

## 골판지를 이용한 마이크로파 브랜치 라인 커플러 설계

조성희\*<sup>1</sup>, 임종식\*<sup>2</sup>, 손성호\*\*<sup>3</sup>, 김동민\*\*\*<sup>4</sup>, 윤원상\*\*\*\*<sup>5</sup>, 한상민\*\*\*\*\*<sup>6</sup>, 안달\*<sup>3</sup>

### Design of a Microwave Branch Line Hybrid Coupler using Corrugated Cardboards

Sunghee Cho\*<sup>1</sup>, Jongsik Lim\*<sup>2</sup>, Seong-Ho Son\*\*<sup>3</sup>, Dong Min Kim\*\*\*<sup>4</sup>, Won-Sang Yoon\*\*\*\*<sup>5</sup>, Sang-Min Han\*\*\*\*\*<sup>6</sup>, and Dal Ahn\*<sup>3</sup>

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(과제번호 2021-0-00731)과 2022학년도 순천향대학교 교수 연구년제 지원에 의하여 연구하였음

#### 요약

본 논문에서는 골판지 종이로 마이크로파 회로의 프로토타입을 신속하게 저가로 설계 및 제작하는 연구 결과를 기술한다. 골판지의 비유전율을 실험적으로 결정하기 위하여 어렵고 복잡한 전자기와 이론이 기대는 대신 의도적으로 시행착오를 겪기 위한 경험적 선행실험 과정을 거친다. 실험적으로 추출한 골판지의 비유전율(1.3)을 검증하기 위하여 마이크로파 전송선로를 설계하고, 대표적인 마이크로파 회로 가운데 하나인 브랜치 라인 하이브리드 커플러 회로를 설계한다. 한 예로써, 중심주파수 1GHz에서 설계한 브랜치 라인 하이브리드 커플러 회로는 -3.39dB, -3.81dB의 전력분배, -25.37dB의 단자 정합, -25.46dB의 격리도 특성, 88.92도의 출력간 위상차 특성을 가진다.

#### Abstract

A study to design and implement prototype microwave circuits very rapidly and cheaply using corrugated cardboard is described in this paper. In order to obtain the practical dielectric constant of the adopted corrugated cardboard, an empirical trial and error of design is experienced intentionally instead of relying on extremely difficult and complicated electromagnetic theories. The extracted relative permittivity(1.3) of the corrugated cardboard is adopted to design microwave transmission lines, and the branch line hybrid coupler which is one of widely used microwave circuits for wireless systems. As an example, the fabricated hybrid coupler at 1GHz shows the power division of -3.39dB and -3.81dB, -25.37dB of port matching, -25.46dB of isolation, and 88.92o of phase difference.

#### Keywords

microwave, branch line hybrid coupler, corrugated cardboard

\* 순천향대학교 전기공학과(\*<sup>2</sup> 교신저자)  
- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-9100-1815>  
- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-8728-4979>  
- ORCID<sup>3</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-0556-0771>  
\*\* 순천향대학교 기계공학과 교수  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1343-1806>  
\*\*\* 순천향대학교 사물인터넷학과 교수  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0019-6379>  
\*\*\*\* 호서대학교 전자디스플레이공학부 교수  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1125-384X>

\*\*\*\*\* 순천향대학교 정보통신공학과 교수  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7521-6661>

• Received: Apr. 11, 2022, Revised: Jul. 01, 2022, Accepted: Jul. 04, 2022  
• Corresponding Author: Jongsik Lim  
Department of Electrical Engineering, Soonchunhyang University  
Soonchunhyang-ro 22, Shinchang-myeon, Asan-si, Chungnam, Korea  
Tel.: +82-41-530-1332, Email: [jslim@sch.ac.kr](mailto:jslim@sch.ac.kr)

## 1. 서 론

무선통신 및 각종 무선시스템을 하드웨어적으로 구성하기 위해서는 마이크로파 대역용 무선회로들이 먼저 설계되어야 한다. 마이크로파 회로들이 제 역할을 하기 위해서는 전송선로 단계부터 매우 정교한 설계 및 제작이 이루어져야 한다. 물리적으로는 유전체 기판상에 필요한 회로 패턴들이 구현되어 기능적으로 요구되는 각 역할을 하게 된다.

마이크로파 회로를 구성하는 핵심요소가 전송선로인데, 대표적으로 마이크로스트립 전송선로(Microstrip transmission lines)가 널리 사용된다[1]-[3]. 그림 1은 마이크로스트립 전송선로의 구조를 보여준다. 유전체의 두께가  $H$ 이고 비유전율(Relative permittivity) 또는 유전 상수(Dielectric constant)가  $\epsilon_r$ 인 유전체 기판(Dielectric substrate)이 먼저 존재한다. 여기에 두께가  $T$ 인 금속 박막이 마이크로파 대역에서 어떠한 특성 임피던스(Characteristic impedance)  $Z_c[\Omega]$ 를 갖기 위해 선폭  $W$ 로 구현된다.  $T$ 가 전송 특성에 미치는 영향은 미미하므로  $T$ 는 크게 고려하지 않아도 괜찮다. 한편, 바닥면은 박막 금속면으로 도포되어 접지 평면의 역할을 한다.

그러나 그림 1과 같이 비교적 간단한 구조의 전송선로라고 하더라도 구현과정에서 필요한  $Z_c$ 를 구현하기 위하여 고도의 설계 과정과 복잡한 전자기학 이론 및 상당한 수준의 정밀도가 요구되는 고가의 제작 환경을 요구한다. 마이크로파 대역에서는 금속 패턴 치수의 정밀도가 매우 높아야 원하는 주파수에서 회로 성능을 보장할 수 있기 때문이다.

연구환경이 상대적으로 열악한 소규모의 연구팀이나 대학실험실 수준의 연구환경에서, 해당 분야의 어떤 좋은 회로적 아이디어를 정교한 전송선로 패턴으로 구현하여 검증하려면 시간적, 경제적으로 부담이 클 수밖에 없다. 그러므로 연구 단계에서 생성되는 어떤 회로적 목표를 신속하고도 저렴하고 쉽게 검증할 방법이 있다면 큰 도움이 될 것이다. 이런 방법의 하나가 종이 재질을 유전체 기판으로 이용하는 것인데, 마이크로파 대역의 전송선로나 안테나 분야에서 종이 기판을 이용한 연구 사례가 발표된 적이 있다[4]-[7].

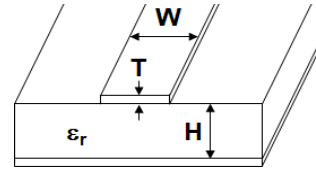


그림 1. 마이크로스트립 선로의 구조  
Fig. 1. Structure of microstrip lines

본 논문에서는 이러한 배경을 바탕으로, 일상생활에서 널리 쓰이고 있어서 쉽게 구할 수 있는 골판지(Corrugated cardboards)를 마이크로파 유전체 기판으로 선택하여 마이크로파 대역에서 전송선로를 설계하고, 더 나아가 이를 이용하여 마이크로파 회로를 설계한 연구 결과를 제시한다.

원래 정석대로라면 매우 복잡하고 어려운 전자기학의 이론을 바탕으로 어떤 주어진 유전체 기판에 대한 전송선로를 설계해야 한다[3][4][8]. 그러나 골판지의 구조적 특징상 정밀한 해석이 곤란할 정도로 가변적이고 연약한(Soft) 구조를 지니고 있어서 정밀한 이론적 분석에 대한 공학적 실익이 매우 미미하다. 그래서 본 연구에서는 의도적으로 시행착오를 위한 사전실험 과정을 먼저 거쳐서, 실제 사용 조건에서 타당한 골판지 기판의 실제적 비유전율을 실험적으로 추출한다. 그리고 이를 이용하여 전송선로를 설계하고, 이어서 널리 사용되는 마이크로파 회로 가운데 하나인 브랜치 라인 하이브리드 커플러(BLHC, Branch Line Hybrid Coupler)를 설계하고 측정하여 본 논문의 방법을 검증한다[9][10].

본 논문에서는 먼저 골판지 기판에 대한 개요를 설명한 후, 의도적인 시행착오를 위한 실험과정을 겪어 골판지 기판의 실제 사용 조건에서의 비유전율이 결정되는 과정을 기술한다. 이어서 마이크로스트립 전송선로와 마이크로파 대역 BLHC를 설계하고, 제작 및 측정된 결과를 기술한다. 본 논문을 통하여 연구환경이 다소 열악한 소규모 연구조직들에게, 마이크로파 회로의 프로토타입(Prototype)을 매우 저가이면서도 신속하게 구현하는 방법을 제공할 수 있을 것이다.

## II. 골판지 기판의 실험적 비유전율 추정

### 2.1 기판의 비유전율에 대한 일반적 고찰

유전체 기판(Dielectric substrate)을 이용하여 그림 1과 같은 마이크로파 전송선로를 설계하기 위해서는 먼저 기판의 유전 상수와 두께를 알아야 한다. 고가의 정밀 설계 및 제작에서는 단위 길이당 손실과 밀접한 관련이 있는 손실 탄젠트( $\tan\delta$ , Loss Tangent)도 고려 대상이다. 그러나 어떤 회로적 아이디어에 대한 프로토타입을 신속하게 제작할 때는 일정 부분 발생하는 손실을 감수해야 하므로 본 논문에서는 미세한 손실까지는 고려하지 않는다.

물리적 특성 정보가 잘 알려진 어떤 유전체 기판에 대해 마이크로파 전송선로를 설계하기 위해서는 고도의 전자기학적 이론의 결과를 활용해야 한다. 또는 특성 정보를 잘 모르는 유전체 기판이 주어질 때도 정밀한 전자기학적 지식과 선행 연구 결과들을 이용하여 유전체 기판의 유전 상수를 결정해야 한다. 고도로 정밀한 이론적인 방법으로 전송선로의 길이 차에 따른 전파상수를 이용하여 유전 상수를 결정하거나, 역행렬 연산을 이용하여 결정하는 방법들이 있었다[3][4][8].

이러한 정밀한 이론적 분석을 통한 유전 상수의 결정 및 전송선로의 설계가 가능하게 하려면, 유전체 기판이 구조적으로 견고해서 제작할 때 변형이 없어야 하고, 또한 이론적 분석을 뒷받침하는 정밀한 인쇄 회로 기판(PCB, Printed Circuit Board) 공정이 제공되어야 한다. 일반적으로 PCB 회로 제작 공정을 간략히 살펴보면, 정밀한 회로의 필름 마스크 제작, 포토 레지스터 도포, 자외선(UV) 조사 및 감광, 정밀 에칭 공정 등을 거친다. 결국, 상당한 시간과 비용이 요구되기 마련이다.

그러나 프로토타입 마이크로파 회로 설계에 사용되는 골판지 기판은 저가격이지만 구조적으로 무른(Soft) 재질이고 외부 충격으로 쉽게 변형되는 제약점이 있다[4]-[6]. 따라서 고도로 어렵고 정교한 전자기학 이론을 이용한 해석 및 설계나, 고가의 정밀 PCB 제작 공정을 동원하는 것이 골판지 기판에 대해서는 오히려 의미가 퇴색된다. 따라서 본 연구에서는 가용 연구환경이 다소 열악한 소규모 실험실에서 실제로 사용할 수 있는 방법을 제시한다. 즉, 의도적인 시행착오를 위한 실험과정을 거쳐서 실제 사용하는 골판지 기판의 비유전율을 경험적으로 결정한다.

## 2.2 골판지 기판의 비유전율 추정을 위한 의도적인 시행착오용 선행실험

본 연구에서 사용한 골판지는 그림 2처럼 모형을 가진 구조를 갖는다. 골판지 단면을 살펴보면, 양쪽 평평한 면과 이들을 연결하면서 연속적이고도 주기적으로 분포하는 사선 구조가 있다. 사선의 연결 구조가 실제로는 기하학적으로 정확한 삼각형을 이루지 않고 약간 부드러운 곡선형으로 되어 있으나, 본 연구에서는 시뮬레이션을 위하여 삼각형 모델로 취하였다. 버니어 캘리퍼스(Vernier calipers)를 이용하여 골판지 곳곳에서 측정된 두께(H)가  $(3\pm 0.2)\text{mm}$ 이었으므로 대푯값인 3mm를 취하였다. 또한, 그림에 표시된 일정 간격(P)을 여러 곳에서 측정된 결과  $(6\pm 0.3)\text{mm}$ 이었으므로 6mm로 취하였다. 종이로 채워지지 않은 공간은 공기층이다.

선행 연구에 의하면 단순히 종이 재질로 채워진 두꺼운 종이판(Cardboard)의 추출된 비유전율이 1GHz에서 1.8 근처이다[4]. 사용한 골판지는 그림 2에 보인 것처럼 공기층을 많이 함유하는 구조를 취하므로 아직 정확한 값을 모르지만, 당연히 1.8보다 낮다고 해야 타당하다.

본 연구에서는 먼저 골판지 기판의 비유전율을 1.8로 가정하고 마이크로스트립 전송선로의 선폭과 길이를 계산하였다. 물론 아직 비유전율을 모르는 상태이므로 이 값은 정확하지 않다. 단지 의도적인 시행착오를 위한 과정이다. 표 1은 비유전율이 1.8이고 두께가 3mm인 어떤 유전체 기판에 대한 마이크로스트립 전송선로의 선폭과 길이를 보여준다.

이제 여기에 정리된 전송선로를 이용하여 BLHC를 설계하였다[9][10].

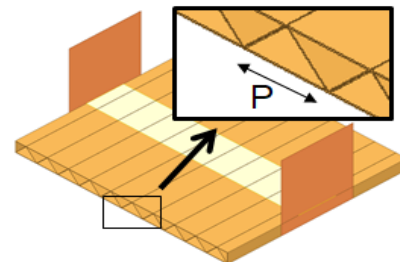


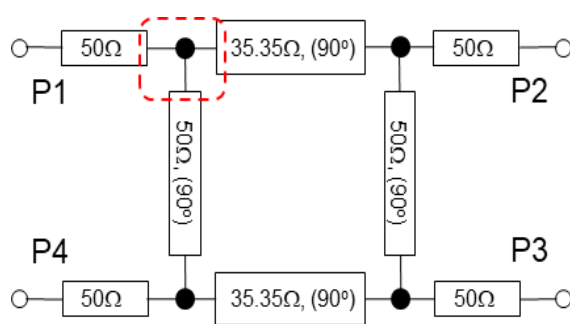
그림 2. 사용된 골판지 기판의 구조적 모델  
Fig. 2. Structural model of the adopted corrugated cardboard

표 1.  $\epsilon_r=1.8$ 일 때 마이크로스트립 선로의 치수  
Table 1. Dimensions of microstrip lines when  $\epsilon_r$  is 1.8

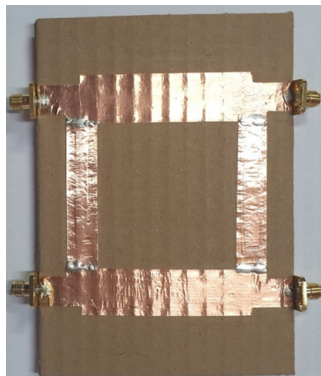
$Z_c$ [ $\Omega$ ]	W [mm]	$\lambda/4$ [mm]@1GHz	Substrate
50	10.4	59.2	$\epsilon_r=1.8$ H=3mm
35.35	16.9	58.5	

그림 3(a)는 BLHC의 대표적인 회로도(Schematic)이다. 입력(P1)단에 입사된 마이크로파 신호전력은 두 출력 단자(P2, P3)로 1/2씩 분배되면서 동시에 두 출력은 서로 90도의 위상차를 갖는다. 격리 단자(P4)로는 입력신호가 이상적으로는 전달되지 않아야 한다.

그림 3(b)는 표 1의 전송선로를 이용하여 구현한 BLHC의 레이아웃(Layout)이다. 의도적으로 시행착오를 하기 위한 측정용이므로 아직 최종회로는 아니다. 편의상 설계 중심주파수를 1GHz로 설정하였다. 금속면으로 회로 패턴을 구현하기 위하여 쉽게 구할 수 있는 동박 테이프를 사용하였다.



(a) 대표적인 회로도  
(a) Normal schematic

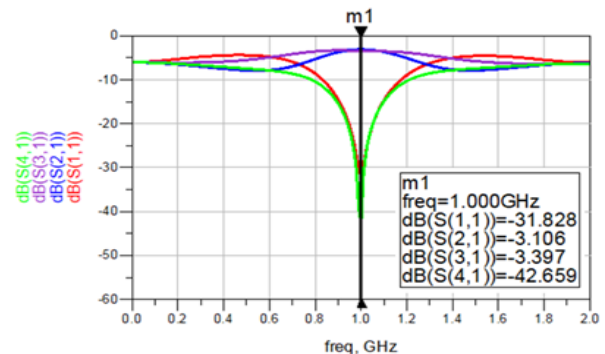


(b) 의도적인 시행착오를 위하여 처음 제작된 회로  
(b) First fabricated circuit for the intentional trial and error

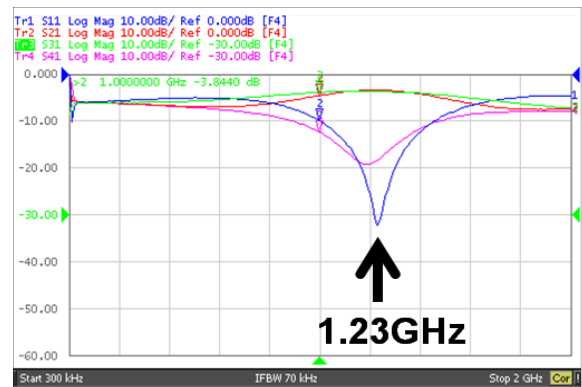
그림 3. 설계된 브랜치 라인 하이브리드 커플러  
Fig. 3. Designed BLHC

이제 설계 및 제작한 BLHC의 전기적 특성을 살펴보겠다. 그림 4(a)는 그림 3(a)에 보인 이상적인 BLHC에 대하여 중심주파수 1GHz에서 동작하는 단자 정합, 신호분배 및 격리 단자 특성의 이론값을 보여준다. 정확하게 중심주파수에서 완벽한 설계 특성을 보여주는데, 측정 데이터와 비교하기 위한 용도로 사용된다. 한편, 본 논문에서는 BLHC 회로의 성능 시뮬레이션과 측정을 위하여 Keysight technologies 사의 회로 설계 S/W인 ADS(Advanced Design System)와 벡터 회로망 분석기(VNA, Vector Network Analyzer) E5071B를 사용하였다.

그림 4(b)는 그림 3(b)에 보인 제작 회로의 측정된 S-파라미터 특성을 보여준다. 측정 결과에 의하면 중심주파수가 약 1.23GHz에서 형성되었음을 알 수 있다. 따라서 위쪽으로 이동한 주파수 천이 (Frequency shift) 결과로부터 현재 BLHC를 구성하는 마이크로스트립 전송선로의 길이가 약 23% 정도 짧아졌음을 알 수 있다.



(a) 이상적으로 예측되는 S-파라미터  
(a) Ideally predicted S-parameters



(b) 실제 측정 결과  
(b) Practical measurement

그림 4. 초기 BLHC의 특성  
Fig. 4. Performances of the first BLHC



이렇게 의도적인 시행착오용 측정 결과로부터 전송선로를 설계할 때 골판지 기판의 유전율 1.8은 과다하게 추정된 값임을 알 수 있다. 마이크로스트립 전송선로의 길이는 기판의 비유전율( $\epsilon_r$ )이 아니라, 주파수나 선폭에 따라 달라지는 유효유전율( $\epsilon_{eff}$ )의 함수이다. 따라서 잘 알려진 전송선로의 기본적 이론에 의하여 다음 절에 설명한 것과 같은 추가적인 고찰을 통하여 사용한 골판지 기판의 실제적 유전상수를 추정한다.

### III. 시행착오용 실험 결과를 이용한 골판지의 실제적인 비유전율 추정

이제 의도적인 시행착오 실험 결과를 이용하여 본 연구에서 사용한 골판지의 실제 비유전율을 추출하는 과정을 설명하고자 한다. 해당 전공 분야에서 표준 임피던스로 가장 널리 쓰이는 50Ω 마이크로스트립 전송선로를 기준으로 설명하고자 한다.

식 (1)-(3)은 전송선로 선폭과 두께, 주파수에 따른 파장( $\lambda$ )과 비유전율과의 관계를 보여주는 잘 알려진 식이다[1][3][9][10].

$$\lambda_g = \lambda_o / \sqrt{\epsilon_{eff}} \Rightarrow \lambda_g/4 = (\lambda_o/4) / \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} A \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \frac{2\epsilon_{eff} - 1 + A}{1 + A} \quad (3)$$

여기서  $A = \frac{1}{\sqrt{1 + 12H/W}}$  이고,  $\lambda_g$ 와  $\lambda_o$ 는 각각 유전체 전송선로에서와 자유공간에서 한 파장의 길이이다.  $W \geq H$ 이면 상기 식들을 적용할 수 있다.

상기 식들을 1GHz에서 표 1에 제시한 50Ω 선로의 치수에 적용해 보자. 만약 비유전율이 1.8인 기판이 있다면 이것의  $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 는 식 (2)로부터 1.26이다. 자유 공간에서  $\lambda_o/4 = 75\text{mm}$ 이고, 표 1에 의해  $\lambda_g/4 = 59.2\text{mm}$ 이다. 식 (1)에 의한  $\sqrt{\epsilon_{eff}} = 1.27$ 이므로 식 (2)에서 얻은 1.26과 거의 같다.

한편, 의도적인 시행착오를 위한 측정 결과인 그림 4(b)를 살펴보면 중심주파수가 약 1.23GHz이다. 즉, 중심주파수가 1GHz에서 23%만큼 상향이동(Shift up)하였으므로, 식 (1)에 의하여 새로운  $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 는 우선 1.033으로 계산된다.

이제 선폭을 고려해야 한다. 표 1에 의하면 50Ω과 35.35Ω의 선폭은 각각 10.4mm와 16.9mm이다. 그림 3(a)의 점선 부분을 확대해 보면, 그림 5와 같이 35.35Ω 선로의 선폭이 6.5mm만큼 더 넓다. 이 추가된 부분이 50Ω 선로의 길이에 더해져서 특성이 나타난다. 즉, 식 (1)에 의하여  $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 가  $75/(59.2 + 6.5) = 1.142$ 가 되어야 한다. 따라서 최종적인  $\sqrt{\epsilon_{eff}}$ 는 1.033~1.142 사이에서 결정되어야 한다. 본 논문에서는 중간값 근처인 1.1로 취하였는데, 그러면 식 (3)에서  $\epsilon_r$ 은 1.28~1.29가 된다.

전술했듯이 골판지 기판의 약한 강도와 비정형성(Non-uniformity) 및 불연속 연결 부분(Discontinuity) 때문에 고도의 전자기학적 이론을 동원한 정밀분석은 오히려 의미가 퇴색된다. 그러나 의도적인 시행착오를 위한 실험을 통해서 얻은 골판지의 비유전율의 근사적 추정값은 실제 사용 환경에서의 실험적 값이라는 의미가 있다. 또한, 골판지 기판의 비유전율이 조성성분에 따라서 1.25~1.5 사이에서 결정된다는 선행 연구의 결과에서 어긋나지 않음을 보여주고 있다[6]. 제안한 방법은 비교적 열악한 연구환경에서도 미지의 기판의 비유전율을 추정하여 어떤 회로적 아이디어를 신속하게 저가로 검증하려는 단순한 목표로 사용할 수 있다. 본 연구에서는 최종적으로 골판지의 비유전율을 편의상 1.28 근처인 1.3으로 설정하고 BLHC를 재설계하였다.

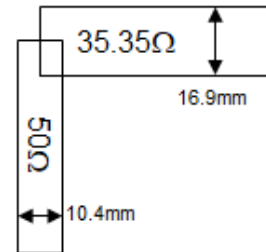


그림 5. 그림 3(a)에 보인 점선 상자 부분의 확대 그림  
Fig. 5. Magnified section of the dotted box in Fig. 3(a)

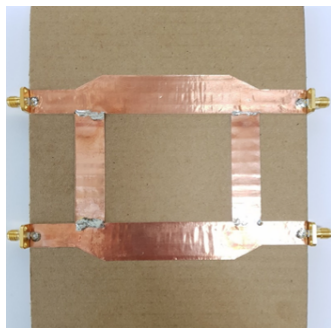
### IV. 수정된 BLHC 회로의 설계 및 측정

이제 골판지 기판의 유전 상수를 의도적인 시행착오를 위한 선행실험을 거쳐서 1.3으로 결정했으므로, 이를 이용하여 마이크로스트립 전송선로를 다시 설계해야 한다. 표 2는 그 결과를 정리한 것인데, 표 1에 보인 것과 약간의 차이가 있다. 이제는 비유전율이 1.3인 기판이 되었으므로 표 2의 수치가 더 정확하고, 이를 이용하여 BLHC를 설계하여야 한다.

그림 6(a)는 표 2의 데이터를 이용하여 중심주파수 1GHz에서 설계한 최종 BLHC의 제작된 회로 사진이다. 위에서 설명한 의도적 시행착오 실험에 사용한 것과 같은 골판지 기판과 동박 테이프를 사용하여 설계 및 제작하였다.

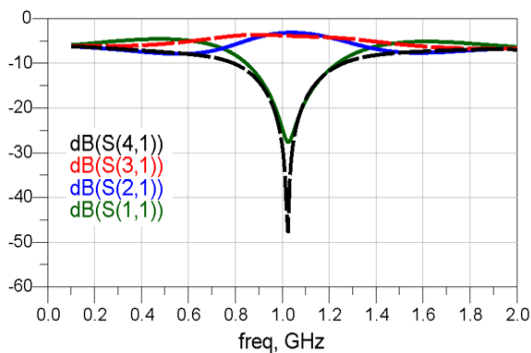
표 2.  $\epsilon_r=1.3$ 일 때 마이크로스트립 선로의 치수  
Table 2. Dimensions of microstrip lines when  $\epsilon_r$  is 1.3

$Z_c$ [ $\Omega$ ]	W [mm]	$\lambda/4$ [mm]@1GHz	Substrate
50	12.6	67.5	$\epsilon_r=1.3$ H=3mm
35.35	20.2	67.1	



(a) 제작된 회로 사진

(a) Photo of the fabricated circuit



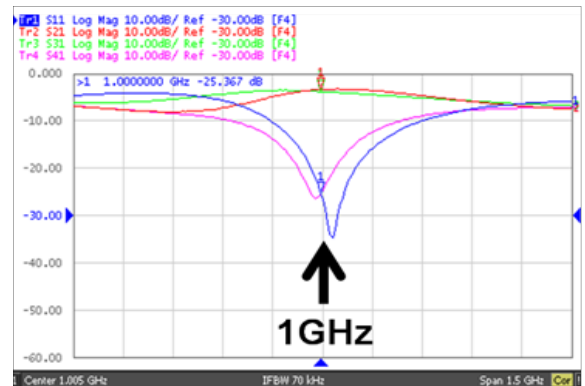
(b) HFSS에서 전자기적으로 시뮬레이션 된 S-파라미터  
(b) Electromagnetically simulated S-parameter using HFSS

그림 6. 최종 설계된 BLHC  
Fig. 6. Finally designed BLHC

그림 6(b)는 ADS Momentum에서 비유전율이 1.3이고 두께가 3mm인 기판과 표 2에 보인 치수로 설계한 그림 6(a)의 BLHC를 전자기적으로 시뮬레이션한 결과를 보여준다. 마이크로파 대역 BLHC로서의 성능이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

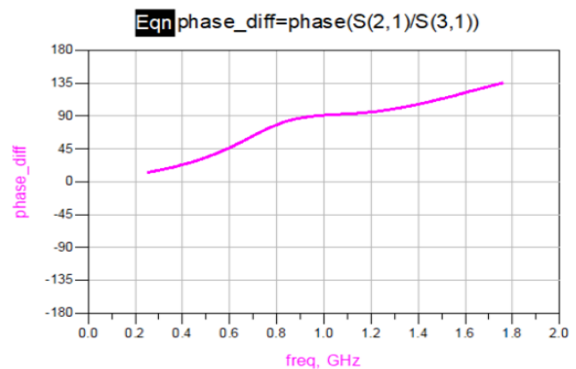
선폭이 서로 다른 마이크로스트립 선로 사이의 접합부에 존재하는 불연속성(Discontinuity)에 의한 성능 저하를 조금이라도 완화하기 위해 그림 3과는 다르게 테이퍼링(Tapering) 구조로 처리하였다.

그림 6(a)의 회로를 제작할 때 RF 컨넥터가 연결되는 50 $\Omega$  선로 부분의 폭이 다소 넓으므로 컨넥터의 접지부와 입력선로가 맞닿지 않도록 주의해야 한다. 이를 위해 컨넥터를 회로 측면으로부터 약간 간격을 주는 것이 좋다. 만약에 이 간격으로 인하여 기생 커패시턴스가 생성되어 S-파라미터 특성에 악영향을 끼친다면 컨넥터 위치를 미세하게 변화시켜 정상적인 S-파라미터 특성이 보이도록 해야 한다.



(a) S-파라미터

(a) S-parameters



(b) 두 출력 단자 사이의 위상차

(b) Phase difference between output ports

그림 7. 최종 BLHC 회로의 측정 성능  
Fig. 7. Measured performances of the 2nd fabricated BLHC

그림 7(a)는 제작한 BLHC를 실제로 측정된 S-파라미터를 보여주고 있다. 미미한 주파수 이동 현상이 보이지만, 중심주파수에서 -3.39dB, -3.81dB의 전력분배, -25.37dB의 단자 정합, -25.46dB의 격리도 특성을 보여 BLHC로서의 기대 성능이 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 이 결과는 그림 6(b)에서 예측한 S-파라미터와 유사하다.

그림 7(b)는 제작한 BLHC의 두 출력 단자 (P2, P3)에서 측정된 위상차 특성을 보여주고 있다. 90도의 위상차가 이론적으로 완전한 값인데, 측정 결과 88.92도로 우수한 특성을 보인다.

그림 7에 보인 BLHC의 성능 측정 결과를 종합해 보면, 상기에서 설명한 바와 같이 의도적인 시행착오 실험을 통하여 근사적으로 결정한 골판지 기판의 유전 상수 1.3가, 비록 완벽하게 정확하지는 않더라도, 충분히 실험적으로 검증되어 받아들일 만한 실제적인 값이라는 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 주변에서 널리 사용되는 골판지를 유전체 기판으로 채택하여, 매우 신속하고 저렴하게 마이크로스트립 전송선로를 구성하고 이를 이용하여 마이크로파 회로를 구현할 수 있음을 보였다. 회로 설계의 한 예로써 무선통신 하드웨어 구성에 널리 사용되는 초고주파 회로 가운데 하나인 BLHC의 프로토타입을 설계 및 제작하고 측정된 성능을 제시하였다.

골판지는 표면, 두께, 내부 조직이 부정형 적이면 서도 매우 물렁물렁한(Soft) 기판이므로 고도로 세밀하고도 어려운 전자기학적 이론을 동원한 분석이 나, 고정밀 회로 제작 시설까지는 동원하지 않아도 된다. 본 연구에서는 실제 채택한 골판지에 대하여 의도적인 시행착오용 설계 및 실험을 먼저 행하고, 이 실험 결과를 분석하여 골판지 기판의 실제적 유전 상수를 근사적으로 추출하였다. 결정된 유전 상수는 1.3 근처였으며, 이로부터 재설계한 BLHC 회로를 측정된 결과, 전자기적 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다. 따라서 본 연구에서 사용한 골판지 기판의 유전 상수가, 비록 완전히 정확한

값은 아닐지라도, 1.3 근처라고 해도 상당히 합리적이다. 즉, 유전 상수가 1.3인 어떤 기판으로 마이크로파 회로인 BLHC를 설계한 결과가 측정된 성능과 크게 어긋나지 않음을 실험적으로 검증한 것이다.

본 연구에서 제안한 방법은 수 GHz 이하의 비교적 낮은 대역의 마이크로파 주파수 영역에서 사용할 수 있다. 골판지 기판은 비유전율이 비교적 낮고 두께가 두꺼운 편에 속하기 때문에 수십 GHz가 넘는 높은 마이크로파 대역에서는 사용하기가 곤란하다.

본 논문에서 설명한 설계, 재제작 및 측정의 일련 과정은 24시간 이내에 완료할 수 있다. 또한, 값을 매기는 것이 의미가 없을 정도로 저가적인 골판지와 동박 테이프를 이용하여 구현할 수 있다. 따라서 정밀 설계를 구현하기 위한 고가의 예칭 설비나 제작과정이 필요하지 않다. 그러므로 상대적으로 연구환경이 풍족하지 않은 소규모 연구조직이나 대학 실험실 등에서 좋은 회로적 아이디어가 있을 때 프로토타입을 설계하여 저가적으로 신속하게 검증할 때 유용한 방법으로 사용할 수 있다.

본 연구에서는 프로토타입 회로의 예로 BLHC를 들었으나, 무선시스템을 구성하는데 필요한 다양한 마이크로파 회로의 프로토타입을 신속하고 저렴하게 구현하는데 본 연구에서 제안한 방법이 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines (2/e)*, Ch. 1 and Ch. 2, Artech House, pp. 83-85, 1996.
- [2] B. Wadell, *Transmission Line Design Handbook*, Ch.3, Artech House, MA, pp. 93-105, 1991.
- [3] W. Hayt Jr. and J. Buck, *Engineering Electromagnetics (9/e)*, Ch. 13, McGraw Hill, New York, pp. 463-466, 2019.
- [4] H. Saghlatoon, L. Sydänheimo, L. Ukkonen, and M. Tentzeris, "Optimization of Inkjet Printing of Patch Antennas on Low-Cost Fibrous Substrates", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, pp. 915-918, May 2014. <https://doi.org/>

10.1109/LAWP.2014.2322572.

- [5] M. Y. Ahmad and A. S. Mohan, "Multi-loop Bridge HF RFID Reader Antenna for Improved Positioning", Proceedings of 2011 Asia-Pacific Microwave Conference, Australia, pp. 1426-1429, Dec. 2011.
- [6] M. Sivakumar and D. Deavours, "A Dual-resonant Microstrip Antenna for Paperboard in the Cold Chain", in Proc. IEEE Sarnoff Symposium, pp. 1-5, Apr. 2008. <https://doi.org/10.1109/SARNOF.2008.4520112>.
- [7] R. Vyas, A. Rida, L. Yang, and M. Tentzeris, "Design, Integration and Characterization of a Novel Paper-based Wireless Sensor Module", 2008 IEEE International Microwave Symposium Digest, WEP2E-03, USA, Jun. 2008. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2008.4633302>.
- [8] M. Lee and S. Nam, "An Accurate Broadband Measurement of Substrate Dielectric Constant", IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 4, No. 4, pp. 168-170, Apr. 1996. <https://doi.org/10.1109/75.481077>.
- [9] D. M. Pozar, Microwave Engineering (4/e), Ch. 2 and Ch.3, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 343-347, 2011.
- [10] R. Collin, Foundations for Microwave Engineering (2/e), Ch. 6, McGraw Hill, New York, pp. 432-434, 1992.

저자소개

조 성 희 (Sunghee Cho)



2020년 2월 : 순천향대 전기공학과 (공학사)  
 2022년 7월 현재 : 국립공원공단  
 재직 중  
 관심분야 : 초고주파 무선 능동,  
 수동 회로, 부품 설계 분야

임 종 식 (Jongsik Lim)



1991년 2월 : 서강대 전자공학과 (공학사)  
 1993년 2월 : 서강대 대학원 전자공학과(공학석사)  
 2003년 2월 : 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부(공학박사)  
 1993년 2월 ~ 2005년 2월 :

한국전자통신연구원 선임연구원  
 2005년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 재직 중  
 관심분야 : 초고주파 무선 회로·부품 설계, 능동·수동  
 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및  
 회로 응용

손 성 호 (Seong-Ho Son)



1997년 2월 : 부산대 제어기계공학과(공학사)  
 1999년 8월 : 포항공대 대학원 기계공학과(공학석사)  
 2009년 2월 : 포항공대 대학원 기계공학과(공학박사)  
 1999년 3월 ~ 2001년 3월 :

대우자동차 기술연구소 연구원  
 2001년 3월 ~ 2019년 2월 : 한국전자통신연구원  
 전파위성연구본부 책임연구원  
 2019년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 재직 중  
 관심분야 : 전파응용, 전파센싱 및 이미징, 메카트로닉스

김 동 민 (Dong Min Kim)



2014년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
 2014년 ~ 2018년, Aalborg University, Denmark, 박사후  
 연수연구원  
 2018년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교  
 사물인터넷학과 재직 중

관심분야 : 사물인터넷, 네트워크제어시스템,  
 분산기계학습, 전파응용



윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과  
(공학사)  
1999년 2월 : 고려대 대학원  
통신시스템공학과(공학석사)  
2010년 8월 : 고려대 대학원  
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)  
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :

한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원  
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자디스플레이공학부  
재직 중

관심분야 : RF Transceivers, Reconfigurable Antenna  
Systems, RF Sensor Systems

한 상 민 (Sang-Min Han)



1996년 2월 : 고려대 전파공학과  
(공학사)  
1998년 8월 : 고려대 대학원  
전파공학과(공학석사)  
2003년 8월 : 고려대 대학원  
전파공학과(공학박사)  
2003년 10월 ~ 2004년 11월 :

UCLA Post Doctoral Research Fellow  
2005년 1월 ~ 2007년 8월 : 삼성중합기술원 전문연구원  
2007년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 재직 중  
관심분야 : RF 시스템, Low power RF Transceivers,

Active Integrated Antenna Systems

안 달 (Dal Ahn)



1984년 2월 : 서강대 전자공학과  
(공학사)  
1986년 2월 : 서강대 대학원  
전자공학과(공학석사)  
1990년 8월 : 서강대 대학원  
전자공학과(공학박사)  
1990년 8월 ~ 1992년 8월 :

한국전자통신연구원 선임연구원  
1992년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 재직 중  
관심분야 : RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계