

RF 커넥터의 Passive IMD에 관한 연구

A Study of Passive Intermodulation Distortion in RF Connectors

조인귀 · 이재화 · 안승호 · 최상국 · 정명영 · 최태구

In-Kui Cho · Jae-Hwa Lee · Seung-Ho Ahn · Sang-Kuk Choi ·
Myung-Yung Jeong · Tae-Goo Choy

요 약

이동통신 서비스가 확장됨에 따라 인접 기지국간의 간섭이 증가하고 그에 따른 IMD(Intermodulation Distortion) 문제도 증가하여 Active IMD뿐만 아니라 Passive IMD(Passive Intermodulation Distortion)에 대한 문제도 함께 부상하고 있다. 따라서 본 고에서는 대표적인 RF 소자 중 동축선에서의 PIMD의 발생기구의 분석을 위하여 다양한 도금 두께와 도금 재질을 갖는 어댑터를 설계 및 제작하였다. 제작된 어댑터 측정결과 IM 발생 수준이 도금 재질의 전도율, 소자의 구조, 도금 재질의 두께, Aging현상 등에 의존함을 확인하였으며, 도금 두께의 변화와 재질의 변화를 통해 PIMD 발생기구를 분석하였고, PIMD의 제어기술 방안을 검토하였다.

Abstract

Nowadays, the interference between neighbor basestations is getting higher as mobile communication services expand, then the increase of the interference causes IMD(Intermodulation Distortion) problems for not only active devices but also passive devices. In this paper, we have designed and assembled several adapters having variable plating thickness and materials to analyze PIMD(Passive Intermodulation Distortion) mechanisms for coaxial cables which is one of the representative passive RF devices. The measurement results of the assembled adapters show that IM level depends on conductivity of plating materials, plating thickness, device structure, aging effect and so on. Furthermore, we have obtained PIMD mechanisms and some control methods of PIMD from the results.

I. 서 론

IMD(Intermodulation Distortion)란 두 개 이상의 신호 주파수들이 서로 간섭 현상을 일으켜 원하지 않는 기생 신호를 발생시키는 것으로 이와 같은 현상이 Passive 소자에서 나타날 때 PIMD(Passive Intermodulation Distortion)라 한다. PIMD는 Active 소자에서 발생하는 Active IMD와는 달리, 얼마 전 까지만 해도 해상통신과 같은 환경의 통신 시스템에

서만 고려되어온 현상으로 상용 이동통신에서는 거의 무시되어져 왔다. 하지만 이동통신 서비스의 확장과 통화 품질의 향상을 위하여 다 채널화, 고 전력화, 고 주파수화 등으로 인하여 인접 기지국간의 간섭이 증가하고 그에 따른 IMD 문제도 증가하여 Active IMD뿐만 아니라 PIMD에 대한 문제도 함께 부상하고 있다. Active IMD는 오래 전부터 꾸준한 연구 대상이었던 부분이라 큰 문제가 없으나, PIMD의 경우 근래까지 통신 시스템 구축에 있어 고려되

한국전자통신연구원 부품기술개발부(Component Technology Development Department, Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 990915-077

· 수정완료일자 : 1999년 11월 24일

지 않은 요소라 더욱 더 큰 문제를 야기시키고 있다 [1].

PIMD에 의해 발생하는 문제는 기지국에서 송수신을 한 개의 안테나와 Duplexer를 이용함으로써 송신부로부터 나온 발신 신호를 안테나로만 보내게 하는 M/W Assemblage가 송신부의 접합부나 송신 선로상에서 발생한 IM이 수신대역에 포함되면 M/W Assemblage에서 수신 필터쪽으로 보이는 임피던스가 무한대가 될 수 없어 비선형에 의해 발생한 IM 신호는 모두 수신부로 들어가게 되는 현상과 필터링 후 커넥터 비선형 접합 현상 등이다. 위와 같이 발생한 IMD는 통신 시스템에서 다음과 같은 영향을 미친다. 신호의 전력에 따라 다르겠지만 일정 수준 이상의 PIMD(-110 dBm)가 발생하면 통신 시스템의 음성채널에서는 그 잡음 신호를 Data 신호로 처리하게 되어 통화 품질이 떨어지며, Control Channel에서는, Digital Signaling의 오류로 인해 통화가 끊어지는 현상이 발생하게 된다^[2]. 실제로 유럽의 통신 시스템인 GSM에서는 이와 같은 문제로 2개의 채널을 비워 서비스 채널에서 문제가 발생하면 비워둔 채널로 주파수 대역을 옮겨 PIMD에 의한 장애를 피하고 있다. 이는 주파수 자원 이용 측면에서는 심각한 자원 낭비이고, 서비스 업체들의 측면에서는 서비스 용량의 감소를 의미한다. 차후 위성 시스템에서의 문제도 있을 것으로 예측되며, 이에 는 위성체에서 보내는 신호의 전력(2×100 W)이 매우 커 안테나 부분의 작은 비선형성에서도 큰 PIMD의 발생이 있을 수 있는 문제가 있다^[3].

이러한 문제는 NRL(Naval Research Laboratory), Eric Weibel, John King 등에 의해 많은 부분이 규명되고 검토되어 왔다. NRL의 보고서에서는 PIMD 발생 기구적인 접근을 수행하였으며, 1년간 기존의 RF 커넥터로 실험을 통해 이들을 검정하고 PIMD 모델링을 수행하였다^[4]. Eric Weibel의 논문에는 금속 대 금속의 접합에서 발생하는 PIMD의 현상을 분석하고 결합력에 관한 연구를 수행하였으며, John King은 동축 커넥터에서의 다양한 PIMD 발생원인과 PIMD의 정의를 규명하였다^{[5],[6]}. 그러나 지금까지의 연구 결과는 단일한 재질에 대한 분석이 대부분이며, 현재 사용되는 재료인 금, 은, 백동, 니켈 등에 대한 자료는 제시되어 있지 못한 실정

이므로 상기 재료별 PIMD 발생기구 분석으로 PIMD 제어 기술과 재료별 PIMD 특성에 대한 기술을 확보하고자 한다. 이를 위해 대표적인 RF 소자인 RF 커넥터와 어댑터의 도금두께와 재질 변화를 주어 제작하고 측정하였다.

II. PIMD의 이론적 고찰

모든 전자장치는 그의 동작범위에서 가능한 한 선형특성을 유지하도록 설계되지만 불행히도 모든 전자장치는 실제적으로 비선형 특성을 가지고 있다. 이러한 비선형적인 특성을 전기적으로 접근하기 쉬운 전압의 관계식으로 표현하면, 이는 승렬 급수로 표현되고 비선형 전달 함수는 식 (1)과 같다.

$$V_0 = G_1 V_i + G_2 V_i^2 + G_3 V_i^3 + \dots + G_n V_i^n \quad (1)$$

식 (1)과 같은 전달함수에 다른 주파수를 가진 두 개의 신호가 입력되는 경우를 고려하자.

$$V = E_a \cos A + E_b \cos B \quad (2)$$

여기서 $A=2\pi f_a t$ 이며 $B=2\pi f_b t$ 이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 두 개의 신호가 입력된 출력을 얻을 수 있다^[7].

$$\begin{aligned} V_0 = & G_2 \left[\frac{1}{2} E_a^2 + \frac{1}{2} E_b^2 \right] \\ & + \left[G_1 E_a + G_3 \left(\frac{3}{4} E_a^3 + \frac{3}{2} E_a E_b^2 \right) \right] \cos A \\ & + \left[G_1 E_b + G_3 \left(\frac{3}{4} E_b^3 + \frac{3}{2} E_a^2 E_b \right) \right] \cos B \\ & + G_2 \left[\frac{1}{2} E_a^2 \cos 2A + \frac{1}{2} E_b^2 \cos 2B \right. \\ & \left. + E_a E_b \cos(A+B) + E_a E_b \cos(A-B) \right] \\ & + G_3 \left[\frac{1}{4} E_a^3 \cos 3A + \frac{1}{4} E_b^3 \cos 3B \right. \\ & + \frac{3}{4} E_a^2 E_b \cos(2A+B) + \frac{3}{4} E_a^2 E_b \\ & \cdot \cos(2A-B) + \frac{3}{4} E_a E_b^2 \cos(A+2B) \\ & \left. + \frac{3}{4} E_a E_b^2 \cos(A-2B) \right] \quad (3) \end{aligned}$$

식 (3)에서 두 성분의 신호가 입력되면 원래의 신호가 이득 G_2 과 G_3 에 의해 변형된 성분을 포함하고 있음을 알 수 있으며, 주 신호에 왜곡을 줄 수 있는 경우는 홀수차의 경우이다. 그 이유는 상·하 주파수 한계가 그렇게 멀지 않는 협대역 시스템의 경우 짝수차 IM이나 고조파 성분은 대역외에 나타나게 되어 영향을 주지 않으나 홀수차 IM은 대역내로 들어오게 되며, 그 크기는 저차일 때가 가장 크므로, 3차의 IMD가 이동통신에서 간섭의 원인이 된다.

RF 부품에서 PIMD 발생 원인은 접촉 비선형성(Contact Nonlinearity)와 물질 비선형성(Material Nonlinearity)로 구분되며, 접촉 비선형성의 원인에는 도체들 사이의 얇은 산화층에 의한 접합 용량, 금속 접촉에서 도체들 사이의 반도체 작용에 의한 터널 효과, 금속들 사이의 빈틈 공간과 미소균열에 의한 Microdischarge, 금속 표면의 먼지와 금속 입자들에 연관된 비선형성 등이 있다^[8]. 물질 비선형성의 원인에는 니켈, 철, 코발트 등의 히스테리시스(Hysteresis) 효과, Internal Shottkey Effect, 도체에서의 한정된 전도율에 의한 Thermal heating 등이 있다^{[9],[10]}. 이러한 다양한 PIMD 발생 원인들은 소자의 구조나 특성에 따라 결정되어지며, 그 중에 대부분의 소자에서 발생원이 될 수 있는 몇 가지 발생 원인에 관하여 검토하고자 한다.

2-1 비자성 도체에서의 PIMD

식 (3)에 G_3 의 값을 결정하는 것이 비선형 특성을 규명하는 것이며, 이는 비선형성의 다양한 종류에 따라 그 도출 방법이 다르다. 도체에서의 한정된 전도율에 의한 Thermal heating은 비자성체의 물질인 금속에서 발생하는 IMD를 규명하는데 이론적인 근거가 된다. Skin depth(원 에너지의 e^{-1} 의 값이 되는 깊이, δ)의 두께에 의해 결정된 체적에서 도체의 한정된 전도율은 항상 금속의 벽에서는 RF손실을 유발하며, 이러한 체적 내에서 에너지의 주기적 변화는 온도의 변화를 유발한다. 온도에 의한 금속의 전도율은 수식적으로는 선형적이거나 그것의 고조파 성분이 존재하며, 이는 IM 주파수에서 가장자리 전류를 발생하는 인자가 된다. 그림 1은 두개의 f_1, f_2 주파수 성분을 갖는 신호 원을 운반하는 동축선을

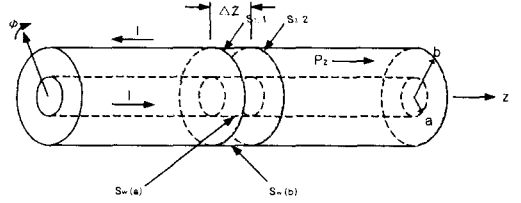


그림 1. 동축선의 기하학적 도면
Fig. 1. Geometry of coaxial cable.

나타낸다.

두 신호는 TEM mode로 전송되며, 금속 표면의 한정된 전도율로 필드는 동축 벽안으로 침투하게 되며, 전장은 작은 접선 성분을 갖게 된다. 유전체내에서의 필드는 식 (4)과 같이 표현된다($a \leq r \leq b$).

$$H_\phi = \sqrt{\epsilon} E_r(r) = \frac{2I}{cr} \cos(\omega t - kz) \quad (4)$$

여기서, I 는 동축 벽에서의 전류이며, 금속 내에서의 필드는 식 (5), (6)과 같다.

$$H_\phi = H(b)e^{-r/\delta} \cos\left(\omega t - \frac{r}{\delta}\right) \quad (5)$$

$$E_z = -\left(\frac{\omega}{4\pi\sigma}\right)^{1/2} H(b)e^{-r/\delta} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{r}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (6)$$

여기서, r 은 외경 b 로부터 계산된 값이다. 자장과 전장은 각각 ϕ 와 z 의 방향으로 에너지는 r 의 방향이 된다. 따라서 이 에너지는 손실로 나타나며, 이 손실이 도체의 열적이 변화를 유발하고 그 수식은 식 (7)과 같다.

$$j \cdot E = \sigma(E_{z,1} + E_{z,2})^2 = c_p \frac{dT}{dt} - k \nabla^2 T \quad (7)$$

위의 식에서 c_p 는 비열, k 는 단위 체적당 열전도율이며, 수식의 왼쪽은 도체 내부로 들어온 에너지를 의미하며, 오른쪽은 도체 내부에서의 도체 손실을 의미한다. 금속벽의 두께는 δ 보다 훨씬 크며, 에너지 손실은 동축선의 외벽과 내벽 사이의 도체손실 뿐으로 가정한다. 여기서 heat wave는 식 (7)의 왼쪽에 금속의 RF 에너지 손실에 의해 유도된다. 위 식 (7)의 왼쪽은 주파수 f_1 과 f_2 의 전장 접선 성분(z)합의 제곱 값으로 이에 2 $f_1, 2f_2, f_1 \pm f_2$ 의 주파수

성분을 갖고 있다.

도체 내부에서 전류밀도 j 는 $\sigma(E_{z,1} + E_{z,2})$ 이며, 이 전류 밀도는 도체내부의 전장의 접선성분 z 와 전도율의 곱으로 이는 도체 내부에서 발생하는 전류 원을 의미한다. 여기서, $\sigma = \sigma_0(1 - \gamma\Delta T)$ 로 도체의 전도율은 온도에 선형적인 변화를 보이며, 이 온도의 변화는 Ω 의 주파수 성분을 지니고 있다. 따라서 전체적인 유기 전류 원은 $\Omega(2f_1, 2f_2, f_1 \pm f_2)$ 와 f_1, f_2 의 곱에 의한 주파수 성분이 발생하며, 그 중에는 $2f_1 - f_2$ 의 3차 IM 신호도 있게 된다. 이 3차 IM 신호를 표현하면 식 (8)과 같다.

$$j_s(b, r) = \Lambda_b(r)e^{-3r/\delta} \sin\left(\omega t - \frac{r}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{where } \Lambda_b(r) = \frac{\gamma\sigma_0^2}{8c_p} \cdot \frac{5\omega_1 - \omega_2}{\omega_1(\omega_2 - \omega_1)}$$

$$\cdot E_{1,z}^2(b)E_{2,z}(b)e^{-3r/\delta} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{r}{\delta} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (8)$$

여기서, ω 는 $2\omega_1 - \omega_2$ 의 주파수 성분을 의미한다. 위의 식 (8)은 전류밀도의 개념을 반경 b 에서 계산된 r 에 의한 값으로 이는 대부분의 전류가 도체의 표면 근처에서 흐르게 되어 r 이 증가하면, 전류밀도가 거의 0에 근접하게 된다. 여기서는 IM current가 $\delta/3$ 내에서 대부분 생성된다고 가정하여, 전류밀도를 r 을 $\delta/3$ 에서 정의하였다. 식 (8)의 IM 주파수 성분 전류 원은 Coaxial구조에서 IM 필드를 유기하게 되고 이 유기된 필드는 다음 식 (9)와 같이 IM 에너지를 전달하게 된다.

$$P_{IM} = \left(\frac{69}{128\pi}\right)^{1/2} \frac{c\omega_2}{8\pi\sigma} \frac{\gamma^2}{c_p^2} \left(1 + \frac{b^3}{a^3}\right)^2$$

$$\cdot \frac{\sqrt{\epsilon}}{\left(\ln \frac{b}{a}\right)} \cdot \left(\frac{5\omega_1 - \omega_2}{\omega_2 - \omega_1}\right)^2 H_1^4(b) H_2^2(b) z^2 \quad (9)$$

이와 같은 도체의 메커니즘에 의해 IM원이 발생되며, 그 발생량이 도체의 전도율, 주파수, 입력전력, 기계적 구조 등에 의존함을 확인할 수 있다.

2-2 강자성 도체에서의 PIMD

물질 비선형성의 원인에는 니켈, 철, 코발트 등과 같은 강자성체 물질의 히스테리시스 효과가 있다. 이때 PIMD는 자계 H (A/m)와 자속 밀도 B (Wb/m²)의 비에 의해 결정되는 투자율(μ)의 값이 전류의 흐름에 따라 비선형 특성곡선을 갖게 되어 발생된다. 주파수가 증가하면, 대부분의 전류는 도체의 δ 인 매우 얇은 표면 층으로 집중하게 되며, 도체 표면에서의 전류밀도 값에 $1/e$ (37%)로 떨어지는 δ 는 식 (10)과 같다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (10)$$

여기서, f 는 동작 주파수이며, σ 와 μ 는 각각 주어진 도체의 전도율과 투자율이다. 도체가 은과 같이 비철금속(Nonferrous)이면 자속 B 와 자계밀도 H 의 선형적인 관계가 존재하게 되어, μ 는 상수가 된다. 이러한 선형적인 관계에 의해 δ 가 유일한 값으로 결정된다. 예를 들면 높은 전도율을 갖는 은의 전도율은 상수로 6.15×10^7 S/m이므로 주파수가 1 GHz일 때 δ 는 2×10^{-6} m이다. 이는 대부분의 전류가 은도금 재료로만 이동하기 위한 조건인 6δ 가 12.7×10^{-6} m임을 알 수 있다.

반면에 전류를 운반하는 도체가 강자성체 물질이면, μ 는 더 이상 상수의 값이 아닌 비선형적으로 H 에 따라 변하게 된다. 이것은 B 가 현재의 H 값에 함수이면서 과거의 H 값에 의해 결정되어지는 히스테리시스 효과에 의한 것이다. 이러한 비선형적인 μ 의 변화는 δ 의 변화를 유발하게 되어 비선형 회로의 임피던스 변화와 증가를 이룬다. 특히 미세한 전류로 가정하면, 니켈의 초기 투자율 μ_i 는 $4\pi \times 10^5$ h/m이며, 니켈의 전도율은 1.3×10^7 S/m이다. 따라서 초기 δ 는 주파수 1 GHz에서 4.4×10^{-7} m이며, 이는 은의 1/5의 값이 된다. 한편 신호의 전류가 증가하면, 니켈의 투자율이 증가하게 되어 초기 값의 10에서 100배까지 증가하고 δ 는 3에서 10배 가량 감소되는 현상이 발생된다. 하지만 한계전류 이상에서는 투자율이 다시 감소하여 자유공간에서의 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ h/m가 되어 최대 니켈의 δ 는 은의 δ 에 2배가 된다. 이러한 과정에서 표피 저항 R_s 는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$R_s = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\pi f \mu \rho} \quad (11)$$

도체에 가해진 자계는 그것의 저항 변화를 일으키며, 강자성체 물질에서의 이러한 현상은 IM 신호를 발생하는 원인이 된다.

2-3 도체 접합부의 터널 효과에 의한 PIMD

알루미늄 경우 금속 대 금속의 결합에 있어서 산화층은 제조 후 수 분 안에 20Å의 두께를 갖게 되며, 이 두께는 상온에서 급속하게 증가하여 터널 효과를 나타내는 22~27Å까지 성장하는데 1시간 정도이다. IM 발생에 중요한 접합부의 터널 효과는 RF 신호가 흐르는 영역의 비선형 저항과 용량(Capacitance)에 의해 결정된다. 그림 2은 전형적인 Al-Al₂O₃-Al 접합의 전류-전압특성 곡선이다.

전압-전류 특성은 $I = G_0V + \alpha G_0V^3$ 이며, 입력전압에 $V_{in} = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t$ 두개의 신호 원을 사용한 것으로 하면, 우측의 첫 번째 항 G_0V_{in} 는 선형 특성을 나타내며, 두 번째 항 αG_0V^3 이 비선형 특성을 나타낸다^[4]. 여기서, G_0 는 선형 영역의 전압에서 기울기 값이며, 위에서 G_0 , α , 접합 저항 R_0 는 모두 시간에 대하여 상수가 아닌 시간에 의존한다. 특히 비선형 접합 저항은 시간이 지남에 따라 저항 값이 증가하며, 그 원인은 접합면에서의 확산, 불순

물 흡착, 가장자리(edge) 효과, 기계적인 파열 등이 될 수 있다. 이 산화층은 순방향(금속에 전압 인가)으로 인가한 경우와 역방향으로 인가한 경우의 저항 값이 3~7%의 차이를 보여 정류소자와 같은 작은 저항의 비대칭성이 발생한다.

산화층의 성장은 기판의 재질에 따라 성장 속도가 다르나, 포화상태의 성장 후에는 산화층의 증가는 심하지 않으나 표면 저항(R_0)의 값은 증가하게 된다. 이 저항의 증가는 2000시간까지 증가하게 된다. 이는 PIMD의 발생량이 시간의 함수이며, Aging 현상에 의한 PIMD의 특성을 나타낸다. 도금 재질로 많이 이용되는 은의 경우 상온에서 산화현상이 발생하기 쉬워 제조 후에 터널 현상이 발생하게 되며, 이를 제어하는 것이 필수적이다. 그러나 금과 같은 도금 재질은 상온에서 산화가 일어나지 않아 시간에 대하여 우수한 PIMD 특성을 나타낸다. 이러한 산화 문제의 예는 Coaxial Cable Assembly에 커넥터의 핀과 보드를 모두 금 혹은 은으로 도금을 한 경우 초기 측정 및 초기 측정 후 60일 경과 후 측정을 수행하였을 때 은에는 산화층이 형성되어 특성이 10 dB정도 악화되는 반면, 금의 경우에는 산화현상이 발생하지 않아 거의 처음과 같은 PIMD 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

앞에서 살펴본 세가지 IM 발생원 이외에 다양한 원인이 존재하며, RF 부품의 PIMD를 제어하기 위해서는 이러한 발생 원인을 찾아내어 발생 원인들을 억제하는 기술의 개발이 필요하다^[11,12].

앞에서 언급한 도금 재질적인 Thermal heating과 강자성체의 특성을 예측 프로그램을 활용하여 예측한 내용이 그림 3이다. 강자성체의 비선형 문제는 투자율의 변화를 전도율의 변화로 유도하여 계산하였다.

여기서 사용된 Coaxial cable은 길이가 1 m, 내경이 7 mm, 외경이 16 mm이며, 수식에 사용된 입력전력은 20 W, 입력 주파수는 GSM대역인 935~960 MHz이다. Cable이 각각 은, 금, 니켈로 된 경우, 은이 가장 우수한 특성을 보임을 확인할 수 있으며, Cable의 Base 물질이 황동으로 된 경우 도금 두께가 3δ 이상인 경우는 은으로 형성된 구조와 동일한 특성의 IM 특성을 보였다. 이러한 예측은 IM의 특성에 전도율이 중요하며, 도금 형태가 중요함을 의미한다.

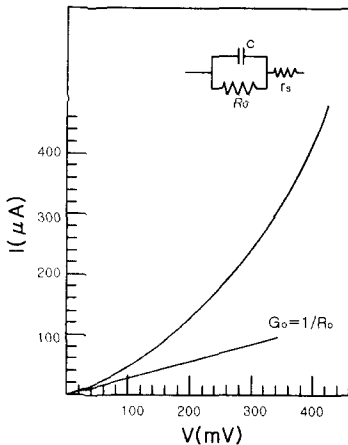


그림 2. 터널 접합에 의한 전압-전류 특성 곡선
Fig. 2. The current-voltage characteristic curve for a tunnel junction.

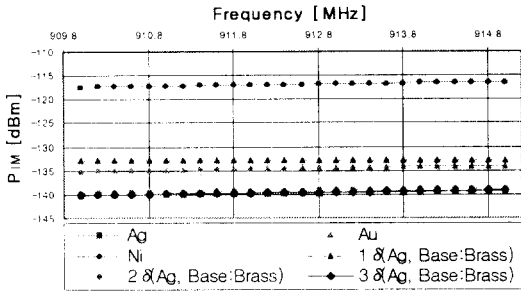


그림 3. RF Cable Assembly의 PIMD 예측
 Fig. 3. The PIMD expectation of RF Cable Assembly.

III. RF 어댑터의 제작 및 측정

앞의 PIMD의 이론적 고찰과 예측을 바탕으로 RF 소자의 비선형성을 실험적인 측정을 통하여 규명하고 이의 제어기술 개발을 위해 어댑터를 제작·측정하였다. 측정에 사용된 장비는 Summitek사의 PIMD Analyzer(SI-900A)와 SI-20A Termination으로 그림 4와 같은 구성을 갖고 있다. 이 장비(Passive IM Analyzer(SI-900A))는 데이터 측정 부분과 데이터 처리 부분의 두 부분으로 나누어져 있다. 데이터 측정 부분은 주파수 합성 신호를 DUT에

공급해 주는 역할과 반사(reflected) IM 신호를 받아들이는 역할을 동시에 수행하는 듀플렉스를 활용한 시스템이며, 데이터 처리 부분은 측정된 데이터를 사용자의 요구 사항을 만족하는 형태로 Display 하는 역할과 소프트웨어적으로 측정 시스템을 전반적으로 조정하는 역할을 하고 있다. 이 장비의 잔류(residual) IM 수준은 $-120 \text{ dBm} (@2 \times 20 \text{ W})$ 이며, 측정 가용 주파수는 GSM 대역인 935~960 MHz이다.

RF 소자에서의 PIMD 제어기술을 확보를 위하여 다양한 재질과 RF 에너지의 전달특성을 고려해 다양한 도금 두께로 어댑터를 설계 및 제작 하였다. 재질의 변화는 앞에서 살펴본 발생기구 중 재질의 전도율에 의한 전도손실의 차와 강자성체의 특성을 보여 줄 것이며, 도금 두께의 변화는 RF 에너지가 충분한 도금 두께를 확보하지 못할 때의 PIMD 특성과 우수한 PIMD 특성을 확보하기 위한 최소한의 도금 두께를 얻는데 있다. 따라서 본 실험을 수행하기 위하여 그림 5와 같은 도면의 어댑터를 설계 및 제작하였다.

여기서 ①과 ②는 어댑터의 보디, ③은 절연체인 Teflon, ④와 ⑤는 핀, ⑥과 ⑦은 O-Ring, ⑧은

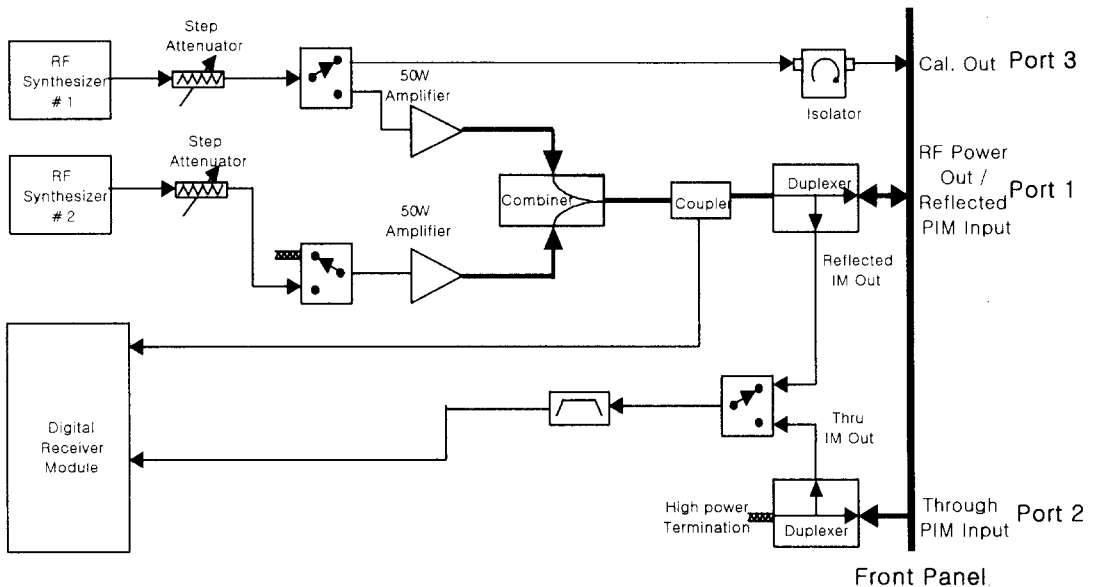


그림 4. PIMD 측정 장비의 구성도
 Fig. 4. The block diagram for measurement of PIMD.

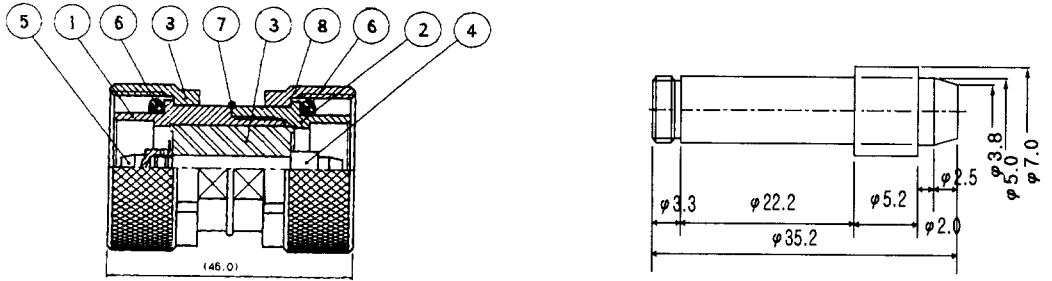


그림 5. 제작된 어댑터의 도면

Fig. 5. The layout for manufacture of adapter.

표 1. 어댑터의 제작

Table 1. The fabrication of adapters.

DIN 7/16" Male to Male Adapter	PIN 도금	BODY 도금	수량
Case 1. 은 도금	은 2.09 μm (1 δ)	은 2.09 μm (1 δ)	4개
	은 2.09 μm (1 δ)	은 6.28 μm (3 δ)	4개
	은 6.28 μm (3 δ)	은 2.09 μm (3 δ)	4개
Case 2. 은 도금	은 2.09 μm (1 δ)	은 6.28 μm (3 δ)	4개
	은 6.28 μm (3 δ)	은 6.28 μm (3 δ)	4개
	은 8.38 μm (4 δ)	은 6.28 μm (3 δ)	4개
	은 10.47 μm (5 δ)	은 6.28 μm (3 δ)	4개
Case 3. 금, 은, 니켈, 백동을 3 δ 로 도금	금 7.95 μm	금 7.95 μm	4개
	은 6.28 μm	은 6.28 μm	4개
	니켈 12.95 μm	니켈 12.95 μm	4개
	백동 10.66 μm	백동 10.66 μm	4개

Coupling을 나타낸다. 우측의 그림은 ④번 핀의 사이즈를 나타낸다. PIMD 제어를 위한 도금이 이루어지는 부분은 ①과 ②인 보디부분과 ④와 ⑤로 구성되는 핀이 된다.

표 1은 어댑터의 제작에 이용된 도금에 관한 자료이다. Case 1은 핀과 보디 도금 두께의 변화이며, Case 2는 보디를 고정하고 핀의 도금두께를 변화시킨 것이며, Case 3은 도금 재료의 변화를 준 것이다. 제작에 사용된 금속의 전도율은 은, 금, 니켈, 백동 순으로 각각 $6.17 \times 10^7 \text{ S/m}$, $4.10 \times 10^7 \text{ S/m}$, $1.46 \times 10^7 \text{ S/m}$, $2.15 \times 10^7 \text{ S/m}$ 이다.

측정 환경은 그림 6과 같으며 측정의 정밀성과

비교 분석을 위하여 동일한 Coaxial Cable Assembly에 어댑터를 교체하면서 측정을 수행하였다. 여기에 사용된 Load는 DUT를 통과한 f_1 , f_2 신호를 모두 흡수하고 자체 IM발생량이 -120 dBm 이하인 Termination이다.

측정 시험 주파수는 f_1 , f_2 가 각각 937 MHz, 960 MHz이며, 입력 전력은 f_1 , f_2 동일하게 43 dBm(20 W)를 사용하였다. IM 주파수는 914 MHz에서 발생하였고, 측정 결과는 시간에 따른 PIMD 특성을 dBc 단위로 측정하였으며, 초기 어댑터를 연결 후 재질의 종류와 도금 상태에 따라 IM의 값이 시간의 함수가 될 가능성을 확인하기 위하여 2분 간격으로 10

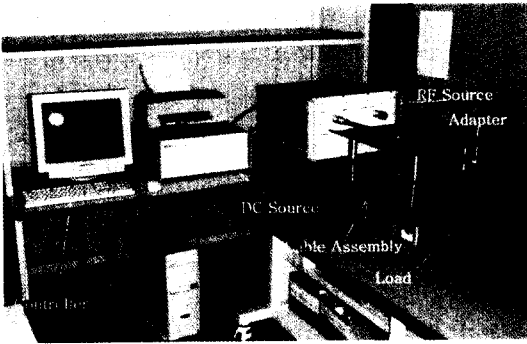


그림 6. 어댑터의 PIMD 측정 환경

Fig. 6. The adapter's PIMD measurement station.

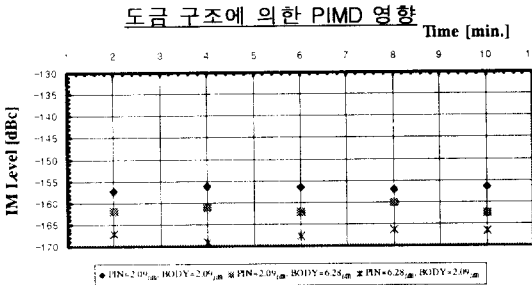
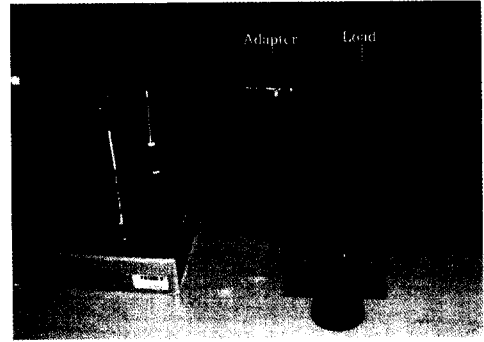


그림 7. 핀과 보디의 도금 두께 변화와 PIMD관계

Fig. 7. Relation between PIN and BODY's plating thickness variation and PIMD.

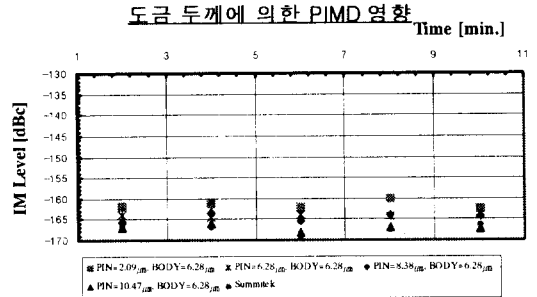


그림 8. 도금 두께에 따른 PIMD 수준

Fig. 8. PIMD level with plating thickness.

분 동안 측정치를 기록하였으며, 모든 측정치는 동일하게 제작된 4개의 어댑터의 측정치 중 최상과 최하의 결과치는 제외하고 나머지 두 측정치의 평균치이다.

그림 7은 핀과 보디의 도금 두께를 이용하여 구조적인 문제가 PIMD에 미치는 영향을 보여주는 것이다.

핀의 경우가 동일한 도금 두께로 도금될 경우 더 낮은 IM 수준을 보임을 확인할 수 있으며, 이는 식 (8)에서 핀의 경우가 더 큰 IM 전류 원을 갖는 것으로부터 설명 가능하며, 그 원인은 핀의 경우 동일한 전류 원에서 도체 내부의 z방향 전장이 크게 되어 전체적인 전류밀도와 그에 의해 유기되는 IMD가 크게 되는데 있다. 이것은 PIMD를 제어하기 위해 내경 구조에 더 큰 의미를 두어야 함을 뜻한다.

그림 8은 PIMD에 있어서 정상적인 RF 에너지 전달을 위한 최소한의 도금 두께를 보여주는 측정치

다. 이를 수행하기 위해 핀의 도금 두께를 다양한 값으로 변화시켰다.

여기에서는 충분한 에너지 전달을 보장하는 5δ 이상에서는 IM 수준이 외국 전문업체(Summitek)에서 제작된 어댑터와 동일한 특성을 얻었다. 이것은 예측에서 보여준 3δ 값과 차가 있는데 이는 접촉에서 발생하는 접촉저항이 예측 사항에서는 포함되지 않은데 기인한다.

그림 9는 동일한 도금두께를 갖는 다양한 재료의 특성을 측정된 내용으로 도금두께는 RF에너지 측면에서 선택된 skin depth로 결정된 값이다.

은의 경우가 가장 우수한 IM 특성을 보이며, 백동은 낮은 IM 수준이나 시간에 따른 변화가 심하며, 니켈은 강자성체의 특성에 의해 높은 IM 수준을 나타내었다. 이는 II에서 언급한 각 재료의 전도율, 비열, 열전도율, 비저항계수, 강자성 등의 물질 특성의 차에 기인된 결과이며, 예측에서 본 결과와 유사한

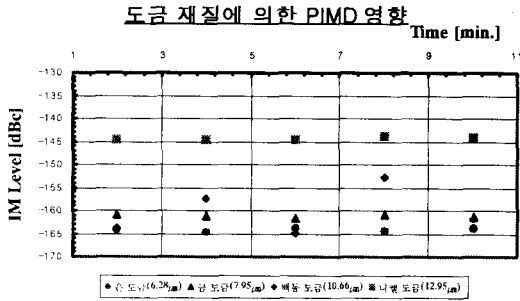


그림 9. 도금 재질에 따른 IM 수준
Fig. 9. IM level with plating material.

특성을 보임을 확인할 수 있다. 따라서 우수한 IM 특성을 갖는 소자 개발을 위해서는 전도율이 높고, 비열이 높은 금속의 선택이 필수적이며, 강자성체의 이용은 피하는 것이 바람직 하며, 백동과 같은 3원 합금의 개발이 요구된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 PIMD가 통신 시스템에서 간섭의 원인이 되어 통신 시스템 품질을 떨어뜨리는 현상이 있었으므로, RF 수동소자에서의 PIMD 발생기구에 대하여 검토하고, 다양한 시작품을 제작하여 이들의 규명과 제어 기술에 대하여 기술하였다. RF 소자에 이용되는 다양한 도금 재질의 특성을 규명하기 위해 도금재료로 많이 이용되는 4가지 재질로 다양한 도금 두께로 도금하여 그 특성을 규명하였다. 구조적인 측면에서는 편을 3 δ 로 도금한 경우가 보디를 3 δ 로 도금한 경우보다 평균 5dB 이상 저감화 시켰으며, 도금 두께의 경우는 5 δ 로 도금했을 때가 1 δ 보다 평균 7dB 개선을 보였다. 도금 재질면에서는 동일한 로 도금을 했을 때 은의 경우가 니켈의 경우보다 20dB 개선되었다.

앞의 제작과 측정의 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 대부분의 전류가 통과하는 경로에는 전도율이 높은 금속의 이용과 접촉면이 넓은 것이 유리하며, 접촉면이 전기적으로 우수하기 위해 표면 조도가 낮은 것이 유리하다. 둘째, 도금의 두께는 RF 에너지가 충분히 한 매질에서 대부분 통과할 수 있게 5 δ 이상이 유리하다. 셋째, 우수한 전도율을 갖는 경우에도 도금 재료의 Aging

현상을 방지하기 위한 기법의 개발이 필요하다. 넷째, 한번 발생된 IM 원은 누적현상이 뚜렷하게 일어나며, 이를 제어하는 기술의 개발과 IM 발생을 억제하는 기술의 개발이 필요하다. 다섯째, 소자의 구조에 따라 RF 에너지의 전달특성이 다르므로 구조적으로 전류가 많이 형성되는 곳이 PIMD의 원이 된다. 연구 결과, 전도율이 높으며, 노화가 적은 새로운 도금기법에 관한 연구와 접촉력에 관한 연구를 통하여 우수한 PIMD 제어 기술을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] P. L. Lui, "Passive intermodulation interference in communication system", *Electronics & Communication Engineering Journal*, June, 1990.
- [2] B. G. M. Helme, "Passive intermodulation of ICT components", *The Institution of Electrical Engineers*, 1998.
- [3] G. H. Schennum, G. Rosati, "Minimizing passive intermodulation product generation in high power satellites", *IEEE*, 1996.
- [4] J. A. Woody, T. G. Shands, "Investigation of intermodulation products generated in coaxial cables and connectors", *Georgia Institute of Technology*, September, 1982
- [5] E. Weibel, U. Hugel, "Tests evaluate the influence of junctions on PIM", *Microwave & RF*, August, 1998.
- [6] J. King, "Intermodulation in coaxial connectors", *RF Tutorial*, September, 1996.
- [7] D. D. Henkes, S. C. Kwok, "Intermodulation concepts and calculations", *Applied Microwave & Wireless*, July, 1997.
- [8] C. D. Bond, C. S. Guenzer, "Intermodulation generation by electron tunneling through aluminum-oxide films", *Proceeding of the IEEE*, December, 1979.
- [9] J. Z. Wilcox, P. Molmud, "Thermal heating contribution to intermodulation fields in co-

axial waveguides”, *IEEE Transactions on Communication*, February, 1976.

- [10] C. E. Young, “Connector design techniques to avoid RFI”, *NRL Memorandum Report 4233*.
- [11] E. N. Johnson, “Method and apparatus for suppressing passive intermodulation”, *Patent*

Number 5757246, May, 26, 1998.

- [12] M. J. Grall, L. E. Coleman, “Passive microwave structure and methods having reduced passive intermodulation”, *Patent Number 5834993*, Nov., 10, 1998.

조 인 귀

1997년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1999년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 1999년 5월~현재: 한국전자통신연구원 중소기업기술진흥
 홍보부 부품기술개발부 연구원
 [주 관심분야] RF 수동소자, Passive IMD

이 재 화

1999년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1999년 3월~현재: 한국정보통신대학원(ICU) 선임연구원
 [주 관심분야] RF 수동소자, RF 발진기

안 승 호

1986년 2월: 전남대학교 산업공학과(공학사)
 1988년 2월: 전남대학교 산업공학과(공학석사)
 1989년 7월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
 [주 관심분야] RF 수동소자, Passive IMD

최 상 국

1975년 2월: 인하대학교 전자공학과(공학사)
 1992년 2월: 청주대학교 전자공학과(공학석사)
 1992년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
 [주 관심분야] RF 수동소자, ESD

정 명 영

1982년 2월: 부산대학교 기계공학과(공학사)
 1984년 2월: 부산대학교 기계공학과(공학석사)
 1998년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 박사수료
 1983년 9월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
 [주 관심분야] 이동통신, RF 수동소자, Passive IMD

최 태 구

1976년 2월: 고려대학교 물리학과(공학석사)
 1977년 1월: 고려대학교 물리학과(강사)
 1977년 12월: KIST 연구원
 1978년 1월~현재: 한국전자통신연구원 중소기업기술진흥
 홍보부 부품기술개발부 부장
 [주 관심분야] 이동통신, 마이크로파