

LPG 충전노즐용 O-링과 패킹의 응력거동해석에 관한 연구

김 청 균[†]

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

Stress Behavior Analysis of O-rings and Packing for a LPG Filling Nozzle

Chung Kyun Kim[†]

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – The stress behavior analysis of O-rings and packing for a LPG filling unit has been presented using a finite element analysis technique by non-linear MSC/MARC program. The sealing performance and endurance of O-rings and packing are affected by working conditions such as filling pressure, friction coefficient, compression ratio, and material properties. The elastomeric polymers of O-rings and packing are nitrile butadiene rubber (NBR) and polytetrafluoroethylene (PTFE), which are selected as proper materials of O-rings and packing based on the stress analysis results. The calculated FEM results showed that the proper material of O-ring is NBR as a secondary sealing component and the recommended material of packing is PTFE as a primary sealing unit during a LPG filling process.

Key words – LPG, filling nozzle, filling nipple, o-ring, packing, FEM, NBR, PTFE.

1. 서 론

액화석유가스(LPG)는 자동차의 대표적인 가스연료로 가솔린, 경유 다음으로 많이 사용하고 있다. 정부의 청정연료 보급정책에 따라 영업용 택시를 비롯한 장애인 자동차, SUV 자동차 등에 제한적으로 LPG 연료의 사용을 허가한 결과, 우리나라는 2005년도 기준 189만대가 등록되어 세계 최대의 LPG 자동차 보유국으로 성장하였다[1].

자동차는 탄화수소 연료를 연소하여 동력을 얻는데, 이 때에 많은 유해 배기가스를 배출한다. 특히, 휘발유나 경유와 같은 액체연료는 공기와의 완벽한 혼합을 유지하기가 어렵기 때문에 완전한 연소가 어렵지만, LPG와 같은 가스연료는 상대적으로 공기와 완벽한 혼합이 가능하여 완전연소를 하기 때문에 유해 배출가스 생성량이 극히 작아 친환경적 연료로 인식되고 있다.

휘발유를 사용하는 가솔린 엔진은 불완전 연소나 미

연소에 의한 유해물질을 발생하고, 경유를 사용하는 디젤 엔진은 열효율 상승에 따른 질소 산화물이나 입상 물질(particulates)을 대량 배출하는 등 많은 환경오염 물질을 배출하고 있다. 그러나, LPG와 같은 가스연료는 공기와의 혼합이 이상적으로 진행되므로 액체연료에 비하여 유해 배출가스 발생량이 크게 줄어드는 장점이 있다.

정부는 휘발유, 경유, LPG의 가격을 100 : 85 : 50의 비율로 유지하는 유가정책을 고수하고 있다. 이것은 LPG 차량의 보급을 권장하고, 디젤 자동차의 보급을 억제하는 환경정책으로 국가의 세금과 밀접한 관련이 있다. 결국, 장애인 자동차나 택시 등에는 세제상 혜택을 주는 복지정책과 유해 배기가스 오염원 감축이라는 환경정책 측면에서 LPG 자동차를 공급하고 있다. 당분간 고유가와 정부의 친환경 정책은 LPG 자동차 판매량의 지속적 증가를 예상할 수 있다.

LPG 연료를 사용한 차량의 보급은 환경오염 물질 감축이라는 장점이 있지만, 엔진 출력이나 사용상 측면에서 보면 액체연료에 비하여 문제점을 갖고 있다. 즉,

[†]주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

LPG 연료의 사용은 상대적으로 낮은 출력, 불량한 냉간 시동성, 부족한 LPG 충전소로 인해 빈번한 충전 등을 문제점으로 지적할 수 있고, 보다 중요한 문제는 LPG 가스누출에 의한 폭발 위험성이 대단히 높다는 점이다. 또한, LPG 충전소나 운전중에 LPG의 가스누출에 의해 발생하는 운전자의 피로감, 신경마취로 인한 졸음현상과 구토증상 등은 문제점으로 부각되고 있다. 따라서 LPG 자동차의 연료주입 과정에서 발생하는 가스누출을 최대한 차단하여 폭발 위험성을 제거하는 것은 물론 운전자의 주행 안전성을 보장하고, 동시에 연료의 손실방지 및 오존층 보호의 지름길이라 할 수 있다[2-4].

따라서 본 연구에서는 LPG 충전소에서 연료를 충전하는 과정에서 발생하는 가스누출을 최대한 억제하여 연료의 손실을 방지하고, LPG 증발가스로 인한 충전맨과 운전자의 건강을 보호하며, 가스누출에 의한 환경오염을 차단하는데 일조하는 LPG 충전노즐의 가스누출을 차단하는 밀봉기구를 개발하고자 한다. 즉, LPG 충전노즐을 자동차의 충전니플에 연결하는 과정에서 가스누출을 차단하기 위해 사용하는 O-링은 구조적으로 축방향의 누출을 차단하려는 방식이기 때문에 가스누출은 불가피하게 발생할 것으로 예상된다. 이러한 가스누출의 문제점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 O-링을 포함하여 새로운 패킹을 설치하여 가스누출을 완벽하게 차단하고자 O-링과 패킹의 접촉응력 거동특성을 유한요소법으로 해석하고자 한다. 여기서 사용한 O-링과 패킹의 소재는 NBR과 PTFE로, 이들의 응력거동 특성을 해석하여 상대적으로 비교한 데이터를 제시하고자 한다.

2. 유한요소해석

2-1. 해석조건

LPG 충전노즐의 충전초기와 충전을 끝내는 단계에서 가스누출을 차단하기 위해 사용한 앞쪽의 O-링과 정상적인 충전과정에서 LPG 가스누출을 차단하는 뒤쪽의 패킹에 대한 응력거동 특성을 해석하고자 한다. 이때에 사용한 밀봉소재는 NBR과 PTFE의 두 가지로 이들의 조립모형은 Fig. 1에서 보여준 것과 같다. 차량의 저장탱크에 연결된 LPG 충전니플(filling nipple)은 Fig. 1에서 보여준 것처럼 왼쪽에서 오른쪽으로 진입하는 동안, 1차적으로 O-링과 상대접촉 미끄럼 마찰운동을 하면서 고압측 LPG의 외부누출을 차단한다. 충전

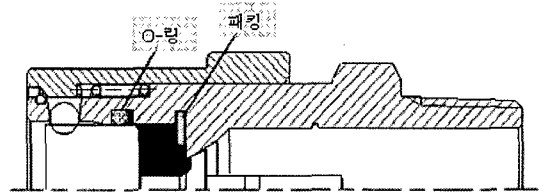


Fig. 1. Analysis model of O-rings and packing for a LPG filling unit.

니플의 전진으로 체결의 마지막 단계에서 충전니플의 선단부가 오른쪽의 패킹과 접촉·압착하게 되면 충전노즐의 체크밸브는 완벽하게 열리고, LPG는 가스충전기(gas filling dispenser)에서 자동차의 연료 저장탱크로 가스누출 없이 안전하게 충전을 한다.

LPG는 보통 18 kg/cm²의 충전압력으로 차량에 주입하도록 설계되어 있지만, 실제의 충전압력은 8 kg/cm²로 충전소마다 설정압력이 약간씩 다르다. LPG를 주입하는 과정에서 27 kg/cm² 정도로 충전압력을 과도하게 높이면 안전장치가 작동하여 가스주입을 차단하도록 설계되어 있다. 그러나, 본 연구에서는 충전시스템의 안전성을 좀더 강화하여 35 kg/cm²까지 안전성을 보장받을 수 있도록 설계 작동압력을 높여서 해석하였다.

NBR로 제작한 O-링과 패킹의 응력·변형을 곡선은 일반적으로 사용하는 물성치를 선정하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 PTFE 소재의 경우는 실험을 통하여 확보한 응력·변형을 특성곡선을 Ogden 2차 모델로 가정하고, 비선형 거동특성을 같이 고려함으로써 해석결과에 대한 신뢰성을 높이도록 하였다. 또한, O-링과 패킹은 자동차에 설치한 충전니플과 미끄럼 마찰접촉을 하면서 밀봉작용을 하기 때문에 이들 사이에서 발생하는 마찰계수는 메탈과 나일론의 마찰계수에 해당하는 0.3을 적용하였다[5]. Table 1에서는 밀봉장치의 탄성체 소재로 사용한 O-링과 패킹에 대한 물리적 특성치를 제시하고 있다.

Table 1. Material properties of O-rings and PTFE materials

Material Properties	NBR	PTFE
Modulus of elasticity, MPa	3	460
Density, kg/m ³	1,150	2,190
Poisson's ratio	0.46	0.46

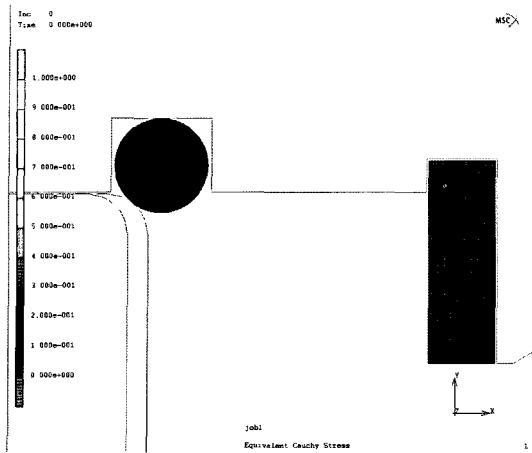


Fig. 2. FE meshes and analysis model for O-rings and packing.

2.2. 유한요소 해석모델

Fig. 1의 LPG 충전노즐에서 O-링은 축방향의 가스 누출을 차단하고, 패킹은 반경방향의 가스누출을 차단하는 밀봉시스템으로 누설 안전성을 대폭적으로 강화한 해석모델이다.

또한 Fig. 2는 충전노즐에 배열한 O-링과 패킹의 응력거동 특성을 해석하기 위한 유한요소 해석모델이다. Fig. 2는 자동차의 충전니플이 왼쪽에서 오른쪽으로 진입하는 동안에 O-링과 접촉하기 직전의 형상을 보여주는 O-링과 패킹의 유한요소 해석모델을 보여준다. 충전노즐과의 마찰접촉 운동과정에서 간극 압축력과 충전가스 압력을 O-링과 패킹에 가하기 때문에 발생하는 응력변형 거동특성을 NBR과 PTFE를 사용하는 두 가지 경우에 대하여 각각 고찰하고자 한다.

여기서 O-링과 패킹은 탄성체이고, 충전밸브의 구조물은 황동으로 제작되어 있으므로 응력거동이 대단히 작게 발생하기 때문에 충전노즐과 충전니플 구조물은 강체(rigid body)라 가정할 수 있고, O-링과 패킹은 탄성체라고 하여 유한요소해석을 진행하였다.

본 연구에서 사용한 비선형 유한요소해석 프로그램은 MSC/MARC[6]이고, 해석에 사용한 것은 2차원 축대칭 4각 요소모델이다.

3. 해석결과 및 고찰

자동차에 LPG를 충전하는 과정에서 가스의 외부누출을 차단하기 위해 사용하는 O-링은 압축력에 의한

뒤틀림과 압출현상(extrusion)이 반복적으로 발생하면서 O-링은 손상을 받는다. O-링의 변형거동 현상은 소재의 피로와 시효를 촉진하여 밀봉력과 내구성을 떨어뜨리는 원인으로 작용한다. 이러한 변형거동 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 충전니플 선단부가 패킹에 축방향으로 압축력을 가함으로써 가스누출을 차단하도록 해석하였다. 따라서 O-링과 패킹 소재로 임의 선정한 NBR과 PTFE에 대한 응력거동 특성을 유한요소법으로 해석하여 O-링과 패킹에 적합한 소재를 선정하고자 한다.

Figs. 3~8은 LPG 차량의 저장탱크에 LPG를 충전하기 위해, 차량의 가스연료 주입구에 설치한 충전니플에 LPG 충전기(dispenser)로부터 나오는 충전노즐을 결합하고, LPG의 충전과정에서 발생하는 O-링과 패킹의 응력 분포도 결과를 제시하고 있다. 여기서 LPG의 충전압력은 O-링과 패킹의 안전성을 고려하여 설계압력을 최대 35 kg/cm²으로 설정하고 해석한 데이터이다. 여기서 사용한 O-링과 패킹의 소재는 Table 1에서 제시한 것처럼 NBR과 PTFE를 적절히 조합하여 해석하였다. 이들 두 소재에 대한 응력거동 특성을 비교하여 상대적으로 우수한 특성을 갖는 O-링과 패킹의 소재를 선정하였다.

Fig. 3은 NBR 소재로 제조한 O-링과 패킹에 대한 응력분포로 자동차 충전니플의 선단부가 충전노즐에 설치한 O-링의 위치를 약간 지났을 때 발생하는 응력 분포를 보여준다. 이 때에 작용하는 충전 최고압력은 35 kg/cm²이고, 충전니플의 외경측 표면과 O-링의 내

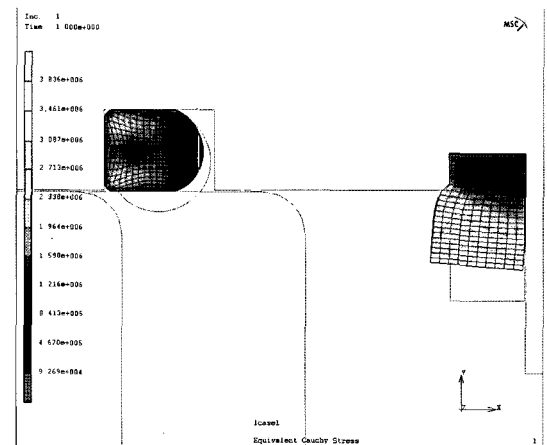


Fig. 3. Equivalent Cauchy stress distribution of O-rings and packing at the contacting stage between O-ring and filling nipple using NBR elastomers.

경측은 서로 미끄럼 마찰접촉 운동과정에서 발생하는 마찰계수를 0.3으로 가정한다. 이러한 체결위치에서 가스누출의 차단은 전적으로 O-링에 의해 담당되는 작동상태이고, 아직은 충전노즐의 체크밸브가 완전하게 개방되지 않은 LPG 충전의 초기단계이다. Fig. 3의 해석결과에 의하면, O-링에 작용하는 Cauchy 최대응력은 3.2 MPa 정도로 체결초기의 밀봉 작용력은 아직 불안정한 상태를 나타내지만 가스누출 안전성은 확보되고 있다는 표현을 할 수 있다. 그러나, 현장에서 사용하는 실제의 충전조건을 보면, 충전압력이 8~18 kg/cm² 정도이므로 안전하다고 표현할 수 있다. Fig. 3에서 패킹은 차량에 설치한 충전니플 선단부와는 아직 접촉한 상태가 아니므로 충전노즐의 밀봉작용에 어떠한 영향을 주지는 못하지만, LPG 충전압력의 변동에 따라 변형되고 있음을 보여주고 있다.

반면에 Fig. 4는 O-링과 패킹을 모두 PTFE 소재로 제조하고, NBR 소재를 사용한 Fig. 3의 작동조건과 동일하게 적용한 상태에서 응력거동 특성을 해석하였다. Fig. 4의 FEM 해석결과에 의하면, O-링의 Cauchy 최고응력은 3.8 MPa 정도로 NBR 소재를 사용한 경우에 비하여 18.8% 높게 나타났다. 이것은 LPG 충전노즐을 충전니플에 체결하는 초기과정에 어떠한 가스누출도 허용하지 않을 것이라는 해석이 가능하다. 그리고, 충전노즐의 선단부가 아직 패킹과 접촉하지 못하였으므로 패킹은 가스누출에 어떠한 역할을 담당하지 못하지만, 패킹의 응력거동은 Fig. 3의 NBR 소재사용

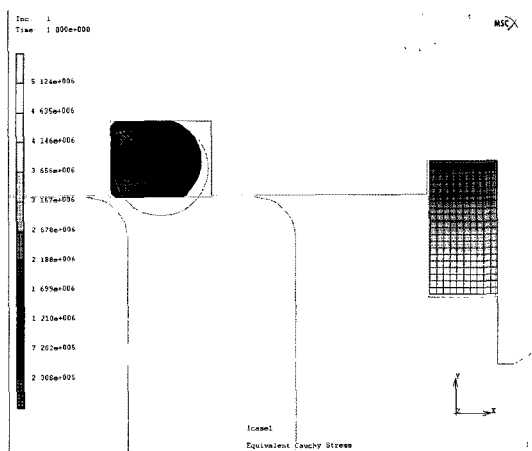


Fig. 4. Equivalent Cauchy stress distribution of O-rings and packing at the contacting stage between O-ring and filling nipple using PTFE elastomers.

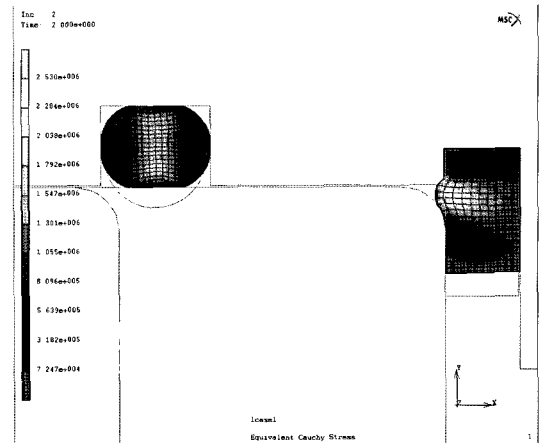


Fig. 5. Equivalent Cauchy stress distribution of O-rings and packing at the initial contacting stage between packing and filling nipple using NBR elastomers.

한 패킹보다 안정되었다.

Fig. 5는 충전니플을 Fig. 3의 위치로부터 계속 전진시켜 니플의 선단부가 패킹에 처음 접촉하는 순간에 발생하는 O-링과 패킹의 응력거동 특성을 제시한 결과로, O-링의 Cauchy 최고응력은 2.2 MPa로 Fig. 3의 3.2 MPa에 비하여 31%나 떨어지는 응력거동을 보여준다. 또한 NBR 소재사용 패킹의 응력거동도 2.5 MPa 정도로 크게 완화된 변형거동 결과로 불안정하다. 이것은 차량측의 충전니플을 충전노즐에 결합하는 초기과정(Fig. 3의 경우)에 비하여 패킹과 접촉하는 체결단계에서 가스누출 위험성은 높아진다는 사실을 제시한 중요한 해석결과이다. 이 과정에서도 실제의 LPG 충전압력은 크게 낮기 때문에 O-링에 의한 안전성은 확보될 수 있지만, O-링과 패킹의 소재를 모두 NBR로 사용하였을 경우 상대적으로 가스누출 불안정성은 분명하게 높아졌다고 표현할 수 있다.

Fig. 6은 O-링과 패킹의 소재를 Fig. 5의 NBR 소재 대신에 모두 PTFE 소재로 제조하여 Fig. 5의 작동조건을 그대로 적용한 조건에서 응력거동 특성을 비교한 것이다. Fig. 6의 해석결과에 의하면, O-링의 Cauchy 최고응력은 3.8 MPa 정도로 NBR 소재를 사용한 Fig. 5의 2.2 MPa에 비하여 1.7배나 높게 나타났다. Fig. 6의 작동상태는 LPG 충전노즐을 충전니플에 체결하는 거의 마지막 단계로 어떠한 가스누출도 허용하지 않을 것이라는 해석이 가능하다. 아직도 가스누출에 어떠한 영향도 미치지 못하는 패킹의 응력거동은 NBR 소재를 사용한 Fig. 5의 경우보다 대단히 안정되었다는 표

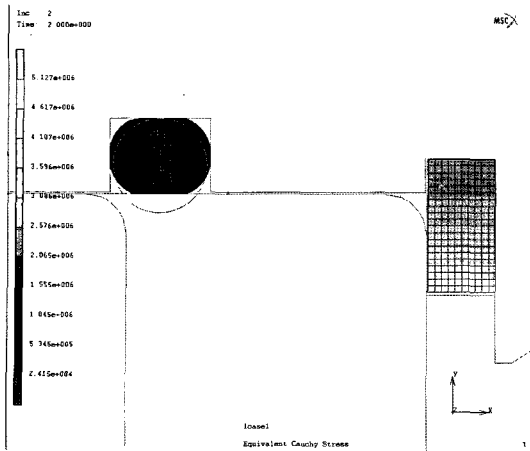


Fig. 6. Equivalent Cauchy stress distribution of O-rings and packing at the initial contacting stage between packing and filling nipple using PTFE elastomers.

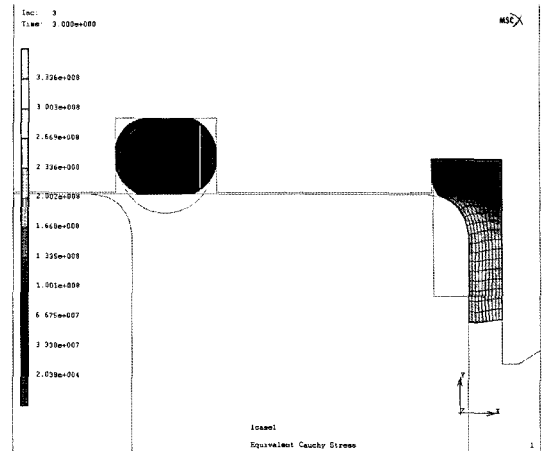


Fig. 8. Equivalent Cauchy stress distribution of O-rings and packing at the final contacting stage between packing and filling nipple using PTFE elastomers.

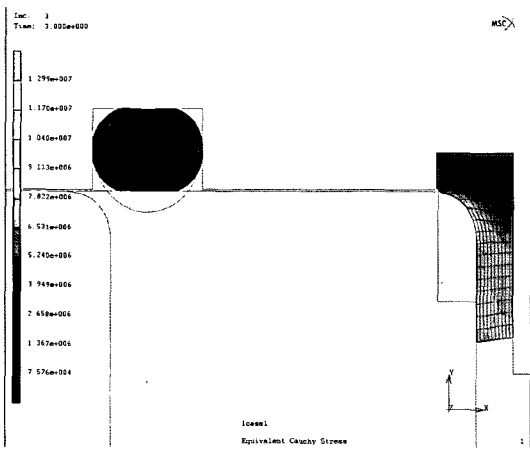


Fig. 7. Equivalent Cauchy stress distribution of O-rings and packing at the final contacting stage between packing and filling nipple using NBR elastomers.

현을 할 수 있다.

Fig. 7은 차량측의 충전니플을 LPG 충전노즐의 패킹에 완벽하게 접촉하면서 패킹에 의한 밀봉작용을 시작하고, 이 때에 충전노즐의 체크밸브는 100% 개방되어 LPG를 정상적으로 공급하는 충전공정을 보여준 해석모델이다. 이 때는 O-링에 의한 축방향 가스누출 방지보다는 패킹에 가해진 축방향 압력에 의한 반경방향 가스누출을 차단하도록 밀봉력이 작용한다. Fig. 7의 해석결과에 의하면, 패킹에 걸리는 Cauchy 최고응력은 12 MPa로 가스의 외부누출을 완벽하게 차단할 수 있

으나, 충전니플의 외경부 선단부와 접촉하는 특정지역에서 응력이 집중되므로 NBR 패킹은 피로에 의한 손상을 예상할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 NBR 소재를 모두 PTFE로 대체하고, LPG 공급압력 35 kg/cm²을 적용한 상태에서 충전노즐의 선단부가 패킹과 완벽하게 밀착한 경우에 대한 응력거동 특성을 제시하고 있다. Fig. 8의 해석결과에 의하면, 패킹에 걸리는 Cauchy 최고응력은 300 MPa 정도로 NBR 소재를 사용한 12 MPa에 비하여 25배나 높게 나타났다. 이것은 충전니플과 PTFE 소재를 사용한 LPG 충전노즐이 서로 완벽하게 체결한 접촉조건에서 LPG를 공급하게 되면, 어떠한 가스누출도 허용하지 않을 것이라는 해석이 가능하다. 더욱이 PTFE를 패킹소재로 사용한 Fig. 8의 경우는 패킹에 분포하는 응력분포가 비교적 고르게 분포하므로 NBR 소재를 사용한 Fig. 7의 충전노즐보다 더 안정적인 응력거동 특성을 보여주는 것으로 보아 내구성이 우수하다고 평가할 수 있다.

이들 두 가지 소재를 사용하여 해석한 결과에 의하면, 충전니플을 충전노즐에 체결하는 중간과정에서는 O-링은 1차적으로 초창기의 가스누출 차단기능을 담당한다. 이 때에 NBR 소재는 3.2 MPa, PTFE 소재는 3.8 MPa로 18.8%의 차이를 보이지만, 실제로는 본 연구에서 고려한 충전압력의 최고치인 35 kg/cm² 보다 크게 낮은 충전압력을 사용하기 때문에 O-링 소재로 저렴한 NBR을 선정하는 것이 바람직하다. 반면에 충

진니플과 충전노즐을 완벽하게 체결한 LPG의 정상적인 충전과정에서는 가스누출을 O-링이 아닌 패킹에 의해 작동하도록 설계됨으로, 응력거동 특성이 상대적으로 우수한 PTFE 소재를 선정하는 것이 내구성 측면에서 유리하다는 사실을 알 수 있다. 물론 패킹소재로 NBR을 사용해도 가스누출 측면에서는 문제가 없으나 상대적으로 PTFE의 거동특성이 안정적이라는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 LPG 자동차의 저장탱크에 LPG를 안전하게 충전하기 위해 사용한 LPG 충전노즐의 O-링과 패킹의 응력거동 특성과 밀봉성을 유한요소법으로 고찰하였다. 이 때에 사용한 O-링과 패킹의 사용소재는 탄성이 우수한 NBR과 강도가 높은 PTFE 소재를 사용하여 해석한 결과를 바탕으로 밀봉소재를 선정하였다.

FEM 해석결과에 의하면, 충전노즐을 충전니플과 체결하는 초기과정과 분리하는 단계에서 앞쪽의 O-링은 1차적으로 가스누출을 차단하지만, 완벽하게 체결한 상

대에서 LPG를 정상적으로 공급하는 충전과정에서는 패킹에 의해 밀봉작용을 담당하는 역할분담을 한다. 이 때에 O-링과 패킹의 밀봉소재로는 PTFE를 사용하는 것이 보다 안전하지만, 실제의 LPG 충전압력이 낮기 때문에 O-링의 소재는 NBR을 선정하고, 패킹의 소재는 PTFE를 사용하는 것이 바람직하다는 결과를 얻을 수 있다. 이것은 소재의 가격과 탄성, 물리적 거동특성을 고려하여 소재를 선정할 결과이다.

참고 문헌

1. LP가스공업협회, "2005년도 LPG 차량등록 현황," 2005.
2. Johnson, E., "LPG: a Secure, Cleaner Transport Fuel? A Policy Recommendation for Europe," *Energy Policy*, pp.1573-1577, 2003.
3. 김청균, "자동차엔진공학," 복두출판사, 2004.
4. 김청균, "자동차전기전자제어공학," 복두출판사, 2005.
5. Rabinowicz, E., "Friction and Wear of Materials," 2nd Ed., John Wiley and Sons, pp.100, 1995.
6. "MARC Analysis," Version K7.3, 1999.