

## 다구찌 실험법을 이용한 압력용기 메탈시일 구조물의 최적화 설계

† 김 청 균 · 조 승 현

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
(2004년 5월 18일 접수, 2004년 10월 4일 채택)

### Optimized Design of Metal Seal Structure for a Pressure Vessel using Taguchi's Experimental Method

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho

Department of Mechanical and System Design Engineering

Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received 18 May 2004 ; Accepted 4 October 2004)

#### 요 약

본 논문은 다구찌 실험 설계법을 이용하여 압력용기의 메탈시일 구조물에 대한 해석을 수행하였다. 다구찌 설계방법은 압력용기의 밀봉을 위한 캔틸레버 타입 밀봉장치 구조물에 대한 설계 파라미터를 최적화 하는데 대단히 유용하다. 다구찌 기법으로 수행된 해석결과에 따르면, 최적화 설계 치수는 단지 16번의 반복 실험법에 의해 파라미터 치수를 최적의 조건으로 얻을 수 있다는 측면에서 간편한 설계도구이다. 이것은 다구찌 설계 실험법이 곡선면을 갖는 구조물의 최적화 설계에서 대단히 유용하다는 것을 의미한다. 다구찌 설계기법에 기초한 해석결과를 보면, 메탈시일 구조물의 에지부에 대한 최적화 치수와 경사각도는  $d_1=50\text{mm}$ ,  $d_2=60\text{mm}$ ,  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=8^\circ$ ,  $\alpha_3=5^\circ$ 으로 각각 요약될 수 있다.

**Abstract** - In this paper, the metal seal for a pressure vessel has been analyzed using the Daguchi method. This method may efficiently optimize the design parameters for a cantilever sealing device of a pressure vessel in terms of dimensions and angles. The computed results indicate that the optimized design parameters can only be drawn by sixteen experimental numbers of iterations when the Daguchi design technique has been employed. This means that the Daguchi design method is very useful for the optimization design of the curved design of the structure. Based on the computed results by the Daguchi design technique, the dimension and angle of the metal seal structure are given as  $d_1=50\text{mm}$ ,  $d_2=60\text{mm}$ ,  $\alpha_1=20^\circ$ ,  $\alpha_2=8^\circ$ , and  $\alpha_3=5^\circ$ .

**Key words** : Daguchi design method, Pressure vessel, Metal seal, SN ratio

#### 1. 서 론

압력용기(pressure vessel)는 내부압력을 대기압력에 비하여 높게 유지할 수 있도록 제작된 용기 구조물로 산업용 압력장치를 비롯하여 가스용기 등에서 특히 많이 활용되고 있다. 보통은 액체 또는 기체를 작동유체로 사용하여 t

압력용기의 시스템을 구성하는 사례가 대단히 많다. 특히, 가스를 연료로 사용하는 현재의 에너지 소비 패턴과 고온·고압의 압력상태에서 사용하는 산업설비[1]가 늘어나면서 압력용기에 의한 사고와 설계의 어려움은 크게 증가하였다. 압력용기는 사용하는 온도조건, 특히 압력조건에 의해 저압용기, 중압용기, 고압용기, 초고

압 용기 등으로 분류할 수 있다. 압력용기에서 탱크의 압력을 일정하게 유지하기 위해서는 구조물과 구조물을 연결하는 접촉부에는 불가피하게 밀봉장치를 설치해야 용기의 압력을 일정하게 유지하고, 동시에 안전하게 사용할 수 있다. 압력용기에서 사고 위험성이 가장 높은 곳은 밀봉장치와 호스 연결부로, 이들 부품에 대한 설계는 엄격하게 유지되어야 안전하다.

용기의 압력이 높아질수록 구조물의 연결부에 설치된 밀봉장치의 역할을 안전성 측면에서 대단히 중요하게 취급하고 있다[2]. 압력용기 밀봉장치의 역할이 우수하지 못하면, 용기는 저장된 유체의 압력유출에 따른 시스템의 성능을 떨어뜨리고, 용기의 안전성은 크게 약화되어 안전상의 문제점을 많이 노출하게 된다. 즉, 압력용기의 밀봉장치 기능이 약화되면, 압력용기는 내부의 압력을 안정적으로 유지할 수 없으므로 압력용기의 역할을 상실하게 된다.

압력용기의 내부압력을 일정하게 유지하기 위해서 대부분은 폴리머 소재를 사용한 접촉 밀봉방식을 채택하지만, 고압 또는 초고압 용기의 압력은 폴리머 소재로 완벽하게 차단할 수 없기 때문에 강성도가 높은 메탈소재를 사용하여 접촉밀봉을 한다. 용기에서 접촉방식의 밀봉은 모두 밀봉재로 사용하는 소재의 탄성을 이용한 것이므로 소재가 갖고 있는 탄성 히스테리시스(elastic hysteresis) 특성은 대단히 중요하다. 소재의 탄성이 우수하지 못하면 압력용기의 반복적 사용에 따른 내구성과 밀봉성이 문제가 되므로 압력용기에 사용하는 밀봉장치는 특히 소재의 선정에 큰 비중을 두고 다루면서 최적화 설계를 추진해야 압력용기의 밀봉 안전성을 보장할 수 있게 된다.

본 연구에서는 초고압 상태에서 사용중인 압력용기의 밀봉장치에 대한 설계 안전성을 확보하기 위한 수치적 연구로 초고압 용기의 밀봉을 위해 사용하는 메탈시일 구조물의 설계특성을 고찰하고자 한다. 메탈을 사용한 밀봉 메카니즘은 설계기술로 소재의 제한된 탄성을 적극적으로 활용하지만, 탄성 중합체인 폴리머 소재에 비하여 탄성 복원 에너지가 현저하게 떨어진다. 따라서, 메탈소재를 사용한 접촉식 밀봉 구조물에 대한 접촉응력을 해석하기 위해 유한요소법(FEM)과 다구찌 실험방식(Taguchi's experimental method)을 이용한 최적화 설계기술로 구조물에 대한 설계 안전성을 확보하는 것이 가장 효과적인 설계기법이라 생각되어 수치적 복합연구를 추진하고자 한다.

## 2. 수치해석적 연구

### 2.1. 해석모델

본 연구에서 사용된 압력용기의 구조와 밀봉 형상은 Fig. 1과 같다. 즉, 압력용기의 몸체는 상부의 플랜지에 의해 분리되고, 플랜지와 몸체 사이에는 메탈시일 구조물을 설치하여 압력용기의 밀봉을 유지할 수 있도록 제작하였다. Fig. 1(b)은 캔티레버 형상의 메탈시일 구조물로 탄성변형에 의한 밀봉 메카니즘을 충분히 보유할 수 있도록 설계하였고, 메탈시일 구조물의 하단부는 압력탱크에 저장된 내부 압력과 온도의 변동에 의한 하중을 받게 된다.

메탈시일 소재는 압력과 온도에 따른 굽힘 모멘트와 변형거동에 적용하기 용이한 알루미늄 소재를 사용하였고, 소재의 탄성과 열특성을 최대한 활용하여 플랜지와 메탈시일이 접촉하는 에지부의 접촉강도를 안전적으로 유지하도록 하였다. 알루미늄 소재의 항복강도가 315MPa이라는 점과 메탈시일이 시스템의 안전성에서 차지하는 비중을 감안하여 탱크 내부의 가스압력과 온도조건을 고려하여 기준값을 조절하였다. 따라서, 본 연구에서는 압력탱크 내부의 최고압력을 200MPa(=2000bar)로 결정함으로써 알루미늄 소재의 항복응력보다는 높은 250MPa를 기준 목표로 정하여 메탈시일 구조물의 설계 안전성을 확보토록 하였다. 압력용기의 메탈시일 소재로 사용한 알루미늄 구조물의 기계적, 열적 특성치를 Table 1에서 제시하고 있다.

Table 1. Mechanical and thermal properties of an aluminium.

Properties	Values
Elasticity module [GPa]	79
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2,680
poisson's ratio	0.34
Yield strength [MPa]	315
Thermal expansion coefficient [ $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]	21
Thermal conductivity [W/m · K]	138
Specific heat [J/kg · K]	850

모든 압력용기는 안전성을 제일 중요하게 다루기 때문에 탱크의 안전설계는 일본의 JIS와

미국의 ASME Sec. VIII Div. 2에서 제시한 표준기준에 의거 설계된 구조물을 해석하여 사용하고 있다.

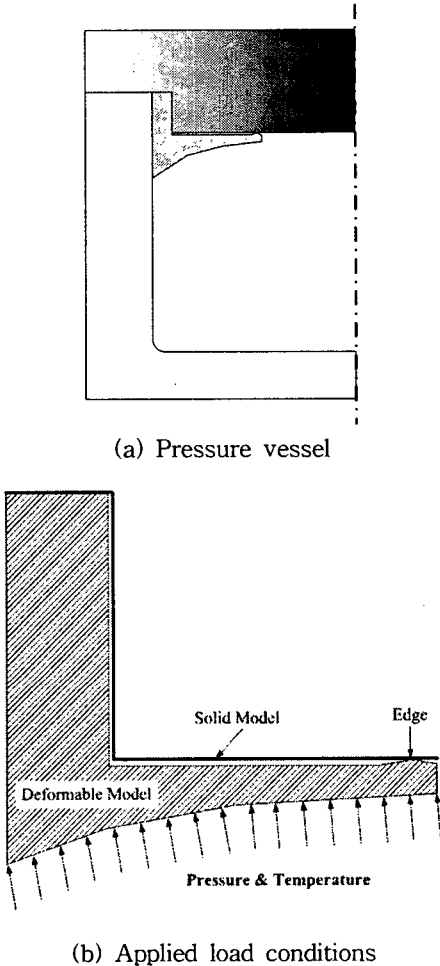


Fig. 1. Analysis model and boundary condition of a pressure vessel.

### 2.2. 해석조건 및 방법

Fig. 2는 압력용기의 밀봉상태를 해석하기 위해 사용된 압력과 온도의 작동조건을 제시하고 있다. 즉, 압력탱크에 가해지는 압력을 완만하게, 또는 급속하게 공급하는 압력과 온도하중의 두 가지를 고려하였고, 압력용기를 1회 사용하기 위해 유지한 시간은 10시간으로 하였다. Fig. 2의 작업조건을 보면, 압력용기에 3시간 정도의 가압과 가온 과정을 거친 후에 최고 압력과 초고온도를 약 2시간 동안 2000bar,

1,500℃에서 유지하고, 그 이후로 압력을 0~22.2bar/min의 속도로 강압하고, 온도를 0~11℃/min의 속도로 냉각하는 작동조건을 각각 제시하고 있다.

본 논문에서는 플랜지를 하나의 솔리드 모델로 단순화시켜 접촉모델로 해석하였고, 메탈시일 구조물에 의한 접촉 밀봉력을 해석하기 위해 메탈시일 구조물의 중앙 예지부에 걸리는 접촉응력을 계산하였다. 하중조건에 의해 메탈시일 구조물에서 발생하는 접촉응력을 계산하기 위해 사용한 유한요소해석 프로그램은 압력과 온도조건을 연계·해석할 수 있는 MSC/MARC[3]이다.

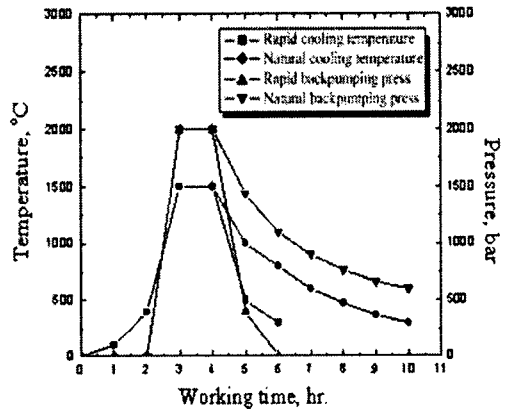


Fig. 2. Applied pressure and temperature conditions as a function of working hours.

### 3. 다구찌 설계법

다구찌 설계방법(Taguchi design method)[4]을 이용한 구조물 형상에 대한 최적화 설계기법은 다양한 분야[5-8]에서 적용되어 검증되었다. 다구찌 방법은 짧은 해석시간과 적은 비용으로 가장 효과적인 설계를 할 수 있다는 큰 장점이 있다. 따라서, 구조물의 형상을 최적의 치수와 기울기 각도 등으로 설계 데이터를 창출하는데 편리한 설계기법이다. 본 연구에서 메탈시일 구조물의 형상을 접촉응력 조건에 적합한 최적설계 치수와 각도를 구하는데 다구찌 방법을 사용하여 효과를 거두었다.

#### 3.1. 다구찌 해석방법

압력용기에서 메탈시일 구조물에 걸리는 응력집중 현상을 완화시켜 설계 안전성을 확보하고, 동시에 탄성거동을 확보하여 에지부의 접촉면압 증가에 따른 밀봉성을 보장할 수 있는 최적화 설계기술은 대단히 중요하다. 즉, 메탈시일 구조물의 하단부에 작용하는 압력과 온도에 의해 시일 구조물의 에지부에서는 굽힘 모멘트에 의한 응력집중 현상이 덜 일어나고, 메탈시일의 중심부와 플랜지가 접촉하는 에지부에 적절한 밀봉력이 항상 발생할 수 있는 설계 노하우를 다구찌 기법으로 해결하고자 한다.

구조물에 대해 최적화 설계를 수행할 수 있는 다구찌 기법은 파라미터 설계로, 구조물의 성능특성이 노이즈(noise)에 둔감하도록 제품 설계나 공정설계를 최적화 하는 것이다. 따라서, 다구찌 기법은 실험과 설계의 최적조건을 결정하는 기준으로 특성치의 산포도가 가장 작은 조건을 선정하고 있다. 특성치의 산포도는 SN(signal to noise ratio) 값에 의해 표현되며, SN 값은 특성치의 성질에 따라 다음과 같이 정의되는 것이 일반적이다.

- 1) 망목특성(특정 목표치가 주어져 있는 경우) : 길이, 무게 등과 같이 지정된 목표치  $M$ 이 있는 경우이다.
- 2) 망소특성(특정 목표치가 작을수록 좋은 경우) : 마모, 진동, 불량률 등과 같은 파라미터가 작을수록 좋은 경우이다.
- 3) 망대특성(특정 목표치가 클수록 좋은 경우) : 강도, 수명, 연료효율 등과 같은 파라미터가 클수록 좋은 경우이다.

본 연구에서는 망소특성이 작은 특성치의 경우에 해당하는 SN값을 사용하고, 다음과 같이 정의한다. 망소특성을 채택한 이유는 메탈시일 구조물에 걸리는 설계기준 목표치를 250MPa로 설정하였는데, 유한요소해석 결과 접촉시일 구조물의 중앙부 에지에서 발생한 접촉응력이 설계 목표치로 결정된 250MPa를 훨씬 초과하기 때문에 소재의 항복강도를 고려하여 망소특성을 사용하여 최적화 설계를 추진하였다.

Fig. 1에서 보여준 시일 구조물에 걸리는 접촉점 부근의 최대응력을 다구찌 기법으로 낮추기 위해 Fig. 3과 같이 메탈시일의 하단부 형상을 5개(A~E)의 파라미터로 분할하여 메탈시일 구조물의 최적화 설계를 수행하였다. 다

구찌 방법을 수행하기 위한 SN 기준값은 다음의 식으로 결정된다.

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

상기식에서 SN 기준값이 크게 나타난 경우는 그 때의 설계 파라미터들이 시일 구조물의 접촉응력을 줄이는 효과가 있다는 것을 의미한다. 따라서, 본 연구에서 지정된 5개의 해석번호에 대한 SN 기준값으로부터 각 파라미터의 구조물 형상 에지부에서 발생한 접촉응력의 집중 효과를 간이 분석법을 통하여 고찰하였고, 각각의 파라미터들이 SN 특성값에 미치는 기여도를 계산하였다.

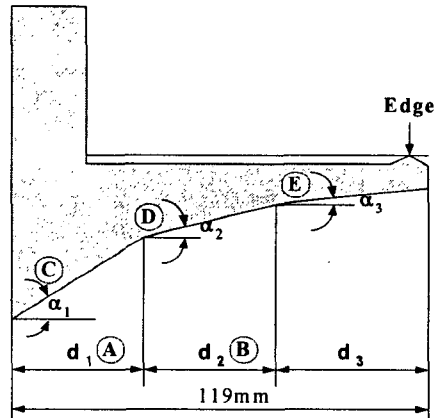


Fig. 3. Five design parameters of metal seal geometry.

### 3.2. 설계 파라미터와 직교 배열표

다구찌 해석에 사용된 5개의 파라미터와 각 파라미터의 수준(level)을 Table 2에서 제시하고 있다. Fig. 3에서 에지부의 형상 변화가 일어나는 길이를 나타낸  $d_1$ 은 20~50mm,  $d_2$ 는 30~60mm로 하고,  $d_3$ 는 전체길이 119mm와 ( $d_1+d_2$ )의 차이에 의해 결정되도록 하였다. 또한, 접촉식 메탈시일 구조물의 기울기 정도를 나타내고 있는  $\alpha_1$ 은 20~14°,  $\alpha_2$ 는 12~6°,  $\alpha_3$ 은 7~1°으로 각각 설정하였다. 이와 같이 다구찌 최적화 설계에서 5개의 파라미터를 4개 수준으로 나누어 4개 수준계 직교 배열표인  $L_{16}(4^5)$ 을 사용하였고, 이것들은 Table 3에서 제시하고 있다.

**Table 2. Factors and levels for Taguchi design method.**

	Factors					
	No	Ⓐ : $d_1$ [mm]	Ⓑ : $d_2$ [mm]	Ⓒ : $\alpha_1$ [degree]	Ⓓ : $\alpha_2$ [degree]	Ⓔ : $\alpha_3$ [degree]
Level	1	20	30	20	12	7
	2	30	40	18	10	5
	3	40	50	16	8	3
	4	50	60	14	6	1

**Table 3. Experimental layout of orthogonal array table of  $L_{16}(4^5)$ .**

Exp. No.	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ	Ⓔ
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

**4. 해석결과 및 고찰**

Table 4는 Table 3의 직교 배열표에서 제시한 16개의 실험적 해석모델을 통하여 Fig. 3에서 보여준 메탈시일 구조물의 에지부 5곳(Ⓐ~Ⓔ)에서 발생한 접촉응력으로 von Mises 응력과 SN비를 각각 나타내고 있다. 여기서 16개 모델에 대한 해석 결과처럼 에지부 5곳에서 발생한 접촉응력이 모두 300MPa을 넘는 것으로

계산되었다. 이것은 메탈시일의 초기 설계 목표치인 250MPa을 크게 넘어서는 수치로, 메탈시일의 에지부에서 발생할 수 있는 과도 접촉력에 의한 손상을 고려한다 해도 에지부의 망소특성으로 계산한 SN값은 비교적 합리적인 기준치이다. 또한, Table 4의 결과에서 제시한 SN비가 -49.76683959로 계산된 16번째 해석 모델은 본 연구에서 고려한 가장 적합한 설계 기준치에 해당한다. 이 때의 메탈시일 에지부 5곳에 해당하는 길이  $d_1$ 은 50mm,  $d_2$ 는 60mm 이고, 기울기 각도  $\alpha_1$ 은 20°,  $\alpha_2$ 는 8°,  $\alpha_3$ 은 5°인 경우가 다구찌 설계법에 의해 구해진 최적의 설계조건이다. 여기서 제시한 에지부의 설계 치수는 다구찌 방법을 이용한 최적화 기준값으로, 메탈시일의 접촉응력 조건을 가장 안정적으로 유지할 수 있는 데이터가 된다.

**Table 4. Experimental results and SN ratios for contact stress at the edge of the metal seal structure**

Exp. No.	Stress [MPa]	SN ratio [db]
1	314.805	-49.96083243
2	315.019	-49.96673497
3	315.017	-49.96667983
4	315.016	-49.96665225
5	315.018	-49.96670740
6	315.017	-49.96667983
7	314.819	-49.96121870
8	314.809	-49.96094280
9	315.013	-49.96656953
10	311.449	-49.86773882
11	314.712	-49.95826606
12	311.994	-49.88282484
13	315.017	-49.96667983
14	314.726	-49.95865244
15	314.762	-49.95964592
16	307.852	-49.76683959

Table 4에서 제시한 SN비를 기준값으로 하여 메탈시일 구조물의 에지부에서 발생하는 접촉응력에 직접적으로 영향을 미치는 파라미터의 수준합(level sum)과 기여율(affecting ratio)

Table 5. Factors affecting the contact stress at the edge of the metal seal structure.

		A	B	C	D	E	Sum
Levels	1	-199.8609	-199.8608	-199.6526	-199.7636	-199.7492	-998.8871
	2	-199.8555	-199.7598	-199.7760	-199.8526	-199.6614	-998.9054
	3	-199.6755	-199.8458	-199.8528	-199.5680	-199.7830	-998.7251
	4	-199.6518	-199.5774	-199.7623	-199.8595	-199.8503	-998.7013
Level difference		0.2091	0.0860	0.1097	0.2916	0.1216	0.8179
Affecting ratio [%]		25.5619	10.5147	13.4083	35.6483	14.8668	100

을 간이 분석법을 이용하여 계산한 결과를 Table 5에서 제시하고 있다. 수준차(level difference)는 각 파라미터의 수준합 중에서 가장 큰 수와 가장 작은 수의 차이를 나타낸 것이고, 기여율은 수준차의 합(sum of level difference)에 대한 각 파라미터 수준차의 백분율을 의미한다. 해석결과에 의하면 각 파라미터의 수준합은 약 -998.7~-998.9db로 거의 일정하고, 수준차의 합은 0.8179db으로 계산되었다.

Table 5의 다구찌 해석결과로부터 메탈시일 구조물의 에지부 5곳에서 발생하는 접촉응력에 큰 영향을 미치는 기여율을 보면, 각도를 나타내는 ㉠ 파라미터에 해당하는  $a_2$ 가 35.65%로 가장 크고, 치수를 나타내는 ㉢ 파라미터에 해당하는  $d_2$ 가 10.51%로 가장 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, Fig. 3과 같은 압력용기의 메탈시일 구조물을 설계하는 경우 접촉응력에 가장 큰 영향을 미치는  $a_2$ (35.6%),  $d_1$ (25.6%),  $a_3$ (14.9%),  $a_1$ (13.4%),  $d_2$ (10.5%)의 순서대로 최적설계 우선 순위를 결정하는 것이 바람직하다는 것을 나타내고 있다.

### 5. 결 론

압력용기 설계에서 최적의 밀봉 안전성을 확보하기 위해 다구찌 방법으로 메탈시일 구조물의 밀봉부 접촉응력을 최적의 조건으로 증가시킬 수 있는 설계조건을 해석하였다. 본 연구에서는 다양한 분야에서 적용되고 있는 검증된 설계기법으로 알려진 다구찌 방법을 이용하여 메탈시일의 최적화 설계 데이터를 얻고자 한다.

메탈시일 구조물 에지부의 최적화를 위해 고려한 5개의 설계 파라미터와 4개의 수준을 해석하기 위해서 모두 1024번의 반복적 해석을 수행해야 하지만, 다구찌 실험적 설계 해석법

에서는 Table 4에서 제시한 것처럼 단지 16번의 해석을 통하여 기준 목적값 250MPa에 적합한 최적의 조합조건을 찾아낼 수 있었다. 그 결과 메탈시일 구조물의 에지부에 해당하는 경사각과 길이, 에지부의 개수 등 메탈시일 구조물에 대한 최적 설계조건을 다구찌 방법으로 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Anders Traff, "HIP Equipment Safety-Reliability-Cost Efficiency," Proceeding of the International Conference on Hot Isostatic Pressing, pp. 528-535, 1993.
- [2] 조승현 외, "가스압력용기의 밀봉시스템에 관한 수치적 연구," 2002 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp. 119-128, 2002.
- [3] "MARC user's manual," Version K7.3, MARC Analysis Research Co., 1996.
- [4] 송서일, 실험계획법, 한경사, June, 2001.
- [5] 김석우, "다구찌 방법을 이용한 효율적인 사시 시스템 설계방법에 관한 연구," 국민대학교 자동차공학과 석사논문, 1999.
- [6] 박경진, "자동차 분야에서의 최적설계기술의 응용," 월간기계설계, pp. 82-89, Sep., 2002.
- [7] 안주양, 김대은, 최진용, 신경호, "다구찌 실험 계획법을 이용한 탄소코팅 초박막의 마찰 특성," 한국정밀공학회, Vol. 20, No. 4, pp. 143-150, April 2003.
- [8] Seong Jin Kim, Kwang Seok Kim, Ho Jang, "Optimization of Manufacturing Parameter for a Brake Lining using Taguchi Method," Journal of Material Processing Technology 136, pp. 202-208, 2003.