

유연 그리드 센서를 활용한 탄소섬유 복합재료의 경사 충격 손상탐지 성능 평가

전어진* · 김은우** · 김의진* · 임진영* · 노민주* · 이창열*,**†

Performance Evaluation of Oblique Impact Damage Detection in Carbon Fiber Reinforced Polymers Using a Flexible Grid Sensor

Eo-Jin Jeon*, Eunwoo Kim**, Ui-Jin Kim*, Jin-Young Rim*, Min-Joo Roh*, Chang-Yull Lee*,**†

ABSTRACT: Carbon fiber reinforced polymers(CFRPs) are vulnerable to impact. Therefore, it is important to apply a structural health monitoring(SHM) system capable of detecting impact damage. In actual operating environments, impacts often occur at oblique angles to the surface, making it necessary to evaluate the damage detection performance of SHM systems under oblique impact conditions. In this study, an oblique impact test fixture was fabricated, and performance evaluation tests were conducted for an SHM system using a flexible grid sensor to detect damage under oblique impacts. The experimental results demonstrated that the area of the elliptical penetration damage increased with increasing impact angle. In addition, the proposed SHM system effectively estimated the penetration damage area with a maximum error of 11.7%.

초 록: 탄소 섬유 복합재료는 충격에 취약하므로, 충격 손상의 탐지가 가능한 구조 건전성 모니터링(SHM) 시스템의 적용이 중요하다. 실제 운용 환경에서 가해지는 충격 하중은 대부분 표면에 경사진 각도로 작용하기 때문에, 경사 충격 조건에서 SHM 시스템을 검증하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 경사 충격시험 치구를 제작하고, 유연 그리드 센서를 활용한 SHM 시스템의 경사 충격 손상탐지 성능 평가 시험을 수행하였다. 시험 결과, 충돌각도가 커질수록 더 넓은 크기의 타원형 관통 손상이 발생함을 확인할 수 있었다. 또한, 제안한 SHM 시스템을 통해 최대 11.7%의 오차 내에서 관통 손상 면적을 효과적으로 추정할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 구조 건전성 모니터링(Structural health monitoring), 손상탐지(Damage detection), 유연 센서(Flexible sensor), 경사 충격시험(Oblique impact test)

1. 서 론

탄소 섬유 복합재료는 비강도와 비강성, 피로 저항성이 우수한 재료로, 무게 감소가 중요한 항공우주, 선박, 기차, 자동차 등의 산업 분야에서의 적용 사례가 증가하고 있다[1,2].

복합재료 구조물은 기체의 실제 운용 중, 여러 요인들로 인한 충격 상황에 노출될 수 있다. 하지만, 복합재료는 면 외(out-of-plane) 방향 물성이 약해 충격에 취약하다. 따라서, 충격이 가해지면 기지 균열(matrix cracking), 층간 박리(delamination)와 같은 손상이 발생할 수 있으며, 이는 잔류

Received 10 March 2026, received in revised form 1 July 2026, accepted 1 August 2026

*Department of Aerospace Engineering and the Program in Aerospace Systems Convergence, Inha University

**Aerospace Systems Research Institute, Inha University

†Corresponding author (E-mail: cylee@inha.ac.kr)

강도를 급격하게 저하시켜 구조의 파손을 유발할 수 있다 [3,4]. 따라서, 복합재료 구조물에 구조 건전성 모니터링 (structural health monitoring, SHM) 시스템을 적용하는 것이 중요하며, 이에 대한 수요가 점차 증가하고 있다.

항공기 적용 복합재료 구조물의 충격 손상탐지 모니터링 기법으로는 광섬유 브래그 격자 센서(fiber bragg grating, FBG)를 활용하는 방법과, 압전 센서(piezoelectric sensor)를 활용하는 방법들이 다수 연구되고 있다[5,6]. 하지만 센서 별로 장단점이 존재하여 사용 목적에 따라 적절하게 적용되어야 한다. FBG의 경우, 광섬유 계측 시스템 구성이 어렵고, 센서가 쉽게 파손될 수 있다. 또한, 곡률에 따라 적용이 어려울 수 있다는 문제점도 존재한다. 압전 센서의 경우, 전자기 간섭에 취약하며, 적용 대상 구조물의 형상 및 부위에 따라 새로운 알고리즘을 적용하여야 한다는 한계점이 있다. 이러한 한계점의 보완을 위해 압저항(piezoresistive) 센서를 활용한 복합재료 구조 건전성 모니터링 시스템에 대한 연구들이 수행되고 있다[7-9].

복합재료의 충격 저항성 평가를 위해 많은 연구들이 수직 방향으로 충격을 가하여 수행되어 왔다. 하지만, 실제 운용 환경에서는 대부분 경사진 각도로 충격이 발생하게 되기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다[10-13].

본 연구에서는 압 저항 기반의 유연 그리드 센서를 제작하고, 이를 활용하여 복합재료 구조 건전성 모니터링 시스템을 구축하였다. 유연 그리드 센서는 electrohydrodynamic(EHD) 잉크젯 프린팅 기술을 통해 제작한 압 저항 센서이며, 단선 신호를 통해 손상 위치를 검출하기 때문에, 신호 해석이 간단하다. 경사 충격 상황에서의 손상탐지 성능 평가를 위해 시험 치구를 개발하였다. 이를 활용하여 경사 충격시험을 수행하고, 구조 건전성 모니터링 결과를 분석하였으며, 경사 충격으로 인한 관통 손상 검출이 가능함을 검증하였다.

2. 실험 방법

2.1 유연 그리드 센서 제작

유연 그리드 센서의 제작 과정은 Fig. 1과 같이 총 다섯 단계로, polyvinylidene fluoride(PVDF) 필름 제작, EHD 잉크젯 프린팅, 전극 제작, 보호 층 코팅, flexible printed circuit board(FPCB) 접착 단계로 구성된다.

PVDF 필름은 PVDF 용액을 유리 웨이퍼(wafer) 위에 스핀 코팅하여 제작하였다. PVDF 파우더와 N,N-dimethylformamide (DMF)를 15:85의 비율로 혼합하여 용액을 제작하고, 200 rpm으로 스핀 코팅하여 필름을 제작하였다. 이후, 제작한 필름 위에 EHD 잉크젯 프린팅 기술을 활용하여 전도성 잉크를 프린트한다. 활용한 전도성 잉크는 은(Ag) 기반 잉크이며, 은 페이스트와 용매(solvent)인 diethylene glycol monobutyl ether acetate(DGBA)를 1:1 비율로 혼합하여 제작하였다.

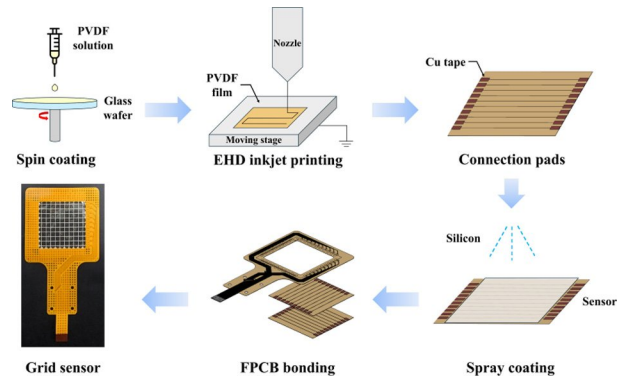


Fig. 1. Manufacturing process of flexible grid sensors

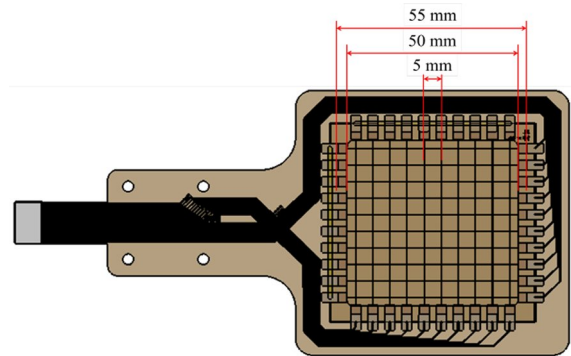


Fig. 2. Geometry of flexible grid sensors

구리 테이프를 활용해 전극 연결부를 제작하고, 굽힘과 같은 의도되지 않은 상황에서의 센서 파손을 방지하기 위해 실리콘 용액을 스프레이 코팅하였다. 위와 같은 과정으로 제작된 센서층을 FPCB에 가로 방향 한층, 세로 방향 한층으로 교차하여 접착하면 유연 그리드 센서의 제작이 완료된다. 본 연구에서 제작한 센서의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 센서는 총 20 채널의 저항 신호를 측정하도록 구성되어 있으며, 구리테이프를 포함한 센서의 총 면적은 30.25 cm^2 , 손상 탐지가 가능한 면적은 25 cm^2 이다. 선 사이 간격은 5 mm로 제작되었다.

2.2 경사 충격시험 치구 제작

복합재료 경사 충격시험을 수행하기 위해 치구를 제작하였다. 제작한 시험 치구의 모습과 각 구성요소 들을 Fig. 3에 나타내었다.

제작한 시험 치구는 크게 impact support fixture, moving stage, damping unit, indexing unit으로 구성되어 있다. Impact support fixture는 ASTM D 7136 규격을 참고하여, $125 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 의 크기의 직사각형 창을 뚫어 제작하였다. 충격 위치를 조정하기 위한 moving stage를 제작하였으며, 시편 충격 후에 impactor를 멈추기 위한 damping unit도

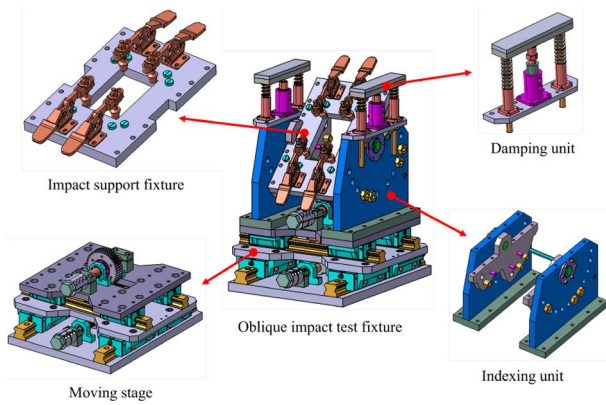


Fig. 3. Configuration of the oblique impact test fixture

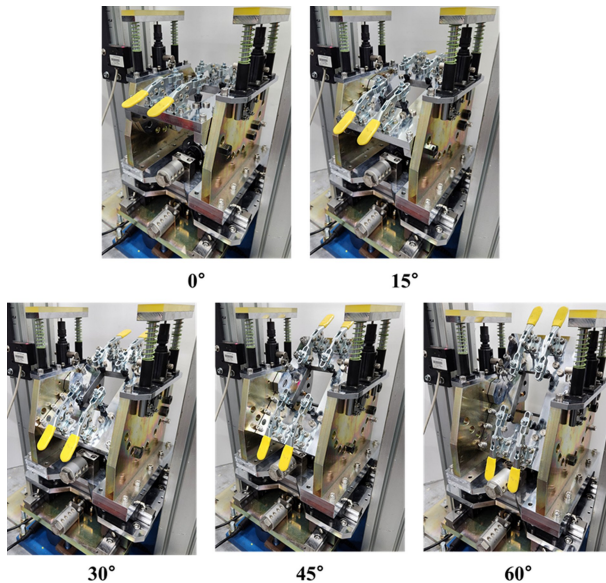


Fig. 4. Oblique impact test fixture at different inclination angles

적용하였다. Damping unit은 높이 조절이 가능하도록 제작하였다. 시험 각도는 indexing unit을 활용하여 변경할 수 있으며, 0°에서 60°까지 15° 간격으로 조절이 가능하다. 시험 각도별 치구의 모습들을 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 충격시험

충격시험에 활용할 복합재는 WSN 03KP 200 Y K51M 평직 프리프레그(plain woven prepreg)를 사용하여 제작하였다. 준등방성(quasi-isotropic) 시편의 제작을 위해 적층 순서는 $[0/45/90/-45]_s$ 으로 총 8층 적층 하였으며, 두께는 약 1.6 mm로 제작하였다.

ASTM D 7136 규격을 참고하여 150 mm × 100 mm 크기로 시편을 제작하였으며, 사용한 프리프레그의 물성치는 Table 1에 정리하였다. 최종적으로, 센서 성능평가 시험을 위해 복합재료 시편에 제작한 유연 센서를 부착하여 충격 시험 시편을 제작하였다.

Table 1. Material properties of the carbon fiber prepreg[14]

Properties	Value (GPa)	Properties	Value (GPa)	Properties	Value
E_1	53	G_{12}	3.65	ν_{12}	0.064
E_2	53	G_{13}	3.65	ν_{13}	0.064
E_3	5.9	G_{23}	3.65	ν_{23}	0.32

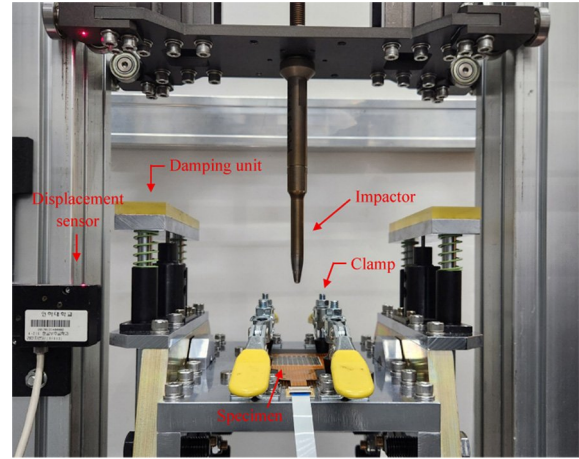


Fig. 5. Impact test setup

충격시험 장치의 구성은 Fig. 5와 같다. 자체 제작한 시험기를 사용하였으며, Impactor의 지름은 12.7 mm, 무게는 6 kg으로 제작하였다. Impactor의 속도는 레이저 거리 센서를 활용하여 측정하였으며, 21 J의 충격에너지를 가하기 위해 2.6 m/s의 속도로 낙하하여 시험을 수행하였다. 0°에서 60°까지 15° 간격으로 각도를 조절하여 총 다섯 번의 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충격시험 결과

충격시험 후, 시편의 파손 모습들을 Fig. 6에 나타내었다.

21 J의 충격에너지가 가해지면서, 모든 각도의 시편에서 관통 손상이 발생하였으며, 그리드 센서의 손상 부위에서는 단선 신호가 측정되었다. ImageJ를 통해 표면 관통부의 면적을 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 시험 각도가 커질수록 관통 손상의 면적이 타원형의 형태로

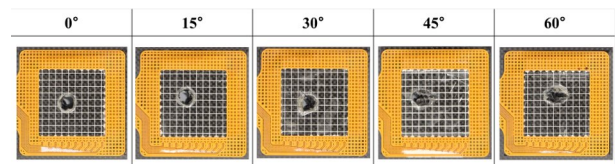


Fig. 6. Experimental results of oblique impact test

Table 2. Comparison of measured and estimated damage areas at different impact angles

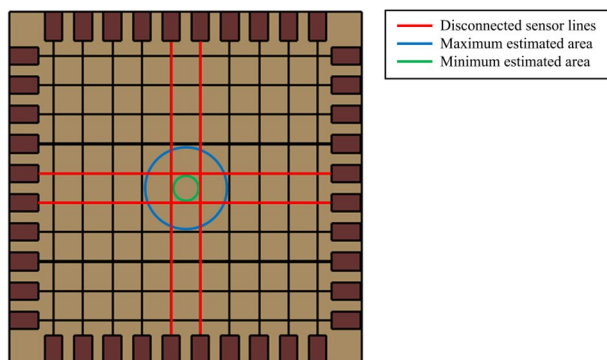
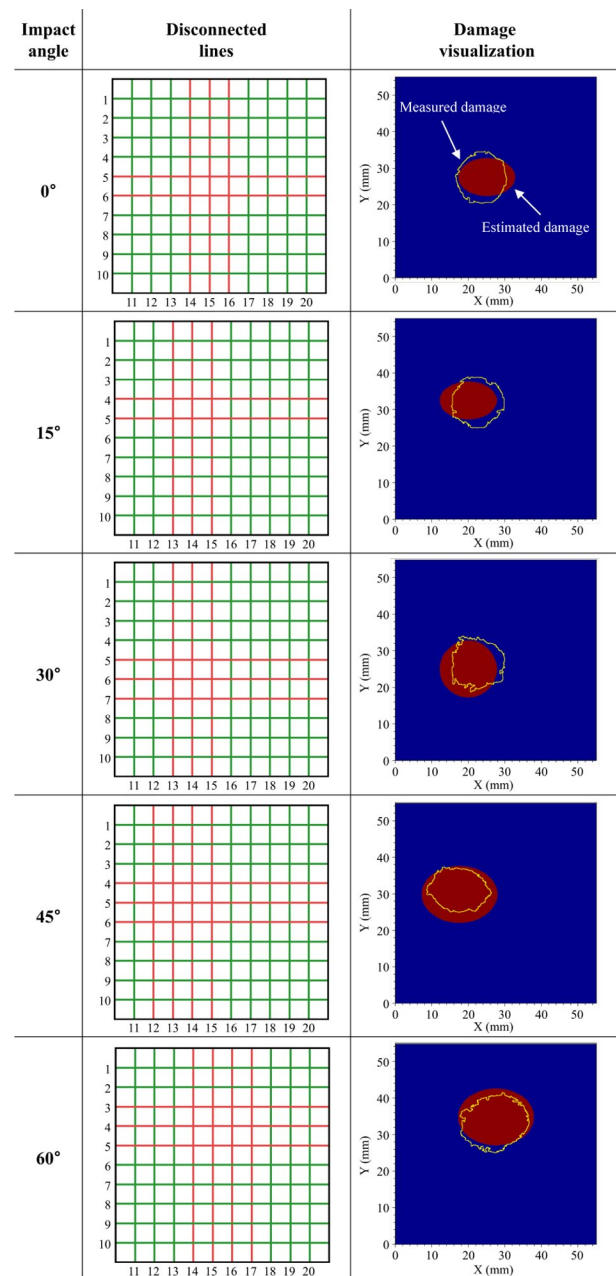
Impact angle (°)	Measured damage area (mm ²)	Estimated damage area (mm ²)	Estimation error (%)
0	125.8	117.8	6.4
15	127.7	117.8	7.7
30	142.4	159.0	11.7
45	172.4	188.5	9.3
60	202.8	188.5	7.1

발생하는 것을 알 수 있으며, 점차 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시험 각도가 커질수록 손상의 면적이 더 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 시험결과에서 60° 관통 면적은 0° 관통 면적의 1.61배 더 크게 나타났다.

3.2 손상탐지 결과

손상탐지 알고리즘은 센서의 가로 선과 세로선의 단선 신호가 교차하는 지점에 z축 좌표를 부여하고, 단선이 발생하지 않은 부분의 z축 좌표 값과 보간(interpolation)하여 관통 손상의 중심 위치와 면적을 계산하도록 구성하였다. 구리 테이프를 포함한 센서 전체의 면적을 기준으로 알고리즘을 적용하였으며, 손상 면적의 계산 결과는 Table 2에 정리하였다. 각 센서 채널의 단선 신호 측정 결과와 알고리즘을 통해 계산된 손상 위치 및 면적 추정 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

알고리즘을 통해 계산된 손상 면적은 일정 구간마다 상승하는 모습을 확인할 수 있다. 이는 손상된 면적이 넓어지더라도, 단선된 가로 방향 선의 개수와 세로 방향 선의 개수가 같으면 알고리즘 상에서는 같은 면적으로 추정하게 되어 나타나는 현상이다. 단선된 센서 선을 기준으로 나타낼 수 있는 최소 추정 손상면적과 최대 추정 손상면적을 정의하여 Fig. 7에 나타내었다.

**Fig. 7.** Schematic illustration of the estimated damage area range based on disconnected sensor lines**Fig. 8.** Results of oblique damage visualization by sensor signals

알고리즘을 통해 계산된 손상 면적에서도 시험 각도가 커질수록 손상 면적이 넓어지는 것을 확인할 수 있으며, 60°에서의 손상면적은 0°에서의 결과보다 1.6배 더 크게 나타났다. 이는 시험 결과와 비슷한 경향을 나타내며, 알고리즘을 통해 효과적인 면적 추정이 가능함을 확인하였다.

실제 측정된 손상면적과 알고리즘으로 계산된 손상 면적을 비교한 결과, 충돌 각도에 따라 6.4%에서 11.7%까지 오차가 발생함을 알 수 있으며, 30°에서의 손상 면적 계산 결과에서 가장 큰 오차가 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 유연 그리드 센서를 활용한 복합재료 구조 건전성 모니터링 시스템을 구축하고, 경사 충격 상황에 이를 검증하였다. 경사 충격시험을 위해 0°부터 60°까지 15° 간격으로 충격 각도를 조절할 수 있는 치구를 제작하고, 21 J의 충격 에너지 조건에서 시험을 수행하였다. 시험 결과, 모든 각도 조건에서 관통 손상이 발생하였으며, 충돌 각도가 증가할수록 더 넓은 타원형 형태의 손상이 발생함을 확인하였다. 60°에서의 손상 면적은 0°에서의 손상 면적 보다 1.61배 더 크게 나타났다.

센서 신호를 통한 손상탐지 알고리즘 결과는 충돌 각도에 따라 6.4%에서 11.7%의 오차 범위 내에서 관통 손상 면적 추정이 가능함을 확인하였다. 특히, 0°와 15°에서는 비교적 작은 오차를 보였으나, 30° 조건에서 11.7%로 가장 큰 오차를 확인하였다. 이러한 오차 발생의 원인은 손상 면적이 증가하더라도 단선된 가로 및 세로 선의 수가 동일하면 알고리즘 상에서 동일한 면적으로 계산되기 때문이다. 센서 선 사이 간격이 5 mm로 제작되어 손상 면적의 반경 측정 시 최대 5 mm의 오차가 발생할 수 있다. 또한, 손상 위치에 따라서 실제 손상 면적보다 더 많은 단선을 유발할 수 있으며, 이는 오차를 더 크게 만드는 원인이 될 수 있음을 확인하였다.

따라서 향후 연구에서는 센서 패턴을 변경하여 면적 추정 해상도를 높이는 방법에 대한 연구와 함께 확률 기반 면적 추정 알고리즘을 개발하여 정확도를 높이는 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2021R1A5A1031868). 이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.P0023691, 우주 소재·부품·장비 전문인력 양성사업).

REFERENCES

1. Jang, W.C., Jeong, W.J., Shim, Y.J., Hwang, S.H., and Roh, H.D., "Assessment of Interfacial Reliability of Adhesive-Free CFRP Sandwich Structures under Mode-II-Dominated Flexural Loading," *Composite Research*, Vol. 39, No. 1, 2026, pp. 53-59.
2. Zhang, J., Lin, G., Vaidya, U., and Wang, H., "Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 250, 2023, 110463.
3. Bak, J.Y., and Kim, J., "Inverse Estimation and Verification of Parameters for Improving Reliability of Impact Analysis of CFRP Composite Based on Artificial Neural Networks," *Composite Research*, Vol. 36, No. 1, 2023, pp. 59-67.
4. Cho, S.W., and Cheon, S.S., "Prediction of Interlaminar Shear Stress in Laminated Composites using Hybrid PINN incorporated with Anisotropic Hertzian Contact Theory," *Composite Research*, Vol. 39, No. 1, 2026, pp. 1-7.
5. Ogunleye, R.O., Rusnáková, S., Javořík, J., Žaludek, M., and Kotlánová, B., "Advanced Sensors and Sensing Systems for Structural Health Monitoring in Aerospace Composites," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 26, No. 22, 2024, 2401745.
6. Rocha, H., Semprinoschnig, C., and Nunes, J.P., "Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review," *Engineering Structures*, Vol. 237, 2021, 112231.
7. Liu, Q., Song, P., Yan, J., Sun, M., Wang, K., Wang, Y., and Qing, X., "In Situ Monitoring of Failure Modes in Composite Bolted Joint Structures Using CB/CNT Piezoresistive Sensor," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 24, No. 12, 2024, pp. 19845-19854.
8. Nauman, S., "Piezoresistive Sensing Approaches for Structural Health Monitoring of Polymer Composites—A Review," *Eng*, Vol. 2, No. 2, 2021, pp. 197-226.
9. Yang, L., Wang, Z., Hu, W., Zhang, M., Du, A., Xuan, F.-Z., Cang, Y., and Yang, B., "Three-dimensional spatial damage localization in GFRP using embedded piezoresistive sensor arrays," *Composite Structures*, Vol. 385, 2026, 120213.
10. Duan, Y., Xie, X., Zou, T., and Wang, T., "Mechanical Response of CFRP Laminates Subjected to Low-Velocity Oblique Impact," *Applied Composite Materials*, Vol. 29, No. 3, 2022, pp. 1105-1124.
11. Ivañez, I., Moure, M.M., Garcia-Castillo, S.K., and Sanchez-Saez, S., "The oblique impact response of composite sandwich plates," *Composite Structures*, Vol. 133, 2015, pp. 1127-1136.
12. Kaware, K., and Kotambkar, M., "Effect of Oblique and Off-Center Impact on CFRP Laminate Under Low Velocity Impact," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, Vol. 49, No. 2, 2024, pp. 779-796.
13. Kazemianfar, B., and Nami, M.R., "Influence of oblique low velocity impact on damage behavior of 2D and 3D woven composites: Experimental and numerical methods," *Thin-Walled Structures*, Vol. 167, 2021, 108253.
14. Xin, R., Le, V.T., and Goo, N.S., "Buckling identification in composite cylindrical shells with measured imperfections using a Multi-DIC method and finite element analysis," *Thin-Walled Structures*, Vol. 177, 2022, 109436.