

다구찌법을 이용한 O-링의 최적설계 및 수치적 연구

김청균[†] · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Design Optimization and Numerical Study of O-ring using Taguchi Method

Chung Kyun Kim[†] and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – The sealing performance of O-rings is affected by working conditions such as applied pressure, operation temperature, pre-compressed ratio and material properties. In this paper, a pressurized and compressed elastomeric bi-polymer O-ring in which is inserted into a rectangular groove is analyzed by non-linear MARC finite element program based on the Taguchi experimental method. O-rings with 9 different profile models are analyzed for design parameters that are related to the diameter ratio between outer diameter and inner one of bi-polymer O-ring, compressive ratio, groove angle and groove depth. The calculated FEM results showed that the affection ratio of design parameter d/D , which may control sealing pressure of O-rings, is the most influential parameter among the groove angle, groove depth and compression ratio.

Key words – taguchi method, design optimization, o-ring, FEM.

1. 서 론

기계장치에 사용되는 유체가 외부로 누설되는 것을 차단하기 위해 도우넛 형상의 O-링을 널리 사용한다. O-링은 압력용기와 같은 구조물에 설치되어 밀봉을 하는 정적 O-링과 상대 접촉 운동면을 갖는 유공압 장치나 기계평면시일 등에 설치되어 기밀성을 유지하는 동적 O-링의 두 가지가 있다. 따라서, O-링은 같은 동근 형상을 하고 있지만 사용하는 환경조건에 따라서 그 특성을 달리하고 있다.

O-링이 사용중에 밀봉된 유체에 직접 접촉해야 하는 경우는 매체(medium)와 적합성이 우수한 O-링 소재를 선정하여 설계해야 매체로 인한 물리·화학적 문제점으로부터 벗어날 수 있다.

O-링의 설계조건은 O-링의 내구성과 밀봉성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 엄밀한 해석과

최적설계를 수행해야 O-링을 사용한 기계장치의 안전성을 확보할 수 있다. O-링의 소재로 널리 사용하는 탄성체 폴리머는 컴파운드의 종류와 첨가되는 필러(Filler)의 종류에 따라서 기계적 특성과 화학적 성질의 변형에 큰 영향을 받으므로 실제 설계에서는 소재 데이터에 대한 점검이 필요하다.

O-링의 밀봉성에 대한 연구에서 실제의 해석 데이터를 실험적으로 구하기가 대단히 어렵기 때문에 표준 폴리머 소재에 대한 데이터를 사용하여 모델링하고, 설계치를 예측하는 것이 일반적인데, 본 연구에서는 소재에 대한 실험 데이터를 사용하여 해석결과의 정확도를 높이려고 노력하였다[1,2].

본 논문에서는 최적설계 기법으로 널리 활용되고 있는 다구찌법(Taguchi method)을 O-링의 형상 치수에 대한 설계조건을 확보하는데 적용하고, 구체적인 형상에 대한 해석은 유한요소법을 이용하여 O-링의 밀봉력 향상을 위한 여러 가지 O-링 형상에 대하여 최적설계를 수행하였다.

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

2. 본 론

2-1. 중합체

하나의 소재로 제조된 기존의 단일체 O-링(solid O-ring)과 두 가지 소재를 결합제로 접합하여 하나의 소재처럼 사용한 복합소재 O-링의 두 가지가 있다. 기존의 단일체 O-링은 제조하기가 용이하지만 다양한 기계적 특성을 확보하기가 어렵고, 복합소재 O-링은 제조 공정이 비교적 복잡하기 때문에 특수한 사용조건에서 활용되고 있다. O-링의 이러한 설계기술이나 제조 공법은 대부분 특허에 의해 규제되고 있다.

단일체 O-링은 프레스 금형에 의한 기계적 제도가 대부분이지만, 복합소재 O-링은 압출이나 사출에 의해 제조하는 것이 일반적이다. 단일체 O-링에서 폴리머 컴파운드의 동질성과 이질성의 결합특성에 따라서 밀봉성능에 중요한 영향을 미치지만, 복합소재 O-링에서는 기계적 특성에 더욱 중요한 영향을 주기 때문에 컴파운드 선정에서 필러의 물리적 특성, 화학적 특성이 보다 엄격하게 제한되어야 필요한 특성을 갖는 복합소재 O-링이 개발될 수 있다.

복합소재 O-링의 특성은 소재의 가격과 물리·화학적 특성을 서로 혼합하여 최상의 사용조건을 제작하는 것이다. 즉, O-링이 사용할 환경에서 내화학성, 내마멸성, 저마찰성, 내플라즈마성, 고온성, 저온성, 내부식성, 고탄성, 저탄성, 고강도, 저강도, 내방사성 등을 적절히 고려되어야 하는 것으로 O-링의 제조과정에서 이질성에 의한 문제점이 많이 제기될 수 있다.

O-링의 일반소재로 널리 사용하는 NBR과 고온성과 고탄성 강도를 유지하는 PTFE와 같은 중합체는 소재의 비선형 거동특성 때문에 정확한 수치적 해석이 대단히 어려운 분야이다. 따라서 폴리머 중합체의 거동 특성을 파악하기 위해서는 실험적으로 데이터를 얻는 방법을 주로 사용하였다. 비선형 거동특성을 갖는 소재에 유한요소해석의 정확도를 갖는 MARC와 같은 프로그램의 보급과 컴퓨터의 성능향상으로 컴퓨터를 이용한 수치적 해석이 활발하게 진행되고 있다[3,4].

유한요소해석 프로그램을 이용하여 중합체를 해석하기 위해 실험적으로 수행한 응력-변형률 곡선을 기반으로 단일체 O-링과 복합소재 O-링의 밀봉성을 확보하기 위한 최적화 설계를 수행한다. 본 논문에서는 NBR과 PTFE 소재를 Ogden 3차원 모델로 가정하여 비선형 거동특성을 해석하였다. Ogden 모델의 변형 에너지 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} \left[J^{\frac{-\alpha_n}{3}} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + 4.5K \left(J^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서 μ_n 와 α_n 은 물질 상수이고, K 는 초기 체적 탄성계수(Bulk modulus)이며, J 는 체적비(Volumetric ratio)로 $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ 으로 정의된다. 또한, N 은 Ogden 해석모델에서 고려해야 하는 항목의 개수를 나타내며, 보통은 2~3개항 정도를 나타낸다.

Fig. 1은 복합소재 O-링의 기본소재인 NBR과 PTFE의 응력-변형률 특성 곡선으로, 유한요소법으로 해석하기 위해 3차항의 Ogden 모델로 근사화한 결과이다. 이 그림에서 NBR과 PTFE의 응력-변형률 특성곡선은 단축 압축실험에 의해 획득한 응력-변형률 데이터를 사용하였다. 이와 같이 실험에 의해 확보한 곡선을 Ogden

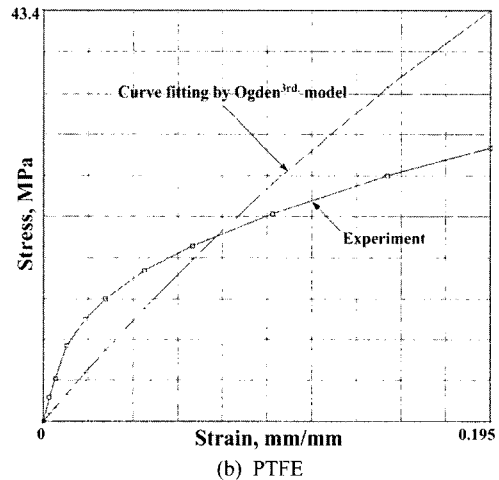
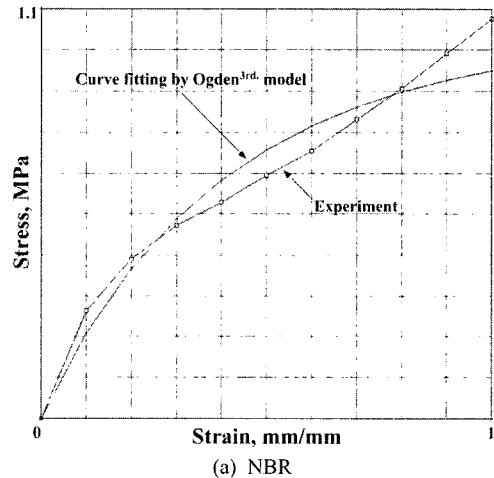


Fig. 1. Stress-strain properties of NBR and PTFE.

모델로 근사화를 하면 Fig. 1에서 보여준 것처럼 근사치 결과를 FEM 해석에 사용하는데 실험적 특성곡선과 완벽하게 일치하지는 않으나 통상적으로 받아들일 수 있는 오차범위 이내에 있다.

2.2. 압축율

O-링의 압축율은 O-링의 초기지름에 대한 변형량의 비율을 나타낸 것으로 변형량은 특정 온도조건에서 일정시간 동안 압축하였을 때 중합체가 원래로 돌아가지 않는 량으로 결정한다.

가스와 액체와 같은 작동유체를 밀봉하는 O-링은 수축이 약간 발생하기 때문에 O-링의 사용조건을 결정할 때는 소재의 압축율과 수축율을 함께 고려해야 한다. 만약 O-링의 수축율을 고려하지 않고 압축율을 결정한다면 O-링의 밀봉력을 저하시켜 시일의 수명을 단축하기 때문이다[5].

Fig. 2는 복합소재로 사용된 O-링의 압축율을 나타낸 그림으로 압축율 C는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C = \frac{(t_o - t_R)}{(t_o - t_s)} \tag{2}$$

여기서 t_o 는 O-링의 초기두께, t_D 는 수직방향의 변형량으로 ASTM에 의해 $t_D = 1/4t_o$ 로 규정된다. t_s 는 $t_s = t_o - t_D$ 의 관계를 가지며, t_R 는 압축된 이후로 다시 복원된 길이를 각각 나타낸다.

2.3. 해석조건

복합소재로 제조된 O-링의 변형거동 특성을 해석하기 위해서 Fig. 3과 같은 구형 그루브의 한쪽에서 가스압이 가해진다. 이때 O-링에 가해지는 가스압은 접촉표면에 수직인 방향으로 항상 작용하고, O-링 소재의 투과율은 무시한다. 또한 중합체인 O-링과 그루브, 플랜지 소재와의 화학적 상호작용은 고려하지 않았고, NBR과 PTFE 소재와 접촉하는 경계면은 완벽하게 접

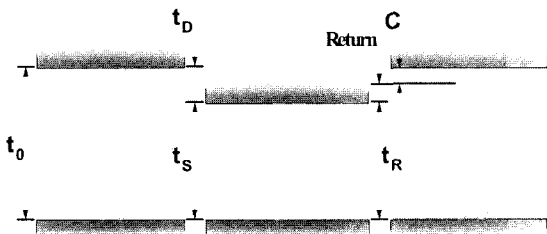


Fig. 2. Compression set of O-ring seals.

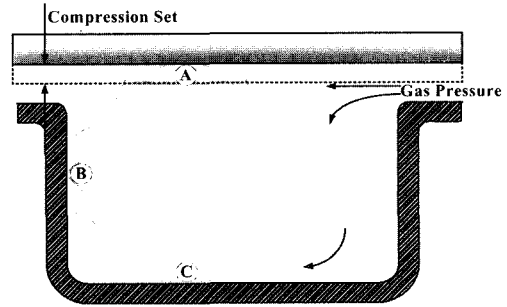


Fig. 3. Boundary condition.

합된다고 가정한다.

O-링의 변형거동 특성을 파악하기 위해 플랜지와 그루브는 강체로 모델링하였다. O-링이 설계에서 제시한 밀봉력을 유지하도록 하기 위해서는 O-링이 접촉하는 그루브와 플랜지의 표면가공이 대단히 중요하다. 중합체 마찰의 분자-운동이론은 O-링이 접촉하는 강체의 표면 거칠기가 중합체의 평균 시슬길이인 100 Å를 넘지 않도록 하여 강체 돌기에 의해 발생할 수 있는 O-링의 부작용을 무시하였다[6].

그러나 현장에서는 이론과 같이 초정밀 가공은 비용과 기술적 난이도 측면에서 바람직하지 않아 1~3 μm의 표면 거칠기로 표면을 가공하고 있다. 그러나 본 해석에서는 강체로 모델링한 그루브와 플랜지의 표면은 완벽하게 균일하다고 가정하였다.

또한, O-링이 실제로 사용하는 작동온도는 중합체에 대단히 중요한 설계변수로 중합체는 종류에 따라 사용이 가능한 온도조건이 선정되어 있다.

본 논문에서는 플랜지와 그루브의 온도가 100°C로 일정하고, 강체와 O-링 사이의 접촉 열저항은 무시한다. 그러나 접촉거동 특성에 대한 유한요소해석 시간을 10시간으로 유지하여 그루브와 플랜지로부터 열이 충분히 전달되도록 하였다.

실험적 결과에 의하면, 중합체의 마찰상수는 온도가 증가할수록 감소하지만, 압축율과 가스압에는 거의 무관한 것으로 알려져 있다. 그러나, 경우에 따라서는 마찰이론과 반대로 온도가 증가할 때 마찰력이 증가하는 비정상적인 경우도 발생한다. 따라서 본 논문에서는 강체와 O-링의 마찰계수는 0.1로 일정하다고 가정하고 유한요소해석과 다구찌의 최적화 설계를 수행하였다[6].

2.4. 다구찌법

다구찌 실험법의 핵심은 파라미터 설계인데, 제품의

성능특성이 잡음(noise)에 둔감하도록 제품설계나 공정설계를 하지는 것이다. 따라서 다구찌 방법은 실험과 설계의 최적조건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 결정하는데, 특성치의 산포가 가장 작은 실험조건을 최적조건으로 결정한다. 이러한 특성치의 산포는 SN (Signal to Noise ratio)값에 의해 알 수 있다. 본 논문에서는 망소특성, 즉 특성치의 값이 작을수록 좋은 경우의 SN값을 적용하였다.

SN값이 큰 경우가 그 때의 설계 파라메타들이 접촉응력을 줄이는데 효과적이라는 것을 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 때문이다. 따라서 O-링의 접촉력이 충분히 확보된 상황에서 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 고찰하였고, 각 파라메타들이 특성값에 미치는 기여율을 계산하였다[7].

2-5. 유한요소해석 모델

O-링의 내부에는 NBR을 사용하고, 외부에는 사용온

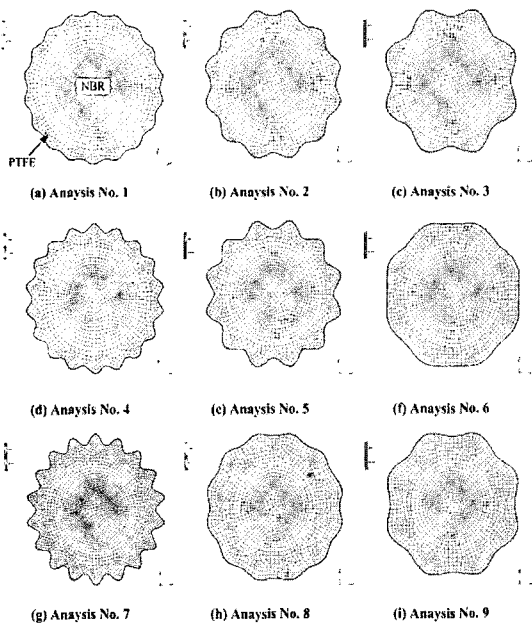


Fig. 4. Analysis model by Taguchi's experimental method.

도가 200°C까지 허용되고 내부식성과 높은 강도를 갖는 PTFE로 제조된 복합소재 O-링을 다구찌법의 L₉ (3⁴)형 직교 배열표에 의해 Fig. 4와 같이 9개의 유한요소해석 모델을 구성하였다. Mooney나 Ogden 해석모델과 같이 대변형 거동을 하는 모델에 적합한 부정형 사각 축대칭 링 요소를 사용하여 중합체 해석의 정확도를 높였다.

본 논문에서는 O-링의 변형거동 특성을 해석하기 위해 압축과 온도를 동시에 고려할 수 있는 열-기계적 연계해석법(Coupled thermo-mechanical analysis)을 이용하였고, O-링의 모델링과 유한요소해석에 사용된 프로그램은 MSC/MENTAT과 MSC/MARC를 각각 사용하였다[8].

Table 1은 유한요소해석에 필요한 NBR과 PTFE의 특성값을 나타내고 있다.

2-6. 설계 파라메타와 직교 배열표

O-링의 최적설계에 사용된 파라메타는 Fig. 5와 같이 O-링의 외곽에 가공된 파형의 홈 개수와 관련이 있는 홈의 각도 α 와 홈의 깊이 δ , O-링의 바깥쪽 지름에 대한 내부의 NBR의 지름비 d/D , 그리고 O-링의 압축률이다. 여기서 4개의 파라메타 모두는 Table 2와

Table 1. Mechanical properties of elastomer

Properties	NBR	PTFE
Elasticity modulus [MPa]	3	460
Density [kg/m ³]	1,150	2,190
Thermal expansion coefficient [$\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$]	94.4	135

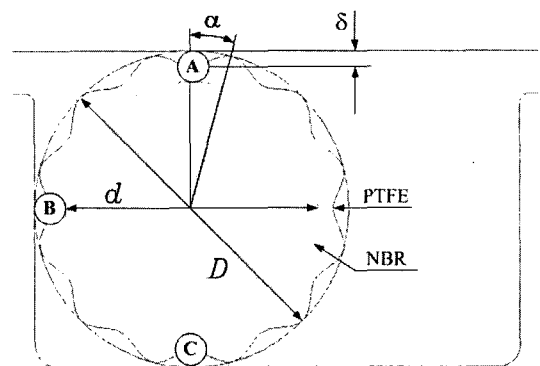


Fig. 5. Design parameters for analyzing bi-polymer O-ring using Taguchi method.

Table 2. Factors and levels for Taguchi method

	Factors			
	d/D	α [degree]	δ [mm]	C
Level 1	0.8	20	0.2	10
Level 2	0.7	30	0.35	15
Level 3	0.6	45	0.5	20

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

Analysis No.	Factors	d/D	α [degree]	δ [mm]	C
1	1	1	1	1	1
2	2	1	2	2	2
3	3	1	3	3	3
4	2	2	1	2	3
5	2	2	2	3	1
6	2	2	3	1	2
7	3	3	1	3	2
8	3	3	2	1	3
9	3	3	3	2	1

같이 3개의 수준으로 각각 설계하였다. 이와 같이 총 4개의 파라미터를 3수준으로 나누어 3수준계 직교 배열표인 $L_9(3^4)$ 형을 사용하였으며, 이들을 요약하면 Table 3과 같이 제시된다.

3. 결과 및 토의

Fig. 6은 복합소재 O-링의 초기온도가 25°C일 때 압축된 상태로 10시간 동안 O-링의 온도변화를 관찰한 해석결과이다. 시간이 흐르면서 O-링의 온도가 그루브와 플랜지의 온도와 같은 100°C로 서서히 수렴하고 있음을 알 수 있다. 특히 6번의 해석모델에서 가장 빠른 수렴을 하고, 그 다음으로 3번과 9번 모델에서 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 6번, 3번, 9번의 해석모델이 빠르게 온도가 올라가는 것은 그루브의 각도가 45°로 O-링이 압축되었을 때 실제로 접촉하는 면적이 넓어지기 때문이다. 반면에 1번과 5번 해석모델은 온도가 가장 늦게 상승하는데, 이것은 접촉면적이 가장 작기 때문이다.

Fig. 7은 10시간이 경과한 후에 그루브, 플랜지와 접촉하는 O-링의 표면에서 발생하는 최대 von Mises 응

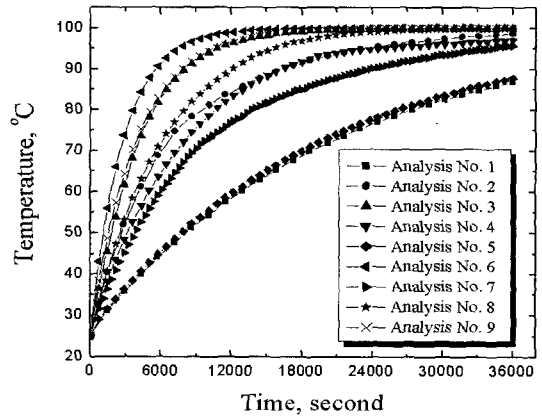


Fig. 6. Temperature history plot of O-rings as a function of a sealing time.

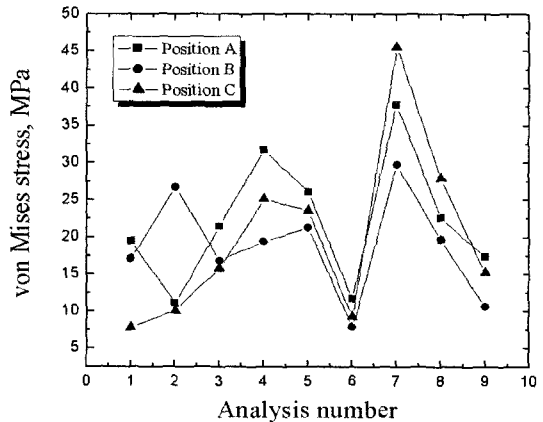


Fig. 7. Von Mises stress at contact position of O-ring after 10 hour's operation.

력을 다구찌 해석모델에 따라 나타낸 그림으로 관찰 위치를 Fig. 4에서 표시하였다. 실질적으로 O-링의 밀봉력은 O-링의 접촉면에서 발생하는 접촉력에 의해 결정되기 때문에, O-링의 밀봉력을 해석하기 위해서는 O-링이 접촉하는 면적에 대한 접촉응력을 해석한다.

해석결과에 의하면 6번 모델이 가장 낮은 접촉응력을 발생하고, 그 다음으로 9번 해석모델이 낮게 나타났는데, 이것은 O-링과의 접촉면적이 다른 모델에 비해 넓기 때문이다.

O-링의 밀봉력을 해석하기 위해서는 O-링의 접촉면에서 발생하는 응력을 관찰하면 되지만, O-링의 내구성을 파악하기 위해서는 O-링이 안정적으로 탄성을 유지하면서 기능을 발휘해야 한다. 이것을 고찰하기 위해서 O-링에서 발생하는 최대 응력과 변형률을 관찰

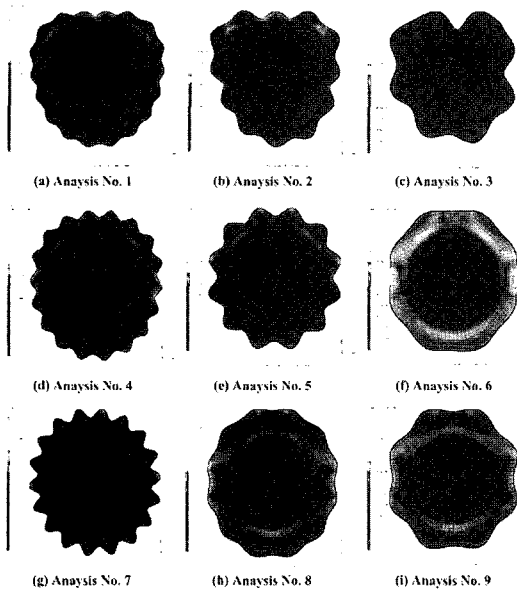


Fig. 8. Von Mises stress distributions in O-rings after 10 hour's operation.

하는 것도 유용한 방법중의 하나이다.

Fig. 8은 O-링에서 발생한 응력과 변형률 분포를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 제시한 결과처럼 응력은 PTFE 소재에서 높게 발생하고, 특히 O-링의 접촉면에서 국부적으로 높은 응력을 보여준다. O-링의 그루브가 45° 간격으로 떨어진 6번과 9번 해석모델이 상대적으로 응력이 넓게 분포하였다. 그러나 6번과 9번 해석모델과 같은 45° 간격의 그루브가 있는 3번 모델의 경우는 $d/D=0.8$ 로 PTFE 소재의 두께가 가장 얇고 압축률이 20%이고, 그루브의 깊이가 0.5 mm로 깊어서 가스압에 의해 그림과 같이 대변형이 발생하면서 응력은 과도하게 집중되어 문제가 된다.

Table 4는 Table 3의 직교 배열표에 의한 9개 모델을 해석하여 O-링에서 발생한 von Mises 응력과 변형률의 SN값을 나타낸 표이다. O-링의 접촉부에서 발생한 응력이 가스를 밀봉하기 위해 필요한 값보다 높게 발생한 상태에서 과도한 접촉력에 의한 손상을 고려한다면 응력과 변형률을 망소특성으로 SN값을 계산하는 것이 바람직하다. SN값을 계산하기 위해서 응력은 Fig. 4에서 표시한 3군데의 접촉위치에서 발생한 응력값을, 그리고 변형률과 온도는 O-링에서 발생한 최대값을 각각 사용하였다.

망소특성으로 계산된 SN값이 클수록 응력과 변형률은 낮게 발생한 것이 된다. 해석 결과에 의하면 응력

Table 4. Stress and strain of S/N ratios in composite O-ring materials

Analysis No.	Stress	Strain
1	-37.8371	14.4846
2	-43.8185	11.7912
3	-43.7444	5.3602
4	-48.9991	21.1777
5	-49.2644	24.9100
6	-32.5276	22.2129
7	-57.8884	20.3537
8	-50.0197	18.8619
9	-39.5124	23.3613

의 SN값은 6번 해석모델이 -32.5276과 가장 크게 발생하여 가장 적합한 모델이고, 변형률의 SN값은 5번 모델이 22.2129로 가장 적합한 모델이다. 따라서 위의 2개를 기준으로 가장 적합한 모델을 선정하는 것은 쉽지 않지만 PTFE 소재에서 과도한 변형률과 응력이 발생한 3번 모델을 제외하면 모두가 적합한 모델이라 생각된다. 그러나 1번, 2번, 4번, 7번 모델은 시계방향으로 회전이 발생한다. 이와 같은 O-링이 가스압에 의해 회전이 발생하면 O-링은 뒤틀림 변형이 발생하게 되어 밀봉력이 떨어질 위험성이 높기 때문에 결국은 바람직하지 않은 모델이라 생각된다. 나머지 5번, 6번, 8번, 9번 모델의 변형률 SN값은 큰 차이가 없으나 응력의 SN값에서는 큰 차이가 있다. 따라서 응력의 SN값이 가장 큰 판단기준이 되며, 6번 해석모델이 가장 적합한 해석모델이 된다.

Table 4에서 구한 SN값을 가지고 O-링에서 발생하는 응력, 변형률에 영향을 미치는 파라미터의 수준 합과 기여율을 간이 분석법을 이용하여 계산하면 Table 5와 Table 6에서 제시한 것과 같다.

Table 5의 해석 결과로부터 O-링의 접촉부에서 발생하는 응력에 미치는 영향은 O-링의 그루브 깊이인 δ 가 약 31.78%로 가장 크고, 그루브의 각도 α 가 28.46%로 약간 작다. 이와 같은 결과는 O-링 홈의 각도가 작을수록, 그리고 깊이가 클수록 홈의 기울기가 커져서 접촉면적이 좁아지기 때문이다.

변형률에 미치는 영향은 Table 6과 같이 O-링의 직경에 대한 내부 NBR의 직경비 d/D 가 약 52.86%로 대단히 높다. NBR 소재가 변형률이 높게 발생하기 때문에 NBR소재의 양을 결정하는 것이 d/D 이기 때문이다.

Table 5. Factors affecting stresses in composite O-ring materials

	A : d/D	B : α	C : δ	D : C	Sum	
Level	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	27.3182	30.5129	16.1492	96.0008	
Affecting ratio [%]	22.9378	28.4562	31.7840	16.8220	100	

Table 6. Factors affecting strains in composite O-ring materials

	A : d/D	B : α	C : δ	D : C	Sum	
Level	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	9.6379	5.7064	17.3561	64.8087	
Affecting ratio [%]	52.8575	13.8945	8.2267	25.0213	100	

4. 결 론

본 논문에서는 복합소재 O-링에 대한 다구찌 실험법을 적용하고, 유한요소해석을 사용하여 O-링의 밀봉 성능 향상을 위한 최적설계를 수행하였다. 다구찌 방법에 의한 최적설계는 다양한 분야에서 적용되고 검증된 설계기법으로서 적은 비용과 시간으로 효과적으로 최적설계를 할 수 있다는 장점이 있다. 실제로 본 논문에서 채택한 4개의 파라메타와 3개의 수준을 모두 해석하거나 실험하기 위해서는 81번의 해석을 수행해야 하지만, 본 해석처럼 단지 9번의 해석을 통해 81번의 해석을 해석한 결과처럼 목적하는 설계값에 도달하는 최적조합을 찾을 수 있었다.

해석결과에 의하면 9개의 다구찌 모델 중 5번, 6번, 8번, 9번 모델이 안정적인 거동특성을 나타내었고 발생한 변형률의 SN 차이가 크지 않았으나, von Mises 응력이 확연히 낮게 발생한 다구찌 모델 6번 즉, O-링의 직경에 대한 내부 NBR의 지름비(d/D)가 0.7이고, 홈의 각도(α)가 45°이며, 홈의 깊이(δ)가 0.2 mm, 압축율(C)이 15%일 때 가장 우수한 밀봉성능을 발휘하는 최적의 설계조건이다.

또한 O-링에서 발생한 von Mises 응력 측면에서 설계 파라메타 중 홈의 깊이(δ)가 가장 높은 약 31.8%의 기여도로 계산되었고, 변형률 측면에서는 O-링에서 변형률이 PTFE보다 큰 NBR의 사용량을 결정하는 지름비(d/D)가 가장 높은 약 52.9%의 기여도를 나타

내었다.

이와 같이 O-링의 설계에서 다구찌법을 적용하여 최적의 설계조건을 선정하고, 설계 파라메타들이 O-링의 응력, 변형률에 미치는 영향의 순서를 파악함으로써 설계의 효율성을 높일 수 있다.

참고 문헌

1. Peter Waschle and Heiz K. Muller, "PTFE-Shaft Seal for Higher Pressures," *Institute for Machine Element*, University Stuttgart, Germany.
2. P. Botto, E. Dragoni and A. Strozzi, "Finite Element Redesign of Reciprocating PTFE Rod Seal," pp. 671-683.
3. Green, I. and English C., "Stress and Deformation of Compressed Elastomeric O-ring Seals," *International Conference on Fluid Sealing*, Firenze Italy, pp. 83-95, 1994.
4. Kim, C.K., Cho, S.H. and Ko, Y.B., "Computer Simulations on the Thermomechanical Distortions of an O-ring Seal including a Temperature," *Proceedings of the Int'l Tribology Conference*, Nakasaki, Japan, pp. 1925-1929, 2000.
5. Parker O-ring Handbook.
6. G.M. Bartenev and V.V. Lavrentev, "Friction and Wear of Polymers," 1981.
7. 송서일, 실험계획법, 한경사, June 2001.
8. "MARC user's manual," Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.