

## 도체 평판에서 소형 개구의 투과 단면적

# Transmission Cross Section of the Small Aperture in an Infinite Conducting Plane

고 지 환 · 박 순 우\* · 조 영 기\*

Ji-Hwan Ko · Soon-Woo Park\* · Young-Ki Cho\*

### 요 약

얇은 도체 평판에 소형 리지 원형 개구, H-형태 개구, U-형태 개구, 예루살렘 십자형 개구와 같은 다양한 투과 공진 개구에 대하여 개구 모양에 무관하게 투과 단면적은 해석적으로  $2G\lambda^2/4\pi$ 로 주어지게 된다. 이러한 표현식에 대해 MOM 방법을 사용하여 계산한 결과와 비교하여 일치함을 확인하였다. 또한 두꺼운 도체 평판 내에 투과 공진기 구조에 대해 투과 단면적을 연구했으며, 투과 효율 관점에서 이들 두 소형 개구 구조 간에 동등함을 보였다.

### Abstract

Transmission cross section(TCS) is described analytically as  $2G\lambda^2/4\pi$  irrespective of the aperture shapes for various transmission resonant apertures, such as small ridged circular or H-shaped, U-shaped, or Jerusalem cross-shaped apertures in an infinite thin conducting plane. The proposed expression is validated by comparison with the numerical results obtained from the method of moments(MOM). The TCS characteristics of the transmission resonant cavity structure in a thick conducting plane are also studied and the equivalence between the two small aperture structures is reported from the viewpoint of transmission efficiency.

Key words: Subwavelength Aperture, Small Aperture, Transmission Resonant Aperture, Ridge-Loaded Aperture, Transmission Cross Section, Transmission Resonant Cavity

## I. 서 론

두께가 얇은 무한 도체 평판에 파장에 비해 작은 소형 개구가 있는 구조에 전자파를 입사하면 잘 알려진 바와 같이 극히 일부만 투과하고 대부분 반사하게 된다. 이 문제는 Bethe<sup>[1]</sup>가 다룬 이후 오래 동안 관심이 되어 왔었다. Bethe는 파장에 비해 매우 작은 개구에 전자파가 입사되면 투과되는 전자파는 매우 적다는 사실을 정량적으로

밝혔다.

파장에 비해 매우 작은 개구를 통하여 투과 효율을 개선시키기 위해서 Harrington<sup>[2]</sup>은 투과 공진 조건이 만족되는 구조를 제시하였으며, 소형 개구에 커패시터를 연결하거나, 커패시터 특성을 갖는 구조로 변형함으로써 투과공진현상(transmission resonance phenomena)이 생기도록 하였다. 예를 들면 리지 원형 개구, U-형태(또는 C-형태) 개구, H-형태 개구 등을 들 수 있다<sup>[3]~[5]</sup>. 이렇듯이 소형이

「이 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문임.」

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

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

· Manuscript received February 11, 2019 ; Revised April 2, 2019 ; Accepted April 4, 2019. (ID No. 20190211-016)

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

면서 투과공진특성을 갖는 개구는 근접장 광학의 탐침 구조, 나노 현미경, 나노 리소그래피(nano-lithography) 등에 활용되고 있다<sup>6,7)</sup>.

이러한 소형 개구에 전자파의 투과 효율을 객관적으로 나타내는 척도로 전기적 측면에서 단면적의 의미를 갖는 투과 단면적(transmission cross section: TCS)이라는 물리량을 사용한다. 즉, 투과 단면적은 실제 물리적인 면적보다 클 수도 있고 적을 수도 있다. 투과 단면적이 크면 전자파의 투과량이 많으며, 반대로 투과 단면적이 작으면 투과량이 적게 되며, 이러한 투과 단면적을 정의하게 되면 입사파의 전력밀도와 투과 단면적의 곱으로 개구를 통한 전자파의 투과 전력을 계산할 수 있다<sup>2)</sup>.

앞서 언급한 바와 같이 두께가 무한소로 얇은 무한 도체 평판에 리지 원형 개구, H-형태 개구, U-형태 개구와 같이 변형된 소형 개구가 있는 구조에서 투과 공진 현상이 발생하면 투과 단면적은 최대로 커지게 된다. 이때 파장에 비해 작은 소형 개구인 경우 투과 단면적은 모양에 무관하게 대략  $2G\lambda^2/4\pi$  ( $G$ : 개구 이득,  $\lambda$ :자유공간 파장)로 주어지게 된다<sup>8)</sup>. 여기서 파장에 비해 매우 작은 개구인 경우에는 이득은 대략  $G=1.5$ 이므로 투과 단면적은 대략  $3\lambda^2/4\pi$ 에 해당될 것이다<sup>2)</sup>.

본 논문에서는 먼저 앞에서 언급한 바와 같이 매우 얇은 도체 평판에서 소형 개구가 공진 시 모양에 무관하게 투과 단면적이  $2G\lambda^2/4\pi$ 가 되는지 실제로 여러 가지 소형 개구 대해 계산 결과를 비교 제시하여 확인하고자 한다. 그리고 소형 개구를 통한 투과 효율을 증대시킬 수 있는 또 다른 형태인 두꺼운 도체 평판 내에 투과 공진기(transmission resonant cavity: TRC)가 있고, 입·출구에 소형 개구가 있는 구조에 대해 투과 단면적은 얼마가 되는지 계산 결과를 제시할 것이다. 이 구조에서도 여러 가지 소형 개구에 대해 공진시 최대 투과 단면적이  $2G\lambda^2/4\pi$ 인지 계산 결과를 제시하고 비교 고찰하고자 한다.

## II. 얇은 도체 평판에 소형 개구인 경우

앞서 언급한 바와 같이 두께가 매우 얇은 무한 도체 평판에 소형 개구가 있는 구조에 대해 전자파가 수직으로 입사할 때, 소형 개구가 자체 공진하지 않는다면 극히 적은 파가 투과되어 투과 단면적은 매우 작지만, 자체 공진

된다면 개구 모양에 무관하게 최대의 투과 단면적은 거의  $2G\lambda^2/4\pi$ 인 것으로 발표되어 있다. 이를 확인하기 위해 4가지 예제로 그림 1과 같이 리지 원형 개구, H-형태 개구, U-형태 개구 그리고 예루살렘 십자형 개구에 대해 투과 단면적을 계산해 보았다. 계산에 사용한 해석 방법은 모멘트 방법(Rao-Wilton-Glisson method: RWG)<sup>9)</sup>을 사용하였으며, 이 계산 결과의 정확성을 검증하기 위해 그림 2에서 보는 바와 같이 CST사의 MWS S/W를 사용한 계산 결과와 비교하였고, 일치함을 확인하였다.

앞에서 언급한 소형 개구에 대한 투과 단면적을 계산하기 위해 그림 1 (a)의 리지 원형 개구인 경우, 원형 직경은  $D=10$  mm, 리지 폭  $w=3$  mm, 간격  $g=0.5$  mm로 두었고, 그림 1(b)의 H-형태 개구인 경우는 가로, 세로 길이는  $L_x=L_y=10$  mm, 리지 폭과 간격은 앞서 구조와 동일하게  $w=3$  mm,  $g=0.5$  mm, 그림 1(c)의 U-형태 개구는 H-형태 개구의 반으로  $L_x=5$  mm,  $L_y=10$  mm 폭과 간격은  $w=3$  mm,  $g=0.5$  mm, 그리고 그림 1(d)의 예루살렘 십자형 개구는 H-형태 개구를 겹쳐 놓은 형태로  $L=10$  mm,  $a=7$  mm,

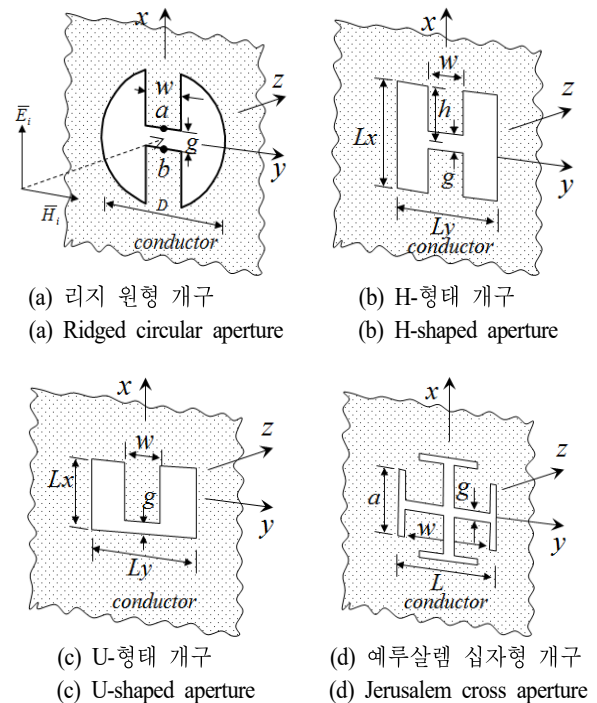


그림 1. 얇은 도체 평판에서 소형 개구  
Fig. 1. Small aperture in an thin conducting plane.

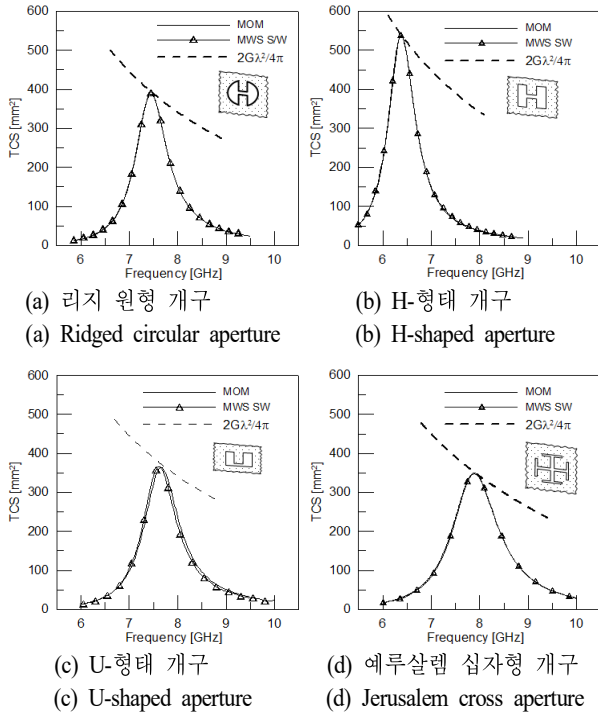


그림 2. 그림 1에서 소형 개구의 투과 단면적 계산  
Fig. 2. Calculated transmission cross section of the small aperture in Fig. 1.

$\omega=8$  mm,  $g=1$  mm로 두었다. 이런 4가지 형태 구조에 대해 투과 단면적을 계산하여 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 제시된 4가지 형태의 소형 개구에 대한 투과 단면적 계산 결과를 보면, 투과 단면적이 최대가 될 때 개구가 공진됨을 알 수 있다. 여기서 공진이라 함은  $2G\lambda^2/4\pi$  곡선과 접하는 경우를 의미하는데, 이 경우에 그림 1(a)의 단자  $a-b$ 에서 좌우로 바라본 총 입력 어드미턴스가 실수가 되는 경우<sup>[8]</sup>를 의미한다. 그림에서 공진주파수를 보면 리지 원형 개구인 경우 7.45 GHz(TCS=398 mm²), H-형태 개구인 경우 6.38 GHz(TCS=539 mm²), U-형태 개구인 경우 7.66 GHz(TCS=366 mm²), 그리고 예루살렘 십자형인 경우 7.89 GHz(TCS=350 mm²)이며, 최대 투과 단면적은 개구 형태와 무관하게  $2G\lambda^2/4\pi$ 와 일치함을 볼 수 있어, 이미 서론에서 언급한 바와 같이  $2G\lambda^2/4\pi$ 가 됨을 확인할 수 있었다. 따라서 이런 소형 개구는 이득  $G$ 가 약 1.5~1.53 정도로서 공진 시 최대 투과 단면적은 간략히 대략  $3\lambda^2/4\pi$ 로 계산하여도 될 것이다.

### III. 두꺼운 도체 평판에 공진기가 있는 경우

이제부터는 소형 개구를 통한 투과 효율을 증대시킬 수 있는 또 다른 형태로 그림 3에서 보는 바와 같이 두꺼운 도체 평판 내부에 공진기가 있는 구조에 대하여 전자파가 수직으로 입사할 때 소형 개구를 통한 투과 단면적을 계산할 것이다. 이 구조는 직육면체 공진기가 있고 얇은 도체판에 소형 개구가 있으며, 소형 개구는 앞 절에서 언급한 자체 공진이 없는 단순한 개구로 구성된다.

이 구조를 등가회로로 표현하면 그림 3(b)와 같으며, 입·출구의 소형 개구는 동일하면 평판의 각 반 공간에 대한 복사 어드미턴스  $Y=G_s+jB_s$ 로 갈게 둘 수 있고, 여기서 실수부  $G_s$ 는 반공간에 해당되는 복사 컨덕턴스, 허수부  $B_s$ 는 소형 개구의 큰 유도성 서셉턴스로 볼 수 있다. 등가 회로에서 공진기 길이  $d$ 를 관내 파장의 반보다 약간 짧게 주어진다면, 부하 쪽으로 바라본 본 어드미턴스는 허수부는 사라지고 실수부만 갖게 되어 공진 상태가 될 것이다. 그러면 앞 절의 매우 얇은 평판의 소형 개구가 자체 공진된 조건과 동일한 경우로 바라볼 수가 있어 최대

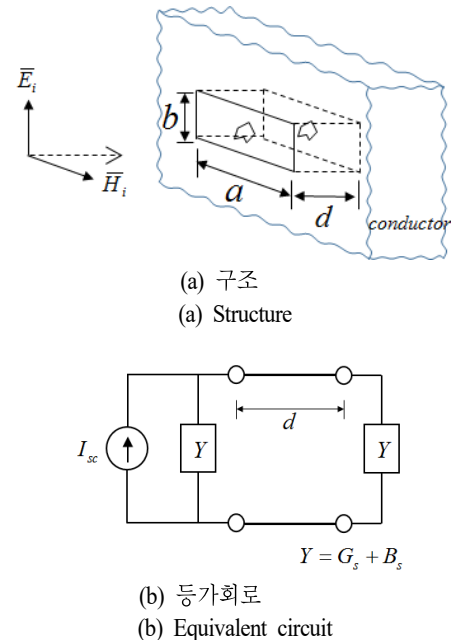


그림 3. 공진기가 있는 두꺼운 도체 평판에서 소형 개구  
Fig. 3. Small aperture in a thick conducting plane with the resonator.

투과 단면적도 마찬가지로  $2G\lambda^2/4\pi$ 가 될 것이다.

실제 이러한 구조에서 도체 평판 내부의 공진기가 공진될 때 입·출구의 소형 개구 형태와 무관하게 최대 투과 단면적이  $2G\lambda^2/4\pi$ 인지 계산해 볼 것이다. 그림 3에서 평판 두께는  $d$ , 공진기의 폭과 높이는  $a, b$ 로 표시하였다. 먼저 공진기의 공진 현상을 보기 위해 소형 개구를 그림 4와 같은 가장 간단한 직사각형 개구로 주파수에 따른 투과 단면적의 특성을 관찰할 것이다.

이를 위해 그림 3에서 공진기의 폭과 높이  $a=20$  mm,  $b=10$  mm, 두께  $d=20$  mm, 그리고 그림 4의 개구는 직사각형으로 크기는  $L_x=5$  mm,  $L_y=3$  mm로 작게 두고 투과 단면적을 계산하여 그림 5에 나타내었다. 그림을 보면 주파수 10.472 GHz에서 공진되는 모습을 볼 수 있으며, 투과 단면적은  $200.5 \text{ mm}^2$ 이다. 여기서 소형 개구는 단순한 직사각형 개구이고, 파장에 비해 작아 자체 공진할 수 없으므로 공진기에 의해 공진됨을 알 수 있다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 공진 시 최대 투과 단면적은  $2G\lambda^2/4\pi$ 라는 주장은 계산 결과인 그림 5에서 보면 공진 시  $2G\lambda^2/4\pi$ 와 일치됨을 볼 수 있어 확인될 수 있다.

다음은 위 구조에서 공진기의 길이  $d$ 를 1 mm씩 변화하면서 투과 단면적을 계산하여 그림 6에 보여주고 있다. 공진기의 길이  $d=19$  mm일 때 공진 주파수  $f_0=10.7347$  GHz ( $\lambda_g/2=19.531$  mm)이고,  $d=20$  mm일 때  $f_0=10.472$  GHz ( $\lambda_g/2=20.524$  mm)이며,  $d=21$  mm일 때  $f_0=10.239$  GHz ( $\lambda_g/2=21.519$  mm)로 예상되는 바와 같이 공진기의 길이가 점차 길어지면 공진 주파수는 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 또한 공진 주파수에서 관내 반파장을 보면 앞에서 언급한 바 같이 공진기의 길이는 관내 반파장보다 약간 짧음을 확인할 수 있다.

다음은 그림 4에서 사각형 개구의 높이  $L_y=3$  mm로 고정하고, 폭  $L_x$ 의 변화에 따른 투과 단면적을 알아보기 위

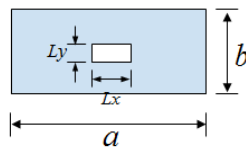


그림 4. 소형 직사각형 개구

Fig. 4. Small rectangular aperture.

해 계산한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림을 보면 직사각형 개구의 폭이 점차 길어질수록 공진 주파수는 조금씩 낮아지지만 이것보다는 대역폭 변화를 볼 수 있다. 즉, 직사각형 개구의 폭  $L_x$ 가 커질수록 대역폭이 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 도파관 여파기의 공진기의 경우 처럼 그림 3의 공진기 구조에서 개구의 크기가 커질수록 공진기의 Q인자가 낮아져서 대역폭이 넓어지기 때

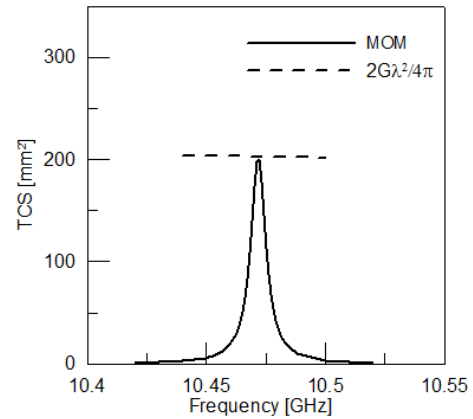


그림 5. 그림 3에서 소형 직사각형 개구의 투과 단면적 계산

Fig. 5. Calculated transmission cross section of the small rectangular aperture in Fig. 3.

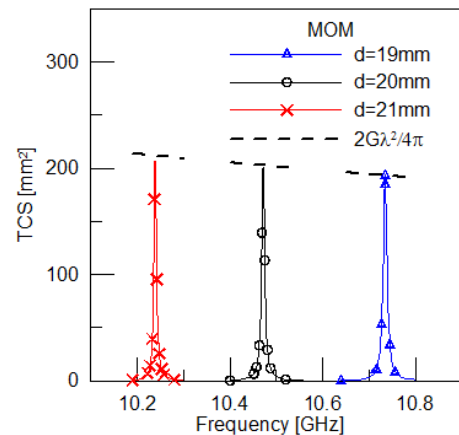


그림 6. 그림 3에서 공진기 길이  $d$ 에 따른 소형 직사각형 개구의 투과 단면적 계산

Fig. 6. Calculated transmission cross section of the small rectangular aperture versus resonator length  $d$  in Fig. 3.

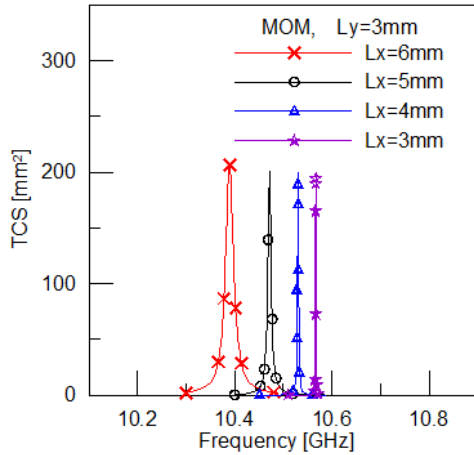
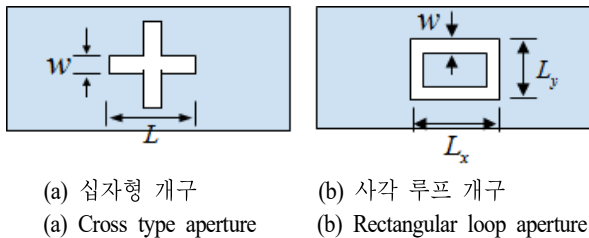


그림 7. 그림 3에서 소형 직사각형 개구의 폭  $L_x$ 에 따른 투과 단면적 계산

Fig. 7. Calculated transmission cross section versus the small rectangular aperture width  $L_x$  in Fig. 3.

문인 것으로 여겨진다.

마지막으로는 그림 3의 구조에서 입·출구에 있는 소형 개구 형태와 무관하게 최대 투과 단면적은  $2G\lambda^2/4\pi$ 로서 표현되는지 좀 더 알아보려고 한다. 이를 위해 그림 4의 직사각형 개구와 더불어 그림 8에서 보는 바와 같이 십자형 개구와 사각 루프 개구를 예로써 검토하였다. 계산을 위해 도체 평판의 공진기의 크기는 앞서 경우처럼  $a=20$  mm,  $b=10$  mm,  $d=20$  mm로 두고 투과 단면적을 계산하여 그림 9에 나타내었다. 여기서 십자형 개구는  $L=5$  mm,  $w=1$  mm이고, 사각 루프 개구는  $L_x=L_y=5$  mm,  $w=1$  mm로 두었다. 계산 결과인 그림 9를 보면 공진 시 최대 투과 단면적은 두 구조 모두  $2G\lambda^2/4\pi$ 와 일치되는 모습을 볼 수 있다. 여기서 십자형 개구의 이득은  $G=1.53$ , 그



(a) 십자형 개구

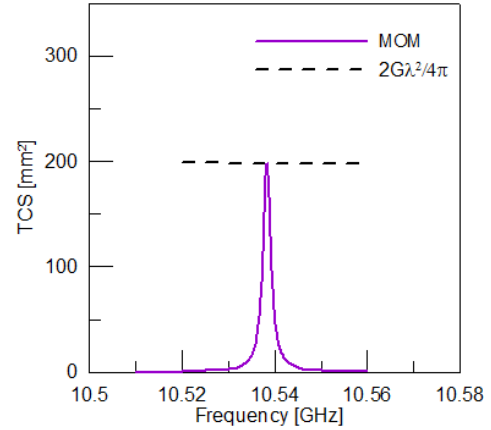
(a) Cross type aperture

(b) 사각 루프 개구

(b) Rectangular loop aperture

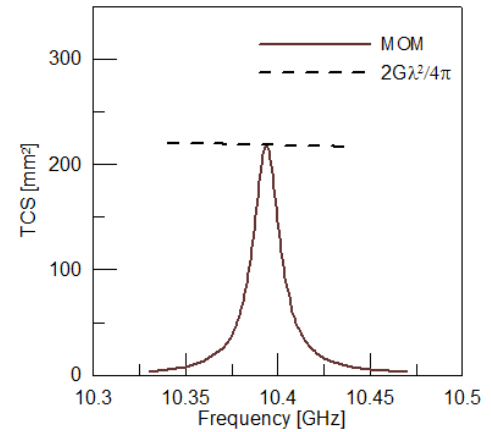
그림 8. 소형 개구 모양

Fig. 8. Small aperture shapes.



(a) 십자형 개구

(a) Cross type aperture



(b) 사각 루프 개구

(b) Rectangular loop aperture

그림 9. 그림 3에서 소형 개구의 투과 단면적 계산

Fig. 9. Calculated transmission cross section of the small aperture in Fig. 3.

리고 사각 루프 개구의 이득은  $G=1.64$ 로 계산되었다.

이러한 점으로부터 앞 절의 매우 얇은 평판의 소형 개구처럼 두꺼운 평판의 공진기의 구조도 입·출구의 개구 형태와 무관하게 공진시 최대 투과 단면적은  $2G\lambda^2/4\pi$ 와 일치함을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

두께가 매우 얇은 도체 평판에 소형 공진형 개구가 있는 구조와 두꺼운 도체 평판 내에 공진기가 있고, 입·출

구에 소형 개구가 있는 구조에 대하여 평면파가 입사할 때 얼마나 투과할 수 있는지 투과 단면적을 계산하였고, 개구 형태와 무관하게  $2G\lambda^2/4\pi$  인지 조사하였다.

이미 알려진 바와 같이 얇은 도체 평판에 소형 개구인 경우, 리지 원형 개구, H-형태 개구, U-형태 개구, 예루살렘 십자형 개구의 4가지 종류에 대하여 투과 단면적을 계산하여 조사하였으며, 개구 형태와 무관하게 공진 시  $2G\lambda^2/4\pi$  임을 확인하였다. 그리고 두꺼운 도체 평판 내에 공진기가 있고, 소형 직사각형 개구, 십자형 개구, 사각 루프 개구인 구조에 대해 투과 단면적을 계산하여 제시하였으며, 이 또한 개구 형태와 무관하게 공진시 최대 투과 단면적은  $2G\lambda^2/4\pi$  임을 확인할 수 있었다.

이와 같은 소형 개구에 대한 분석 결과들은 향후 공진 현상을 활용하는 도파관 필터, 근역장 주사용 프로브 및 개구를 통한 전자파 투과 연구 등에 활용될 것으로 사료된다.

## References

- [1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes," *Physical Review*, vol. 66, no. 7-8, pp. 163-182, Oct. 1944.
- [2] R. Harrington, "Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 2, pp. 205-212, Mar. 1982.
- [3] J. Yeo, J. W. Ko, J. Park, and Y. Cho, "FDTD analysis

of resonant transmission in an electrically small circular aperture with a ridge," in *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Diego, CA, Jul. 2008.

- [4] X. Shi, L. Hesselink, and R. L. Thornton, "Ultrahigh light transmission through a C-shaped nanoaperture," *Optics Letters*, vol. 28, no. 15, pp. 1320-1322, Aug. 2003.
- [5] 고지환, 조영기, "C-형태와 H-형태의 소형 개구에 의한 공진 투과 및 C-형태 개구 간의 상호 결합효과," 한국전자과학회논문지, 23(12), pp. 1399-1405, 2012년 12월.
- [6] X. Shi, L. Hesselink, "Design of a C aperture to achieve  $\lambda/10$  resolution and resonant transmission," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 21, no. 7, pp. 1305-1317, 2004.
- [7] 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.
- [8] 조영기, "소형 개구의 투과효율 향상을 위한 일반 이론," 한국전자과학회논문지, 25(11), pp. 1113-1120, 2014년 11월.
- [9] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.

고 지 환 [금오공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-1076-484>



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

박 순 우 [경북대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6684-9902>



2011년 2월: 부산대학교 바이오시스템공학부 (공학사)  
2015년 2월: 경북대학교 전기공학과 (공학사)  
2017년 2월: 경북대학교 전기공학과 (공학석사)  
2017년 2월~현재: 경북대학교 전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 투과공진구조, 초고주파 능동회로 및 시스템

조 영 기 [경북대학교/교수]

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



1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학  
학과 (공학석사)

1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학  
학과 (공학박사)

2008: 한국전자과학회 회장

1981년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학  
부 교수

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론 등