

센서-구조 일체형 복합재료 구조물 제작 방법

한대현* · 강래형*[†] · Jordan Thayer** · Charles Farrar**

Manufacturing Method for Sensor-Structure Integrated Composite Structure

Dae-Hyun Han*, Lae-Hyong Kang*[†], Jordan Thayer, Charles Farrar**

ABSTRACT: A composite structure was fabricated with embedded impact detection capabilities for applications in Structural Health Monitoring (SHM). By embedding sensor functionality in the composite, the structure can successfully perform impact localization in real time. Smart resin, composed of $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_2$ (PNN-PZT) powder and epoxy resin with 1:30 wt%, was used instead of conventional epoxy resin in order to activate the sensor function in the composite structure. The embedded impact sensor in the composite was fabricated using Hand Lay-up and Vacuum Assisted Resin Transfer Molding(VARTM) methods to inject the smart resin into the glass-fiber fabric. The electrodes were fabricated using silver paste on both the upper and bottom sides of the specimen, then poling treatment was conducted to activate the sensor function using a high voltage amplifier at 4 kV/mm for 30 min at room temperature. The composite's piezoelectric sensitivity was measured to be 35.13 mV/N by comparing the impact force signals from an impact hammer with the corresponding output voltage from the sensor. Because impact sensor functionality was successfully embedded in the composite structure, various applications of this technique in the SHM industry are anticipated. In particular, impact localization on large-scale composite structures with complex geometries is feasible using this composite embedded impact sensor.

초 록: 본 연구는 복합재료 구조물에 전기-기계 변환 기능을 융합한 센서-구조 일체형 복합재료 구조물 제작 방법에 관한 것으로 복합재료 구조물 자체가 센서 역할을 수행할 수 있도록 하여 구조 스스로 충격이나 진동 신호를 감지하고 손상 위치 또는 손상 정도를 실시간으로 모니터링 할 수 있는 다기능 복합 구조물에 관한 연구이다. 복합재 구조물에 전기-기계 변환 기능을 부여하기 위해 복합재 제작에 사용되는 에폭시 수지 대신 전기-기계 변환 기능을 갖는 $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_2$ (PNN-PZT) 분말과 에폭시 수지를 1:30 wt% 혼합하여 제작된 스마트 수지를 사용하였다. Hand Lay-up 공법과, VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 성형 방법을 이용하여 유리섬유에 스마트 수지를 함침시켜 센서-구조 일체형 복합재료 구조물을 제작하였다. 구조물을 센서로 사용하기 위해 시편의 윗면과 아랫면에 전도성 도료를 사용하여 전극을 제작하였고, 고전압 앰프를 이용하여 상온에서 30분간 4kV/mm의 전계로 분극 처리를 수행하였다. 이후 충격망치를 사용하여 시편에 충격을 가했을 때 출력되는 전기 신호와 충격망치 신호를 비교하여 충격 신호 감응 및 감도를 측정하고 그 결과를 기술하였다.

Key Words: 스마트 복합재(Smart composite), 센서(Sensor), 충격(Impact), 감도(Sensitivity), 분극(Poling)

Received 30 June 2015, received in revised form 24 August 2015, accepted 27 August 2015

*Dept. of Mechatronics Engineering, and LANL-CBNU Engineering Institute Korea, Chonbuk National University, Korea

*[†]Dept. of Mechatronics Engineering, and LANL-CBNU Engineering Institute Korea, Chonbuk National University, Korea, Corresponding author (E-mail: reon.kang@jbnu.ac.kr)

**Los Alamos National Laboratory, USA

1. 서 론

복합재료 구조란 두 가지 이상의 재료를 섞어서 전체적인 재료의 특성을 향상시킨 혼합 구조로 일반적으로 유리 섬유나 탄소 섬유 또는 아라미드섬유와 같은 고강도 섬유 재료에 에폭시 수지를 함침시켜 경화시킨 구조물이다. 이러한 복합재 구조는 뛰어난 비강도(Specific strength), 비강성(Specific stiffness), 우수한 내환경성 등 많은 장점을 가지고 있어 경량화가 중요시되는 항공 우주 분야를 비롯하여 건축, 방위산업, 자동차, 해양, 전기/전자, 소비재 산업에 이르기까지 널리 사용되고 있고 그 적용 분야가 점차 확대되고 있다. 하지만 이처럼 증가하는 사용량만큼 관심이 집중되는 것은 운영상의 안전성 확보이다.

예를 들어, 최근 신 재생 에너지 보급의 일환으로 많은 풍력 발전소가 도입되었고 효율을 높이고자 복합재료를 이용하여 대형화, 경량화를 달성하였다. 이런 대형 복합재 구조물은 운용 환경상 인적이 드문 해안, 해상, 그리고 고산 지대와 같이 극한지역에 설치되는 경우가 많아 접근성이 나쁘고, 새, 박쥐, 곤충 등과의 충돌 또는 낙뢰와 같은 다양한 이유로 구조물의 파손이 간헐적으로 발생하고 있어 시스템의 효율적인 유지관리와 신뢰성 확보를 위해 구조물에 발생한 충격의 시점과 그 정도를 파악하는 실시간 감시 기술이나 구조물의 건전성 모니터링(Structural health monitoring, SHM) 기술의 필요성이 점차 증가하고 있다.

이러한 풍력발전기 블레이드의 상태를 모니터링하기 위해 압전 세라믹(Piezoelectric ceramic) 센서, 스트레인게이지(Strain gauge), 광섬유 격자(Fiber bragg grating, FBG) 센서 등 다양한 종류의 센서가 사용되고 있다. 압전 세라믹 센서는 전기-기계 변환 효율이 매우 높아 작은 충격에도 신호를 검출할 수 있는 높은 감도를 가지며, 비교적 손쉽게 설치 가능하지만, 복잡한 형상을 갖는 구조물, 변형률이 큰 구조물 등과 같은 곳에 적용하기 어렵고, 세라믹 센서에 충격이 직접 가해지면 쉽게 파손되며 높은 감도로 인해 유의미한 신호를 취득하기 위해서 불필요한 신호를 차단하는 필터링 기술이 동반되어야 하는 단점이 있다. 스트레인게이지는 가격이 저렴하고 측정되는 데이터의 신뢰성과 환경 변화에 민감하지 않아 안정성은 좋지만, 측정할 수 있는 변형률 범위가 작아(<5%) 과도한 변형이나 반복되는 하중에 센서가 파손되는 문제점이 있다.

FBG 센서는 특정 파장의 빛을 반사시켜 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio, SNR)가 낮아 신호 손실이 적고, 다점 측정에 용이하지만 온도, 습도, 그리고 외부 환경 변화에 따라 주파수 왜곡 문제가 발생하는 단점이 있어 상용화에 어려움을 겪고 있다[1].

이처럼 다양한 종류의 센서를 사용하여 구조물에 충격 신호를 감지할 수 있지만 구조물이 제작된 이후 추가적인 설치 작업이 필요하여 비용적인 측면에서 경쟁력이 떨어

지고, 구조 동작의 효율성 면에서 보면 외부에 센서가 장착됨으로써 공기역학적 특성이 저하될 수 있으며, 일정 영역을 담당하는 센서에 이상이 발생할 경우 정상적인 기능을 수행할 수 없는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 복합 구조물 자체가 센서 역할 수행이 가능하도록, 복합재 제작에 사용되던 에폭시 수지 대신 전기-기계 변환 기능을 갖는 스마트 수지[2-5]를 사용하여 센서-구조 일체형 복합재료 구조물 제작하고 이 구조물에서 충격 신호 감지가 가능한지 확인하였다. 먼저, 센서-구조 일체형 복합재 구조물 제작 가능성을 살펴보기 위해, Hand lay-up 및 VARTM 성형 방법을 사용하여 유리섬유에 스마트 수지를 함침시켜 시편을 제작하였다[6,7]. 이후 충격 센서 가능성을 살펴보기 위해, 전도성 도료를 이용해 시편의 윗면과 아랫면에 전극을 제작 후 분극 처리하였고, 센서의 감도 측정 및 충격 신호 감응 여부 평가를 위해 충격 실험을 수행하였다.

2. 전기-기계 변환기능을 갖는 스마트 수지

전기-기계 변환기는 기계적인 움직임이나 힘이 가해진 경우 전기적인 신호를 출력하고, 그 반대로 전기 신호를 가한 경우 기계적인 힘이 출력되는 재료를 말한다. 압전 재료가 대표적인 전기-기계 변환기라고 할 수 있으며, 이런 압전 재료를 에폭시와 같은 수지와 혼합하면 전기-기계 변환 기능을 가진 스마트 수지를 제작할 수 있다.

압전 재료는 크게 연질 압전 재료(Soft type)와 경질 압전 재료(Hard type)로 분류될 수 있는데, 연질의 압전 재료는 높은 전기-기계적 결합 계수와 높은 압전 변형률 계수를 특징으로 하여 수지와 혼합될 경우 발생하는 감도 저하 문제를 보완할 수 있고 분극이 상대적으로 용이하여 상온에서 분극 처리를 필요로 하는 스마트 수지에 적합하다[8]. 본 연구에서는 연질 압전 재료인 PNN-PZT 파우더를 제작하여 스마트 수지를 개발하였다. 총 다섯 가지의 산화물로 구성되어 있는 PNN-PZT의 혼합 비율은 Table 1에 정리되어 있으며 모두 SIGMA ALDRICH 사의 시약이 사용되었다.

PNN-PZT 압전 파우더 제작은 Fig. 1에 정리되어 있는데 다섯 가지의 산화물을 혼합하고, 하소 과정(Calcination), 소결 과정(Sintering)을 거쳐 수평 Sieve 장비(AS ONE, SKH-01)를 이용하여 53 μm 이하의 입자 크기로 제작되었다. 이렇게 제작된 PNN-PZT 파우더와 에폭시 수지를 혼합 후, Fig. 2와 같이 진공 데시케이터 안에서 기공 제거 작업을 거치게 된다.

Table 1. Mixing ratio for PNN-PZT powder

| Material | PbO | NiO | TiO ₂ | ZrO ₂ | Nb ₂ O ₅ |
|----------|-------|------|------------------|------------------|--------------------------------|
| wt% | 66.91 | 6.10 | 7.54 | 4.98 | 14.46 |

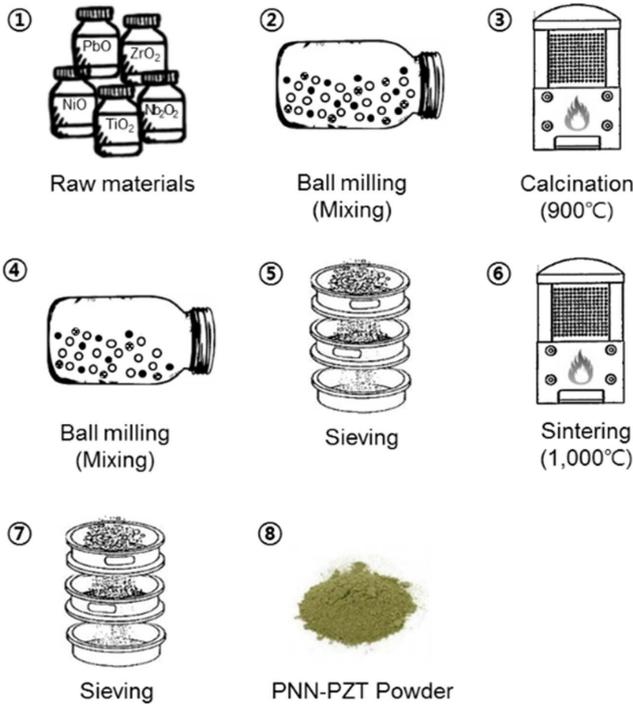


Fig. 1. Fabrication process of PNN-PZT powder

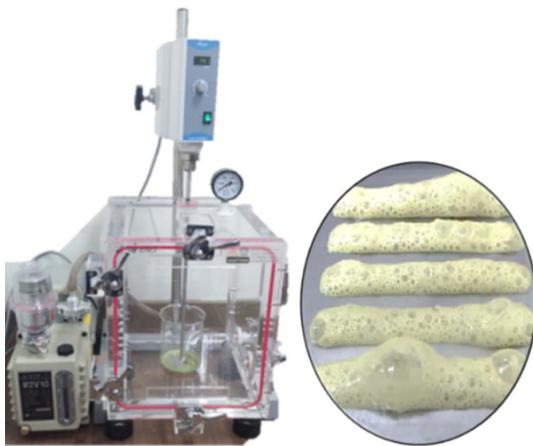


Fig. 2. Voids elimination in a high vacuum desiccator

3. 센서-구조 일체형 복합재료 구조물 제작

센서-구조 일체형 복합재료 구조물은 핸드 레이업(Hand lay-up), RTM(Resin transfer molding), VARTM, 오토클레이브(Autoclave) 성형, Hot press 등 기존에 사용되는 복합재 성형 방법을 그대로 이용할 수 있다. 본 연구에서는 간단하고 효율적으로 제작할 수 있는 Hand lay-up 공법과 VARTM 공법을 사용하여 제작하였다.

VARTM 공법은 양쪽 면이 모두 금형으로 되어있는 RTM 성형 방법과 달리 한쪽 면의 금형과 진공백으로 구성되어 있고 금형 내부와 대기압과의 압력차를 진공펌프로 형성

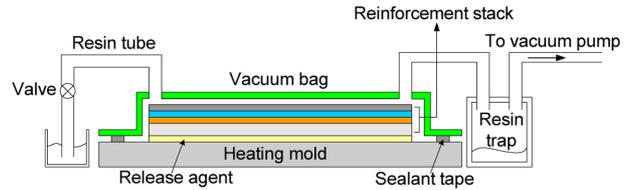


Fig. 3. Schematic of vacuum assisted resin transfer molding

Table 2. Materials information used in sensor-structure integrated composite structure

| Materials | Producer | Model | |
|-------------------|--------------------|----------------|-------------------------|
| | | Epoxy resin | KUKDO Chemical Co. Ltd. |
| | Hardner | KFH-150 | |
| UD E glass fabric | OWENS CORNING Ltd. | EKU 1200 HS-12 | |

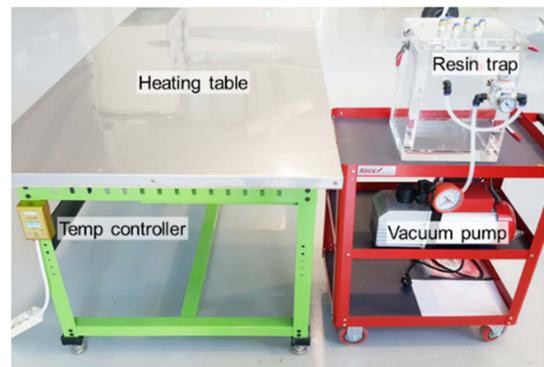


Fig. 4. Fabrication set-up for the sensor-structure integrated composite structure using VARTM

시켜 내부에 적층되어 있는 프리폼(Preform)에 수지를 신속하게 함침시켜 복합재료 구조물을 성형하는 방법으로 RTM 및 Autoclave 공법에 비해 성형비용이 저렴하고, 고품질의 대형 복합소재 구조물 제작에 효과적이며 Hand lay-up 공법보다 좋은 품질의 제품을 생산할 수 있고 Fig. 3에 VARTM 공법을 상세히 도식화하였다.

본 연구에서는 센서-구조 일체형 복합재 구조물, 간단히 스마트 복합재를 제작하는 데 그 목적이 있으므로, 우선 간단하게 Hand lay-up 방법을 이용하여 수지의 낭비를 줄이되 제작된 복합재료 구조물이 센서 역할을 수행할 수 있는지 검토를 해보았으며, 이후 VARTM을 적용하여 구조물 내에 기공이 제거된 좀더 좋은 품질의 스마트 복합재를 제작하고자 하였다. Table 2에는 제작에 사용된 재료의 정보가 정리되어 있고 Fig. 4에서는 실제 센서-구조 일체형 복합재료 구조물 제작에 사용된 VARTM 장비 사진을 나타내었으며, 모두 자체 제작하였다. Hand lay-up 방법을 이용한 스마트 복합재를 제작하기 위해 압전 파우더와 에폭시를 무게비 1:1로 혼합하였고, VARTM 기법을 이용한 스마트 복

합재 제작시에는 압전 파우더와 에폭시를 무게비 1:30으로 하여 제작하였다. Hand lay-up의 경우에는 기존 1:1 비율에서 충격 감응 실험을 한 경험을 토대로 가능성을 보기 위해 선정하였으며, VARTM 이용시에는 수지 낭비를 줄이고, 기존 1:10 비율에서도 충분한 감도를 가진다는 선행 연구를 기반으로 1:30의 비율로 선정하여 진행하였다.

3.1 Hand lay-up 공법을 이용한 제작 방법

Hand lay-up 공법을 이용한 센서-구조 일체형 복합재료 구조물의 제작방법은 Fig. 5에 요약하였고, 그림에 나온 절차를 정리하면 아래와 같다.

- 1) Release agent를 몰드 하판 표면에 도포.
- 2) Release agent를 몰드 상판 표면에 도포.
- 3) PNN-PZT와 에폭시수지 혼합 후 스마트레진 제작.
- 4) 유리섬유 및 탄소섬유에 스마트 수지를 주입.
- 5) 4번 과정을 반복하여 스마트 수지를 섬유에 주입.
- 6) 상판 몰드로 복합재료 구조물에 가압 후 경화.

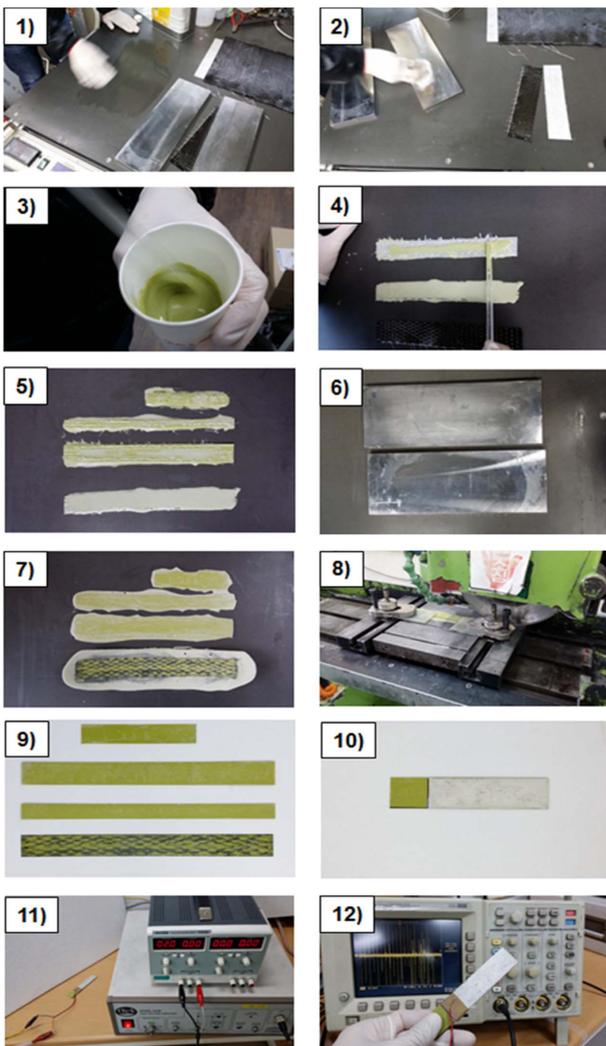


Fig. 5. Fabrication procedure of the hand lay-up method

- 7) 경화된 복합재료 구조물의 모습.
- 8) 절단기를 이용한 시편 절단.
- 9) 제작 완료된 센서 구조 일체형 복합재료 구조물.
- 10) 전도성 도료를 이용한 전극 제작.
- 11) 열처리 없이 상온에서 분극 작업 수행.
- 12) 충격 신호 감응 여부 모니터링.

3.2 VARTM 공법을 이용한 제작 방법

VARTM 공법을 이용한 센서-구조 일체형 복합재료 구조물의 제작방법은 Fig. 6에 나타내었으며, 그림에 나타난 각 단계는 아래와 같다.

- 1) 제작하고자 하는 크기로 섬유 제단.
- 2) Sealant tape 부착 후 Release agent를 몰드 표면에 도포.
- 3) 수지의 균일한 분배를 위해 Spiral 설치.
- 4) 유리섬유 또는 카본 섬유를 넣고 진공백으로 밀봉.
- 5) 진공펌프 작동 후 감압하여 진공 누설 여부 확인 후 수지 주입.
- 6) 절단장치를 이용하여 시편 절단.
- 7) 제작 완료된 센서 구조 일체형 복합재료 구조물.

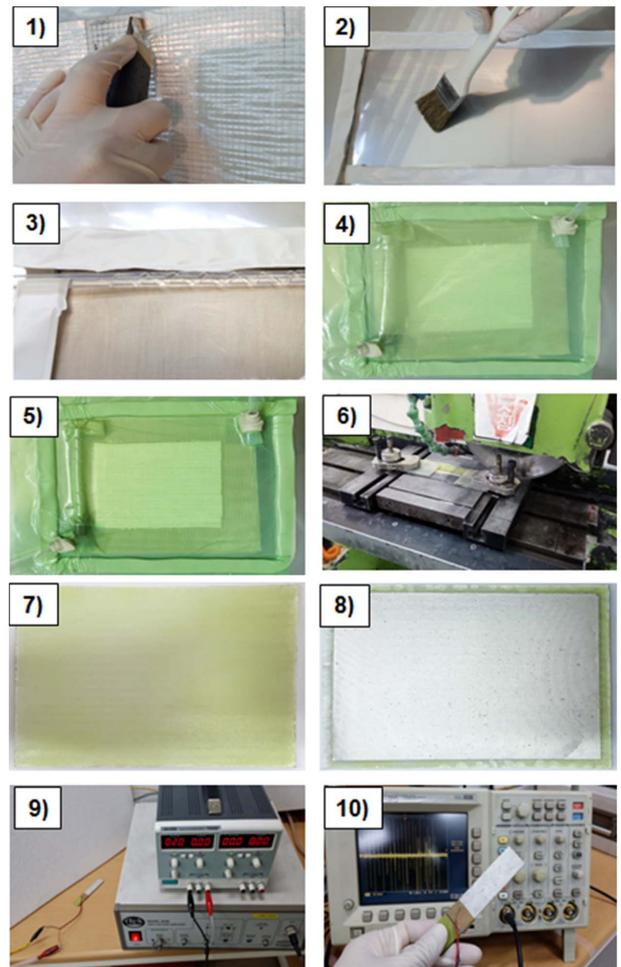


Fig. 6. Fabrication procedure of the VARTM method

- 8) 전도성 도료를 이용하여 전극 제작.
- 9) 열처리 없이 상온에서 분극 작업 수행.
- 10) 충격 신호 감응 여부 모니터링.

4. 감도 측정 방법 및 충격실험 구성

센서-구조 일체형 복합재료 구조물의 감도 및 충격 신호를 측정하기 위해 충격 망치(PCB, 086C01)를 사용하였다. Fig. 7과 같이 충격 망치를 이용해 복합재료 구조물 시편에 충격을 가했을 때 출력되는 힘 신호와 이때 시편에서 충격

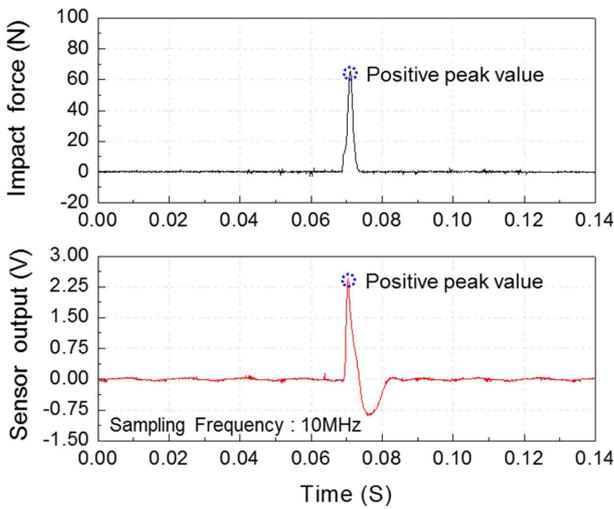
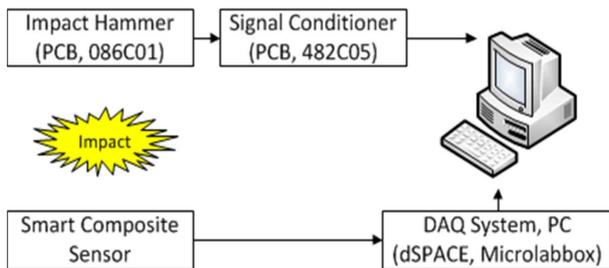
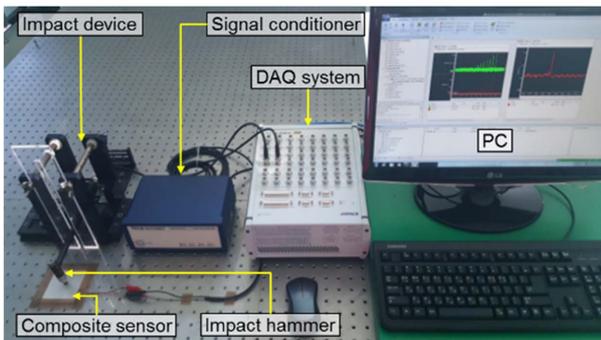


Fig. 7. Impulse response of smart composite sensor according to the impact signal



(a) Schematic test set-up



(b) Actual impact test set-up

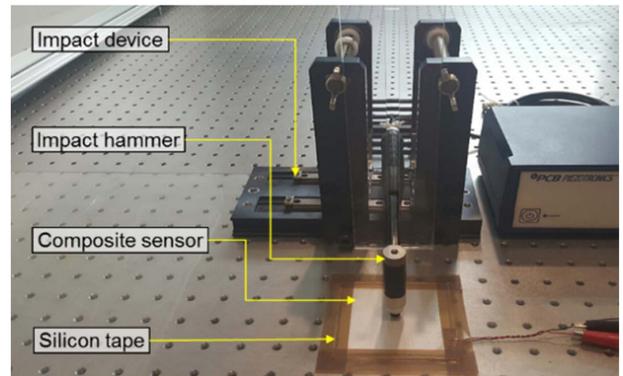
Fig. 8. Impact test set-up

힘에 대한 응답 신호를 수집하였고, 감도를 측정하기 위해 식 (1)과 같이 충격 망치의 최대 힘과 센서의 응답 최대 전압의 비율로 감도를 정의하고 평가하였다.

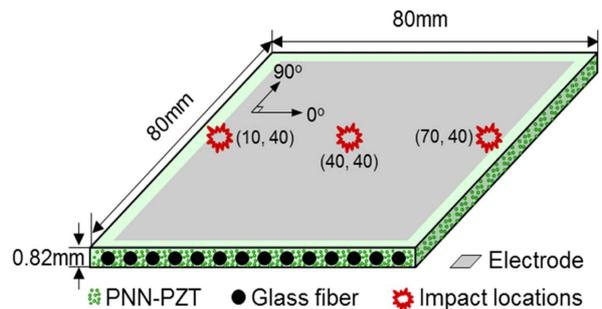
$$Sensitivity (S) = \frac{Output Voltage (mV)}{Impact Force (N)} \quad (1)$$

Fig. 8은 감도 측정 실험의 개념도를 보여준다. 충격을 모사하기 위해 연질의 충격 팁이 부착된 충격 망치가 사용되었다. 센서와 충격 망치에서 출력되는 신호를 수집하기 위해 각 센서에서 출력되는 신호는 DAQ 장비(dSPACE, MicroLabBox)의 입력단자에 연결하였고 10 MHz 취득 주파수로 계속되었다. 광학 테이블 위에 고무패드를 설치하여 충격 시 발생할 수 있는 잡음 신호를 최소화하였고, 시편이 움직이는 것을 방지하기 위해 실리콘 테이프를 이용하여 시편을 고정하였다.

Fig. 9(a)는 동일한 충격 조건을 모사하기 위해 고안된 충격 장치를 보여준다. 충격망치의 자유낙하 높이를 변화시켜 충격힘을 달리할 수 있고 센서에 충격이 가해질 때 시편과 충격 망치가 수직을 이루도록 제작하여 반복되는 충격 실험에서도 충격 조건이 동일하게 재연될 수 있도록 하였다. Fig. 9(b)는 0.8 mm 두께를 갖는 단방향 유리섬유 (OWENS CORNING, EKU1200 HS-12)와 에폭시 수지(국도 화학, KFR-120)를 사용하여 VARTM공법으로 제작된 센서



(a) Impact device for sensitivity measurement



(b) Schematic of smart composite sensor for sensitivity measurement

Fig. 9. Impact test set-up for measurement of sensitivity

의 크기 ($80 \times 80 \times 0.82 \text{ mm}^3$)와 충격 위치를 보여준다. 3번의 반복 실험을 위해 시편의 중앙과 왼쪽 그리고 오른쪽 끝부분을 선정하였다.

5. 센서-구조 일체형 복합재 구조물의 감도 측정 및 충격실험 결과

센서-구조 일체형 복합재료 구조물의 충격 신호 감응 여부 및 충격힘의 변화에 따른 응답 신호와 감도를 측정하기 위해 VARTM 공법으로 제작된 시편을 사용하였다. 시편의 분극 시간과 분극 전계는 최적 분극 조건 검토에 대한 선행 연구에서 확인된 결과를 바탕으로 분극 전계 4 kV/mm, 분극 시간 30분이며, 분극 온도는 향후 비행기, 풍력발전 터빈, 그리고 교량과 같은 구조물에 적용될 경우 분극을 위해 추가적인 고온 장비의 필요성을 없앴과 동시에 열처리 에 따른 구조물의 변형을 방지하고자 상온에서 수행되었다.

충격힘 변화에 따른 센서-구조 일체형 복합재료 구조물의 응답 신호를 Fig. 10에서 살펴볼 수 있다. 충격힘이 증가할수록 구조물의 응답신호 역시 증가하는 결과를 확인할 수 있는데 이는 센서-구조 일체형 복합재료 구조물이 충격 신호를 외부 힘에 비례하여 감응할 수 있다는 결과를 보여준다.

센서-구조 일체형 복합재료 구조물은 충격힘에 대하여 0.5-3.3 V의 출력 전압이 측정되었고 이때 시편에 가해진 충격힘의 범위는 약 5-110 N이었다. 충격 실험에 대한 센서의

Table 3. Sensitivity of piezoelectric smart composite

| Condition | Fixed at (0.0) | | Not fixed at (0.0) | |
|-----------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| | Sensitivity (mV/N) | Adj. R-Square | Sensitivity (mV/N) | Adj. R-Square |
| Test #1 | 35.91 | 0.959 | 22.88 | 0.928 |
| Test #2 | 33.82 | 0.954 | 20.59 | 0.937 |
| Test #3 | 35.67 | 0.976 | 26.33 | 0.913 |
| Average | 35.13 | 0.963 | 23.26 | 0.926 |

응답을 검증하기 위해 충격 실험은 동일한 시편에 3번씩 반복하였고 센서의 감도, 그리고 측정된 감도와 실제 데이터의 유의차를 비교 분석하기 위해 취득된 데이터를 이용하여

1. 원점(0,0)에 고정하지 않은 경우(Fig. 10(a))
2. 원점(0,0)에 고정한 경우(Fig. 10(b))

를 고려하였다. Table 3에는 각 조건에 대한 시편의 감도와 충격힘에 대한 센서의 측정 값과 감도의 차이를 보여주는 Adj. R-Square 값을 요약 정리하였다.

감도 직선을 원점(0,0)에 고정하지 않은 경우, 평균감도 (23.26 mV/N)와 Adj. R-Square의 평균값(0.926)은 단순히 측정된 데이터만을 가지고 반복 실험 결과의 경향성과 감도를 원점에 고정한 경우와 비교 확인하기 위해 수행하였다. 하지만, 센서에 충격이 없을 경우 센서에는 응답 신호를 발생하지 않으므로 센서의 감도로 사용하기에는 적합하지 않다.

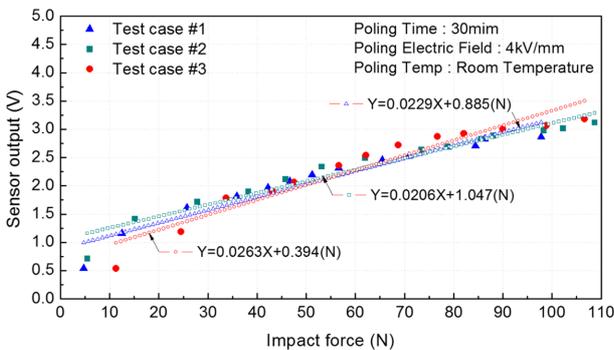
감도 직선을 원점(0,0)에 고정한 경우를 살펴보면 평균 감도는 35.13 mV/N 이며 Adj. R-Square 평균값은 0.963으로 원점(0,0)에 고정하지 않은 경우(0.926)보다 높은 값을 보여주고 있다. 이 결과는 센서-구조 일체형 복합재 구조물을 충격 센서로 사용할 경우 감도는 원점(0,0)에 고정하여 구하는 것이 센서의 감도 측면에서 적합하다고 할 수 있다.

6. 결론

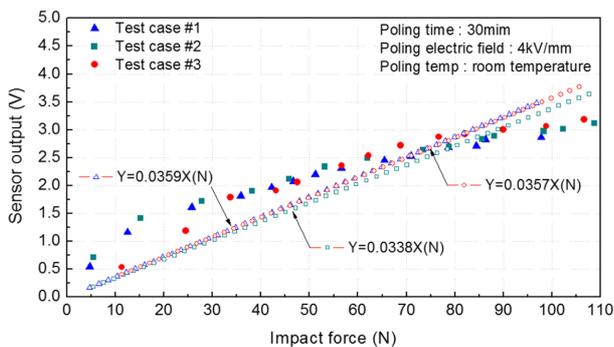
본 연구에서는 센서-구조 일체형 복합재료 구조물의 제작을 위해 Hand lay-up, 그리고 VARTM 제작 공법을 이용하였다. 제작된 복합재 구조물의 센서 동작을 위해 상하부에 전극을 제작한 후 상온에서 분극 전계 4 kV/mm로 30분간 분극 처리를 수행하였다. 시편의 감도를 비교하기 위해 3번의 반복 실험을 5-110 N 범위를 갖는 충격힘을 모사하면서 실험적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) PNN-PZT와 Epoxy 수지를 무게비 1:30으로 혼합한 스마트 수지를 사용하여 제작된 센서-구조 일체형 복합재료 구조물은 상온에서 간단한 분극 처리만을 통해 충격신호 감응이 가능하였다.

(2) 외부 충격힘에 대한 구조물의 응답 신호를 확인하기



(a) Not fixed intercept at (0, 0)



(b) Fixed intercept at (0, 0)

Fig. 10. Piezoelectric sensitivity poled at 4 kV/mm

위해 반복 실험을 수행 한 결과 교차점을 원점에 고정 한 경우와 고정하지 않은 경우에 관계없이 선형적인 감도를 갖는 것을 확인하였다.

(3) 충격힘의 범위가 5-110 N의 경우 평균 35.13 mV/N 의 감도와 Adj. R-Square 평균값은 0.963으로 외부 충격에 대해 선형적인 센서응답을 확인하였다(실제 충격이 없을 경우 센서는 응답신호를 발생하지 않으므로 원점에 고정하여 Curve fitting한 값이 센서의 감도가 된다).

센서-구조 일체형 복합재료 구조물은 기존 복합재 구조물 제작 방법으로 다양한 전기-기계 변환 재료를 활용한 스마트 수지를 사용하여 제작이 가능하다. 구조물이 센서가 되고, 센서가 구조물이 될 수 있는 새로운 형태의 복합 구조물로서 구조물 기본 기능뿐 아니라 외부 충격에 대해 구조물의 상태를 실시간으로 감지할 수 있는 새로운 형태의 경량 복합재료 구조물로 활용 가능성이 높을 것으로 생각한다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 과학기술국제화사업 연구임(2011-0030065).

REFERENCES

1. Park, I.K., Seo, Y., and Kim, B.H., "Development of Liquid Metal Strain Gauge for Measuring WT Blade's Deformation," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 32, No. 3, 2015, pp. 307-314.
2. White, J.R., De Poumeyrol, B., Hale, J.M., and Stephenson, R., "Piezoelectric Paint: Ceramics-polymer Composites for Vibration Sensors," *Journal of Material Science*, Vol. 39, No. 9, 2004, pp. 3105-3114.
3. Zhang, Y. and Li, X., "Analytical Study of Piezoelectric Paint Sensor for Acoustic Emission-based Fracture Monitoring," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 31, No. 8, 2006, pp. 684-694.
4. Kanno, I., Kotera, H., and Wasa, K., "Measurement of Transverse Piezoelectric Properties of PZT Thin Films," *Sensor and actuators A*, Vol. 107, No. 1, 2003, pp. 68-74.
5. Egusa, S. and Iwasawa, N., "Thickness Dependence of the Poling and Current-voltage Characteristics of Paint Films Made Up of Lead Zirconate Titanate Ceramic Powder and Epoxy Resin," *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 10, 1995, pp. 6060.
6. Byun, K.J., Ha, J.R., Kim, B.S., Joe, C.R., and Ok, J.S., "Mechanical Properties of VARTM Processed Abaca Fabric Composites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, No. 6, 2012, pp. 198-204.
7. Kim, S.Y., Shim, C.S., Sturtevant, C., Kim, D.W., and Song, H.C., "Mechanical Properties and Production Quality of Hand-Layup and Vacuum Infusion Processed Hybrid Composite Materials for GFRP Marine Structures," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 6, No. 3, 2014, pp. 723-736.
8. Han, D.H., Park, S.B., and Kang, L.H., "Sensitivity Measurement of the Piezoelectric Paint Sensor according to the Poling Electric Field," *Composite Research*, Vol. 27, No. 4, 2014, pp. 146-151.