

도파관 구조 내에 있는 Bethe의 소형 단일 개구를 통한 투과공진현상과 그러한 소형 개구가 2차원 평면 주기구조를 구성하고 있을 때 관찰되는 투과공진현상

Transmission Resonance Phenomena through Bethe's Small Hole in Waveguide Screen and Its Array in the 2D Planar Periodic Structure

고 지 환 · 김 기 채* · 조 영 기**

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

요 약

두 종류의 투과 공진을 두 가지 구조에서 일어나는 투과 공진 현상의 투과 공진 조건을 중심으로 살펴보았다. 하나는 도파관 내의 Bethe의 소형 개구를 통한 투과 공진 현상이고, 다른 하나는 2D 평면형으로서 Bethe의 소형 개구로 구성된 정방형의 어레이 구조를 통한 투과 공진 현상이다. 그들 간의 공통적인 특징으로 레일리 형태의 Wood anomaly가 투과 공진 주파수와 바로 인접하여 일어남을 기술하였다. 특히 도파관 내 Bethe hole 구조의 경우, 이러한 공진 현상이 TM_{12} 모드와 관련된 parallel configuration 형태의 어레이 구조 즉 입사 전계의 방향으로 배열된 자계전류원 어레이에서 가장 낮은 차수의 grating lobe가 생기는 주파수와 직결되어 있음을 서술하였다.

Abstract

Two types of transmission resonances are investigated with main interest centering on the transmission resonance condition. One is the transmission resonance through the Bethe's small hole in the waveguide screen. The other is the transmission resonance through the 2D planar square array of the Bethe's small holes. As a common feature between two structures, Rayleigh type Wood's anomaly is observed to be associated with the transmission resonance phenomena for the two cases. In particular, the physical reason for the transmission resonance is explained by use of the image array concept in the parallel configuration in connection with the TM_{12} mode. That is, the transmission resonance frequency is mainly determined by the onset frequency of the lowest order grating lobe of the image array over the hole along the E-plane direction of the incident TE_{10} mode.

Key words: Small Hole, TCS, EOT, ET, Aperture, Slot Array, Frequency Selective Surface, FSS, Grating Structure

「이 연구는 금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었음(2021).」

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 November 21, 2022 ; Revised December 15, 2022 ; Accepted December 28, 2022. (ID No. 20221121-096)

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

I. 서 론

평면 전자파가 무한소 두께의 무한 도체 평판에 위치한 파장 λ 에 비하여 매우 작은 직경 D 의 이른바 Bethe^[1]의 작은 개구(small hole)에 입사할 때 이러한 개구를 통하여 투과되는 전력은 $(D/\lambda)^4$ 에 비례할 정도로 매우 작다는 내용은 잘 알려진 사실이다.

개구 결합(aperture coupling) 현상을 이용한 구조의 예로 초고주파 공학분야에서 널리 알려진 구조로서 도파관 내에 구현되기에 용이한 투과 공진기(transmission cavity) 형태의 공진기 구조^{[2],[3]}를 들 수 있다. 이 구조는 한 예로 구형 도파관 내부에 입력과 출력 iris 간의 거리를 관 내 파장의 반 파장에 해당되는 거리를 유지하면서 입출력 iris의 중앙부에 파장에 비하여 충분히 작은 개구를 만들어 주면 대역 통과 여파기(band pass filter)를 구성하게 된다는 사실 또한 잘 알려진 사실이다.

전술한 투과공진기 구조의 투과 공진 주파수의 결정 방식과는 전혀 다른 투과 공진 방식이 있는데 개구의 크기가 '0'으로 수렴하여도 투과 공진 현상을 관측할 수 있는 구조로서 그림 1(a)에 도시되어 있는 바와 같이 도파구조, 즉 예를 들어 구형도파관의 횡단면에 위치한 iris의 중앙부에 매우 작은 개구를 갖고 있는 구조를 그 예로 들 수 있다.

논의의 명확성과 단순성을 위하여 결합개구의 형태는 한 변의 길이가 파장에 비하여 매우 작은 정방형(square) 형태라고 가정한다. 위에서 이야기한 바와 같이 개구의 크기가 '0'으로 수렴하면서도 투과 공진 현상이 일어날 수 있다는 물리적인 상황은 무엇인가?

본 논문에서는 이러한 질문에 대한 답변으로서의 논의를 진행하고, 이러한 답변이 최근 수십여년간 광학 관련 분야에서 활발하게 논의되어 왔던^[4] EOT(extraordinary optical transmission) 현상과의 상사(analogy)가 되는 물리적 함축 내용을 다루고자 한다.

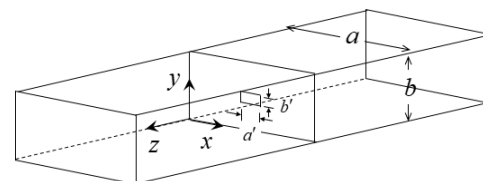
II. 본 론

일반적으로 기본적인 투과 공진기 구조(transmission resonant structure)로 구성된 대역 통과 여파기는 iris 사이

에 공진기가 있으며, 공진에 의해 입사파는 전부 통과하게 된다. 이때 공진주파수는 대략적으로 공진기 길이의 반 파장에 해당된다. 그런데 흥미롭게도 그림 1에서 보는 바와 같이 도파관의 단면의 중앙에 매우 작은 하나의 개구가 위치하게 두고, 개구의 크기가 점차 극히 작은 무한소로 수렴(small hole limit)하게 되더라도 투과 공진이 일어남을 확인할 수 있다.

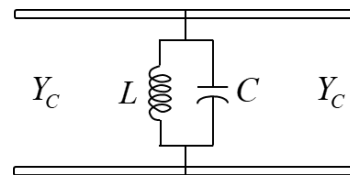
본 논문에서는 먼저 그림 1에서와 같은 구형 도파관에서 단면의 중앙에 작은 개구의 iris를 두고, 이 도파관에 기본 모드인 TE_{10} 모드가 입사할 때 어떤 조건하에서 전체 입사파 전력이 무한소의 크기를 갖는 개구를 통하여 모두 투과할 수 있을까? 라는 질문에 대한 물리적인 답을 논의하고자 한다.

잘 알려진 바와 같이 매우 작은 개구는 작은 값의 인덕턴스를 갖기 때문에 그림 1(b)에서와 같이 LC 병렬 공진 회로를 통하여 투과 공진이 일어나기 위하여는 매우 큰 값의 커패시터 용량값이 필요하게 된다. 그런데 지금 다루고 있는 매우 작은 개구 구조 자체와 관련하여 그러한 커패시턴스값을 구현할 수 없다. 그렇지만 도파구조인 도파관내의 불연속 구조(즉 중앙부에 작은 개구가 있는 iris)에서 고차모드(high order mode)인 감쇠 모드(evanescent



(a) 구형도파관 구조

(a) Rectangular waveguide structure



(b) 등가회로

(b) Equivalent circuit

그림 1. 소형 iris를 갖는 구형 도파관 구조와 그의 등가 회로

Fig. 1. Rectangular waveguide structure with small iris and the equivalent circuit.

mode)들에 의한 축적 에너지에 의해 커패시턴스 성분들을 만들어 줌으로써 투과 공진에^[5] 필요한 조건을 만족할 수 있다. 그렇다면 이러한 고차모드들에 의한 감쇠모드들에 의한 축적에너지를 구성하는 물리적 근거는 무엇인가? 소형 개구에 유기되는 주된 전자계는 y 방향 성분의 전계이며, 이를 등가원리를 사용하여 다시 표현하면 개구의 $z=0^+$ 측에서 x 방향 성분의 자계 전류로 대체할 수 있는데, 이러한 자계 전류에 대하여 $y=0$ 과 $y=b$ 즉 도파관의 윗면과 아랫면에 의한 영상법(image method)을 사용하면 y 축 방향으로 배열된 자계전류원(작은 개구에 대하여 magnetic dipole로 근사되는)들은 parallel configuration^[6]에 해당되기 때문에, 호이겐스 파원(Huygens' source)의 관점에서 이와 대조적인 linear configuration에 해당되는 어레이에 비하여 큰 원거리장(far field)값을 주기 때문에 상대적으로 큰 지향성(directivity) 값을 갖게 된다. 따라서 도체 평판에 위치한 개구 또는 개구 어레이의 투과단면적과 지향성 간의 관계에 의하여 개구에서 y 축 방향의 전계에 해당되는 x 방향의 자계 전류원으로 표현되는 개구를 통한 투과 효율(또는 투과단면적)이 더욱 크게 된다. 이러한 점이 도파 내의 단일 소형 개구에 의한 투과공진현상에 큰 기여를 하게 된다.

지금까지의 논의를 염두에 두고 그림 1의 도파관에 대하여 사용되는 동작주파수보다 더 높은 주파수 범위까지 투과 특성을 조사해 본다. 이 경우의 수치해석에는 전자파 해석 tool인 HFSS를 사용하였다. 계산을 위해 구형 도파관의 폭은 $a=100$ mm, 높이는 $b=70$ mm인 구조로 두고, 단면의 중앙에 위치하고 있는 개구의 크기는 정방향으로 한 변의 길이가 9 mm, 12 mm, 15 mm인 경우에 대하여 투과계수($|S_{21}|$)를 계산하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

흥미롭게도 그림 2에서 투과계수가 1에서 0으로 급격히 떨어지는 주파수가 TM_{12} 모드의 차단주파수(cutoff frequency)에 해당됨을 확인할 수 있다. 동시에 투과계수가 1인 즉 TE_{10} 모드와 관련된 입사파 전력이 모두 투과되어 임피던스 정합이 되는 주파수에서 바로 위인 인접 주파수에서 TE_{10} 입사파 전력이 모두 반사가 되는 전반사 현상이 일어남을 확인할 수 있다. 이는 투과 공진을 위한 조건을 만족시키기 위한 커패시턴스 성분을 주기 위하여

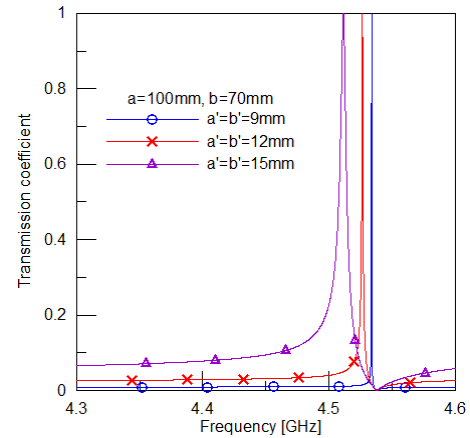


그림 2. 그림 1에서 개구 크기에 따른 투과계수 계산
Fig. 2. Calculated transmission coefficient versus aperture size in Fig. 1.

필요한 것으로 가정한 TM 고차모드들에 의한 감쇠 모드에 기인된 축적에너지로 추정했던 것과는 달리, TM_{12} 모드만에 의한 기여라고 결론지을 수 있다^[7]. 따라서 차단 주파수보다 약간 작은 주파수에서는 커패시턴스가 ∞ 는 아니지만 상당히 큰 어떤 값을 주어 매우 작은 개구가 갖는 작은 인덕턴스값과 이른바 LC 병렬 공진을 일으켜서 투과 공진을 일으키는 반면, 이보다 주파수가 약간 높은 주파수에서는 C 성분이 급격히 변하여 ∞ 값을 갖게 되어 반사계수가 -1 이 되는 전반사를 만들어 주기 때문에 입사 전력이 모두 투과되는 투과 공진과 입사 전력이 모두 반사되는 전반사 점이 매우 좁은 주파수 범위 내에서 일어나는 이른바 Wood's anomaly^[7]가 관찰되는 것으로 생각된다.

특히 y 방향만의 등가 자계전류원 어레이(equivalent source array)를 고려하게 되면 TM_{12} 모드의 차단주파수 $f_c^{TM_{12}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{b}\right)^2}$ 로서 주어지며, 이는 바로 첫 번째 그레이팅 로브(first grating lobe)가 생기는(onset) 주파수에 해당됨을 확인할 수 있다. 이는 반세기 전에 발표되었던 참고문헌 [8]의 Wood's anomaly에 관한 논문에서 기술된 Wood's anomaly에 대한 두 가지(레일리 파장이거나 누설파와 관련된) 원인 중에서, 첫 번째 그레이팅 로브가 생기는 주파수인 레일리 주파수와 관련되어 있음을 명확히 볼 수 있다. 또한 엄밀히 기술하자면 기존의 투과

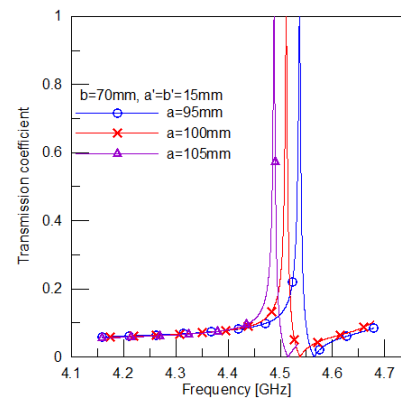
공진기 형태 즉 두 개의 입출력 iris로 구성된 대역 통과 여파기의 결합 개구(coupling aperture)의 크기는 파장에 비하여 충분히 작은 이른바 Bethe의 소형 개구(small hole)에 해당되지만, 지금 여기에서 논의되는 소형 개구는 이른바 small hole(aperture) limit으로서 개구의 크기가 '0'으로 수렴해 가는 경우를 포함하고 있음에 명확한 차이가 있다. 특히 동작주파수의 관점에서 지금 다루고 있는 단일 소형 개구에 의한 투과 공진 주파수가 투과 공진기에 의한 주파수보다 항상 높은 위치에 있음을 인식해야 한다. 투과 공진 조건을 만족시키는 주파수에서도 투과 공진 조건을 위한 커패시턴스 성분의 존재를 위하여 감쇠 모드 형태의, 그레이팅 표면에 속박된(bound) 축적에너지 형태를 유지하면서 투과 공진(입사파의 전량 투과) 현상을 만들어내는 것이다. 이 점은 기존의 투과 공진기 구조와 같은 일반적인 투과 공진 구조에서는 투과 공진 주파수에서 리액턴스 성분이 완전히 상쇄되는 데 반하여, 지금 다루고 있는 도파관 내 단일 개구에 의한 투과 공진 주파수에서는 아직도 리액티브성 축적에너지가 개구 표면에 속박된(bound) 에너지로서 표면파 형태와 유사한 모습으로 존재한다는 점이 크게 다르다고 볼 수 있다.

따라서 이러한 속박된 에너지 형태의 표면파 형태와 입사파의 결합을 통하여 2개 또는 3개의 개구^[9]를 parallel configuration 형태의 어레이를 구성한 경우에도 실제 총 개구면적보다 상당히 큰 면적에 입사되는 전파에너지가 투과된다. 따라서 지금 다루고 있는 종류의 EOT 현상이 일어나기 위하여는 지금까지 논의한 Quasi-bound wave 형태의 역할이 있을 것으로 추측된다^{[9],[10]}.

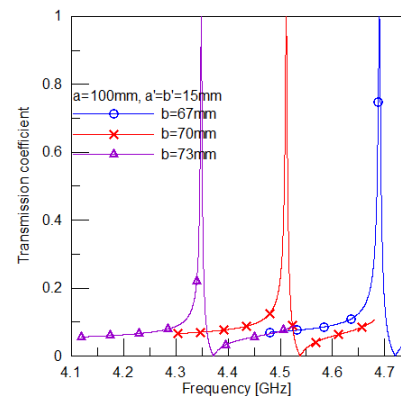
부연컨대 개구 어레이의 지향성과 투과 단면적과 같은 투과 효율과의 관계로부터 첫 번째 그레이팅 로브가 onset(생성)되기 전에 최대의 지향성을 지니며, 첫 번째 그레이팅 로브가 생기는 즉시 지향성이 급감하여 투과 효율이 급격히 떨어질 수 있음도 물리적으로 예측 가능하다고 생각되며, 이와 동시에 첫 번째 그레이팅 로브가 생길 때 복사 시스템의 지향성에 주는 영향이 두 번째 이상의 그레이팅 로브의 영향에 비하여 지배(dominant)적일 것으로 생각되어, 이로 인하여 TM_{12} 모드의 영향이 가장 클 것으로 생각되는 것이 자연스럽다고 하겠다. 지금까지의 논의가 즉 이미지(image)의 parallel configuration^[6]형태

의 어레이가 높은 지향성을(보다 효율적인 호이겐스 소스로서) 주어 큰 투과 효율을 준다는 것, 따라서 y 방향의 어레이가 EOT 현상의 behind physics를 주는 기본 단위 어레이^[11]라는 점, 그리고 개구의 크기가 '0'으로 수렴해 가는 경우에도 매우 작은 개구를 갖는 iris를 도파관 구조 내에 설치하여도 투과 공진 현상이 일어날 수 있음을 보이고자 한다.

특히 앞서 기술한 투과 현상의 개념을 갖고, 도파관 폭 a 와 높이 b 의 변화에 따른 투과계수를 계산하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)를 보면 도파관 폭 a 가 클수록 투과계수가 'zero'가 되는 주파수가 조금씩 낮아지는 반



(a) 도파관 폭 a
(a) Waveguide width a



(b) 도파관 높이 b
(b) Waveguide height b

그림 3. 그림 1에서 도파관 크기에 따른 투과계수 계산
Fig. 3. Calculated transmission coefficient versus waveguide dimensions in Fig. 1.

면에 그림 3(b)를 보면 도파관 높이 b 가 클수록 ‘zero’가 되는 주파수는 보다 크게 변화되는 모습을 볼 수 있다. 여기서 투과계수가 ‘zero’가 되는 주파수는 TM_{12} 모드의 차단주파수인 $TM_{12}^{cut} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{b}\right)^2}$ 와 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

다음은 그림 4에서 보는 바와 같이 무한소 두께의 무한 도체 평판에 2차원으로 사각형 개구가 배열된 FSS 구조에 평면파가 수직으로 입사한 경우를 고려해 보자. 이 구조에서 공진되는 주파수는 전부 투과하지만, 그 외 주파수대는 거의 대부분 반사될 것이다. 본 논문에서 주된 관심인 개구의 크기가 작아질수록 정방형 배열^[12]의 공진주파수는 E면 어레이 방향으로 주기가 한 파장이 되는 경우에 해당된다. 이를 확인하기 위해 배열 주기 $T_x=T_y=20$ mm로 두고, 정사각형 소형 개구의 한 변의 길이가 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm인 경우에 대해 전계가 y 축 방향을 갖는 평면파가 수직으로 입사할 때 투과계수(투과파대 입사파의 전계 크기 비)를 계산하여 그림 5에 보여주었다. 특히 이는 도파구조 내 단일 소형 개구의 E면으로 배열된 영상 간의 간격이 최저 격자 모드가 생길 때의 조건과 동일함을 확인할 수 있다.

또한 소형 개구의 크기는 3×3 mm²로 고정하고 x 축과 y 축 방향의 배열 주기 변화에 따른 투과계수를 계산하여 그림 6에 나타내었다. x 축 방향으로 주기 변화는 도파 구조내의 단일 소형 개구의 경우와 같이 영향이(투과 공진주파수에 대한) 상대적으로 작음을 알 수 있는데, 이 또한 두 가지 경우 E면 방향의 배열이 EOT에 주된 영향을 끼

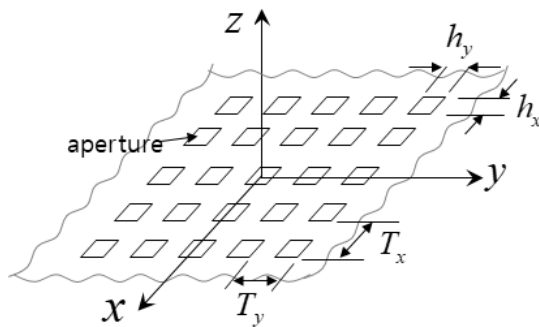


그림 4. 2차원 평면 정방형 배열 구조(FSS)
Fig. 4. 2D planar square array structure (FSS).

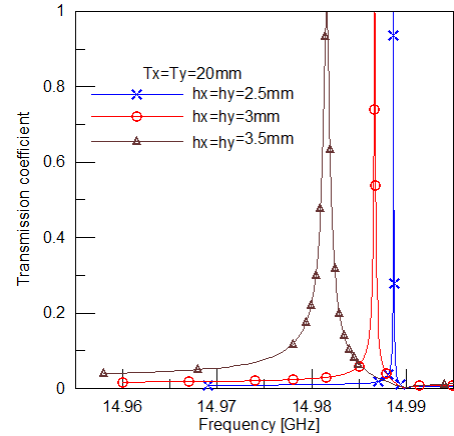
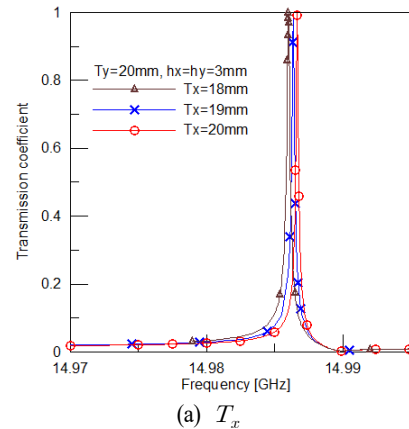
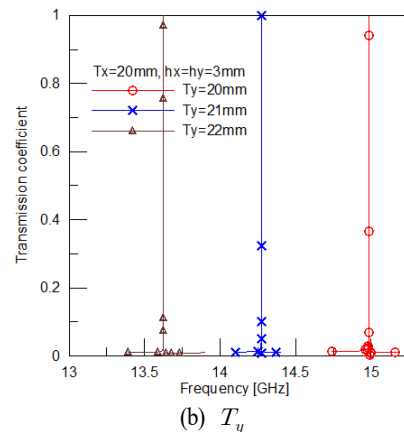


그림 5. 그림 4에서 개구 크기에 따른 투과계수 계산
Fig. 5. Calculated transmission coefficient versus aperture size in Fig. 4.



(a) T_x



(b) T_y

그림 6. 그림 4에서 배열 주기에 따른 투과계수 계산
Fig. 6. Calculated transmission coefficient versus array periods in Fig. 4.

친다는 사실을 보여주고 있다.

한편, 도파관 내 스크린에 있는 작은 개구에 의한 투과 공진 현상과 무한 평판에 위치한 2D 정방형의 소형 개구 어레이에 의한 투과 공진 현상의 비교를 위하여 이러한 두 가지 구조에 대하여, 투과파가 ‘zero’가 되는 주파수를 기존 FSS에서 널리 사용되는 주파수대역에서 비교하여 보고, 그에 인접해 있는 투과 공진(전 투과 현상에 해당되는) 주파수 특성을 구하여 보았다. 그림 4의 2D 배열 구조에서 앞서 언급한 배열 주기가 $T_x=T_y=20$ mm이고, 개구의 크기가 3×3 mm²인 경우에 투과 공진 주파수는 대략 15 GHz이다. 이와 투과 특성이 유사한 그림 1의 도파관에 한 번의 길이가 $10\sqrt{5}$ mm인 정방형의 도파관 내 스크린의 중심에 3×3 mm²의 소형 개구가 있는 경우의 투과 특성과 비교하여 그림 7에 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 투과계수가 ‘zero’인 주파수는 그림 1의 도파관인 경우 14.9903 GHz 그리고 그림 4의 FSS인 경우 14.9898 GHz로서 거의 동일함을 확인할 수 있었다. 이로부터 두 가지 구조에 대하여 투과 공진이 입사 전계와 같은 방향의 배열 구조에 의하여 투과 공진 주파수 및 투과 zero 주파수가 결정됨을 확인할 수 있었다. 또한 결합개구의 크기가 작아질수록 두 가지 구조에서의 투과공진 주파수가 서로 근접해 갈 수 있음을 기대할 수 있다.

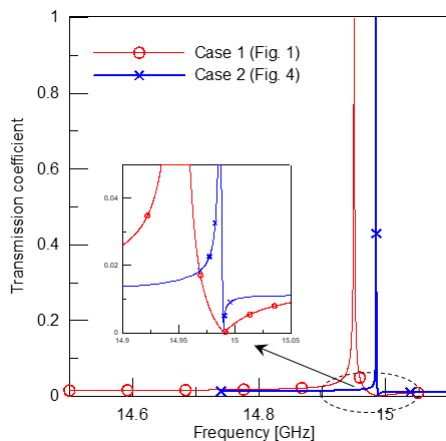


그림 7. 그림 1과 그림 4의 두 경우에 투과 ‘zero’에 대한 비교(case 1: $a=b=10\sqrt{5}$, case 2: $T_x=T_y=20$ mm, $h_x=h_y=3$ mm)

Fig. 7. Comparison of transmission ‘zero’ for the two cases in Fig. 1 and Fig. 4.

III. 결 론

도파관 내 횡단면 도체판의 중심에 위치한 Bethe의 작은 개구 구조와 무한 도체판에 Bethe의 소형 개구로 구성된 정방형의 배열 구조의 두 가지 구조에서 관찰되는 투과 공진 현상(반사 없이 전 투과가 일어나는)에 공통적으로 적용될 수 있는 투과 공진 조건을 생각해 보았다. 특히 도파관 내 Bethe의 소형 개구를 통한 투과 공진 개구를 설명할 때 도입되는 도파관 내 TM_{12} 모드의 역할을 Bethe의 작은 개구에 위치한 등가 자계 전류의 입사 TE_{10} 모드의 전계 방향(parallel configuration에 해당되는)으로의 영상 배열(image array)에서 일어나는 기본적인(낮은 주파수의) 그레이팅 로브와 관련하여 설명하고 평면형 정방형 배열 구조에서 일어나는 레일리 타입의 Wood’s anomaly와의 공통점을 생각해 보았다. 아직 기본적인 TM_{12} 모드와의 관련성의 설명에 머물러 있지만, 좀 더 높은 주파수 대역에서의 투과 공진 현상으로 확대하는 일을 준비하고 있다.

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. 744-747.
- [3] Y. K. Cho, "General theory for enhancing the transmission efficiency through small apertures," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 11, pp. 1113-1120, Nov. 2014.
- [4] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature*, vol. 391, no. 6668, pp. 667-669, Feb. 1998.
- [5] F. Medina, F. Mesa, and R. Marques, "Extraordinary transmission through arrays of electrically small holes

- from a circuit theory perspective," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 12, pp. 3108-3120, Dec. 2008.
- [6] P. S. Carter, "Circuit relations in radiating systems and applications to antenna problems," in *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Jun. 1932, vol. 20, no. 6, pp. 1004-1041.
- [7] Y. Pang, A. N. Hone, P. P. M. So, and R. Gordon, "Total optical transmission through a small hole in a metal waveguide screen," *Optics Express*, vol. 17, no. 6, pp. 4433-4441, Mar. 2009.
- [8] A. Hessel, A. A. Oliner, "A new theory of Wood's anomalies on optical gratings," *Applied Optics*, vol. 4, no. 10, pp. 1275-1297, Oct. 1965.
- [9] J. M. Brok, H. P. Urbach, "Extraordinary transmission through 1, 2 and 3 holes in a perfect conductor, modelled by a mode expansion technique," *Optics Express*, vol. 14, no. 7, pp. 2552-2572, Apr. 2006.
- [10] F. J. García de Abajo, R. Gómez-Medina, and J. J. Sáenz, "Full transmission through perfect-conductor sub-wavelength hole arrays," *Physical Review E*, vol. 72, no. 1, p. 016608, Jul. 2005.
- [11] 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.
- [12] R. Gordon, "Bethe's aperture theory for arrays," *Physical Review E*, vol. 76, no. 5, p. 053806, Nov. 2007.

고 지 환 [금오공과대학교/교수]

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



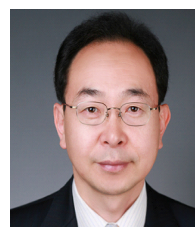
1982년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1985년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1985년~2000년: 한국전자통신연구원 연구원

2000년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수

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

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: 한국전자파학회 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

조 영 기 [경북대학교/명예교수]

<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~2020년: 경북대학교 IT대학 전자

공학부 교수

2020년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 명예교수

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론 등