≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 20, Number 4, August 2010 DOI: 10.4283/JKMS.2010.20.4.143

FeSiCr/폴리머 복합 시트의 전자파 흡수 특성에 미치는 시트 두께의 영향

노태환* · 김주범
안동대학교 공과대학 신소재공학부, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

(2010년 7월 15일 받음, 2010년 8월 3일 최종수정본 받음, 2010년 8월 4일 게재확정)

92.6 %Fe-6.5 %Si-0.9 %Cr(wt%) 연자성 합금 박편을 폴리머 중에 분산시킨 준마이크로파 대역의 전자파 노이즈 흡수용 복합 시트를 제조할 때, 시트 두께에 따른 전자파 전력손실(전송손실) 및 전자기적 특성과 내부 미세구조의 변화를 조사하였다. 시트 두께 0.3~0.5 mm의 범위에서, 시트가 두꺼울수록 1~5 GHz의 주파수 대역에서 투과 파라미터 S_{21}의 값이 현저하게 낮아지면서 전력손실의 크기가 매우 증가하였다. 이 때 복소 투자율 및 자기 손실계수는 시트 두께가 변하여도 거의 비슷한 값을 가져 전력손실의 변화에 별 기여를 하지 못한 것으로 관찰되었다. 한편 복소 유전율은 시트의 두께에 따라 상당한 변화를 보여 1~5 GHz 대역에서 시트 두께가 두꺼우면 유전율 허수부의 크기가 증가하였는바, 내부 미세구조의 변화에 기인하는 것으로 추정되는 이러한 복소 유전율의 변화가 두꺼운 복합 시트의 큰 전력손실 즉 우수한 전자파 흡수 특성의 주된 원인인 것으로 판단되었다.

주제어 : 전자파 흡수, FeSiCr 박편, 복합 시트, 시트 두께, 복소 유전율

I. 서 론

최근 컴퓨터, 휴대전화 등 각종 전기전자 및 정보통신 기기의 디지털화 및 고주파 이용에 따라, 이들로부터 발생되는 전자파 노이즈의 주파수도 GHz 대역으로 높아지고 있다. 또 이들 기기에서 진행되고 있는 소형경량화, 박형화 및 이에 수반된 회로 부품의 고집적화에 의해, 방사 노이즈의 발생 및 내부 반사의 영향, 회로 기판간의 상호 간섭 등 전자파 장해 문제가 대단히 심각해지고 있다.

이러한 전자파 장해 문제에 대한 대응책의 하나로서, 최근 각종 연자성 합금 박편을 폴리머 중에 분산시켜 만든 얇은 복합 시트를 노이즈 방사원 근방에 배치하여 입사된 전자파 노이즈 에너지를 자체 에너지 손실로서 흡수하는 기술 방안이 광범위하게 연구 개발되고 있다[1-8].

일반적으로 입사되는 전자파 에너지를 자신의 에너지 손실로서 흡수 내지 저감시키는 전자파 흡수체 내에서, 전체 에너지 손실(흡수)의 크기는 각각 자기적 손실, 유전 손실 및 도전 손실 등 여러 손실 인자의 합으로 주어진다[9].

이에 따라 GHz 대역에서 전자파 흡수체가 우수한 노이즈 억제효과를 얻기 위해서는 자기손실형 흡수체에서는 복소 투자율, 그리고 유전손실형의 경우 복소 유전율의 허수부가 이 주파수 영역에서 높아야 된다.

그런데 자성체의 경우 통상 동작 주파수가 자연공명이 일어나는 Snoek의 한계(대개 MHz 대) 이상으로 높아지면 투자율이 급격하게 떨어지므로, GHz의 고주파 대역에서 큰 투자율을 얻기 위해서는 공명주파수 f_r을 높여야 하고 이를 위해 포화자화 M_s가 될수록 커야 한다[10].

이에 따라 최근 개발되고 있는 전자파 노이즈 흡수용 복합체의 자성분말에는 M_s가 작은 페라이트 대신 금속을 주로 사용하는바, FeCrSiAl계 내식강[1], FeSi 규소강[2], 스테인레스 자성강[3], FeCuNbSiB 나노결정 합금[4], FeSiAl계 센더스트[5-8] 등의 예가 보고되고 있다.

단 이때 금속 연자성 합금은 낮은 전기저항 특성 때문에 와전류 효과가 커서 높은 주파수까지 큰 투자율을 기대하기 어려우므로, 이들을 표피깊이(skin depth) 정도로 얇게 만드는 편상화 처리 즉 박편(flakes)으로 분말을 가공하여 이방성 자장의 증대와 함께 와전류 효과가 저감되어 보다 높은 주파수 대역까지 큰 투자율을 나타낼 수 있도록 하고 있다.

Noh 등[11, 12]은 근래 GHz 대역용 복합 시트의 새로운 소재로서, 위에 든 여러 기존 연자성 합금과 비교하여 포화자기변형과 결정자기이방성이 작고 전기저항이 커 매우 우수한 교류 특성을 나타내는 것으로 알려져 있는 FeSi계 고규소강 합금[13]의 이용을 다각도로 검토하여 왔다. 그 과정에서 두께 수 μm 이하로 대단히 얇게 편상화 처리된 고규소강 합금을 사용하여 전자파 흡수용 복합 시트를 만든 후 이의 특성에 미치는 자성 입자의 입도 영향, 자성 분말 두께의 영향 등을 체계적으로 조사 분석하여 보고한 바 있다.

본 연구에서는 이러한 복합 시트의 전자파 흡수 특성에 큰 영향을 미칠 수 있는 또 하나의 인자로 생각되는 시트 두께의 효과를 규명하고자, 6.5 %Si-Fe의 고규소강 합금 분말을 편상화하고 이를 폴리머와 혼합하여 0.3~0.5 mm의 여러 가지 두께를 가지는 복합 시트를 제조한 다음 전자파 흡수 특

*Tel: (054) 820-5755, E-mail: thnoh@andong.ac.kr

성을 조사 분석하였다.

II. 실험방법

수분무법으로 만든 92.6 %Fe-6.5 %Si-0.9 %Cr(wt%) 합금 분말(휴먼일렉스사 제조)에 대해 어트리션 밀(KMS-1B)을 이용하여 편상화 가공을 실시하였다. 본 실험에서 사용된 밀링 볼은 스테인레스강, 밀링 용기의 용량은 1 *l*였으며, 모든 밀링은 에탄올을 용매로 한 습식법으로 이루어졌다. 그리고 밀링 볼의 직경은 12.6 mm, 임펠러의 회전속도는 200 rpm, 볼과 분말시료의 장입비는 30 : 1이었으며, 밀링 시간은 24시간으로 하였다.

밀링에 의해 편상화된 합금 박편을 체진동기를 사용하여 26~45 μm 크기의 분말로 분급하고 폴리우레탄 수지와 40 : 60의 중량비로 혼합한 뒤 닥터 블레이드법을 이용한 테이프 캐스팅으로 두께 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5 mm의 복합 시트를 제조하였다.

최초 수분무 원료분말과 편상화 가공에 의해 얻어진 박편형 분말의 모양 및 복합 시트의 단면은 주사전자현미경(SEM, Jeol-JSM 6300)으로 관찰되었으며, X-선(Cu K_α) 회절법으로 구조분석을 실시하였고 진동 시료형 자력계(VSM)로 정적 자화특성을 조사하였다.

또 복합 시트의 전자파 흡수 특성은 네트워크 분석기(HP-8722D)를 이용한 *S* 파라미터(반사 파라미터 S_{11}, 투과 파라미터 S_{21}), 복소 투자율과 복소 유전율 등의 측정을 통하여 평가되었다. 이 때 전자파의 전송 특성 S_{11} 및 S_{21}의 값은 선로 길이가 79.53 mm이고 폭이 2.24 mm이며 특성 임피던스가 50 Ω인 마이크로 스트립 라인 상에 가로 세로가 각각 5 cm인 사각형의 시트 시료를 배치하여 측정하고, 복소 투자율과 복소 유전율은 시료 형상을 내경 3 mm/외경 7 mm의 링형으로 가공하여 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 1의 (a)와 (b)는 각각 수분무법으로 제조된 원료 합금 분말 및 이를 24시간 동안 밀링한 후 편상화 시킨 26~45 μm 크기의 박편(flakes) 모양을 보여주고 있다. (a)에서와 같이 수분무법에 의해 만들어진 분말은 10~100 μm의 크기 범위에서 불규칙한 형상을 하고 있으나, 밀링 공정을 거치면 (b)와 같이 두께가 1~2 μm 전후의 아주 얇은 박편으로 편상화가 일어나면서 입자 직경도 상당히 증가하였다.

Fig. 2는 VSM으로 측정한 합금 박편의 자화곡선으로 보자력(H_c)이 15.62 Oe(약 1,240 A/m), 포화자화는 117.88 emu/g (약 1.10 T)의 값을 나타내었는바, M_s의 크기가 대표적 고연자성 소재인 센더스트와 비슷하고 페라이트보다는 훨씬 큰 값을 가지고 있어, 서론에서 언급한 공명주파수의 상승효과가

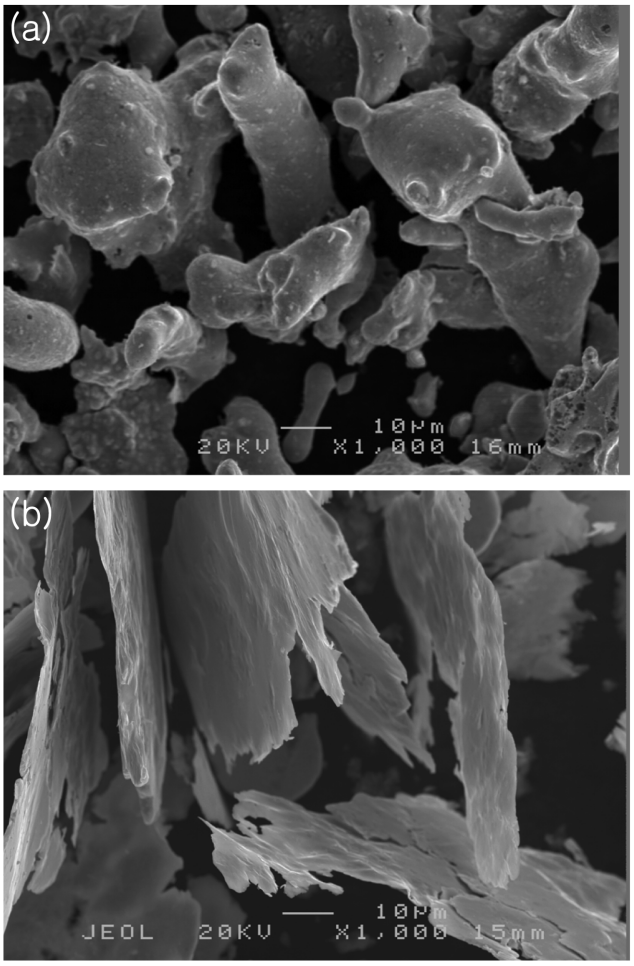

Fig. 1. The SEM images of (a) as-atomized FeSiCr alloy powders, and (b) flakes milled for 24 h (1000 ×).

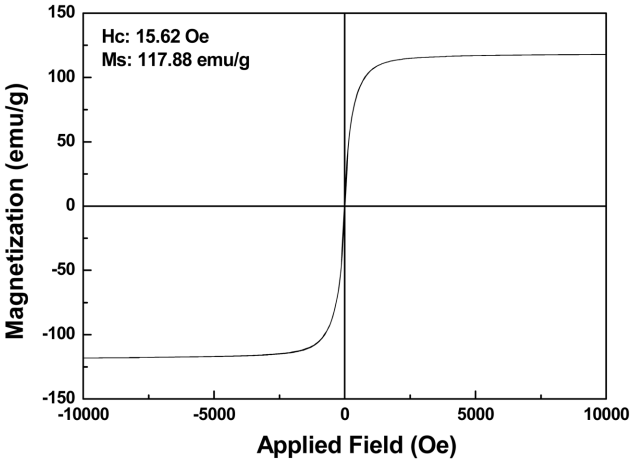

Fig. 2. The magnetization curve of FeSiCr alloy flakes milled for 24 h.

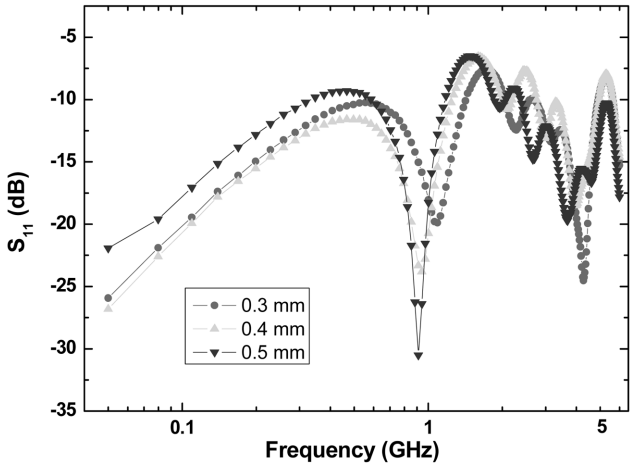

Fig. 3. The frequency dependence of reflection parameter S_{11} for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

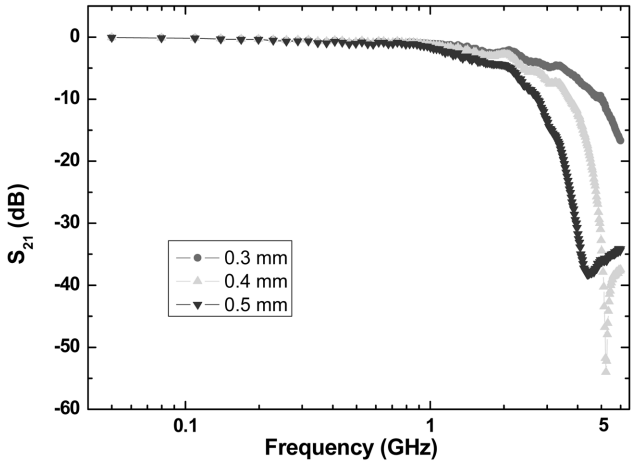

Fig. 4. The frequency dependence of transmission parameter S_{21} for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

기대될 수 있음을 보여주고 있다. 그리고 이들 편상화 분말의 X-선 회절 결과, 이 합금은 체심 입방구조의 α-Fe 단상으로 구성되어 있는 것으로 분석되었다.

이상과 같은 형상과 미세구조를 가진 박편을 이용하여 복합 시트를 만든 후, 네트워크 분석기로 전자파의 반사 및 투과 특성 즉 반사 파라미터 S_{11}과 투과 파라미터 S_{21}에 대하여 측정한 결과를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

복합 시트의 전자파 반사계수를 Γ, 투과계수를 T라고 할 때, 이들과 S_{11} 및 S_{21}은 각각 $S_{11} = 20\log|\Gamma|$, $S_{21} = 20\log|T|$의 관계를 가진다[14].

Fig. 3은 주파수에 따른 반사 파라미터 변화의 시트 두께 의존성을 보여주고 있는데, 대략 0.5 GHz 이하에서는 0.3~0.4 mm 두께의 얇은 시트가 낮은 S_{11}값을 나타난다. 반면 1 GHz

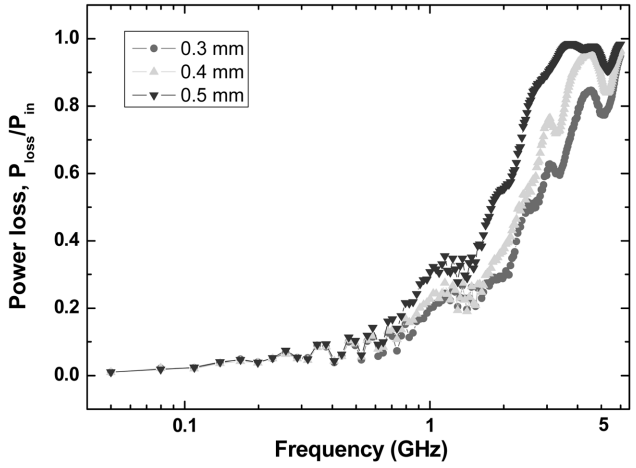

Fig. 5. The frequency dependence of power loss P_{loss}/P_{in} for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

근방에서는 0.5 mm 두께의 시트가 –30 dB에 가까운 극소 값을 가지며, 0.3 mm 두께의 시트는 가장 높은 값을 보여주고 있다. 그리고 그 이상의 주파수 범위에서는 시트 두께에 따라 일정한 경향을 보여주지 못하고 복잡한 변화 거동을 나타내었다.

한편 Fig. 4에 나타내고 있는 투과 파라미터 S_{21}은 S_{11}의 복잡한 변화와 달리, 1 GHz 정도까지는 시트 두께에 따라 별 차이를 보여주지 못하나 그 이상의 주파수에서는 분명히 시트 두께가 두꺼울수록 S_{21}의 크기가 크게 낮아지고 있음을 볼 수 있다.

이상과 같은 Fig. 3 및 Fig. 4의 S 파라미터 특성으로부터 전자파 전력손실(전송손실) P_{loss}/P_{in}를 다음 식으로 구하였으며[14], 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 P_{in}과 P_{loss}는 각각 입사 및 손실 전자파 에너지이다.

$$\frac{P_{loss}}{P_{in}} = 1 - (|\Gamma|^2 + |T|^2) \quad (1)$$

이 그림에서 보는 바와 같이 전력손실은 전반적으로 주파수의 상승과 함께 증대되어 6 GHz 근방이 되면 거의 1의 값에 근접하였다. 그런데 시트 두께에 따라서는 0.5~0.6 GHz 정도까지는 별 차이가 없으나 그 이상의 주파수 즉 1~5 GHz의 범위에서는, 시트 두께가 두꺼울 때 현저히 더 높은 전력손실을 나타내고 있고 따라서 이 경우 상대적으로 전자파 흡수 특성 및 노이즈 억제 효과가 더 우수함을 알 수 있다. 그리고 식 (1)과 Fig. 4의 거동으로부터 이와 같은 전자파 전력손실의 시트 두께에 따른 증가 현상은 투과 파라미터 S_{21}의 현저한 저하에 기인하고 있는 것으로 판단된다.

이상과 같은 전력손실의 주파수 및 시트 두께 의존성과 비

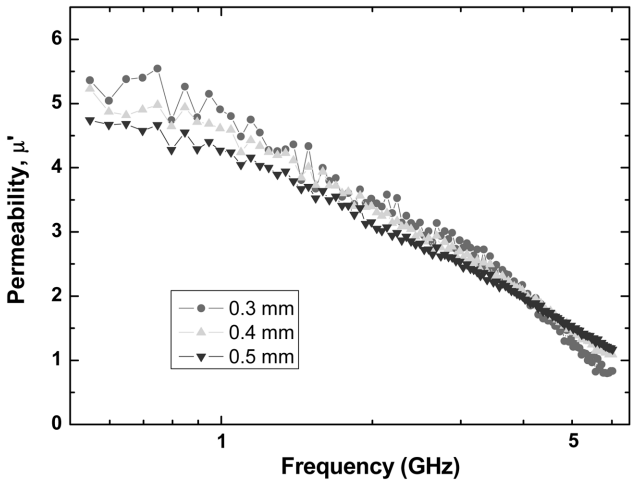

Fig. 6. The frequency dependence of real part of complex permeability μ' for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

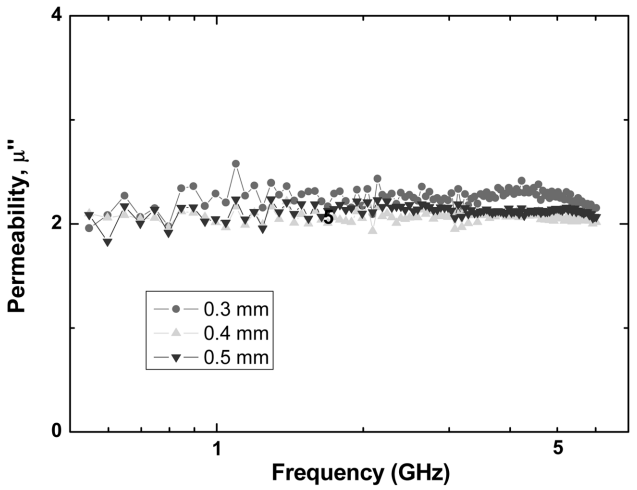

Fig. 7. The frequency dependence of imaginary part of complex permeability μ'' for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

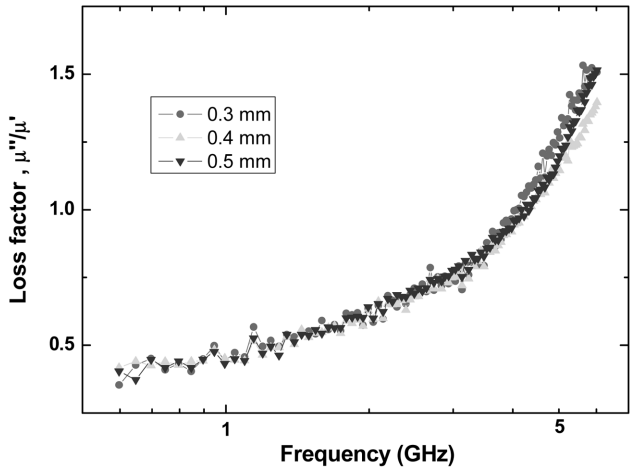

Fig. 8. The frequency dependence of loss factor μ''/μ' for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

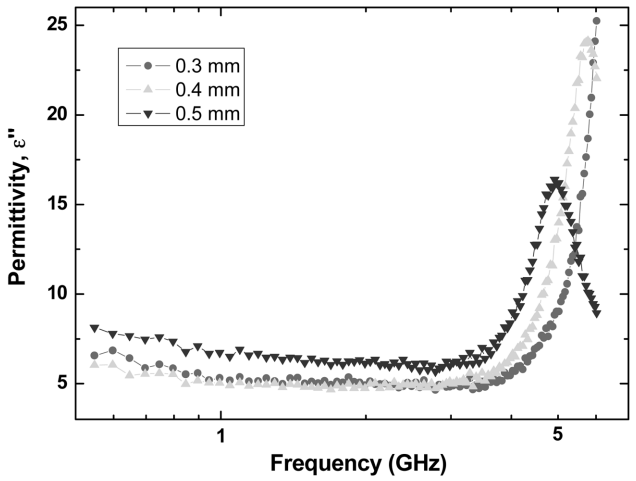

Fig. 9. The frequency dependence of imaginary part of complex permittivity ε'' for the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively.

교 검토하기 위해, $\mu = \mu' - j\mu''$(j: 복소수)로 주어지는 복소 투자율의 주파수 및 시트 두께에 따른 변화를 조사하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 이 때 Fig. 6은 복소 투자율의 실수부를 그리고 Fig. 7은 허수부를 표시하고 있는데, Fig. 6에서 시트 두께에 따른 복소 투자율 실수부의 변화는 4~5 GHz까지 0.3 mm의 두께를 가지는 시트가 가장 높은 값을 가지나 두꺼운 시트와 비교하여 그 차이는 매우 작으며, 마찬가지로 Fig. 7의 허수부에서도 0.3 mm 두께의 시트가 상대적으로 더 큰 값을 가지고는 있으나 그 차가 극히 작음을 알 수 있다.

자성체의 교류자화 과정에서 발생되는 자기 손실의 상대적 크기는 손실계수(loss factor) μ''/μ'에 비례한다[15]. Fig. 6과 Fig. 7의 복소 투자율 데이터로부터 이를 구하여 Fig. 8에 도시하였는데, 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체 측정 주파수 범위에서 시트 두께에 따른 손실계수의 변화는 거의 관찰되지 않음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 Fig. 5에 나타나는 복합 시트의 두께 변화에 따른 전자파 흡수 특성의 변화가 투자율 특성과는 그리 큰 상관성이 없는 것으로 판단된다.

한편 전자파 흡수체에 입사되는 고주파 노이즈의 반사 및 투과 특성에는 그의 투자율뿐만 아니라 유전율도 큰 영향을 미친다[16]. 특히 흡수체를 통과하는 전자파 에너지 손실은 복소 유전율의 허수부 ε''의 크기와 밀접한 상관성을 갖는다.

이에 세 종류의 서로 다른 두께를 가진 복합 시트의 주파

수에 따른 복소 유전율 허수부의 변화를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 대략 유전율의 크기는 1~5 GHz의 주파수 범위에서 0.3 mm 두께의 시트가 가장 낮은 값을 나타내고 0.5 mm 두께의 시트가 가장 높은 값을 보였는바, 시트 두께에 따른

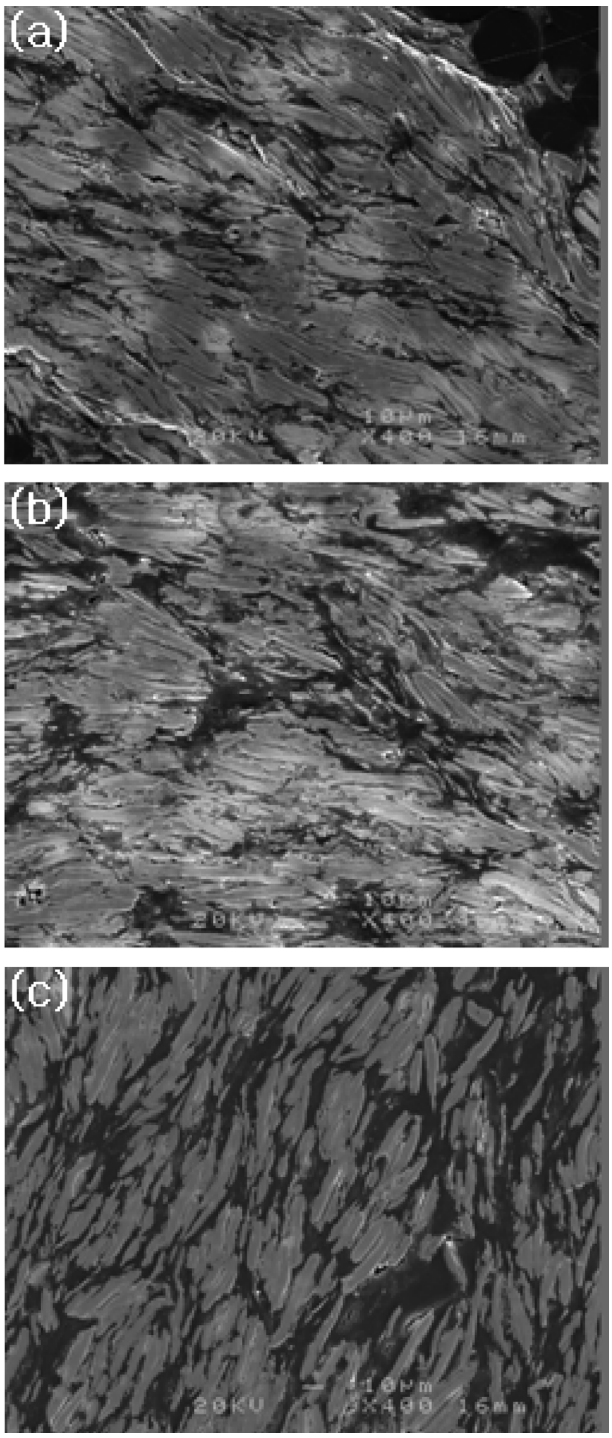

Fig. 10. The cross-sectional views of the FeSiCr/polymer composite sheets with the thickness of (a) 0.3 mm, (b) 0.4 mm, and (c) 0.5 mm, respectively.

이러한 유전율 허수부의 크기 변화는 Fig. 5에서의 전력손실(전송손실)의 시트 두께 의존성과 잘 일치하고 있다.

도전체 입자가 분산되어 있는 금속 도체/유전체 복합상의 유전율은 도전체의 분율, 형상, 분포 상태 등에 따라 많이 달라지는바, 이의 연관성을 알기 위해 두께 0.3 mm, 0.4 mm 및 0.5 mm 시트의 단면 미세구조를 관찰하여 Fig. 10에 나타내었다.

이 그림에서 보는 바와 같이 세 종류 시트의 자성 분말 분포 상태는 상당히 달라, 얇은 0.3 mm 시트에 비해 두꺼운 0.5 mm의 시트에서 보다 입자군간 간격이 균일하고 크게 형성됨을 알 수 있다. 반면 0.3 또는 0.4 mm 두께의 시트에서는 자성 박편분말 간격이 대단히 좁게 형성되면서 약간은 응집되는 경향을 보이고 있다.

현재로서는 이와 같이 시트 두께에 따라 자성 분말의 분포 상태가 달라지는 원인을 잘 알고 있지 못하나, 닥터 블레이드 방식을 채택한 테이프 캐스팅으로 시트를 제조할 때 블레이드 간격에 따라 복합체 슬러리에 가해지는 응력의 전달 분포 양상이 달라지기 때문인 것으로 추측된다.

어쨌든 지금 이들 미세구조의 변화 이유는 잘 모르지만, Fig. 9와 Fig. 5의 상관성으로부터 시트 두께가 두꺼우면 내부 자성 합금 박편의 분포 구조의 변화에 따라 복소 유전율의 허수부의 크기가 증가하고 이에 따라 전력손실이 증가하여 전자파 흡수 특성이 향상되는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

수분무법으로 얻어진 연자성 Fe-Si-Cr 합금 분말을 어트리션 밀로써 두께가 1~2 μm 정도 되도록 편상화 처리한 다음 이를 폴리머 중에 분산시켜 준마이크로파 대역의 전자파 노이즈 흡수용 복합 시트를 제조할 때, 시트 두께에 따른 전자파 전력손실(전송손실)과 전자기 특성 및 내부 미세구조의 변화를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

시트 두께를 0.3, 0.4, 0.5 mm의 세 가지 크기로 하였을 때, 시트의 두께가 두꺼울수록 1~5 GHz의 주파수 대역에서 투과 파라미터의 값이 현저하게 낮아지면서 전력손실의 크기가 매우 증가하였다. 이 때 복소 투자율 및 자기 손실계수의 크기는 시트 두께가 변하여도 거의 비슷한 값을 가져 전력손실의 변화 거동에 별 기여를 하지 못하는 것으로 관찰되었다. 한편 복소 유전율은 시트의 두께에 따라 상당한 변화를 보이는 바, 1~5 GHz 대역에서 시트 두께가 두꺼워질수록 유전율 허수부의 크기가 증가하였고 이에 따라 전력손실의 증가 즉 향상된 전자파 흡수특성이 얻어졌는데, 이는 두꺼운 복합 시트의 현저한 내부 자성 박편 배열 구조의 차이에 기인하는 것으로 추정되었다.

참고문헌

[1] Y. Aikawa and K. Yanagimoto, Sanyo Technical Report **9**, 59 (2002).
[2] Y. Hashimoto and H. Kurihara, Engineering Materials **46**, 36 (1998).
[3] A. Saito, M. Ogawa, K. Tutui, H. Endo, and S. Yahagi, Materia Japan **38**, 46 (1999).
[4] Y. Bizen, J. Sunakawa, S. Arakawa, and S. Takaoka, Hitachi Metals Technical Report **16**, 39 (2000).
[5] S. Yoshida, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, 1353 (1998).
[6] S. Yoshida, M. Sato, and Y. Shimada, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, 1377 (1998).
[7] M. Sato, S. Yoshida, E. Sugawara, and Y. Shimada, J. Magn. Soc. Jpn. **20**, 421 (1996).
[8] S. Yoshida, S. Mitsuharu, E. Sunagawa, and Y. Shimada, J. Appl. Phys. **85**, 4636 (1999).
[9] A. Saito, Technologies & Applications of Wave Absorber (ed. O. Hashimoto), CMC, Tokyo (2004) pp. 123~131.
[10] S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism (2nd edition), Oxford University Press, Oxford (1997) pp. 556~562.
[11] T. H. Noh and J. B. Kim, J. Kor. Inst. Met. & Mater. **46**, 44 (2008).
[12] J. B. Kim and T. H. Noh, J. Kor. Inst. Met. & Mater. **47**, 866 (2009).
[13] A. Goldman, Handbook of Modern Ferromagnetic Materials, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1988) pp. 128~130.
[14] S. Yoshida, H. Ono, S. Ando, S. Ohnuma, M. Yamaguchi, and Y. Shimada, Materia Japan **42**, 193 (2003).
[15] T. H. Noh, Magnetic Materials, Dooyangsa, Seoul (2006) pp. 324~327.
[16] O. Hashimoto, Introduction to Wave Absorber, Morikita Publishing Co., Tokyo (1997) pp. 28~30.

Effects of Sheet Thickness on Electromagnetic Wave Absorption Characteristics in FeSiCr/Polymer Composite Sheets

Tae-Hwan Noh* and Ju-Beom Kim
School of Materials Science & Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received 15 July 2010, Received in final form 3 August 2010, Accepted 4 August 2010)

This study examined the effects of sheet thickness on electromagnetic wave absorption characteristics and internal microstructure in 92.6 %Fe-6.5 %Si-0.9 %Cr (wt%) alloy flakes/polymer composite sheets available for quasi-microwave band. The composite sheets with the thickness of 0.3, 0.4 and 0.5 mm were prepared by tape casting. A significant decrease in transmission parameter S_{21} and a large increase in power loss were observed for the thick composite sheet in the frequency range of 1~5 GHz. However the permeability properties were not affected by thickness variation, while the imaginary part of complex permittivity increased with the increase of sheet thickness at 1~5 GHz. The enhanced electromagnetic wave absorption characteristics in the thicker composite sheets was attributed to the changed microstructure and the higher dielectric loss.

Keywords : electromagnetic wave absorption, FeSiCr flakes, composite sheets, sheet thickness, complex permittivity