

이 글에서는 2차원 탄소나노소재인 그래핀의 응용 분야에 대해서 소개하고자 한다.

2차원 탄소 나노 소재인 그래핀은 원자 하나의 두께를 갖는 신물질로서, 우수한 기계적, 전기적, 열적, 광학적 성질을 갖고 있다. 영률은 1 TPa이고, 강도는 130 GPa이며, 수 천  $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  이상의 전하이동도를 보이고, 수 천  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  이상의 열전도도와 약 97.7%의 투명도를 갖는 것으로 알려져 있다(Nature 2012, Vol 490, pp. 192). 이러한 그래핀의 물성은 다른 어떤 물질보다도 뛰어나서, 다양한 분야에서 활용 가능성이 클 것으로 예상되고 있어 활발한 연구가 진행되고 있다.

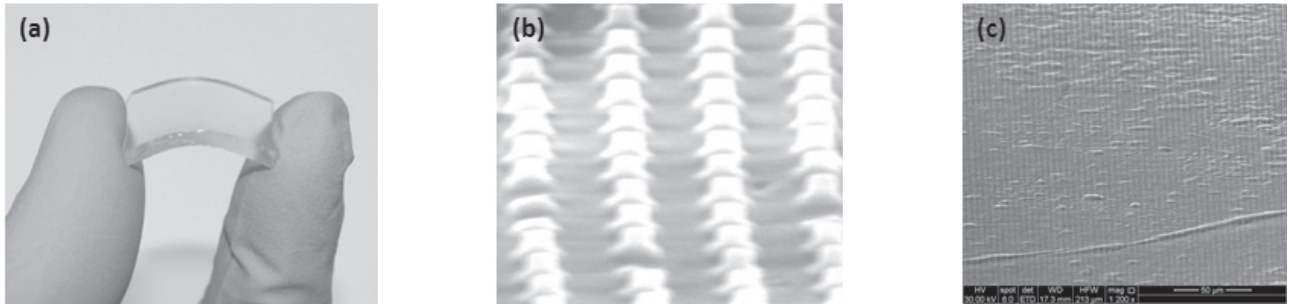
그래핀의 활용 분야로는 투명 전극, 고속 트랜지스터, 에너지 소자의 전극, 가스 센서, 인쇄용 잉크, 가스 배리어, 복합 재료, 방열 소재 등 매우 다양한 분야가 제시되고 있다. 기본적으로 현재까지 알려진 그래핀의 합성 공정은 화학기상증착법(CVD: Chemical Vapor Deposition)과 흑연으로부터 산화/환원 과정을 통해 합성하는 액상분리법(liquid-phase exfoliation)이 있다. 일반적으로, 화학기상증착법은 대면적의 고품질 단일층 그래핀을 합성하기에 용이하며, 액상분리법은 그래핀 플레이크의 크기는 작지만 대량의 그래핀을 합성하기에 용이한 특징이 있다. 두 가지 합성법에 따라서 얻어지는 그래핀의 특성이 다르기 때문에 응용 분야 또한 차별화가 이루어진다. 이 글에서는 이러한 다양한 그래핀 응용 분야 중에서, 그래핀을 이용한 음향 소자와 NEMS(nanoelectromechanical systems) 소자 및 습도 감응 액추에이터에 대해서 소개하고자 한다.

**2차원 탄소나노소재인 그래핀은 기존의 다른 물질을 뛰어 넘는 우수한 물성을 갖고 있는 것으로 알려져, 광범위한 분야에서 다양한 응용 연구가 진행되고 있다.**

### 그래핀 기반 음향 소자

전도체에 교류 전류를 흘려주면, 줄열에 의해 전도체가 주기적으로 가열된다. 이 때, 전도체의 주기적인 가열·냉각을 통해 주변의 공기 분자들도 주기적으로 가열·냉각을 반복하게 되는데, 이러한 공기 분자들의 주기적인 가열·냉각은 공기의 팽창·압축으로 이어져서 음파를 생성하게 된다. 이러한 현상을 열음향 효과(thermoacoustic effect)라고 부른다. 열음향 효과는 이미 100여 년 전에 제안되었지만, 그동안 소재의 제약으로 인해 효과적으로 음파를 생성하기에는 어려움이 있었다.

최근, 나노소재의 활용을 통해서 이러한 열음향 효과를 극대화하고 효율적인 소자로 구현하는 시도가 이어지고 있다. 탄소나노튜브로 이루어진 필름을 이용하여 유연하고 신축성이 있는 열음향 스피커가 개발되어, 기존의 금속 박막을 이용한 열음향 스피커에 비해 크게 개선된 음향 특성을 보여줬다(Nano Lett. 2008, Vol 8, pp. 1530). 특히, 2차원 탄소 소재인 그래핀은 원자 하나의 단일층으로 이루어져 단위면적당 열용량이 매우 낮아 열음향 효과가 뛰어날 것으로 예상된다. 따라서, 그래핀을 이용한 열음향 소자가 소개되고 있는데, 20~100nm 두께의 그래핀 또는 흑연을 종이 위나 다공성의 산화알루미늄 기판에 올려서 열음향 스피커를 구현하기도 하였다(ACS Nano 2010, Vol 5, pp. 4878; Nanoscale 2012, Vol 4, pp. 2272). 한편,



**그림 1** (a) 유연한 그래핀/PDMS 사진: (b) 마이크로 크기의 기둥이 배열된 PDMS 기판의 SEM 사진: (c) 패턴된 PDMS 기판에 전사된 그래핀의 SEM 사진(Copyright: 2012 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.: Adv. Mater. 2012, Vol 24, pp. 6342)

단일층의 그래핀을 PET나 PDMS와 같은 투명한 폴리머 기판에 올려 유연한 열음향 스피커를 구현하였다(Adv. Mater. 2012, Vol 24, pp. 6342). 이러한 그래핀 기반 열음향 스피커는 일반 스피커와는 달리 기계적인 구동 부품이 필요 없는, 매우 단순한 구조를 가지고 있으며, 폭넓은 음역대에서 구동하는 장점이 있다. 그러나, 열음향 소자의 성능을 극대화하기 위해서는 줄열에 의해 생성된 열이 기판으로 전달되어 소실되지 않고, 주변의 공기 분자로 전달되도록 해야 한다. 이를 위해서는 열이 발생하는 소재의 단위 면적당 열용량이 작아야 하고, 소재를 지지하는 기판의 열전도도가 낮아야만 한다. 기판의 열전도도를 낮추는 방법으로 기존의 기판에 패턴을 넣어서 그래핀을 부분적으로 공기 중에 띄우는 방법을 사용할 수 있다(Adv. Mater. 2012, Vol 24, pp. 6342). 실리콘 기판에 마이크로 가공 기술을 이용하여 수  $\mu\text{m}$  직경의 구멍들을 제작하고, 액상의 PDMS 용액을 가공된 실리콘 기판에 부어 경화시킴으로써, 수  $\mu\text{m}$  직경의 기둥이 배열된 PDMS 기판을 제작하였다. 패턴된 PDMS 기판에 CVD 방법으로 합성된 대면적의 그래핀을 건식 전사 기법을 통해 전사하고, 그래핀의 양쪽 끝에 전극을 올려 열음향 스피커를 완성하였다. 실리콘 기판에 패턴된 구멍들 사이의 간격을 조절하여 PDMS 기판 위의 다공성을 조절할 수 있으며, 약 80%의 표면 다공성을 갖는 PDMS 기판을 사용할 경우, 음압이 약 10dB 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

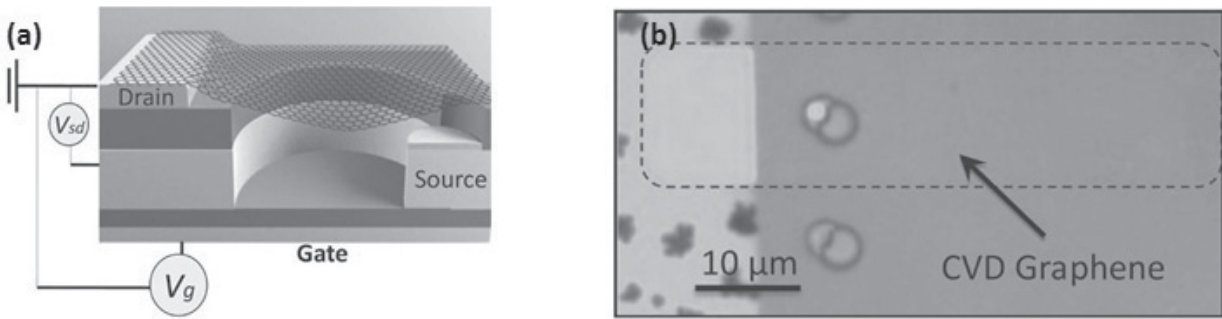
열음향 기반 그래핀 음향 소자와 더불어, 최근에는 정

전기력을 이용한 그래핀 스피커가 보고되었다. 그래핀은 매우 작은 질량 밀도를 갖고 있는 전도체이고, 기계적 강도가 매우 뛰어나서 다이어프램 형태의 정전기 스피커를 제작하기에 용이하다. 특히, 대면적의 다이어프램을 구현함으로써 낮은 음역대에서의 효과적인 스피커를 구현할 수 있는 장점이 있다. 다이어프램 형태의 정전기 그래핀 스피커는 두 개의 다공성 실리콘 기판 사이에 수 mm 직경의 다층 그래핀 필름을 공기 중에 띄워서 제작한다. 두 개의 실리콘 기판을 전극으로 하여 두 전극에 상반된 극성의 전위를 인가하면, 그래핀 다이어프램에 가변 정전기력이 가해져서 진동을 하게 되고, 이러한 기계적 진동을 통해 음파를 생성하게 된다.(Appli. Phys. Lett. 2013, Vol 102, pp. 223109)

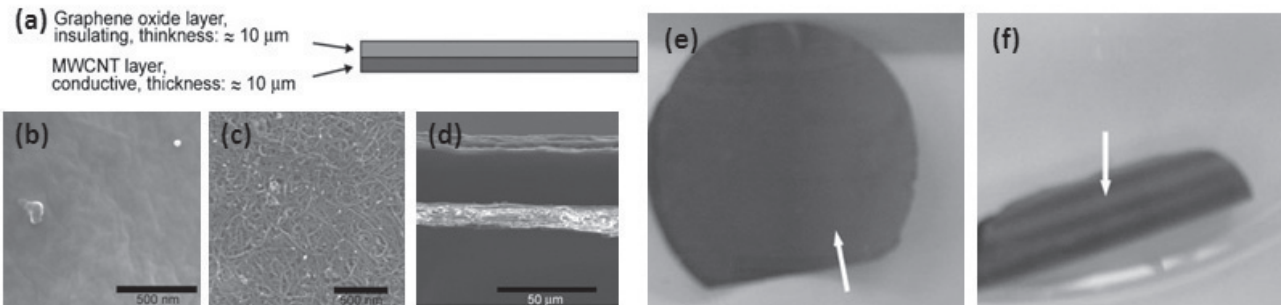
### 그래핀 기반 NEMS 스위치

패턴된 실리콘 기판 위에 단일층의 그래핀을 띄워서 만든 그래핀 멤브레인 구조는 NEMS 소자로 유용하게 이용되는 구조이다. 특히, 이러한 그래핀 멤브레인을 이용한 NEMS 스위치가 보고되었는데, NEMS 스위치는 전력 소모가 적고, on/off 비율이 높으며, 집적도를 높일 수 있는 등의 장점이 있어서 차세대 스위치 소자로 연구가 진행되고 있으며, 기계적·전기적 물성이 우수하고 질량이 작은 그래핀은 멤브레인 소재로 각광받고 있다.

그래핀 NEMS 스위치의 제작을 위해서는 먼저, 마이크



**그림 2** 3-터미널 그래핀 NEMS 스위치: (a) 그래핀 NEMS 스위치의 모식도; (b) 광학 사진(Copyright: 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.; Adv. Mater. 2014, Vol 26, pp. 1571)



**그림 3** 그래핀-탄소나노튜브 액추에이터: (a) 액추에이터 모식도; (b) 그래핀 면 SEM 사진; (c) 탄소나노튜브 면 SEM 사진; (d) 액추에이터의 단면 SEM 사진(위쪽은 탄소나노튜브, 아래쪽은 산화그래핀); (e) 상대습도 49%에서의 액추에이터 사진(화살표는 그래핀 면을 가리킴); (f) 상대습도 90%에서의 액추에이터 사진(화살표는 그래핀 면을 가리킴). (Copyright: 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.; Small 2010, Vol 6, pp. 210)

로 가공 기술을 이용하여 실리콘 기판에 스위치 구조의 패턴을 제작한다. 가공된 스위치 구조에 화학기상증착법으로 합성한 단일층 또는 다층의 그래핀 필름을 전사하게 되는데, 일반적인 습식 전사 공정을 이용할 경우, 물에 의한 모세관 현상으로 그래핀 필름을 떼우기가 어렵게 된다. 따라서, 임계점 건조나 건식 전사와 같은 방법을 통해서 공중에 띄워진 그래핀 멤브레인 구조를 제작하게 된다.

그림 2는 2-터미널과 3-터미널 구동이 가능한 그래핀 NEMS 스위치이다(Adv. Mater. 2014, Vol 26, pp. 1571). 2-터미널 구동의 경우, 소스와 드레인 전극 사이에 전압을 인가하면, 정전기력에 의해서 그래핀 멤브레인이 기계적으로 변형하게 된다. 만약, 정전기력이 충분히 강하게 되면, 그래핀 멤브레인이 소스 전극에 접하여 소스 전극으로 전류가 흐를 수 있게 되어서, 소스-드레인 전류를 측정

할 수 있게 된다. 3-터미널 구동에서는 소스-드레인 전압은 일정하게 유지가 되고, 게이트 전압을 변화시켜 그에 따른 정전기력으로 그래핀 멤브레인을 구동하게 된다. 일반적으로 그래핀 멤브레인은 외팔보나 빔 형태로 만들어 지는데, 이 경우, 그래핀이 손상을 받거나, 구동 중 전극과의 접촉면이 커서 더 이상 스위치 기능을 할 수 없게 된다. 그러나, 그림 2와 같은 원형의 그래핀 멤브레인 구조는 원을 따라서 고정을 할 수 있으며, 개선된 소스 전극 형상을 통해, 그래핀 멤브레인과 소스 전극 사이의 접촉면을 최소화해서 신뢰성 있는 스위치 구동을 구현할 수 있다.

### 그래핀 기반 액추에이터

그래핀 기반 액추에이터의 한 종류로 다중벽 탄소나노

튜브와 결합된 종이 형태의 액추에이터가 보고되었다. 종이 형태의 그래핀 소재는 액상분리법으로 만들어지는데, 흑연 파우더를 강한 산화제를 이용하여 산화그래핀으로 만들어, 물에 분산하고 필터를 통해 층층이 쌓아서 만들게 된다. 이렇게 만들어진 산화그래핀 종이는 영률이 약 40GPa이고 강도가 약 130MPa 정도이며(Nature 2007, Vol 448, pp. 457), 다양한 화학적인 처리를 통해 기계적 물성을 개선할 수 있다.

이러한 산화그래핀을 그림 3과 같이 다중벽 탄소나노튜브와 결합하면 습도에 따라 기계적 거동을 보이는 액추에이터를 제작할 수 있다(Small 2010, Vol 6, pp. 210). 먼저, 탄소나노튜브 용액을 필터를 통해 걸러서 탄소나노튜

브 종이 구조를 만들고, 그 위에 다시 산화그래핀 용액을 걸러 산화그래핀 종이를 만들어 두 개의 층을 갖는 종이 형태의 액추에이터를 간단하게 제작한다.

산화그래핀은 그래핀 표면에 다양한 작용기가 있는 형태로, 친수성 성질을 갖고 있어, 물을 흡수할 수 있다. 반면, 다중벽 탄소나노튜브는 소수성 성질을 갖고 있어, 물을 흡수하지 않게 된다. 두 개의 소재를 결합하면, 산화그래핀은 습도가 높을 때, 물을 흡수해서 부피가 늘게 되고 액추에이터는 탄소나노튜브 쪽으로 감기게 된다. 이러한 그래핀-탄소나노튜브 액추에이터는 기계적 물성뿐만 아니라 전기적 물성도 우수하여 다양한 분야에 응용될 수 있을 것으로 보인다.