

노즐 용삭을 고려한 복합 소호형 차단기의 압력 상승 계산

배재윤*, 안희섭*, 정영우*, 최종웅*, 오일성*
 * LS 산전 전력연구소 선행기술 연구팀

Calculation of Pressure Rise of Self-blast Circuit Breaker considering Nozzle Ablation

Cae-Yoon Bae*, Heui-Sup Ahn*, Yong-Woo Jung*, Jongung Choi*, Il-Sung Oh*

* Advanced technology team, Electro-technology R&D Center, LS Industrial Systems Co.,Ltd., Korea(cybae@lisis.biz)

Abstract - Pressure rise is an important design factor and affects significantly on the characteristics of gas circuit breakers. For self-blast circuit breakers, the nozzle ablation plays important role in pressure-building up and should be properly considered for the accurate calculation. In this paper, the nozzle ablation is treated as a boundary condition and the pressure is calculated from mass fractions of PTFE and SF6. The amount of the ablated mass of a nozzle is assumed to be proportional to the arc energy and the area of nozzle surface that directly touches arc. The calculation result is compared with measured data and shows good agreement with it.

1. 서 론

가스형 차단기의 설계에 있어서 압력 상승의 예측은 중요한 역할을 한다. 그 이유는 차단기의 압력 상승은 차단기의 성능을 어느 정도 예측할 수 있도록 해주는 물리량 중 상대적으로 쉽게 측정 가능한 거의 유일한 물리량이기 때문이다. 압력 상승은 소전류 특성에 영향을 미치는 밀도에 대해 충격파가 발생하기 전까지는 직접적인 영향을 미치며 대전류 특성에 있어서도, 특히 전류 영점부근에서, 에너지를 흠뜨리는 힘을 의미한다.

파괴실과 팽창실을 동시에 갖고 있는 복합형 차단기의 경우 압력 상승은 아크에 의해 발생하는 에너지에 의해 이루어지며, 따라서 정확한 압력 상승을 해석하기 위해서는 정확한 아크 에너지의 계산이 선행되어야 한다. 또한 파괴형 차단기와 달리 노즐의 용삭에 의한 물질이 압력 상승에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 적절한 평가가 이루어지지 않으면 정확한 계산을 할 수 없게 된다. [1-2]

본 논문에서는 용삭되는 물질의 양이 아크 에너지에 비례한다고 가정하고 이를 유동 방정식의 경계조건으로 처리하였으며 아크 에너지는 측정된 아크 전류와 아크 모델을 이용해 계산된 아크 전압을 통해 평가하였다.

2.2 아크 전압의 계산

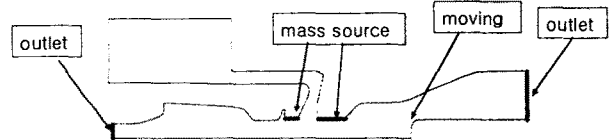
아크 전압의 계산은 아크 에너지의 계산을 위해 정확히 계산되어야 한다. 본 논문에서는 간단한 아크 모델인 Two-zone 모델을 사용하여 전압을 계산하였다[3].

$$V_{arc} = \frac{I_{arc} \cdot I_{arc}}{\sigma \cdot \Phi \cdot \pi \cdot r_{nozzle}^2} \quad (2)$$

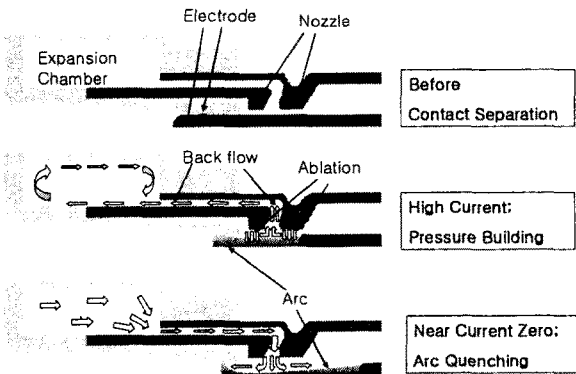
2.3 경계조건 및 용삭

$$\dot{m} = V_{arc} \cdot I_{arc} \cdot \delta \quad (3)$$

전류가 증가함에 따라 아크의 반경은 지속적으로 증가하며, 이 현상은 아크가 노즐에 의해 직접적인 제한을 받을 때까지 계속된다. 노즐에 의한 아크의 폐색 현상이 발생하면 아크에 의해 용삭된 노즐의 일부는 하류장으로 빠져나가지 못하고 팽창실 쪽으로 강한 역류를 발생시킨다. 이로 인해 팽창실 내부의 압력은 급격히 상승하게 된다. 따라서 압력 상승을 정확히 해석하기 위해서는 용삭되는 노즐의 양 및 용삭이 일어나는 시점을 정확히 예측하여야 한다. 본 논문에서는 식(3)을 사용하여 노즐 용삭량이 아크 에너지에 직접 비례한다고 보았으며 역류되는 양은 유동장을 해석하여 구하였다.



<그림 2> 경계 조건



<그림 1> 복합형 차단기의 동작 원리

2. 본 론

복합형 차단기의 압력 상승의 계산은 유동 및 아크 플라즈마 그리고 그것들의 상호작용에 대한 모델링으로 이루어진다.

2.1 보존식을 사용한 유동의 계산

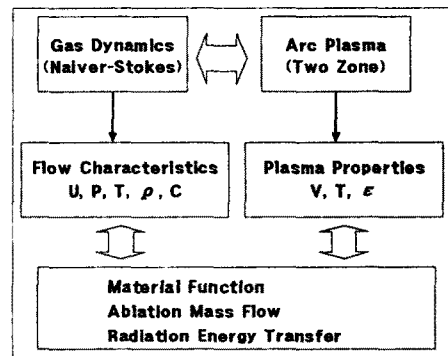
유동장의 계산은 보존식으로 알려진 Navier-Stokes 방정식으로 사용하여 계산하였으며 질량, 운동량, 에너지 방정식에 식(1)과 같은 PTFE의 농도 방정식을 추가하여 계산하였다.

$$\frac{\partial(\rho C_{PTFE})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j C_{PTFE})}{\partial x_j} = \Gamma_{PTFE} \frac{\partial C_{PTFE}}{\partial x_j} + S \quad (1)$$

2.4 물질 특성의 계산

$$(gas\ state) = f(T, P) \quad (4)$$

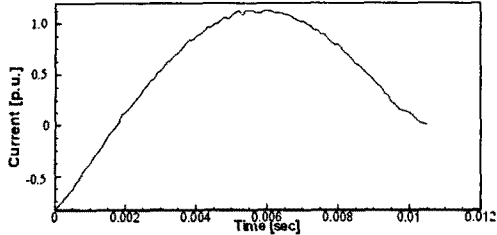
물질의 특성은 식(4)를 따라 계산하였다. 국부 열평형 가정 하에서 기체의 상태는 두 개의 상태변수로 결정될 수 있으며 본 논문의 계산에서는 기체의 압력과 온도를 사용하여 물질 특성을 내삽하여 구하였으며 노즐의 물질과 SF6 기체와 혼합된 플라즈마의 경우는 농도 비에 따라 각각의 성질을 역시 내삽하여 추정하였다.



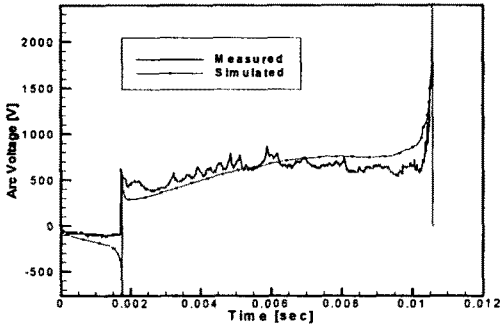
<그림 3> 해석 프로그램의 구조

3. 해석 결과 및 고찰

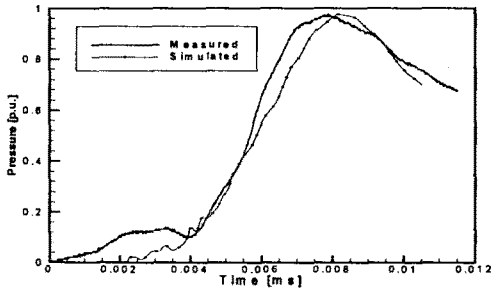
제안된 방법을 통해 대칭 전류와 비대칭 전류에 대해 계산해본 결과 전압과 압력의 과도 상태 변화가 측정결과와 잘 일치하였다. 전압의 경우 전류 영점 부근에서의 가파른 상승이 잘 예측되어 에너지의 정확한 평가가 가능했고 압력의 경우 비대칭 전류에서 약간 높게 평가 되었으나 전체적인 변화 경향은 잘 반영되었으며 오차도 비교적 작은 편이었다.



(a) 전류

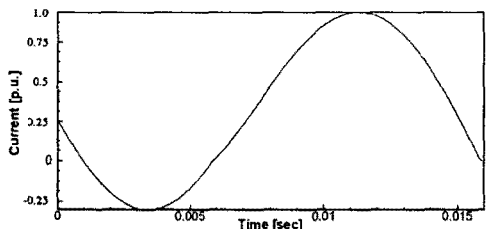


(b) 전압

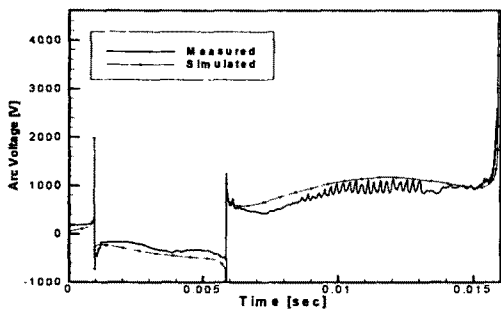


(c) 압력

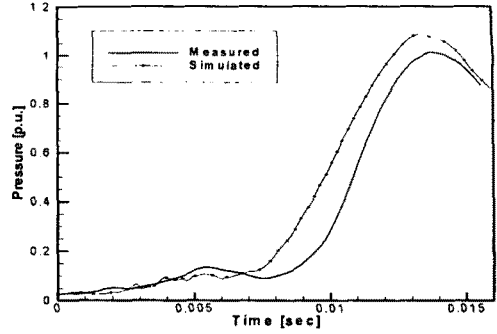
〈그림 4〉 대칭 전류의 해석 결과



(a) 전류



(b) 전압



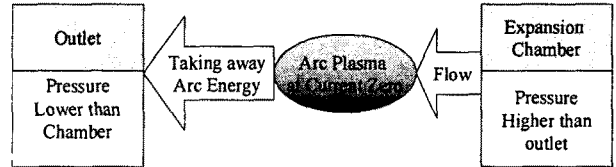
(c) 압력

〈그림 5〉 비대칭 전류의 해석 결과

차단기에서의 압력 상승과 대전류의 특성은 밀접한 관계를 갖고 있으며 TRV와 압력과의 관계는 E. Haginomori 등이 발표한 바 있으며[4] 그 관계를 간략히 나타내면 식 (5)과 같다.

$$\frac{dV}{dt} = \alpha P^\beta \quad (5)$$

이와 같은 간단한 식이 성립하는 이유는 아크 에너지를 소산하는 힘과 압력이 비례하기 때문이다. 특히 가스의 온도가 아크에 의해 상승된 경우는 냉가스와 달리 충격파의 발생이 느려지면서 이와 같은 관계가 성립하기 쉬운 조건으로 된다.



〈그림 6〉 아크 에너지 소산 개념도

4. 결 론

복합형 가스 차단기 내의 과도 압력 상승 및 전압 변화를 계산하고 이를 측정 결과와 비교하였다. 유한 체적법과 two-zone 모델을 사용하여 아크 전압과 아크 에너지를 계산하였으며 아크 에너지와 비례한 용삭량을 가정하여 유동에 반영하였다. SF6 아크 플라즈마와 용삭된 물질간의 상호 반응은 고려하지 않았다.

계산된 결과는 측정된 결과와 잘 일치하였으며 이 결과는 복합형 차단기의 대전류 성능평가 및 설계에 활용 가능할 것으로 생각된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] G. Friberg, and G.J. Pietsch, "Calculation of pressure rise due to arcing faults", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, no.2, pp. 365-370, Apr. 1999.
- [2] Naoko Osawa, and Yoshio Yohsioka, "Calculation of transient puffer pressure rise takes mechanical compression, nozzle ablation, and arc energy into consideration", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no.1, pp. 143-148, Jan. 2005.
- [3] M. Classens, K. Möller, and H.G. Thiel, "A computational fluid dynamics simulation of high- and low- current arcs in self-blst circuit breakers", *J. Phys. D: appl. Phys.*, vol 30, pp.1899-1907, 1997.
- [4] E. Haginomori, A. Kobayashi, S. Yanabu, and Y. Murakami, "Performance of circuit breakers related to high rate of rise of TRV in high-power, high-density network", *IEEE Trans. Power Apparatus and System*, vol. PAS-104, no.8, pp. 2267-2273, Aug. 1985.