

유한요소법을 이용한 일반화된 에너지법과 옴의 적분법에 의한 방전 전류 계산

논 문
60-2-21

Evaluation of Discharge Current Employing Generalized Energy Method and Integral Ohm's Law Using Finite Element Method

이 호 영* · 김 홍 준** · 이 세 희†
(Ho-Young Lee · Hong-Joon Kim · Se-Hee Lee)

Abstract - The terminal current in voltage driven systems is an essential role for characterizing the pattern of electric discharge such as corona, breakdown, etc. Until now, to evaluate this terminal current, Sato's equation has been widely used in areas of high voltage and plasma discharge. Basically Sato's equation was derived by using the energy balance equation and its final form described physical meaning explicitly. To give more general abilities in Sato's equation, we present a generalized approach by directly using the Poynting's theorem incorporating the finite element method. When the magnetic field effect or the time-dependent voltage source is considered, this generalized energy method can be easily applicable to those problems with any dielectric media such as gas, fluid, and solid. As an alternative approach, the integral Ohm's law resulting in small numerical errors has an ability to be applied to multi-port systems. To test the generalized energy method and integral Ohm's law, first, the results from two proposed methods were compared to those from Sato's approach and an analytic solution in parallel plane electrodes. After verification, the generalized method was applied to the tip-sphere electrodes for evaluating the terminal current with three carriers and the Fowler-Nordheim field emission condition. From these results, we concluded that the generalized energy method can be a consistent technique for evaluating the discharge current with various dielectric materials or large magnetic field.

Key Words : Discharge current, Energy method, integral Ohm's law, Poynting's theorem, Finite element method

1. 서 론

일반적으로 고전압 절연과피 실험은 인가된 전압에 따른 시스템의 절연과피 내력을 측정하는 것으로 절연과피가 진행됨에 따라 급격한 절연과피 전류의 증가가 발생한다[1-2]. 현재까지 기체 방전 분야와 플라즈마 전산해석분야에서는 방전전류 계산 시 사토(N. Sato)에 의해 제시된 전류방정식을 주로 사용하고 있다[3-4]. 사토에 의해 제시된 전류계산법은 기본적으로 에너지보존법칙에 근거하고 있어 일반성을 띄고 있으나 식 전개과정에서 기중방전으로 국한하여 최종 형태의 표현식은 다양한 매질에 대해 범용적으로 사용할 수 없는 단점을 지니고 있다. 또한 사토의 방정식은 위와 같은 이유로 전기장만 고려하고 있어, 아크와 같이 공간전류가 강하게 분포하여 자기장의 변화가 두드러지는 방전현상의 경우에도 또한 적용할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 다양한 매질과 여러 방전 현상에 대해 포괄적으로 적용이 가능한 전류계산법을 제시하기 위하여 포인팅 정리로 표현되는 에너지보존법칙을 이용하여

보다 일반화된 전류계산방법인 에너지법을 제시하고자 하였다. 여기서는 해석 시 이산화 방법으로 유한요소법을 이용하였는데 이는 에너지 최소화 정류조건을 따르고 있으므로 일반적으로 에너지와 같은 전체적인 양을 계산할 경우 수치적으로 보다 안정적인 결과를 보여주는 것으로 알려져 있어 일반화된 에너지법과 서로 적합할 것으로 판단된다[5-6]. 또한 직관적인 방식으로 전류를 계산하는 방법인 옴의 적분법칙은 아직까지 유한요소법과 결합하여 수치적으로 적용된 사례가 문헌에서 보고되지 않은 것으로 보이며, 본 논문에서는 실제 사례에 적용하여 각 방법들 사이의 장단점에 대해 논의하였다.

각 방법들의 비교를 수행하기 위해서 우선적으로 두 평행 평판 전극에서 계단입력 전압원을 인가하여 얻어지는 방전 전류를 비교하였다. 이 경우는 단순한 해석모델로서 단일 캐리어에 의한 전류의 흐름을 가정하였으며 수치적으로 서로 다른 방법뿐만 아니라 이론식과의 비교를 통해서 해의 타당성을 검증하고자 하였다[7]. 그 다음 해석모델로 절연유체로 채워진 IEC 60897 침-구 전극에 대하여 뇌입펄스 전압원을 인가한 경우 전류형태를 분석하였다. 이 때 방전해석 모델은 세 개의 이종 캐리어로 양이온, 음이온, 전자가 모두 고려되었다. 여기서 절연유체 내 절연과피 현상이 진행되면 전극으로부터 전자 방출이 발생하고, 이로 인한 전자, 이온, 분자사이의 충돌과정에서 여기, 전리, 해리, 재결합 등의 현상이 발생한다. 이 모델에서는 이러한 현상들을 모두 고려하여 방전현상을 해석하였으며, 일반화된 에너지법과

* 준 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사과정

** 정 회 원 : 미국 City University of New York 전기공학과 조교수

† 교신저자, 정희원 : 경북대학교 IT대학 전기공학과 조교수
E-mail : shlees@knu.ac.kr

접수일자 : 2010년 1월 11일

최종완료 : 2010년 1월 18일

음의 적분법에 따른 전류 계산을 유한요소법과 결합하여 수행하였다.

2. 방전해석 모델 및 전류계산법

2.1 전자기 유체역학 모델

절연유체 내 공간전하 전파해석은 전계에 의한 분자의 전리작용, 이온의 해리작용, 생성된 전하들의 재결합, 전자 부착현상, 전계-열 전자에 의한 전자주입, 전하들의 운동으로 인한 절연유체 내 온도 변화까지 고려해야하는 복합 다중물리현상이다. 전계는 절연유체의 유전율과 공간전하를 고려하여 전계에 의한 푸아송 방정식으로 해석되며 다음과 같이 표현된다.

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = \rho_+ + \rho_- + \rho_e \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 절연유체의 유전율, V 는 전위, ρ_+ , ρ_- , ρ_e 는 각각 양이온, 음이온, 전자의 전하밀도를 나타낸다. 전기장은 스칼라 전위의 기울기 연산 값으로 $\vec{E} = -\nabla V$ 이다. 전자기유체역학 방정식을 이용한 전계에 의한 방전현상의 모델링에서 절연유체 내 양이온, 음이온, 전자에 대한 3개의 전하연속방정식을 표현하면 다음과 같다[8-9].

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

$$\frac{\partial \rho_-}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_- = \frac{\rho_e}{\tau_a} - \frac{\rho_+ \rho_- R_{\pm}}{e} \quad (3)$$

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

여기서 t 는 시간, 양이온, 음이온, 전자의 전류밀도는 전하밀도와 각 전하 속도의 곱으로 $\vec{J}_+ = \rho_+ \mu_+ \vec{E}$, $\vec{J}_- = -\rho_- \mu_- \vec{E}$, $\vec{J}_e = -\rho_e \mu_e \vec{E}$ 로 나타낸다. $G_I(|\vec{E}|)$ 는 전하생성 물리현상 중 가장 영향력 있는 전자의 전리작용, τ_a 는 절연유체 내 전자가 중성 종에 부착하여 소멸됨을 표현하는 전자수명시간, R_{\pm} , R_{+e} 는 절연유체 내 이온-이온, 이온-전자의 중화하는 재결합 비율상수로 전리공간에서 랑제방 재결합 비율상수를 이용하여 $R_{\pm} = R_{+e}$ 로 나타낸다. 절연유체 내 절연과피현상에서 유체가 어떤 적절한 속도를 가진 운동이 없다고 가정하면 절연유체의 온도에 대한 전기적 전력 손실의 영향은 다음에 주어진 열 확산 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\rho_e c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = K_T \nabla^2 T + \phi_d \quad (5)$$

여기서 T 는 유체의 절대온도, \vec{v} 는 유체의 속도, K_T 는 유체의 열 확산성, ρ_e 는 유체의 밀도, c_v 는 유체의 비열, ϕ_d 는 열소스 항이다. 방정식 (5)에서 ϕ_d 는 전도현상을 포함한 에너지 손실 항을 반영하며, $\vec{E} \cdot \vec{J}$ 로 표현된다. 여기서 $\vec{J} = (\rho_+ \mu_+ - \rho_- \mu_- - \rho_e \mu_e) \vec{E}$ 로 전체 전류 밀도이며 국부 전계의 영향으로 인한 자유전하 운동의 결과이다.

2.2 사토 방정식에 의한 전류 계산

에너지 보존방정식으로부터 유도된 이 방정식은 기본적으로 기중에 대하여 적용되어, 해석적으로 도출된 일반적으로 널리 사용되어오는 식이다. 처음 발표당시 시간 변화항이 고려되지 않았다가 최근 수정보완 되면서 식 (6)과 같이 시간에 대한 전계의 미분항이 추가되었다[4].

$$I = \frac{1}{V_a} \int_{\Omega} \vec{J}_e \cdot \vec{E}_L dv + \frac{\epsilon}{V_a} \int_{\Omega} \frac{\partial \vec{E}_L}{\partial t} \cdot \vec{v} \vec{E}_L dv \quad (6)$$

여기서 V_a 는 인가된 전압, \vec{J}_e 는 전도 전류, \vec{E}_L 은 라플라스 방정식으로 유도된 전계의 세기, $\int_{\Omega} dv$ 는 방전 공간의 체적 적분을 나타낸다.

2.3 음의 적분법에 의한 전류 계산

음의 적분법은 보다 직관적이고 직접적인 방법으로 방전 공간을 가로지르는 물리량의 면적분을 통하여 전류를 계산하는 방식이다. 이는 임의의 적분면에 대해 유입되는 전체 전류를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$I = \int_S \left(\vec{J}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{a} \quad (7)$$

여기서 \vec{D} 는 인가된 전압과 공간 전하 분포에 의한 전속밀도, $\int_S d\vec{a}$ 는 해당 전극 또는 방전공간 상의 면적분을 나타낸다. 음의 적분법은 다양한 적분 경로를 임의로 취할 수 있어 비교적 쉽게 적용이 가능하며 다 채널의 전원 전극이 있는 경우에도 해당 전극만 적분을 취하기 때문에 전류의 분배 특성을 확인할 수 있는 유용한 방법이다.

2.4 에너지법에 의한 전류 계산

절연유체에서 절연과피현상이 발생하면 스트리머 채널이 형성되어 채널을 따라 자유전하가 이동하게 되고 전류가 급격하게 증가한다. 일반적으로 절연과피실험을 수행하게 되면 절연과피전압과 절연과피 시 전극 간에 흐르는 전류를 측정할 수 있다. 이때 전자기 에너지의 흐름을 수반하게 되는데 입력된 에너지와 저장 및 소비되는 에너지의 보존관계를 이용한 방법이 일반화된 에너지법이다.

이는 결과적으로 포인팅정리로 표현되며, 단자 전류계산은 임의의 체적 내 전력, 에너지 밀도의 체적 적분으로 계산된다. 이 단자전류 계산법은 체적 내에서 발생된 전계와 자계의 영향을 모두 고려한다. 전계의 영향을 고려한 전체 에너지는 체적 내 모든 점에서 국부 에너지 밀도 $W [J/m^3]$ 가 공간에 분포하고 있다. 또한 전력 손실은 $P_D [J/m^3s]$ 의 비율로 체적 내 임의의 모든 점에서 발생한다. 방전현상이 진행하면서 에너지는 기본적으로 전기장의 형태로 공간상에 저장되지만, 방전전류가 크게 형성되면 자기장의 형태로도 공간상에 저장이 이루어지게 되며, 에너지보존 방정식에서 두 가지 형태의 에너지를 모두 고려하여야 한다. 따라서 전계와 자계의 영향을 고려한 전체 에너지 밀도와 전력 손실은 다음과 같이 표현된다.

$$W = \frac{1}{2}(\epsilon \vec{E} \cdot \vec{E} + \mu \vec{H} \cdot \vec{H}) \quad (8)$$

$$P_D = \vec{E} \cdot \vec{J}_f = \vec{E} \cdot \sum \rho_{fi} \vec{v}_{fi} \quad (9)$$

여기서 μ 는 자기 투자율, \vec{J}_f 는 자유 전하에 의한 전류밀도, ρ_{fi} 는 자유 전하 캐리어, \vec{v}_{fi} 는 자유 전하 캐리어의 속도를 나타내는 것으로 $\vec{v}_{fi} = \mu_{\pm e} \vec{E}$ 의 관계를 가지며 $\mu_{\pm e}$ 는 양이온, 음이온, 전자의 이동도를 나타낸다. 절연유체 내 방전은 전기적으로 전도 전류가 흐르는 것으로 볼 수 있으므로 전력 손실의 대부분은 전도전류와 전기의 스칼라 내적으로 계산된다. 최종적으로 준정자장 근사를 통하여 단자의 전압, 전류형태로 식을 표현하면 입력되는 전력은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i=1}^n v_i i_i = \frac{d}{dt} \int_V W dV + \int_V P_D dV \quad (10)$$

여기서 v_i 는 단자에 인가되는 전압, i_i 는 그 단자에 흐르는 전류이다. 본 논문에서는 자계의 세기에 의한 효과는 고려되지 않으므로 에너지 밀도 항에서 $\vec{H}=0$ 이며 전기에너지 밀도만 고려하였다.

3. 단일 전하의 평판전극에서의 검증

매질 내 한 개의 공간 전하만 존재하는 문제에서 지배방정식은 전기에 관한 푸아송 방정식과 하나의 전하 캐리어에 관한 연속방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla V) = \rho \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mu \vec{E}) = 0 \quad (12)$$

여기서 식 (11), (12)의 경계조건은 $x=0$ 에서 $V=V_0$, $x=d$ 에서 $V=0$ 로 인가되며, 그림 1과 같이 $x=0$ 인 전극에 선형전하주입 조건인 $\rho = A|\vec{E}|$ 이 부여되었다. 여기서 A 는 상수로서 주입 전하 상수이다. 해석모델의 구조는 그림 1과 같이 유전율을 가진 매질에 μ 의 이동도를 가진 전하를 $x=0$ 인 전극에 주입하는 2차원 무한평판 형상구조이며 수치해석에서 기본 단위는 SI단위계를 고려하였다.

해석수행 결과 각 방법에 따른 단자전류를 그림 2에 나타내었는데 각 전류계산 방법은 2장에서 기술하였던 사토의 전류계산법, 옴의 적분법에 의한 전류계산법, 에너지법에 의한 단자 전류 계산법을 이용하였다. 이러한 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 동일한 입력과 기하학적 모델에 대해 해석적으로 얻어진 결과와 비교하였는데 그림 2에서는 해석적해(analytic solution)로 표시하였다. 결과에서 알 수 있듯이 각 접근법 중 사토의 전류계산법 및 에너지법에 의한 접근은 수치적으로 안정된 결과를 나타내며 해석해와 잘 일치하므로 수치적으로 적합한 방법으로 사료된다. 한편, 옴의 적분법칙은 대체로 무난한 결과를 보여주고 있으나, 그림 2에서처럼 양극 및 음극판에서 적분된 두 가지의 경우를

비교하면 각각 초기 전하 주입 시와 극판 도달 시에 다소 수치적으로 불안정한 양상을 보여주고 있어 국부적인 요소망의 형태에 직접적으로 영향을 받는 것을 알 수 있다.

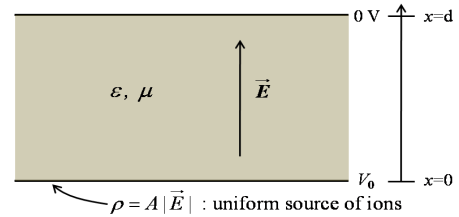


그림 1 2차원 무한평판 모델의 단일 공간전하 해석
Fig. 1 Unipolar space charge analysis in 2D infinite plane-model

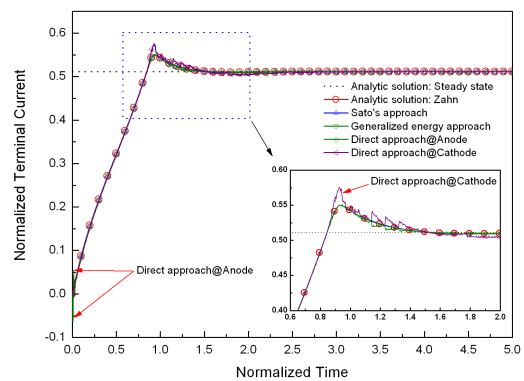


그림 2 무차원 선형 주입 상수($\tilde{A}=1$)가 고려된 다양한 전류 계산법에 의한 무차원 단자 전류 계산
Fig. 2 Normalized terminal current profiles from the various methods with normalized linear charge injection constant $\tilde{A}=1$

4. 실 방전모델에서의 방전전류 해석

유체 내 방전 현상을 기술하기 위해서는 보다 복잡한 해석 모델을 구축하여야 하는데 본 논문은 방전전류의 계산법과 각 방법들 간의 비교를 다루므로 자세한 방전현상 해석모델링 기법은 생략하고 방전전류를 계산하기 위한 최소한의 내용만 다루기로 한다.

유체방전은 최근 설리반(F. O'Sullivan)의 연구에서 보여진 것처럼 전기에 의한 분자 전리는 절연유체 내에서 정극성 스트리머를 유도하는 중요한 메커니즘으로 보고되었다[8]. 매우 빠른 속도를 가진 전자들은 빠르게 전리 영역으로 들어가고 낮은 속도를 가진 양이온은 상대적으로 느린 속도로 전리 영역으로 흡수되어 전체 공간 전하는 빠르게 절연유체 내에서 증가한다. 이런 전하들은 절연유체 내에서 전기의 분포에 절대적인 영향을 미치고 전하들에 의해 유도된 전기장은 양전극에서 음전극으로 이동하게 된다. 전기에 의한 분자 전리 소스 항은 제너의 전자 터널링 이론을 이용하여 절연유체 내 분자 이온화 모델로 적용하였다[8].

$$G_I(\vec{E}) = \frac{e^2 n_0 a |\vec{E}|}{h} \exp\left(-\frac{m^* a \pi^2 \Delta^2}{ch^2 |\vec{E}|}\right) \quad (13)$$

여기서 n_0 는 절연유체의 중에 따라 전리할 수 있는 분자의 밀도 수로 $1 \times 10^{21} m^{-3}$, a 는 분자 분리 상수로 $3 \times 10^{-10} m$, m^* 은 절연유체 내 효과적인 전자의 질량인 $9.1 \times 10^{-32} kg$, h 는 플랑크 상수, Δ 은 분자 전리 에너지 $7.1 eV$ 이다.

절연유체 내 절연과피 모의시험 과정의 1단계는 해석영역의 공간차원을 결정하는 것이다. 본 논문의 경우 그림 3에서 보는 바와 같이 $1.2\mu s/50\mu s$ 너임펄스 전압원을 입력으로 하는 2차원 축대칭으로 해석영역을 모델링 하였다. 정극성 스트리머의 절연과피 현상에 관한 유한요소 해석의 수행을 위해서는 각 요소정보와 절점정보가 충분히 물리적인 의미를 반영될 수 있게 국부적인 단계별 해석이 필요하다. 이를 위해 $0 \sim 2\mu s$ 까지 $0.2\mu s$ 의 시간간격 두어 10단계의 해석을 수행하였다. 지배방정식의 무차원화로 해석한 결과는 후처리 과정에서 무차원 함수군을 이용하여 차원화된 값으로 전환하였다.

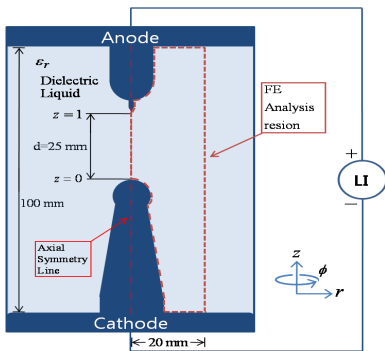


그림 3 IEC 60897 시험모델인 침-원형 전극
Fig. 3 Tip-sphere electrodes expressed in the IEC 60897 model

그림 4는 전리 전계파가 해석 시간에 따라 두 전극 사이에서 전파하는 것을 나타낸다. 해석초기에 라플라시안 전계 분포를 따라 침 전극에 고전계영역이 형성되고 분자의 전리작용, 이온의 해리작용, 재결합, 전자부착 작용과 같은 물리적 작용에 의해 스트리머가 발달된다. 시간에 따라 전위 분포와 전계분포의 최대값이 침에서 원형 전극 쪽으로 이동하는 결과를 나타낸다. 무차원 변수 파라미터를 이용하여 전계값을 실차원 값으로 전환하면 $0.4\mu s$ 부터 평균 전계값이 $5 \times 10^8 V/m$ 으로 나타나며 이는 일반적으로 알려진 절연유체내 절연과피 전계의 세기와 거의 동일한 수준으로 현재의 수치적 모델링이 적절함을 나타낸다[7-9]. 그림 4로부터 최대 전계치의 전파를 이용하여 정극성 스트리머의 평균 속도를 추정하면 $2 km/s$ 로 나타나며 동일모델의 기존의 실험값과 비교하여 시뮬레이션의 정확성에 대한 타당성을 보여준다.

그림 5는 공간전하 및 전자밀도의 시간에 따른 공간 분포를 나타내는 것으로 전계파의 전파와 동일한 형태로 진행하고 있음을 보여준다. 방출된 전자와 공간전하밀도의 동일한 분포는 정극성 스트리머 형성과 전파과정에서 가장 영향력이 있는 물리 요소로 추정할 수 있다.

그림 6은 일반화된 에너지법과 음의 적분법에 의한 방전전류 전류의 계산 결과를 나타낸 것이다. 평판전극에서와 유사하

게 음의 적분법에 의한 결과는 초기에 순간적인 전하의 주입으로 전류가 급격하게 증가된 형태를 지니는 것으로 나타났다. 하지만 일반화된 에너지법에 의한 결과는 짧은 시간에 전류가 상승하나 기하학적으로 구성된 커패시터 성분으로 순간적으로 큰 전류가 형성되지 못함을 고려하면 에너지법은 매우 안정적인 결과를 주고 있는 것으로 판단된다.

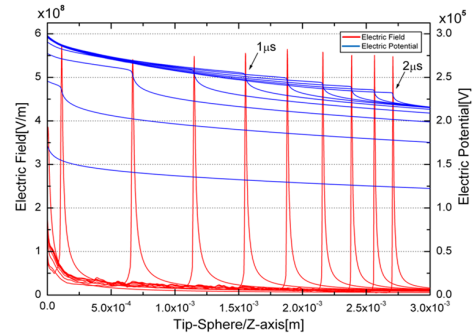


그림 4 전계파 전파와 전위 분포
Fig. 4 Propagations of the electric field wave and electric potential distributions

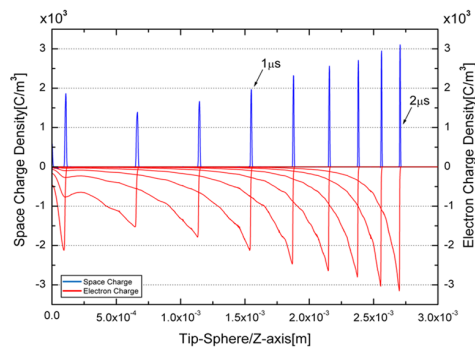


그림 5 공간 전하 전파와 전자 밀도 분포
Fig. 5 Propagations of space charge density and electron charge density distributions

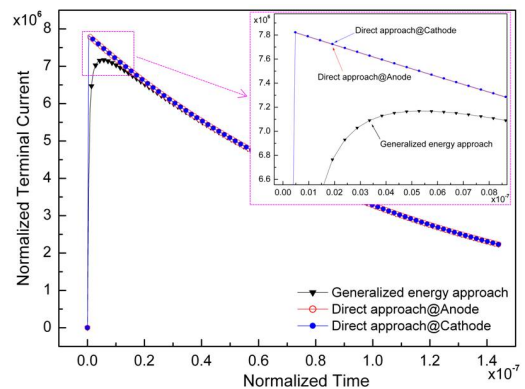


그림 6 음의 적분법(direct approach)과 일반화된 에너지법에 의한 무차원화 방전전류

Fig. 6 Normalized terminal currents (\tilde{i}) with time (\tilde{t}) by the integral Ohm's law (direct approach) and the generalized energy method ($\tilde{t} = t\mu_+ V_0/d^2$, $\tilde{i} = id/\epsilon\mu_+ V_0^2$)

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 방법에 의한 방전전류를 계산하고 결과를 서로 비교하여 매질에 상관없이 범용적으로 사용될 수 있는 일반화된 에너지법을 제시하였다. 그 과정에서 기존에 널리 사용되어온 사토의 방정식과 본 논문에서 처음 수치적으로 구현된 옴의 적분법과도 서로 비교, 검토하였다. 결론적으로 유한요소법이 에너지 최소화 원리에 의해 도출되고 비교적 전체 물리량에서는 수치적으로 안정된 결과를 나타내므로 해석결과에서 잘 알 수 있듯이 일반화된 에너지법이 범용성을 지니고 있으며, 수치적으로도 안정한 방전전류 계산방법으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0027689)

참 고 문 헌

- [1] 정재승, 문재덕, “관형 코로나 방전전극을 이용한 이온 풍속의 최대화”, 전기학회논문지, vol. 59, no. 12, pp. 2256-2261, December 2010.
- [2] 서길수, 조국희, 김영배, 이형호, “고전압·대전류 pulse 방전의 전압·전류특성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1981-1983, July 2000.
- [3] N. Sato, “Discharge current induced by the motion of charged particles,” J. Phys. D: Appl. Phys., No. 13, pp. L3-6, 1980.
- [4] R. Morrow and N. Sato, “The discharge current induced by the motion of charged particles in time-dependent electric fields; Sato’s equation extended,” J. Phys. D: Appl. Phys., No. 32, pp. L20-L22, 1999.
- [5] J. L. Coulomb, G. Meunier, and J. C. Sabonnadiere, “Energy methods for the evaluation of global quantities and integral parameters in a finite elements analysis of electromagnetic devices,” IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-21, No. 5, pp. 1817-1822, September 1985.
- [6] P. Hammond, Energy Methods in Electromagnetism, Oxford University Press, New York, 1981.
- [7] Markus Zahn, Cheung Fung Tsang, Shing-Chong Pao, “Transient electric field and space-charge behavior for unipolar ion conduction,” Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 6, pp. 2432-2440, June 1974.
- [8] F. M. O’Sullivan, “A model for the initiation and propagation of electrical streamers in transformer oil and transformer oil based nanofluids,” Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2007.
- [9] 이호영, 이세희, “유한요소법과 전계-열전자 방출 모델에 의한 절연유체 내 공간전하 전파해석”, 전기학회논문지, vol. 58, no. 10, pp. 2011-2015, October 2009.

저 자 소 개



이 호 영 (李 鎬 永)

2009년 계명대 전자공학과 졸업. 현재 경북대학교 석사과정. 주 관심분야: 전자기 다중물리 해석(전자기-열-유체-구조), 전력기기, 고전압 방전 해석 및 응용, 자성 나노유체, Level set method.
Tel : 053-940-8511
E-mail : leehy@ee.knu.ac.kr



김 홍 준 (金 洪 俊)

1997년 경북대 전기공학과 졸업. 1999년 미국 University of Southern California 전기공학과 졸업. 2006년 미국 University of Wisconsin-Madison 전기공학과 졸업. 2006년-현재 미국 City University of New York 전기공학과 조교수. 주 관심분야: 전자기응용, 고주파 및 집적회로, 전자회로시스템.
Tel : 1-212-650-7256
E-mail : hkim@ccny.cuny.edu



이 세 희 (李 世 熙)

1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 성균관대학교 전기전자컴퓨터학부 졸업(박사). 2002년-2005년 성균관대학교 정보통신기술연구원 선임연구원, 2003년-2006년 미국 메사추세츠공대(MIT) 포스닥연구원, 2006년-2008년 한국전기연구원 선임연구원, 2008년-현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 조교수. 주 관심분야: 전자기다중물리(전자기-열-유체-구조), 전자장수치해석, 방전해석 및 응용, 전자기마이크로/나노유체.
Tel : 053-950-5511
E-mail : shlees@knu.ac.kr