

## Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Polymer Composite Sheet Containing Two Fe-Based Flaky Alloy Powders

Sang-Mun Kim\*

Department of LINC+, Kyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received 16 November 2019, Received in final form 17 December 2019, Accepted 17 December 2019)

In this paper, we studied electromagnetic wave noise absorbing properties for quasi-microwave band with Fe-based magnetic composite sheet. The magnetic composite sheets were made of polymer and of soft magnetic FeSiCr flake powders and Fe80Ni flake powders with the thickness of about 0.5~1.0  $\mu\text{m}$ . In the composite sheets for clarifying the mixing effect of two kind of the magnetic powders, the magnetic properties such as saturation magnetization and residual magnetization by use of VSM, and such as the complex permeability by impedance analyzer, and then the electromagnetic wave absorption properties and the shift of the matching frequency were investigated by Network Analyzer.

**Keywords** : electromagnetic wave absorbing, Flaked FeSiCr, Fe80Ni permalloy, reflection loss

## Fe 계열 이중 연자성 합금 분말을 함유한 폴리머 복합시트의 전파흡수특성

김상문\*

국립경상대학교 LINC+사업단, 경남 진주시 진주대로 501, 52828

(2019년 11월 16일 받음, 2019년 12월 17일 최종수정본 받음, 2019년 12월 17일 게재확정)

본 논문에서는 준 마이크로파 대역의 전자파 노이즈 흡수체의 제조와 이들의 전자기와 흡수특성 등에 대하여 연구하였다. 자성복합 시트는 폴리머와 0.5~1.0  $\mu\text{m}$  두께로 편상화된 연자성 FeSiCr 분말과 Fe80Ni 퍼말로이 분말을 최적비율로 조합하여 제조하였다. FeSiCr에 Fe80Ni 퍼말로이 분말을 첨가하여 제조한 전자파 흡수용 자성 복합시트에서 포화자화, 잔류자화, 복소 투자율 등과 같은 자기적 특성들과 전자기와 흡수 특성, 매칭 주파수의 변화 등을 조사하였다.

**주제어** : 전자파흡수, 편상화된 FeSiCr, Fe80Ni 퍼말로이, 반사손실

### I. 서 론

최근 컴퓨터, 휴대전화 등 각종 전기전자 및 정보통신 기기의 디지털화 및 고주파로 인해 이들 부품으로부터 발생되는 전자파 노이즈의 주파수도 MHz 대역에서 GHz 대역으로 높아지고 있다. 또 이들 기기의 경박 단소화 및 이에 수반된 회로 부품의 고집적화로 인하여 방사 노이즈의 발생 및 기기 내부의 반사, 회로 기판 간의 상호 간섭 등 전자파 장애 문제가 심각해지고 있다. 이러한 전자파 장애 문제의 해결 방안의 하나로서, 각종 연자성 금속 박편을 폴리머 중에 분산

시켜 만든 박막의 복합 시트를 전자파 노이즈 방사원 근방에 배치하여 입사된 전자파 노이즈를 흡수하여 열로 변환하여 소멸시키는 기술이 광범위하게 연구 개발되고 있다[1-9].

특히 모바일 단말기와 같은 정보통신기기들은 1~3 GHz 대역에서 작동하고 있으나, 통신기기 제조사나 이동통신 회사마다 사용하는 주파수 대역이 조금씩 다르기 때문에 한 가지 자성체를 사용하여 매칭 주파수를 맞추려면 자성체 고품분의 함량 및 두께 등의 특성을 변경하여야 한다. 하지만 휴대기기에서 요구하는 동일한 두께리는 제한된 조건 하에서 고품분 이외의 다른 요인이 필요하다. 본 연구에서는 종래의 FeSiCr 분말과 고투자율 자성체 퍼말로이를 함께 사용하여 제조할 경우 전자파 흡수체 복합시트에서 자기적 특성의 변화와 전자파 흡수 특성 및 매칭 주파수의 변화에 관한 연구를 하고 그 결과를 보고자 한다.

## II. 실험 방법

본 연구에서는 어트리션 밀을 이용하여 91.7%Fe-6.5%Si-1.8%Cr(wt%) 조성의 FeSiCr 합금분말과 Fe80Ni 퍼말로이 분말을 각각 편상화 가공하였다. 편상화 가공 시 금속 분말의 깨짐 현상을 방지하기 위해 습식 가공으로 진행하였다. 습식 가공에 사용된 용매는 메탄올을 사용하였으며 윤활작용 및 가공효율을 높이기 위해 메탄올 대비 0.02 wt%의 올레인산과 메탄올을 첨가하여 편상화 가공하였다. 체진동기를 사용하여 편상화 가공된 FeSiCr과 Fe80Ni 퍼말로이를 100~120 μm 및 80~100 μm 크기로 각각 분급한 후 진공 분위기에서 열처리를 실시하여 자성체의 밀링에 의한 가공 스트레스를 해소시키고 또 표면 산화된 자성체를 환원시켰다. FeSiCr 분말에 Fe80Ni 퍼말로이를 Table II에 나타낸 첨가량으로 첨가, 혼합 후 TTT 케미컬(주)의 아크릴계 바인더 SEN-3100을 첨가하였다. 이 때 첨가된 총무게 대비 순수 고형분(자성체 총무게 + 바인더 고형분 무게) 비율이 85 wt%가 되도록 자성분, 바인더를 투입한 다음 혼합, 분산 처리 후 테이프 캐스팅 방법으로 도포, 건조 처리하여 전자파 흡수체 복합시트를 제조하였다. 이렇게 제조된 복합 시트에서 단위두께 당 자성체의 충전 밀도를 증가시키기 위해 100 °C에서 4시간 가열-가압 후 3시간 동안 냉각-가압하는 핫 프레스링 공정을 거쳐 최종적으로 두께 1 mm로 압축된 전자파 흡수체 복합 시트를 제조하였다.

편상화 가공되어진 자성 분말의 형상 및 복합 시트의 평면과 단면 미세구조를 주사 전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 진동 시료형 자력계(VSM)로 자기적 특성을 평가하였다. 또 복합 시트의 자기적 특성 중 복소 투자율 특성은 임피던스 재료 분석기(HP-4291B)를 이용하여 측정하였으며, 전자파 흡수 특성은 Agilent Technologies사 네트워크 분석기(Network Analyzer HP-8753D)를 이용한 반사손실  $S_{11}$ 를 통해 평가하

였다. 이때 전자파의 반사손실  $S_{11}$ 은 50 Ω 계 Type-N Short connector의 샘플 홀더에 도넛 모양의 외경 7 mm, 내경 3.05 mm 크기의 복합 시트를 삽입 후 측정하였다[10-12].

## III. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 본 연구에 사용된 편상화 처리된 합금자성 분말 형상을 확인하기 위하여 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 합금 자성 분말의 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 1로부터 FeSiCr과 Fe80Ni 퍼말로이 분말은 판상형 형태로 1 μm 전후의 두께와 100~120 μm 및 80~100 μm의 크기를 가지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 1과 같이 편상화 가공을 실시하는 이유는 금속 연자성 합금의 낮은 전기저항 특성 때문에 높은 주파수에서 큰 와전류 손실로 인해 큰 투자율을 얻기가 어렵기 때문이다.

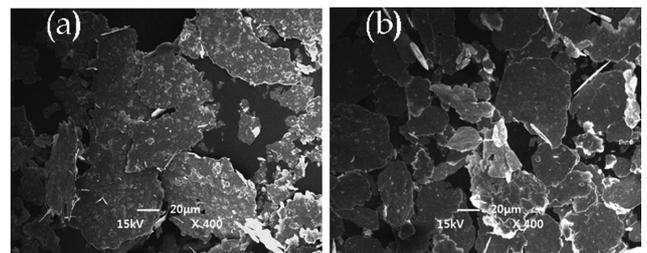


Fig. 1. SEM images of flaked metal alloy powders. (a) FeSiCr (b) Fe80Ni Permalloy.

Table I. Magnetic characteristics of each flaked powders from VSM data.

Material	Coercive (Oe)	Saturation mag. (emu/g)	Residual mag. (emu/g)
FeSiCr	0	178.39	2.52
Fe80Ni	0	94.84	1.24

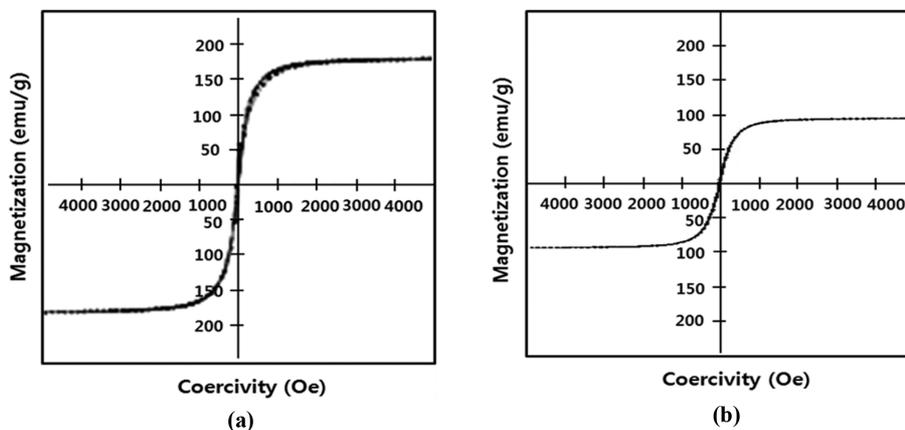
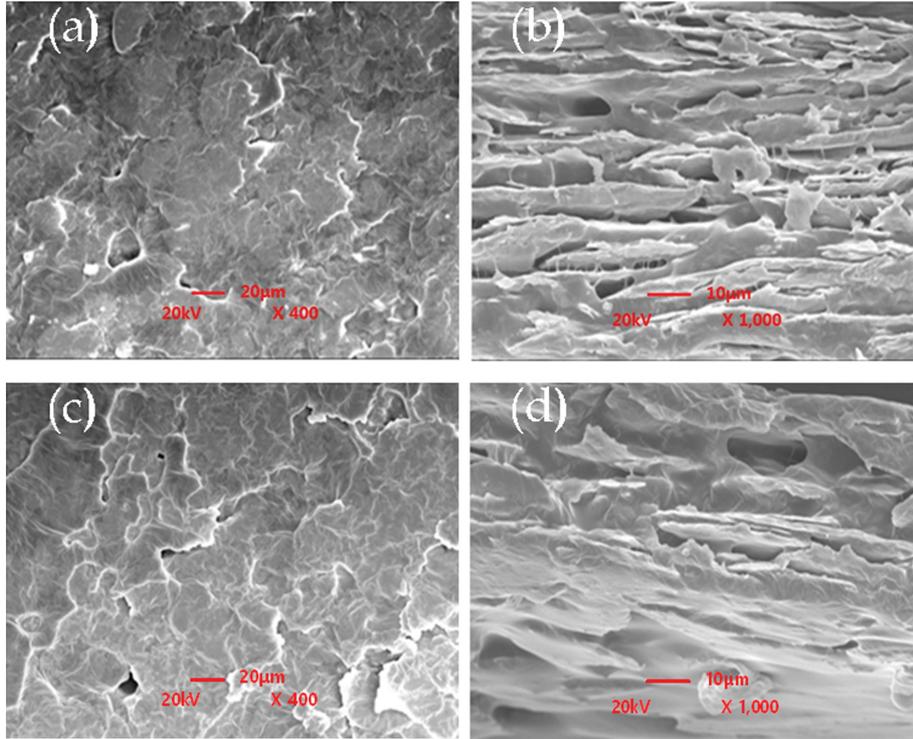


Fig. 2. Magnetic hysteresis curve of the flaked soft magnetic metal powders. (a) FeSiCr (b) Fe80Ni.



**Fig. 3.** (Color online) SEM images of electromagnetic wave sheets according to the change of content of FeSiCr and Fe80Ni powders. (a) plane of sheet with FeSiCr 100% (b) cross-section of sheet with FeSiCr 100% (c) plane of sheet with FeSiCr 85% and Fe80Ni 15% (d) cross-section of sheet with FeSiCr 85% and Fe80Ni 15%.

그래서, 자성분말을 박편(flakes)으로 편상화 가공을 함으로써 자성분말의 형상 이방성을 높이고 와전류손실을 저감시켜 높은 주파수 대역에서도 투자율이 높고 최대의 전자파 흡수를 이끌어 낼 수 있다. 대부분의 자성체는 스누크 한계로 인해 고주파에서 높은 투자율을 얻기가 쉽지 않다고 보고되어 있다[13].

Fig. 1에 나타난 편상화 가공된 자성분말의 자기적특성을 VSM으로 측정하여 Table I과 Fig. 2에 나타내었다.

Table I과 Fig. 2로부터 살펴보면 FeSiCr과 Fe80Ni 자성분말들은 보자력(Hc)이 0 Oe으로 초상자성적 거동을 보이고 있다. 특히 Fe80Ni 퍼말로이 자성분은 포화자화 94.84 emu/g, 잔류자화값 1.24 emu/g으로 FeSiCr 합금에 비해 자기적 특성이 약 50% 정도 낮게 나타나고 있다.

따라서 FeSiCr 합금에 Fe80Ni 퍼말로이 자성분을 첨가하여 전자파 흡수체 복합시트를 제조할 경우 포화자화 값과 잔류자화 값이 낮아져서 투자율과 전자파 흡수 특성에 영향이 미칠 것으로 생각된다.

Fig. 3은 FeSiCr에 Fe80Ni 퍼말로이의 함량비를 변경하여 만들어진 전자파 흡수체 복합시트의 미세구조를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 것이다. 그 결과 모든 시편들은 평면 사진(Fig. 3(a)와 (c))에서 대부분의 자성분들이 평편하게 겹

**Table II.** Magnetic characteristics of according to the contents of Fe80Ni powder in FeSiCr powder from VSM data.

Material	Coercive (Oe)	Saturation mag. (emu/g)	Residual mag. (emu/g)
Fe80Ni 0%	0	167.9	1.94
Fe80Ni 5%	0	164.0	1.86
Fe80Ni 10%	0	159.5	1.75
Fe80Ni 15%	0	154.0	1.22

쳐져 있고 적층된 자성분말들 사이에 바인더가 존재하는 미세구조로 이루어져 있음을 볼 수 있다.

Table II는 FeSiCr 자성분말에 Fe80Ni 퍼말로이 분말을 첨가하여 만든 전자파흡수 복합시트에 대하여 자기적 특성을 VSM으로 측정한 결과이다. Table II로부터 Fe80Ni 퍼말로이의 함량이 증가됨에 따라 포화자화 값과 잔류자화 값이 감소하는 것을 알 수 있다.

전자파 흡수 복합시트에서 FeSiCr 자성분말에 첨가되는 Fe80Ni 퍼말로이 함유량에 따른 자기공명주파수의 변화를 검토하기 위해  $\mu = \mu' - j\mu''$  ( $j$ : 복소수)로 주어지는 주파수에 따른 복소 투자율과 손실계수  $\tan\delta$ 의 변화를 조사하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)와 Table III으로부터 복소 투자율의 실수부  $\mu'$  값

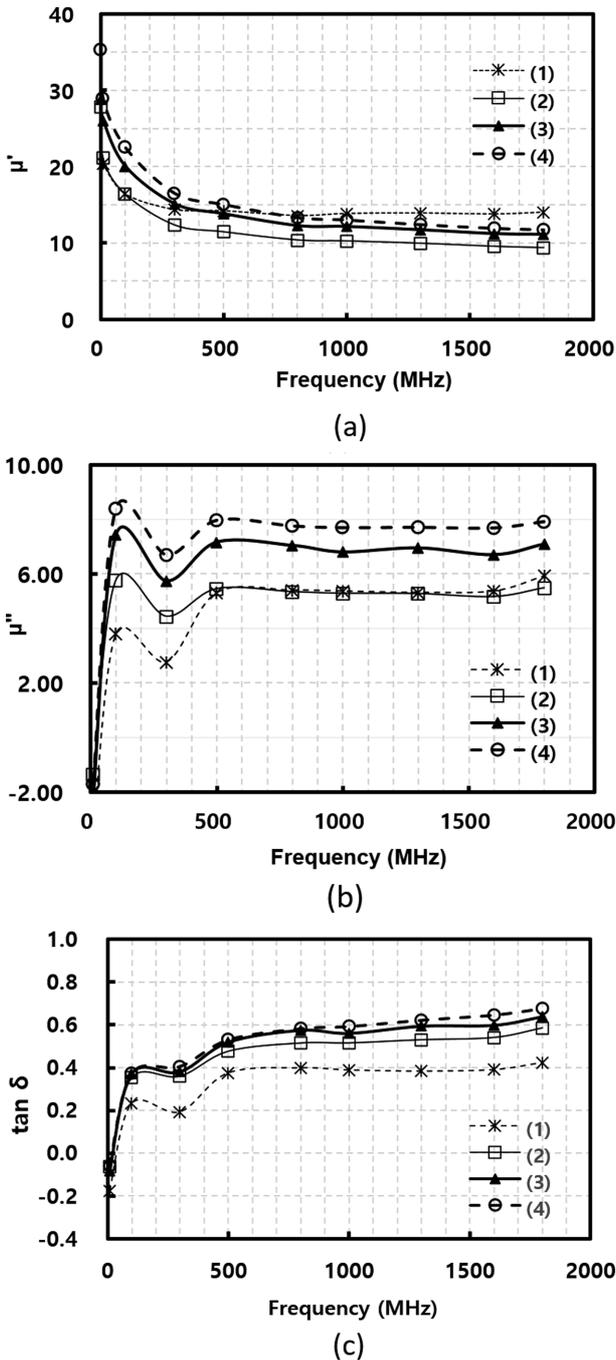


Fig. 4. Complex permeability characteristics according to the contents of FeSiCr and Fe80Ni powders. (a) real part of complex permeability ( $\mu'$ ) (b) imaginary part of complex permeability ( $\mu''$ ) (c) loss factor  $\tan\delta$ . Fe80Ni Contents: (1) 0%, (2) 5%, (3) 10%, (4) 15%.

의 변화를 보면 FeSiCr 합금 자성체만 사용한 시료 대비 Fe80Ni 퍼말로이 자성체를 첨가하였을 경우 100 MHz 이하의 저주파 영역에서는 복소 투자율의 실수부  $\mu'$  값이 최대로 6 정도 높게 나타나고 있지만, 주파수가 증가함에 따라  $\mu'$  값은 감소를 보이다가 800 MHz 이상의 모든 고주파 대역에서

Table III. Real part of complex permeability ( $\mu'$ ) according to the contents of Fe80Ni in FeSiCr powders.

Freq. (MHz)	0%	5%	10%	15%
10	20.38	21.13	26.00	29.00
100	16.42	16.41	20.00	22.58
300	14.36	12.35	15.10	16.54
500	14.18	11.45	13.80	15.06
800	13.57	10.38	12.25	13.35
1000	13.83	10.26	12.13	13.02
1300	13.89	9.95	11.70	12.42
1600	13.77	9.55	11.20	11.93
1800	14.00	9.37	11.11	11.74

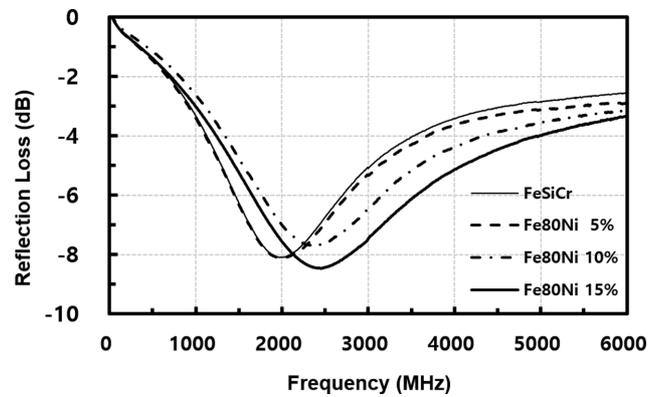


Fig. 5. Reflection parameter  $S_{11}$  of composite sheet according to the contents of Fe80Ni in FeSiCr powders.

FeSiCr만 사용한 전자파흡수체 복합시트 시료의  $\mu'$  값 대비 Fe80Ni 퍼말로이를 첨가한 모든 시료에서는  $\mu'$  값이 낮게 나타나고 있으며 고주파 영역으로 갈수록  $\mu'$  값의 차이는 더 커져 16~33% 낮게 나타나고 있다.

Fig. 4(b)로부터 복소 투자율의 허수부  $\mu''$  특성을 살펴보면 Fe80Ni 퍼말로이를 5 wt% 이상 첨가할 경우 전주파수 대역에서 FeSiCr만 사용한 전자파흡수체 복합시트 시료의  $\mu''$  값 대비 높게 나타나고 첨가량이 증가됨에 따라 더 높은 값을 나타나고 있다.

또 복소투자율의 실수부와 허수부 값으로부터 얻을 수 있는 손실계수  $\tan\delta$  특성은 식(2)와 같이 나타난다.

$$\tan\delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (2)$$

주파수별 손실계수 특성을 나타낸 Fig. 4(c)로부터 FeSiCr 자성체에 Fe80Ni 퍼말로이를 첨가할 경우 손실계수 특성이 전 주파수 대역에서 첨가하지 아니하였을 때 보다 높게 나타나고 또 첨가량이 증가함에 따라 손실계수 값이 더 커지는 것을 볼 수 있다.

FeSiCr 자성체에 Fe80Ni 퍼말로이를 첨가하여 제조한 전자

파 흡수체 복합시트의 전자파의 반사손실 특성을 네트워크 분석기를 사용하여 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

복합 시트의 전자파 반사계수를  $I$ 라고 할 때 이들과 반사손실 파라미터  $S_{11}$ 은

$$S_{11} = 20 \log |I| \quad (3)$$

의 관계로 표시된다[14].

Fig. 5로부터 Fe80Ni 페말로이 함유량이 증가함에 따라 반사손실의 매칭주파수에 해당되는 return loss의 peak에 대응되는 주파수가 2 GHz 대역에서 2.5 GHz 대역으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 이는 편상화된 FeSiCr 분말 대비 Fe80Ni 페말로이의 포화자화가 낮아서 Fe80Ni 페말로이가 첨가됨에 따라 전자파 흡수체 복합시트에서 전체 포화자화와 잔류자화가 감소하게 되어 저주파 손실계수  $\tan \delta$  값이 증가하여 반사손실의 매칭주파수가 고주파 대역으로 이동한 것으로 판단된다. 또한 FeSiCr의 잔류자화 특성이 높아 2 GHz의 매칭 주파수에서 -8 dB의 반사손실 특성이 나타난다. 따라서 FeSiCr 분말에 Fe80Ni 페말로이 분말을 첨가할 경우 반사손실의 매칭주파수가 고주파 영역으로 이동되고 -8 dB 정도의 반사손실 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

어트리션 밀과 진공 열처리 공정을 사용하여 두께가 1~2  $\mu\text{m}$ , 표면 길이가 100~120  $\mu\text{m}$  범위가 되도록 편상화 처리된 연자성 비정질 FeSiCr 합금 분말을 바인더 용액과 혼합 및 분산처리하여 VHF~UHF 대역의 전자파 노이즈 흡수용 복합시트를 제조하는데 있어서 FeSiCr 분말에 표면 길이가 80~100  $\mu\text{m}$ 가 되도록 편상화 처리된 Fe80Ni 페말로이를 첨가하여 전자파 흡수용 복합시트를 제조하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

FeSiCr에 Fe80Ni 페말로이 분말 함유량이 증가함에 따라 보자력 특성은 거의 변화가 없지만 포화자화가 167.9 emu/g에서 154 emu/g으로 감소하면서 잔류자화 특성이 1.94 emu/g에서 1.22 emu/g으로 감소하였으며 100 MHz 이하의 저주파 영역에서는 투자율  $\mu$ 이 최대 6 정도로 높게 나타나고 있으며 800 MHz 이상의 고주파 영역에서는  $\mu$ 이 16~33% 낮게 나

타나고 있으며, 복소 투자율 중  $\mu''$  값과 손실계수  $\tan \delta$ 가 모든 주파수 영역에서 FeSiCr만 사용한 시료 대비 높게 나타나고 있으며, 최대 전자파 흡수와 관련된 매칭 주파수가 2 GHz 대역에서 2.5 GHz 대역으로 이동하면서  $S_{11}$  반사손실 특성은 -8 dB 수준으로 나타나는 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 FeSiCr 합금 분말을 사용한 전자파 흡수체 복합시트의 매칭주파수 보다 높은 2~4 GHz 대역에서 반사손실이 우수한 전자파 흡수체를 제조하기 위하여 FeSiCr 분말에 Fe80Ni 페말로이 분말을 첨가하여 전자파 흡수체 복합시트를 제조하는 공정을 개발하였다.

#### References

- [1] B. E. Mulhall, in Proc. IEEE 1964 **111**, 188 (1964).
- [2] Zhang Huibin, Zhou Peiheng, Lu Haipeng, Xu Yangqiu, Xie Jianliang, and Deng Longjiang, *Electro. Lett.* **48**, 435 (2012).
- [3] S. Yoshida, H. Ono, S. Ando, M. Yamaguchi, and Y. Shimada, in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility **2**, 962 (2003).
- [4] H. Ono, Y. Takase, S. Yoshida, and O. Hashimoto, in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility **2**, 962 (2003).
- [5] Valdimir B. Bregar and Andrej Znidarsic, in Proc. 2006 Asia-Pacific Microwave Conf. IEICE **1**, 540 (2006).
- [6] T. Tobana, T. Sasamori, K. Abe, Q. Chen, and K. Sawaya, in Proc. 2003 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility **2**, 1248 (2003).
- [7] M. M. Dias, H. J. Mozetic, J. S. Barboza, R. M. Martins, L. Pelegrini, and L. Schaeffer, *Powder Technology* **237**, 213 (2013).
- [8] J. B. Kim and T. H. Noh, *J. Korean Magn. Soc.* **23**, 83 (2013).
- [9] T. H. Noh and J. B. Kim, *J. Korean Magn. Soc.* **20**, 143 (2010).
- [10] D. I. Kim, *Electromagnetic Wave Absorber* (Daeyoungsa, Seoul, 2006), p. 175.
- [11] D. Y. Kim and S. S. Yoon, *J. Korean Magn. Soc.* **22**, 215 (2012).
- [12] B. Nam, *J. Korean Magn. Soc.* **28**, 231 (2018).
- [13] O. Acher and S. Dubourg, *American Phys. Soc.* **77**, 104440 (2008).
- [14] S. Yoshida, H. Ono, S. Anto, S. Ohmuma, M. Yamaguchi, and Y. Shimada, *Mater. Japan* **42**, 193 (2003).