

절연유체 내 2상유동을 고려한 뇌임펄스 응답 유한요소해석

이호영\*, 이종철\*\*, 이세희\*  
 경북대학교\*, 강릉원주대\*\*

Lightning Impulse Response with Two-Phase Flow in Dielectric Liquid  
 by Using Finite Element Analysis

Ho-Young Lee\*, Jong-Chul Lee\*\*, Se-Hee Lee\*  
 Kyungpook National University\*, Gangneung-Wonju National University\*\*

**Abstract** - 뇌임펄스에 의한 절연유체 내 절연파괴 현상은 스트리머 채널에서의 유체유동과 기체유동이 동시에 발생한다. 스트리머 개시와 동시에 발생하는 기포들은 절연파괴에 직접적인 영향을 미치며 이를 모의해석하기위해서 2상유동이 고려되어야한다. 2상유동이 고려된 뇌임펄스 응답 유한요소해석은 전계에 의한 푸아송 방정식과 전자, 양이온, 음이온에 대한 전하연속방정식으로 구성되며 전계 방출과 열전자 방출효과를 경계조건으로 부여하였다. 기체 전리현상은 타운젠트 이론을 도입하였으며, 유체 전리현상은 체너 이온화 모델을 도입하여 수학적 모델링을 통한 2상유동으로 결합하였다. IEC standard #60897의 표준규격에 따라 침-구형 전극을 설계하였고 2차원 축대칭 간략화모델에 적용하여 실험적 결과와 비교분석함으로써 신뢰할 수 있는 수치해석기법이 제시되었다.

1. 서 론

유체 절연물에는 고체와 같이 단위체적당 분자수는 많이 분포하고 있지만 기체와 같이 분자가 어느정도 자유로운 움직임을 갖고 있기 때문에, 전기전도 특성이나 절연파괴 특성이 상당히 복잡하다. 현재까지 절연유체 내 절연파괴에 대한 이론적인 연구는 많이 진전되지 못하고 있으며, 전력기기에 이용되는 절연유체의 경우 실험적인 결과만을 이용하는 경우가 많다. CIGRE WG A3.20에 따르면 많은 선진업체들은 축적된 노하우를 바탕으로 한 독자적인 절연파괴 수치해석기술을 보유하고 있는 것으로 발표되었으며 국내에서는 여전히 실험 장치의 설계와 수행과정으로 막대한 경제적 손실이 소요되고 있다. 따라서 본 논문에서는 절연유체 내 전기장에 반응하여 발생하는 물리적 현상을 수학적으로 반영하였고, 수학적 모델링을 통해 다양한 매질에 적용 및 응용이 가능한 전기수력학적인 방전현상 수치해석법을 제시하고자한다. 수치해석 모델은 IEC standard #60897의 침-구형 전극모델을 도입하였고 2상유동은 스트리머 채널 내 유전체의 흐름을 나타내며 기체와 액체상이 복합적으로 존재한다고 가정한다[1]. 정극성 스트리머를 발생하기 위해 충분히 높은 뇌임펄스가 인가되었고 이상유동이 고려된 스트리머 채널 내 전계파의 전파를 기존의 실험치와 비교함으로써 제안된 수치해석법의 유용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 2상유동에서 전기수력학적 모델

절연유체 내 이상유동을 고려한 절연파괴해석은 전계에 관한 푸아송 방정식과 전자, 양이온, 음이온에 관한 전하연속방정식으로 다음과 같이 나타낸다[2-3].

$$\begin{aligned}
 -\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) &= \rho_+ + \rho_- + \rho_e & (1) \\
 \frac{\partial \rho_+}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_+ &= \left[ G_{LP}(|\vec{E}|) + \frac{\rho_+ \rho_e R_{+e}}{e} + \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{e} \right] (1 - H(W - W_0)) \\
 + G_{GP}(|\vec{E}|) H(W - W_0) & & (2) \\
 \frac{\partial \rho_-}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_- &= \left[ \frac{\rho_e}{\tau_a} - \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{e} \right] (1 - H(W - W_0)) & (3) \\
 \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J}_e &= \left[ -G_{LP}(|\vec{E}|) - \frac{\rho_+ \rho_e R_{+e}}{e} - \frac{\rho_+ \rho_- R_{+-}}{e} \right] (1 - H(W - W_0)) \\
 - G_{GP}(|\vec{E}|) H(W - W_0) & & (4)
 \end{aligned}$$

여기서 V는 전계의 세기에 관한  $(\vec{E} = -\nabla V)$ 된 스칼라 전위,  $\rho_+$ ,  $\rho_-$ ,  $\rho_e$ 는 전자, 양이온, 음이온의 전하 밀도이다. 절연유체 내 이상유동을 고려

하기위해 헤비사이드 함수  $(H(W - W_0))$ 를 도입하였다. 따라서 양이온, 음이온, 전자의 전류밀도는  $\vec{J}_+ (= \rho_+ \mu_+ (1 + 99H(W - W_0))\vec{E})$ ,  $\vec{J}_- (= -\rho_- \mu_- (1 + 99H(W - W_0))\vec{E})$ ,  $\vec{J}_e (= -\rho_e \mu_e (1 + 99H(W - W_0))\vec{E})$ 로 나타낸다.  $G_{LP}(|\vec{E}|)$ 는 전계에 반응하는 절연유체 내 전리 소스 항,  $\tau_a$ 는 유체 내 전자가 중성종(neutral species)에 부착하는 것에 대한 전자수명으로  $2 \times 10^{-7}$  s로 주어진다[3].  $R_{+e}$ ,  $R_{+-}$ 는 절연유체 내 이온-이온, 이온-전자의 재결합 비율상수로 기본적인 랑게방 재결합상수를 따라  $R_{+-} = R_{+e} = 1.64 \times 10^{-17} m^3/s$ 와 같이 주어진다.  $G_{GP}(|\vec{E}|)$ 는 이상유동의 기체에서 생성되는 전리 소스 항이다. 일반적으로, 정극성 스트리머 모델은 확산항은 매우 작은 값을 가지므로 무시하였고, 주로 대류항에 의해 지배적인 영향력을 가진다. 확산항을 무시함으로써 발생하는 수치적인 오차는 인공확산항을 고려하여 해결하였다.

2.2 2상유동의 기체 전리 소스 항

고전계에 의한 이상유동의 기체 전리 소스 항은 타운젠트 기체방전이론을 도입함으로써 수학적 모델링이 가능하다. 기체공간에서의 전자는 중성입자와 부딪히기까지의 자유행정운동을 하며, 고전계에 의해 가속되며 큰 에너지를 갖게 된 전자는 새로운 중성입자를 전리시키고 기하급수적으로 자유전자를 생성시킨다. 타운젠트이론의  $\alpha$ 작용은 전계에 의해 가속된 전자가 중성입자를 전리시켜 전류가 급증하는 가장 유효한 영향력을 가진다. 따라서 이상유동의 기체 전리 소스항은 타운젠트이론을 도입하여 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned}
 G_{GP}(|\vec{E}|) &= -\alpha_T \rho_e \mu_e |\vec{E}| & (5) \\
 \left( \alpha_T = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{\nu}{e|\vec{E}|\lambda}\right), \mu_{eGP} = 100\mu_e = 1 \times 10^{-2} m^2/Vs \right) & &
 \end{aligned}$$

여기서  $\alpha_T$ 는 타운젠트 이온화 1차 계수로 기체상에서 단위거리 당 전리하는 전하의 총돌 수를 나타내며,  $\mu_{eGP}$ 는 기체상에서의 자유전자 이동도를 나타낸다.  $\lambda$ 는 자유행정거리,  $\nu$ 는 기체에서 분자의 이온화 에너지를 나타낸다. 이상유동의 기체 전리 소스항은 스트리머 채널 내에서 전위 강하로 이어진다[4].

2.3 2상유동의 유체 전리 소스 항

외부의 어떤 힘이 작용하지 않을 때 절연유체에서 원자들은 전자를 공유하며 안정된 상태를 취하고 있다. 이러한 중성 분자들은 강한 전계의 영향을 받으면 최외각의 전자를 잃어버리고 하전되어 양이온과 자유전자로 분리된다. 고전계에 반응하는 전하의 전리원 항은 유전체의 전자 터널링을 바탕으로 한 전하 밀도 비율로 절연유체 내의 체너 이온화 모델에 적용하였다[2-3,5].

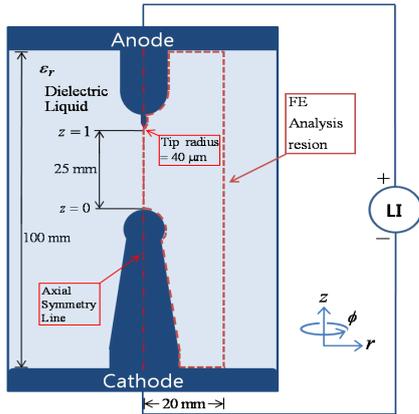
$$G_{LP}(|\vec{E}|) = \frac{e^2 n_0 a |\vec{E}|}{h} \exp\left(-\frac{m^* a \pi \Delta^2}{eh^2 |\vec{E}|}\right) & (6)$$

여기서  $n_0$ 는 전리할 수 있는 분자의 밀도 수,  $a$ 는 분자 분리 상수,  $m^*$ 은 절연유체 내 효과적인 질량,  $h$ 는 플랑크 상수,  $\Delta$ 은 분자의 전리에너지이다. 분자전리의 경우 많은 화학작용을 수반하지만 본 논문은 전계의 영향 하에서의 중성분자는 양이온과 전자로 분리하여 2개의 자유전하를 발생시키는 메커니즘으로 국한한다.

2.4 IEC standard #60897 수치해석 모델

본 논문의 경우 IEC standard #60897 표준 규격 모델에 따라 침-구형 전극형상을 표현하였고 2차원 축대칭 공간 차원을 고려하여 직교좌표계

의 z축을 따라 좌우대칭 구조로 모델링되었다. 침전극에 300kV의 너임 펄스를 인가하여 정극성 스트리머를 모의 해석하였다.

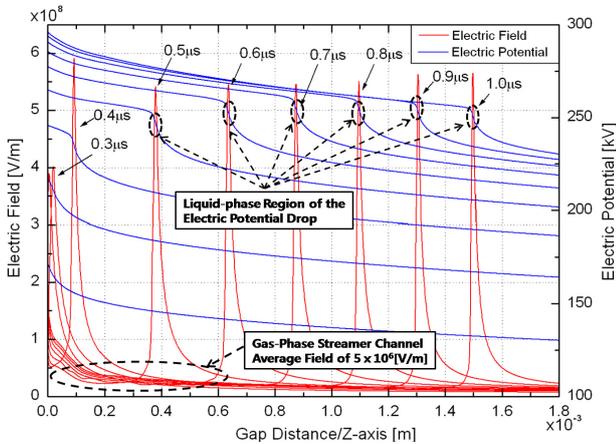


〈그림 1〉 2차원 축 대칭 침-구형 해석모델(IEC standard #60897)

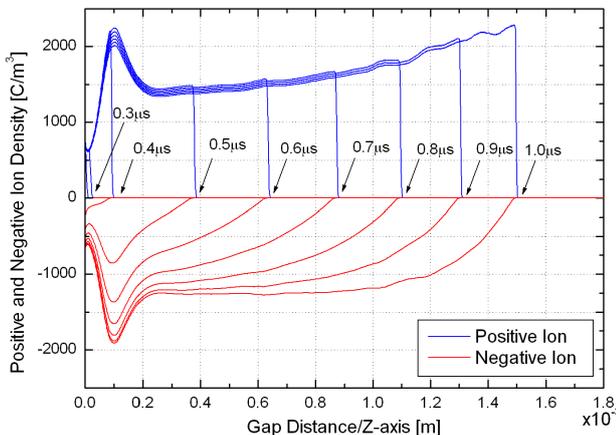
정극성 스트리머와 같은 복잡한 다중물리 유한요소해석의 경우, 정확한 해석결과를 산출을 위해 조밀한 요소망이 생성되면 과도하게 해석시간이 소요될 수 있으므로, 관심영역에 대한 부분구조로 분할하고 특정면, 선, 노드에 대한 정보를 변화시키는 국부적인 요소망 생성 기술이 요구된다. 또한 특정 행렬 요소의 형태로 응축한 적용요소법을 고려하고 0 ~ 1.0 μs까지 0.1 μs의 시간간격 두어 총 10단계의 해석을 수행함으로써 시스템 자원 부족을 막고 효율적인 해석이 가능하였다.

### 2.5 이상유동에서의 정극성 스트리머 해석

IEC standard #60897 모델의 절연물은 순수 변압기유로 가정하고, 외부에서 강한 전계가 인가되는 경우에는 정극성 스트리머가 발생한다. 침-구형의 전극구조로부터 침전극에 전계가 집중되는 불평등 전계가 형성되며 스트리머 채널이 형성되게 된다. 인가된 전계가 10<sup>6</sup> ~ 10<sup>8</sup> V/m 이상이 되면 전극으로부터 자유전자가 방출되며 절연유체 내 중성입자와 충돌하는 전리, 해리, 재결합, 전자부착 등의 현상으로 이어지게 된다.

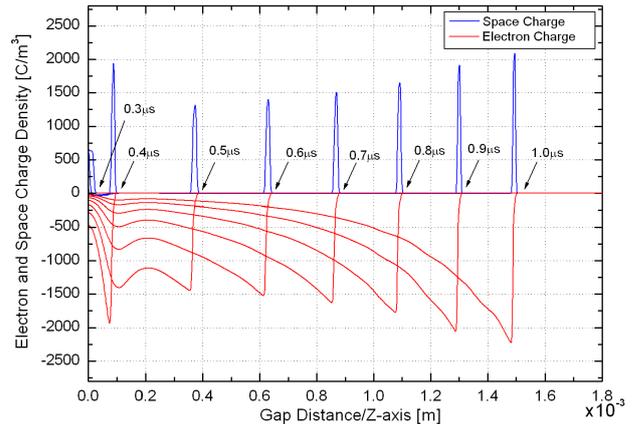


〈그림 2〉 시간에 따른 전위와 전계분포



〈그림 3〉 시간에 따른 양이온과 음이온 분포

그림 2는 정극성 스트리머가 생성되어 전파하는 것을 전위와 전계분포로 나타내었다. 해석초기에 라플라시안 전계분포를 따라 침전극에 고전계영역이 형성되고 약 4 μs 이후 5.5 × 10<sup>8</sup> V/m 전계레벨로 전계파가 전파한다. 전계파의 피크치에서 급격한 전위변화가 발생하며 2상유동에 의한 것으로 사료된다. 그림 3은 스트리머가 침전극(x=0)으로부터 구전극으로 전파하는 중의 시간에 따른 양이온과 음이온 분포를 나타낸다. 스트리머 채널 내 양이온은 음이온보다 상대적으로 많이 분포하고 있으며 분자의 전리작용으로 인한 전하생성에서 기인한다. 그림 4는 전계방출과 열전자 방출로 주입된 전자가 공간상으로 전파하는 것을 나타낸다. 그림 2와 비교하여 전계파의 피크치가 형성된 공간에서 공간전하가 집중되며 자유전자는 이온들보다 빠른 속도로 침전극으로 이동한다. 전계에 의한 분자의 전리작용을 자유전하생성의 주요원인으로 판단하였으며 안정된 증성종으로부터 분리된 전하들은 유전체 내에서 전기장을 따라 이동하게 되고 전자와 이온들의 서로 다른 이동도로 인해 공간전하를 형성하게 된다.



〈그림 4〉 시간에 따른 전자와 공간전하 분포

### 3. 결 론

2상유동이 고려된 절연유체 내 정극성 스트리머는 국부적인 불평등 전계가 형성되는 침전극에서 발생하여 구전극으로 스트리머 채널이 전진된다. 스트리머 채널 내 2상유동 내에는 약 10<sup>6</sup> ~ 10<sup>7</sup> V/m의 불연속 전계가 분포하며 스트리머 주변에 나타나는 기포의 원인으로 사료된다. 절연유에서의 전위 강하는 전계파의 테일(electric field wave's tail)에서 발생되며 단위길위 당 전위 강하를 측정된 실험치와 비교 검증함으로써 제안한 수치해석법의 유효함을 입증한다[4]. 또한 이상유동이 고려된 절연유체 내 스트리머 전파속도는 1.5 km/s로 동일 모델을 이용한 실험치와 적절히 부합함을 확인하였다[6].

### 감사의 글

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

### [참 고 문 헌]

- [1] IEC standard # 60897, Methods for the Determination of the Lightning Impulse Breakdown Voltage of Insulating Liquids, 1987.
- [2] F. O'Sullivan, J. G. Hwang, M. Zahn, O. Hjortstam, L. Pettersson, R. Liu and P. Biller, "A Model for the Initiation and Propagation of Positive Streamers in Transformer Oil," in *IEEE ISEI08*, Vancouver, BC, Canada, June 2008
- [3] H. Y. Lee, S. H. Lee, "Hydrodynamic Modeling for Discharge analysis in Dielectric Medium with the Finite Element Method under Lightning Impulse," *JEET*, Vol. 6, No. 3, pp. 397-401, 2011.
- [4] F. M. Meek and J. D. Graggs, "Electrical Breakdown of Gases," John Wiley & Sons, New York, 1978.
- [5] J. G. Hwang, F. O'Sullivan, M. Zahn, et al., "Modeling of Streamer Propagation in Transformer Oil-Based Nanofluids." Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 361-366, 2008.
- [6] 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.