

접촉 비선형성의 변화에 따른 RF부품의 Passive IMD 특성

정석현*, *김진태, *조인귀, *정명영, 이성재
충남대학교 전자공학과, *한국전자통신연구원 부품기술개발부

Passive IMD Characteristics of RF Components in Contact Nonlinearity

Seok-Hyun Jung^o, Jin Tae Kim*, In-Kui Cho*, Myung-Yung Jeong*, Song-Jae Lee
Dept. of Electronic Engineering, Chungnam National University

*Component Technology Development Department, Electronics and Telecommunications
Research Institute

요약

금속간 접촉에서의 Passive IMD는 Contact의 비선형 요인에 의해 발생된다고 알려져 있다. 금속접촉을 이루는 RF Connector의 PIMD 측정은 측정환경의 변화로 인해 재현성 있는 측정이 어렵다. 본 논문에서는 접촉력, 온도 및 습도로 인한 접촉조건의 변화에 의해 발생하는 PIMD 특성을 연구하고자 4 종류의 도금 재질을 갖는 어댑터를 설계 및 제작하였다. 제작된 어댑터의 PIMD 측정결과, PIMD 수준이 주로 접촉력 및 온도에 영향을 받으며, 측정환경의 명확한 규정이 PIMD의 측정 및 제어에 필수적임을 확인하였다.

I. 서론

RF Passive 소자에서 발생하는 PIMD는 그 발생영역이 모든 RF 경로상에 존재하고 그 수준을 예측하기 어렵기 때문에 지금까지의 PIMD 발생원인에 대한 많은 연구에도 불구하고 측정 기술 및 제어 기술의 확보가 쉽지 않았다. 더욱이 RF 경로상에 존재하는 비선형 특성에 의한 PIMD의 발생은 그 크기가 매우 낮고, 접촉 비선형성과 물질 비선형성을 동시에 갖고 있는 복잡성으로 인하여 일반적인 RF부품의 PIMD 측정이 신뢰성을 갖기는 매우 어렵다. 때문에 측정환경에 대한 객관적 규정의 확립이 무엇보다도 중요하다.

일반적으로 고전력 RF Connector에서는 상당한 수준의 PIMD가 나타나는 것으로 알려지고 있는데[1,2], 이에 대한 연구 결과들은 아직까지 미미하다. 금속과 금속사이의 Contact interface에 의한 전류 밀도 관점과 접촉면에서의 multispot contact 모델을 통한 constriction resistance 이론 등을 도입하여 PIMD 문

제에 접근하고 있다.[3, 4]

PIMD와 관련하여 metal contact에서 RF신호의 전달특성에 관한 연구는 아직까지 체계화 되어 있지 못한 실정이나, 실제로 PIMD 발생은 contact 조건에 따라 영향을 받고 있는 것으로 알려지고 있다.

본 논문에서는 금, 은, Suco, 니켈 등의 도금재료를 사용한 RF 커넥터들에 대하여 Contact 조건의 변화요인으로 작용할 수 있는 주변온도, 상대습도, 그리고 contact pressure의 변수가 PIMD에 미치는 영향을 실험적으로 확인하고 그 결과를 분석하였다.

II. 이론적 고찰

모든 solid surface는 미시적인 관점에서 보면 roughness가 존재한다. 이 경우 두 금속 사이의 물리적 접촉은 수 많은 spot에 의해 이루어진다. 전류의 흐름은 금속의 접촉면을 통해 이루어지므로 spot이 형성된 곳으로

전류들이 집중되는 constriction 현상을 유도한다. 때문에 금속 접촉에서 전류가 흐를 수 있는 면적이 감소하고 결과적으로 전기적인 저항이 증가하는데 이를 constriction resistance(R_c)라 하고 금속의 전체 저항 R 에 다음과 같이 기여한다.

$$R = R_b + R_c \quad (1)$$

여기서 R_b 는 금속의 선형 저항이다.

Spot에서의 전류밀도는 접촉면 사이의 전압강하로 다음과 같이 표현된다.

$$j = \frac{16\lambda}{\pi\rho_0\alpha} \arctan^2\left(\frac{V}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{\rho_0\lambda}}\right) \quad (2)$$

여기서 V 는 전압강하, α 는 저항의 열적상수, ρ_0 는 접촉면의 저항, 그리고 λ 는 열전도율이다. 금속의 선형 저항 R_b 는 전체 전압과 전류에 무관하지만 constriction resistance R_c 는 spot의 전압강하에 의해 식 (2)과 같이 비선형적으로 변화한다. 이 비선형 저항의 변화는 식 (1)에서 표현되는 금속의 전체저항 R 에 비선형적인 요소로 작용하여 궁극적으로는 PIMD를 유발하는 주요인으로 작용한다.

Spot 주위로의 전류 집중은 국소적인 constriction resistance의 증가 외에 Spot 자체의 thermal heating을 유도한다. 이 heat는 금속의 thermal conductivity λ 에 변화를 주어 식 (2)에서와 같이 직접적인 전류밀도의 변화를 유도하고 비선형 저항의 기여를 증가시킨다. 바꿔 말하면 외부에서 금속에 열을 가하면 금속의 thermal conductivity는 감소하고 spot 전류밀도의 비선형적 변화는 증가한다. 전류밀도의 변화는 다시 금속의 비선형 저항 R_c 의 역할을 가중시켜 결과적으로 금속의 PIMD 수준을 증가시키는 요소로 작용할 수 있다. 즉 금속의 온도가 올라가면 PIMD의 수준은 증가하는 것이다.

금속 접촉면에 수분이 침투하면 spot 사이의 빈 공간 영역에서 금속이 수분과 반응하여 산화막을 형성한다. 이 산화막은 금속의 표면 원 특성을 왜곡시키고 비선형성을 증가시킨다. 특히 RF 부품의 접촉면에 형성된 산화막은 미세한 spot 접촉을 방해하여 금속의 전체 저항을 증가시킨다. 더욱이 산화막이 형성된 금속에 고전압의 신호를 흘려보낼 경우 접촉면에서 microdischarge,

tunneling effect 등을 유도하여 궁극적으로 금속 접촉면에 여러 가지 비선형적 현상들을 유발하여 PIMD의 수준을 증가시키는 요소로 작용한다.

이상과 같이 금속 접촉면의 비선형성에 의한 PIMD의 증가는 접촉력, 온도 및 습도와 같은 환경의 영향에 크게 의존하는 것으로 판단된다.

III. 실험 및 검토

환경적인 비선형성을 실험적인 측정을 통하여 규명하기 위해 몇 가지 도금 재료를 이용한 RF 어댑터를 제작 측정하였다. 제작한 RF 어댑터는 내경이 7mm, 외경이 16mm인 DIN type 규격을 따랐고, 표 1에 본 실험에서 사용한 RF 어댑터의 사양을 이용한 도금재료 별로 정리하였다.

표 1. 어댑터의 제작

DIN 7/16" Male to Male Adapter	PIN 도금	BODY 도금	수량
금, 은, 니켈, Suco울 36로 도금	금7.95 μ m	금7.95 μ m	4개
	은6.28 μ m	은6.28 μ m	4개
	니켈12.95 μ m	니켈12.95 μ m	4개
	Suco10.66 μ m	Suco10.66 μ m	4개

제작에 사용된 도금재료의 전도율은 은, 금, 니켈, Suco 순으로 각각 6.17×10^7 (S/m), 4.10×10^7 (S/m), 1.46×10^7 (S/m), 2.15×10^7 (S/m)이다.

위와 같은 전도율을 갖는 금속은 각각 다른 skin depth(δ)를 갖게 된다. 따라서 동일한 RF 에너지 전달조건을 찾고, 그 에너지의 대부분이 한 매질에 의해서 전달될 수 있도록, 실험 결과를 바탕으로 36의 두께로 도금하였다.

측정에 사용된 장비는 Summitek사의 PIMD Analyzer(SI-900A)와 SI-20A Termination이다. 이 장비의 잔류(residual) IM 수준은 -120 dBm(@ 2×20 W)이며, 측정 가능 주파수는 GSM 대역인 935 ~ 960 MHz이다.

측정 시험 주파수는 f_1, f_2 가 각각 937MHz, 960MHz이며, 입력 전력은 f_1, f_2 동일하게 40dBm(10W)를 사용하였다.

IM 주파수는 911MHz에서 발생하였고, 측정 결과는 시간에 따른 PIMD 특성을 dBc 단위로 측정하였다.

metal contact 조건 변화에 따른 spot 접촉면의 변화를 유도하기 위해 connector를 조일 때 가해주는 torque를 다르게 하여 contact pressure의 변화를 유도하였고 각 토크의 크기별로 PIMD의 수준을 측정하였다. RF 커넥터의 온도 변화에 따른 PIMD 수준의 측정의 경우, 상온 20°C에서 어댑터를 연결하고 측정 장비의 warming-up 시간을 15분으로 하여 PIMD의 초기값을 측정하였고, 40°C~80°C 사이에서 10°C간격으로 매 온도에서 17분의 간격으로 3분 동안 측정치를 기록하였으며, 측정치는 동일한 도금재료로 제작된 4개의 커넥터 측정치를 평균하여 측정하였다.

측정환경의 습도 변화에 따른 PIMD 수준을 측정하기 위해서 습도 95%의 상온에서 시간에 따른 PIMD 변화를 측정하였다.

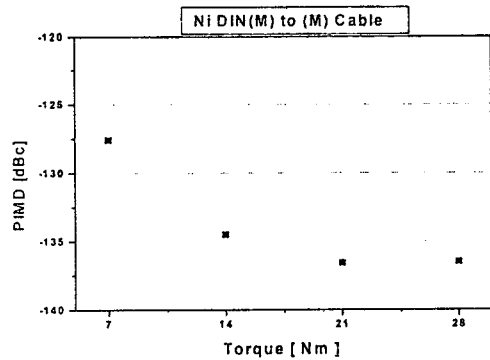


그림 1. 접촉력에 따른 PIMD 특성

그림 1은 RF 커넥터의 접촉력 변화에 따른 PIMD 수준의 변화를 보여주고 있다. Torque가 증가함에 따라 PIMD level이 낮아지다가 약 20Nm부터 일정 수치를 유지한다. 커넥터의 접촉력이 증가함에 따라 metal contact surface의 변형이 이루어지고 spot area의 면적이 증가하므로 junction이 개선되어 PIMD level이 감소한다. 즉 접촉면에서 필연적으로 발생하는 constriction resistance 문제를 최소화하기 위해서는 contact area에 pressure를 인가하여 spot의 수를 늘리거나 spot 면적을 증가시킨다. 이 방법을 통해 전류가

흐를 수 있는 접촉 단면적을 넓게 만들어 줌으로써 PIMD의 수준을 줄일 수 있다.

그러나 일정 수준 이상의 contact pressure에서는 접촉력의 한계에 도달함으로써 contact pressure에 의한 PIMD의 개선 효과는 기대할 수 없다.

그림 2는 측정 시료의 온도에 따른 PIMD 특성을 보여주고 있다.

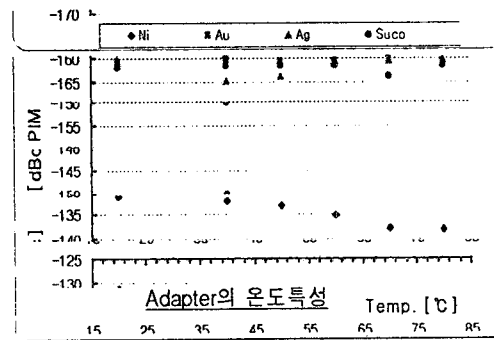


그림 2. 온도에 따른 PIMD 특성

(단, Suco도금 경우 40°C에서 Fluctuation발생 표시)

금도금의 경우 측정 온도 범위에서 일정한 PIMD 특성을 보이는 반면 온도금, Suco도금 그리고 니켈도금의 경우에는 측정 온도의 변화에 따라 각기 독특한 PIMD 특성을 나타낸다.

은(Ag)도금인 경우 40~50°C사이에서 가장 낮은 level이 측정되고, 니켈(Ni)도금의 경우에는 40°C부터 온도가 상승함에 따라 PIMD level이 감소하며, Suco도금의 경우 40°C에서 Fluctuation현상이 일어나지만 온도상승에 따라 변화가 거의 없었고, 금(Au)도금인 경우도 온도상승에 변화가 없음을 보여준다.

II 절의 식 (2)는 금속의 온도상승은 PIMD의 증가를 의미한다. 그러나 본 실험의 결과는 그 반대현상을 나타내었다. 이는 금속의 thermal heat 현상 외에 또 다른 비선형적 요소가 온도 요소보다 지배적으로 작용하고 있음을 의미한다.

고체는 온도가 상승하면 팽창한다. 이러한 팽창은 아래 식으로 표현된다.

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \times \Delta T \quad (3)$$

여기서 L 은 처음 길이, ΔL 은 열에 의해 늘어난 길이 변화, α 는 열팽창계수 그리고 ΔT 는 온도변화로 $T_1 - T_0$ 이다. 이때 체적의 팽창은 각 dimension의 팽창 값을 곱하면 된다. 일정한 외부 압력(Contact pressure)아래 접촉을 이루고 있는 인접한 두 금속의 접촉면은 열팽창에 의해 더욱 접촉면을 증가시킬 수 있고 이는 곧 Spot area의 증가를 유도하여 Constriction resistance를 감소시킬 수 있는 역할을 한다. 때문에 금속의 전체 저항에서 비선형적인 저항 R_c 의 기여도를 감소시키고 결과적으로 PIMD의 감소를 유도하는 것으로 판단된다.

습도에 따른 PIMD 특성을 그림 3에 나타내었다. 그

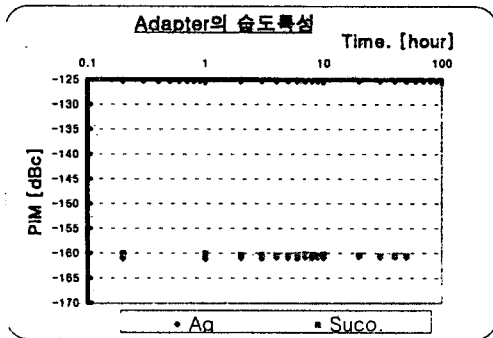


그림 3. 습도에 따른 PIMD 특성

림에서 보는 바와 같이 습도변화에 따른 PIMD의 현저한 변화는 관측되지 않는다. 이와 같은 결과는 접촉이 유지된 상태에서는 어댑터의 접촉면에 수분 침투가 발생하지 못했거나 침투된 수분이 기화했을 것으로 판단된다.

만약 도금체의 접촉이 일어나는 영역으로는 수분이 침투되었다면 도금체 사이에는 산화층이 생성되고 이 결과로 microdischarge, tunneling 효과 등의 비선형 요소가 지배적으로 작용하여 PIMD의 수준은 상당히 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결론

RF 부품의 여러 비선형적 요소 중 본 논문에서는 접촉력, 온도, 습도의 실험을 통해 PIMD의 수준을 측정하고, 어떤 model이 지배적인 요소가 될 수 있는지 연구하였다. 이 중 Spot contact model에 기인한 PIMD의

수준이 지배적임을 확인하였고 다음에 본 실험의 결과들을 정리하였다.

- 1) Connector를 조일 때 가해지는 torque가 증가하면 spot의 개수와 면적이 증가함으로써 PIMD는 감소한다.
- 2) 주변온도가 상승하면 금속의 열전도율은 저하되고 비선형 저항은 증가하여 PIMD의 수준은 증가한다. 그러나 본 실험의 결과 반대의 결과를 나타내었고 분석결과 도금체의 body를 구성하는 brass의 열팽창에 의해 온도가 올라갈수록 접촉면의 spot area가 증가하여 PIMD의 수준이 감소한 것으로 해석하였다.
- 3) 금속 접촉이 일어나는 영역에서 습도의 변화가 생기면 산화막이 형성되고 이것에 의해 PIMD는 많은 영향을 받지만, 본 실험에서는 RF 커넥터 접촉면이 결함에 의하여 수분 침투가 차단되어 습도의 영향은 관측되지 않았다.

이와 같은 결과들을 기초로 한 측정환경의 객관적 규정은 신뢰성이 있는 PIMD측정을 가능하게 하며, RF 부품의 PIMD 측정기술 및 제어기술에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] J. King, "Intermodulation in coaxial connectors", *RF Tutorial*, September 1996.
- [2] E. Weibel, Ulf Hugel, "Tests Evaluate the Influence of Junctions on PIM", *Microwave & RF*, August 1998.
- [3] SOO-WOONG PARK and SUCK-JOO NA, "A Study on the Current Density Distribution and Constriction Resistance in a Single-Line Contact with Various Space Angles by Using Conformal Mapping", *IEEE Trans. Comp., Hybrid, Manufact. Technol.*, June 1988.
- [4] R. S. Timsit, "Electrical contact resistance: Properties of stationary interfaces," *Electrical Contacts, Proceedings of the Forty-Fourth IEEE Holm Conference*, pp.1-19, 1998.