

LPG 용기용 밸브 체결용 나사의 강도 및 누설 안전성에 관한 수치적 연구

오경석, 김한구, 김청균
홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Finite Element Analysis on Strength and Leakage Safety of a Screw Thread of a Valve Body for a LPG Cylinder

Kyoung Seok Oh, Han Goo Kim, Chung Kyun Kim,
Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

1. 서론

LPG는 일찍이 휴대용 연료 공급원으로 사용되었으며, 현재에는 가정용 취사 연료에서 산업 분야까지 가장 광범위한 분야에서 많은 양이 소비되고 있으며, 청정연료라는 친환경적 이미지로 인하여 앞으로도 그 수요가 늘어날 것으로 예상된다. LPG는 다양한 크기의 이동용 용기에 충전되어 가정에서 취사용 연료로 사용되고 있으나, 공기보다 비중이 높아 가스 누출 후 바닥으로 가라앉게 되어 쉽게 확산되지 않는다. 따라서 점화가 이루어지면 폭발 사고로 이어지기가 매우 쉽다.

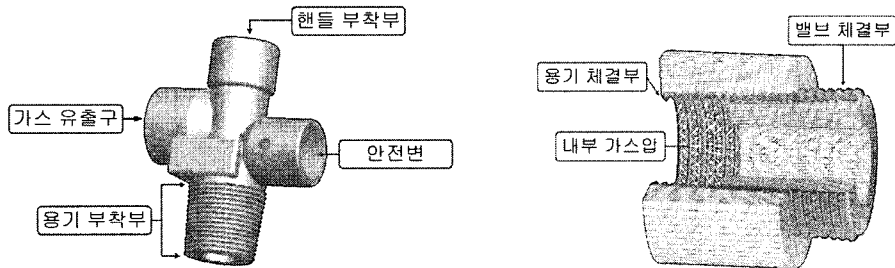
이런 LPG의 특성으로 인해 LPG 용기에서 누설을 방지하는 기술은 매우 중요한 부분을 차지한다. 하지만 가격경쟁력 측면에서 가공 및 조립의 용이함을 고려해야 하기 때문에 다소 간단한 형태의 설계가 이루어질 수밖에 없으며, LPG 용기와 용기용 밸브 사이의 누설은 테이퍼 나사의 결합으로 밀봉하고 있다.

그렇지만 LPG 용기와 용기용 밸브를 연결하는 나사부는 밸브의 재사용 과정에서 자연히 나사산의 마모가 발생하게 되며, 이러한 마모는 가스가 누출될 수 있는 통로가 될 수 있다. 하지만 가격경쟁력을 이유로 나사부의 마모와 가스 누설과의 관계에 대한 충분한 연구가 이루어지지 않고, 관련 논문 또한 매우 부족한 실정이다.

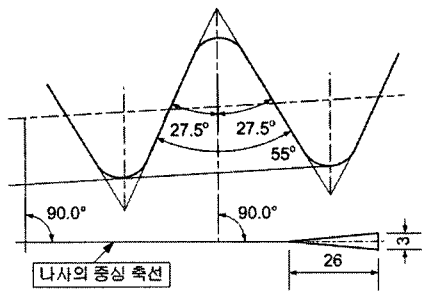
따라서 본 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 LPG 용기용 밸브와 LPG용기가 서로 체결되었을 때, LPG 용기와 밸브 사이의 테이퍼 나사부의 거동을 관찰하고, 나사산의 마모 상태에 따른 접촉면압 데이터로부터 가스의 누출 가능성에 대해 살펴본다. 또한 암·수 나사의 체결 상태에 따른 변화도 해석을 통해 관찰하였다. 그리고 내부에 가해지는 가스 압력에 변화에 따른 나사산의 파손 가능성을 고찰하여 나사산의 내구성에 대해 연구하였다.

2. 해석 대상 및 해석 조건

2-1. 해석 대상



(a) LPG Valve Body (b) Neck and Screw Thread on Valve Body
Fig. 1 LPG Valve Body and Screw Thread on Valve Body



Properties	Brass	AISI 1020
Modulus of elasticity, GPa	97	200
Poisson's Ratio	0.31	0.29
Yield Strength, MPa	124	346

Fig. 2 Geometry of Screw Thread and Material Properties for the Valve and the Neck

Fig. 1 (a)는 LPG 용기용 밸브의 외관을 보여준다. 밸브의 외관은 가스 유출을 제어하는 밸브를 장착하는 밸브 부착부, 가스의 과충전이나 용기의 과열 등의 원인으로 인하여 내압이 증가하였을 때 용기 내부의 가스를 유출시켜 줄 수 있는 안전변, 실제 사용 환경에서 기기를 연결하는 가스 유출구, 그리고 용기의 넥 부와 연결되는 밸브 부착부로 나누어 볼 수 있다. LPG 용기용 밸브는 주로 단조용 황동봉을 단조 후 가공하여 제작하며 밸브 내부에는 스펀들, 스템, 스토퍼 혹은 그랜드 너트(Gland nut), 오링, 밸브 시트(Valve Seat)등으로 구성되어있다. 본 연구에서는 Fig. 1 (a)의 용기 부착부 나사가 해석 대상이 되며, 용기와의 체결 시 모습이 Fig. 1 (b) 에 표현되어있다.

2-2. 해석 조건

Fig. 2는 LPG 용기용 밸브의 밸브 체결부에 사용되는 나사의 형상과 용기용 밸브, LPG 용기 넥 부의 소재에 대한 물성치를 나타내고 있다. 밸브 체결부 나사와 넥 부의 나사는 서로 축대칭이므로 유한요소 해석의 효율성을 위해 축대칭 2차원 모델로 간략화하여 해석을 수행하였으며, 나사부의 형상은 Fig. 2의 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 한국 산업 규격 KS B6214 고압 가스 용기용 밸브의 부속서 1이 제시하고 있는 형상을 이용하였다. 본 부속서는 용해 아세틸렌 용기용 밸브, 액화 석유가스 용기용 밸브 및 고압가스 용기용 밸브에 사용하는 용기 부착부 나사, 충전구 나사 및 안전 장치용 나사에 대하여 규정한다. 재료 물성의 경우 용기용 밸브의 밸브 체결부에 황동이, 넥 부에 탄소강인 AISI 1020이 적용되었다.

Fig. 1 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 용기용 밸브 체결용 나사(밸브 체결부)가 용기의 넥 부분(용기 체결부)에 체결되어있는 상태에서 가스압이 용기용 밸브의 내부에 가압되도록 하였고, 밸브시트와 안전변이 모든 입구를 밀봉한 조건에서 균일하게 가압되는 것으로 가정하였다. 일반적인 사용 환경 하에서의 가스압은 18kgf/cm^2 이지만, 본 연구에서는 한국 산업 규격 KS B6212 액화 석유 가스 용기용 밸브의 내압성 실험에서 적용되는 가스압을 적용하였다. 이 규격은 주로 내용적 3L 이상, 120L 이하의 액화 석유 가스 및 액화 프로필렌, 액화 프로판, 액화 부타디엔, 액화 부탄, 액화 부틸렌 등의 액화 석유계 가스의 용기에 사용하는 용기용 밸브에 대하여 규정하고 있다. 액화 석유 가스 용기용 밸브의 가스압은 압력이 전혀 가하여지지 않는 상태인 0kgf/cm^2 부터 일반적으로 사용되는 액화 석유 가스 용기용 밸브의 내압 시험 압력인 31kgf/cm^2 까지 증압하는 형식으로 가압하였다.

용기용 밸브 체결용 나사는 밸브에 총 14개의 나사산이 존재하는데, 나사산이 마모되지 않은 상태를 100%로 하여 나사산의 마모 상태를 총 10단계로 구분, 온전한 나사산일 때의 상태로부터 본래 나사산의 높이에 10%에 이르도록 마모가 진행된 상태까지에 대하여 고려하였다. 또한, 존재하는 14개의 나사산이 모두 용기에 체결되는 상태를 비롯하여 단 1개의 나사산만이 용기에 체결되는 상황을 가정하여 유한요소 해석을 수행하였고 이에 대한 응력 분포와 접촉 수직응력을 관찰하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3-1. Von Mises Stress

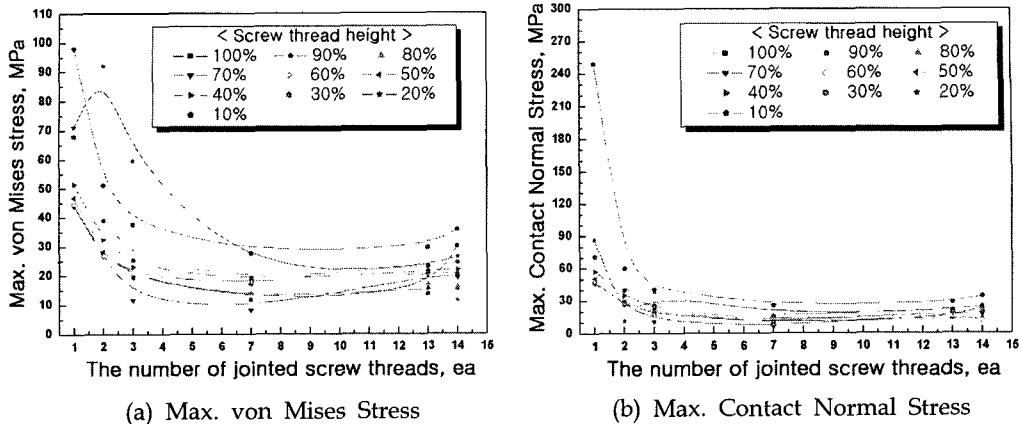


Fig. 3 Maximum von Mises Stress and Maximum Contact Normal Stress

Fig. 3 (a)는 각각의 유한요소 해석 모델로부터 관찰된 최대 von Mises 응력을 나타낸다. 각각의 나사산에서 발생하는 응력 값을 관찰한 후 응력 관측 나사산의 위치에 관계없이 가장 큰 값으로 관찰되는 응력 값을 해당 모델의 최대 von Mises 응력으로 인정하였다. Fig. 2의 표에서 LPG 밸브 체결용 나사산의 재료로 사용된 황동의 경우 항복 응력값이 124MPa, LPG 용기 벽 부의 재료로 사용된 AISI 1020의 항복 응력값은 346MPa이다. 황동 소재의 항복 응력 값이 AISI 1020의 항복 응력 값보다 작으므로 가스의 가압으로 인하여 나사산의 변형이나 파손이 일어나는 경우 황동의 항복응력 값을 기준으로 파손 여부를 판단할 수 있다. 용기용 밸브 체결용 나사에서 응력이 과도하게 발생하여 황동의 항복 응력 값을 초과하게 되는 경우, 밸브 체결용 나사산에서 소성변형이 일어나게 되고 이는 LPG 누출의 원인이 될 수 있다.

von Mises 응력은 체결 나사산의 개수 감소에 크게 영향을 받지 않고 일정한 경향을 보이다가 체결 나사산의 개수가 3개 이하로 내려가면서 크게 상승하기 시작하고, 나사의 마모가 진행되어 나사산의 높이가 낮아질수록 증가하는 경향을 보인다.

나사산의 높이가 가장 낮은 10% 모델에서 가장 큰 응력 값이 관찰되었으나 그 값이 소재의 항복 응력 값인 124MPa의 79% 수준인 98MPa 이다. 따라서 체결되는 나사산의 개수가 극한의 상태인 1개만의 나사가 체결되어있고, 나사의 마모가 심하게 진행되어있는 상태에도 가스압으로 인하여 황동 소재의 밸브 나사 체결부에 손상이 생기지 않는다고 볼 수 있다. 나사산의 마모율에 관계없이 체결되는 나사산의 개수가 증가 할수록 안정화 되는 경향을 보인다.

해석 결과 von Mises 응력 값은 밸브 체결용 나사부 재료의 항복 강도를 넘지 않는 것으로 판명되었으므로 LPG 용기에 담겨져 있는 가스의 내압으로 인한 밸브 부착부 체결용 나사산의 파손 가능성은 극히 낮다고 볼 수 있다.

3-2. Contact Normal Stress

Fig. 3 (b)는 각각의 유한요소 해석 모델로부터 관찰된 최대 접촉 수직 응력을 나타낸다. 각각의 나사산에서 발생하는 접촉 수직응력 값을 관찰한 후, 관측 나사산의 위치에 관계없이 가장 큰 값의 접촉 수직응력을 해당 모델의 최대 접촉 수직응력으로 인정하였다.

관찰되는 최대 접촉 수직응력도 von Mises 응력의 경우와 마찬가지로 체결되는 나사산

개수의 감소에 크게 영향을 받지 않고 일정한 값을 보인다 밸브 체결부 나사의 체결 나사 개수가 3개 이하가 되면서 관찰되는 최대 접촉 수직응력의 크기도 증가하는 경향을 보인다. 가압되는 가스압의 크기가 3.04MPa 이므로 관찰되는 접촉 수직응력의 크기가 이보다 낮은 경우 나사산 부근을 통한 가스의 누출 가능성이 있다고 볼 수 있다. 그러나 나사산의 마모 정도와 체결된 나사의 개수에 관계없이 접촉 수직응력은 가압된 가스압인 3.04MPa 보다 큰 수치를 보이며, 나사산의 마모가 진행 될수록 관찰되는 접촉 수직응력의 크기도 증가하는 경향을 보였다. 가장 작은 값이 관측된 70% 모델의 경우 관찰된 최대 접촉 수직응력의 값은 5.7MPa로서, 가압된 가스압인 3.04MPa의 약 1.8배를 약간 상회하는 값을 보였다. 따라서 발생하는 최대 접촉 수직응력이 가압되는 가스의 압력보다 낮음으로 인하여 나사부를 통하여 가스가 누출될 가능성 또한 매우 낮다고 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LPG 용기용 밸브의 밸브 부착부 나사산과 용기 넥 부의 나사를 해석 대상으로 삼아 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. 밸브의 재사용 과정에서 발생할 수 있는 밸브 부착부 나사산의 손상이나 마모 정도에 따라 가스 누출의 가능성이 있는지 발생하는 접촉 수직응력의 관찰을 통하여 알아보았으며, 나사산의 마모 정도와 체결되는 나사산의 개수에 따라 용기 내부의 가스 압력으로 인한 밸브 체결부 나사산의 파손 가능성에 대하여 고찰하였다.

가장 극한의 상황에서도 발생하는 응력의 크기는 소재의 항복 값을 초과하지 않았으며, 발생하는 접촉 수직응력 값도 가해지는 가스압을 초과하기 때문에 가스의 내압으로 인한 가스 누출의 가능성과 밸브 체결부 나사산의 파손 가능성은 매우 낮음을 알 수 있었다.

일반적인 평나사의 나사부에 걸리는 하중분포는 나사부의 길이에 따라 균일하지 않고 첫 번째 나사부(bottom부 라고도 한다)에서 가장 높은 하중에 걸리게 되고 나사부의 파손은 첫 번째 나사부에서 일어나게 된다. 나사의 테이퍼 각도에 따라 주어진 하중에 대하여 나사부의 첫 번째와 맨 마지막 나사 하중에 같게 되는 테이퍼 각도를 계산하고, 나사산의 마모 정도에 따른 밀봉성 여부, 실제 현장에서 용기용 밸브의 부착 시 이용되는 테프론 등의 영향에 관한 연구가 후속되어야 할 것이다.

5. 참고문헌

1. MARC Analysis Version K7.3 (1999)
2. 이상순, 민동균 외 7인 공역, 재료역학, SciTech, (2000), pp.43-66
3. 이강용, 응력해석 및 재료거동학, 연세대학교 출판부,
4. 김태완, 이부윤, 김진환, 증기 터빈용 스티드 볼트 테이퍼 나사의 유한요소 해석, 대한 기계학회 추계학술대회논문집, (1995), pp.373-377