

무선통신시스템 송신측 제어를 위한 초소형 LTCC 전력검출부의 설계

황문수¹, 임종식^{1*}, 양규열², 안달¹

Design of a Miniaturized LTCC Power Detector for the Tx Power Control in Wireless Communication System

Mun-Su Hwang¹, Jongsik Lim^{1*}, Gyu-Ryeol Yang² and Dal Ahn²

요약 본 논문은 824-849MHz 주파수용 무선통신 단말기의 송신전력을 모니터링하는 역할을 위한 소형화된 LTCC (low temperature co-fired ceramics) 전력검출부에 대하여 기술한다. 제안된 LTCC 전력검출부는 검출기 다이오드, 정합회로를 위한 집중 소자들, 그리고 LTCC 스트립선로 방향성결합기로 구성된다. 소형화를 위하여 실제로 점유된 면적을 줄이기 위해서 다수의 벤드(bend) 소자를 지닌 스트립선로 방향성합기가 설계, 제작되며, 최소 손실과 고속 동작을 위하여 제로 바이어스 쇼트키 다이오드가 사용된다. 제작된 LTCC 전력검출부의 측정결과는 유효 RF 입력 전력 영역에서 우수한 선형성을 지니며 예측 결과와 잘 일치한다.

Abstract This paper presents a compact and miniaturized power detector utilizing low temperature co-fired ceramics(LTCC) technology for the application in wireless handset system to monitor the transmitting power at the frequency of 824-849MHz. The proposed power detector is composed of detector diode, lumped components for matching network, and LTCC stripline coupler based on LTCC substrate technology. A 20dB LTCC stripline direction coupler is designed and implemented with many bending section in order to reduce the practically occupied area for miniaturization. A zero bias schottky diode is adopted for detector design because of its high speed operation with minimized loss. The measured performances of fabricated detector agree well with the predicted results with a good linearity within the effective input RF power range.

key words : Power detector, stripline coupler, directional coupler, LTCC

1. 서론

이동통신시스템에서 기지국이나 단말기의 송신부 출력은 수신부에 비하여 상대적으로 큰 전력을 내보내므로 송신 출력의 낭비성에 대하여 많은 고려가 필요하다. 따라서 수신과 달리 송신측은 적합한 출력의 크기를 제어하기 위하여 신호의 검출 기능이 필요한데, 이는 단말기와 같이 제한된 배터리 용량을 가지는 경우에 매우 중요한 기능이다.

송신부 전력증폭기는 안테나를 통한 신호 전송 직전이고 신호를 크게 증폭하는 모듈로 통화품질에 결정적인

영향을 미치며, 동시에 전체 시스템의 효율을 결정짓는 중요한 부품이다. 전력증폭기는 DC 공급에 따른 배터리 소모량이 많아서, 휴대폰의 경우에 DC를 공급하는 배터리의 용량과 수명이 유한하기 때문에 실제 운용에서 증폭기의 효율이 높여서 배터리 수명을 늘리는 것이 중요한 이슈이다. 최근의 디지털 무선통신 시스템은 높은 음질, 낮은 전력 소비 등을 중요한 기술적 목표로 삼고 있고, 전력증폭기의 효율적이고도 안정된 출력을 제어하기 위한 전력검출부의 전력 제어가 이러한 목표를 달성하기 위한 중요한 수단이 된다.

이전력검출기는 전력 증폭기의 출력전력을 샘플링하여 DC 레벨로 검출함으로써 ALC (Automatic Level Control), AGC(Automatic Gain Control) 등을 제어하기 위한 회로에 중요한 정보를 제공하기 위한 수단이다. 다이오드 검출기는 다이오드의 비선형 특성 때문에 입력레

이 연구는 산학연권소시움 사업의 지원으로 수행되었음.

¹순천향대학교 전기통신공학과

²(주)쏘닉스

*교신저자: 임종식(jslim@sch.ac.kr)

벨에 대한 출력전압을 예측하기가 어려운데, 다이오드 검출기의 출력전압을 선형화하여 설계한다면, 검출된 전압으로부터 RF 전력 레벨을 충분히 예측할 수 있고 ALC, AGC 회로에 사용되는 가변 감쇠기 등의 제어가 좀 더 용이해질 것이다. 다이오드 검출기의 전통적인 응용 및 용도는 기지국, 단말기 등의 응용에 있어서 출력부의 RF 전력을 측정하여 신호의 크기 제어나 시스템 성능에 대한 피드백을 공급하는 것이다. 다이오드 검출기는 가격, 크기 및 DC 전력 소모가 적다는 면에서 유리하고, 그 구성에 있어서 복잡하지 않으면서도 별도의 추가적인 회로가 없어도 바로 디지털 회로로도 적용할 수 있다는 점 때문에 널리 사용된다[1]. 특히 안정적인 검출 전압을 공급하는 중요한 역할을 위하여 회로구성이 간단하고 가격이 저렴한 쇼트키(schottky) 다이오드나 로그(log) 증폭기 등이 많이 사용되고 있다[1,2].

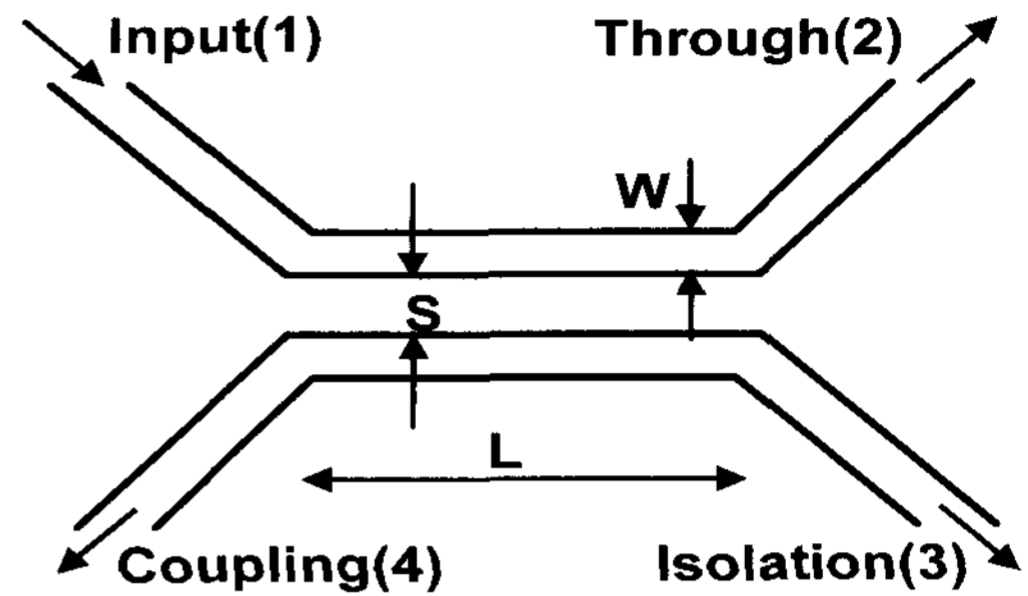
LTCC PCB 적층 기술은 초소형 RF 부품 및 모듈을 구현하기 위한 적합한 기술로 알려져 있다. LTCC는 세라믹 기판 내부에 R, L, C와 같은 수동 소자와 전송선로를 3차원적으로 적층 및 배열하여 구성할 수 있기 때문에 대역통과 여파기(band pass filters), 듀플렉서(duplexers), 전력분배기/결합기(power divider/combiner), 전력 증폭기 모듈(power amplifier module)과 같은 RF 부품 및 모듈에 많이 적용되어 왔다[3].

본 논문에서는 LTCC(low temperature co-fired ceramics) PCB 제작 기술을 이용한 초소형 무선통신단말기용 전력검출부를 설계, 제작하고 그 특성을 제시한다. 본 논문의 전력검출부 구조는 최종 송신단의 전력 추출을 위한 스트립선로형 방향성결합기와, 추출된 전력을 모니터링 해주는 쇼트키 다이오드, 그리고 집중소자 정합회로로 구성된다. 이를 위하여 LTCC 기판 상부 및 적층된 스트립선로 내부에서 전송선로 및 방향성결합기를 3차원적 배열로 구현하고, 여기에 다이오드와 정합회로 소자들을 배열시켜 구현하였다.

2. LTCC 스트립선로 결합기

방향성결합기(directional coupler)는 전력검출 용도로 가장 널리 사용되는 고주파 부품이다. 방향성결합기는 기본적으로 중심주파수에서 $\lambda/4$ 의 길이를 갖도록 설계된다. 그림 1은 방향성결합기의 일반적인 스케매틱 회로도이다. 구현되는 PCB 매질이 마이크로 스트립 선로(microstrip line)이든 스트립선로(stripline)이든, 그림 1과 같은 기본 구조를 지닌다. 여기서 W는 결합선로 부분의 선폭, S는 결합선로 부분의 상호간격, 그리

고 길이 L은 결합선로 부분의 유효 길이이다. L이 바로 중심주파수에서 $\lambda/4$ 의 길이를 갖도록 설계되는 것이다. 한편 결합량은 정해진 주파수하에서 W와 S, 그리고 기판의 유전율(ϵ_r)과 두께에 의하여 결정된다[4-6].

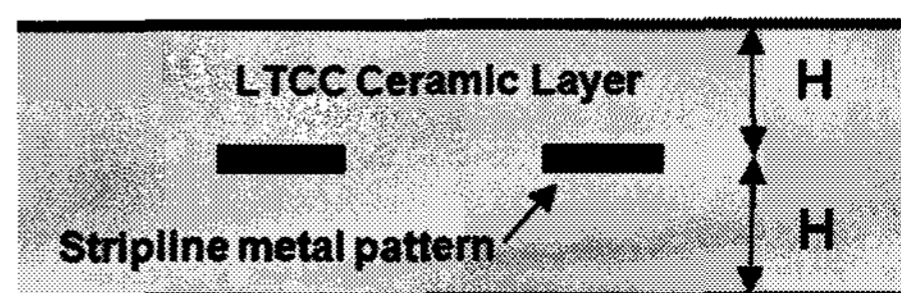


[그림 1] 방향성결합기의 기본 스케매틱 회로도

단자 1이 입력 단자(input port)일 때 단자 2는 통과 단자(또는 전송 단자, through port)로서 결합량에 따라 다소 손실이 생길 수 있으나 입사전력의 대부분이 통과된다. 단자 4는 결합 단자(coupling port)로서 식 (1)로 표현되는 전력의 일부분이 소량 결합되어 추출된다. 식 (1)에서 C는 결합량의 비율이다. 단자 3은 격리 단자(isolated port)인데, 입력 단자에 입사된 전력 가운데 단자 3으로 가는 전력량은 이론적으로 0이다[4]. 그러나 실제로는 미량의 누설전력이 있으므로 반사되어 되돌아오지 않도록 50Ω 저항을 연결하여 단락시킨다.

$$C_{dB} = -10 \log_{10} \frac{1}{|C|^2} [dB] \quad (1)$$

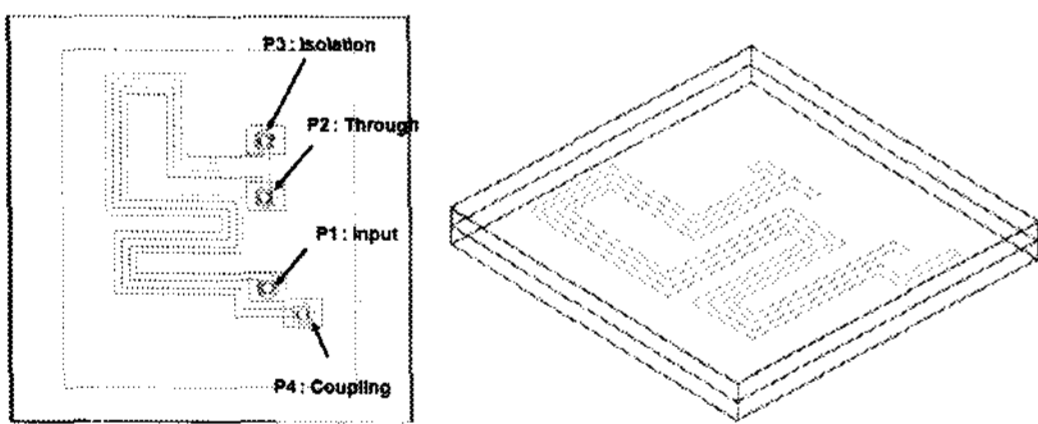
그림 2는 본 논문의 스트립선로 구조에서 구현되는 방향성결합기의 단면도이다. 스트립선로 구조는 유전체층 사이 중앙에 도체 패턴이 자리잡게 되는데, 본 논문에서 구현된 LTCC 스트립선로에서는 다수의 세라믹 시트(sheet)가 적층되어 원하는 두께(2H)를 형성하게 된다. 스트립선로 구조에서는 마이크로스트립 선로와 달리 위아래로 차단된 접지금속판으로 인해 외부로의 누설전계가 없어서 손실이 적고 임피던스의 변화없이 안정적인 동작이 가능하다.



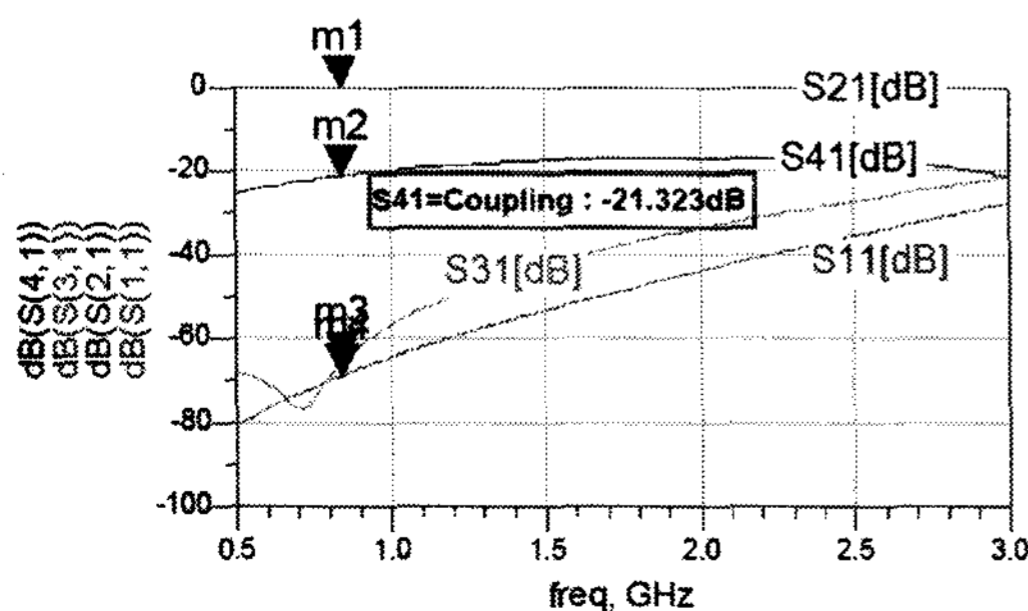
[그림 2] 스트립선로 구조에서 구현될 방향성결합기의 단면도

본 논문에서 사용한 LTCC 적층 세라믹 기판은 소성 후 비유전율(ϵ_r)이 7.5이고, 스트립라인 두께는 $2H=400\mu\text{m}$ 으로 결정하였다. 이것은 제작 후에 LTCC의 크기 및 두께가 최소로 되기 위한 기술적 고려의 결과이다. 본 논문에서 요구되는 중심주파수 836.5MHz에서 -20dB의 결합량을 가지는 방향성결합기를 설계하기 위하여 사용된 스트립선로의 폭과 간격은 각각 $W=88\mu\text{m}$, $S=100\mu\text{m}$ 이다.

한편 길이를 결정하기 위한 기술적 검토 결과로서 회로의 크기를 줄이기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 836.5MHz에서 $\lambda/4$ 의 길이를 갖는 -20dB 결합기를 설계하면 길이가 40000 μm 이 넘게 되어 매우 넓은 면적을 요구하기 때문에 소형화 목적을 달성하는데 큰 지장이 생기게 된다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서, 방향성결합기의 결합량이 중심주파수에서 벗어나면 서서히 낮아지는 특성을 이용하여, 3300MHz에서 -10dB의 결합량을 가지는 결합기를 설계하여 원하는 주파수인 830MHz대에서 -20dB의 결합량을 갖도록 하였다. 이 때 선택된 길이는 3300MHz에서 $\lambda/4$ 의 길이인 10100 μm 이다. 또한 제한된 LTCC 기판 면적 안에 삽입하게 위하여 다수의 밴드 소자(bend elements)를 구성하여 점유면적을 크게 줄였다. 이와 같은 결과로 830MHz대에서 -20dB의 결합량을 갖는 LTCC 스트립라인 방향성결합기의 레이아웃과 3차원 도시가 그림 3에 제시되어 있다.



[그림 3] 설계한 LTCC 스트립라인 방향성결합기의 레이아웃과 3차원 도시



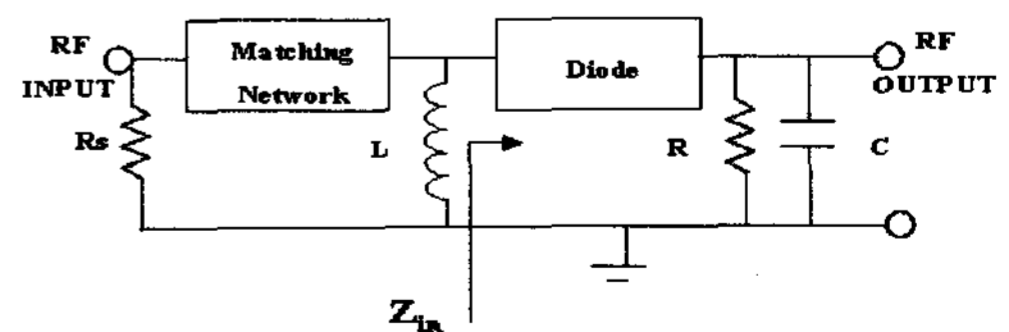
[그림 4] 그림 3의 방향성결합기의 EM 시뮬레이션 특성

그림 4는 그림 3에 대한 전자기적(Electromagnetic, EM) 시뮬레이션 결과이다. 설계 과정에서 정확한 특성을 예측하기 위하여 Agilent사의 ADS(advanced design system) Momentum을 사용하였다. 원하는 주파수에서 -21.3dB의 결합량을 가지며 -69dB의 단자 정합 특성, -66dB의 격리 특성과 45dB 이상의 방향도(directionality), 그리고 -0.03dB의 극히 낮은 삽입 손실 특성을 보이고 있다. 따라서 설계한 LTCC 스트립라인 구조의 방향성결합기의 기능을 송신측 전력증폭기의 출력단에 결합시킬 경우에, 출력 전력의 손실이 거의 없는 상태에서 출력전력 크기를 모니터링할 수 있음을 알 수 있다.

3. LTCC 전력검출부 회로 설계

그림 5는 다이오드 검출기의 블록 다이어그램을 나타낸다. 제로 바이어스용 쇼트키 다이오드를 사용하여 CDMA 단말기 상향 대역 중심주파수에서 전력검출기를 설계하였다. 전력검출기 입력부의 입력임피던스 매칭을 통하여 낮은 입력신호에서의 검출기 출력감도 특성과 선형성이 개선되도록 하였다.

R_s 는 소스 단자에서의 임피던스를 나타내고 있으며, 여기서 RF 임피던스 정합회로가 연결된다. 인덕터 L은 바이어스가 인가될 경우의 초크이므로 다이오드 정합회로 소자는 아니다. 정합회로에 사용되는 저항 R과 캐패시터 C에 의해 정해지는 시정수는 검파된 출력 특성을 결정짓는 역할을 하게 되며, R-C에 의해 정해지는 시정수는 출력 리플 노이즈 특성에 많은 영향을 끼치게 된다. 전력검출기의 입력 매칭은 가변적인 입력 레벨에 따라 어느 입력레벨에서 매칭회로를 구성하느냐에 따라 낮은 입력 레벨에서의 검파 출력 감도와 선형적인 출력 특성에 영향을 미치며, 설계하고자 하는 주파수 대역폭과 전력의 크기에 따라 입력단의 부정합이 절충되어야 한다 [7,8].

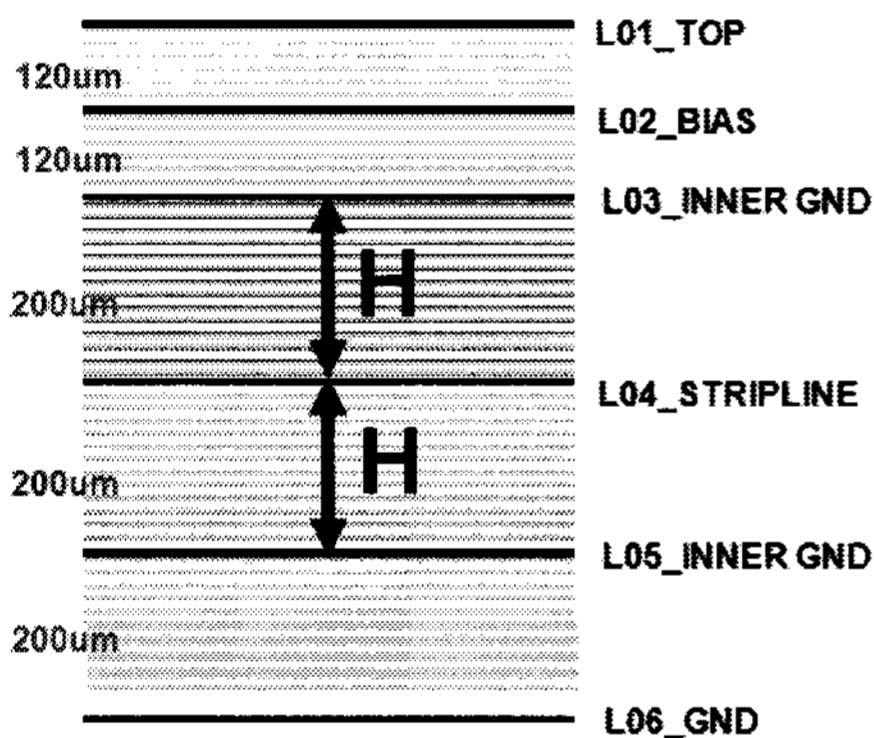


[그림 5] 다이오드 검출기 회로의 블록 다이어그램

그림 5의 블록 다이어그램을 참고하여, 다이오드에 필요한 정합회로를 설계하고, LTCC 구현에 적합한 레이아웃을 하였다. 먼저 검출기 다이오드를 위한 입력 정합회

로는 필요한 스트립 라인과 집중 소자인 R, C로 구성하였으며, 전력검출기의 부하단에도 C로 정합을 하였다.

설계 결과를 LTCC PCB에 반영하기 위하여 레이아웃을 할 때 주의할 것은 앞 절에서 설명했던 스트립라인 커플러만의 회로와는 서로 다른 레이어가 필요하다는 사실이다. 왜냐 하면 LTCC 기판 최상면에는 다이오드와 R,C 집중 소자가 조립되어야 한다는 점, 다이오드에는 직접 바이어스가 인가되지 않더라도 최종적으로 FEM(front end module) 응용시 고출력 증폭소자의 바이어스 선로 연결을 위한 레이어를 미리 확보하여야 한다는 점, 그리고 고출력증폭기의 출력을 방향성결합기의 입력단자로 연결하기 위한 전송선로용 레이어를 미리 확보해야 한다는 점 때문에 여러 레이어를 고려한 LTCC 기판 제작이 이루어져야 하기 때문이다. 이를 고려하여 설계한 LTCC 기판의 레이어 구조가 그림 6에 제시되어 있다.



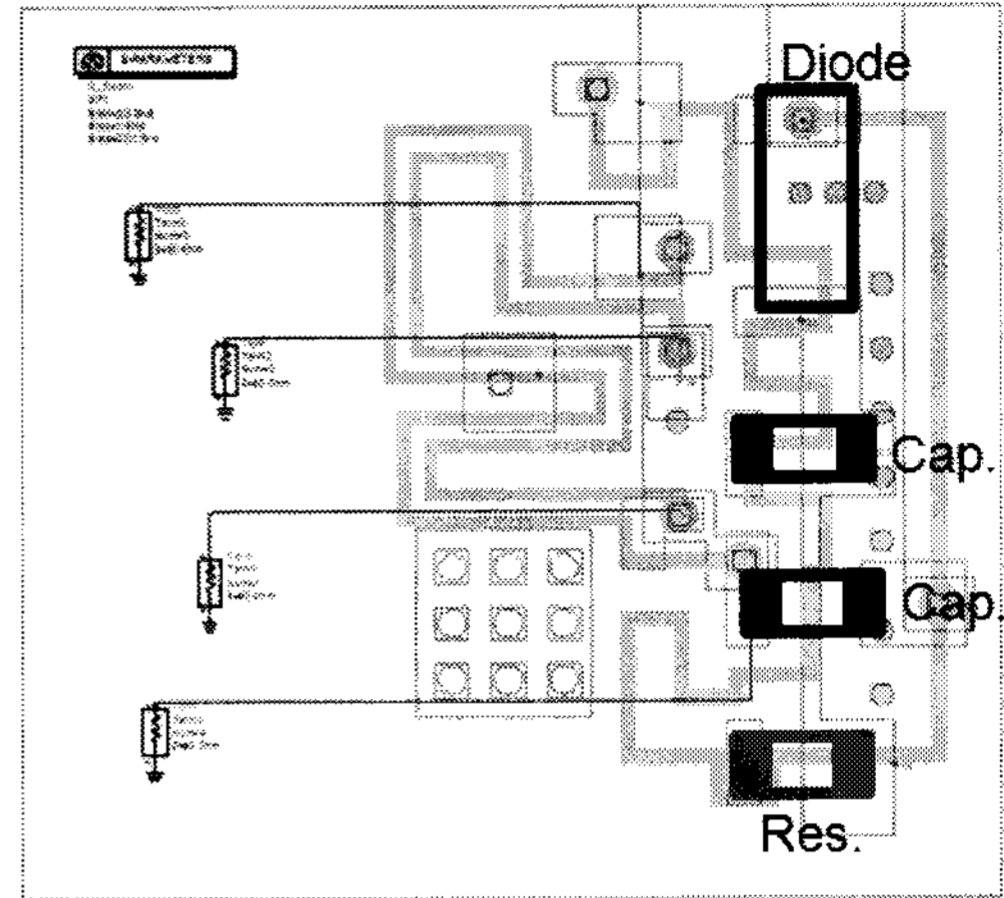
[그림 6] 전력검출부 회로를 고려하여 구성한 다층 LTCC 기판 레이어

그림 7은 전력검출부 회로를 추가한 LTCC의 레이아웃과 co-simulation을 위한 회로 정의, 그리고 상층면에 다이오드와 집중소자들이 실장되는 개념도를 보여주고 있고, 그림 8은 전력검출부 회로를 부가한 상태에서 앞서 설계한 방향성결합기의 특성이 여전히 유지됨을 확인하기 위하여 EM-circuit co-simulation한 결과가 제시되어 있다.

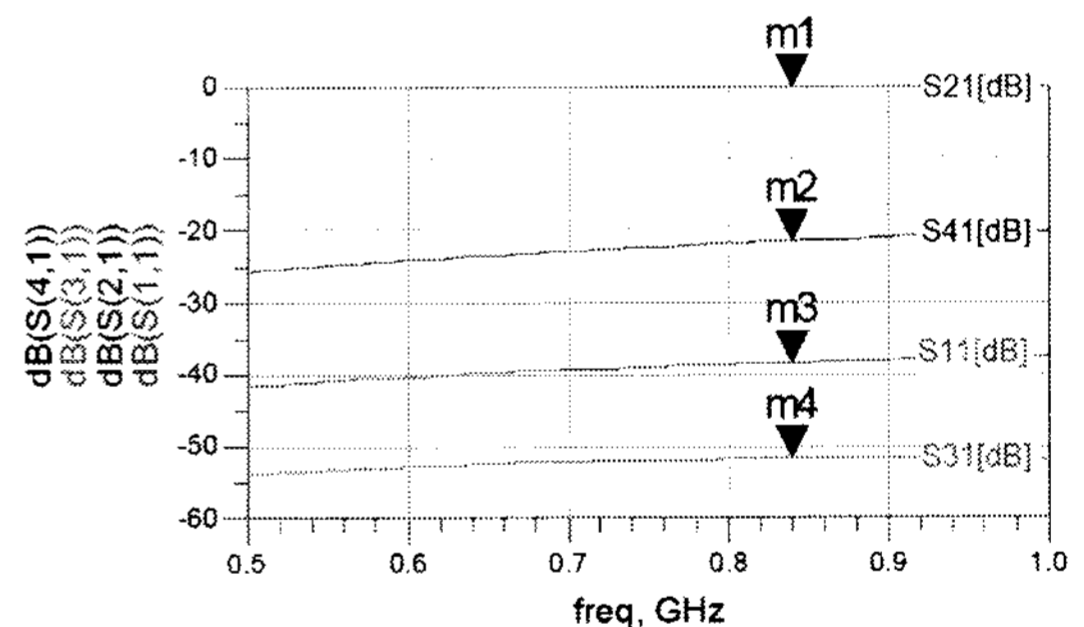
그림 7에 대한 특성이 그림 8에 제시되어 있는데, 목표 주파수에서 -21.4dB의 결합량을 가지며 -38dB의 단자 정합 특성, -52dB의 격리 특성과 31dB 이상의 방향도 (directivity), 그리고 -0.03dB의 극히 낮은 삽입 손실 특성을 보이고 있다. 따라서 그림 4로부터 심각한 성능 손실 (degradation)이 거의 없음을 알 수 있다.

한편, 그림 8처럼 그 특성을 확인해야 하는 이유는, 만약에 전력검출기 회로가 부가되었을 때 방향성결합기의

특성이 변하게 되면 최종적으로 전력을 검출할 때 설계한 것과 전혀 다른 값이 검출되는 것을 방지해야 하기 때문이다.



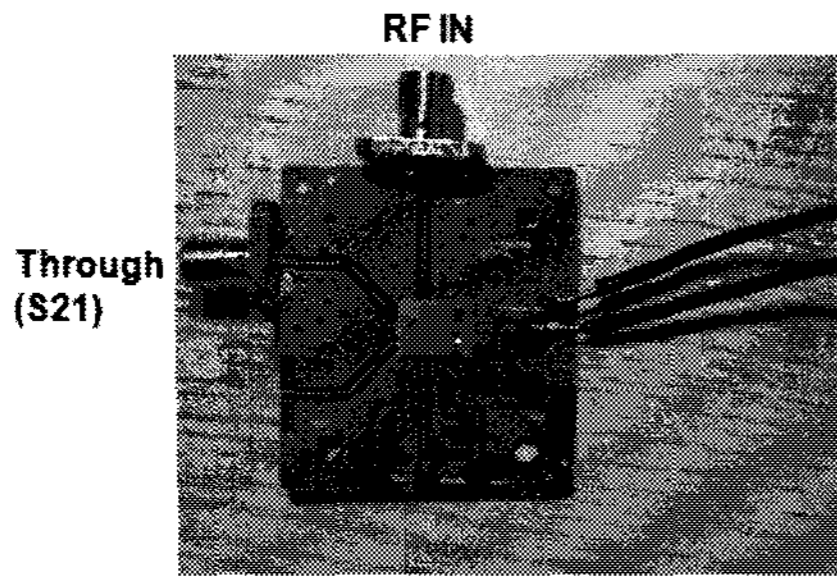
[그림 7] 전력검출부 회로를 추가한 LTCC의 레이아웃과 co-simulation을 위한 회로 정의, 그리고 상층면에 다이오드와 집중소자들이 실장되는 개념도



[그림 8] 그림 7에 대한 EM-circuit co-simulation 특성

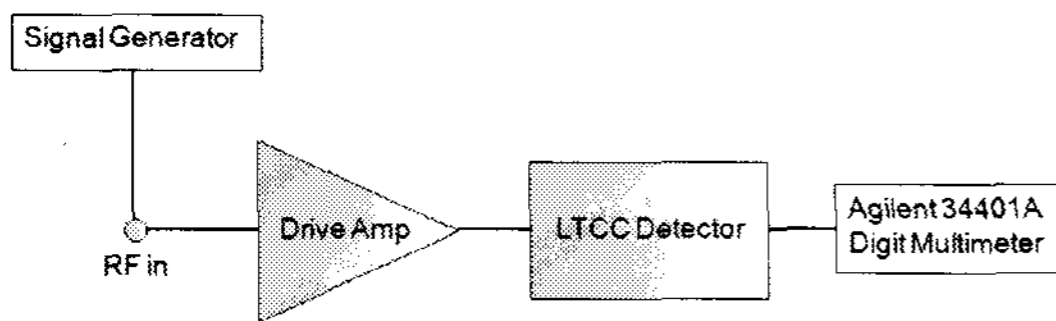
4. LTCC 전력검출부 제작 및 성능 측정

그림 9는 실제로 LTCC 전력검출부 회로를 제작하고, 이를 측정하기 위한 테스트 PCB 보드 위에 실장한 사진을 보여주고 있다. 제작한 LTCC 회로는, 본 논문의 연구 개발 대상인 전력검출부 자체는 물론, 추후에 추가로 진행하게 될 FEM 모듈 개발을 위한 면적까지 고려하여 7 x 5.5mm²의 크기로 결정하였다.

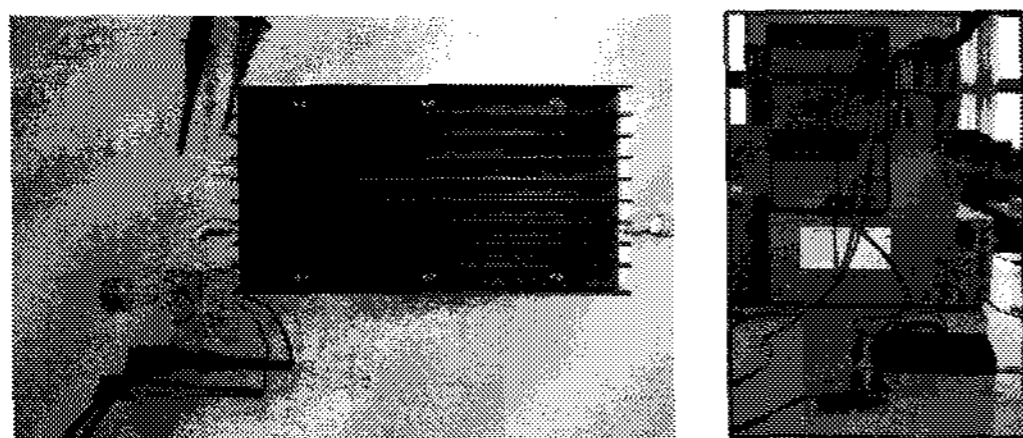


[그림 9] 제작된 LTCC 전력검출부 회로와 테스트용 PCB

그림 10은 성능 측정을 위한 구성도이다. 전력검출부는 송신부 전력증폭기의 출력단에 연결되어 안테나로 전달되는 출력전력의 크기를 모니터링해야 하므로, 30dBm의 출력을 갖는 구동전력증폭기를 전력검출부의 입력단, 즉 방향성결합기의 입력단에 연결해야 한다. 이 때 약 20dB로 커플링된 전력이 전력검출기 다이오드 회로로 인가되며, 이 때 전송(through) 단자로 직접 가는 전력은 터미네이터(terminator)로 연결해서 단락처리 해야 한다. 그리고 전력검출부 출력단에는 DC 전압값을 읽기 위한 장비를 연결한다.



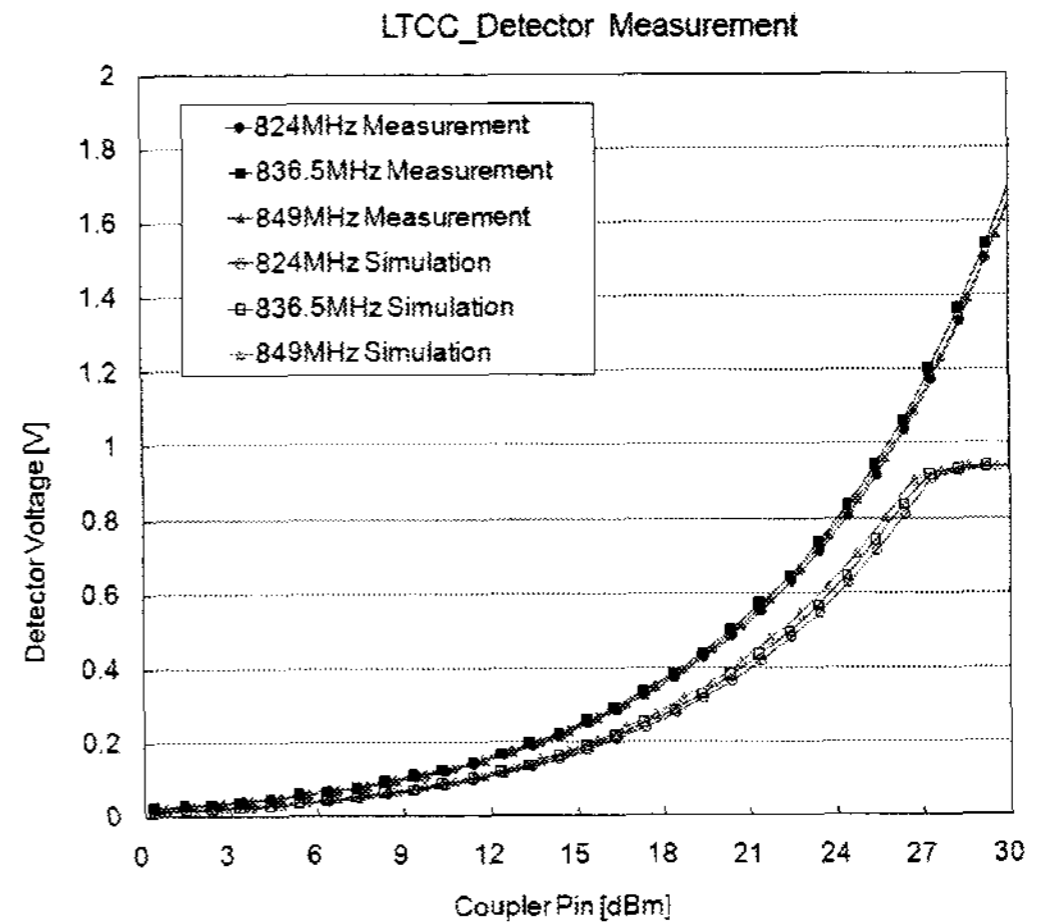
[그림 10] LTCC 전력검출부 회로의 성능 측정 구성도



[그림 11] LTCC 전력검출부 회로의 측정 장비 셋업

그림 11은 그림 10의 구성도에 따라 실제로 구성한 측정장비 셋업이다. 제작한 LTCC 전력검출부 회로에 대하여 그림 11의 측정 셋업을 이용하여 측정을 실시하였다.

그림 12는 제작한 LTCC 전력검출부 회로의 측정 성능 결과를 보여준다. 측정시 입력전력의 크기는 0dBm부터 30dBm까지 1dBm의 간격으로 변화시켰으며, 동일한 입력 조건에서 시뮬레이션한 결과까지 함께 비교하고자 하였다.



[그림 12] LTCC 전력검출부 회로의 성능 측정 결과

다이오드 제조사에서 시뮬레이션을 위해 제공한 spice 모델은 1V 이상의 출력 전압에 제한이 있는 모델이므로 시뮬레이션에서 1V 이상의 출력 전압은 마치 포화된 것처럼 보여서, 이 부분에 대한 비교는 무시해도 좋다. 그러나 정상적으로 시뮬레이션된 입력 영역과 측정된 성능을 보면 매우 유사한 결과를 보인다. 측정시 가장 낮은 입력 (사실은 전력증폭기의 출력) 수준인 0dBm이 입사될 때도 14mV의 비교적 높은 검출기 전압 특성을 보이고 있으며, 0dBm - +10dBm의 상대적으로 낮은 전력 범위에서 1dBm당 23mV 이상의 비교적 균일하면서도 선형적인 출력 전압 특성을 보인다. 또한 비교적 높은 전력 수준인 +10dBm - +30dBm의 범위에서는 1dBm당 0.1V 이상의 특성과 최고 1.7V의 우수한 출력전압 특성을 보이고 있어서 전력증폭기의 출력수준을 판별하기에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 CDMA 이동 단말용 송신 주파수 대역에서 출력전력의 크기를 모니터링 하여 전력조절부에 그 정보를 건네주는 기능을 하는 전력검출부를 LTCC 집적화 기술을 통해 구현하였다. 제작된 전력검출부는 스트립 선로형 방향성결합기와 추출된 전력의 크기를 측정하는 다이오드 검출기 회로로 구성되어 있으며, LTCC 다층 구조로 제작되었다. LTCC 전력검출부의 성공적인 개발을 위하여 회로 시뮬레이션은 물론이고, EM 시뮬레이션, EM-회로 연동 시뮬레이션(co-simulation)까지 실시하여 측정결과와 유사한 시뮬레이션 결과를 사전에 확보하였

다.

제작된 LTCC 구조의 전력검출부를 측정한 결과 0dBm - +10dBm의 상대적으로 낮은 전력 범위에서 1dBm당 23mV 이상의 비교적 균일하면서도 선형적인 출력 전압 특성을 보였고, 비교적 높은 전력 수준인 +10dBm - +30dBm의 범위에서는 1dBm당 0.1V 이상의 출력전압 특성과 최고 1.7V의 우수한 특성을 보였다. 본 논문에서 개발한 LTCC 전력검출부는 추후에 CDMA 무선통신 단말기용 FEM 개발에 직접 적용될 예정이다.

감사의 글

저자들은 LTCC 설계 및 제작 과정에서 기술적 조언과 도움을 주신 (주)RN2 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] A. Kryshtopin, R. Kravchenko, A. Chemyakov, K. Markov, G. Sevskiy, T. Kerssinbrock and P. Heide, "Novel High-Accuracy LTCC-Integrated Power Monitors for 2.4 and 5GHz Wireless-LAN Applications", International Microwave Symposium Digest, 2004, IEEE MTT-S, vol. 2, pp. 1277-1280, Jun. 2004.
- [2] 김희태, 오재석, 박의준, 이영준, 김병철, "온도보상 및 선형화된 전력검출기에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 제11권, 제8호, pp. 1386-1391, 2000년 8월.
- [3] D.-S. Kim, J. C. Kim, E. Kim, H. M. Cho, N. K. Kim, J. C. Park, "An LTCC Power Amplifier Module Integrated with a SAW Duplexer", 2005 European Microwave Conference, vol. 3, pp. 4, Oct. 2005.
- [4] D.M. Pozar, Microwave Engineering, Addison Wesley, Jun. 1990, pp.460-474.
- [5] M. Abouzahra, "Theory and Application of coupling Between curved Transmission Lined," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 30, no. 11, pp. 1988-1995, Nov. 1960.
- [6] J. Lange, "Interdigitated Stripline Quadrature Hybrid," IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 17, pp. 1150-1151, Dec. 1969.
- [7] Agilent Technologies, Application Note 963, "Impedance Matching Techniques for Mixers and

Detector".

- [8] Agilent Technologies, Application Note 1187, "Design of an Input Matching Network for DC biased 850MHz Small Signal Detector".

황 문 수(Mun-Su Hwang)

[준회원]



- 2006년 8월 : 순천향대학교 정보기술공학부(공학사)
- 2008년 6월 현재 : 순천향대학교 대학원 전기통신공학과 석사과정

<관심 분야>

초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델링 및 회로 응용, 발진기, 전력 검출 분야 등.

임 종 식(Jongsik Lim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 서강대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부(공학박사)
- 1993년 2월 ~ 1999년 3월 : 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단, 무선방송기술연구소 선임연구원
- 2003년 3월 ~ 2003년 7월: 서울대학교 BK21 정보기술사업단 박사후 연구원
- 2003년 7월 ~ 2004년 9월: 특허청 특허심사관
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송통신구단 전파기술연구그룹 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재: 순천향대학교 전기통신공학과 재직중

<관심 분야>

초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및 회로 응용 등임.

양 규 열(Gyu-Ryeol Yang)

[정회원]



- 2000년 02월: 경남대학교 전자공학과(공학사)
- 2000년 03월~2000년 09월: 한국전기연구원(KERI) 위촉연구원
- 2000년 10월~현재: (주) 쏘닉스 선임연구원

<관심 분야>

반도체 소자 및 재료, 무선통신 시스템, High Power Devices 등.

안 달(Dal Ahn)

[정회원]



- 1984년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학사)
- 1986년 2월: 서강대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1990년 8월: 서강대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1990년 8월 ~ 1992년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1992년 3월 ~ 현재: 순천향대학교 전기통신공학과 교수

<관심 분야>

RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계 등임.