Special Thema

그라핀 기반 산화 방지막 특성 연구

홍주리 박사과정, 이상근 박사과정, 한희탁 박사과정, 이태윤 교수 (연세대학교 전기전자공학부)

1. 서 론

그라핀은 2차원의 평면구조를 가지면서 단일 원자층으로 배열되어 있는 0.35 nm 두께의 매우 얇은 물질이다. 그라핀은 탄소원자들이 sp^2 결합에 의한 단단한 벌집모양의 배열을 이루고 있기 때문에 매우 얇은 두께를 가지고 있음에도 불구하고 높은 기계적 강도 (Young's modulus 1,000 GPa, tensile strength 130 GPa)[1]를 가지고 있다. 뿐만 아니라 높은 전하 이동도 (200,000 cm^2/Vs at room temperature)[2], 높은 전기 전도도 (1.0×10^{-6} Ωcm)[3], 우수한 열전도도 (5,300 W/mk)[4], 내화학성, 유연성 및 넓은 비표면적과 같은 우수한 특성을 가지고 있어 투명 전극, 에너지 전극 소재, 초경량 소재, 방열 소재, 차세대 반도체 소재 등의 다양한 분야에서 그라핀 응용 연구를 진행하고 있다.

2008년, 미국 Cornell University의 Paul L. McEuen 연구진은 그림 1에서 보는 것과 같이 헬륨과 같이 작은 기체도 그라핀 단층을 직접 통과할 수 없다는 연구결과를 발표하였다[5]. 이러한 그라핀의 기체 차단 특성 연구가 발표되면서부터 차단 재료 및 산화 방지막 소재로서의 그라핀의 응용 연구가 크게 주목받게 되었다. 그라핀의 비투과 성질은 그림 2에 나타난 것과 같이 그라핀의 격자 구조에서 기인한다. 그라핀을 이루고 있는 탄소 원자 사이의 C-C 결합 길이와 탄소 원자의 반데르왈스 (Van der waals, vdw) 지름을 토대로 그라핀의 이론적 Geometric pore를 계산해보면, 그 값이 0.064 nm임을 알 수 있다. 이 크기는

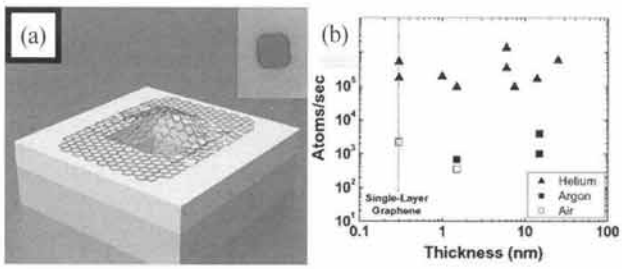

그림 1. (a) 그라핀으로 Sealing된 마이크로 챔버 모식도, (b) 그라핀 층수에 따른 각 기체들의 투과 특성을 나타내는 그래프 [5].

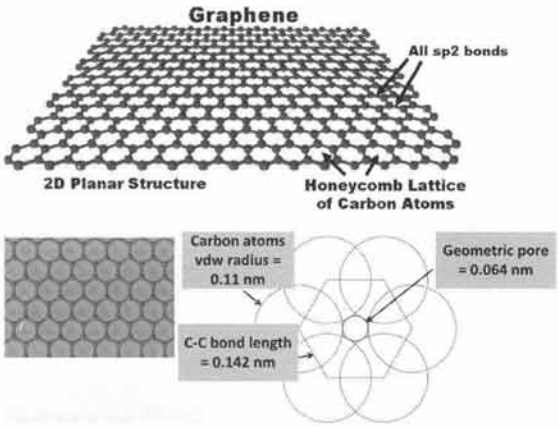

그림 2. 그라핀의 격자 구조 및 그라핀의 이론적 Geometric pore 크기 [6].

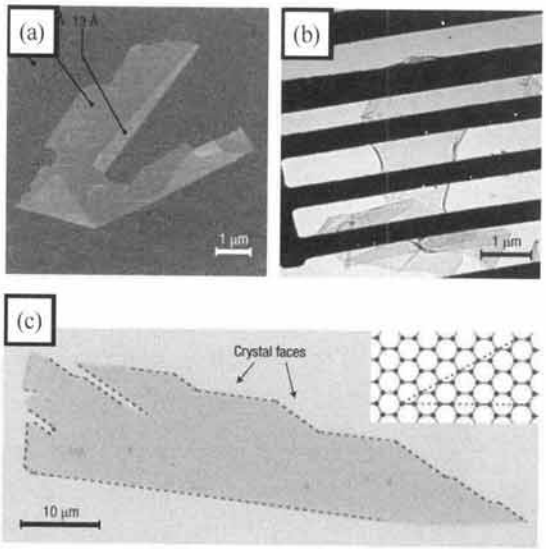

그림 3. 스카치테이프법으로 박리한 한 층의 그라핀 (a) 원자력현미경 이미지, (b) 투과전자현미경 이미지, (c) 주사전자현미경 이미지 [7].

vdw 지름이 각각 0.28 nm, 0.34 nm인 헬륨 및 수소 분자보다 작은 수치로서, 헬륨 및 수소 분자조차 그라핀을 통과할 수 없음을 알 수 있다.

본고에서는 이러한 그라핀의 차단 특성을 이용하여 금속 박막 및 금속 나노 분말의 표면 산화를 방지할 수 있는 그라핀의 방지막 소재로서의 가능성을 주목하여, 원자 한 층의 얇은 두께를 가지고 있으면서도 우수한 전기적, 열적, 화학적, 비투과성 성질을 가지고 있는 그라핀을 이용한 산화 방지막 응용 연구 및 현재의 연구 동향에 대해 살펴보고자 한다.

2. 그라핀 제작 방법

그라핀을 합성하는 방법은 다양하지만 크게 Top-down 방법과 Bottom-up 방법 두 가지로 나눌 수 있다. Top-down 방법은 흑연을 박리하여 그라핀을 얻는 방법으로, 2010년 노벨 물리학상을 수상한 Geim과 Novoselov 교수 연구진이 고안한 스카치테이프법을 이용하여 그라핀 단층을 분리하는 방법 (Mechanical exfoliation)이 이에 해당한다 (그림 3)[7].

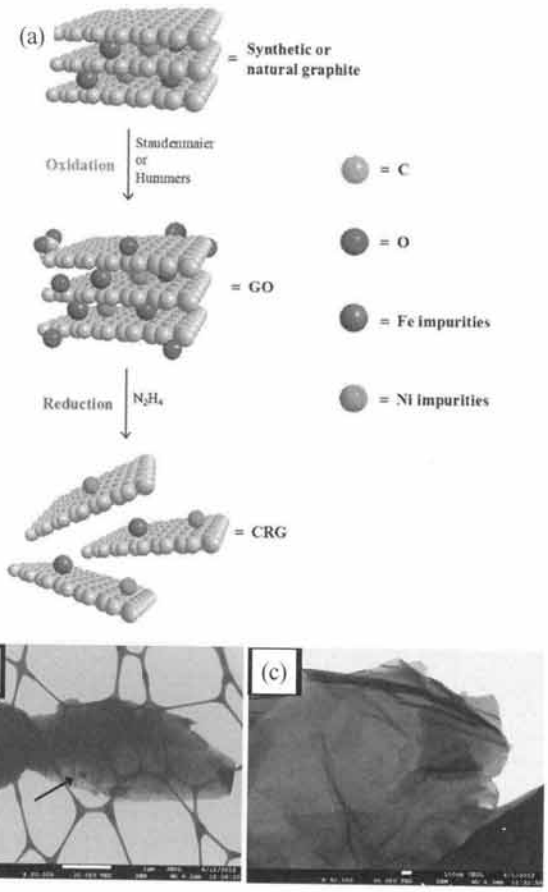

그림 4. (a) Top-down 방법 중의 하나인 화학적 박리방법 과정을 나타내는 모식도, (b) 천연 흑연의 투과전자현미경 사진, (c) 천연 흑연을 산화시킨 후 다시 환원시킨 환원된 그라핀 산화물의 투과전자현미경 사진 [8].

또한, 그림 4에 나타난 것과 같이 용액공정을 통하여 흑연을 산화시키는 경우 그라핀 산화물 (Graphene oxide)이 생성되는데, 이렇게 제작된 그라핀 산화물을 환원 과정을 통해 그라핀으로 복원하는 화학적 박리 방법 (Chemical exfoliation)도 대표적인 Top-down 그라핀 제작법이다 [8].

Bottom-up 방식은 탄소 화합물로부터 탄소 원소를 제공받아 그라핀을 화학적으로 합성하는 방법이다. Bottom-up 방법에는 그림 5에 나타낸 화학기상증착법 (Chemical

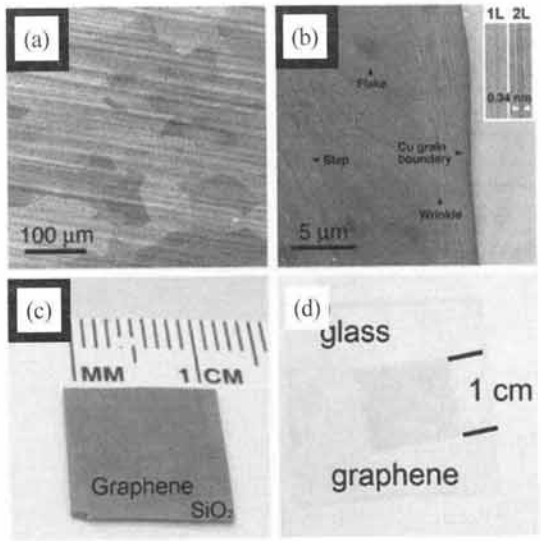

그림 5. (a, b) 화학기상증착법을 이용하여 성장시킨 구리 금속 위 그라핀의 주사전자현미경 사진. (c, d) SiO_2 및 유리 기판위에 전사된 그라핀 [9].

vapor deposition)[9]과 고온 고압의 조건에서 SiC 기판 위에 그라핀을 성장시키는 에피택시 합성법 [10] 등이 있는데, 구리나 니켈 등의 전이금속을 촉매로 탄소화합물로부터 그라핀을 합성하는 화학기상증착법이 균일한 박막 특성을 가지는 대면적 그라핀 합성에 가장 적합한 방법으로 알려져 있다.

그라핀을 산화 방지막으로 사용하는 경우, 그라핀을 합성하는 제작 방법에 따라 그 특성이 현저하게 달라질 수 있다. 먼저, 스카치테이프법을 이용하여 제작한 그라핀은 단결정 (Single grain) 박막이기 때문에 원자나 분자의 확산 방지에 취약한 결정립계 (Grain boundary)가 존재하지 않아 이론적으로 가장 우수한 산화방지막 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 스카치테이프법으로 제작할 수 있는 그라핀의 평균 사이즈는 약 40 μm 정도이기 때문에, 대면적 공정이 사실상 불가능하여, 산업적 목적의 산화 방지막으로 사용할 수 없다. 화학적 박리 방법은 용액 공정을 기반으로 그라핀을 합성하는 방법이기 때문에 추가적인 그라핀 전사 과정이 필요 없고 대량생산이 용이하다. 또한, 저가의 흑연을 원료로 사용하기 때문에 공정비용이 저렴하여 산업화에 적합하다. 하지만 화학적 박리 방법을 통해 그라핀을 합성할 경우, 산화-환원 과정에서 발생한 작용기가 그라핀 표면 위에 남아있기 때문에 그라핀의 전기적 성질이 저하될 수 있다는 단점이 있다. 또한, 화학적 박리 방법으로 제작한 그라핀 조각들을 균일한 박막으로 코팅하는 기술이 추가적으로 필요하기 때문에 개선되어야 할 부분이 많은 실정이다. 현재 다양한 연구진들이 이러한 화학적 박리 방법의 단점을 개선하기 위하여 산화-환원 과정에서 발생한 작용기를 이용하여 그라핀 표면을 화학적으로 기능화 하여 저하된 전기적 특성을 향상시키는 등의 노력을 기울이고 있다.

그라핀을 산화 방지막으로 사용하기 위해서 가장 효과적인 합성 방법으로 주목받고 있는 방법은 화학기상증착법이다. 화학기상증착법을 이용할 경우 화학적 박리 방법과 마찬가지로 대량생산이 가능하고, 그라핀 박막의 전기적 성질 및 박막 균일성이 우수하여 산화 방지막의 필요조건을 충족시킬 수 있다는 장점을 가진다. 또한, 화학적 박리 방법을 이용하여 성장시킨 그라핀보다 우수한 전기전도도를 가진다. 하지만 화학기상증착법을 이용하여 성장시킨 그라핀은 다결정 (Polycrystallin grain) 그라핀 박막으로 성장하기 때문에, 결정립계 (Grain boundary)의 양에 따라 그 특성 변화가 상이할 수 있다.

현재 전 세계적으로 화학기상증착법을 이용하여 큰 결정 크기를 가지는 다결정 그라핀을 제작하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 최근 중국 Nanging university의 Hognlie Shen 연구진은 전이 금속의 표면 연마 및 탄소 공급원의 조절을 통해 그라핀의 핵생성을 제어하는 방법으로 밀리미터 크기의 결정을 가지는 그라핀을 성장시키는데 성공하였다 [11]. 보통 화학기상증착법을 이

용하여 그라핀을 성장시킬 경우, 수~수십 마이크로 크기의 결정을 가지는 다결정 그라핀이 합성되는 것과 비교해 보았을 때, 밀리미터 크기의 결정을 가지는 그라핀을 제작하고, 이를 방지막으로 사용할 경우 매우 효과적인 산화 방지 특성을 보여줄 것으로 예상된다. 실용적 측면에서 화학기상증착법으로 제작된 그라핀이 산화 방지막 소재로 가장 적합하기 때문에 이러한 화학기상증착법 연구의 증가는 우수한 그라핀 산화 방지막 소재를 제작할 수 있는 기틀을 마련해 줄 수 있을 것으로 예상된다.

3. 그라핀 산화 방지막 연구

금속은 산소와 수분에 접촉하게 되면 쉽게 부식되기 때문에, 정제된 금속을 사용하기 위해서는 금속의 표면 보호 코팅이 필수적이다. 금속 표면 코팅 재료로 사용되고 있는 일반적인 물질에는 페인트, 니스, 고분자 물질, 산화층 및 금속 합금 등이 있다. 이러한 금속 표면 코팅 재료는 물과 공기를 차단하여 금속 부식의 원인이 되는 산소와 수분을 차단해 주거나, 보호하고자 하는 금속보다 반응성이 더 큰 물질을 도금하여 표면 부식을 막는 방법을 이용하는 것이 대표적이다. 하지만 이런 부식 방지 기술은 금속 층의 물리적인 특성에 영향을 줄 수 있다. 또한, 부식 방지막의 두께로 인하여 물질 전체의 두께 및 금속의 광학 특성과 외관에 변화를 가져오게 되며, 전기적, 열적 전도도를 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 매우 얇은 보호막을 사용하는 것이 중요하다.

그라핀은 앞서 살펴본 것과 같이 0.34 nm의 매우 얇은 두께를 가지고 있으면서도 모든 분자에 대해 비투과성 성질을 가지고 있기 때문에 우수한 산화 방지막 특성을 보여줄 수 있다. 다양한 그라핀 제작 방법 중 화학적 박리 방법을 이용하여 제작한 그라핀을 이용하여 산화 방지막 특성을 살펴본 연구가 한국 UNIST의 신현석 연구진에 의해 보고되었다 [12]. 신현석 연구진은 그림 6(a)에 나타난 것과 같이 환원된 산화 그라핀이 화학 반응을 통해 양전하 또는 음전하를 띄게 한 후, 층상 자기조립법 (Layer-by-layer assembly)을 이용하여 철과 구리 위에 다층의 그라핀 박막을 형성하였다. 이렇게 형성된 다층의 환원된 그라핀 산화물은 그림 6(b)~(d)에 나타난 것처럼 철과 구리의 산화 방지에 효과적인 역할을 하는 것

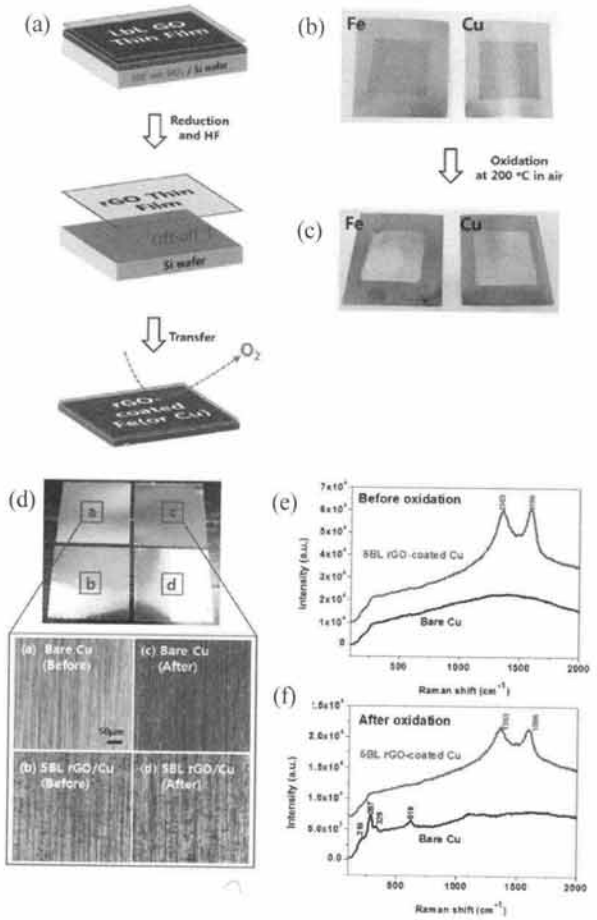

그림 6. (a) 층상 자가 조리법을 이용하여 구리 및 철 표면 위 rGO를 코팅하는 방법을 나타내는 모식도, (b, c, d) rGO 코팅 후 금속의 산화 방지 특성을 보여주는 사진, (e, f) rGO가 코팅된 금속과 코팅하지 않은 금속의 산화 처리 전후 라만 스펙트럼 그래프 [12].

으로 나타났다. 그림 6(e), (f)의 라만 스펙트럼 결과를 살펴보면, 환원된 산화 그라핀이 있는 경우 구리 산화물 피크가 나타나지 않았으며, 이는 환원된 그라핀 산화물이 효과적인 산화 방지막 역할을 할 수 있음을 증명한다.

미국 University of Texas at Austin의 Rodney S. Ruoff 연구진은 화학기상증착법으로 성장시킨 그라핀을 이용하여 구리와 구리-니켈 합금의 산화를 방지할 수 있는 코팅 기술을 연구하였다 [13]. 그림 7은 한 층의 그라핀이 코팅된 Cu 또는 Cu/Ni 금속을 그라핀이 코팅되지 않은 금속과 같은 조건에서 열처리 (대기 중, 200℃, 4시간) 한 후의 금속표면을 관찰한 결과를 보여준다. 그림 7의 (b)와 (c)를 살펴보면, 그라핀을 코팅한 금속의 경우 원래의 금속 표면 색깔이 변화지 않았으며, 이를 통해 금속의 산화반응이 효과적으로 차단되었음을 알 수 있다. Rodney S. Ruoff 연구진은 대기 중에서 산화 반응 전과 후의 금속 표면을 주사전자현미경 이미지와, X선 광전자 분광법 및 라만 스펙트럼 측정 (그림 7(d), (e))을 이용하여 관찰하였으며, 그라핀이 코팅되어 있는 경우, 1000도의 고온에서도 수소가 있는 환경에서 산화층 현성을 방지할 수 있음을 확인하였다. 화학적 박리방법으로 다층의 그라핀 박막을 형성하여 산화 방지막을 제작한 것과 달리 화학기상증착법을 이용하여 제작한 그라핀을 산화 방지막으로 사용할 경우, 한 층의 두께로도 효과적인 산화 방지막 역할을 할 수 있음을 알 수 있다.

이렇듯, 화학기상증착법으로 성장시킨 한 층의 그라핀은 200도에서 4시간 동안의 열처리 환경에서도 구리 및 구리/니켈 합금의 표면 산화 반응을 효과적으로 방지할 수 있지만, 장기간의 열처리 공정이 진행될 경우, 다결정 그라핀의 결정립계의 산화에 의해 산소를 공급하게 되면서 효과적인 산화 방지 특성을 보이지 못하게 된다. 이는 화학기상

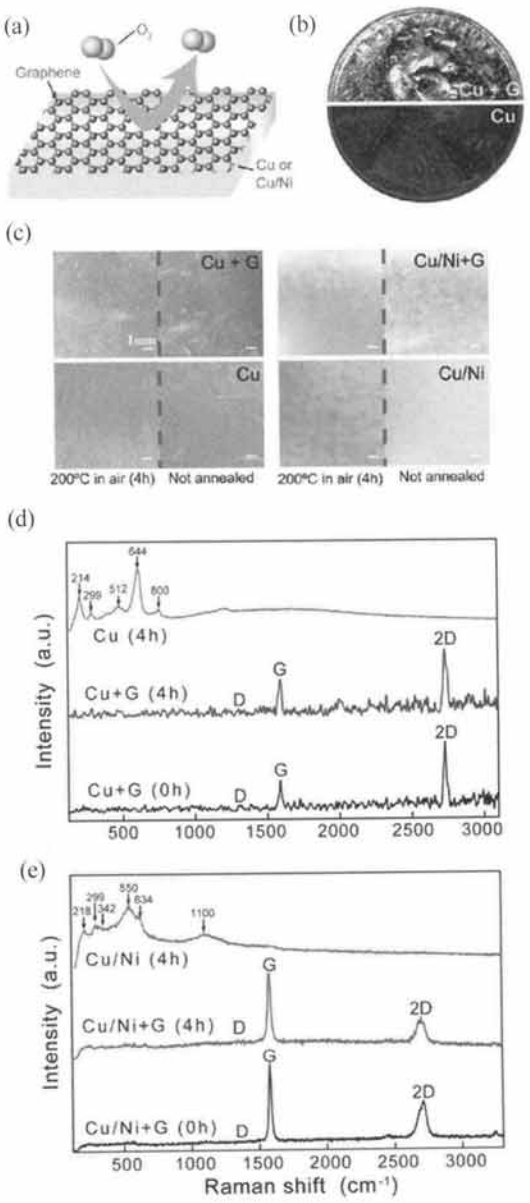

그림 7. (a) 화학기상증착법을 이용하여 제작한 그라핀을 전사하여 구리 및 구리/니켈 합금의 표면 산화 방지막 형성 모식도, (b, c) 그라핀 산화 방지막 형성 후, 방지막 유/무에 따른 산화 진행 과정을 나타내는 광학 이미지, (d, e) 그라핀이 코팅된 금속과 코팅되지 않은 금속의 산화 처리 전후 라만 스펙트럼 그래프 [13].

증착법을 이용하여 그라핀을 성장시킬 때 그라핀 결정의 크기를 최대화하거나 다결정 그라핀이 아닌 단결정 그라핀으로 성장시킬 경우 해결할 수 있는 문제로서, 앞서 살펴보았듯이 보다 향상된 그라핀 성장 기술의 발달

이 필요한 실정이다.

화학기상증착법으로 성장시킨 그라핀의 경우 poly(methyl methacrylate)(PMMA) 물질을 이용하여 원하는 기판에 전사할 수 있는데, 전사를 수차례 진행하여 수 층의 그라핀 방지막을 형성할 수 있다. 그림 8에 나타난 것과 같이 미국 Vanderbilt university의 Kirill I. Bolotin 연구진이 기존의 그라핀 부식 방지 코팅에 대한 증명을 뛰어 넘어, 그라핀의 층수에 따른 부식 방지 정도를 측정하는 연구를 진행하였다 [14]. 순환 전압 전류 측정을 통해 순수한 구리 및 니켈과 그라핀이 코팅된 구리 및 니켈의 부식 속도를 비교하였으며 (그림 8(c)~(e)), 그라핀이 코팅된 경우 구리는 7배, 니켈은 20배 정도로 부식 속도가 현저하게 감소되었음을 알 수 있다. 이는 5배 이상 두꺼운 유기 코팅 물질의 부식속도와 상응하는 결과로서 그라핀을 이용할 경우 얇은 두께로도 우수한 부식 방지 효과를 얻을 수 있음을 나타낸다. 또한, 그라핀을 여러 번 전사하여 수층의 방지막을 형성한 경우, 예상했던 것과 같이 부식 방지 효과가 향상되는 것을 입증하였다.

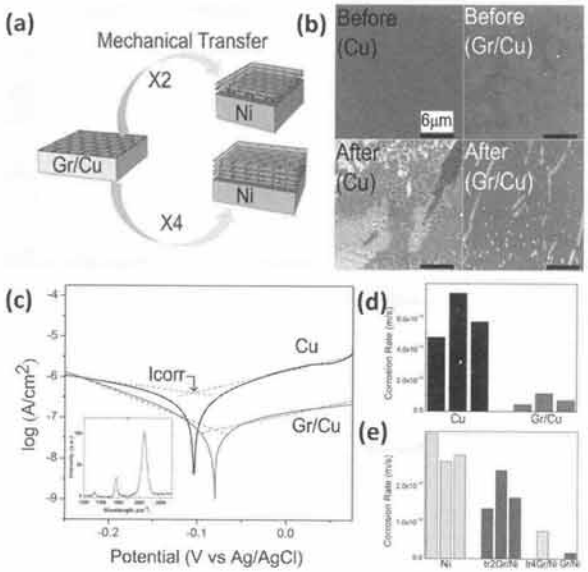

그림 8. (a) 그라핀 전사방법을 통해 수층의 그라핀을 형성하는 방법을 나타내는 모식도, (b) 그라핀 산화 방지막의 유무에 따른 산화 정도를 보여주는 주사전자현미경 이미지, (c) 순환 전압 전류 측정을 통한 순수한 구리와 그라핀이 코팅된 구리의 부식 속도 측정 결과 그래프 (d, e) 그라핀 유무에 따른 금속의 부식 속도 비교 그래프 [14].

그라핀의 우수한 산화 방지막 특성을 이용하여 금속 박막의 표면뿐만 아니라 나노 사이즈의 금속 분말의 산화 및 부식을 방지하는 그라핀 피막 형성 연구도 활발히 진행되고 있다. 다양한 금속 나노 분말 중 구리 나노 분말은 열적, 전기적 전도도가 다른 금속 나노 분말 재료들에 비해 뛰어나고, 가격 경쟁력까지 갖추고 있어 잉크젯 프린팅 기술의 발달과 함께 복잡한 회로를 요구하는 전자기기에 사용되어 왔다. 하지만 구리 나노 분말은 공기에 노출되면 쉽게 산화가 되어 전기 전도도에 심각한 영향을 주기 때문에 구리 나노 분말을 사용하기 위해서는 산화 방지 코팅 기술이 필수적으로 요구된다. 구리 나노 분말의 산화를 방지하기 위해 사용되는 보호막으로는 탄소 계열 물질, 폴리머, 실리카, 금속 등이 있다. 그 중 그라핀을 산화 방지 코팅막으로 사용할 경우 얇은 두께와 우수한 전기전도도 및 내화학적 특성을 가지고 있기 때문에 나노 사이즈의 구리 분말의 성질을 저해하지 않으면서 효과적인 산화 방지막 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

스위스의 Wendelin J Stark 연구진은 그림 9에 나타난 것과 같이 구리와 탄소가 함께 들어있는 전구체 (Precursor)를 이용하여 화염 환원 기법 (Reducing flame technique)으로 구리 나노 분말을 만드는 동시에 구리 나노 분말 위에 약 3 nm 두께의 그라핀 피막을 형성하였다 [15]. 열중량분석 (Thermogravinmetric analysis)를 통해 분석한 결과, 그라핀 피막이 형성된 구리 나노 분말의 경우, 대기 중 165℃에서 열처리를 하여도 산화되지 않음을 확인하였다.

기존의 이러한 구리 나노 분말 위 그라핀 피막 합성법들은 합성과정에서 나노 분말과

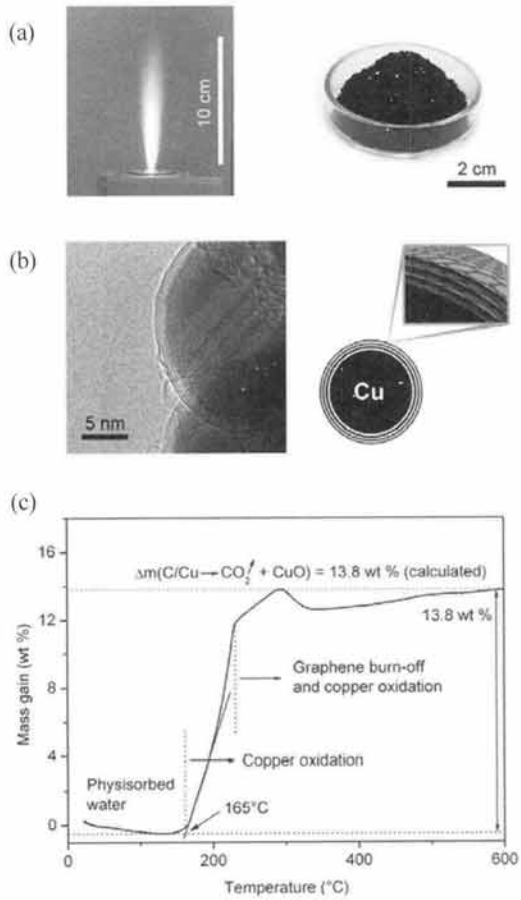

그림 9. (a, b) 화염 환원 기술을 이용하여 그라핀 피막이 형성된 구리 나노 분말 합성 결과를 나타내는 사진 및 투과전자현미경 이미지, (c) 열중량분석을 이용한 구리 나노 분말의 내열성 분석 결과 [15].

그라핀 피막이 동시에 생성되어 나노 분말의 크기를 조절하기 어렵다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 금속 나노 분말의 표면에 그라핀을 직접 형성하는 방법이 필요한데, 기존의 화학기상증착법은 공정온도 (1,000℃)가 금속 나노 분말의 녹는점과 비슷하기 때문에 공정 과정 중 금속 나노 분말이 녹으면서 서로 뭉치는 현상이 발생하여 적용하기 어렵다. 한국 연세대학교 이태윤 연구진은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그라핀 합성 전구체로 사용되고 있는 PMMA 용액을 구리 나노 분말과 혼합하여 열처리하는 기술을 이용하였다. 공정온도가 약 800~900℃임에도 불구하고

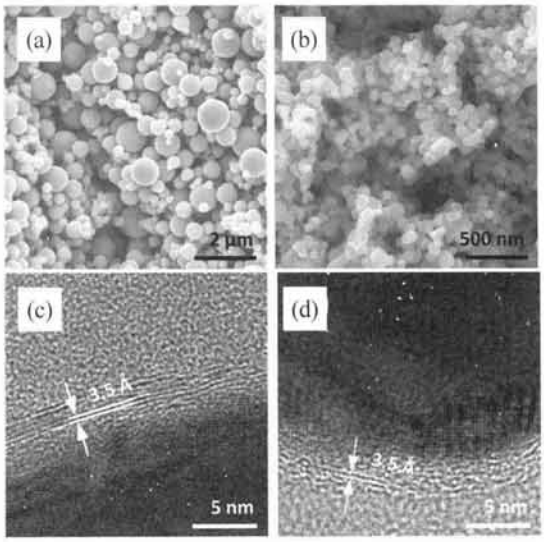

그림 10. PMMA를 열처리하여 그라핀 피막을 형성한 구리 나노 분말의 (a, b) 주사 전자현미경 및 (c, d) 투과전자현미경 사진 [16]

PMMA가 구리 나노 분말을 보호하기 때문에, 구리 나노 분말의 뭉침 현상을 방지하는 동시에 효과적인 그라핀의 탄소 공급원으로 사용되어 양질의 그라핀 피막을 형성할 수 있다 [16]. 그림 10에서 보는 바와 같이 (a), (c) 40~100 nm와 (b,d) 100 nm~1 μm의 크기까지 다양한 크기의 구리 나노 분말 표면에 그라핀을 합성할 수 있다.

이렇게 합성한 구리 나노 분말은 그라핀 피막이 없는 구리 나노 분말 보다 높은 안정성을 띄었다. 기존의 구리 나노 분말은 크기에 따라 100℃ 근처에서 산화되거나, 주변 환경에 따라 상온에서도 쉽게 산화가 되었으나, 그라핀을 합성한 후에는 170℃ 이상에서도 산화가 효과적으로 방지되었음을 그림 11에 나타난 엑스선회절분석을 통해 확인하였다.

합성한 구리 나노 분말의 열적 안정성을 보다 자세히 확인하기 위하여 구리 나노 분말을 스핀 코팅하여 만든 박막의 저항을 온도에 따라 분석한 결과 (그림 12), 약 160℃까지 온도에 의한 저항 변화가 거의 없음을 확인하였고, 이를 통해 구리 나노 분말 위에

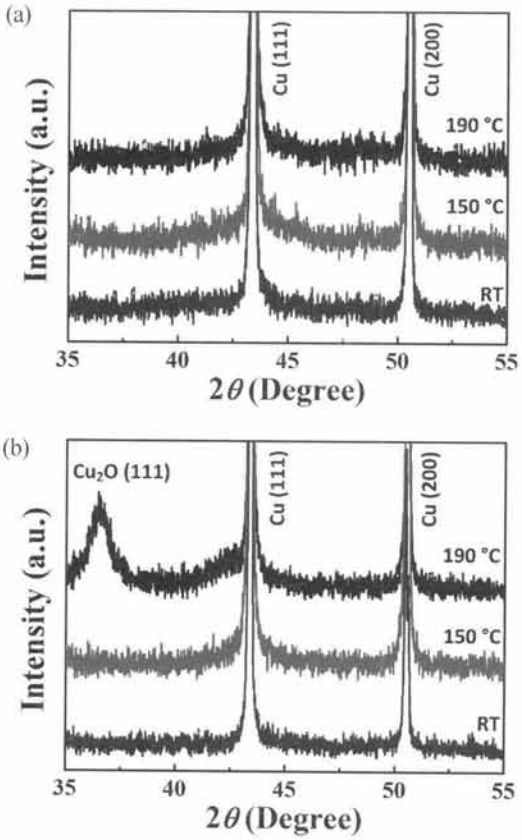

그림 11. (a) 40 nm~100 nm와 (b) 100 nm~1 μm 크기의 구리 나노 분말의 온도에 따른 엑스선회절 분석 결과 [16].

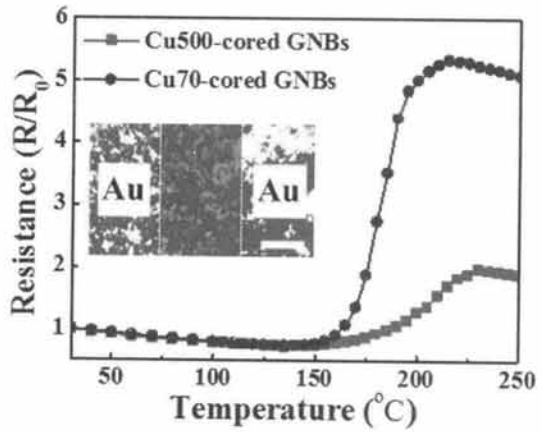

그림 12. 그라핀 피막을 형성한 구리 나노 분말 박막의 열처리 온도에 따른 저항 변화 그래프 [16].

형성된 그라핀이 효과적인 산화 방지막 역할을 하였음을 알 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 다양한 방법으로 합성된 그라핀의 산화 방지막 특성 연구에 대해 살펴보았다. 그라핀은 원자 한 층의 매우 얇은 두께를 가지고 있으면서도 물리적, 기계적, 화학적 성질이 매우 우수하여 다양한 분야에서 각광받고 있다. 그라핀은 합성하는 방식에 따라 그 특성이 조금씩 변화하므로 그라핀을 이용하여 우수한 산화 방지막을 제작하기 위해서는 먼저 용도에 맞는 그라핀 합성 방법을 최적화해야 한다. 다양한 연구 결과를 통해 그라핀이 우수한 산화 방지막 특성을 가지고 있음을 확인하였지만, 아직까지 그라핀의 이론적 특성에 가까운 산화 방지막 특성을 보여준 연구는 존재하지 않기 때문에 보다 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히, 결정립계가 존재하지 않는 화학기상증착법 기반의 그라핀을 성장시킬 수 있다면, 대면적의 우수한 그라핀 산화 방지막을 제작할 수 있을 것으로 보인다. 현재 그라핀은 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 주목받고 있는 차세대 소재로서 산화 방지막 소재 분야에서의 그라핀 연구가 더욱 활발히 진행 될 것으로 예상된다. 또한, 실제 산업에 적용할 수 있는 상용화 연구도 확대되고 있기 때문에 얇으면서도 우수한 비투과 성질을 가지는 산화 방지막 재료의 요구에 부응할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] C. Lee, X. D. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, Science, Vol. 321, p. 5887, 2008.
[2] K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H. L. Stormer, Solid State Commun., Vol. 146, p. 351, 2008.
[3] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V.

Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubbonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, Science, Vol. 306, P. 666, 2004.
[4] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Z. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C. N. Lau, Nano Lett., Vol. 8, p. 902, 2008.
[5] V. Berry, Carbon, Vol. 62, p. 1, 2013
[6] J. S. Bunch, S. S. Verbridge, J. S. Alden, A. M. van der Zande, J. M. Parpia, H. G. Craighead, P. L. McEuen, Nano. Lett., Vol. 8, p. 385, 2008.
[7] A. K. Geim, K. S. Novoselov, Nat. Mater., Vol. 6, p. 183, 2007.
[8] A. Ambrosi, C. K. Chua, B. Kheri, Z. Sofer, R. D. Webster, M. Pumera, PNAS, Vol. 109, p. 12899, 2012.
[9] X. Li, W. Cai, J. An, S. Kim, J. Nah, D. Yang, R. Piner, A. Velamakanni, I. Jung, E. Tutuc, S. K. Banerjee, L. Colombo, R. S. Ruoff, Science, Vol. 324, p. 1312, 2009.
[10] H. Huang, W. Chen, S. Chen, A. T. S. Wee, ACS Nano, Vol. 2, p. 2513, 2008.
[11] T. Wu, G. Ding, H. Shen, H. Wang, L. Sun, D. Jiang, X. Xie, M. Jiang, Adv. Funct. Mater., Vol. 23, p. 198, 2013.
[12] D. Kang, J. Y. Kwon, H. Cho, J. H. Sim, H. S. Hwang, C. S. Kim, Y. J. Kim, R. S. Ruoff, H. S. Shin, ACS Nano, Vol. 6, p. 7763, 2012.
[13] S. Chen, L. Brown, M. Lavendorf, W. Cai, S. Y. Ju, J. Edeworth, X. Li, C. W. Magnuson, A. Velamakanni, R. D. Piner, J. Kang, J. Park, R. S. Ruoff, ACS Nano, Vol. 5, p. 1321, 2011.
[14] D. Prasai, J. C. tuberquia, R. R. Harl, G. K. Jennings, K. I. Bolotin, ACS Nano, Vol. 6, p. 1102, 2012.
[15] N. A. Luechinger, E. K. Athanassiou, W. J. Stark, Nanotechnology, Vol. 19, p. 6, 2008.
[16] S. Lee, J. Hong, J. H. Koo, H. Lee, S. Lee, T. Choi, H. Jung, B. Koo, J. Park, H. Kim, Y. W. Kim, T. Lee, ACS Appl. Mater. Inter., Vol. 5, p. 2432, 2013.

저|자|약|력|

성 명 : 홍주리
◈ 학 력
· 2010년
연세대학교 공과대학
전기전자공학과 공학사
· 현재
연세대학교 대학원
전기전자공학과 박사과정

성 명 : 이상근
◈ 학 력
· 2012년
연세대학교 공과대학
전기전자공학과 공학사
· 현재
연세대학교 대학원
전기전자공학과 박사과정

성 명 : 한희탁
◈ 학 력
· 2011년
연세대학교 공과대학
전기전자공학과 공학사
· 현재
연세대학교 대학원
전기전자공학과 박사과정

성 명 : 이태윤
◈ 학 력
· 1995년
연세대학교 공과대학
금속공학과 공학사
· 1997년
연세대학교 대학원
금속공학과 공학석사
· 2004년
미국 Univ. of Illinois
at Urbana-Champaign
Materials Science &
Engineering Department
공학박사

◈ 경 력
· 2007년 – 현재
연세대학교 전기전자공학과
교수