

분포 통계 해석에 의한 계면 결함 부분방전 진단

Partial Discharge Diagnosis of Interface Defect by the Distribution Statistical Analysis

조경순^{1,a}, 이강원¹, 김원종¹, 홍진웅¹, 신종열²

(Kyung-Soon Cho^{1,a}, Kang-Won Lee¹, Won-Jong Kim¹, Jin-Woong Hong¹, and Jong-Yeol Shin²)

Abstract

Most of the high voltage insulation systems, such as the power cable joint having hetero interface, are composed of more than two different insulators to improve insulating performance. The partial discharge(PD) in these hetero interface is expected to affect the total insulation performance. Thus, it is important to study electrical properties on these interfaces. This study described the influence of copper and semiconductive substance defects on $\Phi-q-n$ distribution between the interface of the model cable joints to classify PD source. PD was sequentially detected for 600 cycles of the applied voltage. The K-means cluster analysis has been analyzed to investigate the $\Phi-q-n$ distribution. The skewness-kurtosis(Sk-Ku) plot from K-means clustering results was defined to quantify cluster distribution and classify distribution patterns. The Sk-Ku plot is composed of skewness and kurtosis along abscissa and ordinate which indicate the asymmetry and the sharpness of distribution. As a result of the Sk-Ku plot, it was confirmed that the data was distributed in 1st 2nd and 3rd quadrant at copper foreign substance defect, but in case of semiconductive foreign substance, the data was distributed in 2nd quadrant only.

Key Words : Partial discharge source, K-means clustering, Centroid, Skewness, Kurtosis

1. 서론

오늘날 전력사용이 급증하면서 부하가 대용량화 되는 추세에 따라 전력 설비의 규모는 점차 대규모화되고 있으며, 설비의 사고 또는 정전 등은 높은 전기 의존도를 가진 정보화 사회에 막대한 경제적 손실과 장애를 초래한다[1]. 이러한 전력 설비의 안전성 확보와 사고 방지를 위해서는 적절한 절연열화 진단기법의 개발이 매우 중요하다. 특히 지중선로는 전력케이블의 운반 및 포설을 쉽게 하기 위하여 일정거리로 나누어 중간 접속을 하는데

전력케이블의 접속부는 절연재료의 성능 개선과 신뢰성을 확보하기 위해 가교폴리에틸렌(XLPE)과 에틸렌 프로필렌다이엔고분자(EPDM)의 2층구조로 이루어져 있다. 따라서 이들 재료 사이에는 이종계면(hetero interface)이 존재하게 되며, 이러한 계면의 존재로 인해 전기전도도, 유전율 등의 차이가 발생하여 전계의 집중이나 전하축적 등이 일어나게 되기 때문에 전력케이블 접속재 계면의 상태는 절연 케이블 시스템 전체의 절연성능과 직결된다 [2]. 케이블 접속은 보통 실외에서 수작업으로 이루어지므로 작업 환경이 열악하고 작업자의 숙련도에 상당한 영향을 받는다. 따라서 케이블과 접속재가 연결되는 계면에 케이블 절단 작업시 케이블의 구리 또는 반도체층에서 떨어져 나온 이물질이 혼입될 수 있다. 이러한 이유로 접속재에서 발생하는 사고의 대부분은 접속 계면에서 발생한다. 사고 분석 결과에 의하면 전력케이블의 절연사고 중 접

1. 광운대학교 전기공학과
(서울시 노원구 월계동 447-1)
2. 삼육대학교 카메카트로닉스학과
a. Corresponding Author : kscho@seoil.ac.kr
접수일자 : 2008. 2. 4
1차 심사 : 2008. 3. 17
심사완료 : 2008. 3. 25

속부에서 발생한 사고는 전체 케이블 사고의 69%를 차지하고 있으며 특히 직선접속재의 고장이 42%로써[3] 접속재 계면의 전기적 특성에 대한 연구가 절대적으로 필요하다. 케이블 포설시 취약 부분인 접속재 계면에서 발생하는 전기적 현상을 분명히 하기 위해서는 최적의 전극 시스템을 구축하고 그 전극 시스템에서 발생하는 부분방전 특성을 검토할 필요가 있다[4]. 한편 부분방전은 통계적으로 불규칙성이 수반되기 때문에 데이터에 대한 적절한 통계처리는 매우 중요하다[5]. 따라서 부분방전원(partial discharge source)의 특성을 반영할 수 있는 방전 특성량을 선정하여 정량화 하여야 한다[6]. 이러한 관점에서 본 연구는 고장 사고의 주요 부분인 케이블 절연재료인 XLPE와 접속재 절연재료인 EPDM 사이의 계면을 설정하고 케이블 절단 작업시 발생하게 되는 구리 이물질과 반도체성 이물질을 넣은 인공적인 결함을 발생시킨 후 부분방전을 측정하였다. 그 결과를 K-means 군집화로 해석한 후[7], 정극성 및 부극성 군집 중심을 크기함수로 변환한 왜도와 첨도를 각각 x와 y축에 대응시킨 왜도-첨도 플롯트를 이용하여[8] 군집 분포를 정량화하고 분포의 집중 형태에 따른 부분방전원의 분류를 시도 하였다.

2. 시료 및 실험

2.1 시료

실험에서 전극은 평판 대 평판을 사용하였고, XLPE와 EPDM 시료를 적층한 후 연면방전 및 코로나방전을 방지하기 위하여 상부전극과 하부전극을 에폭시로 몰딩 하였으며, 실험 중 연면방전을 방지하기 위하여 전극을 점도 100 cSt인 실리콘오일 속에 넣어 실험하였다. 결함에 따른 부분방전 특성을 확인하기 위하여 각각의 두께가 1 mm인 EPDM과 XLPE 계면에 직경 0.6 mm, 길이 2 mm인 구리 이물질과 길이 2 mm, 너비 0.6 mm 두께 0.6 mm인 반도체성 이물질을 삽입하여 이물질 주변에 보이드를 발생시켰다. 한편 시료의 형상과 그에 따른 보이드의 크기와 형상은 전체 부분방전 측정결과에 큰 영향을 줄 수 있는데, 구리 이물질은 원통형임에 비하여 반도체성 이물질은 모서리가 직각을 이루는 형태를 취하고 있기 때문에 보이드의 크기는 반도체성 이물질에 의한 것이 구리 이물질에 의한 보이드 보다 크다. 그림 1은 시료의 구성이다.

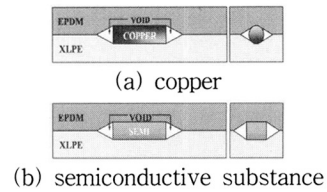


그림 1. 시료의 구성.

Fig. 1. Configuration of specimens.

2.2 부분방전 측정

그림 2는 측정 시스템의 블럭선도로 전원에서 슬라이다스를 통해서 인가된 60 Hz 교류전압을 변압기의 1차측에 입력하여 승압한 후 제한저항 Rk(5 MΩ)를 통하여 결합 커패시터 Ck(500 pF)와 전극에 인가하여 부분방전 펄스를 발생시켰다. 부분방전펄스의 측정감도와 분해능은 검출임피던스의 종류와 접속위치에 따라 변화하기 때문에 사용 목적에 따라 적절히 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는 펄스폭이 수 [ns]인 매우 짧은 부분방전 파형을 컴퓨터계측시스템으로 입력 가능하게 하기 위해 약 1 μs로 펄스를 정형화 할 필요가 있었다. 따라서 펄스정형과 부분방전 전하량만을 입력하기 위하여 특성임피던스를 50 Ω으로 변환하며, DC ~ 800 MHz까지의 주파수 대역을 가진 RC병렬 검출 임피던스를 이용하였다. 임피던스 매칭회로를 이용하여 전극에서 검출시킨 전류를 저항에 의해 전압으로 변환 시키는 도중에, 절연파괴가 발생할 경우 계측장치를 보호하기 위하여 배리스터와 제너다이오드를 검출 임피던스에 병렬로 삽입하였다. 또한 부분방전 펄스 신호를 검출할 때 전원 60 Hz의 주파수성분 신호가 중첩되므로 하이패스필터를 이용하여 60 Hz의 주파수성분을 제거하였으며, 하이패스필터를 이용하면 역극성펄스의 언더슈트가 발생하여 이것을 부분방전 신호로 잘못 인식하고 데이터 취득 시스템이 받아들일 가능성이 있기 때문에 계측기의 최저 입력 전압을 조정하여 처리하였다. 한편 부분방전의 위상정보를 얻기 위해 슬라이다스 2차측의 제로크로스(zero cross) 신호를 데이터 취득 시스템에 입력하였다. 차동증폭기를 통과한 부분방전 펄스 신호와 제로크로스 신호가 데이터 취득 시스템에 입력되면 A/D 변환기에 의해 12 bit(4096 분할)의 크기를 갖는 3개의 디지털 신호인 ZCC(zero cross count), AMP (amplitude of PD pulse) 및 PHA(phase of PD pulse)신호로 변환되고, 동작 명령에 따라 버퍼에 기억된 순서대로 GPIB 보드를 통해 저장하였다.

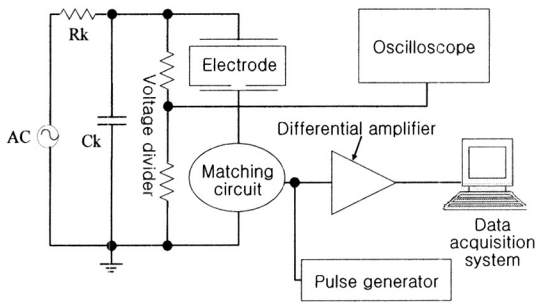


그림 2. 실험장치의 블록선도.
Fig. 2. Block diagram of experimental apparatus.

실험은 인가전압을 30 kV까지 상승시킨 후 600 cycle 동안의 방전 펄스를 측정하였으며 10분 단위로 60분까지 반복 실험 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ϕ - q - n 분포

그림 3은 구리 결함의 ϕ (위상각)- q (방전전하량)- n (발생빈도수) 패턴을 나타낸 것으로 정극성 영역에서는 $2^\circ \sim 135^\circ$ 위상에서 방전이 발생하였으며, 평균 방전 전하량(Q_{AVG+})은 151.2 pC, 발생 수($n+$)는 511개 이었다. 부극성 영역에서는 $182^\circ \sim 338^\circ$ 위상에서 방전이 발생하였으며, 평균 방전 전하량(Q_{AVG-})은 -110.4 pC, 발생 수($n-$)는 600개 이었다

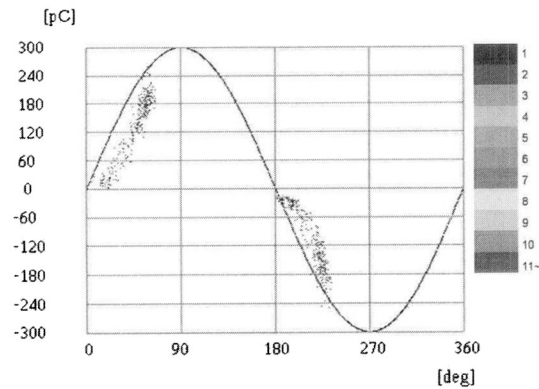


그림 3. 구리 결함의 ϕ - q - n 분포.
Fig. 3. ϕ - q - n distribution of copper defect.

그림 4는 반도체 이물질 결함의 ϕ - q - n 패턴을 나타낸 것으로 정극성 영역에서는 $0^\circ \sim 139^\circ$ 위상에

서 방전이 발생하였으며, 평균 방전 전하량은 49.7 pC, 발생 수는 4,345개 이었다. 부극성 영역에서는 $182^\circ \sim 317^\circ$ 위상에서 방전이 발생하였으며, 평균 방전 전하량은 -123.2 pC, 발생 수는 2,328개 이었다. 한편 유전체 경계면(내부 또는 표면) 사이에서 발생하는 부분방전은 완전한 대칭패턴을 나타내며, 측정전압 피크값 이전에 발생하고 정의 반주기와 음의 반주기에 임펄스의 크기와 발생빈도수 및 위치가 거의 같게 나타나는데[9] 본 연구의 구리 결함과 반도체 이물질 결함 모두에서 부분방전 패턴이 전체적으로 정대칭 패턴을 형성하므로 유전체 경계면의 방전 패턴으로 볼 수 있다.

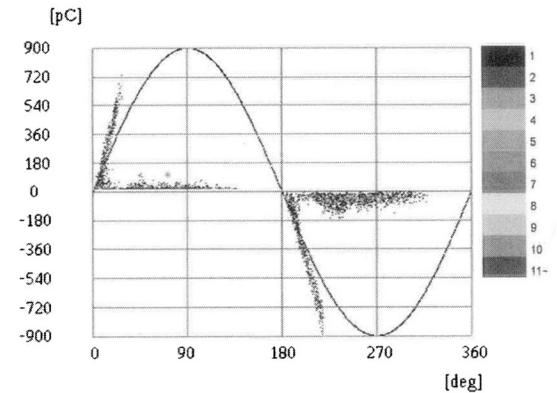


그림 4. 반도체 이물질 결함의 ϕ - q - n 분포.
Fig. 4. ϕ - q - n distribution of semiconductor substance defect.

표 1은 전압 인가 후 시간 경과에 따른 구리 결함의 통계량 변화를 나타낸 것으로 발생 수는 큰 변화가 없었지만 평균 방전 전하량은 시간 경과에 따라 감소하는데 이것은 1회 방전당 방전량이 감소함을 의미한다.

표 1. 구리 결함의 통계량.

Table 1. Statistic quantities of copper defect.

t [min]	n+	n-	Q_{AVG+}	Q_{AVG-}
10	496	504	147.1	-145.2
20	542	574	113.9	-90.6
30	759	508	81.1	-57.1
40	593	407	99.9	-66.7
50	564	219	99.5	-52.2
60	662	460	80.1	-66.9

표 2는 시간 경과에 따른 반도체 이물질 결함의 통계량 변화를 나타내는 것으로 발생수는 40분 까지 증가하다가 포화되는 경향을 나타내었으며 평균 방전 전하량은 증가하는 경향을 나타내었는데 이것은 시간 경과에 따라 1회 방전당 방전량이 증가함을 의미한다.

표 2. 반도체 이물질 결함의 통계량.

Table 2. Statistic quantities of semiconductive substance defect.

t [min]	n+	n-	Q _{AVG+}	Q _{AVG-}
10	3142	1476	45.9	-107.7
20	2370	1554	57.3	-115.8
30	5255	3064	76.2	-161.3
40	6253	3728	59.1	-125.8
50	5984	3468	78.3	-171.6
60	5598	3551	86.3	-162.7

3.2 K-means 군집중심 분포

최근 부분방전 측정 기술이 발전하면서 실험으로부터 취득하는 데이터의 양이 기하급수적으로 증가함에 따라, 많은 양의 데이터를 군집화 (clustering)하여 숨겨진 패턴이나 관계 등의 정보를 찾아내는 새로운 통계 처리에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 군집화는 중복되는 데이터가 없도록 하면서 데이터를 그룹화 하는 것이다. 이때 우선적으로 고려되어야 하는 것은 측정 데이터의 핵심적인 특성을 잃지 않으면서 데이터의 크기를 줄임으로서 처리 시간을 줄이고 효율을 높이는 것이다. 한편 모든 군집은 군집을 대표하는 하나의 값으로 표현되는데, 이러한 대표적인 값을 군집중심(centroid)이라 하며, 일반적으로 데이터의 평균값으로 구해진다. 본 절에서는 흩어진 개체 사이의 거리를 기준으로 군집을 형성함으로써 군집들 간의 관계를 보다 쉽게 탐색하는 통계분석인 K-means 군집화 해석법을 사용하여 측정된 모든 데이터를 위상별로 합친 후 합쳐진 데이터를 정극성 영역과 부극성 영역으로 구분하여 각각 10개의 군집으로 그룹화 하였다.

그림 5는 구리 결함의 군집중심 분포를 나타낸 것으로 시간 경과에 따른 군집중심의 최소값과 최대값의 차이는 정극성 영역에서는 209.6 pC에서 180.7 pC으로, 부극성 영역에서는 -233.2 pC에서 -194.9 pC으로 변화하였다. 한편 시간 경과에 따라 특정 위상에 집중되어 있던 군집중심 분포가 넓은

영역으로 확산되어 정극성 영역에서는 50분 경과 이후 80° 부근에 새로운 군집중심이 발생하고, 부극성 영역에서는 20분경과 후부터 전체 위상각 영역에 군집중심이 분포함을 확인하였다.

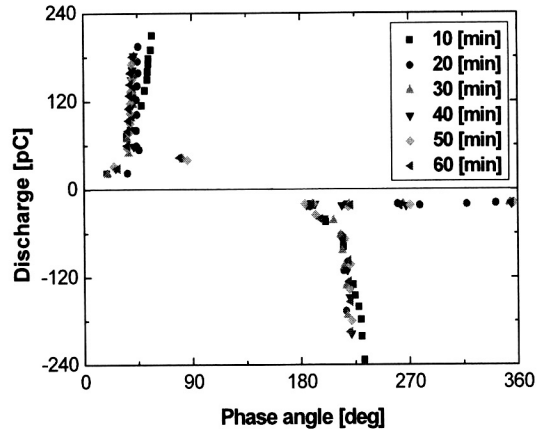


그림 5. 구리 결함의 군집중심 분포.

Fig. 5. Centroid distribution of copper defect.

그림 6은 구리 결함의 군집중심 분포를 나타낸 것으로 시간 경과에 따른 군집중심의 최소값과 최대값의 차이는 정극성 영역에서는 674.7 pC에서 827.2 pC으로, 부극성 영역에서는 -895.9 pC에서 -817.9 pC으로 변화하였다. 한편 시간 경과에 따라 군집중심 분포의 위상영역은 큰 변화가 없었다.

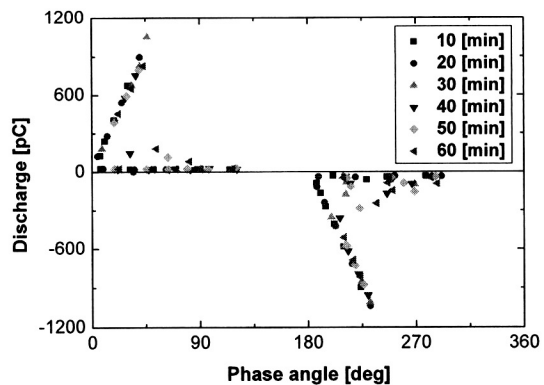


그림 6. 반도체 이물질 결함의 군집중심 분포.

Fig. 6. Centroid distribution of semiconductive substance defect.

3.3 왜도-첨도 분포

왜도(skewness: Sk)와 첨도(kurtosis: Ku)는 합수를 정규 분포에 입각하여 정량화하고 도수 분포의 집중 형태를 전체적으로 측정하는 값이다. 왜도는 자료 분포의 기울어진 방향과 정도를 나타내는 값으로 왜도 계수 값이 클수록 비대칭도는 커져서 분포가 한 쪽으로 치우치게 된다. 정규분포의 왜도는 "0"이며 왜도 계수가 양(+)의 값을 가지면 오른쪽 꼬리분포가 되고, 음(-)의 값을 가지면 왼쪽 꼬리분포가 된다. 첨도는 분포가 얼마나 중심에 집중되어 있는가를 볼 때 사용하며 첨도의 값이 "0"이면 정규 분포이고, "0"보다 크면 정규 분포보다 높은 봉우리를 갖는다. $x(t)$ 를 시계열 신호로 하고, $x(t)$ 의 확률밀도함수를 $P(x)$ 로 했을 때 왜도와 첨도는 식 (1)과 식 (2)로 구할 수 있다.

$$Sk = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} [x(t)^3 p(x) dx]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} [x(t)^2 p(x) dx]^3} \quad (1)$$

$$Ku = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)^4 p(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} [x(t)^2 p(x) dx]^2} - 3 \quad (2)$$

왜도와 첨도를 통하여 부분방전원에 따른 부분방전 발생 특성과 분포의 특성을 알 수 있다. 본 연구에서는 분포의 집중 형태를 분석하기 위하여 정극성 및 부극성 균집중심을 크기함수로 변환한 후 그림 7과 같이 왜도를 x축으로, 첨도를 y축으로 하는 왜도-첨도 플롯을 이용한 통계 해석을 실시하여 부분방전원의 분류를 시도하였다.

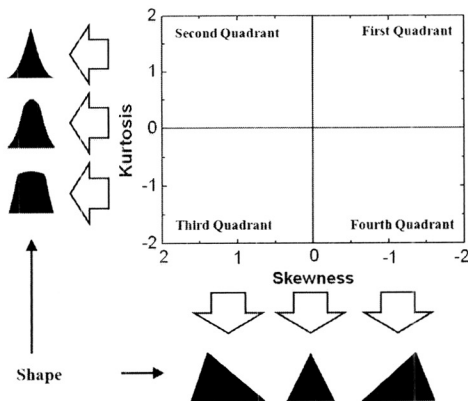


그림 7. 왜도-첨도 플롯.
Fig. 7. Sk-Ku plot.

그림 8은 구리 이물질 결함 시료에 30 kV를 인가한 상태에서 한 시간 동안 측정된 부분방전 데이터를 K-means 군집화로 해석한 후, 정극성 및 부극성 균집중심을 크기함수로 변환하여 왜도를 x축으로, 첨도를 y축의 값으로 표시한 왜도-첨도 플롯이다. 통계적으로 신뢰성 있는 분포의 집중 형태를 파악하기 위하여 전압인가 후 매 10분마다 100 sec(600 cycle × 10 회)동안 측정된 부분방전 데이터를 군집화 하여 왜도와 첨도를 계산하였다. 그 결과 제 4 사분면과 제 2-3 사분면에 걸쳐 분포되어 있었다. 이를 통하여 구리 결함의 부분방전 균집중심 분포 형태는 평균적으로 표준정규분포보다 왼쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다.

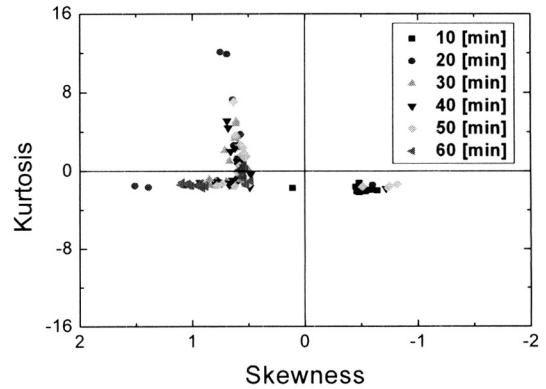


그림 8. 구리 결함의 왜도-첨도 플롯.
Fig. 8. Sk-Ku plot of copper defect.

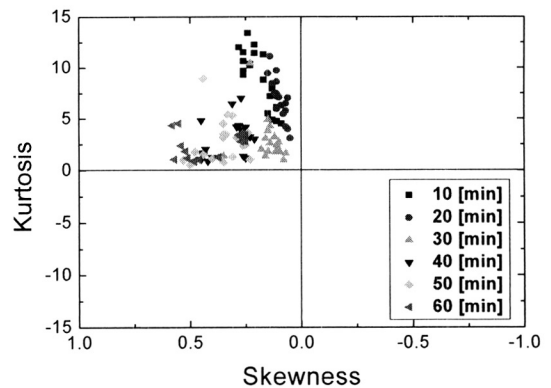


그림 9. 반도체 이물질 결함의 왜도-첨도 플롯.
Fig. 9. Sk-Ku plot of semiconductive substance defect.

그림 9는 반도체성 이물질 결합 시료의 왜도-첨도를 플로트 한 것으로 모든 데이터가 제 2 사분면에 분포되어 있었다. 이를 통하여 구리 이물질 결합 시료 부분방전 군집중심의 분포 형태는 표준정규분포보다 왼쪽으로 치우치고 뾰족한 형태임을 알 수 있다. 컴퓨터를 이용한 측정시스템의 주요한 목적중 하나는 절연체의 다양한 부분방전 패턴을 분석하는 것이다. 일반적으로는 $\phi-q-n$ 분포에서 도출한 방전 전하량의 크기별 발생 빈도수 $H_n(q)$, 발생 빈도수의 위상각에 따른 분포 $H_n(\theta)$, 평균 방전 전하량의 위상각에 따른 분포 $H_{qn}(\theta)$, 최대방전 전하량의 위상각에 따른 분포 $H_q(\theta)$ 를 분석하였으나, 본 연구에서는 새로운 절연 진단 방법으로 특성분포에서 도출한 통계적 파라미터인 왜도와 첨도를 이용하여 부분방전을 발생시키는 방전원의 분류를 시도하였으며 결합의 종류에 따라 그 패턴이 서로 다르게 나타남을 확인 하였다.

4. 결론

계면 결합의 진단을 위하여 케이블 절연재료인 XLPE와 접속재 절연재료인 EPDM 계면에 구리와 반도체 이물질에 의한 인공적인 결합을 발생시킨 시료에 30 kV를 인가하고 한 시간 동안 발생하는 부분방전을 측정 한 후, 방전 데이터의 유사도를 검출한 후 객체정보를 데이터 사이의 거리 정보로 변환하여 복잡하고 대용량인 데이터를 간소화시키는 통계처리 방식인 K-means 군집화를 이용하여 케이블 접속재 계면결합의 부분방전 분포를 해석한 결과, 구리 결합의 군집중심은 0° 와 180° 부근에 국재화 되어 있던 초기 위상 분포가 시간 경과에 따라 위상각 전체로 넓어진 것을 확인할 수 있으며, 반도체성 이물질 결합의 경우에는 한편 시간 경과에 따라 군집중심 분포의 위상영역은 큰 변화가 없었다. K-means 군집화 결과로부터 왜도와 첨도를 구하여 분포의 왜도-첨도를 플로트한 결과 구리 결합은 제 2, 3, 4 사분면에, 반도체성 이물질 결합은 제 2 사분면에 분포함을 확인하여 분포 통계 해석에 의한 부분방전 진단과 부분방전원의 분류가 가능하였다. 본 연구의 방전발생원인 구리 결합과 반도체성 이물질 결합이 각각 도체와 반도체를 대표하는 물질임을 감안할 때, 향후 지속적인 실험을 통한 데이터베이스 구축으로 방전원의 분류와 상태 예측을 위한 보다 정확하고 신

뢰성이 우수한 새로운 절연 진단시스템 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관리자 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 산업자원부, "제 2 차 전력수급기본계획", 산업자원부, p. 47, 2004.
- [2] K. S. Suh, J. H. Nam, J. H. Kim, K. C. Ko, and S. O. Han, "Interfacial properties of XLPE/EPDM laminates", IEEE Trans. on Dielectrics EI, Vol. 7, No. 2, p. 216, 2000.
- [3] 유근양, "지중 케이블 접속재 시공", 전기설비, 18권, 10호, 통권 194호, p. 40, 2001.
- [4] 조정순, 홍진웅, "전력케이블 접속재 XLPE/EPDM 계면의 부분방전 특성", 전기전자재료학회논문지, 20권, 9호, p. 780, 2007.
- [5] R. A. Johnson and D. W. Wichern, "Applied multivariate statistical analysis", Prentice Hall, p. 573, 1992.
- [6] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, "Pattern Classification", John Wiley & Sons Ltd., p. 517, 2001.
- [7] T. Y. Kim, B. C. Ahn, H. J. Lee, D. G. Byun, and J. W. Hong, "The analysis of partial discharge using k-means on ignition coil", Proc. of CMD 2006, p. 160, 2006.
- [8] C. S. Kim and T. Mizutani, "Correlation between change in PD current shapes and ageing by the oxidation of void surface", Trans. on IEEJ, Vol. 122-A, No. 11, p. 983, 2002.
- [9] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment", Temple Press, p. 129, 1989.
- [10] S. Tokunaga, T. Tsurusaki, Y. Z. Arief, S. Ohtsuka, T. Mizuno, and M. Hikita, "Partial discharge characteristics till, breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect", Proc. of 7th ICPADM, p. 1206, 2003.