

# 그래핀 기반 지능형 나노복합소재를 이용한 고감도 임팩트 페인트 센서 개발 연구

## Development of Novel Impact Paint Sensor by Using Graphene based Smart Nano Composite

김 성 용\*·박 세 훈\*·최 경 락\*\*·박 형 기\*\*·강 인 필†  
Sung Yong Kim, Sehoon Park, Gyoung Rak Choi, Hyung-ki Park and Inpil Kang

(Received December 20, 2013 ; Revised March 6, 2014 ; Accepted March 6, 2014)

**Key Words** : Smart Paint(지능형 페인트), Impact Sensor(임팩트 센서), Strain Sensor(스트레인 센서), Graphene(그래핀), Carbon Nano Material(탄소 나노 재료), Smart Material(지능형 재료), Nano Composite(나노 복합재료)

### ABSTRACT

This paper presents a novel impact sensor which can be fabricated with smart paint made of grapheme. This smart nano paint can be easily installed on structures using a spray-on technique and that can make the sensor low cost and practical. The graphene effectively improves the piezor-resistivity of the smart paint and that is available to achieve sensitive impact sensor with high gauge factor. The nano smart-paint can detect sufficient impact to cover the damaged energy range of the composite around 1~3J. The voltage outputs from the sprayed paints show fairly linear responses after signal processing. The impact makes deformation of the structure and it brings change of piezor-resistivity of the paint and those converts into voltage output consequently by means of a simple signal processing system. The nano smart paint is lightweight and easily applied to the structural surface, and there is no stress concentration. The nano smart paint is expected to be a cost effective and sensitive multi-functional sensor for composites and other damage monitoring applications in the field of structural health monitoring.

### 기 호 설 명

$a$  : 외팔보 고정단에서 센서 중심까지의 길이  
 $c$  : 외팔보 두께의 절반  
 $f$  : 센서에 작용한 힘  
 $g$  : 중력 가속도

$h$  : 높이  
 $L$  : 외팔보의 길이  
 $m$  : 추의 질량  
 $R_N$  : 무차원화 된 저항  
 $R_O$  : 무 변형 시 전극의 초기 저항  
 $R_S$  : 변화된 전극의 저항

† Corresponding Author ; Member, Pukyong National University  
E-mail : ipkang@pknu.ac.kr  
Tel : +82-51-629-6167, Fax : +82-51-629-6150  
\* Pukyong National University  
\*\* Manufacturing Automation R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology

# A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2013 Annual Autumn Conference  
‡ Recommended by Editor SungSoo Na  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

$\Delta t$ : 힘이 작용한 시간

$\varepsilon$ : 변형률

## 1. 서 론

현대의 구조물들은 여러 가지 재료들로써 복잡한 형상으로 구성되어 지고 있으며 다양한 외부의 영향으로 손상을 받을 수 있다. 그 중에서도 최근에 항공기 기체와 같은 고기능성 구조물에 많이 사용되고 있는 복합소재의 경우에는 충격으로 인하여 표면에 박리현상이 발생하거나 내부에 균열등과 같은 손상이 발생 되고 있다. 이와 같은 충격 손상은 구조물에 치명적인 결함의 원인이 되어 재해로 이어질 수 있을 뿐만 아니라 기존의 탐지 기법으로는 발견이 어려운 기술적인 한계성도 포함하고 있다. 따라서 충격 감시는 구조물의 건전성 감시(structural health monitoring, SHM) 기술에 중요한 부분이라고 할 수 있다.

우수한 충격감지 시스템을 개발하기 위해서는 충격을 효과적으로 감지할 수 있는 방법을 개발하는 것이 필요하다. 충격에 의한 구조물의 손상을 감지하기 위해 압전센서<sup>(1)</sup>, 가속도계센서, 음향방출 센서 등을 이용한 다양한 방법<sup>(2)</sup>이 적용되어 왔으나 최근 충격에 반응하는 스마트 페인트가 개발되어 구조물의 손상 감지에 활용되고 있다. 스마트 페인트는 현장에서 육안으로 구조물의 손상을 쉽게 확인할 수 있다는 장점이 있으며 구체적인 적용 사례는 다음과 같다. Dynetek Co.는 염료가 들어있는 마이크로캡슐을 페인트와 혼합 시킨 코팅 기술을 개발하고 이를 천연 가스를 연료로 사용하는 버스의 복합소재 연료 탱크에 적용하여 외부 충격에 의한 연료통의 손상과 그 부위를 육안으로 확인할 수 있는 기술을 개발 하였다<sup>(3)</sup>. Luna Innovation Co.은 충격량에 따라서 다른 색상의 마이크로캡슐이 파괴 되어 육안으로 충격량의 정도를 파악 할 수 있어 항공기의 정비 현장에서 사용 할 수 있는 충격 검출 페인트를 개발 하였다<sup>(4)</sup>.

기존에 개발된 스마트 페인트를 이용한 충격 감지 기술의 경우에는 그 대상체가 운행 중에 충격에 의한 손상 여부나 정도를 감지하지 못하므로 운행을 마치고 나서 오프라인(off line)에서 육안으로 손상 발생 여부, 위치 및 정성적인 손상 정도만을 확인

할 수 있다는 기술적인 한계가 있다. 이 연구에서는 이러한 기술적 한계를 극복하기 위하여 그래핀을 이용한 스마트 페인트를 자체 개발하고 스트레인 감도 실험과 충격량 감지실험을 수행함으로써 운행 중 발생하는 충격을 실시간으로 감지하고 정량화 할 수 있는 스마트 센서로서의 기능을 확인하였다.

그래핀(graphene)은 최근에 나노 기술 분야에서 각광을 받고 있는 탄소 나노 재료의 일종으로서 우수한 전기적 성질과 기계적 성질을 지니고 있을 뿐만 아니라 이를 복합소재로 제작 할 경우에는 전왜성(piezoresistivity)을 지녀 감도가 높은 스트레인 센서로 이용 될 수 있다<sup>(5,6)</sup>. 또한 이 연구 방법은 충격 감지를 위한 페인트 형 센서 이므로 분사식 기법으로 대상체에 적용 할 수 있으므로 항공기의 주익과 같은 복잡한 형상의 구조물에 대해서도 쉽게 적용 할 수 있다.

## 2. 스마트 페인트 센서 제작

### 2.1 센서 전극 제작

탄소 나노 재료는 이름에서 알 수 있듯이 일반적으로 수 나노에서 수십 나노미터 크기로 존재하고 있으므로 그 입자들 간에 강한 전기적 결합인 반데르발스(Van der Waals) 힘으로 응집되어 있다. 이러한 응집 현상은 이들 나노 재료를 복합소재화 시키기 위하여 기지재료(matrix)와 혼합시킬 시에 그들만이 응집되어서 기계적 강도와 전도특성을 향상 시킬 수 있는 3차원적 네트워크 구조 형성을 방해한다<sup>(7)</sup>. 따라서 나노소재의 분산은 나노 복합소재 제작에서 가장 중요한 공정 중 하나이다. 이 연구에서는 탄소 나노 재료의 분산을 초음파 분해기(sonicator)를 이용하고 디메틸포름아미드(N,N-dimethyl formamide, DMF)를 용매로 사용하였다. 탄소나노 복합소재 전극들은 그래핀을 충전제(filler)로 사용하고 폴리스티렌(polystyrene, PS)을 기지재료로 이용하여 다음 Fig.1과 같은 자체 개발 공정에 의하여 제작되었다.

나노 충전제(nano filler)인 그래핀이 복합소재 내부에서 전왜성을 발생시키기 위해서는 우수한 전기 전도성이 요구가 된다. 그러므로 이 연구에서는 화학적으로 기능성 처리가 된 그래핀을 이용하지 않고 그라파이트(graphite)를 박리 시킨 H&H사의 제품을

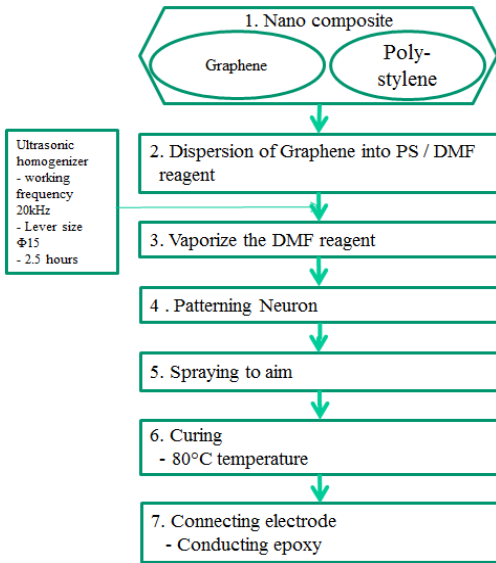


Fig.1 Carbon nano smart paint sensor fabrication process

사용 하였다. 또한, PS을 기지재료로 이용하여 복합 재료 제작을 하였을 경우 경제적인 뿐만 아니라 유연성을 지니도록 하였다. PS와 그래핀이 혼합된 스마트 페인트로 제작되기 위해서는 점도가 낮은 액상 상태로 되어야 혼합이 가능하므로 DMF를 이용하여 이들을 용해 시켰다. 이 혼합액을 초음파 분해기를 이용하여 직접 분산 시킨 후 혼합액이 잘 분사 되도록 용매 증발을 통해 적합한 농도로 조절하였다. 이와 같이 제작된 나노 스마트 페인트를 압축기 (compressor)를 이용하여 목표지점에 분사를 실시한 후 오븐을 이용하여 경화를 실시하였다. 마지막으로 스마트 페인트로 형성된 전극 양 끝에 은에폭시 (silver conductive epoxy, Ted pella Co.)를 이용하여 전선을 연결하여 센서 전극을 제작하였다.

### 2.2 그래핀 복합소재 기반 센서 전극의 모폴로지

그래핀을 충전제로 하는 복합소재전극의 제작공정에서 기지재료 내에서 충전제의 효과적인 분산 확인을 위하여 Fig. 2와 같이 FE-SEM 촬영을 하였다.

그래핀/PS 센서 전극에서 충전제의 총 함량은 3wt%이며, 판상형의 그래핀이 조각(flake) 형상으로 기지재료인 PS 내에 양호하게 분포 되어 있는 모습을 확인 할 수 있었다. 이러한 기지재료 내에서

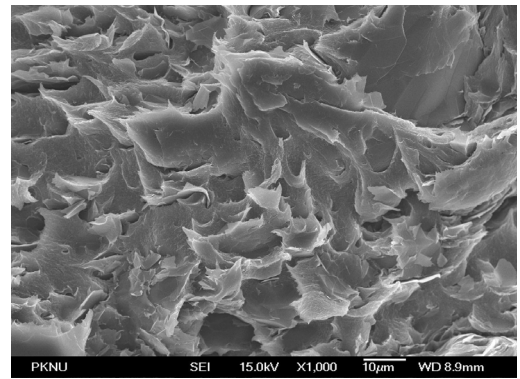


Fig. 2 FE-SEM image of graphene/PS sensor

충전제의 분포는 나노복합소재에 기계적인 변형이 발생할 경우 기지재료에 구속되어 있는 충전제들 간의 전기적인 접촉 조건에 변화를 통한 전왜 특성을 발생시킨다고 추정된다(6,8).

## 3. 그래핀 기반 스마트 페인트 센서 특성 실험

### 3.1 그래핀 기반 복합소재의 스트레인 감도 실험

제작한 스마트 페인트 센서의 스트레인 감도 특성을 확인하기 위하여 Fig. 3과 같이 외팔보의 자유단 처짐을 측정하는 실험을 수행하였다. 클램프(clamp)를 이용하여 고정시킨 외팔보의 고정단 근처에 샘플용 전극을 부착시킨 후 반대쪽 자유단에 하중을 주었다. 하중 인가 시에 외팔보에 발생하는 처짐 변위  $y(L)$ 를 측정한 후 이를 외팔보의 변위와 스트레인의 관계식 (1)을 활용하여 축방향 스트레인으로 환산하였다.

$$\epsilon = \frac{3c(L-a)}{L^3}y(L) \tag{1}$$

각 처짐량으로 인하여 센서 전극에 변형이 발생하게 되면 전왜성에 의해 전기적인 저항의 변화가 발생하게 된다. 이러한 저항의 변화를 멀티미터를 이용해 측정을 한 후에 이를 다음 식 (2)와 같이 무차원화 시켰다.

$$R_N = \frac{R_S - R_O}{R_O} \tag{2}$$

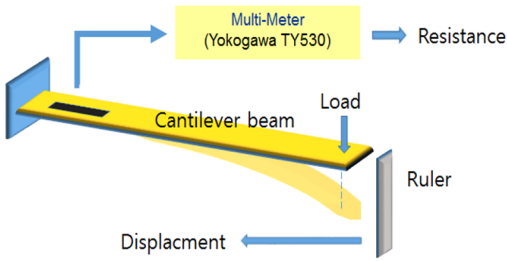


Fig. 3 Schematic diagram of strain sensing experiment

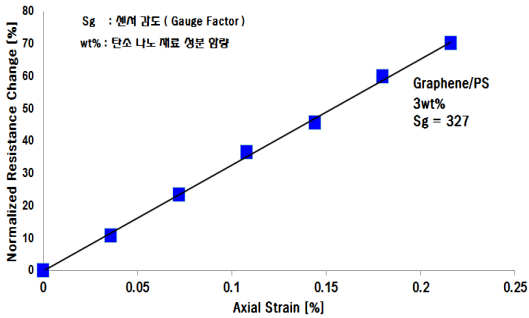


Fig. 4 Graphene/PS(wt 3%) strain experiment

외팔보의 처짐으로 인해 센서 전극에 발생한 변형률과 전기적 저항 변화량의 측정 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

일반적으로 센서의 스트레인 감도(Sg)는 게이지율 (gauge factor)로서 그 크기를 표시하는데 Fig. 4에서 볼 때 직선의 기울기와 같다. 실험결과 그래핀 기반 복합소재 센서의 게이지율은 약 300정도로 추정된다. 탄소 나노 기반의 복합소재는 나노 충전제의 함량 비를 조절함으로써 센서 전극의 스트레인 감도를 조절할 수 있기 때문에 이를 이용하면 충격량 감지 범위의 조절이 가능하다<sup>9)</sup>. 그래핀 기반 스트레인 센서의 감도는 일반적으로 이용되는 포일형 스트레인 게이지율 (2~5)에 비하여 월등하여 충격 감지에 충분히 활용될 수 있을 것으로 예측되었다.

### 3.2 충격 감지 실험

구조물에 발생하는 충격과 같은 물리량은 센서 주변에 스트레인을 발생시켜 센서 전극의 전왜성을 변화시킬 수 있다. 이 연구에서는 이러한 충격량에 의한 전극의 저항 변화를 센서의 출력전압으로 변환시켜 측정하기 위한 시스템을 Fig. 5와 같이 구성하

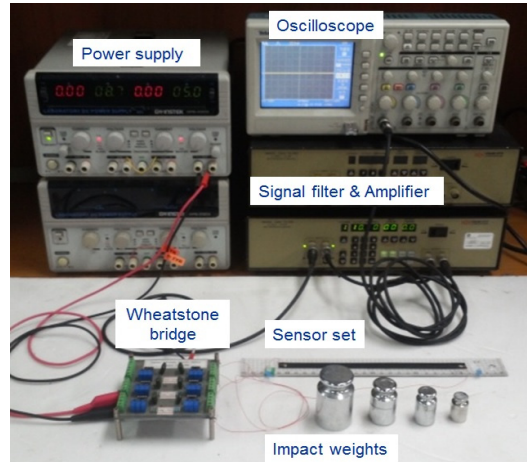


Fig. 5 Impact sensing experimental setup

였다. 센서 전극의 전왜성 변화로 인한 저항 변화를 전압 변화로 변환시키기 위하여 휘스톤 브릿지 회로를 제작 하였다. 휘스톤 브리지의 전압 변화는 미세하므로 앰프와 디지털 필터(Krohn-hite, Model:3382)를 통해 잡음을 걸러낸 후 센서의 출력 신호를 오실로스코프(Tektronix, Model:TDS2014B)에 연결하여 실시간으로 확인 할 수 있도록 구성하였다.

물체의 자유낙하에 의한 충격량은 에너지 보존의 법칙을 이용하여 위치에너지와 운동에너지와의 관계에서 다음 식 (3)과 같이 도출 할 수 있다.

$$f \cdot \Delta t = m \sqrt{2gh} \tag{3}$$

이 연구에서는 구조물에 충격을 인가하기 위하여 각각 0.05 kg, 0.1 kg, 0.2 kg, 0.5 kg 무게의 추들을 1.5 m 높이에서 반복적으로 자유낙하 시킨 후 각각에 해당되는 경우의 센서 출력전압을 측정하였다. 충격에너지에 대한 센서의 출력전압의 한 실험 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 그래핀 기반의 스마트 페인트는 0.07J 이상의 충격 실험에서 우수한 반응 능력을 보였다. 그러나 그 이하의 충격량에 대해서는 낮은 분해능으로 인하여 감도가 떨어 질 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 7은 그래핀 기반 스마트 페인트 센서의 충격량 측정결과이며 각각의 무게 추를 1.5 m 높이에서 10회 자유낙하한 후 센서의 평균 출력전압을 측정 한 평균값을 기록하였다. 이 충격량 감지 실험을 통하여 그래핀 기반 스마트 페인트는 항공기용 복합

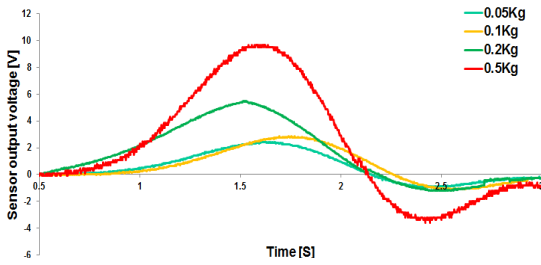


Fig. 6 Output voltages of graphene/PS sensor due to impact on it

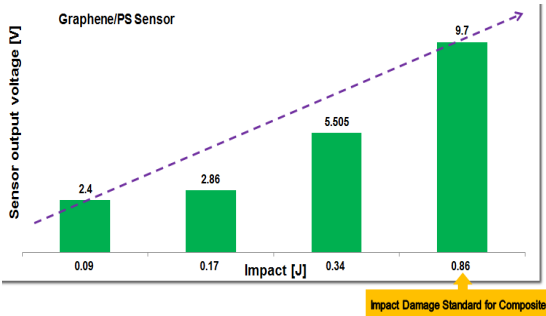


Fig. 7 Graphene based smart paint sensor impact voltage levels

소재의 충격량 감지 기준인 0.8J 보다 더욱 작은 크기의 충격량에도 효과적으로 반응함을 확인할 수 있었다. 또한 센서의 출력전압이 충격량의 크기에 비례하는 선형적인 특성을 보임으로써 새로운 충격용 센서로 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 새로운 SHM 기술로서 충격량을 정량적이면서 실시간으로 감지 할 수 있는 스마트 페인트 개발 연구를 수행 하였다. 스마트 페인트는 높은 감도를 지니기 위하여 그래핀을 충전제로하고 PS를 기지재료로 하여 제작되었다.

스마트 페인트의 충격 감지 성능을 실험하기 위하여 이를 분사 방식을 이용하여 구조물에 도포 시켜 센서 전극으로 제작 하였다. 실험방법에서는 충격량을 센서의 출력전압으로 변화 시켜 계측하기 위하여 간단한 신호처리 시스템을 구성하였으며, 충격 에너지에 대한 해당 출력 전압을 각각 측정 하였다. 그래핀 기반 지능형 나노복합소재는 스트레인 감도

실험에서 게이지 율 300이상의 높은 감도를 보이므로 같은 소재를 이용하는 스마트 페인트는 구조물에 작용하는 충격량에 효과적으로 반응할 것으로 추정 되었다. 따라서 추를 이용한 충격실험에서 그래핀 기반 스마트 페인트는 0.07~1.0J 범위 내의 충격에너지에 대하여 우수한 반응을 보였다. 이러한 실험 결과는 항공기용 복합소재에 요구되는 충격에너지인 0.8J 이상의 측정 정도를 충분히 만족시키는 성능이며 또한 그 반응의 정도에 따른 출력전압이 충격량에 대하여 비교적 선형성을 보이므로 새로운 충격센서로 사용될 수 있음을 보이고 있다.

페인트 형태의 충격센서는 분사식 기법으로 대상체에 적용할 수 있으므로 복잡한 형상의 구조물에 대해서도 쉽게 적용할 수 있다. 그래핀 기반 나노 페인트는 나노 충전제의 함량 비를 조절 등을 통하여 감도의 조절이 가능하며 도포 시에 그 무게가 가벼워 항공기와 같은 적용 구조물에 SHM 시스템의 무게 부담을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 계측시스템의 구성이 간단하여 우수한 경제성을 지닐 수 있다. 따라서 이 연구 결과는 탄소나노재료 기반의 우수한 스트레인 감도를 지닌 스마트 재료의 개발 연구뿐만 아니라 새로운 충격센서 개발과 이를 이용한 효과적인 충격 손상 탐지 시스템의 개발을 가능하게 할 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- (1) Kang., L.-H., 2013, Vibration and Impact Monitoring of a Composite-wing Model Using Piezoelectric Paint, Advanced Composite Materials.
- (2) Choi, K.-S., Choi, Y.-C., Park, J.-H. and Kim, W.-W., 2008, Source Localization Technique for Metallic Impact Source by Using Phase Delay between Different Type Sensors, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 1143~1149.
- (3) George., R., 2005, Develop and Demonstrate

Safety Inspection Methods for NGV Tanks, Gas Technology institute and Battelle AF04-133.

(4) Innovations, L., 2009, Impact Indicator Paint for Composites, Air Force SBIR/STTR Innovation Story.

(5) Zhao, J., He, C., Yang, R., Shi, Z., Cheng, M., Yang, W., Xie, G., Wang, D., Shi, D. and Zhang, G., 2012, Ultra-sensitive Strain Sensors based on Piezoresistive Nanographene Films, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 101, pp. 063112.

(6) Kim, Y.-J., Cha, J. Y., Ham, H., Huh, H., So, D.-S. and Kang, I. P., 2011, Preparation of Piezoresistive Nano Smart Hybrid Material based on Graphene, *Current Applied Physics*, Vol. 11, Issue 1, pp. 350~352.

(7) Kang, I. P. et al, 2006, Introduction to Carbon Nanotube and Nanofiber Smart Materials, *Composites Part B: Engineering*, Vol.37, No6, pp. 382~394.

(8) So, D. S., Seo, J. H., Lee, I. H. and Han, J. H., 2005, R&D Trend and Information Analysis of Dispersion of Carbon Nanotube, *Prospectives of Industrial Chemistry*, Vol. 8, No 5,

(9) Kang, I. P., Schulz, M. J., Kim, J. H., Shanov, V. and Shi, D., 2006, A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring, *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 3, pp. 737~748.



**Sung Yong Kim** received his B.S. degree in mechanical automotive engineering from Pukyong National University, Korea in 2012. Currently he is working on a master's degree course in mechatronics engineering at Pukyong National University. His research interests are nano smart material, nano sensor and structural health monitoring.



**Inpil Kang** received his B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Sungkyunkwan University, Korea in 1991 and 1993, respectively, and a Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of Cincinnati, Ohio, USA in 2005. He is now an associate professor in the Mechanical and Automotive Engineering Department, Pukyong National University, Korea. His research fields are nano smart materials, nano sensor/actuator and structural health monitoring.