

X-Band Radar용 전 파 흡수체의 실장 실험

(Far Field Test on Electromagnetic Wave Absorber for X-Band Radar)

김 동 일*, 안 영 섭**, 정 세 모*

(Dong Il KIM, Young-Sup AHN, Se-Mo CHUNG)

* 정희원, 한국해양대학교

(Korea Maritime Univ.)

** 정희원, 목포해양대학

(Mokpo National Maritime University)

※ 이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제
학술연구비조성에 의하여 연구되었음.

요 약 문

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

따라서, 한국해양대학교 마이크로파연구실에서는 전파흡수체의 전파흡수능을 실험실적으로 간단히 측정할 수 있게 하기 위한 20mmφ동축관 샘플홀더 및 Type-N connector로부터 20mmφ동축관으로의 변환Adaptor를 제작하여 전파흡수체의 설계 및 특성(전파흡수능)평가에 사용할 수 있게 한 바 있으며, 또 구형도파관을 이용한 재료정수 측정법을 채용하여 시료의 형상등의 영향을 적게 받는 실측 방법에 관하여 검토하여 왔다.

본 논문에서는 그동안 실험실적으로 설계하여 온 X-Band Radar용 전파흡수체를 실용의 상태에 가까운 반사전력법에 의하여 그 성능을 예비평가하고, 실제의 target를 제작하여 X-Band Radar로 실장실험한 결과에 대하여 보고하고자 한다.

I. 서 론

전파흡수체는 입사한 전파를 흡수해서 열로 변환하여, 반사파가 생기지 않게하는 특수재료이다. 전파흡수체의 역사는 길어서, 전파가 사용되게 된 당시부터 무반사종단기 등에 사용되었으며, 그 후 공간을 전파하는 전파를 흡수하는 전파흡수체가 1960년대에 개발되어 전파암실(전파무향실)이나 안테나의 지향성 개선 등에 널리 사용되어 왔다.

그러나, 최근 환경전자파공학의 연구의 진전과 더불어 전자파환경의 엄격한 규제 때문에 전파흡수체의 응용범위도 점차 넓어지고 있다. 이로 인하여 전파흡수체의 용도도 다양해져서 계속용 전파암실을 비롯한 TV의 고스트(ghost)방지대책, 전자렌지(microwave oven)나 각종 전자기기로 부터 누설되는 전파를 억제하는 EMC / EMI대책 등에서의 응용이 활발히 연구되고 있다[1]. 이 경향은 세계적인 것이지만, TV나 RADAR의 고스트 대책용에 쓰이는 전파흡수체는 일본에서 독특한 것이 개발되어 왔다.

한편, 제 2차 세계대전중 잠수함이나 비행기가 레이다에 탐지되지 않도록 하기 위하여 전파흡수체의 제작이 시도된 이래, 최근에는 교량 또는 선박의 마스트등에 의한 레이다의 허상방지용 전파흡수체[2]-[4] 및 군사적으로는 레이다에 탐지되지 않는 전함 또는 항공기의 제작을 위한 전파흡수체의 개발이 미국을 비롯한 선진국을 중심으로 활발히 행해져 Gulf전쟁에서 Stealth전투기의 위력을 과시한 바 있다.

이와같은 전파흡수체의 발전과정과 수반하여 전파흡수체의 전파흡수능력 측정방법도 지속적으로 발전되어 오고 있으나, 레이다(C,X-Band)용 전파흡수체의 경우 사용주파수가 높기 때문에 전파의 파장이 짧아서 측정방법에 따른 측정오차가 크기 때문에 정밀도 및 신뢰성에 문제가 남아있다. 단순히 레이다용 전파흡수체(Radar Absorbing Material:RAM)의 품질관리 또는 생산개발을 위하여 전파흡수 능력만을 비파괴적으로 측정하고자 하는 경우에는 NRL Arch를 이용하는 반사전력법이 약 40년전에 개발되어 사용되고 있으나[5], 이것은 전파흡수능 이외에 재료정수등의 측정이 불가능 할 뿐아니라 비교적 큰 샘플(예를 들면 1ft x 1ft, 1ft x 3ft 또는 2ft x 2ft)을 필요로 하기 때문에 실험적으로는 부적당한 방법이다. 또한, 정재파법을 이용하는 경우에는 단일 주파수(point frequency)에서만 측정이 가능하기 때문에 측정에 요하는 노력과 시간이 많이 요구되는 번거로움이 있다.

한편 동축관(coaxial air line)을 이용하는 방법이 있으나 일반적으로 사용되고 있는 지그는 그 치수가 작기 때문에 유전을 또는 투자율이 큰 전파흡수체와 같은 시료의 경우에는 시료의 형상이나 air gap등에 기인하는 오차가 커서 실용적이 못된다.

나아가서, 재료정수의 측정법에 관해서는 크게 나누어, 공진법, 섭동법, 동축관 또는 구형도파관을 이용한 투과반사측정법(2-port method) 및 open-short법, $l-2l$ 법 등이 있다[5]-[11]. 이들중 공진법 및 섭동법은 하나의 공진기를 제작하였을때 한점의 주파수에서만 재료정수를 구할수 있으므로 실용적인 방법이 못되지만, 전자레인지(microwave oven)와 같이 특정주파수(2.45 GHz)의 전파만을 사용하는 경우에 ferrite와 같은 특수재료의 재료정수 측정에 이용된다.

또한, 투과반사 측정법은 비교적 넓은 범위의 주파수대에 걸친 재료정수 측정에 유리한 방법이지만, 사용되는 지그의 치수가 작거나 시료의 fitting이 어렵고, reference plane의 setting 방법등에 오차가 개입되기 쉬워서 측정오차에 큰 문제점이 남아 있다.

위의 각 측정방법이 가지고 있는 문제점을 해결하기 위하여 지속적인 연구가 수행되어오고 있으나, 아직까지 전파흡수능력 및 재료정수 측정방법에는 크고 작은 문제점이 그대로 남아 있다.

따라서, 본 발표자들은 1차적으로 N-Type Coaxial Line으로 부터 대형 Coaxial Tube (내경:약 9mm, 외경 20mm정도)로 변환 시키는 adaptor 및 같은 내외경을 가지는 동축관 sample holder를 설계·제작하여, 비교적 sample의 형상이나 fitting 상태에 영향을 적게 받는 동축관법에 의한 전파흡수능력 측정법을 개발함으로써 크기가 큰 시료를 준비하지않고서도 간단히 전파흡수능력을 측정할 수 있는 lab-scale의 측정법을 제시한 바 있다.[1]-[4]

본 연구에서는 그동안 실험실적으로 설계하여 온 X-band Radar용 전파흡수체를 실용의 상태에 가까운 반사전력법에 의하여 그 성능을 예비평가하고 실제의 target를 제작하여 실제의 X-Band Radar로 실장실험한 결과에 관하여 보고하고자 한다.

II. Radar용 전파흡수체의 설계 및 특성측정법

II-1 Radar용 전파흡수체의 설계법

두께 d 의 전파흡수체를 판상으로 하여 그림1과 같이 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동임피던스 Z 는 진공중의 평면파 파동임피던스로 규격화하여 식(1)과 같이 주어진다.

$$z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} d\right) \quad (1)$$

여기서, λ 는 입사한 평면파의 진공중의 파장이며, 비유전율 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, 비투자율 $\mu_r = \mu/\mu_0$ 이다.

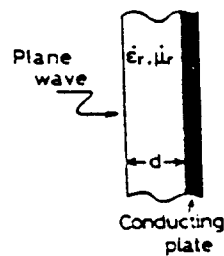


그림1. 단층전파흡수벽

Fig.1 Single-layered electromagnetic wave absorber

완전한 전파흡수체로 되기 위한 조건은 식(1)의 임피던스 z 가 1 이 되면 된다.
즉, 정합조건

$$z = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} d\right) = 1 \quad (2)$$

에서 주파수 f 와 두께 d 를 파라미터로 해서 z 의 궤적을 smith chart상에 그려 $z = 1$ 을 통하는 경우의 f_m , d_m 을 결정하면 전파흡수체의 설계가 가능해 진다.

이와 같은 전파흡수체의 설계법에 따라 X-Band Radar 의 중심주파수인 9.4GHz 근방에서 설계한 전파흡수체의 정합주파수 및 정합두께는 표 1과 같다.

표 1. 설계한 전파흡수체의 정합주파수 및 두께

Table 1. Matching Frequency and Thickness of Designed Microwave Absorbers

Sample	Mixing Ratio (B : F : C)	Matching Freq. (GHz)	Matching Thickness (mm)
E - 7	1 : 0.4 : 0.4	9.4	1.45
E- 7.5	1 : 0.55 : 0.55	9.35	1.57
E - 8	1 : 0.9 : 0.9	9.25	1.56

표 1에서 B:F:C 는 보지재 : 페라이트 : 카본의 중량비를 나타낸다. 여기서, 설계한 전파흡수체는 페라이트와 카본을 동일 중량비로 하여 보지재(에폭시 수지)에 혼합한 것으로서, 종래의 X-band용 전파흡수체의 정합두께 2.4 mm 에 비하면 현저하게 박층화됨을 알 수 있다.

II-2 Radar용 전파흡수체의 전파흡수능 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 Γ 와 입력임피던스 Z_{in} 의 관계는 다음 식(3)과 같다.

$$\Gamma = S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3)$$

따라서, 반사감쇠량 α 는

$$\alpha = -20 \log |S_{11}| \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

으로 구해진다.

2) 정재파비 측정법

전파흡수체의 전방에서 전파를 입사시키고, 공간 또는 도파관내에 형성된 정재파비를 ρ 라 하면 반사감쇠량 α 는 식(5) 또는 식(6)에 의하여 구해진다.

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

$$\alpha = 20 \log \frac{\rho + 1}{\rho - 1} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

으로 구해진다.

한편, 도파관을 이용한 정재파측정기의 후단에 전파흡수체 및 단락판을 장착시킨 후 도파관 관내의 정재파비 ρ 를 측정하면 감쇠량 α 는 다음 식(6)에 의하여 구해진다.

$$\alpha = 20 \log \frac{1}{|\Gamma|} = 20 \log \frac{\rho + 1}{\rho - 1} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

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

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

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

E_i, E_r : 각각 입사파·반사파의 전계의 세기[V/m]

3) 반사전력측정법

지향성을 가지는 송수신안테나를 그림2와 같이 적절한 각도로 배치하고 P_1 및 P_2 를 측정하면, 반사감쇠량 α 는 다음 식으로 구해진다.

$$\alpha = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

단, P_1 : 흡수체가 없이 금속판만 있는 경우의 수신기 수신전력

P_2 : 흡수체를 장착한 경우의 수신기 수신전력

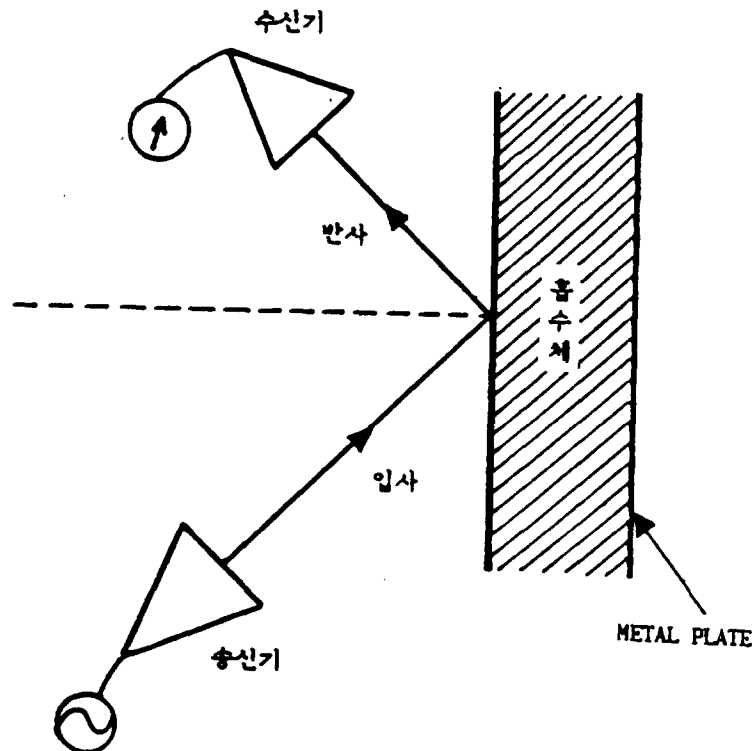


그림2. 반사전력법



그림3. 측정용 혼 안테나 및 전파흡수체

Fig. 3 Measuring Horn Antenna and Microwave Absorber

그림 3은 측정에 사용한 혼 안테나 및 설계·제작한 전파흡수체의 사진이며, 본 측정에 있어서는 반사전력법을 이용하였다. 입사각 및 반사각은 모두 15° 로 하였다. 입사각 θ 에 대한 반사계수 $S(\theta)$ 는 수직입사시에 $S(0) = 0$ 에 대하여 다음의 관계에 있다.[12]

$$|S(\theta)| = \tan^2(\theta/2) \quad (7)$$

따라서, $\theta = 15^\circ$ 에서 $S = 0.0173$ 또는 $|S| = -35.22\text{dB}$ 정도이므로 수직입사한 경우의 특성과 동일한 것으로 간주하여도 무방하다.

그림 4는 도료형으로 제작한 X-band레이다용 전파흡수체의 측정된 주파수특성으로서, 표 1의 설계치와 거의 일치하고 있다. 또 반사량 20dB를 기준으로 한 대역폭은 E-7, E-7.5 및 E-8의 경우 각각 7.35%, 7.8% 및 8.2% 정도로서 페라이트와 카본의 양이 증가함에 따라 넓어짐을 알 수 있다.

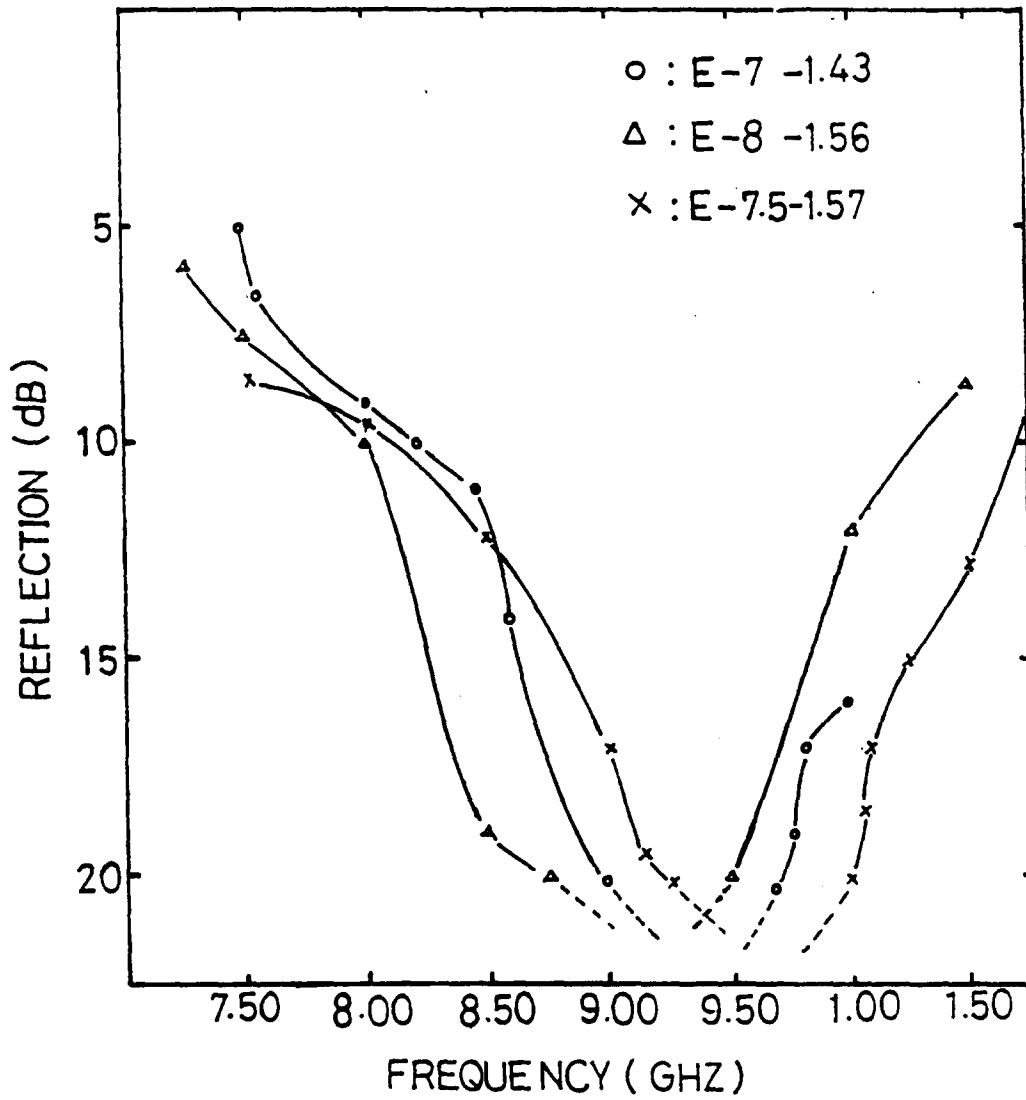


그림 4 X-Band 용 전파흡수체의 주파수 특성

Fig 4. Frequency characteristics of Microwave

Absorbers for X-band.

III. X-Band 레이더용 전파흡수체의 실장실험

III-1. Target의 제작

그림 5는 X-Band Radar의 target로서 전면이 알루미늄판(1.2m x 1.2m)으로 이루어진 하나의 반사판이며, 그림 6은 알루미늄 금속판(1.2m x 1.2m)위에 제II장에서 설계·제작한 X-Band Radar용 전파흡수체 E-7.5-1.57를 균일하게 도포한 것으로서 실제의 target는 전면을 그림 5, 후면을 그림 6으로 하여 일체화 하였다.

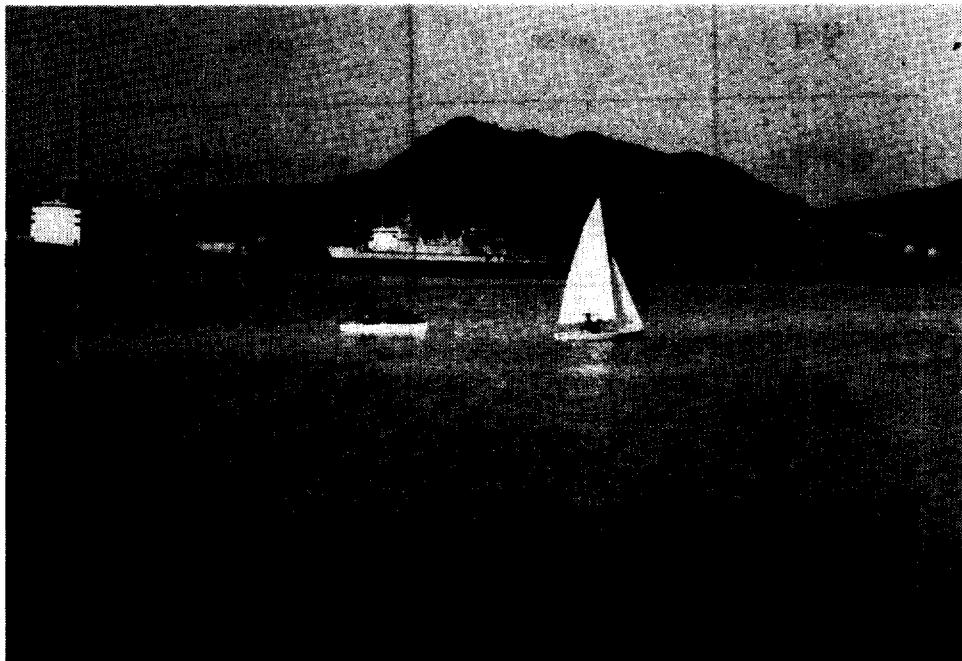
III-2. 실험에 사용한 X-Band Radar의 제원

제작회사	Krupp Atlas	JRC
사용주파수	9.375 GHz	9.375 GHz
지시방식	PPI	PPI
형식	pulse	pulse
설치장소	한국해양대학교 실습선 한바다호	한국해양대학교 실습선 한바다호

III-3 실험방법 및 결과

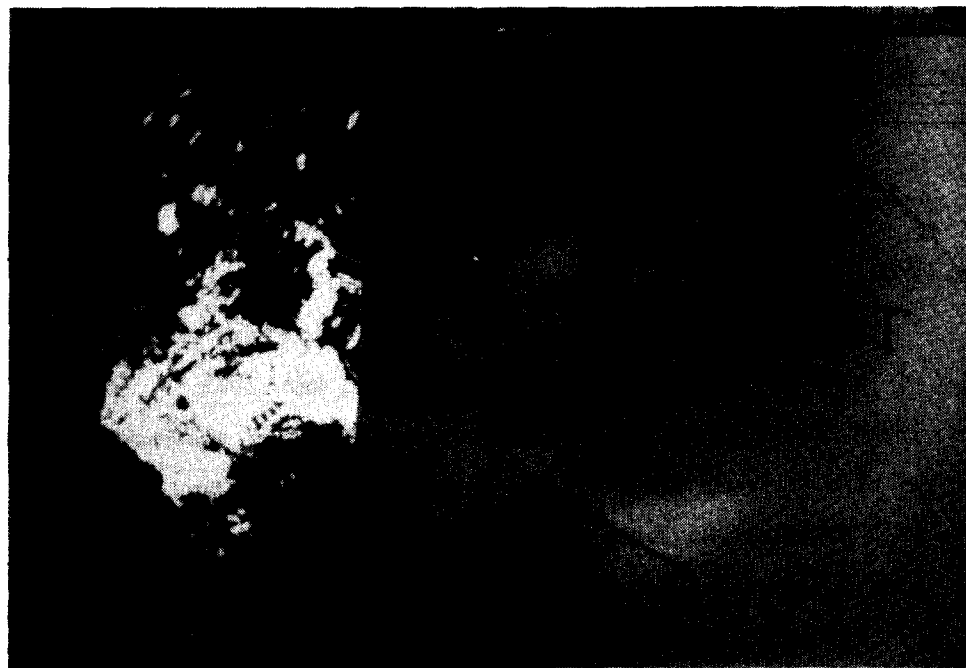
1) Target의 운용

장소: 부산항 내항



2) Radar영상 관측 (거리에 따라서)

장소 : 한국해양대학교 실습선부두에 정박된 한바다호 조타실



IV. 결론

본 연구에서는 그동안 실험실적으로 설계하여 온 X-band Radar용 전파흡수체를 실용의 상태에 가까운 반사전력법에 의하여 그 성능을 예비평가하고, 실용화 적용의 가능성을 확인하기 위하여 실제의 target를 제작하여 실제의 X-Band Radar로 실장실험하였다.

이상의 실장실험결과로부터 우리연구실에서 연구개발한 X-Band Radar용 전파흡수체는 레이더의 허상방지 및 스텔스화에 실용적으로 응용될 수 있음을 확인하였으며, 금 후 Corner Reflector 등을 제작하여 보다 정밀한 평가를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [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 레이더용 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 한국향해학회지, 제 14권 제 1호, pp. 9-19, (1990. 3)
- [3] 김 동일, 안 영섭, 정 세모, "레이더용 광대역형 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구", 한국향해학회지, 제 15권 제 1호, pp. 1-9, 1991
- [4] 김 동일, 정 세모, 안 영섭, "전파흡수체의 전자파적 특성측정기법연구" 한국향해학회지 제 16권 제 4호, pp. 25-34, (1992.12)
- [5] E. F. Knott et al., Radar Cross Section, Artech House, pp.273-313, 1985.
- [6] S. Li, C. Akyel, and R. G. Bosiso, "Precise Calculations and Measurements 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.
- [7] L. P. Lightart, "A Fast Computational Technique for Accurate Permittivity Determination Using Transmission Line Method," IEEE Trans. on MTT, Vol. 31, No. 3, pp. 249-254, Mar. 1983.
- [8] M. N. Afsar et. al., "The Measurement of the Properties of Materials," Proc. IEEE, Vol.74, No.1, pp.183-199, Jan, 1986.
- [9] "Materials Measurement Package," Wiltron 기술자료.
- [10] "Microwave Material Measurements Seminar," 자료, The Johns Hopkin University, Oct. 1990.
- [11] "Measuring Methods for Properties of Gyromagnetic Materials intended for application at microwave frequencies," International Electro technical Commission IEC Standard, 1982.

- [12] Y. Naito, "電波吸收體" Ohm 社, 1987.
- [13] Y. Kobayashi, "The Measurement of Complex Dielectric Constant at Micro wave Frequencies," Written in 1982.
- [14] Product Note 8510-3, "Materials Measurement, Measuring the Dielectric Constant of Solids with the HP 8510 Network Analyzer," Hewlett Packard.
- [15] Product Note, "Model 2300-11A, Materials Measurement Package," Wiltron.
- [16] Brian Sequeira, "Extracting ϵ and μ of Non-Metalic Solids (Powders, Liquids) from Single Port Vector Analyzer Measurements," Microwave Material Measurements Seminar, The John Hopkins University, Oct.4,1990.