

Al₂O₃ 첨가에 따른 Fe계 나노결정립 P/M시트의 전자파 흡수특성

우수정 · 조은경 · 조현정 · 이재준 · 손근용 · 박원욱*
인제대학교 공과대학 나노공학부

Electromagnetic Wave Absorption Properties of Fe-based Nanocrystalline P/M sheets with Al₂O₃ additive

S. J. Woo, E. K. Cho, H. J. Cho, J. J. Lee, K. Y. Sohn and W. W. Park*
School of Nano-System Engineering, Inje University, Gimhae, Korea (ROK)
(Received July 30, 2007; Accepted August 16, 2007)

Abstract Electromagnetic wave absorbing materials have been developed to reduce electromagnetic interference (EMI) for electronic devices in recent years. In this study, Fe-Si-B-Nb-Cu base amorphous strip was pulverized using a jet mill and an attritor and heat-treated to get flake-shaped nanocrystalline powders, and then the powders were mixed, cast and dried with dielectric Al₂O₃ powders and binders. As a result, the addition of Al₂O₃ powders improved the absorbing properties of the sheets noticeably compared with those of the sheets without dielectric materials. The sheet mixed with 2 wt% Al₂O₃ powder showed the best electromagnetic wave absorption, which was caused by the increase of the permittivity and the electric resistance due to the dielectric materials finely dispersed on the Fe-based powder.

Keywords : Nanocrystalline, Fe-Si-B-Nb-Cu, Permittivity, Electromagnetic wave absorber, Al₂O₃

서 론

최근 전자기기의 소형화, 대용량화, 고속화 등에 따른 전자파의 환경 오염문제를 해결하기 위해 전자파 흡수체에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다. 뿐만 아니라 휴대전화·무선 LAN 등 정보통신기기, 도로교통시스템 등에 GHz 대역의 전자파가 사용되고 있으며, 앞으로 고주파대역에서의 이용이 확대될 것으로 예상된다. 특히 전자기기의 상호작용 또는 기기 내부에서의 회로간의 전자파 간섭에 의한 오작동 문제가 심각하여, 그 해결 수단으로서 성능이 우수한 얇은 판상 형태의 전자파 흡수체가 주목을 받고 있다^{1,2,3}. 기존의 전자파 흡수재료로는 퍼멀로이, 페라이트, 비정질 분말 등이 사용되어 왔으나, 본 연구에서는 우수한 연자성 특성을 가진 Fe계 나노결정립 분말을 전자파 흡수체 재료로서 이용하였다. Fe계 나노결정립 분말은 미소결정립으로 인하여 고주파 손실이 적고, 페라

이트에 비해 포화자속밀도가 커서 얇은 두께로 우수한 특성을 나타낼 뿐 아니라, 기존의 재료에 비해 재료자체의 투자율이 높은 장점이 있다^{4,5}. 그리고 결정질 분말이므로 열안정성이 우수하고, 공정 비용의 절감과 함께 복잡한 형상의 부품도 제조가 가능하다.

전자파 흡수특성 변화는 에너지 손실에 의한 것으로 복소투자율과 복소유전율이 손실계수에 중요한 영향을 미치는 인자이다⁶. 본 연구에서는 투자율 및 포화자속밀도가 우수한 Fe계 나노결정립 분말재료를 사용하였는데 반자장 효과를 줄이기 위해 분말을 편상화하였으며, 전자파 흡수능을 더욱 향상시키기 위해 Al₂O₃을 첨가하여 전자파 흡수시트를 제작하였다. Al₂O₃는 유전특성을 가진 산화물질이므로, Fe계 나노결정립 분말 시트의 유전특성을 높여 전자파의 유전손실을 증대시킬 것이라 예상됨에 따라, Al₂O₃를 소량 첨가하여 재료의 유전율 및 투자율 정수와 전자파 흡수 특성에 미치는 영향 등에 대해 분석하였다.

*Corresponding Author : [Tel : +82-55-320-3872; E-mail : wwpark@inje.ac.kr]

2. 실험방법

본 실험에서는 melt spinner를 이용한 급속응고법 (Rapid Solidification Process) 으로 제조된 스트립 형태의 $Fe_{73}Si_{16}B_7Nb_3Cu_1(at\%)$ 비정질 합금을 $425^{\circ}C$ 에서 예비 열처리한 후 jet milling과 attrition milling을 함으로써 편상화된 분말을 얻었다²⁾. 편상화된 Fe계 분말은 270 mesh 이하의 분말만 분급하여 실험에 사용되었으며, Al_2O_3 분말을 각각 1, 2, 3, 4, 5 wt% 첨가하여 ball milling법으로 10분간 혼합하였다. Al_2O_3 분말은 평균 입도가 50 nm 이며 유전상수 값은 약 10 정도이다. Ball Milling시 사용한 볼은 직경 15 mm의 지르코니아 구형볼이었으며, 회전 속도는 116 rpm이었다. 혼합 후 비정질 상태의 분말을 나노 결정화시키기 위하여 $540^{\circ}C$, 고순도 질소 분위기 하에서 1시간 동안 결정화 열처리를 하였으며, 이

Fe계 분말을 바인더와 혼합하여 전자파 흡수 시트를 제조하고 $100^{\circ}C$ 에서 1시간 건조 열처리 후 실온에서 24시간 건조하였다. 유전체 분말인 Al_2O_3 의 분산상태를 확인하기 위하여 Fe계 나노결정립 분말시트의 단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. 완성된 전자파 흡수 시트의 두께는 평균 0.5 mm이었으며, Network Analyzer(Agilent사 제품 N5230A)를 이용하여 2-port coaxial 방법으로 10 MHz에서 10 GHz까지 S-parameter, 유전율, 투자율을 측정하였고, 이로부터 전자파흡수능을 분석하여 재료별 특성을 비교하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 1은 Al_2O_3 분말의 첨가량에 따른 투자율의 실수(μ'), 허수(μ'') 부분을 나타낸 그래프이다. 외부에서 자기장을 인가하면 도메인이 한 방향으로 배열되면

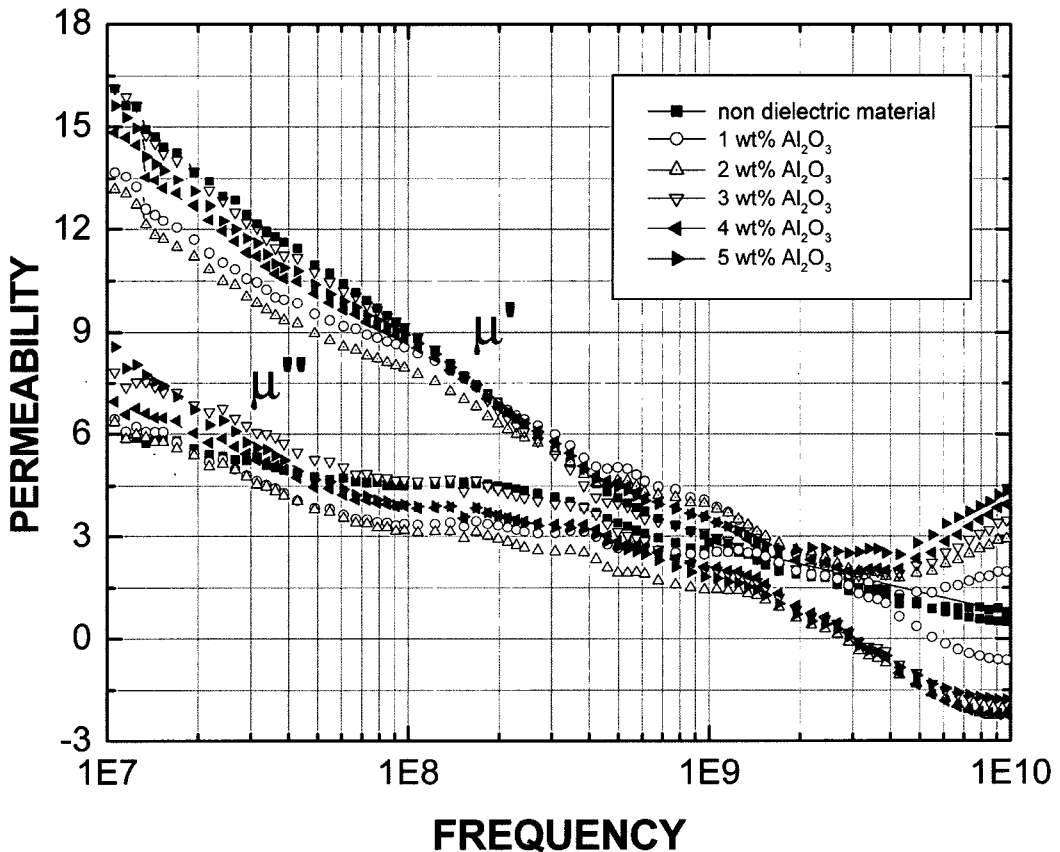


Fig. 1. Variations of complex permeability of electromagnetic wave absorption sheets mixed and cast with 1-5 wt% Al_2O_3 powder.

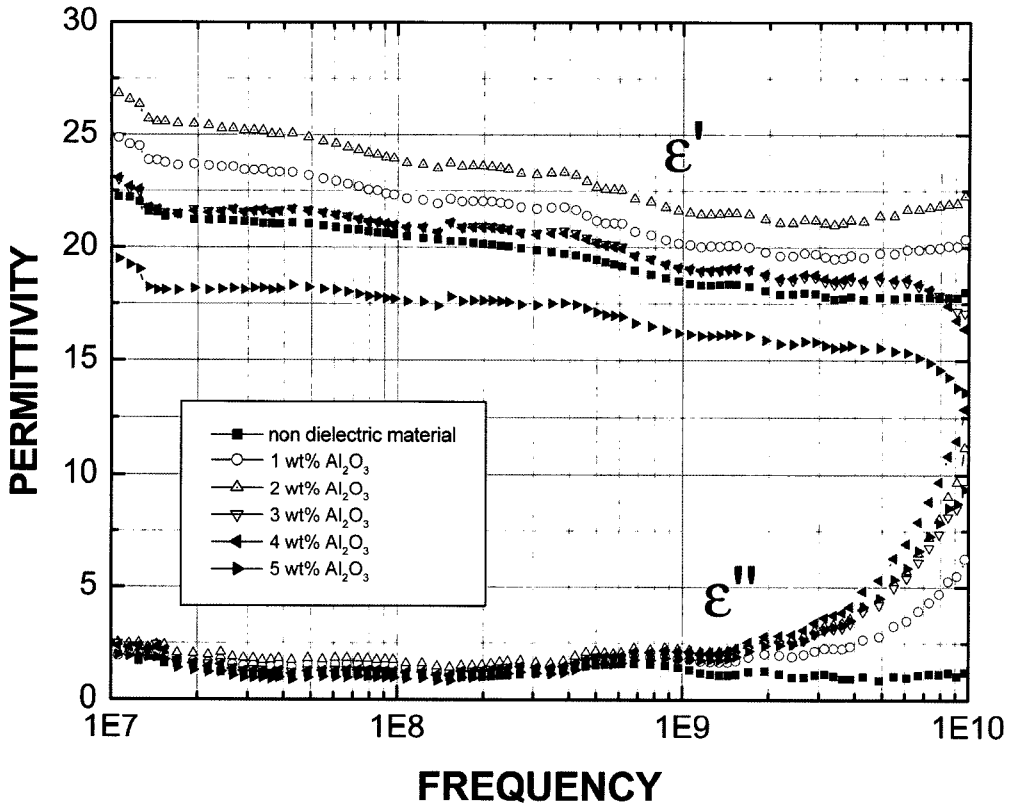


Fig. 2. Variations of complex permittivity of electromagnetic wave absorption sheets mixed and cast with 1~5 wt% Al₂O₃ powder.

서 자화되기 시작하는데 투자율의 실수값은 실제적으로 전자파에너지에 반응하는 함수를 나타내며, 투자율 허수 값은 자성 손실에 관여하는 손실함수를 의미한다.

Al₂O₃ 분말을 첨가한 시트의 투자율 실수값은 주파수 증가함에 따라 감소하였으며, 3 GHz 부근에서부터 투자율 실수값이 증가하기 시작하여 10 GHz 대역에서는 Al₂O₃를 첨가 하지 않은 시트는 약 1, Al₂O₃를 4 wt% 첨가한 시트는 약 4 정도의 투자율 값을 나타내었다. 고주파 대역으로 갈수록 표피 효과 (skin depth effect)에 의해 투자율이 감소하는 것이 일반적이지만⁷⁾, Al₂O₃ 산화물의 절연효과로 인하여 투자율 실수 값이 증가하였다. 투자율 허수부를 살펴 보았을 때, 10 MHz 대역에서 Al₂O₃ 분말을 첨가한 시트의 투자율 허수부가 Al₂O₃ 분말을 첨가하지 않은 경우보다 높게 나타났으며, 고주파 대역으로 갈수록 투자율 허수 값이 감소하였다.

그럼 2는 Al₂O₃ 분말의 첨가에 따른 실수(ϵ'), 허

수(ϵ'') 유전율 값을 나타내는 그래프이다. 유전율 실수부 역시 전자파 에너지에 실제적으로 반응하는 함수이며, 허수부는 유전 손실과 같은 손실 함수를 의미한다. 실수 값은 Al₂O₃ 분말을 2 wt% 첨가한 시트의 경우 가장 높게 나타나며, 1 wt% 첨가한 것, 4 wt%, 3 wt%, 첨가하지 않은 것, 5 wt% 순으로 나타나고 있다. 즉, 실험결과가 예상과는 다르게 유전물질의 첨가량의 증가가 유전율 실수값 상승과 비례하지 않는 것으로 나타났다. 이것은 Al₂O₃ 분말의 유전상수가 Fe계 전자파흡수시트의 유전상수값에 비해 낮지만, Al₂O₃ 유전체 분말을 첨가함으로써 Fe계 분말을 절연하여 전체 유전상수값을 증가시킬 것으로 예상되었으나, 유전율의 비례관계가 잘 성립되지 않는 것은 나노크기분말의 분산의 까다로움에 연유하는 것으로 풀이된다. 한편, 유전율 허수값의 경우에는 1 GHz 주파수 대역에서 그 값이 증가하고 있고, Al₂O₃를 첨가하지 않은 시트 경우에 비하여 Al₂O₃의 첨가한 시트의 유전율 허수 값이 증가함을 알 수 있

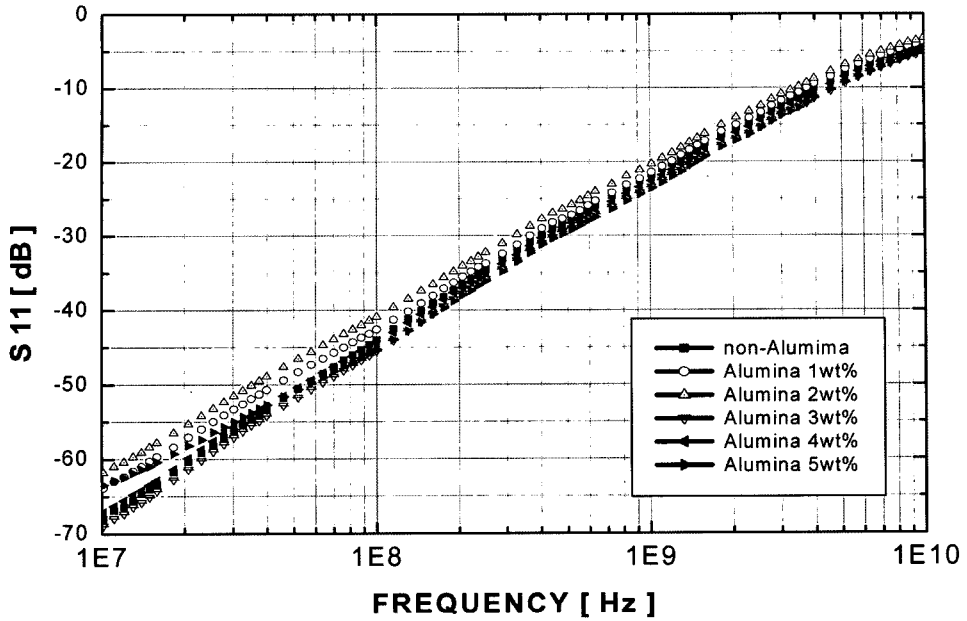


Fig. 3. S11 of electromagnetic wave absorption sheets mixed and cast with 1~5 wt%Al₂O₃ powder.

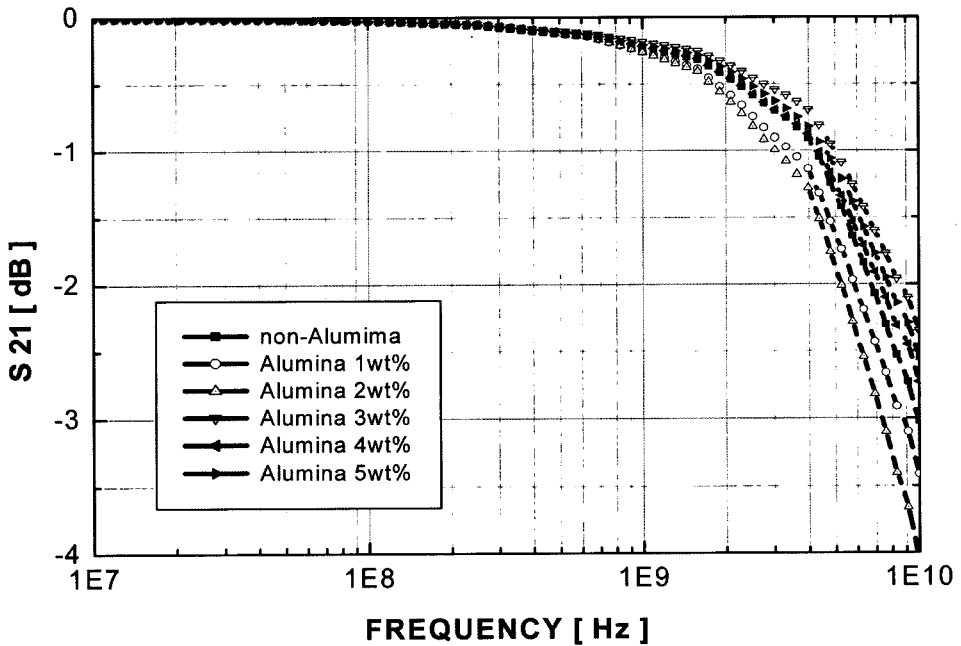


Fig. 4. S21 of electromagnetic wave absorption sheets mixed and cast with 1~5 wt%Al₂O₃ powder.

다. 이는 유전물질의 첨가가 유전 손실에 영향을 미쳤음을 알 수 있으며, Al₂O₃를 4, 5 wt% 첨가한 시트 경우 그 값이 가장 크게 나타나는데, 이는 고주파에서의 유전손실은 유전물질의 첨가량에 비례하는

것으로 해석된다.

그림 3~5는 유전물질의 첨가 양에 따른 S11, S21, 전자파 흡수능에 대해 Network analyzer coaxial 방법으로 측정된 그래프이다. 이 그래프 값은

측정 방법에 의한 누설 전류로 인하여 power loss 값이 전체적으로 낮게 나타났지만, 유전 물질 첨가에 따른 흡수능의 경향성을 보여 주었다. 전자파 흡수능 (power loss)은 다음과 같이 식 (1)에 의해 얻어진다⁸⁾.

$$power\ loss = 1 - (|R|^2 + |T|^2) \quad (1)$$

$$R = \frac{Reflected}{Incident}, S_{11} = 20 \log R \quad (2)$$

$$T = \frac{Transmitted}{Incident}, S_{21} = 20 \log T \quad (3)$$

S₁₁은 전자파 입사에 대한 반사 에너지의 비로서, 반사 계수(R)에 대해 로그를 취해서 20을 곱한 값이고(식 2), S₂₁은 전자파 입사에 대한 투과 에너지 비율로서, 투과 계수(T)에 로그를 취해 20을 곱한 값(식 3)이다. Power loss는 입사한 에너지를 1이라 봤을 때 R과 T의 각각 제곱의 합과의 차에 의해 구해진다.

그림 3에서 알 수 있듯이 고주파로 갈수록 파장(wavelength)의 길이가 짧아지고, 진폭의 증가로 입사

에너지에 대한 반사 에너지 값이 증가함을 알 수 있다. Al₂O₃를 2 wt% 첨가한 시트의 경우 입사한 에너지에 대한 반사되는 에너지 값(S₁₁)이 크며, 즉 Al₂O₃를 2 wt% 첨가한 시트의 경우 반사된 에너지 양이 가장 많다는 것을 의미한다. 그림 4의 경우 대체적으로 입사 에너지에 대한 투과 에너지의 비율(S₂₁)이 0에 가깝게 나타나고 있으나, 1 GHz 대역에서부터 그 값이 감소하였고, Al₂O₃를 2 wt% 첨가한 경우 전자파투과비율이 가장 낮게 나타나고 있으며, Al₂O₃를 3~5 wt% 첨가한 경우 Al₂O₃를 첨가하지 않은 시트에 비하여 높은 전자파 투과비율을 가진다. 따라서, Al₂O₃를 2 wt% 첨가한 경우, 투과되는 에너지가 가장 낮으므로 전자파 흡수체 시트 내에 흡수되는 에너지가 상대적으로 많다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4와 그림 3의 결과로부터 식 (1)을 이용하여 계산한 흡수능을 그래프이다. Al₂O₃ 분말을 2 wt% 첨가한 시트의 경우 흡수능이 가장 높게 나타났으며, 3 wt%와 4 wt%의 Al₂O₃를 첨가한 경우 첨가하지 않은 경우에 비해 더 낮은 흡수능을 가진

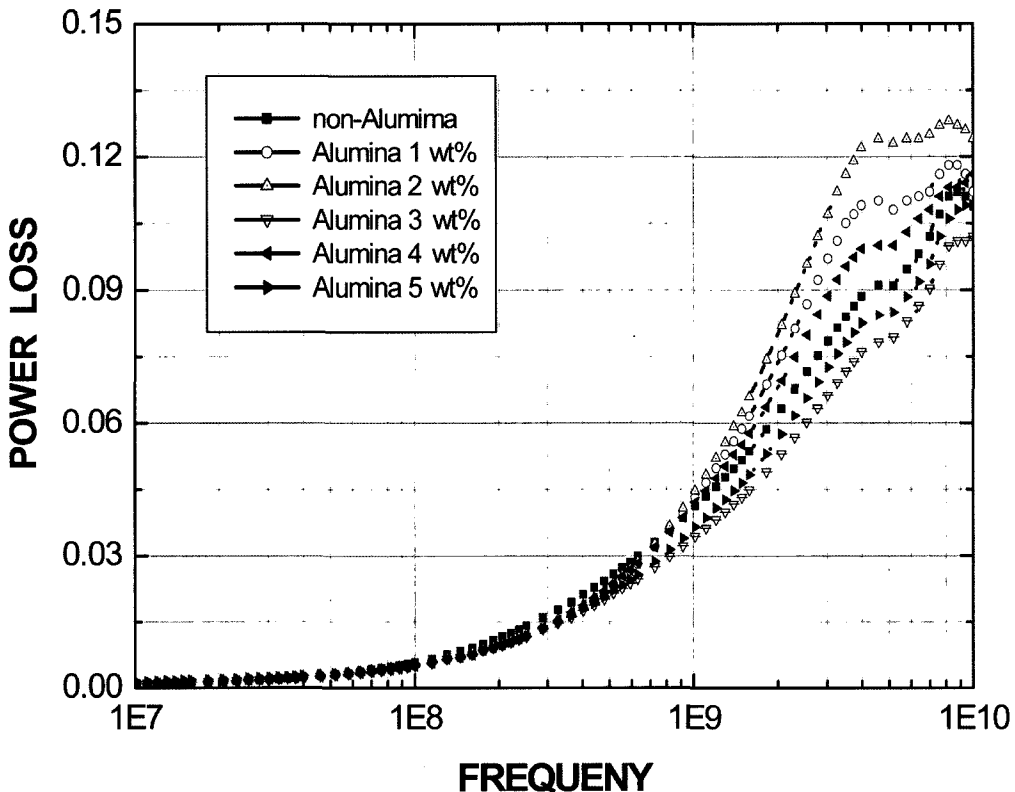


Fig. 5. Power loss of electromagnetic wave absorption sheets mixed and cast with 1~5 wt% Al₂O₃ powder.

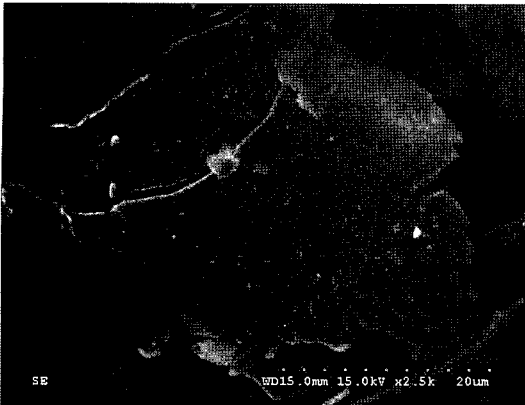


Fig. 6. SEM image of Fe-based powder sheet. (x2500).



Fig. 7. SEM image of Fe-based powder sheet with 2 wt% Al_2O_3 powder, showing the finely dispersed Al_2O_3 nano-sized particle in a open circle (x2500).

다. 이러한 경우는 유전물질이 증가함에 따라 유전상수가 증가하는 일반현상과 맞지 않는 경우로 나노분말을 첨가한 경우 흔히 발생하는 일반적인 분산의 문제로 해석할 수 있다⁹⁾. 실험에 사용된 Al_2O_3 분말은 평균입도가 50 nm인 초미세분말로서 첨가량이 증가함에 따라 Fe계 자성분말과 함께 잘 혼합되지 않고 응집되는 현상을 나타낸다.

SEM을 통하여 전자파 흡수 시트의 단면을 관찰한 결과, 그림 6과 같이 편상화된 Fe계 자성체분말은 2 wt%의 Al_2O_3 를 첨가한 경우에는 미세하고 균일하게 분포하는데 비해, 3 wt%와 4 wt% 첨가의 경우에는 분산도가 나빠지는 현상을 보였다. Al_2O_3 를 첨가하지 않은 시트에 비하여 Al_2O_3 를 2 wt%를 첨가한 분말의 경우는 Fe 분말 표면에 균일하게 Al_2O_3 가 도포 되었음을 그림 7에서 관찰 할 수 있다. 그러나,

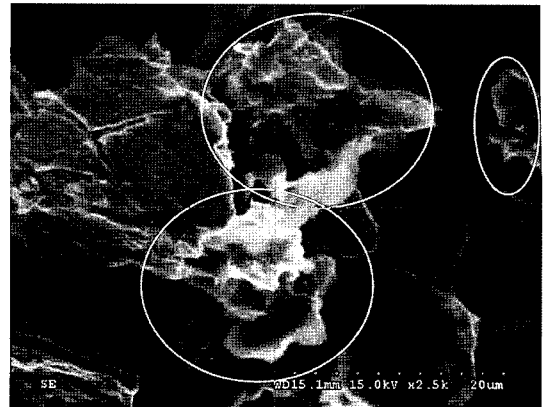


Fig. 8. SEM image of Fe-based powder sheet with 3 wt% Al_2O_3 powder, showing the agglomerated Al_2O_3 particles in a open circle (x2500).



Fig. 9. SEM image of Fe-based powder sheet with 4wt% Al_2O_3 powder, showing the agglomerated Al_2O_3 particles in a open circle (x2500).

Al_2O_3 를 3 wt% 첨가한 경우(그림 8)와 4 wt% 첨가한 경우(그림 9)는 Al_2O_3 가 응집되어 분포하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이러한 나노분말의 응집 현상이 분말의 절연효과 및 시트의 밀도를 감소시키고, 유전특성의 향상을 방해함으로써 전자파 흡수능을 감소시키는 주된 원인이라 사료된다. 따라서, 나노크기의 유전체분말 첨가의 경우에는 이러한 응집현상을 방지하기 위한 연구가 향후 필요한 것으로 분석된다.

4. 결 론

$\text{Fe}_{73}\text{Si}_{16}\text{B}_7\text{Nb}_3\text{Cu}_1(\text{at}\%)$ 계 나노결정립 분말에 Al_2O_3 를 1~5 wt%를 첨가한 후 바인더와 함께 성형 가공한 시트의 복소 유전율, 복소 투자율, 전자파 흡

수능을 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 일반적으로 투자율 실수 값은 표피 효과에 의하여 고주파로 갈수록 투자율 실수 값이 감소하나, Al₂O₃를 첨가한 시트의 경우 3 GHz 대역에서부터 투자율 실수값이 증가 하였고, 이는 Al₂O₃가 Fe계 나노결정립 분말의 절연효과를 증대시킨 것에 기인 하는 것으로 풀이된다.

2. 나노크기의 Al₂O₃ 유전체분말의 첨가는 유전율 값을 증가시켰으며, 특히 2 wt%를 첨가한 경우 Al₂O₃ 를 첨가하지 않은 시트에 비해 실수 유전율값이 크게 증가하였다. 유전율 실수값의 증가는 입사에너지에 대한 반사에너지 비율(S₁₁)을 증가시키지만 입사에너지에 대한 투과에너지 비율(S₂₁)을 감소시킴으로써, 전반적인 흡수시트의 전자과 흡수능을 개선시켰다.

3. Al₂O₃ 를 3 wt% 이상 첨가한 시트는 2 wt% 첨가된 시트의 전자과에 비하여 다소 낮은 전자과 흡수능을 가졌다. 이는 SEM으로 시트의 단면을 측정 한 결과, 유전 물질의 응집 현상으로 인하여 Fe계 나노 결정립분말에 유전 물질을 균일하게 도포되지 않아 흡수능 변화에 영향을 준 것으로 해석된다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것임(This work was supported by the 2006 Inje University research grant).

참고문헌

1. K. M. Lim, M. C. Kim, K. A. Lee and C. G. Park: J Kor. Inst. Met. & Mater., **41** (2003) 3.
2. K. S. Lee, Y. C. Yoon, G. B. Choi, S. S. Kim, J. Y. Lee: J. Kor. Electromagnetic Engineering Society, **16** (2005) 20.
3. H. D. Kim: Polymer Science and Technology, **14** (2003) 1.
4. Y. Yoshizawa, S. Oguma, and K. Yamauchi: J. Appl. Phys., **64** (1988) 10.
5. G. Herzer: IEEE Trans. Mag., **26**(1990)1379.
6. M. Matsumoto, Y. Miyata: IEEE Trans. Magn., **33**(1997) 6.
7. Y. Takemura, S. Masuda, T. Yamada and K. Kakuno: J. Appl. Phys., **79** (1996) 4653.
8. A. Hosoe, K. Nitta, S. Inazawa, K. Yamada, T. Yoshisaka, K. Ikeda: SEI TECHNICAL REVIEW., **54** (2002) 6.
9. J. R. Liu, M. Itoh, T. Horikawa, K. Machida, S. Sugimoto and T. Maeda: J. Appl. Phys., **98** (2005) 054305-1.