



스위블 연결구용 멀티접촉패킹의 밀봉특성에 관한 유한요소해석

†김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2014년 7월 16일 접수, 2014년 8월 23일 수정, 2014년 8월 24일 채택)

FE Analysis on the Sealing Characteristics of Multi-Contact Packing for Swivel Joint

†Chung Kyun Kim

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

(Received July 16, 2014; Revised August 23, 2014; Accepted August 24, 2014)

요 약

본 연구에서는 한곳에서 접촉하는 오링과 여러 곳에서 접촉하는 멀티접촉패킹에 대한 밀봉특성을 유한요소법으로 해석하였다. FEM 해석결과에 의하면, LP가스압력 1.8MPa를 공급하였을 때 기존의 오링에서는 밀봉성에 관련된 2.5MPa의 수직접촉 최대응력을 발생하였다. 반면에 새롭게 고안된 멀티접촉패킹에서는 3.01MPa이 발생하여 20.4%나 높아진 밀봉성이 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 밀봉내구 안전성에 밀접한 관련이 있는 압출현상은 기존 오링의 경우 1.62MPa의 가스압력에서 발생되었지만, 멀티접촉패킹에서는 1.8MPa 정도로 가스내압을 올려도 압출현상이 발생되지 않는 것은 오랫동안 밀봉작용을 한다는 것을 의미한다. 따라서 밀봉성과 내구안전성을 높게 요구할 때는 한곳에서 접촉하는 기존의 오링보다는 여러 곳에서 접촉하는 멀티접촉패킹을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

Abstract - This paper was analyzed for a sealing characteristics of single lip contact type o-ring and multiple lip contact type packing for a swivel joint using the finite element method. According to the FE analysis, a conventional o-ring produces a maximum contact normal stress of 2.5MPa for a supplied LP gas pressure of 1.8MPa, which is related to the sealing performance. But, a sealing performance of newly invented multi-lip packing produces a maximum contact normal stress of 3.01MPa, which is 20.4% higher than that of a conventional o-ring. And an extrusion of a conventional o-ring, which is strongly related to the sealing endurance safety, was occurred at a supplied gas pressure of 1.62MPa. But, a multi-lip packing does not produce up to the gas pressure of 1.8MPa. This means that a new type of multi-lip packing may have excellent sealing characteristics because of no extrusion for high gas pressure. Thus, multi-lip packing with multiple lip contacts may be useful for high sealing and endurance safety compared to that of the conventional o-ring with a single lip contact.

Key words : multi-lip packing, o-ring, sealing characteristics, contact normal stress, FEM

†Corresponding author: ckkim_hongik@nate.com

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

고압호스의 끝단에 연결하여 사용하는 LPG 충전건은 자동차의 연료탱크에 부착된 충전니플에 삽입하여 충전한다. LPG 충전건은 충전니플에 중심축을 잘 맞추어 꼽아주어야 LP가스 누출이 발생되지 않는다.

고압호스에 직결된 기존의 LPG 충전건은 회전하거나 선회운동을 할 수 없는 구조이기 때문에 충전작업이 원활하지 못하다. 따라서 LP가스를 자동차의 연료용기에 안전하게 공급하기 위해서는 훈련된 충전원만이 가스누출 차단 안전성을 확보할 수 있다. 특히, 초보 충전원의 경우는 LP가스 충전건을 충전니플에 쉽게 체결하지 못함으로 인해 충전과정에 LP가스가 더 많이 누출되고, 고압호스가 꺾이면서 쉽게 손상되는 경향이 있다.

안전을 위협하는 이런 문제점을 경험한 주유소에서는 고무호스의 끝단에 스위블 연결구(swivel joint)를 부착하여 주유건을 자동차의 연료 주유구에 용이하게 삽입할 수 있는 구조로 바꾸었다. 따라서 휘발유나 경유를 주유하는 경우는 고무호스가 끼이는 현상이 없어졌고, 운전자에 의한 셀프 주유도 가능한 주유시스템으로 발전하였다.

주유소에서 사용하는 스위블 연결구는 액체연료를 사용하고, 공급압력이 3~4kg/cm² 정도로 낮기 때문에 상대적으로 밀봉성이 떨어져도 누유 가능성이 높지 않다. 반면에 LPG 충전소에서 사용하는 충전건은 LP가스 공급압력이 8~10kg/cm²으로 높고, 기화상태의 가스가 쉽게 누출하기 때문에 가스안전을 확보하는 것이 가장 중요하다.

따라서 LP가스 공급라인에 스위블 연결구를 설치하기 위해서는 주유소에서 사용하는 기존의 스위블 연결구를 그대로 사용하기는 어렵고 선회구조와 밀봉성이 우수한 새로운 스위블 연결구를 개발해야 한다.

본 연구에서는 밀봉기구로 많이 사용하는 종래의 오링[1-4]을 탑재한 스위블 연결구 모델과 여러 곳에서 접촉하여 밀봉작용을 하는 새로운 멀티접촉패킹에 대한 밀봉특성을 유한요소법으로 해석하였다. 한 곳에서 밀봉작용을 하는 기존의 오링은 주유건에서 널리 사용하는 것이지만, 가스 충전압력이 높은 LPG 충전건은 여러 곳에서 접촉하여 밀봉하는 멀티접촉패킹을 설계하는 것이 바람직하다. 따라서 이들 두 모델의 밀봉특성을 FEM으로 해석하여 비교분석하고자 한다.

II. FEM 해석

2.1. 해석모델

스위블 연결구는 Fig. 1에서 보여준 것처럼 고무호스와 연결되는 왼쪽의 너트부분을 통해 LP가스가 유입되고, 유입된 LP가스는 선회운동을 하는 볼의 외측벽면을 타고 압력차에 의해 대기중으로 누출하려 한다. 볼의 외측벽면을 지지하기 위해서는 한 쌍의 시트링을 볼의 양쪽에 설치하고, 볼의 중심부에는 Fig. 1(a)처럼 한곳에서 접촉하는 구조의 오링을 설치한다. 또한, Fig. 1(b)에서 보여준 설계모델에서는 기존의 오링 대신에 다수개의 지점에서 접촉하는 멀티접촉패킹을 설치하여 가스누출을 안정적으로 차단할 수 있도록 구조를 개량하였다.

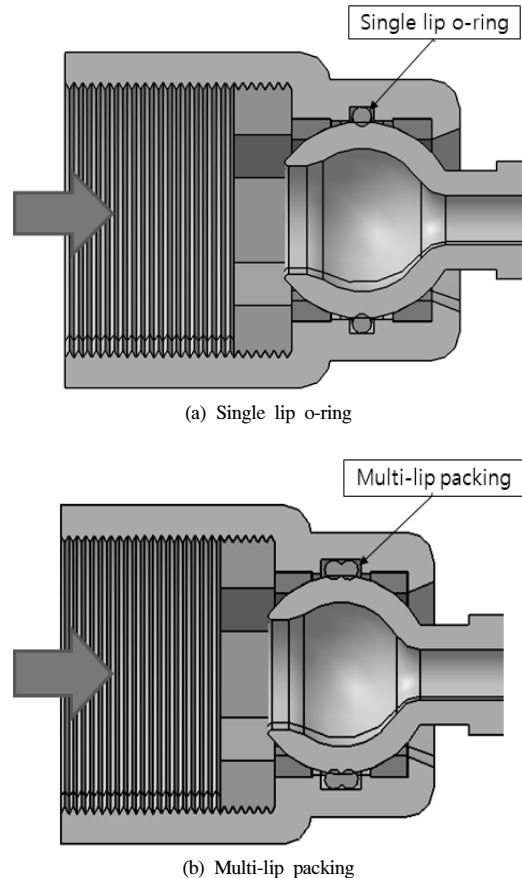


Fig. 1. Swivel joint sealing mechanism.

2.2. 해석조건

스위블 연결구에 설치된 단일접촉 구조의 오링과 다수접촉 구조의 멀티접촉패킹에 대한 밀봉특성을 MARC[5]를 사용하였다. FEM 해석에 필요한 NBR 소재에 대한 물성치를 실험적으로 확보하였고, 이 데이터를 근간으로 추출된 근사함수에 의거 대변형 탄성체인 NBR 소재의 변형거동특성을 Ogden 3차 응력-변형률 곡선으로 처리하였다.

Fig. 1에서 제시한 두 가지의 설계모델은 축대칭을 갖는 2차원 FEM으로 해석하였고, 이들 모델을 고정하는 사각형상의 그루브는 강체(rigid body)로 가정하기 때문에 내부에서 가해지는 가스압력은 탄성체인 NBR 소재가 흡수하여 거동하는 것으로 간주될 수 있다.

Fig. 2에서는 기존의 오링과 새롭게 제안된 멀티접촉패킹에 대한 밀봉특성을 해석하기 위해 사용한 메쉬는 모두 4변형 요소(quadrilateral element)이다. 오링과 멀티접촉패킹에 의한 가스누출 차단 밀봉성을 보장하기 위한 압축률은 두 모델 모두 동일한 15%를 적용하였다.

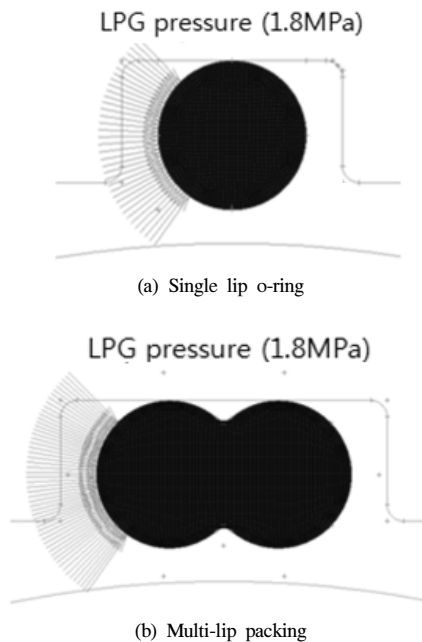


Fig. 2. Finite element analysis models and boundary condition.

III. 해석결과 및 고찰

스위블 연결구의 LPG 가스 누출을 차단하기 위해 형성된 그루브에는 단일접촉 구조의 오링이나 다수접촉 구조의 멀티접촉패킹을 각각 조립하여 사용할 수 있도록 구성하였다. 스위블 연결구에 공급된 LPG 가스의 밀봉특성을 FEM으로 해석하기 위해 Fig. 2에서 보여준 해석모델의 좌우측에 작용하는 압력차는 1.8MPa를 적용하였다.

Fig. 2와 같은 두 가지 해석모델에 대해 밀봉특성과 내구 안전성에 관련된 수직접촉응력과 압출현상(extrusion)은 Fig. 3, 탄성압축응력은 Fig. 4에서 해석결과를 각각 제시하였다.

Fig. 2에서 보여준 두 개의 해석모델에는 최대 1.8MPa의 LPG 압력을 공급하였다. 그 결과 기존의 오링과 새롭게 제안된 멀티접촉패킹은 가스압력에 의해 강체인 그루브와 볼의 벽면에 압착되면서 수직접촉응력이 발생되고, 이 응력은 LPG 가스의 누출을 차단하는 역할을 담당한다.

Fig. 3(a)에서는 한곳에서 접촉하는 기존의 오링에 대한 수직접촉응력 해석결과를 보여준다. 스위블 연결구의 그루브와 볼 구조물과의 밀봉을 위한 접촉선이 각 벽면에 대하여 한 개씩 형성되고, 이곳에서 형성된 수직접촉응력은 밀봉작용을 하게 된다. 또한, 스위블 연결구에 가스압력 1.62MPa가 공급될 경우 볼과 그루브 사이의 간극에는 NBR 소재가 과도하게 돌출되는 압출현상을 Fig. 3(a)처럼 관찰할 수 있다.

또한, 한곳에서 접촉하는 오링에 가스압력 1.62MPa를 공급할 때는 3.08MPa, 1.8MPa의 가스압력을 공급할 때는 2.5MPa의 수직접촉 최대응력이 각각 발생하는 것으로 보아 가스누출은 발생하지 않는 것으로 판단된다. 다만 가스공급압력이 더 높아지면 Fig. 3(a)의 점선부분처럼 압출현상이 심하게 발생되고, 이로 인해 가스누출 차단성능은 점점 약화될 것으로 예상된다.

따라서 스위블 연결구에 공급하는 가스내압의 변동은 오링의 압출현상에 의한 국부적인 손상으로 연결되고, 이로 인해 밀봉내구 안전성은 급격하게 떨어뜨리는 핵심요인으로 작용할 것으로 예상된다.

또한, Fig. 3(b)에서는 두 곳에서 접촉하는 멀티접촉패킹의 수직접촉응력 해석결과로 Fig. 3(a)의 경우와는 다른 응력거동 패턴을 보여준다. 즉, 멀티접촉패킹에서는 그루브와 볼 구조물에 대한 접촉선이 두 곳에서 형성됨으로 누출하려는 가스내압은 두 곳에서 차단되는 효과가 있다. 따라서 멀티접촉패킹에서 밀봉내구 안전성은 크게 향상되고 있음을 알 수 있다. 즉, 오링을 연달아 두 개 설치하는 것보다 한 개

의 멀티접촉패킹을 사용하는 것이 밀봉 안전성이 우수하고, 설치공간이 최소 50% 이상 줄어드는 경량화 효과도 함께 기대할 수 있다.

Fig. 3에서 한곳에서 접촉하는 오링과 두 곳에서 접촉하는 멀티접촉패킹에 대한 수직접촉응력을 비교하면, 가스압력을 1.8MPa를 공급할 때 오링에서는 2.5MPa의 수직접촉 최대응력이 발생하지만, 멀티접촉패킹에서는 3.01MPa로 20.4%나 높아진 밀봉내구 안전성이 향상되었다.

또한, 멀티접촉패킹에서는 LP가스 압력을 1.8MPa로 올려도 Fig. 3(a)에서 보여준 돌출현상이 발생되지 않는다는 사실이다. 이것은 멀티접촉패킹의 밀봉내구 안전성이 상대적으로 우수하다는 것을 의미한다.

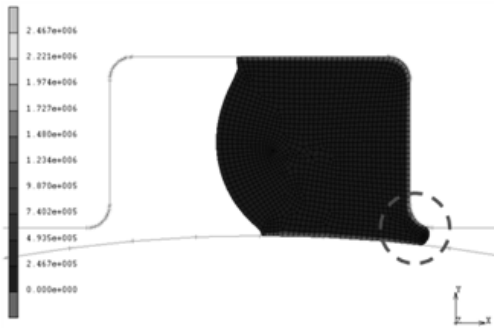
Fig. 4는 Fig. 2의 해석모델에서 보여준 오링이나 멀티접촉패킹에 최대 1.8MPa의 가스압력을 공급하였을 때 발생하는 Cauchy 응력 분포도 해석결과를 제시한 것이다. 오링으로 밀봉한 Fig. 2(a) 모델에서 누출하려는 가스압력에 의해 형성된 Cauchy 최대응력 1.8MPa은 그루브와 볼 사이의 간극을 통해 압

출하려는 위치, 즉 압출현상이 발생하는 부근에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

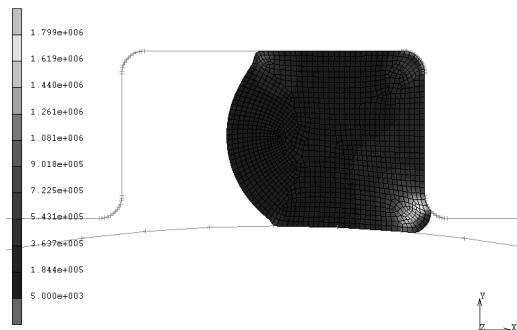
반면에 멀티접촉패킹을 사용하여 밀봉하는 경우는 가스압력에 의해 그루브와 볼 사이의 접촉선이 크게 늘어나면서 Cauchy 응력이 잘 분산되고 있어 상대적으로 낮아지고 있음을 알 수 있다.

따라서 멀티접촉패킹은 밀봉내구 안전성 측면에서 우수하지만, NBR 소재에 걸리는 Cauchy 응력이 분산되기 때문에 Cauchy 최대응력은 상대적으로 떨어진다.

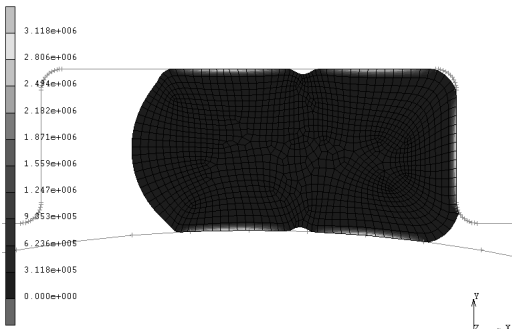
수직접촉 최대응력을 나타낸 Fig. 5의 해석결과에 의하면, 가스내압이 1.62MPa 이하로 작용할 때의 수직접촉 최대응력은 NBR 소재에 의한 압출현상 발생여부가 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 압출현상이 발생하는 1.62MPa 이하에서는 오링에 걸리는 수직접촉 최대응력이 멀티접촉패킹에 비해 약간 높게 나타났다. 반면에 압출현상이 발생하는 가스압력 1.62MPa의 구간을 지나면, 오링에 걸리는 수직접촉 최대응력은 멀티접촉패킹에 비해 급격하게 낮아진다는 해석결과이다.



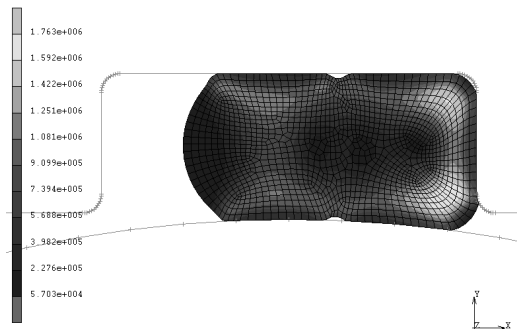
(a) Single lip o-ring



(a) Single lip o-ring



(b) Multi-lip packing



(b) Multi-lip packing

Fig. 3. Contact normal stress distribution for swivel joint.

Fig. 4. Cauchy stress distribution for swivel joint.

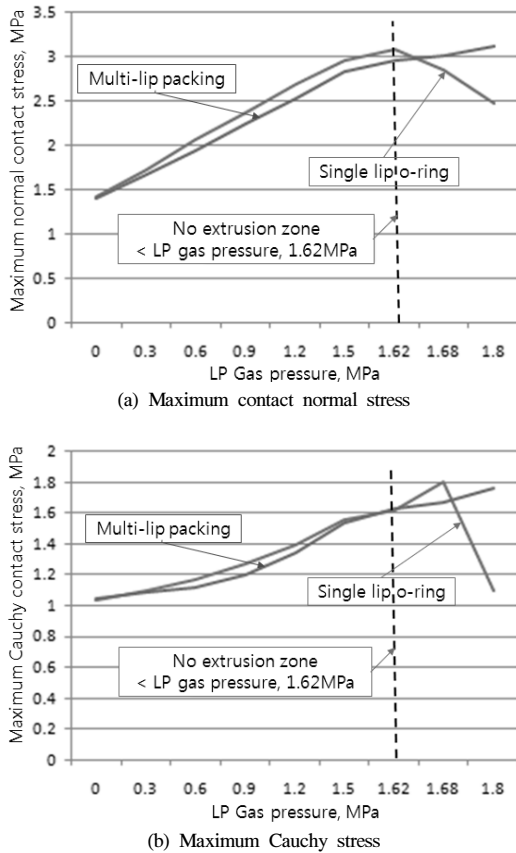


Fig. 5. Contact normal stress & Cauchy stress for single lip o-ring and multi-lip packing.

또한, 두 곳에서 밀봉접촉 하는 멀티접촉패킹에 작용하는 Cauchy 최대응력은 1.76MPa로 기존의 오링에서 해석된 1.8MPa보다는 약간 낮게 나타났다. 이것은 가스내압을 1.8MPa까지 올려도 돌출현상이 발생하지 않고, 전체적인 접촉선이 증가됨으로 인해 Cauchy 응력이 잘 분산되고 있음을 알려주는 데이터이다.

따라서 한곳에서 접촉하는 오링 대신에 여러 곳에서 접촉하는 멀티접촉패킹을 사용하면, 수직접촉 응력이 잘 분산되면서 높게 나타나기 때문에 밀봉내구 안전성이 우수해진다. 또한, 가스내압을 높여도 멀티접촉패킹에서는 압출에 의해 NBR 소재가 간극을 통해 빠져나가려는 현상이 거의 발생하지 않음으로 인해 내구수명은 증가되고, 특히 밀봉내구 안전

성이 향상된다는 사실을 보여준 해석결과이다.

IV. 결론

스위블 연결구에 장착되어 밀봉작용을 하는 종래의 오링과 새롭게 설계한 멀티접촉패킹에 대한 밀봉특성을 FEM으로 해석하고, 고찰하였다.

FEM 해석결과에 의하면 밀봉내구 안전성을 나타내는 수직접촉응력을 보면, 기존의 오링은 한곳에서 밀봉작용을 하기 때문에 약간 높게 나타났지만, 멀티접촉패킹에서는 두 곳에서 밀봉작용을 하기 때문에 밀봉내구 안전성은 2배 이상 향상되었다.

또한, 밀봉내구 안전성에 밀접한 관련이 있는 압출현상을 보면, 기존 오링의 경우는 1.62MPa의 가스내압에서 발생되었지만, 멀티접촉패킹에서는 1.8MPa까지 가스내압을 올려도 압출현상이 발생되지 않는 것으로 보아 오랫동안 밀봉작용을 할 것으로 예상된다.

따라서 밀봉성과 내구안전성을 높게 요구할 때는 한 곳에서 접촉하는 기존의 오링보다는 여러 곳에서 접촉하면서 밀봉작용을 하는 멀티접촉패킹을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Kim, D.H. and Kim, C.K., "Numerical Study on the Sealing Characteristics of O-ring for a Pipe", Proc. of the KSTLE, 49th Fall Conference, pp.221-226, (2009)
- [2] Kim, K.S and Kim, C.K, "A Study on the Sealing Characteristics of Wave O-ring for a Gas Pipe using Finite Element Method", Proc. of the 2010 KIGAS Spring Conference", pp.82-88, (2010)
- [3] Hu, Y.M, Lee, K.O, Shim, T.Y, and Kang, S.S, "A Study on the Profile Design of Lip Seals with Starting Torque and Sealing of Wheel Bearings for a Vehicle" J. of the KSAE, Vol. 15, No. 4, pp.10-16, (2007)
- [4] Kim, T.W. and Kim, C.K., "A Study on the Sealing Characteristics of LPG Valve O-ring Shapes", Proc. of 2011 KIGAS Spring Conference, (2011)
- [5] MARC Analysis Research Corp., Calif. USA, (1994)