

복합재료 구조물의 건전성 모니터링을 위한 P(VDF-TrFE) 직물센서의 가능성 평가

배지훈* · 장승환*[†]

Feasibility Check of Textile Sensor Made of P(VDF-TrFE) for Structural Health Monitoring of Composite Structures

Ji-Hun Bae*, Seung-Hwan Chang*[†]

ABSTRACT: For structural health monitoring of a complex shaped structure a new sensor that can compensate for the drawbacks of the current sensors such as brittleness is needed and the sensor should be highly flexible and durable. In this study a textile sensor made of polyvinylidene fluoride trifluoroethylene (PVDF-TrFE) which is a type of electroactive polymer was fabricated. And the textile sensors were applied to a complex shaped structure (an egg-box panel made of carbon/epoxy composite) for checking their feasibility of structural health monitoring. To correlate the collapse response with failure mechanisms of the structure the multiply-interrupted compressive test was carried out. During the test, the textile sensors succeeded to prove their applicability for damage detection (crack initiation) by generating electric voltages (0.05 V-0.25 V) in the real time.

초 록: 복잡한 형상의 구조 건전성 모니터링을 위해서는 높은 취성 등 기존 센서의 단점을 보완 할 수 있는 매우 유연하고 내구성이 확보된 센서가 필요하다. 본 연구에서는 전기활성고분자의 한 종류인 Polyvinylidene fluoride trifluoroethylene (PVDF-TrFE)를 사용하여 직물센서를 제작하였다. 또한 제작된 직물센서를 복잡한 형상을 가지는 탄소섬유/에폭시 복합재료 구조물에 적용하여 구조 건전성 모니터링을 위한 도구로써 활용 가능성을 평가하였다. 복합재료 구조물의 손상 반응과 파손 메커니즘을 분석하기 위해 다중간헐적 압축시험을 수행하였다. 시험 과정에서 복합재료 구조물에 삽입된 직물센서는 전기적 신호를 발생 (0.05 V-0.25 V)하며 실시간으로 균열발생과 균열위치를 감지해냈다.

Key Words: 전기활성고분자(Electroactive polymer), P(VDF-TrFE) 섬유(P(VDF-TrFE) fibers), 직물센서(Textile sensor), 탄소섬유/에폭시 복합재료(Carbon/epoxy composite), 구조 건전성 모니터링(Structural health monitoring)

1. 서 론

구조 건전성 모니터링(Structural health monitoring, SHM)은 센서를 구조물에 통합하여 주기적 또는 지속적인 검사를 가능하게 하는 비파괴 검사 시스템을 포함한다. 따라서

구조물 해체 및 수동 검사 등 별도의 복잡한 과정과 방법에 의존하지 않고 결과 데이터를 통해 운영자가 구조물의 손상상태를 실시간으로 파악할 수 있으며 손상 유형, 위치, 크기, 그리고 구조의 건전성 진단을 가능케 한다. 광섬유 센서(Fiber Bragg Grating sensor), 스트레인 게이지, PZT 등 세

Received 20 March 2017, received in revised form 28 April 2017, accepted 28 April 2017

*School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea

*[†]School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Republic of Korea, Corresponding author (E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

라믹 기반의 압전센서 등 구조 건전성 모니터링을 위한 다양한 종류의 센서가 존재한다[1]. 해당 센서들은 고유의 장점을 가지고 있지만 동시에 치명적인 단점도 존재한다. 공통된 단점으로는 복잡형상 구조물에 적용하기 어려울 정도로 상대적으로 큰 취성을 가지고 있다는 것이다[2,3]. 그러므로 기존 센서들의 단점을 충분히 보완할 수 있는 높은 연성과 내구성을 가진 새로운 형태의 센서개발이 필요하다.

섬유강화 복합재료는 우수한 비강성, 비강도, 높은 감쇠능 및 낮은 열팽창계수 등의 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 금속재료를 대체하여 전기기기, 자동차 등 일반 산업을 비롯하여 우주항공과 군수산업 분야까지 널리 활용되고 있다[4-6]. 섬유강화 복합재료의 구조 건전성 모니터링을 위한 센서의 기본적 요구사항은 간소·간결성, 대면적 모니터링, 최소한의 전기 배선, 쉬운 장착, 그리고 복합재료 및 그 제조기술과의 호환성 등이다[7].

전기활성고분자(Electroactive polymers; EAPs)는 전기적 자극에 반응하여 대변형(~수백 %)을 발생시키는 지능형 재료이다. 전기활성고분자의 한 종류이자 강유전성 중합체 계열의 P(VDF-TrFE)는 상대적으로 빠른 전기-기계적 반응속도, 높은 기계-화학적 안정성, 유연함, 그리고 낮은 임피던스 등 여러 장점을 가지고 있다[8-16]. 덕분에 스마트센서[17-21], 에너지 수확장치[22], 이온 배터리용 능동형 분리막[23], 생체역학을 위한 구동기[24] 등 다양한 형태로 활용되고 있다.

본 연구에서는 P(VDF-TrFE) 섬유를 활용하여 평직구조 직물센서를 제작 후 복잡형상의 탄소섬유/에폭시 복합재료 구조물에 삽입하여 다중간헐적 압축시험(Multiply-interrupted compressive test)을 통해 직물센서가 구조물 건전성 모니터링을 위한 도구로써 활용가능성을 평가하였다.

2. 직물센서 제작

2.1 P(VDF-TrFE) 섬유제작

P(VDF-TrFE) 공중합체 파우더(KF W#2200, Kureha, Japan)의 PVDF와 TrFE의 몰분율은 각각 75%와 25%이다. P(VDF-TrFE) 섬유는 비틀-신장 방법(Torsion-stretching method)을 통해 제작됐으며 그 과정은 다음과 같다[25]. (1) P(VDF-TrFE) 파우더를 용제(Methyl ethyl ketone)에 녹여 용액 제조, (2) 10 wt% 용액을 유리판 위에 적당량 부은 뒤 자동 도포장치(ZAA 2300, Zehntner, Switzerland)와 초정밀 도포 막대(ZWA 2121, Zehntner, Switzerland)를 사용하여 필름 제작, (3) 제작된 P(VDF-TrFE) 필름을 가로(2 mm) × 세로(50 mm) 크기의 스트립으로 자른 후 40π 라디안만큼 꼬아준 뒤 길이방향으로 450% 만큼 신장시킴(Fig. 1a). 비틀-신장 방법으로 제작된 P(VDF-TrFE) 섬유는 유공형태(Hollow type)이며 섬유의 벽 두께(Wall thickness)와 폭의 범위는 각각 6-7 μm 와 150-350 μm 이다[25](Fig. 1b). 제작된 P(VDF-

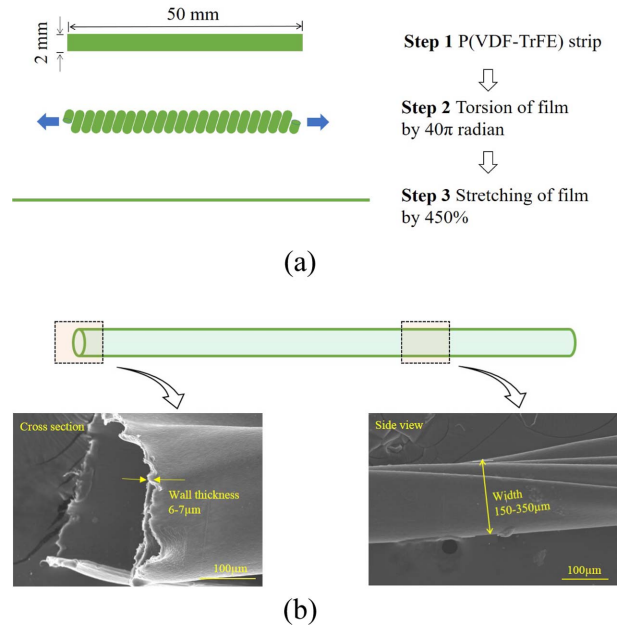


Fig. 1. Torsion-stretching method for fabricating fiber; (a) torsion-stretching process of a film strip and (b) SEM images of fibers fabricated by the torsion-stretching method [25]

TrFE) 섬유 내 잔여 용제제거와 결정화 향상을 위해 위해 140°C에서 24시간동안 열처리를 수행했으며, 전기적 분극(Electrical poling) 처리와 기계적 신장(Mechanical stretching) 처리를 수행하여 압전성능을 극대화시켰다[25]. 더불어 비틀-신장 방법으로 제작된 P(VDF-TrFE) 섬유의 인장강도, 영률, 그리고 변형률은 각각 260 MPa, 900 MPa, 그리고 35%로 측정됐다[25].

2.2 P(VDF-TrFE) 섬유를 활용한 직물센서 제작

직물센서의 직조패턴은 평직이며 3가지의 구성요소를 가지고 있다. (1) 센서섬유다발: 비틀-신장 방법으로 제작된 P(VDF-TrFE) 섬유 10가닥을 꼬아 제작된 섬유다발, (2) 전극섬유: 1가닥의 섬유 직경이 약 7 μm 인 탄소섬유 1k 토우, 그리고 (3) 절연섬유: 전극섬유 사이의 전기적 단락 및 안전성 확보를 위한 폴리에스터 섬유. P(VDF-TrFE) 섬유다발은 날실에 정렬됐으며, 전극섬유와 절연섬유는 씨실에 각각 위치하였다(Fig. 2a). 센서섬유다발은 P(VDF-TrFE) 섬유 10가닥을 서로 꼬아서 제작했으며 SEM 분석결과 평균 폭은 625 μm 로 관찰됐다(Fig. 2b). 직물센서 제작 시 3종류의 섬유의 정렬을 위해 일정한 간격의 리브가 새겨진 알루미늄 프레임을 사용하였다(Fig. 2c). 제작된 직물센서의 크기는 가로 20 mm × 세로 20 mm의 정사각형의 형태이며, P(VDF-TrFE) 섬유다발, 전극 섬유 및 절연 섬유의 폭은 각각 약 650 μm , 400 μm , 280 μm 이다(Fig. 2d). 전기적 연결을 위해 전극섬유의 양쪽 끝단에 구리 테이프를 부착하였다.

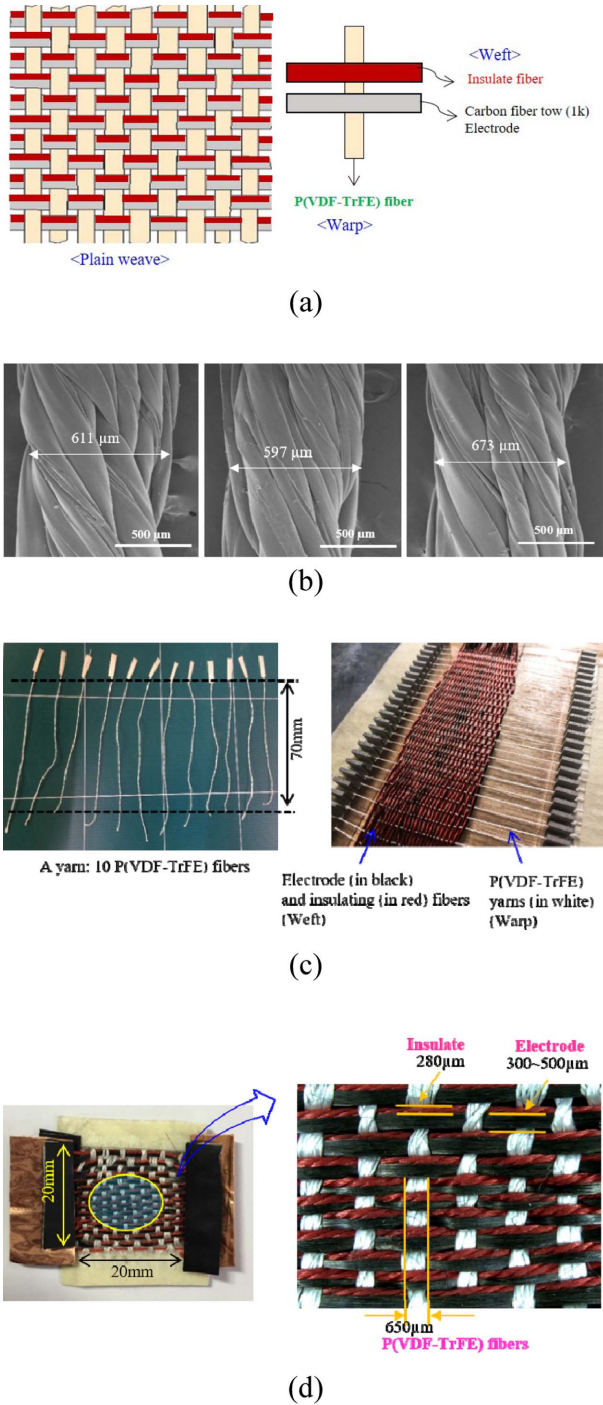


Fig. 2. Fabrication of textile sensor; (a) schematic view of textile sensor, (b) SEM images of P(VDF-TrFE) yarn, (c) weaving with aluminum frame, (d) textile sensor

3. 성능평가

3.1 복합재료구조 및 시편준비

직물센서의 장점인 높은 유연성과 내구성을 극대화시킬 수 있는 복잡형상의 복합재료 구조물은 계란판(Egg-box panel)으로 결정하였다. 복합재료 계란판은 평직 탄소섬유/에

Table 1. Material property of fabrics

	E_L	E_T	X_L	X_T	ρ
WSN3k	54 GPa	54 GPa	591 MPa	591 MPa	1480 kg/m ³

E_L : longitudinal compressive Young's modulus, E_T : transverse compressive Young's modulus, X_L : longitudinal compressive strength, X_T : transverse compressive strength, ρ : density

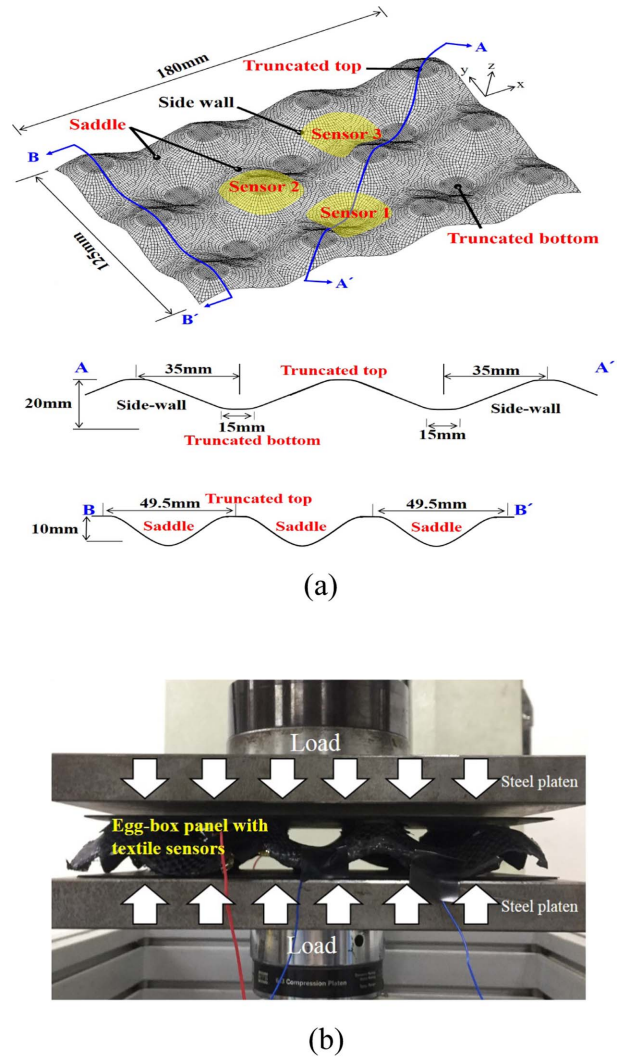


Fig. 3. The shape of composite egg-box core and major terminologies: (a) overall shape and dimensions and principal contour geometries, and (b) test setup and loading direction

폭시 프리프레그(WSN3k, SK Chemical)를 사용하여 제작되었으며 기본적인 물성정보는 Table 1에 표기했다[26,27].

평직 프리프레그의 두께는 0.224 mm이며 계란판 모양과 핵심형상 정보는 Fig. 3a에 나타냈다. 측벽(side-wall)은 잘린 마루(truncated top)와 잘린 골(truncated bottom)과 연결돼 있으며 등마루(saddle)는 잘린 마루와 잘린 골 사이에 위치한다. 복합재료 계란판 전체 구조의 크기는 길이 180 mm

× 폭 125 mm × 높이 20 mm이며 12개의 잘린 마루와 6개의 잘린 골이 포함되어있다. 형상정밀도가 높은 복합재료 구조물 성형을 위해 알루미늄 재질의 계란판 형판을 활용하여 실리콘 금형을 제작하였다[26,27]. 평직 직물 프리프레그는 실리콘 금형 위에 드레이핑 됐으며 동일한 직물센서 3개를 2장의 프리프레그 사이에 삽입하였다. 직물센서의 삽입 위치는 계란판 구조에서 중요한 부위인 잘린 마루, 잘린 골, 그리고 등마루이다(Fig. 3a). 복합재료의 적층각도는 $[0]_{2T}$ 이며 복합재료의 성형과정은 진공백 성형(Vacuum bag degassing molding) 방법으로 오토클레이브(Autoclave)를 사용하여 복합재료 제조사에서 제공받은 성형사이클을 이용하여 성형하였다(30분간 80°C로 온도상승 및 30분간 유지 후 15분 동안 125°C로 올려 150분 간 유지).

3.2 손상탐지시험 및 센서신호획득

만능재료시험기(810, MTS, USA)를 사용하여 복합재료 계란판의 손상 반응과 파손 메커니즘을 분석하기 위해 다중 간헐적 압축시험을 수행하였다. 직물센서가 삽입된 복합재료 계란판은 판의 상·하면과 접촉하고 시험시편의 모서리를 약간 넘어서 확장된 강철 압착 판 사이에 배치한 후 계란판의 두께 방향으로 압축되었다(Fig. 3b). 시험 속도는 2 mm/min이었고 복합재료 계란판은 강철판에 대해 상대 운동이 가능했다. 더불어 전극 섬유를 데이터 수집 장치(NI 9230 & c-DAQ 9174, National Instruments, USA)에 연결하고 직물센서의 압전 출력 전압을 25×10^3 S/s 샘플링 속도로 기록했다. 붕괴 곡선은 공칭 응력(압축 하중을 투영 면적으로 나눈 값) 및 공칭 변형률(Out-of-plane 변위를 시험

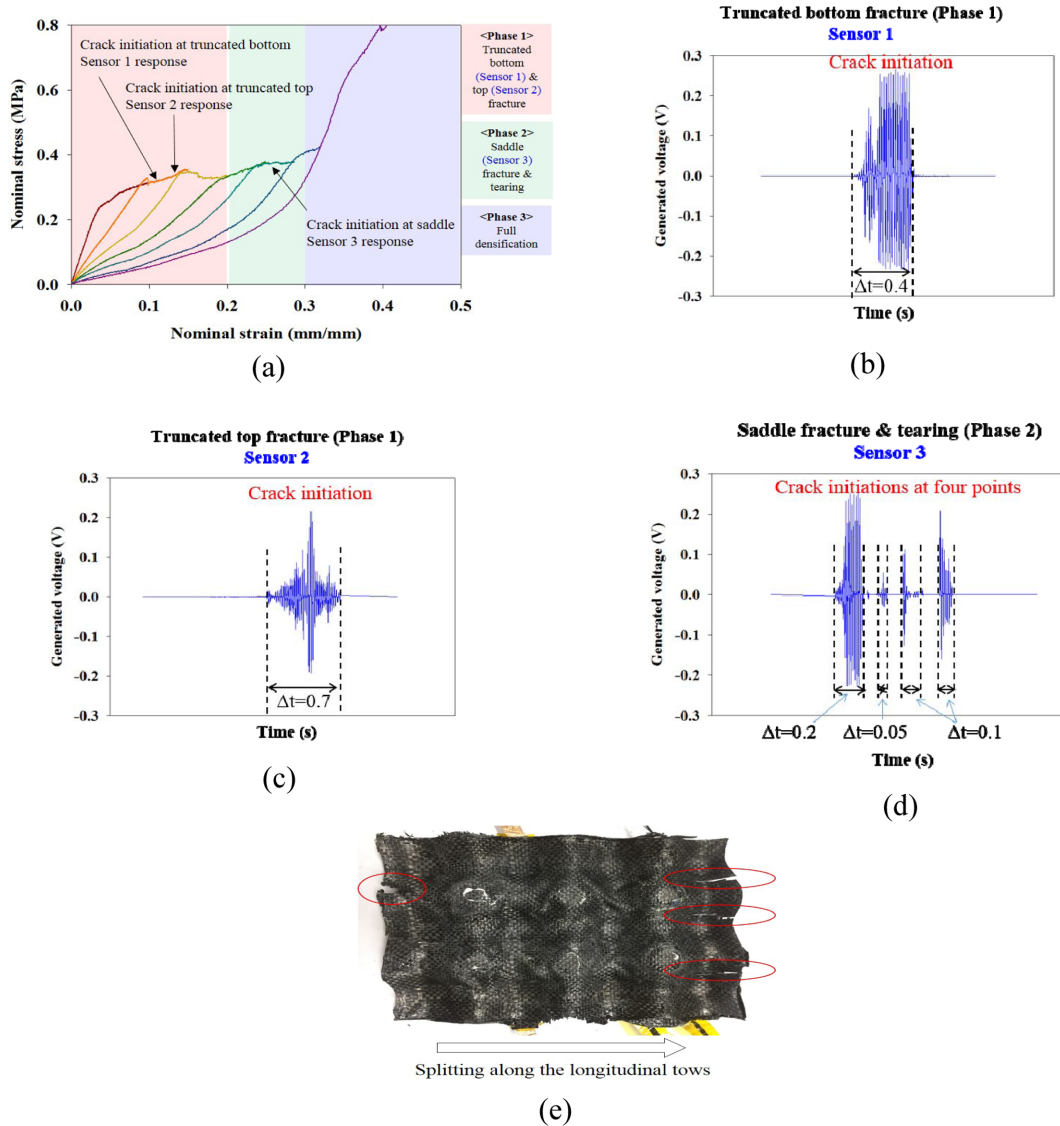


Fig. 4. Structural health monitoring of egg-box panel using textile sensors; (a) result of multiply-interrupted compressive test, (b) signals generated from textile sensor 1 (truncated bottom), (c) signals from textile sensor 2 (truncated top), (d) signals from textile sensor 3 (saddle), and (e) failure mode

편의 원래 높이로 나눈 값)으로 표시됐다(Fig. 4a). 복합재료 계란판의 파손상태확인을 위해 압축시험이 간헐적으로 잠시 멈출 때 마다 육안으로 시편을 관찰하였다. 균열 생성의 정확한 위치를 확인하고 붕괴 반응과 관련 지어서 응력 피크 부근의 세부 사항을 포착하기 위해 변형률 0.2까지는 1 mm 단위로 압축하였고 변형률 0.2이상부터는 3 mm 단위로 압축을 수행했다. 시험 결과, 평판과 접촉하는 하판과 상판의 원형 경계에서 응력 집중에 의해 초기 균열(Phase 1, 공칭 변형률 < 0.2)이 생성되었다. 붕괴가 진행됨에 따라 남은 잘린 골과 잘린 마루에서 연속적으로 파단현상이 진행되었다(가운데 잘린 골에서 시험시편의 꼭대기까지 전파 됨). 그리고 등마루 지점에서 탄소섬유 토우를 따라 찢어지기 시작했고, 결국 등마루 균열이 원형 균열이 있는 곳까지 성장했다. 첫 번째 균열이 발생한 순간(Phase 1) 잘린 골에 위치한 직물센서 1에서 0.25 V의 전압신호가 생성됐으며 신호 발생 후 유지 시간은 약 0.4초로 관찰됐다(Fig. 4b). 이는 직물센서 1이 삽입된 잘린 바닥에서 균열이 발생하는 순간 복합재료에서 발생한 미세한 충격에 반응한 것으로 판단된다. 이어서 두 번째 균열(Phase 1)이 직물센서 2가 삽입된 잘린 마루에서 발생했는데 이때 최고 높은 신호는 0.23 V였으며, 신호 유지시간은 약 0.7초로 관찰됐다(Fig. 4c). 직물센서 1의 경우와 마찬가지로 균열이 생기는 순간에 발생한 충격에 의해 직물센서 2가 반응하였으며 센서에서 발생한 신호의 유지시간(직물센서 1: 0.4초, 직물센서 2: 0.7초)은 압축력에 의한 복합재료 계란판의 최초 균열발생 속도와 관련이 있다고 판단된다. P(VDF-TrFE)의 반응속도는 수십 μ 초 - 수 m초 정도로 매우 빠르기 때문이다[8-16]. 그러나 균열이 생성된 후 성장하는 과정에서는 직물센서 1, 2에서 특별한 신호는 감지되지 않았으며 다른 부위에서 균열이 발생할 때에도 직물센서 1과 2는 전기적 신호를 생성하지 않았다. 상기 사실로 미루어 보아, 잘린 마루와 잘린 골이 압축력에 파손될 때 여러 방향에서 여러 개의 균열이 생성되지 않고 한 방향에서 균열이 생성되어 성장하는 파손 형태를 보인다고 추측할 수 있다. 한편, 등마루 영역에서 첫 번째 균열이 발생한 순간 직물센서 3은 0.2초 동안 0.25 V의 신호를 생성했다. 그 직후 추가적으로 직물센서 3으로부터 연속적으로 획득된 0.05 V(신호유지시간: 0.05초), 0.1 V(신호유지시간: 0.1초) 및 0.2 V(신호유지시간: 0.1초) 신호가 생성됐을 때 등마루 부분의 여러 다른 지점에서 생성된 새로운 균열이 존재한다고 판단된다(Fig. 4d). 등마루의 경우 잘린 마루와 잘린 골의 경우와는 다르게 압축 하중에 의해 여러 방향에서 여러 균열이 발생했다. 상기 결과를 통해 직물센서가 삽입된 부분 혹은 매우 가까운 근접부위에 균열이 발생할 때 그 미세 충격에 의해 센서에서 신호가 발생했으며, 이는 손상 위치 파악의 가능성을 보여주고 있다. 또한 다중간헐적 압축시험 후 계란판 복합재료 시편의 파괴는 종 방향 토우를 따라 찢어지는 형태로 발생했다(Fig. 4e).

한편, 직물 센서는 균열이 발생한 순간에만 전기적 신호를 생성했으며 균열 성장과 같은 다른 유형의 손상은 감지해 내지 못했다. 왜냐하면 P(VDF-TrFE)는 재료 특성 상 동적 힘과 압력감지에 특화돼 있기 때문인데 외력에 의해 P(VDF-TrFE)에서 생성된 전하는 시간이 지남에 따라 빠르게 사라진다[28]. 따라서 정적 하중 및 그에 따른 손상과정은 P(VDF-TrFE) 직물센서가 감지해내기 쉽지 않다. 전하소멸속도는 재료의 유전 상수, 내부 저항 및 전도도에 의존한다. 복합재료 계란판이 완전히 파괴된 후에도 내부에 삽입된 모든 직물센서는 여전히 생존했으며 추가적인 외부 충격을 감지할 수 있었다. 따라서 직물센서의 높은 기계적 신뢰성(유연성 및 내구성)이 입증되었다.

4. 결 론

비틀-신장 방법으로 제작된 P(VDF-TrFE) 섬유를 사용하여 평직 구조의 직물센서를 제작하였다. 직물 센서는 구조 건전성 모니터링의 도구로써 활용가능성 평가를 위해 복잡 형상의 구조(탄소섬유/에폭시 복합재료로 제작된 계란판)에 적용하였다. 직물센서 3개를 2장의 복합재료 프리프 레그 사이 계란판의 주요 지점(잘린 마루, 잘린 골, 등마루)에 삽입하였다. 붕괴 반응과 계란판의 파손 메커니즘을 연관시키기 위해 다중간헐적 압축시험을 직물센서가 삽입된 복합재료 계란판을 사용하여 수행하였다. 시험 중 직물센서는 복합재료 구조에 균열이 발생하는 순간에 전압(0.05 V-0.25 V)을 생성했으며, 해당 데이터를 통해 균열 발생 및 균열위치 파악을 할 수 있었다. 그러나 직물 센서는 균열 발생만을 감지했으며 정적 하중 및 균열 성장과 같은 다른 유형의 손상은 감지하지 못했다. 왜냐하면 P(VDF-TrFE)는 동적 하중에 의해 생성된 전하가 빠르게 소멸되기 때문에 동적인 힘과 압력에 의해 발생하는 거동에 주로 반응하기 때문이다. 또한 완전히 파괴된 복합재료 계란판 내에서 모든 직물센서는 여전히 생존하여 추가적인 충격을 감지할 수 있었다. 이러한 결과로부터 비틀-신장 방법으로 제작된 P(VDF-TrFE) 섬유로 만들어진 직물센서의 높은 기계적 신뢰성(유연성 및 내구성)을 확인할 수 있었으며, 직물센서는 FBG 센서와 같은 기존의 센서가 취성으로 인해 적용될 수 없는 많은 복잡한 모양의 구조물(스마트 공장, 자동차 부품, 압력 용기, 파이프 라인, 콘크리트 구조물 등)에 성공적으로 적용될 수 있는 가능성을 보였다. 더불어 P(VDF-TrFE) 직물센서는 자연 재해 및 산업 재해 예측 시스템 및 자체 구동 웨어러블 장치와 같은 많은 산업 분야에서 수많은 잠재적인 응용 분야에서 유망할 것이라고 판단된다. 후속연구로서 하중의 크기에 따른 P(VDF-TrFE)의 전기적 신호 크기의 선형성 평가, P(VDF-TrFE) 직물센서 삽입으로 인한 복합재료구조의 기계적 물성 저하 평가, 복합재료구조의 곡면에 트레이핑 될 경우 직물센서의 거시적·미시적 변형 및 그에

따른 물성변화 평가 등이 수행될 예정이다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-나노·소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016M3A7B4910532).

REFERENCES

- Balageas, D., et al., *Structural Health Monitoring*, Wiley-ISTE, 2006.
- Chan, T.H.T., et al., "Fiber Bragg Grating Sensors for Structural Health Monitoring of Tsing Ma Bridge: Background and Experimental Observation", *Engineering Structures*, Vol. 28, 2006, pp. 648-659.
- Jayant, S., and Inderjit, C., "Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, 2000, pp. 246-257.
- Bae, J.H., et al., "Design and Fabrication of a Metal-composite Hybrid Wheel with a Friction Damping Layer for Enhancement of Ride Comfort", *Composite Structures*, Vol. 133, 2015, pp. 576-584.
- Mouritz, A.P., et al., "Review of Advanced Composite Structures for Naval Ships and Submarines", *Composite Structures*, Vol. 53, 2001, pp. 21-42.
- Jovan, O., et al., "Lightweight Design and Crash Analysis of Composite Frontal Impact Energy Absorbing Structures", *Composite Structures*, Vol. 94, 2012, pp. 423-430.
- Konk, H.P., et al., "Piezoelectric Fiber Composite Transducers for Health Monitoring in Composite Structure", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 194, 2013, pp. 84-94.
- Rekik, H., et al., "Dielectric Relaxation Behaviour in Semi-crystalline Polyvinylidene Fluoride (PVDF)/TiO₂ Nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, 2013, pp. 1199-206.
- Yang, C., et al., "Effect of Coupling Agents on the Dielectric Properties of CaCu₃Ti₄O₁₂/PVDF Composites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 50, 2013, pp. 180-186.
- Saghafi, H., et al., "The Effect of PVDF Nanofibers on Mode-I Fracture Toughness of Composite Materials", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 72, 2015, pp. 213-216.
- Bae, J.H., et al., "Effect of Water Absorption on the Mechanical Properties of Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) Copolymer Films", *Polymer Engineering & Science*, Vol. 54, 2014, pp. 2654-2659.
- Xia, F., et al., "High Electromechanical Responses in a Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene) Terpolymer", *Advanced Materials*, Vol. 14, 2002, pp. 1574.
- Zhang, S.H., et al., "Normal Ferroelectric to Ferroelectric Relaxor Conversion in Fluorinated Polymers and the Relaxor Dynamics", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, 2006, pp. 271-280.
- Liu, X.Q., et al., "Reinforcement and Plasticization of PMMA Grafted MWCNTs for PVDF Composites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 53, 2013, pp. 9-16.
- Zhang, S.H., et al., "Relaxor Ferroelectric Polymers", *Ferroelectric*, Vol. 339, 2006, pp. 1723-1731.
- Siponkoski, T., et al., "Electromechanical Properties of PZT/P(VDF-TrFE) Composite Ink Printed on a Flexible Organic Substrate", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 80, 2015, pp. 217-222.
- Sharma, T., et al., "Flexible Thin-film PVDF-TrFE Based Pressure Sensor for Smart Catheter Applications", *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 41, 2013, pp. 744-751.
- Corres, J.M., et al., "Optical Fiber Humidity Sensors Using PVDF Electrospun Nanoweb", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 11, 2011, pp. 2383-2387.
- Puthillath, P., et al., "Hybrid Inversion of Elastic Moduli of Composite Plates from Ultrasonic Transmission Spectra Using PVDF Plane Wave Sensor", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, 2010, pp. 8-16.
- Georgousis, G., et al., "Strain Sensing in Polymer/carbon Nanotube Composites by Electrical Resistance Measurement", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 68, 2015, pp. 162-169.
- Butler, R., and Rao, V., "Optimal Control of Infinite-order Smart Composite Structural Systems Using Distributed Sensors", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 4, 1994, pp. 577-89.
- Nunes-Pereira, J., et al., "Energy Harvesting Performance of BaTiO₃/poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) Spin Coated Nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 72, 2015, pp. 130-136.
- Seidel, S.M., et al., "PVDF-HFP/ether-modified Polysiloxane Membranes Obtained via Airbrush Spraying as Active Separators for Application in Lithium Ion Batteries", *Chemical Communications*, Vol. 51, 2015, pp. 12048-12051.
- Ma, M.M., et al., "Bio-inspired Polymer Composite Actuator and Generator Driven by Water Gradients", *Science*, Vol. 339, 2013, pp. 186-189.
- Bae, J.H., and Chang, S.H., "A New Approach to Fabricate Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) Fibers Using a Torsion-stretching Method and Characterization of Their Piezoelectric Properties", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 99, 2016, pp. 112-120.
- Chung, J.G., et al., "Deformation and Energy Absorption of Composite Egg-box Panels", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 2342-2349.
- Yoo, S.H., and Chang, S.H., "An Experimental Study on Energy Absorbing Structures Made of Fabric Composites", *Composite Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 211-219.
- Sorichetti, P.A., and Santiago, G.D., "Modeling Thin Film Piezoelectric Polymer Ultrasonic Sensors", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 85, 2014, pp. 1-7.