

# 개질된 전력용 케이블절연체의 부분방전 특성 해석

(PD Characteristics Analysis of Improved Insulating Materials for Power Cables)

송일근\* · 광희로\*\*

(Il-Keun Song\* · Hee-Ro Kwak\*\*)

## 요 약

본 논문은 성능이 우수한 전력케이블용 절연재료 개발에 대한 기초 자료를 얻기 위한 연구로서, 초음파 센서를 사용하여 폴리에틸렌의 부분방전 특성을 측정하고 측정된 신호의 정량화를 시도하여 폴리에틸렌에서 발생되는 부분방전을 억제시킬 수 있는 방안에 관한 연구를 수행하였다.

이러한 결과로부터 기본 수지인 저밀도 폴리에틸렌을 적당히 개질하면 폴리에틸렌의 부분방전이 억제될 수 있음을 알았고, 이를 검증하기 위하여 폴리에틸렌을 아크릴산으로 개질하여 아크릴산 그래프트 폴리에틸렌을 제조하였으며, 이에 대한 부분방전 특성을 평가하였다. 평가 결과, 본 연구에서는 아크릴산이 0.03 wt(%) 정도 그래프트되면 폴리에틸렌의 부분방전이 크게 억제됨을 발견하였다. 이러한 결과로부터 폴리에틸렌을 적당한 화학성분으로 개질하면 폴리에틸렌의 부분방전이 크게 억제되었다.

## Abstract

In order to get material requirements for the improvement of reliability of insulating materials for power cables, partial discharge characteristics of polyethylenes were measured by an ultrasonic technique and measured signals were processed to obtain the parameters useful for the quantification of partial discharge characteristics of polyethylenes. This technique was applied to obtain material requirements for the development of improved insulating materials for power cables.

As a result, it was found that partial discharging activities in polyethylenes were suppressed considerably when a proper amount of acrylic acid, 0.03(wt %) in this particular case, is grafted on polyethylene chains.

It can be concluded from the present study that partial discharging activities in polyethylenes could be suppressed by the modification of polyethylene with proper chemical components, acrylic acid in this particular study.

\*정회원 : 전력연구원 전력계통연구실 P/L

접수일자 : 1997. 7. 1

\*\*정회원 : 송실대 전기공학과 교수

## 1. 서 론

도시화의 진전과 더불어 배전선로의 지중화가 급속히 진행되고 있으며, 이에 따라 지중 케이블의 사고가 확대되는 등 여러가지 문제점이 증가일로에 있다. 따라서 각 국에서는 전력케이블 자체의 절연성능향상을 위한 새로운 절연재료 개발과 기설케이블의 절연열화특성을 활선상태에서 감시할 수 있는 활선진단장치 개발에 관한 연구를 통해 전력공급의 안정성 및 신뢰성 확보를 위해 노력하고 있다[1~5].

지중 케이블의 주 절연체로 사용하는 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene; LDPE)과 가교 폴리에틸렌(crosslinked polyethylene; XLPE)은 낮은 유전율, 저 손실, 높은 절연과교강도를 가진 우수한 전기적 성능의 케이블 절연재료이다. 특히 비교적 간단한 화학가교에 의하여 제조될 수 있는 XLPE는 LDPE에 비하여 기계적, 열적 특성이 우수하기 때문에 전력케이블의 주 절연층으로 사용되고 있다[6].

그러나 전력케이블의 주 절연층으로 사용되는 LDPE와 XLPE는 상기와 같은 우수한 특성에도 불구하고, 장기간 사용함에 따라 수트리(water tree) 현상 등 열화에 의한 사고가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 그라프팅(grafting) 방법으로 PE (polyethylene; PE) 자체를 화학적으로 개질하는 방법(acrylic acid grafted polyethylene; g-LDPE)과 블렌딩(blending) 기법, 또는 첨가제를 사용하는 방법 등을 사용하여 수트리의 발생 및 진전을 억제함으로써, 주절연층 자체의 성능개선을 위한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 이중 블렌딩기법 및 첨가제를 이용한 수트리 억제형 가교 폴리에틸렌(tree retardant XLPE; TR-XLPE) 컴파운드가 이미 개발되어 배전용 케이블의 중단 부위와 중요 공급선로에 사용중에 있다[7, 8].

부분방전(Partial Discharge; PD)에 대한 연구는 두 가지 측면에서 동시에 이루어져야 좋은 결과를 얻을 수 있다. 첫째는 보다 좋은 측정방법과 열화진단 방법의 개발이고, 둘째는 케이블용 절연재료인 폴리에틸렌의 PD를 억제할 수 있는 방법을 확립하

는 일이다. 이 중에서 후자의 방법은 PD에 의한 재료의 열화를 억제하기 위한 보다 적극적인 방법으로서, 이를 위해서는 케이블 절연재료인 PE의 PD 특성을 보다 정확하게 파악해야 한다.

그러나 지금까지 이루어진 PE의 PD에 대한 연구는 대부분 PE를 시료로 하고는 있으나, 그 시료의 특성에 관한 사항은 거의 미진하며, 또한 재료개발 측면에서의 체계적인 시료를 사용하고 있지 않기 때문에, 기존의 자료를 이용하기에는 많은 어려움이 있다[9~13].

따라서 본 논문은 국내의 지중케이블의 절연체로 주로 사용되고 있는 LDPE와 XLPE를 대상으로 초음파 진단기법을 이용하여 PD를 측정하고, 각 시료별 특성을 분석, 정성화하였으며, 기존의 케이블 절연체가 가지고 있는 단점을 보완하기 위하여 수트리 및 전기트리에 저항성이 큰 절연재료를 개발하였다.

## 2. 실험장지 및 방법

### 2.1 시료

본 연구에서 사용된 LDPE는 국내 석유화학회사에서 제조되어 현재 국내 전력케이블의 주 절연체로 쓰이는 XLPE의 모체수지로 사용되는 것이며, 첨가제가 혼합되어 있지 않은 것이다. LDPE는 밀도가  $0.92 [g/cm^3]$ , 용융지수(melting index; MI)는  $2 [g/10min]$ 이고, 중량평균분자량 (Mw)은 144,000이며 분자량분포(MWD, Mw/Mn)은 약 8이다.

본 연구에서는 내트리성을 증가시킨 g-LDPE를 제조하여 PD를 측정하였고, g-LDPE의 제조는 LDPE를 기본 수지로 하였으며, 개시제 (initiator)로 사용되는 과산화물(dicumyl peroxide; DCP)을 사용하였다. 조성은 기본 수지인 PE에 대하여 개시제인 DCP를  $0.02(phr)$  (phr; part per hundred resin)으로 고정하고, 단량체의 함량을 0.005, 0.01, 0.02, 0.1, 0.5(phr)로 변화시켜서 평량하였다.

그라프트반응은 Henschel혼합기를 사용하여 수지와 단량체, 개시제를 혼합한 후 직경이 30인 쌍사출기로 반응압출시켰다. g-LDPE의 가교도는 0.02 [wt%]가 되도록 크실렌에 녹아있는 g-LDPE를

메탄올을 사용하여 재결정시키고, 여과와 용매로 충분히 씻어 내린 후 70[°C] 진공에서 48시간 동안 건조하였다. g-LDPE는 적외선 흡수분광도법(Fourier Transform-Infrared; FTIR spectroscopy)을 사용하여 아크릴산이 그래프트된 것을 확인하였으며, 사용한 분해능은 4[cm<sup>-1</sup>]였다. g-LDPE의 FTIR 스펙트럼은 그림 2.1에 나타내었다. 그림 2.1에서 순수한 LDPE와 g-LDPE의 스펙트럼을 비교해 보면 g-LDPE에서만 나타나는 피이크를 관찰할 수 있다.

FTIR 스펙트럼의 피이크는 1,714[cm<sup>-1</sup>]에서 나타나는데 이는 메틸렌으로 이루어진 PE에 아크릴산이 그래프트됨에 따라서 산(acid)에 존재하는 카보닐 즉, C=O의 신축진동에 의한 영향으로 나타나게 된다. 또한 이 피이크는 그래프트율이 증가함에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다.

이러한 결과로부터 본 연구에서 사용한 용융 그래프팅 방법에 의하여 PE에 아크릴산이 적절하게 그래프트됨을 확인할 수 있었으며, 표 2.1은 본 연구에서 제조한 g-LDPE의 그래프트율을 정리하였다.

2.2 시편 및 실험장치

표 2.1 g-LDPE의 그래프트율  
Tble 2.1 Grafting ratio of g-LDPE

시료명	AM01	AM02	AM03	AM04	AM05
Graft(%)	0.0154	0.0281	0.031	0.0724	0.1345

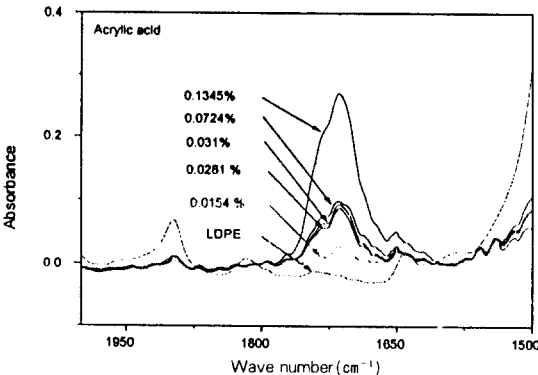


그림 2.1 그래프트된 LDPE의 FTIR 스펙트럼  
Fig. 2.1 FTIR spectra of grafting LDPE

PD 측정용 전극은 그림 2.2와 같은 구조의 시편을 핫 프레스를 이용하여 80×6×50[mm<sup>3</sup>] 크기로 압축성형하였다. 우선 두께 3[mm]의 판 2장을 압축성형한 후, 침 대 평판 전극을 만들기 위하여 판 사이에 바늘을 넣고 다시 한번 성형하였다. LDPE의 경우에는 130[°C]에서 10분간 녹인 후 20분간 성형하였고, XLPE의 경우에는 130[°C]에서 10분간 녹인 후 180[°C]에서 20분간 가교시켜 성형하였다. 바늘은 일본의 오구라(Ogura)사에서 구입한 곡률 반경이 10[μm]인 바늘을 사용하였고, 바늘 끝에서 시편 바닥까지의 거리는 2[mm]로 조정하였다. 접지 측 전극에는 시편의 바닥에 은전극을 도포하였다.

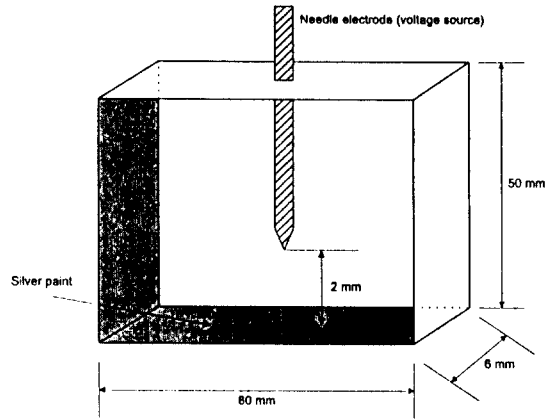


그림 2.2 전극 배열  
Fig. 2.2 Electrode arrangement

또한 절연과괴시 센서를 보호하고 센서의 부착을 용이하게 할 목적으로 시편과 초음파 센서 사이에 두께 1[mm]의 PE판을 삽입하였다. 이 판은 시편과 같은 종류의 PE를 사용하였으며, 외부의 전기적 잡음 영향을 최소화하기 위하여 스테인레스 스틸로 센서 케이스를 구성하였고, 이 케이스는 접지의 역할을 겸하고 있다. 이 실험장치의 구성은 그림 2.3과 같다.

2.3 초음파 센서 및 신호증폭기

본 연구에서 사용한 초음파센서는 공진주파수 500[kHz]인 PZT-5A인 디스크형의 압전진동자를 사용하였고, 압전진동자의 직경은 25.4[mm]이며, 두

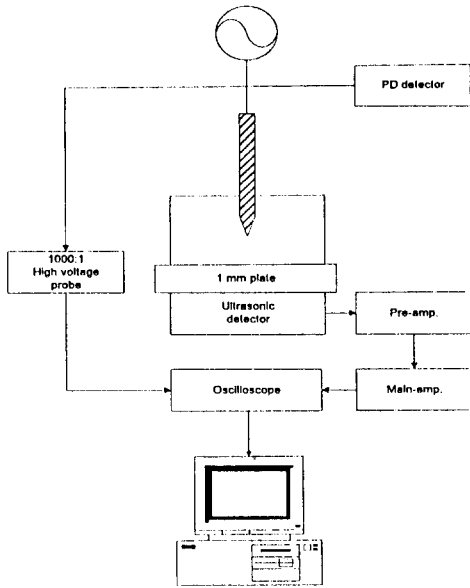


그림 2.3 실험장치의 개략도  
Fig. 2.3 Schematic diagram of experimental apparatus

께는 12.7[mm]이다.

초음파 센서의 사용 가능한 온도범위는  $-45[^\circ\text{C}] \sim 80[^\circ\text{C}]$ 이며, 설치압력은 400[psi] 이하이다. 초음파가 케이스내에서 다중반사되면 탐지해야될 초음파 신호와 간섭이 일어나 방해가 되므로, 압전진동자의 뒷부분은 에폭시를 흡수제로 사용하여 충진하였다. 센서에 도달한 초음파의 충격을 흡수하기 위하여 센서부와 콘넥터부는 도입선(lead wire)의 꼬임을 방지하기 위하여 볼트로 양쪽을 고정하여 뒤틀림이 없도록 하였으며, 이때 초음파의 충격이 콘넥터부로 전달되지 않도록 하였다.

시편에서 측정된 초음파 신호의 레벨은 수십 [ $\mu\text{V}$ ] 정도로 상당히 낮은 상태이므로 초음파 신호를 센서로부터 신호처리장치로 전송하게 될 경우 이들 신호를 어느 정도 증폭하여야만 신호의 전송이 가능하다. 이에 본 연구에서 사용한 신호증폭기는 센서에 내장된 40[dB]의 이득을 갖는 전단증폭기가 사용되었고, 후단의 주 증폭기는 0~60[dB]의 이득을 갖는 가변증폭기가 사용되었다.

또 100~300[kHz] 범위의 대역통과 필터를 사용하여 외부 잡음들에 의한 다른 주파수 성분의 신호

를 감쇄되게 함으로써 잡음에 의한 영향을 줄일 수 있었다.

## 2.4 신호의 정량화

실험에서 얻은 전기적 측정법에 의한 PD 크기의 결과와 정량적으로 비교하기 위하여 초음파 신호의 몇가지 변수 즉,  $\Delta y^2$ , 펄스 수 (number of pulses), 지속시간(duration time), 그리고 진폭이 가장 큰 신호의 피크-피크치(peak to peak)를 PD에 의해 발생하는 초음파 신호의 변수들로 측정하였다.

여기에서  $\Delta y^2$ 는 16.67[ms]동안의 진폭을 제공하여 적분한 값으로 PD의 에너지에 비례하며, 펄스 수는 16.67[ms] 동안의 펄스 수로 문턱전압(threshold voltage)이 0.1[V]이다.

그리고 상승시간은 최대 피크까지의 시간이며, 지속시간은 1개의 신호가 지속되는 시간을 나타낸다.  $\Delta y^2$ 과 펄스 수의 경우 시간을 16.67[ms]로 정한 것은 16.67[ms]가 AC전압의 1주기에 해당하기 때문이다.

본 논문에서는 케이블 절연재료의 개질을 위하여 PD를 측정하는 관계로 16.67[ms] 동안의 한 주기에서 발생하는 PD의 크기만 측정하였다.

따라서 기존의 케이블 절연체로 사용하고 있는 국내의 시료의 장단점을 파악한 후 본 연구에서 개발한 g-LDPE 시료와 비교 검토를 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

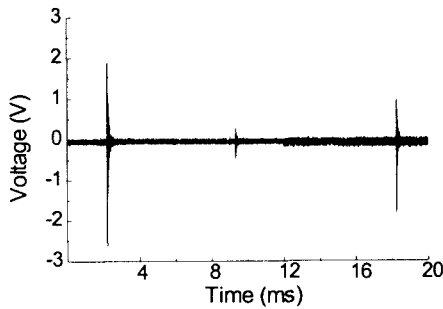
### 3.1 LDPE와 XLPE의 PD 특성

LDPE와 XLPE에 대한 12[kV]에서의 초음파 신호를 그림 3.1에 나타내었다. 그림 3.1에서 알 수 있듯이 LDPE와 XLPE의 초음파 신호에는 뚜렷한 차이점이 관찰된다. LDPE는 지속이 0.1~0.2[ms]로 매우 짧으나, XLPE는 지속시간이 수 [ms]로 매우 길다. LDPE의 초음파 크기가 XLPE의 초음파 크기 보다 약 2배의 크기가 나타났으며, 특히 LDPE의 초음파는 펄스형의 초음파 파형인데 반하여 XLPE의 초음파는 수초형(bush type) 파형이 측정되었다.

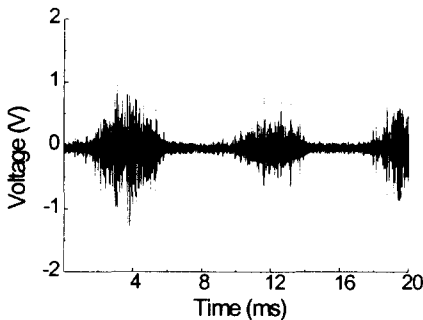
LDPE는 트리가 생성되자마자 절연파괴되기 때문에 트리진전 후의 PD 파형을 관찰할 수가 없으나, XLPE는 트리진전의 전후 모두 PD 파형을 관찰할 수 있으며, LDPE 보다 성능이 우수한 XLPE의 PD 개시전압이 11.5[kV] 이므로, 본 파형은 12[kV] 전압을 인가한 상태에서 트리가 진전된 후의 파형으로 해석할 수 있다.

따라서 모체수지인 LDPE와 XLPE의 초음파 모양이 크게 다른 것은 XLPE 시료를 가교시키는 과정에서 내부보이드가 다량 생성되었기 때문이다.

결과적으로 전기트리가 진전되기 전의 PD는 재료 자체의 내부 보이드에서 발생하는 PD이므로 절연수명에는 영향이 적다. 그러나 장기 열화가 진행되면 트리가 발생되고 이로 인한 절연파괴가 발생되므로, 트리발생후의 PD 크기는 수명에 절대적으로 중요한 영향을 미친다.



(a) LDPE



(b) XLPE

그림 3.1 12[kV] 인가시 LDPE and XLPE의 초음파 신호  
Fig. 3.1 Ultrasonic signals at 12[kV] of LDPE and XLPE

그림 3.2에 LDPE와 XLPE의 PD 변수를 비교하여 그래프로 나타내었다. 피크-피크치 특성을 제외한 모든 변수에서 XLPE의 값이 크며, 특히 지속시간과 피크의 개수는 XLPE의 값이 현저히 크다. 이러한 결과의 원인은 모체수지인 LDPE를 DCP에 의해 화학적으로 가교시키는 과정에서 발생된 것으로 생각된다. 이러한 가교부산물은 휘발성이 강한 유기 화합물이므로 가공 공정 혹은, 시편의 제조과정 중 휘발되어 사라지게 된다. 가교부산물의 휘발에 의하여 부산물이 존재하고 있던 위치에는 미세한 공극이 형성되고, 이 공극에서 트리가 발생되고 진전되는 현상은 잘 알려진 것이다. 따라서 많은 미소기공이 생성되기 때문에 XLPE에서 PD가 보다 활발해진 것으로 여겨진다.

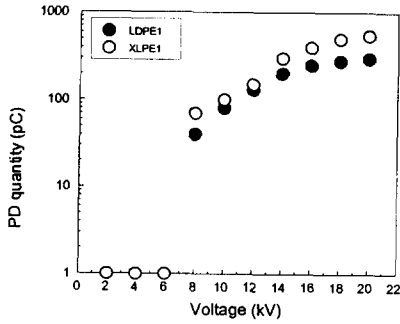
그림 3.2 (a)에서와 같이 LDPE와 XLPE의 PD 개시전압은 모두 약 7[kV]이고, 인가 전압이 높아짐에 따라 PD도 활발히 진행되었다. 특히 주목할 만한 것은 LDPE가 XLPE 보다 PD 특성이 더욱 양호한 것으로 측정된 것이다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 LDPE가 내부 미소기공의 XLPE보다 적고, PD의 개시전압이 더 큰 것과 같은 이유이다.

특히 LDPE 시료는 20[kV] 인가시 피크-피크치와  $\Sigma y^2$  값이 XLPE의 값과 비교할 때 비슷한 값을 나타내는데 이는 절연파괴 바로전의 값을 취득한 결과이며, 곧바로 절연파괴가 진전되었다.

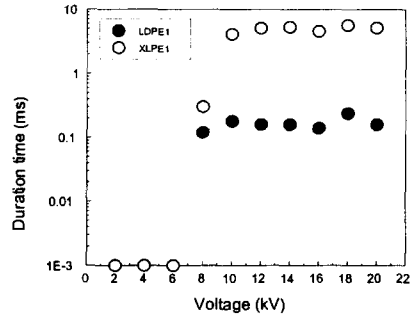
그림 3.2(a)는 전기적 방법으로 PD량을 측정하고, 비전기적 방법인 초음파 측정은 (b)에서 (e)까지의 변수 즉,  $\Sigma y^2$ , 펄스 수, 지속시간, 피크-피크치를 측정하고 있으며, 측정결과 PD 측정값이 비슷함을 보여주고 있다.

### 3.2 개질된 g-LDPE의 PD 특성

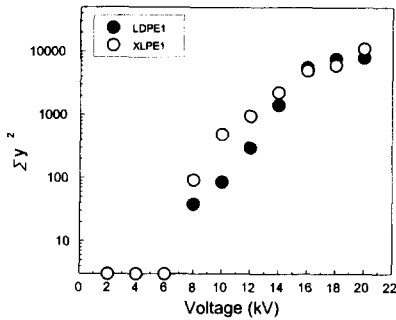
전력케이블의 수트리 현상을 억제하기 위한 노력은 차수형 케이블 등과 같이 구조를 변경하는 방법과 TR-XLPE 케이블 등과 같은 절연재료 자체를 개질하는 방법으로 대별된다. 절연재료 자체를 개질하는 방법중에서 블렌딩 기법과 첨가제를 사용하는 방법은 저분자량 물질과 고분자량 물질과의 상분리, 블렌딩시의 계면문제와 첨가제의 불순물 작용 등으



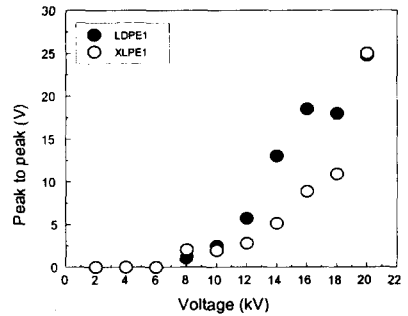
(a) PD quantity



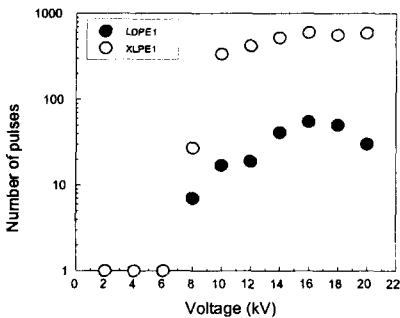
(d) Duration time



(b)  $\Sigma y^2$



(e) Peak to peak



(c) Number of pulses

그림 3.2 LDPE and XLPE의 PD 특성  
Fig. 3.2 PD characteristics of LDPE and XLPE

할 수 있고, PE의 미세피로파괴는 재료가 취약하거나 결정화도가 높은 경우에도 잘 일어난다.

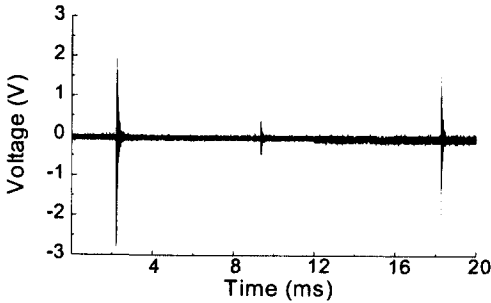
따라서 PE의 결정화도를 감소시켜서 인성을 증가시키기 위해서는 PE에 인성이 좋은 에틸렌계 공중합체를 블렌드하거나, 첨가제를 사용하여 PE 자체의 결정화도 및 결정 크기를 감소시켜 인성을 높이는 방법이 있다.

본 연구에서는 배전용 전력케이블의 절연성질을 증가시키기 위하여 극성기를 갖고 있는 성분을 PE에 화학적으로 결합시키는 그래프팅 방법을 시도하였으며, PD 특성을 향상시켜 트리성장을 억제시키는 재료를 개발하였고, PD특성시험을 분석하였다.

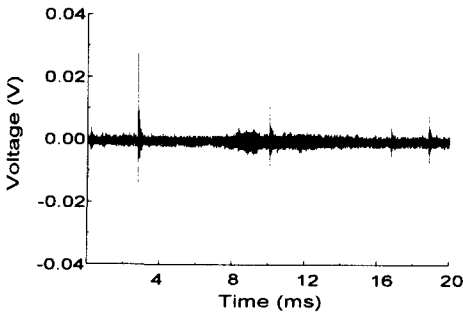
그림 3.3은 그래프팅된 g-LDPE 시료와 LDPE 시료의 초음파 신호를 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이 두 시료간의 초음파 파형에는 큰 변화가 없으

로 인한 장기 신뢰성에 문제가 있다. 또한 XLPE는 DCP와 같은 화학 가교반응을 통하여 망목구조를 갖게 되므로 DCP에 의한 가교부산물인 보이드를 형성할 가능성이 높으며, 2차 부산물로 수분이 생성될 수 있다는 단점도 가지고 있다. 그리고 산화방지제와 같은 첨가제의 경우 본질적으로 시간의 경과에 따라서 외부로 증발되어 혼합시의 목적을 이루지 못

나, 초음파 크기는 상당히 억제된 것을 알 수 있다.



(a) LDPE1(12[kV]인가시)



(b) g-LDPE(14[kV]인가시)

그림 3.3 g-LDPE(AM03)와 LDPE의 초음파 신호  
Fig. 3.3 Ultrasonic signals of g-LDPE (AM03) and LDPE

이는 g-LDPE의 시료 내부의 미세한 미소기포의 크기가 상당히 작고, 또한 미소기포의 분포수도 적게 내포한 것을 의미 하고 있다. 또 PE에 화학성분인 아크릴산이 있어도 초음파 파형 자체는 변화하지 않음을 알 수 있다.

g-LDPE의 시료는 초음파 크기를 제외한 다른 특성 변화가 없었다. LDPE와 그래프트 함량 차이에 의한 PD의 특성을 조사하고자 초음파 신호를 정량화하였으며, 그 결과가 그림 3.4에 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 14[kV] 인가 상태에서 LDPE1의 PD량은 200[pC]이나, 본 연구에서 개발한 g-LDPE의 PD 크기는 시료명 AM01은 130 [pC], AM02은 100[pC]이며, AM03은 가장 작은

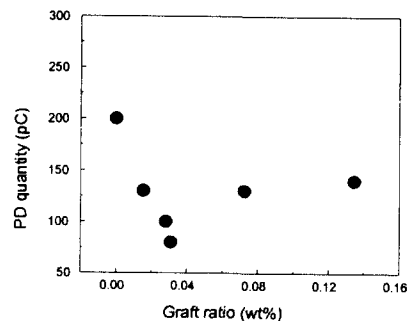
80[pC]으로 나타났다. 그러나 AM04은 130[pC], AM05은 150[pC]으로 PD량이 다시 증가되는 경향을 알 수 있다.

결과적으로 g-LDPE와 LDPE의 PD 특성을 비교해 본 결과 모든 변수값에 있어서 g-LDPE 시료는 모체수지인 LDPE 시료의 특성치 보다 작으며, 그래프트율이 증가함에 따라 일정 그래프트율에서 PD의 모든 특성치가 현저하게 감소함을 알 수 있다. 또한 그래프크율이 증가함에 따라 PD 개시전압도 그림 3.5와 같이 변화하였다.

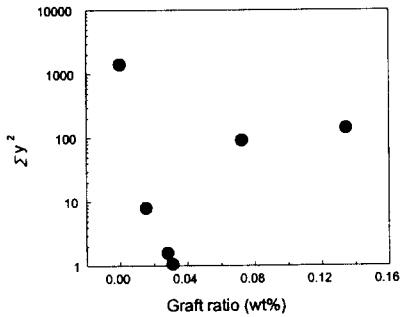
그러나 그래프트율이 어느 일정 값 이상에서는 PD의 특성치가 다시 떨어지는 값을 나타나기 때문에 그래프트율이 높을수록 반드시 좋은 것은 아니며, 본 연구 결과 그래프트율이 0.03~0.04[wt%] 범위에서 가장 효과가 좋은 것으로 나타났다. 이러한 시험결과들을 종합하여 보면 g-LDPE의 PD 특성은 모체수지인 LDPE에 비하여 월등히 우수함을 알 수 있다.

상기와 같이 PE의 종류에 따라 PD 특성이 현저히 다를 수 있었다. 이는 같은 PE라도 구조 및 화학적 특성이 다를 경우 PD의 특성도 다르다는 것을 의미한다. 이는 PE의 PD를 억제시키는 방법을 찾는다는 면에서 매우 중요한 요인이며, 본 연구에서와 같이 절연체의 특성을 향상시키기 위해 PE를 아크릴산으로 개질하면 PD 특성이 크게 억제된다는 사실을 검증하였다.

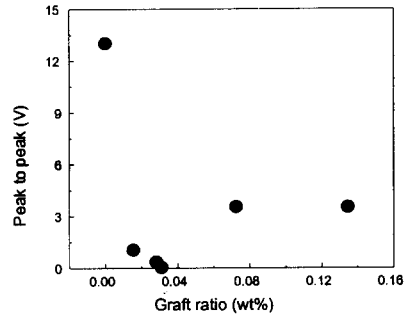
그래프트 함량에 따른 PD 개시전압의 특징은 그림 3.5와 같이 0.031[wt%] 일 때 PD 개시전압이



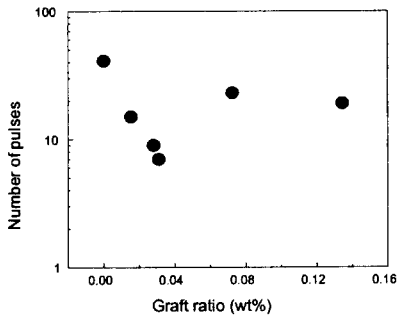
(a) PD quantity



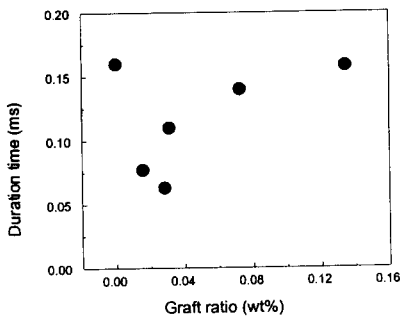
(b)  $\Sigma Y^2$



(e) Peak to peak



(c) Number of pulses



(d) Duration time

그림 3.4 그래프트율에 따른 LDPE의 PD 특성  
Fig. 3.4 PD characteristics with graft ratio

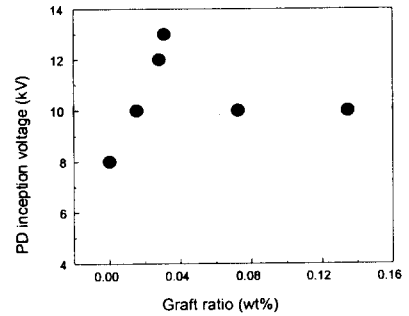


그림 3.5 그래프트율에 따른 PD 개시전압  
Fig. 3.5 PD inception voltage with graft ratio

한다. 그러나 그래프트 함량이 0.04(wt%) 이상시는 PD 개시전압이 다시 떨어지고 다른 PD의 특성도 나빠지는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 개질된 g-LDPE의 수트리 특성

수트리 시험은 기존에 보고된 방법을 사용하였으며, 장치의 개략도는 그림 3.6에 나타내었다. 시편은 수트리 발생이 용이도록 곡률반경이 5( $\mu\text{m}$ )인 바늘을 사용하여 핫 프레스에서 130( $^{\circ}\text{C}$ )에서 30분간 압축성형 방법을 이용하여 제작하였고, 이와 같이 제조한 시편에 아크릴 튜브를 부착하여 시편을 컵 모양으로 만든 후 시편의 바닥에 전극을 부착하였다. 수용성 전극으로는 0.1M의  $\text{AgNO}_3$  수용액을 사용하였다. 이와 같이 제조된 시편에 백금 전극을 통하

가장 큰 13(kV)이며, 이는 모체수지인 LDPE와 비교하여 보면 약 2배의 차이를 나타낸다. PD 개시전압이 가장 낮은 LDPE는 7(kV)일 때 PD가 개시되었으며, 이는 품질이 떨어지는 모체수지를 화학적으로 개질하면 고품질의 절연체 개발이 가능함을 시사



여 10[kV], 60[Hz]의 전압을 96시간 동안 인가한 후 8개의 바늘에서 생성된 트리 길이의 평균값을 발생된 수트리 길이로 하였다.

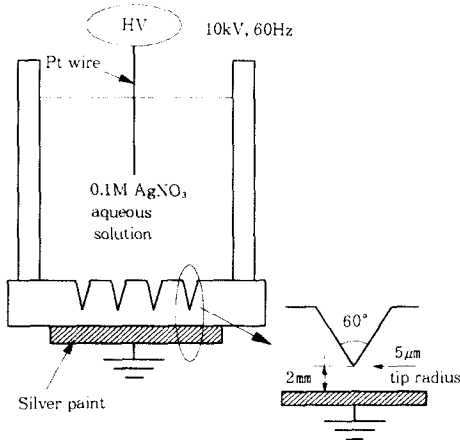


그림 3.6 수트리의 전극 배열  
Fig. 3.6 Electrode arrangement of water tree

그라프트율에 따른 수트리의 길이를 측정한 결과 그림 3.7에 나타내었다. 그림에서와 같이 모체수지인 LDPE는 약 436( $\mu\text{m}$ )의 수트리 길이를 나타내었으며, 그라프트율이 0.0154[wt%]인 AM01 시료는 약 308( $\mu\text{m}$ )의 수트리 길이가 생성되었으나, 그라프트율이 0.0281[wt%]인 AM02 시료는 약 292( $\mu\text{m}$ )의 수트리 길이가 생성되었고, 그라프트율이 0.031[wt%]인 AM03 시료는 약 233( $\mu\text{m}$ )의 수트리 길이가 생성되어 가장 작은 수트리 크기를 나타내었다. 그러나, 그라프트율이 0.0724[wt%]인 AM04 시료는 약 250( $\mu\text{m}$ )의 수트리가 성장되었고, 그라프트율이 0.1345[wt%]인 AM05 시료는 약 265( $\mu\text{m}$ )의 수트리가 성장되어 수트리 길이가 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

결과적으로 그라프트율이 증가하면서 트리의 길이는 감소되다가 그라프트율이 어느 함량 이상이면 트리의 길이가 증가되는 결과가 나타났다.

본 연구에서 개발한 g-LDPE는 그림 3.4 및 그림 3.5에서와 같이 PD 특성이 우수할 뿐만 아니라, 그림 3.6과 같이 g-LDPE가 상용의 LDPE 보다 수트리 특성도 우수한 것으로 보이며, 그림 3.3과 같이 LDPE 보다 2[kV] 더 높은 전압이 인가된 g-

LDPE의 초음파 파형 크기도 LDPE의 초음파 파형 크기보다 더 작게 나타나, g-LDPE의 PD 특성이 우수함을 뒷받침해 주고 있다.

또한 절연재료의 절연파괴는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 발생하는데, 그 중에서 수트리와 전기트리로 인한 절연파괴는 재료적인면에서 볼 때 크랙 전파(crack propagation)가 동일하므로, 본 실험결과에서는 수트리 저항성이 우수함을 나타낸 g-LDPE가 전기트리의 저항성에서도 우수할 것으로 판단된다.

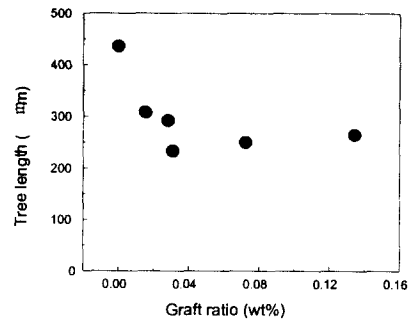


그림 3.7 그라프트율에 따른 수트리 특성  
Fig. 3.7 Water tree characteristics with graft ratio

#### 4. 결론

개질된 전력케이블 절연체의 특성시험 결과는 PD 및 수트리 특성이 우수함을 검증하였고, 다음과 같은 시험결론을 도출하였다.

1) 세라믹 압전소자로 된 초음파 센서를 사용해서 각종 PE에서 발생하는 PD 신호를 측정하였고, 측정된 신호에 대한 신호처리를 통하여 PD 특성을 대표할 수 있는 변수들을 확인하였다. 따라서 전기적 측정방법에 의한 PD 크기와 비전기적 측정방법에 의한 초음파 신호의 변수들인  $\Delta y^2$ , 펄스수, 지속시간, 피크-피크치 등을 측정하여 각종 PE의 PD 특성을 측정·분석한 결과, 전기적인 방법인 PD 크기와 초음파센서에 의한 초음파 신호의 변수들이 동일한 값으로 나타남을 확인하였고, 그 근거로 개질된 PE의 PD 특성을 분석하였다.

2) LDPE에서 PD에 의해 발생하는 초음파 신호

는 지속시간이 0.1~0.2[ms]인 매우 짧은 펄스형의 파형인데 반하여, XLPE에서 PD에 의해 발생하는 초음파 신호는 지속시간이 수 [ms]인 수초형(bush type) 파형이다. 이것은 LDPE 내부의 미소보이드 수가 XLPE 내부의 보이드 수보다 상당히 적기 때문이다.

3) PE를 개질한 아크릴산 그래프트 폴리에틸렌인 g-LDPE는 상업용 LDPE 보다 내트리성 성능이 우수하였고, 그래프트율이 증가할수록 트리성장이 억제되다가 어느 값 이상에서는 트리성장에 나쁜 영향을 주었다.

즉, 그래프트율이 0.031[wt%]일 경우에는 PD 개시전압이 LDPE1보다 약 2배치인 13[kV]까지 향상되었고, 내트리성과 PD 특성도 가장 양호하였다. 그러나 그래프트율이 0.031[wt%]이상시는 내트리성과 PD 특성이 오히려 나쁜 결과가 나타났다.

4) PE를 개질하여 케이블 절연체의 내구성을 확보할 수 있는 새로운 방안을 제시하였으며, 실계에 적용하기 위해서는 향후 신뢰성 검증에 대한 검토가 필요하다.

#### 참 고 문 헌

- [1] I. K. Song, S. J. Kim and K. S. Suh, "Characterization of 22.9[kV] Underground Distribution Cables", The Korea-Japan Joint Conference on KIEEM, pp.111~115, 1996.
- [2] S. Nagasaki, H. Matsubara, S. Yamanouchi, M. Yamada and S. Fukunaga, "Development of Water-tree-retardant XLPE Cables", IEEE Trans. Power Appar. Systems, Vol. 103, pp.536~544, 1984.
- [3] I. K. Song, K. S. Suh and H. R. Kwak, "Characteristics of Partial Discharge in Various Polyethylenes", IEEE EIC, Chicago, 1997.
- [4] J. C. Chan and P. Duffy, "PD Testing of Solid Dielectric Cable", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 5, pp.9~20, 1991.
- [5] 송일근, 곽희로. 서광석 "초음파 센서를 이용한 폴리에틸렌의 부분방전특성연구" 한국 전기전자재료학회 추계학술대회 논문지, pp.283~286, 1996.
- [6] L. Gao, "Study on Improvement of Withstand Strength of Polyethylene in Cables Using Special Additives", International Workshop on Electrical Insulation, pp.369~372, 1993.
- [7] J. Lewiner, "Evolution of Experimental Techniques

for the Study of the Electrical Properties of Insulating Materials", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 22, pp. 351~360, 1986.

- [8] T. Niwa, M. Hatada, H. Miyata and T. Takahashi, "Studies on the Improvement of Breakdown Strength of PE", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, No. 1, pp.30~34, 1993.
- [9] L. E. Lundgarr, "Partial Discharge", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 4, pp.25~31, 1992.
- [10] M. Nawata, H. Kawamura and M. Ieda, "Effect of Additives on DC Treeing Breakdown in Polyethylene under Divergent Fields", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, pp.527~534, 1990.
- [11] L. E. Lundgard, "Acoustic Partial Discharge Detection Practical Application", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 5, pp. 34~43, 1992.
- [12] R. T. Harrold, "Acoustical Technology Applications in Electrical Insulation and Dielectrics", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, No. 1, pp.3~19, 1985.
- [13] I. K. Song, K. S. Suh and H. R. Kwak, "Partial Discharge Characteristics of Polyethylenes", KIEE Conference, pp.54~59, 1997.

#### ◆ 著 者 紹 介 ◆



송 일 근(宋一根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 공대 전기공학과 졸. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 1985.9~현재 전력연구원 전력계통연구실, 배전자동화그룹 Project Leader, 선임연구원.



곽 희 로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울공대 전기공학과 졸. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(박사). 1967년 한전근무. 1986년 미국 M.I.T Visiting Scientist. 현재 숭실대학교 공대 학장, 전기공학과 교수, 당학회 부회장.