

저밀도 폴리에틸렌의 트리 파괴 예지와 음향방출과의 관계

(The Relation between Treeing Breakdown Prediction and Acoustic Emission in Low Density Polyethylene)

白灌鉉* · 沈鍾倬* · 金在煥**

(Kwan-Hyun Baek · Jong-Tak Sim · Jae-Hwan Kim)

요 약

이 논문에서는 저밀도 폴리에틸렌(이하 LDPE라 함)의 절연파괴 실험시 발생하는 전기적 트리진전시 발생하는 부분방전을 음향방출 측정법에 의해서 측정하였다. 부분방전 발생시 생기는 음향방출 펄스와 펄스 진폭을 각 위상각별 시간별로 측정하였고, 왜도 즉, Skewness(이하 S라 함)개념을 도입하여 S값에 의한 LDPE 파괴예지가 가능함을 보였다. 또한 시료로서 인공보이드가 있는 시료와 보이드가 없는 시료를 사용하여 같은 전압 인가시 보이드가 있는 시료가 절연파괴로의 진전이 빠르게 진행됨을 알았다.

Abstract

This paper is measured partial discharge of low density polyethylene by using acoustic emission measuring method when the electrical tree grow its length in LDPE. Acoustic emission's pulses and its amplitudes of partial discharge are measured by acoustic emission measuring devices. Theorem of skewness are used for breakdown prediction of LDPE. So, it is found that the breakdown of LDPE could be predicted by its skewness's value. There are two kind of specimen of no void and specimen of artificial void, this one's electrical tree grows very faster than that one's.

Key words : Skewness(왜도), Treeing Breakdown Prediction(트리파괴예지), Acoustic Emission(음향방출), Distribution Characters(분포특성), Branch-type Tree(가지형트리)

1. 서 론

LDPE는 케이블이나 전기기기 등에 많이 사용

되는 고체 절연체로 고전압하에서 절연체내의 작은기공(void), 갈라진틈(crack), 이물질등이 존재하여 부분방전을 일으켜 절연수명에 큰 영향을 주는 전기적트리가 발생하게 된다¹⁾. 따라서 전기기기나 케이블 등에 절연파괴 사고를 방지할 수 있는 방법이 있어야 하는데 절연체내에 생기는 부분방전으로 인한 전기적 트리발생시 생기는 음

*正會員: 光云大學校 大學院 電氣工學科 博士課程

**正會員: 光云大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字: 1994年 2月 24日

향방출을 초음파센서를 이용하여 감지하였다. 이때 감지된 신호를 전기적 신호로 바꾸어 오실로스코프를 통한 인터페이스를 이용하여 디지털컴퓨터로 보내어 해석하였다.

음향방출을 이용하여 Polyester에 50(Hz), 여러 교류전압을 인가하여 음향방출량과 트리형상, 길이를 관찰하고 부분전하량을 측정하여 음향방출량과 전하량이 비례함을 보여준 경우가 있고²⁾, XLPE의 경우에 실험을 행한 경우가 있다³⁾.

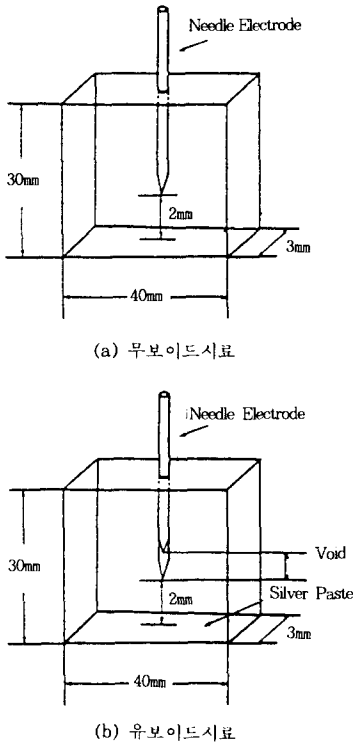


그림 1. 시편과 전극배열
Fig. 1. Specimen and electrode arrangement

상용주파수 60(Hz), 고전압 9(kV)하에서 발생되는 음향방출 펄스와 펄스 진폭값은 정극성, 부극성에 대해서 각 위상각별로 해석하고 각각에 대한 S값을 구하였고, 시간에 따른 트리 진전 길이와 비교하였다. 또한 인공보이드가 있는 시료(이하 유보이드라 함)와 보이드가 없는 시료(이하 무보이드라 함)의 경우에 실험결과를 나타내어 비교 검토하였다. 시간에 따른 S의 값을 그렸고, "S+", "S-" 값을 이용한 S평면을 만들어 전압인가후에서 절연과괴에 이르기까지의 시간 경과에 따른 S궤적을 그리어 보았다.

위의 실험과 방법들은 LDPE의 파괴예지가 음향방출 측정과 S값으로 예측 가능한가 하는 점을 실험과 해석을 통하여 알아보려 함이다.

2. 시편 및 실험 방법

실험에 사용된 시료는 그림 1에 나타내었는데 밀도가 0.92(g/cm³)의 LDPE 펠릿을 사용하여 시료제작틀에 침과 펠릿을 고온프레스에 놓고 성형온도 150(°C), 150(kg·f/cm²)로 30분간 가입한 후에 10(°C)의 물로 급냉하였다. 그림 1에서 무보이드 시료는 침이 LDPE안에 그대로 삽입되어 있고, 유보이드 시료는 삽입된 침을 빼어내고 다시 삽입하여 인공보이드 길이가 1(mm)가 되도록 하였다. 그러므로 보이드형상은 침의 형상이 된다. 침선단은 에칭법을 이용하여 곡률변경 5(µm), 침선단 각도 30°로 하였다. 시료의 밑부분은 접지전극에 잘 접할 수 있도록 실버 페인트를 도포하였고, 시료의 윗부분은

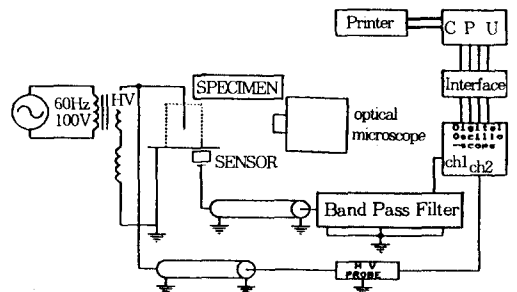


그림 2. 실험장치와 블록선도
Fig. 2. Block diagram of experiment

에폭시 수지로 봉하였다. 침전극과 접지 전극과의 거리는 무보이드 시료인 경우 2[mm]로 하였고, 유보이드인 경우도 인공 보이드 끝에서 접지 전극까지의 거리를 2[mm]로 하였다.

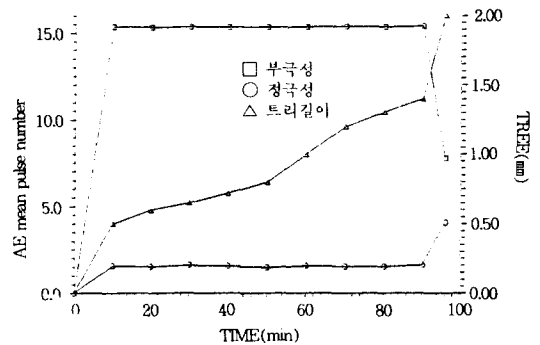
실험장치의 블록선도는 그림 2에 나타내었다. 이것은 문헌에 나타난 PE에 대한 트리성장에 관한 음향방출 실험장치⁴⁾와는 다르게 전극을 구성하였고, corona detector는 설치되지 않았다. 또, 다른 문헌과는 전압인가 방법을 다르게 하였다⁵⁾. 시편은 실리콘 오일속에 함침시켜서 연면 방전을 방지하였다. 교류 60[Hz], 9[kV]의 일정 전압을 침전극에 인가하여 트리를 발생하고 절연파괴에 이르기까지 일정하게 유지하였다. 트리의 진전 모양은 광학 현미경을 통하여 길이를 측정하였다. 고전압 발생장치는 단상 변압기로 0~50[kV]까지 연속 변화시킬 수 있으며, 이 중의 한 단자는 고전압 프로브를 통해 오실로스코프 채널 2에 입력된다. 음향방출 센서는 시료와 함께 실리콘 오일에 함침되어 시료 밑에 놓인다. 이것은 공진 주파수 300[kHz]를 갖는 PZT 변환기로 미약한 음향신호를 증폭기로 전달시킨다. 전달된 신호는 60[dB], Pre-Amp와 80~450[kHz]의 대역 필터를 통하여 디지털 오실로스코프 채널1에 입력된다. 오실로스코프에 입력된 신호는 인터페이스 카드를 통하여 데이터 통계처리를 위해 퍼스널 컴퓨터로 입력저장되어 매 시간마다 자동계측이 되어 음향방출 펄스 수와 펄스진폭에 대한 각 위상각에 따른 정보와 왜도 S를 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

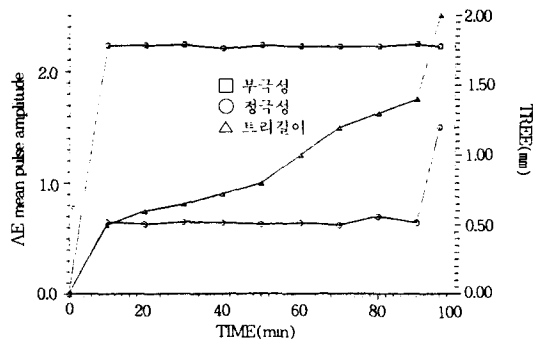
3.1 정극성, 부극성에 따른 트리 길이, 평균 펄스 진폭의 시간 변화 특성

그림 3과 4는 무보이드 시료를 실험 장치를 통하여 상용 주파수 60[Hz], 9[kV] 인가시 인가 시작에서부터 파괴에 이를 때까지의 평균 펄스 수, 평균 펄스 진폭의 경시 변화를 보여준다. 그림 3의 펄스 수의 경우 대개 3개의 단계로 나누어 볼 수 있다. 초기(약 10분 이내)의 트리 길이가 진전할 때 정극성 펄스 수와 부극성 펄스 수도 증가한다. 그 이후 중기(10분에서 80분 사이)에 트리

길이는 약간씩의 증가를 계속함과과는 다르게 정·부극성에서의 펄스 수는 거의 변화가 없이 계속된다. 절연파괴에 가까워진 경우에는 부극성 펄스 수는 감소하나 정극성의 펄스 수는 상당히 증가하게 되고, 이 때의 트리 길이는 상당히 급속도로 진전을 이루어 절연파괴에 이르게 된다. 그림 4의 펄스 진폭의 경우에는 초기단계에서는 펄스 수의 경우와 같이 트리 진전시 정극성·부극성 펄스 진폭도 증가한다. 중기에는 펄스 진폭의 경우에도 증감이 크게 보이지 않고 유지되어 오다가 절연파괴에 이르러서는 부극성의 경우에 음향방출 평균펄스 진폭에는 감소가 조금 일어나고 정극성의 경우 음향방출 펄스 진폭은 크게 증가를 보였다.



● 그림 3. 음향방출펄스수의 시간변화 (9[kV], 무보이드시료)
Fig. 3. Time variation of acoustic emission pulse number (9[kV], specimen of no void)



● 그림 4. 음향방출펄스진폭의 시간변화 (9[kV], 무보이드시료)
Fig. 4. Time variation of acoustic emission pulse amplitude (9[kV], specimen of no void)

이와 같이 부극성의 경우가 펄스 수가 많고 펄스 진폭이 정극성의 펄스 수와 펄스 진폭에 비해 커지는 경우는 교류전압 인가시 시료의 침전극에서 LDPE로 주입되는 전하에 의한 것으로 주입된 전하 캐리어들 가운데는 쉽게 움직이지 않는 트랩된 전하 캐리어가 있는데 정극성시보다 부극성시에 트랩된 전하 캐리어들이 음향방출에 영향을 주어 부극성시의 많은 음향방출 펄스 수와 펄스 진폭을 보이게 된다⁶⁾.

그림 5와 6은 유보이드 경우로 같은 실험장치와 같은 조건하에서 전압인가시부터 절연파괴에 이를 때까지의 음향방출 평균 펄스 수와 평균 펄스 진폭의 경시변화를 보여준다. 무보이드의 경우에서와 같이 트리의 진전과 펄스 수, 펄스 진폭의 변화는 거의 그림 3과 4의 경우와 비슷한 양상을 보여준다. 또한 절연파괴에 가까워지게 되면 정극성의 경우 펄스 수가 급격히 증가하고 펄스 진폭도 증가하며, 부극성인 경우에는 펄스 수가 급격히 감소하고 펄스 진폭은 약간의 감소를 보여줌이 거의 일치하고 있다.

트리 길이의 진전은 전기적 트리를 광학적, 전기적 방법으로 해석한 Laurent 경우에서와 같이 9[kV]인 경우 가지형을 나타내는데 대체로 3가지로 구분한다⁷⁾. 첫째로 초기에 음향방출 펄스 수와 진폭이 트리길이와 같이 증가하는 경우이고, 둘째로는 트리의 진전이 서서히 증가되는 경우이고, 셋째는 파괴직전의 트리길이가 급속히 증가

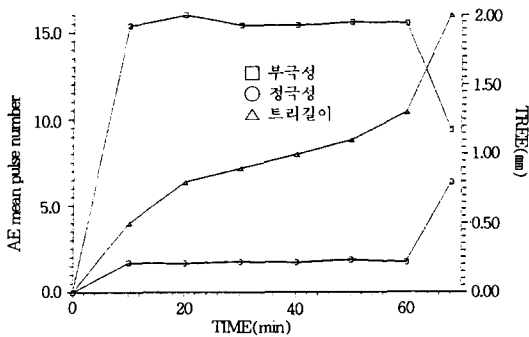


그림 5. 음향방출펄스수의 시간변화 (9[kV], 유보이드시료)
Fig. 5. Time variation of acoustic emission pulse number (9[kV], specimen of void)

하는 경우로 이 때에는 음향 방출 평균 펄스 수와 펄스 진폭과는 비례하지 않는다.

위의 결과에서와 같이 보이드의 유무에 관계없이 시간에 따른 트리진전의 길이와 음향방출 평균 펄스 수와 평균 펄스 진폭과는 초기의 경우를 제외하고는 거의 일치하지 않는다.

3.2 시간 경과에 따른 음향 방출 펄스 진폭의 각 위상각 분포 특성

그림 7은 정극성의 경우로 0°에서 180°까지를 23개 구간으로 나누어 각 위상각별로 나타나는 음향 방출 펄스 진폭의 크기를 시간 경과에 따른

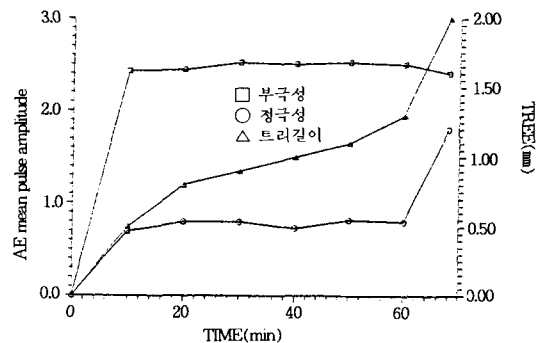


그림 6. 음향방출펄스진폭의 시간변화 (9[kV], 유보이드시료)
Fig. 6. Time variation of acoustic emission pulse amplitude (9[kV], specimen of void)

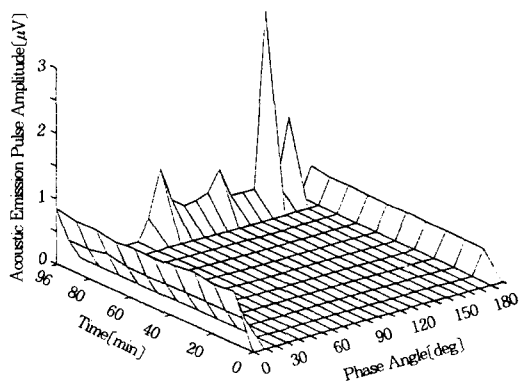


그림 7. 정극성위상각-음향방출펄스진폭의 시간변화 (9[kV], 무보이드시료)
Fig. 7. Time variation of positive phase-acoustic emission pulse amplitude (9[kV], specimen of no void)

3차원 그래프로 나타냈다. 음향 펄스와 진폭과의 관계는 3.1절에서와 같이 거의 비례함을 나타내었는데 음향 펄스 진폭은 초기 위상각 20° 이내와 180° 부근에서 계속 나타나다가 절연파괴 직전에서는 진폭이 넓은 위상각으로 분포하게 되고 고위상각으로 갈수록 진폭은 커진다. 그림 8은 부극성의 경우를 180°에서 360°까지의 위상을 23개의 구간으로 나누어 전압 인가시에서부터 절연파괴에 이르기까지의 진폭의 크기를 보인 것으로, 240°~270° 사이를 피크치로 하여 비슷한 양상으로 시간에 따라 음향방출 펄스 진폭 분포에 거의 변화가 없으나 절연파괴 직전에 이르러서 분포 양상에 약간의 변화가 나타난다. 정·부극성의 이같은 파괴직전의 변화는 다음 절에 나타나는 파라미터 S의 값이 負로 향하는 사실과 밀접한 관계를 나타낸다.

그림 9의 경우에는 유보이드의 경우를 나타내는데 전압 인가후에서 절연파괴에 이르는 시간까지의 시간은 훨씬 짧아지나 그림 7의 무보이드 경우와 거의 같은 결과가 유도됨을 알았다. 부극성의 경우 그림 10과 같이 피크 부근에서 진폭이 가장 커짐이 그림 8의 경우와 유사하다.

위의 4개의 그림에서의 큰 특징은 정극성의 경우에 절연파괴에 가까워질수록 넓은 위상각에 펄스가 발생하며 저위상에서 고위상으로 펄스 진폭이 커지게 된다. 즉, 펄스가 정극성에게 넓게 퍼지면서 펄스 진폭이 저위상보다 고위상에서 크

게 나타날 때 절연파괴에 가까워짐을 알 수 있다. 음향방출 펄스 수에 대한 위상각 분포는 음향방출 펄스 진폭에 대한 위상각 분포와 거의 유사하게 나타난다. 각 위상각별 음향방출 분포 특성은 다음에 설명하는 파라미터 왜도 S의 경시 변화로 절연파괴 예지를 설명하게 된다.

3.3 왜도 S의 경시 변화를 통한 절연파괴 예지

S값을 이용하여 절연체의 파괴예지를 실험한 경우는 많은 논문에서 볼 수 있다^{8), 9)}. 그림 11에서는 음향방출 펄스 수에 대한 분포파라미터 왜도 S의 값을 정극성, 부극성으로 나누어 경시 변화를 나타내었다. 그림 12는 음향방출 진폭에 대한 왜도 S의 경시 변화인데 펄스 진폭에 있어서

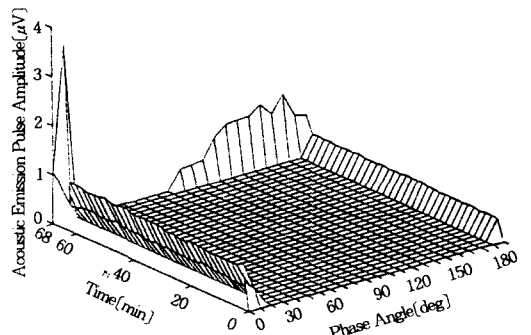


그림 9. 정극성위상각-음향방출펄스진폭의 시간변화 (9 [kV], 유보이드시료)

Fig. 9. Time variation of positive phase-acoustic emission pulse amplitude (9 [kV], specimen of void)

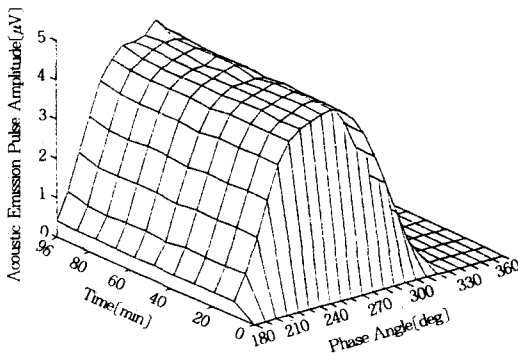


그림 8. 부극성위상각-음향방출펄스진폭의 시간변화 (9 [kV], 무보이드시료)

Fig. 8. Time variation of negative phase-acoustic emission pulse amplitude (9 [kV], specimen of no void)

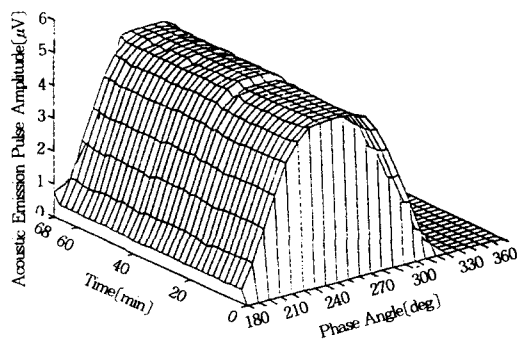


그림 10. 부극성위상각-음향방출펄스진폭의 시간변화 (9 [kV], 유보이드시료)

Fig. 10. Time variation of negative phase-acoustic emission pulse amplitude (9 [kV], specimen of void)

펄스 수 보다는 약간 큰 양상을 볼 수 있으며, 이것들의 중요한 특징은 파괴 직전에 S의 값이 정극성과 부극성 둘 다 “-”로 가는 것이다. 유보이드의 경우도 그림 13과 14와 같이 나타나는데

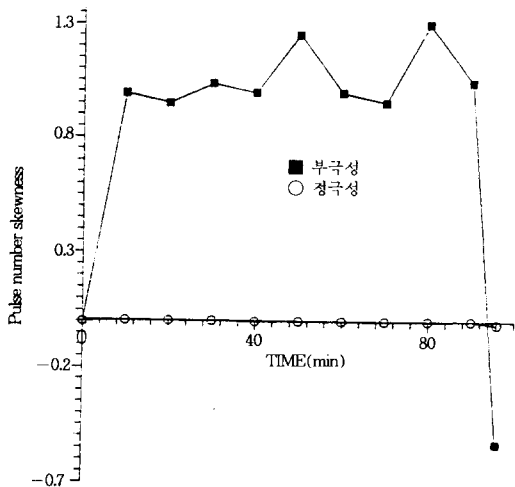


그림 11. 음향방출수의 왜도 S의 시간변화 (9(kV), 무보이드시료)

Fig. 11. Time variation of acoustic emission number's skewness (9(kV), specimen of no void)

무보이드의 경우와 같이 파괴직전에 무보이드의 경우와 근사하게 된다.

이 무보이드 시료의 음향방출 펄스 수와 펄스 진폭의 정극성, 부극성 S값과 유보이드 시료의

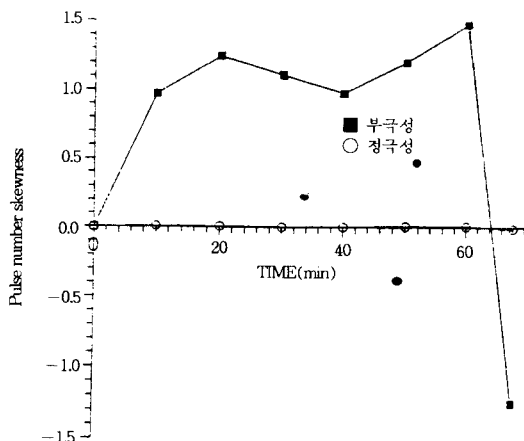


그림 13. 음향방출수의 왜도 S의 시간변화 (9(kV), 유보이드시료)

Fig. 13. Time variation of acoustic emission number's skewness (9(kV), specimen of void)

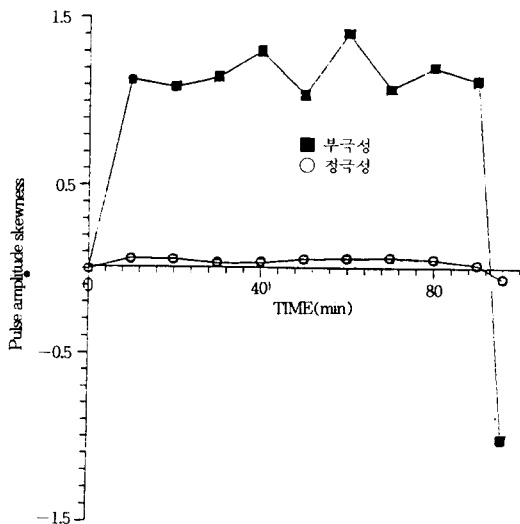


그림 12. 음향방출진폭의 왜도 S의 시간변화 (9(kV), 무보이드시료)

Fig. 12. Time variation of acoustic emission amplitude's skewness (9(kV), specimen of no void)

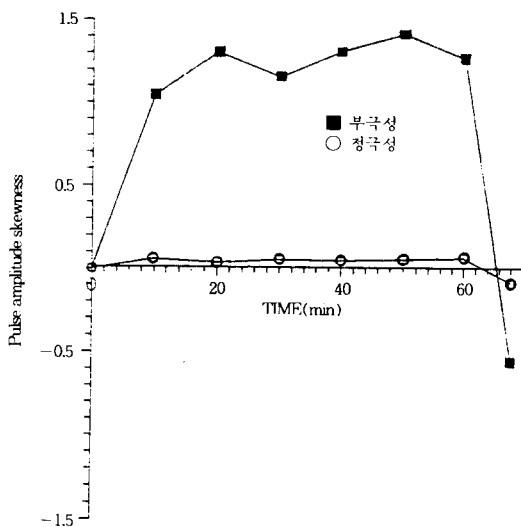


그림 14. 음향방출진폭의 왜도 S의 시간변화 (9(kV), 유보이드시료)

Fig. 14. Time variation of acoustic emission amplitude's skewness (9(kV), specimen of void)

음향방출 펄스 수와 펄스 진폭의 정극성, 부극성 S값 4개를 갖고 정극성인 경우의 값을 횡축으로 "S+"로 하고, 부극성인 경우의 값을 종축으로 "S-"로 하여 S평면에 나타내면 무보이드에 대한 경우로는 그림 15와 16이고, 유보이드에 대한 경우는 그림 17 및 18과 같이 된다. 이 4개의 그림의 특징은 S의 값이 시간의 경과에 따라 원점

에서 멀어져가는데 이것이 원점에서 멀어짐으로 절연파괴의 위험성을 알게하여 주고 절연파괴 직전의 파괴를 예견할 수 있는 시점은 S평면 3상한에 들어간다는 점이다^{9), 10)}. 바로 이 점이 음향방출펄스 분포를 분포 파라미터 왜도를 이용하여 절연파괴 예지로 사용할 수 있다.

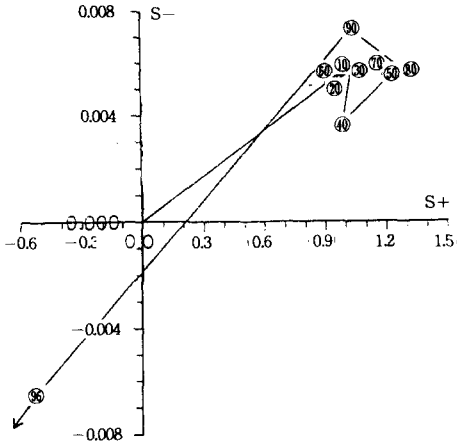


그림 15. S평면상에서 음향방출펄스수의 S왜도 (9[kV], 무보이드시료)

Fig. 15. Trajectory of acoustic emission pulse number's skewness in S-plane (9[kV], specimen of no void)

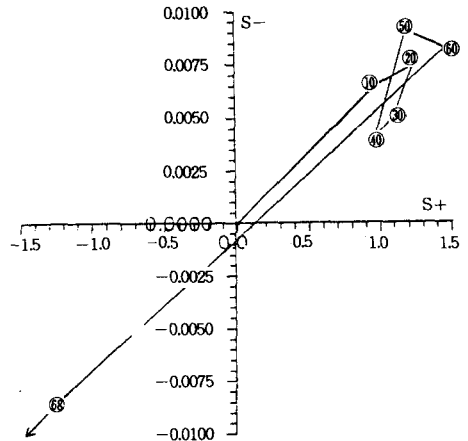


그림 17. S평면상에서 음향방출펄스수의 S왜도 (9[kV], 유보이드시료)

Fig. 17. Trajectory of acoustic emission number's skewness in S-plane (9[kV], specimen of void)

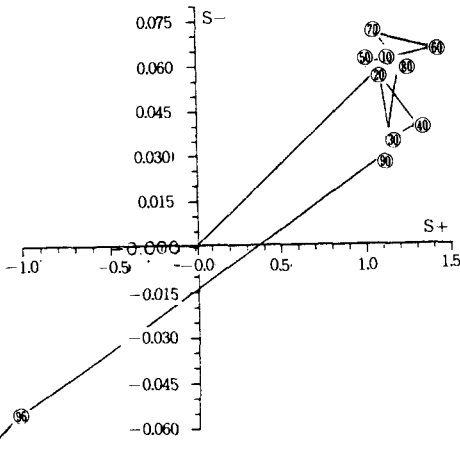


그림 16. S평면상에서 음향방출펄스진폭의 S왜도 (9[kV], 무보이드시료)

Fig. 16. Trajectory of acoustic emission pulse amplitude's skewness in S-plane (9[kV], specimen of no void)

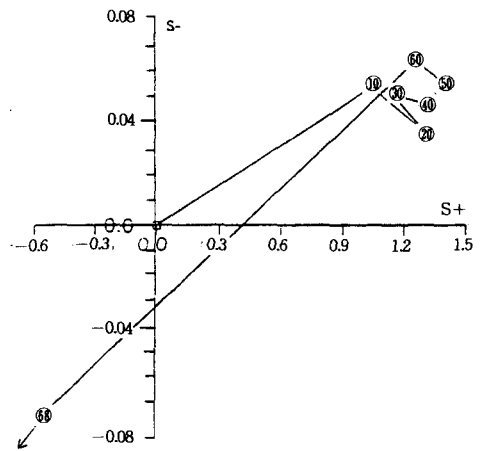


그림 18. S평면상에서 음향방출펄스진폭의 S왜도 (9[kV], 유보이드시료)

Fig. 18. Trajectory of acoustic emission amplitude's skewness in S-plane (9[kV], specimen of void)

4. 결 론

무보이드, 유보이드 LDPE 시료의 트리진전 실험에서 음향방출 펄스 진폭과 펄스 수를 정·부극성 위상각으로 나누어 해석하고 왜도 S를 이용하여 분포 상황의 경시 변화를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 무보이드와 유보이드의 경우 정·부극성의 음향방출 펄스 진폭과 펄스 수의 시간에 따른 변화는 초기(약 10분 이내)에는 증가하나 그 이후에는 거의 증가하지 않음을 알 수 있으나, 트리진전 길이는 초기에는 급히 증가하나 중기에는 완만히 증가하다가 파괴직전 말기에는 매우 빠르게 증가한다.

2. 음향 방출 펄스 진폭과 펄스 수의 각 위상각별 분포 특성에서 무보이드, 유보이드 시료 모두 정극성인 경우에는 파괴직전에 가서 넓은 위상각 분포를 보여주고, 부극성인 경우는 전압인가시에서 파괴에 이를 때까지 피크값 부근에 분포되어 거의 같은 값으로 유지해오다가 파괴직전에 변화를 나타낸다.

3. 무보이드, 유보이드의 LDPE 시료 트리실험에 따른 왜도 S의 값의 경시 변화와 S평면 그림에서 S값이 3상한으로 들어서면 절연파괴에 이르게 되므로 절연파괴 예지가 가능하다.

參 考 文 獻

- 1) F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", 1989
- 2) H. Fujita, T. Nakanish, Y. Yamaguchi, "Acoustic Emission Distribution & Types of Electrical Tree in Polyester", IEEE EI-18, pp. 520~527, 1983
- 3) 김 재환, 박재준, "음향방출 측정법에 따른 가교 폴리 에틸렌 케이블의 트리잉 파괴 예지에 관한 연구", 조명전기설비학회, Vol. 7, No. 4, pp. 26~33, 1993
- 4) N. Yoshimura, H. Kudo, F. Noto, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polyethylene", Jap. J. Appl. Vol.20, No. 11, pp. 775~778, 1981
- 5) Y. Kagawa, S. Yanazaki, "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials", IEEE EI-17, No. 4, pp. 314~318, 1982
- 6) T. Tanaka, "Effects of Charge Injection & Extraction on Tree Initiation in PE", IEEE PAS-97, No. 5, pp. 1749~1757, 1978
- 7) C. Laurent, "Analysis of the Propagation of Electrical Treeing Using Optical & Electrical Method", IEEE EI-15, No. 1, pp. 33~41, 1980
- 8) T. Okamoto, T. Tanaka, "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement System", IEEE EI-21, No. 6, pp. 1015~1019 Dec. 1986
- 9) T. Okamoto, T. Tanaka, "Prediction of Treeing Breakdown from Pulse Height of Partial Discharge on Voltage Phase Angle", Jap. J. Appl. Phys. Vol.14, pp. 156~160, 1985
- 10) T. Okamoto, T. Tanaka, "Change of Pulse-Mean ϕ -q Distribution Patterns of Partial Discharges due to Treeing Propagation", JIEE Vol. 102, No. 12, pp. 37~44, 1982