

## 전사 방법에 따른 그래핀의 물 접촉각 변화

윤민아<sup>1,2</sup> · 김 찬<sup>1,2</sup> · 정현준<sup>3</sup> · 김재현<sup>1,2</sup> · 김광섭<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과  
<sup>2</sup>한국기계연구원 나노융합기계연구본부, <sup>3</sup>과동에너지극한제어연구단

### Water Contact Angles of Graphene Transferred by Wet and Dry Transfer Methods

Min-Ah Yoon<sup>1,2</sup>, Chan Kim<sup>1,2</sup>, Hyun-June Jung<sup>3</sup>, Jae-Hyun Kim<sup>1,2</sup> and Kwang-Seop Kim<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nano-Mechatronics, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113, Korea

<sup>2</sup>Nano-Convergence Mechanical Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM), Daejeon 34103, Korea

<sup>3</sup>Center for Advanced Meta-Materials (CAMM), Daejeon 34103, Korea

(Received February 10, 2018; Revised March 15, 2018; Accepted March 15, 2018)

**Abstract** – Graphene is a monolayer of carbon atoms (approximately 0.34 nm), arranged in a honeycomb network. It has been hailed as a next-generation flexible and transparent material because it has high electrical and thermal conductivities, excellent mechanical properties, as well as flexible and transparent properties. The wettability of graphene alters its adhesion or surface energy, and it is therefore an important parameter influencing its application in the fabrication of next-generation flexible and transparent electronics. Studies on the wettability of graphene are numerous and various opinions exist. However, almost all of these studies use the wet transfer method to transfer the graphene. In this study, therefore, we investigated the effect of wet and dry transfer methods on water contact angles of graphene on a substrate. The contact angles of substrates vary depending on the type of substrate. It was found that after graphene is transferred to the substrate, regardless of transfer method, the graphene/substrate contact angle increases to a value. The contact angle of graphene transferred using the dry transfer method is higher than the contact angle of graphene transferred using wet transfer methods. The wet transferred graphene is affected by the poly(methyl methacrylate) (PMMA) residue and the polar surface of substrate. The dry transferred graphene is influenced by the conformal contact between graphene and substrate.

**Keywords** – contact angles(접촉각), graphene(그래핀), wet transfer(습식 전사), dry transfer(건식 전사)

### 1. 서 론

그래핀은 탄소 원자 한 층(single-atom-thick sheet)이며 그 두께가 0.34 nm로 매우 얇다. 그래핀은 두께가 매우 얇기 때문에 유연하고 투명하며, 높은 전하 이동도 및 뛰어난 열전도도, 훌륭한 기계적 성질(mechanical property) 등의 특성으로 인해 유연하고 투명한 차세대

전자 기기의 핵심 소재로 유망하다[1].

그래핀의 젖음 특성에 따라 그래핀의 표면 에너지나 기판과의 점착 특성이 바뀌기 때문에[2] 차세대 전자 기기의 핵심 소재로 사용하기 위해서는 그래핀의 젖음 성에 대한 연구가 매우 중요하다. 그래핀의 젖음 특성 중 특히 젖음 투과성(wetting transparency)에 대해 다양한 의견이 개진되고 있다[2-6]. 젖음 투과성 현상은 그래핀이 매우 얇기 때문에 나타나는 현상으로, 그래핀이 코팅 되기 전의 샘플의 접촉각과 그래핀이 코팅된 후 그래핀/기판의 접촉각의 차가 10° 이내로 유사한 현상을 말한다[3]. 즉, 그래핀을 기판에 전사하면 그래핀

\*Corresponding author: kskim@kimm.re.kr  
Tel: +82-42-868-7770, Fax: +82-42-868-7884  
http://orcid.org/0000-0003-4939-1973  
© 2018, Korean Tribology Society

이 전사된 기판의 전기 및 열적인 특성은 변화되지만 기판의 접촉각은 유지된다고 보고된 바가 있다[3-4]. Shih 등[3]과 Rafiee 등[4]은 그래핀의 젖음 투과성은 기판의 접촉각에 따라 달라질 수 있음을 보고하였다. 즉, 기판의 접촉각이 30° 보다 크고 90° 보다 작은 기판에 대해서는 젖음 투과성이 나타나지만, 30° 보다 작거나 90° 보다 큰 기판은 젖음 투과성을 보이지 않는다고 보고하였다. 반면, Li 등[5]은 그래핀의 표면은 소수성(hydrophobic) 표면이 아니라 친수성(hydrophilic) 표면이고 그래핀이 소수성 표면인 것처럼 보이는 이유는 공기중에 존재하는 탄화수소(hydrocarbon)의 흡착 때문이며, 탄화수소의 흡착이 그래핀의 표면을 오염시켜 그래핀의 접촉각을 증가시킨다고 보고하였다. Shih 등[6]은 그래핀은 반투명 물질이기 때문에, 그래핀이 기판 위에 전사된 경우 물과 기판 사이에서 작용하는 반 데르 발스(van der Waals) 상호작용이 30% 정도만 그래핀을 투과한다고 보고하였다. 이와 같이 그래핀의 젖음 투과성에 대해서는 아직까지 일치된 결론이 없는 상황이다.

그래핀을 원하는 기판에 전사하는 방법은 두 가지로 건식 전사 방법과 습식 전사 방법이 있다. 두 전사 방법 모두 폴리머를 이용하여 기판에 그래핀을 전사한다는 공통점이 있다. 그러나 습식 전사 방법은 타겟 기판을 이용하여 그래핀을 물에서 직접 떼 올리는 방법이고 건식 전사 방법은 반 데르 발스 상호작용을 통하여 폴리머 필름인 캐리어 필름(carrier film, CF) 위에

있는 그래핀을 기판으로 붙였다가 캐리어 필름을 떼어내는 방법으로 그래핀을 기판에 전사하는 방법이다. 앞서 언급된 그래핀의 젖음 투과성에 대한 연구들은 주로 습식 전사 방법을 통해 연구되었다. 반면, 건식 전사 방법에 따른 그래핀의 젖음 투과성에 대한 연구가 부족한 실정이며, 전사 방법에 따라 그래핀의 젖음 투과성에 대한 비교가 필요하다.

본 연구에서는 건식 전사 방법으로 전사된 그래핀의 물 접촉각에 대해 연구하기 위해 습식 전사 방법으로 전사된 그래핀의 물 접촉각과 비교하여 전사 방법이 전사된 그래핀의 물 접촉각에 어떠한 영향을 미치는지 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 그래핀 샘플 제작

#### 2-1-1. 습식 전사

Fig. 1(a)는 습식 전사 공정을 보여준다. 화학기상증착방법(chemical vapor deposition, CVD)을 통해 구리 포일 위에 합성된 CVD 그래핀의 한쪽 면에 poly(methyl methacrylate) (PMMA)를 스핀 코팅한다. 스핀 코팅한 그래핀의 반대면 그래핀을 O<sub>2</sub> 플라즈마를 이용하여 제거한다. 0.1 M 과황산암모늄 수용액(ammonium persulfate, APS)에 담궈 구리 포일을 에칭(etching)하고 증류수(Deionized water, DI water)에

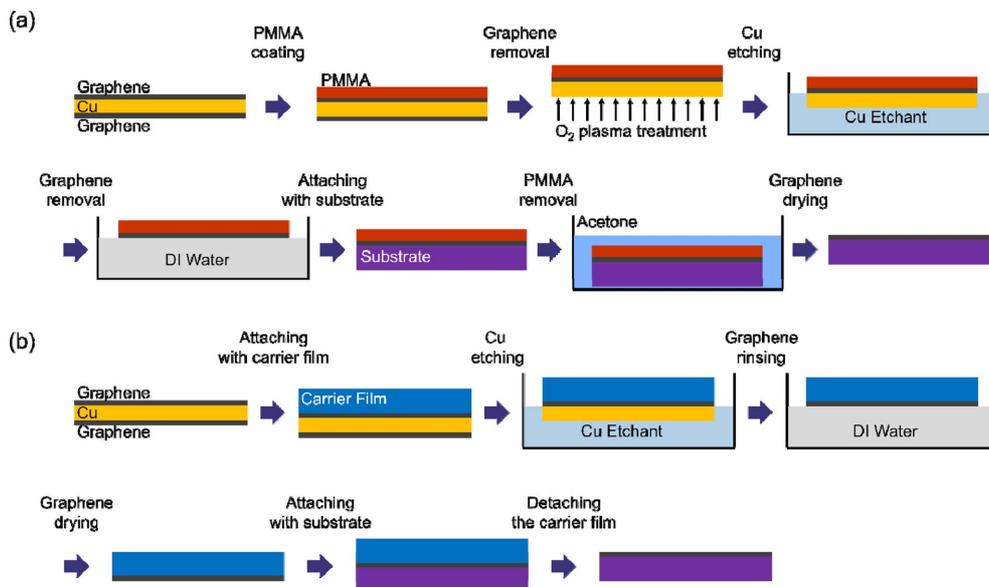


Fig. 1. Schematics of (a) wet and (b) dry transfer methods.

담귀 그래핀 표면에 묻은 과황산암모늄 수용액을 씻어낸다. 타겟 기판으로 PMMA/그래핀 샘플을 건진 후 데시케이터에서 건조시킨다. 마지막으로 아세톤에 담귀 그래핀 표면에 있는 PMMA를 제거한다[7].

### 2-1-2. 건식 전사

Fig. 1(b)는 건식 전사 공정을 보여준다. 화학기상증착방법을 통해 합성된 그래핀을 라미네이터(laminator)를 이용하여 캐리어 필름에 붙인다. 그 후, 과황산암모늄 수용액에 넣어 구리를 에칭한 뒤 증류수에 행군다. 캐리어 필름/그래핀 샘플을 데시케이터에서 건조시킨다. 라미네이터를 이용하여 건조된 캐리어 필름/그래핀 샘플을 원하는 기판에 붙였다가 캐리어 필름을 떼어낸 뒤 기판에 그래핀이 전사된다[8].

### 2.2. 접촉각 측정

접촉각 측정 장비(DSA 100, Kruss, German)를 이용하여 실리콘 웨이퍼( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) 및 primer-polyethylene terephthalate(p-PET), hard coated polyethylene terephthalate(h-PET) 기판의 접촉각과 습식과 건식 전사 방법으로 각 기판에 전사된 그래핀의 접촉각을 측정하였다. 습식 전사 방법으로 기판에 전사된 그래핀의 경우, PMMA 잔여물을 제거한 뒤로부터 5시간 후에 접촉각을 측정하였다. 건식 전사 방법으로 기판에 전사된 그래핀의 경우, 원하는 기판에 그래핀을 전사한 뒤로부터 5시간 이후에 접촉각을 측정하였다. 접촉각 측정에 사용된 용액은 증류수(DI water)이며 각 샘플의 표면에 3  $\mu\text{L}$ 를 떨어뜨려 접촉각을 측정하였다. 측정 시, 샘플 내에서 서로 다른 부분에 3회 이상 용액을 떨어뜨려 접촉각을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 전사된 그래핀의 품질

Fig. 2는 습식과 건식 전사 방법을 이용해 그래핀을  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , p-PET, h-PET 기판에 전사한 후, 기판에 전사된 그래핀을 광학 현미경으로 관찰한 이미지이다. Fig. 2(a)~(c)는 습식 전사 방법으로 각 기판 위에 전사된 그래핀/기판의 이미지로 그래핀 합성 시에 형성되는 2~3층 그래핀 아일랜드(ad-layer) 및 주름(wrinkle)이 관찰된다. Fig. 2(d)~(f)는 건식 전사 방법으로 각 기판 위에 전사된 그래핀 샘플의 이미지를 보여준다.

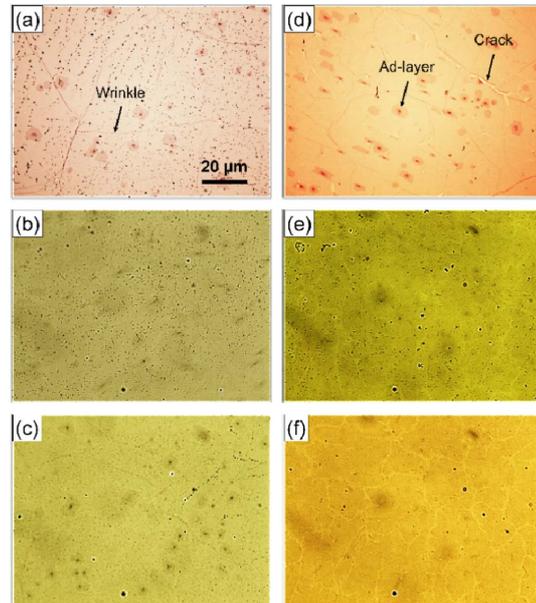


Fig. 2. Optical microscopy image of coated graphene by wet transfer method on (a)  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , (b) p-PET, and (c) h-PET and by dry transfer method on (d)  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , (e) p-PET, and (f) h-PET.

Fig. 2(a)~(c)의 습식 전사 방법으로 전사한 그래핀은 액상 폴리머를 그래핀의 표면에 코팅하기 때문에 그래핀의 표면 형상에 관계없이 폴리머가 그래핀을 컨포멀(conformal)하게 잘 잡고 있으며, 타겟 기판을 이용하여 그래핀을 물에서 떼낸 후 폴리머를 제거하였기 때문에 건식 전사 방법으로 전사한 그래핀에 비해 상대적으로 그래핀의 균열이 적다는 장점이 있다. 그러나 화학적 방법을 이용하여 PMMA를 제거하기 때문에 PMMA의 잔여물이 그래핀 표면에 남아 있을 수 있다는 단점이 있다. 건식 전사 방법으로 전사된 그래핀은 반 데르 발스 상호작용에 의해 캐리어 필름에서 타겟 기판으로 그래핀이 전사되기 때문에 반 데르 발스 힘의 차에 의하여[8-9] 대면적으로 그래핀을 기판에 전사할 수 있는 장점이 있으나, 전사 과정 중에서 그래핀이 쉽게 손상을 입을 수 있다는 단점이 있다. Fig. 2(d)와 같이 건식 전사 방법으로 전사한 그래핀의 표면에 미세한 균열이 존재하나 그 균열의 밀도가 작으므로 접촉각 측정에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

### 3-2. 기판과 전사된 그래핀의 물 접촉각

Fig. 3은 기판의 물 접촉각과 기판에 습식 및 건식

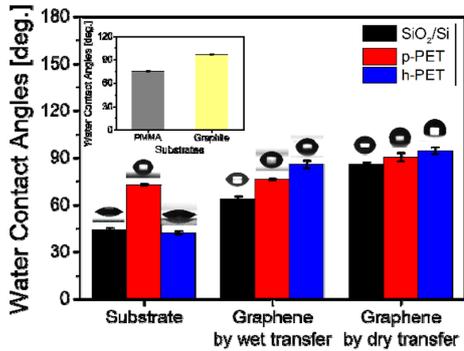


Fig. 3. Water contact angles of substrates and transferred graphene on substrates.

전사방법으로 전사한 그래핀의 물 접촉각을 보여준다. 기판의 물 접촉각을 살펴보면, SiO<sub>2</sub>/Si 및 p-PET, h-PET 기판은 물 접촉각이 44, 72, 42°로 각각 다르다. SiO<sub>2</sub>/Si와 h-PET의 물 접촉각이 p-PET보다 작은 이유는 두 기판 모두 기판 표면에 물 분자와 수소결합을 잘 형성하는 산화층(oxide layer)이 존재하기 때문이다. 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각은 그래핀 전사 공정 중에 그래핀 표면에 남게 되는 잔여물과 기판의 표면 특성에 따라 달라질 수 있다. 특히 기판의 표면 특성이 그래핀의 물 접촉각에 미치는 영향은 대부분 반데르 발스 상호작용에 의한 것으로 그래핀과 기판 사이의 거리에 따라 크게 달라질 수 있다[3]. 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각을 측정된 결과, 기판의 종류 및 전사 방법에 상관없이 그래핀이 없는 기판의 경우보다 물 접촉각이 증가하였다. 동일한 기판에 그래핀이 전사된 경우, 습식 전사 방법으로 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각에 비해 건식 전사 방법으로 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각이 더 큰 것으로 측정되었다. 습식 전사 방법으로 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각은 76±10°로 측정되었는데 습식 전사 방법으로 전사된 그래핀의 표면에는 PMMA 잔여물(약 1.5 nm)이 남아 있기 때문에 PMMA의 물 접촉각(Fig. 3 내부 그래프)과 유사한 값이 측정된 것으로 판단된다. SiO<sub>2</sub>/Si, p-PET, 그리고 h-PET 기판에 습식 전사된 그래핀의 물 접촉각의 오차가 큰 이유는 습식 전사 방법으로 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각은 PMMA 잔여물의 영향이 지배적이지만, 기판의 영향을 완전히 배제할 수 없기 때문이다. 건식 전사 방법으로 그래핀을 SiO<sub>2</sub>/Si, p-PET, h-PET 기판에 전사한 그래핀의 물 접촉각은 86, 91, 95°가 측정되었다. 이는 그래프

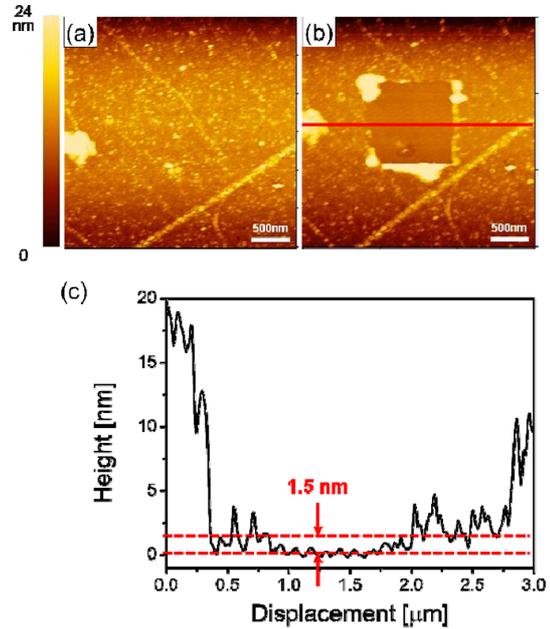


Fig. 4. PMMA residue check (a) before scraped PMMA, (b) after scraped PMMA, and (c) the line profile about red line in (b).

이트의 물 접촉각과 이론적으로 계산한 그래핀의 물 접촉각인 96°와 유사한 수준이다[3].

Fig. 4는 습식 전사된 그래핀 위에 남아있는 PMMA 잔여물을 확인한 이미지이다. Fig. 4(a)-(b)는 각각 원자 힘 현미경(atomic force microscopy, AFM)의 접촉 모드로 샘플을 측정하기 전후에 비 접촉 모드로 샘플을 스캔한 이미지이다. 비 접촉 모드를 이용하여 3 μm × 3 μm 사이즈로 측정된 후(Fig. 4(a)), 비 접촉 모드로 측정된 영역의 가운데 부분을 접촉 모드로 1.6 nN의 힘을 가하여 1 μm × 1 μm 사이즈로 샘플의 표면을 긁어 내었다. 그 후 다시 비 접촉 모드로 스캔해보면 Fig. 4(b)와 같이 측정된다. Fig. 4(c)는 Fig. 4(b)의 빨간 선의 라인 프로파일을 확인한 그래프이다. AFM 팁과 그래핀/SiO<sub>2</sub>/Si 샘플이 접촉했던 부분의 경계에 PMMA 잔여물이 쌓이는 것을 확인하였고, PMMA가 벗겨져 드러난 부분과 그렇지 않은 부분의 단차가 약 1.5 nm 정도 되는 것을 확인하였다. 따라서 습식 전사된 그래핀의 물 접촉각에 대한 PMMA 잔여물의 영향을 배제할 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 5는 기판의 물 접촉각과 그래핀의 물 접촉각의 상관관계를 보여주는 그래프이다. 만약, 그래핀이 전사된 후에 젖음 투과성을 보이는 경우에는 기판의 접촉각

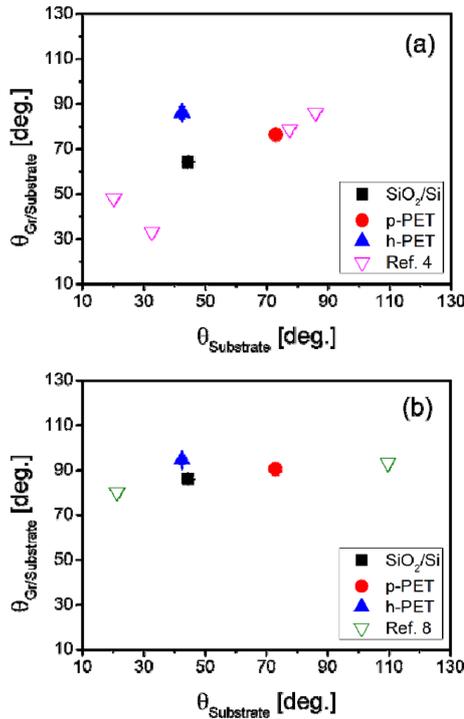


Fig. 5. Water contact angles of (a) wet and (b) dry transferred graphene on substrates as a function of water contact angles of substrates.

과 그래핀이 전사된 기판의 접촉각이 거의 유사하기 때문에 그래프에서 선형적인 관계가 보여진다. Fig. 5(a)는 습식 전사된 그래핀의 물 접촉각 그래프이다. 본 연구 결과는 SiO<sub>2</sub>/Si와 h-PET 기판에 그래핀이 습식 전사되었을 때 그래핀의 물 접촉각과 기판의 물 접촉각이 유사하지 않기에 그래프에서 선형적인 관계가 보이지 않았다. 즉, SiO<sub>2</sub>/Si와 h-PET 기판의 경우 산화층이 있는 기판이기 때문에 기판의 물 접촉각이 30° 보다 크고 90° 보다 작음에도 불구하고 기판에 대한 그래핀의 젖음 투과성이 나타나지 않는다. 반면, p-PET 기판은 표면에 산화층이 존재하지 않기 때문에 전사된 그래핀의 물 접촉각과 기판의 물 접촉각이 유사하며 선형적인 관계에 있음을 알 수 있다. Fig. 5(a)에 추가적으로 표시한 바와 같이 Rafiee 등[4]의 실험 결과에서는 기판의 물 접촉각이 30° 보다 크고 90° 보다 작은 기판에서는 젖음 투과성이 관찰되었으나 산화층이 존재하며 물 접촉각이 30° 보다 작은 SiO<sub>2</sub>/Si 기판의 경우 기판에 대한 그래핀의 젖음 투과성이 나타나지 않았다. 본 연구와 Rafiee 등[4]의 차이는 PMMA의 잔

여물의 존재 유무의 차이로 보여진다. Rafiee 등[4]은 PMMA가 코팅된 그래핀을 아세톤에 담궈 제거한 후 아르곤-수소 가스 환경인 챔버 안에 온도를 가해 PMMA 잔여물을 증발시킨 반면, 본 연구에서는 PMMA가 코팅된 그래핀을 아세톤에 담궈 제거하는 일반적인 습식 전사 방법을 이용하여 그래핀 샘플을 준비하였기 때문에 Fig. 4에서 보여진 것처럼 PMMA가 그래핀 표면에 남아있게 되고, PMMA 잔여물이 습식 전사된 그래핀의 물 접촉각에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 추가적으로 PMMA의 제거를 위해 열처리를 할 경우, 그래핀과 기판이 더 밀착되어 그래핀과 기판 사이의 간격이 더 좁아진다는 연구결과도 있다[10]. 따라서 일반적인 습식 전사의 경우, PMMA의 잔류 유무 및 그래핀과 기판 사이의 밀착 정도(그래핀과 기판 사이의 거리)가 그래핀/기판의 물 접촉각에 영향을 줄 수 있으며, 일반적인 습식 전사 공정으로 제작된 그래핀/기판 샘플의 경우, 물 접촉각 변화에 PMMA 잔여물의 영향이 매우 큰 것으로 판단된다. Fig. 5(b)는 건식 전사 방법으로 전사된 그래핀의 물 접촉각 그래프이다. 기판의 물 접촉각이 30° 보다 크고 90° 보다 작음에도 불구하고, 그래핀의 물 접촉각은 기판에 관계없이 일정한 값인 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Choi 등[8]이 보고한 건식 전사 공정으로 준비된 그래핀 샘플의 물 접촉각과 매우 유사한 결과이며, 이를 통해 건식 전사된 그래핀의 경우 기판에 대한 그래핀의 젖음 투과성이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

전사 방법에 따라 물 접촉각이 달라지는 이유는 물/기판 샘플과 물/그래핀/기판 샘플 사이에 지배적으로 작용하는 상호작용이 변하기 때문이다. 기판의 물 접촉각을 측정할 때는 주로 물과 기판의 수소 결합 또는 반 데르 발스 상호작용이 지배적이며, 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각을 측정할 때는 물-PMMA 잔여물, 물-그래핀, 또는 물-기판 사이의 반 데르 발스 상호작용이 지배적이다[3-4, 9]. 산화층이 없는 기판의 물 접촉각을 측정할 때는 물과 기판의 반 데르 발스 상호작용이 지배적이나, 기판의 표면에 산화층이 있는 경우에는 물 분자와 기판의 산화층이 수소결합을 하기 때문에 수소결합이 지배적이다. 기판에 그래핀이 전사되면 산화층이 있는 기판은 그래핀에 의해 수소결합이 차단되고 이로 인해 수소결합보다 물과 그래핀 또는 물과 기판의 반 데르 발스 상호작용이 지배적이게 된다. 그래서 산화층이 없는 기판은 기판의 물 접촉각과 그래핀이 전사된 기판의 물 접촉각이 유사하나, 산화

층이 존재하는 기판의 경우 기판의 물 접촉각 보다 그래핀이 전사된 기판의 물 접촉각이 더 증가하는 결과가 나타난 것으로 판단된다. 일반적인 습식 전사 방법으로 전사된 그래핀은 그래핀과 기판 사이의 거리가 상대적으로 가까우면서도 불구하고 그래핀의 표면에 PMMA 잔여물이 남아있어 물과 그래핀 또는 물과 기판 사이의 힘이 약해지며 물과 PMMA의 반 데르 발스 상호작용이 지배적이 되므로 PMMA 필름의 물 접촉각과 유사한 물 접촉각이 측정된 것으로 판단된다. 건식 전사된 그래핀은 그래핀과 기판 사이의 거리가 멀어 물과 기판 사이의 힘이 매우 약하며 물과 그래핀 간의 반 데르 발스 상호작용이 지배적이다. 즉, 건식 전사된 그래핀의 물 접촉각이 일정하게 측정된 것은 그래핀의 물 접촉각이 측정되었기 때문이라고 판단된다(Fig. 5(b)). 따라서, 기판과 그래핀 사이의 거리가 가까운 습식 전사된 그래핀도 PMMA 잔여물이 남아 있거나, 산화층이 존재하는 기판은 젖음 투과성이 나타나지 않으며, 건식 전사된 그래핀은 그래핀과 기판 사이의 거리가 멀기 때문에 젖음 투과성이 나타나지 않는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

그래핀의 젖음 투과성 특성을 확인하기 위해 일반적인 습식 전사 방법과 건식 전사 방법으로 다양한 종류의 기판에 그래핀을 전사한 후 그래핀의 물 접촉각을 측정하였다. 기판의 종류에 따라 물 접촉각은 다르게 측정되며, 전사 방법에 따라 동일한 기판에 전사된 그래핀의 물 접촉각도 달라지는 것을 확인하였다. 기판 위에 전사된 그래핀의 물 접촉각은 기판의 물 접촉각에 비해 증가하며, 습식 전사 방법으로 전사한 그래핀의 물 접촉각 ( $76 \pm 10^\circ$ )보다 건식 전사한 그래핀의 물 접촉각 ( $91 \pm 4^\circ$ )이 28% 더 증가됨을 확인하였다. 전사 방법에 따라 기판 위에 있는 그래핀의 물 접촉각의 차이가 나는 이유는, 전사 방법에 따라 지배적으로 작용하는 물과 기판 사이의 상호작용이 변하기 때문이다. 기판의 산화층의 유무에 따라 수소결합(물-산화층 표면인 기판) 또는 반 데르 발스 상호작용(물-기판)이 지배적이며, 산화층이 있는 기판의 경우에는 그래핀이 전사되면 젖음 투과성 현상이 나타나지 않았다. 습식 전사된 그래핀은 그래핀의 표면에 존재하는 PMMA 잔여물의 영향이 지배적이어서 PMMA 필름의 물 접촉각과 유사한 물 접촉각이 측정되었다. 건식 전사된 그

래핀은 그래핀과 기판 사이의 거리가 충분히 멀기 때문에 물과 기판 사이의 상호작용이 매우 작고, 그래핀과 물의 반 데르 발스 상호작용이 지배적으로 영향을 미치기 때문에 기판에 상관없이 일정한 접촉각이 측정된 것으로 판단된다. 즉, 전사 방법에 따라 물과 그래핀 사이에 지배적으로 작용하는 상호작용이 변하며 이로 인해 그래핀의 물 접촉각에 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 따라서, 그래핀이 기판에 잘 밀착되어 있고 물과 강한 수소 결합을 하는 산화층이 없는 기판인 경우에 물과 기판 사이의 반 데르 발스 상호작용이 지배적으로 작용하여 젖음 투과성이 나타날 것으로 판단된다.

#### Acknowledgements

This research was supported by the Development of nano-based manufacturing key technologies for next-generation transparent display with flexibility (NK211C) funded by Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM) and the Center for Advanced Meta-Materials (CAMM) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning as a Global Frontier Project (NM9050).

#### References

- [1] Das, T., Sharma, B. K., Katiyar, A. K., Ahn, J. H., "Graphene-based flexible and wearable electronics", *J. Semicond.*, Vol. 39, No. 1, pp.011007, 2018.
- [2] Kozbial, A., Li, Z., Sun, J., Gong, X., Zhou, F., Wang, Y., Xu, H., Liu, H., Li, L., "Understanding the intrinsic water wettability of graphite", *Carbon*, Vol. 74, pp. 218-225, 2014.
- [3] Shih, C. J., Wang, Q. H., Lin, S., Park, K. C., Jin, Z., Strano, M. S., Blankschtein, D., "Breakdown in the wetting transparency of graphene", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 109, pp. 176101, 2012.
- [4] Rafiee, J., Mi, X., Gullapalli, H., Thomas, A. V., Yavari, F., Shi, Y., Ajayan, P. M., Koratkar, N. A., "Wetting transparency of graphene", *Nat. Mater.*, Vol. 11, pp. 217-222, 2012.
- [5] Li, Z., Wang, Y., Kozbial, A., Shenoy, G., Zhou, F., McGinley, R., Ireland, P., Morganstein, B., Kunkel, A., Surwade, S. P., Li, L., Liu, H., "Effect of airborne contaminants on the wettability of supported graphene and graphite", *Nat. Mater.*, Vol. 12, pp. 925-931.
- [6] Shih, C. J., Strano, M. S., Blankschtein, D., "Wetting

- translucency of graphene”, *Nat. Mater.*, Vol.12, pp. 866-869, 2013.
- [7] Jo, K., Kim, S. M., Lee, S. M., Kim, J. H., Lee, H. J., Kim, K. S., Kwon, Y. D., Kim, K. S., “One-step etching, doping, and adhesion-control process for graphene electrodes”, *Carbon*, Vol. 82, pp. 168-175, 2015.
- [8] Choi, T., Kim, S. J., Park, S., Hwang, T. Y., Jeon, Y., Hong, B. H., “Roll-to-roll continuous patterning and transfer of graphene via dispersive adhesion”, *Nanoscale*, Vol. 7, pp. 7138-7142, 2015.
- [9] Israelachvili, J. N., *Intermolecular and surface forces*, 3rd ed., Elsevier, USA, 2011.
- [10] Lee, S. M., Kim, S. M., Na, M., Y., Chang, H. J., Kim, K. S., Yu, H., Lee, H. J., Kim, J. H., “Materialization of strained CVD-graphene using thermal mismatch”, *Nano Research*, Vol. 8, pp. 2082-2091, 2015.