

마이크로파 회로의 성능 측정을 위한 테스트 픽스처의 개발

임종식^{1*}, 박형식², 진철호³, 한상민¹, 안달¹
¹순천향대학교 ICT융합학과, ²(주)휴바, ³(주)삼성정밀

Development of a Test Fixture for Measuring Performances of Microwave Circuits

Jongsik Lim^{1*}, Hyung-Sik Park², Cheul-Ho Jin³, Sang-Min Han¹, Dal Ahn¹

¹Department of ICT Convergence, Soonchunhyang University

²HUBA Co., Ltd.

³Sansung Precision Co., Ltd.

요약 본 논문에서는 무선시스템에 사용되는 마이크로파 회로의 성능을 측정하기 위한 마이크로파 테스트 픽스처의 개발에 대하여 기술한다. 마이크로파 회로의 성능을 측정하기 위해서는, 프로토타입 회로의 입출력단에 동축형 RF컨넥터를 납땜하고, 벡터 회로망 분석기라는 장비를 이용하여 S-파라미터 특성을 측정하는 것이 기본이다. 그런데 어떤 회로에 RF컨넥터가 납땜으로 부착되면 컨넥터의 교체나 수리가 필요할 경우에, 기존의 납땜 부위를 제거해야 하는 불편이 매우 크다. 이에 본 연구에서는 컨넥터의 납땜 없이도 초고주파 회로의 성능을 편리하게 측정할 수 있는 테스트 픽스처를 개발한다. 개발된 픽스처에는 탈부착이 가능한 RF컨넥터가 입출력 단자에 기계적으로 체결되어 있다. 따라서 마이크로파 신호의 전달이 납땜 대신 기계적 접촉 방식으로 이루어지므로 매우 편리하고 빠르며 반복 측정이 가능하다. 개발된 픽스처를 이용하면 초고주파 회로의 성능 측정에 소요되는 시간이 종래의 컨넥터 납땜 방법에 비하여 1/40 이하로 줄어든다.

Abstract This paper describes the development of a microwave test fixture that measures the performance of microwave circuits for wireless systems. To measure the performance of microwave circuits conventionally, coaxial RF connectors are soldered to the input/output ports of the prototype circuit, and S-parameters of the circuits are measured on vector network analyzers. However, once the RF connector is soldered to the circuit, it is not easy to replace it with another one because it is very difficult to remove the soldered section. In this work, a test fixture is developed that measures microwave circuits easily without soldered connectors. The proposed fixture adapts RF connectors at the input/output ports, providing a mechanical contact without soldering. Instead of through solder, the microwave signal flows through contact points between the mechanically combined RF connectors and the microwave circuits so measurements can be made easily, quickly, and repeatedly. The required time for measurement using the developed fixture is shorter than 1/40 of the conventional soldered connector method.

Keywords : Test Fixture, Fixture, Microwave Circuit, RF, RF Connector

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004)과 순천향대학교의 지원으로 수행하였음.

*Corresponding Author : Jongsik Lim(Soonchunhyang University)

email: jslim@sch.ac.kr

Received July 21, 2023

Revised August 31, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

무선통신을 포함한 각종 무선응용을 위한 시스템 구성 시, 다수의 마이크로파 (초고주파) 회로가 사용된다. 마이크로파 회로에는 능동회로에 증폭기, 주파수혼합기, 발진기 등이 있으며, 수동회로에는 여파기, 전력분배기/결합기, 커플러 등이 있다. 마이크로파 대역에서 동작하는 모든 마이크로파 회로는 연구개발 과정에서 개별 회로 단위의 초기 프로토타입(prototype) 회로를 설계 및 제작하고, 성능을 측정하여 검증한 후 양산 과정을 거쳐 무선시스템의 핵심 구성요소로 삽입되어 사용된다.

마이크로파 회로의 개발과정에서, 종래에는 그리고 지금도 대부분 프로토타입 회로의 입출력단에 RF컨넥터를 납땜하여 그 성능을 측정한다[1-3]. 납땜에 의한 컨넥터의 연결은, 납땜 작업 자체가 번거로운 과정이기는 하나, 마이크로파 신호 전달 성능이 우수하다는 점 때문에 널리 사용되는 방법이다.

그런데 연구개발 과정에서 프로토타입 회로의 수정이나 교체가 필요하거나, 또는 RF컨넥터나 납땜 부위 파손으로 인하여 프로토타입 회로 및 RF컨넥터를 교체해야 할 필요가 있을 때, 기존 납땜 부위를 제거하고 새로운 납땜을 실시해야 하는, 매우 번거로운 과정을 겪어야 하는 문제가 있다. 따라서 납땜작업이 없이도 회로의 성능을 측정할 수 있는 마이크로파 테스트 픽스춰에 대한 필요성이 제기된다[4,5].

이에 본 연구에서는 마이크로파 회로의 연구개발 과정에서 프로토타입 회로의 성능 측정시, 번거로운 작업과 장시간이 요구되는 RF컨넥터의 납땜 과정 없이, 곧바로 프로토타입 회로의 성능을 측정할 수 있는 마이크로파 테스트 픽스춰 개발에 대하여 기술한다. 개발될 픽스춰의 주요 기능적 장점으로, RF컨넥터의 납땜이 불필요하며, 프로토타입 회로의 크기에 제한받지 않으며, RF 신호의 연결 위치에도 구애받지 않고 프로토타입과 RF컨넥터 사이에 마이크로파 신호의 전달이 가능하며, 매우 신속하게 반복적으로 측정이 가능하다는 점을 들 수 있다. 이제 본문에서 자세하게 기술하기로 하겠다.

2. RF컨넥터 솔더링에 의한 종래의 방법

Fig. 1은 마이크로파 회로의 성능 측정시 매우 널리 사용되는 RF컨넥터의 예를 보여준다. 중심핀(center pin)과 주변 접지 도체부 사이에 유전체 물질이 삽입되

어 마이크로파 대역에서 필요한 특성 임피던스(예를 들면 50Ω)를 구성하는 동축 컨넥터 구조를 형성한다.



Fig. 1. Photo of microwave RF coaxial connectors

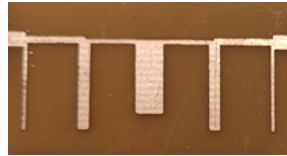


Fig. 2. Example of a microwave prototype circuit

Fig. 2는 무선통신 등 무선시스템에서 널리 사용되는 마이크로파 프로토타입 회로의 한 예이다. 유전체 기판의 상면에 마이크로스트립 선로(microstrip line)로 구성되는 초고주파 대역 회로의 패턴이 구현되고, 바닥은 넓은 접지도체면으로 구성된다.

마이크로파 회로의 성능을 측정하기 위해서는 Fig. 3에 보인 것과 같이 RF컨넥터를 회로의 입출력 단자 선로에 연결해야 한다. 컨넥터의 중심핀과 회로의 입출력 단자의 연결 선로를 납땜(soldering)으로 연결하는 방법이 널리 사용되고 있다.

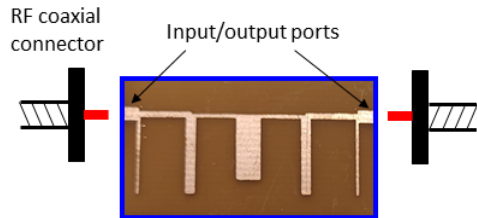


Fig. 3. RF connectors and prototype circuit

종래의 방법인 납땜에 의한 컨넥터 부착에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 4를 제시하였다. 두께(H)가 얇은 유전체 기판의 측면을 바라본 Fig. 4(a)에서, 컨넥터의 중심핀이 회로의 입출력 단자 선로에 접촉되고, 그 주변이 납땜으로 덮인다는 것을 알 수 있다. 이때 컨넥터의 주변부 금속과 기판 바닥의 접지도체면도 Fig. 4(b)처럼 납땜으로 연결하여야 마이크로파 신호 전송에 필요한 접지면이 형성된다. Fig. 4(c)는 RF컨넥터와 마이크로파 회로의 입출력 단자간 실제 납땜에 의한 연결을 보여주는 예이다.

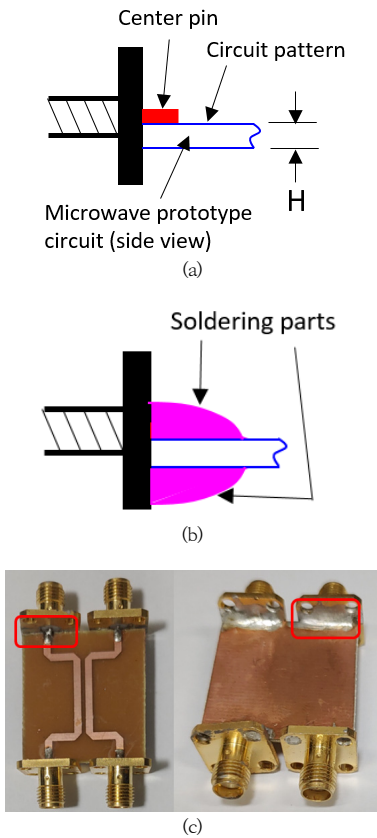


Fig. 4. Concept of the soldering between a RF connector and prototype circuit (a)side view (b)soldering parts (c)practical example of soldering for RF connectors

Fig. 4의 방법에 의한 컨넥터의 연결은 종래로부터 현재까지 매우 널리 사용되는 방법으로 몇 가지의 장점을 가지고 있다. 납땜이 튼튼하게 잘 이루어질 경우 마이크로파 신호의 전송이 저손실로 잘 이루어진다는 장점이 있다. 또한 RF컨넥터의 납땜을 위한 설비가 매우 저렴하다. 특히 납땜기의 비용이 상대적으로 매우 저렴하다는 점 때문에 해당 분야 연구개발 과정에서 널리 사용되고 있다.

3. 마이크로파 픽스처의 설계

Fig. 4의 방법이 해당 기술 분야의 연구개발 과정에서 오랫동안, 그리고 지금도 널리 사용되고 있지만, 사실 불편한 점이 매우 많다. 저손실로 마이크로파 신호를 보내기 위한 양질의 납땜 작업 결과를 얻는 과정이 실은 매우

번거롭고, 시간이 많이 소요되며, 작업자의 건강 문제까지 불러일으킨다는 단점이 있다. 무엇보다도 가장 큰 문제점은 한 번 납땜이 완성될 경우 피측정 회로(device under test, DUT)의 교체나 RF컨넥터의 교체가 매우 어렵다는 점이다. 연구개발 과정에서 DUT의 수정이나 교체가 필요하거나, 또는 RF컨넥터나 납땜 부위의 파손으로 인하여 이를 교체할 필요가 수시로 발생한다. 그런데 한 번 작업이 완료되어 납땜이 고정되면 이 부분을 제거하기도 어렵고, 또한 어렵사리 제거하더라도 새로운 마이크로파 회로나 컨넥터를 이용하여 다시 납땜을 가하여야 하므로, 여기에 소요되는 시간적, 비용적 손실이 상당하다는 단점이 있다. 따라서 납땜에 의하지 않고도 마이크로파 회로의 성능을 쉽게 측정할 수 있는 장치인 마이크로파 테스트 픽스처가 개발된다면 해당 분야의 연구개발 과정에서 매우 편리하게 사용될 수 있을 것이다.

납땜에 의한 마이크로파 측정 회로 제작에 따라오는 단점이 극복되어야 하므로 본 연구에서 개발하려는 마이크로파 테스트 픽스처는 설계시 다음과 같은 요구사항을 만족해야 한다.

(1)마이크로파 회로의 성능을 측정하기 위한 입출력 연결용 RF컨넥터를 사용하지 않으므로, 납땜도 불필요하다. 그러나 Fig. 5에 보인 것처럼 RF컨넥터의 중심핀이 마이크로파 회로 윗면 입출력 단자에 분명히 접촉되어야 한다.

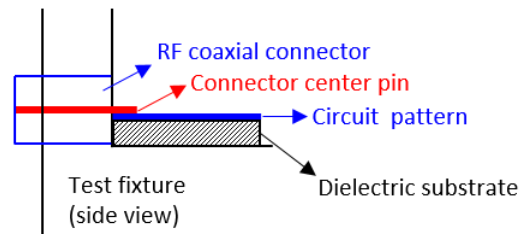


Fig. 5. Concept of the contact between RF connectors and microwave circuits

(2)픽스처의 입출력 단자에 RF컨넥터가 기계적으로 장착되어야 하며, RF컨넥터가 파손되거나 고장시 이를 손쉽게 교체할 수 있어야 한다.

(3)마이크로파 회로의 입출력 단자간 거리를 기준으로, 통상적으로 사용되는 범위내에서 회로가 임의의 크기를 가져도 사용 가능해야 한다. 즉, 가로축 크기의 가변성을 수용해야 하는데, Fig. 6이 이 개념을 설명해 주고 있다.

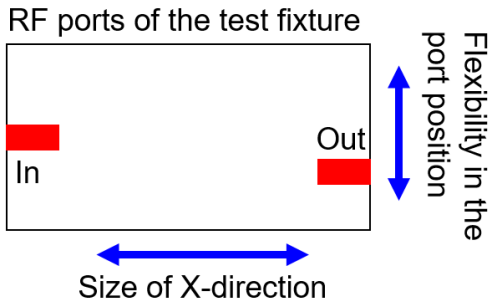


Fig. 6. Required flexibility in size of the microwave test fixture

(4)마이크로파 회로의 단자 위치가 통상적으로 사용되는 범위내에서 세로축상 임의의 위치에 있어도 사용 가능해야 한다. 즉, 픽스춰의 세로축에 가변성이 있어야 하는데, 이 개념도 역시 Fig. 6이 설명해 주고 있다.

(5)마이크로파 회로에 사용된 유전체 기판이 통상적으로 사용되는 범위내에서 임의의 두께를 가져도 충분히 사용 가능해야 한다. 즉, 임의의 두께의 유전체 기판에 대해서도 픽스춰에 장착된 RF컨넥터와 잘 연결되어야 한다.

(6)픽스춰를 구성하는 금속기구물의 접지(chassis ground)와 마이크로파 회로의 접지면 사이의 통전(short) 특성이 좋아서 마이크로파 회로의 성능이 잘 측정되어야 한다.

4. 마이크로파 픽스춰의 제작 및 성능

위와 같이 종래 마이크로파 회로 제작의 문제점을 해결하고, 필요한 요구조건들을 반영한 마이크로파 테스트 픽스춰를 설계하고 이를 제작하였다. 캐드 설계를 위하여 기계적 구조물 설계에 널리 사용되는 Autodesk사의 Inventor2024를 사용하였다[6]. 제작 이후 기계적 결합 과정에서의 오류를 사전에 제거하기 위하여, 제작전에 3차원 구조물들의 체결을 확인한 후 기계적 가공을 실시하였고, 접지면 사이의 접촉과 전기적 통전 특성을 보강하기 위하여 RF컨넥터 체결 부위에 금도금을 가하였다.

Fig. 7은 제작된 픽스춰가 마이크로파 회로의 크기에 따라 가변될 수 있음을 보여준다. 마이크로파 회로 관련 연구개발에서 제작되는 프로토타입 회로의 통상적인 크기는 10~100mm 이내가 대부분이다. 제작된 픽스춰는 최대 104mm의 크기의 회로를 수용할 수 있다(Fig. 7(a)). 필요시 더 길게 확장되도록 설계를 변경하여 제작

할 수 있으나, 사용빈도수를 고려하여 100mm를 약간 넘게 결정하였다. Fig. 7(b)는 본 개발에서 한 예로서 선택한 길이 30mm의 마이크로파 저역통과여파기 회로를 픽스춰에 장착한 사진이다.

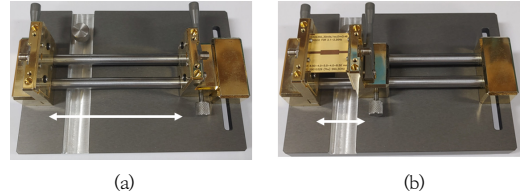


Fig. 7. Fabricated microwave test fixture (a)maximum range (104mm) (b)practically loaded circuit as an example (size=30mm)

Fig. 8은 마이크로파 회로의 연결단자 위치가 세로축 방향으로 어느 정도 가변성이 있어도 제작한 픽스춰가 충분히 이를 수용할 수 있음을 보여주는 사진이다. Fig. 8은 편의상 입력단자의 위치를 고정시킨 후 출력단자의 위치를 각각 상,하 한계까지 이동시켜 본 사진을 보여준다. 출력단자 위치의 세로축 최대 가변 길이는 37mm이다.

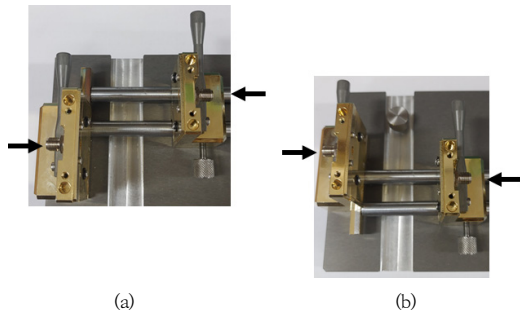


Fig. 8. Flexibility of the port position (maximum deviation=37mm) (a)upper limit (b)lower limit

Fig. 9(a)는 제작한 픽스춰에 기계적으로 장착한 RF 컨넥터를 외부에서 바라본 사진을 보여주고 있고, Fig. 9(b)는 내부에서 마이크로파 회로의 입출력 연결선로와 RF컨넥터의 중심핀과의 접촉장면을 보여주고 있다. 이 그림에서 명백하게 알 수 있듯이 납땜에 의하지 않고도 기계적 접촉(contact)으로 마이크로파 신호가 잘 전달될 수 있다는 사실이다. 또한 RF컨넥터가 어떤 원인에 의하여 파손되거나 고장이 나도 기계적으로 체결된 RF컨넥터를 교체하기만 하면 되므로, 납땜없이 픽스춰를 이용한 마이크로파 회로의 성능 측정이 반복적이고도 항구적으로 가능하다.

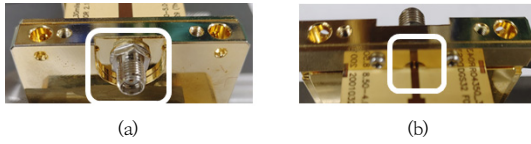


Fig. 9. Combined RF coaxial connector (a)outside view (b)inside view

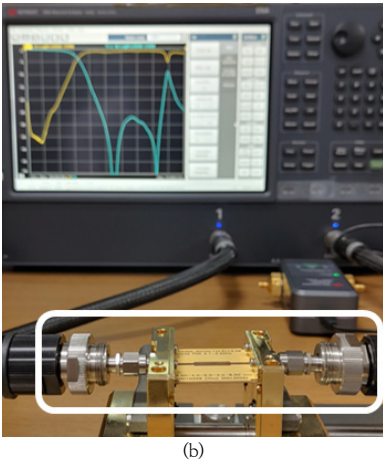
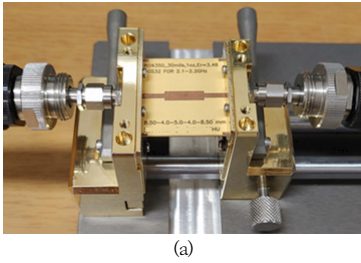


Fig. 10. Practical measurement using the developed microwave test fixture and the circuit sample (a)microwave circuit loaded on the fixture (b)the moment of measurement

Fig. 10(a)는 실제 샘플로 선택한 마이크로파 저역통과여파기 회로의 성능을 측정하기 위하여 픽스처에 장착한 장면이다. 마이크로파 회로의 성능은 해당 연구 분야에서 널리 사용되는 초고주파용 벡터 회로망 분석기 (vector network analyzer, VNA)라는 장비를 이용하여 측정된다. 본 연구에서는 Keysight社의 VNA 가운데 하나인 E5080B를 사용하였다[7,8]. Fig. 10(b)는 정해진 규칙과 이론에 의하여 사전에 캘리브레이션 (calibration)이 이루어져 있을 때, 픽스처에 결합된 마이크로파 회로의 성능이 실제로 측정되고 있는 장면을 보여준다[9].

Fig. 10(b)에서 VNA로 실시간 측정되고 있는 회로의

성능이 이처럼 신뢰성있게 얻어진다는 것을 보이기 위한 사례로 Fig. 11이 제시되었다. 본 논문의 주제가 마이크로파 회로의 설계나 성능 개선에 관한 것은 아니므로, 여기서 마이크로파 회로의 특성에 대한 언급은 하지 않는다. 하지만 Fig. 11과 Fig. 10(b)를 통하여 마이크로파 회로의 성능이 픽스처 위에서 실시간으로 잘 측정되고 있음을 알 수 있다.

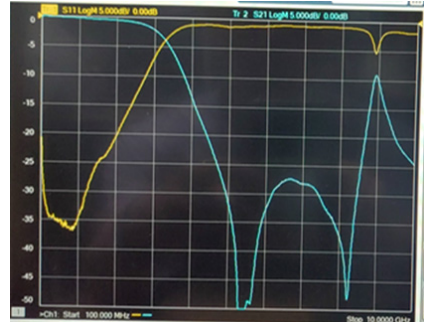


Fig. 11. Practically measured performances of the microwave circuit on the fixture as an example

이처럼 측정용 마이크로파 회로가 준비되어 있고 VNA의 캘리브레이션이 이루어져 있을 때, 회로를 픽스처에 장착하여 전기적 특성을 측정하는데 걸리는 시간은 30초가 채 걸리지 않는다. 그러나 수작업에 의한 RF컨넥터의 납땜 방법을 이용할 경우, 아무리 숙련된 경험자라고 하여도 RF컨넥터 1개당 최소한 10분 이상의 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 소요시간을 비교하기 위하여, Fig. 10에 보인 동일한 회로의 입출력 단자에 각각 RF컨넥터를 납땜하여 측정하였는데, 숙련된 손기술로 매우 신속히 진행하였음에도 약 20분 이상이 소요되었다. 물론 측정된 마이크로파 회로가 같으므로 측정된 성능도 동일하다. 따라서 개발한 픽스처를 이용한 경우, RF컨넥터가 두 개만 필요한 단순한 2단자 회로를 기준으로 비교해도 약 1/40 이하의 시간만이 소요된 것이다. 또한, 개발한 픽스처를 이용하면, 마이크로파 회로의 연구개발 과정에서 필요한 다수의 프로토타입 회로의 성능을 측정할 때에도 신속하게 반복측정이 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 무선통신용 마이크로파 회로의 성능을 원활하게 측정하기 위하여 마이크로파 테스트 픽스처의 개발에 대하여 기술하였다. 마이크로파 회로의 초고주파

대역 성능을 측정하기 위하여, 종래에는 프로토타입 PCB (printed circuit board) 회로에 동축 구조의 RF 컨넥터를 납땜하여 회로망 분석기에 연결하는 방법을 사용하였다. 이 과정에서 개발자들의 수작업을 위한 매우 긴 시간과 노력이 요구되었고, 이는 곧 전체적으로 연구 개발 비용의 증가로 이어졌다. 또한 피측정 PCB 회로나 RF컨넥터의 교체가 필요할 시 매우 큰 노력과 번거로운 작업 과정을 필요로 하였다.

본 연구에서 개발된 마이크로파 테스트 픽스처는 RF 컨넥터가 픽스처의 단자 부분에 기계적으로 체결되어 있어서 RF컨넥터에 대한 납땜의 필요성이 전혀 없다. 그래서 마이크로파 회로의 입출력 단자선로와 컨넥터의 중심핀이 접촉하는 방식으로 측정이 이루어지므로 신속하고도 편리한 측정이 가능하다. 혹시 극히 낮은 확률로 RF 컨넥터의 중심핀이 손상을 입더라도, 단순히 새로운 것으로 교체만 해주면 해결되므로 다수의 피측정 PCB 회로가 있더라도 신속하고도 거의 항구적인 반복성을 지닌 채 측정이 가능하다.

개발한 픽스처를 활용할 경우 측정 시간이 크게 절약되는 것을 확인하기 위하여, 한 예로써 마이크로파 저역 통과여파기의 프로토타입 회로에 대하여, 납땜에 의한 종래의 방법과 개발한 픽스처를 이용한 경우의 측정시간을 비교하였다. 동일한 프로토타입 회로와 벡터 회로 망분석기를 이용한 측정 과정에서, 픽스처를 이용할 경우에 약 1/40 이하의 시간만이 소요되었으며, 신속하고도 반복적인 측정이 가능하였다. 따라서 개발한 마이크로파 테스트 픽스처가 무선시스템 관련한 연구개발 과정에서 프로토타입 회로의 성능 측정을 편리하고 신속하고 원활하게 하도록 하는데 큰 기여를 할 것이라 기대할 수 있다.

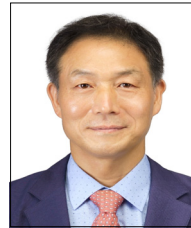
References

- [1] G. Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design, Ch. 1, Prentice-Hall, 1984.
- [2] A. Rahn, The Basics of Soldering, Ch.1, John Wiley & Sons, 1993.
- [3] G. Brady, et al., Materials Handbook, pp.768-770, McGraw Hill, 1996.
- [4] S. Wartenberg, RF Test Fixture Basics, *Microwave Journal*, vol. 46, no. 6, pp.22-40, Jun. 2003.
- [5] Agilent Technologies, Application Note AN 1287-9, In-fixture Measurements Using Vector Network Analyzers, 1999.

- [6] Autodesk <https://www.autodesk.co.kr/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/KOR/System-requirements-for-Autodesk-Inventor-2024.html>
- [7] Keysight Technologies, 5992-3843EN, E5080B ENA Series Vector Network Analyzer, 2022.
- [8] Keysight Technologies, 5963-3743E, Electronic Calibration (E-Cal) Modules for Network Analyzer - Technical Overview, 2022.
- [9] A. Ferrero, F. Sanpetro and U. Pisani, "Multiport Vector Network Analyzer Calibration: A General Formulation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, no. 12, Dec, 1994, pp.2455-2461. DOI: <https://doi.org/10.1109/22.339781>

임 종 식(Jongsik Lim)

[종신회원]



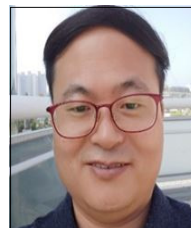
- 1991년 2월 : 서강대 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 서강대 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 2005년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 순천향대전기공학과 교수

<관심분야>

초고주파 및 무선통신용 회로·부품 설계, 능동·수동 소자 모델링과 회로 응용, 주기구조의 모델링과 회로 응용 등

박 형 식(Hyung-Sik Park)

[정회원]



- 2001년 2월 : 순천향대 전자공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 순천향대 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 ~ 2004년 5월 : 스마트전자 주임연구원
- 2004년 5월 ~ 2007년 8월 : 지티텔레콤 선임연구원
- 2007년 8월 ~ 2019년 7월 : KEC 책임연구원
- 2019년 10월 ~ 현재 : (주)휴바 연구소장 재직중

<관심분야>

무선통신용 수동 회로 및 부품 설계 등

진 철 호(Cheul-Ho Jin)

[정회원]



- 1996년 2월 : 대덕공고 전자기계과 졸업
- 1996년 3월 ~ 2003년 10월 : (주)센추리 근무
- 2003년 11월 ~ 현재 : (주)삼성정밀 설계팀장, 부장 재직중

<관심분야>

산업용 정밀 기계 설계 및 가공 등

안 달(Dal Ahn)

[종신회원]



- 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 : 순천향대 전기공학과 교수

<관심분야>

RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계 등

한 상 민(Sang-Min Han)

[정회원]



- 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 : 삼성종합기술원 전문연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 순천향대 정보통신공학과 교수

<관심분야>

RF 시스템, Low power RF Transceivers, Active Integrated Antenna Systems 등