

압력센서 개발을 위한 탄소 나노 튜브 기반 지능형 복합소재 전왜 특성 연구

A Study on Piezoresistive Characteristics of Smart Nano Composites based on Carbon Nanotubes for a Novel Pressure Sensor

김성용¹ · 김현호¹ · 최백규¹ · 강인혁¹ · 이일영¹ · 강인필^{1*}

Sung Yong Kim, Hyun Ho Kim, Baek Gyu Choi, In Hyuk Kang,

Ill Yeong Lee and In Pil Kang

Received: 15 Jan. 2016, Accepted: 26 Feb. 2016

Key Words : Carbon nano tube (탄소 나노 튜브), Pressure sensor (압력 센서), Piezoresistivity (전왜성)

Abstract: This paper presents a preliminary study on the pressure sensing characteristics of smart nano composites made of MWCNT (multi-walled carbon nanotube) to develop a novel pressure sensor. We fabricated the composite pressure sensor by using a solution casting process. Made of carbon smart nano composites, the sensor works by means of piezoresistivity under pressure. We built a signal processing system similar to a conventional strain gage system. The sensor voltage outputs during the experiment for the pressure sensor and the resistance changes of the MWCNT as well as the epoxy based on the smart nano composite under static pressure were fairly stable and showed quite consistent responses under lab level tests. We confirmed that the response time characteristics of MWCNT nano composites with epoxy were faster than the MWCNT/EPDM sensor under static loads.

1. 서 론

센서는 일반적으로 측정 대상물을 감지 또는 계측하여 그 정보를 전기적인 신호로 변환하는 장치이다. 이를 연구 개발하는 센서기술은 전통적으로 과학, 공학, 산업 전반에 걸쳐, 근간이 되는 계측기술의 핵심에서 최근 생활수준의 향상과 정보기술의 급속한 발전으로 이제는 우리생활 전반에 걸쳐 안전 및 편의성 증대와 관련된 핵심기술로 그 중요도가 점점 높아지고 있다. 이러한 수요와 과학기술 발전의 영향으로 다양하고 새로운 센서가 활발히 연구 개발되고

있으며, 이들의 감지 대상에는 압력을 비롯하여 온도, 이미지, 속도, 가속도, 습도, 이온, 바이오 등 기본적으로 물리, 화학, 생체 신호등의 범위가 주를 이루고 있다. 그 중에서도 압력은 센서시장에서 수요가 많은 계측 부분 중 하나이며, 이를 담당하는 압력 센서는 공업계측, 제어, 의료, 자동차, 전기제품 등 우리 생활 여러 분야에 폭 넓게 이용되고 있다. 이들의 최근 기술 동향은 경박단소, 복합화, 고성능화 및 대량 생산의 수요조건을 만족시키는 마이크로 반도체기술의 MEMS 압력 센서를 중심으로 연구 개발되고 있다.¹⁾ 특히 압력센서는 여러 MEMS 센서 중 세계 시장에서 가장 규모가 클 뿐만 아니라 2012년 대비 2019년까지 7.7% 성장이 예측되고 있다.²⁾ MEMS기반의 센서기술은 앞서 기술한 요구를 만족시키며 발전되어 왔으나 이들 제작의 주류를 이루는 실리콘 공정은 높은 등급의 청정 제조 조건을 필요로 할 뿐만 아니라 값 싼 유연성 재질에 제한이 있어 일반적으로 공정이 복잡하고 관련 비용

* Corresponding author: ipkang@pknu.ac.kr

1 Department of Mechanical Design & Engineering, Pukyong National University, Busan 48547, Korea

Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 비교적 고가이다. 따라서 이들의 재료적 제한성을 극복하기 위하여 가볍고 유연성이 있으며 보다 더 저렴한 비용으로 제작이 가능한 신소재를 이용한 새로운 압력센서의 개발이 꾸준히 시장에서 요구되고 있다.

센서는 동작 메커니즘에 있어서 일반적으로 구조형(構造形)과 물성형(物性形)으로 구분을 하고 있다. 반도체식 압력센서 중 주로 미세압력을 감지하는 정전용량식 압력 센서들은 전형적인 구조형 센서로서 다이어프램(diaphragm)과 같은 구조물을 커패시턴스(capacitance)로 구성한 후 이들이 압력의 변화에 따른 변형량을 정전용량의 변화로 바꾸어 검출하는 방식을 이용하고 있다. 반면에 물성형 센서의 일부는 측정 정보를 물질 고유의 전기적 특성을 변화시키는 압저항식의 방식을 이용하고 있다.³⁾ 이러한 물성형 센서는 신호 변화특성을 지니고 있는 재료를 이용하고 있으며, 새로운 신소재 기술과 이를 결합한 진보된 제조기술을 활용한 소형화와 대량생산에 의한 저렴화가 가능하며, 가동부가 없어 높은 신뢰성과 응답 특성을 지닐 수 있다. 이와 같은 물성형 센서로 사용될 수 있는 유망한 재료로는 근래에 들어서 널리 연구되고 있는 탄소 나노 튜브(carbon nanotube, CNT)를 대표적인 소재라 할 수 있을 것이다.

탄소 나노 튜브는 나노 기술 분야에서 각광을 받고 있는 소재로서 우수한 전기적 성질과 기계적 성질을 지니고 있을 뿐만 아니라 이를 전도성 복합재료로 제작할 경우에는 외부의 압력, 힘 또는 변형량에 따라 소재의 전기 전도성이 변화하는 전왜성(piezoresistivity)을 지닌 지능형 나노 복합소재(smart nano composite, SNC)로 개발될 수 있다. 이들의 민감도(sensitivity)는 나노 복합소재의 충전재(filler)가 되는 CNT의 함유량⁴⁾ 과 기지재료(matrix)⁵⁾ 의 특성 및 복합재료의 형상에 따라 조절이 가능 할 수 있다. 또한 제조 방식과 재료에 있어서도 인쇄기법을 이용한 저비용의 대량생산이 가능할 뿐만 아니라, 유연성을 부여할 수 있어 다양한 재질, 크기 및 형태의 압력 센서 설계가 가능할 것으로 기대된다. 현재 세계적으로 압력센서 개발에는 전왜성 기반의 센서 기술이 주류를 이루고 있다고 보고가 되고 있으므로⁶⁾, 이와 같이 제작에 경제적 이점이 있을 뿐만 아니라 뛰어난 센서 특성을 지니고 있는 CNT와 이들의 전왜성을 이용하는 압력센서는 그 연구의

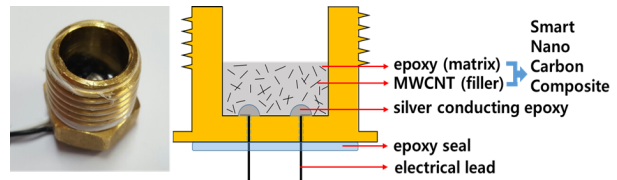


Fig. 1 The plug pipe type pressure cap sensor based on the MWCNT smart nano composite

새로운 압력 센서 개발을 위하여 CNT 기반의 SNC가 지니는 전왜성 기반의 압력 측정을 위한 기초 특성을 소개하고자 한다.

2. 탄소 나노 전왜성 복합소재를 이용한 압력 센서 제작

압력센서에서 압력을 전기 저항의 변화로 감지할 센서 전극부(electrode)를 구성하는 SNC는 나노 복합소재 공정으로 제작을 하였다. 나노 충전재인 다중벽 탄소나노튜브 (multi-wall CNT, MWCNT CM-250)는 기지재료인 액상의 에폭시를 용매(solvent)인 염화메틸(methyl chloride)과 혼합 시킨 후 초음파 분쇄기(sonicator)를 이용하여 용매 내에 균질하게 분산시켜 나노 분산액(nano emulsion)을 준비하였다. 본 연구에서 충전재의 함량은 센서감도와 상관관계 실험결과를 기반으로 감도가 급격히 변화되는 2wt%(weight percent) 부근을 최적 함량비로 선정하여 압력 센서를 제작하였다. 분산된 용액은 오븐에 넣어 용매를 증발 시킴으로써 제작에 적절한 농도로 조절한 후 센서 본체가 될 파이프 플러그 캡(pipe plug cap) 내부에 적당량을 도포시킨 후 건조 응고시켜 센서의 전극부를 형성시켰다. SNC는 위와 같은 제작에 액화 공정을 포함하고 있어 액상으로써 다양한 크기와 형상으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 형상설계의 자유성을 이용하여 캡 내부에 SNC를 채워 넣는 방식으로 제작을 하였다. 제작된 SNC 센서 전극부의 전기적 저항 변화를 측정하기 위하여 캡 외부에 전선(lead)을 관통시킨 후 그 도선을 도전성 에폭시(Elcoat, P-100)를 이용하여 복합소재 표면에 접합(bonding)을 시켰다. 연결된 전극과 플러그 사이에 틈새는 에폭시 접착제를 침투시켜 기밀을 유지하도록 제작하였다. Fig. 1은 제작된 센서의 실물 사진과 구성 내용의 도시이다.

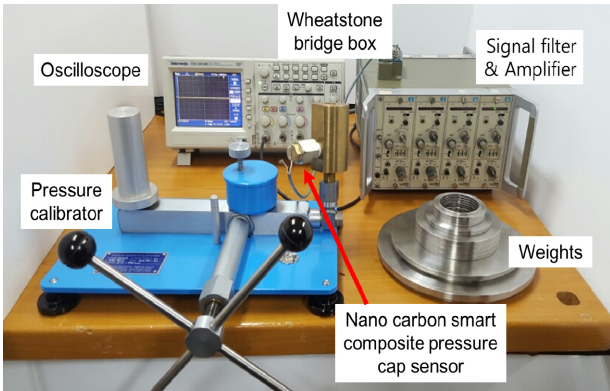


Fig. 2 Experimental setup for pressure sensing characteristics

센서를 제작하는 경우에는 지능형 소재의 전왜성 변화를 이용할 뿐만 아니라 그 소재를 액상형으로 제작이 가능하므로 구성하고자 하는 센서 전극에 도포시키거나 채워 넣는 단순한 공정의 적용이 가능하여 기존의 센서보다 경제성과 신뢰성을 보완할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 탄소 나노 스마트 복합재료의 센싱 특성 실험

3.1 압력 센싱 특성 실험을 위한 장치 구성 및 방법

SNC 기반 센서의 압력변화에 따른 전왜 특성을 압력 교정에 이용되는 정밀 분동식 압력교정기를 이용하여 다음과 같이 실험하였다. 제작된 플러그 형의 압력센서를 압력교정기(pressure calibrator, Pressurements LTD, L1500)에 장착시켜 무게 추를 이용하여 정확한 압력 조절이 가능하도록 하였으며 출력신호를 전압 신호로 계측하기 위하여 신호처리 시스템과 함께 Fig. 2와 같이 실험 장치를 구성하였다.

교정기의 압력 변화는 SNC의 전왜성으로 인하여 센서 내부에 장착된 전극의 저항 변화를 발생시키고, 이는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 휘스톤 브릿지(Wheatstone bridge)를 통해 전압의 변화로 바뀌어 출력된다. 이후 신호처리를 통해 증폭(40dB) 및 저주파 통과 필터링(1kHz)의 조건으로 DC 증폭기 (San-ei, DC strain amplifier 6M94)에 의하여 신호처리된 후 그 출력전압을 오실로스코프로 (Tektronix, TDS2014B)로 확인할 수 있도록 구성하였다.

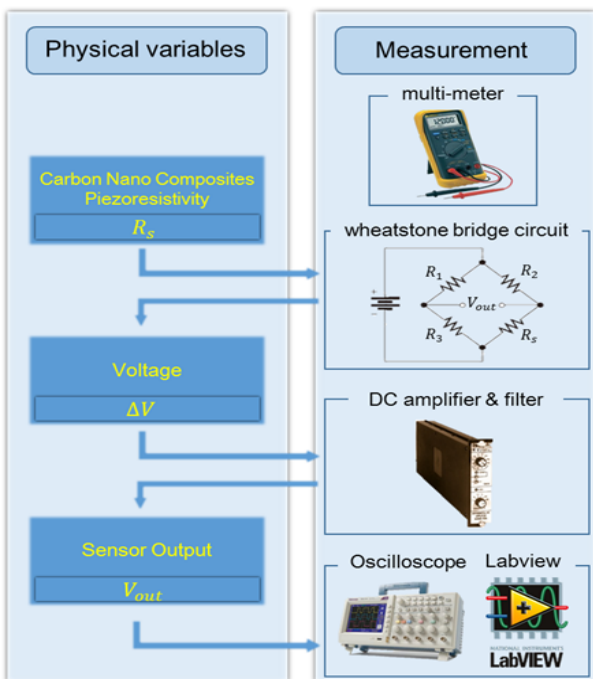


Fig. 3 Schematic illustration of smart nano carbon composites to measure piezoresistivity and sensing characteristics by means of using a signal processing with data acquisition system⁷⁾

다이아프램, 벨로즈, 튜브식 등의 구조형 압력 센서들은 내부 작동원리가 압력이 가해졌을 때 이를 변위로 바꿔주는 1차변환, 그리고 이를 다시 전기량으로 변환하는 2차변환의 단계를 거치게 된다.³⁾ 이러한 구조형 센서는 지능형 재료를 이용하는 센서와 비교하여 트랜스듀서(transducer) 기능 구현을 위한 구조가 복잡하며 제작에 여러 단계를 거치게 되어 제작비용 상승과 동작 신뢰성에 어려움을 겪을 수 있다. 반면에 탄소 나노 복합재료를 이용하여 압력

3.2 압력센서의 출력 전압 측정

CNT는 그 결정방향(curlarity)에 따라 도체와 반도체의 성질을 지니고 있으며 시판되는 제품들은 대부분 분말형태로 이들이 혼재되어 있다. 이를 이용하여 기지재료와 함께 혼합시켜 복합소재로 제작할 경우 전기적 전도성을 구현할 수는 있으나 그 특성은 금속성 전도체에 비하여 우수하지 못하여 전기 저항값의 범위가 일반적으로 수kΩ에 달하며 불안한 저항값의 변동을 보이고 있다. 이러한 저항의 변동은 CNT의 선천적 전기적 특성과 제조공정에 의존적인 전도성 나노복합소재의 품질에 주로 기인하게 되며, 이는 결과적으로 외부 하중 변화에 따른 SNC의 전왜성 변화 감도를 저하시키는 뿐만 아니라 무부하 상태에서 센서의 출력전압 불안정을 발생시키는 주

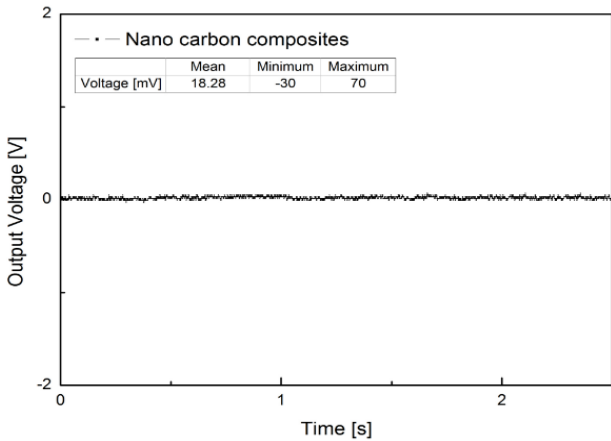


Fig. 4 Output voltage response of MWCNT smart nano composites without load(zero drift test)

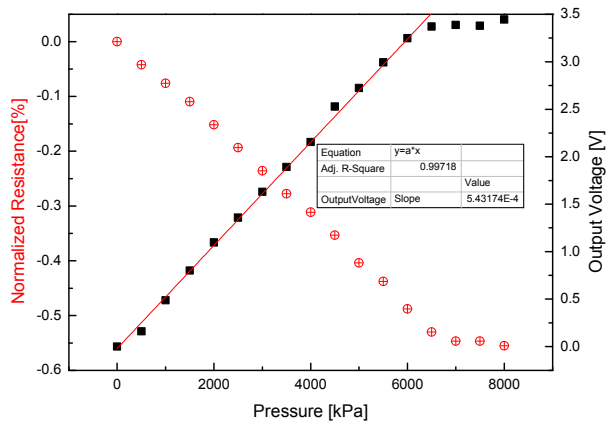


Fig. 5 Experiment of the pressure sensor voltage output and its resistance change of MWCNT and epoxy based on the smart nano composite under static pressure

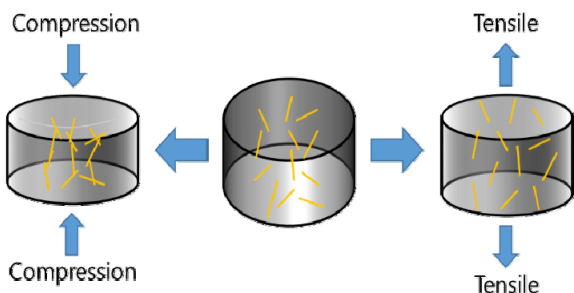


Fig. 6 Schematic illustration of carbon nano smart composites piezoresistivity mechanism

된 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 개선된 SNC 제작 공정과 더불어 정밀한 센서 출력 전압을 얻을 수 있는 신호처리 기법을 통하여 다음 Fig. 4과 같이 무부하 시 매우 안정된 센서의 출력 전압 신호를 얻

어내었다. 무부하 상태의 센서 출력 전압은 계측 시작 후 상당 시간이 지난 후에도 그 상태가 매우 안정적임을 확인할 수가 있었다. 이 결과를 상용 포일 스트레인 게이지의 무부하 특성과 비교한 결과 SNC 센서의 출력 전압 값의 분산도가 약간 높게 나타났으나 이는 회로적으로 보상이 가능할 것으로 사료된다. 탄소 나노 압력센서의 온도 변화에 따른 보상은 기존의 스트레인 게이지와 동일하게 더미 게이지 (dummy gauge)를 휘스톤 브리지 회로에 추가로 연결함으로 보상이 가능하다.

제작한 센서의 압력 변화에 따른 출력전압의 변화를 조사하기 위하여 유압 분동식 압력 교정기에 0kPa 부터 8000kPa까지 500kPa 단위로 증가시키며 해당 조건의 출력전압을 수차례 걸쳐 측정하였다. 반복된 실험에서 매번에 측정의 결과는 유사하게 나왔으며 그중 한 예를 Fig. 5 에 도시하였다. 탄소나노 복합소재의 저항 변화는 압력의 증가에 대하여 감소하고 있으며 이는 신호처리 시스템을 통하여 안정된 전압으로 출력될 수 있었다. 센서의 전기적 특성은 6500kPa 이상의 조건에서는 압력이 증가하더라도 크게 변하지 않는 모습을 확인할 수 있었다. 이는 탄소 나노 복합재료가 소성변형의 영역으로 진입하므로 더 이상의 저항의 변화가 발생하지 않는 것으로 추정되나 향후 보다 자세한 조사가 요구된다. MWCNT/에폭시의 전왜성을 이용한 압력센서는 0~6000kPa 영역의 압력 범위에서 양호한 선형적 전압출력 특성을 보였다. 이러한 압력측정 범위는 일반적으로 고압센서의 측정범위인 700~3500kPa영역 이상에도 적용이 가능함을 보여 주고 있다.

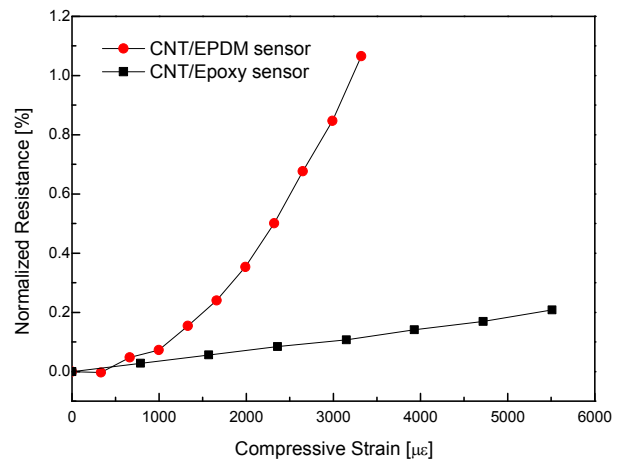


Fig. 7 Piezoresistive characteristics MWCNT smart nano composites with epoxy and EPDM under compressive loads

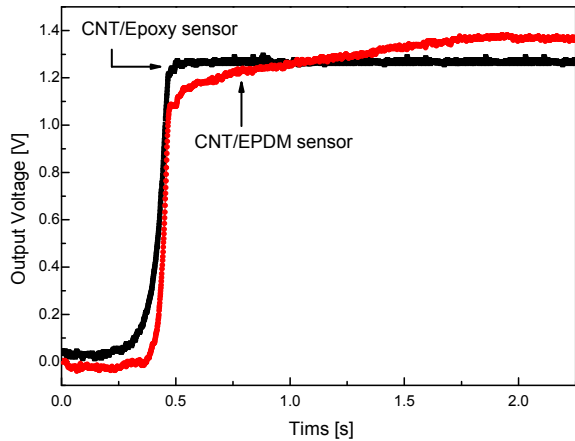


Fig. 8 Response time characteristics of MWCNT nano composites with epoxy and EPDM under static loads (step inputs)

4. 탄소 나노 복합소재 압력센서의 특성 설계

전왜형 압력센서의 개발을 가능하게 하는 SNC의 전왜 메커니즘은 Fig. 6 에 도시한 바와 같이 기지재료 내에서 구속된 충전재들 간에 발생하는 전기적 접촉저항의 변화에 기인한다고 추정되고 있다.⁷⁾ 이러한 전왜성은 충전재료의 크기, 형상 및 함량과 관계가 있을 뿐만 아니라 이들을 구속하고 있는 기지재료의 특성에도 영향을 받는 것으로 실험되고 있다.⁵⁾ 따라서 적절한 압력센서의 설계와 제작을 위하여 전왜성을 특성 지우는 인자들에 대한 고찰이 필요하다.

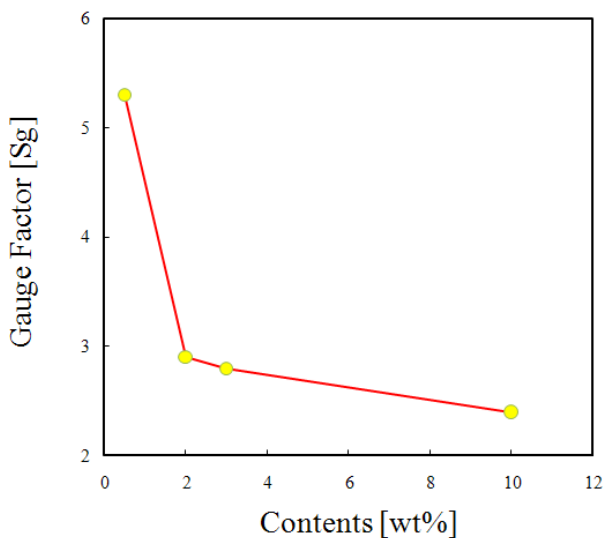


Fig. 9 Piezoresistive sensitivity of MWCNT/Epoxy composites in terms of gauge factor with respect to variation of wt%⁸⁾

Table 1 Piezoresistive relative characteristics of nano carbon smart composites in terms of matrix hardness

Characteristics \ Matrix	Hard	Soft
Resolution	fine	rough
Span	small	large
Response	fast	slow
Sensitivity	various	various

센서의 적용압력은 기지재료의 경도(hardness)로서 선택적 설계가 가능할 수 있다. 다음 Fig. 7은 경도 높은 에폭시와 부드러운 천연고무인 EPDM를 기지재료들로 하는 CNT복합소재들이 압축 하중 변화에 따른 이들의 전왜성 변화 특성을 도시하였다.

다음 Fig. 8은 정하중을 가하였을 때 그에 따른 이들의 전왜성 변화를 신호처리 회로를 이용하여 출력 전압으로 변화시킨 후 그 응답특성 실험 예를 비교 도시하였다. 센서의 감도는 기지재료와 혼합되어 전기 전왜성을 지니게 하는 충전재인 CNT의 함량에 따라 조절이 될 수 있을 것이다. Fig. 9 에 도시한 바와 같이 스트레인센서의 감도 지표인 게이지 울 (gauge factor, Sg)은 탄소나노 충전재의 종류와 공정 기법에 따라 다소 변화될 수는 있으나 일반적으로 CNT의 함량과 지수 함수적 반비례의 관계가 있음이 실험적으로 확인되었다. 따라서 새로운 압력센서의 개발을 위한 SNC는 다음 Table 1과 같은 특성을 지닌다. 센서의 특성은 제작의 주 재료가 되는 기지재료와 충전재의 함량으로 조절 가능할 수 있다. 에폭시와 같은 단단한 기지 재료는 고압의 압력센서에 적합하며, 고무재료인 EPDM과 같은 유연성을 지닌 기지재료는 저압에도 쉽게 변형을 일으키므로 미세 압력 측정에 적합할 것으로 기대된다. 또한 기지재료의 경도는 이들 재료가 탄성범위 내에서 외부 하중/압력에 의한 변형 후 재료의 복원시간과 관계가 있으므로 이들의 응답성과 관계가 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

센서 제작에 있어 고비용의 제조공정 및 제한된 재료의 제한성을 개선하고자 본 논문에서는 최근 센서 재료로 각광받고 있는 CNT를 사용하여 전왜성 SNC 기반의 새로운 압력 센서 개발을 위한 기초 특성을 연구하였다. CNT의 전기적 특성은 그고유의 특

성으로 인하여 금속성 전도체에 비하여 불안정한 저항값 변동을 보이고 있으나 본 연구에서는 개선된 SNC 제작 공정과 더불어 정밀한 센서 출력 전압을 얻을 수 있는 신호처리 기법을 통하여 매우 안정된 센서의 출력 전압 신호를 얻어낼 수 있었다. SNC에 가해진 압력이 증가함에 따라 SNC의 출력 전압이 선형적 (결정계수 : 0.997)임을 확인 할 수 있었다. 또한 일반적인 고압센서의 측정범위에 비해 SNC는 높은 범위인 8000kPa 까지 압력 측정이 가능하므로 향후 새로운 압력 센서로 활용 가능성을 실험적으로 확인 할 수 있었다. 향후 연구로는 정밀한 압력센서의 설계와 제작을 위해서 전왜성 관련 특성 인자들에 대한 심도 있는 연구들과 기지재료에 따른 전왜성을 가진 탄소 나노 복합재료의 응답성, 측정범위, 분해능, 안정성 등 상세한 센서 특성에 대한 연구들이 수행될 계획이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) J. G. Hur and K. U. Yang, "The Technology Trend and Newest Product of Pressure Sensor," Journal of Drive and Control, Vol.4, No.3, pp.2-10, 2007
- 2) YOLE Development, "What are the business and technology trends that are impacting the MEMS business for the next 5 years," 2013
- 3) Sehwa, "Sensor's Principles and Instructions," ISBN : 2003718002210, 1988
- 4) I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov and D. Shi, "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring," Smart Materials and Structures, Vol. 15, No. 3, pp. 737-748, 2006
- 5) G. R. Choi, H. K. Park, H. Huh, Y. J. Kim, H. Ham, H. W. Kim, K. T. Lim, S. Y. Kim and I. Kang, "Strain Sensing Characteristics of Rubbery Carbon Nanotube Composite for Flexible Sensors," Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 16, No. 2, pp.1607-1611, 2016
- 6) C. Ravula, W. L. Bodem, J. K. Taylor, "Global Markets for Electronic Pressure Transmitters and Transducers," VDC research, 2008
- 7) S. Y. Kim, S. H. Park, G. R. Choi, H. K. Park and I. Kang, "Development of Novel Impact Paint Sensor by Using Graphene based Smart Nano Composite," Transactions of the KSNVE, Vol.24, No.3, pp.247-252, 2014
- 8) J. Y. Cha, "A Study on Nano Carbon Based Smart Materials Characteristic," master's thesis of pukyong graduate school, 2012