

SF₆ 가스 안전밸브 디스크 시일의 최적설계에 관한 연구

김청균[†] · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Shape Design Optimization of Disk Seal in SF₆ Gas Safety Valve

Chung Kyun Kim[†] and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – Sulfur Hexafluoride, SF₆ is widely used for leak detection and as a gaseous dielectric in transformers, condensers and circuit breakers. SF₆ gas is also effective as a cleanser in the semiconductor industry. This paper presents a numerical study of the sealing force of disk type seal in SF₆ gas safety valve. The sealing force on the disk seal is analyzed by the FEM method based on the Taguchi's experimental design technique. Disk seals in SF₆ gas safety valve are designed with 9 design models based on 3 different contact length, compressive ratio and gas pressure. The calculated results of Cauchy stress and strain showed that the sealing characteristics of Teflon[®]PTFE is more effective compared to that of FKM(Viton), which is related to the stiffness of the materials. And also, the contact length of the disk seal is important design parameter for sealing the SF₆ gas leakage in the safety valve.

Key words – SF₆ gas valve, taguchi method, design optimization, teflon[®]PTFE, FEM.

1. 서 론

고상에서 직접 기상으로 변하는 성질을 갖는 무색, 무취, 무독의 SF₆ 가스는 발전설비의 절연가스로, 그리고 반도체 제품의 세정제 등으로 널리 사용되고 있다. SF₆ 가스는 최대 28 bar의 압력과 204°C의 높은 온도에서도 대부분의 물질과 반응을 일으키지 않는 안정된 가스이다. 따라서 SF₆ 가스는 변압기, 콘덴서, 회로 차단기 등의 가스 유전체(Gaseous dielectric)로 사용되거나 누설 감시제로 널리 사용되며, 최근에는 반도체 산업의 에칭공정에 유용하게 활용되는 등 적용분야가 비교적 넓은 산업용 가스이다.

또한, SF₆ 가스의 누설을 차단하는 안전밸브의 디스크 시일부는 정상 작동기간에는 가스의 누설을 차단하지만, SF₆의 현재 가스압이 초기에 설정된 작동압력 이상으로 급등하면 디스크 시일은 자동적으로 열리면 누설이 발생함으로써 밸브는 안전성을 충분히 확보하게 된다. 회로 차단기가 정상적으로 작동하면, 즉 가

스 누설을 차단하는 공정이 정상적으로 작동하는 경우는 안전하지만, 가스압의 비정상적인 상승은 안전밸브 역할을 하도록 하여 가스저장 탱크의 안전성을 확보하게 된다.

한편, 가스밸브의 디스크 시일부의 최적화 설계를 위해서 1980년대 이후로 산업공학의 통계분야에서 주로 적용한 다구찌 방법(Taguchi method)을 이용한 통계는 최적설계 기법으로 널리 활용되었고, 최근 트라이볼로지 핵심부품 설계분야에도 적용이 확대되는 추세에 있다[1-3].

따라서 본 논문에서도 다구찌 방법을 이용한 SF₆ 가스밸브의 디스크 시일부에 대한 최적설계와 유한요소 해석을 통하여 가스용 안전밸브의 형상을 결정하고, 동시에 가스밸브의 밀봉 안전성을 확보하고자 한다.

2. 본 론

2-1. 소재 선정

SF₆ 가스의 누출을 차단하기 위한 가스밸브의 소재로 사용하기 위한 국제 규격은 ISO 11114-1(1998년)

[†]주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

와 ISO 11114-2(2001년)에 각각 제정되어 있다. 즉, 온도, 습도, 불순물의 함유정도 등에 따라 정해진 소재는 없기 때문에 사용조건에 따라서 시일소재를 선정해야 한다.

일반적으로 SF₆ 가스밸브의 소재로 알루미늄, 황동, 구리, 탄소강, 스테인레스강 등이 사용되는데, 본 논문에서는 가스밸브 소재로 널리 사용하는 황동으로 제작된 밸브에 대하여 해석하였다. 또한, SF₆ 가스용 디스크 시일의 소재는 플라스틱 계열로 Teflon®PTFE, PCTFE, PA(Nylon™), PP, PVDF 등이 사용되고, 탄성체로 NBR, FKM(Viton), Silicon, EPDM 등이 설계의 대상이 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 시일소재로 널리 사용되고 있는 플라스틱 계열의 Teflon®PTFE과 탄성체의 FKM(Viton)을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. Table 1은 본 해석에 사용된 Teflon®PTFE과 FKM(Viton)의 기계적 특성값을 각각 제시한다.

2-2. 해석조건

효율적 해석을 위해 유한요소법의 적용은 축대칭 모델을 사용하였다. 디스크 시일에 가해지는 가스압력은 벨로우즈에 의해 가해지는 압력과 가스압력의 차이인 Δp를 적용하였고, SF₆의 작동온도와 주변의 온도는 모두 상온 20°C로 균일하다고 가정하였다. 황동과 디스크 시일의 접촉면에서 마찰계수는 황동과 나이론 사이의 마찰계수인 0.3을 적용하였다[4].

다구찌법에서는 설계인자들의 상호작용에 의해 목적값에 영향을 미치는 경우를 교호작용이라고 한다. 이러한 인자들간의 교호작용은 종종 최적설계에 적용되기도 하지만, 본 논문에서는 SF₆ 가스밸브의 접촉면 형상에 대한 최적 설계를 위해서 교호작용을 무시한 다구찌 방법의 3인자 3수준의 L₉(3⁴)형 직교 배열표에 의해 모두 9개의 유한요소 해석모델을 구성하였다[5].

2-3. 설계 파라메타와 직교 배열표

Fig. 1은 본 논문의 해석대상인 SF₆ 가스 안전밸브의 디스크 시일을 중심으로 황동 구조물의 형상을 보여준다. SF₆ 가스밸브는 디스크 시일과 디스크 시트와의 작은 접촉면에 형성된 밀봉력에 의해 내부의 가스가 외부로 누설을 것을 차단한다.

이러한 가스밸브 형상의 최적설계를 위해 사용된 파라메타는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 디스크 홀더와 디스크 시일의 접촉면 길이(l)와 Fig. 2에서 표시한 디스

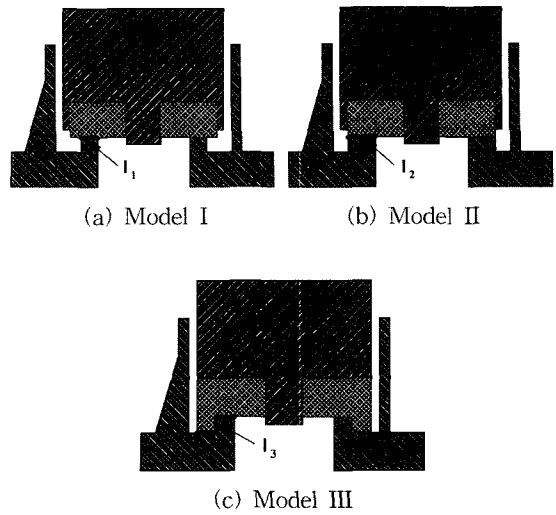


Fig. 1. Analysis models of SF₆ gas safety valve.

Table 1. Mechanical properties of Teflon®PTFE and FKM(Viton)

Properties	Teflon®PTFE	FKM(Viton)
Elasticity module, MPa	460	6.8
Density, kg/m ³	2,160	1,510
Poisson's ratio	0.46	-
Ultimate strength, MPa	31	14.3

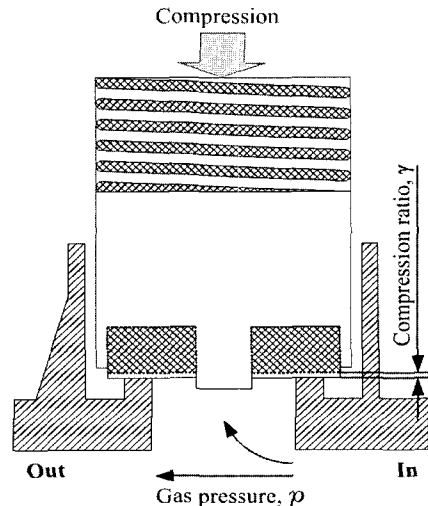


Fig. 2. Design parameters for optimization of disk-seal contact type cylinder using Taguchi method.

크 시일의 압축률(γ), 가스압력(p)의 3개로 설정하였다. 이러한 설계 파라메타는 Table 2와 같이 각각 3개의

Table 2. Factors and levels for Taguchi method

	Factors				
	A(l), mm	B(γ), %	e	C(p), MPa	
Levels	1	2.2	3	-	0.9
	2	3.75	6	-	1.8
	3	5.55	12	-	3.66

Table 3. Analysis layout of orthogonal array table of L₉(3⁴)

Analysis No.	Factors			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
Indication	a	b	a	a
Arrangement	A	B	e	C

수준(level)으로 설계하였다. e는 다구찌 설계의 오차항을 나타낸다. 이와 같이 설계된 3인자 3수준의 다구찌 최적설계 모델은 Table 3과 같은 직교 배열표에 의해 해석을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 Teflon®PTFE로 제작된 다구찌 모델 1의 디스크 시일에서 발생한 Cauchy 응력 분포를 나타낸 FEM 해석결과이다. 그림에서 보여주는 것처럼 디스크 시일이 시트와 접촉하는 경계면에서 국부적으로 응력이 집중적으로 발생되고 있음을 알 수 있다. 특히, 디스크의 내측 접촉면에서 더 큰 응력이 걸리고, 외측으로 갈수록 줄어들고 있음을 알 수 있다.

디스크 시일과 디스크 시트와의 접촉면적을 증가시킨 4-6번째 다구찌 모델에서 4번째 모델의 Cauchy 응력분포를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 디스크와 시트의 접촉 경계면이 하나로 줄어들면서 응력밴드가 하나

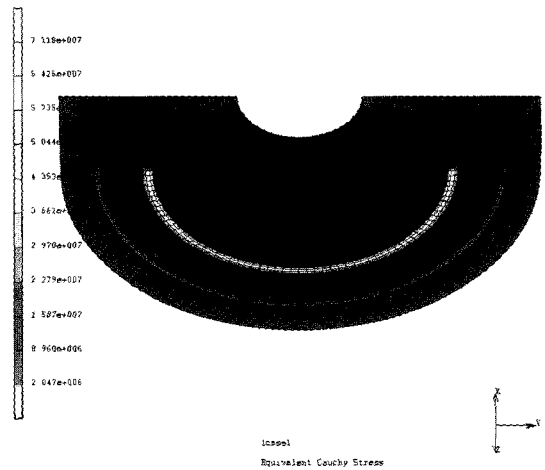


Fig. 3. Cauchy stress distributions of Teflon®PTFE disk seal of 1st Taguchi model (l=2.2 mm, compression ratio(γ)=3%, gas pressure(p)=0.9 MPa).

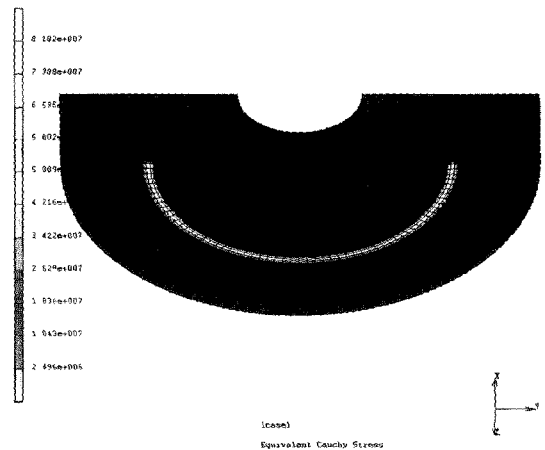


Fig. 4. Cauchy stress distributions of Teflon®PTFE disk seal of 4th Taguchi model (l=3.75 mm, compression ratio(γ)=3%, gas pressure(p)=3.66 MPa).

만 발생하기 때문에 상대적으로 응력은 증가하는 패턴을 보여주고 있다.

Fig. 5는 디스크 시일의 형상이 Fig. 1(c)와 같을 때 7번째 다구찌 모델에서 발생한 Cauchy 응력 분포를 나타낸 해석결과이다. 디스크 시일에서 발생한 응력의 크기가 Fig. 1(a)에서 제시한 시일의 접촉형상보다 높고, Fig. 1(b)의 형상보다는 낮게 발생하였다.

Fig. 6은 디스크 시일의 소재가 Teflon®PTFE과 FKM(Viton)일 때 디스크에서 발생한 최대 Cauchy 응력을 다구찌 모델에 따라 나타낸 그림이다. 해석 결과에서 알 수 있는 것처럼 모든 다구찌 모델에서 가해진 가스

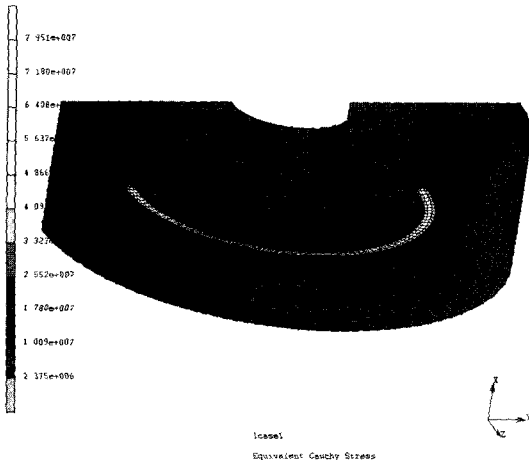


Fig. 5. Cauchy stress distributions of Teflon®PTFE disk seal of 7th Taguchi model ($l=5.55$ mm, compression ratio(γ)=3%, gas pressure(p)=1.8 MPa).

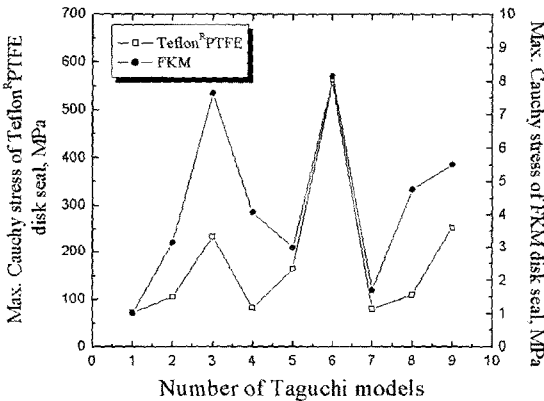


Fig. 6. Cauchy stress distributions of disk seal as a function of various Taguchi models.

압보다 높은 응력이 발생하였다는 사실은 가스 밀봉력을 안전하게 확보하고 있다는 것이다. 따라서 좋다고 생각되는 디스크 시일의 형상과 작동조건은 가장 낮은 응력상태를 발생하는 1번째 다구찌 모델을 알 수 있다.

Fig. 7은 디스크 시일에서 발생한 변형률 분포를 여러 가지 다구찌 모델에 대하여 해석한 결과를 제시하고 있다. 디스크 시일의 소재가 Teflon®PTFE인 경우는 3, 6, 9번째 모델에서 0.4 이상의 변형률이 발생하고, FKM(Viton)으로 제작된 디스크 시일의 경우도 역시 3, 6, 9번째 모델에서 0.6 이상의 높은 변형률이 계산되었다. 이것은 디스크 시일에서 발생한 접촉 응력이 모두 가스압보다는 높게 유지되므로 밀봉력이 안정적으로 확보된 상태에서 변형률의 변화 폭이 작은

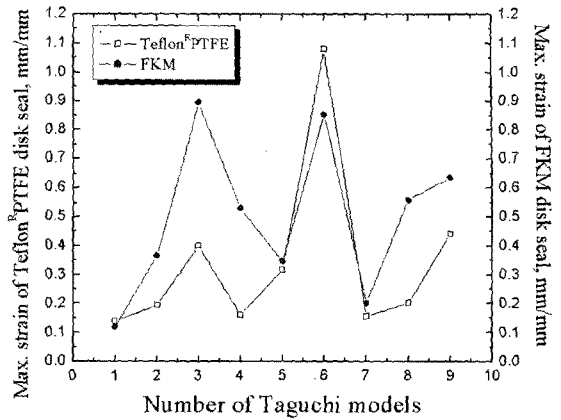


Fig. 7. Cauchy stress distributions of disk seal as a function of various Taguchi models.

모델로 설계가 안정적이라 판단된다.

Fig. 1(a)의 디스크 형상은 1~3번째 다구찌 모델에 해당되고, Fig. 1(b)는 4~6번째 다구찌 모델이며, Fig. 1(c)는 7~9번째 다구찌 모델에 각각 해당된다.

Fig. 7의 변형률 결과로부터 변형률의 변화 폭이 낮은 순서는 디스크 시일의 소재가 Teflon®PTFE일 때 1~3번째 다구찌 모델에서 가장 작고, 그 다음으로 디스크 시일의 소재가 Teflon®PTFE일 때 7~9번째 다구찌 모델에서 작고 나타났고, 디스크 시일의 소재가 FKM(Viton)일 때 7~9번째 다구찌 모델에서 3번째로 작게 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 디스크 시일의 소재가 Teflon®PTFE이고 형상이 Fig. 1(a)와 같을 때 시일의 압축률과 가스압에 가장 안정적인 밀봉 특성을 발휘한다는 것을 알 수 있다.

Figs. 5~6의 해석결과에 의하면 디스크 시일이 Fig. 1(b)의 디스크형상에 해당되는 4~6번째 다구찌 모델에서 높은 응력과 변형률이 발생하였다. 이와 같은 결과는 디스크 시일의 소재가 FKM(Viton)일 때 더욱 확연해지는데, 이것은 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 디스크 시일이 디스크 홀더와 시트 사이의 홈(groove)으로 돌출이 발생하였기 때문이다. 이와 같은 변형은 반복적인 작업이 진행될 때 손상이 일어날 우려가 높기 때문에 바람직한 설계가 될 수 없다.

SF₆ 가스밸브의 밀봉력에 미치는 설계 파라메타들의 기여도를 계산하기 위해 다구찌 방법의 망소특성을 이용하여 SN비를 계산하여 Table 4와 같이 제시하였다.

본 논문에서는 망소특성, 즉 특성치의 값이 작을수록 좋은 경우의 SN값을 적용하였는데, 망소특성의 정의는 다음과 같다.

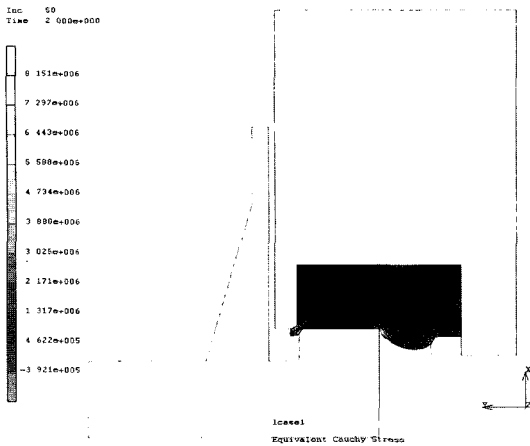


Fig. 8. Cauchy stress distributions of FKM(Viton) disk seal of 6th. Taguchi model ($l=3.75$ mm, compression ratio(γ)=12%, gas pressure(p)=1.8 MPa).

Table 4. SN ratios for Cauchy stress and strain of SF₆ gas safety valve

Analysis No.	Cauchy stress	Strain
1	-37.0	17.1
2	-40.4	14.2
3	-47.4	8.0
4	-38.3	15.9
5	-44.3	10.9
6	-55.0	-0.7
7	-38.0	16.2
8	-40.8	13.9
9	-48.1	7.1

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

식 (1)에서 SN값이 큰 경우가 그때의 설계 파라메타들이 Cauchy 응력과 변형률을 줄이는데 효과적이라는 것을 의미한다. 다구찌 최적설계에서 망소특성을 채택한 이유는 해석을 선행해 본 결과 디스크시일의 접촉력이 가스압보다 월등히 높게 발생하였는데, 높은 것이 디스크 시일의 밀봉성능에 오히려 부정적인 영향을 미치기 때문이다. 디스크 시일의 밀봉 접촉력이 충분히 확보된 상황에서 변형률은 작게 발생하는 것이 밀봉성능 향상에는 유리하기 때문이다.

Table 4에서 1번째 다구찌 모델의 SN비가 가장 크게 발생하였다. 이와 같은 결과는 Figs. 4와 5의 결과

Table 5. Factors affecting Cauchy stress in SF₆ gas safety valve

	A(l)	B(γ)	e	C(p)	Sum	
Levels	1	-124.8	-113.3	-132.9	-129.5	-500.5
	2	-137.6	-125.6	-126.8	-133.5	-523.4
	3	-126.9	-150.5	-129.7	-126.4	-533.5
Difference of level		12.8	37.2	6.1	7.1	63.1
Affecting ratio, %		20.3	58.9	9.7	11.2	100

Table 6. Factors affecting strain in SF₆ gas safety valve

	A(l)	B(γ)	e	C(p)	Sum	
Levels	1	39.2	49.2	30.3	34.2	152.9
	2	25.3	38.0	37.2	29.6	130.1
	3	37.1	14.4	34.1	37.8	123.5
Difference of level		14.0	34.8	6.9	8.1	63.8
Affecting ratio, %		21.9	54.5	10.8	12.8	100

와 같이 1번째 다구찌 모델이 가장 바람직한 사용조건이라는 것을 의미한다.

Table 5와 Table 6은 Cauchy 응력과 변형률에 대해 계산한 디스크 시일에 밀봉특성에 영향을 미치는 설계 파라메타들의 기여도를 각각 나타낸 결과이다. 이 데이터에 의하면 압축률(γ)이 Cauchy 응력과 변형률을 줄이는데 각각 59%와 55%의 영향을 미치는 가장 중요한 설계 파라메타임을 알 수 있다. 그 다음으로 접촉면 길이(l)는 응력과 변형률에 각각 20%와 22%의 영향을 미치는 설계 파라메타이고, 가스압(p)은 각각 11%와 13%로 상대적으로 제일 작은 영향을 주고 있다. 따라서 디스크 시일 해석에서 시일과 시트의 접촉면에 영향을 미치는 압축율을 가장 적합한 조건으로 유지하도록 작동조건을 잡아주고, 시일의 실제 접촉면 길이를 설계하면 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기 개폐장치에서 가스 누설차단 기능을 하는 중요한 기계부품인 SF₆ 가스 안전밸브의 디스크 시일에 대한 최적설계를 다구찌법과 유한

요소법을 사용하여 수행하였다. 탄성체인 디스크 시일의 특성과 밀봉력을 고려하여 최적설계의 판단기준은 Cauchy 응력과 변형률의 망소특성을 적용하였다. 디스크 시일과 시트의 접촉면의 길이에 따라 크게 3개의 모델과 압축률, 가스압의 크기를 고려하여 모두 9개의 다구찌 해석모델을 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 안정적인 밀봉성능을 발휘하기 위해서는 디스크 시일의 소재를 FKM(Viton)과 같은 대변형을 하는 소재보다 강한 Teflon®PTFE와 같은 플라스틱을 사용하고, 접촉면의 길이를 작게 하는 것이 바람직하다.
2. SF₆ 가스 안전밸브의 밀봉력에 미치는 주요 파라메타는 압축률이 가장 중요하고, 다음으로 접촉면 길이 즉, 접촉조건이 중요하며, SF₆ 가스압이 마지막으로 중요하다.

참고 문헌

1. 안주양, 김대은, 최진용, 신경호, “다구찌 실험계획법을 이용한 탄소코팅 초박막의 마찰 특성,” 한국정밀공학회, Vol. 20, No. 4, pp. 143-150, April 2003.
2. Seong Jin Kim, Kwang Seok Kim and Ho Jang, “Optimization of Manufacturing Parameter for a Brake Lining using Taguchi Method,” *J. of Material Processing Technology*, 136, pp. 202-208, 2003.
3. 조승현, 김청균, 김영규, “다구찌 실험법을 이용한 O-링 형상의 최적설계,” 한국윤활학회 추계학술대회, 37회, pp. 241-247, 2003.
4. Ernest Rabinowicz, “Friction and Wear of Materials,” John Wiley & Sons, Inc., 1965.
5. 박성현, “현대실험계획법,” 민영사, 2003.
6. “MARC user's manual,” Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.