

도파관 슬롯 배열 안테나용 리지가 장하된 끝이 둥근 소형 슬롯 Ridge-Loaded Small Round-Ended Slot for Waveguide Slot-Array Antenna

김 병 문* · 이 종 익** · 조 영 기

Byung-Mun Kim* · Jong-Ig Lee** · Young-Ki Cho

요 약

본 논문에서는 도파관 슬롯 배열 안테나의 요소로서 구형 도파관 광벽에 위치하고 이중 리지가 장하된 끝이 둥근 소형 슬롯을 제안하였다. 리지 치수를 적절히 조절하면 원하는 주파수에서 슬롯의 공진을 얻을 수 있다. 제안된 슬롯의 공진 길이는 공진 주파수에서 약 $0.26 \lambda_0$ (자유 공간 파장)이다. 제안된 공진 슬롯은 소형이고, 작은 공진 컨덕턴스 그리고 짧으면서도 안정된 공진 길이 등의 장점을 가진다. 부가적으로 슬롯을 도파관 슬롯 배열에 적용할 때 각 슬롯의 특성들이 인접한 슬롯에 의해서 영향을 적게 받는다. 부엽 준위 -20 dB를 가지는 4×1 도파관 슬롯 배열 안테나를 설계, 제작한 후 실험하였다. 측정결과들이 시뮬레이션 결과들과 잘 일치하고, 주파수 9.41 GHz에서 부엽 준위 -15.9 dB, E-평면 반치각 110.2° , H-평면 반치각 21.2° 이다.

Abstract

In this paper, a small round-ended slot loaded by double ridges on the broad wall of a rectangular waveguide is presented as an element for a waveguide slot-array antenna (WSAA). By properly adjusting the ridge dimension, a resonance of the slot at a desired frequency can be achieved. The resonant length of the proposed slot is about $0.26 \lambda_0$ (free space wave length) at the resonance frequency. The proposed resonant slot has some advantageous properties, such as small size, small resonant conductance, and short and stable resonant slot length. In addition, the characteristics of the slots are slightly affected by the adjacent elements when the slots are arrayed for a waveguide slot antenna. A 4×1 WSAA with -20 dB side-lobe level (SLL) is designed, fabricated, and tested experimentally. The measured results are well agreed with the simulated ones and have an SLL of -15.9 dB and a half-power beam width of 110.2° in the E-plane and 21.2° in the H-plane, respectively, at 9.41 GHz.

Key words : Waveguide Slot, Longitudinal Slot, Slot Array, Round-Ended Slot, Ridge-Loaded Slot

I. 서 론

도파관 슬롯 배열 안테나는 레이더 시스템 및 초고주파 통신과 같이 고출력, 저손실 및 고이득 등의

성능이 요구되는 많은 분야에 폭넓게 응용되어 왔다. 도파관 슬롯 배열 안테나(Waveguide Slot-Array Antenna: WSAA)의 배열 요소인 도파관 슬롯에 관한 기존 연구들에서 많이 다루어진 것은 구형 도파관의

「이 논문은 경북대학교 2단계 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었으며, 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임」

경북대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, IT College, Kyungpook University)

*경북도립대학 IT특약 계열(Division of IT Cooperative Systems, Gyeongbuk Provincial College)

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

· Manuscript received March 16, 2012 ; Revised May 15, 2012 ; Accepted July 24, 2012. (ID No. 20120316-026)

· Corresponding Author : Jong-Ig Lee (e-mail : leeji@gdsu.dongseo.ac.kr)

광벽에 위치한 종방향 슬롯(longitudinal slot)의 복사 특성이었다^{[1]~[6]}. 종방향 슬롯은 다른 구조들에 비해 낮은 교차 편파, 넓은 범위의 공진 컨덕턴스와 같은 우수한 특성을 갖고 있기 때문이다. 일반적으로 종방향 슬롯의 공진 길이는 공진 주파수에서 약 $0.5\lambda_0$ 이며, 슬롯으로부터 복사 전력을 결정짓는 정규화된 공진 컨덕턴스는 도파관의 중심으로부터 슬롯의 이격 거리에 따라 증가된다. 기존에 많이 사용된 금속 도파관은 마이크로스트립 선로나 스트립 선로와는 달리 자유공간으로의 누설 복사에 의한 손실과 유전체 손실이 없으므로 손실이 매우 작으나 부피가 크고 무겁다는 단점이 있다. 최근에는 PCB 인쇄기술을 사용하여 비아홀로 도파관 협벽을 구성하여 가볍고 소형이며, 저비용의 기관 집적형 도파관(Substrate Integrated Waveguide: SIW)을 적용한 사례들이 많이 보고되고 있다^{[7],[8]}. 공진 슬롯의 길이가 짧아지면 인접 슬롯 사이의 도파관 내부 상호 결합이 감소되어 단일 슬롯의 특성과 배열된 슬롯의 특성 간 차이가 줄어들게 된다. 따라서 배열 안테나의 최적화 설계를 위한 각 슬롯의 파라미터들의 최종 값에 보다 가까운 초기값을 제공할 수 있어서 WSAA 설계 시 최적화 시간을 단축시킬 수 있다.

본 논문에서 구형 도파관 광벽에 실장할 수 있는 소형 공진슬롯으로서 리지가 이중으로 장하된 끝이 둥근 슬롯을 제안한다. 공진 길이와 정규화된 공진 컨덕턴스와 같은 슬롯의 특성들은 상용 FEM 시뮬레이터(Ansoft HFSS)로 조사하였으며, 종래의 끝이 둥근 종방향 슬롯의 특성들과 비교하였다. 그리고, 예로서 X-band용 WSAA로 응용하기 위한 동작주파수 9.41 GHz에서 -20 dB 부엽 준위를 갖는 4-슬롯 배열안테나를 설계, 제작 및 실험하고, 시뮬레이션 결과와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

II. 리지가 장하된 끝이 둥근 슬롯의 공진 특성

그림 1에 구형 도파관의 광벽에 위치한 끝이 둥근 종래의 종 방향 슬롯 구조(그림 1(a))와 리지가 장하된 제안된 슬롯의 구조(그림 1(b))가 도시되어 있다. 각 슬롯의 길이는 $l_s (= w_r + 2r)$ 이고, 폭은 $2r$ 이며, 슬롯의 양끝은 반경 r 인 반원형 슬롯으로 중단된

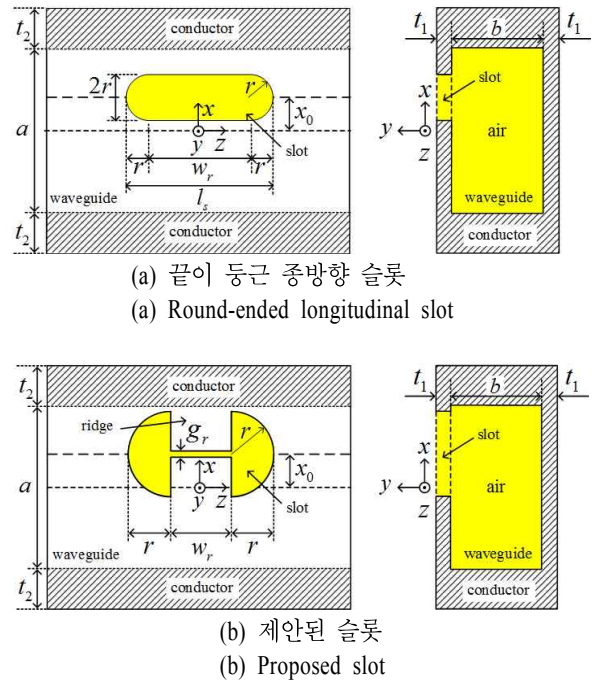


그림 1. 구형 도파관 광벽에 위치한 슬롯의 구조
Fig. 1. Geometries of the slot on a broad wall of a rectangular waveguide.

표 1. 도파관과 슬롯의 치수
Table 1. Dimensions of waveguide and slot.

Parameters	a	b	t_1	t_2	r	g_r
Values(mm)	22.86	10.16	1.0	8.0	2.81	0.5

다. 리지가 장하되지 않은 그림 1(a)의 슬롯 구조에서 폭이 파장에 비해 충분히 작을 때, 슬롯의 공진 길이는 $0.5\lambda_0$ 에 가깝다. 그림 1(b) 구조는 길이가 w_r 이고, 폭이 $2r$ 인 사각 슬롯 부분에 이중 리지를 장하한 것으로서, 리지 폭이 w_r 이며, 리지 사이 간극은 g_r 이다. 소형 원형 개구의 공진에 관한 이전 연구 결과^[9]로부터 끝이 둥근 직선 슬롯의 길이 l_s 가 $0.5\lambda_0$ (λ_0 : 자유 공간 파장)보다 작아도 이중 리지로 장하되면 공진 구조가 될 수 있음을 예측할 수 있다.

제안된 슬롯의 특성을 조사하고 종래의 종방향 슬롯과 비교하기 위해서 상용 FEM 시뮬레이터인 Ansoft사의 HFSS를 활용하였다. 도파관과 슬롯의 치수는 표 1에 제시된 바와 같다.

본 논문에서 적용할 슬롯에 대한 2 포트 등가회로는 그림 2에 제시된 T-형 회로망이다. 회로에서 정규화된 직렬 임피던스 z_s 와 정규화된 병렬 어드미턴

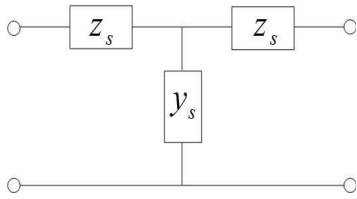


그림 2. 제안된 슬롯에 대한 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit for the proposed slot.

스 y_s 는 다음 관계식으로 부터 계산할 수 있다^{[5],[10]}.

$$z_s = \frac{(1 + S_{11} - S_{21})}{(1 - S_{11} + S_{21})} \quad (1)$$

$$y_s = \frac{(1 - S_{11} - S_{21})(1 - S_{11} + S_{21})}{2S_{21}} \quad (2)$$

여기서 S_{11} 과 S_{21} 은 HFSS로 구한 반사계수와 투과계수이다.

그림 3은 리지 폭 $w_r=2.69\text{mm}$, 도파관의 중심으로 부터 이격 거리 $x_0=5\text{mm}$, 표 1에 제시된 치수를 갖는 슬롯에 대한 정규화된 임피던스와 어드미턴스를 나타낸 것이다. 정규화된 임피던스는 어드미턴스에 비해 무시할 수 있을 정도로 대단히 작다. 이것은 종래의 종 방향 슬롯과 마찬가지로 제안된 슬롯이 도파관 축 방향 전류에 대해서 영향이 미미하기 때문이다. 그리고 주파수 9.41 GHz에서 정규화된 어드미턴스의 허수, 즉 서셉턴스가 0이 되어 공진이 되며, 정규화된 공진 컨덕턴스는 0.57이다.

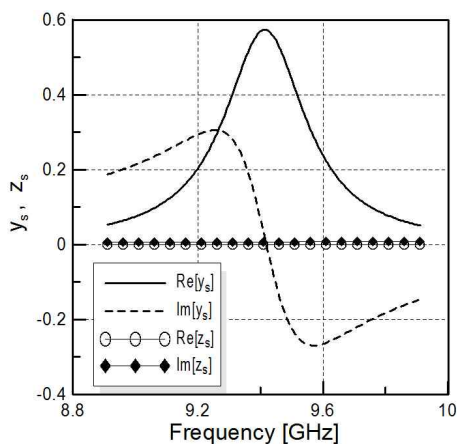


그림 3. 제안된 슬롯의 정규화된 어드미턴스와 임피던스($w_r=2.69\text{ mm}$, $x_0=5\text{ mm}$).

Fig. 3. Normalized admittance and impedance of the proposed slot($w_r=2.69\text{ mm}$, $x_0=5\text{ mm}$).

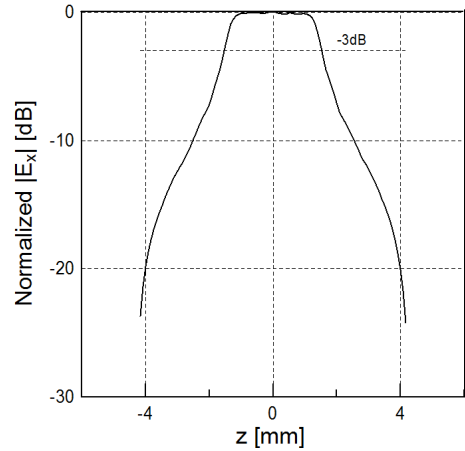


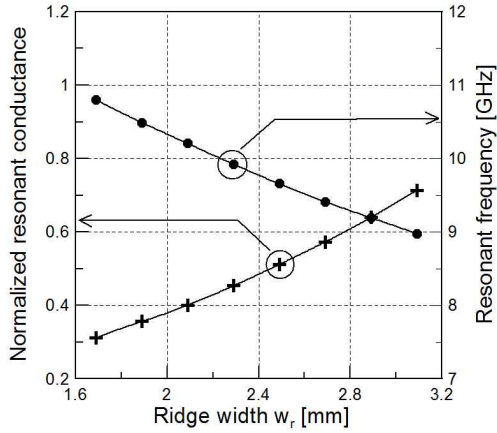
그림 4. 제안된 슬롯의 축 방향 중심선($x = x_0$)을 따른 정규화된 전기 세기($w_r=2.69\text{ mm}$, $x_0=5\text{ mm}$)

Fig. 4. Normalized electric field along the center line ($x = x_0$) of the proposed slot($w_r=2.69\text{ mm}$, $x_0=5\text{ mm}$).

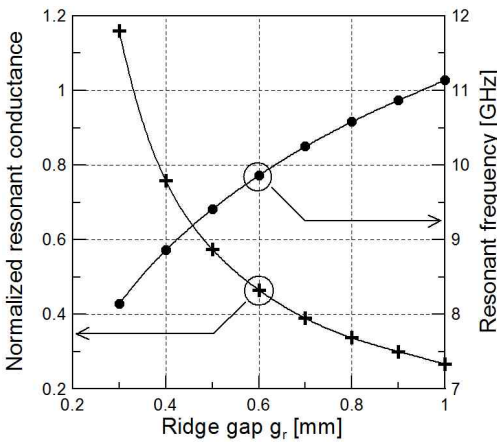
제안된 슬롯이 공진이 될 때 슬롯의 중심선($x = x_0$)에서 전기 $E_x(x_0, z)$ 의 크기를 그림 4에 도시하였다. 전기분포는 제안된 슬롯의 리지 영역에서 균일하게 집중 분포되어 있으며, 반원형 슬롯 영역으로 가면서 급격히 감소된다. 전기 세기가 최대치의 0.707배(-3 dB) 이상에 해당되는 슬롯 영역의 길이(실효 슬롯 길이)는 약 3.24 mm로 실제 리지 폭($w_r=2.69\text{ mm}$)의 약 120%, 슬롯 전체 길이($l_s = w_r + 2r = 8.31\text{ mm}$)의 약 39%이다.

이중 리지 구조는 마치 평판 면적 $w_r \times t_1$, 간격 g_r 인 평행판 커패시터처럼 동작하여, 용량성 리액턴스를 가진다. 이중 리지 구조의 등가 커패시턴스는 도체판의 두께 t_1 , 리지 폭 w_r , 리지 사이 간극 g_r 등에 의해 결정된다. 리지가 없는 유도성 소형 슬롯에 리지를 장하시켜 리지의 폭과 간극을 조절하면 소형 슬롯을 원하는 주파수에서 공진시킬 수 있다. 이중 리지 사이의 좁은 슬롯에 연결된 두 개의 반원형 슬롯은 등가적으로 공진기의 인덕턴스를 제공한다. 등가 인덕턴스 값은 반경 r 이 증가됨에 따라 증가되어 등가 공진 회로의 공진 주파수와 Q값(Quality Factor)을 감소시키게 된다.

그림 5(a)는 표 1에서 주어진 구조에 리지 간극 $g_r = 0.5\text{ mm}$, 이격 거리 $x_0=5\text{ mm}$ 인 경우, 리지 폭에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스와 공진 주파수를 나타낸



(a) $g_r=0.5$ mm, $x_0=5$ mm



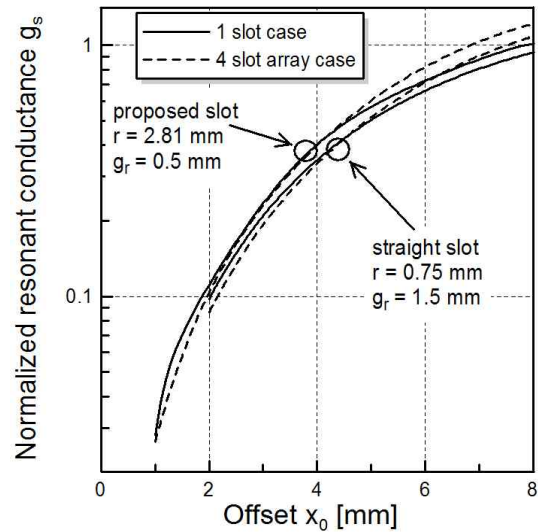
(b) $w_r=2.69$ mm, $x_0=5$ mm

그림 5. 리지 폭과 간극에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스와 공진 주파수

Fig. 5. Normalized resonant conductance and resonant frequency against the ridge width and gap.

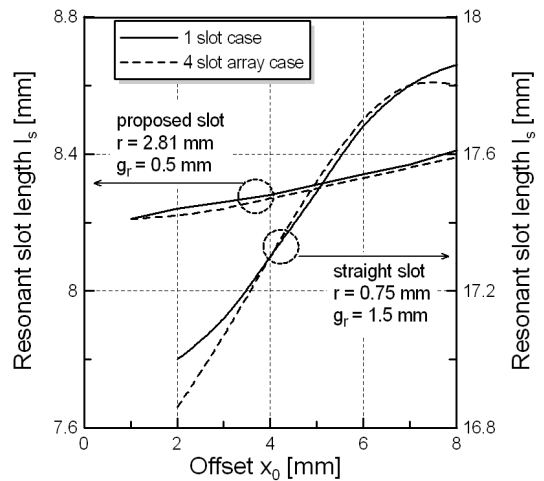
다. 리지 폭에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스는 0.31에서 0.71로 평균 약 0.057/0.2 mm로 증가하고, 공진 주파수는 10.8 GHz에서 8.975 GHz로 평균 0.26 GHz/0.2 mm로 감소한다.

그림 5(b)는 표 1에서 주어진 구조에 리지 폭 $w_r=2.69$ mm, 이격 거리 $x_0=5$ mm인 경우, 리지 간극 g_r 에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스와 공진 주파수를 나타낸다. 리지 간극에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스는 1.16에서 0.27로 평균 0.25/0.2 mm로 급격히 감소하고, 공진 주파수는 8.14 GHz에서 11.14 GHz로 평균 0.86 GHz/0.2 mm로 증가한다. 그림 5의 두 그림을 비교하면, 리지 폭에 비해 간극 변화에 대해 정규화된 공진 컨덕턴스와 공진 주파수가 민감하게 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 각 배열 슬롯의 원하



(a) 정규화된 공진 컨덕턴스

(a) Normalized resonant conductance



(b) 공진 길이

(b) Resonant length

그림 6. 이격 거리에 대한 제안된 슬롯의 특성

Fig. 6. Characteristics of the proposed slot against the offset.

는 공진 컨덕턴스에 상응하는 슬롯 치수를 결정하는 방법으로서 간극 g_r 은 일정한 값(0.5 mm)으로 고정시키고 리지 폭을 조절하는 것이 제작 공차에 의한 영향을 감소시키는 데 있어서 유리하다.

그림 6은 주파수 9.41 GHz에서 직선 슬롯인 종방향 슬롯과 제안된 슬롯의 이격 거리 x_0 에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스 g_s 와 공진 길이 $l_s (=w_r + 2r)$ 를 나타내고 있다. 종방향 슬롯은 리지가 없는 즉, $2r = g_r$ 인 경우이다. 4-슬롯 배열의 경우, 동일한 4개의 슬롯들을 그림 7과 같이 $\lambda_g/2(\lambda_g$: 도파관 관내 파

장)의 간격으로 배치하고, 인접한 슬롯은 중심선에 대해 같은 이격 거리를 가지고 양편으로 교차 배치시킨다. 그리고 마지막 슬롯의 중심과 단락 블록(short block) 간 거리는 $\lambda_g/4$ 이다. 4-슬롯 배열 경우에 대한 데이터는 슬롯 간 상호 결합이 고려된 것으로서, 시뮬레이션에 의해 배열에 대한 정규화된 공진 컨덕턴스를 계산한 후 단일 슬롯의 컨덕턴스는 평균을 취한 값이다. 그 결과들은 이격 거리 x_0 가 증가하면 정규화된 공진 컨덕턴스 g_s 와 공진 길이 l_s 도 증가됨을 보여주고 있으며, x_0 가 2 mm 이상인 범위에서는 제안된 소형 슬롯과 기존의 종방향 슬롯의 특성들 간에는 큰 차이가 없다. 그러나 제안된 슬롯은 x_0 가 2 mm 이하에서도 안정적이고 작은 컨덕턴스 값을 가지게 되므로 종방향 슬롯에 비해 고이득의 대규모 WSAA 구성에 적합하다.

그림 6(b)에서 보여주는 바와 같이 제안된 슬롯의 공진 길이는 종래의 종방향 슬롯의 그것과 비교하면 크기도 작으면서 이격 거리 x_0 에 대한 변화도 적다. 제안된 슬롯의 경우에서 단일 슬롯의 컨덕턴스는 4-슬롯 배열의 그것과 잘 일치하며, 이격 거리 x_0 범위 1~5 mm에 대한 컨덕턴스 변화는 $0.03 \leq g_s \leq 0.6$ 이며, 두 경우의 차이는 6.82 % 이내이다. 제안된 슬롯의 공진 길이는 주파수 9.41 GHz에서 $0.257 \sim 0.263 \lambda_0$ 범위에 있으며 종방향 슬롯의 공진 길이 약 $0.5 \lambda_0$ 에 비하면 상당히 짧다. 이격 거리 x_0 의 범위 1~5 mm에 대해 공진 길이는 약 0.1 mm 이내로 미세한 변화를 보인다.

주목해야 할 사항은 제안된 슬롯이 도파관 슬롯 배열에 사용될 때, 각 슬롯의 컨덕턴스에 해당되는 공진 길이는 큰 차이가 없으며, 이 제안된 슬롯들 간의 상호 결합은 종래의 종방향 슬롯들 간의 것보다 훨씬 적다는 것이다. 또한, 원하는 도파관 안테나 설계를 위해서 매개변수의 초기 값을 제공하고, 약간의 수정과 노력을 통하면 원하는 성능을 가지는 최적화 설계가 가능하다.

제안된 슬롯을 활용한 4-슬롯 배열에 대한 곡선들은 범위 $1 \text{ mm} \leq x_0 \leq 8 \text{ mm}$ 에서 슬롯 이격 거리 (x_0)에 대하여 3차와 4차 다항식 함수들로 다음과 같이 데이터 피팅(data-fitting)하였다.

$$g_s(x_0) = (-0.2166x_0^4 + 1.2581x_0^3 + 22.2196x_0^2 + 5.0616x_0 - 1.9125) \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$l_s(x_0) = -0.0018x_0^3 + 0.015x_0^2 - 0.0246x_0 + 8.2214 \quad (4)$$

III. 4x1 슬롯 배열 안테나의 설계

앞서 얻은 제안된 슬롯의 특성을 기반으로 하여 WSAA의 설계 예로서 SLL=-20 dB의 4x1 WSAA를 그림 7의 구조로 설계해 보고자 한다. 먼저 특정값 이하의 SLL을 갖도록 복사 패턴을 발생시키는 전원 분포 함수로부터 각 슬롯의 컨덕턴스($g_{si}, i=1, 2, 3, 4$)를 구한다. 식 (3)을 이용하여 각 슬롯 컨덕턴스 g_{si} 에 상응하는 이격 거리 x_0 를 구한다. -20 dB 부엽 준위와 3개의 부엽이 등준위인 복사 패턴을 형성하는 테일러 선 분포(Taylor line source distribution)^[11]로부터 얻은 슬롯의 컨덕턴스는 $g_{s1} = g_{s4} = 0.13$ (슬롯 #1, 4)과 $g_{s2} = g_{s3} = 0.38$ (슬롯 #2, 3)이다. 여기서 각 슬롯의 컨덕턴스를 합한 전체 컨덕턴스(=1.02)는 임피던스 정합을 위하여 약 1이 되도록 하였다. 그리고 해당되는 공진 길이 l_s 는 식 (4)를 활용하여 계산할 수 있다. 이렇게 구한 파라미터 값들은 표 2에 제시된 바와 같다. 4개의 슬롯으로 그림 7의 WSAA를 구성하고, HFSS를 이용하여 복사 패턴을 계산하였으며, 이는 이론적으로 합성한 패턴과 잘 일치하였다.

표 2. 배열 슬롯들의 치수
Table 2. Dimensions of array slots.

Parameters	Slot#1,4	Slot#2,3
Ridge width w_r	2.60 mm	2.65 mm
Offset x_0	2.25 mm	3.89 mm
Slot length l_s	8.22 mm	8.27 mm

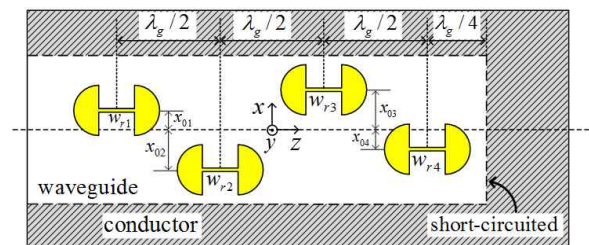


그림 7. 4x1 슬롯 배열 안테나의 구조
Fig. 7. Geometry of 4x1 slot array antenna.

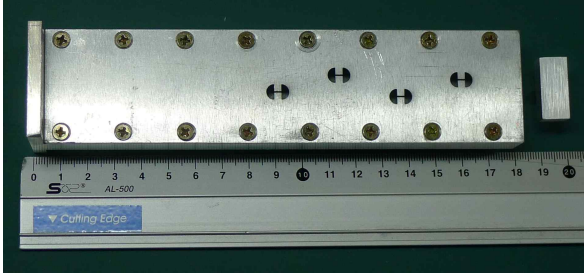


그림 8. 4×1 슬롯 배열 안테나의 구조
Fig. 8. Geometry of 4×1 slot array antenna.

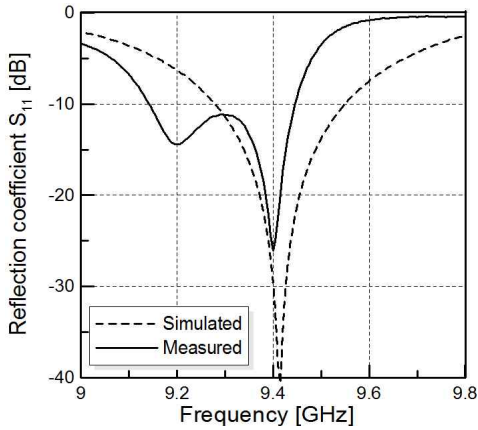
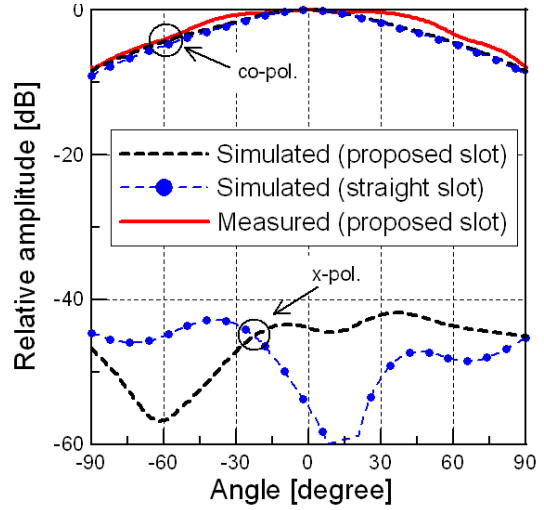


그림 9. 입력 반사계수
Fig. 9. Input reflection coefficient.

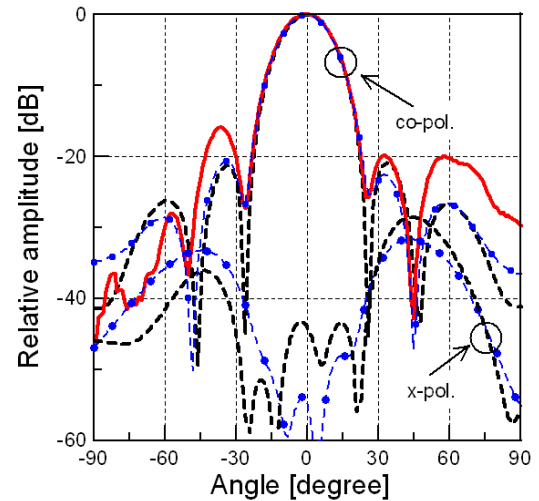
그림 8은 알루미늄으로 제작된 WSAA로서, 고정밀 와이어 방전기(Wire Electro Discharge Machine)를 활용하여 가공되었다. 슬롯들이 있는 도체 상판, 도파관 단락중단용으로 위치 조절이 가능한 직육면 도체 블록 및 도파관의 측벽과 하판에 해당되는 도체 블록들로 구성되며, 나사로 조립하였다.

안테나는 특성 실험을 위해 벡터 회로망 분석기(Agilent, 8510C)와 동축-도파관 어댑터를 통하여 연결되었다. 이러한 측정 환경은 도파관 포트에서 반사계수를 계산한 시뮬레이션 환경과 다르기 때문에 그림 9에서 보는 바와 같이 측정값과 시뮬레이션 값은 약간 차이를 보인다.

그림 10은 제작된 안테나의 E-평면과 H-평면에서 측정된 복사 패턴과 시뮬레이션 결과를 함께 보여주고 있으며, 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치한다. 시뮬레이션에 의한 제안된 슬롯 안테나의 최대 교차 편파 준위(-28.6 dB)는 직선 슬롯으로 구성된 배열 안테나의 교차 편파 준위(-31.7 dB)에 비해 3.1 dB 정도 높지만, 다양한 장점을 감안할 때 충분



(a) E-평면 패턴
(a) E-plane pattern



(b) H-평면 패턴
(b) H-plane pattern

그림 10. 주파수 9.41 GHz에서 복사 패턴
Fig. 10. Radiation patterns at 9.41 GHz.

히 수용할 만한 성능이라 볼 수 있다. 그림 10에서 보는 바와 같이 제작된 안테나는 SLL=-15.9 dB, H-평면 반치각 21.2°와 E-평면 반치각 110.2°의 성능을 갖는다. 첨두 이득은 11.79 dBi로 시뮬레이션 이득 12.12 dBi와 잘 일치한다. E-평면에서는 측정값과 시뮬레이션 값이 매우 잘 일치하나, H-평면에서는 측정값과 시뮬레이션 값 사이에는 다소 차이가 있다. 이것은 시뮬레이션에서는 고려되지 않은 안테나에 연결되어 있는 어댑터와 급전 케이블이 복사 슬롯과 동일한 측정면에 놓이게 되면 복사 특성에 영향을 미치게 되는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

IV. 결 론

본 논문에서 도파관 슬롯 배열 안테나의 요소로서 이중 리지가 장하된 끝이 둥근 슬롯을 제안하고, 그 특성에 대해 연구하였다. 구형 도파관의 광벽에 위치한 제안된 슬롯은 종래의 종방향 슬롯에 비해서 보다 넓은 범위의 공진 컨덕턴스, 짧고 안정적인 공진 길이 등의 장점들을 가지고 있다. 제안된 구조의 슬롯은 배열 안테나로 설계시, 인접한 슬롯에 의한 특성 변화가 작아서 최적화에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있고, 작은 컨덕턴스 값을 구현할 수 있어서 대형 배열 안테나 설계에 유리하다. SLL=-20 dB를 갖는 4×1 슬롯 배열 안테나를 설계, 제작 후 실험을 통해 입력 반사 계수, 복사 패턴, 이득 등의 성능을 측정하였다. 측정된 결과들이 시뮬레이션으로 계산된 결과들과 잘 일치함을 확인하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] R. S. Elliot, L. A. Kurtz, "The design of small slot arrays", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 26, pp. 214-219, Mar. 1978.
 [2] G. J. Stern, R. S. Elliot, "Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation: theory and experiment", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 33, pp. 1264-1271, Nov. 1985.
 [3] R. S. Elliot, W. R. O'Loughlin, "The design of slot arrays including internal mutual coupling", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, pp. 1149-1153, Sep. 1986.

[4] D. Y. Kim, R. S. Elliot, "A design procedure for slot arrays fed by single-ridge waveguide", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 1531-1536, Nov. 1988.
 [5] M. Mondal, A. Chakrabarty, "Resonant length calculation and radiation pattern synthesis of longitudinal slot antenna in rectangular waveguide", *Progress in Electromagnetic Research Letters*, vol. 3, pp. 187-195, 2008.
 [6] R. S. Elliott, *Antenna Theory and Design*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1981.
 [7] L. Yan, W. Hong, G. Hua, J. Chen, K. Wu, and T. J. Cui, "Simulation and experiment on SIW slot array antennas", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 446-448, Sep. 2004.
 [8] A. Bakhtafrooz, A. Borji, D. Busuioc, and S. Safavi-Naeini, "Novel two-layer millimeter-wave slot array antennas based on substrated integrated waveguides", *Progress in Electromagnetic Research*, vol. 109, pp. 475-491, 2010.
 [9] J. E. Park, J. Yeo, J. I. Lee, 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.
 [10] Y. Leviatan, P. G. Li, A. T. Adams, and J. Perini, "Single-post inductive obstacle in rectangular waveguide", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 31, pp. 806-812, Oct. 1983.
 [11] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd Ed. New York: Wiley, 1998.

김 병 문



1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년 6월: 경북대학교 전자공학과 박사수료
 1990년 1월~1997년 2월: LG정밀 선임연구원

1997년 3월~현재: 경북도립대학 IT 특약 계열 부교수
 [주 관심분야] Antenna, RF, EMC, Radar 등

이 중 익



1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 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: 한국전자과학회 회장

1981년~현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수

[주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기 구조, 안테나 이론 등