

X-Band Radar용 도료형 전파흡수체의 실장실험

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

안 영 섭* · 김 동 일** · 정 세 모**

(Young Sup Ahn* · Dong Il Kim** · Se-Mo Chung*)

※ 이 논문은 1992년도 교육부지원 학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

요 약

전파흡수체의 전파흡수능 측정방법은 기본적으로 다양한 마이크로파 측정법이 이용될 수 있지만, 레이더용 전파흡수체의 경우, 전파의 주파수가 높기 때문에 파장이 짧아서 측정오차가 큰 문제점이 있다. 따라서, 지금까지는 20mmΦ 동축관 및 구형도파관을 이용한 재료정수 측정법과 전파흡수능 측정기법에 관하여 검토하여 왔다.

본 논문에서는 그동안 실험실적으로 설계하여 온 X-Band Radar용 전파흡수체를 실용의 상태에 가까운 반사 전력법에 의하여 그 성능을 예비평가하고, 실제의 target를 제작하여 X-Band Radar로 실장실험한 결과에 관하여 보고한다.

Abstract

As a method to measure the absorbing characteristics of microwave absorber, various microwave measuring method can be used fundamentally, there is, however, a big problem in measuring errors, since the wavelength of microwave such as used for radar is very short.

Therefore, this research aimed to design and fabricate a converting adaptor of 20mmΦ coaxial tube from a type-N connector to 20mmΦ coaxial tube and to use it for evaluating absorption characteristics of microwave absorber.

Furthermore, the measurements of absorbing characteristics and material constants have been performed and reviewed, which were carried out by using the coaxial and by using rectangular waveguide, respectively. As a result, the validity of the proposed measuring method has been conformed.

In this paper, a preliminary evaluation on the characteristics of the electromagnetic wave absorber for

* 목포해양대학교 항해학과
 ** 한국해양대학교 전파공학과

X-band radar designed and fabricated for a laboratory use is performed by reflected power method near to a practical use. Then for field test by using X-band radar is carried out with real target of 1.2m×1.2m in size.

As the result of the above, the usefulness of the designed and fabricated electromagnetic wave absorber in paint type for X-band radar has been confirmed.

I. 서 론

전파흡수체는 입사한 전파를 흡수해서 열로 변환하여, 반사파가 생기지 않게하는 특수재료이다. 전파흡수체의 역사는 길어서, 전파가 사용되게 된 당시부터 무반사중단기 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 계측용 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 레이더에 탐지되지 않도록 하기 위하여 전파흡수체의 제작이 시도된 이래, 최근에는 교량 또는 선박의 마스트등에 의한 레이더의 허상방지용 전파흡수체[2]-[4] 및 군사적으로는 레이더에 탐지되지 않는 전함 또는 항공기의 제작을 위한 전파흡수체의 개발이 미국을 비롯한 선진국을 중심으로 활발히 행해져 Gulf전쟁에서 Stealth 전투기의 위력을 과시한 바 있다.

이와같은 전파흡수체의 발전과정과 수반하여 전파흡수체의 전파흡수능력 측정방법도 지속적으로 발전되어 오고 있으나, 레이더(C, X-Band)용 전파흡수체의 경우 사용주파수가 높기 때문에 전파의 파장이 짧아서 측

정방법에 따른 측정오차가 크기 때문에 정밀도 및 신뢰성에 문제가 남아있다. 단순히 레이더용 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 불가능할 뿐아니라 비교적 큰 샘플(예를 들면 1 ft × 1 ft × 3ft 또는 2 ft × 2 ft)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 유전율 또는 투자율이 큰 전파흡수체와 같은 시료의 경우에는 시료의 형상이나 air gap 등에 기인하는 오차가 커서 실용적이 못된다.

나아가서, 재료정수의 측정법에 관해서는 크게 나누어, 공진법, 섭동법, 동축관 또는 구형 도파관을 이용한 투과반사측정법(2-port method) 및 open-short법, ℓ -2 ℓ 법 등이 있다[5]-[11]. 이들중 공진법 및 섭동법은 하나의 공진기를 제작하였을 때 한점의 주파수에서만 재료정수를 구할 수 있으므로 실용적인 방법이 못되지만, 전자레인지(microwave oven)와 같이 특정주파수(2.45GHz)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 방법 등에 오차가 개입되기 쉬

위서 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.

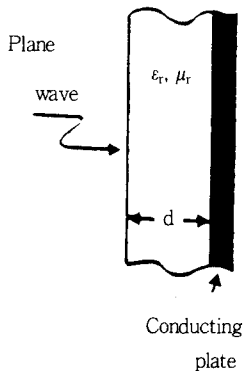
따라서, 본 발표자들은 1차적으로 N-Type Coaxial Line으로 부터 대형 Coaxial Tube (내경 : 약 9mm, 외경 : 20mm정도)로 변환 시키는 adaptor 및 같은 내외경을 가지는 동축관법에 의한 전파흡수능력 측정법을 개발함으로써 크기가 큰 시료를 준비하지 않고서도 간단히 전파흡수능력을 측정할 수 있는 lab-scale의 측정법을 제시한 바 있다[1]~[4].

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

2-1. Radar용 전파흡수체의 설계법

두께 d의 전파흡수체를 판상으로 하여 [그림1]과 같이 놓은 경우, 평면파의 수직입사에 대한 파동임피던스



[그림 1] 단층전파흡수벽

[Fig. 1] Single-layered electromagnetic wave absorber.

Z는 진공중의 평면파 파동임피던스로 규격화하여 식(1)과 같이 주어진다.

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

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

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

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

에서 주파수 f와 두께 d를 파라미터로 해서 z의 궤적을 smith chart상에 그려 Z=1을 통하는 경우의 f_m , d_m 를 결정하면 전파흡수체의 설계가 가능해 진다.

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

<표 1> 설계한 전파흡수체의 정합주파수 및 두께
<Table 1> Matching Frequency and Thickness of Designed microwave Absorbers.

Sample	Mixing ration (B : F : c)	Matching Freq. (GHz)	Matching Thickness (mm)
E-7	1 : 0.41 : 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 1>에서 B : F : C는 보지재 : 페라이트 : 카본의 중량비를 나타낸다. 여기서, 설계한 전파흡수체는 페라이트와 카본을 동일 중량비로 하여 보지재(에폭시 수지)에 혼합하여 페인트화한 것으로서, 종래의 X-band 용 전파흡수체의 정합두께 2.4mm에 비하면 현저하게 박층화됨을 알 수 있다.

2-2. Radar용 전파흡수체의 흡수능 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_m 의 관계는 다음 식(3)과 같다.

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

따라서, 반사감쇠량 α 는

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

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

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

으로 구해진다.

한편, 도파관을 이용한 정재파측정기의 후단을 단락시키고 단락판전면에 전파흡수체를 장착시킨 후 도파관내의 정재파비 ρ 를 측정하면 감쇠량 α 는 다음 식(6)에 의하여 구해진다.

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

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

$|\Gamma| = \frac{E_r}{E_i}$ (반사계수)

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

E_i, E_r : 각각 입사파·반사파의 전계의 세기 [V/m]

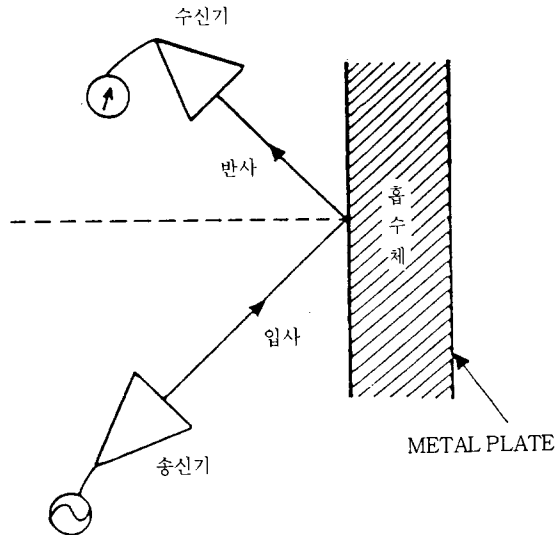
3) 반사전력측정법

지향성을 가지는 송수신안테나를 [그림 2]와 같이 적절한 각도로 배치하고 P_1 및 P_2 를 측정하면, 반사감쇠량 α 는 다음 식으로 구해진다.

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

단, P_1 : 흡수체가 없이 금속판만 있는 경우의 수신기 수신전력

P_2 : 흡수체를 장착한 경우의 수신기 수신전력



[그림 2] 반사전력법

[Fig. 2] Reflected Power Method.

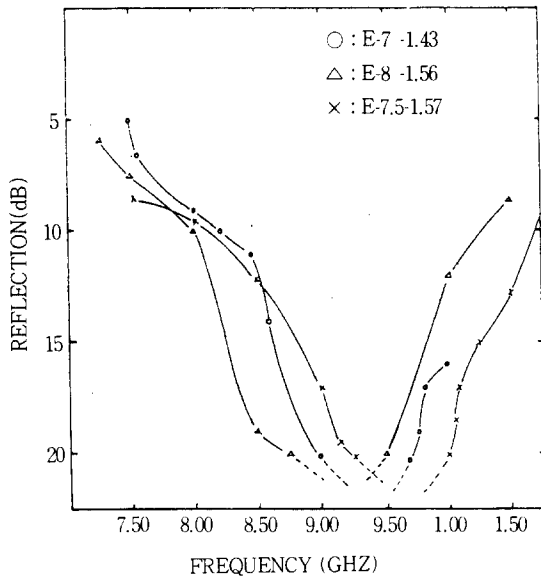
[그림 3]은 측정에 사용한 혼 안테나 및 설계 제작한 전파흡수체의 사진이며, 본 측정에 있어서는 실험실적인 측정법이기보다 실용의 상태에 가까운 전파흡수능을 예비평가하기 위하여 반사전력법을 이용하였다. 입사각 및 반사각은 모두 15°로 하였으며, 송수신 안테나와 전파흡수체간의 거리는 60cm정도를 유지하였다. 입사각 θ 에 반사계수 $S(\theta)$ 는 수직입사시에 $S(0) = 0$ 에 대하여 다음의 관계에 있다.[12].



[그림 3] 측정용 혼 안테나 및 전파흡수체
[Fig. 3] Measuring Horn Antenna and Microwave Absorber.

$$|S(0)| = \tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (8)$$

따라서, $\theta = 15^\circ$ 에서 $S = 0.0173$ 또는 $|S| = -35$. 22dB 정도이므로 수직입사한 경우의 특성과 동일한 것으로 간주하여도 무방하다.



[그림 4] X-Band 용 전파흡수체의 주파수 특성
[Fig. 4] Frequency characteristics of Microwave Absorbers for X-band.

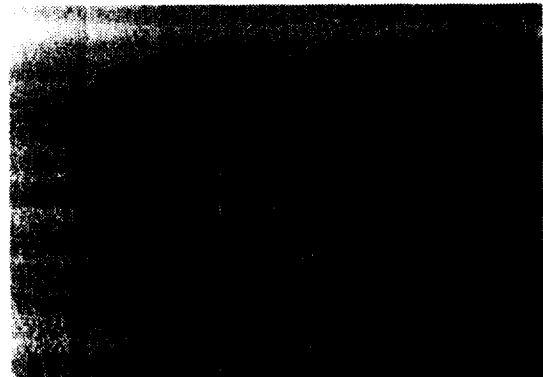
[그림 4]는 도료형으로 제작한 X-band레이다용 전파흡수체의 측정된 주파수특성으로서, <표 1>의 설계치와 거의 일치하고 있다. 또 반사량 20dB를 기준으로 한 대역폭은 E-7, E-7.5 및 E-8의 경우 각각 7.35%, 7.8% 및 8.2%정도로서 페라이트와 카본의 량이 증가함에 따라 넓어짐을 알 수 있다.

본 실장실험에서는 Sample E-7.5를 이용한 target를 제작하여 사용하였다.

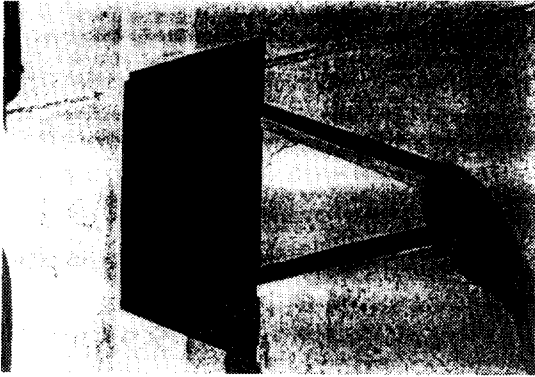
Ⅲ. X-Band Radar용 전파흡수체의 실장실험

3-1. Target의 제작

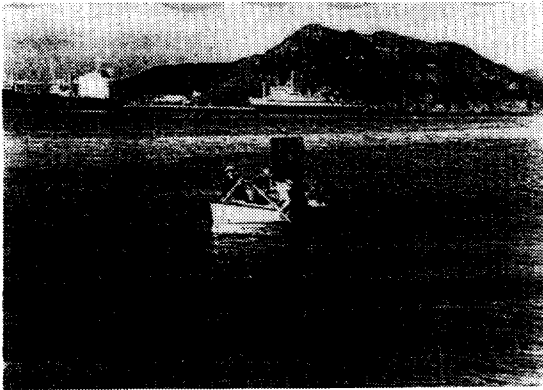
[그림 5]는 X-Band Radar의 Target로서 전면이 알루미늄판(1.2m × 1.2m)으로 이루어진 하나의 금속판 target이며, [그림 6]은 알루미늄 금속판(1.2m × 1.2m)위에 제Ⅱ장에서 설계·제작한 X-Band Radar용 전파흡수체 E-7.5를 휘발성이 강한 thinner에 혼입하여 스프레이하여 알루미늄판위에 도포하고 완전히 건조한 후 다시 spray하는 작업을 반복하여 최종적으로 균일하게 두께 1.57mm가 되도록 한 것으로 target의 전면(금속판target 또는 Metal plate)을 [그림 5]후면(전파흡수체 target 또는 no target)을 그림 6인으로써 일체화 하였다. [그림 7(a)] 및 (b)는 target를 실은 FRP선과 이를 이동시키는 데에 사용한 YACHT의 사진이다.



[그림 5] 금속판 target
[Fig. 5] Metal Plate Target.



[그림 6] 전파흡수체 Target
[Fig. 6] Electromagnetic Wave Absorber Target.



[그림 7(a)] Target를 실은 FRP선
[Fig. 7(a)] FRP Ship Loading the Target.



[그림 7(b)] Target를 실은 FRP선과 이를 끄는 요트
[Fig. 7(b)] Pulling Yacht(Right) and FRP Ship Loading the Target.

3-2. 실험에 사용한 X-Band Radar의 제원

〈표 2〉는 전파흡수체의 실장실험에 사용한 2대의 레이더의 각각의 제원을 나타낸다.

〈표 2〉 실장실험에 사용한 X-Band Radar의 재원
〈Table 2〉 The Specification of X-Band Radars Used Far Field Test.

제 작 회 사	Krupp Atals	JRC
사용주파수	9.375GHz	9.375GHz
지시 방식	PPI	PPI
형 식	pulse	pulse
설 치 장 소	한국해양대학교 실습선 한바다호	한국해양대학교 실습선 한바다호

3-3. 실험방법 및 결과

1) Target의 운용

위에서 설계·제작한 target를 FRP선에 싣고 바람을 이용한 Yacht와 로프를 연결하여 FRP선을 끌고 부산항 내항을 이동하면서 target를 설정하였다.

2) Radar영상 관측

한국해양대학교 실습선부두에 정박중인 한바다호에서 사용주파수 9.375Hz인 Krupp Atals 및 JRC제 X-Band Radar를 이용하여 Walkie-talkie로 선교와 target를 실은 FRP선 간을 연락하면서 레이더 PPI Scope상에서 금속판 target의 면을 Radar Scanner로 향하게 하였을 경우의 레이더 영상을 관측한 후, 다시 전파흡수체를 부착한 no target로 바꾸어서 PPI Scope상에서 영상을 관측하고, 다시 거리를 바꾸어 반복 실험을 행하였다. 거리를 0.75mile 및 1.0mile에서 PPI Scope 상에서 target의 영상을 관측하였다. [그림 8(a)], (b) 및 [그림 9(a)], (b)는 각각 거리가 0.75mile, 1.0mile에서의 금속판target (Metal Plate)와 전파흡수체 target (No Target)를 관측한 사진이다.

[그림 8(a)] 및 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 거리가 0.75mile로 대단히 가까움에도 불구하고 금속판 target에 비하여 전파흡수체target는 실별하기 어려운 만큼 영상이 희미하게 나타나고 있다. 또, [그림 9(a)] 및 (b)로부터 거리가 1.0mile 정도 떨어지면 전



[그림 8(a)] 금속판에 대한 레이더영상(거리 : 0.75 마일)

[Fig. 8(a)] Observed Radar Scope for Metal Plate(Dist : 0.75mile).



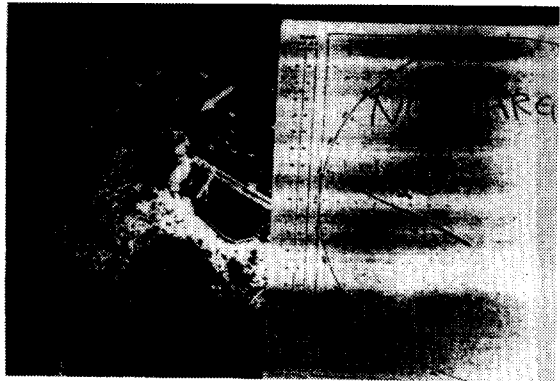
[그림 9(a)] 금속판에 대한 레이더영상(거리 : 1.0 마일)

[Fig. 9(a)] Observed Radar Scope for Metal Plate(Dist : 1.0 mile).



[그림 8(b)] 전파흡수체에 대한 레이더 영상(거리 : 0.75마일)

[Fig. 8(b)] Observed Radar Scope for the Absorber Target(Dist : 0.75 mile).



[그림 9(b)] 전파흡수체에 대한 레이더 영상(거리 : 1.0마일)

[Fig. 9(b)] Observed Radar Scope for the Absorber Target(Dist : 1.0 mile).

파흡수체target는 거의 영상이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서 설계·제작된 X-Band Radar 용 전파흡수체는 레이더의 허상방지 및 스텔스화용으로 유효하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 그동안 실험실적으로 설계하여 온

X-band Radar용 도료형전파흡수체를 실용의 상태에 가까운 반사전력법에 의하여 그 성능을 예비평가하고, 실용화 적용의 가능성을 확인하기 위하여 실제의 target를 제작하여 X-Band Radar로 실장실험하였다.

이상의 실장실험결과로부터 본 연구에서 개발한 X-Band Radar용 전파흡수체는 레이더의 허상방지 및 스텔스화에 적용될 수 있음을 확인하였으며, 금후 Corner Reflector 등을 제작하여 보다 정밀한 평가를 수행하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 김 동일, 정 세모, “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”, 한국항해학회지, 제 14권 제 1호, pp. 9-19. (1990. 3).
3. 김 동일, 안 영섭, 정 세모, “레이더용 광대역형 고성능 전파흡수체의 개발에 관한 연구”, 한국항해학회지, 제15권 제 1호, pp. 1-9, 1991.
4. 김 동일, 정 세모, 안 영섭, “전파흡수체의 전자파적 특성측정기법연구” 한국항해학회지 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 Tm_{010} 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 Microwave 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-Metallic Solids (Powders, Liquids) from Single Port Vector Analyzer Measurements,” Microwave Material Measurements Seminar, The John Hopkins University, Oct. 4, 1990.