

# 유한요소해석을 이용한 복합소재의 기계적 물성 평가 연구

이용우<sup>1\*</sup>, 김현준<sup>2</sup>

<sup>1</sup>신한대학교 미래자동차공학과, <sup>2</sup>한국교통안전공단 첨단자동차검사연구센터

## Study on the Mechanical Property Evaluation for Composite Materials using Finite Element Analysis

Yongwoo Lee<sup>1\*</sup>, Hyunjun Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Department of Automotive Engineering, Shinhan University

<sup>2</sup>Advanced R&D Department, Korea Transportation Safety Authority

**요약** 수소차에 사용되는 압력 용기는 고압 조건을 견딜 수 있을 만큼 견고해야 한다. 따라서, 압력용기는 강도적 특성이 우수한 복합소재를 사용하여 제작된다. 이러한 복합소재는 제조특성에 따라 다양한 기계적 물성을 가지게 된다. 수소 압력용기의 기본 설계 시 고려해야 할 복합소재의 기계적 특성은 기존 연구를 통해 조사된 바 있으나, 주로 시험 평가에 의존하고 있어 다양한 조건에서의 기계적 특성을 예측하는 것은 어려운 실정이다. 본 연구에서는 복합소재에 대해 각각 ASTM D 3039와 D 2344에 따라 인장 및 굽힘 시험을 수행하고, 시험 결과와의 상관도 검토를 통해 유한요소 모델링 및 해석을 수행하였다. 해석 결과 적층 각도가 증가함에 따라 탄성계수는 점차 감소하는 반면, 전단계수는 점차 증가하여 90 도 각도를 전후로 소폭 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구는 적층 각도에 따른 복합소재 모델링 및 물성 예측 결과를 제시하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 향후 적층조건을 고려한 복합소재 사용 부품의 설계 및 손상평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** Pressure vessels used in hydrogen vehicles need to be robust enough to withstand high-pressure conditions. Therefore, hydrogen pressure vessels are constructed using composite materials with high strength properties. These composites can have a wide range of mechanical properties depending on their manufacturing characteristics. Previous studies have investigated the mechanical properties of composite materials that need to be considered during the basic design of pressure vessels, but predicting mechanical properties under various conditions is challenging as they are mainly based on test evaluations. In this study, we performed tensile and bending tests on composite materials according to the ASTM D 3039 and D 2344 standards and conducted finite element modeling based on correlation analysis of the test results. The analysis revealed that as the stacking angle increased, the elastic modulus and shear modulus varied depending on the direction. As the stacking angle increased, the elastic modulus gradually decreased, while the shear modulus gradually increased and showed a slight decrease around the angle of 90 degrees. This study provides prediction results for composite material modeling and property changes according to the stacking angle. Based on this research, it is anticipated that the results could be utilized for the design and damage assessment of composite material components in future studies that take stacking conditions into consideration.

**Keywords** : Composite Material, Finite Element Method, Mechanical Property, Pressure Vessel, Stacking Angle

본 논문은 본 연구는 국토교통부 수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발 사업의 연구비지원(RS-2020-KA158067)에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Yongwoo Lee(Shinhan Univ.)

email: ywlee@shinhan.ac.kr

Received July 7, 2023

Revised August 16, 2023

Accepted September 1, 2023

Published September 30, 2023

## 1. 서론

수소차량은 700 bar 압력의 수소를 압력용기에 저장하고 운행함에 따라 누출 및 폭발에 의한 사고가 발생하지 않도록 하기 위한 안전 설계가 필요하다. 이에 따라 수소차량용 압력용기는 기존의 강(steel)대신 강도가 높은 복합소재를 사용하고 있다. 이러한 압력용기는 초기 설계단계부터 운용 중 발생하는 성능 저하 요인을 고려하여 평가되어야 한다. 특히, 압력용기는 복합소재로 제작되어 육안으로 결함을 확인하기 어려운 경우도 있으며, 내부 결함 발생 시 안전 여부를 판단할 수 있어야 한다. 그러나 수소 압력용기는 제조사별로 제작 방법이 다르기 때문에, 제조사의 용기를 제외한 다른 모델에 대한 예측 평가는 어려운 상황이다. 또한, 수소 압력용기에 대한 안전성 평가 연구[1-4]는 시험을 기반으로 하기 때문에 설계 단계에서 필수적으로 검토해야 하는 해석적 예측 자료로 활용하는데 있어서 한계가 있다. 또한, 해석적 방법을 사용한 평가 연구도 있었는데, Roh et al.[5]은 700 bar 압력 용기에서 안전성을 고려하여 내압 조건에 대한 해석을 통해 압력용기의 최적화 연구를 수행하였다. 그러나 해당 연구에서는 특정한 압력용기를 대상으로 하며, filament winding 기법으로 제작된 용기의 적층 방향과 조건에 대한 고려가 되지 않았다. 또한, Leh et al.의 연구[6]에서는 700 bar 내압 조건을 가진 수소 압력 용기 시편에 대한 파손 기구 연구를 수행하였다. 그러나 해당 연구에서는 단일한 대표 물성(bulk material properties)으로 해석이 이루어져 제작 시 발생하는 적층 특성과 물성 변화에 대한 부분은 고려되지 않았다. 관련 연구로는 Kim et al.[7]와 Hu et al.[8]의 연구에서는 CFRP 적층판에 대한 응력 특성과 Tan-Cheng의 파손 기준, 그리고 J-integral을 활용하여 파괴 강도 특성에 대한 연구를 수행하여 손상 여부에 대한 방법적 특성을 제시했으나, 재료의 다양한 특성에 대한 연구는 제시되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 시편 시험을 수행하고 유한요소 해석과 상관도 분석을 통해 유한요소 모델을 검증하고 적층 특성을 고려한 기계적 물성을 예측하였다.

## 2. 본론

연구는 복합소재의 평가 기준인 ASTM D 3039[9]와 D 2344[10]에 따라 진행하였다. ASTM D 3039는 인장 방향으로 하중을 가하며, D 2344는 굽힘 하중을 가하여

복합소재의 기계적 물성을 평가하는 방법이다. ASTM D 3039는 주로 섬유(fiber) 배열에 대한 영향이 주요하게 작용하며, D 2344는 굽힘에 의한 기지(matrix)의 층간 분리(delamination)가 주요한 영향을 미친다. 연구는 시편 시험을 수행하고 유한요소 해석과 상관도 분석을 통해 유한요소 모델을 검증하고, 적층 조건에 대한 기계적 물성을 예측하였다.

### 2.1 시편 시험 평가

Fig. 1은 ASTM의 시편의 크기와 형상을 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 D 3039의 시편 형상으로 인장 강도에 대한 평가를 수행하며, (b)는 D2344의 시편 형상으로 전단 강도에 대한 평가를 수행하게 된다.

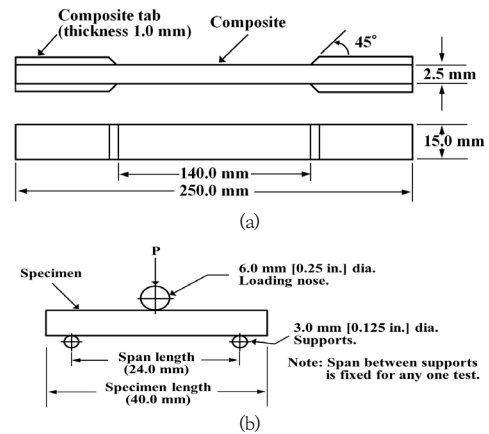
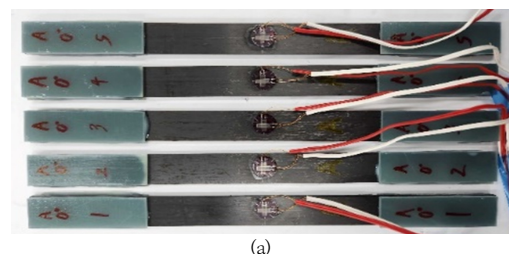


Fig. 1. Figure of test specimen of ASTM standard  
(a) Tensile strength specimen (b) Shear strength specimen

인장시험은 5개의 시편에 대하여 수행하였으며, 시편의 중심의 앞뒤에 시편의 길이방향 및 수직방향의 변형률 게이지(strain gauge)를 접착하여 시험을 수행하여 길이방향 및 수직방향의 변형률을 측정하였다. 시편의 적층각도는 0°이며 두께 2.5 mm에 대하여 63개 층을 적층하여 제작하였다. 인장시험의 속도는 2.0 mm/min으로 하였다.



(a)

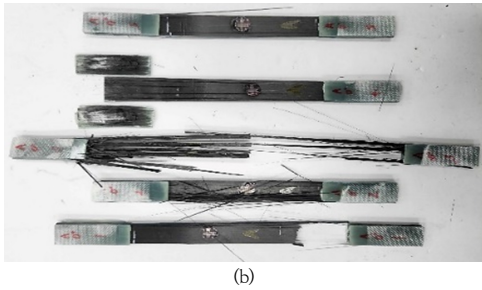


Fig. 2. Figure of specimens for tensile strength test  
(a) Before test (b) After test

시편에 대한 인장시험 전후의 사진은 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 길이방향의 섬유 끊김에 의한 파손이 나타났다. 각각의 평가된 물성은 Table 1과 같이 각각의 시편에 대한 물성 값 및 평균값이 나타나 있다.

Table 1. Material properties of tensile test

No.	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
1	1130	104	1.05	0.30
2	1100	105	1.00	0.34
3	1071	110	0.98	0.30
4	1190	105	1.10	0.34
5	1296	104	1.21	0.35
Avg.	1157	105	1.07	0.33

굽힘 시험은 7개의 시편에 대하여 수행하였으며, ASTM D 2344에 따라 하단부에 3.0 mm의 원통(cylinder) 형상 막대를 시편의 중심부에서 양측으로 12.0 mm 지점에 위치한 후 시편의 중심에 직경 6.0 mm의 원통형상의 강봉에 수직하중을 부여하여 시험 평가를 수행하였다. 시험 속도는 2.0 mm/min으로 하였다. Fig. 3은 시험 전 후의 시편의 사진을 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 원통 형상의 지그(jig)의 하중에 의하여 압흔 손상이 발생함을 볼 수 있다.

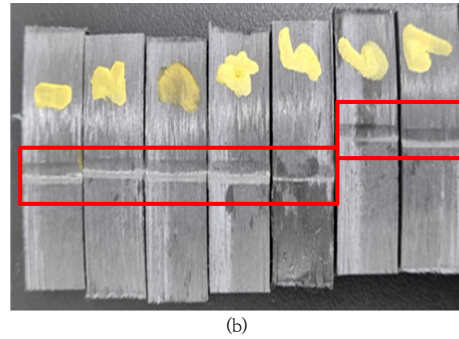
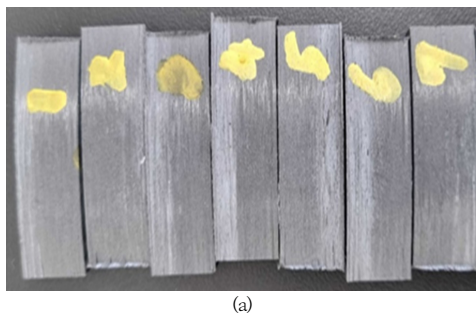


Fig. 3. Figure of specimens for shear strength test  
(a) Before test (b) After test

ASTM D 2344에 의한 전단 강도 평가 결과는 Table 2에 나타나 있으며, 파단시까지 최대 전단 응력은 55.4 MPa가 나타났다.

Table 2. Material properties of shear strength test

No.	1	2	3	4	5	6	7	Avg.
Max. Shear Stress (MPa)	55.2	55.6	56.8	54.3	54.7	55.5	55.9	55.4

## 2.2 유한요소 해석

유한요소 해석은 Fig. 4와 같은 절차에 따라 수행되었다. 유한요소 모델링 시 섬유와 기지에 대해 축방향의 물성 및 파단 값을 입력하고 각 섬유의 적층 방향별 복합소재의 방향성을 부여하였다. 또한, 손상이 발생할 경우 내부 섬유 또는 기지의 파단에 대한 영향 및 강도 저하를 고려하기 위해 파손에 대한 손상을 모델링하였다.

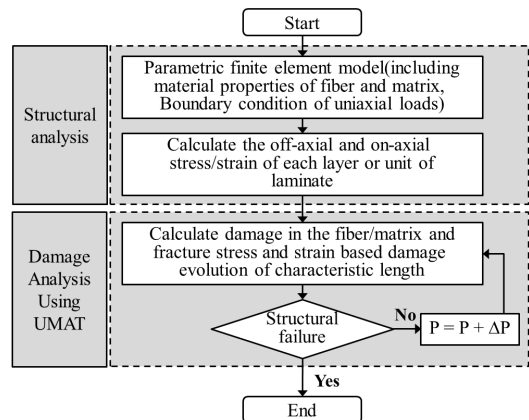


Fig. 4. Scheme of the finite element analysis using in this study

### 2.2.1 손상연계 물성 모델링

파손에 대한 물성 변이 모델링은 Hangenbeek et.al[11]의 손상 모델을 ABAQUS[12]의 user subroutine을 사용하였다. 손상은 섬유와 기지로 구분하여 계산된다. Eq. (1)은 섬유 손상 기준(fiber damage criterion)으로 식이 만족하면 손상이 발생된다.

$$f_f = \sqrt{\frac{\epsilon_{11}^{f,t}}{\epsilon_{11}^{f,c}} \epsilon_{11}^2 + (\epsilon_{11}^{f,t} - \frac{\epsilon_{11}^{f,t^2}}{\epsilon_{11}^{f,c}}) \epsilon_{11}} > \epsilon_{11}^{f,t} \quad (1)$$

$$\epsilon_{11}^{f,t} = \frac{\sigma_L^{f,t}}{C_{11}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{11}^{f,c} = \frac{\sigma_L^{f,c}}{C_{11}} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma$ 는 응력(stress)을,  $C_{ij}$ 는 미손상시 강성 행렬(elasticity matrix in undamaged state)을 의미한다. 또한, 이에 따른 섬유 손상값(fiber damage variable)  $d_f$ 는 Eq. (4)와 같으며,  $L_c$ 는 특성길이(characteristic length associate with the material point)를,  $G_f$ 는 섬유의 전단탄성계수(shear modulus of fiber)를 의미한다.

$$d_f = 1 - \frac{\epsilon_{11}^{f,t}}{f_f} e^{-C_{11} \epsilon_{11}^{f,t} (f_f - \epsilon_{11}^{f,t}) L^c / G_f} \quad (4)$$

또한, 기지 손상 기준(matrix damage criterion)은 Eq. (5)에 나타내고 있다.

$$f_m = \sqrt{\frac{\epsilon_{22}^{f,t}}{\epsilon_{22}^{f,c}} \epsilon_{22}^2 + (\epsilon_{22}^{f,t} - \frac{\epsilon_{22}^{f,t^2}}{\epsilon_{22}^{f,c}}) \epsilon_{22} + (\frac{\epsilon_{22}^{f,t}}{\epsilon_{12}^{f,c}})^2 \epsilon_{12}^2} > \epsilon_{22}^{f,t} \quad (5)$$

$$\epsilon_{22}^{f,t} = \frac{\sigma_T^{f,t}}{C_{22}} \quad (6)$$

$$\epsilon_{22}^{f,c} = \frac{\sigma_T^{f,c}}{C_{22}} \quad (7)$$

$$\epsilon_{12}^f = \frac{\tau_{LT}^f}{C_{44}} \quad (8)$$

손상기준을 만족하면 기지 손상값(matrix damage value)  $d_m$ 은 Eq. (9)와 같이 나타난다. 여기서,  $G_m$ 은 기지의 전단탄성계수(shear modulus of matrix)를 의미한다.

$$d_m = 1 - \frac{\epsilon_{22}^{f,t}}{f_m} e^{-C_{22} \epsilon_{22}^{f,t} (f_m - \epsilon_{22}^{f,t}) L^c / G_m} \quad (9)$$

계산된 손상 값을 포함 하는 응력  $\sigma$ 는 Eq. (10)과 같이 계산된다.

$$\sigma = C_d \epsilon \quad (10)$$

여기서, 손상에 따른 강성행렬  $C_d$ 는 다음과 같다.

$$C_d = \begin{bmatrix} (1-d_f)C_{11} & (1-d_f)(1-d_m)C_{12} & (1-d_f)C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & (1-d_m)C_{22} & (1-d_m)C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & symmetric & & (1-d_f)(1-d_m)C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix}$$

### 2.2.2 유한요소 모델링

유한요소 모델은 섬유와 기지에 대한 적층 특성 및 방향을 고려하기 위해 적층 두께 40  $\mu m$ 를 기준으로 모델링되었다. 적층 조건은 층별로 일정한 각도의 차이를 두어 복합소재의 방향성을 부여하였다. 모델은 ASTM D 3039와 D 2344 시험 시편과 동일하게 모델링되었으며, ASTM D 3039 모델은 요소수 532,560개, 절점수 560,639개로 구성되었고, ASTM D 2344 모델은 요소수 371,840개, 절점수 390,233개로 구성되었다. 해석은 ABAQUS를 사용하였으며, 사용된 요소는 육면체 C3D8 요소이다. 각 모델은 Fig. 5에 나타나 있다.

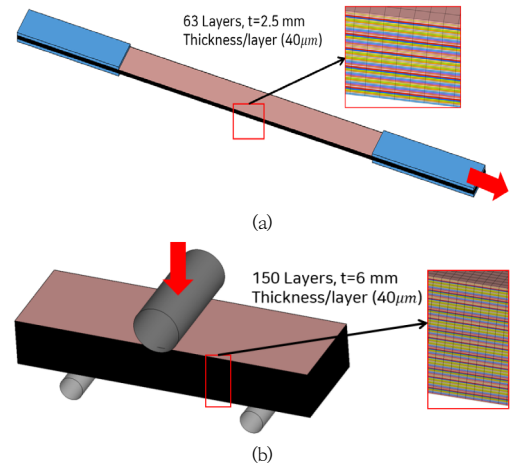


Fig. 5. Finite element model  
(a) Tensile strength specimen (b) Shear strength specimen

해석에 사용된 물성은 Table 3에 나타나 있다. Table 3의 물성은 수소압력용기에 사용하는 120  $\mu m$  두께의

프리프레그(prepreg) 물성으로 시편 제조사로부터 제공되었다.

Table 3. Mechanical properties of carbon fiber composite materials using in FE model

Properties	Value
Elastic modulus in fiber direction	105 GPa
Elastic modulus in transverse direction	8.2 GPa
Shear modulus in 1-2 and 1-3 plane	3.5 GPa
Shear modulus in 2-3 plane	3.5 GPa
Poisson's ratio	0.33
	0.418
Tensile strength in fiber direction	1157 MPa
Compressive strength in fiber direction	920 MPa
Tensile strength in transverse direction	61 MPa
Compressive strength in transverse direction	130 MPa
Shear strength in 1-2 and 1-3 plane	70 MPa
Shear strength in 2-3 plane	40 MPa

### 2.2.3 유한요소 모델 검토

유한요소 모델의 검증을 위해 시험 평가 결과와 상관도 분석을 수행하였다. 시험에 사용된 시편의 적층 각도와 같이 설정하여 모델링하고 각 조건에 따른 해석을 수행하였다. Fig. 6은 인장 시험에 대한 응력-변형률 선도를 나타내고 있으며, Fig. 7은 굽힘 시험에 대한 힘-변위 선도를 보여주고 있다. Fig. 6에서 시험과 해석의 결과는 비교적 일치함을 볼 수 있었으며, 해석에 의한 파단 응력은 1144 MPa이고 시험 결과는 1157 MPa로 비교적 유사한 경향을 보였음을 확인할 수 있었다.

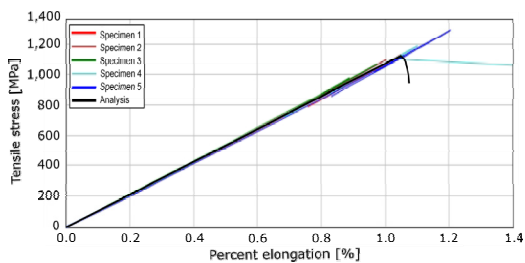


Fig. 6. Stress-strain curve specimens for tensile test

또한, Fig. 7에서 전단 방향의 파단 응력은 시험의 평균은 55.4 MPa이고 해석 결과는 55.7 MPa로 거의 유사한 결과를 보였음을 확인하였다. 해석에 의한 결과는 Table 4와 같이 나타났으며, 시험의 평균값과 비교하여 최대 오차는 4.67%로 해석 모델은 시험과 충분한 정합

성을 가짐을 확인하였다.

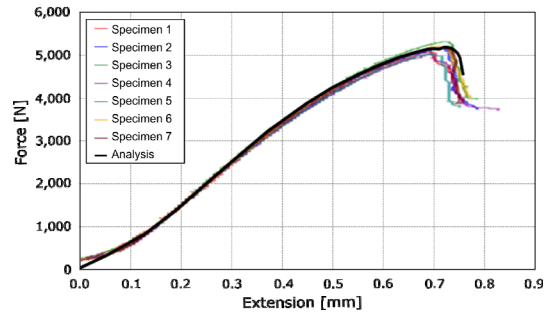


Fig. 7. Force-displacement curve specimens for bending test

Table 4. Correlation of test and analysis results

Results	ASTM D 3039				ASTM D 2344
	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Percent elongation (%)	Poisson's ratio	Max. shear strength (MPa)
Test	1157	105	1.07	0.330	55.4
Analysis	1114	109	1.02	0.327	55.7
Error(%)	-3.72	3.8	-4.7	-0.9	0.5

### 2.2.4 유한요소 해석 결과

유한요소 해석은 적층각도에 따라 수행되었다. Fig. 8은 ASTM D 3039 인장 시험 조건에서 적층 각도별로 파단 시 응력 분포를 보여주고 있다. 해석 결과는 시편 내부의 응력분포 및 손상을 검토하기 위해 대칭면을 기준으로 단면을 포함하여 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 적층각도에 따라 최대 응력과 응력 분포가 다르게 나타난다. 특히 0° 조건에서는 하중 방향과 섬유 방향이 일치하여 응력이 높은 수준까지 나타나며, 45° 조건에서는 파단까지 낮은 응력 분포를 보여준다. 이는 섬유의 방향이 하중 방향과 최대 편차를 가지는 조건으로, 섬유 파단이 아닌 기지에서 파손이 발생하는 것으로 판단된다. 또한, Fig. 9는 물성 모델링 시 정의된 손상값에 대한 분포를 보여주고 있다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 섬유의 방향이 하중방향과의 편차가 적은 경우 섬유에서 손상이 발생함을 알 수 있으며 하중 방향과의 편차가 클수록 기지에 의한 손상에 의한 파단이 나타남을 확인할 수 있었다.

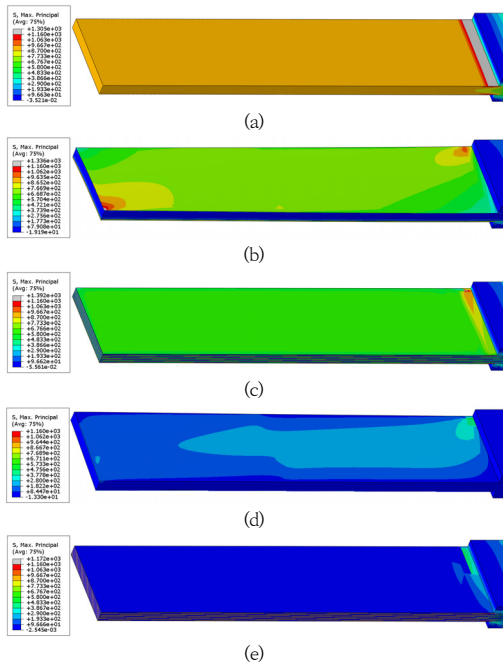


Fig. 8. Distribution of principal stress with respect to stacking angle for ASTM D 3039 condition (a) 0° (b) 15° (c) 30° (d) 45° (e) 60°

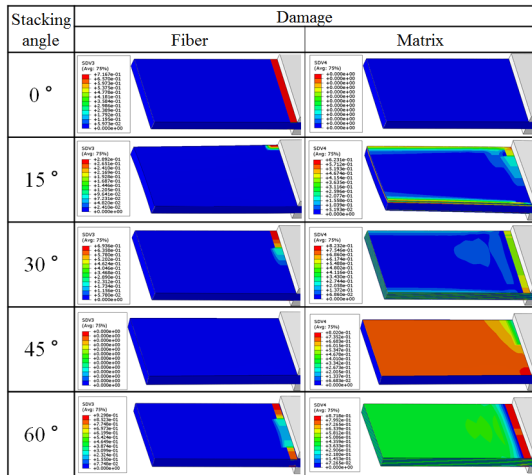


Fig. 9. Distribution of damage with respect to stacking angle for ASTM D 3039 condition

ASTM D 2344 평가에 대한 해석 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 시편의 중심 단면에 대하여 도시하였다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 0° 조건에서는 섬유 방향이 전부 일치하여 단면의 응력 분포가 연속적으로 나타나고 있으나, 30° 조건 및 60° 조건에서는 내부에서 불연속적인 응력 분포를 보여주고 있다. 이는 기지에 비해 섬유의 탄

성계수가 매우 높아 적층 구간 중 섬유가 하중 방향과 편차가 작은 부분에서 높은 응력이 나타남을 알 수 있다.

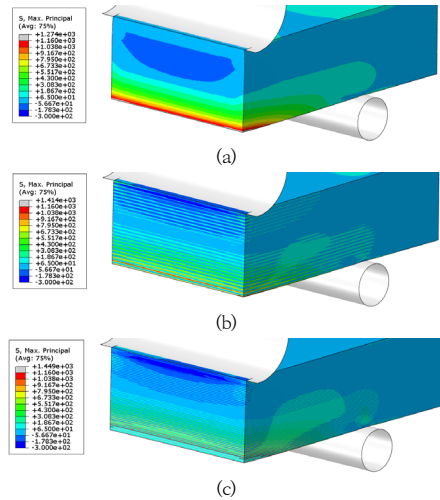


Fig. 10. Distribution of principal stress with respect to stacking angle for ASTM D 2044 condition (a) 0° (b) 30° (c) 60°

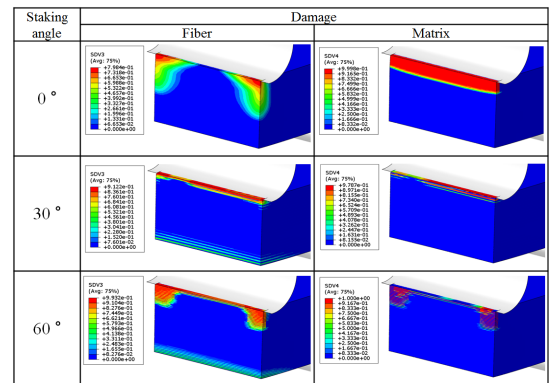


Fig. 11. Distribution of damage with respect to stacking angle for ASTM D 2044 condition

Fig. 11은 ASTM D 2344 평가에서 발생한 손상값에 대한 분포를 보여준다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이, 적층 각도에 따라 손상 기구 및 형태가 다르게 나타남을 볼 수 있다. 특히, 0° 조건에서는 기지 손상이 섬유 손상보다 주요한 손상 기구로 나타나며, 이는 Fig. 3(b)의 시험 결과와도 유사한 형태를 나타냄을 확인할 수 있었다.

### 2.2.5 적층 각도별 기계적 물성 예측

각도별 모델링 및 해석을 수행하여 Fig. 12와 같이 복합소재의 적층각도에 대한 기계적 물성을 예측하였다.

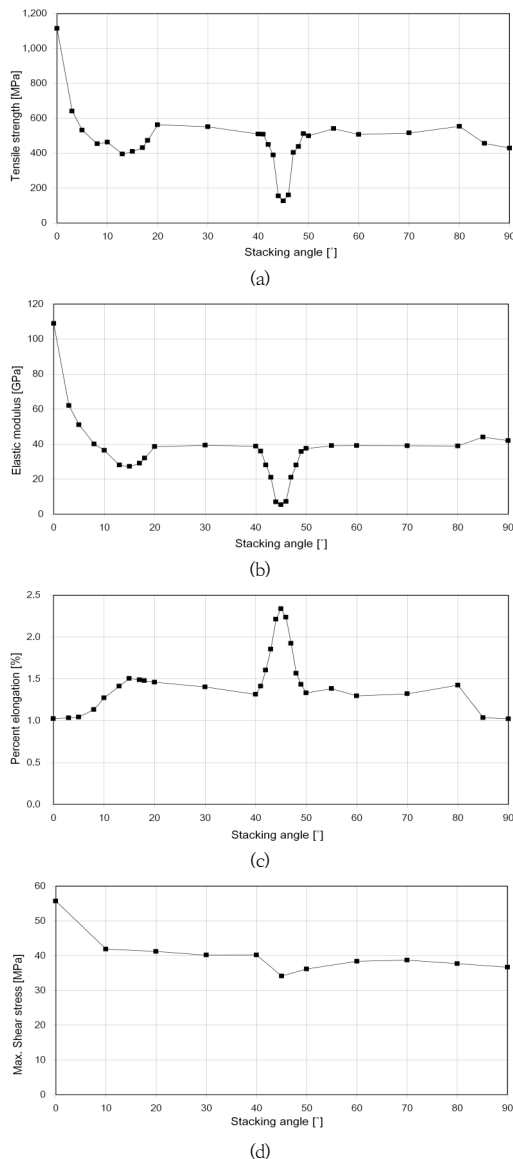


Fig. 12. Material properties of CFRP on stacking angle using FEM

(a) Tensile strength (b) Elastic modulus  
(c) percent elongation (d) Max. shear stress

Fig. 12에서 인장 강도와 탄성계수는 적층 각도가 0°에서 10°까지 변화함에 따라 탄성계수는 급격히 감소하며, 45° 근처에서 최소값을 나타낸다. 이는 인장 하중 방향과 섬유 배열 방향의 각도 차이가 다른 조건에 비해 작아서 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 연신율은 연성이 높은 기지의 영향이 커지므로 취성이 높은 섬유보다는 반대로 나타나며, 45° 근처에서 최대값을 보인다. 최대

전단 응력은 0°를 제외하고 거의 유사한 수준의 응력을 나타내고 있으며, 이는 최대 전단 응력이 주로 기지의 층간 분리에 의한 것이며, 섬유의 적층 방향은 영향이 크지 않기 때문에 판단된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 내압용기에 사용되는 복합소재의 물성 예측을 위해 ASTM D 3039와 D 2344에 따라 시험 평가를 수행하고, 해석 모델 검증을 거쳐 유한요소 해석을 통해 복합소재의 적층 특성에 대한 기계적 물성을 예측하였다. 주요 수행 결과와 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) ASTM D 3039와 D 2344에 따라 시험 평가를 수행하고 유한요소 해석 모델링을 통해 도출된 기계적 물성을 검토하였다. 유한요소 모델은 파손에 대한 물성 변이 모델을 손상 평가 기준과 연계하여 모델링되었다. 시험과 연계한 분석 결과, 최대 오차는 4.7% 이내로 해석 모델이 충분한 상관도를 가짐을 확인하였다.
- 2) 적층 각도별 모델링 후 해석을 통해 예측한 결과, 인장 강도와 탄성계수는 적층 각도가 0°에서 10°까지 변화함에 따라 탄성계수는 급격히 감소하며, 45° 근처에서 최소값을 나타내고, 연신율은 45° 근처에서 최대값을 보였다. 또한, 최대 전단 응력은 0°를 제외하고 거의 일정한 수준의 응력을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

향후, 본 연구 결과를 바탕으로 적층조건을 고려한 복합소재 압력용기의 설계 및 손상평가와 연계한 연구를 수행하고자 한다.

### References

- [1] J. B. Kim, K.W. Jung, D.C. Choi, C. H. Kim, Y. Kim, "Study on Phased Array Ultrasonic Testing Technique During Repair of Carbon Steel Plate using CFRP Materials", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 41, No. 2, pp.126-132, Apr. 2021.
- [2] J. R. Lee, H. Jeong, T. T. Chung, H. Shin, J. Park, "Damage Visualization of Filament Wound Composite Hydrogen Fuel Tank Using Ultrasonic Propagation Imager", *Composites Research*, Vol.28, No. 4, pp.143-147, Apr. 2015.

[3] D. Wang, B. Liao, C. Hao, A. Wen, J. Zheng, P. Jiang, C. Gu, P. Xu, Q. Huang, "Acoustic emission characteristics of used 70 MPa type IV hydrogen storage tanks during hydrostatic burst tests", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 23, pp. 12605-12614, Mar. 2021.

[4] R. Gutkin, C. J. Green, S.Vangrattanachai, S. T. Pinho, P. Robinson, P. T. Curtis, "On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 25, No. 4, pp. 1393-1407, May. 2011.

[5] H.S. Roh, T.Q. Hua, R.K. Ahluwalia, "Optimization of carbon fiber usage in Type 4 hydrogen storage tanks for fuel cell automobiles", *International journal of Hydrogen Energy*, Vol.38, No. 29, pp.12795-12802, Sep. 2013.

[6] D. Leh, P. Saffre, P. Francescato, R. Arrieux and S. Villalonga, "A progressive failure analysis of a 700-bar type IV hydrogen composite pressure vessel", *International Journal of Hydrogen energy*, Vol. 40, No. 38, pp 13206-13214, Oct. 2015.

[7] S. Y. Kim, H. S. Park, M. S. Kang, W. H. Lee, J. H. Choi, J. M. Koo, C. S. Seok, "Evaluation of Failure Strength of Woven CFRP Composite Plate Subject to Axial Load by Tan-Cheng Failure Criterion", *Transactions of the KSME A*, Vol. 33, No. 4, pp.360-365, Apr. 2009.

[8] J. Hu, F. Liu, Q. Duan, G. Cheng, Z. Zhang, "Failure analysis based on J-integral values: A case study of hydrogen blistering defect", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, pp.924-932, Apr. 2011.

[9] ASTM International, "ASTM D3039/D3039M-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", West Conshohocken, PA, 2014.

[10] ASTM International, "ASTM D2344/D2344M Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates", ASTM: West Conshohocken, PA, 2014.

[11] Hagenbeek, M., C. Van Hengel, O. J. Bosker and C. A. Vermeeren, "Static Properties of Fibre Metal Laminates", *Applied Composite Materials*, vol. 10, pp. 207-222, 2003.

[12] Dassault Systems, Simulia, User's Manuals for ABAQUS, Ver.6.12, 2012.

이 용 우(Yongwoo Lee)

[정회원]



- 2005년 8월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 기계공학과 (공학박사수료)
- 2007년 1월 ~ 2017년 9월 : 에스텍 컨설팅그룹 기술이사
- 2017년 9월 ~ 현재 : 신한대학교 자동차공학과 부교수

<관심분야>

자동차, 유한요소법, 최적설계

김 현 준(Hyunjun Kim)

[정회원]



- 2013년 2월 : 계명대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 : 한양대학교 융합기계공학과 (공학박사 수료)
- 2013년 1월 ~ 2019년 1월 : 한국자동차연구원 연구원
- 2019년 1월 ~ 현재 : 한국교통안전공단 차장

<관심분야>

자동차, 자동차 검사