

# Taguchi Method 와 HALT(High Accelerated Life Test)를 이용한

## WCDMA Node B Amplifier 강건설계

### Robust Design for WCDMA Node B Amplifier by Taguchi Method and HALT (High Accelerated Life Test)

이준서\*, 노영석, 홍진표, 안광은, 연철흠  
(Lee Jun-Seo and Roh Young Seok, Hong Jin Pyo, Ahn Kwang Eun, Yon Chul Heum)

**Abstract :** In the RRH (Radio Remote Head) of a WCDMA Node B System, an HPA (High Power Amplifier) is used in order to amplify the transmission RF signal. Upon designing an HPA, the design requirements demand that the intermodulation characteristics are optimized during design and that the stability of the characteristics is maintained in the field. In this DOE (Design of Experiments) research, a few vital factors that affect intermodulation characteristics were first selected; then, an optimal solution was produced for high reliability in a noisy environment in the field by employing the Taguchi Method, a statistical method used for a robust design. Furthermore, by employing HALT (High Accelerated Life Test) during the verification test, this experiment has verified that an HPA that was designed using the Taguchi Method proved to be a far more robust design than an HPA that was designed without using the method.

**Keywords:** WCDMA HPA, Intermodulation, Robust Design, Taguchi Method, Reliability, HALT

#### I. 서론

오늘날의 무선 이동통신 시스템은 전력소비가 낮고 선형성이 높은 전력증폭기를 요구한다. 특히 WCDMA와 같은 디지털 변조방식은 정보가 신호의 진폭과 위상에 실려서 전송되며, 신호 진폭의 최대값 대 평균값의 비(peak-to-average ratio)가 큰 것이 특징이다. 따라서 선형성 요구조건이 매우 엄격하며, ACPR (Adjacent Channel Power Ratio)과 Intermodulation을 그 기준으로 정하고 있다. 한편 시스템이 운용되는 환경의 온도 변화 및 전력 증폭기 구성 부품의 고유 공차에 의해 비선형 특성이 증가하는(ACLR 특성이 저하되는) 현상이 발생하며 이를 방지하기 위한 고신뢰성 설계가 요구 되어진다.

본 논문에서는 최대출력이 25W인 WCDMA 기지국 RRH (Remote Radio Head)용 HPA (High Power Amplifier)설계 시 실험 계획법(Design of Experiment)의 일종인 다구찌 방법(Taguchi Method)을 사용하여 고온에서의 비선형특성을 개선하였다. 그리고 신뢰성 설계 검증방법의 하나인 HALT(High Accelerated Life Test)를 통해 운용 온도 범위(Operating Temperature Range)를 벗어난 스트레스 상 황에서의 동작여부를 확인하여 다구찌 방법에 의한 개선 정도를 확인하였다.

#### II. 증폭기 설계

IMT-2000 서비스의 전송제한은 3GPP에 규정하고 있다. IS-95A 서비스보다 IMT-2000 서비스는 3배의 대역폭을 가짐으로 해서 Peak to Average가 높아졌고, 이 때문에 인접채널에 대한 영향을 줄이는 쪽으로 더 주의깊게 설계하여야 하는 어려움이 발생하였다. 이러한 요소에 가장 민감하게 동작하는 모듈이 이동통신 시스템의 최종단에 위치하여 멀리까지 서비스를 가능하게 하여주는 HPA(High Power Amplifier)이다.

HPA는 P1dB 근처에서 동작시킴으로 인하여 3차, 5차 고조파 신호로 인해 인접채널에 영향을 미치며, 신호가 포화 됨으로 인해 비선형 특성인 신호왜곡이 발생한다. 이는 고온 환경에서 더 큰 신호 왜곡으로 이어지며 이에 HPA를 어떻게 선형화시킬 수 있을 것이냐가 중요한 요소로 작용한다.

당사의 WCDMA 기지국 RRH의 HPA에는 선형화 기법 중의 하나인 Digital Pre Distortion 방식을 적용하였는데 본 논문은 고온에서의 HPA Unit 자체의 비선형 특성 개선에 초점을 맞추었다.

#### III. 다구찌 방법

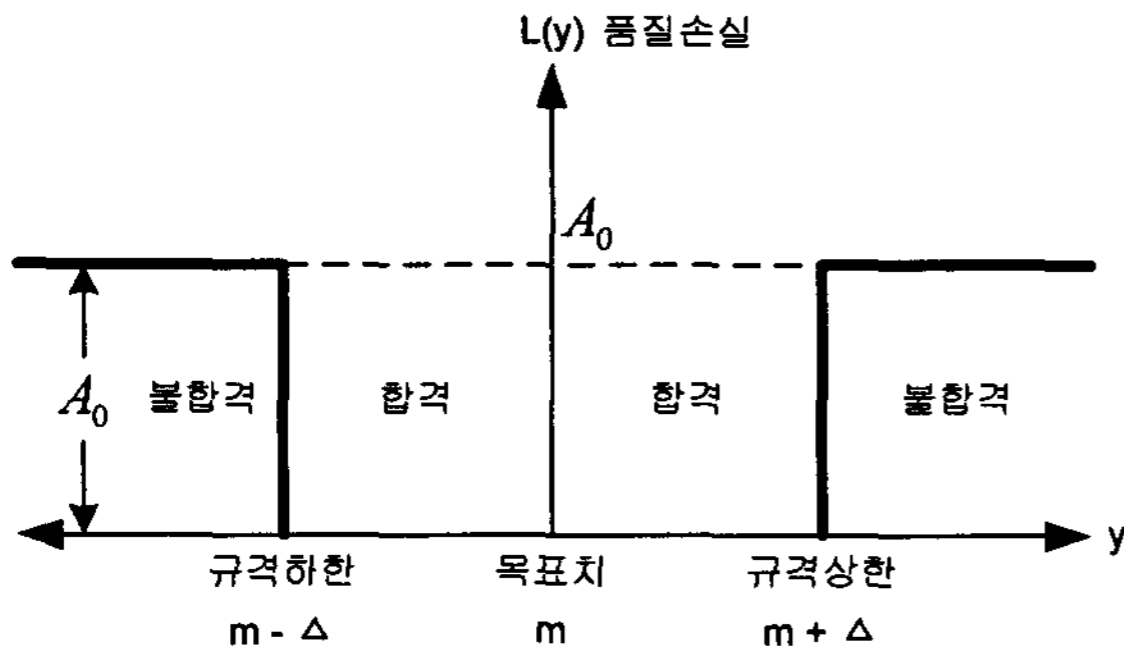
실험계획법에는 많은 방법이 있으나, 이 중에서 일본의 다구찌 겐이찌 (Taguchi Genechi)가 만든 직교배열표를 이용한 다구찌 방법이 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. 다구찌 방법은 종래의 실험계획법에 비하여 잡음(환경)인자에 강건한 설계 (Robust Design)를 가능하게 하여주는 장점이 있다.

이 방법을 많은 설계변수들을 고려해야 하는 전력증폭기의 설계에 적용하면 실험횟수를 상당히 단축하면서 잡음에 대하여 산포가 적은 제어인자의 최적조건을 찾는 효율적인 실험이 가능해진다.

다구찌 방법의 핵심은 두 가지로 볼 수 있는데 그것은 손실함수와 강건설계(Robust Design)이다.

기존의 관점으로 볼 때 규격하한과 규격상한의 사이에 들 어간 양품은 비용 즉, 손실을 발생시키지 않지만 그 사이를 벗어난 불량품은 폐기비용이나 수리비용과 같은 비용을 발생시키므로 생산자에게 손실이 된다. 따라서 생산자는 허용공차를 만족시켜서 불량품을 생산하지 않도록 하는 것을 목표로 하게 된다. 손실에 대한 이러한 관점을 그림으로 나타내면 그림1과 같다.

\* 책임저자(Corresponding Author)



$y$ : 제품의 특성치  
 $m$ : 목표치  
 $\Delta_0$ : 기능적 한계치(공차)  
 $A_0$ : 사회적 손실 = 수리비용 + 부대비용  
 $L(y)$ : 소비자의 평균 손실

그림 1. 전통적 관점의 손실함수

다구찌의 관점으로 볼 때는 생산한 제품이 목표치를 정확하게 충족시키지 않는 이상 그 제품은 손실을 발생시킨다. 전통적 관점에서는 생산한 제품이 불량품으로 판정되지만 않으면 폐기비용이나 수리비용과 같은 비용을 발생시키지 않으므로 생산자에게는 손실이 생기지 않는다. 그러나 품질특성치가 규격범위 내에 있다 하더라도 목표치와 일치하지 않으면 고객에게 불편을 야기시키는 등의 다른 손실을 수반한다. 따라서 생산자는 목표치를 충족시키는 것을 목표로 하게 된다. 손실에 대한 이러한 관점을 그림으로 나타내면 아래와 같다.

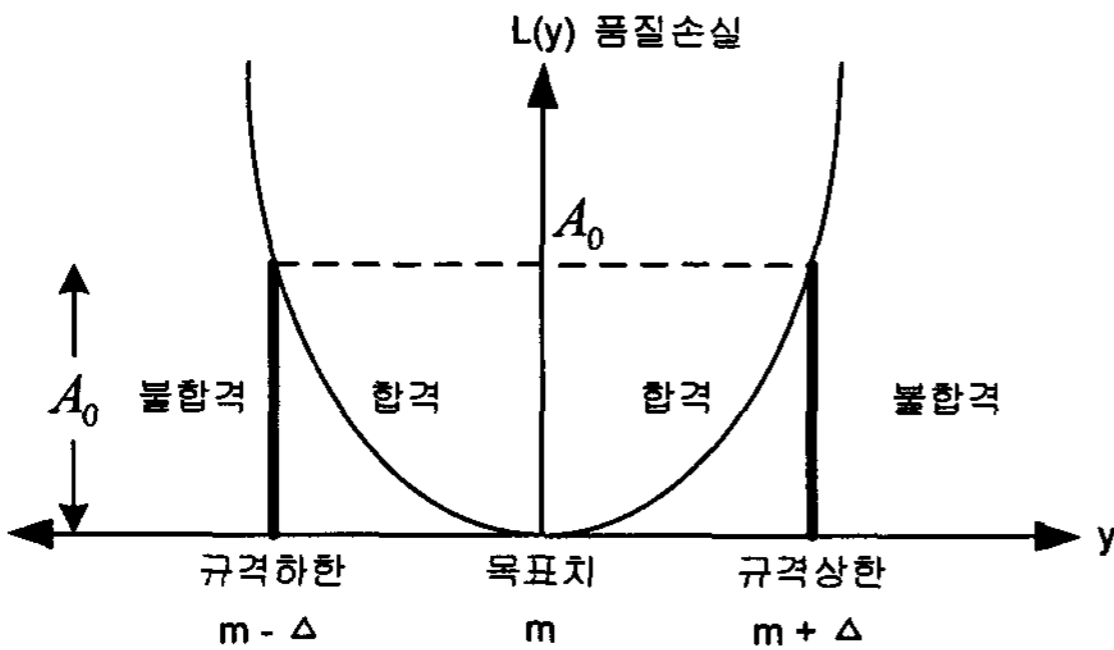


그림 2. 다구찌 방법의 손실함수

그림 2에서 알 수 있듯이 생산한 제품이 발생시키는 손실이 0이 될 때는 제품의 품질특성치가 목표치를 만족시키는 한 점 뿐이다. 그리고 규격하한과 규격상한의 사이에 있는 바깥에 있던 마찬가지로 목표치에서 멀어질수록 더 큰 손실을 발생시키고 손실 곡선은 목표치에서 멀어질수록 가파르게 된다. 이와 같은 형태의 손실을 수식으로 유도한 것이 다구찌의 2차 함수형 손실함수이고 아래와 같다.

손실함수  $L(y) = k(y-m)^2$  단,  $k = \frac{A}{\Delta^2}$

평균 기대손실  $L = k[\sigma^2 + (\mu - m)^2]$

본 논문의 품질특성 Y는 망대특성이므로 그림 3과 같은 손실함수 그래프와 아래와 같은 평균기대손실값을 갖는다,

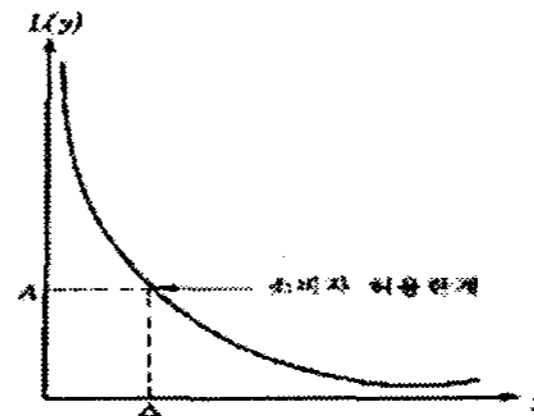


그림 3. 본 논문의 망대특성 손실함수 그래프

손실함수  $L(y) = k' \frac{1}{y^2}$  단,  $k' = A\Delta^2$   
 평균 기대 손실  $L = k \left( \frac{1}{\mu^2} \right) \left( 1 + \frac{3\sigma^2}{\mu^2} \right)$

두 번째로 강건 설계의 개념을 이해하기 위해서는 먼저 노이즈(Noise)의 개념을 알아둘 필요가 있다. 노이즈란 제품을 생산할 때 제품에 변동을 일으키는 원인, 즉 변동원인을 말한다. 예를들면 진동, 소음, 온도, 습도 등이 있다. 강건 설계는 제품이 노이즈에 둔감한 즉, 노이즈에 의한 영향을 받지 않거나 덜 받도록 하는 설계를 말한다.

본 논문에서는 노이즈에 해당하는 잡음인자를 온도로 설정하였으며 고온 환경에 둔감한 비선형 특성을 보이는 제어인자의 최적조건을 찾고자 하였다.

IV. 시험 및 측정 결과

정적 계량치 다구찌 방법을 적용할 전력증폭기의 비선형 특성에 영향을 주는 제어인자로 다음과 같은 5가지를 설정하였고 실험 구성은 그림 4와 같다.

Idq, Memory Effect, Heat Sink Type, P1dB, Bias Line Width

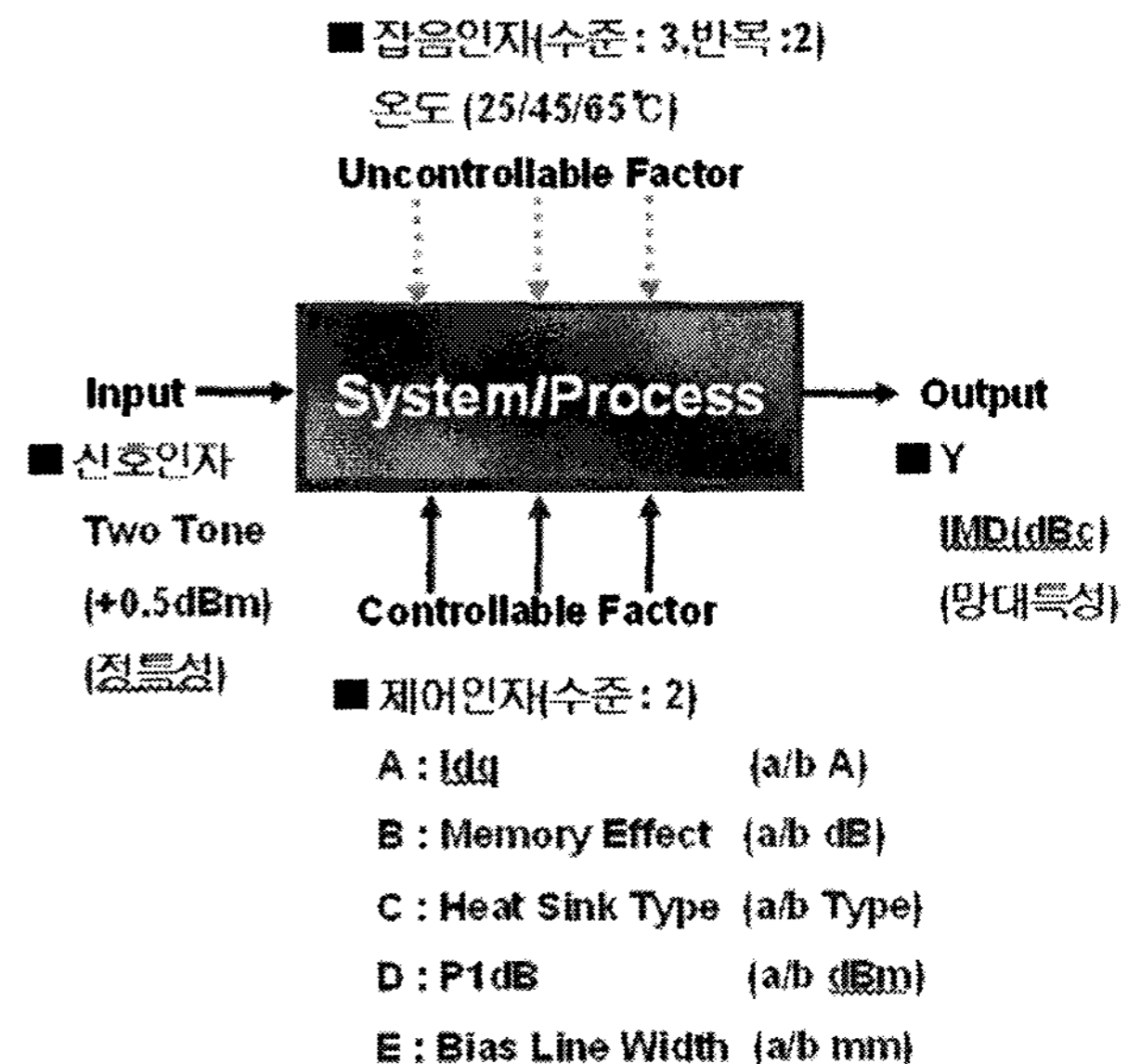


그림 4. 다구찌 방법의 실험 구성도

이 제어인자의 수준을 각각 2수준으로 설정한 뒤 아래와 같은 표준형 2수준 직교배열표를 사용하였다.

$$L_{2^m} 2^{2^m-1} = L_8 2^7$$

신호인자는 +0.5dBm의 two tone을 입력하였고 잡음인자는 25°C, 45°C, 65°C 3수준의 온도로 설정하였다. 전력증폭기의 IMD특성 측정은 Agilent사의 스펙트럼 분석기인 E4440A를 사용하였고 GPIB를 통한 데이터 수집에는 LabVIEW 7.1, 데이터 분석에는 MiniTab 14를 사용하였다.

독일 Weiss사의 SB35 항온 항습기로 실험한 결과는 아래 표 1과 같다.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
	Idq	Memory Effect	Heat Sink Type	P1dB	Bias Line	N25	N45	N65	N25_1	N45_1	N65_1
1	1	1	1	1	1	53.9	53.0	52.4	54.1	53.5	52.7
2	1	1	1	2	2	54.3	53.7	53.1	54.0	53.4	52.9
3	1	2	2	1	1	54.1	53.7	52.7	54.3	53.6	52.9
4	1	2	2	2	2	54.2	53.6	52.9	54.2	53.4	52.7
5	2	1	2	1	2	54.0	53.1	52.5	53.7	53.1	52.5
6	2	1	2	2	1	53.8	52.8	51.9	53.8	53.0	51.5
7	2	2	1	1	2	53.6	53.1	52.5	53.9	53.3	52.7
8	2	2	1	2	1	54.0	53.2	52.6	54.0	53.1	52.6

표 1. 다구찌 2수준 직교배열표의 제어인자 내측배열, 잡음인자 외측배열 및 IMD 측정결과

실험 결과 잡음인자인 온도에 가장 둔감한 정도를 표현하는 SN 분석결과 전력증폭기 비선형특성에 미치는 영향도 정도는 Idq, Memory Effect, Bias Line, Heat Sink Type, P1dB의 순서로 나타났으며 최적조건은 각각 1,2,1,1,2 수준인 것으로 밝혀졌으며 이 SN 정도와 주효과 분석결과는 아래 그림 5,6과 같다.

Response Table for Signal to Noise Ratios  
Larger is better

Level	Idq	Memory Effect	Heat Sink Type	P1dB	Bias Line
1	34.56	34.52	34.54	34.53	34.52
2	34.50	34.54	34.52	34.53	34.54
Delta	0.06	0.03	0.01	0.00	0.02
Rank	1	2	4	5	3

그림 5. 제어인자 S/N 분석 결과

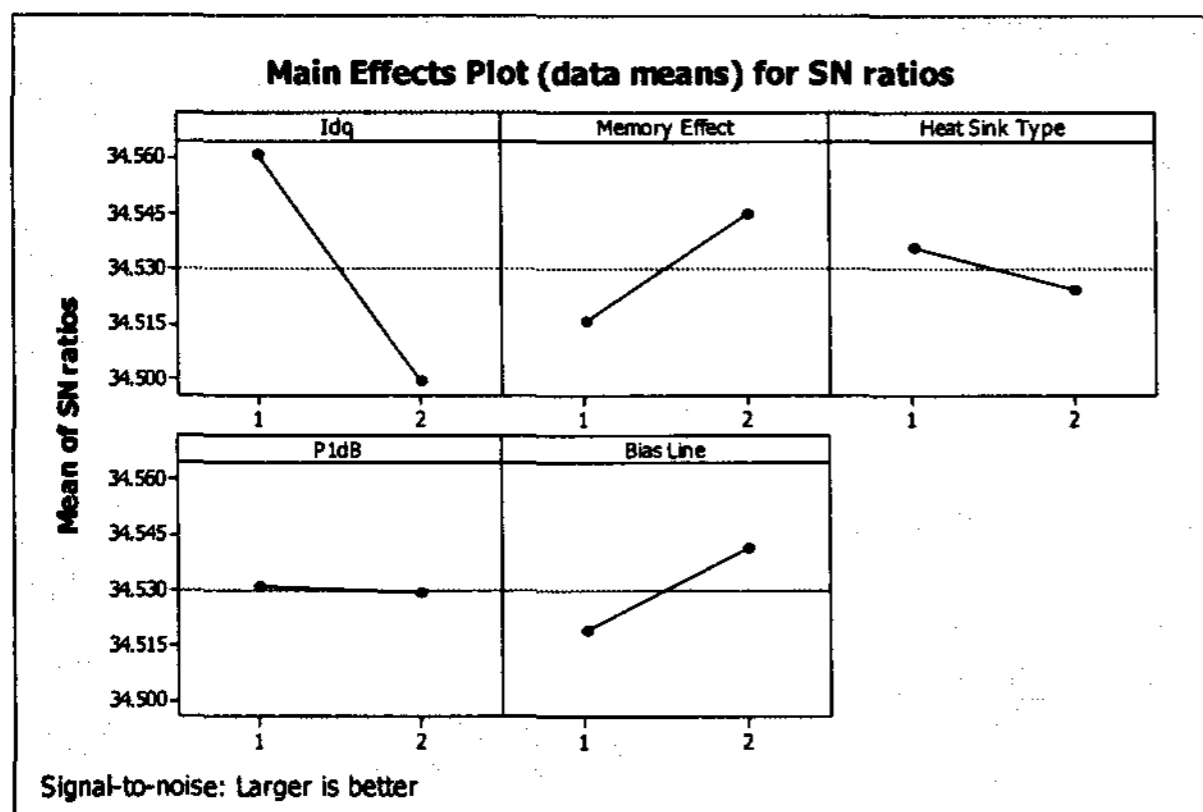


그림 6. 제어인자의 주효과 분석 결과

결국 다구찌 방법을 적용하기 전의 전력증폭기의 비선형특성은 그림 7과 같이 평균 52.4dBc, 표준편차 0.65dB의 0.5시그마 수준이었지만 다구찌 방법으로 찾은 제어인자의 최적조건 적용시 그림 8과 같이 평균 53.2dBc, 표준편차 0.24dB로 평균 및 산포 개선이 이루어졌고 이는 5시그마 수준의 품질특성으로 향상된 것임을 알 수 있다.

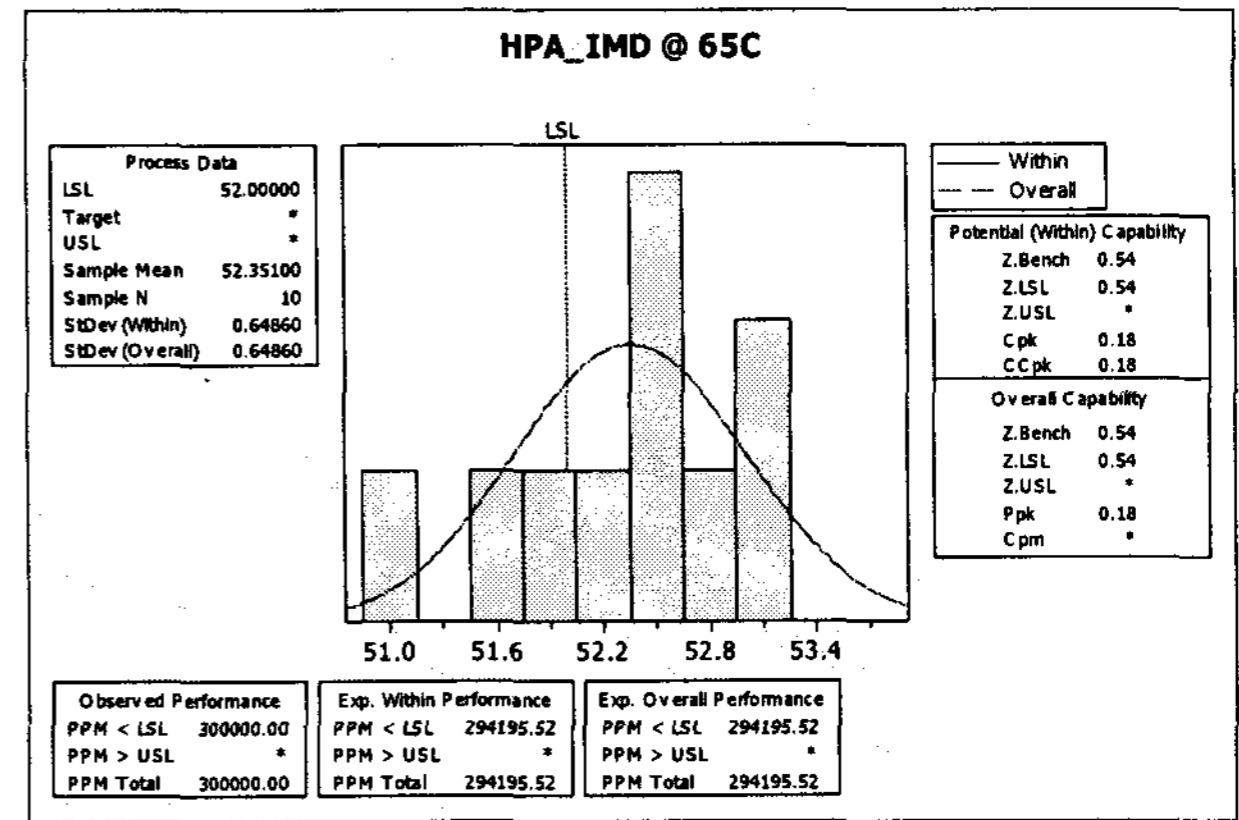


그림 7. 개선 전의 전력증폭기 IMD특성 공정능력분석 결과

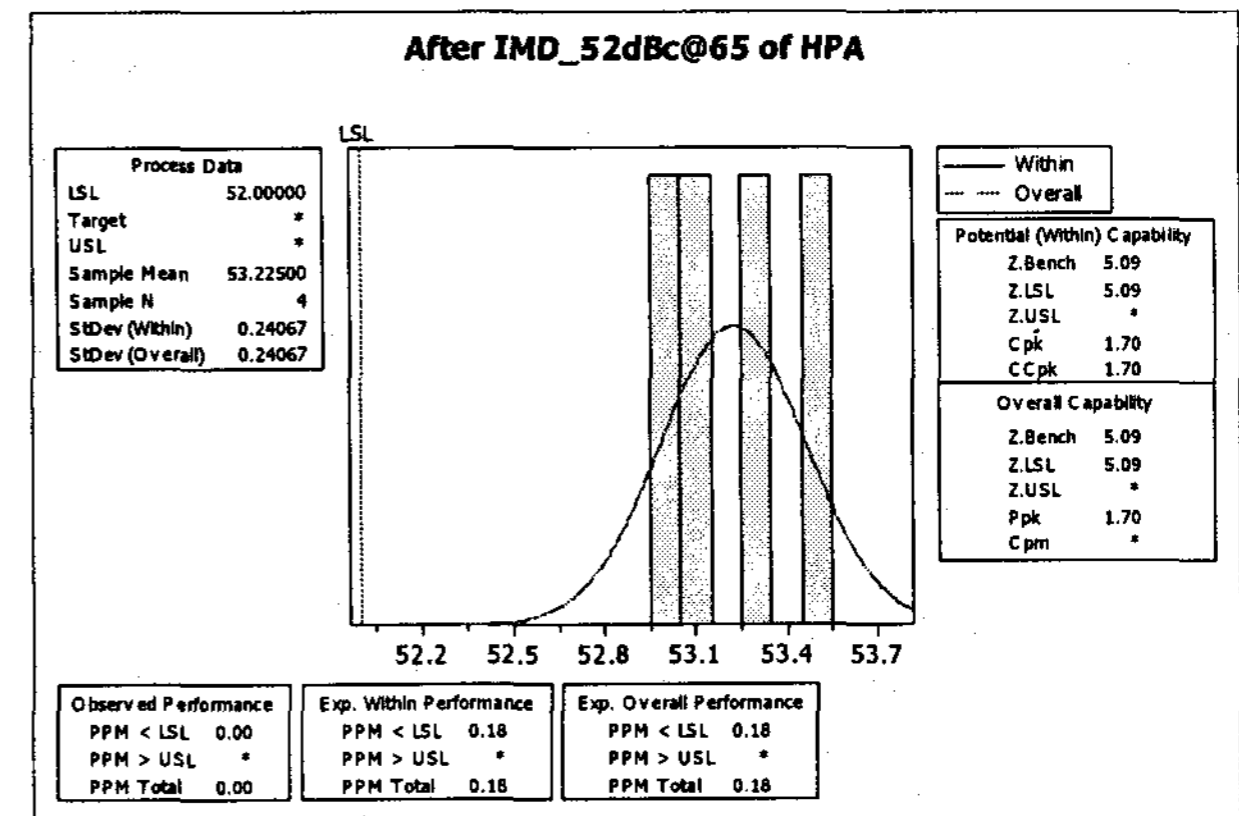


그림 8. 개선 후의 전력증폭기 IMD특성 공정능력분석 결과

개선된 전력증폭기의 비선형 특성의 평균 기대손실을 다구찌 손실함수를 사용하여 아래 그림 9와 같이 도출하였다. 개선 후 평균과 산포를 고려한 전력증폭기의 평균 손실비용은 269,112원이었다. 이는 개선 전의 282,000원에 비해 Unit당 9,338원의 손실금액 감소를 의미하는 것이다.

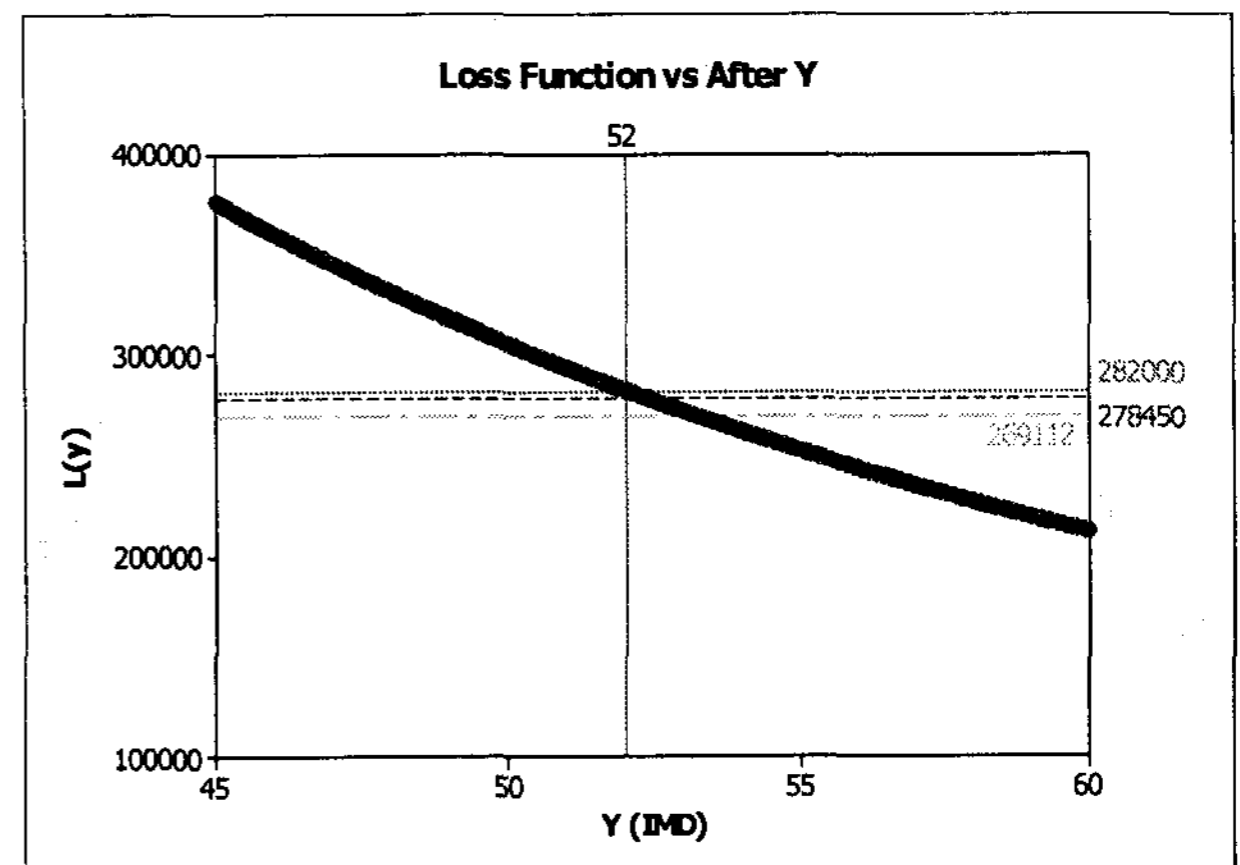


그림 9. 개선 후의 평균 기대손실

$$L = k \cdot \left( \frac{1}{\mu^2} \right) \left( 1 + \frac{3\sigma^2}{\mu^2} \right)$$

$$A_0 = 282000 \text{원}$$

$$\mu = 53.23 \text{dBc}$$

$$\sigma = 0.24 \text{dBc}$$

$$L = 269,112 \text{원}$$

다구찌 방법에 의한 개선 정도를 검증하기 위하여 항온항습기가 아닌 허용 한계 스트레스 상황에서의 정상 동작 여부를 확인하는 HALT 장비를 사용하였다. 시험 시료의 HALT 구성은 그림 10과 같으며 미국 QualMark사의 Typhoon-2.5 장비를 사용하였다.

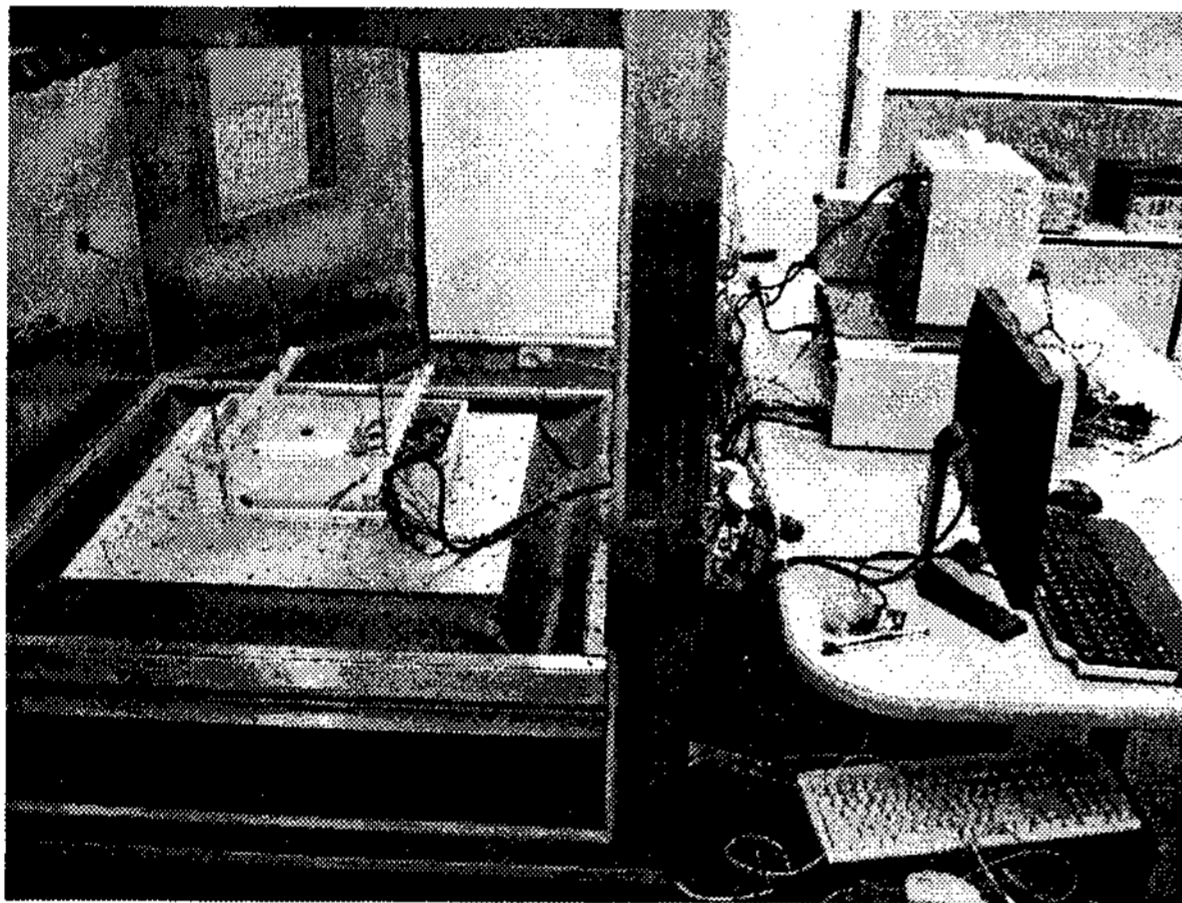


그림 10. 시험 시료 HALT 구성도

일반적인 HALT 시험 단계는 저온(Low Temperature Step Stress), 고온(High Temperature Step Stress), 빠른 온도 변화(Rapid Thermal Transition Stress), 진동(Vibration Step Stress), 온도/진동 복합(Combined Environmental Stress)의 5단계를 거치는 것이 원칙이지만 본 논문은 다구찌 방법의 잡음인자인 온도 스트레스로만 국한하여 저온, 고온, 빠른 온도변화 3단계만 적용하여 검증하였다. HALT 결과 HPA의 ACLR 특성은 자사 제품에 공통적으로 적용되는 허용 공차 이상의 신뢰성을 확보한 것으로 판단할 수 있었다.

#### V. 결론

본 논문에서는 고온에서의 비선형 특성이 개선된 WCDMA 기지국용 HPA의 고신뢰성 설계를 구현하기 위하여 통계적 방법론인 다구찌 방법(Taguchi Method) 과 HALT를 사용하였다. 그 결과 기존 설계 대비 Intermodulation의 경우 평균 0.68dB 향상 및 표준편차 0.29dB 감소의 효과를 보았다.

하지만 많은 시험 횟수에 비해 절대적으로 부족하게 확보한 시험 시료로 인해 장기간의 시간이 소요되었고, 일부 불완전한 시료를 수리 후 재사용하여 각 시료에 가해진 스트레스 정도가 균일하지 않았다. 이는 일부 데이터의 변질로 이어졌음을 부인 할 수 없다. 결국 이를 보완하기 위해 실험을

2회 반복하여 오차분산을 최소화하였다.

향후 현장 적용된 HPA의 고장 데이터를 근거로 고장을 및 평균 수명을 산출하여 HPA의 강건성 정도를 재확인 하는 작업이 요구 되어진다.

#### 참고문헌

- [1] S. Arimoto, "Linear controllable systems," *Nature*, vol. 135, pp. 18-27, July, 1990.
- [2] R. C. Baker and B. Charlie, "Nonlinear unstable systems," *International Journal of Control*, vol. 23, no. 4, pp. 123-145, May, 1989.
- [3] G.S. Peace (1993). Taguchi Methods. Addison-Wesley Publishing Company.
- [4] J.H. Lochner and J.E. Matar (1990). Designing for Quality. ASQC Quality Press.
- [5] W. Y. Fowlkes and C.M. Creveling (1995). Engineering Methods for Robust Product Design. Addison-Wesley Publishing Company.
- [6] S.H. Park (1996). Robust Design and Analysis for Quality Engineering. Chapman & Hall.
- [7] M.S. Phadke (1989). Quality Engineering Using Robust Design. Prentice-Hall.
- [8] 김연성, 박영택, 서용호, 유왕진, 유한주 "품질경영", 박영사, 1999

#### 이준서

1992년 한양대학교 전자통신공학과 졸업.

6Sigma MBB, CRE (Certified Reliability Engineer)

현재 LG-Nortel. Mobile Network H/W team 책임연구원 재직 중  
관심분야는 무선 H/W 설계, 6Sigma, 신뢰성 설계 및 시험

#### 노영석

현재 LG-Nortel. Wireless Broadband System team 책임연구원 재직 중

관심분야는 H/W 신뢰성 배분/예측, 신뢰성 설계기술 및 시험 (HALT/ALT)

#### 홍진표

1981년 성균관대학교 전자공학과 졸업.

1998년 고려대학교 전자공학 석사

2000년 ~ 현재 고려대학교 통신공학 박사과정

현재 LG-Nortel. Mobile Network H/W team 팀장 재직 중

#### 안광은

1990년 한양대학교 전자통신공학과 졸업.

1999년 한양대학교 전자통신공학과 박사

현재 LG-Nortel. Mobile Access H/W team 팀장 재직 중

#### 연철흠

1981년 서강대학교 전자공학과 졸업.

1993년 KAIST 전자공학부 박사.

현재 LG-Nortel. H/W 개발실장 및 연구위원 재직 중