



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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

탄소나노 지능형 복합소재의 스트레인
게이지로 이용을 위한 특성 연구

2016년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 설 계 공 학 전 공

최 백 규

공 학 석 사 학 위 논 문

탄소나노 지능형 복합소재의 스트레인
게이지로 이용을 위한 특성 연구

지도교수 강 인 필

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2016년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 설 계 공 학 전 공

최 백 규

최백규의 공학석사 학위논문을 인준함.

2016년 8월

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.....	7
II. 전왜성 지능형 탄소나노 복합소재 제작	8
2.1 탄소나노튜브(CNT)	8
2.2 탄소나노 복합소재의 전왜성	10
2.3 CNCS 제작	13
III. CNCS의 계측특성실험	15
3.1 CNCS 신호처리시스템구성	15
3.2 CNCS의 감도와 선형성	17
3.3 CNCS의 히스테리시스	22
3.4 CNCS의 영점 드리프트	24
3.5 CNCS의 온도특성	26
3.6 CNCS의 단위 계단입력 응답특성	28
3.7 구조물의 자유진동에 따른 CNCS의 응답특성	29
3.8 충격을 받는 구조물에서의 CNCS의 응답특성	30
IV. CNCS의 제작형상의 영향	31
4.1 CNCS 제작형상에 대한 저항특성	33
4.2 CNCS의 스트레인 측정 메커니즘	36
4.3 CNCS의 제작형상에 따른 구조물의 자유진동 응답특성	38
4.4 CNCS의 제작형상에 따른 전압출력특성.....	39

V. 단차가 있는 구조물의 응력집중 측정실험.....	43
5.1 CNCS 의 교정	45
5.2 단차가 있는 구조물의 구조해석	46
5.3 결과	47
VI. 결론	49
참고문헌.....	51



A Study on Strain Sensing Characteristics of Nano-Carbon Smart Composites for a Strain Gauge

Choi Baek Gyu

Department of Mechanical Design Engineering,

The Graduate School,

Pukyong National University

Abstract

A strain gauge is one of popular sensors since it can measure deformation and force with a simple processing data acquisition system. Since carbon materials have been studied to develop a strain sensor, this study experimentally characterized strain sensing performances of piezoresistive Carbon-Nano Composites Sensor (CNCS) and its application in the case of stress concentration on a beam to develop a novel strain gauge. The CNCS was made of multi-walled carbon nanotube (MWCNT)/epoxy composites by using nano-composite process. The sensing characteristics were experimentally evaluated with tests of linearity, zero drift, hysteresis, thermal effect, free vibration and impact. The CNCS showed fairly good strain sensing performances compared with a conventional strain gauge. This study also examined geometrical parameters of the CNCS such as width and length to design the strain gauge. The design parameters determine the strain sensitivity and that can be explained by a piezoresistive model. This study presume that the electrical conductive paths of the fillers in the matrix may dominate the piezoresistive changes and that can be designed by the parameters as well. For the application of the CNCS fabricated by brushing process, this study tested its sensing performance in the case of stepped beam which brings stress concentration to the structure. A stress concentration evaluation at the discontinuous region was conducted with experiments and ANSYS analysis. The experimental and analytical results showed wide discrepancies and that may be caused by imperfect boundary conditions due to the experimental setup.

Key Words: Carbon-Nano Composites Sensor, Strain Gauge, Installation shape, Stress Concentration, CNT, Piezoresistivity,

I. 서론

1. 연구배경

센서기술은 과학, 공학, 산업전반에 걸쳐 전통적으로 근간이 되는 계측기술의 핵심에서 최근 생활 수준의 향상과 정보기술의 급속한 발전으로 이제는 우리생활 전반에 걸쳐 안전 및 편의성 증대와 관련된 핵심기술로 그 중요도가 점점 높아지고 있다. 따라서 다양한 기술전반에 걸쳐 경제적이고 쉽게 이용할 수 있는 새로운 형태의 센서기술 개발이 요구가 될 것이다. [1] 본 연구에서 활용한 탄소나노소재 (Carbon Nano material)는 우수한 기계적, 전기적 및 전기화학적 성질로 인하여 구조용 재료뿐만 아니라 전자 소자, 에너지 저장 및 센서 재료로 각광을 받고 있어 최근 기계공학분야에서도 활발한 연구가 진행 중이다. [2] 탄소나노소재를 충전재(filler)로 하여 복합소재센서를 제작했을 때 이 센서는 “물체의 전기 저항값은 길이와 단면적 변화에 의하여 변화하다”는 외력에 따른 전기전도체의 형상변형에 따른 저항의 변화 원리와는 달리 전기전도성을 지닌 충전재가 이를 포함하고 있는 복합소재 내에서 외부 하중조건에 따른 충전재 상호간의 접촉저항의 변화 즉 전왜성(電歪性, piezoresistivity)을 기반으로 하는 새로운 형태의 센서이다. 탄소나노 복합소재 센서(Carbon-Nano Composites Sensor, CNCS)는 고분자 재료를 기저재료(matrix)로 사용하므로 유연한 센서로 제작이 가능하기 때문에 현재 확대되고 있는 웨어러블(wearable) 시장에 적극적으로 활용될 수 있으며 차세대 센서기술로써 인쇄제작기법을 적용한다면 경제성이 높으며 대중적으로 쉽게 사용할 수 있을 것으로 전망된다.

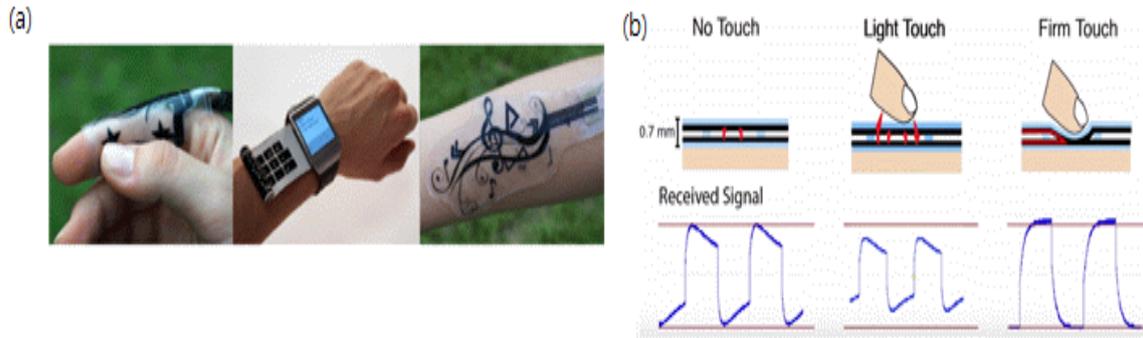


Fig. I -1 iSkin a thin, flexible, stretchable and visually customizable touch sensor (a) iSkin touch sensors (b) voltage output owing to touch contact events. [3]

최근에 연구되고 있는 탄소 기반 웨어러블 기술로 독일의 막스프랑크 연구소에서는 Fig. I -1(a)와 같이 피부에 착용 가능한 터치센서를 생체적합성이 뛰어난 재료인 PDMS(Polydimethylsiloxane)에 CB(Carbon Black) 전극을 패터닝 시켜 분무식 인쇄시킴으로써 iSkin이라는 웨어러블 센서를 개발하였다. [3] 이들의 개발품은 높은 유연성과 가벼운 착용성을 지녀 신체에 부착이나 착용이 가능하나 Fig. I -1(b)에서 알 수 있듯이 센서의 감지부가 낮은 전왜성을 지닌 CB로 제작이 되어 입력 신호 정도를 3단계로만 인식할 수 있어 심박과 같은 미세한 감각의 생체 정보 모니터링에는 한계가 있다고 분석된다.

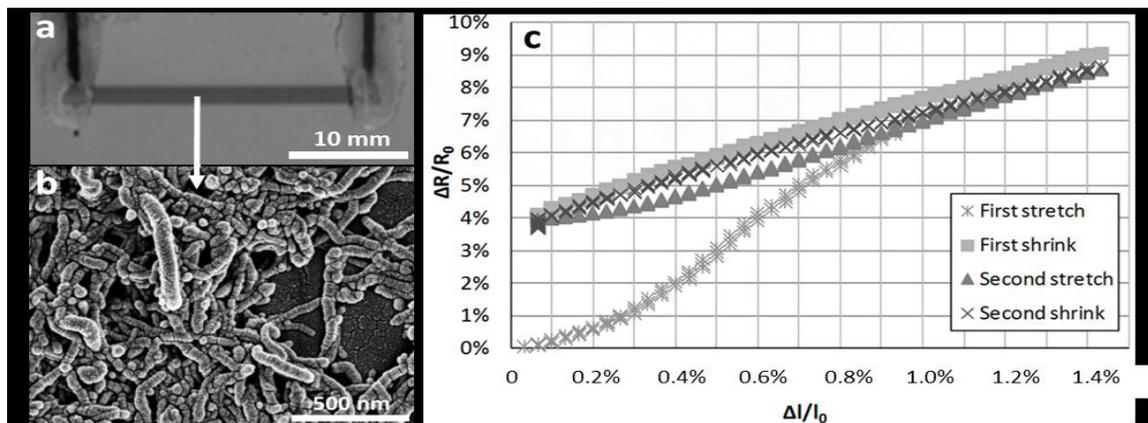


Fig. I -2 MWCNT films deposited by inkjet printing (a) Optical microscopy image of a CNT film with a size of 2mm x 30mm (b) corresponding SEM image of the CNT film (c) change of resistance vs. strain. [4]

탄소나노소재의 잉크젯 프린트를 이용한 센서제작연구로는 Dinh 외 6명이 유연한 PET에 액상형 탄소나노튜브(Carbon-nanotube, CNT)를 Fig. I-2(a)와 같이 인쇄하였다. [4] CNT에 분산제를 첨가하여 분자간의 결합에 의해 다발로 구성되어있는 CNT를 고르게 분산을 시켜 Fig. I-2(b)와 같이 CNT가 균일하게 분산되어 있음을 전자현미경을 통해 관찰하였고 CNT간의 전도성통로(Conducting path)가 생성됨을 확인하였다. 제작된 CNT 필름센서로부터 Fig. I-2(c)에 도시 한 바와 같이 스트레인에 대한 전왜특성을 분석하였다. 그 결과 초기 CNT 필름의 인장에서는 감도(Gage factor)가 3.5에서 6까지 비선형적으로 출력되었지만 두 번째 인장과 압축실험에서는 안정적인 선형출력을 얻어냈고 이러한 원인을 CNT간의 접촉저항의 원리를 통해 설명하였다.

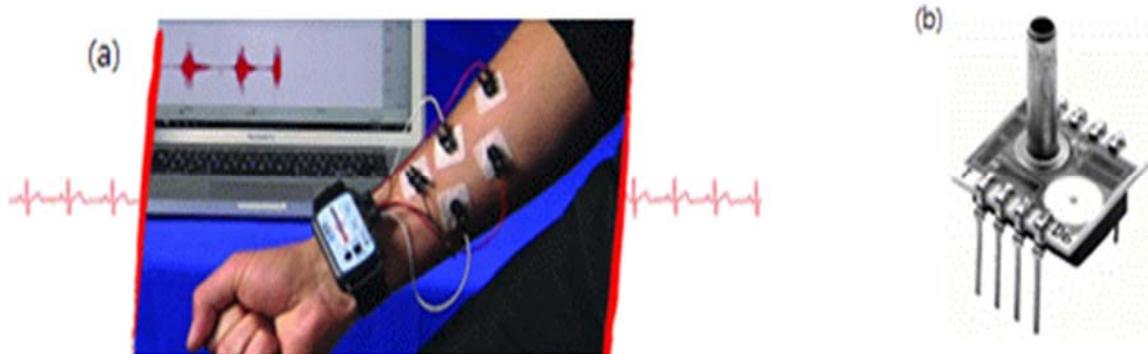


Fig. I-3 Conventional cardiac monitoring sensors (a) BIOPAC MP 150 Biopac Systems Inc. USA, (b) MEMS piezoresistive sensor. [5]

최근 생명공학기술과 정보통신기술의 융·복합으로 바이오 헬스산업에서도 센서의 활용이 중요해지고 있다. 심장건강 모니터링 센서의 한 예들을 Fig. I-3과 같이 도시하였다. Fig. I-3(a)의 압전필름(piezoelectric film) 및 Fig. I-3(b)의 MEMS 전왜성 센서를 활용한 혈압이나 심장 박동을 모니터링 하는 연구들이 보고되고 있지만 내구성 부족과 비선형성 등의 문제점과 유연성 구현에 어려움이 있어 웨어러블 기술 구현을 위한 센서로는 적합하지 않다고 사료된다. [5] CNCS의 연구 사례들과 최근 이슈가 되고 있는 바이오산업에서의 센서의 활용으로부터 CNCS는 다음과 같은 특징과 활용성을 가진다. CNCS의 복합소재 제조공정에 따라 센서의 감도를 조절하는 것이 가능하며 페인트방식의 액상형센서로써 유연성을 가지고 있어 넓은 영역을 계측하는 연속형 센서로 사용하거나 복잡한 형상의 구조물을 계측할 수 있는 목적형 포인트 센서로 활용이 가능하다. 압전필름이나 MEMS센서에 비해 유지보수와 내구성 및 경제성에 있어서도 액상형으로 제작이 가능하기 때문에 유지보수가 뛰어나고 기저재료로 주로 고분자폴리머를 사용하므로 내구성이 뛰어나면서 센서 제작비용이 저렴하여 경제적이다. 또한 CNCS는 스트레인 게이지(Strain Gauge, SG)와 유사한 전왜메커니즘을 가지는 센서로 SG와 동일한 신호처리시스템을 이용할 수 있다. 따라서 CNCS는 SG의 역할을 보완할 수 있는 스트레인 센서로 개발될 수 있다.

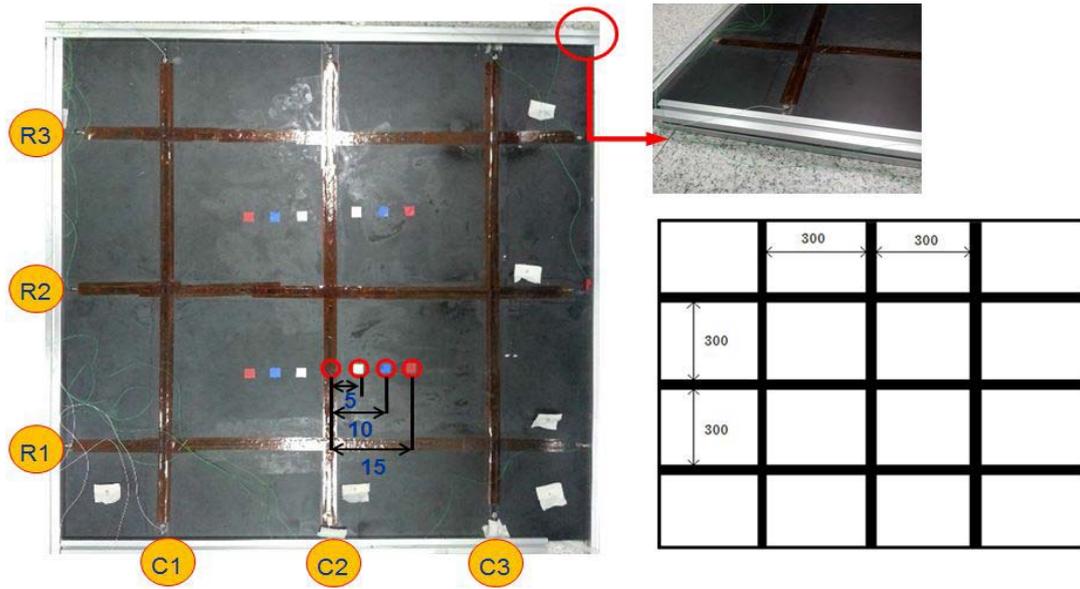


Fig. I-4 3 x 3 neuron network on the 1m x 1m composite panel. [6]

본 연구실에서는 전술한 CNCS의 특징과 활용성을 통하여 CNCS를 Fig. I-4와 같이 연속형으로 제작한 Artificial Neuron System(ANS)를 이용하여 충격 위치를 추정하는 Structural Health Monitoring(SHM) 기술에 대해 연구했다. [6] 이를 통하여 페인트방식의 센서를 이용한 새로운 SHM기술의 가능성을 보였으며 이와 더불어 위 연구에서는 다양한 구조의 나노소재들의 복합소재 제조공정을 통해 고분자기저 내에서 분산되어있는 나노소재들의 접촉형태에 따라 감도를 획기적으로 향상시킬 수 있음을 밝혔다.

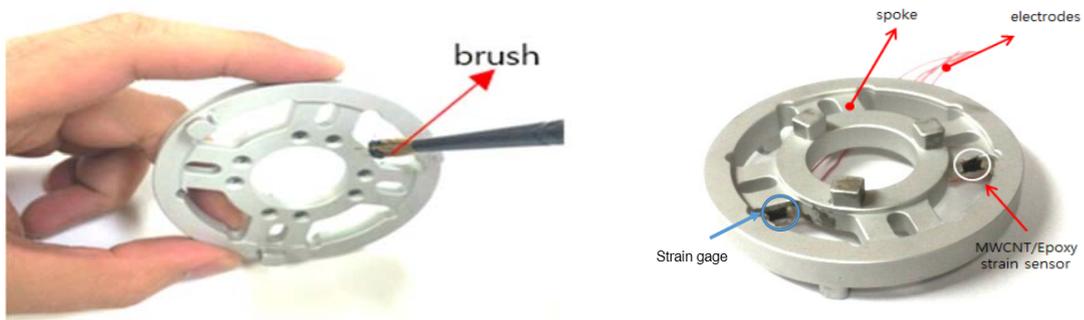


Fig. I -5 A spoke type joint torque sensor by using painted strain sensors made of a MWCNT/epoxy composite. [7]

이후로는 연속형 CNCS가 아닌 복잡한 구조물의 스트레인을 계측할 수 있는 목적형 포인트센서로의 활용에 대해 연구하였다. [7] 이 연구에서는 Fig. I -5와 같이 로봇의 관절토크를 측정하는 요소부품인 스포크타입 토크센서의 스포크부분에 CNCS를 부착하여 인가토크에 대한 전압특성을 상용SG와 비교했다. 또한 여러 복합소재 공정으로 제작된 CNCS의 전왜성과 정적인 전압출력특성을 SG와 비교하였다.

2. 연구목적 및 내용

앞선 두 연구들에서는 CNCs를 연속형 센서로 활용하여 ANS로 개발하여 SHM기술에 대해 연구하였고 목적형 포인트센서로는 로봇관절용 스포크타입 토크센서에 부착하여 국소부위의 스트레인을 측정하였다. 또한 공통적으로 복합소재 제조공정에 대한 연구를 수행하여 CNCs의 재료적 측면에서의 감도향상과 센서의 기초특성실험을 하였다. 하지만 위의 연구들에서는 CNCs가 가지고 있는 고유의 재료적인 잡음으로 인한 저항의 불안정성과 신호처리시스템에서 발생한 외부잡음으로 CNCs를 구조물에 적용한 계측과 CNCs와 SG를 비교한 기초특성실험에 신뢰성이 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 CNCs의 센서로서의 신뢰성을 확보하고 SG를 보완하는 스트레인 센서로 이용하기 위하여 연구내용을 크게 아래의 3개부분으로 구성하였다.

- (1) CNCs가 가지는 고유의 재료적인 잡음으로 인한 저항의 불안정성을 복합소재 제조공정으로 개선시키고 계측을 위한 신호처리시스템을 외부잡음저감에 중점을 두어 구성함으로써 개선된 출력신호의 CNCs에 대한 센서특성실험을 동일한 환경에서 상용 SG와 비교하였다.
- (2) 포인트형 CNCs와 연속형 CNCs의 제작형상에 따른 차이를 분석하기 위하여 CNCs의 길이, 폭을 변화시켜 스트레인에 대한 전압특성을 살펴보고 매크로스케일에서의 CNCs의 스트레인 측정메커니즘에 대한 연구를 하였다. 이는 차세대 센서기술 중 하나로 기대되는 잉크젯을 이용한 프린트형 센서제조공정에 있어 중요한 요소이다.
- (3) SG와 차별되는 CNCs가 가지는 장점으로써 페인트형 방식의 센서제작이 가능하다는 것을 활용하여 CNCs의 응용으로 실제 산업현장에서 수요가 많은 단차가 있는 구조물에서 형상변화가 있는 부분에 발생하는 응력집중을 측정하는 목적형 포인트센서로서의 실용적인 연구를 SG와 비교하여 수행하였다.

II. 전왜성 지능형 탄소나노 복합소재 제작

1. 탄소나노튜브(CNT)

탄소는 우리에게 대표적인 두 가지 결정형태인 흑연 및 다이아몬드를 구성하는 물질로 알려져 있었다. 1985 년 축구공 모양을 가진 탄소분자 C_{60} 인 풀러렌이 처음 발견된 이래로 전 세계의 많은 연구진들은 새로운 구조의 탄소를 합성하기 위한 연구를 진행하였고 그 과정에서 1991 년에 일본의 Iijima 박사는 두 개의 탄소 전극간의 아크에 의해 발생된 탄소 부산물들을 관찰하는 동안 가늘고 긴 원통형 튜브모양의 탄소구조를 가지는 다중벽 형태의 탄소나노튜브(CNT)를 최초로 발견하였으며 [8], 이어서 철, 코발트, 니켈등의 전이금속류를 함유한 전극을 이용한 아크방전실험을 통해 다중벽 CNT 보다 작은 1~2nm 직경의 단일벽 CNT 가 생성될 수 있음이 밝혀졌으며, 1996 년에 Smalley 등이 촉매를 이용하여 다량의 단일벽 CNT 를 제조하여 CNT 에 관한 본격적인 연구가 시작되었다. [9] CNT 에서 하나의 탄소원자는 3 개의 다른 탄소원자와 결합되어 있고 육각형 벌집 무늬를 이룬다. 벌집 무늬 형태를 이루는 탄소원자들을 원통형으로 말아 만든 튜브 형상을 가지는 CNT 는 벌집 무늬가 열리는 각도와 직경에 따라 금속과 같은 도체가 되기도 하고 전기가 잘 안 통하는 반도체가 되기도 한다. [10] CNT 는 탄소로 구성되는 다이아몬드, 흑연, 풀러렌보다 밀도가 낮고 길이/직경비(aspect ratio)가 크며 고강도의 합금의 수십 배에 이르는 기계적 강도와 구리이상의 전기전도도를 가지며 다이아몬드의 2 배에 이르는 열전도도와 대기에서 750℃까지 안정한 열안정성을 가지고 있다. CNT 의 우수한 전기적 기계적 특성은 특히 나노복합재료 분야에서의 이상적인 충전재로 활용되어 활발한 연구가 진행되고 있으며, 대부분의 복합재료는 고분자 폴리머를 기저로 사용하고 있다. [11], [12] CNT 는 Fig II-1 에 도시한 바와 같이 합성방법 및 실험 조건에 따라 각기 다른형태의 CNT 가 형성된다. Fig II-

1(b)와 같이 벌집 무늬의 탄소원자로 구성되는 흑연판이 말린 겹 수에 따라 단일벽(Single walled), 이중벽(double walled) 다중벽(Multi walled)로 분류되며, Fig II-1(a) 처럼 말린 각도와 직경에 따라 armchair, zigzag, chiral 로 구분된다. CNT 는 구조에 따라 전기적 특성이 다르게 나타나게 되는데 Armchair 는 금속 (전도성)의 특성을 나타내고 zigzag 는 반도체특성을 나타낸다. 단일벽 탄소나노튜브 (Single-walled carbon nanotube, SWCNT)는 단순히 흑연판 한 층을 말아 놓은 구조로 직경은 0.5~3 nm 이며 이중벽 탄소나노튜브(double-walled carbon nanotube)는 SWCNT 의 두 층이 동심 축을 이룬 형태로 직경이 1.4~3nm 에 이른다. 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled carbon nanotube, MWCNT)는 벽수가 3~15 겹의 층을 이루며 직경은 5 ~ 100nm 에 이른다. CNT 의 독특한 전기적 특성은 1 차원적 구조와 흑연 고유의 전기적 구조에 기인하며 매우 낮은 전기적 저항값을 나타낸다. 저항값은 구리의 1/100 에 불과하며 전류수송능력은 구리의 1,000 배에 이른다. 기계적 물성 측면에서 CNT 는 구조적으로 탄소-탄소간의 sp^2 결합을 이루고 있음에 따라 매우 높은 강성과 강도를 나타낸다. CNT 의 기계적 물성에 대한 다수의 연구결과, CNT 의 영률은 5.5Tpa 에 이르며 인장강도는 100 Gpa 에 이르는 것으로 보고되고 있다. 이는 고강도 합금의 영률이 200Gpa, 인장강도가 1~2Gpa 인 것과 비교하여 매우 높은 기계적 특성을 나타내는 것이다. [13], [14]

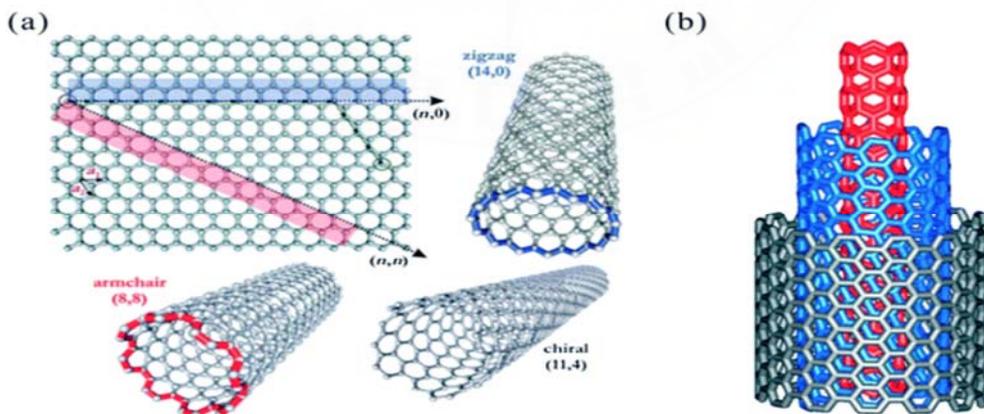


Fig. II-1 A construction of the CNT.

2. 탄소나노 복합소재의 전왜성

나노 소재들은 높은 기계적 강도, 뛰어난 전기적 성질, 안정된 전기-화학적 성질 등을 보유하고 있어 기존 재료들의 단점을 보완하거나 그 한계를 극복할 수 있는 새로운 재료의 개발을 가능하게 하고 있다. 그 중에서 탄소나노 스마트 재료 (Carbon-nano based smart material)는 기계적 변형이 가해질 때 전기전도도가 변화되는 전왜특성이 관찰되었고 이러한 특성은 고감도의 기전센서의 응용 가능성을 보여주었다. 이러한 특성에 근거하여 개별적인 CNT에 기계적 변형이 가해질 때 발생하는 특성 변화를 이들의 Band gap변화를 통한 라만 신호에 의한 측정 등이 연구되었다. [15] 그러나 이러한 연구들은 CNT의 스트레인 측정 특성을 마이크로 이하의 스케일에서 나노 센서로 사용하기 위한 연구들이므로 다수의 공학적 응용이 요구되는 매크로 스케일 분야에는 적용의 차이가 존재할 뿐만 아니라, 측정 방법 역시 공학 현장에 적합한 경제적인 방법들이 아니다. 그러므로 이와 같은 한계를 벗어나 CNT를 공학적 응용 분야의 스트레인 센서로 응용하기 위하여 이를 복합소재 기술에 의한 매크로 스케일의 센서로 개발하는 연구들이 수행되고 있다. [16] Fig. II-2 에 보이는 그림은 전왜성에 관한 기본 모델이며 어떠한 기저 재료 안에 나노충전재가 갇혀 있을 경우 그 복합 재료의 전기적 성질은 나노충전재의 접촉 조건에 따라 달라진다는 것이다. 그림과 같이 복합재료에 인장력을 주었을 경우 각 나노충전재 사이의 거리가 벌어지기 때문에 복합재료가 가지는 전기적 성질이 떨어지는 것이며, 반대로 생각 하여 압축력을 주었을 때는 각 나노 충전재 사이가 서로 접촉이 되며 전기가 지나가는 길이 많아지기 때문에 복합재료가 가지는 전기적 성질이 향상된다는 것이다. [17] CNT는 흑연판 사이의 상호작용과 유사하게 튜브와 튜브간의 강한 반데르발스 상호작용으로 인하여 다발이나 응집체 형태로 존재한다. 이러한 응집현상은 전기적 물성이나 기계적 물성을 향상시키는 목적의 복합소재를 제조함에 있어서 튜브의 3차원적인 네트워크 구조형성을 방해한다.

고분자 기저 내에 나노튜브가 가능한 개개의 나노튜브로 분산되지 않으면 충전재로써의 나노튜브의 장점을 발휘 할 수 없다. 따라서 튜브간의 간격을 벌리고 효과적으로 고분자 기저 내에 분산시키는 기술은 복합체 제조에 있어서 가장 중요한 단계라 할 수 있다. CNT를 분산시키기 위한 방법으로는 기계적 분산법으로 초음파 처리, 볼밀링에 의한 분산, 고전단력에 의한 분산법과 함께 용매와 분산제를 이용한 분산, 강산을 이용한 분산, 표면 기능화등의 방법을 들 수 있으며 이들 방법을 혼용하여 사용하기도 한다. MWCNT의 분산성을 향상시키기 위하여 분산제를 화학적인 결합으로 MWCNT 표면에 도입하면 강성은 대폭 증가하지만 전기전도성은 오히려 감소하였다, 이는 분산성이 개선되어 MWCNT가 에폭시에 고르게 분산됨으로써 에폭시에 부과된 하중이 효율적으로 MWCNT에 전달되어 강화효과는 극대화되지만, MWCNT표면에 화학결합으로 도입된 분산제가 전자의 흐름을 분산시킬 뿐만 아니라 MWCNT 사이의 긴밀한 접촉을 방해하여 오히려 전기 전도성을 저해하는 것으로 이해되고 있다. [18] 전기전도도 측면에서 CNT는 길이/직경비가 매우 크기 때문에 복합체 내에서 3차원적으로 균일한 분산이 이루어졌을 경우 튜브에 의한 전도성 통로가 형성되어 적은 충전량에 전기전도도가 급격히 증가하는 percolation threshold가 발생된다. 이 때 튜브간 접촉거리는 5nm 이내에서 전자의 호핑이 이루어져 전기적 전도성을 나타낼 수 있으며 길이/직경비가 클수록 낮은 CNT 함량에서 전기적 전이 일어난다. [14] CNT 복합체의 전기전도도와 관련된 지금까지의 다수의 연구 결과에 따르면 Fig. II-3 에 도시한 바와 같이 통상 다중벽 CNT의 경우는 1~2wt%, 단일벽 CNT는 0.05~0.1wt% 함량에서 전기적 전도성을 지니게 된다. [19]

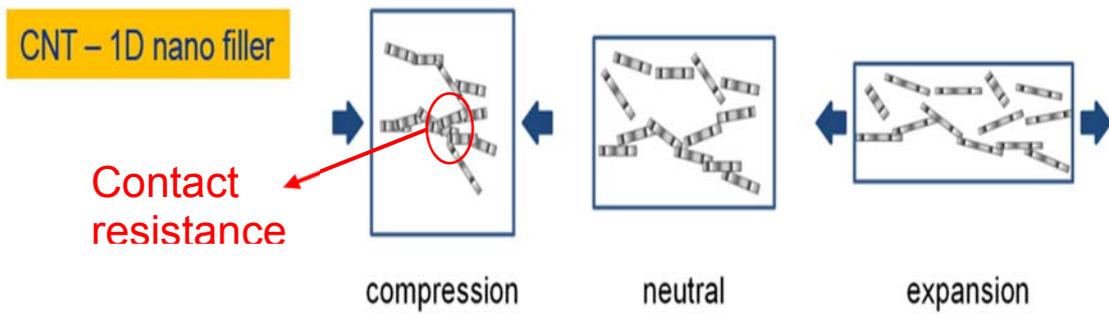


Fig. II-2 Electrical conductivity as a function of the CNT volume fraction. [18]

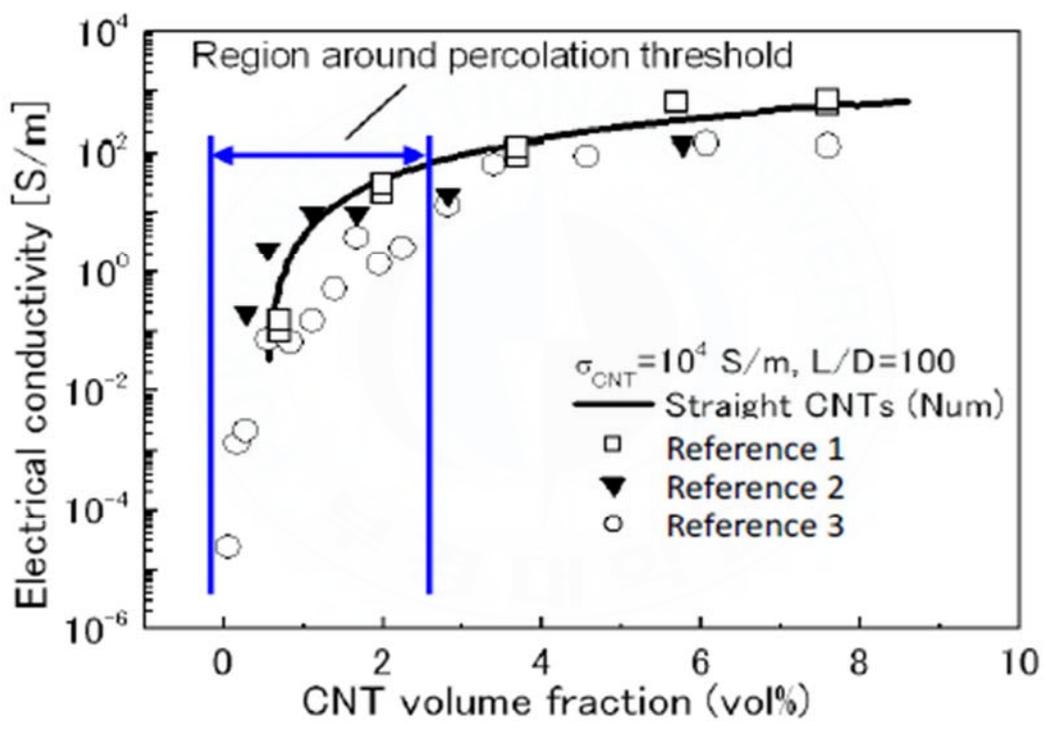


Fig. II-3 Electrical conductivity as a function of the CNT volume fraction. [19]

3. CNCS 제작

CNCS 제작에는 MWCNT(hanwha, cm280)를 충전재로 하고 에폭시(KUKDO CHEMICAL Co., YD-128)를 기저재료로 사용했다. 에폭시는 우수한 기계적인 강도를 가지며 복합소재로 제작이 용이하여 CNCS 의 기저재료로 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 MWCNT 를 0.5wt% 함량으로 하여 복합소재를 제작하였다. 우선 응집체로 존재하는 MWCNT 를 용매와 에폭시와 함께 초음파처리과정을 거쳐서 분산을 시킨다. 다음으로 용매를 50~80℃에서 제거한 후 경화제를 에폭시 100:32 의 비율로 첨가하여 진공오븐에 넣어 탈포과정을 거치면 액상형태의 복합소재가 만들어진다. 액상형태의 재료의 경우 Fig II-4 와 같이 몰드 방식과 스프레이 또는 브러쉬 방식으로 CNCS 의 제작이 가능하다. 본 연구에서는 브러쉬방식을 채택하여 30cm 스틸자에 바른 후 80℃ 에서 경화과정을 거쳤다. 경화가 완료되면 전도성 에폭시(conductive epoxy)를 이용하여 센서의 양 끝에 전선을 부착하여 표면에서 발생하는 접촉저항(contact resistance)의 변화에 의한 불안정성을 감소시켰고 전선은 이중 실드선을 사용하여 신호처리 시 외부 잡음을 감소시켰다. 완성된 CNCS 를 Fig II-5 에 도시하였다. 그림과 같이 CNCS 의 반대편에 상용 SG 를 부착하여 센서들의 특성을 비교하였다.

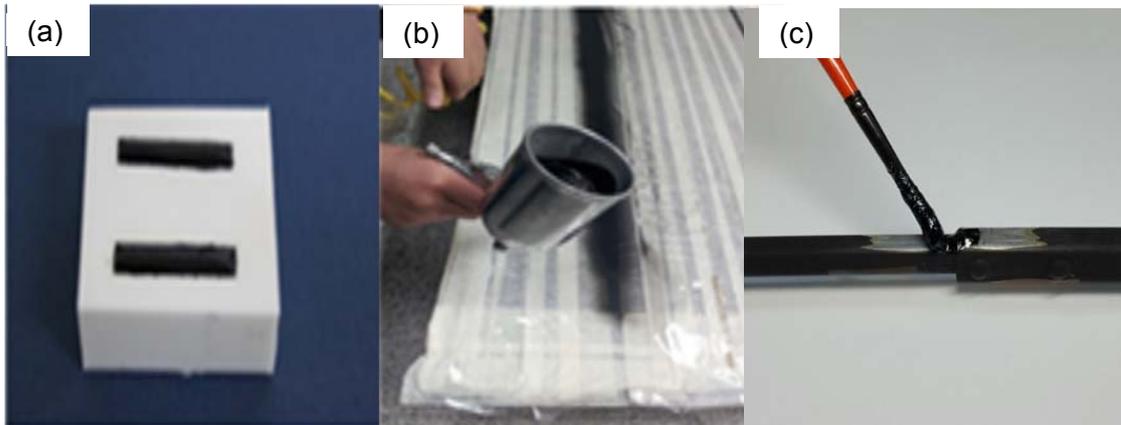


Fig II-4 Fabrication methodology of nano-carbon composite strain sensors: (a) solution casting, (b) spraying, and (c) paint brushing. [1]

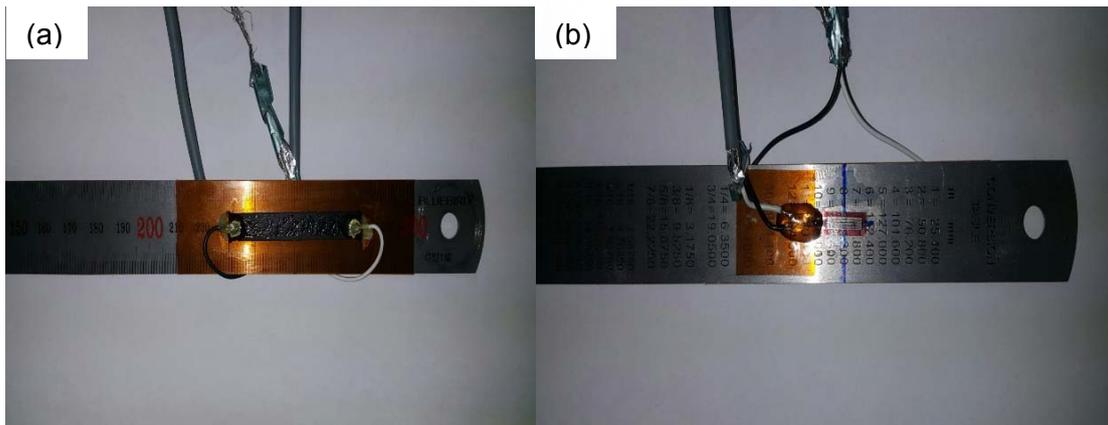


Fig II-5 Installation of the CNCS (a) front CSCS(50mm x 8mm x 0.25mm, $R = 4.201k\Omega$) (b) rear strain gauge (Tokyo Sokki 120 Ω).

III. CNCS 의 계측특성실험

3.1 CNCS 신호처리시스템구성

CNCS 는 외력에 대하여 기저재료 내부 충전재의 접촉저항의 변화로 나타나는 전왜성을 가지는 센서로써 상용 SG 가 가지는 금속의 저항메커니즘을 이용한 신호처리방법과 같은 방식으로 출력신호를 얻어낼 수 있다. CNC 의 신호처리시스템 구성은 Fig. III-1 과 같다. C 클램프에 외팔보를 고정시키고 끝 단에 처짐을 주었을 때 처짐량은 레이저 변위 센서를 이용하여 계측하고 이 때 나타나는 CNCS 의 전왜성을 휘스톤브릿지를 통해 전압으로 변화시켜 출력된 전압을 스트레인앰프 (NEC Dynamic strain Amplifiers Model 6M91)를 통해 증폭시켜 전압을 계측하였다. 이 때 증폭계인은 40dB 이며 필터는 1kHz 저역통과대역필터(Low Pass Filter, LPF)를 사용하였다. 앞선 연구에서는 CNCS 가 복합소재 내부에 분산되었을 때 발생하는 고유한 저항의 불안정성으로 인하여 더 낮은 영역의 LPF 를 사용하여야 안정적인 신호를 뽑아낼 수 있었지만 본 연구에서는 복합소재 공정을 통해 개선된 신호의 CNCS 를 외부 잡음제거에 중점을 둔 상용신호처리시스템을 사용하여 안정적인 신호를 출력하였다.

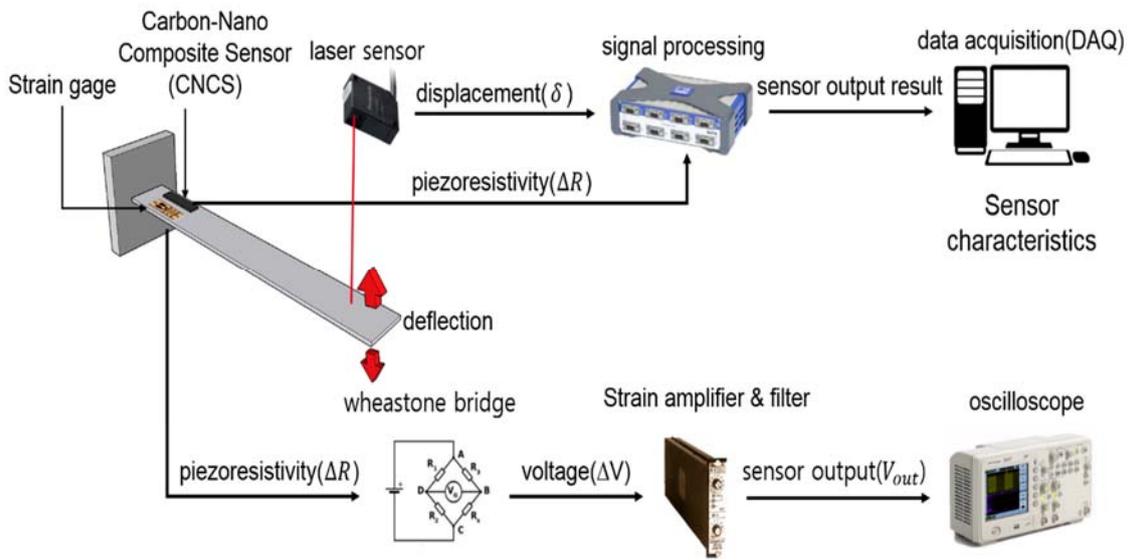


Fig III-1 A signal processing system of the CNCS.

3.2 CNCS 의 감도와 선형성

3.2.1 CNCS의 감도

감도는 감지하고자 하는 대상, 즉 센서의 입력이 Δx 만큼 변화하였을 때 출력이 Δy 만큼 변화했다면 감도는 다음 식과 같이 주어진다.

$$S = \frac{\text{출력값}}{\text{입력값}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.1)$$

즉 감도는 측정대상 양이 변화했을 때 센서의 출력이 얼마나 많이 변화하느냐를 나타내는 것으로 측정 정밀도 및 정확도를 결정하는 중요한 요소이다.

CNCS의 감도를 측정하기 위해 측정된 값이 직선의 기울기를 갖는다고 가정하여 최소제곱법을 통하여 구한다. 최소제곱법은 측정된 데이터에 가장 적합한 근사 함수를 구하는 방법으로 오차는 주어진 자료와 근사 함수 값과의 차이를 제곱하여 모두 합한 것이다. [20] Fig. III-2에 실험에서 측정된 데이터를 나타내었다. x축은 센서를 부착한 외팔보의 끝 단에 처짐을 주었을 때 센서의 중심점에서 발생한 이론적인 스트레인 값을 나타내었고 y축은 발생한 스트레인에 대한 전압출력을 나타내었다. 센서의 감도를 나타내기 위해서는 먼저 주어진 자료에 가장 적합한 근사직선을 구하는 것을 생각한다. 즉 측정된 데이터에서 i 번째 값을 y_i , 근사적인 i 번째 값을 $\alpha x_i + \beta$ 라 하면 근사 직선을 구한다는 것은

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha x_i + \beta]^2 \quad (1.2)$$

최소제곱법에서 식 1.2와 같이 나타나는 오차를 최소로 하는 α 와 β 를 구하는 것이다. 따라서 식 1.2을 이용하여 α 와 β 를 구하면 식 1.3과 같이 나타낼 수 있다

$$\alpha = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad \beta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1.3)$$

식 1.3을 통해 구한 α 와 β 로부터 CNCS와 SG의 근사직선 방정식을 유도할 수 있다.

CNCS의 유도된 방정식은 식 1.4와 같고

$$y = 0.0003x + 0.0049 \quad (1.4)$$

SG의 근사직선 방정식은 식 1.5와 같다.

$$y = 0.0003x - 0.0002 \quad (1.5)$$

각 센서들의 실험데이터로 유도된 근사직선 방정식에서 기울기를 센서들이 나타내는 감도라고 하면 CNCS는 약 $0.0003[V/\mu\epsilon]$ 의 감도를 가지고 SG도 약 $0.0003[V/\mu\epsilon]$ 의 감도를 가진다. 결과적으로 탄소나노 복합소재 공정으로 제작된 CNCS(MWCNT/Epoxy 0.5wt, 50mm x 8mm x 0.25mm)와 상용 SG의 감도는 비슷한 결과를 가지는 것으로 판단된다.

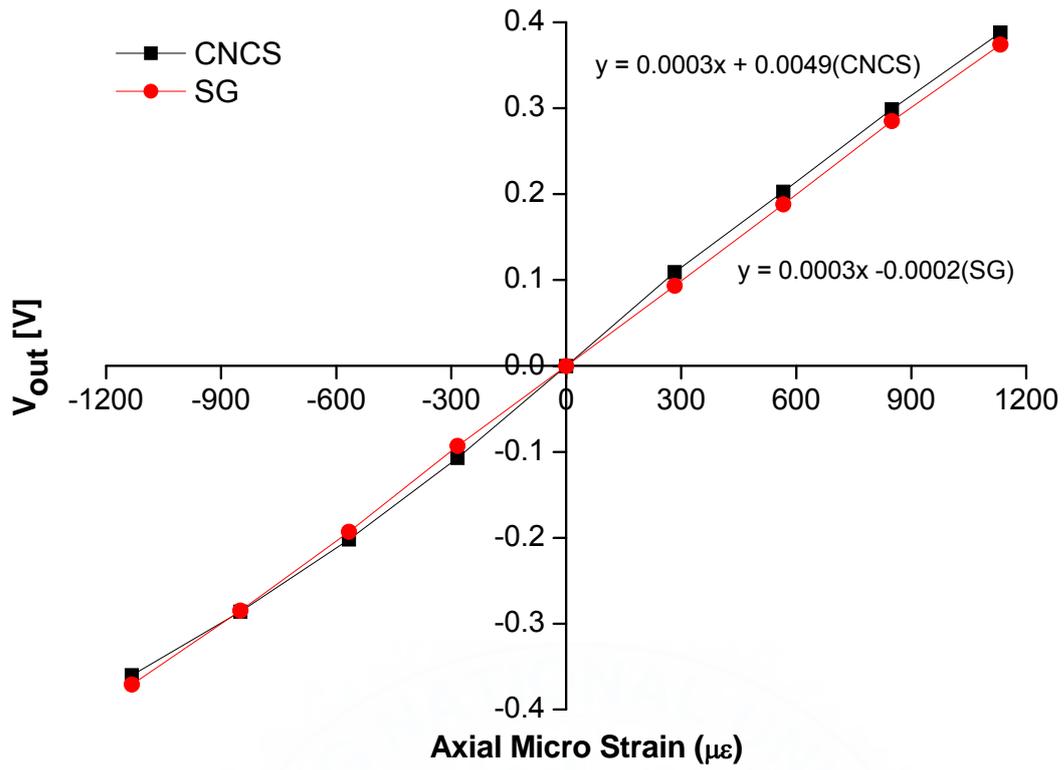


Fig III-2 A sensitivity of the CNCS and strain gauge

3.2.2 CNCS의 선형성

이상적인 센서의 경우 입력값과 출력값의 관계는 원점을 지나는 직선으로 표시되는 것이 가장 이상적이다. 이 때 실제 입력값과 출력값의 관계가 이러한 직선에 얼마나 가까운가를 정량적으로 나타낼 필요가 있다. 실제 센서의 경우 다소 곡선이 될 수가 있으며 이러한 경우에 감도는 근사적으로 직선으로 간주할 수 있는 부분을 사용 범위로 하여 정하거나 또는 직선이 되도록 보정하여 표시한다. 직진성의 정도를 나타내는 것이 비직선도이며 비직선도는 다음의 수식으로 나타낼 수 있다. [21]

$$\text{비직선도} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1.6)$$

여기서 B는 Fig. III-3에 나타낸 것과 같이 출력 신호를 나타내는 곡선과 근사직선 사이의 최대편차이며 A는 센서의 사용범위에서의 정격출력이 된다. 위 수식을 통한 센서의 비직선도는 %FSO (Full Scale Output)으로 나타낼 수 있다. 그 결과를 Fig. III-4 에 도시하였다. CNCS와 SG의 최대편차는 외팔보의 처짐이 8cm 일 때 (1,133 $\mu\epsilon$)였으며 비직진성의 정도는 CNCS는 5.76 %FSO였고 상용 SG는 4.59 %FSO의 값을 가지고 있다. CNCS와 상용 SG의 비직진성의 차이는 1.17 %FSO로 1% 내외의 값의 차이를 가진다. CNCS와 상용 SG의 비직진성의 차이로 볼 때 CNCS의 직진성은 센서로 활용하기에 충분하다고 사료된다.

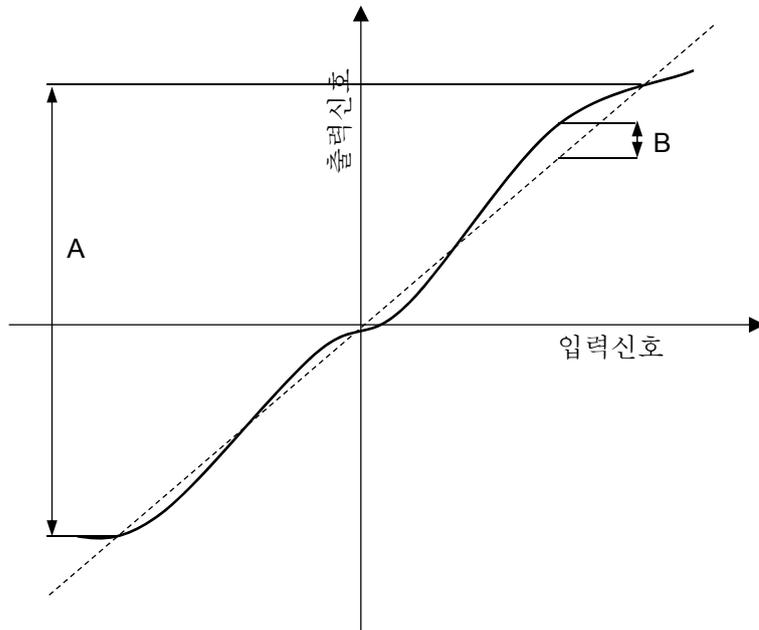


Fig III-3 A static characteristics of input and output

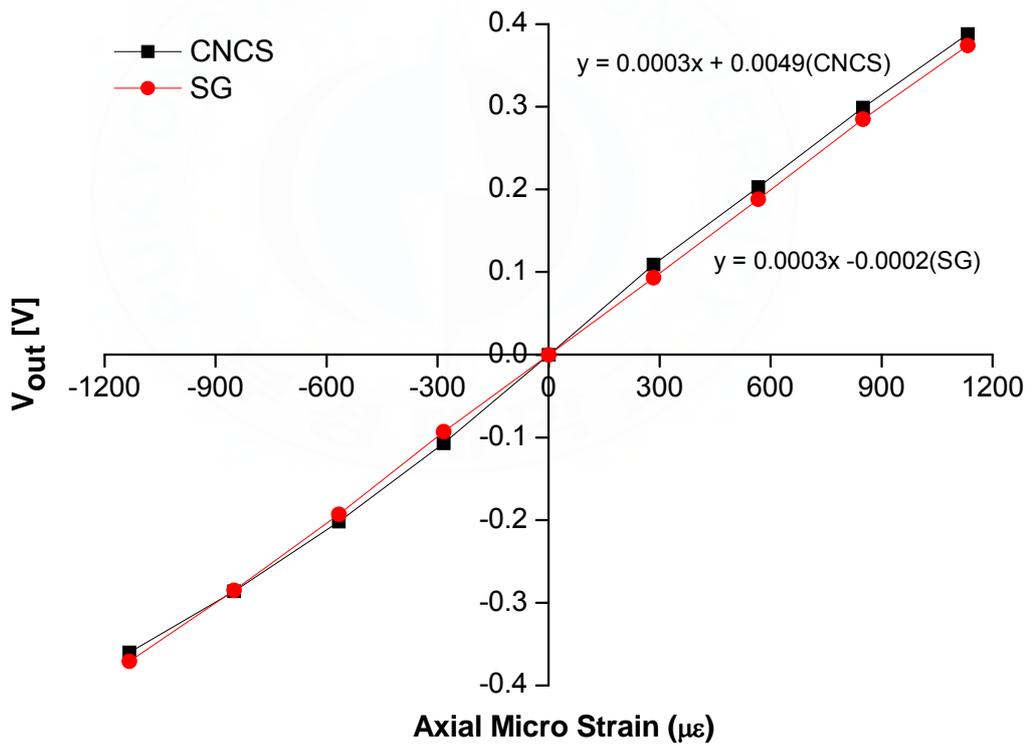


Fig III-4 A linearity of the CNCS and strain gauge.

3.3 CNCS 의 히스테리시스

히스테리시스는 계측기 출력의 복원 성능을 나타낸다. 대부분의 센서에 있어서 같은 입력을 인가한 경우라도 작은 값에서부터 증가시키면서 인가한 경우와 큰 값에서부터 감소시키면서 인가한 경우의 출력값이 다르게 된다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 어떤 입력값에 대한 출력값은 그전에 인가된 입력의 값과 무관하지 않기 때문이다. 이러한 특성을 히스테리시스라 하며 히스테리시스는 증가시의 값과 감소시의 값의 차이 중 가장 큰 값을 %FSO로 나타내게 된다. [21]

CNCS와 SG의 히스테리시스에 대한 특성을 파악하기 위해 앞서 기술한 방법을 통하여 센서의 축방향 스트레인 값을 증가와 감소의 구간으로 나누어 실험을 한 후 그 결과를 Fig. III-5 에 도시하였다. 도시된 CNCS와 SG의 증가와 감소 구간 중 가장 큰 히스테리시스 차이를 보이는 0 $\mu\epsilon$ 에서 감소구간의 하중에 대한 출력값을 y_1 이라고 하고 증가 구간의 하중에 대한 출력값을 y_2 라고 정하여 두 구간의 차를 측정하여 각 센서의 히스테리시스오차를 측정하였다. 측정한 결과 CNCS는 6.15%FSO의 오차를 갖고 SG는 0.4%FSO 오차를 가진다. 이 결과는 CNCS의 기저재료에 의한 영향으로 고분자 기저재료의 고유한 재료적인 회복력에 의한 것으로 사료된다. 이 때문에 전도성을 구성하는 충전재들이 빠르게 원상태로 돌아가지 못하여 금속의 저항인 SG보다 큰 히스테리시스 오차를 가지게 된다.

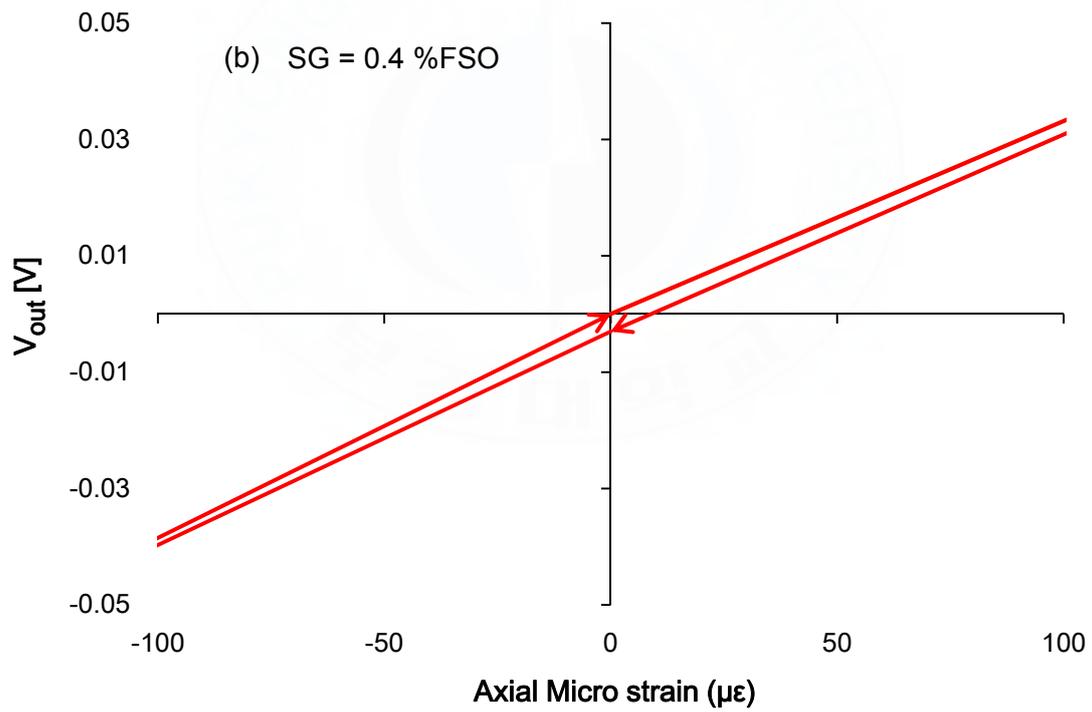
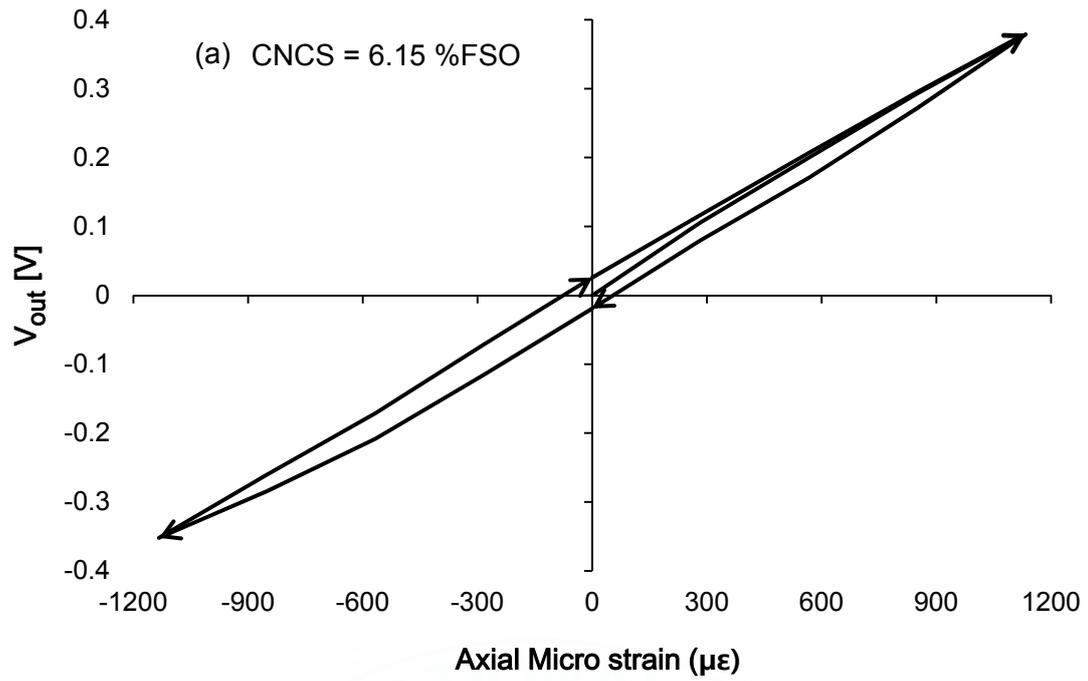


Fig III-5 A hysteresis of the CNCS(a) and strain gauge(b) [enlarged].

3.4 CNCS 의 영점 드리프트 (Zero drift)

영점 드리프트란 센서를 일정시간 사용하면 입력이 없는 상태에서 출력값이 영점이 아닌 다른 값으로 벗어나는 정도를 말한다. [21] CNCS의 저항변화를 휘스톤브릿지를 이용하여 전압으로 바꿔준 후 출력전압을 오실로스코프에서 계측하였고 증폭계인은 40dB이다. 필터는 1kHz LPF를 사용하였다. 이 전에 수행했던 특성실험에서는 나노소재가 가지는 재료의 불안정성과 신호처리회로에서의 외부노이즈로 인해 Fig. III-6 에 도시한 바와 같이 영점 드리프트의 표준편차가 6.5mV로 센서의 정확한 특성을 파악하기가 어려웠으나 나노소재 재료가 가지는 불안정성을 안정화시키고 신호처리회로에서의 노이즈를 감소시킴으로써 Fig. III-7 과 같이 상용 SG와 비슷한 수준의 영점 드리프트 특성을 가지게 되었다. 영점 드리프트 측정시간은 1분, 5분으로 실험하였고 계측시간이 길어질수록 드리프트의 표준편차는 커지지만 CNCS를 사용한 계측에 있어 충분히 안정적인 신호를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

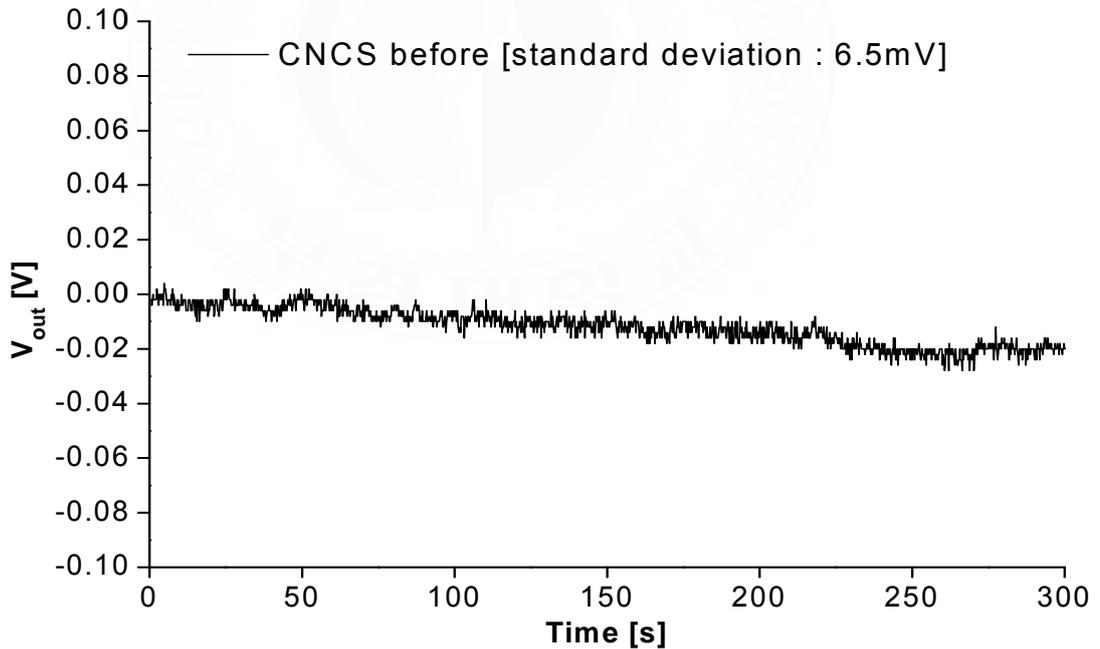


Fig III-6 A zero drift of the CNCS (before) [experimental time: 300s].

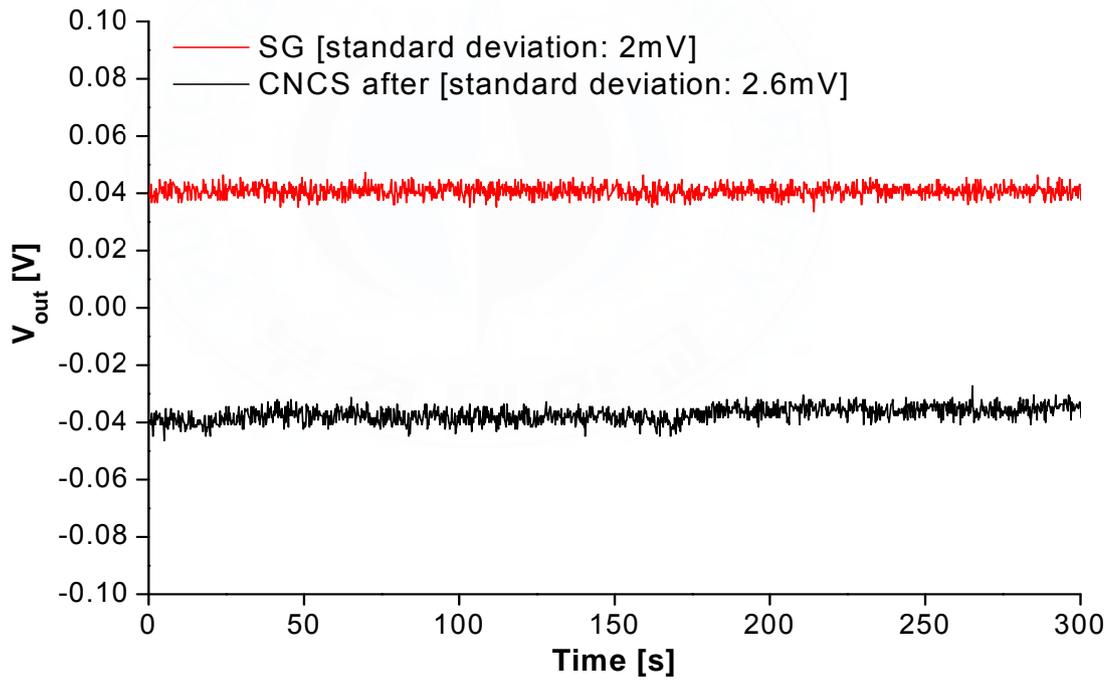
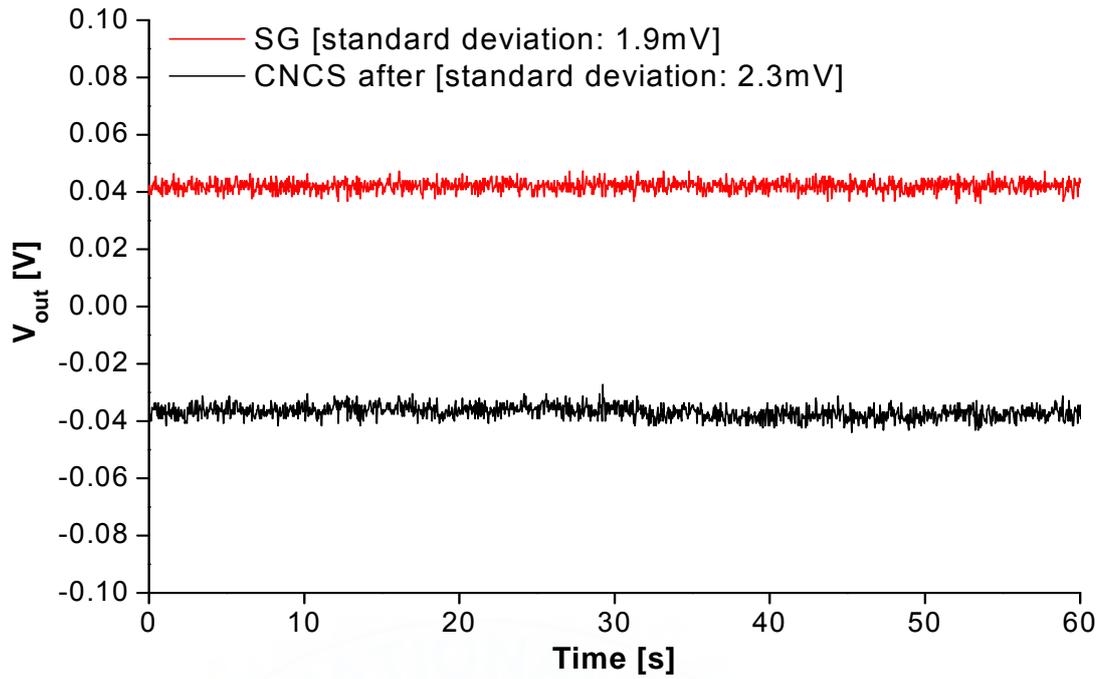


Fig III-7 A zero drift of the CNCS (after) [experimental time: 60s and 300s].

3.5 CNCS 의 온도특성

센서의 성능과 밀접한 관계가 있는 온도 특성은 센서를 구성하는 재료의 성질에 따라 온도에 반응하는 특성이 다르며 이 특성의 영향으로 인해 센서의 출력값에 오류가 발생하기도 한다. 상용 SG의 경우도 온도변화에 따른 영향을 크게 받기 때문에 측정 시 큰 오차를 발생시킬 수 있다. SG의 경우 온도의 변화가 심하면 측정 시 오차의 원인이 되는 두 가지 현상이 나타나게 된다. 이는 길보기 변형도의 발생과 게이지 상수의 변화이다. 이를 보상하기 위한 방법으로 SG는 자체 온도보상하여 온도의 영향을 최소화시키거나 회로에 의한 온도보상방법을 사용하고 있다. 회로에 의한 온도보상방법으로는 Fig. III-8에 도시한 바와 같이 동일한 SG를 더미 게이지로 사용하여 하프브리지로 연결하는 액티브-더미(active-dummy method)가 많이 사용된다. 변형을 측정하려는 SG (액티브 게이지)를 시험편에 부착시키고 동일한 종류의 게이지(더미 게이지)를 시험편의 다른 곳에 부착하거나, 시험편과 같은 재질의 다른 시편에 부착한다. 이 때 더미 게이지는 액티브 게이지와 외부 온도조건이 같도록 하여야 하고, 기계적인 변형을 받지 않거나 변형이 아주 작은 곳에 위치하도록 하여야 한다. 액티브 게이지와 더미 게이지가 동일한 SG이

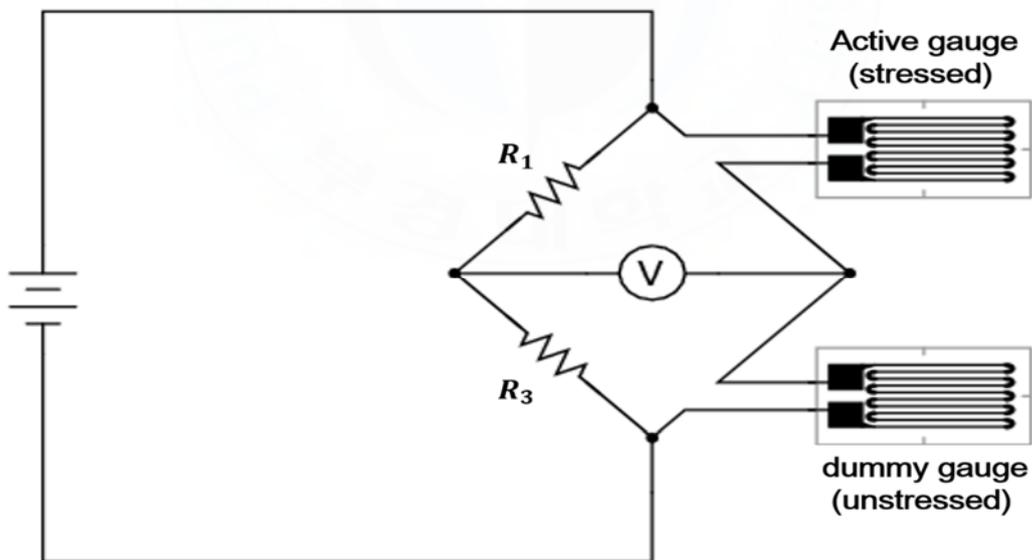


Fig III-8 A half bridge – active dummy method of strain gauge temperature compensation.

고 온도조건이 같으며, 더미 게이지가 전혀 변형을 받지 않는 경우 브리지 회로에서 이론적으로 온도에 의한 영향이 상쇄된다. [22] 본 연구에서는 CNCS가 가지는 온도에 대한 특성을 알아보기 위해 상온에서 80℃까지 상승시켜보았을 때의 CNCS의 출력전압 특성과 80℃에서 상온까지 하강시켰을 때의 온도특성을 실험한 결과를 Fig. III-9에 도시하였다. 선형화하여 단위 온도당 전압의 변화를 봤을 때 상온에서 80℃까지는 약 0.071(V/℃)의 비율로 전압이 내려갔고, 80℃에서 상온까지는 0.067(V/℃)로 전압이 올라갔다. 이는 고분자 기저재료가 온도의 변화에 의해 받는 재료적인 변형과 함께 전도성 통로를 구성하는 충전재들이 온도가 상승함에 따라 전도성 통로간의 간격이 멀어지게 되어 저항이 올라가는 것으로 사료된다. 이러한 온도특성을 가지는 CNCS의 온도보상을 위해서는 같은 공정에서 제작된 CNCS를 SG의 회로보상원리와 같이 액티브-더미 방법을 이용하여 더미게이지로 사용한다면 온도에 대한 보상이 일정수준 가능할 것으로 사료된다.

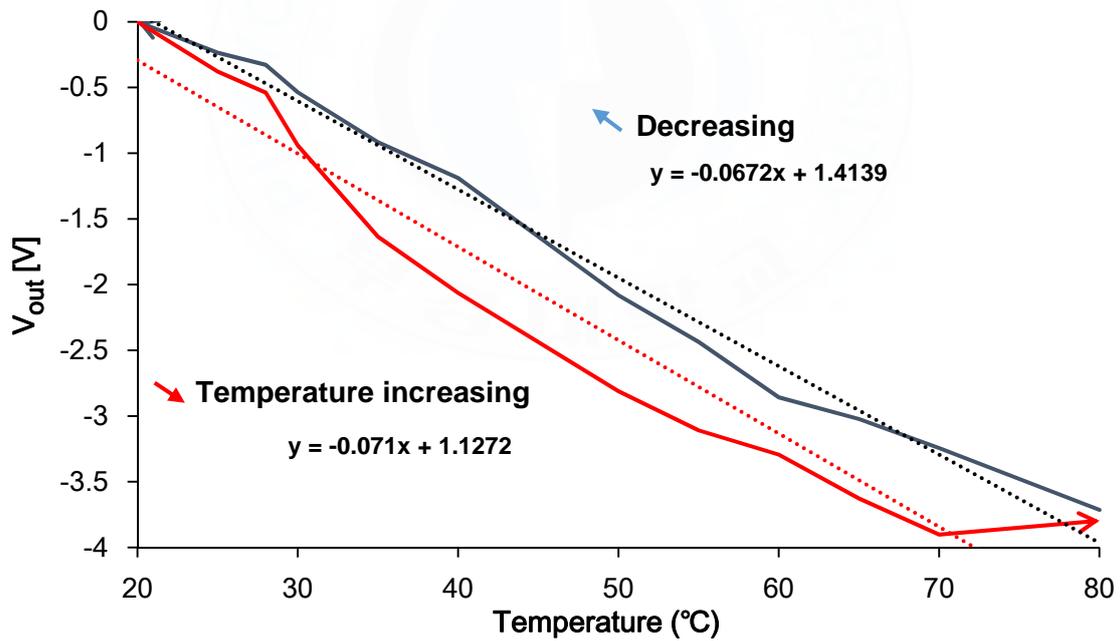


Fig III-9 A temperature characteristic of the CNCS.

3.6 CNCS의 단위 계단입력 응답특성

센서를 부착한 구조물에 단위계단 입력응답(step response)을 가하였을 경우 주어진 입력에 대한 센서의 응답이 빠르게 해당하는 출력값에 도달하여야 구조물의 정보를 신속하게 읽을 수 있다. 따라서 이러한 센서의 정적응답특성을 파악하기 위하여 단일입력을 구조물에 가하였을 때 CNCS와 SG의 응답특성을 실험을 통해 고찰하고자 한다. 앞서 기술한 실험방법과 동일하게 신호처리시스템을 구성하고 외팔보에 손으로 일정한 처짐을 주었을 때의 결과를 Fig. III-10에 도시하였다. CNCS의 상승시간은 약 0.71s 이고 SG는 0.76s로 나타났다. CNCS는 SG보다 조금 더 짧은 상승시간과 하강시간을 가지지만 이는 센서의 부착위치와 함께 센서의 형상변화와 관련있는 것으로 사료된다. 결과적으로 CNCS는 상용SG와 응답성을 비교해볼 때 외부 변화에 대한 응답성은 구조물을 계측하는데 있어서 충분히 빠르다고 사료된다.

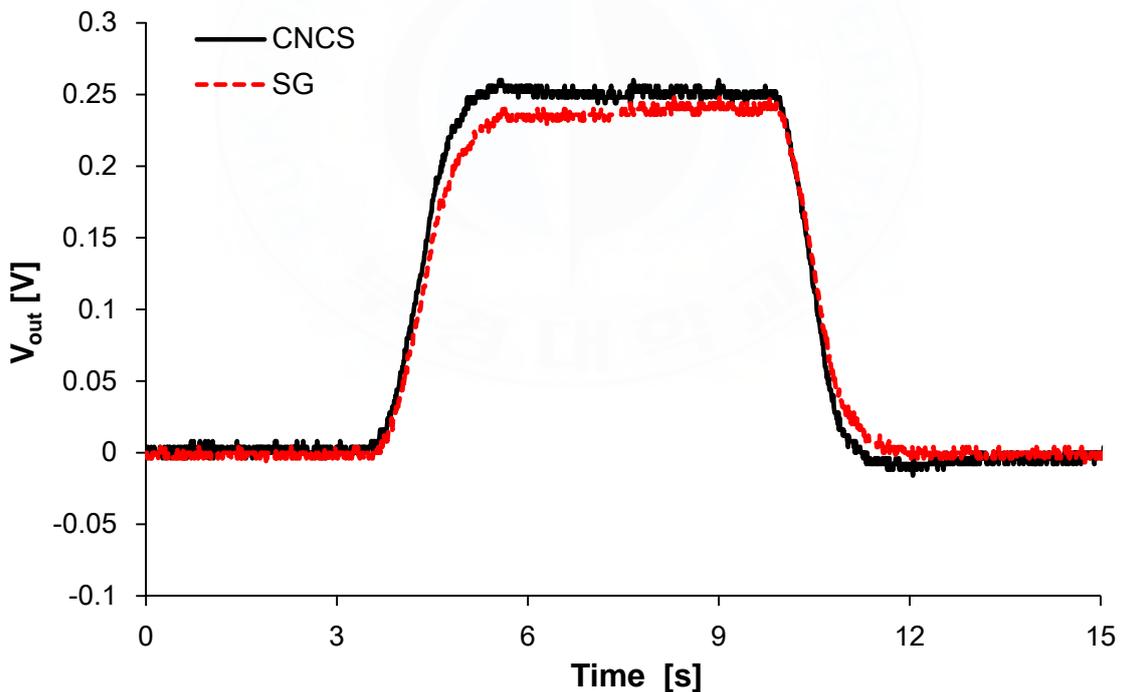


Fig. III-10 A step response of the CNCS and strain gauge.

3.7 구조물의 자유진동에 따른 CNCS의 응답특성

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 인가되므로 입력의 변화에 따라 출력이 변화하지 못한다면 구조물이 어떠한 상태에 있는지를 감시 또는 판단 할 수 없기 때문이다. 구조물의 자유단에서 임의의 처짐을 초기값으로 주어 출력된 자유진동 특성결과를 Fig. III-11에 도시하였다. 상용SG와 동일한 주파수를 측정하였고 출력의 크기도 센서가 받는 압축과 인장방향에서 비슷하게 출력되었다. 따라서 낮은 주파수대의 진동에 대해서는 SG와 동일한 측정이 가능할 것으로 사료된다.

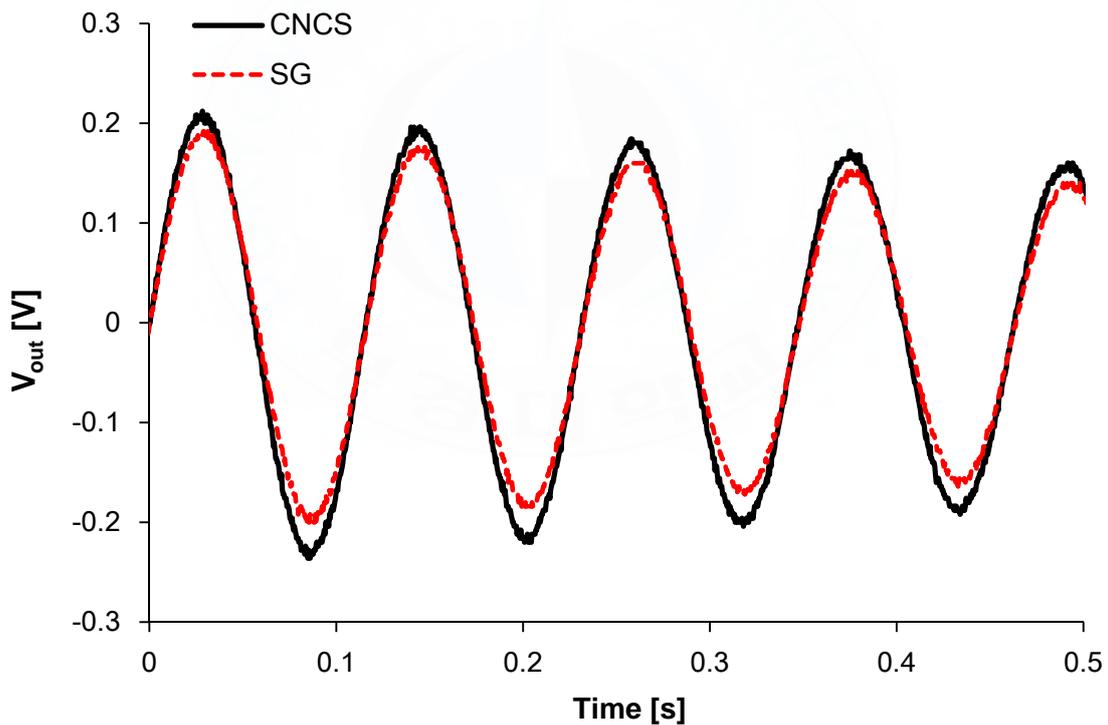


Fig. III-11 A freevibration response of structure with the CNCS and strain gauge.

3.8 충격을 받는 구조물에서의 CNCS의 응답특성

구조물이 받는 충격(Impact)의 경우 그 주파수대가 높은 영역에 분포하고 있다. 따라서 센서가 구조물이 받는 충격을 감지하기 위해서는 높은 영역의 주파수를 계측할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 고무 해머로 센서를 부착한 구조물에 근처에 임팩트를 가하여 그 특성을 SG가 가지는 신호와 비교한 결과를 Fig. III-12에 도시하였다. 기존의 CNCS의 경우 재료적인 잡음이 심하여 계측이 불가능했던 높은 영역의 주파수를 개선된 CNCS의 경우 계측에 불필요한 잡음을 제거하여 성공적으로 계측이 가능하였다. 결과적으로 다소 높은 고주파 성분의 동적 응답 역시 측정이 가능할 것으로 기대된다.

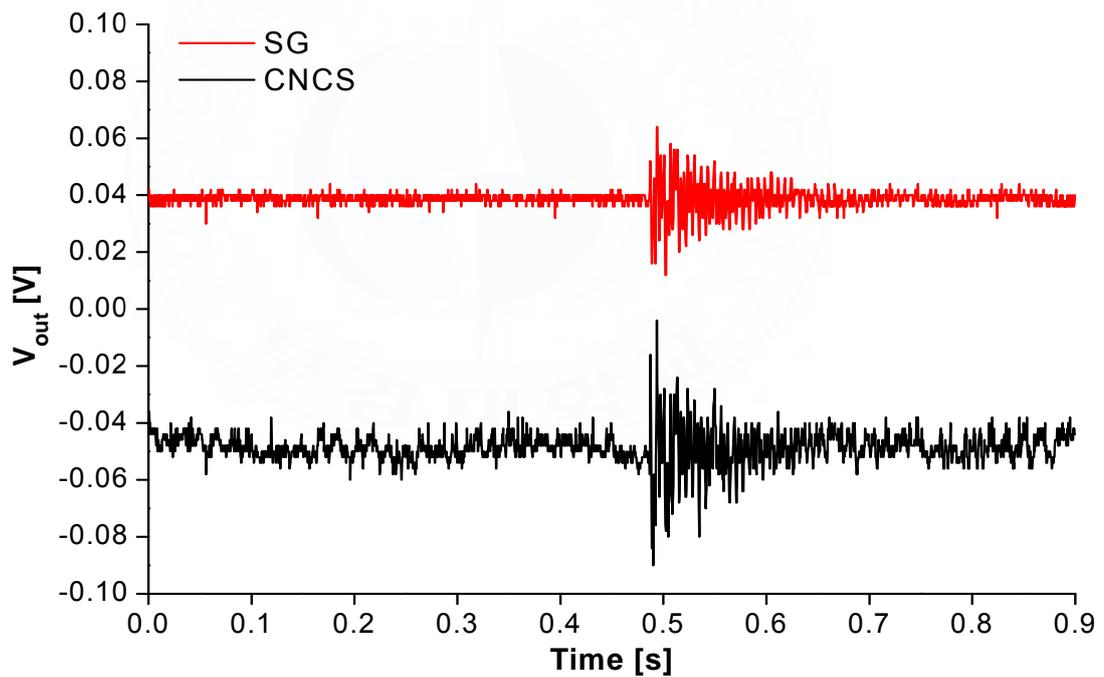


Fig. III-12 An impact response of the structure with the CNCS and strain gauge under random impact.

IV. CNCS 제작형상의 영향

SG 는 측정하는 대상물의 크기에 따라 적합한 그리드길이를 Fig. IV-1 에 도시된 것과 같이 선택하여 계측이 가능하다. 국부적인 변형률을 측정하고자 할 경우에는 가능한 한 짧고 작은 게이지가 좋으며 넓은 범위에 걸쳐 평균적인 변형률을 측정할 필요가 있을 경우에는 길고 큰 것이 좋다. 일반적으로 응력집중과 관련하여 국부적으로 높은 응력이 발생하는 부분의 변형률을 측정하기 위하여 SG 를 사용하는 경우가 많으며, 이러한 부분에서는 응력 구배가 크므로 작은 게이지를 사용하여도 실제 보다는 작은 변형률이 측정될 가능성이 크다. 따라서 변형률 분포에 대해서 충분히 고려하여 게이지를 고를 필요가 있으며, 또한 얻어진 측정결과에 대해서도 검토할 필요가 있다. Fig IV-2 에 SG 의 그리드길이에 따른 측정원리를 도시하였다. 구조물에 SG 를 부착하였을 때 그리드 부분에서 발생하는 스트레인을 평균한 수치를 측정값으로 한다. [23] 이와 같이 SG 와 유사한 스트레인 센서인 CSCS 는 액상형 스트레인 센서로 활용이 가능하기 때문에 본 연구에서는 센서의 제작 형상에 따라 실제 발생하는 스트레인을 측정하는 메커니즘이 다를 것으로 판단되어 센서의 제작형상에 따른 특성을 실험하였다.

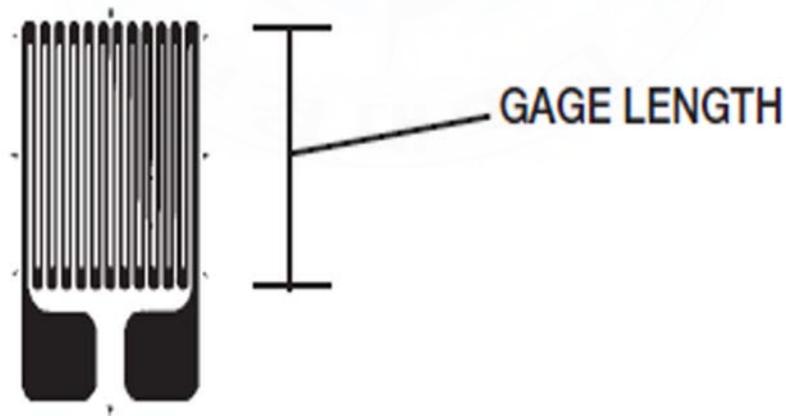


Fig. IV-1 A selectable gage length of the strain gauge.

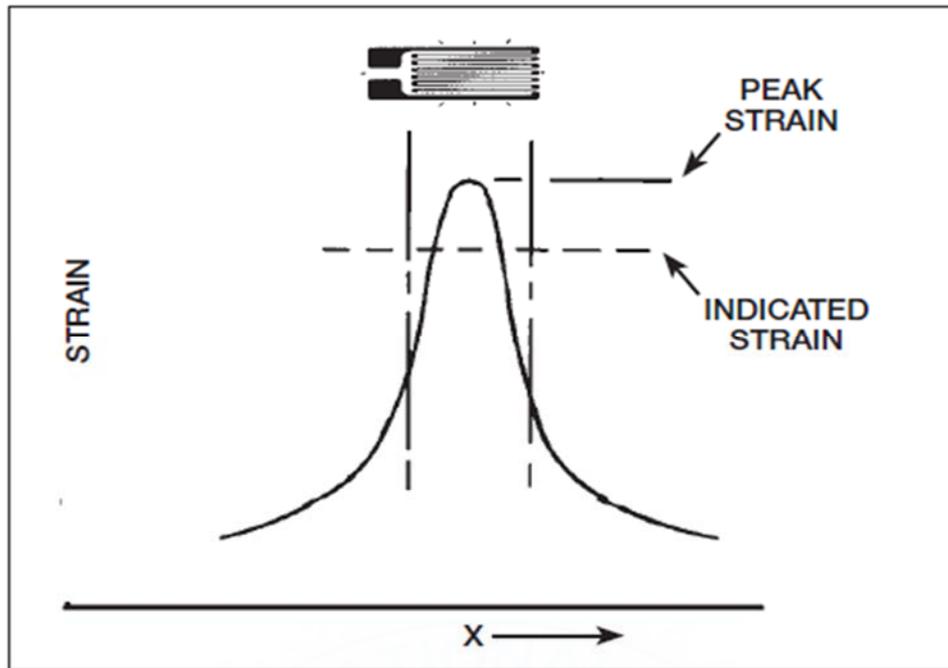


Fig. IV-2 A measurement mechanism of the strain gauge.

4.1 CNCS 제작형상에 대한 저항특성

4.1.1 길이방향에 대한 저항특성

본 연구에서는 CNCS의 설치형상에 따른 측정메커니즘을 파악하기 위하여 Fig. IV-3 과 같이 끝 단에서 센서의 중심이 45mm 떨어진 곳으로부터 폭과 두께는 일정하나 각각의 길이가 다른 50mm, 30mm, 20mm 의 3 개의 센서를 제작하였다. 3 개의 센서는 동일 복합소재공정에서 제작되었다. 센서의 폭은 8mm 이며 두께는 0.25mm 이다. 각각의 센서의 저항을 Table 4.1 과 같이 나타내었다. 금속이 가지는 저항의 특성과 동일하게 길이에 비례하여 저항이 증가하였다.

Table 4.1 Resistance of the CNCS.

Electrode length (mm)	Resistance (k Ω)
50	4.201
30	2.556
20	1.228



Fig. IV-3 Installation of CNCS (50mm, 30mm, 20mm).

4.1.2 길이와 폭에 대한 저항특성

앞선 실험에서는 SG의 측정원리와 같이 센서의 중심점을 동일하게 하여 실험을 수행하였다면 이번 실험에서는 센서의 중심점을 위의 실험과 다르게 하여 고정단에서 20mm 떨어진 위치로부터 50mm, 40mm, 30mm, 20mm, 10mm의 길이로 폭을 8mm로 하여 CNCS를 제작하였고 또한 똑같은 센서 길이로 하여 폭에 대한 변화를 실험하기 위해 길이 별로 폭을 3mm로 하여 CNCS를 제작하였다. 제작된 센서의 그림을 Fig. IV-4에 도시하였다. 각각의 저항과 비저항을 Table 4.2에 도시하였다. 앞선 실험과 다른 공정에서 만들어진 CNCS로 실험을 수행하였다.

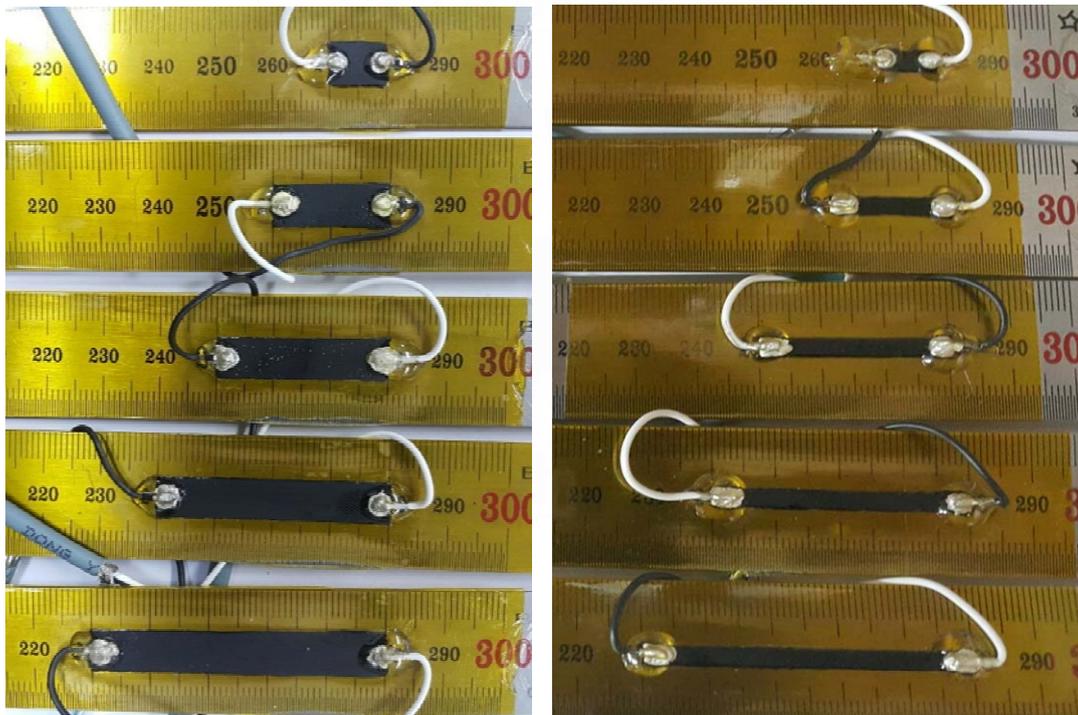


Fig. IV-4 Installation of the CNCS on the length and width.

Table 4.2 Resistance and resistivity of the CNCS on the length and width.

Electrode length (mm)	Base		Width	
	Resistance (k Ω)	Resistivity (Ω /m)	Resistance (k Ω)	Resistivity (Ω /m)
10	3.888	0.78	6.656	0.50
20	11.8563	1.19	15.688	0.59
30	23.418	1.56	20.89	0.52
40	42.79	2.14	35.07	0.66
50	76.78	3.07	50.1	0.75

앞선 실험과 비슷한 결과로 길이가 늘어날수록 저항은 폭이 넓을 때와 좁을 때 모두 증가하였고, 같은 길이에 대하여 폭이 작아지면 30mm 까지는 저항이 작아지다가 20mm 일 때는 폭이 넓은 것과 비교해서 저항이 오히려 더 커졌다. CNCS 안에 전도성통로가 똑같이 무작위로 배열되어있다고 했을 때 CNT의 종횡비(aspect ratio)에 의해 저항의 메커니즘이 달라진 것으로 사료된다. 결과적으로 볼 때 금속의 저항구성메커니즘은 저항은 길이에 비례하고 단면적에 반비례하지만 CNCS는 고분자기체 내에 충전재들이 무작위로 배열되어 있어 형상별로 각각의 비저항이 달라질 뿐만 아니라 폭이 줄어들수록 무작위 하게 배열된 충전재들이 전도성통로를 만들 확률이 높아서 같은 길이에서 폭이 줄어들수록 저항이 작아지는 것으로 사료된다. 이는 CNT(충전재)의 종횡비와 관련이 있어 20mm 일 때부터의 결과와 같이 저항이 다시 증가하는 경향을 보인다. 또한 비저항과 관련해서 폭이 줄어들 경우 폭이 넓은 때보다 길이에 대하여 비저항의 변화가 작아지는 특성이 나타나는데 이는 위의 결과와 마찬가지로 폭이 작을 때 전도가 만들어질 확률이 높아 일정한 재료의 성질을 가지는 것으로 사료된다. 따라서, 센서를 제작할 때 상대적으로 폭을 작게 하는 것이 센싱길이의 변화에 따른 충전재 배열의 불확실성을 줄여줄 수 있을 것이다.

4.2 CNCS 의 스트레인 측정 메커니즘

동일한 신호처리회로를 구성하여 스틸자를 C 클램프에 고정시킨 후 외팔보 끝단에 처짐을 주었다. Fig. IV-5 에 처짐에 대한 센서의 전압특성을 도시하였다. 같은 처짐에서 센서의 길이가 길게 제작된 센서가 더 높은 전압값을 출력하였다. 구조해석 프로그램을 활용하여 끝단의 처짐이 80mm 일 때 센서가 부착된 위치의 포인트 별 스트레인 값을 Table 4.3 에 도시하였다. 2cm 로 제작된 센서는 처짐이 80mm 일 때 0.216mV 30mm 로 제작된 센서는 20mm 로 제작된 센서의 1.4 배인 0.307mV, 50mm 는 1.8 배인 0.388mV 가 출력이 되었다. CNCS 스트레인 측정 메커니즘의 첫 번째 경우로 CNCS 가 도포된 부위의 스트레인 값을 합산하여 출력한다고 가정했을 때 20mm 의 경우 총 스트레인은 중심에서부터 양쪽의 점에서 발생한 스트레인을 합하여 총 $3420\mu\epsilon$, 30mm 는 20mm 의 1.6 배인 $5694\mu\epsilon$, 50mm 는 2cm 의 2.3 배인 $7394\mu\epsilon$ 였다. 출력된 결과와 비교해봤을 때 수치의 증가정도가 유사한 경향을 보였다. 반면에 두 번째 경우로 센서가 도포된 부위의 스트레인 값을 평균화 한다고 가정하였을 경우 그 값의 차이가 출력된 신호만큼 발생하지 않았다. 따라서 CNCS 는 센서를 도포한 곳의 스트레인 정보를 합산하여 출력한다고 사료된다.

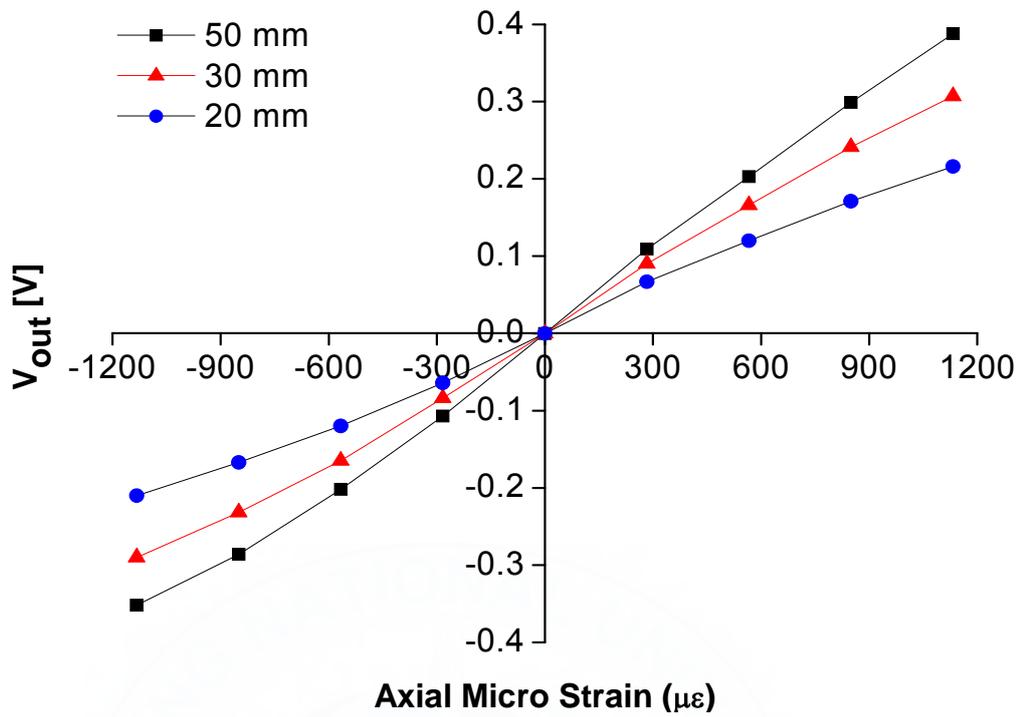


Fig. IV-5 A voltage output of the CNCS.

Table 4.3 ANSYS structure analysis of the CNCS.

X Location (mm)	Y Location (mm)	Normal Elastic Strain ($\mu\text{mm}/\text{mm}$)	Length
-12.501	20.001	1218	50mm
-12.5	29.999	1198	30mm
-12.5	35	1181	20mm
-12.5	45.002	1141	Mid-point
-12.5	55.007	1098	20mm
-12.5	60.001	1076	30mm
-12.5	70.005	1031	50mm

4.3 CNCS 의 제작길이에 따른 구조물의 자유진동 응답특성

길이 별로 제작된 센서를 구조물에 부착하여 자유진동을 측정한 결과를 Fig. IV-6 에 도시하였다. 각 길이 별로 주기를 구한 결과 20mm 일 때 0.1160s, 30mm 일 때 0.1148s, 50mm 일 때 0.1152s 였으며 SG 는 0.1164s 로 측정되었다. 30mm, 50mm, 20mm, SG 순으로 주기가 빨랐다. 따라서, 센서의 부착위치와 길이에 따라 조금씩 다른 주기를 갖는 것으로 사료된다.

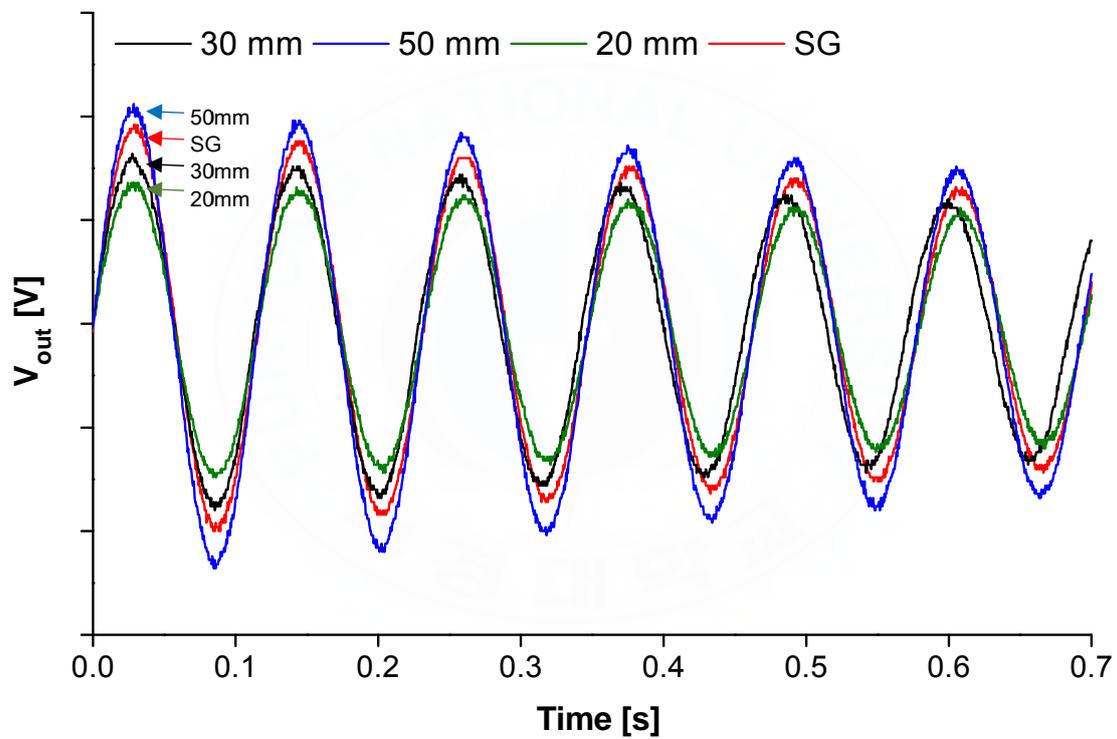


Fig. IV-6 A freevibration response of structure with the CNCS on the length change.

4.4 CNCS 의 제작형상에 따른 전압출력특성

4.4.1 길이에 대한 영향

앞선 실험과 동일한 실험과정을 통해 각기 길이와 폭이 다른 30cm 스틸자의 끝단에 처짐을 주어 전압출력특성실험을 수행하였다. Fig. IV-7 에 길이에 따른 전압출력결과를 도시하였다. 센서 중심을 다르게 하여 측정한 경우 처짐이 100mm 일 때를 보았을 때 전압출력이 선형적으로 출력되지는 않았지만 길이가 증가할수록 전압이 더 크게 출력되었다. Fig. IV-8 에 도시한 바와 같이 길이가 10mm 에서 20mm 로 변할 때 기울기가 가장 크고 20mm, 30mm, 40mm 로 변할 때의 기울기는 점점 작아지다가 50mm 일 때 다시 변화의 폭이 커졌다. 이는 구조물의 곡률반경과 함께 외팔보의 처짐에 의해 발생하는 스트레인 값이 센서가 도포된 위치에 따라 다르게 나타나기 때문이라고 사료된다. 또한, CNCS 내부의 충전재들이 무작위로 배열 되어 있어 길이에 비례하여 선형적인 출력이 나타나지 않은 것으로 사료된다.

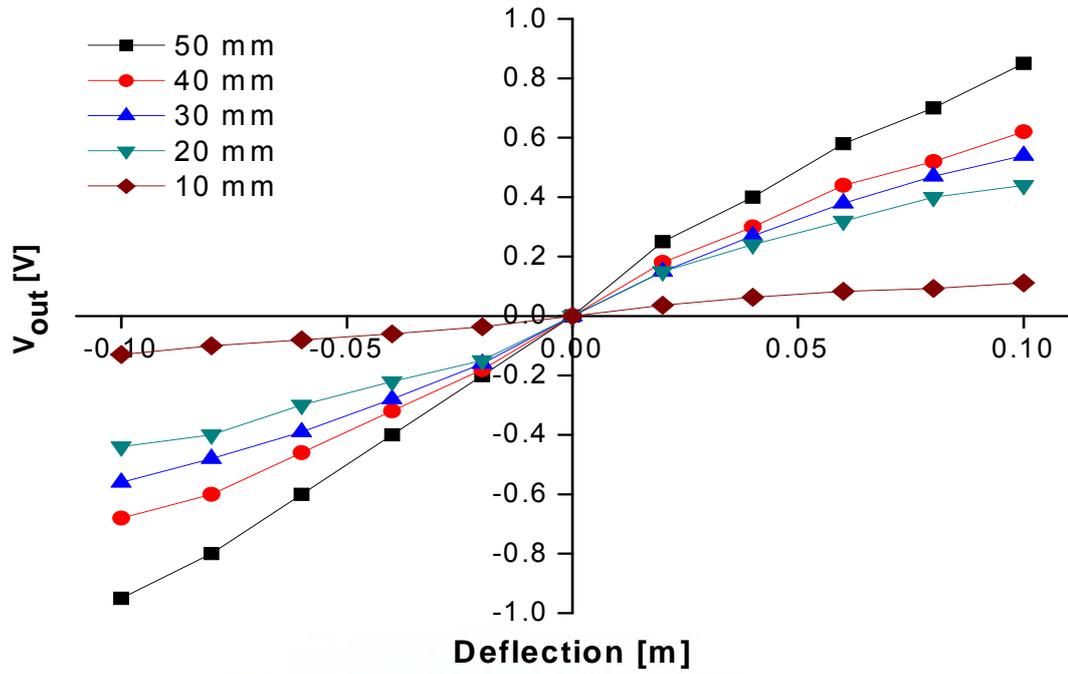


Fig. IV-7 Voltage output of the CNCS on the length.

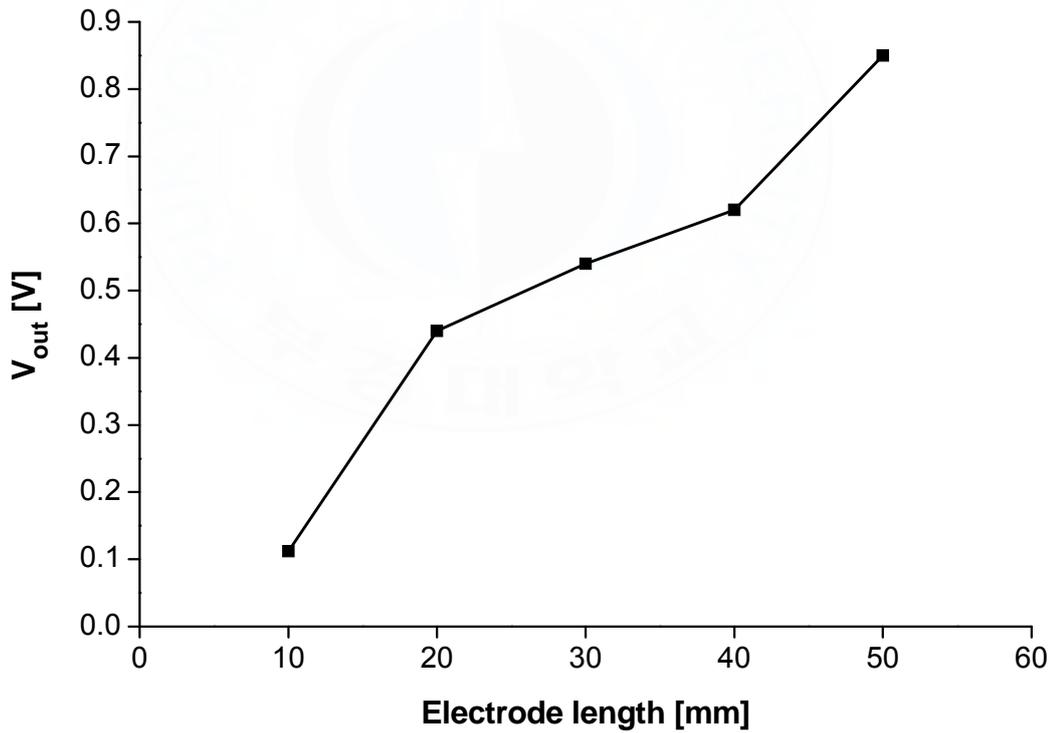


Fig. IV-8 Voltage output of the CNCS on the length at 100mm deflection.

4.4.2 폭에 대한 영향

폭을 3mm 로 줄였을 때 전압출력특성을 Fig. IV-9 에 도시하였다. 센서의 길이가 10mm~30mm 일 때 같은 길이의 센서에서 폭이 작은 경우 더 큰 전압을 출력되었지만 40mm 이상에서의 전압출력은 폭이 큰 센서에서 더 큰 값을 가졌다. Fig. IV-10 과 같이 폭이 작은 센서는 앞선 실험과 동일하게 길이가 늘어남에 따라 선형적으로 출력되지는 않았으며, 40mm 까지는 출력전압이 증가하다가 50mm 일 때는 감소했다. 이는 전도성통로를 구성하는 충전재들이 복합소재 내부에서 포화상태에 이르러 나타난 것으로 사료된다. [24]

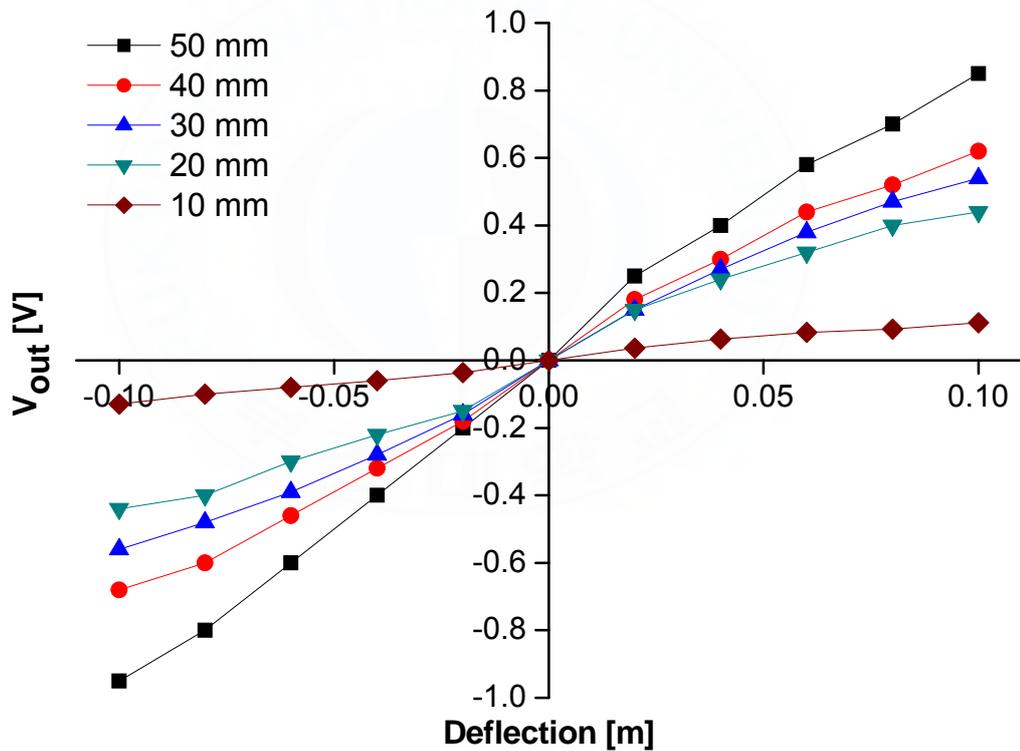


Fig. IV-9 Voltage output of the CNCS on the width.

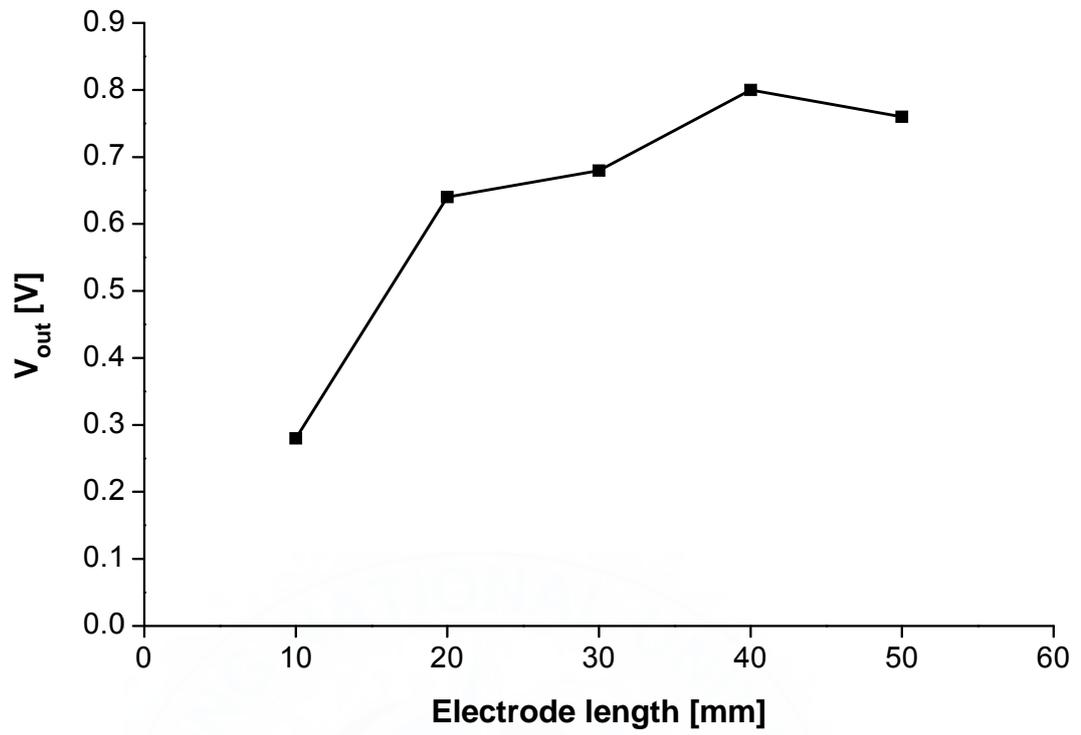


Fig. IV-10 Voltage output of the CNCS on the width at 100mm deflection.

V. 단차가 있는 구조물의 응력집중 측정실험

센서를 활용한 계측기술은 구조물의 안정성을 판단하는데 중요한 부분을 차지 하고 있다. 구조물의 스트레인을 측정하기 위해서는 일반적으로 SG 가 널리 이용되고 있지만, 상용 SG 로는 실제로 표면 형상이 복잡한 구조물이나 소형구조물의 경우는 계측이 쉽지가 않은 실정이다. 본 연구에서는 단차가 있는 구조물에서 발생하는 스트레인을 CNCS 를 적용하여 측정하고자 한다. 단차가 있는 구조물의 경우, 그 형상변화로 인해 응력집중(stress concentration)이 발생하게 되는데, 이 때 최대 응력은 형상변화가 생기는 부분에서 발생한다. 단차가 있는 구조물에서 발생하는 최대응력을 상용 SG 를 사용하여 측정할 경우 센서의 형상에 제한을 받아 정확한 응력값을 측정하기에는 어려움이 따르지만, CNCS 는 액상형 브러시방식으로 제작이 가능하므로 형상에 제한을 받지 않는 측정이 가능할 것이라 기대되어 본 연구를 수행하였다. [25] CNCS 가 가지는 스트레인 특성을 교정하기 위한 방법으로 스틸자에 SG 와 비슷한 크기로 센서를 Fig. V-1 (a)와 같이 도포한 후 경화시켰다. 이후 양쪽 단에 전도성 에폭시를 사용하여 전극을 연결시켰다. 동시에, 같은 공정에서 만들어진 액상을 Fig. V-1 (b)와 같이 구조물의 단차가 있는 부위에 도포하고 동일 공정을 통해 CNCS 를 제작하였고, 반대편에는 단차가 있는 부분을 기준으로 하여 양쪽으로 SG 를 부착하였다.

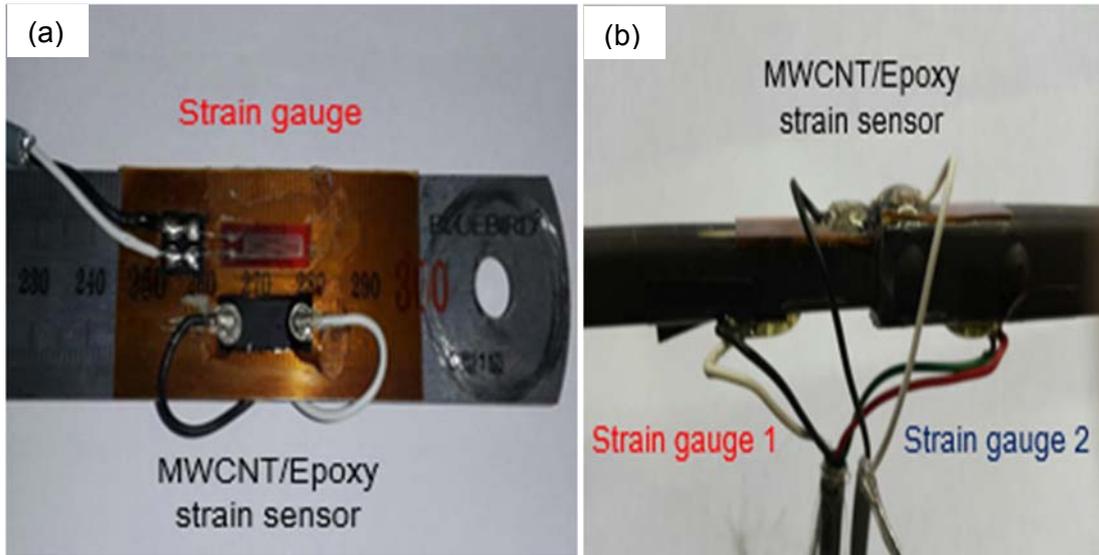


Fig. V-1 Installation of the MWCNT nanocomposite sensor on the stepped structure.

5.1 CNCS 의 교정

교정용 스틸자에서 축 방향 변형량에 의해 나타나는 CNCS 의 전왜성을 SG 와 같은 신호처리 방식을 적용하여 전압신호로 변환시킨 결과를 Fig. V-2 에 도시하였다. Fig. V-1 (a) 에서 도시한 바와 같이 각 센서들을 부착한 위치의 스트레인 값을 구하여 스트레인 당 전압출력을 얻어냈다. CNCS 는 상용 SG 와 유사한 선형적인 전압특성을 보이고 있으며, SG 는 1 [$\mu\epsilon$]당 0.0006 [v], CNCS 는 1 [$\mu\epsilon$]당 0.0009 [v] 정도의 선형적인 전압출력을 가진다. 이 교정결과를 Fig. V-1 (b)의 단차가 있는 구조물에 적용하여 스트레인 값을 추정하였다.

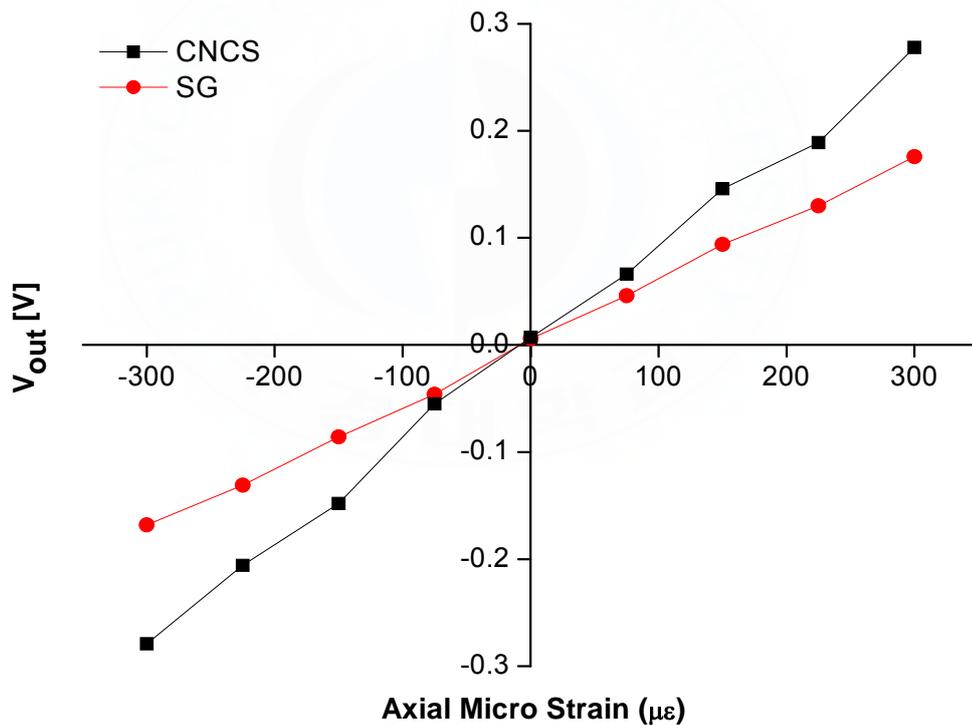


Fig. V-2 Sensor voltage output calibration for the CNCS.

5.2 단차가 있는 구조물의 구조해석

단차가 있는 구조물의 구조해석결과를 Fig. V-3 과 같이 도시하였다. 단면의 형상 변화가 있는 부분에서 응력집중으로 인해 축 방향으로의 최대 스트레인이 발생하였다. SG 1, 2 번은 Fig. V-1 (b)의 형상변화가 일어나는 곳에서 8mm 떨어진 위치에 양쪽으로 부착되어있고, CNCS 는 4mm 위치에서 양쪽으로 도포되어있다.

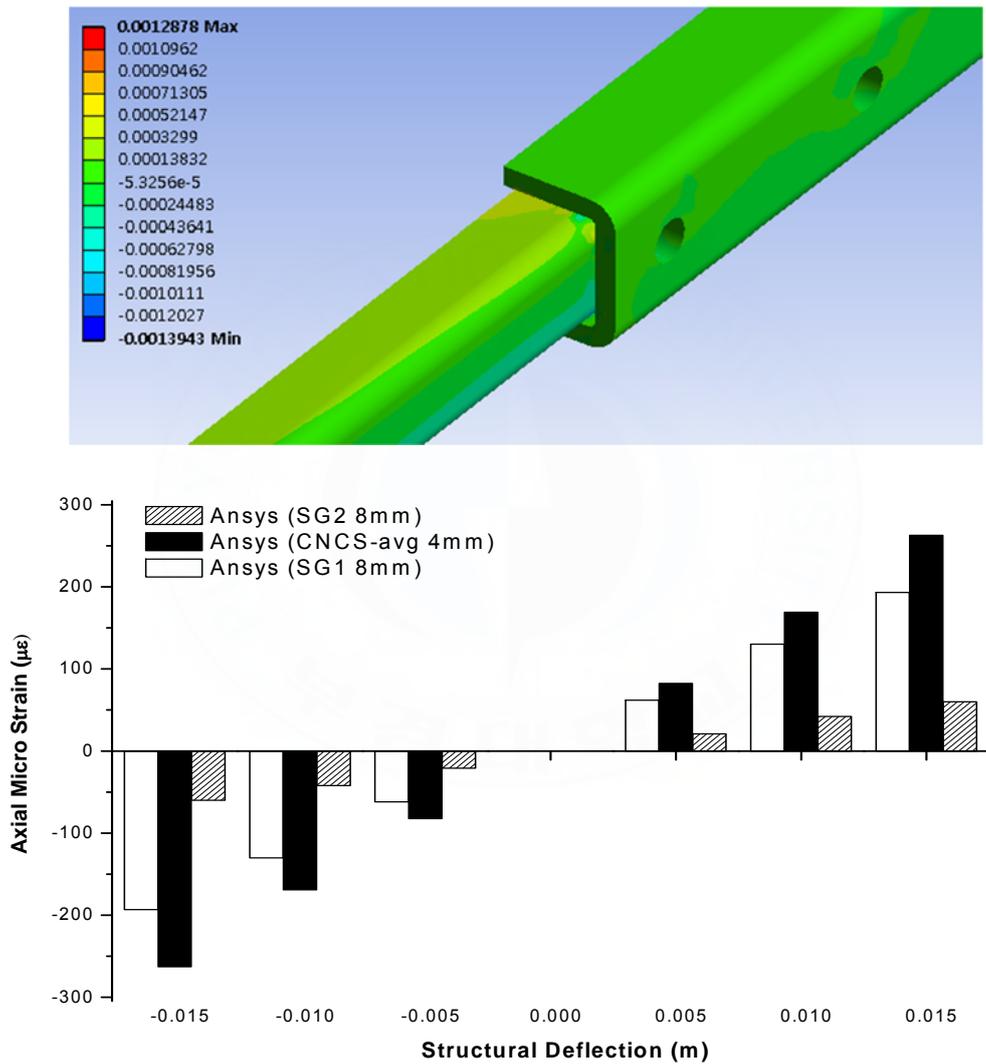


Fig. V-3 Stress analysis of the stepped structure by means of ANSYS. [25]

5.3 결과

단차가 있는 구조물의 처짐량을 레이저 변위센서로 측정하고 센서들에서부터 출력된 전압을 교정하여 스트레인으로 환산한 결과를 Fig. V-4 와 같이 도시하였다. CNCS 는 최대응력집중이 발생하는 부분에 더 근접하여 측정이 가능하므로 양쪽 SG 보다 높은값의 스트레인을 측정할 수가 있었다. 하지만, 출력 값에서 CNCS 의 형상으로 인해 인장과 압축방향의 대칭성이 있지는 않았다. Fig. V-5 에 도시한 바와 같이 처짐이 5mm 일 때는 구조해석과의 스트레인 오차가 40% 였지만 처짐이 증가함에 따라 오차율이 평균 10% 로 줄어들었다. 이는 실제 측정에 있어서 경계조건이 정확하게 설정되지 않아 발생한 것으로 사료된다. 또한, CNCS 를 도포한 부분에서 CNCS 의 형상변화에 대한 센서의 형상요인을 보정한다면 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

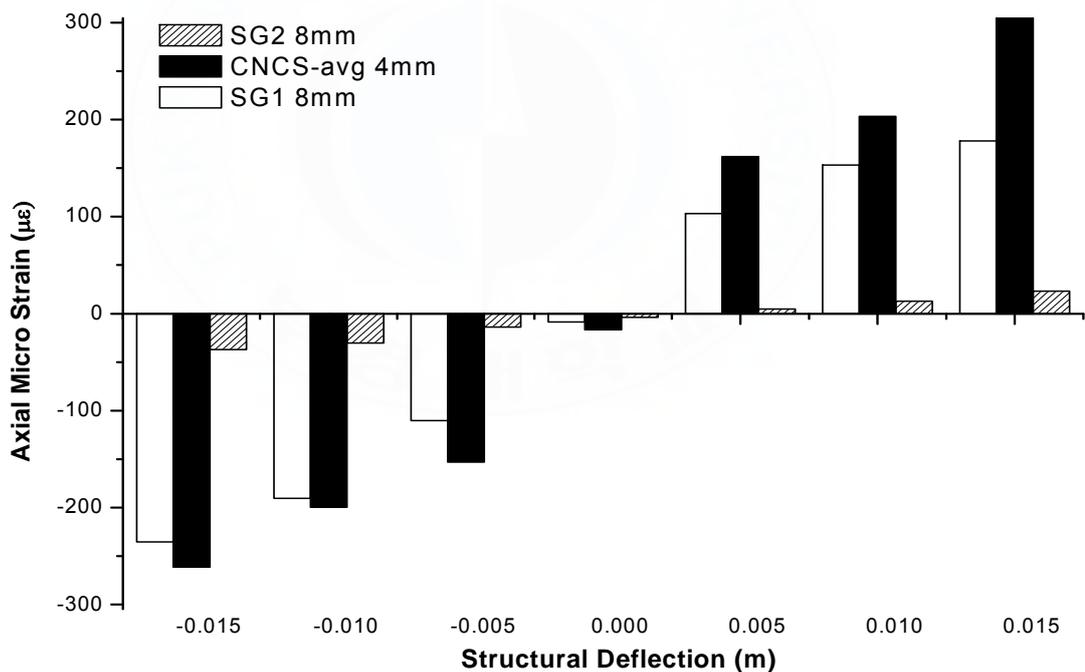


Fig. V-4 Strain measurements on the stepped structure.

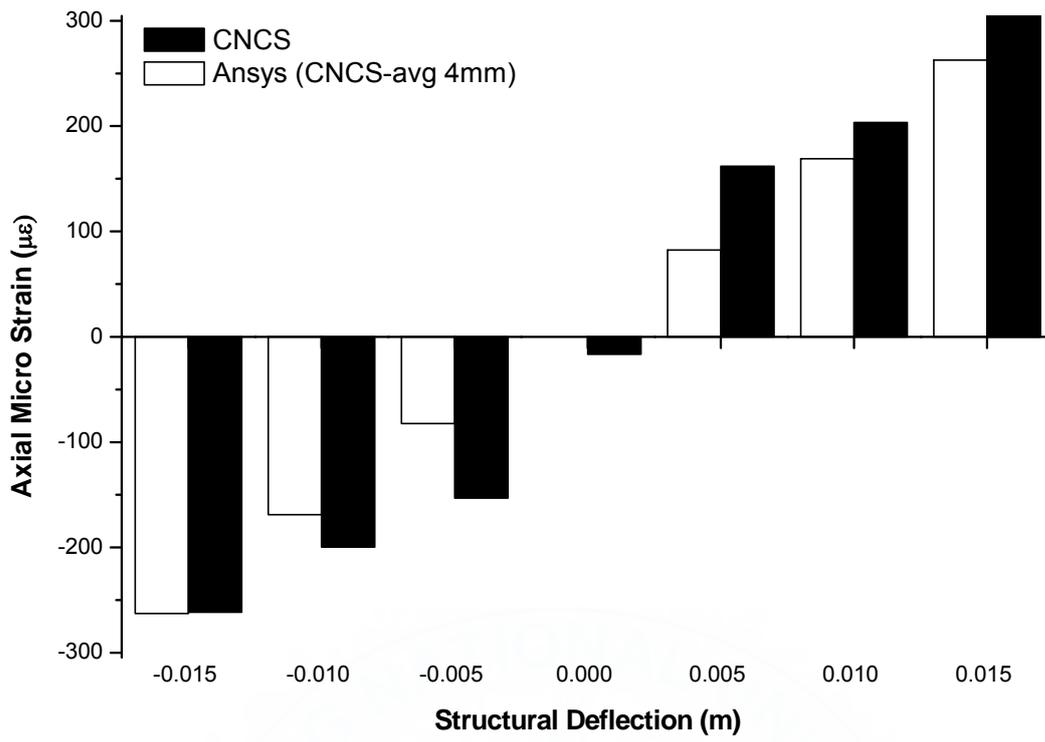


Fig. V-5 A result of ANSYS and Strain measurement for the CNCS.

VI. 결 론

본 연구에서는 CNT 를 충전재로 활용하여 복합소재의 기저재료내부에 분산시켜 기저재료내에서 CNT 들이 구성하는 전도성통로에 의해 나타나는 전왜성을 이용한 나노 전왜센서를 제작하였다. 기저재료는 구조용 재료로 다양한 분야에 이용되고 있는 에폭시를 사용하여 복합소재로 제작하였고 이를 스트레인게이지를 보완하는 센서로 개발하기 위한 실용화 연구를 수행하였다. 기존에 탄소나노 복합소재가 가지는 고유의 재료적인 잡음으로 인한 저항의 불안정성과 신호처리시스템에서 발생하는 외부잡음을 저감시켜 센서의 정적 특성실험을 하였으며 그 결과 외부하중에 대한 출력이 선형적이고 상용 SG 에 근접한 영점 드리프트 특성으로 부터 안정적인 신호로 임팩트를 계측하였고 이를 통해 높은 고주파 성분의 동적 응답이 계측 가능할 것으로 사료된다. 또한 CNCS 는 액상형으로 제작이 가능하기 때문에 포인트형 센서로 활용하여 상용 SG 는 계측이 어려운 위치의 정보를 획득이 가능함과 동시에 연속형 센서로 활용하여 다수의 SG 가 필요한 넓은 부위의 대변형과 충격을 계측이 가능할 것으로 사료된다. CNCS 의 포인트형과 연속형에서의 제작차이에서 발생하는 CNCS 의 제작형상변화에 대한 연구를 하였으며 계측에서 CNCS 의 매크로스케일 에서 스트레인 측정메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 CNCS 를 도포한 곳의 길이방향에서의 스트레인 정보를 SG 와는 달리 합산하여 출력을 하는 것으로 판단된다. 또한 CNCS 의 길이와 폭을 다르게 하여 제작했을 때 나타나는 저항특성과 외부하중을 가하였을 때 나타나는 전압특성을 계측하였다. CNCS 는 금속의 저항메커니즘과 같이 센서의 길이가 증가할 때 저항이 비례하여 증가하였으며 센서의 폭을 좁게하여 제작하였을 경우는 전도성통로가 상대적으로 폭이 넓을 때보다 형성되기가 유리하여 금속의 저항메커니즘과는 달리 단면적이 줄어들 때 낮은 저항값을 가진다. 이는 기저재료 내부에서 충전재인 CNT 재료가

가지는 종횡비에 의해 센서의 저항특성과 전왜특성이 변화하는 것으로 사료된다. 폭이 좁을 때가 넓은 때보다 전왜성에 기인하는 전도성통로의 수가 많아 같은 외부하중에 대하여 상대적으로 높은 전압출력특성을 가진다. 또한, 재료가 가지는 비저항의 변화도 폭이 넓은 때 보다 좁을 때가 작은 것으로 보아 CNCS 를 제작할 때 폭을 좁게하는 편이 재료의 신뢰성을 확보하여 실제측에 있어 재료적인 측면에서의 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 포인트형 센서로써의 실제 응용으로는 상용 SG 로는 계측이 어려운 단차가 있는 구조물에서 발생하는 응력집중을 CNCS 로 측정하였다. 단차가 있는 부분에 CNCS 를 도포하였을 경우 그 출력값이 일반적으로 응력집중 계측을 위해 단면변화의 양쪽에 SG 를 부착한 경우보다 더 높은 출력값을 얻을 수가 있었지만 CNCS 의 형상변화에 대한 보정이 필요할 것으로 사료된다. 이를 통해 산업에서 수요가 많은 응력집중이 발생하는 구조물에서의 응력집중계측이 CNCS 를 이용해 가능하다고 판단된다. CNCS 를 상용 SG 를 보완하는 차세대 센서로 사용하기 위한 실용적인 접근에서의 연구를 진행하였고 그 결과로 볼 때 CNCS 의 무궁무진한 분야에서의 응용이 기대가 된다.

참고문헌

- [1] 김성용, 최백규, 최경락, 강인필 (2015) "탄소나노 복합소재 기반 스트레인 센서 개발 연구" 대한기계학회 동역학 및 제어부문, 춘계학술대회 논문집 2015.05,13-14
- [2] Inpil Kang, Mark J Schulz, Jay H Kim, Vesselin Shanov, Donglu Shi, (2006), "A carbon nano tube strainsensor for structural health monitoring", Smart Material sand Structures, Vol.15, pp737~748.
- [3] M Weigel, T Lu, G Bailly, A Oulasvirta, C Majidi, (2015) iSkin: Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing, Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM,
- [4] Dinh, T.N.; Sowade, E.; Arreba, A.; Belau, R.; Blaudeck, T.; Baumann, R.R.; Kanoun, O. (2011)"Performance of liquid-deposited multiwalled carbon nanotube films under strain." Print. Future Days 109-115,
- [5] S. Noh, C. Yoon, E. Hyun, H.N. Yoon, T.J. Chung, K.S. Park and H.C. Kim, (2014) "Ferroelectret film-based patch-type sensor for continuous blood pressure monitoring", ELECTRONICS LETTERS, Vol. 50 No. 3 pp. 143.144.
- [6] 김성용 (2014), "탄소 나노 지능형 복합 소재 기반 임팩트 센서 개발 연구", 부경대학교
- [7] 박세훈 (2015), "구조물 건전성 감시를 위한 나노 카본기반의 전왜성 센서 특성연구", 부경대학교
- [8] Iijima, S. (1991), "Helical microtubules of graphitic carbon", Nature, 354, 56-58

[9] Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., Xu, C., Lee, Y. H., Kim, S. G., Rinzler, A. G., Colbert, D. T., Scuseria, G. E., Tomanek, D., Fischer, J. E. and Smalley, R.E., (1996), "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes," Science, Vol.273, No.5274, pp.483~487.

[10] Thess, A., Lee, R., Nikolaev, P., Dai, H., Petit, P., Robert, J., Xu, C., Lee, Y. H., Kim, S. G., Rinzler, A. G., Colbert, D. T., Scuseria, G. E., Tomanek, D., Fischer, J. E. and Smalley, R.E., (1996), "Crystalline Ropes of Metallic Carbon Nanotubes," Science, Vol.273, No.5274, pp.483~487.

[11] D. Ferrer, T. Tani, I. Matsuy, G. Zhong, S. Okamoto, and H. Kawarada, (2006) Appl. Phys. Lett. 88, 033116

[12] S. Y. Lee, D. H. Ryu, J. Y. Hong, M. H. Yeom, J. H. Yang, W. C. Choi, M. H. Kwon, and C. -Y. Park, (2007) J. Korean Vacuum Soc. 16, 291

[13] 윤창훈, 이현상 (2007.2) "탄소나노튜브(CNT) 복합소재", 고분자과학과 기술 제18권 제1호, 4-7

[14] 이종일, 정희태 (2007) "탄소나노튜브 복합체의 기술동향" 화학공학회지 제46권 제 1호 통권 246호

[15] Wood, J. R. and Wagner, H. D. (2000) "Single-wall carbon Nanotube as molecular pressure sensors," Applied Physics Letters, Vol.76, No.20, pp.2883-2885.

[16] 강인필, Mark J Schulz, 이종원 최경락, 최연선 (2006), "탄소나노튜브 복합 소재를 이용한 스트레인 센서", 한국소음진동공학회논문집 제 16권 제 7호,

[17] M. Taya, W.J. Kim, K. Ono., (1998), "Piezoresistivity of a short fiberrelastomer matrix composite, Mechanics of Materials", Vol.28,pp.53~59.

[18] 차주영 (2014),"나노 탄소 기반 지능형 소재의 특성연구"부경대학교

[19] Olfa Kanoun et al, (2014) "Flexible Carbon Nanotube Films for High Performance Strain Sensors" Sensors 10042-10071 ISSN 1424-8220

[20] 추인선 저 (1998), "수치해석학", 교우사, pp.243~246.

[21] 이일영 저 (2012) "제어용 센서공학" 다솜출판사 pp 4

[22] 주진원 (1992.6) "스트레인게이지의 온도특성과 극저온 환경에서의 거동" 대한기계학회

[23] CERIC Strain Gauge Technology 및 계측관리시스템 제1장 Strain Gauge 원리

[24] Daojun Wang, D.D.L. Chung (2013) "Through-thickness piezoresistivity in a carbon fiber polymer-matrix structural composite for electrical-resistance-based through-thickness strain sensing" SciVerse ScienceDirect CARBON 60129-138

[25] 최백규, 김성용, 강인혁, 최경락, 강인필 (2016.4) "탄소나노 복합소재 기반 스트레인 센서를 이용한 단차가 있는 구조물의 응력집중 측정실험" 대한기계학회 동계부문 2016년도 춘계학술대회, 214-215e