≪연구논문≫ Journal of The Korean Magnetics Society, Volume 14, Number 4, August 2004

이동통신주파수 대역에서 순철 분말-고무 복합체 Sheet의 전파흡수특성

김선태 · 김상근 · 김성수*
충북대학교 재료공학과, 컴퓨터정보통신연구소
충북 청주시 흥덕구 개신동 산 12

윤여춘 · 이경섭 · 최광보
(주)창성 중앙연구소
인천광역시 남동구 남동공단 11B 9LT

(2004년 6월 18일 받음, 2004년 7월 10일 최종수정본 받음)

이동통신주파수 대역에서 박형의 전파흡수체를 제작하기 위해 순철 분말을 흡수 충진재로 사용한 고무 복합체의 고주파 특성(복소투자율, 복소유전율) 및 전파흡수특성에 대해 조사하였다. 주요 실험변수는 순철 분말의 초기입도와 형상(구형, 압분체) 변화였다. Attrition milling에 의해 두께가 표피두께보다 작은 순철 압분체를 제작함으로써 임피던스정합 조건에 근접하는 고투자율과 고유전율을 동시에 얻을 수 있었다. 이는 milling에 의해 구형에서 평판상으로 모양이 바뀜에 따라 와전류 손실이 감소하고(복소투자율의 증가), 압분체 간의 정전용량이 증가한 것(복소유전율의 증가)에 기인한다. 초기입도가 10 μm인 순철 압분체를 흡수 충진재로 사용함으로써 이동통신주파수 대역(0.8~2.0 GHz)에서 반사손실이 −5 dB(70% 전력흡수율), 두께가 0.7 mm 수준인 박형의 전파흡수체를 제안할 수 있었다.

주제어 : 전파흡수체, 순철 분말, 이동통신주파수, 복소투자율

I. 서 론

최근 수년간 PCS(Personal Communication System)와 같은 이동통신시장은 양적으로나 질적으로 실로 대단한 급성장을 하고 있다. 그러나 이들 이동통신단말기로부터 나오는 전자파가 인체에 유해할 수 있다는 문제가 제기되면서 국내는 물론 전 세계가 전자파의 인체영향연구 및 그 대책마련에 골몰하고 있다. 현재까지 인체유해 여부가 확실히 규명된 바는 없으나, 있을 수 있는 가능성에 대비해 각 국에서는 인체보호기준을 고시해 그 규제를 강화하고 있다.

따라서 이동통신단말기에서 전자파의 누설을 방지하고 인체유해영향을 최소화하기 위한 여러 가지 방안들이 검토되고 있다. 재료적인 측면에서 이에 대한 대처방안 중의 하나가 전파흡수체의 사용이다. 현재 시판되고 있는 이동전화의 경우 케이스 내부를 금속피막으로 코팅하여 전파누설을 최소화하고 있으나, 반사된 전파가 내부 회로 또는 부품에 전파 장해를 발생시킬 수 있다는 점에서 전자파 차폐재보다는 전파 감쇠 기능 및 반사억제 기능을 동시에 겸비한 전파흡수체가 보다 효과적이다.

이동통신단말기에 들어가는 전자파 감쇠용 전파흡수체로서 요구되는 가장 중요한 특성은 통신주파수(셀룰러폰: 800 MHz, PCS: 1.8 GHz, IMT-2000: 2.2 GHz)에서 전자파 흡수율이 커야 함은 물론, 무엇보다도 두께가 박형이어야 한다. 정합형 전파흡수체에서 전파흡수율은 두께가 파장(λ)의 1/4일 때 최대가 되고, 이 정합두께는 구성 재료의 투자율 및 유전율의 제곱근에 반비례한다. 예를 들어 PCS 주파수대역인 1.8 GHz를 기준으로 하여 흡수체의 두께(λ/4)를 1 mm 이하로 줄이기 위해서는 비투자율 또는 유전상수가 1,700 이상이 되어야 한다. 스피넬 페라이트 자성체의 경우 Snoek의 한계에 의해 비투자율이 GHz 대역에서 5 이하로 줄어들기 때문에 근본적으로 박형 흡수체의 제작이 불가능하다[1, 2]. 최근 강유전체의 고유전율 특성을 이용하여 준 마이크로파 대역에서 박형의 흡수체가 제안된 바 있으나 흡수체의 두께는 2.5 mm 수준에 머무르고 있다[3].

반면 철계 연자성 금속의 경우 페라이트에 비해 포화자화가 2배 이상이기 때문에, 낮은 저항에 의한 와전류손실을 최소화할 수 있다면 GHz 대역에서 높은 투자율을 얻을 수 있다. 또한 절연 매트릭스에 분산된 금속 미립자의 경우 전하축적에 의한 공간전하분극에 의해 높은 유전상수가 얻어질 수 있다. 연자성 금속 자성체에서 와전류 손실을 줄이는 방법으로 입자의 편상화와 이를 절연 매트릭스에 분산시키는 방법을 많이 쓰고 있다[4, 5]. 전파의 입사 방향에 수직으로 배열된 압분체에서 입자 두께가 표피두께보다 작으면 와전류 손실을 줄일 수 있고, 상대적으로 높은 투자율을 얻을 수 있다.

*Tel: (043) 261-2418 , E-mail: sskim@chungbuk.ac.kr

아울러 입자의 편상화가 이루어지면 전하축적 면적이 증가하기 때문에 유전상수 또한 크게 증가한다.

본 연구에서는 연자성 금속 자성체로 철 분말을 선정하고, 철 분말의 초기 입도, 분쇄시간에 따른 편상화의 정도를 변화시키면서 이동통신주파수 대역에 초점을 맞추어 재료정수(투자율, 유전율)의 변화 및 전파흡수특성을 조사하였다.

II. 이론적 고찰

배면이 도체로 단락된 전파흡수체의 표면에서 무반사 조건에 해당하는 임피던스 정합은 다음 식으로 주어진다.

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

여기서 d는 흡수층의 두께, λ는 자유공간에서의 파장, μ_r은 흡수층의 복소투자율, ε_r은 복소유전율이다. Fig. 1은 식 (1)을 만족하는 주파수 · 두께(f · d)의 궤적을 복소투자율 평면(μ_r'-μ_r'') 상에 유전상수(ε_r')의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 유전손실계수 $\tan\delta_\varepsilon$=0, Fig. 1(b)는 $\tan\delta_\varepsilon$=0.1일 때이다. 이동통신주파수 대역이 0.8~2 GHz이고, 흡수체의 허용 두께를 1 mm로 잡으면, f·d=800~2000 MHz·mm 범위에서 임피던스 정합근이 존재할 복소투자율 및 복소유전율의 허용 범위는 Fig. 1에서 A와 B 두 구역으로 나누어 고찰할 수 있다.

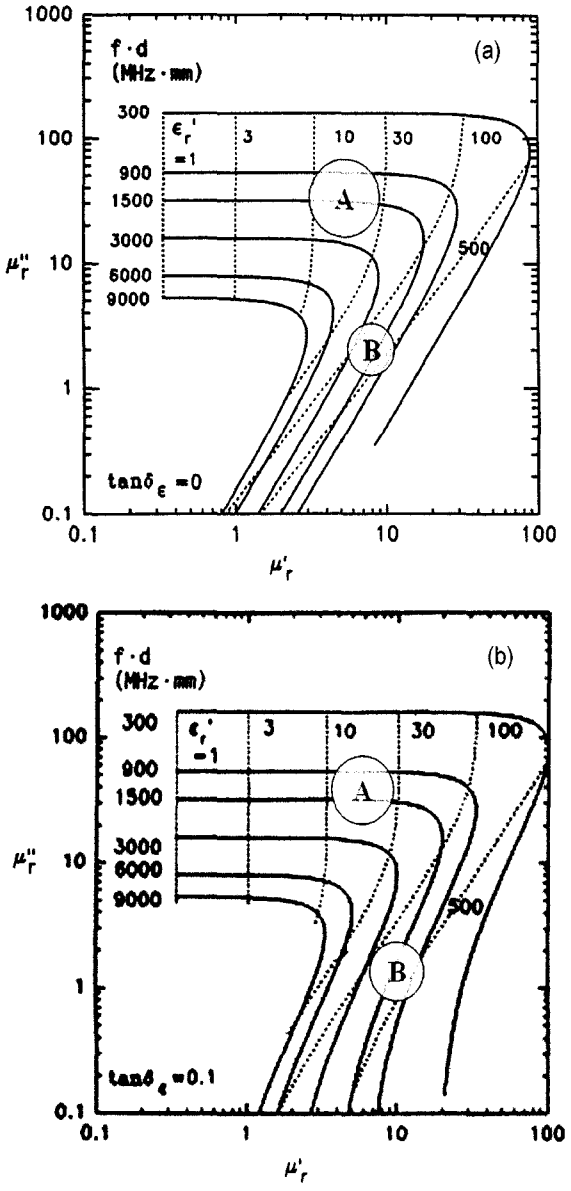

Fig. 1. Contour of frequency and thickness (f·d) satisfying impedance matching at the given material parameters: (a) $\tan\delta_\varepsilon = 0$ and (b) $\tan\delta_\varepsilon = 0.1$.

A 구역은 저유전율($\varepsilon_r' < 20$) 영역으로 페라이트 소결체가 여기에 속한다. 복소투자율의 범위는 μ_r'=3~6, μ_r''=20~60으로서 매우 큰 자기손실을 요한다. 그러나 페라이트의 경우 Snoek의 한계에 의해 GHz 대역에서 투자율은 5 이하의 낮은 값을 갖는다[1]. 따라서 $\mu_r'' > 20$의 높은 자기손실을 얻기 어렵다. GHz 대역용 박형 전파흡수체로 페라이트의 한계가 여기에 있다.

B는 매우 큰 유전상수($\varepsilon_r' > 200$)를 특징으로 하는 구역으로, 이 때 요구되는 복소투자율의 범위는 μ_r'=7~10, μ_r''= 1~3이다. 유전손실($\tan\delta_\varepsilon$)이 커지면 Fig. 1(b)에서와 같이 f·d의 궤적이 투자율의 실수가 큰 쪽으로 이동하기 때문에 임피던스 정합은 보다 큰 투자율을 요한다. 자기손실보다는 매우 큰 유전상수와 투자율의 실수를 요구하는 영역으로 연자성 금속 압분체가 여기에 해당할 수 있다. 철계 연자성 금속의 경우 페라이트에 비해 포화자화가 2배 이상이기 때문에, 낮은 전기저항에 의한 와전류손실을 최소화할 수 있다면 GHz 대역에서 페라이트보다 높은 투자율을 얻을 수 있다. 또한 절연 매트릭스에 분산된 금속 미립자의 경우 전하축적에 의한 공간전하 분극에 의해 높은 유전상수가 얻어질 수 있다.

III. 실험방법

본 연구에 사용된 흡수재는 연자성 특성을 갖는 순철 분말이다. 순철 분말의 평균입도를 5 μm(고순도화학), 10 μm(고순도화학), 70 μm(창성)로 달리하였다. 원료 분말을 평판상(이하 압분체로 칭함)으로 가공하기 위하여 attrition mill에서 분쇄과정을 거쳤다. Milling 시간은 0.5~4시간 범위 안에서 조절하였다.

이들 분말을 실리콘 고무와 혼합하여(분말의 부피비 = 65%) 내경 3 mm, 외경 7 mm, 두께 1.0~1.5 mm의 복합재료

시편을 제조하였다. 이 시편을 동축 샘플 holder에 삽입한 후 반사/투과 법에 의해 재료정수(복소투자율, 복소유전율)를 측정하였다. 측정 주파수 대역은 0.5~6 GHz이었다. 전파흡수능은 복합재료 시편의 배면을 금속 도체로 단락시킨 후 반사손실을 측정함으로써 구하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 순철 분말의 미세조직

순철 분말은 milling에 의해 쉽게 평판상으로 변형된다. Fig. 2는 평균입도가 10 μm인 순철 분말을 attritior에서

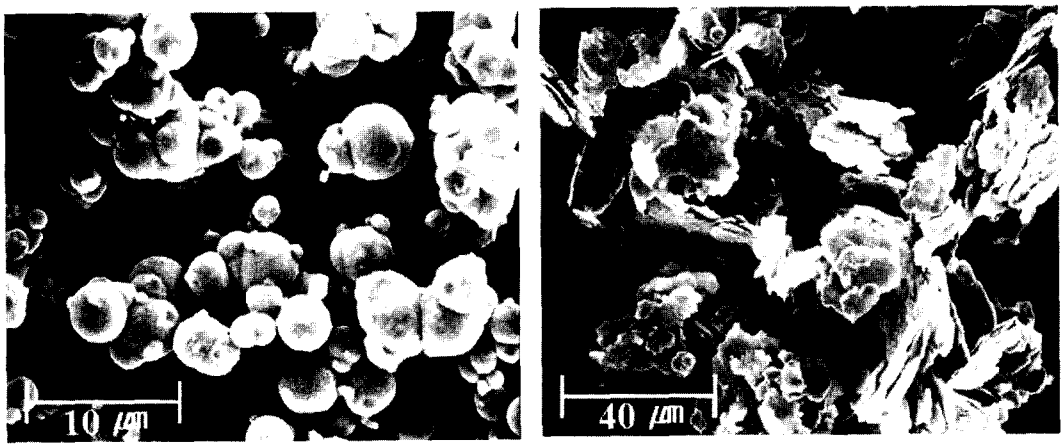

Fig. 2. Morphology of iron particles: (a) virgin (spheres) and (b) attrition milled (flakes).

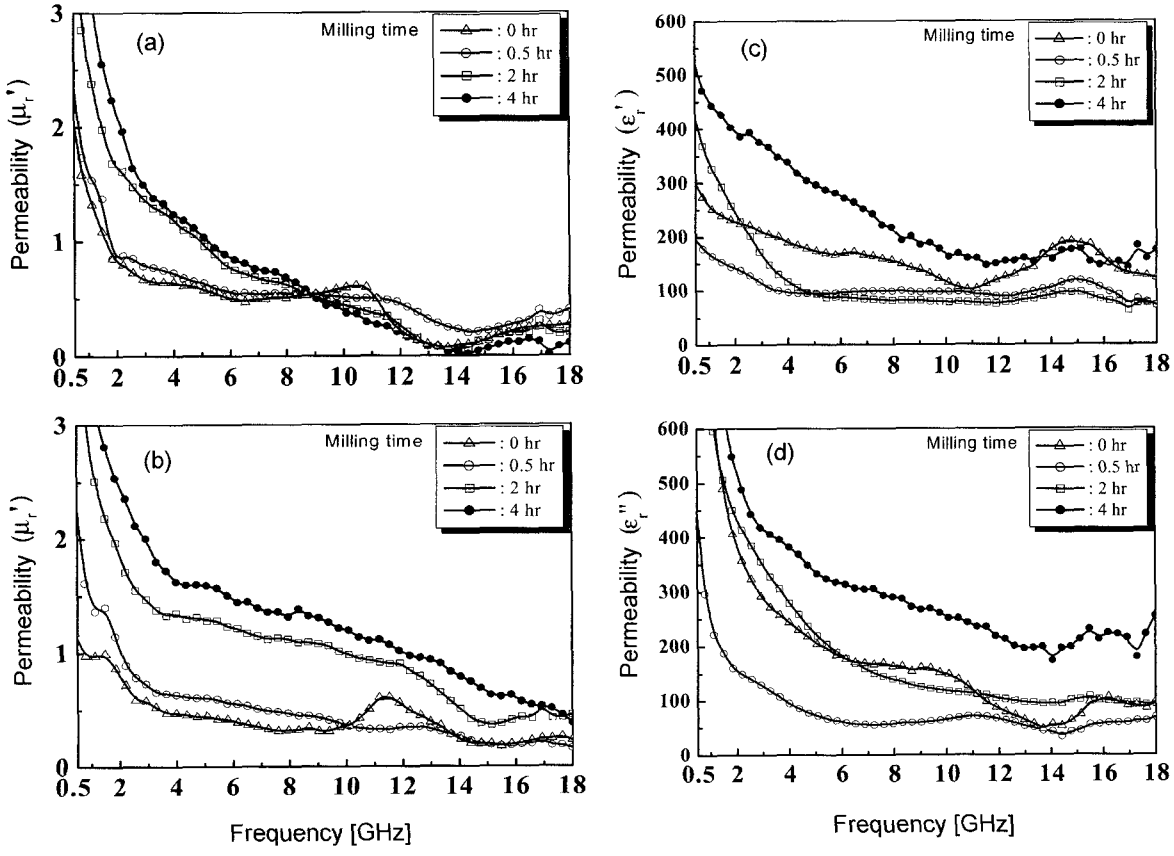

Fig. 3. Material parameters of attrition milled iron particles (70 μm): (a) μ_r', (b) μ_r'', (c) ε_r', and (d) ε_r''.

milling하였을 때 분말의 형상 변화를 보여준다. 원료 분말의 경우 Fig. 2(a)에서와 같이 구형의 형태를 취하나, attritor에서 4시간 milling하면 소성변형 과정을 거쳐 Fig. 2(b)에서와 같이 얇은 판상의 flake 입자로 변형된다. 압분체의 직경은 약 30 μm, 두께는 1 μm 정도로 관찰된다. 평균입도 5 μm와 70 μm의 순철 분말도 attrition milling에 의해 유사한 판상의 flake 입자로 변형되었다.

4.2. 복소투자율 및 복소유전율

Fig. 3은 평균입도가 70 μm인 순철 분말의 milling 시간에 따른 복소투자율($\mu_r=\mu_r'-j\mu_r''$) 및 복소유전율($\varepsilon_r=\varepsilon_r'-j\varepsilon_r''$)의 주파수 분산 특성을 보여준다. Milling 시간이 증가함에 따라 복소투자율 및 복소유전율의 실수, 허수 모두 증가함을 볼 수 있다. 이는 milling에 의해 구형에서 평판상으로 모양이 바뀜에 따라 와전류 손실이 감소하고(복소투자율의 증가), 압분체 간의 정전용량이 증가한 것(복소유전율의 증가)에 기인한다.

평균입도가 10 μm인 순철 분말의 경우(Fig. 4)에도 milling 시간이 증가함에 따라 복소투자율 및 복소유전율의 증가가 관찰되었다. 특히 복소투자율의 증가가 주목되며, 4 hr μ_r'한 압분체 시편의 경우 2 GHz에서 μ_r'=8.8, μ_r''=6.4에 달하였다. 복소유전율도 ε_r'=210, ε_r''=98로 증가하였음을 볼 수 있다.

반면 평균입도가 5 μm인 순철 분말의 경우에는 Fig. 5에서와 같이 milling에 의한 복소투자율(특히 μ_r')의 변화가 거의 없었다. GHz 대역에서 순철의 표피두께(skin depth)는 대략 수 μm 정도로 보고되고 있다[6]. 즉, 초기 분말입도가 표피두께에 근접하면 milling에 의한 투자율의 증대 효과가 나타나지 않는 것으로 보인다.

이상의 결과를 이동통신 주파수대역인 2 GHz에 초점을 맞추어 Table 1에 정리하여 나타내었다. 구형 원료 분말의 경우

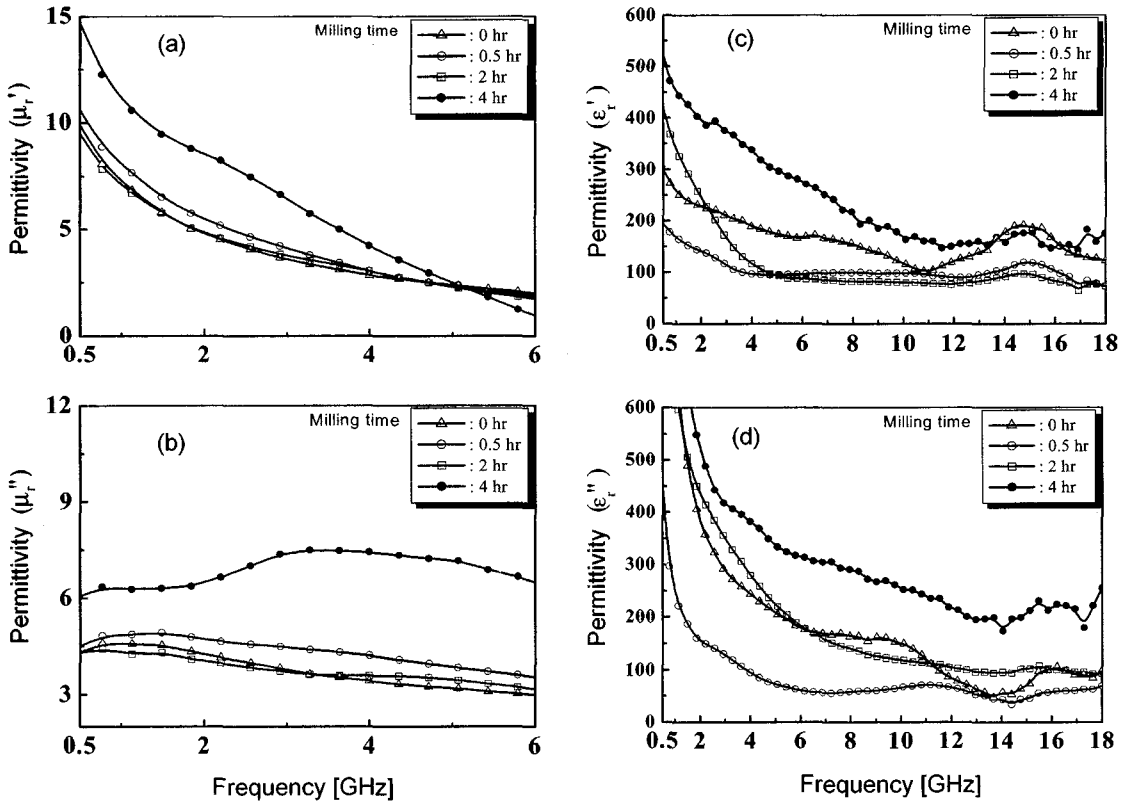

Fig. 4. Material parameters of attrition milled iron particles (10 μm): (a) μ_r' (b) μ_r'', (c) ε_r', and (d) ε_r''.

Table 1. Complex permeability and permittivity of iron powders (in the shape of spheres and flakes) dispersed in rubber matrix at 2 GHz.

Powder	Average Size (μm)	Virgin (spheres)				Attrition milled (flakes)			
		μ_r'	μ_r''	ε_r'	ε_r''	μ_r'	μ_r''	ε_r'	ε_r''
Iron	5	6.9	4.8	53	4	6.6	3.6	75	18
Iron	10	5.0	4.3	66	8	8.8	6.4	210	98
Iron	70	0.9	0.9	231	406	2.2	2.5	403	548

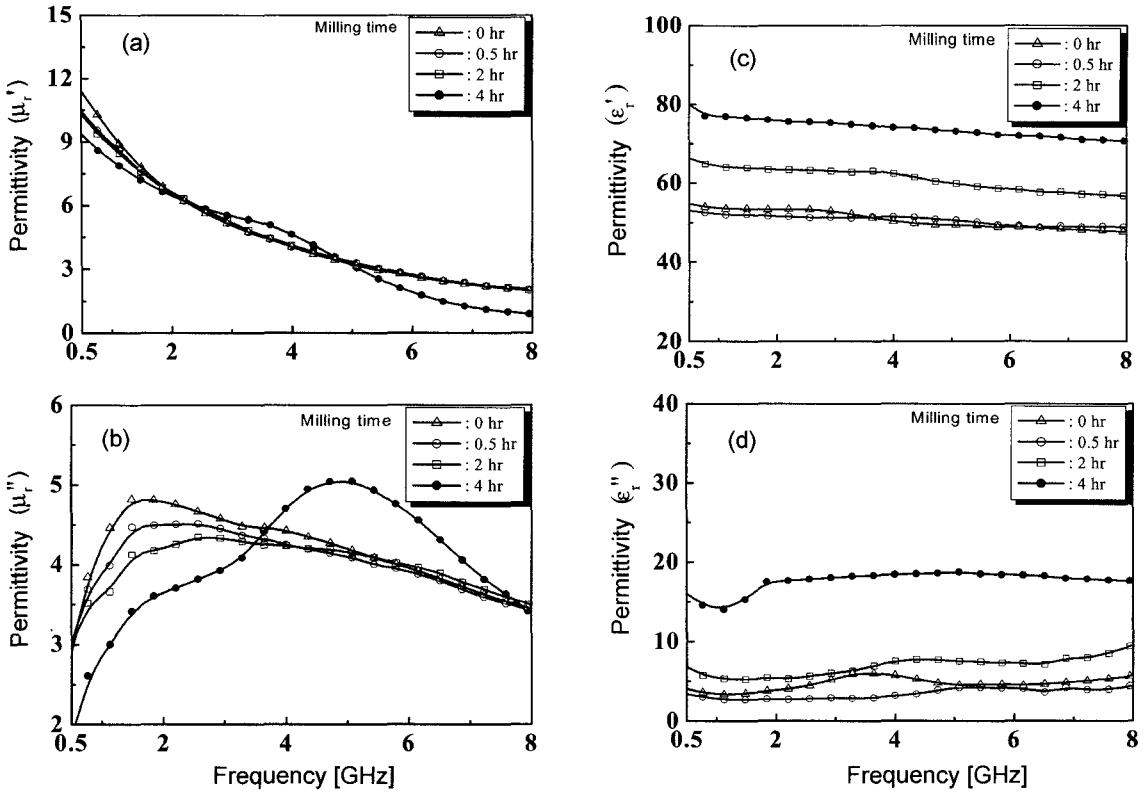

Fig. 5. Material parameters of attrition milled iron particles (5 μm): (a) μ_r', (b) μ_r'', (c) ε_r', and (d) ε_r''.

평균입도가 증가할수록 복소투자율의 실수, 허수 모두 감소한다. 이는 평균입도가 커질수록 와전류손실이 증가하기 때문이다. 반면 복소유전율의 실수, 허수는 평균입도가 증가할수록 증가한다. 이것은 공간전하 분극시 전하축적 면적이 평균입도에 비례하여 증가하기 때문이다.

Attrition milling에 의해 분말의 형상이 평판상으로 바뀌면 복소투자율의 실수, 허수 모두 증가한다. 초기 분말입도가 표피두께에 근접한 경우(5 μm)를 제외하고는 와전류손실의 감소에 의해 투자율의 증가가 일어난다. 특히 평균입도가 10 μm인 순철 압분체의 경우 복소투자율의 실수를 μ_r'=8.8까지 증가시킴으로써, Fig. 1에서 예측한 이동통신 주파수 대역용 흡수체의 구성 재료로 가능성이 가장 높았다. 구형 분말에 비해 압분체의 경우 복소유전율이 증가하는 것은 표면적 증가에 의한 공간전하분극의 증가에 기인한다. 이러한 결과는 초기 분말입도가 커질수록 더욱 뚜렷해짐을 볼 수 있다.

4.3. 전파흡수능

앞서 언급한 바와 같이, 금속 자성체 분말의 고주파 특성(복소투자율, 복소유전율)은 분말의 형상과 입도에 의해 크게 변화한다. 순철 분말의 형상(구형, 압분체)과 평균입도에 따른 전파흡수특성의 변화를 이동통신주파수 대역(0.8~2 GHz)에 초점을 두어 조사하였다.

Fig. 6은 순철 분말의 형상 및 초기 입도에 따른 전파흡수특성의 변화를 보여준다. 평균입도가 10 μm인 구형 순철 분말을 실리콘 고무와 부피비 65:35로 혼합하여 제조한 복합체의 반사손실을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 일반적인 전파흡수체의 특성과 같이 복합체의 두께가 커질수록 흡수주파수 대역은 저주파로 이동한다. 두께가 0.8 mm인 경우 최대흡수 주파수는 5 GHz, 1.4 mm인 경우 최대흡수 주파수는 2.5 GHz로 내려간다. 즉, 2 GHz를 기준으로 –5 dB 이하의 반사손실을 얻기 위해서는 복합체의 두께가 적어도 1.1 mm 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 6(b)는 순철 분말 압분체(초기 입도=10 μm)를 흡수재로 사용한 복합체의 반사손실을 나타낸 것이다. 구형 분말에 비해 흡수 대역이 1~2 GHz 대역으로 하향되었음을 볼 수 있다. 두께 0.5 mm, 1.2 mm에서 최대흡수 주파수는 각각 3 GHz, 1.2 GHz이다. 2 GHz를 기준으로 –5 dB 이하의 반사손실을 얻는데 필요한 흡수체의 두께는 0.7 mm에 불과하다. 평판상의 순철 분말을 사용함으로써 흡수체의 박형화를 이룰 수 있음을 보여준다. 이는 순철 분말의 판상화에 의해 투자율 및 유전율이 증가한 것에 기인한다.

Fig. 6(c)는 초기 입도가 5 μm인 순철 압분체를 흡수재로 사용했을 때의 반사손실이다. 전파흡수가 2 GHz 이상의 고주파 대역에서 일어남을 볼 수 있다. 이는 초기 입도가 10

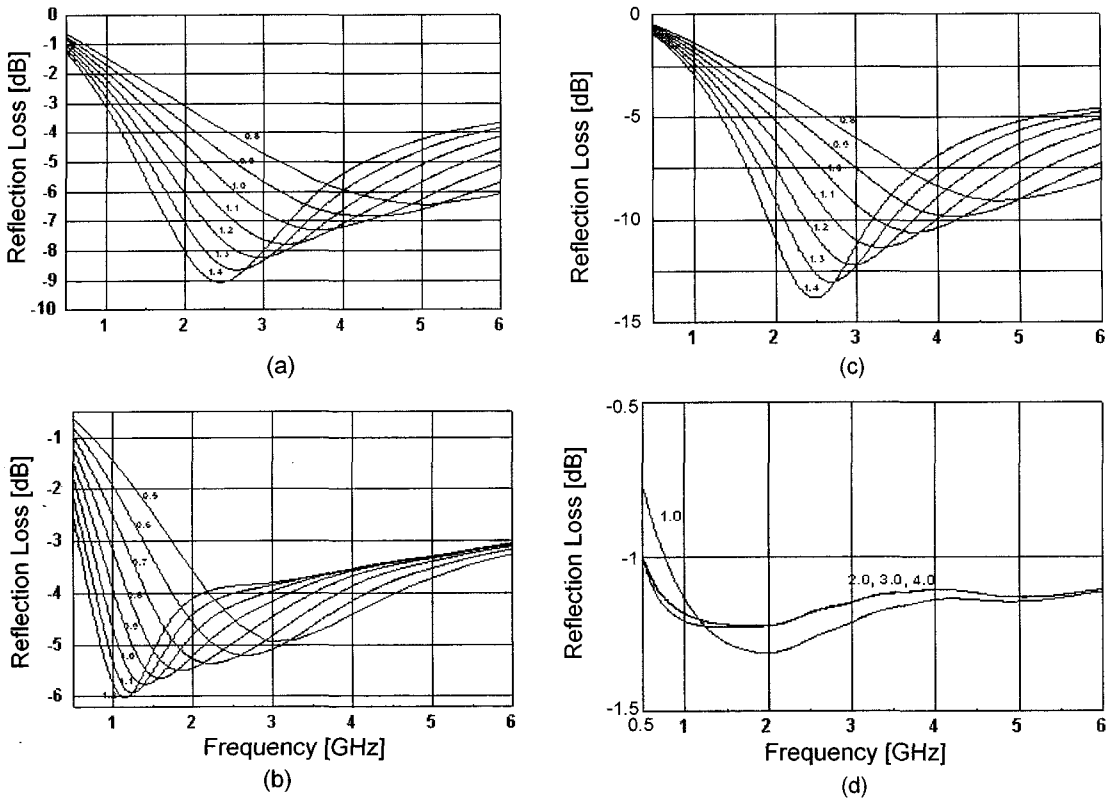

Fig. 6. Reflection loss determined as a function of thickness of rubber composites containing iron particles; (a) spheres (10 μm), (b) attrition milled (10 μm), (c) attrition milled (5 μm), and (d) attrition milled (70 μm).

μm인 순철 압분체에 비해 투자율 및 유전상수가 작기 때문이다.

초기 분말입도가 70 μm인 압분체의 경우(Fig. 6(d)), 두께를 1~4 mm 범위에서 변화시켜도 전파흡수능은 1.5 dB 이내로 매우 열악함을 알 수 있다. 이것은 유전상수는 500 이상으로 Fig. 1에 제시한 임피던스 정합조건에 근접하나, 투자율의 실수가 너무 작아(μ_r'=2) 임피던스 정합조건에서 크게 벗어나기 때문이다.

V. 결 론

순철 압분체를 흡수 충전재로 사용함으로써 이동통신주파수 대역(0.8~2.0 GHz)에서 반사손실이 -5 dB(70% 전력흡수율), 두께가 0.7 mm 수준인 박형의 전파흡수체를 설계할 수 있었다. Attrition milling에 의해 두께가 표피두께보다 작은 순철 압분체를 제작함으로써 임피던스정합 조건에 근접하는 고투자율과 고유전율을 동시에 얻을 수 있었다. 이는 milling에 의해 구형에서 평판상으로 모양이 바뀜에 따라 와전류 손실이 감소하고(복소투자율의 증가), 압분체 간의 정전용량이 증가한 것(복소유전율의 증가)에 기인한다. 그러나 순철 분말의 초기 입도가 표피두께에 근접할 정도로 너무 작으면 milling에 의한 투자율 증대 효과가 나타나지 않았고, 초기입도가 너무 큰 경우에는 압분체로 가공하여도 와전류 손실에 의해 투자율은 매우 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 연자성 금속 분말을 흡수재로 사용할 경우 중요한 설계 인자는 충전재의 형상과 초기 입도임을 제안할 수 있고, 특히 투자율이 보다 큰 흡수재의 조성선정이 이루어지면 흡수능과 박형화 측면에서 보다 향상된 전파흡수체를 얻을 수 있을 것으로 예상한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신인력양성사업과 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] S. S. Kim, D. H. Han, and S. B. Jo, "Microwave Absorbing Properties of Sintered Ni-Zn Ferrites", IEEE Trans. Mag., **30**, 4554-4556(1994).

[2] J. Smit and H. P. J. Wijn, Ferrites, Philips Technical Library, Eindhoven, Netherlands, 1959.

[3] S. S. Kim, Y. C. Yoon, and K. H. Kim, "Electromagnetic Wave Absorbing Properties of High-Permittivity Ferroelectrics Coated with ITO Thin Films of 377 Ω", J. of Electroceramics, **10**, 95-101(2003).
[4] S. Yoshida, M. Sato, E. Sugawara, and Y. Shimada, "Permeability and Electromagnetic-interference Characteristics of Fe-Si-Al Alloy Flakes-polymer Composite", J. Appl. Phys., **85**, 4636-4638(1999).
[5] M. Matsumoto and Y. Miyata, "Thin Electromagnetic Wave Absorber for Quasi-microwave Band Containing Aligned Thin Magnetic Metal Particles", IEEE Trans. Mag., **33**, 4459-4464 (1994).
[6] H. W. Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, John Wiely & Sons, New York (1975).

Microwave Absorbing Properties of Iron Particles-Rubber Composites in Mobile Telecommunication Frequency Band

Sun-Tae Kim, Sang-Keun Kim, and Sung-Soo Kim*
Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Yeo-Choon Yoon, Kyung-Sub Lee, and Kwang-Bo Choi
Chang Sung Cooperation, R & D Center, 11-9 Namdong Industrial Area, Namdong-Ku, Inchon, Korea

(Received 18 June 2004, in final form 10 July 2004)

For the aim of thin electromagnetic wave absorbers used in mobile telecommunication frequency band (0.8~2.0 GHz), we investigate high-frequency magnetic, dielectric and microwave absorbing properties of iron particles dispersed in rubber matrix in this study. The major experimental variables are particle shape (sphere and flake) and initial particle size (in the range 5~70 μm) of iron powders. High value of magnetic permeability and dielectric permittivity can be obtained in the composites containing thin plate-shape (flake) iron particles (of which thickness is less than skin depth in GHz frequency), which can be produced by mechanical forging of spherical iron powders using an attrition mill. This result is attributed to the reduction of eddy current loss (increase of permeability) and the increase of space charge polarization (increase of permittivity). The optimum initial particle size is found to be about 10 μm for the attainment of the material parameters (particularly, real part of complex permeability) satisfying the wave impedance matching. With the iron powders controlled in size and shape as absorbent fillers in rubber matrix, the thickness can be reduced to about 0.7 mm with respect to -5 dB reflection loss (70% power absorption) in mobile telecommunication frequency band.

Key words : Microwave absorbers, iron particles, mobile telecommunication, complex permeability.