

# 수치해석프로그램을 이용한 전계분포해석과 부분방전의 발생

이강원, 박철현\*, 강성화\*\*, 임기조\*

한국철도기술연구원, 충북대학교\*, 충청대학\*\*

## Electric field distribution Analysis and Occurrence of Partial Discharge using Numeric Analysis Program

Kang-Won Lee, Cheol-Hyun Park\*, Sung-Hwa Kang\*\* and Kee-joe Lim\*

KRRI, ChungBuk Uni\*, ChungChong College.\*\*

### Abstract

Aspects of PD occurrence from PD sources are different with their physical and structural appearances which cause the variation of electric field distributions of them. This paper have investigated electric field distributions of some kinds of electrode structure by FEM applied analysis program. Numeric analysis is a good method to investigate the electric and magnetic field distribution of partial discharge source. The analysis results were confirmed by real PD occurring situation in the laboratory.

### 1. 서론

부분방전은 절연과파를 일으키는 하나의 주된 요인으로서 알려져 있으며, 부분방전의 원인에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 부분방전의 구조적 다양성과 방전환경에 대한 예측의 어려움등으로 인하여 부분방전의 식별은 매우 어려운 과제중 하나이다.[1,2] 일반적으로 부분방전원으로부터 발생된 부분방전과 관련된 여러 가지 현상을 종합적으로 판단하고 그 원인에 따른 차이점을 분석함으로써 부분방전의 식별이 가능하여 진다.

본 논문에서는 전압이 인가된 부분방전원에서 부분방전의 발생양상을 다르게 하는 요인으로서 부분방전의 구조적 차이 즉 전계분포의 차이를 조사하였다. 실제 환경에서 각 부분방전원별 전계분포를 확인 하는것이 대단히 어려우므로 일반적인 수치해석프로그램을 이용하여 전계분포를 모의전극구조들에 따라 해석하였고, 그 결과를 분석하였다. 분석된 결과에 의하여 각 전극구조별 차이를 확인하고, 이러한 차이가 실질적인 전극구조에서 어떠한 부분방전분포상의 차이를 발생시키는가에 대하여 실험을 통해 확인하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 전계분포해석

전하분포에 의한 전계문제는 실제문제에서 매우 복잡한 전계분포인 경우가 많으므로 적절한 미분방정식을 세우고 이에서 도출한 전위함수에서 전계를 구하는 방법을 이용하고 있다. 전하밀도  $\rho$  [ $C/m^3$ ]가 공간적으로 분포되어 있을 때 전하분포내 한점의 전위  $V[V]$ 를 구하는 일반식으로 2차 편미분 방정식에 의한 Poisson의 방정식이 있으며, 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1)$$

이에 대하여 전하분포 영역밖의 한점의 전위  $V[V]$ 를 생각할 때 그점에는 전하가 없으므로  $\rho=0$ 이 되어 식(2)는 식과 같이 2차 편미분방정식의 Laplace 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

전하분포에 의한 전계는 주어진 경계조건을 이등방성식에 적용하여 얻어진 전위함수를 이용하여 구할수 있다.

## 2.2 실험결과 및 고찰

일반적인 해석툴로서 사용되는 맥스웰해석프로그램을 이용하여 침대 평판, 침대 침, 침대구 그리고 절연체로 이격된 전극구조를 해석하였다. 해석된 각 구조에서의 전계분포, 전기력선의 방향, 전위분포가 관찰되었고, 각 전극의 중심축에서의 전계의 세기에 대한 기울기와 전위크기가 그래프로써 보여진다. 표1은 맥스웰프로그램의 실행에 따른 각 전극구조별 목표오차값(0.1), 최종 에너지오차값, 각 단계별 에너지차, 최종 세분된 미소영역의 개수, 최종에너지값등을 나타내고 있다. 표에서도 알수있듯이 최종 에너지값은  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  정도의 매우 작은값을 보여주고 있다. 해석에 사용된 침전극 및 이격거리 그리고 구의 반지름등은 실제 실험에서 사용된 것과 동일한 치수로서 침전극으로는 끝단반지름을 0.5mm이고, 구의 반지름은 5mm 그리고 이격거리는 10mm로 하였다. 일반적으로 평등전계에서의 공기(상온상압)의 절연파괴전계의 세기는 약 30kV/cm로서 알려져 있다. 그러므로 각 전극에서의 인가된 전압에 따른 최대전계의 세기를 구해보면 그림 1과 같으며, 침대평판의 경우는 4kV에서 30.1kV/cm, 침대구의 경우는 5kV에서 30.55kV/cm, 침대침의 경우는 6.3kV에서 30.35kV/cm, 그리고 표면방전전극의 경우는 2.9kV에서 30.46kV/cm 이었다. 접지로서 사용되는 전극의 반지름의 크기에 따라서 절연파괴전계의 세기를 만드는 인가전압의 크기가 증가하는 것을 볼수 있다. 이것은 전극간 전계의 세기가 정의 전극 끝단의 반지름의 역제곱에 비례하는 한편으로 전극에 축적하는 전하의 크기에 비례하기 때문으로 접지전극의 표면적이 넓으면 넓을수록 정의 전극에서 침끝단의 전계의 세기는 증가하게 되므로 절연파괴전계의 세기를 만드는데 소요되는 인가전압의 크기는 표면적이 줄어들수록 높아지게 된다. 표면방전전극의 경우 절연파괴전계의 세기에 대한 인가전압의 크기는 다른 전극에 비하여 작은 이유는

전극갭으로서 사용된 폴리에틸렌의 두께가 1mm로서 침대평판전극구조에 비하여 이격거리가 짧기 때문이다.

표 1. Simulation convergence data

	needle-plane	needle-sphere	needle-needle	surface
target error(%)	0.1	0.1	0.1	0.1
energy error(%)	0.061	0.0617	0.0591	0.0662
delta energy(%)	0.0762	0.0752	0.0752	0.00998
final triangle	1377	1579	1949	3718
total energy	$5.98 \times 10^{-4}$	$6.79 \times 10^{-6}$	$5.52 \times 10^{-6}$	$2.459 \times 10^{-5}$

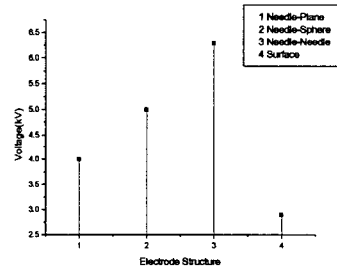


그림 1. Breakdown voltages according to different electrode structure

그러나 폴리에틸렌의 절연파괴강도가 공기중 보다 수십배 크므로 폴리에틸렌에서 절연파괴가 발생하기는 어려우므로, 침전극에서 발생된 방전은 방전 발생이 수월한 폴리에틸렌의 표면을 따라 전개되며 폴리에틸렌의 표면조건에 따라 절연파괴전압은 달라 질 수 있다. 그림 2와 3은 표면방전을 제외한 각 전극구조에 따른 거리별 전계분포 및 전위분포를 나타낸 것이다. 그림 2의 거리에 따른 전위분포의 경우, 침대평판의 경우는 거리에 반비례( $V \propto 1/r$ )하게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 침대구, 침대침의 경우 약 2mm까지는 유사하게 감소하는 경향을 보여주지만 2mm 이상이 되면 약간씩 감소기울기가 차이가 나며 6mm이상의 거리에서는

침대침의 경우가 매우 다른 감소기울기를 나타낸다. 이것은 침대침의 접지전극끝단의 전하집중에 따른 거리에 반비례하여 감소하는 것을 보여주는 것이다. 다른 한편으로 전위의 기울기는 전계의 세기를 나타낸다. 그림 3의 거리에 따른 전계분포에서 침대평판전극의 경우 전계의 세기가 거리의 제곱에 반비례( $E \propto 1/r^2$ )하여 감소하는 것을 나타내고 있고, 침대구의 전극의 경우에는 침단에서 약 2mm 정도 떨어진 거리까지는 침대평판의 경우와 같으나 그이상의 거리에서는 감소가 멈추고 약간 증가하는 경향을 보여주며, 침대침의 경우도 2mm의 거리까지는 침대평판전극의 경우와 같으나 그이상의 거리에서는 침대구의 경우보다 더 크게 전계의 세기가 증가하여 정의 전극끝단의 전계의 세기와 거의 유사한 크기를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 그 원인으로는 정의 전극 끝단에 집중된 전하에 대해 접지전극의 표면적이 감소됨에 따른 유도전하의 집중에 의해 즉 접지전극 끝단의 반지름이 감소함에 따라 전계의 세기가 다시 증가하는 경향을 보여주는 것이다. 그림 4(a), (b), (c), (d)는 각 전극구조별 전계분포, 전기력선의 방향, 전위분포를 전체적으로 보여주고 있다. 이와 같이 전계분포는 전극구조에 따라 차이를 보여주며, 이러한 차이는 전자의 발생에 따른 전자의 가속, 감속, 2차전자방출, 재결합등에 영향을 나타내며 또한 이온화된 공간전하의 분포에도 영향을 주게 되며, 결과적으로 각 전극구조에서 발생하는 방전전하의 특성을 좌우하는 요인으로서 크게 작용한다.

방전전하의 특성은 방전전류로서 외부로 방사되는 전자기파에 영향을 주게 되어 광대역 안테나에 측정되는 신호파형에 차이를 나타내게 된다. 그러나 이러한 전계분포의 해석은 표면방전의 발생양상을 설명하기에는 매우 미흡하다고 볼 수 있으므로, 표면방전의 경우는 전극구조의 차이와는 별도로 방전로의 구조 및 오손종류 및 정도의 차이를 부가적으로 고려해야 한다. 공기중의 고체유전체 표면의 연면방전을 고려한 그림 4(d)의 경우는 공기중의 고체유전체 표면의 연면방전을 고려한 것으로서 정의 전극 주변에 있어 전계의 세기가 크고 전기력선이 밀집하며 또 유전체의 표면에 직각에 가까운 각도를 이루고 있다. 따라서 정의 전극 주변에 코로나 방전이 발생하면, 유전체의 표면에 전하가 축적되어 이 때문에 고체절연물 즉 폴리에틸렌

의 표면에 연하여 스파이크방전이 진전하기 쉽게 된다. 특히 교류전압에 인가된 경우에는 정의 전극과 부의 전극사이에 가해지는 전압은 반주기마다 극성이 변하므로 정의전극이 정인 반주기에 고체절연물의 표면에 정의 전하가 축적되고 다음반주기에 정의 전극이 부가 되면 정의 전극과 고체절연물의 표면간에 전위차는 전하가 없는 경우에 비하여 상당히 높게 된다. 이 때문에 코로나가 발달하고 정의 전하를 중화한후에 더욱먼곳에 부의 전하를 남긴다.

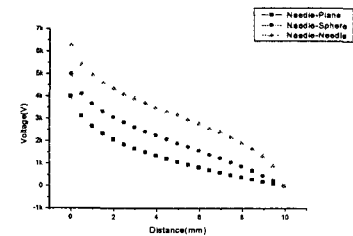


그림 2. Potential distributions of electrode structures depending on gap distance

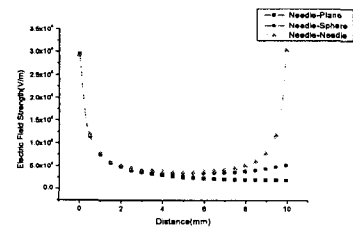
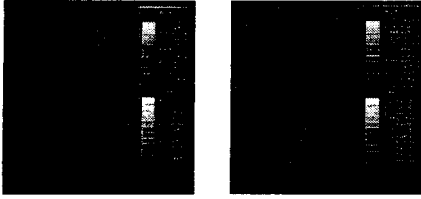
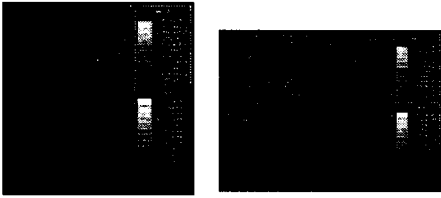


그림 3. Electric strengths of electrode structures depending on gap distance

다음으로는 각 전극구조별 전계분포의 차이에 따른 실제 모의전극상에서의 부분방전발생양상을 살펴보기 위한 실험을 행하였으며, 본 실험에서는 침대침, 침대평판, 침대구의 세가지 전극구조를 사용하여 부분방전발생양상의 전극구조에 따른 차이를 확인하였다. 표면방전의 경우는 방전진행경로의 차이로서 해석되므로 향후 관련실험에서 좀 더 심도 있게 살펴보기 위하여 본 실험에서는 제외하였다. IEC60270에 따라서 제작된 기존의 부분방전계측기를 이용하여 5kV(60Hz)를 인가한 경우에 측정된  $\phi-q-n$ 분포를 각 전극구조에 따라 구성하였으며, 그림 5에 이들을 나타내었다.



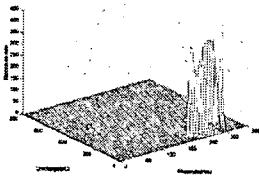
(a) Needle to Plane (b) Needle to Sphere



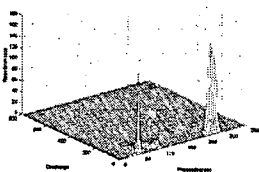
(c) Needle to Needle (d) Surface discharge

그림 4. Simulation results of electrode structures

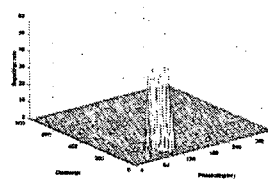
그림 5(a)의 침대평판구조에서의  $\phi-q-n$ 분포에서는 부 주기에서 방전전하량은 작으나 방전빈도수가 매우 높다는 것을 알 수 있으며, 이것은 침전극에서 발생된 trichel pulse 방전에 의한 것이며, 정 주기에서는 방전이 있으나 방전빈도가 낮은 것을 알 수 있다. 그림 5(b)의 침대 침전극의 경우에  $\phi-q-n$ 분포에서는 정 주기와 부 주기에서 거의 유사한 분포를 보여주고 있으며, 부 주기가 정 주기보다 약간 넓은 위상각에 걸쳐 있는 것은 고압부의 침전극의 반지름과 접지부의 침전극의 반지름이 서로 일치하지 않기 때문이다.



(a) Needle-Plane



(b) Needle-Needle



(c) Needle-Sphere

그림 5. Distributions of electrode structures

침대침전극의 경우에는 그림 5(b)에서 보여준 분포를 거친후 바로 스파크방전을 일으키며 침전극 사이에 절연파괴가 발생되었다. 그림 5(c)의 침대구전극에서의  $\phi-q-n$ 분포인 경우에는 침대평판의 경우와는 달리 정주기에서 주로 방전이 발생하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 서로 다른 전극구조는 전계분포가 상이하므로 서로 다른 분포를 보여주고 있다.

### 3. 결론

부분방전원의 물리적, 구조적차이에 따라 전계분포의 차이가 발생하지만, 실제 부분방전원의 구조 및 환경은 복잡다양하므로, 이를 단순화한 전극구조를 모의하고 각 구조에 대한 전계분포를 컴퓨터를 이용한 수치해석프로그램으로서 먼저 해석하였는데 그 결과는 실제 실험에서 얻어진 결과들과 매우 유사하게 나왔다. 전계분포에 대한 해석결과는 전극구조별 차이가 발생한다는 것을 보여주었으며, 이러한 결과를 토대로 실제 모의 전극하에서의 부분방전분포를 확인하였으며, 각 전극구조별 분포의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] F. H. Kreuger, E. Gulski, A. Krivda "Classification of Partial Discharges", IEEE Trans. on EI, Vol. 28 No. 6, December 1993, pp 917 - 929
- [2] E. Gulski, F. H. Kreuger "Computer-aided recognition of Discharge Sources" IEEE Trans. on EI, Vol. 27, No.1 February 1992, pp 82 - 96