

이동 통신 기지국 안테나의 PIMD 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of PIMD in the Mobile Communication Base Station Antenna

서 창 재 · 천 창 을* · 정 용 식

Chang-Jae Seo · Chang-Yul Cheon* · Young-Seek Chung

요 약

이동 통신 서비스가 확대됨에 따라 인접 기지국 간의 간섭 문제가 증가하게 되었으며, 그에 따라 CDMA 시스템의 능동 상호 변조 왜곡(AIMD: Active Inter-Modulation Distortion)뿐만 아니라 수동 상호 변조 왜곡(PIMD: Passive Inter-Modulation Distortion)에 대한 문제도 기지국 안테나 시스템 설계 시 고려되어야 한다. 본 연구에서는 기지국 안테나에 사용되는 도체와 도체 조립에 있어 국부적인 전류 비선형을 유발하는 전류 밀도의 특성을 분석하였고, 전류 비선형성을 낮추기 위한 방법을 연구하였다. 이를 통하여 안테나 구조의 도체-도체 결합을 위한 너트의 간격, 면적 등이 미치는 영향을 분석하여 수동 상호 변조 왜곡의 개선 방향을 제안한다.

Abstract

As the mobile services have been increased, the PIMD(Passive Inter-Modulation Distortion) as well as the active-IMD of the CDMA system should be considered for the design of base station antenna systems, because they have an interference of the neighboring base stations. In this paper, in order to reduce the nonlinearity of current caused by the local point contact, we have investigated an influence of the combination of nuts, contact torque(kgf.cm), and the contact area on the PIMD. We propose the improvement techniques of PIMD by investigating the effects of the distance of nuts, the contact area, and the type of nuts.

Key words : Passive Inter-Modulation Distortion, PIMD, AIMD

I. 서 론

서비스 용량의 증대와 통화 품질의 개선은 이동 통신의 발전을 위한 중요한 요소이다. 이러한 용량 증대와 통화 품질의 개선 시 채널간의 간섭이 중요한 문제이며, 이 간섭 문제 중의 한 중요한 인자가 상호 변조 왜곡(IMD: Intermodulation Distortion)이다. 상호 변조 왜곡은 통신 시스템의 비선형성에 의하여 인가된 신호의 주파수의 합 또는 차에 해당하는 기생 신호가 발생하는 현상으로 능동 소자에 의한 능

동 상호 변조 왜곡으로 수동 소자에 의한 수동 상호 변조 왜곡로 나뉜다. 능동 상호 변조 왜곡은 수동 소자에서 발생하는 수동 상호 변조 왜곡과는 달리 위성 통신과 같은 고출력 통신 시스템에서만 고려되어 온 현상으로 상용 이동 통신에서는 거의 무시되어져 왔다. 그러나 이동 통신 서비스가 확장됨에 따라 인접 기지국 간의 간섭이 증가하고, 그에 따른 수동 상호 변조 왜곡 문제도 증가하여 능동 상호 변조 왜곡뿐만 아니라 수동 상호 변조 왜곡에 대한 문제도 함께 부상하고 있다. 능동 상호 변조 왜곡은 오래 전부터

「이 논문은 2010년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.」

광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

*서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

· 논문 번호 : 20100407-041

· 교신저자 : 정용식(e-mail : yschung@kw.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 10월 14일

꾸준한 연구 대상이었던 부분이라 큰 문제가 없으나, 수동 상호 변조 왜곡의 경우 근래까지 통신 시스템 구축에 있어 고려되지 않은 요소라 더욱 더 큰 문제를 야기시키고 있다. 실례로 유럽의 통신 시스템인 GSM에서는 2개의 채널을 비워 문제 발생에 대비하고 있다. 이는 주파수 자원의 심각한 낭비이며, 업체 측도 할당 주파수 대역이 증가하여 그만큼 손실이다. 차후 위성 시스템 문제도 예측되며, 이는 위성체에서 보내는 신호의 전력(100 W)이 높아 작은 비선형에도 큰 수동 상호 변조 왜곡의 문제가 발생한다. 이 때문에 유럽 등 선진국의 통신 업체에서는 RF 부품의 수동 상호 변조 왜곡 특성에 대한 성능을 엄격히 관리한다.

그러나, 국내는 아직까지 깊이 있는 연구가 수행되고 있지 않고, RF 부품의 수준이 우수하지 못하며, 이를 극복하기 위하여 재료와 구조적인 측면 등 노력하고 있지만, 많은 업체가 수동 상호 변조 왜곡의 발생 원인 및 저감화 방법은 물론 측정 방법조차 모르고 있어 향후 RF 부품의 수출에 영향을 받을 것으로 예상된다.

II. 이 론

2.1 발생 요인

수동 상호 변조 왜곡 발생 원인 중 도체-도체 결합시 발생하는 비선형이 있다. 도체가 갖는 표면의 거칠기, 이물질, 면이 고르지 못할 경우 그림 1의 두 가지 결합 형태로 조립이 된다.

이상적인 도체-도체 결합은 두 면이 수평을 이루며 결합을 한다(그림 2(a)). 그러나, 현실적으로 가공 및 보관으로 인해 금속 표면에 나타나는 이물질, 굴곡, 산화 작용 등으로 인하여 그림 1(a)의 점 접촉 결

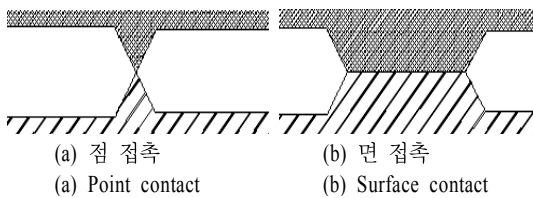


그림 1. 도체간 접촉의 형태
Fig. 1. Cases of metal contact.

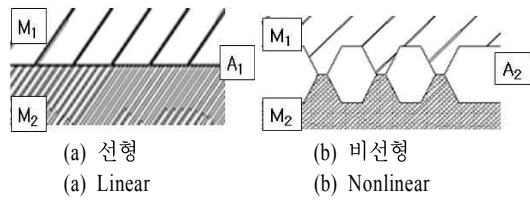


그림 2. 접촉의 형태
Fig. 2. Cases of contact.

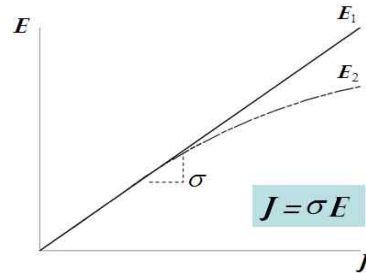


그림 3. 전류 밀도
Fig. 3. Current density.

합과 그림 1(b)의 작은 면들의 결합 형태가 나타난다³⁾.

결합을 이루는 면에 그림 2(b)와 같은 접촉이 많을수록 면적은 작아져 전류 밀도는 높아지게 된다. 이러한 도체 저항의 비선형 성분의 증가는 도체 접촉점을 통과하는 RF 전류의 비선형성을 유발시켜 궁극적으로는 수동 상호 변조 왜곡 수준을 증가시킨다.

때문에 도체 접촉면 그림 2(a)와 같은 면, 즉 균일 전류를 보내는 그림 3의 E_1 과 같은 선형으로 만들어 주는 것이 필요하다.

2.2 수동 상호 변조 왜곡의 모델링

수동 상호 변조 왜곡의 비선형 특성이 주 원인으로 다음과 같은 수식으로 모델링된다.

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

여기서 식 (1)과 같은 전달 함수를 가지는 소자에 대해서 두 개의 서로 다른 주파수를 가지는 신호의 입력을 생각해 보자.

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

여기서 $A=2f_a t$ 이며, $B=2f_b t$ 이다.

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

식 (1)을 식 (2)에 대입하면 비선형 특성 소자에 대해 두 개의 신호가 입력된 아래와 같은 출력을 얻을 수 있다. 식 (3)에서 보면 두 성분의 신호가 입력되면 원래의 신호가 이득 G_2 과 G_3 에 의해 변형된 성분을 포함하고 있음을 알 수 있다. 또한, 원래의 신호와 더불어 DC항과 제2차 고조파 및 상호 변조, 그리고 제3차 고조파 및 상호 변조가 함께 발생하였음을 알 수 있다.

2-3 원인 구분 및 개선 방안

원인은 접촉 비선형성(contact nonlinearity)과 물질 비선형성(material nonlinearity)으로 구분된다. 접촉 비선형성의 원인에는 도체들 사이의 얇은 산화층에 의한 접합 용량, 도체 접촉에서 도체들 사이의 반도체 작용에 의한 터널링 효과(tunneling effect), 도체들 사이의 빈 틈 공간과 미소 균열에 의한 micro-discharge, 도체 표면의 먼지와 도체 입자들에 연관된 비선형성 등이 있다. 물질 비선형성에는 니켈, 철, 코발트 등의 히스테리시스(Hysteresis) 효과, Internal Shottkey Effect, 도체에서의 한정된 전도율에 의한 Thermal Heating 등이 있다.

도체 접촉면의 비선형성을 줄여 발생하는 수동 상호 변조 왜곡의 수준을 저감화하기 위해서는 접촉면의 거칠기(roughness)를 향상시키고, 접촉을 최소화할 수 있도록 일정 접촉력 이상으로 도체-도체의 결합이 이루어지도록 해야 한다^[3].

압력 즉, 양 도체를 압착하는 힘이 커질수록 접촉면에서 점 접촉이 차지하는 부분은 줄어들게 되고, 그에 따라 비선형의 요인은 줄어들게 된다. 이와 같은 예측을 바탕으로 도체-도체 결합시 발생하는 비

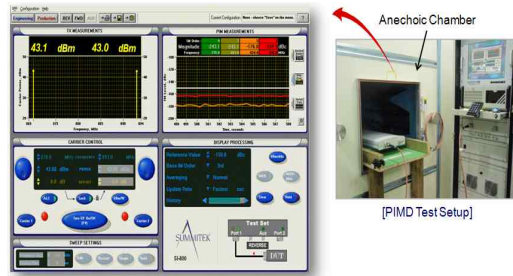
선형 요인을 줄일 수 있는 실험으로 넷트 체결의 간격을 줄이는 실험, 도체와 도체 결합에서 비선형을 발생시키는 그림 1(a) 점 접촉을 제거하는 실험, 전 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 버닝 탭 방식의 결합을 제안하였다^[4].

III. 실험

3-1 측정 절차

그림 4(a)는 수동 상호 변조 왜곡 측정 구성 모습이며, 그림 4(b)는 Passive IMD Analyzer(수동 상호 변조왜곡 측정기)의 규격이다.

PIMD Analyzer의 측정 절차는 다음과 같다. PIMD Analyzer에 전원을 인가하고 약 30분 정도 예열시킨다. Port 1에 System Cable을 연결한다. System cable의 다른 한 쪽에 termination을 연결한다. 3차 PIMD 주파수가 활성화되도록 두 개의 송신 주파수 f_1 , f_2 를 설정한다. 측정 장비의 출력을 규격에 맞게 설정한다(20 W=43 dBm, -43 dBc=0 dBm). RF ON을 클릭하여 출력을 송신한 후 수동 상호 변조 왜곡을 측정한다. 이때 3차 수동 상호 변조 왜곡의 값이 -160 dBc 이하(안정화 상태의 출력 값)가 유지되는지 확인한다. Termination을 제거한 후 안테나를 연결하고 동일한 방법으로 수동 상호 변조 왜곡을 측정한다.



(a) 측정 구성
(a) Test setup

1. Frequency < SI - 800 A > 824~ 894 MHz
< SI - 2000FE > 1920~2170 MHz
 2. INPUT 2 Tones 20W
 3. OUTPUT 3TH 162dBc (-119 dBm)
- (b) 규격
(b) Specification

그림 4. 시스템
Fig. 4. System.

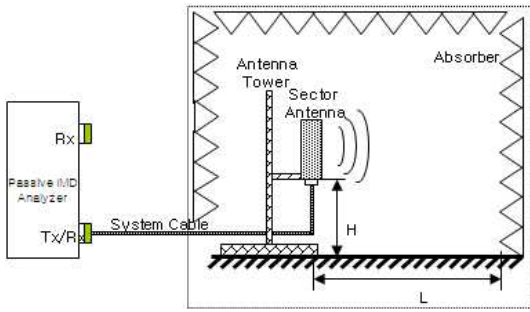


그림 5. 전파 측정실
Fig. 5. Anechoic chamber.

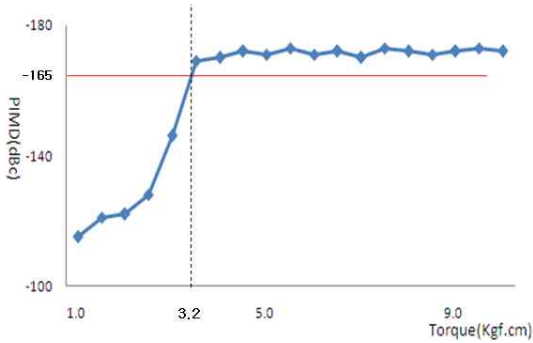


그림 6. 토크
Fig. 6. Torque.

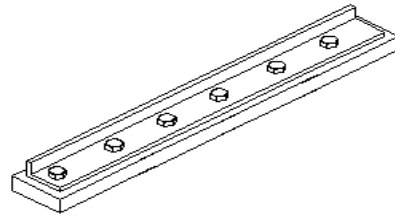
PIMD analyzer의 측정은 그림 5의 전파 측정실에서 하였다.

컨넥터의 결합 토크에 따른 수동 상호 변조 왜곡 수준의 변화를 보여주고 있다. 토크의 증가에 따라 수준이 향상됨을 볼 수 있다. 결합이 증가함에 따라 도체-도체 간 접촉력이 증가하여 불연속적인 결합이 줄어들어 수준이 향상되는 것이다. 3.2 kgf.cm부터 일정 수준을 유지하는데 접촉력이 한계에 다다르면 더 이상 수동 상호 변조 왜곡에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 6은 3.2 kgf.cm 이상의 토크로 죄어 주면 안정된 결합을 형성함을 의미한다.

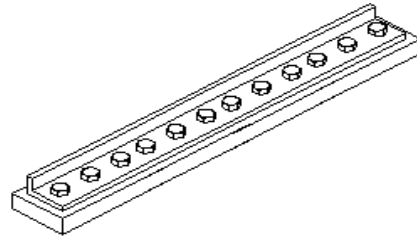
3-2 체결 간격 변화에 의한 수동 상호 변조 왜곡

본 실험에서는 너트 체결에 있어 간격을 변화하여 수동 상호 변조 왜곡을 비교 측정하였다.

안테나 제작 과정에서 그라운드의 결합을 그림 7 (a)는 너트 체결 간격 160 mm(현재 적용 간격)으로



(a) 160 mm 간격으로 조립
(a) Assembly of 160 mm distance



(b) 80 mm 간격으로 조립
(b) Assembly of 80 mm distance

그림 7. 조립 간격
Fig. 7. Distance of assembly.

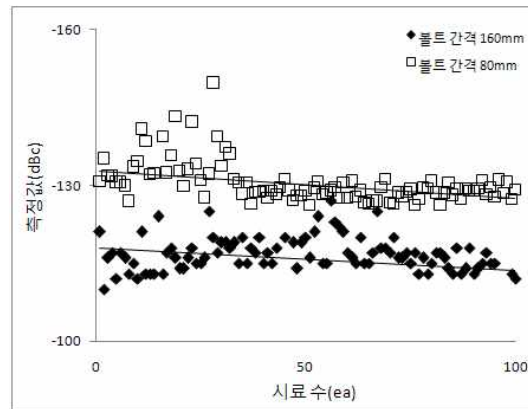


그림 8. PIMD 측정
Fig. 8. Measurement of PIMD.

그림 7(b)는 너트 체결 간격 80 mm으로 조립하였다. 본 실험의 신뢰를 위해 각 실험에 사용된 안테나의 수(시료수)는 100 ea로 하였다.

그림 8의 결과에서 볼트의 간격을 160 mm(-120 dBc)에서 80 mm(-131~-132 dBc)로 좁혔을 때 11~12 dBc의 수동 상호 변조 왜곡의 향상을 얻을 수 있었다. 이는 비선형성이 발생하는 요인을 감소시킨다고 할 수 있다.

그림 9와 같이 볼트 사이의 도체가 압력 및 이물

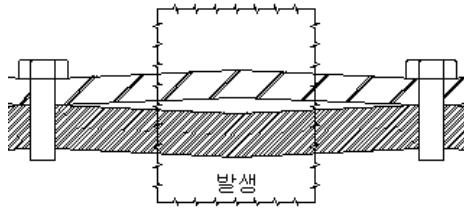


그림 9. 점 접촉 발생 위치
Fig. 9. Position of point contacts.

질 등의 영향으로 벌어져 비선형을 발생시킨다. 벌어지는 위치에 볼트를 체결하여 비선형을 줄인 것이다. 그러나, 볼트의 양을 계속 증가시키는 것은 도체의 표면에 탭을 증가시키는 것이 된다. 증가한 탭 또한 비선형의 원인이 되는 거칠기 및 불량이라 할 수 있다.

이 문제의 개선을 위해 비선형의 영향을 주는 도체 면을 제거하는 두 번째 실험을 하였다.

3-3 도체-도체 접촉 면적의 최소화 측정

본 실험에서는 첫 번째 실험에서 비선형에 영향을 주는 요인을 제거하는 실험을 제안하였다.

그림 10과 같이 첫 번째 실험의 접촉 면적(검은 부분)을 제거하여 비교 측정하였다. 즉, 검은 부분의 비선형 발생 요인인 점 접촉 결합을 제거한 것이다.

그림 11의 결과와 같이 비선형 발생되는 부분을 제거하는 실험으로 13~16 dBc의 수동 상호 변조 왜곡의 향상을 얻을 수 있었다. 본 실험은 비선형성이 발생하는 요인을 감소시킨다고 할 수 있다.

그림 12와 같이 면적 최소화의 결합에도 체결한 볼트의 양쪽, 벌어지는 도체 부분이 비선형을 발생

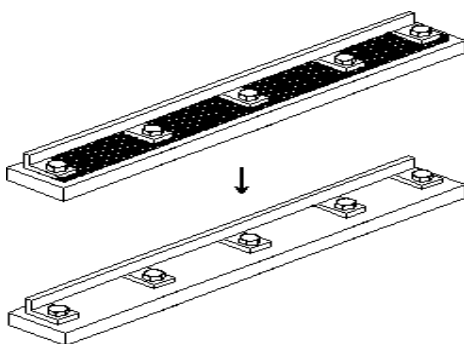


그림 10. 면적 최소화의 결합
Fig. 10. Assembling with minium area.

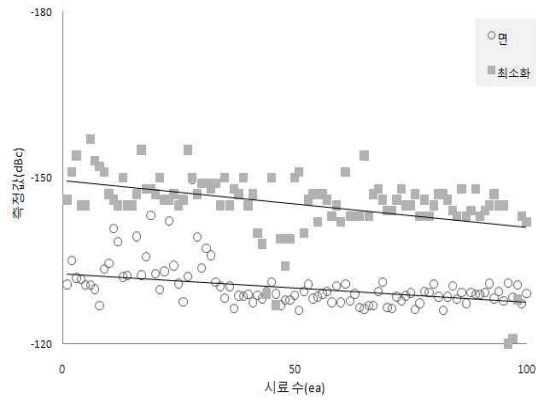


그림 11. 접촉 면적 감소에 따른 PIMD 감소
Fig. 11. Reduction of PIMD due to mini-mization of contact area.

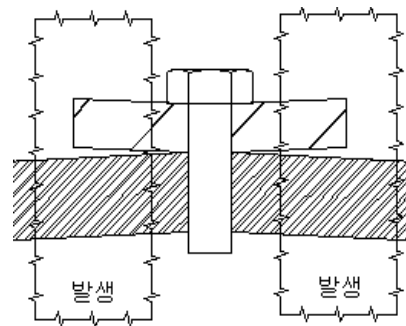


그림 12. 비선형 발생 부분
Fig. 12. Nonlinear of area.

요인이 된다.

이 문제의 개선을 위해 버닝 탭을 이용하여 볼트 부분만의 결합으로 실험을 하였다.

3-4 버닝 탭을 이용한 도체-도체 접촉

본 실험에서는 버닝 탭을 이용하여 도체-도체를 결합하였다. 버닝 탭이란 그림 8과 같이 도체 표면의 구멍 주위를 세워 올려 성형 가공하는 것이다.

그림 13의 버닝 탭을 적용하여 그림 14와 같이 그라운드 넷트 160 mm의 간격으로 결합을 하였다.

그림 15는 조립 간격의 실험, 면적 최소화 실험, 버닝 탭 실험을 비교하였다.

버닝 탭을 이용한 접촉은 면 접촉보다 약 20~25 dBc의 수동 상호 변조 왜곡 값의 향상을 보였다. 저항 성분의 감소로 인해 비선형이 일어나지 않았다고 할 수 있다.

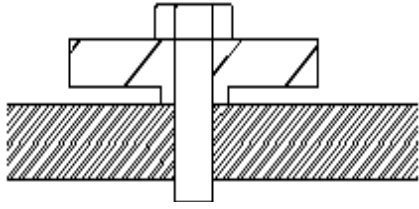


그림 13. 버닝 탭
Fig. 13. Burring tap.

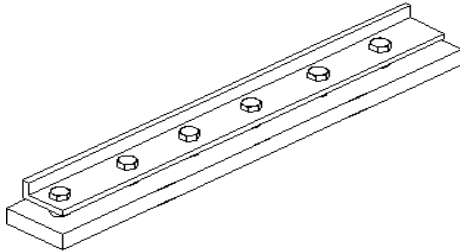


그림 14. 버닝 탭을 이용한 결합
Fig. 14. Combining with burring tab.

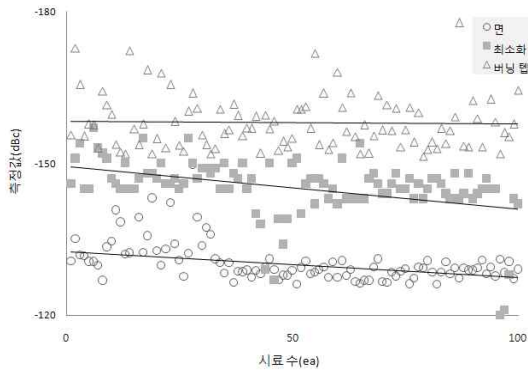


그림 15. 접촉 방법에 따른 수동 상호 변조 왜곡의 변화
Fig. 15. PIMD change with three contact methods.

IV. 결 론

본 논문에서는 수동 상호 변조 왜곡이 통신 시스템에서 간섭의 원인이 되어 통신 시스템의 품질을 떨어뜨리는 현상을 개선시키기 위하여 수동 상호 변조 왜곡 발생 원인에 대하여 검토하고, 도체-도체의 결합 시 접촉 표면의 거칠기와 이물질 등 비선형을 유발하는 요인을 감소하는 개선 방법을 제안하였다.

넛트 체결의 간격을 줄이는 실험을 통해 기존의 160 mm의 체결 간격 측정 값 -120 dBc에서 80 mm

의 체결 간격 측정 값 $-131 \sim -132$ dBc로 11~12 dBc 성능 개선이 됨을 알았다. 도체와 도체 사이의 결합 면적을 최소화하여 비선형 요인을 제거함으로써 넛트 체결 간격(80 mm)을 줄이는 실험보다 13~16 dBc 성능 개선이 됨을 알았다. 이전 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 버닝 탭 방식의 결합을 제안하였고, 그 결과로 40~45 dBc의 수동 상호 변조 왜곡이 개선된 $-160 \sim -165$ dBc을 얻었다.

실험의 결과로부터 우수한 수동 상호 변조 왜곡 성능을 갖는 설계를 하기 위해서는 표면 거칠기, 결합력, 접촉 면적이 좋아야 개선됨을 알 수 있었다. 향후 각 업체마다의 수동 상호 변조 왜곡 요구 성능을 만족하기 위해 표준과 기준 없이 업체들의 사양에 따라 개발되는 불합리함을 개선하기 위해서는 조속히 국내 수동 상호 변조 왜곡 성능 개선을 위한 제작 방법 및 가공 기술 등에 대한 많은 연구가 수행되어야 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] P. L. Lui, "Passive intermodulation interference in communication system", *Electronics & Communication Engineering Journal*, Jun. 1990.
- [2] Jin Tae Kim, In-Kui Cho, Myung Jeong, and Tae-Goo Choy, "Effects of external PIM sources on antenna PIM measurements", *ETRI*, pp. 435-442, vol. 24, no. 6, Dec. 2002.
- [3] Youn Sun Ko, "RF DIN Connector의 Passive IMD 개선에 관한 연구", 한국항공학회논문지, 6(3), pp. 195-202, 2002년 11월.
- [4] Myung Young Jeong, "Passive IMD 측정의 환경적 영향", *ETRI*, 전파연구소, 2004년.
- [5] G. H. Schennum, G. Rosati, "Minimizing passive intermodulation products generation in high power satellites", *IEEE*, 1996.
- [6] D. D. Henkes, S. C. Kwok, "Intermodulation concepts and calculations", *Applied Microwave & Wireless*, Jul. 1997.
- [7] J. Z. Wilcox, P. Molmud, "Thermal heating contribution to intermodulation fields in coaxial waveguides", *IEEE, Transactions on Communication*, Feb. 1976.

서 창 재



2005년 2월: 우송대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 3월~현재: 광운대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] PIMD, 안테나, EMI/EMC

정 용 식



1989년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
2001년 9월~2003년 2월: 미국 Syracuse대학교 (Post Doctor)
2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통신공학과 조교수
2006년 3월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 부교수
[주 관심분야] 전자파 수치 해석, 안테나, EMI/EMC

천 창 율



1983년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1992년: 미국 University of Michigan, Ann Arbor (공학박사)
1992년~1995년: 강원대학교 전기공학과 조교수

1995년~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, EMC 등