

밀리미터파 대역 전파흡수체의 설계 및 제작에 관한 연구

김대훈* · 최창묵** · 최동수*** · 김동일†

*, ***, † 한국해양대학교 전파공학과
** 해군사관학교

A Study on Design and Fabrication of mm-Wave EM Absorber

Dae Hun Kim* · Chang Mook Choi** · Dong Soo Choi*** · Dong Il Kim†

*, ***, † Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea
** Department of Navigation & Shiphandling, Korea Naval Academy, Jinhae, 645-797, Korea

요 약 : 군사적인 용도로 사용 중인 탐지레이더는 사용대역이 점점 광대역화 되고 있으며 최근에는 Millimeter-Wave 영역까지 확장되고 있다. 탐지를 목적으로 하는 군사용 레이더의 Millimeter-Wave 사용대역은 대부분이 35 GHz와 94 GHz 영역이기 때문에 탐지 회피를 위한 전파흡수체의 설계는 필수적인 문제라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 94 GHz 대역의 전파흡수체를 10 dB 이상의 흡수능을 가지도록 개발하기 위하여 연구를 진행하였으며, FDTD를 이용해 시뮬레이션 결과를 토대로 94 GHz 대역의 전파흡수체를 제작한 결과, 조성비 Binder(CPE 외 additional material) : Carbon=70 : 30 wt.%, 두께 0.7 mm에서 14 dB 이상의 흡수능을 나타내었다.

핵심용어 : 탐지레이더, 밀리미터파, 군사적 용도, 전파흡수체, FDTD

Abstract : The bandwidth of detecting radars used for military purpose is increasingly broadened, and recently, the frequency band of the detecting radars is expanding to millimeterwave bands of the millimeterwave bands of 35 GHz and 94 GHz. Since, especially, it is essential and important to fabricate and develop EM wave absorber with the absorption ability more than 10 dB in 94 GHz band, the EM wave absorber was manufactured based on the design method by FDTD simulation. As a result, the developed EM wave absorber with the composition ratio of Binder(CPE with additional materials) : Carbon = 70 : 30 wt.% has the thickness of 0.7 mm and the absorption ability more than 14 dB in the frequency range of 94 GHz.

Key words : Detecting radar, Millimeterwave, Military purpose, EM wave absorber, FDTD

1. 서 론

레이더(RADAR)는 RAdio Detection And Ranging 의 머리 글자를 모은 약어로 그 어원에서도 알 수 있는 바와 같이 좁은 빔폭을 갖는 지향성 안테나를 통하여 전자파를 방사하여 임의의 물체에서 반사되는 반사파를 수신함으로써 송수신간의 시간차를 측정하여 표적까지의 거리를 계산할 수 있다. 이와 같이 전자파를 이용하여 표적까지의 거리와 안테나의 방향을 탐지하는 전자장치를 레이더라고 한다. 레이더는 사람의 시계가 확보되지 않는 악천후시나 야간에도 움직이는 물체나 장애물을 관측할 수 있기 때문에 항공기 또는 선박의 유도나 안전 확보 등에 중요한 역할을 하고 있다(Skolnik, 2001).

밀리미터파 레이더는 마이크로파에 비해 짧은 파장으로 인해 대기감쇠가 크지만, 매우 정밀한 위치측정 및 도플러 속도 측정이 가능하고, IR이나 광학에 비해 비, 안개, 구름 등의 영향을 적게 받는 장점으로 1980년대 후반부터 군사용과 상업용

으로 연구 개발되어 활용이 확대되고 있다(BROOKER et al., 2000).

특히, 적의 탐지를 위한 목적으로 사용 중인 군사용 레이더는 전파유도기술의 발달 및 고성능화에 의해 사용주파수가 millimeterwave 까지 확장되고 있다. 최근 개발 중인 군사용 탐지레이더는 millimeter wave 영역 중에서 대기 중에 가장 잘 전파되는 주파수인 35 GHz나 94 GHz를 주로 사용한다. 따라서 그에 따른 탐지거부를 위한 목적으로 millimeterwave 대역에 대한 전파흡수체의 개발은 필수적인 문제라 할 수 있다(Soh et al., 2001; 김, 2006).

millimeterwave 대역에서 전파를 흡수하는 손실재료는 Carbon, Permalloy, TiO₂ 등을 이용하여 연구되고 있다(Choi et al., 2006; 김 등, 2006).

본 논문에서는 군사적인 목적으로 사용되는 millimeterwave 대역 중 94 GHz에서 흡수능 10 dB이상을 가지는 전파흡수체를 개발하기 위하여 유전손실재료 중 입자가 25 nm 이하 인

* 대표저자 : 정회원, daehunezzang@hanmail.net, 051)410-4932
** 정회원, navsun@naver.com, 051)410-4932
*** 정회원, iamjustok@nate.com, 051)410-4932
† 교신저자 : 종신회원, dikim@hhu.ac.kr, 051)410-4314

Carbon을 이용하여 조성비에 따른 최적의 흡수능을 보이는 두께를 FDTD 시뮬레이션에 의해 계산하고 최적 조성비를 바탕으로 전파흡수체를 실제 제작하여 Network Analyzer로 측정 후 FDTD 시뮬레이션에 의한 계산값과 비교 분석하였다.

2. 전파흡수체의 설계

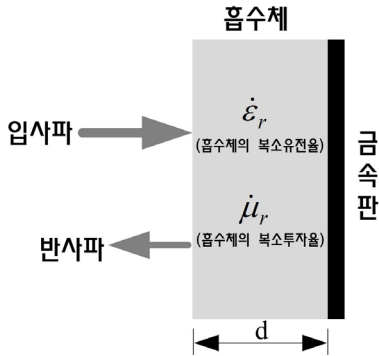


Fig. 1 Single-layered EM wave absorber.

그림 1의 두께가 d인 전파흡수체에서 입사파와 반사파의 반향손실(Return Loss)은 식 (1)처럼 나타낼 수 있다(Soh et al., 2001).

$$RL = -20 \log_{10} \left| \frac{\dot{z} - 1}{\dot{z} + 1} \right| \text{ [dB]} \quad (1)$$

여기서 \dot{z} 는 정규화된 입력임피던스를 의미한다.

그러나, 도파관내에서 전파흡수체를 설계하였기 때문에 TE_{10} 모드를 기본모드로 계산을 하여야 하며, 그림 2처럼 나타낼 수 있다.

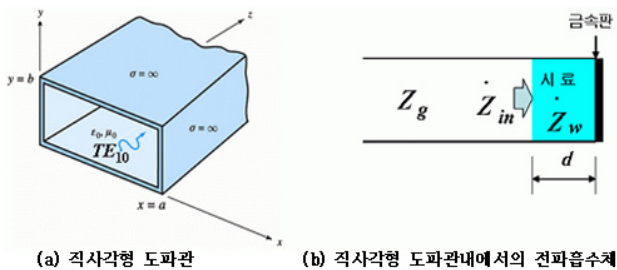


Fig. 2 EM wave absorber in rectangular waveguide.

평면파의 수직입사에 대한 입력임피던스 \dot{z} 는 도파관내 공중의 파동임피던스 Z_g 로 정규화 시킨 것으로 식 (2)처럼 주어진다.

$$\dot{z} = \dot{\mu}_r \sqrt{\frac{1 - (\lambda/2a)^2}{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - (\lambda/2a)^2}} \cdot \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - (\lambda/2a)^2} d \right) \quad (2)$$

여기서, λ 는 입사한 평면파의 자유공간상의 파장이며, a 는 직사각형 도파관 내의 x축 길이이며, d 는 직사각형 도파관내

에서의 전파흡수체 두께이며, $\dot{\epsilon}_r$ 은 복소 비유전율($\dot{\epsilon}/\epsilon_0$), $\dot{\mu}_r$ 은 복소 비투자율($\dot{\mu}/\mu_0$)이다. 또한 완벽한 전파흡수체가 되기 위해서는 \dot{z} 가 1이 되는 것으로 전파흡수체의 완전정합 조건은 식 (3)과 같다.

$$\dot{\mu}_r \sqrt{\frac{1 - (\lambda/2a)^2}{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - (\lambda/2a)^2}} \cdot \tanh \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r \dot{\mu}_r - (\lambda/2a)^2} d \right) = 1 \quad (3)$$

3. 전파흡수체의 제작 및 재료정수 측정

3.1 전파흡수체 제작

본 논문에서는 군사적인 목적으로 사용되는 millimeterwave 대역 중 94 GHz에서 10 dB 이상의 흡수능을 가지는 전파흡수체를 개발하기 위하여 유전손실재료 중 입자가 25 mm 이하인 Carbon을 사용하였고 바인더로는 CPE를 사용하였다. 먼저, 두께는 2 mm이고, Carbon과 CPE의 조성비를 다르게 구성한 샘플을 제작하여 흡수능을 측정하였다. 그림 3은 그 결과를 나타낸다. 65 GHz에서 110 GHz 범위에서 측정한 결과, 10 dB 이상의 흡수능을 보이는 조성비는 Carbon 함유량이 20wt.%, 30wt.%, 40wt.% 인 경우였지만 최대 흡수능을 보이는 함유량이 30wt.% 이므로 본 논문에서는 Carbon 함유량을 30wt.%로 결정하여 FDTD 시뮬레이션을 통해 1 mm 이하의 두께에서 최적의 흡수능을 보이는 두께인 0.7 mm로 제작할 흡수체의 두께를 결정하였다.

전파흡수체 제작과정은 먼저 Carbon : Binder(CPE 및 additional materials) = 30 : 70 wt.% 를 기본 조성비로 결정하고, 군용 제품 사용허가 규격을 만족하기 위해 난연성, 내유성, 충격강도 등의 이화화적인 성능 부여를 위한 물성소재를 추가하였다(국방규격, 2007).

Sheet형 전파흡수체의 대량생산을 위해 Compound Mixer에서 재료들을 혼합하고, Sheet 타입의 필름 등을 제조하는 Calendar Machine에서 두께 0.7 mm를 가지는 전파흡수체를 최종 생산하였다.

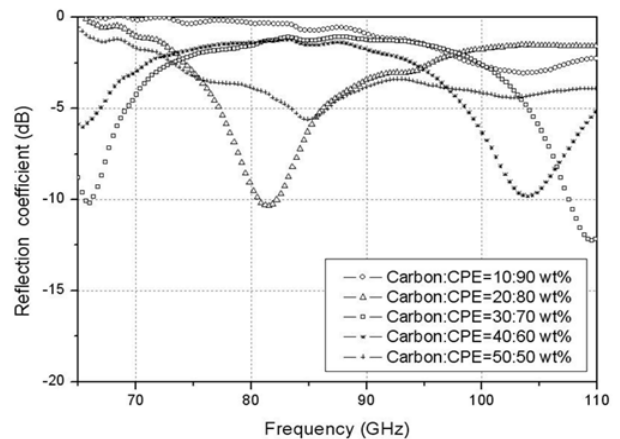


Fig. 3 Reflection coefficients of samples with different composition ratio (Thickness : 2 mm).



Fig. 4 Manufactured EM wave absorber.

3.2 재료정수 측정법

재료정수 측정은 길이 ℓ 의 변화에 의한 측정법을 사용하였다.

그림 5와 같이 도파관의 종단을 단락시키고 길이가 각각 ℓ , 2ℓ 인 시료를 삽입하여 시료 전면에서 들여다 본 입력임피던스를 측정하여 각각 \dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 로 한다.

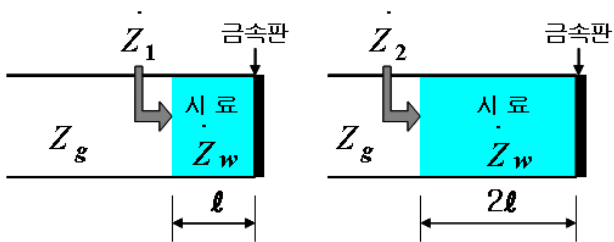


Fig. 5 Test case in sample length ℓ and 2ℓ .

$Z_L = 0$, 길이는 ℓ 이라고 두면 \dot{Z}_1 , \dot{Z}_2 은 식 (4), (5)와 같이 된다.

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_w \tanh(\dot{\gamma}\ell) \quad (4)$$

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_w \tanh(\dot{\gamma}2\ell) \quad (5)$$

따라서, 파동임피던스 \dot{Z}_w 와 전파상수 $\dot{\gamma}$ 를 이용하여 재료정수 $\dot{\epsilon}_r$ 및 $\dot{\mu}_r$ 를 구할 수 있다.

3.3 측정 시스템

그림 6은 가로 2.54 mm, 세로 1.27 mm의 전파흡수체 시료를 장착하기 위한 Jig의 설계 도면을 나타내며 전파흡수체 시료를 제작하여 Jig에 삽입한 후 그림 7과 같이 Vector Network Analyzer(Anritsu사의 ME7808A)에 연결하여 임피던스를 측정하였다. 그림 8은 제작된 전파흡수체와 Jig, 시료의 실사진이다. 그리고 측정 데이터를 MATLAB 프로그램이

용하여 복소비유전율 $\dot{\epsilon}_r$ 과 복소비투자율 $\dot{\mu}_r$ 을 계산하였다.

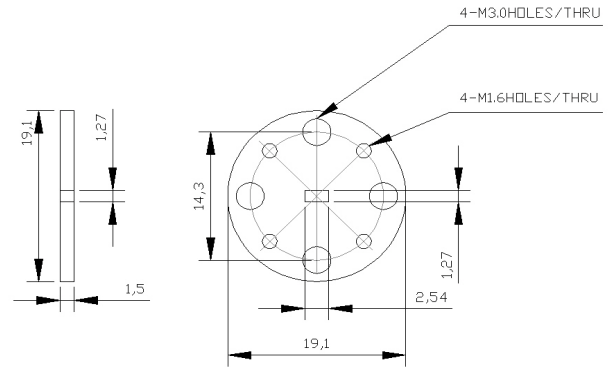


Fig. 6 Drawings of Jig.

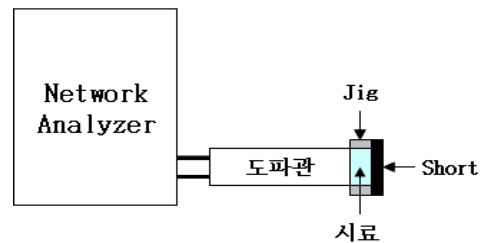


Fig. 7 Measurement system.

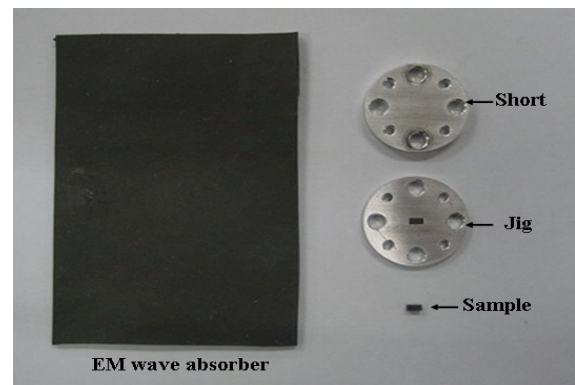


Fig. 8 Manufactured absorber, Jig, and sample.

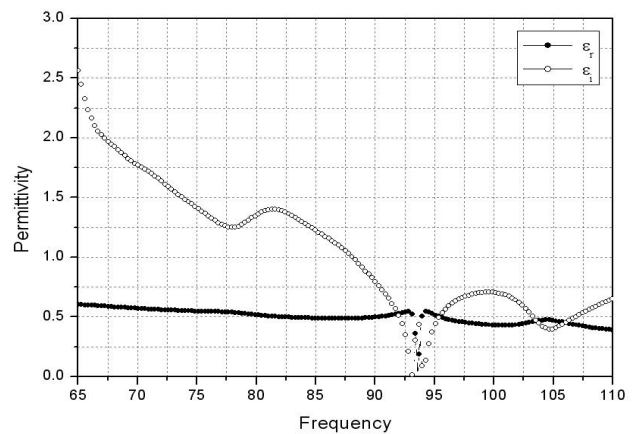


Fig. 9 The complex permittivity of EM absorber.

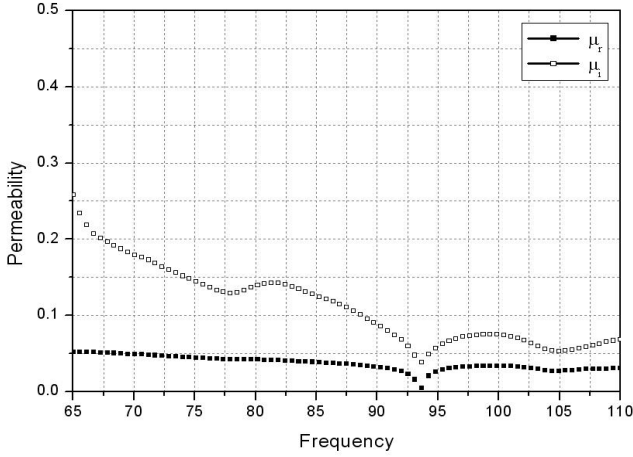


Fig. 10 The complex permeability of EM absorber.

4. 전파흡수체의 반사계수 측정

4.1 FDTD 시뮬레이션

FDTD는 Maxwell 방정식을 유한차분법을 이용하여 시간과 공간에 이산화시켜 전자기 문제를 분석하는 수치해석법이다. FDTD를 이용하여 전파흡수체의 흡수능을 구하기 위한 시뮬레이션은 먼저 정의된 cell 공간 내에 한쪽 경계면 끝을 Metal plate로 인식시키고, 그 위에 두께와 손실매질이 정의된 전파흡수체가 Metal plate 위에 놓인 것으로 인식시킨 다음, cell 공간 내 적정 지점에서 Gaussian derivative pulse를 입사파로 인가시켜 손실매질인 전파흡수체를 통과하여 Metal plate에 반사되는 반사파와의 비를 계산하여 수행된다(Holloway et al., 1997).

시간 변화를 갖는 Maxwell 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (6)$$

$$D(w) = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r(w) \cdot E(w) \quad (7)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (8)$$

$$B(w) = \mu_0 \cdot \mu_r(w) \cdot H(w) \quad (9)$$

여기서 D 는 전속밀도, E 는 전기장, B 는 자속밀도, H 는 자계를 의미한다.

손실매질의 재료정수는 다음 식으로 정의 할 수 있다.

$$\epsilon_r = \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} \quad (10)$$

$$\mu_r = 1 + \frac{K_r}{1 + j\frac{\omega}{\omega_r}} \quad (11)$$

여기서 ϵ_r 은 복소유전율, σ 는 도전율, μ_r 은 복소투자율, w 는 각주파수, w_r 은 완화주파수, K_r 은 초투자율을 의미한다. 식(10)은 Debye 항으로 유전손실매질에서 복소유전율의 실제 주파수 분산특성을 나타낸다. 식(11)은 Naito 항으로 자성손실매질에서 복소투자율의 실제 주파수 분산특성을 나타낸다.

시변계 Maxwell 방정식을 FDTD에 적용하기 위해 정규화 parameter 식(12)~식(15)을 이용하여 스칼라 수식으로 표현한 Maxwell 방정식은 식(16)~식(19)와 같다.

$$\bar{E} = \sqrt{\epsilon_0} E \quad (12)$$

$$\bar{D} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0}} D \quad (13)$$

$$\bar{H} = \sqrt{\mu_0} H \quad (14)$$

$$\bar{B} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0}} B \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \nabla \times \bar{H} \quad (16)$$

$$\bar{D}(w) = \epsilon_r(w) \bar{E}(w) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \nabla \times \bar{E} \quad (18)$$

$$\bar{B}(w) = \mu_r(w) \bar{H}(w) \quad (19)$$

3차원 해석을 수행할 경우 $\bar{E}_x, \bar{E}_y, \bar{E}_z, \bar{H}_x, \bar{H}_y, \bar{H}_z$ 의 6개 Field를 고려해야하지만, 본 논문에서는 \bar{E}_x 와 \bar{H}_y Field를 고려한 TM Mode에서의 1차원 해석을 수행하였다. 정규화된 Maxwell 방정식을 시간과 공간 변화에 대한 유한차분법을 이용하여 나타내면 다음과 같다(Sullivan, 2000).

$$\frac{\bar{E}_x^{n+1/2}(k) - \bar{E}_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \quad (20)$$

$$\frac{H_y^n(k-1/2) - H_y^n(k+1/2)}{\Delta x}$$

$$\frac{H_y^{n+1}(k+1/2) - H_y^n(k+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \quad (21)$$

$$\frac{\bar{E}_x^{n+1/2}(k+1) - \bar{E}_x^{n+1/2}(k)}{\Delta x}$$

FDTD의 정확한 해석을 위해 안정조건이 고려되어야 한다. 자유공간을 진행하는 전자기파의 진행속도가 빛보다 빠를 수 없기에 한 cell을 전파하기 위한 최소 시간을 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{\sqrt{2} C_0} \quad (22)$$

여기서 Δt 는 시간스텝, Δx 는 cell 크기, C_0 는 빛의 속도를 의미한다. cell의 크기는 파장의 1/10 이하로 정의해야 한다. FDTD 알고리즘에서 전계와 자계의 값은 갱신된다. 즉, 자계의 각 성분의 값을 계산한 뒤 컴퓨터 메모리에 저장하고 $\Delta t/2$ 시간 후에 전계의 각 성분의 값을 계산한다. 그리고 과도현상이 사라질 때까지 위 과정을 반복하여 수행하게 된다. 그림 11에 FDTD 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 94 GHz에서 14 dB의 흡수능을 나타내었다.

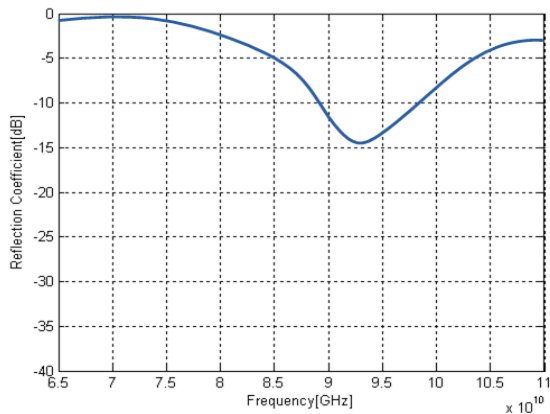


Fig. 11 Result of FDTD simulation.

4.2 재료정수 측정법

제작된 전파흡수체를 Network Analyzer와 Rectangular waveguide를 이용하여 측정 한 결과 그림 12와 같이 측정되었다. 94 GHz에서 14 dB의 흡수능 나타내었다.

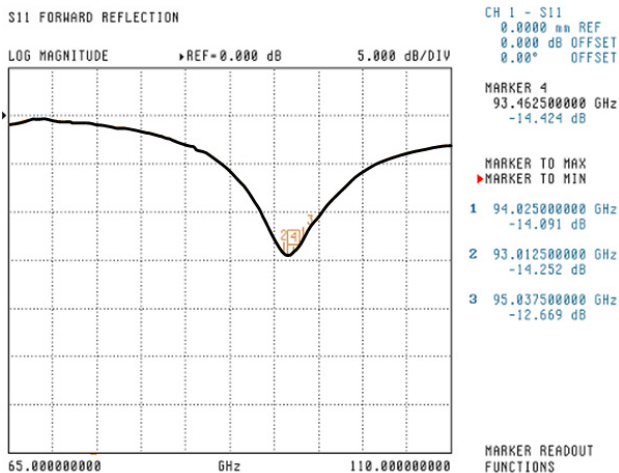


Fig. 12 Measured result.

4.3 비교 분석

FDTD 시뮬레이션을 이용하여 설계한 두께 0.7 mm 전파흡수체의 흡수능과 실제 제작되어 측정된 흡수능을 비교하여 그림 12에 나타내었다.

시뮬레이션 결과와 측정 결과의 패턴이 비교적 일치함을 알

수 있다.

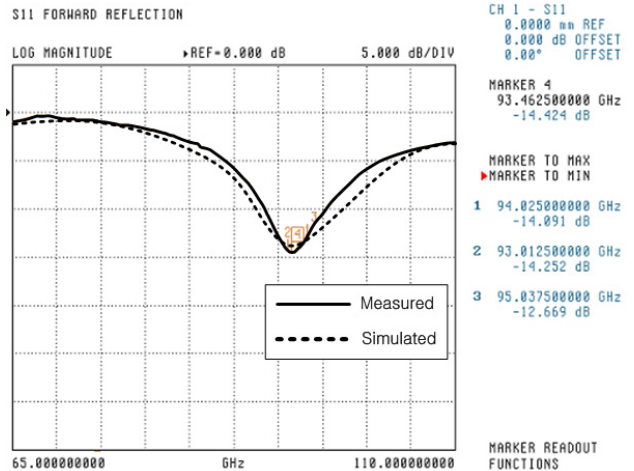


Fig. 13 Comparison of FDTD simulation results and measurement ones.

5. 결론

탐지를 목적으로 사용하는 밀리미터파 대역 군사용 레이더의 주파수는 대부분이 35 GHz와 94 GHz 영역이다. 따라서 탐지 회피를 위한 35 GHz와 94 GHz 영역의 전파흡수체 설계는 필수적인 문제라 할 수 있다. 본 논문에서는 특히, 94 GHz 대역에서 10 dB 이상의 흡수능을 가지는 전파흡수체 개발을 위하여 연구를 진행하였으며, FDTD를 이용한 시뮬레이션 결과를 토대로 94 GHz 대역의 전파흡수체를 제작한 결과 조성비 Binder(CPE + additional materials) : Carbon=70 : 30 wt.%, 두께 0.7 mm에서 14 dB의 흡수능을 나타내었다.

본 논문에서는 1차원 FDTD에 의한 시뮬레이션 방법을 제안하여 수직입사에 따른 흡수능 만을 분석하였지만, 향후 3차원 FDTD에 의한 시뮬레이션 방법 및 사입사에 따른 흡수체의 전파흡수능 분석에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산학협동재단의 2009년도 산학 fellowship 지원사업과 2008년도 산학협력실지원사업의 지원과 지식경제부의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음“ (IITA-2009-(C1090-0902-0034))

참 고 문 헌

- [1] 국방규격(2007), “KDS 1080-400, CN-007,” 다영역차장 위장망 체계.
- [2] 김동일(2006), 전파흡수체 공학, 대영사.
- [3] 김동일, 최창묵, 고평섭(2006), “ITS의 차량충돌방지 레이더용 전파흡수체 개발,” 전자공학회 논문지, 제43권, TC편

제9호, pp.1-5.

- [4] BROOKER, G. M., BIRCH, D., and SOLMS, J.(2000), "W-Band Airborne Interrupted Frequency Modulated CW Imaging Radar," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, Vol. 41, No.3, pp. 955-972.
- [5] Choi, C. M., Kim, D. I., Li, R., and Ko, G. S. (2006), "Development of the Electromagnetic Wave Absorber for 94 GHz Radar Sensors Using Permalloy," Inter. J. KIMICS, vol.4, no.3, pp.114-117.
- [6] Holloway, C. L., Delyser, R. R., German, R. F., Mckenna, P., and Kanda, M. (1997), "Comparison of Electromagnetic Absorber Used in Anechoic and Semi-Anechoic Chamber for Emissions and Immunity Testing of Digital Device." IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol.39, no.1, pp.33-47.
- [7] Skolnik, M. I. 정재순 역(2001), "Introduction to Radar Systems, 광명사.
- [8] Soh, T., and Hashmoto, O. (2001), "A Study on Millimeter-Wave Absorber Coating for V Band and W Band," Trans. IEICE, Vol.J84-B, No.8, pp. 1401-1556.
- [9] Sullivan, D. M. (2000), "Electromagnetic Simulation Using the FDTD method", IEEE Press series on RF and Microwave Technology.

원고접수일 : 2010년 2월 16일
심사완료일 : 2010년 4월 16일
원고채택일 : 2010년 4월 26일