

복합 Ferrite 전파흡수체의 유전율 제어 및 임피던스 정합

최경구 · 조성백 · 권경일 · 김성수 · 김재묵

국방과학연구소

(1992년 1월 27일 접수)

Permittivity Adjustment and Impedance Matching of Ferrite Composite Microwave Absorber

Kyung-Ku Choi, Sung-Baeg Cho, Kyoung-Il Kwon, Sung-Soo Kim and Jae-Mook Kim

Agency for Defense Development

(Received January 27, 1992)

요 약

임피던스 정합을 이용한 무반사 전파흡수체를 만들기 위해서는 흡수체의 복소투자율 및 복소유전율의 적절한 조합이 필요하다. 본 연구에서는 정합조건에서 벗어난 ferrite-고무 복합재의 유전율을 증가시킴으로써 전파흡수 특성을 향상시키는 흡수체 설계방안에 대하여 고찰하였다. 유전율 제어방안으로 높은 유전상수를 갖는 graphite 분말을 ferrite-고무 복합재에 첨가하였으며 임피던스 정합 근 궤적도를 이용하여 유전율 변화가 임피던스 정합에 미치는 영향을 구명하였다. 복합 ferrite 전파흡수체의 특성(흡수능 및 박형화) 향상에 유전율 제어가 매우 유용한 방법임을 알 수 있었다.

ABSTRACT

A proper combination of complex permeability and permittivity is necessary to produce the zero-reflection microwave absorber with an impedance matching. Increasing of dielectric permittivity and development of an impedance matching was investigated in ferrite-rubber composite specimens by addition of conducting materials. Graphite powder of high dielectric constant was added to the composite specimens to increase the permittivity. The precise estimation of graphite content to produce the matched-wave-impedance absorber at a given frequency can be made by using the numerically derived solution map of impedance matching. It was suggested that permittivity adjustment is an effective technique to obtain the microwave absorber with both good absorbing properties and small thickness as well.

1. 서 론

Ferrite 전파흡수체는 뒷면에 금속판을 부착시킨 구조로서 공기중에서의 임피던스와 흡수체 표면에서의 입력임피던스가 동일한 값을 갖을 때 임피던스 정합 또는 정합(무반사) 효과를 얻을 수 있다. 임피던스 정합은 구성재료의 복소투자율과 복소유전율의 적절한 조합이 있을 때 가능하다. 원하는 주파수에서 이와같은 조합을 갖는 재료를 찾기는 매우 어렵다.

따라서, ferrite를 고무 등의 비자성체와 복합화하여 ferrite의 화학조성, ferrite 분말과 비자성체와의 혼합비

조절 등을 통하여 재료정수의 조합을 시도하고 있으나¹⁾, 적절한 구성조건을 얻기 위하여는 수 많은 실험량이 요구된다. 한편, 内藤喜之 등²⁾은 복합 ferrite에 graphite 분말을 첨가함으로써 박형의 전파흡수체를 실현하였으나, graphite 첨가에 의한 재료정수 변화 및 적정 graphite 첨가량에 대한 정량적 분석이 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 임피던스 정합이 일어나지 않는 복합 ferrite의 유전율을 제어함으로써 X-band 주파수에서 정합이 일어나도록 하는 흡수체 설계방안에 대하여 고찰하였다. 유전율 제어방안으로 높은 유전상수를 갖는 graphite 분말을 복합 ferrite에 소량 첨가하였으며, 임피던스

정합조건의 해를 도식화함으로써 재료정수와 정합조건과의 관계를 분석하였다. 복합 ferrite 전파흡수체의 사용주파수 조절, 흡수능 향상, 두께 감소 등의 특성 향상에 유전을 제어가 매우 유용한 방법임을 제시할 수 있었다.

2. 실험방법

2.1. 시편의 제조

일반적인 고상법을 이용하여 hexagonal ferrite(Z-type) 분말을 제조하였다. Ferrite 분말과 silicone 고무와의 무게비(F/R=ferrite/rubber)를 4로 혼합하여 10.2×22.9×3.0 mm³의 mold에 넣고 상온에서 숙성시킨 후 탈형하여 ferrite-고무 복합재 시편을 제조하였다. Ferrite-고무 복합재의 F/R을 4로 일정하게 유지하면서 graphite 분말(Aldrich, 1~2 μm)을 2~6 wt.% 범위로 첨가하여 ferrite-graphite-고무 복합재 시편을 제조하였다. 또한, 전파흡수능 측정용 시편은 내경 3mm, 외경 7mm의 toroidal mold를 이용하여 두께별로 제조하였다.

2.2. 재료정수 및 전파흡수능 측정

복합재 시편의 재료정수(복소투자율, 복소유전율)는 HP8720B Network Analyzer와 X-band용 사각도파관(10.2×22.9×10.0 mm³)을 이용하여 측정하였다. 투과-반사법으로 사각도파관에 삽입된 시편의 반사계수(S₁₁)와 투과계수(S₂₁)을 측정하고 이 값으로부터 재료정수를 계산하였다⁴⁾. 전파흡수능은 APC-7 동축관(내경 3mm, 외경 7mm, 길이 100mm)에 측정용 시편을 삽입하고 시편 뒷면을 단락(short)시킨 후 반사감쇠량(reflection loss)을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Ferrite-고무 복합재의 재료정수와 전파흡수특성

X-band 주파수 영역에서 ferrite-고무 복합재(F/R=4)의 재료정수를 Fig. 1에 나타내었다. 복소투자율의 실수(μ_r')와 허수(μ_r'')는 주파수가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 복소유전율의 실수(ε_r')와 허수(ε_r'')는 주파수 변화와 관계없이 거의 일정한 값(ε_r'=7.4, ε_r''=0.16)을 가지고 있다. 또한, 이 재료의 자기손실계수(tanδ_m=μ_r''/μ_r')는 8.0 GHz에서 0.45, 12.4 GHz에서 0.27로 큰 값을 가지고 있으며, 유전손실계수(tanδ_e=ε_r''/ε_r')는 평균 0.02로 매우 작은 값을 나타낸다. 따라서, ferrite-고무 복합재는 자기손실이 크며 유전손실은 매우 작은 재료임을 알 수 있다.

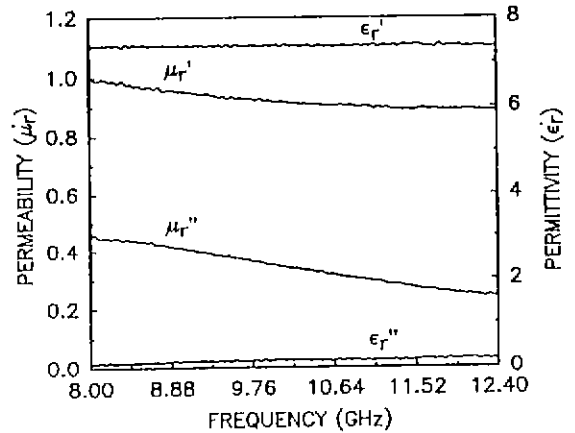


Fig. 1. Material constants (μ_r, ε_r) vs. frequency spectra of the ferrite-rubber composite (F/R=4).

Ferrite를 이용한 정합형 전파흡수체는 뒷면에 금속판을 부착시킨 구조이며 이 경우 흡수체 표면에서의 규격화 입력임피던스(\bar{Z}_m)는 식 (1)로 나타내어진다⁵⁾.

$$\bar{Z}_m = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh[j(2\pi/\lambda)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}d] \quad (1)$$

여기서, μ_r은 복소투자율(μ_r'-jμ_r''), ε_r은 복소유전율(ε_r'-jε_r''), λ는 자유공간에서 마이크로파의 파장이며 d는 흡수체의 두께이다. $\bar{Z}_m=1$ 일 때 전자파를 완전히 흡수하며 이 경우 정합조건(matching condition)을 만족시켰다고 한다. 정합조건을 만족시키기 위하여는 μ_r', μ_r'', ε_r', ε_r'', λ, d 등 6가지의 변수를 적절히 제어하여야 함을 식 (1)로부터 알 수 있다. 반사감쇠량(reflection loss)은 \bar{Z}_m 의 함수로서 식 (2)로 나타내어지며⁶⁾, 식 (1)의 6가지 변수를 알 경우 반사감쇠량의 계산이 가능하다.

$$\text{reflection loss [dB]} = 20 \log \left| \frac{\bar{Z}_m - 1}{\bar{Z}_m + 1} \right| \quad (2)$$

Fig. 1의 재료정수와 식 (1) 및 (2)를 이용하여 두께 d를 변화시킴에 따른 전파흡수능을 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 3.0 mm의 두께일 때 흡수능이 가장 우수하여 8.7 GHz에서 -23 dB의 반사감쇠량을 나타내고 있으나 일반적인 정합형 전파흡수체의 성능(최대흡수능 < -30 dB)에는 미치지 못하고 있다.

전파흡수체의 성능은 재료정수와 밀접한 관련이 있으며 재료정수와 전파흡수특성간의 상관관계는 식 (1)에서 정합조건의 해를 구하여 도식화(임피던스 정합 근 제적도)함으로써 해석이 가능하다⁷⁾. 식 (1)에서 정합조건의 해를 구하여 μ_r'=0.6~1.1, μ_r''=0.1~1.0의 범위로 도식화한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 또한 ferrite-고무 복

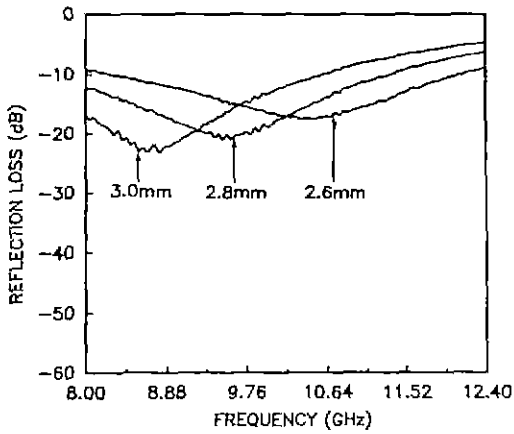


Fig. 2. Thickness dependence of microwave absorption in the ferrite-rubber composite (F/R=4).

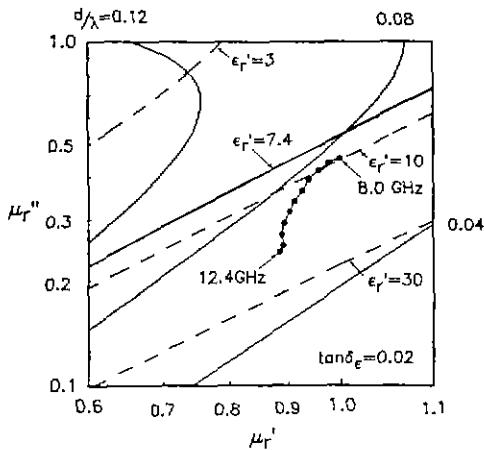


Fig. 3. Impedanc-matching solution map for zero-reflection and μ_r' - μ_r'' locus of the ferrite-rubber composite (F/R=4).

합재의 μ_r' , μ_r'' 과 ϵ_r' 값(Fig. 1)을 적용하여 Fig. 3에 함께 표시하였다. 여기서 $\epsilon_r'=7.4$, $\tan\delta_\epsilon=0.02$ 는 X-band 주파수 범위에서의 평균값이다. $\epsilon_r'=7.4$ 인 선과 $\mu_r'-\mu_r''$ 의 궤적의 교차점이 존재하는 경우 정합조건을 만족하여 전파흡수능이 매우 우수하게 되나, 이 경우에는 교차점이 존재하지 않으므로 정합조건을 만족하지 못하여 $\epsilon_r'=7.4$ 인 점과 $\mu_r'-\mu_r''$ 의 궤적이 가장 근접하는 8.7 GHz 근처에서 흡수능이 가장 우수하게 된다.

Fig. 3에서 ϵ_r' 을 10 이상으로 증가시킨다면 $\mu_r'-\mu_r''$ 의 궤적과 ϵ_r' 선과의 교차점이 존재하여 임피던스 정합을 유도할 수 있을 것으로 기대되며 유전율 제어에 의한 임피던스 정합 방법은 다음과 같다.

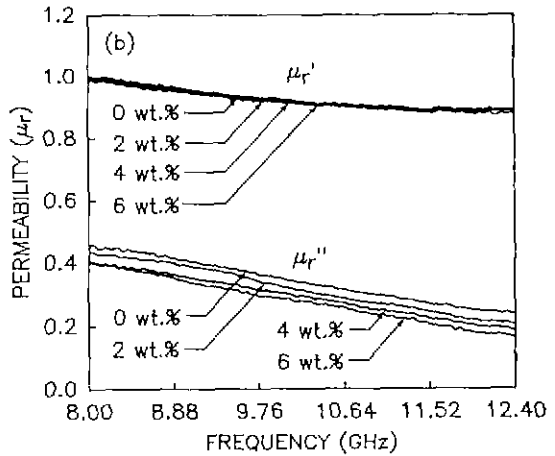
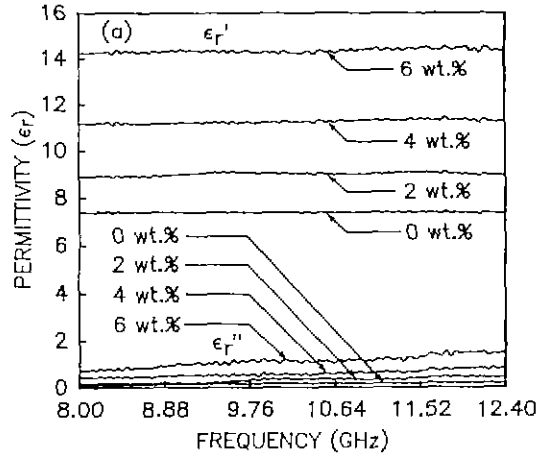


Fig. 4. Material constants spectra of ferrite-graphite-rubber composites with small increase in graphite contents.
(a) ϵ_r vs. frequency spectra
(b) μ_r vs. frequency spectra

3.2. 유전율 제어에 의한 임피던스 정합

복합 ferrite의 유전율 증가방안으로 ferrite-고무 복합체 시판에 유전상수값이 큰 graphite 분말을 첨가하였다. 예비실험을 통하여 silicone 고무에 graphite 분말을 소량 첨가하여도 복소유전율($\epsilon_r'-j\epsilon_r''$)이 급격하게 증가하며, 이때 $\mu_r'=1$, $\mu_r''=0$ 으로 일정한 값을 가지고 있음을 확인하였다.

이와같은 특성을 가지는 graphite를 ferrite-고무 복합체에 ferrite와 고무의 무게비(F/R)를 4로 일정하게 하면서 소량(2~6 wt.%) 첨가한 후 재료정수를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)로부터 graphite 첨가량이 증가할수록 ϵ_r' 및 ϵ_r'' 이 증가하고 있음을 알 수 있으며,

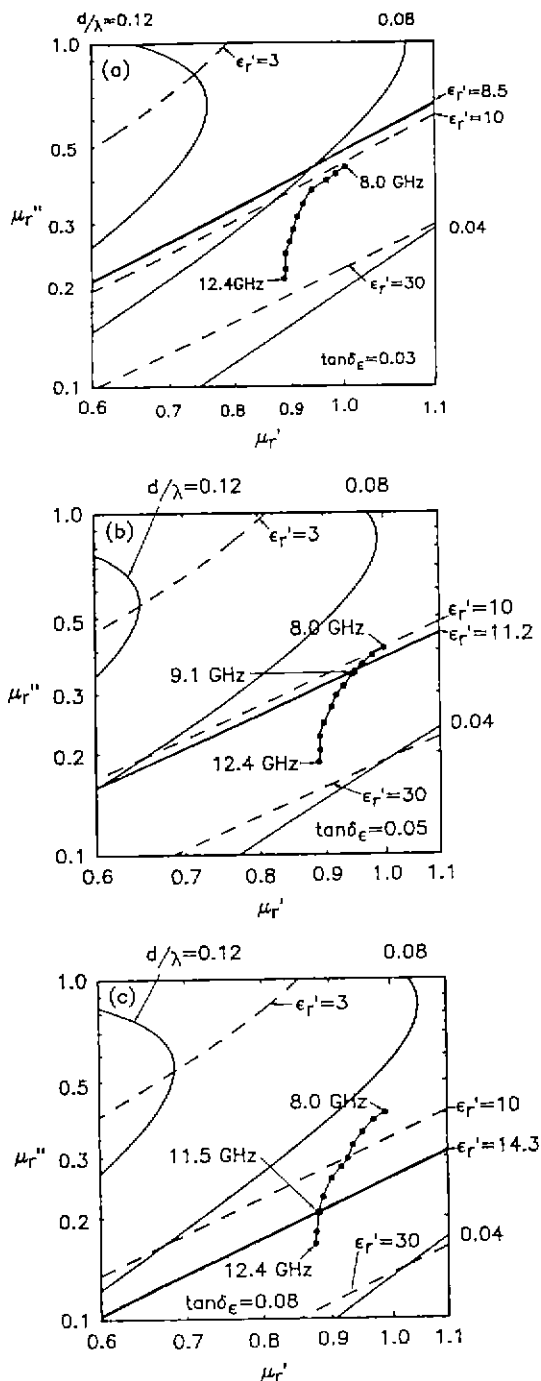


Fig. 5. The matching points of ferrite-graphite-rubber composites in the impedance-matching solution map.

- (a) graphite content=2 wt.%, $\tan\delta_e=0.03$
- (b) graphite content=4 wt.%, $\tan\delta_e=0.05$
- (c) graphite content=6 wt.%, $\tan\delta_e=0.08$

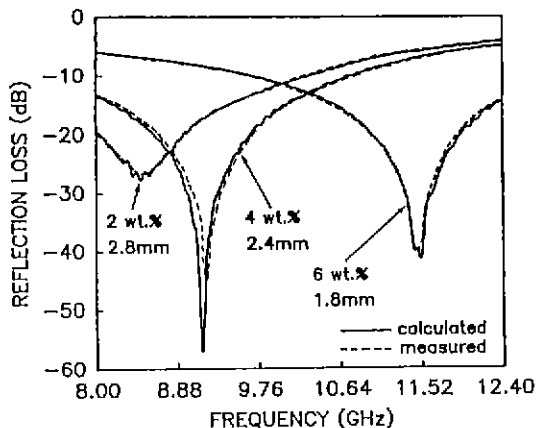


Fig. 6. Microwave absorption of the ferrite-graphite-rubber composites with maximum attenuation.

ϵ_r' 값이 10 이상이 되는 4 wt.%($\epsilon_r'=11.2$) 및 6 wt.%($\epsilon_r'=14.3$)인 시편은 정합조건을 만족할 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 4(b)에서 μ_r' 은 graphite 첨가에 대하여 거의 변화하지 않는 반면 μ_r'' 은 graphite 혼합량이 증가함에 따라 감소하고 있다. Ferrite-고무 복합체(F/R=4)의 μ_r' 은 1~0.9(Fig. 1), graphite와 고무는 $\mu_r'=1$ 의 값을 가지므로 소량의 graphite 첨가에 의한 μ_r' 의 변화는 거의 없으며 μ_r'' 의 변화는 복합체내에서 자기손실이 큰 ferrite의 함량이 감소하기 때문이지만 ϵ_r' 의 변화에 비하여 그 변화량이 매우 적다. 이상의 결과로부터 ferrite-고무 복합체에 graphite 첨가량을 0~6 wt.%로 변화함으로써 μ_r' , μ_r'' 의 변화가 거의 없는 상태에서 ϵ_r' 을 7.4~14 범위로 제어하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

유전을 변화에 의한 정합조건 만족여부를 임피던스 정합 근 궤적도를 이용하여 고찰하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 재료정수를 임피던스 정합 근 궤적도에 나타낸 결과이다. Fig. 5(a)의 graphite를 2 wt.% 첨가한 시편의 경우 ϵ_r' 이 7.4에 8.5로 증가하였으나, $\mu_r'-\mu_r''$ 의 궤적과 만나지 않고 있다. Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)의 4 wt.% 및 6 wt.% 첨가한 시편의 경우에는 $\mu_r'-\mu_r''$ 의 궤적과 ϵ_r' 선(4 wt.%; 11.2, 6 wt.%; 14.3)과의 교차점(정합점)이 존재하므로 이 점에서 정합조건을 만족하게 된다. 이 교차점의 주파수(4 wt.%; 9.1 GHz, 6 wt.%; 11.5 GHz)와 d/λ 값(4 wt.%; 0.073, 6 wt.%; 0.069)으로부터 4 wt.%인 경우는 2.4 mm의 두께일 때, 6 wt.%인 경우는 1.8 mm의 두께일 때 각각 최대흡수능이 일어날 것으로 예상된다.

Fig. 6은 ferrite-graphite-고무 복합체의 재료정수(Fig. 4)를 이용하여 전파흡수능을 계산한 결과이다. 여기에

나타낸 두께는 두께별로 흡수능을 계산한 후 최대흡수능이 나타날 때의 값이며 또한, 전파흡수능 측정값과 계산값의 비교로부터 본 연구에서 선택한 측정방법 및 계산방법의 신뢰성을 확인할 수 있다. Graphite 혼합량이 2 wt.%인 시편에서는 2.8 mm, 8.5 GHz에서 -28 dB, 4 wt.%인 시편은 2.4 mm, 9.1 GHz에서 -57 dB, 6 wt.%인 시편은 1.8 mm, 11.5 GHz에서 -41 dB의 최대흡수능을 나타내며 이 결과는 임피던스 정합 근 제적도로부터 예상된 결과와 일치하고 있다.

정합형 전파흡수체에서는 흡수체 두께가 시편내 파장의 1/4(quarter wavelength)일 때 최대흡수능이 일어나며 $|\epsilon_r| > |\mu_r|$ 인 경우 흡수체의 정합두께는 식 (3)의 관계로 표시된다⁸⁾.

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{4(\sqrt{\mu_r \epsilon_r})'} \quad (3)$$

여기서, $(\sqrt{\mu_r \epsilon_r})'$ 은 $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ 의 실수항을 의미한다. ϵ_r' 이 커질수록 d/λ 값은 작아지므로 박형 전파흡수체의 제조가 가능하며, Fig. 6으로부터 ϵ_r' 의 증가에 따른 두께 감소를 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 유전율 증가에 의해 흡수능 향상과 두께 감소 효과를 동시에 얻을 수 있으며, 사용주파수의 조절 또한 가능함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 정합조건을 만족하지 못하는 재료의 효과적인 이용방법으로 제시될 수 있다.

4. 결 론

본 연구로부터 정합조건에서 벗어난 복합 ferrite의 유전율을 제어함으로써 정합조건을 만족시키는 X-band

용 전파흡수체 설계방안을 제시할 수 있었다. 임피던스 정합 근 제적도를 이용하여 복합 ferrite의 정합조건을 만족시키기 위한 ϵ_r' 의 증가범위의 예측하였으며 graphite를 첨가함으로써 적정량의 ϵ_r' 값을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용된 ferrite의 경우 복합재에서 유전율을 제어함으로써 흡수능 향상, 두께 감소를 동시에 얻을 수 있었고 사용주파수의 조절이 가능하였다.

REFERENCES

1. B.V.A. Wickenden and W.G. Howell, "Ferrite Quarter Wave Type Absorber," 1st Conf. Proc. Military Microwaves, 310-317 (1978).
2. 石野建, "最近の電波吸収體," 色材, **58**(3), 149-157 (1985).
3. 内藤喜之, 水本哲弥, "電波吸収體ゴムフェライトへのカーボン添加效果," 電子通信學會文誌, **J69-C**(3), 257-261 (1986)
4. W.B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies," *Proc. IEEE*, **62**(1), 33-36 (1974).
5. 乾哲司, "電波吸収體," *エレクトロニクセラミクス*, 冬號, 18-24 (1985).
6. H.M. Musal, Jr. and H.T. Hahn, "Thun-Layer Electromagnetic Absorber Design," *IEEE Trans. Mag.*, **MAG-25**(5), 3851-3853 (1989).
7. S.S. Kim, S.B. Cho, K.I. Kwon, K.K. Choi, J.M. Kim and K.S. Churn, "Complex Permeability and Permittivity and Microwave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X-band Frequencies," *IEEE Trans Mag.*, **27**(6), 5462-5464 (1991).
8. M.B. Amn, J.R. James, "Techniques for Utilization of Hexagonal Ferrites in Radar Absorbers, Part 1 Broadband Planar Coatings," *Radio Electro. Eng.*, **51**(5), 209-218 (1981).