Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 36, No. 6, pp.571~576, 1999.

마이크로 주파수에서 전파 흡수성 코팅재료의 특성 평가

임종인 · 김찬욱 · 오택수
포항산업과학연구원, 재료공정연구센터, 금속코팅재료연구팀
(1998년 7월 13일 접수)

Evaluations of Radar Absorbing Coating Materials in the Microwave Frequencies

Jong In Im, Chan Wook Kim and Taeg Su Oh
Metal & Coating Materials Research Team, Material & Processing Research Center, RIST,
Pohang 790-330, Korea
(Received July 13, 1998)

초 록

본 논문은 마이크로파 대역에서 전파 흡수성 코팅 재료의 전자기적 재료 특성과 전자파 흡수 특성을 분석한 것에 관한 것이다. 전파 흡수성 코팅 재료는 주제 및 경화제로 구성된 고분자 폴리머와 페라이트(Ferrite) 분말을 혼합하여 제조하였고, S-parameter 방법을 이용해 마이크로파 주파수 영역에서 복소 투자율 및 복소 유전율 등의 물질정수를 측정함으로써 전자파 흡수능에 대한 검토를 행하였다. 그 결과, 대표적인 코팅재료의 상대 유전율 및 상대 투자율은 각각 약 4 및 2정도의 값을 가지고 있으며, 4~6 GHz 및 12 GHz 근처에서 전자파 흡수 특성이 발현됨을 확인하였다. 따라서 사용 주파수 대역에 따라 구성 재료의 자기적 특성 및 유전 특성을 적절히 선정함으로써 마이크로파 대역에서 전자파 흡수 특성이 양호한 전자파 흡수채용 코팅 재료의 개발이 가능하다고 사료된다.

ABSTRACT

This paper describes both electromagnetic properties and electromagnetic-wave absorbing (EMA) characteristics of the radar absorbing coating materials in the microwave frequencies. The coating materials are prepared by mixing ferrite powder with epoxy resin polymers. The electromagnetic property and the EMA characteristics of the coating materials are measured in the frequency ranges between 0.2 GHz and 15 GHz using the S-parameter method. The results show that the typical coating material has (μ_r' of about 2 and (ε_r' of about 4. And the coating materials have a little EMA characteristics in the frequency from 4 to 6 GHz and more improved EMA characteristics around 12 GHz. And it is desirable for improvement of the EMA characteristics of the coating materials to properly select electromagnetic properties of constitutional materials in the interesting frequency ranges.

Key words* : *Coating material, Radar absorbing material, S-parameter, Electromagnetic property, Two-port method

1. 서 론

각종 전기 및 전자, 통신기기의 광범위한 보급으로 인하여 발생하는 전자파는 인체에 악영향을 주거나 혹은 전자파의 상호간섭에 의한 기기의 오동작을 유발하기로 한다. 그러므로 전기, 전자, 통신 등 여러 분야에서 전자파의 차폐 및 흡수 기술이 중요시 되고 있고, kHz, MHz 및 GHz 대역 등 전자파 주파수대역에 따라 재질 및 형상을 달리한다.

일반적으로 전파의 흡수는 도전손실, 유전손실 및 자성손실 등에 의해 좌우되고, 전자파 흡수체의 성능은 반사 감쇠량, 비대역폭 및 정합두께 등으로 평가된다.[1,2] 현재 반사 감쇄량이 크고, 광대역 및 얇은 정합두께를 갖는 전파흡수체 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3,4] 대표적인 전자파 흡수성 재료로는 각종 도전성 재료와 페라이트 등 자성재료, $BaTiO_3$등의 유전재료, 그리고 전파 흡수능을 높이기 위하여 자성 및 유전, 도전 손실을 함께 이용하는 자성체/유전체/폴리머 복합체 등으로 분류할 수 있다. 도전손실에 의한 전파흡수체는 금속 분말 혹은 carbon 분말, 탄소섬유 등[5]을 천연고무, 실리콘 등

폴리머에 분산시켜 사용된다. 일반적으로 ferrite 전파흡수체는 수십~수백 MHz 영역에서 특성을 나타내고, 복합체 ferrite 전파흡수체는 GHz 대역에서의 전파흡수체로 사용한다.[6,7]

본 연구에서는 고분자 폴리머와 Ni-Zn ferrite 분말을 혼합하여 코팅시료를 제조하고, 이들 시료에 대한 마이크로파 대역에서 복소 투자율 및 복소 유전율 등을 측정함으로써 합성한 시료가 마이크로파 대역에서 전파흡수능을 발현하는 지를 검토함과 동시에 향후 전파흡수용 코팅재료 개발에 관한 가능성을 평가하고자 하였다.

재료의 표면에 전파를 평면 입사 시켜 재료의 복소 투자율 및 복소 유전율을 측정하는 방법으로는 HP사에서 개발한 Two-port 측정법[8,9]과 Wiltron사에서 개발한 One-port 측정법[10]이 있고, GHz대역 이상에서 주로 사용되고 있다. Two-port 측정법이란, 입사파의 강도에 대한 투과파와 반사파의 비율을 측정하여 물질정수 및 흡수능을 도출하는 방법이고, One-port 방법의 경우 두께가 다른 두 시료의 입사파에 대한 반사파의 강도 비율을 측정하여 물질 정수 및 흡수능을 도출하는 방법이다. Two-port 방법의 경우, 우선 회로망 분석기를 이용하여 S-parameter 인 S_{11} 및 S_{12}를 측정하고, 다음 관계식을 이용하여 시편의 반사계수(Γ)와 투과계수(T)를 계산할 수 있다.

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1-T^2)\Gamma}{1-T^2\Gamma^2} \quad (1)$$

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1-\Gamma^2)T}{1-T^2\Gamma^2} \quad (2)$$

또한 시편의 반사계수와 투과계수로부터 식(3)과 식(4)로 표현되는 관계식을 이용하여 시편의 복소 투자율과 복소 유전율을 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}-1}{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}+1} \quad (3)$$

$$T = \exp\left[-j\left(\frac{w}{c}\right)\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}\cdot d\right] \quad (4)$$

여기서 ω(=2πf)는 각주파수 이고, c는 광속도, d는 시편의 두께를 의미한다. 이렇게 구해진 시편의 복소 투자율, 복소 유전율 및 반사 계수로부터 식 (5)와 (6)을 이용하여 측정 시편의 정합 임피던스 및 전자파 흡수능을 구할 수 있다 또한 임피던스 정합 그림을 이용하여 시편의 정합 주파수를 구할 수 있다.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_R}{\varepsilon_R}} \star \tanh\left(j\omega d\sqrt{\mu_R\varepsilon_R}\right) \quad (1)$$

$$\alpha(dB) = 20\log|(Z-1)/(Z+1)| \quad (2)$$

본 논문에서는 고 주파수 대역에서 사용 가능한 전파흡수성 코팅재료의 특성을 분석한 것으로, 회로망 분석기를 이용하여 two-port 방법으로 코팅재료의 물질 정수 및 전파 흡수특성을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편 제조

전파 흡수성 코팅시편은 고분자 폴리머와 평균 입경이 2(m인 Ni-Zn ferrite(Fe_2O_3 66.98 wt%, ZnO 20.4 wt%, NiO 6.34 wt%, MgO 0.03 wt%, CuO 1.89 wt%) 분말을 혼합하여 제조하였다. 본 연구에서 사용한 고분자 폴리머는 성형성이 우수하여 코팅재의 두께 조정이 용이한 에폭시 폴리머를 선정하였으며, 고분자 폴리머의 주제와 경화제의 조성은 Table 1과 같이 구성되어 있다. 그리고 고분자 폴리머와 Ni-Zn ferrite를 Table 2에 나타낸 배합비로 평량하고, 고속 혼합기를 사용하여최대 20,000 rpm로 혼합하여 전파흡수체용 코팅재료를 제조하였다. 이렇게 제조된 코팅재료를 고형화 시키고, 코팅재료의 전파흡수능 평가를 위해 최종적으로 절삭 가공하여 내경 3 mm 및 외경 7 mm(coaxial sample holder 사양)를 갖는 중공 원통형 시편을 제조하였다.

2.2. 특성 평가

Fig. 1에 나타낸 전자파 흡수체의 특성 평가 장치를

Table 1. Basic Compositions of the Coating Materials

Resin			Hardener		
Components	Amounts [wt.%]	Remarks	Components	Amounts [wt.%]	Remarks
YD 115CA	35.0	Epoxy resin	KH 816A	21.0	Amino resin
BYK354	0.8	Leveling agent	BYK A501	0.5	Defoamer
BYK A501	0.7	Defoamer	Silica #325	30.0	Pigment
Silica #325	60.0	Pigment	DMP #30	3.0	Reactive agent
Carbosil TS-720	1.5	Additive agent	Carbosil TS-720	0.5	Additive agent
DBP	5.0	Plasticizer			
Texanol CS-12	3.0	Film former			

Table 2. Compositions of the Coating Materials for Radar Absorbing Applications

Materials / Compositions		A	B	C	D	E
Resin	Silica (wt.%)	57.5	50	42.5	12.5	–
	(Ni,Zn)ferrite (wt.%)	-	7.5	15	45	57.5
Hardener	Silica (wt.%)	30	30	30	30	–
	(Ni,Zn)ferrite (wt.%)	-	-	-	-	30

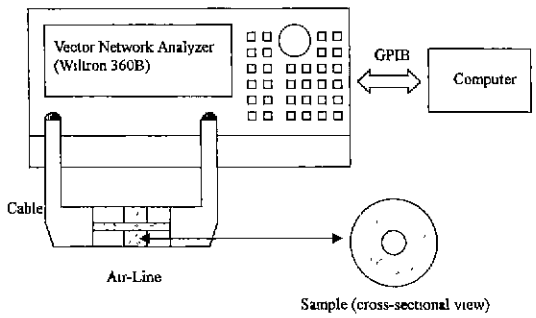

Fig. 1. Experimental Set-ups for the measurements of RAM(Radar Absorbing Material)'s properties.

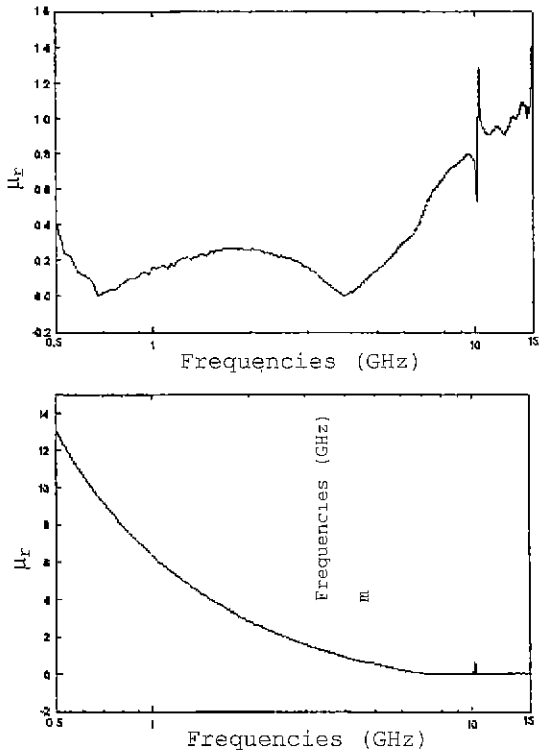

Fig. 2. Frequency dependence of the magnetic properties of the sintered ferrite added to the radar absorbing coating materials.

이용하여 0.2 GHz~15 GHz인 주파수 영역에서 시편의 전자기적 특성을 S-parameter 법에 의해 측정하였다. 측정 장치는 Wiltron Model. 360B 회로망 분석기, GPC7 connector, cable 및 동축선 air line으로 구성되어 있고, PC에 연결되어 전자기 특성을 분석하도록 되어있으며, 측정용 시편을 동축선 air line에 삽입하고, two-port 방법으로 S_{11} 및 S_{21}을 측정하였다. 측정된 이들 S-parameter로 식 (1)부터 식 (4)의 관계식을 이용하여 복소 투자율, 투자손실, 복소 유전율 및 유전손실을 계산하였다. 또한, 한쪽 끝을 단락시킨 One-port 방법으로 시편의 반사 전력을 측정하여 전자파 코팅재료의 흡수특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 본 연구의 코팅재료의 제조에 사용한 페라이트 소결체의 복소 투자율을 측정한 결과를 나타내었다. Fig. 2의 실수부 투자율은 주파수 변화에 따라 복잡한 양상을 보이고 있고, 허수부 투자율의 경우 주파수가 증가함에 따라 급속하게 감소하는 특성을 나타내고 있다. 반면 페라이트 소결체의 유전특성 결과인 Fig. 3에서 알 수 있듯이, 10 GHz까지는 상대 유전율의 실수부의 값은 약 7 정도로 일정하고, 허수부의 경우 거의 0에 가까운 일정한 특성을 지니고 있었다. 그러나 Fig. 2 및 3에서 알 수 있는 바와 같이 페라이트 소결체는 10 GHz 근처의 주파수에서 자기적 공진 및 유전 공진 특성을 나타내고 있다.

전파 흡수성 코팅재료의 복소 투자율을 측정한 결과 (Fig. 4 참조)에서 알 수 있듯이, 2 GHz 이하의 저주파수 영역에서는 ferrite 함량이 증가함에 따라 높은 투자율 (μ_r')을 나타내었고, 그이상의 주파수 영역에서는 코팅재료 E가 다른 코팅재료보다 더 낮은 투자율(μ_r')을 보여주고 있다. 또한 Fig. 4(b)에 나타낸 복소 투자율의 허수부 (μ_r'')의 경우, 7 GHz 미만의 주파수 영역에서는 코팅재료 E가 다른 코팅재료보다 훨씬 큰 값을 가지고 있었으나, 8 GHz이상의 주파수 영역에서는 거의 유사한 특성을 지니고 있었다. 그리고 μ_r''/μ_r' 로 표시되는 자기손실 (tanm δ)의 경우(Fig. 4(c) 참조), 7 GHz 미만의 주파수 영역에서는 ferrite의 함량이 증가함에 따라 자기손실이 증가하였음을 알 수 있다. 특히 코팅재료 E의 경우 2 ~ 5 GHz에서 월등히 큰 자기 손실 특성을 지니고 있는 것은 bulk형태의 ferrite 소결체가 수백 MHz 대역의 전파흡수 특성을 보이고 있는 결과와는 다소 상이한 결과이다. 그러나 이 결과는 ferrite를 분말 형태로 전파흡수

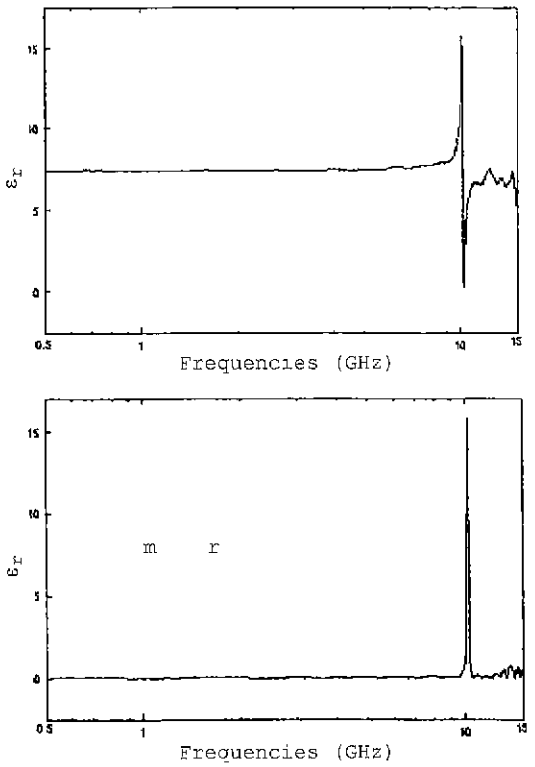

Fig. 3. Frequency dependence of the dielectric properties of the sintered ferrite added to the radar absorbing coating materials.

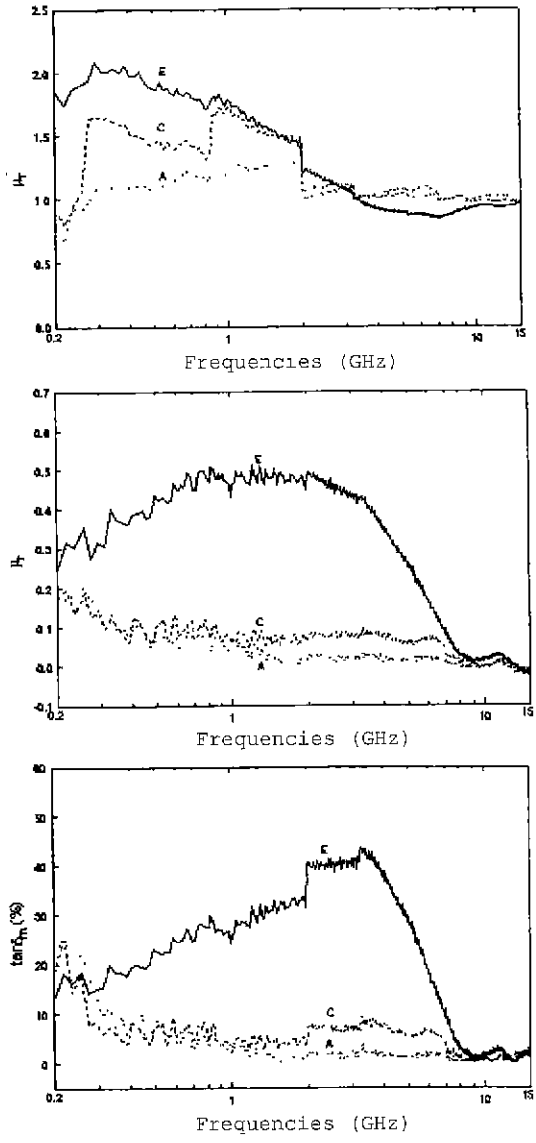

Fig. 4. Frequency dependence of the magnetic properties of the radar absorbing coating materials

성 코팅재료에 첨가하여 전파흡수성 복합체에 분사시킴으로써 회전자계에 의한 공명현상에 기인한 자기손실 기여가 크게되어 MHz보다는 더 높은 주파수 대역인 GHz대역에서도 자기적 특성을 나타낸 것으로 해석된다.

전파 흡수성 코팅재료의 복소 유전율을 측정한 결과 (Fig. 5(a) 참조)에서 알 수 있듯이, 모든 측정 주파수 영역에서는 ferrite 함량이 증가함에 따라 높은 유전율(ε_r')을 나타내었고, 특히 코팅재료 E는 2 GHz이상의 고주파수 영역에서 다른 코팅재료보다 훨씬 높은 유전율(ε_r')을 보여주고 있다. Ferrite를 첨가하지 않은 코팅재료의 경우 3~3.6의 ε_r'을 가지고, ferrite를 가장 많이 첨가한 코팅재료의 경우 4~4.5 정도의 ε_r'의 값을 나타내었다. 그러므로 ferrite의 첨가에 의해 1~2 정도의 유전율의 향상될 수 있으나 그 이상의 향상은 어렵다고 판단되며, 유전체 분말을 별도로 첨가하여야 할 것으로 생각된다. 또한 Fig. 5(b)에 나타낸 복소 투자율의 허수부(μ_r'')의 경우, 7 GHz 미만의 주파수 영역에서는 모든 코팅재료가 유사한 주파수 의존 특성을 보여주고 있으나, 5~10 GHz의 주파수 영역에서는 E를 제외한 ferrite를 함유한 다른 코팅재료의 경우 ferrite를 첨가하지 않은 코팅재료 A보다 다소 떨어진 유전손실 특성을 보이고 있다. 그리고 $\varepsilon_r''/\varepsilon_r'$로 표시되는 유전손실 ($\tan_e \delta$)를 Fig. 5(c)에 나타내었다.

전자파 흡수성 코팅재료의 반사 손실을 측정하고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 모든 코팅재료들이 4~6 GHz 영역에서 미미한 전자파 흡수 특성을 나타내고 있고, 12 GHz 근처의 주파수 영역에서 전자파 흡수 특성을 보이고 있다. 4~6 GHz 영역의 경우, 코팅재료 D와 E가 전자파 흡수특성을 보이고 있고, 코팅재료 D보다는 코팅재료 E의 전자파 흡수특성 더 우

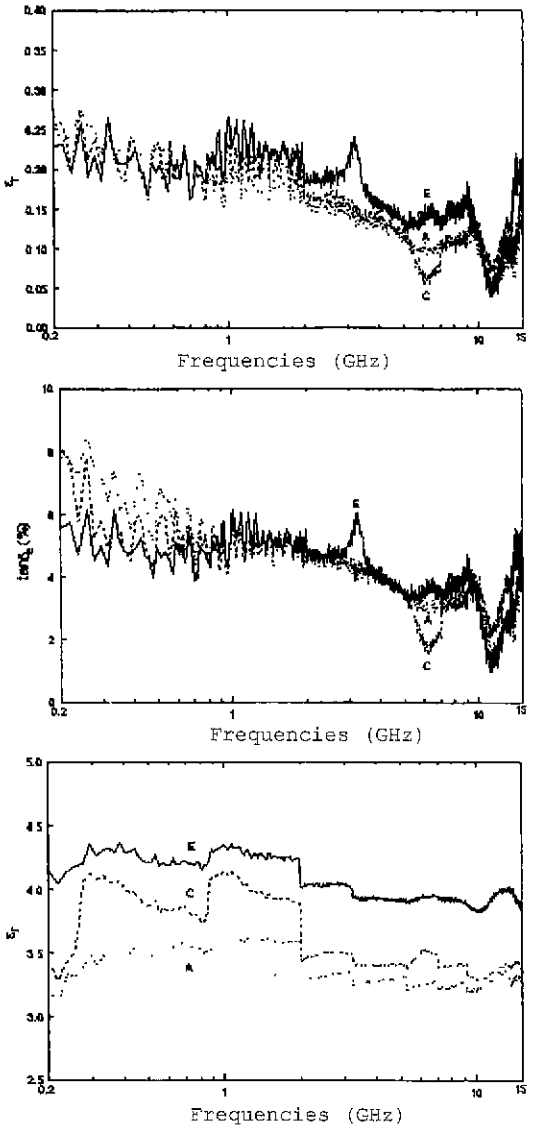

Fig. 5. Frequency dependence of the magnetic properties of the radar absorbing coating materials.

수함을 알 수 있다. 그러므로 이 주파수 대역에서의 전자파 흡수특성은 코팅재료의 자기적 특성에 의하여 나타난 결과로 해석되고, ferrite 함량이 증가할수록 자기적 특성이 우수함으로 전자파 흡수특성이 향상되었다고 해석할 수 있다. 그리고 8 GHz 이상의 영역에서는 코팅재료 C, A, E 순으로 전자파 흡수 특성이 향상됨을 알 수 있다. 이 결과는 코팅재료의 자기적 특성보다는 유전적 특성에 의해 나타난 결과로 해석된다. 일반적으로 복합형 ferrite(고분자+ferrite)가 소결성 ferrite보다 더 높은 주파수에서 공명현상을 일으키는 것으로 알려져 있으며,[11] 본

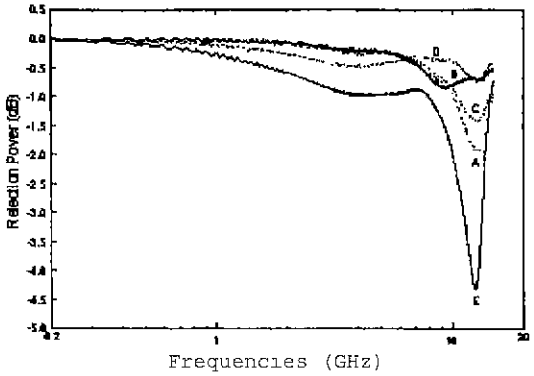

Fig. 6. Variations of the reflection powers of the radar absorbing coating materials with the frequency.

연구에서도 전술한 바와 같이 ferrite 분말을 고분자 폴리머와 복합화함으로써 GHz 대역에서 공명이 일어나고 있음을 확인하였다. 그리고 측정 주파수 영역에서 코팅재료 E의 전파 흡수특성을 고찰하여 볼 때, 10 GHz 이상의 고 주파수 영역에서 다른 코팅재료보다 훨씬 우수한 전자파 흡수특성을 보이고 있다. 그러나 전자파 흡수성 코팅재료의 실용화를 위해서는 흡수성능 및 광대역화에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다. 이상과 같은 본 연구의 결과는 구성 재료의 자기적 특성 및 유전 특성의 적절한 선정과 사용 함량의 최적화 등에 대한 방향 제시에 유용한 결과라고 판단되며, 향후 관심 있는 주파수 영역에서 이들에 대한 연구를 진행할 경우, 전자파 흡수능이 향상된 코팅 재료의 개발 및 실용화가 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

마이크로파 주파수 대역에서 전파 흡수성 코팅 재료의 전자기적 재료 특성과 전자파 흡수 특성을 측정하고 분석하였다. 전파 흡수성 코팅 재료는 에폭시 고분자 폴리머와 Ni-Zn ferrite 분말을 혼합하여 제조하였고, S-parameter 방법을 이용해 마이크로파 주파수 영역에서 복소 투자율 및 복소 유전율 등의 물질정수, 전자파 흡수특성 등을 측정하였다. 그 결과, 대표적인 코팅재료의 상대 유전율 및 상대 투자율은 각각 약 4 및 2정도의 값을 가지고 있었으며, 코팅 재료는 4~6 GHz 및 12 GHz 근처에서 전자파 흡수 특성을 나타내었다. 그러므로 사용 주파수 대역에 따라 구성 재료의 자기적 특성 및 유전 특성을 적절히 선정하는 연구가 선행된다면, 향후 마이크로파 대역, 특히 C~X band에서 전자파 흡수특성이 향상된 전자파 흡수체용 코팅재료의 개발이 가능하다고 판단된다.

REFERENCES

1. 內藤喜之,電波吸收體, ohm社 (1987).
2. K. J. Vinoy and R. M. Jha. Radar Absorbing Materials, Kluwer Academic Publisher, U.S.A. (1996).
3. Y. Kotsuka, "磁化 Ferrite에 의한 電波吸收體의 技能化," 技能材料, **7**, 35~38 (1990).
4. 石野健, "電波吸收體로의 應用," 工業材料, **36**(4), 55~60 (1988).
5. K. Ichino and Y. Narumiya, "Development of Magnetic Ferrite: Control & Application of Losses," *Ceram. Bull.*, **66**(10), 1469~1474 (1987).
6. Y. Naito and K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and its Characteristics," IEEE Trans. *Microwave Theory & Tech.*, **19**(1), 65~72 (1971).
7. 乾哲司, "電波吸收體," Electronic Ceramics, 冬號, 18~24 (1985).
8. A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-domain Techniques," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **IM-19**(4), 377~382 (1970).
9. W. B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies," *Proceedings of IEEE*, **62**(1), 33~36 (1974).
10. H. B. Sequerra, Technical Report TR89-83, Martin Marietta Lab (1989).
11. 石野健, 市原謙一, "樹脂 ferrite," *Ceramics*, **14**(3), 202~209 (1979).