

음향방출 계측법에 따른 가교폴리에틸렌 케이블의 트리잉 파괴 예지에 관한 연구

(A Study on Prediction of Treeing Breakdown in XLPE Cable According to Method of Acoustic Emission Detection)

金在煥* · 朴材俊**

(Jae-Hwan Kim · Jae-Jun Park)

요 약

트리열화 현상을 감시하기 위한 노력으로 음향방출 펄스를 계측할 수 있는 자동계측 시스템을 자체 개발하였다.

가교 폴리에틸렌(이하 XLPE라 부른다)시편에 교번전압 15(kV)을 인가했을 때 수초형 트리(bush-type tree)로의 개시 및 진전시 수초형에서 가지형(branch-type tree)으로 진전할 때는 음향방출 평균펄스 진폭(이하 펄스평균 진폭이라 부른다)이 작은 펄스가 많이 발생하였고, 가지형에서 수초형 트리로 진전할 때에는 큰 펄스진폭을 갖는 작은 수의 펄스수를 계측할 수 있었다. 이로써 작은 진폭을 갖는 많은 펄스진폭 및 펄스수에 대한 3차원의 분포양상으로서 왜도(Skewness)가 방전의 특성량임을 확인하였고, 왜도를 이용한 S-평면상의 궤적(Trajectory) 변화시 원점에서 멀어질수록 파괴에 가까워짐을 알았다.

Abstract

The acoustic emission automatic detection system is developed to observe tree deterioration phenomena.

Applying an alternating voltage of 15(kVrms) to XLPE tree specimens, many pulses of small amplitude are detected when the bush type tree develops branch type and a few pulses of high amplitude produced as branch type propagated to bush type tree.

Therefore, it is known that pulses having small amplitude operates as a destructive factor.

It is observed that the skewness of the amplitude and the number of average pulses as distribution tendency of three dimension are characteristic quantity of AE pulses.

As the trajectory of skewness is farther from the origin on the S-plane, it is more likely to breakdown.

* 正會員 : 광운대 電氣工學科 교수·工博

** 正會員 : 광운대 電氣工學科 강사·工博

接受日字 : 1993年 5月 27日

1. 서 론

고전압에서 사용되는 가교폴리에틸렌(이하 XLPE라 부른다) 절연케이블이나 전기기기등 고체 절연조직 내부에 미소한 결함 즉, 미세공극(micro void), 미세기포(micro bubble), 갈라진 금(crack), 이물질 및 돌기 등이 존재하면 고전계 영역에서 부분파괴의 원인으로 인해, 절연 수명에 가장 유해한 전기적 트리가 발생하게 되며, 이로 인하여 부분방전을 일으켜서 절연 수명을 현저히 감소시킨다.^{1), 2)}

이런 문제에 대해서 지금까지 많은 연구가 있었다. 즉, 부분방전의 정량적인 특성을 파악하기 위한 노력으로서 부분방전 및 음향방출 펄스 발생 특성의 새로운 정보로서 인가전압 위상각을 도입하여 절연열화과정 및 절연파괴와의 관계, 예를 들면 여러종류의 전극형상에 의한 싸이클 평균 $\phi-q$ 분포를 도입하여, 보이드 결함(void-defect)를 추정했던 예가 그 대표적이라 할 수 있다.^{3), 4), 5)}

그 밖에도 복합 절연재료의 부분방전시 위상각 특성을 측정하여 절연재료의 수명을 추정하였다.⁶⁾ 이런 여러가지 대책이 강구되었지만, 이들의 대책 역시 아직 완전하다고는 말할 수 없다.

이런 절연파괴 사고를 미연에 방지하기 위해서는 확실한 트리밍 열화진단계측법(measuring method of treeing deterioration diagnosis)를 개발하여 연구할 필요가 있다. 때문에 각종의 비파괴 실험방법 중, 국내 전력 케이블의 접지 방식중 부분방전시 방출되는 전하량을 계측하는 것보다 음향방출 펄스등을 계측함이 용이하다고 사료되어, 음향방출 자동계측 시스템을 자체개발하여 정량화한 새로운 정보를 얻기 위해서 인가전압 위상각의 정보를 도입하였다.^{12), 7), 8), 9)}

본 연구에서는 전압인가 직후 트리의 개시, 진전, 절연파괴 전 과정을 통하여 인가전압 15(kV), 60(Hz)의 위상각에 의한 음향방출 평균펄스 진폭과 펄스 수에 대한 3차원의 분포양상을 나타내었고, 그에 따라 정량화된 왜도 및 케적을 이용하여 트리의 진전정도를 판명하였다. 이들의 결과에 기인하여 트리 파괴 예지법을 검토하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

2.1 시편제작 및 전극구성

본 실험에 사용된 시편은 XLPE 케이블 시편을 이용하여 케이블내 동심을 빼내어 일정한 크기로 절단한 다음, 자체 제작한 시료제작기로 110[°C]에서 40분 동안 150[kg·f/cm²]의 압력을 가한 채 서냉하였다.

시편의 블록 형태는 그림 2.1에 나타낸 바와 같다. 침전극은 직경 0.56[mm]인 일본제 바늘(스테인레스 스틸)을 에칭법에 의해 침전단 곡률반경 5[μm]로 조정하여 시편에 주입하였다.

삽입시 시료의 변형을 없애기 위하여 다시 110[°C]에서 10분간 가열한 후 서냉하여 트리전극 시편으로 사용하였다.

시료 표면과 침전극 사이를 에폭시 수지계의 접착제로 밀봉하였으며, 접지측 전극으로는 실버 페이스트를 사료면에 도포하였다. 전극의 형태는 침대평판 전극이고 극간거리는 2[mm]로 하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

실험장치에 대한 블록선도는 그림 2.2에 표시하였다.

인가전압은 교류 15(kV), 한 종류의 전압 레벨을 승압속도 1[kV/s]로 트리 개시로부터 파괴시까지 일정전압에서 실시하였다. 고전압회로는 음향방출 검출회로의 잡음을 일으킬 수 있는 코로나 방전을 방지하기 위하여 실리콘오일(silicon oil)에 함침하였다.

음향센서(일산, 원통형 타입)는 공진 주파수 300[kHz]를 PZT변환기가 사용 되었고, 평판 전극 바로 아래(거리 2cm)에 설치 하였다. 음향의 원신호 자체는 매우 미약하므로 신호는 이득이 80[dB]인 차동증폭기로 80[kHz] 고역필터(high pass filter)를 사용하였다.

설계시 최대한으로 노이즈를 제거하였고, 문턱준위(threshold level)는 증폭된 신호를 0.03(V)로 하여 확실한 음향신호를 얻을 수 있었다. 센서에서 포착된 신호는 증폭된 후 디지털 오실로스코프(HP 54501A)의 채널 1에 입력된다.

그리고 AE(Acoustic Emission, 이하 AE라 부른

다) 펄스의 위상각 특성을 보기 위해 인가전압을 고전압 프루브(HP34300A)로 전압강하시켜 채널 2에 입력된다. 오실로스코프에서 디지털화된 신호는 데이터 통계처리를 위해 인터페이스 카드(GP-IB Card)를 통해 컴퓨터에 입력되어 하드 메모리에 저장된다.

트리진전과 관련된 음향방출 파형을 그림 2.3에 나타내었다. 여기서 계측한 값 자체는 절대값이라기 보다는 상대적인 값이 타당할 것이다. 본 연구에서 사용한 자료처리는 펄스평균으로 행하였다.

3. 실험결과 및 검토고찰

3.1 트리 진전 양상

사진 3.1 (a), (b)는 15[kV]인가시 3분, 파괴시

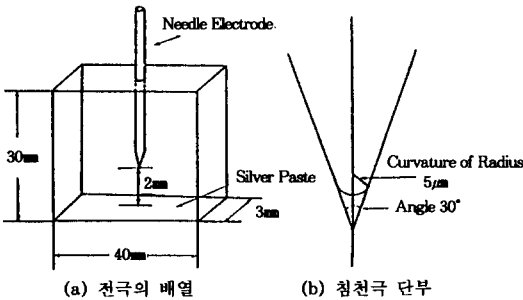


그림 2.1 전극배열
Fig. 2.1 Electrode arrangement

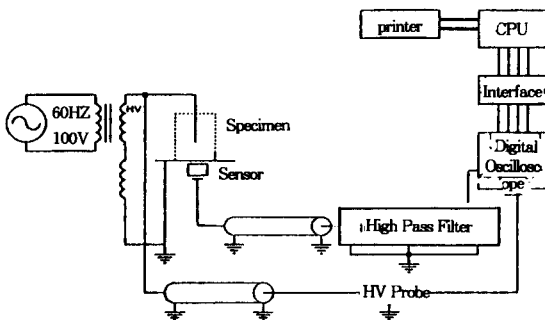


그림 2.2 실험장치 블록선도
Fig. 2.2 Block diagram of experimental set up

273분의 수초형 트리(Bush-type tree)의 트리개시 및 진전양상을 나타내고 있다. 수초형 트리 진전시 초기에는 미소채널(fine channel)이 무수히 발생되었지만, 파괴중기에 이르러서는 점차적으로 평판전극축을 향하여 미소채널이 가지형 트리로 진전되어가는 양상을 볼 수 있었고, 파괴시는 가지형 트리의 채널이 평판전극에 이르러서, 결국 관통파괴에 이르고 있다. 그리고 초기 3분에 비하여 파괴시에는 트리의 체적이 축방향으로 진전하는 것보다는 횡방향으로 진전되어 트리발생 체적이 증가됨을 볼 수가 있었다.

3.2 수초형 트리의 트리진전에 따른 음향방출 특성

본 실험에서 검출된 음향방출 발생원은 문헌에 의해 $N_{AE} = 1.82Q_{max}$ 인 선형관계가 이루어진다는 것이 명백하게 확립되어서,⁸⁾ 트리채널 내부의 부분방전에 의한 것이라고 생각하고, 이를 근거로 하여 음향방출 특성을 논의하고자 한다.

수초형 타입의 트리는 파괴시까지 같은 형상을 갖고 전극 축방향보다 횡방향으로 팽창하기 때문에 걸리는 시간이 길다고 생각한다. 수초형 트리에서는 진전시 전트리영역에서 광방출이 있었고, 이러한 모든 방전시 물리량은 시간에 따라 변화한다.

그림 3.1과 3.2는 15[kV]인가시 트리진전에 따른 AE펄스수 및 진폭의 시간변화를 나타내고 있다. 파전초기 3분정도에서 AE펄스수 및 진폭(1.1 μV)이 극히 미약한 펄스가 발생하였고, 트리열

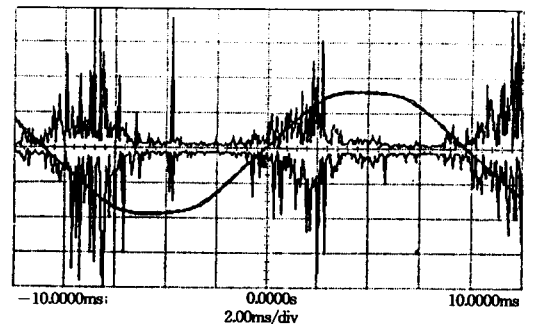


그림 2.3 음향방출 파형
Fig. 2.3 Acoustic Emission waveform

화가 진행함에 따라 210분까지의 경우, 정·부극 성시 변화의 폭은 3~19, 5~20(μV)으로 날카롭게 피크가 증가와 감소를 반복하면서 트리열화에 따라 증가함을 볼 수 있었다. 파괴말기에 이르러 정·부극성이 동시에 작은 펄스진폭을 가진 적은 펄스수의 발생을 나타내면서, 결국 관통파괴에 이르렀다.

이상의 결과에 대한 수소형트리의 방전메카니즘에 대해서 여러 연구자들은^{10), 11), 12)} 고분자 절연재료에서는 진성파괴강도를 초과했을 때 파괴를 동반하는데, 이런 제한된 파괴강도에 따르지 못한 교류전압 응력하에서 전자들은 부극성 반파동안에 절연체내로 주입되어 트랩되어지며, 주입된 전자들 중 약간은 정극성 반파동안 에너지를 얻어서 침전극 뒤로 끌려 올 수 있다고 주장하고 있다. 이때 잔류된 나머지 전자들은 유전체내에서 머무르게 되어 정지하고 있는 부극성 공간전하가 침전극 앞에 정제됨이 강화되고, 절연재료를 향하여 10(μm) 또는 그 이상의 깊이로 뻗어간다. 침전극 앞의 절연체로서는 전위경도가 약하게 되므로 그에 따라 전계는 더욱 강화될 것이다. 그때 전계강도의 결과가 절연재료의 진성파괴강도를 초과할 때 비로서 미소부분방전 채널이 형성하게 된다.

이처럼 전계가 높아짐에 따라 뒤로 표류된 전하가 더욱 높은 에너지를 얻어서 침전극 후미 절연체를 열화시켜 수소형으로 진행된다고 생각한다. 이런 방법으로 전자들은 이리저리 이동하여 고분자내의 방전작용으로 벌크내 표면의 열화를 가속하여, XLPE내 방전 생성가스의 발생 즉,

CO₂, CO, H₂O 및 가교의 부산물(아세트페놀)들이 생성된다. 생성된 가스는 고분자내에 흡수 및 흡착에 의해 일부는 기체분자의 전자충돌에 의한 양이온화, 전자와 양이온화의 소수의 재결합 또는 음이온화가 되었고, 채널내 표면은 2차 방출에 의한 양전하와 트랩된 음이온화가 되어 결국은 표면전도로 작용된다고 보고하고 있다.^{1), 13)} 이처럼 트리가 진전함에 따라 펄스가 날카롭게 증가한 이유는 수소형 트리로 진전함에 따라 광방선의 발생영역이 증가하여, 수소형 트리로 진전시 펄스 진폭은 증가하고 있고 그리고 감소의 피크를 나타내는 이유는, 특정점에서의 방전의 국소화에 의해 가지형 트리로 이행하여 이것이 트리진전 길이로 될 때, 펄스 진폭이 감소되어진다고 생각된다.

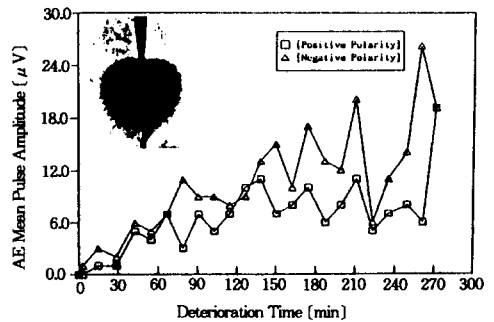


그림 3.1 수소형 트리에 있어서 AE 펄스진폭의 시간변화
Fig. 3.1 Time variation of AE pulse amplitude on the bush-type tree

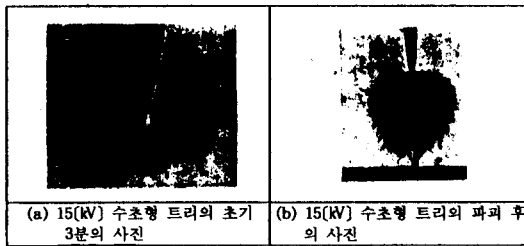


사진 3.1 15(kV) 인가시 트리진전 양상
Photo. 3.1 Tree propagation type under applied 15(kV) AC voltage

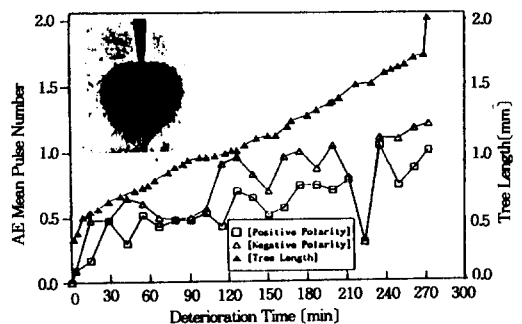


그림 3.2 수소형 트리에 있어서 AE 펄스 수의 시간변화
Fig. 3.2 Time variation of AE pulse number on the bush-type tree

결국 펄스의 유해성에 대해서는 문헌에 의해서 처럼¹⁴⁾ 작은 펄스는 큰 펄스에 비해서 트리의 열화를 더욱 가속시키는 유해한 인자로 작용한다고 생각하였다.

3.3 인가전압 위상각(ϕ)-평균 펄스진폭(AEA) 및 펄스수(AEN) 열화시간(t)의 분포 특성

그림 3.3~3.6은 인가전압 15[kV]에서 수초형 타입의 트리가 진전했을 때의 ϕ -AEA- t , ϕ -AEN- t 의 관계를 열화시간변화에 따라 측정된 결과이다.

ϕ -AEA- t 의 경우, 과전초기 펄스 발생은 정극성시 분포중심 30° 내외, 부극성시 240° 내외에서 미약한 펄스발생을 볼 수 있었다. 파괴에 가까워짐에 따라 정, 부극성시 공히 고위상 영역쪽으로 이동하고 있다. 더우기 정극성에 비해 부극성시 더욱 넓게 분포하고 있다.

ϕ -AEN- t 정, 부극성의 경우는 과전초기부터 파괴에 이르기까지 분포중심의 위상영역은 30° , 240° 근방에서, 열화시간에 따라 점진적인 증가를 보인다 파괴말기에서는 펄스의 발생수가 점점 넓은 영역으로 발생되고 있다.

이상의 결과로부터 수초형 트리가 진전할 때는 저위상영역에서 펄스가 발생됨을 볼 수 있지만, 열화가 진행되어 파괴에 이르러서는 본 연구자들이 이미 보고한 바¹²⁾ 있는 저밀도 폴리에틸렌의 경우에서처럼 가지형 트리에서 나타난 결과와 유사하게 분포중심이 이동됨을 알 수 있었다.

이는 파괴말기에 있어서 수초형 트리에서 가지형 트리로 전환됨으로써 트리채널 내부의 전압강하가 크게 되어 펄스를 발생시키는 실제 전압이 낮아지므로 이를 보상하기 위해 고위상각 영역으로 펄스의 분포중심이 이동된다고 사료된다.

3.4 방전 파라메타 S(왜도)

본 논문에서는 부분방전시 트리의 개시 및 진전에 따른 ϕ -AEA- t , ϕ -AEN- t 의 3차원의 분포양상을 더욱 정량화된 양으로 절연파괴 진단의 파라메타로 이용하기 위한 분포의 특성량인 왜도를 도입하기로 한다.

이와 같은 특성량은 분포의 형상에만 의존하는 정량화한 값으로, 전 보고에서 보고되어 활용된 바 있다.¹²⁾

그림 3.7은 ϕ -AEA- t 의 열화시간에 따른 왜

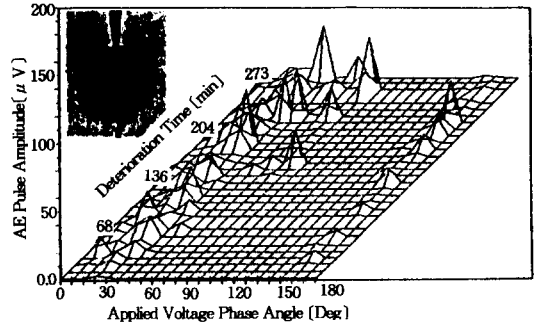


그림 3.3 수초형 트리의 ϕ -AEA- t 분포특성 (정극성)
Fig. 3.3 Characteristics of distribution ϕ -AEA- t on the bush-type tree (positive polarity)

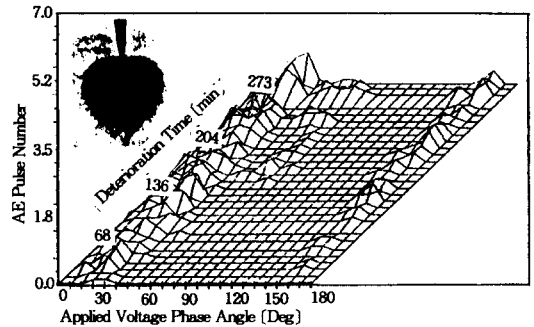


그림 3.4 수초형 트리의 ϕ -AEA- t 분포특성 (부극성)
Fig. 3.4 Characteristics of distribution ϕ -AEA- t on the bush-type tree (negative polarity)

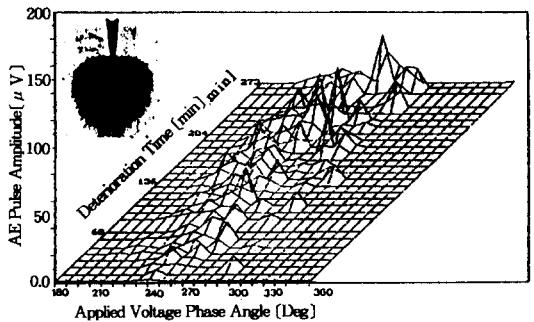


그림 3.5 수초형 트리의 ϕ -AEN- t 분포특성 (정극성)
Fig. 3.5 Characteristics of distribution ϕ -AEN- t on the bush-type tree (positive polarity)

도를 나타내고 있다. 과전초기부터 파괴시까지 정의 값을 갖는다. 과전초기는 분포중심이 상대적으로 흐트러지고 120분정도까지는 왜도가 급증하여 큰폭으로 요동한다 파괴말기인 240분까지 왜도값이 정, 부극성시 약간의 폭으로 요동하고 있지만 전반적으로는 낮아지고 있다. 이는 고위상 영역으로 분포중심이 이동되기 때문이고, 파괴직전에 다시 상승하는 것은 저위상 영역에서 파괴에 이르고 있음을 나타내고 있는 것이다.

그림 3.8은 ϕ -AEN인 펄스의 왜도를 나타내고 있다. 과전초기에서는 정, 부극성 모두 좌우대칭 분포인 0의 값을 갖고 있다. 그 이후 90분정도까지 정극성인 경우가 부극성에 비하여 큰 값으로 요동하고, 부극성시 (-) 왜도값과 (+)

왜도값으로 변화하다. 파괴시까지 정, 부극성이 함께 (+) 왜도값으로 이동하였으며, 파괴말기에 이르러서는 급상승하다 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이상의 결과로부터 ϕ -AEA-t, ϕ -AEN-t의 펄스발생분포를 정량화한 왜도값으로 대응되고 있음을 보여주고 있다.

3.5 S-평면상에서의 절연파괴 진단

위상각을 도입하지 않는 최대 방전전하량 q_{max} 나 평균 방전전류 I_a 만으로는 절연파괴를 예지하는데 유효한 정보로서 제공되지 못한다는 것은 이미 보고된 바있다.¹⁾ 따라서 절연파괴 진단에 유효한 정보로 제공되는 S-평면을 이용한 음향방출펄스의 절연파괴 예지에 관한 가능성에 대해서 검토하고자 한다.

위상각을 고려한 펄스의 특성에서는 사이클 평균과 펄스 평균이 있는데 그중에서도 사이클 평균을 이용하는 경우보다는 펄스의 평균을 이용한 경우가 파괴진단에 더 유용하다.^{4), 6)}

그림 3.9, 3.10은 ϕ -AEA-t, ϕ -AEN-t의 S-평면상에서의 경시변화를 나타내고 있다. X축은 정극성시의 펄스진폭 및 펄스 수의 왜도(S_p^+ , S_p^-), Y축은 부극성시의 왜도(S_p^+ , S_p^-)를 나타내어 S-평면상의 좌표로 정의한다. S-평면의 각 시각에 있어서 왜도(S_p^+ , S_p^-)를 도시하고 그리고 시간에 따라 이 플롯점의 궤적으로 표시하였으며, 각 점에 있는 숫자는 열화시간을 나타내

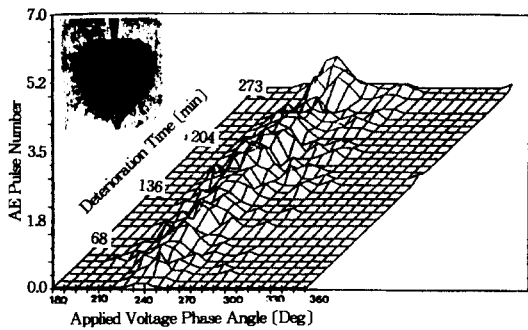


그림 3.6 수초형 트리의 ϕ -AEN-t 분포특성(부극성)
Fig. 3.6 Characteristics of distribution ϕ -AEN-t on the bush-type tree (negative polarity)

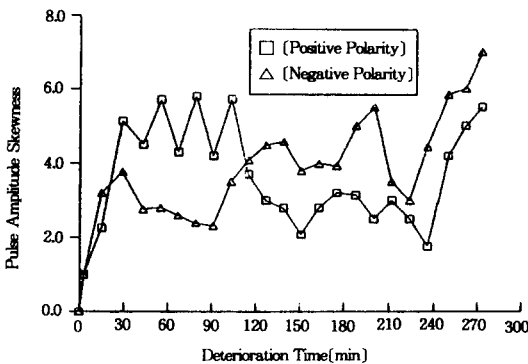


그림 3.7 ϕ -AEA-t의 분포패턴에 대한 왜도의 시간변화 (교류전압 15(kV))
Fig. 3.7 Time variation of the skewness of ϕ -AEA-t distribution patterns (AC 15(kV))

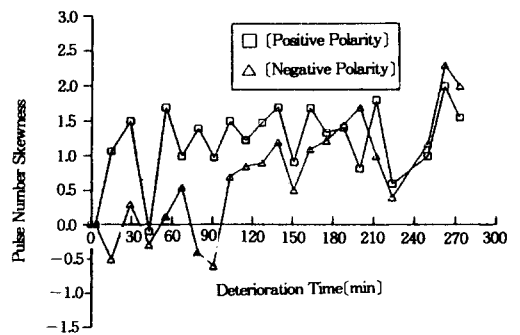


그림 3.8 ϕ -AEN-t의 분포패턴에 대한 왜도의 시간변화 (교류인가전압 15(kV))
Fig. 3.8 Time variation of the skewness of ϕ -AEN-t distribution patterns (AC 15(kV))

고있다. 문헌에 의해 나타나듯이 좌표 평면상 3상한으로 들어가는지의 여부에 따라 절연파괴 판정기준으로 얻어진다고 보고하고 있다.⁴⁾

본 연구에서는 그림 3.9, 3.10의 결과에서 왜도의 절대값이 크고, 파괴에 가까워 질수록 원점으로부터 멀어지고 있다.

따라서 플롯점과 원점과의 거리, 즉 $R = \sqrt{(S_p^+)^2 + (S_p^-)^2}$ 의 크기로 위험도를 나타내는 파라메타로 이용될 수 있는 것이다. 측정시의 여러 조건 및 사용시료의 종류에 따라 각각의 펄스발생 양상이 다를 수도 있고, 고분자의 종류에 따라서도 각기 다르게 되므로 앞으로 많은 연구에 의해 좀 더 명확한 파괴진단 파라메타로서 규명이 되어야 할 것으로 생각한다.

4. 결론

자체 개발한 음향방출 자동 계측시스템을 이용하여, XLPE케이블의 트리열화현상을 감시할 목적으로 열화시간에 따른 AE(Acoustic Emission) 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 열화시간에 따른 AE 펄스진폭 및 펄스수의 특성에 대해서

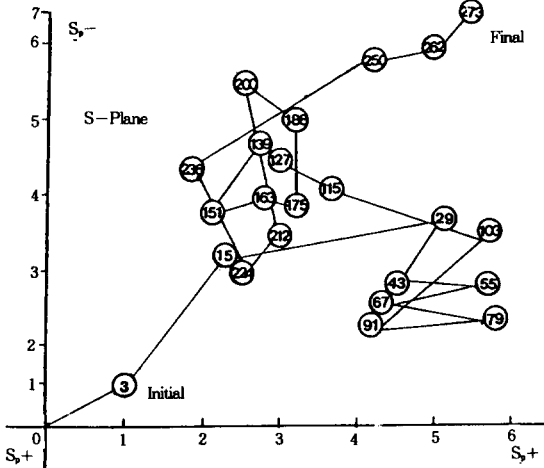


그림 3.9 S-평면상에서 ϕ -AEA-t 분포패턴의 왜도 궤적변화 (교류전압 15(kV))

Fig. 3.9 Trajectories variation of skewness on the ϕ -AEA-t distribution patterns in S-plane (AC15(kV))

트리 진전 길이와 AE 펄스수와는 반드시 비례하지 않음을 확인할 수 있었다. 수초형 트리의 개시 및 진전시 과전초기에서는 미약한 펄스가 발생하지만 열화가 진행함에 따라 날카롭게 펄스진폭의 증가와 감소를 반복하였고, 이때 증가시에는 수초형 트리로, 감소시에는 가지형 트리로 변화함을 나타내고 있었다. 파괴직전에 감소하는 것은 특정점에서 방전의 국소화에 의해 전로 파괴되기 때문이다. 그 결과 큰 진폭을 갖는 펄스보다는 작은 진폭을 갖는 펄스의 발생이 트리진전에 관계되고, 절연열화를 가속시키는 유해한 인자로 생각된다.

2) 펄스 평균 ϕ -AEA-t, ϕ -AEN-t 분포의 왜도 S는 트리열화를 예지하는데 유효한 부분방전 특성량임을 재확인 할 수 있었다. 정 펄스군의 S⁺와 부 펄스군의 S⁻을 각각 X축과 Y축으로 하여 S-평면상의 좌표로 정의하고 이 평면상에서의 경시변화를 플롯하면 열화상태를 용이하게 할 수 있다. 또한 플롯한 점이 원점으로부터 멀

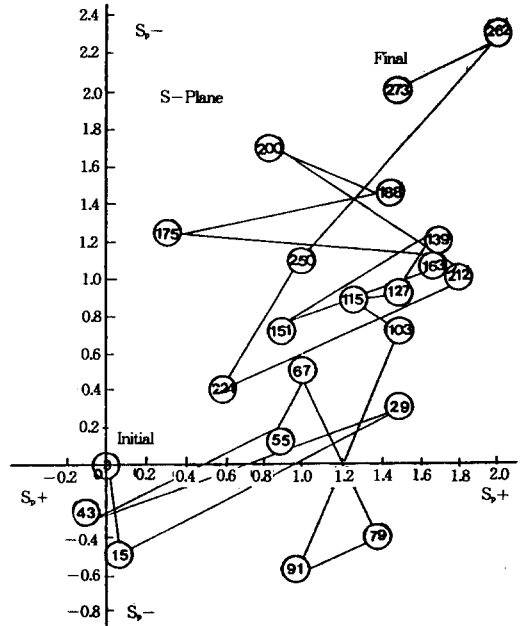


그림 3.10 S-평면상에서 ϕ -AEN-t 분포패턴의 왜도 궤적변화 (교류전압 15(kV))

Fig. 3.10 Trajectories variation of skewness on the ϕ -AEN-t distribution patterns in S-plane (AC15(kV))

게 될 수록 절연파괴에 가까움을 알 수 있었다.

3) 앞으로 국내 여건에 맞게 응용할 수 있는 계측법을 개선함과 동시에, 파괴를 미연에 방지하는 파괴진단법을 위한 연구가 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) 絶縁材料 微小放電劣化 調査 専門委員會：“日本 電氣學會 技術報告(I I), 部分放電 劣化”, 1984.
- 2) 絶縁材料 微小放電劣化 調査 専門委員會：“日本 電氣學會 技術報告(I), 絶縁 劣化 試驗 方法”, 1984.
- 3) U. Bammert, et al : “Partial Discharge Measured with an Automated System in Epoxy Resin and Polyethylene, IEEE Trans, Vol.23, No.2, 1988.
- 4) T. Okamoto and T. Tanaka : “Change of Pulse-Mean Distribution Patterns of Partial Discharge due to Treeing Propagation JIEE Japan, Vol.102, No.12, pp. 37~44, 1982.
- 5) T. Okamoto and T. Tanaka : Cycle-mean ϕ -q Characteristics of Partial Discharges in Six Electrode System”, T. IEE Japan, Vol.102, No.7, pp. 7~14, 1982.
- 6) T. Numano, N. Nagaoka and A. Ametani : “Lifetime Estimation of a Composites Insulation Materials Based on its Partial Discharge Characteristics”, T. IEE Japan, Vol. 107-A, No.2, pp. 81~88, 1987.
- 7) Y. Kagawa and S. Yamazaki : “Acoustic Emission Associated With Tree Growth in Polymeric Materials”, IEEE Trans. Elec. Insul, Vol.EI-17, No.4, pp. 314~318, 1982.
- 8) N. Yoshimura, H. Kudo : “Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polyethylene”, JJAP, Vol.20, No.11, pp. L775~L778, 1981.
- 9) H. Fugita, T. Nakanishi and K. Yamaguchi : “Acoustic Emission Distribution and Types of Electrical Tree in Polyester Resin”, IEEE Trans. Elec. Insul, Vol.EI-18, No.5, pp. 520~527, 1983.
- 10) C. Laurent and M. Mayoux : “Analysis of the Propagation of Electrical Treeing Using Optical and Electrical Method”, IEEE Trans. Elec. Ins, Vol.EI-15, No.1, pp. 33~42, 1980.
- 11) T. Tanaka and A. Greenwood : “Effects of Charge Injection and Extraction on Tree Initiation in Polyethylene”, IEEE Trans. PAS, Vol.PAS-97, No5, 1977.
- 12) 박재준, 강태오, 김재환 : “트리잉 열화에 따른 ϕ -AE 분포 특성에 관한 연구”, 대한 전기학회, Vol.41, No.9, 1992.
- 13) R. J. Densley : “An Investigation into the Growth of Electrical Trees in XLPE Cable Insulation”, IEEE Trans. Elec. Insul, Vol.EI-14, No.3, 1979.
- 14) Y. Shibuya, S. Zoledziowski and J. H. Caldwood : “Void Formation and Electrical Breakdown in Epoxy Resin”, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-P6, No.1, Jan. 1977.