

이동 통신 기지국 안테나의 수동 상호 변조 왜곡에 진동이 미치는 영향 분석 및 개선 방안

Effects of Vibration on Passive Intermodulation Distortion in Mobile Base Station Antennas

박진성 · 정순영* · 이용식

Jinsung Park · Soon-Young Jung* · Yongshik Lee

요약

본 논문은 800 MHz 대역의 CDMA 이동 통신 기지국의 안테나에서 보편적으로 발생되고 있는 수동 상호 변조 왜곡 특성에 대하여 조망해 보고 진동이 수동 상호 변조 왜곡에 미치는 영향을 분석하여 그에 대한 개선 방안을 연구하였다. 이동 통신 기지국은 대부분 건물 옥상이나 첩탑 등 고지대에 위치하게 된다. 그렇기 때문에 비, 바람 등 자연 환경적인 요인이나 차량 등 생활 환경적인 요인에 의해 미세한 흔들림 곧, 진동이라는 영향을 수없이 받고 있다. 이에 착안하여 이동 통신 안테나가 진동에 의해 영향을 받고 있다는 것을 실험을 통해 입증해냄으로써 실제 이동 통신 운용 필드에서 진동이라는 요인에 의해 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성이 쉽게 열화된다는 것을 증명해 보였다. 또한, 진동에 잘 견딜 수 있는 안테나 구조에 대한 개선 방안을 제시하였고, 구조 개선 전후 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성을 실험적으로 비교함으로써 그 열화 정도를 35 dB 이상 향상시킬 수 있었다.

Abstract

This work investigates the effects of vibration on the passive intermodulation distortion characteristics of base station antennas for 800 MHz CDMA mobile communication systems. In general, base station antennas are located at high positions such as on building rooftops or iron towers. Thus the antennas are always affected by random vibrations, coming from various natural environmental factors such as rain and wind, or from living environmental factors such as vehicles and trains passing by. The measured intermodulation distortion characteristics before and after vibration accelerated degradation test show that vibrations are indeed the main cause for the intermodulation distortion performances of such antennas. To minimize the effects of vibrations, a new antenna design is proposed that has an improved tolerance for vibrations. Experimental results show that the proposed antenna design dramatically reduces the degradation of the intermodulation distortion more than 35 dB.

Key words : Passive Intermodulation Distortion, Intermodulation Distortion, Antenna, Vibration

I. 서론

이동 통신의 발전과 함께 다양한 서비스를 제공

하기 위해 새로운 네트워크와 무수한 장비들이 출현하고 있다. 그 중에서 무선 액세스 분야의 장비 중 통화 품질의 중요 부분으로서 무선 통신 품질의 핵

「본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업을 통한 연세대학교 대학전력 연구 센터의 연구 결과입니다. 연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*SK 텔레콤(SK Telecom)

· 논문 번호 : 20080905-116

· 수정완료일자 : 2008년 11월 13일

심이라 할 수 있는 안테나는 실제 운용 필드에서 여러 가지 예측하기 힘든 문제점들이 나타난다. 근래에 주목되기 시작한 문제점은 바로 수동 상호 변조 왜곡(passive intermodulation distortion) 특성 열화이다. 특히 이동 통신 기지국 안테나의 경우는 출력이 매우 강한데, 수동 상호 변조 왜곡의 값은 출력 대비 선형 로그 스케일로 급격히 증가하므로 결과적으로 수동 상호 변조 왜곡 특성의 열화는 이동 통신 통신 품질에 결정적인 영향을 미칠 수 있다.

수동 상호 변조 왜곡은 비단 안테나에만 국한되는 것이 아니라^{[1]~[3]} 대부분의 수동 소자에서 관찰된다^{[4]~[6]}. 즉, 비선형적인 전압-전류 관계가 야기하는 상호 변조 왜곡 현상은 능/수동 소자 구분 없이 그 성능을 저하시키고 있다.

수동 소자에서도 상호 변조 왜곡이 일어난다^[7] 물리적인 원인으로서는 크게 강자성체와 같은 물질의 본질적인 비선형성^[8], 금속간의 접합 부분에서의 비선형성^[9]을 들 수 있다.

금속간 접합 부분에서 상호 변조 왜곡이 일어나는 근본 원리는 매우 복잡하여 정확한 분석이 힘들지만 주요 요인으로 터널링 효과^[10], 열에 의한 도전을 변화 효과, 부하 임피던스 효과^[11] 등이 보고된 바 있다. 하지만 터널링 효과의 경우, 얇은 산화막에서 수동 상호 변조 왜곡 현상에 대한 부분적인 이해는 주지만 산화막이 없거나 혹은 그 두께가 매우 두꺼운 경우의 상호 변조 왜곡 현상을 설명하지 못하며, 열에 의한 효과 역시 설명할 수 있는 범위가 제한적이다. 이러한 한계를 극복하고자 접속의 강도에 따른 정성적인 분석이 시도되기도 하였다^[12].

이렇듯 지금까지 많은 수동 소자에 대한 여러 연구 결과가 있었지만, 이동 통신 기지국 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성에 관한 연구는 미미했다.

이동 통신 무선 액세스망 유지 보수 용역회사를 대상으로 실시한 안테나 유지 보수 현황에 대한 조사 결과, 수동 상호 변조 왜곡 불량률이 32%, VSWR 불량률(31%)과 기타 고장보다 더 큰 문제를 야기시킴에도 불구하고 이동 통신 기지국 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 연구 및 개선 노력은 미미했다. 특히 수동 상호 변조 왜곡 현상에 대한 조치로는 근본적인 원인 해결 방안보다는 값 비싼 안테나 교체가 66%로 가장 많았으며^[13], 이는 안테나의 수동 상호 변조 왜

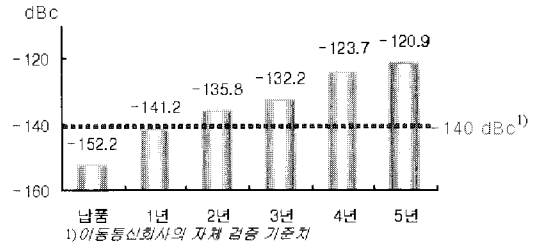


그림 1. 사용 기간별 기지국 안테나 수동 상호 변조 왜곡 특성

Fig. 1. Passive intermodulation distortion levels of base station antenna vs. usage time.

곡 특성에 대한 연구가 절실하다는 점을 말하고 있다.

이동 통신 기지국 안테나가 설치된 고층 옥상 같은 환경은 바람과 자동차 등 주변 환경에 의한 진동과 비, 눈 같은 기상 여건에 따른 부식에 항상 노출되어 있기 때문에 수동 상호 변조 왜곡이 일어날 가능성이 매우 높다. 실제 이동 통신 무선 액세스망 유지 보수 용역회사를 대상으로 한 조사 결과, 그림 1에서처럼 안테나가 오래될수록 수동 상호 변조 왜곡 특성이 나빠져서 2년된 안테나의 평균 수동 상호 변조 왜곡 특성이 이미 이동 통신회사 자체 최대 기준치인 -140 dBc를 초과하고 있으며^[13], 사용 기간이 오래된 안테나일수록 더욱 나빠짐을 알 수 있다. 즉, 좋지 않은 환경에 오래 노출될수록 수동 상호 변조 왜곡 특성 열화가 더 많이 일어나고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 이동 통신 안테나에서 많이 발생되고 있는 수동 상호 변조 왜곡 열화 문제의 원인을 실험적으로 분석하고 그 개선 방안을 제시한다. 안테나의 수동 상호 변조 왜곡의 원인과 핵심 요소로 진동과 부식이라는 두 가지 가설을 제안하였으며, 실제 실험을 통하여 제안된 가설의 타당성을 입증함으로써 원인 규명뿐 아니라 개선 방안까지 제시하였다. 또한, 제시된 개선 방안을 샘플 안테나에 적용하여 실험을 통해 개선 수준을 입증해 보였다.

II. 기지국 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성 분석

수동 소자에서도 상호 변조 왜곡이 발생하는 이유는 앞서 말했듯이 금속의 접합 저항과 같은 접합

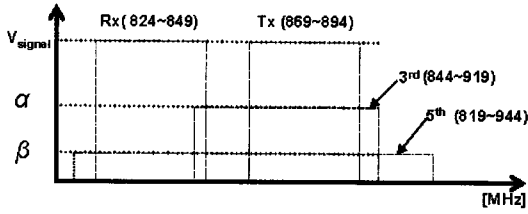


그림 2. 800 MHz CDMA 시스템의 송신 신호 상호 변조 왜곡 성분
 Fig. 2. Intermodulation distortion components of 800 MHz CDMA cellular Tx signals.

의 비선형성에 의한 원인과 니켈, 철, 코발트 등 강자성체 자체의 비선형성 때문이다.

그림 2는 우리나라 800 MHz CDMA 송신 신호의 상호 변조 왜곡 분포를 나타낸 것이다. 이는 세로축의 값은 투톤(two tone) 신호를 가정하고

$$V_i = E_a \cos \omega_1 t + E_b \cos \omega_2 t \quad (1)$$

식 (1)을 비선형 전달 함수를 가지는

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

와 같은 시스템에 V_i 를 입력 신호로 인가하고 5차 전달 함수까지만 고려하였을 때 생성되는 3차 수동 상호 변조 왜곡 항을 α , 5차 수동 상호 변조 왜곡 항을 β 라고 하였을 때의 이들의 분포를 보여준다.

$$\alpha = G_3 \left\{ \frac{3}{4} E_a^2 E_b \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t) + \frac{3}{4} E_a E_b^2 \cos(\omega_1 t - 2\omega_2 t) \right\} + G_5 \left\{ \frac{5}{4} E_a^4 E_b \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t) + \frac{15}{8} E_a^3 E_b^2 \cos(2\omega_2 t - \omega_1 t) + \frac{15}{8} E_a^2 E_b^3 \cos(2\omega_1 t - \omega_2 t) + \frac{5}{4} E_a E_b^4 \cos(2\omega_2 t - \omega_1 t) \right\} \quad (3)$$

$$\beta = G_5 \left\{ \frac{5}{8} E_a^3 E_b^2 \cos(3\omega_1 t - 2\omega_2 t) + \frac{5}{8} E_a^2 E_b^3 \cos(3\omega_2 t - 2\omega_1 t) \right\} \quad (4)$$

869~894 MHz 대역 송신 신호의 3차 및 5차 상호 변조 왜곡 성분 모두 수신 신호 대역인 824~849 MHz 범위에 포함된다. 특히 869~894 MHz 송신 신호 대역의 3차 성분은 수신 신호 대역의 일부분인 844~849 MHz에만 존재하지만 5차 성분은 세기는

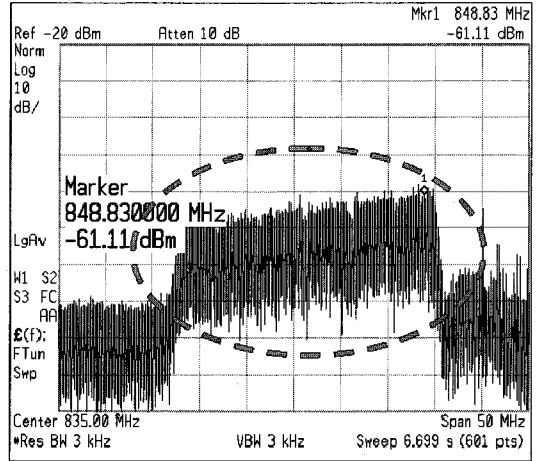


그림 3. 수동 상호 변조 왜곡이 발생한 기지국의 스펙트럼 분석기 측정 결과
 Fig. 3. Measured intermodulation distortion of mobile communication base station antenna.

약하지만 824~849 MHz 대역 전반에 걸쳐서 나타날 수 있다.

그림 3은 이동 통신 기지국 안테나에서 상호 변조 왜곡이 발생하는 것을 실험적으로 보여주는 결과이다. 안테나에 송신 주파수 대역인 869~894 MHz 대역에서 모든 조합 가능한 2개의 반송파(two-tone)를 인가시켰을 때 반사된 신호를 824~849 MHz의 수신 대역 통과 여파기와 저잡음 증폭기를 통과시킨 뒤 Agilent 社의 E4445A 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정한 결과이다. 측정에 사용된 안테나는 실제로 수동 상호 변조 왜곡 문제가 발생한 기지국 안테나를 확보하여 2회 반복 측정하였다. 반복 측정에 따른 결과, 차이는 미미하여서 그 중 한 결과만을 그림 3에 나타내었다.

측정 결과, 그림 3에서 800 MHz CDMA의 수신 대역인 824~849 MHz 대역의 신호 레벨이 우상향으로 기울어져 있다. 그 이유는 송신 대역인 869~894 MHz 대역의 3차와 5차 상호 변조 왜곡 성분 모두 수신 신호 대역에서 점진적으로 증가하는 형태로 분포하기 때문이다. 즉, 그림 3은 이동 통신 기지국 안테나에서 수동 상호 변조 왜곡이 발생하고 있다는 것을 보여주고 있다.

본 논문에서는 그림 1에서와 같이 사용 기간에 따라 수동 상호 변조 왜곡이 점점 심해지는 현상과 이

동 통신 안테나의 주변 환경을 고려하여 두 가지 요소, 즉 진동과 부식이 기지국 안테나의 수동 상호 변조 왜곡에 미치는 영향을 실험을 통하여 검증해 보았다.

진동에 의한 영향 검증을 위해서 진동가속 열화 시험(vibration accelerated degradation test)을 IEC 600-68-2-64^[14]의 규격에 따라 테스트 주파수 범위 20~2,000 Hz, 테스트 시간 측당 30분씩 X, Y축 두 방향으로 인가하였다. 부식에 의한 가설을 증명하기 위해서는 IEC 60068-2-67^[15] 규격을 적용하여 인공적으로 온도와 습도를 높인 상태인 85 °C의 온도와 85 % 습도 상태로 96시간과 168시간을 지속시켰다. 이 두 가지 테스트를 거치기 전후 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성을 측정하여 비교 분석하였다.

실험의 객관성을 확보하기 위해 실험 대상 안테나는 운용 필드에서 보편적으로 사용되고 있는 CDP-13-65(CDMA Dual Pole Antenna, 출력 13 dBi, 빔 폭 65°) 안테나를 선정하여 실험하였다. 특히 안테나 제조업체별로 동일 모델을 선정하여 실험의 객관성을 확보하였다. 수동 상호 변조 왜곡 특성 측정 장비로는 가장 널리 사용되고 있는 SUMMITEK 社の SI-800A를 이용하였고, 인가한 주파수는 800 MHz CDMA의 Tx단의 시작과 끝에 해당하는 870 MHz와 893 MHz를 사용하였으며, 신호 세기는 각각 43 dBm으로 안테나 입력 포트에서 반사된 신호 중 3차 상호 변조 왜곡 성분인 847 MHz 신호의 세기를 측정, dBc 단위를 사용하여 인가한 신호의 크기인 43 dBm과 상대적 세기를 나타내었다. 각 안테나에 대해서 3회씩 실험을 반복하였으며, 표 1에는 그 평균값을 정리하였다.

표 1. 진동 가속 열화 시험 전후 안테나 3차 상호 변조 왜곡 특성 [dBc]

Table 1. Measured 3rd-order IMD levels before and after vibration accelerated test [dBc].

모델	$(m/s^2)^2/Hz$		
	0	50	100
A	-149.0	-140.0	-131.0
B	-150.0	-144.0	-108.0
C	-154.5	-117.5	-105.5
평균	-151.2	-133.8	-114.8

실험 대상 안테나는 제조 회사별로 동일한 형태의 모델로 실험하였으므로 표 1에서 알 수 있듯이 진동 가속 스트레스를 가하고 난 이후에는 가하지 않았을 때보다 모든 제품에서 수동 상호 변조 왜곡 특성이 급격히 나빠지는 것을 알 수 있다. 특히 진동가속도 스트레스 정도가 클수록 열화 정도가 더 커짐을 알 수 있다. 즉, 진동 환경이 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 열화에 직접적인 원인이 됨을 알 수 있다.

실제 800 MHz CDMA 시스템 운용상에 더 큰 문제를 일으킬 수 있는 5차 상호 변조 왜곡 성분의 세기는 평균적으로 진동 가속 열화 실험 이전에 계측기의 신뢰 한계치인 -163 dBc 이하, 50 $(m/s^2)^2/Hz$ 진동 가속 열화 실험 후 -159 dBc, 100 $(m/s^2)^2/Hz$ 진동 가속 열화 실험 후 -156.4 dBc로 측정되어 역시 진동 가속 노출 시간에 비례하는 결과를 보여주었다.

다음으로 안테나의 부식에 따른 수동 상호 변조 왜곡 특성을 보기 위한 실험을 수행하였다. 우리나라의 사계절 특성을 감안하여 온습도에 의한 수동 상호 변조 왜곡 특성과 산성비, 습도, 먼지 등으로 인하여 안테나 부식이 특성에 어느 정도 영향을 미치는지를 실험하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 모든 실험 규격은 IEC 규격^{[14],[15]}을 따랐으며, 85 °C 온도에서 85 % 습도 상태로 96시간과 168시간 동안 지속시킨 후 수동 상호 변조 왜곡 특성을 측정하여 보았다. 본래 IEC 규격^{[13],[14]}에는 1,000시간 동안 온습도 상태를 유지하도록 권고하고 있으나, 이는 너무 오랜 시간이 소요되기 때문에 국내 이동 통신회사가 적용하고 있는 96시간 시험 방식을 적용하였고, 3일을 더 연장하여 7일 동안 고온/고습 상태를 지속시켜 본 후 부식의 상태를 지켜보았다.

세 가지 안테나에 대한 온습도 실험 전후의 3차 상호 변조 왜곡 특성을 3회씩 측정하여 그 평균을 표 2에 정리하였다. 그 결과에 근거하면 장시간 고온/고습 상태에서 부식이 발생하기는 하였지만 안테나 수동 상호 변조 왜곡 특성에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

5차 상호 변조 왜곡 성분의 평균 세기는 온습도 실험 이전과 이후 모두 계측기의 신뢰 한계치인 -163 dBc 이하로 측정되어 3차와 마찬가지로 온습도 실험에 따른 열화는 관찰되지 않았다.

두 가지 실험을 통해서 이동 통신 기지국용 안테

표 2. 온습도 실험 전후 안테나 3차 상호 변조 왜곡 특성 [dBc]

Table 2. Measured 3rd-order IMD levels before and after temperature and humidity test [dBc].

모델 \ 시간	최초	96시간	168시간
A	-153.5	-153.0	-152.8
B	-154.5	-154.5	-154.3
C	-151.0	-150.0	-150.1
평균	-153.0	-152.5	-152.4

나의 수동 상호 변조 왜곡 특성에 결정적인 영향을 미치는 요인은 진동임을 알 수 있다. 이에 반해서 일반적으로 잘 알려진 수동 상호 변조 왜곡의 원인인 온습도에 의한 부식은 실험 대상 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성을 열화시키는 정도가 매우 미미하였다. 이외에 VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) 도 두 실험 전과 후를 비교하여 측정하였으나, 그 영향은 미미한 것으로 판단되어 결과를 본 논문에 실지는 않았다.

III. 수동 상호 변조 왜곡 개선 방안

진동의 영향을 최소화하기 위한 방법으로써 다음과 같이 안테나 구조 개선 방안을 제시하였다.

첫째, 안테나 구조를 개선하여 급전선과 소자간 등 납땜 지점을 최소화함으로써 금속간의 접촉 효과를 줄였다.

둘째, 그림 4와 같이 나사못을 이용한 소자간 연결을 볼트와 너트로 대체함으로써 진동에 의한 영향을 최소화 시켰다. 반사판에 소자를 고정하는 방식이 안테나마다 다르지만, 반사판에 소자를 나사못으로 고정하는 것이 일반적이었다. 이러한 구조는 진동이 발생될 때마다 반사판과 소자를 고정하는 나사못 사이에 미세한 이격이 생기기 때문에 접촉 상태가 불량해져서 진동의 영향을 많이 받는 구조였다. 이런 취약점을 없애기 위해 소자를 별도의 볼트와 너트를 사용하여 반사판에 고정시키는 체결 방식을 적용하였다. 물론 정도의 차이는 있겠지만 볼트와 너트 역시 진동에 의한 이격에 무관한 구조는 아니므로 그 수를 최소화시키는 형태를 택하였다.

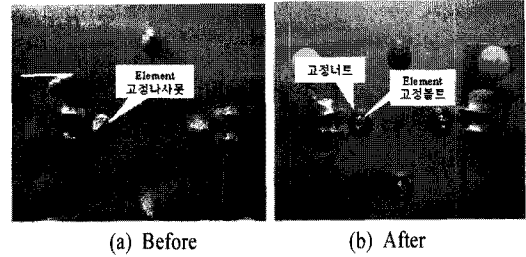


그림 4. 소자 고정 방식 (a) 나사못 (b) 볼트와 너트
Fig. 4. Antenna component fixing methods (a) with screws (b) with bolts and nuts.

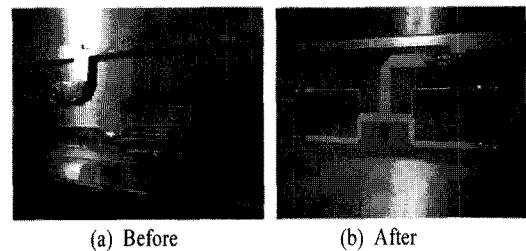


그림 5. 급전선 구조
Fig. 5. Modified feed line structure.

셋째, 급전선 구조를 변경하였고 커넥터 라인 또한 최대한 고정시킴으로써 진동에 의한 영향이 최소화 되도록 하였다. 현재 가장 보편화되어 사용되고 있는 급전선 구조는 스트립라인 형태의 급전 방식이었다. 이는 반사판과의 이격을 두고 스트립라인이 설치되고 볼트를 이용해서 고정하는 형태로 이동 통신 기지국용 안테나에서 일반적인 구조이다. 외관상 깨끗해 보이지만 진동에 비교적 큰 영향을 받을 수 있다. 이를 그림 5와 같이 변경하였다.

중전의 동축 선로부터 들어온 신호가 스트립라인을 통하여 분배되어 각각의 안테나로 들어가던 형태에서 우측 상단의 동축 선로부터 들어온 급전을 중앙의 전력 분배기를 거쳐 다시 동축 선로를 통하여 각각의 안테나로 급전이 이루어지는 방식으로 바뀌었다.

마지막으로 커넥터 라인 고정 여부에 따라 진동의 의한 영향을 받는 정도가 달라지므로 급전선 구조는 진동에 강한 동축 선로를 적용하였고, 커넥터 접속 라인도 고정시키는 구조를 적용하였다. 이를 그림 6에 나타내었다.

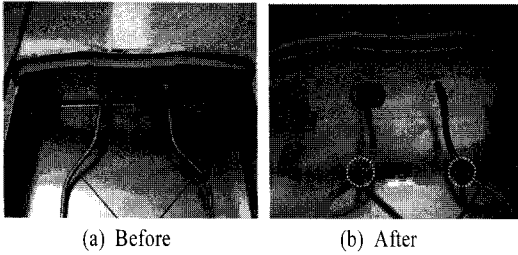


그림 6. 변경된 커넥터 라인 구조
Fig. 6. Modified connector line structure.

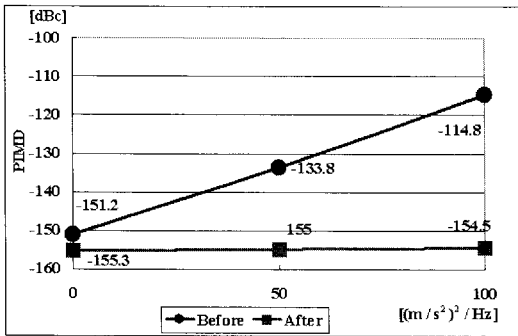


그림 7. 개선된 구조와 이전 구조의 진동 가속도 실험 후 안테나 3차 상호 변조 왜곡 특성 측정값
Fig. 7. Measured 3rd-order IMD levels before and after antenna structure modification.

그림 7은 개선 구조를 적용한 후의 진동 가속도 열화시험을 거친 결과를 정리한 그림으로 실험에 사용된 세 가지 안테나 모델의 평균치이다.

그림 7의 결과에서 진동에 강한 구조를 가진 안테나는 진동 가속도 열화 시험을 거친 후에도 그 정도에 상관없이 상호 변조 왜곡 특성이 변하지 않고 원래의 상태를 유지하는 것을 보여주고 있다.

구조 개선에 따른 진동 가속도 열화 시험 3차 상호 변조 왜곡 특성의 평균 열화는 초기값에서 1 dB 미만으로 기존의 안테나에 비해서 열화 정도가 최대 35 dB 이상 개선되었다. 즉, 개선된 구조는 진동에 의한 수동 상호 변조 왜곡 열화 현상을 최소화 시키는 데 매우 효과적인 구조였음을 실험적으로 검증할 수 있었다.

5차 상호 변조 왜곡 성분의 평균 세기는 구조가 개선된 안테나에서는 모든 경우 측정기의 신뢰 한계치인 -163 dBc 이하로 측정된 반면 기존의 안테나

에서는 표 1에 정리된 실험과 유사한 경향을 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 이동 통신 무선 액세스 기술의 핵심이라고 할 수 있는 이동 통신 기지국용 안테나의 수동 상호 변조 왜곡 특성을 분석하여 실험을 통해 가장 큰 열화 요인을 찾아내고, 이를 해결할 수 있는 개선 방안을 제시하였다. 특히, 운용 필드에서 많이 나타나고 있는 현상을 토대로 현실감 있는 접근 방법을 택함으로써 연구 결과의 신뢰성과 정확성을 더하고자 하였다.

그 동안 수동 상호 변조 왜곡에 문제가 많았던 안테나를 대상으로 실험해 본 결과, 진동으로 인해서 급속간의 접합 부분이 느슨해지는 현상이 생기고, 여기에서 비선형적인 전압/전류 관계가 유도되어 수동 상호 변조 왜곡 문제를 일으킴을 알 수 있었다. 따라서 이를 개선하기 위해 안테나 구조를 진동에 강한 구조로 재설계하여 실험으로써 그 효과를 입증하였다. 진동가속도 열화 시험 결과, 36.4 dB까지 관찰된 안테나의 평균 수동 상호 변조 왜곡 특성 열화가 구조 개선을 통해 동일 실험 후에도 1 dB 미만으로 유지되는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 진동이 수동 상호 변조 왜곡 특성의 열화로 이어지는 물리적 현상에 대한 정확한 분석은 과제로 남아 있다.

이 연구 결과를 실제 운용 필드에 적용한다면 기존 안테나의 운용 기한을 늘리는 데 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] V. Golikov, S. Hienonen, and P. Vainikainen, "Passive intermodulation distortion measurements in mobile communication antennas", *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*, Atlantic City, pp. 2623-2625, Oct. 2001.
- [2] P. L. Lui, A. D. Rawlins, "Passive non-linearities in antenna systems", *IEE Colloquium on Passive Intermodulation Products in Antennas and Related Structures(Digest No. 94)*, London, pp. 6/1-6/7, Jun. 1989.
- [3] P. Bolli, S. Selleri, and G. Pelosi, "Passive intermo-

- dulation on large reflector antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 5, pp. 13-20, Oct. 2002.
- [4] Dmitry Zelenchuk, Aleksey P. Shitvov, Alex G. Schuchinsky, and Torbjörn Olsson, "Passive intermodulation on microstrip lines", *Microwave Conference, 2007. European*, Munich, pp. 396-399, Oct. 2007.
- [5] M. B. Amin, F. A. Benson, "Coaxial cables as sources of intermodulation interference at microwave frequencies", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 20, no. 3, pp. 376-384, Aug. 1978.
- [6] Justin Henrie, Andrew Christianson, and William J. Chappell, "Prediction of passive intermodulation from coaxial connectors in microwave networks", *IEEE Transaction in Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, no. 1, Jan. 2008.
- [7] P. L. Lui, "Passive intermodulation interference in communication systems", *Electronics and Communication Engineering Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 109-118, Jun. 1990.
- [8] David. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, Addison-Wesley, pp. 257-262, 1992.
- [9] F. Arazm, F. A. Benson, "Nonlinearities in metal contacts at microwave frequencies", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 22, no. 3, pp. 142-149, Aug. 1980.
- [10] Clarence D. Bond, Charles S. Guenzer, and Carmine A. Carosella, "Intermodulation generation by electron tunneling through aluminum-oxide films", *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 12, pp. 1643-1652, Dec. 1979.
- [11] S. Hienonen, A. V. Raisanen, "Effect of load impedance on passive intermodulation measurements", *Electronic Letters* 40, no. 4, pp. 245-247, Feb. 2004.
- [12] Zhang Shi-quan, Ge De-biao, "The generation mechanism and analysis of passive intermodulation in metallic contacts", *Environmental Electromagnetics, The 2006 4th Asia-Pacific Conference on*, Dalian, pp. 546-549, Aug. 2006.
- [13] "국내 이동통신회사의 유지 보수 관리 site인 So Café 통계 자료", 2007년 1월~6월.
- [14] IEC 60068-2-64, "Environmental testing - Part 2-64: Tests - Test Fh: Vibration, broadband random and guidance", Apr. 2008.
- [15] IEC 60068-2-67, "Environmental testing - Part 2: Tests - Test Cy: Damp heat, steady state, accelerated test primarily intended for components", Dec. 1995.

박진성



2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2008년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나, 메타 물질

정순영



2006년 2월: 한양대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2008년 8월: 연세대학교 공학대학원 전파통신공학 전공
 1995년~현재: SK텔레콤 재직
 [주 관심분야] 근거리 무선 통신 RF 시스템

이 용 식



1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)

2004년 4월: University of Michigan (Ph.D.)

2004년 10월: Post-doctoral Research Associate, Purdue University

2005년 7월: Senior Research Engineer, EMAG Technologies, Inc.

2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수

[주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나, 메타 물질