

논문 2009-46TC-6-15

집중소자를 이용한 새로운 윌킨슨 전력 분배기

(New Wilkinson Power Divider Using Lumped Elements)

조 승 현*, 박 찬 형**, 정 인 영**, 정 진 호**

(Seung-Hyun Cho, Chan Hyeong Park, In-Young Chung, and Jinho Jeong)

요 약

본 논문에서는 집중소자를 이용한 새로운 윌킨슨 전력 분배기를 제안한다. 제안된 구조는 기존 구조보다 임피던스 변환 과정에서 낮은 Q-지수를 가지도록 설계되어 우수한 대역폭 특성을 갖는다. 또한, 보다 작은 수의 집중소자를 사용하여 회로의 크기를 더욱 줄일 수 있다. 제안된 구조는 L-형태의 임피던스 정합회로를 사용하였으며 이에 대한 설계 방정식을 유도하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 구조는 기존 구조보다 임피던스 정합과 격리도에서 대역폭이 50% 우수하였고, 삽입손실은 줄어드는 장점이 있었다. 기존 구조와 제안된 구조의 집중소자 윌킨슨 전력 분배기는 중심주파수 2 GHz에서 설계, 제작 및 측정되었다. 측정 결과, 제안된 구조는 중심 주파수에서 입력 반사계수(S_{11})는 -23.0 dB, 격리도(S_{23})는 -29.0 dB, 삽입손실(S_{21})은 -3.12 dB 등의 우수한 특성을 보였으며 기존 구조보다 넓은 대역폭을 보임을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a new lumped Wilkinson power divider which is designed to have lower quality-factors in the impedance transformation. Therefore, it can provide wider bandwidth than the conventional one. Moreover, the proposed power divider consists of fewer number of elements so that the circuit size can be further reduced. Simulation results show that the proposed lumped power divider allows a 50 % wider bandwidth in the return loss and isolation performance. The conventional and new Wilkinson power was designed and fabricated based on the derived equations at 2.0 GHz. In the measurement, the proposed divider achieved a good performance with an input return loss (S_{11}) of -23.0 dB, an isolation (S_{23}) of -29.0 dB and an insertion loss (S_{21}) of -3.12 dB at the design frequency with wider bandwidth than the conventional one.

Keywords : bandwidth, lumped elements, Wilkinson power divider.

I. 서 론

전력 분배와 전력 결합의 기능을 하는 전력 분배기는 가장 기본적인 마이크로파 회로 중의 하나이다. 일반적인 3-단자 전력 분배기는 모든 단자에서 임피던스 정합, 두 출력 단 사이에서의 격리도 (isolation), 낮은 삽입 손실 특성을 만족시켜야 한다. 그림 1은 이러한 특성을 모두 만족시키는 가장 일반적인 전력 분배기인 윌킨슨 전력 분배기를 보여준다^[1]. 특성 임피던스가

$\sqrt{2}Z_0$ 이고 길이가 $\lambda/4$ 인 두 전송선과 $2Z_0$ 의 저항으로 구성되어 있다. 회로의 대칭성을 이용한 우 모드, 기 모드 해석을 통하여 윌킨슨 전력 분배기의 S-파라미터를 다음의 수식 (1)과 같이 구할 수 있다^[1].

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = -\frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

하지만 이와 같은 일반적인 윌킨슨 전력 분배기는 $\lambda/4$ 길이의 전송선으로 인하여 회로의 크기가 큰 단점이 있다. 이는 회로의 소형화와 집적화에 치명적인 문제점을 야기하며, 결과적으로 제작비용의 증가를 가져온다. 따라서 윌킨슨 전력 분배기의 특성을 유지하면서

* 학생회원, ** 평생회원, 광운대학교 전자통신공학과

(Kwangwoon University)

접수일자: 2009년2월18일, 수정완료일: 2009년6월17일

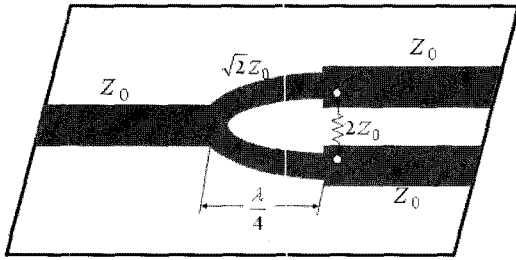


그림 1. 마이크로스트립으로 구성된 윌킨슨 전력 분배기^[1].

Fig. 1. Wilkinson power divider in a microstrip form^[1].

회로 크기를 줄이기 위한 여러 연구가 진행되어 왔다. 가장 일반적인 방법은 전송선을 인덕터, 커패시터와 같은 집중소자로 대체하는 것이다^[2-5]. 전송선에 비해 상대적으로 크기가 작은 집중소자를 사용하면 전체 회로를 크게 감소시킬 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 기존에 제안된 집중소자 윌킨슨 전력 분배기보다 더욱 발전된 새로운 구조를 소개한다. 먼저 기존에 제안되어 온 여러 방식들에 대하여 서술하고 새롭게 제안된 방식의 구조를 설명한 후 시뮬레이션을 통해 그 특성을 비교하여 제안된 구조의 우수성을 서술한다. 마지막으로 기존 구조와 새로운 집중소자 윌킨슨 전력 분배기를 직접 제작하여 측정된 결과를 제시하여 특성을 비교한다. 모든 설계는 2.0 GHz를 중심주파수로 하여 이루어졌다.

II. 본 론

1. 집중소자를 이용한 기존의 3-dB 전력 분배기

윌킨슨 전력 분배기의 물리적 크기를 줄이기 위해 여러 가지 방법이 제안되어 왔다. 그 중의 한 방법으로서

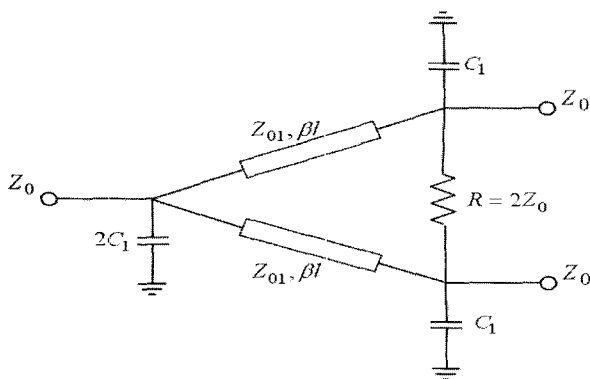


그림 2. 캐패시터를 이용한 윌킨슨 전력 분배기^[4].

Fig. 2. Wilkinson power divider using capacitive loading^[4].

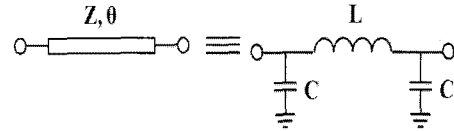


그림 3. π -네트워크를 이용한 전송선의 집중소자 등가화^[2].

Fig. 3. Lumped element equivalent circuit of transmission line using π -network^[2].

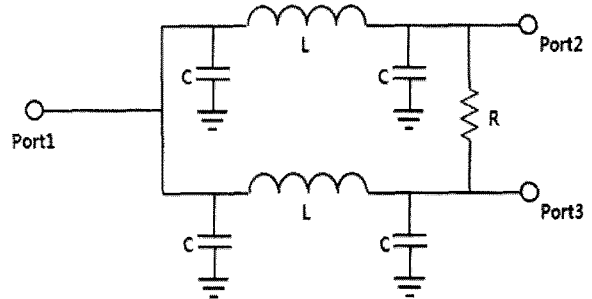


그림 4. 기존 집중소자 윌킨슨 전력 분배기^[5].

Fig. 4. Conventional lumped Wilkinson power divider^[5].

그림 2는 입출력 단에 캐패시터를 연결하여 필요한 전송선의 길이를 줄이는 방법을 보여주고 있다^[4]. 하지만 이 구조 역시 남아있는 전송선의 길이로 인해 크기가 작지 않다는 문제점이 있다.

위의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 $C-L-C$ 의 π -network를 이용하여 $\lambda/4$ -전송선을 다음과 같이 집중소자로 등가화 하는 방법이 있다^[2]. 그림 3의 L, C 값은 ABCD matrix를 이용하여 구할 수가 있고, 중심주파수 f 에서 $\theta = \lambda/4$ 일 때 그 계산식은 다음과 같이 수식 (2)로 나타낼 수 있다^[2].

$$L = \frac{Z}{\omega}, C = \frac{1}{\omega Z} \quad (2)$$

식 (2)의 계산식을 바탕으로 집중소자 윌킨슨 전력 분배기를 그림 4와 같이 구현할 수 있다^[5].

그림 4의 L, C 값은 식 (2)을 통해 $L = \sqrt{2}(Z_0/\omega), C = 1/(\sqrt{2}\omega Z_0)$ 로 계산된다. 이 구조는 모든 구성 소자를 집중소자로 구현하므로 회로의 크기를 효과적으로 줄일 수 있다.

하지만, 이 구조는 전송선으로 이루어진 전력 분배기에 비해 대역폭이 좁을 뿐 아니라, 집중소자의 손실로 인하여 삽입손실이 높다는 단점이 있다^[3, 7].

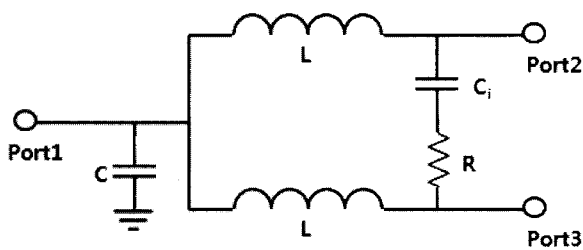
2. 새로운 구조의 집중소자 윌킨슨 전력 분배기

본 연구에서는 그림 4의 구조를 바탕으로 필요한 집

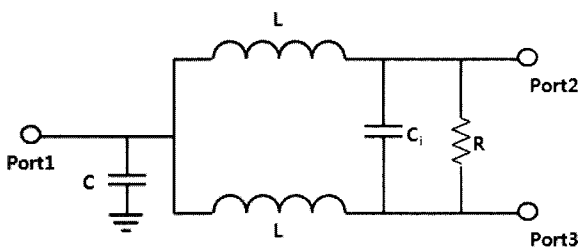
중소자 개수를 줄이고, 이 구조의 단점으로 지목되어 왔던 좁은 대역폭 문제, 높은 삽입손실 문제를 해결하는 새로운 구조의 윌킨슨 전력 분배기를 제안한다. 그림 5는 제안된 새로운 구조의 집중소자 윌킨슨 전력 분배기를 보여준다^[8]. 이 구조는 기존의 π -네트워크 구조와는 다르게, 캐패시터 C 와 인덕터 L 이 L 자 모양으로 연결된 L -네트워크로 구성되어 있다. 이 L -네트워크로 단자 1에서의 임피던스 정합을 이루며, 단자 2와 단자 3 사이에 커패시터(C_i)와 저항(R)을 직렬(그림 5(a)) 또는 병렬(그림 5(b))로 연결하여 단자 2, 단자 3에서의 임피던스 정합과 격리도 특성을 얻도록 하였다.

3-단자 전력 분배기의 조건인 각 단자에서의 임피던스 정합, 단자 2와 단자 3간의 격리도 특성을 갖도록 하는 L, C, C_i, R 의 값을 유도하기 위하여 우 모드, 기 모드 해석을 적용한다. 먼저 그림 5 (a)의 구조를 살펴보자. 그림 5(a)의 단자 2에 신호가 인가되었을 때 이 구조에 대한 우 모드 및 기 모드 등가회로가 제시되어 있다. 각각에 대하여 단자 2에서 임피던스 정합이 되어야 한다. 이 조건으로부터 L, C, C_i, R 의 계산식을 아래 수식과 같이 구할 수 있다.

$$L = \frac{Z_0}{\omega} \tag{3}$$



(a)



(b)

그림 5. 새로운 집중소자 윌킨슨 전력 분배기. 격리회로: (a) 직렬 형태 (b) 병렬 형태.

Fig. 5. New lumped Wilkinson power divider. Isolation network: (a) series type (b) parallel type.

$$C = \frac{1}{\omega Z_0} \tag{4}$$

$$C_i = \frac{1}{\omega Z_0} \tag{5}$$

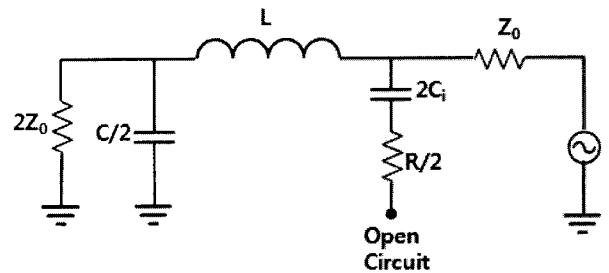
$$R = Z_0 \tag{6}$$

식 (3)~(6)은 각 단자에서의 임피던스 정합, 두 출력 단 사이의 격리도, 두 출력 단으로 3-dB 전력 분배가 가능케 하여 3-단자 전력 분배기의 조건을 모두 만족시키게 한다. 그림 5(b)처럼 격리회로의 R 과 C_i 가 병렬로 연결되어 있는 경우, 그림 6과 동일한 방법으로 우 모드, 기 모드 해석을 통하여 다음과 같은 수식을 유도할 수 있다.

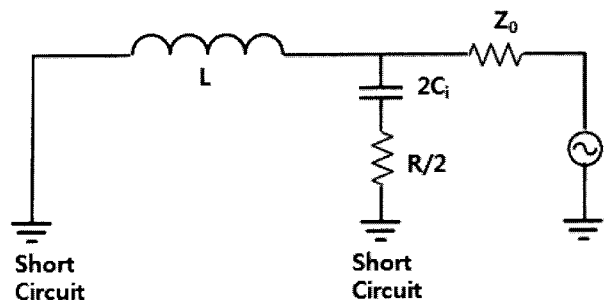
$$L = \frac{Z_0}{\omega} \tag{7}$$

$$C = \frac{1}{\omega Z_0} \tag{8}$$

$$C_i = \frac{1}{2\omega Z_0} \tag{9}$$



(a)



(b)

그림 6. 그림 5(a) 회로의 우 모드 및 기 모드 등가회로. (a) 우 모드 (b) 기 모드.

Fig. 6. Even-mode and odd-mode equivalent circuit of Fig. 5(a). (a) even-mode (b) odd-mode.

$$R = 2Z_0 \tag{10}$$

제안된 두 구조 그림 5(a)와 (b)의 특성을 비교하기 위하여 2.0 GHz에서 두 구조를 설계하였다. 아래 표 1은 위의 식 (3)~(10)을 토대로 2.0 GHz에서 계산된 각 소자 값을 나타낸다. 표 1의 소자 값을 토대로 그림 5의 직렬 형태와 병렬 형태, 두 경우를 Agilent ADS(Advanced Design System)를 사용하여 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 비교해 보았다.

그림 7(a)에서 단자 2에서의 반사손실(S_{22})를 보면
 표 1. 2 GHz에서 계산된 새로운 구조(그림 5)의 소자 값

Table 1. Element values of Fig. 5 at 2 GHz.

	$L(nH)$	$C(pF)$	$C_i(pF)$	$R(\Omega)$
그림 5 (a)	3.978	1.591	1.591	50
그림 5 (b)	3.978	1.591	0.795	100

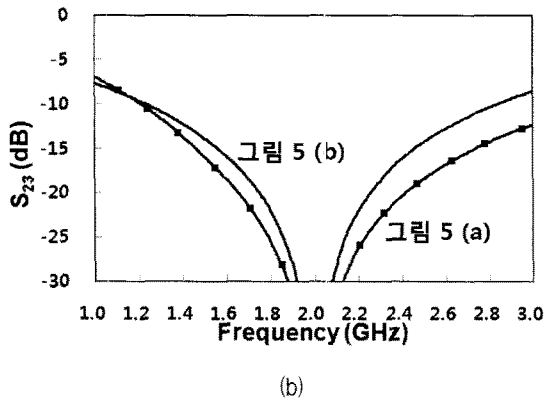
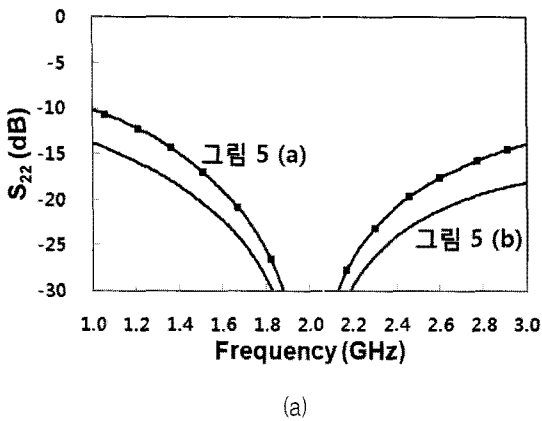


그림 7. 그림 5(a)와 (b) 구조의 시뮬레이션 특성 비교.
 (a) 단자 2에서의 반사손실 (S_{22}) (b) 격리도 (S_{23})

Fig. 7. Simulation comparator of the circuits in Fig. 5 (a) and (b). (a) return loss at port 2 (S_{22}) (b) isolation(S_{23}).

병렬 구조의 대역폭이 더 넓지만, 그림 7(b)의 격리도 특성(S_{23})의 경우에는 직렬 구조의 대역폭이 약 0.4 GHz 정도 더 넓다는 것을 확인할 수 있다 (-15 dB 기준). 이러한 경우 좁은 대역폭의 S-파라미터가 회로 전체의 대역폭을 결정하는 특성상 전체 전력 분배기의 대역폭은 그림 5 (a)의 직렬 형태가 더 넓다고 할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 그림 5 (a) 구조를 설계 및 제작 추정한다.

3. 기존 구조와 새로운 구조의 특성 비교

제안된 구조(그림 5(a))와 기존 구조(그림 4)의 특성을 시뮬레이션을 통해 비교할 수 있다. 그림 4의 각 소자 값은 식(2)을 바탕으로 계산할 수 있으며 표 2는 중심 주파수 2.0 GHz에서의 계산 값을 나타낸다.

표 1과 2를 비교해 보면 알 수 있듯이 새로운 구조가 기존 구조에 비하여 낮은 인덕턴스 값을 가진다. 인덕턴스 값이 높을 수록 칩 인덕터의 자기공진 주파수 (self-resonating frequency)를 감안할 때, 이는 새로운 구조가 높은 주파수에서 유리함을 의미한다.

그림 8은 기존 구조(그림 4)와 제안된 구조(그림 5(a))의 시뮬레이션 특성을 비교하여 보여준다. 그림 8(a), (b)에서 제안된 전력 분배기가 임피던스 정합 (S_{11})과 격리도(S_{23})에서 약 50 % 정도 우수한 대역폭 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 집중소자로 윌킨슨 전력분배기를 구현할 시에 나타나는 가장 큰 문제 중의 하나인 대역폭 문제를 크게 개선시킨 것이다. 뿐만 아니라 삽입손실(S_{21})의 대역폭 특성도 보다 우수하다는 것을 그림 8(c)을 통해 확인할 수 있다.

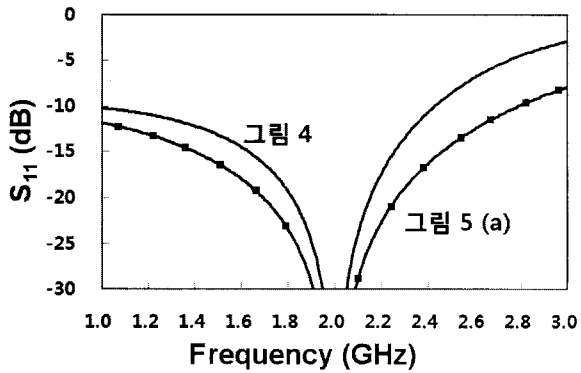
윌킨슨 전력 분배기는 기본적으로 임피던스 변환회로이다. 임피던스 정합 과정에서 Q -지수가 낮은 값을 유지하고 있을 때 더 광대역 특성을 보인다^[1]. 제안된 전력분배기가 우수한 대역폭 특성을 보이는 것은 회로의 임피던스 정합에 사용된 $C-L$ 의 L -네트워크이 기존의 $C-L-C$ 의 π -네트워크에 비하여 임피던스 정합 과정에서 더 낮은 Q -지수를 유지하기 때문이다.

그림 9는 제안된 전력 분배기 (그림 5(b))의 전체 S-

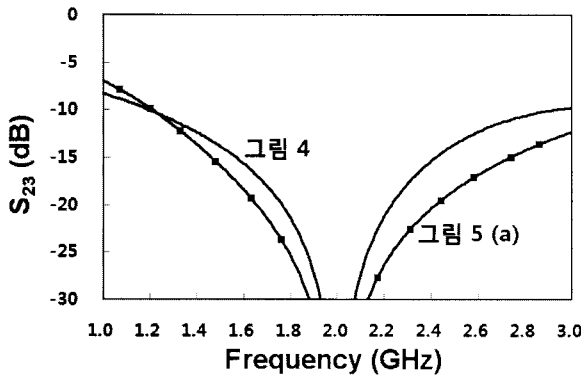
표 2. 2 GHz에서 계산된 기존 구조 (그림 4)의 소자 값

Table 2. Element values of Fig. 4 at 2 GHz.

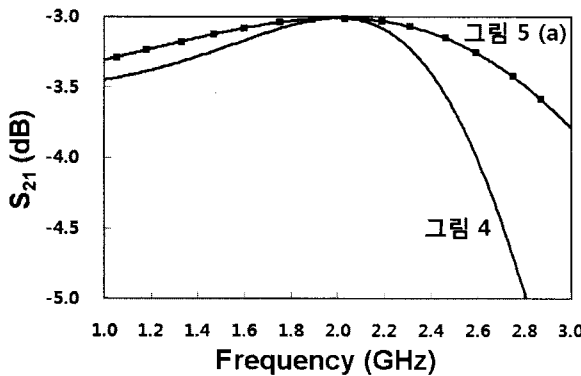
f_0	$L(nH)$	$C(pF)$	$R(\Omega)$
2 GHz	5.627	1.125	100



(a)



(b)



(c)

그림 8. 기존 윌킨슨 전력분배기(그림 4)와 제안된 윌킨슨 전력분배기(그림 5(a))의 시뮬레이션 특성 비교. (a) 입력 반사손실(S_{11}) (b) 격리도(S_{23}) (c) 삽입손실(S_{21})

Fig. 8. Comparisons of the simulated performance between the conventional and the proposed power divider. (a) input return loss(S_{11}) (b) isolation(S_{23}) (c) insertion loss(S_{21})

파라미터를 보여준다. 이 시뮬레이션은 표 1에 제시된 이상적인 값과 가장 가까운 값을 가지는 실제 칩 소자를 사용하여 수행하였다. S_{31} , S_{33} 의 경우 각각 S_{21} , S_{22} 와 같은 결과가 나왔으므로 편의상 생략하였다.

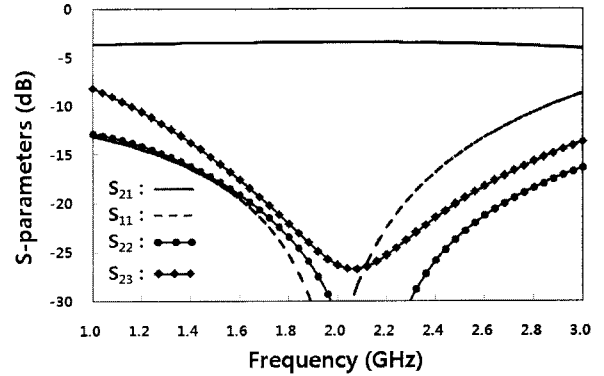


그림 9. 제안된 전력 분배기의 시뮬레이션 특성. (그림 5 (b))

Fig. 9. Simulated performance of the proposed power divider. (Fig. 5 (b)).

III. 실험

새롭게 제안된 회로는 유전상수 2.55, 기판 두께 0.508 mm, 구리 두께 18 μm 의 teflon 기판에서 제작하였다. 제작에 사용된 소자는 $1.6 \times 0.8 \text{ mm}^2$ 크기의 칩 소자로서, $L = 3.9 \text{ nH}$, $C = 1.5 \text{ pF}$, $C_i = 1.5 \text{ pF}$, $R = 51 \Omega$ 의 값을 갖는다.

그림 10은 제작된 회로의 사진을 보여준다. 입력단에 연결되어 있는 커패시터의 경우 기판과 소자와의 기생(parasitic) 효과를 최소화하기 위하여 비아홀(via hole)을 뚫어 그 속에 삽입하여 그라운드와 연결하였다. 네트워 분석기(network analyzer)를 사용하여 제작된 회로의 S-파라미터를 측정하였으며 그림 11은 측정 결과를 보여준다.

그림 11의 측정 결과를 분석해보면, 단자 2에서의 반사손실(S_{22})의 정합 주파수가 설계 주파수 2.0 GHz로

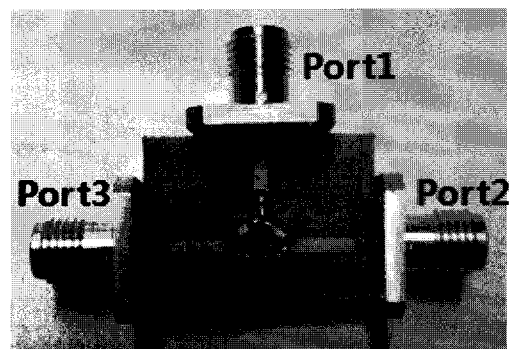


그림 10. 제작된 집중소자 윌킨슨 전력 분배기.
Fig. 10. Fabricated lumped Wilkinson power divider.

부터 약 0.3 GHz 정도 떨어진 1.7 GHz에 위치하며 약 -29.0 dB 정도의 값을 가진다. 입력 임피던스 매칭(S_{11})의 경우 -23.0 dB의 값을 가졌으며, 격리도 특성(S_{23})의 경우 역시 -29.0 dB의 우수한 특성을 보였다. 삽입 손실(S_{21})은 약 -3.1 dB로 역시 우수하였다.

중심 주파수가 이렇게 낮아진 이유는 제작에 사용된 칩 소자의 제작 공정상의 오차와 측정을 위해 소자 연결에 사용된 마이크로스트립 라인의 영향 때문으로 시뮬레이션을 통해서 알 수 있었다. 이러한 문제점은 이론값과 매우 근사한 소자를 사용하거나 마이크로스트립 라인이 필요 없는 집적 회로에서 구현된다면 충분히 극복할 수 있는 부분이라고 생각한다.

그림 11의 측정 결과 값을 토대로 기존의 전력 분배기와 제안된 전력 분배기의 특성을 비교하기 위해 그림 4의 기존 전력 분배기를 제작하였다. 제작에는 앞에서와 동일한 종류의 기판과 소자를 사용하였고 각 소자는 $L=5.6nH$, $C=1pF$, $R=100\Omega$ 의 값을 갖는다. 다음 그림 12는 제작된 기존 전력 분배기(그림 4)와 제안된 전력 분배기(그림 5(a))의 측정 결과를 비교한 것이다.

그림 12 (a)의 S_{11} 특성을 보면 -15 dB 기준으로 비교 하였을 때 제안된 구조가 더 넓은 대역폭 특성을 보이며 임피던스 정합 특성이 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 12 (b)의 S_{23} 의 경우, 그림 8(b)의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 제안된 구조의 대역폭이 기존의 구조에 비해서 약 50 % 정도 증가되었다 (-15 dB 기준). 그림 12 (c)의 S_{21} 의 경우에도 제안된 구조의 삽입

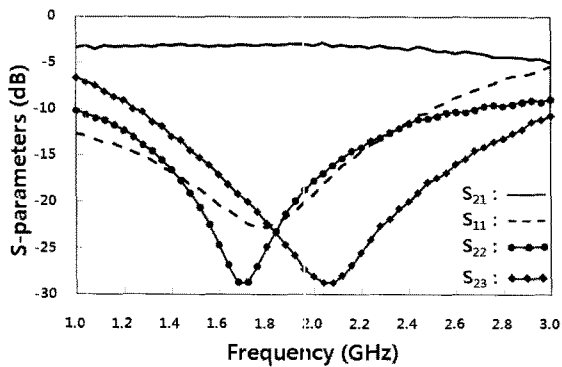
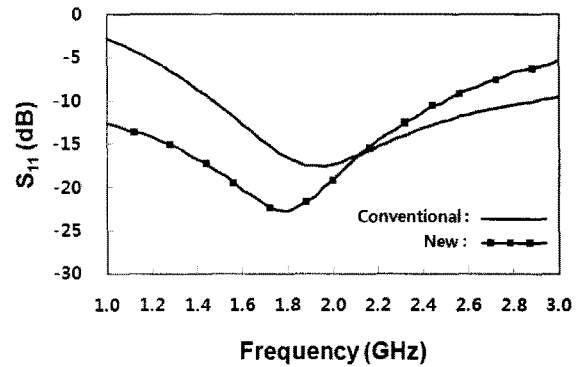
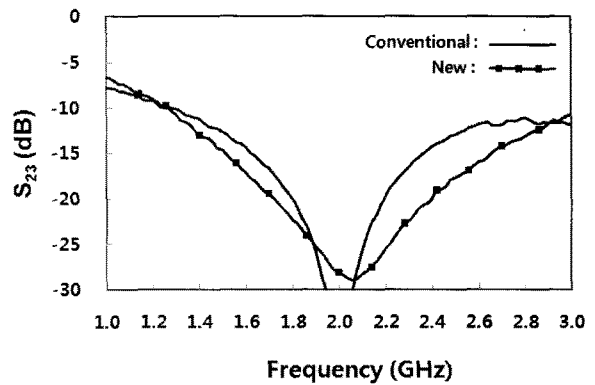


그림 11. 제작된 집중소자 윌킨슨 전력 분배기 측정 결과.

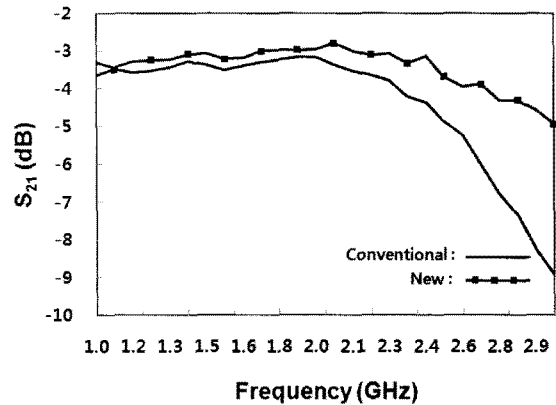
Fig. 11. Measured performance of the fabricated lumped Wilkinson power divider.



(a)



(b)



(c)

그림 12. 기존 전력 분배기(그림4)와 제안된 전력 분배기(그림 5 (a))의 측정 결과 특성 비교. (a) S_{11} (b) S_{23} (c) S_{21}

Fig. 12. Comparisons of the measured performance between the conventional and the proposed power divider. (a) S_{11} (b) S_{23} (c) S_{21}

손실이 중심주파수인 2.0 GHz에서 0.3 dB 우수하며 대역폭도 더 넓은 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기존에 연구되어왔던 것보다 발전된 새로운 구조의 집중소자 윌킨슨 전력 분배기를 설계 및 제작하였다. 기존의 π -네트워크 대신 L -네트워크를 이용하여 임피던스 정합을 하였으며, 이 구조는 보다 낮은 Q -지수를 가지게 되어 더 광대역 특성을 보였다. 뿐만 아니라 고주파에 민감한 인덕터 값을 낮추어 자기공진 영향을 줄일 수 있다.

제안된 구조는 소형으로 제작이 가능하면서 기존 구조보다 낮은 삽입손실과 넓은 대역폭 특성을 가지게 때문에 RF 집적회로 등에 효과적으로 사용될 수 있으리라 기대한다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd Ed., pp.363-368, John Wiley & Sons, Inc., 1998.

[2] H. S. Nagi, "Miniature lumped element 180° Wilkinson divider," IEEE MTT-s Digest, pp. 55-58, 2003.

[3] I. D. Robertson and S. Lucyszyn, RF and MMIC design and technology, The Institution of Electrical Engineers, 2001.

[4] B. Piernas and M. Hirata, "Enhanced Miniaturized Wilkinson Power Divider," IEEE MTT-s Digest, pp. 1255-1258, 2003.

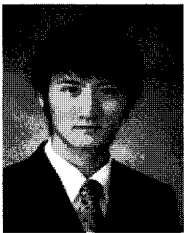
[5] L. Lu, P. Bhattacharya and Linda P. B. Katehi, "X-band and K-band lumped Wilkinson power dividers with a micromachined technology," IEEE MTT-s Digest, pp. 287-290, 2000.

[6] K. Chang, Handbook of RF/Microwave Components and Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2003.

[7] P. Vizmuller, RF Design Guide: Systems, Circuits, and Equations, Artech House, 1995.

[8] 조승현, 정진호, "Lumped elements를 이용한 새로운 Wilkinson power divider에 관한 연구", 한국통신학회 하계종합학술발표회, vol. 37, pp. 309, 제주도, 대한민국, 2008년 7월.

저 자 소 개



조 승 현(학생회원)
2008년 광운대학교 전파공학과
학사 졸업.
2008년 2월~현재 광운대학교
전자통신공학과
석사 과정.

<주관심분야 : RF system, RF power Amplifier, MMIC, 초고주파 회로설계>



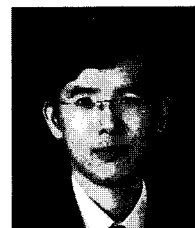
박 찬 형(평생회원)
1992년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1994년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
2000년 서울대학교 전자공학과
박사 졸업.

2000년~2003년 MIT(Massachusetts Institute of Technology). Visiting Scientist.
2003년~현재 광운대학교 전자통신공학과 부교수
<주관심분야 : 반도체 소자 및 집적회로 잡음 모델링, 나노 전자 및 광소자 해석 및 설계, Carrier transport>



정 인 영(평생회원)
1994년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.
1996년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
2000년 서울대학교 전자공학과
박사 졸업.

2000년~2004년 삼성전자 메모리사업부
책임연구원.
2004년~2008년 경상대학교 전자공학과 조교수
2008년~현재 광운대학교 전자통신공학과 부교수
<주관심분야 : 메모리 소자 및 회로 설계, 저전력 집적회로, 바이오 센서 소자 및 회로 설계>



정 진 호(평생회원)
1997년 서울대학교 전기공학부
학사 졸업
1999년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.
2004년 서울대학교 전자공학과
박사 졸업.

2004년~2007년 University of California, San Diego Post-Doc
2007년~현재 광운대학교 전자통신공학과 조교수
<주관심분야 : RF power amplifiers, MMIC, RFIC, Microwave transistor modeling, power combiners>