

## V홈을 갖는 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 관한 유한요소해석

†김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터  
(2012년 8월 19일 접수, 2013년 2월 14일 수정, 2013년 2월 14일 채택)

### Finite Element Analysis on the Sealing Behavior and Endurance Safety of O-rings with a V-groove

†Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology  
Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received August 19, 2012; Revised February 14, 2013; Accepted February 14, 2013)

#### 요약

본 연구에서는 유한요소해석법을 사용하여 V홈 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 관련된 변형률, 응력, 접촉법선응력 해석결과를 제시하고 있다. 밀봉거동과 내구 안전성에 관한 FEM 해석결과에 의하면, V홈 형상을 갖는 오링에 작용하는 최대변형률, 최대압축응력, 최대접촉법선응력은 기존의 오링에 비해 약 1.2배나 더 높게 나타났다. 이것은 오링이 두 개의 원형을 겹치도록 형성된 중간부에 V홈을 넣었기 때문에 가능한 것으로 판단되고, V홈 오링은 볼밸브, 압력용기, 가스기기의 밀봉을 하는데 매우 유용한 것으로 알려져 있다. 그리고, V홈 오링에서 가스압력을 높여도 압출에 의한 파손현상이 발생되지 않았는데, 이것은 V홈이 형성되어 있기 때문이다. 따라서, V홈 오링은 기존 오링에 비해 밀봉수명을 연장시킬 수 있다.

**Abstract** - This study presents sealing behavior and endurance safety of V-grooved o-rings as functions of a strain, compression stress, and contact normal stress using a FEM technique. The FEM results on the sealing behavior and endurance safety show that the maximum strain, maximum compression stress, and maximum contact normal stress of V-grooved o-rings are approximately 1.2 times higher than those of conventional solid o-rings. This is why that an o-ring has a V-groove in the center between two overlapped circles, which is very effective in sealing for ball valves, pressure vessels, and gas equipment. And the extrusion failure in V-grooved o-rings does not take place under an increased gas pressure due to a V-groove. This may extend sealing life compared with that of a conventional solid o-ring.

**Key words** : V-grooved o-ring, sealing behavior, endurance safety, stress and strain

#### 1. 서론

볼밸브나 압력용기에서 고압가스의 외부누출을 차단하기 위해 탄성중합체고무로 제작한 접촉식 오링(o-ring)을 많이 사용한다. 볼밸브의 스템축(stem shaft)을 따라서 누출하려는 고압가스를 차단하기 위해 스템축의 외경부에 사각 형상의 홈(groove)을 형성하여

오링을 조립하고, 이 오링에 초기 압축력을 공급함으로써 스템축과 밸브의 몸체사이에 형성된 밀봉간극을 따라서 외부로 누출하려는 고압가스를 차단하게 된다.

기존의 오링은 원형의 절단면 형상을 갖기 때문에 사각 홈에 조립한 상태에서 가스압력을 오른쪽에서 공급하면, 가스압력을 직접적으로 접촉하지 않는 반대편의 왼쪽 지역에 형성된 빈 공간으로 밀려나 압착되면서 밀봉력을 확보하게 된다. 이때 가스압력이 작용하는 반대편인 왼쪽의 밀봉간극(sealing gap),

†Corresponding author: cckim\_hongik@nate.com  
Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

즉 스템축과 볼밸브 몸체사이에 형성된 작은 간극을 통해 탄성중합체인 고무소재는 빠져나가려는 압출 현상이 발생하고, 이런 현상이 가스압력 변동에 의해 반복적으로 진행되면 오링의 접촉표면은 손상을 받아 고압가스의 누출을 예상할 수 있다[1-3].

따라서, 볼밸브에 작용하는 가스압력이 높을 경우는 더 높은 밀봉 내구 안전성을 확보하기 위해 두 개의 오링을 병렬로 설치한다. 이처럼 오링 두 개를 병렬로 설치하면 누출차단 내구 안전성은 향상되지만, 설치공간은 더 많이 늘어나고, 볼밸브의 무게가 증가되는 문제점이 있다. 더욱이, 오링을 병렬로 두 개 또는 그 이상으로 설치해도 고압가스의 작동압력을 더 높여서 사용할 수 있는 것은 아니고, 단지 두 개의 오링을 연달아 설치하기 때문에 가스누출에 대한 밀봉 내구 안전성, 즉 내구수명이 향상될 뿐이다.

본 연구에서는 기존의 오링이 갖는 문제점을 개선하여 밀봉압력을 더 높이면서, 동시에 밀봉 내구 안전성을 증가시켜보자는 것이다. 즉, 오링 두 개를 겹친 형상의 절단면 중간부에 V홈을 넣어서 제조한 오링 구조물이다. 이러한 V홈 오링은 V홈을 중심으로 좌우측의 두 개 구역에서 밀봉 접촉면을 형성하기 때문에 밀봉력은 더 높아지고, 밀봉 내구 안전성이 향상된 밀봉 메커니즘을 갖게 된다. 또한, V홈을 갖는 오링은 한 개의 오링을 두 개로 연결한 밀봉장치에서 흔히 발생하는 압출에 의한 접촉표면의 손상 때문에 발생하는 가스누출을 차단할 수 있어 오링을 장기간 사용할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 원형 절단면을 갖는 기존의 오링과 V홈이 형성된 오링에 대한 밀봉거동과 내구 안전성에 관련된 오링의 변형률, 압축응력, 접촉법선응력을 FEM으로 해석하고, 이들 결과를 상대적으로 비교·고찰하고자 한다.

## II. 해석모델 및 해석조건

### 2.1. 해석모델

Fig. 1은 볼밸브의 스템축 외경부를 따라서 형성된 사각형상의 홈에 조립된 원형의 절단면을 갖는 오링을 보여주고 있다. Fig. 1(a)에서는 고압가스의 외부누출을 차단하고, 밀봉 내구 안전성을 높이기 위해 연달아가공한 두 개의 사각 홈에 원형 절단면을 갖는 기존 오링을 조립한 것으로 밀봉작용은 접촉면의 한곳에서만 이루어진다.

또한, Fig. 1(b)에서는 고압가스 누출을 차단하기 위해 한 개의 사각 홈에 두 개의 밀봉 접촉면을 갖는 V홈 오링을 삽입한 것으로, 밀봉작용은 V홈을 기점으로 두 곳의 접촉면에서 이루어지도록 구성된 밀봉 메커니즘

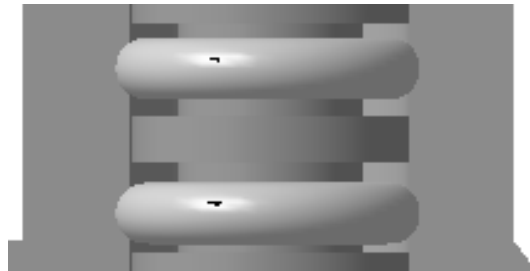
을 보여주고 있다.

본 연구에서는 오링의 변형률, 압축응력, 접촉법선응력 등과 같은 밀봉거동과 내구 안전성을 해석하기 위해 FEM 프로그램 MARC[4]를 사용하였고, FEM 해석에 사용된 해석모델은 4절점 축대칭 솔리드 요소이다.

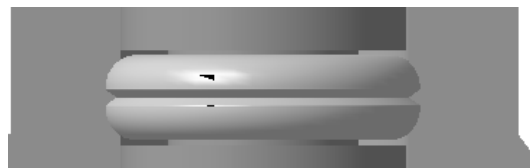
### 2.2. 가스압력 및 오링소재

오링의 한쪽으로부터 공급된 작동가스의 내압은 LPG를 연료로 사용하는 볼밸브, 압력용기, 용기용 밸브, 콕 커플러 등에서 충전압력으로 사용하는 0.9MPa 과 오링의 밀봉성을 확보하기 위해 안전기준으로 설정한 최대밀봉압력 1.8MPa을 각각 사용하여 오링의 변형거동 및 응력거동 특성을 FEM으로 해석하였다.

본 연구에 사용된 오링소재는 탄성거동 안전성이 대단히 우수한 NBR이고, 가격 또한 저렴하기 때문에 취사용, 산업용 등으로 많이 사용되고 있다. NBR 소재



(a) Solid o-rings with two rectangular grooves



(b) V-grooved o-ring with a rectangular groove

**Fig. 1.** Sealing mechanism with one or two elastomeric o-rings for high pressure gases.

**Table 1.** Material properties of NBR O-rings

Material Properties	Values
Elastic modulus, MPa	3
Poisson's ratio	0.49
Density, kg/cm <sup>3</sup>	1,460

를 LPG용 밀봉소재로 사용할 경우는 내액화석유가스 성질을 갖추어야 안전하다고 KGS AA212[5]에 명시되어 있다.

Table 1은 밀봉거동 및 내구 안전성을 FEM으로 해석하기 위해 사용한 NBR 소재의 물성치를 제시하고 있다.

### III. 해석결과 및 고찰

#### 3.1. 기존 오링에 대한 밀봉거동특성 해석

Figs. 2~4는 볼밸브나 고압용기 등에서 발생할 수 있는 밀봉거동 및 내구 안전성을 FEM으로 해석한 결과를 제시하고 있다.

Fig. 2(a)에서는 원형단면을 갖는 오링을 사각 홈에

삽입하고, 밀봉성을 확보하기 위해 조립하는 과정에 필요한 25%의 초기 압축률(compression rate)을 적용하였을 때 오링의 탄성압축 변형률 거동특성을 보여주고 있다. 오링에 가한 초기 압축률 25% 이외에는 어떠한 가스압력도 공급하지 않았을 때 발생한 최대 변형률은 0.47이고, 이때의 변형거동 패턴은 대칭적으로 나타났다. Fig. 2(b)에서는 조립된 오링의 오른쪽에서 가스충전압력 0.9MPa를 가하였을 때 발생한 최대 변형률 0.48은 오링의 중앙부에서 나타내지만, Fig. 2(a)의 최대변형률 0.47과는 큰 차이가 없었다. 다만, 가스압력이 가해지는 반대편에서는 상대적으로 낮은 압축 변형률이 비대칭적으로 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(c)에서는 조립된 오링의 오른쪽에서 기밀시험 압력 1.8MPa를 가하였을 때 발생한 최대 변형률 0.49

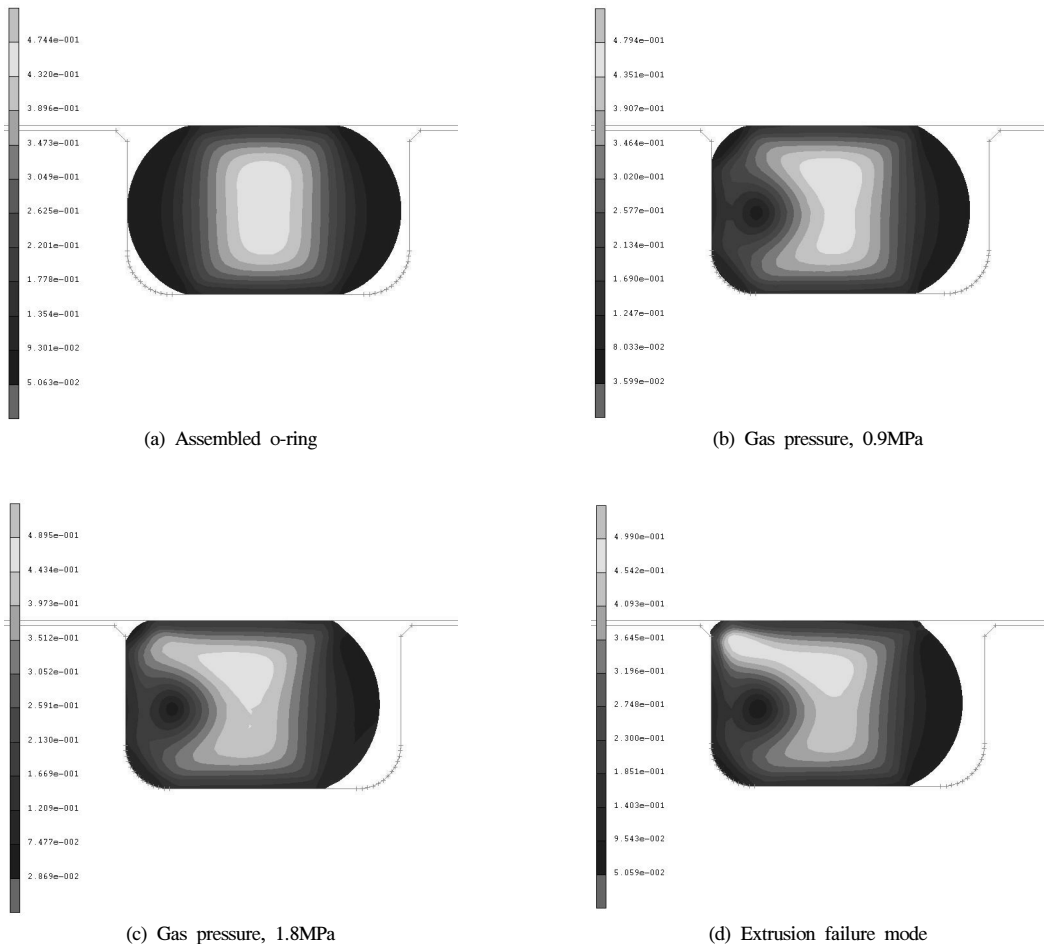


Fig. 2. Strain distributions of solid o-rings for LP gas pressures.

가 오링의 중앙부에서 위쪽의 밀봉간극을 향하여 나타났지만, Fig. 2(b)의 최대변형률 0.48과는 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. Fig. 2(d)에서는 오링의 압출파손을 관찰하기 위해 가스압력을 올렸을 때 형성된 최대변형률은 0.5이고, 이 변형률은 중앙부에서 밀봉간극 지역인 상좌측으로 많이 이동하였음을 보여주고 있다. 이것은 오링을 사각 홈에 조립하고, 가스압력이 증가됨에 따라 오링의 변형거동은 중심부에서 가스압력이 작용하는 반대편인 왼쪽으로 점차 이동하면서 오링소재가 밀봉간극을 통해 빠져나가는 압출파손 현상이 진행될 것이라는 예측이 가능하다.

Fig. 3(a)에서 오링을 사각 홈에 삽입하였을 때 초기 압축률 25%에 의해 발생한 최대압축응력은 2.38MPa이고, Fig. 3(b)에서 충전압력 0.9MPa를 가하였을 때

발생한 최대압축응력은 2.41MPa이며, Fig. 3(c)에서 기밀시험압력 1.8MPa를 가하였을 때 발생한 최대압축응력은 2.46MPa으로 각각 나타났다. Fig. 3(d)에서 가스압력을 더 증가하면 오링에 걸리는 압축압력은 2.52MPa을 넘어서게 되고, 이것은 오링소재의 압출에 의해 형성되는 돌출현상으로 인해 오링은 파손으로 연결될 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4(a)에서 오링을 사각 홈에 삽입하였을 때 초기 압축률 25%에 의해 발생한 최대접촉법선응력 2.49MPa은 사각 홈의 상부와 하부의 접촉면에서 대칭적으로 형성되었다. 또한, 충전압력 0.9MPa를 가하였을 때는 3.36MPa의 최대접촉법선응력이 오링의 상하부와 좌측면에 작용하고, 기밀시험압력 1.8MPa를 가하였을 때는 4.27MPa의 최대접촉법선응력이 걸리면서 오링

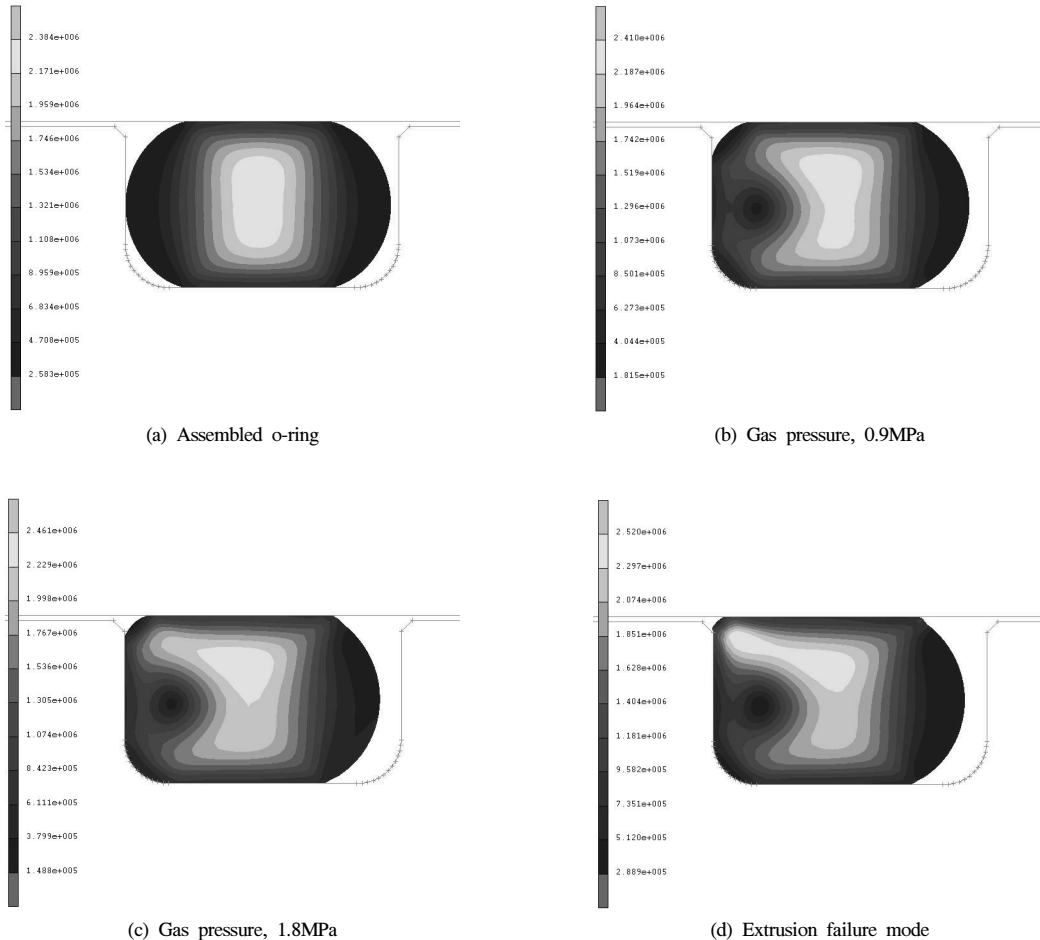
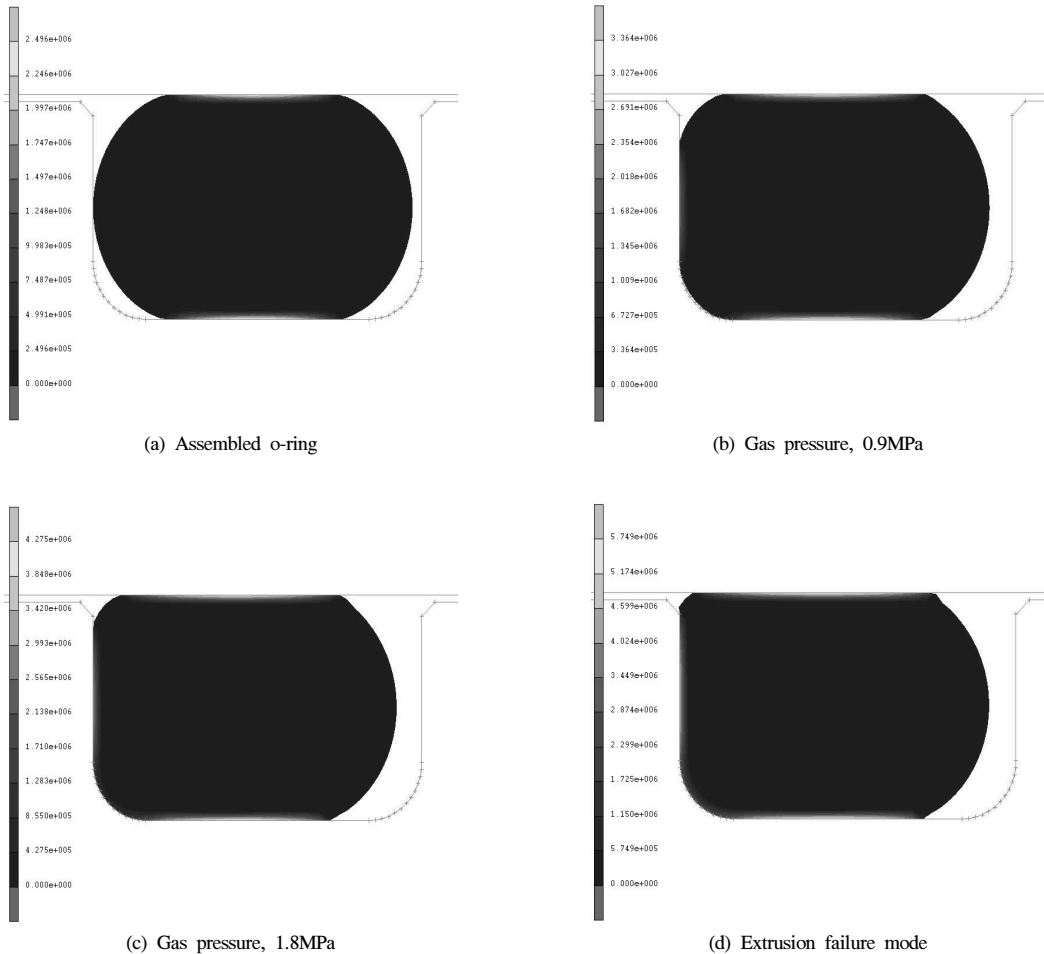


Fig. 3. Compression stress distributions of solid o-rings for LP gas pressures.

## V홈을 갖는 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 관한 유한요소해석



**Fig. 4.** Contact normal stress distributions of solid o-rings for LP gas pressures.

의 가스누출 차단에 필요한 밀봉력은 충분히 확보되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4(d)에서 가스압력을 지속적으로 증가하면 오링에 걸리는 최대접촉법선응력이 5.75MPa를 넘어서면서 압출현상에 의한 오링의 표면파손은 좌측상단에서 진행되고 있음을 관찰할 수 있다.

기존의 원형단면을 갖는 오링에 대한 Figs. 2~4의 해석결과에 의하면, 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 오링을 사각 홈에 조립할 때 제공되는 초기 압축률이라는 것을 알 수 있다. 또한, 고압가스 압력이 상승되면, 단기적으로 볼 때 밀봉력 확보는 유리하지만, 장기적으로 보면 내구 안전성을 떨어뜨리는 원인으로 작용하는 압출에 의한 오링파손을 예상할 수 있다.

### 3.2. V홈 오링에 대한 밀봉거동특성 해석

Figs. 5~7은 오링의 좌우측에 두 개의 밀봉 접촉면을 갖도록 설계된 V홈 오링에 대한 밀봉거동과 내구 안전성을 해석한 결과를 제시하고 있다.

Fig. 5(a)에서는 V홈을 중간부에 형성한 오링을 사각 홈에 조립하였을 때 초기 압축률에 의해 발생된 최대변형률은 0.48이고, 충전압력 0.9MPa를 가하였을 때 발생한 최대변형률은 0.54로, 이것은 기존의 오링보다 1.13배나 높은 변형거동 특성을 나타낸 결과치이다. 또한, 기밀시험압력 1.8MPa를 가하였을 때 작용하는 최대변형률은 0.61로 기존의 오링보다 1.25배나 높은 변형거동 특성을 보여주고 있다. 또한, Fig. 5(d)에서 V홈 오링의 압출파손 초기현상을 관찰하고자 Fig.

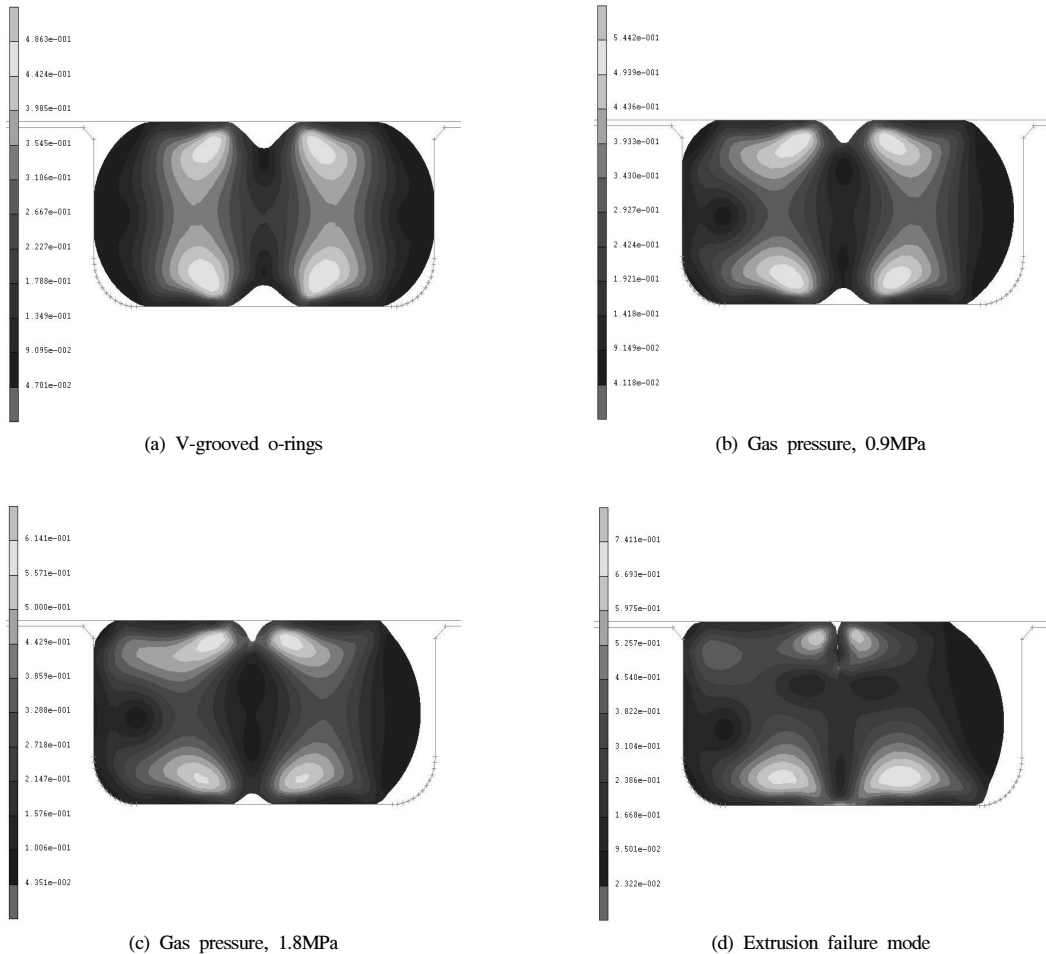


Fig. 5. Strain distributions of V-grooved o-rings for LP gas pressures.

2(d)처럼 가스압력을 동일하게 적용하였다. Fig. 5(d)에서 예측된 최대변형률은 0.74이지만, 밀봉간극 사이로 통해 오링소재가 빠져나가는 압출현상이 V홈 오링에서는 발생하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 이것은 V홈 오링의 중간부에 형성된 V형상의 홈에서 겹쳐지려는 현상이 발생하는 것도 하나의 원인으로 작용하였다. 이것은 V홈 오링에 가스압력을 높게 가해도 압출과손이 발생하기 어려운 구조라는 것으로, V홈 오링의 밀봉력과 밀봉 내구 안전성을 높이는 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 6(a)은 V홈을 갖는 오링을 사각 홈에 삽입하였을 때 최대압축응력 2.43MPa이 상하지점에서 대칭적으로 발생한 것을 보여주고, Fig. 6(b)은 충전압력 0.9MPa을 가하였을 때 발생한 최대압축응력은

2.74MPa로, 이것은 기존의 오링보다 1.14배나 높은 압축응력을 나타내고 있다. 또한, Fig. 6(c)은 기밀시험압력 1.8MPa을 가하였을 때 3.1MPa의 최대압축응력이 걸리고 있음을 보여주고 있다. 이것은 기존 오링의 최대압축응력 2.46MPa에 비해 1.26배나 높은 압축응력으로 밀봉성이 크게 강화되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 6(d)에서는 V홈 오링의 압출현상을 관찰하기 위해 가스압력을 높였을 때, V홈 오링에서 발생한 최대압축응력이 3.7MPa로 높게 형성되었지만 밀봉간극을 통한 압출과손은 발생되지 않았다.

Fig. 7(a)은 V홈 오링을 사각 홈에 삽입하였을 때 최대접촉법선응력 3.7MPa이 상하지점에서 발생한 것을 보여주고, Fig. 7(b)은 충전압력 0.9MPa을 가하였을 때 발생한 최대접촉법선응력은 4.6MPa로, 이것은 기

V홈을 갖는 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 관한 유한요소해석

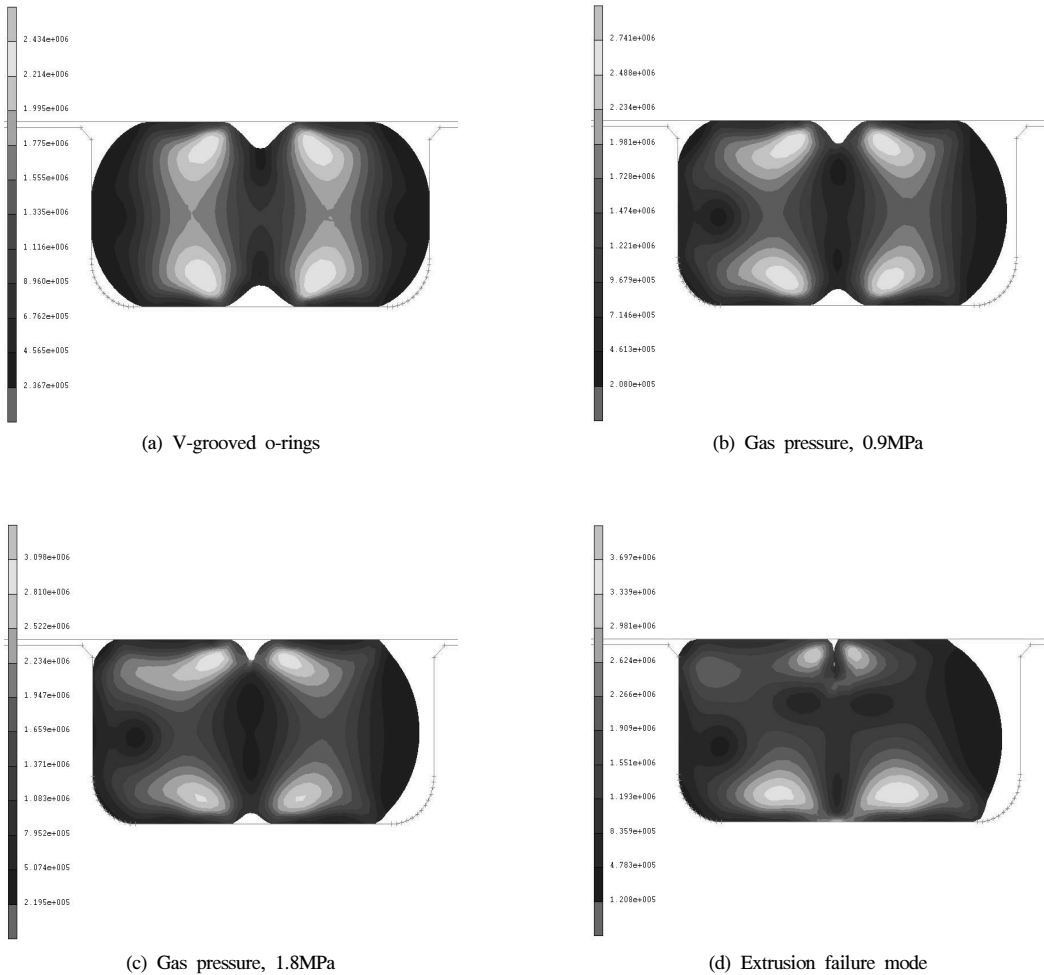


Fig. 6. Compression stress distributions of V-grooved o-rings for LP gas pressures.

존의 오링보다 1.37배나 높은 최대접촉범선응력을 상하지점에서 형성된 결과를 제시하고 있다. 또한, Fig. 7(c)은 기밀시험압력 1.8MPa를 가하였을 때 5.5MPa의 최대접촉범선응력이 작용하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 기존 오링의 최대접촉범선응력 4.27MPa에 비해 1.29배나 높은 최대접촉범선응력으로 밀봉성이 크게 강화되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(d)에서는 V홈 오링의 압출현상을 관찰하기 위해 가스압력을 증가하였지만, 발생된 최대접촉범선응력은 6.6MPa로 기밀시험압력 1.8MPa의 경우에 비해 크게 높아졌다. 그럼에도 불구하고 V홈 오링에서 밀봉간극을 통한 압출과손은 일어나지 않았다.

V홈을 갖는 오링에 대한 Figs. 5~7의 해석결과에 의

하면, V홈 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 큰 영향을 미치는 것은 기존의 오링처럼 초기 압축률이지만, V형상의 홈도 밀봉성과 내구 안전성을 높이는데 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 결국 V형상의 홈을 갖는 오링이 기존의 오링보다 더 우수한 밀봉특성을 유지하는 것은 V형상의 홈이 둘로 갈라져서 밀봉접촉을 하기 때문에 밀봉력과 내구수명을 안전하게 확보할 수 있다.

또한, V홈을 갖는 오링에서는 초기 압축력 25%에 작동유체의 밀봉압력을 높여도 변형률이나 접촉점선응력이 높으면서 균질하게 분포한다는 특징 때문에 밀봉성과 내구 안전성이 우수함을 예상할 수 있다.

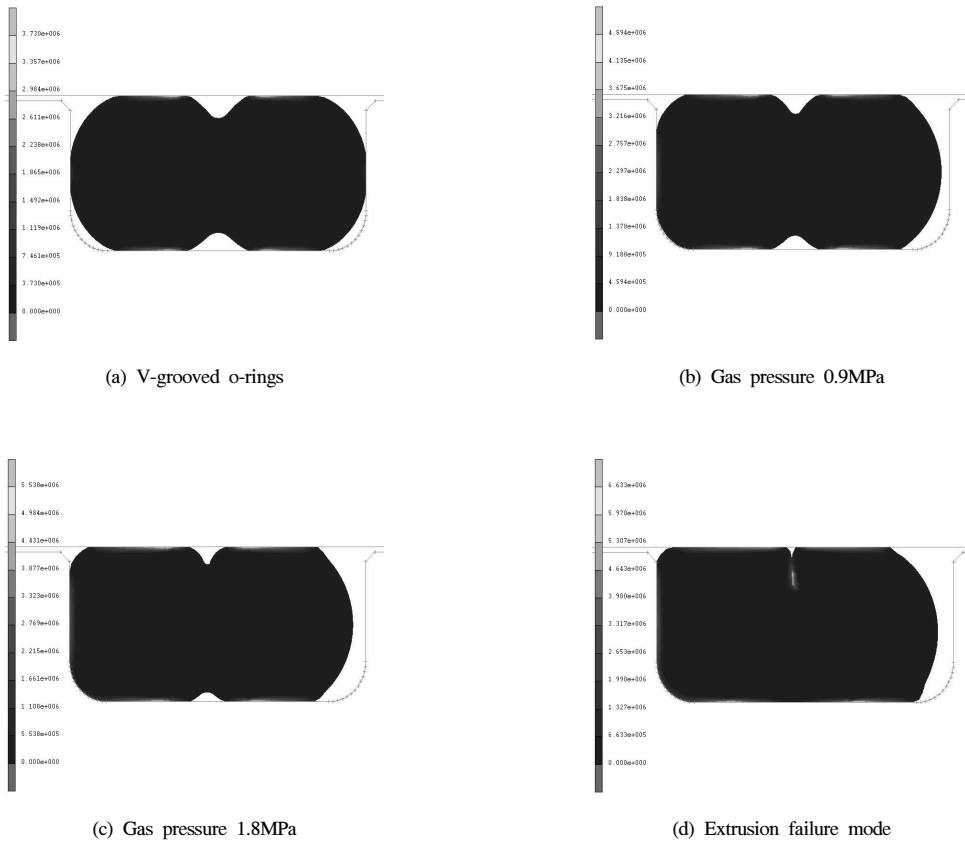


Fig. 7. Contact normal stress distributions of V-grooved o-rings for LP gas pressures.

#### IV. 결 론

원형의 절단면을 갖는 오링과 V홈 형상을 갖는 오링의 밀봉거동과 내구 안전성에 관련된 변형률, 압축응력, 접촉법선응력을 FEM으로 해석하였다.

V홈 오링에 충전압력 0.9MPa를 가하였을 때 발생한 최대변형률은 기존 오링에 비해 1.13배, 최대압축응력은 1.14배, 최대접촉법선응력은 1.37배나 더 높게 나타났다. 이 결과는 V홈 오링이 기존 오링에 비해 밀봉거동과 밀봉 내구 안전성이 더 우수하다는 것을 의미한다. 또한, V홈 오링에서는 고압가스의 압력을 높여도 V홈 부근에서 변형거동성이 우수하기 때문에 밀봉간극을 통한 압출현상이 발생하지 않았다.

또한, V홈 오링은 밀봉을 위한 접촉표면이 V홈의 좌우측으로 갈려 두 지점에서 형성되기 때문에 가스압력 증가에 따른 밀봉성은 2배로 늘어나 높은 밀봉성과 밀봉 내구 안전성이 증가하는 효과를 기대할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Richter, B., "Perfluoroelastomer O-rings Reduce Risk of Failure", World Pumps, pp.34-36, (1995)
- [2] Kim, C. K., Cho, S. H., and Kim, Y. G., "On the Contact Behavior Analysis and New Design of O-ring Seals", Proceedings of the Second Asia International Conference on Tribology, Oct. 21-24, Jeju Korea, pp.121-122, (2002)
- [3] Kim, C. K., "A Study on the Stress Behavior Analysis of O-rings for a LPG Fuelling Nozzle", J. of the KSTLE, Vol. 22, No. 1, pp.23-28, (2006)
- [4] MARC, MARC User's Manual Ver. 7.3, MARC Analysis Research Corp., California USA, (1999)
- [5] KGS AA212, (2010)