

전압파형을 이용한 트래킹 진전과정 분석방법에 관한 연구

(A Study on the Analysis Method of Tracking Process using Voltage Waveforms)

지승욱* · 이춘하 · 윤대희 · 송헌직 · 심광열 · 박원주 · 이광식**

(Sung-Wook Jee · Chun-Ha Lee · Dae-Hee Yoon · Hyun-Jik Song
· Kwang-Yul Shim · Won-Ju Park · Kwang-Sik Lee)

요 약

고전기·전자 측정에서 가장 쉽고 정확하게 측정할 수 있는 것이 전압이다. 그래서 우리는 단지 전압만으로 트래킹의 진전과정을 알 수 있는 방법을 연구하였고, 이를 분할-FFT(Partition-FFT)라고 명명하였다.

트래킹은 IEC 60112에서 제안하는 방법과 시험 장비로 모의하였다. 이 때 얻은 전압파형을 분할-FFT로 분석하였고, 그 결과 정상상태에서 트래킹이 일어나기까지의 과정을 6단계로 명확히 구분할 수 있었다.

트래킹 현상은 전기재해의 주요 원인 중 하나이다. 분할-FFT는 오실로스코프와 컴퓨터 소프트웨어에만 의존한다. 따라서 기존의 전기설비에 분할-FFT를 적용한다면 적은 비용과 쉬운 측정으로 트래킹으로 인한 전기재해를 방지할 수 있다. 무엇보다도 분할-FFT는 트래킹 진전과정을 시각적으로 표현해 주기 때문에 일반인들도 쉽게 전기재해 발생 가능성을 판별해 낼 수 있을 것이다.

Abstract

Voltage is generally and exactly measured in the electric and electronic field. So, we studied method for detecting electric equipment faulty state using only electric voltage. It is called the Partition-FFT.

Tracking is simulated by method and tester proceed on IEC 60112. We analyze voltage waveforms by tracking tester with Partition-FFT. As the result tracking process is clearly distinguished by 6 steps.

Tracking is one of the major reason of electric accidents. The Partition-FFT is using a digital oscilloscope and a computer software. If Partition-FFT analysis is applied to the electricity facilities, We can prevent from happening electric accidents cause of tracking breakdown with low prices and easy measurment. Most of all, Partition-FFT is system that make a visual tracking process. So, everyone is able to detect to possibility of electric accidents.

Key Words : FFT, Partition-FFT, Tracking

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과

** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수

Tel : 053-810-2486, Fax : 053-810-4629

E-mail : skraken@chol.net

접수일자 : 2006년 4월 14일

1차심사 : 2006년 4월 19일, 2차심사 : 2006년 6월 22일

심사완료 : 2006년 7월 6일

1. 서 론

2002년 우리나라 전체 전기 화재의 78[%]는 단락에 의해 출화(出火)된 것으로 알려져 있다. 이러한

단락은 통상적으로 탄화(흑연화)가 발생할 수 있는 피복류에서 일어날 위험이 큰 것으로 알려져 있다 [1-3].

탄화, 즉 트래킹 과정을 검출하기 위한 가장 고전적인 방법은 시각적인 구분과 전류를 이용하는 것이다. 이 밖에도 트래킹 과정 중에 동반되는 방전현상을 이용한다면, 방전과 함께 수반되는 광, 음파, 초음파, 전자파 등을 측정함으로써 트래킹의 진전 상태를 알 수도 있다. 그러나 이상의 방법들은 외부의 영향이나, 고가의 측정장비를 필요로 하며 일부의 방법들은 지속적인 모니터링이 어렵다[4-7].

트래킹은 절연물의 표면에서 장시간에 걸쳐 서서히 진행되는 현상이다[8].

따라서 지속적이며, 측정이 용이한 트래킹 감지방법을 개발한다면 전기배선에서 발생하는 전기재해의 상당부분을 방지할 수 있을 것이다.

본 논문은 이러한 취지에서, 측정이 용이한 전압만을 이용하였고, 이를 개인용 컴퓨터에서 데이터 처리를 함으로써 트래킹 진전 상황을 분석하였다.

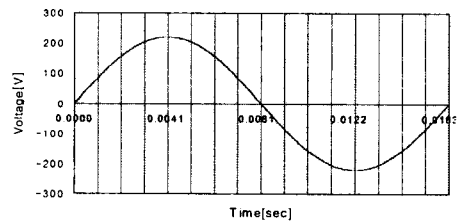
2. 트래킹 진전 과정

일반적으로 습윤 및 오손된 조건하에서의 트래킹 파괴에 이르는 과정은 “절연재료 표면의 습윤이나 오손→표면 누설전류에 의한 전해액의 증발과 건조대의 형성→건조대에서의 방전 개시→탄화 도전로 형성→탄화 도전로 진전→트래킹 파괴”의 단계를 거치는 것으로 알려져 있으며[9], 각 과정은 다음에 의해서 판단된다.

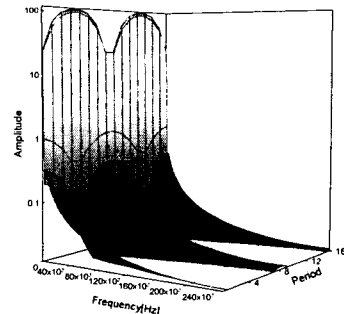
1. 누설전류가 전해액 적하(滴下) 직후에 일단 상승하여 최대치에 도달한 후 점차적으로 감소하여 최종적으로 누설전류는 거의 0으로 되고 건조대가 형성된다.
2. 건조대에서 방전이 개시되면 전류 파형에 고조파 성분이 중첩된다.
3. 탄화가 개시되면 고조파 성분을 포함한 전류 값이 증가한다.
4. 탄화 도전로가 진전하여 트래킹 파괴에 이르게 되면, 누설전류가 급격히 증가하게 된다[9-11].

3. 분할-FFT 알고리즘

그림 1 (a)는 8,192개의 데이터로 구성되어 있다. 데이터 수를 512개씩 16개의 구간(period)으로 나누고, 그 각각을 Microcal Origin 6.0에서 FFT(fast fourier transform)하였다. x축을 구간, y축을 주파수, z축을 진폭(amplitude)으로 하여 그린 것이 (b)이다.



(a) General sine waveform



(b) Time-frequency analysis of fig. 1 (a)

그림 1. 시간-주파수 분석의 예
Fig. 1. Example of time-frequency analysis

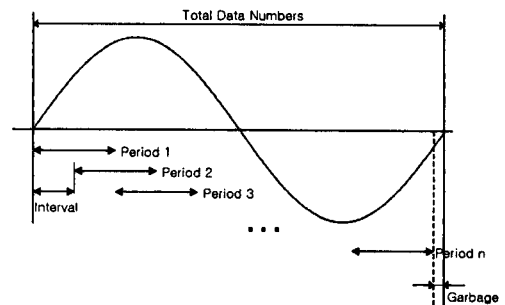


그림 2. 분할-FFT의 기본 개념
Fig. 2. Concept diagram of Partition-FFT

그림 1 (a)는 60[Hz]의 정현파가 아니라 (b)와 같이 다수의 고주파 성분들이 시간이 지남에 따라 일정하거나 혹은 서서히 변화하면서 만들어낸 결과라고 가정하였다.

이러한 가정 하에 만들어진 것이 분할-FFT이며, 그 알고리즘은 다음과 같다.

첫째, 오실로스코프로부터 데이터를 입력받는다. 측정 데이터를 그림 2와 같이 일정한 크기로 잘라 각각의 구간(그림 2의 'Period 1'에서 'Period n')에 저장한다. 그런데 낮은 샘플링 타임으로도 측정이 용이하도록 데이터를 중복해서 사용할 수 있도록 하였다.

둘째, 각 구간에 대하여 FFT를 수행한다. 그림 3에서 'Period 1'을 FFT한 결과가 'FFT 1'이다.

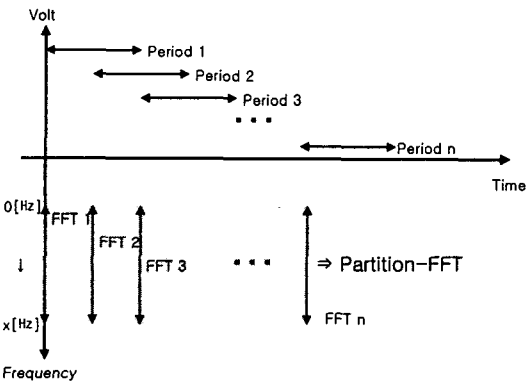


그림 3. FFT 결과의 배치
Fig. 3 Array of FFT results

셋째, 이상의 결과들에 대하여 관찰자가 쉽게 알아볼 수 있도록 그림 4와 같은 방법으로 그래픽 처리하였다.

그림 3의 'FFT 1'부터 'FFT n'까지에서, 최대 진폭값을 기준으로 관찰자가 정한 임의의 값 J_m (m[%])과 J_n (n[%])을 기준으로 그래픽 처리한다.

이상의 처리 과정을 거친 데이터들을 그림 3과 같이 배치한다. 그림 3에서 'FFT 1'은 'Period 1'의 시작시간에 세로방향으로 0[Hz]부터 주파수가 증가하는 방향으로 위치시킨다. 이로서 분할-FFT를 수행한 데이터도 측정 파형과 동일하게 가로축을 시간으로 해석할 수 있다[12].

4. 실험 장치 및 방법

4.1 실험 장치 및 방법

트래킹 시험은 IEC 60112 "Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions"에서 규정한 시험장치와 방법으로 진행하였다[13]. 인가 전압은 교류 380[V], 60[Hz]로 하였으며, 시료는 PVC(polyvinyl chloride)를 사용하였다. 크기는 6×6[cm], 두께는 3[mm]이다.

전체적인 실험회로는 그림 5와 같이 구성하였으며, 전압·전류파형 취득을 위해서 LeCroy DSO (digital storage oscilloscope) Waverunner LT372 (4[GS/s])를 이용하였다.

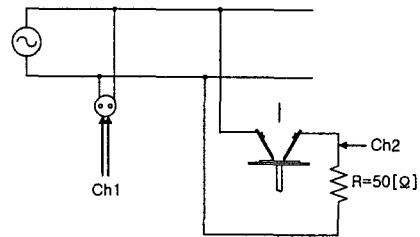


그림 5. 실험 장치도
Fig. 5. Experimental setup diagram

전압 측정은 그림 5의 콘센트에서 100 : 1 프로브 (LeCroy, PPE 2[kV])를 이용하였고, 이를 텍스트 파일로 디스켓에 저장한 후, 컴퓨터에서 분할-FFT를 수행하여 그 결과 값을 분석하였다. 전류 측정은 무유도 저항 양단에 동일 사양의 100 : 1 프로브를 사용하여 측정된 후, 저항값을 나누는 방식으로 구하였다.

4.2 분할-FFT의 계수 결정

이번 실험에서는 DSO로부터 입력되는 전체 데이터 수 50,002개, 구간의 크기를 512, 구간의 개수를 256개로 하였다. 또한 $J_n=0.67$, $J_m=0.33$ 로 하여 분석하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

전극에 전압이 인가되고 전해액이 적하되기 시작하면서부터 트래킹 파괴가 일어나기까지 모두 6단계로 나누어 전압·전류 파형을 관찰하였다. 그 각각의 경우에 대하여 DSO 파형을 나타낸 것이 그림 6이다.

그림 6에서 (a)는 정상상태이고, (b)는 적하된 전해액에 의해 양 전극 사이가 교락되면서 누설전류가 흐를 때이다. 이 누설전류에 의해 형성된 건조대에 전계가 집중되어 부분 방전이 처음으로 시작된 것이 그림 (c)이고, (d)는 방전이 상당히 진전되었을 때이다.

열화가 가중되면서 탄화가 시작되는 것이 (e)이다. 미소발광방전(scintillation)이 수반되면서 급격히 탄화가 진전되고, 양 전극 사이에 탄화도전로가 생성, 트래킹 파괴에 이른 것이 (f)이다.

이상의 분석은 트래킹의 진전상태를 구분함에 있어 전류파형에 의존한 것이다. 그러나 이 방법은 회로 중에 저항을 삽입해야 하며 사고 지점을 정확히 알고 있어야 한다. 반면에 전압파형으로 트래킹의 진전을 구별하기는 매우 어렵다.

그림 7은 그림 6에서 각각의 전압 파형에 대하여 분할-FFT를 수행한 것이고, 그림 아래의 수치는 최대 진폭값이다.

가로축은 DSO와 동일한 시간이며, 세로축은 주파수이다. 가장 위에 줄이 DC이며 아래로 내려가면서 주파수가 증가한다. 그림 6의 경우, 기본주파수가 4,883[Hz], 주파수 대역은 DC~1.25[MHz], 시간은 0.019 866[sec/dot], 총 dot 수는 256개이다.

단락상태는 정상상태와 비교하여 전반적으로 진한 색상의 분포를 보이고 있다. 또한 최대 진폭값의 차도 상당히 크게 나타나고 있다.

방전이 개시되면서 방전이 일어난 지점과 동일한 시간에서 진한 색의 선(이하 줄무늬)이 나타나고 있다. 이 줄무늬는 방전전류가 크고, 지속시간이 길어질수록 그 주변보다 진하고, 폭도 두꺼워지고 있다. 특히 트래킹에 도달하게 되면 줄무늬는 주파수의 모든 영역에서 나타나고 있다.

그림 6 (d)에서 'A' 부분을 분할-FFT 한 것이 그림 7 (d)의 'B' 부분이다.

그림 7 (d)의 윗부분만을 확대한 것이 그림 8 (a)

이고, 그림 6 (d)에서 'A'부분만을 확대해서 다시 그런 것이 그림 8 (b)이다.

그림 8 (a)에서 줄무늬는 ㉔, ㉕, ㉖, ㉗의 순서로 길게 나타나고 있다. 또한 그림 8 (b)에서 전압파형과 추세선의 차이가 큰 순서대로 나열하게 되면 ㉓, ㉒, ㉑, ㉐로 된다. 이는 전류파형의 크기와 지속시간 파도 일치하고 있다.

줄무늬가 길수록 전압파형의 변화 정도가 크게 나타나는 것은, 변화에 동참하는 고조파의 수가 많아질수록 전압파형도 많이 변화하기 때문이다.

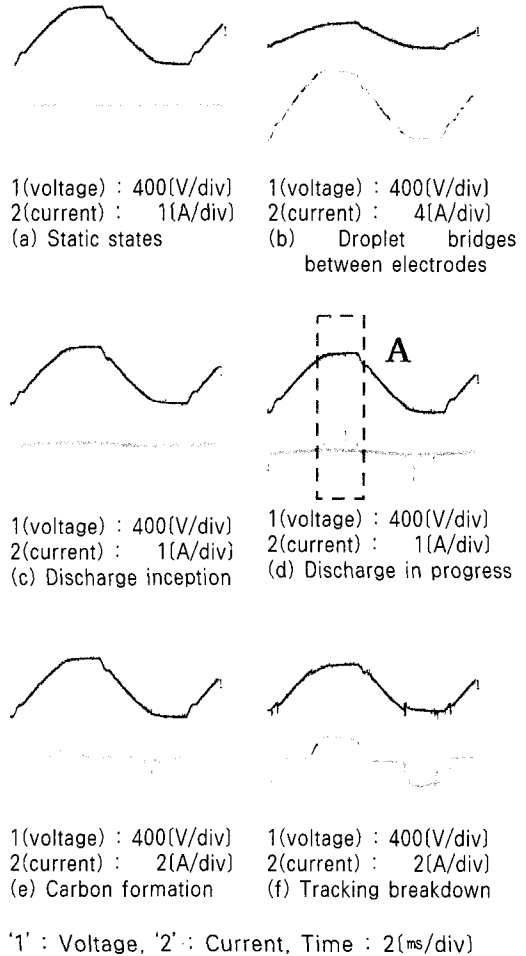


그림 6. 전압·전류 파형
Fig. 6. Waveform of voltage and current

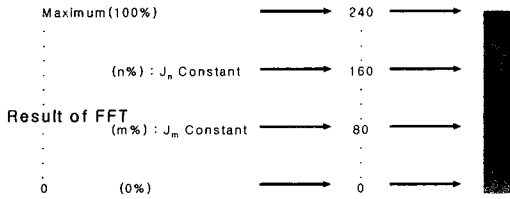


그림 4. 그래픽 처리 방법
Fig. 4. Graphic processing method

그림 9는 시험회로(그림 5)에 대한 방전시의 전기적 등가회로를 그린 것이며, 식 (1)은 이때의 전압강하식이다.

$$V = V_d + V_R = V_d + I \cdot R \quad (1)$$

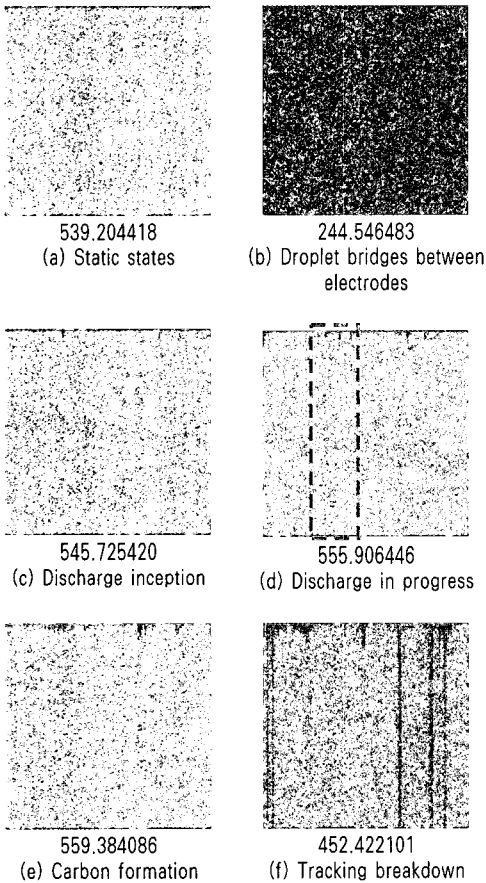
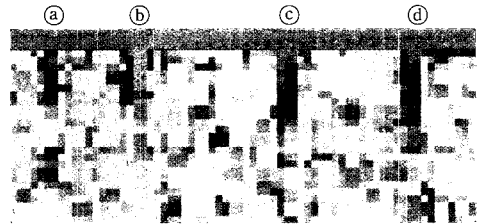
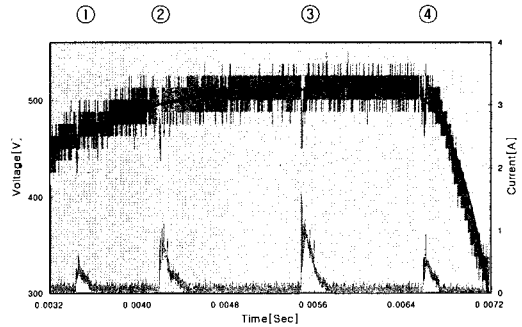


그림 7. 분할-FFT 결과
Fig. 7. Result of Partition-FFT

그림 8에서 ③의 경우, $V=520[V]$, $V_d=430[V]$, $R=50[\Omega]$ 이므로 이를 식 (1)에 대입하면 $I=1.8[A]$ 가 되고, 이는 그림 8 (b)의 전류값과 일치함을 알 수 있다. 이로써 전압파형의 주된 변화 원인이 전압강하 때문인 것으로 판단된다.



(a) Enlargement of 'B' in Fig. 7 (d)



(b) Enlargement of 'A' in Fig. 6 (d)

그림 8. 그림 6 A와 그림 7 B의 비교
Fig. 8. Comparison between Fig. 6 'A' and Fig. 7 'B'

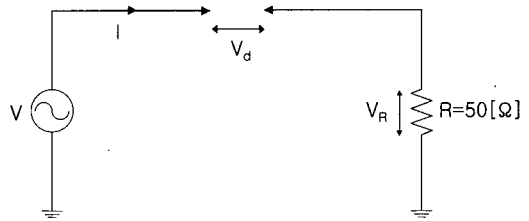


그림 9. 방전 시 등가회로
Fig. 9. Equivalent circuit at discharge

6. 결 론

1. 전압파형만으로는 트래킹의 진전 상태를 구별할 수 없었지만, 분할-FFT를 이용할 경우 그 구분이 명확했고, 방전이 일어나는 시점까지 정확히 알 수 있었다.

2. 분할-FFT를 이용하게 되면 샘플링 타임 2.5 [MHz]의 낮은 사양의 전압측정만으로도 트래킹 진전 과정을 시각적으로 명확하게 판별하는 것이 가능하였다.
3. 노후 된 전기설비에서는 여러 원인으로 인해 트래킹이 진행 중일 수 있다. 여기에 분할-FFT를 적용하게 되면, 전압측정만으로 트래킹으로의 진행 여부 및 진행 정도를 감지할 수 있다. 그럼으로써 트래킹으로 이행되었을 때 발생 가능한 전기재해를 미연에 방지할 수 있다.
4. 변화에 동참하는 고조파의 수와 이들의 모파형인 전압파형의 변화 정도는 비례하였다.
5. 트래킹현상에서 전압파형에 변화를 주는 가장 주된 요인은 방전으로 인한 전압강하로 판단된다.

References

- [1] 행정자치부, "2002년도 화재통계연보", 11-1310000-000002-10, 2003.
- [2] 한국전기안전공사, "전기재해 통계분석", 2002.
- [3] 이춘하 외, "전기화재공학", pp. 172-211, 2000.
- [4] 윤진열 외, "GIS 부분방진 검출기술 연구", 한국전력공사, TR.98PJ04.J2002.407, 2002.
- [5] Changchang Wang, Xianhe Jin, et al, "Analysis and Suppression of Continuous Periodic Interference for On-line PD Monitoring of Power Transformers", 1999. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 5, pp.212-215, 1999.
- [6] 이덕출 외, "고분자 절연체의 열화진단기법 및 수명에 측에 관한 연구", 기초전력공학공동연구소 97-중-06, 2000.
- [7] 이병호 외, "레이저를 이용한 전력기기 비파괴 열화진단 기술의 개발에 관한 연구", 기초전력공학공동연구소 97-중-04, 2000.
- [8] 전춘생, "방전 · 고전압 공학", pp.313-314, 동명사, 1980.
- [9] 최병화, "有機絶縁材料의 Tracking 破壊에 관한 研究", 석사학위논문, 영남대학교, 1985.
- [10] 西田眞, 吉村昇, 能登文敏, "有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程", 전기학회논문지, A pp.593-600, 昭58-A72.
- [11] 吉村昇, 西田眞, 能登文敏, "有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における炭火開始過程(IEC 112 方法の場合)", 전기학회논문지, A pp.429-436, 昭56-A54.
- [12] 지승욱, "주파수-시간 분석(분할-FFT)을 이용한 전기설비 이상신호 검출", 박사학위논문, 영남대학교, 2005.
- [13] IEC 60112, "Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials", 2004.

◆ 저자소개 ◆

지승욱 (池昇昱)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 공학 교육인증지원센터 연구원.

이춘하 (李春夏)

1953년 10월 20일생. 1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985~1994년 한국기계연구원 실장. 현재 호서대 환경안전공학부 소방학과 교수.

윤대희 (尹大熙)

1971년 3월 1일생. 1997년 영남대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

송현직 (宋炫直)

1968년 7월 30일생. 1991년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2004년 구미대학 컴퓨터응용전기전공 전임강사. 본 학회 평의원. 현재 영남이공대학 전기자동차학과 교수.

심광열 (沈光烈)

1961년 9월 8일생. 1983년 경남대 전기공학과 졸업. 1991년 영남대학교 대학원 졸업(박사). 1985~1991년 현대중공업(주)기전연구소 선임연구원. 현재 본 학회 편수위원. 울산과학기술대 전기전자통신학부 부교수.

박원주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 일본 큐우슈우대학교 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 교수. 본 학회 편수위원장.

이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전 고전압연구회 간사장 역임. 영남대학교 산업대학원장 역임. 현재 본 학회 회장. 영남대 공대 전기공학과 교수.