XLPE 케이블의 트리잉 열화에 따른 음향방출 특성

조대연*, 김명호, 백관현, 심종탁, 박재준, 김재환
광운대학교 공과대학 전기공학과 .

Title: A Characteristics of Acoustic Emission according to *Treeing Deterioraction in Crosslinked Polyethylene Cable*

Cho Dae-yeon*, Kim Myung-ho, Baek Kwan-hyun,
Sim Jong-tak, Park Jae-jun, Kim Jae-hwan
Dept. of Electrical Eng. Kwang woon Univ.*

ABSTRACT

The Acoustic Emission due to treeing progress in Crosslinked Polyethylene(XLPE) is studied by using the self developed automatic measuring system of acoustic emission.

Tree progression and average pulse amplitude are almost in proportion to the rising of applied voltage but there is no proportionality relation between tree progression and pulse numbers.

From now on, Skewness and Kurtosis of average cycle, special property of ϕ-a distribution characteristics can be confirmed as the useful parameters of treeing deterioration.

1. 서 론

종래의 전력 케이블의 절연열화 측정법은 누설전류, 유전정접, 직류인가 측정법 등 다양하게 연구되어져[1] 왔으나 확선상태에서의 측정 및 파괴지점의 정확한 위치를 확인할 수 없기 때문에 상시 감시할 수 있는 방법은 못된다. 이런 점을 충분히 보완한 측정기법으로서 위상각을 포함한 부분방전 측정법이 활발히 연구되고 있다[2][3].본 논문에서는 음향센서를 이용하여 트리의 진전중에 발생하는 음향 방출 펄스를 전기적인 신호로 변환하여 이 신호를 퍼스널 컴퓨터에 입력하여 분석하므로써 트리의 진전상태를 조사하였다[2][4]~[6]. 음향방출 펄스를 이용한 방식은 다른 방식들에 비해 전자기적인 간섭을 받지 않으며, 시료가 불투명하거나 전극배열이 복잡한 것에 적합하고, 긴 물체내의 트리 진행 위치를 탐지할 수 있을 뿐더러, 전압이 인가되었을 때도 상시 감시가 가능한 것이 그 장점이다[7].

따라서 본 연구실에서 자체 개발, 제작한 음향방출 계측시스템을 이용하여 두 종류(10[kV], 15[kV])의 교류 전압을 제작된 시료에 인가시 트리의 진전길이와 음향방출 펄스수, 음향방출 평균진폭을 측정하였고, Okamoto[9]가 제안한 방전분포의 파라미터인 왜도 S와 첨예도 K의 시간적 변화를 음향방출 진폭에 대하여 조사하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

2-1. 시편제작

시료는 한양화학제 가교 폴리에틸렌 (밀도 0.92 [g/cm^3], DCP 3[%], 가교도 85 [%])의 펠릿(Pellet)을 사용하였다. 가교 폴리에틸렌의 성형 온도와 압력은 각각 190[℃], 140[kgf/cm^2]로 15분간 가압하여 5[℃]의 물에서 급냉하여 거의 투명한 시료를 얻었다.

완성된 시료는 그림 2-1과 같은 뷰록 형태로서 규격은 30×40×3[mm^3]이다. 바늘 끝의 곡률반경은 5[μm], 선단각도는 30° 이다.

전극의 형태는 매우 높은 고전계를 발생시키기 위해 절연물 사이에 봄꽹둥 고전계를 발생할 수 있는 침 평판 전극구조이고, 전극간거리는 2[mm]이며, 평판전극에 실버페인트(Silver Paint)를 도포하였다.

2-2. 실험방법 및 장치[12]

10, 15[kV$_{rms}$]의 두가지 종류의 전압을 침전극에 인가하여 트리개시로부터 파괴까지 일정하게 유지하고 배율 180배의 광학 현미경(Micro scope, OLYMPUS사)으로 침선단 측방향 트리의 길이를 관측, 기록하였다.

트리사진은 광학 현미경에 접사된 카메라로 촬영하였고, 트리형태와 길이의 변화를 실험 후에 사진으로 검토하였다.

실험장치에 대한 블록선도를 그림 2-2에 표시하였다. 고전압 발생장치는 교류 100[V], 60[Hz]의 단상변압기로써 0~50[kV$_{rms}$]까지 연속으로 변화시킬수 있으며 이 중의 한 단자는 고전압 프로브(HP 34300A)를 통하여 전압강하시켜 디지탈 오실로스코프(HP 54501A)의 채널 2에 입력된다.

음향방출 센서는 공진 주파수 300[kHz]를 갖는 PZT변환기로 시료와 함께 실리콘 오일(Silicon Oil)에 함침시켰고 시료와의 이격거리를 2[cm]정도되게 설치하였으며 실리콘 유중에서의 음향 전파 속도는 1400[m/s]로서 트리 진전에 따른 음향방출 신호가 센서를 통하여 총 이득이 60[dB]인 프리앰프(Pre AMP)와 메인앰프(Main AMP)에서 증폭된 후 증폭기의 잡음을 줄이기 위하여 80~450[kHz]의 대역 필터(Band Pass Filter)를 거쳐 디지탈 오실로스코프의 채널 1에 입력된다. 오실로스코프에 입력된 신호는 디지탈화 되어 인터페이스(GP-IB Card)를 통해 데이타 통계처리를 위해 IBM-PC(AT)에 입력되어 임의의 시간마다 자동 계측되어 음향방출 펄스수, 평균진폭과 방전 파라미터인 S와 K값을 계산한다.

3. 실험결과 및 검토

3-1. 트리의 형태와 길이

가교 폴리에틸렌에서 트리진전에 관련된 음향방출은 교류전계하에서 측정하였으며, 전압인가는 1[kV/S]의 승압속도로 10[kV$_{rms}$]와 15[kV$_{rms}$]로 일정하게 과전하여 트리가 파괴될 때까지 실시하였다.

그림 3-1은 전극 측방향 트리길이의 전압 의존성을 나타내고 있다.

사진 3-1과 3-2는 10[kV]와 15[kV]의 인가전압에서 진전한 트리형태를 나타내고 있으며, 각각 전형적인 가지형과 수초형을 보이고 있다.

10[kV]의 전압을 인가했을 때 트리의 진전속도는 빨라 파괴까지에 걸리는 시간은 77분 정도로 짧았으며, 15[kV]에서는 트리진전은 둔화되어 343분만에 파괴에 이르고 있다.

이상은 XLPE의 결과로서 가교시키지 않은 LDPE의 경우, 9[kV] 및 14[kV]전압 인가시 파괴에 이르는 시간은 각각 37분, 164분으로 보다 단시간내에 파괴에 이르러 가교의 내전압 개선결과를 관찰할 수 있었다.

3-2. 트리진전에 따른 AE 펄스수와 평균진폭의 시간변화

그림 3-2와 3-3은 10[kV]의 인가전압에서 AE 펄스수와 평균진폭의 시간변화를 나타내고 있다.

AE 펄스수는 처음 5분 동안에는 138[cps]정도를 나타냈고 트리길이가 증가함에 따라 25분 정도까지 서서히 증가하였으며, 그후 파괴에 이를 때까지 거의 포화상태를 나타내고 있다. 이것은 트리발생 초기 미소채널의 생성으로 부분방전이 격렬하여 방전의 군소화의 한 요인으로 사료된다. 파괴 직전의 AE 펄스수는 190[cps] 정도였다.

AE 평균진폭은 트리발생 초기부터 25분까지는 트리의 진전에 따라 급격하게 증가하고 있고 25~55분까지는 완만하게 증가하고 있으며, 그후 파괴에 이를 때까지 거의 일정한 값을 유지하고 있다.

트리발생 초기의 AE 평균진폭은 0.16[mV]정도였고, 파괴직전에는 1.56[mV]정도였다.

그림 3-4와 3-5는 15[kV]의 인가전압에서 트리진전에 따른 AE 펄스수와 평균진폭의 시간변화를 나타내고 있다.

AE 평균진폭은 10[kV]에 비해서 극성의 변화가 현저하였으며 트리발생 초기부터 파괴에 이를 때까지 측방향 트리길이의 진전에 따라 증가하고 있다.

트리발생 초기의 AE 평균진폭은 정·부극성 모두 0.66[mV]정도였고, 파괴직전에는 정극성에서 1.31[mV], 부극성에서 1.9 [mV]정도였다.

이상의 결과로부터 그림 3-2~3-5를 종합해 볼 때 다음과 같은 사실을 알 수 있다(5)-(11).

인가전압의 상승(10[kV] → 15[kV])에 따라 정극성에 비하여 부극성의 평균진폭이 큰 원인은 공간전하 효과에 기인하여 인가전압이 증가함에 따라 침전극 선단 근방에서 전계가 증가하여 침전극으로 부터 방전이 용이해져 큰 진폭과 많은 방전펄스가 발생되고 침선단으로부터의 방전갭 길이가 증가하기 때문에 전계가 약간 약화되어 둔화된 진폭변화를 볼 수 있다.

또한, 트리채널의 가지수는 인가된 전계의 증가로 인하여 늘어나며 측방향 트리길이가 약간 증가한 것은 측방향의 전계의 영향이 악해져서 다수의 채널이 측면으로 발생되고 또한, 고분자 부분은 전원에 의해 활폐되고 이온화된 많은 전하들 즉, H^+, O^- 이나 가교 부산물의 이온들이 트리채널내에서 만들어져 이 전하들이 고전계에 의해 가속된 후 트리채널의 벽에 충돌하여 더욱 늘어난다. 반면, 트리길이의 증가로 인하여 트리채널의 선단과 평판전극사이의 거리가 감소하게 되면 더욱 높은 정전용량이 형성되어 AE 평균진폭도 더욱 크게 나타나게 된다고 사료된다.

3-3. 트리진전에 따른 ϕ-α 분포양상의 시간변화

그림 3-6은 인가전압 10[kV]에서 가지형 트리가 진전했을 때, ϕ-α 분포의 양상을 시간별로 나타내고 있다.

정 부극성 펄스는 모두 트리발생 초기부터 10분까지는 거의 전압 위상각에 관계 없이 일정한 크기를 나타냈다. 즉, 분포의 흐트러짐이 작으며, 10~50분까지는 60°, 240° 영역에서 다소 큰 펄스가 발생했으며, 트리가 더욱 진전하여 파괴에 가까워짐에 따라 보다 낮은 위상각영역(35, 215°)에서 큰 펄스가 발생했다.

(32)LDPE의 경우 9[kV] 인가시 분포중심보다 높은 위상각(75, 255°)영역에서 다소 큰 펄스가 발생했고 트리가 평판전극에 가까워지면서 피크직전에는 (80°, 260°)영역에서 큰 피크가 발생하는 다른 양상을 나타내고 있다.

위의 사실로부터 트리가 여러가지 길이를 갖는 수많은 가지로 구성되어 있고 부분방전은 각각의 가지에서 독립적으로 발생한다고 가정한다면 큰 가지는 방전의 큰 전압을 필요로 하지만 작은 가지는 더 낮은 전압을 필요로 한다. 결과적으로 큰 부분방전 펄스만이 고전압 위상영역에서 일어날 수 있고 작은 펄스는 영점부근에 가까운 위상영역에서 일어날 수 있다고 본다.(8)-(9)(11)

ϕ-α 분포가 각 재료마다 같은 것은 아니므로 특별한 형태로 존재하는 이유는 명백하지 않다. 그러나 중요한 응용성을 가질수 있으므로 이러한 분포형태는 트리를 검출하는데 유용하다고 생각한다.

그림 3-7은 인가전압 15[kV]에서 수초형 트리가 진전했을 때, ϕ-α 분포의 양상을 시간변화에 따라 측정한 결과이다.

정 부극성 펄스 모두 트리발생 초기부터 20분까지는 거의 전압 위상각에 관계없이 일정한 크기를 나타내고 있고, 20~220분까지는 비교적 낮은 위상각(30°, 210°)에서 큰 펄스가 발생하고 있으며, 파괴에 가까워짐에 따라 분포가 전체 위상각 영역으로 흐트러지고 있다.

또한 LDPE에서는 트리발생 초기부터 파괴될 때 까지 비교적 낮은 위상각 영역인 (30°~60°, 210°~240°) 사이에 큰 펄스가 발생됨을 알 수 있었다(12).

위의 사실로부터 트리발생 초기부터 220분 까지는 인가전압의 극성이 반전한 직후에 큰 부분방전이 일어나고 있으나, 트리가 더욱 진전하여 평판전극에 가까워짐에 따라 전 위상각 영역에서 부분방전이 일어나고 있음을 알 수 있다.

3-4. 왜도 S와 첨예도 K값의 시간 변화

본 논문에서는 분포의 특성량으로써 왜도 S 및 첨예도 K를 도입하였다.

이 특성량은 분포의 형상에만 의존하는 양으로, 분포형상을 간편히 정량화 하는 양으로써 적절하며 왜도 S는 분포의 비대칭성을 표현하는 양으로 좌우 대칭이면 S=0, 우하(右下)의 분포이면 S〉0, 그리고 우상(右上)의 분포이면 S〈0 으로 된다. 첨예도 K는 방전의 집중도에 관계하며, K가 큰 경우, 즉 위상적으로 집중하여 부분방전이 발생하는 경우에는 공간적으로도 부분방전이 집중하여 발생하는 경우가 많다. 반대로 K 가 작은 경우에는 위상적으로 흐트러짐이 크고, 공간적으로도 흐트러짐이 크다고 생각된다.

그림 3-8과 그림 3-9는 인가전압 10[kV]에서 왜도 S와 첨예도 K의 시간변화를 나타내고 있다.

왜도 S는 트리발생 초기부터 50분까지는 0.8~1.2정도의 값을 유지하고 있다가 파괴에 가까워짐에 따라 증가하고 있는 경향을 나타내고 있다.

첨예도 K는 트리발생 초기부터 파괴에 이를 때까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

그림 3-8과 3-9으로부터 가지형 트리가 진전하여 파괴에 가까워짐에 따라, 주로 낮은 위상각 영역에서 방전이 집중되고 있음을 알 수 있다.

그림 3-10과 3-11는 인가전압 15[kV]에서 왜도 S와 첨예도 K의 시간변화를 나타내고 있다. 정 부 펄스 모두 왜도 S는 트리발생 초기~80분까지는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 그 이후~220분까지는 1.2~1.4정도의 왜도를 나타내고 있으며, 그 이후부터 파괴에 이를 때까지는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

첨예도 K는 트리발생 초기부터 260분까지는 점진적으로 증가하는 경향을 나타내고 있지만, 그 이후부터~파괴에 이르기까지는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다.

그림 3-10과 3-11로부터 수초형 트리가 발생한 후 어느 시간까지는 낮은 위상각 영역에서 방전이 집중되고 있으나, 그 이후부터 파괴직전 까지는 방전분포가 위상적, 공간적으로 흐트러지고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 분포의 특성량인 왜도 S와 첨예도 K는 앞 그림에 나타난 ϕ-α 분포 양상의 시간변화를 잘 반영하고 있다.

4. 결 론

자체 개발한 음향 펄스 자동계측 장치를 이용하여 불평등 교번전계하에서 가교 폴리에틸렌의 음향방출 특성 연구를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 트리진전과 AE 펄스 평균진폭과는 반드시 비례하지는 않으나 10[kV]에서 15[kV]로 전압인가를 상승했을 때 비례관계를 볼 수 있었고 펄스수와의 관계에서는 비례하지 않음을 확인할 수 있었다. 이로써 응용적인 측면에서 AE 평균진폭이 유용함을 알았다.

2. AE 평균진폭은 가지형 트리와 수초형 트리에서 각각 초기에는 160[μV], 660[μV]였고, 파괴직전에는 1560[μV], 1900[μV]로써 수초형 트리에서 진폭이 큼을 알 수 있었다.

3. 사이클 평균 ϕ-AE의 분포의 왜도 S 및 첨예도 K는 트리잉 열화에 유용한 특성량임을 확인할 수 있었다.

4. XLPE의 열화특성은 가지형과 수초형에서 각각 77분과 343분으로써, LDPE에 비해서 특성이 향상됨을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) 河村英昭: "架橋ポリエチレンのトリ-イング破壊と空間電荷形成に及ぼす架橋剤分解残査の影響". 電學論A, 103, 443, 1983

(2) 電氣技術報告(Ⅱ) "部分放電劣化", 1984
(3) 電氣技術報告(Ⅰ) "絶緣劣化診斷試驗方法", 1984
(4) 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
(5) N.Yoshimura, H.Kudo: "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polyethylene", JJAP, Vol.20, No.11, pp.L775~L778, 1981
(6) 河村英昭: "架橋ポリエチレンのトリーイング破壊と空間電荷形成に及ぼす架橋剤分解殘査の影響", 電學論A, 103, 443, 1983

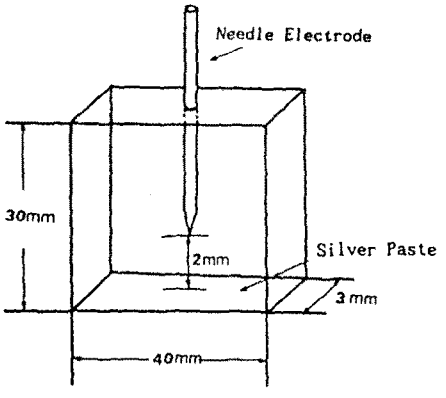

그림 2-1. 시편과 전극의 구조
Fig 2-1. Arrangement of electrode and sample

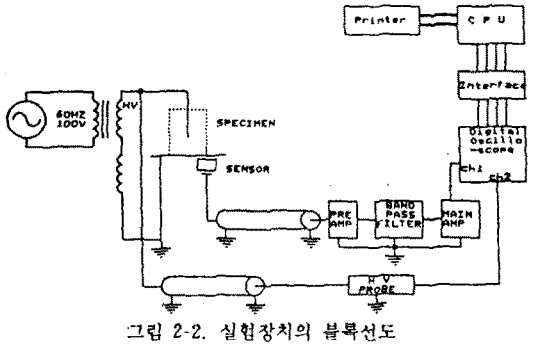

그림 2-2. 실험장치의 블록선도
Fig 2-2. Block diagram of experimental set-up

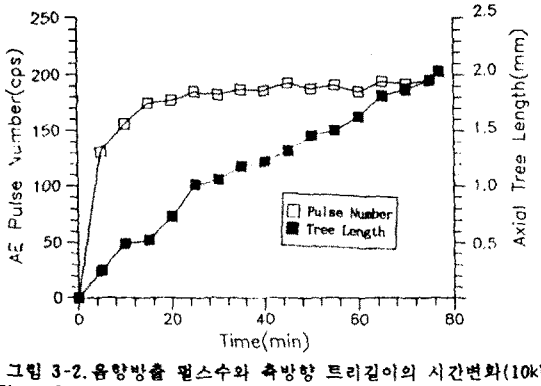

그림 3-2. 음향방출 펄스수와 축방향 트리길이의 시간변화(10kV)
Fig 3-2. Time Variation of AE pulse number and axial tree length in XLPE(10kV)

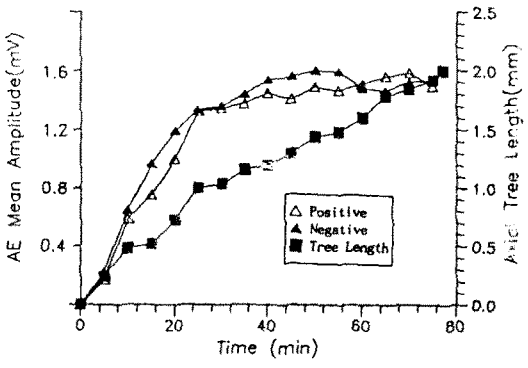

그림 3-3. 음향방출 평균진폭과 축방향 트리길이의 시간변화 (10kV)
Fig 3-3. Time variation of AE mean amplitude and axial tree lenghth in XLPE (10kV)

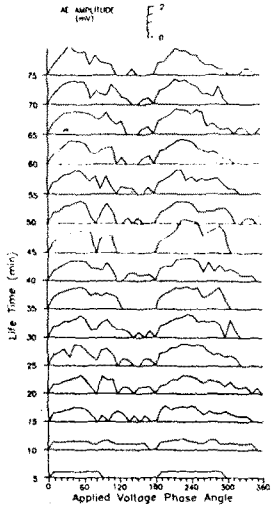

그림 3-6. ϕ-a 분포패턴의 시간변화 (10kV)
Fig 3-6. Time variation of ϕ-a distribution patterns in XLPE (10kV)