

# 다중 모드 공동기 내의 전계 분포 균일성 향상을 위한 슬롯 도파관 급전기 설계 및 제작

## Design and Realization of a Slotted Waveguide Feeder for Improving Electric Field Uniformity in Multi-Mode Cavity

이정환 · 최성수 · 김성재\* · 박동철

Jung-Hwan Lee · Sung-Su Choi · Seung-Jae Kim\* · Dong-Chul Park

### 요 약

본 논문에서는 마이크로파 가열 시스템에서 가열을 위한 반응기로 사용되는 다중 모드 공동기 내부의 전계 분포를 균일하게 형성시키기 위한 슬롯 도파관 급전기를 설계, 제작하였다. 기존의 급전기 경우에는 다중 모드 공동기 내부의 전계를 균일하게 해주기 위해 모드 스티러나 턴테이블과 같은 추가적인 부품을 공동기 내부에 설치해 사용하였다. 제안된 슬롯 도파관 급전기는 자체적으로 균일한 방사를 갖도록 구형 도파관의 넓은 면에 4개의 슬롯이 있고 양쪽의 개구면이 단락된 구조를 특징으로 한다. 제안된 급전기가 장착된 다중 모드 공동기 내부의 전계 분포는 CST사의 MWS(Microwave Studio)를 이용하여 시뮬레이션 하였고, 기존의 급전기를 장착한 경우보다 더 균일한 전계 분포 특성을 보임을 확인하였다. 제작된 급전기는 사용 주파수 2.45 GHz에서 -20 dB 이하의 반사 손실을 보였다. 우리 제안의 타당성을 검증하기 위해, 공동기 내에 물 시료들을 배치해 일정시간 가열시켜 가열 전후의 온도 변화를 관찰하였다. 온도 변화는 공동기에 기존 급전기를 장착한 경우, 중앙과 가장 자리에 있는 시료들 사이에 약 3.5 °C, 제안된 급전기를 장착한 경우에는 약 0.7 °C의 차이를 보였다. 이를 통해, 제안된 급전기가 기존의 급전기보다 다중 모드 공동기 내의 전계 분포 균일성 향상에 기여함을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, a slotted waveguide feeder for the electric field uniformity in multi-mode cavity is designed and fabricated. In case of the conventional feeder, a mode stirrer or a turntable is used for improving electric field uniformity in the multi-mode cavity. The proposed feeder has four slots, which have uniform radiation characteristic, on broad wall and shorted terminations at both ends. The electric field uniformity is simulated by CST's MWS(Microwave Studio) for the conventional and proposed feeders, respectively. The fabricated feeder shows the return loss of less than -20 dB at 2.45 GHz. To verify the validity of our proposal, the temperature distribution of the water samples in the multi-mode cavity is observed after a few minutes' heating. The proposed feeder is confirmed to have much better field uniformity in the multi-mode cavity than the conventional feeder.

Key words : Slotted Waveguide Feeder, Electric Field Uniformity, Multi-Mode Cavity

### I. 서 론

ISM(Industrial, Scientific, Medical) 대역의 마이크

로파는 플라즈마의 발생, 소재의 소성 및 경화, 물질의 건조 및 가열과 같은 분야로 이용 범위가 확대되고 있다. 그 중 마이크로파를 이용한 가열은 유전체

충남대학교 전파공학부(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

\*(주)진양플라텍(Jeonyang Platech Co., Ltd.)

· 논문 번호 : 20070116-009

· 수정완료일자 : 2007년 3월 30일

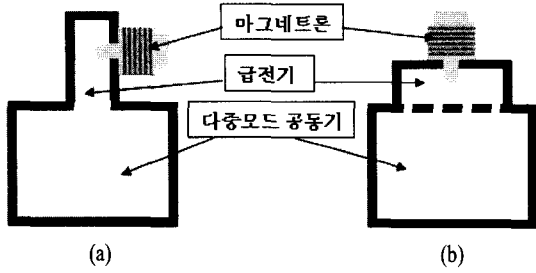


그림 1. (a) 기존 가열 시스템, (b) 제안 가열 시스템  
Fig. 1. (a) Conventional heating system, (b) Proposed heating system.

를 체적 가열(volumetric heating)하는 것으로 기존의 열풍을 이용하는 것보다 빠른 특성을 갖는다. 산업용 마이크로파 가열 시스템에서 가열을 위한 반응기(applicator)로 사용되는 다중 모드 공동기(multi-mode cavity)는 가열하고자 하는 물질을 공동기 내부로 출입시키는 방식에 따라 배치(batch)형과 컨베이어(conveyer)형으로 구분할 수 있다. 배치형의 경우, 그림 1(a)와 같이 구형 도파관이 급전기로 사용되며, 급전기가 위치하는 공동기 가운데 부분과 가장자리 부분에 전계 세기 차이가 있어 불균일한 가열이 발생한다. 그래서 물질을 균일하게 가열하기 위해서는 모드 스테러나 터네이블과 같은 추가 부품을 공동기 내부에 장착하여야 한다<sup>[1]-[3]</sup>.

본 논문에서는 다중 모드 공동기 내의 전계 분포 균일성 향상을 위해 기존의 급전기를 대체하는 슬롯 도파관 급전기를 제안한다. 제안된 급전기를 이용한 가열 시스템을 그림 1(b)에 보였다. 제안된 급전기는 자체적으로 균일한 방사 특성을 갖도록 구형 도파관의 넓은 면에 4개의 슬롯이 있고, 양쪽 개구면이 단락된 구조를 갖는다. 슬롯 도파관 안테나 원리를 이용해 제안된 급전기를 2.45 GHz에서 설계하였고, CST사의 MWS(Microwave Studio) 시뮬레이터를 이용해 그 특성을 확인하였다. 다중 모드 공동기 내부에 규칙적으로 배열된 물 시료들의 온도 변화 시험을 통해 제안된 급전기의 타당성을 확인하였다.

## II. 설계 및 최적화

### 2-1 급전기의 설계

제안된 슬롯 도파관 급전기를 그림 2에 보였고,

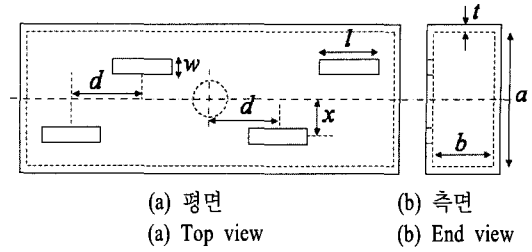


그림 2. 제안된 슬롯 도파관 급전기  
Fig. 2. Proposed slotted waveguide feeder.

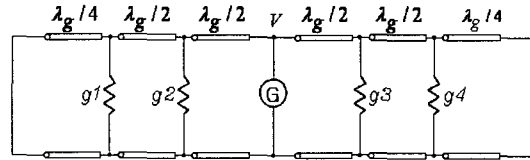


그림 3. 4개의 슬롯을 갖는 단락 도파관의 등가 회로  
Fig. 3. Equivalent circuit of a shorted waveguide having 4 slots.

그림 3은 제안된 급전기의 등가 회로이다. 그림 2(a)의 가운데 부분으로 마그네트론으로부터의 전자파가 입력되며, 도파관내 전계 세기가 최대인 곳에 슬롯을 위치시켰다. 먼저 구형 도파관의 크기는 도파관내로 삽입되는 마그네트론 안테나의 크기를 고려하여 96×56 mm로 결정하였다. 슬롯 길이는 슬롯 자체의 공진을 위한  $\lambda_0/2$ 이며, 슬롯의 폭은 슬롯 길이의 11%로 결정하였고, 일반적으로 슬롯 길이의 10~20%로 선택된다<sup>[1]</sup>.

도파관내 전계 세기가 최대인 곳에 슬롯을 위치시키기 위해 슬롯과 슬롯의 간격은  $\lambda_g/2$ 로 결정하였다. 슬롯 도파관 급전기가 균일한 방사를 하기 위해서는 급전기의 모든 슬롯이 동일한 컨덕턴스를 가져야 하고, 임피던스 정합을 위해서는 다음 식을 만족해야 하며, 본 논문의 경우  $g_1=g_2=g_3=g_4=1/4$ 이다.

$$\sum_{n=1}^4 g_n = 1 \quad (1)$$

구형 도파관의 넓은 면에 존재하는 길이 방향 슬롯의 컨덕턴스는 다음과 같다<sup>[4]</sup>.

$$g_n = g_0 \sin^2\left(\frac{\pi x_n}{a}\right) \quad (2)$$

여기서,  $g_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

표 1. 설계된 파라미터 값

Table 1. Design parameter values.

Parameters	Values [mm]	
Waveguide dimension	<i>a</i>	96
	<i>b</i>	56
	<i>t</i>	2
Slot spacing	<i>d</i>	79.49
Slot width	<i>w</i>	6.7
Slot length	<i>l</i>	59.39
Slot offset	<i>x</i>	20.4

$$\epsilon_0 = \left( \frac{2.09a\lambda_g}{b\lambda_0} \right) \cos^2 \left( \frac{\pi\lambda_0}{2\lambda_g} \right) \quad (3)$$

앞서 결정된 구형 도파관의 크기와 식 (1)~(3)을 이용하면 슬롯의 오프셋인 *x*를 결정할 수 있다.

표 1은 설계된 슬롯 도파관 급전기의 설계치를 보여준다.

### 2-2 급전기의 반사 손실 특성

설계된 급전기의 파라미터를 바탕으로 반사 손실 특성을 확인하기 위해 MWS 시뮬레이션 모델을 그림 4와 같이 도시하였다.

설계된 슬롯 도파관 급전기의 임피던스 정합 특성을 확인할 수 있는 반사 손실은 그림 5와 같다. 마그네트론의 사용 중심 주파수인 2.45 GHz에서 약 70 MHz 상향 편이(shift)된 반사 손실 특성을 확인할 수 있었다.

### 2-3 급전기의 최적 설계

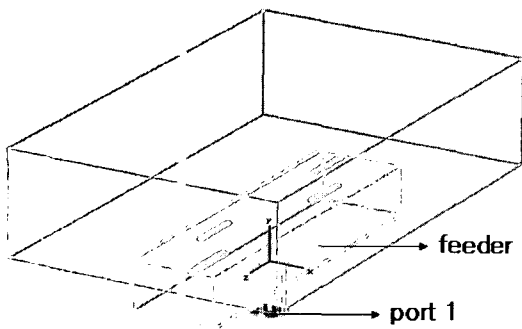


그림 4. 슬롯 도파관 급전기의 시뮬레이션 모델  
Fig. 4. Simulation model of the slotted waveguide feeder.

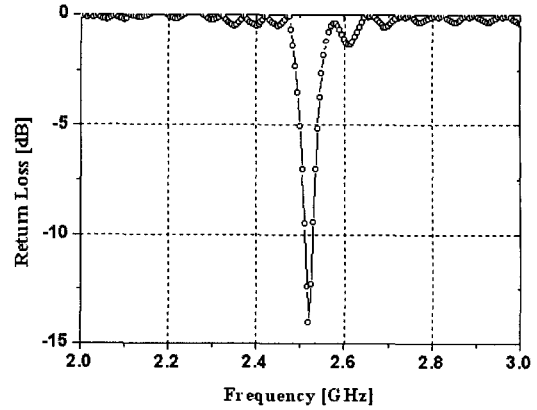


그림 5. 반사 손실 시뮬레이션 특성  
Fig. 5. Simulated return loss characteristic.

설계된 급전기의 공진 주파수를 2.45 GHz에 맞추기 위해 슬롯의 길이 변화에 따른 공진 특성을 검토하였다. 그림 6은 급전기의 슬롯 길이 변화에 따른 반사 손실 특성 변화를 보여주고, 그림 7은 슬롯 길이에 따른 공진 주파수 변화를 보여준다. 슬롯의 길이가 길어짐에 따라 급전기의 공진 주파수가 내려가는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 7을 이용해 원하는 급전기의 공진 주파수를 얻은 후, 급전기의 반사 손실 특성은 슬롯의 오프셋 변화를 통해 개선하였다. 설계를 용이하게 하기 위해 그림 8과 같이 급전점으로부터 가까운 슬롯의 오프셋(*x*<sub>1</sub>)과 멀리 떨어져 있는 슬롯의 오프셋(*x*<sub>2</sub>)으로 구분해 반사 손실 특성 변화를 확인하였다.

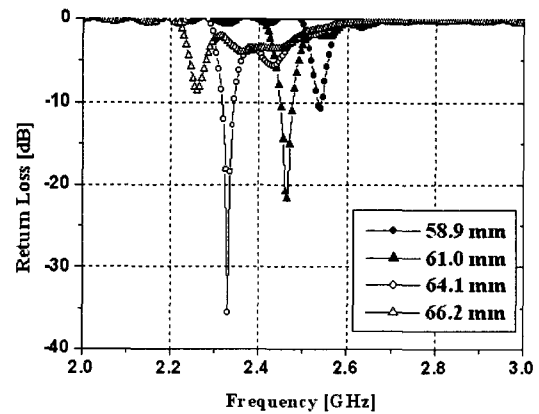


그림 6. 슬롯 길이 변화에 따른 반사 손실 특성  
Fig. 6. Return loss characteristics for various slot lengths.

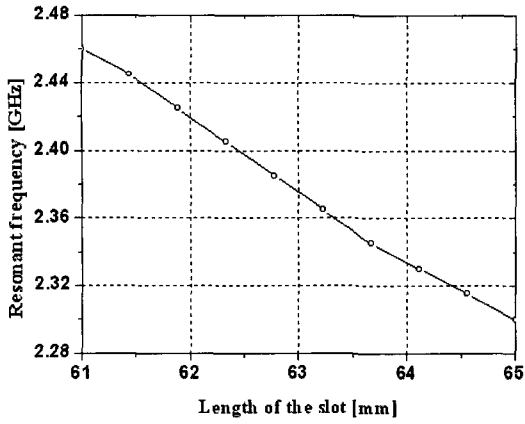


그림 7. 슬롯 길이에 따른 공진 주파수 변화  
Fig. 7. Resonant frequency versus slot length.

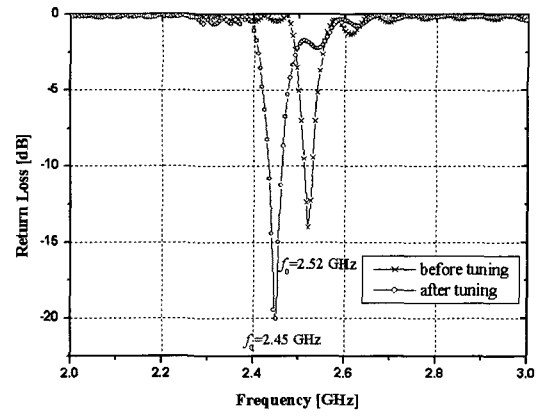


그림 10. 최종 설계된 급전기의 시뮬레이션 결과  
Fig. 10. Simulated results of the finally designed feeder.

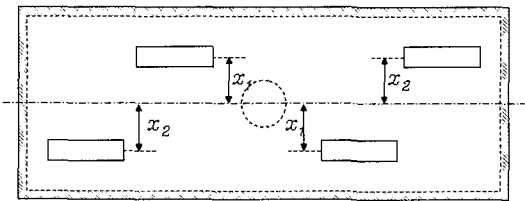


그림 8. 슬롯의 오프셋  
Fig. 8. Slot offsets.

$x_1$ 의 변화에 따른 반사 손실 특성 변화를 그림 9에 보였다. 여기서  $x_2$ 는 초기 설계치인 20.4 mm이며  $x_1$ 이 변화함에 따라 공진 주파수의 편이는 적고, 반사 손실 특성은 크게 변함을 알 수 있다. 그림 9를 참고로  $x_1$ 을 18.2 mm로 결정하였다.

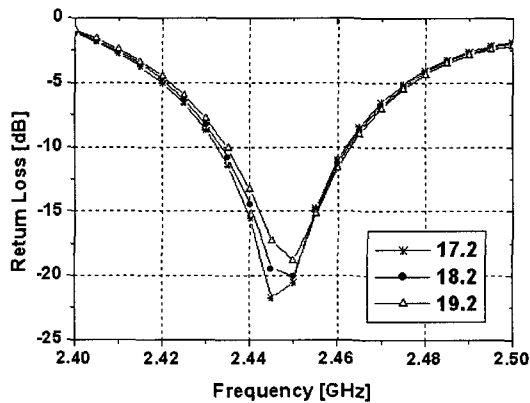


그림 9.  $x_1$ 의 변화에 대한 반사 손실 특성 변화  
Fig. 9. Return loss characteristics for various  $x_1$ 's.

공진 주파수와 반사 손실 특성을 개선시키기 위한 튜닝 전과 후의 결과를 그림 10에 보였다. 2.52 GHz의 상향 편이된 공진 특성을 보정하기 위해 슬롯 길이를 59.39 mm에서 61.3 mm로 변경하였으며, 반사 손실 특성을 개선하기 위해 그림 9를 참고로  $x_1$ 은 18.2 mm,  $x_2$ 는 20.4 mm로 결정하였다. 튜닝 후 중심 주파수 2.45 GHz에서 약 -20 dB의 반사 손실 특성을 확인할 수 있다. 여기서, 반사 손실 특성은 다중 모드 공동기가 장착되지 않은 경우로 급전기만의 특성이다. 급전기를 공동기에 장착한 경우의 반사 손실 특성은 공동기 내부 시료의 유전체적 특성, 시료의 구조 및 배치 등에 따라 변할 것이다.

최종 설계된 급전기의 자체 방사 특성을 확인하기 위한 전계 분포 시뮬레이션 결과를 그림 11에 보

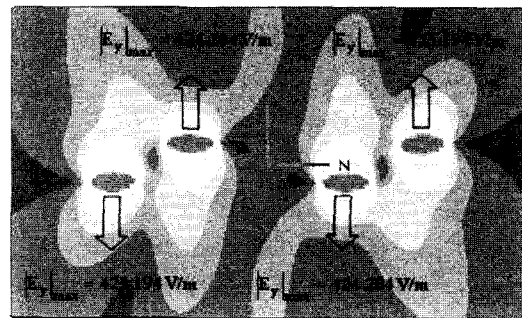
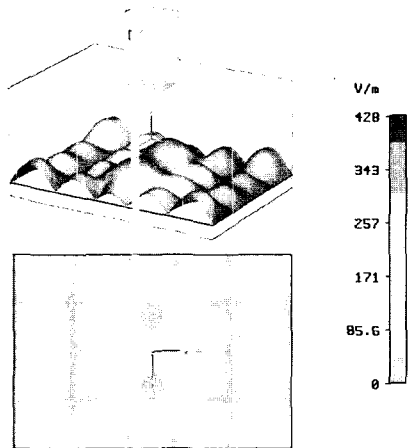


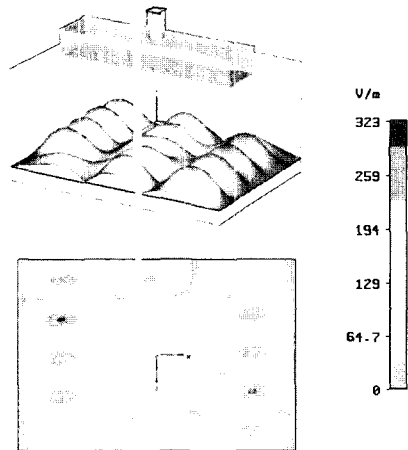
그림 11. 슬롯 근처의 전계 분포 시뮬레이션 결과  
Fig. 11. Simulated electric field distribution nearby the slots.

였다. 4개의 슬롯들이 균일한 방사 특성을 가짐을 알 수 있다.

기존 급전기를 사용할 때와 설계된 슬롯 도파관 급전기를 사용할 때의 다중 모드 공동기내 전계 분포를 그림 12에 보였다. 다중 모드 공동기의 크기는 494(x)×244(y)×344(z) mm이다. 그림 12는 공동기 바닥에서 33 mm 떨어진 x-z 평면에서의 전계 분포 시뮬레이션 결과이다. 기존 급전기를 사용했을 때는 공동기내 전계 분포가 중앙에 집중되는 반면, 제안된 급



(a) 기존 급전기 사용시  
(a) Conventional feeder case



(b) 설계된 슬롯 도파관 급전기 사용시  
(b) Designed slotted waveguide feeder case

그림 12. 다중 모드 공동기내의 전계 분포 시뮬레이션 결과

Fig. 12. Simulated electric field pattern in the multi-mode cavity.

전기를 사용한 경우에는 전체 면적에 걸쳐 전계가 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 급전기는 자체적으로 균일한 방사 특성을 가지므로 공동기내의 전계 분포가 더 균일함을 확인할 수 있다.

### III. 측정 결과

설계 및 제작된 슬롯 도파관 급전기의 특성을 측정하기 위하여 그림 13과 같이 장비를 구성하였다. 측정된 반사 손실 특성을 그림 14에 보였고, 측정 결과가 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

제작된 급전기를 장착한 다중 모드 공동기 내부의

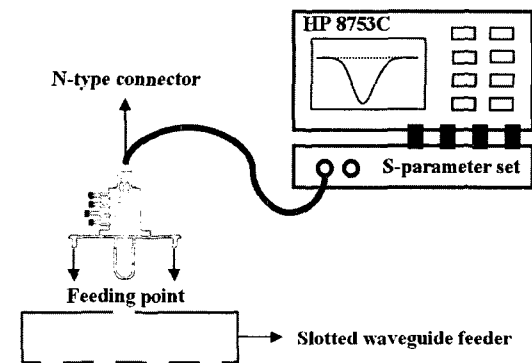


그림 13. 측정 실험 구성

Fig. 13. Experimental setup.

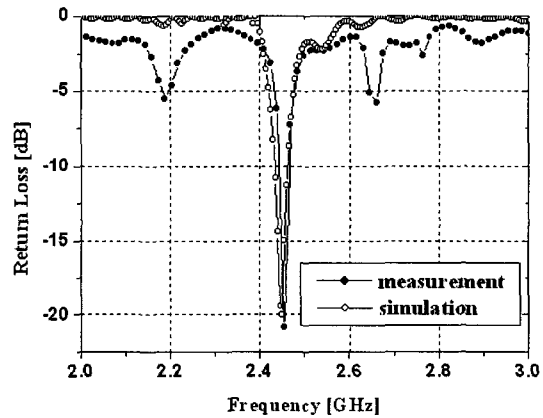
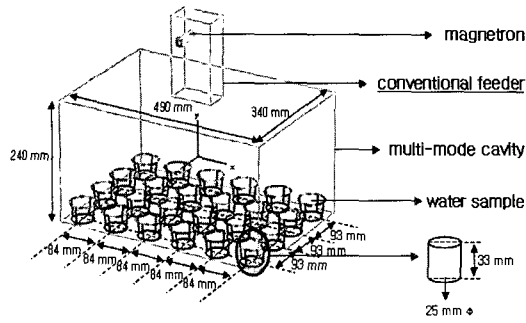
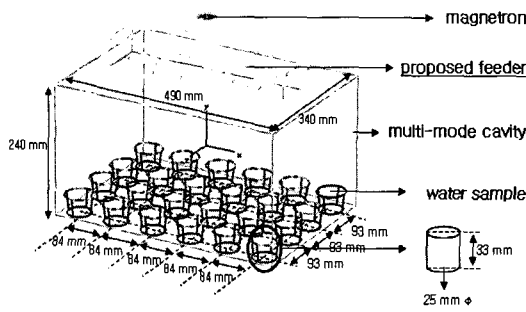


그림 14. 제안된 급전기의 시뮬레이션 결과와 측정 결과

Fig. 14. Simulated and measured results of the proposed feeder.



(a) 기존 급전기 사용시  
(a) Conventional feeder case



(b) 설계된 슬롯 도파관 급전기 사용시  
(b) Designed slotted waveguide feeder case

그림 15. 균일성 실험  
Fig. 15. Uniformity experiments.

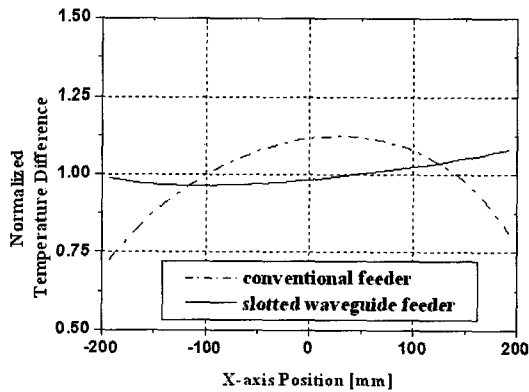


그림 16. 물 시료들의 정규화된 온도 차 분포  
Fig. 16. Normalized temperature difference of water samples.

전계 분포 균일성에 대한 타당성을 검증하기 위하여 그림 15와 같이 공동기의 내부 바닥면에 높이가 33 mm인 컵에 물을 완전히 채운 시료 24개를 균일하게

배치시켜 1분간 가열한 후 변화된 온도를 측정하였다. 실험에 사용된 물의 초기 온도는 18 °C이었다. 물 시료들의 가열 전후 온도차를 평균값으로 정규화한 결과를 그림 16에 보였다. 기존의 급전기보다 본 연구에서 제안된 급전기를 사용했을 때 더 균일하게 가열됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 ISM 밴드의 2.45 GHz 마그네트론을 사용하는 다중 모드 공동기 내부의 전계 분포 균일성을 향상시키기 위한 급전기를 설계 및 제작하였고, 그 타당성을 검증하였다. 제안된 급전기는 균일한 방사를 위해 구형 도파관의 넓은 면에 4개의 길이 방향 슬롯을 가지며 양쪽의 종단면을 단락 처리하였다. 제안된 급전기가 장착된 다중 모드 공동기 내부의 전계 분포는 CST사의 MWS(Microwave Studio)를 이용하여 시뮬레이션 하였고, 기존의 급전기를 장착한 경우보다 더 균일한 전계 분포 특성을 보임을 확인하였다. 제작된 급전기는 사용 주파수 2.45 GHz에서 -20 dB 이하의 반사 손실을 보였다. 설계의 타당성을 검증하기 위해, 공동기 내에 물 시료들을 배치해 일정시간 가열시켜 가열 전 후의 온도 변화를 관찰하였다. 온도 변화는 공동기에 기존 급전기를 장착한 경우, 중앙과 가장자리에 있는 시료들 사이에 약 3.5 °C, 제안된 급전기를 장착한 경우에는 약 0.7 °C의 차이를 보였다. 이를 통해, 제안된 급전기가 기존의 급전기보다 다중 모드 공동기 내의 전계 분포 균일성 향상에 기여함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Roger Meredith, *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*, The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [2] G. Roussy, J. A. Pearce, *Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields-Physical and Chemical Processes*, John Wiley & Sons, 1995.
- [3] Tse V. Chow Ting Chan and Howard C. Reader, *Understanding Microwave Heating Cavities*, Artech House, 2000.

[4] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*,

McGraw-Hill, 1984.

이 정 환



2002년 2월: 한남대학교 광·전자 물리학과 (이학사)

2002년 2월~2003년 6월: 포항산업 과학연구원 위촉연구원

2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2003년 6월~현재: 진양플라텍 부 설연구소 연구원

[주 관심분야] Microwave components and applicator

김 성 재



1985년 2월: 부산대학교 무기재료 공학과 (공학사)

1990년 2월: 부산대학교 무기재료 공학과 (공학석사)

1993년 8월: 부산대학교 무기재료 공학과 (공학박사)

1990년 11월~2003년 5월: 국방과 학연구소 선임연구원

2003년 6월~현재: 진양플라텍 대표이사

2003년 7월~현재: 진양플라텍 부설연구소장 겸임

[주 관심분야] 산업용 마이크로파 응용 시스템

최 성 수



1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)

2001년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2001년 3월~현재: 충남대학교 전 파공학과 박사과정

[주 관심분야] Microwave and milli-

meterwave filters

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1976년 2월: 한국과학기술원 전기 전자공학과 (공학석사)

1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson

2000년~2001년: 한국전자파학회 회장

1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

2005년 4월~현재: 대덕 Wireless 포럼 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeterwave passive components, Antennas, EMI/EMC