

오염된 고체절연물의 AC 연면 절연파괴특성 분석

김진태\*, 서청원\*\*, 박현성\*, 김병대\*, 강종성\*  
 현대중공업(주)\*, 충북대학교\*\*

Study on AC creepage discharge characteristics on polluted solid dielectrics

J. T. Kim\*, C. W. Seo\*\*, H. S. Park\*, B. D. Kim\*, J. S. Jang\*  
 Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.\*, Chungbuk National University\*\*

**Abstract** - 공기를 주 절연매질로 사용하는 전력기기의 소형화 추세 속에서 제품의 절연성능을 확보하기 위해 ‘절연베리어’인 고체절연물이 사용된다. 고체절연물의 연면 절연성능은 운전 환경에서 발생된 수분 및 오염원 등에 영향을 받기 쉽기 때문에, 다양한 오염도 조건에서 고체절연물의 연면 절연파괴특성 분석이 필요하다.

본 논문에서는 전력기기에 폭넓게 적용되는 있는 고체절연물에 대하여 평등전계가 모의된 평판 - 평판 전극 실험 조건에서 연면거리 및 오염도를 정량화한 전기전도도에 따른 AC 연면 절연파괴특성을 분석하였다.

그 결과, AC 연면 절연파괴전계는 고체절연물 재질에 관계없이 단(短)갭에서 연면거리에 대한 의존성을 거의 보이지 않았다. 또한, PC 연면 절연파괴전계는 BMC 및 에폭시 대비 높았으며, 이것은 재질에 따른 연면 절연파괴 형태 및 표면의 소수성 차이와 관련이 있는 것으로 사료된다.

1. 서 론

공기의 절연내력은 SF<sub>6</sub> 가스 및 고체절연물보다 상대적으로 낮기 때문에 전력기기의 소형화 및 친환경 추세 속에서 공기를 주 절연매질로 사용하는 차단기의 제품 사이즈를 축소하기 위해서는 고체절연물이 필요하다. 특히, 에폭시 함침을 이용한 밀폐형 구조와 달리 공기에 노출된 개방형 구조의 제품의 경우, ‘절연베리어’ 형태로 고체절연물이 사용되고 있다.

공기 중 전극에 설치된 고체절연물은 절연파괴 진전경로를 증가시켜 절연성능을 향상시키는 역할을 하며, 제품 절연설계 시 배치 및 형상에 따라 절연파괴전압 예측이 용이한 장점을 가지고 있다[1-3]. 하지만, 고체절연물 표면의 절연성능이 주위 운전환경에 영향을 받기 쉽다. 특히, 먼지 및 결로 등의 오염원에 노출되기 쉬운 지하변전소 및 선박 등에 설치될 경우, 오염된 고체절연물 표면의 절연성능 저하로 인하여 연면 절연파괴 발생 가능성이 높으며, 이러한 현상은 제품 전체의 절연사고를 일으키는 원인 중 하나로 지목되고 있다. 또한, 제품의 절연사고가 발생하지 않더라도 오염된 고체절연물의 연면 절연성능이 공기보다 낮고, 오염 조건에 따라 고체절연물의 연면 절연성능이 달라지기 때문에 제품의 절연 신뢰성을 확보하는데 어려움이 있다. 따라서, 운전 환경과 특수 사용 조건에서 절연성능을 확보하기 위하여 오염을 고려한 고체절연물의 연면 절연파괴특성 분석이 요구된다.

본 논문에서는 단(短)갭의 평판 - 평판 전극 조건에서 연면거리 및 오염도가 정량화된 전기전도도에 따른 AC 연면 절연파괴전계를 분석하였다. 또한, 고체절연물 재질에 따른 연면 절연내력 차이를 분석하기 위하여 절연파괴 형태 및 표면의 소수성 특성을 확인하였다.

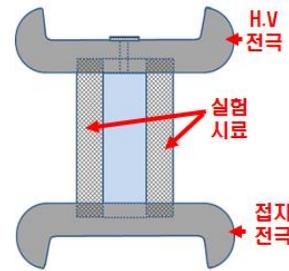
2. 본 론

2.1 고체절연물 재질 및 오염도에 따른 AC 연면 절연파괴특성 분석

고체절연물의 연면 절연성능에 영향을 미치는 환경적인 요인은 수분 및 이물질, 금속 입자 등 다양한 요인들이 있고, 시료적인 요인은 연면거리, 재질 및 형상 등이 있다. 본 논문에서는 표 1에서 확인할 수 있는 것처럼, 오염도 조건을 반영한 물리적 인자인 전기전도도와 시료적 인자인 재질과 연면거리에 따른 AC 연면 절연파괴특성을 분석하였다. 전기전도도는 고체절연물 표면의 오염도를 정량화한 값이며, 본 값들은 IEC 60815 및 IEC 60507을 토대로 선정되었다[4,5].

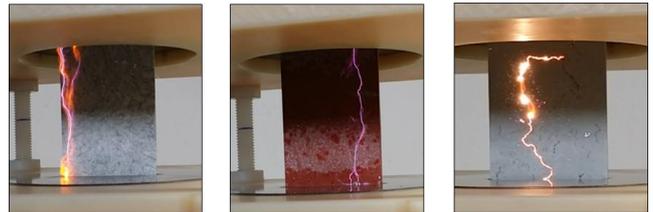
〈표 1〉 오염도 조건에서 AC 연면 절연파괴특성 분석 실험 조건

전극	평판 - 평판
인가 전압 파형	AC(Ramp 파형)
고체절연물 재질	BMC, PC, 에폭시
전기전도도	3.7, 16, 65uS/cm
연면거리	42, 52.5, 60mm



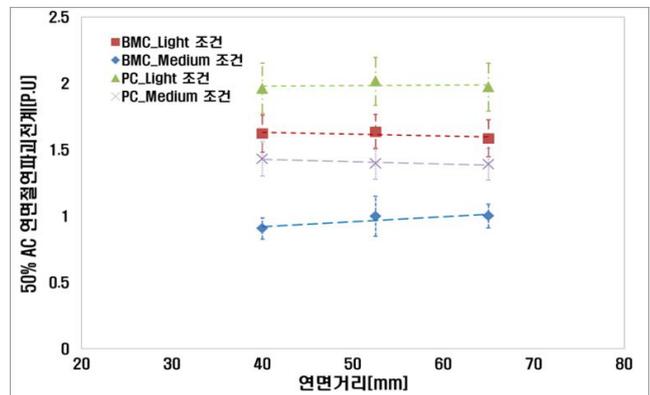
〈그림 1〉 오염도 조건에서 AC 연면 절연파괴 실험 전극

일반적으로 오염된 고체절연물은 전기적 스트레스에 지속적으로 노출되어 있으며, 오염도 조건에서 연면 절연파괴는 표면의 소수성이 친수성으로 바뀐 이후에 발생하는 것으로 보고되고 있다[4]. 따라서, 본 실험에 활용된 시료들은 오염이 적용되기 전, 표면 소수성 파괴 과정을 먼저 거쳤다. 그리고, 고체절연물 재질에 따른 연면 절연파괴강도를 비교하기 위하여 그림 1의 평판 전극이 실험에 사용되었다.



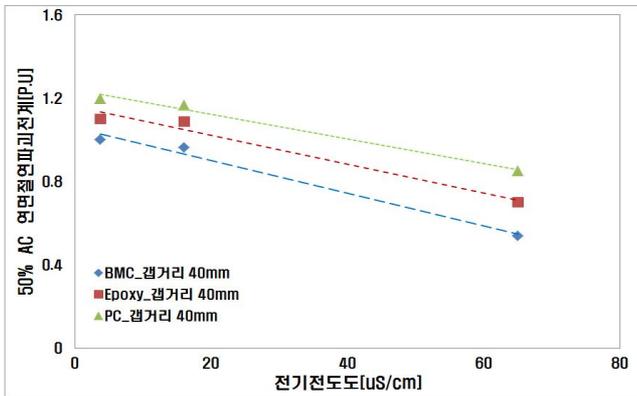
〈그림 2〉 고체절연물 재질에 따른 연면 절연파괴 형태

우선, 오염도 조건에서 고체절연물 표면에 대한 절연파괴 진전형태를 분석하였다. 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼, BMC와 에폭시의 경우, 건조대 발생 후 자색의 펄스형 절연파괴가 관찰되었다. 반면에 PC의 경우, 다른 고체절연물과 달리 tracking 현상처럼, 빛과 열이 동반된 미소 방전과 함께 탄화물이 형성되어 절연파괴가 진전됨을 확인하였다. 이러한 절연파괴 진전형태 차이로 인하여 최초 절연파괴 이후 BMC와 에폭시는 연면 절연성능을 유지하였지만, PC의 경우, 도전로 형성으로 연면 절연내력이 매우 저하되었다.

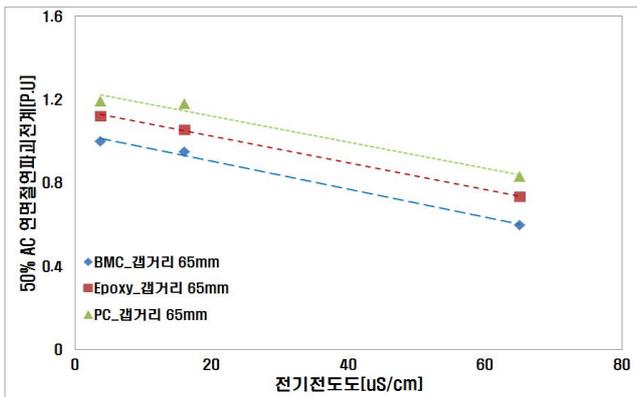


〈그림 3〉 단 갭에서 연면거리에 따른 AC 연면 절연파괴전계 분석

두 번째로, 여러 오염도가 고려된 단(短) 갭에서 연면거리에 따른 AC 연면 절연파괴전계 변화를 분석하였다. 그림 3에서 확인할 수 있는 것처럼, 오염도에 관계없이 연면거리에 따른 연면 절연파괴전계는 거의 동일하였으며, clean 조건의 40mm 이하의 단 갭에서 스트리머 - leader 전환특성으로 발생하는 절연파괴전계의 변곡점은 관찰되지 않았다. 이러한 내용을 토대로 운전 환경이 고려된 물리적인 인자인 전기전도도에 따른 AC 연면 절연파괴특성을 고찰하였다. 그림 4는 각 연면거리에서 고체절연물 재질 및 전기전도도에 따른 AC 연면 절연파괴전계이다. 고체절연물 재질에 관계없이 전기전도도에 따라 AC 연면 절연파괴전계는 거의 선형적으로 감소하였으며, 전기전도도에 관계없이 고체절연물 재질간 연면 절연성능은 거의 일정 비율 만큼 차이가 있음을 확인하였다. 또한, AC 연면 절연파괴전계는 BMC 및 에폭시 대비 PC가 가장 높았으며, 본 실험결과는 고체절연물의 내오염성을 분석하기 위해 수행된 tracking 분석결과와 반대였다[6]. 현재, 두 실험간 결과 차이에 대하여 분석을 수행하고 있으며, 본 논문에서는 우선적으로 고체절연물 재질간 AC 연면 절연파괴전계 차이의 원인을 고찰하였다.



(a) 연면거리 40mm 조건



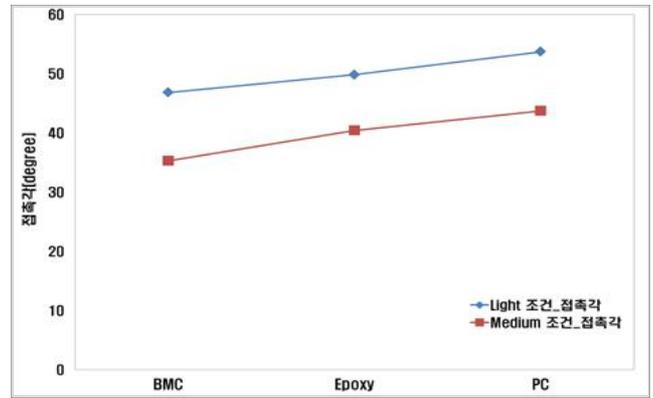
(b) 연면거리 65mm 조건

<그림 4> 전기전도도에 따른 AC 연면 절연파괴전계

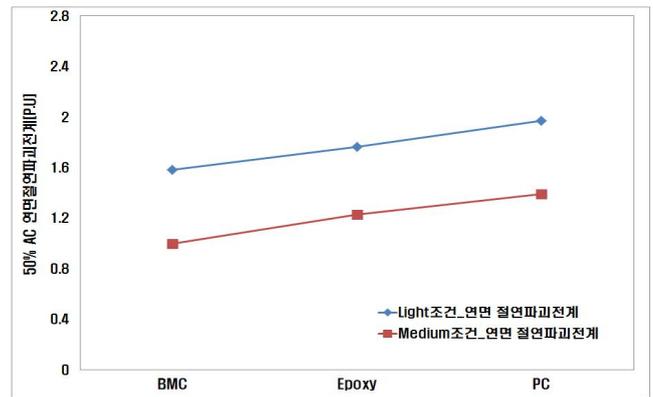
### 2.2 AC 연면 절연파괴전계에 대한 고체절연물 재질 영향 분석

운전 조건에서 오염된 고체절연물의 연면 절연파괴는 표면에 부착된 이물질과 수분으로 인하여 만들어진 전도성 수막에 따른 누설전류와 관련이 있다. 전도성 수막의 형성 및 분포는 표면의 소수성에 따라 달라지며, 소수성은 고체절연물 재질의 영향을 받는다. 이에, 고체절연물 재질에 따른 AC 연면 절연파괴전계 차이를 분석하기 위하여 각 오염도 조건에서 실험 직전 contact angle을 측정하였다.

그림 5는 고체절연물 재질에 따른 contact angle과 AC 연면 절연파괴전계이다. (a)에서 볼 수 있는 것처럼, 오염도가 높을수록 contact angle이 감소하였으며, BMC 및 에폭시 재질에 비해 PC의 contact angle이 가장 높았다. 그리고 이러한 경향성은 재질에 따른 AC 연면 절연파괴전계 특성에서도 나타났다. AC 연면 절연파괴전계는 다른 재질들에 비해 PC가 가장 높음을 확인하였으며, 이것은 누설전류가 개시된 후 건조대 형성 전 초기 단계에서 소수성 정도에 따른 전도성 수막의 퍼짐 정도가 연면 절연파괴 개시 및 진전에 영향을 주는 것으로 사료된다.



(a) 고체절연물 재질에 따른 contact angle



(b) 고체절연물 재질에 따른 AC 연면 절연파괴전계

<그림 5> Contact angle과 AC 연면 절연파괴전계간 상관관계

### 3. 결 론

본 논문에서는 전자친화력이 높은 가스 및 고체절연물 대비 절연내력이 상대적으로 낮은 공기를 주 절연매질로 이용하는 차단기의 절연성능 향상을 위하여 적용된 고체절연물의 AC 연면 절연파괴특성을 다양한 오염도 조건에서 분석하였다.

Clean 조건의 단(短) 갭에서 연면거리에 따라 연면 절연파괴전계의 변곡점이 발생한다는 것과 달리, 오염도 조건의 경우, 고체절연물 재질에 관계없이 AC 연면 절연파괴전계는 연면거리의 의존성을 보이지 않았다. 또한, 고체절연물 재질에 따른 AC 연면 절연파괴전계는 PC가 BMC 및 에폭시 보다 높았다. BMC와 에폭시의 경우, 자색의 glow 방전 형태의 절연파괴가 발생한 반면, PC의 경우, 빛과 열을 내면서 tracking과 같은 도전로를 형성하며 서서히 절연파괴가 발생하였다. 또한, 표면 전계 분포 및 도전로 형성에 영향을 주는 소수성 특성은 PC가 다른 재질에 비해 높았다.

### [참 고 문 헌]

- [1] S. M. Lebedev et al, "The barrier effect in Dielectrics : The role of interfaces in the breakdown of inhomogenous dielectrics", IEEE, Vol. 12, 2005.
- [2] A. Beroul et al, "Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gap in point/plane arrangement", IEEE, Vol. 26, No. 6, 1991.
- [3] 김진태, "진공차단기 복합절연기술", 대한전기학회, 추계학술대회, 2013
- [4] R. Matsuoka, H.Shinokubo et al, "Assessment of basic contamination withstand voltage characteristics of polymer insulators", IEEE Trans. Power Del., Vol. 11, 1996
- [5] IEC 60815, "Selection and dimensioning of high -voltage insulators intended for use in polluted conditions-part 1: Definitions, information and general principles"
- [6] IEC 60507, "Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems"
- [7] 김진태, "고체절연물 tracking 특성 분석", 2013