

자동차 엔진에서 O-링의 압출거동에 관한 수치적 연구

이일권 · 김청균*

홍익대학교 대학원 기계공학과
*홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Numerical Simulations on the O-ring Extrusion in Automotive Engines

Il Kwon Lee and Chung Kyun Kim*

Graduate School, Hongik University
*Tribology Research Center, Hongik University

Abstracts – O-rings in automotive engines are important components such as a coolant pipe, engine oil circulating lines and fuel injector for sealing that makes efficient performance of the engine. Life cycle of O-rings is effected in environments of the O-ring seal, like that applied pressure, working temperature, pre-compressed ratio and materials. It is related in extrusion, expansion and fatigue failure of O-rings. In this paper, an pressurized, compressed elastomeric O-ring inserted into a rectangular groove is analysed numerically using the nonlinear finite element method. The calculated FEM results showed that extrusion ratio and contact stress are strongly related to the gap clearance and edge radius of the groove.

Key words – O-ring, automotive engine, NBR, PTFE, composite, extrusion, contact stress, FEM.

1. 서 론

자동차 엔진에서 연료라인, 냉각수, 엔진오일의 순환계통에는 여러 종류의 O-링이 장착되어 작동유체의 누설을 방지하는 역할을 수행하고 있다. 자동차 엔진에서 O-링이 파손하게 되면 이들 작동유체는 외부로 누설되면서 엔진의 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 연구개발이 대단히 중요하다.

실제로 현장에서 연료, 냉각수, 윤활유에 관련된 외형적으로 식별할 수 있는 고장사례의 대부분은 O-링과 같은 밀봉 시스템의 문제라는 사례가 많이 보고되었다. 그럼에도 불구하고 O-링 자체의 역할이 단순하고, 가격이 대단히 저렴하기 때문에 이에 대한 자동차 메이커의 관심이 크지 못하다는 사실은 소비자의 불만 요인이 거창한 부품에 있는 것이 아니라 이렇게 작은 부품으로부터 자동차의 가격 경쟁력은 시작된다는 사실을 적시할 필요가 있다.

연료라인, 엔진오일, 냉각수 계통은 일정한 압력이

작용하므로 이러한 부위에 사용되는 O-링의 파손 원인은 대부분 가해진 압력에 의해 간극사이로 소재의 일부가 압출변형(extrusion)하는 것이다[1,2]. 이러한 경우, O-링의 장착 형태와 작동 상태가 매우 다양하고, 압력이 가해지는 동안에 O-링의 성능을 직접 확인하기가 현실적으로 어렵기 때문에 작동중인 O-링의 압출특성을 파악한다는 것은 더욱 어려운 일이다. 또한, O-링은 시일 시스템에 일단 장착되면, 유지보수가 매우 어렵기 때문에 적용환경에 적합한 O-링의 선정과 수명예측에 대한 연구가 대단히 중요하다.

O-링 시일에 대한 연구는 주로 측면압이 존재하지 않는 상태의 비구속(unrestrained), 또는 구속(restrained) 상태의 O-링에 대한 것이었으며[3,4], 측면압에 대한 연구는 대부분 실험적인 방법[5,6]을 통하여 일부 수행되어 왔으나, 아직까지는 이에 대한 연구가 미미한 상황이다. 그러나, 최근에는 실험에 의존하지 않고도 이러한 문제를 구현할 수 있는 우수한 해석용 프로그램들이 상용화되어 있으며, 그 중에서도 비

선형, 대변형 해석과 접촉응력 해석 등이 용이한 MARC[7]가 대표적이다.

MARC는 밀봉압력이 작용하는 O-링 그루브(O-ring groove)에서 압출현상과 접촉응력에 대한 해석을 효과적으로 수행할 수 있다. O-링의 소재로는 가장 널리 사용되고 있는 니트릴계 고무(NBR)와 기계적 성질이 우수한 PTFE, 그리고 NBR 소재의 외경부에 PTFE를 10% 두께로 코팅한 복합재(N-P 복합재)에 대한 압출변형 변형거동을 수치적으로 해석하고자 한다.

2. 수치해석 모델링

탄성 중합체(elastomeric rubber)는 대표적인 비선형 거동재질로 탄성특성을 사용하여 변형거동을 나타내는 것은 폴리머 소재의 대변형 특성을 정확하게 표현한 것이 아니다. 따라서, 폴리머와 같은 재질에 대한 변형거동 현상을 엄밀하게 나타내기 위해서는 Mooney-Revlin 상수와 Odgen 상수 등을 고려한 해석이 효과적이다[8]. 그러나, 탄성거동 특성을 이용한 해석은 압축된 O-링과 같이 작은 변형에 대해서는 비교적 타당하다고 볼 수 있으며, 또한 해석의 용이성과 기존의 연구결과[3,4]와의 비교, 분석을 위해 본 논문에서는 탄성해석을 수행하였다.

O-링이 냉각수, 연료, 오일의 압력을 Fig. 1에서 보여준 것처럼 오른쪽으로부터 받게 될 경우에 O-링의 변형된 형상을 보여주고 있다. 본 연구에서는 O-링의 밀봉 효과를 증대시키기 위하여 20%의 초기압축을 가한 상태에서 파이프 고정부에 세팅한 후에 주어진 작동압력까지 가압하였다. 압력은 O-링의 소재에 따라 최대 15 MPa까지 가압할 수 있다.

본 연구에서도 이와 같은 압력용기의 사용조건에 따라서 초기에 20%를 압축하고, 그 이후에 압력이 가하는 해석조건을 주었다. O-링에 가해진 압력은 NBR 소재와 N-P 복합재의 경우로 최대 600 kPa까지 압력을 가하였으며, PTFE 소재의 경우는 최대 1.2 MPa까지 외부압력을 가하여 O-링 시일에 대한 압출거동 문제를 유한요소 해석법으로 수행하였다.

O-링에서 압출거동이 발생하는데 중요한 역할을 하는 것은 O-링이 장착되는 그루브의 형상과 밀봉간극의 크기이다. 일반적으로 그루브의 형상은 모서리의 반경, O-링 장착부의 폭, 그리고 O-링과 접촉하는 측면벽의 경사각에 의해 결정된다.

측면벽의 경사각은 가공의 용이성을 고려하여 대

개의 경우는 90° 값을 갖는다. 이러한 형태에 대한 O-링의 규격은 KS B2805에서도 잘 나타나 있다. 또한, O-링의 간극에 대한 규격 및 사용조건에 따라서 차이가 있으나, 0.1~0.5 mm 사이의 범위를 갖는다.

본 연구에서 그루브의 모서리 반경이 0.5, 1, 1.5 mm인 곡률 형상에 대하여 밀봉간극을 0.5, 1, 2, 3 mm로 바꾸어 가면서 압출특성에 대한 비선형 거동 해석을 하였다.

Fig. 1과 같은 O-링을 해석하기 위하여 O-링은 2차원 축대칭 요소를 사용하여 모델링 하였다. 축대칭 요소의 경우, O-링의 중심축으로부터의 거리 또한 중요한 해석 변수중의 하나이고, 단면지름 D와 중심축과의 거리비가 O-링의 변형거동에 미치는 영향에 대해 많은 연구[9]가 있었지만, 본 논문에서는 형상의 치수를 고정하였기 때문에 이러한 효과를 고려하지 않았다.

O-링의 형상치수는 KS 규격과 기존의 상용제품의 규격을 고려하여, 지름은 110 mm, 단면지름은 12.7 mm, 그루브의 폭은 단면지름의 1.2배인 15 mm로 하여 해석하였다. 유한요소해석에서 요소 타입은 Full-Hermann formulation quad 82를 사용하였고, 메쉬는 오토메쉬 기능을 이용해 O-링의 요소를 생성한 후에, O-링이 그루브의 측면벽과 만나는 곳과 압출변형을 일으킬 우려가 있는 부분은 다시 메쉬를 세밀하게 나누었다.

O-링의 소재는 탄성 변형체이고, O-링과 접촉하는 상단, 하단, 압력을 받는 반대편은 강체와 접촉하는 것으로 설정하였으며, O-링의 상단에서는 20스텝 동안 이송속도를 주어 20%를 초기에 압축시키고, 그 이후에는 20스텝 동안 외부의 압력이 O-링의 측면을

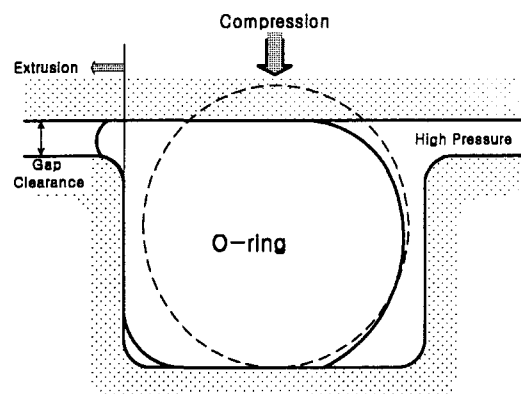


Fig. 1. Geometry of an a O-ring.

Table 1. Material properties of elastomer seals

Materials	Young's Modulus, MPa	Poisson's ratio	Density kgf/mm ²	Friction coefficient
NBR	3.52	0.49	1480	0.4
PTFE	10.1	0.49	1480	0.1

따라서 하중이 가해지도록 하였다.

또한, 본 연구에서 사용한 O-링 시일의 기본 소재는 NBR과 PTFE로 이들에 대한 물성치는 Table 1에서 제시하고 있다.

3. 해석결과 및 토의

3-1. 응력거동 해석

Fig. 1에서와 같이 초기 압축력을 20% 가한 O-링에 대한 응력분포를 Fig. 2에서 보여주고, Fig. 3은 O-링 소재(NBR, NBR-PTFE 복합재, PTFE)에 초기 압축력 20%에 외부압력을 추가한 상태에 대한 응력분포도를 각각 보여주고 있다.

O-링에 수직 압축력을 가한 Fig. 2에서는 압축응력이 대칭적이면서 균일한 분포를 갖는 응력변형 거동을 보여준다. 여기에 외부압력을 추가적으로 받고 있는 O-링은 Fig. 3에서 보여주는 것처럼 압력을 받는 반대측의 왼쪽 상단부를 중심으로 압축현상이 발생되면서 최대 압축응력은 상단부의 약간 아래쪽에서 발생되고, 압축이 일어나는 모서리에서도 가압력에 따라서 압축응력이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 NBR, PTFE, N-P Composite의 O-링에

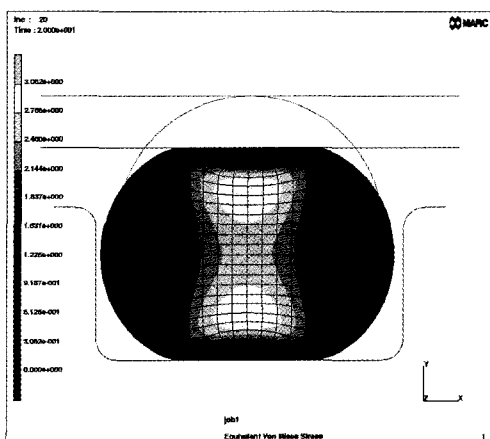
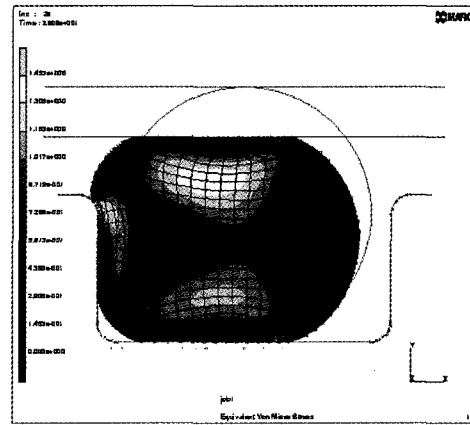
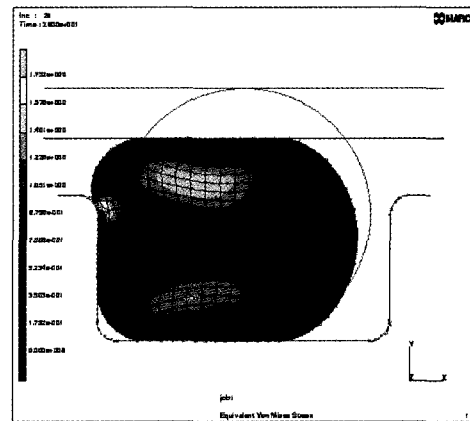


Fig. 2. Typical stress distribution of an O-ring with 20% pre-compressed ratios.

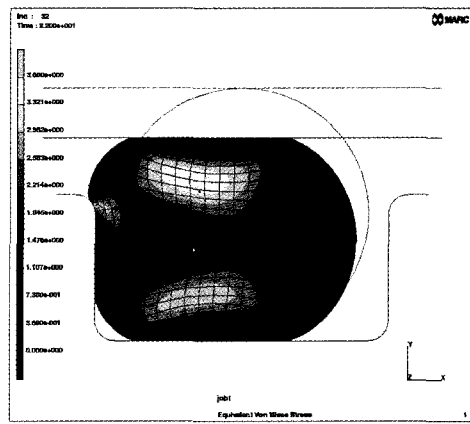
대한 밀봉 간섭량, 즉 압축율에 대한 최대 압축응력을 보여주고 있다. Fig. 4에서 제시한 시뮬레이션 결



(a) NBR



(b) N-P composite



(c) PTFE

Fig. 3. Typical extrusion of an O-ring seal with 20% pre-compressed ratios.

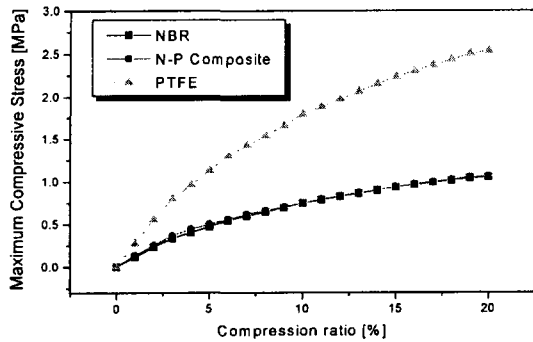
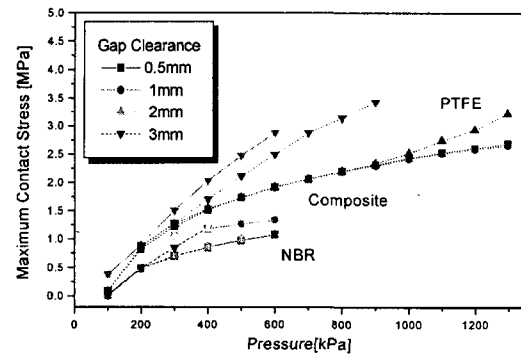


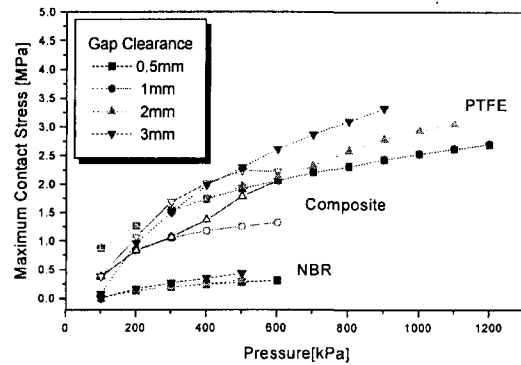
Fig. 4. Maximum compressive stress of an O-ring.

과에 의하면 PTFE로 제작된 O-링은 NBR이나 NBR-PTFE 복합재에 비하여 대단히 높은 압축응력을 나타내고 있다. 특히, 압축율이 20% 정도로 높아지면, 최대 압축응력은 PTFE 소재가 NBR에 비하여 두배 정도 높게 나타나는데, 이것은 소재의 물리적 특성에 관련된 것으로 NBR은 탄성계수가 PTFE에 비하여 대단히 낮기 때문에 외부의 하중을 변형거동에너지로 대부분 사용하므로 압축응력은 낮게 나타나지만, PTFE는 소재내에서 높은 압축응력으로 나타난다. 즉, O-링은 압축력이나, 여기에 외부압력을 추가적으로 받거나, 또는 미끄럼 마찰력에 의한 변형거동이 일어나게 되면, 그곳을 중심으로 최대 압축응력이 발생된다.

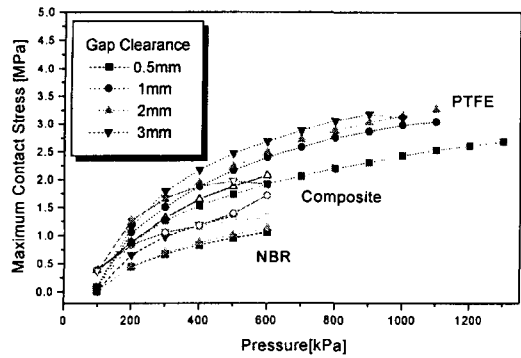
Fig. 5는 O-링 그루브의 곡률반경이 $R=0.5, 1.0, 1.5$ mm인 경우에 대해, 가해진 밀봉압력의 향으로 그루브의 왼쪽 경사면을 따라 접촉하면서 발생한 평균 법선응력(mean normal stress)을 나타낸 결과이다. 이들의 계산결과에 의하면, 탄성계수가 작은 NBR에서는 가장 작은 접촉응력이 발생하고, 강도가 가장 높은 PTFE 소재에서는 접촉응력이 높게 발생하였다. 특히, 연한 소재인 NBR의 경우는 O-링 장착부인 그루브의 곡률반경에 따라서 접촉응력이 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 즉, 곡률반경이 0.5 mm, 또는 1.5 mm인 경우의 접촉응력은 곡률반경이 1 mm인 경우에 비하여 두배 이상 높게 나타났다. 이것은 NBR과 같이 연한 소재에서는 곡률반경에 따라서 최대 접촉응력이 크게 영향을 받으므로 곡률반경의 최적화 설계가 중요함을 제시하고 있다. 그러나, 강도가 높은 PTFE나 NBR-PTFE 복합재에서는 곡률반경의 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 O-링이 장착되는 그루브의 설계치보다는 소재의 기계적 특



(a) $R=0.5$ mm



(b) $R=1$ mm



(c) $R=1.5$ mm

Fig. 5. Contact stresses of O-rings for a applied pressure.

성에 더 의존적이라는 결과로 압축응력이 크면, 변형 거동량은 상대적으로 줄어들므로 마찰계수가 낮게만 유지된다면, 기계적 성질이 우수한 소재가 O-링의 내구성 측면에서 대단히 유리하다.

또한, 본 연구에서 제시한 NBR과 PTFE처럼 소재의 특성이 서로 다른 복합재를 제작하여 사용한 경우는 외피로 사용한 PTFE의 특성 때문에 NBR보다는 PTFE 소재에 가깝게 거동하므로 곡률반경의 영

향을 덜 받고 있다. 이러한 압축응력 특성은 압출 변형거동을 완화시켜 주므로 O-링의 피로파손에 의한 문제점을 크게 개선할 수 있다.

접촉응력은 밀봉성과 직결되는 것으로 PTFE 소재가 가장 우수한 특성을 나타냈으며, 특히 N-P 복합재의 경우, 압출량 측면에서는 NBR 소재에 비해 유리하지는 않았으나 접촉응력의 경우 PTFE 소재와 거의 유사한 값을 나타내며 우수한 밀봉특성을 갖는 것으로 나타났다. 접촉응력은 밀봉간극이 증가하면서

상승하는 것을 알 수 있는데, 이것은 압출량과 직접적인 관계가 있는 것이라 볼 수 있다. 모서리 반경이 1.5 mm인 경우 밀봉간극의 변화에 따른 응력의 상승이 비교적 낮고 안정적인 응력의 상승을 볼 수 있는데, 이는 곡률이 커지면서 응력집중 현상이 완화되기 때문이다.

3-2. 압출 변형거동

Figs. 6-8은 여러 가지의 탄성 중합체에 대한 압출

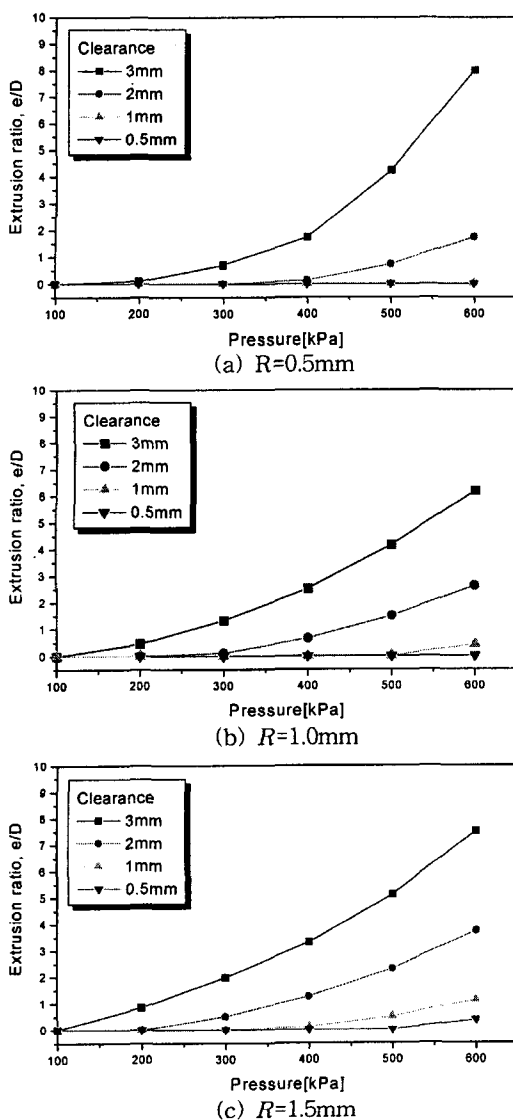


Fig. 6. Extrusion ratio vs. applied pressure for NBR O-rings.

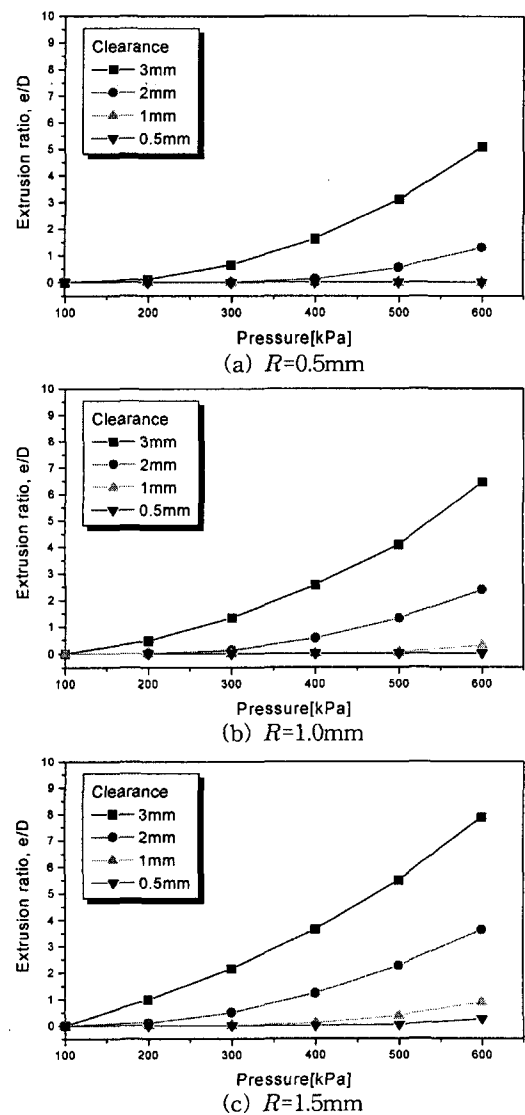


Fig. 7. Extrusion ratio vs. applied pressure for NBR-PTFE composite O-rings.

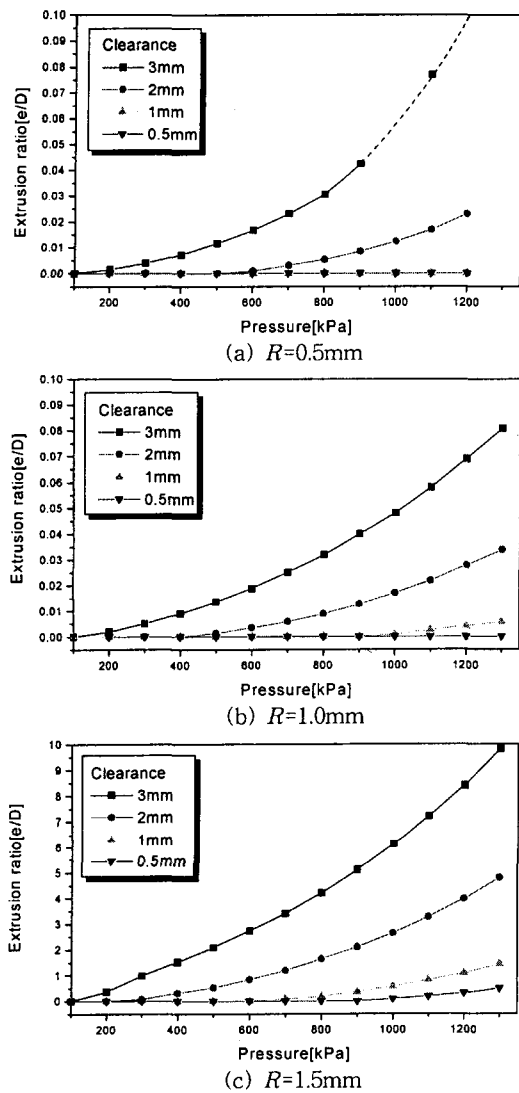


Fig. 8. Extrusion ratio vs. applied pressure for PTFE O-rings.

변형률비 e/D 를 나타낸 결과로 초기 압축율이 20%인 상태에서 외부압력을 받게되면, 일반적으로 압출량은 비선형적으로 증가하고, 압출량에 대한 임계 특성값은 서로 다르게 나타난다. 이들의 계산결과에 의하면, 각 소재의 압출량을 그루브의 모서리 반경에 따라 약간씩 다르게 나타나고, 압출 거동량은 소재에 관계없이 압력이 증가하면서 급격히 상승하며, 밀봉간극이 클수록 그 상승폭이 점점 커짐을 알 수가 있다. 또한, 모서리 반경이 클수록 압출량은 증가하면서 압출파손(extrusion fracture)의 임계값이 크게 달

라지고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6에서는 O-링 소재가 NBR로 간극과 O-링에 가하는 압력이 증가함에 따라서 압출량비 e/D 의 차이가 크게 증가한다. 여기서 O-링 장착부인 그루브의 코너 에지 반경이 0.5, 1.5 mm인 경우는 밀봉압력이 증가할수록 압출량이 크게 증가하면서 모서리와 맞나는 부위에서 압출파손이 발생할 우려가 대단히 높다. 그러나, NBR 소재에 PTFE 소재로 외곽을 10% 코팅한 복합재에 대한 Fig. 7의 시뮬레이션 결과에 의하면, 모서리의 곡률반경이 증가함에 따라서 압출량 크기와는 완만하게 증가하지만, NBR 소재에 비하여 아직은 피로 파손이 일어날 정도로 위험한 단계는 아니다.

Fig. 8에서 사용된 PTFE 소재는 재료의 특성상 밀봉간극이 1 mm 이하인 경우는 외부의 가압력이 1200 kPa까지는 압출변형에 의한 압출파손이 일어날 것 같지는 않다. 밀봉간극이 3 mm로 높은 값을 유지한다 해도 900 kPa 정도까지는 대단히 우수한 압출변형 거동특성을 나타낸다. 그러나, O-링 장착부의 곡률반경이 1 mm 이하로 제작될 경우는 압출 변위량비 e/D 의 임계값이 4정도로 곡률반경이 1.5 mm인 경우의 6보다 크게 낮은 값을 갖는다.

NBR 소재의 경우, 모서리의 곡률반경에 대한 압출량의 상승폭은 비교적 작으나 전반적으로 높은 압출파손 임계값을 갖는다. 이것은 NBR 소재의 탄성계수가 낮아서 압출이 크게 낮은 압력하에서도 발생한다. 따라서, 초기의 저압구간(100~300 kPa)에서는 모서리의 곡률반경에 따라 압출량 차이가 극히 작으나, 고압(300 kPa 이상)에서는 급격한 압출량 발생으로 인한 그 차이가 크게 증가하였다.

NBR-PTFE 복합재에 대한 압출현상은 NBR과 유사한 거동을 나타낸다. 따라서, 압출량 측면에서 N-P 복합재가 유리하다고 볼 수 없으나 NBR 소재에서 나타났던 압출파손의 급격한 변화는 나타나지 않아 NBR 소재에 비해 고압에서도 유효하다고 볼 수 있다.

PTFE 소재에 대한 압출량은 NBR 소재에 비해 40% 이하의 값을 나타내며, 전반적으로 안정적인 상승을 보여준다. 그러나, 모서리의 곡률반경이 0.5 mm인 경우는 압출 파손 임계량의 급격한 상승을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 구조해석 프로그램인 MARC

를 이용하여 압축상태에서 측면압이 작용하는 O-링에 대한 동출변형 거동 및 압축응력을 해석하였다.

O-링 그루브의 곡률반경과 간극을 변화시키면서 해석한 결과에 의하면 간극이 작을수록 압출의 발생이 작게 일어났다. 또한, 모서리 반경이 작을수록 압출은 작게 발생하였으나 NBR 소재와 같이 연한 소재에서는 급격한 압출량이 발생되었다. 이러한 현상은 소재를 급격하게 파손시킬 수 있으므로 안전성 측면에서 위험하다. N-P 복합재의 경우 압출량은 NBR 소재와 유사하게 나타났으나 O-링 그루브의 형상 변화에 대해 비교적 안정적인 값을 나타내어 형상의 변화 및 환경에 의한 영향측면에서 NBR 소재보다 우수한 것으로 나타났다. O-링에서는 압축응력이 높을수록 밀봉압력이 높아지고, 또한 변형거동이 작게 나타나므로 압출에 의한 파손이 적게 일어날 것이다. 그러므로 외부에서 O-링 시일에 가해지는 압력이 높을수록 PTFE와 같이 기계적 강도가 높은 소재를 선택하는 것이 유리하다.

참 고 문 헌

1. Kazimerz T. Ksieski, "Seal Extrusion," *Lubrication Engineering*, pp. 198-205, June, 1970.
2. Reddy, D. and Nau, B. S., "The Static and Dynamic Extrusion of Elastomer Seals into Large Clearances," *Proc. of 10th Int'l. Conf. on Fluid Sealing*, Pickford, F., ed., BHRA Fluid Engineering Centre, Granfield, UK, pp. 190-196, 1984.
3. George, A. F., Strozzi, A. and Rich, J. I., "Stress Fields in a Compressed Unconstrained Elastomeric O-ring seal and a Comparison of Computer Predictions and Experimental," *Tribology Int'l.*, Vol. 20, No. 5, Oct. 1987.
4. Green, I. and English, C., "Analysis of Elastomeric O-ring Seals in Compression Using the Finite Element Method," *Tribology Trans.*, Vol. 35, pp. 83-88, 1992.
5. Raparelli, T., Bertetto, A. M. and Mazza, L., "Experimental Study of Pneumatic Seal Extrusion," *Tribology Trans.* Vol. 40, No. 4, pp. 715-719, 1997.
6. Reddy, D. and Nau, B. S., "The Static and Dynamic Extrusion of Elastomer Seals into Large Clearances," *Proc. of 10th Int'l. Conf. on Fluid Sealing*, Pickford, F., ed., BHRA Fluid Engineering Centre, Granfield, UK, pp. 190-196, 1984.
7. MARC Analysis Research Corporation, *Computer Program MARC*, 1994.
8. Jun, I. K., Kim, C. K., and Choi, I. H., "On the Contact Pressure of Lip Seals for a Ball Bearing," *Proc. of Int'l Symp. on Tribology*, Beijing Tsinghua Univ., Oct. 1993.
9. Dragoni, E. and Strozzi, A. "Analysis of an Unpressurized, Laterally Restrained, Elastomeric O-Ring Seal," *J. of Tribology*, Vol. 110, pp. 193-199, April 1998.