



자동차용 CNG 충전니플의 밀봉접촉응력에 관한 유한요소해석

†김청균 · 유재욱

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2012년 8월 19일 투고, 2012년 12월 26일 수정, 2012년 12월 26일 채택)

Finite Element Analysis on the Sealing Contact Stress of a CNG Fueling Nipple for Vehicles

†Chung Kyun Kim · Jae Wook Yoo

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

(Received August 19, 2012; Revised December 26, 2012; Accepted December 16, 2012)

요약

본 연구에서는 압축천연가스 자동차용으로 사용하는 CNG 충전니플의 밀봉성과 밀봉내구 안전성에 관련된 접촉법선응력 및 등가진응력을 유한요소법으로 해석하였다. 기존의 원형 오링과 새로운 더블립 오링에 초기압축률 15%를 가한 상태에서 밀봉력을 해석한 결과에 의하면, 두 곳에서 밀봉작용을 하는 더블립 오링이 환곳에서 밀봉작용을 하는 기존의 원형 오링보다 41% 더 높게 나타남을 알 수 있다. 오링에 초기압축력 15%와 가스압축압력 8MPa을 작용한 상태에서 가스누출 차단 안전성을 비교하면, 기존의 원형 오링보다는 더블립 오링에서 5% 향상된 해석결과를 제시하고 있다. 또한, 오링의 밀봉내구 안전성을 비교한 FEM 해석결과에 의하면, 원형 오링보다는 더블립 오링에서 발생된 최대등가진응력이 10.2%나 더 높게 발생한 것으로 나타났다. 이것은 더블립 오링이 기존의 원형 오링보다는 장수명을 보장할 수 있다는 것이다.

Abstract - In this study, the leak-free performance and sealing endurance safety of CNG fueling nipple in which are related to the contact normal stress and equivalent true stress have been analyzed for CNG automobile using a finite element analysis. For the conventional circular o-rings and new double-lip o-rings with an initial compression rate of 15 percentages, the leak-free performance of double-lip o-rings with two contact sealing spots is 41% higher than that of the conventional circular o-rings with a contact sealing spot. The FEM computed results present that the leak-free endurance safety of double-lip o-rings with two contact sealing spots is 5% higher than that of the conventional circular o-rings for initial compression ratio of 15 percentages and a gas compression pressure of 8MPa. And, the maximum equivalent true stress of double-lip o-rings is 10.2% higher than that of the conventional circular o-rings for the leak-free endurance safety. This means that the double-lip o-ring may guarantee the extended sealing life compared to that of a conventional circular o-ring.

Key words : CNG nipple, compressed natural gas, circular o-ring, double-lip o-ring, endurance safety

1. 서론

천연가스(NC)를 20~25MPa 정도로 압축하여 내압

용기에 충전한 것이 압축천연가스(CNG)이다. CNG를 자동차용 가스연료로 안전하게 사용하기 위해서는 고압충전과 고압저장이 가능한 내압용기를 자동차용 연료탱크로 설치해야 한다. 이 내압용기에 20MPa 이상의 CNG 가스연료를 안전하게 충전하기 위해서는 CNG 충전소의 대형 저장탱크에 연결된 CNG 충전노

†Corresponding author:ckkim_hongik@nate.com

Copyright © 2012 by The Korean Institute of Gas

즐을 차량의 내압용기에 부착된 CNG 충전니플(CNG fueling nipple)에 완벽하게 체결한 상태에서 압축천연가스를 공급해야 한다.

압축천연가스가 불완전하게 연소함에 따라 발생하는 환경오염물질은 휘발유나 경유에 비해 대단히 낮다. CNG는 도시가스를 압축하여 사용하기 때문에 초고압이라는 위험성에 항상 노출되어 있다. 그럼에도 불구하고, 연료가격이 상대적으로 저렴하기 때문에 CNG 자동차에 대한 관심은 나날이 높아지고 있다[1]. CNG 자동차의 충전압력은 경제적인 주행거리를 고려하여 보통은 20MPa를 넘도록 충전한다. 이렇게 높은 고압으로 내압탱크에 충전하려면, 내압용기는 강도안전성을 충분히 고려하여 설계해야 한다. 가스연료로 가장 많이 사용하는 액화석유가스(LPG)의 경우는 LPG 자동차의 충전압력이 1MPa[2]로 대단히 낮은 점을 고려할 때 CNG 자동차의 위험성은 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다.

우리나라에서는 1988년의 올림픽 대회를 계기로 디젤버스의 환경오염 배출가스를 낮추기 위해 모든 버스를 CNG 연료를 사용하는 친환경 차량으로 개조한 결과 도심환경은 크게 개선되었지만, 20MPa를 넘는 내압용기를 장착하고 운행하는 버스로 인해 많은 사람들은 항상 위험성에 노출되어 있다. 따라서 환경개선과 저가연료 측면에서 CNG 차량에 대한 관심은 높아졌지만, 위험성이 높은 CNG를 충전한 일반차량 보급에는 신중을 기할 필요가 있다.

CNG 자동차에 관련된 가스폭발 사고의 대부분은 CNG 충전소에서 압축천연가스를 충전하는 과정에서 가스누출과 충전미숙으로 인해 발생한 경우가 많았다 [3]. 따라서 CNG 자동차가 충전소에 주차한 상태에서 CNG 충전노즐을 자동차의 내압탱크에 연결된 CNG 충전니플에 체결한 상태에서 어떠한 가스누출도 발생되지 않도록 설치된 오링(O-ring)의 밀봉안전성을 확보하는 것은 대단히 중요하다[4].

CNG 충전니플을 사용하여 압축천연가스를 공급받지 않을 경우는 내부의 체크밸브에 설치된 원형 오링에 의해 압축가스의 외부누출을 차단한다. 또한, CNG 충전니플에서 CNG를 충전할 때는 오링 홈에 안착된 오링이 이탈하거나 오링의 끝단부가 떨어지면서 고압가스의 안정된 유입을 방해하여 충전효율을 떨어뜨리는 문제점이 발생하기도 한다.

따라서 본 연구에서는 CNG 충전니플에 장착된 기존의 원형 오링에 대한 밀봉응력 안전성을 유한요소법으로 해석하고, 그 결과를 새롭게 설계된 더블립 오링(double lip O-ring)의 밀봉응력과 비교적으로 고찰하고자 한다.

Table 1. Material properties of NBR O-rings

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

II. 유한요소 해석모델 및 해석조건

CNG 자동차의 내압용기에 가스연료를 공급받기 위해 설치된 CNG 충전니플은 Fig. 1에서 보여준 것과 같다. CNG 충전니플의 가스누출을 차단하기 위해 충전니플의 몸체 내부에 설치된 집축식 오링을 삽입할 수 있도록 오링 홈의 형상과 치수를 KS 규격[5]에 의거 선정하였다.

Fig. 2에서는 가스누출을 차단하기 위해 기존의 원형 오링 대신에 더블립 오링을 설치한 것을 보여주고 있다. CNG 충전니플의 몸체에 경사지게 형성된 시일 시트에 압착되게 더블립 오링(또는 원형 오링)을 조립할 수 있도록 구성된 오링 홈에 더블립 오링을 삽입한 구조를 총칭하여 체크밸브라 한다.

또한, Fig. 3에서 CNG 충전니플의 내부에 설치된

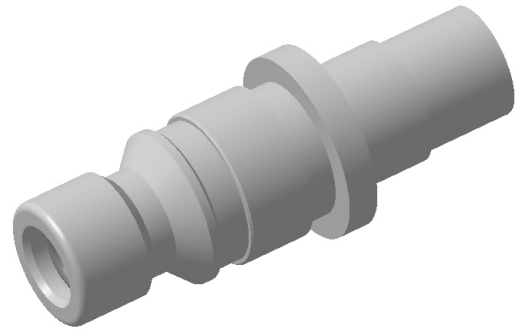


Fig. 1. Typical CNG fueling nipple model for CNG storage fuel tank.

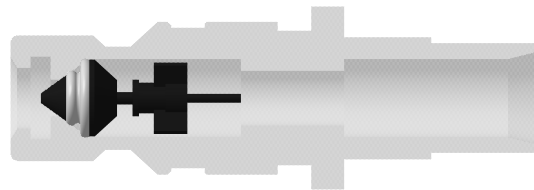


Fig. 2. CNG fueling nipple model with double-lip O-rings.

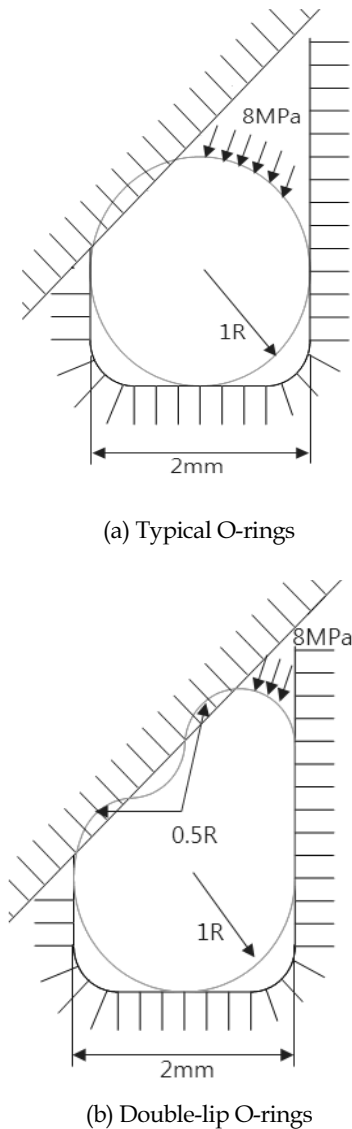


Fig. 3. NBR O-rings for a check valve of CNG fueling nipple.

체크밸브에는 한 개의 지점에서 밀봉작용을 하는 원형 O링을 설치한 기존의 CNG 충전니플과 밀봉력을 높이기 위해 두 개의 지점에서 접촉하면서 밀봉작용을 할 수 있도록 구성된 비대칭형의 더블립 O링을 각각 보여주고 있다.

CNG 차량에 충전하는 CNG 압력은 20~25MPa로 초고압이지만, CNG 충전니플의 체크밸브에 장착된

오링에 작용하는 CNG의 가스압력을 8MPa로 가정하였다. 이것은 CNG 충전니플의 몸체에 경사지게 형성된 시일시트와 체크밸브의 시일링 경사면이 서로 급속한 접촉을 하면서 탄성거동성이 대단히 우수한 오링을 압착 밀봉하기 때문에 20MPa의 초고압 충전압력이 오링에 그대로 가해지지 않고 감압된 CNG 압력이 작용하기 때문에 니트릴부타디엔고무(NBR) 오링으로 기밀성을 확보할 수 있다.

만약 탄성중합체로 제조된 오링에 충전압력 20MPa 이상의 CNG 압력이 직접 작용한다면, NBR과 같은 탄성체 고무소재로 제조한 탄성오링으로는 밀봉력을 실제로 확보하기가 어렵다. Table 1은 오링의 밀봉능력 해석을 위해 사용한 NBR 소재의 물성치를 제시하고 있다.

Fig. 3에서 보여준 것처럼 FEM 해석모델에 사용한 탄성고무 오링의 기본반경은 1mm이고, 이 오링을 제조하기 위해 사용한 고무소재는 CNG에 대한 적합성과 경도안전성이 우수한 NBR을 사용하였다.

또한, 오링의 압축거동 안전성을 확보하기 위한 초기압축률은 15%로 설정하였고, CNG 충전니플의 몸체에 형성된 시일시트와 체크밸브의 시일링 사이는 서로 경사지게 접촉하면서 밀봉작용을 하도록 구성하였다. 오링을 삽입하기 위한 오링 홈의 간격은 2.0mm로 하여 완벽한 조립성을 보장하였다.

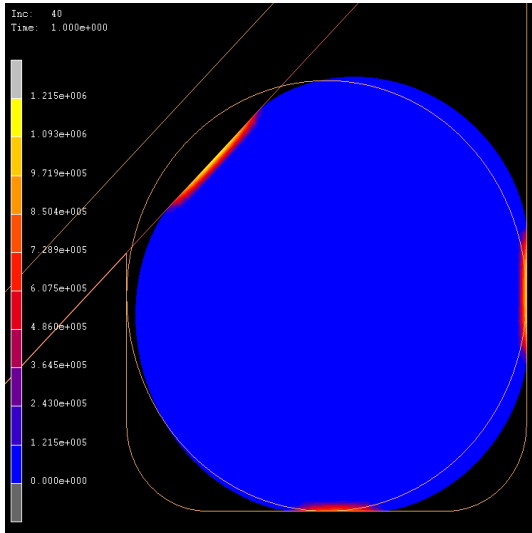
III. 해석결과 및 고찰

본 연구에서 밀봉능력에 관련된 오링의 접촉법선응력 및 등가인장응력을 해석하기 위해 사용한 FEM 프로그램은 MARC[6]이고, 해석에 사용한 해석모델은 4절점 축대칭 솔리드 요소이다.

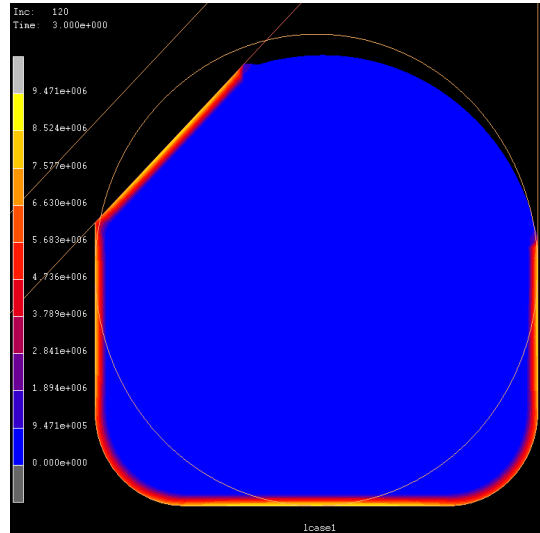
3.1. 접촉법선응력(Contact normal stress)

탄성체 고무오링의 밀봉성은 원형 오링이 오링 홈에 완벽하게 조립된 상태에서 경사진 시일시트와 원형 오링, 원형 오링과 오링 홈 사이에서 발생하는 접촉법선응력에 의해 결정된다. 원형 오링과 오링 홈 사이에서는 세 지점에서 압착되므로 이곳을 통해 천연가스가 누출될 가능성은 전혀 기대할 수 없고, 가스누출이 실질적으로 발생하는 곳은 경사진 시일시트와 원형 오링 사이의 접촉법선응력 크기에 의해 결정된다고 본다.

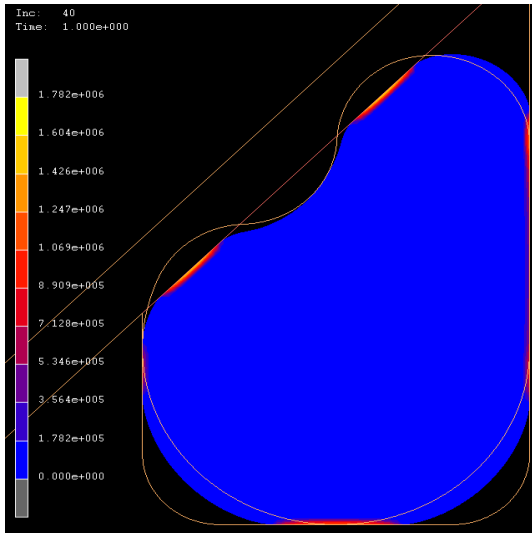
Fig. 4에서는 기존의 원형 오링과 새로운 더블립 오링의 초기 밀봉력을 확보하기 위해 초기압축률을 15% 가한 상태에서 원형 오링과 더블립 오링 사이의 접촉법선응력을 유한요소법으로 해석한 결과를 제시하고 있다. 기존의 원형 오링을 보여준 Fig. 3(a)와 같은 모델



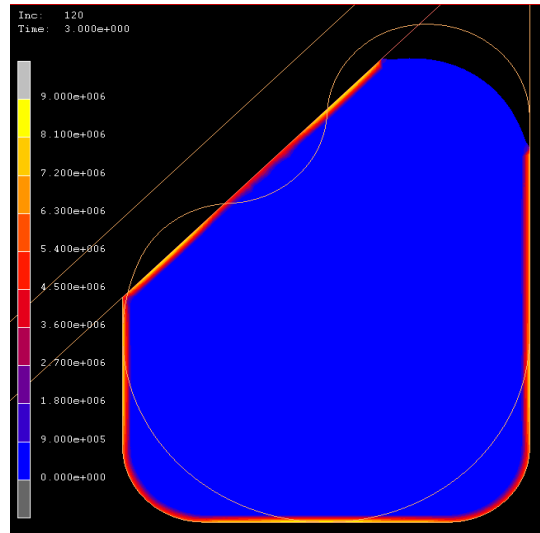
(a) Maximum contact normal stress of 1.21MPa in typical O-rings



(a) Maximum contact normal stress of 8.53MPa in typical O-rings



(b) Maximum contact normal stress of 1.71~1.78MPa in double-lip O-rings



(b) Maximum contact normal stress of 8.95~9.03MPa in double-lip O-rings

Fig. 4. Contact normal stress distribution with a initial compression rate of 15%.

Fig. 5. Contact normal stress distribution with a initial compression rate of 15% and a gas compression pressure of 8MPa.

에 대한 FEM 해석결과에 의하면, 경사진 시일시트와 원형 오링 사이에서 가장 높은 접촉법선응력 1.21MPa 이 발생하고 있다. 또한, 더블립 오링을 보여준 Fig. 3(b)와 같은 모델에 대한 FEM 해석결과에 의하면, 경

사진 시일시트와 더블립 오링 사이에서 발생한 두 지점에서의 최대접촉법선응력은 1.71MPa과 1.78MPa 로 기존의 원형 오링에 비해 41%~47%나 더 높게 나타

났다. 이것은 기존의 원형 오링을 사용하는 것보다 두 곳에서 접촉·밀봉작용을 하는 더블립 오링을 사용하는 것이 더 우수한 밀봉성을 확보할 수 있다는 것이다.

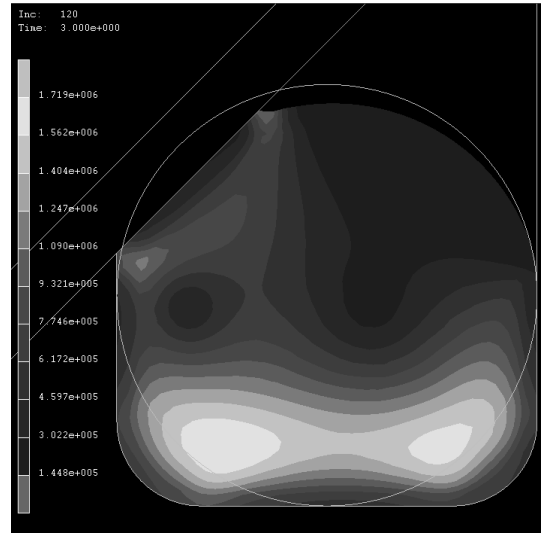
Fig. 5에서는 원형 오링의 안정된 밀봉력을 확보하기 위해 초기압축률을 15%로 조절된 상태에서 원형 오링의 입구 측을 통해 가스압축압력 8MPa이 유입된다고 가정할 때 기존의 원형 오링과 더블립 오링 사이의 접촉법선응력을 유한요소법으로 해석한 결과를 제시하고 있다. 기존의 원형 오링에 대한 Fig. 5(a)의 해석결과에 의하면, 경사진 시일시트와 원형 오링 사이에서 가장 높은 접촉법선응력 8.53MPa을 나타내고 있다. 또한, 더블립 오링에 대한 Fig. 5(b)의 해석결과에 의하면, 경사진 시일시트와 더블립 오링 사이에서 발생한 두 지점에서의 최대접촉법선응력은 8.95MPa과 9.03MPa로 기존의 원형 오링에 비해 5%~6%나 더 높게 나타났다. 이 해석결과에 의하면, 오링의 밀봉성에 큰 영향을 미칠 수 있는 요소 중의 하나는 초기압축률이고, 또한 오링에 가해지는 가스압축압력임을 알 수 있다. 여기서 초기압축률과는 달리 가스압축압력에 의해 오링의 표면에 직접적으로 접촉하는 부위가 국부적으로 작은 것에 비해 오링의 탄성변형 거동성이 대단히 크게 나타나기 때문에 오링의 밀봉응력에 미치는 영향이 상대적으로 줄어들음을 알 수 있다.

본 연구에서 제시한 초기의 가스압축압력 8MPa은 Fig. 5에서 보여준 FEM 해석결과처럼 원형 오링과 더블립 오링 해석모델 모두에서 가스누출 차단 안전성은 확보하고 있으나, 기존의 원형 오링보다는 더블립을 갖는 변형된 오링에서의 밀봉성이 5~6% 향상되었다는 데이터를 제시하고 있다.

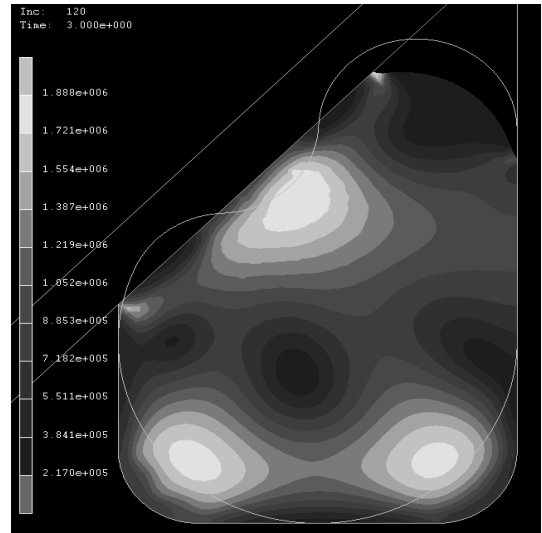
3.2. 등가진응력(Equivalent true stress)

비선형 변형거동과 대변형 특성을 나타내는 탄성중합체로 제조한 원형 오링 및 더블립 오링에서 발생하는 응력을 계산할 때는 변형된 면적의 크기를 고려하는 등가진응력이 초기면적에 대한 응력을 예측하는 Von Mises 응력에 비해 중합체의 변형거동 특성을 보다 잘 나타낸다. 이것은 탄성체 고무오링에서 발생한 등가진응력이 오링의 밀봉내구 안전성과 관련이 있는 성능평가를 나타내는 하나의 지표라 할 수 있다.

Fig. 6(a)에서는 압축천연가스를 CNG 충전니플에 공급하였을 때 기존의 원형 오링 모델에서 발생한 최대등가진응력 1.56MPa을 보여주고 있다. 또한, Fig. 6(b)에서는 새로운 더블립 오링에서 발생한 최대등가진응력은 1.72MPa로 기존의 원형 오링에 비해 10.2%나 더 높게 발생한 데이터를 제시하고 있다. 이것은 더블립 오링에서 탄성변형 거동에 의한 밀봉내구 안전성이 보다 향상될 것이라는 것을 예측할 수 있다.



(a) Maximum equivalent true stress of 1.56MPa in typical O-rings



(b) Maximum equivalent true stress of 1.72MPa in double-lip O-rings

Fig. 6. Equivalent true stress distribution with a initial compression rate of 15% and a gas compression pressure of 8MPa.

결국, CNG 충전니플에 사용된 기존의 원형 오링과 새롭게 제시된 더블립 오링에 대한 등가진응력 해석결과에 의하면, 한곳에서 밀봉작용을 하는 원형 오링

모델보다는 두 곳에서 밀봉작용을 하는 더블립 오링에서 더 높게 나타났다는 사실이다. 이것은 원형 오링보다 더블립 오링을 사용하는 것이 보다 더 긴 내구수명을 확보할 수 있다는 것이다.

IV. 결 론

CNG 충전니플의 가스누출을 차단하기 위해 설치한 기존의 원형 오링과 새로운 더블립 오링의 밀봉성에 관련된 접촉법선응력과, 밀봉내구 안전성에 관련된 등가진응력을 유한요소법으로 각각 해석하였다.

1) 15%의 초기압축력을 가한 상태에서 이들 두 모델에 대한 밀봉성을 비교하면, 한곳에서 밀봉작용을 하는 기존의 원형 오링보다는 두 곳에서 밀봉작용을 하는 더블립 오링이 41% 이상 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

2) 초기압축력 15%와 가스압축압력 8MPa를 공급한 상태에서 가스누출 차단 안전성을 비교하면, 기존의 원형 오링보다는 더블립 오링에서 5% 이상 향상된 해석결과를 제시하고 있다.

3) 밀봉내구 안전성 측면에서 기존의 원형 오링과 새로운 더블립 오링에 대해 비교하면, 한곳에서 밀봉작용을 하는 원형 오링보다는 두 곳에서 밀봉작용을

하는 더블립 오링의 최대등가진응력이 10.2%나 더 높게 발생한 것으로 보아 더블립 오링이 보다 오랫동안 사용할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] Park, K.I, "Effectiveness debate of Daegu corporate taxi CNG remanufacturing cost supporting project", Newsis, (2012. 4. 26)
- [2] Kim, C.K., "A Study on the Stress Behavior Analysis of O-rings and Packings for a LPG fueling Nozzle", J. of the KSTLE, Vol. 22, No. 1, pp.23-28, (2006)
- [3] Yoo, J.H., "Not ending of Jeonbuk CNG bus explosion", Newsis, (2010. 8. 10)
- [4] Cho, S.H., Kim, C.K., Kim, Y.G, "Optimized Design of O-ring Profiles Using Taguchi's Experimental Method", Proceedings of the KSTLE, Vol. 37, pp.241~247, (2003. 11.)
- [5] KS B 2799, (2009)
- [6] MARC, MARC User's Manual Ver. 7.3, MARC Analysis Research Corp., CA USA, (1999)