

논문 2007-44TC-7-4

# OFDM 시스템에서 시간 및 주파수 영역 클리핑의 Total Degradation 성능평가

( Total Degradation Performance Evaluation of the Time- and Frequency-Domain Clipping in OFDM Systems )

한 창 식\*, 서 만 중\*, 임 성 빈\*\*

( Changsik Han, Manjung Seo, and Sungbin Im )

## 요 약

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 다수 반송파 전송의 특수한 형태로 볼 수 있으며 하나의 데이터열이 보다 낮은 데이터 전송률을 갖는 부반송파를 통해 전송된다. OFDM을 사용하는 중요한 이유 중 하나는 OFDM을 사용하면 주파수 선택적 페이딩이나 협대역 간섭에 대한 강건함이 증가하기 때문이다. 하지만, 시간 영역 OFDM 신호는 독립적으로 변조된 많은 부반송파들로 구성되므로 이들이 동위상으로 더해질 때 신호의 진폭이 증가하여 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)이 증가된다. 본 논문에서는 수신단의 구조에 변화를 주지 않으며 또한 추가적인 정보의 전송이 필요 없이 기존 수신기를 그대로 사용할 수 있는 PAPR 감소기법의 성능을 평가하였다. 이 방법은 에러 벡터 크기 (Error Vector Magnitude; EVM) 내에서 시간 영역과 주파수 영역 신호에 대하여 클리핑을 사용한 것으로 기존의 최적화 방법과 비교하여 계산량의 복잡도가 낮다. 이 기법을 비선형 증폭기를 사용하는 OFDM 시스템에서 평가하였다. 모의실험 결과, 시간 및 주파수 영역 클리핑 기반의 PAPR 감소기법은 TD (Total Degradation) 관점에서 전력효율이 향상되며 증폭기의 비선형 왜곡의 영향을 줄이는 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

## Abstract

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a special case of multicarrier transmission, where a single data stream is transmitted over a number of lower-rate subcarrier. One of the main reasons to use OFDM is to increase robustness against frequency-selective fading or narrowband interference. Unfortunately, an OFDM signal consists of a number of independently modulated subcarriers, which can give a large PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) when added up coherently. In this paper, we investigate the performance of a simple PAPR reduction scheme, which requires no change of a receiver structure or no additional information transmission. The approach we employed is clipping in the time and frequency domains. The time-domain clipping is carried out with a predetermined clipping level while the frequency-domain clipping is done within EVM (Error Vector Magnitude). This approach is suboptimal with lower computational complexity compared to the optimal method. This evaluation is carried out on the OFDM system with a nonlinear amplifier. The simulation results demonstrated that the PAPR reduction algorithm is one of ways to reduce the effects of the nonlinear distortion of an HPA (High Power Amplifier)

**Keywords :** OFDM, PAPR, CLIPPING, HPA, TOTAL DEGRADATION

## I. 서 론

최근 들어 유럽의 지상파 디지털 비디오 방송 (Digital Video Broadcasting-Terrestrial; DVB-T)<sup>[1]</sup> 및 IEEE 802.11 W-LAN (Wireless Local Area Network), 휴대인터넷, 차세대 이동통신 등의 고속 멀티미디어 무선 네트워크의 전송 방식으로서 직교 주파수 분할 다중

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

\* 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 수행되었음.

접수일자: 2007년7월12일, 수정완료일: 2007년7월18일

화 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing; OFDM)<sup>[2-3]</sup> 시스템이 큰 관심을 받고 있다. OFDM 통신 시스템은 단일 반송파 시스템에 비해 우수한 장점들을 가지고 있지만 복소 가우시안 분포 형태의 출력 샘플들은 높은 PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)을 발생시키는 특징을 가지고 있다.<sup>[2]</sup> 이러한 신호의 높은 첨두값 (peak)으로 인한 비선형 왜곡을 피하기 위하여 일반적으로 송신기에서는 상당한 크기의 백오프 (back-off)를 사용하여야 한다. 이로 인하여 증폭기의 출력이 낮아지며 또한 효율이 감소한다.<sup>[4]</sup>

본 논문에서는 시간 및 주파수영역 클리핑 기법<sup>[5]</sup>의 성능평가를 위해, 비선형 고출력 증폭기를 사용하는 OFDM 시스템을 모델링하여 TD 관점에서 전력 효율 및 비선형 왜곡을 확인한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 서론에 이어 II절에서는 본 논문에서 적용한 PAPR 감소기법에 대하여 기술하고, III절에서는 시스템 모델에 대해 살펴보고, IV절에서는 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하며, 마지막으로 V절에서 결론을 맺는다.

## II. PAPR 감소기법

### 1. PAPR 최소화 문제

본 논문에서는 먼저 PAPR 감소 문제를 다음 식 (1)과 같은 최적화 문제로 간주하였다.<sup>[6]</sup> 기존의 최적화 해법이 갖는 높은 복잡도를 해결하기 위하여 클리핑 기반의 준최적화 방법을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } p \\
 & \text{subject to } \|\tilde{x}_i\| \leq p, i = 1, \dots, NL \\
 & \quad \tilde{x} = \text{IFFT}_l(\tilde{c}) \\
 & \quad \|S(\tilde{c} - c)\| \leq \epsilon \\
 & \quad \text{Re}\langle \tilde{S}\tilde{c}, S\tilde{c} \rangle \geq \|S\tilde{c}\|^2 - \epsilon^2/2 \\
 & \text{in variables } p \in R, \tilde{c} \in C^N, \tilde{x} \in C^{NL}
 \end{aligned} \tag{1}$$

위 식 (1)에서,  $p$ 는 신호의 첨두값,  $\tilde{c}$ 는 평균 오차 벡터 크기의 제한을 충족하는 성상도,  $\tilde{x}$ 는 PAPR 감소 신호,  $S$ 는 대각 반송파 행렬 (diagonal carrier selection matrix),  $\epsilon$ 는 성상도 오차 계수를 각각 나타낸다.

### 2. 시간 및 주파수 영역 클리핑

본 논문에서는 식 (1)의 PAPR 감소 문제를 해결함에

있어서 계산의 복잡도를 낮추면서 PAPR을 최소화하기 위해 시간 및 주파수 영역 클리핑 기반의 준최적의 방법을 사용한다. 준최적의 감소기법은 식 (1)에서 찾은 최적의 최소 PAPR 보다는 높지만 원래 신호의 PAPR 보다는 낮으며, 찾는 과정이 최적의 해를 찾는 방법보다 상대적으로 간단하여 계산의 복잡도를 낮출 수 있는 방법을 의미한다. 표 1에 시간 및 주파수 영역 클리핑 알고리즘의 절차를 정리하였다.

이 방법은 시간 영역 신호에 대하여 클리핑을 사용하여 원하는 PAPR을 갖는 신호를 발생시키고 이로 인해 발생하는 대역 내 왜곡 (in-band distortion)과 대역 외 왜곡 (out-of-band distortion)을 주파수 영역에서 클리핑과 필터링<sup>[7]</sup>을 사용하여 감소시킨다. 대역 내 왜곡은 성상도 오차를 초래한다. 이 오차는 성상도의 오차 벡터 크기 (Error Vector Magnitude; EVM)에 의해서 정해지는 오차 한계내로 강제적으로 제한한다. 대역 외 왜곡은 강제적으로 대역 외 밴드에 영을 삽입함으로써 제거한다. 이러한 방식의 PAPR 감소기법은 기존의 수신기 구조를 그대로 사용할 수 있으며 계산량이나 구현 방법이 간단하다는 장점이 있는 반면 전송신호 PAPR은 최적의 해보다 개선 정도가 떨어지는 단점이 존재한다.

표 1. 시간 및 주파수 영역 클리핑 알고리즘  
Table 1. Summary of the time- and frequency-domain clipping algorithm.

Step	Procedure
1	Generate the time-domain waveform $x_0 = \text{IFFT}_l(c_0)$
2	Apply time-domain clipping with a target PAPR to get the clipped time-domain waveform $\tilde{x} = \text{IFFT}_l(\tilde{c})$
3	Find the constellation error $\Delta = \tilde{c} - c_0 = \text{FFT}(\tilde{x} - x_0)$
4	If $ \Delta_k  > \delta$ then apply frequency-domain clipping $\tilde{\Delta}_k = \Delta_k \frac{\delta}{ \Delta_k }$
5	Apply frequency-domain filtering given in [7]
6	Generate the time-domain waveform to be transmitted $\tilde{x}_t = \text{IFFT}_l(c_0 + \tilde{\Delta})$

### III. 시스템 모델

무선통신 시스템에서는 일반적으로 신호의 전송전력을 얻기 위해 증폭기를 사용한다. 하지만 증폭기의 비선형 왜곡에 의한 성능 열화가 발생한다. 고출력 증폭기 (High Power Amplifier; HPA)는 AM/AM 변환과 AM/PM 변환에 의해 입력 신호의 진폭에 따라 출력 신호의 진폭과 위상이 비선형적인 특성을 보인다. 그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템의 구성도를 도시하고 있다.

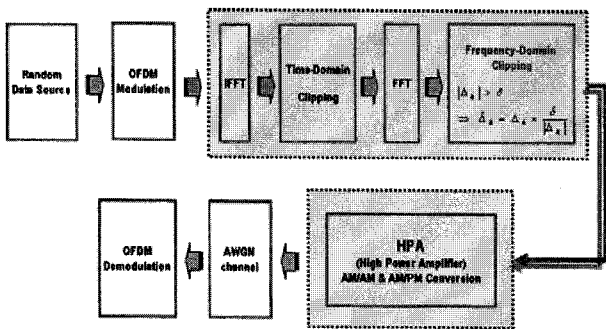


그림 1. 전송 시스템의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of the transmission system.

#### 1. HPA의 비선형성

본 논문에서는 가장 보편적으로 사용되는 Saleh's two-parameter model을 적용하였고 특성식은 다음과 같다.

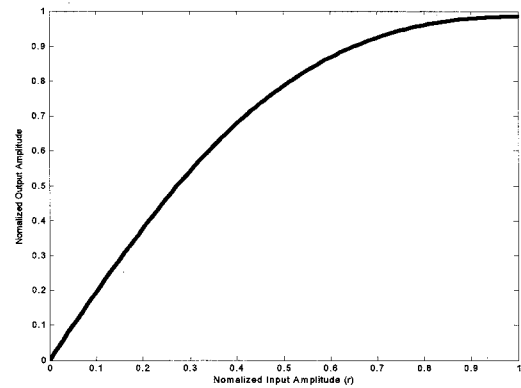
$$A(r) = \frac{1.9638r}{1 + 0.9945r^2} \quad (2)$$

$$\Phi(r) = \frac{2.5293r^2}{1 + 2.8168r^2} \quad (3)$$

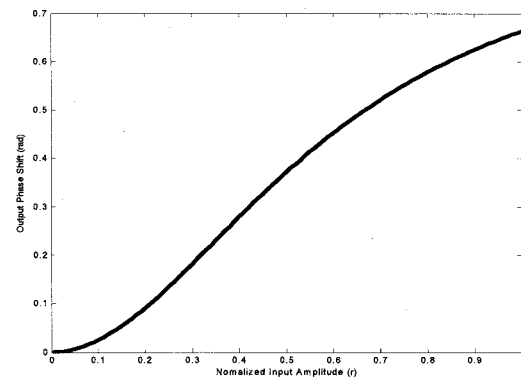
식 (2)와 (3)은 각각 AM/AM 변환과 AM/PM 변환을 나타내며,  $r$ 은 HPA 입력의 진폭을 말한다. 그림 2는 고출력 증폭기의 비선형 특성을 나타낸 것으로 증폭기의 동작점이 포화영역에 가까울수록 출력 신호는 더욱 왜곡 된다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 OFDM 시스템에서 고출력 증폭기를 사용할 경우 신호의 높은 첨두값 (peak)로 인한 비선형 왜곡을 줄이기 위해서는 식 (4)와 같이 정의되는 IBO (Input Back-Off)가 필요하다.<sup>[8]</sup>

$$IBO = \frac{A_{sat}^2}{P_{in}} \quad (4)$$



(a) AM/AM 변환



(b) AM/PM 변환

그림 2. 고출력 증폭기의 비선형 특성  
Fig. 2. Nonlinear characteristics of the HPA.

위 식 (4)에서,  $P_{in}$ 은 입력신호의 평균전력이고  $A_{sat}$ 은 입력 포화레벨을 나타낸다. 따라서 위 식으로부터  $A_{sat}$ 과 IBO가 주어졌을 때 입력신호의 전력이 결정됨을 알 수 있다.

#### 2. TD (Total Degradation)

시스템에서 목표로 하는 비트오율 (Bit Error Rate; BER)을 만족하기 위한 HPA의 출력 전력과 선형 증폭기의 출력전력의 차를 나타내는 TD는 비선형 환경에서 성능측정을 위해 사용된다.<sup>[9]</sup>

$$Total\ Degradation = SNR_{HPA}(IBO) - SNR_{AWGN} + IBO \quad [in\ dB] \quad (5)$$

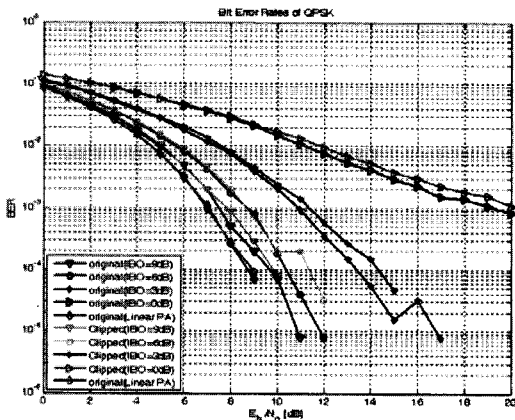
위 식 (5)에서,  $SNR_{AWGN}$ 는 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서 달성하고자하는 비트 오율을 얻기 위해 필요한 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)이고,  $SNR_{HPA}(IBO)$ 는 주어진 백

오프에서 HPA에 의해 발생된 왜곡을 고려하였을 때 요구되는 신호 대 잡음비를 나타낸다. 비선형 채널에서는 TD를 최소로 하기위한 최적의 IBO를 결정하는 것이 우선적으로 고려되어야 한다. 또한 효과적인 PAPR 감소기법을 사용할수록 주어진 IBO에서 낮은 TD를 갖는다.

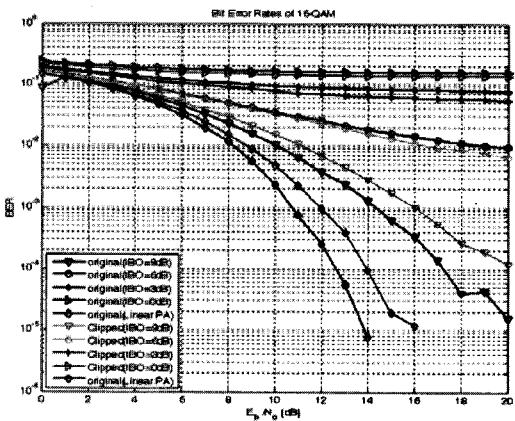
IV. 모의실험 및 결과

이 절에서는 HPA의 비선형 왜곡을 감소시키기 위해 시간 및 주파수 영역 클리핑 기반의 PAPR 감소기법을 이용하여 비트오율과 TD 관점에서 모의실험을 통하여 성능을 검증하고자 한다.

그림 3(a)는 QPSK 변조에 대하여 클리핑 레벨 CL=7 dB, 심볼간 허용간격  $\delta$ 는 심볼 결정경계의 20%로 설정하고 64-FFT를 사용하였다. PAPR 감소기법을 적용한



(a) QPSK (CL=7 dB,  $\delta=0.2$ )



(b) 16-QAM (CL=5 dB,  $\delta=0.2$ )

그림 3. 신호대 잡음비에 따른 비트오율  
Fig. 3. Bit error rates vs. SNRs.

신호와 적용하지 않은 신호에 IBO를 0 dB에서 9 dB까지 3 dB 단위로 변화시킨 후에 비선형 증폭기를 통해 출력된 신호의 비트오율을 비교하였다. 그림에 나타난 것처럼 QPSK 변조의 경우 두 신호의 비트오율 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

반면 그림 3(b)에 나타난 16-QAM 변조의 경우에는 PAPR 감소기법을 적용하였을 때 비트오율이 개선됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 변조 레벨이 증가함에 따라 심볼간 결정경계가 좁아지기 때문에 HPA의 비선형성에 더욱 민감해지는 것에 기인한다. 따라서 PAPR을 감소시키면 비선형성에 대한 영향을 적게 받고 비트오율이 PAPR 감소 전보다 개선된다.

그림 4는 QPSK 변조에서 클리핑 레벨에 따른 TD의 변화를 측정한 것으로 그림 4와 표 2에 나타난 것처럼 1

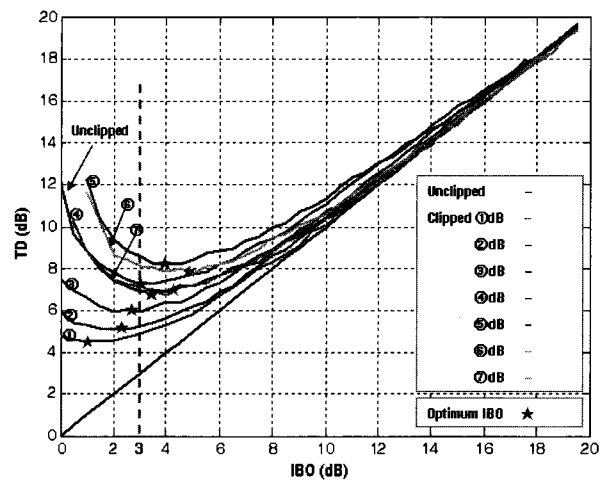


그림 4. QPSK 변조에 대한 total degradation  
Fig. 4. Total degradation for QPSK.

표 2. QPSK 변조에서 클리핑 레벨에 따른 최적의 IBO와 total degradation

Table 2. Optimal IBO and total degradation according to the clipping levels for QPSK.

(dB)	IBO <sub>opt</sub>	TD <sub>opt</sub>
unclipped	3.4	6.6
1 dB	1.2	4.3
2 dB	2.2	4.9
3 dB	2.4	5.8
4 dB	2.8	7.1
5 dB	4	8.1
6 dB	4.9	7.6
7 dB	4.1	6.7

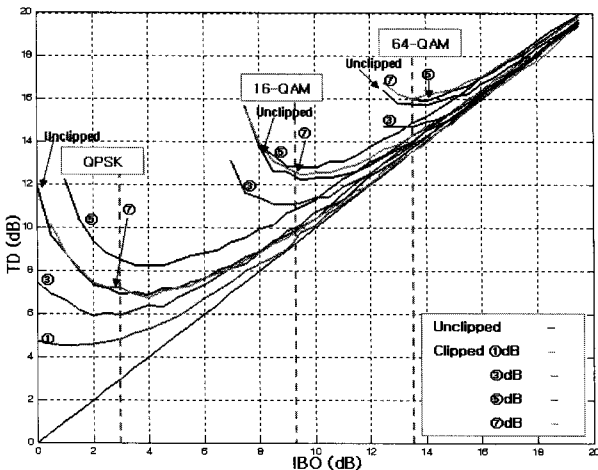


그림 5. QPSK, 16-QAM, 64-QAM 변조에 대한 total degradation

Fig. 5. Total degradation for QPSK, 16-QAM and 64-QAM, respectively.

dB 클리핑을 했을 경우 클리핑을 하지 않은 것보다 최적의 IBO ( $IBO_{opt}$ )가 2.2 dB 낮다. 즉 전력효율이 약 2.2 dB 정도 향상됨을 알 수 있다. 또한 2 dB와 3 dB 클리핑을 했을 경우에도 클리핑을 하지 않은 것보다  $IBO_{opt}$ 가 낮아짐을 알 수 있다.

그림 5는 QPSK, 16-QAM, 64-QAM 변조에 대하여 TD를 측정하여 클리핑 기법의 적용에 의한 영향을 나타낸 것으로 3 dB 클리핑을 했을 경우 클리핑을 하지 않은 것보다  $IBO_{opt}$ 가 낮아짐을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 OFDM 시스템의 성능 개선을 위해 비선형 고출력 증폭기를 모델링 하고 증폭기를 통해 발생하는 비선형적 왜곡을 감소시키기 위해 수신단의 구조에 변화를 주지 않으며 또한 추가적인 정보의 전송이 필요 없는 시간 및 주파수 영역 클리핑 기반의 PAPR 감소기법을 적용하여 성능을 평가하였다. 모의실험 결과에 따르면 TD 관점에서 클리핑을 하지 않은 경우보다 클리핑 기법을 적용하였을 경우 전력효율이 향상되는 것을 확인 하였다. 또한 QPSK 보다는 16-QAM과 같이 변조 레벨이 높을수록 PAPR 감소에 따라 HPA의 비선형 왜곡의 영향이 줄어드는 것을 관측하였다.

### 참 고 문 헌

[1] Digital Video Broadcasting (DVB); Framing

structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, ETSI EN 300 744 V1.5.1, 2004.

[2] R. van Nee and R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*, London, UK: Artech House Publishers, 2000.

[3] "Special issue on multicarrier communications," *Wireless Personal Commun.*, vol. COM-33, pp. 665-675, Jul. 1985.

[4] S. C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Northwood, MA: Artech House, 1999.

[5] 서만중, 임성빈, 정재호, 이광천, "OFDM 신호의 PAPR 감소를 위한 시간 및 주파수 영역 클리핑의 반복," *2006년도 대한전자공학회 하계종합학술대회 논문집*, pp. 233-234, 2006년 6월

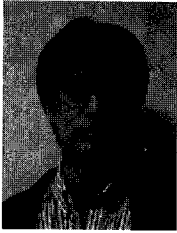
[6] A. Aggarwal and H. Meng, "Minimizing the Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals using Convex Optimization," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 54, pp.3099-3110, Aug. 2006.

[7] J. Armstrong, "Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering," *IEE Electronics Letters*, vol. 38, no. 5, pp. 246-247, Feb. 2002.

[8] S. C. Thompson, J. G. Proakis, and J. R. Zeidler, "The Effectiveness of Signal Clipping for PAPR and Total Degradation Reduction in OFDM Systems," *IEEE Globecom 2005*, vol. 5, pp. 2807-2811, Nov. 2005.

[9] H. A. Al-Asady and M. Ibnkahla, "Performance evaluation and total degradation of 16-QAM modulations over satellite channels," *IEEE CCECE 2004*, vol. 2, pp. 1187-1190, May. 2004.

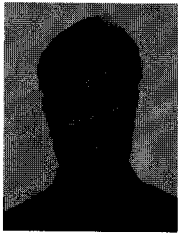
저 자 소 개



한 창 식(학생회원)  
 2005년 숭실대학교  
 정보통신 및 전자공학부  
 학사  
 2005년~2007년 LG필립스LCD  
 2007년~현재 숭실대학교  
 정보통신전자공학부  
 석사과정 재학 중  
 <주관심분야 : OFDM 시스템, 통신 시스템>



서 만 중(학생회원)  
 2005년 한국교육개발원  
 정보통신공학과 학사  
 2005년~현재 숭실대학교  
 정보통신전자공학부  
 석사과정 재학 중  
 <주관심분야 : OFDM PAPR 감  
 소기법, DVB-T 시스템>



임 성 빈(정회원)  
 1986년 서울대학교  
 전자공학과 학사  
 1988년 서울대학교  
 전자공학과 석사  
 1994년 University of Texas at  
 Austin 전기 및 컴퓨터  
 공학과 박사  
 1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부  
 부교수  
 <주관심분야 : 비선형 신호처리, 통신 시스템, 디  
 지털 방송 시스템>