Check for updates

동력시스템공학회지 제24권 제1호 pp. 18-22 2020년 2월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online)
Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.1.018
Vol. 24, No. 1, pp. 18-22, February 2020

실리콘 고무 기반 탄소나노 복합소재 대변형 스트레인 센서 특성 연구
A Study on the Characteristics of Large Deformation Strain Sensor for Nano-Carbon Piezoresistive Composite Based on Silicone Rubber

최백규* · 강인혁* · 김성용* · 강인필*†
Baek-Gyu Choi*, In-Hyuk Kang*, Sung-Yong Kim* and In-Pil Kang*†

(Received 21 August 2019, Revision received 28 August 2019, Accepted 28 August 2019)

Abstract: In this study, a carbon nanotube based flexible strain sensor was experimentally studied to develop a large deformable sensor. The sensor was made of silicone rubber and a multi-wall carbon nanotube as an electrically conductive filler with less than 3 wt% content. Since the nanocomposite sensor has piezoresistivity, its electrical resistivity is changed according to deformation. The sensor was fabricated as a sandwich structure to prevent buckling under large deformation and the electrodes were made with conductive fabrics to be able to connect it on large deformable materials. Flexible strain sensors are less sensitive than commercial strain sensors, but can have sufficient sensing characteristics to be large strain sensors. The output voltage range of the sensor can be enough to cover the large deformation of the sensing object completely due to it lower sensitivity. Further research should develop a high hysteresis compensation algorithm due to viscoelasticity to obtain more accurate rubber parts deformation measure.

Key Words : Carbon nanotube composites, Large strain sensor, Flexible strain sensor, Vehicle rubbery parts

1. 서 론

고무재료는 특정한 기계적 특성을 갖도록 성형 제작이 용이하며 금속과의 접착성도 우수하다. 이러한 장점을 이용하여 고무부품은 충격 완화 및 저 진동, 저 소음화 및 작동감 향상 등을 통한 고

*† 강인필(ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4125-2354) : 교수, 부경대학교 기계설계공학과
E-mail : ipkang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6167
*최백규(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5914-9545) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과
*강인혁(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3009-1129) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과
*김성용(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5693-3246) : 대학원생, 부경대학교 기계설계공학과

*† In-Pil Kang(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4125-2354) : Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.
E-mail : ipkang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6167
*Baek-Gyu Choi(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5914-9545) : Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.
*In-Hyuk Kang(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3009-1129) : Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.
*Sung-Yong Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5693-3246) : Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

품질, 고 신뢰성 달성을 위해 자동차의 여러 가지 시스템의 주요부품으로 사용되고 있다. 하지만 아직까지 고무부품의 설계는 고무의 물성을 맞추기 위한 성분 배합부터 형상설계, 시험평가 등 대부분의 과정을 경험적 기법에 의존하고 있다. 경험적 기법을 활용하는 데 소요되는 경비와 시간은 매우 크며 이를 절감하기 위해 전산시뮬레이션기술이 적극 활용되어가고 있는 추세이다.[1] 이러한 전산시뮬레이션 기술을 이용한 유한요소해석방법은 고무 부품의 설계 기술 고도화에 기여하고 있다. 하지만 유한요소해석과 같은 간접적인 방법은 고무의 비선형적인 특성 때문에 해석 결과에 대한 정확도와 신뢰성이 낮다. 따라서 현재 스트레인 게이지와 같이 부품에 부착하여 변형률을 직접 계측할 수 있는 새로운 대변형 스트레인 센서가 개발된다면 실시간으로 계측된 고무 부품의 변형 양상과 변형률 분포를 통해 취약부위를 예측하는 직접적인 모니터링 시스템의 구현이 가능할 것이다. 본 논문에서 다루고 있는 유연 스트레인 센서는 다중 벽 탄소나노튜브(MWCNT, multi-walled carbon nanotube)를 충전재로 활용하여 제작한 실리콘 고무기반의 전왜성 방식의 복합소재 센서이다.[2] 실리콘 고무는 높은 인장률에 대하여 우수한 반복특성을 가진 신축성소재로 대변형 센서소재의 활용에 적합하며 센서의 전극형성 구조에 따라 선형성과 히스테리시스 특성을 결정할 수 있다. 본론의 내용에서는 이러한 대변형 센서의 제작과정 및 기초특성실험의 결과에 대하여 수지 재료의 특성을 중점으로 하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 대변형 스트레인 센서 제작

유연 스트레인 센서의 제작 과정은 크게 5가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로 용매(메틸렌 클로라이드, Methylene Chloride), 수지(실리콘고무, Ecoflex, smooth-on) 및 필러(MWCNT, CM-280, Hanwha Inc)를 혼합하는 과정이다. 두 번째로 소니케이터(Digital Sonifier 250 Cell Disruptor, Branson)를 이용하여 초음파를 이용하여 30 Watt 크기로 30분간 MWCNT 필러들을 분산시킨다. 세 번째는 센서 용액의 점도 조절을 위해 오븐을 이용하여 용매를 증발시키는 과정을 거친다. 이때 용매를 증발시키는 시간은 최종 제작 방법에 필요한 센서 용액의 점도에 따라 다르다. 네 번째는 경화제를 넣고 페이스트 믹서(ARE-310, THINKY)를 이용하여 2,000 RPM의 속도로 2분간 분산 및 혼합하고 2,200 RPM의 속도로 2분간 탈포하는 과정을 거친다. 다섯 번째는 이렇게 제작된 센서 용액을 스프레이로 분사하여 유연 스트레인 센서를 완성하는 과정이다. 본 연구에서는 유연 스트레인 센서를 충전재로 MWCNT 수지로 실리콘고무를

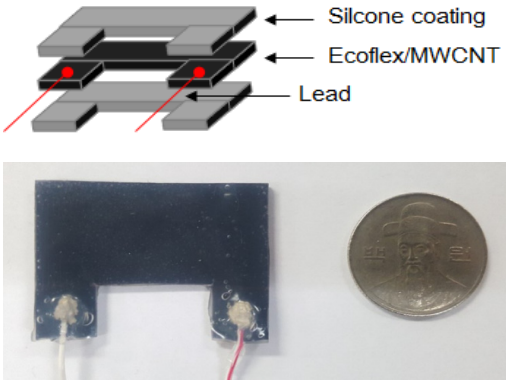

Fig. 1 Experimental carbon nanotube composites large strain sensor for lab test

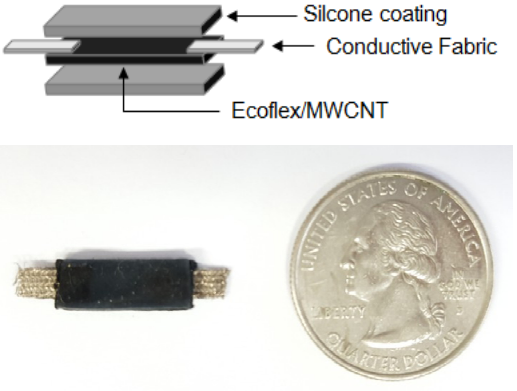

Fig. 2 Experimental carbon nanotube composites large strain sensor for application

이용하여 제작하였다. 복합 재료의 기계적 및 전기적 특성은 전도성 필러의 종류와 제조 방법, 화학 첨가제의 존재에 따라 다양하다.[3] 따라서 적절한 재료와 제조 방법을 신중하게 고려하여야 한다. 제작된 센서는 Fig. 1과 같이 순수 실리콘 고무가 양면을 감싸고 있고, 그 가운데에 나노복합재료가 위치한 샌드위치 구조로 하였으며, 인장시험 시 축 방향으로 인장이 발생하였을 때 전선의 영향을 줄이기 위해 센서의 구조를 'ㄷ'자로 하여 센서의 특성을 시험하였다. 단일층 구조의 센서는 반복적인 인장 및 완화 시 점탄성에 의해 전기적인 성질이 정상적으로 초기 상태로 복귀하지 못하게 된다. 따라서 센서의 히스테리시스 오차가 커지고 반복함에 따라 감도가 매번 바뀌게 되므로 샌드위치 구조의 센서제작으로 외면이 좌굴되는 현상을 감소시키며 센서층의 복귀를 도와주는 보조층 역할을 하여 앞서 단일층 구조 센서에서 발생하는 문제를 해결할 수 있다. Fig. 1과 같이 제작된 유연 스트레인 센서는 인장이 발생할 때 센서와 전극을 형성하는 부위의 강성차이로 인한 크랙이 발생하여 전극의 접촉저항이 불안정하였다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 센서의 전극 부의 강성차이를 고려하여 Fig. 2와 같이 은이 도금된 유연한 나일론 직물을 활용하여 고 인장에서 센서의 신호안정성을 개선할 수 있다.

2.2 대변형 스트레인 센서 특성 시험

유연 스트레인 센서의 특성실험을 위해 Fig. 3과 같이 구성하였다. 인장 시험기(CT-PPS50, CORETECH)를 이용하여 유연 스트레인 센서에 인장과 인장완화를 주었다. 그후 휘스톤 브릿지(Brige box 5370, San-ei)를 이용하여 출력을 전압으로 변환한 후 엠프와 필터(3382, Krohn-Hite)를 이용하여 증폭 및 필터링을 하였다. 그후 디지털 멀티미터기(34465A, Keysight)를 이용하여 출력 전압을 측정하였다. 또한 디지털 멀티미터기로 유연 스트레인 센서의 출력 저항을 측정하였다. 유연 스트레인 센서의 수지로 실리콘 폴리머를 이용하였기 때문에 센서의 특성이 수지의 점탄성 성질에 많은 영향을 받는다. 물체에 힘을 가하면 그

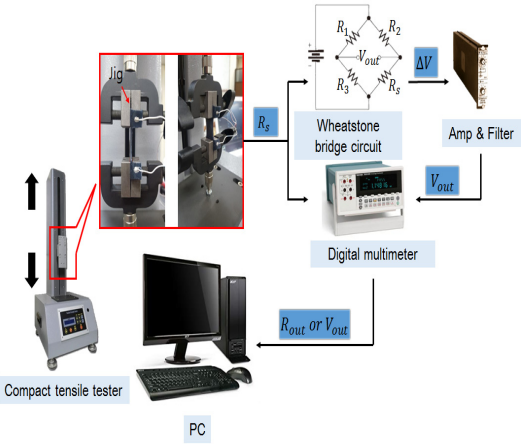

Fig. 3 Experimental setup for sensor characteristics test

내부에는 힘의 크기에 상당하는 응력이 발생한다. 역학적인 측면에서 응력은 물체 변형의 정도를 나타내는 변형률과 상관관계를 맺고 있으며, 이 상관관계는 물체의 재료 물성치를 통해 표현된다. 센서의 특성시험은 유연복합재료의 점탄성 특성에 의한 최대변형률과 영점특성 및 반복특성을 시험하였다.

2.2.1 대변형 센서의 영점 특성 시험

유연 스트레인 센서의 저항변화를 휘스톤 브릿지를 이용하여 전압으로 바꿔준 후 출력전압으로 오실로스코프에서 계측하였고 증폭의 게인은 40 dB이다. 필터는 1 kHz의 저주파 통과필터를 사용하였다. 영점 드리프트의 측정시간은 50초로 실험하였다. Fig. 4의 실험결과 상용 포일 스트레인 게이지의 경우 2 mV의 전압 표준편차를 가지며, 유연 스트레인 센서의 경우 3.2 mV의 전압 표준편차를 가졌다. 상용 포일 스트레인 게이지보다 높은 편차를 가지며 이는 신호가 상용 스트레인 게이지에 비해 다소 불안정하다고 말할 수 있다. 이는 나노소재가 가지는 재료의 불안정성과 실리콘 고무의 점탄성적인 성질 중 의탄성 때문인 것으로 판단된다. 응력성분이 제거되는 데 시간에 의존하기 때문에 충분한 회복시간을 가져야만 안정된 드리프트를 얻을 수 있다.

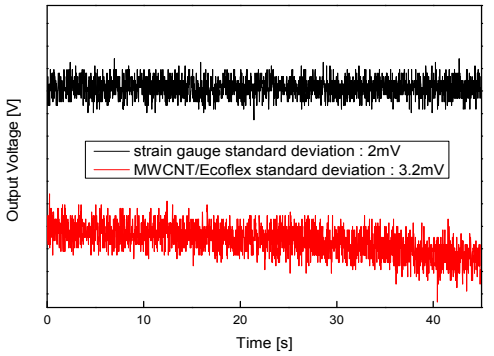

Fig. 4 A characteristic of zero drift compared with conventional strain gauge

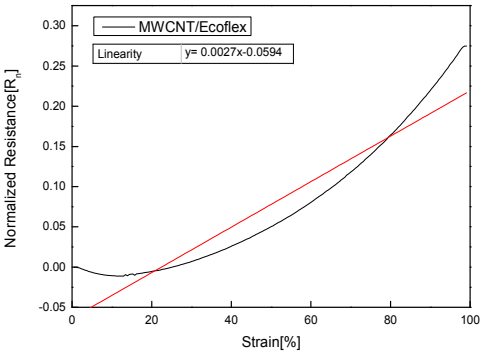

Fig. 5 A characteristic of linearity test

2.2.2 대변형 센서의 선형 특성 시험

유연 스트레인 센서의 근사 직선을 이용하여 직진성의 정도를 나타내는 비직선도를 구한다. 비직선도는 다음의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{비직선도} = \frac{B}{A} \times 100\,\% \tag{1}$$

여기서 B는 출력신호를 나타내는 곡선과 근사 직전 사이의 최대편차이며 A는 센서의 사용범위에서의 정격출력이 된다. 위 수식을 통한 센서의 비직선도는 %FSO(Full Scale Output)으로 나타낼 수 있다. Fig. 5의 유연 스트레인 센서 최대 편차는 50% 스트레인일 때이며 비 직선성의 정도는 약 13.6 %FSO이다. 이는 상용 포일스트레인 게이지의 4.59 %FSO에 비해 약 9.05% 정도 높은 값이다. 이는 유연 스트레인 센서의 수지인 실리콘 고무의 점탄성 성질 때문이다. 점탄성은 응력을 가하면 순간적으로 탄성변형이 발생한 다음 시간에 따라 변화하는 변형, 즉 의탄성 변형이 발생하기 때문에 초기의 변형률과 끝단의 변형률에 대한 출력 값이 응력에 대해서 일정하지 않고 차이가 나기 때문에 비직진성이 높다.

2.2.3 대변형 센서의 고무시편 측정 시험

본 실험에서는 자동차에 적용되는 고무재료에 유연 스트레인 센서를 부착하여 적용 가능성을 확인하기 위하여 고무에 대한 접착성 및 최대 측정 가능 변형률에 대한 센서의 특성을 실험하였다.

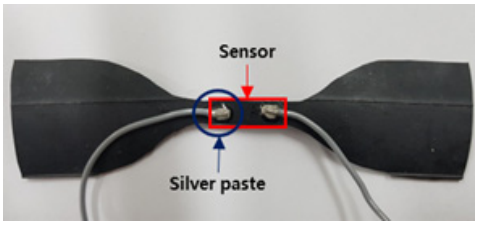

Fig. 6 Flexible strain sensors attached to rubber specimens

실험은 Fig. 6에 도시된 바와 같이 유연 스트레인 센서를 제작된 고무 시편(JIS K-6301 3type 규격)에 실리콘 고무용 접착제(ES-5227, foto polymer)를 이용하여 부착하여 실험하였다. 최대 변형률을 측정하기 위해 Fig. 7과 같은 비접촉방식인 초고속 카메라를 사용하였다. 초고속 카메라는 10 FPS로 촬영을 하여 최대 인장률 60%와 100%에 대하여 표점거리의 4 %/s, 20 %/s로 하여 반복 측정하였다. 고무시편의 측정시험에서는 최대인장 및 완화에 의한 히스테리시스특성에 대하여 시험하였다. Fig. 8에서 시험결과에 대한 결과 그래프를 나타내었다. 유연 스트레인 센서의 등가와 감소 구간 중 가장 큰 히스테리시스 차이를 보이는 변형률 20%에서 감소구간의 하중에 대한 출력 값을 y_1이라고 하고 증가구간의 하중에 대한 출력 값을 y_2라고 정하여 두 구간의 차를 측정하여 유연 스트레인 센서의 히스테리시스 오차를 측정하였다. 측정한 결과 유연 스트레인 센서는 9.1 %FSO의 오차를 보이고 있다. 이는 유연 스트레인 센서재료의 점탄성에 의해 전도성을 구성하는 충전재들이 빠르게 원 상태로 돌아

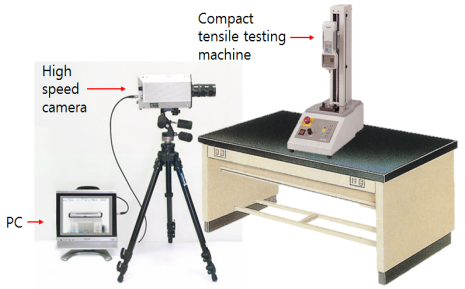

Fig. 7 Experimental setup for maximum strain measurement

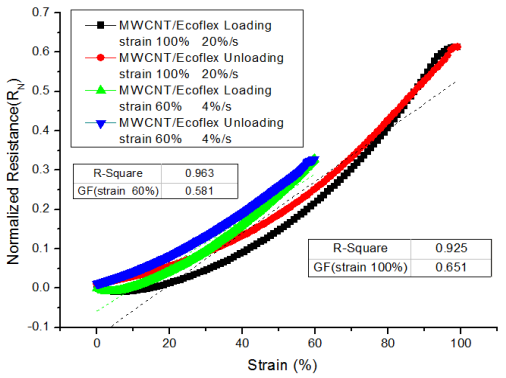

Fig. 8 Piezoresistivity test of the sensors

가지 못하여 발생하는 히스테리시스 오차로 판단할 수 있다. 이러한 히스테리시스는 속도에 인장률 속도에 대해 4 %/s와 20 %/s에 각각 9.1 %FSO, 11.36 %FSO를 가진다. 즉 인장과 인장 완화의 속도가 느릴수록 히스테리시스의 오차가 작아진다. 이는 인장이 완화될 때 재료 내부의 충전재들이 원상태로 돌아가는 회복속도가 존재하기 때문에 인장완화 시간이 길어지면 길어질수록 충분한 회복 시간을 가지게 되기 때문에 빠른 변형에서 큰 히스테리시스 오차를 가지게 되는 것으로 판단할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 실리콘 고무재료 기반의 탄소나노 복합소재 대변형 스트레인 센서의 기초 특성 실험을 수행하였다. 실리콘 기반 재료의 점탄성 성질에 의해 상용 스트레인 게이지와 비교하여 불안정성을 보이지만 재료의 주요특성인 의탄성은 시간에 의존하기 때문에 충분한 회복시간을 가진다면 센서로 활용 가능한 안정된 신호를 얻을 수 있다. 유연 스트레인 센서는 상용 포일 스트레인 센서보다 낮은 감도를 가지지만 높은 최대 측정 가능 변형률을 가지므로 대변형 센서의 특성에 적합할 것으로 판단된다. 유연 스트레인 센서의 선형성 및 히스테리시스는 수지의 재료적인 점탄성 성질인 의탄성과 응력 완화 때문에 이상적인 센서의 조건에 만족하지 못하는 결과가 확인되었다. 따라서 점탄성 성질에 의해 발생하는 비 직진성과 히스테리시스를 보상할 수 있는 보상 알고리즘을 추가 연구할 예정이다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

B. G. Choi; Writing-original draft, I. H. Kang; Methodology. S. Y. Kim; Methodology. I. Kang; Conceptualization, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. C. S. Woo, W. D. Kim and W. S. Kim, 2005, "A Study on the Characteristics and Fatigue Life Evaluation of Rubber Components for Automobile Vehicle", Journal of The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 2, pp. 997-1001.
2. I. P. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov and D. Shi, 2006, "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring", Smart Materials and Structures, Vol. 15, No. 3, pp. 737-748. (https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/3/009)
3. W. Obitayo and T. Liu, 2012, "A review: Carbon nanotube-based piezoresistive strain sensors", Journal of Sensors, Vol. 2012, Article ID 652438, pp. 15-31. (https://doi.org/10.1155/2012/652438)