

## 균일한 임피던스 전송선로 길이 조정을 통한 비대칭 Bagley 분배기

# Unequal Bagley Divider based on Uniform Characteristic Impedance Transmission Lines with Adjustment Electrical Lengths

윤영철<sup>1</sup> · 홍성욱<sup>1</sup> · 김 영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>가톨릭관동대학교 전자공학과

<sup>2</sup>금오공과대학교 전자공학부

Young-Chul Yoon<sup>1</sup> · Soung-Wook Hong<sup>1</sup> · Young Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University, Gangwon-do, 25601, Korea

<sup>2</sup>School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

### [요 약]

본 논문은 균일한 임피던스를 갖는 출력 포트사이 전송선로의 전기적 길이를 다르게 함으로서 비대칭 Bagley 분배기 설계에 대한 내용을 서술하였다. 이 분배기는 입력 포트와 연결된 출력 포트의 전기적 길이만을 조정하여 출력 포트에 원하는 임피던스의 출력 비율을 얻을 수 있고, 모든 전송선로의 특성 임피던스는 균일한 것이 특징이다. 이러한 설계 방법을 사용하면 비대칭 출력을 얻을 수 있음에도 출력포트에는 임피던스 변환기를 사용하지 않는다. 이것을 증명하기 위해서 동작주파수 2 GHz에서 1:2:1 비율의 3차와 2:3:4:3:2 비율의 5차 비대칭 Bagley 분배기를 시뮬레이션과 제작하였다. 측정 결과는 시뮬레이션과 동일함을 확인하였다.

### [Abstract]

This paper describes an unequal Bagley divider using uniform transmission lines with adjustment electrical lengths between output ports. To obtain an arbitrary dividing ratio of Bagley divider, we have only adjusted the electrical lengths of the transmission line between output ports. All the transmission lines have the same characteristic impedance value. This design method does not require an impedance transformer for port matching. For verification, we simulated and fabricated a 3-way, 1:2:1 and 5-way, 2:3:4:3:2 ratio Bagley divider with an operating frequency of 2 GHz. The experimental results are in agreement with the simulated results.

**Key word** : Bagley divider, Electrical length adjustment, Unequal, Uniform transmission line.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.3.287>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 10 May 2017; Revised 16 May 2017  
Accepted (Publication) 19 June 2017 (30 June 2017)

Corresponding Author; Young Kim

Tel: +82-54-478-7506

E-mail: youngk@kumoh.ac.kr

## 1. 서론

전력 분배기는 무선 시스템에서 사용되는 가장 기본적인 요소이다. 이것은 믹서, 전력증폭기, 선형화기 및 안테나 시스템에 사용되고 있으며 여기에 사용되는 분배기는 대칭 또는 비대칭 특성을 갖고 있다. 특히 비대칭 분배기의 경우에는 출력 포트에 분배되는 전력의 분배 비율에 따라서 높은 임피던스 값을 갖는 전송선로가 필요하다.

높은 임피던스 전송선로는 마이크로스트립 기술로 구현할 때 좁은 선폭 때문에 특정 임피던스 이상의 전송선로를 구현하는 것이 불가능하다. 이러한 높은 임피던스 값을 갖는 전송선로 구현은 electromagnetic band gap (EBG) [1], 쇼트된 커플드 라인 [2], defected ground structure (DGS) [3], 그리고, grooved 물질 [4]등을 이용하여 만들 수 있다.

최근에 구현된 비대칭 분배기[5]는 임의의 출력 분배비율을 얻기 위해서 입력과 출력 포트 사이의 전송선로의 전기적 길이만을 조정하여 구현하였다. 이때 전송선로는 모두 같은 특성 임피던스 값을 갖고 있다. 이러한 종류의 비대칭 분배기 구현 연구 사례는 서로 다른 임피던스 값과 세 종류의 전기적 길이를 갖는 윌킨슨 분배기 [6], 분배기의 고립 저항에 개방 스테르브를 연결한 구조 [7], 같은 임피던스 전송선로로 고립 저항을 연결하는 구조 [8] 그리고 다른 임피던스 전송선로로 고립 저항을 연결하는 구조 [9]등이 있다.

같은 분배 비율을 갖는 Bagley 분배기[10]는 입력과 출력 사이에는  $N/4$ 의 전송선로 그리고 출력과 출력 사이에는  $N/2$ 의 전송선로로 연결되는 구조로 구성이 되어있다. 또한, 전송선로의 임피던스는  $N$ 개의 출력 포트를 기준으로  $2Z_0/\sqrt{N}$ 의 임피던스 값을 갖고 있다. 또한, 비대칭 분배 비율을 갖는 Bagley 분배기[11]는 대칭 분배기와 같은 길이의 전송선로를 사용하고 분배 비율에 따라서 임피던스 값이 변화함으로써 분배비율이 크면 전송선로의 임피던스 값을 구현하는데 어려움이 존재한다.

본 논문에서는 비대칭 분배비율을 갖는 Bagley 분배기를 구현함에 있어서 입력과 출력 그리고 출력과 출력 사이의 전송선로의 전기적인 길이만을 조정하여 비대칭 분배 비율을 만족하고 이때 사용된 전송선로는 일정한 특성 임피던스 값을 갖는 분배기를 구현하였다. 또한, 이 설계 방법으로 구현된 분배기는 출력 포트의 정합에 필요한 임피던스 변환기는 필요가 없는 구조이다.

## II. Bagley 분배기 설계

### 2-1 3-way 비대칭 분배기

그림 1은 3-way 비대칭 Bagley 분배기의 블록도와 등가회로를 나타낸 것이다.

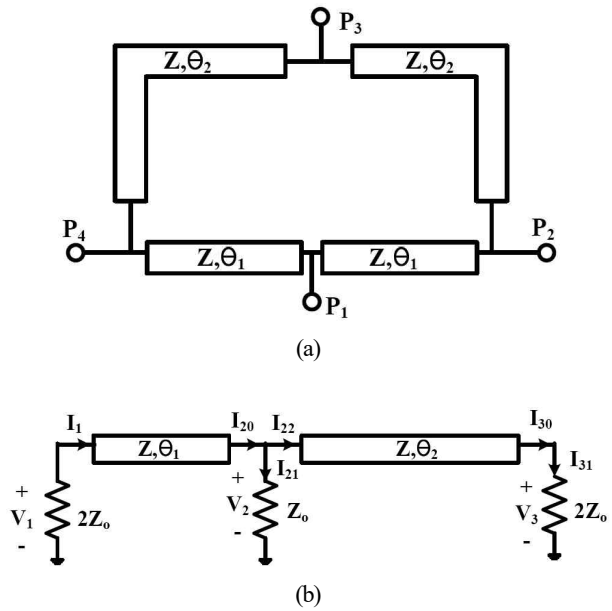


그림 1. 3-way Bagley 분배기의 (a) 구성도 (b) 등가회로  
 Fig. 1. 3-way Bagley divider (a) Configuration (b) Equivalent circuit.

이것에 대한 해석[12]을 수행하면 다음과 같은 삽입 손실과 분배기의 전기적 길이를 구할 수 있다.

$$S_{21} = \frac{V_2}{V_1} = -j \frac{Z}{2Z_0} \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \tag{1}$$

$$S_{31} = \frac{V_3}{V_1} = \frac{-j \frac{Z}{2Z_0} \sin \theta_1 + \cos \theta_1}{j \frac{Z}{2Z_0} \sin \theta_2 + \cos \theta_2} \tag{2}$$

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \sqrt{\frac{1 - M_3}{1 - K_3^2}} \right) \tag{3}$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \sqrt{\frac{1 - M_3/N_3}{1 - K_3^2}} \right) \tag{4}$$

여기서  $K_3 = Z/2Z_0$ , 포트 2의 전력은  $M_3$ , 포트 3의 전력은  $N_3$  이다.

### 2-2 5-way 비대칭 분배기

그림 2 (a)는 5-way 비대칭 Bagley 분배기의 구성도를 표시했고, 그림 2 (b)는 포트 1에서 시작한 5-way Bagley 비대칭 분배기의 등가회로를 나타낸 것이다.

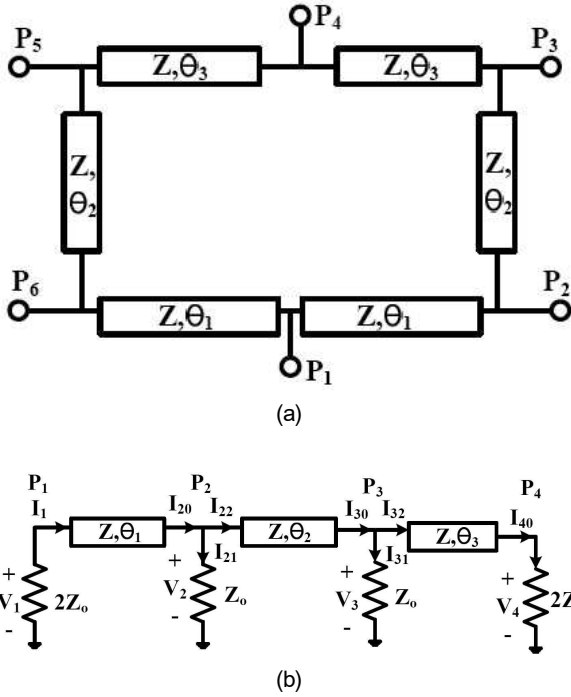


그림 2. 5-way Bagley 분배기의 (a) 구성도 (b) 등가회로  
 Fig. 2. 5-way Bagley divider (a) Configuration  
 (b) Equivalent circuit.

먼저, 포트 1에서 KCL을 적용하면 다음을 만족한다.

$$I_1 = \frac{V_1}{2Z_0} \quad (5)$$

이때, 식 (5)는 포트 1에서의 정합 조건이다 ( $S_{11} = 0$ ). 또한, 포트 1과 포트 2에서 관련 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & jZ \sin \theta_1 \\ jY \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$I_{20} = I_{21} + I_{22}, \quad I_{21} = \frac{V_2}{Z_0} \quad (7)$$

다음으로 포트 2와 포트 3 사이에서 관련 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & jZ \sin \theta_2 \\ jY \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_3 \\ I_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$I_{30} = I_{31} + I_{32}, \quad I_{31} = \frac{V_3}{Z_0} \quad (9)$$

마지막으로 포트 3와 포트 4 사이에서 관련 식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} V_3 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & jZ \sin \theta_3 \\ jY \sin \theta_3 & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_4 \\ I_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$I_{30} = I_{31} = \frac{V_4}{2Z_0} \quad (11)$$

위의 식에서 (5) ~ (7)을 연립하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$S_{21} = \frac{V_2}{V_1} = -j \frac{Z}{2Z_0} \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \quad (12)$$

또, 위의 식에서 (5) ~ (9)를 연립하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$S_{31} = \cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{2} \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 - j \frac{Z}{2Z_0} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (13)$$

마지막으로 식 (5) ~ (11)을 연립하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$S_{41} = \frac{\cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{2} \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 - j \frac{Z}{2Z_0} \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\cos \theta_3 + j \frac{Z}{2Z_0} \sin \theta_3} \quad (14)$$

이때, 출력 전력의 비를 다음과 같이 정의한다.

$$|S_{21}|^2 : |S_{31}|^2 : |S_{41}|^2 = M_5 : N_5 : L_5 \quad (15)$$

$$K_5 = \frac{Z}{2Z_0} \quad (16)$$

이것을 이용하여 각 포트 사이의 전기적 길이를 구하면 다음과 같다.

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left( \sqrt{\frac{1 - M_5}{1 - K_5^2}} \right) \quad (17)$$

$$\theta_2 = \cot^{-1} \left( \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \right) \quad (18)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left( \sqrt{\frac{1 - N_5/L_5}{1 - K_5^2}} \right) \quad (19)$$

여기서  $A = b^2 + d^2 - N_5$  ,  $B = ab - cd$  ,  
 $C = a^2 + c^2 - N_5$  이며,  $a = -\sin\theta_1 + \frac{1}{2}\left(\frac{Z}{Z_0}\right)^2 \sin\theta_1$  ,  
 $b = \cos\theta_1$  ,  $c = \frac{Z\cos\theta_1}{2Z_0}$  ,  $d = \frac{Z\sin\theta_1}{2Z_0}$  이다.

### III. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 설계 방법의 유용성을 확인하기 위하여 동작 주파수 2 GHz에서 같은 특성 임피던스 값의 전송선로와 포트 사이의 전기적인 길이를 다르게 갖는 1:2:1 3-way 와 2:3:4:3:2 5-way의 Bagley 분배기를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 분배기를 설계하는데 있어서 선로의 특성 임피던스 값은  $Z = 40 \Omega$  그리고  $Z_0 = 50 \Omega$ 로 설정하였다. 1:2:1 3-way 분배기는 전력 분배 비율에 따라서  $M_3 = \frac{1}{4}$  ,  $N_3 = \frac{1}{2}$  그리고  $K_3 = 0.4$ 로 계산되었고, 2:3:4:3:2 5-way 분배기에서 전력 분배 비율은  $M_5 = \frac{1}{7}$  ,  $N_5 = \frac{3}{14}$  ,  $L_5 = \frac{2}{7}$  그리고  $K_5 = 0.4$ 로 계산되었다. 이러한 값을 이용하여 식 (3), (4), (17) ~ (19)를 이용하여 전기적 길이를 계산한 결과를 표 1에 나타내었다.

여기서 사용된 시뮬레이션 소프트웨어는 NI 사의 Microwave Office를 사용하였다. 또한, 사용된 PCB는 Taconix사의 TLX-9 으로, 유전율  $\epsilon_r = 2.5$ , 유전체 두께  $h = 0.787 \text{ mm}$  , 동박 두께는  $t = 0.035 \text{ mm}$ 인 PCB를 사용하였고, 중심 주파수는 2 GHz 로 설계를 하였다.

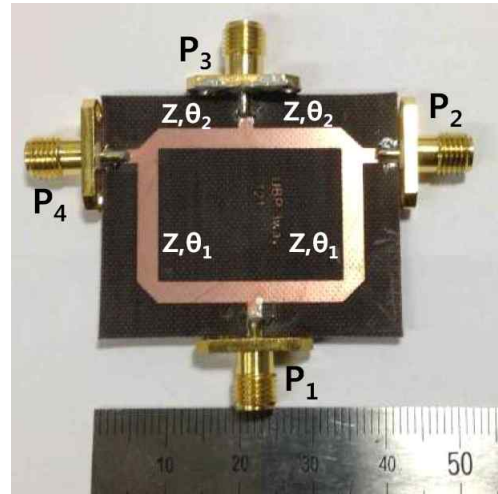
이렇게 구한 전기적 길이를 사용하여 특정 임피던스 전송선로를 이용하여 제작된 3-/5-way Bagley 분배기 PCB 사진은 그림 3에 나타내었다.

그림 4 (a)는 제안된 1:2:1 3-way Bagley 분배기의 시뮬레이션과 측정결과의 삽입손실을 비교하여 나타낸 것이다. 중심 주파수 2.0 GHz에서 시뮬레이션의 결과는  $|S_{21}| = 6.2 \text{ dB}$ ,  $|S_{31}| = 2.8 \text{ dB}$ ,  $|S_{41}| = 6.2 \text{ dB}$ 를, 측정 결과는  $|S_{21}| = 6.1 \text{ dB}$ ,  $|S_{31}| = 2.75 \text{ dB}$ ,  $|S_{41}| = 6.1 \text{ dB}$ 의 값을 나타내고 있으며 두 결과가 거의 동일함을 보여주고 있다. 또, 그림 4 (b)는 시뮬레이션과 측정결과의 반사손실과 고립도를 비교한 그래프로, 반사손실과 고립도 특성 역시 시뮬레이션과 측정결과가 유사한 것을 볼 수 있다. 이 때 중심주파수에서  $|S_{11}| = 19.8 \text{ dB}$ ,  $|S_{22}| = 7.4 \text{ dB}$  ,  $|S_{33}| = 6.5 \text{ dB}$ ,  $|S_{44}| = 8.1 \text{ dB}$ , 그리고  $|S_{32}| = 9.3 \text{ dB}$ 의 결과를 얻었다.

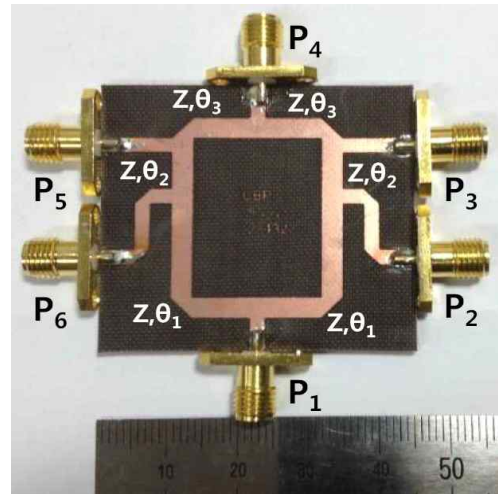
그림 5 (a)는 제안된 2:3:4:3:2 5-way Bagley 분배기의 시뮬레이션과 측정결과의 삽입손실을 비교하여 나타낸 것이다. 중심 주파수 2.0 GHz에서 시뮬레이션의 결과는  $|S_{21}| = 8.27 \text{ dB}$ ,  $|S_{31}| = 7.13 \text{ dB}$ ,  $|S_{41}| = 5.08 \text{ dB}$ ,  $|S_{51}| = 7.13 \text{ dB}$  그리고  $|S_{61}| = 8.27 \text{ dB}$ 를 얻었고, 제작된 PCB의 측정 결과

표 1. 3-/5-way Bagley분배기의 계산된 전기적 길이  
 Table 1. Calculated electrical lengths of 3-/5-way Bagley divider.

	$\Theta_1$ (degree)	$\Theta_2$ (degree)	$\Theta_3$ (degree)
3-way	109.11	50.49	-
5-way	90	21.4	38.06



(a)



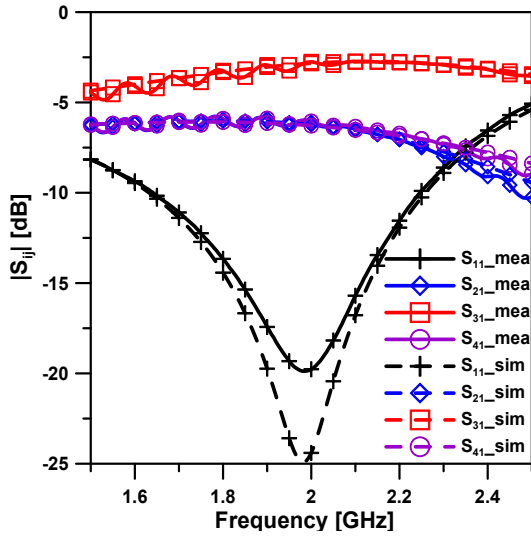
(b)

그림 3. (a) 제작된 3-way 비대칭 Bagley 분배기 사진  
 (b) 제작된 5-way 비대칭 Bagley 분배기 사진

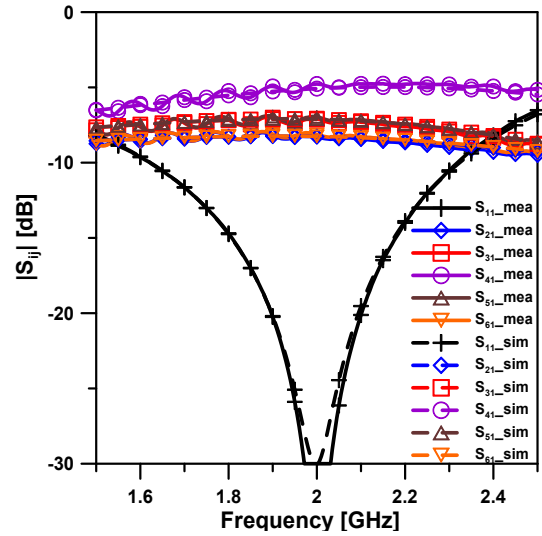
Fig. 3. (a) Photograph of 3-way fabricated unequal Bagley divider (b) Photograph of 5-way fabricated unequal Bagley divider.

는  $|S_{21}| = 8.27 \text{ dB}$ ,  $|S_{31}| = 7.09 \text{ dB}$  ,  $|S_{41}| = 4.78 \text{ dB}$ ,  $|S_{51}| = 7.0 \text{ dB}$  그리고  $|S_{61}| = 8.12 \text{ dB}$ 의 값을 나타내고 있으며 두 결과가 거의 동일함을 보여주고 있다.

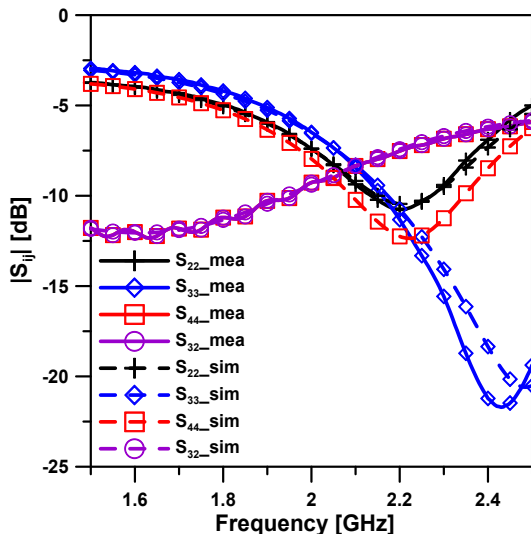
또, 그림 5 (b)는 시뮬레이션과 측정결과의 반사손실과



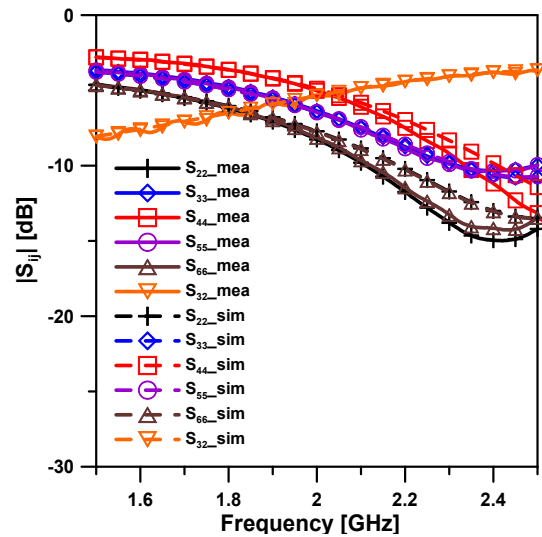
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 4. 1:2:1 3-way Bagley 분배기의 시뮬레이션과 측정 결과 (a) 삽입 손실 (b) 반사 손실과 고립도

Fig. 4. Measured and simulated results of 1:2:1 3-way Bagley divider (a) insertion loss (b) return loss and isolation.

그림 5. 2:3:4:3:2 5-way Bagley 분배기의 시뮬레이션과 측정 결과 (a) 삽입 손실 (b) 반사 손실과 고립도

Fig. 5. Measured and simulated results of 2:3:4:3:2 5-way Bagley divider (a) insertion loss (b) return loss and isolation.

고립도를 비교한 그래프로, 반사손실과 고립도 특성 역시 시뮬레이션과 측정결과가 유사한 것을 볼 수 있다. 이 때 중심주파수에서  $|S_{11}| = 38.6$  dB,  $|S_{22}| = 8.3$  dB,  $|S_{33}| = 6.4$  dB,  $|S_{44}| = 5.0$  dB,  $|S_{55}| = 6.5$  dB,  $|S_{66}| = 8.2$  dB,  $|S_{32}| = 5.3$  dB의 결과를 얻었다.

표 1에서 나타낸 전기적 길이는 기존의 3-way Bagley 분배기가  $\theta_{con} = 540^\circ$  인 것과 비교하여 본 논문의 전기적 길이는  $\theta_{proposed} = 319.2^\circ$  로 59 %의 크기로 줄어들었음을 알 수 있으며, 또한 5-way 분배기는 기존 분배기 대비 33.2 %로 작게 설계 되어 있음을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문은 임의의 분배 비율을 갖는 특정 임피던스 전송선로를 이용한 Bagley 분배기를 나타내었다. 임의의 분배 비율을 얻기 위해서 포트 사이의 전기적인 길이만을 조정하여 얻을 수 있었고, 분배 비율에 따른 출력 포트에서의 임피던스 변환기를 사용하지 않았다. 또한, 이러한 설계 방법으로 기존 Bagley 분배기 대비 3-way 분배기는 41 %, 5-way 비대칭 분배기는 67%의 크기를 줄 일 수 있었다.

이렇게 설계된 분배기는 중심주파수 2 GHz에서 시뮬레

이선으로 설계된 값과 동일한 실험결과를 얻었다.

## References

- [1] Y. J. Ko, J. Y. Park, and J. U. Bu, "Fully integrated unequal Wilkinson power divider with EBG CPW," *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, Vol. 13, No. 7, pp. 276-278, Jul. 2003.
- [2] Y. T. Chen, P. H. Deng, B. L. Chen, W. Lo, and T. H. Hsieh, "Design of microstrip out-of-phase power divider using shorted-coupled-line transformer," in *Proceeding of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference*, Nanjing: China, Dec. 2005.
- [3] J. S. Lim, S. W. Lee, C. S. Kim, J. S. Park, D. Ahn, and S. W. Nam, "A 4:1 unequal Wilkinson power divider," *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, Vol. 11, No. 3, pp. 124-126, Mar. 2001.
- [4] M. Moradian and H. Oraizi, "Application of grooved substrates for design of unequal Wilkinson power dividers," *IET Electronics Letters*, Vol. 44, No. 1, pp. 32-33, Jan. 2008.
- [5] M. J. Park and B. J. Lee, "Design of ring couplers for arbitrary power division with 50  $\Omega$  lines," *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, Vol. 21, No. 4, pp. 185-187, Apr. 2011.
- [6] K. K. M. Cheng, and P. W. Li, "A novel power divider design with unequal power dividing ratio and simple layout," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, No. 6, pp. 1589-1594, Jun. 2009.
- [7] Y. Z. Zhu, X. J. Zhang, X. F. Wu, C. Li, and G. Y. Fang, "Novel Wilkinson power divider with uniform impedance line," in *Proceeding of the 2008 Asia-Pacific Microwave Conference*, Macau: China, Dec. 2008.
- [8] S. Horst, R. Bairavasubramanian, M. M. Tentzeris, and J. Papapolymerou, "Modified Wilkinson power dividers for millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, No. 11, pp. 2439-2446, Nov. 2007.
- [9] T. Qi, S. He, Z. Dai, and W. Shi, "Novel unequal power divider with 50  $\Omega$  characteristic impedance lines," *IEEE Microwave Wireless Components Letters*, Vol. 26, No. 3, pp. 180-182, Mar. 2016.
- [10] I. Sakagami, T. Wuren, M. Fujii, and Y. Tomoda, "A new type of multi-way microwave power divider based on Bagley polygon power divider," in *Proceeding of the 2006 Asia-Pacific Microwave Conference*, Yokohama: Japan, Dec. 2006.
- [11] O. A. Alnadi, N. Dib, K. Al-Shamaileh, and A. Sheta, "Design and analysis of unequal split Bagley power dividers," *International Journal of Electronics*, Vol. 102, No. 3, pp. 500-513, Apr. 2014.
- [12] Y. Kim, "Unequal Bagley power divider using uniform transmission lines," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium(PIERS)*, St Petersburg: Russia, May 2017.



### 윤영철 (Young-Chul Yoon)

1978년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
 1982년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 1989년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)  
 1987년 9월 ~ 현재 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 교수  
 ※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로설계



### 홍성욱 (Soung-Wook Hong)

1995년 2월 : 부경대학교 물리학과 (공학사)  
 2006년 2월 : 부경대학교 대학원 음향진동학과 (공학석사)  
 2017년 3월 ~ : 가톨릭관동대학교 대학원 전자공학과 박사과정  
 2013년 7월 ~ 현재 : 아이소닉스 대표  
 ※ 관심분야 : Sonar 시스템



**김 영 (Young Kim)**

1988년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사),

2002년 8월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)

1988년 1월 ~ 1993년 5월 : 이즈텔 시스템즈(주) 연구소 선임연구원

1993년 6월 ~ 1998년 2월 : 삼성전자(주) 정보통신사업본부 선임연구원

1998년 3월 ~ 2003년 2월 : 두원공과대학 정보통신과 조교수

2003년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수

※ 관심분야 : RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계