

폴리에틸렌의 절연파괴와 그의 온도 및 두께의존성

^{a)}김점식^{a)} 이종범^{a)} 정우교^{b)} 김미향^{b)} 박대희^{a)}
a) 원광대학교 b) 생산기술원

A Study on Thickness and Temperature Dependence of Dielectric Breakdown in Polyethylene

^{a)}Jeom - Sik Kim^{a)} Jong - Bum Lee^{a)} Woo - Kyo Jung^{b)} Mi - Hwang Kim^{b)} Dae - Hee Park^{a)}
a)Wonkwang University b)KAITECH

Abstract : The characteristic of dielectric breakdown in solid insulating material dominates the reliability and safety of power equipment and affects directly to its life. In this point of view, the thickness and temperature dependence of dielectric breakdown strength and mechanism of dielectric breakdown in low density polyethylene which has been employed widely as insulating material have been technically reviewed by examinations of thermal property.

The dielectric breakdown strength depending on its thickness was measured 2.6[MV/cm] at the thickness of 20[μ m] and 1.9[MV/cm] at the thickness of 75[μ m] based on ambient temperature of 30[$^{\circ}$ C]. It is shown the temperature dependence that dielectric breakdown strength decreases in linear as the thickness increases.

The dielectric breakdown strength depending on temperature was measured 2.6[MV/cm] at the temperature of 30[$^{\circ}$ C], 1.6[MV/cm] at 60[$^{\circ}$ C] and 1.3[MV/cm] at 90[$^{\circ}$ C] based on the thickness of 20 [μ m]. As the ambient temperature increases, the temperature dependence is shown that a very large drop is occurred up to temperature of 60[$^{\circ}$ C] and a very small drop is discovered over 60[$^{\circ}$ C].

1. 서론

최근 전력 수요의 증가로 계통 전압의 초고압화와 전력 기기의 대응량화가 이루어지면서 전력 공급의 안정성과 신뢰성이 요구되어 절연에 관련된 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 절연재료는 가혹한 사용조건 하에서도 우수한 절연 성능이 요구되며 특히 전력케이블에서는 절연재료의 전기적, 기계적 특성에 의하여 케이블의 신뢰성 및 수명이 큰 영향을 받게 되었다^{1,2)}. 따라서 고분자 절연재료의 절연 향상이라는 측면에서 절연 특성에 관한 많은 연구가 발표^{3,4)}되고 있다.

유기고분자인 폴리에틸렌(polyethylene: 이하 PE)은 반결정성, 비극성으로 전기적 특성이 우수하여 배전용 케이블, 특고압 전력케이블의 절연재료로 이용되고 있으며, 고

주파 특성이 우수하고 유전 손실이 작기 때문에 고주파용 통신 케이블에 이르기까지 광범위하게 사용⁵⁾되고 있다. 특히 전력케이블의 절연재료로는 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene: 이하 LDPE)을 가교시켜 사용하며 LDPE를 사용하는 전력케이블은 외국의 경우 500[kV]까지 실용화되고 있으며⁶⁾ 향후 국내에서도 송전선의 지중화와 함께 345[kV]급에 응용될 전망이다.

이에 본 논문은 고체절연체의 신뢰성 측면에서 전력용 케이블에 사용되는 기본 재료인 첨가제가 가미되지 않은 순수한 LDPE 필름을 시료로 하여, 상용 주파수 교류 전원 하에서 두께 및 온도 변화에 따른 절연파괴강도와 시료의 절연파괴 부위를 각각 비교 분석하였다. 또한 절연파괴강도의 두께 및 온도의존성과 절연파괴기구에 대하여 연구 고찰하였다.

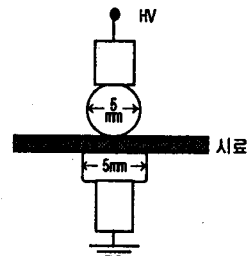


그림 1. 구-평판 전극

2. 실험

2.1 시료 및 실험장치

본 실험에서 사용한 시료는 시판되고 있는 첨가제가 들어가지 않은 순수한 LDPE 필름으로 절연파괴의 두께의존성을 고찰하기 위하여 두께가 20, 33, 47, 75[μ m]인 4종류의 LDPE 필름을 사용하였다.

절연파괴 시험 전극은 재질이 스텐레스이며 직경 5[mm]의 상부 구 전극과 직경이 5[mm]의 하부 평판 전극으로 구성되어 그림1과 같이 측정 중에 연면 방전을 억제시키기 위하여 전극을 실리콘유조 중에 함침시켜 실험을 하였다. 절연파괴실험은 출력이 50[kV]인 교류전압인가 장치를 사용하였으며 절연파괴와 동시에 자동 차단되는 장치로 하였다. 실험에서 온도의 변화는 실리콘유의 온도를 항온조와

온도 조절 장치를 사용하여 가변시켰으며 절연파괴 부위의 관찰은 광학 현미경을 이용하였다.

2.2 실험방법

절연파괴 특성 실험은 교류전압인가 장치를 이용하여 상용주파수의 교류전압을 인가 속도 0.1[kV/sec]로 단시간 인가법에 의해 인가하였다. LDPE 시료의 두께는 20, 33, 47, 75[μm]의 4종류로 제한하고 각 두께 별로 절연파괴강도를 측정하였으며, LDPE의 용융점이 107.8[$^{\circ}\text{C}$]임을 감안하여 온도조절항온조를 이용하여 실온에서 부터 90[$^{\circ}\text{C}$]까지 10[$^{\circ}\text{C}$]씩 간격으로 온도를 변화시키면서 절연파괴강도를 측정하여 절연파괴강도의 두께 및 온도의존성을 검토하고 절연파괴기구를 고찰하였다.

측정 자료의 처리는 각각의 실험에서 동일한 시료를 사용하여 10회 반복하여 실시하고 최저값과 최대값을 제외한 나머지 측정치의 평균값을 취하여 자료로 활용하였다.

각 시료의 절연파괴된 부분의 형상은 광학현미경을 사용하여 100배의 배율로 파괴 부분의 크기를 직경과 면적으로 비교하여 분석하였으며 파괴부분의 형상을 고찰하였다.

3. 실험결과

3.1 절연파괴와 두께의존성

동일한 시료를 20, 33, 47, 75[μm]의 두께 별로 각각 절연파괴강도를 실험하였다. 그림2는 주위온도 30[$^{\circ}\text{C}$]에서 두께에 따른 LDPE의 절연파괴강도를 나타내고 있다. 그림2에서 시료의 두께가 20[μm]일 때 절연파괴강도가 2.6[MV/cm]이나 75[μm]에서는 1.9[MV/cm]로 시료 두께의 증가와 함께 절연파괴강도가 직선적으로 감소하는 현상의 두께의존성을 나타내고 있다. 두께가 얇은 시료에서는 두꺼운 시료보다 평균치 이탈이 크게 발생되고 있음을 알 수 있다.

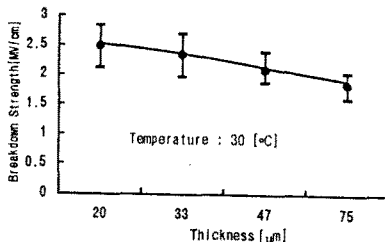


그림 2. 30[$^{\circ}\text{C}$]에서의 LDPE 절연파괴 강도의 두께의존성

그림3은 온도변화에 따른 절연파괴강도의 두께의존성을 나타낸 것으로 각각의 온도에서도 두께의존성의 경향은 같게 나타나고 있다. 그림의 실험과 같은 조건으로 선행 연구된 LDPE의 직류절연파괴강도가 4.7[MV/cm]으로 제시되고 있는 것과 비교할 때 교류절연파괴강도 2.6[MV/cm]은 크게 낮은 값으로 나타났다.

이와 같은 절연파괴현상의 파괴기구는 절연재료 내의 전자의 사태로 인하여 얇은 시료에 비해서 두꺼운 시료가 절연파괴강도가 낮아지는 것으로 사료된다.

3.2 절연파괴의 온도의존성

두께 20[μm]의 LDPE 필름에 대하여 실온에서 90[$^{\circ}\text{C}$]까지 10[$^{\circ}\text{C}$]씩 증가시키며 절연파괴강도를 실험한 결과를 그림4에 나타냈다. 이 결과는 실온에서 절연파괴강도가 2.6[MV/cm]이나 90[$^{\circ}\text{C}$]에서는 1.3[MV/cm]로 나타나 절연파괴강도는 온도의 증가와 함께 저하되는 것을 보이고 있다.

시료의 두께를 달리하여 각각의 온도에서 측정된 절연파괴강도의 결과를 그림5에 나타냈다. 이 결과에서도 그림과 동일한 현상을 나타내고 있으나 50[$^{\circ}\text{C}$] 이하의 온도 영역에서는 온도 증가에 따른 절연파괴강도의 감소가 두드러지게 나타나지만 50[$^{\circ}\text{C}$]이상의 온도에서는 절연파괴강도의 변화가 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있었다.

교류절연파괴의 온도의존성은 선행 연구된 PE의 직류 절연파괴 특성 결과에 비교하여 볼 때 온도에 의한 영향이 미미한 것으로 검토되었다. 절연파괴기구로 상온 부근에서는 전자가 열에너지를 받은 상태에서 전계에 의해 가속되어 일어나는 현상인 전자사태로 추정되며 고온에서는 전자열 파괴와 전기기계적 파괴의 복합적인 작용으로 인한 현상으로 추정되고 절연재료의 자유 체적과 전자의 수 및 활성화 에너지에 관련된 것으로 여겨지며 향후 이에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

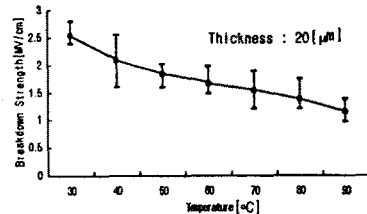


그림 4. 두께 20[μm] LDPE 절연파괴 강도의 온도의존성

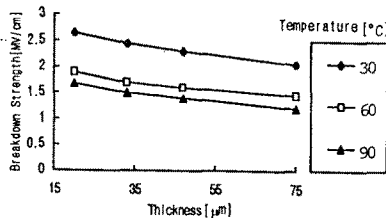


그림 3. 온도 변화에 따른 LDPE 절연파괴 강도의 두께의존성

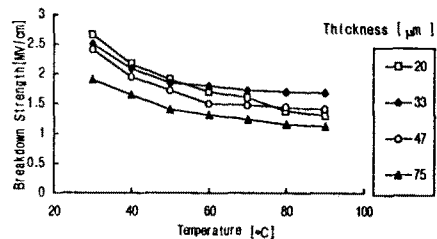


그림 5. 두께 변화에 따른 LDPE 절연파괴 강도의 온도의존성

3.3 절연파괴부위의 관찰

고체 절연체의 절연파괴는 순간적으로 나타나며, 주위 온도 및 시료두께에 따라서 파괴부위는 파괴기구의 고찰에 참고가 될 것으로 사료되어 각각의 파괴시료에 관찰을 하였다. 그림6은 시료의 절연파괴부분의 한 예로써 나타난 현미경 사진으로 이 파괴부위의 관찰로부터 알 수 있는 것은 시료의 두께 및 온도에 따라 파괴된 부분의 형상이 다르게 나타났다. 두께가 얇고 온도가 낮을수록 파괴흔적이 작은 것을 알 수 있었다. 또한 절연파괴는 LDPE가 용융되면서 일어나는 것으로 보이며 이와 같은 파괴 구멍은 금속 전극의 선단에서 발생되었다.

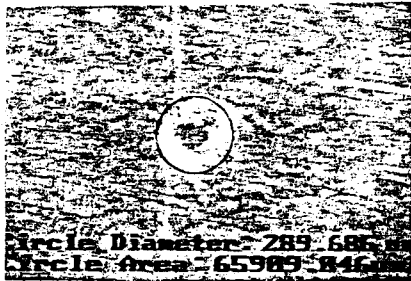


그림 6. 30(°C)에서 20(μm) 시료를 전자현미경으로 관찰한 절연파괴부위

LDPE의 교류 절연파괴 특성에 미치는 두께 및 온도의존성과 절연파괴기구를 실험을 통하여 고찰한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

- 1) 두께 변화에 따른 절연파괴강도는 온도가 30[°C]일 때 두께가 20[μm]인 시료에서는 2.6[MV/cm]이며, 75[μm]에서는 1.9[MV/cm]로 나타나 두께가 증가함에 따라 절연파괴강도는 완만하게 직선적으로 감소되는 온도의존성이 나타났고, 절연파괴기구는 전자사태에 의한 파괴로 추정된다.
- 2) 온도 변화에 따른 절연파괴강도는 두께 20[μm]인 시료의 경우 주위 온도 30[°C]에서 2.6[MV/cm]이며, 90[°C]에서 1.3[MV/cm]로 나타나 온도가 증가함에 따라 절연파괴강도는 감소되며 실온에서 60[°C]사이에서는 감소 현상이 크게 나타났고 60[°C]이상에서는 감소 현상이 거의 나타나지 않았다. 파괴 기구는 전자가 열 에너지를 받은 상태에서 전계에 의한 가속으로 인하여 일어나는 과정으로 사료되며 본 연구의 고찰 결과는 발표된 이론과 일치됨을 확인할 수 있었다.
- 3) 시료의 절연파괴부위는 전극의 선단에서 일어나며 파괴 부위의 형태는 용융된 상태를 보이고 시료의 두께가 얇고 측정 주위의 온도가 낮을수록 파괴 흔적이 작게 나타났다.

참고문헌

1. Y. Lunishi, "High Field Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Vol.EI-15, pp.139, 1980.
2. H. Kato et al, "New Insulating Materials", IEEE Trans.Vol.EI-21, No.6, pp.925-927, 1986.
3. P. J. Phillips et al, "The Morphology of Cross-linked Polyethylene Insulation", IEEE Trans. Vol.EI-13, No.3, pp.171-178, 1978.
4. B. Yoda et al, "Development of 500kV Cross-linked Polyethylene Insulated Power Cable", IEEE Trans. Vol.Pas-104, pp.32, 1985.
5. 朴承國, "폴리에틸렌 수지", 대광서림, pp.64, 1979.
6. G. Bahder et al, "Life Expandancy of XLPE Insulated Cables Rated 15 to 35kV", IEEE Trans. Vol.PAS-100, 1981.