

나노 소재를 이용한 전자파 차폐 소재 리뷰

김 상 우

한국과학기술연구원

I. 서 론

최근 웨어러블 디바이스나 폴더블 디스플레이 등 모양과 형태에 규약이 없는 자유로운 디자인과 휴대성을 지닌 유연 디바이스에 대한 수요가 점차 늘어나고 있다^{[1]~[5]}. 그러나 이러한 유연 디바이스는 유연성과 더불어 소형화되면서 각각의 독립된 시스템에 의해 발생하는 전자기파에 의해 간섭이 일어나게 되어 제품 구동 문제나 수명 단축을 유발시킬 수 있다^{[6],[7]}. 또한, 디바이스 내부에서 발생하는 방사 전자기파가 인체에 직·간접적으로 유해한 영향^{[8]~[10]}을 줄 수 있다는 사회적인 인식 또한 고조되고 있다. 이에 따라 주변의 다양한 유연 디바이스간의 전자기파 장애와 인체 유해성^{[11],[12]}을 차단하기 위한 국제적 규제가 점점 엄격해지고 있어, 전자파 차폐에 대한 중요성이 점점 높아지고 있다. 특히 유연 디스플레이 소자에서는 다른 용도와는 달리 전자파 차폐필름의 높은 차폐특성과 유연성 이외에 높은 투광성이 동시에 요구되고 있지만, 이들 특성을 충분히 만족하는 전자파 차폐재는 아직도 개발되어 있지 않는 상황이다.

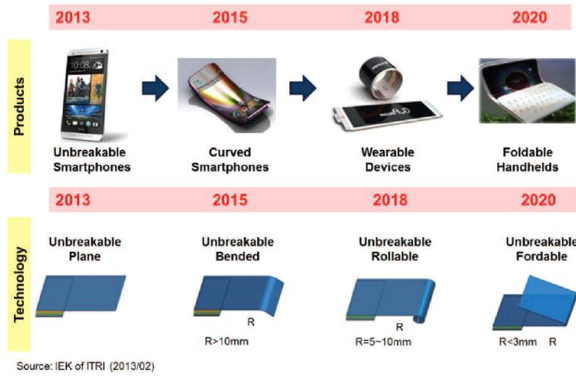
더욱이 새로운 무선서비스의 등장으로 5세대(5 Generation: 5G) 이동통신과 사물인터넷(Internet of Things: IoT) 통신이 활성화되고 있고, 이에 따라 주파수 부족 현상이 곳곳에서 심화되고 있다^[13]. 뿐만 아니라, 자율자동차의 출현으로 ITS(Intelligent Transportation System) 통신을 통한 차량 간 정보공유와 지능정보처리가 요구되면서^{[14]~[16]} 향후 인접한 대역간의 전자파 간섭이 더욱 심화될 예정이다. 주파수 부족을 해결하기 위한 방안으로 밀리미터파 대역으로 확장하려는 추세에 있어^{[17]~[20]} 향후 전자파 차폐재는 밀리미터파 대역까지 차폐할 수 있는 소재의 개발이 필요할 것으로 예상된다.

II. 나노 소재 이용 전자파 차폐재

전자파 차폐재의 차폐 성능을 높이기 위해서 전도체인 경우, 이론적으로 소재의 고유물성(intrinsic properties)인 전기 전도도 및 자기 투자율이 높을 것이 요구된다^[21]. 하지만 그 용도에 따라 또 다른 기능들이 요구되고 있는데 예를 들면 스마트폰 등에서 경험한 바와 같이 미래의 요구 추세는 박막화, 유연화 및 경량화이며, 여기에 투명 차폐 소재로서의 요구조건은 고투광화이다. 그러나 상기한 미래 수요의 추세에 대응할 수 있는 차폐 소재가 요구되고 있으나, 기존의 차폐 소재는 그 특성의 한계로는 제대로 대응할 수 없는 것이 현실이다. 이에 따라 최근 나노 소재를 이용한 전자파 차폐재가 연구되고 있다. 그 연구 추세는 나노 소재를 이용한 투명(혹은 불투명) 유연 차폐재와 경량 차폐재로 나눌 수 있다.

2-1 투명 유연 전자파 차폐재

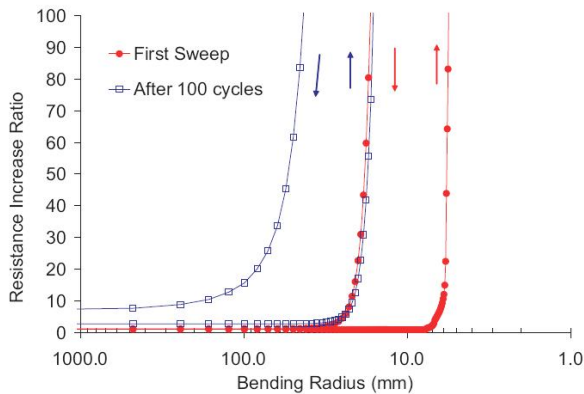
접거나 펼 수 있는 유연 디스플레이(Flexible Display: FD)에서는 상기한 특성 이외에 투광성과 유연성이 높을 것이 요구된다. 특히 FD는 인장, 압축, 굽힘 등의 다양한 변형이 일어나는 환경에서 사용되기 때문에, FD의 유연성을 나타내는 기준으로 곡률반경(Radius of Curvature: ROC)이 사용된다^{[22]~[25]}. 임계 ROC는 유연 디스플레이를 구부렸을 때 전기 저항이 10 % 이상 증가할 때의 ROC를 말한다. 이러한 임계 ROC는 벤더블 디스플레이의 경우, 약 10 mm에서 롤러블 혹은 폴더블 디스플레이의 경우 5~3 mm 미만으로 고투광화의 요구에 따라 점점 감소하는 추세에 있다([그림 1])^{[1]~[4]}. 미래 FD의 고투광화 추세에 따라 고 변형 하에서도 전자파 차폐 특성과 기계적 특성의 열화를 막을 수 있는 1 mm 이하의 낮은 임계 ROC를 갖는 유연 차폐재가 필요하다. 하지만, 대표적인 투명 전자파 차폐재인 인듐 주석 산화물(Transparent Conducting Oxide: TCO) 필름^{[26]~[28]}은 0.5 % 이상의 크랙 발생 변형률(또는 임계 변형률)에서의 굽힘 응력에서는 크래킹 또는 채널링 결함에 의한 취성 파괴가 일



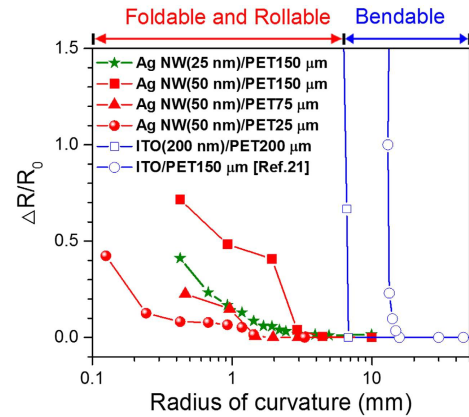
[그림 1] 곡률반경에 따른 유연 제품들의 로드맵^[1]

어나 특성이 급격히 저하된다^[26]. 즉, 필름 두께가 약 100 μm 일 때 5 mm 이하의 ROC에서는 파괴에 의해 전기 저항률이 급격히 증가하기 때문에 전자파 차폐 특성이 급격히 하게 된다([그림 2], [그림 3]). 따라서, 이러한 열화를 막기 위해서는 낮은 임계 ROC를 갖는 유연 전자파 차폐재의 개발이 요구된다.

ITO 전자파 차폐재를 대체하기 위해 연구되고 있는 소재로는 산화물 전도체(Transparent Oxide Conductor: TCO), 메탈메쉬, 그래핀, 나노와이어 등^{[28]~[34]}이 있으며, 최근에는 메탈 메쉬와 그래핀을 복합화시킨 차폐필름^{[35],[36]} 등이 연구되고 있다. TCO 투명차폐 필름은 희소원소인 인듐의 가격과 중국 등의 일부 국가에서 생산되는 희귀성으로 공급 불안정의 문제가 있어 인듐을 저가 금속이온으로 대체하는 연구가 진행되고 있다. 대표적인 ITO 대체 TCO인 Al 도핑된 ZnO(AZO)는 투광도 84.2 %에서 차폐성능 6.5 dB(0.3~



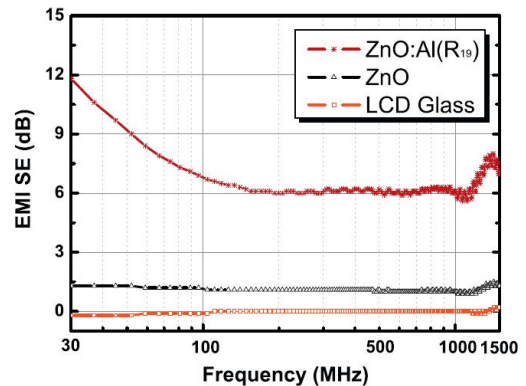
[그림 2] ITO 필름의 곡률반경에 따른 저항 변화^[26]



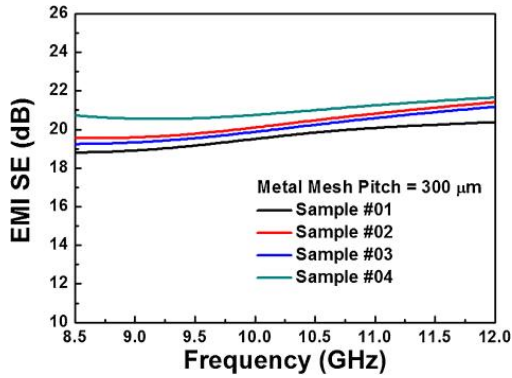
[그림 3] 곡률반경에 따른 ITO 및 은나노와이어 전자파 차폐재의 저항 변화^[22]

1.5 GHz) 값을 가진다([그림 4])^[29]. 하지만, AZO와 같은 산화물 전도체 또한 재료고유의 취성으로 높은 굽힘 변형 조건 (ROC < 5 mm) 하에서 크랙이 발생하고, 아직까지 차폐특성이 좋지 않아 유연 투명전자파 차폐소재로서 한계를 가지고 있다.

보다 높은 투광도와 차폐능을 구현하기 위하여 에칭기법으로 만든 메탈메쉬타입 차폐재가 연구되고 있다^{[30],[31]}. 메탈메쉬는 높은 투광도와 더불어 높은 EMI 차폐효율을 나타내지만 공정과정이 복잡하여 비용이 많이 들 뿐만 아니라, 부식문제와 반복 피로특성에 문제가 있다. 이러한 공정의 복잡성을 해결하고자 잉크젯 기술을 이용하여 제조한 메탈 메쉬 투명차폐 필름은 투광도 88.2 %에서 20 dB(8~12 GHz) 차폐효율을 보이고 있다([그림 5])^[30]. 이러한 장점에도 불구하고, 여전히 비용이 높고 미세한 패턴이 반복되어 나타나



[그림 4] 투명 AZO 필름의 전자파 차폐 특성^[29]



[그림 5] 잉크젯으로 만든 메탈 메쉬 필름의 전자파 차폐 특성^[30]

는 모아레 현상이 발생하는 단점을 가진다.

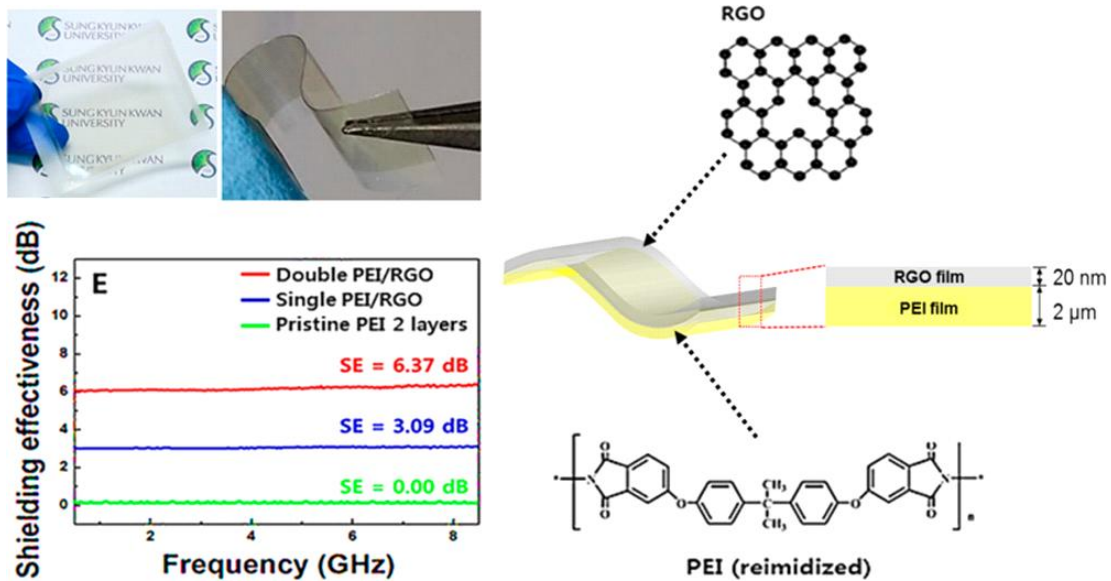
최근 유연성이 보다 높고 전도성이 우수하여 연구되고 있는 단일 층 CVD 그래핀은 투광도 97 %의 매우 높은 광 투과도에서 2.27 dB(2.2~7 GHz)의 차폐 성능을 가진다^[37]. 단일층으로는 차폐성능이 낮기 때문에 차폐특성을 향상하기 위하여 다층으로 제조한 다층 그래핀은 투광도 80.5 %에서 19.14 dB(18~26.5 GHz)로 높은 차폐성능을 보이지만([그림 6])^[34], 공정과정이 매우 복잡하고, 대면적화가 어렵다는 단점이 있다.

상기한 결점을 극복하기 위해 유망하게 연구되고 있는 차세대 소재는 나노와이어를 이용하는 투명 유연차폐재이

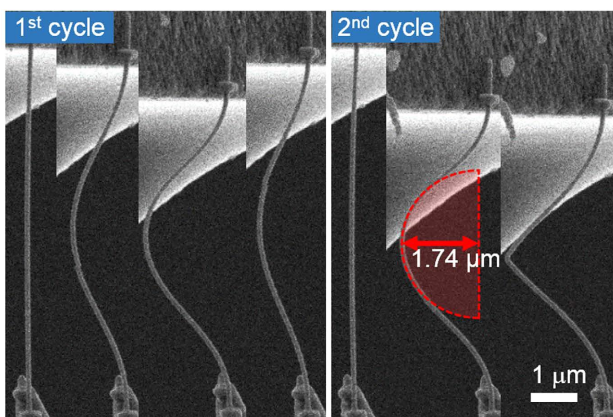
다. 그 중에서 Ag NWs(Silver Nanowires)는 우수한 투광성, 전기전도성 및 기계적 유연성으로 인하여 가장 유력한 후보 물질로 간주되고 있다^{[38]~[40]}. 또한, 은 나노와이어는 잉크형태로 분산되어 상온에서 유연기판에 롤투를 코팅공정이 가능하여 저비용 및 대량으로 생산한다.

상기한 장점에도 불구하고, Ag NWs는 폴리올 합성공정에서 나노와이어를 비등방성 성장시키기 위하여 사용되는 절연성 캡핑제로 인하여 네트워크 특성이 약화되어 나노와이어 간 접합부의 결합이 제대로 이루어지지 않아 접촉저항이 증가한다는 문제를 가지고 있다^[5]. 또한, 은 나노와이어는 기판과의 접합력이 약하고, 금속으로 이루어져 있기 때문에 수분과 산소에 취약할 뿐만 아니라, 빛을 반사시켜 산란을 일으키게 된다. 이러한 특성은 전자 디바이스 적용 시 반드시 해결되어야 할 문제이다.

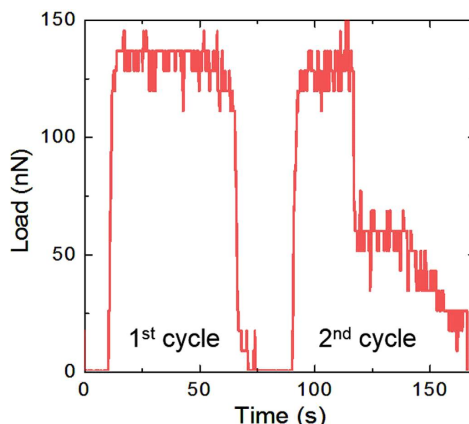
최근 연구결과에 따르면 은 나노와이어의 접촉저항 문제를 해결하고, 나노와이어 간 네트워크를 강화하기 위한 몇 가지 방법들이 제시되고 있다. 고온 소결법, 물리적 압착법, 광학적 소결법, 습식 가열법이 제시되었다. 또한, 은 나노와이어의 산란특성을 억제하고, 기판과의 접합력을 향상시키기 위해 전도성 고분자를 복합화시키는 연구가 진행되었다. 하지만 앞서 보고된 연구의 경우, 대량생산, 대면적 공정으로의 확장성이 부족할 뿐만 아니라, 공정 시간과 비용이 많



[그림 6] 환원 그래핀 필름의 전자파 차폐 특성^[32]



(a) 은 나노와이어의 1회 및 2회 사이클 압축 변형 파괴

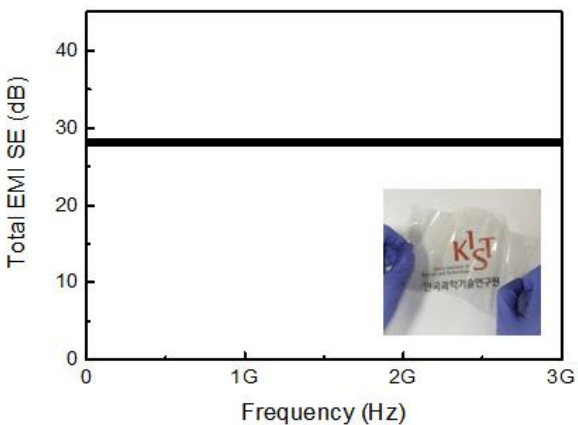


(b) 시간에 따른 반복 압축 하중 변화

[그림 7] 반복 압축 테스트에 따른 은 나노와이어의 파괴^[22]

이 든다는 한계를 가지고 있다.

Ag NWs 역시 임계 ROC를 갖고 있는데, 기판 두께에 따라 달라지나 필름 두께가 약 100 μm 일 때 대략 3 mm 정도로 ITO 보다 낮기 때문에 가능성이 높은 ITO 대체 투명 전자파 차폐 소재이다([그림 8])^[22]. Ag NWs의 임계 ROC는 소결에 의하여 크게 낮출 수 있다. 이렇게 해서 얻은 투명 유연 차폐 필름의 전자파 차폐특성은 광투과도가 85 % 정도 일 때 28 dB의 높은 차폐능을 얻을 수 있다. 또한, Ag NWs를 UV 경화성 폴리머에 임베딩시킨 필름의 굽힘 시험결과에서도 임계 ROC를 2 mm 이하로 낮출 수 있음을 보여주고 있다.

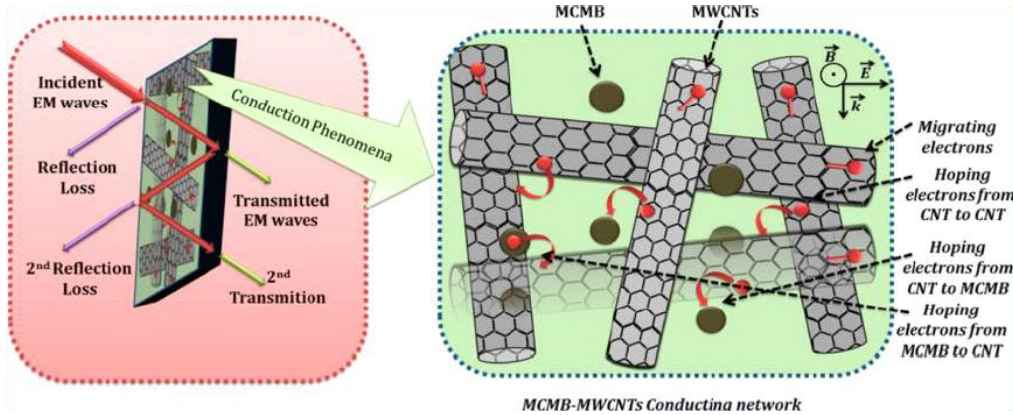


[그림 8] 은 나노와이어 투명 유연 차폐 필름의 전자파 차폐특성(광투과도 85 %)

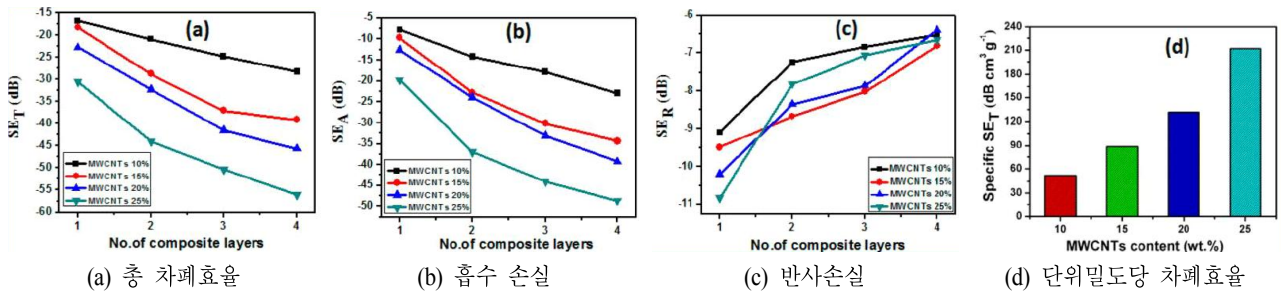
2-2 경량 전자파 차폐재

나노소재를 이용한 초경량 전자파 차폐재에 대한 연구가 최근 이루어지고 있는데, 그 형태로 구분하면 시트 타입과 폼 타입으로 나눌 수 있다. 경량화를 위하여 무거운 금속 차폐소재나 장섬유 탄소파이버 등을 사용하지 않고 CNT 혹은 그래핀 플레이크 같은 2차원 나노소재를 이용한 경량 복합체를 제조함으로써 유연성을 가지면서 초경량인 전자파 차폐 시트 개발에 성공하였다([그림 9])^[41].

이전에는 CNT 혹은 환원 그래핀 등의 나노소재는 입자간 강한 응집력 때문에 시트 내부에 고르게 고함량으로 분산하기 어려워 얇으면서 차폐효율이 높은 나노복합체를 제조하기 어려웠다. 나노소재에 대한 이해도가 높아지고 표면개질 기술이 발달함에 따라 분산성 문제가 많이 해결되어 성형성이 향상되어 얇은 두께에서도 유연성과 우수한 성능을 가진 나노복합체 시트가 개발되고 있다. Multiwalled carbon nanotube(MWCNT)가 25 % 함유된 mesocarbon microbead (MCMB) 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트는 불과 두께 0.15 mm와 밀도 0.26 g/cm^3 에서 X-밴드인 8.2~12.4 GHz 영역에서 31 dB 높은 성능을 구현하고 있다([그림 10])^[41]. 이 시트의 단위밀도당의 차폐효율은 215 $\text{dB}/\text{cm}^3/\text{g}$ 에 달하며, 또한 이들 시트를 4장의 적층함에 의해 55 dB 이상을 구현하고 있다. 5 %의 CNT가 함유된 poly-(vinylidene fluoride) (PVDF) 나노복합체 시트의 차폐효율은 두께 0.25 mm에서 18~27 GHz 영역에서 36.5 dB를 구현하였고, PVDF/CNT/



[그림 9] MCMB/MWCNT 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트^[41]

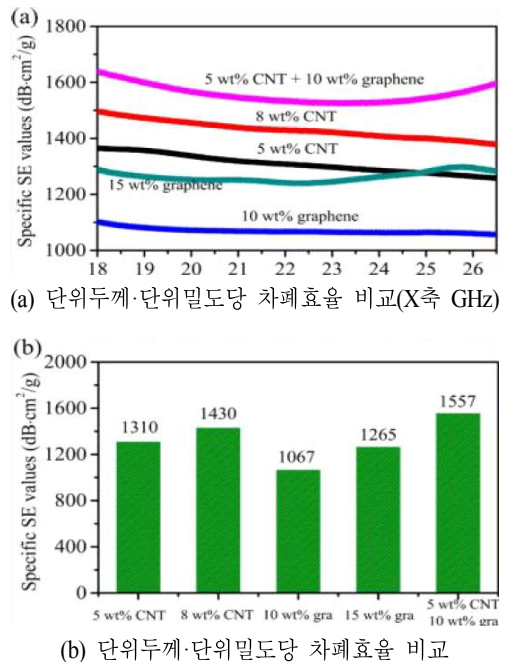


[그림 10] MCMB/MWCNT 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트의 차폐 성능^[41]

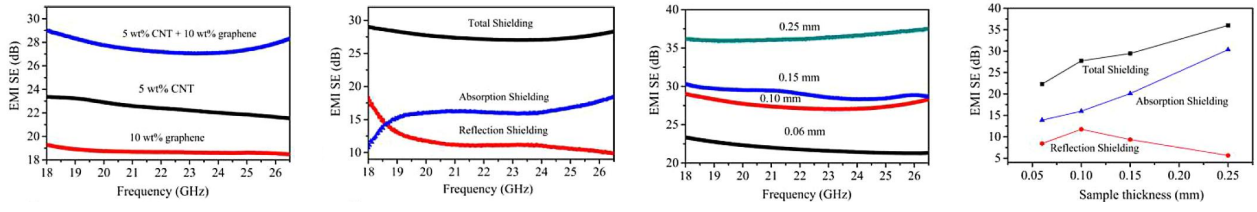
graphene 복합체에 대하여 1,557 dB·cm²/g의 매우 높은 단위밀도당 차폐효율을 구현하고 있다([그림 11], [그림 12])^[42]. 아래의 <표 1>에서 각종 나노복합체로 구성된 경량 차폐시트를 비교하면, 폴리우레탄 CNT 나노복합체의 경우, 단위밀도당 차폐효율이 2,143 dB/cm²/g에 달하지만, CNT의 함량이 무려 76.2%인 것을 감안한다면 PVDF/CNT/graphene 나노복합체 시트가 작은 양의 함량에서 높은 차폐성능을 보여 가성비 높은 차폐시트로 볼 수 있다.

실버 나노와이어가 함유된 폴리우레탄 폼 나노복합체 시트는 불과 45 mg/cm³의 밀도에서 65 dB의 높은 전자파 차폐효율을 얻었고, 이때의 단위밀도당 차폐효율은 1,422 dB/cm²/g을 얻었다([그림 13], [그림 14])^[43]. 이는 발포에 의해 두께 방향으로 배향된 형태의 기공을 갖는 다공성 폴리우레탄에 의하여 그 수직방향으로 나노와이어가 정렬이 됨에 의하여 높은 차폐특성을 나타낸 것으로 추정되며, 기계적인 유연성 역시 이 때문에 크게 상승한 것으로 나타났다.

그래핀 폼을 이용한 전도성 폴리머(GF/PEDOT:PSS) 나노



[그림 11] PVDF/CNT 나노복합체 차폐 성능^[42]

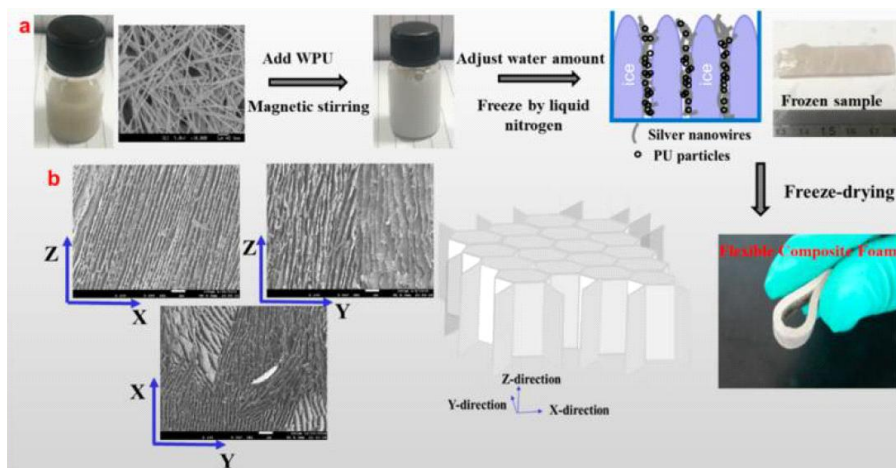


(a) PVDF/graphene 시트 (b) PVDF/15 % graphene 시트 (c) PVDF/15 % graphene 시트 (d) PVDF/graphene(20 GHz)

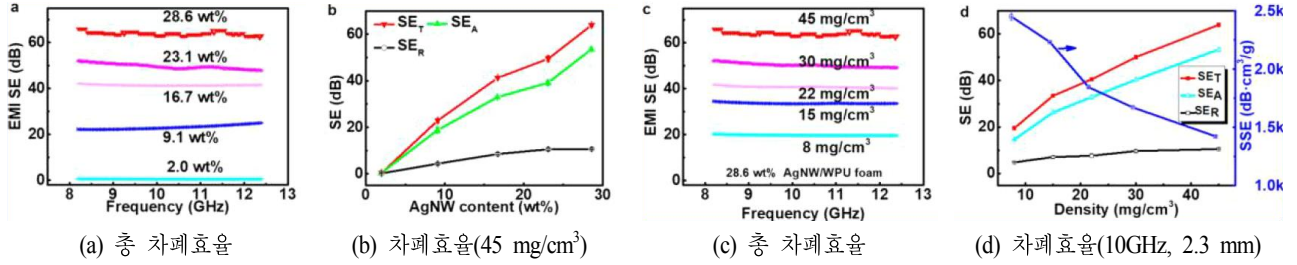
[그림 12] PVDF/CNT 및 PVDF/CNT/graphene 나노복합체(0.1 mm 두께)로 구성된 초경량 유연 차폐 시트의 차폐 성능^[42]

<표 1> 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트의 차폐성능비교^[42]

Materials	Carbon contents	Thickness(mm)	EMI SE(dB)	Specific SE value(dB cm ² /g)	Ref
PMMA/graphene	4.23 vol %	3.4	30	74	58
PS/graphene	10 wt %	2.8	18	62	32
WPU/graphene	5 vol %	2.0	32	112	59
PEI/graphene	10 wt %	2.3	20	68	26
cellulose/CNT	33 wt %	0.64	30	312.7	60
PP/CNT	16 wt %	1.0	34.8	356.9	27
PMMA/CNT	20 wt %	4.5	30	49.0	28
WPU/CNT	76.2 wt %	2.3	35	2,143.0	25
epoxy/CNT	0.66 wt %	2.0	33	169.2	29
PE/CNT	10 wt %	3.0	35	117.0	61
ABS/CNT	10 wt %	1.1	40	317.9	62
PANI/CNT	10 wt %	2	35	194.4	63
PI/graphene foam	16 wt %	0.8	21	937	64
PS/graphene foam	30 wt %	2.5	29.3	260	33
PUG/graphene foam	10 wt %	60	57.7	332	31
phenolic/CNT	60.6 wt %	0.14	32.4	1,257.6	65
WPU/CNT	61.5 wt %	0.32	35	778.5	30
PVDF/CNT	5 wt %	0.1	22.41	1,310	This work
PVDF/CNT	8 wt %	0.1	25.02	1,430	This work
PVDF/graphene	10 wt %	0.1	18.70	1,067	This work
PVDF/graphene	15 wt %	0.1	22.58	1,265	This work
PVDF/CNT/graphene	5 wt% CNT + 10 wt% graphene	0.1	27.58	1,557	This work



[그림 13] Unidirectionally porous WPU/AgNW 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트의 제조과정^[43]

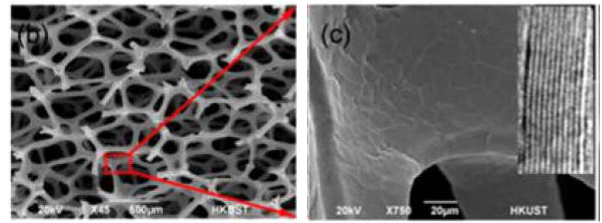


[그림 14] Unidirectionally porous WPU/AgNW 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트의 차폐 성능^[43]

복합체는 기공도가 98.8 %로 밀도가 18.2 mg/cm³에 불과하지만, 전도성 폴리머인 PEDOT:PSS의 도움으로 전기전도도가 43.2 S/m로 상승하여 차폐효율이 X 밴드에서 91.9 dB까지 얻을 수 있었으며, 단위밀도당 차폐효율은 3,124 dB/cm³/g을 달성하였다([그림 15], [그림 16])^[44].

III. 결 론

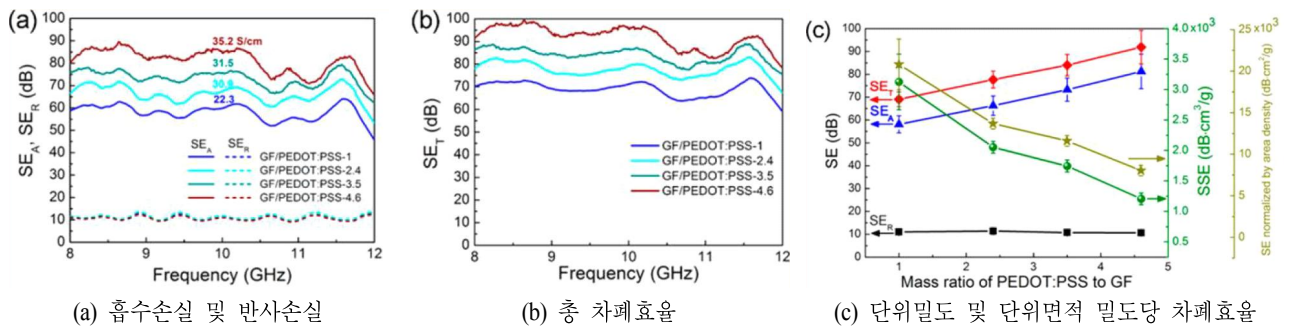
상술한 바와 같이 나노 소재를 이용한 전자파 차폐재는 최근에 그 기술이 비약적으로 발전하여 가볍고 유연성이 좋고, 투명도가 높을 뿐만 아니라, 전자파 차폐 효율이 우수하여 투명 차폐재 혹은 경량 차폐재로서의 응용 가능성이 매우 높아졌음을 알 수 있다. 하지만, 좀 더 쉽고 값싸게 양산성 있게 대량생산하는 공정 기술에서 많은 개선이 필요하다. 특히 나노소재가 가지고 있는 이론적인 물성을 달성하기 위해서는 불순물의 도핑이나 결합 제어 등의 다양한 방법에 의해 향상의 여지가 아직도 많이 있기 때문에, 향후 다양한 미래 수요에 대응할 수 있는 나노소재를 이용한 전자파 차폐재의 발전 가능성이 멀지 않을 것으로 보인다.



(a) 나노복합체의 미세구조 (b) 확대 사진
[그림 16] GF/PEDOT:PSS 나노복합체의 구조^[44]

참 고 문 헌

- [1] J. Chen, C. T. Liu, "Technology advances in flexible displays and substrates". *IEEE Access*, vol. 1, pp. 150-158, 2013.
- [2] Y. Khan, A. E. Ostfeld, C. M. Lochner, A. Pierre, and A. C. Arias, "Monitoring of vital signs with flexible and wearable medical devices". *Adv. Mater.*, vol. 28, pp. 4373-4395, 2016.
- [3] H. Pang, K. Rajan, J. Silvernail, P. Mandlik, R. Ma, M. Hack, J. J. Brown, J. S. Yoo, S.-H. Jung, and Y.-C. Kim, "In recent progress of flexible AMOLED displays, advances



[그림 15] GF/PEDOT:PSS 나노복합체로 구성된 초경량 유연 차폐 시트의 차폐 성능^[44]

- in display technologies; And e-papers and flexible displays", *International Society for Optics and Photonics*, p. 79560J, Feb. 2011.
- [4] J. A. Rogers, T. Someya, and Y. Huang, "Materials and mechanics for stretchable electronics". *Science*, vol. 327, pp. 1603-1607, 2010.
- [5] E. Torres Alonso, G. Karkera, G. F. Jones, M. F. Craciun, and S. Russo, "Homogeneously bright, flexible, and foldable lighting devices with functionalized graphene electrodes". *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, pp. 16541-16545, 2016.
- [6] S. Umrao, T. K. Gupta, S. Kumar, V. K. Singh, M. K. Sultania, J. H. Jung, I.-K. Oh, and A. Srivastava, "Microwave-assisted synthesis of boron and nitrogen co-doped reduced graphene oxide for the protection of electromagnetic radiation in Ku-band". *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, pp. 19831-19842, 2015.
- [7] B. Shen, W. Zhai, and W. Zheng, "Ultrathin flexible graphene film: An excellent thermal conducting material with efficient EMI shielding". *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, pp. 4542-4548, 2014.
- [8] W.-L. Song, X.-T. Guan, L.-Z. Fan, W.-Q. Cao, C.-Y. Wang, Q.-L. Zhao, and M.-S. Cao, "Magnetic and conductive graphene papers toward thin layers of effective electromagnetic shielding". *J. Mater. Chem.*, vol. 3, pp. 2097-2107, 2015.
- [9] Z. Chen, C. Xu, C. Ma, W. Ren, and H. M. Cheng, "Light-weight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding". *Adv. Mater.*, vol. 25, pp. 1296-1300, 2013.
- [10] H.-C. Lee, J.-Y. Kim, C.-H. Noh, K. Y. Song, and S.-H. Cho, "Selective metal pattern formation and its EMI shielding efficiency". *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, pp. 2665-2672, 2006.
- [11] A. Ameli, M. Nofar, S. Wang, and C. B. Park, "Light-weight polypropylene/stainless-steel fiber composite foams with low percolation for efficient electromagnetic interference shielding". *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 6, pp. 11091-11100, 2014.
- [12] W.-L. Song, C. Gong, H. Li, X.-D. Cheng, M. Chen, X. Yuan, H. Chen, Y. Yang, and D. Fang, "Graphene-based sandwich structures for frequency selectable electromagnetic shielding". *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, pp. 36119-36129, 2017.
- [13] 김종호, 윤영근, 김명돈, 정영준, "5G/IoT 시대의 밀리미터파 대역 전파전파 기술동향(Harmonized Site-General Path Loss 모델 개발)", *전자파기술*, 28(4), pp. 45-53, 2017년 7월.
- [14] 김창주, "자율주행차 전파 기술", *전자파기술*, 28(4), pp. 27-36, 2017년 7월.
- [15] D. Patton, "Automated drive: A reality check", Jun. 2015.
- [16] 강영홍 등, "무인 이동체를 위한 전파기술 및 정책연구", *KCA 연구 2016-16*, 2017년.
- [17] P. Smulders, L. Correia, "Characterisation of propagation in 60 GHz radio channels", *Electronics Communication Engineering Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 73-80, Apr. 1997.
- [18] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. Wong, J. Schulz, M. Samimi, and F. Guitierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!", *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [19] G. R. MacCartney, M. Samimi, and T. S. Rappaport, "Omnidirectional path loss models from measurements recorded in New York city at 28 GHz and 73 GHz", in *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC)*, Sep. 2014.
- [20] T. S. Rappaport, R. MacCartney, M. Samimi, and S. Sun, "Wideband millimeterwave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design", *IEEE Trans. on Communications*, vol. 63, no. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.
- [21] S. Kwon, R. Ma, U. Kim, H. R. Choi, and S. Baik, "Flexible electromagnetic interference shields made of silver flakes, carbon nanotubes and nitrile butadiene rubber". *Carbon*, vol. 68, pp. 118-124, 2014.
- [22] D. G. Kim, S. H. Kim, J. H. Kim, J.-C. Lee, J.-P. Ahn, and S. W. Kim, "Failure criterion of silver nanowire electrodes on a polymer substrate for highly flexible devices". *Sci. Rep.*, vol. 7, p. 45903, 2017.

- [23] J. Jang, "Displays develop a new flexibility". *Mater. Today*, vol. 9, pp. 46-52, 2006.
- [24] T. Ikeda, D. Nakamura, M. Ikeda, Y. Iwaki, H. Ikeda, K. Watanabe, H. Miyake, Y. Hirakata, S. Yamazaki, D. Kurosaki, M. Ohno, C. Bower, D. Cotton, A. Matthews, P. Andrew, C. Gheorghiu, and J. Bergquis, "A 4-mm radius curved display with touch screen". *Dig. Tech. Pap.*, vol. 45, pp. 118-121 2014.
- [25] M. Melzer, J. Monch, D. Makarov, Y. Zabala, G. Bermudez, D. Karnaushenko, S. Baunack, F. Bahr, C. Yan, M. Kaltenbrunner, and O. Schmidt, "Wearable magnetic field sensors for flexible electronics", *Adv. Mater.*, vol. 27, pp. 1274-1280, 2015.
- [26] J. Lewis, "Material challenge for flexible organic devices", *Mater. Today*, vol. 9, pp. 38-45, 2006.
- [27] S. Greco, M. S. Sarto, and A. Tamburrano, "Shielding performances of ITO transparent windows: Theoretical and experimental characterization", *EMC Europe*, pp. 8-12, Sep. 2008.
- [28] J.-L. Huang, B.-S. Yau, C.-Y. Chen, W.-T. Lo, and D.-F. Lii, "The electromagnetic shielding effectiveness of indium tin oxide films", *Ceramics Ceram. International Int.*, vol. 27 no. 3, pp. 363-365, 2001.
- [29] Y.-J. Choi, S. C. Gong, D. C. Johnson, S. Golledge, G. Y. Yeom, and H.-H. Park, "Characteristics of the electromagnetic interference shielding effectiveness of Al-doped ZnO thin films deposited by atomic layer deposition", *Applied Appl. Surface Surf. Science Sci.*, vol. 269, pp. 92-97, 2013.
- [30] S. K. Vishwanath, D.-G. Kim, and J. Kim, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of invisible metal-mesh prepared by electrohydrodynamic jet printing. Japanese", *J. Appl. Phys.*, vol. 53(5S3), pp. 05HB11, 2014.
- [31] H. Wang, Z. Lu, and J. Tan, "Generation of uniform diffraction pattern and high EMI shielding performance by metallic mesh composed of ring and rotated sub-ring arrays", *Optics Opt. Express*, vol. 24, no. 20, pp. 22989-23000, 2016.
- [32] S. K. Hong, K. Y. Kim, T. Y. Kim, J. H. Kim, S. W. Park, J. H. Kim, and B. J. Cho, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene", *Nanotechnology*, vol. 23, no. 45, p. 455704, 2012.
- [33] S. Kim, J.-S. Oh, M.-G. Kim, W. Jang, M. Wang, Y. Kim, H. W. Seo, Y. C. Kim, J.-H. Lee, and Y. Lee, "Electromagnetic interference (EMI) transparent shielding of reduced graphene oxide (RGO) interleaved structure fabricated by electrophoretic deposition", *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, vol. 6, no. 20, pp. 17647-17653, 2014.
- [34] Z. Lu, L. Ma, J. Tan, H. Wang, and X. Ding, "Transparent multi-layer graphene/polyethylene terephthalate structures with excellent microwave absorption and electromagnetic interference shielding performance", *Nanoscale*, vol. 8, no. 37, pp. 16684-16693, 2016.
- [35] Y. Han, Y. Liu, L. Han, J. Lin, and P. Jin, "High-performance hierarchical graphene/metal-mesh film for optically transparent electromagnetic interference shielding", *Carbon*, vol. 115, pp. 34-42, 2017.
- [36] L. Ma, Z. Lu, J. Tan, J. Liu, X. Ding, N. Black, T. Li, J. Gallop, and L. Hao, "Transparent conducting graphene hybrid films to improve electromagnetic interference (EMI) shielding performance of graphene". *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, vol. 9, no. 39, pp. 34221-34229, 2017.
- [37] S. K. Hong, K. Y. Kim, T. Y. Kim, J. H. Kim, S. W. Park, J. H. Kim, and B. J. Cho, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene", *Nanotechnology*, vol. 23, p. 455704, Oct. 2012.
- [38] M. Song, D. S. You, K. Lim, S. Park, S. Jung, C. S. Kim, D. H. Kim, D. G. Kim, J. K. Kim, and J. Park, "Highly efficient and bendable organic solar cells with solution-processed silver nanowire electrodes", *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, pp. 4177-4184, 2013.
- [39] M.-S. Lee, K. Lee, S.-Y. Kim, H. Lee, J. Park, K.-H. Choi, H.-K. Kim, D.-G. Kim, D.-Y. Lee, and S. Nam, "High-performance, transparent, and stretchable electrodes using graphene-metal nanowire hybrid structures", *Nano Lett.*, vol. 13, pp. 2814-2821, 2013.

- [40] J. Jin, J. Lee, S. Jeong, S. Yang, J.-H. Ko, H.-G. Im, S.-W. Baek, J.-Y. Lee, and B.-S. Bae, "High-performance hybrid plastic films: A robust electrode platform for thin-film optoelectronics", *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, pp. 1811-1817, 2013.
- [41] A. Chaudhary, S. Kumari, R. Kumar, S. Teotia, B. P. Singh, A. P. Singh, S. K. Dhawan, and S. R. Dhakate, "Light-weight and easily foldable MCMB-MWCNTs composite paper with exceptional electromagnetic interference shielding", *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, vol. 8, pp. 10600-10608, 2016.
- [42] B. Zhao, C. Zhao, R. Li, S. M. Hamidinejad, and C. B. Park, "Flexible, ultrathin, and high-efficiency electromagnetic shielding properties of poly(vinylidene fluoride)/carbon composite films", *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, vol. 9, pp. 20873-20884, 2017.
- [43] Z. Zeng, M. Chen, Y. Pei, S. I. S. Shahabadi, B. Che, P. Wang, and X. Lu, "Ultralight and flexible polyurethane/silver nanowire nanocomposites with unidirectional pores for highly effective electromagnetic shielding", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, pp. 32211-32219, 2017.
- [44] Y. Wu, Z. Wang, X. Liu, X. Shen, Q. Zheng, Q. Xue, and J. K. Kim, "Ultralight graphene foam/conductive polymer composites for exceptional electromagnetic interference shielding", *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, vol. 9, pp. 9059-9069, 2017.

≡ 필자소개 ≡

김 상 우



1985년 2월: 인하대학교 무기재료공학과 (공학사)

1995년 8월: 고려대학교 재료공학과 (공학박사)

2002년: 오사카대학교 나노재료공학과

1988년 6월~1989년 5월: 한국과학기술원 재료연구부 연구원

1989년 6월~현재: 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 책임연구원

[주 관심분야] EMC/EMI Materials, Nanomaterials