

< 논문 >

# 접촉면 형상에 따른 O-링의 접촉거동해석에 관한 연구

김 청 균<sup>†</sup>

(2003년 10월 9일 접수, 2004년 12월 17일 심사완료)

## On the Contact Behavior Analysis of the O-ring Depending on the Contact Surface Profiles

Chung Kyun Kim

**Key Words:** Contact Stress(접촉응력), FEM(유한요소해석), Odgen Model, O-ring, Sealing(실링), Strain(변형률)

### Abstract

In this paper, the contact stress and strain distributions in elastomer O-ring seals have been analyzed using a non-linear finite element method. The stress behavior of PTFE materials is assumed as Odgen model because the sealing clearance between the flange and the surface of the O-ring is not small and the sealing pressure of working fluids covers from the atmospheric pressure to high pressure of 15MPa. The contact normal force and stress in wavy O-rings in which is developed for this analysis are uniformly distributed along the flange and the wall of the rectangular groove. And the normal sealing forces are also kept high compared to other contact sealing models such as the conventional O-ring and X-ring. Thus, the FEM computed results indicate that the sealing characteristic of wavy O-rings is good compared with other contact seals.

### 1. 서 론

O-링(O-ring)은 도우넛 형상의 시일(seal)로 단순하기 때문에 설치와 제작이 간단하고, 밀봉효과가 우수하며, 대량생산이 용이하기 때문에 가격이 저렴하다는 강점이 있다. 따라서, 기계장치의 밀봉(sealing)에 관련된 설계와 조립, 유지·보수(maintenance) 측면에서 가장 많이 사용되고 있는 범용 부품으로 성장하였다.

1940년대의 전쟁특수라 할 수 있는 자동차, 항공기와 같은 수송기계 수요를 만족시키기 위해 대량 생산체계를 갖추면서 기계요소부품으로 확실한 자리를 잡게 되었다.<sup>(1)</sup> O-링은 1951에 영국공업규격(BS)으로 채택되었고, 1960년대 중반에 들어서면서 진공기술<sup>(2,3)</sup>이나 석유·화학·플랜트 산업의 활성화로 O-링의 새로운 소비처가 급격하

게 형성되었다. 따라서, O-링 밀봉기술을 활용한 새로운 고온·고압의 동적 시스템 개발은 항상 새로운 수요를 창출하게 되었고, 이제는 기계장치에서 가장 흔하게 사용하는 요소부품이 되었다.

O-링의 사용처가 기존의 수송기계, 유압장치, 진공장치, 압력용기 등에서 반도체 장비, 전자기계 등의 첨단장비로 빠르게 옮겨가면서 새로운 소재개발과 장수명의 내구성 유지를 위한 엄격한 품질관리와 새로운 최적화 설계기술을 필요하게 되었다. 특별히, O-링의 중요성이 강조된 사건은 1986년 7월에 발사된 우주왕복선 챌린저호가 구조물 연결부를 밀봉하던 탄성체 O-링(elastomer O-ring)의 저온 변형률 응답성이 급격히 떨어지면서 내부 가스가 외부로 갑자기 빠져나가는 과정에서 폭발한 사건이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 O-링의 접촉면 형상에 따라 달라지는 접촉거동 특성을 비선형 유한요소법으로 고찰하고자 한다. 즉, 기존의 접촉식 O-링은 단면적 형상이 원형이나 X형으로 설계되었지만, 원형의 외주면에 물결 형상을 갖는 새로운

<sup>†</sup> 회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과  
E-mail : cckim@wow.hongik.ac.kr  
TEL : (02)320-1623 FAX : (02)323-8793

O-링이라 할 수 있는 파형 O-링(wavy O-ring)을 기존의 O-링과 비교한 접촉거동 해석결과를 제시하고자 한다.

## 2. 소재거동 특성

물리적으로 볼 때, O-링은 변형 거동성과 내구성 확보를 위해 보통은 탄성체 폴리머를 사용한다. 원래 O-링은 오일, 가스, 공기와 같은 작동유체를 사용하여 일을 하는 압력용기, 액추에이터, 진공장치와 같은 기계장치에 설치되어 유체의 누설을 차단한다. 따라서, O-링의 밀봉성을 안정적으로 확보하기 위해서는 작동유체와의 적합성, 내열성, 저온성, 내화학성, 저마찰성, 내마멸성 등과 같은 까다로운 조건을 대부분 만족해야 한다. 결국, O-링은 화학적으로 안정성을 확보할 수 있도록 최적의 컴파운드를 선정해야 하고, 기계적으로 안전한 설계와 내구성을 담보할 수 있는 물리적 특성도 동시에 갖추어야 한다.

PTFE(Polytetrafluoroethylene)는 사용온도, 내구성, 저마찰성, 내마멸성 등 우수한 특성을 확보하고 있기 때문에 기계장치 조립을 위한 O-링의 고급소재로 많이 사용하고 있다. O-링은 용기 구조물과 같이 정적접촉 상태에서 밀봉하는 경우와 액추에이터와 같이 상대 마찰접촉 운동의 동적상태에서 밀봉성을 유지해야 하는 두가지 경우가 있다. 이들 조건 모두는 접촉거동 상태가 미세한 간극에서 밀봉을 해야 하는 경우, 즉 O-링의 변형 거동량이 작은 경우는 탄성범위 이내라 하여 폴리머 고무재의 변형 거동성을 Mooney-Rivlin 모델로 해석할 수 있지만, 변형 거동량이 약간 커지는 경우는 탄성 거동성을 항상 보장할 수 없기 때문에 비선형성을 고려한 Odgen 모델로 해석하는 것이 바람직하다.

따라서, 본 연구에서 고려한 접촉식 O-링은 기존의 원형 단면적을 갖는 O-링(O-ring)을 포함하여 변형 거동량이 약간 크다고 할 수 있는 X-링(X-ring)과 새로운 형상의 O-링이라 할 수 있는 파면 형상의 O-링(wavy O-ring)에 대한 비선형 유한요소 해석을 수행하고, 이들 상호간의 접촉거동 특성에 대하여 고찰하고자 한다. Fig. 1은 PTFE 탄성체 소재의 특성치<sup>(4)</sup>에 대한 Odgen 해석모델로 본 연구의 비선형 유한요소해석을 위해 사용한 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다.

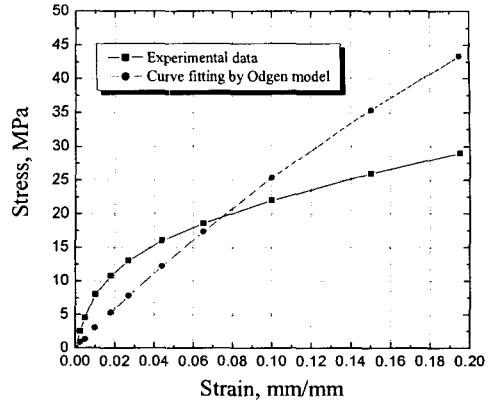
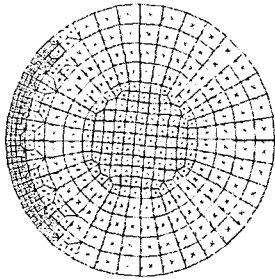


Fig. 1 Experimental stress-strain curve of PTFE elastomer and curve fitted with the 2nd term approximation of Odgen model analysis

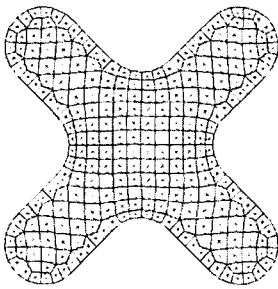
Fig. 1의 실험적 데이터에 근사하게 얻어진 Odgen 모델을 사용하여 접촉식 O-링에 대해 비선형 유한요소해석을 수행하였다. Odgen 모델을 사용하여 해석된 변형거동 결과는 O-링의 실제 작동조건에서도 충분히 사용할 수 있는 적용범위이다. 본 연구에서 사용된 PTFE 소재의 탄성계수는  $460\text{MN/m}^2$ , 열팽창 계수는  $135\ \mu\text{mm/mm}$ ( $100^\circ\text{C}$  기준조건), 밀도는  $2,190\text{kg/m}^3$ 의 특성을 각각 갖고 있다.

## 3. 해석모델 및 경계조건

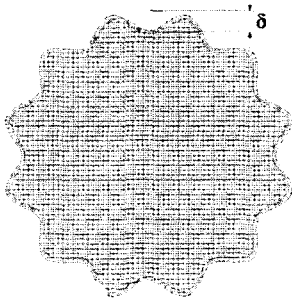
Fig. 2는 접촉식 O-링을 포함한 X-링, 파형 O-링에 대한 해석모델을 보여주고 있다. 여기서 Fig. 2(a)는 단순한 원형 단면적의 O-링으로 제작성이 간단하기 때문에 기계장치의 조립공정에서 가장 많이 사용하고, Fig. 2(b)는 X형 단면적을 갖는 X-링으로 변형 거동성이 우수하기 때문에 탄성 복원력을 많이 요구하는 상대접촉 운동장치에 사용되며, Fig. 2(c)는 원형 단면적의 외주면에 규칙적인 진폭( $\delta$ )이 제작된 파형 O-링으로 기존의 O-링과 X-링의 중간적 거동특성을 나타낼 것으로 예상하지만, 해석결과는 진폭크기에 따라 약간씩 다른 접촉거동 특성을 나타낸다. 본 수치적 연구를 위해 사용한 비선형 유한요소해석 프로그램은 MARC<sup>(5)</sup>로 4-절점(node)과 축대칭 모델을 사용하였다.



(a) O-ring



(b) X-ring



(c) Wavy O-ring

Fig. 2 Contact type seal models

O-링 해석모델의 기본 외경은 7mm이고, X-링은 90°로 분할된 4개의 접촉점을 갖으며, 파형 O-링은 30°로 분할된 12개의 접촉점에  $\delta=0.2\text{mm}$ 와  $\delta=0.35\text{mm}$ 의 진폭을 갖는 두 가지 모델에 대한 해석을 수행하였다.

접촉식 O-링의 밀봉성을 점검하기 위해 사용한 해석조건은 작동유체의 가스압력을 최대 15MPa까지 적용하였고, O-링의 압축률(compression set)은 최대 30%까지 고려하였다. 접촉식 O-링에서 밀봉간극(sealing gap)이 작거나 탄성률이 낮은 소재를 사용하는 경우는 낮은 압축률 조건이라 할

수 있는 10~15% 부근에서 사용하지만, 밀봉간극이 크거나 탄성률이 높은 소재를 사용하는 경우는 25~30% 정도의 높은 압축률을 사용하기도 한다. 따라서, 이러한 압축률에 대한 접촉조건 선정은 O-링의 실제 사용조건을 정확히 고려하여 시일 설계자(seal designer)가 결정하면 된다.

#### 4. 해석결과 및 토의

접촉식 O-링의 밀봉거동 특성을 고찰하기 위해서 형상이 조금씩 다른 O-링의 접촉면에서 발생하는 응력분포의 해석은 대단히 중요하다. Fig. 3은 접촉식 O-링시일의 접촉형상에 따른 대표적인 접촉응력 분포도를 보여주고 있다. Fig. 3(a)에서 보여준 기존의 O-링은 구형 그루브(rectangular groove)의 한쪽에 10MPa의 밀봉압력이 가해졌다고 가정할 경우에 플랜지(flange)와 접촉하는 O-링의 상단부와, 그루브의 바닥면과 접촉하는 O-링의 하단부에서 발생된 50MPa의 접촉응력을 보여주고 있다. O-링의 상단부와 하단부에 집중적으로 발생된 압축응력은 이들 접촉계면을 따라서 외부로 빠져나가는 밀봉유체의 누설을 차단하게 된다. 또한, X-링의 해석결과를 제시한 Fig. 3(b)에 의하면, 7MPa 정도의 작은 밀봉압력에서도 접촉응력이 [A] 지점에 국부적으로 집중되어 접촉면이 손상될 우려가 있음을 알 수 있다. 이러한 파손은 X-링에 가해진 압축력과 가스압에 의해 회전 모멘트가 추가적으로 작용하면서 [A] 지점에 집중되었기 때문에 일어나는 현상이다. 그러나, 파형을 갖는 새로운 O-링의 해석결과를 제시한 Fig. 3(c)에서는 12MPa의 높은 밀봉압력에서도 플랜지와 접촉하는 상단부와, 구형 그루브의 하단부와 측면부에서 균일하게 접촉하였기 때문에 120MPa 정도의 높은 압축응력이 걸려도 비교적 안정되게 분포하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 2배 이상의 집중응력 차이는 접촉하는 O-링의 형상이 다르기 때문에 발생된 것으로 O-링의 형상설계가 대단히 중요함을 나타내고 있다.

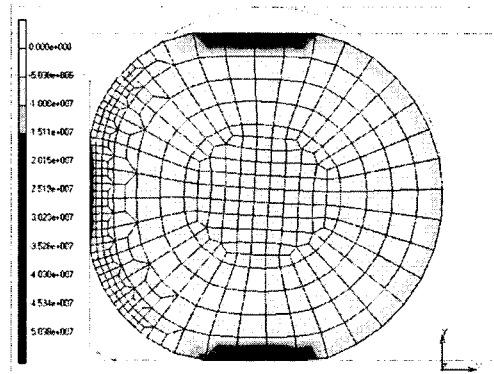
O-링에 가해지는 최대 접촉응력 분포를 밀봉압력에 대하여 해석하면, 이들 접촉면의 형상이 달라짐으로 인해 발생하는 접촉면의 거동형태와 밀봉특성이 다르게 나타나고 있음을 Fig. 4에서 알 수 있다. 원형 단면을 갖는 기존의 O-링은 낮은 밀봉압력에서 안정적이지만, 높은 밀봉압력에서

도 접촉응력이 완만하게 증가하는 것으로 보아 높은 압축률에서는 밀봉성과 내구성을 유지하기가 어려운 것이라는 사실을 제시하고 있다. 그러나, X-형상의 X-링은 유연성이 우수하지만, 밀봉압력(4~7MPa)이 높아지면 불안정할 것이라는 계산결과를 보여주고 있다. FEM 해석결과에 의하면, 기존의 O-링이나 X-링은 중고압의 밀봉압력에 대해 불안정한 특성을 나타내지만, 표면 파형을 갖는 O-링은 상단부와 하단부, 그리고 측면 접촉부에서 발생하는 접촉응력은 12MPa 정도의 높은 밀봉압력에서도 압축응력이 접촉면에 대해 비교적 균일하게 분포하기 때문에 우수한 밀봉성을 유지할 수 있을 것이라는 데이터이다.

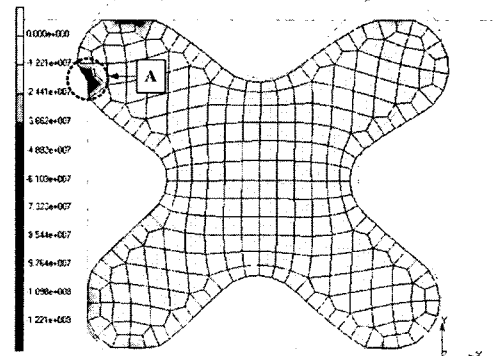
파형을 갖는 O-링(wavy O-ring)은 접촉면의 밀봉성과 균질성을 확보하도록 개량한 것으로 Figs. 5와 6에서 파형 O-링의 변형량 거동특성과 밀봉력 해석결과를 각각 보여준다. Fig. 5는 밀봉유체의 압력변화에 따른 최대 변형률을 여러 가지 압축률에 대하여 제시하고 있다. 기존 O-링의 최대 변형률을 나타낸 Fig. 5(a)는 4~12MPa 정도의 넓은 밀봉압력에 대하여 압축률에 의한 안정성을 유지하지만, 이것을 벗어나면 O-링의 밀봉성은 압축률(compression set)보다는 밀봉압력에 더 의존하기 때문에 플랜지를 통한 누설 가능성은 높아지고, 내구성은 떨어지는 관계로 큰 밀봉압력을 지속적으로 유지하기가 어렵다. 그러나, 원형의 외주면에 파형이 있는 작은 진폭( $\delta=0.2\text{mm}$ )의 O-링에 대한 Fig. 5(b)의 해석결과에 의하면, 최대 변형률은 약간 증가하지만, 사용된 밀봉압력의 사용범위는 4~15MPa로 약간 더 넓어지는 경향을 보여준다. 여기에 동일한 형상을 갖는 파형 O-링의 진폭을  $\delta=0.35\text{mm}$ 로 증가시키면, 최대 변형률은 크게 증가하면서 사용된 밀봉압력도 8~15MPa 이상으로 증가한 결과를 제시한다. 결국, 파형 O-링의 밀봉성은 밀봉압력이 낮은 단계에서는 압축률에 대한 의존도가 높지만, 밀봉압력이 증가하여도 압축률 의존도가 아직 존재하는 경향을 보여준다. 이것이 기존 O-링의 압축률 의존도 패턴과 다른 것으로 파형 O-링의 변형 거동성이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 6은 접촉식 O-링에 밀봉압력을 가할 경우, O-링과 플랜지 또는 구형 그루브의 측면부와 접촉하면서 법선방향으로 발생된 최대 접촉 밀봉력을 제시한 결과로 밀봉유체의 압력과 압축률이

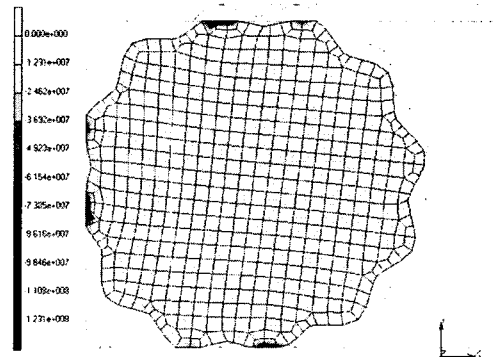
증가할수록 접촉면에 작용하는 법선방향의 밀봉력은 크게 증가한다. 여기서 법선 밀봉력은 기존의 O-링이나 작은 파형을 갖는 O-링( $\delta=0.2\text{mm}$ )보다



(a) O-ring with sealed pressure of 10MPa



(b) X-ring with sealed pressure of 7MPa



(c) Wavy O-ring with sealed pressure of 12MPa

Fig. 3 Contact normal stress distributions with a compression set of 10% in contact sealing models

는 어느 정도 큰 진폭( $\delta = 0.35\text{mm}$ )을 갖는 파형 O-링이 보다 우수한 밀봉성능을 제시하고 있다. O-링의 접촉면에서 밀봉유체의 누설 차단력을 보면, 기존 O-링은 밀봉압력이 증가할수록 약간 가파르게 증가하는 반면에 큰 진폭을 갖는 파형 O-링은 밀봉압력의 변동에 대하여 비교적 완만한 변동을 나타내는 것으로 보아 파형 O-링의 밀봉성이 보다 안정적이라 할 수 있다. 20~25%의 높은 압축률 해석결과를 제시한 Figs. 6(c)와 6(d)에 의하면, 주어진 밀봉압력에 대한 범선방향의 최대 접촉 밀봉력은 O-링의 접촉면에 균일하게 분포할 것이라는 사실은 Parker O-링 회사<sup>(6)</sup>에서 권장하는 데이터와 대단히 유사한 결과이다.

접촉식 밀봉기구(sealing mechanism)를 형상변화에 따라 비교한 유한요소해석 결과에 의하면, 원형의 단면적을 갖는 기존의 O-링보다는 파형의 단면적을 갖는 파형 O-링이 압축률이나, 사용 밀봉압력 측면에서 우수한 변형거동 특성을 나타내고 있다. 따라서, 변형 거동성이 작거나 밀봉압력이 낮은 경우는 기존의 O-링을 사용해도 밀봉 안정성 측면에서 문제가 없지만, 우수한 변형 거동성을 요구하는 큰 밀봉간극이나 밀봉유체의 압력이 높게 유지되어야 하는 경우는 어느 정도의 진폭을 갖는 개량된 파형 O-링을 사용하는 것이 접촉거동 측면에서 안정적이고, 밀봉성 또한 유리함을 알 수 있다. 파형 O-링은 파형의 개수에 따라 접촉거동과 접촉응력이 달라지고, 특히 파형의 진폭이 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

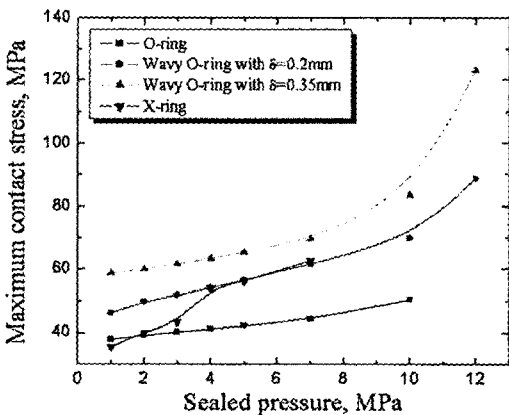
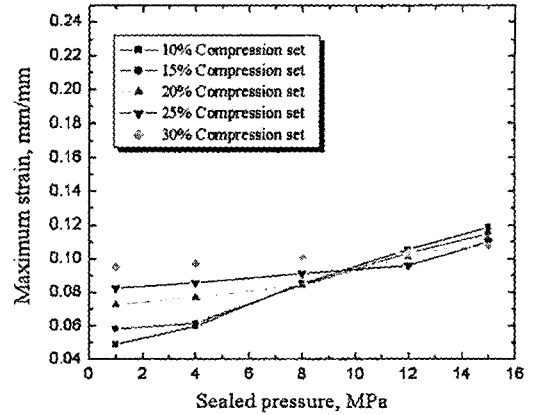
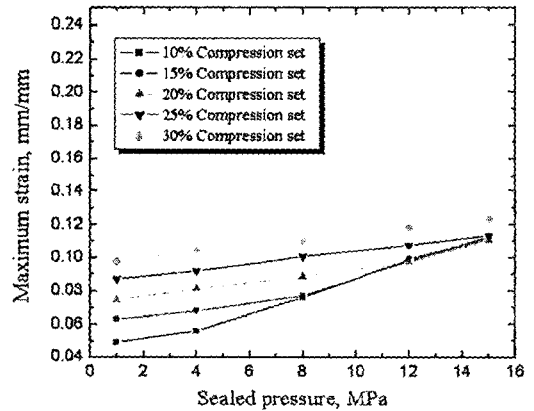


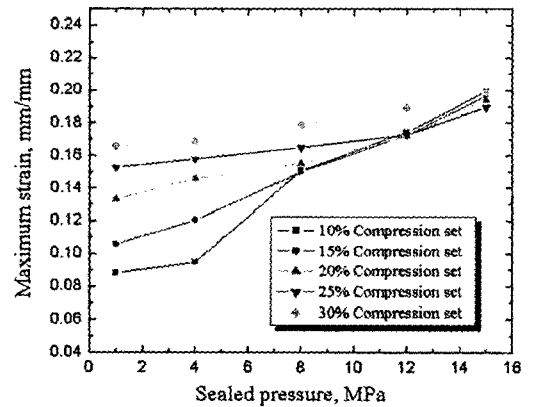
Fig. 4 Maximum contact normal stresses as a function of sealed pressures for various contact sealing models



(a) Conventional O-ring

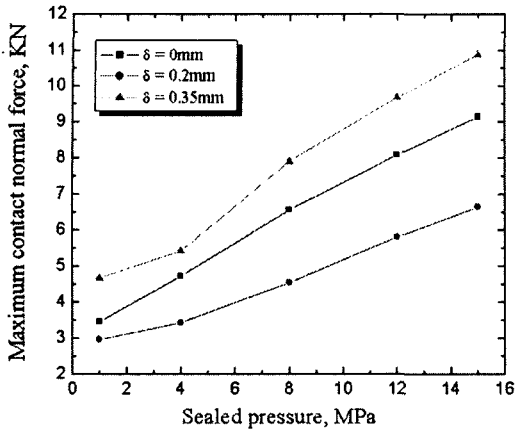


(b) Wavy O-ring with  $\delta = 0.2\text{mm}$

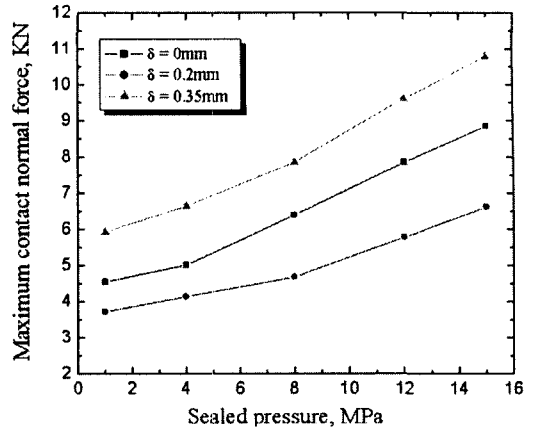


(c) Wavy O-ring with  $\delta = 0.35\text{mm}$

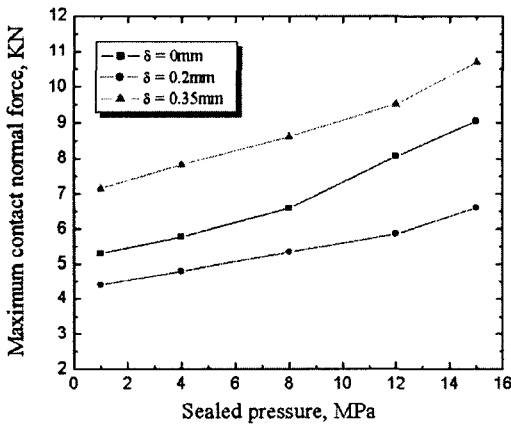
Fig. 5 Maximum strains of conventional O-ring and wavy O-ring as a function of a gas pressure



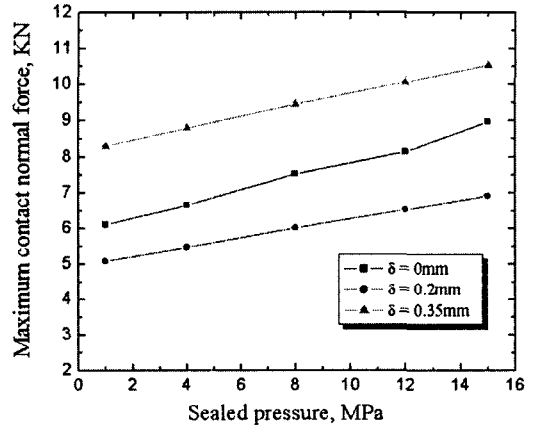
(a) Compression set = 10%



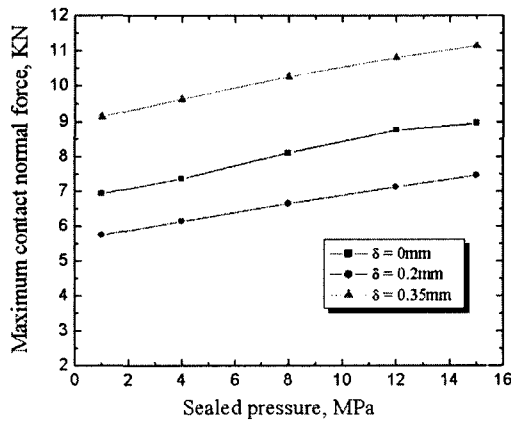
(b) Compression set = 15%



(c) Compression set = 20%



(d) Compression set = 25%



(e) Compression set = 30%

Fig. 6 Maximum contact normal forces of the conventional and wavy O-rings as a function of the gas pressure

## 5. 결 론

본 연구에서는 접촉식 밀봉기구로 많이 사용하는 O-링, X-링, 파형 O-링과 같이 접촉면의 형상 변화에 따라 발생하는 접촉거동 특성을 비선형 유한요소법으로 해석한 결과를 제시한다.

원형 단면적을 갖는 기존의 O-링은 압축률이나 밀봉압력이 비교적 낮은 사용조건에서 우수한 특성을 나타내지만, 중·고압의 밀봉압력을 필요로 하는 기계장치에서 원형 O-링은 파형 O-링에 비하여 접촉거동 측면에서 밀봉성이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 특히, 파형 O-링이 어느 정도의 파형 진폭을 갖게 되면, 밀봉유체의 다양한 변동 압력에 대하여 밀봉성과 접촉거동 특성은 기존의 어떠한 접촉식 O-링과 비교해도 우수한 안정성을 확보하고 있다.

## 후 기

본 논문은 2003년도 홍익대학교 학술연구 조성비에 의해 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Mills, A.A., 1995, "Who Invented the O-ring?," *Sealing Technology*, No. 31, pp. 10~11.
- (2) Roth, A., 1966, "Vacuum Sealing Techniques," *Pergamon Press*.
- (3) Yarwood, J., 1967, "High Vacuum Sealing Technique," 4th edition, *Chapman & Hall, London*.
- (4) Botto, P., Dragoni, E., Strozzi, A., 1995, "Finite Element Redesign of Reciprocating 'PIFE' Rod Seal," pp. 671~683.
- (5) MARC, 1998, *MARC Analysis Research Corporation, California, USA*.
- (6) Parker Co., 2000, *Parker O-ring Handbook*.