

## 노즐현상에 따른 절연성능 변화에 관한 연구

윤정훈, 안희섭, 최종웅, 강성모, 임성삼, 오일성, 이성호, 신영준  
(주)LS 산전

### A Study On The Improvement Of Dielectric Performance By Nozzle Shapes

Jeong-Hoon Yoon, Heui-Sub Ahn, Jong-ung Choi, Sung-Mo Kang, Sung-Sam Im, Il-Sung Oh, Sung-Ho Lee,  
Young-Jun Shin

**Abstract** - 초고압 차단기 내부에는 여러 종류의 절연 물들이 존재하며, 절연물들 중 노즐은 차단현상에 큰 영향을 미치는 요소 중에 하나로 작용을 하고 있다. 노즐의 형상과 노즐 뜨의 길이, 노즐의 재질에 따라 전계강도의 차이와 유동의 흐름에 영향을 미치고 있으며 결국 차단기의 차단성능의 변화를 발생시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 서로 다른 형상의 노즐을 가지고 차단기 내부 접점의 이동에 따른 스크로크별 해석 데이터와 시험 데이터를 비교함으로써 절연성능의 변화를 연구하였다.

### 1. 서 론

차단기는 전력계통에 고장이 발생할 경우, 고장전류를 자동적으로 차단하여 계통과 다른 전력기기를 보호하는 역할을 한다. 차단기에서 진상소전류 차단책무는 대전류 차단책무와 함께 차단기가 갖추어야 할 기본 성능 중의 하나이다.

2001년 IEC규격 62271-100의 개정으로 진상소전류 단시험은 기존규격에 비해 훨씬 가혹해졌다. 대표적인 변화로는 재발호의 확률에 따라 차단기는 C1과 C2의 등급으로 구분되며 전제적인 시험횟수도 증가하였다. 특히 C2등급은 사전시험(pre-condition test)으로 T60(단락고장 차단전류의 60%)책무에 해당하는 전류를 3회 차단후 실시하여야 한다. 사전시험 시 주입되는 전류와 이에 따른 아크의 영향으로 시험 후 접점이나 노즐에 손상이 발생하며 결국 차단기의 절연내력이 사전시험이 없는 경우에 비해 저하된다. 따라서 사전시험을 고려한 진상소전류 차단성능에 관한 연구는 차단기의 차단능력에 대한 신뢰성의 제고 차원에서 점점 중요해지고 있다.

차단기의 차단성능을 예측, 평가하기 위해 CAE를 이용하는 방법은 널리 사용되고 있다[1]. 일반적으로 진상소전류 차단성능의 예측은 유동과 전계가 결합된 실험식을 통하여 절연내력을 구한다. 이러한 해석적인 절연성능 예측방법은 다양한 모델에 적용되어 검증이 되었고 계속 연구가 진행되고 있다[2]. 그러나 차단성능 예측에 사용되는 실험식은 접점이나 노즐의 손상이 없는 경우에 적절한 것으로 사전시험에 의해 손상된 접점 등의 영향을 충분히 고려할 수 있는지에는 충분한 연구가 진행되지 않았다. 만약 사전시험의 영향을 해석적으로 충분히 고려할 수 없다면 이것의 영향을 고려할 수 있는 실험식의 변경에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 2종류의 모델을 선정하여 소전류 성능을 평가하였으며, 소전류 성능을 향상시킬 수 있는 형상 구조 설계와 소전류 성능을 향상 시킬 수 있는 결정적인 인자들을 찾기 위함이 연구 목적이다. 소전류성능을 향상시킬 수 있는 인자들을 찾아봄으로써 대전류 성능과도 연결시켜 차단기의 차단성능향상에 기여하는 것이 궁극적인 연구 목적이라 할 수 있다.

### 2. 본 론

#### 2.1 진상 소전류 차단성능 예측

진상소전류의 차단성을 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 식 (1)을 사용하였다. 여기서,  $a$ 와  $b$ 는 실험에서 결정되는 실험 상수이다[3].

유동 및 전계 해석에서 밀도  $\rho$ 와 전계  $E$ 를 구하며 이를 통해 차단기의 절연내력(Dielectric Strength)  $V_{bd}$ 를 산한다. 계산된 절연내력을 전류차단 후 극간에 인가되는 과도회복전압(Transient Recovery Voltage : TRV) 선과 비교하여 차단성능을 평가한다. 식 (2)는 과도회복전압을 나타내는 식이다. 여기서,  $V_n$ 은 차단기 정격전압  $F_k$ 는 전압계수,  $F_p$ 는 차단기 점철 수를 나타낸다

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$V(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_n \times (1 - \cos(\omega t)) \times F_k \times F_p \quad \dots \dots \dots (2)$$

소전류 성능 예측방법으로서 사용되는 해석적인 방법은 접점개극 직후 과도회복전압이 발생된다고 가정하고 해석을 하지만, 실제 시험에서는 접점 개극 후 아킹타임이 존재한 후 과도회복전압이 발생하게 된다. 따라서 해석적인 방법이 더 가혹하게 나타날 수 있다.

#### 2.2 모델 비교

소전류 평가에 사용되어진 모델들은 차단부 내부구조와 소호원리는 모두 동일하게 적용하였으며, 같은 조작기를 사용하였으므로  $V10$ 속도와 스트로크길이도 동일하게 적용되었다. 압축실과 팽창실의 크기도 차단성능에 크게 좌우 되므로, 모두 동일한 조건에서 노즐 형상의 차이에 의한 소전류 차단성능만을 비교하기 위해 같은 크기의 압축실과 팽창실을 적용하였다.

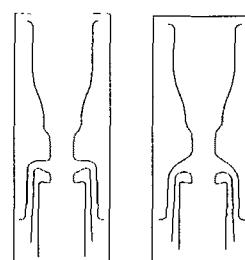


그림 1. A모델과 B모델의 노즐형상 비교  
그림 1과 같이 'A 모델'을 기본모델로 하여 'B 모델'을

설계하였다. 'B 모델'은 제 1노즐인 주 노즐의 형상과 제 2노즐인 보조 노즐의 형상이 'A 모델'과 다른 형상을 나타내고 있다. 제 1노즐의 형상 변경은 압축된 가스가 흘러나오는 유로부분의 각도를 변경함으로써 고정아크접점 선단부의 밀도변화를 예상하여 설계하였다. 또 다른 차이는 제 2노즐의 곡률반경에 있으며, 이 형상 또한 유동의 흐름을 조절하고 개극 후 전계강도를 완화 시키고자 설계하였다. B 모델은 TRV(과도회복전압)의 피크치가 인가되는 시점에서 전상소전류 차단성능을 A 모델보다 개선시키기 위해 설계 되었다. A, B 모델에 사용되어 어진 가동아크접점과 고정아크접점의 형상, 아크접점간의 투입깊이도 동일하게 적용하여 개극시점의 차이가 발생하지 않은 조건에서 전상소전류 차단성능을 평가하였다. 소전류 평가는 접점 개극후 상용주파수를 반주기 시점까지만 평가하였으며, 60Hz 상용주파수를 적용하여 개극 후 8.3ms까지 동일한 속도를 가진 스트로크 상태에서 평가하였다. 그림 2는 소전류 성능 평가가 끝나는 시점을 나타내고 있으며, 제 1노즐 상류장의 형상의 차이에 따른 발생이라 할 수 있다.

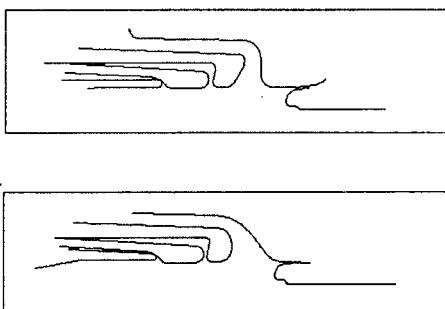


그림 2. A 모델과 B 모델의 소전류 종료 시점

### 2.3 소전류 성능 평가

#### 2.3.1 모델별 전계 해석

그림 3은 고정아크 접점 선단부의 최대 전계 강도를 개극후 8.3ms까지 나타낸 것이다. Y축 스케일의 차이 때문에 두 개의 그래프로 나누어 표현하였다. 2ms 이하에서는 A 모델의 최대 전계값이 B 모델보다 높게 나타나고 있다. 2ms-3ms 지점에서는 B 모델은 이미 제 2노즐 목을 빠져 나와 있으나, A 모델은 아직도 제 2 노즐목에 위치하고 있다. 따라서 제 2노즐의 곡률반경의 영향으로 인해 고정아크 접점선단부의 최대 전계강도가 A 모델보다 B모델이 높게 나타나고 있다.

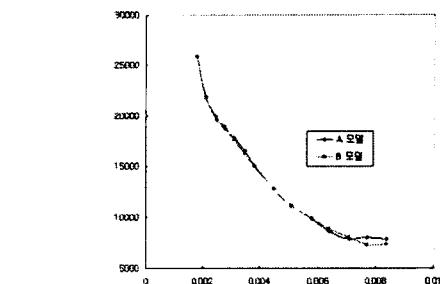
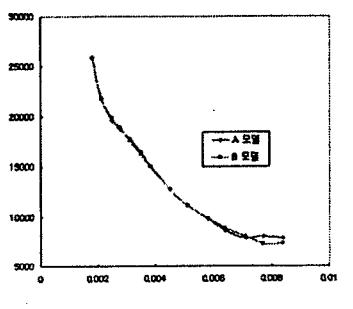


그림3. A,B모델 스트로크에 따른 전계 해석 결과

3ms-5ms 지점까지는 거의 비슷한 전계강도를 보이고 있다. 하지만 B 모델보다 A 모델이 제 1 노즐을 먼저 통과함으로써 소전류 종료시점에서는 A 모델이 B 모델보다 최대전계강도가 높게 나타나게 된다. 그림 2를 보면 알수 있듯이 제 1노즐의 상류장 형상이 A 모델이 B 모델보다 상류장 방향으로 튀어 나와 있어 위와 같은 현상이 발생된다. 같은 시점에서의 A,B 모델의 최대전계값은 0.08%-9%의 차가 발생되고 있다.

#### 2.3.2 모델별 유동해석

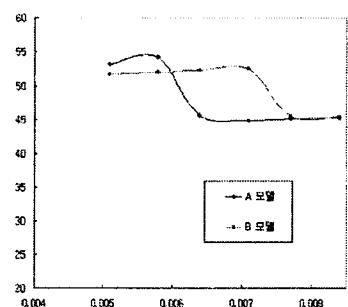
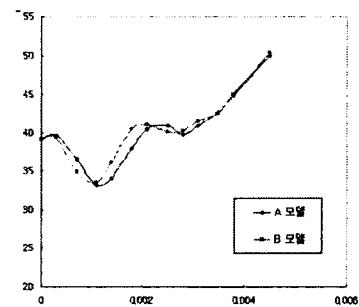


그림4. 고정아크 접점 선단부 밀도 비교

고정아크 접점 선단부의 모델별 밀도변화를 그림 4에 표현 하였으며 Y축 스케일의 차이로 인해 개극후 0.5ms 그리고 0.5ms-8.3ms로 나누어 두 개의 그래프로 나타냈다. 그림 2를 참고 하면 동일 시점에서 B 모델의 고정아크 접점이 제 2 노즐목을 먼저 통과 하게 되므로 유로에 먼저 진입하게 되어 접점 선단의 밀도가 A모델보다 먼저 높아지게 된다. 이 후에 A 모델의 고정아크 접점이 유로에 진입하여 밀도의 상승을 나타내고 있다. 하지만 5ms 이후에는 A 모델이 먼저 제 1노즐목을 통과하게 됨으로써 밀도가 감소하는 변화가 나타나게 되고 반면에 B 모델은 계속 상류장에 위치하고 있어 비슷한 밀도 분포를 유지하고 있다. B 모델도 제 1노즐목을 통

과하면서 밀도의 감소가 나타나고 있다. 이 시점에서 A 모델은 이미 밀도가 감소한 상태로 남아 있다. B 모델의 상류장 부분의 노즐형상을 변경함으로써 고정아크 접점 선단부의 밀도 증가 효과를 나타내고 있다. A, B 모델의 동일한 시점에서의 밀도 변화를 비교해 보면 1%-17%의 차이를 보이고 있다. 최대 전계값의 변화율 보다 유동에 따른 밀도 변화율이 더 크다는 것을 알 수 있다.

### 2.3.3 모델별 소전류성능 평가

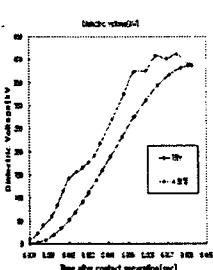


그림 5.1 A 모델 절연내력 곡선      그림 5.2 B모델 절연내력 곡선

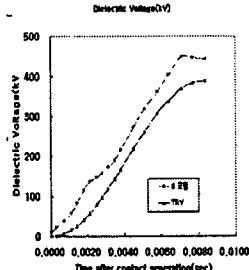


그림 5.1 A 모델 절연내력 곡선      그림 5.2 B모델 절연내력 곡선

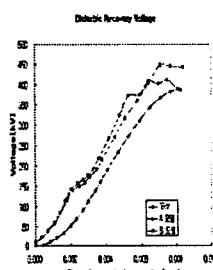


그림 5.3 A, B 비교

그림 5. A, B 모델 절연내력 곡선과 여유율비교

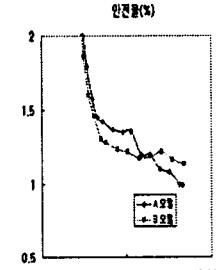


그림 5.4 여유율 비교

A 모델과 B 모델의 절연내력곡선과 여유율을 그림 5에 나타냈다. A 모델이 B 모델보다 5ms- 6ms지점에서 절연성능이 3~4%우수하나 6ms-8ms위치에서는 B모델이 A 모델보다 2%-12% 절연성능이 우수하게 평가되었다. 이러한 현상은 고정아크접점선단부의 밀도 변화와 전계강도 변화에 따라 발생될 수 있으며, 결국 유로 형상을 어떻게 조절하는가에 따른 제 1, 2 노즐 형상 설계에 있다고 할수 있다[4]. A 모델의 경우, 소전류 종료 시점에서의 절연성능이 TRV(과도회복전압)곡선 보다 더낮게 평가 되었다. 이를 개선 시키기 위해서 제 1노즐의 상류장 형상을 하류장 방향으로 유선형 형태로 설계 함으로써 고정아크 접점선단부의 밀도를 증가 시키고 전계를 완화 시키기 위해 설계한 B 모델이 A 모델보다 절연성능이 우수하게 평가 되었다. 이러한 설계 변수들을 통해 소전류 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되어 왔으며, 현재 진행 중에 있다. 해석적인 방법과 시험적인 방법을 통해 많은 데이터도 확보하여 분석을 하고 있으며 투입깊이의 변화, 접점선단의 형상, 소전류 종료위치 결정, 유로 형상의 설계, 개극시점의 조절, 노즐의 형상, 압축실과 팽창실의 체적, 조작력...등 많은 소전류 인자들을 대전류 차단 성능에도 적용하여 필요한 성능을 향상시키고자 할때 적시적소에 사용하도록 연구가 활발히 진행되고 있다.

### 2.3.4 모델별 소전류 시험

A 모델과 B 모델을 제작하여 KERI에서 진상소전류 시험을 통해 차단성능을 검증하였다. BC1과 BC2시험을 통해 아킹타임별 전 구간에 걸쳐 restrike 발생없이 정격과도회복전압을 견디는 절연성능을 확보하였다. IEC 규격에 따라 T60(preconditioning test)후 소전류 차단시험을 실시하였다.

## 3. 결 론

초고압 차단기의 진상소전류 차단성능을 해석적인 방법과 시험기반 방법을 통해 비교하기 위해 서로 다른 노즐 형상을 가진 A, B 모델을 설계하여 진상소전류 차단성능을 향상시킬수 있는 방법을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. A 모델은 진상소전류 종료 시점에서 해석적인 방법을 통해서는 절연성능을 확보하지 못했다.
2. A 모델이 절연성능을 확보하지 못한 구간에서 B모델은 TRV(과도회복전압)의 12% 이상의 절연내력을 나타냈다.
3. 제 1, 2 노즐 형상의 변화에 따라 소전류 차단성능에 영향을 미치는 것을 해석적인 방법을 통해 평가 할 수 있었다.
4. A 모델은 해석적인 방법으로는 진상소전류 차단성능이 확보 되지 않았으나 시험적인 방법으로는 진상 소전류 차단을 성공하였다. 이 결과를 통해 해석적인 방법의 오차율을 줄이는데에도 많은 연구가 필요하리라 사료된다.
5. 차단기의 차단성능에 영향을 미치는 중요한 인자들을 찾아냄으로써 소전류 성능뿐만 아니라 대전류 성능 향상에도 기여 할 수 있도록 많은 시험테이터와 해석테이터를 확보하여 비교 분석해야 할 것이다.

## (참 고 문 헌)

- [1]J. L. Zhang., J.D. Yan., M.T.C Fang, "Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-Expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor", IEEE Trans. on Plasma Science, 30, pp. 706-719, 2002
- [2]F. Endo., M. Sato.,M. Tsukushi. "Analytical Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF<sub>6</sub> Gas Circuit Braker", IEEE Trans. on Power Delivery, 4, pp.1731-1737,1989
- [3]송기동, 이병윤, 박경열, 박정후, "초고압 SF<sub>6</sub> 가스 차단기의 소전류 차단성능 해석기술 I", 대한전기학회 논문지 50B권 7호,pp. 331-337, 2001
- [4]K. Suzuki., H. Toda, "Development of 550kV 1-Breaker GCB(Part I)", IEEE Trans. on Power Delivery, 8, p.1184-1191, 1993