

유압액추에이터용 U자형 시일의 해석 및 실험적 고찰

유명호*, 이택성#, 권종호**

Computational and Experimental Investigation on U-type Seal of Hydraulic Actuator

Myung-Ho Yoo*, Taek-Sung Lee# and Jong-Ho Kwon**

ABSTRACT

Seals are usually made from elastomer, a kind of rubber, and it has the non-linearity and hyper-elasticity. U-type seals are used to prevent the leakage of internal fluid sealed in hydraulic actuator because they have more excellent performance than O-rings or rectangular seals. As a core part of hydraulic actuator, U-type seal gives much effect on performance and reliability of actuator. This study considers an NBR U-type seal under high pressure of a hydraulic actuator, and provides its deformation, stress-strain characteristic and contact force using the non-linear finite element analysis. Analysis results are compared with the experimental ones performed by the self-developed testing equipment. Verification result shows that this study presents a good application process for the effective design of U-type seals under high operation pressure.

Key Words : U-type seal (U자형 시일), Hydraulic actuator (유압액추에이터), NBR(Nitrile Butadiene Rubber, 니트릴 합성고무), Finite element analysis (유한요소해석), Experimental verification (검증시험)

1. 서론

산업계 전반에 걸쳐 생산성 향상을 목적으로 관련설비의 고도화가 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 큰 힘을 필요로 하는 산업설비나 건설 중장비 등에 사용되는 유압액추에이터의 성능은 압력의 전달과 밀봉의 역할을 하는 시일(seal)에 의해서 좌우된다. 유압액추에이터는 일반적으로 흔히 볼 수 있는 건설 장비인 굴삭기 및 크레인뿐만 아니라 안정성을 최고로 여기는 항공기의 랜딩기어(landing gear)나 운항조종 계통 등에도 폭넓게 적용되고 있

으며, 이러한 유압장치들은 성능적인 면에서 좀더 빠르고 강한 힘을 내면서도 크기는 줄이는 방향으로 설계, 제작되고 있다. 이와 같이 중요한 부분에 적용되는 유압액추에이터의 성능은 시일의 성능을 얼마나 우수하게 확보하느냐에 달려있기 때문에 시일에 대한 연구의 중요성은 계속하여 증가되고 있다. 선진국에서는 일찍부터 소재 및 제조에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서는 최근에야 연구소나 대학을 중심으로 연구가 진행되고 있으나 아직은 기초적인 시험데이터의 확보나 해석방법의 체계 확립에 주력하고 있는 실정이다.

* 접수일: 2006년 5월 15일; 게재승인일: 2006년 11월 6일

(주)에스제이테크 R&D센터

교신저자 : 한국산업기술대학교 기계설계공학과

E-mail: lts724@kpu.ac.kr Tel. (031) 496-8222

** 신홍대학 자동차과

U자형 시일은 내유성을 갖는 합성고무인 탄성중합체(elastomer)로 주로 제조되며, 근래에 와서는 합성고무보다 물리적 특성이 우수한 TPU (Thermoplastic Polyurethane)로도 제조 생산되고 있다. 이것은 유압액추에이터와 같은 밀봉된 유체의 누설을 보다 적극적으로 방지하기 위한 U자 형태의 단면형상을 갖고 있기 때문에 기존에 널리 사용되어지는 O-ring 또는 Rectangular 형태의 시일보다 우수한 밀봉성능을 가지고 있으며, 이러한 장점으로 인하여 주로 밀봉대상의 압력이 변화되고 밀봉부위가 움직임이 있는 장치에 주로 사용된다. 또한, 건설중장비와 산업기계 등에 적용되는 유압액추에이터의 핵심 부품으로서 성능과 신뢰성에 가장 큰 영향을 가지고 있다. 그러나 이와 같은 시일의 중요성에도 불구하고 초탄성체(hyperelastic material)인 고무재료의 특수한 성질로 인하여 체계적인 방법보다는 경험적이고 단순반복적인 시행착오를 통해 제품이 생산되고 있는 실정이다.

국내 연구동향을 살펴보면, 김원두 등^{1,2}이 고무재료의 물리적 시험 및 고무부품 설계나 유한요소해석에 적용할 수 있는 기초적인 시험데이터나 관련 기술 등을 제시하였다. 김청균³은 고무 립 시일(lip seal)의 접촉거동에 관한 유한요소해석 결과를 보고하였고, 심우전⁴은 립 시일의 접촉력과 동적거동에 관하여 연구하였다. 또한, 산업계에서 가장 널리 사용되는 시일인 O-ring에 대해서는 고영배⁵가 이종소재를 사용한 반도체용 오링 시일의 접촉거동해석에 관한 연구를 통해 열 특성을 고려한 이종소재에 관한 결과를 제시하였다. 본 연구와 관련된 U자형 시일에 대해서는 구분은⁶이 자동차용 마스터 실린더에 사용하는 저압용 유압 시일에서 누유와 관계된 적합한 형상 설계에 관한 기초 자료를 제시 하였다. 국외의 연구동향을 살펴보면, Nikas와 Sayles⁷가 극한 온도환경과 고압 상태의 사각시일(rectangular seal)에 관하여 연구하였으며, Mokhtar⁸는 회전체의 축(shaft)이 어긋난 상태에서 스프링이 없는 U자형 시일에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 유압용 시일 재료인 NBR(Nitrile Butadiene Rubber)로 제조된 U자형 시일이 유압액추에이터 내에서 높은 압력을 받았을 때, 시일의 비선형 거동과 응력 및 변형 특성, 접촉력 등을 유한요소해석에 의하여 구하였고, 해석결과는 검증용 위하여 제작한 시험 장치에서 실험 결과와 비교하였다. 연구결과는 U자형 시일과 접촉 요소의 설계

에 적용할 수 있으며 해석에 사용된 소프트웨어는 비선형 해석 프로그램인 MARC^{9,11}이다.

2. 비선형거동 및 응력해석

2.1 U-type Seal

U-type 시일은 Fig.1과 같은 유압용 액추에이터(actuator)의 오일 누출을 방지하는 중요한 부품으로 Fig.2에 나타낸 바와 같이 전체적으로 원형의 형태를 유지하고 있으며, U자 형태와 같은 단면형상을 가지고 있다.

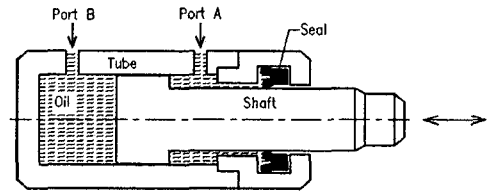


Fig. 1 U-type seal in hydraulic actuator

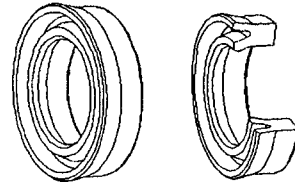


Fig. 2 Shape and cross-section of U-type seal

2.2 유한요소모델

U자형 시일은 Fig.2와 같이 축대칭 형상을 하고 있으므로 수치적 계산의 효율을 위해 Fig.3과 같이 2차원 축대칭요소(2D axisymmetric element)를 사용하였다. 재료는 유압액추에이터의 고압용에 주로 사용하는 높은 경도를 갖는 NBR Hs 90 (shore A)이며, 파단시 인장강도는 27~29MPa, 신율은180~210%로 본 연구 단계에서 배합하고 시험시편을 제작하여 얻은 기계적 특성이다. 유한요소는 MARC의 full- Hermann formulation quad 82를 사용하였고, auto mesh 생성기능을 이용하여 요소 망을 생성한 후 시일에 큰 압력이 작용할 시에 돌출(extrusion) 변형이 나타날 수 있는 우측하단 모서리 부분에 대하여 세밀하게 요소망을 추가하였다. 유한요소모델의 요소망의 요소 수는 2778개, 절점 수는 2956개이다. 해석을 위한 재료 물성치는 Fig.4와 같은 상온상태의 이축인장 시험결과를 사용하였고, 유압용 U자형 시일은 액추에이터에 장착 사용될 때 최

대 25%의 변형률 범위 내에서 변형되므로 변형률 25% 이내에서 실험한 Fig.5의 5회 하중반복 응력-변형률 곡선 중에서 안정화 된 마지막 곡선을 curve fitting하여 물성값(Table 1)을 얻었다.

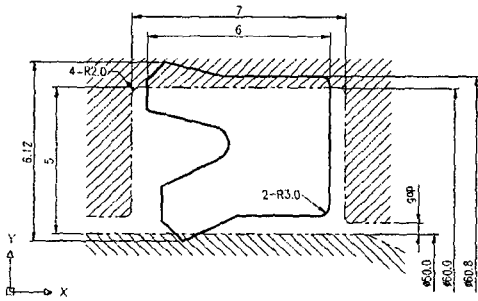


Fig. 3 Shape and dimension of analytical model

Table 1 Material constants
(Biaxial Tension, NBR90, 25%, 20°C)

terms	Ogden		Mooney-Rivlin	
	μ (MPa)	α	MPa	
1	-1.6013	-5.5601	C10	27.3624
2	0.8690	-25.3532	C01	-22.3222
3	0.8567	50.7911	C11	9.5926

Table 1에 표현된 물성값은 다음과 같은 과정을 통해 결정하였다.

유한요소해석에서 사용하는 변형률 에너지 함수(W)는 대표적으로 식(1)과 같이 탄성변형률 불변량 함수인 Mooney-Rivlin 3항 모델과 식(2)의 주연신율 함수인 Ogden 3항 모델로 표현된다.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3) \quad (1)$$

$$W = \sum_{n=1}^3 \frac{\mu_n}{a_n} (\lambda_1^{a_n} + \lambda_2^{a_n} + \lambda_3^{a_n} - 3) \quad (2)$$

여기서 I_1, I_2 는 각각 탄성변형률 1차, 2차 불변량이고, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 는 주연신율이다. C_{10}, C_{01}, C_{11} 은 Mooney-Rivlin 3항 상수이고 μ_n, a_n 은 Ogden 상수이며 실험으로부터 얻어지는 재료상수이다¹¹.

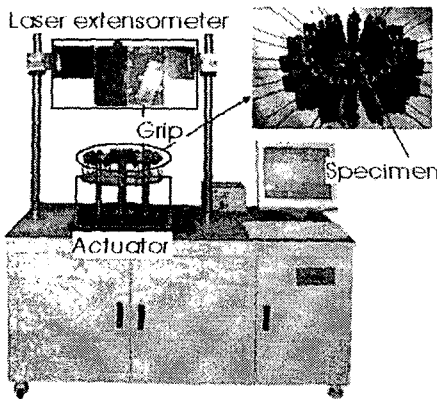


Fig. 4 Biaxial tension test equipment and specimen

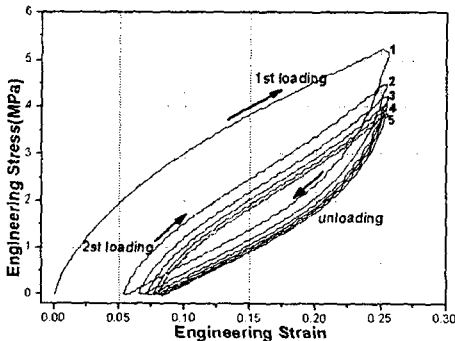


Fig. 5 Biaxial loading and unloading curves

2.3 경계조건과 하중조건

유압액추에이터 내부의 시일 조립상태를 유한요소해석의 경계조건으로 나타내기 위하여 시일의 소재는 탄성변형체로 하고, 시일과 접촉하는 상단과 하단의 홈(groove)과 축(shaft)은 강체(rigid body)로 설정하였다.

시일을 홈에 장착할 때 시일의 상단에 있는 홈은 0.5mm 만큼 -Y방향으로 40스텝 동안 하강하여 시일을 압축하고, 이어서 좌측 축은 X방향으로 8mm 만큼 10스텝 동안 이동하여 시일과 접촉하도록 하였다. 또한 시일은 홈 내에서 X축 방향으로 변위구속이 없는 상태로 설정하였다. 그리고 유압력은 Fig.6과 같이 시일 단면 좌측에서 우측으로 향하도록 하고, U-cup 안쪽에서 350스텝 동안 시일을 0~35MPa로 점차 가압하는 것으로 설정하였다. 또한 시일의 간섭량은 약 18%인 1.12mm이며, 이 치수는 현재 산업현장에서 사용 중인 시일을 참고하여 설정하였다.

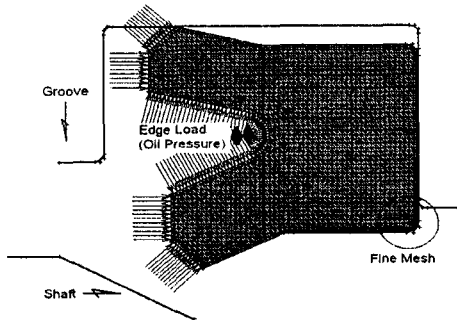


Fig. 6 Boundary and load conditions

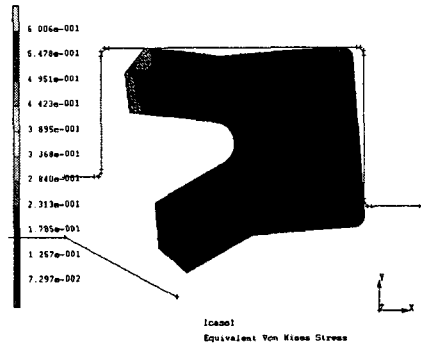


Fig. 7 Stresses before shaft insertion

2.4 해석 결과

2.4.1 응력 및 변형

액추에이터에 시일을 조립하는 방법은 축이 없는 상태에서 홈에 시일을 삽입하고 축을 밀어 넣는 방법을 사용한다. Fig.7은 축 조립 전의 응력상태로 시일의 단면 모양이 반 시계 방향으로 약간 기울어진 상태를 취하고 있음을 나타내며, 이때 립 경이 조립시의 중요한 역할을 한다. 간섭량이 클수록 립은 아래쪽으로 내려가며, 시일 내경이 삽입되는 축의 끝 모서리 경 보다 작을 경우 조립에 영향을 줄 수 있다.

Fig.8은 초기의 홈과 축이 이동하여 시일과 간섭된 상태에서의 응력을 보여주고 있다. 이 때의 간섭량은 Fig.3의 좌측부분 치수에서 시일이 조립되기 전의 자유상태인 6.12mm에서 완전히 조립된 후 5mm와의 크기의 차이인 1.12mm를 말한다. 상부의 홈이 하강하여 밀착되고 우측 수직벽 쪽에는 시일의 하단부가 벌어지면서 U-cup 안쪽에 응력이 발생하고 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이어서 U-cup 안의 우측에서 좌측으로 유압력이 작동되면 시일은 홈의 우측 수직 벽에 완전히 밀착되고 축에 립 끝부분만 접촉되었던 상태에서 시일 아래쪽 좌측 립에서 우측하단의 라운드부분까지 거의 수평 상태에 가깝게 변형된다. 또한 Fig.9와 같이 시일의 우측하단의 축과 홈의 틈(gap)으로 돌출현상(extruded part)이 발생되면서 유압이 커지면서 응력이 크게 증가한다.

산업현장에서는 시일의 구경에 따라 틈(gap)의 크기를 달리하고 있으나 일반적으로 축경이 50mm인 경우 0.1mm 이하를 적용한다. 시일의 파손 가능성은 틈(gap)의 크기가 클수록 높아지므로 본 연구에서는 0.1mm, 0.4mm, 0.8mm를 적용하였다.

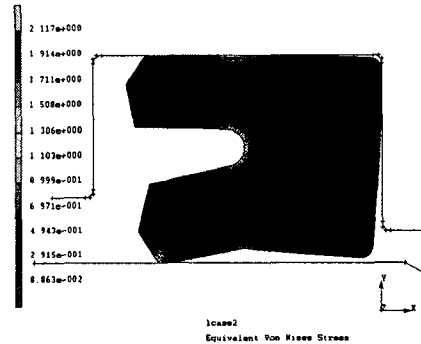


Fig. 8 Stresses caused by interference with shaft

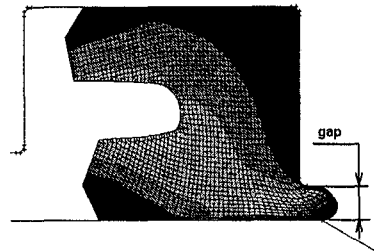


Fig. 9 Extruded part caused by oil pressure

Fig.10과 Fig.11은 유압력의 크기가 같은 조건하에서 틈의 크기에 따라 돌출길어도 증가하고 그 부분에 응력도 크게 집중됨을 나타내고 있다. Fig.11은 틈의 크기에 따른 돌출부분의 응력을 나타내며, 틈 크기가 0.4mm, 0.8mm인 경우에 나타난 응력 값이 본 해석에 적용한 NBR Hs 90 (shore A)의 파단 강도가 27~29MPa 임을 감안할 때 시일의 파손 가능성이 있으므로 위험한 상황임을 알 수 있다. 돌출길이는 홈의 우측 수직벽을 기준으로 하여 유압력의 가압방향인 X방향으로 시일이 홈과 축의 틈

으로 밀려난 크기를 말한다. 유압액추에이터에서 틈새는 피할 수 없는 제작상의 요건이나, 이 틈새의 크기가 작을수록 시일의 사용수명 연장에 큰 영향이 있음을 예측할 수 있다.

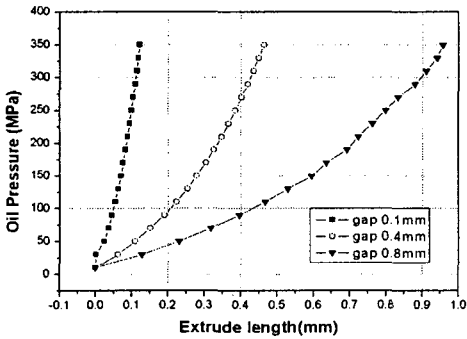


Fig. 10 Extruded length vs. Oil pressure

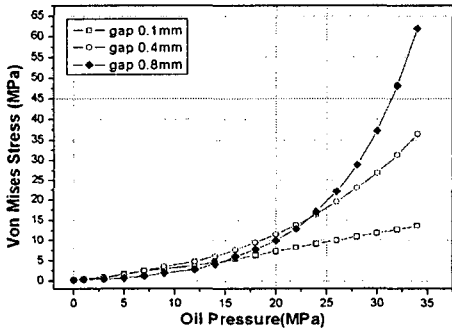


Fig. 11 Oil pressure vs. Stresses

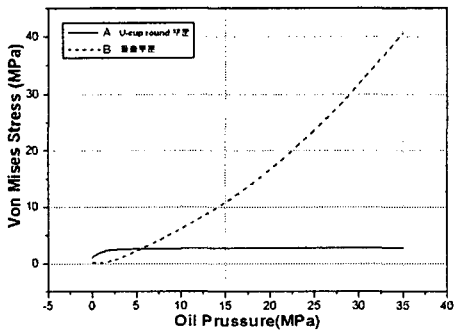


Fig. 12 Oil pressure vs. Stresses (Gap 04.mm)

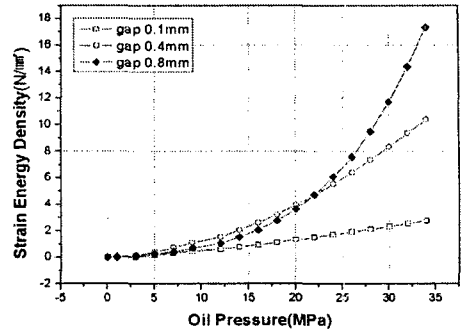


Fig. 13 Oil pressure vs. Strain energy density

Fig.12에서 시일의 중심부인 U-cup안쪽의 라운드 부분의 응력은 어느 정도 증가하다가 더 이상 상승하지 않지만, 우측하단의 돌출부위 응력은 유압력에 따라 비선형 상태로 계속 증가하는 것을 알 수 있다. Fig.13은 틈새의 크기에 따른 돌출 부분의 Strain Energy Density인데 Fig.11의 응력변화와 유사한 경향을 보이고 있다.

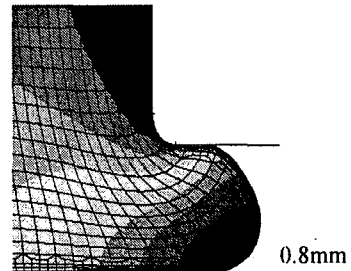
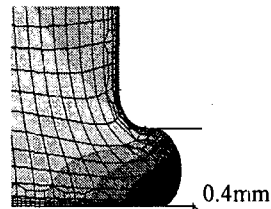
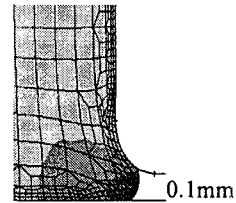


Fig. 14 Extruded displacement varied with the gap

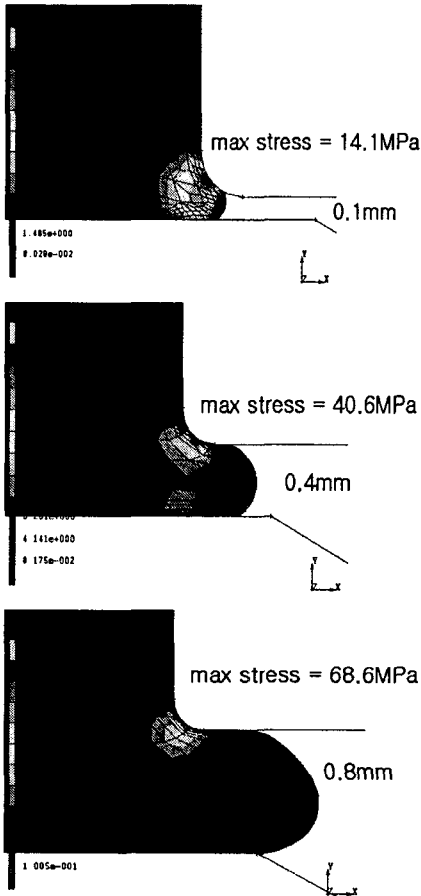


Fig. 15 Stress distribution varied with the gap

Fig.14와 Fig.15는 유압력 35MPa에서 틈의 크기에 따른 돌출상태와 응력분포를 각각 나타낸 그림으로 틈새의 크기에 따라 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

2.4.2 접촉력

Fig.16은 시일을 축과 홈 사이에 끼웠을 때의 간섭량으로 인한 접촉력을 보여주고 있는데 외측 립 부분과 내측 립 부분에 주로 나타나며 시일의 우측 상단에도 작지만 접촉이 일어나고 있다. 35MPa까지 압력을 가할 때 강체와 접촉되는 3면 전체에 걸쳐 접촉이 발생하고, 특히 좌측 립 부분과 우측 아래의 구석 돌출부에서 접촉력이 크게 나타나고 있다. 또한 Fig.17와 Fig.18은 유압력에 따라 발생하는 접촉력(N)의 상태를 보여준다.

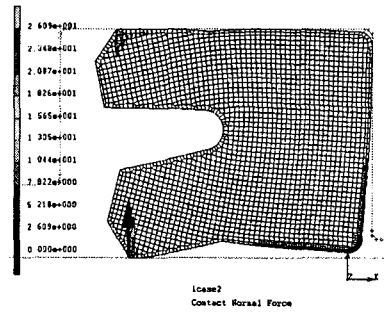


Fig. 16 Initial contact force

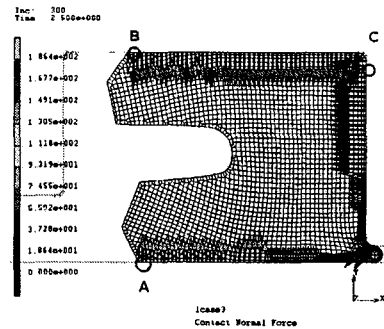


Fig. 17 Contact force caused by oil pressure

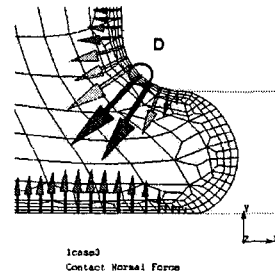


Fig. 18 Contact force at extruded part caused by oil pressure

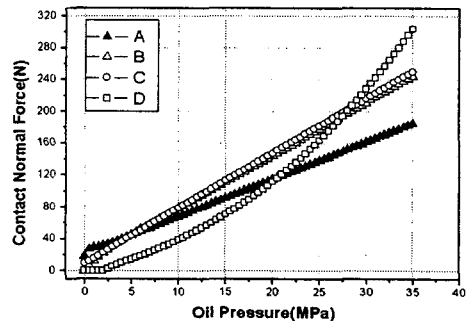


Fig. 19 Contact force vs. Oil pressure

Fig.19는 Fig.17~18을 기초로 유압력에 따른 시일 단면의 4개 모서리 중 접촉응력이 가장 큰 부분만을 보여주고 있는데, 4군데 모두 압력에 따라 접촉력이 증가함을 알 수 있다. 또한 시일의 우측 하단 돌출부분인 D의 경우 다른 부분과 다르게 접촉력이 비선형적으로 증가함을 볼 수 있다. D부분의 노드가 유압력을 받기 시작한 초기위치인 그르브의 우측 수직 벽에 있다가 점차 유압력이 상승하면서 그르브우측 수직벽 하단의 라운드 부를 타고 흐르면서 Fig. 18과 같이 돌출된다. Fig. 10~13을 포함하여 Fig. 19의 D부분의 비선형적인 거동을 보이는 것은 D에 위치한 노드가 초기위치인 수직 벽으로부터 벽면의 라운드부로 이동하기 때문인 것으로 보인다.

3. 검증시험

3.1 시일 변형시험장치

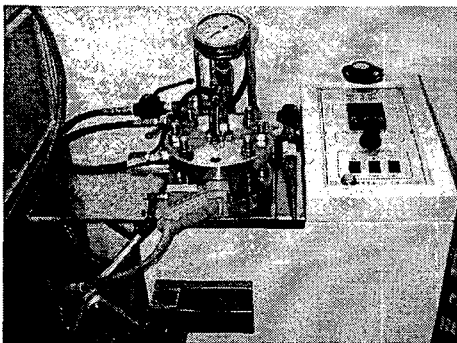
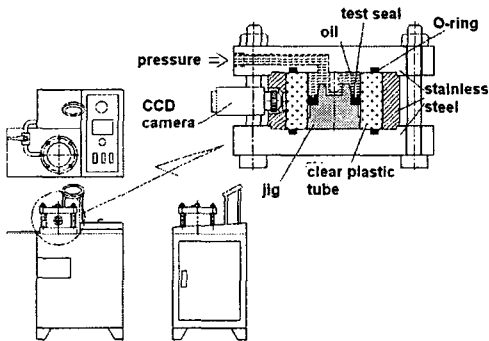


Fig. 20 Testing equipment for seal deformation

시일 변형 시험 장치는 해석 결과의 일부를 비교 검증하기 위한 장치로 시일에 유압력과 온도

를 가하여 그 변형량을 측정할 수 있도록 고안되었다. 시일의 돌출변형 상태를 관측하기 위하여 실린더 형태의 구조로 시일의 외측과 접촉하는 부분은 Fig.20과 같이 투명한 플라스틱으로 되어있으며 외측에 stainless steel tube로 보강하여 내부 유압력에 대비할 수 있게 제작하였다. 보강된 stainless steel tube 상하의 중간 부분에는 관측구멍을 가공하여 CCD 카메라를 장착하였다. 이 장치는 유압력을 최대 70MPa(700bar)까지 가압할 수 있으며, 가압장치 내부에 전기히터를 장착하여 오일의 온도를 상온에서 120℃ 까지 조절할 수 있다.

3.2 시험 방법 및 결과

변형량을 확인할 시일을 지그(jig)와 함께 장치에 삽입하고, 오일 및 장치의 온도가 상온 상태임을 확인한 후 장치의 전면에 CCD 카메라를 부착하여 조절한 후 일정한 간격을 두고 장치 내부의 시일 재료에 안정화를 주기 위하여 압력 가하기를 5회에 걸쳐 시행한 후 압력을 0~35MPa 7단계로 나누어 각각의 압력 하에서의 돌출현상을 촬영하고 이미지 데이터로 변형량을 측정하여 비교하였다.

Fig.21은 NBR Hs90 상온에서의 재료시험에서 얻은 25% 이축인장시험 결과를 MARC로 계산하고 해석한 결과이다. 5~35MPa까지 7단계의 유압력에서 틸 0.4mm로 밀려나온 크기를 측정하였는데 변형 시험결과와 해석결과 모두 유압력이 증가하면서 돌출길이가 비선형적인 상태로 나타나며, 실험과 해석 결과의 경향이 일치함을 볼 수 있다.

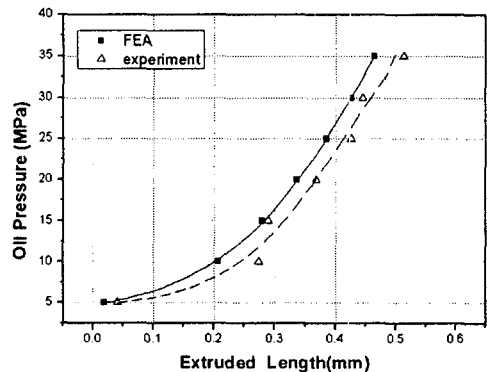


Fig. 21 FEA vs. Experimental results

4. 결론

본 연구에서는 유압액추에이터용 U자형 시일(NBR)에 대하여 유한요소해석과 검증시험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유압액추에이터의 틈새크기는 동일압력 조건에서 시일의 돌출량의 크기를 좌우하는 주요요소인 동시에 시일 단면에서 최대 응력이 집중되는 부분이다. 이는 시일의 손상이 이 부분에서 가장 먼저 시작되는 것과 일치한다.

(2) 유한요소해석 결과와 시험 장치를 이용하여 측정된 변형량은 NBR 고무재료의 비선형 특성에도 불구하고 그 경향이 잘 일치되어 시일 설계 시 유한요소해석 결과의 유용성을 확인하였다.

본 연구에서 수행하지 못한 시일의 수명과 성능을 개선하기 위한 재질과 형상에 따른 최적설계와 내구성실험은 기업에서 사업화로 이어지기 위해서 계속해서 연구해야 할 중요한 연구내용으로 판단된다.

참고문헌

1. Kim, W. D., Kim, W. S., Woo, C. S. and Lee, H. J., "Experimental Testing of Rubber Material for Finite Element Analysis," Proceedings of KSME Spring Conference, A, pp.704~709, 2001.
2. Kim, W. D., Kim, W. S. and Kim, C. H., "Determination of Rubber Material Model and the Deformation Behaviors of Rubber Component Considering Mullins Effect," KIMM Research Report-UCN236-712.M, 1999.
3. Kim, C. K., "Finite Element Analysis of Contact Behaviors of Rubber Lip Seals," Journal of Korean Society of Tribologist and Lubrication Engineers, Vol.10, No.4, pp.82~88, 1994.
4. Shim, W. J., "A Study on the Contact Force and Dynamic Behaviour of Lip Seal," Hongik University Graduate School, 1994.
5. Ko, Y. B., "A Study on the Contact Behavior Analysis of an O-ring Seal for Semiconductor using Heterogeneous Material," Hongik University Graduate School, 2001.

6. Gu, B. E., "Finite Element Analysis of U-type Seal for Master Cylinder," Keimyung University Graduate School, 2002.
7. Nikas, G. K. and Sayles, R. S., "Nonlinear Elasticity of Rectangular Elastomeric Seals and Its Effect on Elastomer Hydrodynamic Numerical Analysis," Tribology International Journal, Vol.37, pp.651-660, 2004.
8. Mokhtar, M. O. A., Mohamed, M. A. A., El-Giddawy, M. E. and Yassaen, S. A. Y., "On the Effect of Misalignment on the Performance of U-type Lip Seal," Wear, Vol.223, pp.139-142, 1998.
9. White Paper, "Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomer," MARC Analysis Research Corporation, 1996.
10. MSC Marc Volume A, "Theory and User Information," MSC Software Corporation, 2003.
11. MSC Marc, "Experimental Elastomer Analysis," MSC Software Corporation, pp.31~44, 2003.