단 측벽 구속하에서 압축 및 내압을 받는 고무 오링의 설계 민감도 연구

박성한* · 김재훈† · 김원훈*
*국방과학연구소 · 충남대학교 BK21메카트로닉스사업단
(2007. 10. 3. 접수 / 2007. 11. 30. 채택)

A Study on Design Sensitivity of Elastomeric O-ring Squeezed and Highly Pressurized Under Laterally One-sided Constrained Condition

Sung-Han Park* · Jae-Hoon Kim† · Won-Hoon Kim*
*Agency for Defense Development
BK21 Mechatronics Group at Chungnam National University
(Received October 3, 2007 / Accepted November 30, 2007)

Abstract : Static or dynamic elastomeric O-ring seals are installed between joining parts, and play key roles of high pressure-tightening. Sealing performance and structural safety of the O-ring are dependent on groove design, plain diameter, squeeze and applications such as pressure and temperature.
In this study, to solve O-ring problem squeezed and highly pressurized under laterally one-sided constrained condition, hyperelastic FE analyses are performed, and FE results are compared with measured ones by computer-aided tomography, deformed shape and extrusion depth of the O-ring. Through the comparisons, FE analysis technique was verified. In order to evaluate design sensitivity, Taguchi method was used to select FE analysis cases. Adjustment parameters are clearance gap, groove corner radius, plain diameter and squeeze. By means of verified FE analysis technique, it has been analysed how the parameters have effects on contact stress fields, internal stress fields, and extrusion depths. Sealing performance has been evaluated based on contact stress fields and contact widths, and structural safety on internal stress and strain, extrusion lengths.
Key Words : O-ring, design sensitivity, finite element analysis, sealing performance, extrusion depth, peak contact stress, one-side laterally constrained, squeezed and pressurized

1. 서 론

오링은 가장 기본적인 기밀부품으로, 구조부품 사이의 그랜드(gland)에 장착되며 압축된 상태에서 압력이 작용하면 기밀(sealing)을 유지한다. 기밀은 압축변형(squeeze)에 대한 고무의 반발력(reaction force)과 내압의 중첩에 의해 각 접촉 계면에서 접촉 응력이 발생하여 유지된다. 1940년대에 고무 오링이 발명된 이후로 오링의 설계, 해석 및 시험 평가 관점에서 많은 연구가 수행되어 왔으나 주로 측벽 비구속 압축(laterally unconstrained and squeezed) 문제에 대한 근사해, 수치 해석 및 측정 연구에 국한되었다[1-3]. 특히 오링의 실제 사용 조건인 단 측벽 구속하에서 압축 및 압력을 받는(one sided laterally constrained, squeezed and pressured) 기밀 설계는 상당히 어려우며 주로 제작자의 자료 및 경험에 의존해 왔다. 최근 소수의 연구자들은 단 측벽 구속하에서 압축 및 압력 중첩시 접촉 응력 분포를 근사해 및 실험으로 제시하였으나[4-7] 접촉 응력장(contact stress field)의 형태에 대해서 서로 상반된 결과를 제시하고 있으며, 다양한 설계 변수의 영향이 고려되지 못하고 있는 실정이다.

고무 오링은 고압을 유지하면서 파괴되지 않아야 하므로 기밀 성능과 구조 안전성이 동시에 만족되어야한다. 기밀 성능(sealing performance)은 최대 접촉 응력(peak contact stress) 및 접촉 폭(contact width)의 크기로 평가된다. 또한 그들은 압축률(squeeze), 조립 틈새(clearance gap), 압력 등에 의존하는 것으

† To whom correspondence should be addressed.
kimjhoon@cnu.ac.kr

로 알려져 있다[8].

구조 안전성은 고무 오링에 작용하는 응력 및 변형율로 평가되고 있으며 실린더와 피스톤의 조립 틈새로 빠져 나오는 압출 현상도 오링 파괴의 주된 원인으로 알려져 있다[9,10]. 오링의 중심부 및 어깨 부(shoulder)에서 파괴는 압축률 만에 의해서도 발생될 수 있다. 중심부 균열은 압축 방향과 수직한 인장 응력 때문에 나타나며 어깨부의 표면 균열이 선경(plain diameter)의 원주방향 응력 때문에 발생한다는 보고도 있다[11]. 오링이 조립 틈새로 압출될 때 가장 응력이 집중되는 곳은 그루브 모서리 부위이며 이곳에서 인장 응력이 고무 강도보다 클 때 오링이 찢어진다고 알려져 있다[10].

또한 오링이 조립 틈새로 빠져나오는 압출 현상은 오링을 설계할 때 기본적으로 고려되어야 할 사항이다. 이 현상 때문에 오링 제작자들은 조립 틈새의 크기를 0.15mm 이하로 설계하며, 특히 백업 링 등의 보조 수단 없이 오링을 사용할 수 있는 압력을 10MPa 이하로 제한하고 있다[12]. 그러나 이와 같은 적용 한계 압력은 오링 설계시 일률적으로 적용될 수 없으며 사용 환경과 고무 재료 및 다양한 설계 변수의 영향이 고려되어야 한다. Pearl은 오링에 대한 광범위한 조사 결과, 오링의 압출 깊이는 압력, 고무 경도 및 조립 틈새에 영향을 받고 선경의 크기나 그루브 모서리 반경 등에 미미한 영향을 받는 것으로 보고하였다[9]. Reddy 등은 실험 연구에서 오링의 압출 깊이가 고무 경도가 낮거나 조립 틈새가 크면 증가하며, 동일한 조립 틈새 및 고무 경도 하에서 압출량의 증가율이 압력이 증가할수록 커진다고 보고하였다[13]. 그러나 압력이 증가할수록 압출량의 증가율이 커진다는 Reddy의 연구 결과는 Pearl의 조사 결과[9] 및 박 등[8]의 연구 결과와 상반된 결과이다. Rapalleri 등[14]은 lip-seal에 대한 연구 결과 압축률이 클수록 압출량이 증가한다고 보고하였다. Eshel[15]은 조립 틈새에 따른 임계 압출 압력을 근사적으로 예측하였고 실험으로 측정하였다. 그러나 실험 및 근사해 만으로 다양한 설계 변수를 고려하여 기밀 성능 및 구조 안전성을 평가하기 어렵다. 특히 고압 기밀 및 구조안전성이 동시에 만족되어야하는 고무 오링의 설계는 다양한 설계 변수와 사용 조건에 지배되므로 Modeling & Simulation 방법을 통한 설계 변수가 분석되어야 신뢰성이 향상된다.

본 연구에서는 단 측벽 구속하에서 압축 및 압력을 받는 오링 문제에 대하여 초탄성(hyperelastic) 대변형 해석을 수행하였으며, 오링의 변형 형상 및 압출 깊이 측정 결과와 비교 분석하였다.

특히 오링의 설계 민감도 연구를 수행하기 위하여 실험 계획법을 적용하였으며, 해석에 의해 조립 틈새, 모서리 반경, 선경 및 압축률이 접촉 응력장, 내부 변형장 및 압출 깊이에 주는 영향이 분석되었다. 기밀 성능은 접촉 응력장 및 접촉 폭의 관점에서 평가되었으며, 구조 안전성은 압출 깊이 및 내부 변형율의 관점에서 평가되었다.

2. 시 험

오링 해석에 필요한 변형 에너지 함수(strain energy function)의 계수를 결정하기 위하여 경도(Shore A) 70 수준인 CR(chloroprene rubber)의 인장, 등 이축(equi-biaxial) 및 순수 전단 시험이 상온에서 실시되었다. 등 이축 시험은 압축 시험시 발생하는 마찰계수의 영향을 배제할 수 있는 효과적인 대체 시험 방법으로 알려져 있으며 결과의 정확성 때문에 널리 사용되고 있는 시험법이다.

오링의 변형 형상은 전산화 단층촬영(computed tomography) 기법으로 측정되었고 압출 깊이는 단층촬영과 프로브를 이용한 변위 센서로 측정되었다. 측정은 오링의 표면이 윤활된 상태로 수행되었다. 단층촬영은 물체에 투과한 방사선을 검출하고 물체의 단면에 대한 선형흡수계수를 사용하여 영상을 재구성하는 시험기법이다. 전산화 단층촬영의 장점은 오링에 손상을 주지 않고 변형 형상을 측정할 수 있으며, 특히 고압 작용시 조립 틈새로 빠져 나오는 고무 압출 깊이 및 변형 형상을 정량적으로 평가할 수 있는 시험기법이다[16]. 치구의 조립 틈새는 1.0mm, 모서리 반경은 0.5mm로 설계하였다. Fig. 1은 압축 및 압력하에서 변형된 오링 형상을 나타내며 E_L은 팽창 길이, E_Z는 압출 깊이를 나타낸다.

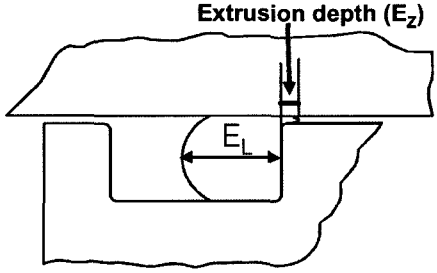


Fig. 1. Deformed shape of O-ring.

3. 유한요소해석 및 실험계획법

3.1. 유한요소해석

Fig. 2는 선경(d)이 7.0mm이고 내경(D)이 121.5mm인 오링의 축 대칭 해석 모델이며 고무 오링의 초탄성 대변형 유한요소해석은 MARC를 이용하여 수행되었다. 오링해석에는 full integration quad 80 요소와 updated Lagrangian 에너지 최소화 원리가 적용되었다. 접촉 계면에서는 stick-slip 마찰 모델이 적용되었으며 마찰 계수(μ)는 0.17[15]이 사용되었다. Salita[15]의 마찰 계수 측정 결과에 의하면, 마찰 계수 0.17은 오링 표면에 그리스가 발라져 있는 상태에서 측정된 평균값이다. 오링 해석에서는 비선형성으로 인하여 해의 수렴성이 좋지 않기 때문에 반복계산의 횟수가 증가되었다. 또한, 계산시간을 최소화하기 위하여 오링을 제외한 구조물들은 강체로 처리되었다. 요소의 변형이 과대하여 수렴성에 문제가 될 경우 자동으로 격자가 재생성 되도록 하였다. 또한 해의 정확성을 향상시키기 위하여 잔차력(residual force) 뿐만 아니라 변위에 대한 수렴 조건이 추가로 적용되었다. 재료모델로는 Ogden 3차 모델이 사용되었으며 오링에 압축만 작용할 경우에는 인장 및 등 이축 시험 결과가 조합되었으며, 압축 및 압력이 중첩될 경우 인장, 등 이축 및 순수 전단(planar tension) 시험 결과가 조합되었다.

Table 1은 비선형 최소 자승법으로 계산된 고무의 Ogden 상수를 나타낸다.

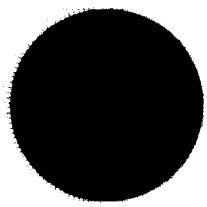


Fig. 2. Axisymmetric FE analysis model of O-ring.

Table 1. Strain energy constants of Ogden model

μ_1	0.87664	α_1	1.4307	K	40137.9
μ_2	65.8816	α_2	-0.120786		
μ_3	-16.7206	α_3	-0.409349		

3.2. 실험계획법과 S/N 비

실험 계획법 중에서 Taguchi 방법은 최소한의 경우의 수로 설계 인자(factor)들의 영향력을 고찰할 수 있는 방법이다[17,18]. 본 연구에서 적용된 직교배열(orthogonal array)은 설계 인자가 4개, 수준수가 3인 경우에 적용되는 $L_9(3^4)$를 사용하였으며, 총 9회의 해석을 수행하여 각 인자의 수준변화에 따른 특성치를 분석하였다. 4개의 설계인자로는 오링 설계 핸드북을 참조하여 조립 틈새(g), 모서리 반경(r), 오링 선경(d) 및 압축률(s)을 선정하였다. Table 2는 직교배열의 내측배열에 들어가는 인자와 그 수준을 제시하였으며, Table 3은 직교 배열표를 제시하고 있다. Table 3에서 하나의 열은 하나의 자유도 즉 하나의 효과에 해당한다.

실험계획법을 활용한 강건 설계 개념은 잡음인자의 영향을 최소화하고 그 품질 설계를 강건하게 유지시키기 위해 S/N(signal/noise)비를 사용한다. S/N비는 신호대 잡음의 비율로 정의되며, 특성치에 대한 잡음인자의 영향을 효과적으로 추정할 수 있는 기법이다. S/N비를 계산하고 분석하여 제일 큰 값을 갖는 S/N비를 구하는 것이 목적이며, 시스템의 출력 특성치에 따라 S/N비의 정의는 달라진다.

본 연구에서는 설계 조정 변수들이 기밀성능 및 구조안전성에 주는 인자들의 영향을 평가하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 이를 위하여 상면 최고 접촉응력(peak contact stress in top contact surface, $p_{ct,max}$), 하면 최고 접촉응력(peak contact stress in bottom contact surface, $p_{cb,max}$), 상면 접촉 폭(w_t) 및 하면 접촉 폭(w_b)는 망대특성을 사용하였으며, 압출깊이(E_Z), 최대 전단응력(max. shear stress, τ_{max}), 최대등가 변형률(max. effective strain, $\varepsilon_{eff,max}$) 및 최대주 변형률(max. principal strain, $\varepsilon_{p,max}$)은 망소특성을 적용하였다.

식 (1) 및 (2)는 각각 망대 및 망소 특성의 S/N비의 정의를 나타내고 있다.

$$\text{망대특성 } S/N\text{비} = -10\times\log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right] \quad (1)$$

$$\text{망소특성 } S/N\text{비} = -10\times\log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i^2\right] \quad (2)$$

여기서 n은 해석의 경우의 수를, y_i는 해석결과인 특성치를 나타낸다.

Table 2. Factors and their levels

Factors		Levels		
		1	2	3
g	Clearance gap(mm)	0.1	0.5	1.0
r	Corner radius(mm)	0.1	0.25	0.5
d	Plain diameter(mm)	ϕ 4	ϕ 7	ϕ 10
s	Squeeze(%)	15	22.5	30

Table 3. $L_9(3^4)$ orthogonal array

Analysis case	Design factors				Combination of analysis
	g	r	d	s	
1	1	1	1	1	g1r1d1s1
2	1	2	2	2	g1r2d2s2
3	1	3	3	3	g1r3d3s3
4	2	1	2	3	g2r1d2s3
5	2	2	3	1	g2r2d3s1
6	2	3	1	2	g2r3d1s2
7	3	1	3	2	g3r1d3s2
8	3	2	1	3	g3r2d1s3
9	3	3	2	1	g3r3d2s1

4. 결과 및 고찰

4.1. 유한요소해석 결과 검증

Fig. 3은 오링 변형 형상에 대한 단층촬영 및 해석 결과를 비교한 것이다. 조립 틈새 1.0mm, 모서리 반경 0.5mm, 압축률 22.5%와 1.38MPa의 내압이 작용할 때 단층촬영 결과와 해석결과 비교로부터 오링의 팽창 길이 및 접촉 깊이 들이 비교적 일치함을 확인 할 수 있다.

Fig. 4는 조립 틈새 1.0mm, 모서리 반경 0.5mm, 및 22.5% 압축률하에서 압력을 증가시킬 때 변위 센서 및 단층 촬영에 의한 측정 결과를 해석결과와 비교한 것으로 오링의 선경을 기준으로 압출 깊이 및 팽창 길이를 무차원화하여 나타낸 것이다. 여기서 압출 깊이는 측벽으로부터 오링이 조립틈새로 빠져나간 길이를 나타낸다. 측정 및 해석 결과로 부터 압력이 증가하면 팽창 길이가 감소하고 그 감소량이 체적 일정의 원리에 의해 조립 틈새로 들어가 고무의 압출 깊이가 증가된다는 것을 알 수 있다. 팽창 길이의 측정과 해석결과는 상당히 잘 일치하였다. 압출 깊이 해석결과는 측정결과와 약간의 차이를 나타내지만 그 경향성은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 압출 깊이의 증가량은 압력이 증가될수록 둔화되는 경향을 보이는데 이는 조립 틈새로 압출이 시작된 후 압출 깊이가 증가됨에 따라 마찰력 및 형상 계수(shape factor)가 증가하기 때문으로 생각된다. 오링은 압축률 22.5% 및 압력 15.68MPa에서 압출시험 후 손상 흔적이 없었다.

Fig. 5는 Table 3에 나타낸 해석 조건에서 압력을 증가시킬 때 오링과 실린더가 접촉하는 계면에서

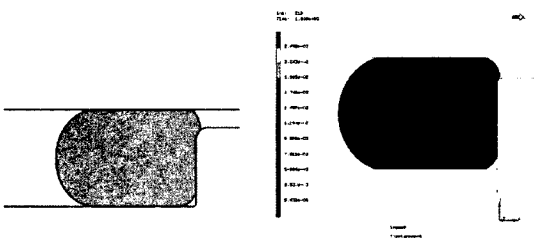


Fig. 3. Comparison of the deformed shape measured by the computed tomography and calculated by the FEM under 22.5% squeeze and the pressure of 1.38MPa.

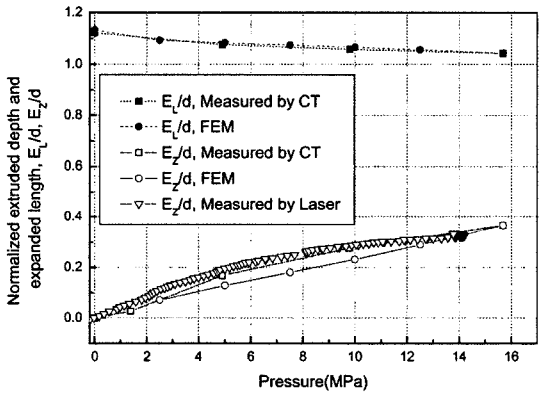


Fig. 4. Normalized extruded and expanded length with experimental results(gap = 1.0mm).

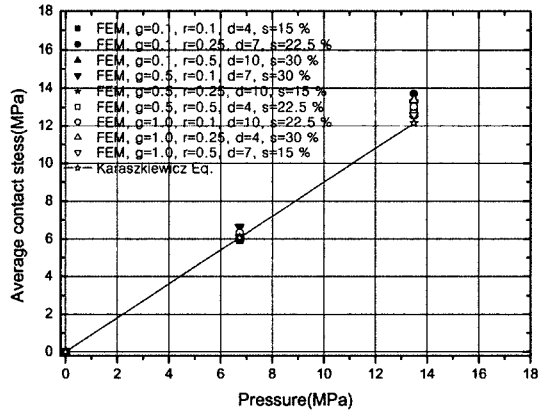


Fig. 5. Pressure-average contact stress according to FE analysis cases.

평균 접촉응력의 해석결과와 Karaszkiewicz[4]의 근사식 (3)에 의한 계산결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서는 압력에 의한 접촉 응력만 고려되었다. 압력 6.74MPa에서 유한 요소 해석 결과는 근사식과 상당히 잘 맞으며 해석 결과의 유용성을 입증한다. 그러나 압력 13.48MPa에서 해석 결과는 조립 틈새가 클 경우에는 근사식과 상당히 잘 일치하였으나 조립 틈새가 작을 경우에는 근사해보다 증가하는 결과를 보여주었다.

$$\bar{\sigma} = 0.9p \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma}$:평균 접촉응력, p: pressure

4.2. 설계 변수에 따른 유한요소해석 결과

Table 3에 의거하여 3종류의 압력조건 즉, 0MPa, 6.74Mpa 및 13.48Mpa에서 해석을 수행하였다. 해석에서 고찰한 결과로는 $p_{ct,max}$, $p_{cb,max}$, w_t, w_b, E_Z, τ_{max}, $\varepsilon_{eff,max}$ 및 $\varepsilon_{p,max}$ 등이며, 해석 결과를 Table 4~6에 제시하였다.

Table 4. Analysis results for 0MPa

Anal. case	$p_{ct,max}$ (MPa)	$p_{cb,max}$ (MPa)	w_t (mm)	w_b (mm)	E_Z (mm)	τ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{eff,max}$	$\varepsilon_{p,max}$
1	0.73	0.77	1.94	1.94	0	0.22	0.23	0.20
2	1.27	1.28	4.55	4.51	0	0.38	0.35	0.31
3	2.16	2.22	8.5	8.43	0	0.69	0.50	0.44
4	2.15	2.20	5.82	5.76	0	0.59	0.49	0.43
5	0.74	0.75	4.90	4.85	0	0.23	0.23	0.20
6	1.23	1.23	2.52	2.51	0	0.38	0.35	0.31
7	1.25	1.27	6.37	6.31	0	0.39	0.36	0.31
8	2.04	2.07	3.24	3.21	0.11	0.56	0.50	0.44
9	0.75	0.75	3.42	3.39	0	0.20	0.23	0.20

Table 5. Analysis results for 6.74MPa

Anal. case	$p_{ct,max}$ (MPa)	$p_{cb,max}$ (MPa)	w_t (mm)	w_b (mm)	E_Z (mm)	τ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{eff,max}$	$\varepsilon_{p,max}$
1	7.37	7.40	2.84	2.84	0.05	4.9	0.85	0.73
2	7.84	8.09	5.89	5.8	0.09	2.09	0.73	0.63
3	8.78	8.85	9.79	9.85	0.16	2.82	0.78	0.68
4	8.94	8.93	6.85	6.62	0.47	6.16	1.07	0.93
5	7.43	7.40	7.11	7.31	0.3	4.81	0.96	0.83
6	7.83	7.69	3.49	3.3	0.56	4.05	0.89	0.78
7	7.92	7.98	8.28	8.51	0.57	12.5	1.29	1.12
8	8.64	8.24	4.19	3.73	0.99	8.97	1.24	0.81
9	7.78	7.36	5.25	4.84	0.98	5.14	0.99	0.86

Table 6. Analysis results for 13.48MPa

Anal. case	$p_{ct,max}$ (MPa)	$p_{cb,max}$ (MPa)	w_t (mm)	w_b (mm)	E_Z (mm)	τ_{max} (MPa)	$\varepsilon_{eff,max}$	$\varepsilon_{p,max}$
1	14.12	14.15	2.89	2.88	0.12	6.86	1.10	0.97
2	14.62	14.7	6.02	5.89	0.20	5.33	0.99	0.86
3	15.58	15.86	9.9	9.87	0.37	4.13	0.92	0.80
4	16.9	15.7	7.12	6.55	0.76	13.01	1.37	1.19
5	14.2	14.14	7.18	7.36	0.51	12.03	1.39	1.20
6	15.03	14.39	3.63	3.29	0.74	8.48	1.23	1.01
7	15.37	14.68	8.78	8.6	1.08	26.29	1.754	1.526
8	18.94	14.88	4.62	3.52	1.82	14.8	1.55	1.35
9	16.44	14.07	5.9	4.76	1.78	10.86	1.34	1.16

4.3. 실험계획법에 의한 해석 결과

앞 절에서 제시한 Table 4~6의 해석 결과 중 압력 6.74MPa 경우에 대하여 실험계획법에 의해 분산분석표(ANOVA, Analysis of variance table)를 작성하였고, 그 결과를 Table 7~10에 제시하였다. Table에서 SS는 변동(variation), df는 자유도(degree of freedom), V는 분산(mean square variation over degree of freedom), Fc는 검정(variation over error mean square), SS'는 순변동, PC(%)는 기여율(rate of contribution), e는 오차(error), T는 총합을 나타낸다.

Table 7~10의 분산 분석표의 점 추정값(point estimation)으로부터 각 설계인자의 수준별 대표적 특성치($p_{ct,max}$ - $\varepsilon_{p,max}$)를 Fig. 6에 제시하였다.

또, Fig. 7은 각 설계 인자의 수준별 평균 S/N비를 나타낸다.

오링부의 여러 특성치에 미치는 인자들의 영향력을 살펴보면 다음과 같다.

망대 특성이 적용된 상면 최고 접촉응력의 경우 가장 지배적인 설계인자는 압축률로 나타났으며, 특히 0MPa에서와 압력 6.74MPa에서는 다른 3종류의 설계인자에 비해 매우 지배적인 영향을 주었으나, 압력이 13.48MPa로 증가함에 따라 압축률의 영향은 감소한 반면, 조립 틈새의 영향이 상당한 수준으로 증가함을 알 수 있었다. 또한, 상면 최고 접촉응력은 압축률 증가에 따라 그 값이 증가하였다.

하면 최고 접촉응력의 경우 그 경향은 상면 최고 접촉응력의 경우와 유사한 결과를 보여 주었으나, 압력 13.48MPa에서는 오링 선경의 영향이 미미하게 작용함을 알 수 있었다.

한편, 상면 접촉 폭과 하면 접촉 폭의 경우에는 3가지의 압력 범위에서 유사한 경향을 보여주었으며, 모두 주 인자는 오링 선경이, 부 인자로는 압축

Table 7. ANOVA table for $p_{ct,max}$

Factor	SS	df	V	Fc	SS'	PC
g	0.0207					
r	0.0398	2	0.0199	1.9248	0.0191	0.7083
d	0.0875	2	0.0437	4.2288	0.0668	2.4727
s	2.5535	2	1.2767	123.4232	2.5328	93.7557
e	0.0207	2	0.0103		0.0828	3.0633
T	2.7015	8				100.0

Table 8. ANOVA table for $p_{cb,max}$

Factor	SS	df	V	Fc	SS'	PC
g	0.0971	2	0.0485	1.6378	0.0378	1.3130
r	0.0593					
d	0.2150	2	0.1075	3.6277	0.1557	5.4097
s	2.5075	2	1.2537	42.3082	2.4482	85.0424
e	0.0593	2	0.0296		0.2371	8.2349
T	2.8788	8				100.0

Table 9. ANOVA table for E_Z

Factor	SS	df	V	Fc	SS'	PC
g	0.8381	2	0.4190	29.4403	0.8096	81.4487
r	0.0621	2	0.0310	2.1803	0.0336	3.3803
d	0.0654	2	0.0327	2.2974	0.0369	3.7156
s	0.0285					
e	0.0285	2	0.0142		0.1139	11.4554
T	0.9940	8				100.0

Table 10. ANOVA table for $\varepsilon_{p,max}$

Factor	SS	df	V	Fc	SS'	PC
g	0.0972	2	0.0486	36.1570	0.0945	55.8414
r	0.0527	2	0.0263	19.5950	0.0500	29.5353
d	0.0167	2	0.0083	6.2066	0.0140	8.2699
s	0.0027					
e	0.0027	2	0.0013		0.0108	6.3534
T	0.1693	8				100.0

률이 영향을 주는 것으로 나타났다. 오링 선경과 압축률이 증가함에 따라 상면 및 하면 접촉 폭은 증가함을 확인할 수 있었다.

망소 특성이 적용된 압출 깊이의 경우 조립 틈새가 매우 지배적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었으며, 조립 틈새의 증가에 따라 압출 깊이는 증가하였다.

최대 전단응력의 경우에는 0MPa에서는 압축률이 주 영향을 주는 인자였으나, 압력이 작용할 경우에는 오히려 조립 틈새가 주 영향을 나타내는 것으로

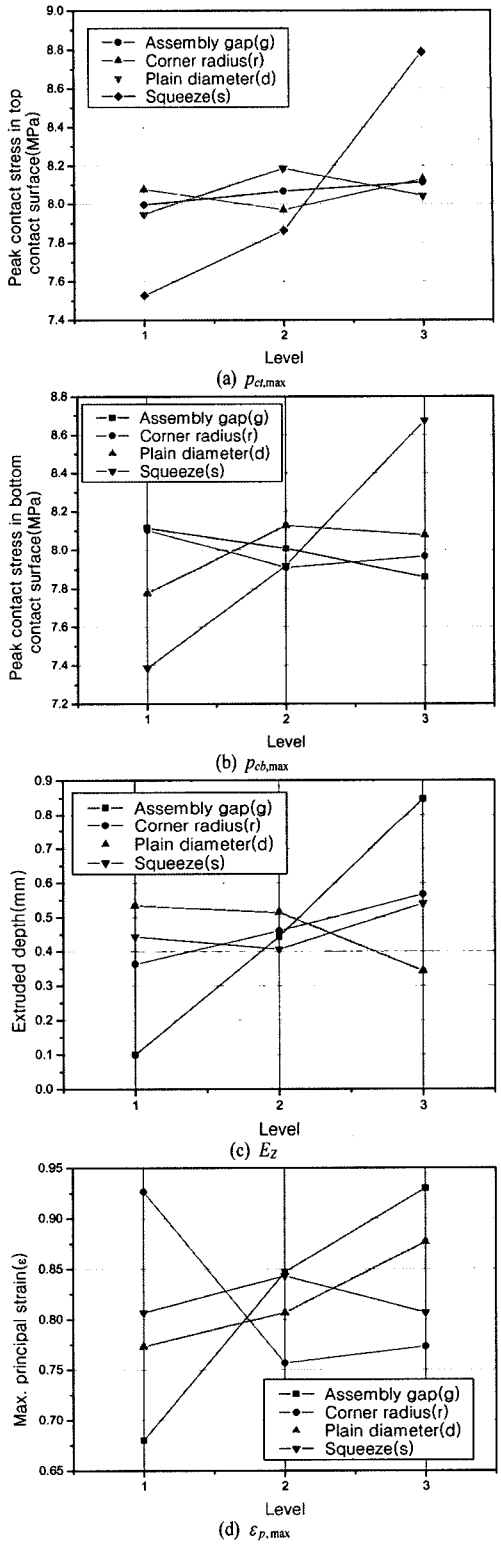
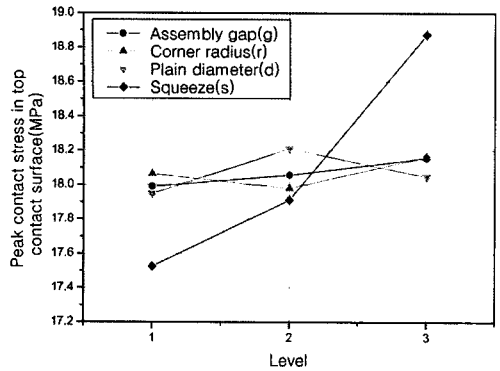
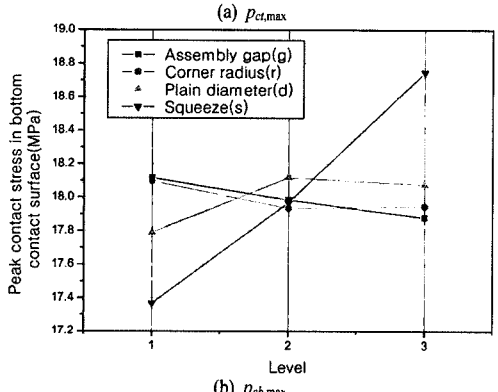


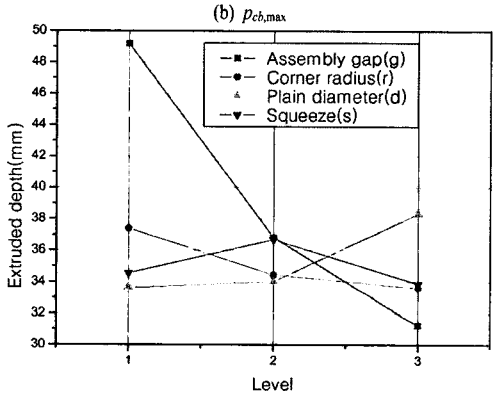
Fig. 6. Response for each level of factor.



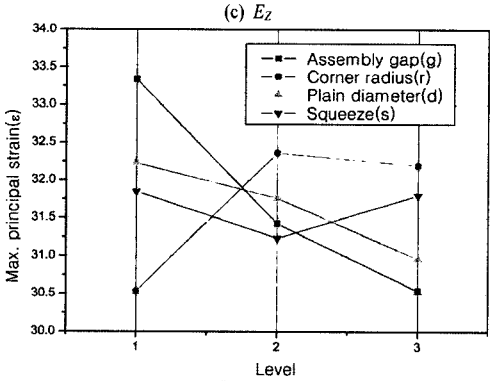
(a) $p_{ct,max}$



(b) $p_{cb,max}$



(c) E_Z



(d) $\varepsilon_{p,max}$

Fig. 7. Mean S/N ratio for each level of factor.

나타났고, 모서리 반경이 부 영향을 주는 인자로 나타났다.

최대 등가 변형률과 최대 주 변형률의 경우에는 0MPa에서는 압축률이 지배적인 영향을 보여주었지만, 압력이 중첩될 경우에는 영향을 끼치는 주 인자는 조립 틈새로 나타났으며, 부 인자로는 모서리 반경이 영향을 주는 인자로 분석되었다. 이 경우에 있어서 조립 틈새의 증가에 따라 특성치들이 모두 증가하는 경향을 보여 주었다.

이상의 결과를 종합하여 살펴보면, 본 논문에서 채택한 4종류의 설계 인자 중 조립 틈새와 압축률이 가장 지배적인 오링 설계 인자로 나타났다. 망대 특성이 적용된 상면 최고 접촉응력과 하면 최고 접촉응력의 경우에는 압축률이 3 수준인 경우에서 또, 상면 접촉 폭, 하면 접촉 폭은 조립 틈새가 3 수준인 경우에서 이상적인 설계 조합을 확인할 수 있었다. 그러나 망소특성이 적용된 압출 깊이, 최대전단응력, 최대 등가 변형률 및 최대 주변형률에서는 조립 틈새가 1 수준인 경우가 이상적인 설계 조건임을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석 결과의 검증을 통하여 단측벽 압축 및 압력을 받는 고무 오링의 설계 민감도를 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

1) 실험계획법을 적용한 분산분석표를 도출하여 각 설계 인자가 오링의 기밀성능 및 구조안전성에 어떤 영향을 주는지를 분석하였으며, 특히 S/N비를 도출하여 다른 잡음에 의하여 그 변화가 적은 오 링 설계 체결부의 강건 설계 방법을 제시하였다. 본 연구를 통해 품질 및 신뢰성이 향상된 오링 설계변수 결정시 더 좋은 설계 기준을 제시하였으며, 따라서 본 방법의 적용으로 설계 및 해석에 따른 비용과 시간을 절감할 수 있다.

2) 설계 민감도 연구에서 채택한 4종류의 설계 인자 중 조립 틈새와 압축률(s)이 가장 지배적인 오링 설계 인자로 나타났다. 망대 특성이 적용된 상면 최고 접촉응력과 하면 최고 접촉응력의 경우에는 압축률의 3 수준에서 또, 상면 접촉 폭, 하면 접촉 폭은 조립 틈새의 3 수준에서 이상적인 설계 조합을 확인할 수 있었다. 그러나 망소특성이 적용된 압출 깊이, 최대전단응력, 최대 등가 변형률 및 최대 주변형률에서는 조립 틈새의 1 수준이 이상적인 설계임을 확인하였다.

참고문헌

1) P. B. Lindley, "Load-Compression Relationships of Rubber Units", J. Strain Analysis, Vol. 1, No. 3, pp. 190~195, 1966.
2) P. B. Lindley, "Compression Characteristics of Laterally-Unrestrained Rubber O-Rings", J. IRI, Vol. 1, pp. 202~213, 1967.
3) A. F. George, A. Strozzi, A. and J. I. Rick, "Stress Field in a Compressed Unconstrained Elastomeric O-ring seal and a Comparison of Computer Predictions and Experimental Results", Tribology, Vol. 20, No.5 , pp. 237~247, 1987.
4) A. Karaszkiewicz, "Geometry and Contact Pressure of an O-ring Mounted in a Seal Groove", Ind. Eng. Chem. Res. 29, pp. 2134~2137, 1990.
5) K. Yokoyama, M. Okazaki, and T. Komito, "Effect of Contact Pressure and Thermal Degradation on the Sealability of O-ring", JSAE Review, Vol. 19, pp. 123~128, 1998.
6) H. Johannesson, "Calculation of the Pressure Distribution in an O-Ring Seal Contact", Proc. 5th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, Sep., pp. 379~387, 1978.
7) P. G .Molari, "Stresses in O-ring Gaskets", 6th Int. Conf. on fluid sealing, Munich, German Federal Republic, pp. B2-15~B2-31, 1973.
8) 박성한, 김재훈, "단 측벽 구속하에서 압축 및 압력을 받는 고무 오링의 구조 해석", 한국안전학회지, 제22권, 제5호, 게제예정, 2007
9) D. R. Pearl, "O-Ring Seals in the Design of Hydraulic Mechanics", SAE Quarterly Transactions, Vol. 1 No. 4, pp. 602~611, 1947.
10) T. S. Kazimierz, "Seal Extrusion", Lubrication Engineering, pp. 198~205, 1970.
11) B. M. Golerik and G.I. Fel'dman, "Failure of Rubber Sealing Rings of Circular Transverse Section under the Action of Stresses", Soviet Rubber Technology, No. 4, pp. 21~23, 1964.
12) MIL-P-5514E, "Packings; Installation and Gland Design, Hydraulic, General Requirements for".
13) D. Reddy and B. S. Nau., "The Static and Dynamic Extrusion of Elastomer Seals into Large Clearances", *10th Int. Conf. Fluid Sealing, Innsbruck*, Austria, pp. 189~196, 1984.
14) T. Raparelli, A. M. Bertetto, L. Mazza, "Experimental Study of Pneumatic Seal Extrusion", Tribology Transactions, Vol. 40, No.4, pp. 715~719, 1977.
15) R. Eshel, "Prediction of Extrusion Failures of O-Ring Seals", ASLE Transactions Vol. 27, No. 4, pp. 332~340, 1984.
16) 김동륜, 김재훈, 박성한, 이환규, "전산화 단층촬영에 의한 오링 변형 거동 분석", 한국 비파괴 검사학회지 게제 예정.
17) S. P. Madhav, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
18) 염봉진, 고선우, 김성준, "제품 및 공정 설계를 위한 다구찌 방법", 한국과학기술원 경영과학, 제7권, 제2호, 12월, 1990.