

Study on the Multislotted Waveguide for the High Power Microwave

白周元*·俞東旭**
(Ju-Won Baek and Dong-Wook Yoo)

Abstract - The radiating multislotted antennas widely used in the antennas technique are rather prospective for the application in industrial installations for microwave heating. In this paper, the model of such an antenna is experimentally investigated. The model under investigation presents a section of the waveguide WR 340 whose broad wall contains 15 movable slotted plates. This design allows to experimentally define a location of all the slots providing the necessary distribution of radiating power along the waveguide with minimal SWR of all the system. The variants of power uniform distribution along the waveguide as well as the power decreasing to the waveguide end are examined. The application of plates with different thickness allowed to estimate the influence of the walls thickness on the power distribution. The possibility of system extra-tuning with the help of tuning screws located in the vicinity of each slot is considered. Obtained results are compared to the conducted theoretical calculations and data in references.

Key Words : Multislotted waveguide, high power microwave, microwave heating

1. 서 론

여러 가지 유전물질의 마이크로웨이브 가열과 건조기법의 연구는 오랫동안 많이 이뤄졌다[1]. 다양하게 설계, 제작된 마이크로웨이브 오븐 중에서 본 논문에서는 터널형태의 오븐 종류를 제작하였다. 이를 이용한 시스템에서, 오븐을 따라 이동하는 물질은 연속적으로 마이크로웨이브를 받을 수 있는 장점이 있다. 그러므로 traveling wave 모드에서 동작하는 멀티슬롯 웨이브가이드의 응용분야는 마이크로웨이브를 가열전력으로 이용하는 방법으로 전망이 매우 밝다.

기존의 가열공정에서 최종단에 위치한 물질의 마이크로파 흡수율은 수분율이 상당 부분 감소하면서 본질적으로 감소할 수 밖에 없었는데 이러한 수분율이 낮은 상태는 열풍을 사용하는 것이 효과적이었다. 이에 따라 기존의 많은 연구에서 마이크로웨이브와 열풍을 겸용한 방법이 여러 가지 식품의 가열에 효과적임을 입증하였다[2],[3].

수분율에 따른 마이크로파 흡수율의 문제를 줄이기 위해서는 웨이브가이드의 종단에 방사되는 전력을 감소시켜주는 것이 바람직하다. 이러한 웨이브가이드의 축을 따라 전력분포를 주어진 조건(감소 또는 증가)으로 조절할 수 있는 것이 멀티슬롯 웨이브가이드의 장점이라 할 수 있다. 전력분포는 실제 웨이브가이드의 축으로부터 모든 슬롯의 거리를 변화시켜서 조절한다.

슬롯 안테나의 이론은 많은 논문에서 소개되어 왔다[4]-[15]. 그 중에서 [4]는 파장 $\lambda/2$ (λ 는 자유공간에서의 파장)를 가진 협소한 슬롯은 웨이브가이드 내에서 H10 모드를 가진 것으로 설명하였다. 슬롯은 등가회로로 나타낼 수 있고 웨이브가이드내에서 종축방향 슬롯의 정량화한 분포 커패시턴스로 나타내었다.

$$G \approx 2.09 \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda} \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot x_1}{a} \right] \cdot \cos^2 \left[\frac{\pi \cdot \lambda}{2} \cdot \lambda_w \right] \quad (1)$$

여기서, a와 b는 가로축의 웨이브가이드 크기이고 λ_w 는 웨이브가이드내에서의 파장이다. x_1 은 중심선으로부터의 슬롯의 거리이다.

[4]에서는 해석과정에서 벽의 두께는 고려하지 않았다. [5]-[12]의 논문에서는 벽의 두께를 고려하였으며 슬롯의 공진 특성이 상세히 조사되었다. [7]에서 여러 가지 형태의 슬롯 방사특성이 고려되었으며 등가변수를 위한 식들이 주어지고 좁은 벽의 웨이브가이드에서 원형 구멍이 있는 시스템에 의한 방사특성이 조사되었다. [8]에서는 [6]의 이론에 기초하여 슬롯 안테나의 방사능력에 대한 유전을 적용범위에 대해 다루었다. [11]에서 여러 방법들이 상세히 논의되었고 슬롯 공진과장의 위치에 따른 의존성이 조사되었다. 또한, 수행한 계산을 기초로 등가회로에 의한 확장된 슬롯을 나타내는 방법이 다루어졌다. 그렇지만 그러한 근사식은 표준크기(크기 b)를 가진 웨이브가이드에서 적용가능하나 b/4보다 작거나 긴 슬롯의 위치를 가진 형태에서는 불가능하다. [12]에서 슬롯 공진 길이에 대한 여러 변수들(벽 두께, 웨이브가이드 길이, 슬롯 위치등)의 영향이 다루어졌다. 마이크로웨이브 가열에서 방사성 성분으로 종축방향의 슬롯을 가진 단일 슬롯의 안테

* 正會員 : 韓國電氣研究院 電力電子그룹 先任研究員 · 工博
 ** 正會員 : 韓國電氣研究院 電力電子그룹 責任研究員 · 工博
 接受日字 : 2002年 9月 11日
 最終完了 : 2002年 10月 14日

나의 응용은 [13]에서 설명되었다. 웨이브가이드 축을 따라서 계속적인 방사상 전력을 공급하는 웨이브가이드 구조와 슬롯에 대한 표현식이 논문에서 소개되었다.

그렇지만, 상기의 기존 연구들은 단지 단일 슬롯의 방사적인 특성에 대한 것으로 멀티슬롯 안테나에 대한 방사상의 값을 얻고 이를 데이터로 나타내지는 않았다. [14]에서는 등가 회로에 의한 슬롯 표현식으로 이를 해결하고자 하였다. 넓은 웨이브가이드에서 종축의 슬롯의 정량화한 등가 도전성을 나타내기 위해 표현식 (1)이 사용되었다. 마이크로웨이브 가열 장치에서 방사상의 요소로서 멀티 슬롯 웨이브가이드의 실험적인 연구 데이터와 넓은 벽면의 슬롯길이를 가지는 이동형 슬롯 안테나의 실험모델이 [15]에서 다루어졌다. 모든 슬롯의 위치를 실험적으로 정의하였으며 웨이브가이드를 따라 방사상의 전력이 균일한 분포가 되고 상응하는 실험적인 관계가 설명되었다.

본 논문에서는 멀티슬롯 웨이브가이드 안테나의 실험적인 모델의 연구가 다루어진다. 전력 분포의 미세조정을 위해 새로이 나사구조의 부가적인 튜닝기를 장착하여 보다 정밀한 조절이 가능하도록 하였다. 안테나는 15개의 이동형 슬롯으로 구성되며 판의 두께는 2mm와 11mm가 사용되었다. 웨이브가이드를 따라 전력분포는 균일한 것과 감소하는 것으로 두 가지를 시험하였으며 두 개의 다른 두께의 슬롯을 통해 슬롯 위치에 따른 방사상 전력의 의존성을 정의하였다.

2. 다중슬롯 도파관 안테나의 계산.

멀티슬롯 안테나의 계산은 설계를 위해 [14]에서 도입한 방법으로 먼저 수행되었다. 기본적인 가정은 다음과 같다. 안테나는 비 공진형이고, 슬롯은 travelling wave에 의해 여자된다. 이러한 조건을 만족하기 위해 근접한 슬롯사이의 d 는 $\lambda w/2$ 로 동일할 필요는 없다. 일반적으로 d 는 $\lambda w/2$ 보다 크게 선택된다. 이런 안테나의 장점으로 높은 효율과 넓은 주파수 범위에서 간단히 잘 매칭되고 웨이브가이드를 따라 바라는 전력분포가 가능하다. e_n 은 전력 P_n 의 비이고 전달되는 전력에 대해 n 개의 슬롯에 의해 방사된다고 할 때 식 (2)로 표현된다.

$$e_n = \frac{P_n}{P_n + P_{n+1} + K + P_N} = \frac{f_n^2}{f_n^2 + f_{n+1}^2 + K + f_N^2} \quad (2)$$

여기서 f_n 은 방사되는 파장의 크기이고 f_n 과 e_n 값들 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{f_{n+1}}{f_n}\right)^2 = \frac{e_{n+1} \cdot (1 - e_n)}{e_n} \quad (3)$$

식 (3)의 해는 e_n 의 표현식으로 주어진다.

$$e_n = \frac{e_{n+1}}{e_{n+1} + (f_{n+1}/f_n)^2} \quad (4)$$

한편, e_n 의 크기는 슬롯과 도파관의 등가 컨덕턴스를 통해서 정의된다.

$$e_n = \frac{G_n}{G_n + G_{in}} \quad (5)$$

여기서 G_n 은 전체 슬롯의 컨덕턴스이고, G_{in} 은 슬롯의 우측에 위치한 도파관의 내부 컨덕턴스이다. 만약 슬롯의 수가 많거나 정확한 배열이 되면 $G_{in} \approx 1$ 인 진행파 모드에 가깝고, 이 경우에 도파관을 통과여 전파되는 각각의 슬롯에 의해 방사되는 전력 비는 전체 슬롯 컨덕턴스의 유효값으로부터 근사화 할 수 있다.

$$e_n = \frac{G_n}{1 + G_n} \approx G_n \quad (6)$$

(4)에 (6)을 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$G_n = \frac{G_{n-1} \cdot (f_{n+1}/f_n)^2}{1 - G_{n-1}} \quad (7)$$

식 (7)은 주어진 크기의 전력 분포에서 슬롯의 컨덕턴스 사이의 관계를 결정한다. 만약 모든 슬롯에서 방사되는 전계의 크기가 각각 같다면 분명히 $(f_{n+1}/f_n) = 1$ 이다. 즉, G_n 의 크기는 식 (1)의 표현에 의해 슬롯의 변위와 도파관의 매개변수와 관계되어 진다. 각각의 컨덕턴스 절대값과 각 슬롯 x_1 은 식 (8)과 같이 다중슬롯 안테나의 효율 식으로부터 결정된다.

$$\eta = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - e_n) \quad (8)$$

$\eta \approx 1$ 에 대해서 (1), (6), (7)과 (8)을 조합해서 풀면, 각각의 슬롯에 대해서 G_n 과 x_1 이 필요로 하는 값을 결정할 수 있다.

여기에 실험치에 의한 축상의 모든 슬롯의 거리계산은 식 (9)로 할 수 있다[15].

$$\begin{aligned} X_1 &= 14.9 \cdot \arctan(0.659 \cdot K_n^{1/2}) \text{mm} \\ X_2 &= 27.4 \cdot \arctan(0.433 \cdot K_n^{1/2}) \text{mm} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, X_1 은 홀수 슬롯의 거리, X_2 는 짝수 슬롯의 거리, K_n 은 각 슬롯 한 쌍의 전력 감소치(dB)이다. K_n 의 크기는 균일한 전력이 방사될 때 총 슬롯의 수 N 과 슬롯 한 쌍의 개수 M_n 으로 식 (10)과 같이 표현된다.

$$K_n = 10 \cdot \log \frac{N - 2 \cdot (M_n - 1)}{N - 2 \cdot M_n} \quad (10)$$

14개의 슬롯은 식 (11)에 의해서 위치되고, 마지막 슬롯은 도파관 옆 벽의 바로 근처의 끝 부분에 위치시켰다. 그림 1은 축을 따라 고정된 전력 값을 얻기 위한 전체 슬롯에서 중앙선으로부터 슬롯거리의 관계를 나타낸 것이다.

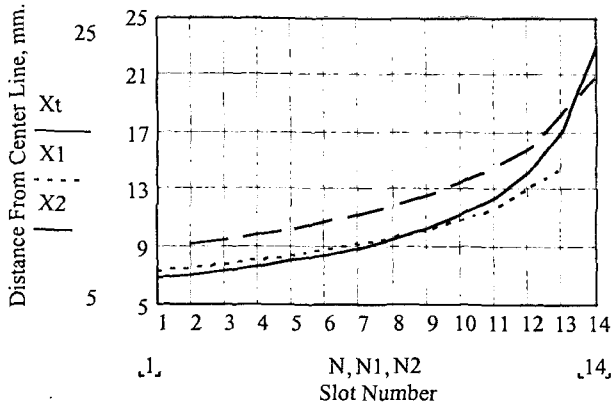


그림 1 축을 따라 고정된 전력 값을 얻기 위한 슬롯거리의 관계
 Fig. 1 Relation to distance of slot to obtain constant power along axis

X1곡선(점선)과 X2(파선)은 실험식 (10)으로 부터 구해지고, Xt 곡선(실선)은 이론 식에 따라 계산하였다. 그림 1에서 전체 곡선이 유사한 특성을 나타내지만 실험식으로 얻은 X1곡선(점선)과 X2(파선)은 이론식으로 나타낸 Xt 곡선(실선)으로 나타낼 수 없는 짝수 슬롯이나 홀수 슬롯 사이의 전력 분배의 방사 특성이 다르게 주어진다.

3. 실험장치모형의 구성

그림 2에 나타낸 실험 모형은 길이가 86.36*43.18mm인 도파관의 사진을 나타낸다. 치수가 59*6mm 인 둥근 가장자리를 가진 슬롯 15개가 움직일 수 있는 판이 전체 벽면에 위치해 있다. 모든 슬롯의 중심에서 중심까지의 거리는 131mm로 같다. $(3\lambda_w)/4$ 인 이 길이는 진행파 모드를 고려한 값으로 제작이 용이하다. 모든 슬롯 판은 시스템의 볼트에 의해 도파관 벽을 따라 붙여진다. 다소 제한된 SWR을 조절하는 것을 쉽게 하기 위해 추가로 조절나사는 다중슬롯 도파관의 끝에 위치시켰다. 모형의 실험적인 관찰은 Hewlett-Packard Network Analyzer HP8753D를 사용하여 매개변수 S11 (SWR)과 S21을 측정하였다.

도파관은 슬롯의 변화에 따라 주파수 2.45GHz (H10 mode)에서 측정하였다.

출력의 측정은 컵모양의 안테나로 수신하였고, 동축선의 외측표면의 바깥부분에서 이극 안테나 반파를 측정하였다. 진동기의 각 폭의 길이는 $\lambda/4$ 와 같다.

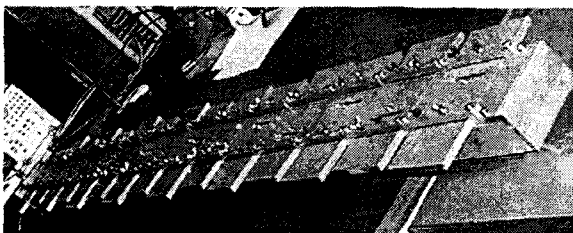


그림 2 전체 다중 슬롯 안테나의 사진
 Fig. 2 Picture of multi slot antenna

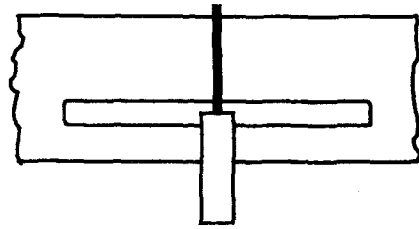


그림 3 슬롯과 안테나의 배치도
 Fig. 3 Arrangement of slot and antenna

수신 안테나는 지지대안에 고정되며, 그림 3에서 개략적으로 나타낸 것처럼 안테나의 중심은 슬롯의 중심 위에 위치하고, 같은 방향으로 40mm거리에서 슬롯과 수직되게 위치한다. 두께가 다른 형태의 슬롯을 시험한다. 첫 번째 변수에서 것은 슬롯의 두께(슬롯을 자른 넓은부분 벽)가 11mm이고, 두 번째는 2mm이다. 다음 실험 결과에서 "굵은" 슬롯과 "얇은" 슬롯의 실험결과가 설명된다.

4. 실험 결과

A. '두꺼운' 슬롯으로 실험

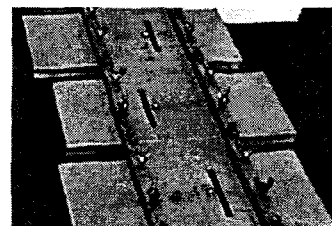
실험에서 모든 시스템의 SWR과 주어진 슬롯의 전력 상태를 dB로 동시에 측정하였다. 시스템은 슬롯의 위치에 매우 민감하게 나타났다. [15]에서 제안된 이론을 기준으로 실험의 기준변수를 이용하였다. 인접한 슬롯간의 차이를 약화시키는 부분은 3-4dB정도로 나타났다. 그러므로 도파관을 따라서 필요한 전력의 분배를 위해서 전력 분포의 조율은 필요한 전력 분배점까지 슬롯 판을 이동시켜서 맞추었다. 각 슬롯의 조율 후에, 작은 슬롯 상호간의 영향 때문에 전력이 변화되므로 각 요소가 안정된 값에 도달 할 때까지 조절하였다.

실험에서 각 슬롯의 조율에 따른 데이터 측정을 통해 다음과 같은 관계를 만든다.

슬롯에 의해 방출된 전력이 $P_n = k P_{in}$ 일 때, P_n 를 측정장치로 시험하면, n번째의 슬롯을 약화시키는 요소는 K_n (dB)과 같다

($K_n = 10 \ln(P_n / P_{in})$), 여기서, P_{in} 은 입력전력, 모든 안테나의 관계는 식 (11)과 같다.

$$k \left(\frac{P_{1L}}{P_{in}} + 1 + \frac{P_{n2}}{P_{in}} \right) = \eta = \frac{4\rho}{(1+\rho)^2} \quad (11)$$



여기서 $\rho = SWR$, η 는 시스템의 효율이다. 식(11)로부터 k 를 정의 할 수 있다.

$$k = \frac{4\rho}{(1+\rho)^2 \sum_n 10^{K_n/10}} \quad (12)$$

자연히 k 는 전체 장치의 슬롯의 크기, 측정장치, 측정장치와 슬롯의 거리에 의존한다. 본 논문에서는 측정은 $k=24.4$ 의 평균값을 유지하면서 슬롯 위치가 다르게 이동시켰다. 실험에서 하나의 슬롯이 약화되는 값인 약 -25.6dB 와 일치한다.

표 1에 전력이 길이에 따라 안정하게 분포하는 두 가지 다른 조율특성을 나타내었다. 이 표의 2와 5 열은 첫 번째와 두 번째 변수를 약화시키는 값이고, 3와 6 열은 중심선으로부터 슬롯의 모든 거리이고, 4와 7열은 5kW의 파워가 들어가는 동안 재 계산한 방출되는 전력의 절대값이다.

첫 번째 변수의 SWR값은 1.01~1.02 정이고, 두 번째는 1.14~1.18이다. 그림 4에 도파관 길이를 따라 전력의 분포 특성을 나타내었다.

그림에서 실선은 첫 번째 변수(표 1의 4번째열)이고 파선은 두 번째 변수(7번째열)이다.

그림 5에서 슬롯의 수는 축으로부터의 거리에 의존함을 홀수 슬롯 - X1(점선), 짝수 슬롯 - X2(파선), 이론적 곡선 - Xt(실선)의 관계에서 나타내었다. 표 1과 그림 5에서 실험에 의한 곡선의 특성이 이론선과 유사함을 볼 수 있다.

그림에서 이론곡형 보다 측정치들은 높은 값이 나타났다. 이것은 출력되는 전력의 양이 계산치 보다 높은 값을 나타낸다. 이 때문에, 출력되는 전력이 도파관을 따라 실제로 일정하다면 그림 4에서 볼 수 있듯이 하나의 변수 즉, 14번째 슬롯에서 급격한 전력강화가 일어난다. 실험에서, 홀수와 짝수 슬롯의 방출 능력이 다른 것이 관찰되었다.

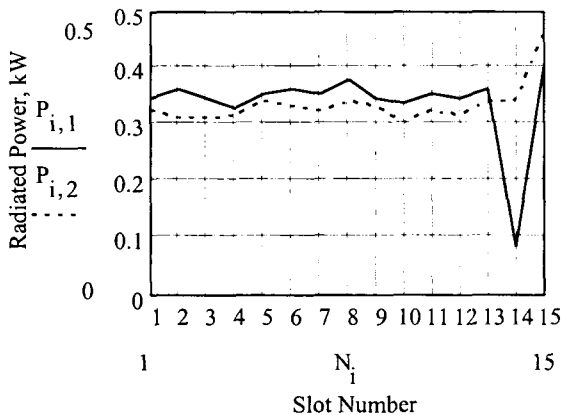


그림 4 도파관 길이에 따른 전력의 분포 특성
Fig. 4 Characteristic of power distribution to length of waveguide

표 1 각 슬롯의 거리에 따른 전력분포

Table 1 Power distribution along with a distance of each slot

No of slot	Kn(dB) 1 var.	Xn (mm)	Prad (kW) (Pin=5kW)	Kn(dB) 2 var.	Xn (mm)	Prad (kW) (Pin=5kW)
1	-25.7	8.75	0.341	-25.6	11.11	0.321
2	-25.5	14	0.354	-25.8	11.3	0.307
3	-25.7	9.6	0.341	-25.8	12.34	0.307
4	-25.9	13.3	0.326	-25.7	12.24	0.314
5	-25.6	10.2	0.349	-25.4	13.3	0.336
6	-25.5	15	0.357	-25.5	13.38	0.329
7	-25.6	12.25	0.349	-25.6	14.18	0.321
8	-25.3	15.2	0.374	-25.4	13.28	0.336
9	-25.7	12.25	0.341	-25.5	13.08	0.329
10	-25.8	17	0.334	-25.9	14.16	0.3
11	-25.6	13.4	0.349	-25.6	13.28	0.321
12	-25.7	18.5	0.341	-25.7	16.81	0.314
13	-25.5	14.2	0.357	-25.4	13.47	0.336
14	-32	35	0.08	-25.4	17.73	0.336
15	-25	40	0.401	-24	32	0.464

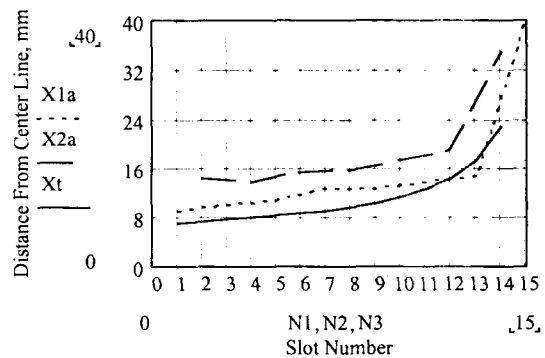


그림 5 슬롯의 수에 대한 축과의 거리 의존성
Fig. 5 Dependence between a number of slot and a distance of axis

짝수 번째 슬롯과 홀수 번째 슬롯으로부터 방출되는 전력에서 짝수 슬롯의 전력은 실제로 14번째 슬롯에서 차이를 나타내며 완전히 방출되었지만, 홀수 슬롯의 전력은 15번째 슬롯을 포함한 모든 슬롯사이에 균일하게 분포되었다. 조율나사를 이용하여 작은 조율로도 도파관의 모든 길이에 대해 실제로 안정한 전력분포를 이룰 수 있었다.

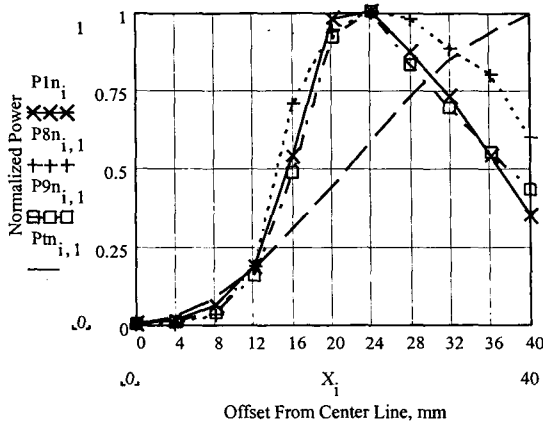


그림 6 전력 관계의 상호 의존성
Fig. 6 Correlation of Power relationship

슬롯들의 위치 특성을 좀 더 잘 이해하기 위해 모든 슬롯 1 동시에 동작 할 때 방출되는 전력을 변화시켜, 상쇄된 슬롯의 전력변화에 대해 고정된 위치에 있는 몇몇 슬롯의 의존성을 검사하였다. 그림 6에 전력 관계의 상호 의존상태를 나타내었다. 각각의 포인트에서 SWR의 관계가 재 계산되었다. 첫 번째(실선), 여덟번째(점선), 아홉번째(이중쇄선) 슬롯을 고려 준다.

식(1)에 기초를 두고 성립하는 이론적인 곡선(파선) 또한 표현하였다.

중심선으로부터 최대 22~24 mm 떨어져 있는 것 보다 가까이 배치된 다른 슬롯들의 실험 곡선은 이론적인 곡선과 실제 차이가 있음을 볼 수 있다. 전력분배를 위해 축으로부터 슬롯거리의 변경에 의한 시스템 조율은 힘들기 때문에 또 다른 조율 장치가 사용된다. M4 나사는 슬롯의 중심에서 대칭축의 다리에 각각 슬롯에서 5mm 떨어져서 위치시켰다. 이 조율나사의 영향은 매우 크며 예로써 그림 7과 8은 두 번째 슬롯의 나사 깊이에 따른 SWR과 약화되는 전력의 관계를 나타낸다.

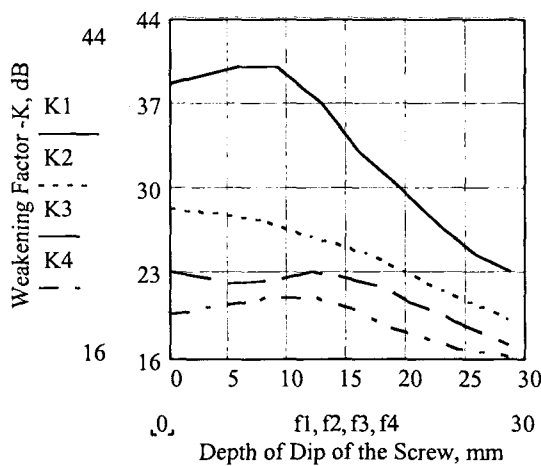


그림 7 나사깊이에 따른 전력변화
Fig. 7 Power change to depth of dip of screw

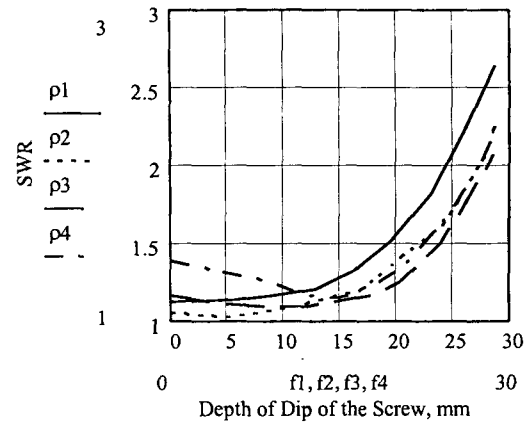


그림 8 두 번째 슬롯의 나사 깊이에 따른 SWR
Fig. 8 SWR to depth of second screw

실선은 축으로부터 슬롯 오프셋까지 5mm, 점선은 12.2mm, 파선은 14mm, 이중쇄선은 19mm이다. 나머지 슬롯들도 유사한 곡선을 얻었다. 조율 범위는 SWR에서 1~2 dB 그리고 감소 요인에서 평균 7~10 dB로 같거나 더 큰 것을 볼 수 있었다. 높은 수분을 함유한 농산물의 건조를 위해서는 일반적으로 건조의 마지막 단계에서 마이크로웨이브의 전력을 줄이는 것이 바람직하며 본 연구에서는 최종 슬롯에서 전력이 약화되게 조율하였다.

나사에 의한 조율 후에 전력을 약화시키는 요소의 값을 측정하였으며 표 2에서 조율하는 두 변수를 나타내었다. 모든 기호는 표 1의 기호와 동일하다.

f_1 의 크기는 조율나사가 들어간 깊이이다.

첫 번째 변수에서 최종의 SWR은 1.08, 두 번째 변수에서는 1.06 이다. 축을 따라 전력 분배를 나타낸 곡선은 그림 9에서 나타내었다. 실선은 첫 번째 변수, 점선은 두 번째 변수이다.

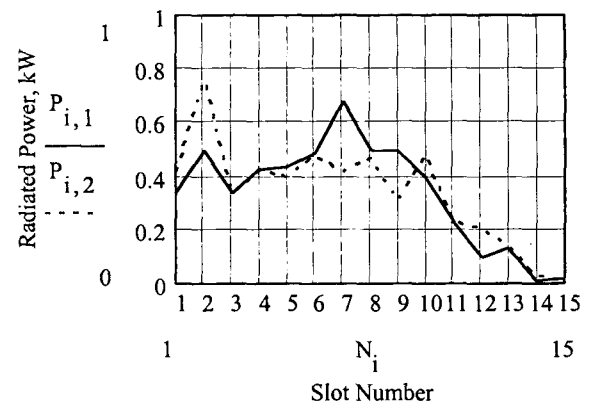


그림 9 축을 따라 전력 분포를 나타낸 곡선
Fig. 9 Power distribution along with axis

여기서, 주목할 점은 나사에 의해 조율하기 전보다 SWR (≈ 1.3)이 크다. 이것은 몇 개의 비균일한 전력이 커진 결과이다.

표 2 각 두꺼운 슬롯에서의 전력분포
Table 2 Power distribution at each thick slot

number of slot	Kn (dB) 1 var.	X (mm)	fl (mm)	Prad(kW) (Pin=5kW)	Kn (dB) 2 var.	X (mm)	fl (mm)	Prad(kW) (Pin=5kW)
1	-26.3	9.28	0	0.334	-26.1	8.85	0	0.412
2	-24.6	12.78	0	0.495	-23.5	12.19	14.68	0.749
3	-26.4	8.03	0	0.327	-27	7.8	0	0.335
4	-25.3	13.43	13.72	0.421	-26.05	12.74	17.23	0.417
5	-25.2	11.24	9.76	0.431	-26.35	10.34	0	0.389
6	-24.7	14.44	0	0.483	-25.5	13.49	0	0.473
7	-23.3	13.54	4.53	0.667	-26.1	12.2	0	0.412
8	-24.6	14.86	0	0.495	-25.6	13.6	0	0.462
9	-24.6	16.07	0	0.495	-27.4	13.93	0	0.305
10	-25.57	18.21	0	0.396	-25.5	15.43	0	0.473
11	-28	19.91	0	0.226	-28.8	20.26	0	0.221
12	-32	19.21	0	0.09	-29.3	19.88	0	0.197
13	-30.5	18.72	0	0.127	-31	19.9	0	0.133
14	-48	20.2	0	0.006	-40	20.69	0	0.017
15	-44.5	20.07	0	0.006	-54	20.22	0	0.0008

B. "얇은" 슬롯의 실험.

방사특성에서 슬롯 두께의 영향을 조사하기 위해, 슬롯의 측정 위치에 두께 2mm의 움직이는 금속판을 제작한 뒤에 이를 이용하여 슬롯의 위치에 따른 전력의 의존성을 측정하였다. 각각의 점에서 기록된 SWR과 감소요인의 측정 값으로부터 재계산된 슬롯 위치에 따라 방사 전력의 의존성은 그림 10(1, 2 슬롯) 과 11(8, 9 슬롯) 에 나타내었다.

첫 번째와 여덟 번째 슬롯은 실선이고, 두 번째와 아홉 번째 슬롯은 점선이다.

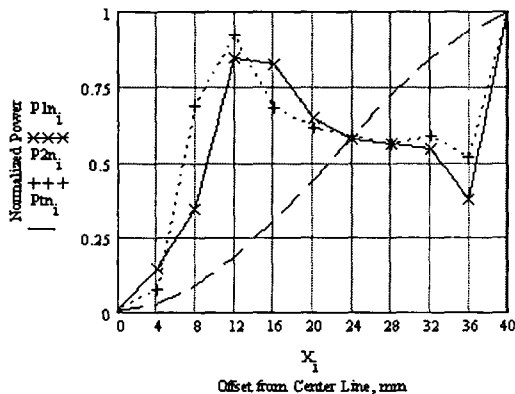


그림 10 슬롯 위치에 따른 방사 전력의 의존성(슬롯 1, 2)
Fig. 10 Dependence of power to slot position (slot 1, 2)

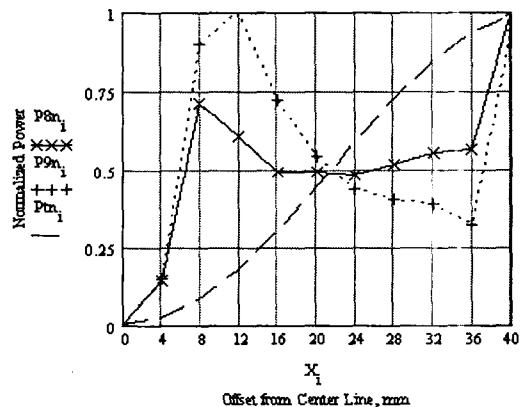


그림 11 슬롯 위치에 따른 방사 전력의 의존성(슬롯 8, 9)
Fig. 11 Dependence of power to slot position (slot 8, 9)

앞의 경우처럼, 이론적인 곡선(파선)이 비교를 위해 주어진다. 여기서 알 수 있는 것은, 전력의 최대치는 두꺼운 슬롯이 보다 멀리 떨어진 축에서 관찰된다. 그러나 앞의 경우와 대조하여, 전력의 증가는 도파관 벽의 측면에 가까운 곳에서 관찰된다. 도파관 끝(조울 나사 없이)에서 전력이 감소하도록 하면서 전력의 방출을 안정하게 하기 위해서 '얇은' 슬롯의 슬롯 안테나 조율이 슬롯의 위치에 따라 더욱 중요하다는 것을 나타낸다. 이것은 슬롯 위치에 따라 출력 전력의 의존성이 더욱 증가하는 것과 관계된다.

슬롯의 위치에 따른 민감도가 높지만 본 논문에서는 표 3에서 나타낸 바와 같이 조율나사에 의해 안정하게 전력을 조절할 수 있었다. 이 변수의 SWR은 1.22이다. 5kW 입력전력에 대해 재 계산된 전력 분배 곡선이 그림 12이며, 그림 13은 이 변수에 대해서 축으로부터 슬롯의 거리이다. 홀수 슬롯에 대한 거리는 X1(점선)으로 나타내어지고, 짝수 슬롯은 X2(파선), 비교를 위한 이론적인 곡선(직선)이 보여진다. '얇은' 슬롯의 경우와 주어진 곡선으로 부터 볼 수 있듯이, 도파관을 따라 일정한 전력분포가 얻어진다.

표 3 각 얇은 슬롯에서의 전력분포
Table 3 Power distribution at each thin slot

number of slot	Kn (dB)	Xn (mm)	Prad (kW) (Pin=5kW)
1	-23.3	6.47	0.359
2	-23	8.1Xn 2	0.385
3	-22.4	9.34	0.442
4	-22.6	8.24	0.422
5	-22.9	7.68	0.394
6	-22.1	10.79	0.474
7	-22.4	7.89	0.279
8	-22.8	9.2	0.403
9	-25	8.47	0.243
10	-23.2	9.5	0.368
11	-25.3	12.96	0.227
12	-22.8	9.33	0.403
13	-27	13.5	0.153
14	-23	9.73	0.385
15	-38	18	0.012

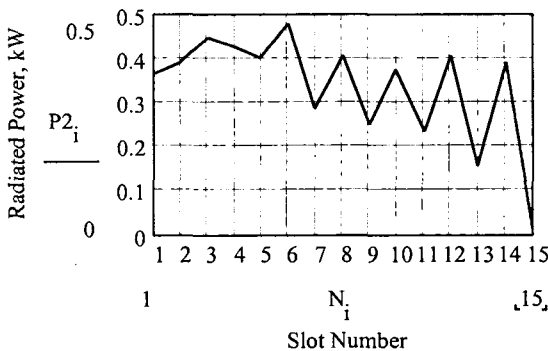


그림 12 5kW 입력전력에 대해 재 계산된 전력 분배 곡선
Fig. 12 Recalculated power distribution to 5kW input power

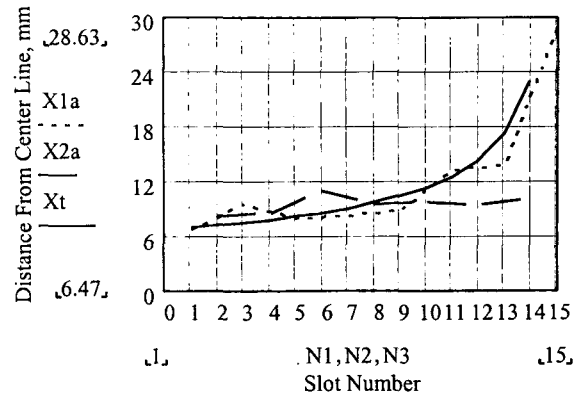


그림 13 그림 12에서 축으로부터 슬롯의 거리
Fig. 13 A distance from slot to axis at Fig. 12

4. 결 론

본 논문에서는 슬롯 폭의 값이 다른 마이크로웨이브 가열 장치에 대하여 다중슬롯 안테나의 연구를 수행하였다.

1. “두꺼운” 그리고 “얇은” 슬롯 모두 슬롯 안테나 계산의 결과와 특성이 잘 일치하였으며 슬롯의 표현식을 기초로 전송선의 변수를 조절하였다.
2. “두꺼운” 그리고 “얇은” 슬롯 모두 도파관을 따라 방사하는 전력의 분포와 얻기 쉬운 정재파비로써 만족스러운 결과를 얻었다. 즉, 우수한 효율을 나타내었다.
3. 방사 전력은 다른 방법으로 홀수와 짝수 슬롯들로 나누어 보았다. 이러한 방법은 이전의 연구에서 다루어지지 않았다. 결과적으로, 슬롯 변위의 연속적인 의존성을 그려 볼 때, 짝수와 홀수 슬롯에 대해 다른 곡선으로 나누어짐을 알 수 있었다.
4. 슬롯 변위에 의존하는 방사 전력의 특성은 이론적인 것과 다르며 최대값은 슬롯 두께의 감소가 되면 중앙선으로 이동한다. 그러므로 “얇은” 슬롯에서 안테나의 조율은 더욱 민감하게 되었다. 이것은 슬롯 위치에 의존하는 슬롯 공간 길이의 변화와 양 슬롯의 상호작용 때문이다.
5. 조율나사의 사용으로 도파관을 따라 전력의 분포와 정재파비 크기를 쉽게 조절하였다. 조율나사의 적용은 슬롯 안테나의 전력조절을 용이하게 하였다.

본 논문에서는 다중슬롯 안테나의 모형이 실험을 통해 연구되었다. 홀수 슬롯과 짝수 슬롯에 대한 전력조절의 분포를 구분하고 이에 대한 실험 연구를 하였다.

향후, 본 연구결과는 대출력 마이크로웨이브 안테나의 설계에 실험적인 기준이 될 수 있을 것으로 사료되었다.

참 고 문 헌

[1] A. C. Metaxas and R.J. Meredith, "Industrial Microwave Heating", Peter Peregrinus Ltd., London, 1993.

- [2] M. Bouraoui, P. Richard and T. Durance, " Microwave and convective drying of potato slices ", Journal of Food Process Engineering, 17(3) pp.353-363, 1994.
- [3] L. Abhayawick, J.C. Laguerre, V. Tauzin, J.M. Eneriz and A. Duquenoy, " Combinet Microwave and Hot Air Drying of Onion in Comparison with the Drying Only by Microwave and Only by Hot Air", Int. Microwave Power Ins., 34-th annual microwave symposium proceedings, July 18-21, 1999, Arlington, VA, USA.
- [4] A. F. Stevenson, "Theory of Slots in Rectangular Waveguides", J. of Appl. Phys., Vol.19, p.24-38, Jan.1948.
- [5] V. H. Rumsey, "Traveling Wave Slot Antennas", J. of Appl. Phys., Vol.24, No.11, p.1358-1365, Nov.1953.
- [6] A. A. Oliner, "The Impedance Properties of Narrow Radiating Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide", IRE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-5, p.1-20, Jan. 1957.
- [7] L. O. Goldstone and A. A. Oliner, "Leaky-Wave Antennas I: Rectangular Waveguide", IRE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-7, p.307-319, Oct. 1959.
- [8] M. C. Bailey, "The Impedance Properties of Dielectric-Covered Narrow Radiating Slots in the Broad Face of a Rectangular Waveguide", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-18 p.596-603, no.5, Sep. 1970.
- [9] T. Yu Khac and C. T. Carson, " Impedance Properties of a Longitudinal Slot Antenna in the Broad Face of a Rectangular Waveguide", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 61, p.708-710, no.9, Sep. 1973.
- [10] R. W. Lyon and A. J. Sangster, "Efficient Moment Method Analysis of Radiating Slots in a Thick-Walled Rectangular Waveguide", IEE Proc., Vol.128, Pt. H, no.4, Aug.1981.
- [11] G. J. Stern and R. S. Elliott, "Resonant Length of Longitudinal Slots and Validity of Circuit Representation: Theory and Experiment", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-33, p.1264-1271, no.11, Nov. 1985.
- [12] L. G. Josefsson, "Analysis of Longitudinal Slots in Rectangular Waveguides", IEEE Trans. on Antennas and Propagation", Vol. AP-35, p.1351-1357, no.12, Dec. 1987.
- [13] M. V. Davidovich and V. P. Meschanov, "Synthesis of Configuration of Uniformly Radiating Longitudinal Slots in the Sections of Non-regular Rectangular Waveguides", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.46, no.2, Feb.1998.
- [14] G. Z. Aizenberg, V. G. Iampolskiy O. N. Terechin, "ANTENNAS OF VHF", Moscow, Sviyas, 1977.
- [15] W. Rueggeberg, "A Multislotted Waveguide Antenna for High-Powered Microwave Heating Systems", IEEE Tras. on Industry Applications, Vol. IA-16, no.6, Nov./Dec. 1980.

저 자 소 개



백 주 원(白周元)

1967년 1월 2일생. 1990년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재, 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1432, Fax : 055-280-1436

Email : jwbaek@keri.re.kr



유 동 옥(兪東旭)

1959년 11월 3일생. 1983년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1983년 - 1985년 KIST 전기제어실 근무. 1985년 - 1997년 한국전기연구원 전력전자연구부 선임연구원 1997년 - 1999년 고주파 응용연구팀장. 1999년 - 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원