

9.45GHz용 전파흡수체의 설계 방법 (Design Method for the Electromagnetic Wave Absorber at 9.45 GHz)

김 왕 섭*, 김 경 용*
(Wang Sup Kim, Kyung Yong Kim)

요 약

원하는 주파수에서 20 dB 이상의 전파 흡수능을 갖는 전파 흡수체를 제조하고자 하는 경우 이를 설계할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 특히 설계시 이론식에 의하여 결정되는 정합범위 외에 제조 공정에 따른 추가적인 제한 요소를 고려하였다. 또한 실제로 전파 흡수체를 제조할 경우 발생하는 칫수와 물성의 편차에 의한 영향을 고찰하고 이에 의한 영향이 허용될수 있는 설계 조건을 제시하였다. 변수의 범위는 주파수 9.45 GHz, 비유전율 실수값이 5에서 30까지 변화하는 조건으로 제한하였으며 유전율 허수값의 영향은 고려하지 않았다.

ABSTRACT

A design method for the electromagnetic wave absorber with the attenuation over 20 dB at a frequency was formulated. In addition to the matching boundary which is determined by the theoretical equation, several limiting conditions due to the fabrication process were examined. Based on the study on the effects of the variance of the thickness and permittivity on the electromagnetic wave absorbing characteristics, a mean to exclude such effects was also included in the proposed design method. The ranges of variables were limited as the frequency of 9.45 GHz and $\epsilon' = 5 \sim 30$, when the effect of ϵ'' was not considered.

I. 서 론

정보 통신 기술이 발달함에 따라 전파의 사용량이 증대되고 이에 의한 전파 공해가 큰 사회적 관심을 끌고 있다. 방사 noise에 의한 전파 공해의 대책 중에

하나의 전파 흡수 특성을 갖고 있는 재료를 사용하여 외부에서 들어오는 전파를 흡수하여 반사 자체를 없애는 것이다.

그러나 전파 흡수체의 특성을 조절하기 위하여 필요한 변수가 너무 많기때문에 실용 가능한 Design-rule을 제시하고자 하는 노력이 행해지고 있다.^(1,2) 이와 같은 연구는 완전 정합 조건을 만족하는 정합점에 초점을 맞추고 있다.

*한국과학기술연구원 세라믹스 공정실

전파 흡수체를 설계하기 위해서는 후술할 식(1)의 값을 결정하는 6개의 변수들의 관계를 설명하여야 하지만 그것을 해석적으로는 풀 수가 없다. Kim 등은³⁾ 이론식을 대수적으로 풀고 완전 정합점 개념 대신에 20 dB 이상의 전파 흡수능을 발휘할 수 있는 정합 범위를 찾는 방법을 제시하였다. 또한 실제로 전파 흡수체를 설계, 제작할 경우 의도하는 물성과 형상에 오차가 필연적으로 발생하는 데 어떠한 변수의 오차가 전파 흡수 특성에 얼마 만큼의 영향을 미치는지도 해석적인 방법으로는 알 수가 없다. 특히 전파 흡수체의 특성을 측정할 때도 측정 오차가 개입되기 때문에⁴⁾ 이를 수용할 수 있는 설계 조건의 설정이 필요하다.

이제까지는 경험적으로 여러가지 재료(자성체, 유전체 및 도전체)를 여러 分率로 조합하는 실험을 반복하여 완전 정합점에 일치시키는 노력을 해 왔다.⁵⁾ 그러나 완전 정합점에 해당하는 조건을 완전히 만족시키기가 어렵고 각 물질들이 전파 흡수능에 미치는 영향의 정도가 정량적으로 연구되지 않아서 제조 조건에 따라서 전파 흡수 특성이 예민하게 변화하여 설계구현에는 어려운 점이 많았다. 본 연구에서는 어떤 주파수에서 20dB 이상의 전파흡수능력을 발휘할 수 있는 전파 흡수체를 제조할 경우 이를 설계할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히 설계치로 실제 제조할 경우 발생하는 물성의 편차를 고려한 실제적인 설계 조건과 그 방법을 설명하였다.

변수의 범위는 주파수 9.45 GHz, 비유전율 실수값이 5에서 30까지 변화하는 조건으로 제한하였으며 유전율의 허수값의 영향은 고려하지 않았다.

목표주파수인 9.45 GHz는 X-band radar용으로 사용되는 주파수로서, 이 대역의 전자파 흡수체가 방위 산업용으로 많이 연구되고 있다.

II. 정합 범위 도표의 작성 및 이용

裏面に 금속판을 부착시킨 전파 흡수체의 경우, 평면파가 수직 입사할 때 입력 임피던스(자유공간의 임피던스로 규격화) 다음과 같이 표현된다. 즉

$$Z = \frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \cdot f \cdot d \right] \quad (1)$$

여기서 μ_r , ϵ_r 과 d는 각각 전파 흡수체의 복소비투자율, 유전율 및 두께이며 c와 f는 각각 진공 중의 광

속과 전자파의 주파수이다.

이 때 보통 return loss로 표현되는 전파 흡수능(dB)은 다음의 식과 같이 된다.

$$\text{Return loss(dB)} = 20 \log \left(\left| \frac{Z-1}{Z+1} \right| \right) \quad (2)$$

여기서 $\Gamma = (Z-1)/(Z+1)$ 이다.

식(1)과 (2)에서 알 수 있듯이 입력단의 규격화 임피던스값이 1이 되면 무한대의 감쇠가 발생하여 반사가 전혀 일어나지 않는 조건이 되는데 이를 완전 정합(perfect matching)이라 한다. 그러나 실용상으로는 입사된 전자파가 99% 흡수되는 20 dB를 사용상의 한계로 하고 있다. 이 조건은 다음의 식에 의해서 반사 계수의 절대값이 0.1 보다 작을 경우 만족된다. 즉,

$$20 \log(|\Gamma|) \leq -20 \quad (3)$$

$$|\Gamma| \leq 0.1 \quad (4)$$

Fig. 1은 $\epsilon_r'' = 10$, $\epsilon_r' = 0$ 이고 fd값이 0.6 GHz·cm 인 경우 복소비투자율의 변화에 따른 감쇠능을 3차원적으로 도시한 것이다. 곡면 상의 점들은 식(2)에 의해 결정되는 감쇠량이고, 곡면의 정점이(실제로는 무한대 값을 나타냄) 완전 정합점에 해당된다. 이 감쇠 표면과 z축(attenuation)의 20 dB 평면이 만나서 이루는 단면의 내부에 해당되는 조건이 되면 20 dB 이상의 감쇠능을 나타내게 된다. 이하에서는 이와 같은 영역을 정합 범위(matching boundary)라고 칭하기로 한다. 이러한 감쇠표면은 복소비유전율과 fd값에 따라 변화하기 때문에 정합 범위도 이에 따라 변하게 된다.

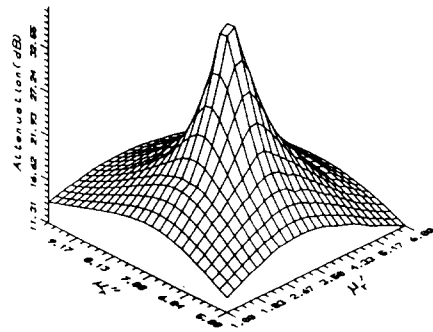


Fig. 1. Attenuation surface as a function of relative complex permeability at a fixed fd value and ϵ_r'' . (fd = 0.6 GHz·cm, $\epsilon_r'' = 10$)

Fig. 2는 fd 값이 $0.4725 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$ 일 경우 前述한 감쇠표면과 20 dB 평면이 만나서 이루는 정합 범위와 비유전율의 관계를 나타낸 것이다. 완전 정합의 조건을 만족시키지 않더라도 μ_r' 와 μ_r'' 가 주어진 圓內의 범위안에 있으면 전파 흡수체로서 사용될 수 있다. fd 값이 $0.4725 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$ 인 것은 9.45 GHz에서 측정된 투자율의 실수, 허수값이 원으로 표시된 정합 범위 내의 값을 가지면 이 재료를 사용하여 두께 0.5 mm의 전파 흡수체를 만들 경우 이 주파수에서 20 dB 이상의 전파 흡수능을 발휘할 수 있다는 뜻이다. 비유전율이 변화함에 따라 정합 범위가 이동되며 그 크기도 변화하는 것을 알 수 있다. 그림에서 원의 중심이 완전 정합점에 해당하며 원의 반경을 20 dB 이상의 전파 흡수능을 발휘할 수 있는 복소투자율의 허용범위라고 정의할 수 있다.

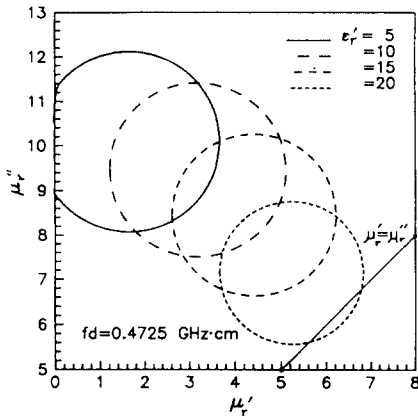


Fig. 2. Matching boundaries as a function of ϵ_r' at a fixed fd value of $0.4725 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$.

소결 ferrite의 경우 대개 MHz 대역에서 공진현상을 일으키기 때문에 GHz 대역에서 큰 비투자율 값을 나타내지 못하며 일반적으로 GHz 대역에서 사용하는 자성체 ferrite와 resin등의 복합형 전파흡수체인 경우도 이 범위를 만족시키기는 어렵다. 그러므로 실제로 전파흡수체를 설계, 제조할 경우 식(4)에 의하여 결정할 수 있는 허용 범위와 함께 다음과 같은 추가적인 제한 요소를 고려해야 한다.

1) 복합형 전파 흡수체의 경우 9.45 GHz 정도의 microwave 영역에서는 큰 비투자율을 나타내기 어렵기 때문에 비투자율 실수부가 1 근방에서 전파 흡수능을

발휘할 수 있어야 한다.

2) 자성체 ferrite와 resin등의 복합형 전파 흡수체인 경우 일반적으로 비자성체 물질인 resin이 혼합됨에 따라 비투자율 실수와 허수가 모두 감소 하지만, 허수의 경우 감소하는 정도가 크므로 설계상 완전 정합점의 비투자율 허수부가 실수부보다 작아야 한다.

3) 실제로 전파 흡수체를 제작할 경우 완전 정합점에 해당하는 조건에 일치시킨다는 것이 거의 불가능하기 때문에 제조상의 허용오차(두께와 비유전율, 비투자율)가 어느 정도 허용되어야 하며 그 허용 오차는 클 수록 유리하다. 물론 이와 같은 제한 요소는 허용 범위와는 달리 절대적인 것은 아니며 구현하는 방법과 요구되는 특성에 따라 변경될 수 있다.

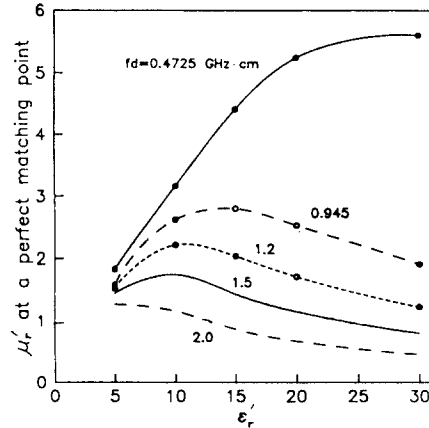


Fig. 3. Relationship between the μ_r' and the ϵ_r' at perfect matching point with different fd values.

Fig. 3과 4는 정합범위의 중심좌표에 해당하는 완전 정합점의 비투자율 실수값과 허수값이 비유전율과 fd 값에 따라 변하는 경향을 나타낸 것이다. 완전 정합점의 비투자율 실수값은 fd 값이 작은 경우($fd = 0.4725 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$) 비유전율이 5에서 30까지 증가함에 따라 계속 증가한다. 따라서 前述한 제한 요소를 고려한다면 이 경우는 재료의 비유전율이 작을 수록 유리하다고 생각할 수 있다. 그러나 비유전율이 감소할 수록 완전 정합점의 비투자율 허수값은 증가되기 때문에 앞의 제한 요소 (2)에 의하여 비유전율이 작아짐은 타당하지 않다. 완전 정합점의 비투자율 실수부가 비유전율에 따라 변화하는 양상은 fd 값이 증가함

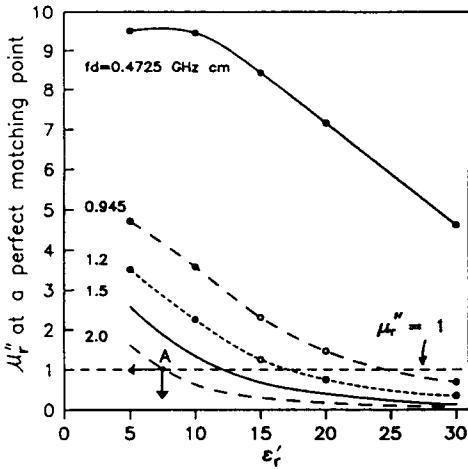


Fig. 4. Relationship between the μ_r'' the ϵ_r' at perfect matching point with different fd values.

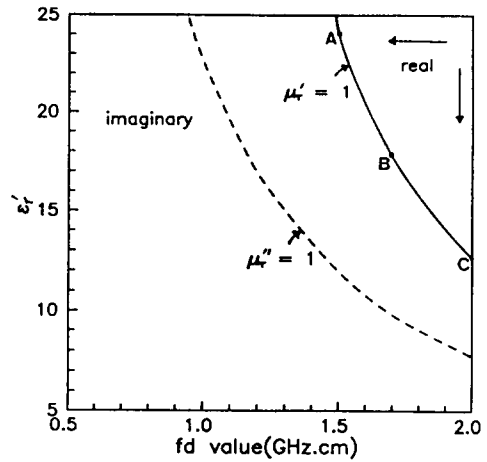


Fig. 5. Desirable region for a wave absorber at 9.45 GHz in terms of fd value and ϵ_r' .

에 따라 어떤 비유전율까지는 증가하다가 감소하는 경향을 나타내며 이 최대값에 해당되는 비유전율도 fd 값이 증가함에 따라 감소한다. 완전 정합점의 비투자율 허수값은 fd 값에 관계없이 비유전율이 증가함에 따라 감소하기 때문에 이를 고려하면 완전 정합점의 비투자율 실수부가 비유전율이 증가함에 따라 감소하는 범위에 관심을 가져야 한다.

前述한 제한 요소 1)과 2)를 만족시키는 조건을 구하기 위하여 fig. 3과 4에서 정합점의 비투자율 실수, 허수값이 1인 경우 각 fd 값에 해당하는 곡선과의 교점을 구하였다. Fig. 4에 표시한 A점은 fd 값이 2.0 GHz·cm인 경우로서 교점의 비유전율값은 약 7.8이 된다. 비유전율 실수값이 7.8 이상이되면 정합점의 비투자율 허수값은 1이하가 된다. 이것은 9.45 GHz에서 비유전율이 7.8 이상일 경우 두께가 약 2.12mm인 흡수체를 제조할 때 비투자율 허수값이 1 이하인 재료의 사용이 가능하다는 뜻이다.

Fig. 5는 이와 같은 목적으로 작성된 것이다. 그림에서 'imaginary'라고 표시된 곡선은 fig. 4의 곡선과 새로축의 값이 1인 직선과의 교점으로 이루어진 것이므로 비투자율 허수값이 1 이하이고 이 곡선의 오른쪽 윗부분 내의 유전율을 가진 재료로 두께 $d = 'fd/0.945'$ mm인 흡수체를 만들면 $\mu_r'' < 1$ 인 9.45 GHz용 전파흡수체를 제작할 수 있다는 뜻이 된다. 'real'이라고 표시된 곡선은 같은 방법으로 fig. 3의 곡선과 새로축

의 값이 1인 직선과의 교점으로 이루어진 것이다.

이 곡선을 경계로 하여 그 오른쪽 윗부분이 'imaginary' 곡선의 오른쪽 윗부분에 포함되기 때문에 이 영역 내의 조건이면 前述한 제한 요소 중 1)과 2)를 모두 만족시킬 수 있게 된다.

그러나 세번째 제한 요소인 허용오차도 fig.2에서 알 수 있듯이 fd 값과 비유전율에 따라 변화하기 때문에 이 영역내에서도 가장 최적인 부분이 존재하게 된다.

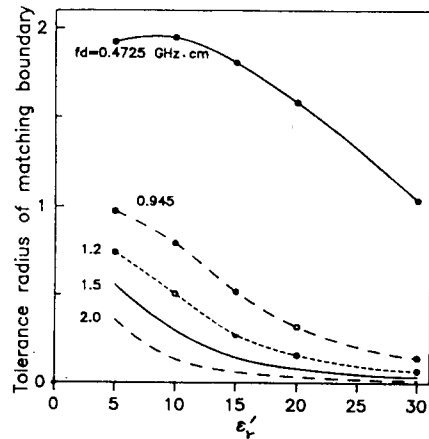


Fig. 6. Relationship between the tolerance radius of matching boundaries and the ϵ_r' with different fd values.

Fig.6은 fig. 2에 나타난 정합 범위의 반지름에 해당하는 허용 오차가 fd 값과 비유전율에 따라 변화하는 것을 나타낸 것이다. $fd=0.4725 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$ 일 때 비유전율이 10까지 변화할 때를 제외하고는 허용 오차는 비유전율과 fd 값이 증가할 수록 감소함을 알 수 있다. 그러므로 fig. 5의 오른쪽 윗부분내에서도 제조상의 편리를 위해서는 화살표 방향의 조성일 수록 유리하며, 따라서 'real' 곡선 상의 점들이 이에 해당한다는 것을 알 수 있다. 'real' 곡선 상에 A, B, C로 표시된 것은 이와 같은 조건을 대표할 수 있는 점으로서 A($\epsilon_r'=24, fd=1.5 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$)는 비유전율이 크고 fd 값은 작은 경우이며 C($\epsilon_r'=12.7, fd=2.0 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$)는 반대로 비유전율이 작고 fd 값이 큰 경우이다. B($\epsilon_r'=17.8, fd=1.7 \text{ GHz}\cdot\text{cm}$)는 두 조건의 중간 경향을 나타내는 조건이다.

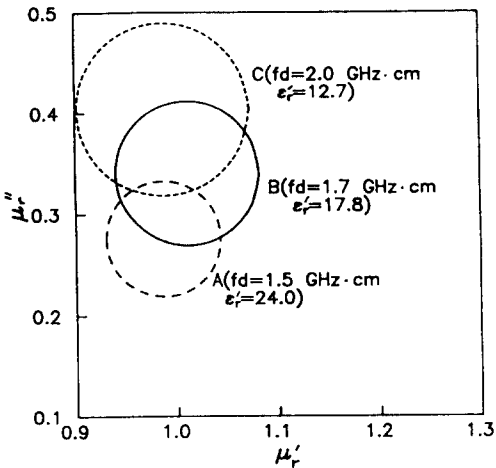


Fig. 7. Matching boundaries for the case of A, B and C in Fig. 5.

Fig. 7은 fig. 5의 A, B, C에 해당되는 fd 값과 비유전율에서 20 dB 이상의 전파흡수능을 발휘할 수 있는 μ_r' 와 μ_r'' 의 범위를 나타낸 것이다. 모두 의도했던 대로 비투자율 실수부가 1 근방이고 허수값은 1 이하인 범위에서 정합 범위가 형성됨을 알 수 있다.

이제까지는 前述한 제한 요소 중 비복소투자율의 허용 범위 만을 알아보았다. 그러나 실제로 전파 흡수체를 제조할 경우 원하는 비유전율과 두께도 정확

히 완전 정합점과 일치시킬 수가 없으므로 이것들의 허용 범위도 고려해 보아야 한다. Fig. 5에 나타난 C 점의 경우는 비유전율이 12.7인 재료의 9.45 GHz에서 측정된 비투자율 실수값이 0.9~1.07, 허수값이 0.3~0.47의 범위 안에 들면 두께 약 2.1 mm에서 20 dB 이상의 전파흡수능을 발휘하는데, 만약 두께가 2.0mm로 제조된 경우에는 fd 값이 fig. 8에서와 같이 1.9일 경우에 해당된다. 따라서 두 허용 범위가 겹치는 영역내에서 비복소 투자율 값을 제어하고 이 재료로 전파흡수체를 제조할 경우, 두께가 2.0에서 2.1 mm 사이로 제어하면 두께 편차에 의한 영향이 정해진 흡수능을 충족시킬 수 있다는 뜻이 된다. 또한 각각의 fd 값에서 비유전율이 13인 경우의 영역도 같은 방법으로 표시할 수 있다. Fig. 8의 dotted region은 이 네가지 경우가 모두 만족되는 영역이다. 그러므로 이 네 범위가 함께 만족되는 범위 내에서 비복소투자율을 제어하면 두께 편차에 의한 영향은 물론 유전율이 12.7에서 13사이에서 변화하여도 9.45 GHz에서 20 dB 이상의 전파 흡수능을 발휘할 수 있는 전파 흡수체를 제조할 수 있다.

물론 이와 같은 설계 조건은 절대적인 것은 아니다. 예를 들어 허용되는 오차의 범위가 감소하더라도 보다 薄板인 전파 흡수체를 제조할 경우 fig. 5의 C점 대신 A점(9.45 GHz에서 두께 1.59 mm)을 선정할 수도 있다. 또한 겹쳐지는 범위를 더욱 엄밀히 제어할 수 있으면, 즉 비복소투자율을 더욱 좁은 범위 내에서 제어할 수 있으면 두께와 비유전율의 허용 편차는 더욱 증대될 수 있다.

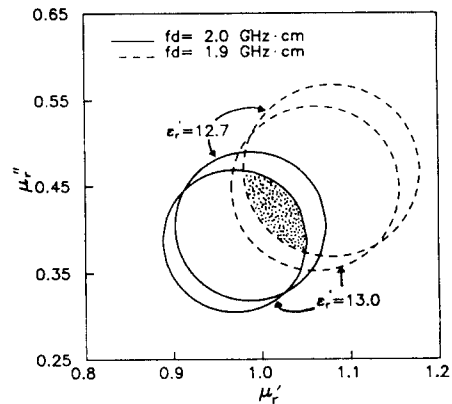


Fig. 8. Matching boundaries for the case of C in Fig. 5, as a function of fd value and ϵ_r' .

Ⅲ. 결 론

본 연구에서는 어떤 주파수에서 20dB 이상의 전파 감쇠능을 발휘할 수 있는 전파 흡수체를 제조하고자 하는 경우 흡수 특성을 나타내는 이론식에 의한 정합 범위와 함께 추가되어야 하는 제한 요소들을 고려하여 보았다.

본 연구에서는 목표 주파수로 설정한 9.45GHz에서는 큰 비투자율을 나타내는 재료를 제조하기 힘들기 때문에 제한 조건으로 비복소투자율 실수값 및 허수값이 1 이하를 나타내는 재료를 사용하여 전파 흡수체를 제조할 수 있는 조건을 선정하였다. 또한 상기 제한 조건을 만족시키는 범위 내에서 정합 범위가 가장 큰 조건을 선정하고 이를 이용하여 두께와 물성의 허용 편차를 결정할 수 있는 방법을 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 제안한 방법을 사용하면 기존의 방법(완전 정합점을 이용하여 물성 및 두께를 고정시키는 방법)에서는 알 수 없었던 각 변수들의 허용 오차 범위를 산정할 수 있음을 알았다. 실제로 어떤 특성을 갖는 재료를 제조할 경우 정도 차이는 있지만 설계치와 실측치에 편차가 있을 수 밖에 없다는 점을 고려하면 본 연구에서 제안된 방법은 매우 유용할 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Y.Naito and K.Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and Its Characteristics," IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-19, No.1, pp.65-72, Jan. 1971.
2. H.M.Musal, Jr. and H.T.Hahn, "Thin-Layer Electromagnetic Absorber Design," IEEE Transaction on Magnetics, vol.25, No.5, pp.3851-3853, Sep. 1989.
3. K.Y.Kim, W.S.Kim and S.Y.Hong, "A Study on a Method to Design an Electromagnetic Wave Absorber with an Attenuation over 20 dB," J.Kor.Phys.Soc., vol.24(6), pp.456-459, Dec. 1991.
4. K.Y.Kim, W.S.Kim and et al., "Measurement Error Induced by Air Gap of Electromagnetic Wave Absorber in the Coaxial Line Method," Jpn.J. Appl. Phys., vol.31, part 1, No.7, pp. 2096-2100, Jul. 1992.
5. 최경구 외 3인, "복합 Ni-Zn Ferrite의 제조 및 전파흡수 특성," 한국요업학회지, vol.29(7), pp. 505-510, 1992.
6. Y.Naito and T.Mizumoto, "Effect of Doping Carbon in a Electromagnetic Wave Absorber, Rubber Ferrite," 일본 전자통신학회지, vol.J69-C, No.3, pp.257-260, 1986.