

# 실내 마이크로파 배전 전송계를 위한 가변전력분배기와 도파관의 결합구조 설계

## Design of Variable Power Distributor and Waveguide Connecting Structure for Wireless Microwave Power Transmission in a Building

최영규\*  
(Young-Kyu Choi)

**Abstract** - This paper deals with a new variable microwave power distributor and a connector between a deck plate and an input power waveguide for indoor microwave wireless power transmission. We design a new type connector built in the 3-stage coaxial line structure, and calculate the return loss of the connector at 2.45GHz. Newly designed connector shows the excellent return loss performance less than -30dB at the operating frequency of 2.45GHz. And we show a power distributor in which the dividing ratio of the power is controlled mechanically by three rotary fins. The distributor can control the dividing power from 4.5% to 58% with the variance of 5% output power. The experimentally tested results of the distributor are good agreement with the simulation within the return loss of 1%.

**Key Words** : Microwave power, Indoor wireless transmission, Distributor, Waveguide connector

### 1. 서론

최근, 도시의 신형 대형 건축물은 유비쿼터스 시대에 부응하여 모바일PC, 휴대전화 등으로 대표되는 IT기기를 실내의 모든 장소에서 자유롭게 사용할 수 있는 설계법이 도입되고 있다. 그러나 현재 전력을 공급하는 전원 인프라는 종래의 유선망에 의한 송배전 시스템 수준에 머물고 있어 정보통신의 무선화에 비해 전력의 공급은 유비쿼터스 시대에 부응하지 못하고 있다. 마이크로파를 통한 공간상의 전력 송수신 기술을 이용하여 유비쿼터스 시대에 맞는 전력공급 방법으로 건축물의 구조체나 마감재 등으로 만들어지는 밀폐 공간으로 전력을 공급하는 건물 내 마이크로파 송배전 시스템에 대한 연구가 주목을 받고 있다[1-4].

건물 내 무선 전력 공급 시스템에서 건물의 각 층 사이에 있는 바닥이나 천장을 구성하는 강판으로 된 차폐 공간은 구형 도파관의 연속된 배열로 활용할 수 있으며 각 층의 차폐공간에 전력을 공급하기 위해서는 층간 마감 강판과 수직으로 교차하는 방향으로 공급용 도파관을 설치하면 된다. 공급용 도파관에서 각 층의 데크 플레이트(deck plate)로 된 구형 도파관에 공급된 전력은 전력의 유효 이용 면에서 각 층의 전력 사용 상황에 따라 능동적인 변화가 가능하도록 설계할 수 있으며, 데크 플레이트 도파관을 도파하는 마이크로파는 또 다시 분배되어 출력으로 사용된다. 데크 플레이트 도파관의 마이크로파 전력은 도파관의 적절한 위치에 동축

프로브를 삽입하여 끌어내지만, 전력의 사용 상황에 따라 전력을 끌어내거나 끌어내지 않도록 선택할 수 있는 장치가 필요하다. 출력된 마이크로파는 마이크로파 정류회로나 레귤레이터, 축전지 등으로 구성되는 콘센트 박스를 설치하여 용도에 맞는 직류 전력으로 사용할 수 있다. 또, 데크 플레이트 도파관의 윗면 또는 아랫면(H면)의 임의의 위치에서 안테나 접속 동축 프로브를 이용하면 마루 또는 천정으로 전력을 출력할 수도 있으므로 건물 내의 조명이나 그 외의 전기기기 등에도 급전이 가능하다. 마이크로파 배전 시스템은 데크 플레이트를 그대로 이용한다는 점에서 전기 배전공사 비용의 절감을 기대할 수 있을 뿐 아니라, 전력을 출력하는 위치를 자유롭게 변경할 수 있으므로 급전 장소의 자유도 또한 높아지게 된다.

이 논문에서는 이러한 마이크로파 배전 시스템의 실용화에 서 문제점으로 지적되고 있는 가변 전력 분배기와 데크 플레이트 도파관의 결합부에 대하여 지금까지 제안된 동축 어댑터를 사용하는 방법과 다른 급전 방법을 제안하였다[5]. 또, 데크 플레이트 도파관을 도파하는 전력은 사용 상황에 따라 출력을 선택하도록 스위칭[6-7]하게 되는데 이러한 스위칭 동작에 의해 발생하는 반사를 최소화시킬 수 있는 전력 분배 스위치를 제안하고, 이를 설계하여 실용화의 가능성을 검토하였다.

### 2. 가변 전력분배기의 결합부 구조

공급용 도파관으로 부터 데크 플레이트 도파관로의 급전에는 그림 1과 같은 건축물 설계 구조에 약 5% 간격으로 4.6~58 %의 범위 내에서 출력되는 전력량을 변화시킬 수

\* 정 회 원 : 신라대 공대 전자공학과 교수 공박

E-mail : ykchoi@silla.ac.kr

접수일자 : 2012년 4월 27일

최종완료 : 2012년 9월 20일

있는 가변 전력분배기를 제작하여 사용하였다. 현재까지 가변 전력 분배기와 데크 플레이트 도파관의 접속은 전력 분배기의 출력을 동축 선로로 변환하여 나사로 조인 상태로 동축 어댑터를 경유하여 결합시켰다, 그러나 이러한 방법은 장시간 사용시 나사의 조임 상태가 변하게 되므로 시간이 지나면 성능이 나빠지는 요인을 지적되었다. 이러한 측면에서 가변전력 분배기와 데크 플레이의 접속은 동축 어댑터를 사용하지 않는 기계적으로 안정된 특성을 가지는 접속 방법이 필요하다.

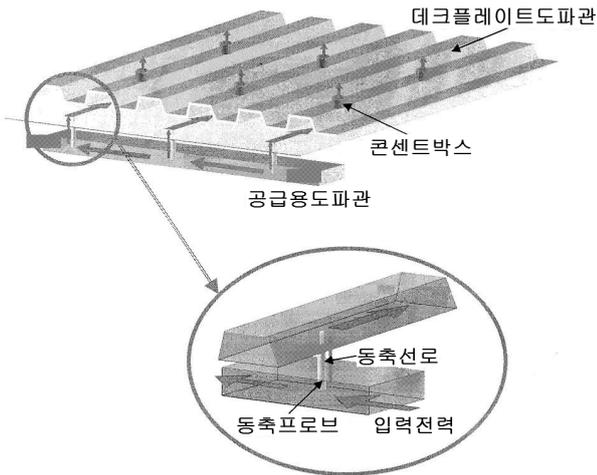


그림 1 건축물 데크 플레이트에 무선전력 공급 개념도  
 Fig. 1 Schematic configuration for transmitting microwave power to deck plate in building.

이 논문에서 제안하는 결합 방법의 구조를 그림 2에 보였다. 그림 2에서 아래쪽은 전력 분배기, 위쪽은 데크 플레이트의 도파관이다. 종래에는 분배기 위쪽 도파관의 관벽 바로 위에 N형 커넥터를 설치하였으나, 동축 선로를 그대로 위로 연장하여 그림 3에 보인 것처럼 3단으로 구성된 동축 선로 구조로 변형시켰다. 새로운 3단의 동축 선로는 전력 분배기와 데크 플레이트 도파관에 삽입하는 동축 프로브를 일체화 시켜서 이것을 동축 선로의 내부 도체로 하고, 도파관의 관

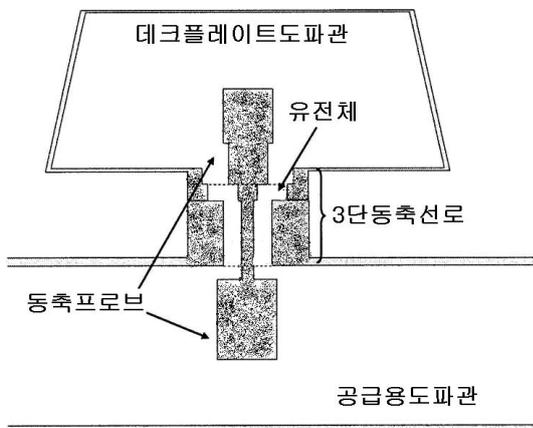


그림 2 새로 제안된 결합부의 구조  
 Fig. 2 Newly proposed connecting structure

벽을 그대로 연장하여 외부 도체로 사용하였다. 하단과 상단은 가변 전력 분배기와 데크 플레이트 도파관 각각에 삽입되어 있는 동축 프로브를 내부 도체로 하고 있다. 또, 외부 도체는 특성 임피던스가 50Ω으로 되도록 직경의 크기를 조정하였다.

중단의 내부 도체는 가변 전력 분배기의 동축 프로브를 지지하기 위해 하단 보다 직경을 크게 하여 외부 도체는 상단과 하단이 정합을 취할 수 있게 하였다. 이 때문에 중단의 특성 임피던스는 50Ω이 되지 않는다. 내부 도체를 지지하기 위해 하단과 중단에는 테프론을 채운 3단 동축 선로의 상단과 중단의 외부 도체를 서로 압착 고정시켜 실장하는 방법으로 기계적 안정성을 확보하였다.

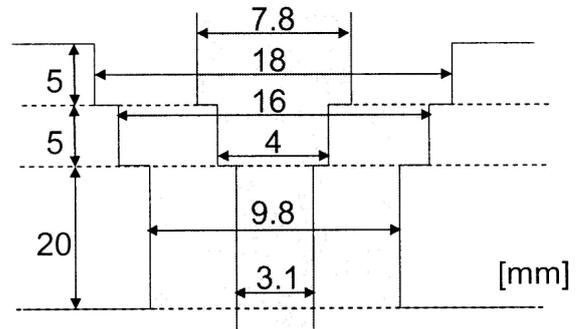


그림 3 3단 동축 선로의 규격  
 Fig. 3 Size of the 3-stage coaxial line structure

### 3. 결합부의 설계

결합부는 그림 4처럼 플레이트 도파관과 3단 동축 선로 변환기가 무반사 접속이 이루어지도록 설계하였다. 이처럼 변환기가 무반사가 되도록 설계함으로써 새로 제안하는 결합 방법에 의한 전기적 특성의 악화되는 일이 없도록 하였다. 도파관과 동축 선로 변환기의 해석에는 그림 5와 같은 등가회로를 사용하였다. 등가회로에는 도파관에 삽입하는 동축 프로브의 병렬 어드미턴스를

$$y_p = g_p + jb_p \quad (1)$$

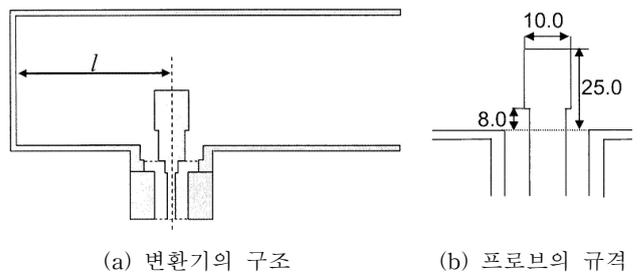


그림 4 동축 선로-도파관 변환기의 구조와 프로브 규격  
 Fig. 4 Converting structure of the coaxial line and waveguide and the size of the probe

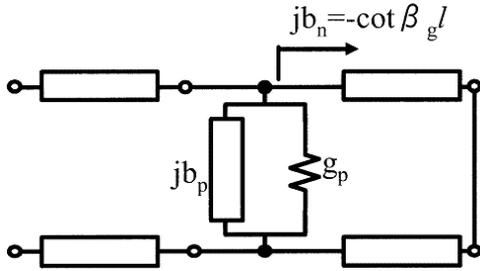


그림 5 결합부의 등가회로  
Fig. 5 Equivalent circuit of the connecting part

로 나타내고, 프로브 중심에서 단락판 방향을 바라본 어드미턴스를  $jb_n$ 으로 하였다. 여기서 식(1)은 그림 4(a)의 동축 프로브와 단락판 사이의 거리를  $l$  이라 하면,

$$b_n = -\cot \beta_g l \tag{2}$$

로 나타낼 수 있다. 등가회로의 각 어드미턴스의 값이 설계 주파수인 2.45GHz에서

$$g_p + j(b_p + b_n) = 1 + j0 \tag{3}$$

의 조건식을 만족하도록 프로브의 형상과 단락판까지의 거리  $l$ 을 설계하였다. 등가회로의 각 어드미턴스의 주파수 특성을 그림 6에 보였다. 주파수 특성을 살펴보면 각각의 어드미턴스는 주파수에 대하여 변화가 있지만, 설계 주파수 부근에서는 정합 조건을 만족하고 있다.

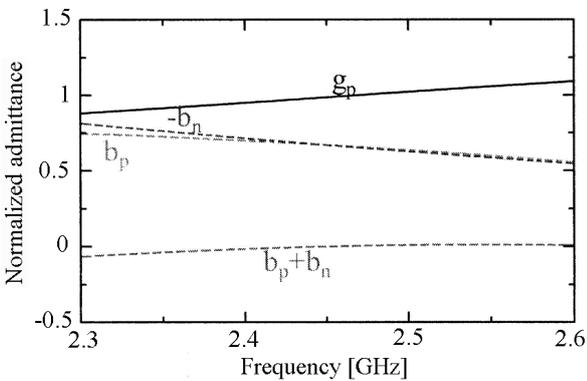


그림 6 등가회로 어드미턴스의 주파수 특성  
Fig. 6 Admittance-frequency characteristics of the equivalent circuit.

설계한 변환기의 특성을 그림 7에 보였다. 설계에서 프로브와 단락판 사이의 거리는  $l=23.5\text{mm}$ 이지만, 동축 프로브에서 발생한 고차 모드의 영향을 받아 설계 주파수에서 약간 벗어난 위치에서 반사의 피크를 보이고 있다. 따라서 2.45GHz에서 가장 반사가 작아지도록 거리를 조정하여,  $l=24.2\text{mm}$ 로 하였다. 반사의 크기가 2.45GHz를 중심으로 2.4~2.5GHz의 범위에서 -30dB 이하로 되는 양호한 결과를 보여 제안된 결합 방법이 시스템 전체의 특성에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다.

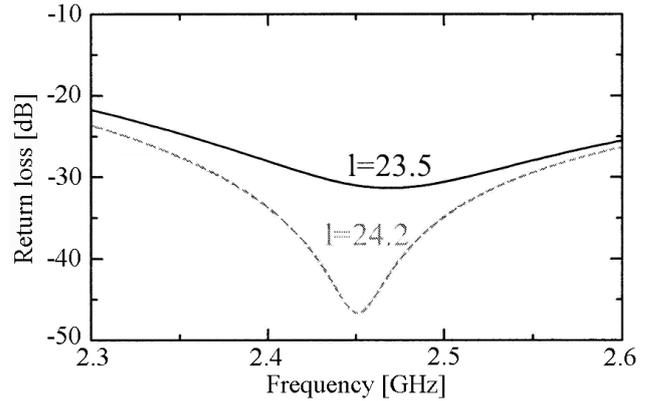


그림 7 동축-도파관 변환기의 반사손실 특성  
Fig. 7 Return Loss characteristic of the coaxial-waveguide converter

#### 4. 실험결과

그림 8(a)처럼 가변 전력분배기를 동축-도파관 변환기로 결합하는 방법으로 실험계를 제작하여 분배특성을 측정하였다. 그림 8(b)과 같이 동축 선로의 출력을 직접 측정할 수 있는 구조와 비교하여 본 논문에서 제시한 결합법의 유용성을 확인하였다. 여기서, 가변 전력 분배기는 그림 9와 같은 구조로 설계하였다. 동축 프로브에서 추출하는 전력량을 가변시키기 위한 분배비 조정용 회전 핀과 정합을 취하기 위한 회전 대칭핀을 삽입하였다. 필요한 추출 전력량에 따라 분배비 조정용 회전핀의 각도  $\phi$ 와 대칭 회전핀의 각도  $\theta$ 를 각각 변화시켜서 출력되는 전력량의 크기를 조절하였다. 사용하는 전력 분배기는 실험적으로 동축 선로에서 추출하여 4.6%~58%의 범위에서 출력량을 가변시킬 수 있도록 조절하였다.

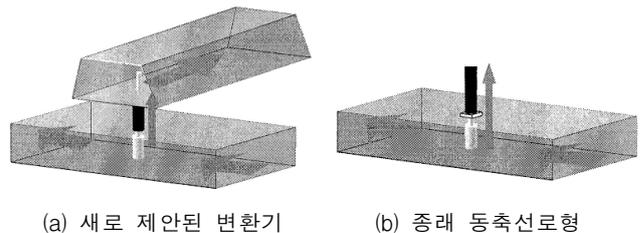


그림 8 분배특성 측정용 실험계 구조  
Fig. 8 Experimental set-up (a) newly designed structure, (b) coaxial line structure

그림 10은 분배기의 핀의 각도를  $0^\circ$ 로 하여 측정한 프로브의 특성이다. 측정치와 시뮬레이션 결과는 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. 특히, 컨덕턴스가 시뮬레이션의 값보다 약간 작은 것으로 보아 시험적으로 제작된 변환기는 시뮬레이션에서 보다 출력되는 전력의 비율이 작을 것으로 판단된다. 한편, 동축 선로를 사용한 구조에 대한 결과와의 비교에서는 약간의 차이를 보였다. 실험에서 이러한 약간의 차이를 나타내는 요인으로는 제작된 시작품에 사용된 테크 플레이트 도파관이나 구형 도파관 규격의 차이에 의한 것으로 판

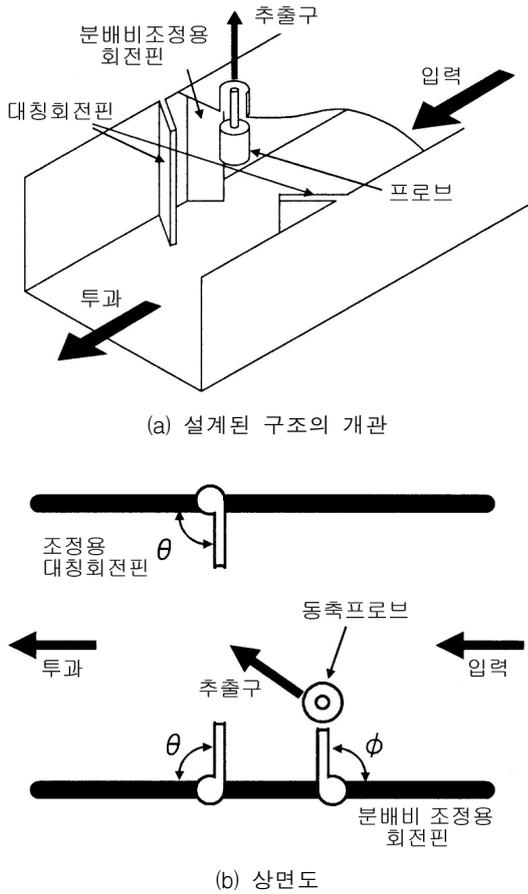


그림 9 가변전력 분배기의 구조  
 Fig. 9 Structure of the variable power divider

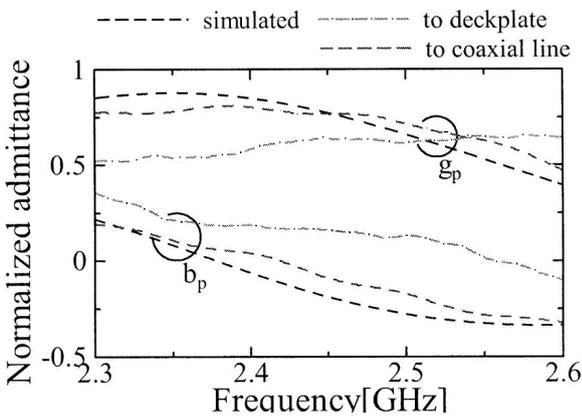


그림 10 프로브 1개의 주파수-어드미턴스 특성  
 Fig. 10 Frequency-admittance characteristics of a probe

단된다.  $\phi = 58^\circ$ ,  $\theta = 57^\circ$  인 경우의 주파수 특성의 측정 결과를 그림 11에 보였다. 시뮬레이션의 결과에 비하여 반사가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

이러한 결과의 원인은 핀과 관벽 사이의 간극 등, 시뮬레이션 모델과 제작된 변환기의 구조상규격의 차이에 의한 것으로 실험계의 정밀 제작으로 개선이 가능하다.

그림 12는 동축 선로 구조에서 직접 전력을 출력하여 측

정한 경우와 비교한 결과이다. 설계 주파수에서 반사량에 약간의 차이가 있으나,  $-20\text{dB}$  이하로 이는 거의 1% 이하에 해당하는 반사량이다. 핀의 각도를  $0^\circ$ 로 한 경우에는 결합 방법의 차이에 따라 약간 다른 결과를 보였으나, 핀의 각도를 크게 하면 이러한 차이는 거의 사라졌다. 이러한 결과에서 분배기의 특성은 핀의 상태에 따른 영향이 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

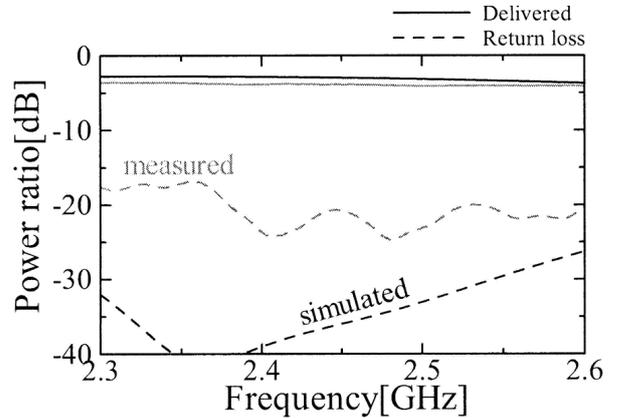


그림 11  $\phi = 58^\circ$ 일 경우의 출력-주파수 특성  
 Fig. 11 Power ratio-frequency characteristics at  $\phi = 58^\circ$

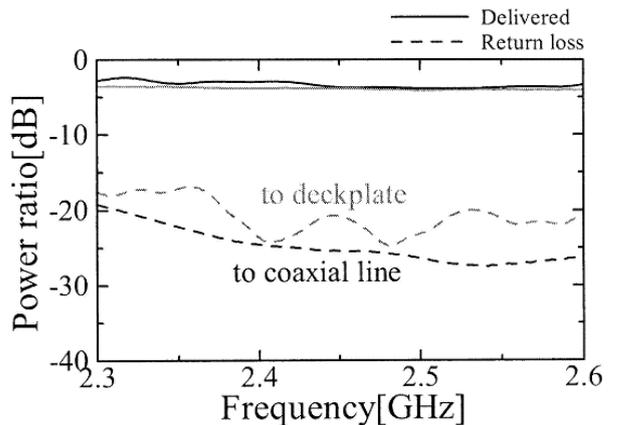
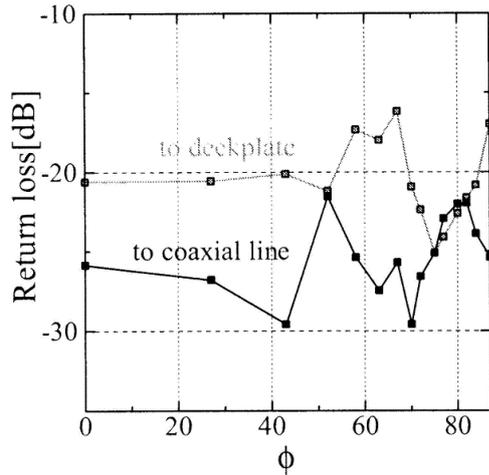
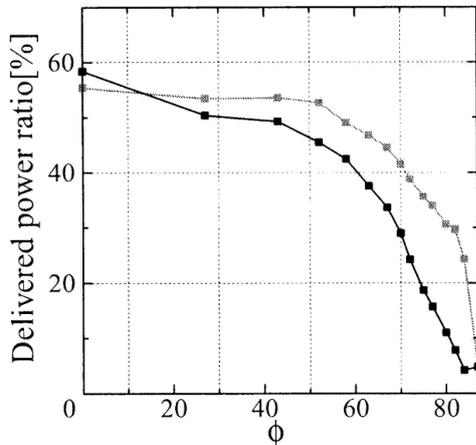


그림 12 동축 어댑터에 의한 추출 방법과의 비교  
 Fig. 12 Comparison with the power ratio of the coaxial line adapter

설계된 주파수에서 가변 분배기의 각도 변화에 대한 특성을 그림 13에 보였다. 반사는 동축 선로에서 추출하는 경우와 비교하여 전체적으로 증가되어 있으며, 가장 큰 곳에서 약  $-16.2\text{dB}$  정도였다. 출력된 전력을 보면 전체적으로 출력되는 양이 증가되어 있다. 표 1에 가변 전력 분배기의 각 핀의 각도와 전력의 비율을 보였다. 표를 보면 핀의 조합에 따라서 전력의 합계가 100%를 넘어서는 경우가 보인다. 이것은 출력을 측정하는 실험계와 투과를 측정하는 실험계의 구성이 약간 다르기 때문이다. 실험계의 제작시 3단 동축 선로의 밀착에 다소 어려움이 있어 압착 부분에서 부정합이 발생한 것으로 판단되며 이러한 부정합은 실물 제작시에는 개선이 가능한 부분이다.



(a) 반사특성



(b) 추출전력

그림 13 각도 변화에 대한 각 전력 비율

Fig. 13 Return and delivered power ratio in variance with the angle

표 1 각 핀의 각도와 전력량의 비교

Table 1 Power ratio in variance with the angle of pin

$\phi$	$\theta$	반사[dB]	추출량[%]	투과량[%]
0	75	-19.27	56.05	54.51
27	72	-18.25	56.40	56.21
43	67	-17.64	54.41	58.30
52	61	-17.40	51.73	60.34
58	57	-17.32	49.08	62.17
63	54	-17.98	46.79	66.22
67	51	-16.19	44.53	67.63
70	47	-20.93	41.57	36.51
72	44	-22.34	38.86	38.05
75	40	-25.09	35.71	40.61
77	38	-24.06	34.06	44.63
80	35	-22.62	30.62	47.26
82	32	-21.64	29.72	49.89
84	24	-20.79	24.35	52.53
87	19	-17.04	5.03	71.66

### 5. 결 론

마이크로파 배전 시스템의 실용화에서 문제점으로 지적되고 있는 가변 전력 분배기와 테크 플레이트 도파관의 결합부에 대하여 지금까지 주로 사용되던 동축 어댑터를 사용하지 않고 3단으로 구성된 동축 선로 구조로 변형시킨 새로운 급전 방법을 제안하였다. 또, 테크 플레이트 도파관을 도파하는 전력을 전력의 사용 상황에 따라 출력의 유무를 선택하는 스위치에 대하여 스위칭 동작에 의해 발생하는 반사를 최소화시킬 수 있는 전력 분배 스위치를 제안하고, 이를 설계하여 실용화의 가능성을 검토하였다.

3단 동축 선로 구조에서 관벽으로부터 프로브까지의 거리를  $l=24.2\text{mm}$ 로 한 경우 반사의 크기가 2.45GHz를 중심으로 2.4~2.5GHz의 범위에서 -30dB 이하로 되는 양호한 결과를 보여 제안된 결합 방법이 시스템 전체의 특성에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 확인되었다. 종래의 동축 선로 구조와 비교한 결과 설계 주파수에서 반사량에 약간의 차이(약 -20dB 이하)가 있었으나, 이는 거의 1% 이하에 해당하는 반사량에 해당하여 양호한 결과이다. 또, 공급용 도파관으로부터 테크 플레이트 도파관으로의 급전에는 분배비 조정용 회전핀과 대칭 회전핀을 삽입한 전력 분배기를 제작하여 약 5% 간격으로 46~58 %의 범위 내에서 출력되는 전력량의 스위치 특성을 확인하였다.

앞으로는 이 논문의 결과를 바탕으로 더욱 정밀한 시제품을 제작하여 이론해석 결과와 실측치의 오차를 줄일 필요가 있으며, 보다 넓은 범위에서 출력되는 전력량을 조절할 수 있는 분배기의 구조에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] N. Shinohara and H. Matsumoto, " Experimental Study of Large Rectenna Array for Microwave Energy Transmission", IEEE trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-46, no. 3, pp. 261-268, Jun, 1998
- [2] M. Takeshi, H. Tomonari, N. Shinohara, K. Hashimoto and H. Matsumoto, " Study of Microwave Power Transmission System with a Magnetron", IEICE, Society Conf. 1998, B-1-6, Sep. 1998.
- [3] T. Miura, H. Tomonari, N. Shinohara, and H. Matsumoto, "Study of Microwave Power Transmission System with a Magnetron", IEEE AP-S Tokyo Chap. A.P98-26, vol.98, no. 169,170, Jul. 1998.
- [4] T. Miura, N. Shinohara, and H. Matsumoto, "Experimental Study of Microwave Power Transmission Efficiency(2)", IEICE General Conf. B-1-23, vol. 1-7, Mar. 1999.
- [5] N. Shinohara, T. Mitani, J. Kojima. and M. Hashitani, "Development of Small and High Efficient Rectenna for High Power Microwave Power Transmission", IEICE, MW2008-16, vol. 108, no. 63, pp. 7-10, May, 2008.

- [6] J. Pollak, M. Moisan, Z. Zakrzewski, J. Pelletier, Y. Arnal, A. Lacoste, and T. Lagarde, "Compact Waveguide-Based Power Divider Feeding Independently Any Number of Coaxial Lines", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 55, no. 5, pp. 951-957, Nov. 2007.
- [7] K. Song, Y. Fan and Y. Zhang, "Eight-Way Substrate Integrated Waveguide Power Divider with Low Insertion Loss", IEEE trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-56, no. 6, pp. 1473-1477, Oct., 2008.

---

## 저 자 소 개



### 최 영 규 (崔 泳 圭)

1982년 중앙대학교 전자공학과 학사,  
1988년 교토대학(일본)대학원 전자공학  
졸업(석사), 1992년 동 대학원 공학박사,  
1992년~1995년 국립 후쿠이대학 (일본)  
전자공학과 전임강사, 1998년~현재 신라  
대학교 공과대학 전자공학과 교수

Tel : 051-999-5622

E-mail : ykchoi@silla.ac.kr