

## 체결부 재료에 따른 FCEV 연료파이프 메탈 씰링부의 기밀성 분석

이정민<sup>1</sup> · 한은수<sup>2</sup> · 전문수<sup>3</sup> · 이형욱<sup>3#</sup>

### Analysis of Hydrogen-tightness on the Metal Sealing of a Fuel Pipe for FCEV according to Material Change of the Fitting Body

J. M. Lee, E. S. Han, M. S. Chon, H. W. Lee

(Received June 28, 2019 / Revised September 10, 2019 / Accepted September 16, 2019)

#### Abstract

Metal sealing is used to connecting the parts between valves and fuel pipes for a FCEV which utilizes hydrogen gas of 700 bar. Instead of general carbon steel, stainless steel is the primary material used to manufacture fuel pipes due to hydrogen embrittlement. The shape of deformation between metals is an important factor on the air-tightness of the metal to metal contact. Since the stainless steel pipe is hardened using the plastic forming during the tip shaping stage, this work hardening could have an effect on the deformed shape and characteristics of contact surfaces in fastening of pipes. In this paper, the deformation history of the pipe model was considered in order to analyze the hydrogen-tightness on the metal sealing part. The contact distance and the forward displacement for fastening were compared using experimental results and the simulation results. The simulation of the effect of material change on the fitting body demonstrated that the hardness or the strength of the formed tip of the pipe was designed to a proper valued level since the characteristics of the contact surface was exhibited better when the strength of the pipe was lower than that of the fitting body.

**Key Words:** Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), Hydrogen-tightness, Metal Sealing, Fitting Body, Surface Pressure

## 1. 서 론

수소연료전지차(FCEV)는 전기자동차의 일종으로 배터리 대신에 연료전지를 사용하는 차량이며, 차량에 장착되는 연료전지는 전기를 생산할 때 주로 공기 중의 산소와 압축 저장된 수소를 사용한다[1]. 수소연료전지차의 주행거리는 충전압력 700기압의 고압저장용기의 도입을 통하여 1회 충전에 400 ~ 500 km 수준인 것으로 알려져 있다. 수소연료는 기존에는 350기압으로 충전되었으나 700기압으로 충전 압력이 상향되면서 연료탱크의 주변장치들도 이에 적

합하도록 설계되고 있다. HONDA 사의 부품들에서는 수소와 고무재질 오링의 직접 접촉을 배제하기 위한 기술이 제시되었다[2]. 수소저장용기의 상향된 충전 압력(700기압)과 안전법규 강화에 따라 수소탱크 연료 배관 및 주변 장치들의 기밀특성은 중요한 설계 요인으로 인식되고 있다. 고압저장용기를 위한 주변장치로는 수소 충전·방전 시스템용 솔레노이드 밸브 모듈, 탱크 연결용 고압 부품, 감압 밸브 등이 있다[3]. 일반적인 화석연료를 사용하는 차량의 주변 부품들과 파이프의 연결부를 Fig. 1에 도시하였다.

수소연료를 사용하면서 연결부에서 기존과 다른 설계가 적용된다. 첫째는 수소 분자가 매우 작아 고무재질을 투과하는 성질이 있어 직접 연결되는 부위는 고무 재질의 오링 타입의 씰링을 사용하기 어

1. 한국교통대학교 자동차공학과 대학원 졸업

2. (주) 한일튜브

3. 한국교통대학교 자동차공학과

# Corresponding Author: Korea National University of Transportation,  
E-mail: hwlee@ut.ac.kr, ORCID ID: 0000-0003-4875-1308

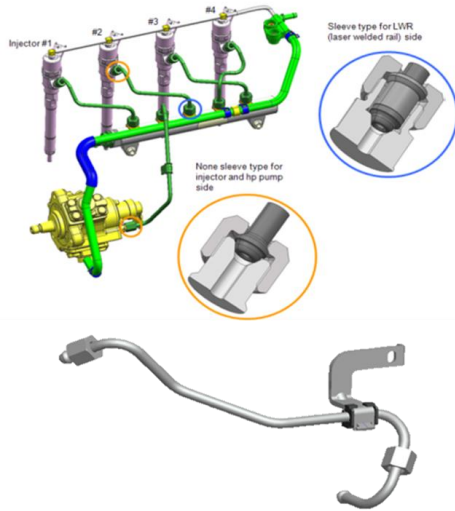


Fig. 1 Conventional fuel pipe system and connectors

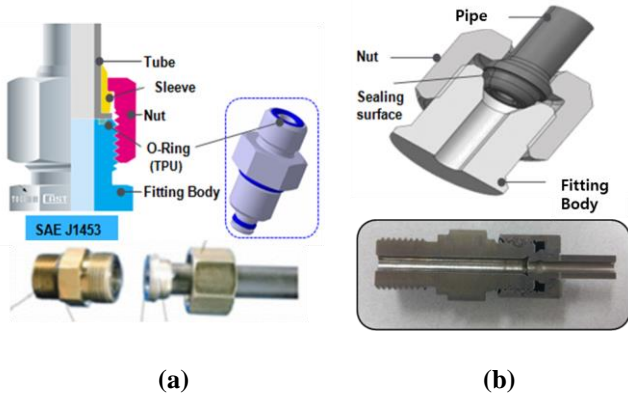


Fig. 2 Typical sealing of pipes: (a) rubber-based O-ring type; (b) metal sealing

럽다. 둘째는 일반적인 탄소강은 수소취성이 발생하기 때문에 디젤엔진에서 사용하던 S45C 재질의 파이프를 사용하지 못하고 스테인리스 강으로 된 파이프를 사용해야 한다. 따라서 연결부에서 메탈 씰링을 적용하여야 하는데, 접촉부의 기밀성이 중요한 고려사항이 된다. 또한 금속과 금속의 접촉 체결에서는 각각의 부품 또는 한쪽의 부품에 소성변형이 일부 발생할 수 있으며, 이는 파이프 제조사와 밸브 제조사 간에 문제를 야기할 수 있다. 기존의 오링 타입의 씰링과 메탈 씰링을 Fig. 2에 도시하였다. 메탈 씰링에서 파이프의 끝단은 구형으로 성형되고 밸브의 체결부는 V자형의 원추형으로 가공되어 안정적으로 넓게 접촉될 수 있도록 되어있다.

메탈 씰링에 대한 연구는 주로 압력용기[4], 밸브 [5, 6], 고온조건[7] 등에서 이루어지고 있으나, FCEV

등의 수소 분위기에서의 사용에 대한 연구는 최근 들어 수행되고 있다. 이정민 등[8-12]은 FCEV 연료파이프 체결부의 성형해석을 통하여 체결부 접촉압력 및 형상의 변화를 예측하였고, 축력의 변화에 따른 파이프의 소성변형 등을 연구하였다. 성형형상 및 성형이력을 고려한 해석을 통하여 변형 형상을 실험 결과와 비교하였다[8-11]. 또한 성형이력과 실험을 통하여 소재의 변화에 따른 메탈 씰링부의 영향을 분석하였다[12]. 기존 연구를 통하여 메탈 씰링 접촉부에서 기밀성을 판단할 수 있는 주요 인자는 접촉길이, 접촉압력의 분포형태, 체결 후 충전으로 인하여 가압될 때의 접촉압력의 변화인 것을 알 수 있다. 스테인리스 파이프는 소성가공으로 인한 변형경화가 일어나고 이는 체결부 금속과 접촉 시 변형형상 및 접촉의 형태에 영향을 주게 될 것을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 파이프와 밸브 체결부의 기밀성 분석을 위하여 파이프에 성형이력을 고려하도록 하였다. 해석의 정확성을 검증하기 위하여 체결토크에 따른 접촉길이와 체결길이를 실험과 비교하였다. 체결부의 소재를 파이프와 동일한 재료를 사용한 경우와 파이프 보다 항복강도가 높은 재료를 사용한 경우에 대하여 변형과 접촉압의 형태를 검토하였다.

## 2. 유한요소해석 및 실험

### 2.1 체결토크 시험

앞서 Fig. 2 (b)에 도시된 메탈씰링 부품이 본 연구의 대상 제품으로 이 중 STS316LTP 재질의 파이프의 외경은 6.35 mm이고, 내경은 3.0 mm이다. 파이프와 밸브를 나사산이 있는 S45C 재질의 너트와 밸브 체결부의 나사산을 통하여 체결한다. 밸브의 원추형 표면과 파이프의 구면이 맞닿아 기밀을 유지하는 접촉면을 형성한다. 파이프의 체결 기준은 토크 30 N·m에서 축력 10 kN 이상이다.

나사산의 결합을 해석적으로 모사하기에는 상당한 시간과 해석적 어려움이 존재하기 때문에 축 방향 변위와 접촉조건을 사용한다. 이 경우 토크를 계산 또는 설정하기 어렵기 때문에 축력과 토크와의 관계를 얻어야 하며 마찰계수와 탄성변형 내에서의 이론적 계산을 이용하는 것보다는 실험을 통하여 관계를 획득하였다. 토크-축력 시험장치를 통하여 너트의 회전에 따른 축력과 토크 선도를 Fig. 3에 도

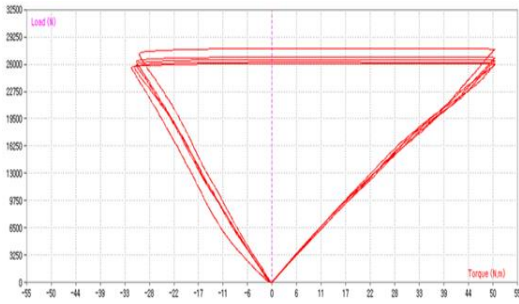


Fig. 3 Variation of the axial load with respect to the torque during the fastening test

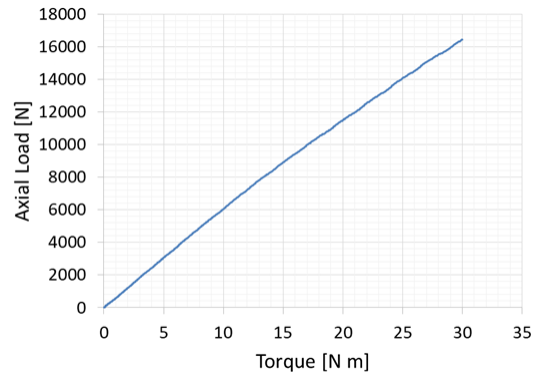


Fig. 5 Variation of the load with respect to the torque during the fastening test

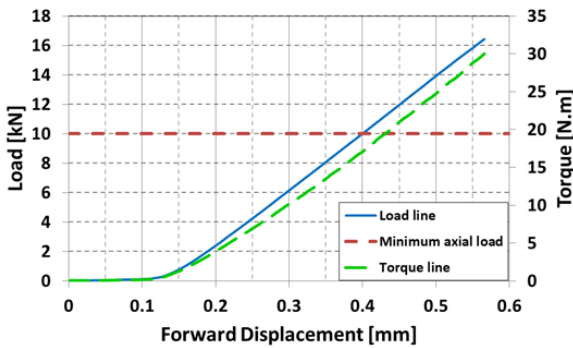


Fig. 4 Variation of the axial load and the torque with respect to the forward displacement of the nut curve during the fastening test [9]

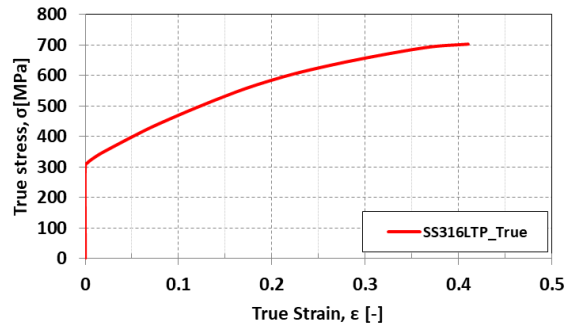


Fig. 6 True stress-strain curve of SUS316LTP [9]

시하였고, 너트의 회전에 따른 체결 전진변위와 축력 및 토크 선도를 Fig. 4에 도시하였다. 이 결과에서 토크와 축력의 관계 선도를 Fig. 5와 같이 얻을 수 있다.

Fig. 3의 1사분면은 너트를 쥘 때의 토크와 축력 선도이고 2사분면은 너트를 풀 때의 토크와 축력 선도이다. 쥘 때의 선도 중 체결토크 기준인 30 N·m까지의 영역에 대하여 너트의 축 방향 전진 거리와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 4[9]이다. 초기 0.1 mm 정도의 하중이 상승하지 않는 부분은 나사산 사이의 유격 때문인 것으로 판단된다. 축력 10 kN이 되기 위한 실제 체결 거리는 유격을 제외한 약 0.3 mm인 것을 알 수 있고, 토크 30 N·m가 되기 위한 체결 거리는 약 0.45 mm인 것을 알 수 있다. 축력과 하중과의 관계인 Fig. 5를 통하여 해석에서 얻어지는 반력을 토크로 환산하도록 하였다.

2.2 설계 형상 해석  
2.2.1 해석 조건

해석 모델은 3차원 형상의 나사 체결이지만 앞서 기술한 대로 나사 체결을 해석적으로 모사하기에는 다양한 어려움이 존재하기 때문에 파이프, 너트, 밸브의 체결면을 2차원 축 대칭 모델로 구성하였다. 나사의 체결은 너트의 유효지름 위치에 너트면을 모델링하고 축 방향으로 이동시키면서 접촉조건을 부과하도록 하였고, 체결 후 가압 시는 너트의 유효지름 면과 밸브의 체결면을 슬라이딩 및 분리되지 않도록 고정하였다.

파이프의 재료는 SUS316LTP로 탄소성 구성방정식을 사용할 수 있도록 하였고, 물성치는 인장시험을 통하여 구하였다[9]. 인장시험을 통하여 얻은 진응력-진 변형률 선도를 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 2의 너트는 S45C, 실제 밸브 체결부품은 SUS 재질이지만 테스트 과정에서의 검증을 위하여 체결 시험과 동일한 SKD11로 사용하였다. 해석에서는 S45C는 항복강도 490 MPa, 탄성계수 209 GPa, 포와송비는 0.29, SKD11은 항복강도 1034 MPa, 탄성계수 200 GPa, 포와송비 0.295를 사용하였다[12].

해석 절차는 체결 시는 너트를 이동시키고, 접촉 조건을 고정으로 변경한 후, 내부의 수소연료와 접촉되는 면에 700기압의 테스트압력인 1050기압(105 MPa)를 부과하였다. 해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Standard를 사용하였다.

### 2.2.2 설계형상 해석

설계된 형상을 이용하여 체결 과정 및 가압 과정을 해석하였다. 축력을 기준으로 10 kN이 되도록 축 방향으로 너트를 약 0.28 mm를 이동시켰다. 본 절에서의 해석은 참고문헌 9의 해석 과정과 동일하나 참고문헌 9에서는 축 방향의 변위를 0.2 ~ 0.4 mm 이동시켰을 때, 체결 변위에 따른 변형형상과 체결 후 및 가압 후의 접촉압력을 분석하였다. 본 논문에서는 체결부의 소재가 SKD11이고 길이가 0.28 mm일 때의 해석결과를 기술하였다.

Fig. 7에 체결 후와 가압 후의 von Mises 응력분포를 도시하였고, Fig. 8에는 체결 후의 유효소성변형률 분포를 도시하였다. 체결 시 파이프와 밸브 체결부의 접촉부에 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있고, 가압 시 체결 단계 대비하여 응력이 완화되는 것을 알 수 있다. 이는 수소압력에 의해서 파이프와 밸브의 체결부가 밀려나기 때문이다.

Fig. 8의 유효소성변형률을 보면 체결 시 파이프의 끝단에 소성변형이 발생하고 너트와 밸브 체결부에는 소성변형이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)에서 가압 후의 변형률은 체결 후와 동일하여 추가적인 소성변형이 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 변형 양상은 파이프 제작사의 관점에서는 유리한 설계가 된다. 수리나 교체 시 파이프만 교체하면 되기 때문에, 상대적으로 고가의 밸브의 손상을 주지 않을 수 있기 때문이다. 하지만 체결 단계에서 파이프에 과도한 소성변형이 일어나는 것은 유지 또는 보수를 수행한다는 관점에서는 좋지 않을 것으로 생각할 수 있다. 보수를 위하여 분리 후 다시 체결 할 경우에 동일한 형태가 유지되지 않을 수 있기 때문이다.

하지만 본 해석은 파이프에 초기 소성변형이 존재하지 않는다는 가정에서 시작하였으나, 파이프의 체결부 끝은 직선에서 소성가공을 통하여 구형으로 제작되기 때문에 이러한 가정은 틀릴 수 있다. 그리고 구형으로 소성 가공이 일어나면 체결부에 가공경화가 발생하여 항복강도가 증가한다. 항복강도의

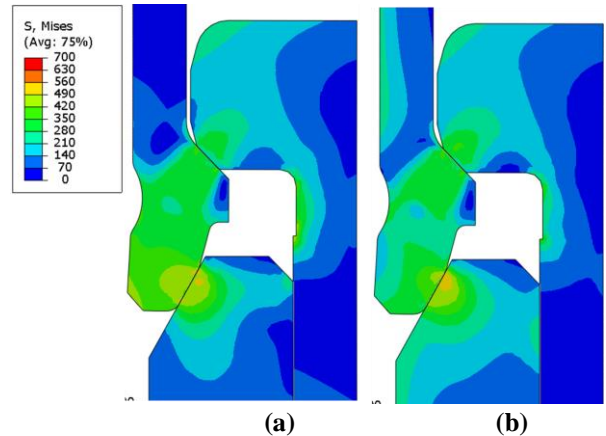


Fig. 7 Distributions of von Mises stress of the designed model: (a) after fastening; (b) after pressurizing

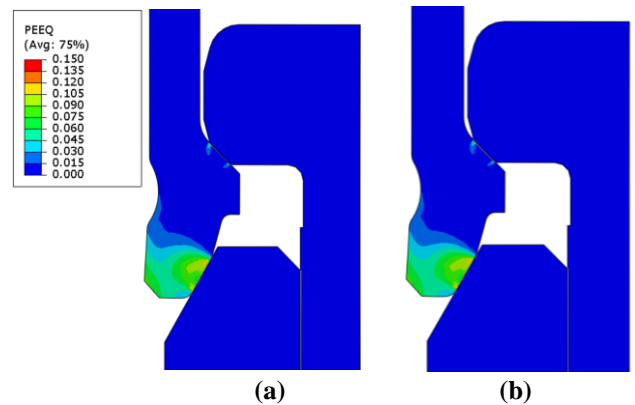


Fig. 8 Distributions of the effective plastic strain: (a) after fastening; (b) after pressurizing

증가는 전체적인 변형양상을 변화시킬 수 있어 파이프의 구형 형성을 위한 성형이력을 고려해야 하는 것을 알 수 있다.

### 2.2.3 경도 시험

파이프 끝 단의 구형형상 성형공정에서 발생하는 소성가공의 정도를 확인하기 위하여 단면의 부식시험과 마이크로 경도 측정시험을 수행하였다. 부식시험의 결과와 경도시험의 결과를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9의 상단에 나타나 부식시험 결과를 보면, 전체적인 형상의 변화에 따라 단류선이 형성된 것을 확인할 수 있다.

마이크로 경도시험을 적용하면 부위별로 소성변형의 정도를 어느 정도 예측할 수 있기 때문에 파이프를 절단하여 끝단부 절단면에 16개의 지점을 설정하여 마이크로 비커스 경도를 측정하였다. 끝단

성형 전 파이프 절단면에서 측정된 경도는 내측 면에서 193 Hv 정도이며, 외측 면은 260 Hv 정도이다.

Fig. 9에는 측정된 경도를 총 세 단계로 나누어 컬러로 도시하였다. 세 단계의 표기는 300 Hv 미만은 파란색, 300 Hv 이상 350 Hv 미만은 초록색, 350 Hv 이상은 노란색으로 표기하였다. 파이프의 외측 면에서 경도가 가장 큰 것을 알 수 있으며 내측 끝단부는 상대적으로 경도가 낮은 것을 알 수 있다. 초기 경도와 비교하여 경도의 증가치를 내측에서 외측으로 부위별로 평균을 내어 Table 1에 요약하였다. 경도값은 외측 보다는 소재의 중간 부분에서 가장 크게 증가됨을 알 수 있다. 부위 별로 경도가 다르게 나타나기 때문에 성형 이력을 고려하여야 한다는 것을 알 수 있고, 외측의 경도가 밸브 체결부와의 변형에 영향을 주기 때문에 경도에 대한 관리도 필요하다

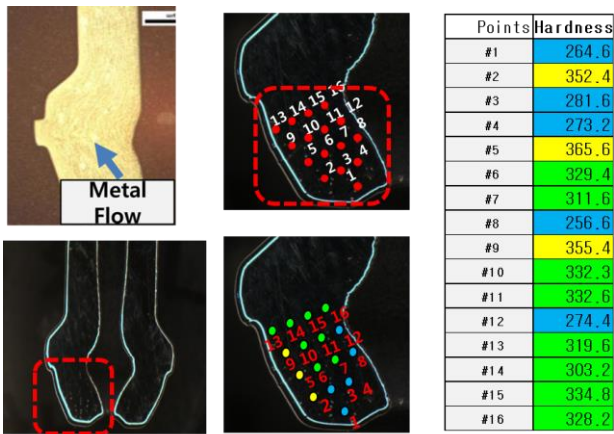


Fig. 9 Results of corrosion test with metal flow and micro Vickers hardness test with designated points

Table 1 Comparison of increase in the micro Vickers hardness with respect to the radial directional region

| Position | Ave. Hv of initial pipe | Ave. Hv of formed pipe | $\Delta$ Hv |
|----------|-------------------------|------------------------|-------------|
| Outer    | 260                     | 348.2                  | 88.2 ↑      |
| Middle   | 193                     | 317.9                  | 124.9 ↑     |
| Inner    | 193                     | 283.1                  | 90.1 ↑      |

### 2.3 성형이력을 고려한 해석

파이프의 성형 이력을 고려하여 가공경화 상태에서 체결해석을 수행하기 위하여 금형을 이용한 성형공정해석을 수행하였다[10-11]. 이를 위하여 총 4 단계의 해석과정을 설정하였다. 해석단계는 소성가공, 탄성회복, 체결, 가압 과정이다. 소성가공 시 금형의 형상은 설계 형상의 파이프 외부 형상을 토대로 구성하였으며, 적용된 물성은 파이프는 SUS316 LTP, 너트는 S45C이다. 테스트에 사용한 체결부는 참고문헌 11과 다르게 SKD11을 사용하였다.

성형이력을 고려하여 설정한 4단계의 해석과정을 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10 (a)는 금형에 소재를 위치시킨 상태이며, (b)에서 하단 금형이 상승하여 금형에 따라 소재가 가공되어 내부의 응력이 상승하였다. 경도시험의 결과에서 볼 수 있듯이 파이프의 가운데 부위에 가장 큰 응력이 걸리고 경화되는 것을 확인할 수 있다. (c)에서는 성형이 끝나고 금형을 제거한 후, 파이프가 탄성 회복하여 내부의 응력이

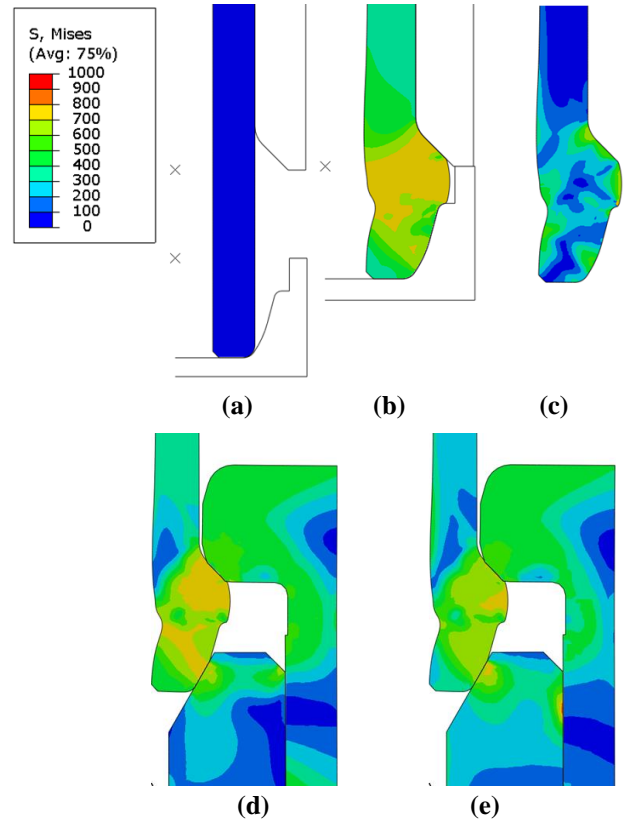


Fig. 10 Distributions of von Mises stress at the stage of: (a) initial; (b) forming; (c) elastic recovery; (d) fastening; (e) pressurizing

줄어드는 것을 나타내고 있다. 체결과정을 (d)에 나타내었으며, 파이프와 체결부가 맞닿는 부분과 너트와 파이프가 접촉하는 곳에서 다시 응력이 상승하는 것을 볼 수 있다. 마지막 단계인 가압 과정의 (e)에서 내부 가압을 통해 플러그 내측에 응력은 상승하였고, 파이프 내부의 응력이 감소하는 것이 확인되었다[12].

### 3. 결과 분석 및 토론

#### 3.1 체결 시험 및 분석

해석결과를 검증하기 위하여 체결 토크에 따른 너트와 체결부 사이의 간격의 변화와 접촉면의 접촉길이를 측정하였다. Fig. 11과 같이 체결 토크 10, 20, 30 N·m에 따라 체결된 시편을 2개씩 준비하고 금속 마이크로 CT를 이용하여 3차원 이미지를 획득하였다. 기기의 분해능은 3 $\mu$ m이다.

CT 이미지는 3개의 평면으로 단면을 측정할 수 있는데 수직으로 된 A-A, B-B평면과 수평으로 된 C-C 평면이다. Fig. 12와 같이 수직평면에서 너트와 체결부 사이의 간격의 변화를 측정하였다. 4지점의

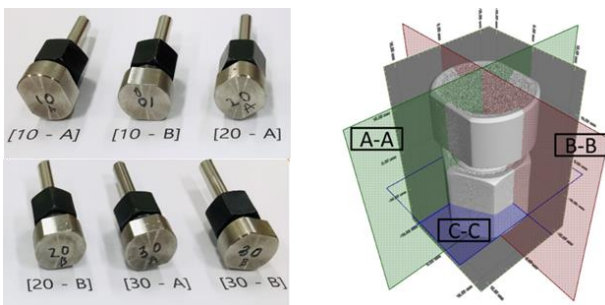


Fig. 11 Specimens for micro CT with respect to fastening torques and CT image

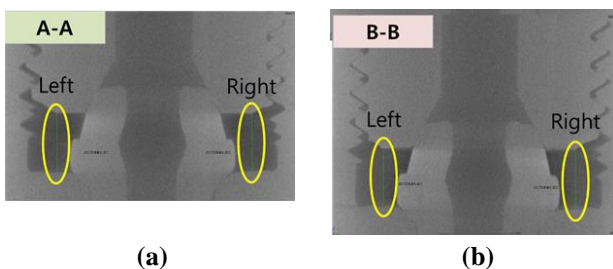


Fig. 12 Measurement image of distance between the nut and the fitting body with respect to the fastening torque: (a) in A-A plane; (b) in B-B plane

측정값을 평균하여 Fig. 13과 같은 정량적 데이터를 얻을 수 있다. 접촉면의 접촉거리는 C-C평면을 변화시켜가며 접촉면 이전과 이후에 나타나는 간극을 파악하여 간극간의 높이를 Fig. 14의 (a)와 (b)같이 측정하였다. 측정된 데이터를 체결 토크에 대하여 정리하여 Fig. 14의 (c)에 선도로 도시하였다. 30 N·m에서 접촉길이는 0.75 mm로 측정되었다.

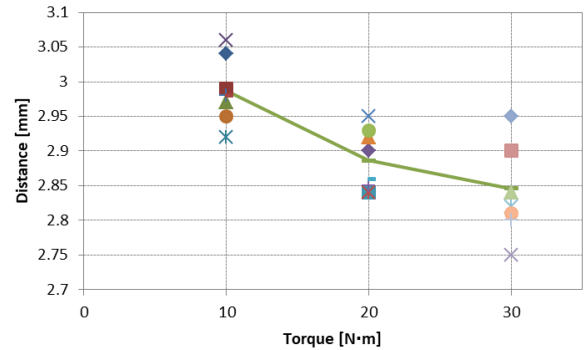


Fig. 13 Variation of distance between the nut and the upper surface of the fitting body of the valve with respect to the fastening torque

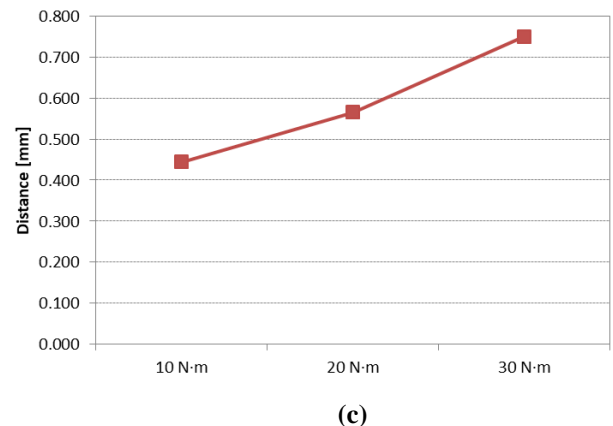
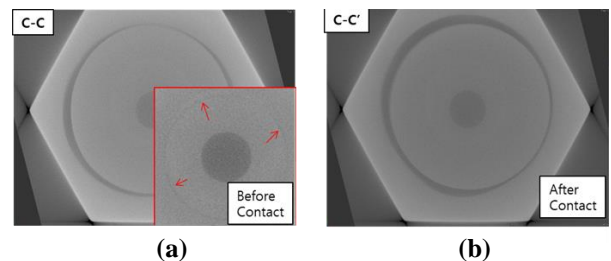


Fig. 14 Variation of contact distance on the sealing surface with respect to the fastening torque: (a) image below the contact surface in C-C plane; (b) image above the contact surface in C'-C' plane; (c) summarized curve

### 3.2 해석 결과 검증

체결 토크에 따른 체결 시 간격의 변화와 접촉길이의 변화에 대하여 CT 데이터와 설계 모델(design model)과 성형이력 모델(forming model)의 해석결과를 비교하였다. Fig. 15와 16에 체결 시 너트와 체결부의 간격과 접촉길이의 변화를 각각 도시하였다. 점선으로 도시된 설계 모델보다 성형이력 모델이 실험 결과와 유사한 것을 확인 할 수 있다.

이상의 결과를 통하여 성형 이력을 고려한 해석

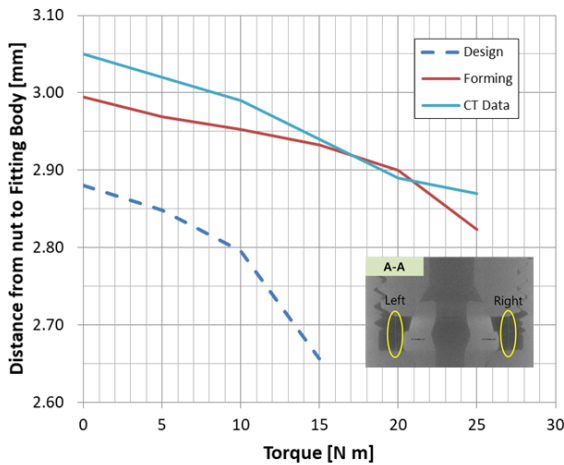


Fig. 15 Comparison of distance from nut to the fitting body between CT data and simulated data of design model and forming model with respect to fastening torque

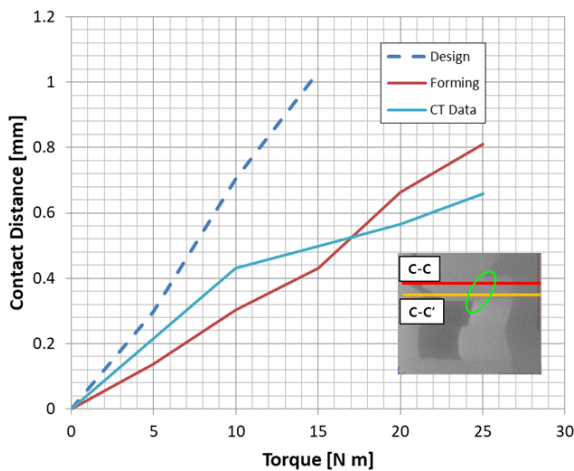


Fig. 16 Comparison of contact distance on the sealing surface between CT data and simulated data of design model and forming model with respect to fastening torque

이 실험 결과와도 잘 일치하며 메탈샐링의 접촉부 분석을 위해서는 이와 같은 과정을 거쳐야 함을 알 수 있다. 다음 절에서는 체결부 소재의 변화에 따른 부품들의 변형형상과 접촉압 변화를 검토하고, 이에 따른 메탈 샐링부의 기밀성에 대한 분석을 수행하고자 한다.

### 3.3 체결부 소재 변경 해석

체결 실험을 위해 사용된 체결부 재료는 SKD11 이나 실제 부품에서는 SUS 재료를 주로 사용하기 때문에 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 체결 시 SKD11 물성을 적용한 체결부의 접촉면에서 체결 토크에 따른 접촉 압력 분포를 Fig. 17에 SUS 재료를 적용한 경우를 Fig. 18에 도시하였다.

Fig. 17과 같이 SKD11에서는 체결 토크가 증가할 수록 최대 접촉압력과 접촉거리도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 20 N·m 이상의 토크에서는 이전의 토크보다 최대 접촉 압력 크기는 줄고, 최대 접촉압력의 폭은 넓어지는 것을 볼 수 있다.

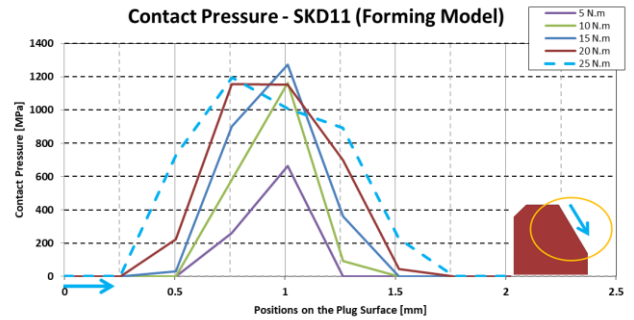


Fig. 17 Variation of the contact pressure with respect to the position on the contact surface along the fastening torque in the fitting body of SKD11

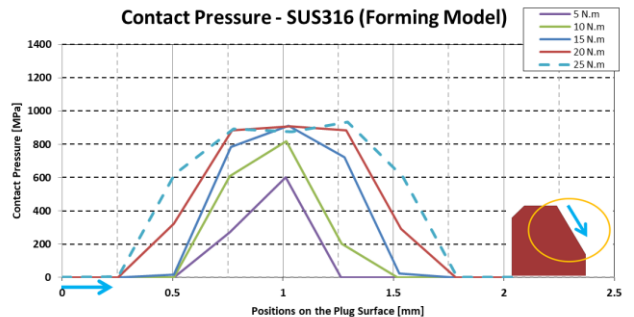
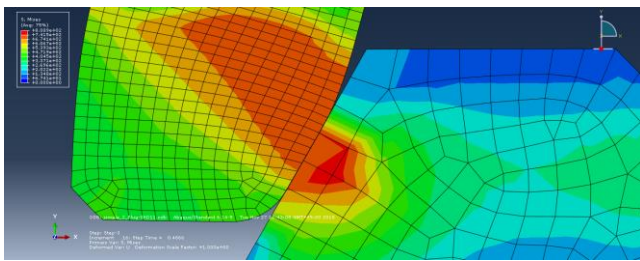
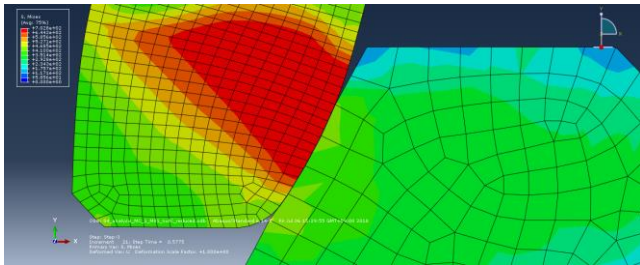


Fig. 18 Variation of the contact pressure with respect to the position on the contact surface along the fastening torque in the fitting body of SUS

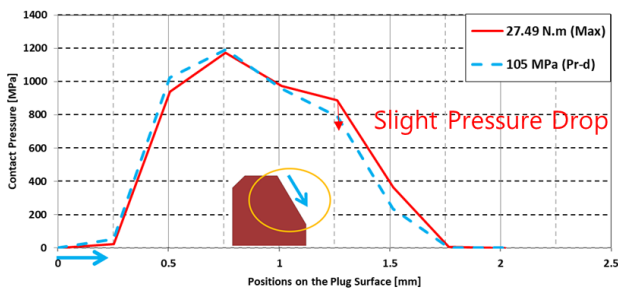


(a)

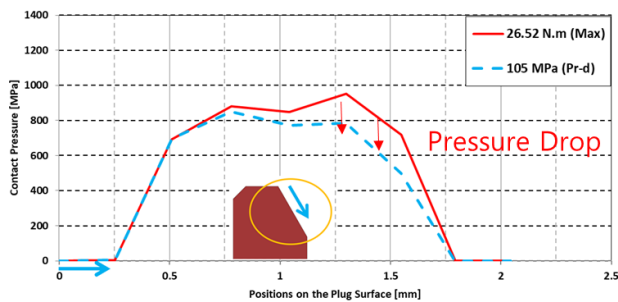


(b)

**Fig. 19 Deformed shapes of fitting body with respect to the material of the fitting body: (a) SKD11; (b) SUS**



**Fig. 20 Comparison of the contact pressure after pressurizing with respect to the position on the contact surface in fitting body of SKD11**



**Fig. 21 Comparison of the contact pressure after pressurizing with respect to the position on the contact surface in fitting body of SUS**

SUS재료를 사용한 Fig. 18에서는 체결 토크 15 N·m 이상의 접촉 압력분포를 보면 최대 접촉압력은 거의 증가하지 않지만 접촉압력의 폭은 넓어지는 것을 알 수 있다. 두 가지 재료에 대한 접촉압력 분포의 형태는 체결부의 재료가 상대적으로 강하면 뾰족한 피크 형태를 나타내고, 체결부의 재료가 상대적으로 약하면 둔한 형태의 최대 접촉압력을 보이고 있다.

체결 과정이 끝난 단계에서의 변형 형상을 Fig. 19에 도시하였다. Fig. 19 (a)는 체결 실험에 사용된 SKD11인 경우이고 (b)는 SUS물성을 사용한 경우이다. 체결부 소재로 SKD11을 적용한 경우는 파이프가 소성 변형하여 체결부와의 접촉면을 따라 파이프가 평편하게 변형하고 있으며, SUS를 적용한 체결부에서는 체결부가 상대적으로 약하기 때문에 파이프 끝단의 외측 형상에 따라 체결부가 소성 변형하는 것을 볼 수 있다.

이러한 변형 형상은 앞선 Fig. 17, 18의 접촉압력의 분포와 같이 분석해 볼 수 있다. SKD11 소재의 체결부는 체결부가 소성 변형하지 않기 때문에 상대적으로 약한 파이프가 변형하여야 하는데 둥근 형상의 파이프가 완전히 퍼지지 않아 일부에서 뾰족한 피크가 나타날 수 밖에 없다. SUS 소재의 체결부에서는 상대적으로 약한 체결부가 파이프 전체 외측 형상에 따라 소성 변형하기 때문에 접촉면이 넓어져 전체적으로 둔탁한 형태의 피크가 나타날 것으로 예상할 수 있다.

수소압력 105 MPa를 부과한 경우 접촉압력의 변화를 SKD11과 SUS 소재의 체결부에 대하여 각각 Fig. 20과 21에 도시하였다. 두 그래프에서 붉은 실선은 체결 단계에서의 접촉압력 분포이고, 파란 점선은 가압 단계에서의 접촉압력 분포로 두 선도의 차이가 가압을 통하여 접촉압력이 떨어지는 양이다.

SKD11 소재를 사용한 Fig. 20에서는 수소가 위치한 내측면에서 접촉압력이 약간 낮아지나 최대 접촉압력은 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 이와는 다르게 SUS 소재의 Fig. 21에서는 접촉압력의 강하도 더 크며, 최고 접촉압력이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 두 가지 경우 접촉압력은 전체적으로 유지되고 있기 때문에 기밀성에 대한 문제는 크게 없을 것으로 예상할 수 있다.

파이프의 초기 접촉부 형상은 소성 가공으로 만들어지기 때문에 형상의 설계 변경으로는 가공경화



현상 및 강도나 경도의 증가를 크게 바꿀 수는 없을 것으로 생각된다. 체결부의 접촉면이 많이 변형되지 않는 방향으로 제작하기 위해서는 파이프 끝단을 성형한 후 가공경화에 의하여 상승된 강도나 경도를 낮추는 방법이 필요하다. 실제 현장에서는 표면 열처리를 이용하여 경도를 낮추는 방법을 사용하며 파이프 표면과 체결부의 경도를 비슷하도록 유지하도록 하고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 FCEV의 수소연료 배관에 사용되는 메탈씰링에 대하여 해석적 접근 방법으로 기밀성과 접촉면에서의 현상 등을 분석하였다. 해석의 정확성을 높이기 위하여 성형이력을 고려하였고, 체결부의 소재 변경에 따른 접촉부 압력분포를 분석하였다. 연구된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 해석 검증을 위하여 실험을 통하여 축력과 체결 토크와의 관계를 구하였고, 소성변형에 의한 경도의 증가, 금속 CT 촬영을 통하여 체결 토크에 따른 체결 거리, 접촉면의 접촉 길이를 구하였다. 최대 경도는 외측에서 나타나며, 경도의 최대 증가는 두께 방향으로 중간위치에서 나타난다. 체결토크 30 N·m에서 접촉면 길이는 0.75 mm로 나타났다.

(2) 성형이력을 고려한 해석이 설계모델을 이용한 해석보다 형상 측면에서 보다 정확한 결과를 얻을 수 있었으며, 실험결과와도 잘 일치한다.

(3) 수소압력으로 인하여 접촉면에서는 수소가 위치하는 내측면에서 압력이 강하되나, 접촉면에서의 접촉 압력은 800 MPa 이상으로 기밀성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 체결부 소재의 강도에 따라 접촉면에서의 접촉압력과 변형 형상이 다르게 나타나며, 체결부의 재료가 상대적으로 강하면 뾰족한 형태의 접촉압력 분포를 나타내고, 상대적으로 약하면 둔탁한 형태가 되고 접촉압의 강도가 전자보다는 크다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원한 산업핵심기술(No.10070218)과제의 지원을 받아 수행하였습니다.

#### REFERENCES

- [1] Wikipedia, 2019, FCEV, <http://wikipedia.org>.
- [2] S. Asano, K. Kato, H. Ozaki, and M. Wada, 2016, Proc. 2016 Spring Conf., Honda Company, No. 20165375, pp. 2003~2008. (in Japanese)
- [3] W. Rha, 2017, Strategy for the Standardization of Hydrogen Fuel Cell Vehicle, Auto J., Vol. 39, No. 1, pp. 29~31.
- [4] C. K. Kim, S. H. Cho, 2004, Optimized Design of Metal Seal Structure for a Pressure Vessel using Taguchi's Experimental Method, J. Kor. Inst. Gas, Vol. 8, No. 4, pp. 30~35.
- [5] S. M. Lee, H. G. Song, J. H. Kang, Y. C. Park, 2008, Proc. Kor. Soc. Machine Process. Eng. Conf., Kor. Soc. Machine Process. Eng., pp.167~169.
- [6] J. T. Ahn, K. C. Lee, Y. B. Lee, S. H. Han, 2011, Seat Tightness of Flexible Metal Seal of Butterfly Valve at Cryogenic Temperatures, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 35, No. 6, pp. 643~649.
- [7] H. J. Park, G. H. Kim, 2016, Proc. Kor. Soc. Precision Eng. Conf., Kor. Soc. Precision Eng., Seoul, Korea, pp. 309~310.
- [8] 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.
- [9] J. M. Lee, J. H. Jeong, M. S. Chon, H. W. Lee, 2018, Analysis on Fitting Characteristics of a Metal-Sealing Pipe of the Hydrogen Fuel Tank for FCEV, Trans. Mater. Process., Vol. 27, No. 1, pp. 54~59.
- [10] J. M. Lee, J. H. Jeong, S. H. Choo, J. S. Park, M. S. Chon, H. W. Lee, 2018, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, p. 178.
- [11] J.M. Lee, J. H. Jeong, S. H. Choo, J. S. Park, M.S. Chon, H.W. Lee, 2018, Proc. Kor. Soc. Automotive Eng. Spring Daejeon, Sejong, Chungcheong Branch Conf., Kor. Soc. Automotive Eng., pp. 56~57.
- [12] J. M. Lee, 2019, MS Thesis, Korea National University of Transportation, Chungju.