

변곡점 추정을 이용한 전력선 신호의 이상현상 검출

Power Disturbance Detection using the Inflection Point Estimation

임 병 관^{*★}

Byeong-Gwan Iem^{*★}

Abstract

Power line signal can show disturbances due to various causes. Typical anomalies are temporary sag/swell of the amplitude, flat topped signal, and harmonic distortions. The disturbances need to be detected and treated properly for the quality of the power signal. In this study, the power disturbances are detected using the inflection points (IP). The inflection points are defined as points where local maxima/minima or the slope changes occur. The power line signal has a fixed IP pattern since it is basically sinusoidal, and it may have additional inflection points if there is any disturbance. The disturbance is detected by comparing the IP patterns between the normal signal and distorted signal. In addition, by defining a cost function, the time instant where the disturbance happens can be decided. The computer simulation shows that the proposed method is useful for the detection of various disturbances. The simple sag or swell signal only shows the amplitude changes at the detected inflection points. However, the flat top signal and harmonically distorted signal produce additional inflection points and large values in the cost function. These results can be exploited for the further processing of disturbance classification.

요 약

전력선 신호는 다양한 원인으로 인하여 이상 현상을 보일 수 있다. 대표적인 이상 현상으로는 일시적인 진폭의 증가 혹은 감소(swell/sag), 클립핑에 따른 진폭의 일시적인 평탄화(flat top), 고조파 왜곡(harmonic distortion) 등이다. 고품질의 전력 신호를 위하여는 이러한 이상 현상의 검출 및 대응이 필요하다. 본 연구에서는 변곡점 검출법을 활용하여 전력선 신호의 이상 현상을 검출한다. 변곡점은 국부적인 최대값/최소값 그리고 기울기가 변하는 지점으로 정의된다. 전력선 신호는 정현파이기 때문에 최대값과 최소값 부근에서 변곡점이 존재하며 이상 현상이 발생하는 곳에서 추가적인 변곡점이 발생한다. 본 연구에서는 대상 신호에서 검출된 변곡점과 정상 신호의 변곡점을 비교하여 이상 현상을 판단한다. 아울러 비용함수를 정의하여 이상 현상이 발생하는 시점을 추정한다. 컴퓨터 모의실험으로 다양한 이상 현상에 대한 제안된 방법의 유용성을 검증한다. 일시적인 진폭의 증가/감소의 경우, 변곡점의 위치는 정상 신호와 동일하며, 변곡점에서의 진폭에서만 차이가 발생한다. 고조파 왜곡이나 평탄화된 진폭의 경우 추가적인 변곡점이 발생하여 비용함수가 큰 값을 보인다. 이러한 이상 현상 간의 차이를 이용하여 이상 현상을 분류할 수 있다.

Key words : power line signal, inflection point detection, power disturbances, harmonic distortion

*Dept. of Electronic Eng., Gangneung-Wonju Nat. Univ.

★ Corresponding author

E-mail : ibg@gwnu.ac.kr, Tel : +82-33-640-2426

※ Acknowledgment

Manuscript received Nov. 24, 2021; revised Dec. 28 2021; accepted Dec. 28, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

전력선상에서의 신호는 다양한 원인으로 오류를 보일 수 있다. 이러한 오류를 전력선 이상현상(power line disturbances) 이라고 칭한다[1-4]. 대표적인 예로서 일시적인 진폭의 감소 혹은 상승(sag/swell), 일시적인 클립핑 현상에 따른 평탄화된 마루(flat top), 고조파 신호 첨가에 따른 왜곡(harmonic distortion) 등을 들 수 있다[3]. 다양한 전력생산 방법이 혼재되어 있고, 전기 생산지와 소비지 사이의 장거리 전송로 등의 환경적인 요인으로 인하여 전력신호는 전술한 이상 현상을 보인다. 한편, 대부분의 기기가 마이크로프로세서를 활용하는 디지털화가 진행됨에 따라 고품질의 전력신호가 요구된다. 고품질의 전력신호를 얻기 위해 이러한 이상 현상의 적절한 검출이 필요하다. 대표적인 검출방법으로는 FFT를 이용한 방법[4], 스펙트로그램이나 웨이브렛 변환, 순간 주파수와 같은 시간주파수 분석법을 이용한 방법[2, 3] 등이 있다. FFT를 이용한 방법은 신호의 이상 시점을 확인하기 위해 short-time으로 처리해야 하며, 성능이 윈도우 함수에 의존한다. 시간주파수 분석법을 이용한 방법은 1차원, 혹은 2차원 변환을 통해 신호를 분석하는 방법으로 많은 계산량을 필요로 한다.

이와 같이 기존 방법들이 구조가 복잡하거나 계산량이 많다는 단점이 있음을 고려할 때, 간단한 구조와 계산으로 의미 있는 통계를 얻을 수 있는 변곡점 추정법이 대안이 될 수 있다. 변곡점 추정은 소량의 덧셈과 나눗셈으로 국부적인 최대값/최소값을 포함한 변곡점을 검출하는 방법이다[5, 6]. 전력선상에서 정상 상태의 신호는 일정한 변곡점 분포와 패턴을 보인다. 따라서, 검출된 변곡점의 패턴과 정상 패턴을 비교하면 이상 현상의 유무를 검출할 수 있다.

본 논문에서는 변곡점 검출법을 소개하고, 이를 이용하여 전력선 신호의 이상 현상을 검출하기 위한 비용함수(cost function)를 제안한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 전력선 신호의 대표적인 이상 현상 예를 구체적으로 소개한다. 다음으로 변곡점 검출법과 이상 현상 검출방법을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션으로 제안한 방법의 유용성을 보이고 계산량을 비교하며 결론을 맺는다.

II. 본론

1. 전력선 신호의 이상현상 유형

전력선 신호는 다양한 환경적, 자연적 요인으로 이상 현상을 보인다. 대표적인 예로 일시적으로 진폭이 축소되거나 증가되는 Sag/Swell 현상, 정현파의 값이 일시적으로 클립되어 최대값/최소값이 유지되는 Flat Top 현상, 그리고 마지막으로 고조파에 의해 오염되는 상황을 제시한다. 예로 보인 모든 신호에서 이상 현상은 0.1초에 발생하여 0.2초에 종료되는 것으로 가정한다.

1.1 Sag/Swell 신호

신호는 일시적으로 일정 비율로 감소하거나 증가할 수 있다. 여기에서는 진폭의 최대치의 10% 만큼 감소하거나 증가하는 것으로 가정한다. 신호의 주파수나 위상의 변화는 없다. 그림 1의 a)는 진폭이 감소한 신호를 b)는 증가한 신호를 보인다.

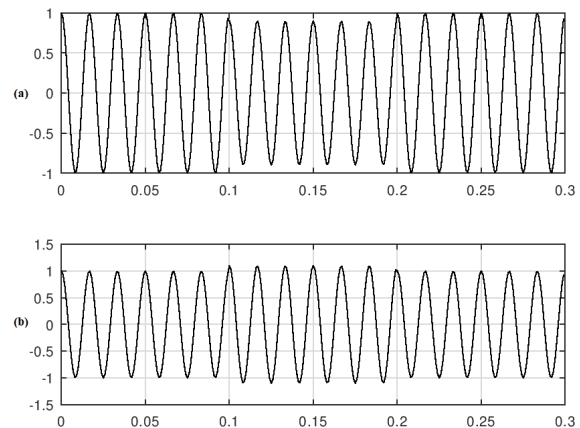


Fig. 1. A signal with sagged and swelled amplitude
a) Sag signal b) Swell signal.

그림 1. 진폭이 감소/증가된 신호 a) 감소신호 b) 증가신호

1.2 Flat Top 신호

정현파의 특성을 보이는 전력선 신호가 클립되어 진폭이 고정되는 현상이다. 그림 2는 최대값의 85%에서 flat top 현상을 보이는 신호를 보인다.

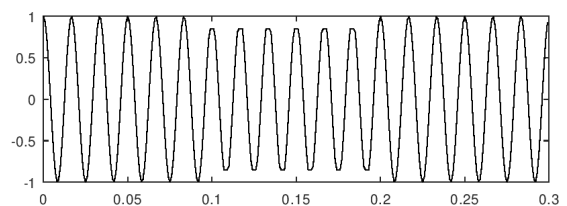


Fig. 2. A signal with flat top.

그림 2. 평편화된 마루와 골을 갖는 신호

1.3 Harmonic Distortion 신호

전력선 신호에 고조파 성분이 부가되어 신호가 왜곡되는 현상을 보인다. 그림 3은 원신호의 9% 진폭의 제 5고조파, 5% 진폭의 제 7고조파가 첨가된 신호이다.

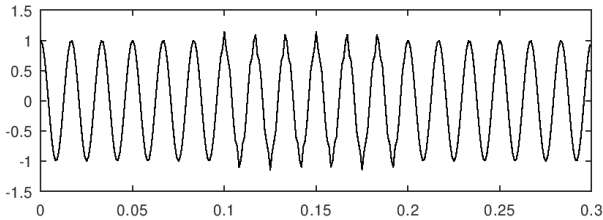


Fig. 3. A signal with harmonic distortion. 그림 3. 고조파로 인한 왜곡이 있는 신호

2. 변곡점 검출 알고리즘

변곡점은 신호의 추이가 바뀌는 지점으로 정의할 수 있다. 예를 들어, 국부적인 최고점 또는 최저점은 신호가 증가하다가 감소하는 지점 혹은 감소하다가 증가하는 지점으로 대표적인 변곡점이다. 아울러, 신호가 계속 증가하더라도 증가의 정도가 변하는 지점도 변곡점이라 할 수 있다. 반대로 감소의 정도가 달라지는 지점도 신호의 기울기가 변화하는 변곡점이라 할 수 있다. 아래 그림 4는 변곡점의 다양한 유형을 보여준다. 그림 4의 점 A, B는 지역적인 최고점과 최저점을 나타내며, 점 C는 신호의 증가 혹은 감소 국면에서 기울기가 변화하는 단순 변곡점을 보여준다.

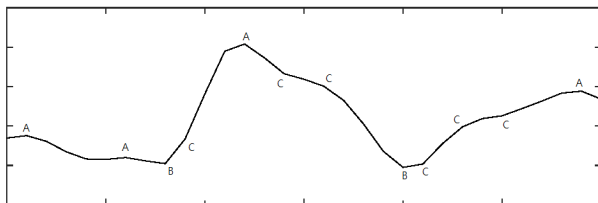


Fig. 4. A signal with various inflection points [5]. 그림 4. 다양한 변곡점을 갖는 신호 [5]

세 개의 연속하는 신호값 x_1, x_2, x_3 에 대하여 연속하는 두 신호값의 차를 $d_{ij}=x_i - x_j$ 라 할 때, 만약 $d_{21} \cdot d_{32} < 0$ 이면 x_2 는 국부적인 최고점 A 혹은 최저점 B에 해당한다. 신호의 증가 혹은 감소의 추이가 바뀌는 기울기가 변화하는 변곡점 x_2 는 아래 식에 의하여 검출될 수 있다[5, 6].

$$ID = \frac{|d_{21} - d_{32}|}{|d_{21}| + |d_{32}|} \geq threshold \tag{1}$$

threshold값은 0과 1 사이의 값으로 설정된다. 그림 5는 변곡점 검출 알고리즘을 보인다.

3. 전력선 신호의 이상현상 검출 방법

정상 상태의 신호는 정현파의 형태를 보이며 따라서 골과 마루 부분에서 변곡점이 발생한다. 그림 6은 정상적인 전력선 신호의 변곡점 패턴을 보인다. 그림에서 보이듯이 변곡점은 주기적인 일정한 형태의 패턴을 보인다. 전력선 신호에 본론 1절에서 설명한 이상 현상이 발생하면 변곡점의 형태가 달라질 것이다. 따라서, 정상 신호의 변곡점 패턴을 참조 패턴(reference pattern)으로 하여 주어진 신호의 변곡점 패턴을 비교하여 그 차이를 활용한 비용함수가 정해놓은 임계값 보다 크면 이상 현상이 발생한 것으로 판정할 수 있다.

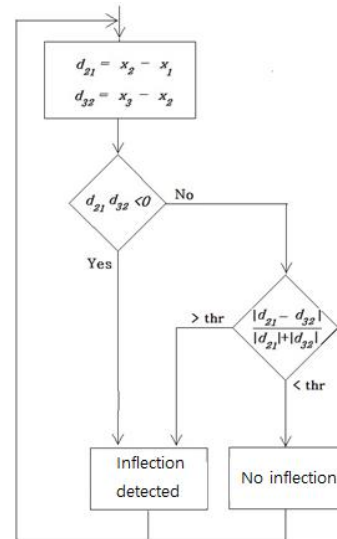


Fig. 5. Inflection point detection algorithm [5]. 그림 5. 변곡점 검출 알고리즘 [5]

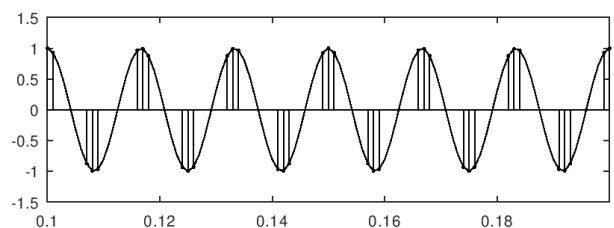


Fig. 6. Inflection point pattern of a normal power line signal. 그림 6. 정상적인 전력선 신호의 변곡점 패턴

본 연구에서는 비용함수(cost function)를 아래와 같이 정의한다.

$$C(k) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r(kN+n) - x(kN+n)|^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

$k = 0, 1, 2, \dots, K$

여기에서 $r(\cdot)$ 은 정상 신호의 변곡점 패턴, $x(\cdot)$ 은 시험 신호의 변곡점 패턴, N 은 한 주기당 샘플 수, K =전체샘플수/ N 으로 블록의 수이다.

4. 컴퓨터 모의실험

컴퓨터 모의실험으로 제안된 방법의 유용성을 확인한다. 모의실험은 1절에서 소개한 이상 현상을 대상으로 한다. 첫 번째 예는 일시적으로 진폭이 증가하는 Swell 신호로 처리 결과는 아래 그림 7과 같다. 그림 7의 (a)는 정상 상태 신호와 변곡점을 보이며, (b)는 Swell 신호와 변곡점, (c)는 두 변곡점 패턴의 차를 이용한 비용함수를 보인다. Swell 신호 발생 구간에서는 정상 신호와 동일하나, 변곡점의 크기가 증가하여 (c)에서 보이듯이 비용함수는 진폭이 증가한 구간에서 0이 아닌 값을 갖는다. 따라서, 이상 현상이 발생함을 알 수 있다.

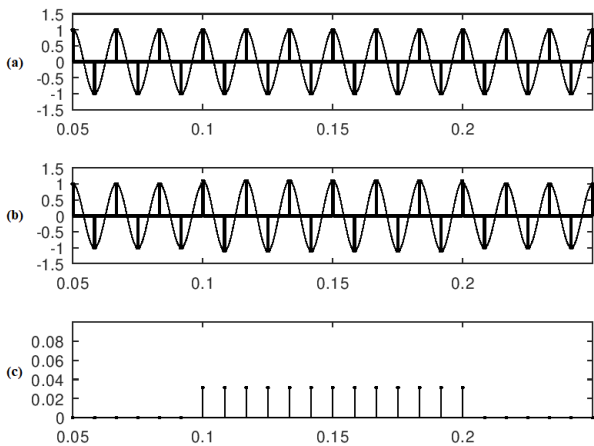


Fig. 7. Comparison of Inflection point patterns of a normal signal and a swell signal (a) normal signal, (b) swell signal, and (c) the cost function $C(k)$ patterns.

그림 7. 정상 전력선 신호와 swell 신호의 변곡점 패턴 비교 (a) 정상신호, (b) Swell 신호, (c) 비용함수 $C(k)$

진폭이 일시적으로 감소하는 Sag의 경우도 변곡점의 진폭이 감소하는 점을 제외하고 증가하는 경우와 유사한 변곡점 패턴을 보인다.

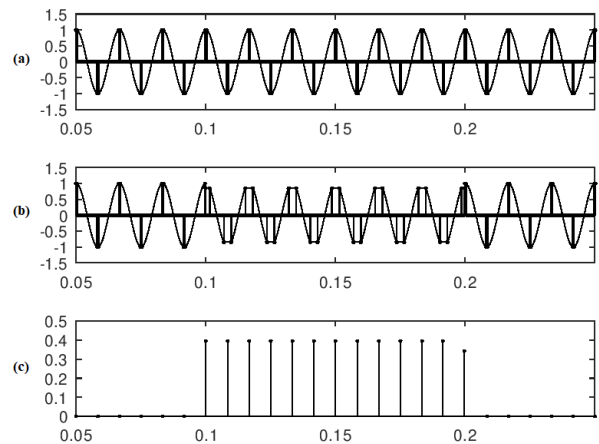


Fig. 8. Comparison of Inflection point patterns of a normal signal and a flat top signal (a) normal signal, (b) flat top signal, and (c) the cost function $C(k)$ patterns.

그림 8. 정상 전력선 신호와 flat top 신호의 변곡점 패턴 비교 (a) 정상신호, (b) flat top 신호, (c) 비용함수 $C(k)$

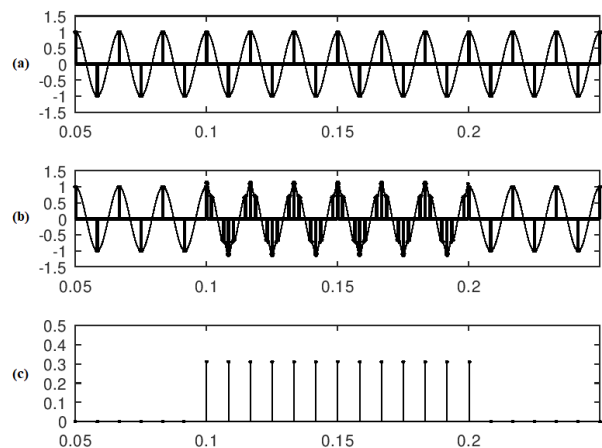


Fig. 9. Comparison of Inflection point patterns of a normal signal and a signal with harmonic distortion (a) normal signal, (b) harmonic distortion signal, and (c) the cost function $C(k)$ patterns.

그림 9. 정상 전력선 신호와 고조파 왜곡 신호의 변곡점 패턴 비교 (a) 정상신호, (b) 고조파 왜곡 신호, (c) 비용함수 $C(k)$

두 번째 예는 진폭이 일시적으로 상수 값을 보이는 Flat top 신호이다. flat top 신호의 경우 이상 현상이 발생하는 지점에서 변곡점이 발생하여, 변곡점의 발생 위치에서 정상 신호와는 다른 형태를 보인다. 그림 8의 (a)와 (b)는 이러한 변곡점의 차이를 보인다. 따라서 앞서 설명한 Sag/Swell 경우보다 두 변곡점 패턴의 차이는 현저하다. (c)는 이러한 변곡점의 차이를 비용함수로 보인다. 그림 7 (c)

와 비교해서 비용함수의 진폭값 범위가 달라짐을 알 수 있다.

마지막 예는 고조파 왜곡이 발생한 경우이다. 정상신호에 기본주파수의 2배, 5배, 7배인 주파수의 고조파가 각각 최대 진폭의 1%, 9%, 5%의 진폭으로 추가되는 경우를 가정한다. 그림 9는 정상 신호와 고조파 왜곡 신호, 그리고 변곡점 패턴을 보인다. 고조파 왜곡의 경우, 신호의 파형에 왜곡이 발생하며, 신호의 진폭이 낮은 부분에서도 변곡점이 발생할 수 있기 때문에 그림 9 (c)에서 보이듯이 비용함수의 변화가 진폭이 큰 부분과 낮은 부분에 모두 존재한다.

5. 계산량 비교

기존의 FFT를 이용한 방법, 순간주파수를 이용한 방법과 본 논문에서 제시한 방법의 계산량을 비교하면 아래 표 1과 같다. FFT를 이용하는 방법은 신호의 샘플수가 N 일 때, FFT에 따른 계산량으로 $N \log_2 N$ 의 연산이 필요하다. FFT로 얻어진 결과는 이상현상의 발생 유무만을 판정할 수 있을뿐, 어느 순간에 발생하는지는 알 수 없다. 발생 시점을 판정하기 위해서는 short-time으로 처리해야 하며 더 많은 계산량을 필요로 한다. 순간주파수를 이용하는 경우는, 신호가 실수값을 갖기 때문에 위상정보를 얻기 위해 아날리틱 신호로 만들어야 하며, 그 과정에서 힐베르트 변환을 해야 한다[7]. 결과로 $2 N \log_2 N$ 의 연산이 필요하다. 제안된 방법은 그림 5의 변곡점 추출과 식 (2)의 비용함수 계산과정에서 $3 N$ 의 연산이 필요하다. 따라서, 제안된 방법이 비교적 적은 계산량으로 전력선상 신호의 이상현상을 검출함을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of computation amount.

표 1. 계산량 비교

	FFT based method	Instantaneous frequency	Proposed method
Computation amount	$N \times \log_2 N$	$2 N \times \log_2 N$	$3 N$

III. 결론

변곡점 추출 방법을 이용하여 전력선 신호의 이상 현상을 검출하는 방법을 제안하였다. 전력선 신호는 자연적인 혹은 인공적인 원인으로 인해 일시

적인 진폭의 증가 혹은 감소, 클리핑에 따른 평탄화된 진폭, 그리고 고조파 신호의 첨가에 따른 왜곡 등 다양한 이상 현상을 보일 수 있다. 정상 상태에서 전력선 신호가 정현파임에 착안하여 변곡점을 관찰함으로써 이상 현상의 유무 및 유형을 판정할 수 있다. 즉 정상 신호는 일정한 변곡점의 패턴을 보이는데 이상 현상이 발생하면 변곡점 패턴에 변화를 보이며 이러한 변화를 검출하여 이상 현상을 판별할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다양한 이상 현상이 서로 다른 변곡점 패턴을 보임을 확인했으며, 제안된 비용함수를 이용하여 이상 현상을 검출함을 확인했다. 계산량 비교를 통해 제안된 방법이 기존의 방법보다 적은 연산으로 이상현상을 검출함을 보였다. 향후 과제로 변곡점 패턴에 따른 이상 현상의 분류를 위한 후처리 방법 연구가 필요하다.

References

- [1] T. K. Abdel-Galil, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "Online tracking of voltage flicker utilizing energy operator and Hilbert transform," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.19, pp.861-867, 2004. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.824428
- [2] Y. Shin, A.C. Parsons, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Time-frequency analysis of power system disturbance signals for power quality," in *Proc. 1999 IEEE Power Engineering Society Summer meeting*, pp.402-407. 1999. DOI: 10.1109/PSS.1999.784382
- [3] S. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis," in *Proc. 1994 IEEE TF/TS Analysis Symposium*, pp.166-169, 1994. DOI: 10.1109/TFSA.1994.467267
- [4] K. Srinivasan, "Digital measurement of the voltage flicker," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.6, pp.1593-1598, 1991. DOI: 10.1109/61.97697
- [5] B. Iem, "Instantaneous frequency estimation of AM-FM signals using the inflection point detection," *Journal of Inst. Korean Electrical and Electronics Engineers*, vol.24, no.4, pp.1081-1085, 2020. DOI: 10.7471/ikeee.2020.24.4.1081

[6] B. Iem, "A Nonuniform Sampling Technique based on Inflection Point Detection and its Application to Speech Coding," *Journal of Acoustical Society of America*, vol.136, no.2, pp.903-909, 2014.

DOI: 10.1121/1.4884882

[7] B. Boashash, "Estimating and Interpreting the Instantaneous Frequency of a Signal. I. Fundamentals," *Proceedings of the IEEE*, vol.80, no.4, pp.520-538, 1992. DOI: 10.1109/5.135376

BIOGRAPHY

Byeong-Gwan Iem (Member)



1988 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
1990 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
1998 : PhD degree in Electrical Engineering, University of Rhode Island.

1999~2001 : Senior Research Engineer, Samsung Electronics.

2002~Present : Professor, Gangneung-Wonju National University