

플라즈마 용사방식에 의해 형성된 페라이트-탄화규소 표면층의 마이크로파 흡수특성(Ⅱ)

正會員 申 東 燦* 正會員 孫 鉉**

Microwave Absorbing Characteristics of Ferrite-silicon carbide surface Films Produced by Plasma-spraying(Ⅱ)

Dong Chan Shin*, Hyon Son** *Regular Members*

要 約

레이다의 추적 및 탐색으로부터 비행 물체를 보호하기 위한 목적으로, 알루미늄 합금표면에 페라이트-탄화규소 복합물인 마이크로파 흡수층을 플라즈마 용사방식으로 제작하였다.

본 논문에서는 페라이트-탄화규소층(Ⅰ) 제조시 사용했던 탄화규소 입자의 평균크기인 34[μm]대신에 15[μm]가 사용되었으며, 플라즈마 용사변수들 중에서 분말의 공급비율은 70[Kg/h]대신에 50[Kg/h] 그 리고, 용사거리는 80[mm] 대신에 100[mm]가 사용 되었다.

X-band(8~12.4[GHz])레이다용 페라이트-탄화규소 전자파 흡수체를 실험적으로 설계하고 시험제작 하여 전기적 특성을 평가한 결과, -10dB의 반사량을 허용한도로 했을 때 약 2.8%의 대역폭이 얻어졌으며, 최대 흡수두께는 0.5[mm]로 매우 양호한 박층형 전자파 흡수체가 얻어졌다.

ABSTRACT

Plasma spraying method was used to fabricated the microwave absorbing ferrite-silicon carbide on the aluminum-alloy of the fuselage of an aircraft to protect it from RADAR detection.

In this paper 15[μm] instead of 34[μm], the mean size of SIC-powder for ferrite-silicon carbide surface films(Ⅰ) was used, 50[Kg/h] instead of 70[Kg/h], the powder feed and 100[mm] instead of 80[mm], spray distance of spray parameters was used.

This M/W absorbers were designed experimentally and fabricated trially, as a result of which the relative frequency bandwidth of 2.8% were obtained under the tolerance limits of the reflection coefficients lower than-10[dB], and the maximum absorption thickness becomes 0.5[mm], which is much thinner than that of the conventional ones.

*K. M. -3rd. A. 電子工學科

**慶北大學校 電子工學科

Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.

論文番號 : 93-120

I. 서 론

탄화규소를 사용한 전자파 흡수체는 제작기법에 따라 유전손실을 크게할 수 있는 특징이 있어서, 최근 이를 이용한 전자파 흡수체의 연구가 진행되고 있으며^{[1]-[6]}, 이들 중 일부가 상품화되어 사용되고 있다.

橋本등^{[5],[6]}은 1990년 9월 탄화규소 섬유 FRP(fiber reinforced plastics)의 전파 흡수특성에 대한 연구결과를 발표하였고 1991년 7월에는 2층구조 탄화규소 섬유 FRP의 전파 흡수층에 관한 연구결과를 보고하였다. 이 흡수체는 레이더 안테나의 허상 방지용으로 제작된 것으로서 두께는 4.8[mm]였다. 이 흡수체의 반사 손실특성은 대역폭 4[GHz]에 대하여 -20[dB]이하로서, 이 흡수체는 실용성 및 신뢰성에 있어서 우수한 것으로 평가되고 있다. 그러나 그 두께가 고속 비행물체 표면에 사용하기에는 너무 두꺼운 문제점이 있다.

일반적으로 고속 비행물체에 사용되는 표면 금속판의 두께가 1.2 내지는 2.4[mm]인 것을 고려할 때, 전자파 흡수층의 두께는 이보다 얇은 것이 바람직하다. 또한 이 흡수층은 표면금속과 거의 수명을 같이 할 수 있을 정도의 우수한 내내열 사이클성, 내태양광성, 내습성, 내산성, 내염기성, 내유성 및 내구성 등의 특성을 가져야 한다. 또한 이 흡수층과 표면 금속판과의 접착성이 우수해야 한다.

플라즈마 용사 코팅은 열 용사 코팅의 한 분야이다. 열용사 코팅은 1910년경 스위의 Schoop가 부식방지를 목적으로 미세 입자화한 용융아연을 저온의 기관표면에 고속으로 용사 시켜 형성된 코팅층에 대한 경화처리(metallization process) 기술을 소개하면서 서부터 시작됐다.^{[7]-[10]}

1930년에는 마모된 부품에 고경도 금속을 코팅하기에 이르렀고, 1950-60년경에는 고융점의 세라믹재료의 코팅이 가능하여졌다. 1950년 후반에 이르러 산업용 플라즈마 용사장비가 개발되어 새로운 표면코팅 기술로서 일반산업에 널리 이용되어 왔으며, 1988년 후반에는 개선된 용사장비가 소개되어 용융가능분야가 급진적으로 확대되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 Ni·Zn 페라이트-탄화규소 플라즈마 코팅층(I)^[3]에 대한 시편제조시, 입자의 평균크기가 34[μ m]인 탄화규소의 미용착 손실량이 많이 발생했기 때문에, 본 실험에서는 입자의 평균크기가 15[μ m]인 탄화규소를 사용하여 제작된 페라이트-탄화규

소 플라즈마 코팅층의 재료정수 제어의 가능성과 전자파 흡수특성을 조사하였다.

II. 실험 및 측정

1. 시편준비

Ni·Zn페라이트-탄화규소 플라즈마 코팅층(I)에 대한 시편제조시, 입자의 평균크기가 34[μ m]인 탄화규소 분말의 미 용착 손실이 많이 발생했기 때문에, 본 실험에서는 입자의 평균크기가 15[μ m]인 탄화규소 분말을 선정했다. 그리고 페라이트 분말의 평균입자 크기는 10[μ m]였다.

페라이트 분말과 탄화규소 분말을 표1에서와 같은 비율로 섞어서 충분히 혼합한 다음 가열하여 수분을 제거하였다. 그리고 #100체로 일부 남아있는 페라이트 미세 덩어리를 걸러 후 플라스틱 통에 넣어 밀봉했다. 이 밀봉된 통을 회전로에 넣어 8시간 동안 회전(360rpm)혼합했다.

재료정수 측정을 위한 용사용 기관으로는 레이더파 운패가 요구되는 비행물체의 동체재료인 Al2024 합금을 선정하였으며, 기관의 형상은 내경 7[mm], 내축직경 3.05[mm]의 동축관에 적합하도록 외경 6.99[mm], 내경 3.00[mm] 및 두께 10[mm]인 토로이드형으로 만들었다. 또한 전자파 흡수특성 측정용으로 직사각 도파관형 측정기구에 사용될 수 있도록 10.2×22.9×12.86[mm]³크기의 직사각형 기관도 만들었다.

그림1은 본 실험에서 이용한 플라즈마 용사시스템의 개략도이다. 본 연구에서는 플라즈마 방전제어장치(METCO 7MC-II), 분말공급장치(4MP), 용사총(9MB) 및 용사총 자동이동장치(4MC)를 사용했다. 페라이트-탄화규소 혼합분말을 그림1의 Dual powder feeder)넣는다. Plasma spray gun 앞면에 토로이드형 및 직사각형 기관을 Spray gun과 수직되게 위치시키고 용사시스템을 가동시켜서 기관표면에 피복층이 형성되도록 하였다. 이렇게해서 만들어진 토로이드형 및 직사각형 시편을 그림2와 3의(a)에 보여진 동축관 및 도파관속에 넣어서 그림2와 3의(b)에 보여진 것처럼 회로망 분석장치(HP8720B)에 설치하여 피복층 재료의 특성 및 흡수성질을 측정하였다.

Ni·Zn페라이트-탄화규소 플라즈마 코팅(I)^[3]에서 페라이트 분말 중량비 1에서 대한 탄화규소 분말 중량비 1.19, 1.56 및 2.27 중에서 1.56일때가 전자파 손실이 가장 많았고, 그 다음으로는 1.19였다. 전자파

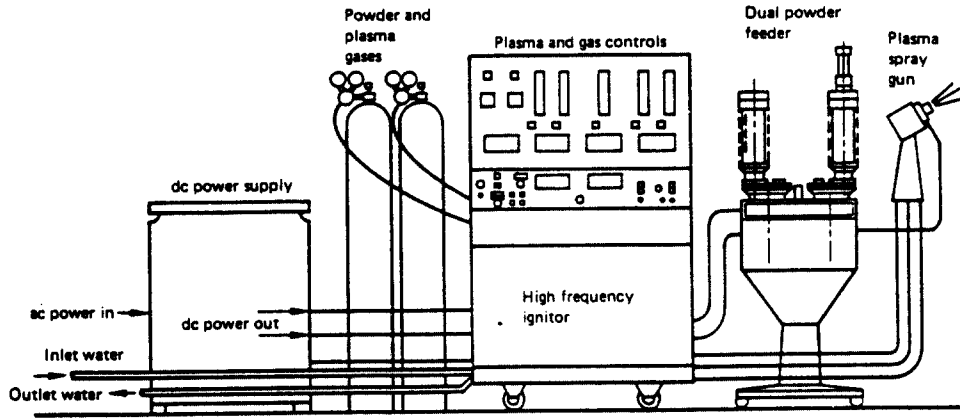


그림 1. 플라즈마 용사 시스템
Fig 1. Complete installation plasma spray system

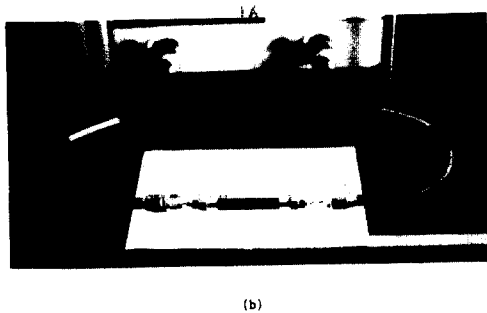
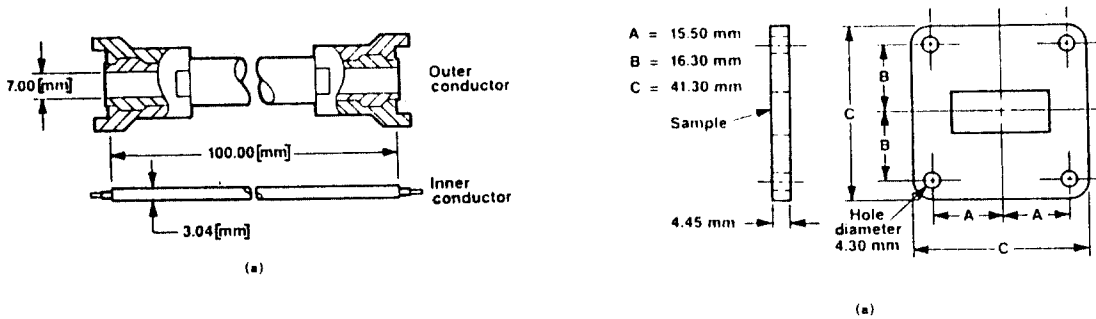


그림 2. 동축형 시편 측정기구
(a) 시편설치 기구의 제원
(b) 시편의 설치

Fig 2. Measurement apparatus for coaxial sample
(a) Coaxial sample holder
holder, (b) Measurement setup

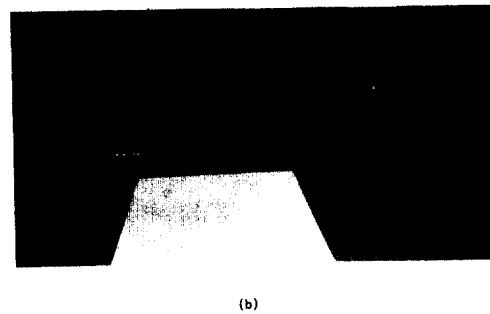


그림 3. 도파관형 시편 측정기구
(a) 시편설치 기구 제원
(b) 시편 설치

Fig 3. Measurement apparatus for waveguide sample
(a) Coaxial sample holder
(b) Measurement setup

손실이 가장 많이 생기는 최적 혼합비가 1.19와 1.56 사이에 있을 것으로 보고, 본 실험에서는 혼합물의 재료 구성비를 표1과 같이 결정했다.

표 1. 혼합물의 재료구성비

Table 1. Composition of composite specimens.

Specimens	Ferrite	Silicon-carbide
FFS-1	1	1.0
FFS-2	1	1.2
FFS-3	1	1.4
FFS-4	1	1.6

코팅시 용사변수는 Ni-Zn 페라이트-탄화규소 코팅층(I) 제작시의 용사변수들 중에서 Powder feed rate[Kg/h]를 70에서 50으로 Spray distance [mm]를 80에서 100으로 변경하여 실시 하였다. 이때 코팅층의 두께가 0.63[mm] 이상 성층되지 않았다. 최초 계획대로 용사거리 및 다른 용사변수를 조정하여 코팅층의 두께를 1[mm]까지 형성하려고 시도했으나, 이 경우 코팅층의 조직이 구조면에서 불균일하게 형성되어 전기적 특성에 영향을 줄 우려가 있기 때문에 더 이상 시편제조를 시도하지 않았다.

2. 측 정

어떤 재료가 전자파 흡수체용 재료로서 사용될 수 있는 것인지, 또는 제작기법에 따라 재료의 전자파 흡수특성이 어떻게 변화하는 것인지를 알기 위해서는 재료의 전기적 특성을 나타내는 재료정수, 즉 복소 비투자율($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$)과 복소 비유전율($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)을 알 필요가 있다. 이러한 재료정수의 측정은 광대역 회로망 분석장치(HP8720B)에 의해서 이루어 졌다. 측정방법은 동축선법 중에서 두께 변화법^[3]이 사용되었다.

마이크로파 감쇄성질은 TEM전파 모드로 동축선로에서 측정하였다. 시편의 뒷면은 단락회로로 종단시켰으며, 반사전력에 대한 스칼라 값은 광대역 회로망 분석장치인 HP8720B 모델에 의해서 얻어졌다. 전자파가 입사될 시편은 코팅층 표면이 평탄하고 두께가 일정하게 할 목적으로 사포(#800)를 사용하여 0.67[mm]의 흡수층 두께를 0.6[mm]까지 연마했고 두께 0.6[mm]에서 0.1[mm] 간격으로 갈아내면서 각 시편에 대한 두께별 전자파 흡수특성을 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 재료정수 스펙트럼

플라즈마 용사 코팅방법으로 제작된 페라이트-탄화규소 복합물에 대하여 주파수 변화에 따른 재료정수를 측정된 결과는 그림4-7과 같았다. 그림 4와 5는 페라이트와 탄화규소 분말의 혼합비율별 비투자율의 실수성분(μ') 및 허수성분(μ'')에 대한 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이 그림에서 페라이트 분말 중량비 1에 대하여, 탄화규소 분말 중량비가 1.0에서 부터 1.6까지 변화함에 따라 μ' 및 μ'' 의 크기가 감소하는 현상을 보여주고 있다. 그리고 중량비가 증가함에 따라 μ' 의 V의(notch point)는 낮은 주파수 쪽으로 이동하지만 μ'' 의 V점은 높은 주파수 쪽으로 이동하는 현상을 나타내고 있다. 그러나, \wedge 점(summit point)은 다소 불규칙하게 나타나는데 이는 제작상의 결함으로 판단된다. 위와 같은 결과는 전자파 에너지의 최대 흡수가 일어나는 주파수를 분말의 혼합비율로 어느 정도 제어할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6과 7은 페라이트와 탄화규소 분말의 혼합비율별 비유전율의 실수성분(ϵ') 및 허수성분(ϵ'')에 대한 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이 그림에서는 페라이트 분말 중량비 1에 대하여 탄화규소 분말 중량비가 1.0에서 부터 1.4까지 변할때는 ϵ' 및 ϵ'' 의 크기가 증가하다는 1.6이 되면서 다시 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이런 결과가 전자파 흡수체 설계시 고려해야 할 사항이라고 판단된다. 그러나, 중량비가 증가함에 따라서 ϵ' 의 V점 및 \wedge 점은 낮은 주파수 쪽으로 이동하고, ϵ'' 의 \wedge 점 역시 낮은 주파수 쪽으로 이동하는 현상을 보여주고 있어서, 분말의 혼합비율에 의한 페라이트-탄화규소 복합물의 비유전율 제어가 가능함을 알 수 있다.

그림 8은 페라이트-탄화규소 복합물 FFS-3에 대한 재료정수($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$, $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이 그림에서 ϵ_r' 는 ϵ_r' 값이 14.9인 8.8 [GHz]에서 부터 ϵ_r' 값이 3.5인 11[GHz]까지 하향 맥동 곡선을 그린다. 이곡선의 중간 부분인 9.8 [GHz]에서 ϵ_r'' 의 \wedge 점($\epsilon_r'' = 18.5$)이 존재함을 알 수 있다. 이 부분에 전자파 에너지의 공명흡수 현상이 존재한다고 볼 수 있다. 반면에 μ_r' 는 μ_r' 값이 10.7인 9.7[GHz]에서부터 μ_r' 값이 17.5인 10.3[GHz]까지 상향곡선을 그린다. 이 곡선의 중간 부분인 10.1 [GHz]에 μ_r'' 의 \wedge 점($\epsilon_r'' = 9.7$)이 존재함을 볼 수 있다^{[12],[13]}. 이 부분에 전자파 에너지에 대한 자기공명 흡수 현상이 나타난다. 따라서 전자파 에너지에 대한

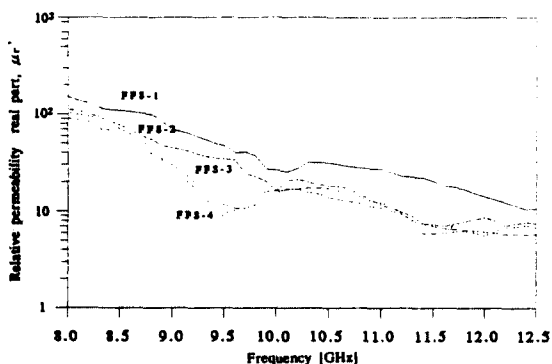


그림 4. 페라이트-탄화규소 복합물의 비투자율 실수성분(μ_r') 스펙트럼

Fig. 4. Material constant (μ_r') vs frequency spectra of the ferrite-SiC composites

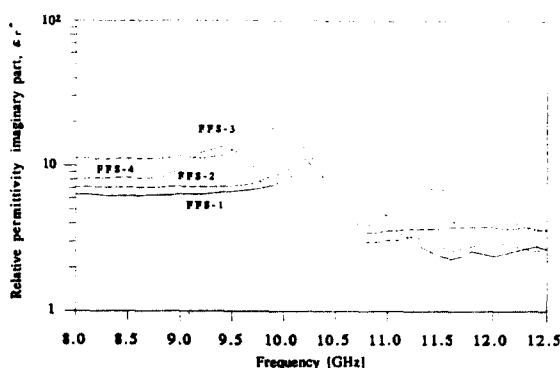


그림 7. 페라이트-탄화규소 복합물의 비투자율 허수성분(μ_r'') 스펙트럼

Fig. 7. Material constant (μ_r'') vs frequency spectra of the ferrite-SiC composites

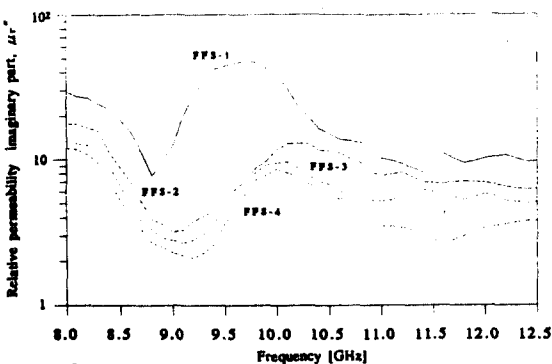


그림 5. 페라이트-탄화규소 복합물의 비투자율 허수성분(μ_r'') 스펙트럼

Fig. 5. Material constant (μ_r'') vs frequency spectra of the ferrite-SiC composites

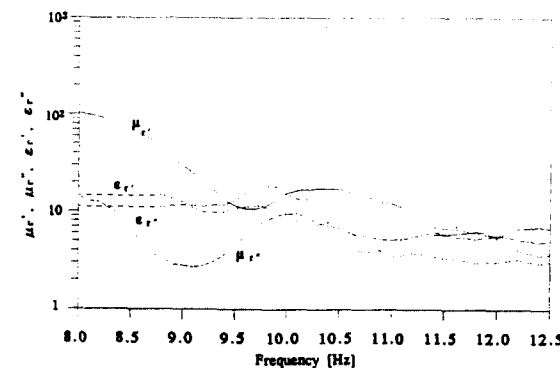


그림 8. 페라이트-탄화규소 복합물(FFS-3)의 재료정수($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$, $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) 스펙트럼

Fig. 8. Material constants ($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$, $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$) vs frequency spectra of the ferrite-SiC composite(FFS-3)

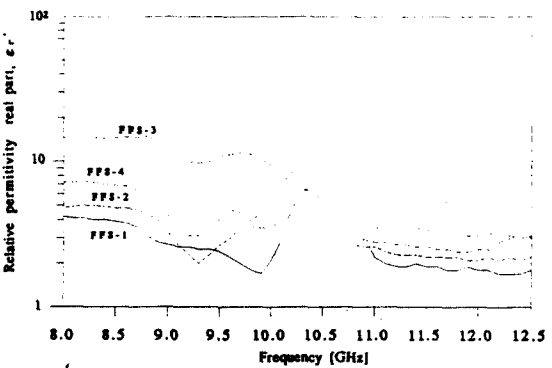


그림 6. 페라이트-탄화규소 복합물의 비투자율 실수성분(ϵ_r') 스펙트럼

Fig. 6. Material constant (ϵ_r') vs frequency of the ferrite-SiC composites

최대 흡수주파수는 9.8[GHz]와 10.1[GHz] 사이에 존재할 것으로 추측된다.

2. 마이크로파 흡수특성

금속판의 앞면에 두께가 d인 균일한 전자파 흡수체료를 붙인 단층구조의 전자파흡수체를 고려한다. 이 흡수체의 앞면에 전자파가 수직 입사한 경우, 흡수층 표면에서의 정규화 입력 임피던스 Z_{in} 는

$$Z_{in} = (\mu_r/\epsilon_r)^{1/2} \tanh[j(2\pi d/\lambda) (\mu_r \cdot \epsilon_r)^{1/2}] \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 λ 는 자유공간에서의 전자

과 파장이고, d 는 흡수층의 두께이다. 반사손실은 다음과 같이

$$\text{reflectionloss[dB]} = 20\log |(Z_{in}-1)/(Z_{in}+1)| \quad (2)$$

로 나타낸다.

그림9는 도파관 전송선로에서 측정된 페라이트-탄화규소 복합물의 중량비에 따른 전자파 반사 손실특성을 보여주고 있다. 이 그림에서 반사손실이 페라이트(F)와 탄화규소(S)의 중량비에 크게 의존하고 있음을 명백히 보여주고 있다.

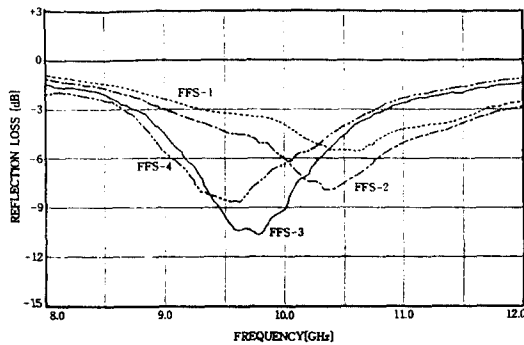


그림 9. 최대 감쇄가 나타나는 페라이트-탄화규소 복합물 (두께 : 0.50[mm])들의 반사특성

Fig 9. Reflection characteristics of the ferrite-SiC composites(thickness : 0.5[mm]) with maximum attenuation

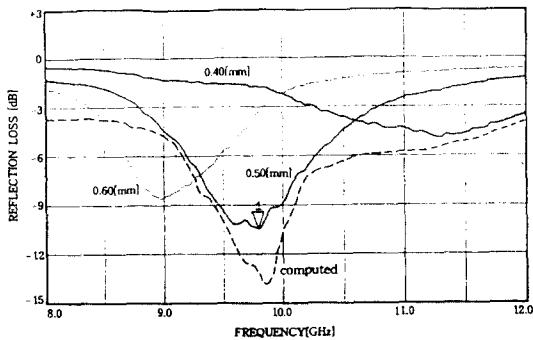


그림 10. 페라이트-탄화규소 복합물(FFS-3)의 두께 변화에 따른 반사특성

Fig 10. Dependence of reflection characteristics on thickness, for ferrite SiC composite(FFS-3)

그림 10은 FFS-3에 대해 두께변화에 따른 반사 손실특성을 나타낸 것이다. 반사손실 특성은 두께에 민감하게 의존됨을 알 수 있다. 이 그림에서 최대 흡수가 일어나는 두께는 0.5[mm]이고, 이 경우 중심주파수는 9.8[GHz]이며, 이에서의 반사손실 특성은 -10.4[dB]였다. 그리고 반사손실특성이 -10[dB] 이하가 되는 대역폭은 280[MHz]이다. 이는 중심주파수 9.8[GHz]에 대한 비 대역폭 2.8[%]에 해당한다.

식(1)과 (2)에서 나타낸 바와 같이, 흡수체의 반사 정도는 6개 특성 파라메타 즉, 파장(λ), 흡수체의 두께(d), 그리고 비투자율(μ_r) 및 비유전율(ϵ_r)의 실수와 허수에 의해서 결정된다. 그림 8에 나타낸 결과들에 의해서 계산된 반사손실 특성이 그림9의 점선으로 표시되었다. 이 값들은 도파관 전송선로로 측정된 결과와 큰차이 없이 어느정도 일치하고 있다.

반사손실 특성이 중심주파수에 -20[dB] 이하이고, -20[dB] 이하가 되는 대역폭이 2[GHz] 이상이 되도록 하기 위해서는 광대역 임피던스 정합이 이루어져야 한다. 그림 8의 최대 흡수주파수 9.9[GHz]에서의 $\mu_r = 13.2 - j9.2$, $\epsilon_r = 10 - j18.2$ 는 식(1)의 정합 조건을 만족시키는데 비흡수이다. 따라서 비투자율의 변화없이 흡수체의 두께(d) 0.5[mm]에서 9.9[GHz]가 정합주파수가 되기 위해서는 $\epsilon_r = 40 - j18.2$ 의 값을 지녀야 한다. 즉 ϵ_r '의 값이 10.2에서 40까지 상승시킬 수 있고 내구성 및 내열성이 좋은 새로운 유전 재료를 선정해야 할것으로 판단된다. 그 다음으로는 전자파 흡수체 전용 신소재 페라이트를 연구하여 페라이트-탄화규소 복합체의 $\mu_r = 3.5 - j9.5$ 와 $\epsilon_r = 10 - j3.5$ 가 되도록 하는 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 페라이트 분말과의 혼합 유전재료의 흑색 탄화규소 분말을 사용하여 플라즈마 용사 방식으로 분말 혼합비에 따른 페라이트-탄화규소층을 형성하고, 이들에 대한 재료정수의 제어범위와 전자파 흡수특성을 조사했다.

페라이트 분말 중량비 1에 대하여 탄화규소 분말 중량비를 1.0에서 부터 1.6까지 증가시키면 μ_r ' 및 μ_r'' 의 크기는 감소하지만, ϵ_r ' 및 ϵ_r'' 의 경우 중량비가 1.0에서 1.4까지는 비유전율의 크기가 증가하다가 1.6이 되면 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에 혼합비율에 어느정도 비례해서 \wedge 점 및 \vee 점은 이동하고 있

어서 혼합비율이 재료정수를 제어하고 있음을 알 수 있었다.

FFS-3(페라이트:탄화규소=1:1.4)의 반사손실 특성이 -10.4[dB]로 가장 양호 했으며, 이때 중심 주파수는 9.8[GHz]였고, -10.4[dB] 이하가 되는 대역폭은 280[MHz]였다. 그리고, 최대 흡수두께는 0.5[mm]였다.

반사손실 특성이 -20[dB] 이하이고, -20[dB] 이하가 되는 대역폭이 2[GHz] 이상이 되도록 하기 위해서는 광대역 임피던스 정합이 이루어져야 한다. 따라서 전자파 흡수전용 페라이트 소재의 연구가 있어야 될것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Roser A. Stonier, "Stealth aircraft and Technology form World War II to the Gulf," *Sample Journal*, vol.27, no.4, pp.9-17, July/Aug. 1991.
2. 김희재, 신동찬, 김용운, 송상현, "플라즈마 용사 방식에 의해 형성된 카보런덤-페라이트 표면층의 전자파 흡수특성에 관한 연구(I)," 육군사관학교 논문집, 제39집, pp.181-206, 1990. 12.
3. 신동찬, 손현, "플라즈마 용사방식에 의해 형성된 탄화규소-페라이트 표면층의 마이크로 흡수특성(I)," 한국통신학회 논문집, 제17권 제6호, 6.

4. 신동찬, "전자파 흡수체 고무-페라이트에의 탄화규소 첨가효과," 육군 제3사관학교 논문집, 제30권, pp.539-543.1990.5.
5. 橋本 修, 原義弘, "炭化イット素纖維FRPの電波吸收特性について,"*信學論 B-II*, vol. J.73-B-II, no.9, pp.480-482, 1990.9.
6. 橋本 修, 院義弘, "2層構造 炭化イット素纖維FRPの電波吸收特性について,"*信學論B-II*, vol.J74-B-II, no.7, pp.421-423, 1991.7.
7. I.W.S.Co., "Thermal spray coatings," METCO, 1990.10.
8. AWS Committee, "Thermal spraying practice, theory, and application." *AWS, INC.*, 1985.
9. 김희재, "열 용사코팅과 신소재 산업에의 응용," 신금속지, pp.2-12, 1989.7.
10. 김희재, "Wear Behavior of Plasma-Sprayed Alumina-Titania Coatings," *대한금속학회지*, 제27권, 제10호, pp.881-887, 1989.10.
11. 신동찬, "플라즈마 용사방식으로 제조한 페라이트-탄화규소 막의 마이크로 흡수특성," 경북대학교 박사학위 논문, 1991.6.
12. L. Solymar and D. Walsh, "Lectures on the electrical properties of materials," *Oxford Science*, pp.262-328, 1986.
13. Donald G. Fink and Alexander A. Mckenzie, "Engineers' Handbook," *M-H*, pp.6-146, 1975.

申 東 燦(Dong Chan Shin) 正會員
 1948年 10月 26日生
 1973年 3月 : 육군사관학교 전기공학과 卒業(理學士)
 1981年 2月 : 延世大學校 大學院 電子工學科 卒業(工學碩士)
 1989年 2月 : 慶北大學校 大學院 電子工學科 博士課程修了

1982年 10月 : K.M. -3rd.A 電子工學科 副教授



孫 鉉(Hyon Son) 正會員
 1935年 5月 27日生
 1960年 8月 : 延世大學校 電氣科 卒業(工學士)
 1974年 8月 : 漢陽大學校 大學院 卒業(工學碩士)
 1984年 8月 : 慶熙大學校 大學院 卒業(工學博士)
 1960年 9月 ~ 1977年 4月 : 駐韓美陸軍 戰略 情報通信團 勤務
 1977年 4月 ~ 現在 : 慶北大學校 電子科 教授
 ※주관심분야 : 마이크로파공학, 위성통신, 이동통신