Journal of the industrial Technology Research Institute,
Korea Maritime University, Vol. 10, 1992.

전파흡수체의 전기적 특성측정에 관한 연구

김동일* · 안영섭** · 정중식* · 백명숙* · 정세모*

A Study on Measuring the Electrical Characteristics of Microwave Absorbers

Kim Dong - Il, Ahn Young - Sup, Jeong Jung - Sik, Paek Myung - Sook, Chung Se - Mo

요 약 문

사회구조의 다양화, 고도화에 수반하여 전파의 이용도가 높아지고, 또한 각종 전자기기의 보급이 확대되게 되었다. 이에 따라 필수적으로 수반되는 전자파 환경의 폭주는 현대사회의 심각한 공해로 등장하기에 이르고 있다. EMC관련으로 불요전파를 내지않거나 또는 반사하지 않도록하는 재료는 주로 양도체의 금속 또는 저저항체, 손실재료이다.

이와 같은 전파흡수체의 전파흡수능 측정방법은 기본적으로 다양한 마이크로파 측정법이 이용될 수 있지만, 레이다용 전파흡수체의 경우, 전파의 주파수가 높기 때문에 파장이 짧아서 측정오차가 큰 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 전파흡수체의 전파흡수능을 실험실적으로 간단히 측정할 수 있게 하기 위한 20mmϕ 동축관 샘플홀더 및 Type - N connector로부터 20mmϕ 동축관으로의 변환 Adaptor를 제작하여 전파흡수체의 설계 및 특성(전파흡수능) 평가에 사용할 수 있게 하였다. 또 구형도파관을 이용한 재료정수 측정법을 채용하여 시료의 형상 등의 영향을 적게 받는 실측방법에 관하여 검토하였다. 나아가서, 구형도파관을 이용한 재료정수 측정치를 반사감쇠량으로 환산한 전파흡수능과 동축관으로 측정한 전파흡수능의 주파수 특성을 구하여 거의 일치함을 밝히고 있다.

† 이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성에 의하여 연구되었음.

* 한국해양대학교

** 목포해양전문대학

Ⅱ. 전파흡수특성의 측정기법 비교

Ⅱ-1. 전파흡수능의 측정법

1) 입력임피던스 또는 반사계수 측정법

동축관 등과 같은 샘플홀더에 시료를 장착하고 Network Analyzer 또는 Vector 임피던스측정기 등으로 임피던스 또는 반사계수 S_{11}을 측정하면, 반사계수 Γ와 입력임피던스 Z_{in}의 관계는 다음 식(1)과 같다.

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \tag{1}$$

따라서, 반사감쇠량 α는

$$\alpha = -20\log|S_{11}| \ [dB] \tag{2}$$

으로 구해진다.

2) 정재파비 측정법

전파흡수체의 전방에서 전파를 입사시키고, 공간 또는 도파관내에 형성된 정재파비를 ρ라하면 반사감쇠량 α는 식(3) 또는 식(4)에 의하여 구해진다.

즉, 공간에 놓인 전파흡수체의 전방에서 전파를 입사시키고, 전방의 공간에 형성된 정재파를 적절한 안테나로 측정하면 반사감쇠량 α는

$$\alpha = 20\log\frac{\rho+1}{\rho-1}[dB] \tag{3}$$

으로 구해진다.

한편, 도파관을 이용한 정재파측정기의 후단에 전파흡수체 및 단락판을 장착시킨 후 도파관 관내의 정재파비를 측정하면 감쇠량 는 다음 식(4)에 의하여 구해진다.

$$\alpha = 20\log\frac{1}{|\Gamma|} = 20\log\frac{\rho+1}{\rho-1}[dB] \tag{4}$$

단, $$\rho = \frac{E_M}{E_m} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

$$|\Gamma| = \frac{E_r}{E_i} \quad (\text{반사계수})$$

E_M, E_m : 각각 정재파의 극대 · 극소점의 전계의 세기[V/m]

E_i, E_r : 각각 입사파 · 반사파의 전계의 세기[V/m]

Collection

3) 반사전력측정법

지향성을 가지는 송수신안테나를 그림1과 같이 적절한 각도로 배치하고 P1 및 P2를 측정하면, 반사감쇠량 α는 다음 식으로 구해진다.

$$\alpha = 10\log\frac{p_1}{p_2} \ [dB] \tag{5}$$

단, P_1 : 흡수체가 없이 금속판만 있는 경우의 수신기 수신전력

P_2 : 흡수체를 장착한 경우의 수신기 수신전력

본 논문에서는 제I장에서 설명한 바와 같이 비교적 측정오차가 작으면서도 실험적인 방법으로 간단히 전파흡수능을 측정할 수 있게 하기 위하여 전파흡수체의 배면단락시의 흡수능측정 및 설계를 위한 입력임피던스의 측정시스템을 그림2와 같이 구성하였으며, 이 측정을 위하여 마이크로파전송선로의 동축선 이론[10]에 바탕을 두고, 제작한 20.05 mmϕ 50Ω계 동축관 샘플 홀더 및 50Ω계 Type－N connector로 부터 20.05mmϕ 동축관 샘플홀더로의 변환 adaptor의 도면은 각각 그림3(a) 및 그림3(b)와 같다.

따라서, 시편을 제작한 후 그림2 또는 그림3(a)의 동축관 샘플홀더의 배면 Short Plate에 시편이 밀착되도록 삽입하여 반사감쇠량(반사계수) 또는 입력임피던스를 측정하면, 식(1) 및 식(2)에 의하여 전파흡수능이 구해진다.

Ⅱ－2. 재료정수의 측정법

재료정수의 측정원리는 크게 다음의 4가지로 분류할 수 있으며[11-14], 각 방법의 특징을 간단히 기술

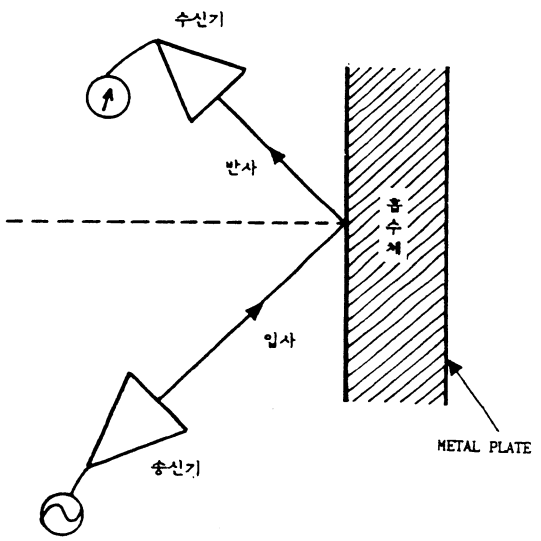

Fig.1 Reflected Power Method.

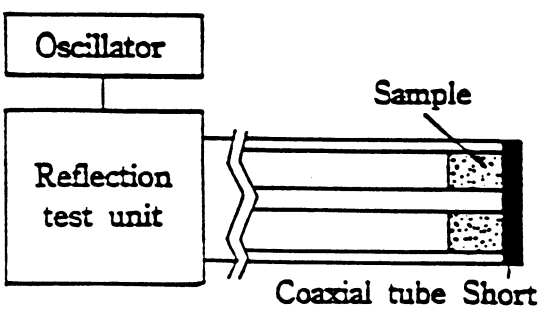

Fig.2 Measurement Apparatus of Microwave Absorbing Characteristics

dCollection

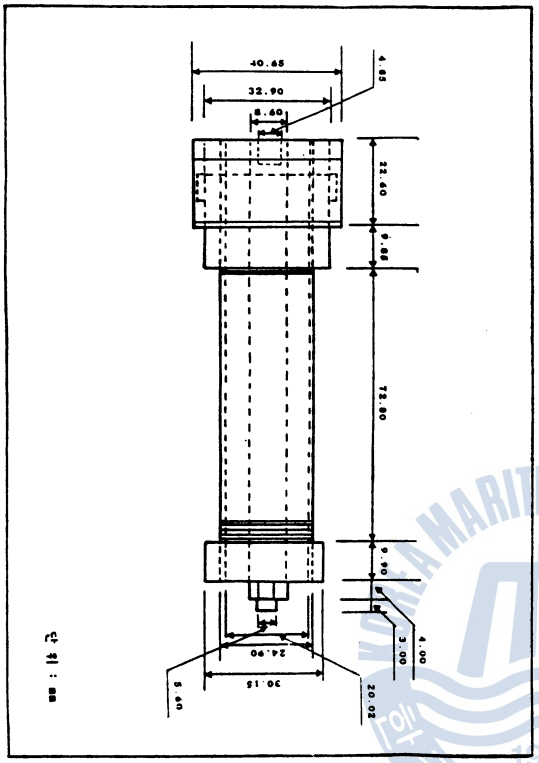

Fig.3(a) Drawing of Fabricated Coaxial Sample Holder with 20mm Diameter.

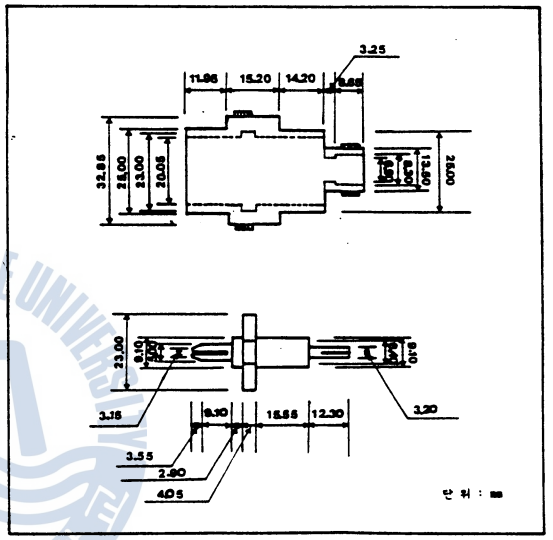

Fig.3(b) Drawing of Fabricated Adaptor from Type – N Connector – to – 20.05mm Coaxial Tube.

하면 다음과 같다.

1) 정재파법(또는 반사법)

동축관 또는 도파관의 일부에 시료를 삽입하고, 시료로부터의 반사에 의한 정재파 또는 입력임피던스를 측정하여, 그 결과로부터 재료정수를 구한다. 이 방법은 비교적 넓은 범위의 ε, tan δ를 가지는 재료의 측정에 이용된다.

2) 공진법

공동공진기의 일부에 시료를 삽입하여, 공진조건의 변화 및 Q의 저하정도로부터 재료정수를 산출하는 방법으로, 주로 손실이 적은 재료의 측정에 이용된다.

3) 섭동법

ferrite와 같은 특수한 재료에 대해서는, 공동공진기중에 놓인 작은 시료에 의한 공진조건의 변화로부터 섭동법으로 계산하여 재료정수를 구하는 방법이다.

dCollection

4) 투과반사법(2 - Port Method)

전송로의 중간에 샘플을 삽입하고, S_{11} 및 S_{21}을 측정하여 이를 이용하여 재료정수를 구하는 방법이다. 여기서는, 전파흡수체의 재료정수측정법으로 투과반사법(2 - Port Method)을 사용하였으며, 그 측정기법을 요약하면 다음과 같다.

분포정수회로를 기본으로 하여 전송선로에 시료를 삽입하여 2 - PORT 전송선로에 대한 입사파와 반사파를 구하고, 그로부터 산란행렬을 구하여 투과계수와 반사계수를 구한 다음 재료정수 즉 복소유전율과 복소투자율을 계산한다[12].

시료가 삽입된 전송선로에 대한 전압.전류방정식을 세우고, 경계조건을 만족시키도록 S_{11}과 S_{21}에 대하여 정리하면 식(6) 및 (7)과 같이 된다.

$$S_{11}|\omega| = \frac{(1-\Gamma^2)T}{1-T^2\Gamma^2} \tag{6}$$

$$S_{21}|\omega| = \frac{(1-\Gamma^2)T}{1-T^2\Gamma^2} \tag{7}$$

식(6)과 식(7)을 Γ에 관해서 정리하면

$$\Gamma = \frac{T - S_{21} - S_{11}}{T(S_{11} + S_{21}) - 1} \tag{8}$$

또 T에 관해서 정리하면

$$T = \frac{\Gamma - (S_{11} + S_{21})}{\Gamma(S_{11} + S_{21}) - 1} \tag{9}$$

와 같이되고 식 (8)을 식(9)에 대입하면

$$S_{11}\Gamma^2 - (S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)\Gamma + S_{11} = 0 \tag{10}$$

식(10)은 2차 방정식이므로 근의 공식에 의해

$$\Gamma = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1) \pm \sqrt{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1) - 4S_{11}^2}}{2S_{11}}$$

$$= \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \pm \sqrt{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1) / 2S_{11}) - 1} \tag{11}$$

여기서, $K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}}$ 이라고 하면

$$\Gamma = K \pm \sqrt{(K-1)} \tag{12}$$

dCollection

와 같은 결과식을 얻을 수 있다.

식(9)과 식(12)에서 알수 있듯이 투과계수 T와 반사계수 는 S-PARAMETER S_{11}과 S_{21}으로 나타낼 수가 있다.

여기서, Γ는 시료의 길이가 무한대 (즉 $l=\infty$)에서의 반사계수, T는 한정된 길이의 시료($l=d$)에서의 투과계수이며, 각각 다음과 같이 나타낸다.

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} - 1}{\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} + 1} \tag{13}$$

$$T = \exp(-j\omega\sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot d) = \exp[-j(\omega / c)\sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r} \cdot d] \tag{14}$$

식 (13),(14)를 각각 ε_r과 μ_r에 관해서 정리를 하면 식(15) 및 (16)과 같이 된다.

$$\varepsilon_r = \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\lambda_c^2}\right)\lambda_0^2}{\mu_r} \tag{15}$$

$$\mu_r = \frac{1+\Gamma}{\Lambda(1-\Gamma)\sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \tag{16}$$

단, λ_o : 자유공간파장, λ_c : 도파관 차단파장

$$\frac{1}{\Lambda^2} = -\left[\frac{1}{2\pi d}\ln\left(\frac{1}{T}\right)\right]^2$$

결론적으로 식 (9), (12)에서 알 수 있듯이 S_{11}과 S_{21}의 S-Parameter만을 측정하면 T와 Γ는 계산할 수 있으며, 식(13), (14)를 이용해서 복소유전율($\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$)과 복소투자율($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$)을 각각 식(15)과 식(16)으로써 구할 수 있다.

Ⅲ. 전파흡수특성의 실측 및 검토

Ⅲ-1. 전파흡수능의 측정

가. 20.05mmϕ Coaxial Tube에 의한 측정

그림3과 같이 설계한 샘플홀더 및 50Ω계 Type-N connector-to-20.05mmϕ Coaxial Tube로의 변환 adaptor(ADPT)의 특성을 평가하기 위하여, 우선 adaptor를 샘플홀더에 연결한 상태에서 TIME DOMAIN에서의 반사특성을 측정하였다. Adaptor와 샘플홀더를 연결한 전체의 길이는 13.92 Cm이다.

dCollection

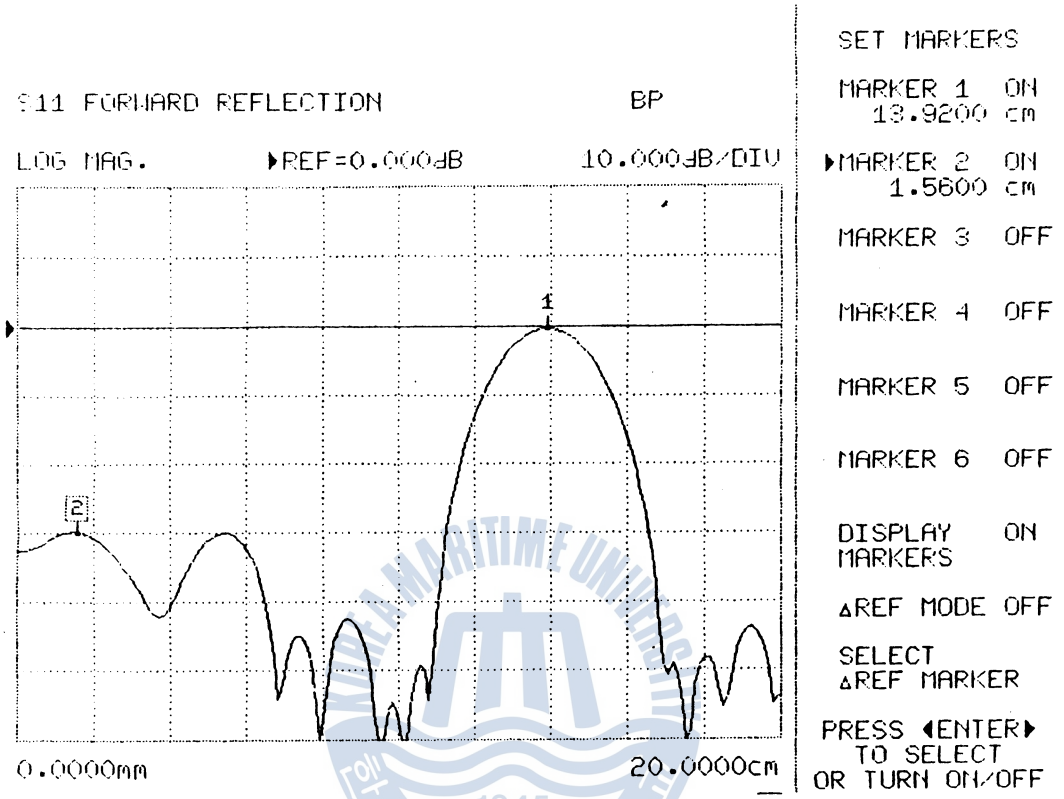

Fig.4 Reflection Characteristics of Sample Holder Connected with ADPTin Time Domain (Sweep Frequency;1 – 11GHz)

그림4는 제작한 adaptor와 종단단락형 샘플홀더를 연결한 경우의 TIME DOMAIN에서의 반사특성을 나타내며, adaptor부의 정합도가 –30dB이하이고 단락판의 단락상태가 거의 완벽하여 양호한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림5는 제작한 adaptor와 샘플홀더를 연결시키고 reference plane을 종단면까지 이동시킨 경우의 입력임피던스를 Smith Chart상에서 측정한 것이며, 1 – 11GHz의 넓은 주파수범위에 걸쳐 규격화 입력임피던스가 거의 0을 유지하고 있음을 알 수 있다.

이상의 평가실험으로 부터, 본 연구에서 제작한 종단단락형 동축관 샘플홀더 및 50Ω계 Type – N connector – to – 20.05mmϕ Coaxial tube로의 변환 adaptor는 비교적 잘 설계 · 제작되 었음을 확인하였다.

그림6은 실험용으로 제작된 rubber ferrite 전파흡수체 시편(샘플 : A – 1, 두께 : 2.8mm을 설계.제작한 샘플홀더의 단락판에 밀착되도록 삽입시키고, Type – N connector – to – 20.05mm Coaxial Tube로의 변환 adaptor에 연결한 후, 회로망분석기(Wiltron 360)와 연결된 S – parameter test set의 Port – 1에 연결하여 전파흡수능을 측정한 결과이다.

나아가서, 본 연구에서 설계.제작된 샘플홀더에 의한 전파흡수능의 측정결과와 7mAir Line 및

Collection

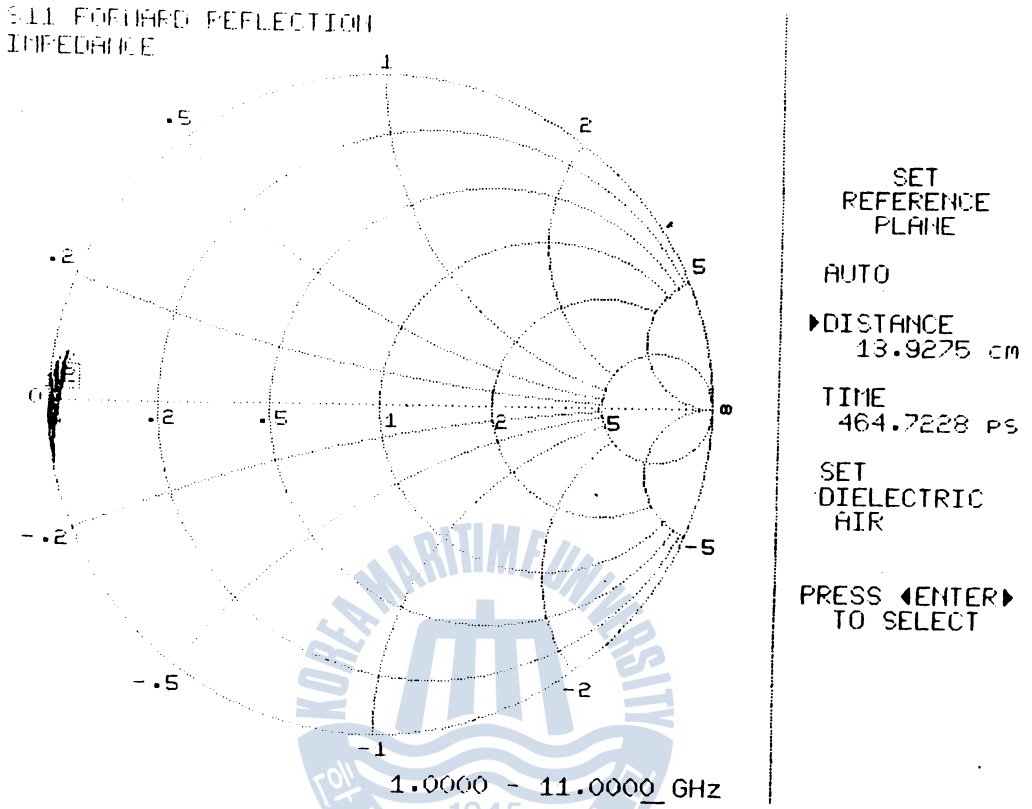

Fig.5 Input Impedance on Smith Chart to the Sample Holder Connected with the ADPT When the Reference Plane is Shifted to the Shorted Plane.

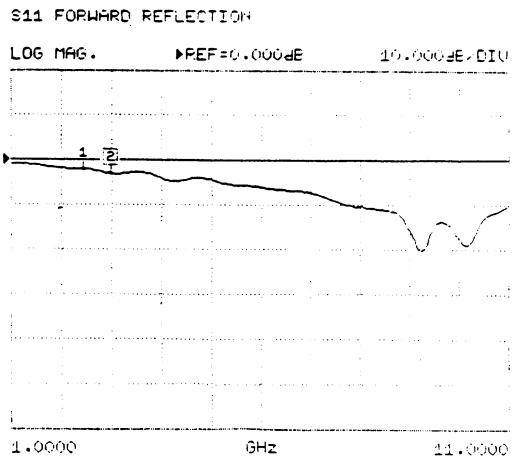

Fig.6 Frequency Characteristics of Microwave Absorber Sample(Sample No. A – 1) Measured by the Manufactured Sample Holder and ADPT

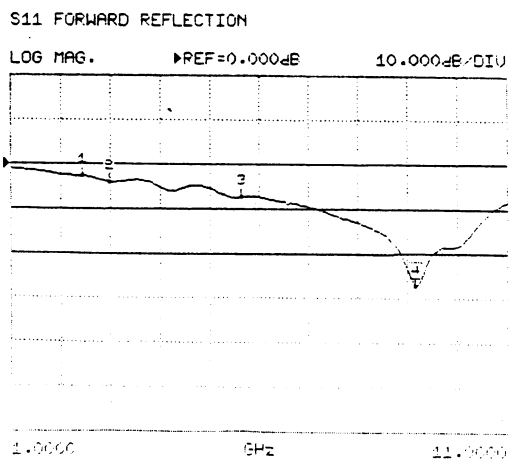

Fig.7 Frequency Characteristics of Microwave Absorber Sample (Sample No. C – 1) Measured by the Manufactured Sample Holder and ADPT. 3.

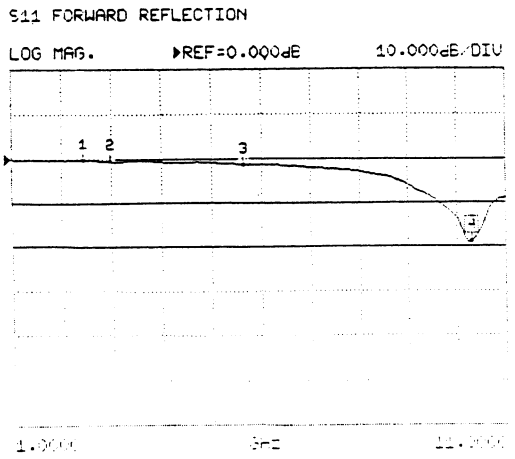

Fig.8 Frequency Characteristics of Microwave Absorber Sample (Sample No. C－2) Measured by the Manufactured Sample Holder and ADPT. 3.

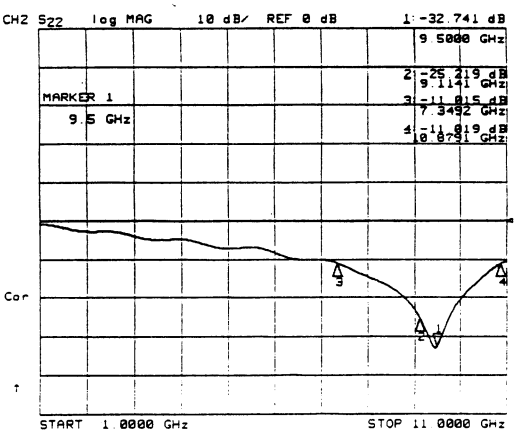

Fig.9 Frequency Characteristics of Microwave Absorber Sample (Sample No. C－1) Measured by Use of 7mm Air Line.

Table 1. Samples of Microwave Absorber by Rubber Ferrite Used for the Comparative Measurements

Sample No.	Thickness
C－1	3.081 mm (Partly 3.079 mm)
C－2	1.276 mm

X－Band용 구형도파관에 의한 전파흡수능 측정결과를 각각 비교하기 위하여 비교측정을 행하였다. 비교측정에 사용한 전파흡수체 샘플은 표1과 같으며, 그 측정결과를 그림7 및 그림8에 나타낸다.

나. 7mmϕ Air Line에 의한 측정결과와의 비교

표1에 나타낸 전파흡수체샘플(C－1)의 전파흡수특성을 20.05mmϕ 동축관 샘플홀더를 이용하여 측정한 결과를 검증하기 위하여, 종단단락된 7mm Air Line을 이용하여 측정한 결과와 비교·검토하였다. 동일한 두께의 전파흡수체 샘플(C－1)을 종단단락된 7mm Air Line에 삽입하고 전파흡수능을 측정한 결과는 그림9와 같으며, 이것은 그림7에 나타낸 20.05mmϕ 동축관법에 의한 측정치와 잘 일치하고 있어서,본 연구에서 설계.제작한 20.05mmϕ 동축관에 의한 전파흡수능측정법의 간편성과 정확성을 명백히 해주고 있다.

다. 구형도파관에 의한 측정결과와의 비교

구형도파관(Rectangular Waveguide)은 기본적으로 TE모오드의 전파를 전송하는 도파로이므로 평면파와는 상당한 차이가 있지만, 참고를 위하여 표1의 전파흡수체 샘플 C－1 및 C－2의 전파흡수능을 종단단락된 X－Band용 구형도파관에 장착하여 전파흡수능을 측정한 결과를 그림 10 및 그림 11에 각각 나타낸다. 그림 10 및 그림 11에서 보는 바와 같이 X－Band용 구형도파관의 차단주파수 대역을 제외한 8－11GHz대에서의 전파흡수 특성은 이 결과는 그림 7 및 그림 8의 20.05mmΦ 동축관 샘플홀더를 사용하여 측정한 결과와 비교하여 그 경향에 있어서는 유사하지만 다소 차이를 보이

dCollection

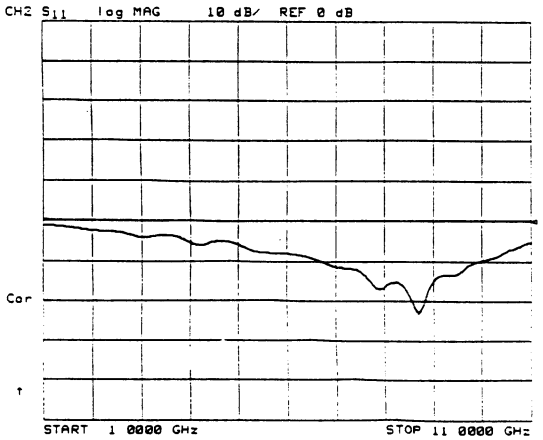

Fig.10 Frequency Characteristics of Sample C – 1 Measured by Use of Rectangular Waveguide for X – Band.

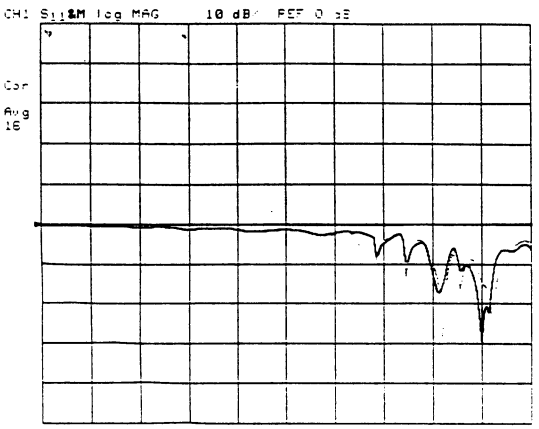

Fig.11 Frequency Characteristics of Sample C – 2 Measured by Use of Rectangular Waveguide for X – Band.

고 있으며, 이것은 전파모오드의 차이에 의한 당연한 결과로 분석된다.

Ⅲ – 2. 재료정수의 측정

앞에서 기술한 투과반사법(2 – Port Method)에 전송선로로서 X – Band용 구형도파관 샘플홀더를 사용하여 전파흡수체 샘플의 재료정수를 측정하고, 이를 이용하여 전파흡수능을 구한 결과에 대하여 검토한다. 전파흡수능(반사감쇠량) α는 다음 식(17)에 의하여 계산하였다.

$$\alpha\,(\mathrm{dB}) = 20\log|S_{11}| = 20\log\left|\frac{z-1}{z+1}\right| \tag{17}$$

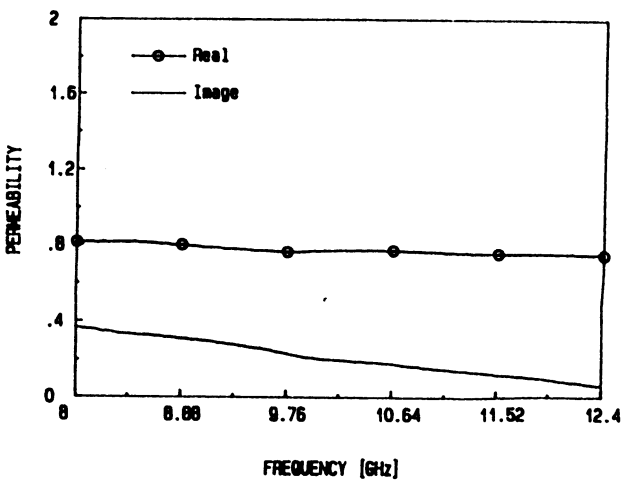

Fig.12(a) Measured Permeability of Sample C – 1.

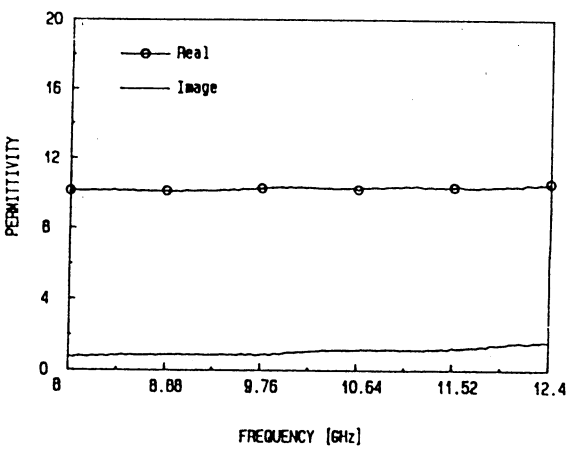

Fig.12(b) Measured Permittivity of Sample C – 1.

dCollection

단,

$$z=\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}\tanh\left(j\omega\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}\cdot d\right)$$

그림12(a) 및(b)는 표1의 Sample C－1(두께 ; 3.079mm)의 재료정수 측정결과를 나타낸다. 여기서, 복소 투자율 및 유전율의 부호는 음이다.

나아가서, 그림13은 그림12(a) 및 (b)에 나타낸 샘플C－1의 재료정수를 식(17)에 대입하고 두께 d를 2.5mm에서 3.0mm까지 0.1mm간격으로 변화시킨 경우의 전파흡수 주파수특성을 나타낸다.

그림13의 3.0mm곡선과 그림7에 나타낸 동축관 샘플홀더에 의한 측정결과는 직접비교가 어렵지만, 개략적으로 유사한 것으로 평가할 수 있다. 다만, 최대흡수 중심주파수 및 반사감쇠량에 약간의 차이가 있으나, 이것은 전파흡수체와 단락판 사이의 air gap 및 샘플의 fitting 상태 등에 기인하는 것으로 판단된다.

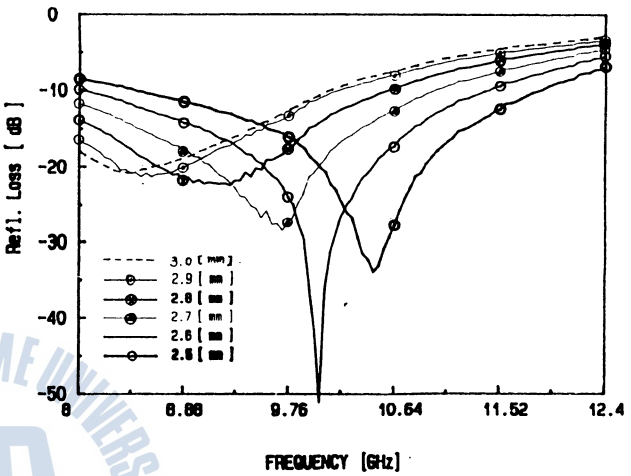

Fig. 13 Frequency Characteristics of Sample C－1 Calculated from the Measured Material Constants Which are Shown in Fig. 15(a) and (b)

Ⅳ. 결　　론

전파흡수체의 전파흡수능을 실험실적으로 간편하게 측정할 수 있게 하기 위한 20.05mmϕ 동축관 샘플홀더 및 Type－N connector로 부터 20.05mmϕ 동축관으로의 변환 Adaptor를 제작하여, 그 특성을 평가.검토하고 전파흡수체의 설계 및 전파흡수특성의 측정에 사용할 수 있게 하였다. 또한 본 연구에서 제작한 20.05mmϕ 동축관샘플홀더 및 변환 Adaptor를 이용하여, 실제의 전파흡수체 샘플의 전파흡수능을 측정하고, 구형도파관을 이용한 측정치, 7mmϕ Air Line에 의한 측정치 등과 비교.검토하였다.

나아가서, 구형도파관을 이용한 재료정수 측정치를 반사감쇠량으로 환산한 전파흡수능과 동축관으로 측정한 전파흡수능의 주파수 특성을 구하여 거의 일치함을 밝힘으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

Collection

사 사

본 연구를 수행함에 있어서, 연구비 일부를 지원하여 주신 한국학술진흥재단의 관계자 여러분과, 연구를 도와 준 한국해양대학교 이공대학 마이크로파연구실의 정 중식, 백명숙, 민 경식군 그리고 대륭정밀(주)의 김 동철군에게 감사드린다.

참고문헌

1) 김 동일, 정 세모 외, "카아본 - 페라이트 전파흡수체의 특성", 대한전자공학회 논문지, 제 26권 제 11호, pp. 92 - 97,(1989. 11)
2) 김 동일, 정 세모 외, "X - 밴드 레이다용 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 한국항해학회지, 제 14권 제 1호, pp. 9 - 19,(1990. 3)
3) 內藤喜之, ムイクロ波工學, 1986.
4) S. Li, C. Akyel, and R. G. Bosiso, "Precise Calculations and Measure - ments on the Complex Dielectric Constant of Lossy Materials Using TM010 Cavity Perturbation Techniques," IEEE Trans. on MTT, Vol. 29, No.10, pp. 1041 - 1048, Oct. 1981.
5) L. P. Lightart, "A Fast Computational Technique for Accurate Permit - tivity Determination Using Transmission Line Method," IEEE Trans. on MTT, Vol. 31, No. 3, pp. 249 - 254, Mar. 1983.
6) M. N. Afsar et. al., "The Measurement of the Properties of Materi - als," Proc. IEEE, Vol.74, No.1 , pp.183 - 199, Jan, 1986.
7) "Materials Measurement Package," Wiltron 기술자료.
8) "Microwave Material Measurements Seminar," 자료, The Johns Hopkin University, Oct. 1990.
9) "Measuring Methods for Properties of Gyromagnetic Materials intended for application at microwave frequencies," International Electro tech nical Commission IEC Standard, 1982.
10) 中島將光, ムイクロ波 工學, 森北出版(株) Jan.1979.
11) Y. Kobayashi, "The Measurement of Complex Dielectric Constant at Micro wave Frequencies," Written in 1982.
12) Product Note 8510 - 3, "Materials Measurement, Measuring the DielectricConstant of Solids with the HP 8510 Network Analyzer," Hewlett Packard.
13) Product Note, "Model 2300 - 11A, Materials Measurement Package," Wiltron.
14) Brian Sequeira, "Extracting and of Non - Metalic Solids (Powders, Liquids) from Single Port Vector Analyzer Measurements," Microwave Material Measurements Seminar, The John Hopkins University, Oct.4,1990.

dCollection