DOI : 10.5515/KJKIEES.2011.22.3.320

소형 공진 개구의 2차원 주기적 배열에 의한 전자파 산란

Electromagnetic Scattering by a Two-Dimensional Periodic Array of Small Resonant Apertures

고 지 환 · 이 종 익* · 조 영 기**

Ji-Hwan Ko · Jong-Ig Lee* · Young-Ki Cho**

요 약

공진되는 개구와 비공진 개구로 구성되는 두 가지 형태의 FSS 구조에 대해 전부 투과되는 응답을 비교 연구하였다. 입사파가 전부 투과할 때 공진 개구의 FSS 구조는 파장 λ 대 배열 주기 T의 비에 대해 비공진 개구의 FSS인 경우보다 더 큰 비를 가짐을 알 수 있었고, 또한 동작 주파수는 공진 구조를 이용함에 의해 상당히 낮출 수 있다. 이러한 물리적 상황은 현재 물리학 분야에서 널리 연구되고 있는 공진형의 특이한 광투과 현상과 유사한 성질을 지닌다고 사료된다.

Abstract

Comparative study on the total transmission(zero reflection) has been done between two FSS structures which are composed of the resonant aperture and the nonresonant aperture. It has been found that, the FSS of the resonant aperture has much larger ratio λ/T of wavelength λ to array periodicity T than that of the FSS of the nonresonant aperture for the total transmission(or zero reflection). Also the operating frequency can be made to be significantly reduced by using such a resonant structure. This physical situation is thought to be similar to that of EOT(Extraordinary Optical Transmission) phenomenon, in optics area.

Key words : Aperture, FSS, EOT

Ⅰ. 서 론

무한 도체 평판에 소형 개구가 있는 구조에서 전자파가 투과하는 문제는 Bethe[1]가 다룬 이후 오래 동안 관심의 대상이 되어 왔었다. 지금까지 잘 알려진 바와 같이 이 구조에서 Bethe는 파장에 비하여 작은 개구를 통과하여 투과되는 전자파는 매우 적다는 것, 즉 투과 효율이 매우 낮다는 사실을 정량적으로 밝혔다.

이렇게 파장에 비해 매우 작은 개구에도 불구하고 높은 투과 효율을 얻기 위해서 Harrington[2]은 소형 개구에 커패시터를 연결하거나, 커패시터 특성을 갖는 구조로 변형함으로써 투과 공진 현상(transmission resonance phenomena)이 생기도록 하였다. 여기에서 투과 공진 현상이란 실제의 개구 면적이 작은데도 불구하고 개구의 형태를 변형하여, 변형된 소형 개구를 통하여 투과되는 파의 전력이 현저하게 증가되는 현상을 의미한다. 파장에 비해 매우 작은 개구는 근접장 광학의 탐침 구조, 나노 현미경, 나노 리소그래픽(nano-lithography) 등에 활용되고 있으며,

「본 논문은 금오공과대학교 2008년 교내학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임.」

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

*동서대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Dongseo University)

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

· 논 문 번 호 : 20101011-148

· 교 신 저 자 : 고지환(e-mail : kojh@kumoh.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 12월 1일

그리고 투과 효율이 개선된 소형 개구(sub-wavelength aperture 또는 nano-aperture) 구조에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있다[3]~[6].

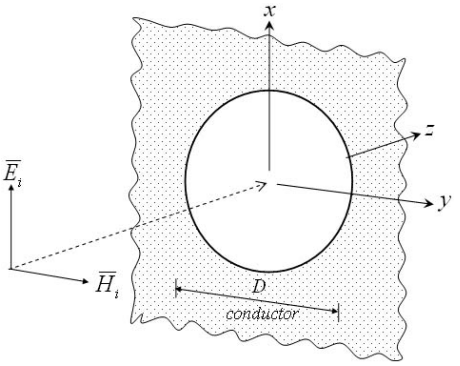
한편, 이와 같은 소형 개구가 평면에 2차원 주기적으로 배열된 구조를 FSS(Frequency Selective Surface)라 부른다. 또한 유전체 판에 도체 패치가 배열된 FSS 구조들도 있다. 이러한 FSS는 입사되는 특정 주파수대는 전부 투과하고, 동시에 다른 주파수대는 전부 반사되는 또는 그 반대의 특성을 갖는 주파수 여파 기능을 갖는다. 기존의 FSS 연구는 주기적으로 배열되는 단위 셀(cell)의 형태로 원형, 사각형, 루프 형태 등이 있으며, 이런 단위 셀의 형태가 단독으로 있을 때 공진 현상의 여부와 무관하게 연구가 이루어져 왔었다[7],[8].

따라서 본 논문에서는 소형 개구에 대하여 투과 효율을 검토하고, 공진 개구와 비공진 개구가 도체 평면에 배열된 FSS 구조에 대해 주파수 응답 특성을 계산하여 이에 대한 결과를 비교 고찰하고자 한다.

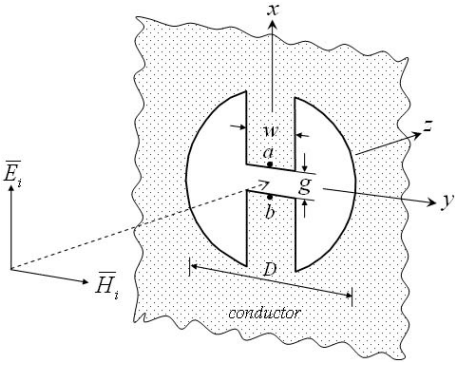
Ⅱ. 소형 개구의 투과 효율

두께가 매우 엷은 무한한 완전 도체 평면에 파장에 비해 매우 작은 개구가 놓여져 있는 구조에서 파가 입사한다면, 앞서 언급한 바와 같이 개구에 통과되는 파의 전력은 극히 매우 적을 것이다. 소형 개구를 갖고 전자파를 최대로 투과시키기 위해서는 커패시터 성분을 갖도록 구조를 변형하여 공진 현상이 생기도록 구현해야 할 것이다. 실제 예로써 그림 1(a)는 파장에 비해 매우 작은 지름을 갖는 원형 개구 구조이고, 그림 1(b)는 리지를 추가하여 공진 현상이 생기는 구조에 해당된다.

그림 1(b)와 같이 변형된 소형 개구 구조에서 공진 현상이 발생될 때 입사파는 최대로 투과되며, 개구의 어떤 모양에도 무관하게 투과 단면적(transmission cross section)은 최대로 대략 $3\lambda^2/4\pi$ 만큼 투과하게 된다[2]. 여기서 투과 단면적의 물리량은 개구가 있는 도체 평판에 수직으로 입사하는 평면파의 전력밀도가 1 [W/m^2]로서 가정했을 때, 그림 1의 예와 같이 소형 개구를 통하여 $z>0$인 영역으로 투과하는 총 투과전력을 $z<0$인 영역에서 입사하는 평면파의 입사 전력 밀도로 나누어서 정의한 것으로



(a) 소형 원형 개구
(a) Small circular aperture



(b) 변형된 원형 개구
(b) Modified circular aperture with a ridge

그림 1. 투과 효율이 증대되도록 변형한 원형 개구
Fig. 1. Modified circular aperture to increase the transmission efficiency.

단위는 면적(area)이다. 즉, 투과 단면적이 클수록 투과 효율이 높으며, 개구를 통과하는 투과파의 전체 전력이 커짐을 의미한다.

위의 그림 1에 도시되어 있는 형태를 갖는 개구에서 공진 현상을 조사하고, 실제 투과 단면적을 구해 보고자 한다. 정확한 투과 단면적을 계산하기 위해 모멘트 방법((RWG: Rao-Wilton-Glisson method)[9]을 사용하였으며, 계산 결과의 정확성을 검증하기 위해 FDTD 방법의 계산 결과와 비교하여 정확성을 확인하였다[6].

먼저 그림 1(a)의 도체 평면에 원형 개구만 있는 구조에서 직경을 D=10 mm로 두고, 주파수에 따른 투과 단면적 T를 계산하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 계산 결과를 보면 낮은 주파수대에서는 투과

단면적이 매우 적음을 알 수 있고, 주파수가 점차 높아져서 15.5 GHz에서 최대로 $T=128$ mm^2 정도 된다. 15.5 GHz에서 파장은 19.35 mm이고, 원형 개구의 직경 D=10 mm이므로 개구의 직경은 반 파장 정도 되며, 이 원형 개구는 15.5 GHz에서 바라보면 소형 개구에 해당되지 않는다. 즉, 파장 대비 소형 개구라 볼 수 있는 주파수대는 대략 8 GHz 이하이고, 이 주파수대에서 개구를 통해 투과되는 파는 매우 적음을 알 수 있다.

다음은 그림 1(b)의 원형 개구에 리지가 부착된 변형된 구조에서 직경은 D=10 mm 그대로 두고, 리지의 폭이 $w=3$ mm이고, 리지의 간격이 g=0.2 mm, 0.5 mm, 0.8 mm인 경우와 간격이 g=0.5 mm로 두고, 폭이 $w=1.5$ mm, 2 mm, 3 mm인 경우에 대하여 투과 단면적을 계산하여 그림 3에 제시하였다. 그림을 보면 투과 효율이 현저히 향상되는 공진 현상이 발생되는 모습을 볼 수 있으며, 공진 현상이 발생될 때 예상되는 투과 단면적 $3\lambda^2/4\pi$(점선으로 표시)과 거의 비슷함을 볼 수 있다. 또한 리지의 간격 g가 작을수록, 폭 w가 클수록 공진 주파수는 점점 낮아짐을 모습을 볼 수 있는데, 이는 리지 폭이 커지고 간격이 작아지면 커패시터 성분이 크게 증대되어 공진 주파수를 낮아지게 한다. 따라서 그림 2와 비교하여 보면 공진 현상으로 인하여 파장 대비 작은 소형 개구임에도 불구하고 투과 효율이 상당히 향상됨을 확인할 수 있다.

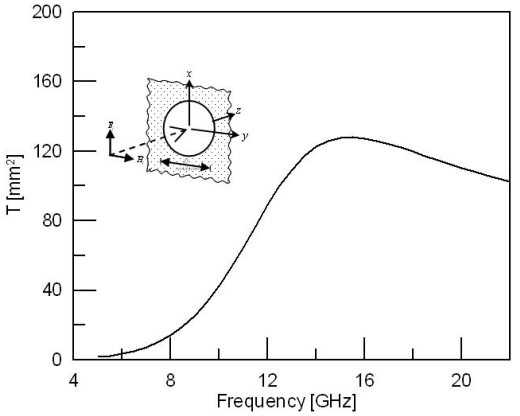
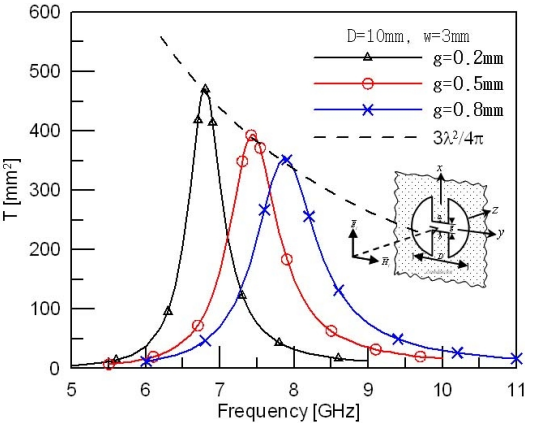
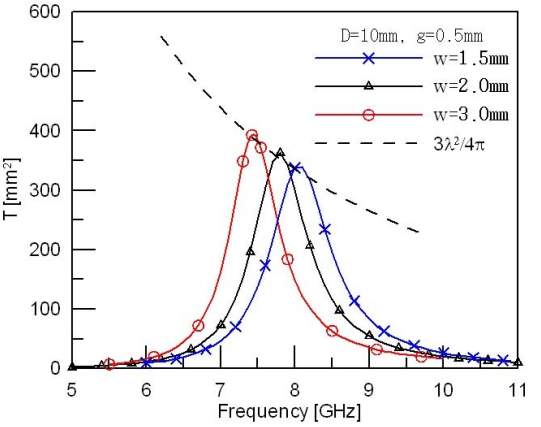


그림 2. 원형 개구 구조의 투과 단면적 T(D=10 mm).
Fig. 2. Transmission cross section T of circular aperture structure(D=10 mm).



(a) D=10 mm, $w=3$ mm



(b) D=10 mm, g=0.5 mm

그림 3. 리지 원형 개구 구조의 투과 단면적 T
Fig. 3. Transmission cross section T of ridged circular aperture structure.

Ⅲ. 소형 개구가 2차원 배열된 구조의 투과 특성

앞에서 언급한 그림 1의 개구가 도체 평면에 2차원 주기적으로 배열될 때 투과파의 주파수 응답 특성은 어떻게 되는지 비교 분석하는 일은 상당히 흥미로울 것이다. 이미 잘 알려져 있는 바와 같이 유전체 판에 도체 패치가 배열되어 있거나 또는 도체 판에 개구가 배열된 구조를 FSS라 부르며, 오래 전부터 연구가 진행되어 왔었다[7],[8].

기존의 연구는 그림 1(a)와 같은 원형 개구가 배열된 구조에 대해서는 상당한 연구가 이루어졌지만, 그림 1(b)와 같이 변형된 소형 공진 개구가 배열된

구조에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 이 두 가지 형태의 FSS 구조에 대하여 투과 주파수 응답을 제시하고 특성을 비교 검토할 것이다.

FSS 구조에 대한 전자파 해석으로는 Floquet 모드 전개로 산란파를 정의하고, 슬롯 영역에서 전계 접선 성분인 자계전류는 지붕 기저 함수(rooftop basis function)로 두었고, 개구면에서 자계의 접선 성분은 연속인 경계 조건을 적용하여 적분방정식을 얻었으며, 시험 과정(testing)은 Galerkin 기법을 이용하는 모멘트 방법을 사용하였다. 이런 수치 해석 방법에 대하여 프로그램을 만들었고, 투과 계수를 계산하였다. 계산 결과의 정확성을 검증하기 위하여 기존의 참고문헌 [11]과 비교 검증하였고, 또한 측정 결과와 비교하여 정확성을 입증하였다[8]. 본 논문에서는 검증된 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 그림 1(a)의 원형 개구를 배열한 FSS 구조(그림 4 참조)에 대하여 원형 직경을 $D=10$ mm로 두고, 주기가 T_x=T_y=15 mm, T_x=T_y=20 mm, T_x=T_y=25 m, T_x=T_y=30 mm일 때 주파수에 따른 투과 계수를 계산하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5를 보면 주파수 9.876 GHz, 11.63 GHz, 14.08 GHz, 그리고 18.105 GHz에서 파가 전부 투과하는 모습을 볼 수 있으며, 그 외의 주파수대에서는 입사된 파는 대부분 반사하게 되어 여파기 기능을 수행하게 됨을 알 수 있다.

그림 5에서 보여준 투과 주파수 응답에 대해 각 주기별 공진 주파수, 3 dB 대역폭(BW), 비 대역폭(fractional BW) 그리고 파장 대 주기 비(λ_o/T)를 요약하여 표 1에 나타내었다. 여기서 주기가 $T_x=T_y$ =15 mm인 경우 비 대역폭이 지나치게 크지만, 그 외는 비교적 좁은 비 대역폭을 갖는다. 그리고 파장 대 주기 비는 거의 1이므로 파가 약간(몇 도)만 비스듬

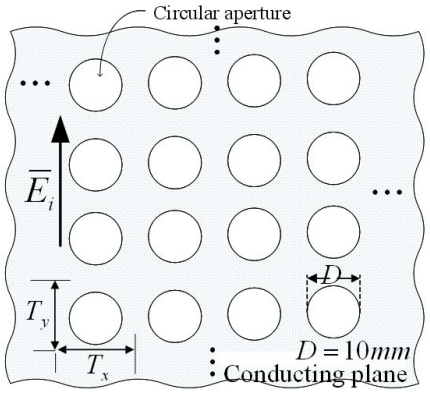


그림 4. 원형 개구로 배열된 FSS
Fig. 4. FSS composed of circular aperture.

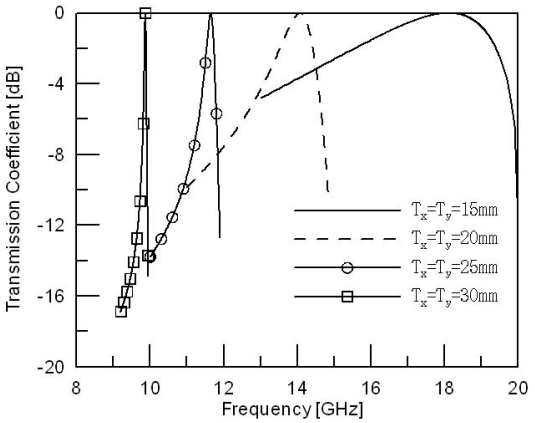


그림 5. 원형 개구로 배열된 FSS의 투과 계수($D=$ 10 mm)
Fig. 5. Transmission coefficient of the FSS composed of circular aperture($D=10$ mm).

하게 입사되어도 그레이딩 로브(grating lobe)가 발생하게 된다. 여기서 FSS 구조에서 그레이딩 로브가 발생되지 않는 조건으로는 $\lambda_o/T>(1+\sin\theta_o)$이며, θ_o는 파의 입사각을 의미한다[7]. 이런 이유로 FSS

표 1. 그림 5의 각 주기별 3 dB 대역폭, 비 대역폭 그리고 파장 대 주기
Table 1. 3 dB bandwidth, fractional bandwidth and λ_o/T versus periodicity of Fig. 5.

주기($T_x=T_y$) [mm]	중심 주파수(f_o) [GHz]	3dB 대역폭(BW) [GHz]	비 대역폭 (Δ=BW/f_o)	파장 대 주기 (λ_o/T)
15	18.105	4.9507	0.27344	1.105
20	14.08	1.1876	0.08434	1.065
25	11.63	0.2626	0.02257	1.032
30	9.876	0.0508	0.00514	1.013

면에 수직으로 입사되는 경우에만 사용해야 하므로 실제 응용에서는 실용적이지 못하다.

다음은 그림 1(b)의 변형된 리지 원형 개구가 도체 평면에 배열된 FSS 구조를 그림 6에서 보여주고 있다. 배열된 개구의 크기는 원의 직경이 D=10 mm, 리지 폭은 w=3 mm, 리지 간격은 g=0.5 mm 이고, 앞서 FSS 구조와 마찬가지로 배열 주기가 T_x=T_y=15 mm, T_x=T_y=20 mm, T_x=T_y=25 m, T_x=T_y=30 mm, T_x=T_y=35 mm인 경우, 주파수에 따른 투과 계수를 계산하여 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 주파수 응답 특성을 그림 5와 비교하여 보면 대역 통과 여파기의 모습을 좀 더 잘 갖추고 있음을 볼 수 있다. 공진 주파수는 7.28 GHz, 7.43 GHz, 7.563 GHz, 7.7 GHz 그리고 7.825 GHz이고, 입사파는 공진 주파수 근처에서는 전부 통과하고, 그 외 주파수대에서는 대부분 반사하게 되어 여파기 기능을 가짐을 볼 수 있다. 이러한 공진 소자의 이차원적 배열 구조를 사용하여 대역 통과 여파기 구조를 구현하게 될 때의 물리적 상황은, 단일 공진 소자의 경우 실제 개구의 면적에 비하여 매우 큰 투과 단면적(transmission cross section)에 입사하는 전자파 에너지가 실제의 좁은 개구 면적을 통하여 깔대기처럼 모여지면서, 통과하게 되는 과정을 거쳐서 뒤쪽으로 투과해 나가는 과정을 거치게 되는데, 이러한 공진 소자를 2차원적으로 배열하여 투과계수를 거의 1이 되게끔 만들어 줄 수 있다는 의미에서, 최근 광학 분야에서 널리 연구되어 온 EOT(Extraordinary Optical Transmission) 문제[10]와 유사한 것으로 생각된다.

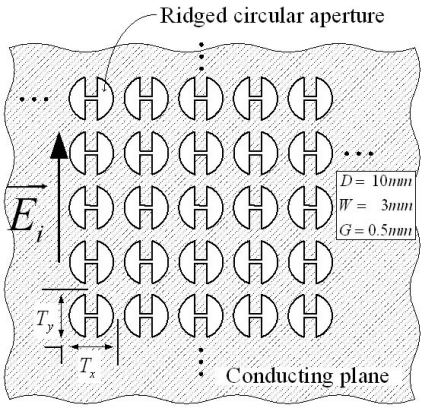


그림 6. 리지 원형 개구로 배열된 FSS
Fig. 6. FSS composed of ridged circular aperture.

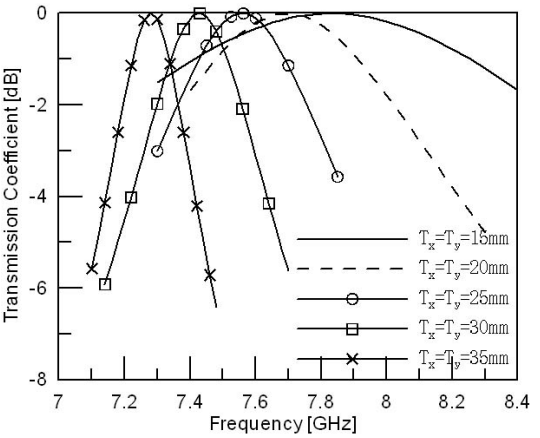


그림 7. 리지 원형 개구로 배열된 FSS의 투과 계수 (D=10 mm, w=3 mm, g=0.5 mm)
Fig. 7. Transmission coefficient of the FSS composed of ridged circular aperture(D=10 mm, w=3 mm, g=0.5 mm).

그림 7에서 보여준 주파수 응답의 각 주기별 공진 주파수, 3 dB 대역폭(BW), 비 대역폭(fractional BW) 그리고 파장 대 주기 비(λ_o / T)를 표 2에 나타내었다. 표 1과 비교하여 보면 주기가 $T_x = T_y$=15 mm인 경우 외에는 비 대역폭은 상당히 더 크다는 점을 알 수 있다. 또한 투과 공진이 일어날 때 표 2의 파장대 주기 비가 표 1의 원형 개구인 경우에 비하여 현저히 증가되므로 총 개구면적이 감소하게 되고, 동시에 입사각이 수직으로부터 벗어나게 되어도 그레이딩 로브(grating lobe)가 생길 염려도 현저하게 준다.

따라서 그림 1(b)의 소형 공진 개구로 배열된 FSS 구조의 투과 응답 특성을 보면 보다 낮은 주파수에서 공진이 발생되었고, 비 대역폭(Δ)이 확대되어 보다 좋은 여파 성능을 얻을 수 있었으며, 그리고 파장 대 주기 비가 커져서 FSS 구조를 설계하고 응용하는 데 훨씬 용이할 것으로 생각된다.

Ⅳ. 결 론

도체 평판에 소형 원형 개구가 놓여져 있는 구조에 대하여 투과 효율을 조사하였다. 단순히 원형 개구인 구조에서 원의 직경이 반파장에 해당되는 높은 주파수대는 상당히 큰 투과 효율을 갖지만, 파장 대비 작은 소형 개구로 볼 수 있는 낮은 주파수대에서는 투과 효율이 매우 적음을 확인하였다. 이런 소형

표 2. 그림 7의 각 주기별 3 dB 대역폭, 비 대역폭 그리고 파장 대 주기
Table 2. 3 dB bandwidth, fractional bandwidth and λ_o / T versus periodicity of Fig. 7.

주기($T_x = T_y$) [mm]	중심 주파수(f_o) [GHz]	3 dB 대역폭(BW) [GHz]	비 대역폭 (Δ=BW/f_o)	파장 대 주기 비 (λ_o / T)
15	7.825	1.6425	0.20990	2.556
20	7.70	0.8535	0.11084	1.948
25	7.563	0.5159	0.06821	1.587
30	7.43	0.3359	0.04520	1.346
35	7.28	0.2203	0.03026	1.177

개구에 커패시터 성분을 갖도록 리지 형태를 부착하여 투과 효율이 현저히 향상되는 공진 현상을 관찰하였고, 공진 현상이 발생될 때 투과 단면적이 최대로 증가하는데, 예상치 3 $\lambda^2 / 4\pi$와 거의 비슷함을 확인하였다.

이러한 소형 공진 개구 또는 비공진 개구를 2차원 주기적으로 배열되어진 FSS 구조에 대해 투과파의 주파수 응답 특성을 비교 조사하였다. 공진 개구인 경우, 보다 낮은 주파수에서 공진이 발생되었고, 여파 성능이 보다 우수하였으며, 그리고 파장 대 주기 비가 증대됨을 확인하였다. 따라서 입사각도가 수직 입사에서 충분히 떨어진 경우에도 그레이딩 로브에 의한 불편한 점을 염려할 필요가 없다. 이런 점을 고려하면 소형 공진 개구로 배열된 FSS 구조는 다양한 응용 분야에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes", *Phys. Rev*., vol. 66, no. 7-8, pp. 163-182, Oct. 1944.

[2] Roger. F. Harrington, "Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body", *IEEE Trans. Antennas Propag*., vol. 30, no. 2, pp. 205-212, Mar. 1982.

[3] X. Shi, L. Hesselink, "Design of a C aperture to achieve λ/10 resolution and resonant transmission", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 21, no. 7, pp. 1305-1317, 2004.

[4] E. X. Jin, X. Xu, "Finite-difference time-domain studies on optical transmission through planar nano-apertures in a metal film", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 43, no. 1, pp. 407-417, 2004.

[5] J. E. Park, J. I. Lee, J. W. Ko, and Y. K. Cho, "Physics in resonant transmission on the small aperture coupling", in *Proceedings ISAP'09*, pp. 887-890, 2009.

[6] J. E. Park, J. Yeo, J. W. Ko, and Y. K. Cho, "Resonant transmission of an electrically small aperture with ridge", *J. of Electromagnetic Waves and Appl*., vol. 23, pp. 1981-1990, Nov. 2009.

[7] T. K. Wu, *Frequency Selective Surface and Grid Array*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[8] 고지환, 조영기, "삼중 사각 루프 슬롯 배열 형태를 갖는 Ka/Ku 대역 주파수 선택 반사기 설계", 한국전자파학회논문지, 14(10), pp. 1060-1070, 2003년.

[9] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnectic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propag*., vol. 30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.

[10] T. W. Ebbesen, H. Z. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole array", *Nature*(London), vol. 391, pp. 667-669, Feb. 1998.

[11] C. C. Chen, "Scattering by a two-dimensional periodic array of conducting plates", *IEEE Trans*, vol. AP-18, no. 5, pp. 660-665, Sep. 1970.

고 지 환

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 부품설계, 전자파 산란, 위성통신

이 종 익

1992년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1994년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1998년: 금오공과대학교 연구교수
1999년~현재: 동서대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 전자기산란, 평면안테나

조 영 기

1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2008년: 한국전자파학회 회장
1981년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수
[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론