

## 공진 개구 구조의 소형화 및 투과 효율 개선

# Miniaturization and Transmission Efficiency Improvement of Resonant Aperture Structure

유종경 · 여준호\* · 고지환\*\* · 김병문\*\*\* · 조영기

Jong-Gyeong Yoo · Junho Yeo\* · Ji-Wan Ko\*\* · Byung-Mun Kim\*\*\* · Young-Ki Cho

### 요 약

무한 도체 평판에 위치한 파장에 비하여 작은 개구의 투과 효율을 향상시키는 방법으로써, 기존에 제안된 H-형태의 공진 개구를 변형하여 공진 주파수를 낮추어 파장 대비 개구의 크기를 소형화하고, 공진 개구의 투과 효율을 향상시켰다. 공진 개구를 등가 회로로 표현하여 계산된 최대 투과 단면적은 시뮬레이션을 통해 계산된 변형된 소형 공진 개구에서의 최대 투과 단면적과 일치함을 보이고, 최대 투과 단면적이  $2D\lambda^2/4\pi$ 의 정량적 수식으로 표현되어 투과 효율을 비교할 수 있다. 본 논문에서 제안한 변형된 공진 개구는 H-형태의 개구와 비교하여 최대 투과 단면적은  $846\text{ mm}^2$ 에서  $2,431\text{ mm}^2$ 으로 약 2.87배 증가되었으며, 공진 주파수는 5.06 GHz에서 2.92 GHz로 낮아져 개구의 길이 대 파장 비는 0.178에서 0.103으로 소형화되었다.

### Abstract

As a method of the transmission efficiency improvement of an aperture smaller than the wavelength, we modified the conventional H-shaped resonant aperture to lower the resonance frequency of resonant aperture, and the transmission efficiency of resonant aperture was improved more than the conventional aperture. The maximum transmission cross section(TCS) calculated using the equivalent circuit tends to be almost equal to the maximum TCS from the small resonant aperture modified to improve the transmission efficiency. The transmission characteristics of resonant apertures can be quantified as the TCS, and the transmission efficiency of that can be compared. The modified resonant aperture has a maximum TCS increased by about 2.87 times from  $846\text{ mm}^2$  to  $2,431\text{ mm}^2$  compared to the H-shaped aperture, and the resonant frequency decreased from 5.06 GHz to 2.92 GHz, and the length-to-wavelength ratio of the aperture was reduced from 0.178 to 0.103.

Key words: Resonant Aperture, Miniaturization, Transmission Cross Section(TCS), Frequency Selective Surface(FSS)

## I. 서 론

두께가 매우 얇은 무한 도체 평판에 위치한 개구를 통한 전자파 투과 현상은 오랫동안 연구되어 왔다. 파장에

「이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1D1A1A09058357).」

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

\*대구대학교 정보통신공학부(School of Computer and Communication Engineering, Daegu University)

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

\*\*\*경북도립대학교 전기전자과(Department of Electrical and Electronics, Gyeongbuk Provincial College)

· Manuscript receive March 31, 2017; Revised May 22, 2017; Accepted May 24, 2017 (ID No. 20170331-029)

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

비해 작은 개구에 전자파가 입사되었을 때, 개구를 투과하는 전자파는 그 효율이 매우 적다는 것은 Bethe의 연구를 통해 확인되었다<sup>[1]</sup>. 개구의 전자파 투과 효율을 개선하기 위해 Harrington은 투과 공진 현상(transmission resonance phenomena)이 생기는 개구의 구조를 제안하였으며<sup>[2]</sup>, 현재까지 소형 개구의 투과 효율을 개선하기 위해 C-형태와 H-형태를 갖는 소형 개구를 이용하여 파장에 비하여 작은 투과 공진 개구를 만드는 연구는 많이 진척되었다<sup>[3],[4]</sup>.

이론적으로 연구된 리지가 장하된 원형 개구의 투과 특성은 기존 연구에서 제작하여 결과를 검증한 바 있다<sup>[5]</sup>. 리지가 장하된 원형 개구와 C-형태의 공진 개구는 리지의 간격이 작아질수록 공진 주파수는 낮아지고 투과 효율이 상승하지만 제작상의 한계로 리지의 간격을 줄이는 것에는 한계가 있다. 따라서 공진 개구의 모양을 변형하여 투과 효율이 개선된 공진 개구의 소형화 연구가 필요하다.

개구의 투과 효율을 개선하고 소형화를 이루는 설계 기술의 응용 연구로는 초고주파 및 밀리미터파 대역의 필더<sup>[6]</sup>, 소형 안테나, 메타 구조의 설계 등에 적용할 수 있다. 그리고 향후 공진 개구의 투과 특성을 바탕으로 2차원 주기 배열<sup>[7]</sup>을 하여 frequency selective surface(FSS), radar absorbing material(RAM) 설계에 적용하고자 한다.

본 논문에서는 기존에 연구된 H-형태의 개구<sup>[3]</sup>의 구조를 변형하여 투과 효율이 개선된 소형화 구조를 설계하고자 한다. 소형화된 개구의 공진 특성과 투과 단면적(TCS)을 시뮬레이션 결과와 등가 회로에서의 결과로 비교하여, 본 논문에서 제안한 소형화된 공진 개구 구조에서의 투과 효율이 개선됨을 보이고자 한다.

## II. 이 론

투과 단면적은 그림 1에서 보이는 것과 같이, 무한한 도체 평판에 소형 공진 개구가 위치하는 것으로 가정하고, 소형 공진 개구에 전자파가 입사하였을 때 투과되는 전력  $P_t$ 를 입사하는 평면파의 입사 전력 밀도  $P_i$ 로 나누어서 정의한다<sup>[5]</sup>. 투과 단면적을 수식적으로 표현할 경우, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$TCS[m^2] = \frac{\frac{1}{2} Re \int_{\text{aperture's area}} \vec{E}_i \times \vec{H}_i \cdot d\vec{S}}{\frac{1}{2} (\eta_0 |H_i|^2)} = \frac{P_t}{P_i} \quad (1)$$

투과 공진 개구의 등가 회로적 표현을 통해 최대 투과 단면적을 계산할 수 있으며, 등가 회로적 표현은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다<sup>[8],[9]</sup>. 그림 2의  $G_{hs}$ 는 도체 평면을 기준으로 입사하는 공간과 투과되는 공간을 각각 반 공간(half space)로 나누어 반 공간에서의 복사 컨덕턴스(conductance)를 표현한 것으로, 표현식은  $G_{hs} = (4\pi/3\eta_0)(l_{eff}/\lambda)^2$ 이다.  $\eta_0$ 는 자유 공간의 임피던스이며,  $\lambda$ 는 파장을 의미한다.

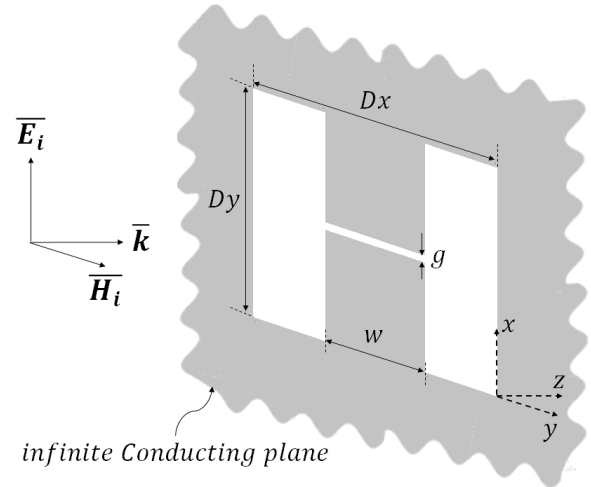


그림 1. H-형태의 소형 개구  
Fig. 1. H-shaped small aperture.

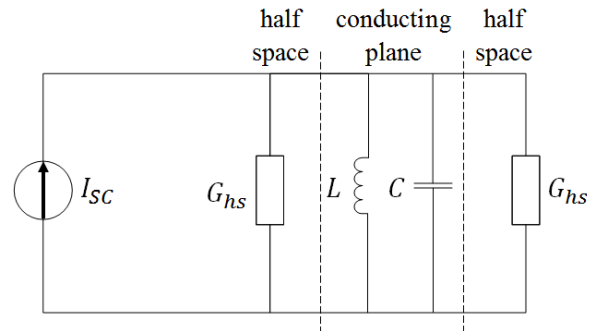


그림 2. 소형 공진 개구의 등가 회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of small resonant aperture.

다.  $l_{eff}$ 는 전류가 분포하는 실효 길이를 나타내며, 공진에 의해 개구에 유도된 전기장의 분포가 집중적으로 모인 구간을 의미한다. 유사한 의미로 자기 전류(magnetic current)의 분포 길이에 해당한다. 전류원  $I_{SC}$ 는 개구에 표면 전류밀도에 해당하는 자계에 전류 밀도가 실효적으로 분포하는 구간의 길이  $l_{eff}$ 를 곱한 값으로 표현식은  $I_{SC}=2H_i l_{eff}$ 이다.

투과 단면적은 등가 회로적 표현을 통해 투과되는 반공간의 복사 컨덕턴스  $G_{hs}$ 에서 소모되는 전력  $P_G$ 에 의해 표현될 수 있으며, 최대 투과 단면적을 전력으로 나타낸다면 다음과 같이 정리할 수 있다. 복사 컨덕턴스  $G_{hs}$ 에서 소모되는 최대 전력은  $P_{G_{max}}=(I_{SC}/2\sqrt{2})^2/G_{hs}$ 와 같이 표현될 수 있으며, 개구에서 투과되는 전력과 같다. 식을 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{G_{max}} = \frac{3\eta_0(H_i\lambda)^2}{8\pi} = P_t \tag{2}$$

$$TCS[m^2] = \left( \frac{3\eta_0(H_i\lambda)^2}{8\pi} \right) / \left( \frac{1}{\frac{1}{2}\eta_0|H_i|^2} \right) = \frac{3\lambda^2}{4\pi} \tag{3}$$

최대 투과 단면적은 등가 회로적 표현을 통해 식 (3)과 같이 표현되고, 개구의 지향성  $D$ 가 파장에 비하여 작은 구조에서 일반적으로 3으로 표현되는데<sup>[10]</sup>, 도체 평면을 기준으로 양쪽으로 방사하는 경우에는 지향성이 반으로 감소하게 된다. 그로 인해 지향성  $D$ 가 3/2이므로 임의의 구조를 갖는 개구에 대해 성립할 수 있는 표현식으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TCS[m^2] = \frac{2D\lambda^2}{4\pi} \tag{4}$$

참고문헌 [9]와 [11]을 통해 최대 투과 단면적은 소형 공진 개구에서 공통적으로  $2G\lambda^2/4\pi[m^2]$ ( $G$ 는 개구의 이득)의 값을 가지는 것을 확인한 바 있다. 개구의 이득  $G$ 는 손실이 없는 조건에서 개구의 지향성  $D$ 와 동일한 의미로 사용된다. 소형화된 공진 개구의 등가 회로적 표현을 통해 구한 최대 투과 단면적과 시뮬레이션을 통해 얻은 최대 투과 단면적이 공진 개구의 구조에 관계없이

$(2D\lambda^2)/(4\pi)$ 의 값을 가지는 것을 보이코자 한다.

### III. 변형된 소형 개구의 투과 효율

다양한 소형 공진 개구의 구조 변화에 따른 전기적 투과 단면적을 계산하기 위하여 3차원 전자기파 시뮬레이터인 CST Microwave Studio를 사용하였다. 시뮬레이션 상에서 무한 도체 평면을 가정하기 위해 소형 공진 개구의 공진 파장에 비하여 매우 넓은 도체 평면이 끝나는 모든 면에 개방 경계 조건(open boundary condition)을 사용하여 공진 개구가 입사파에 노출되었을 때 오직 입사파에 의한 공진 개구의 투과 전력을 계산하였다. 투과 단면적의 계산상 편의를 위하여 입사 평면파의 전력 밀도  $P_i$ 의 크기는  $1 W/m^2$ 을 가정하였다. 투과 단면적은 일반적으로 입사 전력 밀도보다 작은 값을 가지므로 그림에서는  $m^2$ 의 단위를  $mm^2$ 의 단위로 표기하였다.

우선 CST 시뮬레이션을 통해 계산된 투과 단면적의 정확성을 검증하기 위해 그림 1의 H-형태 개구의 크기가  $Dx=Dy=10.6 mm$ ,  $g=0.2 mm$  그리고  $w=3 mm$ 일 때, 모멘트 방법(moment method)의 일종인 RWG(Rao-Wilton-Glisson) 방법<sup>[12]</sup>를 사용하여 개발한 프로그램의 계산 결과와 비교하여 그림 3에 나타내었다. CST와 모멘트 방법 계산 결과

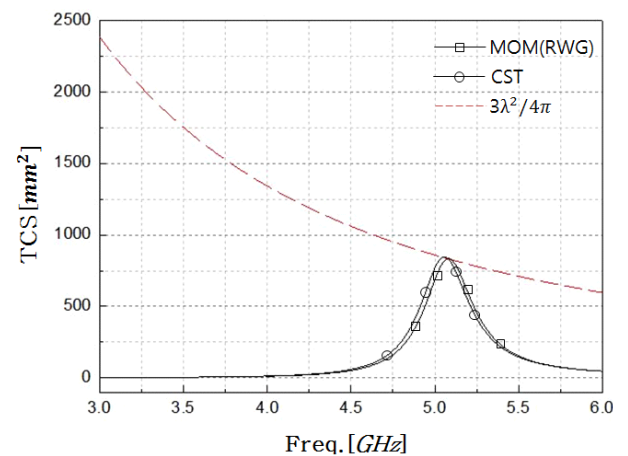


그림 3. H-형태 소형 개구에 대한 모멘트 방법 계산 결과와 CST 시뮬레이션 계산 결과 비교

Fig. 3. Comparison of calculated results by using MOM method and CST simulation for the H-type small aperture.

는 각각 공진 주파수가 5.06 GHz, 5.08 GHz이며, 최대 투과 단면적은 846 mm<sup>2</sup>, 837 mm<sup>2</sup>으로 거의 일치한다.

참고문헌 [3]을 통해 단순한 정사각형 개구에서는 공진 현상이 발생하지 않거나, 공진 현상이 발생하더라도 분명하게 나타나지 않고, 투과 단면적이 매우 작은 값을 가지는 것을 확인하였다. 하지만 C-형태 또는 H-형태의 개구에서는 공진 현상에 의해 최대 투과 단면적이 증가되는 것을 확인한 바 있다.

기존에 연구된 C-형태의 공진 개구<sup>[3]</sup>에서는 리지의 간격인  $g$ 의 간격이 좁아질수록 공진 주파수가 낮아지고, 투과 단면적이 커져 투과 효율이 상승하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 H-형태의 공진 개구의 리지 간격인  $g$ 를 0.2 mm로 유지한 상태에서 개구의 다른 구조 변화에 따른 투과 단면적을 비교하여 기존의 H-형태와 C-형태에 비해 투과 효율이 개선됨을 보이고자 한다.

우선 그림 1의 H-형태의 공진 개구의 크기를  $Dx=Dy=10.6$  mm,  $g=0.2$  mm로 고정한 상태에서 리지의 폭인  $w$ 에 따라 공진 주파수와 투과 단면적을 비교하여 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 H-형태의 개구에서 리지의 폭이  $w=4$  mm에서 6 mm가 될 때 공진 주파수는 5.32 GHz에서 5.06 GHz로 감소하며, 최대 투과 단면적은 770 mm<sup>2</sup>에서 846 mm<sup>2</sup>으로 증가한다. 리지의 폭  $w$ 가 8 mm일 때 공진 주파수는 5.07 GHz이며, 최대 투과 단면적은 841 mm<sup>2</sup>로 리지의

폭이 6 mm일 때와 거의 변화가 없다. 하지만 리지의 폭이 10.2 mm가 되면 공진 주파수는 5.84 GHz이며, 최대 투과 단면적은 635 mm<sup>2</sup>로 투과 효율이 크게 감소한다. 투과 효율이 가장 높은 H-형태의 개구 구조는 리지의 폭이  $w=6$  mm일 때 최대 투과 단면적은 실제 H-형태의 개구 면적인 49.96 mm<sup>2</sup>에 비해 약 17배로 전기적으로 매우 큰 값을 가진다. 개구의 길이 대비 공진 파장의 비는  $Dx/\lambda_0=0.178$ 로 소형임을 알 수 있다. 그리고 그림 1의 구조의 변화에 따라 등가 회로적 표현에 따른 등가 인덕턴스와 커패시턴스의 변화를 표 1에 나타내었다. 등가 인덕턴스와 커패시턴스는 계산된 TCS 공진 곡선에서 최대 값의 주파수  $f_0$ 와 최대 값의 절반이 되는 두 주파수 즉, 하측주파수  $f_L$ 와 상측주파수  $f_H$ 로부터  $Q$  인자( $Q$  factor)를 구하여 다음 식으로 계산된다.

$$Q = \frac{f_0}{f_H - f_L} \tag{5}$$

$$Q = \frac{R}{w_0 L} = w_0 RC \tag{6}$$

여기서  $R = 1/2G_{hs}$ 이다. 인덕턴스의 단위 nH는 10<sup>-9</sup>H이고, 커패시턴스의 단위 fF는 10<sup>-15</sup>F이다.

H-형태 공진 개구에서 리지의 폭  $w$ 가 길어지면서 인덕턴스는 감소하고, 커패시턴스가 증가한다. 구조적으로는 공진이 주로 일어나는 리지의 폭이 늘어나면 커패시턴스가 증가하지만, H-형태 개구의 양쪽에 위치한 개구의 넓은 부분의 둘레가 감소하면서 인덕턴스는 감소하게 된다.  $w$ 가 4 mm에서 6 mm로 증가할 때, 인덕턴스의 감소 비율

표 1. 그림 4의 리지 폭  $w$ 에 따른 H-형태 개구의 등가 인덕턴스와 커패시턴스

Table 1. Equivalent inductance and capacitance of H-shaped aperture vs.  $w$  of Fig. 4.

$w$ [mm]	Resonance Freq.[GHz]	$L$ [nH]	$C$ [fF]
4	5.32	21.37	41
6	5.06	9.83	101
8	5.07	5.34	185
10.2	5.84	2.50	296

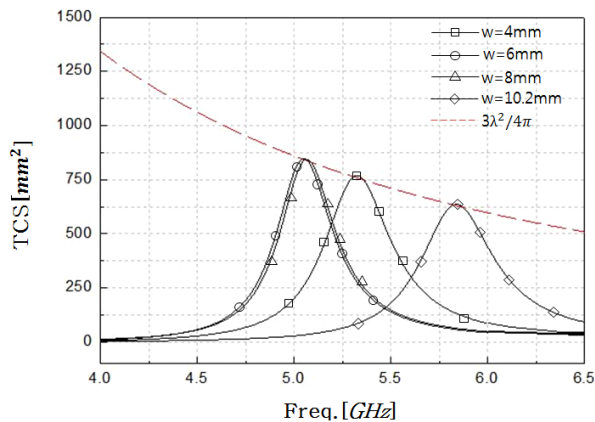


그림 4. 리지 폭  $w$ 에 대한 H-형태 개구의 투과 단면적 변화( $Dx=Dy=10.6$  mm,  $g=0.2$  mm)

Fig. 4. Variations in TCS of H-shaped aperture vs.  $w$ .

은 54 %인데, 커패시턴스의 증가 비율이 59 %로 크기 때문에 공진 주파수를 구하는 식인  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  에 따라 공진 주파수는 감소한다. 하지만  $w$ 가 6 mm에서 8 mm로 증가할 때, 인덕턴스의 감소 비율은 45 %로 커패시턴스의 증가 비율인 45 %와 차이가 거의 없어 공진 주파수는 변화가 거의 없다.  $w$ 가 8 mm에서 10.2 mm로 증가할 때, 인덕턴스의 감소 비율은 53 %로 커패시턴스의 증가 비율인 37 %에 비해 매우 크기 때문에 공진 주파수는 크게 상승하게 된다.

본 논문에서 제안한 변형된 소형 공진 개구의 구조는 그림 5와 같이 H-형태의 개구를 변형하여 설계하였으며, 상하 대칭의 구조를 갖는다. 공진 개구의 크기는  $Dx = Dy = 10.6$  mm,  $g = w_2 = 0.2$  mm로 고정한 상태에서  $h$ 와  $w_1$ 의 변화에 따라 공진 주파수와 최대 투과 단면적을 CST Microwave Studio을 통해 계산하여 그림 6에 나타내었다.

그림 6(a)는 공진 개구의 크기를  $w_1 = 6$  mm,  $w_2 = 0.2$  mm로 고정한 상태에서  $h$ 의 변화에 따라 투과 단면적을 그린 것으로,  $h$ 의 값이 커질수록 개구 중앙에 위치한 도체 선의 두께가 작아지게 된다.  $h$ 의 길이가 3 mm가 될 때 공진

주파수는 3.71 GHz에서 최대 투과 단면적을 가진다. H-형태 개구에서 리지의 폭이 6 mm일 때와 비교하였을 때 공진 주파수는 5.06 GHz에서 3.71 GHz로 낮아졌으며, 최대 투과 단면적은 846 mm<sup>2</sup>에서 1,537 mm<sup>2</sup>으로 약 1.8배 상승하게 된다.

그림 6(b)는 공진 개구의 크기를  $h = 3$  mm,  $w_2 = 0.2$  mm로 고정한 상태에서  $w_1$ 의 변화에 따라 투과 단면적은 비교하여 그린 것으로, 개구의 중앙에 위치한 도체의 길이

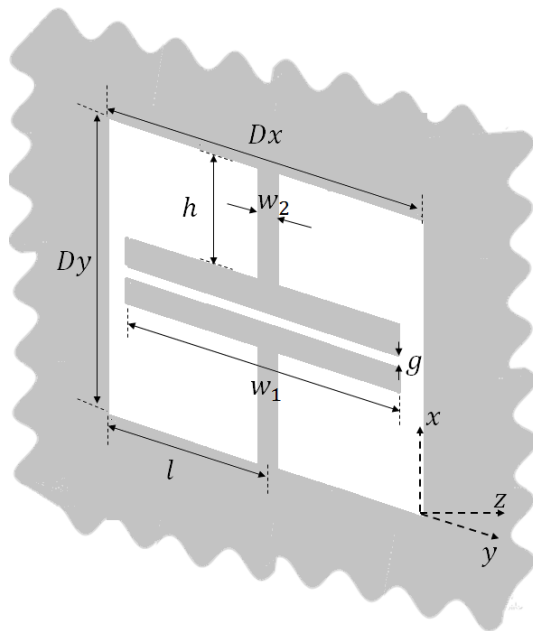
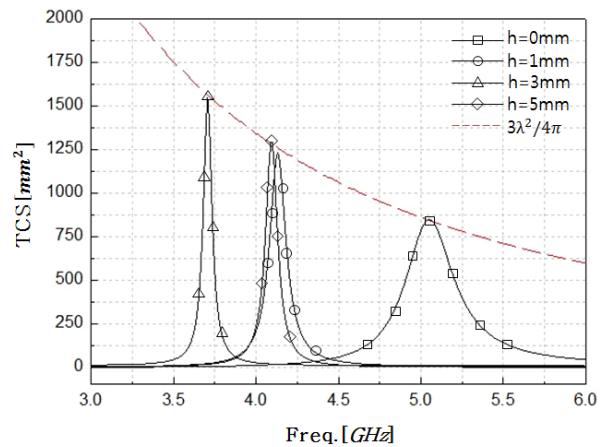
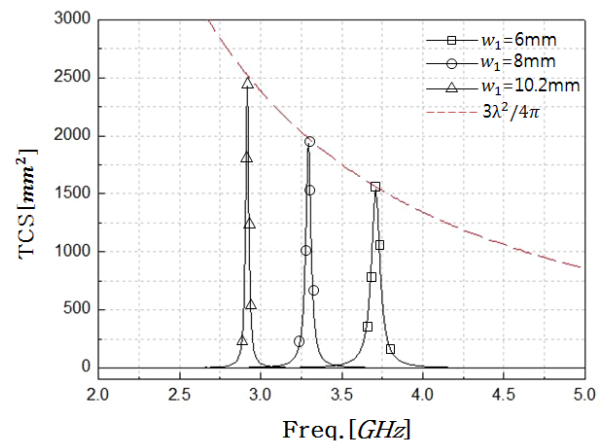


그림 5. 변형된 소형 개구 구조  
Fig. 5. Modified small resonant aperture.



(a)  $h$ 에 따른 투과 단면적 변화 ( $w_1 = 6$  mm,  $w_2 = 0.2$  mm)  
(a) Variations in TCS vs.  $h$ .



(b)  $w_1$ 에 따른 투과 단면적 변화 ( $h = 3$  mm,  $w_2 = 0.2$  mm)  
(b) Variations in TCS vs.  $w_1$ .

그림 6.  $h$ 와  $w_1$ 에 따른 변형된 소형 개구의 투과 단면적 변화

Fig. 6. Variations in TCS of modified small aperture vs.  $h$  and  $w_1$ .

$w_1$ 이 길어짐에 따라 공진 주파수가 낮아지고, 최대 투과 단면적이 증가하는 것을 확인할 수 있다.  $w_1=6$  mm에서 8 mm가 될 때 공진 주파수는 3.71 GHz에서 3.29 GHz로 감소하고, 최대 투과 단면적은 1,537 mm<sup>2</sup>에서 1,935 mm<sup>2</sup>로 증가한다.  $w_1=8$  mm에서 10.2 mm로 증가할 때, 공진 주파수는 3.29 GHz에서 2.92 GHz로 감소하고, 최대 투과 단면적은 1,935 mm<sup>2</sup>에서 2,431 mm<sup>2</sup>로 증가하였다.  $w_1$ 의 길이가 증가함에 따라 투과 효율이 상승하는 것이 관찰된다. 그리고 그림 5의 구조의 변화에 따라 등가 회로적 표현에 따른 등가 인덕턴스와 커패시턴스의 변화를 표 2와 3에 나타내었다.

표 2에서 그림 6(a) 결과를 정리하면 내려오는 리지의 폭을 부분적으로 깎아낸 길이를  $h$ 라고 표현하며,  $h$ 의 길이가 0 mm에서 1 mm가 될 때 인덕턴스의 감소 비율은 25 %이며, 커패시턴스의 증가 비율은 50 %이고,  $h$ 의 길이가 1 mm에서 3 mm가 될 때 인덕턴스의 감소 비율은 23 %이며, 커패시턴스의 증가 비율은 38 %로,  $h$ 가 0 mm에서 3 mm까지 증가할 때 커패시턴스의 증가 비율이 인

표 2. 그림 6(a)의  $h$ 에 따른 등가 인덕턴스와 커패시턴스 ( $w_1=6$  mm,  $w_2=0.2$  mm)

Table 2. Equivalent inductance and capacitance vs.  $h$  of Fig. 6(a).

$h$ [mm]	Resonance Freq.[GHz]	$L$ [nH]	$C$ [fF]
0	5.06	9.83	101
1	4.13	7.38	201
3	3.71	5.67	325
5	4.09	5.76	263

표 3. 그림 6(b)의  $w_1$ 에 따른 등가 인덕턴스와 커패시턴스( $h=3$  mm,  $w_2=0.2$  mm)

Table 3. Equivalent inductance and capacitance vs.  $w_1$  of Fig. 6(b).

$w_1$ mm]	Resonance Freq.[GHz]	$L$ [nH]	$C$ [fF]
6	3.71	5.67	325
8	3.29	3.42	683
10.2	2.92	1.88	1,580

덕턴스의 감소 비율보다 상대적으로 커 공진 주파수는 감소한다. 하지만  $h$ 의 길이가 3 mm에서 5 mm가 될 때 인덕턴스는 거의 변화가 없고, 커패시턴스는 감소하여 공진 주파수가 상승하게 된다. 도체 중앙에 위치한 리지의 도체 부분이 매우 얇은 경우에 커패시턴스가 감소하는 것으로 보인다. 표 3은 표 2의  $h=3$  mm일 때  $w_1$ 의 변화에 따른 결과를 정리한 것이다.  $w_1=6$  mm에서 8 mm로 증가할 때 인덕턴스의 감소 비율은 40 %이며, 커패시턴스의 증가 비율은 52 %이고,  $w_1=8$  mm에서 10.2 mm로 증가할 때 인덕턴스의 감소 비율은 45 %이며 커패시턴스의 증가 비율은 56 %로  $w_1$ 의 길이가 길어짐에 따라 커패시턴스의 증가 비율이 인덕턴스의 감소 비율보다 상대적으로 커지면서 공진 주파수는 낮아지게 된다.

그림 6(b)에서 투과 효율이 가장 높은 공진 개구 구조를 투과 효율면에서 H-형태의 개구와 비교한다면 변형된 공진 개구의 최대 투과 단면적은 2,431 mm<sup>2</sup>으로 실제 변형된 공진 개구의 면적인 66.28 mm<sup>2</sup>보다 약 36배 정도 큰 전기적 면적을 가지며, H-형태의 공진 개구의 최대 투과 단면적보다 약 2.87배 증가되었다. 개구의 길이 대 파장 비는  $Dx/\lambda_0=0.103$ 으로 앞서 H-형태의 개구의 길이 대 파장 비보다 소형화되었음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 H-형태, C형태의 개구에 비하여 공진 개구 구조의 투과 효율을 높이고, 소형화하기 위해 공진 개구의 구조를 변형하였다. 투과 효율을 높이기 위해서는 개구의 크기를 일정하게 유지한 상태에서 공진이 낮은 주파수에서 일어나는 구조를 만들고, 공진 개구의 지향성  $D$ 가 반 파장 슬롯에서의 지향성에 가까운 것이 좋다. 그리고 평면파에 의해 여기되는 슬롯에서의 지향성은 슬롯의 양면으로 방사될 경우에 1.5의 값을 가지게 되어  $3(\lambda^2)/4\pi$ 의 값을 가지게 된다. 시뮬레이션을 바탕으로 계산한 H-형태의 개구와 변형된 개구에서 최대 투과 단면적이 대략  $3(\lambda^2)/4\pi$ 가 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 변형된 개구에서 투과 효율이 가장 개선된 크기는  $Dx=Dy=10.6$  mm,  $g=w_1=0.2$  mm,  $h=3$  mm,  $w_1=10.2$  mm일 때 공진주파수는 2.92 GHz로 개구의 길이 대비 파장 비는 0.103으로 H-형태 개구의 길이 대비 파장 비인 0.178에 비

해 소형화되었음을 알 수 있다. 변형된 개구의 공진 주파수는 2.92 GHz로 H-형태의 개구의 공진 주파수인 5.06 GHz에 비해 크게 낮아지게 되고, TCS는 주파수의 제곱에 반비례하므로 TCS 값이 상당히 증가하게 된다. 그러나 상대적으로 지향성은 매우 적은 폭으로 감소하게 되기 때문에, 전술한 TCS 값에 아주 미미한 영향만을 주며, 앞에서 이론적으로 계산된 TCS 값에 변화를 주지 못한다. 따라서 TCS 값이 크게 상승하여 투과 효율이 증가한다. 변형된 개구의 최대 투과 단면적은 2,431 mm<sup>2</sup>로 H-형태 개구의 최대 투과 단면적인 846 mm<sup>2</sup>보다 2.87배 정도 큰 값을 가지며, 물리적 개구의 면적에 비해 약 36배의 큰 전기적 면적을 가져 투과 효율이 크게 개선된다. 투과 효율을 개선한 소형 개구는 소형 안테나, FSS, RAM 등의 설계에 응용이 가능하다.

### References

- [1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes", *Phys. Rev.*, vol. 66, no. 7-8, pp. 163-182, Oct. 1944.
- [2] R. 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] 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.
- [4] 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.
- [5] 고지환, 조영기, 여준호, 이종익, "리지가 장화된 소형 원형 개구의 공진 투과에 관한 연구", *한국전자과학회논문지*, 22(6), pp. 654-660, 2011년 6월.
- [6] Y. K. Cho, J. Y. Choi, H. W. Son, and J. H. Ko, "Experimental verification of two kinds of transmission resonance phenomena for a narrow slot in thick conducting screen", *J. of the Korean Physical Society*, vol. 63, no. 8, pp. 1554-1558, Oct. 2013.
- [7] 고지환, 이종익, 조영기, "소형 공진 개구의 2차원 주기적 배열에 의한 전자파 산란", *한국전자과학회논문지*, 22(3), pp. 320-326, 2011년 3월.
- [8] J. E. Park, Y. K. Cho, "Comparison of transmission resonance phenomena through small coupling apertures between two kinds of transmission resonance structures", *2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory(EMTS 2010)*, pp. 899-902, 2010.
- [9] 조영기, "소형 개구의 투과효율 향상을 위한 일반 이론", *한국전자과학회논문지*, 25(11), pp. 1113-1120, 2014년 11월.
- [10] A. G. Demeryd, "Linearly polarized microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 24, pp. 846-851, Nov. 1976.
- [11] Y. K. Cho, H. W. Son, and C. H. Lee, "Transmission resonance through small apertures in conducting screen", *2015 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, pp. 77-79, Mar. 2015.
- [12] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.

유 중 경



2016년 2월: 전남대학교 전자정보통신공학전공 (공학사)  
2016년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 설계 등

김 병 문



1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
2015년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)  
1990년 1월~1997년 2월: LG정밀 선임연구원

1997년 3월~현재: 경북도립대학교 전기전자과 교수  
[주 관심분야] Antenna, RF, EMC, Radar 등

여 준 호



1992년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1994년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
2003년: 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 (공학박사)  
1994년 3월~1999년 6월: 국방과학연구소 연구원  
2003년 9월~2004년 6월: 미국 Pennsylvania

State University 박사후과정  
2004년 8월~2007년 2월: 한국전자통신연구원 RFID 시스템연구팀 선임연구원  
2007년 3월~현재: 대구대학교 정보통신공학부 부교수  
[주 관심분야] AMC, EBG, FSS 설계 및 안테나 응용, RFID 및 광대역 안테나, 전자파 산란

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 전자공

학부 교수  
[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론

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 부품 설계, 전자파 산란, 위성 통신