

가교폴리에틸렌(XLPE)의 부분방전에 의한 초음파 검출

(Detection of Ultrasonic Wave Signals Associated with Partial Discharge in XLPE)

김 성규 · *이 상우 · *구 경철 · *김 충년 · **김 인식 · *이 광식 · *이 동인

Seung-Gyu Kim · *Sang-Woo Lee · *Kyung-Chul Gu · *Chung-Nyen Kim · **In-Sik Kim · *Kwang-Sik Lee ·

*Dong-In Lee

(*Yeungnam University · **Kyungil University)

Abstract

Measurements of AE signals caused by partial discharges were performed by using an ultrasonic measurement technique to diagonalise the electrical treeing deterioration in XLPE cable. We also examined the partial discharge magnitude and AE signals(peak-to-peak) with the increase of the deterioration time.

From these results, it was found that AE signal due to partial discharge can be greatly detected at the peak value of positive polarities prior to the breakdown voltages, and the magnitude of AE signals was closely related to the current pulses by the increase of deterioration, and it appeared that AE signals(peak-to-peak) was proportional to partial discharge magnitude. Attenuation and time-delaying characteristics of ultrasonic signals propagated in various polymers sample by using ultrasonic oscillation and receiving systems are also reported as a basic data of ultrasonic measurements in XLPE cable

1. 서 론

현재 지중선로에 사용되고 있는 가교폴리에틸렌 케이블은 전기적 절연 성능이 우수하므로 지중선로용 절연체로 XLPE가 널리 사용되고 있다.

고전압이 인가된 XLPE 절연체에 보이드 등이 존재하면 유전율의 차이에 의해 보이드 내부의 전계는 집중되어 부분방전이 발생되고 절연재료는 트리(tree) 형태로 열화되어 결국 절연파괴에 이르게 된다.[1] 그러므로 고분자 재료의 트리잉파괴 특성은 절연성능과 기기의 절연수명에 매우 중요한 영향을 미치는 전구파괴현상이므로 트리의 발생 및 성장에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다.[2]

고전압 전기회로에서 부분방전이 일어나면 반드시 방전음이 수반되고 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며 이러한 방전음을 효과적으로 검출하기 위해 초음파센서가 이용되고 있다. 초음파센서를 이용하여 전력용 유압변압기 또는 커패시터 내부에서 발생하는 부분방전을 비교적 정확히 검출 할 수 있다는 연구보고가 최근 많이 발표되고 있다.[3][4]

그러나 지중케이블은 고체인 복합절연체로 사용되고 이러한 절연매질에서는 트리잉파괴가 가장 심각한 문제가 되고 있으므로[5][6] 트리의 발생 및 성장에 따른 초음파신호 검출에 관한 연구는 매우 미흡한 상태이므로

연구의 필요성을 느낀다. 트리잉파괴는 심한 불평등 전극구조에서 국부적인 고전계에 의해 발생되고 있다. 일단 트리가 발생되면 시료의 일부를 수[μ m] 정도의 극히 미세한 공동을 형성시키고 그 공동내부에서 부분방전이 계속 발생하면 트리는 대향전극을 향해 성장하게 된다. 따라서 본 연구에서는 침전극을 XLPE 시료 내부에 투입하여 상용주파수의 교류전압을 인가하였을 때 열화시간에 따른 부분방전전류펄스 및 AE신호 최대출력전압(V_p-p)과 부분방전전하량(q)의 관계를 조사하였다.

또한 각종 고분자 시료에서의 음압 감쇄 특성 및 펄스신호의 의한 지연시간 특성 등을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 트리를 용이하게 형성시키기 위해서는 대단히 높은 전계가 필요하므로 침대 평판전극으로 구성하였다.

교류전압을 인가하면 가장 전위경도가 높은 침전극의 선단으로부터 트리채널(tree channel)이 형성되어 평판전극을 향해 성장하게 된다. 본 실험에 사용된 시료는 현재 송·배전용으로 사용되고 있는 가교폴리에틸렌 케이블(XLPE cable) 전선의 외피를 제거하여 절연체인 XLPE를 잘라 시료의 형태를 20*30*8[mm]로 하여 상온에서 실험하였다.

본 실험에 사용한 침전극 및 시료의 형상은 침전극은

직경 1.0[mm], 길이 55[mm]이며 재질은 stainless steel 이며 침의 선단각은 약30도이고 선단곡률반경은 약10[μm]가 되도록 연마하였다. 침전극으로 사용된 바늘은 XLPE 절연체를 잘라 삽입하였다. 삽입하기 전에 침전극 선단에 길이 1.0[mm]인 인공 void를 만들고 침전극 선단과 평판전극사이의 거리는 3[mm]로 하였다. 평판전극의 지름은 약40[mm]이고, 전극의 두께는 약 10[mm]이며 전극 가장자리는 둥근 형상으로 제작하여 설치하였다. 실험은 온도 22~30[°C], 습도 50~70[%]의 실온에서 하였으며, 고전압 인가시 시료표면으로 섬락현상이 발생되지 않게 하기 위해 천연 광유인 1종 2호의 절연유에 침착 시켰으며, 이를 위해 사용된 유조는 두께 4[mm]인 아크릴판(acrylic plate)으로 제작하였으며, 유조의 크기는 35*20*20[cm]이다. 음향신호를 검출하기 위해 광대역 AE센서(wide-band AE sensor)를 사용하였으며, 이 센서의 주파수범위는 약100[kHz]~1.5[MHz]이며, 주파수 특성은 그림2와 같이 1.5[MHz]까지는 거의 평탄한 이득곡선을 나타내고 있다.

AE 신호의 수신회로는 전치증폭기, 고역통과필터 및 주증폭기로서 구성하였다.

여기서 증폭기회로의 이득은 40[dB]을 갖도록 설계하였다. 기계적 진동 등에 의한 외부 노이즈를 제거하기 위해 차단주파수 100[kHz]인 고역통과필터(high-pass filter)를 사용하였다. 본 증폭장치의 주파수응답은 그림3과 같다. 여기서 약 100~450[kHz] 영역에서 측정감도가 비교적 양호한 것으로 나타났다.

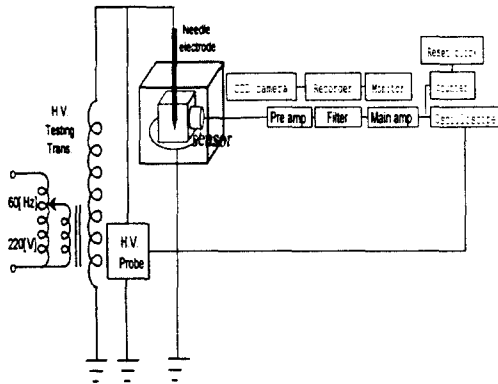


그림 1. 실험장치도

Fig. 1. Block diagram of experimental apparatus

부분방전에 의한 AE센서의 신호를 관찰하기 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9350AL)를 사용하였다.

고전압의 발생 및 방전전하량[μC]으로 나타낸 코로나

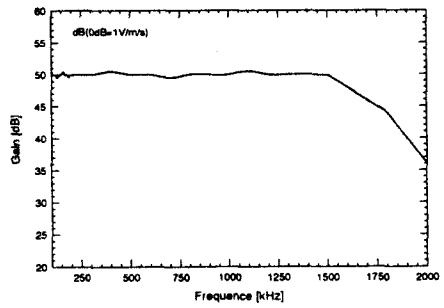


그림 2. AE센서의 주파수 특성

Fig. 2. Frequency characteristics of acoustic emission sensor.

방전의 크기는 코로나 측정시스템(corona detecting apparatus system set, 일본 Pultec Electronics Co.)을 사용하여 측정하였다. 이 장치는 슬라이더에 의해 전압값을 조정할 수 있으며, 교류입력전압은 60[Hz], 220[V]이고, 시험용 변압기의 2차 최대전압은 30[kV]이다. 코로나 발생전압에서 오실로스코프를 사용하여 전압파형을 관측하기 위해 분압비 2000:1인 고전압프로브(high voltage probe, type : EP-50K, 일본 Pulse Electronic Engineering Co.)를 사용하였다.

또한 부분방전에 의한 트리잉의 진전상태를 확인하기 위해 배율 50인 디지털 카메라(CCD camera)를 설치하였다.

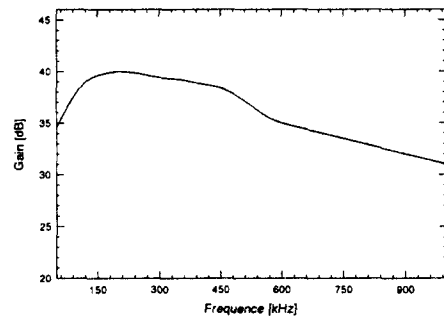


그림 3. 증폭장치의 주파수 특성

Fig. 3. Frequency characteristics of amplifying circuit.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고분자 시료의 음압 감쇄 특성

초음파의 기본 특성은 전파매질에 따라 분류할 수 있다. 일반적으로 특성이 상이한 매질이 공존하는 경우에는 초음파의 반사 및 굴절특성이 요구되고 있다.

본 실험에서는 주변 잡음을 최대한 억제시킨 실내에서 측정하였다.

그림4는 각종 고분자 재료의 이격거리(d) 변화에 따른 초음파신호 감쇄 특성을 나타낸 것이다.

본 실험에 사용된 고분자 재료는 우레탄(Urethane), 테프론(Teflon) 및 폴리에틸렌(Polyethylene)이며, 고분자 재료의 두께는 5~30[cm]이다.

여기서 초음파 발진기의 송신 최대출력전압(V_p -p)은 15[V]로서 일정하게 유지하고, 송·수신 초음파센서의 이격거리(d)를 변화시켰을 때 초음파 수신회로의 최대 출력전압(V_p -p)으로 나타낸 것이다.

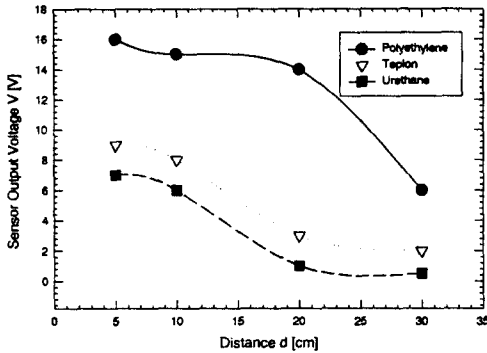


그림 4. 고분자 재료의 음압 감쇄 특성
Fig. 4. Ultrasonic attenuation in various polymers.

그림4에서 알 수 있는 바와 같이 거리 d가 증가할 수록 음압은 감소되고 있으나, 고체인 고분자 재료의 음압 감쇄 특성은 재질에 따라 매우 상이한 것으로 나타났다.

폴리에틸렌은 테프론 및 우레탄에 비해 수신 감도가 매우 높은 것으로 나타났으며, 또한 거리 d가 20[cm]까지는 감쇄의 정도가 비교적 낮은 것으로 나타났다.

이는 우레탄 및 테프론 시료에 비해 저밀도 폴리에틸렌의 음향임피던스가 초음파센서의 송·수신용소자에 부착된 정합용 플라스틱판의 음향임피던스가 초음파센서의 송·수신용소자에 부착된 정합용 플라스틱판의 음향임피던스값에 가깝기 때문에 경계면에서 반사작용이 적어 초음파는 폴리에틸렌 시료 내부를 용이하게 전달될 수 있기 때문이라고 생각된다.

본 실험에서 전파거리 30[cm]인 음압레벨은 5[cm]떨어진 음압레벨에 비해 폴리에틸렌은 8.5[dB], 테프론은 15.6[dB], 우레탄은 16.9[dB] 감소된 것으로 각각 나타났다.

3.2 PE의 초음파신호 지연시간 특성

초음파신호는 매질에 따라 일정한 전파속도를 갖고 있기 때문에 방전이 발생한 순시에 그 신호를 수신하는 것은 불가능하고, 방전 점으로부터 센서 설치장소까지

매질을 통해 전달되기 위해서는 일정한 시간지연이 발생되고 있다.

대부분의 물질에 대해 초음파의 전파속도는 잘 알려져 있으며, 상온 및 상기압에서 고체인 폴리에틸렌은 약2,000[m/s], 에폭시수지는 약2,700[m/s]으로 더욱 증가되는 것으로 보고되고 있다.

그림5는 초음파신호의 지연시간 특성을 오실로스코프에 의해 측정된 것이다.

여기에서 상부 파형은 초음파 발신장치에 인가된 주기 16[ms], 폭50[μs]인 구형파 펄스를 나타낸 것이고, 하부 파형은 공진 주파수 200[kHz]인 초음파센서를 사용하여 폴리에틸렌의 두께 4[cm]인 시료에서 측정된 초음파신호 파형이다.

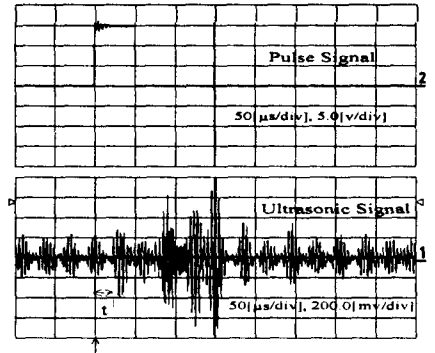


그림 5. PE 시료의 펄스신호에 대한 초음파신호 지연 시간 특성

Fig. 5. Delay characteristics of ultrasonic signal for pulse signal in polyethylene sample.

초음파신호는 고주파 밴드의 형태로서 오실로스코프 화면상에 나타나고 있으며, 구형파 펄스보다 일정시간 t에 의해 지연되고 있다. 여기에서 지연시간 t는 약22[μs]로 측정되었으며, 발생 점까지의 계산거리는 4.4[cm]이다.

따라서 매질의 전파속도를 알고, 초음파신호의 지연시간을 측정하므로써 음원까지의 거리는 용이하게 계산될 수 있다.

3.3 부분방전 전류펄스와 AE신호의 특성

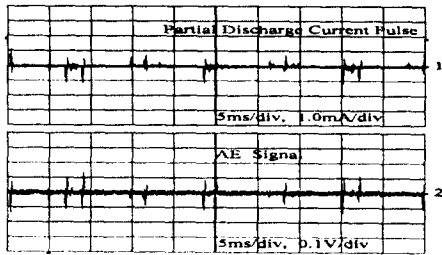
그림6은 XLPE 시료에 상용주파수의 교류전압 14[kV]를 인가하였을 때, 열화시간에 따른 부분방전 전류펄스 및 초음파신호 파형을 나타낸 것이다. 여기서 채널1은 부분방전 전류펄스이며, 채널2는 초음파신호 파형이다.

부분방전전류 펄스는 그림6(a) 채널1의 열화초기에는 인가전압의 상승 및 하강 부분에서 크기가 거의 비슷하게 나타나고 있으며, 그 발생 영역도 거의 동일하게 나

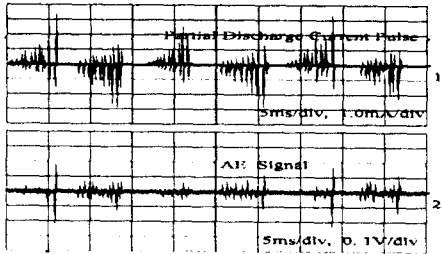
타나고 있다.

그림6(c) 채널1의 열화말기에서는 인가전압의 상승 및 하강 부분에서 부분방전전류 펄스의 크기가 열화초기에 비해 크게 증가되었다. 이는 트리 채널 내부의 방전에너지의 증가로 인해 전류펄스의 크기가 증가되는 것으로 생각된다.

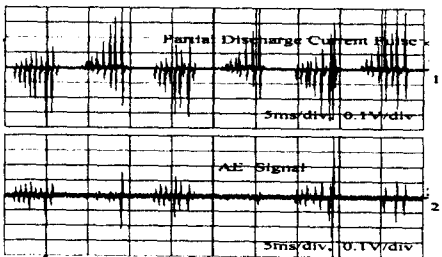
초음파신호의 경우 그림6(a) 채널2의 열화초기에는 전류펄스의 발생 위치 부근에서 초음파신호가 검출되었다. 그림6(c) 채널2의 열화말기에는 초음파신호의 발생 영역은 열화 초기보다 발생영역이 확대되었으며, 그 크기도 증가되었다.



(a) 열화초기



(b) 열화중기



(c) 열화말기

그림 6. 열화시간에 따른 부분방전 전류펄스 및 AE신호 파형

Fig 6. Waveform partial discharge current pulse and AE signal with deterioration time

따라서 열화시간 증가에 따라 부분방전전류펄스와 초음파신호의 크기는 서로 비례하여 증가함을 알수 있다.

그리고 XLPE의 트리 발생은 인공 보이드 내부에서 기중 방전에 의한 높은 방전에너지가 XLPE 절연물에 작용하여 트리가 진전하는 것으로 생각되고 있으나, 트리의 발생 메카니즘은 아직 명확히 구명되어 있지 않다. 그러나 트리의 진전은 트리 채널 내부에서 발생하는 코로나 스트리머에 의해 많은 영향을 받는 것으로 생각된다.

3.4 AE신호 최대출력전압(V_p-p)과 방전전하량(q)의 관계

XLPE내의 침전극에 상용주파수의 교류전압 14[kV]를 인가하였을 때 열화시간이 경과함에 따라 부분방전에 의한 방전전하량은 증가하는 것으로 나타났다.

그림7은 방전전하량(q)과 AE신호 최대출력전압(V_p-p)의 관계를 나타내었다. 또한 그림7은 동일한 조건에서 XLPE 시료의 인가전압을 14[kV]로 인가하여 10회 이상의 값을 평균하여 나타낸 것이며, 방전전하량 기준으로 하여 AE신호(V_p-p)를 측정하면 그때 파고치 변화가 10%이내로 나타났다.

본 실험에서는 방전전하량(q)의 증가에 따라 AE신호(V_p-p)는 증가되었다. 또한 본 실험에 사용한 XLPE 시료의 절연파괴 부근에서는 부분방전전하량(q)은 약 120[pC]이었으며, AE신호(V_p-p)는 약1.5[V]로 나타났다.

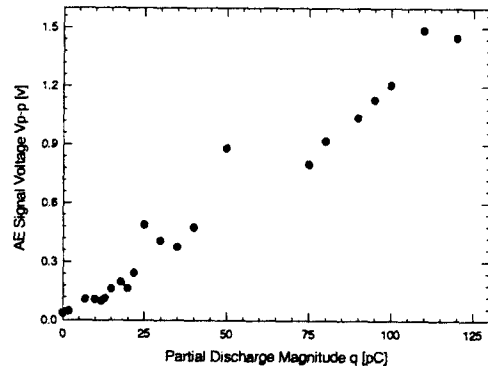


그림 7. AE신호(V_p-p)와 방전전하량(q)의 관계
Fig. 7. Relation between AE signal(V_p-p) and discharge magnitude(q)

4. 결론

본 연구에서는 초음파 측정법을 사용하여 부분방전에 의한 XLPE의 열화를 진단하기 위해 침대 평판전극 배치에서 상용주파수의 교류전압 14[kV]를 인가하였을 때,

XLPE의 열화에 따른 방전전하량과 AE신호 최대출력전압(Vp-p)의 상호관계 특성을 조사하였다. 또한 초음파 측정시 기본데이터를 얻기 위해 각종 고분자 시료의 초음파의 감쇄특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

상용주파수 교류전압을 인가하였을 때 XLPE내의 부분방전에 의한 열화시간이 경과함에 따라 전류펄스의 크기가 증가하고, 초음파신호 크기도 증가되었으며, 초음파신호의 발생영역은 열화초기에서 말기로 진행할수록 발생영역이 증가되었다.

방전전하량과 AE신호 최대출력전압(Vp-p)과의 관계는 서로 비례하여 증가되는 것으로 보아 상호 밀접한 관계가 있음을 알수있으므로 절연진단에 초음파신호출력전압(Vp-p)이 상당히 유용하다고 생각된다.

각종 고분자 시료에 대한 초음파신호의 감쇄는 전파거리 30[cm]인 음압레벨은 5[cm]떨어진 음압레벨에 비해 폴리에틸렌은 8.5[dB], 테프론은 15.6[dB], 우레탄은 16.9[dB] 감소된 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 松浦慶士, 岡部成光, 金子英男, “電力機器の絶縁余壽命推定法の現状” 電學論A, 114卷 12号, pp.845-852 平成6年
- [2] 渡部剛士, 笠間一郎, 石井秀和, 高木義之, “受配電設備診斷用部分放電檢出裝置” 電學論B, 116卷 1号, pp.65-73 平成8年
- [3] R. T. Harold, “Acoustic Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics,” IEEE Trans. E, Vol. 20, No. 1, pp. 3-19, 1985.
- [4] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, K. Ando, “Basic Studies of Acoustic Emissions Caused by the Partial Discharge in an Oil-Tank” K-J Joint Symp. on ED and HVE, pp. 16-19, Oct. 1998.
- [5] R. Bartrikas & K. D. Srivastava, Power Cable Technology, Sandford Educational Press, Waterloo, Ontario, 1987
- [6] 電氣學會: 「特別高壓CVケーブル設備實態と絶縁熱火 診斷技術の動向」, 電學技報, 11部, No 266, 31 (1988-3)