

# 두 가지 개구구조의 투과 단면적에 대한 일반적인 표현식의 타당성: 단일 공진 개구 구조와 비공진 개구의 유한 주기구조

## Validity of the Expression of Transmission Cross-Section for Two Cases: A Single Transmission Resonant Aperture Structure and Finite Array Structure Composed of a Non-Transmission Resonant Aperture

고 지 환 · 김 기 채\* · 조 영 기\*\*

Ji-Hwan Ko · Ki-Chai Kim\* · Young-Ki Cho\*\*

### 요 약

무한 도체 평판에 있는 파장에 비하여 매우 작은 개구 구조에 평면파가 입사했을 때 투과전력의 척도로서의 투과단면적에 대한 일반적인 표현식의 타당성을 다음의 두 가지 형태에 대하여 조사하였다. 즉 첫째, 개구의 실제 면적이 기존의 자계 다이폴로서 근사할 수 있는 경우보다는, 상대적으로 큰 경우의 투과 공진형 개구 형태(예를 들어 CSRR과 같은)와 둘째 비공진개구가 다이폴 어레이 분야의 평행배치에 해당되는 E-면 방향으로 구성된 유한 배열 형태에 대하여 모멘트 방법으로 구한 수치결과와 비교하여 제안된 표현식의 타당성을 검증하였다. 특히 E-면 방향으로 배열된 유한 주기구조의 경우, H-면 방향으로 배열된 유한 주기구조에 비하여 보다 지향성이 큰 호이겐스 소스를 구성한다는 점을 보였는데, 이러한 관찰을 구형 마이크로스트립 안테나 분야에서 사용되는 두 슬롯 모델과 EOT 현상을 보여주는 최소한 기본 단위로서의 선형 배열 개념에 관련된 물리적 내용을 이해하는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

### Abstract

For an electromagnetic plane wave that is normally incident upon an aperture or aperture array in an infinite perfectly electrical conducting plane, the validity of the general expression for the transmission cross-section as a measure of the transmitted power through the aperture or aperture array is investigated for the following two cases: first, for a single transmission resonant aperture (TRA) such as a complementary split ring resonator, which is larger than Bethe's small magnetic dipole; second, for the finite periodic array of a non-TRA such as the usual circular or rectangular apertures aligned along the E-plane direction corresponding to the parallel configuration in terms of the terminology of the electrical dipole array theory. To validate the investigation, the proposed expression is applied to a general aperture distribution, and the results are compared with the results obtained using the Rao - Wilton - Glisson method for the above two cases of aperture distributions. Consequently, it is discovered that for the finite array of non-TRAs, the E-plane aperture array produces an improved directive for the field than the H-plane aperture array used as the Huygens source. This observation may aid in understanding the underlying physics of the two-slot model for rectangular microstrip antennas and the basic 1D linear array as a minimal system exhibiting the extraordinary optical transmission phenomena in 2D aperture arrays.

Key words: TCS, EOT, ET, Aperture, Slot Array, Frequency Selective Surface

†이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(202001980001).

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

\*영남대학교 전기공학과(Department of Electronic Engineering, Yeungnam University)

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

· Manuscript received June 15, 2022 ; Revised June 29, 2022 ; Accepted August 30, 2022. (ID No. 20220615-052)

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

## I. 서 론

두께가 영인 무한 도체판을 관통하여 있는 직경  $D$ 가 파장  $\lambda$ 에 비하여 매우 작은 원형 개구에 평면파 형태의 전자파가 수직으로 입사할 때 그 개구를 통하여 투과하는 투과전력  $P_t[W]$ 를 입사전력밀도  $E_i^2/2\eta_0[W/m^2]$ 로 정규화하여 단위가 면적 $[m^2]$ 으로 주어지는 투과단면적(TCS: transmission cross section)으로 표현하면  $(D/\lambda)^4 D^2$ 에 비례할 정도로 투과효율이 아주 작다. 여기서 투과단면적의 정의식을 명확히 표현하면  $TCS[m^2]=P_t/(E_i^2/2\eta_0)$ 이다. 이러한 이론은 1944년도에 H. A. Bethe<sup>[1]</sup>에 의하여 발표된 바 있다.

그러나 이 경우에도 투과효율이 아주 작은 개구 근처의 적절한 위치에 적당한 크기의 도체 산란체를 놓으면 작은 개구의 투과효율을 매우 크게 증대시킬 수가 있다. 이러한 문제를 개구-산란체 문제(aperture-body problem)<sup>[2]</sup>라고 부르는데, 본 논문에서는 작은 개구 근처에 도체 산란체를 위치시켜서 투과효율을 증대시키기보다는 작은 개구의 기하학적 구조를 변형하여 인접한 산란체를 배치하여 작은 개구의 투과효율을 증대시킬 수 있는 효과를 구현하고자 한다. 다시 말하면 인접한 산란체 효과를 작은 개구 내부 구조의 변형으로 구현하고자 하는 것이다. 이렇듯이 투과효율이 증대되도록 기하학적 구조를 변형한 개구구조를 투과 공진형 개구(TRA: transmission-resonant aperture)라고 한다<sup>[2]</sup>. 한편, 나노기술 시대가 도래되면서 회절의 한계를 극복할 수 있는, 파장에 비하여 충분히 작은 개구 구조를 지니면서도 투과전력이 H. A. Bethe의 이론에 의하여 예견되는 매우 작은 양에 비하여 충분히 증대된 양으로 개선할 수 있는 방법에 관하여 활발히 연구되어 왔다.

본 연구와 관계가 있는 연구로는 상기한 바와 같이 Harrington<sup>[3]</sup>이 다루었던 방법으로서, 좁은 개구 근처에 인접 도체 산란체를 놓아 개구의 투과전력을 증대시키는 방법과 입출력단에 파장에 비하여 좁은 개구로 결합된 투과공진기 구조를 사용하는 방법<sup>[4]</sup>의 두 가지를 대표적인 관련 연구를 들 수 있다. 이들 두 가지 연구 모두 결합 개구가 반경이 매우 작은 원형 개구인 경우에 대하여 투과단면적의 표현식을  $3\lambda^2/4\pi$ 의 형태로 발표한 바 있다.

지금까지의 기존 논문에서는 결합개구의 크기가 파장에 비하여 매우 작은 원형 개구에 입사하는 전자계가 오직 접선성분의 자계만으로 주어지는 간단한 경우에 국한하여 다루었기 때문에, 개구 구간을 단락(short)시킨 영역에 오직 자계 헤르찌안 다이폴(전계 헤르찌안 다이폴의 쌍대 원천으로서)을 놓고 이러한 상황에서 자계 헤르찌안 다이폴의 복사전력을 구하여 작은 개구를 통한 투과전력을 계산하였다.

본 논문에서는 기존의 소형 개구의 투과단면적에 대한 표현식을 하나의 투과공진개구로서 개구면적이 조금 더 커지거나 형태가 변형된 경우 또는 여러 개의 개구를 유한 배열 형태로 구성한 두 가지 경우에 대하여 적용될 수 있는 수식으로 확장하여 그 타당성을 검증하고자 하고, 동시에 이러한 확장된 표현식이 최근에 널리 연구되어온 EOT(extraordinary optical transmission) 현상과의 관계를 논의하고자 한다.

## II. 수정된 표현식과 그의 타당성 검토

앞에서 언급한 매우 작은 소형 개구가 공진될 시 투과 단면적은  $3\lambda^2/4\pi$ 로 비교적 정확한 수식이지만, 개구 면적이 점차 커지면 이 표현식의 정확성이 떨어진다. 개구 면적이 커지거나 소형 개구 배열에서도 비교적 일반화된 정확한 투과단면적의 표현식을 생각해 보고자 한다.

원래 수식  $T=3\lambda^2/4\pi$ 인 표현식의 수정 근거로서는 헤르찌안 자계 다이폴의 지향성(directionality)  $D$ 가 1.5에 해당됨을 알고, 이와 더불어 투과단면적  $T$ 와 개구의 지향성  $D$ 가 서로 일차 함수적으로 선형적 비례 관계가 있음을 활용하여<sup>[5]</sup> 이러한 관계로부터  $D > 1.5$ 인 일반화된 경우에도 적용될 수 있는  $T=2D\lambda^2/4\pi$ <sup>[6]</sup>로 표현식을 수정하고, 이를 검증하기 위해 두 가지 경우에 대하여 그 타당성을 검토하고자 한다.

### 2-1 단일 투과공진개구 구조로서 $D > 1.5$ 인 CSRR

먼저 단일 투과공진개구 구조로서 메타물질(metamaterials) 분야에서 널리 연구되고 있는 CSRR(complementary split ring resonator) 구조(그림 1(a))<sup>[7],[8]</sup>의 투과 특성으로서의 투과단면적의 주파수 특성을 조사해 보았다. 그림

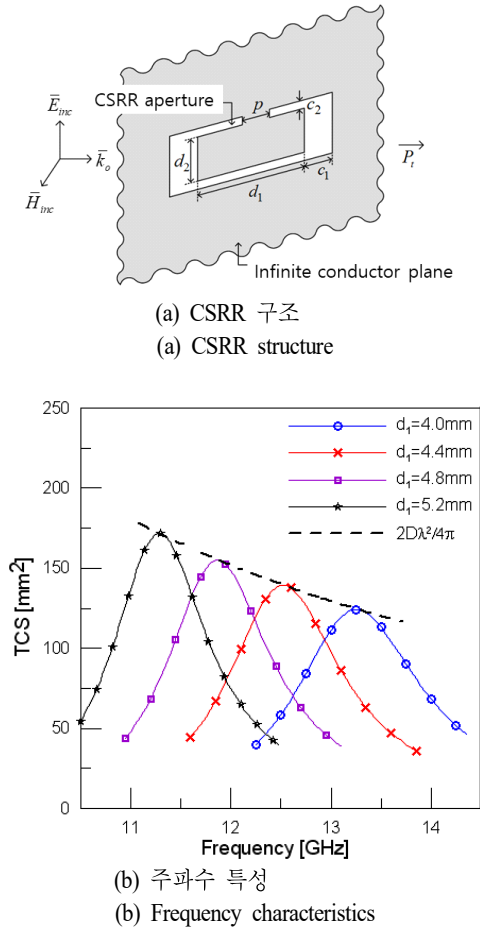


그림 1. CSRR 구조 및 주파수 특성( $d_2=0.8$ ,  $c_1=1.5$ ,  $c_2=0.25$ ,  $p=1.4$ )

Fig. 1. CSRR structure and frequency characteristics.

1(b)에 주파수 특성을 먼저 개구의 지향성  $D$ 를 구한 후에  $2D\lambda^2/4\pi$ 의 표현식을 사용하여 구한 투과단면적의 주파수 특성과 기존의 상용 software를 이용하여 구한 투과단면적의 주파수 특성 간의 수치적 결과를 비교하여 그림 1(b)에 제시하였다. 그림을 보면  $d_1$ 의 변화에 따라 개구의 크기가 달라지며, 각 개구가 공진될 때 투과단면적은 수식  $2D\lambda^2/4\pi$ 와 거의 일치됨을 볼 수 있어, 수정된 표현식  $2D\lambda^2/4\pi$ 는 개구 면적이 커지더라도 비교적 정확함을 알 수 있다.

그리고 그림 1에서 보여준 단일 공진 개구를 갖고 parallel configuration(형태)<sup>[7]</sup>의 배열구조(E-면 방향으로 배열)와 collinear configuration의 배열 구조(H-면 방향으로

배열)에 대하여 투과단면적을 계산하여 일반화 표현식  $2D\lambda^2/4\pi$ 와 비교하여 보면 거의 일치되는 결과를 얻는다. 이는 공진개구 구조이므로 어느 방향으로 배열하여도 개구 간 간격을 적절하게 최적화하면 최대의 투과단면적을 얻을 수 있다.

## 2-2 비투과공진 개구(Non-Transmission Resonant Aperture)로 구성된 유한한 주기배열구조(Finite Periodic Array Structure)

여기에서는 공진개구 구조가 아닌, 기존 FSS에서 보편적으로 널리 다루어 왔던 구조인, 원형 개구나 사각형 개구로 유한한 개구배열 구조를 구성한 경우에도 수정된 투과단면적의 표현식이 적용됨을 살펴보고자 한다. 이와 동시에 실제 유한한 개수의 개구의 주기적 배열에 의한 개구면적에 해당되는 물리적 면적에 입사되는 입사파 전력에 비하여 충분히 큰 전력이 투과되는, 이른바 EOT (extraordinary optical transmission) 현상 또는 ET(enhanced resonant transmission) 현상으로 불리는 물리적 현상이 발생 하는지도 살펴보고자 한다. 이를 위하여 먼저 non-TRA 구조로서 사각형 구조를 택하고(추론되는 물리적인 내용에 변화 없이 계산상의 편리함 때문에), E-면 배열구조와 H-면 배열구조에 대하여 투과단면적 특성을 조사해 본다.

그림 2(a)에서 보듯이 실제 개구의 면적이  $10 \times 10 [\text{mm}^2]$ 인 경우에 그림 2(b)에 도시된 바와 같이 단일 사각형 개구의 투과단면적은 12.82 GHz에서  $171.62 \text{ mm}^2$ 로서 실제 개구면적( $d_x \times d_y$ )보다는 어느 정도 크지만, 변형된 리지 구조인 H형태 소형 사각 개구인 경우에는 공진주파수가 매우 낮아지므로, 공진 시 투과단면적( $2D\lambda^2/4\pi$ )과 비교하면 단일 사각구조는 매우 작은 투과단면적을 갖는다.

여기에서는 그림 3(a)에서 주어진 바와 같이 입사파의 전계 벡터 방향과 동일 방향으로 E-면 배열된 parallel configuration의 배열 형태<sup>[9]</sup>의 경우에 투과단면적을 고찰하여 보자. 이를 계산하기 위하여 배열 축인  $y$ 축과 입사 전계의 편파방향이 동일하도록 선택하고 이러한 가정하에 Rao-Wilton-Glisson(RWG) 형태의 MoM을 사용하여 아래와 같은 수치해석 과정을 거쳐 개구 개수  $N$ 을 함수로 하여 투과단면적을 계산한다.

첫 단계로 두께가 무한소인 무한 도체 평판에 위치한

두 가지 개구구조의 투과 단면적에 대한 일반적인 표현식의 타당성: 단일 공진 개구 구조와 비공진 개구의 유한 주기구조

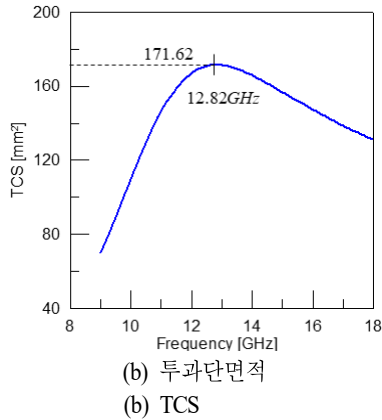
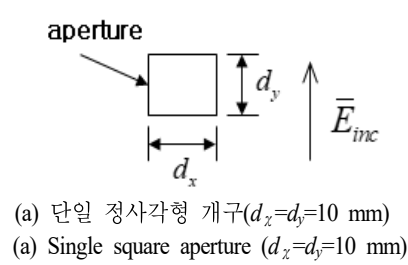


그림 2. 단일 정사각형 개구와 투과단면적  
Fig. 2. Single square aperture and TCS.

$N$ 개의 개구에 등가적으로 놓인 표면 자계전류밀도를 미지수로 하는 적분방정식을 세우고(수직 입사에 대하여), 상기의 MoM 방법을 사용하여 미지 함수인 등가자계전류를 계산하고, 각 개구에 대하여 복소포인팅 정리를 이용하여 각 개구를 통하여 투과되는 총 전력을 구하고 난 후, 이 결과를 입사 포인팅 벡터의 크기로 나누어 전체 개구 배열에 대한 투과단면적을 계산하게 된다. 여기서 개구의 개수를 1개씩 증가시키면서 전체  $N$ 개의 배열 개구의 투과단면적이 최대가 되도록, 즉 개구 간의 상호결합의 효과가 증대되게 배열 간격을 최적화하였다. 이러한 과정을 되풀이 하여 구한 전체 투과단면적값을 개구 개수  $N$ 의 함수로서 표현된 투과단면적과  $2D\lambda^2/4\pi$ 를 이용해서 구한 결과와 비교하여 그림 3(b)에 도시하였으며, 두 수치가 거의 정확히 일치함을 확인할 수 있었다.

참고로 MoM 방법을 사용하여 계산할 때 개구 개수  $N$ 에 따른 최적의 배열 간격  $T_y$ , MoM으로 구한 투과단면적 (TCS), 전체 개구에 의한 지향성  $D$  그리고 이 지향성  $D$ 를 적용한  $2D\lambda^2/4\pi$ 인 투과단면적의 계산값을 표 1에 수록

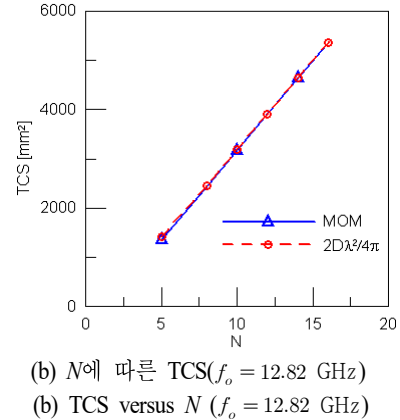
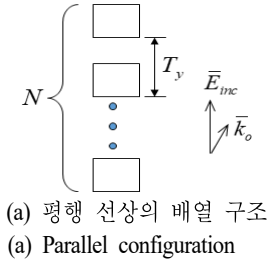


그림 3. 평행 선상의 배열 구조와  $N$ 에 따른 TCS  
Fig. 3. Parallel configuration and TCS versus  $N$ .

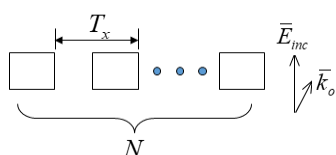
하였다.

다음은 배열 방향을 바꾸어  $x$ -축상에 배열하였다. Huygens source로서의 두 가지 구조 즉 E-면 배열(parallel configuration)과 H-면 배열(collinear configuration)<sup>[9]</sup>의 경우에 대하여 개구 숫자  $N$ 의 함수로서 지향성을 비교하기 위하여 그림 4(a)에서와 같이 주어지는 H-면 배열에 대한 투과단면적을 MoM 방법으로 구한 결과와  $2D\lambda^2/4\pi$ 의 표현식으로 얻은 결과를 비교하여 그림 4(b)에 도시하였다. E-면 배열의 결과와는 달리 MoM 방법으로부터 구한 TCS 결과와  $2D\lambda^2/4\pi$ 에 의한 결과를 보면 배열  $N=5$ 인 경우 거의 동일하고, 배열 수  $N$ 이 많아질수록 두 값이 커지는 경향은 일치되지만 불일치의 정도가 확대됨을 볼 수 있다. 이는 수정된 투과단면적의 표현식이 H-면 배열의 경우에는 적용되지 않음을 의미한다. 그리고 H-면 배열의 투과단면적은 E-면 배열에 비하여 상당히 작은 값을 확인할 수 있다. 참고로 표 2에 H-면 배열에 대한 표 1에 상응하는 자료를 수록하였다.

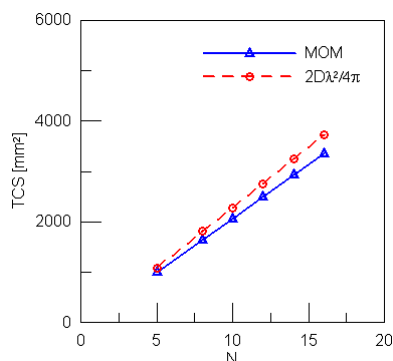
이와 같이 E-면 배열 구조인 경우 투과단면적이 표현

표 1. E-plane(parallel) 배열에서 개구 수  $N$ 에 따른  $T_y$ , TCS(MoM), TCS( $2D\lambda^2/4\pi$ ) 그리고 지향성의 변화  
 Table 1. Variations of  $T_y$ , TCS (MoM), TCS ( $2D\lambda^2/4\pi$ ) and directivity versus aperture number  $N$  for E-plane array.

Aperture number $N$	Separation between two adjacent aperture along y-direction, $T_y$ [mm]	TCS (MoM) [mm <sup>2</sup> ]	TCS ( $2D\lambda^2/4\pi$ ) [mm <sup>2</sup> ]	Directivity
5	21.0	1,359.77	1,420.88	16.30
8	21.6	2,431.45	2,457.58	28.20
10	21.7	3,164.72	3,198.21	36.70
12	21.9	3,903.59	3,914.95	44.92
14	22.0	4,640.53	4,638.18	53.22
16	22.0	5,362.95	5,366.10	61.57



(a) 동일 선상의 배열 구조  
 (a) Collinear configuration



(b)  $N$ 에 따른 TCS( $f_o = 12.82$  GHz)  
 (b) TCS versus  $N$  ( $f_o = 12.82$  GHz)

그림 4. 동일 선상의 배열 구조와  $N$ 에 따른 TCS  
 Fig. 4. Collinear configuration and TCS versus  $N$ .

식과 일치하고, 보다 큰 값을 갖는 것은 배열 개구 간의 상호결합의 영향인데, H-면 배열인 경우에 비해 E-면 배열일 때 배열 개구 상호 간에 보다 큰 결합이 존재하기 때문인 것으로 여겨진다.

흥미롭게도 비공진형의 개구라도 parallel configuration의 배열을 구성하면 collinear configuration의 배열에 비하여 투과단면적이 충분히 커서 EOT 또는 enhanced tran-

smisson 현상과 같은 일이 일어날 수 있다. 물론 각각의 개구를 개별 TCS가 큰 공진형 개구를 사용하는 경우에는 parallel이나 collinear configuration 모두의 경우 EOT 또는 enhanced transmission 현상<sup>[10]</sup>이 일어나게 됨을 기대할 수 있기 때문에 여기서는 non-TRA 형태의 개구를 parallel configuration과 collinear configuration의 두 경우의 배열로 분류하여, non-TRA 형태의 개구라도 parallel configuration의 배열을 구성하면 collinear configuration의 경우와 비교하여 투과단면적 측면에서 큰 값을 보이기 때문에 EOT 현상 또는 enhanced transmission 현상이 일어날 수 있는 개구 구조로서 작용하게 됨을 의도적으로 확인한 것이다.

정리하면 단일 투과공진 개구이거나 비투과공진 개구라 하더라도 parallel configuration 형태의 배열구조이면 개구의 실제 면적에 입사되는 전력보다 상당히 큰 입사 전력이 투과될 수 있는 EOT 또는 ET 현상이 일어날 수 있음을 의미하는 것이다. 즉, TRA의 경우에는 parallel configuration이나 collinear configuration 모두에 대하여 EOT 또는 ET 현상이 일어날 수 있는데, 이는 단일 TRA 구조에 기인된 것임에 반하여 non-TRA를 배열로 구성할 경우에는 parallel configuration인 경우에만 투과단면적이  $2D\lambda^2/4\pi$ 와 동일하다는 의미에서 EOT 또는 ET가 일어난다고 정의한 것이다. 이와는 대조적으로 non-TRA의 경우 collinear configuration 형태의 배열을 구성한다면 MoM으로 구한 실제의 투과단면적은  $2D\lambda^2/4\pi$ 보다 상당히 작은 값을 지니며 Huygens source로서의 지향성 또한 parallel configuration에 비해 상당히 작다.

두 가지 개구구조의 투과 단면적에 대한 일반적인 표현식의 타당성: 단일 공진 개구 구조와 비공진 개구의 유한 주기구조

표 2. H-plane(collinear) 배열에서 개구 수  $N$ 에 따른  $T\chi$ , TCS (MoM),  $TCS(2D\lambda^2/4\pi)$  그리고 지향성의 변화  
Table 2. Variations of  $T\chi$ , TCS (MoM),  $TCS(2D\lambda^2/4\pi)$  and directivity versus aperture number  $N$  for H-plane array.

Aperture number $N$	Separation between two adjacent aperture along y-direction, $T_x$ [mm]	TCS (MoM) [ $\text{mm}^2$ ]	TCS ( $2D\lambda^2/4\pi$ ) [ $\text{mm}^2$ ]	Directivity
5	24.338	992.66	1,089.39	12.50
8	24.000	1,633.87	1,813.30	20.81
10	24.065	2,064.55	2,282.24	26.19
12	24.065	2,494.20	2,756.55	31.63
14	24.000	2,924.93	3,244.83	37.23
16	24.000	3,357.61	3,721.60	42.70

### III. 토 론

앞에서 논의한 바와 같이 개구를 통한 EOT 또는 ET 현상이 일어나기 위한 구조로서 첫째, 단일 투과공진개구에 의한 것이나 둘째, 비공진투과 개구로 구성된 Parallel configuration 형태의 주기구조에 의한 ET 현상의 두 가지를 지적할 수 있는데 이는 일반적인 도체구조에서 EOT가 일어날 수 있는 조건으로서의 하나의 공진개구에 의한 단일 공진과 주기적인 구조에 의한 격자(lattice) 공진으로 분류한 것과 유사하게 된다<sup>[1]</sup>. 또한 주기적인 구조에 의한 공진의 경우에는 Parallel configuration과 collinear configuration 형태 중에 parallel configuration 형태의 배열에 의한 배열구조가 중요한 역할을 하는데, 이 구조는 electric dipole array의 parallel configuration과 쌍대성(duality) 구조가 된다. 지금까지 다루어온 개구배열의 경우 parallel configuration과 collinear configuration은 각각 E-면 배열 및 H-면 배열에 해당됨을 유념해야 한다. 자계 전류의 두 개의 마그네틱 다이폴로 구성된 대표적인 예로는 구형 마이크로스트립 안테나 구조에서의 two slot model이 좋은 예가 되겠다. 또 하나 중요한 parallel configuration 형태의 배열의 예로서, 2차원 개구 배열에서 배열의 기본적인 EOT 배열<sup>[12]</sup>로서 parallel configuration 배열의 예를 들 수 있다.

### IV. 결 론

EOT 또는 ET의 정의를 실제 개구면적에 입사되는 전력보다 상당히 넓은 면적에 입사되는 전력이 투과되는

경우로서 생각한다면 ET를 가능케 하는 투과공진구조는 첫째, 단일 투과공진 개구구조 그리고 둘째, 주기구조와 관련된 구조로서는 비공진 개구구조라도 parallel configuration 형태의 배열구조를 구성하여도 ET를 가능케 할 수 있음을 확인하여 보았다. 특히 이러한 배열구조는 2차원 EOT 구조에서 단일 선형배열구조의 기본 EOT 구조로서 이해할 수 있다. 무엇보다도 본 논문에서의 주요 결론으로는 기존의 소형 개구의 투과단면적의 표현식을 보다 일반적인 표현식으로 수정하여 그 타당성을 두 가지 구조에 대하여 확인하였다.

또한 본 논문에서 다룬 두 가지 종류의 투과공진구조는 기존의 EOT 구조를 다룰 때의 기본 공진 요소인 단일 공진구조와 주기구조 간의 관련된 격자(lattice) 공진구조로서 비유<sup>[11]</sup>될 수 있다는 점을 지적할 수 있다. 즉, EOT 구성하는 경우는 두 가지로 나누어 설명할 수 있는데 첫째, 각각의 개구 구조가 투과 공진형인 경우와 둘째, 본 논문에서 다룬 바와 같이 각각의 개구 구조가 투과 공진 개구가 아닌 경우라도 E-면 주기 배열구조이면 그러한 EOT 현상이 관찰될 수 있음을 보인 것이다.

### References

- [1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small holes," *Physical Review*, vol. 66, no. 7-8, pp. 163-182, Oct. 1944.
- [2] J. E. Park, Y. K. Cho, "Comparison of transmission resonance phenomena through small coupling apertures between two kinds of transmission resonance structures,"

- in *2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, Berlin, Aug. 2010, pp. 899-902.
- [3] 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.
- [4] Y. Leviatan, R. Harrington, and J. Mautz, "Electromagnetic transmission through apertures in a cavity in a thick conductor," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 6, pp. 1153-1165, Nov. 1982.
- [5] L. Verslegers, Z. Yu, P. B. Catrysse, and S. Fan, "Temporal coupled-mode theory for resonant apertures," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 27, no. 10, pp. 1947-1956, Oct. 2010.
- [6] Y. K. Cho, "General theory for enhancing the transmission efficiency through small apertures," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 11, pp. 1113-1120, Nov. 2014.
- [7] J. Y. Choi, J. H. Ko, and Y. K. Cho, "Calculation of the transmission cross-section of the CSRR structure," in *2011 The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science(KIEES) Summer Conference*, Gumi, Jul. 2011, p. 72.
- [8] J. H. Ko, S. W. Park, and Y. K. Cho, "Transmission cross section of the small aperture in an infinite conducting plane," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 4, pp. 300-306, Apr. 2019.
- [9] P. S. Carter, "Circuit relations in radiating systems and applications to antenna problems," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 20, no. 6, pp. 1004-1041, Jun. 1932.
- [10] Z. Ruan, M. Qiu, "Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: The role of localized waveguide resonances," *Physical Review Letters*, vol. 96, no. 23, p. 233901, Jun. 2006.
- [11] F. J. García de Abajo, J. J. Sáenz, I. Campillo, and J. S. Dolado, "Site and lattice resonances in metallic hole arrays," *Optics Express*, vol. 14, no. 1, pp. 7-18, Jan. 2006.
- [12] J. Bravo-Abad, F. J. García-Vidal, and L. Martín-Moreno, "Resonant transmission of light through finite chains of subwavelength holes in a metallic film," *Physical Review Letters*, vol. 93, no. 22, p. 227401, Nov. 2004.

두 가지 개구구조의 투과 단면적에 대한 일반적인 표현식의 타당성: 단일 공진 개구 구조와 비공진 개구의 유한 주기구조

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>



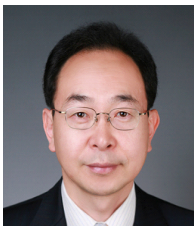
1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
2008: 한국전자과학회 회장  
1981년~2020년: 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수

2020년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 명예교수

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론 등

김 기 채 [영남대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1039-1933>



1984년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
1986년 3월: Keio University 전기공학과 (공학석사)  
1989년 3월: Keio University 전기공학과 (공학박사)  
1989년 4월~1993년 3월: 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원

1993년 4월~1995년 8월: 일본 후쿠오카공업대학 정보공학과 조교수

1995년 9월~현재: 영남대학교 전기공학과 교수

2012년 1월~2012년 12월: 한국전자과학회 회장

1988년: IEICE Japan, Young Scientist Awards

1994년: IEE Japan, Paper Presentation Awards

[주 관심분야] EMC/EMI 관련 안테나 및 전자파 차폐, 전자파 이론 및 전자파 응용