

탄소나노튜브 복합소재 전왜 특성과 3D 프린팅을 활용한 로드셀 개발 연구

A Study on Load Cell Development by means of a Nano-Carbon Piezo-resistive Composite and 3D printing

강인필¹ · 정관영² · 최백규¹ · 김성용¹ · 오광원¹ · 김병탁¹ · 백운경^{1*}

Inpil Kang¹, Kwan Young Joung², Beak Gyu Choi¹, Sung Yong Kim¹, Gwang Won Oh¹,
Byung Tak Kim¹ and Woon Kyung Baek^{1*}

Received: 28 Oct. 2020, Accepted: 11 Nov. 2020

Key Words : Nano Carbon Piezoresistive Composite(나노 카본 전왜 복합재), 3D Printing Sensor(3D 프린팅 센서), Load Cell(로드셀), Strain Gauge(스트레인 게이지)

Abstract: This paper presents the basic research for the design and fabrication of a 3D-printed load cell made of NCPC (nano-carbon piezo-resistive composite). We designed a structure that can resonate at a low frequency range of about 5 - 6 Hz with ANSYS using sensitivity analysis and a response surface method. The design was verified by fabricating the device with a low-quality commercial 3D printer and ABS filament. We conducted a feasibility test for a commercial sensor using 1000 cyclic load tests at 0.3 Hz in a material testing system. A manufacturing process for the 3D printer filament based on the NCPC was also developed using the nano-composite process.

1. 서 론

힘이나 압력과 같은 물리량을 전기적인 신호로 변화시켜 압력이나 하중을 측정하는 로드셀(Load cell)은 일상용 전자저울에서부터 산업용 자동화 및 계측용으로 널리 사용되는 대표적인 센서이다. 로드셀의 내부 구조는 빔과 같은 구조물을 포함하고 있으며, 외부 하중으로 인하여 변형되는 구조물의 변형을 스트레인 센서를 활용하여 감지하는 원리를 사용하고 있다. 이때 사용되는 스트레인 센서로는 광케이블 센서, 반도체 스트레인 게이지 및 포일형 스트레인 게이지 등이 활용되고 있다. 1) 대표적인 스트레인 게이지

로는 금속선을 활용한 포일(foil type) 스트레인 게이지이며, 이는 “물체의 전기 저항값은 길이와 단면적 변화에 의하여 변화 한다” 는 외력에 의한 전기 전도체의 형상 변형에 따른 전왜 방식을 사용하고 있다.

로드셀은 특정형상의 구조물과 스트레인 게이지를 기반으로 설계된 센서이므로, 로드셀의 성능은 이를 구성하는 스트레인 게이지의 특성과 밀접하다. 포일형 스트레인 게이지는 합금 재료를 에칭 방식을 활용하여 미세 패턴으로 가공을 하여 사용하고 있으며, 감도는 2~3정도로 저항 재료에 의하여 결정이 되어 감도가 낮고 특성 조절이 어려우며 특히 내구성이 취약하다. 고성능 로드셀에는 반도체 스트레인 게이지가 활용되고 있다. 작은 힘이나 변형을 측정하기 할 수 있는 반도체 스트레인 게이지는 포일 스트레인 게이지 보다 높은 감도를 지니고 있고 출력이 크므로 고성능 로드셀 개발에 활용이 되고 있다. 반도체 스트레인 게이지는 실리콘 결정을 절삭 공정을 활용하여 제작을 하고 있어 가공성이 떨어지고, 취성으로 내구성이 떨어져 산업적 응용에 제한이 있다.

* Corresponding author: baekwk@pknu.ac.kr

1 Department of Mechanical & Design Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

2 Innovative Smart Manufacturing R&D Department, KITECH, Cheonan 31056, Korea

Copyright © 2020, 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.

새로운 센서 소재의 등장은 기존 센서의 문제를 극복한 새로운 지닌 센서 개발을 가능하게 할 수 있다. 로드셀의 핵심요소인 스트레인 게이지 역시 우수한 성질을 지닌 나노 재료들의 등장으로 단점인 감도, 취성, 가공성 등을 보완하거나, 그 한계를 극복할 수 있어 새로운 로드셀 개발이 가능 할 것이다. 이러한 대표적인 소재로는 나노기술을 이끌고 있는 탄소나노 소재인 탄소나노튜브(CNT, Carbon nanotube)와 그래핀(graphene) 등 전기 전도성을 지닌 나노 탄소 동소체가 유망하다. 이들은 연속적인 탄소원자들의 결합으로 이루어져 높은 기계적 강도와 우수한 전기 전도성을 지니고 있어, 초경량 고강도 전도성의 신소재 연구에 이용이 되고 있다. 이러한 탄소나노 기반 전왜 센서는 수지재료(matrix)로 주로 폴리머를 이용하고 있다. 탄소나노 동소체 기반의 스트레인 센서는 탄소나노 소재들을 고분자 재료와 혼합시켜 NCPC(Nano Carbon Piezoresistive Composite)로 개발되며, 이들의 전왜 메카니즘은 포일 스트레인 게이지와는 다르다. NCPC는 복합소재 내부에 전기 전도성을 지니는 탄소나노 동소체들을 전도성 충전재(filler)로 활용하여 수지재료안에서 전도성 네트워크를 구성하게 한다. 그리하여 NCPC를 전왜성 센서로 제작하게 되어 압축력을 주게 되면 전도성 네트워크가 더 가깝게 많이 이루어지게 되므로 센서 저항이 감소하게 한다. 반대로 인장력을 주었을 경우에는 NCPC 내부에 있는 충전재들 간극이 커지며 전도성네트워크가 뜰어지게 되면서 저항이 증가하게 된다.^{2, 3)} 이러한 NCPC는 고분자재료 및 여타 소재들과 혼합하여 스트레인 센서를 개발할 수 있으므로, 기존의 금속이나 세라믹 계열 소재와는 다른 새로운 특성을 지닌 스트레인 센서와 로드셀의 개발을 가능하게 할 수 있다. 일례로 실리콘 고무와 혼합을 할 경우에는 유연성과 높은 연신율을 지닌 스트레인 센서의 개발이 가능하다.⁴⁾ 또한 고분자 복합소재 스트레인 게이지는 고분자 재료의 양호한 기계 가공성을 활용하여 다양한 구조체 형상으로 제작이 가능하므로 새로운 구조적 특성을 지닌 로드셀의 개발에 유리하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 탄소나노 동소체를 파이버(fiber)형태로 가공할 경우 3D 프린팅 필라멘트(filament)로 제작이 가능하므로, 향후 생산기술의 주력이 될 수 있는 3D 프린팅 기술과 결합하여 다양한 형상의 로드 셀로 쉽게 제작 될 수 있다. 현재 3D 프린팅 기술은 고분자를 주재료로 하며 제작 공정을 간단히 설계할 수 있다는 경제적인 장점이 있으므로

고분자 재료와 3D 프린팅 기법을 활용한 센서 연구 역시 활발히 이루어지고 있다.⁵⁻⁸⁾

따라서 본 연구에서는 우리 생활 및 공학 기술에 널리 이용될 수 있는 경제성 높은 새로운 로드셀의 개발을 위한 기초 연구를 수행하였다. 본 논문은 탄소나노소재 기반 3D 프린터의 필라멘트개발, 저주파 동적 하중 측정이 가능한 다중 cymbal 공진 구조체의 로드셀 설계 및 제작과 반복 하중 시 탄소나노 복합소재의 스트레인 계측 특성관련 실험 연구를 소개한다.

2. 3D 프린터를 활용한 압력 센서 설계 및 제작

NCPC를 로드셀 구조체로 제작을 한다면 구조체 자체가 센서이므로 재료형과 구조형이 일체인 센서로 개발이 가능하다. 일반적으로 구조형 센서는 그 기능의 최적화를 위하여 복잡한 형상이 필요할 수 있으나, 현재 활용되는 미세가공 기술로는 그 제작에 한계가 있다. 이러한 센서 제작에 한계를 극복하기 위하여 Fig. 1과 같이 본 연구팀은 NCPC를 센서로 하며, 이를 소형 외팔보 형상의 센서 구조체로 하는 소형 압력 센서를 3D 프린터를 활용하여 개발하는 연구를 수행하고 보고하였다.^{9, 10)} 이들 선행 연구에

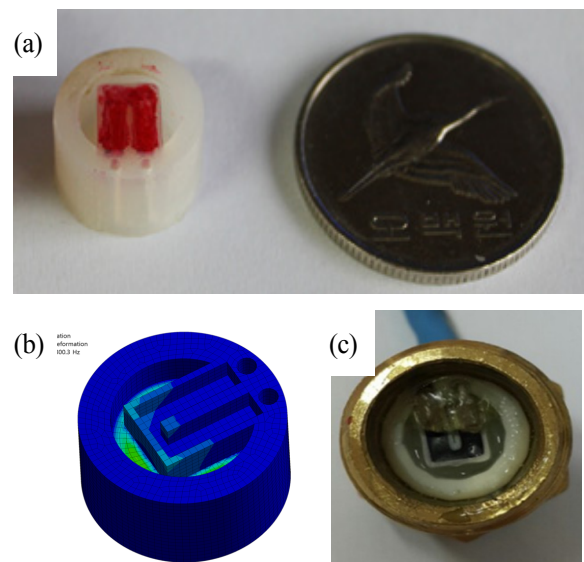


Fig. 1 The 3D printing pressure sensor; (a) a sensor design by using ANSYS and (b) a 3D printed sensor body with (outer diameter: 14.5mm, height: 9mm) and (c) cantilever sensor electrode filled with NCPC(Nano Carbon Piezoresistive Composite, black) in the ABS sensor body (white).

서 외팔보 전극의 압력 센서는 특별한 형상 없이 제작된 벌크형(bulk) 전극의 압력센서 대비 선행적인 출력전압이 개선되어 약 200% 압력측정 성능 향상을 보였다. 이 연구는 센서 구조체의 역할이 그 성능에 미치는 중요성을 보여준 연구이나, 3D 프린팅 로드셀의 정적 압력 계측 성능만을 실험적으로 보고하였다. 그러므로 본 연구에서는 NCPC 기반 센서가 동적 하중 계측에 유용하게 사용 될 수 있도록 특정 주파수 영역에서 공진을 발생시켜 계측 감도를 높일 수 있는 3D 프린팅 구조형 센서 설계와 제작을 위한 기초 연구를 수행하였다. 이를 위하여 특정 주파수 영역에서 공진을 발생시켜 계측 감도를 높일 수 있는 특수 구조형 센서를 설계하고 3D 프린터를 활용하여 제작하였다. 공진 구조체는 가속도 센서를 비롯하여 여러 분야에 활용되고 있으나, 주로 규소(silicon)와 MEMS공정을 활용하여 초소형 센서로 제작되고 있으며, 높은 주파수 영역에서 공진이 발생하는 특성을 활용하는 센서로서 개발되고 있다. 그러나 일반적으로 기계 구조물에 발생하는 1차 공진은 저주파 영역이며, 저주파 공진체는 고주파 공진체보다 형상 구조가 복잡하고 보다 도전적이라 판단되어 본 연구에서는 저주파 영역에서 사용 가능한 로드셀 개발을 수행하였다. 소자에 장착되어 저주파 대역에서 공진을 발생 시킬 수 있는 소형 구조체는 Fig. 2와 같이

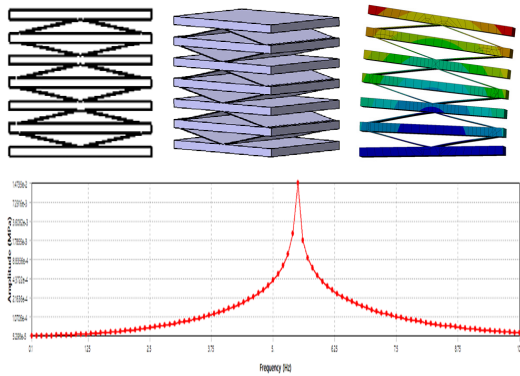


Fig. 2 Design of a multi-cymbal resonant structure for low frequency (5~6Hz) resonant load cell.

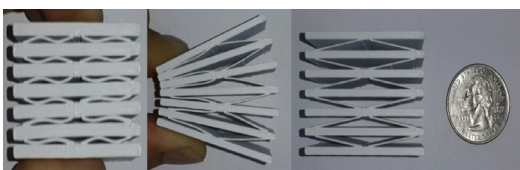


Fig. 3 3D printed the multi-cymbal resonant structure for resonant load cell.

이 전산 해석프로그램(ANSYS)와 반응 표면법을 통한 민감도 분석을 활용하여 5~6Hz 부근에서 공진을 발생시킬 수 있는 구조체 설계를 선행적으로 수행하였다.

Fig. 3은 위의 설계 결과를 기반으로 보급형 FDM(Fused Deposition Modeling)방식의 3D 프린터 (Flashforge USA, Dreamer)를 활용하여 선행적으로 제작한 저주파 공진체 시작품이다. 이 제작을 통하여 저주파 소형 공진체가 간단히 3D 프린터와 일반적으로 널리 활용되는 열가소성 소재인 ABS 수지로 제작 될 수 있음을 확인하였으며, ABS 수지를 기반으로 하는 NCPC 필라멘트 개발을 수행하였다. 동적 하중 계측이 가능한 로드셀 개발을 위하여는 NCPC가 반복적인 하중에서도 안정적인 성능을 지니고 있음이 실험적 검증이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 재료시험기(MTS 244.41)를 활용하여 0.3Hz의 속도로 1000회 반복하중에서 NCPC 기반 로드셀이 출력 특성을 수행하고 Fig.4와 같은 결과를 얻었다. 위의 결과는 NCPC가 반복적인 하중에서도 충분히 내구성을

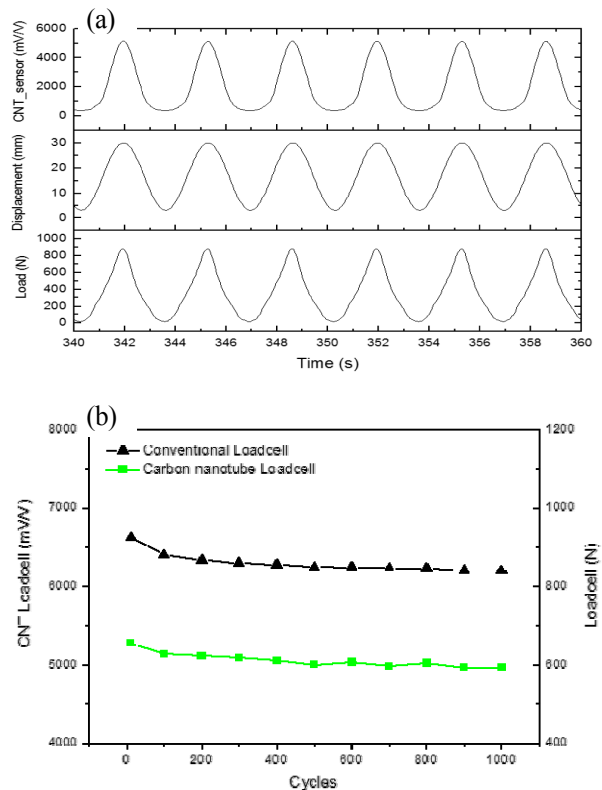


Fig. 4 Cyclic load test of NCPC (2wt%, MWCNT/epoxy) with MTS under 0.3Hz and to 1000 cycle; (a) cyclic voltage output response of the NCPC sensor (CNT sensor) and (b) voltage output stability test with conventional load cell of MTS.

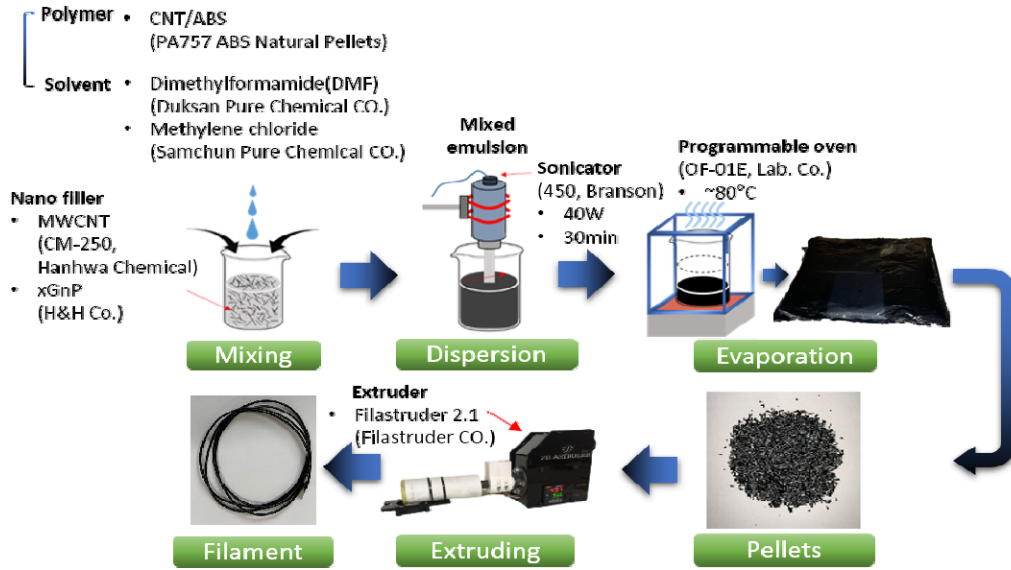


Fig. 5 The fabrication process of 3D printer filament based on NCPC using nano composite process.

지너 상용 로드 셀 개발에 활용 될 수 있는 중요 기초 자료라 판단된다. 현재는 재료 시험기의 성능 한계로인하여 낮은 동적 하중에서만 실험이 수행되었으나, 향후 유사한 내구성 실험을 동적 가진기를 활용하여 1kHz 이상의 높은 주파수 대역에서 계획 중이다. 이와 더불어 공진은 센서의 출력을 높일 수 있으나 출력전압의 선형성에 영향을 줄 수 있으므로, 이를 보상할 수 있는 신호처리 방안 연구가 진행 중이다.

3. NCPC 기반 3D 필라멘트 제작 연구

NCPC는 3D 프린터 용 필라멘트로 가공 되거나 액상형으로 제작되어 몰드 성형 가능하므로 최적화된 자유로운 형상 구현이 가능하여 재료형과 구조형이 일체화된 센서 개발이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 위에 기술한 복잡한 형상의 구조체와 센서 전극을 3D 프린터를 일체화 시켜 제작할 수 있도록 NCPC를 활용한 3D 필라멘트 제작을 연구하였다.

대표적인 3D프린팅 기법인 FDM(Fused Deposition Modeling)방식은 열가소성재료(ABS, PC, PLA 등)를 필라멘트로 이용하고 있다. 이러한 단순 필라멘트들은 기계적인 강도가 약하고 기능성이 없어 간단한 시제품(prototype)의 제작에만 사용이 제한되고 있다. 최근에는 이러한 한계점을 극복하기 위해 열가소성 재료에 여러 재료들을 혼합한 복합소재 필라멘트들

의 기계적 강도 향상과 경량화에 대한 다양한 연구가 진행 되고 있다.11) 우수한 기계적 특성과 기능성을 가진 위의 나노 소재와 열가소성 재료를 혼합한 나노 복합소재 필라멘트는 커다란 산업적인 응용가능성을 가지고 있을 것으로 전망된다. 현재 선행연구로는 PBT(polybutylene terephthalate) 수지 기반에 CNT와 Graphene을 혼합한 전도성 폴리머 필라멘트 연구가 수행되었다.12) 또한 현재 탄소 나노 소재를 함유하는 필라멘트들이 제품화 되어 있으나, 이들은 단순히 전도성이 높은 전극 제작용이므로 본 연구실에서 이들을 활용한 센서 제작에서는 압저항 특성 활용이 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 다음 Fig.5와 같이 나노복합소재 공정을 활용하여 3D 프린터용 NCPC를 제작하였다. 3D 프린팅을 활용한 압저항 특성의 효율적 사용을 위하여 압저항 특성에 영향을 미칠 수 있는 필러 함량, 분산 시간, 필러 중횡비와 같은 다양한 요인은 공정 개선 연구를 통하여 지속적으로 수행되어야 할 분야이다. 특히, CNT 기반 NCPC 펠릿이 사출기(extruder)를 통하여 필라멘트로 가공됨에 있어 내부에 있는 CNT의 정렬 효과가 예상되고 있고 이는 압저항 특성 개선에 기여할 것으로 기대되고 있다.

4. 맺음말

본 연구에서는 NCPC 기반 센서가 동적 하중 계측

에 유용하게 사용 될 수 있도록 특정 주파수 영역에서 공진을 발생시켜 계측 감도를 높일 수 있는 3D 프린팅 구조형 센서 설계와 제작을 위한 기초 연구를 수행하였다. 전산 해석프로그램(ANSYS)와 반응 표면법을 통한 민감도 분석을 활용하여 5~6Hz 부근에서 공진을 발생 시킬 수 있는 구조체를 설계하였고, 보급형 3D 프린터와 ABS 수지로 제작 가능성을 확인하였다. NCPC의 센싱 내구성을 재료시험기를 활용하여 0.3Hz의 속도로 1000회 반복하중 실험을 통해 상용 센서 개발 가능성을 제시하였다. 또한 NCPC를 3D 프린터용 필라멘트로 활용하기 위한 제작공정 역시 함께 연구하였다.

3D 프린팅 기술을 이용하여 센서 구조체를 구현할 경우 단순 그래픽 설계를 이용하여 제작 공정이 단순해질 뿐만 아니라, 필요에 따라 다양한 필라멘트를 활용하여 다양하게 구현 할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 로드셀 구조체는 그 형상과 재질에 따라 강성과 감도 특성이 필라멘트의 재질로 용이한 조절 가능할 수 있을 것이다. 그러므로 3D 프린팅 공정은 향후 NCPC 기반 로드셀 개발뿐만 아니라 향후 다양한 센서를 개발하고 제작하는데 유용할 것으로 기대된다.

향 후 NCPC 기반 필라멘트는 수지재료에 따라 압저항 특성이 달라질 수 있어 필라멘트 제조 최적 공정과 더불어 연구되어야만 한다. 또한 적층형 3D 프린팅에서 발생 할 수 있는 적층 변수(적층 각도, 온도, 형상)와 압저항 메커니즘에 따른 전기적 성능을 조화시켜 3D 프린팅 구조체를 설계, 제작, 실험을 통해 정량적 연구가 필요하므로 이에 대한 연구가 진행되고 있다.

후 기

"이 논문은 2017학년도 부경대학교 연구년[III] 교수 지원 사업에 의하여 연구되었음.(C-D-2017-0962)"

Author Contributions

I. Kang: Conceptualization, Writing-original draft, K. Y. Joung: Methodology, B. G. Choi: Methodology, S. Y. Kim: Methodology, G. -W. Oh: Methodology, B. -T. Kim: Methodology. W. K. Baek : Conceptualization, Supervision, Writing-review & editing.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) <https://kr.omega.com/prodinfo/loadcells.html>
- 2) I. P. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, S. 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.
- 3) I. P. Kang, "A Study on Sensing Characteristics of Carbon Nanotube Smart Composite Nano Sensors Based on Electrical Impedance Measurement", *Journal of The Korean Society for Power System Engineering*, Vol.13, No.1, pp.65-71, 2009.
- 4) 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.
- 5) H. S. Jin, J. K. Lee, S. Lee and K. C. Lee, "Output Characteristic of a Flexible Tactile Sensor Manufactured by 3D Printing Technique," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol.31, No.2, pp.149-156, 2014.
- 6) P. Giovanni, N. Gabriele, G. Gianmarco, L. Marinella and T. Stefano, "Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling," *Composites: Part A*, Vol.76, pp.110-114, 2015.
- 7) D. Zhang, B. Chi, B. Li, Z. Gao, Y. Du, J. Guo and J. Wei, "Fabrication of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing," *Synthetic Metals*, Vol.217, pp.79-86, 2016.
- 8) M. G. John, S. Godfrey, J. W. Kim, J. C. Roberto, A. W. Russel, J. S. Christopher, W. G. Brian, C. W. Dennis and J. S. Emilie, "3-D printing of multifunctional carbon nanotube yarn reinforced components," *Additive Manufacturing*, Vol.12, pp.38-44, 2016.
- 9) S. Y. Kim and I. Kang, "A Study on the Development of a Novel Pressure Sensor based on

- Nano Carbon Piezoresistive Composite by Using 3D Printing”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.41, No.3, pp. 187-192, 2017.
- 10) S. Y. Kim, H. Kim, B. G. Choi, I. H. Kang, I. Y. Lee and I. Kang, “A Study on Piezoresistive Characteristics of Smart Nano Composites based on Carbon Nanotubes for a Novel Pressure Sensor”, Journal of Drive and Control, Vol.13, No.1, pp.43-48, 2016.
- 11) Xin Wang, Man Jiang, Zuowan Zhou, Jihua Gou and David Hui 3D printing of polymer matrix composites : A review and prospect, Composite Part B, 110, pp.442-458, 2017.
- 12) K. Gnanasekaran, T. Heijmans, S. van Bennekom, H. Woldhuis, S.Wijnia, G. de With and H. Friedrich, “3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling”, Applied materialstoday, Vol.9, pp.21-28, 2017.