

실내 마이크로파 배전용 완전 정합형 전력 분배 스위치의 설계

Matching-type Power Dividing Switch for Low Reflection in Indoor Microwave Power Distribution

최영규*
(Young-Kyu Choi)

Abstract - In a indoor microwave power distribution system, matching-type power dividing switch is proposed and designed with a various power dividing ratio. A matching coaxial cable probe is used behind the output probe for the reflecting power absorption. Reflecting characteristics of the matching coaxial cable probe are calculated by analyzing the S-parameter of this structure. Newly proposed matching-type switch shows a very low return loss less than -30dB at the operating frequency of 2.45GHz with a dividing power ratio of 50.2% . The simulated results by use of 3-stage power divider shows a good agreement with the theoretical estimation for the various combination of the different switching ratio.

Key Words : Microwave power distributor, Microwave energy transmission, Waveguide-based power divider

1. 서론

유비쿼터스 시대의 도시형 대형 건축물은 모바일PC, 휴대전화, 각종 멀티미디어 기기 등을 실내의 모든 장소에서 자유롭게 사용할 수 있도록 설계되고 있다. 따라서 이러한 IT 기기에 전력을 공급하기 위한 전원 인프라도 건축물의 유비쿼터스화에 부응하여 무선으로 전력을 공급하는 마이크로파 전력 공급 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[1-4].

건축물의 구조를 이용한 마이크로파 전력 공급에는 유선망의 배전반에 해당되는 마이크로파 분배 스위치가 핵심적인 역할을 수행하게 된다[5-7]. 마이크로파 전력 분배 스위치는 마이크로파 공급 도파관 내의 적절한 위치에 전력 추출용 동축 선로 프로브 쌍을 삽입하여 도체 내부와 도체 외부 사이를 단락하거나 개방하는 방식으로 필요한 전력을 추출해 내게 되는데, 이러한 전력 추출용 스위치의 동축 프로브 쌍은 전력 추출 과정에서 입력된 마이크로파를 반사하여 공급되는 전력의 활용 효율을 저하시키는 요인이 된다. 저자의 연구 그룹에서는 추출용 동축 프로브 뒤 쪽에 도체 포트 쌍을 설치하여 짧은 거리 내에서 반사파를 상쇄시키는 방법으로 스위치 전체를 통하여 진행과 동작이 원활하게 진행되도록 하는 저반사형 마이크로파 전력 분배 스위치를 제안하고 이에 대한 이론 해석 및 실험 결과를 보고하였다[8]. 그러나 저반사형 전력 분배 스위치는 공급되는 전력에 비해 추출되는 전력의 비율이 작을 경우에는 반사되는 전력을 최소화시킬 수 있었으나, 추출되는 전력의 비율이 50% 이상으

로 증가되는 경우에는 반사되는 전력도 점차적으로 증가하는 특성을 나타내므로 추출할 수 있는 전력량에 제한이 있었다. 만일 반사되는 전력이 완전히 차단되는 전력 분배 스위치를 제작할 수 있다면, 추출되는 전력의 비율에 관계없이 자유롭게 공급되는 마이크로파 전력을 추출할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 이전에 보고된 저반사형 분배 스위치의 반사용 도체 프로브 쌍의 구조를 개선하여 반사 전력이 전혀 발생하지 않는 반사용 도체 프로브 쌍을 정합용 동축 프로브로 대체한 구조를 제안하였다. 정합용 동축 프로브의 동작 원리를 동축 프로브의 등가회로 모델을 이용하여 해석하고, 같은 특성을 가진 스위치 3개를 조합한 연결 구조를 이용하여 추출되는 전력과 동작 상태를 변화시키면서 설계된 대로 스위치가 동작하는지를 살펴보았다.

2. 완전 정합형 전력분배 스위치

2.1 동작원리

전력을 추출하는 비율에 관계없이 반사되는 전력을 최소화시키기 위해서는 분배 스위치에서 전력의 반사가 일어나지 않도록 완전 정합형으로 설계할 필요가 있다. 새로 설계된 완전 정합형 전력 분배 스위치의 구조를 그림 1에 보였다. 기본적인 구성과 동작원리는 저반사형 전력 분배 스위치의 경우와 동일하게 출력용 동축 프로브에 접속한 선로의 내부 도체와 외부 도체를 단락시키거나 개방시키는 방법으로 스위치의 동작을 실시한다[8]. 전력 분배 스위치의 정합은 저반사형에서 반사되는 전력을 상쇄시키기 위해서 출력 동축 프로브 쌍 뒤에 설치한 도체 포트 쌍을 대신하여 반사되는 전력을 최소화시키기 위한 정합용 동축 프로브를 삽입하였다. 정합용 동축 프로브는 동축 선로의 내부 도체를

* Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering,
Silla University, Korea

E-mail : ykchoi@silla.ac.kr

Received : March 12, 2013; Accepted : May 10, 2013

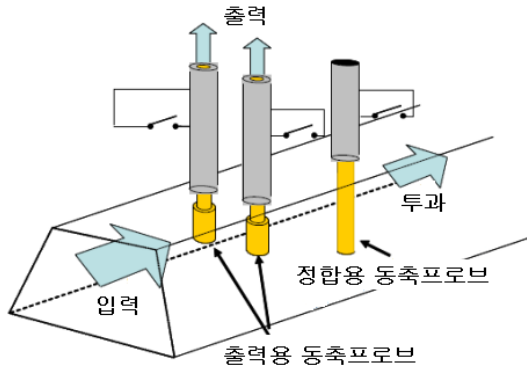


그림 1 완전 정합형 전력 분배 스위치의 구조
 Fig. 1 Schematic configuration of the matching-type microwave power dividing switch.

도파관의 중심에 삽입한 구조로써 동축 프로브에 접속된 동축 선로의 종단은 단락되어 있으므로 정합용 동축 프로브를 통하여 전력이 추출된다. 동축 선로의 적절한 위치에 내부 도체와 외부 도체를 단락시키거나 개방 시킬 수 있는 스위치를 배치하여 선로 내의 스위치로 사용하면 선로의 단락 위치를 변화시킬 수 있다.

이처럼 전력 분배 스위치의 스위칭에 따라서 정합용 동축 프로브의 상태를 변화시키는 것으로 on상태와 off상태의 어느 경우에도 완전한 정합을 취할 수 있다.

2.2 정합용 동축 프로브의 어드미턴스

정합용 동축 프로브의 어드미턴스는 프로브에 접속한 동축선로의 길이에 따라 변화한다. 따라서 그림 2(a)에 보인 것처럼 도파관에 동축 프로브를 삽입한 모델에 대해서 3포트의 등가회로로 해석할 수 있다. 이러한 구조의 해석을 위한 등가회로를 그림 2(b)에 보였다. 등가회로의 Z_s , Z_p 는 동축 프로브의 임피던스를 나타내는 파라미터이다. 등가회로의 각 파라미터는 시뮬레이션을 통해서 얻은 S-파라미터를 사용하여 다음 식으로 부터 구할 수가 있다.

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

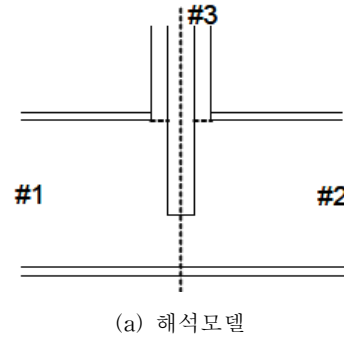
$$Z_{12} = \frac{2\sqrt{2}S_{31}}{(1-S_{11}-S_{21})(1-S_{33})-2S_{31}^2} \quad (2)$$

$$Z_{a1} = \frac{(1-S_{33})(1+S_{11}+S_{21})+2S_{31}^2-2\sqrt{2}S_{31}^2}{(1-S_{11}-S_{21})(1-S_{33})-2S_{31}^2} \quad (3)$$

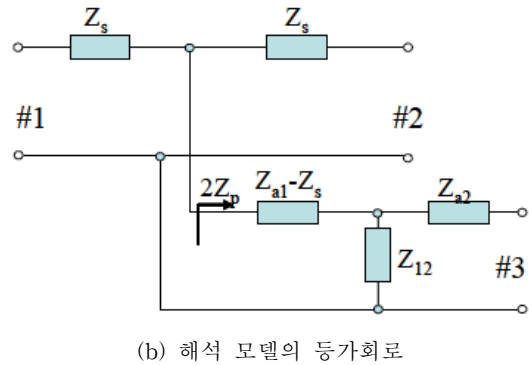
$$Z_{a1} = \frac{(1-S_{33})(1-S_{11}+S_{21})-2S_{31}^2-2\sqrt{2}S_{31}^2}{(1-S_{11}-S_{21})(1-S_{33})-2S_{31}^2} \quad (4)$$

정합용 동축 프로브는 그림 2(a)의 동축 선로의 종단을 단락시킨 구조로써 등가회로에서는 포트#3에 $Z_n = jZ_0 \tan \beta_l$ 로 되는 임피던스를 접속시킨 것과 동일이다. 이러한 값들을 사용하여 정합용 동축 프로브의 임피던스 Z_p 를 구하면,

$$Z_p = \frac{1}{2} \left[(Z_{a1} - Z_s) + \frac{Z_{12}(Z_{a2} + Z_n)}{Z_{12} + Z_{a2} + Z_n} \right] \quad (5)$$



(a) 해석모델



(b) 해석 모델의 등가회로

그림 2 정합용 동축 프로브의 해석모델과 등가회로

Fig. 2 Analysing model and equivalent circuit of the coaxial cable probe for matching.

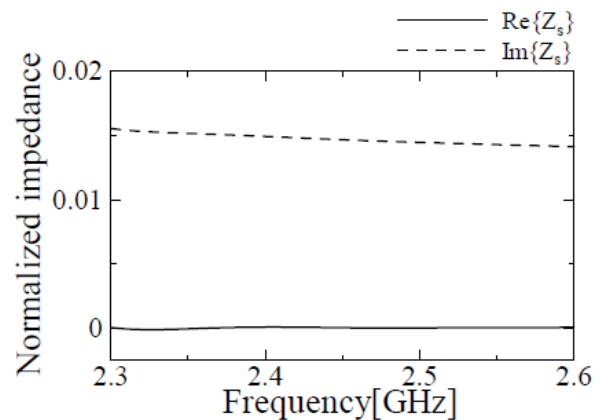


그림 3 정합용 프로브 직렬 임피던스

Fig. 3 Serial impedance of the probe for matching

가 된다. 실제로 실험에서 사용하는 정합용 동축 선로 프로브에 대하여 등가회로 해석에 의한 어드미턴스를 계산하였다. 프로브의 직렬성분인 Z_s 에 대한 계산 결과를 그림 3에 보였다. 사용되는 주파수 대역내에서 Z_s 값은 매우 작기 때문에 Z_s 의 영향은 거의 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 계산 결과를 반영하여 실제의 설계에서는 Z_s 가 전혀 없는 것으로 간주하고 설계할 수 있다. 동축 프로브의 병렬 어드미턴스에 대한 계산 결과를 그림 4에 보였다. 비교를 위해 정합용 동축 프로브를 시뮬레이션한 결과에서 반사특성을 사용하여 계산한 값을 같이 나타냈다.

두 경우 사이에 약간의 차이를 보이지만 거의 같은 정도

의 값을 보이고 있으므로 등가회로를 이용한 계산 결과가 매우 유용하다는 것을 알 수 있다. 또, 이러한 등가회로를 이용하여 설계함으로써, 식 (5)를 통하여 필요로 하는 어드미턴스를 얻을 수 있는 동축 선로의 길이 l 을 바로 산출해 낼 수 있기 때문에 스위치의 설계를 아주 간단하게 할 수 있다.

3. 스위치의 구조 설계

완전 정합형 전력 분배 스위치의 상면도와 등가회로를 그림 5에 보였다. 기본적인 구조는 저반사형 전력 분배 스위치와 유사한 모양이지만, 등가회로에서는 그림 5(b)와 같이 정합용 동축 프로브의 어드미턴스를 b_m 로 나타냈다. b_m 은 앞에서 설명한 등가회로 해석에 의해 구한 값이며 추출용 동

축 프로브에서 들여다 본 어드미턴스는 $y_n = g_n + jb_n$ 으로 나타냈다. on상태와 off상태에서

$$g_p + jb_p + g_n + jb_n = 1 \tag{6}$$

의 정합 조건을 만족할 수 있도록 각 파라미터 값을 결정하였으며, 추출되는 전력이 공급 전력의 1/2, 1/3, 1/4이 되는 3개의 스위치를 설계하였다. 추출하는 전력의 비율이 1/2인 경우의 어드미턴스 특성을 그림 6에 보였다. 계산의 결과를 보면 정합형에서는 2.45GHz의 주파수에서 on상태, off상태 어느 경우에서도 정합 조건을 만족하고, 또, $g_p = g_n = 0.5$ 의 요건을 만족 시키고 있다. 설계한 스위치의 반사특성을 그림 7에 보였다. 반사의 크기는 on상태와 off상태 어느 경우에도 -30dB 이하로서 거의 무반사 특성을 나타내고 있으며, 이 때 추출되는 전력의 비율은 50.2%로 설계시 예상한 결과를 보였다. 추출되는 전력의 비율을 1/3, 1/4로 설계한 경우에 대한 계산 결과를 각각 그림 8과 9에 보였다.

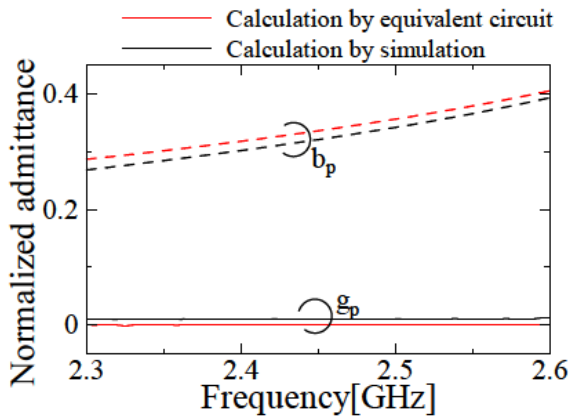


그림 4 정합용 프로브의 병렬 어드미턴스
Fig. 4 Parallel admittance of the matching probe

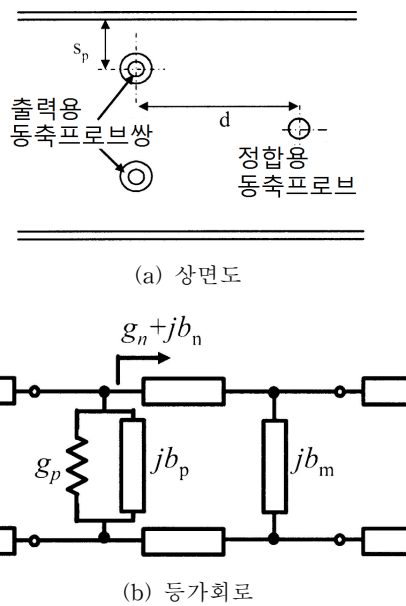
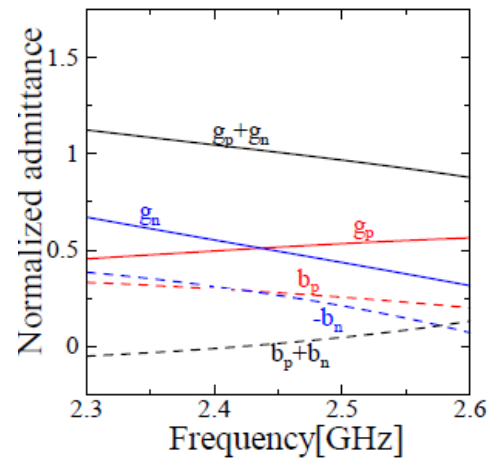
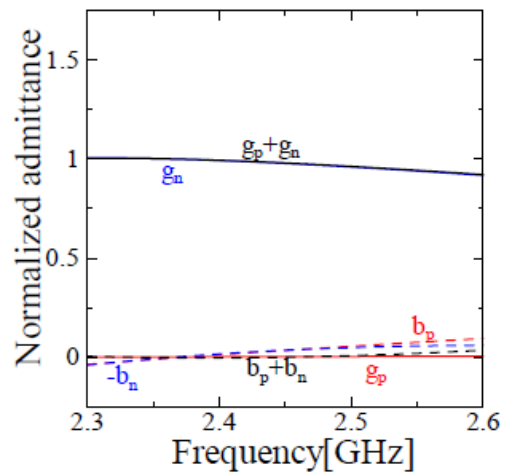


그림 5 정합형 전력 분배 스위치의 구조와 등가회로
Fig. 5 The structure and equivalent circuit of the matching-type power dividing switch



(a) on 상태



(b) off 상태

그림 6 분배 스위치의 어드미턴스 특성
Fig. 6 Admittance characteristics of the dividing switch

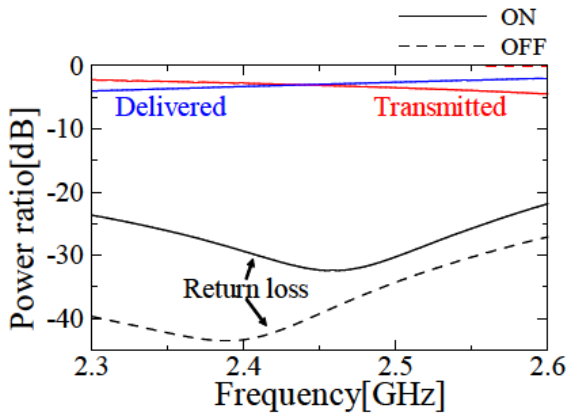


그림 7 유닛 #2의 전력전달 특성
Fig. 7 Power transmitting characteristics of the unit #2

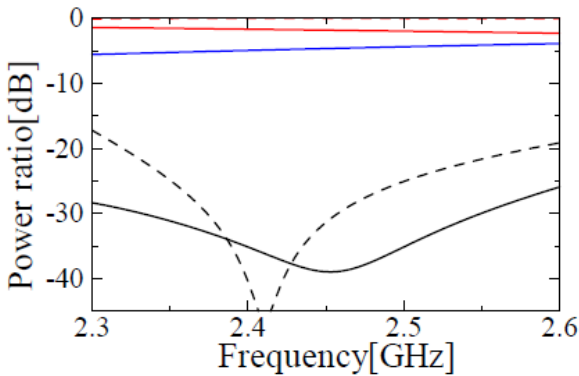


그림 8 유닛 #3의 전력전달 특성
Fig. 8 Power transmitting characteristics of the unit #3

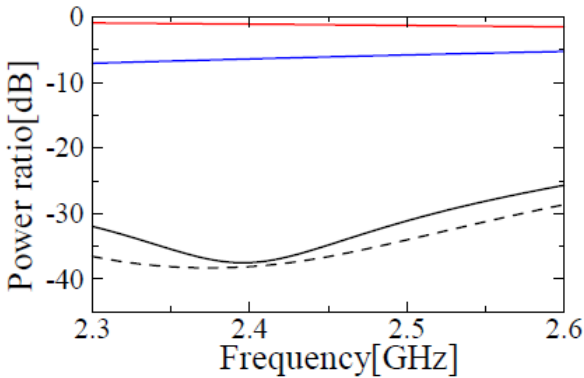


그림 9 유닛 #4의 전력전달 특성
Fig. 9 Power transmitting characteristics of the unit #4

추출하는 전력의 비율이 작을수록 반사되는 전력이 줄어드는 것을 알 수 있다. 표 2에 2.45GHz에서 추출량의 변화에 따른 각 스위치의 반사특성을 정리하였다. 세 가지 경우 모두 on상태와 off상태 어느 경우에도 -30dB 이하의 저반사를 나타내는 것으로 보아 추출되는 전력의 비율에 의존하지 않고 항상 정합을 취할 수 있는 분배 스위치의 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다.

이처럼 완전 정합형 전력 분배 스위치는 저반사형과 비교

하여 한층 더 저반사화가 가능하고 추출하는 전력의 비율을 자유롭게 조절할 수 있는 설계가 가능하다. 끝으로 표 2에 각 스위치의 설계 파라미터를 보였다. 여기서 정합용 동축 프로브의 삽입거리를 d_m , 도파관의 관벽에서 본 동축 선로의 단락 위치를 l_n 으로 나타냈다.

표 1 추출량이 다른 분배 스위치의 특성

Table 1 Characteristics of each switch by the difference of the output power ratio.

	추출량 [%]	on상태반사 [dB]	off상태반사 [dB]
unit#1	50.2	-32.3	-39.3
unit#2	33.9	-38.4	-31.3
unit#3	24.6	-34.8	-36.6

표 2 완전 정합형 스위치의 설계 파라미터

Table 2 Design parameters of the each matching-type switch.

	D	d_p	d_n	s_p	d	d_m	l_p	$l_n(\text{on})$	$l_n(\text{off})$
unit#1	9.0	19.0	8.0	20.0	43.5	20.0	20.0	5.6	20.6
unit#2	9.0	18.0	10.0	15.0	43.5	20.0	20.0	40.0	65.0
unit#3	9.0	16.0	9.0	16.0	47.0	20.0	19.0	32.0	20.0

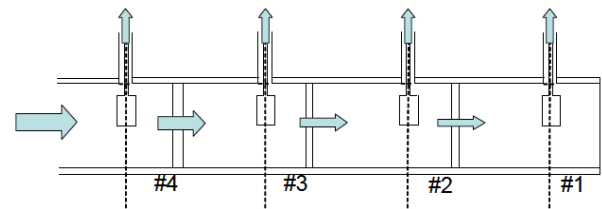


그림 10 각 스위치의 연결 구조
Fig. 10 Connecting structure of each switch

4. 스위치의 연결특성

완전 정합용으로 설계한 3개의 스위치를 그림 10처럼 연결하고 전체의 특성을 각 스위치의 S-파라미터를 사용하여 수치계산으로 산출하였다. 이러한 구조로 스위치를 배치하면 모든 스위치를 on상태로 하였을 때 같은 비율로 분배 된다.

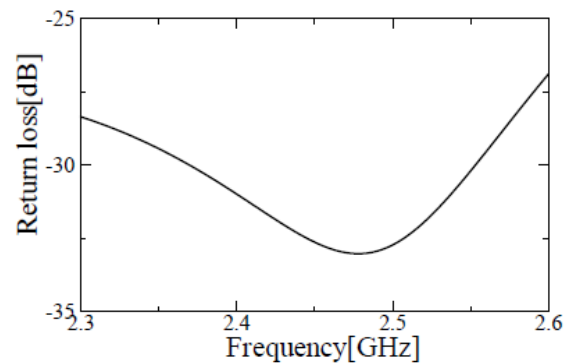
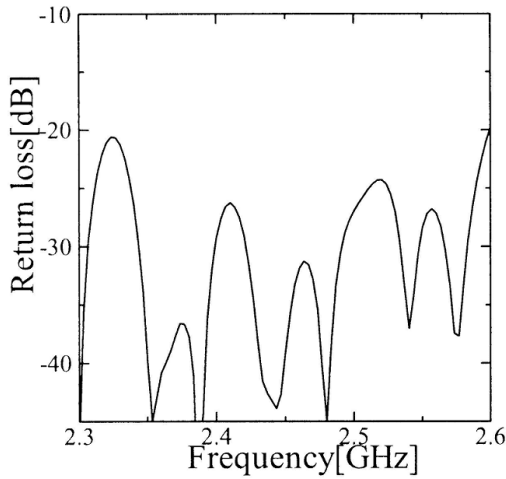
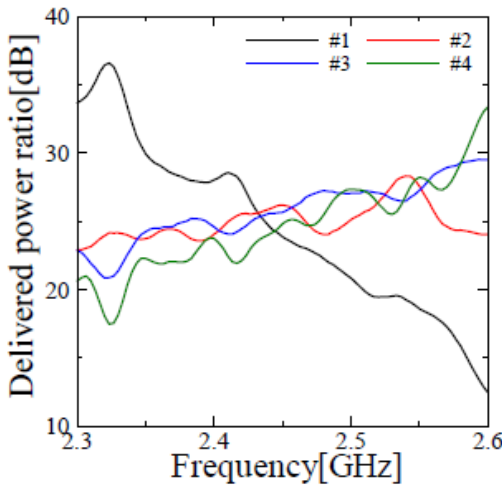


그림 11 유닛 #1의 반사손실 특성
Fig. 11 Reflecting loss characteristics of the unit #1



(a) 반사특성



(b) 추출전력의 비율

그림 12 모든 스위치가 on상태일 때의 특성

Fig. 12 The characteristics of the distributor for all of the switches are on state

저반사형과 동일하게 주파수에 대한 변화를 볼 수 있으나, 동작하는 주파수대에 있어서는 -20dB 이하이므로 변화 폭은 1% 이하 이었다[8]. 또, 각 스위치에서 추출하는 비율을 살펴보면 설계 주파수에서는 거의 같은 분배가 가능한 것을 알 수 있다. 각 스위치의 on상태와 off상태의 조합을

표 3 연결특성

Table 3 Connecting characteristics of each unit

case	반사[dB]	추출량 [%]			
		unit#1	unit#2	unit#3	unit#4
1	-38.9	23.9	26.2	25.7	24.8
2	-30.8	37.2	off	25.5	23.8
3	-36.6	43.7	38.6	off	24.6
4	-38.1	75.3	off	off	25.8
5	-37.9	32.9	33.8	33.2	off
6	-40.9	66.5	off	23.5	off
7	-33.9	49.4	50.6	off	off
8	-23.1	99.9	off	off	off

변화를 주면서 계산한 결과를 표 3에 정리하였다. 각각의 주파수 특성을 그림 12에 보였다. 조합되는 상태에 관계없이 반사의 크기는 1% 이하의 저반사 특성을 보였다. 추출하는 전력의 비율은 이론계산의 결과와 일치하였다. 그러나 종단 유니트 #1은 항상 on상태로 동작하므로 전력의 사용 상황에 따라서는 효율이 나쁜 경우도 있을 것이므로 실제의 시스템에 적용할 경우에는 보다 효율적인 사용을 위해서는 각 스위치의 전력 추출 비율과 배치를 조절할 필요가 있다.

5. 결 론

추출되는 전력의 비율이 증가하면 반사되는 전력의 비율이 증가하는 저반사형 전력 분배기의 단점을 개선할 수 있는 완전 정합형 전력 분배기를 설계하여 그 동작특성을 해석하였다. 저반사형의 경우 공급된 전력의 1/2의 추출을 목표로 한 설계에서 추출전력의 비율이 42.2%에서 on상태와 off상태 모두 -17dB의 반사가 한계였으나, 완전 정합형에서는 같은 조건에서 추출되는 전력이 50.2%로 설계에서 예상한 것과 일치하는 결과를 얻었으며, 이때의 반사전력도 -30dB 이하로 아주 우수한 저반사가 실현되었다. 또, 추출 비율을 1/3, 1/4로 설계한 경우에도 반사전력의 크기가 on상태, off상태 모두 -30dB 이하의 저반사 특성을 보여, 완전 정합형은 추출되는 전력의 비율에 관계없이 저반사의 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 3개의 스위치를 직렬로 연결하여 스위치의 동작 조건을 변화시킨 결과 조합되는 상태에 관계없이 1% 이하의 저반사 특성을 보였다. 현장에서 실내 마이크로파 전력 분배기를 도입할 경우, 완전 정합형은 저반사형에 비하여 구조가 복잡하므로 제작비 높아지는 단점이 있으므로 스위치를 조합할 경우 분배되는 전력의 비율에 따라 저반사형과 완전 정합형을 병행하여 연결하면 시스템의 설치 비용을 절감할 수 있을 것이다.

References

- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Y. K. Choi, "Low Loss Power Dividing Switch for Indoor Microwave Power Distribution", KIEE Trans. vol. 62. no. 1, pp. 90-94, Jan. 2013.

저 자 소 개



최 영 규 (崔 泳 圭)

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

Email : ykchoi@silla.ac.kr