

스텔스 전투기 캐노피를 위한 투명 전자파 흡수구조 설계

홍익표^{*,1)}

¹⁾ 국립공주대학교 정보통신공학부

Design of Transparent Electromagnetic Absorbing Structure for Stealth Aircraft Canopy

Ic-Pyo Hong^{*,1)}

¹⁾ Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University, Korea

(Received 6 January 2015 / Revised 30 May 2015 / Accepted 3 July 2015)

ABSTRACT

In this paper, transparent circuit analog radar absorbing structure with angular stability for stealth aircraft canopy was proposed and designed. To obtain wideband electromagnetic absorption, optical transparency and smaller thickness, we proposed the novel FSS(Frequency Selective Surface) for X-band and implemented the resistive FSS and PEC(Perfect Electric Conductor) plane using ITO(Indium Thin Oxide) coating with optical transmissivity of 90 %. Reflection loss characteristics for different incident angles of both TE(Transverse Electric) and TM(Transverse Magnetic) polarizations are presented through simulations. We then fabricated the proposed structure to verify the simulation results. The comparisons between the simulation and measured results show good agreements. The results also show that the proposed radar absorbing structure can provide better frequency stability for different incidence angles and polarizations as well as optical transparency. We can apply this proposed structure to the canopy of stealth aircraft and other stealth applications for visible transparency.

Key Words : Radar Absorbing Structure(전파흡수구조), Frequency Selective Surface(주파수 선택막), Stealth Aircraft(스텔스 전투기), Optical Transmissivity(광투과율)

1. 서론

스텔스 기술은 적의 지상, 해상 및 항공기 탑재 레이더로부터 아군의 항공기, 함정, 지상무기 등이 탐지

될 수 있는 확률을 낮추기 위한 종합적 기술로 항공기 등이 발생시키는 엔진소음 같은 음향신호, 배기가스 등 시각으로 확인되는 광학적 신호를 최소화시키는 기술과 기체에서 발생되어지는 열을 적외선 신호로부터 탐지되지 않게 하는 기술, 레이더 전자파에 의한 반사 신호를 최소화시키는 기술로 구분할 수 있다. 그 중에서 적의 레이더가 발생시키는 전자파

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

를 흡수 또는 산란시켜 탐지되지 않도록 하는 기술이 여러 스텔스 기술들 중 가장 중요한 기술이라 할 수 있다^[1]. 이러한 전자파에 대한 스텔스 기술은 입사하는 전자파를 레이더의 방향이 아닌 다른 방향으로 산란 시키는 반사파 감소 형상화기술과 능동/수동소자를 이용한 기술, 그리고 입사하는 전자파를 흡수 또는 간섭을 통해 소멸시키는 전자파 흡수 재료(RAM : Radar Absorbing Material)를 사용하는 방법, 그리고 최근에 연구가 이루어지고 있는 플라즈마를 이용한 스텔스 기술로 분류될 수 있다^[2]. 이 중 전자파 흡수 재료는 보통 전자기파와 같은 레이더신호를 흡수하기 위한 도료 또는 물질로 구현되는데, 최근에는 고분자 페라이트나 탄소나노튜브 등을 이용한 전자파 흡수 페인트, 코팅, 판넬 등이 구현 되고 있으며, 자성체로 구현된 RAM, 허니컴(Honeycomb) 구조를 갖는 흡수체, 흡수잉크가 도포된 구조체 등 다양한 연구가 이루어지고 있다. RAM 구조는 주파수 대역특성에 따라 협대역 전자파 흡수체인 Salisbury 스크린, 자성 흡수체(Magnetic Absorber), Dallenbach Layer 등과 Jaumann 흡수체와 같은 광대역 전자파 흡수체로 구분할 수 있다^[2]. Salisbury 스크린은 금속판에 공기저항과 같은 저항성 표면을 갖는 플라스틱 폼(Foam) 또는 허니컴 간격재(Spacer)와 같은 저항성 유전체를 코팅한 구조이며 자성 흡수체는 페라이트와 같은 자성체를 금속판에 코팅하는 구조로 무게가 무겁다는 단점이 있고, Dallenbach Layer는 1/4 파장 두께를 갖는 유전체를 금속판에 부착하여 다층 구조 응용이 가능하다는 장점이 있으며, Jaumann 흡수체는 Salisbury 스크린을 다층 배열하여 광대역 특성을 얻을 수 있다고 알려져 있다^[2,3].

FSS는 유전체 기판 위에 단위셀 구조를 갖는 도체 또는 슬롯이 주기적으로 배열된 전자기 구조로 특정 주파수만을 투과시키거나 또는 반사시키는 특성을 갖는다. 이 주파수 선택막은 일반적으로 기본 단위요소의 형상과 크기, 배열 주기 및 배열 형상 그리고 배열 구조를 포함하는 유전체 등에 따라 전자기적 특성이 달라진다. 특히 대역통과 특성을 갖는 전자기 공간필터 특성을 이용하여, 스텔스 레이더 또는 배열구조 반사판 등 통신의 여러 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다^[4,5]. 최근에는 이러한 FSS 구조 또는 인공자기 도체(AMC : Artificial Magnetic Conductor)와 같은 단위셀 주기 구조를 응용하여 RAM 구조와 결합된 CA (Circuit analog)-RAM 구조가 연구되고 있으며, 입사각에 따라 주파수 특성이 변하는 단점이 있지만 전파흡

수구조의 두께는 얇으면서 광대역 특성을 구현할 수 있다는 장점이 있기 때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있다^[6]. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 입사각 안정성을 가지며 투명한 전도성 도체를 사용한 FSS 구조를 설계하고 이와 결합된 투명한 CA-RAM 구조를 설계하고 제안하였다.

투명한 전도성 도체를 사용한 응용 연구는 투명하다는 특징을 이용하여 크기에 구애 받지 않고 외부에 구현이 가능하다는 장점으로 자동차, 모바일 기기 등의 안테나 적용을 목적으로 연구되고 있으며^[7,9], 건물 실내 온도를 유지하여 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 건물의 유리창 등에 적용되는 ESG(Energy Saving Glass)와 건물 내부에 무선 자원을 효율적으로 제어하기 위한 주파수 선택면 구조의 적용을 위한 응용 등으로 연구되고 있다^[10]. 대표적으로 사용되는 투명 전도성 도체는 AZO(Aluminum-doped Zinc Oxide), ITO (Indium Tin Oxide), Silver(Ag), Gold(Au) 등이 있으며, RF 분야에서는 고전도성(High conductivity)와 고광투과성(High optical transparency)의 특성을 가지고 있는 ITO를 중심으로 응용연구가 진행되고 있다.

항공기 또는 전투기 조종석(Cockpit)의 경우 조종사의 머리, 헬멧, 의자, 제어판 등은 탐지레이더의 가장 큰 표적 중 하나이기 때문에 스텔스 기술이 반드시 필요한 부분이며, 또한 가시영역을 확보해야 한다. 따라서 스텔스 전투기를 위해서는 조종석에 대한 저피탐지성(Low Observability)을 확보하기 위하여 F-22와 같은 스텔스 전투기 캐노피는 금속 메쉬로 코팅하고 레이더 신호 반사를 최소화하기 위한 형상설계를 적용하고 있다^[11].

본 논문에서는 ITO를 이용하여 X대역인 8~12 GHz에서 동작하는 입사각 안정성이 우수한 FSS를 설계하고 이 구조를 전파 흡수구조와 결합하여 항공기 캐노피 등에 응용이 가능한 투명한 전파 흡수구조(CA-RAM)를 설계, 제작 및 측정하였다.

2. 투명 전파흡수구조 설계

앞서 설명한 바와 같이 본 논문에서 설계한 투명 전파 흡수구조는 특정 주파수 대역을 흡수하기 위해 투명 전도성 도체인 ITO를 이용하여 주파수 선택표면구조를 설계하였다. X 대역의 대역통과특성을 구현하기 위하여, Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이 대역통과 특성을

갖는 커패시티브 패치(Capacitive patch)구조와 대역차단 특성을 갖는 인덕티브 메쉬(Inductive mesh)구조를 결합하며, Fig. 1(b)와 같은 대역통과 특성을 갖는 새로운 구조의 주파수 선택구조와 등가회로를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 주파수 선택구조 패턴은 입사각에 따라서 표면에 유기되는 전기장과 자기장의 비가 일치하도록 설계가 되었으며^[12], 따라서 제안된 주파수 선택구조는 안정된 입사각 특성을 갖는 대역통과특성을 가지며, 전파 흡수구조와 결합되어 특정 주파수대역에 대해 전자파 흡수특성을 가져 스텔스 성능구현이 가능하다.

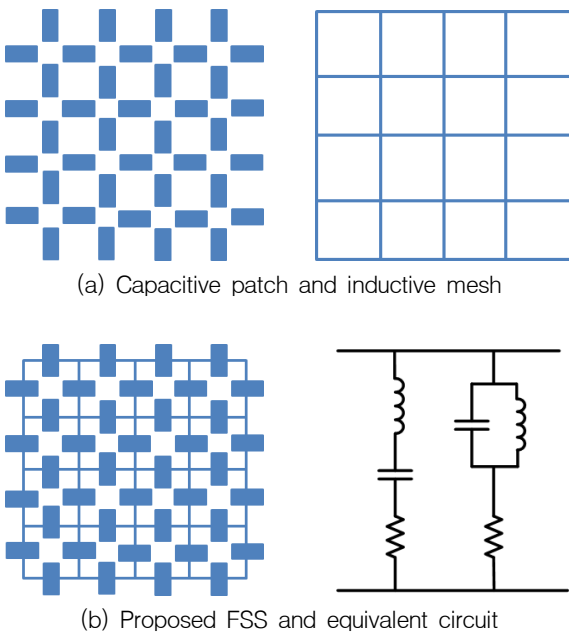


Fig. 1. Proposed frequency selective surface structure

Fig. 1(b)에 제안된 FSS를 갖는 전파 흡수구조를 구현하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 두께 T 를 갖는 투명유리를 유전체로 사용하고 접지면과 주파수선택구조면을 구현하기 위하여 완전도체인 PEC 대신 투명 전도성도체인 ITO를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 ITO는 면저항 $15 \Omega/\square$ 을 갖는 저항성 표면으로 모델링을 할 수 있으며, 코팅 두께는 실제 제작치수인 1450 \AA 를 사용하였다. Fig. 2(b)에 본 논문에서 제안한 CA-RAM 전파 흡수구조의 단위셀 구조를 나타내었다. ITO 코팅에 사용한 유전체는 유전율 $\epsilon_r = 6.5$ 손실탄젠트 $\delta = 0.01$ 을 갖는 Soda-Lime Glass를 사용하였으며, 제작

여건상 유전체 두께는 0.7 mm 의 배수로 설계가 가능하여 본 논문에서는 X 대역 동작을 위해 2.1 mm 의 두께를 선택하였다. 설계에 사용한 시뮬레이션 소프트웨어는 유한요소법을 사용하는 상용 전자기해석 소프트웨어인 Ansoft HFSS의 Floquet 모드를 사용하여 무한주기구조 해석을 수행하였으며, 설계파라미터를 위한 변수를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 제안구조는 항공기 캐

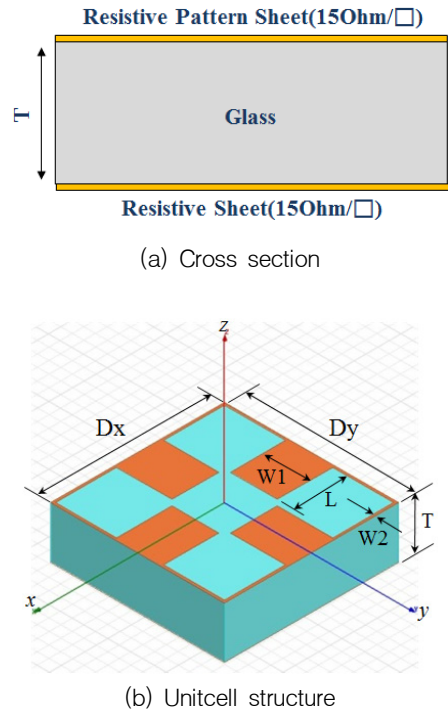


Fig. 2. Cross section and unitcell of proposed electromagnetic absorber

Table 1. Design parameters of proposed electromagnetic absorber

설계 변수	설계값(단위 : mm)
Dx	7.4
Dy	7.4
$W1$	2.0
$W2$	0.1
L	2.35
T	2.1

노피의 스텔스 특성 구현을 위해 설계되었기 때문에, 입사각에 대해 안정성을 갖는 구조로 시뮬레이션을 통하여 주파수 특성을 고려하여 파라미터 최적화 설계를 수행하였다. 최적화된 설계 파라미터 값들을 Table 1에 나타내었다.

3. 투명 전파 흡수구조 시뮬레이션 및 측정

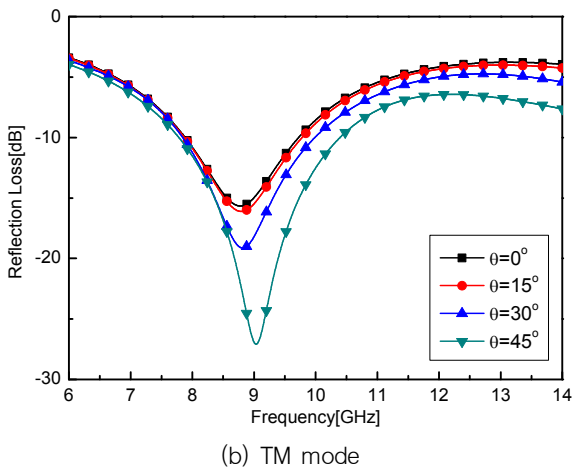
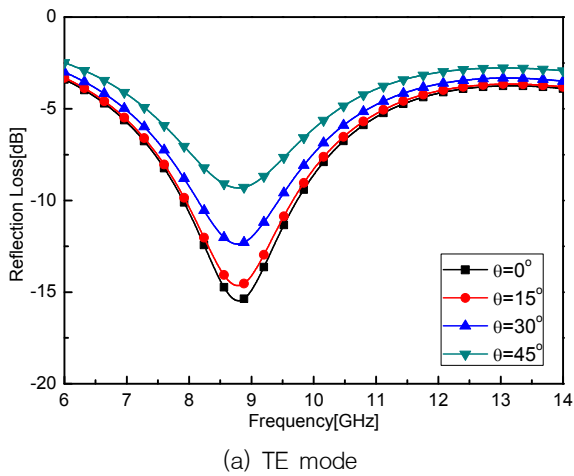


Fig. 3. Simulated reflection loss

Fig. 3(a)와 (b)에 각각 TE(Transverse Electric) 모드와 TM(Transverse Magnetic) 모드에 대해 입사각의 변화에 따른 HFSS로 계산된 전파흡수특성으로 반사손실을 나타내었다. 전체 90 % 전력을 흡수하는 반사손실 -10

dB를 기준으로 TE 모드의 경우 입사각 0°에 대해 공진주파수는 8.8 GHz, 대역폭의 경우 1830 MHz를 갖는 것을 확인할 수 있다.

또한, 입사각이 커질수록 -10 dB 대역폭이 줄어드는 특성이 나타나지만, 공진주파수는 입사각과 관계없이 일정한 특성을 나타내는 것을 알 수 있어, 설계목적인 입사각 안정성과 광대역 전파흡수특성을 모두 만족하는 것을 확인하였다. TM 모드의 경우 입사각 0°에 대해 공진주파수는 8.8 GHz, 반사손실 -10 dB 대역폭도 1830 MHz로 TE 모드와 동일한 값을 가지고 아울러 입사각의 변화에 따라 안정적인 주파수특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제작된 투명 전파 흡수구조를 Fig. 4에 나타내었다.

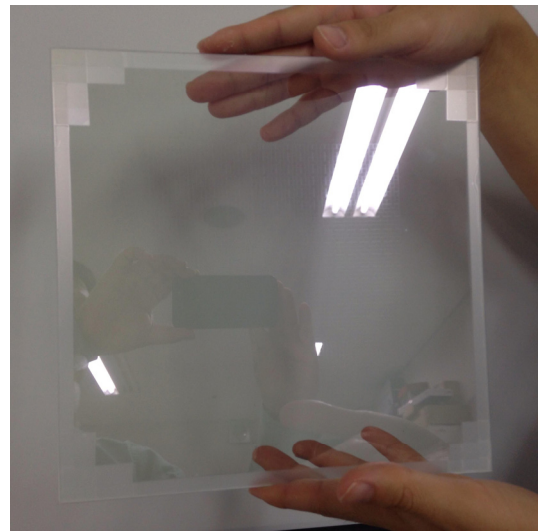


Fig. 4. Fabricated frequency selective surface

FSS 패턴은 Simulation과 동일하게 흡수체의 유전체로 사용된 Soda-lime Glass 위에 ITO를 프린팅하고, Dry Laser Etching 기법을 이용하여 패턴을 구현하였다. 이 방법은 일반적으로 사용되는 Photolithography 공정에 비하여 소량의 ITO 샘플제작에 유용한 방법이다. FSS 패턴과 반사판에 사용된 ITO 코팅은 면저항 15 Ω/□을 갖는 저항성 표면으로 제작이 되었으며, 코팅 두께는 1450 ± 70 Å를 갖는다. FSS 패턴을 구현하기 위해 코팅된 ITO 광투과율(Optical transmittance)은 90 %로 가시광 영역에서 투명구조에 응용하는데 문제가 없는 수준으로 Fig. 5에 파장에 따른 측정된 광투과도를 나타내었다.

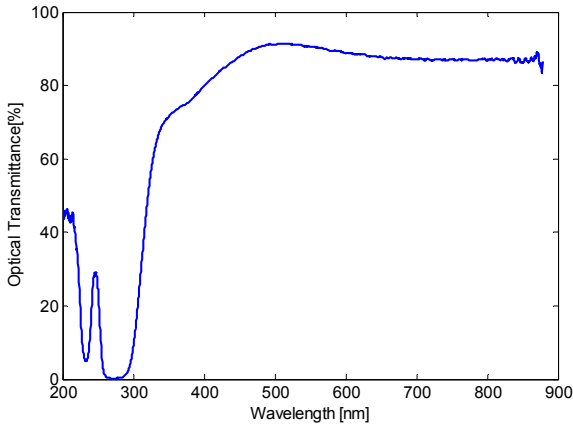


Fig. 5. Measured optical transmittance

실험에 사용하기 위해 제작된 전체 크기는 전파흡수 측정 지그 사이즈에 적합한 $250 \times 250 \text{ mm}$ 로 제작이 되었으며, ITO로 구현된 주파수 선택구조 패턴은 $150 \times 150 \text{ mm}$ 로 구현되었다.

제작된 전파 흡수구조의 입사각에 따른 전파흡수특성을 측정하기 위하여 Fig. 6과 같은 측정시스템을 구성하였다. 표준 혼 안테나를 송수신을 위해 사용하였으며, 측정값의 보정을 위해 구리판으로 만들어진 PEC 완전도체를 사용하였다. 또한, 반경 R 로부터 입사각 θ 를 각각 0° , 15° , 30° , 45° 로 변화시키면서 6~14 GHz 대역에 대해 측정을 할 수 있도록 하였다.

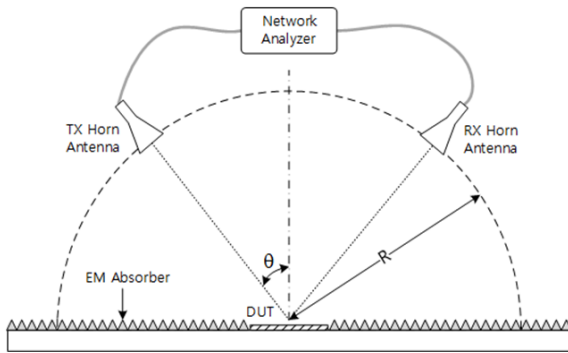
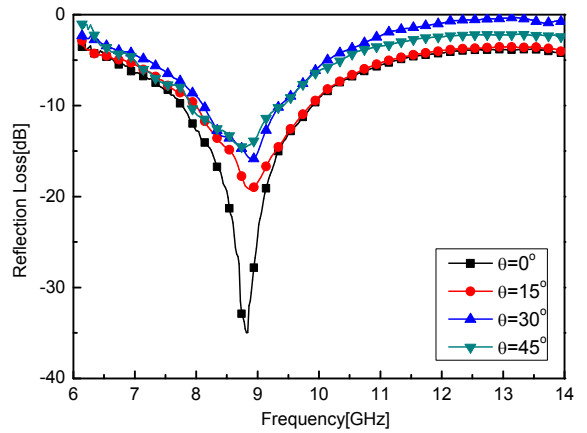


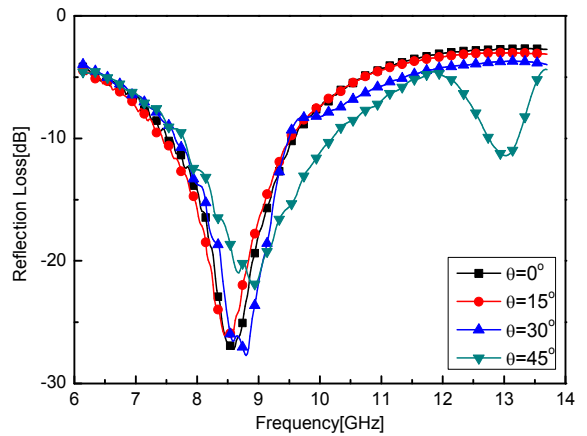
Fig. 6. Measurement system of reflection loss

본 논문에서 제안된 전파 흡수구조를 검증하기 위하여 제작된 Fig. 4의 투명 전파 흡수구조를 시뮬레이션과 마찬가지로 TE 모드와 TM 모드에 대해 입사각 θ 를 각각 0° , 15° , 30° , 45° 로 변화시키면서 반사손실을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 전체 90 % 전력을 흡

수하는 반사손실 -10 dB 를 기준으로 TE 모드의 경우 입사각 0° 에 대해 공진주파수는 8.8 GHz로 시뮬레이션 결과와 동일한 공진주파수를 갖는 것을 확인할 수 있었으며 이 때 반사손실은 -35 dB 로 주어지며, 대역폭의 경우 2080 MHz($7.50 \sim 9.58 \text{ GHz}$)로 23.6 %의 광대역의 흡수특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 99 %의 입사전력을 흡수할 수 있는 -20 dB 대역폭의 경우 600 MHz($8.50 \sim 9.10 \text{ GHz}$) 대역폭으로 측정되어 6.8 %의 비교적 광대역 전파 흡수구조의 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 입사각이 커질수록 -10 dB 대역폭이 줄어드는 특성이 나타나지만, 45° 입사에 대해서도 공진주파수를 유지하면서 1520 MHz($7.92 \sim 9.44 \text{ GHz}$) 대역폭으로 17.3 % 흡수대역폭을 갖는 것으로 측정되었



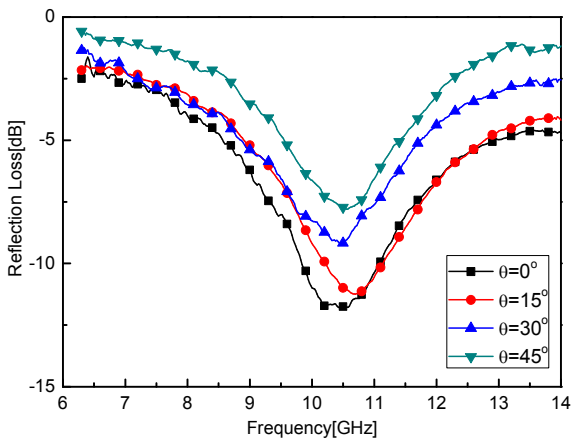
(a) TE mode



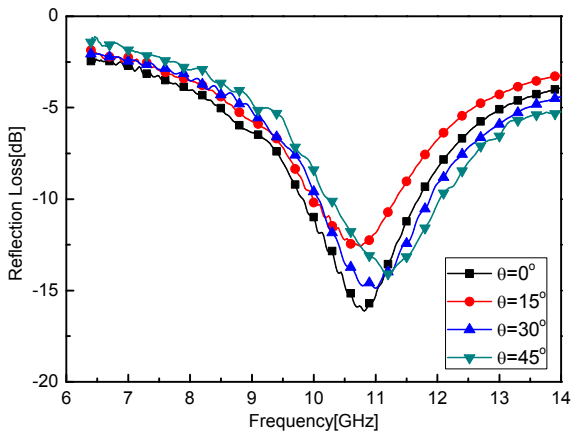
(b) TM mode

Fig. 7. Measured reflection loss($T = 2.1 \text{ mm}$)

다. TM 모드의 경우 입사각 0°에 대해 공진주파수는 8.6 GHz로 TE 모드에 비해 200 MHz 정도의 주파수 이동이 있지만 다른 입사각들의 공진주파수는 8.8 GHz 인 것으로 보아 측정오차라고 판단되며, 전파흡수특성을 갖는 반사손실 -10 dB 대역폭은 2080 MHz(7.52~9.60 GHz)로 TE 모드와 동일한 크기의 전파흡수 대역폭을 갖고, -20 dB 대역폭은 620 MHz(8.28~8.90 GHz)로 TE 모드와 유사한 값을 가지면서, 아울러 입사각의 변화에 따라 안정적인 전파흡수특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.



(a) TE mode



(b) TM mode

Fig. 8. Measured reflection loss(T = 1.4 mm)

본 논문에서는 또한 유전체 두께에 대한 영향을 알아보기 위해, 동일한 ITO 패턴을 갖는 구조에 대해 유

전체의 두께를 2.1 mm에서 1.4 mm로 줄여 전파흡수특성을 측정하였다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 각각 TE 모드와 TM 모드에 대한 측정된 반사손실 특성을 나타내었다. FSS 패턴구조가 최적화되지 않았기 때문에 흡수 성능 특성은 이전 구조에 비해 떨어지지만 유전체 두께 변화에 따른 공진주파수 이동과 입사각에 따른 안정성이 유지되는 것을 관찰할 수 있다. TE 모드에서 측정된 흡수되는 전파의 주파수는 10.6 GHz 였으며, TM 모드에 대해 공진주파수는 10.7 GHz로 측정되어 이미 많은 문헌들에서 알려진 바와 같이 유전체 두께의 조절을 통해 공진주파수를 최적화할 수 있다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 또한, 제작된 전파흡수구조가 PEC가 아닌 표면저항을 가진 ITO 코팅을 갖기 때문에 전파투과특성, 즉 삽입손실을 측정하였으나, 측정 주파수대역에서는 PEC 도체판과 동일하게 삽입손실이 측정되지 않고 전반사가 되는 특성을 얻었다.

4. 결론

본 논문에서는 입사각에 대해 전파흡수 주파수 특성이 안정성을 갖는 주파수 선택구조를 제안하고 전파흡수구조에 응용하여, 기존의 전파흡수구조에 비해 두께를 줄이고, 광대역 특성을 구현하였으며, 또한 주파수 선택구조와 완전 도체면을 투과율 90 %인 ITO 박막으로 구현하여 스텔스 전투기 캐노피 등에 적용 가능한 X-대역용 투명 전파 흡수구조를 제안하였다. 제안한 구조를 상용 전자기 소프트웨어인 Ansoft HFSS를 이용하여 입사각의 변화에 따른 반사손실특성을 계산하였으며, 계산된 결과를 검증하기 위하여 ITO 박막으로 구현된 주파수 선택면이 코팅된 두께 2.1 mm의 Soda-Lime 유리 유전체를 이용하여 투명 전파 흡수구조를 제작하였다. 제작된 투명 전파 흡수구조를 시뮬레이션과 마찬가지로 입사각을 각각 0°, 15°, 30°, 45° 변화시키면서 반사특성을 측정하였다. 측정결과로부터 TE 모드와 TM 모드에 대해 입사각에 대한 공진주파수는 안정된 특성을 가지는 것을 확인하였으며, 반사손실 -10 dB 대역폭도 약 24 % 정도로 광대역 전파흡수특성을 갖는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 투명 전파 흡수구조는 스텔스 전투기의 캐노피 등 스텔스 무기체계에서 요구되는 투명 전파흡수구조 응용에 다양하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0023742).

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] P. Saville, "Review of Radar Absorbing Materials," Technical Memorandum of Defence R&D Canada, Jan. 2005
- [4] E. L. Pelton and B. A. Munk, "A Streamlined Metallic Radome," IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 22, No. 6 pp. 799-803, 1974.
- [5] A. E. Martynyuk, J. I. Martinez Lopez, and N. A. Martynyuk, "Spiraphase-type Reflectarrays Based on Loaded Ring Slot Resonators," IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 52, No. 1, pp, 142-153, 2004.
- [6] 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.
- [7] C. Mias, C. Tsakonas, N. Prountzos, D. C. Koutsogeorgis, S. C. Liew, C. Oswald, R. Ranson, W. M. Cranton, and C. B. Thomas, "Optically Transparent Microstrip Antennas," in Proc. IEE Colloquium on Antennas for Automotives, pp. 8/1-8/6, 2000.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] C. Mias, C. Tsakonas, and C. Oswald, "An Investigation into the Feasibility of Designing Frequency Selective Windows Employing Periodic Structures," Final Report for the Radiocommunications Agency, Nottingham University, 2001.
- [11] B. S. Haisty, "Lockheed Martin's Affordable Stealth," Technical document of Lockheed Martin, 2000.
- [12] 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.