

Measurement of Complex Permittivity and Permeability for Powder-type Materials

朴 商 馥* · 李 章 秀* · 鄭 容 植** · 千 昌 律†
 (Sang-Bok Park Jang-Soo Lee Young-Seek Chang-Yul Cheon)

Abstract - Materials used at microwave are usually used as a dielectric with a manufacturing purpose of printed circuit boards, etc. Complex permittivity of them can be measured from attenuation constant or propagation constant of a transmission line using a microstrip line with bulk type. But as the technique recently which can manufacture to have complex permittivity and permeability demanded using nonferrous metals for powder-type grows up, we need sensors and methods which can measure characteristics of powder-type materials. So far measuring methods of permittivity and permeability with waveguide or coaxial cable are used but they have faults which have a complex measurement method and are difficult to simultaneously measure permittivity and permeability. In this paper, a simultaneous measuring method of permittivity and permeability with 2-port coaxial cable and a new proposed calculation. The proposed 2-port coaxial cable is designed to be easy to insert materials and to have a wideband. We measure permittivity and permeability of magnetic powder(Ni-Fe-Mo, Ni-Fe) which reveal its characteristic at 0.3~1.3GHz to identify the proposed sensor.

Key Words : Permittivity, Permeability, Coaxial Cable, Transmission Line, Magnetic Powder

1. 서 론

투자율과 유전율은 전자파영역에서 동작주파수에 의존하는 상수이기 때문에 이러한 상수들을 알아내기 위한 측정 기법들을 개발하는 연구가 활발히 제안되고 있다. 일반적으로 전자파영역에서 사용되는 재료는 유전체로서 저손실을 갖고 기판이나 유전체 렌즈 등 벌크의 형태로 사용된다. 이러한 벌크의 유전체 재료는 주로 마이크로스트립 선로 등을 제작하여 감쇠상수와 전파상수를 측정하여 복소 유전율값을 측정하게 된다. 복소 유전율값은 실수의 유전율값과 loss-tangent로 구성된다.

최근 전자기기의 고성능화 및 초소형화로 EMI/EMC 문제가 갈수록 심각해지고 있다. 이러한 EMI/EMC 문제는 구조 및 회로변경 등으로 해결이 어려워지고 있어 다른 접근법이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 전자기기의 내부의 EMI 발생가능성이 큰 회로기판 부근에 흡수체 등을 부착하여 발생된 전자파를 흡수하여 간섭을 줄이는 기법이 사용되고 있다. 전자파 에너지 흡수는 재료 내부의 굴절률(Index of Refraction of Material)에 기인하는데 이것은 전파상수(β)에 의하여 얻어진다. 또 전파상수는 전기적인 값

인 유전율과 자기적인 값인 투자율에 관련된 값으로 표현이 된다. 일반적으로 흡수체의 비유전율과 비투자율의 값이 동일하면 공기와 동일한 임피던스를 갖게 되므로 공기에서 흡수체로 수직으로 입사하면 흡수체경계에서 반사가 이론적으로 '0'이 된다. 그래서 이때 흡수체의 특성의 결정하는 것이 흡수체가 갖는 복소 유전율과 투자율이다. 그리고 흡수체의 복소 유전율과 투자율의 허수부분에 의하여 흡수체 내부로 전파된 전자파는 열에너지로 변환되어 감쇠하게 된다. 즉, 고분자 물질이 전자계 안에 놓여있을 때 분자가 활성화되어 전자계 형태의 에너지를 열에너지로 변환시키면서 전자파를 흡수하게 되는 것이다. 완벽한 흡수재료는 복소수 비유전율과 비투자율이 동일하면서 큰 값을 가져야 하나 전자파 대역에서는 비투자율값이 비유전율값과 비슷해지는 것이 매우 힘든 일이다. 그러므로 흡수체의 매질특성을 설계하는 것은 전자파 흡수능력을 향상시키는 데 매우 중요하다. 최근 비철금속 분말을 이용하여 고분자와의 합성을 통하거나 기지재료인 고분자에 다양한 물성의 분체를 혼합하여 흡수체를 가공하는 기술이 발전하고 있다. 이러한 비철금속 분말로부터 적절한 복소 유전율과 투자율을 갖는 흡수체를 생성하기 위해서는 분말상태의 복소 유전율과 투자율을 조절해야 하고 이를 위해서는 각 공정에서 분말상태의 복소 유전율과 투자율의 측정이 가능해야 한다. bulk 형태의 복소 유전율과 투자율 측정은 도파관이나 동축전송선로를 이용하여 측정이 되고 있으며, 또 일부는 상용화가 이루어져 있다. 그러나 기존에 개발된 센서들은 측정 방법이 매우 복잡하고 다양한 재료 측정이 어렵다. 최근 전자파 흡수체 등의 재료로 사용되는 비철금속 분말은 유전율과 투자율을 함께 갖는 대표적인 재질이다. 이러한 분말재료를 고분자 재료와 혼합

* 學生會員 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 석사과정
 ** 正 會 員 : 팽운대학교 전파공학과 교수
 † 교신저자, 正會員 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수

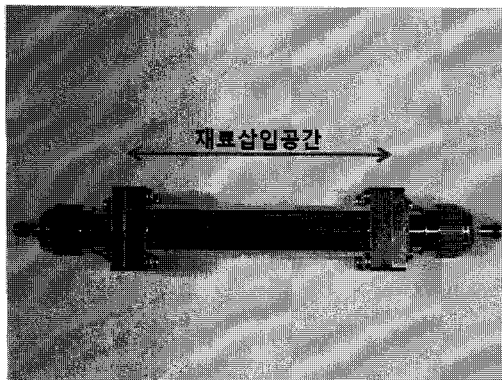
E-mail : changyul@uos.ac.kr

接受日字 : 2007年 7月 5日

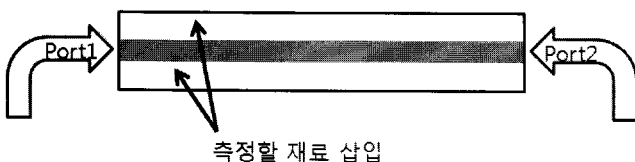
最終完了 : 2007年 9月 11日

하여 적당한 밀도로 가공을 하면 원하는 주파수대역에서 흡수특성을 갖도록 할 수 있다. 하지만 비철금속 분말을 고분자재료와 혼합하기 전에 금속 분말의 재료특성을 정확히 파악할 필요가 있으나 기존의 센서는 이러한 재료의 복소수 유전율 및 투자율을 측정하는데 어려움이 많았다.

기존에 개발된 센서들 대부분은 벌크형태의 재료에 적합하며, 분말형태가 측정이 되더라도 복소수 유전율 측정만이 가능할 뿐 복소수 투자율 측정이 어려웠다. 복소수 유전율을 측정하기 위해서 널리 쓰이고 있는 센서는 종단이 개방된 1-Port 센서를 [1] 예로 들 수 있다. 이 센서는 분말 측정($\mu_r=1$)에서 매우 간단하고 쉽게 측정할 수 있다. 그러나 종단이 개방된 1-Port 센서는 유전율 측정만이 가능하고, 비투자율(μ_r)이 '1'이 아닌 분말 형태의 재료 측정시 부정확한 결과를 유도해 내는 결점을 가지고 있다. 종단이 개방된 1-Port 센서는 수식 전개과정에서 측정되는 물질의 비투자율(μ_r)을 '1'이라고 가정하였기 때문이다. 따라서 수식전개 과정에서 가정한 조건과 일치하지 않는 재료를 측정할 경우 신뢰할 수 없는 결과가 유도된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서 복소수 유전율과 투자율을 동시에 측정해 낼 수 있도록 동축전송선로를 이용하여 제작된 센서를 제안하였다. 그림 1은 제안된 센서를 보여주고 있다.



(a) 2-Port Coaxial 전송선로



(b) 2-Port Coaxial 전송선로의 단면

그림 1 2-Port Coaxial 전송선로

Fig. 1 2-Port Coaxial Transmission Line

그림 1에서와 같이 제작된 센서는 양쪽의 port부분과 동축케이블로 구성이 되어있고 동축케이블은 유전체가 없는 공기로 채워진 상태다. 본 센서는 그림 1과 같이 제작하여 측정 물질의 삽입이 용이하도록 나사로써 조립 및 분해가 가능하도록 제작하였으며 동축케이블내에서 TEM 모드를 전송하도록 설계하였다.

2. 본 론

2.1 개방된 2-Port Coaxial 전송라인 설계 및 측정

본 센서는 동축케이블과 port의 분리가 가능하도록 제작되어 분말재료 삽입이 용이하다. Port1과 Port2는 50옴의 특성임피던스를 갖도록 설계되었으며 재료가 삽입되는 동축케이블은 삽입된 재료의 유전율과 투자율값에 따라 특성임피던스가 변하게 된다.

Port와 동축케이블에서의 특성임피던스 차이는 두 접합면에서 반사와 투과가 발생하고 이에 따라 반사계수와 투과계수는 동축케이블내의 분말재료의 유전율과 투자율로서 표현할 수 있다. 그림 2는 port와 동축케이블에서 특성임피던스의 차이에 의한 반사와 투과를 나타낸 그림이다.

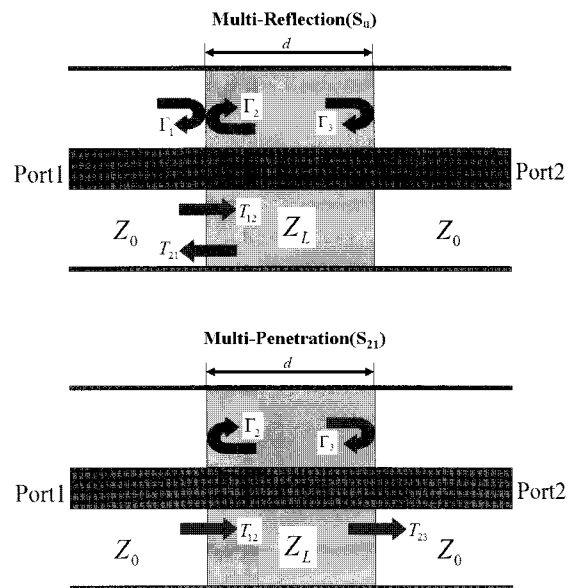


그림 2 다중 반사 계수와 다중 투과 계수의 개념도

Fig. 2 Multi-Reflection Coefficient and Multi-Transmission Coefficient

위의 그림 2를 다중반사이론(multiple reflection theorem)을 이용하여 수식으로써 표현하면 다음과 같다.

$$\Gamma_{total} = \Gamma_1 + T_{12}T_{21}\Gamma_3 e^{-2j\beta d} + T_{12}T_{21}\Gamma_2\Gamma_3^2 e^{-4j\beta d} + \dots$$

$$\therefore \Gamma_{total} = S_{11} = \Gamma_1 + \frac{T_{12}T_{21}\Gamma_3 e^{-2j\beta d}}{1 - \Gamma_2\Gamma_3 e^{-2j\beta d}} = \frac{\Gamma - \Gamma e^{-2j\beta d}}{1 - \Gamma^2 e^{-2j\beta d}} = \frac{\Gamma - \Gamma T^2}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (1)$$

$$T_{total} = T_{12}T_{23} e^{-j\beta d} + T_{12}T_{23}\Gamma_2\Gamma_3 e^{-j2\beta d} + T_{12}T_{23}\Gamma_2^2\Gamma_3^2 e^{-j4\beta d} + \dots$$

$$\therefore T_{total} = S_{21} = \frac{T_{12}T_{23} e^{-j\beta d}}{1 - \Gamma_2\Gamma_3 e^{-j2\beta d}} = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (2)$$

$$T = \exp(-j\beta d)$$

수식 (1), (2)에는 주파수에 따라 변하는 복소수 유전율과 투자율 상수가 포함되어 있기 때문에 이들을 이용하면 삽입된 분말의 유전율과 투자율을 알아낼 수 있다. 분말의 유전율과 투자율은 접합면에서의 반사계수와 투과계수 그리고 전파상수 β 에 영향을 준다. 그러므로 반사계수, 전송계수 및 전파상수를 유전율과 투자율로 [2] 표현할 수 있다.

식 (1)와 (2)를 연립하여 풀 후, 각각의 수식에 포함된 반사계수(Γ)와 전송계수(T)를 식(4), (5)의 수식에 대입한다.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{3}$$

여기서

$$Z_L = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_m, \quad Z_m = 60 \ln\left(\frac{b}{a}\right) \text{이다. } Z_m \text{은 공기로 채워진 동축 케이블의 특성임피던스를 의미하고 } Z_L \text{은 분말의 재료가 채워진 동축 케이블의 특성임피던스를 나타낸다.}$$

식(1)와 (3)으로부터

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = \left(\frac{50}{60 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right)^2 \tag{4}$$

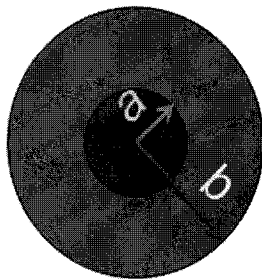


그림 3 동축선로 단면도
Fig. 3 Cross-section of Coaxial Transmission Line

식(2)의 투과계수(T)는

$$T = \exp(-j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \cdot d), \quad d: \text{재료가 삽입된 부분의 간격}$$

$$\mu_r \epsilon_r = -\left(\frac{c}{\omega d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \right)^2 \tag{5}$$

복소수 유전율과 투자율 값이 포함된 반사계수(Γ)와 투과계수(T)를 (1), (2)식으로부터 유도하여 유전율과 투자율을 구해낼 수 있다. 다중반사계수(Γ_{total})와 다중투과계수(T_{total})에 해당하는 S-파라미터는 8753D 네트워크 계측장비를 사용하여 측정하였다. (4)과 (5)식을 유도한 후 간단한

계산과정을 통해 측정된 재료의 복소수 유전율과 투자율을 구해낼 수 있다.

2.2 간격 보상

제작된 2-Port Coaxial 전송선로의 삽입된 재료의 경계면과 HP 8753D 네트워크 계측장비의 Port와의 간격이 불가피하게 존재한다. 이러한 간격은 임피던스 등에 차이를 발생시켜 측정오차를 야기하므로 이에 대한 보상이 반드시 필요하다. 실제로 유도한 수식에서는 이러한 간격을 따로 고려하지 않고 삽입된 분말재료의 경계 면에 Port가 존재한다고 가정하고 수식을 유도하였다. 그래서 다음 그림 4와 수식 (6)와 (7)과 같은 보상과정이 이루어져야 한다.

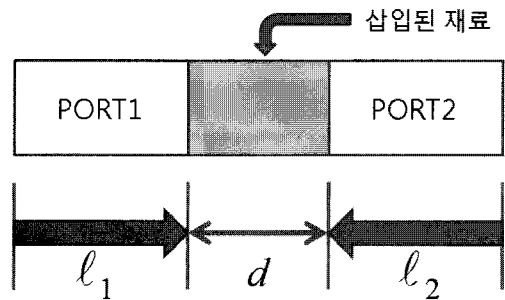


그림 4 간격보상
Fig. 4 Compensation for Interval of Transmission Line

$$S'_{11} = S_{11} \cdot \exp(j\beta l_1 + j\beta l'_1) \tag{6}$$

$$S'_{21} = S_{21} \cdot \exp(j\beta l_1 + j\beta l'_2 - j\beta l') \tag{7}$$

식 (6)의 변수 l' 는 8753D 네트워크 계측기의 Calibration과정에서 나타나는 오차를 보상하기 위한 간격이다. 네트워크가 사용하는 Calkit의 종류 중에 Thru-Cal Kit이 있는데 Calibration 후에 Thru-Cal Kit만큼의 길이에 해당하는 Phase가 무시되게 된다. 그래서 Phase가 무시된 만큼의 길이를 보상해주는 수식이 식(7)과 같이 이루어져야 한다.

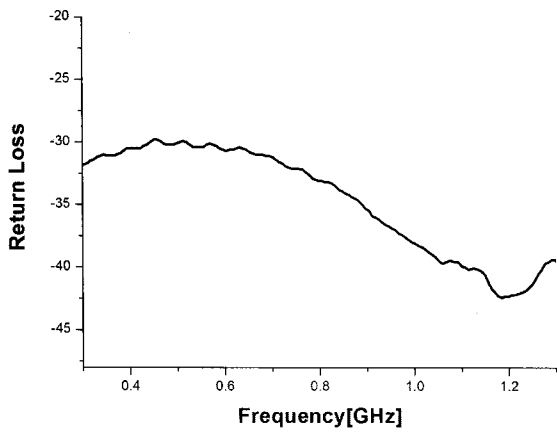
길이보상을 해주기 위해선 정확한 간격측정이 이루어져야 하는데 이를 위해서 HP 8753D 네트워크 장비에서 주파수영역을 시간영역으로 바꾸어 주는 기능을 사용하였다. 이러한 기능을 사용하게 되면 각 Port에서 삽입된 재료 경계면까지 전파가 진행되는 정확한 시간을 구해 낼 수 있다. 즉, 특성 임피던스가 차이 나는 면에서 반사가 발생하고 이러한 반사파가 되돌아온 시간을 이용하면 간격의 값을 구할 수 있다. 반사파의 시간을 다음과 같은 수식에 대입하여 거리를 유도해 낼 수 있다.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

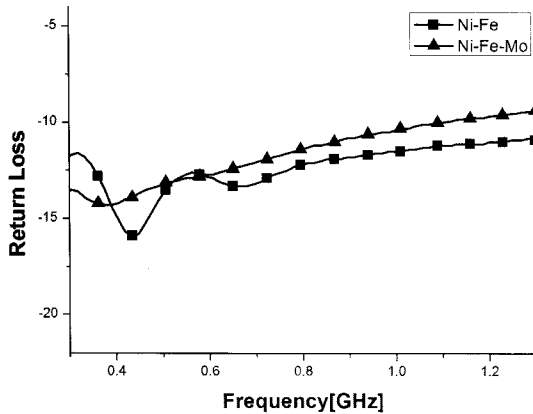
$$\therefore \text{거리} = v \cdot \text{시간} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \cdot \text{시간} \tag{8}$$

2.3 측정

8753D 네트워크 계측기를 이용하여 S-파라미터를 측정하여 위의 수식전개를 통해 유전율과 투자율을 유도해 내었다. 본 논문에서 제안한 센서의 성능을 증명하기 위해 공기와 Ni-Fe, Ni-Fe-Mo 합금 자성 물질을 측정하였다. 우선 제작된 2-Port Coaxial 전송선로의 물질이 삽입되는 부분의 특성임피던스가 50옴으로 되어 있으며 이 때의 각 측정 물질들의 Return Loss를 측정하여 수식전개에 추가적인 손실을 보상하는 변수가 필요하지 않음을 확인하였다.



(a) 공기



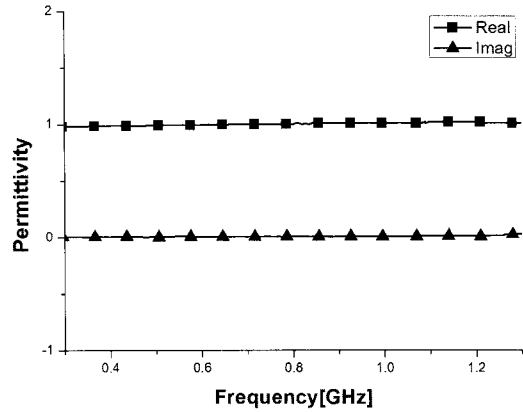
(b) Ni-Fe와 Ni-Fe-Mo 자성 합금 분말물질

그림 5 2-Port Coaxial 전송선로의 Return Loss (300MHz ~ 1.3GHz)

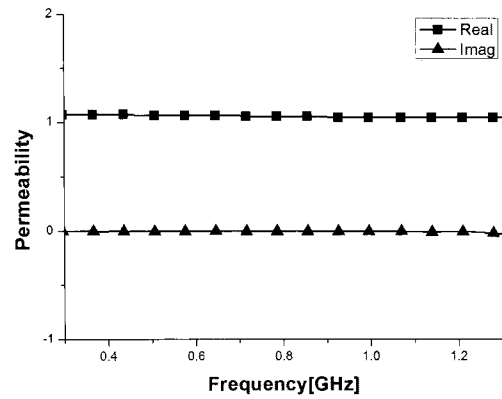
Fig. 5 Return Loss of 2-Port Coaxial Transmission Line (300MHz ~ 1.3GHz)

그림 5와 같이 본 논문에서 측정된 각 물질들의 Return Loss의 차이는 측정된 물질들의 특성차이인 것으로 보인다.

재료를 삽입하여 측정하기 전에 공기로 채워진 2-Port Coaxial 전송선로의 유전율과 투자율을 측정해 보았다. 공기의 유전율과 투자율은 이미 알고 있기 때문에 제작된 센서의 올바른 동작 유무를 확인할 수 있었다. 2-Port Coaxial 전송선로에 공기가 채워졌을 때의 유전율과 투자율은 그림 6과 같았다.



(a) 공기의 유전율



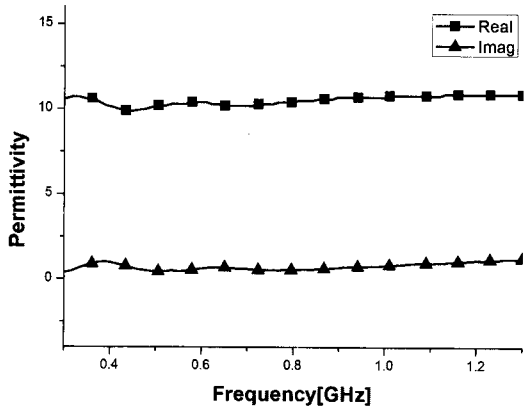
(b) 공기의 투자율

그림 6 제작된 2-Port Coaxial 전송선로를 이용하여 측정된 공기의 유전율과 투자율 (300MHz ~ 1.3GHz)

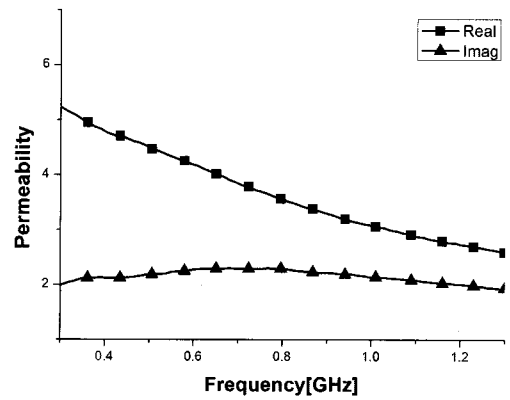
Fig. 6 Measured Permittivity and Permeability of Air Using Manufactured 2-Port Coaxial Transmission Line(300MHz ~ 1.3GHz)

공기의 측정이 제대로 되었기 때문에 전자파영역에서 자성을 띄는 분말로 된 Ni-Fe 합금 자성물질과 Ni-Fe-Mo 합금 자성분말물질을 측정해 보았다. 이런 자성분말물질들은 sheet 형태로 제작되어 전자파 장애 및 간섭 문제가 되는 영역에 접촉시킴으로써 그 영역에서의 EMC/EMI 문제를 해결할 수 있다. 최근 동작주파수가 높아지고 고밀도 집적화가 이루어짐에 따라 EMC/EMI 문제가 증가하고 있어서 이러한 제품에 대한 수요가 증가하고 있다.

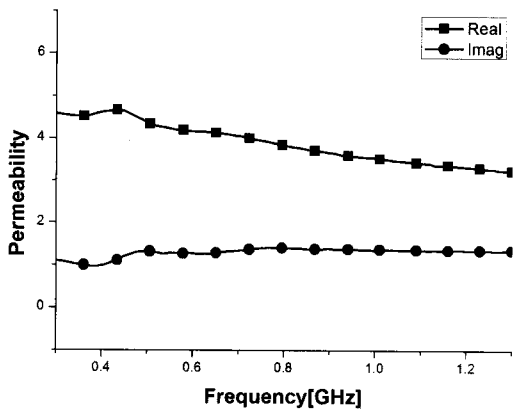
측정 결과는 그림 7, 8과 같았다.



(a) Ni-Fe 합금 분말자성물질의 유전율



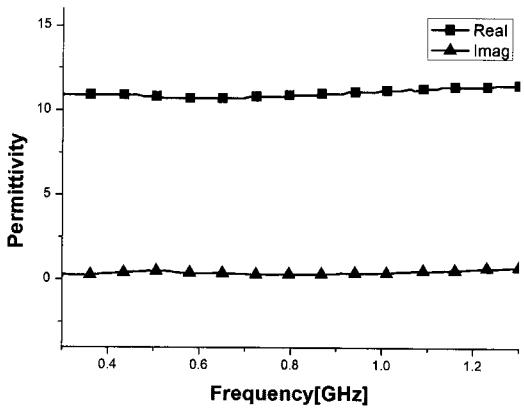
(b) Ni-Fe-Mo 합금 분말자성물질의 투자율



(b) Ni-Fe 합금 분말자성물질의 투자율

그림 7 Ni-Fe 합금 분말자성물질의 유전율과 투자율 (300MHz ~ 1.5GHz)

Fig. 7 Permittivity and Permeability of Ni-Fe (300MHz ~ 1.5GHz)



(a) Ni-Fe-Mo 합금 분말자성물질의 유전율

그림 8 Ni-Fe-Mo 합금 분말자성물질의 유전율과 투자율 (300MHz ~ 1.5GHz)

Fig. 8 Permittivity and Permeability of Ni-Fe-Mo(300MHz ~ 1.5GHz)

3. 결 론

최근 기술이 발달함에 따라 높은 주파수 영역과 고밀도 집적회로를 요구하고 있어 이를 해결할 수 있는 합금 자성 물질 개발에 박차를 가하고 있다. 본 논문에서 제안한 센서는 생산된 제품의 복소 비유전율과 비투자율의 측정이 가능하기 때문에 양질의 합금 자성 물질을 개발하는데 매우 유리하다.

제안된 2-Port Coaxial 전송선로는 복소수 유전율과 투자율을 보다 효율적으로 알아낼 수 있는 장치로서 가루 형태의 재료 측정에서는 매우 유용한 센서이다. 약간의 보완이 이루어진다면 액체나 고체 형태의 물질도 쉽게 측정할 수 있는 잠재성을 가지고 있다. 또한 2-Port Coaxial 전송선로의 크기 및 길이를 줄이게 되면 주파수의 범위는 더욱 넓어지게 된다.

감사의 글

측정 재료를 제공해 주신 (주)창성 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A.Nyshadham, C.L. Sibbald and S.S. Stuchly, "Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration - An uncertainty analysis," IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., vol. 40,no. 2, pp. 305-313, 1992.
- [2] William B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies", Proceedings of IEEE, vol. 62, No. 1, January 1974.

저 자 소 개



박 상 복 (朴 商 馥)

2007년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 서울시립대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 EMI/EMC 및 RF 수동소자 설계.



정 용 식 (鄭 容 植)

1989년 2월 :서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 2월 :서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년 8월 :서울대학교 전기공학과 (공학박사)
2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수
2006년 2월~현재: 광운대학교 전파공학과 조교수
[주 관심분야]: 전자파수치해석 및 EMI/EMC



이 장 수 (李 章 秀)

2007년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 서울시립대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정 재학중. 관심분야는 안테나 및 RF 수동소자 설계.



천 창 울 (千 昌 律)

1983년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학사)
1985년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학석사)
1992년 : 미국University of Michigan, Ann arbor(공학박사)
1992년~1995년 : 강원대학교 전기공학과 조교수
1995년~현재 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
주 관심분야 : RF, RF Power Amplifier, EMC 등