



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

구조물 건전성 감시를 위한 나노 카본 기반의 전왜성 센서 특성연구



2015년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 설 계 공 학 전 공

박 세 훈

공 학 석 사 학 위 논 문

구조물 건전성 감시를 위한 나노 카본
기반의 전왜성 센서 특성연구

지도교수 강 인 필

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2015년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 설 계 공 학 전 공

박 세 훈

박세훈의 공학석사 학위논문을 인준함

2015년 2월



주	심	공학박사	이 일 영	인
위	원	공학박사	정 영 석	인
위	원	공학박사	강 인 필	인



목 차

Abstract -----	iii
I . 서 론 -----	1
1.1 연구배경 -----	1
1.2 연구목적 및 내용 -----	3
II . 구조물 건전성 감시 -----	5
2.1 구조물 건전성 감시 -----	5
2.2 구조물 건전성 감시에 사용되는 센서 -----	7
2.2.1 FBG 센서 -----	7
2.2.2 PVDF 센서 -----	9
2.2.3 PZT 센서 -----	9
2.3 구조물 건전성 감시 연구사례 -----	9
2.3.1 건축 구조물 -----	11
2.3.2 항공기 구조물 -----	12
2.3.3 풍력발전 구조물 -----	14
2.3.4 선박 구조물 -----	14
III . 나노 카본 기반의 SHM 센서 제작 및 특성 -----	16
3.1 나노 카본 기반의 SHM 센서 제작 -----	16
3.1.1 MWCNT/epoxy 센서 -----	16
3.1.2 xGnP/MWCNT/PS 센서 -----	17
3.2 나노 카본 기반의 SHM 센서 특성실험 -----	18
3.2.1 나노 카본 기반 SHM 센서의 감도와 게이지 율 -----	18
3.2.2 나노 카본 기반 SHM 센서의 선형성 -----	26
3.2.3 나노 카본 기반 SHM 센서의 히스테리시스 -----	31
3.2.4 나노 카본 기반 SHM 센서의 제로 드리프트 -----	34
3.2.5 나노 카본 기반 SHM 센서의 동적특성 -----	36

IV. 모사 구조물 적용 실험 -----	38
4.1 나노 카본 기반의 SHM 센서 선정 -----	38
4.2 저속 충격을 받는 복합재료 구조물 적용 실험 -----	40
4.2.1 실험방법 -----	41
4.2.2 실험결과 -----	43
4.2.3 고찰 -----	48
4.3 인장-압축 변형을 받는 구조물 적용실험 -----	50
4.3.1 실험방법 -----	51
4.3.2 실험결과 -----	52
4.3.3 고찰 -----	52
V. 결 론 -----	55
VI. 참고 문헌 -----	57



A Study on Nano Carbon Based Piezoresistivity Sensors Characteristics For Structural Health Monitoring

Sehoon Park

*Department of Mechanical Desgine Engineering,
The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

This study characterized nano carbon based piezoresistive composite sensors for applications of structural health monitoring (SHM). The composite sensors were made of multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/epoxy and exfoliated graphite nano-platelets (xGnP)/polystyrene (PS) respectably. The piezoresistivity of the nano carbon based composites was utilized to develop novel strain gages and their basic static strain sensing properties such as linearity, hysteresis and stability were experimentally characterized.

For the preliminary application of impact monitoring system, a sensor matrix network was built on a carbon fiber reinforced composite panel with long xGnP/PS strain sensors. The impact sensing properties of the xGnP/PS sensors were investigated under ball drop tests and their impact responses were measured by using a signal processing system. For further

applications, a robot joint torque sensor was developed by using MWCNT/epoxy sensor under loading conditions both tension and compression. The novel carbon nano based composite sensors showed fairly good sensing characteristics in experimental tests and their performances were compared with conventional foil strain gages

Key Words : Carbon nanotube, Strain sensor, Structural Health Monitoring, strain gage



I. 서론

1.1 연구배경

현대 사회는 지구 온난화의 원인인 탄소 배출을 규제하기 위해 각종 제도들을 도입하고 있다. 탄소 배출량 감소를 위한 방법으로는 대체 에너지 개발과 경량화 등이 있다. 탄소 배출과 밀접한 관계가 있는 자동차, 조선과 항공 분야에서는 구조물의 경량화를 위하여 일반 금속에서 알루미늄이나 복합재료(composite materials)와 같은 기계적 물성은 뛰어나지만 무게는 가벼운 재료들의 사용을 늘려 나가고 있다.[1] 이러한 복합재료는 2가지 이상의 재료를 조합하여 우수한 기계적 특성과 기능적 물성을 갖도록 만들어진 소재이다. [2] 우수한 특성들을 가진 복합재료를 이용하여 자동차, 항공, 로봇, 건설, 스포츠 등 다양한 분야에 이용하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 특히 경량화로 인한 에너지 효율 증가가 경제적 이익으로 직접 연결되는 항공 분야에서는 에어버스社와 보잉社가 복합소재의 적용에 적극적이다. A380과 B787 기종은 전체 구조물의 40% 이상을 복합재료로 제작하여 기존의 금속재료 대비 4톤 이상의 경량화를 실현하였다.[3] 또한 대체 에너지 분야인 풍력 발전에서도 복합재료는 윈드 터빈 블레이드(wind turbine blade)의 재료로 사용이 활발하게 진행되고 있다.[4]

그러나 복합재료로 제작된 구조물의 경우 외부에서 가해진 충격 손상(impact damage)이나 피로 손상(fatigue damage)등과 같은 요인들에 의하여 재료의 표면이나 적층판 사이에서 박리(flaking)현상이 발생하거나, 크랙(crack)과 같은 파단이 발생하는 문제가 야기된다.[5] 이러한 문제들은 복합재료로 제작된 구조물에 파손이나 붕괴 등과 같은 심각한 문제를 야기할 수 있다. 복합재료에 발생하는 문제들을 감시 및 진단하기 위하여 개발된 기법으로는 구조물 건전성 감시(SHM, structural health monitoring)기법이 있다.

SHM은 구조물의 손상을 진단/감시 하는 기법으로 교량, 보트, 풍력발전기

의 블레이드 및 항공기 구조물에 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6] 현재 광범위 하게 사용되고 있는 SHM 기법으로는 비파괴 검사방법(NDE, non-destructive evalution)이 있다. 비파괴 검사방법은 초음파를 구조물에 발사하여 구조물 내부의 구멍이나 결함에 의하여 산란 또는 반사되는 초음파를 통해 손상을 탐지한다.[7] 그러나 초음파를 이용하는 기법의 경우 움직이고 있는 상태의 구조물에 대해서는 손상 탐지가 불가능하고 정지 상태의 구조물에 대해서만 적용이 가능하며 손상 여부 및 손상 위치를 정량적(quantitative)으로 표현하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 움직이고 있는 상태의 구조물과 정지 상태에 있는 구조물에 모두 적용이 가능하며 손상 여부 및 손상 위치를 정량적으로 표현할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다고 사료된다.



1.2 연구목적 및 내용

초음파를 이용한 구조물 건전성 감시기법을 보완하기 위해 다양한 센서들을 이용하는 방법이 연구되고 있다. SHM 기법으로 적용이 연구되고 있는 센서로는 스트레인 게이지(strain gage), 광섬유 브래그 격자(FBG, fiber bragg grating) 센서, 압전 필름(PVDF, poly vinylidene fluoride) 센서, 압전 세라믹(PZT, lead zirconate titanate) 센서 등이 있다.[8,9,10] SHM에 센서를 적용하는 연구가 진행 중인 원인은 구조물에 발생하는 손상이나 변형을 정량적으로 평가할 수 있기 때문으로 사료된다. 정량적으로 평가하는 방법은 정성적으로 평가하는 방법과 비교하여 구조물에 충격이나 외력이 가해진 위치와 크기를 객관적 데이터인 수치로서 확인할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 정량적 평가를 위하여 센서를 구조물에 부착할 경우 구조물의 형상이나 크기와 같은 파라미터가 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 기존 센서의 경우 구조물의 크기가 교량과 같이 클때 거대한 영역을 감시하기 위해서 많은 수량의 센서를 부착하여 배선도 복잡하게 되므로 측정 비용을 상승 시킬 수 있다. 또, 구조물의 형상이 복잡한 구조물의 경우 센서의 재질적 특성으로 인하여 곡면과 같은 다양한 형상에는 적용이 불가능 하거나 구조물에 인위적 손상을 가하여 적용해야하는 한계가 있다. 이에 나노 카본 기반의 SHM 센서는 탄소나노튜브(MWCNT, multi wall carbon-nanotube)를 기반으로 기저재료(matrix)를 혼합하여 제작되어 분사기법(spray)을 통하여 기존의 센서들과 다르게 포인트형 센서 형태와 연속형 센서 형태로 제작할 수 있어 크기가 거대한 구조물이나 다양한 구조물의 형상에도 적용이 가능하다. 또한 전왜성(piezoresistivity)을 가지고 있어 센서에 인가되는 외력이나 스트레인(strain)과 같은 물리량의 변화를 저항 변화로 나타낼수 있어 스트레인게이지와 같이 휘스톤 브릿지(wheatstone bridge)를 통하여 간단히 전압신호를 획득할 수 있다.[11]

따라서 본 연구에서는 나노 카본 기반의 센서를 사용하여 센서 기초 특성 연구를 진행 하여 기존의 센서와 비교하였고, SHM에 포인트형 센서 및 연속

형 센서로 적용될 수 있도록 실제 구조물을 모사한 구조물에 나노 카본 기반의 센서를 실험적으로 적용하여 거동을 확인 하였다.



II. 구조물 건전성 감시

2.1 구조물 건전성 감시

SHM은 구조물을 분해하거나 파괴하지 않고 대상의 손상을 감시/진단하는 기법이다.[12] 분해와 조립등과 같은 많은 시간이 소요되는 진단과정이 필요하지 않아 유지와 보수에 유연하게 사용될 수 있다. 또한 구조물의 손상을 감지하여 유지와 보수 측면에서도 비용 절감과 같은 효율성 증대와 손상으로 인한 갑작스런 사고를 예방할 수 있는 안전성으로 인하여 최근 항공기, 선박, 건설등의 분야에서 연구가 지속적으로 진행되고 있다. SHM 시스템의 구성요소는 Fig. 1과 같다. 구조물의 상태를 측정할 수 있는 센싱 파트(sensing part)와 센서에서 출력되는 신호(signal)를 수신할 수 있는 신호 처리 파트(signal processing part) 그리고 결과를 사용자에게 알려줄 수 있는 통신 파트(communicate part)로 구성된다.

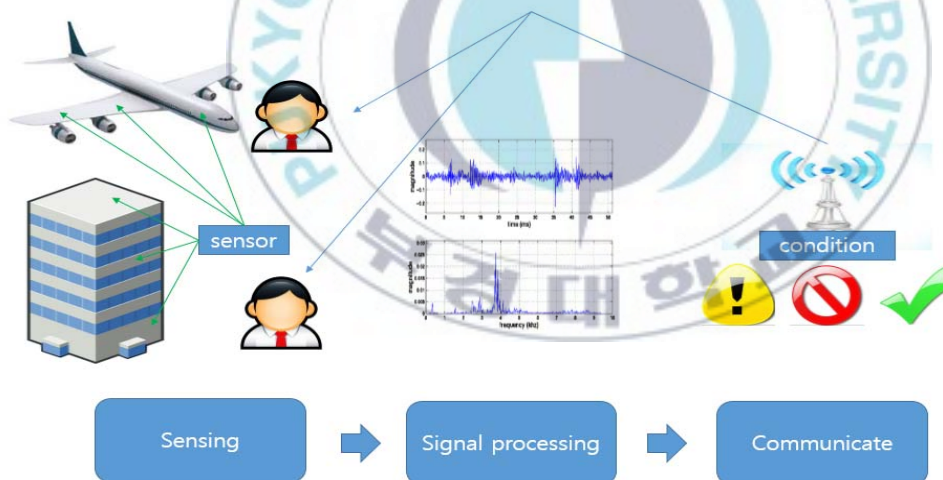


Fig. 1 A configuration of the SHM system.

센싱 파트에서는 구조물에 작용하는 외력과 같은 물리량을 측정할 수 있는 센서가 장착되어 전압과 같은 신호를 출력하는 역할을 한다. 신호 처리 파트에서는 센서에서 출력된 신호를 증폭하고 필터링할 수 있는 증폭기(**amplifier**)와 필터(**filter**)가 장착되어 필터링 된 신호를 통신 파트로 전달한다. 통신 파트에서는 필터링 된 신호를 통하여 구조물의 상태를 판단하여 사용자에게 전달하여 사용자가 구조물의 상태를 확인할 수 있도록 하는 역할을 한다. 따라서 구조물에 작용하는 물리량을 측정할 수 있으며 구조물에 쉽게 장착이 가능하고 쉽게 출력신호를 획득할 수 있는 센서의 개발이나 연구가 SHM에서 중요한 부분을 차지할 것으로 사료된다.



2.2 구조물 건정성 감시에 사용되는 센서

SHM에서 구조물의 손상을 정량적으로 감시/진단하는 방법으로 여러 가지 센서 들을 사용하고 있다. SHM에 사용되는 센서로는 스트레인 게이지, FBG 센서, PVDF 센서, PZT 센서 등이 사용되고 있다. 이들 센서들은 구조물에 발생하는 변형이나 충격과 같은 물리량을 전압과 같이 계측할 수 있는 물리량으로 변환하여 구조물의 상태를 표현 할 수 있다.

2.2.1 FBG 센서

FBG 센서는 광섬유 센서의 종류의 하나로서 직경이 250um로 작고 가벼우며 구조물 내·외부에 설치가 가능하다.[13] 광섬유를 이용한 센서는 Fig. 2 와 같이 물리량의 변화를 빛의 강도나 파장과 같은 성질 변화로 변환되는 원리를 이용하여 센서로 사용되고 있다. 그러나 FBG 센서의 경우 제작 및 설치 과정에서 손상을 받기 쉽기 때문에 외부에 보호용 패키징(packaging)을 설치해야 하며 패키징의 두께에 의해서 변형에 대한 신호의 차이가 생기거나 변형률이 제대로 전달되지 않는다.[13,15,23] 또한 빛의 강도나 파장과 같은 성질변화로 나타나기 때문에 일정한 광원을 센서에 공급해야하는 광대역 광원이 필요하며, 복조기를 통하여 파장을 측정해야 하는 어려움과 비용의 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 보호용 패키징에 대한 연구가 활발하게 이루어 지고 있으며, 다른 폴리머(polymer) 재료와 함께 혼합하여 사용하는 연구도 진행되고 있다.[15]

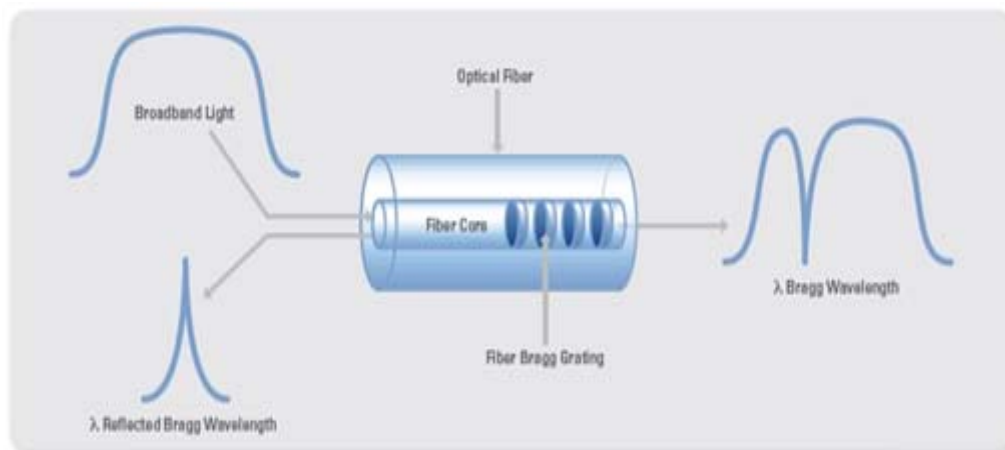


Fig. 2 Operating principle of a fiber bragg grating sensor.[13]



2.2.2 PVDF 센서

PVDF 센서는 얇은 필름 형태의 센서로서 센서 요소와 전자장치가 일체형으로 센서 표면에 부착된다. PVDF 센서는 Fig. 3 와 같이 얇은 필름형태로 제작되기 때문에 가벼운 시스템에서 유용하게 사용될 수 있다.[16] 또한 고분자 재료의 특성인 우수한 연성을 가지고 있다. 따라서 거대한 변형을 측정할 경우나 곡면과 같은 구조물의 형상에 적용하기 용이하다.[17] 그러나 센서의 특성이 결정구조에 따라 영향을 받기 쉽고 결정구조 배열을 위하여 제작 과정에서 2kV 정도의 고전압 전원을 이용하여 분극과정(polarization)을 거쳐야 하며, 센서에 압축력이 작용할 때 출력이 일정하지 않다는 문제점이 있다.

2.2.3 PZT 센서

PZT 센서는 Fig. 3 과 같이 세라믹(ceramic)계열의 높은 에너지 변환 특성과 압전 특성(piezoelectric)을 이용하여 각종 센서와 액추에이터로 응용되는 연구가 많이 이루어지고 있다.[18] 하지만 PZT 센서의 경우 세라믹과 같이 인성이 작아서 센서가 취성을 가지는 단점이 있다. 따라서 큰 변형을 측정하고자 하는 경우나 곡면과 같은 구조물에는 적용이 어려운 단점이 있다.[19] 또한 제작 과정에서 2kV 의 고전압을 가하여 분극과정을 통해 결정구조를 배열해 주어야 한다는 기술적 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 결정성장과 도핑등과 같은 재료 혼합에 대한 연구가 이루어지고 있다.[20]

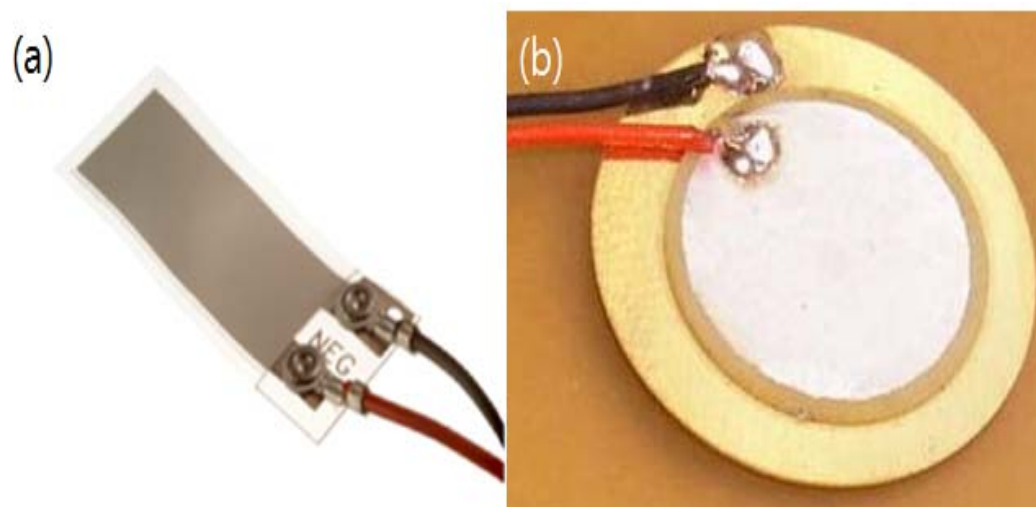


Fig. 3 Piezoelectric sensors : (a) PVDF sensor and (b) PZT sensor.



2.3 구조물 건정성 감시 연구사례

SHM 기법으로 스트레인 게이지, FBG 센서, PVDF 센서, PZT 센서를 실제 구조물에 부착하여 작용하는 외력이나 하중을 측정하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 최근 연구된 사례를 살펴보면 교량과 같은 건축 구조물에서부터 복합재료를 사용하는 항공기 구조물과 풍력발전에 사용되는 윈드 터빈 블레이드등과 같은 다양한 구조물에서의 적용이 진행되고 있다. 이와 같은 기존의 연구사례들은 연속형 센서가 아닌 포인트형 센서를 사용함으로써 구조물 전체를 감시하기 힘들며, 구조물의 형상에 따라서 적용이 힘든 기술적 한계가 존재 하므로 연속형 센서 또는 구조물의 형상에 구애받지 않고 적용 가능한 센서를 개발하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

2.3.1 건축 구조물

건축 구조물의 경우 주로 교량에서 센서를 사용하여 작용하는 하중을 모니터링하는 연구가 진행되고 있다. 각각 2001년 캐나다에서 Tennyson 등과 2006년 중국에서 Chan 등은 FBG 센서를 이용하여 교량에 작용하는 하중을 측정하였고, 2012년 한국에서 광안대교를 대상으로 PVDF 센서를 이용하여 교량에 작용하는 하중을 측정하였다.[21,22,23] Fig. 4 는 [22]의 연구에서 사용한 FBG 센서와 적용영역을 나타낸다. 기존의 교량 검사 방법과 비교하면 기존의 방법은 정기적인 점검일자 또는 외관상 문제점이 있다고 판단될 때 검사를 실시하여 보수 또는 보강 여부를 결정하며, 점검을 주기적으로 실시하여 이전의 점검자료와 새로운 점검자료 사이의 구간에서는 정보를 얻을 수 없다.[21] 반면에 최근의 연구 사례들의 경우 센서를 이용하여 실시간으로 구조물의 상태를 수집하므로 유지 및 보수에 필요한 데이터를 지속적으로 획득할 수 있다. 그러나 FBG 센서 와 PVDF 센서는 포인트형 센서로서 전체영역을 감시하기 위해서는 계측비용 증가와 같은 문제가 발생하기 때문에 교량 구조

물의 전체영역이 아닌 일부영역에만 적용할 수 있다는 기술적 한계가 존재한다.

2.3.2 항공기 구조물

항공기 구조물은 운항동안 풍향과 같은 기상 조건과 이륙과 착륙 과정에서 발생하는 충격에 의해 손상이 발생할 수 있다. 특히 복합재료가 대부분의 비율을 차지하는 주익의 경우에는 그러한 충격 손상에 의하여 박리나 경계면 사이의 파단과 같은 문제가 발생한다.[24] 2009년 Staszewski는 복합재료로 제작된 항공기 주익 구조물을 대상으로 PZT 센서를 적용하여 충격량을 측정하였다.[7] 기존의 항공기 진단기법의 경우에는 1~2년 주기로 비파괴 검사방법을 이용하여 진단을 실시하고 5년을 주기로 완전분해 하여 재조립하며 구조물의 상태를 감시하는 정밀 진단을 실시하고 있다.[25] 반면에 연구 사례들의 경우 센서를 이용한 SHM 시스템을 구성하여 실시간으로 주익 모사 구조물에 작용하는 충격량을 측정 및 수집하여 유지 및 보수에서 정량적 데이터 획득이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 PZT 센서는 세라믹 계열의 약한 인성을 지니고 있어 Fig. 5의 항공기 주익과 같은 곡면형상을 지니고 있는 구조물에 적용하기가 어려우며 포인트형 센서이기 때문에 주익 전체를 감시하기 위해서는 많은 수량의 센서를 사용해서 측정비용을 증가시키는 기술적 한계를 지니고 있다.

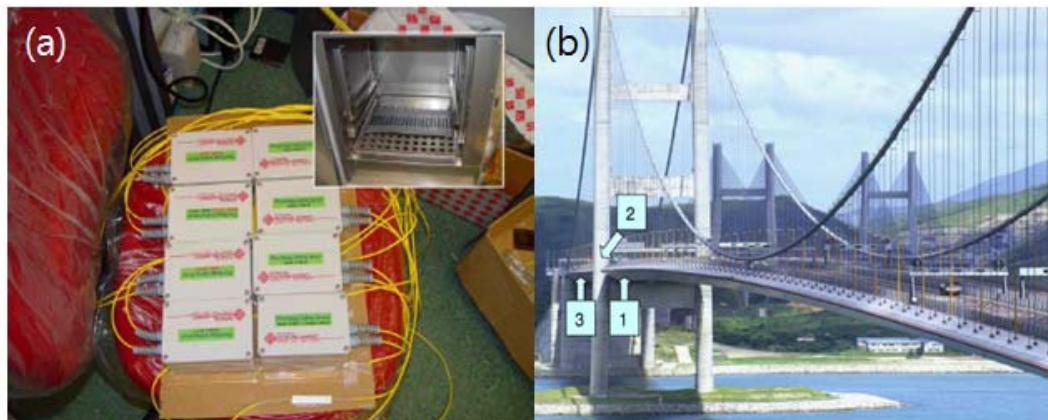


Fig. 4 The case study of using FBG sensor to adapt SHM (a) sensor and (b) installation position.[22]

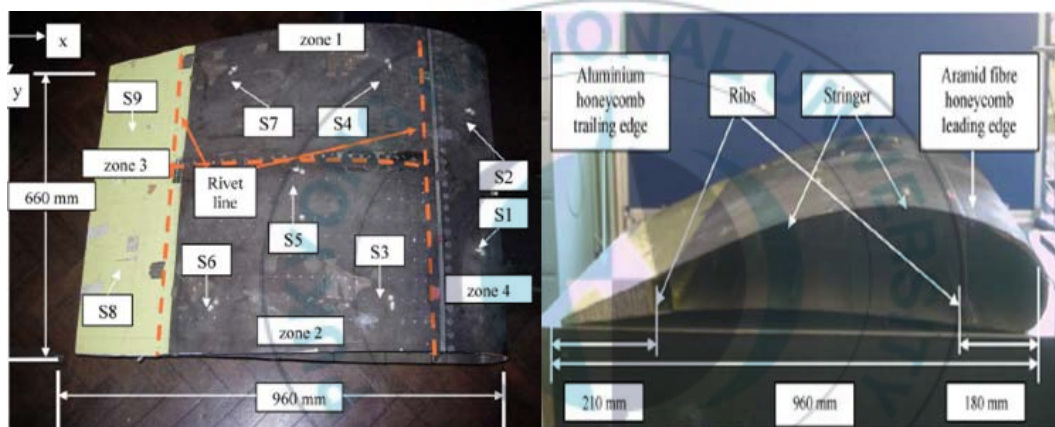


Fig. 5 Research case of using SHM system to wing made by composite.[7]

2.3.3 풍력발전 구조물

풍력발전 구조물의 경우 복합재료로 제작된 윈드 터빈 블레이드와 타워 구조물이 풍향과 같은 요인들에 의하여 지속적인 손상을 받아 Fig. 6의 붕괴(collapse)와 같은 문제가 발생할 수 있다.[4] 이러한 문제들을 해결하기 위해 2008년 Ciang은 PZT 센서를 이용하여 블레이드를 대상으로 SHM 기법을 적용하는 연구를 진행하였다. 풍력 발전의 경우 상업적 이용을 위해 대규모 발전 단지를 구성하기 때문에 통제실에서 블레이드나 타워의 손상을 확인할 수 있는 SHM 시스템의 개발이 필요하다고 사료된다.

2.3.4 선박 구조물

선박 구조물의 경우 요트나 보트와 같은 소형 선박에서 복합재료의 사용이 늘어가고 있다. 복합재료로 제작된 선체는 파도에 의하여 충격손상을 받을 수 있고 레저용으로 빈번히 사용되기 때문에 SHM기술의 적용 연구가 진행되고 있다.[26] 최근 연구 사례를 살펴보면 2001년 노르웨이에서 Wang은 보트에 FBG 센서를 적용한 SHM 기법을 연구하였고, 2012년 미국에서 Swartz에 의해 전투함에 스트레인 게이지를 이용하여 Fig. 7과 같이 운항 중에 파도에 의하여 발생하는 선체의 변형을 측정하는 SHM 기법을 연구 하였다.[26,27]

운항이 끝 난후 선체에 이상이 육안으로 확인되어 도크에서 선체검사를 받거나 주기적으로 선체 검사를 받는 기존의 방법과 비교하여 실시간으로 선체에 가해진 데미지를 확인할 수 있다는 장점이 있으나 포인트형 센서의 사용으로 인해 전체 구조물이 아닌 구조물의 일부영역만 확인할 수 있다는 기술적 한계가 있다.



Fig. 6 A collapsed wind turbine blade.[4]

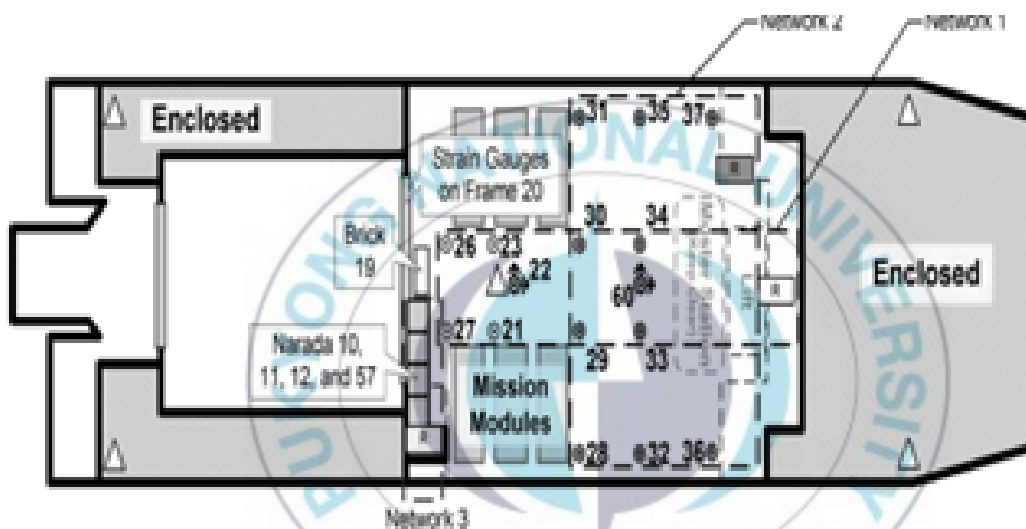


Fig. 7 For a hull ship health monitoring sensor setup position.[27]

Ⅲ. 나노 카본 기반의 SHM 센서 제작 및 특성

3.1 나노 카본 기반의 SHM 센서 제작

3.1.1 MWCNT/epoxy 센서

MWCNT/epoxy 센서는 전기적 성질이 뛰어난 소재인 MWCNT를 충전재(filler)로 사용하고 epoxy(KUKDO CHEMICAL Co., YD-128)를 기저재료로 하여 0.8wt%의 함량비로 제작되었다. MWCNT/epoxy 센서는 페인트와 같은 분무 기법과 브러쉬(brush) 기법은 물론 몰드(mold)로도 제작이 가능하여 다양한 형상의 표면에 적용하기 쉽다는 장점이 있다.[28] 제작된 센서는 전기 전도성을 지니고 있으며 스트레인과 같은 물리량의 변화를 저항변화를 통하여 나타내는 전왜성을 지니고 있다.[11] 따라서 제작된 센서를 외팔보(cantilever)에 스트레인 게이지(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., LOT-152411)와 함께 접착 에폭시(Aldrich, adhesive epoxy)를 이용하여 부착하고 전극을 연결하여 Fig. 8과 같이 제작하였다. 전극을 부착한 후 측정된 저항은 $1.85K\Omega$ 이다.

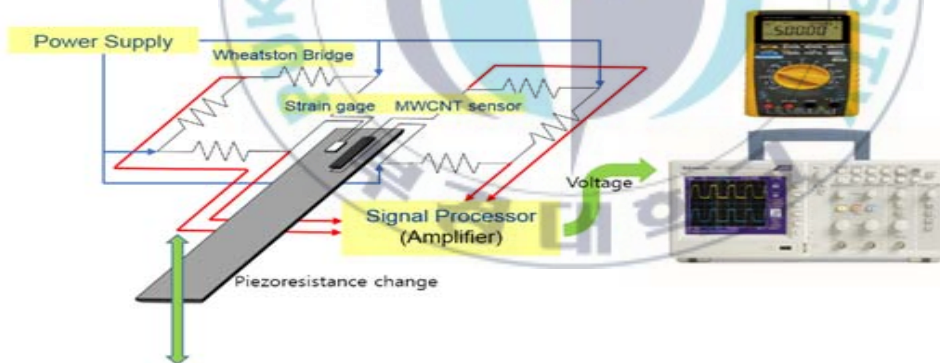


Fig. 8 Experimental of MWCNT/EOPXY characteristic setup.

3.1.2 xGnP/MWCNT/PS 센서

그래핀(xGnP, grephen)은 매우 뛰어난 전도체로서 실리콘과 비교하여 100배 정도의 전기 전도성을 가지고 있어 센서로 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다.[29]

xGnP/MWCNT/PS 3wt% 센서는 유연성을 가지는 PS(poly styrene)를 기저재료로 사용하여 충진재로 전기전도성을 가진 xGnP와 MWCNT를 사용하였다.

이 센서는 MWCNT/epoxy 센서와 동일하게 분사기법과 몰드기법으로 제작이 가능하여 복잡한 형태의 구조물에도 쉽게 적용이 가능하다.[28] 또한 전왜성을 지니고 있어 물리량의 변화를 저항변화로 나타낸다. 제작된 센서를 Fig. 9와 같이 외팔보에 스트레인 게이지(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., LOT-152411)와 함께 접착 에폭시(Aldrich, adhesive epoxy)를 이용하여 부착하였다. 전극을 부착한 후 측정된 센서의 저항은 $1.08K\Omega$ 이다.

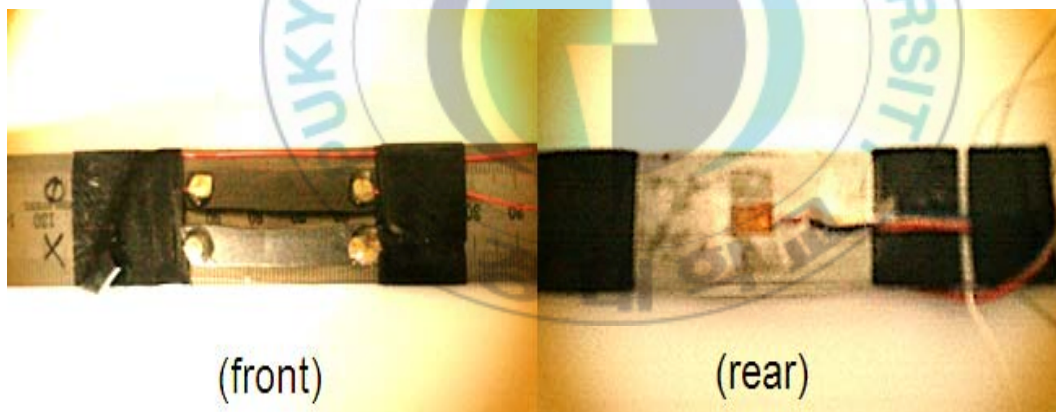


Fig. 9 Installation xGnP/MWCNT/PS sensor on cantilever.

3.2 나노 카본 기반의 SHM 센서 특성실험

MWCNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/PS 센서를 SHM에 적용할수 있는 센서로 사용하기 위해서는 센서에 인가되는 스트레인과 같은 물리량의 변화를 전기적 신호로 변환해 주는 과정이 필요하다. 나노 카본 기반의 MWCNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/PS 센서 경우 전왜성으로 인하여 물리량의 변화가 센서의 저항변화로 나타나기 때문에, 저항변화를 전압변화로 변환해주는 휘스톤 브릿지(wheatstone bridge)를 이용하여 전압 신호로 획득 하였다.

획득된 신호는 DC 증폭기(DSA-310A, Park electronics)를 이용하여 약 43dB로 증폭하고 DC 증폭기의 내장필터를 이용하여 1000Hz로 필터링 하였다. CNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/PS 센서의 특성실험은 스트레인 게이지를 기준으로 하여 실험을 진행 하였고 SHM에 적용하기 위한 기초 연구로 정특성(steady state characteristics)과 동특성(dynamic characteristics)을 실험 하였다.

3.2.1 나노 카본 기반 SHM 센서의 감도와 게이지 율

감도(Sensitivity)는 측정대상의 물리량의 변화 하였을 때 센서의 출력이 어느정도 변화하는가를 나타내는 척도로서 정밀도와 정확도를 결정하는 요소로 사용된다. 감도는 다음의 식(1) 과 같이 정의 할 수 있다.[31]

$$S = \frac{\text{출력값}}{\text{입력값}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1)$$

즉 센서에 입력되는 물리량이 x_0 에서 x_1 으로 변화 하였을 때의 변화량 Δx 와 센서의 출력값이 y_0 에서 y_1 으로 변화하는 변화량 Δy 의 비율로 나타낼

수 있다.

MWCNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/PS 센서 감도는 2가지 방법으로 측정하였다. 나노 카본 기반의 SHM 센서는 전왜성을 가지고 있기 때문에 스트레인과 같은 물리량의 변화를 저항 변화로 나타낼 수 있다. 또한 휘스톤 브릿지를 이용하여 저항 변화를 전압 변화로 변환 할 수 있다. 따라서 인가되는 스트레인의 변화에 따른 저항변화를 이용한 게이지 율(gage factor)과 전압변화를 이용한 감도를 모두 측정 하였다. 실험 방법은 외팔보에 변형(deflection, δ)을 인가하여 이를 스트레인[ϵ] 으로 환산하여 도출하였으며 인가한 변형의 크기는 -0.08m 에서 $+0.08\text{m}$ 까지 0.02m 단위로 증가/감소시키며 동일조건으로 8회 반복 실시하였다. 발생한 스트레인의 크기는 -1.44ϵ 에서 $+1.44\epsilon$ 이다.

실험 결과에서 감도는 Fig. 10과 Fig. 11에 도시된 데이터들의 근사 직선을 구하여 도출 하였으며 그 결과 MWCNT/epoxy 센서는 스트레인에 대하여 약 $0.30 \text{ [V}/\epsilon]$ 의 감도를 갖고, 스트레인 게이지의 감도는 $0.33\sim 0.39 \text{ [V}/\epsilon]$ 의 감도를 갖는 것으로 확인할 수 있다. 또한 xGnP/MWCNT/PS 센서는 MWCNT/epoxy 센서와 다르게 인장 변형(+)과 압축 변형(-)에서 스트레인에 대하여 각기 다른 감도를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 인장 변형에서 감도는 약 $0.46 \text{ [V}/\epsilon]$, 압축 변형에서는 약 $0.20 \text{ [V}/\epsilon]$ 의 감도를 가진다. 스트레인 게이지의 경우 약 $0.33\sim 0.39 \text{ [V}/\epsilon]$ 의 감도를 가지므로 인장 변형에서는 스트레인 게이지보다 높은 감도를 가지며 압축 변형에서는 스트레인 게이지보다 낮은 감도를 지니는 것으로 사료된다.

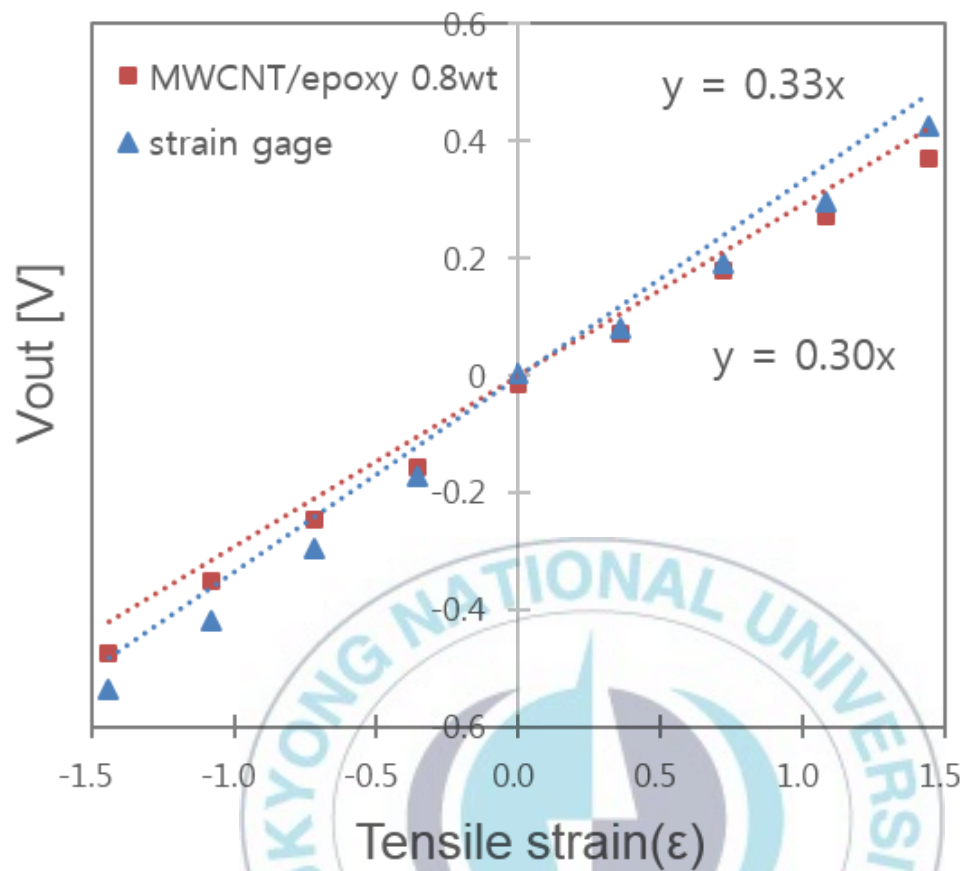


Fig. 10 The sensitivity of MWCNT/epoxy sensor and strain gage.

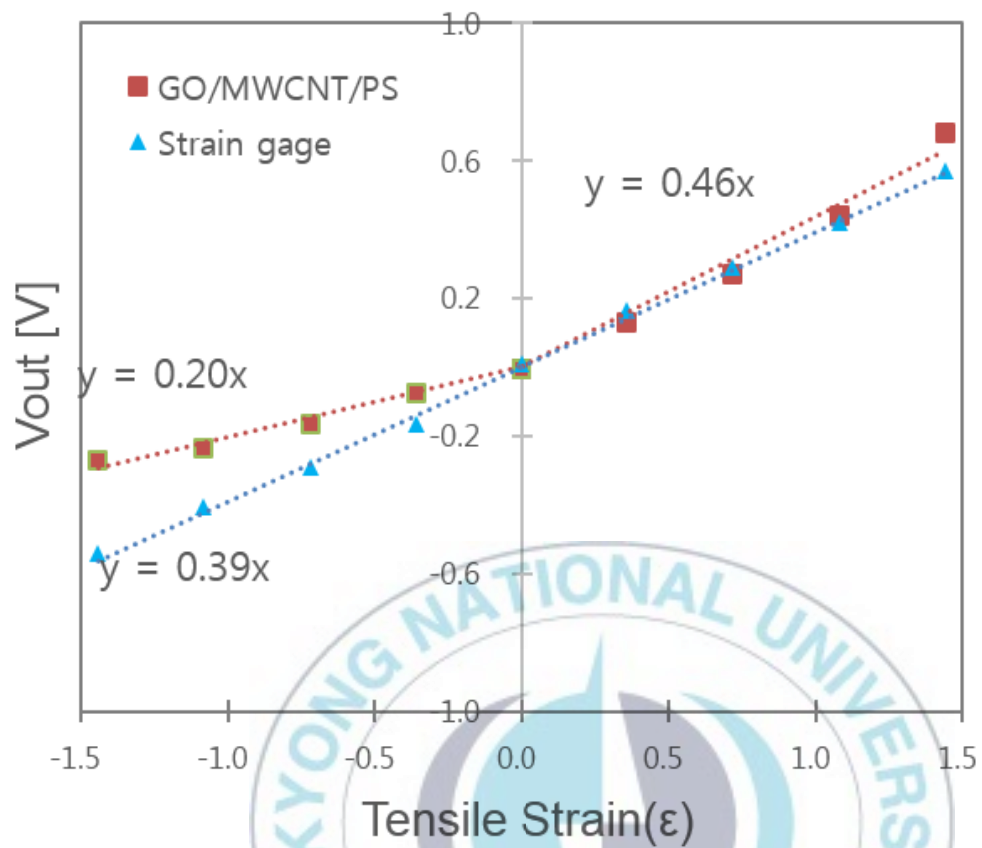


Fig. 11 The sensitivity of xGnP/MWCNT/PS sensor and strain gage.

게이지 율은 MWCNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/ PS 센서에 전압은 인가하지 않고 변형만을 인가하여 센서의 저항변화를 측정하여 Fig. 11과 Fig. 12에 도시된 근사 직선을 이용하여 도출 하였다. 식(2)는 나노 카본 기반 센서와 스트레인 게이지의 저항변화를 무차원화 하여 비율로 나타낸다.

$$R_N = \frac{R_s - R_0}{R_0} \quad (2)$$

R_N 은 무차원화 한 저항의 변화비율, R_0 는 초기 측정한 센서의 저항값, R_s 는 변형을 인가한 후 측정한 센서의 저항값 이다.

게이지 율을 확인하여 보면 MWCNT/epoxy 센서의 게이지 율은 2.47이지만 상용화된 스트레인 게이지의 게이지 율은 2.1 ± 0.1 로서 스트레인 게이지에 비하여 큰 값을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 xGnP/MWCNT/PS 센서는 인장방향의 게이지 율이 2.47, 압축방향의 게이지 율이 1.05 로서 감도와 마찬가지로 인장과 압축에 대하여 상이한 게이지 율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

xGnP/MWCNT/PS 센서와 MWCNT /epoxy 센서를 비교하여 보면 Fig. 10과 Fig. 11의 감도 측정 실험 결과와 Fig. 12와 Fig. 13의 게이지 율 측정 실험 결과 모두 인장 변형에서는 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 압축 변형에서는 xGnP/MWCNT/PS 센서가 MWCNT /epoxy 센서에 비하여 낮은 감도와 낮은 게이지 율을 보이고 있다.

xGnP/MWCNT/PS 센서가 인장 변형과 압축 변형에서 서로 상이한 경향을 보이는 것은 기저재료의 차이에서 기인한 것으로 사료된다. 기저재료인 PS는 epoxy 와 달리 유연성을 지니고 있기 때문에 인장 변형과 압축 변형 과정에서 센서 내부의 전기 전도성이 뛰어난 충전재의 접촉 조건이 달라져서 발생한 것으로 사료된다. 또한 게이지 율이 스트레인 게이지에 비하여 높은 MWCNT /epoxy 센서의 감도가 스트레인 게이지에 비하여 작게 나타나는 것

은 센서의 드리프트에 의한 문제로서 나노 카본 기반의 센서의 경우 저항값이 미세하게 변동하여 휘스톤 브릿지의 밸런스가 어긋나서 야기된 것으로 사료된다.



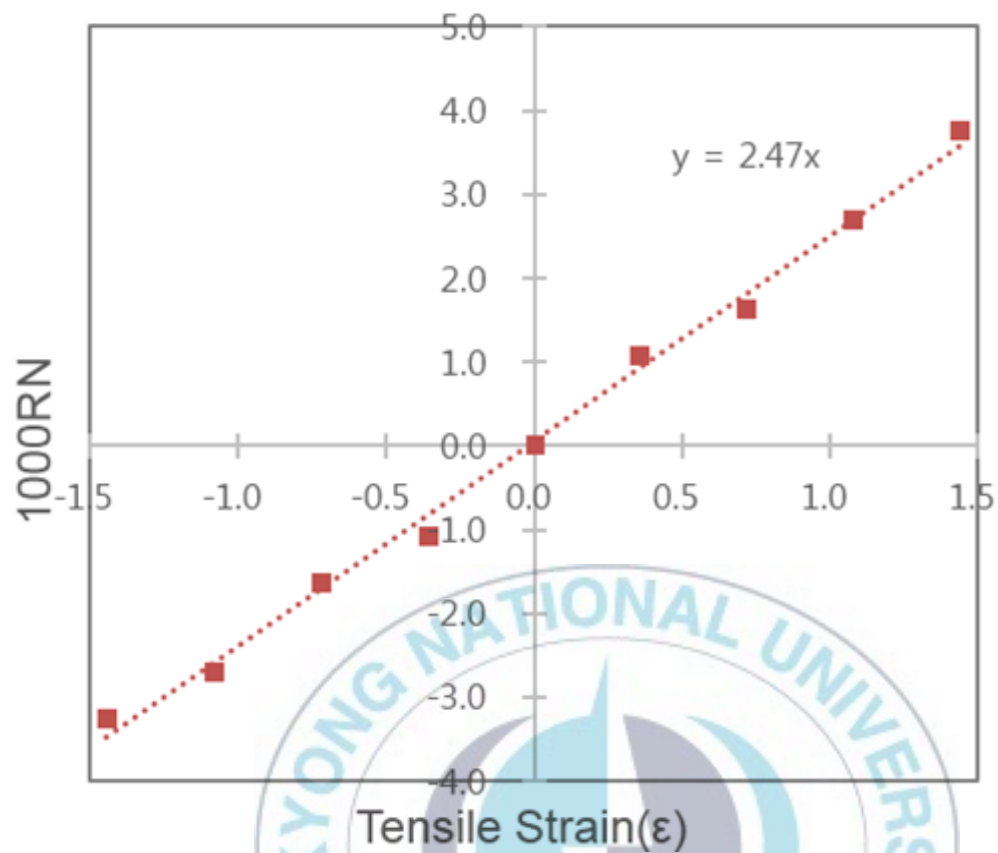


Fig. 12 The gage factor of MWCNT/epoxy sensor.

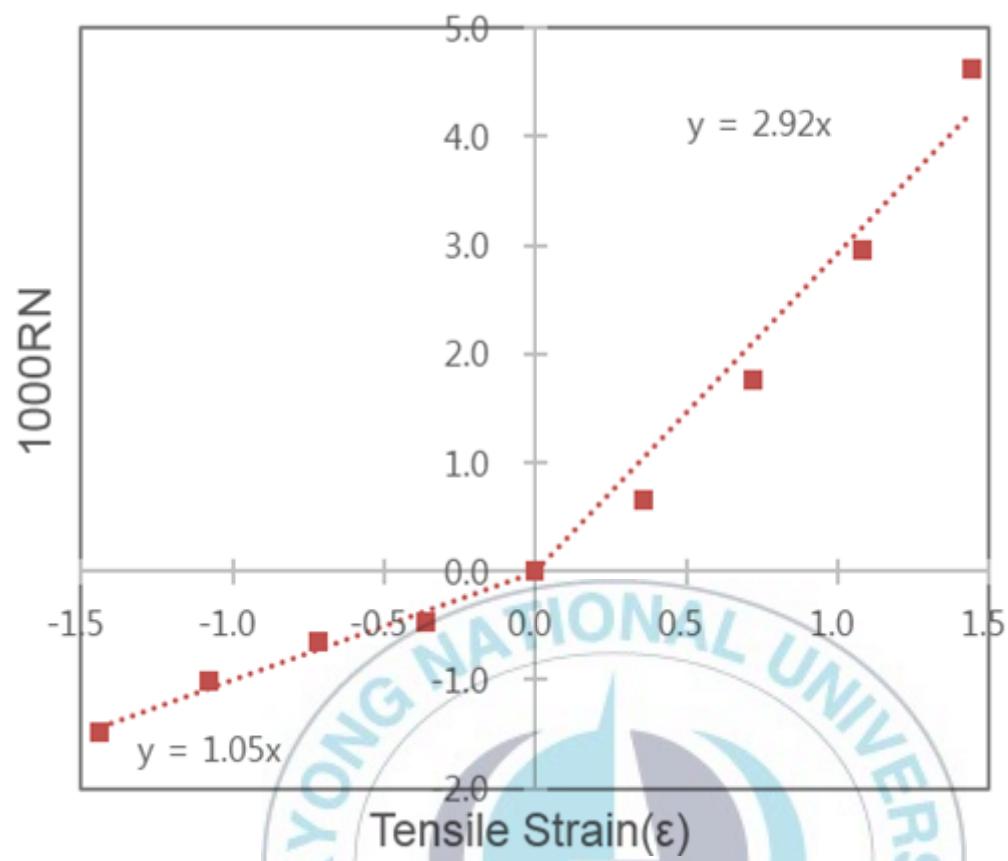


Fig. 13 The gage factor of xGnP/MWCNT/PS sensor.

3.2.2 나노 카본 기반 SHM 센서의 선형성

선형성(Linearity)은 센서에 입력되는 입력값과 출력값의 관계가 얼마나 직선에 가까운가를 보여주는 척도이다. 일반적으로 입력과 출력의 관계 즉 감도가 직선으로 표시되는 경우가 가장 이상적인 경우이다.[31] 그러나 실제 센서는 입력과 출력의 관계가 직선 형태가 아닌 경우로 나타날 수도 있다. 이때 선형성의 정도를 보여주는 것이 비직선도이다. 비직선도는 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{비직선도} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (3)$$

A는 출력의 전체 변화폭을 나타내며 B는 출력 신호와 선형직선 사이의 최대편차를 나타낸다. Fig. 10의 결과를 토대로 MWCNT/epoxy 센서의 근사 직선의 방정식을 구하면 식(4)과 같다.

$$y = 0.30x - 0.04 \quad (4)$$

Fig. 10의 스트레인 게이지의 근사직선의 방정식을 구하면 식(5)와 같다.

$$y = 0.33x - 0.04 \quad (5)$$

Fig. 11의 결과를 토대로 xGnP/MWCNT/PS 센서의 선형성은 인장 변형과 압

축 변형에 대해서 서로 다른 경향을 보이고 있다. 따라서 인장 변형과 압축 변형의 경우로서 선형성을 평가 하였다. xGnP/MWCNT/PS 센서의 근사 직선의 방정식을 구하면 인장변형은 식(6-1)로, 압축변형은 식(6-2)로 나타 낼 수 있다.

$$y = 0.46x - 0.03 \quad (6-1)$$

$$y = 0.19x - 0.01 \quad (6-2)$$

Fig. 11의 스트레인 게이지의 근사직선의 방정식을 구하면 식(7)과 같다.

$$y = 0.34x + 0.05 \quad (7)$$

Fig. 14는 MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지의 근사직선을 도시 한 것이다. MWCNT/epoxy 센서의 경우 -1.44ϵ 에서 최대 편차가 발생하였고, 스트레인 게이지의 경우 $+1.44\epsilon$ 에서 최대 편차가 발생하였다. 이상적인 경우에서 선형성이 0%의 비직진성을 가진다고 할 때 MWCNT/epoxy 센서는 4.56%, 스트레인 게이지는 4.90%의 비직진성을 가진다. 따라서 MWCNT/epoxy 센서는 스트레인 게이지 보다 선형성이 우수한 것으로 사료된다.

Fig. 15는 xGnP/MWCNT/PS 센서와 스트레인 게이지의 근사직선을 도시 한 것이다. xGnP/MWCNT/PS 센서의 인장 변형 영역에서는 $+1.44\epsilon$, 압축 변형 영역에서는 -1.08ϵ 에서 최대 편차가 발생하였고, 스트레인 게이지의 경우에는 -0.36ϵ 에서 최대편차가 발생하였다. xGnP/MWCNT/PS 센서의 인장 변형 영역에서 비직선성은 4.95%, 압축 변형 영역에서 비직선성은 4.91% 이고 스트레인게이지의 비직선성은 4.09%이다. xGnP/MWCNT/PS 센서의 비직선성은

인장 변형과 압축 변형 영역에서 5%이내의 비직선성을 가지며 이는 MWCNT/epoxy 센서 와 비교하여도 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다.



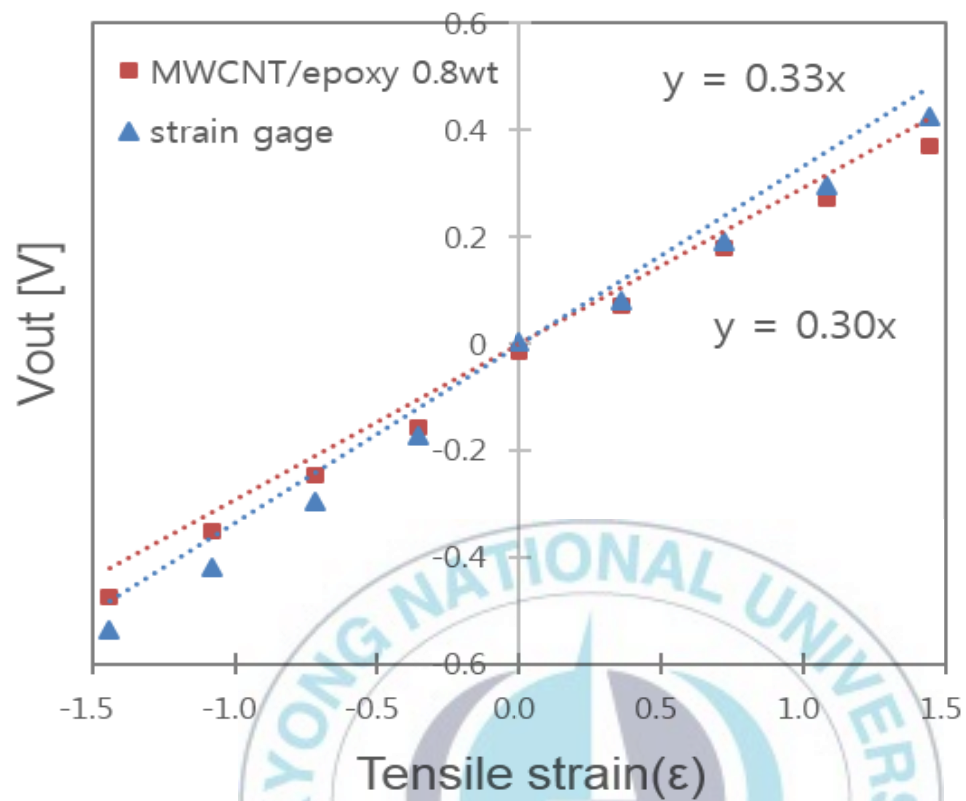


Fig. 14 The linearity of MWCNT/epoxy sensor and strain gage.

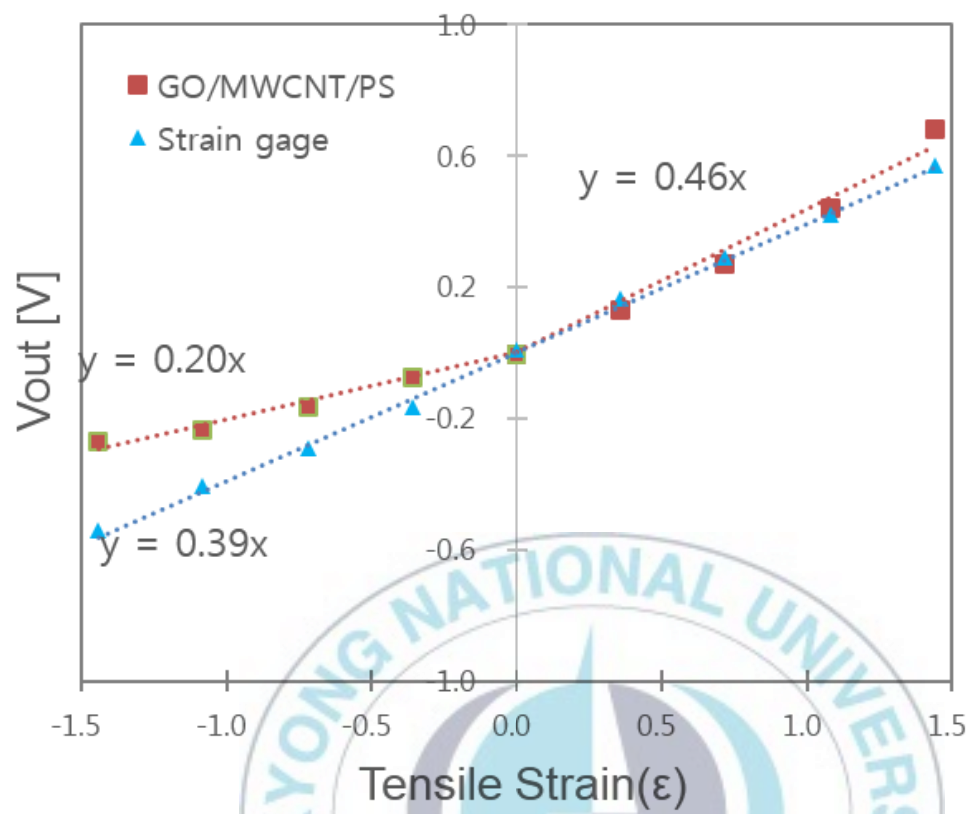


Fig. 15 The linearity of xGnP/MWCNT/PS sensor and strain gage.

3.2.3 나노 카본 기반 SHM 센서의 히스테리시스

히스테리시스(Hysteresis)는 센서에 있어서 입력을 증가할 때 작은 값에서 큰 값으로 증가시키며 증가하는 경우와 큰 값에서 작은 값으로 감소시키며 인가하는 경우에 발생하는 오차를 말한다.[32]

MWCNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/PS 센서, 스트레인 게이지의 히스테리시스에 대한 특성을 파악하기 위해 3.2.1.절에서 기술한 실험방법을 토대로 외팔보에 변형을 -0.08m 에서 $+0.08\text{m}$ 까지 증가와 감소 구간으로 나누어 8회 측정을 실시하였다.

그 결과는 Fig. 16에 도시되어 있다. 도시된 결과로부터 MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지의 히스테리시스 차이가 가장 큰 구간을 확인할 수 있다. MWCNT/epoxy 센서는 -0.72ϵ 구간에서 히스테리시스가 가장 크게, 스트레인 게이지는 -1.08ϵ 구간에서 히스테리시스가 가장 크게 나타났다. 감소구간의 변형에 대한 출력값과 증가 구간에서의 출력값의 차이를 측정하여 각 센서의 히스테리시스의 크기를 측정 하였다. 측정된 결과로 MWCNT/epoxy 센서는 -0.72ϵ 구간에서 11%의 오차가 발생하고 스트레인 게이지는 -1.08ϵ 구간에서 4.78%의 오차가 발생하였다.

xGnP/MWCNT/PS 센서와 스트레인 게이지의 결과는 Fig. 17에 도시되어 있다. 도시된 결과를 살펴보면 xGnP/MWCNT/PS 센서는 압축변형의 -0.72ϵ 구간에서 스트레인 게이지의 경우 -0.36ϵ 구간에서 히스테리시스가 가장 크게 나타났다. 감소구간과 증가구간에서의 출력값의 차이를 측정하여 각 센서의 히스테리시스의 크기를 측정 하였다. 측정된 결과로 xGnP/MWCNT/PS 센서는 -0.72ϵ 구간에서 16.2%, 스트레인 게이지의 경우는 -0.36ϵ 구간에서 3.3%의 히스테리시스 오차를 확인 할수 있다.

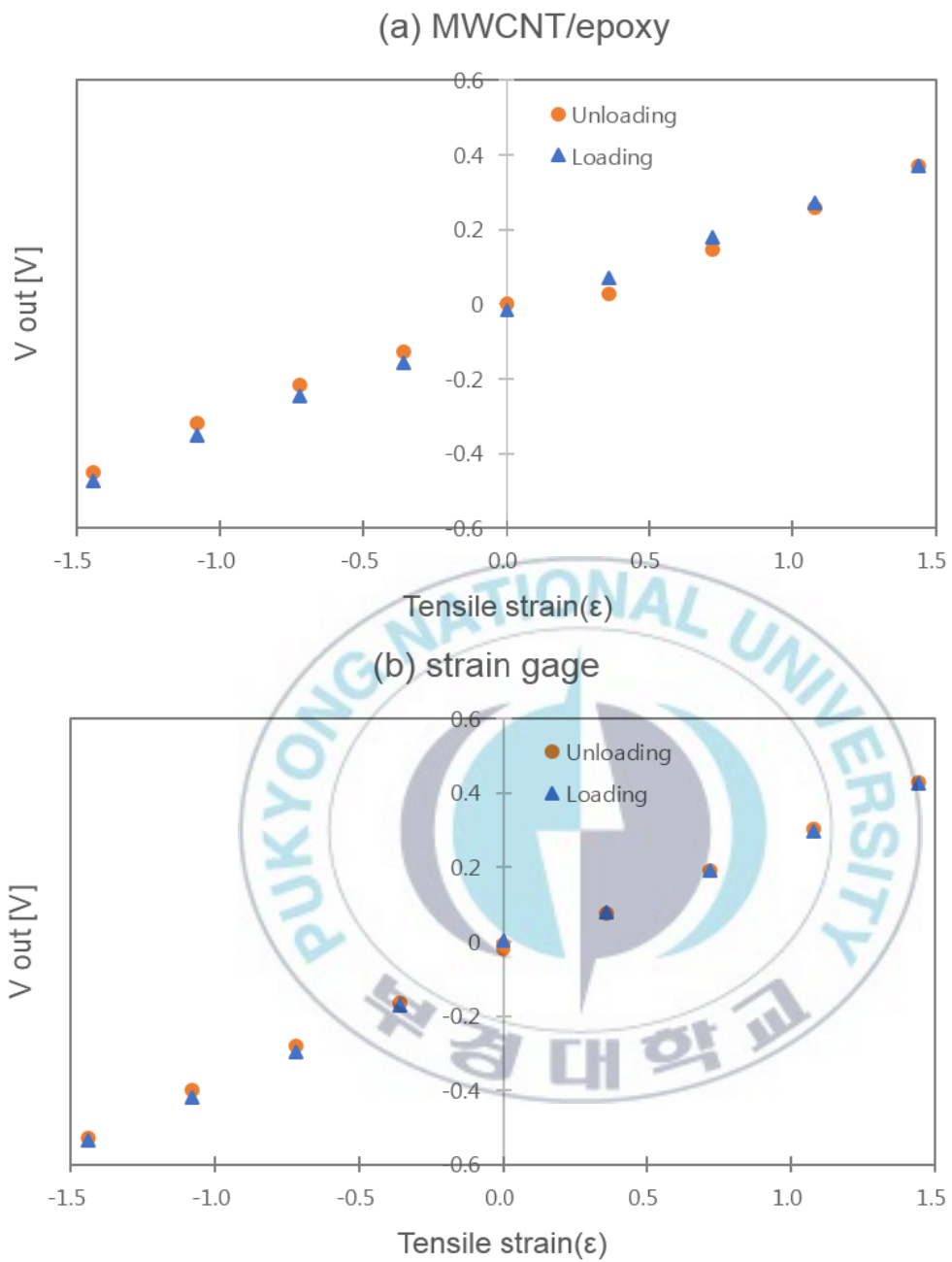


Fig. 16 The hysteresis of MWCNT/epoxy sensor and strain gage.

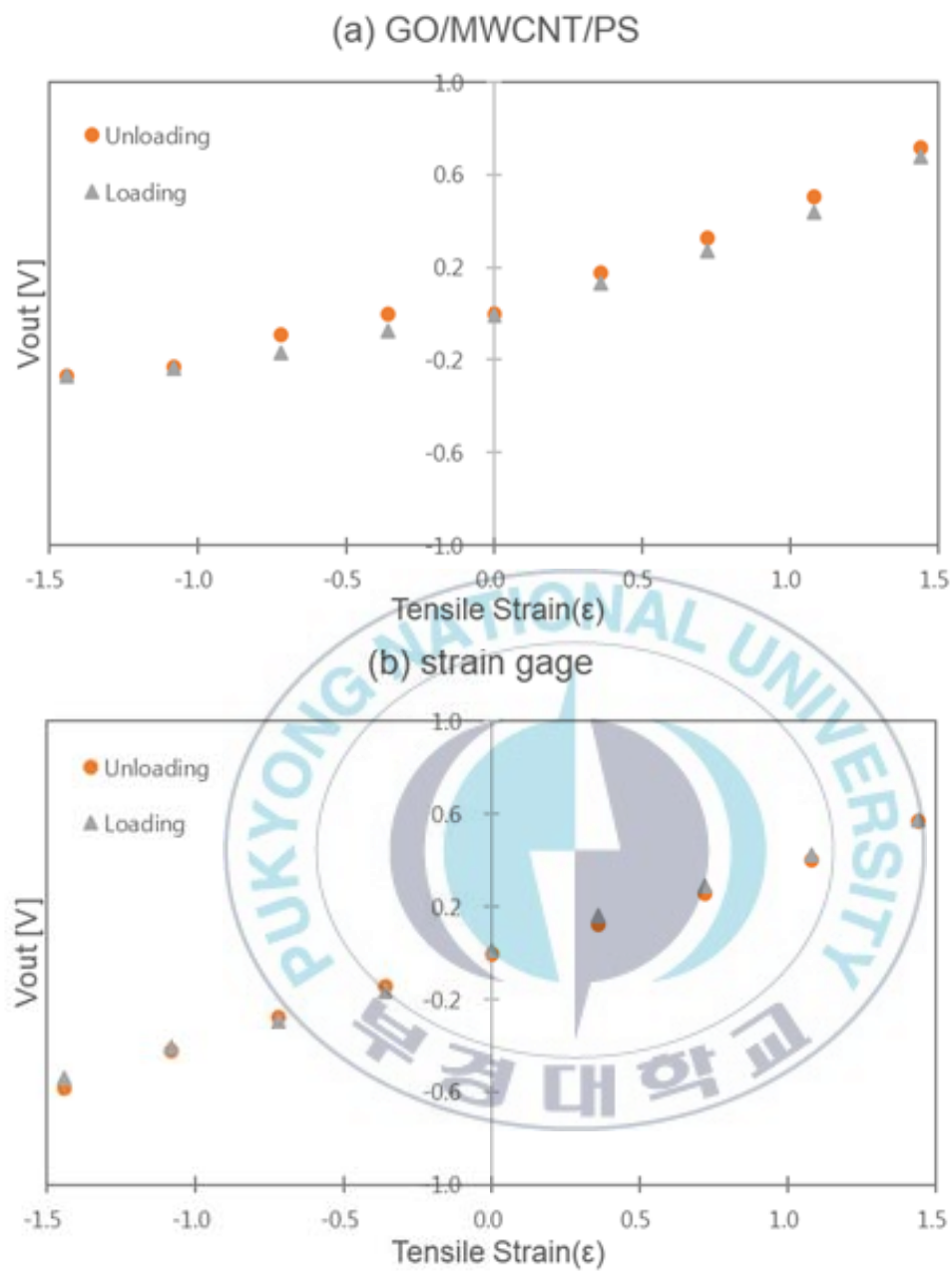


Fig. 17 The hysteresis of xGnP/MWCNT/PS sensor and strain gage.

3.2.4 나노 카본 기반 SHM 센서의 제로 드리프트

센서는 이론적으로 외부입력이 없을 경우에는 출력이 입력의 변화가 없기 때문에 0(zero)으로 수렴되어야 한다. 그러나 입력이 없는 상태에서도 출력이 0이 아닌 다른 값으로 벗어나는 정도를 제로 드리프트(Zero Drift)라 한다.[32]

SHM은 기존의 검사방법과는 달리 지속적으로 구조물을 진단할 수 있는 기법이므로 입력이 인가되지 않더라도 출력이 0과 같이 일정히 유지되는 특성이 중요할 것으로 사료된다. 제로드리프트 측정 실험은 2.1절의 실험 방법과 동일하게 구성하였으나 센서에 외부에서 입력을 가하지 않는 상태를 유지하는 방법으로 오실로 스코프를 이용하여 450s 동안 측정 하였다.

MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지의 측정 결과는 Fig. 18에 도시되어 있다. 도시된 결과에서 MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지는 0 근처에서 출력이 계속 유지되고 있는 경향을 확인할 수 있다. 또한 xGnP/MWCNT/PS 센서와 스트레인 게이지의 측정 결과는 Fig. 19에 도시되어 있다. 도시된 결과에서 xGnP/MWCNT/PS 센서와 스트레인 게이지는 0 근처에서 출력이 계속 유지되고 있는 경향을 확인할 수 있다.

그러나 450s 라는 시간은 지속적인 경향으로 판단하기에는 극히 짧은 시간이라 사료된다. 따라서 제로드리프트 특성을 신뢰성 있는 데이터로 확보하기 위해서는 일주일이나 그이상의 긴 시간영역에 대한 데이터 수집이 필요할 것으로 사료되며, 제로드리프트를 보상할 수 있는 알고리즘이나 보상회로에 대한 연구도 수반되어야 할 것으로 사료된다.

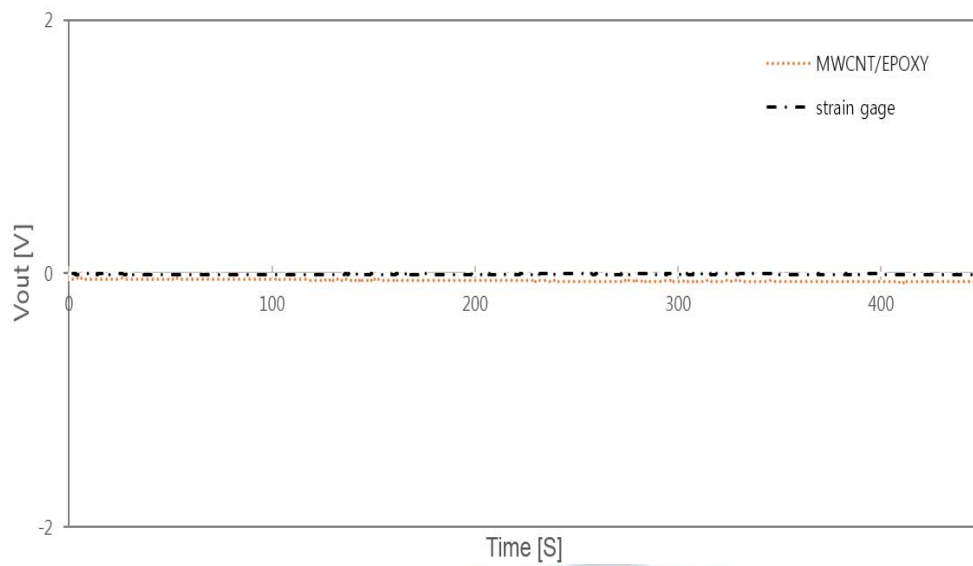


Fig. 18 The zero drift of MWCNT/epoxy sensor and strain gage.

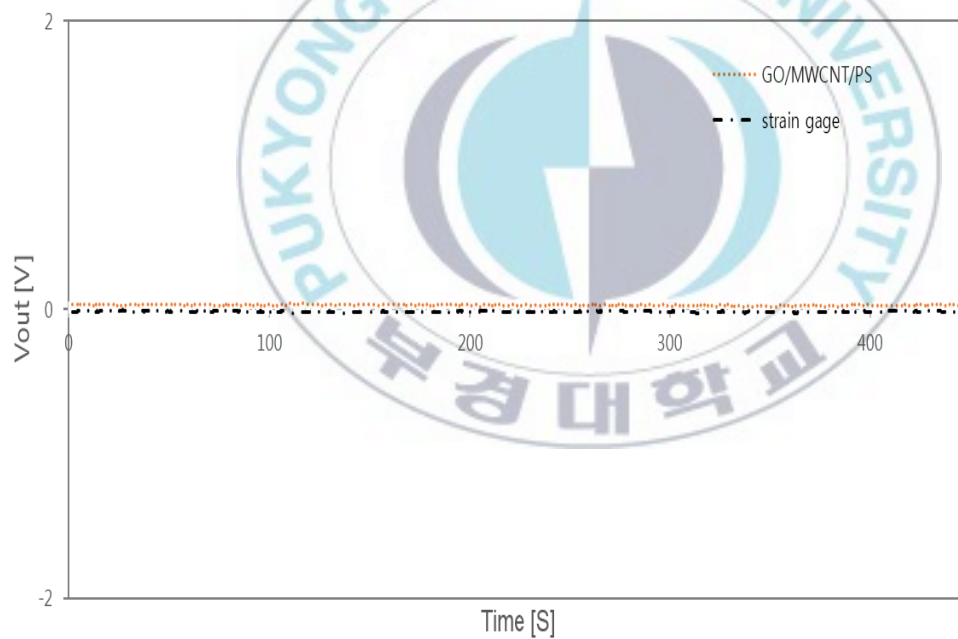


Fig. 19 The zero drift of xGnP/MWCNT/PS sensor and strain gage.

3.2.5 나노 카본 기반 SHM 센서의 동적 특성

SHM에 있어서 연속적으로 변화 하는 입력이 인가될 경우 그 변화에 따라 센서의 출력이 연속적으로 비례하며 변화하는 것이 중요한 특성으로 사료된다. 실제 구조물의 경우 각종 내부/외부적 요인들에 의해 입력이 연속적으로 인가 되므로 입력의 변화에 따라 출력이 변화하지 못한다면 구조물이 어떠한 상태에 있는지를 감시 또는 판단 할 수 없기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 MWCNT/epoxy 센서와 xGnP/MWCNT/PS 센서, 스트레인 게이지가 부착된 외팔보에 자유진동을 이용하여 동적하중을 인가하고 입력의 변화에 따른 출력의 변화를 측정 하였다. 자유진동에 의한 출력변화는 Fig. 20과 Fig. 21에 도시되어 있다. 외팔보에 인가된 자유진동은 약 2~2.5Hz 정도의 주파수를 가짐을 확인할 수 있고 MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지는 외팔보의 진동을 따라서 출력형태가 사인과 형태의 진동으로 나타남을 확인할 수 있다. 하지만 인가된 자유진동의 주파수가 2Hz 정도의 저주파 영역이기 때문에 그 이상의 영역에서 가해지는 동적입력에 대한 실험이 실시되어야 할 것으로 사료된다. 또한 xGnP/MWCNT/PS 센서는 입력에 대하여 변화하는 경향을 보이고 있으나 X축을 기준으로 살펴보면 스트레인 게이지와는 다르게 최대 진폭(max-peak) 과 최소 진폭(min-peak)의 출력 크기가 차이를 확인할 수 있다. 이는 MWCNT/epoxy 센서와 비교하여 지지재료의 차이에서 기인한 것으로 사료된다. epoxy와는 다르게 PS의 경우 유연성을 지니고 있어 센서 내부의 뛰어난 전기 전도성을 가지는 충진재인 xGnP 와 MWCNT 의 접촉 조건이 바뀌기 때문으로 사료된다.

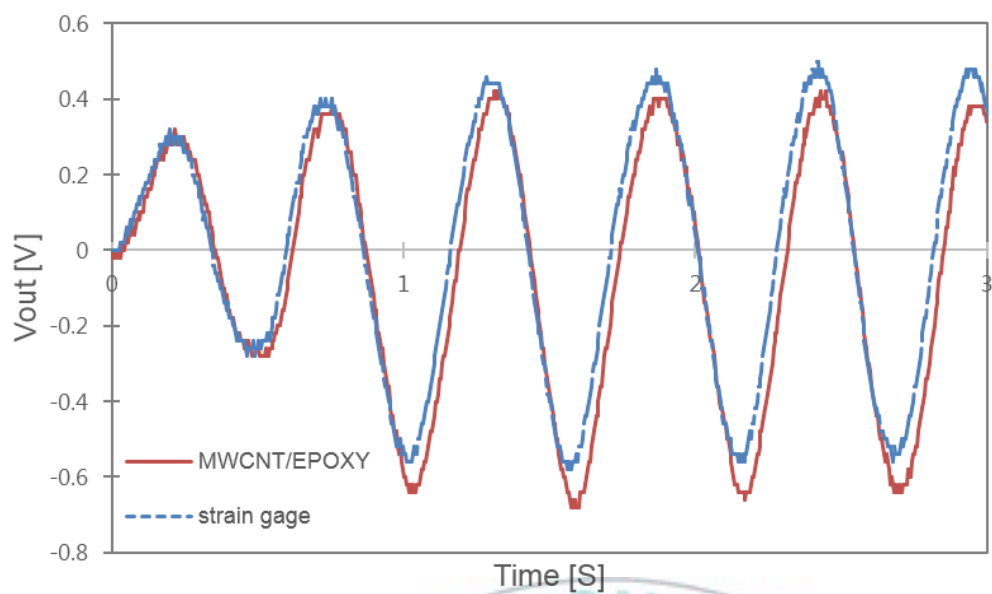


Fig. 20 The dynamic response of MWCNT/epoxy sensor and strain gage.

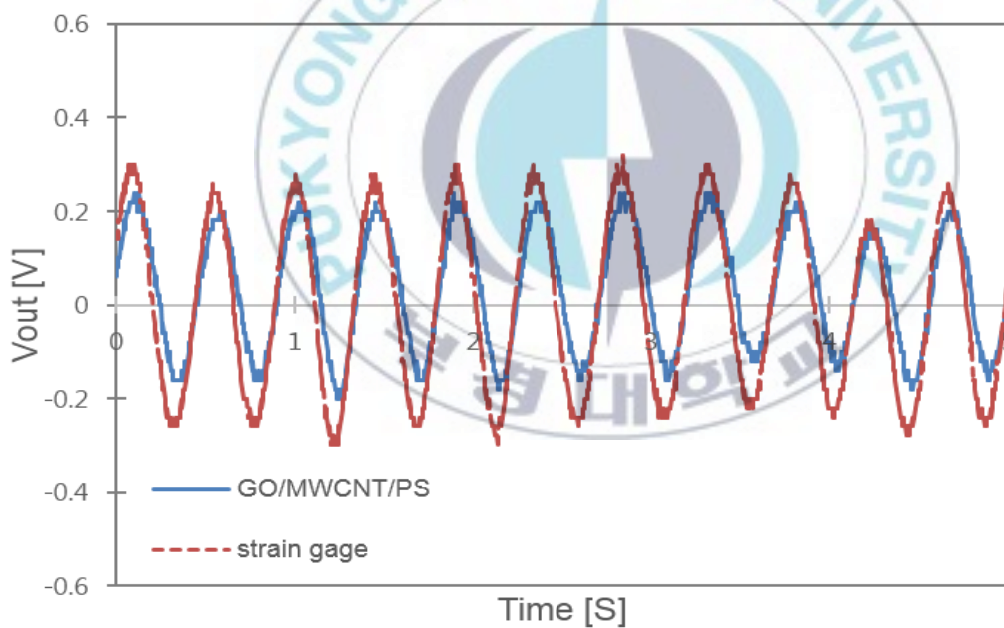


Fig. 21 The dynamic response of xGnP/MWCNT/PS sensor and strain gag

IV. 모사 구조물 적용 실험

4.1 나노 카본 기반의 SHM 센서 선정

나노 카본 기반으로 제작된 센서는 특성실험을 통하여 감도와 선형성, 히스테리시스 등의 정특성과 응답특성과 같은 동특성을 확인하였다. 나노 카본 기반의 xGnP/MWCNT/PS 센서와 MWCNT/epoxy 센서는 스트레인 게이지와 비교하여 뛰어나거나 유사한 특성들을 지니고 있다. 이들 센서의 특성을 정리하면 Table. 3과 같다.

xGnP/MWCNT/PS 센서는 히스테리시스와 압축변형에 대해서 다른센서와 비교하여 성능이 떨어지지만 인장상태에서 감도가 뛰어나고 상대적으로 높은 게이지 율을 가지고 있다. 또한 PS를 기저재료로 사용하여 비교적 유연한 특성을 지니고 있다. 유연한 성질은 인성(toughness)에 도움이 되어 풍향과 같은 동하중이 지속적으로 작용하는 구조물에서도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

Table. 3 The characterization result of carbon nano based sensor and strain gage

sensor element	xGnP/MWCNT/ PS sensor	MWCNT/epoxy sensor	strain gage
Gage factor	2.92 / 1.05	2.47	2.1±0.1
Strain sensitivity	0.46[V/ε] / 0.20[V/ε]	0.30 [V/ε]	0.33~0.39 [V/ε]
Linearity	4.95% / 4.91%	4.56%	4.09~4.90%
Hysteresis	16.2%	11%	3.3~4.78%

MWCNT/epoxy 센서는 히스테리시스가 높지만 스트레인 게이지에 비하여 게이지 팩터가 뛰어나 스트레인과 같은 변형을 측정하기 용이할 것으로 사료되며 몰드기법과 분사기법, 브러쉬 기법으로 제작이 가능하여 기존의 스트레인 게이지나 PZT 센서, FBG 센서가 적용되기 힘든 복잡한 형상이나 크기가 작은 구조물에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

따라서 유연성을 지닌 xGnP/MWCNT/PS 센서를 이용하여 풍향과 같은 동하중을 지속적으로 받는 항공기나 윈드 터빈 블레이드와 같은 구조물의 주요 재료인 복합재료의 손상진단을 위한 모사 구조물에 적용하고, MWCNT/epoxy 센서는 기존의 센서가 적용되기 어려운 작은 형상의 구조물에 적용하였다.



4.2 저속 충격을 받는 복합재료 구조물 적용 실험

복합재료로 구성된 구조물은 저속충격에 대한 내구성이 취약하다. 따라서 저속충격에 의한 손상을 탐지하기 위해 xGnP/MWCNT/PS 센서를 적용하여 복합재료인 CFRP(carbon fiber reinforced polymer)평판에 띠(strap)형태로 분사 기법으로 연속형 센서를 제작하였다. 연속형 센서의 장점은 포인트형 센서에 비하여 넓은 영역을 감시 할 수 있으며 SHM 시스템을 구성하는 데이터 획득 채널의 수량을 줄일 수 있다.[11] xGnP/MWCNT/PS 센서로 구성된 충격량 감시 시스템은 CFRP평판에 작용하는 충격을 으로 인한 센서의 저항 변화를 휘스톤 브릿지를 통하여 전압신호로 변환하여 DAQ(NI)를 통해 데이터를 수집한다. SHM시스템의 구성도는 Fig. 22에 도시되어 있다.

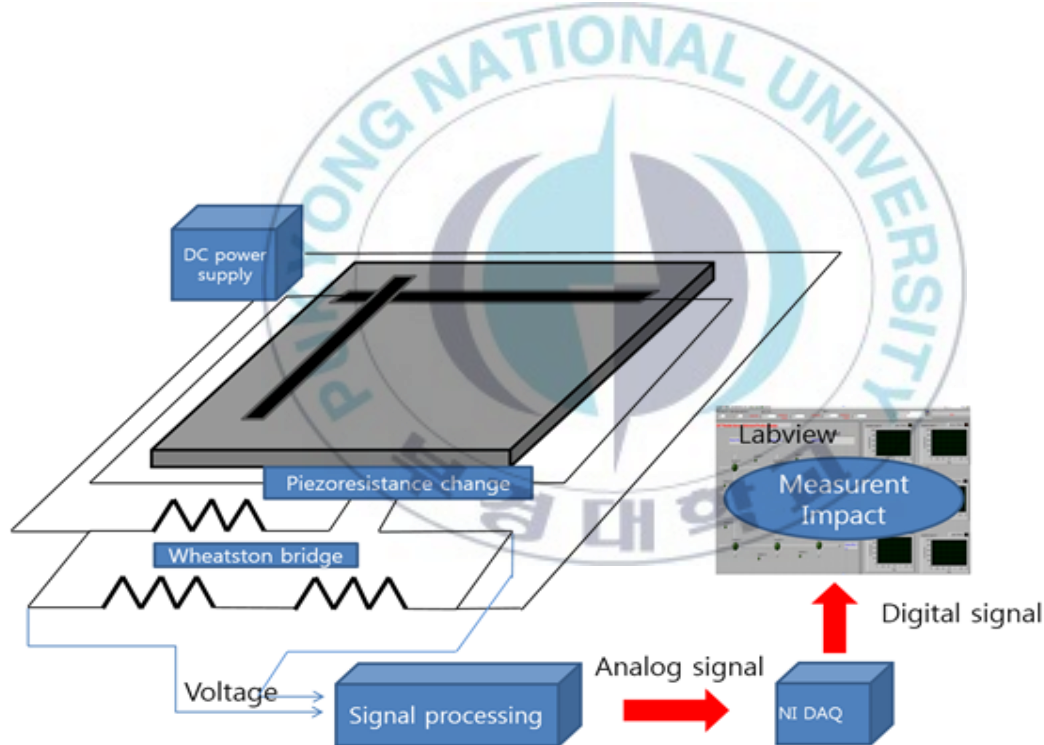


Fig. 22 System for SHM by using xGnP/MWCNT/PS sensor.

4.2.1 실험방법

xGnP/MWCNT/PS를 기반으로 띠 형태로 제작된 C1 센서와 R1 센서의 인가되는 충격에 대한 출력 전압의 특성을 분석하기 위하여 0.85kg의 베어링 볼을 낙하시키는 높이를 다르게 하는 방법으로 충격량을 인가 하였다. CFRP 평판에 인가한 충격량은 Fig. 23와 같이 환산하였고, 인가된 충격량의 크기는 0.41J, 0.83J, 1.25J 이다. 충격량을 인가한 지점은 각각 B0, B1, B2, B3 4개의 지점으로 그위치는 Fig. 24에 도시되어 있다. 충격량 인가실험은 각각의 충격량을 한 지점 당 70회씩 드랍하여 실시하였으며, 인가된 충격량에 대한 C1 센서와 R1 센서의 출력 전압을 측정 하였다.

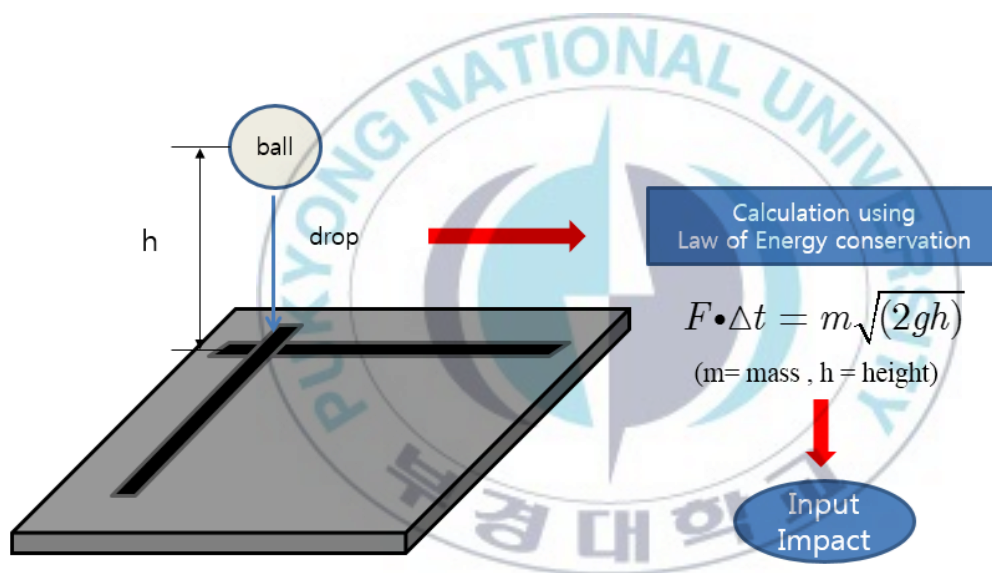


Fig. 23 Impact estimated method under ball drop.

4.2.2 실험결과

xGnP/MWCNT/PS를 기반으로 제작된 C1 센서와 R1 센서의 교차점 B0와 각각 100mm, 150mm, 210mm 의 거리만큼 떨어져 있는 B2,B1,B3 포인트에서 0.41J, 0.83J, 1.25J 의 충격량에 대한 전압출력은 Table. 4, Table. 5, Fig.25, Fig.26, Fig.27, Fig.28, Fig.29, Fig.30에 도시되어 있다. C1 센서와 R1 센서 모두 인가되는 충격량이 증가함에 따라 출력전압이 증가하는 선형적인 경향을 보임을 확인할 수 있다. Table. 4, Table. 5는 각각C1 센서와 R1 센서에 작용한 충격력과 평균출력전압을 나타낸 것이다.

Table. 4 Impact response of sensor C1

Position	Distance	0.41J	0.83J	1.25J
B0	0mm	228.52 [V]	274.94 [V]	665.58 [V]
B2	100mm	218.47 [V]	262.36 [V]	665.57 [V]
B1	150mm	205.12 [V]	250.54 [V]	645.97 [V]
B3	210mm	199.82 [V]	244.71 [V]	655.67 [V]

Table. 5 Impact response of sensor C2

Position	Distance	0.41J	0.83J	1.25J
B0	0mm	357.60 [V]	671.85 [V]	1164.34 [V]
B2	100mm	342.47 [V]	643.72 [V]	1159.15 [V]
B1	150mm	329.10 [V]	628.71 [V]	1146.38 [V]
B3	210mm	312.24 [V]	617.56 [V]	1149.14 [V]

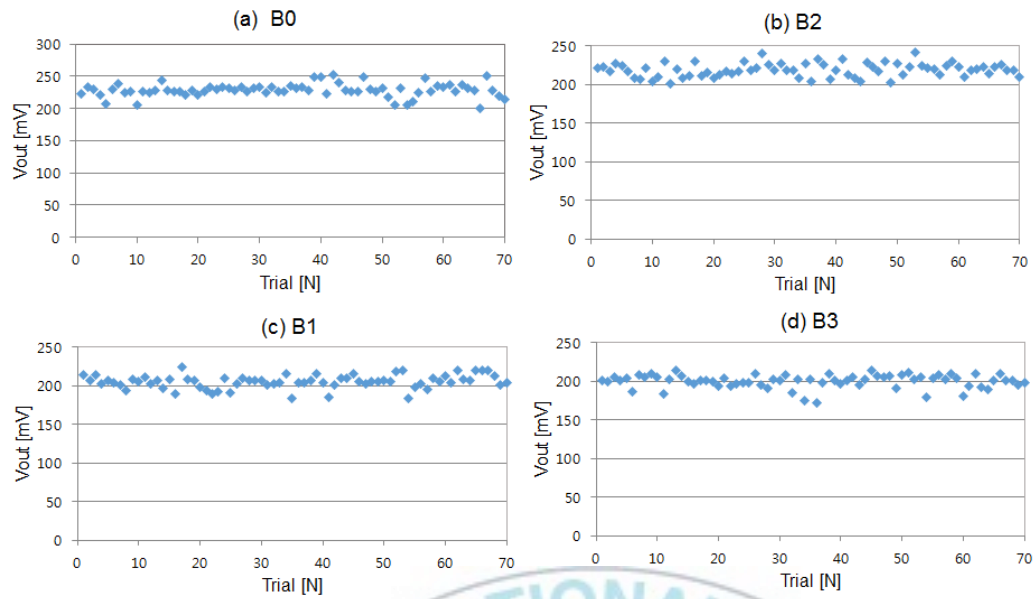


Fig. 25 The graph of a reliability for 0.41J at C1 sensor.

Fig.25, Fig.26, Fig.27을 살펴보면 C1 센서에서 획득된 충격량에 대한 출력전압의 거동을 확인할 수 있으며, Fig.28, Fig.29, Fig.30을 통하여 R1 센서에서 획득된 충격량에 대한 출력전압의 거동을 확인할 수 있다.

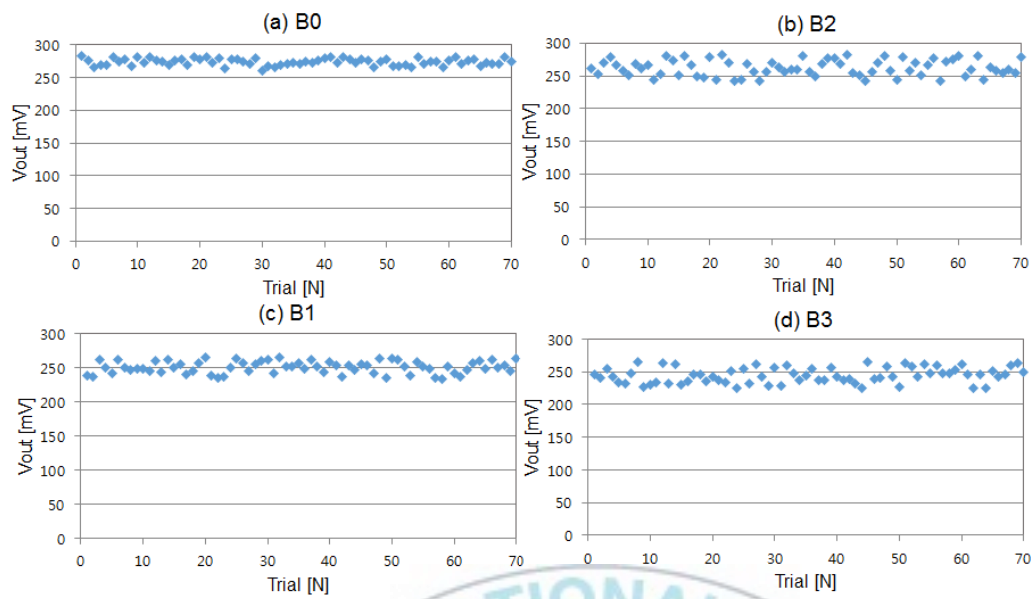


Fig. 26 The graph of reliability for 0.83J at C1 sensor.

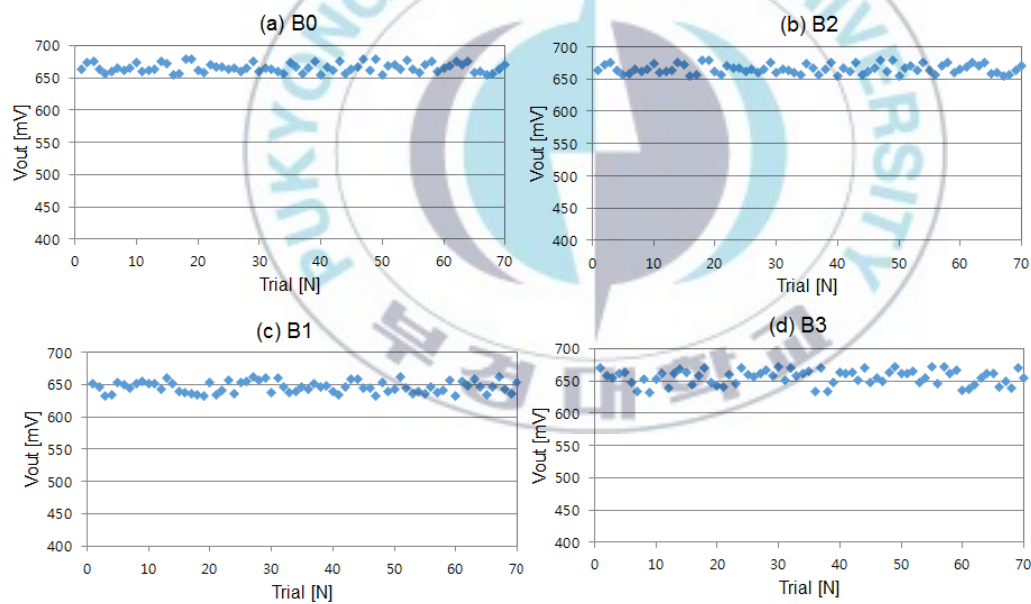


Fig. 27 The graph of reliability for 1.25J at C1 sensor.

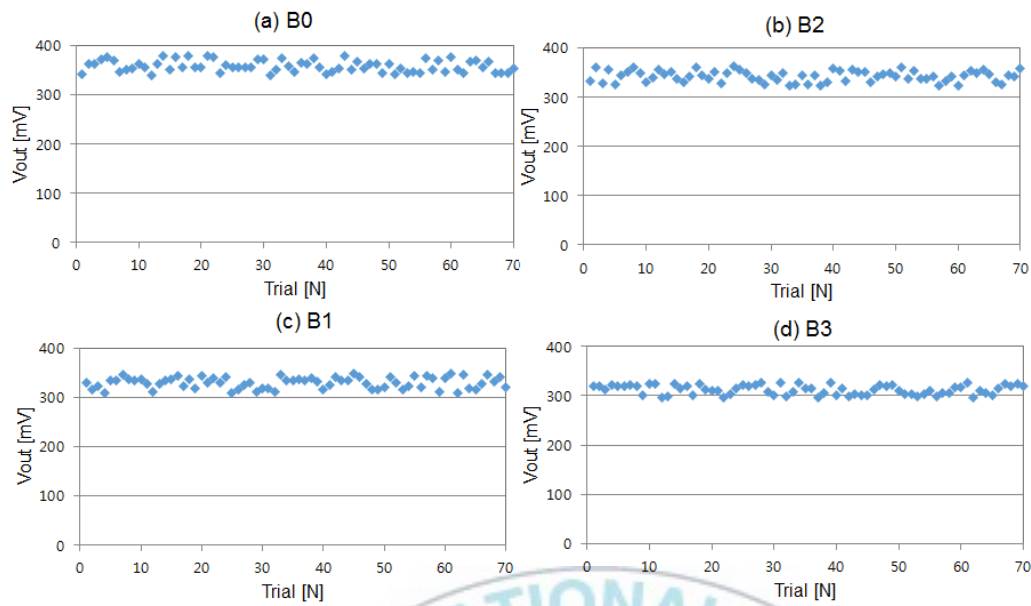


Fig. 29 The graph of reliability for 0.41J at R1 sensor.

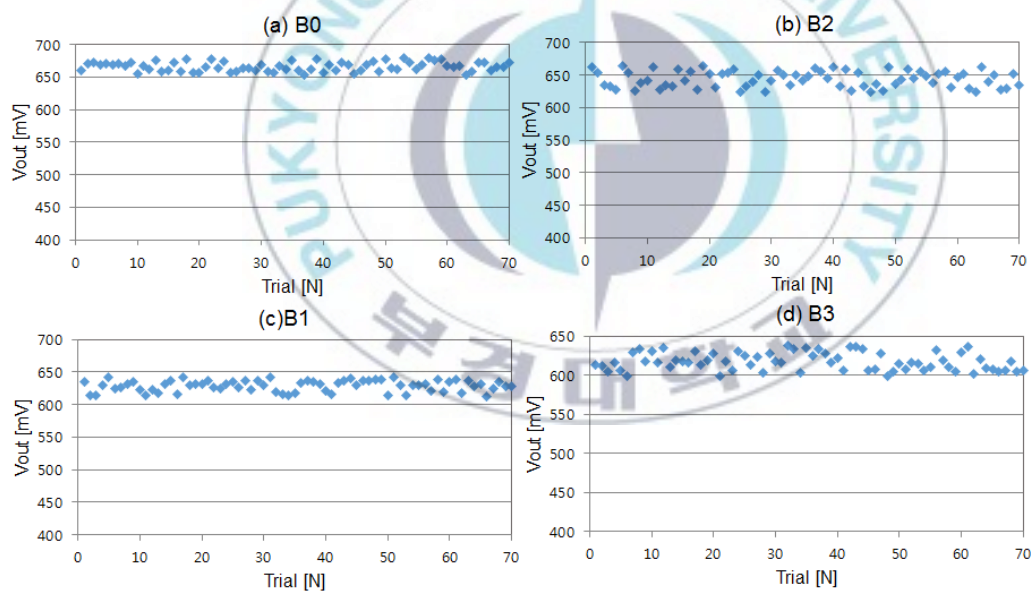


Fig. 29 The graph of reliability for 0.83J at R1 sensor.

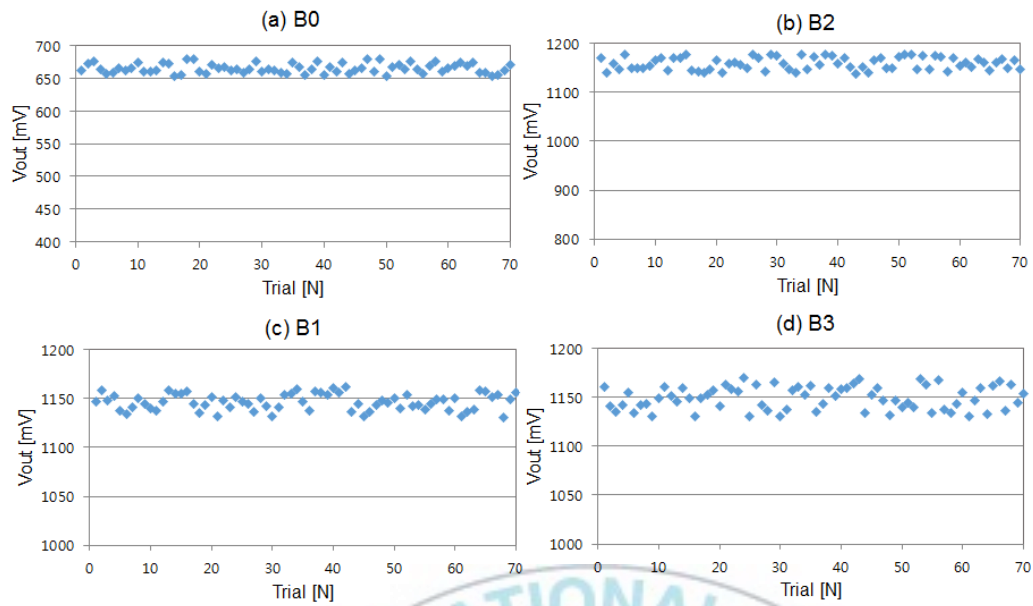


Fig. 30 The graph of reliability for 1.25J at R1 sensor.

또한 교차점인 B0 지점을 기준으로 B0 에서 거리가 100mm, 150mm, 210mm 로 멀어질수록 센서의 출력전압이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 센서와 떨어진 정도에 따라 같은 크기의 충격이 가해졌을 때 센서에서 느끼는 충격량의 크기가 작아지기 때문이라 사료된다.

4.2.3 고찰

xGnP/MWCNT/PS를 기반으로 제작된 C1과 R1 센서의 실험결과를 살펴보면 인가되는 충격량의 크기와 센서의 출력 전압이 비례하여 증가하는 선형적인 거동을 확인할 수 있다. 충격량의 크기에 비례하는 거동 이외에도 C1과 R1의 교점에서 떨어짐에 따른 출력전압의 감소도 확인할 수 있었다. Fig. 31과 Fig. 32는 충격량에 따른 C1과 R1 센서의 실험결과를 이용하여 센서들의 충격량에 대한 감도를 도출한 것이다.

감도를 도출한 것은 센서에 임의의 크기의 충격량이 가해지면 그때의 출력전압을 토대로 역으로 임의 크기의 충격량을 식(8) 과 같이 도출할 수 있기 때문이다.

$$Impact_{estimated} = \alpha V + \beta \quad (8)$$

α 는 센서의 감도, V 는 센서의 출력 전압, β 는 상수이다.

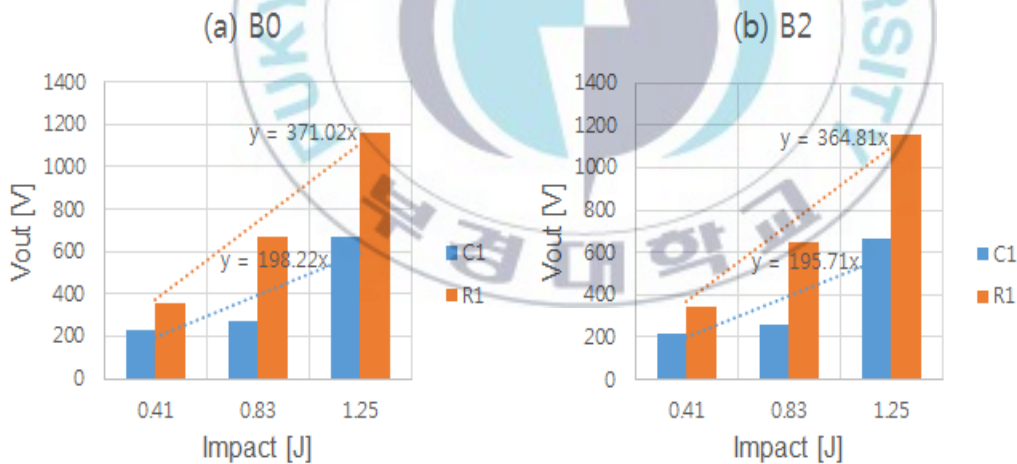


Fig. 31 Sensor output volatage w.r.t impact level (a) point B0 (b) point B2.

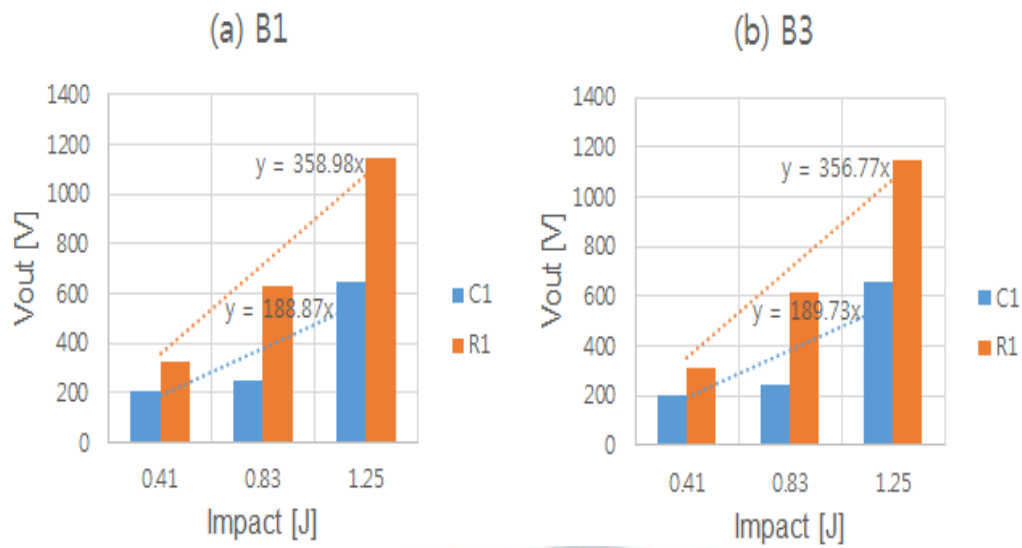


Fig. 32 Sensor output volatage w.r.t impact level (a) point B1 (b) point B2.

Fig. 25, Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28, Fig. 29, Fig. 30에서 센서에서 출력된 전압이 일정한 범위 내에서 지속적으로 나타나는 경향을 볼 수 있다. 따라서 식 (8)과 같은 방법을 이용하면 임의의 충격을 정량적으로 측정하거나 혹은 거리에 따른 출력 전압이 변화하는 거동을 이용하여 위치추정 알고리즘의 개발도 가능 할 것으로 사료된다.

4.3 인장-압축 변형을 받는 구조물 적용 실험

Fig. 34는 조인트(joint)에 사용되는 스포크 타입(spoke type)의 토크(torque) 센서 이다. 조인트형 토크 센서는 조인트의 형상에 발생하는 스트레인을 측정하여 조인트에 인가되는 토크를 추정한다. 조인트 토크 센서의 경우 임의의 부위에 외력이 가해지더라도 외력을 측정할 수 있으며 6축 힘/토크 센서에 비하여 구조가 단순하고 제작이 쉽다.[34,35]

기존의 연구에서는 토크 센서 구조물에 발생하는 스트레인을 스트레인 게이지를 이용하여 측정 하였다.[36] MWCNT/epoxy 센서는 분사기법이나 브러쉬 기법으로 크기가 작은 구조물이나 형상이 복잡한 구조물에 적용하기 쉬우며 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 스트레인에 대해 선형적인 반응을 보인다.



Fig. 33 The spoke type joint torque sensor.

4.3.1 실험방법

MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지(Tokyo Sokki Kenkyujo Co., LOT-152411)를 부착하여 제작된 조인트 토크 센서를 이용하여 Fig.34와 같이 토크 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 토크 인가 장치, 휘스톤 브릿지, 신호 처리 장치로 구성된다. 휘스톤 브릿지는 조인트 토크 센서의 저항변화를 전압 변화로 변환하기 위해서 사용하였다. 변환된 전압신호는 DC 증폭기를 이용하여 증폭하여 데이터를 획득하였다. 센서에 토크가 인가되지 않았을 때의 출력을 초기 조건으로 하여 cw(clock wise) 와 ccw(counter clock wise) 의 방향으로 0[N·m]에서 48[N·m]까지 12[N·m]단위로 늘려 가며 실험을 실시하였다.

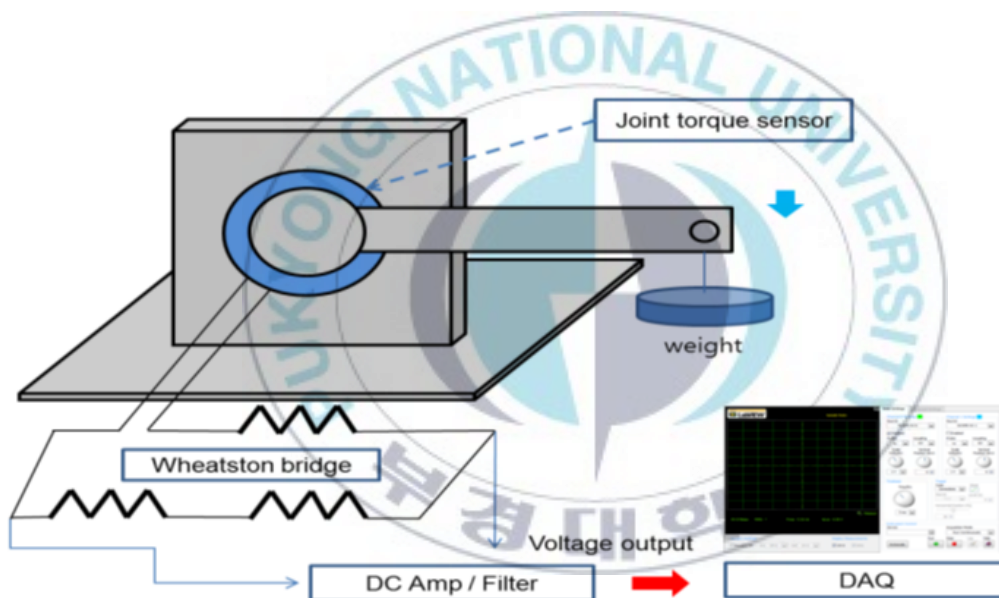


Fig. 34 The experimental apparatus with signal processing.

4.3.2 실험결과

cw와 ccw의 방향으로 0[N·m]에서 48[N·m]까지 12[N·m]단위로 늘려 가며 실험을 실시한 결과는 Fig. 35과 같다. MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지는 인가되는 토크에 비례하여 인장과 압축 방향에서 선형적인 거동을 보이고 있다. MWCNT/epoxy 의 감도는 약 3.9 [mV/Nm] 로 측정되었고, 스트레인 게이지의 감도는 약 4.1[mV/Nm] 로 측정되었다. MWCNT/epoxy 센서의 감도는 스트레인 게이지와 비교하여 0.2 [mV/Nm] 정도 떨어지지만 거의 유사한 감도를 가진다고 사료된다.

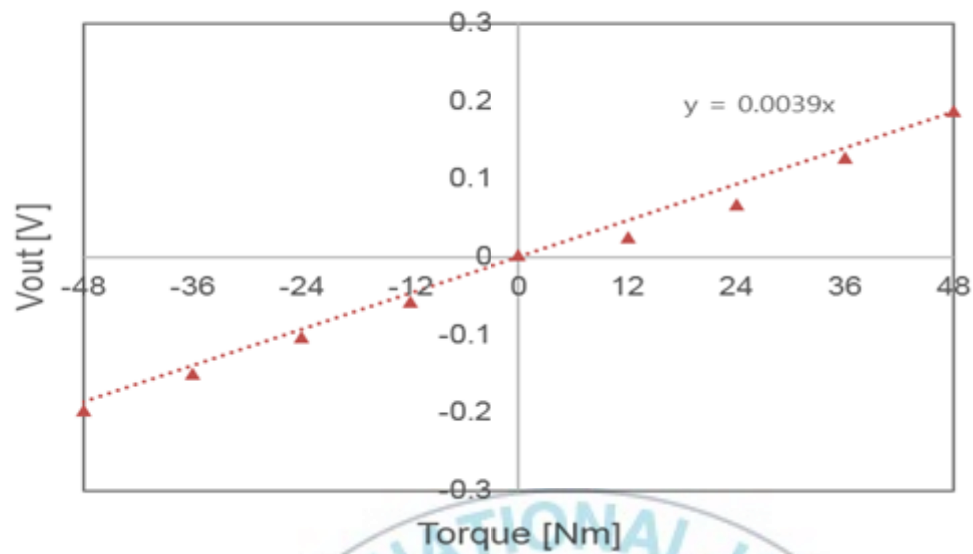
Fig. 36에는 MWCNT/epoxy 센서와 스트레인 게이지의 토크에 대한 히스테리시스가 도시되어있다. 스트레인 게이지는 토크에 대한 히스테리시스가 -24Nm에서 4.9%로 측정되었고, MWCNT/epoxy 센서는 히스테리시스가 +48Nm에서 11.4%로 측정되었다.

4.3.3 고찰

MWCNT/epoxy 센서는 Fig. 34의 조인트 토크 센서와 같은 구조물에 인장 하중과 압축 하중으로 야기되는 스트레인에 대해서 선형적인 출력 특성을 보임을 확인할 수 있다. 히스테리시스 특성에서는 3장의 기초 특성 실험의 실험 결과와 유사한 히스테리시스가 측정되었다.

선형성만을 고려하여 보면 MWCNT/epoxy 센서는 스트레인 게이지와 유사한 성능을 보인다고 할 수 있다. 하지만 히스테리시스 특성에서 스트레인 게이지와 비교하여 낮은 성능을 보이고 있다. 그 이유는 히스테리시스는 센서에 이전에 입력된 입력이 이후의 입력된 입력의 출력에 영향을 미치기 때문으로서 센서 내부의 전기 전도성을 가진 충진재인 MWCNT와 기저재료인 epoxy의 접촉 조건 사료된다.

(a) MWCNT/epoxy sensitivity



(b) strain gage sensitivity

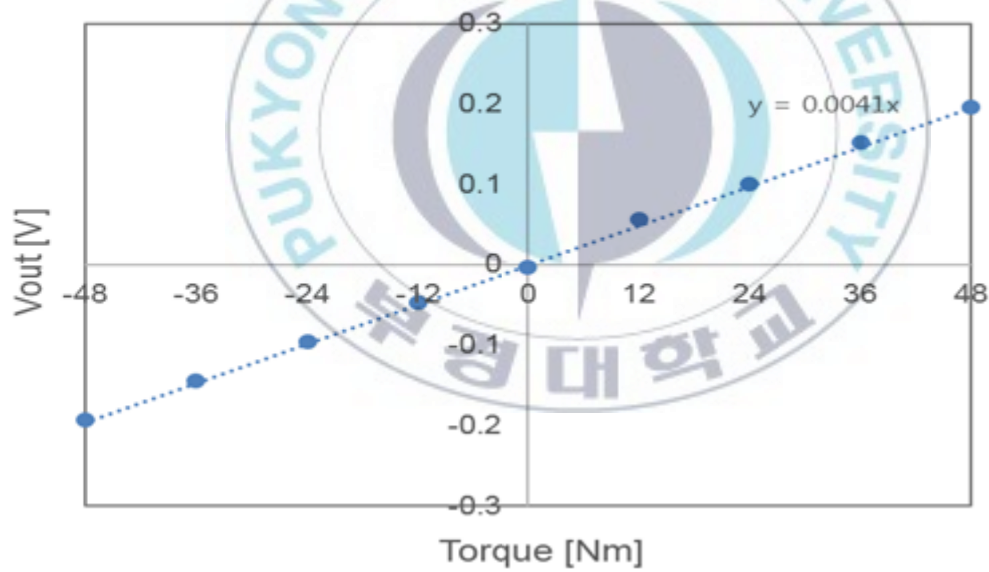
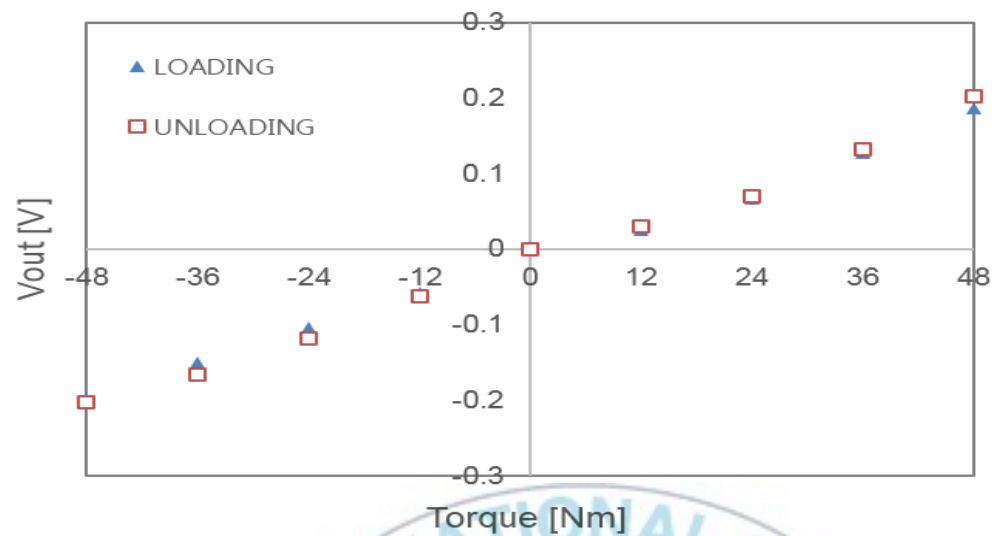


Fig. 35 The sensitivity of MWCNT/epoxy and strain gage.

(a) MWCNT/epoxy hysteresis



(b) strain gage hysteresis

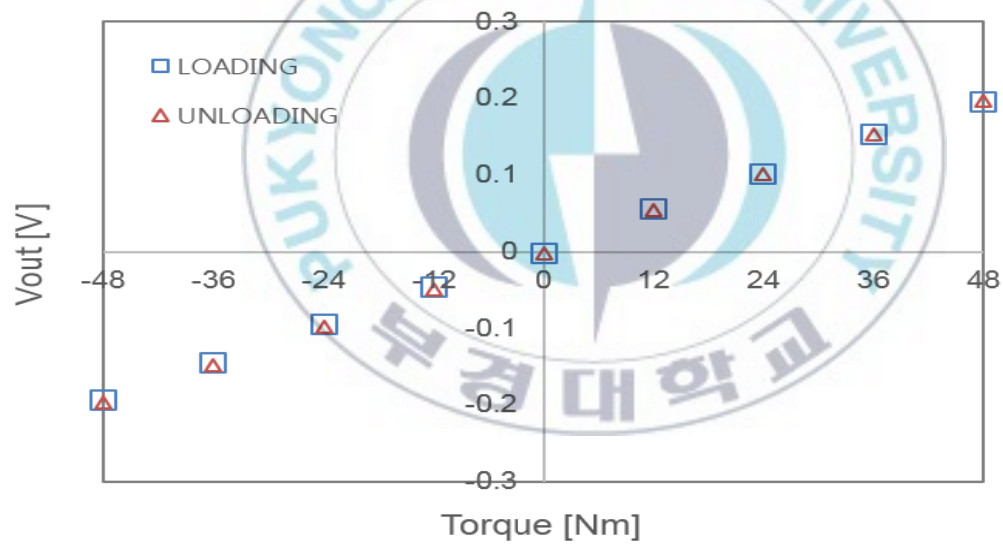


Fig. 36 The hysteresis of MWCNT/epoxy and strain gage.

V. 결 론

본 연구에서는 나노 카본 기반의 xGnP/MWCNT/PS 센서와 MWCNT/epoxy 센서를 구조물 건전성 감시(SHM)에 적용하기 위하여 기존의 SHM 기법과 적용된 센서들의 연구 사례를 조사하고, 이를 기반으로 나노 카본 기반의 xGnP/MWCNT/PS 센서와 MWCNT/epoxy 센서의 특성 실험을 진행하였다. 특성 실험의 결과를 토대로 유연성을 지니는 xGnP/MWCNT/PS 센서는 저속 충격을 받는 구조물에 연속형 센서로 적용하기 위한 기초 연구와 SHM에 적용하여 구조물에 인가된 저속 충격을 정량적 방법으로 획득하기 위한 연구를 진행하였다. 또한 분사나 브러쉬 기법으로 구조물에 적용할 수 있는 MWCNT/epoxy 센서는 포인트형 센서인 스트레인 게이지와 함께 토크센서 구조물에 적용하여 인가되는 토크에 대한 기초 특성을 확인하였다.

본 논문에서 적용한 나노 카본 기반의 xGnP/MWCNT/PS 센서와 MWCNT/epoxy 센서는 감도, 선형성, 히스테리시스, 반복성, 제로드리프트, 동적 특성등의 기초 특성 실험에서의 비교 대상인 스트레인 게이지와 비교하여 대체적으로 동등하거나 뛰어난 특성을 보이고 있어 SHM에 적용될 수 있다고 사료된다. 나노 카본기반의 센서들은 뛰어난 전기 전도성을 바탕으로 기저재료의 특성까지 지닐 수 있어 적용 대상의 상태, 즉 구조물의 크기나 형태 또는 변형에 견딜수 있는 유연성등과 같은 센서의 요구 조건을 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다.

나노 카본 기반의 xGnP/MWCNT/PS 센서와 MWCNT/epoxy 센서는 전왜성을 기반으로 하여 물리량의 변화를 저항의 변화로 나타내기 때문에 휘스톤 브릿지를 사용하여 간단히 전압신호로 변환이 가능하여 컨버터나 광원 분석기와 같은 측정 장비가 요구되지 않는다. 또한 저속 충격 실험과 같이 연속형으로 센서를 제작하는 것이 가능하여 기존의 센서들과 비교하여 적은 수의 데이터 획득 채널로서 SHM 시스템을 구성할 수 있어 비용절감에도 기여할 수 있을

것으로 기대된다. 하지만 연속형으로 센서를 사용 하였을 경우 센서에서 떨어진 거리가 멀어짐에서서 따라 동일하게 인가되는 물리량에 대한 출력이 감소하는 경향을 보이므로, 이를 이용한 충격 위치 추정 알고리즘에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 기존의 다른 센서에 비하여 히스테리시스와 같은 특성을 감소시키는 기저재료의 혼합기법이나 센서 제작기법의 연구도 수반되어야 할 것으로 사료된다.



VI. 참고 문헌

- [1] H. Friedrich, S. Schumann , “Research for a “new age of magnesium” in the automotive industry“ , Journal of Materials Processing Technology Vol 117 , 2001 , pp 276–281
- [2] F. Campbell , “Structural Composite Materials” , ASM Internationa , 2010 , pp1-30
- [3] H. Baldwin , “The new-technology Boeing 787 Dreamliner, which makes extensive use of composite materials, promises to revolutionize commercial air travel.“ , Aviation week & Space Technology , 2005 , pp1–s30
- [4] C.C. Ciang , Lee J.R. and Bang H.J. , “Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods“, Measurement Science and Technology , 2008 , pp1-20
- [5] J. Schweiger ,“ Aircraft Applications of Smart Structures , Smart Materials“ , Taylor & Francis Group , 2008
- [6] H.S. Choi and Y.H. Cho , “Structural Health Monitoring Techniques for Composite Aircraft“ ,Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing , vol 30 No. 1 , 2010

- [7] W.J. Staszewski , S. Mahzan , R. Traynor , "Health monitoring of aerospace composite structures - Active and passive approach" , Composites Science and Technology , 2009 , pp1678-1685
- [8] M. Hoffmann , H. Kungl , "High strain lead-based perovskite ferroelectrics , Current Opinion in Solid" , State and Materials Science , vol 8 , 2004 , pp51-57
- [9] M. Schmidt , B. Werther , N. Furstenau , M. Matthias, T. Melz , "Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometer Strain Sensor with < 50 pm displacement resolution using three-wavelength digital phase demodulation" , Optics Express , vol 8, 2001,
- [10] J. Dargahi , "A piezoelectric tactile sensor with three sensing elements for robotic, endoscopic and prosthetic applications", Sensors and Actuators A , vol 80 , 2000 , pp23-30
- [11] Kang I.P. , M.J. Schulz , Kim J.H. , V. Shanov and D. Shi , "A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring", Smart Materials and Structures , 2006 , pp 737-748
- [12] C.K. Soh , Y. Yang , S. Bhalla , "Smart Materials in Structural Health monitoring, control and biomechanics" , Springer , 2012

- [13] 고종인 , “복합재 구조물의 변형률과 고주파 진동의 동시 측정을 위한 광섬유 브래그 격자 센서 시스템의 개발” , 박사학위논문 , 한국 과학 기술원 , 2007
- [14] Y.B. Lin , K.C. Chang , J.C. Chern and L.A. Wang ,
“Pack-aging Methods of Fiber-Bragging Grating Sensors in Civil Structure Applications”, IEEE Sensors Journal , 2005 , pp419-424
- [15] V.P. Wnuk , A. Mendez , S.Ferguson , T. Graver ,
“Process for Mounting and Packaging of Fiber Bragg Grating Strain Sensors for use in Harsh Environment Applications” , SPIE ,
Smart Structures Conference 2005 , pp5758-6
- [16] Y. Nemirovsky , A. Nemirovsky , P. Malt , N. Setter ,
“Design of a novel thin-film piezoelectric accelerometer”,
Sensors and Actuators A , vol 56 , 1996 , pp239-249
- [17] P. Sajkiewicz , A. Wasiak , Z. Goclowski , “Phase transitions during stretching of poly(vinylidene fluoride)”, European Polymer Journal , vol 35 , 1999 , pp423-429
- [18] J. Yang , “Analysis of Piezoelectric Devices” , World Scientific Publishing , 2006
- [19] P.M. Franch , T.Martin , D.L. Tunnicliffe , D.K.D Gupta ,
“PTCa/PEKK piezo-composites for acoustic emission detection” ,
Sensors and Actuators A , vol 99 , 2002 , pp236-243

- [20]] T.R. Shrout and S.J. Zhang , “Lead-free piezoelectric ceramics Alternatives for PZT” , Journal of Electroceramics , vol 19 , 2007 , pp111–124
- [21] 김성민. “압전 필름을 이용한 교량 탄성 받침의 동적 하중 모니터링” , 석사 졸업논문 , 부경대학교, 2012
- [22] T.H.T. Chana , L. Yu , H.Y. Tam , Y.Q. Ni , S.Y. Liu , W.H. Chung , L.K. Cheng , “Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Mabridge: Background and experimental observation” , Engineering Structures , vol28 , 2006 , pp648–659
- [23] C.S. Shin , B.L. Chen, and S.K. Liaw , “An FBG-Based Impact Event Detection System for Structural HealthMonitoring” , Hindawi Publishing Corporation , Advances in Civil Engineering vol 2010 , pp253-274
- [24] W.J. Staszewski , C. Bolle and G.R Tomlinson , “Health Monitoring of Aerospace Structures” , John Wiley & Sons , 2004
- [25] “Aircraft Characteristiocs Airport and Maintenance Planning” , Airbus S.A.S , 2005
- [26] G. Wang , K Pran , G Sagvolden , G.B. Havsgard , A.E. Jensen , G.A. Johnson and S.T. Vohra , “Ship hull structure monitoring using fibre optic sensors” , Smart Materials and Structures , vol10 , 2001 , pp472–478

- [27] R.A Swartz , A.T. Zimmerman , J.P. Lynchb , J.Rosario ,
T. Brady, ,L. Salvino and K.H. Law ,
“Hybrid wireless hull monitoring system for naval combat vessels” ,
Structure and Infrastructure Engineering , vol 8 No. 7, 2012 ,
pp621-638
- [28] Kim S.Y. , Park S.H. , Choi Gy.R , Park H.K. and Kang I.P. ,
“Development of Novel Impact Paint Sensor by Using
Graphene based Smart Nano Composite” , Transactions of the KSNVE,
vol 24 , 2014 , pp247~252
- [29] Kim, Y.J. , Cha, J.Y. , Ham H. , So D.S. and Kang I.P. ,
“Preparation of Piezoresistive Nano Smart Hybrid Material based on
Graphene” , Current Applied Physics , vol 11 , 2011 , pp350~352
- [30] Kang I.P. , Heung Y.Y. , Kim J.H. , Lee J.W. , R. Gollapudi ,
S. Subramaniam , S. Narasimhadevara , D. Hurd , G.R. Kirikera ,
M.J. Schulz , D. Shi , J. Boerio , S. Mall , M.R. Wren , “Introduction to
Carbon Nanotube and Nanofiber Smart Materials” ,
Composites Part B : Engineering , vol.37, 2006 , pp. 382~394.
- [31] 이일영 저 , 제어용 센서공학 , 다솜출판사 , 2012
- [32] 박용균 저, 메카트로닉스의 기초, 두양사, 2004

[33] 홍준희 저, 자동화를 위한 메카트로닉스, 시그마프레스, 2000

[34] S. Haddadin , A.A. Schaffer , A.D. Luca and G. Hirzinger , “Collision Detection and Reaction: A contribution to sage physical Human-Robot Interaction” , IEEE , Intelligent Robots and Systems , 2008 , pp3356-3363,

[35] D. Tsetserukou , R. Tadakuma , H. Kajimoto , N. Kawakami and S. Tachi , “Development of a Whole-Sensitive Teleoperated Robot Arm using Torque Sensing Technique” , IEEE , Euro Haptic Conference 2007 and Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems , 2007 , pp476-481

[36] Kim J.H. , Kim Y.L. and Song J.B. , “A Switching Notch Filter for Reducing the Torque Ripple Caused by a Harmonic Drive in a Joint Torque Sensor” , Trans. Korean Soc. Mech. Eng A , vol 35 , vol. 7 , 2011 , pp709-715