

다중물리해석기법에 의한 이온의 해리 및 열특성을 고려한 유전체의 방전해석

이호영, 이세희
경북대학교

Discharge Analysis in Dielectric Media Considering Ionic Dissociation And Thermal Characteristics Employing Multiphysics Analyzing Technique

Ho-Young Lee, Se-Hee Lee
Kyungpook National University

Abstract - 분자의 전리(ionization)작용과 이온의 해리(dissociation)작용에 의한 유전체 내 방전해석을 위해서 전자, 양이온, 음이온의 생성과 소멸, 전자부착, 재결합 과정을 포함한 전하연속방정식, 전계에 의한 푸아송 방정식, 유전체 온도에 관한 열확산 방정식을 결합하여 해석하였다. 전계 방출 조건과 열전자 방출 조건이 경계조건으로 부여되었고 에너지 최소화 정류조건을 따르는 유한요소법(finite element method)을 이용하여 해석하였다. 비교적 작은 값을 가지는 확산성을 무시하고 대류성에 역점을 두어 발생하는 수치적 불안정은 인공확산항(artificial diffusion technique)을 도입하여 안정화하였다. 본 논문에서는 IEC standard 60897의 표준규격에 따른 2차원 축대칭 침-구 전극에 적용하여 제안된 다중물리해석기법의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

전력수요가 급격히 증가함에 따라 전력기기는 고효율을 목적으로 소형화, 대용량화 되므로 절연체에 대한 관심이 높아진다. 특히 절연유체는 고전력기기의 냉각과 전기절연특성을 높이기 위해 폭넓게 사용되어지고 있다. 절연유체에서 절연과괴 현상은 고체와 같이 규칙적이지 않고 불순물의 영향이나 전극표면의 상태에 따라 전기전도 특성이 상당히 다르고 복잡하다. 본 논문에서는 고전계 환경에서의 유전체 내 절연과괴현상이 발생할 경우 전자, 양이온, 음이온들의 물리적, 화학적 작용을 고려한 수학적 모델링을 통해 다중물리현상을 모의 해석하였다. 수치해석모델은 절연유체로 채워진 IEC standard 60897 침-구 전극이 도입되었고 300 kV의 뇌임펄스(1.2/50 μs) 전압원을 인가하였다[1]. 유전체로 고려된 절연유체는 불순물이나 수분을 함유하지 않은 순수 변압기유가 고려되었다.

2. 본 론

2.1 전기장과 온도에 의한 수학적 모델링

뇌임펄스에 의한 공간전하 전파해석은 전계에 의한 분자의 전리작용, 이온의 해리 작용, 생성된 전하들의 재결합, 전자 부착현상, 전계-열전자에 의한 전자 주입, 전하들의 운동으로 인한 유전체 내 온도 상승을 모두 고려한 복합 다중물리현상이다. 전계는 유전체의 유전율과 공간전하를 고려하여 가우스법칙으로부터 유도된 푸아송방정식으로 해석이 되며 다음과 같다[2-3].

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = \rho_+ + \rho_- + \rho_e \tag{1}$$

여기서 ϵ 는 유전체의 유전율, V 는 전위, ρ_+ , ρ_- , ρ_e 는 전자, 양이온, 음이온의 전하 밀도를 나타낸다. 전기장은 스칼라 퍼텐셜의 기울기 연산값으로 $\vec{E} = -\nabla V$ 이다. 유체역학 방정식을 이용한 전계에 의한 방전현상의 모델링에서 유전체 내 양이온, 음이온, 전자에 대한 3개의 전하연속방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_+}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{J}_+) = G_I(|\vec{E}|) + G_D(|\vec{E}|) + \frac{\rho_+ \rho_e R_{+e}}{e} + \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{e} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho_-}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{J}_-) = \frac{\rho_e}{\tau_a} - G_D(|\vec{E}|) - \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{e} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{J}_e) = -G_I(|\vec{E}|) - \frac{\rho_+ \rho_e R_{+e}}{e} - \frac{\rho_e}{\tau_a} \tag{4}$$

여기서 \vec{J}_+ , \vec{J}_- , \vec{J}_e 는 양이온, 음이온, 전자의 전류밀도, $G_I(|\vec{E}|)$ 는 전계에 반응하는 유전체 내 분자의 전리 항, $G_D(|\vec{E}|)$ 는 해리 소스 항, R_{+e} , R_{+-} 는 절연유체 내 이온-이온, 이온-전자의 재결합 비율상수, e

는 전자 전하의 크기, τ_a 는 유전체 내 전자가 중성종(neutral species)에 부착하여 소멸하는 전자수명을 나타낸다. 또한 고전계가 인가된 유전체 내에서는 전하들의 물리적작용으로 인해 온도에 대한 전기적 전력 손실이 발생하며 온사거 이론에 따라 다음에 주어진 열 확산 방정식으로 표현할 수 있다[3-4].

$$\rho_l c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = k_T \nabla^2 T + \phi_d \tag{5}$$

여기서 ρ_l 는 절연유전체의 질량밀도, c_v 는 비열, T 는 유전체의 절대온도, \vec{v} 는 유전체 유동흐름속도, k_T 는 열 확산 상수를 나타낸다. 본 논문에서는 유전체 내 유동흐름이 없다고 가정을 하면 ϕ_d 는 유전체 내 대류, 전도현상을 포함한 에너지 손실 항을 반영하며, $\vec{E} \cdot \vec{J}_o$ 로 가정한다. 여기서 $\vec{J} = (\rho_+ \mu_+ - \rho_- \mu_- - \rho_e \mu_e) \vec{E}$ 는 온도 변화에 영향을 미치는 자유전하들의 운동을 고려한 전체 전류밀도를 나타낸다.

전자 주입 모델은 유전체 내에서 전하가 주입되지 않고 부극성 바이스가 걸린 극판에서 직접적으로 주입된다. 따라서 본 논문은 전계에 의한 전계 방출 조건과 온도에 의한 열전자 방출 조건이 경계조건으로 고려되었다.

2.2 이온의 해리 작용

온사거(L. Onsager)는 약전해질의 유전체에서 전계의 영향으로 인한 이온의 해리 작용을 전도성변화로 설명하였다[4]. 안정된 전해질에서는 화학 결합력의 원인인 원자에 전기적인 인력이 발생하여 양이온과 음이온이 서로 끌어당겨 중화 상태를 유지하며 많은 중성의 이온쌍을 가지고 있다. 외부에서 화학 결합력보다 큰 전기적인 힘이 가해지면 중성 이온쌍은 양이온과 음이온으로 분리된다. 이렇게 화학적으로 결합해 있는 양이온과 음이온의 쌍을 자유 이온전하로 해리시키는 비율과 자유 이온전하를 중성의 이온쌍으로 재결합시키는 비율은 각각 운동 비율 상수 K_D , K_R 로 조절되어지며 전계의 영향을 받는 해리 상수의 표현은 다음과 같다.

$$K_D(|\vec{E}|) = K_D^0 F(|\vec{E}|) \tag{6}$$

여기서 K_D^0 는 외부의 전기적인 에너지가 작용하지 않을 때의 해리상수, $F(|\vec{E}|)$ 는 전계에 의한 함수로 나타낸다. 전계레벨에 따라 해리상수는 변화할 수 있으며 다음과 같이 표현한다.

$$F(|\vec{E}|) = \frac{I_1(4b)}{2b} \tag{7}$$

$$\text{with } b = \sqrt{\frac{e^3 |\vec{E}|}{16\pi\epsilon k^2 T^2}}$$

여기서 I_1 는 제 1종 변형 베셀 함수(modified Bessel function of the first kind), k 는 볼츠만 상수, T 는 절연유체의 절대온도를 나타낸다. 해리상수는 인가된 전계의 영향과 열특성에 관계하는 온도에 의해 정의된다. 온사거 이론에 따라 열적평형상태이고 전계의 영향이 없을 때, 유전체 내 중성 이온쌍의 밀도를 고려해서 다양한 유전체에 적용가능하게 수정하여 제시하면 다음과 같다.

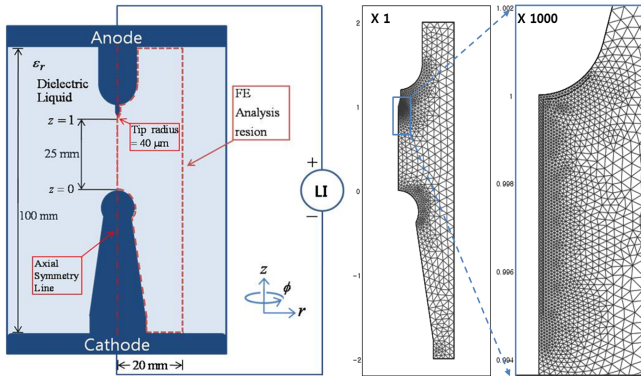
$$G_D(|\vec{E}|) = ecK_D^0 F(|\vec{E}|) \tag{8}$$

여기서 c 는 중성 이온쌍의 농도를 나타낸다. 본 논문에서 K_D 는 전계와

온도에 의해 가변적인 영향을 받지만 K_R 은 전계에 영향을 받지 않는다고 가정한다.

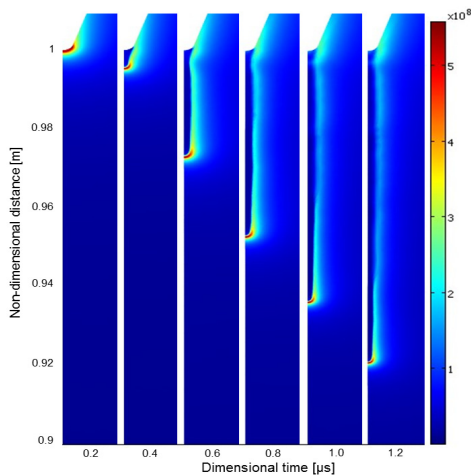
2.3 수치 해석 결과

시뮬레이션 과정의 1단계는 해석영역의 공간차원을 결정하는 것이다. 본 논문의 경우 2차원 축대칭을 고려하였는데 공간 내 회전대칭을 통한 3차원으로의 확장이 용이할 뿐만 아니라 2차원 요소망을 사용함으로써 컴퓨터 연산능력을 극대화 시킬 수 있다. 수치 해석 모델은 침-구형 전극으로 구성된 IEC standard #60897 모델을 도입하였다. 침 전극의 반경은 $40 \mu\text{m}$, 구 전극의 반경은 6.35 mm , 전극간의 거리는 25 mm 로 설계되었다. 그림 1은 표준규격에 따라 설계된 해석모델과 정극성 스트리머가 형성되어 국부적으로 진행될 전극형상의 요소망 분포를 배율에 따라 나타내었다.

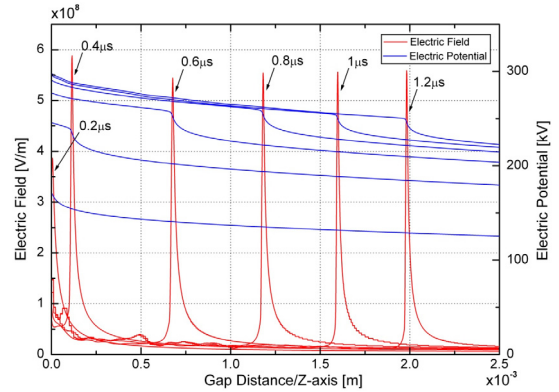


(a) IEC standard #60897 (b) 국부 요소망 생성
 <그림 1> 수치 해석 모델(침-구) 및 요소망 분포

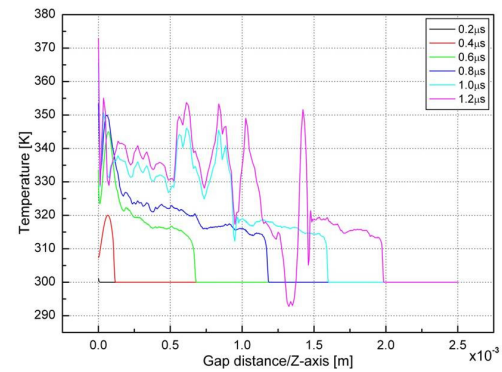
정극성 스트리머의 경우 고전계영역에서 복합 다중물리현상이 발생하므로 그 특정영역의 물리적, 화학적 운동이 잘 반영할 수 있는 많은 질점과 요소가 요구된다. 순간적으로 강한 전계가 전극간에 형성되면 스트리머가 형성되어 분자의 전리작용, 이온의 해리작용, 전하의 재결합, 전자부착현상이 진행된다. 그림 2는 전계에 의한 분자의 전리작용과 이온의 해리작용으로 인한 전계와 전파를 나타낸다. 일반적으로 침-구형 전극에서는 국부적인 불평등 전계가 형성되어 스트리머가 발생된다. 방전 초기 침전극에 전계가 집중되고 시간이 지남에 따라 구형전극으로 전파하는데 공간전하의 영향으로 사료된다. 그림 3은 뇌임펄스가 인가된 침-구형 전극간의 시간에 따른 전위분포와 전계분포를 나타낸다. 절연유체 내 정극성 스트리머의 전계파는 평균 $5 \times 10^8 \text{ V/m}$ 의 전계레벨로 전파하며 전위와 전계 최대치가 정확히 일치함을 보여준다. 또한 전계파의 평균속도를 추정하면 1.5 km/s 로 나타나며 동일모델의 실험값과 비교하여 시뮬레이션의 타당성을 증명한다[5]. 그림 4는 열전자 방출 조건에 입각하여 주입된 전자와 전계의 영향으로 생성된 전자의 영향으로 인한 온도변화를 나타낸다. 침 전극으로부터 유전체로 전자가 주입되어 중성입자와 충돌하면 자유전하가 발생된다. 자유전하들의 생성과정에서 침전극 주변의 온도상승도 동반되며 실온(300K)에서 수행한 수치해석 결과 약 350 K 이상까지 온도가 상승하며 이온의 해리작용으로 인한 온도상승으로 사료된다.



<그림 2> 시간에 따른 전계파 전파



<그림 3> 시간에 따른 전위분포와 전계분포



<그림 4> 시간에 따른 온도분포

3. 결 론

절연유체에 전계를 인가하면 전극으로부터 전자방출이 발생하게 되며 전자와 중성입자들과의 충돌과정에서 여기, 전리, 해리, 재결합, 전자부착현상이 발생한다. 본 논문에서 수행한 수치해석방법은 절연유체 내 공간전하 해석을 위해 고전계하의 전계 방출과 열전자 방출을 고려하였고 전자, 양이온, 음이온에 대한 모두 세 개의 미지수로 구성된 전하 연속방정식을 전계 변화와 결합하여 정극성 스트리머의 발생과정 뿐만 아니라 전파하는 현상까지 효과적으로 해석하였다. 본 논문은 다중물리해석기법을 통해 유전체에서의 시뮬레이션과 실험적 결과와 비교분석하여 신뢰성있는 수치해석기법에 제시되었다. 또한 고전압, 대전류 환경에서 사용되고 있는 고전력기기의 전산 수치 해석시스템으로 확대되는 디딤돌이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0002977).

[참 고 문 헌]

- [1] IEC standard # 60897, Methods for the Determination of the Lightning Impulse Breakdown Voltage of Insulating Liquids, 1987.
- [2] Ho-Young Lee, Se-Hee Lee, "Hydrodynamic Modeling for Discharge analysis in Dielectric Medium with the Finite Element Method under Lightning Impulse," JET, Vol. 6, No. 3, pp. 397-401, 2011.
- [3] Francis O'Sullivan, Se-Hee Lee, Markus Zahn, "Modeling the Effect of Ionic Dissociation on Charge Transport in Transformer Oil," Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 756-759, 2006.
- [4] L. Onsager, "Deviations from Ohm's Law in Weak Electrolytes," J. Chem. Phys., Vol. 2, pp. 599-615, 1934.
- [5] V. Segal et. al., "AC(60Hz) and Impulse Breakdown Strength of a Colloidal Fluid Based on Transformer Oil and Magnetite Nanoparticles," IEEE Int. Symp. On Elec. Insul., Arlington, Virginia, USA, June7-10,1998.