

탄소섬유강화 복합재의 순수 전단 시험 장치 및 미시적 파괴 지점을 고려한 멀티스케일 해석 기법 개발

김규원* · 노현지* · 김영우* · 송준섭* · 김외태** · 김동휘** · 김학성*,***†

Development of the Pure Shear Test Device for Carbon Fiber Reinforced Composites and Multi-scale Analysis Technique Considering Microscopic Failure Points

Gyu-Won Kim*, Hyun-Ji Rho*, Young-Woo Kim*, Jun-Seop Song*,
Woe Tae Kim*, Dong-Hwi Kim**, Hak-Sung Kim*,***†

ABSTRACT: This study presents a novel shear test for evaluating the pure shear behavior of unidirectional and plain-woven carbon fiber reinforced plastics (CFRPs). The fixture was redesigned to reduce specimen slip and to suppress in-plane and out-of-plane rotations that commonly deteriorate the reliability of conventional shear tests. The proposed method was compared with the $\pm 45^\circ$ tensile test, the Iosipescu shear test, and the conventional V-notched rail shear test. Digital image correlation (DIC) confirmed that the modified fixture produced the most stable and uniform shear strain field in the gauge section. To analysis the stress distribution and the damage evolution, an advanced multi-scale finite element model was developed by considering multiple microscopic failure points candidates instead of a single fixed failure point. The redesignated shear test provided a higher failure strain and a clearer pure shear response than the conventional methods. The proposed experimental procedure and the advanced simulation framework provide a reliable basis for composite shear behavior.

초 록: 본 연구에서는 일방향 및 평직 탄소섬유강화 복합재의 순수 전단 거동을 보다 안정적으로 평가하기 위하여 새로운 전단 시험법을 제안하였다. 제안된 시험장치는 기존 전단시험에서 발생하기 쉬운 시편 슬립, 면내 회전 및 면외 뒤틀림을 억제할 수 있도록 고정장치를 재설계하였다. 시험법의 타당성을 확인하기 위해 $\pm 45^\circ$ 인장 시험, Iosipescu 전단 시험, 기존 V-노치 레일 전단 시험과 결과를 비교하였다. DIC를 이용하여 시편 게이지부의 전단 변형을 분포와 면외 변형을 정량적으로 분석하였다. 실험에서 관찰된 손상 축적을 분석하기 위해 다중 파손 후보점을 고려하는 멀티스케일 유한요소해석 기법을 적용하였다. 재설계된 시험법이 시편 게이지부에서 가장 균일한 전단 거동 상태를 형성하는 것을 검증하였다. 제안된 시험절차와 해석기법은 복합재 전단 물성의 신뢰성 있는 평가 및 손상 메커니즘 해석에 유용한 기반을 제공한다.

Key Words: 탄소섬유강화 복합재(Carbon fiber reinforced plastic), V-노치 레일 전단 시험(V-notched rail shear test), 순수 전단 거동(Pure shear behavior), 디지털 이미지 상관법(Digital image correlation), 멀티스케일 해석(Multi-scale simulation)

Received 2 April 2026, received in revised form 19 April 2026, accepted 21 May 2026

*Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea

**APV Division, Hyundai Motor Group, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

***Center for Advanced Semiconductor Packaging, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea

†Corresponding author (E-mail: kima@hanyang.ac.kr)

1. 서 론

탄소섬유강화 복합재는 높은 비강도와 비강성으로 인해 항공, 자동차 및 에너지 구조물에 널리 적용되고 있다[1]. 그러나 적층 복합재의 설계와 제작에서는 전단 거동이 제조 공정, 성형성, 체결부 손상 및 국부 좌굴 안정성과 밀접하게 연관되므로, 신뢰성 있는 전단 물성의 확보가 필수적이다[2]. 특히 복합재의 비선형 거동은 기지 손상과 섬유-기지 상호작용의 영향을 크게 받기 때문에, 시험 중 실제로 순수 전단 상태가 형성되는지 여부가 도출된 전단 물성의 신뢰성을 좌우한다.

복합재 전단 물성 평가에는 ASTM D3518의 $\pm 45^\circ$ 인장시험[3], ASTM D5379의 Iosipescu 전단시험[4], ASTM D7078의 V-노치 레일 전단시험[5]이 널리 사용되고 있다. $\pm 45^\circ$ 인장시험은 장치 구성이 비교적 단순하지만 혼합 응력 상태의 영향으로 전단강도를 보수적으로 평가하는 경향이 있으며, Iosipescu 시험은 굽힘 모멘트와 노치 근방 응력 집중의 영향을 받을 수 있다[6]. 기존 V-노치 레일 전단시험은 비교적 넓은 게이지부와 양호한 하중전달 능력을 갖는 장점이 있으나, 장치 정렬 불량이나 클램핑 압력 저하가 발생할 경우 시편 슬립과 면내·면외 회전이 동시에 나타나 전단 물성의 신뢰성이 저하된다[7].

본 연구에서는 기존 V-노치 레일 전단 시험의 약점을 보완할 수 있는 재설계된 시험장치를 제시하였다. 개발된 순수 전단 시험으로 평가된 복합재의 전단 거동을 기존 전단 시험의 결과와 비교하였다. DIC를 이용하여 게이지부에서의 전단 변형률 균일성과 면외 변형 억제 효과를 정량적으로 확인하였다. 또한, 미시 파손 예상 지점을 다중으로 고려하는 멀티스케일 해석을 통해 시편에 분포되는 응력과 손상 진전을 분석하였다.

2. 실험 및 해석 방법

2.1 재료 및 시험편 구성

실험에는 일방향 탄소섬유복합재와 평직 탄소섬유복합재의 두 종류 시편을 사용하였다. 일방향 복합재는 T700SC 탄소섬유와 K51 에폭시 프리프레그를 이용하여 제작하였으며, 평직 복합재는 T300B 탄소섬유와 SF4 에폭시 프리프레그를 사용하였다. 시편 단면 관찰 결과 일방향 복합재의 섬유 체적분율은 약 60%, 평직 복합재의 섬유 체적분율은 약 70%로 확인되었다.

Fig. 1과 같이 전단 시험법별 시편을 제작하였으며, 전단 시험 종류에 따라 적층 구성이 달라지도록 시편을 설계하였다. $\pm 45^\circ$ 인장시험용 시편은 $[+45/-45]_4s$ 적층으로 제조하였고, Iosipescu 및 V-노치 레일 전단 시험용 시편은 $[0/90]_4s$ 적층으로 제작하였다.

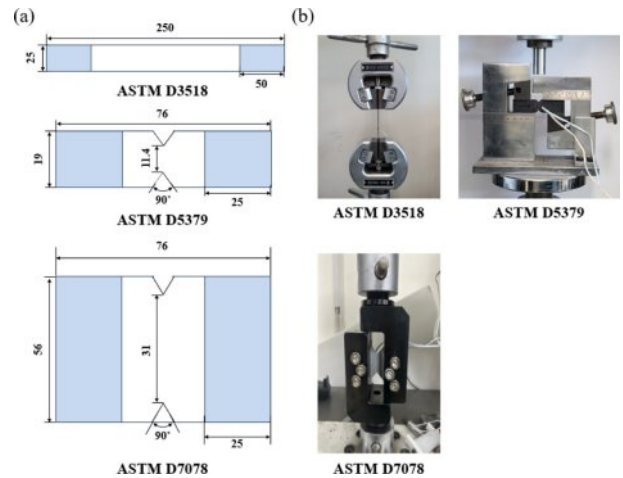


Fig. 1. (a) Specimen geometries and (b) test setups for the conventional shear test methods

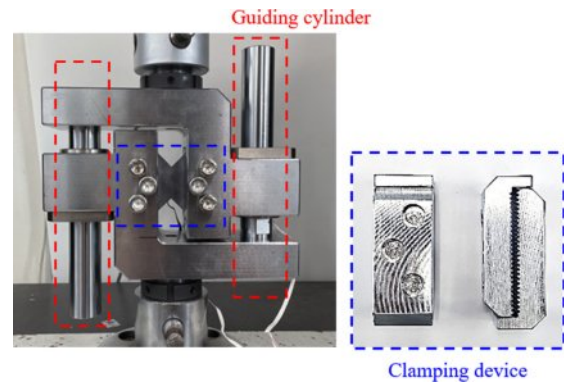


Fig. 2. Geometry of the pure shear test fixture with guiding cylinders and redesigned clamping devices

2.2 복합재 물성 평가 실험

본 연구에서는 $\pm 45^\circ$ 인장시험, Iosipescu 전단시험, V-노치 레일 전단시험 및 개발된 순수 전단 시험을 동일 재료군에 대해 수행하여 시험법별 전단 응답을 비교하였다. 전단 응력은 하중을 시편의 단면적으로 나누어 계산하였고, 전단 변형률은 $\pm 45^\circ$ 방향에서 측정한 표면 정상 변형률의 절대값 합으로 산정하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 순수 전단 시험의 셋업을 나타낸다. 순수 전단 시험 기법의 핵심은 두 가지이다. 첫째, 기존 V-노치 전단 시험에서 발생할 수 있는 면외 뒤틀림을 억제하기 위해 양측 지그의 정렬을 유지하는 가이드 실린더를 도입하였다[7]. 둘째, 상·하부 그림 영역 전체를 구속하는 새로운 클램핑 장치를 설계하여 시편의 슬립과 면내 회전을 방지하였다. 이때 그림 구간의 과도한 국부 응력 집중을 줄이기 위해 시편에 탭을 부착하여 하중이 분산되어 전달되도록 하였다.

2.3 DIC 기반 전단 거동 분석

각 시험법에서 게이지부에 형성되는 전단 상태의 신뢰성을 검증하기 위해 3차원 DIC 시스템을 사용하였다. 두 대의 카메라를 활용하여 4000×3000 pixel 해상도에서 시편 표면의 speckle 패턴을 추적하였으며, 이를 통해 면내 전단 변형률 분포뿐 아니라 시험 중 발생하는 면외 변위도 동시에 측정하였다.

DIC 결과는 동일 전단 변형률 수준에서 각 시험법의 게이지부 균일성을 비교하는데 사용하였다. 본 연구에서는 시편 게이지부의 전단 변형률의 균일성, 면외 변형률의 수준을 비교함으로써 순수 전단 거동 상태 형성 여부를 판단하였다.

2.4 멀티스케일 시뮬레이션

탄소섬유강화 복합재에 대한 순수 전단 시험을 구현하여 전단 응력 거동과 손상 진전을 분석하기 위해 멀티스케일 유한요소해석을 수행하였다(Fig. 3). 일방향 복합재는 섬유와 기지로 구성된 3차원 마이크로 Representative volume element (RVE)를 이용하여 유효 물성을 거시 모델에 전달하였고, 평직 복합재는 직조 구조를 반영하기 위해 yarn과 matrix pocket을 고려하는 메소-마이크로 연계 모델이 추가 구축되었다[8].

기존의 단일 파손점 기반 Stress amplification factor(SAF) 접근법은 미시 영역의 특정 위치에서 추출한 응력전달 계수만을 사용하므로, 실제 시험에서 여러 위치에서 동시에 발적으로 발생하는 기지 손상 개시를 충분히 반영하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 섬유 및 기지 영역에서 여러 개의 예상 파손 예상 지점을 정의하고, 각 지점에서 계산된 미시 응력 중 가장 먼저 손상 조건에 도달하는 값을 반영하도록 알고리즘을 구성하였다.

기지의 손상은 변형 압력 효과를 고려한 수정 von Mises 파괴 기준에 기반하여 평가하였고, 섬유 손상은 Maximum longitudinal stress 파괴 기준으로 판단하였다. 손상 인덱스가 증가하면 해당 구성요소의 강성을 점진적으로 저하시켜, 시험에서 관찰되는 비선형 전단 응답을 거시 해석에 반영하도록 하였다.

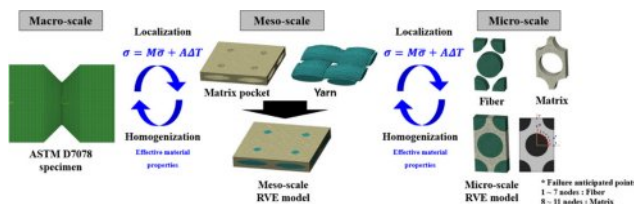


Fig. 3. Schematic view of multi-scale analysis of CFRP composites

3. 결과 및 고찰

3.1 전단 응력-변형률 응답 비교

시험법별 응력-변형률 곡선을 비교한 결과(Fig. 4, 5), 초기 선형 구간에서의 전단 탄성계수는 시험법에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 일방향 복합재는 대체로 4.22 GPa 수준, 평직 복합재는 4.63 GPa 수준의 전단 탄성계수를 나타냈다. 반면 파단 강도와 파단 변형률은 시험법에 따라 현저하게 달랐다. 이는 각 시험법의 게이지부에서 형성되는 응력 상태가 동일하지 않고, 시편 구속 안정성도 서로 다르기 때문이다.

±45° 인장시험은 혼합 인장-전단 응력의 영향으로 단방향 및 평직 복합재 모두 약 0.07 수준의 상대적으로 낮은 파단 변형률을 보였다. 장치 정렬 및 클램핑의 한계로 인해 시편 왜곡이 초기에 발생하면서 Iosipescu 전단 시험은 단방향 및 평직 복합재에서 각각 약 0.12, 0.16의 파단 변형률이 관찰되었고, 동일 원인으로 기존 V-노치 레일 전단 시험은 각각 약 0.18, 0.17 수준의 낮은 전단 강도를 나타냈다.

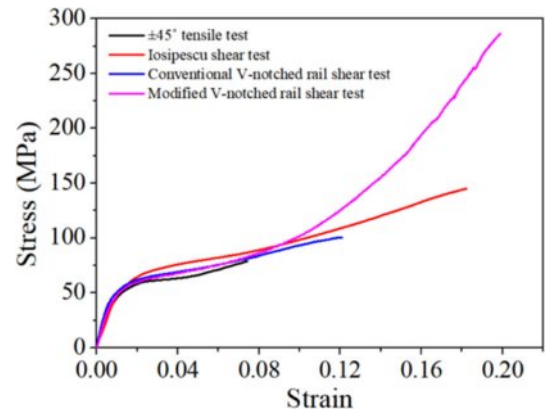


Fig. 4. Comparison of shear stress-strain curves for unidirectional CFRPs measured by the four shear tests

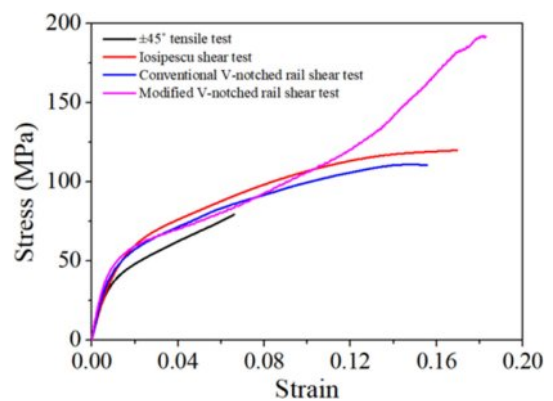


Fig. 5. Comparison of shear stress-strain curves for Plain woven CFRPs measured by the four shear tests

반면 순수 전단 시험은 평직 복합재에서 약 192 MPa의 전단강도와 약 0.19 수준의 파단 변형률을 확보하였다. 일방향 복합재는 시험 종료 시점까지 뚜렷한 파단이 발생하지 않아, 장치가 높은 변형률 영역에서도 비교적 안정적인 순수 전단 상태를 유지함을 보여주었다.

3.2 DIC를 이용한 전단 변형률 균일성 및 면외 변형 분석

DIC 분석 결과, $\pm 45^\circ$ 인장시험에서는 시편 전체에 복합적인 변형률이 분포하여 게이지부 국소 전단 상태를 명확히 정의하기 어려웠다. Iosipescu 및 기존 V-노치 레일 전단 시험에서는 노치부 부근에서 전단 변형률이 집중되었으나, 시험이 진행될수록 시편의 면외 뒤틀림이 증가하는 경향이 관찰되었다. 특히 기존 V-노치 레일 전단시험은 동일 변형률 수준에서 가장 큰 면외 변형을 보였다(Fig. 6, 7).

순수 전단 시험에서는 전단 변형률 0.05 이하 구간에서 면외 변형이 거의 발생하지 않았고, 그 이후 고변형률 영역에서도 증가율이 매우 완만하였다. 게이지부 선상에서 추출한 전단 변형률 분포 또한 다른 시험법에 비해 가장 집중된 형태를 나타내어, 노치 사이 영역 전반에 걸쳐 상대적으로 균일한 순수 전단 상태가 유지되었음을 확인하였다.

이 결과는 가이드 실린더가 양측 지그의 편심 정렬을 방지하고, 개선된 클램핑 블록이 그립 구간 전체를 고정하여 시편 슬립을 억제한 데 기인한다. 따라서 개발된 순수 전단 시험법의 우수성은 단지 높은 파단 변형률 및 강도를 얻었다는 데 그치지 않고, 그 값이 보다 더 신뢰성 있는 순수 전단 응답으로 해석될 수 있다는 점을 DIC 분석 결과가 뒷받침한다.

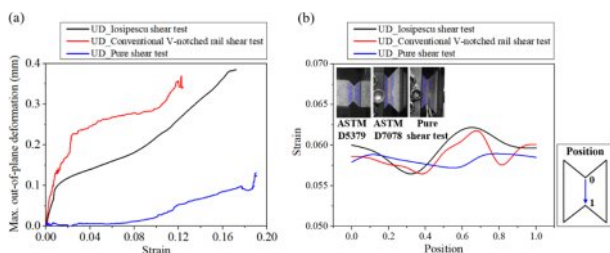


Fig. 6. DIC-based comparison of (a) out-of-plane deformation and (b) shear strain uniformity of unidirectional CFRPs

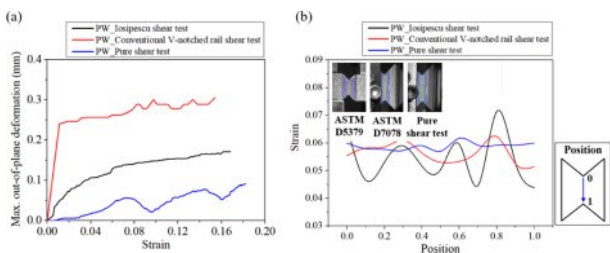


Fig. 7. DIC-based comparison of (a) out-of-plane deformation and (b) shear strain uniformity of Plain woven CFRPs

3.3 멀티스케일 해석 검증 및 응력-손상 분포

해석 결과를 실험 결과 응력-변형률 곡선과 비교하면, 단일 파손점 기반 기존 멀티스케일 해석은 전단 응력을 다소 높게 예측하는 경향을 보였다(Fig. 8). 이는 미시 영역의 단일 위치에서 얻은 SAF만으로는 시험 중 점차 확대되는 기지의 손상 영역을 보수적으로 포착하기 어렵기 때문이다. 이에 비해 다중 미시적 파손 지점을 고려한 해석은 초기 강성뿐 아니라 비선형 전단 구간의 응력 저하 경향도 보다 적절하게 구현하였다.

일방향 복합재에서는 노치부에서 기지 손상이 먼저 시작되어 게이지부 중앙으로 점차 전파되는 양상이 나타났고, 평직 복합재에서는 노치 측면뿐 아니라 게이지 중앙의 matrix pocket에서도 손상이 동시적으로 성장하는 경향이 확인되었다(Fig. 9). 평직 복합재에서 중앙부 손상이 비교적 빠르게 발달한 것은 DIC 및 파손 관찰 결과와도 정성적으로 잘 일치하였다.

종합하면, 미시 파괴 지점을 고려한 멀티스케일 해석은 시험장치로부터 확보한 신뢰성 있는 순수 전단 데이터를 해석 모델에 연결함으로써, 복합재의 전단 비선형성과 미시 손상 진전을 더 현실적으로 예측할 수 있었다. 이는 향후 복합재 전단 물성 기반의 설계 허용값 정립과 파손 예측 모델 고도화에도 유용하게 활용될 수 있다.

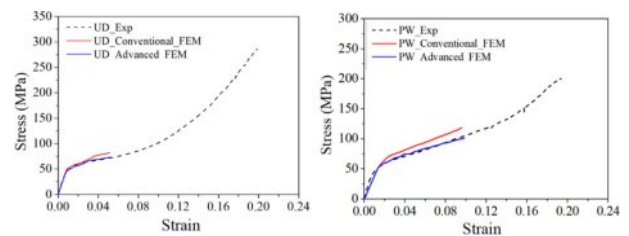


Fig. 8. Comparison of experimental and simulated shear stress-strain curves

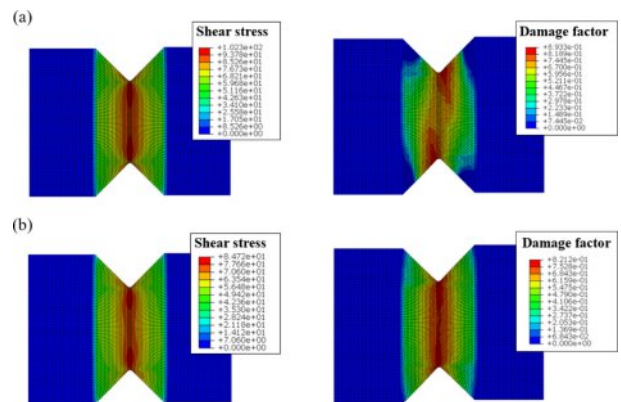


Fig. 9. Stress/damage contours predicted by the advanced multi-scale model: (a) unidirectional and (b) plain woven CFRPs

4. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유복합재의 순수 전단 거동을 보다 신뢰성 있게 평가하기 위해 V-노치 레일 전단 시험 장치를 보완한 순수 전단 시험법을 제안하고, 실험 및 멀티스케일 해석을 통해 그 유효성을 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 순수 전단 시험 장치는 가이드 실린더와 전면 구속형 클램핑 블록을 적용함으로써 시편의 면내 회전, 면외 뒤틀림 및 슬립을 효과적으로 억제하였다. 둘째, DIC 분석 결과에서 순수 전단 시험법은 다른 전단시험법에 비해 게이지부에서 가장 균일한 전단 변형률 분포를 형성하였다. 셋째, 평직 복합재는 약 192 MPa의 전단강도와 0.19의 파단 변형률을 보였고, 일방향 복합재는 약 0.2 전단 변형률까지 안정적인 순수 전단 거동을 유지하였다. 넷째, 다중 미시적 파손 지점을 고려한 멀티스케일 해석은 기존 단일 파손점 기반 해석보다 실험의 비선형 응답과 손상 진전을 더 잘 재현하였고, 개발된 전단 시험이 시편에 순수 전단 거동 상태를 잘 유도할 수 있음을 검증하였다.

따라서 본 연구에서 제안한 시험법과 해석 체계는 복합재 전단 특성 평가의 신뢰도를 높이는 동시에, 실제 구조부재 설계와 손상 해석에 활용 가능한 실험-해석 연계 기반을 제공할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20212020800090, 정온물류 운송 및 물류센터 에너지 효율화 기술 개발 및 실증) 또한, 본 연구는 현대자동차 그룹의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Othman, R., Ismail, N.I., Pahmi, M.A.A.H., Basri, M.H.M., Sharudin, H., and Hemdi, A.R., "Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review," *J. Mech. Manuf.*, Vol. 1, 2018, pp. 144-154.
2. Holmes, J., Das, R., Stachurski, Z., Compston, P., and Kalyanasundaram, S., "Development of an S-specimen geometry for shear testing of woven thermoplastic composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 203, 2020, 108485.
3. Testing, A.S.f. and Materials, Standard Test Method for In-plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of $\pm 450^\circ$ Laminate. 2007: ASTM International.
4. ASTM, A. D5379/D5379M-12: Standard test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method; 2014.
5. D/DM-12, A. Standard test method for shear properties of composite materials by V-notched rail shear method. 2012, ASTM International West Conshohocken, PA.
6. Choi, J.H., Jang, J., Shim, W., Cho, J.M., Yoon, S.J., Choi, C.H., and Yu, W.R., "Determination of the in-plane shear modulus of unidirectional carbon fiber-reinforced plastics using digital image correlation and finite-element analysis," *Composite Structures*, Vol. 229, 2019, 111392.
7. Gude, M., Hufenbach, W., Andrich, M., Mertel, A., and Schirner, R., "Modified V-notched rail shear test fixture for shear characterisation of textile-reinforced composite materials," *Polymer Testing*, Vol. 43, 2015, pp. 147-153.
8. Lim, H.J., Choi, H.I., Yun, S.J., Lim, S.W., Choi, J.H., and Yun, G.J., "Development of RVE Reconstruction Algorithm for SMC Multiscale Modeling," *Composites Research*, Vol. 34, 2021, pp. 70-75.