

다중벽탄소나노튜브의 자기장 분산 기술에 관한 연구

오현우*, 권주역°, 이왕주*, 백승원*

A Study on the Magnetic Dispersion Technology of Multi-Walled Carbon Nanotubes

Hyun-Woo Oh*, Joo-Yeok Kwon°, Wang-Joo Lee*, Seung-Won Baek*

요약

4차 산업혁명은 모든 산업분야에 스마트 센서가 활용되는 것을 의미한다. 최근 스마트 센서는 세라믹 센서에서 폴리머 기반에 탄소나노튜브와 같은 전도성 필러를 첨가한 유연한 센서로 진화하고 있다. 탄소나노튜브는 우수한 전기적 특성과 기계적 특성을 가지고 있다. 하지만 상호 간의 반데르발스 분자 간의 인력으로 인해 발생하는 응집 현상이 상용화에 어려운 이유가 되고 있다. 본 논문에서는 기존의 폴리머 매트릭스 내에서 탄소나노튜브의 반데르발스 응집현상을 극복하고 분산을 개선할 수 있는 자기장 형성 분산 기술을 제안한다. 제안하는 제조 공정은 기존의 탄소나노튜브 분산을 위한 복잡한 방법을 사용하지 않고 단순하면서도 편리한 제조 공정을 적용한다. 자전력과 공전력을 이용하는 PCM(Planetary Centrifugal Mixer) 혼합기에 자기장을 형성하여 줌으로써, 탄소나노튜브의 물리적 특성을 훼손하지 않고 폴리머 내에서 분산이 잘 되도록 한다. 우리는 동일한 탄소나노튜브의 혼합비에서 제안하는 자기장 분산 기술과 기존의 방식에 의해 제작된 센서를 기반으로 압저항 특성을 비교 분석하여 자기장 분산 기술의 우수성을 입증한다.

Key Words : CNT, Dispersion, Magnetic Field, Soft Sensor, Smart Sensor

ABSTRACT

In order to be used in various industrial fields, many types of smart sensors are expected to play a key role in leading the industries 4.0. CNTs(Carbon nanotubes) are attracting attention as versatile materials due to their excellent electrical and mechanical properties. Although CNTs have been studied extensively, it is difficult to control the bundle caused by van der Waals force. Therefore, we have developed a new magnetic field dispersion technique to disperse CNTs and we propose a new process that we applied the technology. The proposed process is simplified and the material cost can be expected to be reduced. A new type of cylindrical sensor was fabricated and tested. Minimizing the surface damage of CNTs by using magnetic dispersion technique was able to maintain the excellent electrical and mechanical properties of CNTs. The data were collected and analyzed from the fabricated sensors and it was confirmed that the application of the magnetic field dispersion technology contributed to dispersion of CNTs.

※ 본 연구는 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터(IITP)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2017-0-00052, “휴먼 감각 감지 및 진단을 위한 초감각 스마트 물리센서 원천 기술/하이브리드 복합체 로드셀 소프트센서 원천기술”)

• First Author : (ORCID:0000-0002-4887-2356)Hyper-connected Basic Technology Research Division, hyunwoo@etri.re.kr, 정희원
° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0430-957X)Hyper-connected Basic Technology Research Division, kgy30849@etri.re.kr, 학생회원

* (ORCID:0000-0001-8861-9446,0000-0002-8337-6091)Hyper-connected Basic Technology Research Division, wjlee@etri.re.kr, bsw30850@etri.re.kr

논문번호 : 201806-0-073-SE, Received May 25, 2018; Revised September 19, 2018; Accepted September 26, 2018

I. 서 론

최근 대두되고 있는 인더스트리 4.0 시대는 매년 1조개 이상의 센서가 생산되는 Trillion 시대가 될 것이다. 과거 가장 많이 사용하던 센서는 금속 센서였으나, 현재에는 실리콘 센서와 세라믹 센서를 많이 사용하고 있다. 하지만 가까운 미래에는 지능형 센서, 즉 스마트센서로써 폴리머와 혼합한 복합체 센서가 중요한 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 특히, 폴리머 복합체를 구성하는 전도성 필러로써, 탄소나노튜브(CNT, Carbon nanotube)는 우수한 전기적 특성과 기계적 특성을 가지고 있어서 센서뿐만 아니라 넓은 산업분야에서 많은 연구가 되고 있다¹⁻⁴⁾.

하지만 이러한 연구에도 불구하고 상용화가 어려운 이유는 상호 간의 반데르발스 분자 간의 인력으로 인해 발생하는 번들(Bundle) 현상 때문이다. 반데르발스(van der Waals) 인력은 서로 응집하여 다발이나 응집체를 형성시켜서 탄소나노튜브의 고유 특성을 저하시키는 단점이 있다. 기존에 걸림돌이 되는 응집현상을 억제하고 분산시키기 위한 분산 기술들이 활발하게 연구되고 있다. 분산 원리에 따라서 분류를 하면 기계적 분산, 물리적 흡착에 의한 분산, 화학적 기재에 의한 분산으로 나뉜다. 구체적으로는 초음파처리, 볼 밀링, 분산제, 계면활성제, 산 처리 등 다양한 방법들이 사용되고 있다. 그렇지만 기존의 분산 기술들은 분산 공정이 너무 복잡하고 처리 과정에서 탄소나노튜브에 손상을 발생시켜 탄소나노튜브의 장점을 잃어버리기 쉽다. 고유 특성을 잃어버린 탄소나노튜브는 센서를 만들기에 더 이상 적합한 재료가 아니다. 따라서 센서로 사용하기 위해서는 탄소나노튜브의 응집체를 분산하면서 동시에 고유 특성의 감소를 최소화 할 수 있는 분산 기술이 필요하다. 탄소나노튜브를 분산시키고 탄소나노튜브의 손상을 최소화하는데 자기장 분산 기술이 하나의 해결책으로 사료되어 연구하였다⁵⁻⁷⁾.

본 논문에서는 기존의 분산 기술들이 가지고 있는 문제점들을 보완하여 제조 효율을 높이기 위한 새로운 자기장 분산 기술을 개발하고 이를 이용한 쉽고 빠른 공정을 제안한다. 제안된 제조공정에 따라 반복적으로 제조공정을 수행하고 제조된 실린더 형태의 센서들을 분석하여 자기장 분산 기술의 재현성과 실현성을 증명한다.

II. 본 론

2.1 기존 탄소나노튜브 분산 기술

2.1.1 기계적 분산

기계적 분산에서는 두 가지 기술이 가장 많이 사용되는 데, 그 가운데 한 가지는 초음파 처리이다. 초음파 처리는 탄소나노튜브의 제조과정에서 같이 생성되는 흑연, 비정질 탄소, 촉매금속 등 많은 불순물들은 탄소나노튜브의 고유 특성을 저하시키고 탄소나노튜브의 표면에 흡착되어 있는 불순물들을 제거하는 데 유용한 기술이다⁸⁾. 다음 볼 밀링은 세라믹 볼과 탄소나노튜브를 넣어서 일정 시간 분쇄를 시켜서 탄소나노튜브의 길이와 직경을 줄일 수 있다. 분쇄 과정에서 탄소나노튜브의 양 끝단 뚜껑을 열어주어 넓은 표면적으로 기체 흡착을 할 수 있도록 한다⁹⁾.

하지만 기계적 분산에 가장 큰 문제점은 서로 번들을 형성하고 있는 탄소나노튜브들을 분산시키기 위해서 인위적으로 힘을 가해서 파괴를 한다는 점이다. 필요 이상으로 파괴를 하면 탄소나노튜브가 휘어지거나 절단되는 등 많은 손상을 발생시키기 때문에 분산력을 높이려다가 고유 특성을 잃어버리기 쉽다¹⁰⁾.

2.1.2 물리적 흡착에 의한 분산

미세한 나노입자를 원하는 형태로 제어한다는 것은 매우 어려운 일이다. 그럼에도 불구하고 다양한 산업분야에서 탄소나노튜브를 활용하기 위해서는 용매를 넣어 용액으로 취급하는 것이 용이하다. 물리적 흡착에 의한 분산 기술은 물리적 힘에 의한 파괴를 줄이고 탄소나노튜브의 표면을 손상시키지 않으며 응집체를 분산시킬 수 있다. 현재까지 물리적 흡착 용매로서 아마이드(Amide) 계열의 용매들이 가장 효율성이 좋다고 알려져 있다.

또 다른 물리적 흡착에 의한 분산 방법으로써 계면활성제를 이용한 분산이 있다. 계면활성제가 탄소나노튜브 표면을 둘러싸서 발생하는 정전기적 반발력으로 번들을 이루려고 하는 반데르발스 인력을 최소화하는 것이다. 계면활성제에 의한 분산도 마찬가지로 탄소나노튜브에 형태나 구조에 직접적으로 관여를 하지 않기 때문에 탄소나노튜브의 고유 특성을 유지하면서 분산을 할 수 있다.

하지만 물리적 흡착에 의한 분산 방법은 다음과 같은 문제점들이 있다. 먼저 용매를 이용한 분산은 시간이 지날수록 불안정해져 다시금 탄소나노튜브들이 번들을 형성한다는 것이고 남아있는 용매를 제거하는

과정에서 시간과 비용이 필요하다. 계면활성제의 경우에는 분산 이후 공정에서 탄소나노튜브와 흡착하고 있는 계면활성제의 제거가 어렵고 최대 분산 농도가 1% 수준이라는 한계점을 가지고 있다¹¹⁾.

2.1.3 화학적 개질에 의한 분산

산 처리는 화학적 개질에 의한 분산 방법 중 대표 주자로 탄소나노튜브의 분산을 위해 표면에 화학적으로 처리된 산 기능을 도입하여 탄소나노튜브와 물 분자와의 인력을 증가시키고, 탄소나노튜브를 음으로 대전시켜서 정전기적 반발력을 유도한다. 응집현상을 유발하는 반데르발스 인력은 탄소나노튜브의 흑연 구조가 가지는 고유의 극성 때문에 발생되며 산 처리 기술은 고유 극성을 약화시켜 분산을 시키면서 침전 현상이 없는 안정된 탄소나노튜브 용액을 얻을 수 있게 한다.

하지만 산 처리는 공정이 매우 복잡하고 높은 속련도를 요구하여 쉽게 사용할 수 없다. 또한 탄소나노튜브의 구조적인 결합이 있으면 그 부분에서 파괴가 잘 발생하고 표면에 도입된 산 기능기에 의해 구조적인 손상을 입게 되기 때문에 탄소나노튜브의 고유 특성을 잃어버린다. 그리고 필요한 산의 구매 비용과 처리 비용이 많이 들어 보편적으로 활용하기가 쉽지 않다¹²⁾.

기존의 분산 기술의 동향과 문제점을 살펴보았다. 이들 분산 기술이 여러 장점을 가지고 있음에도 불구하고 더불어 가지고 있는 문제점을 해결하지 못 하면 탄소나노튜브의 상용화는 여전히 어려운 문제이다. 탄소나노튜브의 분산은 기계적, 물리적 흡착, 화학적 개질 등 여러 방향에서 접근을 하고 있지만 구조의 파괴 또는 변형으로 인해서 탄소나노튜브의 고유 특성을 저하시키는 결과를 가져왔다. 그래서 본 논문에서는 탄소나노튜브 분산에 있어서 손상을 최소화하여 가지고 있는 고유한 특성을 극대화할 수 있는 새로운 자기장 분산 기술을 제안한다.

2.2 기존 자기장 분산 기술

기존 자기장 분산 기술 중 하나는 탄소나노튜브를 분산시키기 위해 자성입자와 자기장을 사용하는 기술이다. 탄소나노튜브에 흡착되어 있는 자성입자는 자기장이 인가되면 자기장 방향으로 인력을 받아 응집체를 형성하고 있던 탄소나노튜브를 분산하는 기술이다. 이 기술을 적용한 연구에서는 탄소나노튜브의 분산과 배향의 움직임을 보기 위해 탄소나노튜브의 표면에 마그네타이트를 라디칼 개시제(Radical Initiators)

로 사용하여 부착시키고 자기장을 인가하여 실험하였다¹³⁾. 또 다른 연구는 카본 파이버에 자성입자인 산화니켈과 산화코발트를 흡착시키고 강한 자기장을 인가하여 분산을 유도하고 카본 파이버들을 자기장의 방향으로 배향시켰다¹⁴⁾. 기존 선행연구에서 자성입자 또는 자성입자가 결합된 탄소나노튜브, 카본 파이버를 자기장에서 분산시키고 자기장 방향으로 배향시켰다. 하지만 기존의 자기장 분산 기술도 인위적으로 자성입자를 부착해야 하는 공정의 어려움이 있고, 탄소나노튜브에 부착되어 있는 자성입자들이 불순물로 작용되어 센서를 만들 때에는 적합한 분산 기술이 아니다. 그래서 탄소나노튜브의 고유 특성을 유지하면서 별도의 자성입자를 부착시키지 않고 탄소나노튜브를 분산할 수 있는 기술을 제안한다.

2.3 새로운 자기장 분산 기술

새로운 자기장 분산 기술은 자성입자 없이 탄소나노튜브를 자기장을 사용해 분산시킴으로써 기존의 자성입자를 부착시키는 과정을 생략하여 공정의 어려움을 해소하고 발생했던 시간과 비용을 줄일 수 있다. 이 기술에 대한 신뢰를 얻기 위해서 이론과 실험을 병행하였다.

이론적으로 증명하기 위해서는 탄소나노튜브를 화학적으로 접근할 필요가 있다. 탄소나노튜브를 이루고 있는 기본 원소는 탄소이다. 탄소는 탄소나노튜브뿐만 아니라 다양한 동소체를 가지고 있다. 흑연, 다이아몬드, 그래핀, 플러렌 등 여러 동소체를 가질 수 있는 이유는 탄소 원자들 사이의 결합 구조 때문이다. 탄소의 전자구조는 1S²-2S²-2P²으로 표현할 수 있고 최외각 전자 수는 4개이다.

탄소 원자들이 모여 결합을 할 때 외각에 있는 S 궤도와 P 궤도가 혼성화(Hybridization)를 통해서 최대 4개의 SP³ 혼성 궤도(Hybrid orbital)를 만들 수 있다. 탄소나노튜브를 이루는 탄소는 그림 1 과 같이 SP² 결합 구조를 가지고 있고 세 개의 SP² 궤도는 주변의 탄소 원자들과 시그마(σ) 결합을 이루어 육각형 고리 구조를 만들게 된다. 그리고 각각 탄소 원자에게 하나씩 남아있는 2P 궤도들은 육각형 고리 위, 아래에 연속적으로 분포하며 파이(π) 결합을 이룬다.

탄소 원자들이 모여 결합을 할 때 외각에 있는 S 궤도와 P 궤도가 혼성화(Hybridization)를 통해서 최대 4개의 SP³ 혼성 궤도(Hybrid orbital)를 만들 수 있다. 탄소나노튜브를 이루는 탄소는 그림 1 과 같이 SP² 결합 구조를 가지고 있고 세 개의 SP² 궤도는 주변의 탄소 원자들과 시그마(σ) 결합을 이루어 육각형 고리

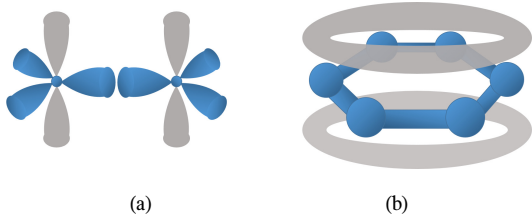


그림 1. (a) 탄소의 SP2 혼성구조, (b) 남은 2P 궤도들의 파이(π) 결합(b)
 Fig. 1. (a) SP2 Hybridization of carbon, (b) π -bond of remaining 2P orbit

구조를 만들게 된다. 그리고 각각 탄소 원자에게 하나씩 남아있는 2P 궤도들은 육각형 고리 위, 아래에 연속적으로 분포하며 파이(π) 결합을 이룬다.

여기서 파이결합을 이루고 있는 2P 궤도들의 전자들은 비편재(Delocalization)되어 특정 탄소나 결합에 국한되지 않고 자유롭게 존재할 수 있다^[15]. 그래서 인위적인 힘, 자기장을 인가하면 자유롭게 존재하고 있는 전자들을 일정한 방향으로 이동시킬 수 있고 탄소나노튜브의 형태에 따라서 전류를 발생시킬 수 있다. 탄소나노튜브에 자기장을 인가하여 유도되는 전자기장을 계산하는 기존 연구가 있다. 이 연구에서 탄소나노튜브의 형태에 따라 결과가 다르게 나왔다. 현재까지 발견된 탄소나노튜브의 형태에는 그림 2와 같이 zigzag, armchair, R-chiral, L-chiral 등이 있지만 오직 chiral형 탄소나노튜브에서만 자기장을 걸었을 때 전류가 유도되었다.

우리는 특정 형태의 탄소나노튜브를 하나의 코일처럼 생각할 수 있고 코일과 마찬가지로 자기장내에서 같은 물리법칙을 따른다고 생각한다^[16]. 따라서 탄소나노튜브에 자기장을 인가하고 탄소나노튜브를 통과

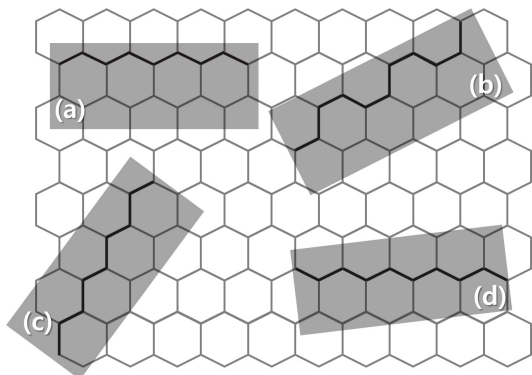


그림 2. (a) Zigzag-CNT, (b) Armchair-CNT, (c) L-chiral-CNT, (d) R-chiral-CNT
 Fig. 2. (a) Zigzag-CNT, (b) Armchair-CNT, (c) L-chiral-CNT, (d) R-chiral-CNT

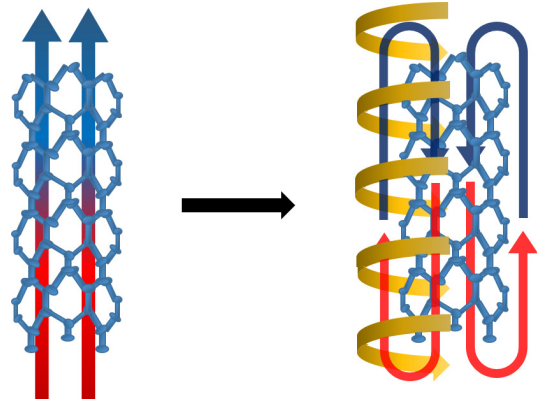


그림 3. (a) 자기장을 받는 탄소나노튜브, (b) 유도된 전류와 자기장의 방향
 Fig. 3. (a) CNT in magnetic field, (b) Direction of induced current and magnetic field

하는 자기력선의 개수와 통과하는 속도를 변화시키면 유도되는 전자기력에 의해서 반데르발스 인력을 극복하고 응집되어 있는 응집체들을 분산시킬 수 있다고 생각한다.

그림 3의 모식도와 같이 자기장이 탄소나노튜브를 통과하게 되면 이를 저항하기 위해서 파이결합에 존재하고 있던 전자들이 이동해 전류를 유도하게 된다. 유도된 전류로부터 탄소나노튜브는 자력을 띄게 되어 인가한 자기장의 방향으로 움직이는 힘이 생겨 응집체로부터 분리되어 분산할 수 있다.

우리는 탄소나노튜브를 분산시키는 기존의 분산 기술들의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 자기장 분산 기술을 고안하고 이를 뒷받침할 수 있는 과학적인 근거를 제시하였다. 새로운 자기장 분산 기술을 적용한 공정을 살펴보기에 앞서서 기존의 센서가 가지는 한계점을 극복할 수 있는 새로운 형태의 센서를 제안하고자 한다.

2.4 새로운 형태(Cylinder type) 센서

센서를 생각하면 박막형 센서를 쉽게 떠올릴 만큼 박막형 센서가 대중화를 이루고 있다. 하지만 박막형 센서가 가지고 있는 한계점이 있어 모든 상황에서 활용이 가능한 것은 아니다. 게다가 최근 다양한 산업분야에서 수요가 증가하고 있으므로 새로운 형태의 센서 개발이 필요하다. 본 논문에서 제안하는 형태는 실린더형 센서이다. 4차 산업혁명 시대에 사람들 생활 속으로 침투하여 데이터를 수집하고 분석하기 위해서는 강도가 강한 실린더 형태의 압저항 센서가 적합하다. 예를 들면 신발, 의자, 방석, 침대 등 실린더 형태의 압저항 센서를 활용할 수 있는 제품들이 무궁무진

하다.

하지만 실린더형 센서를 제작하는 공정이 복잡하고 어려워 상용화가 되지 못하고 있었다. 따라서 본 논문에서는 새로운 자기장 분산 기술을 접목해 실린더 형태 센서를 제작하는 공정을 간소화하고 어려움을 개선시킨 새로운 공정을 제안한다¹⁷⁾.

2.5 제안하는 공정 및 실험방법

새로운 자기장 분산 기술을 적용하기 위해서 탄소나노튜브와 고분자 중합체를 잘 혼합시키고 자기장을 인가하기 용이한 PCM(Planetary Centrifugal Mixer)를 사용하였다. PCM은 원심분리기로 지구를 묘사하여 공전과 자전을 하여 탄소나노튜브에게 많은 위치 변화량을 주어 자기장으로부터 전자기력이 유도되기 쉽게 한다. 동시에 적당한 장입량의 세라믹 볼을 넣어 탄소나노튜브의 길이와 직경을 제어한다. 그리고 그림 4와 같이 강한 자석을 위아래로 배치시켜 시료를 통과하는 자기장을 형성한다. 형성된 자기장의 세기는 용기의 중간지점이 700~1,000 Gauss 가 되게 한다. 탄소나노튜브가 자기장 내에서 운동을 하면 유도되는 전자기력에 의해 분산을 하게 된다.

이러한 새로운 자기장 분산 기술을 적용한 실린더 형태의 압저항 센서의 제작 공정을 제안한다. 새로운 자기장 분산 기술을 접목시킴으로서 기존의 공정을 간소화하고 결과적으로 제조 시간과 재료비를 줄일 수 있다. 또한, 이 공정을 도입하면 실린더 형태의 압저항 센서의 대량생산이 가능하고 낮은 탄소나노튜브 분산 농도에서도 센서를 제작할 수 있다.

우리가 제안하는 공정은 그림 5와 같으며 인위적인 자성입자의 부착을 하지 않고 탄소나노튜브에 자기장을 노출시켜 응집현상을 억제하고 분산을 유도한다.

다중벽탄소나노튜브(MWCNT, Mutli-Walled Carbon

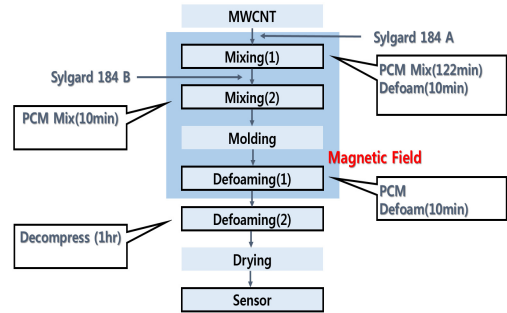


그림 5. 자기장 분산 공정
Fig. 5. Magnetic field dispersion process

Nano Tube)와 고분자 중합체 Polydimethylsiloxane (PDMS, Sylgard 184 A)를 PCM에서 혼합하고 PDMS 경화제(Sylgard 184 B)를 넣어서 경화시킨다. 실린더 형태의 압저항 센서로 제작하기 위해 준비된 틀에 성형하고 발생한 기포를 제거한다. 완전히 기포가 제거되면 완전 건조를 시켜 센서를 완성한다. 실험에서 사용한 다중벽탄소나노튜브(MR99, 카본나노텍)은 Thermal Chemical Vapor Deposition(TCVD) 방법으로 합성되어 직경은 50~300 nm, 길이는 10~30 μm 이며 순도는 95% 이상이다.

제작된 센서의 특성을 알아보기 위해서 그림 6과 같은 환경에서 물성을 평가하였다. 종 방향으로 위, 아래에서 힘을 주고 압력에 따라 변화하는 저항에 따라 준비한 저항에 걸리는 전압이 변화한다. 힘을 600N 까지 증가시켰다가 같은 속도로 힘을 제거하면서 변화하는 데이터를 아두이노(Arduino)로 읽어 랩뷰(Labview)에서 처리를 하였다. 압력을 가하면 실린더 속에 분산되어 있는 탄소나노튜브들 사이의 거리가 가까워져 터널링효과(Tunneling effect)에 의해 전기 전도도가 높아지게 된다. 이러한 원리를 이용해 압저항 센서로 적용하고자 한다.

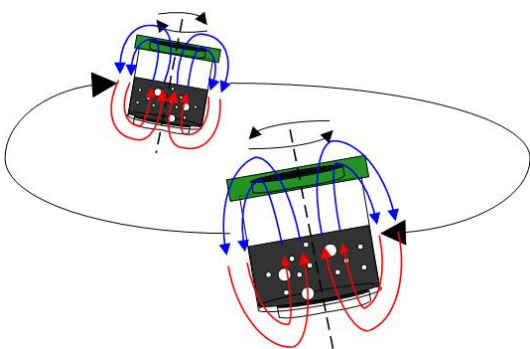


그림 4. (a) 자기장 분산기술의 모식도
Fig. 4. A schematic diagram of magnetic field dispersion technology

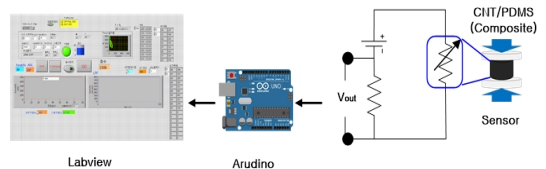


그림 6. 테스트 환경
Fig. 6. Test environment

2.6 실험 결과

제안하는 공정을 따라 제작한 센서의 새로운 자기장 분산 기술의 분산 정도를 알아보기 위해 탄소나노튜브의 분산 농도 0.3wt. % 에서 자기장의 유무를 변

화시키면서 실험하였고 도출된 데이터를 분석하였다. 그림 7은 데이터를 분석한 결과를 정리한 그래프이다.

자기장을 인가했을 때 최저 탄소나노튜브 분산 농도 0.3wt. %에서 측정이 가능한 센서를 얻을 수 있었지만 그 이하의 분산 농도에서는 표면 저항이 높아 측정이 불가하였다. 같은 분산 농도에서 자기장 분산의 영향을 비교하기 위해 자기장을 걸어주지 않은 센서도 만들었다. 자기장 분산 기술을 적용한 센서(그림 7. a)는 압력을 증가시킬수록 센서의 저항이 낮아져 전압이 비례 관계를 가지고 높아지는 것을 확인하였다. 이러한 패턴은 탄소나노튜브들이 자기장내에서 서로 응집하지 않고 분산에 성공해 탄소나노튜브의 전기적 특성을 저하되지 않았음을 증명한다. 뿐만 아니라 이 데이터는 상용화 된 박막 센서가 보여주는 압저항 센서의 전도도 패턴과 일치하고 박막 센서보다 높은 압력에 대해 감지 할 수 있는 물리 센서로 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다.

하지만 자기장 분산 기술을 적용하지 않은 센서(그림 7. b)는 오히려 높은 압력에서 저항이 높아져 전기 전도도가 떨어지는 반비례 관계를 보인다. 이는 제조 과정 중에 탄소나노튜브가 분산되지 못하고 응집하여 센서 내부에서 불균일하게 분포하기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 때문에 같은 조건에서 실험을 반복해서 수행할 때 마다 다른 형태의 패턴과 일정하지 않은 표면저항이 측정되었다.

새로운 자기장 분산 기술을 적용해 제작한 샘플로부터 탄소나노튜브가 자기장내에서 분산되는 것을 확인하고 탄소나노튜브의 우수한 전기적 특성의 저하를 최소화하여 탄소나노튜브의 낮은 분산 농도에서도 실린더형 압저항 센서를 제작할 수 있었다.

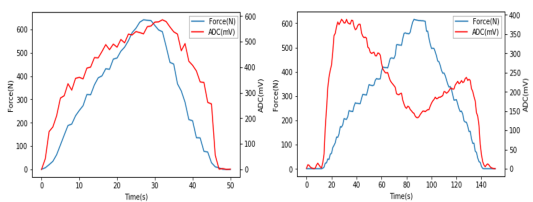


그림 7. (a) CNT(0.3wt%)와 PDMS 자기장 분산, (b) CNT(0.3wt%)와 PDMS 기존 분산
 Fig. 7. (a) CNT(0.3wt%) and PDMS magnetic field dispersion, (b) CNT(0.3wt%) and PDMS existing dispersion

III. 결론 및 향후 연구 방향

새로운 자기장 분산 기술은 탄소나노튜브에 파괴를 유발하거나 화학적 결합을 하여 표면을 손상시키지

않으며, 기존의 분산 방법들 보다 CNT의 고유 특성을 유지할 수 있다. 게다가 기존 자기장 분산 기술에서 사용하였던 자성입자를 사용하지 않음으로써 공정을 간소화하고 제조비용의 절감 효과를 기대 할 수 있다. 본 논문에서 탄소나노튜브를 분산시키기 위한 기존 분산 기술에 대해 알아보고 문제점을 보완할 수 있는 새로운 자기장 기술을 연구하였다. 제한한 공정을 따라 센서를 제작하고 실험데이터를 통해 자기장 내에서 탄소나노튜브의 분산되는 것을 확인하였다.

실험 과정 중에 자기장의 세기에 따라서 분산의 정도가 달라 실험 데이터에도 영향을 받았는데, 일정 크기 이상 자기장을 증가시키면 오히려 분산성이 떨어지는 것을 확인하였다. 향후에 자기장의 세기에 따라 탄소나노튜브의 분산 정도와 배향을 연구하는 것이 필요하다.

References

- [1] Y. H. Kim, "The three major trends of the smart sensor market and trillion sensor age," POSRI issue report, 2018.
- [2] X.-L. Xie, Y.-W. Mai, and X.-P. Zhou, "Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review," *Materials Sci. and Eng.*, vol. 49, no. 4, pp. 89-112, May 2005.
- [3] T. W. Ebbesen, "Carbon nanotubes," *Phys. Today*, vol. 49, pp. 26, 1996.
- [4] A. Thess, et al., "Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes," *Science*, vol. 273, pp. 483-497, 1996.
- [5] J. Liu, M. J. Casavant, M. Cox, D. A. Walyers, P. Boul, Wei Lu, A. J. Rimerberg, K. A. Smith, D. T. Colbert, and R. E. Smalley, "Controlled deposition of individual single-walled carbon nanotubes on chemically functionalized templates," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 303, no. 1-2, pp. 125-129, Apr. 1999.
- [6] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. de Heer, "Carbon nanotubes-the route toward applications," *Science*, vol. 297, no. 5582, pp. 787-792, Aug. 2002.
- [7] X. Li, J. Liang, J. Zhou, J. Luo, Y. Wang, and L. Qi, "Fabrication and characterization of aligned carbon nanotubes cluster reinforced

magnesium composite based on ultrasound/magnetic compound field,” *Procedia Eng.*, vol. 207, pp. 95-100, 2017.

[8] K. B. Shelimov, R. O. Esenaliev, A. G. Rinzler, C. B. Huffman, and R. E. Smalley, “Purification of single-wall carbon nanotubes by ultrasonically assisted filtration,” *Chem. Phys. Lett.*, 282, pp. 429-434, 1998.

[9] N. Pierard, A. Fonseca, Z. Konya, I. Willems, and G. Van Tendeloo, “Production of short carbon nanotubes with open tips by ball milling,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 335, no. 1-2, pp. 1-8, Feb. 2001.

[10] J. Hilding, E. A. Grulke, Z. G. Zhang, and F. Lockwood, “Dispersion of carbon nanotubes in liquids,” *J. Dispersion Sci. and Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 1-41, 2003.

[11] K. D. Ausman, R. Piner, O. Lourie, and R. S. Ruoff, “Organic solvent dispersions of singles-walled carbon nanotubes: Toward solutions of pristine nanotubes,” *J. Phys. Chem.*, vol. 104, no. 38, pp. 8911-8915, 2000.

[12] M. S. P. Shaffer, X. Fan, A. H. Windle, “Dispersion and Packing of Carbon Nanotubes,” *Carbon*, vol. 36, no. 11, pp. 1603-1612, 1998.

[13] F. Stoffelbach, A. Aqil, C. Jerome, R. Jerome, and C. Detrembleur, “An easy and economically viable route for the decoration of carbon nanotubes by magnetic nanoparticles, and their orientation in a magnetic field,” *Chem. Commun.*, vol. 36, pp. 4532-4533, Sept. 2005.

[14] D. Shi, P. He, J. Lian, X. Chaud, S. L. Bud’ko, E. Beaugnon, L. M. Wang, R. C. Ewing, and R. Tournier, “Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties,” *J. Applied Phys.*, vol. 97, Mar. 2005.

[15] F. Simon, H. Kuzmary, B. Náfrádi, T. Fehér, L. Forró, F. Fülöp, A. Jánossy, L. Koreez, A. Rockenbauer, F. Hauke, and A. Hirsch, “Magnetic fullerenes inside single-wall carbon nanotubes,” *Phys. Rev. Lett.*, PRL 97, 136801, 2006.

[16] D. Sebastiani and K. N. Kudin, “Electronic response properties of carbon nanotubes in magnetic fields,” *ACS Nano*, vol. 2, no. 4, pp. 661-668, Apr. 2008.

[17] S. J. Moon, H. W. Oh, W. J. Lee, and J. D. Huh, “Cylindric 3D force sensor using a flexible MCNTs/PDMS composite material,” *ICTC*, pp. 757-759, 2017.

오 현 우 (Hyun-Woo Oh)



1999년 2월 : 아주대학교 정보통신공학부 학사
 2001년 2월 : 아주대학교 정보통신대학원 컴퓨터공학과 석사
 2012년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사
 2001년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 초연결원천연구본부 책임연구원, Project Leader

<관심분야> 소프트웨어, 웨어러블 스마트디바이스, 상황인지 플랫폼, 실감미디어 서비스 플랫폼, Giga Korea 서비스 플랫폼, 홈네트워크 시스템

권 주 역 (Joo-Yeok Kwon)



2018년 8월 : 한양대학교 자원환경공학과 학사
 2018년 9월~현재 : 한양대학교 자원환경공학과 석사과정
 <관심분야> 전자공학, 통신공학, 재료공학

이 왕 주 (Wang-Joo Lee)



1986년 2월 : 서울대학교 물리
학과 학사

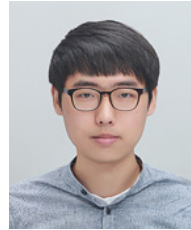
1988년 2월 : KAIST 물리학과
석사

1999년 8월 : KAIST 물리학과
박사

2000년 10월~현재 : 한국전자통
신연구원 초연결원천연구본부 책임연구원

<관심분야> 소프트센서, 극한 전력선 통신, 횡속도
탐지 도플러레이더

백 승 원 (Seung-Won Back)



2013년 3월~현재 : 전북대학교
신소재공학부 학사과정

<관심분야> 전자공학, 통신공
학, 광통신 공학