

보이드 분포 형태에 따른 LDPE의 부분 방전 특성 연구

신 두성, 전 승익*, 이 준호**, 윤 도홍, 한 민구

서울대학교 전기공학과, LG 전선(주) 전력연구소*, 호서대학교 전기공학과**

A Study on the Partial Discharge Characteristics according to the Distribution Pattern of Voids within LDPE

Doo Seong Shin, Seung Ik Jeon*, Jun Ho Lee**, Do Hong Yun and Min Koo Han

Department of Electrical Engineering, Seoul National University,

Power Institute of LG cable co., Department of Electrical Engineering, Ho-Seo University**

ABSTRACT

Internal voids located within an insulation will arise partial discharge that causes local breakdown and even the entire insulation breakdown. For HV apparatuses, it is usual case that several voids are formed within non-uniform electric field condition rather than single void within uniform field, which can be solved analitically. The purpose of this work is to study partial discharge and breakdown characteristics of an insulation according to the distribution pattern of two disc-type voids that are located within non-uniform field. The results from numerical field analysis and experiments show that the electric field within the voids decreases as they are arranged more serially, which accordingly results in the increase of partial discharge inception field (PDIF) much higher than that of single void model. With parallel arranged voids, PDIF is almost the same as that of single void model. On the other hand, AC breakdown strength decreases as voids are arranged more serially, which is a natural result considering the reduction of effective insulation thickness. For parallel voids, this effect cannot be noticed where as they show different pattern compared with single void and serial void models in ϕ -Q-N analysis. Considering these results may leads us to the conclusion that, in the evaluation of insulating products through PD test, it is not sufficient to determine only PDIV or existence of PD at predetermined voltage level. We could evaluate more accurately by considering all the available data such as PDIV, PD magnitude, PD occurring phase, number of PD pulses, and etc.

Key words : Insulation, Void, Partial Discharge, Dielectric Breakdown, Field Analysis, ϕ -Q-N analysis

1. 서 론

절연체 내부에 존재하는 보이드(void)는 그 양단에 일정치 이상의 전압이 인가되면 부분 방전 현상이 발생하고, 국부적인 파괴로 진전하여 결국에는 전체적인 절연 파괴를 일으키는 치명적인 결함이다. 따라서, 절연체 내부의 보이드에 의한 부분 방전 현상에 대해서는 상당히 많은 연구가 이루어져 왔으나, 평등 전계 내에 존재하는 단일 보이드에 대한 경우로 국한된 것이었다. [1]~[5]

그러나, 실제 절연 제품에 있어서는 하나의 보이드는 물론, 여러개의 보이드가 인접하여 존재하는 경우가 많고, 더욱이 그 발생 위치 조건도 제품에 삽입된 급속 전극 부근에 생성되는 등의 불평등 전계 내에 존재하는 조건으로서 생성되는 경우가 많다. 이렇게 불평등 전계 내에 존재하는 조건 또는 복수 개가 인접하여 존재하는 조건일 경우에는 이론적인 분석이 해석적 방법으로는 매우 복잡하기 때문에 연구하지 못해 왔다. 따라서 평등 전계 내 단일 보이드의 계산 결과를 적용하여 실 제품에서의 현상을 분석·평가하여 왔으나, 이것은 근본적으로 실 제품에 맞지않는 모델에 대한 것이므로 엄밀한 적용에는 다소 무리가 있었다. 그러나 최근 컴퓨터 기술의 급속한 발달에 힘입어 여러가지 수치 해석 기법이 개발되어 종래에 해석적 방법으로 불가능하였던 경우의 풀이가 가능하게 됨으로써 실 제품에서 발생하는 현상을 비교적 정확하게 분석할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 불평등 전계 내에 존재하는 복수 개의 보이드에 있어서의 부분 방전 특성 등을 분석하기 위하여 기본적으로 2개의 인접 보이드에 있어서 배치 가능한 여러 종류의 분포 형태를 선정하고 각 선정 모델에 대하여 수치 해석 기법에 의해 보이드 내부의 전계 분포를 계산한 후, 그 결과를 토대로 하여 각 모델에 있어서의 부분 방전 개시 전압을 계산하였다. 또한, 이론적 계산 결과를 실험적으로 입증하기 위하여 고분자 재료로 시료를 제작하여 부분 방전 특성을 측정하였으며, 부분 방전의 종국적인 현상으로 나타나는 교류 절연 파괴 강도도 측정하여 절연체 내 보이드의 분포 형태가 부분 방전 특성 및 절연 파괴 강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며 부분방전 펄스의 위상각에 대한 평균방전량 및 발생빈도를 분석하였다.

2. 이론적 해석

2-1. 전계 계산

해석 대상이 만족하여야 할 조건은 실 제품에서의 경우와 마찬가지로 불평등 전계 내에 두 개의 보이드가 존재하여야 한다는 것이다. 종래의 해석적 방법에서는 보이드가 평등 전계 내에 존재하는 조건으로서 절연체 내부 보이드의 크기는 시료의 절연 두께에 비해 상당히 작다는 것을(비율 1/10 이하) 전제로 하였다.[1] 이에 반해, 본 연구의 해석 모델에서는 시료 제작상의 문제가 허용하는 한, 보이드의 크기와 재료의 절연 두께가 큰 차이가 나지 않도록 하여(비율 = 1/5) 보이드의 유무에 의해 절연체 내부의 전체적인 전계 분포가 변화하게 함으로써, 결국 보이드가 불평등 전계 내에 존재하는 조건을 만족하도록 하였다.

보이드의 형태는 시료 제작상 문제를 고려하여 제작이 용이한 원판형 보이드로 선정하였다. 이미 연구된 결과에 의하면 보이드 두께와 시료 두께와의 비는 ($= a/t$) 작아질수록, 보이드 직경과 보이드 두께와의 비는 ($= b/a$) 커질수록 보이드 내의 전계 증가율이 커지므로 [2] [3], $a/t (= 0.2)$ 는 작고, $b/a (= 4)$ 는 크게 되도록, 보이드의 직경과 두께를 각각 2 mm 및 0.5 mm로, 시료의 두께는 2.5 mm로 선정하였다. 보이드의 배치 구조는 실 제품상에서 가능한 모든 분포 형태를 고려하여 전극에 대하여 직렬 배치, 병렬 배치 및 사선 배치로 선정하였으며, 각 배치 구조에 있어서 시료 제작상의 문제가 허용하는 한, 보이드 간의 간격을 변화시켜 가면서 보이드 상호간의 인접 효과를 파악할 수 있도록 하였다. 선정된 해석 모델의 구조를 종합하여 표 1에 정리하였다.

표 1. 해석 모델의 구조

| 모델명 | 구조상 | 특징 |
|--------|---------------------------|----|
| 1 SIN | 단일보이드(직경=2 mm, 두께=0.5 mm) | |
| 2 PAR1 | 보이드 2개를 병렬배치 (간격 1 mm) | |
| 3 PAR2 | 보이드 2개를 병렬배치 (간격 2 mm) | |
| 4 SER | 보이드 2개를 직렬배치 | |
| 5 OVL | 보이드 2개를 사선배치 (절반 중첩) | |
| 6 OBL0 | 보이드 2개를 사선배치 (양단 일치) | |
| 7 OBL1 | 보이드 2개를 사선배치 (간격 1 mm) | |
| 8 OBL2 | 보이드 2개를 사선배치 (간격 2 mm) | |

그림 1에 대표적 모델에 있어서의 등전위선 분포도를 보였다. 전계 분포 계산에는 유한 요소법으로 작성된 2차원 해석 프로그램 (Magsoft사의 Flux-2D)을 사용하였다. 그림 1에서 보인 해석 모델중 몇가지에 대해서는 엄밀한 해석 결과를 얻으려면 3차원적으로 계산하여야 하나, 모델의 구조상 대칭성을 고려하면 2차원 문제로 단순화하여 계산하여도 큰 차이가 없을 것이다. 해석시의 경계 조건으로서 절연체의 폭은 보이드의 폭보다 상당히 크게 하여 (10 배) 자연 경계 조건이 만족하도록 하였다. 해석 결과 각 모델에 있어서의 보이드 내 최대 전계값을 단일 보이드인 모델 (SIN)의 결과를 기준값으로 하여 상대 비교한 결과를 그림 2에 보였다. 비교 대상으로서 최대 전계값을 택한 것은 이 값이 부분 방전 개시 전압과 직접적인 관계가 있기 때문이다. 그림 2을 보면 2개 보이드의 배치가 직렬적으로 될수록 (SER, OVL 및 OBL0) 보이드간의 상호 작용에 의해 보이드 내 전계가 감소하며 보이드간 간격에 따른 전계치의 변화도 확인된다, 보이드의 배치가 병렬적으로 되면 (PAR1, PAR2, OBL1 및 OBL2) 보이드간의 상호 작용이 없어져 보이드 내 전계값이 단일 보이드인 경우 (SIN)와 동일하고 보이드간 간격에 따른 전계치의 변화도 확인되지 않는다. 한편, 2차원에서의 계산 결과를 검증하기 위하여 3차원 해석 프로그램 (Maxwell사의 Maxwell-3D)으로 재계산하여본 결과, 각 모델에 있어서의 전계값의 변동은 최대 4% 이내로서 큰 차이가 없었으며, 2차원 해석 결과 나타난 위와 같은 경향성은 동일하게 확인되었다.

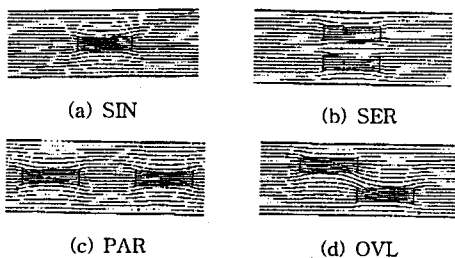


그림 1. 대표적 모델에서의 등전위선 분포도

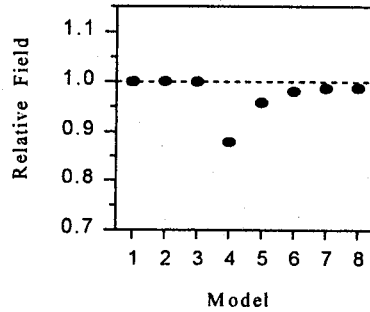


그림 2. 보이드내 최대 전계치의 상대 비교

2-2. 부분 방전 개시 전압 계산

Hall과 Russek의 연구 결과에 따르면 원판형 보이드에 있어서 보이드 내 공기가 절연 파괴를 일으킬 때의 보이드 양단간 전압은 아래 식으로 계산할 수 있다. [4]

$$V_i = 26.5 (p \cdot m) + 0.55 \text{ [kV, rms]}$$

단, p = 보이드 내 압력 [atm], m = 보이드 두께 [cm]

일반적으로 절연체 내 보이드의 내부 압력은 1 [atm]인 것으로 가정하므로 [5], $p = 1$ 을, $m = 0.05$ 를 대입하여 계산하면 $V_i = 1.875$ [kV] 가 얻어진다. 2-1.절의 전계 계산 결과를 기초로 하여 각 모델에서 보이드 양단 전압이 1.875 [kV] 일 때 시료 양단에 인가되는 전압을 계산한 후, 이 전압을 시료 두께 (2.5 mm)로 나눈 평균 전계를 계산할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3-1. 부분 방전 특성 측정

수치 전계 계산법에 의해 얻어진 보이드의 분포 형태에 따른 보이드 내 최대 전계값의 변화, 즉, 부분 방전 개시 전압의 변화를 확인하기 위하여 실험을 행하였다. 재료로서는 케이블 절연체로서 널리 사용되는 저밀도 폴리에틸렌 (LDPE : Low Density Polyethylene)을 사용하였으며, 두께 0.5 mm의 얇은 슈트를 드릴로 구멍을 뚫어 보이드를 만들고 이 슈트를 보이드가 있는 층에 해당하도록 구멍이 있는 슈트와 구멍이 없는 슈트를 교대로 적층하였다. 프레스 가공시에는 적절한 각 슈트들이 완벽히 접착되어 층간에 원하지 않는 미세 공극이 없으며, 또한, 프레스 중에 원판형 보이드의 형상이 왜곡되지 않도록 하는 최적의 조건을 유지하였다.

제작된 시료를 이용하여 우선 부분 방전 개시 전압을 측정하였다. 측정시 사용한 설비는 Robinson Instrument사의 Partial Discharge Detection System Type 700 설비를 사용하였다. [6] 측정 전극로서는 직경 50 mm의 원통형 전극을 절연유 속에 담근 전극계를 사용하여 시료 표면에서의 부분 방전 발생을 방지하도록 하였으며, 각 모델 시료의 부분 방전 특성 측정 전에 건전한 시료를 사용하여 특성 측정 범위보다 상당히 높은 전압 범위 (20 kV 까지)에서도 측정 전극계에서 부분 방전이 발생하지 않는 것을 확인한 후 시험을 행하였다. 측정 설비의 입력 신호 통과 주파수 대역은 10 kHz ~ 200 kHz 범위로 설정하였으며, 기본 background noise는 2~3 pC 수준이었다.

각 모델의 시료에 대한 실험 결과 부분 방전 개시 전계의 측정값과 전계 해석에 의한 계산값을 그림 3에 비교하였다.

여기서 부분 방전 개시 전계는 측정된 부분 방전 개시 전압을 해당 시료의 두께로 나눈 값으로서 시료의 두께가 각각 약간씩 차이가 나므로 부분 방전 개시 조건을 동일한 조건으로 비교하기 위하여 도입한 값이다. 측정 결과는 각 모델별로 3 개씩의 시료에 대해서 각 시료당 3 회 이상 측정된 결과이며, 한 모델에 있어서 시료간의 편차는 무시할 수 있는 정도이었다. 그림 3.을 보면 부분 방전 개시 전계에 있어 계산치와 측정치가 비교적 일치하고 있으며, 특히 보이드의 분포 형태에 따른 부분 방전 개시 전계의 변화는 그 경향성이 일치함을 알 수 있다. 즉, 보이드의 분포가 병렬적인 모델들 (PAR1, PAR2, OBL1 및 OBL2)의 부분 방전 개시 전계는 상대적으로 낮고 단일 보이드인 모델 (SIN)의 값과 비슷한 반면, 보이드의 분포 형태가 직렬적인 모델들 (SER, OVL 및 OBL0)의 부분 방전 개시 전계는 이들보다 상대적으로 높다. 또한, 보이드의 분포가 직렬적인 모델중 사선 배치인 모델들에서는 보이드간의 간격에 따른 부분 방전 개시 전계의 변화도 확인할 수 있다. 특히 사선 배치인 모델에서 계산치와 측정치간에 비교적 큰 오차가 나타나는데, 이것은 실제의 3차원 구조에 있어서 이들 모델이 다른 모델들에 비하여 2차원 대칭성이 적으므로 실제의 전계값과 계산된 전계값간에 오차가 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

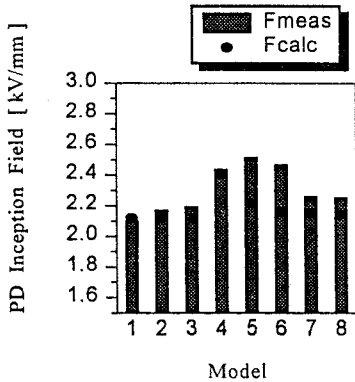


그림 3. 부분방전 개시전계 (측정치와 계산치 비교)

3-2. 교류 절연 파괴 전압 측정

부분 방전 특성을 측정할 동일 시료와 보이드가 없는 건전 시료에 대해 교류 절연 파괴 전압을 측정하였다. 시험 전극으로는 직경 25 mm인 봉대봉 전극을 사용하였고, 30 초 이내에 파괴가 발생하도록 전압을 일정하게 상승하였다. 시험 결과 절연 파괴 전압을 각 시료의 두께로 나눈 절연 파괴 강도를 환산하여 그림 4.에 보였다. 그림 4.를 보면 보이드가 있는 모델들의 파괴 강도는 모두 보이드가 없는 건전한 시료의 절반 정도 수준으로 저하되어 있음을 알 수 있다. 또한, 보이드가 있는 모델들을 비교해 보면, 보이드의 분포 형태가 직렬적인 모델 (SER, OVL 및 OBL0)들의 파괴 강도가 보이드의 분포 형태가 병렬적인 모델들 (PAR1, PAR2, OBL1 및 OBL2) 및 단일 보이드인 모델 (SIN)보다 낮은 수준임을 알 수 있다. 이것은 보이드의 분포 형태가 직렬적으로 될수록 절연 파괴의 입장에서 볼 때는 전체 절연 두께가 감소되는 효과가 있는 것을 고려하면 당연한 결과이다. 그림 3.과 그림 4.에서, 부분 방전 개시 전계가 높은 직렬 보이드의 교류 파괴 강도가 오히려 더 낮다는 매우 중요한 사실을 알 수 있다. 즉, 보이드가 직렬적으로 배치되어 두 보이드간의 간격이 작은 경우에는 보이드의 인접 효과에 의해 부분 방전 전계가 높아지는 한편 절연 두께 감소 효과로 파괴 강도가 낮아지는

반면에, 보이드가 병렬적으로 배치되는 경우에는 단일 보이드인 경우와 유사하게 부분 방전 개시 전계가 낮고 파괴 강도는 상대적으로 높다.

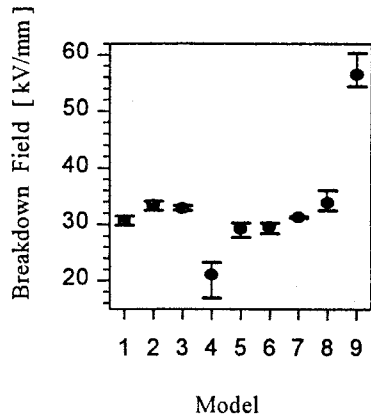


그림 4. 교류 절연 파괴 강도

3-3. 부분방전 펄스의 위상각-전하량-빈도수 측정

위에서 기술한 보이드 분포에 따른 부분방전 특성을 검증하기 위하여 단일보이드, 직렬보이드 및 병렬 보이드에서 부분방전 펄스의 위상각과 전하량 및 발생빈도수를 측정하였다. Tektronix 2430A 디지털 오실로스코프와 IEEE488.2를 이용하였으며, 측정회로는 RC병렬회로로 20kHz이하의 주파수는 차단하도록 설정하였으며, 이때의 측정 Sensitivity는 7~8pC이었다. 앞서 측정된 부분방전 개시전압의 이상인 7kV의 고전압을 인가하여 부분방전 펄스의 발생빈도수와 평균전하량을 통계적으로 처리하였다.

그림 5.는 단일보이드, 직렬 보이드 및 병렬보이드에서의 위상-평균 전하량 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 단일 보이드의 경우와 직렬보이드의 위상-전하량 분포는 거의 유사하며 4 ~ 10° 부근과 240 ~ 255°의 위상영역에서 100~200pC의 비교적 큰 방전펄스가 간헐적으로 발생하였다. 병렬 보이드의 경우 분포가 완만하며 약 40~50pC의 방전량을 나타내었다.

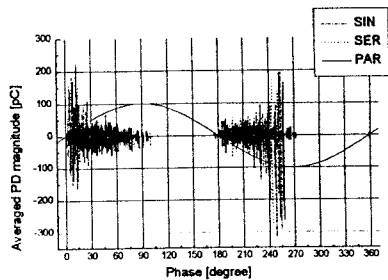


그림 5. 부분방전 펄스의 위상각 대 평균방전량

그림 6.은 단일 보이드와 직렬 보이드 및 병렬 보이드에서의 위상-발생빈도수 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 단일 보이드 경우 약 17°와 30° 부근에서 두개의 첨점을 가지는 분포를 보이며 전체적으로 약 30° ~ 40° 부근과 205° ~ 220°의 위상에서 부분방전 펄스가 발생하였으며 직렬 보이드의 경우 약 20° ~ 50° 부근과 205° ~ 225°에서 부분방전 펄스가 발생하여 위상영역에 좁게 집

중되어 있는 반면, 병렬 보이드의 경우는 약 $10^\circ \sim 60^\circ$ 부근과 $195^\circ \sim 230^\circ$ 의 보다 넓은 위상영역에서 펄스가 발생함을 알 수 있다. 이는 병렬 보이드의 경우, 보이드의 전체 단면이 넓어서 부분방전이 발생할 수 있는 확률이 높기 때문이라고 생각된다.

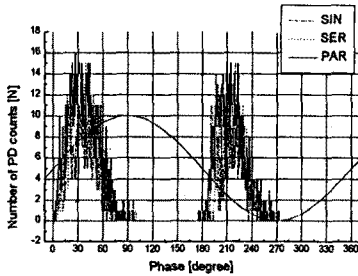


그림 6. 부분방전 펄스의 위상각 대 발생빈도

4. 결 론

본 논문에서는 절연체내 복수개의 보이드가 있을 때, 그 분포 형태가 부분 방전 특성 및 절연 파괴 전압에 미치는 영향에 대하여 수치 전계 해석을 하고 실제로 시료를 만들어 시험해 보았다. 우선, 보이드의 분포 형태가 직접적으로 되고 또 그 간격이 작을수록 상호간에 영향을 미쳐 내부 전계가 감소하고 따라서 부분 방전 개시 전계가 높아지는 반면, 절연 파괴의 입장에 있어서는 전체 절연 두께의 감소 효과가 있으므로 교류 절연 파괴 강도는 낮아진다. 한편, 보이드의 분포가 병렬적인 경우에는 이러한 효과가 나타나지 않았으나 위상각-평균방전량-발생빈도의 ϕ -Q-N 분포는 단일보이드와 직렬보이드가 유사하였으며 병렬 보이드의 경우 다소 다른 분포를 보였다. 이상의 결과로부터 부분 방전 시험을 통해 비파괴적으로 절연 제품의 성능을 평가하는데 있어, 현재에 행하고 있는 바와 같이 제품의 부분 방전 개시 전압 또는 일정 전압에서의 부분 방전 발생 여부만을 평가 기준으로 삼아서는 부족하고, 본 연구의 결과와 같이 보이드의 분포 형태에 따라서는 부분 방전 개시 전계는 높더라도 절연 파괴 강도는 낮은 경우도 있으므로 제품 평가시에는 부분 방전 개시 전압 뿐만 아니라 부분 방전량, 발생 위상 및 발생 빈도 등 얻을 수 있는 모든 데이터를 다각적으로 종합 분석하여 성능 평가를 하여야 정확한 결과를 얻을 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

5. 참고 문헌

- [1] G. C. Crichton, et. al., "Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids", IEEE., Trans. EI., Vol. 24, No. 2, pp. 335-342, 1989.
- [2] G. Mitra & B. Salvage, "Electric stress in a circular cylindrical gaseous cavity in a solid dielectric, the axis of the cylinder being parallel to the field", Proc. IEE., Vol. 113, pp. 931-935, 1966.
- [3] D. D. Chang, et. al., "Analysis of electric stress distribution in cavities embedded within dielectric structures", IEEE Trans. EI., Vol. EI-21, No. 2, pp. 213-219, 1986.
- [4] H. C. Hall & R. M. Russek, "Discharge inception and extinction in dielectric voids", IEEE., Vol. 101, pt II, pp. 47-55, 1954.

[5] 安井 貞三 & 山田 有一, "球狀 ボイド 内 放電 の 理論 計算 と 實驗", 住友 電氣, 第 94 號, pp. 36-50, 1966.

[6] S. A. Boggs, "Partial discharge - Part II : Detection Sensitivity", IEEE., EI Magazine, Vol. 6, No. 5, pp. 35-42, 1990.