

전자파 차폐용 하이브리드 탄소나노물질

이시화* · 오일권*†

Hybrid Carbon Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding

Si-Hwa Lee*, Il-Kwon Oh*†

ABSTRACT: Recently, electromagnetic interference (EMI) shielding materials have been extensively developed and significantly considered to protect electronic systems from harmful electromagnetic waves. Although, metal-based materials show high electrical conductivity and EMI shielding effectiveness, they have several challenging problems such as high density and corrosion. Carbon-based materials have been acclaimed as alternative EMI materials due to light weight, high mechanical properties, resistance to corrosion and excellent electrical conductivity. Here, we introduce 1-phase and 2-phase carbon materials as well as 3-phase hybrid carbon materials. The 3-phase hybrid carbon materials composed of metal nanoparticles, carbon nanotubes and graphene can be used as a promising EMI shielding material.

초 록: 최근 유해한 전자파 문제에 대응하여 사용되는 전자파 차폐 물질에 대한 관심이 대두되고 있다. 우선, 전통적으로 사용되는 전도성이 높은 금속 기반 물질들이 있지만, 무겁고 부식성에 대한 한계가 있기에 이를 극복할 수 있는, 가볍고 기계적 강도가 우수하고, 부식에 대한 내구성이 있으며 전기 전도성이 높은 탄소계 물질들이 대두되었다. 탄소계 물질을 phase별로 나누어, 그래핀, CNT와 같은 1-phase 단일계 탄소계 물질부터 단일계 탄소물질에 금속이 추가되거나, 서로 다른 탄소계 물질이 혼합된 2-phase 탄소계 물질, 서로 다른 탄소계 물질에 기능성 금속이 추가된 3-phase 탄소계 물질순으로 각각의 특징을 소개하였다.

Key Words: 전자파 차폐(EMI Shielding), 탄소나노구조체(Carbon nanostructure), 나노물질(nanomaterials)

1. 서 론

전자, 전기 및 통신관련 제품들의 발전에 따라 인류는 휴대용 통신기기(~2 GHz)부터 군사용 레이더(X band, 8-12 GHz)까지 다양한 주파수의 전자파를 광범위하게 사용하며 문명의 이기를 누리고 있다. 다기능화, 소형화, 경량화 추세에 따라 다양한 전자 부품의 집적화가 이루어지고

있으며 이에 따라 각각의 전자부품에서 발생하는 전자파 노이즈와 이에 따른 간섭 현상은 전자 기기의 동작과 신뢰성에 영향을 더욱 미치게 되었다. 또한 전자파의 장기간 노출 시 생체 조직 세포의 온도를 상승시켜 면역 기능이 약화되는 등의 인체유해성 문제 또한 발생하고 있다. 이에 따라 한국을 비롯한 세계 각국에서는 전자파 허용 규제를 강화하고 있으며, 전자파 차폐를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Received 29 July 2016, received in revised form 16 August 2016, accepted 18 August 2016

*Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

*†Department of Mechanical Engineering, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Corresponding author (E-mail: ikoh@kaist.ac.kr)

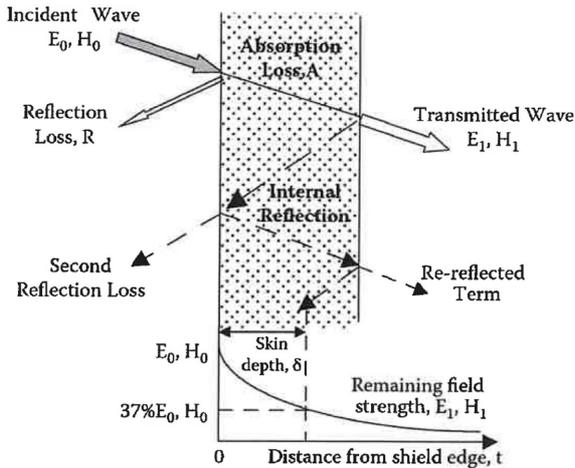


Fig. 1. Graphical representation of EMI shielding [1]

2. 전자파 차폐 원리

전자파 차폐는 입사되는 전자파가 다른 공간에 전파되지 못하도록 하는 것이며 재료의 차폐성능은 Fig. 1과 같이 전자파 반사, 전자파 흡수, 전자파 다중 반사의 합으로 표현된다[1].

- 1) 전자파 반사: 전자파 반사는 재료의 표면에서의 매질 간의 임피던스 차이에 의해 발생하며 주로 금속 재료에서 발생한다.
- 2) 전자파 흡수: 전자파 흡수의 경우 재료 내에서 도전 손실(conductive loss), 자성손실(magnetic loss)에 의해 전자파가 열에너지로 소실되며, 탄소계 재료는 주로 도전손실이 발생하고, 페라이트와 같은 자성계 재료에서는 자성손실이 발생한다.
- 3) 전자파 다중반사: 전자파 다중반사의 경우 재료 내 전자파의 산란 등에 의해 다른 방향으로 전자파가 전달되는 것이다.

3. 1-Phase 금속계 물질

전통적으로 높은 전도성 특징 때문 많이 사용되는 금속계 물질에는, 구리(Cu), 니켈(Ni), 스텐리스 스틸(S.S)이 있다. 이를 변형한, 니켈 섬유(Ni fiber)[2], 스텐리스 섬유(S.S fiber)[3], 철 섬유(Steel fiber)[4], 구리 나노와이어(Cu Nanowire)[5], 니켈 필라멘트[2], 알루미늄 플레이크[3] 등이 있다. 1-phase 금속계 물질은 높은 차폐효율을 보이는 장점이 있어 많이 사용되었으나, 밀도가 높고, 부식성이 있어, 사용에 한계가 있다.

4. 1-Phase 탄소계 물질

전통적으로 사용된 금속계 차폐 물질에 비해, 복합재에

전도성 필러가 삽입된 전기적 전도성 고분자 복합재가 주목받고 있다. 그 이유는, 유연성, 부식에 대한 저항성, 가벼운 무게, 저비용 생산공정 때문이다. 전도성 고분자 복합재의 전자파 차폐효율(EMI shielding effectiveness)은 유전율(dielectric constant), 전기전도성(intrinsic electrical conductivity), 종횡비(aspect ratio), 투자율(magnetic permeability), 전도성 필러의 함량 등에 의해 결정된다.

메조포러스 카본(mesoporous carbon)[6], 카본블랙(carbon black)[7], 탄소 필라멘트(carbon filament)[2], 탄소섬유(carbon fiber)[3,8], 풀러린(fullerene)[9], 탄소나노코일(carbon nanocoil), 탄소나노튜브(carbon nanotube)[7,10-14], 팽창 흑연(exfoliated graphite), 흑연 나토시트(graphite nanosheet)[15], 플렉서블 흑연(flexible graphite)[16], 기능화된 그래핀(functionalized graphene)[17], 환원된 그래핀(reduced graphene oxide)[18-21], 화학적 박리 그래핀(chemically drive graphene)[22-25], Fig. 2와 Fig. 3과 같은, 화학기상증착법으로 합성한 그래핀(CVD grown graphene)[26-29], 등과 같은 1-phase 탄소계 물질들은, 조절할 수 있는 종횡비, 높은 기계적 특성, 가벼운 무게, 우수한 전기적

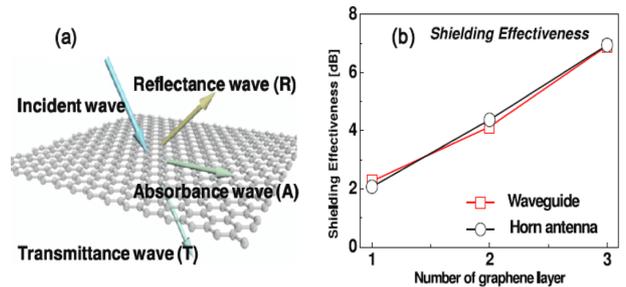


Fig. 2. (a) Description of wave dispersion on graphene (b) The average SE of graphene as a function of the number of graphene layers [26]

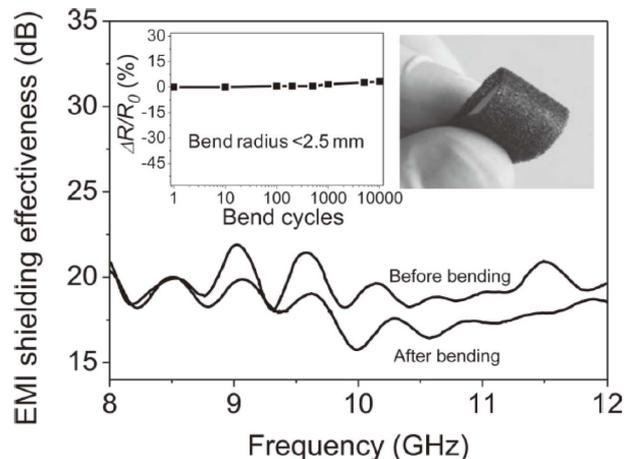


Fig. 3. EMI shielding effectiveness of a graphene/PDMS foam composite before and after repeatedly bending to a radius fo 2.5 mm 10,000 times [27]

전도성, 유연성 등의 이유로 복합재료의 전도성 필러로서 사용되어 왔다.

5. 2-Phase 탄소계 물질

최근에는 금속을 그래핀이나[30-32] 탄소나노튜브[33,34] 위에 데코레이트하여, 자성 특성을 향상시켜 자성손실과 유전손실을 동시에 발현하여, 전자파 차폐성능을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. Fig. 4와 같이, 그래핀 옥사이드

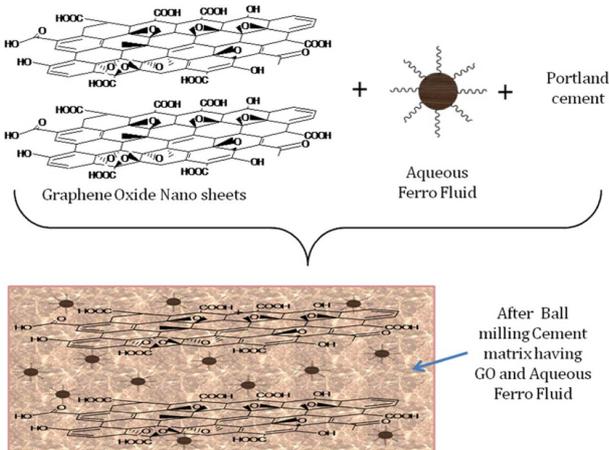


Fig. 4. Schematic representation of the ferrofluid-cement matrix having graphene oxide nanosheets [32]

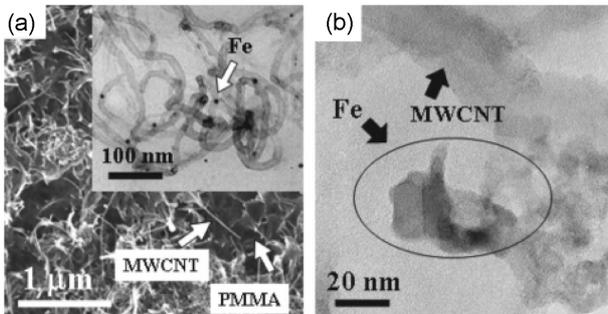


Fig. 5. SEM image of MWCNT-Fe composite film [34]

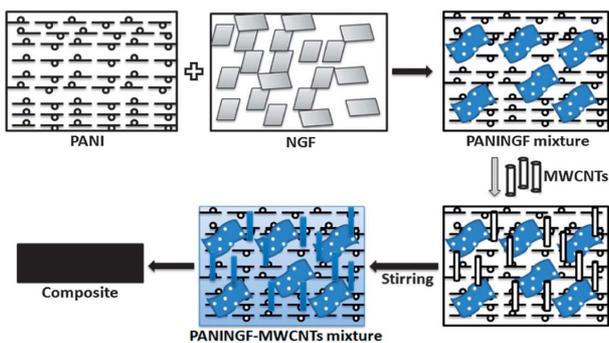


Fig. 6. Schematic of the processing of PNANGF and PANINGF-MWCNTs nanocomposites [35]

에 자성유체(ferrofluid)를 더한 경우 30 wt%의 많은 필러량이 필요한 한계가 있다[32].

철 촉매 입자가 포함된 탄소 나노튜브를 차폐제로 적용할 때는(Fig. 5), 광대역에 걸쳐(0.05-13.5 GHz) 전자파 차폐성능을 나타냈으나, 27 dB 정도의 낮은 효율을 보였다[34].

한편 Fig. 6의 경우, 서로 다른 종류의 탄소계 물질인 그래핀과 탄소나노튜브를 혼합하여, 공간전하분극(space charge polarization)의 증가와, 캐리어 이동도(carrier mobility)를 감소시킬 수 있는 시너지 효과를 통해, 전기 전도성, 차폐효율, 강도를 극대화 시키는 연구도 보고되었다[35].

6. 3-Phase 탄소계 물질

그래핀 기반 3-phase의 나노구조체 합성 결과가 몇몇 보고가 되었고[36-38], 높은 차폐효율을 보였다[39,40]. 팽창

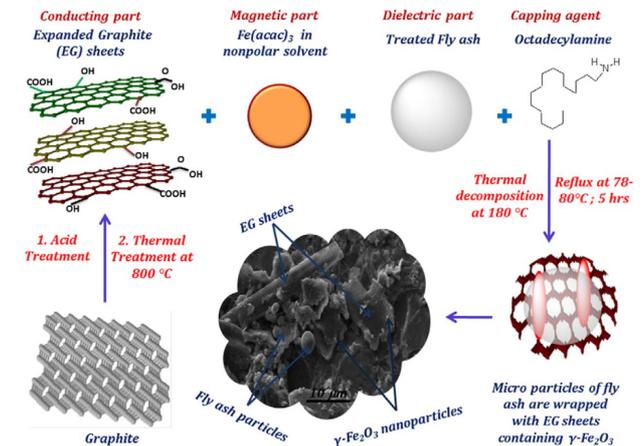


Fig. 7. Schematic representation of preparation of different composite of EG/ γ -Fe₂O₃/fly ash with varying ratios of EG, γ -Fe₂O₃ and fly ash using ODA as a capping agent in the organic medium [39]

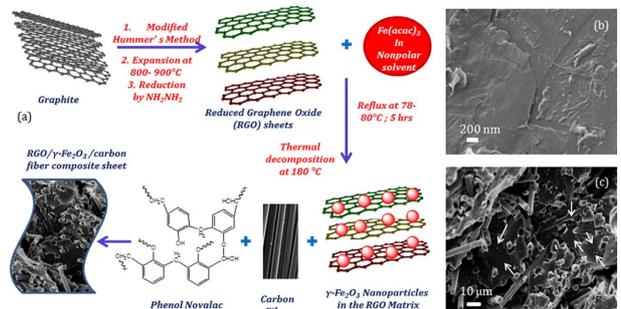


Fig. 8. Schematic representation of preparation of phenolic resin-based composite sheets containing different wt.% of RGO, γ -Fe₂O₃ nanoparticles and carbon fibers in the organic medium, (b) SEM images of RGO and (c) RGO/ γ -Fe₂O₃ sheet having 1% carbon fiber and 50 wt.% of phenolic resin showing the pullouts of carbon fibers and the fracture surface of sheet [40]

흑연-나노페라이트-플라이애쉬 복합재(expanded graphite-nanoferrite-fly ash composite)는(Fig. 7) 높은 차폐효율(98 dB at 12 GHz)을 보이나, 필름의 두께가 두껍고 좁은 대역(narrow bandwidth)에서만 성능이 발휘되는 한계점이 있다[39].

3-phase 환원된 그래핀 옥사이드-산화철-탄소 섬유 복합재(reduced graphene oxide- γ -Fe₂O₃-carbon fibers composite)는(Fig. 8) 전기 전도성이 향상되고(173.13 S/Cm) 차폐효율이 향상되었다(45 dB at 12 GHz). 그러나 높은 필러 함량이 필요한 단점이 있다[40].

그래핀, 탄소나노튜브, 산화철 나노입자가 하나의 나노구조체 내에 포함된다면, 도전 손실(conduction loss), 이력 손실(hysteresis loss), 다중 산란(multiple scattering)이 복합적으로 발현하여 전자파 차폐효율(EMI shielding effectiveness)을 극대화할 수 있다. 단순히 그래핀, 탄소나노튜브, 산화철 입자를 혼합한 나노 복합재의 경우, 각각의 나노입자들끼리의 바인딩(binding)을 강화하고, 분산(dispersion)을 시키기 위해, 추가적으로 화학적, 물리적 처리가 필요하다. 탄소나노튜브와 그래핀 사이의 결합(bonding)을 향상시키기 위해, 산처리가 필요하고 이 과정에서 탄소나노튜브에 있던 산화철 나노입자가 씻겨 나가기 때문, 이력 손실이 줄어들게 된다. 게다가 그래핀 시트의 리스테킹 현상을 막고 균일한 분산을 위해 초음파를 이용한 균질화(homogenization), 볼밀링(ball milling) 과정이 추가적으로 필요하다[35]. 샌드위치 네트워크 구조의 탄소나노튜브-환원된 그래핀 옥사이드 복합재(sandwich network of carbon nanotube-reduced graphene oxide composite)의 경우(Fig. 9), 드롭 캐스팅 방법(drop casting method)를 통하여 합성하며, 탄소나노튜브, 산화철, 환원된 그래핀 옥사이드 사이의 결합이 약한 단점이 있다[41].

한편, Fig. 10과 같이, 오다코 메커니즘(Odako mechanism)을 통해 끝단 성장(tip growth)을 통하여 탄소나노튜브가 그

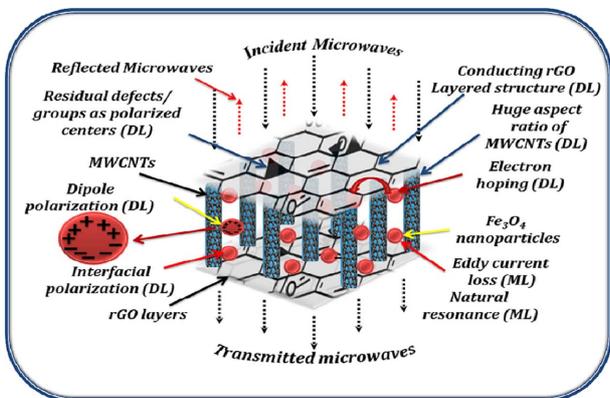


Fig. 9. Schematic presentation of the interaction of EM wave with sandwich network of vertically aligned carbon nanotube-reduced graphene oxide composites [41]

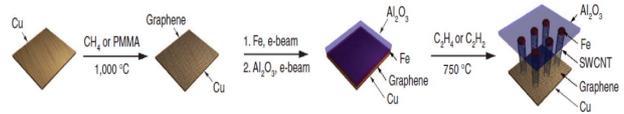


Fig. 10. Scheme for the synthesis of CNT carpets directly from graphene [42]

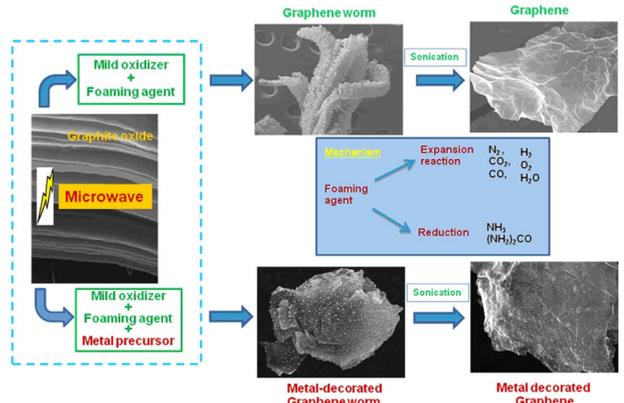


Fig. 11. One-pot synthesis of pristine and graphene decorated with metal nanoparticles [31]

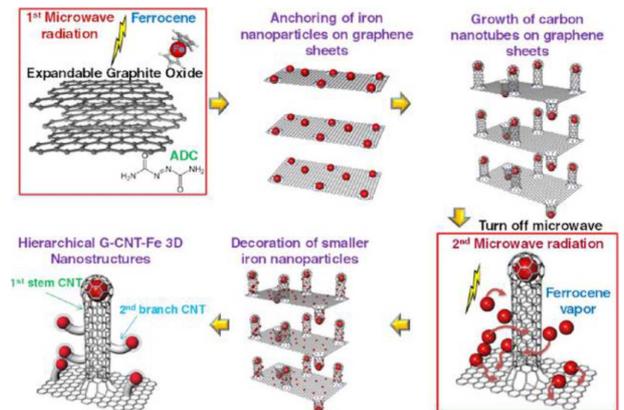


Fig. 12. Two-step synthesis of hierarchical G-CNT-Fe 3D nanostructure [38]

래핀 서브스트레이트에 수직으로 자라난 구조도 최근 보고되었다[42]. 그래핀과 탄소나노튜브 사이에 강력한 공유 결합(C-C covalent bonding)이 형성되어 있고, 자성을 띠는 나노입자가 3차원 구조체에 데코레이트(decorated)가 된 형상이다. 이 구조체의 경우 E-빔 증착(E-beam evaporation)과 화학 기상 증착법(Cheical Vapour Deposition, CVD)과 같은 복잡하고 시간이 많이 소요되는 공정이 필요한 단점이 있다.

이에 그래핀, 탄소나노튜브, 산화철을 하나의 구조체에 포함하는 이종나노구조체(multi phase heteronanostructure)를 한번에 간단하게(simple one pot method) 만들 수 있는 합성법의 필요성이 대두되었다. Fig. 11과 같은, 마이크로파 기법을 사용하여 금속 나노파티클이 데코레이트된 그래핀[31], 그래핀-탄소나노튜브-팔라듐 나노구조체[37], Fig. 12

Table 1. EMI shielding effectiveness of various materials

Phase	Materials Filler	EMI SE (dB)	Drawback	Ref.
1-phase Metal	Copper(Cu)	90.2	High density	[2]
	Nickel(Ni)	82.1	High density	[2]
	Stainless steel(S.S)	88.9	High density	[2]
	Ni filaments	83.7	High density	[2]
	Ni fibers	60.3	High density	[2]
	S.S fibers	35.7	High density	[2]
	Al flakes	7.6-14.5	Low EMI SE	[3]
	CuNW(copper nanowire)	35.2	High density	[5]
1-phase Carbon	Steel fiber	70	Long process time	[4]
	Carbon fiber(100um)	5.7-12.6	Low EMI SE	[3]
	Carbon fiber(200um)	8.4-15.8	Low EMI SE	[3]
	Carbon fiber(400um)	14.6-21.8	Low EMI SE	[3]
	Graphene	21	Low EMI SE	[24]
	Graphene foam	30	Low modulus	[27]
	SWCNT	15.0-20.0	Low EMI SE	[11]
	MWCNT	35.6-36.8	Low EMI SE	[12]
	rGO	34.5-37.5	Low EMI SE	[18]
Flexible graphite	129.4	Thick film	[16]	
2-phase Carbon	MWCNT/graphene	85.0-98.0	Thick film	[35]
	MWCNT/Fe	~27	Low EMI SE	[34]
	Graphene oxide/ferrofluide	46.3-48.3	High filler contents	[32]
3-phase Carbon	rGO/ γ -Fe ₂ O ₃ /carbon fiber	45.26	High filler contents	[40]
	Expanded graphite/nanoferrite (γ -Fe ₂ O ₃)/fly ash	79.0-98.2	Thick film	[39]

와 같은 계층적 3차원 그래핀-탄소나노튜브-산화철 구조체 [38] 등을 합성한 선행보고가 있다.

마이크로파 방법을 이용하여 빠르고 손쉽게 그래핀, 탄소나노튜브, 산화철을 하나의 구조체에 포함하는 3D- G-CNT-Fe 나구조체를 합성하여 전자파 차폐물질로 적용한다면, 도전손실, 이력손실을 동시에 발현하는 우수한 차폐 효율을 가질 것으로 기대한다.

앞서 언급한 금속계 물질, 1-phase 탄소물질, 2-phase 탄소물질, 3-phase 탄소 물질의 차폐성능과 한계점에 대해 Table 1에 정리하였다.

7. 요약

전통적인 사용된 금속계 차폐 물질에 비해 탄소계 필러

가 가볍고 기계적 강도가 우수하고, 부식에 대한 내구성이 있어 활발히 연구되고 있다. 탄소섬유, 팽창흑연, 그래핀, 탄소나노튜브와 같은 1-phase 단일계 탄소계 물질, 그래핀이나 탄소나노튜브에 메탈을 데코레이트하거나 그래핀/탄소나노튜브를 혼합한 2-phase 탄소계 물질, 그래핀-탄소나노튜브, 산화철이 복합적으로 구성되어 도전손실과 이력손실을 복합적으로 발현하여 가장 차폐효율이 높은 3-phase 탄소계 물질이 있다. 3-phase 탄소계 물질을 합성하기 위해서, 단순 혼합, 드롭 캐스팅, 화학 기상 증착법등의 기법이 있으나 복잡하고 시간이 오래걸리는 한계점이 있었고, 마이크로파 합성법을 이용할 경우, 빠르고 손쉽게 우수한 차폐효율을 가지는 나노물질을 합성할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A3A2028975).

REFERENCES

- Tong, X.C., *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*, CRC Press, Abingdon, UK, 2009.
- Shui, X., and Chung, D.D.L., "Nickel Filament Polymer-Matrix Composites with Low Surface Impedance and High Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 26, No. 8, 1997, pp. 928-934.
- Li, L., and Chung, D.D.L., "Electrical and Mechanical Properties of Electrically Conductive Polyethersulfone Composites," *Composites*, Vol. 25, No. 3, 1994, pp. 215-224.
- Wen, S., and Chung, D.D.L., "Electromagnetic Interference Shielding Reaching 70 dB in Steel Fiber Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 39-332.
- Al-Saleh, M.H., Gelves, G.A., and Sundararaj, U., "Copper Nanowire/Polystyrene Nanocomposites: Lower Percolation Threshold and Higher EMI Shielding," *Composites: Part A*, Vol. 42, 2011, pp. 92-97.
- Wang, J., Zhou, H., Zhuang, J., and Liu, Q., "Influence of Spatial Configurations on Electromagnetic Interference Shielding of Ordered Mesoporous Carbon/Ordered Mesoporous Silica/Silica Composites," *Scientific Reports*, Vol. 3, No. 3252, 2013, pp. 1-5.
- Deng, H., Skipa, T., Bilotti, E., Zhang, R., Lellinger, D., Mezzo, L., Fu, Q., Alig, I., and Peijs, T., "Preparation of High-Performance Conductive Polymer Fibers through Morphological Control of Networks Formed by Nanofillers," *Advanced Functional Materials*, Vol. 20, 2010, pp. 1424-1432.
- Cao, M.-S., Song, W.-L., Hou, Z.-L., Wen, B., and Yuan, J., "The Effects of Temperature and Frequency on the Dielectric Properties, Electromagnetic Interference Shielding and Microwave-Absorption of Short Carbon Fiber/Silica Composites," *Carbon*, Vol. 48, 2010, pp. 788-796.

9. Rajagopalan, M., and Oh, I.-K., "Fullerenol-Based Electroactive Artificial Muscles Utilizing Biocompatible Polyetherimide," *ACS Nano*, Vol. 5, No. 3, 2011, pp. 2248-2256.
10. Yang, Y., Gupta, M.C., Dudley, K.L., and Lawrence, R.W., "Novel Carbon Nanotube-Polystyrene Foam Composites for Electromagnetic Interference Shielding," *Nano Letter*, Vol. 5, No. 11, 2005, pp. 2131-2134.
11. Li, N., Huang, Y., Du, F., He, X., Lin, X., Gao, H., Ma, Y., Li, F., Chen, Y., and Eklund, P.C., "Electromagnetic Interference (EMI) Shielding of Single-Walled Carbon Nanotube Epoxy Composites," *Nano Letter*, Vol. 6, No. 6, 2006, pp. 1141-1145.
12. Al-Saleh, M.H., and Sundararaj, U., "Electromagnetic Interference Shielding Mechanisms of CNT/Polymer Composites," *Carbon*, Vol. 47, 2009, pp. 1738-1746.
13. Vázquez, E., and Prato, M., "Carbon Nanotubes and Microwaves: Interactions, Responses, and Applications," *ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, 2009, pp. 3819-3824.
14. Liu, L., and Grunlan, J.C., "Clay Assisted Dispersion of Carbon Nanotubes in Conductive Epoxy Nanocomposites," *Advanced Functional Materials*, Vol. 17, 2007, pp. 2343-2348.
15. Bourdo, S., Li, Z., Biris, A.S., Watanabe, F., Viswanathan, T., and Pavel, I., "Structural, Electrical, and Thermal Behavior of Graphite-Polyaniline Composites with Increased Crystallinity," *Advanced Functional Materials*, Vol. 18, 2008, pp. 432-440.
16. Luo, X., and Chung, D.D.L., "Electromagnetic Interference Shielding Reaching 130 dB Using Flexible Graphite," *Carbon*, Vol. 34, No. 10, 1996, pp. 1293-1303.
17. Huang, W., Ouyang, X., and Lee, L.J., "High-Performance Nanopapers Based on Benzenesulfonic Functionalized Graphenes," *ACS Nano*, Vol. 6, No. 11, 2012, pp. 10178-10185.
18. Wen, B., Cao, M., Lu, M., Cao, W., Shi, H., Liu, J., Wang, X., Jin, H., Fang, X., Wang, W., and Yuan, J., "Reduced Graphene Oxides: Light-Weight and High Efficiency Electromagnetic Interference Shielding at Elevated Temperatures," *Advanced Materials*, Vol. 26, 2014, pp. 3484-3489.
19. Yousefi, N., Sun, X., Lin, X., Shen, X., Jia, J., Zhang, B., Tang, B., Chan, M., and Kim, J.-K., "Highly Aligned Graphene/Polymer Nanocomposites with Excellent Dielectric Properties for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding," *Advanced Materials*, Vol. 26, 2014, pp. 5480-5487.
20. Yan, D.-X., Pang, H., Li, B., Vajtai, R., Xu, L., Ren, P.-G., Wang, J.-H., and Li, Z.-M., "Structured Reduced Graphene Oxide/Polymer Composites for Ultra-Efficient Electromagnetic Interference Shielding," *Advanced Functional Materials*, Vol. 25, 2014, pp. 559-566.
21. Kim, J., Jeon, J.-H., Kim, H.-J., Lim, H., and Oh, I.-K., "Durable and Water-Floatable Ionic Polymer Actuator with Hydrophobic and Asymmetrically Laser-Scribed Reduced Graphene Oxide Paper Electrodes," *ACS Nano*, Vol. 8, No. 3, 2014, pp. 2986-2997.
22. Zhang, H.B., Yan, Q., Zheng, W.G., He, Z., and Yu, Z.Z., "Tough Graphene-Polymer Microcellular Foams for Electromagnetic Interference Shielding," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 3, 2011, pp. 918-924.
23. Eswaraiyah, V., Sankaranarayanan, V., and Ramaprabhu, S., "Functionalized Graphene-PVDF Foam Composites for EMI Shielding," *Macromolecular Materials and Engineering*, Vol. 296, 2011, pp. 894-898.
24. Liang, J., Wang, Y., Huang, Y., Ma, Y., Liu, Z., Cai, J., Zhang, C., Gao, H., and Chen, Y., "Electromagnetic Interference Shielding of Graphene/epoxy Composite," *Carbon*, Vol. 47, 2009, pp. 922-925.
25. Shen, B., Zhai, W., and Zheng, W., "Ultrathin Flexible Graphene Film: An Excellent Thermal Conducting Material with Efficient EMI Shielding," *Advanced Functional Materials*, Vol. 24, 2014, pp. 4542-4548.
26. Hong, S.K., Kim, K.Y., Kim, T.Y., Kim, J.H., Park, S.W., Kim, J.H., and Cho, B.J., "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Monolayer Graphene," *Nanotechnology*, Vol. 23, No. 455704, 2012, pp. 1-5.
27. Chen, Z., Xu, C., Ma, C., Ren, W., and Cheng, H.-M., "Light-weight and Flexible Graphene Foam Composites for High-Performance Electromagnetic Interference Shielding," *Advanced Materials*, Vol. 25, 2013, pp. 1296-1300.
28. Batrakov, K., Kuzhir, P., Maksimenko, S., Paddubskaya, A., Voronovich, S., Lambin, P., Kaplas, T., and Svirko, Y., "Flexible Transparent Graphene/polymer Multilayers for Efficient Electromagnetic Field Absorption," *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 7191, 2014, pp. 1-5.
29. Kim, G.-T., Gim, S.-J., Cho, S.-M., Koratkar, N., and Oh, I.-K., "Wetting-Transparent Graphene Films for Hydrophobic Water-Harvesting Surfaces," *Advanced Materials*, Vol. 26, 2014, pp. 5166-5172.
30. Lee, S.-H., Jung, J.-H., and Oh, I.-K., "3D Networked Graphene-Ferromagnetic Hybrids for Fast Shape Memory Polymers with Enhanced Mechanical Stiffness and Thermal Conductivity," *Small*, Vol. 10, No. 19, 2014, pp. 3880-3886.
31. Sridhar, V., Jung, J.-H., and Oh, I.-K., "Microwave Syntheses of Graphene and Graphene Decorated with Metal Nanoparticles," *Carbon*, Vol. 49, 2011, pp. 4449-4457.
32. Singh, A.P., Mishra, M., Chandra, A., and Dhawan, S.K., "Graphene Oxide/ferrofluide/cement Composites for Electromagnetic Interference Shielding Application," *Nanotechnology*, Vol. 22, No. 465701, 2011, pp. 1-9.
33. Li, Y.-A., Tai, N.-H., Chen, S.-K., and Tsai, T.-Y., "Enhancing the Electrical Conductivity of Carbon-Nanotube-Based Transparent Conductive Films Using Functionalized Few-Walled Carbon Nanotubes Decorated with Palladium Nanoparticles as Fillers," *ACS Nano*, Vol. 5, No. 8, 2011, pp. 6500-6506.
34. Kim, H.M., Kim, K., Lee, C.Y., Joo, J., Cho, S.J., Yoon, H.S., Pejaković, D.A., Yoo, J.W., and Epstein, A.J., "Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding of Multi-walled Carbon Nanotube Composites Containing Fe Catalyst," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, No. 4, 2004, pp. 589-591.
35. Gupta, T.K., Singh, B.P., Mathur, R.B., and Dhakate, S.R., "Multi-walled Carbon Nanotube-graphene-polyaniline Multi-phase Nanocomposite with Superior Electromagnetic Shielding Effectiveness," *Nanoscale*, Vol. 6, 2014, pp. 842-851.
36. Kim, H.-J., Randriamahazaka, H., and Oh, I.-K., "Highly Conductive, Capacitive, Flexible and Soft Electrodes Based on a 3D

- Graphene-Nanotube-Palladium Hybrid and Conducting Polymer,” *Small*, Vol. 10, No. 24, 2014, pp. 5023-5029.
37. Sridhar, V., Kim, H.-J., Jung, J.-H., Lee, C., Park, S., and Oh, I.-K., “Defect-Engineered Three-Dimensional Graphene-Nanotube-Palladium Nanostructures with Ultrahigh Capacitance,” *ACS Nano*, Vol. 6, No. 12, 2012, pp. 10562-10570.
 38. Lee, S.-H., Sridhar, V., Jung, J.-H., Karthikeyan, K., Lee, Y.-S., Mukherjee, R., Koratkar, N., and Oh, I.-K., “Graphene-Nanotube-Iron Hierarchical Nanostructure as Lithium Ion Battery Anode,” *ACS Nano*, Vol. 7, No. 5, 2013, pp. 4242-4251.
 39. Mishra, M., Singh, A.P., and Dhawan, S.K., “Expanded Graphite-Nanoferrite-Fly Ash Composites for Shielding of Electromagnetic Pollution,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 557, 2013, pp. 244-251.
 40. Singh, A.P., Garg, P., Alam, F., Singh, K., Mathur, R.B., Tandon, R.P., Chandra, A., and Dhawan, S.K., “Phenolic Resin-Based Composite Sheets Filled with Mixtures of Reduced Graphene Oxide, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and Carbon Fibers for Excellent Electromagnetic Interference Shielding in the X-band,” *Carbon*, Vol. 50, 2012, pp. 3868-3875.
 41. Singh, A.P., Mishra, M., Hashim, D.P., Narayanan, T.N., Hahm, M.G., Kumar, P., Dwivedi, J., Kedawat, G., Gupta, A., Singh, B.P., Chandra, A., Vajtai, R., Dhawan, S.K., Ajayan, P.M., and Gupta, B.K., “Probing the Engineered Sandwich Network of Vertically Aligned Carbon Nanotube-Reduced Graphene Oxide Composites for High Performance Electromagnetic Interference Shielding Applications,” *Carbon*, Vol. 85, 2015, pp. 79-88.
 42. Zhu, Y., Li, L., Zhang, C., Casillas, G., Sun, Z., Yan, Z., Ruan, G., Peng, Z., Raji, A.-R.O., Kittrell, C., Hauge, R. H., and Tour, J.M., “A Seamless Three-Dimensional Carbon Nanotube Graphene Hybrid Material,” *Nature Communications*, Vol. 3, No. 1225, 2012, pp. 1-7.