



## 다접오링의 밀봉특성 해석에 관한 연구

†김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터  
(2012년 7월 21일 투고, 2012년 10월 26일 수정, 2012년 10월 28일 채택)

## A Study on the Sealing Characteristics of Multi-contact O-rings

†Chung Kyun Kim

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

(Received July 21, 2012; Revised October 26, 2012; Accepted October 28, 2012)

### 요약

본 연구에서는 유한요소해석법을 사용하여 다접오링의 밀봉특성에 관련된 변형률, 응력, 접촉법선응력을 해석하였다. 밀봉특성에 관한 FEM 해석결과에 의하면, 다접오링에 작용하는 최대 변형률, 최대압축응력, 최대접촉법선응력은 기존의 오링에 비해 약 1.7배나 더 높게 나타났다. 이것은 다접오링의 절단면에 U홈을 형성하였기 때문이고, 다접오링은 고압가스 용기, 밸브, 가스기기의 밀봉을 유지하는데 매우 유용할 것으로 판단된다. 그리고, 다접오링에서 가스압력을 높여도 압출파손 현상이 발생되지 않았는데, 이것은 U홈이 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 다접오링은 기존의 오링에 비해 밀봉수명을 길게 연장시킬 수 있다.

**Abstract** - This study presents sealing characteristics of multi-contact o-rings as functions of strain, compression stress, and contact normal stress using a FEM technique. The FEM results on the sealing characteristics show that the maximum strain, maximum compression stress, and maximum contact normal stress of multi-contact o-rings are approximately 1.7 times higher than those of conventional o-rings. This is due to a U-grooved cross section of multi-contact o-rings, and the multi-contact o-rings with a U-groove show more effective in sealing for high pressure vessels, valves, and gas equipments. And the extrusion failure in the multi-contact o-ring does not produce for an increased gas pressure due to a U-groove. This may extend sealing life compared to that of a conventional o-ring.

**Key words** : o-ring, multi-contact o-ring, sealing characteristics, stress and strain, extrusion failure

### 1. 서론

가스배관이나 가스밸브와 같은 제품에서 발생하는 고압가스의 외부누출을 방지하기 위해 다양한 종류의 접촉식 밀봉제품이 사용되고 있다.

밸브나 구조용기의 가스누출을 차단하기 위해 개발된 대표적인 밀봉제품은 탄성중합체 고무로 제작한

오링(o-ring)을 예로 들 수 있다. 오링이 배관이나 구동축의 내경축 또는 외경축에 삽입될 수 있도록 원주방향을 따라 홈(groove)을 형성하고, 이곳에 오링을 조립한 다음, 이 오링을 커버로 완벽하게 덮어서 압축·밀봉작용을 할 수 있는 구조[1]로 설계된다. 홈에 삽입된 오링은 내외부의 밀봉가스 압력차에 의해 변형거동이 발생해도 외부로 이탈되지 못하도록 고정해야 하고, 더 중요한 것은 탄성변형 거동성이 우수하여 항상 밀봉성과 내구 안정성을 확보하고 있

†교신저자: cckim\_hongik@nate.com

어야 한다[2-4].

기존의 오링은 원형의 절단면 형상을 갖기 때문에 오링 홈에 조립된 상태에서 가스내압을 받으면 가스압력을 직접적으로 받지 않는 타 지역의 빈 공간으로 밀려나서 탄성 압착되고, 그 반발력에 의해 기밀성을 확보하게 된다. 이때 가스압력이 직접 작용되는 오링의 반대편에 형성된 작은 밀봉간극(sealing gap)을 통해 오링소재는 빠져나가려는 압출현상이 발생하고, 이런 현상은 궁극적으로 오링을 파손시켜 가스누출을 허용하게 된다. 따라서 가스압력이 높을 경우는 가스누출 차단 안전성을 높이기 위해 두 개의 오링을 병렬로 이어지도록 설치하는 경우가 많다. 밀봉 신뢰성을 높이기 위해 오링 두 개를 병렬로 설치하면 누출차단 내구 안전성은 더 확보되지만, 설치공간이 그만큼 늘어나 밸브나 용기의 무게가 증가되는 문제점이 있다. 그렇지만, 오링을 두 개 설치한다 해도 고압 가스압력을 더 높여서 사용할 수 있는 것은 아니고, 단지 두 개의 오링을 연달아 설치하기 때문에 가스누출에 대한 밀봉 신뢰성과 내구 안전성이 향상된다는 것이다.

기존의 오링은 원형 단면적을 형성하기 때문에 하나의 밀봉 접촉면으로는 가스누출이 비교적 용이하게 발생하는 구조이다. 그러나, 본 연구에서 개발한 피너트 형상의 절단면을 갖는 다접오링(multi-contact o-rings)에서는 두 지점에서 밀봉 접촉면을 형성하기 때문에 가스누출이 상대적으로 어려운 구조이다. 또한, 다접오링은 한 개의 오링을 두 개로 연결한 밀봉구조에서 흔히 발생하는 압출에 의한 오링 파손이 발생되지 않는 장점을 갖고 있다.

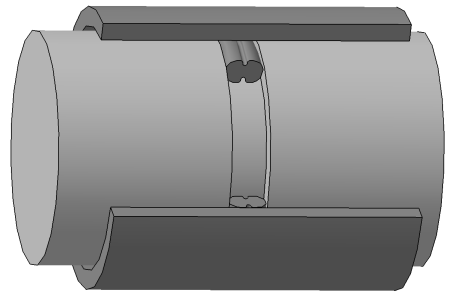
따라서, 본 연구에서는 기존의 오링과 새로운 피너트 타입의 다접오링에 대한 변형률, 압축응력, 접촉법선응력을 유한요소법으로 해석하고, 이들 해석 결과를 상대적으로 비교하여 밀봉특성을 고찰하고자 한다.

## II. 해석모델 및 해석조건

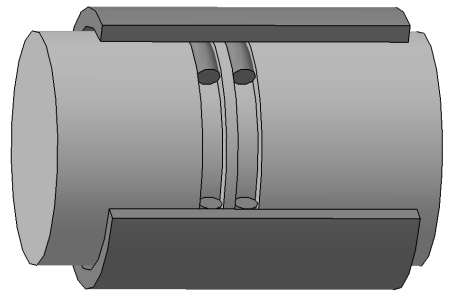
### 2.1 해석모델

Fig. 1은 원형축의 외경축에 형성된 오링 홈에 조립된 두 가지 타입의 오링 형상을 보여주고 있다. Fig. 1(a)에서는 고압가스의 누출을 안전하게 차단하고, 밀봉 내구성을 높이기 위해 두 개의 오링 홈을 이어서 형성한 구조물에 원형단면을 갖는 기존 오링을 조립한 것으로 밀봉 접촉면이 한 곳이다.

또한, Fig. 1(b)에서는 고압가스 누출을 차단하기 위해 한 개의 오링 홈에 두 개의 밀봉 접촉면을 갖는 피너트 형상의 절단면을 갖는 다접오링을 삽입하여 두 지점에서 밀봉을 동시에 할 수 있는 구조를 보여주



(a) Single peanut o-ring for high pressure sealing



(a) Typical two o-rings for high pressure sealing

**Fig. 1.** Contact Sealing models with elastomeric o-rings for high pressure gas structures such as pipes, valves, and vessels.

고 있다.

본 연구에서 밀봉특성에 관련된 오링의 변형률과 응력거동 특성을 해석하기 위해 사용한 FEM 프로그램은 MARC[5]이고, 해석에 사용한 해석모델은 4절점 축대칭 솔리드 요소이다.

### 2.2 가스압력 및 오링소재

오링에 작용하는 가스내압은 LPG를 연료로 사용하는 압력용기나 배관, 용기용 밸브, 킥퍼러 등에서 충전압력으로 사용하는 0.9MPa과 오링의 밀봉안전 기준으로 설정된 최대 밀봉압력 1.8MPa을 사용하여 오링의 변형률과 응력거동 특성에 대한 해석을 하였다.

본 연구에서 사용한 오링소재는 NBR이고, 이 소재는 상온에서 탄성거동 안정성이 대단히 우수하고, 가격이 저렴하기 때문에 취사용, 산업용 등으로 많이 사용되고 있다. NBR 소재를 LPG용 밀봉소재로 사용할 경우는 내액화석유가스 성질을 갖추어야 안전하다고 KGS AA212[6]에 명시되어 있다.

Table 1은 접촉식 오링의 밀봉특성 해석을 위해 사용한 NBR 소재의 물성치를 제시하고 있다.

**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

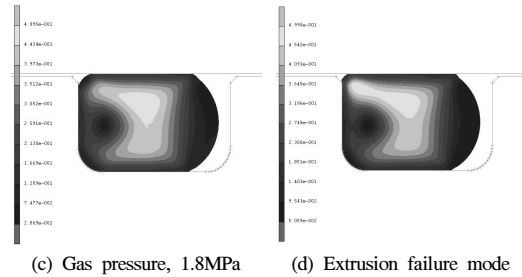
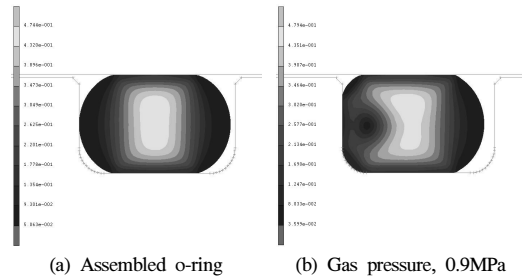
### III. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 기존 오링에 대한 밀봉거동 특성 해석결과

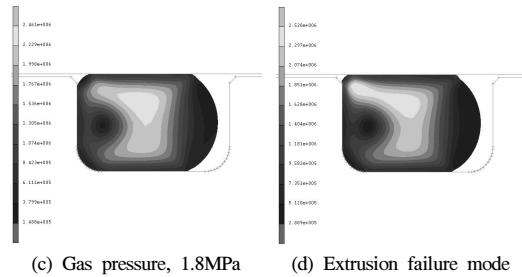
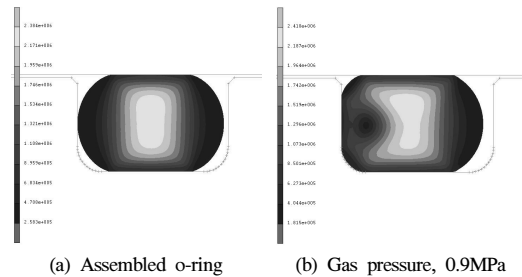
Figs. 2~4는 가스용기나 배관, 밸브 등과 같은 가스용품에서 발생하는 밀봉거동 특성을 고찰하기 위해 FEM으로 해석한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 2(a)에서는 오링을 오링 홈에 삽입하고, 실린더 구조물을 덮개로 조립하면서 제공되는 초기 압축률(compression rate)에 의해 발생된 오링의 탄성압축 변형률 거동특성을 보여주고 있다. 조립된 원형 단면의 오링에는 압축률 이외에 어떠한 가스압력도 가하지 않은 경우로 최대 변형률은 0.47이고, 변형거동은 대칭적으로 나타났다. Fig 2(b)에서는 오링 홈에 조립된 오링의 오른쪽에서 가스충전압력 0.9MPa를 가하였을 때 발생한 최대 변형률 0.48을 오링의 중앙부에서 나타내고 있지만, Fig. 2(a)의 변형률과 큰 차이가 없다. 다만, 가스압력이 가해지는 오링의 반대편인 왼쪽에서는 상대적으로 극히 낮은 압축 변형률이 비대칭적으로 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(c)에서는 조립된 오링의 오른쪽에서 기밀시험압력 1.8MPa를 가하였을 때 발생한 최대 변형률 0.49가 오링의 중앙부에서 위쪽의 밀봉간극을 향하여 나타내지만, Fig 2(b)의 변형률과 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. Fig 2(d)에서는 오링이 밀봉간극을 통해 빠져나가는 압출파손을 관찰하기 위해 가스압력을 점진적으로 증가시켰을 때 나타난 최대 변형률은 0.5이고, 이 최대 변형률은 중앙부에서 밀봉간극 지역인 위쪽의 왼쪽으로 많이 이동하였음을 보여주고 있다. 이것은 오링을 홈에 조립하고, 가스압력이 증가함에 따라 오링의 변형거동은 중심부에서 가스압력이 작용하는 반대편으로 점차로 이동하고, 이에 따라 오링은 밀봉간극을 통해 빠져나가는 압출파손 현상이 진행되고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 3(a)에서 오링을 홈에 삽입하였을 때 초기 압축률에 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 2.52MPa



**Fig. 2.** Strain behavior characteristics of typical o-rings for LPG pressures.



**Fig. 3.** Compression stress behaviors of typical o-rings for LPG pressures.

을 넘어서게 되고, 이것은 오링소재의 압출현상에 의한 오링파손으로 진행되고 있음을 의미한다.

Fig. 4(a)에서 오링을 홈에 삽입하였을 때 초기 압축률에 의해 발생한 최대접촉법선응력 2.49MPa에

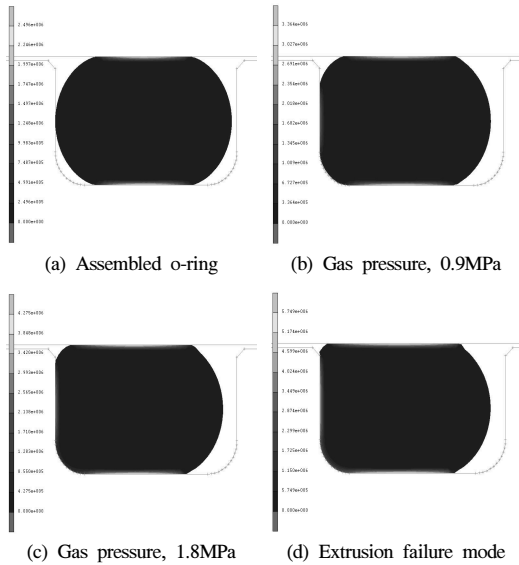


Fig. 4. Contact normal stress behaviors of typical o-rings for LPG pressures.

오링 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 오링의 가스누출 차단 밀봉력이 충분히 확보되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4(d)에서 가스압력을 지속적으로 증가하면 오링에 걸리는 최대접촉법선응력이 5.75MPa를 넘어서면서 압출현상에 의한 오링파손이 좌측의 상단에서 진행되고 있음을 관찰할 수 있다.

기존 오링에 대한 Figs. 2~4의 해석결과에 의하면, 오링의 밀봉특성 거동해석에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 오링을 오링 홈에 조립할 때의 초기 압축률이라는 것을 알 수 있다. 또한, 밀봉가스 압력을 높이면, 오링의 밀봉성은 향상되지만, 압축응력 증가로 인해 밀봉 내구 안전성은 떨어지기 때문에 압출에 의한 오링파손을 예상할 수 있다.

### 3.2 다점오링에 대한 밀봉거동 특성 해석결과

Figs. 5~7은 두 개의 밀봉 접촉면을 갖도록 설계된 피너트 타입의 다점오링에 대한 밀봉거동 특성을 해석한 결과를 제시하고 있다.

Fig. 5(a)에서는 피너트 형상의 절단면 형상을 갖는 다점오링을 오링 홈에 조립하였을 때 초기 압축률에 의해 발생된 최대 변형률은 0.52이고, 충전압력 0.9MPa

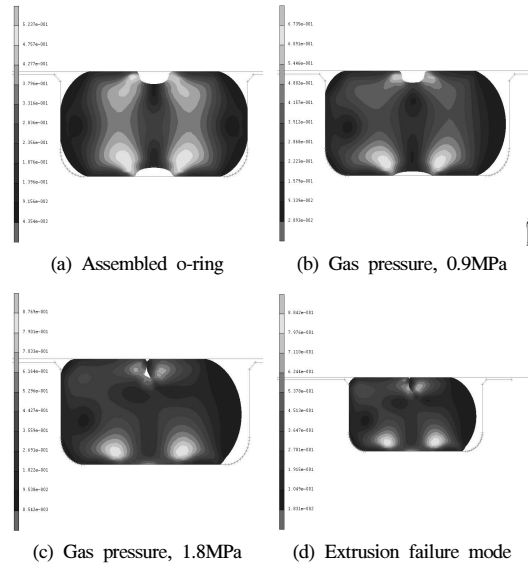


Fig. 5. Strain behaviors of typical o-rings for LPG pressures.

를 가하였을 때 발생한 최대 변형률은 0.67이며, 기밀 시험압력 1.8MPa를 가하였을 때 작용하는 최대 변형률은 0.87로 기존의 오링보다 1.77배나 높은 변형거동 특성을 나타내고 있다. 또한, Fig. 2(d)에서 발생한 오링의 압출파손 초기현상을 다점오링에서도 관찰하고자 가스압력을 동일하게 적용하였다. 그러나, Fig. 5(d)에서는 밀봉간극 사이로 오링이 빠져나가는 압출 현상이 다점오링에서는 발생하지 않았고, 다점오링의 중간부에 형성된 U형상의 홈에서 겹쳐지는 현상이 발생하였다. 이것은 다점오링에 가스압력을 높여도 압출파손이 발생하기 어려운 구조로 다점오링의 밀봉 내구성을 높이는 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 6(a)은 피너트 타입의 다점오링을 오링 홈에 삽입하였을 때 최대압축응력 2.63MPa이 상하의 네 지점에서 발생한 것을 보여주고, Fig. 6(b)은 충전압력 0.9MPa를 가하였을 때 3.37MPa의 최대압축응력이 상하의 네 지점에서 형성된 것을 나타내고 있으며, Fig. 6(c)은 기밀시험압력 1.8MPa를 가하였을 때 4.38MPa의 최대압축응력이 걸리고 있음을 제시하고 있다. 이것은 기존 오링의 최대압축응력 2.46MPa에 비해 1.78배나 높은 압축응력으로 밀봉성이 강화되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 6(d)에서는 다점오링의 압출현상을 관찰하기 위해 가스압력을 높였지만, 오링에서 발생한 최대압축응력이 4.4MPa로 높게 형성되었지만, 이것으로 인해 밀봉간극을 통한 압출파손 현상이 발

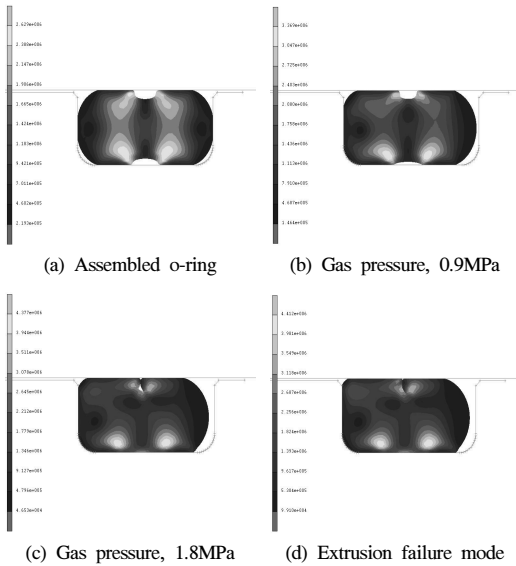


Fig. 6. Compression stress behaviors of typical o-rings for LPG pressures.

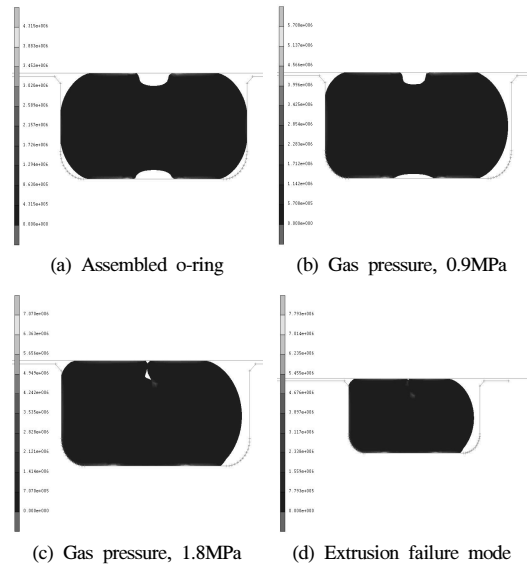


Fig. 7. Contact normal stress behaviors of typical o-rings for LPG pressures.

생되지 않았다.

Fig. 7(a)은 다접오링을 오링 홈에 삽입하였을 때 최대접촉범선응력 4.32MPa이 상하의 네 지점에서 발생한 것을 보여주고, Fig. 7(b)은 충전압력 0.9MPa을 가하였을 때 5.71MPa의 최대접촉범선응력이 상하의 네 지점에서 형성된 것을 나타내고 있으며, Fig. 7(c)은 기밀시험압력 1.8MPa을 가하였을 때 7.1MPa의 최대접촉범선응력이 작용하고 있음을 제시하고 있다. 또한, Fig. 7(d)에서는 다접오링의 압출현상을 관찰하기 위해 가스압력을 증가하였지만, 발생된 최대접촉범선응력은 7.79MPa로 기밀시험압력 1.8MPa의 경우에 비해 크게 높아졌다. 이렇게 높은 밀봉 안정성을 보여줌에도 불구하고, 다접오링에서는 밀봉간극을 통한 압출파손 현상이 일어나지 않았다.

기밀시험압력 1.8MPa이 작용할 때 Fig. 7(c)의 다접오링에서 제시한 최대접촉범선응력 7.1MPa은 기존 오링의 해석결과인 Fig. 3(c)에서 제시한 4.27MPa에 비해 1.66배나 높은 것으로 보아 밀봉성은 더 우수하고, 특히 밀봉접촉을 하는 위치가 U홈을 경계로 좌우측의 두 지점으로 늘어나기 때문에 기존의 오링에 비해 밀봉효과가 2배나 더 향상되었음을 알 수 있다.

피너트 단면형을 갖는 다접오링에 대한 Figs. 5~7의 해석결과에 의하면, 다접오링의 밀봉거동 안전성에 큰 영향을 미치는 것은 기존의 오링처럼 다접오링을 오링 홈에 조립할 때의 초기 압축률이지만,

U형상의 홈도 밀봉성을 높이는 데 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 결국 피너트 형상의 다접오링은 기존의 오링보다 더 우수한 밀봉특성을 유지하는 것은 U형상의 홈이라는 것이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 원형의 절단면을 갖는 기존의 오링과 피너트 형상의 절단면을 갖는 다접오링에 대한 변형률, 압축응력, 접촉범선응력 거동특성을 유한요소법으로 해석하였다.

다접오링에 기밀시험압력 1.8MPa을 가하였을 때 발생한 최대 변형률은 기존 오링에 비해 1.77배, 최대압축응력은 1.78배, 최대접촉범선응력은 1.66배나 더 높게 나타났다. 이 결과는 다접오링이 기존 오링에 비해 변형거동 특성이 우수하다는 것을 의미한다. 또한, 기존 오링에서 흔히 발생하는 압출에 의한 파손현상이 피너트 타입의 다접오링에서는 관찰되지 않아 밀봉작용 내구 안전성이 더 우수함을 알 수 있다.

더욱이 U형상의 홈을 갖는 다접오링에서는 밀봉을 하는 접촉표면이 두 지점이기 때문에 한 지점에서 접촉하는 기존 오링보다 2배의 밀봉효과를 기대할 수 있어 밀봉성과 내구 안전성이 더 좋은 결과를 제시하고 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

### 참고문헌

- [1] Richter, B., "Perfluoroelastomer O-rings Reduce Risk of Failure", *World Pumps*, 34-36, (1995)
- [2] 김도현, 김청균, "복합소재 O-링의 압축변형 특성에 관한 연구", *한국윤활학회지*, **21**(4), 171-176, (2005)
- [3] 김청균, "LPG 충전노즐용 O-링과 패킹의 응력 거동해석에 관한 연구", *한국윤활학회*, **22**(1), 23-28, (2006)
- [4] 김청균, "LPG 용기 밸브용 O-링의 누설안전성에 관한 해석적 연구", *한국가스학회지*, **11**(2), 37-42, (2007)
- [5] MARC, *MARC User's Manual Ver. 7.3*, MARC Analysis Research Corp., California, USA, (1999)
- [6] KGS AA212, (2010)