

ABAQUS를 이용한 O-링 밀봉 부의 설계민감도 분석기법 연구

이방엽, 구송희, 조원만, 오광환
국방과학연구소(4-4-2)

요 약

본 연구는 고체 추진기관의 각종 밀봉 부에 많이 사용되는 O-링의 설계시 고려되는 각종 형상인자의 변화에 따른 O-링의 거동과 응력 상태를 분석하여 설계 최적조건을 찾기 위한 내용을 다루고 있다. 조립 부의 내외경과 조립 공차, 챔퍼길이와 각도, 조립 홈의 외경, 깊이, 폭, 구석반경, O-링의 내경과 선 직경 등의 설계 변수에 의한 조립부 형상과 재료의 물성치, 유한요소 선택 및 요소 분할, 경계조건, 하중조건, 접촉부 정의 등을 MSC/PATRAN3의 PCL^[1]로 프로그래밍 하여 설계변수에 의한 결과 분석을 손쉽게 수행할 수 있도록 시도하였다. 고무의 Hyperelastic 물성치는 문헌상의 자료^[2]에 제시된 Ogden 상수를 사용하였으며 추후에는 인장시험, 순수전단시험, 이 축 인장시험을 통해 실험적으로 측정^[3]하여 적용할 예정이다. 고무의 대변형, 대 변형률을 고려한 비선형 응력해석은 MSC/PATRAN3의 Advanced FEA 모듈과 ABAQUS 5.5를 사용하였다. 본 연구에서의 해석결과를 설계변수들의 영향을 비교 분석하는데 사용하였으나 그 정확도가 입증된 상태는 아니며 추후 실제 조립 및 수압시험을 통해 평가할 예정이다.

1. 서론

고체추진기관의 각종 밀봉 부에 많이 사용되는 O-링은 Fig. 1과 같이 축대칭 형상을 하고 있으며 연소관과 노즐의 조립 부에서 압력 작용시 밀봉 역할을 수행한다. Fig. 2에서의 O-링부 설계 인자는 O-링의 직경(W)과 내경(D_i), 조립 부의 내경(D_a)과 외경(D_b), O-링 홈의 외경(D_c)과 깊이(h), 폭(gw) 및 구석 반경(R₁, R₂)등이다.^[4] 이러한 설계인자들과 O-링 재료의 물성치, 유한요소의 선택, 요소분할, 경계조건, 하중조건, 접촉부 모델링 등을 MSC/Patran3의 PCL(Patran Command Language)를 이용하여 설계 인자의 변화에 따른 결과 분석을 손쉽게 수행할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

본 논문에서는 여러 가지 설계변수 중 O-링의 변형과 응력상태에 가장 중요한 영향을 미치는 O-링의 직경과 홈 깊이에 따른 고무의 압축률과 조립부 내경, 외경 및 설계 공차에 따른 조립틈새를 변화시켜 O-링의 거동과 응력 상태를 비교 분석하여 최적 설계기법을 찾고자 하였다.

고무의 Hyperelastic 물성치는 Ogden 상수를 사용하였으며 추후에는 인장시험, 순수전단시험, 이 축 인장시험을 통해 실험적으로 측정하여 해석에 적용할 예정이며 O-링과 조립 부의 마찰계수도 실험으로 측정할 예정이다. 본 논문에서 다루지 못한 다른 설계변수들의 변화에 따른 설계결과를 심층 분석하면 보다 최적화 된 O-링 밀봉 부를 설계할 수 있으리라 판단된다. 또한 수압시험과 지상연소시험을 통해 고무의 변형을 측정하여 해석의 정확도를 확인할 예정이다.

2. 응력해석

해석모델은 Fig. 2와 같이 O-링 조립 부의 형상을 PCL로 그린 후 O-링의 거동을 고려하여 조립틈새에 접촉되는 부위의 요소를 상세하게 하여 Mesh seed를 설정한 후 요소 분할을 한 다음 접촉요소의 모델링을 하고 형상(Geometry)에 변위 경계조건과 하중 조건을 적용한다. Fig. 3은 요소 분할된 해석 모델과 경계조건 및 하중조건을 나타낸다.

O-링은 축대칭 8절점 사각형 Reduced Hybrid 요소(CAX8RH)를 , 조립부 내경과 외경은 접촉 문제의 Rigid line을 적용하기 위해 축대칭 Bar요소(RAX2)를 Master surface로 하고, O-링 표면은 CAX8RH의 Edge를 Slave surface로 정의하였다.^[5] O-링과 구조물 사이의 마찰계수는 O-링 관련자료를 참조하여 적용하였다.^[6]

O-링의 내면 접촉부는 Rigid Line의 Reference node의 반경방향과 축방향 변위를 고정하였으며 외면 접촉부는 조립 방향인 축방향 대신에 조립 후의 응력상태가 같도록 Reference node를 반경방향으로 이동시켜 해의 수렴성을 좋게 하였다. 압력은 O-링이 조립틈새로 돌출 되는 값을 찾아 500psi로 설정하였으며 O-링의 압력 접촉부 절반의 Geometry에 적용하였다. O-링 재료로 사용된 고무는 비압축성으로 가정하였으며 Hyperelastic Material로서 대변형률에 적합한 모델인 Ogden 상수를 Table 1과 같이 적용하였다.

Table 1. O-링 재료인 고무의 기계적 물성치

Ogden 상수						Poisson Ratio	Friction Coefficient
i	1	2	3	4	5		
μ_i	0.030517	7.8092E-3	2.9288E-8	4.4506E-4	1.2E-4	0.5	0.2
α_i	0.622	2.952	9.692	-1.606	-2.771		
Ogden strain energy potential	$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$						

해석 조건은 Table 2와 같이 조립홈 외경과 조립 틈새를 고정하고 조립부 내경을 변화시켜 압축률을 조정한 3가지 경우와, 조립부 내경과 조립홈 외경을 고정하여 압축률을 일정하게 하고 O-링 홈 깊이를 조정하여 조립틈새를 변화시킨 3가지 경우에 대하여 해석하고 설계민감도를 분석하였다.

Table 2. 설계변수의 변화

항목	압축률 변경			조립틈새 변경		
	15%	17.5%	20%	0.085	0.11	0.135
압축률	15%	17.5%	20%	17.5%		
조립틈새	0.11			0.085	0.11	0.135
조립홈 외경	723.53			723.53		
조립부 내경	735.43	735.08	734.73	735.08		
O-링 홈 깊이	5.84	5.665	5.49	5.69	5.665	5.64

해석은 HP735/125 Workstation에 설치된 MSC/PATRAN3의 PCL로 모델링하였으며 PATRAN3/Advanced FEA 모듈과 Cray YMP/2E에 설치된 비선형 전용 프로그램인 ABAQUS 5.5를 사용하였다. ABAQUS 프로그램에서는 고무의 비선형 탄성 거동 역학인 Hyperelasticity에 의한 재료 비선형(Material Nonlinearity)과 기하학적 비선형(Geometric Nonlinearity)을 동시에 적용하였으며, 고무와 구조물간의 비선형 마찰 접촉에 의한 극심한 비선형성으로 말미암아 해의 수렴성이 좋지 않기 때문에 ABAQUS에서 Default로 제시한 힘의 평형과 마찰평형의 반복 계산횟수를 증가시켜 해석하였다.^[7,8]

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4는 O-링을 조립한 상태에서, Fig. 5와 6은 가압 상태에서의 변형과 응력분포를 나타낸다. 조립된 상태에서는 조립부 내경과 O-링 홈 외경 접촉부에서 압축응력이 크며, 압력이 가해진 상태에서는 O-링 홈 구석 반경에 O-링이 밀착되고 조립틈새로 돌출된 부분에서 최대 응력이 발생하게 된다.

3.1 압축률의 영향

O-링의 압축률은 압축된 길이를 O-링의 직경으로 나눈 백분율로 정의하였다. Fig. 7은 O-링 외부 구조물의 Reference Node에서의 반력을 나타내는데 조립한 상태에서의 반력보다 조립 후 가압한 상태에서의 반력이 11 - 17배 만큼 크며, 가압시 O-링의 압축률이 클수록 구조물에 반경 방향으로 큰 힘이 발생하므로 조립 틈새가 벌어질 위험이 있어 구조물의 설계시 반경방향의 변형을 고려해야 함을 나타낸다.

Fig. 8은 가압후 조립틈새로 O-링이 돌출된 양을 나타내는데 압축률이 작을수록 돌출 양이 크므로 압력이 조립틈새로 셀 확률이 높아지며 밀봉성 향상을 위해서는 압축률이 커야 함을 보인다.

Fig. 9는 가압 후 돌출된 O-링 부위의 최대 전단응력과 최대 인장응력을 나타내며 압축률이 클수록 최대응력이 작아 지므로 가능한 압축률을 크게 해야 O-링이 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

Table 3에는 압축률과 조립틈새의 변화에 따른 O-링의 거동과 반력, 최대 전단응력, 최대 인장응력을 요약하여 제시하였으며 Table 4는 설계결과의 민감도를 나타낸다.

3.2 조립틈새의 영향

Fig. 10에서 O-링 외부 구조물의 반력을 보면, 조립한 상태에서의 반력은 일정하며 가압상태에서의 반력은 조립틈새가 클수록 약간 감소하고 있다.

Fig. 11은 가압후 조립틈새로 O-링이 돌출된 양을 나타내는데 조립틈새가 클수록 돌출양이 크므로 압력이 조립틈새로 셀 확률이 높아지며 밀봉성 향상을 위해서는 조립틈새가 작아져야 함을 보인다.

Fig. 12는 가압 후 돌출된 O-링부위의 최대 전단응력과 최대 인장응력을 나타내며 조립틈새가 클수록 최대응력이 커지므로 가능한 조립틈새가 작아져야 O-링이 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

Table 3. 설계변수에 따른 설계결과

항목	압축률 (조립틈새=0.11)			조립틈새 (압축률=17.5%)		
	15%	17.5%	20%	0.085	0.11	0.135
조립시 반력 (Kg)	179	250	309	250	204	205
가압시 반력 (Kg)	3029	3108	3326	3100	3035	3045
돌출량 (mm)	0.1617	0.1548	0.1526	0.1295	0.1513	0.1778
최대 전단응력 (Kg/mm ²)	0.4852	0.3479	0.2839	0.2575	0.2696	0.3134
최대 인장응력 (Kg/mm ²)	0.9276	0.6535	0.5184	0.4812	0.504	0.5885
최대 전단변형률 (%)	127.7	125.4	114.2	118.4	122.4	116.7
최대 인장변형률 (%)	229.0	219.2	200.4	205.1	212.0	202.1

Table 4. 설계변수의 변화에 따른 설계결과의 민감도

항목	압축률 증가량		조립틈새 증가량	
	15% -> 17.5%	17.5% -> 20%	0.085 -> 0.11	0.11 -> 0.135
조립시 반력 (Kg)	+71	+59	0	0
가압시 반력 (Kg)	+79	+218	-65	+10
돌출량 (mm)	-0.4618	-0.0002	+0.0218	+0.0259
최대 전단응력 (Kg/mm ²)	-1373	-640	+0.0121	+0.0438
최대 인장응력 (Kg/mm ²)	-0.2741	-0.1351	+0.0228	+0.0845
설계민감도	- 반력 증가 - 돌출량 감소 - 고무의 응력 감소		- 반력 불변 - 돌출량 증가 - 고무의 응력 증가	

4. 결론

O-링 밀봉부를 MSC/Patran3의 PCL(Patran Command Language)로 프로그래밍하여 구조해석에 적용해 본 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 주요한 설계변수를 용이하게 변화시켜 가며 설계결과에 미치는 영향을 파악할 수 있었으며 추후 모든 O-링 설계변수가 결과에 미치는 설계민감도를 분석하면 설계조건에 부합하는 최적 설계 기법을 확립할 수 있으리라 판단된다.
- (2) O-링의 압축률이 클수록 틈새 돌출량이 작아 밀봉성능이 좋아지며 고무의 안전율이 증가하므로 설계상 유리하나 반력이 커지므로 구조물의 변형에 주의해야 한다.
- (3) O-링부 내외경과 제작공차에 의한 조립틈새는 작을수록 돌출량이 작아 밀봉 성능이 좋아지며 고무의 구조적 안전율도 증가하나 반력이 커지고 조립성이 나빠지므로 가공공차 및 조립성을 고려하여 설계하여야 한다.
- (4) 해석에 적용할 고무의 실제적인 비선형 물성치를 확보하기 위해서는 인장시험, 순수전단 시험, 이축 인장시험을 수행하여야 하며, 고무와 구조물 사이의 마찰계수도 측정하여 해석에 적용하여야 한다.

참고문헌

- (1) 한국 엠에스씨, "P3/PATRAN-PAT304 Course Notes", Patran Manual
- (2) E. Becker, T. Miller, M. Moyle, "Development of Methodology for ASRM Flexseal Analysis", Final Report to Gencorp aerojet ASRM Division
- (3) ABAQUS/Standard Example Problems Manual, Vol. 1, version 5.4, pp 2.2.3-1 ~ pp 2.2.3-17
- (4) 오광환, 조원만, "고체 추진기관의 O-링 밀봉설계 및 해석", pp6-14
- (5) ABAQUS/Standard User's Manual, Vol. 1, version 5.4, pp 5.1.1-1 ~ pp 5.2.4-1
- (6) M, Salita, " A simple Finite Element Model of O-Ring Deformation and Activation During Squeeze and Pressurization", AIAA-87-1739, June 1987, pp 1-16
- (7) ABAQUS/Standard User's Manual, Vol. 2, version 5.4, pp 2.14.1-1 ~ pp 2.14.4-3
- (8) ABAQUS/Standard User's Manual, Vol. 2, version 5.4, pp2.14.1-1 ~ pp2.14.4-3

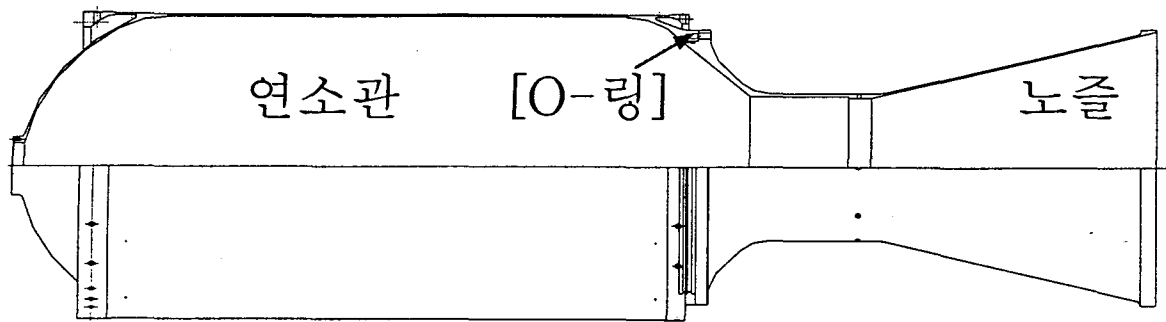


Fig. 1 O-Ring part of Solid rocket motor

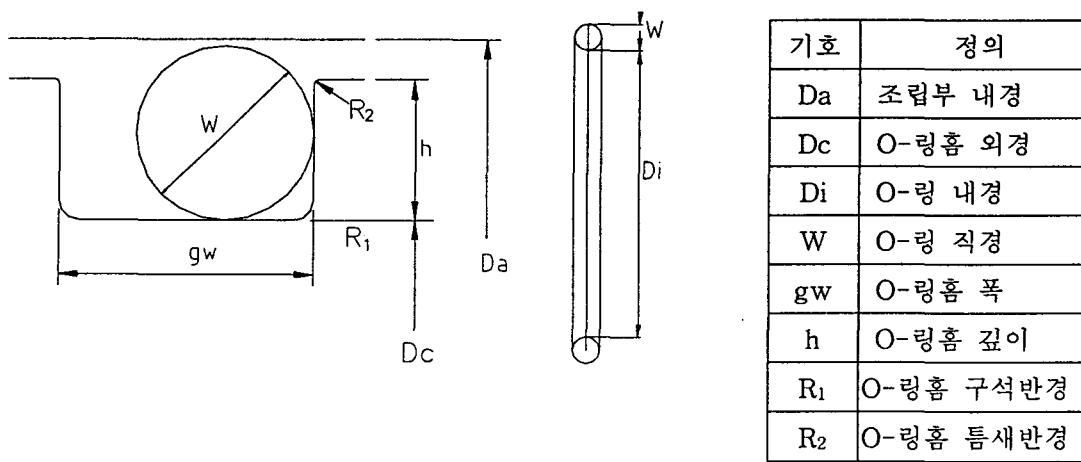


Fig. 2 Configuration of O-Ring part

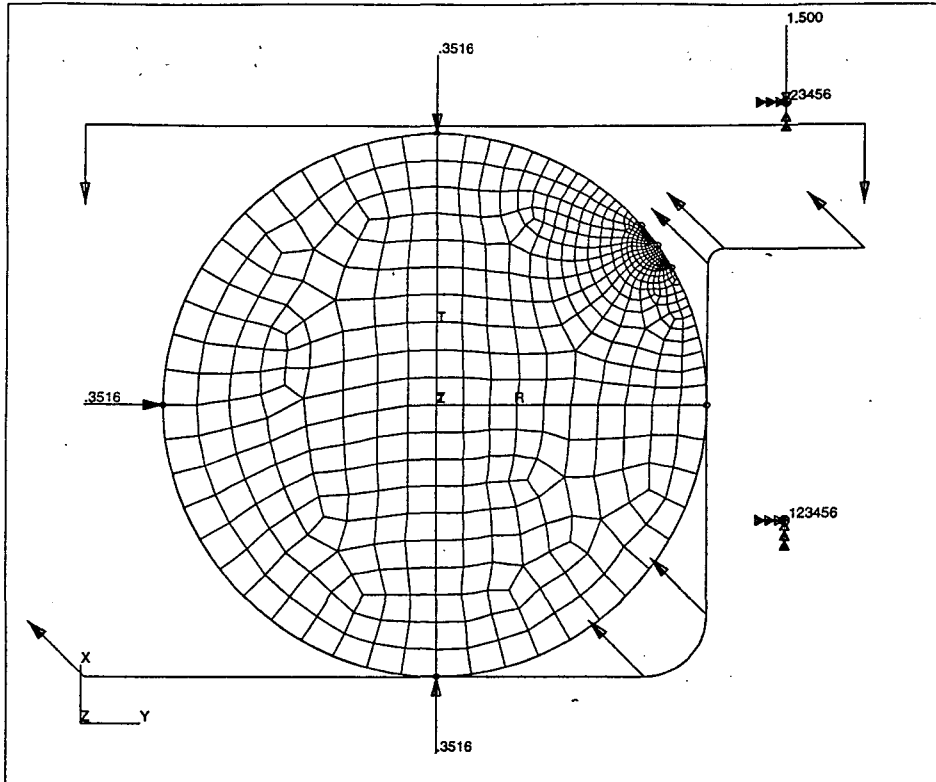


Fig. 3 Finite Element Model of O-Ring part

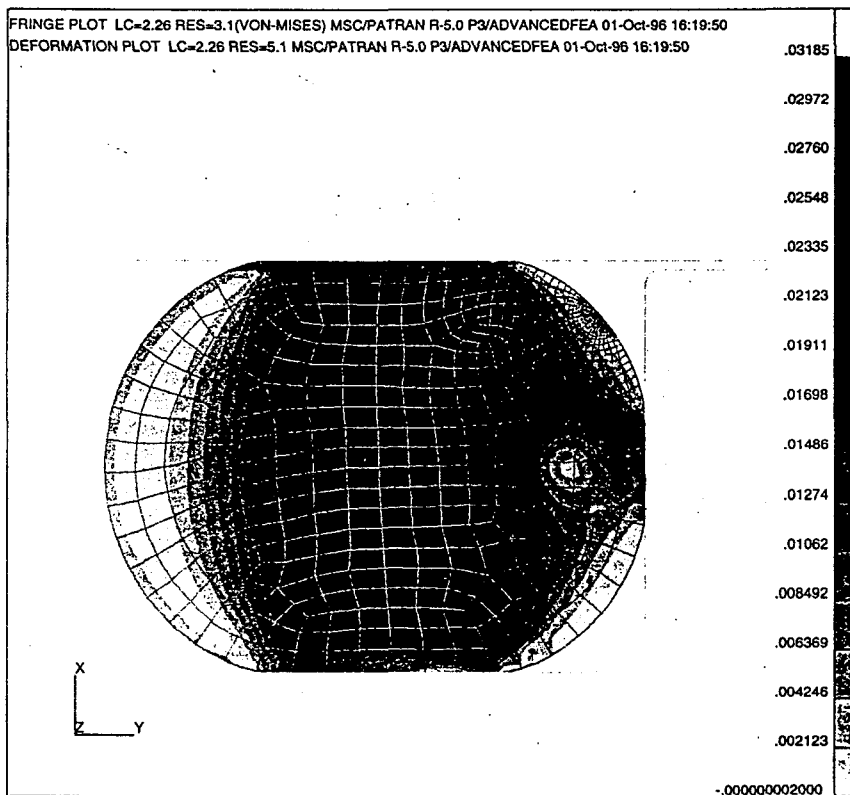


Fig. 4 Deformation and stress distribution after jointing

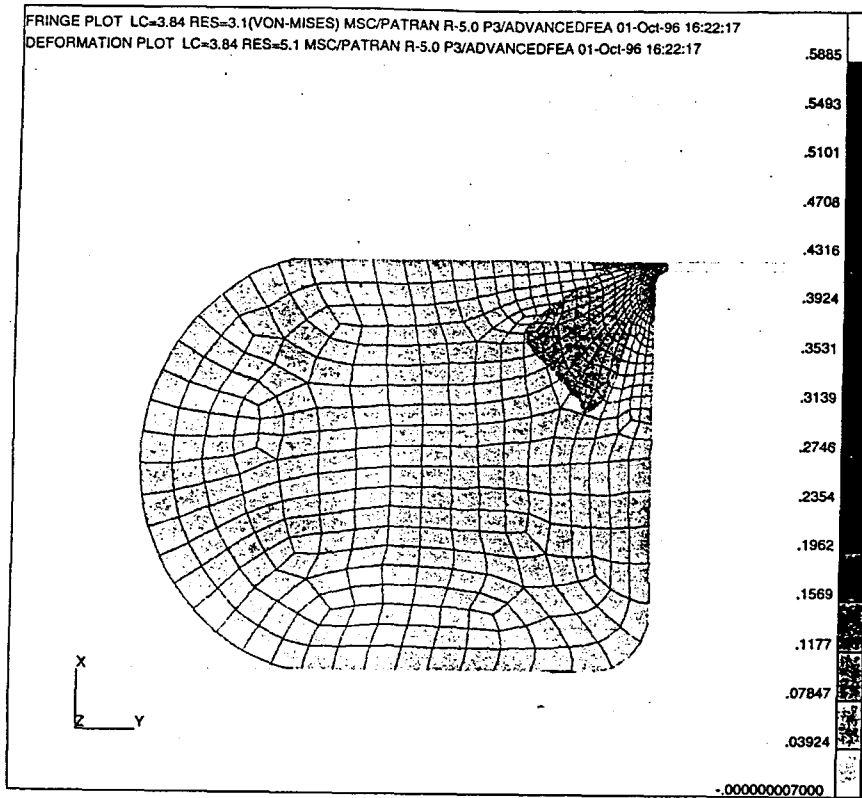


Fig. 5 Deformation and stress distribution after pressurization

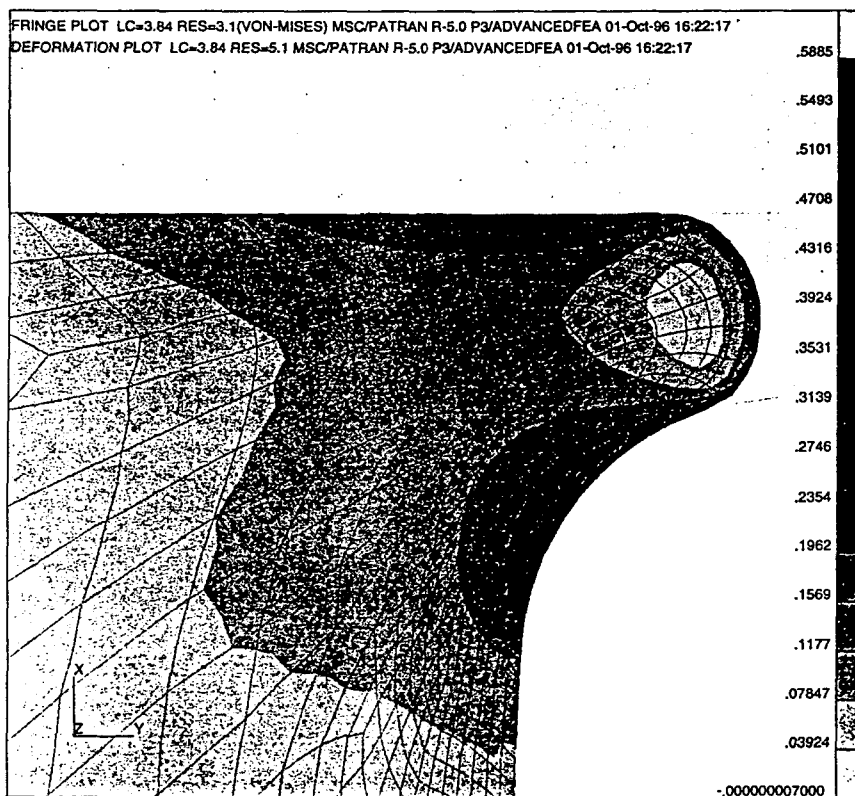


Fig. 6 Detailed deformation and stress distribution after pressurization

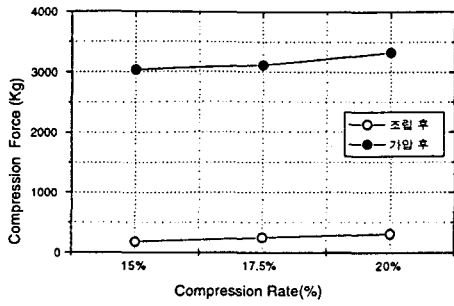


Fig. 7 Compression force according to the compression rate

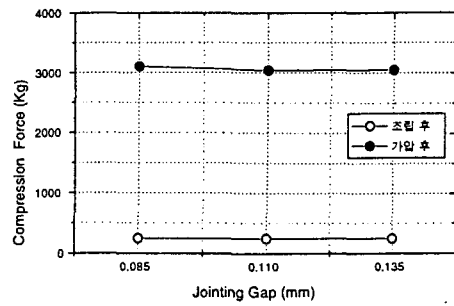


Fig. 10 Compression force according to the jointing gap

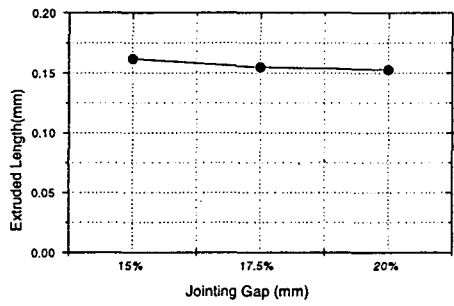


Fig. 8 Extruded Length according to the compression rate

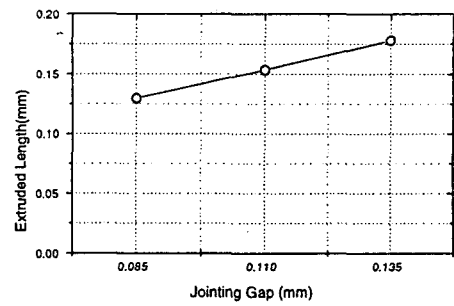


Fig. 11 Extruded Length according to the jointing gap

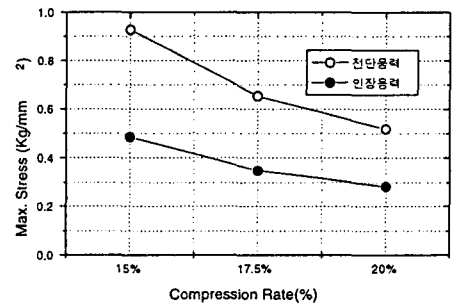


Fig. 9 Max. Stresses according to the compression rate

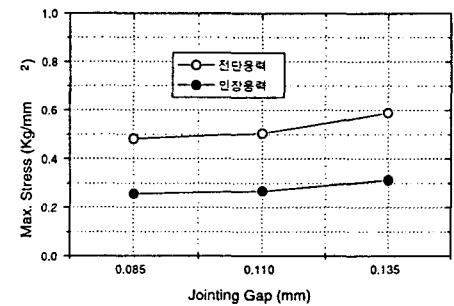


Fig. 12 Max. Stresses according to the jointing gap