

이산 웨이브렛변환에 의한 부분방전패턴 분석

(The Analysis of Partial Discharges Pattern using Discrete Wavelet Transform)

이현동* · 이광식** · 이동인**

(Hyun-Dong Lee · Kwang-Sik Lee · Dong-In Lee)

요 약

본 논문은 다중 해상도 웨이브렛 변환을 이용하여 코로나 방전과 코로나방전 후 연면방전을 거치는 다중결합에 대한 방전전류펄스의 변화량을 시간 대역과 주파수 대역에서의 변화량을 분석하였다. 마더웨이브렛의 선정은 방전전류펄스의 형태를 고려하여 Daubechies 마더웨이브렛을 선정하였으며, 방전전류펄스는 이산 웨이브렛 변환을 이용하여 근사신호와 상세신호로 4단계까지 다중분해되었다. 이중 상세신호만을 이용하여 12개의 세그먼트로 나눈후 설정한 변수에 따라 그 패턴을 파악하였다. 그 결과 코로나 방전에서는 설정된 변수의 세그먼트 7, 8, 9, 10의 값이 방전의 진전에 따라 증가하였으므로 위상분포를 $210\sim 330[^\circ]$ 분포를 특징지을 수 있고, 에폭시 절연체를 삽입한 다중결합에서는 연면방전의 특징에 기인하여 설정된 변수의 값이 대칭적인 패턴을 나타내었다.

Abstract

This paper deals with multiresolution analysis of wavelet transform for partial discharge(PD), composite discharge(corona + surface discharge). Multiresolution analysis was used for performing discrete wavelet transform. PD signals was decomposed into "approximation" and "detail" components until 4 levels by using discrete wavelet analysis. In this paper, daubechies family is adopted for the research of the characteristics of PD signals. The results show that in corona discharge the segment 7, 8, 9, 10, 11 values of defined variable is increased with discharge process, so phase distribution is characterized by $210\sim 330$ ranges.

In case surface discharge in epoxy insulator inserted, defined variable values is fairly symmetric discharge pattern because coupled both corona and dielectric bounded discharges. We can confirmly discriminate the type of PD source.

1. 서 론

부분방전이라 함은 두 도체사이의 절연물이 일부 분 교락된 전기적 방전이다. 전력설비에서 절연성이

저하하여 절연이 파괴되기 전에 거의 모든 경우가 부분방전(partial discharge)을 수반하고 있다. 전력설비의 각종 절연물에서 부분방전에 의한 절연열화는 화학적인 특성과 물리적인 특성으로 구분되며, 그 형태는 대개 4가지로 분류되고 있다.

①코로나 방전(corona discharges): 기체나 액체의 절연물에서 침전극과 같이 예리한 전극부가 존재할

* 정회원 . 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** 정회원 . 영남대학교 전자정보공학부 교수, 공박
접수일자 : 2000년 10월 13일

때 전계 집중에 따른 방전이 발생한다. ② 연면방전(surface discharges): 절연물 표면을 따라 발생하는 방전으로 침전극 선단의 공기와 절연물이 조합되어 있는 경우에 공기의 절연 내력과 유전율은 절연물보다 적기 때문에 전압이 상승되어 어떤 전압에 이르렀을 때 침전극 선단의 공기 부분에서 절연물을 따라 방전이 발생하게 된다. ③ 내부 방전(internal discharges): 일종의 보이드 방전으로 고체 절연물 내에서 보이드가 존재하여 일어나는 방전이다.

④ 전기적 트리(electric trees): 고체 절연물에 있어서 공극이나 도전성 불순물에 의하여 발생하는 방전이다[1].

이들 부분방전은 아주 미약하고, 주변환경의 여러 잡음에 쉽게 영향을 받기 때문에 부분방전과 잡음의 판별은 난이하다. 최근의 부분방전 분석은 부분방전의 제량과 결합의 상호관계인 위상각-방전전하량-방전펄스수($\phi - q - n$) 파라미터를 이용한 통계적인 기법과, FFT를 이용하거나 방전에 의해 방사되는 방사전자파를 안테나에 의한 주파수 스펙트럼에 의한 구분화 방법이 시도되고 있다. 그 측정에도 부분방전 발생시 나타나는 방전펄스전류, 초음파, 진동, 방사전자계, 광, 가스생성 등의 특성에 기인한 방전펄스측정법, 초음파법, 진동가속법, 발광검출법, 발생 가스 분석법 등이 있다[2][3].

부분방전의 신호 분석은 시간(time)과 주파수영역(frequency domains) 분석들로 많이 소개되어져 왔다. 그러나, 이러한 분석법들은 방전신호와 같은 비주기적인 신호, 일시적인 시간영역을 갖는 신호에 포함될수 있는 정보의 해석에 만족스러운 결과를 보여주기에는 한계가 있으며, 분석이 정량적이지 못하고 전문가적인 경험에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 침대 평판전극을 이용한 코로나 방전과 전력설비내 절연지지물로 많이 사용되고 있는 에폭시 절연체를 그림 1의 (b)와 같이 공극과 직렬로 배치한 경우의 방전펄스 전류를 전기적 방법으로 측정하였다. 측정된 신호는 기존의 통계적 방법과는 달리 새로운 신호 해석방법인 시간-주파수 해석의 도구(신호의 급격한 변화부분은 아주 짧은 고주파 기저를 이용하고, 저주파 신호에 대해서는 긴 윈도우를 적용)인 웨이브렛 변환을 이용하여 부분방전시 발생하는 방전전류펄스의 변화량을 시간 대역과 주파수 대역에서 규명하기 모호한 부분의 정보량을 분석하

여 그 패턴인식에 대한 명확한 구분을 가능하게 하고자 한다.

2. 웨이브렛 변환 (4)

웨이브렛 변환은 푸리에 변환이 주어진 신호를 사인(sine)과 코사인(cosine)기저함수를 이용하여 표현하는 것과는 달리 일정한 시간-주파수 정보를 가지는 기저함수(basic function)로서 주어진 신호를 표현한다. 그래서 푸리에 변환이 정제적 신호해석에 유리한 반면에 웨이브렛 변환은 비정제적 신호(non-stationary signal) 해석에 커다란 장점을 가지게 된다. 웨이브렛 변환에 사용되는 기저함수로서의 스케일링(scaling) 함수와 마더웨이브렛(mother wavelet)이 있으며 모 웨이브렛은 다음 식처럼 표현된다.

$$\Psi_{a,\tau} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (1)$$

여기서, a 는 스케일링 파라미터(scaling parameter)이고 τ 는 천이 파라미터(translation parameter)이며, $\frac{1}{\sqrt{a}}$ 는 정규화 인자(normalization factor)이다.

웨이브렛 변환은 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환으로 분류된다.

이산신호(discrete signal) $s(t)$ 에 대한 연속시간 영역에서 웨이브렛 변환(CWT: Continuous Wavelet Transform)과 이산 웨이브렛(DWT: Discrete Wavelet Transform)은 다음 식처럼 주어진다.

$$\begin{aligned} CWT(a, \tau) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \\ &= \langle s(t), \Psi_{a,\tau}(t) \rangle \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 스케일링 파라미터와 천이 파라미터가 다음의 식(3)과 같이 표현될 경우 이산 웨이브렛 변환이 얻어진다.

$$a = 2^m, \tau = n 2^m \quad m, n \in \text{정수} \quad (3)$$

$$DWT(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_k s(k) \Psi\left(2^{-\frac{m}{2}} k - n\right) \quad (4)$$

이산 웨이브렛변환에 의한 부분방전패턴 분석

식 (2)와 식(4)로부터 이산 웨이브렛은 연속 웨이브렛을 샘플화하여 변형시킨 형태이다. 그리고 웨이브렛은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

(i) $\omega=0$ 에서 $\Psi(\omega)=0$ 즉, $\int \psi(t)dt=0$ dc 성분이 0이다.

(ii) 밴드패스(bandpass) 신호이다.

(iii) 시간영역에서 영(zero)으로 빠르게 감소한다.

특징 (i)은 웨이브렛 변환이 역변환이 존재하기 위한 조건이며, 특징(ii)은 주파수영역에서 웨이브렛 함수의 특징을 나타낸다. 특징 (iii)은 실제적인 웨이브렛 변환에서 시간영역에서의 분해능을 좋게 하기 위한 조건이 된다.

마더웨이브렛의 형태는 Morlet, Haar, Shannon, Meyer, Daubechies 등 만들어 낸 사람들에 따라서 다양하며 각각의 모 웨이브렛이 가지고 있는 신호 분해의 특성과 장점에 따라서 응용되는 분야는 다를 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

그림 1은 부분방전을 모의하고 부분방전시의 방전 펄스 전류를 측정하기 위한 전극 배치의 개략도를 나타낸 것이다.

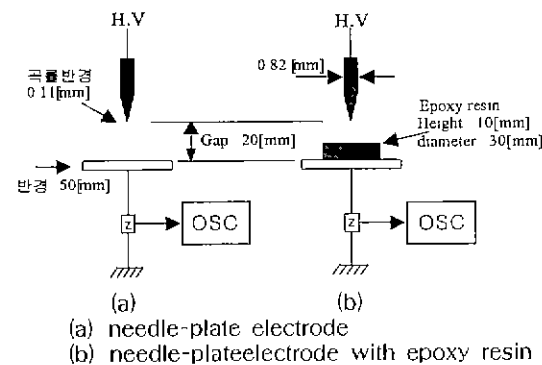


그림 1. 전극구성도
Fig. 1. Electrode configuration

본 실험에 사용된 전압원으로는 교류고전압 발생 장치(입력:AC 220[V] 1 ϕ , 60[Hz], 출력: AC 30[kV], Pultec Electronics Co. Ltd.)를 사용하였다. 전극시스템으로는 침대평판 전극으로, 침전극은 곡률반경

0.11[mm], 직경 0.84[mm]이며, 평판전극은 직경이 50[mm]인 스테인레스 스틸로 로고스키형 타입을 사용하였다. 침대평판전극에 삽입된 시료인 에폭시 절연체는 열경화성수지로서 비스페놀-A형(bisphenol-A type)이며, 경화제를 사용하여 주재와 배합비율이 100 : 30~35%로 제작하였으며, 시료의 형상은 높이 10[mm], 직경 30[mm]인 원통형으로 제작하였다.

한편, 전극시스템의 방전 펄스를 측정하기 위하여 50[Ω] 정합용 무유도 저항을 사용하였다. 저항 양단에 걸리는 방전 펄스에 의한 전압펄스를 관찰하기 위하여 액티브프로브를 사용하여 디지털 오실로스코프(Lecroy 9350AL, bandwidth(0~1GHz), sampling rate(1GSa/s), sensitivity range(2mV/div ~1V/div))에 연결하였다. 측정된 방전펄스 파형의 데이터는 GPIB(general purpose interface bus)를 통하여 PC로 전송된다.

3. 2 데이터 처리 및 변수추출

방전 펄스신호를 디지털 오실로스코프의 샘플링 주파수(sampling frequency : Fs)를 IMSa/s로 하여 인가전압의 한 주기에 대한 방전 펄스신호의 데이터(16670point)를 획득한 후 웨이브렛 변환을 이용하여 방전 펄스신호를 분할·재구성하였다. 신호의 분석에 사용된 마더웨이브렛(mother wavelet)은 Daubechies family중 'db4'를 이용하였고, 이 PD신호를 4단계의 주파수 대역별(Fs/2, Fs/4, Fs/8, Fs/16)로 나누어서 분할처리하였다.

즉, DWT를 이용하여 PD신호를 저역통과필터를 통과한 신호(A1, A2, A3, A4)와 고역통과필터를 통과한 신호(D1, D2, D3, D4)로 분할하였다. A1~A4는 저주파성분이며, 원신호의 불확실한 형태를 표현하며, D1~D4는 고주파성분으로 고주파 대역에서 신호 특성과 에너지를 나타낸다.

본 논문에서는 그림 2와 같이 DWT를 통하여 고주파필터 통과신호와 저주파필터 통과신호로 분리된 부분방전 신호중 고주파 필터 통과신호, 즉 detail성분값들을 가지고 부분방전신호를 전압대별로 비교함으로써 시간 및 주파수대역에서의 차이유무를 관정하고자 시간축상에서 12 segment로 분할한 후, 각 segment의 면적값을 변수로 추출하였다[5].

$$PD_{ij} = \sum_{seg} |D_i| \quad : \text{부분방전 신호의 } i\text{레벨}$$

의 details, (level $i=1,2,3,4$ segment $j=1,2,3,\dots,12$)

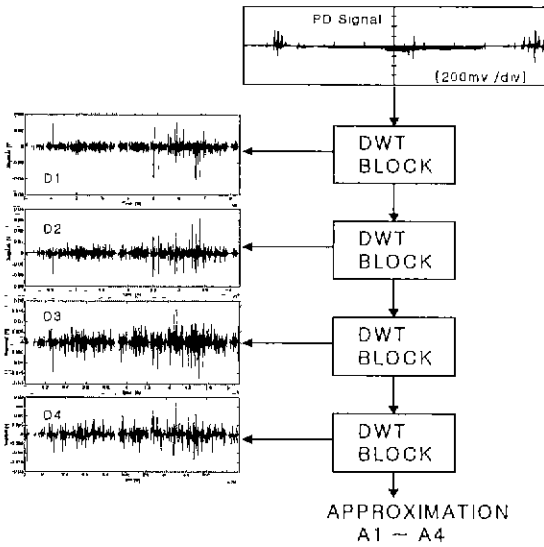


그림 2. 이산웨이브렛 변환
Fig. 2. Discrete wavelet transform

4. 결과 및 검토

4.1 부분방전 방전펄스

그림 3은 인가전압의 증가에 따른 전극시스템(그

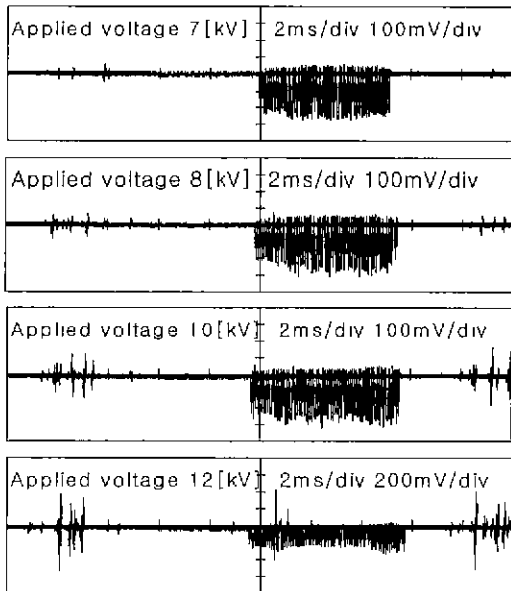


그림 3. 코로나방전의 방전전류 파형
Fig. 3. Current waveform of corona discharge

림 1의 (a))에서의 코로나 방전전류 파형이다. 방전의 개시는 인가전압의 부의 위상 영역 270°]부근에서 일어났으며, 인가전압의 증가에 따라 펄스군이 부의 위상영역 220°]에서 330°]전역으로 확대되었다. 그러나, 펄스의 크기는 비슷하게 나타났다. 인가전압의 정의 위상영역 70°]부근에서 정펄스 발생이후 정펄스군이 45°]에서 90°]부근에서 정펄스군이 발생되었다. 부의 펄스군과는 달리 정펄스는 인가전압의 증가에 따라 크기가 증가하였으며, 12[kV]에서는 부의 펄스크기보다 큰 펄스가 발생되었다.

이러한 방전의 물리적 진전과정은 침단의 전극에 전압인가에 의하여 전계가 집중되고, corona의 발생 공간의 부분적 이온화에 기인하여 공기의 전기 전도도가 증가하기 때문이다. 공기중의 양이온과 전자의 수는 이온화와 재결합으로 인하여 그 수가 일정하게 동적 평형을 이루게 된다. 하지만, 외부의 작용 즉 전압인가 등에 의해 분자들이 에너지를 얻게 되면, 분자는 전자를 방출하고 양이온화가 된다. 전자의 이동속도는 양이온보다 상대적으로 빠르므로 공기중의 양이온수는 증가하게 된다. 분자들이 에너지를 얻는 과정에는 전자충돌, 충돌전자로 인한 원자의 여기상태에서 나오는 광자에 의한 방법, 이온전자 재결합에서 나오는 광자, 양이온이 운동전자 포획, 준안정에 의한 이온화 과정등이 있지만, 일단 전자가 전계에

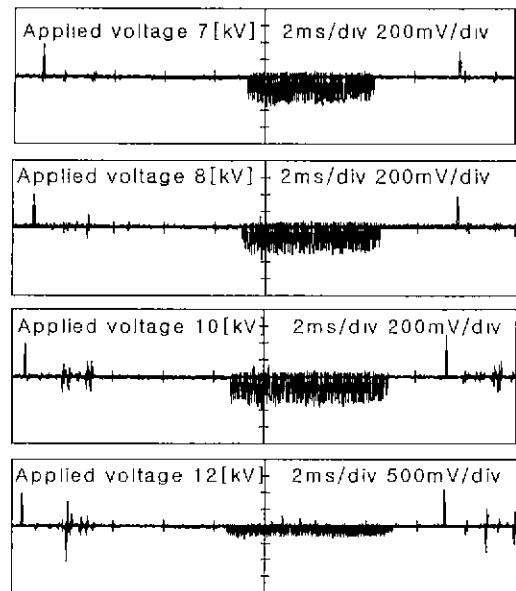


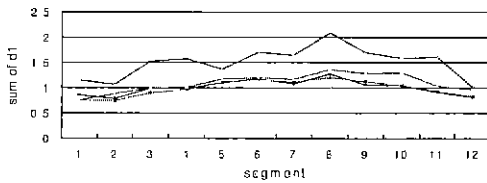
그림 4. 연면방전의 방전전류 파형
Fig. 4. Current waveform of surface discharge

이산 웨이브렛변환에 의한 부분방전패턴 분석

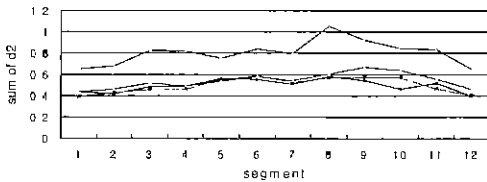
의해 강한 힘을 받아 전계방향으로 가속되면 전자 충돌에 의한 이온화가 방전현상을 주도 한다.

그림 4는 전형적인 연면방전을 모의한 것과는 달리 실제 절연시스템에서의 다중절합을 생각하여 코로나방전 후 연면방전을 거치는 전극시스템(그림 1의 (b))에서의 연면방전 전류파형이다.

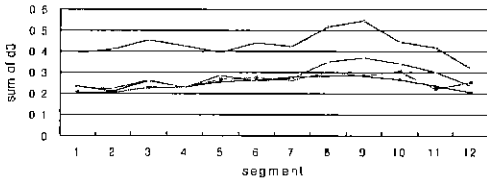
방전전류의 파형은 코로나방전을 모의한 전극시스템에서의 인가전압에 따른 방전전류 파형의 형태를 가지고 있으면서 전형적인 연면방전 형태와 유사하게 정펄스 특성을 가지고 있다. 펄스의 크기는 코로나방전의 펄스의 크기보다 약 2배정도의 크기를 가지며, 인가전압의 증가에 따라 양의 반주기 동안의 방전이 빠른 위상각영역으로 전이되고 있다.



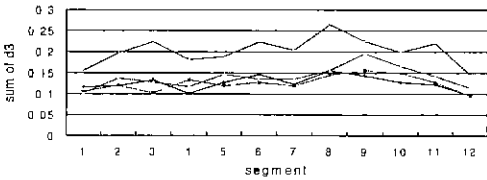
(a) detail 1



(b) detail 2



(c) detail 3

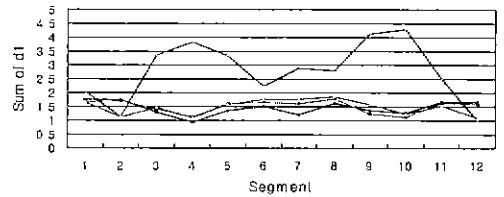


(d) detail 4

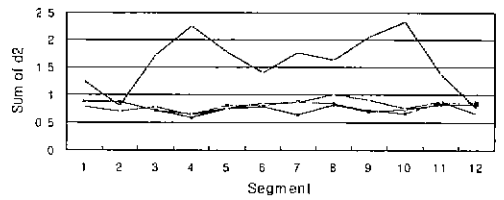
인가전압이 낮은 경우는 절연체내로 주입된 전자가 공간 전하를 형성하며, 이 공간 전하층에 의하여 전류는 제한을 받지만, 본 논문에서 나타낸 전압레벨 이상에서는 고체절연체 계면의 전위장벽의 높이 이상이므로 전자방출이 쉽게 되는 현상으로 절연체내에서도 전자가 방출되어 전류가 증가한 것으로 사료 된다.

그림 5는 코로나 방전 신호를 이산 웨이브렛 변환을 수행하여 저역통과필터를 통과한 신호(A1)과 고역통과필터를 통과한 신호(D1)로 나누고, A1을 다시 두 개의 저역통과필터(A2)와 고역통과필터(D2)로 분해하는 과정을 4단계로 한 후, detail신호(D1~D4)들로부터 설정된 변수추출에 의해 통계처리하여 나타낸 것이다.

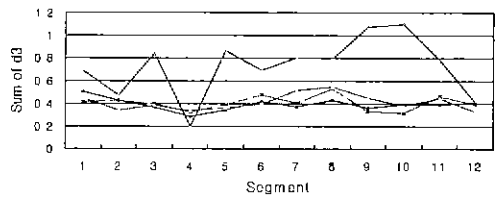
코로나 방전의 변수추출에 의한 패턴적 특징은 부의 펄스군의 형성되는 위상영역 $210[^\circ]$ 에서 $330[^\circ]$ 부근인 segment 7에서 segment 11부근의 언덕모양으로 나타났으며, 인가전압의 증가에 따라 그 특징이 명확히 나타난다.



(a) detail 1



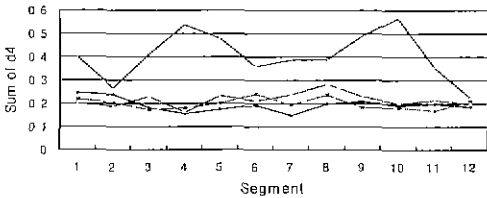
(b) detail 2



(c) detail 3

그림 5. 코로나 방전의 시간영역 분석

Fig. 5. Time domain analysis of corona discharge



(d) detail 4

범례(그림 5, 그림 6)

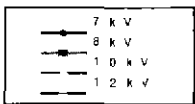


그림 6. 연면 방전의 시간영역 분석
Fig. 6. Time domain analysis of surface discharge

그림 6은 절연체가 삽입된 연면방전 신호를 이산 웨이블릿 변환을 수행하여 지역통과필터를 통과한 신호(A1)과 고역통과필터를 통과한 신호(D1)로 나누고, A1을 다시 두 개의 지역통과필터(A2)와 고역통과필터(D2)로 분해하는 과정을 4단계로 한 후, detail 신호(D1~D4)신호들로 부터 설정된 변수추출에 의해 통계처리하여 나타낸 것이다.

절연체가 삽입된 연면 방전의 경우 변수추출에 의한 패턴적 특징은 코로나 방전의 방전패턴의 부분적인 인식을 함과 동시에 전형적인 연면방전의 방전패턴의 정부의 대칭적 경향으로 낙타등모양으로 나타났다.

연면 방전 펄스 신호가 코로나 방전 펄스 신호보다 약 2배의 증가를 보임에 따라 신호분석 후 통계 처리한 detail 성분에서도 그 크기가 약 2배로 증가하였다.

5. 결 론

비주기적이고 일시적인 시간영역을 갖고, 주변 잡음에 대하여 상당한 영향을 받는 부분방전 신호를 전기적 방법으로 측정 한 후, 측정된 방전펄스 신호를 이산 웨이블릿 변환을 이용해 부분방전 신호를 분석 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 코로나방전의 방전신호는 부의 위상에서 개시된 후 부의 위상전역으로 확대된 후에 정의 위상영

역에서 정펄스가 개시된다

(2) 이산 웨이블릿 변환에 의한 코로나 방전의 통계처리후 그 특징은 부의 펄스군의 형성되는 위상영역 $210[^\circ]$ 에서 $330[^\circ]$ 부근인 segment 7에서 segment 11의 볼록모양으로 특징지을 수 있다.

(3) 절연체가 삽입된 연면방전의 방전신호는 코로나 방전의 신호 특징을 가지고 있으면서 인가전압 정의 위상영역에서 전형적인 연면방전 유형의 정펄스가 나타났다. 인가전압의 증가에 따라 정펄스가 빠른 위상영역으로 전이되는 경향이 있다.

(4) 이산 웨이블릿 변환에 의한 절연체 삽입 복합 방전 신호의 통계처리후의 특징은 정부가 대칭적 경향을 갖는다.

참 고 문 헌

- (1) F.H Kreuger, Partial Discharge Detection in HV Equipment, Heywood London, Butterworths, 1989.
- (2) E. Gulski and F.H Kreuger. "Computer aided recognition of discharge sources", *IEEE Trans. on Elect. Insul.* Vol.27, pp.82~92, 1992.
- (3) 김충년, 이현동외, "고체절연체의 연면방전에 따른 방사전지파 분포 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 20, pp.1862 ~ 1864, 2000.
- (4) Charles K.Chui, An Introduction to Wavelets, 1992
- (5) 이현동, 이광식의, "다중해상도 분해에 의한 부분방전 신호의 특징에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1924~1926, 2000.

◇ 저자 소개 ◇

이 현 동 (李炫東)

1970년 6월 13일생. 1993년 영남대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

이 광 식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 1995~1998년 당학회 대구·경북 지회장. 현재 당학회 부회장. 영남대 공대 전자정보공학부 교수. 영남대 산업기술대학원장.

이 동 인 (李東仁)

1936년 10월 19일생. 1959년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 영국 Strathclyde대 대학원 졸업(박사). 1982~1983년 미국 South Carolina대 방문교수. 현재 영남대 전자정보공학부 교수.