Composites Research

Vol. 28, No. 6, 333-339 (2015)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2015.28.6.333
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Special Issue Paper

FeCo 자성 금속 중공형 섬유 고분자 복합재의 전자파 차폐 특성 연구

최재령* · 정병문* · 최우혁* · 조승찬* · 박가현* · 김원정* · 이상관* · 이상복*†

Characterization of FeCo Magnetic Metal Hollow Fiber/EPDM Composites for Electromagnetic Interference Shielding

Jae Ryung Choi*, Byung Mun Jung*, U Hyeok Choi*, Seung Chan Cho*, Ka Hyun Park*, Won-jung Kim*, Sang-Kwan Lee*, Sang Bok Lee*†

ABSTRACT: Electromagnetic interference shielding composite with low density (1.18 g/cm^3) was fabricated using electroless plated FeCo magnetic metal hollow fibers and ethylene propylene diene monomer (EPDM) polymer. Aspect ratio of the fibers were controlled and their hollow structure was obtained by heat treatment process. The FeCo hollow fibers were then mixed with EPDM to manufacture the composite. The higher aspect ratio of the magnetic metal hollow fibers resulted in high electromagnetic interference shielding effectiveness (30 dB) of the composite due to its low sheet resistance (30 ohm/sq). The enhanced electromagnetic interference shielding effectiveness was mainly attributed to the formation of conducting network over the percolation threshold by high aspect ratio of fibers as well as an increase of the reflection loss by impedance mismatch owing to low sheet resistance, absorption loss, and multiple internal reflections loss.

초 록: 무전해 도금을 통해 제조한 FeCo 자성 금속 중공형 섬유와 EPDM 고분자를 이용하여 전자파 차폐 복합재를 제작하였다. 열처리 공정을 통하여 섬유의 종횡비를 제어하였으며 중공형 구조로 섬유를 제조한 후, 이를 EPDM 수지에 첨가하여 복합재를 제조하였다. 자성 금속 중공형 섬유의 종횡비가 클수록 낮은 표면 저항 특성과 우수한 전자파 차폐 성능을 나타내었다. 약 100 μm 길이의 자성 금속 중공형 섬유를 이용한 두께 150 μm 전자파 차폐 복합재의 경우 밀도 1.18 g/cm^3, 약 30 ohm/sq의 표면 저항, 그리고 30 dB의 전자파 차폐 성능을 나타내었다. 이는 종횡비가 큰 섬유에 의한 퍼콜레이션 임계치 이상의 전도성 네트워크 형성과 더불어, 낮은 표면 저항에 기인한 임피던스 차이에 의한 반사 손실 증가, 흡수 손실, 그리고 다중 내부 반사 손실에 의하여 우수한 전자파 차폐 성능을 나타내는 것으로 판단된다.

Key Words: 전자파 차폐 복합재(Electromagnetic interference shielding composite), 무전해 도금(Electroless plating), 자성 금속 중공형 섬유(Magnetic metal hollow fiber), 표면 저항(Sheet resistance), 전자파 차폐 성능(Electromagnetic interference shielding effectiveness)

1. 서 론

최근 전자기기의 급격한 발달로 인한 전자파 장해(Electromagnetic Interference, EMI) 문제가 대두되고 있다. 전자파 장해로 인하여 전자제품, 정보통신기기, 의료기기 및 군사장비 등에 노이즈가 발생하거나 오작동이 발생하는 경우가 보고되고 있으며, 기기의 다기능화, 경량화 및 경박 단소화 경향에 따른 고밀도, 고집적 그리고 복합화는 전

Received 2 October 2015, accepted 18 December 2015

*Functional Composites Department, Korea Institute of Materials Science (KIMS)
*†Functional Composites Department, Korea Institute of Materials Science (KIMS), Corresponding author (E-mail: leesb@kims.re.kr)

자파 장해를 더욱 유발시키는 원인이 되고 있다[1,2].

전자파는 전자기기뿐만 아니라 인체에도 큰 영향을 미치는데, 강한 전자파에 인체가 지속적으로 노출되면 면역체계 이상 증상뿐만 아니라 신경 및 뇌세포까지도 자극을 받게 되어 질환 발생 확률이 증가하게 된다. 특히 임산부의 경우 유해 전자파로 인한 유산이나 기형아 출산 확률이 높아지며, 청소년의 경우 뇌 학습 능력이 저하되어 주의력 결핍 과잉행동장애인 ADHD 발병 위험이 증가하게 된다[3-5]. 최근 세계 각국에서는 전자파 장해 방지 국제 규격인 전자파 적합성(Electromagnetic Compatibility, EMC)을 통해 전자파의 폐해를 방지하고 유해 전자파를 감소시키기 위한 노력을 가하고 있다[6,7]. 따라서 효과적으로 전자파 장해를 방지하는 것은 전자 부품의 성능 향상 및 수명 연장의 핵심 사안이며, 유해 전자파가 인체에 미치는 악영향을 줄여 삶의 질을 향상시킬 수 있는 중요한 요소이다.

이러한 유해 전자파 장해 방지 방책으로 전자파 차폐가 대두되고 있다. 일반적으로 전자파 차폐재로 전기적 특성이 우수한 금속을 많이 사용하고 있으나 무겁고 쉽게 부식되며 가공성이 좋지 않은 문제점 등을 가지고 있다[8]. 최근 이러한 단점을 보완하기 위하여 경량성과 내환경성, 그리고 높은 생산성을 겸비한 고분자와의 복합재가 부각되고 있다[9]. 특히 금속-고분자 복합재의 경우 종횡비가 큰 금속 섬유 형상이 주목받고 있는데, 이는 낮은 함량에서도 높은 종횡비에 의하여 도전성 경로가 확대되고 그로 인해 경량성 확보와 더불어 전도성 증가에 따른 우수한 전자파 차폐 특성을 구현하기 때문이다[10-13].

본 연구에서는 자성 금속 중공형 섬유를 이용하여 고분자 복합재 전자파 차폐 필름을 제조하였다. 낮은 함량에서 전도성을 확보하기 위하여 높은 종횡비를 갖는 자성 금속 섬유를 이용하였으며 경량성을 구현하기 위하여 무전해 도금을 통해 중공형 구조의 자성 금속 섬유를 제조하였다. 특히 자성 금속 중공형 섬유의 길이에 따른 전자파 차폐 특성 비교를 위해 자성 금속 섬유의 열처리 조건을 달리하여 각기 다른 종횡비를 갖는 자성 금속 중공형 섬유를 제조하였다. 또한 복합재의 두께에 따른 전자파 차폐 특성을 비교 분석하기 위해 캐스팅 두께를 달리하여 복합재의 두께를 조절하였다. 제작된 전자파 차폐 복합재 필름의 미세 구조 및 섬유 구조 형상을 평가하기 위하여 표면 분석과 X-선 회절 분석을 수행하였으며 전기적 특성을 평가하기 위하여 표면 저항을 측정하였다. 8.2~12.4 GHz 주파수 대역에서의 전자파 차폐 성능을 평가, 비교하였으며 측정된 전자파 차폐 성능과 표면 저항의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서는 자성 금속 중공형 섬유를 제조하기 위하여 Huvis Corporation에서 생산된 180 μm 길이의 polyester 해도사를 사용하였다. 전자파 차폐 복합재 제작에 사용된 고분자 수지는 EPDM이며 GM Tech에서 구입하였다. EPDM의 점도를 낮추기 위하여 toluene과 xylene을 희석제로 사용하였으며 Sigma-Aldrich에서 공급받아 정제없이 사용하였다.

2.2 FeCo 자성 금속 중공형 섬유 제조

자성 금속 중공형 섬유를 제조하기 위해서 극세사 표면에 FeCo 자성 금속을 무전해 도금한 후 열처리 공정을 진행하였다. 먼저 극세사를 제조하기 위해 polyester 해도사를 NaOH 강염기 수용액에서 30분 동안 감량시켰다. 감량된 직경 2 μm의 극세사 표면에 이원계 자성 금속인 FeCo을 무전해 도금하기 위하여 활성화 전처리 공정을 진행하였다. tin(II) chloride($SnCl_2$, Sigma Aldrich)와 palladium(II) chloride($PdCl_2$, Samchun Chemical)을 이용하여 극세사 표면에 자성 금속 도금을 촉진시키기 위한 Sn/Pd 핵을 형성하였다[14]. FeCo 무전해 도금욕의 구성으로 iron(II) sulfate heptahydrate($FeSO_4{\cdot}7H_2O$, Junsei Chemical), cobalt(II) sulfate heptahydrate($CoSO_4{\cdot}7H_2O$, Junsei Chemical)는 각각 Fe와 Co를 무전해 도금하기 위하여 첨가되었으며 sodium tartrate (Sigma Aldrich), sodium citrate(Sigma Aldrich)는 착화제로 이용되었다. sodium metavanadate(Sigma Aldrich)는 반응 속도를 느리게 제어하여 FeCo 자성 금속층을 균일하게 도금시키는 역할을 하며 ammonium sulfate(Alfa Aesar)는 버퍼로, phosphorous acid(Alfa Aesar)와 borane-dimethylamine (DMAB, Alfa Aesar)는 환원제로 사용되었다[15]. 무전해 도금은 pH 9, 온도 75°C 조건에서 1시간 동안 진행되었으며 ethanol로 세척 후 하루 동안 진공 건조하였다.

Polyester 극세사에 무전해 도금된 FeCo 자성 금속 섬유를 중공형 구조의 섬유로 제조하기 위해서는 고온의 열처리 공정이 필요하며, 자성 금속 중공형 섬유의 종횡비를 제어하기 위해서는 각기 다른 열처리 조건이 필요하다. 약 100, 15 μm 길이의 중공형 섬유를 제조하기 위해 각각 700, 1000°C에서 고온 열처리 공정을 진행하였다. FeCo 중공형 섬유의 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기에서 열처리를 진행하였으며 분당 5°C의 승온 속도로 1 h 동안 상기 온도조건을 유지하였다.

2.3 자성 금속 중공형 섬유 고분자 복합재 필름 제조

전자파 차폐 복합재 필름을 제작하기 위하여 제조한 FeCo 자성 금속 중공형 섬유를 EPDM 고분자 수지에 분산하였다. EPDM의 점도를 낮추기 위하여 toluene과 xylene을 무게비 1:1로 혼합한 용매를 EPDM 고분자 수지와 무게비 7:3으로 혼합하여 희석하였다. EPDM 고분자 수지 내 자성 금속 중공형 섬유를 30 wt%, 부피비로 약 4.5 vol% 함량으로 혼합하였으며 중공형 섬유의 분산성을 높이기 위해 homogenizer (PT 2500E, KINEMATICA)를 이용하여 10000 rpm으로 20분

동안 효과적으로 교반을 실시하였다. 혼합 및 분산 과정에서 발생한 기포와 용매를 제거하기 위하여 60°C에서 약 1시간 동안 진공 탈포 과정을 진행하였다.

Comma roll을 이용하여 필름 형태의 전자파 차폐 복합재를 제조하였다. Casting 높이는 500 μm와 700 μm로 고정하여 시편 제작을 진행하였으며 상온에서 하루 동안 건조하였다. 자성 금속 중공형 섬유 고분자 복합재 내 toluene, xylene 용매가 건조과정 동안 증발되어 각각 100 μm와 150 μm의 최종 두께를 갖는 전자파 차폐 복합재를 제작하였다. 전자파 차폐 복합재의 차폐 특성을 평가하기 위하여 가로, 세로 150 mm × 150 mm 정사각형 필름 형태의 시편으로 복합재를 가공하였다.

2.4 전자파 차폐 복합재 특성 평가

FeCo 자성 금속 중공형 섬유 전자파 차폐 복합재의 차폐 성능을 평가하기 위해 Free space measurement system (HVS Technologies)을 이용하여 제작된 150 mm × 150 mm 전자파 차폐 복합재를 주파수 8.2~12.4 GHz의 범위에서 차폐 성능을 측정, 분석하였다. 차폐 소재의 차폐 성능과 필름의 전기적 특성을 비교, 평가하기 위하여 4 point probe(Napson Corporation, Cresbox)를 이용하여 표면 저항을 측정하였다. 동일한 시편의 각기 다른 지점에 대해 10회 반복 측정을 실시하여 유사값에 대해 평균값을 계산하였다. 제조된 자성 금속 중공형 섬유와 제작된 전자파 차폐 복합재의 분산성과 건전성을 평가하기 위하여 주사 전자 현미경(SEM, JSM-5800, JEOL Ltd.)과 광학 현미경(OM, LV150N, Nikon)을 사용하여 미세구조를 분석하고 섬유의 결정성을 평가하기 위하여 X-선 회절분석(XRD, D/MAX-2500V, Rigaku)을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 무전해 도금과 고온의 열처리 공정을 통하여 제조한 FeCo 자성 금속 중공형 섬유를 나타낸 SEM 이미지이다. NaOH 강염기 분위기에서 해도사를 감량하여 약 2 μm의 직경을 가지는 극세사를 제조한 후 FeCo을 무전해 도금하여 약 500 nm 두께의 자성 금속층을 도금하였다. 고온의 열처리 공정을 통하여 polyester 극세사를 제거하고 중공형 구조의 섬유를 제조하였다. 고온의 열처리 공정을 통해 중공형 구조의 섬유를 구현 가능하게 하여 충진제로써의 경량성을 높였을 뿐만 아니라, 자성 금속층의 조직과 상을 제어하여 결정성을 높이고 더 치밀한 FeCo 구조를 형성하였다[16]. Fig. 2의 X-선 회절분석 결과에서 알 수 있듯이 열처리 전의 자성 금속 섬유의 경우 약한 결정성을 갖는 amoprhous 구조의 FeCo 상을 보이고 있지만 열처리 후의 자성 금속 중공형 섬유는 FCC 구조의 FeCo 상을 나타내며 결정성이 증가함을 알 수 있으며, 더불어 고온의 열처리 공정 동안 FeCo 자성 금속 도금층이 산화되지 않음을 확인할 수 있다[17].

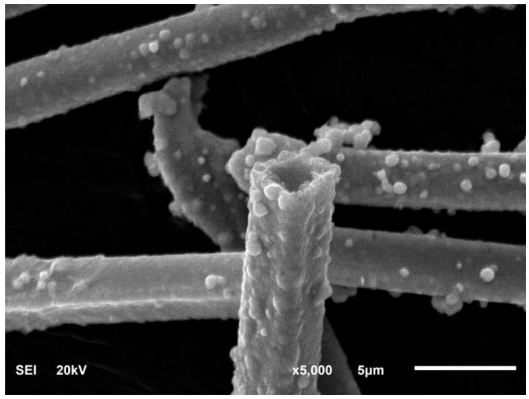

Fig. 1. SEM image of the FeCo magnetic metal hollow fiber after electroless plating and heat treatment process

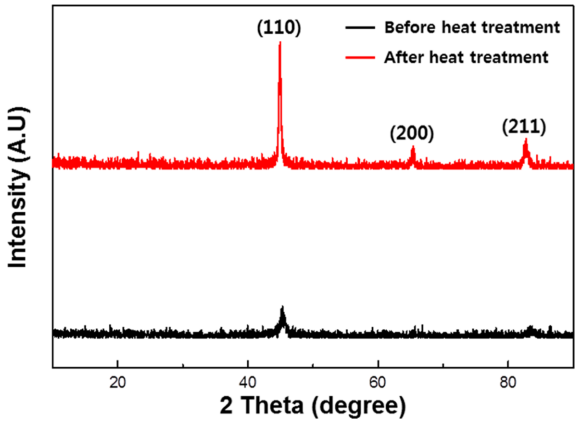

Fig. 2. XRD spectrum of FeCo magnetic metal hollow fiber before (black) and after (red) heat treatment process

Table 1. Summary of physical properties of the electromagnetic interference shielding composites

Sample	Film thickness (μm)	Density (g/cm^3)	Fiber mean length (μm)
S1	100	1.12	14.9
S2	150	1.18	16.7
S3	110	1.17	88.1
S4	150	1.18	91.4

제조한 FeCo 자성 금속 중공형 섬유와 EPDM 고분자 수지를 혼합하여 전자파 차폐 복합재 필름을 Table 1과 같은 조건으로 제작하였다. 전자파 차폐 성능에 영향을 미치는 요인을 평가 분석하기 위하여 자성 금속 중공형 섬유의 종횡비와 복합재 필름의 두께를 제어하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 S1과 S2 시편의 경우 약 15 μm의 길이를 갖는 자성 금속 중공형 섬유를 이용하여 각각 100 μm, 150 μm 의 두께를 갖는 전자파 차폐 복합재를 제조하였다. S3와 S4 시편

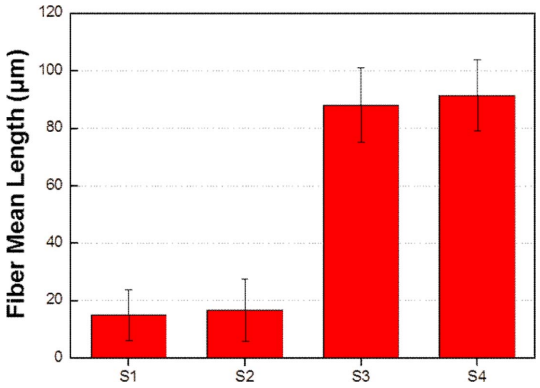

Fig. 3. FeCo magnetic metal hollow fiber mean length in electromagnetic interference shielding composites

의 경우 약 100 μm의 길이를 갖는 자성 금속 중공형 섬유를 이용하여 각각 100 μm, 150 μm의 두께를 갖는 전자파 차폐 복합재를 제조하였다. 중공형 섬유의 독특한 구조로 인하여 제작된 전자파 차폐 복합재 시편들은 약 1.1~1.2 g/cm^{3}의 낮은 밀도를 나타낸다. 보통 금속이 충진된 고분자 복합재의 경우 금속의 높은 밀도로 인하여 통상 2.0 g/cm^3 이상의 밀도를 갖게 되는데[18] 본 연구에서 제조한 자성 금속 섬유의 경우 섬유의 중간이 비어있는 구조를 가지고 있어 전자파 차폐 복합재의 밀도를 낮추고 경량성을 구현할 수 있다.

무전해 도금 자성 금속 섬유의 열처리 공정을 통하여 중공형 구조의 섬유를 제조하고 결정상을 제어할 뿐만 아니라[19], 중공형 종횡비를 제어하였다. 열처리 공정에서

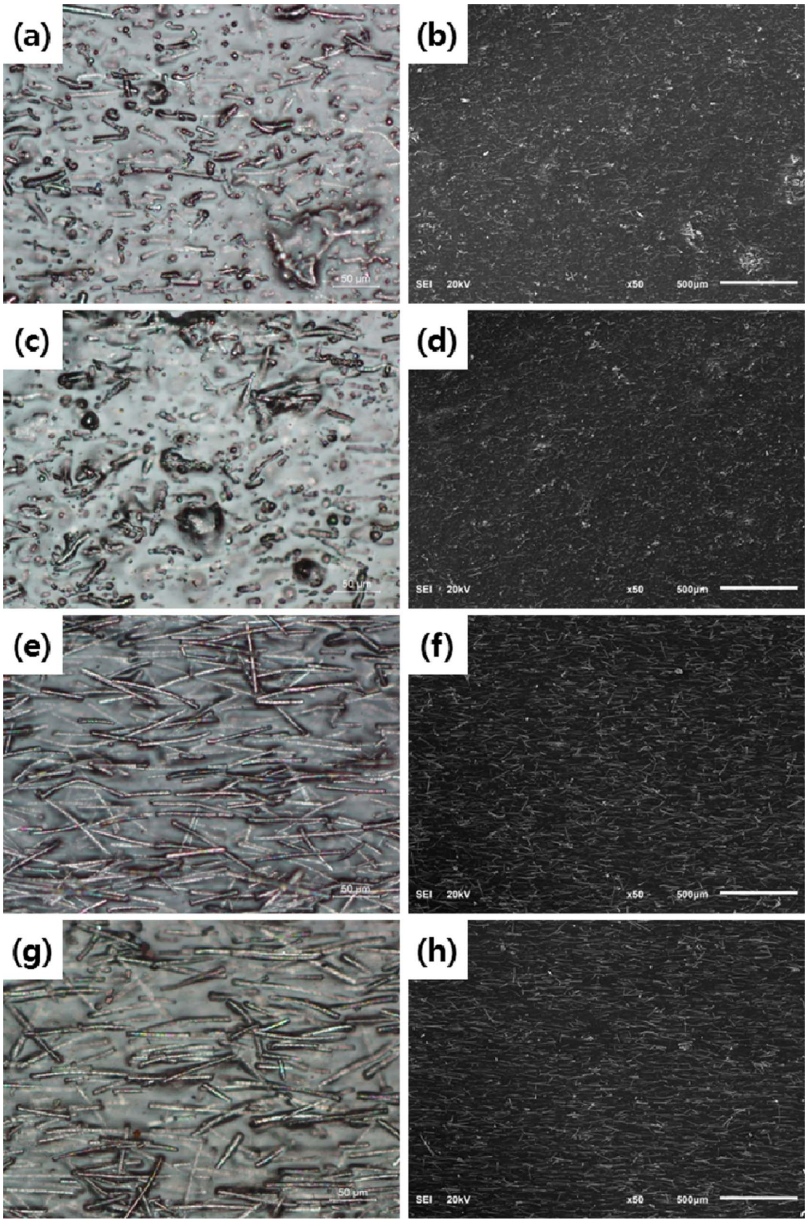

Fig. 4. (a, c, e, g) OM and (b, d, f, h) SEM images of S1, S2, S3 and S4 composites, respectively

polyester 극세사가 열분해에 의해 CO_2 가스가 생성되고 이로 인해 금속 코팅층 내부에 압력이 발생하며, 자성 금속 도금층에 가스 제거를 위한 크랙이 생성되며 섬유가 파단된다. 열처리를 통한 FeCo 결정화와 함께 일부 산화로 인해 도금층의 취성이 증가 또한 섬유 파단의 원인이 된다. 이러한 현상은 700°C 보다 1000°C의 열처리 조건에서 보다 가속화 되어 섬유의 길이가 15 μm 수준으로 작아지게 된다. 이를 통해 중공형 섬유의 종횡비를 제어할 수 있었다.

Fig. 3은 복합재 필름의 중공형 섬유 길이를 이미지 분석을 통하여 나타낸 도표이다. S1 및 S2는 약 15 μm, S3 및 S4는 약 100 μm의 길이를 가지고 있으며, 약 ±10% 내외의 편차로 일정한 길이를 가지는 것을 확인하였다.

제조된 전자파 차폐 복합재 필름의 표면 미세구조와 분산성 및 건전성을 OM 및 SEM을 통하여 평가 분석하였다. Fig. 4(a), (c), (e), (g)는 각각 제작된 전자파 차폐 복합재 필름 S1, S2, S3, S4의 OM 이미지이며 Fig. 4(b), (d), (f), (h)는 각각 제작된 전자파 차폐 복합재 필름 S1, S2, S3, S4의 SEM 이미지이다. Fig. 4(a), (b), (c), (d)의 경우 1000°C 열처리 자성 금속 중공형 섬유이므로 단섬유 형태를 보이는 반면에 Fig. 4(e), (f), (g), (h)의 경우 700°C 열처리 자성 금속 중공형 섬유이므로 큰 종횡비를 갖는 장섬유 형태인 것을 확인할 수 있었다. EPDM 점도 희석제로 사용한 toluene과 xylene은 FeCo 중공형 섬유-EPDM 복합재 탈포 과정 및 복합재 필름 건조 과정에서 증발되어, 표면 미세구조 이미지에서 확인할 수 있듯이 기포 형태나 국부적 응집 현상을 확인할 수 없었다. 또한 자성 금속 중공형 섬유의 분산이 균일하게 형성되었으며 특히 S1, S2 시편의 단섬유 형태의 중공형 섬유가 무질서하게 캐스팅 된 것에 비하여 S3, S4 시편의 장섬유 형태의 중공형 섬유의 경우 캐스팅 방향에 따라 나란하게 배향된 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 제작된 시편들의 경우 신뢰성과 건전성이 높음을 알 수 있었으며 이를 통해 전자파 차폐 특성 또한 향상 가능함을 알 수 있었다.

전자파 차폐에 많은 영향을 미치는 시편의 전기 전도도 특성을 평가, 분석하기 위하여 표면 저항을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 필름의 표면 저항이 낮을수록 전기 전도도가 향상되며, 높은 전기 전도도를 갖는 시편은 표면에서 전자파를 더욱 반사시켜 전자파를 효과적으로 차폐시킨다[20]. 비슷한 종횡비를 가지는 자성 금속 중공형 섬유를 이용하여 전자파 차폐 복합재를 제작한 S1과 S2, 그리고 S3와 S4는 각각 비슷한 표면 저항 특성을 나타내었다. 그러나 단섬유 형태의 자성 금속 중공형 섬유로 제작한 S1, S2 시편의 경우 표면 저항이 약 10^4 ohm/sq 이상에 이르나, 장섬유 형태의 중공형 섬유로 제작한 S3, S4 시편의 경우 약 30 ohm/sq 으로 약 300배 이상의 낮은 값을 나타내었다. 또한 S1과 S3 시편의 경우 각각 S2와 S4 시편에 비해 평균적으로 약간 짧은 평균 중공형 섬유 길이를 가지고 있는데, 이는 Fig. 5의 표면 저항 특성 결과에서 볼 수 있듯

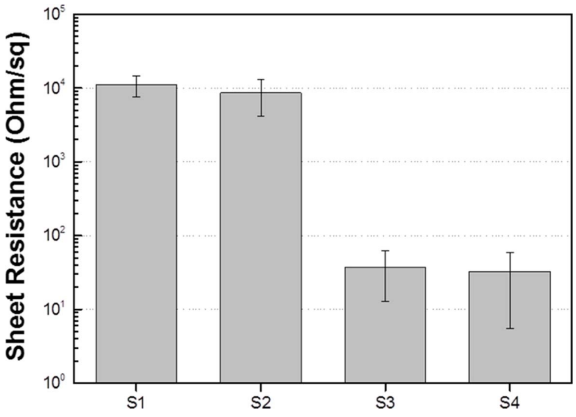

Fig. 5. Sheet resistance of the electromagnetic interference shielding composites

이 S1와 S3 시편은 각각 S2와 S4와 비교하여 약간 높은 표면 저항 특성을 나타내었다. 이는 표면 저항의 특성이 중공형 섬유의 길이와 밀접한 관계에 있음을 나타낸다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 장섬유 형태의 자성 금속 중공형 섬유는 길이가 짧은 섬유에 비해 EPDM 고분자 수지 내에서 고르게 분산되어 전도성 경로를 용이하게 형성하게 되었다. 퍼콜레이션 임계치(Percolation threshold) 이상의 전도성 네트워크가 형성되면서 전기 전도도가 급격하게 증가하고 이는 낮은 표면 저항을 구현할 수 있게 되는 것이다[12]. 종횡비가 큰 장섬유 형태의 FeCo 자성 금속 중공형 섬유는 고분자 수지와의 혼합 분산 과정과 comma roll에 의한 필름 제작 과정에서 고르게 배향되어 퍼콜레이션 전도성 네트워크를 형성하였으며 이는 높은 전기 전도도, 즉 낮은 표면 저항을 구현할 수 있게 되었다.

전자파의 차폐 성능 (Shielding Effectiveness, SE)은 외부의 전자파로부터 특정 공간을 보호하거나, 특정 공간에서 발생한 전자파가 외부로 유출되는 것을 방지할 수 있는 효과로, 입사되는 전자파의 전력(P_I)과 투과되는 전자파의 전력(P_T)의 비인 다음의 (1)과 같은 식으로 표현할 수 있다[21].

$$SE(dB) = 10\log\frac{P_I}{P_T} \tag{1}$$

또한 전자파 차폐는 흡수손실(Absorption loss, SE_A), 반사손실(Reflection loss, SE_R), 그리고 다중 내부 반사(Multiple internal reflections, SE_M)에 의하여 결정되므로 전자파 차폐 성능(SE)는 다음의 식 (2)와 같이 세 가지 손실의 합에 의하여 나타낼 수 있다.

$$SE(dB) = SE_A + SE_R + SE_M$$
$$= 20\log(e^{-\gamma t}) + 20\log\left\{\frac{(1+k)^2}{4k}\right\} + 20\log\left\{1-\left(\frac{k-1}{k+1}\right)^2 e^{-2\gamma t}\right\} \tag{2}$$

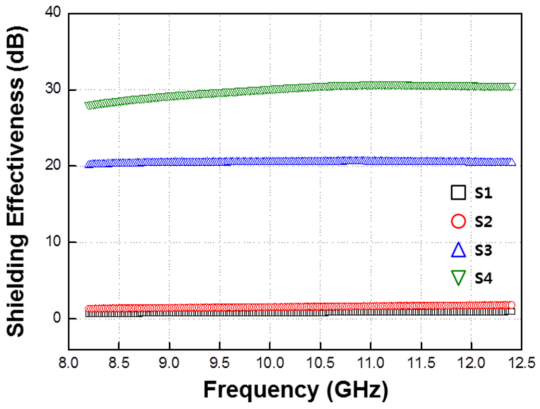

Fig. 6. Frequency dependent electromagnetic interference shielding effectiveness of the electromagnetic interference shielding composites

식 (2)의 각각의 항은 흡수손실, 반사손실, 그리고 다중 내부 반사를 뜻하며, γ는 전자파의 전파상수, t는 차폐재의 두께, 그리고 k는 전자파 임피던스(Z_w)와 차폐재 임피던스(η)의 비를 의미한다. 특히 낮은 표면 저항을 가지는 차폐재의 경우 매질간의 임피던스 차이에 의하여 반사손실이 증가하게 되므로 우수한 차폐 성능을 나타낼 수 있다[1,22].

Fig. 6은 8.2~12.4 GHz 주파수 대역에서의 제조된 전자파 차폐 복합재 시편 S1, S2, S3, S4의 전자파 차폐 성능 결과이다. 주파수가 증가함에 따라 전자파 차폐 성능 또한 증가하는 경향을 보이며, 단섬유 형태의 중공형 섬유로 제작한 S1, S2 시편의 경우 주파수 10 GHz에서 전자파 차폐능이 약 1 dB의 낮은 차폐 성능을 보였으나, 장섬유 형태의 중공형 섬유로 제작한 S3, S4 시편의 차폐능은 각각 20 dB, 30 dB의 우수한 성능을 나타내었다. S1, S2 시편의 경우 차폐 성능을 거의 발현하지 못하였으나 S3는 99%, S4는 99.9%의 차폐 성능을 나타내었다. 전자파 차폐 성능은 Fig. 3와 Fig. 5에서 비교할 수 있듯이 제조된 FeCo 자성 금속 중공형 섬유의 종횡비에 영향을 받으며 그에 따른 표면 저항에 의해서도 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 자성 금속 중공형 섬유의 길이가 증가할수록 전도성 네트워크 형성이 용이해져 낮은 표면 저항을 나타내며, 이는 임피던스 차이에 의한 반사손실을 증가시킨다. 따라서 종횡비가 큰 자성 금속 중공형 섬유 복합재 S3, S4는 효과적으로 전자파를 차폐시킬 수 있었으나, 반면에 짧은 자성 금속 중공형 섬유로 제조된 S1, S2 시편은 높은 표면 저항으로 낮은 전자파 차폐 성능을 나타내었다. 또한 S1과 S2 그리고 S3, S4 시편의 경우 각각 동일한 종횡비의 자성 금속 중공형 섬유를 이용함에도 불구하고 각각 약 1 dB, 약 10 dB의 차폐 성능 차이를 나타내는데, 이는 두께가 두꺼운 S2, S4 시편의 경우 다중 내부 반사가 증가하게 되어 전자파 차폐 성능이 높아졌기 때문이다. 따라서 종횡비가 큰 장섬유 형태의 FeCo 자성 금속 중공형 섬유를 이용한 전자파 차폐 복합재 S4 시편은 낮은 표면 저항에 따른 반사손실과 흡수손실, 더불어 다중 내부 반사 손실 증가에 의해 우수한 전자파 차폐 성능을 나타낸 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 무전해 도금과 고온의 열처리 공정을 통하여 FeCo 자성 금속 중공형 섬유를 제조하였으며, EPDM 고분자 수지와 혼합 분산하여 전자파 차폐 복합재를 제작하였다. 제작된 전자파 차폐 복합재의 전자파 차폐 성능을 평가하고 복합재의 전기적 특성과 비교, 분석하기 위하여 표면 저항을 측정하였다. 자성 금속 중공형 섬유의 열처리 전후의 결정성을 평가하기 위하여 X-선 회절을 분석하였고 OM과 SEM을 통하여 복합재의 건전성과 분산성을 평가하였다. 또한 자성 금속 중공형 섬유의 종횡비에 따른 전자파 차폐 복합재의 특성 차이를 평가 분석하였다.

열처리 공정을 통하여 섬유의 종횡비를 제어하고 결정성을 높였으며, 자성 금속 섬유를 중공형 구조로 제조하여 경량성을 구현하였다. 장섬유 형태의 중공형 섬유로 제작한 전자파 차폐 복합재의 경우 30 ohm/sq의 표면 저항을 나타내었으며, 주파수 10 GHz에서 99.9% 차폐 성능인 30 dB의 전자파 차폐능을 나타내었다. 종횡비가 큰 자성 금속 중공형 섬유는 종횡비가 작은 섬유에 비하여 낮은 표면 저항과 높은 전자파 차폐능을 나타내었는데, 이는 장섬유 형태의 섬유가 단섬유 형태의 섬유에 비하여 전도성 네트워크를 퍼콜레이션 임계치 이상으로 형성하게 하여 우수한 차폐 성능을 구현하게 하는 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Lee, S.E., Lee, M.Y., Lee, M.K., Jeong, E., and Lee, Y.S., "Effect of Fluorination of Carbon Nanotubes on Physico-chemical and EMI Shielding Properties of Polymer Composites," *Polymer Korea*, Vol. 39, 2014, pp. 114-121.
2. Chen, C.S., Chen, W.R., Chen, S.C., and Chien, R.D., "Optimum Injection Molding Processing Condition on EMI Shielding Effectiveness of Stainless Steel Fiber Filled Polycarbonate Composite," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, 2008, pp. 744-749.
3. Hong, M.S., Bae, K.M., Lee, H.S., Park, S.J., An, K.H., Kang, S.J., and Kim, B.J., "Electromagnetic Interference Shielding Behaviors of Electroless Nickel-loaded Carbon Fibers-reinforced Epoxy Matrix Composites," *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 22, 2011, pp. 672-678.
4. Al-Ghamdi, A.A. and El-tantawy, F., "New Electromagnetic Wave Shielding Effectiveness at Microwave Frequency of Polyvinyl Chloride Reinforced Graphite/Copper Nanoparticles," *Composites: Part A*, Vol. 41, 2010, pp. 1693-1701.
5. Lu, N.N., Wang, X.J., Meng, L.L., Ding, C., Liu, W.Q., Shi, H.L., Hu, X.S., and Wu, K., "Electromagnetic Interference Shielding

Effectiveness of Magnesium Alloy-Fly Ash Composites," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 650, 2015, pp. 871-877.
6. Park, K.Y., Lee, S.E., Kim, C.G., and Han, J.H., "Application of MWNT-added Glass Fabric/Epoxy Composites to Electromagnetic Wave Shielding Enclosures," *Composite Structures*, Vol. 81, 2007, pp. 401-406.
7. Al-Saleh, M.H., and Sundararaj, U., "Electromagnetic Interference Shielding Mechanisms of CNT/Polymer Composites," *Carbon*, Vol. 47, 2009, pp. 1738-1746.
8. Rochon, P. and Gauthier, N., "Strong Shielding due to an Electromagnetically Thin Metal Sheet," *American Journal of Physics*, Vol. 58, 1990, pp. 276.
9. Bigg, D.M., and Stutz, D.E., "Plastic Composites for Electromagnetic Interference Shielding Applications," *Polymer Composites*, Vol. 4, 1983, pp. 40-46.
10. Stubhan, T., Krantz, J., Li, N., Guo, F., Litzov, I., Steidl, M., Richter, M., Matt, G.J., and Brabec, C.J., "High Fill Factor Polymer Solar Cells Comprising a Transparent, Low Temperature Solution Processed Doped Metal Oxide/Metal Nanowire Composite Electrode," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 107, 2012, pp. 248-251.
11. Silva, A.B., Arjmand, M., Sundararaj, U., and Bretas, R.E.S., "Novel Composites of Copper Nanowire/PVDF with Superior Dielectric Properties," *Polymer*, Vol. 55, 2014, pp. 226-234.
12. 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.
13. Hu, M., Gao, J., Dong, Y., Li, K., Shan, G., Yang, S., and Li, R.K.Y., "Flexible Transparent PES/Silver Nanowires/PET Sandwich-Structured Film for High-Efficiency Electromagnetic Interference Shielding," *Langmuir*, Vol. 28, 2012, pp. 7101-7106.
14. Uysal, M., Karslioglu, R., Alp, A., and Akbulut, H., "The Preparation of Core-Shell Al_2O_3/Ni Composite Powders by Electroless Plating," *Ceramics International*, Vol. 39, 2013, pp. 5485-5493.
15. Dadvand, N., Jarjoura, G., and Kipouros, G.J., "Preparation and Characterization of Co–Fe–B Thin Films Produced by Electroless Deposition," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 19, 2008, pp. 51-59.
16. Meng, X. and Shen, X., "Preparation of FeCo-, FeNi- and NiCo-Alloy Coated Cenosphere Composites by Heterogeneous Precipitation," *Particuology*, Vol. 10, 2012, pp. 334-338.
17. Wilson, L., Kalu, E.E., Martin, L., and McHenry, M.E., "Decoration of Carbon Nanotubes with Iron–Cobalt (FeCo) Alloy using Polymer-Stabilization and Electroless Deposition Techniques for Thermotherapy Applications" *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 22, 2012, pp. 595-601.
18. Yu, Y.H., Ma, C.C.M., Teng, C.C., Huang, Y.L., Tien, H.W., Lee, S.H., and Wang, I., "Enhanced Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Composites Filled with Silver Nanowires and Nanoparticles," *Journal of the Taiwan Insititute of Chemical Engineers*, Vol. 44, 2013, pp. 654-659.
19. Qin, D.H., Cao, L., Sun, Q.Y., Huang, Y., and Li, H.L., "Fine Magnetic Properties Obtained in FeCo Alloy Nanowire Arrays," *Chemical Physics Letters*, Vol. 358, 2002, pp. 484-488.
20. Mall, S., Rodriguez, J., and Alexander, M.D., "Electromagnetic Interference and Electrical Conductivity Behavior of Carbon/Polycyanate Composite With Nickel Nanostrands™ Under Fatigue," *Polymer Composites*, Vol. 32, 2011, pp.483-490.
21. Lan, M., Cai, J., Zhang, D., Yuan, L., and Xu, Y., "Electromagnetic Shielding Effectiveness and Mechanical Property of Polymer–Matrix Composites Containing Metallized Conductive Porous Flake-Shaped Diatomite," *Composites: Part B*, Vol. 67, 2014, pp. 132-137.
22. Yim, Y.J., Seo, M.K., Kim, H.Y., and Park, S.J., "Eletromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Mechanical Properties of MWNCNT-reinforced Polypropylene Nanocomposites," *Polymer Korea*, Vol. 36, 2012, pp. 494-499.