

군집화 기법을 이용한

케이블 접속부 계면의 부분방전 해석

조경순 교수 (서일대학 컴퓨터전자과)

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. 이러한 전력 설비의 안전성 확보와 사고 방지를 위해서는 적절한 절연열화 진단 기법의 개발이 매우 중요하다. 특히 지중선로는 미관확보, 설비안전 및 공급신뢰도 향상 등의 장점 때문에 1970년대 이후로 꾸준히 증가하고 있지만, 대도시의 도로 지반 아래 포설되어 있어 사고 발생 시 복구에 많은 시간이 필요하며 교통 및 산업 활동에 많은 피해를 끼치게 된다. 또한 지중선로는 전력케이블의 운반 및 포설을 쉽게 하기 위하여 일정거리로 나누어 중간 접속을 하는데 전력케이블의 접속부는 절연재료의 성능 개선과 신뢰성을 확보하기 위해 가교폴리에틸렌 (Crosslinked polyethylene : XLPE) 과 에틸렌 프로필렌 다이엔 고분자 (Ethylene propylene diene methylene : EPDM)의 2층 구조로 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 된다. 더욱이 계면에는 보이드, 불순물 등의 혼입 가능성이 높아 전기적 특성은 매우 복잡한 양상을 띠기 때문에, 전력케이블 접속재 계면의 상태는 절연 케

이블 시스템 전체의 절연성능과 직결된다.

현재 적용되고 있는 고체 절연재료의 절연열화 진단기법에는 절연저항법, 직류전류법, 교류전류법, $\tan\delta$ 법, 부분방전법 등이 있으며, 특히 부분방전 (Partial discharge : PD)은 절연체 내부 보이드나 이물질 등의 결함부에 발생하는 미소한 방전으로 각 부분방전 펄스의 에너지양은 미세하나 부분방전의 발생이 주기적으로 반복되고 그 위치가 국부적으로 밀집되어 있기 때문에 전력기기의 절연특성 및 사고의 위험을 가장 잘 나타내는 요소이며 절연열화의 진단에 가장 유효한 수단으로 사용되고 있다. 따라서 사고를 미연에 방지하기 위한 절연 진단 기술로서 부분방전측정이 주목되고 있으며 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

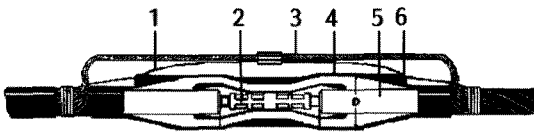
최근 이러한 목적을 달성하기 위해 전문가시스템을 연구 개발하여 널리 적용하고 있으며, 대표적인 방법으로 뉴우렐 네트워크, 와이블렛을 이용한 진단시스템 개발이 주로 이루어지고 있지만, 복합적 메커니즘으로 인한 절연체 내부의 부분방전은 매우 불규칙적인 양상이 나타나며, 측정환경 및 측정 장치마다 고유한 특성을 나타내고 있으므로 전력케이블의 부분방전으로부터 열화 진행 상태 진단과 수명예측을 위한 적절한 데이터를 찾아내는 것은 매우 중요하다. 또한 부분방전 측정 기술이 발전하면서 실험으로부터 취득하는 데이터의 양이 기하급수적으로 증가함에 따라, 새로운 분포 통계모델에 의한 연구 및 데이터의 소형화 기법은 매우 중요한 주제로 부각되고 있다. 이러한 노력의 일환으로

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 군집 (Cluster)으로 그룹화 하는 것이다. 이때 우선적으로 고려되어야 하는 것은 측정 데이터의 핵심적인 특성을 잃지 않으면서 데이터의 크기를 줄이는 것이다. 또한 모든 군집은 군집을 대표하는 하나의 값으로 표현되는데, 이러한 대표적인 값을 군집 중심 (Centroid)이라 하며, 데이터의 평균으로 구해진다.

2. 접속재의 종류

전력케이블에 사용되는 접속재는 그 사용 용도에 따라 케이블용 접속재로서 종단 접속재, 개폐기 접속재, 분기 접속재가 있으며 기기용 접속재로서 변압기 엘보접속재, 개폐기 엘보접속재가 있고 개폐기 엘보접속재는 다시 데드브레이크형 접속재와 스태크 조작용 접속재로 분류한다. 또한 사용용압 및 전류용량에 따라 다양한 규격으로 제조되고 있다.

이중에서 직선 접속재 (Cable joint)는 케이블과 케이블을 연결하는 접속재로서 작업 방법에 따라 조립형, 열 수축형, 테이프 레진형 (Tape resin type)으로 구분한다. 조립형은 완제품으로 성형되어진 접속재의 본체를 조립이 준비된 케이블에 밀어 끼우고 두 케이블을 단자로 압착한 다음 접속 부위로 다시



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

그림 1. 조립형 직선접속재.

밀어 시공하는 형태로서 방수성 및 전기적 특성이 우수하다.

3. 접속재의 사고

접속재는 용도에 따라 재질, 구조와 시공 방법 등이 다르다. 이러한 재질이나 구조, 시공 방법 등의 차이점에 의하여 열화 경향이나 절연 파괴 시 각 접속재마다 파괴 부위, 파괴 원인 등은 각각 다른 경향을 나타낸다. 또한 케이블의 절연체는 XLPE 단일 절연체로서 절연 시스템이 구성되어 있고 제작 방법이나 제작 수준 등은 세계적으로 비슷한 경향을 보이고 있으므로 자료에 의한 등가 수명 추정이나 열화 분석이 가능하다. 케이블 종단 접속재 및 직선 접속재의 사고는 전체 케이블 사고의 약 70% 정도를 차지하고 있다. 케이블 접속재 사고 원인으로는 시공 불량에 의한 사고 원인과 장시간 옥외 노출에 따른 환경 열화에 의한 사고 요인으로 분석되고 있다. 그러면 여기에서 접속재의 시공 불량으로 발생하는 열화의 원인을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 습기·물기 등이 포함된 경우케이블 절연체 표면 및 내부에 습기나 물기가 있는 상태에서 접속할 때 접속재 내에 습기나 물기가 포함된 경우로, 이로 인하여 접속재 내에서 외부 트리로진척되어 수 트리 (Water tree) 등을 유발시켜 케이블 열화를 촉진시킨다.
- ② 도체에 스리브 또는 터미널의 압착을 잘못된 경우도체 사이즈에 맞는 스리브 및 터미널 사용 후 압착 단자에 의해 정확히 도체와 압착되어야 한다. 압착 단자의 부적격품 사용 또는 도체 규격에 맞지 않는 압착 공구 다이스의 사용 등으로 인해 단자 헐거움이 발생하여 도체의 저항이 증가함으로 이상 발열을 일으키는 원인이 된다.
- ③ 접속재 시공 시 케이블 재단을 잘못된 경우종단 접속재 및 직선 접속재의 시공시 케이블 사이즈 맞는 접속재 사용 및 규격에 적합하도록 케이블을 재단하여야 하므로 제작사별 접속재 시공 방

법에 따라 정확한 재단이 필요하다. 그러나 케이블을 잘못 재단하여 시공할 경우에는 전기적 스트레스의 집중으로 케이블 열화가 촉진되어 사고의 원인이 된다. 특히 조립형과 자기 수축형은 정확한 사이즈의 선택 사용이 열화 원인의 한 면을 줄일 수 있는 중요한 요소이다.

- ④ 불순물이 케이블과 접속재의 절연체에 오염된 경우 절연체 표면 또는 반도체층 표면에 찌꺼기나 혹은 세척을 소홀히 하여 오손물이 있는 상태로 접속하는 경우 내부 보이드 등 이물질에 의한 내부 트리가 발생하여 케이블 열화 원인이 될 수 있다. 특히 반도체층을 제거한 후 절연체의 이물질을 제거하고자 세척포를 사용할 때, 반도체층과 함께 절연체를 세척할 경우 절연체에 탄소 가루가 묻어 케이블 열화의 주요 원인이 된다.
- ⑤ 도체 표면에 손상을 입히는 경우 도체 표면에 흠집을 입히거나 불순물이 포함된 상태에서 직선 접속이나 종단 접속재 시공 시 내부 보이드 등이 발생하여 전계가 집중되므로 케이블 열화의 원인이 된다.
- ⑥ 절연체의 끝 부분이 매끄럽지 못할 경우 조립형의 경우에는 접속재를 삽입할 때 접속재의 절연체가 케이블의 절연체보다 재질이 무르므로 손상을 줄 수 있으며, 테이프 레진형의 경우에는 연필깎기 모양으로 절연체 끝부분의 처리가 매끄럽지 못할 경우 종단 접속재 사이와의 불균형으로 절연체 열화가 심하게 진척되어 열화 사고의 원인이 될 수 있다.
- ⑦ 케이블과 접속재의 반도체층이 불완전하게 연결된 경우 케이블과 접속재의 반도체층이 불완전하게 시공되는 경우에는 전계의 분포가 집중되거나 케이블 외부로 전계가 누설되어 케이블과 접속재의 열화를 촉진시켜 치명적인 사고가 유발된다.

국내에서 발생한 접속재 고장에 관한 연구 보고서를 살펴보면 케이블과 접속재의 고장 점유율이 총 140건의 고장 중에서 접속재가 97건으로 69%의 고장율을 차지하고 있으며, 97건의 고장 중 직선 접속

재가 점유하고 있는 고장율이 42%로써 가장 높고, 그 다음이 T 접속, 종단 접속재, 엘보 접속재 순으로 되어 있다. 여기에서 T 접속을 직선 접속에 포함시키면 접속재의 고장 중 직선 접속이 차지하는 고장율은 약 70%로써 접속재 고장의 대부분이 직선 접속이라 할 수 있다.

고장 원인별 사용 연수에서도 시공 불량에 의한 고장율이 약 76.3%로써 전체 고장 원인 중 가장 높게 분포되고 있으며, 사용 기간도 시공 불량의 전체 고장 건수 74건 중 71.6%에 해당되는 53건이 시공 후 5년 이내에 고장이 발생하는 것으로 분석되고 있다. 그리고 직선 접속재의 고장 원인별 고장 건수를 요약하면 스리브 압축 불량으로 인한 고장이 가장 많은 비율을 차지하고 있으나, 이는 고장점 위치 탐색 과정에서 일어나는 용융 현상으로 인하여 오인된 경우가 포함되어 있을 것으로 추정되며, 다음으로 테이프 감기 불량, 구부러짐에 의한 공극 발생, 연필깎기 불량, 반도체층 제거 불량, 절연체 손상, 튜브 가열 불량, 이물질 침입에 의한 공극 발생 등의 경우가 나와 있다.

케이블 접속은 보통 실외에서 수작업으로 이루어지므로 작업 환경이 열악하고 작업자의 숙련도에 상당한 영향을 받는다. 따라서 케이블과 접속재가 연결되는 계면에 케이블 절단 작업시 칼날에 의한 흠집이 발생할 수 있고, 케이블의 구리 또는 반도체층에서 떨어져 나온 이물질이 혼입될 수 있다. 이러한 이유로 접속재에서 발생하는 사고의 대부분은 접속 계면에서 발생한다.

케이블 포설 시 취약부분인 접속재 계면에서 발

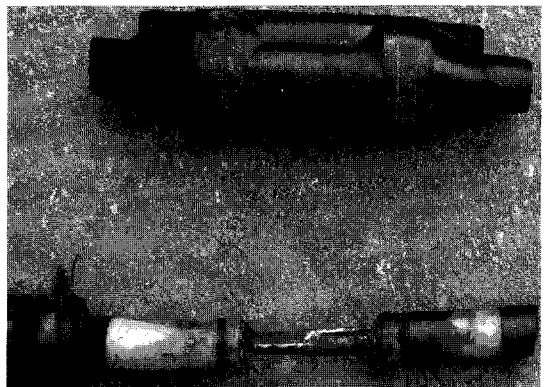
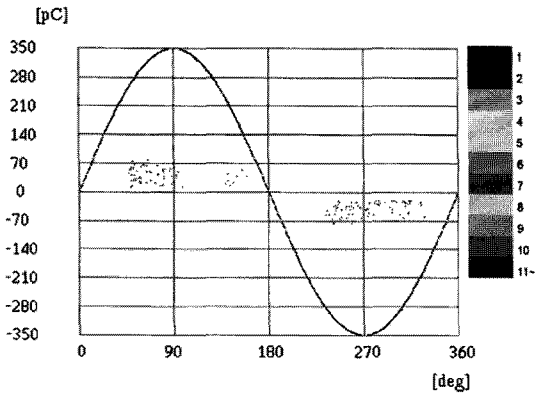
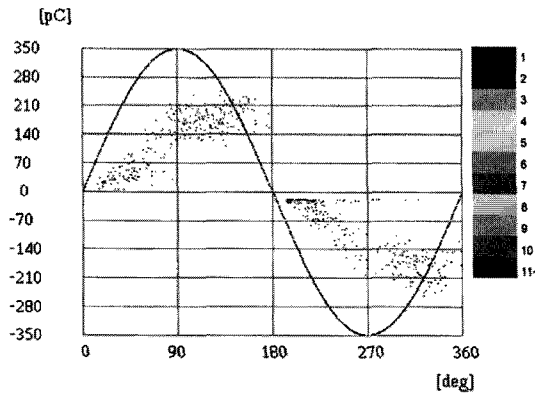


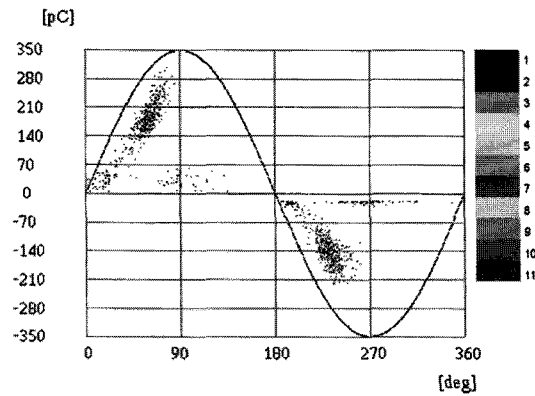
그림 2. 사고가 발생한 조립형 직선접속재.



(a)



(b)



(c)

그림 3. 보이드 결합에 의한 ϕ - q - n 분포 (a) 10 [kV], (b) 20 [kV], (c) 30 [kV].

생하는 전기적 현상을 분명히 하기 위해서는 최적의 전극 시스템을 구축하고 그 전극 시스템에서 발생하는 부분방전 특성을 검토할 필요가 있다. 이러한 관점에서 고장 사고의 주요 부분인 케이블 절연재료인 XLPE와 접속재 절연재료인 EPDM 사이의 계면을 설정하고, 칼날에 의한 상처를 모의한 보이드 결합을 발생시킨 후, 불규칙적인 부분방전 패턴을 위상 분해 부분방전 분석법을 이용하여 위상각 (ϕ)-방전 전하량 (q)-발생빈도수 (n)로 도시하고 또한 방전 데이터의 유사도를 검출한 후 객체정보를 데이터간 거리 및 편차정보로 변환하여 복잡하고 대용량인 데이터를 간소화시키는 통계처리 방식인 K-means 군집화로 결합에 따른 부분방전의 군집 분포를 해석한 사례를 제시한다.

그림 3은 보이드 결합 시료의 ϕ - q - n 패턴을 나타낸 것으로 인가전압의 증가에 따라 방전발생빈도수, 방전전하량 및 방전발생위상의 증가를 나타내는데 이는 전압의 증가에 따라 전자주입이 증가되기 때문이라고 생각된다. 또한 정부극성의 발생위상이 대칭 패턴을 나타내므로 전형적인 유전체 경계면의 방전 패턴으로 볼 수 있다.

4. 군집 분포

부분방전 특성은 통계적으로 불규칙성이 수반되기 때문에 데이터에 대한 적절한 통계처리가 매우 중요하다. 따라서 개별 방전발생원 (Discharge source)의 특성을 반영할 수 있는 방전 특성량을 선정하여 정량화하여야 한다. 군집분석 (Cluster analysis)은 흩어진 개체 사이의 유사성 또는 거리에 의하여 군집을 형성하고, 형성된 군집의 특성을 파악하여 각 특성의 유사성에 따라 몇 개의 그룹으로 나눔으로써 군집들 간의 관계를 분석하는 탐색적 통계분석 방법으로 공학, 통계학, 패턴 인식 등 여러 분야에서 광범위하게 연구가 진행되고 있다.

군집분류법중 무감독분류 기법은 분류할 군집의 개수와 각 분광 군집 사이의 한계 거리를 지정해 줌으로써 작업이 가능하다. 일단 사용자가 초기 입력값을 지정해 주면, 컴퓨터가 분류할 군집 개수만큼

의 초기 군집중심을 자동으로 생성하여 통계 평면상에 임의로 위치시키게 되는데, 이 객체가 군집을 구성하는 군집중심으로 작용한다. 분류가 시작되면 컴퓨터는 영상 내 각각의 객체들을 그 객체와 가장 근접한 객체들의 군집으로 분류를 수행한다. 분류 작업이 끝난 후에는 군집에 소속된 객체들을 사용하여 새로운 군집 중심을 선택하게 되고 이와 같은 작업을 사용자가 입력한 횟수 또는 더 이상 군집중심의 변화가 없을 때까지 계속하게 된다. 이와 같은 무감독 분류기법에는 순차군집분류 기법, ISODATA 기법, Fuzzy C-means 군집분류 기법, K-means 군집분류 기법 등이 있다.

4.1 순차군집분류 기법

순차군집분류 기법은 객체를 한 개씩 순차적으로 검사하는 방법으로 각각 분석된 객체와 이미 계산된 군집 중심 사이의 거리를 계산하여 각 객체를 새로운 군집중심의 형성에 사용하거나 이미 존재하는 군집에 포함시킨다. 사용자의 요구 군집보다 많은 수의 군집이 생성되었을 경우 군집들의 병합이 일어난다. 순차군집분류 기법은 적은 설정과 준비단계를 가지고 몇 개의 입력 변수만을 입력함으로써 군집형성이 가능하며, 순차군집기법은 모든 객체를 한번만 분석하게 되므로 매우 빠르게 실행된다. 그러나 사용자의 입력변수의 개수에 대한 정확한 지식이 필요하고, 객체간의 관계를 정확하게 파악하기가 힘들다는 단점을 가지고 있다.

4.2 ISODATA 기법

ISODATA 기법은 매 반복 단계마다 객체간의 평균을 군집의 중심으로 정하면서, 군집의 분리와 병합을 한다. 알고리즘을 수행기전에 초기 군집중심을 결정해야 하며, 초기 군집중심들은 주어진 데이터 집합에서 표본들을 임의로 선택함으로써 결정될 수 있으며, 그 개수가 요구되는 군집중심의 개수와 같을 필요는 없다.

4.3 Fuzzy C-means 군집분류 기법

불확실한 표본들을 표현하려면 퍼지 분할 공간에서 퍼지 부집합을 이용하는 것이 바람직하다. 표본

자료 집합 X 는 그 원소인 표본 자료 x_k 가 p 차원의 벡터로 표시된다.

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset R^p$$

c 개의 클래스의 분류 표시 자료로 표본 자료들을 분류한다고 가정했을 때, 표본 자료에 대한 퍼지 부집합은 다음과 같다.

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_c\} \in R^{c \times n}$$

여기서 $u_i(x_k) = u_{ik}$ 을 클래스 i 에 속하는 객체자료 x_k 의 소속등급이라고 하면

$$U = \begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_k & \dots & x_n \\ 1 & & \downarrow & & \\ \vdots & & & & \\ i & \dots & u_{ik} & \rightarrow & \\ c & & \downarrow & & \end{pmatrix}$$

퍼지 부집합은 가로 클래스 i 에 해당하는 모든 객체의 소속등급이며, 세로는 k 번째 표본에 대한 모든 클래스의 소속등급이다.

4.4 K-means 군집분류 기법

K-means 군집분류 기법은 벡터양자화를 수행하기 위한 군집화 기법으로 그 기본이론은 무한히 많은 수의 데이터를 미리 정해진 K개의 대표 값(군집 중심)으로 사상시키는 집단화 알고리즘으로써 임의의 입력 데이터에 대한 양자화에러를 최소로 하기 위해 반복적으로 클러스터의 군집중심을 갱신하는 알고리즘이다. 즉 측정된 데이터를 통해 얻고자 하는 군집의 개수를 사용자가 지정하도록 되어있고, 사용자가 지정한 개수만큼의 군집중심을 다차원 측정공간상에 위치시킨다.

K-means 군집분류는 여러 가지 분리군집방법 중에서 가장 보편적으로 많이 쓰이는 알고리즘의 하나로, 군집 내 유사성은 작게 하고, 군집 간 유사성은 크게 분류를 하는 것이 목적이다. 군집의 유사성은 군집의 군집중심인 평균과 객체들 사이의 거리로 측

정한다. 거리를 계산하는 방법으로는 유클리디안 거리 (Euclidean distance), 맨하탄 거리 (Manhattan distance), 민코우스키 거리 (Minkowski distance), 마할라노비스 거리 (Mahalanobis distance) 등이 일반적으로 사용된다. 두 개의 객체 i 와 j 사이의 거리를 측정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 유클리디안 거리의 식은 다음과 같다. 여기에서 공통적으로 $i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})$ 이고, $j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp})$ 이다.

$$d(i, j) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \dots + (x_{ip} - x_{jp})^2}$$

맨하탄 거리는

$$d(i, j) = |x_{i1} - x_{j1}| + |x_{i2} - x_{j2}| + \dots + |x_{ip} - x_{jp}|$$

민코우스키 거리는 유클리디안 거리와, 맨하탄 거리를 일반화시킨 형태로

$$d(i, j) = \{|x_{i1} - x_{j1}|^q + |x_{i2} - x_{j2}|^q + \dots + |x_{ip} - x_{jp}|^q\}^{\frac{1}{q}}$$

즉, 민코우스키 거리에서 q 가 1일 경우 맨하탄 거리가 되고, q 가 2일 경우 유클리디안 거리가 된다. 이때 사용된 척도 단위에 따라서 거리순위에 상당한 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 일반적으로 각 변수를 표준편차로 나눈 표준화변수를 사용하게 된다. 변수들 사이의 상관관계를 고려한 거리를 마할라노비스 거리라고 하고, 그 식은 다음과 같다. 여기에서 S 는 표본분산이다.

$$d(i, j) = \sqrt{\frac{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \dots + (x_{ip} - x_{jp})^2}{S}}$$

데이터들은 군집들의 임시 평균벡터들 중에서 가장 가까운 군집에 할당되며, 모든 데이터들이 이러한 방법으로 분류된 후 군집은 새로운 군집중심이 계산된다. 이렇게 수정된 군집중심은 데이터의 재분류 근거로 사용된다. 군집중심의 위치가 더 이상 변하지 않을 때까지 알고리즘의 반복이 지속된다. K-means 알고리즘에 의한 군집화 과정은 다음의 4단계로 구분된다.

- (1) Stage 1 : 초기화 과정으로 임의의 K 개의 입력 특징벡터를 선택하여 K 개의 클러스터의 군집 중심 벡터 $\{c_1(l), c_2(l), \dots, c_k(l)\}$ 로 설정한다.
- (2) Stage 2 : 군집화 단계로 K 개의 클러스터 군집 중심 벡터와 각 입력 특징벡터에 대한 유클리디안 거리를 측정하여 입력벡터를 거리가 가장 작은 클러스터의 멤버벡터로 집단화한다. 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.)
- (3) Stage 3 : 군집중심 갱신단계로 각 클러스터의 멤버벡터를 통해 클러스터의 군집중심을 갱신한다.

$$c_j(l+1) = \frac{1}{N_j} \sum_{x^{(p)} \in S_j(l)} x^{(p)}$$

여기서, N_j 는 클러스터집합 S_j 에 소속된 멤버 벡터의 수

- (4) Stage 4 : 이전 군집중심과 새로운 군집중심을 비교하여 갱신되는 값이 없으면 작업을 종료하고 군집중심이 갱신되면 단계 2로 되돌아가 반복하여 수행한다.

K-평균 알고리즘의 과정을 도식화하면 그림 4와 같이 표현할 수 있다. 첫 번째 그림은 stage 1의 과정으로 전체 데이터를 임의로 두 개의 군집으로 나누는 것이다. 두 번째 그림은 stage 2의 과정으로 나누어진 두 개의 군집에서 평균을 이용하여 군집중심을 구한 것이다. 세 번째 그림은 stage 3의 과정으로 stage 2에서 새로 구해진 중심에 가까운 객체들로 다시 분류하기 위해 군집으로 나누어 놓은 객체들의 군집을 해체한 것이다. 네 번째 그림은 새로운 군집 중심에 각 객체들을 마저 분류하여 새로운 군집을 형성하는 과정을 나타낸 것이다. stage 4 과정은 앞의 과정을 반복하면서 더 이상의 군집의 변동이 없을 때까지 가장 최적의 군집을 찾아나간다.

그림 5는 보이드에 의한 결함 시료의 ϕ - q 데이터를 K-means 군집분류기법에 의하여 각각 10개의 정극성과 부극성 군집중심으로 사상시킨 군집중심 분포를 나타낸 것이다. 10 [kV] 인가 시 정극성 영역에서는 43 [pC]에서 가장 많은 14개의 객체를 포함하

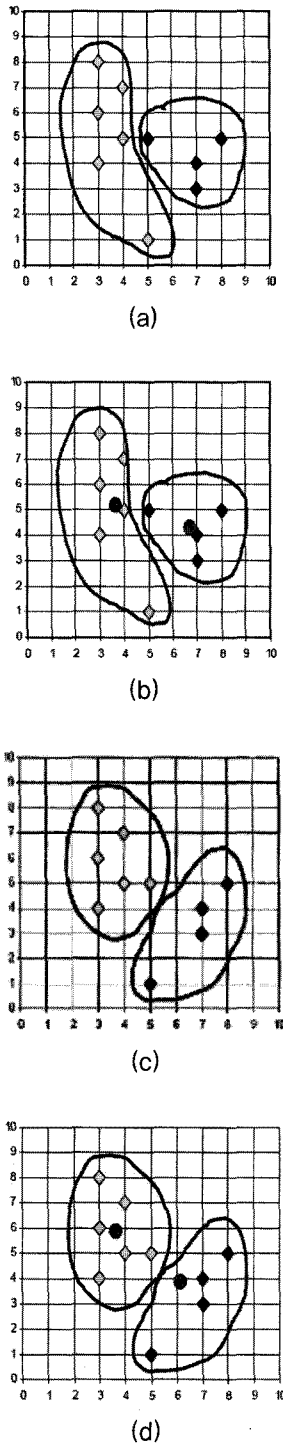


그림 4. K-means 알고리즘 단계 (a) stage 1, (b) stage 2, (c) stage 3, (d) stage 4.

고 있고 부극성 영역에서는 -29 [pC]에서 가장 많은 17개의 객체를 포함하고 있다. 20 [kV] 인가 시 정극성 영역에서는 26 [pC]에서 가장 많은 42개의 객체를 포함하고 있고 부극성 영역에서는 -22 [pC]에서 가장 많은 124개의 객체를 포함하고 있다. 30 [kV] 인가 시 정극성 영역에서는 185 [pC]에서 가장 많은 110개의 객체를 포함하고 있고, 부극성 영역에서는 -139 [pC]에서 가장 많은 106개의 객체를 포함하고 있다. 인가전압 상승에 따른 방전량의 최소값과 최대값의 차이는 정극성 영역에서는 71 [pC]에서 243 [pC]으로, 부극성 영역에서는 46 [pC]에서 167 [pC]으로 증가하였다.

그림 6은 보이드 결합 시료의 ϕ - q 함수 군집중심 분포로부터 구한 평균 중심과 위상각 및 부분방전 전하량의 표준편차를 나타낸 것이다. 10 [kV] 인가 시 정극성 영역의 중심은 위상 82° 에서 83 [pC]이며, 부극성 영역의 중심은 위상 302° 에서 -80 [pC]을 얻었다. 20 [kV] 인가 시 정극성 영역의 중심은 위상 94° 에서 139 [pC]이며, 부극성 영역의 중심은 위상 287° 에서 -142 [pC]을 얻었다. 30 [kV] 인가 시 정극성 영역의 중심은 위상 61° 에서 139 [pC]이며, 부극성 영역의 중심은 위상 234° 에서 -89 [pC]임을 확인하였다. 인가전압 상승에 따른 정극성 영역의 위상각 표준편차는 24.3에서 25.0으로 부극성 영역의 위상각 표준편차는 28.5에서 31.2로 약간 증가하였고, 정극성 영역의 부분방전 전하량 표준편차는 27.5에서 40.0으로 부극성 영역의 부분방전 전하량 표준편차는 25.2에서 42.1로 증가하였다.

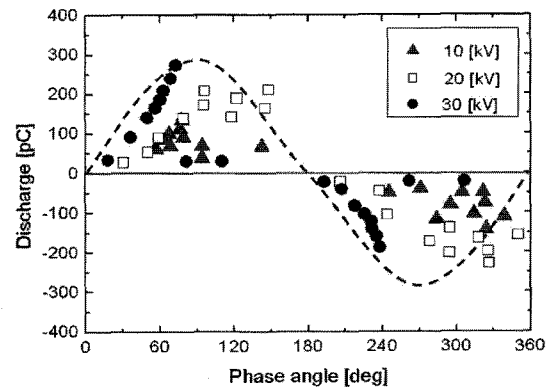


그림 5. K-means 군집분류 기법에 의한 군집중심 분포.

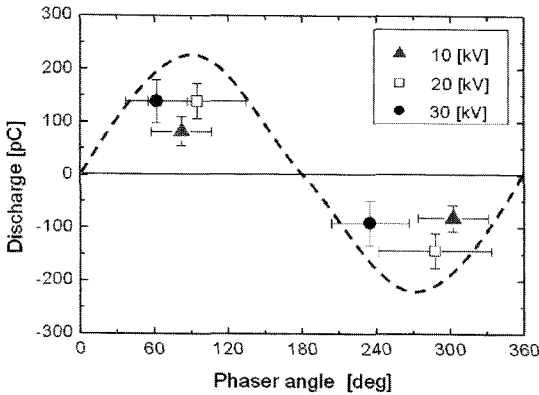


그림 6. 균집중심의 평균과 표준편차.

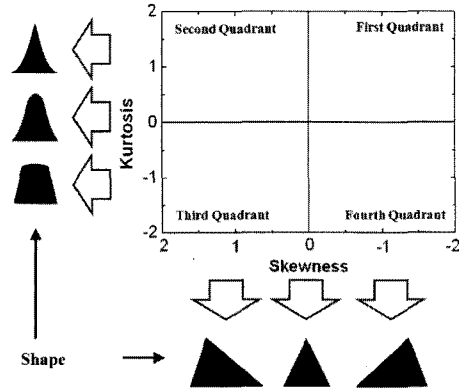


그림 7. 왜도-첨도 플롯.

5. 왜도-첨도 plot에 의한 균집 분포 해석

왜도 (Skewness : Sk)와 첨도 (Kurtosis : Ku)는 합수를 정규 분포에 입각하여 정량화하고 도수 분포의 집중 형태를 전체적으로 측정하는 값이다. $x(t)$ 를 시계열 신호로 하고, $x(t)$ 의 확률밀도함수를 $P(x)$ 로 했을 때 왜도와 첨도는 다음 식으로 구할 수 있다.

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

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

왜도는 자료 분포의 기울어진 방향과 정도를 나타내는 값으로 왜도 계수 값이 클수록 비대칭도는 커져서 자료의 분포가 한 쪽으로 치우치게 된다. 정규분포의 왜도는 "0"이며 왜도 계수가 양 (+)의 값을 가지면 오른쪽 꼬리분포가 되고, 음 (-)의 값일 경우는 왼쪽 꼬리분포가 된다. 왜도의 계수 값이 큰 양 (+)의 값을 갖는다는 것은 정규분포 곡선이 왼쪽으로 치우쳐서 평균 이하지만 몇몇 값들이 상당히 크다는 것을 의미한다.

첨도는 분포가 얼마나 중심에 집중되어 있는가를

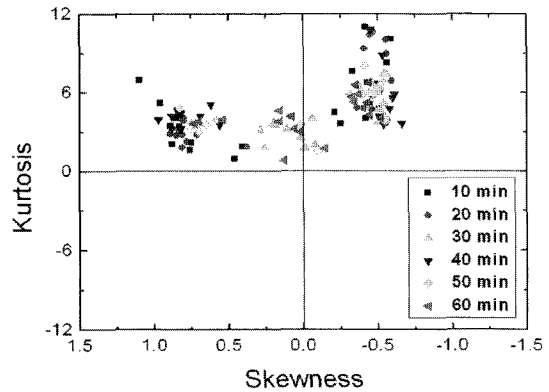


그림 8. 시간 경과에 따른 균집 분포의 왜도-첨도 플롯.

볼 때 사용하며 첨도의 값이 "0"이면 정규 분포이고, "0"보다 크면 정규 분포보다 높은 봉우리를 갖는다. 왜도와 마찬가지로 첨도에서도 분포의 형태에 따라 부분방전의 발생 특성을 알 수 있다.

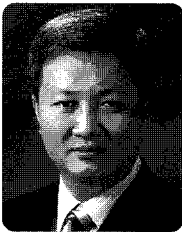
그림 8은 보이드 결합 시료에 30 [kV]를 인가한 상태에서 한 시간 동안 측정된 부분방전 데이터를 K-means 균집화로 해석한 후, 정규성 및 부극성 균집중심을 크기함수로 변환하여 왜도를 x축으로, 첨도를 y축의 값으로 표시한 왜도-첨도 플롯이다. 통계적으로 신뢰성 있는 분포의 집중형태를 파악하기 위하여 전압인가 후 매 10분마다 10 [sec] (60 [cycle] × 10회) 동안 측정된 부분방전 데이터를 균집화 하여 왜도와 첨도를 계산하였다. 그 결과 모든 데이터가 제 1 사분면과 제 2 사분면에 분포하고 있었다. 이를 통하여 보이드 결합 시료 부분방전 균집중심의 분포

형태가 표준정규분포보다 더 뾰족한 형태, 즉 평균보다 높은 형태가 된다는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] 조경순, 홍진웅, “전력케이블 접속재 XLPE/EPDM 계면의 부분방전 특성”, 전기전자재료학회논문지, 20권, 9호, p. 780-786, 2007.
- [2] 조경순, 이강원, 김원중, 홍진웅, 신종열 “분포 통계 해석에 의한 계면 결함 부분방전 진단”, 전기전자재료학회논문지, 21권, 4호, p. 348-353, 2008.
- [3] 유근양, “지중케이블 접속재 시공”, 전기설비, 18권, 10호, Vol. 194, p. 40, 2001.
- [4] Tokunaga, S., Tsurusaki, T., Arief, Y.Z., Ohtsuka, S., Mizuno, T., Hikita, M., "Partial discharge characteristics till, breakdown for XLPE cable joint with an artificial defect", Proceedings 7th International Conference on Application of Dielectirc Materials, p. 1206, 2003.
- [5] S. Matsumoto, "Recent Technology of Sensing, Monitoring, Diagnosis, and Maintenance for Aged Electric Power and Energy System", Trans. on IEEJ, Vol. 126-B, No. 6, pp. 574-577, 2006.

저|자|약|력|



성 명 : 조경순

◆ 학 력

- 1991년
광운대학교 공과대학 전기공학과
공학사
- 1993년
광운대학교 대학원 전기공학과
공학석사
- 2007년
광운대학교 대학원 전기공학과
공학박사

◆ 경 력

· 현재

서일대학 컴퓨터전자과 부교수

