

트리억제제가 첨가된 LDPE의 방사선 조사에 따른 절연특성 변화

류 부 형

동국대학교 안전공학과

(2012. 1. 26. 접수 / 2012. 3. 29. 채택)

Variation of Insulation Characteristics due to γ -ray Irradiation on LDPE Contained Treeing Inhibitors

Boo-Hyung Ryu

Department of Safety Engineering, Dongguk University

(Received January 26, 2012 / Accepted March 29, 2012)

Abstract : The effectiveness of treeing resistance in low density polyethylene containing azocompounds were investigated under radiation environments. 4-(4-nitrophenylazo)-1-naphthol and 4-(4-nitrophenylazo) resorcinol were selected for treeing inhibitors. LDPE containing the additives were crosslinked with dicumyl peroxide, irradiated by Co^{60} γ -ray in the presence of air at room temperature. Treeing inception voltage, AC breakdown strength measurements were carried out for electrical insulation characteristics, thermoluminescence and gel contents were analyzed as various irradiation doses also. LDPE with treeing inhibitors showed much better insulation characteristics than pure LDPE. It is interpreted that molecular structures, polar groups and the type of radicals connected on the benzene ring of the additives affected electrical characteristics. From the results, 4-(4-nitrophenylazo) resorcinol was the most effective upon the best treeing and radiation resistance.

Key Words : radiation, electrical tree, treeing inhibitor, thermoluminescence, azocompounds

1. 서론

전력수요와 전력용량의 증가에 따라 전력 케이블의 절연파괴로 인한 고장이 증가하고 있다¹⁾. 특히, 원자력발전소에 사용되고 있는 고분자 전기절연재료의 경우 심각한 방사선 환경에 노출되는 경우가 많기 때문에 전기적 특성뿐만 아니라 우수한 내방사선 특성까지도 고려되어야 중대사고를 방지할 수 있다.

케이블 절연파괴 사고에 관한 여러 통계에서 사고원인을 검토하여 보면, 전기트리, 열화, 침수의 순서로 전기트리에 의한 사고가 60% 이상을 차지하고 있으며²⁾, 이와 같이 전기트리는 전기고장의 복합적 원인 중에서 가장 중요한 인자로 알려지고 있다.

전기트리에 대한 억제대책으로는 제조공정상의 개선³⁾, 블렌드 또는 공중합체를 이용하는 방법⁴⁾ 또는 첨가제를 혼합하여 특성을 개선시키는 방법⁵⁾ 등이 논의되고 있다. 공정상의 개선은 어느 정도 한계에 이르렀으며, 공중합체를 만드는 것은 반응을 수정해야 하는 어려움이 따라 활발하게 이용되지 못하고 있다. 첨가제를 혼합하는 방법은, 사용

도중 소멸될 수 있다는 단점이 있지만, 첨가제가 충분한 내열성과 내약품성을 가진다면, 소량의 첨가제만으로도 절연특성을 개선시킬 수 있으며, 다른 물성에 크게 영향을 주지 않기 때문에 효율적이며 경제적인 방법이라 할 수 있다. 또한 전력케이블에 있어, 절연파괴의 주된 원인이 되는 전기트리에 관한 방사선 조사영향은 방사선 장내에서의 피폭뿐만 아니라 근접한 케이블 사이에서도 전자선의 집적에 의해 절연성능이 저하할 가능성이 높기 때문에 열화평가에서 중요한 요소라고 할 수 있다⁶⁾.

따라서, 본 연구에서는 LDPE에 2종류의 질소화합물(azocompounds)을 트리억제제로 첨가하여 가교시킨 후, 방사선 조사에 따른 절연, 유전 특성과 함께 전기트리의 개시와 진전특성을 평가하였고, 열발광 집적전하량과 가교도 등 화학적 특성의 변화도 분석하였다.

2. 실험

2.1. 시편의 제작 및 방사선 조사

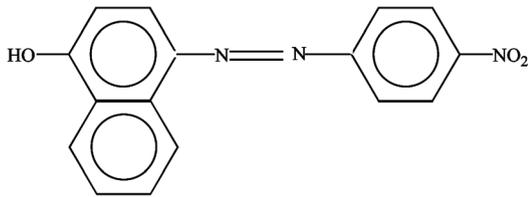
본 실험에서는 밀도와 용융지수가 각각 0.92 g/cm^3 ,

2.0 g/10 min인 가교제(dicumyl peroxide, DCP)를 선행 연구에서⁷⁾ 전기절연특성의 개선에 가장 적합한 조성비로 알려진 2 phr을 첨가하여 가교한 LDPE를 기준시료로 사용하였고 순수 LDPE와 트리억제제를 첨가한 시료의 특성을 기준시료와 비교하였으며, 시료의 구분은 Table 1과 같다. 트리억제제는 각각 4-(4-nitrophenylazo)-1-naphthol, 4-(4-nitrophenylazo) resorcinol을 사용하였으며 이들의 화학구조식을 Fig. 1에 나타내었다.

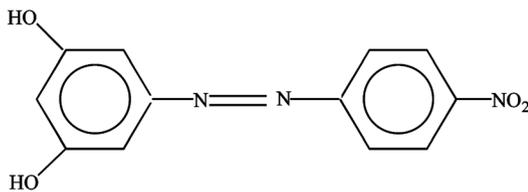
시편의 제작은 two-roll mill을 사용하여 DCP가 2 phr씩 혼합된 LDPE에 질소화합물들을 각각 1 phr의 함량으로 첨가하여 100°C에서 약 15분간 혼련하였다. 혼련한 시료를 가교시키기 위해 hot press로 190°C에서 20분간 가열, 용융하여 두께 0.3 mm와 1 mm의

Table 1. Nomenclature of specimens

No.	Components
PE-1	LDPE
PE-2	LDPE + DCP (2 phr)
PE-3	PE-2 + 4-(4-nitrophenylazo)-1-naphthol (1 phr)
PE-4	PE-2 + 4-(4-nitrophenylazo) resorcinol (1 phr)



(a) 4-(4-nitrophenylazo)-1-naphthol



(b) 4-(4-nitrophenylazo) resorcinol

Fig. 1. Molecular structure of treeing inhibitors.

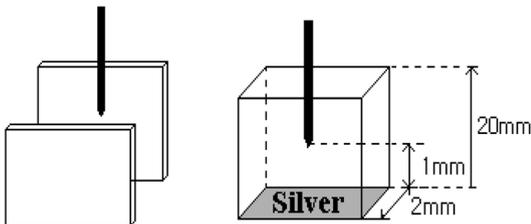


Fig. 2. Shape of specimens for treeing observation.

시트형태로 제작하였다.

트리관측용 시편의 형상은 Fig. 2와 같이 두 개의 두께 1 mm 판상시료에 침 전극을 삽입하여 용융, 접합한 후 침 침단으로부터 1 mm 떨어진 시편의 표면에 silver paste를 도포하여 평판전극을 형성하였다. 관측의 용이성을 위해 침-평판 전극의 3차원적 구조를 얇은 두께로 제작하였으며, 현미경 관측을 통해 전극간에 보이드, 불순물 등이 없는 것만을 선별해서 사용하였다. 제작된 트리관측용과 두께 0.3 mm 판상시편을 한국원자력연구소 방사선 조사시설의 Co⁶⁰ γ -ray 선원을 사용하여 실온, 대기 중에서 선량율 5 kGy/hr로 각각 200, 400, 600, 800, 1,000 kGy의 선량으로 조사하였으며, 조사된 판상 시편을 교류절연파괴강도, 유전손실계수, 열발광, 가교도 측정에 적합하게 가공하여 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 열발광 및 가교도 측정

방사선이 조사된 시편들의 화학적 특성 변화와 절연, 유전 특성의 변화의 상관관계를 규명하기 위하여 열발광 분석과 가교도를 측정하였다. 열발광 분석(열발광 집적전하량 측정)은 Saint-Gobain Industrial Ceramics사의 Thermoluminescence Detector (TLD Model 2210)를 사용하여 50°C로 평형을 유지한 후 6°C/sec의 승온속도로 200°C까지의 열발광을 측정하였으며, 광 방출면적을 일정하게 유지하기 위해 시편을 직경 5 mm로 절단하였고 방출광 신호를 방전전하량으로 변환하여 매 1°C마다 기록하였다. 가교도 측정은 ASTM D2765에 정해진 표준에 따라 xylene 추출법으로 측정하였다⁸⁾.

2.2.2. 트리개시전압 및 진전과정 측정

트리의 개시 및 진전과정을 관측하기 위한 측정 장치는 Fig. 3과 같이 구성하였다. 트리개시전압(V_{ic}) 측정시, 시편에서의 연면방전을 피하기 위하여 시편을 실리콘유에 함침하여 실험을 하였으며, 전원은 입력전압 100 V, 출력전압 AC 0-50 kV, 출력용량 0.3 kVA의 절연유 내압시험기를 사용하였다. 교류전압 1 kV를 1분간 인가한 후, Olympus사의 SZ11 광학 현미경으로 관측하여 트리가 발생되지 않은 시편에 대해서는 앞서 인가한 전압보다 1 kV 더 높은 전압을 다시 1분간 인가하여 관측하는 방법으로 트리의 초기발생이 확인될 때까지 반복하였으며, 대향전극 방향으로 관측된 트리의 길이가 200 μ m 이상인 것을 초기발생 길이로 간주하였다. 트리의 개시를

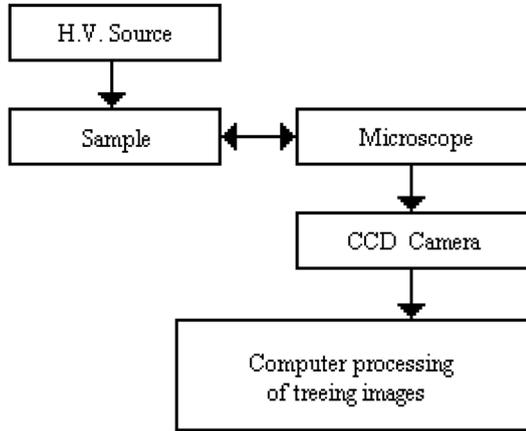


Fig. 3. Schematic diagram of treeing observation.

확인한 직후 인가전압을 8 kV로 승압하여 일정하게 유지하면서 트리의 진전 상태를 관측하였다.

2.2.3. 절연파괴전계 및 유전손실계수 측정

교류절연파괴전계는 1차전압 100 V, 2차전압 0~50 kV, 60 Hz 정격의 교류 내압시험장치(京南電氣(日), Model YPS-55M)를 사용하여 시편을 실리 콘유에 침지시킨 상태에서 각각 10회씩 측정하였다. 방사선조사 시의 물성변화에 따른 유전특성변화를 확인하기 위해 고주파 정전용량과 유전손실계수를 Hewlett-Packard사의 LF Impedance Analyzer (Model 4192A)로 주파수 1 MHz에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열발광 및 가교도

Fig. 4는 방전 전하량으로 환산한 집적 열발광량을 50~200°C의 온도범위에서 측정하여 조사선량과의 관계를 나타낸 것으로, 미조사 시편에 비해 방사선이 조사된 시편에서는 전반적으로 열발광량이 증가하여 열적으로 불안정한 특성을 보였으며, 방사선 조사에 따른 가교도의 변화는 그림5에 보인 것과 같이 대체로 선량의 증가에 따라 가교도도 증가하였다. 열발광량과 가교도의 변화에서 알 수 있는바와 같이 공기 중에서의 고분자 물질의 방사선 조사는 분자구조에 다양한 변화를 가져오는 것으로 알려지고 있다⁹⁾.

순수한 폴리에틸렌(PE-1)의 경우, 열발광량으로부터 환산한 집적 전하량과 가교도가 Fig. 4와 5에서 보는 것처럼 조사선량의 증가에 따라 증가하였으며, 특히 200 kGy 이하에서 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 고선량 영역에서는 주로 분자쇄

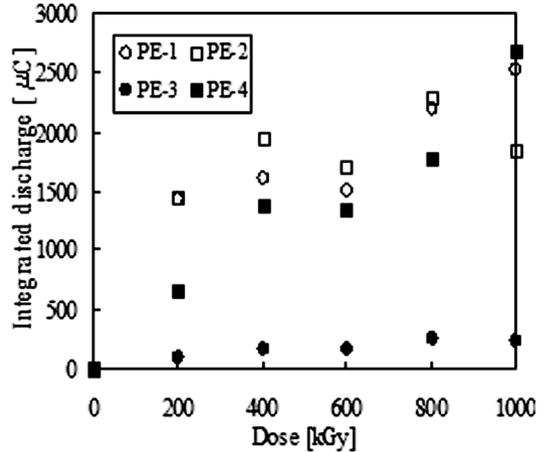


Fig. 4. Integrated discharge of γ -irradiated LDPE with treeing inhibitors between 50 and 200°C.

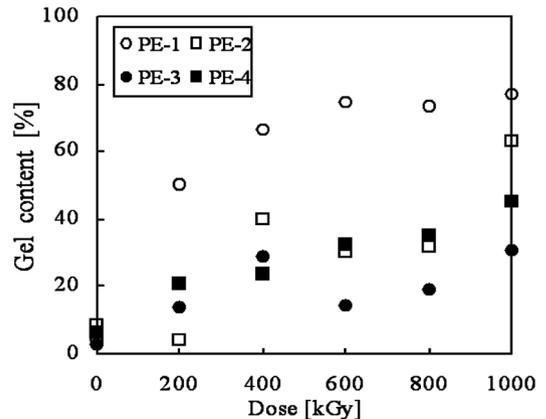


Fig. 5. Gel content of γ -irradiated LDPE with treeing inhibitors.

절단과정이 진행되지만 저선량 영역에서는 가교반응이 주도적으로 작용하며¹⁰⁾, 200 kGy 이하의 저선량 영역에서 가교가 시작되어 600 kGy 이후 가교와 분해반응이 거의 비슷하게 발생하여 포화하는 경향을 보이는 것으로 기존의 연구와도 잘 일치하고 있다¹¹⁾.

가교된 시편(PE-2)의 경우에도 방전 전하량은 PE-1과 유사한 경향을 보였으나 조사선량의 증가에 따른 가교도 변화는 800 kGy까지는 서서히 증가하지만 800 kGy 이상에서 급증하는 경향을 보이고 있다. 이것은 DCP내의 벤젠고리의 분해에 따른 것으로, 700 kGy 이상에서는 분해된 폴리에틸렌의 수소를 벤젠고리에 의해 치환하기 때문이다¹²⁾.

그러나 PE-3의 경우는 방사선량의 증가에 따라

방전 전하량과 가교도가 거의 변화하지 않으며, 다른 시편에 비해 가장 우수한 열적 특성을 나타내었다. 이것은 Fig. 1의 트리억제제 분자구조에서 보인 바와 같이 4-(4-nitrophenylazo)-1-naphthol은 용점이 250°C 이상으로 열적 안정성을 가지는 나프탈렌 고리를 포함하고 있기 때문이며, 안정한 공명구조의 벤젠고리만을 가지는 4-(4-nitrophenylazo) resorcinol을 첨가한 PE-4에 비해서도 상대적으로 극성기의 수가 적기 때문에 라디칼 반응이 적은 것으로 생각된다. PE-4에서는 조사선량의 증가와 함께 방전 전하량은 일정하게 증가하며, 가교도는 벤젠고리와 라디칼의 반응에 따라 서서히 증가하다가 600~800 kGy 범위에서 포화하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이, 트리억제제가 첨가된 시편이 순수 폴리에틸렌에 비해 낮은 가교도를 보이는 것은 트리억제제에 포함된 벤젠고리가 방사선 조사로 생성된 라디칼을 포획하여 가교반응을 억제시킨 것으로 이해할 수 있다.

3.2. 트리 개시전압과 트리의 진전

LDPE에 교류 전계를 가했을 때의 방사선 조사에 따른 트리개시전압 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

방사선이 조사되지 않은 경우, 트리억제제가 첨가된 시편이 미첨가 시편에 비해 훨씬 높은 전압에서 트리가 개시되었다. 이것은 수산기 또는 질산기와 같은 트리억제제내의 극성기의 작용에 관계된 것으로, 인가 전계에 의해 절단된 극성기로 인해 침단부에 형성된 불평등 전계를 완화시키기 때문으로 이해할 수 있다. 비극성 결합을 갖는 순수 LDPE에 비해 전자친화도가 큰 극성기가 침단 부근의 국부전계를 감소시키는데 주된 역할을 하기 때문으로¹³⁾, 침단부로부터 고분자 매질내로 주입된

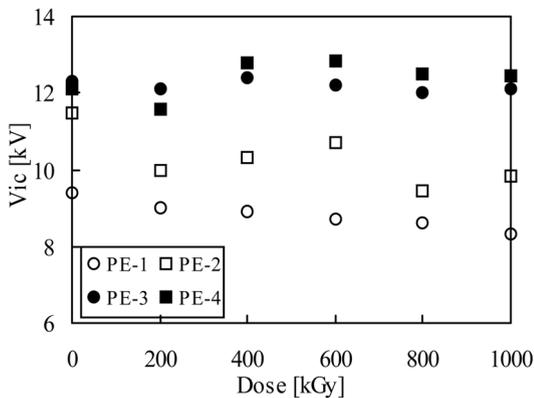


Fig. 6. Tree inception voltage of γ -irradiated LDPE with treeing inhibitors.

전자가 분자구조 내의 극성기에 의해 포획되는 점을 고려하면 극성기가 많이 존재할수록 더욱 높은 인가전압에서 트리가 개시될 것으로 기대할 수 있다.

PE-1의 경우, 400 kGy 까지는 개시전압이 크게 변화하지 않았지만 이후 조사선량의 증가에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였으며, 이는 폴리에틸렌의 조사시 저선량 영역에서 발생하는 가교현상에 기인하는 것으로 보인다¹⁰⁾.

그러나, DCP와 트리억제제가 첨가된 시편은 미첨가 시편과 매우 다른 양상을 보이고 있다.

DCP를 함유한 PE-2는 분자구조 자체의 안정된 공명구조로 인해 PE-1보다 우수한 특성을 보인 것으로 사료된다. PE-3와 PE-4는 더욱 높은 트리개시전압을 나타내었는데 이는 트리억제제의 분자구조에서 보이듯이, 벤젠과 나프탈렌의 안정한 공명구조와 NO₂기의 높은 전자친화도로 인한 고속전자의 포획 즉, 방사선 조사에 의해 생성되는 도전성 캐리어들과 쉽게 결합하기 때문으로 보인다¹⁴⁾.

PE-2, PE-3와 PE-4의 경우, 200 kGy 이하의 선량에서는 가교도가 증가하는 경향과는 반대로 트리 개시전압이 감소하는 양상을 보이고 있다. 그러나, 200~600 kGy 영역에서는 방사선 조사에 의해 폴리에틸렌과 DCP, 트리억제제 사이의 화학반응으로 가교도 증가와 함께 트리 개시전압이 증가하고 있다. 이것은 저선량 영역에 비해 고선량 영역에서 방사선 조사로 유리된 극성기들이 증가하고 이들이 침전부 침단부의 불평등 전계를 완화시키는 동시에 안정한 공명구조인 벤젠과 나프탈렌의 영향으로 도전성 캐리어들이 더욱 쉽게 결합하기 때문으로 이해할 수 있다.

600 kGy 이상의 고선량 영역에서는 조사선량 증가에 따라 가교도 감소와 함께 트리 개시전압이 감소하는 경향을 보이고 있으나, 트리억제제의 벤젠고리들이 트리 개시전압의 결정에 중요한 기능을 하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이, 순수 폴리에틸렌(PE-1)과 DCP만을 첨가하여 가교한 시편(PE-2)에서는 branch형 트리로 진전한 반면에 트리억제제를 첨가한 PE-3, PE-4의 경우는 bush형 트리로 성장하는 경향을 보이고 있다.

이것은 분해된 첨가제의 극성기들이 트리 channel(방전로) 내에서 공간전하를 형성하기 때문으로 이해할 수 있으며¹⁵⁾, 높은 전자친화도를 갖는 극성기들이 방전로 내에서 부분방전을 하기 때문에 트리의 진전 양상이 bush형으로 변화하는 것으로 생각된다¹³⁾.

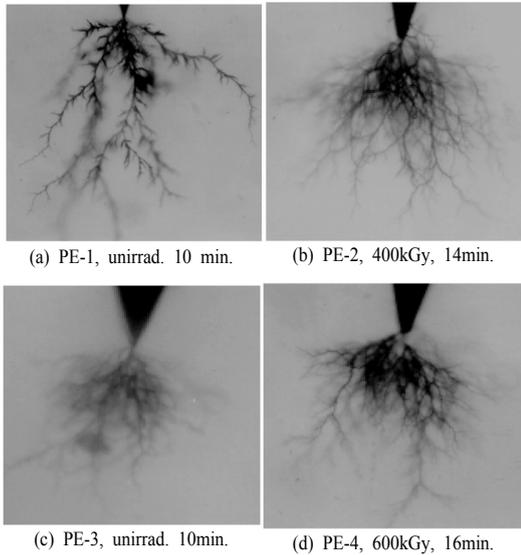


Fig. 7. Tree propagation of γ -irradiated LDPE with treeing inhibitors(AC 8 kV applied).

방사선 조사를 하지 않았을 때는 Fig. 7 (a)와 같이 branch형으로 성장하였던 PE-1의 경우에도 조사선량이 증가하면 bush형으로 전환되는 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 방사선 조사에 의해 생성된 도전성 이온, 가스 등이 트리 도전로 내의 공간전하 형성에 기여하기 때문으로 이해할 수 있다.

3.3. 교류절연파괴전계 및 유전손실계수

Fig. 8은 방사선 조사에 따른 교류절연파괴전계의 변화를 나타낸 것으로, 첨가제를 함유한 시편들에서

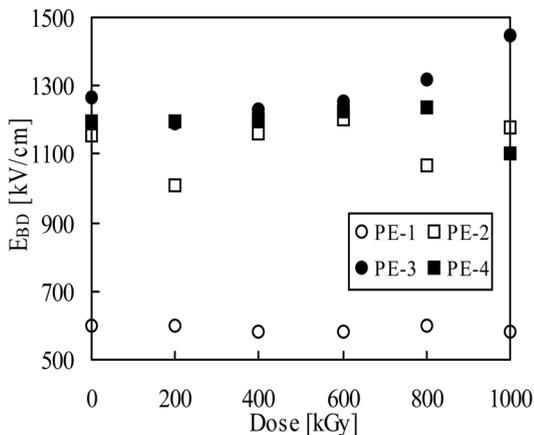


Fig. 8. AC breakdown strength of γ -irradiated LDPE with treeing inhibitors.

순수한 폴리에틸렌의 경우보다 우수한 특성을 보였으며 대체로 트리개시전압과 비슷한 경향을 보였다. 그러나, 전기 트리 특성과 교류절연파괴강도 특성 사이에 약간의 다른 점을 보이고 있는 것은 절연파괴가 비교적 단시간에 발생하지만, 전기 트리는 상대적으로 장시간에 걸쳐 개시, 진전되므로 발열반응이 주도적으로 작용하기 때문인 것으로 고려된다²⁾.

방사선을 조사하지 않은 경우, 순수 LDPE에 비해 DCP, 트리억제제 등을 첨가한 시편의 파괴전계가 높은 값을 나타내었다. 이것은 절연파괴전계가, 첨가제의 벤젠고리에 연결된 radical(관능기)의 성질에 영향을 받는 전도 전류에 지배되기 때문이다¹⁴⁾.

전자공여체(electron-donor; CH₃, OH)형 극성기를 가지는 PE-2의 경우보다 PE-3와 PE-4와 같이 전자공여체와 전자포획체(electron-acceptor; NO₂)를 전부 가지고 있는 트리억제제를 첨가한 경우가 상대적으로 우수한 특성을 보였는데, 이것은 극성기가 전자공여체와 전자포획체를 모두 가진 첨가제가 어느 하나만을 가진 경우보다 우수한 교류절연파괴강도를 보인다는 Y. Yamano 등의 연구와도 잘 일치한다. 전자포획체를 가지는 첨가제는 전계인가시 전자를 트랩시킬 수 있으며, 전자공여체를 가지는 첨가제의 경우는 전계로 인해 전자와 충돌하여 첨가제를 여기시킬 수 있기 때문에 벤젠고리에 연결된 극성기가 전자공여체 또는 포획체인지에 따라 트랩준위와 여기에너지가 영향을 받아 이와 같은 결과를 보이는 것으로 생각할 수 있다. 방사선 조사시에 트리억제제를 첨가한 경우가 더욱 우수한 특성을 나타낸 것은 방사선 조사에 따라 생성된 도전성 이온, 전하, 가스 등의 캐리어가 첨가제에 의해 포획되었기 때문인 것으로 사료된다.

DCP, 트리억제제 등을 첨가한 PE-2, PE-3 및 PE-4 시편의 경우, 200 kGy 이하의 저선량 영역에서는 조사선량의 증가에 따라 파괴전계가 감소하는 경향을 보이다가 200 kGy 이상에서는 증가하는 것은 가교도가 낮은 저선량 영역에서는 절단된 극성기들이 산소 또는 다른 극성기와 반응하여 파괴전계를 저하시키지만, 고선량 영역에서는 극성기의 포획, 소멸로 인해 파괴전계를 증가시키는 것이며 극성기의 종류에 따라 파괴전계 값이 결정되는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 9는 1 MHz에서의 유전손실계수의 변화를 방사선 조사량에 따라 측정된 결과이다. 미조사시, 트리억제제를 첨가한 경우는 순수한 폴리에틸렌에

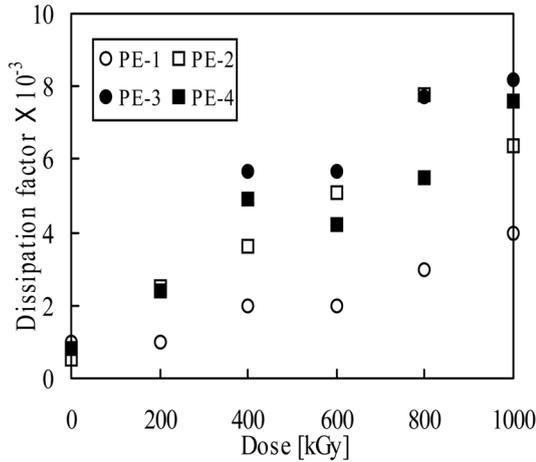


Fig. 9. Dissipation factor of γ -irradiated LDPE with treeing inhibitors.

비해 유전손실계수가 감소하는 경향을 보였다. 이것은 무극성인 폴리에틸렌에 극성을 가지는 트리억제제를 첨가함으로써 인한 배향분극이 증가되기 때문인 것으로 보인다¹⁶⁾. 그러나, 방사선 조사에 따라 폴리에틸렌 자체의 도전성 이온 및 전하 등 캐리어의 증가로 유극성을 가지게 되며, 첨가된 유극성 트리억제제의 관능기가 쉽게 산화나 가교반응을 하여 유전손실계수가 전체적으로 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다¹⁷⁾.

4. 결론

방사선 조사시, 케이블 절연재의 전기트리억제를 위해 저밀도 폴리에틸렌에 질소화합물을 첨가하여 방사선 조사에 따른 트리 개시전압 및 진전, 절연 및 유전특성, 열발광량, 가교도 등을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 트리억제제로 질소화합물을 첨가한 경우, 조사선량 증가에 따라 가교도, 열발광 특성과 함께 유전특성이 순수 LDPE에 비해 다소 저하하지만, NO₂기의 높은 전자친화도와 안정된 분자구조로 인해 트리개시전압, 교류절연파괴전계 등은 대체로 증가하는 경향을 보여 우수한 트리개시 특성과 교류절연파괴 특성을 나타내었다.

2) 방사선 조사에 따른 트리억제제의 극성기 분해가 트리 개시에 영향을 주며, 미조사에는 트리억제제를 첨가하지 않은 시편은 branch형, 첨가한 시편은 bush형 트리로 성장하였으나 200 kGy 이상의

고선량 영역에서는 모든 시편에서 bush형 트리가 관측되었다.

3) 트리억제제의 벤젠고리에 연결된 관능기의 종류에 따라 교류절연파괴전계가 영향을 받았으며, 전자 공여체와 포획체를 동시에 갖고 있는 억제제가 방사선 조사시 가장 우수한 절연파괴 특성을 보였다.

위와 같은 사실들로부터 방사선 환경내에서 LDPE에 가장 우수하게 사용될 수 있는 트리억제제는 4-(4-nitrophenylazo)-1-naphthol인 것으로 확인되었다.

감사의 글 : 이 논문은 2010년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.

참고문헌

- 1) S. S. Bamji, "Threshold Voltage for Electrical Tree Inception in Underground HV Transmission Cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, No. 2, pp. 402-404, 1992.
- 2) W. Vahlstrom, "Investigation of insulation deterioration in 15kV and 22kV polyethylene cables removed from service", IEEE Trans. PES, 1971.
- 3) R. M. Eichhorn, "Treeing in solid extruded insulation", IEEE Trans. on EI, Vol.EI-12, No.1, 1976.
- 4) K. S. Suh *et al*, "Electrical properties chemically modified polyethylenes", IEEE Trans. on EI, Vol. 4, No. 6, 1997.
- 5) E. J. McMahon, "A tree inhibiting insulation for power cable", IEEE Trans. on EI, Vol.EI-16, No. 4, 1981.
- 6) R. W. Gould *et al*, "Practical aspects of polymer stabilisation", British Polymer Journal, Vol.16, 1984.
- 7) G. S. Kim *et al*, "Electrical Characteristics of XLPE by DCP and TMPTA Content Ratio", Proc. of ACEID '99, pp. 191-194, Cheongju, Korea, Nov. 1999.
- 8) Annual book of ASTM standards, D 2765, "Test methods for determination of gel content and swell ratio of crosslinked ethylene plastics", Vol. 08, 1992.
- 9) R. Setnescu *et al*, "Chemiluminescence Study on the Oxidation of Several Polyolefins : I. Thermal-induced Degradation of Additives Free Polyolefins", Polym. Degra. and Stabi., Vol. 60, pp. 377-383, 1998.
- 10) M. H. Van de Voorde, "Effects of Radiation on Materials and Components", CERN, Euro. Organization for Nuclear Research, 1970.
- 11) J. Y. Koo *et al*, "Water Treeing Phenomena and Their Morphological Aspects in Co⁶⁰ γ -Ray Irradiated Poly-

- thylene”, J. of KIEE, Vol. 6, No. 2, pp. 26-31, 1993.
- 12) F. J. Campbell, “Radiation Effects on Electrical Insulation”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 4, No. 6, pp. 30-34, 1998.
 - 13) K. J. Lim, “A Study on Treeing Mechanism and Methods to improve Treeing resistance in Low Density Polyethylene”, Thesis for PhD., 1986. (in Korean)
 - 14) Y. Yamano and H. Endoh, “Increase in breakdown strength of PE film by additives of azocompounds”, IEEE Trans. on EI, Vol. 5, No. 2, 1998.
 - 15) 강성화 등, “고체유전체에서 발생한 부시형 전기 트리에 수반된 내부 부분방전 펄스 해석”, 산업안전학회지, 15권 1호, pp. 100-105, 2000.
 - 16) 家田正之外 3人, “誘電體現象論”, 日本電氣學會, pp. 83-101, 1975.
 - 17) 김기엽 등, “전자스핀공명을 이용한 저밀도 폴리에틸렌의 방사선 열화 검지”, 한국안전학회지, 20권 1호, pp. 81-85, 2005.