

충격 하중 조건에서의 Type IV 수소 압력용기 구조건전성 분석

한민구* · 정경채* · 장승환*†

Experimental Study on the Structural Integrity of Type IV Hydrogen Pressure Vessels Experienced Impact Loadings

Min-Gu Han*, Kyung-Chae Jung*, Seung-Hwan Chang*†

ABSTRACT: In this paper, finite element analysis and real time monitoring experimental work using FBG sensor were carried out for analyzing structural integrity of a Type IV hydrogen pressure vessel under impact loading condition. By using finite element analysis with the ply based modeling technique, sensor insertion points and pressure condition were suggested. Tensile test with an angle ply specimen was conducted for getting the reliability of FBG sensor insertion method. After fabricating the vessel, total five times pressurization fatigue tests were conducted (Non-impact pressurization: 1, After impact pressurization: 4). Experimental results revealed that filling cycle time was gradually increased and filling gradient was decreased when the vessel experienced impact.

초 록: 본 연구에서는 Type IV 수소 압력용기 시제품의 충격하중 조건에 따른 구조 건전성을 분석하고자 유한요소해석과 FBG 센서 삽입을 통한 실시간 모니터링 실험을 수행하여 결과를 분석하였다. 플라이 모델링 기법을 활용한 유한요소해석을 통해 FBG 센서를 삽입할 수소 압력용기의 취약부 선정 및 가압 조건을 제시하였으며, 실험을 진행할 기초 정보를 확보하였다. 실제 용기제작에 앞서 시편 실험을 통해 FBG 센서의 삽입방식 신뢰성을 확보하였으며, 이후 해당 결과를 활용하여 필라멘트 와인딩 공정에 적용하였다. 비충격 가압 피로실험과 총 4회의 충격 피로실험을 수행하였다. 실험결과 비충격 가압 피로실험에서는 해석과 동일한 거동을 보였으며, 4회의 충격 피로실험에서는 용기의 충전 시간이 점진적으로 증가하고 충전률은 감소하는 것을 확인하였다.

Key Words: 수소 압력용기(Hydrogen pressure vessel), 광섬유 센서(FBG Sensor), 충격 하중(Impact loading), 충전률(Filling gradient)

1. 서 론

범 세계적으로 화석 연료로 인한 환경 오염이 심화되면서 이를 규제하기 위하여 국제적 협약인 기업평균 연비(CAFE)와 같은 제도를 만들었으며, 동시에 화석 연료를 대체할 대체 연료의 필요성이 강조되어 수소 에너지를 활용한 연구가 각광받고 있다. 환경 오염으로부터 자유로우며, 대체 에너지로서의 가능성이 매우 높은 수소 에너지를 원

료로 연료전지 차량의 개발이 가속화되고 있다. 연료 전지 차량에서 수소를 저장하는 수소 압력용기의 경우 수소의 낮은 에너지 밀도를 해결하기 위해 매우 높은 압력으로 수소를 압축하여 저장하기 때문에 폭발 등의 위험으로부터 운전자를 보호하고 안전성을 확보하고자 일반적인 금속 재료가 아닌 비강성, 비강도가 높은 고가의 탄소섬유 복합재료를 활용하여 제작하고 있다. 필라멘트 와인딩 공정을 통해 제작되는 수소 압력용기의 경우 두꺼운 복합재료 층을

Received 1 April 2016, received in revised form 28 April 2016, accepted 28 April 2016

*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Corresponding author (E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

가지며, 복잡한 패턴과 비구면 돔 형상에서의 와인딩 각도 변화 등 구조적인 복잡성을 가지고 있으므로, 이러한 구조의 형상 모델링과 물성 부여 및 해석에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. Son 등[1,2]은 복합재료의 정확한 해석을 수행하기 위하여 Type III 수소압력용기의 모델링 시 적층판 모델링 기법이 아닌 플라이 모델링 기법을 활용하여 보다 정확한 해석을 수행하였고, 이를 활용하여 최적의 자기압력을 제시하였다. Kim 등[3,4]은 준층지계적 알고리즘 등을 활용하여 수소 압력용기의 정확한 모델링 연구를 수행하였다. 또한 이러한 모델링 기법을 활용하여 수소 압력용기의 사용 환경 조건을 반영한 연구도 다양하게 진행되었다. Hong 등[5]은 수소 압력용기의 충전 시 발생하는 온도 변화를 반영하여 복합재료의 에폭시 물성 저하를 반영한 자기 압력 조건을 제시하였으며, Hu 등[6]은 국부적으로 열응력을 부가하여 복합재료의 파손 발생을 해석적으로 분석하였다. Han 등[7]은 압력용기 규격에서 제공하는 낙하 시험 조건에서의 충격해석을 수행하여 수소 압력용기의 복합재료 파손 정도를 분석하였다. 이 외에 차량에 활용되는 수소 압력용기의 경우 저속 및 고속 충격 조건에 노출될 확률도 높으며, 이때 구조물의 건전성을 평가하여 재사용 여부를 판단하는 것이 안전성에 직결되기 때문에 해당 구조물의 구조 건전성을 파악하는 연구도 필요하다.

본 논문에서는 Type IV 수소 압력용기 시제품을 활용하여 실시간 모니터링을 수행하고자 FBG 센서를 삽입하여 해석적 및 실험적 연구를 수행하였다. 유한요소해석을 통하여 센서를 삽입할 특정 포인트를 선정하였으며, 해석과 실험 결과 비교를 통하여 교차 검증을 하는 등 실험과 해석의 신뢰성을 확보하여 이를 통해 구조물의 실시간 모니터링 방식을 제안하였다. 또한 가압 피로실험과 충격실험을 수회 수행하여 수소 압력용기의 구조적 변화를 실시간으로 분석하였으며, 분석된 결과를 통해 수소 압력용기의 건전성을 평가하는 연구를 수행하였다.

2. 유한요소해석

2.1 구조물 형상 및 재료 정보

본 논문의 연구 대상은 Type IV 복합재료 수소 압력용기 시제품이며, 100 L 체적 및 20.7 MPa 급이다. 수소 압력용기는 크게 두 부분으로 구성되며, 탄소섬유 복합재료가 와인딩 되는 틀 역할을 하는 라이너와 탄소섬유 복합재료 층으로 나뉜다. 라이너는 압력용기의 피로 수명을 충족시키기 위하여 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)로 제작되며, 충전 부분에서의 기밀성을 유지하고자 포트 및 노브 부분은 알루미늄(Al6061-T6)을 이용하였다. 복합재료는 탄소섬유/에폭시(T700/epoxy)를 사용하였으며, 해석에 활용한 각 재료의 물성은 Table 1에 정리하였다.

Type IV 시제품 수소 압력용기는 총 32 플라이로 구성되

Table 1. Material properties

| High Density Polyethylene(HDPE) | | | |
|---------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| E | 1.8 GPa | ν | 0.42 |
| ρ | 930 kg/m ³ | | |
| Aluminum (6061-T6) [8] | | | |
| E | 69 GPa | ν | 0.3 |
| ρ | 2700 kg/m ³ | σ_{yield} | 276 MPa |
| Carbon/epoxy (T700/epoxy) | | | |
| E_1 | 144.8 GPa | ν_{12}, ν_{13} | 0.31 |
| E_2, E_3 | 8.6 GPa | ν_{23} | 0.38 |
| G_{12}, G_{13} | 5.2 GPa | r | 1595 kg/m ³ |
| G_{23} | 2.8 GPa | | |

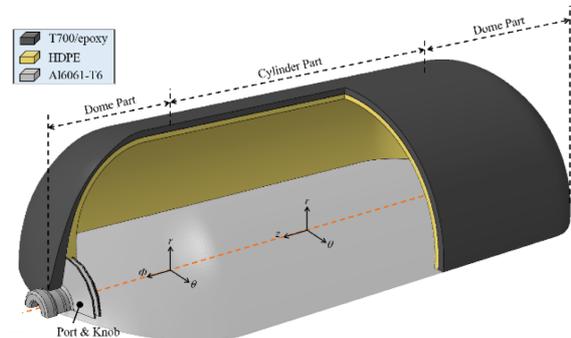


Fig. 1. Type IV prototype hydrogen pressure vessel FEA model

어 있으며, 와인딩 각도와 패턴은 업체에서 제공한 정보를 활용하였다. 와인딩 각도는 7.3°, 11.1°, 27.4°, 30°, 75°, 80°, 90°로 구성되어 있다. 복합재료 특성상 $\pm\theta$ 로 밸런스 적층 구조를 가져야 구조물의 구조적 안전성이 유지되기 때문에 본 연구 역시 와인딩 각도가 밸런스 형태를 갖도록 설정하였다. 유한요소해석을 수행하기 위하여 상용유한요소 소프트웨어인 ABAQUS 6.10-1을 활용하였다. 수소 압력용기를 라이너 부분과 복합재료 파트로 따로 모델링을 하였으며, 8절점 3차원 사각요소(C3D8R)를 활용하여 메시를 형성하여 전처리 작업을 수행하였다. 복합재료의 두께가 얇은 적층판의 경우에는 고전 적층판 이론을 이용하여 적층판 물성을 쉽게 계산하여 사용할 수 있으나 수소 압력용기와 같이 복합재료가 두꺼운 모델의 경우 두께 방향의 영향으로 고전 적층판 이론을 이용한 경우 정확한 응력 분포를 얻을 수 없다. 따라서 복합재료의 이방성 물성을 정확하게 구현하고자 요소별 국부 좌표계를 활용하였으며, ABAQUS 내에서 제공하는 Composite Lay-up 기능을 활용하여 각 플라이별 모델링을 수행하였다. 라이너와 복합재료 각 파트에 사용된 요소는 117,936개, 241,380개이고, 절점 수는 197,280개, 370,008개이다. 수소 압력용기의 유한요소 모델의 전체적 형상은 Fig. 1에 제시하였다.

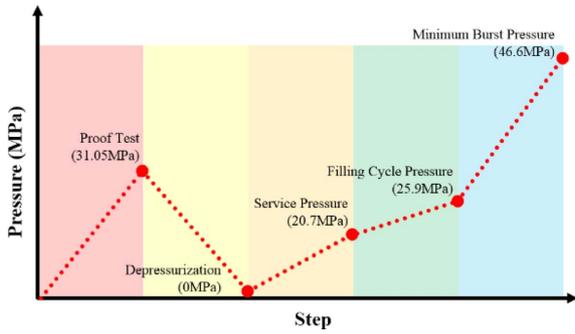


Fig. 2. Loading history

2.2 하중 및 경계조건

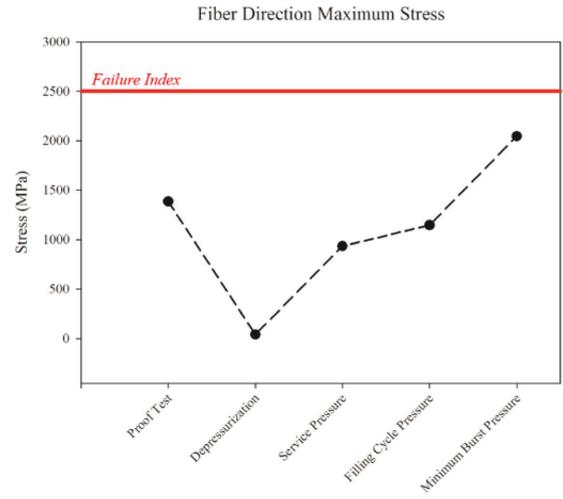
본 논문에서 수행하는 유한요소해석의 목적은 실험에 앞서 국제 규격에서 제공하는 하중 조건 해석을 통해 FBG 센서를 삽입할 수소 압력용기의 취약점을 선정하는 것이다. 각 규격의 하중 조건을 부여하여 해석을 수행하기 위해 EIHP II[9]와 ISO 15869[10] 같은 연료전지 차량용 국제 규격을 참고하여 하중을 부여한 후 Type IV 수소 압력용기의 취약점을 선정하였다. 본 해석에 사용한 내압 조건은 Fig. 2와 같다.

수소 압력용기는 필라멘트 와인딩 과정과 경화 과정을 통해 라이너와 복합재료가 접착된 상태로 제작이 된다. 하지만 Proof Test 과정에서 사용압력의 1.5배를 가압함과 동시에 잉여수지 층이 파손되어 라이너와 복합재료는 단순한 접촉 조건을 갖는 상태로 변화한다. 이 후 라이너는 복합재료의 와인딩된 섬유 장력으로 결속된 상대 운동을 하는 상태이기 때문에 선행연구자들이 사용한 완전 접착 상태와는 차이가 있다. 본 논문에서는 라이너의 외면과 복합재료의 내면에 상대 거동을 모사할 수 있도록 접촉 조건을 부여하여 해석을 수행하였다. 해석 시간의 단축을 얻고자 전체 용기의 절반만 모델링을 수행하였으며, 전체 용기 해석과 동일한 해석 결과를 얻고자 면대칭 경계조건을 부여하여 해석을 수행하였다.

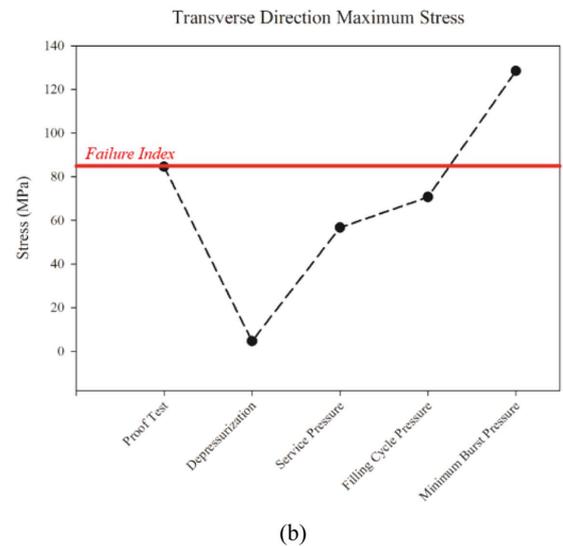
2.3 유한요소해석 결과

유한요소해석 수행 결과 Type IV 수소 압력용기 시제품의 각 플라이 별 면내 응력 분포를 확인할 수 있다. 해석을 통해 최대 응력이 걸리는 플라이는 섬유방향과 섬유 직교 방향으로 각각 7.3°와 11.1°로 와인딩 된 헬리컬(Helical) 플라이였다. 두 와인딩 플라이의 응력 값은 Fig. 3에 표기하였다.

Fig. 3(b)에서 확인할 수 있듯이 섬유 직교방향 응력 분포를 분석해 보았을 때 사용압력의 1.5배에 해당하는 극한 시험(Proof test = service pressure × 1.5) 압력에서 파괴지수(Failure index)에 매우 근접함을 확인할 수 있다. 본 논문의 유한요소해석에서는 재료의 파손을 반영하지 못하기 때문에 극한 시험보다 큰 내압 해석의 결과 대신 사용압력(Service pressure)과 충전 사이클 압력(Filling cycle pressure) 해석 결과를 활용하여 FBG 센서를 삽입 할 수소 압력용기의 취약



(a)



(b)

Fig. 3. Maximum stress in helical winding layers (a) fiber direction, (b) in-plane transverse direction

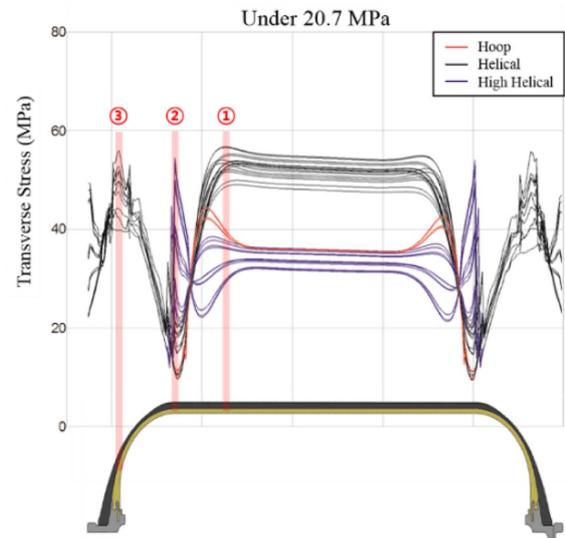


Fig. 4. FBG Sensor insertion points

점을 선정하였다. 총 세 곳의 취약부를 선정하였으며, 모든 취약부는 헬리컬(Helical), 고 헬리컬(High helical) 와인딩 패턴에 속해있다. 센서 삽입부로 선정된 세 취약부의 응력값은 거의 유사하였다(Fig. 4).

3. 실험

3.1 시제품 제작 및 센서 신뢰성 확인

Type IV 수소 압력용기 시제품의 제작은 관련 업체의 필라멘트 와인딩 기기를 활용하여 제작을 수행하였다. 제작을 수행하기에 앞서 FBG 센서의 신뢰성을 확인하고자 시편 실험을 수행하였다. FBG 센서의 경우 섬유방향에 따라 삽입하는 것이 일반적인 사용법이지만 압력용기와 같이 복잡한 패턴을 갖는 복합재료 구조물의 경우 섬유방향을 따라 삽입할 시 주변 플라이에 의해 왜란이 발생하여 센서의 신뢰성에 문제를 일으킬 수 있다. 본 논문에서는 Kuang 등 [11]의 선행 연구를 참고하여 FBG 센서의 비직교(Off-Axis) 방향 삽입이 유효함을 확인하였으며, 실험적으로 유효성을 판단하고자 임의의 각도를 가지는 대칭적층판 인장 시편에 비직교 방향으로 FBG 센서 삽입 및 변형률 센서(Strain gauge), 신장계(Extensometer)를 부착한 후 결과값을 비교하여 센서의 신뢰성을 확인하였다.

이 후 수소 압력용기 시제품 제작 공정에서 FBG 센서를 비직교 방향으로 삽입하였다. 유한요소해석에서 얻은 센서 삽입 위치에 정확하게 FBG 센서를 삽입하고자 와인딩 공정 진행 중에 삽입을 수행하였다. 세 곳의 위치에 각 두 개의 센서를 삽입하여 총 여섯 개의 FBG 센서를 삽입하였으며, 용기의 축대칭 특성을 활용하여 동일한 위상의 반대편

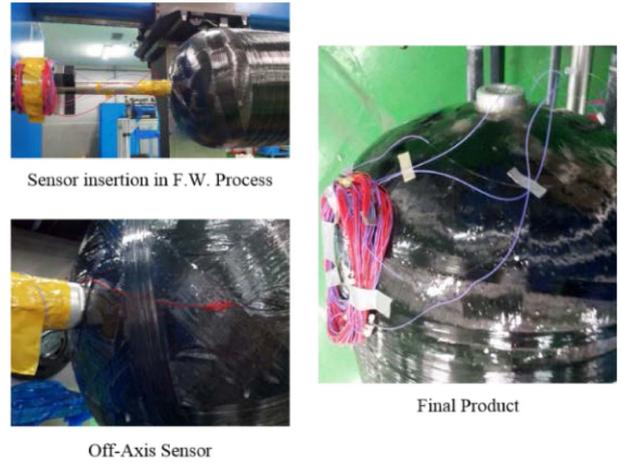


Fig. 6. FBG sensor installation during the fabrication process of a Type IV pressure vessel

위치에 센서를 나누어 삽입하였다. 총 여섯 개의 센서를 삽입하여 실험을 수행할 예정이었으나 경화과정 중 2번 포인트에서 두 개 센서의 손실과 충격 가압 실험 후 한 개 센서의 파손이 발생하여 결과적으로 1번 포인트에 한 개, 3번 포인트에 두 개, 총 세 개의 센서가 완성품에서 작동하였다.

3.2 가압 실험

시제품 제작 및 센서 삽입 후 Type IV 수소 압력용기의 가압 실험을 진행하였다. 가압 실험에는 유압을 이용하였으며, 사용압력을 부여할 수 있도록 가압 조건은 0~22 MPa로 설정하였다. 실험 도중 폭발할 위험성을 갖고 있기 때문에 수소 압력용기는 1차로 세라믹 파이프에 삽입하였고 2차로 폭발 탱크(Explosion tank)에 넣어 안전성을 확보하여 실험을 수행하였다. 제작된 용기의 안전성을 확보하고자 초기 200 사이클의 피로 시험을 수행한 이후 1000 사이클 동안 가압 실험의 데이터를 확보하였다.

실험결과 FBG 센서가 삽입된 각 포인트에서의 변형률 측정값은 각각 동일한 경향과 유사한 크기가 나타남을 확인할 수 있었다. 돔 부분에서 발생하는 변형률 값의 차이는 센서 장착 과정에서 발생한 오류에 의한 것으로 판단된다. 돔 부분에서의 변형률은 실린더 부분의 변형률보다 일반적으로 크며, 이를 해석 결과와 비교하였다. FBG 센서의 경우 센서의 삽입 방향으로 변형률을 측정하기 때문에 섬유방향, 섬유 직교방향의 변형률을 확인하기 위해 식 (1)의 변형률 변환행렬을 이용해 실험값을 섬유방향 변형률 값으로 변환하였다[12].

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$\varepsilon_{1,2}, \gamma_{12}$: ply strain, $\varepsilon_{x,y}, \gamma_{xy}$: laminate strain, $m: \cos\theta, n: \sin\theta$

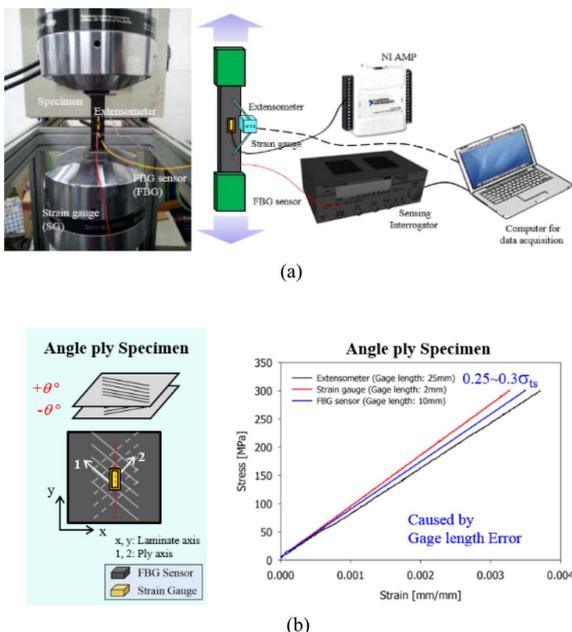


Fig. 5. FBG sensor reliability; (a) Tensile test, (b) Sensor reliability

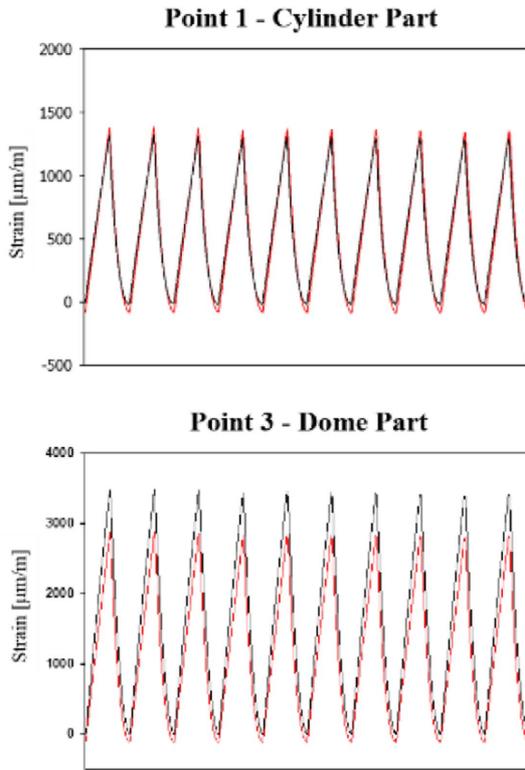


Fig. 7. Strain data during pressurization experiment

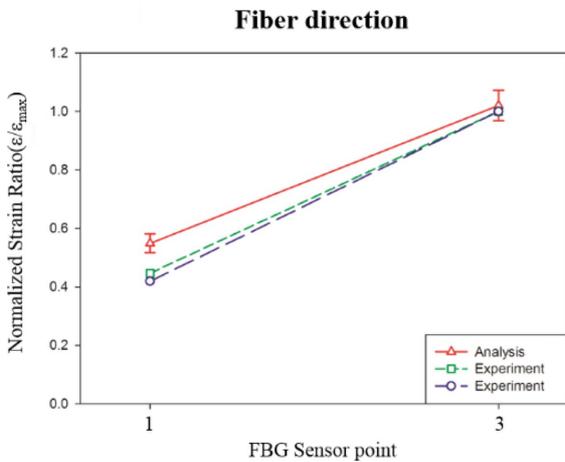


Fig. 8. Comparison of strains between FEA and experiment results

FBG 센서 삽입부에서의 결과는 실험과 해석이 동일한 경향을 보였으며, 원주방향(Hoop direction)의 적층 패턴이 없어 적층판 강성이 실린더 부분에 비해 약한 돔 부분에서 변형률이 크게 발생하는 경향을 보였다(Fig. 8).

3.2 충격 시험

가압실험을 수행한 후 동일한 용기를 이용하여 ISO 15869에서 제시하는 진자형(Pendulum type) 충격실험을 반복하여 수행하였다. 충격 시험은 75 J의 에너지량을 가할 수 있

는 높이로 진자의 높이를 조정하여 충격을 부가한 후 1000 사이클 동안 피로 실험을 수행하는 순서로 진행하였으며, 충격은 총 4회를 부가하였다. 실험 진행 절차는 Fig. 9에 정리하였다.

총 4회의 충격 실험을 수행하면서 용기의 건전성을 분석한 결과 충격실험의 횟수에 따라 용기의 충전시간이 증가하는 것을 확인하였다. 각각 1000 사이클의 피로 실험 데이터 중 무작위로 1 사이클을 추출하여 충전시간을 비교한 결과 충격이 없는 경우 용기의 충전시간은 8.8 sec이며, 1회와 2회의 충격이 가해진 용기의 충전 시간은 0.2 sec 증가한 9 sec로 변화하였고 3회와 4회의 충격이 가해진 경우 기존에 비해 0.6 sec가 증가한 9.4 sec로 충전 시간이 증가하였다. 각 피

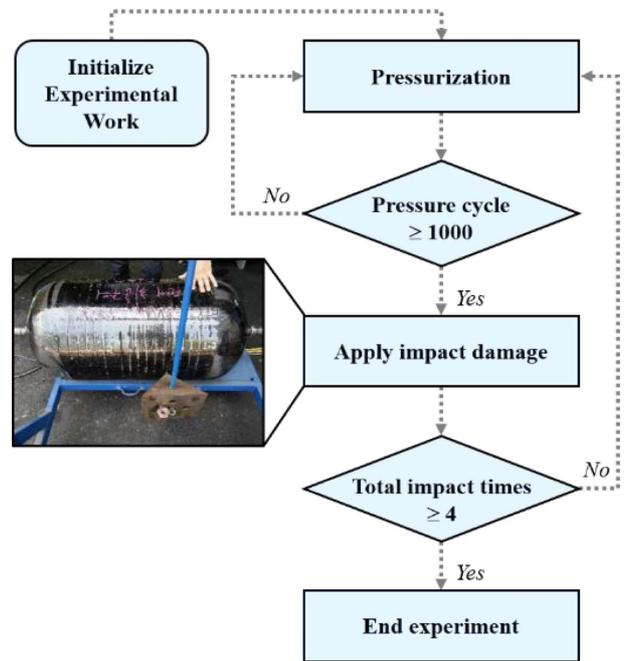


Fig. 9. Impact experimental work procedure

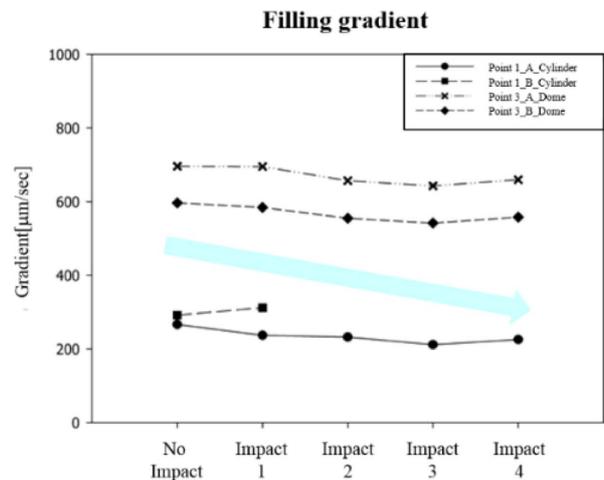


Fig. 10. Filling gradient trends

로 실험 마다 충전률(Filling gradient)을 분석한 결과 전체적으로 충전률이 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 FBG 센서 삽입부인 Point 1과 Point 3에서 모두 동일하게 나타났다. 충격하중으로 발생한 손상에 의해 구조물의 전체적인 구조 강성의 저하가 발생하여 변형량에 변화가 발생하고 이로 인해 가압 목표인 22 MPa에 도달하는 시간이 증가한 것으로 분석된다(Fig. 10).

4. 결 론

본 논문에서는 Type IV 수소 압력용기 시제품에 FBG 센서를 삽입하여 충격하중에 대한 용기의 구조 건전성 변화를 분석하였다. FBG 센서를 삽입할 위치를 선정하기 위하여 플라임 모델링 기법과 국부 좌표계 적용을 통하여 복합재료의 이방성 물성을 정확하게 구현한 해석을 수행하였다. 해석을 통해 실린더 부, 실린더와 돔의 연결부, 돔 부, 총 세 개의 취약부를 선정하였으며, 취약부는 모두 헬리컬과 고 헬리컬 와인딩에 속한 복합재료부인 것을 확인하였다. 선정된 취약부에 센서를 삽입하기에 앞서 참고문헌 조사와 FBG 센서 및 변형률 게이지와 신장계를 동시에 부착한 실제 시편실험을 통해 FBG 센서를 비직교 방향으로 삽입 시 FBG 센서의 측정 신뢰성을 확인하였다. 필라멘트 와인딩 특성상 $\pm\theta$ 로 와인딩이 수행되기 때문에 이 후 실제 용기에도 동일한 방식으로 해당 와인딩 층의 비직교 방향으로 삽입을 수행하였다. 센서 삽입 후 실험을 수행한 결과 비충격 가압 실험에서 변형률 경향은 해석과 동일한 거동을 보였다. 충격 가압 실험에서는 충격 횟수가 증가할수록 수소 압력용기의 충전시간이 증가 하였으며, 이는 충격 하중으로 인한 구조 건전성 저하에 의한 결과로 분석된다. 각 충격실험에서의 피로 실험 데이터 중 무작위로 결과를 추출하여 충전률을 분석한 결과 전체적으로 감소하는 경향이 보임을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 용기에 이상이 발생할 수 있음을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구결과는 수소 압력용기의 구조물 건전성 모니터링에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 현대자동차그룹 산학협동 연구과제 NGV 사업의 연구비 지원으로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Son, D.S. and Chang, S.H., "Evaluation of Modeling Techniques for a Type III Hydrogen Pressure Vessel (70 MPa) Made of an Aluminum Liner and a Thick Carbon/epoxy Composite for Fuel Cell Vehicles," Vol. 37, No. 3, 2012, pp. 2353-2369.
2. Son, D.S., Hong, J.H., and Chang, S.H., "Determination of the Autofrettage Pressure and Estimation of Material Failures of a Type III Hydrogen Pressure Vessel by Using Finite Element Analysis," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 17, 2012, pp. 12771-12781.
3. Kim, C.U., Kang, J.H., Hong, C.S., and Kim, C.G., "Optimal Design of Filament Wound Structures under Internal Pressure Based on the Semi-geodesic Path Algorithm," *Composite Structures*, Vol. 67, No. 4, 2005, pp. 443-452.
4. Kang, S.G., Kim, M.G., Kim, C.U., and Kim, C.G., "Development of Optimization Code of Type 3 Composite Pressure Vessels Using Semi-geodesic Algorithm," *Composites Research*, Vol. 21, No. 1, 2007, pp. 1-7.
5. Hong, J.H., Han, M.G., and Chang, S.H., "Safety Evaluation of 70 MPa-capacity Type III Hydrogen Pressure Vessel Considering Material Degradation of Composites due to Temperature Rise," *Composite Structures*, Vol. 113, No. 2014, pp. 127-133.
6. Hu, J., Chen, J., Sundararaman, S., Chandrashekhara, K., and Chernicoff, W., "Analysis of Composite Hydrogen Storage Cylinders Subjected to Localized Flame Impingements," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 11, 2008, pp. 2738-2746.
7. Han, M.G. and Chang, S.H., "Failure Analysis of a Type III Hydrogen Pressure Vessel under Impact Loading Induced by Free Fall," *Composite Structures*, Vol. 127, No. 2015, pp. 288-297.
8. Hong, J.H., Yoo, S.H., and Chang, S.H., "Design and Performance Evaluation of Carbon Fiber/Epoxy Composite-aluminum Hybrid Wheel for Passenger Cars," *Composites Research*, Vol. 26, No. 6, 2013, pp. 386-391.
9. GRPE Information Group: Hydrogen/Fuel Cell Vehicles. Draft ECE Compressed Gaseous Hydrogen Regulation, EIHP II; 2003.
10. ISO 15869. Gaseous Hydrogen and Hydrogen Blends - Land Vehicle Fuel Tank; 2009.
11. Kuang, K., Kenny, R., Whelan, M., Cantwell, W., and Chalker, P., "Embedded Fibre Bragg Grating Sensors in Advanced Composite Materials," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 10, 2001, pp. 1379-1387.
12. Lee, D.G., Jeong, M.Y., Choi, J.H., Cheon, S.S., Chang, S.H., and Oh, J.H., "Composite Materials," *Hongrungs Publishing Company*, 2007.