

## K-means 클러스터링을 이용한 케이블 접속재 계면결함의 부분방전 분포 해석

### Partial Discharge Distribution Analysis on Interface Defects of Cable Joint using K-means Clustering

조경순<sup>1,a</sup>, 홍진웅<sup>1</sup>

(Kyung-Soon Cho<sup>1,a</sup> and Jin-Woong Hong<sup>1</sup>)

#### Abstract

To investigate the influence of partial discharge(PD) distribution characteristics due to various defects on the power cable joints interface, we used the K-means clustering method. As the result of PD number(n) distribution analyzing on  $\Phi$ -n graph, the phase angle( $\Phi$ ) of cluster centroid shifted to  $0^\circ$  and  $180^\circ$  increasing with applying voltage. It was confirmed that the PD quantity(q) and euclidean distance of centroid were increased with applying voltage from the centroid distribution analyzing of  $\Phi$ -q plane. The dispersion degree was increased with calculated standard deviation of the  $\Phi$ -q cluster centroid. The PD number and mean value on  $\Phi$ -q graph were some different by electric field concentration with defect types.

**Key Words** : K-means, Partial discharge(PD), Cluster analysis, Centroid, Euclidean distance

#### 1. 서론

절연체 내에 보이드나 이물질 등 결함부가 존재하면 부분방전이 발생하는데, 부분방전 펄스의 에너지양은 미세하나 부분방전의 발생이 매 주기 반복적이고 그 위치가 국부적으로 밀집되어 있기 때문에 제 특성의 열화를 심각하게 진행시키는 주원인으로 알려져 있다[1]. 따라서 사고를 미연에 방지하기 위한 절연 진단 기술로 부분방전측정이 주목받고 있으며 많은 연구가 되고 있다[2]. 특히 케이블 포설시 취약부분인 접속재부분에서 발생하는 부분방전 현상을 분석하기 위해서는 최적의 전극 시스템을 구축하고, 그 전극 시스템에서 발생하는

부분방전 특성을 검토할 필요가 있다[1,3].

한편 K-mean 군집분석(cluster analysis)은 흩어진 개체 사이의 유사성과 거리로 군집을 형성하고, 형성된 군집의 특성을 파악하여 다변량 자료를 각 특성의 유사성에 따라 몇 개의 그룹으로 나눔으로서 군집들 간의 관계를 보다 쉽게 탐색하는 통계분석이다. 군집분석 기법은 변수들에 대한 역할 정의 없이 의미 있는 자료구조를 얻을 수 있으며, 거의 모든 형태의 데이터에 적용가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에 공학, 통계학, 패턴 인식 등 여러 분야에서 광범위하게 연구가 되고 있다[4]. 특히 부분방전 특성은 많은 데이터로 통계적으로 불규칙성이 수반되기 때문에 적절한 통계처리가 매우 중요함을 보고하고 있다[5]. 따라서 본 논문에서는 케이블 접속재 진단을 위한 전문가 시스템 개발하기 위하여 K-means 클러스터링을 이용하여 부분방전 특성인 위상과 빈도수( $\Phi$ -n), 위상과 방전전하량( $\Phi$ -q)의 군집 분포를 해석하고 분석한 결과를 소개한다.

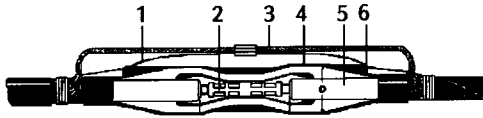
1. 광운대학교 전기공학과,  
충북대학교 중전기기 미래기술개발연구센터  
(서울시 노원구 월계동 447-1)

a. Corresponding Author : kscho@seoil.ac.kr

접수일자 : 2007. 9. 3

1차 심사 : 2007. 10. 12

심사완료 : 2007. 10. 23



No.	Classification	Material
1	Wire	Cu
2	Connector	Cu(+Tin Plate)
3	Metallic Screen	Cu
4	Insulator	EPDM
5	Insulator	XLPE
6	Molded Shield	EPDM

그림 1. 조립형 직선 접속재.

Fig. 1. Premolded type power cable joint.

## 2. 시료 및 실험

### 2.1 시료

케이블 접속재 작업은 보통 맨홀에서 수작업으로 이루어지므로 환경이 열악하고 작업자의 숙련도에 상당한 영향을 받는다. 따라서 우리나라에서는 그림 1과 같은 조립형 접속재를 사용 현장에서 작업 내용을 최소로 줄이고 있지만, 케이블과 접속재가 연결되는 계면에 금속 이물질이나 케이블의 반도체 층에 이물질이 삽입될 수 있고, 절단 작업 시 칼날에 의한 흠집이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 접속재에서 발생하는 사고의 대부분은 접속계면에서 발생된다[6]. 이상과 같이 계면결합에 의한 부분방전특성을 조사하기 위하여 접속재 내부중앙에 직경 0.6 mm, 길이 2 mm인 구리와 길이 2 mm, 너비 0.6 mm 두께 0.6 mm인 반도체 층 재료 및 길이 5 mm, 깊이 0.6 mm인 칼날에 의한 인공 보이드를 만들었다. 그리고 실험 결과의 신뢰도를 높이기 위해 154 kV용 케이블(L. co.)의 절연층 XLPE를 1 mm 두께로 사용하였으며, EPDM은 조립형 직선 접속재 제조사(P. co.)에서 1 mm 두께로 제작한 것을 사용하였다.

### 2.2 부분방전 측정

측정 시료는 XLPE와 EPDM 시트를 스프링(바넷 정수: 25 mm/80 kg)에 의해 2 kg/cm<sup>2</sup>의 변압 구조로 전극 시스템을 구성한 후 연면방전을 방지하기 위하여 모델 전극 전체를 100 cSt의 실리콘유 안에 담가 실험하였다. 실험은 부분방전 개시부터 30 kV 까지 600 cycle 동안 측정하였다. 이때 발생하는 부분방전을 RC검출회로, 하이패스필터 및 앰프를 통해 데이터 취득 시스템에 입력하였다.

### 2.3 K-means 클러스터링

K-means 클러스터링은 무한히 많은 수의 입력 벡터를 미리 정해진 K개의 대표값(중심값)으로 사상(mapping)시키는 집단화 알고리즘으로써 임의의 입력벡터에 대한 Vector Quantizer의 양자화에러를 최소로 하기 위해 반복적으로 군집의 중심값을 갱신하는 알고리즘이다. 즉 취득한 데이터를 통해 얻고자 하는 군집의 개수를 사용자가 지정하도록 되어있고, 사용자가 지정한 개수만큼의 군집 중점을 다차원 측정공간상에 위치시킨다. K-means 클러스터링 알고리즘에 의한 군집화 과정은 초기화, 군집화, 중심점 갱신, 반복 및 종료의 4단계로 구분되며, K-means 클러스터링 알고리즘은 객체들은 군집들의 임시 평균벡터들 중에서 가장 가까운 군집에 할당되며, 모든 객체들이 이러한 방법으로 분류된 후 새로운 군집중심이 계산된다[7]. 이렇게 수정된 군집중심은 영상 및 신호 데이터의 재분류 근거로 사용되고, 군집중심의 위치가 더 이상 변하지 않을 때까지 알고리즘의 반복이 지속된다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 부분방전 특성

표 1은 인가전압에 따른 결합별 부분방전 발생빈도수 N과 충전하량 Q pC를 나타낸 것으로 구리(Copper)에 의한 결합 시료의 경우 전압상승에 따라 N은 큰 변화가 없었지만, 충전하량은 38401 pC에서 111006 pC으로 급격히 상승하다가 117941 pC으로 포화됨을 확인했으며, 반도체재료(Semi)와 칼날 상처(Void) 시료는 전압상승에 따라 발생수와 충전하량의 상승을 관측하였다. 또한 정극성(0°~180°)과 음극성(180°~360°) 영역으로 나누어 방전의 크기와 발생빈도수를 살펴보면 거의 같게 나타나지만 때로는 다르게 나타나는 수도 있으며, 반도체 이물질에 의한 결합처럼 양쪽의 반주기 사이에서 2:1 차이 차이를 보이기도 한다. 이와 같은 현상은 보이드에서 발생하는 부분방전의 전형적인 특성이다[1]. 구리와 반도체재료 결합을 포함한 시료도 구리 이물질 양쪽 끝부분에 존재하는 미소공극 또는 반도체재료 모서리에 생성된 미소 공극들에서 부분방전이 발생하였기 때문으로 판단된다. 특히 반도체재료 결합의 경우에는 굉장히 큰 방전전하량과 빈도수를 관측하였는데, 이것은 반도체재료 모서리들에 집중된 전계 분포에 의해 방전이 발생하기 때문으로 판단된다.

표 1. 인가전압에 따른 부분방전 발생수와 총 전하량.

Table 1. Number and total discharge quantity of partial discharge with applied voltage.

Defect	Applied Voltage	Positive region		Negative region	
		N	Q [pC]	N	Q [pC]
Copper	10 [kV]	438	17,812	594	-20,589
	20 [kV]	466	52,617	535	-58,389
	30 [kV]	399	58,675	452	-59,266
Semi	10 [kV]	850	56,411	590	-81,241
	20 [kV]	3,185	150,390	1,905	-270,193
	30 [kV]	4,366	228,170	2,367	-298,873
Void	12 [kV]	74	3,026	88	-4,001
	20 [kV]	279	37,018	335	-31,223
	30 [kV]	504	77,456	600	-66,303

이처럼 결함을 발생시키는 이물의 종류와 이때 형성되는 보이드의 형태에 따라 부분방전의 양상은 각기 다르게 나타났다.

### 3.2 K-means 클러스터 분포

군집 데이터는 정극성 영역과 부극성 영역으로 구분하여 군집화 시켰으며, 군집화 개수는 각각 10개로 고정하였고 K-means 클러스터링의 초기 중심값은 랜덤하게 설정하였다. 그림 2는 구리 결함에서 발생한 부분방전의  $\Phi$ -n 군집 방전 횟수 분포를 나타낸 것으로 위상각에 따른 방전 발생수를 군집화한 것이다. 구리 결함 시료 군집의 방전 횟수 최대값과 최소값 사이의 편차는 정극성에서는 14.1에서 7.0으로 부극성에서는 7.5에서 4.2로 감소하는데, 이것은 부분방전 초기에는 부분방전이 특정위상에서 집중적으로 발생하지만 전압 상승에 따라 집중도가 낮아지고 부분방전이 발생위상영역 전반에 걸쳐 나타남을 의미한다.

그림 3은 구리 결함에 따른  $\Phi$ -q 군집의 중심값 분포를 나타낸 것으로 위상각에 따른 방전전하량을 군집화 한 것이다. 군집의 중심값은 10 kV 인가시 정극성은 13 pC에서 68 pC, 부극성은 -23 pC에서 -66 pC 이었으며, 30 kV 인가시 정극성은 24 pC에서 233 pC, 부극성은 -20 pC에서 -217 pC 으로 이 결과는 표 1의 부분방전 발생수 및 총전하량으로 10 kV 에서 계산할 수 있는 부분방전의 평균방전 전하량이 정극성 40.8 pC, 부극성 -41.1 pC 이고 30 kV 로 인가 시 정극성 148.4 pC, 부극성 -118.7 pC인 것과 비교할 때 타당하다 할 수 있다. 30 kV로 인가전압이 상승함에 따라 부분방전 전하량의 크기가 최대한

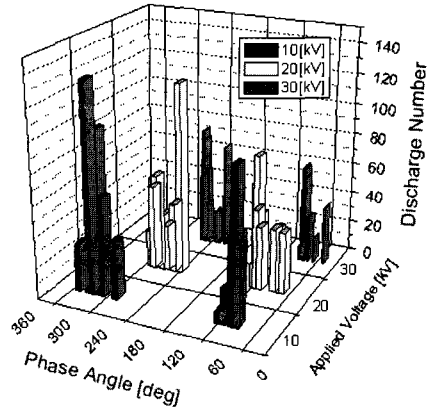


그림 2.  $\Phi$ -n 군집의 방전 횟수 분포 (구리).

Fig. 2. Discharge number distribution of  $\Phi$ -n cluster (copper).

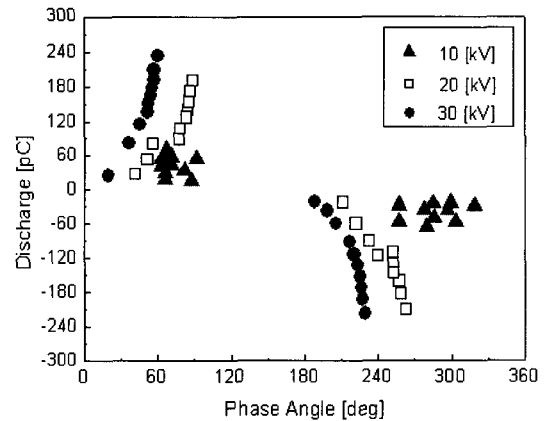


그림 3.  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포 (구리).

Fig. 3. Centroid distribution of  $\Phi$ -q cluster (copper).

위상각은 59°와 229°로 변위하여  $\Phi$ -n 군집의 방전 횟수가 가장 큰 위상각인 54°와 225°에 군집하였다.

그림 4는 반도체재료 결함 시료에 인가전압을 승압시켰을 때의 군집 분포를 살펴보면 10 kV 인가시 정극성 영역에서는 67°에서 141개로 가장 많이 포함하고 있으며, 부극성 영역에서는 264°에서 94개의 객체를 포함하고 있다. 방전 횟수 편차는 정극성 영역에서는 4.3 이었고 부극성 영역에서는 18.8 이며 인가전압 상승에 따른 객체수 분포 편차는 정극성에서는 5.4로 변함이 없었으나 부극성에서는 5.2로 낮아졌다.

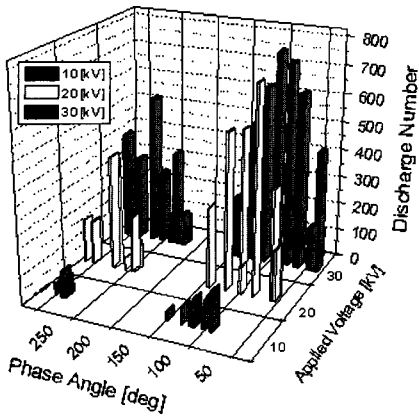


그림 4.  $\Phi$ -n 군집 방전횟수 분포 (반도체재료).  
 Fig. 4. Discharge number distribution of  $\Phi$ -n cluster (semiconducting materials).

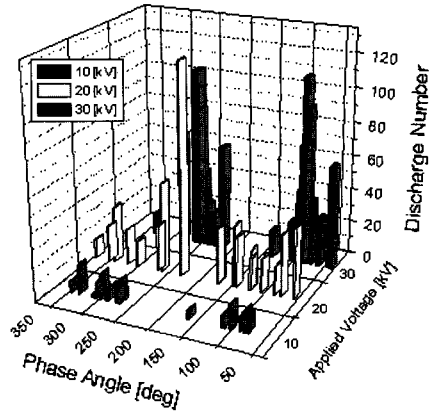


그림 6.  $\Phi$ -n 군집 방전 횟수 분포 (보이드).  
 Fig. 6. Discharge number distribution of  $\Phi$ -n cluster (void).

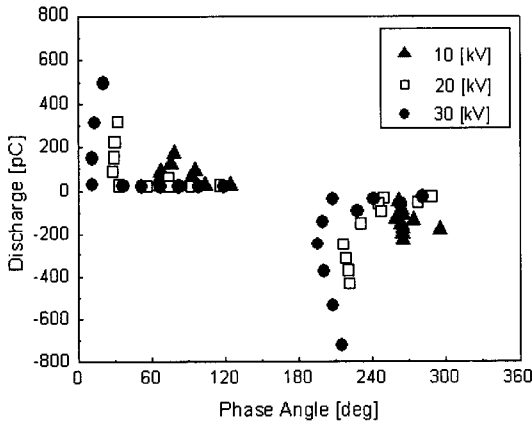


그림 5.  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포 (반도체재료).  
 Fig. 5. Centroid distribution of  $\Phi$ -q cluster (semiconducting materials).

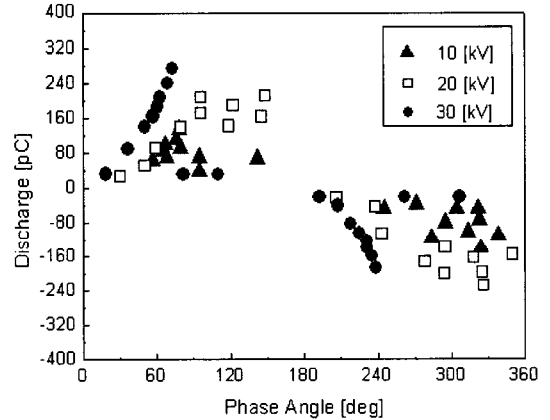


그림 7.  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포 (보이드).  
 Fig. 7. Centroid distribution of  $\Phi$ -q cluster (void).

반도체 재료 결함 시료의 부분방전에 대한  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포는 그림 5와 같고  $\Phi$ -n 군집의 방전 횟수 분포와 종합하면 10 kV에서는 부분방전 전하량의 크기가 최대인 위상각과 부분방전 발생 횟수가 가장 많은 위상각이 정극성 영역에서는 각각 78°와 67°, 부극성에서는 각각 265°와 264°로 근접하면 인가전압의 상승에 따라 20°와 67°, 214°와 241°로 차이가 발생함을 확인 할 수 있었다.

한편 구리 결함과 반도체 재료 결함 시료의 경우 부분방전 전하량의 크기가 최대인 군집의 위상각은 전압상승에 따라 정극성에서는 0° 부근으로 부극성 영역에서는 180° 부근으로 이동함을 확인하였다.

그림 6은 보이드 결함에 의한  $\Phi$ -n 군집의 방전 횟수 분포를 나타낸 것으로 전압인가에 따른 객체 수 편차는 정극성 영역의 경우에는 10 kV 인가시 13.32에서 30 kV 인가시 6.8로 감소하는데 비하여 부극성 영역에서는 10 kV 인가시 3.5에서 30 kV때 2.5로 큰 변화가 없었다.

그림 7은 보이드에 의한 결함 시료의  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포를 나타낸 것으로 12 kV 인가시 90°와 300° 부근에 국재화 되어 있던 초기 위상 분포가 20 kV에서는 위상각 전체로 넓어진 후 30 kV에서는 0°와 180° 부근으로 집중되었다.

표 2. 중심점간 유클리드 거리.

Table 2. Euclidean distance among centroids.

Defect	Applied Voltage	Positive region			Negative region		
		Min	Max	Avg	Min	Max	Avg
Copper	10 [kV]	8.1	58.9	26.9	13.3	67.5	32.5
	20 [kV]	13.5	170.1	67.0	12.8	194.7	70.8
	30 [kV]	12.4	212.4	74.6	18.0	200.7	82.4
Semi	10 [kV]	14.9	153.2	65.5	15.1	179.9	66.2
	20 [kV]	16.7	307.3	126.1	27.4	416.2	183.9
	30 [kV]	14.8	485.1	179.1	30.8	695.7	274.5
Void	12 [kV]	11.6	90.7	44.1	18.1	79.8	41.9
	20 [kV]	31.7	219.1	92.1	31.2	237.9	98.7
	30 [kV]	21.8	246.7	115.3	18.0	180.5	87.5

표 2는 인가전압 상승에 따른 중심점간 유클리드 거리의 최소(Min), 최대(Max) 및 평균값(Avg)을 정리한 것으로 전압상승에 따라 최소 및 최대값들은 불규칙적인 변화 하였지만 평균값은 결함의 종류에 관계없이 대부분 증가하는 경향을 나타내어 전압상승에 따라 중심점들의 분산이 커짐을 확인하였다.

3.3  $\Phi$ -q 군집 중심점의 평균값과 표준편차

그림 8, 9는 구리 결함과 반도체 재료 결함의  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포로부터 구한 평균값에 부분방전량 표준편차와 위상각 표준편차를 표시한 것이다. 평균값의 전하량 변화를 살펴본 결과 구리 결함 시료와 반도체 재료 결함 시료는 전압상승에 따라 그 크기가 커짐을 확인 하였다. 한편 중심점은 보이드 결함을 제외하고는 전압상승에 따라 정극성에서는 0° 부근으로 부극성 영역에서는 180° 부근으로

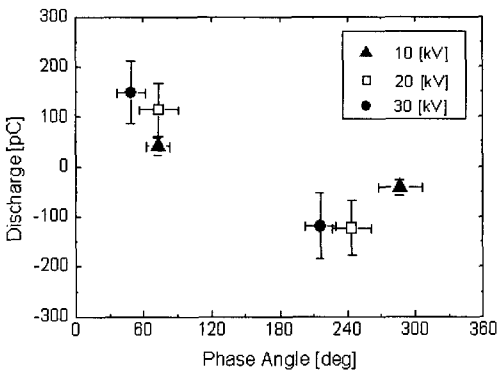


그림 8.  $\Phi$ -q 군집 중심점의 평균값과 표준편차 (구리).

Fig. 8. Mean value and standard deviation of  $\Phi$ -q cluster centroid (copper).

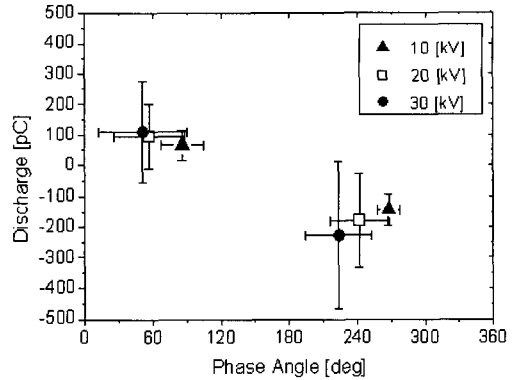


그림 9.  $\Phi$ -q 군집 중심점 평균과 표준편차 (반도체 재료).

Fig. 9. Mean value and standard deviation of  $\Phi$ -q cluster centroid (semiconducting materials).

이동함을 확인하였다.

그림 10은 보이드 결함 시료의  $\Phi$ -q 군집의 중심점 분포로부터 구한 평균값에 부분방전량 표준편차와 위상각 표준편차를 표시한 것이다. 보이드 결함의 경우에는 전압 상승에 따라 경향이 일정하지 않았는데 이것은 전압 상승에 따라 부분방전 발생횟수가 급격히 상승하였기 때문으로 판단된다. 부분방전량의 표준편차와 위상각의 표준편차는 결함의 종류와 관계없이 전압상승에 따라 그 크기가 커짐을 확인 하였다. 특히 위상각의 표준편차 변화를 통하여 인가전압 상승에 의하여 부분방전이 넓은 위상각에 걸쳐 발생한 것임을 알 수 있다.

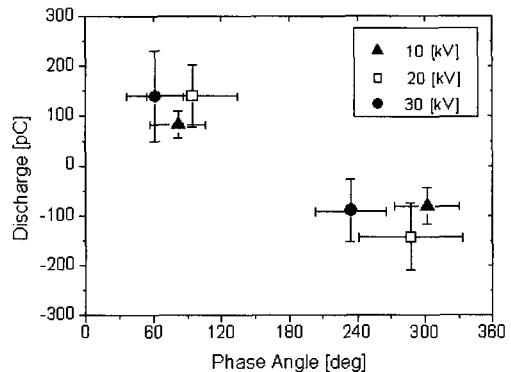


그림 10.  $\Phi$ -q 군집 중심점 평균과 표준편차 (보이드).

Fig. 10. Mean and standard deviation of  $\Phi$ -q cluster centroid (void).

#### 4. 결론

K-means 클러스터링을 이용하여 케이블 접속재 계면결합의 부분방전 분포를 군집화하여 해석한 결과, 구리 결합과 반도체재료 결합 시료는  $\Phi$ -n 군집에서 부분방전 발생수가 최대인 군집과  $\Phi$ -q 군집에서 방전전하량이 최대인 군집의 위상각은 전압상승에 따라 정극성에서는  $0^\circ$  부근으로 부극성 영역에서는  $180^\circ$  부근으로 이동하였다. 보이드에 의한 결합 시료는  $\Phi$ -n 군집의 부분방전 발생수가 최대인 군집과  $\Phi$ -q 군집에서 방전전하량이 최대인 군집의 위상각은  $90^\circ$ 와  $300^\circ$  부근에 국재화 되어 있던 초기 위상 분포가 전압 상승에 따라 위상각 전체로 넓어진 후 30 kV 에서  $0^\circ$  와  $180^\circ$  부근으로 집중됨을 확인하였다.  $\Phi$ -q 군집에서 얻은 방전 전하량과 중심점간의 유클리드 거리는 결합의 종류와 관계없이 인가전압 상승에 따라 크기가 증가하였다.  $\Phi$ -n 군집의 방전횟수 분포 편차와  $\Phi$ -q 군집의 중심점 평균값은 결합의 종류에 따라 그 분포가 서로 달랐는데 이것은 부분방전 발생원인 보이드의 형상과 그에 따른 전계집중도가 결합의 종류에 따라 다르기 때문으로 판단된다. 앞으로 부분방전을 군집화한 군집 분포결과를 데이터베이스화 하면 계면에 존재하는 여러 가지 결합의 상태를 분류할 수 있을 것이며 새로운 절연 진단기법의 개발을 기대할 수 있다.

#### 참고 문헌

[1] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-voltage Equipment", Butterworths, p. 52, 1989.

[2] Cavallini, A., Montanari, G. C., Contin, A., and Pulletti, F., "A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 2, p. 23, 2003.

[3] K. Uchida, T. Hirata, and H. Takehana, "Partial discharge and breakdown characteristics of various defects in XLPE cable joints", T.IEE Japan, Vol. 115-B, No. 10, p. 1185, 1995.

[4] R. A. Johnson and D. W. Wichern, "Applied multivariate statistical analysis", Prentice Hall, p. 573, 1992.

[5] Chatpattananan, V., Pattanadech, N., and Yutthagowith, P., "Partial discharge classification on high voltage equipment with K-means", ICPADM 2006, p. 191, 2006.

[6] 유근양, "지중 케이블 접속재 시공", 전기설비, 18권, 10호, 통권 194호, p. 40, 2001.

[7] 변두균, 김원중, 이강원, 홍진웅, "K-means 군집화 기법을 이용한 개폐장치의 부분방 패턴 해석", 전기전자재료학회논문지, 20권, 10호, p. 901, 2007.

[8] 北川賢司, "信頼性工學入門", コロナ社, p. 102, 2004.

[9] T. Tanaka, "Internal partial discharge and material degradation", IEEE Trans. DEI, Vol. 21, No. 6, p. 899, 1986.

[10] R. O. Duda, P. E. Hart, and D. G. Stork, "Pattern Classification", John Wiley & Sons Ltd, p. 517, 2001.