

분포통계모델에 의한 가교폴리에틸렌 절연체의 부분방전 패턴해석

Analysis of the Partial Discharge Pattern in XLPE Insulators using Distribution Statistical Models

김탁용^{1,a}, 박희두², 조경순¹, 박하용², 홍진웅¹

(Tag-Yong Kim^{1,a}, Hee-Doo Park², Kyung-Soon Cho¹, Ha-Yong Park², and Jin-Woong Hong¹)

Abstract

It has been confirmed that the inner defect of insulator and the perfect diagnosis for aging are closely related to safe electric power transmission system and that the detection of accident and diagnosis technique turn out to be very important issues. But perfect diagnosis is difficult because discharge pattern is irregular. Thus, we investigated discharge pattern using the new distribution statistical models with cross-linked polyethylene(XLPE) specimens. Voltage was applied to power frequency by step method, and calibration of discharge was set to 50 pC. After the voltage was applied, it measured the discharge occurring during 10s. We investigated discharge pattern using the K-means analysis and Weibull function. We also investigated variation of centroid and shape parameter due to variation of voltage. As a result of analyzing K-means, it was confirmed that cluster including many object numbers was formed by the presence of void. And result of Weibull distribution, it was confirmed that shape parameter of discharge varied from 1.28 to 1.62 in no void specimens, and that shape parameter of discharge number varied from 1.28 to 1.62. In the void, shape parameter of discharge varied from 5.66 to 6.43, and shape parameter of discharge number varied from 5.05 to 5.08.

Key Words : Distribution statistical model, K-means, Centroid, Cluster, Weibull distribution

1. 서 론

21세기에는 사람들의 생활이 한층 더 다양화 고도화되어, 전기에너지의 사용비율은 해가 거듭될수록 증가되고 있다. 그런데 현재 우리나라의 전력은 도심으로부터 멀리 떨어진 곳에서 발전하여 장거리 송전시켜 수요지에서 사용되는 형태로 되고 있다. 전기에너지의 공급원인 발전소는 환경문제나

입지제약을 고려하여 해안가 및 산악지대에 위치하고 있으므로 발전되어진 전력을 효율적으로 전송하기 위해서는 고전압으로 송전하는 것이 필요하다. 고압송전은 전력기기의 스트레스를 증가시켰으며, 사고 시 대형 사고를 유발하게 되었다[1,2].

산업체에서는 이를 위해 전기설비기기의 절연내력이나 절연특성에 관한 초기시험을 행하고 있다. 또한 이들 내용, 방법은 규격에 의해서 정해져 있다. 초기시험에서 성능 검사된 전기설비는 장시간 운전에 의해 절연특성의 열화를 발생하며 이러한 현상이 통계적으로 불규칙성이 수반하기 때문에 파괴강도에 관한 데이터의 통계처리가 필요하다[1,3]. 이들 분포통계모델 중 데이터 분포의 불규칙적이며 다양한 정보의 해석을 위해 패턴해석 및 뉴우렐을 이용한 패턴 유사성에 해석이 제안되며

1. 광운대학교 전기공학과
(서울시 노원구 월계동 447-1)
2. 강원대학교 삼척캠퍼스
a. Corresponding Author : xkrdyd@kw.ac.kr
접수일자 : 2006. 7. 11
1차 심사 : 2006. 8. 17
2차 심사 : 2006. 9. 19
심사완료 : 2006. 9. 25

[4], 최근 통계처리에 의한 데이터 해석기법 중 데이터들의 유사성을 바탕으로 동적적인 집단으로 분류하는 군집화 방법이 제안되고 있으며[5,6], 그 중 K-means 알고리즘은 비계층적 군집화 방법 중 하나이며, 대용량에 대한 탐색적인 기법으로 사전적인 정보없이 의미있는 자료구조를 얻을 수 있으며, 텍스트와 이미지 등 거의 모든 형태의 데이터에 적용가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 변수들에 대한 역할 정이가 필요 없으므로 적용이 용이하다[7,8]. 또한 신뢰도의 시간적 추이를 수학적으로 표현한 것이 신뢰도 함수이며, 이로부터 수명시간의 확률분포, 고장률의 시간적 추이를 표시한 고장률함수 혹은 불신뢰도 함수를 도출할 수 있는데 신뢰도 함수는 고장분포 뿐만 아니라 특성 값의 분포, 스트레스의 분포, 유지시간의 분포 등 신뢰성에 관계하는 확률 변수의 분포를 나타내는데 이용되어지는 함수들 중 전기적 해석을 위한 대표적인 함수가 와이블 분포함수이다[1].

이에 본 논문에서는 절연기기의 절연성 진단 및 전문가 시스템개발을 위한 기초자료 지원을 위해 부분방전의 패턴을 K-means 알고리즘[2] 및 Weibull 해석을 통한 위상-전하량($\phi - q$)분포의 군집패턴 및 방전전하량의 형상파라미터를 조사한 결과를 소개한다.

2. 실험

2.1 시료

시료는 전기적 특성이 우수한 초고압 절연케이블 XLPE를 두께 800 μm 로 절단한 시편을 이중층으로 적층하여 사용하였으며, 보이드 유무에 대한 패턴해석을 위해 상부 층에 지름 2 mm의 원통보이드를 삽입하였으며, 전극으로는 평판 대 평판을 이용하여 부분방전을 측정하였다. 또한 전극에서의 연면방전을 억제하기 위해 전극주변을 에폭시로 몰딩하였다. 그림 1은 전극의 형상 및 시료의 형상을 나타내고 있다.

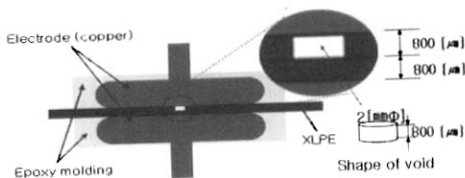


그림 1. 전극 및 시료의 형상.
Fig. 1. Shape of electrode and specimens.

2.2 실험장치

XLPE의 방전분포를 그림 2와 같은 부분방전 검출장치를 이용하여 측정하였으며, 인가전압은 AC 전압을 step 법으로 인가하였다. 검출기에 교정기 (Calibration)를 연결하여 부분방전 최대 검출전하량을 600 pC이하로 교정한 후 부분방전을 측정하였다. 모든 실험은 실리콘오일 내에서 실시하였으며, 측정된 데이터는 DAQ보드를 거쳐 컴퓨터로 저장했으며, 측정은 전압인가 후 10 s 동안 발생하는 방전을 검출하였다. 데이터 처리는 LabView를 이용하여 발생한 위상과 전하량을 사인파 한주기에 적층한 후 동일전하량의 값이 동일위상에서 발생한 것을 방전빈도수로 처리하였다. 또한 C++로 평균방전 및 극성별 전하량 및 방전빈도수를 계산하였다. 계산된 데이터를 위상별로 누적시킨 후 K-means해석 및 와이블 해석을 하였다.

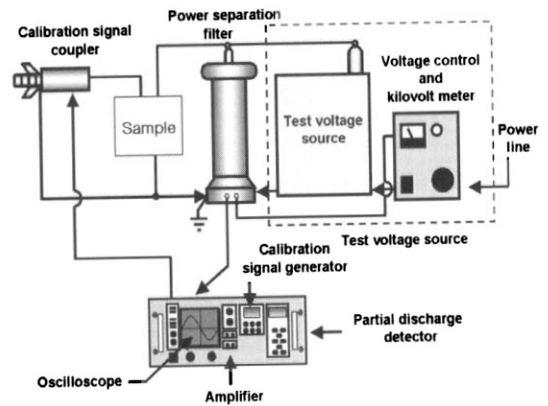


그림 2. 부분방전 검출회로.
Fig. 2. Detection circuit of partial discharge.

3. 결과 및 고찰

K-means 군집화의 초기 중심 값은 랜덤하게 설정하였으며, 군집데이터는 정극성 영역과 부극성 영역으로 구분하여 군집화 시켰다. 또한 군집의 분포를 조사하기 위해 군집화 개수는 10개로 고정시켰다.

K-means는 크게 4단계로 구분하고 있는데 표 1은 각 단계에 대하여 간략히 설명한 것이며[9,10], 그림 3에서 단계별 흐름도를 나타내고 있다.

표 1. K-means 처리.

Table 1. Processing of K-means.

단계 1	초기화 과정으로 임의의 K개의 입력 특징벡터를 선택하여 K개의 클러스터의 중심점 벡터 $\{c_1(l), c_2(l), \dots, c_K(l)\}$ 로 설정한다.
단계 2	<p>군집화 단계로 K개의 클러스터 중심점 벡터와 각 입력 특징벡터에 대한 유클리드 거리를 측정하여 입력벡터를 거리가 가장 작은 클러스터의 멤버벡터로 집단화한다.</p> <p>만약 $\ x^{(p)} - c_j(l)\ < \ x^{(p)} - c_i(l)\$ (모든 $i = 1, 2, \dots, K, i \neq j$이면 $x^{(p)} \in S_j(l)$ 이다.)</p>
단계 3	<p>중심점 갱신단계로 각 클러스터의 멤버벡터를 통해 클러스터의 중심점을 갱신한다.</p> $c_j(l+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{x^{(p)} \in S_j(l)} x^{(p)}$ <p>여기서, N_j는 클러스터집합 S_j에 소속된 멤버벡터의 수</p>
단계 4	이전 중심점과 새로운 중심점을 비교하여 갱신되는 값이 없으면 작업을 종료하고 중심점이 갱신되면 단계 2로 되돌아가 반복하여 수행한다.

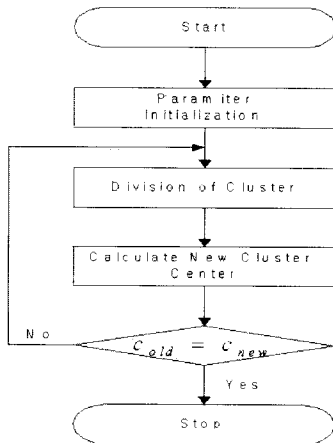


그림 3. K-means 흐름도.

Fig. 3. Flowchart of K-means.

3.1 K-means 해석

표 2는 무보이드 XLPE 시료에 전압을 6 kV 인가할 때, 발생하는 부분방전의 패턴에 대한 군집 해석결과로 정극성 영역에서는 Cluster0인 31°에

표 2. 무보이드의 클러스터 분포(6 kV).

Table 2. Cluster distribution of no void(6 kV).

Classification	ϕ	q	Object	Variance	Max. Distance
Cluster0	31.02	43.71	681	4.67	6.35
Cluster1	37.42	116.12	510	5.45	9.81
Cluster2	48.43	351.53	257	6.17	13.17
Cluster3	49.38	229.96	322	6.06	8.86
Cluster4	85.95	45.42	365	5.35	9.64
Cluster5	217.41	40.07	816	4.91	7.15
Cluster6	219.78	204.95	355	5.72	9.98
Cluster7	222.39	104.11	564	5.44	9.00
Cluster8	225.20	325.47	230	6.27	12.06
Cluster9	294.11	46.04	187	5.83	9.84

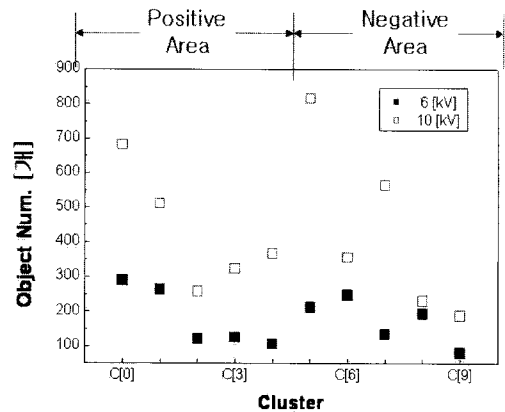


그림 4. 무보이드에서 객체수.

Fig. 4. Numbers of object in no void.

서 가장 많은 객체를 포함하고 있으며, 이 군집의 객체 간 편차도 4.13으로 정극성 영역에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 부극성 영역에서는 Cluster5인 217°위상에서 가장 많은 객체인 816개의 객체를 포함하고 있으며, 객체 간 편차는 4.91을 나타내고 있다. 또한 정극성 영역에서는 Cluster0과 Cluster1인 31-35°부근에서 형성된 군집과 부극성 영역에서는 Cluster5와 Cluster7인 217°와 222° 부근에서 객체의 집중이 일어남을 확인할 수 있다. 이를 통해 정극성 영역에서는 35° 부근에서 43 pC과 116 pC의 방전이 주로 형성되어됨을 의미하며, 부극성 영역에서는 220°부근에서 40 pC과 104 pC의 방전이 많이 존재함을 나타내고 있다. 또한 객체 간 편차를 통해 정극성 영역에서는 44 pC, 부극성 영역에서는 40 pC의 방전전하량을 가지는 방전이 주로 형성됨을 의미한다.

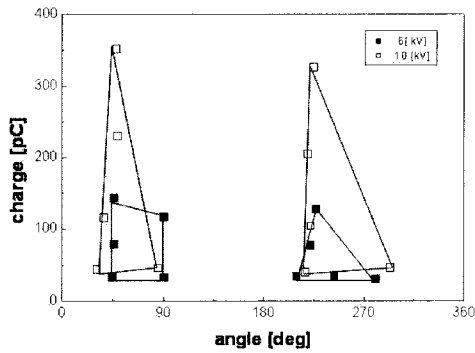


그림 5. 무보이드에서 중심점분포.
Fig. 5. Distribution of centroid in no void.

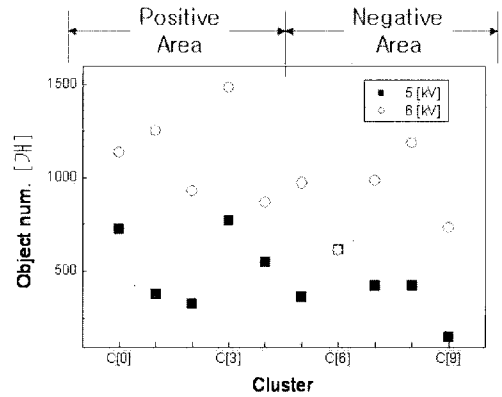


그림 6. 보이드에서 객체수.
Fig. 6. Numbers of object in void.

표 3. 보이드 시료의 클러스터 분포(6 kV).

Table 3. Cluster distribution of void(6 kV).

Classification	ϕ	α	Object	Variance	Max. Distance
Cluster0	34.63	59.86	1135	5.35	8.00
Cluster1	48.14	279.53	1251	5.83	9.41
Cluster2	49.88	418.67	929	6.36	10.72
Cluster3	50.49	164.59	1483	5.81	9.24
Cluster4	88.57	63.09	869	5.66	8.28
Cluster5	210.71	52.76	971	5.02	6.88
Cluster6	216.94	325.30	613	5.93	13.52
Cluster7	218.94	222.79	985	5.21	9.26
Cluster8	222.55	134.66	1186	5.34	9.25
Cluster9	267.52	51.30	733	5.26	9.94

그림 4는 K-means 처리에 의한 각 군집에 포함된 객체 수를 나타낸 것으로 전압의 증가에 따라 전체 객체수의 증가를 확인할 수 있으며, 특히 정극성 및 부극성 영역 모두 초기 클러스터에 많은 객체가 포함됨을 확인할 수 있었다.

그림 5는 무보이드 시료에서의 중심점 분포를 나타낸 결과로 정·부극성 영역에서 전압의 증가로 중심점의 전하량 분포가 증가하였다. 중심점이 하나의 위상에 집중되는 형태를 나타내었다. 또한 전압의 증가는 전하량의 높은 중심점을 형성시키는 것을 확인할 수 있었으며, 방전전하량의 분포도 면적은 커지고 전하량의 증가폭이 더 크게 나타남을 볼 수 있으며, 이는 무보이드 시료는 절연내력이 우수하여 방전분포는 비슷하게 형성되었다. 이로 인해 무보이드 시료의 절연내력은 안정적이며, 전하량의 증가는 전압의 증가로 인해 주입전자가 증가되기 때문이라고 사료된다.

표 3은 보이드 시료에 인가전압을 6 kV로 승압하였을 때의 클러스터 분포를 나타낸 것으로 정극

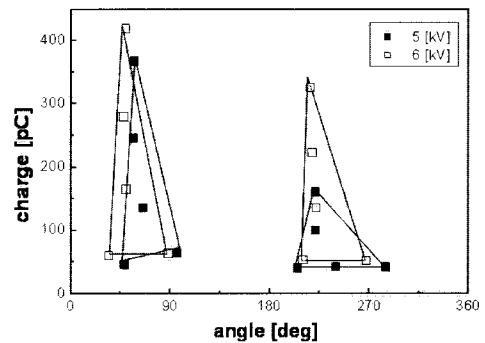


그림 7. 보이드에서 중심점분포.
Fig. 7. Distribution of centroid in void.

성 영역에서 Cluster1인 50°에서 1,483개의 객체로 가장 많이 포함하고 있으며, 부극성 영역에서는 Cluster8인 223°에서 1,186의 객체를 포함하고 있다. 편차는 정극성 영역에서는 Cluster0에서 1,135개의 객체를 포함하며 최소 편차인 5.35를 나타내었으며, 부극성 영역에서는 Cluster5에서 971개의 객체를 포함하며 최소편차인 5.03을 나타내었다. 또한 전압이 6 kV로 승압하면서 군집의 중심점 분포가 5 kV보다 앞선 위상에서 나타났으며, 객체 간 편차가 증가함을 확인할 수 있었다.

그림 6은 보이드 시료에서의 각 군집에 포함된 객체 수를 나타낸 것으로 전압증가에 따라 모든 군집의 객체수는 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7은 보이드 시료의 중심점 분포를 나타낸 것으로 정·부극성 영역에서 전압의 증가로 중심점의 전하량 분포가 증가하였으며, 무보이드 시료보다 정극성 영역에서 전하량이 높은 중심점이 형

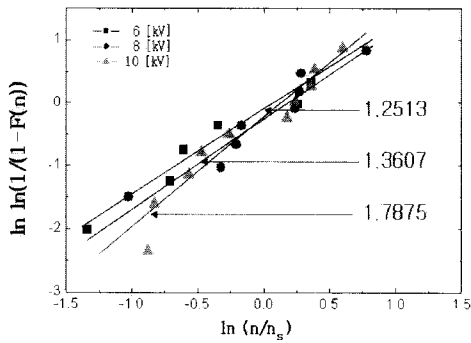


그림 8. 무보이드에서 빈도수의 형상과라미터.
Fig. 8. Shape parameter of discharge number in no void.

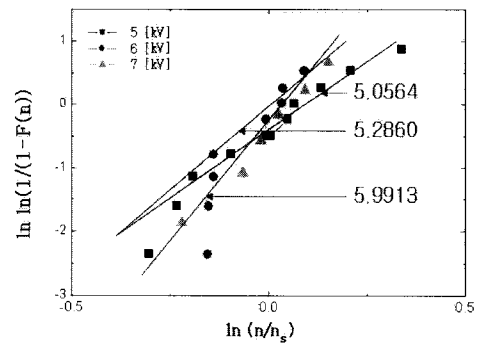


그림 9. 보이드에서 빈도수의 형상과라미터.
Fig. 9. Shape parameter of discharge number in void.

성되었다. 이는 보이드로 인해 전자주입이 용이하게 되어 부극성에서 주입되는 전자가 이동이 활발해지기 때문이라고 사료된다.

3.2 Weibull 해석

그림 8은 무보이드 시료에서 방전발생빈도의 와이블 분포를 나타낸 것으로 초기 방전발생전압인 6 kV에서 1.2513의 기울기를 얻었고, 전압이 10 kV로 증가하면 기울기가 1.7875로 1.4배 증가하였으나, 방전빈도수의 형상과라미터는 전압이 증가하여도 모두 2이하의 값을 나타내었다. 일반적으로 스트레스가 작고 사물에 의한 실수 등이 원인으로 고장 나는 경우는 형상과라미터가 1 전후로 나타나며, 이 경우를 우발성 고장을 의미한다[1]. 또한 형상과라미터가 2보다 작은 경우 통계분포가 지수 분포를 형성하는 것을 의미하므로 무보이드 시료에서는 절연층의 절연내력이 매우 안정하기 때문이며, 형상과라미터의 변화가 거의 없으며, 약간의 증가는 인가전압의 증가로 인해 전자주입이 증가되기 때문이라고 생각되어진다.

그림 9는 보이드 시료에서 빈도수의 형상과라미터 변화를 나타낸 것으로 5 kV에서 형상과라미터는 5.0564를 얻었으며, 트립전 전압인 7 kV에서 5.9913으로 매우 큰 기울기를 가짐을 알 수 있었다. 형상과라미터가 2이상의 값을 나타내므로 방전 분포는 모두 정규분포형태를 나타내며, 이는 보이드에 전계의 집중으로 지속적인 방전이 발생하기 때문이라고 생각된다.

또한 형상과라미터의 증가는 수명의 급격한 감소를 의미하기도 한다. 보이드 시료에서 방전빈도수의 형상과라미터가 모두 2이상이므로 방전분포는 모두 정규분포로 나타남을 확인할 수 있었다.

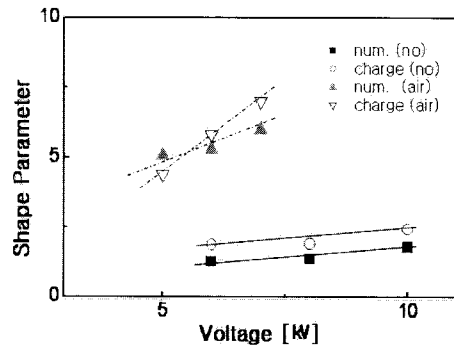


그림 10. 전압변화에 따른 형상과라미터.
Fig. 10. Shape parameter due to voltage variation.

이것은 보이드로 인해 보이드에 전계의 집중현상을 유발하고 또한 마찰적인 트리 성장특성을 나타내기 때문에 방전의 형태가 우발적인 방전현상이 아니라 지속적이고 규칙적인 방전이 발생함을 의미한다고 생각된다.

그림 10은 전압 변화에 따른 형상과라미터의 변화를 나타낸 그래프로 무보이드 시료의 형상과라미터는 실선으로, 보이드 시료는 일점쇄선으로 표기하였다. 그림에서 보이드 시료의 형상과라미터는 전압의 증가에 따라 빈도수는 0.4675, 전하량은 1.3053의 기울기 값을 나타내었으며, 무보이드 시료는 빈도수는 0.1341, 전하량은 0.1393의 기울기로 증가하였다. 이것은 보이드 시료에서 전압의 증가에 따라 보이드 내부 전계집중현상으로 방전분포가 급격히 정규분포를 형성하며, 이로 인한 평균수명 감소율을 증가시키고 있다고 생각되어진다.

4. 결 론

분포통계모델에 의한 XLPE 절연체의 부분방전 패턴해석을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

K-means 알고리즘을 통한 방전패턴 조사결과 전압의 증가로 중심점의 전하량 값이 커졌고, 위상의 분포는 감소하여 분포하였으며, 보이드의 존재로 군집객체수가 증가하였다. 또한 객체 간 편차 및 객체 간 최대거리의 변화의 보이드 유무에 관계없이 유사한 편차를 얻었다.

와이블 분포 해석으로 무보이드 시료에서는 전압에 변화에 따라 형상파라미터가 안정적으로 나타났으며, 보이드 시료에서는 전압증가에 따라 형상파라미터가 증가폭이 무보이드보다 10배 이상 커졌으며, 무보이드 시료는 전압증가에 따라 지수 분포를 형성한 반면, 보이드 시료는 정규분포형태를 형성함으로 고장확률이 증가하였다.

참 고 문 헌

- [1] 北川賢司, "信頼性工学入門", コロナ社, p. 1, p. 102, 2004.
- [2] Sing, J. K., Basu, D. K., Nasipuri, M., and Kundu, M., "Improved k-means algorithm in the design of RBF neural networks", TENCON 2003. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, Vol. 2, p. 841, 2003.
- [3] T. Y. Kim, H. T. Sin, K. H. Yeon, C. H. Lee, and J. W. Hong, "Analysis of partial discharge using non-linear clustering algorithm", ICPADM2006, Vol. 2, p. 502, 2006.
- [4] 박성희, 임기조, 강성화, "건인전동기용 고정자 코일의 off-line 부분방전 진단을 위한 NN의 적용", 전기전자재료학회논문지, 18권, 8호, p. 766, 2005.
- [5] 김탁용, 조경순, 신현택, 연구호, 이충호, 홍진웅, "분포통계변화에 따른 XLPE 절연체의 부분방전 패턴 해석", 한국전기전자재료학회 2006하계학술대회논문집, 7권, p. 83, 2006.
- [6] R. A. Johnson and D. W. Wichern, "Applied Multivariate Statistical Analysis", Prentice Hall, p. 668, 2002.
- [7] F. R. D. Velasco, "Thresholding using the isodata clustering algorithm", IEEE Trans., Vol. 9, No. 1, p. 135, 1981.
- [8] J. C. Bezdek, J. Keller, R. Krisnapuram, and N. R. Pal, "Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing", Kluwer Academic Publishers, p. 137, 1999.
- [9] D. Pollard, "Strong consistency of k-means clustering", The Annals of Statistics, Vol. 9, No. 1, p. 135, 1981.
- [10] T. Y. Kim, B. C. Ahn, H. J. Lee, H. T. Shin, Y. H. Lee, and J. W. Hong, "The Analysis of Discharge Pattern using K-means on Ignition Coil", CMD2006, p. 160, 2006.