

FCEV용 고압연료탱크 메탈씰링 파이프의 체결특성 해석

이정민¹ · 정화정² · 전문수¹ · 이형욱^{1, #}

Analysis on Fitting Characteristics of a Metal-Sealing Pipe of the Hydrogen Fuel Tank for FCEV

J. M. Lee, J. H. Jeong, M. S. Chon, H. W. Lee

(Received December 4, 2017 / Revised December 9, 2017 / Accepted December 27, 2017)

Abstract

In connecting parts of a hydrogen fuel cell vehicle, since the rubber ring is permeable to hydrogen, it is necessary to use a metal sealing structure which ensures leakage stability. Finite element analysis was performed to verify the fitting characteristics of the metal sealing structure, which is used to connect the pipe to a high pressure hydrogen FCEV tank. Deformation shape, contact distance and axial load were compared experimentally and these values were in agreement with each other. In the contact surface, between the pipe and the fitting body, the stress at the edge of the contact surface was higher than the center point, which was considered to be a good characteristic in view point of the leakage. The location of the contact points has almost no change in the upper part of the fitting, but that of the lower parts move downward as the fastening amount increases. The contact pressure at the lower part is maintained at the same constant level.

Key Words : Fitting Characteristics, Metal Sealing, Hydrogen Fuel Tank, FCEV, Surface Pressure

1. 서론

전 세계적인 에너지 문제와 선진 각국의 환경규제 강화에 따라 자동차 산업은 친환경 자동차 시대로 전환되고 있다. 화석연료 고갈 우려와 앞으로의 수소경제시대에 대비하여 에너지 다소비 분야인 자동차 산업에서 수소연료전지차(FCEV)의 개발이 계속 진행되고 있다. 수소연료전지차는 기술적 난제였던 충전 주행거리, 연료 충전시간, 연료전지 내구성 등에서 커다란 기술적 진보가 이루어져 상용화에 접근하고 있다. 수소연료의 충전거리는 충전 압력 700bar의 고압저장용기 도입으로 400 ~ 500km 수준을 확보하였다[1].

700bar의 고압저장용기를 위한 주변장치로는 수소

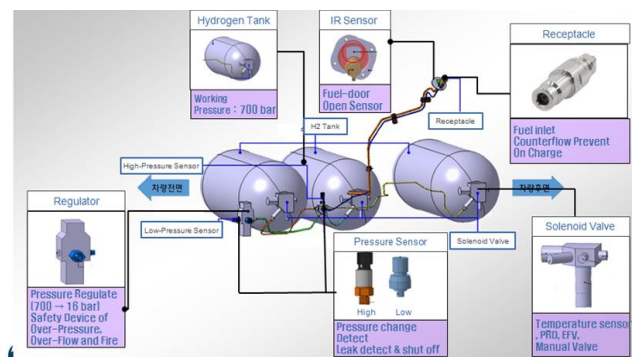


Fig. 1 System diagram of hydrogen fuel tanks and balance of tank devices for FCEV

충방전 시스템용 솔레노이드밸브 모듈, 탱크연결용 고압부품, 감압밸브 등이 있다[2]. Fig. 1은 고압저장

1. 한국교통대학교 자동차공학과

2. ㈜ 한일튜브

Corresponding Author: Korea National University of Transportation,
E-mail: hwlee@ut.ac.kr

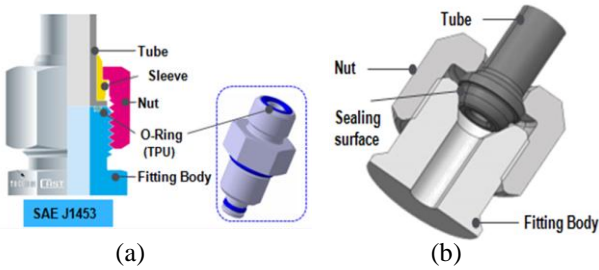


Fig. 2 Typical sealing types: (a) face-sealing type, (b) metal-sealing type

용기 주변장치를 포함한 시스템 개념도이다. 수소연료탱크와 타 부품들을 연결하기 위한 연결용 부품은 피팅, 매니폴드, 배관 등으로 구성된다. 수소저장용기의 안전법규 강화에 따라 수소탱크 주변장치의 기밀특성이 중요해지고 있다.

수소는 구조상, 원소들 중 가장 작은 원소이기 때문에 재료 내부에서 시간경과에 따라 서서히 침투하여 소재의 연성을 잃게 하여 외부 충격에 쉽게 파손되도록 하는 수소 취성 특성을 갖고 있다. 따라서 고압 수소 공급배관은 S45C를 사용하는 기존의 가솔린 차량의 배관과 달리 수소 취성에 내구성을 갖는 스테인리스 강을 사용해야 하며, 연결 피팅부 또한 -40℃ ~ 85℃까지 변화하는 열 충격 환경에서 견딜 수 있어야 한다. 특히 수소가 투과되는 고무재질의 링을 사용할 수 없기 때문에, 기밀 안정성이 보장되는 메탈씰링 구조를 사용하는 것이 필요하다. 일반적으로 사용되는 면씰링 형태와 메탈씰링에 대한 차이를 Fig. 2에 도시하였다[3].

본 연구에서는 기존의 가솔린 차량의 연료공급 배관에 사용되던 메탈씰링을 수소연료전지차에 적용할 수 있는지 분석하였다. 수소 취화 내구성을 갖는 재료인 SS316LTP를 사용하고, 이에 따른 메탈씰링 구조의 특성, 체결시의 변형형상, 접촉압력 등을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 이 결과로 부품의 손상, 기밀성의 유지 등을 검토하였다.

2. 해석방법

2.1 모델링 및 재료 물성치

차량의 연료배관에 사용되는 메탈씰링 피팅구조는 Fig. 2와 같이 배관 파이프(튜브), 연결을 위하여 배관 파이프의 끝단에 형성된 씰링면, 연결의 상대측인 피팅체로 구성된다. Fig. 3에는 본 연구에서 대

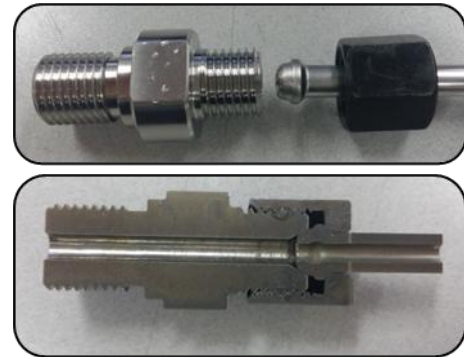


Fig. 3 Parts assembly and sectional shapes of metal-sealing structures

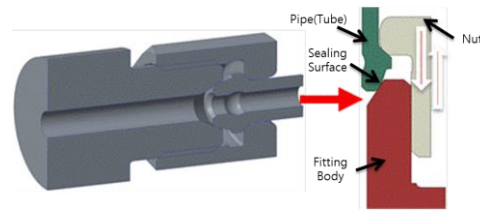


Fig. 4 Analysis model of metal-sealing structures

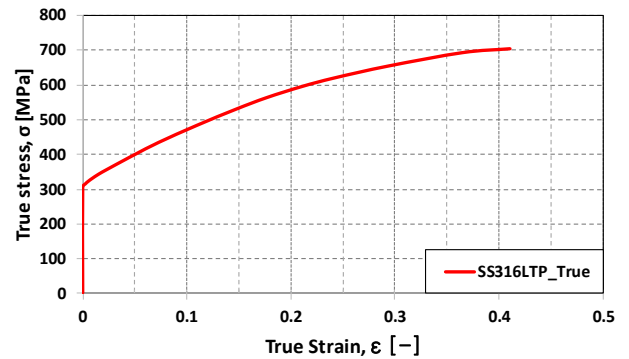


Fig. 5 Flow stress curve of SS316LTP

상으로 한 메탈씰링 구조의 부품들 및 조립한 상태에서의 단면을 도시하였다. 파이프의 외경은 6.35 mm, 내경은 3.0mm, 너트부는 M14×1.5이다. 끝단에 씰링면이 형성된 파이프를 너트를 이용하여 피팅체에 결합하는 방식이다.

해석 대상 형상을 고려하여 축대칭으로 모델링하였고, 파이프와 피팅체의 재료는 SS316LTP를 사용하였고, 너트는 SWCH25K소재를 사용하였다. 가솔린 차량에서는 파이프와 피팅체는 S45C를 사용한다. 메탈씰링은 파이프와 피팅체 사이에서 소성변형이 생겨 접촉면 사이의 씰링이 일어나도록 한 구조이기 때문에, 탄소성 물성치가 중요하다. 기존의 해석 [4]에서는 정확한 물성치 없이 사전해석을 수행하였

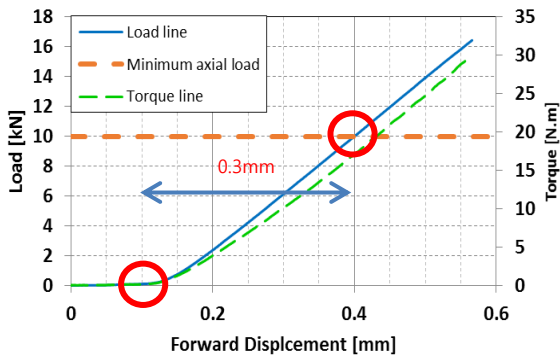


Fig. 6 Variation of the axial loads and the torques of pipe fastening process with respect to the forward displacement of the nut

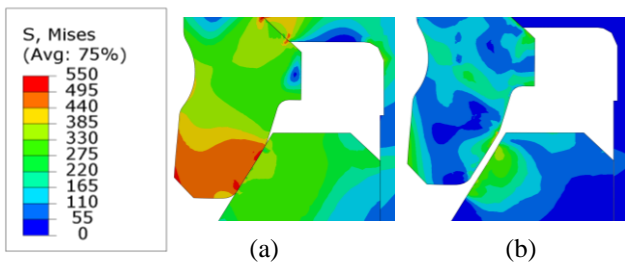


Fig. 7 Distributions of the von Mises stress: (a) loading step (displacement of 0.4 mm), (b) recovery step

으나 본 연구에서는 인장시험을 통하여 SS316LTP 소재의 탄소성 응력-변형률 선도를 Fig. 5와 같이 도출하여 해석의 정확도를 향상하였다. 실험을 통해 도출된 항복응력은 304MPa이고, 인장응력은 691 MPa이다.

2.2 경계조건

메탈씰링은 나사의 회전을 이용하여 체결을 하는 구조이나 해석에서 나사의 회전을 고려하는 것이 어렵기 때문에, 모델링 시 너트와 피팅체는 피치유효지름을 기준으로 모델링 한 후 너트를 축방향으로 변위경계조건으로 전진시켰다. 피팅체와 너트 사이에 접촉조건을 설정하여 피팅체와 너트의 변형도 고려할 수 있도록 하였다.

자동차 연료배관 피팅부의 경우 체결토크 30N·m와 축력 10kN 이상을 기준으로 체결력을 제한하고 있다. 그러나 메탈씰링 체결력이 너무 클 경우 파이프와 피팅체가 모두 변형하게 되는데 피팅체가 변형되면 추후 차량의 유지보수 시 피팅체를 교체해야 하므로 비용 부담이 증가하게 된다. 따라서 변형을

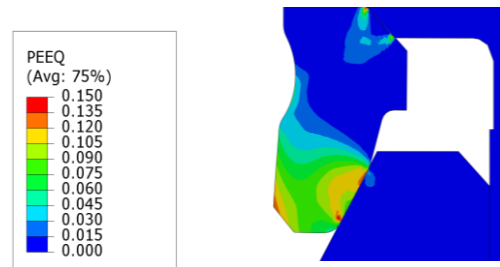


Fig. 8 Distributions of the effective plastic strain after the loading step

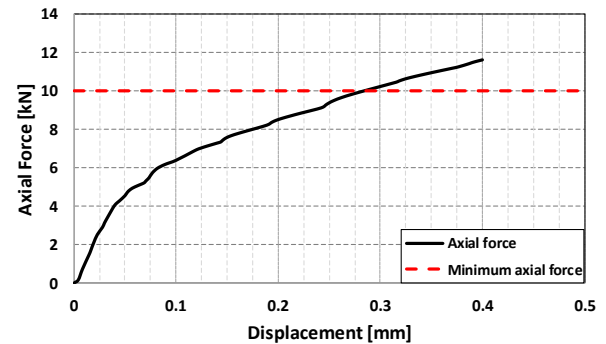


Fig. 9 Variation of the axial force with respect to the forward displacement

고려하여 적절한 축력을 결정하는 것이 중요하다. 10kN을 발생시키는 변위량을 구하기 위해서 너트의 전진변위에 따른 축력과 토크를 실험으로 구하였다. 전진변위에 따른 토크 및 축력을 Fig. 6에 도시하였고, 실험에서는 너트와 피팅체 나사산의 유격으로 인하여 약 0.1mm 정도는 하중이 나타나지 않았다. 축력 10 kN을 기준으로 할 경우 상대적인 전진변위는 0.3mm가 되어 이 값을 해석의 기준으로 하였다. 해석은 상용유한요소 프로그램인 ABAQUS/ Standard를 사용하였다. 형상의 변화 및 해석의 검증을 위해서 너트를 0.3mm ± 0.1mm로 전진시켜 하중과 형상의 변화를 검토하였다.

3. 해석결과

3.1 실험검증

너트의 체결변위를 0.4mm로 주고 압하한 후 다시 원위치로 복원시키는 해석을 수행하였다. Fig. 7에 0.4mm에서 압하 시와 복원 시 von Mises 응력분포를 도시하였고, Fig. 8에는 유효소성변형률을 도시하였다. 변형은 주로 파이프 끝단부에서 일어나며 너트부와의

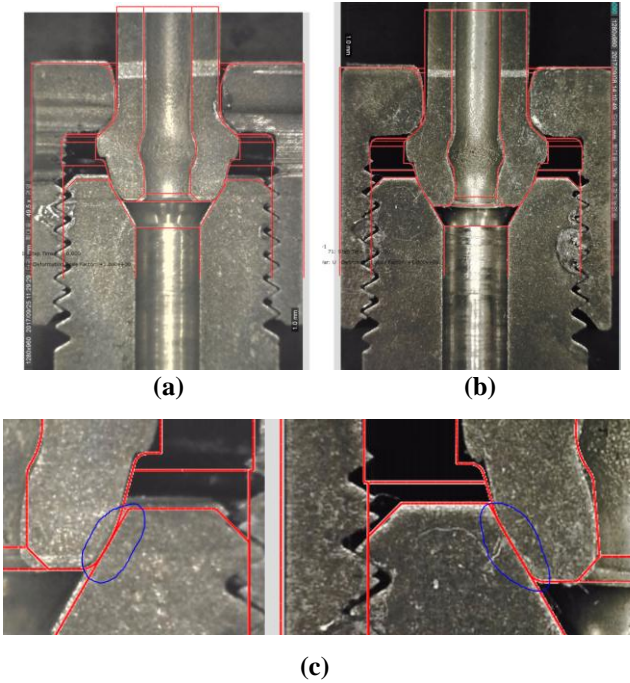


Fig.10 Comparisons of deformed shapes between experiments (photos) and FE simulations (red perimeter lines): (a) initial, (b) forward displacement of 0.4 mm, (c) contact surfaces

사이에서도 응력집중현상이 일어나고 있는 것을 확인할 수 있다. 유효소성변형률을 통하여 체결이 일어나면 파이프 끝단부와 너트 체결부는 전체적으로 소성변형상태에 있으며, 피팅체와 닿은 부분에서는 면을 따라서 양쪽 끝에서 소성변형이 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

메탈셀링에서 최초 닿는 부분에서 응력 또는 접촉압력이 계속 커질 것으로 예상할 수 있지만 너트가 전진될 수록 양쪽 측면에서 더 큰 응력이 발생하게 되어 기밀성 측면에서는 좋은 특징인 것을 알 수 있다.

Fig. 9에는 전진변위에 따른 축력의 변화를 도시하였다. 실험에서 약 0.3mm 정도에서 10kN이 나오는 것으로 예측하고 해석을 수행하였는데, 축력 기준 10kN 이상이 되는 지점은 전진변위가 약 0.3mm일 때로 실험치와 비슷한 값을 나타냈다.

변형형상을 기준으로 해석결과와 실험결과를 비교하였다. Fig. 10에 초기 형상과 기준 토크에서의 단면형상을 절단하여 도시하였고, 해석결과는 초기형상과 0.4mm일 때의 결과를 외곽선으로 나타내었다. 파이프의 내경이 3.0mm 이므로 전진변위는 내경 대비

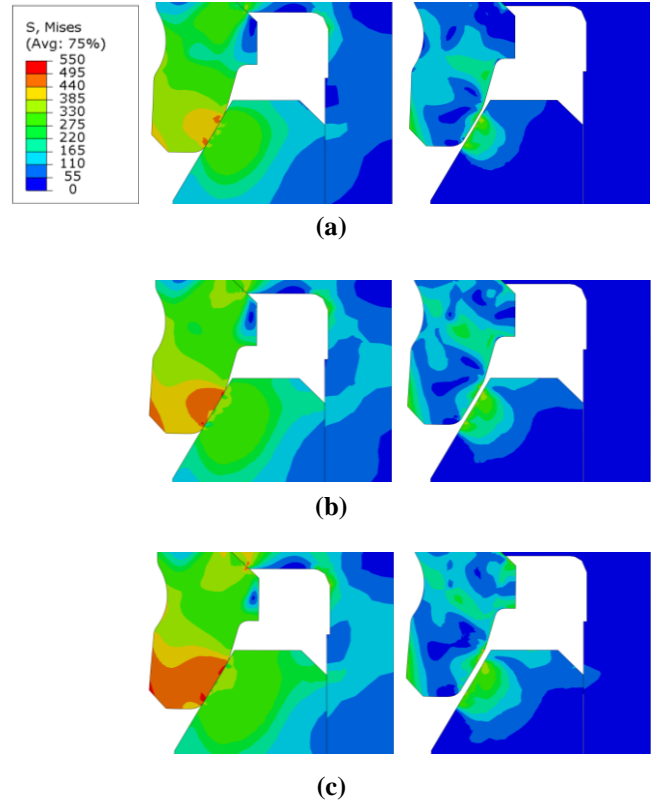


Fig.11 Distributions of the von Mises stress of fastening step (left side) and recovery step (right side) with respect to the forward displacement of nut: (a) 0.2mm, (b) 0.3mm, (c) 0.4mm

약 13% 전진시켰다. Fig. 10(c)에는 초기상태와 0.4mm 전진시의 파이프와 피팅체가 닿은 부분 즉 기밀유지를 위하여 접촉된 부분의 형상을 확대하여 도시하였다. 초기에 비해 더 넓은 면적에서 접촉하고 있으며, 해석 결과와 실험결과는 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2 체결변위에 따른 기밀성 분석

앞서 서술한 것과 같이 체결력이 너무 큰 경우 소성변형이 많이 일어나게 되고, 이는 피팅체에 영구변형이 발생할 수 있다. 이를 검토하기 위하여 0.2, 0.3, 0.4mm의 압하량에 대하여 유효소성변형률을 분석하고, 접촉압력 비교를 통하여 기밀성을 검토하였다.

압하량에 따라 von Mises 응력분포를 Fig. 11에 도시하였다. 압하량이 커질수록 파이프의 끝단부는 전체적으로 응력이 커지지만 파이프의 응력상태는 피팅체와 닿은 부분에서 원형의 분포를 보이고 있다. 특히 0.2mm와 0.3mm를 늘렸을 때는 표면 중심부의

응력보다 주변부의 응력이 더 크게 나타나 접촉면의 가장자리가 더 많이 눌러짐을 알 수 있다. 기밀성 측면에서는 수소와 닿는 부분이 초기에 벌어져 있는 것보다 좋을 수 있을 것으로 판단되며, 이는 접촉압력 선도에서 다시 비교할 수 있다.

Fig. 11의 우측그림은 압하량을 제거한 후의 응력 분포이다. 소성변형이 일어나 탄성으로 완전히 돌아가지 못하고 잔류응력이 남아있는 것을 보여준다. Fig. 12에는 유효소성변형률 분포를 도시하였다. 0.2 mm의 최대 유효소성변형률을 기준으로 동일하게 도시하면 0.3mm와 0.4mm에서는 영구변형이 표면에서 둥근 형태로 크게 일어나고, 피팅체 역시 소성변형이 일어나게 되어 손상의 가능성이 있다.

하지만 현재의 최대 0.15 정도의 유효소성변형률로는 소재 자체의 파단 진변형률인 약 0.4의 37.5% 정도이므로 재료의 손상은 문제가 없지만 영구변형이 일어나지 않도록 파이프에서 변형이 더 유도되도록 할 필요는 있다.

피팅체와 파이프 사이의 접촉압력을 피팅체의 상단부를 원점으로 설정하고 상단부에서 거리를 기준으로 Fig. 13에 도시하였다. 접촉이 일어나는 길이로 압력이 시작되는 점과 압력이 0인 경계의 중간점을 기준으로 잡으면, 압하량 0.2mm에서 1.32mm, 압하량 0.3mm에서 1.52mm, 압하량 0.4mm에서 1.72mm이다. Fig. 10(c)에서 구한 기준 토크에서의 접촉길이는 약 1.69mm로 0.3mm와 0.4mm 사이 정도로 볼 수 있으며, 해석 결과와 잘 일치한다고 판단할 수 있다.

접촉압력 분포를 보면 피팅체 상단부는 거의 접촉점이 변화가 없으나, 압하량이 증가할수록 하단부의 접촉영역이 넓어지는 것을 알 수 있다. 접촉압력 선도는 시작부와 끝단부에서 두 개의 피크치를 갖는 형태로 나타나며 압하량이 증가할수록 양쪽 피크가 명확하게 드러나는 형태가 된다. 하단부의 피크치는 크기는 압하량이 증가하면서 떨어지는 순간이 있지만 거의 비슷한 수준에서 위치만 점차 이동하는 것을 알 수 있다. 이 접촉압력은 내부의 수소압이 70 MPa이 가해질 경우 파이프와 피팅체를 분리시키는 인장력으로 작용하기 때문에 그 수준이 점차 떨어지게 될 것으로 예측이 되지만, 접촉압력의 하단 피크치가 압축으로 약 600MPa 이상인 정도인 것으로 보아 기밀성에는 문제가 없을 것으로 예측된다. 추후 내부 압력을 부과한 후 접촉압력의 강하를 분석해야 할 것으로 판단된다.

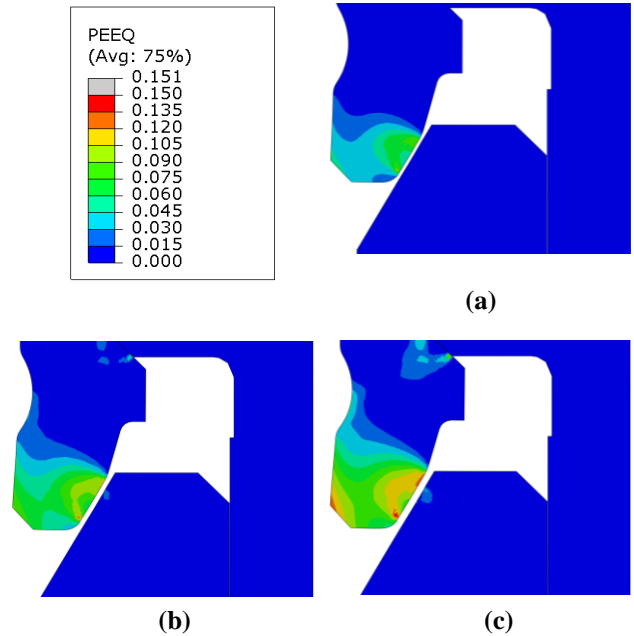


Fig.12 Distributions of the effective plastic strains with respect to the forward displacement of nut: (a) 0.2 mm, (b) 0.3 mm, (c) 0.4 mm

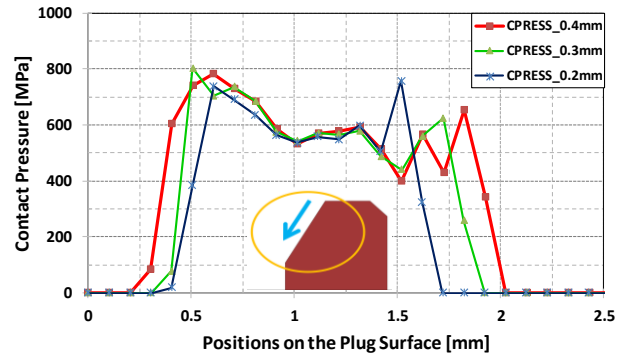


Fig.13 Variation of contact pressure on the plug surface (fitting body) with respect to the surface positions according to the forward displacement of nut

4. 결론

수소연료전지차에 사용되는 고압수소탱크의 주변장치를 연결해주는 파이프의 메탈씰링 구조에서의 체결특성을 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. 변형형상 및 접촉거리, 하중은 실험적으로 비교하였으며 이 값들은 서로 잘 일치하였다. 연구된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 너트의 체결 전진량에 따라 파이프와 피팅체는 소성변형이 일어나고, 체결력 10 kN의 체결 전진

거리는 약 0.3mm로 분석되어, 해석적 연구결과는 실험결과와 유사한 결과로 도출되었다.

(2) 파이프와 피팅체의 접촉면에서는 접촉면의 가장자리의 응력이 중심점보다 높게 나타나며, 이는 기밀성 측면에서 좋은 특성이 될 것으로 판단된다.

(3) 압하량 0.3mm에서 접촉길이는 1.52mm, 0.4mm에서는 1.72mm로 예측되었으며, 실험에서는 1.69mm로 나타났다.

(4) 접촉점은 피팅체 상단은 거의 변화가 없으나 하단부는 압하량이 증가할수록 아래쪽으로 이동하며 하단부의 접촉압력은 거의 일정한 수준에서 유지된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원한 산업핵심기술(No.10070218)의 수행결과입니다.

REFERENCES

- [1] R&D Information Center, 2017, Analysis of Domestic and Foreign Trends of Future Automobile Industry, Knowledge Industry Information Institute, Seoul, Korea, p. 407
- [2] W. Rha, 2017, Strategy for the Standardization of Hydrogen Fuel Cell Vehicle, Auto J., Vol. 39, No. 1, pp. 29~31.
- [3] SAE J1453, Specification for O-Ring Face Seal Connectors.
- [4] J. M. Lee, J. H. Jeong, S. H. Choo, J. S. Park, Ms. S. Chon, H. W. Lee, 2017, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Autumn Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 147~148.