

Fe-Si-Al 합금 분말 · 고무 복합 자성체의 전파 흡수 특성

Microwave Absorbing Properties of Fe-Si-Al Alloy Flaky Powder-Rubber Composites

이경섭 · 윤여춘 · 최광보 · 김성수* · 이준영**

Kyung-Sub Lee · Yeo-Choon Yoon · Gwang-Bo Choi · Sung-Soo Kim* · Jun-Young Lee**

요 약

준 마이크로파 대역용 전자파 노이즈의 흡수체로서 자성 복합 시트를 개발하였다. Fe-Si-Al 자성 분말을 attrition mill을 이용해 편상화한 후 이것을 polymer와 혼합 분산시켜 전자파의 입사 방향에 수직인 방향으로 배향된 자성 복합 시트를 제조하였다. Attrition milling 시간이 긴 편상 분말일수록 제조된 자성 복합체의 유전율은 증가하나 투자율은 다소 감소하는 경향을 보인다. 또한 오랜 시간 milling한 편상 분말일수록 임피던스 정합 주파수는 저주파 쪽으로 이동하나 정합 주파수에서의 전자파 흡수율은 감소한다. 이러한 결과들로부터 복합 자성체의 유전율과 투자율의 주파수 특성을 제어하여 1.4 GHz에서 -8.2 dB의 반사 손실 특성을 갖는 두께 1.0 mm의 노이즈 흡수 시트를 개발하였다.

Abstract

A magnetic composite as noise absorber of quasi-microwave band was developed. The Fe-Si-Al alloy powder were forged by attrition mill to get flaky shape. The magnetic composite sheet was fabricated in which powders are dispersed in polymer and aligned in the direction perpendicular to electromagnetic wave propagation. The permittivity of magnetic composite is increased as forging time increasing, while the permeability is decreased slightly. The maximum attenuation peak of reflection loss is shifted to lower frequency range as milling time increasing, and the value of maximum attenuation peak is to get smaller gradually. From these result, we could designed a noise absorber sheet ($t=1.0$ mm) for quasi-microwave band, which is impedance matched at 1.4 GHz with respect to -8.2 dB reflection loss.

Key words : Microwave Absorber, Magnetic Composite, Material Characteristics, Reflection Loss

I. 서 론

최근 정보화 사회로의 발전과 함께 급속히 보급되어온 휴대폰은 단순 음성 통화 위주의 기능을 넘어 영상 정보의 저장 및 송수신 기능을 수행하는 개인 정보 처리 단말기로서 기능이 변화하고 있다. 또한 디지털 카메라와 캠코더 등과 같은 소형 디지털

전자기기의 데이터 처리 용량과 속도가 점차 대용량화, 고속화되고 있어 이러한 소형 디지털 전자기기 내에 고밀도로 실장된 전자 부품들과 배선들 간에 발생하는 준 마이크로파 대역의 전자기 간섭문제(EMI)가 예전에 비해 매우 심각한 문제로 인식되고 있으며, 이러한 전자파 장애 대책의 일환으로서 소형 디지털 전자기기의 제한된 공간 내에서 방사된

「이 논문은 산업자원부에서 지원하는 산업기술개발사업의 연구비 지원으로 수행한 것임.」

(주)창성 중앙연구소(R&D Center, Chang Sung Corporation)

*충북대학교 재료공학과(Department of Material Engineering, Chungbuk University)

**성균관대학교 응용화학부(School of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Sung Kyun Kwan University)

· 논문 번호 : 20041105-20S

· 수정완료일자 : 2004년 12월 16일

준 마이크로파 에너지를 열로 변환시키는 전자파 흡수 재료가 주목받고 있다.

본 연구에서는 준 마이크로파 대역에서 자성 손실과 유전 손실이 우수한 재료를 개발하기 위하여 편상화시킨 Fe-Si-Al 합금 분말을 제조한 후 이것을 Polymer 속에 혼합 분산시킨 복합 자성체를 실험실적으로 제조하였다. 이때 제조조건에 따른 복합 자성체의 재료정수(μ_r' , μ_r'' , ϵ_r' , ϵ_r'')와 주파수 특성과의 관계를 조사하여, 사용하고자 하는 특정 주파수의 준 마이크로파 대역용 임피던스 정합형 흡수체를 컴퓨터를 통해 계산한 후 계산한 전자파 반사 손실 특성과 실제 제작된 복합 자성체 시트의 전자파 반사 손실 특성의 결과를 비교하였다.

II. 실험방법

2-1 전자파 흡수체의 구조 설계

특정 주파수에 대응하는 전자파 노이즈 흡수체를 설계하기 위해서 투자율(μ_r) 또는 유전율(ϵ_r')의 분산이 시작하는 주파수를 제어할 필요가 있다. 스피넬 구조를 갖고 있는 페라이트 자성체의 경우 Snoek의 한계에 의해 비투자율이 GHz 대역에서 5 이하로 줄어들기 때문에 근본적으로 준 마이크로파 대역(300 MHz~3 GHz) 용으로 두께가 1 mm 이하인 박형 흡수체의 제작이 불가능하다^{[1][2]}. 따라서 본 실험에서는 페라이트에 비해 포화자화가 2배 이상인 연자성 코어용 원료인 FeSiAl계 합금을 고려하였다. 준 마이크로파 같은 고주파 영역에서 양호한 투자율 특성을 나타내기 위해서는 자기 이방성을 향상시키고 재료의 전기 저항을 높여야 한다^[3]. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 분말의 형상을 편상화 시킴으로써 큰 형상 자기 이방성을 부여하였다. 그리고 재료의 와전류 손실을 줄이기 위하여 분말의 두께를 표피 두께(skin depth) 정도로 줄였으며, 이렇게 편상화된 입자들을 고분자 절연 매트릭스에 고밀도로 분산시켜 표면 전기 저항이 $1 \times 10^6 \Omega/\square$ 이상이 되도록 설계하였다.

2-2 시료의 제작

본 실험에서는 평균 입도 50 μm 의 FeSiAl 분말을

사용하였다. 이 분말의 형상을 이방화 시키고 입자의 두께를 표피 두께 수준으로 줄이기 위하여 attrition mill을 이용하였으며 이때 산화 방지를 위해 탄화수소 용매 중에서 기계적으로 milling 하였다. 또한 분말 입자의 두께를 조절하기 위하여 milling 시간을 5시간부터 14시간까지 1시간 간격으로 변화시켰다. 이렇게 얻은 편상화된 분말의 aspect ratio 및 두께 변화는 주사전자현미경으로 관찰하였고, 표면 분석기(Surface Area Analyzer)를 이용하여 비표면적(Specific Area)을 측정하였다. 또한 편상 분말의 두께 및 복합 자성체의 조성에 따른 주파수와 재료정수의 상관관계를 조사하기 위하여 분말과 Polymer를 혼합하고 프레스로 압축 성형하여, 두께 1 mm의 자성 복합체를 제작하였으며, HP Agilent社 PNA 8364A 장비로 주파수(45 MHz~10 GHz)에 따른 S-parameter를 측정하여 재료정수(복소유전율, 복소투자율)를 계산하였다^[4]. 이후 측정되어진 재료정수(μ_r' , μ_r'' , ϵ_r' , ϵ_r'') 값으로 전산 모사 실험을 통해 1 mm의 두께로 0.8~1 GHz의 주파수 대역에서 임피던스 정합이 일어나는 조건들을 조사한 후, 1~2 GHz에서 반사 손실이 최대가 되도록 복합 자성체의 제조조건을 설계하여 제품을 제작하였다. 이렇게 제작된 제품의 반사 손실 특성과 컴퓨터를 이용해 계산된 반사 손실 특성을 비교하였다.

III. 실험 결과

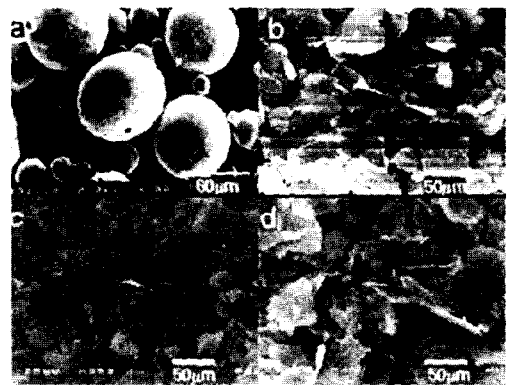


그림 1. Milling 시간을 달리하여 편상화된 Fe-Si-Al 분말들의 SEM 사진

Fig. 1. SEM micrographs of flaky Fe-Al-Si particles with milling time ; (a) before milling, (b) 5 hrs, (c) 7 hrs, (d) 9 hrs.

그림 1은 평균 입도 50 μm 인 FeAlSi 분말의 형상 이방화에 변화를 주기 위해 milling 시간을 변화시키며 편상화 한 분말의 형상을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. Milling 전에는 구형이던 분말이 milling을 시작한지 2시간 후부터 편상으로 바뀌었으며, 시간이 증가함에 따라 편상화된 분말의 두께가 시간에 비례하여 직선적으로 감소하였다. 하지만 분말의 직경은 milling 시간에 따라 그다지 큰 차이가 나지 않으며 9시간 정도 milling한 경우 편상화된 분말의 aspect ratio는 30~50의 분포를 나타내었다.

그림 2는 편상화된 입자들과 유기고분자 바인더를 혼련하여 복합 자성체 시트 형상으로 제조한 후 바인더 내에 자성 분말의 분산된 상태를 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 편상화된 분말이 자성 복합 시트의 면에 평행하게 잘 분산 배향되어 있다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 milling 시간에 따른 분말의 두께가 변하는 것을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 5시간 milling 한 분말의 경우 시트 내에 분산된 편상 분말의 두께는 1.5~3.5 μm 의 분포로서 두께가 균일하지 않으며 평균두께는 2.5 μm 정도이다. 이에 비해 12시간 milling한 분말의 두께는 대체로 균일하고 평균두께는 1 μm 이하이며 5시간 milling한 편상 분말로 제조한 복합 자성체와 비교할 때 동일한 두께의 복합 자성체 내에 약 2배 이상의 편상 입자들이 적층되어 있어 재료 내에 정전용량이 보다

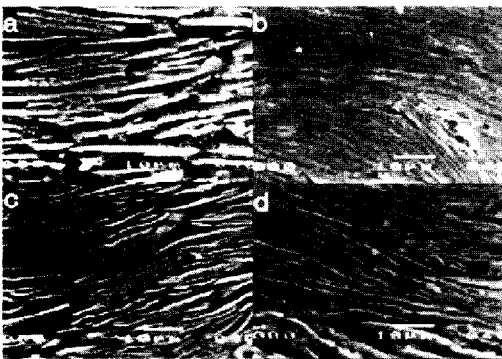


그림 2. Fe-Si-Al 편상화 분말 / Polymer 복합 자성체의 단면 조직 사진
 Fig. 2. Cross section images of Fe-Si-Al alloy flaky powder-rubber composites ; (a) 5 hrs, (b) 7 hrs, (c) 9 hrs, (d) 12 hrs.

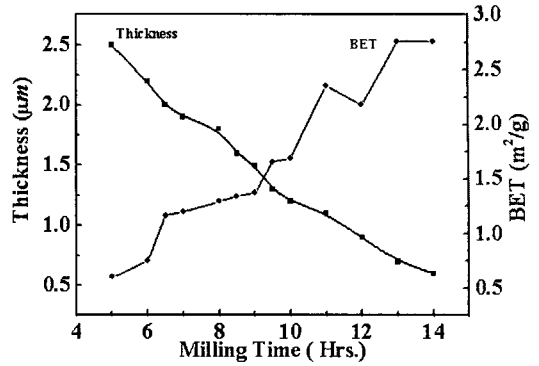


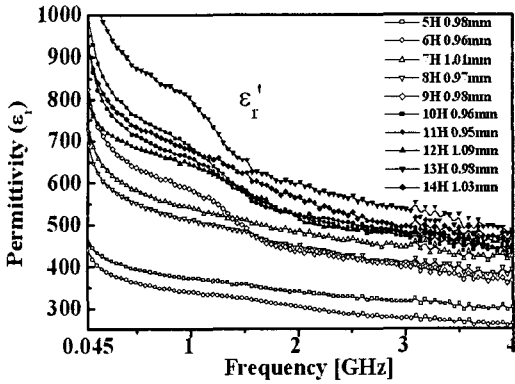
그림 3. 밀링시간에 따른 편상 분말의 두께와 비표면적의 변화
 Fig. 3. Thickness and specific surface areas of flaky powder as milling time.

클 것을 예측할 수 있다.

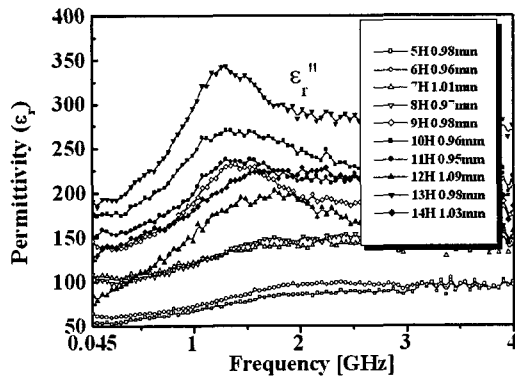
그림 3은 milling 시간을 달리하여 제조된 편상 분말들의 두께와 비표면적의 관계를 나타낸 것이다. 가공시간이 증가함에 따라 입자의 두께는 직선적으로 감소하며 이와 함께 입자의 비표면적은 직선적으로 증가하여 편상 입자들의 두께와 비표면적이 가공 시간에 따라 서로 반비례의 관계가 있음을 알 수 있다.

그림 4는 milling 시간이 다른 편상 분말로 제조된 복합 자성체의 복소유전율의 주파수 분산 특성($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)을 보여준다. 시간이 증가함에 따라 복합 자성체들의 유전율 실수부와 허수부 모두 큰 폭으로 증가하였다. 이 같은 이유는 앞의 그림 2에서 관찰하였듯이 milling 시간이 긴 편상 분말일수록 편상 분말 입자의 두께가 얇아서 동일한 두께의 복합 자성체 내에 많은 수의 편상입자들이 적층될 수 있기 때문에 정전용량이 증가한 것에 기인한다.

그림 5에 milling 시간에 따른 복소투자율($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$)의 주파수 분산 특성을 나타내었다. 분말의 형상을 편상화시킴으로서 준 마이크로파 대역에서도 복소 투자율이 대부분 5 이상의 값을 가짐을 볼 수 있다. 이는 입자들의 형상이 편상으로 바뀌어 따라 와전류 손실이 감소하였기 때문이다. 또한 복소 유전율의 경우와는 달리 3 GHz 이하의 대역에서만 비교하면, 복소 투자율은 오히려 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 같이 milling 시간과 함께 재료의 복소투자율이 감소하는 이유는 명확히 설명하기 어렵다. 하지만 재료의 조성 및 결정구조 등에 의해



(a) ϵ_r'

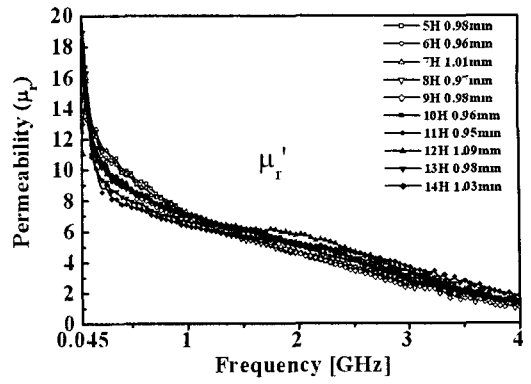


(b) ϵ_r''

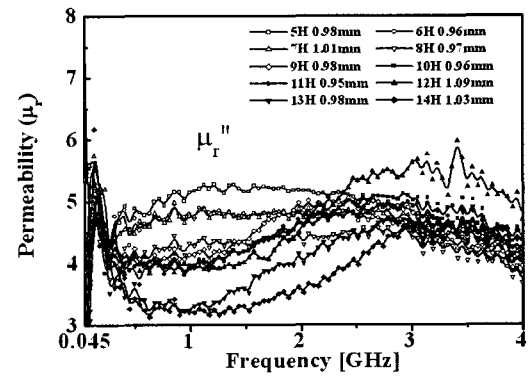
그림 4. 복합 자성체의 유전율의 주파수 의존성
Fig. 4. Frequency dependence of the permittivity of the magnetic composite material.

자기적 특성이 바뀔 수 있다는 점을 고려할 때 높은 에너지로 고속 milling하는 동안 재료 내에 결정구조의 변화나 일부 조성의 변화가 발생하였기 때문으로 해석할 수 있다. 향후 복합자성체의 투자율과 분말의 milling 시간과의 상관관계를 규명하기 위한 연구를 수행할 계획이다. 그림 4 및 그림 5의 결과로 보아 편상 분말의 두께 및 aspect ratio 변화에 의하여 복합 자성체의 투자율보다 유전율이 훨씬 더 민감하게 영향받음을 알 수 있다.

그림 6은 milling 시간이 다른 편상화 분말로 제작된 복합 자성체들의 전파 흡수능을 측정하기 위하여 반사 손실을 측정된 결과이다. 12시간 Milling한 편상 분말이 5시간 milling한 분말보다 600 MHz 정도 낮은 주파수에서 최대 반사 손실을 갖는 임피던스 정합이 일어났으며 반사 손실의 절대값의 크기는 -1.5



(a) μ_r'



(b) μ_r''

그림 5. 복합 자성체의 투자율의 주파수 의존성
Fig. 5. Frequency dependence of the permeability of the composite material.

dB 정도 감소하였다. 이 같은 결과는 임피던스 정합형 흡수체의 정합조건으로 설명할 수 있다. 배면이 도체로 단락된 전파 흡수체의 표면에서 무반사 조건에 해당하는 임피던스 정합은 다음 식으로 주어진다^[9].

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left[j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right] = 1 \quad (1)$$

식 (1)에서 d 는 복합 자성층의 두께, λ 는 자유공간에서의 파장, μ_r 은 흡수층의 복소 투자율, ϵ_r 은 복소 유전율이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 임피던스 정합조건은 투자율과 유전율에 의해 바뀔 수 있으며, 그림 6에서 milling 시간이 길어짐에 따라 복합 자성체들의 정합조건이 보다 낮은 주파수로 이동한 것은 복합 자성체의 유전율이 증가하여 임피던스

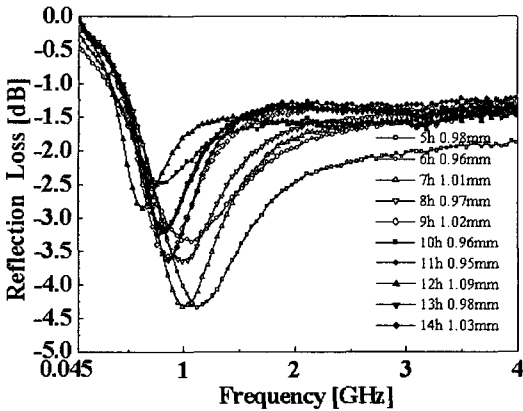
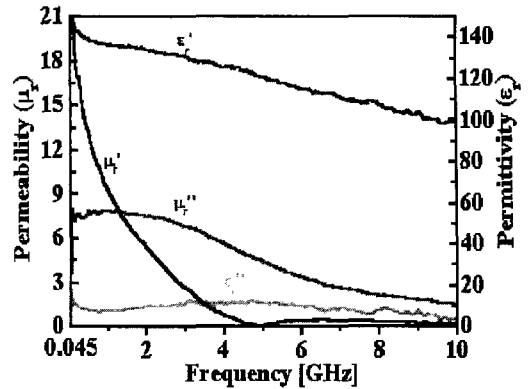


그림 6. Milling 시간의 변화에 따른 복합 자성체의 반사 손실

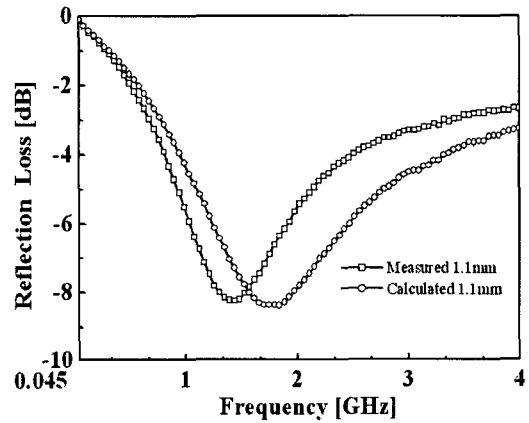
Fig. 6. Reflection loss of the composite magnetic materials with milling time.

정합조건이 보다 파장이 긴 저주파 대역으로 이동하였기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 한편 이와 함께 반사 손실의 크기가 줄어드는 것은 투자율이 다소 감소한 것도 하나의 원인으로 생각할 수 있지만 이보다 더 주된 원인은 유전율의 증가에서 찾을 수 있다. 즉, 유전율이 커짐에 따라 축적된 전하량이 증가하여 복합 자성체로 입사되는 전자파 중 자성체 표면에서의 반사율은 증가하고 상대적으로 매질 내로 들어가는 전자파의 양은 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 유전율이 커짐에 따라 축적된 전하량이 증가하여 입사되는 전자파 중 자성체 표면에서의 반사율이 증가하고 상대적으로 매질 내로 들어가는 전자파의 양은 감소하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 따라서 준 마이크로파 대역에서 반사 손실이 큰 재료를 개발하기 위해서는 임피던스 정합조건과 반사율을 모두 고려하여 재료를 설계하여야 한다. 위의 실험결과들을 종합해 볼 때 1~2 GHz에서 전자파의 흡수율이 가장 우수한 편상 분말은 10시간 milling한 분말이었다. 따라서 편상 분말의 배합율, 임피던스 정합 주파수, 전자파의 반사 감쇄율 등의 관계를 고려하여 10시간 milling한 편상 분말을 Polymer에 분산시켜 1~2 GHz 대역용 전자파 흡수체를 개발하였다.

그림 7은 (주)창성에서 1~2 Hz 대역용 전자파 흡수체로 개발한 CNS(Changsung Noise Suppressor)의 재



(a) 재료정수
(a) Material constants



(b) 반사 손실
(b) Reflection loss

그림 7. 복합 자성체의 재료정수로부터 계산된 값과 실측한 반사 손실의 비교

Fig. 7. Calculated and measured reflection loss of the composite magnetic materials.

료정수와 반사손실을 나타낸 것이다. 앞의 그림 4 및 그림 5와 비교할 때 준 마이크로파 대역에서 투자율은 큰 차이가 없으나 유전율의 실수부가 500 정도 감소되었으며, 이로 인해 1~2 Hz에서의 반사 손실을 -4 B 이상 증가시킬 수 있었다. 또한 컴퓨터를 이용해 계산된 반사 손실 특성과 비교할 때 흡수율은 -8.2 dB로 잘 일치하였으나, 임피던스 정합 주파수가 계산된 주파수에 비해 0.4 Hz 낮은 1.4 GHz에서 반사손실이 최대로 일어났음을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 FeSiAl 합금 분말의 milling 시간에 따른 편상 분말의 복소 유전율과 복소 투자율의 변화를 조사하여 준 마이크로파 대역용 전파흡수체 시트를 설계하였다. 분말의 형상을 편상화한 후 polymer와 혼련하여 복합 자성체를 구성할 경우 1 mm 이하의 두께에서 준 마이크로파 대역에서 임피던스 정합이 일어날 수 있는 정도의 복소 유전율과 복소 투자율을 얻을 수 있었다. 또한 분말의 편상화를 위한 milling 시간 및 분말의 배합량을 변화시킴으로 재료의 투자율 및 유전율을 제어할 수 있으며, 이로써 임피던스 정합 주파수의 조정이 가능함을 확인하였다. 실험 결과들을 근거로 1~2 GHz 대역의 임피던스 정합형 전파 흡수체의 재료정수를 컴퓨터 계산을 통해 얻은 후 이를 근거로 실제로 두께 1 mm의 전파 흡수체 시트를 제작하였다. 그 결과 1.4 GHz에서 임피던스 정합이 일어났으며, 이 주파수에서의 반사 손실은 -8.2 dB로서 컴퓨터 계산을 통해 얻은 흡수율과도 거의 일치하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Snoek, "Dispersion and absorption in magnetic ferrites at frequencies above one mc/s", *Physica*, vol. 4, pp. 207, 1948.
- [2] S. S. Kim, D. H. Han, and S. B. Jo, "Microwave absorbing properties of sintered Ni-Zn ferrites", *IEEE Trans., Mag.*, vol. 30, pp. 4554, 1994.
- [3] Shigeyoshi Yoshida et al., "Permeability and electromagnetic-interference characteristics of Fe-Si-Al alloy flakes-polymer composite", *J. Appl. Physics*, vol. 85, no. 8, pp. 4636-4638, 1999.
- [4] W. B. Weir, "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies", *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 33-36, 1974.
- [5] Y. Naito, K. Suetake, "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics", *IEEE Trans., MTT*, vol. 19, no. 1, pp. 65-72, 1971.

이 경 섭



1990년: 성균관대학교 금속공학과 (공학사)
 1992년: 성균관대학교 금속공학과 (공학석사)
 1997년: 성균관대학교 금속공학과 (공학박사)
 1997년 3월~1999년 2월: 일본 과학기술청 금속재료기술연구소 COE 특별연구원

2001년 2월~현재: (주)창성 중앙연구소
 [주 관심분야] 전파흡수재료, 고주파 자성체/유전체, EMI/EMC

윤 여 춘



2001년: 충북대학교 재료공학과 (공학사)
 2003년: 충북대학교 재료공학과 (공학석사)
 2003년~현재: (주)창성 중앙연구소
 [주 관심분야] 전파흡수재료, EMI/EMC

최 광 보



1988년: 서울대학교 금속공학과 (공학사)
1988년~1990년: 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
1990년~현재: (주)창성 중앙연구소
1999년~현재: 연세대학교 대학원

박사과정
[주 관심분야] 고주파 자성재료, 전파 흡수재료

이 준 영



1983년: 서울대학교 섬유공학과 (공학사)
1985년: 서울대학교 섬유공학과 (공학석사)
1987년~1992년: University of Massachusetts-Lowell, 화학과 (공학박사)

1992년~1998년: 한국과학기술연구원 선임연구원
1998년~현재: 성균관대학교 응용화학부 교수
[주 관심분야] 전도성 고분자, EMI/EMC

김 성 수



1978년 2월: 서울대학교 금속공학과 (공학사)
1980년 2월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)
1983년 8월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학박사)
1984년 3월~1992년 2월: 국방과학

연구소 선임연구원
1987년 10월~1988년 9월: 미국 펜실베이니아주립대 방문연구원
1992년 3월~현재: 충북대학교 재료공학과 교수
2003년 1월~2003년 12월: 일본 동경공업대 객원교수
[주 관심분야] 전파흡수재료, 고주파 자성체/유전체, EMI/EMC