

# 다구찌 실험법을 이용한 O-링 형상의 최적설계

조승현<sup>1</sup> · 김청균<sup>1</sup> · 김영규<sup>2</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 기계시스템디자인공학과

<sup>2</sup>한국가스안전공사 가스안전시험연구원

## Optimized Design of O-Ring using Taguchi Method

Seung Hyun Cho<sup>1</sup> · Chung Kyun Kim<sup>1</sup> · Young Gyu Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

<sup>2</sup>Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

**Abstract**-The sealing performance of O-ring is effected in environments of the O-ring seal, like that applied pressure, working temperature, pre-compressed ratio and materials. In this paper, design of composite O-ring under pressurized, compressed was optimized based on Taguchi experimental design method. and it analysed numerically using non-linear finite element method. Ogden model in which is developed based on the experimental data is used for simulating the contact stress and strain in NBR and PTFE materials. Sensitivity analysis was performed with FEM results, which are contact stress, strain and temperature as variable.

**Key Words:** O-ring, NBR, PTFE, Composite O-ring, Contact Stress, FEM

### 1. 서론

O-링에서 널리 사용하는 탄성체 폴리머 소재는 컴파운드의 종류와 첨가되는 필러의 특성에 따라서 기계적 특성과 화학적 성질에 큰 영향을 받으므로 문헌상에서 제시된 표준 물성치 데이터와는 항상 차이가 있다.

그러나, 대부분의 연구에서는 실제의 해석 데이터를 실험적으로 구하기가 대단히 어렵기 때문에 표준 폴리머 소재에 대한 데이터를 사용하여 모델링하고, 설계치를 예측하는 것이 일반적인데, 본 연구에서는 실험데이터를 사용하여 표준 물성치 데이터를 사용하여 해석한 경우보다 해석의 정확도를 높였다.[1,2]

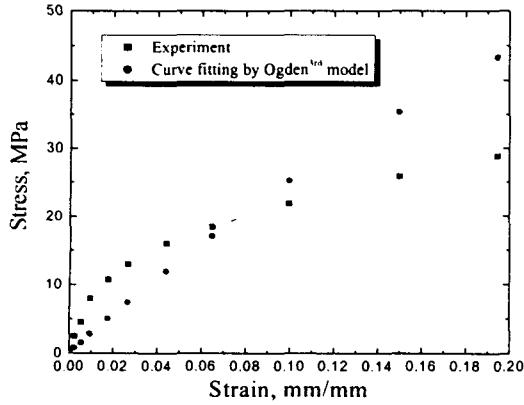
본 논문에서는 최적설계기법으로 산업 전분야에서 활용되고 있는 다구찌법을 사용하고 유

한요소법을 이용하여 O-링의 밀봉력 향상을 위한 최적설계를 하고자 한다.

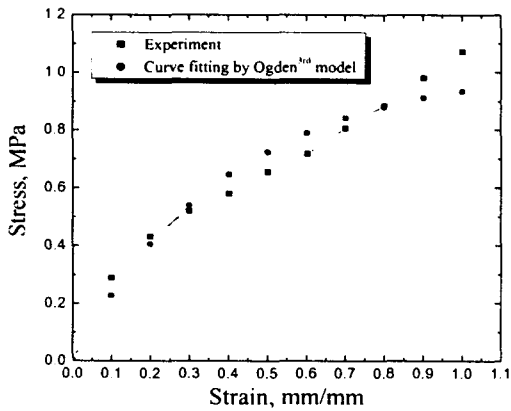
### 2. 본론

#### 2.1 중합체 모델

Fig. 1은 복합소재 O-링의 소재인 NBR과 PTFE의 응력-변형률 특성곡선을 유한요소법으로 해석하기 위해 3차항의 Ogden 모델로 근사화한 그림으로서 NBR과 PTFE의 응력-변형률 특성곡선은 단축 압축실험에 의해 획득한 데이터를 사용하였다. 이와 같이 실험에 의해 얻은 곡선을 Ogden 모델로 근사화를 하면 그림에서 알 수 있는 바와 같이 근사화하여 FEM 해석에 사용하는데 특성곡선과 완전하게 일치하지는 않으나 통상적으로 받아들일 수 있는 오차이다.



(a) PTFE



(b) NBR

Fig. 1 Stress-strain properties of NBR and PTFE

## 2.2 압축율

일반적으로 기체와 유체의 밀봉을 담당하는 O-링은 약간의 수축이 발생하기 때문에 설계자가 O-링의 사용조건을 결정할 때는 압축율과 수축율을 함께 고려해야 한다. 왜냐하면 O-링의 수축율을 고려하지 않고 압축율을 결정한다면 밀봉력을 저하시켜 시일의 수명을 단축하기 때문이다.[3]

Fig. 2는 복합소재로 사용된 O-링의 압축율을 나타낸 그림으로서 압축율  $C$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C = \frac{(t_o - t_R)}{(t_o - t_S)} \quad (2)$$

여기서  $C$ 는 압축율이고  $t_o$ 는 초기 O-링의

두께,  $t_D$ 는 수직방향의 변형량으로 미국재료시험학회(ASTM)에 의해  $t_D = \frac{1}{4} t_o$ 으로 규정된다.

$t_R$ 는 압축된 후 회복되는 길이를 나타낸다.

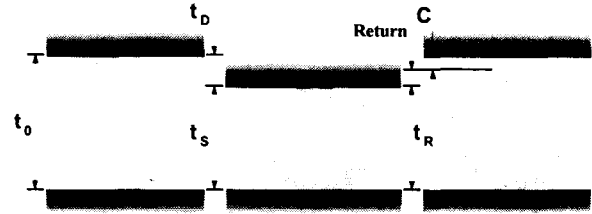


Fig. 2 Compression set of ring seals

## 2.3 해석조건

이종소재로 된 O-링의 변형거동 특성을 파악하기 위해서 Fig. 3과 같이 한쪽에서 가스압이 가해진다. 이때 O-링에 가해지는 가스압은 표면의 법선방향으로 가해지며 O-링소재의 투과율은 무시한다. 또한 중합체인 O-링과 그루브, 플랜지 소재와의 화학적 상호작용은 고려하지 않았으며 NBR과 PTFE의 경계면은 완벽하게 접합되었다고 가정하였다.

O-링의 변형거동특성을 파악하기 위해 플랜지와 그루브는 강체로 모델링하였는데, O-링이 설계와 같은 밀봉력을 발휘하기 위해서는 O-링이 접촉하는 그루브와 플랜지의 표면가공이 대단히 중요하다. 중합체 마찰의 분자-운동이론은 O-링이 접촉하는 강체면의 표면조도가 중합체의 평균 사슬길이인 100 Å를 넘지 않도록 하여 강체 돌기에 의해 발생할 수 있는 O-링의 부작용을 무시하였으나[4], 실제로 현장에서는 이와 같이 초정밀 가공은 비용과 기술측면에서

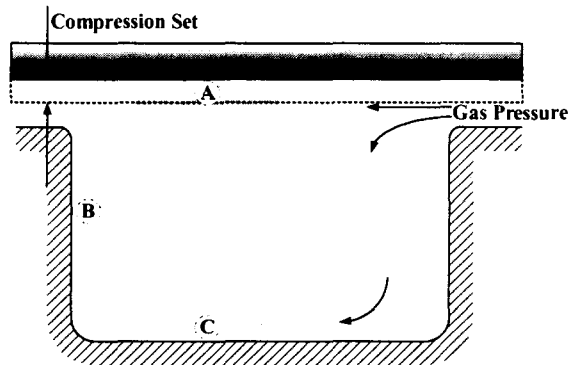


Fig. 3 Boundary condition

바람직하지 않아 1~3 $\mu$ m의 조도로 표면을 가공하고 있다. 그러나 본 논문에서는 강체로 모델링한 그루브와 플랜지의 표면은 완벽하게 균일하다고 가정하였다.

한편 온도는 중합체에 대단히 중요한 설계변수로서 중합체는 종류에 따라 사용이 가능한 온도조건이 있다. 본 논문에서는 플랜지와 그루브의 온도가 100 $^{\circ}$ C로 일정하며 강체와 O-링 사이의 접촉열저항은 무시하였다. 그러나 해석시간을 10시간으로 하여 그루브와 플랜지로부터 열이 충분히 전달되도록 하였다.

중합체의 마찰상수는 실험에 의하면 온도가 증가할수록 감소하지만 압축율과 가스압과는 거의 무관하다. 그러나 때로는 마찰이론과 반대로 온도가 증가할 때 마찰력이 증가하는 비정상적인 경우도 발생한다. 따라서 본 논문에서는 강체와 O-링의 마찰계수는 0.1로 일정하다고 가정하였다.[4]

#### 2.4 다구찌 방법

다구찌 법은 실험과 설계의 최적조건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 정하는데 특성치의 산포가 가장 적은 실험조건을 최적조건으로 결정한다. 특성치의 산포는 SN값에 의해 알 수 있다. 본 논문에서는 망소특성, 즉 특성치의 값이 적을수록 좋은 경우의 SN값을 적용하였다. SN값이 큰 경우가 그때의 설계 파라메타들이 접촉응력을 줄이는데 효과적임을 의미한다. 다구찌 최적설계에서 망소특성을 채택한 이유는 해석을 선행해 본 결과 O-링의 접촉력이 가스압보다 월등히 높게 발생하였는데 오히려 높은 것이 O-링의 성능에 부정적인 영향을 미치기 때문인데, 충분한 O-링의 접촉력이 확보된 상황에서는 O-링의 변형률은 작고, 온도는 낮게 발생하는 것이 O-링의 밀봉성능 향상에는 유리하기 때문이다. 또한 본 논문에서는 SN값을 사용하여 설계 파라메타들이 O-링의 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통하여 분석하였고, 각 파라메타들이 특성값에 미치는 기여율을 계산하였다.[5,6]

#### 2.5 유한요소 해석 모델

내부는 저가의 NBR이고 외부는 사용온도가 200 $^{\circ}$ C까지 허용되며 내부식성과 높은 강도를 갖는 PTFE으로 이루어진 O-링을 다구찌법의  $L_9(3^4)$ 형 직교배열표에 의해 9개의 유한요소 모델을 구성하였다. Mooney나 Ogden 모델과 같이 대변형 거동을 하는 모델에 적합한 부정형 사각 축대칭 링 요소를 사용하여 중합체 해석의 정확도를 높였다.

본 논문에서는 O-링의 변형거동특성을 해석하기 위해 압축과 온도를 thermo-mechanical coupled 해석을 이용하였고, O-링의 모델링과 해석은 각각 상용프로그램 MSC/MENTAT과 MSC/MARC를 사용하였다.[7]

#### 2.5 설계 파라메타와 직교배열표

O-링의 최적설계에 사용된 파라메타는 Fig. 4와 같이 O-링의 외곽에 가공된 홈의 개수와 관련된 홈의 각도( $\alpha$ )과 홈의 깊이( $\delta$ ), O-링 내부의 NBR과 외부의 PTFE의 직경비( $\frac{d}{D}$ ), 마지막

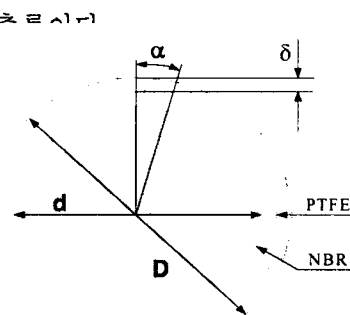


Fig. 4 Design parameters for optimized o-ring using taguchi method

Table 1. Factors and levels for Taguchi method

		Factors			
		A $d/D$	B $\alpha$ [degree]	C $\delta$ [mm]	D $c$
L e v e l	1	0.8	20	0.2	10
	2	0.7	30	0.35	15
	3	0.6	45	0.5	20

Table 2. Analysis layout of orthogonal array table of  $L_9(3^4)$

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

이와 같이 모두 4개의 파라메타들은 Table 1과 같이 각각 3개의 수준으로 설계하였다. 이와 같이 총 4개의 파라메타를 3수준으로 나누어 3수준계 직교배열표인  $L_9(3^4)$ 형을 사용하였으며 Table 2에서 나타내었다.

### 3. 해석 결과

Fig. 5는 O-링의 초기온도가 25℃일 때 압축된 상태로 10시간동안 O-링의 온도변화를 관찰한 결과이다. 시간이 흐르면서 O-링의 온도가 그루브와 플랜지의 온도인 100℃로 수렴하는 것을 알 수 있다. 6번 해석모델이 가장 빠르게 수렴을 하고 다음으로 3번과 9번 해석모델이 빠르게 수렴을 한다. 이와같이 6,3,9번의 해석모델이 빠르게 온도가 올라가는 것은 모두 홈의 각도가 45°로서 O-링이 압축되었을 때 접촉면적이 넓어지기 때문이다. 반면에 1번과 5번 해석모델은 온도가 가장 늦게 상승하는데 접촉면적이 가장 좁기 때문이다.

Fig. 6은 O-링에서 발생한 변형률 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 6의 결과를 보면 NBR에서 높은 변형률을 나타내었는데 8번과 9번 모델이 가장 고르게 분포하였다. 본 논문에서는 두 소재의 경계면이 완벽하게 접합되었다고 가정하였기 때문에 이와 같은 변형률 분포가 문제가 없으나 실제로 팽창율이 다른 NBR과 PTFE의

경계면이 완벽하게 접합이 되지 않았다면 소재의 분리와 같은 문제점이 발생할 수 있다.

중합체의 마찰력과 온도와의 관계를 나타낸 이론에 의하면 압력과는 무관하게 온도가 상승하면 마찰력이 감소한다. 그러나 이와 같은 이론과는 달리 온도가 상승할 때 마찰력이 증가하는 경우가 있는데 그 이유로는 첫째, 실제 접촉면적(real contact area)이 증가하기 때문이고, 둘째 강체와 접촉하는 O-링의 접촉면에서 산화현상과 관련이 있는 것으로 알려져 있다.[4]

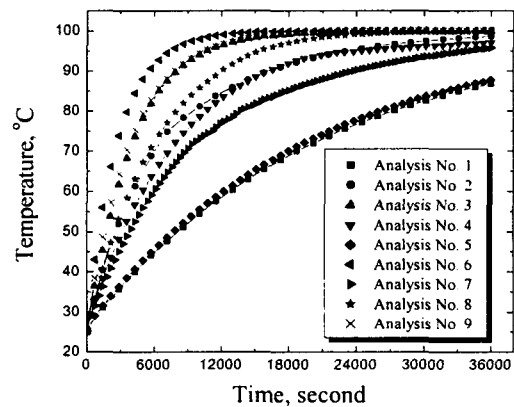


Fig. 5 Temperature history plot of o-ring as function of sealing time

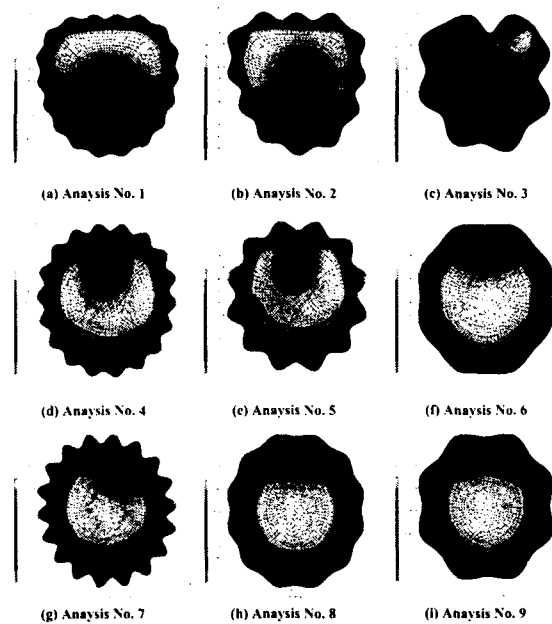


Fig. 6 Strain distributions in o-ring after 10hours

Fig. 7은 O-링의 접촉면에서 온도상승에 따른 von Mises 응력을 나타낸 그림으로서 2번 해석 모델을 제외하면 온도가 상승할수록 온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 온도가 증가하면서 접촉면적이 증가하였기 때문이다. 따라서 O-링의 형상을 그루브형태로 제작하게 되면 온도상승에 따른 밀봉력 감소를 완화시킬 수 있다.

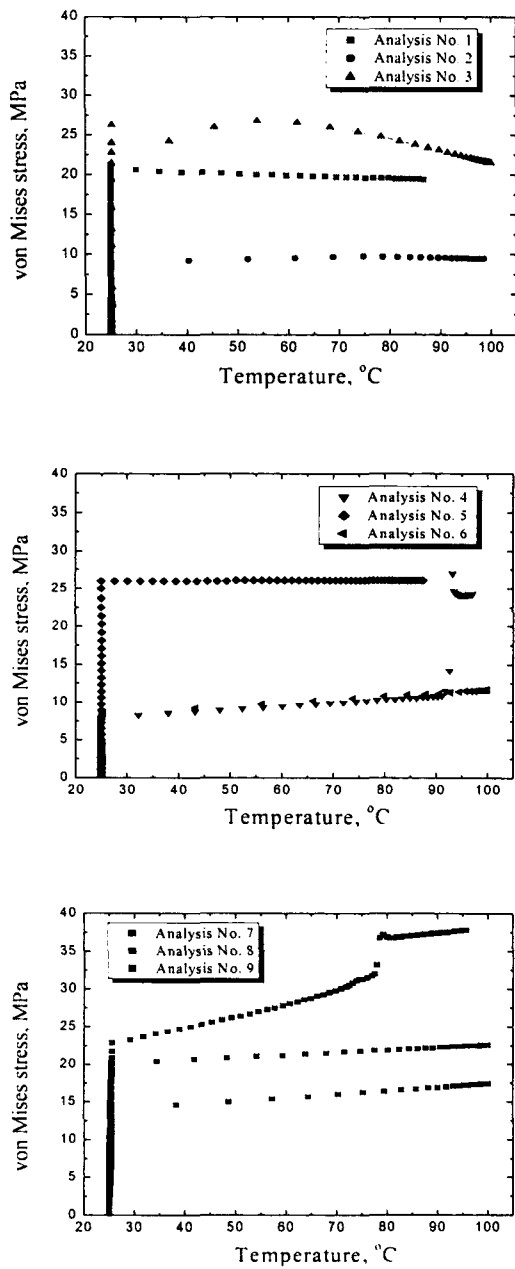


Fig. 7 Relation of von Mises stress on contact surface to temperature for O-ring

Table 3은 Table 2의 직교배열표에 의한 9개 모델을 해석하여 O-링에서 발생한 von Mises 응력과 변형률, 온도의 SN비를 나타낸 표이다. O-링의 접촉부에서 발생한 응력이 가스를 밀봉하기 위해 필요한 값보다 높게 발생한 상태에서 과도 접촉력에 의한 손상을 고려한다면 응력, 변형률, 온도를 망소특성으로 SN를 계산하는 것이 합리적이다. SN비를 계산하기 위해서 응력은 Fig. 3에서 표시한 3군데 접촉위치에서 발생한 응력값을 사용하였고 변형률과 온도는 O-링에서 발생한 최대 값을 사용하였다.

망소특성으로 계산된 SN값이 클수록 응력, 변형률, 온도가 낮게 발생한 것이 된다. 해석 결과에 의하면 응력의 SN비는 6번 해석모델이 -32.5276과 가장 크게 발생하여 가장 적합한 모델이고, 변형률의 SN비는 5번 모델이 22.2129로 가장 적합한 모델이다. 온도의 SN는 1번 모델이 -38.7724로 가장 적합한 모델이다. 따라서 위의 3개를 기준으로 가장 적합한 모델을 선정하는 것은 쉽지 않지만 PTFE에서 과도한 변형률과 응력이 발생한 3번 모델을 제외하면 모두가 적합한 모델이다. 그러나 1번, 2번, 4번, 7번 모델은 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 시계방향으로 회전이 발생하였다.

Table 3. S/N ratios for stress, strain and temperature in composite material o-ring

Analysis No.	Stress	Strain	Temperature
1	-37.8371	14.4846	-38.7724
2	-43.8185	11.7912	-39.8793
3	-43.7444	5.3602	-39.9991
4	-48.9991	21.1777	-39.7471
5	-49.2644	24.9100	-38.8659
6	-32.5276	22.2129	-40.0000
7	-57.8884	20.3537	-39.6192
8	-50.0197	18.8619	-39.9939
9	-39.5124	23.3613	-39.9991

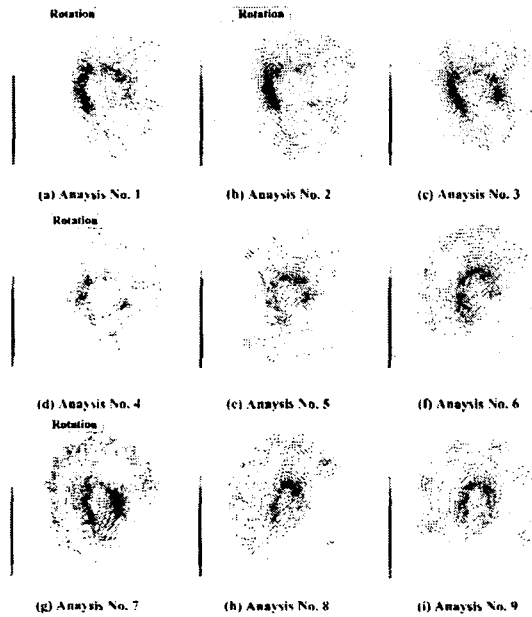


Fig. 8 Displacement vector distributions of o-ring after 10hours

이와 같은 O-링이 가스압에 의해 회전이 발생하면 뒤틀림이 발생하게 되어 밀봉력이 떨어질 위험이 있기 때문에 결국 바람직 하지 않은 모델이다. 나머지 5번, 6번, 8번, 9번 모델의 변형률 SN비와 온도 SN비는 큰 차이가 없으나 응력의 SN비는 큰 차이가 있다. 따라서 응력의 SN비가 가장 큰 판단기준이 되며 6번 모델이 최종적으로 가장 적합한 모델이 된다.

Table 3에서 구한 SN비의 값을 가지고 O-링에서 발생하는 응력, 변형률, 온도에 영향을 미치는 파라메타들의 수준 합과 기여율을 간이분석법을 이용하여 계산하여 table 4~table 6과 같이 정리하였다. 수준의 범위는 각 파라메타의 수준 합계 중에서 가장 큰 수와 가장 작은 수와의 차이이고, 기여율은 수준의 범위의 합에 대한 각 파라메타 수준 범위의 백분율이다.

Table 4의 결과로부터 O-링의 접촉부에서 발생하는 응력에 미치는 영향은 O-링의 홈 깊이인  $\delta$ 가 약 31.78%로 가장 크고 홈의 각도  $\alpha$ 가 28.46%로 약간 작다. 이와 같은 결과는 O-링 홈의 각도가 작을수록, 깊이가 클수록 홈의 기울기가 커져서 접촉면적이 좁아지기 때문이다.

변형률에 미치는 영향은 table 5와 같이 NBR

과 PTFE의 직경비  $d/D$ 가 약 49.21%로 단연 크다. NBR 소재가 변형률이 높게 발생하기 때문에 NBR소재의 양을 결정하는 것이  $d/D$ 이기 때문이다. 그리고 온도에 미치는 영향은 table 6과 같이 O-링 홈의 각도  $\alpha$ 가 43.85%로 가장 높았고 다음으로 압축율이 높았다. 이것은 O-링의 온도는 접촉면적이 넓을수록 온도가 높아지는데 접촉면적에 영향을 미치는 효과가 홈의 각도와 압축율이 가장 크기 때문이다. 홈의 깊이  $\delta$ 의 영향은 4.73%로 거의 없는 것으로 계산되었다.

Table 4. Factors affecting stress in composite material o-ring

		A : $d/D$	B : $\alpha$	C : $\delta$	D : C	Sum
Levels	1	-125.4001	-136.1007	-120.3844	-126.6140	-508.4991
	2	-130.7911	-143.1026	-132.3300	-134.2345	-540.4583
	3	-147.4205	-115.7845	-150.8973	-142.7632	-556.8655
Difference of level		22.0205	28.9401	30.5129	16.1492	97.6227
Affecting ratio [%]		22.9378	28.4562	31.7840	16.8220	100

Table 5. Factors affecting strain in composite material o-ring

		A : $d/D$	B : $\alpha$	C : $\delta$	D : C	Sum
Levels	1	31.6359	60.5723	55.5593	62.7559	210.5234
	2	68.3005	55.5631	56.3303	54.3577	234.5516
	3	62.5769	50.9343	50.6238	45.3998	209.5349
Difference of level		36.6646	5.0816	5.7064	17.3561	64.8087
Affecting ratio [%]		49.2138	15.3298	7.8503	27.6061	100

Table 6. Factors affecting temperature in composite material o-ring

		A : $d/D$	B : $\alpha$	C : $\delta$	D : C	Sum
Levels	1	-118.6508	-117.3854	-118.7663	-117.6375	-472.4400
	2	-118.6130	-118.7392	-119.6255	-119.4984	-476.4761
	3	-119.6122	-119.9983	-118.4842	-119.7401	-477.8348
Difference of level		0.9614	2.6129	0.2821	2.1027	5.9590
Affecting ratio [%]		16.1331	43.8474	4.7341	35.2854	100

#### 4. 결론

본 논문에서는 다구찌 법을 적용하고 유한요소 해석을 사용하여 O-링의 밀봉성능 향상을 위한 최적설계를 하였다. 다구찌 법에 의한 최적설계는 다양한 분야에서 적용되고 검증된 설계기법으로서 엔지니어가 적은 비용과 시간으로 효과적인 설계를 할 수 있도록 도와 준다. 실제 본 논문에서 채택한 4개의 파라메타와 3개의 수준을 모두 해석하거나 실험하기 위해서는 81번의 해석을 수행해야 하지만 단 9번의 해석을 통해 81번의 해석중에서 목적값에 맞는 최적조합을 찾을 수 있었다. 설계 파라메타들이 O-링의 응력, 변형률, 온도 등에 미치는 영향의 순서를 파악함으로써 향후 O-링의 설계에 활용 할 수 있다.

#### 5. 참고 문헌

- [1] Peter Waschle, Heiz K. Muller, "PTFE-Shaft Seal for Higher Pressures", Institut for Machineelement, Unversity Stuttgart, Germany.
- [2] P. Botto, E. Dragoni, A. Strozzi, "Finite Element Redesign of Reciprocating 'PTFE' Rod Seal", pp. 671-683.
- [3] Paker o-ring Handbook
- [4] G. M. Bartenev, V.V. Lavrentev, Friction and Wear of Polymers, 1981.
- [5] 박경진, "자동차 분야에서의 최적설계기술의 응용," 월간 기계설계, pp. 82-89, September, 2002.
- [6] 송서일, 실험계획법, 한경사, June, 2001.
- [7] "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.