

부분 방전 전하와 음향 방출 펄스의 동시 측정에 의한 트리잉 파괴 진단



The Diagonosis of Treeing Breakdown Using Simultaneous Detection of Electrical Charge and Acoustic Emission pulse of Partial Discharge

김성홍*, 박재준**, 김재환*

(Sung-Hong Kim, Jae-Jun Park, Jae-Hwan Kim)

Abstract

Internal voids in insulators give rise to partial discharge, which causes a local breakdown and even entire insulation breakdown. Recently, the necessity of establishing the way to diagnose the aging of insulation materials and to predict of insulation breakdown become important.

The purpose of our work are to investigate the treeing phenomena with an artificial needle shaped void by the charge of discharge and acoustic emission pulse in each phase angle area at the same time. We analyzed the Φ -QA- t pattern and Φ -AEA- t pattern using statistic operators such as pulse magnitude, pulse number, skewness, kurtosis. Therefore, the relation between the charge of discharge and acoustic emission pulse will be helpful to predict the breakdown just before the breakdown occur.

Key Words(중요 용어) : Φ (인가전압 위상각)-QA(방전 전하량의 평균 펄스 진폭) - t(열화 시간), Φ (인가전압 위상각)-AEA(음향 방출의 평균 펄스 진폭)- t(열화 시간), Skewness(왜도), Kurtosis(첨쇄도).

1. 서 론

안정된 전력 요구가 점차적으로 증가됨에 따라 서 전력 기기나 전력 케이블을 시작으로 전력 계통에 있어서 절연 성능의 중요성이 한층 높아지고 있다. 그러므로 종래에 비해 절연 재료의 내구성, 전기적 특성 등이 우수한 고분자 재료가 광범위하게 이용되고 있다.

그러나 고분자 재료 내의 미소 보이드 또는 도체 경계에서의 보이드, 크랙(crack)등의 결함이 존재하면 부분 방전의 원인이 되어 재료를 열화 시키고 절연 파괴를 일으키게 된다는 것은 지금까지 알려진 사실이다. 이 문제에 대해 많은 연구가 진행되고 있으나 완전한 대책은 아직 없다.¹⁾

절연 조직 중에 부분 방전이 발생하지 않기를 바라지만, 발생되면 그 방전이 절연 수명에 치명적

인 역할을 하기 때문에, 절연 파괴만은 방지해야 한다는 관점에 파괴 예지를 위한 절연 열화 진단법이 확립되어야만 한다.

부분 방전이 발생하게 되면 여러 형태로의 에너지 변환이 일어나게 된다. 즉, 방전 전류, 음향 방출, 광 방출 등의 물리량을 검출할 수 있으며, 이중 전기적 신호와 음향 방출 등의 감도가 우수하여 주로 이용되고 있다. 음향의 장점으로는 불투명한 재료와 복잡한 전극 배열에 적합하고, 음향신호를 검출하기 때문에 전기, 자기적인 간섭을 받지 않고 실시간의 트리 진단과 서비스 상태의 감시가 가능하다. 방전 전하량의 검출의 장점으로는 음향에 비하여 노이즈의 영향을 덜 받고, 고전압 기기 등의 신뢰성을 평가 하기에 적합하다. 이 둘의 장점 으로서는 어느 정도 긴 물체 중에서도 트리 발생 점의 위치 표정에 의해 국소적인 열화 상태의 파악이 가능하다.

본 연구에서는 부분 방전 측정 시스템과 음향 방출 시스템의 장점을 이용하기 위해 복합적으로 결합하여, 유중 상태 고분자 시편에서 전기적 트리를 유발시켜 트리 개시로부터 파괴 시까지의 트리

* : 광운대학교 전기공학과 신기술연구소

** : 중부대학교 컴퓨터 과학부

접수일자 : 1996년 7월 15일

심사완료 : 1997년 2월 15일

열화 각 과정에서 인가 전압 위상각 해석법으로 상호 관계를 규명해서 열화 진단을 용이하게 하기 위하여 복합 시스템을 구현하였다. 분석 방법으로는 상용 주파 인가 전압 11[kV], 60[Hz]의 위상각에 의한 음향 방출 평균 펄스 진폭(이하 Φ -QA라고 약한다)과 상용 주파 인가 전압 11[kV], 60[Hz]의 위상각에 의한 방전 전하량의 평균 펄스 진폭(이하 Φ -AEA라고 약한다)에 대한 3차원 분포 양상을 이용하여 트리 개시 및 진전에 따른 트리 열화를 감시할 목적으로 독자적으로 개발한 음향 방출 계측 시스템과 부분 방전 검출기를 복합 운용하여 연구에 착수하였다.^{2,3)}

2. 시편 제작 및 실험 방법

2.1. 시편 및 전극 구성

본 실험에 사용된 시편은 저밀도 폴리에틸렌(이하 LDPE)으로서 밀도 0.92[g/cm³] LDPE의 펠렛(Pellet)을 사용하였다. 순수한 LDPE 펠렛을 자체 제작한 시료 제작기의 주형 위에 올려놓고 120[°C]에서 5분간 예열한후 시료 중앙에 바늘을 꽂고 압력이 100 [kg·f/cm²]가 될 때까지 5분간 단계적으로 가압하였다. 다시 5분 동안 주형을 가열한 후 시료의 투명도를 위하여 10[°C]의 물에서 급냉 하였다. 시편의 블록 형태는 그림 2-1에서 나타낸 바와 같다. 시편의 규격은 30×40×3.5[mm]로 제조하였으며 침 전극은 직경 0.56[mm Φ]인 스테인레스 스틸 재질의 바늘을 에칭법에 의해 침 전단 곡률 반경10 [μ m]로 조정하여 시편에 주입하였다. 삽입시 시료의 변형을 없애기 위하여 다시 110[°C]에서 10분간 가열한 후 서냉하여 트리 전극 시편으로 사용하였

다. 인공적인 침상 보이드는 주입된 전극을 다시 빼내어 보이드 갭길이를 1.5[mm]의 시편을 제작하였으며, 이때 1기압의 공기를 봉입 하였다. 시료의 표면과 침전극 사이를 에폭시 수지 계의 접착제로 밀봉하였고, 실험 순서에 따라 실물 현미경 (배율 80배)로 관찰하여 보이드의 이상 유무를 확인한 후 실험에 사용하였다. 전극의 형태는 침대 평판 전극이고 극간 거리는 3.5[mm]로 하였다.

2.2. 실험 장치 및 방법

실험 장치에 대한 블록 선도는 그림2-2에 표시하였다. 인가 전압은 11[kV] 60[Hz]이며 전압 인가 방식은 승압 속도 1[kV/s]로 11[kV]까지 전압을 인가한후 파괴시까지 일정하게 유지하였다. 고전압 회로는 음향 방출 검출 회로의 잡음을 일으킬 수

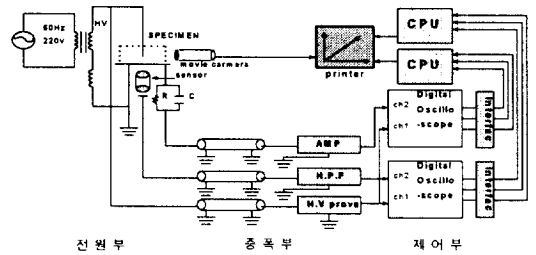


그림 2. 실험 장치 블록 선도
Fig. 2. Block Diagram of Experiment Device.

있는 코로나 방전을 억제하기 위해 실리콘 오일에 함침하였다. 음향 센서는 공진 주파수 300[kHz]를 갖는 ZPT 변환기가 사용되었고 평판 전극 바로 아래 거리 2[cm]에 설치하였고 음향의 원신호 자체는 너무 미약해서 80[db]의 차동 증폭기로 증폭하고 80[kHz]의 High Pass Filter를 사용하였다. 설계시 최대한의 노이즈를 제거하였고 문턱 준위는 증폭된 신호를 0.03[V]로하여 확실한 음향 신호를 얻을 수 있었다. 부분방전 검출은 Partial discharge detection system(BIDDLE instruments)로서 방전 전하량을 탐지하기 위해 같은 방법으로 High Pass Filter를 사용하여 전원 주파수를 제거하였다. 위상각 특성을 보기 위해 인가 전압을 고전압 Probe(HP 34300A)로 전압을 강하시켜 디지털 오실로스코프(HP 54501)의 채널1에 입력시켰다. 증폭된 음향 신호는 동기화를 거쳐 인가 전압 한 주기 동안의 펄스를 디지털 오실로스코프 채널 2에 입력되어 Interface를 통해 PC로 전송되고 각 펄스의 위상 정보와 펄스 크기 정보를 얻는다. Filtering된 방전 전하량도 같은 방법으로 디지털

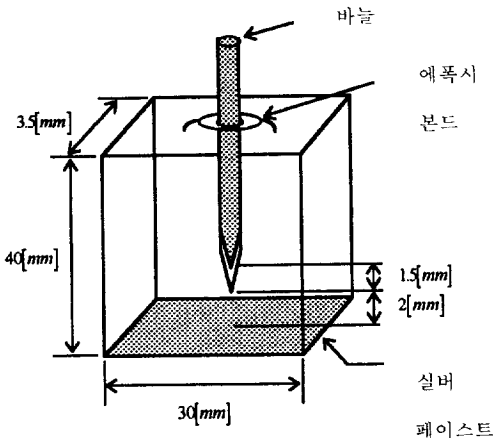


그림 1. 전극 구성
Fig. 1. Electrode Composition.

오실로스코프에 입력되어 PC로 전송된다.⁴⁾ 방전 전하량과 음향 방출의 평균 펄스는 인가 전압 1사이클을 정의 제로 크로스점을 44개의 위상각으로 구분하여 각 위상각 구간 마다의 3분 동안의 펄스를 평균한값으로 사용하였다.

3. 실험 결과 및 검토 고찰

3.1. 인공적인 침상 보이드에 따른 트리 진전 양상

보이드 방전시 트리 형태는 잔가지가 존재하는 가지형 트리 형태이고 파괴에 이르는 시간은 30분의 짧은 파괴 시간을 얻을 수 있었다.

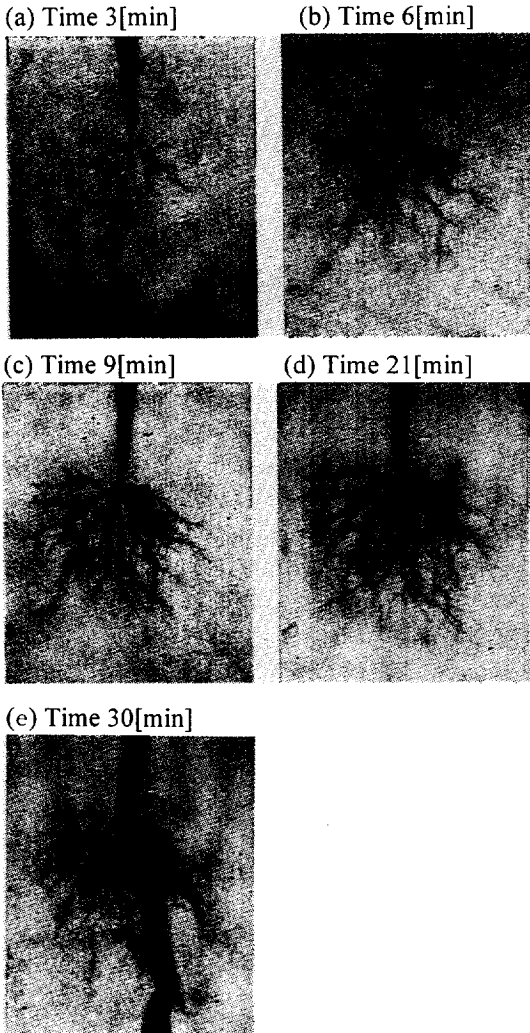


사진 1. 트리의 진전 양상
Photo. 1. Tree Propagation-Type.

인공적인 보이드 갭 길이 1.5[mm]의 시료에 전압11[kV]를 인가 할 때 보이드 방전에서 트리로 진전하는 양상을 나타내고 있다. 사진 1. (a)-(e)는 이퀄라이저 필터링을 거친 후 각각 열화 초기 3분, 6분, 9분, 21분, 파괴시 30분의 보이드 방전 트리 진전을 나타내고 있다.

트리 형상은 전 보고^{5,6,7)}와 같이 잔가지가 많은 가지형 트리 진전을 볼 수 있었다. 트리의 길이(Lmax)는 방전갭 하부로부터 대향 전극으로 향하여 신장하는 트리 내부의 최대 트리 길이로 하였다. 과전후 2분 후에 트리의 발생 성장을 확인할 수 있었다. 트리의 성장은 1개소만이 아니고 복수의 장소로부터 일어나 그중 1~2개가 크게 성장하여 절연 파괴에 이른다. 특징적인 것은 전 보고^{5,6,7)}와 같이 갭 길이가 길어서 상대적으로 파괴에 이르는 시간이 빨랐으므로(30분) 트리의 발생과 진전 양상도 각 가지마다 독립적으로 발생됨을 알 수 있었다.

3.2. 열화 시간에 따른 방전 전하량의 평균 펄스 진폭(이하 QA라고 약한다) 과 음향 방출 평균 펄스 진폭(이하 AEA라고 약한다) 의 특징

인공적인 보이드 갭 길이 1.5[mm]의 시료에 전압11[kV]를 인가 할 때 발생하는 QA와 AEA를 동시에 계측하였다.

그림 3 은 트리링 열화 시간에 따르는 QA의 특성을 나타내고, 그림 4는 트리링 열화 시간에 따르는 AEA의 특성을 나타내고 있다.

그림 3 에서 트리 길이(이하 Lmax)는 열화 초기에 급격히 증가되었다가 그 이후에는 완만한 증가를 보이다가 파괴 말기에 급속히 증가하였다. QA와 Lmax는 비례하지 않아서 절연 파괴 예지에 이용될 가능성이 적다고 사료된다.⁸⁾ 왜냐하면 방전갭 하부로부터 대향 전극으로 향하여 신장하는 축방향 트리진전 길이(Lmax)경우는 적은 방전에서도 충분히 성장하기 때문에 QA의 감소에도 불구하고 Lmax는 계속 증가한다.

QA에 있어서 정부의 펄스 크기는 다르게 되고 측정된 부분 방전 전하량은 200[pc]-1400[pc]이다. 트리가 진전함으로써 QA는 점진적으로 증가하여 파괴 말기에 감소하다가 결국 파괴에 이른다. 이처럼 초기에 점진적으로 증가함은 가지형 트리의 발생 밀도가 점차 높아져 증가 하지만, 파괴 말기에 QA의 진폭이 감소하는 이유는 방전이 국부적으로 발생하다가 하나의 주 채널이 형성되어 방전이 급속히 일어나기 전 단계로 사료된다. 파괴에 이르러

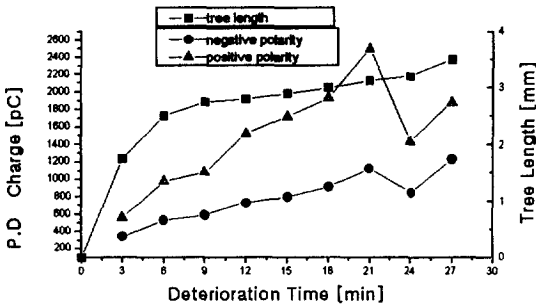


그림 3. 트리잉 열화 시간에 따른 트리 길이와 QA의 특성

Fig. 3. Characteristics of Tree Length and QA according to Treeing Deterioration Time.

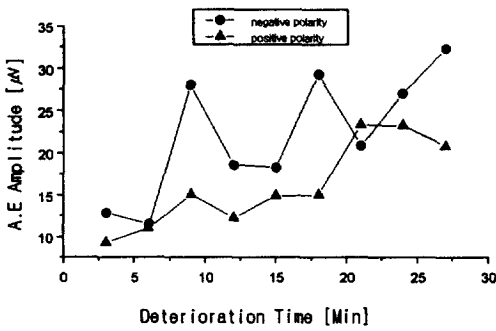


그림 4. 트리잉 열화 시간에 따른 AEA의 특성

Fig. 4. Characteristics of AEA According to Treeing Deterioration Time.

서는 트리 관내에 잔류 전하의 포획과 열화 면적의 확대에 급속도로 방전 전하량이 증가하여 파괴에 이른다.

그림 4의 AEA는 QA와 전반적인 경향으로 보아서 유사한 그래프를 나타내고 있다.

단지 트리 발생 초기로부터 파괴에 이르기까지 증가와 감소를 이루며 전체적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 파괴에 이르기까지 증가와 감소를 이루는 AEA의 진폭 특성은 QA의 진폭 특성과 다소 다른 경향을 보여주고 있다. 이는 QA와 AEA의 진폭 특성은 상이한 경향이 있음을 보여주고 있는 Yoshimura씨 등의 보고와 일치하고 있음을 알 수 있다.¹¹⁾

그림 5은 트리잉 열화 시간에 따른 방전 전하량의 평균 펄스수(이하 QN이라고 약한다)의 특성을 나타내고, 그림 6은 열화 시간에 따른 음향 방출 평균 펄스수(이하 AEN이라고 약한다)의 특성을 나타내고 있다.

QN은 QA와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 발생 펄스는 열화 초기에는 작은 진폭을 갖는 펄스수의 증가를 보여주고 있고, 열화가 가속됨에 따라 큰 진폭을 갖는 펄스수의 증가를 보여주고 있다. 열화 말기인 20분 이후에는 작은 진폭을 갖는 펄스수의 급격한 감소를 보인다 파괴에 이르고 있다.

AEN은 AEA와 유사한 그래프를 나타내며 펄스수가 증감을 계속 하면서 점진적인 증가를 보인다 파괴에 이른다. AEA는 QA와 전반적인 경향으로 보아서 유사한 그래프를 나타내고 있다고 볼 수 있지만, QN과 AEN는 전반적인 경향으로 보아도 유사 관계는 볼 수 없었다.

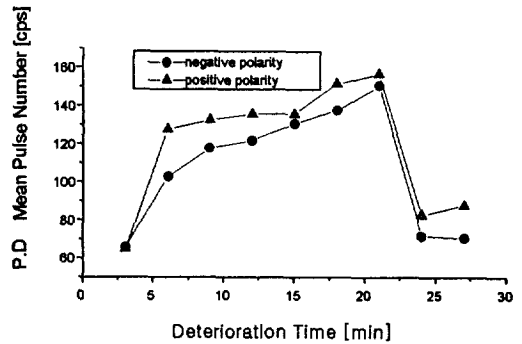


그림 5. 트리잉 열화 시간에 따른 QN의 특성

Fig. 5. Characteristics of QN According to Treeing Deterioration Time.

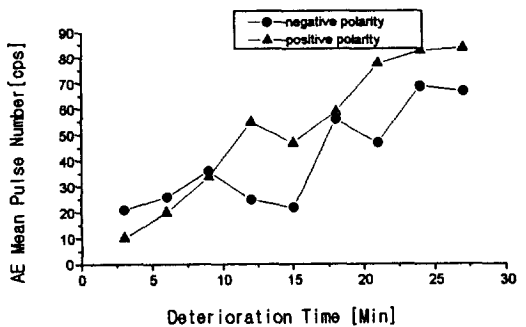


그림 6. 트리잉 열화 시간에 따른 AEN의 특성

Fig. 6. Characteristics of AEN According to Treeing Deterioration time.

3-3. Φ -QA-t와 Φ -AEA-t의 분포 특성

그림 7은 인가 전압 위상 각에 따른 방전 전하량의 평균 펄스 진폭의 열화 시간(이하 Φ -QA-t라고 약한다)의 분포 특성을 나타내고 그림

8은 인가 전압 위상 각에 따른 음향 방출의 평균 펄스 진폭의 열화 시간(이하 ϕ -AEA-t라고 약한다)의 분포 특성을 나타내고 있다. ϕ -QA-t의 1.5[mm] 인공적 침상 보이드 방전의 분포 특성은 정극성시 열화 초기부터 말기까지 피이크(위상각이 $\pi/2$)를 넘어서는 영역에서 펄스 발생을 보이지만 펄스 발생 분포 중심은 저위상($\pi/6 \sim \pi/4$)영역에서 발생하고, 부극성시는 열화 초기 저위상($110\pi/9 \sim 115\pi/9$)에 머무르다 파괴 말기에 이르러 점차 고위상($3\pi/2$)으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 무보이드 경우는 특정 영역($\pi/6, 7\pi/6$)에서 집중하고 있지만^{2,5)} 보이드 방전시는 호트러짐이 크게 나타나고 있다. 정극성시 저위상각에 머무르는 이유는 교류 전압 인가시 반 사이클 부의 피크로부터 극성이 변화하여 정극성의 피이크는 부극성의 방전에 의해 잔류 전하의 영향을 최고로 받기 쉬운 영역이 정극성의 위상 초기이며 정극성 피크 근방에서는 전류 전하 영향을 최고로 받기 어렵기 때문에 피크 부근에서 펄스 발생이 둔화된다. 부극성시 파괴 말기 고위상으로 이동하는 이유는 Kitamura씨^{3,9)} 등의 연구를 인용하면 파괴에 가까울수록 트리 길이가 길어져서 방전시 높은 전압이 필요하기 때문에 고위상으로 약간 이동한다고 사료된다.

ϕ -AEA-t의 분포 특성은 갭 길이가 긴 경우인 큰 펄스 진폭을 갖는 펄스의 호트러짐이 크다고 볼 수 있다. 전 보고^{5,6,7)}의 경우 무보이드 경우와 보이드 방전시 펄스 발생이 급격히 상승했으며 인공적인 침상 보이드의 길이가 길수록 큰 펄스 진폭을 갖는 펄스의 호트러짐이 크게 발생함을 볼 수 있었다. 정극성시는 방전 전하량과 유사한 경향을 나타내며 열화 초기부터 파괴에 이르기까지 저위상 영역에 이르고, 부극성시는 펄스 발생 위상 분포의 폭이 넓어지면서 분포 중심의 호트러짐이 크고 열화 초기부터 열화가 진행됨에 따라 저위상으로 이동하다 파괴 말기 고위상 영역에 이른다. 이상을 요약해 볼 때 갭길이가 긴 경우[1.5 mm]일 때는 ϕ -QA-t와 ϕ -AEA-t의 비교에 있어서 정극성시는 둘다 펄스 발생 위상 영역이 저위상에서 발생하여 파괴 말기에 이르렀고 부극성시는 ϕ -QA-t는 열화 초기에는 저위상에서 머무르다 파괴 말기는 고위상 영역으로 이동하지만 ϕ -AEA-t는 위상의 호트러짐이 크고 전 위상 영역에서 발생함을 알 수 있었다.

3.4. 방전 파라메타 왜도(S) 및 첨예도(K)

본 논문에서는 트리 채널 내의 부분 방전에 의해 트리가 진전함에 따라 ϕ -QA와 ϕ -AEA의 동

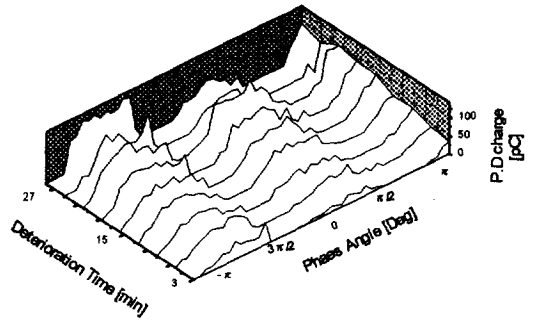


그림 7. 보이드 방전에 있어서 ϕ -QA-t 분포 특성

Fig. 7. Characteristics of distribution ϕ -QA-t on the void discharge(11[kV], 1.5[mm]).

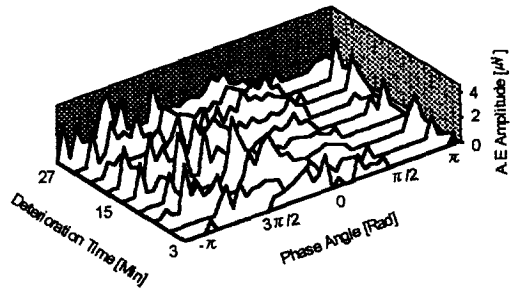


그림 8. 보이드 방전에 있어서 ϕ -AEA-t 분포 특성.

Fig. 8. Characteristics of distribution ϕ -AEA-t on void discharge(11kV), 1.5 [mm])

시 측정으로 상관 관계를 얻었다. 이런 변화를 더욱 정량적으로 표현하여 절연 진단 파라메타로 이용하기 위하여 분포의 특성량인 왜도를 도입하기로 한다. 이와 같은 특성량은 분포 형상에만 의존하는 정량화한 값으로 여러 연구자에 의해 보고되어 활용되고 있다.^{2,10)} 왜도 S는 분포의 비대칭성을 표현하는 양으로 좌우가 대칭이면 S=0, 오른쪽 분포 중심이 낮으면 (右下) S>0, 오른쪽 분포 중심이 높으면 (右上) S<0, 으로 된다. 그림 9은 1.5[mm]갭길이가인 시편에 11[kV]의 전압을 인가한 경우 ϕ -QA의 왜도를 나타내고 그림 10은 갭 길이가 1.5[mm]인 시편에 11[kV]의 전압을 인가한 경우 ϕ -AEA의 왜도를 나타내고 있다. ϕ -QA의 경우는 열화시간이 21분까지는 정펄스 분포의 왜도 S+와 부펄스의 S-도 함께 정의 값을 갖지만 (右下 분포 형상 = 저위상 분포 중심)이 파괴 말기에 이르러서는 S+는 급격히 증가하다 떨어지고 S-는 급격히 감소하여 부의 값을 나타낸다. 이것

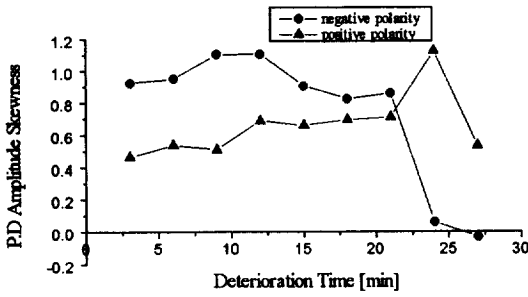


그림 9. ϕ -QA의 분포 패턴에 대한 왜도의 시간변화

Fig. 9. Time variation of the skewness of ϕ -QA distribution patterns(11[kV], void of 1.5[mm]).

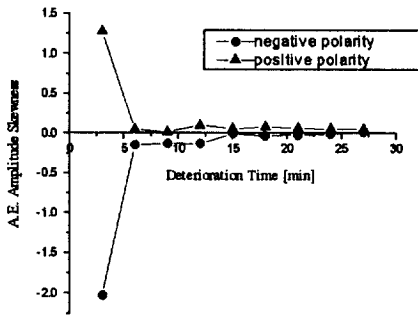


그림 10. ϕ -AEA의 분포 패턴에 대한 왜도의 시간변화

Fig. 10. Time variation of the skewness of ϕ -AEA distribution patterns(11[kV], void of 1.5[mm])

이로부터 ϕ -QA 분포의 왜도는 절연 파괴가 일어나기 전에 급격히 감소하므로 파괴 예지에 중요한 정보를 준다. ϕ -AEA는 S+ 는 열화 초기에는 정의 값을 나타내지만 이후 파괴 말기까지 대칭형의 분포 특성을 보여준다. S- 는 부의 값에서 시작하여 15분이 지나면서 파괴 말기까지 대칭형의 분포 특성을 갖는다.

이상을 요약해 보면 ϕ -QA는 왜도에 의한 파괴 예지가 가능한 정보로 사료되고 ϕ -AEA는 ϕ -QA와 상이한 상태를 나타내고 있다. 한편 ϕ -QA와 ϕ -AEA 분포의 첨세도(이하 K라고 약한다) 표현하는 것으로 K가 큰 경우 즉 위상적으로 집중하여 부분 방전이 발생하는 경우에는 공간적으로 부분 방전이 집중하여 발생하는 경우가 많다. 반대로 K가 작은 경우에는 위상적으로 흐트러짐이 크고 공간적으로 흐트러짐이 크다고 생각한다. K 값이 1.8일 경우 방형 분포 2.4일 경우는 삼각 분

포를 나타내고 3.0일 경우는 정규 분포를 나타내며 9.0일 경우는 지수 분포를 나타낸다. 그림 11은 ϕ -QA의 K를 나타내고 그림12은 ϕ -AEA의 K를 나타내고 있다. ϕ -QA의 K값은 초기 3분 시는 정, 부의 값이 각각 4.2와 7이 나타나며 트리가 진행되어 파괴에 이르기까지 1.5 ~ 2값을 나타내고 있다. ϕ -AEA의 K 값은 정규성시 열화 초기값은 매우낮은 1.5의 값이고 열화가 진행되어 파괴에 이르기까지 큰 변화 없이 1.5 ~ 3.5값을 나타내지만 부극성시 열화 초기에 5정도이고 열화가 진행됨에 따라 점차 감소하여 파괴에 이르러서는 1.6값을 나타내고 있다. 이로서 ϕ -QA와 ϕ -AEA의 K는 열

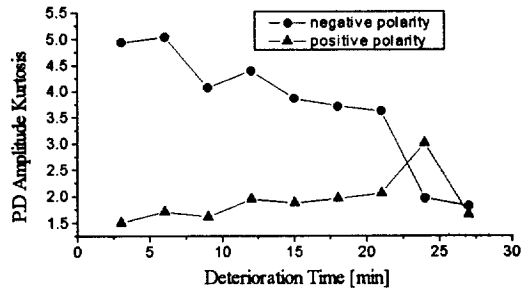


그림 11. ϕ -QA의 분포 패턴에 대한 첨세도의 시간변화

Fig. 11. Time variation of the kurtosis of ϕ -QA distribution patterns(11[kV], void of 1.5[mm])

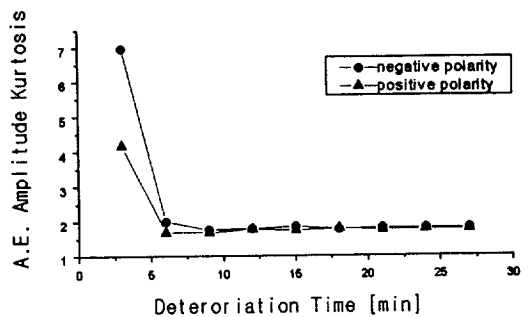


그림 12. ϕ -AEA의 분포 패턴에 대한 첨세도의 시간변화

Fig. 12. Time variation of the kurtosis of ϕ -AEA distribution patterns(11[kV], void of 1.5[mm])

화 초기에는 방전의 집중도는 크지만 방전이 진행됨에 따라 광범위한 위상 영역에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 열화 초기는 지수함수 분포 형상을 보이고 열화가 진행됨에 따라 방형 분포 형상

으로 변해 감을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 방전 전하량과 음향 방출 펄스를 동시에 계측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 트리 개시로 부터 파괴에 이르기까지 열화 시간에 따른 QA와 AEA의 진폭 특성은 전반적인 경향으로 보아 유사한 형태를 나타내고 Yoshimura씨의 연구 결과와도 비교될 수 있음을 알 수 있었다. QN과 AEN과의 펄스수의 분포 특성에 있어서는 유사성을 확인할 수 없었다. 이로써 QA와 AEA의 진폭 특성은 열화 진단에 정보로 이용될 수 있다고 생각된다.
2. 위상각 분포 특성에 있어서 무보이드 경우 특성 위상 영역에 집중 하지만 본 연구에 ϕ -QA-t와 ϕ -AEA-t의 경우 피크를 넘어서 고위상 영역까지 분포 중심의 흐트러짐이 크다는 사실은 절연 진단의 정보로 사용되리라 생각한다.
3. 절연 진단 파라메타 왜도(Skewness)와 첨쇄도(Kurtosis)는 위상각 해석의 유효한 파라메타로 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. L.A Dissade, J.C Fothergill, : Electrical Degradation and Breakdown in Polymers Peter Peregrious Ltd, pp. 69~154, 1992
2. T. Okamoto, T.Tanaka, : "Change in Pulse-Mean ϕ -Q Distribution Patterns of Partial Discharge due to treeing Propagation", Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn, Vol. 102. A, NO. 12, pp.665~672, 1982
3. Tairo et al, : "Phase Angle Analysis of discharge Magnitude distribution in a Fine Void", JIEE. Vol. 109, NO. 12, 1989
4. Koji Urume, YoshiYasr Ehara, Haruo Kishida, Tairo Ito, : "Analysis of Treeing Phenomena by Discharge Luminescence in Each Phase Angle", Musashi Institute of Technology, Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn. Vol.115. A, NO. 11, 1995
5. 朴材俊, 姜泰伍, 金在煥 : "트리잉 열화에 따른 ϕ -AE 분포 특성에 관한 연구", 대한 전기 학회, Vol. 41, No. 9, pp. 1060~1070, 1992
6. 朴材俊, 金在煥 : "음향 방출 계측법에 따른 가교 폴리에틸렌 케이블의 트리잉 파괴 예지에 관한 연구", 조명 전기 설비 학회 논문지, Vol.7, No4, pp26~33, 1993
7. 朴材俊, 金相男 : 인공적 침상 보이드의 갭 길이 변화에 따른 음향 방출 특성", 전기 전자 재료 학회, Vol.8, No.4, pp. 495~503, 1995
8. C. Laurent & C. Mayoux : "Analysis of Propagation of Electrical Treeing Using Optical and Electrical Methods", IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-15,33,1980
9. Kitamura and S. Hirabayashi : "Tree Growth in Epoxy Resin at Final Stage of Internal Partial Discharge Degradation", JIEE, Vol. 104. NO. 10, PP.561-568, 1974.
10. Hiroyuki Matsuzaki. etal : "A Study of Phase-Angle Analysis Discharge at a Cylindrical Void in a Polyethylene Sheet." JIBE, Vol. 108, NO. 3, 1988
11. N.Yoshimura, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials", IEEE Trans. Elic. Ins. Vol. EI-17, No. 4, pp. 314-8(1982)