

군집 최적화를 이용한 열화 진단 알고리즘 개발

김기준^{1,a}

¹ 인천대학교 메카트로닉스공학

The Algorithm Development of Aging Diagnosis Using Swarm Optimization

Ki-Joon Kim^{1,a}

¹ Department of Mechatronics Engineering, University of Incheon, Incheon 407-772, Korea

(Received December 24, 2012; Accepted January 7, 2013)

Abstract: In this paper, properties of pattern using LBG (Linde-Buzo-Gray) Algorithm was explored including the exactness of K-means algorithm and process time of EM (Expectation Maximization) algorithm in order to develop analysis algorithm of partial discharge pattern in a cable using acoustic data analysis system. Partial discharge was measured by generating inner fault due to lamination of XLPE which is used for cable insulation material. Discharge pattern was analysed by changing the number of swarm article to 2, 4, and 6 in order to interpret swarm structure and properties.

Keywords: Swarm, Optimization, Aging diagnosis, LBG Algorithm, EM algorithm

1. 서 론

21세기에는 사람들의 생활이 한층 더 다양해지고 고도화되어 전기에너지의 사용 비율은 해가 거듭될수록 증가되고 있다. 우리나라의 경우 2005년 최대 수요가 5,294만[kW]에서 2017년에는 6,874만[kW]로 연간 4~5[%] 이상 증가될 전망이다. 현재 우리나라의 전력은 도심으로부터 멀리 떨어진 곳에서 발전하여 장거리 송전시켜 수요지에서 사용되는 형태로 되고 있다. 전기에너지의 공급원인 발전소는 환경 문제나 입지 제약을 고려하여 해안가 및 산악지대에 위치하고 있으므로 발전된 전력을 효율적으로 전송하기 위

해서는 고전압으로 송전하는 것이 필요하다 [1,2]. 또한 수요지인 도심지에서는 안전 문제로 인해 전력선을 지중으로 가설하는 것이 점차적으로 증가하는 형태를 취하고 있다.

현재 우리나라에서는 초고압용 지중전력 케이블의 절연물로 가고 폴리에틸렌 (cross-linked polyethylene, XLPE)을 사용하고 있으며, 수명을 10~20년을 볼 때, 1980년대 후반부터 가속화된 지중 케이블이 거의 20년이 경과되면서 서서히 사고에 대한 예방이 필요한 실정이다. 한국전력공사에서 발표한 통계 보고에 의하면 2001년도 지중 배전선로 고장 분석 및 예방대책 자료에서 1997년부터 2001년까지 설비별 고장사고 중 케이블 접속재가 약 82[%]를 차지하고 있으며, 원인별 고장 통계에 의하면 외상에 의한 사고가 39[%], 열화에 의한 사고가 44[%]를 차지하고 있다. 고분자 물질은 절연성능이 우수하고 가공 및 시공에 많은 장점을 가지고 있지만, 열화에 대한 특성은 매우 복잡적으로

a. Corresponding author: kijoon@incheon.ac.kr

발생하기 때문에 정확한 원인을 찾기가 어려우며, 더욱이 사용 환경 변화에 따른 복합적 열화가 진행되고 노이즈로 인해 정확한 진단이 매우 어려운 현실이다 [2-4]. 따라서 복합적 열화의 작용에 의한 계통 및 전력기기의 신뢰성 유지를 도모하기 위해서는 우수한 절연재료와 절연설계를 통한 내부 결함이 없는 절연기기를 제작하여야 하며, 가동 중인 기기의 정확한 방전패턴분석을 통한 절연열화 진단시스템 구축은 매우 중요한 과제이며, 특히, 무인화 설비를 통한 전력기기의 정확한 진단은 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 패턴 해석기법으로 새롭게 대두되고 있는 K-means 알고리즘은 학습과정에서 항상 일정한 크기의 코드 북을 생성하므로 사용자 편의성을 고려하여 학습 데이터가 충분치 못한 신호에서는 많은 집단화 오차를 발생시킬 수 있다. 또한 학습 데이터 분포가 특수한 형태를 나타낼 때, 분할 벡터의 방향을 잘못 선택하게 되면 어쩔 수 없이 양자화 에러 및 수렴 속도는 크게 증가하게 된다. 이는 전체 데이터 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다 [5~8].

본 논문에서는 소규모 음성 데이터 분석 시스템을 이용하여 케이블에서 발생하는 부분 방전의 패턴을 분석하는 알고리즘을 개발하기 위해 K-means 알고리즘의 정확성과 EM (expectation maximization) 알고리즘의 처리 속도를 포함한 LBG (linde-buzo-gray) 알고리즘을 이용하여 패턴의 특징점을 조사하였다. 이를 위해 케이블 절연재료로 사용되는 XLPE를 적층하여 내부 결함을 발생시켜 부분방전을 측정하였으며, 방전패턴에 대해 군집의 개수를 2, 4, 6으로 변화시키면서 특징 및 군집 구조에 대해서 해석해보았다.

2. 실험 방법

2.1 군집화 기법

대부분의 패턴인식 시스템은 교사와 비교사 학습방법이 있으며, 본 논문에서는 주어진 데이터의 군집화 형태를 조사하기 위한 것으로 비교사 학습 방법을 적용하였다. 비교사 학습은 클리스 라벨 ω_i 가 주어지지 않고 특정 벡터 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 만으로 이루어진 데이터 집합이 주어질 때 사용하며, 결국 데이터 마이닝의 클러스터링은 비교사 학습을 통해 데이터를 유사한 것끼리 적절하게 모아주는 방법을 적용한다.

그림 1에서는 각각의 알고리즘을 이용하여 벡터 양

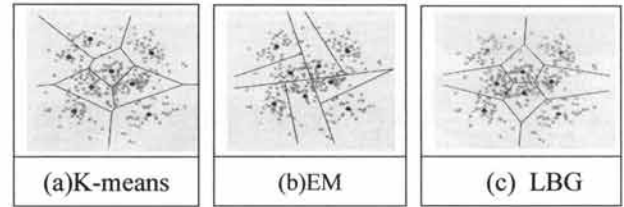


Fig. 1. Vector quantization and clustering.

자화인 클러스터링을 위해 N개의 특징 벡터들의 집합을 K개의 특징 벡터들의 집합으로 사상하는 것이며, 클러스터의 중심들인 코드 벡터들을 특징 벡터에 대한 데이터의 밀도가 가장 높은 특징 공간의 한 지점에 놓아야 하는데, 이를 위해 K-mean 알고리즘과 EM알고리즘의 장점을 이용한 LBG알고리즘을 사용하였다 [9]. LBG 알고리즘은 EM알고리즘을 이용하여 초기 중심을 잡고, 표준 K-means 방법을 중심점을 조정하는 방법으로 속도와 군집화의 정밀도를 높이 방법을 적용하였다.

본 연구에 적용한 클러스터링 알고리즘을 정리하면 다음과 같다 [6].

- 단계 1: Initialization: 모든 입력 벡터에 대한 하나의 중심값을 설정한다.

$$C_1^1 = \frac{\sum_{all} x_{(p)}}{N_T} \quad (1)$$

(단, N_T 는 벡터의 수)

- 단계 2: Searching: 현재의 모든 클러스터 중 최대 분산을 갖는 클러스터를 검출한다.

$$\bar{k} = \arg \max \sum (S_k) \quad (2)$$

(단, $\sum (S_k)$ 는 k번째 클러스터의 분산, S_k 는 k번째 클러스터)

- 단계 3: Splitting: 최대 분산을 갖는 클러스터의 중심값을 이동시켜 둘로 분할하고, 이때 분할 방향은 다음과 같이 분산을 고려하여 분할하고자 하는 클러스터의 멤버를 양분하도록 한다.

$$n = \arg \max_{all j} d(c_i, x_j) \quad (3)$$

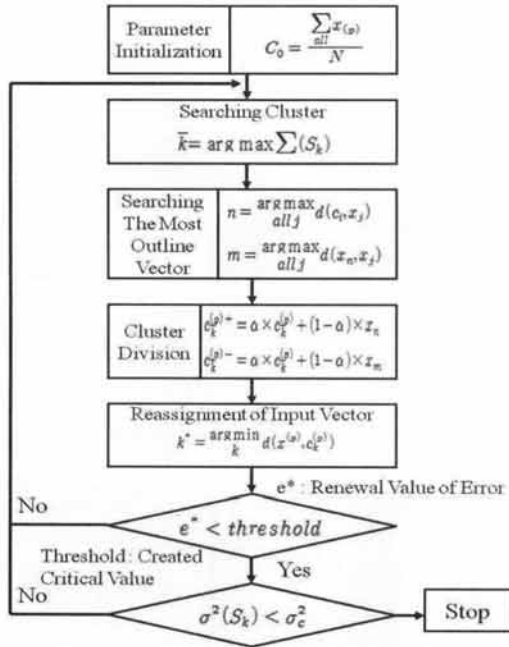


Fig. 2. The flow chart of LBG algorithm.

$$m = \operatorname{argmax}_{\text{all } j} d(x_n, x_j) \quad (4)$$

$$c_k^{(p)+} = \alpha \times c_k^{(p)} + (1 - \alpha) \times x_n \quad (5)$$

$$c_k^{(p)-} = \alpha \times c_k^{(p)} + (1 - \alpha) \times x_m \quad (6)$$

(단, $0.8 \leq \alpha \leq 0.9$, c_k 는 k 번째 클러스터의 평균값)

- 단계 4: Clustering: 모든 입력벡터에 대한 분할된 각 클러스터와의 유클리드 거리를 측정하여 가장 작은 거리를 갖는 클러스터의 멤버벡터로 집단화한다.

$$k^* = \operatorname{argmin}_k d(x^{(p)}, c_k^{(p)}) \quad (7)$$

- 단계 5: Centroid update: 각 클러스터의 멤버벡터를 통해 클러스터의 중심점을 갱신한다.

$$C_{k^*} = \frac{1}{N_{k^*}} \sum_{x \in S_{k^*}} x \quad (8)$$

- 단계 6: Termination 1: 오차의 갱신값이 설정된 임계값 이하이면 '단계 7'을 수행하고, 그렇지 않으면 '단계 4'로 되돌아간다.

- 단계 7: Termination 2: 각 클러스터들의 분산이 임계값 이하이면 작업을 종료하고, 그렇지 않으면 '단계 2'로 되돌아가 반복하여 수행한다.

그림 2는 제안한 LBG 알고리즘의 흐름도를 나타내고 있다 [6].

2.2 시료

본 실험에서 사용한 시료는 그림 3과 같이 154[kV] 케이블 절연층 XLPE를 두께 800[μm]의 판상으로 크기 60×70[mm]로 제작하여 사용하였다.

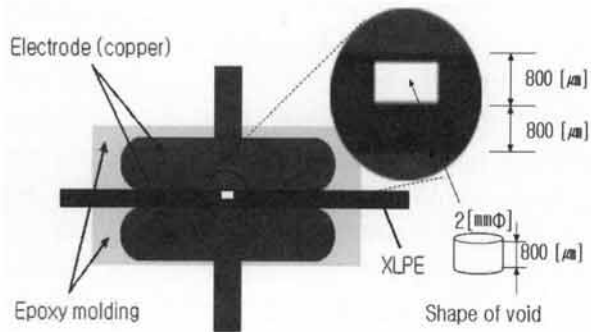


Fig. 3. A sample and electrode shape.

또한 시료의 보이드 특성을 조사하기 위하여 상부층에 지름 2[mm] 원기둥 보이드를 삽입하였다. 실험에서 전극은 평판 대 평판을 사용하였고, 일정한 압력을 유지하기 위하여 스프링을 이용하였으며, 연면방전 및 코로나방전을 방지하기 위하여 상부전극과 하부전극을 에폭시로 몰딩하여 실험하였다. 그리고 실험중 연면방전을 억제하기 위해 점도 1,000[cSt]인 실리콘 오일 내에서 실험하였고, 그림 3은 시료가 삽입된 전극의 형상을 나타내고 있다.

2.3 부분방전 측정

XLPE 시료의 부분방전 특성인 $\phi-q-n$ 분포를 고찰하기 위해 AVO Co.에서 제작한 그림 4의 부분방전 측정장치를 이용하여 AC 60[Hz] 전압으로 방전 특성을

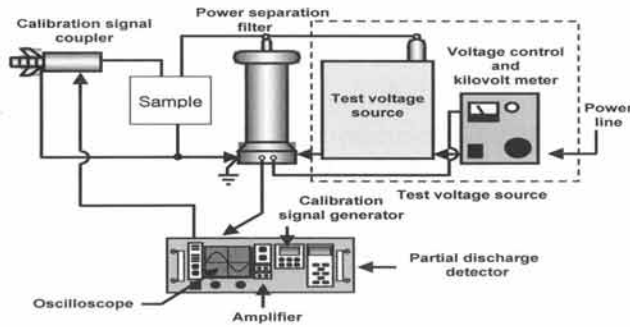


Fig. 4. The measurement circuit of partial discharge.

실험하였다. 검출기에 교정기 (calibration signal coupler)를 연결하여 부분방전 측정 장치를 50[pC]으로 교정하여 최대 검출 전하량을 600[pC] 이하로 설정한 후 측정하였다. 모든 실험은 실리콘 오일 내에서 실시하였으며, 측정된 데이터는 DAQ보드를 거쳐 컴퓨터로 저장했으며, 측정은 전압 인가 후 10[sec] (600[cycle]) 동안 발생하는 방전을 검출하였다. 데이터 처리는 LabView를 이용하여 발생한 위상과 전하량을 사인과 한주기에 적층한 후 동일 전하량의 값이 동일 위상에서 발생한 것을 방전 빈도 수로 처리하였다. 또한 C++로 평균 방전 및 극성 별 전하량 및 방전 빈도 수를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 $\phi-q-n$ 분포

XLPE 보이드 특성을 알아보기 위해 XLPE 판상시료의 중심에 인공 보이드 (지름 2[mm ϕ])를 삽입한 후 보이드 삽입 시료를 상부층으로, 보이드가 없는 층을 하부층으로 적층하여 인가전압에 따른 부분방전을 측정하였다.

그림 5는 측정된 부분방전의 $\phi-q-n$ 분포를 나타내고 있으며, 그림 (a)는 전압 10[kV] 인가 시 $\phi-q-n$ 분포로 정극성 영역에서는 0° ~ 80° 위상에서 방전이 발생하였다. 정극성 영역에서는 5°와 50° 위상에서 방전이 집중적으로 나타났으며, 방전발생 빈도수는 5°에서 140회, 50°에서 212회 발생하였다. 또한 전하량이 200[pC] 이상인 방전도 발생하였으나, 그 빈도수는 1회에 그쳤으며, 대부분의 방전은 전하량이

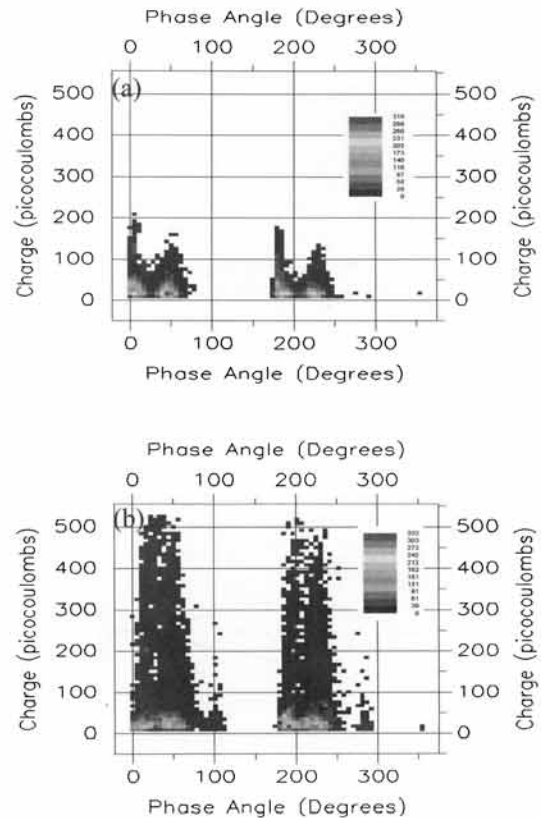


Fig. 5. $\phi-q-n$ distribution of XLPE (air void). (a) 10 [kV], (b) 15 [kV].

25[pC]인 방전이였다. 부극성 영역에서는 180° ~ 300° 부근에서 방전이 나타났으며, 최대 방전전하량은 정극성영역과 비슷한 192[pC]이였다.

주로 방전이 발생하는 위상도 190°와 220°에서 나타났으며, 최대방전 빈도수는 25[pC]의 방전이 231회 발생하였다. 그림 (b)는 전압을 15[kV]로 승압하였을 때의 $\phi-q-n$ 분포로서, 정극성 영역에서는 방전이 0° ~ 130°로 방전발생 영역이 증가하였으며, 방전전하량도 500[pC] 이상인 큰 방전도 발생함을 확인할 수 있었다. 그러나 대부분은 전하량이 25~50[pC]인 방전이였다. 방전이 주로 발생하는 위상의 10[kV]와 동일하게 정·부극성 영역에서 각각 2 지점에서 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 보이드시료의 방전은 위상이 변화는 위치(0°와 180°)에서 방전이 개시되었으며, 방전발생 위상은 정극성 영역에서는 5°~130°에서 0°~80°로 줄었지만, 방전 빈도 수는 2배 이상 발생함을 확인할 수 있었다.

Table 1. Partial discharge values of XLPE.

Classification	Applied Voltage [kV]	Discharge Current [nA]	Positive Discharge Number	Negative Discharge Number	Total Discharge number
Air Void	10	29.09	2296	1606	3902
	15	98.91	5860	6651	12511
	20	149.32	9119	9218	18336

Classification	Applied Voltage [kV]	Positive Discharge [pC]	Negative Discharge [pC]	Total Discharge [pC]
Air Void	10	2.0564E+05	1.0159E+05	3.0722E+05
	15	6.1375E+05	4.2739E+05	1.0411E+06
	20	9.4976E+05	6.1978E+05	1.5695E+06

또한 방전패턴도 무보이드 시료에서는 삼각형 모양이 위 아래로 놓인 형상을 나타내었지만 보이드 시료에서는 두 개의 삼각형이 좌우로 겹쳐 있는 형상을 나타내고 있음을 확인하였다. 방전 빈도수는 보이드 시료에서는 정극성 영역에서 5,860회 발생하였으며, 부극성 영역에서는 12,511회 발생함을 확인할 수 있었다. 이것은 보이드로 인해 전자의 이동이 용이해지기 때문에 방전발생 빈도 수가 급증한다고 생각된다. 또한 보이드 방전패턴도 정(+의 반주기와 음(-)의 반주기에서 대칭패턴을 형성하므로 유전체 경계면의 방전패턴이라고 할 수 있다. 특히 유전체 내부의 제한된 보이드에서 전압이 인가되어 열화가 된 후에는 유전체 내의 보이드에서는 더 이상 방전이 커지지 않고 연면방전이나 큰 갭 내의 방전 및 경계면에서의 방전은 인가전압 변화에 따라 방전전하량이 계속 증가하는 현상으로 인가전압의 상승은 부분방전에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

표 1은 XLPE 시료 부분방전 분포를 나타낸 것으로 전압의 증가에 따라 방전전류는 29[nA]에서 149[nA]로 증가하였으며, 방전 전하량도 3.0722E+5[pC]에서 1.5695E+6[pC]으로 5배 증가함을 확인할 수 있었다. 이것은 절연층에 보이드의 존재는 전계집중현상 및 전자의 이동이 용이한 경로를 생성하기 때문에 방전전류 및 방전전하량이 증가하고 방전빈도수의 상승을 초래한다고 생각된다.

3.2 군집화 분포

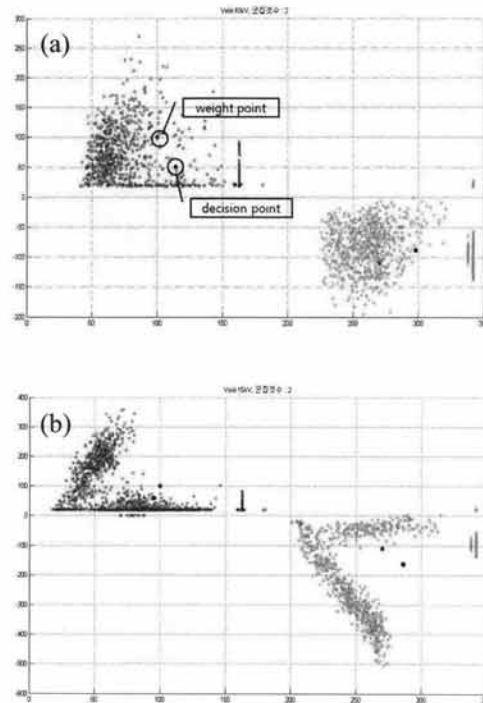


Fig. 6. The number of swarm article to 2. (a) 10[kV], (b) 15[kV].

패턴해석을 위해 데이터의 특징을 뽑아내는 방법 중 군집화 분포가 있다. 본 논문에서는 $\phi-q$ 분포를 화면에 뿌린 후 LBG 알고리즘을 이용하여 중심점 변화에 따른 특징점을 선택하고자 한다. 그림 6~8은 중심 개수변화에 따른 군집화 형태를 나타내고 있다.

그림 6은 두 개의 중심점에 대해서 해석한 것으로 정극성과 부극성에 각각 하나씩의 중심값을 형성하였으며, 10 [kV]에서는 중심점이 110도의 위상으로 이동하였으나 전압의 증가에 따라 정극성 영역은 90도 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 부극성 영역에서는 전압의 증가에 무관하게 300도 영역으로 이동하였지만 전하량의 크기가 증가하여 15[kV]에서는 전하량이 증가하는 위치로 이동함을 확인할 수 있었다.

그림 7은 중심값을 4개로 증가시켰을 때의 모습으로 정극성과 부극성에 각각 2개의 중심점이 형성되는 것을 확인할 수 있었으며, 정극성 영역에서는 10[kV] 인가시 군집이 70도와 160도 위치로 좌우로 군집이 형성되었지만, 15[kV]로 전압이 상승하면서 상하로 군

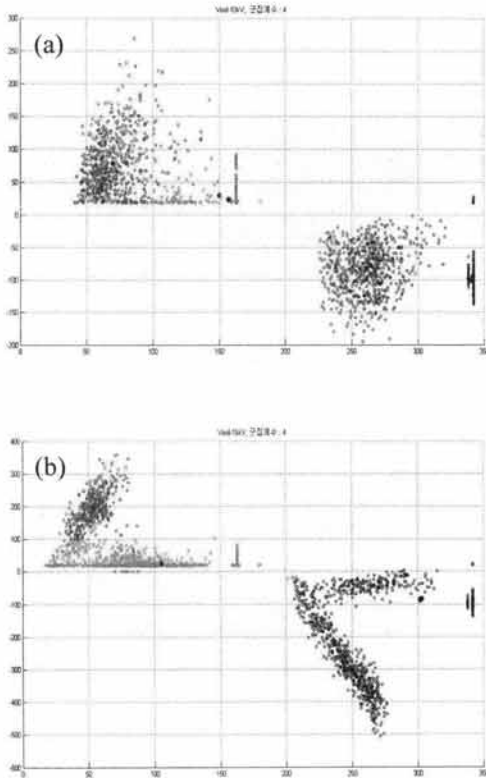


Fig. 7. The number of swarm article to 4. (a) 10[kV], (b) 15[kV].

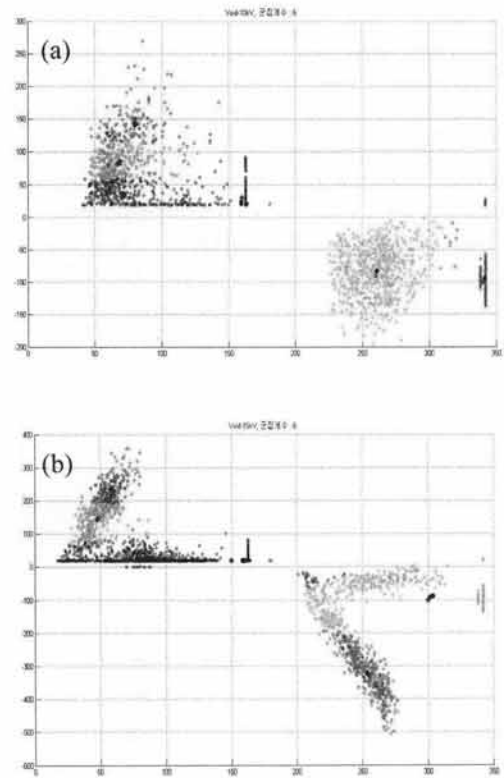


Fig. 8. The number of swarm article to 6. (a) 10[kV], (b) 15[kV].

집이 형성되어짐을 확인할 수 있었다. 부극성 영역에서도 정극성과 동일하게 10[kV]에서는 좌우로 군집이 형성되었으며, 전압의 상승은 상하의 군집이 형성됨을 확인할 수 있었다.

그림 8은 중심점을 6개를 주었을 때의 군집 분포도이다. 10[kV]에서는 정극성에서는 상하로 군집화가 형성되었으며, 부극성에서는 좌우로 2개의 군집이 형성됨을 확인할 수 있었으며, 전압을 15[kV]로 증가하면서 부극성의 군집화는 상하로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 중심점 이동을 보면 10 kV에서 중심점의 이동은 (115,50)과 (295,82)에서 (72,79), (157,25), (265,75), (339, 92)의 점을 6개의 군집에서는 (73, 31), (70,80), (80,140), (157, 21), (262,80), (340,90)의 중심점이 형성됨을 확인할 수 있었다. 이와 같이 군집의 변화를 보면 정극성에서는 90도 이전의 위상에서 전하량의 크기가 큰 것과 작은 것이 공존하고 있으며, 90도 이후에는 낮은 전하량이 나타남을 의미하며, 부극성은 군집 분포가 80 pC의 전하량을 중심으로

분포되어 있으며, 위상도 262~300도 부근에 집중적으로 나타나는 것을 의미한다.

또한 군집의 개수 변화에 따라 부극성에서 중심점의 이동이 비슷하게 나타남을 통해 특징점으로 설정해도 될 것으로 사료된다.

15 kV에서 중심점 이동은 (92,50), (275,162)에서 군집 개수의 증가에 따라 각각 (56,198), (105,25), (260,310), (308,82) 및 6개로 증가시키면 (80,21), (47,150), (63,240), (160,25), (257,310), (310,83)으로 중심점이 형성되었다. 군집 개수의 증가에 따라 정극성에서는 군집이 90도 이전에 집중되며, 위상값의 변화가 주로 발생되었으며, 부극성에서는 4개와 6개가 유사한 위치에서 중심점이 형성됨을 확인할 수 있었다.

이를 통해 정극성에서는 좁은 영역에서 방전전하량이 증가되며, 부극성에서는 넓은 영역에서 부분방전이 형성된다고 추정할 수 있으며, 부극성에서는 특징점이 (260, 310)과 (310, 82)점을 형성한다고 사료된다.

4. 결 론

지중 전력선 XLPE 절연층의 열화에 의한 방전 패턴을 균집화 기법을 이용한 패턴의 특징점 선택 가능성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보이드의 존재는 전압의 증가에 따라 전하량이 큰 방전이 발생하였다.
- 2) 보이드에 의한 방전 패턴은 유전체 경계면 방전 패턴 형상을 나타남을 확인할 수 있었다.
- 3) 균집화에 의한 패턴 조사 결과 정극성은 좁은 위상에서 방전의 크기 변화가 주로 나타났으며, 부극성에서는 부분방전이 나타나는 위상 영역이 넓어짐을 확인할 수 있었다.
- 4) 균집화 결과 부극성에서는 특징점이 나타남을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] T. Y. Kim and J. W. Hong, *KIEE International Transactions on Electrophysics and Applications*, 5, 155 (2005).
- [2] T. Y. Kim, Ph. D. Thesis, Kwangwoon University, Seoul (2006).
- [3] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High-Voltage Engineering* (Pergamon Press, 1, 1970).
- [4] G. Wu, X. Jiang, H. Xie, and D. H. Park, *Proceedings of The 6th ICPADM*, 558 (2000).
- [5] F. K. Soong, A. E. Rosenberg, L. R. Rabiner, and B. H. Juang, *Proc. ICASSP'85*, 387 (1985).
- [6] H. S. Cheong and C. H. Kang, *The Acoustical Society of Korea*, 23, 548 (2004).
- [7] J. H. Kim, *J. of KICS*, 15, 38 (2000).
- [8] J. Bilmes, *International Computer Science Institute* (Berkeley, U.S.A., 1997)
- [9] C. H. Park and G. B. Shim, *J. of KIASS*, 12 (2006).