

Metal Grid Mesh 인쇄를 이용한 투명 전자 흡수구조 설계

윤선홍¹⁾ · 이준상¹⁾ · 이인곤²⁾ · 홍익표^{*,2)}

¹⁾ 전자부품연구원 IT응용연구센터

²⁾ 공주대학교 정보통신공학부

Design of Transparent Electromagnetic Absorbing Structure using Metal Grid Mesh Printing

Sun-Hong Yoon¹⁾ · Jun-Sang Lee¹⁾ · In-Gon Lee²⁾ · Ic-Pyo Hong^{*,2)}

¹⁾ IT Application Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Korea

²⁾ Department of Information and Communication Engineering, Kongju National University, Korea

(Received 9 November 2015 / Revised 10 March 2016 / Accepted 20 May 2016)

ABSTRACT

In this paper, we designed the transparent circuit analog radar absorbing structure using printed metal grid mesh for enhanced optical transmittance. To obtain wideband electromagnetic absorption and enhanced optical transparency at X-band, we proposed the resistive FSS(Frequency Selective Surface) using printed metal mesh pattern on transparent glass with PEC(Perfect Electric Conductor) plane using ITO(Indium Thin Oxide) coating. We then fabricated the proposed structure to verify the simulation results obtained from commercial EM simulator. The comparisons between the simulation and measured results show good agreements. The results also show that the proposed radar absorbing structure can provide wideband reflection as well as better optical transparency. We can apply this proposed structure to the canopy of stealth aircraft and other stealth and security applications for visible transparency.

Key Words : Electromagnetic Absorbing Structure(전자파 흡수구조), Frequency Selective Surface(주파수 선택표면구조), Metal mesh(메탈 메쉬), Optical Transmittance(광투과율)

1. 서론

임의의 방향으로부터 입사하는 전자파를 흡수 또는

간섭을 통해 소멸시키는 전자파 흡수재료(RAM, Radar Absorbing Material)는 보통 전자기파와 같은 무선 신호를 흡수하기 위한 도료 또는 물질로 구분된다. 도료를 사용하는 방식은 고분자 페인트나 탄소 나노튜브 등을 이용한 전자파 흡수 페인트, 코팅, 판넬 등이 구현되고 있으며, 물질로 구분되는 방식은 자성

* Corresponding author, E-mail: iphong@kongju.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

체로 구현된 RAM, 허니컴(Honeycomb) 구조를 갖는 흡수체, 흡수 잉크가 도포된 구조체 등 다양한 연구가 이루어지고 있다^[1]. 이러한 전자파 흡수재료는 주파수 대역특성에 따라 협대역 전자파 흡수체인 Salisbury 스크린, 자성 흡수체(Magnetic Absorber), Dallenbach Layer 등과 광대역 전자파 흡수체인 Jaumann 흡수체 등으로 구분할 수 있으며^[2-5], Salisbury 스크린의 경우 금속판에 플라스틱 폼(foam) 또는 허니컴 간격체(Space)와 같은 저항성 유전체로 코팅된 형태를, 자성 흡수체는 페라이트와 같은 자성체를 금속판에 코팅된 형태를 가진다. Dallenbach Layer는 동작 주파수의 1/4 파장 두께를 갖는 유전체를 금속판에 부착하는 방식으로 다층구조 응용이 가능하다. 이러한 흡수체들은 다층으로 배열함으로써 광대역 특성을 얻을 수 있지만, 흡수체의 두께와 무게가 증가한다는 단점을 가지고 있으며^[6], 최근 이러한 한계를 개선하기 위해 주파수 선택 표면 구조(FSS, Frequency Selective Surface)와 RAM 구조가 결합된 CA(Circuit Analog)-RAM 구조가 대안으로 제시되고 있다. FSS 구조는 유전체 위에 전도성 도체로 이루어진 단위셀이 주기적으로 배열함으로써 특정 주파수 대역을 투과 또는 반사시키는 특성을 갖는 구조로 단위셀의 형상, 크기, 배열주기, 배열 형상 등에 따라 그 특성이 달라진다^[7]. 이러한 주기구조를 갖는 CA-RAM 구조는 두께는 얇으면서 광대역 특성을 구현할 수 있다는 장점으로 많은 연구가 이루어지고 있지만, 입사파의 편파와 입사각에 대한 주파수 응답 안정성이 낮다는 단점이 있다^[8].

한편, 유리 창호 또는 스텔스 항공기 캐노피 등에 적용하기 위해 투명 전극(Transparent electrode)을 사용하여 저항성 FSS 구조를 설계한 CA-RAM 기반의 투명 전파흡수구조에 관련한 연구도 이루어지고 있다.

투명 전극은 비저항 $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 이하이고 면저항이 $10^3 \Omega/\square$ 이하인 동시에 가시광선 영역(380-750 nm)에서 80 % 이상의 광투과율을 가진 박막으로, AZO (Aluminum-doped Zinc Oxide), ITO(Indium Tin Oxide), 두께 15 nm 이하의 Silver(Ag), Gold(Au) 등이 있으며, 이러한 특징을 바탕으로 자동차, 모바일 기기 등의 안테나 적용과^[9,10], 건물의 유리창 등에 적용되어 실내 온도를 유지하여 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 ESG(Energy Saving Glass)와 건물 내부의 무선 자원을 제어함으로써 통신 성능을 향상시키기 위한 주파수 선택 구조 응용 등에 연구되고 있다^[11]. 대표적으로 많이 사용되고 있는 투명 전극은 ITO로 고전도성(High

conductivity)과 고광투과성(High optical transparency) 등의 강점을 바탕으로 활발히 연구되고 있으나, 부족한 회로의 유연성과, 재료의 희소성에 따른 제작비용 상승 그리고 고온의 제작 공정 등의 실질적인 활용에 한계를 드러내고 있다^[12].

2012년 Y. Okano 등이 UHF-RFID 시스템에서의 간섭신호로 작용하는 다른 RFID의 신호를 부분적으로 차단하기 위해, 알루미늄 마이크로 메쉬(PET film) 기반의 사각 패치 형태를 이용하여 0.9 GHz 대역에서 동작하는 투명한 전파 흡수구조를 제안하였으며^[13], 2015년 J. P. Tak 등은 ITO 필름을 기반으로 8 GHz, 12 GHz 다중 대역에서 동작하는 흡수구조를^[14], D. Yi 등은 Graphene을 기반으로 38.5 GHz 대역에서 동작하는 투명한 전파 흡수구조를 제안하였다^[15]. 하지만 선행 연구된 논문들은 반복 배열되는 단위구조의 크기 등의 문제로 충분히 큰 구조에 대한 적용 등 한정적으로 가능하거나, 안정적인 전파 흡수 성능 또는 충분히 투명하지 않은 전파 흡수구조를 제안하고 있다.

본 논문에서는 전통적인 인쇄방식의 장점을 가지며 대면적 생산이 유리하고, 높은 광투과율과 정밀도를 가진 패턴의 형성이 유리한 투명 전극 메탈 그리드 메쉬(Metal grid mesh)를 사용하여 입사파의 편파 및 입사각에 따른 안정적인 성능을 갖는 저항성 FSS를 설계하고 이를 전파 흡수구조와 결합하여 X-대역에서 안정적인 흡수성능의 투명한 CA-RAM을 제안하고, 제작 및 측정을 통해 검증하였다.

2. 메탈 그리드 메쉬를 이용한 투명 전파 흡수구조

공진형 전파 흡수체로 분류되는 CA-RAM 구조는 특정 주파수에서 손실을 갖는 구조로 FSS 패턴을 가진 저항성 매질(resistive material)층과 접지면(ground plane)으로 구성되어 있다. 저항성 매질층의 경우 패턴의 두께가 실효 저항을 패턴의 형상, 간격 등으로 실효 인덕턴스 및 커패시턴스를 조절하여 공기에 가까운 임피던스의 경계면을 구현할 수 있으며, 이를 지지하는 두께 $d = \lambda_o / 4 \sqrt{\epsilon_r}$ 를 가진 유전체, 그리고 유전체 아랫면에 접지면을 위치시킴으로써 특정 주파수에서 저항 매질은 개방 상태로, 접지면은 단락 상태와 같은 동작을 통해 접지면으로부터의 반사파로부터 상쇄간섭을 통해 손실을 유도할 수 있다. 이와 같은 전파 흡수체의 동작은 전파 흡수구조의 등가회로를 통해 전

송선로 이론을 바탕으로 설명할 수 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 종단에 Z_L 의 부하가 위치한 특성 임피던스 Z_0 를 가진 전송선로에서, 종단으로부터 거리 d 위치에서 전송선로의 입력 임피던스 Z_{in} 는 식 (1)과 같다.

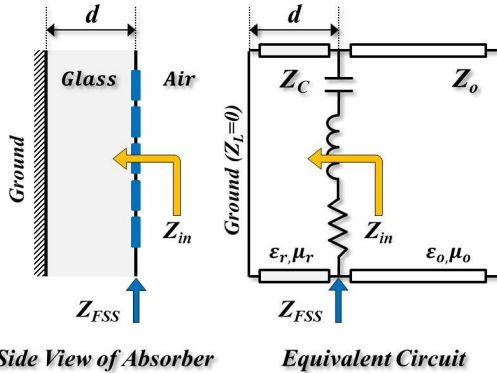


Fig. 1. Equivalent circuit model of the Circuit-Analog RAM^[7]

$$Z_{in} = Z_C \frac{Z_L + Z_C \tanh \gamma_C d}{Z_C + Z_L \tanh \gamma_C d} \quad (1)$$

Z_C 는 선로의 특성 임피던스로 $Z_C = Z_0 \sqrt{\mu_r / \epsilon_r}$ 의 관계를 가지고 있으며, γ_C 는 무손실 매질에서 전파상수로 $\gamma_C = j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ 에 관계에 있다. 전파 흡수구조의 등가회로부터 FSS 경계면으로 들여다 본 입력 임피던스는 부하가 단락 상태이므로 식 (2)으로 나타낼 수 있으며, 이를 공기의 임피던스 $Z_0 (= \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \approx 377 \Omega)$ 와 흡수구조의 임피던스 Z_{in} 간 매칭($Z_{in} = Z_0$)을 통해 반사파를 제거할 수 있다.

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j\omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r} d) \parallel Z_{FSS} \quad (2)$$

CA-RAM 구조는 전자기파에 대해 저항, 인덕턴스, 커패시턴스로 구성된 등가회로로 표현될 수 있으며, 각 변수들의 조합에 따라 다양한 전자파 흡수 특성 설계가 가능하다. 여기서 손실재료의 저항 성분은 전기 전도도와 재료의 두께로 조절되며 흡수체의 흡수 성능을 결정하는 중요한 변수로 작용한다. 본 논문에서 제안하는 전파 흡수구조는 X-대역 전파의 흡수 특성을 구현하기 위하여 대역 통과 특성을 갖는 커패시티브 패치(Capacitive patch) 구조와 대역 차단 특성을 갖는 인덕티브 메쉬(Inductive mesh)가 결합된 구조의 개구면을 가진 FSS 구조를 설계하였으며 그 외형을 Fig. 2에 나타내었다. 설계한 FSS 구조의 안정된 광대역 대역 통과 특성을 위하여 편파에 따라 표면에 유기되는 전기장과 자기장의 비가 일치하도록 최적화하였다^[16,17].

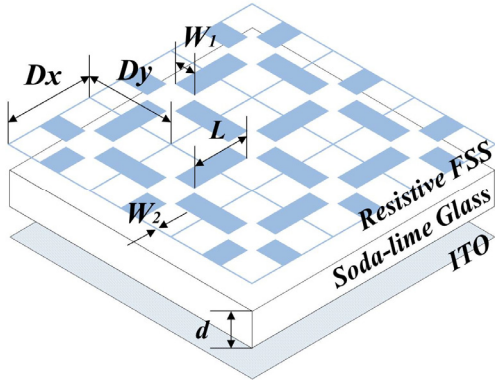
이를 바탕으로 높은 광투과율을 갖는 CA-RAM 기반의 전자파 흡수구조를 설계하기 위해, 설계한 저항성 FSS 구조를 선폭 30 μm , 인쇄두께 107.3 ~ 115.5 nm의 메탈 그리드 메쉬 투명 전극으로 구현하였다. 유전체로는 유전율 $\epsilon_r = 10.6$, 손실탄젠트 $\delta = 0.15$ 의 소다라임 글래스(Soda-lime Glass), 그리고 전반사를 위한 도체면은 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 낮은 비저항을 갖는 ITO로 설정하였다. ITO는 제작 환경을 고려해 1450 Å 두께로 설정하였으며, 면저항 15 Ω/\square 를 갖는 저항성 표면으로 모델링 할 수 있다. 메탈 그리드 메쉬로 구현된 저항성 FSS 구조는 실제 측정된 면저항 R_{\square} 으로부터 식 (3)을 통해 얻은 근사 표면저항 R'_{\square} 을 이용하여 모델링이 가능하다^[18].

설계에 적용된 메탈 그리드 메쉬는 상용 은(Ag) 전도성 잉크를 가정하였으며, 제작 환경을 고려하여 인쇄 선폭 28.6 μm , 인쇄 두께 115 nm 그리고 주기(p)는 628.6 μm 로 설정하였다. 상용 Ag 전도성 잉크의 전기적 특성을 측정하기 위해 크기 10×10 mm, 두께 115 nm로 인쇄된 샘플을 제작하고 4-point probe를 통해 면저항($R_{\square} = 988 \Omega/\square$)을 측정하였으며, 메쉬에서 빈 여백을 제외한 면적에 대한 비례식으로부터 계산된 표면저항 87.9 Ω/\square 를 얻었다. 이를 바탕으로 반복되는 메탈 메쉬의 주기(p), 메쉬에서 주기에 대해 빈 여백의 길이가 차지하는 비율($\tau \times p$) 그리고 계산된 표면저항 R_{\square} 의 관계를 나타내는 식 (3)으로부터 메탈 그리드 메쉬의 근사 표면저항을 얻었다. 제안된 구조에서 τ 는 메쉬의 빈 여백(600 μm)을 주기(628.6 μm)로 나눈 값으로 0.955을 가지며, 계산된 R_{\square} , τ 으로부터 근사화된 표면저항 $R'_{\square} = 1.95 \text{ k}\Omega/\square$ 을 갖는 저항성

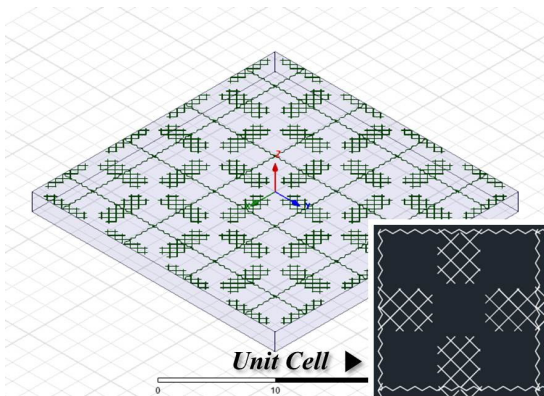
$$R'_{\square} \approx \frac{\tau \times p}{p - \tau \times p} R_{\square} + R_{\square} = \frac{1}{1 - \tau} R_{\square} \quad (3)$$

296 / 한국군사과학기술학회지 제19권 제3호(2016년 6월)

시트로 모델링하였다. 투명한 유전체의 두께는 제작 여건상 0.7 mm의 배수로 가능하여 $d = \lambda_0 / 4 \sqrt{\epsilon_r}$ 관계로부터 12 GHz 대역 동작($d = 1.9196$ mm)을 목표로 2.1 mm의 두께로 설정하였다.



(a) Geometry of the proposed CA-RAM



(b) 3D model in perspective view

Fig. 2. Transparent electromagnetic absorbing structure using metal grid mesh

모델링한 CA-RAM 전파 흡수구조는 상용 전자기 해석 소프트웨어를 사용하여 계산을 수행하였으며, 설계한 CA-RAM 구조의 외형을 Fig. 2에, 최적화된 변수를 Table 1에 나타내었다. 설계 변수에 대한 최적화는 공진 주파수를 결정하는 주요 설계 변수로 L 을, 대역폭을 결정하는 주요 변수로 W 로 설정하여, 수직 입사하는 TE, TM 편파를 가정하고, 설계 변수에 따른 반사 손실을 관찰하는 변수분석(parametric study)을 통하여 최적화를 수행하였다.

Table 1. Design parameters of the proposed RAM

Parameters	Value(unit:mm)
D_x	7.4
D_y	7.4
W_1	2.0
W_2	0.1
L	4.7
d	2.1

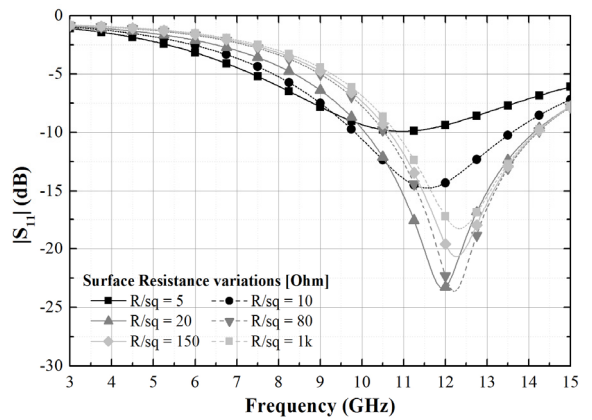


Fig. 3. Simulated reflection characteristics for different surface impedances

계산된 근사 표면저항 값을 바탕으로 설계오차를 줄이기 위해 메탈 그리드 메쉬의 표면저항의 변화에 따른 반사손실 특성을 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 해석 결과로부터 흡수체의 흡수성능이 표면저항에 따라 공진 주파수는 최대 1.35 GHz의 차이를 보였으며, 최대 -13.74 dB의 반사손실 차이를 확인하였다. 따라서 메탈 그리드 메쉬의 표면 저항은 흡수체의 흡수 성능에 큰 영향을 주는 설계 변수로서 근사 표면저항(R'_{\square})을 통한 메탈 그리드 메쉬의 정확한 모델링이 흡수체의 설계에 있어서 매우 중요한 요소임을 알 수 있으며, 본 논문에서 식 (3)을 이용하여 얻은 표면 저항값이 유효함을 확인하였다.

앞서 계산된 메탈 그리드 메쉬의 근사 표면저항 $R'_{\square} = 1.95 \text{ k}\Omega/\square$ 을 바탕으로 입사 평면파가 전파 흡수구조에 수직 입사 및 경사 입사할 때를 가정하여 TE(Transverse Electric) 모드와 TM(Transverse Magnetic)

모드에 대한 전파 흡수 특성인 반사손실을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

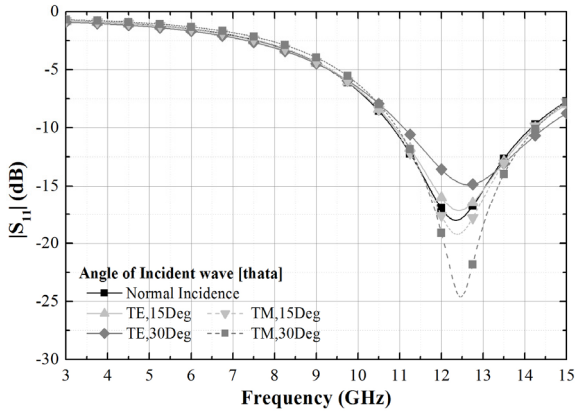


Fig. 4. Simulated reflection characteristics for different angles of incident wave

계산된 결과로부터 수직으로 입사하는 입사파에 대하여 공진 주파수는 12.3 GHz, 반사손실 -10 dB 기준 대역폭의 경우 3.27 GHz를 갖는 것을 확인할 수 있다. TE, TM 모드에 대하여 입사각이 증가함에 따라 공진 주파수의 변화는 미비하며, 흡수 성능에 대하여 감소 또는 증가 되는 등의 주파수 응답을 확인하였다. 특히 TE 모드 30°의 결과로부터 동작 주파수에 대하여 흡수 성능의 감소 현상이 있지만, 반사손실 -15 dB로 안정적인 흡수성능을 가짐을 확인할 수 있다.

3. 투명 전파 흡수구조 제작 및 측정

계산결과를 바탕으로 검증은 위하여, 설계한 단위셀 구조를 20×20으로 배열한 투명한 전파 흡수구조를 제작하였다. 저항성 FSS를 구현하기 위한 인쇄 기판은 소다라임 글래스 제품으로 인쇄 공정 전에 유리 전용 세정액으로 세척하여 사용하였고 잉크는 점도가 10,000 cps인 Ag 전도성 잉크를 사용하였다. 인쇄 장비는 N사에서 제작한 그라비아 옷셋 R2P 장비를 사용하였으며, 인쇄 위치 정밀도는 ±10 μm 이하, 인쇄 속도는 최대 300 mm/sec인 사양의 장비를 사용하여 인쇄 공정을 진행하였다. 인쇄한 Ag 패턴은 200 °C에서 30분간 경화하였으며, 전반사를 위한 도체층은 면저항 15 Ω/□, 두께 1450±70 Å의 ITO를 유전체 아랫면에

코팅하는 방식으로, 진공 증착법의 일종인 스퍼터링 (sputtering)하여 ITO를 유리 기판에 증착하였으며, 유리기판과 박막의 밀착력은 반데르발스(Van der Waals) 결합에 기인한다. 제작에 사용된 메탈 그리드 메쉬와 ITO 시트의 광투과율(Optical transmittance)은 각각 96.3 %, 90 %로 가시광 영역에서 높은 광투과율을 가지며, 광원의 크기 (beam size) 26.5 mm의 두께측정기 (Thickness measurement)를 사용하여 파장에 따른 광투과율을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

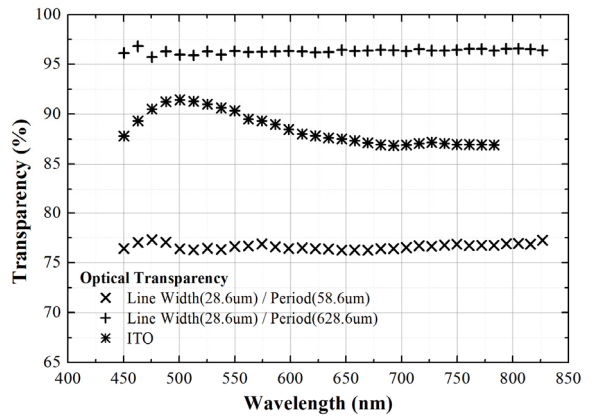
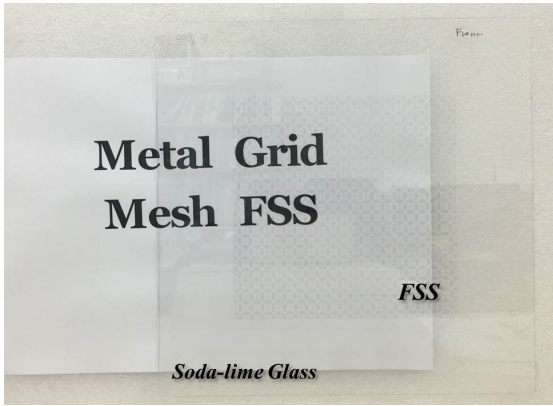


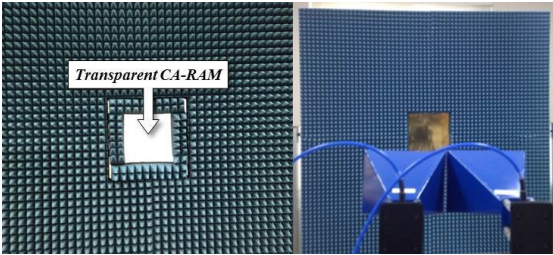
Fig. 5. Measured results of optical transmittance for fabricated CA-RAM

메탈 그리드 메쉬의 경우 패턴의 밀도가 높을수록 광투과율이 낮아지며, 근사 표면저항 계산식으로부터 표면저항은 낮아지는 경향을 알 수 있다. 측정 실험을 위한 전파 흡수구조의 전체 크기는 250×250 mm으로 측정 지그 사이즈를 고려하여 제작하였으며, 3-15 GHz에서 동작하는 두 개의 독립적인 광대역 혼 안테나를 통해, 송신 안테나로부터 전파 흡수구조를 거쳐 수신 안테나로 전달된 전력의 비(bi-static)를 통하여 제작된 전파 흡수구조의 반사손실 특성을 측정하였으며, 별도 제작된 구리판을 통하여 각각의 입사각도에 대한 측정값을 보정하였다. 제작된 투명한 전파 흡수구조의 외형을 Fig. 6(a)에 나타내었으며, 구성된 측정시스템을 Fig. 6(b)에 나타내었다. 투명한 유전체 아랫면에 전반사를 위한 도체면으로 구현된 ITO 코팅에 대한 반사 성능을 확인하기 위해 측정실험을 수행하였으며, 구리 도체판과 동일한 전반사특성을 확인하였다. 이를 바탕으로 제안된 CA-RAM 구조에 대한 측정 실험을 진행하였으며, 입사파의 편파 및 입사각 0°,

30°에서의 반사손실 특성을 관찰하였다.



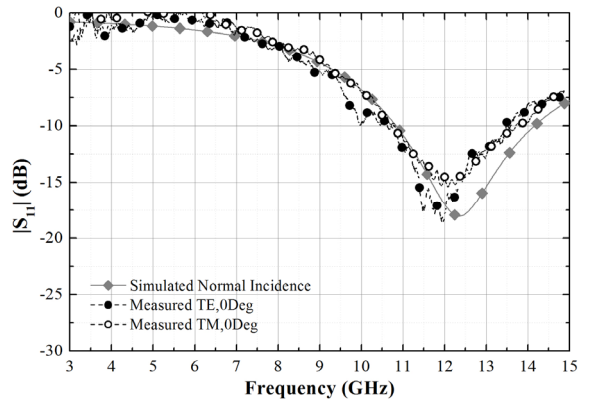
(a) Fabricated transparent CA-RAM



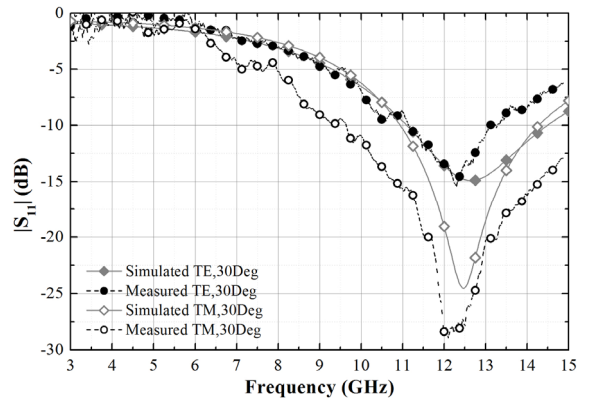
(b) free-space measurement & reflection characteristics calibration

Fig. 6. Proposed CA-RAM structure and measurement system

Fig. 7(a)는 입사파의 수직 입사(0°)로부터 편파 TE, TM에 따른 반사손실을, Fig. 7(b)에는 입사각 30°에서의 반사손실 측정 결과를 나타내었다. 측정된 결과로부터 TE 모드, 입사각 0°를 기준으로 공진 주파수는 11.97 GHz(-18.5 dB), 반사손실 -10 dB 기준 대역폭은 2.92 GHz을 가짐을 확인하였으며, TM 모드, 입사각 0°를 기준으로 공진 주파수는 12.1 GHz(-15.39 dB), 반사손실 -10 dB 기준 대역폭은 2.88 GHz을 갖는 것을 확인하였다. 해석 결과로부터 측정된 공진 주파수에 대하여 최대 0.3 GHz(2.7 %)의 오차를, -10 dB 기준 대역폭은 최대 0.39 GHz(11.9 %)의 오차를 확인하였다. 측정결과와 시뮬레이션결과와의 오차는 단위구조를 설계하여 동일한 패턴을 갖는 무한한 주기구조를 가정한 해석 방식과 실제 패턴 제작에 있어서 발생하는 단위셀의 불규칙성으로부터 기인한 결과로 사료된다^[9].



(a) Normal incidence



(b) Angle of incidence = 30°

Fig. 7. Compared results between measurements and simulations

4. 결론

본 논문에서는 광투과율이 향상된 메탈 그리드 메쉬 투명 전극을 이용하여 광대역 특성 구현에 용이한 CA-RAM 흡수체에 기반을 둔 투명 전파 흡수구조를 설계하였다. X-대역에 대한 광대역 흡수성능을 구현하기 위해 투명한 유전체인 두께 2.1 mm의 소다라임 글래스와 96.3 %, 90 %의 광투과율을 갖는 투명전극 메탈 그리드 메쉬 그리고 ITO를 이용하여 설계하였다. 또한 표면저항 근사식을 이용하여 CA-RAM 흡수체를 구성하는 저항성 FSS를 인쇄전자 기법을 이용하여 메탈 그리드 메쉬로 구현하였으며 ITO와 결합하여, 측정 결과로부터 입사파의 수직 입사를 기준으로 11.97 GHz

의 공진 주파수와 -10 dB 기준 2.92 GHz(약 24 %)의 대역폭을 가진 광대역 흡수특성을 얻었다. 제안한 구조는 광대역의 안정적인 흡수성능을 가짐은 물론 높은 광투과율을 갖기 때문에 무선 신호로부터 보안성 확보가 요구되는 시설 또는 투명한 전파흡수체가 필요한 국방 분야 등에 사용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 연구개발 특구진흥재단의 지원(2015K000281)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2015R1A2A2A01003380)임.

References

- [1] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, Radar Cross Section, 2nd Ed, SciTech Publishing, 2004.
- [2] K. J. Vinoy, and R. M. Jha, Radar Absorbing Materials : From Theory to Design and Characterization, Springer, 2011.
- [3] K. D. Il, K. J. Chang, and J. Y. Ick, "Development of the EM wave Absorber for Improving the Performance of Hi-Pass System in ITS," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 1505-1510, 2014.
- [4] P. S. Hwa, et. al., "Optimal Design of Radar Absorbing Structure for Reduction of Radar Cross Section," Proceeding of the 2012 KSAS Spring Conference, pp. 291-296, 2012.
- [5] C. W. Ho, et. al., "Design of the Broadband Hybrid Multi-Slab Circuit-Analog(CA) Microwave Absorber," Proceeding of the 2014 IEEK Summer Conference, pp. 362-363, 2014.
- [6] P. Saville, "Review of Radar Absorbing Materials," Technical Memorandum of Defence R&D Canada, Jan. 2005.
- [7] Munk, B. A, Frequency Selective Surfaces : Theory and Design, John Wiley & Sons, 2005.
- [8] B. Zheng, and Z. Shen, "Wideband Radar Absorbing Material Combining High-Impedance Transmission Line and Circuit Analogue Screen," Electronics Letters, Vol. 44, No. 4, pp. 318-319, 2008.
- [9] N. Outaleb, J. Pinel, M. Drissi, and O. Bonnaud, "Microwave Planar Antenna with RF-sputtered Indium Tin Oxide Films," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 24, No. 1, pp. 3-7, 2000.
- [10] N. Guan, H. Furuya, K. Himeno, K. Goto, and K. Ito, "A Monopole Antenna Made of a Transparent Conductive Film," International Workshop on Antenna Technology : Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications, pp. 263-266, 2007.
- [11] C. Mias, C. Tsakonas, and C. Oswald, "An Investigation into the Feasibility of Designing Frequency Selective Windows Employing Periodic Structures," Final Report for the Radio Communications Agency, Nottingham University, 2001.
- [12] M.-G. Kang, and L. J. Guo, "Semitransparent Cu Electrode on a Flexible Substrate and its Application in Organic Light Emitting Diodes," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 25, pp. 2637-2641, 2007.
- [13] Y. Okano, O. Satoshi, and I. Koji, "Development of Optically Transparent Ultrathin Microwave Absorber for Ultrahigh-Frequency RF Identification System," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 60, No. 8, pp. 2456-2464, 2012.
- [14] J. P. Tak, H. Y. Taek, and C. J. Hoon, "Design of a Dual Band Transparent Metamaterial Absorber," 2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS), IEEE, pp. 301-303, 2015.
- [15] D. Yi, et al., "Transparent Microwave Absorber based on Single Layer Graphene Film," 2015 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC), IEEE, Vol. 3, 2015.
- [16] E. S. Rodrigues Montalvao, A. P. de S. Montalvao, A. Gomes D'Assuncao. L. M. Mendonca, and A. Gomes Neto, "Study of the Geometric Complexity Reduction of a Quasi-Fractal FSS using WCIP," 2011 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference(IMOC), pp. 970-974, 2011.
- [17] L. Musa, P. W. B. Au, E. A. Parker, and R. J.

- Langley, "Sensitivity of Tripole and Calthrop FSS Reflection Bands to Angle of Incidence," *Electronics Letters*, Vol. 25, No. 4, pp. 284-285, 1989.
- [18] J. Hautcoeur, X. Castel, F. Colombel, R. Benzerga, M. Hindi, G. Legeay, and E. M. Cruz, "Transparency and Electrical Properties of Meshed Metal Films," *Thin Solid Films*, Vol. 519, pp. 3851-3858, 2011.
- [19] G. H. H. Sung, "A Frequency Selective Wall for Interference Reduction in Wireless Indoor Environments," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Vol. 48, No. 5, pp. 29-37, 2006.