

마이크로파대역에서 손실 있는 접지 도체층과 결합된 주기적인 개구배열 구조에 근거한 전자기파의 흡수 현상

Electromagnetic Absorption Phenomena Based on Periodic Aperture Array Combined with Lossy Ground Conducting Layer at Microwave Frequencies

고 지 환 · 조 영 기*

Ji-Hwan Ko · Young-Ki Cho*

요 약

마이크로파대역에서 손실 있는 접지 도체층과 결합된 주기적인 개구배열구조를 모멘트법을 이용하여 해석하고, 이러한 구조가 흡수현상을 구현할 수 있음을 보였다. 단위 개구가 직사각형인 경우와 직사각 루프인 경우의 두 가지 구조를 다루었고, 본 논문의 해석 방법의 타당성을 확인하기 위하여 단위 개구가 직사각형인 경우의 반사특성에 대한 수치해석 결과를 기존의 상용 소프트웨어인 HFSS와 CST MWS의 결과와 비교하였다. 또한 손실있는 평면 도체에 의한 산란을 다룰 때 기존의 상용 소프트웨어를 사용한 결과와 비교하여 손실있는 도체의 두께가 충분히 클 때 정확히 동일한 해를 주는 방법을 살펴보았다. 특히 기존의 손실있는 FSS 스크린과 무손실 접지평면의 조합으로 구성된 구조와 비교하여 본 논문의 구조인 무손실 FSS 스크린과 손실 접지평면의 조합으로 구성된 구조가 레이다 흡수 물질(RAM: radar absorbing material)의 두께 소형화 측면에서 떨어지지 않음을 단일개구 구조가 직사각형 루프인 경우에 대하여 살펴보았다. 또한 흥미롭게도 본 논문의 구조가 기존 포토볼태익(photovoltaic) 소자의 근간 구조와 본질적으로 동일함을 지적하였다.

Abstract

A periodic aperture array structure combined with a lossy ground conducting layer was analyzed using the method of moments and was shown to produce near-perfect absorption. Rectangular aperture and rectangular loop aperture geometries were considered as examples of a unit cell of aperture. The numerical results for the reflection coefficient for the case where the unit cell of the aperture was rectangular were compared with those obtained by using commercially available software, such as HFSS and CST MWS, to validate the analysis method. A method for solving the scattering problem using a planar lossy conductor was also considered. The accuracy of the solution provided by this method was better than or comparable to that of the commercially available software for an arbitrary thick conductor. In particular, the present structure composed of a combination of lossless FSS and lossy ground was observed to be useful in comparison with the previous structure composed of a combination of lossy FSS and perfect conducting ground from the viewpoint of the thickness minimization of the radar absorbing material in the case of a rectangular loop aperture. Notably, the present structure is the same as the basic architecture of photovoltaic devices.

Key words: Frequency Selective Absorber, Metamaterial Absorber, Frequency Selective Surface

「이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문.」

금오공과대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kumoh National University of Technology)

*경북대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

· Manuscript received November 11, 2020 ; Revised December 8, 2020 ; Accepted December 18, 2020. (ID No. 20201111-096)

· Corresponding Author: Young-Ki Cho (e-mail: ykcho@ee.knu.ac.kr)

I. 서 론

한 평면에 도체 패치가 주기적으로 배열되거나, 한 도체 평판에 개구(aperture)가 주기적으로 배열된 구조를 주파수 선택 표면(FSS: frequency selective surface)이라 부르며, 이것은 일종의 공간 여파기로 어떤 특정 주파수 대역만을 통과시키거나 반사시키는 특성을 갖는다^{[1],[2]}. 본 연구에서는 이러한 FSS구조와 접지 평면의 조합으로 구성된 일종의 레이다 흡수 물질(RAM: radar absorbing material) 구조를 생각한다. 이러한 구조는 두 가지 방식이 있을 수 있다. 손실 있는 FSS 구조와 무손실의 접지판의 조합으로 구성된 형태와 이와는 달리 무손실의 FSS 구조와 손실 있는 접지판의 조합으로 구성된 형태가 있을 수 있는데, 현재까지 RAM 설계 분야에서는 주로 전자의 형태가 연구되어 왔다. RAM 설계 분야에서는 비교적 넓은 주파수 대역폭을 가지면서 부피가 작게 즉, 두께를 얇게 만드는 것이 바람직하다. 예로서 비행체의 스텔스화를 구현하기 위해서는 비행체에 흡수체를 부착해야 하고, 비행체의 부담을 덜어주기 위해서는 흡수체의 두께를 줄여야 한다.

이제까지 마이크로파대에서 일반적으로 사용되는 흡수 구조로는 도체판에서 $\lambda/4$ 만큼 거리를 두고 저항성 시트를 두층으로 입사되는 전자파를 흡수하게 하는 Salisbury 스크린 구조^{[3],[4]}나 또는 광대역 주파수를 얻기 위해 유전율이 서로 다른 유전체 층과 여러 층의 손실 있는 도체층을 겹쳐 구성하는 Jaumann 구조^[5]의 변형된 형태들이 시도되어 왔다.

이러한 단점을 개선하기 위해 완전 도체 평판 위에 손실성 저항 패치를 배열한 흡수체 구조가 발표되어 왔다^{[6],[7]}. 이런 배열 구조는 공진시 스크린에 배열된 저항성 도체에 의해 전자파의 흡수가 일어나게 하는 구조이다. 이와는 달리 본 논문에서는 저항성 매질인 손실 접지 평판 위에 무손실 개구를 배열한 FSS 스크린을 두어 투과한 전자파가 접지에서 모두 소모되게 하는 구조로 두께가 얇은 새로운 흡수체 구조로 구현할 수 있으며, 이와 더불어 특정 주파수만 스크린을 통과해야 하는 solar cell의 주기 구조인 포토볼태익스(photovoltaics) 소자의 근간 구조(architecture)로서도 활용될 수 있다^[8].

따라서 본 논문에서는 무손실 개구가 주기적으로 배열된 FSS 스크린의 후면에 저항성 매질인 손실 접지 평판이 부착된 구조에 대하여 전자파의 흡수 능력과 공진현상을 조사하고자 한다. 이 구조에 대한 전자파 해석은 Floquet 모드 전개로 그림 1에서의 각 영역 I, II, III에서 산란파를 정의하였으며, 모멘트법을 사용하여 전자파를 해석하였다. 이 방법에서 개구 영역의 자계전류는 지붕기저함수(rooftop basis function)와 단위펄스함수(unit pulse function)를 사용하여 표현하였다^[2]. 이 모멘트법으로 부터 입사파에 대한 반사파와 저항성 평판에 침투되는 투과파를 계산하였으며, 배열 주기, 개구의 크기 및 스크린과 저항성 평판간의 간극에 채워진 유전체의 유전율과 두께의 변화에 따른 공진 현상과 주파수 응답 특성을 살펴보았다.

II. 본 문

본 논문에서 다루고자 하는 전자파 흡수 구조는 그림 1에 도시되어 있다. 그림 1(a)에서와 같이 매우 얇은 무손실 도체판에 개구가 주기적으로 배열되어 있는 모습으로, 개구는 x 축 방향으로 주기는 T_x , 그리고 y 축 방향으로

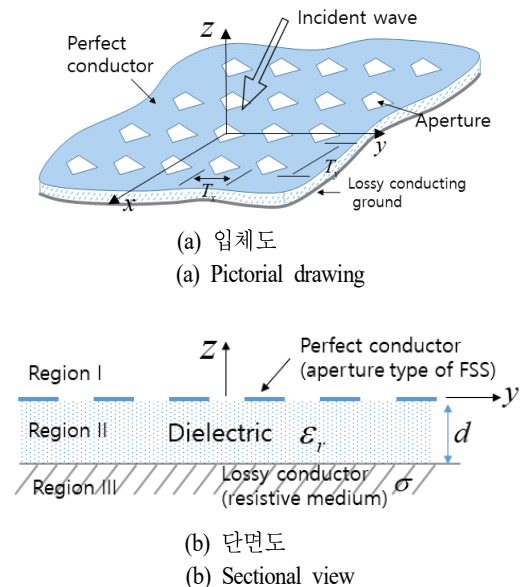


그림 1. 주기적 개구 배열에 의한 전자파 흡수 구조
Fig. 1. Structure of a electromagnetic absorption by the periodic aperture array.

주기는 T_y 로서 배열되어 있다. 그림 1(b)는 흡수체 구조의 단면을 보여 주고 있으며, 영역 I은 자유공간, 영역 II은 유전체 영역 그리고 영역 III은 도전율이 σ 인 저항성 매질인 접지층으로 구성되어 있다.

그림 1의 구조에서 전자파가 위쪽으로부터 입사하면 특정 주파수대역은 개구가 배열된 스크린을 투과하여 저항성 매질에서 흡수되지만, 그 외의 다른 주파수대는 스크린에서 반사될 것이다. 이를 확인하기 위해 모멘트 방법을 사용하여 입사파에 대한 반사파의 전력비인 반사계수(P_{ref}/P_{in} : 반사파의 전력밀도 대 입사파의 전력밀도 비)를 계산한다.

전자파 해석 방법으로는 참고문헌 [9]에서 제시된 FSS의 해석과 동일한 방법을 사용한다. 여기서 간략하게 해석 방법을 언급하면 그림 1에 도시된 바와 같이 자유공간(영역 I), 유전체(영역 II) 및 저항성 매질(영역 III)의 각 영역에 대해 TE 모드와 TM 모드의 합인 Floquet 모드 전개로 산란파를 정의하고, 경계면에서 전계와 자계의 접속성분의 연속 조건에 해당되는 경계조건을 적용하여 적분방정식을 만든다. 그리고 이 적분방정식에 대해 Galerkin 방법을 거쳐 행렬식을 얻는 모멘트 방법(MOM)을 사용한다. 이 방법으로 부터 스크린에 입사되는 입사파에 대하여 반사파와 투과파를 계산하므로 저항성 매질에 침투되는 흡수량을 파악하게 된다. 여기서 사용되는 개구 영역에 대한 미지의 자계전류는 앞에서 설명한 바와 같이 지붕 기저함수를 사용하여 전개하였다^[2]. 일반적인 FSS 구조인 경우 영역 III은 자유공간이므로 매질의 전파상수는 $k_o = \omega \sqrt{\mu_o \epsilon_o}$ 로 두지만, 본 구조에서는 저항성 매질이므로 저항성 매질내의 복소 전파상수로서 $k_R = \omega \sqrt{\mu_o \epsilon_o} \sqrt{(1 - j\sigma/\omega\epsilon_o)}$ 로 대체해야 한다. 그리고 z 축에 대해 TE 모드의 어드미턴스는 자유공간인 경우와 동일하게 $Y_{pq}'' = k_z/\omega\mu_o$ 이지만, TM 모드의 어드미턴스는 $Y_{pq}' = (\omega\epsilon_o - j\sigma)/k_z$ 로서 표현되는 바와 같이 분자에 도전율을 고려해야 한다. 여기서 σ 는 저항성 매질의 도전율이며, k_z 는 z 축 방향의 전파상수를 의미한다. 만약 도전율이 매우 작게 되는 극한에서 $\sigma=0$ 이 되면, 영역 III은 자유공간이 되어 기존의 투과형 FSS 구조에 해당된다.

언급한 모멘트 방법을 이용하여 본 논문에서는 그림 2

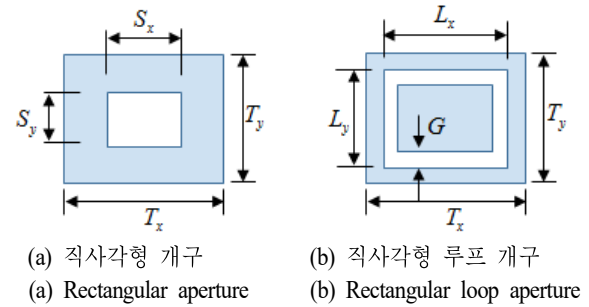


그림 2. 단위 셀의 모습
Fig. 2. View of the unit cell.

에 보는 바와 같이 직사각형 개구(그림 2(a))와 직사각 루프형 개구(그림 2(b))가 배열된 구조에 대하여 반사계수를 계산하여 배열 구조에서 어느 정도 전자파를 흡수하는지 또는 주파수 응답 특성이 어떤지 살펴볼 것이다. 단위 셀(cell)의 설계파라미터는 그림 2와 같으며, 흰색 부분이 개구이고, 그 외로 어둡게 칠해진 부분은 도체 표면에 해당된다.

앞에서 언급한 모멘트 방법(MOM)에 의한 계산 결과의 정확성을 검증하기 위해 전자파 수치해석 상용 SW인 Ansoft사 HFSS와 CST사 MWS를 이용하여 직사각형 개구 배열에 대한 반사계수를 계산하여 그림 3에 함께 비교

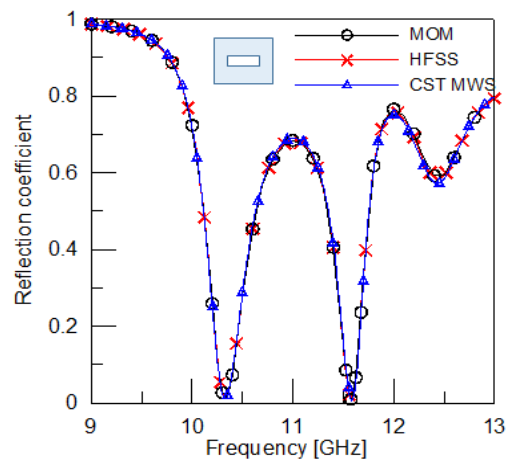


그림 3. MOM, HFSS, CST MWS간의 반사계수 비교($T_x = T_y = 20$ mm, $S_x = 10$ mm, $S_y = 4$ mm, $\epsilon_r = 1.5$, $d = 22$ mm, $\sigma = 30.7$ S/m)

Fig. 3. Comparison of the calculated results by using MOM, HFSS and CST MWS.

하여 나타내었으며, 비교 결과, 모두 일치됨을 확인하였다. 여기서 상용 S/W인 HFSS와 MWS를 사용하기 위해서 저항성 매질인 손실 접지의 두께를 설정해야 한다. 전자파는 저항체에 침투시 지수 함수적으로 급격하게 감쇠하므로 저항체 두께는 표피 두께(skin depth)의 1.5배 정도 이상 두면 두께에 무관하게 거의 동일한 계산 결과를 얻을 수 있었으며, 본 계산에서는 이 점을 고려하여 여유 있게 2 mm 정도로 두었다.

2-1 직사각형 개구 배열

그림 2(a)의 직사각형 개구가 배열된 스크린에 전자파가 수직으로 입사될 때 어느 정도 흡수되는지 알기 위해 반사계수를 계산하였다. 먼저 계산을 위해 x, y 축 방향의 개구 배열 주기를 $T_x = T_y = 15$ mm로 두고, 직사각형 개구의 크기는 $S_x = S_y = 10$ mm로 두었다. 이런 스크린에 주파수가 10 GHz인 파를 입사하게 하고, 유전체($\epsilon_r=2$)의 두께 d 와 저항체의 도전율 σ 을 조절하여 반사계수가 0이 되도록 최적화한다. 최적화의 결과로 유전체의 두께는 $d=8.57$ mm, 저항체 도전율은 $\sigma=24.86$ S/m로 주어지는데, 참고로 σ 의 여러 값에 대하여 주파수에 따른 반사계수를 그림 4에 도시하였다.

그림 4를 보면 도전율이 $\sigma=0$ 인 경우는 영역 III이 자유공간이므로 주파수 선택 표면 자체만의 반사특성에 해당되며, 13.95 GHz에서 반사계수가 0이 되어 입사파가 배열 스크린을 통하여 전부 투과함을 보여준다. 그리고 그

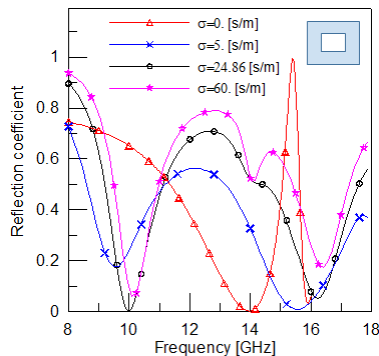


그림 4. 도전율 σ 에 따른 반사계수 계산(직사각형 개구 배열)($T_x=T_y=15$ mm, $S_x=S_y=10$ mm, $\epsilon_r=2$, $d=8.57$)

Fig. 4. Calculated reflection coefficient versus conductivity σ (Rectangular type aperture array)

림에서 보듯이 저항성 매질의 도전율을 조금씩 증가하면 10 GHz대와 15.5 GHz대에서 반사계수가 0이 되어 흡수가 최대가 되는 흡수 공진이 일어남을 볼 수 있고, 개구 배열 스크린과 손실있는 접지층 사이에 공진구조가 형성되면 10 GHz대에 강한 흡수 현상이 관찰되었다. 이미 언급한 바와 같이 도전율이 $\sigma=24.86$ S/m인 경우, 10 GHz에서 반사계수가 0이 되고, 또한 도전율이 $\sigma=5$ S/m인 경우도 15.5 GHz에서 반사계수가 0이 되었다. 이와 같이 특정 주파수대의 전자파가 FSS 스크린에 입사되면 배열 개구를 통과하여 저항체에서 전부 흡수하게 만들 수 있음을 확인하였다. 즉, FSS 스크린 위에서 반사계수를 0으로 만들면서 동시에 손실 있는 도체 접지층을 통한 투과계수가 0이라는 것은 손실 있는 도체 접지층에서 거의 100%의 흡수를 가능케 함을 의미한다.

앞서 언급한 바와 같이 그림 4에서 도전율에 따라 10 GHz와 15.5 GHz대에서 공진되는 모습을 볼 수 있는데, 좀 더 공진 현상을 파악하기 위해 저항체의 도전율을 $\sigma=24.86$ S/m로 고정하고, 배열 주기 T_x, T_y 와 유전체 두께 d 및 개구 크기 S_x, S_y 의 변화에 따른 반사계수를 계산하여 그림 5에 나타내었다.

그림 5(a)의 주기 T_x, T_y 가 14 mm, 15 mm, 16 mm로 변화될 때 반사계수를 보면 10 GHz대의 공진 주파수는 거의 변화되지 않고 16 GHz대의 주파수대는 변화되는 모습을 볼 수 있다. 이는 10 GHz에서의 공진은 단일 개구 구조에 의해 결정되는 반면, 16 GHz 근처의 공진은 주기(periodicity)성에 의한 공진으로 해석할 수 있다. 이는 매우 흥미로운 현상으로서 투과공진(EOT: extraordinary optical transmission) 현상에서도 관찰되는 현상이다. 이는 EOT 현상이나 지금 다루고 있는 흡수공진 현상에서 공통적으로 관찰될 수 있는 보편적인 현상으로 생각되어지는데, 이에 대한 연구는 더욱더 진행되어야 할 것으로 생각된다.

반면에 그림 5(b)에서는 유전체의 두께 d 에 따른 반사계수를 보면 10 GHz대의 공진 주파수가 그림 5(a)에 비해 현저하게 변화되는 모습을 볼 수 있다. 그리고 개구의 크기 S_x, S_y 의 변화에 따른 반사계수는 그림 5(c), 그림 5(d)에서 볼 수 있는데, 입사되는 전계의 벡터 성분이 y 방향 성분인 경우에 예상되는 바와 같이 그림 5(c)에서는 개구

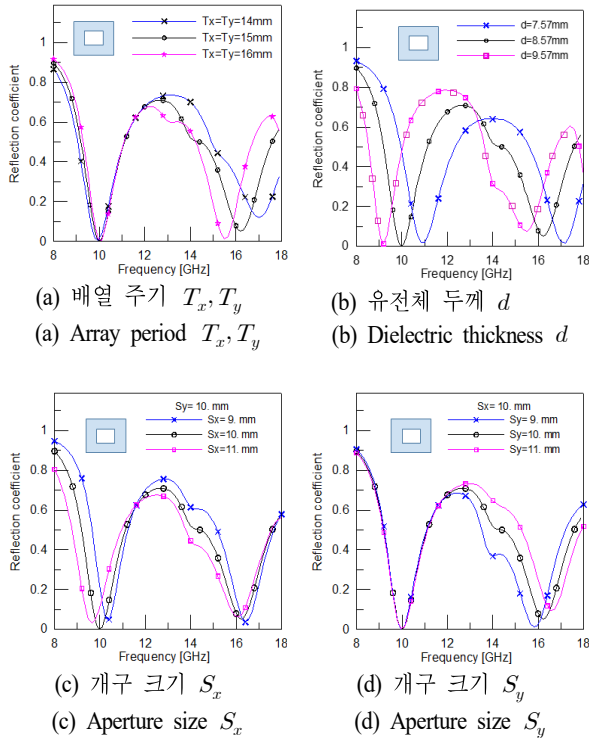


그림 5. 배열 주기와 유전체 두께 및 개구 크기 변화에 따른 반사계수 계산

Fig. 5. Calculated reflection coefficient versus array period, dielectric thickness and aperture size.

크기 S_x 가 커질수록 10 GHz대의 공진 주파수는 낮아지지만, 반면에 그림 5(d)의 개구 크기 S_y 의 변화에 따라서는 10 GHz대의 공진 주파수는 거의 변화되지 않았다. 따라서 그림 5에서 나타난 바와 같이 주기를 고정할 경우, 유전체 두께 및 개구 크기에 따라 공진 주파수가 변화됨을 알 수 있었다.

실제 RAM의 응용분야에 활용되기 위해서는 그림 1 구조에서의 저항체의 두께는 유한할 수밖에 없다. 이미 앞에서 언급한 바와 같이 전자파는 저항체에 침투시 지수 함수적으로 급격하게 감쇠한다. 두께 효과를 계산하기 위해 그림 6의 삽도인 단면도와 같이 완전 도체판에 위에 유한한 두께를 가진 저항체를 두고, 그 위에 FSS 스크린을 두었다. 이 구조에서 저항체 두께 dr 의 변화에 따른 반사계수를 계산하기 위해 Ansoft사 HFSS SW를 사용했으며, 비교 결과를 그림 6에 도시하였다. 여기서 사용된 저항체 도전율은 24.86 S/m이며, 10 GHz에서 표피두께는

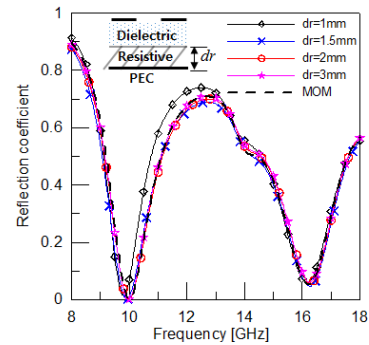


그림 6. 저항체 두께에 따른 반사계수 계산($T_x = T_y = 15$ mm, $S_x = S_y = 10$ mm, $\epsilon_r = 2$, $d = 8.57$, $\sigma = 24.86$ S/m)

Fig. 6. Calculated reflection coefficient versus thickness of resistive medium.

약 1 mm이다. 그림 6의 저항체 두께 dr 에 따른 반사계수 특성을 보면 표피 두께의 1.5배인 1.5 mm 이상에서는 거의 변화가 없을 수 있다.

2-2 직사각형 루프 개구배열

다음은 그림 2(b)에 도시되어 있는 직사각형 루프 형태의 개구가 배열된 흡수체 구조의 경우에 대하여 반사계수를 계산하였다. 앞서 계산한 배열 스크린과 동일하게 배열 주기는 $T_x = T_y = 15$ mm로 두고, 단위 셀의 사각형 루프의 크기는 $L_x = L_y = 10$ mm, 루프의 슬롯 폭은 $G = 1$ mm인 배열 구조에 대하여 앞서 경우와 마찬가지로 주파수 10 GHz에서 반사계수가 0이 되도록 유전체의 두께 d 와 저항체의 도전율 σ 를 최적화 하였다. 최적 결과로 유전체의 두께는 $d = 1.76$ mm이고, 저항체의 도전율은 $\sigma = 27.89$ S/m로 계산되었으며, 참고로 도전율이 $\sigma = 0$, $\sigma = 5$ S/m, $\sigma = 60$ S/m인 경우도 계산하여 그림 7에 함께 나타내었다. 그림을 보면 도전율에 따라 공진되는 주파수가 약간씩 변화되는 모습을 확인할 수 있다. 그리고 앞서 언급한 바와 같이 도전율이 $\sigma = 0$ 인 경우는 영역 III이 자유공간이 되어 FSS 자체만으로 작용하여 8.5 GHz에서 투과 공진되어 입사파가 스크린을 전부 투과함을 의미한다. 이는 FSS 자체만의 투과공진 주파수가, 접지도체를 추가하였을 때 FSS 구조와 접지도체 구조사이에 공진기 구조가 형성되어 흡수공진이 일어날 때 주파수 10 GHz의 변화가 어떻게 일어나는지를 알려주는 의미 있는 계산치가 된다. 즉, FSS 자체만의 투과공진 주파수는 8.5 GHz인데, FSS와

마이크로파대역에서 손실 있는 접지 도체층과 결합된 주기적인 개구배열 구조에 근거한 전자기파의 흡수 현상

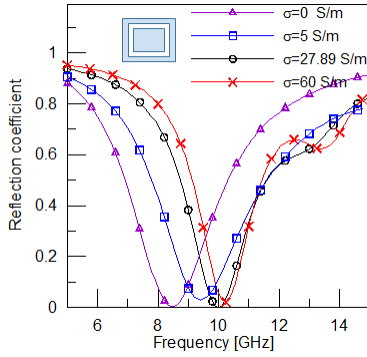


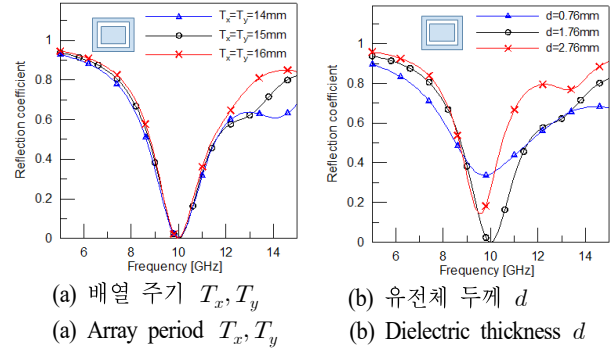
그림 7. 도전을 σ 에 따른 반사계수 계산(직사각형 루프 개구 배열)($T_x=T_y=15$ mm, $L_x=L_y=10$ mm, $G=1$ mm, $\epsilon_r=2$, $d=1.76$ mm)

Fig. 7. Calculated reflection coefficient versus conductivity σ (Rectangular loop type aperture array).

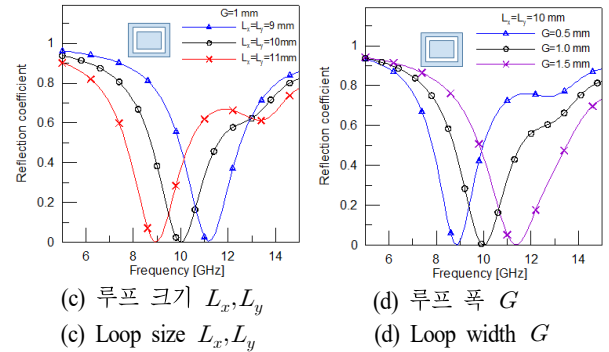
접지면 사이의 공진기 구조가 형성될때의 흡수공진기 구조의 공진주파수는 10 GHz로 변화된다는 것을 의미한다.

그림 8은 루프 배열 스크린의 설계 파라미터인 배열 주기 T_x, T_y , 사각형 루프 개구 크기 L_x, L_y 그리고 유전체 두께 d 의 변화에 따른 반사계수를 보여 주고 있다. 그림 8(a)를 보면 배열 주기의 변화에 따른 반사계수는 거의 변화되지 않는 모습을 볼 수 있지만, 반면에 그림 8(b)를 보면 유전체 두께 d 의 변화에 따라서는 상당히 변동되어 공진은 유전체 두께의 변화에 상당히 민감함을 알 수 있다. 그리고 그림 8(c)와 그림 8(d)는 사각 루프 크기 L_x, L_y 와 루프의 슬롯 폭 G 의 변화에 따라 공진주파수가 상당히 변동되는 모습을 볼 수 있다. 예상되는 바와 같이 루프 크기가 클수록 공진주파수는 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 이 구조에서 저항체 두께에 대한 효과는 이미 그림 6에서 언급한 바와 같이 거의 비슷한 결과를 얻었으며, 비교 그림은 생략한다.

다음은 직사각형 루프 배열 구조에 전자파가 비스듬하게 입사될 때 반사계수를 계산하여 그림 9에 나타내었다. 여기서 입사파는 10 GHz로 z 축에 대해 TE 파가 입사되는 경우와 TM 파가 입사되는 경우, 각각에 대하여 구좌표계의 ϕ 는 고정으로 두고, θ 의 변화에 따라 주파수 응답 특성을 보여준 것으로 θ 가 커짐에 따라 약간 달라지지만 대체로 비슷한 경향을 알 수 있다. 이는 슬롯 폭이 파장에 비하여 충분히 작아서 투과 공진 주파수 특성이



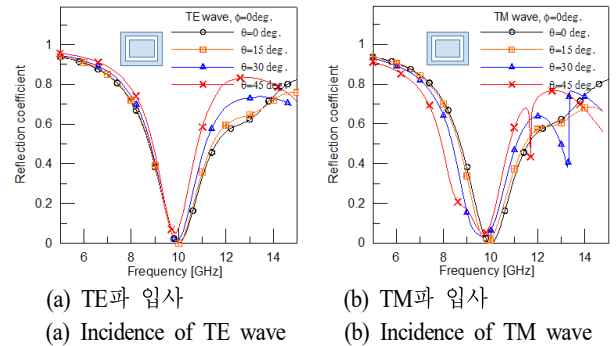
(a) 배열 주기 T_x, T_y (a) Array period T_x, T_y
(b) 유전체 두께 d (b) Dielectric thickness d



(c) 루프 크기 L_x, L_y (c) Loop size L_x, L_y
(d) 루프 폭 G (d) Loop width G

그림 8. 배열 주기와 유전체 두께 및 루프 개구 크기 변화에 따른 반사계수 계산

Fig. 8. Calculated reflection coefficient versus array period, dielectric thickness and loop aperture size.



(a) TE파 입사 (a) Incidence of TE wave
(b) TM파 입사 (b) Incidence of TM wave

그림 9. 비스듬한 입사에 대한 반사계수 계산($T_x=T_y=15$ mm, $L_x=L_y=10$, $G=1$ mm, $\epsilon_r=2$, $d=1.76$ mm, $\sigma=27.89$ S/m)

Fig. 9. Calculated reflection coefficient for oblique incidence.

입사각도의 변화에 둔감해지기 때문으로 생각된다.

지금까지 앞서 보여준 그림 2의 사각형 개구와 사각형

루프 개구가 배열된 흡수체 구조에 대하여 반사계수를 계산하여 특성을 살펴보았다. 두 구조 모두 배열 주기가 같고, 공진 주파수가 10 GHz로 동일하게 가질 때 유전체의 두께 d 를 비교하여 보면 사각형 루프 배열인 경우 $d=8.57$ mm인데 비하여 사각형 루프 개구 배열인 경우는 $d=1.76$ mm로 약 1/5 정도 매우 얇다는 점을 알 수 있다. 이는 기존의 RAM 연구분야의 결과와 비교하면 초박 (ultra thin)^[6]의 경우에 해당되는 흥미로운 결과에 해당된다. 이는 파장 보다 작은 루프는 용량성을 띠며 저항성 매질을 바라볼 때 유전체 두께가 매우 작을 경우, 유도성이라 이때 공진 현상이 일어나기 때문이다. 따라서 사각형 루프 개구 배열을 사용한 흡수체인 경우, 흡수체 부착으로 인한 구조의 부피와 무게를 크게 줄일 수 있어 큰 장점으로 활용될 수 있다. 앞에서 제시한 단일 사각형 루프 배열 구조인 경우, 주파수 대역폭이 협소해 보이지만 여러 개의 루프로 구성된 multi-loop 형태의 구조를 이용하면 광대역을 설계할 수 있을 것으로 생각된다. 그러니까 Jaumann 흡수체의 multi-layer 구조는 본 논문구조에서 multi-loop 구조로 변환될 것으로 기대되는데, 이 변환 과정도 필터 설계에서의 변환 과정처럼 체계적인 기술로 정리될 것으로 기대된다.

이로써 본 논문에서는 무손실 FSS에 저항성 매질인 손실 접지의 조합으로 구성된 구조로서 전자파 흡수체 구현의 가능성을 확인하였다. 실제 전자파 흡수체로 설계하기 위해서는 원하는 규격에 대하여 설계 파라미터인 배열 주기, 개구 형태 및 크기, 유전체 두께 그리고 저항체 도전율에 대하여 최적화해야 하고 더불어 제작 시 여러 문제 등을 검토하여 설계해야 할 것이다. 또한 흡수형 FSS의 두께를 상당히 줄일 수 있다는 것은 RAM 설계 개념의 경우에는 소형 경량은 물론 진술한 바와 같이 multi-loop 구조를 채택함으로써 대역폭의 증가를 가능하게 할 수 있는 장점이 있으면서, 동시에 solar cell과 같은 포토볼태익스 분야의 주기구조의 경우에는 입사각에 따르는 민감도를 줄이면서 수신전력 효율의 반응특성에도 유익한 구조로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

III. 결론 및 토의

기존의 RAM 구조의 한 예로써 널리 사용되어 오고 있

는 손실있는 FSS 평면과 이상적인 도체 접지의 조합으로 구성된 구조와는 달리 손실 없는 FSS(개구 형태의)와 손실 있는 접지의 조합으로 구성된 구조를 제시하고, 제안된 구조가 기존의 구조에 비하여 두께 측면에서의 소형화 관점에서도 그 유용성에 있어서 떨어지지 않음을 확인하였다. 본 논문에서의 손실있는 접지의 경우, 두께가 어느 정도 이상이면 전계가 급속히 “0”으로 사라지기 때문에 어느 정도의 두께를 지나서 완전 도체의 접지로 연결해도 된다. 또한 본 논문에서의 구조인 무손실의 FSS 평면과 손실 있는 접지 사이에 매우 큰 값의 전계가 초래되어 그 사이에 공진기 구조가 형성하게 되어 광학적으로 능동매질을 넣고 FSS 평면은 anode로, 손실 접지에서 전계가 영이 되는 위치는 Cathode로 하여 포토볼태익스 소자의 근간 구조로 활용될 수 있는데, 실제로 기존의 그러한 구조와 유사함을 확인하였다^{[10],[11]}. 그리고 본 구조에서의 대역폭을 광대역으로 조정하고자 하는 경우에는 multi-loop 형태의 개구를 사용하면 될 것으로 기대되는데, 이렇게 하여 여러 층의 손실 층(lossy layers)을 사용하여 광대역을 구성하는 Jaumann 흡수체의 성능을 유지하면서도 부피가 큰(bulky) 단점도 본 구조에서 제안된 multi-loop 구조를 채택하면 해결될 것으로 기대된다.

끝으로 본 구조에서 관찰되는 완전 흡수 현상이 최근에 EOT(extraordinary optical transmission) 현상과 관련하여 포토볼태익스 소자 분야에서 효율을 높이기 위하여 연구되고 있는 EOA(extraordinary optical absorption) 현상과 어떤 관계에 있는지에 대한 연구가 곧바로 이어질 것으로 기대한다.

References

- [1] T. K. Wu, *Frequency Selective Surface and Grid Array*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1995.
- [2] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik "Techniques for analyzing frequency selective surfaces: A review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615, Dec. 1988.
- [3] R. L. Fante, M. T. McCormack "Reflection properties of the Salisbury screen," *IEEE Transactions on Antennas*

- and Propagation, vol. 36, no. 10, pp. 1443-1454, Oct. 1988.
- [4] B. Chambers, "Optimum design of a Salisbury radar absorber," *Electronics Letters*, vol. 30, no. 16, p. 1353, Aug. 1994.
- [5] E. F. Knott, C. D. Lunden, "The two-sheet capacitive Jaumann absorber," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 11, pp. 1339-1343, Nov. 1995.
- [6] F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara, "Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 5, pp. 1551-1558, May 2010.
- [7] F. Costa, A. Monorchio, "A frequency selective radome with wideband absorbing properties," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 6, pp. 2740-2747, Jun. 2012.
- [8] J. S. White, G. Veronis, Z. Yu, E. S. Barnard, A. Chandran, and S. Fan, et al., "Extraordinary optical absorption through subwavelength slits," *Optics Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 686-688, Mar. 2009.
- [9] J. W. Ko, Y. K. Cho, "Design of Ka/Ku band frequency selective surface with triple square loop slot array," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 14, no. 10, pp. 1060-1070, Oct. 2003.
- [10] N. C. Lindgnist, W. A. Luhman, S. H. Oh, and R. J. Holmes, "Plasmonic nanocavity arrays for enhanced efficiency in organic photovoltaic cells," *Applied Physics Letters*, vol. 93, no. 12, p. 123308, 2008.
- [11] S. Collin, F. Pardo, and J. L. Pelouard, "Resonant-cavity-enhanced subwavelength metal-semiconductor-metal photodetector," *Applied Physics Letters*, vol. 83, pp. 1521-1523, 2003.

고 지 환 [금오공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-1076-4843>



1982년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1985년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1985년~2000년: 한국전자통신연구원 연구원

2000년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 안테나 설계, 초고주파 도파관 및 수동 부품 설계, 전자파 산란, 위성 통신

조 영 기 [경북대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-4363-4877>



1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2008: 한국전자과학회 회장
1981년~2020년: 경북대학교 IT대학 전자

공학부 교수

2020년~현재 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 명예교수

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론 등