11) 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.

(12) Kim, J.K., 1999, "Optimum Design of a Heat-Exchanger-Fan Casing of Clothe Using the Taguchimethod," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 12, pp.962~972.

(13) 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.

(14) Lawton, G., 1992, "Genetic Algorithms for Scheduling Optimization. AI Expert"

(15) 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.

(16) Mardia, 1996, "Kriging and Splines with Derivative Information," *Biometrica*, Vol. 83, pp. 207~221.

(17) Matheron, G., 1962, "Traite de Geotatistique Appliquee. Tome I," *Memoires du Burean de Recherches Geologigues et Minieres*, Vol. 14, Editions Technip, Paris

(18) Matheron, G., 1969, "Le Krigeage Universel," *Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique*, Vol. 1, Fontainebleau, France

(19) Matheron, G., 1971, "The Theory of Regionalized Variables and its Applications," *Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique*, Vol. 5, Fontainebleau, France.

(20) Metropolis, N., Rosenbluth, M. and Rosenbluth, A, 1953, "Teller and E. Teller Equation of State Calculations by Fast Computing Machines," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, pp. 1087~1092.

(21) 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.

(22) Oh, J.E., Han, K.H. and Lee, J.C, 1995, "Analysis and Advance for Performance of the Muffler of a Passenger Car," *Proceedings of Spring Conference*, pp. 726~732.

(23) Oh, J.E., Han, K.H. and Son, D.Y. 1996, "The Design Technique for Low-Noise Intake System of Vehicle," *Proceedings of Autumn Conference, Korean Society of Automotive Engineering*, pp. 317~322.

(24) Piazza, 1983, "The Making and Testing of Geographic Gene-Frequency Maps," *Biometrics*, Vol. 37, pp. 635~659.

(25) Ryu, J.S., Kim, M.S., Cha, K.J., Lee, T.H. and Choi, D.H., 2002, "Kriging Interpolation Methods in Geostatistics and DACE Model," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 5, pp. 619~632.

(26) Sacks, J., Welch, W.J., Mitchell, T.J. and Wynn, P.H., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 409~435.

(27) Sasena. M.J., 1998, "Optimization of Computer Simulations via Smoothing Splines and Kriging Metamodels," M.S.Thesis, Department of Mechanical Engineering. University of Michigan, Ann Arbor, MI.

(28) Simpson, T.W., Peplinski, J.D., Koch, P.N. and Allen. J.K., 1997, "On the use of Statistics Indesign and the Implications for Deterministic Computer Experiments," *ASME Design Engineering Technical Conferences*, Sept. 14-17,1997, Sacramento, California.

(29) Simpson, T.W., 1998, "A Concept Exploration Method for Product Family Design," Ph.D. Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, Georgia Instiute of Technology.

(30) Srinivas, M. and Patnaik, L., 1994, "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Systems Man and Cybernetics*.

(31) Webster, R., 1985, "Quantitative Spatial Analysis of Soil in the Field. Advances is Soil Science. 3," B.A. Stewart(ed.), New York, Springer Verlag, pp. 1~70.