

---

# W-band 전파특성 분석용 샘플홀더 제작에 관한 연구

최창묵\*

A Study on Manufacturing of Sample Holder for the EM Property Analysis in W-band

Chang-Mook Choi\*

## 요 약

본 논문에서는 W-Band(75 GHz ~ 110 GHz) 주파수 대역에서 전파특성 분석을 위한 샘플홀더 제작을 위하여 수행되었다. 먼저 도파관 내에서 전파의 전파이론을 정립하고 재료정수 측정기법을 도출하였다. 그리고 밀리미터파 W-band에 알맞은 도파관형 샘플홀더를 설계 및 제작하고 RAM 샘플을 이용하여 재료정수 및 전파흡수능을 측정하여 분석하였다. 분석결과 샘플시료 특성을 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였으며, 향후 이 측정 샘플홀더는 W-band 대역 전파특성 분석을 위해 매우 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

## ABSTRACT

In this paper, fabrication of sample holder was studied for an analysis of electromagnetic(EM) wave property in W-band(75 GHz ~ 110 GHz). First of all, a propagation theory of EM wave was considered in the rectangular waveguide, and measurement technique was suggested for analysis of characteristics. A sample holder using in W-band was designed and fabricated, and used for analysis of material property and absorption ability using RAM samples. As a result, the sample holder test was verified exactly for measuring EM wave property of RAM sample. In the future, the proposed sample holder would like to be used for the EM wave property analysis in W-band.

## 키워드

샘플홀더, 재료정수, 전파흡수능, RAM, W-band

## Key word

EM Wave Absorption property, Material Property, RAM, Sample Holder, W-band

---

\* 증신회원 : 해군사관학교(nav-sun@hanmail.net)

접수일자 : 2011. 02. 22

심사완료일자 : 2011. 03. 23

## I. 서 론

레이더 반사 단면적을 최소화하는 전자파 기술은 두 가지의 방법으로 발전해 왔다. 그 중 하나는 플랫폼의 표면을 형상화하는 것이며, 다른 하나는 전체적이거나 부분적으로 표면에 RAM(Radar Absorbing Materials)을 붙이는 것이다[1].

따라서 레이더 반사 단면적 최소화에 필수불가결한 RAM을 설계하고 개발하기 위해서는 재료의 특성을 파악하거나 성능을 측정하는 방법이 보다 현실적으로 묘사가능하고 간편해야 한다[2], [3].

일반적으로 실험실에서 매질의 특성과악이나 성능 측정 방법은 전송선로법이 많이 쓰이고 있으며, 이 기법은 전송선로 홀더 내에서 샘플을 측정하는 기법으로 RF 에너지의 반사계수는 물론 매질의 재료정수까지 측정하는 기본 기법이다. 또한 전송선로법은 측정샘플 형상에 따라 크게 동축관 샘플 홀더법과 도파관 샘플 홀더법으로 나눌 수 있다[3].

동축관은 TEM 전송선로로써 도파관 보다 사용이 용이하고 차단 주파수가 사용되지 않는 장점이 있으며, 사용주파수는 보통 10 GHz 이하로 제한된다. 그리고 그 이상의 주파수에서는 도파관법보다 샘플의 물리적 크기가 작아지며, 측정시 선로가 완전도체가 아니므로 오차를 포함하게 되기 때문에 도파관 내에서 측정을 요하게 된다. 10 GHz 이상에서도 동축선로를 이용하여 측정하는 것이 가능하지만, 선로에서 고유모드가 전파되지 않도록 하기 위해서는 선로의 크기가 매우 작아져야하기 때문에 샘플의 제작도 어려울 뿐만 아니라 샘플홀더 제작에도 고 비용을 요하게 된다.

따라서 동축관 샘플 홀더법은 보통 50 MHz ~ 10 GHz 주파수에서 사용되며, 도파관 샘플 홀더법은 10 GHz ~ 100 GHz 주파수에서 사용된다[4].

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 샘플의 재료정수 및 전파흡수 특성을 분석하기 위하여 주파수 대역별 도파관 샘플홀더를 어떻게 설계해야 되는지 이론 정립 후 CAD 이용 밀리미터파 대역의 W-band에 대하여 도파관형 샘플홀더를 설계 후 실 제작하였다. 그리고 자체 RAM 샘플을 제작하고 설계 및 실 제작된 도파관 샘플홀더에 삽입하여 매질의 재료정수 및 전파흡수 특성을 측정하였다. 측정 및 분석 결과 제작한 샘플홀더가 완벽하

게 사용 가능함을 확인하였다.

## II. 도파관 전파특성 이론

### 2.1 도파관 내에서의 전파

그림 1과 같이 도파관 내에서 파의 전자계 원이 없다면 맥스웰 방정식을 이용하면, z-축 방향으로  $e^{-j\beta z}$  항을 포함한  $E_z$ 와  $H_z$ 에 의한 4개의 횡방향 성분은 식 (1) ~ (4)와 같다[5].

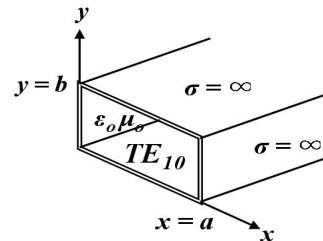


그림 1. 도파관 내에서의 전파  
Fig. 1 Propagation in a rectangular waveguide

$$H_x = \frac{j}{k_c^2} \left( \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$H_y = \frac{-j}{k_c^2} \left( \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$E_x = \frac{-j}{k_c^2} \left( \beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \left( -\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (4)$$

여기에서  $k_c^2 = k^2 - \beta^2$ 는 차단파수로 정의된다.

위 식을 적용하기 위해서는 다음의 파동방정식에서  $H_z$ 를 구해야 한다.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) H_z = 0 \quad (5)$$

여기서,  $H_z(x, y, z) = h_z(x, y)e^{-j\beta z}$ 이다.

위의 편미분 방정식에서  $h_z(x, y) = (A \cos px + B \sin px)(C \cos qy + D \sin qy)$ 로 나타낼 수 있다.

위 식의 상수 값을 구하기 위하여 도파관 벽면에 대한 접선성분의 전기장 경계조건을 이용하면

$$h_z(x, y) = AC \cos \frac{n\pi}{a} x \cos \frac{m\pi}{b} y \text{가 된다.}$$

여기서  $k_c^2 = \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 = k^2 - \beta^2$ 이다.

전파상수  $\beta$ 는 다음 식(6)과 같으며, 실수이어야 전파 진행이 가능하다[6].

$$\begin{aligned} \beta &= \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \left(\frac{n\lambda}{2a}\right)^2 - \left(\frac{m\lambda}{2b}\right)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

도파관 내에서 차단 주파수가 가장 작아지도록 기본 TE 모드인  $TE_{10}$  모드 고려시  $n=1, m=0$  이기 때문에 식(7)과 같다.

$$1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 > 0 \Rightarrow a > \frac{\lambda}{2} \quad (7)$$

또한  $TE_{20}$  모드가 전파되지 않게 하기 위해서는 식(8)과 같다.

$$1 - \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 < 0 \Rightarrow a < \lambda \quad (8)$$

결과적으로  $TE_{10}$ 만이 전파가능하기 위해서는 식(9)와 같은 조건을 만족하여야 한다[7].

$$\frac{\lambda}{2} < a < \lambda \quad (9)$$

## 2.2 재료정수의 측정

도파관내에서 빈공관 속에서의 전파정수와 파동임피던스는 식 (10), (11)과 같다[6].

$$\gamma_g = j \frac{2\pi}{\lambda_g} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (10)$$

$$Z_g = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (11)$$

그리고 도파관 내 매질이 차 있을 경우 매질에서 전파정수와 파동임피던스는 식 (12), (13)과 같다[6].

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r - (\lambda/2a)^2} \quad (12)$$

$$Z_w = \frac{Z_0 \mu_r}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r - (\lambda/2a)^2}} \quad (13)$$

여기서,

$\lambda$ : 자유공간에서의 파장

$Z_0: \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 376.7 \Omega$  (진공 중 파동임피던스)

$\mu_r$ : 매질의 복소비투자율

$\epsilon_r$ : 매질의 복소비유전율

위 식 (10) ~ (14) 를 이용하여 매질의 복소비투자율과 복소비유전율을 정리하면, 식 (14), (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_r = -j \frac{(Z_w/Z_g) \gamma \lambda}{2\pi \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (14)$$

$$\epsilon_r = j \frac{\pi \lambda \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}{2\gamma (Z_w/Z_g)} \left( \frac{1}{a^2} - \frac{\gamma^2}{\pi^2} \right) \quad (15)$$

여기서 매질의 재료정수 특성인 복소비투자율과 복소비유전율을 구하기 위해서는 매질에서의 전파정수 및 파동임피던스를 구해야한다.

따라서 그림 2와 같이 시료의 길이  $\ell$  변화에 따른 측정법[8]을 이용하여 변수를 구할 수 있다.

그림 2와 같이 도파관의 종단을 금속판으로 단락시키고 길이가 각각  $\ell, 2\ell$  인 시료를 삽입하여 시료 전면에서 들여다 본 입력임피던스를 측정하여 각각  $Z1, Z2$ 로 한다.

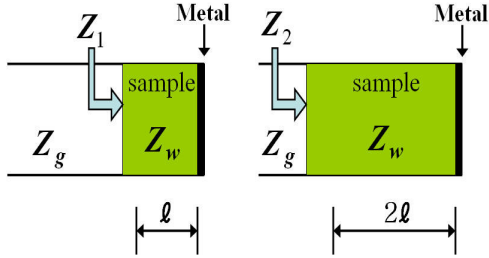


그림 2.  $l - 2l$  법  
Fig. 2  $l - 2l$  Method

여기서  $Z_1, Z_2$ 는 식 (16), (17)과 같이 된다.

$$Z_1 = Z_w \tanh(\gamma l) \tag{16}$$

$$Z_2 = Z_w \tanh(\gamma 2l) \tag{17}$$

여기서,  $\tanh$ 의 성질을 이용하고 정리하면 식 (18), (19)가 도출된다.

$$\gamma = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{2Z_1 - Z_2}{Z_2}} \tag{18}$$

$$Z_w = Z_1 \sqrt{\frac{Z_2}{2Z_1 - Z_2}} \tag{19}$$

따라서 식 (14), (15), (18), (19)을 사용하면 재료정수를 구할 수 있다.

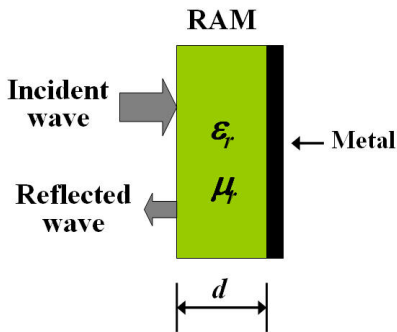


그림 3. RAM  
Fig. 3 RAM

### 2.3 전파흡수능의 측정

그림 3처럼 두께  $d$ 인 RAM에 입사파와 반사파에 의한 전파흡수능  $A$ 는 식 (20)처럼 나타낼 수 있다[2], [3].

$$A = -20 \log_{10} \left| \frac{z-1}{z+1} \right| \text{ [dB]} \tag{20}$$

직사각형 도파관 내에서 측정하기 때문에 그림 1과 같은 형태의 도파관내에서 그림 3과 같은 RAM이 존재한다면, 정규화 입력임피던스  $z$ 는 식 (21)처럼 주어진다.

$$z = \mu_r \sqrt{\frac{1 - (\lambda/2a)^2}{\epsilon_r \mu_r - (\lambda/2a)^2}} \cdot \tanh \left( j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r - (\lambda/2a)^2} d \right) \tag{21}$$

실제 전파흡수능은 샘플홀더를 Network analyzer에 연결하여 반사계수를 측정함으로써 얻을 수 있다.

## III. 제작 및 측정

### 3.1 샘플홀더 제작

앞에서 언급한 도파관 내에서의 전파이론에서 정립된  $TE_{10}$  모드의 주파수별 한계치를 고려하여 측정하고자 하는 주파수 대역에 맞는 샘플 홀더를 제작 할 수 있으며 본 논문에서는 식 (9)를 이용하여 W-band 대역 75 GHz ~ 110 GHz에서 측정 가능한 샘플홀더를 그림 4와 같이 CAD 이용 설계하였다.

그림 4를 토대로 실제제작한 것이 그림 5이며, 특성을 좋게 하기 위해 도전율이  $\sigma = 5.7 \times 10^7$ 인 동을 사용하는 것이 바람직하지만 여건상 제작이 용이한  $\sigma = 4.1 \times 10^7$ 인 알루미늄을 이용하여 제작하였다.

### 3.2 측정 샘플 제작

제작된 샘플홀더를 검증하기 위해 측정용 RAM 샘플 제작 시 주재료는 카본을 사용하였으며, 바인더로서 CPE(chlorinated polyethylene)를 사용하였다.

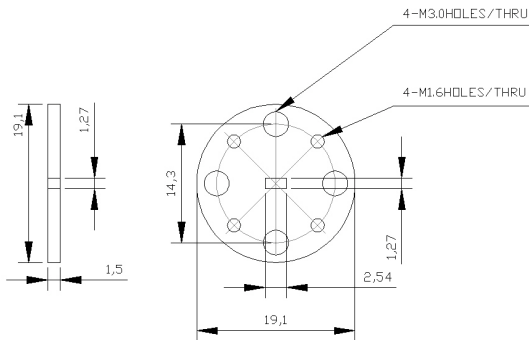


그림 4. W-band용 도파관 샘플홀더 설계자료  
Fig. 4 Designed data of rectangular waveguide sample holder in W-band

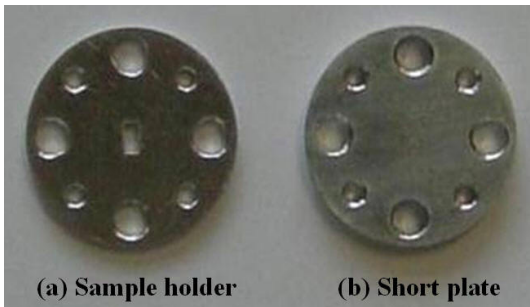


그림 5. 제작한 W-band용 도파관 샘플홀더  
Fig. 5 Fabricated rectangular waveguide sample holder in W-band

RAM 제작과정은 먼저 Mixer에서 카본과 CPE를 특정 조성비에서 혼합하고, 연구실에서 자체 제작한 Open Roller를 이용하여 70 °C의 일정한 온도[9]에서 측정을 위한 Sheet형 RAM 샘플을 제작하였다. 그림 6은 측정을 위하여 자체 제작한 RAM 샘플이다.



그림 6. 측정을 위해 제작된 RAM  
Fig. 6 Fabricated RAM for measuring

### 3.3 측정 시스템 구성

측정하기 위하여 자체 제작된 RAM 샘플을 설계제작한 샘플홀더에 삽입하고 Network analyzer에 직접 연결하여 구현된 측정 시스템은 측정 단계에서 적절한 Calibration 후에 반사계수  $S_{11}$ 을 측정하였다.

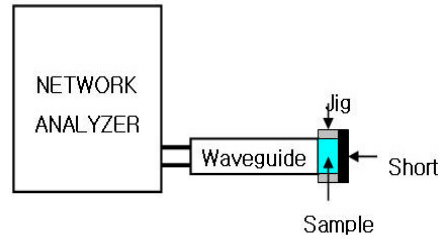


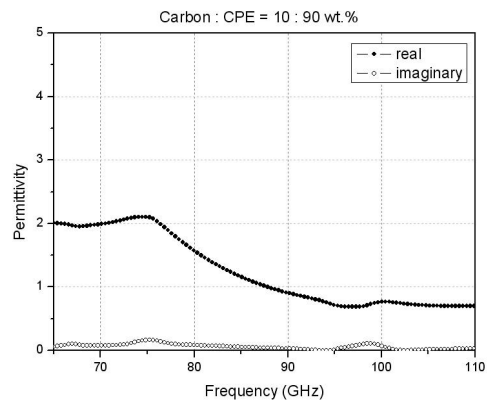
그림 7. 도파관을 이용한 측정시스템  
Fig. 7 Measurement system using rectangular waveguide

### 3.4 측정결과 분석

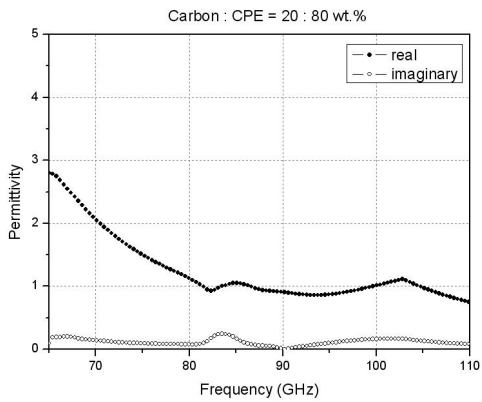
재료정수는 측정된 반사계수를 이용하여  $l-2l$  법 [9]에 의하여 계산하였다.

먼저 도전손실재료인 카본을 함유한 샘플을 함유량 별 복소비유전율을 계산하여 그림 8과 같이 나타내었다. 함유량에 따른 복소비유전율 분석결과 실수부 대비 허수부가 크게 나타나는 카본 함유량 30 wt.%에서 우수한 특성이 나타날 수 있음을 예측할 수 있다.

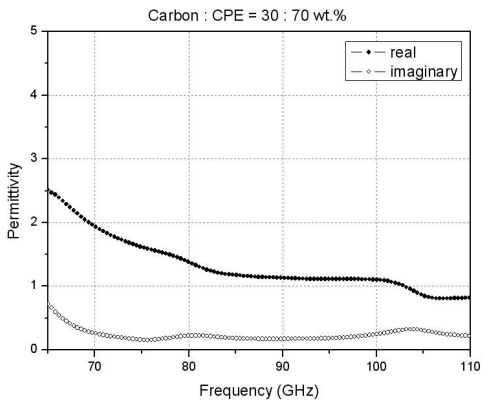
그리고 우수한 특성을 예측할 수 있는 카본 함유량 30 wt.% 샘플을 두께별 전파흡수능을 분석하기 위하여 측정된 반사계수를 그림 9(a), (b)에 나타내었다. 반사계수는 최대 -40 dB 이상까지 측정 할 수 있었다.



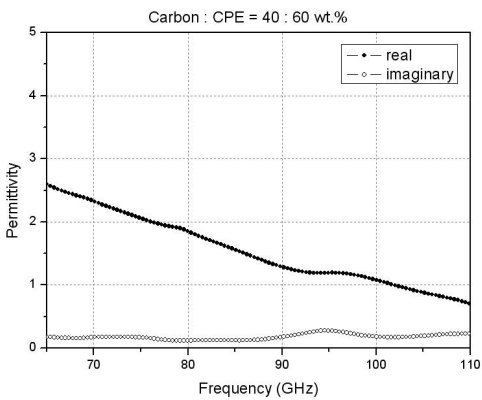
(a)



(b)

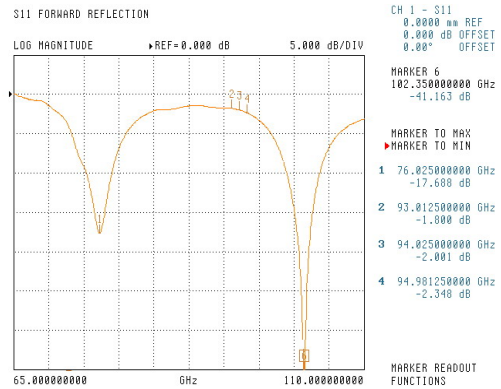


(c)

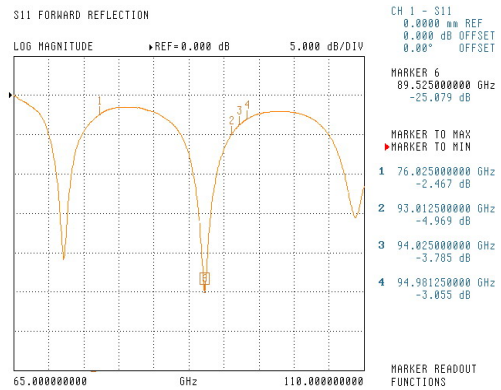


(d)

그림 8. 카본 함유량에 따른 샘플의 재료정수(유전율)  
 (a) 10 wt.% (b) 20 wt.% (c) 30 wt.% (d) 40 wt.%  
 Fig. 8 Material property(permittivity) of samples containing difference composition ratio of Carbon : (a) 10 wt.% (b) 20 wt.% (c) 30 wt.% (d) 40 wt.%



(a)



(b)

그림 9. 카본 함유량 30 wt.% 샘플의 두께별 전파흡수능 : (a) thickness 2 mm, (b) thickness 3 mm  
 Fig. 9 Absorption ability of samples containing 30 wt.% Carbon at several thicknesses : (a) thickness 2 mm, (b) thickness 3 mm

#### IV. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역 W-band 전파특성 분석용 샘플홀더 제작을 위하여 연구가 수행되었다. 먼저 측정용을 위한 도파관 내에 전파의 도파이론을 정립하고 도파관 내에서  $TE_{10}$  모드만을 전파시키기 위한 도파관 사이즈가 주파수 파장  $\lambda$  에 따라  $\lambda/2 < a < \lambda$  임을 이론으로 정립하였다.

또한 W-band 75 GHz ~ 110 GHz 에 맞는 도파관 샘플홀더의 사이즈를 1.27 × 2.54 mm로 설계하고 실 제작하였다.

그리고 제작된 도파관 샘플홀더의 유용성을 검증하기 위하여 RAM 샘플의 재료정수 및 전파흡수 특성을 분석한 결과 40 dB 이상까지 측정 가능함을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제작하고 실험한 도파관 샘플홀더를 이용하는 방법이 실험실에서 밀리미터파 대역 재료정수 및 전파흡수 특성을 효과적으로 측정할 수 있는 방법으로 제시하고자 한다.

### 참고문헌

- [1] Francisco Saez de Adanna et al., "Method Based on Physical Optics for the Computation of the Radar Cross Section Including Diffraction and Double Effects of Metallic and Absorbing Bodies Modeled With Parametric Surfaces," *IEEE Trans. Aatennas Propagat.*, vol.52, no.12, pp.3295-3303, Dec. 2004.
- [2] 최창목, 임봉택, 고광섭, "RF 스틸스용 RAM의 전파흡수능 측정기법에 관한 연구," 한국해양정보통신학회 논문지, 제14권, 제6호, pp. 1331-1337, 2010년 10월.
- [3] Eugene F. Knott et. al., *RADAR CROSS SECTION, 2nd ed.*, Scitech, 2004.
- [4] Carl H. Durney et al., *RADIO FREQUENCY RADIATION DOSIMETRY HANDBOOK, 4th-ed.*, Brooks Air Force Base, 1986.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering, 3rd-ed.*, NJ; John Wiley & Sons, pp. 91-130, 2005.
- [6] O. Hashimoto, *Measurement Method of Material Property*, Tokyo: Morikita Shuppan, 2003.
- [7] O. Hashimoto and Y. Shimizu, "A Measurement of the Complex Permittivity Tensor by a Standing-Wave Method in a Rectangular Waveguide," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol.EMC-29, no.2, pp.141-149, May 1987.
- [8] Y. Naito, *Electromagnetic Wave Absorbers*, Tokyo: New ohm, 1987.
- [9] Sang-Hyun Moon et al., "Development of composite Ba ferrite EM wave absorbers for GHz frequency," *J. Korea Electromag. Engin. Soc.*, vol.14, no.12, pp. 1329-1334, Dec. 2003.

### 저자소개



#### 최창목(Chang-Mook Choi)

1996년 해군사관학교 기계공학과 (공학사)

2001년 군사과학대학원해양공학과 (공학석사)

2008년 한국해양대학교 전파공학과 (공학박사)

2003년~현재 해군사관학교 교수

※관심분야: 전파/위성항법, 전파흡수체 개발