

# 초고압 SF<sub>6</sub>가스차단기의 소전류 차단성능 해석기술 I

## Evaluation Method I of the Small Current Breaking Performance of High-Voltage Gas Circuit Breakers

宋基東\* · 李秉潤\*\* · 朴敬燁\*\*\* · 朴正后§

(Ki-Dong Song · Byeong-Yoon Lee · Kyong-Yop Park · Jung

**Abstract** - With the increasing reliability of analysis schemes and the dramatically improved computer simulation has become an indispensable process to predict the interruption capacity of circuit breakers. Generally, circuit breakers have to possess both the small current and large current interruption abilities and the circuit breaker designers need to evaluate its capacities to save the time and the expense. The analyses of small current and the large current interruption performances have been considered separately because the phenomena occurring in a interrupter are quite different. To analyze the dielectric recovery after large current interruption many physical phenomena such as heat transfer, convection and arc radiation, the nozzle ablation, the ionization of high temperature SF<sub>6</sub> gas, the electric and the magnetic forces and so forth must be considered. However, in the analysis of small current interruption performance only the cold gas flow analysis needs to be carried out because the capacitive current is so small that the influence from the current can be neglected.

In this paper, an empirical equation which is obtained from a series of tests to estimate the dielectric recovery strength has been applied to a real circuit breaker. The results of analysis have been compared with the test results and the reliability has been investigated.

**Key Words** : GCB(Gas Circuit Breakers), small capacitive current, current zero, cold gas flow field, breakdown electric stress  $E_f$ , supersonic flow, shock wave

### 1. 서 론

전력계통에 고장이 발생하는 경우, 계통의 각종 주요기 기들을 보호하기 위해서는 고장전류를 신속히 차단하여 고장점을 건전상으로부터 분리시켜야 한다. 이러한 의무를 차단기(Circuit Breakers)가 가지고 있다.

차단기는 지상 및 진상소전류와 같이 수백 암페어(Ampere) 정도의 소전류를 차단할 수 있는 능력과 근거리 선로고장(SLF: Short Line Fault)과 단자단락고장(BTF: Bus Terminal Fault)과 같이 수만 암페어 정도의 대전류를 차단할 수 있는 능력을 동시에 보유하여야 한다. 따라서, 차단기는 소전류 차단성능 또는 대전류 차단성능 중 어느 한 쪽만을 고려하여 설계될 수 없다. 하지만, 대부분의 설계자들은 대전류의 차단이 차단기의 입장에서 훨씬 부담스럽기 때문에 대전류 차단성능을 확보하는 데 우선적으로 주력하게 된다. 실제로, 대전류 차단성능을 보유한 대부분의 차단기는 소전류 차단성능을 갖고 있는 경우가 많다. 하지만, 일단 소전류 차

단성능이 문제가 되는 경우에, 그 문제를 간단히 해결하는 것은 쉽지 않으며, 최악의 경우 차단기 전체를 다시 설계해야 하는 경우가 있을 수 있다.

저자들은 소전류 차단성능에 문제가 있는 차단부에 대해서 차단성능을 개선한 경험을 많이 가지고 있다. 그 개선과정에서 차단부의 설계변수, 예를 들어 노즐형상 또는 아크집점형상 등을 실제로 제작하여 차단성능 시험을 통해 개선여부를 판단하는 과정을 밟기도 하였지만, 실제로 부품을 제작하여 차단시험을 통해 개선하는 방법은 많은 시간과 비용이 소요되었다. 따라서 설계단계에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 차단성능을 미리 예측할 수 있는 방법을 모색하게 되었다.

본 논문은 저자들이 적용하였던 소전류 차단성능을 미리 예측할 수 있는 방법 두 가지 중 하나의 방법에 대한 것이다. 즉, 실험상수를 이용하는 경험적인 평가방법과 스트리머이론(streamer theory)을 이용하는 이론적인 평가방법 중, 전자의 방법을 실제 차단부에 적용한 것이다. 해석된 결과는 시험결과와 비교되었으며, 평가방법의 유용성에 대해 검토되고 있다.

### 2. 소전류 차단성능 해석

차단기는 전력계통에 고장이 발생할 경우, 고장전류를 자동적으로 차단하여 계통과 다른 전력기기를 보호하는 역할을 한다.

\* 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員

\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員

\*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究所 新電力機器그룹 그룹長

§ 正會員 : 釜山大 工大 電子電氣通信工學部 教授

接受日字 : 2001年 5月 22日

最終完了 : 2001年 6月 7日

초고압 계통에서는 주로 파퍼형 가스차단기(puffer type gas circuit breaker)가 사용되고 있으며, 그림 1에 동작원리를 나타내고 있다. 전력계통에 고장이 발생하면 정격전류의 수십배에 달하는 고장전류가 흐른다. 이 고장전류는 차단부 조작기의 트립(trip) 코일을 여자시키고 여자된 트립코일에 의해 조작기의 개극동작 스위치가 작동한다. 조작기는 조작로드를 통해 그림 1의 빗금친 가동부를 이동시킨다. 가동부가 이동함에 따라 파퍼실린더(puffer cylinder)내의 SF<sub>6</sub>가스는 피스톤에 의해 압축되고, 아크접점은 분리되며, 분리된 아크 접점사이에는 아크(arc)가 발생하게 된다. 이와 같이 발생된 아크는 노즐을 통해 파퍼실린더에서 압축된 가스에 의해 소호되어 전류는 흐르지 않게 된다. 아크가 소호된 직후 두 접점사이에는 과도회복전압(TRV: transient recovery voltage)이 인가되며, 이 전압에 견디기 위해서는 소호부(노즐, 가동아크접점 및 고정아크접점이 동시에 위치하는 부분)에 남아 있는 열가스를 신속히 배출시키고 냉각시켜 절연성을 회복해야 한다. 차단기가 차단성공에 이르기 위해서는 재발호(restrike) 없이 이러한 과정이 수행되어야 한다.

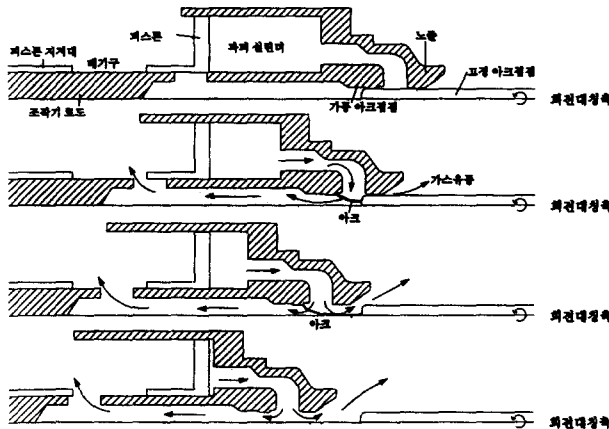


그림 1 초고압 파퍼형 가스차단기의 동작원리  
Fig. 1 Operating mechanism of UHV puffer type GCB

이상과 같이 차단기는 수 암페어(A)에서 수십 킬로암페어(kA)까지 전류의 크기에 관계없이 무조건 차단할 수 있는 능력을 보유해야 한다.

2.1 소전류 차단기의 기본개념

차단기가 소전류를 차단하는 경우에는 크게 두 가지 경우가 있다. 즉, 셉트 리액터(shunt reactor)에 흐르는 전류 또는 변압기의 무부하 또는 여자전류와 같은 지상 소전류를 차단하는 경우와 개로된 장거리 송전선로나 콘덴서 뱅크를 개로할 때 흐르는 진상 소전류를 차단하는 경우이다.

차단기가 유도(inductance)성 회로에 흐르는 전류를 차단할 때 전류가 영이 되기 전에 전류를 차단하는 전류재단현상(current chopping phenomena)이 발생할 수 있다. 즉, 일반적으로 차단기는 전류영점에서 전류를 차단하게 되어 있지만, 차단기의 소호력은 대전류를 고려하여 매우 강력하기 때문에 지상 소전류와 같이 매우 작은(보통 6A~20A 정도) 전류는

전류가 영점이 되기 전후에 아크를 소호하는 경우가 발생한다. 이러한 전류재단에 의해 써지(surge)가 발생하고, 이 써지는 차단기의 절연뿐만 아니라 다른 전력기기에 해를 끼칠 수 있다. 하지만, 가스차단기의 경우는 재단전류 치가 작을 뿐만 아니라 수직적으로 재단하기보다는 어느 정도의 기울기를 가지고 재단하므로 써지의 크기가 현저히 줄어들며, 또한 새롭게 개발된 저써지용 접점재질에 의해 전류재단에 의한 써지의 발생이 작으므로 특수용도의 차단기를 제외하고는 초고압급 가스차단기에서는 특별히 고려하지 않는다[1]. 따라서 소전류 차단에 대한 가스차단기의 설계는 주로 진상 소전류에 대한 차단설계만을 고려하고 있다.

그림 2에 진상 소전류 개폐시 발생할 수 있는 현상에 대해 설명하고 있다. 그림 2에서는 전류영점에서 진상 소전류를 성공적으로 차단한 경우를 나타내고 있으며, 전원측의 인덕티브 리액턴스(그림 2의 L: inductive reactance)는 부하측의 커패시티브 리액턴스(그림 2의 C: capacitive reactance)에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 전류와 전압의 위상차는 대략 90° 정도이며, 전류가 전압보다 진상이다.

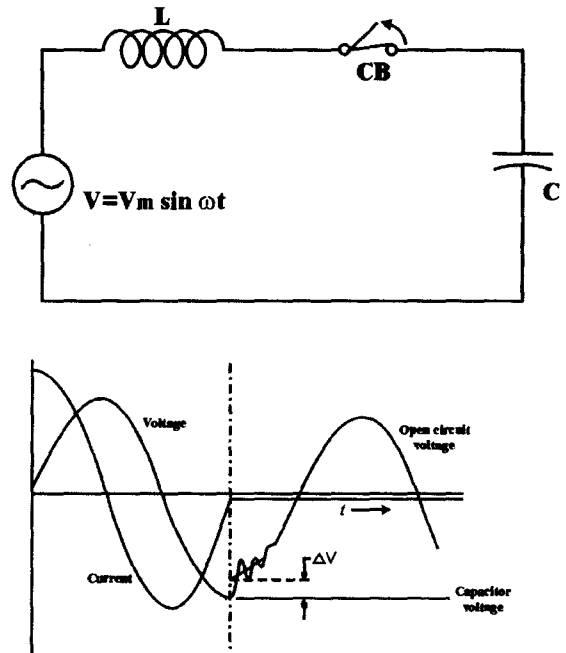


그림 2 진상소전류 차단시의 과전압 발생현상.  
Fig. 2 Transient recovery voltage during the small capacitive current interruption

전류가 차단될 때 콘덴서에 충전된 전압은 대략 최대 전압으로 되고, 콘덴서는 전원으로 부터 분리되었으므로 이 전하를 유지하게 된다. 전류영점에서 차단된 후 전원측 전압은 계속하여 상용주파수 전압파형으로 진행해 감으로 0.5 사이클 후에는 계통전압 최대치의 거의 2배에 해당하는 전압, 즉 다음 식과 같은 전압이 차단기 극간에 걸리게 되어 위험한 상황이 일어날 수 있다[2].

$$V_c(t) = V_m(1 - \cos \omega t) \tag{1}$$

여기서,  $V_m$ 은 계통 최대전압[V],  $\omega$ 는  $\omega=2\pi f$  로  $f$ 는 주파수[Hz]를 나타낸다.

콘덴서가 부하측에 결선된 상태에서 전력계통의 인덕턴스(Inductance)를 통해 진상 소전류가 흐르면, 차단기가 개로(open)상태에서 전원측의 계통전압보다 콘덴서에 걸리는 전압이 페란티(Ferranti) 상승효과에 의해 조금 더 상승한다. 그림 2에서  $\Delta V$ 가 페란티 상승효과에 의한 전압상승 분이다. 따라서 콘덴서가 분리될 때 전원측 전압은 전원측 인덕턴스와 차단기 전원측 표류용량(stray capacitance)에 의해 진동을 하면서 조금 낮은 전압으로 되돌아 간다.

대부분의 차단기는 부하전류나 고장전류를 차단할 때 첫 전류영점에서 차단하지 못하고 점접간격이 충분히 확보된 후에야 성공적으로 아크를 소호하지만, 진상 소전류와 같이 전류크기(수십 A ~ 수백 A)가 작은 경우는 접점이 개리한 뒤 곧 차단할 수 있으므로 대략  $2V_m$ 의 전압이 점접개리(separated distance of contacts)가 적을 때 점접사이에 인가되어 재발호가 일어날 가능성이 증가한다.

이와 같이, 차단기의 소전류 차단성능은 극간의 절연회복 능력과 밀접한 관계가 있다. 특히, 진상 소전류차단에서 가장 문제가 되는 것은 재발호이므로 차단후 0.5 사이클 시점에서 인가되는 회복전압의 파고치에 대하여 극간거리가 가장 작은, 아크시간이 영인 가혹한 경우에도 충분히 견딜 수 있어야 한다. 또한 대전류차단에 의해 절연노즐 및 아크접점이 손상 또는 오손될 수 있으므로 충분한 여유를 가져야만 한다.

**2.2 소전류 차단성능의 평가방법**

차단기의 소전류 차단성능을 파악하기 위한 해석기법은 크게 2가지 방법으로 접근해왔다. 즉, 절연파괴시험을 통해 구해진 실험적인 상수값을 이용하는 실험적인 접근방법과 스트리머 이론을 적용한 이론적인 접근방법이 있었다. 본 연구에서는 전자인 실험적인 방법을 적용한 결과를 제시한다.

소전류 차단에서는 전류가 작기 때문에 접점이 분리된 후 곧 차단될 수 있고, SF<sub>6</sub> 가스는 열적으로 분해되지 않으며 전기적으로 이온화되지 않는다. 따라서 상온에서 움직이는 냉가스(cold gas flow)로 취급할 수 있다. 또한, 방전속도의 관점에서 전하를 띤 하전입자의 속도는 보통  $10^7 \sim 10^8$  cm/sec 로, SF<sub>6</sub> 가스의 음속(sonic velocity) 또는 초음속 속도(supersonic velocity)보다 훨씬 빠르다. 즉, SF<sub>6</sub>가스가 초음속 유동(초음속인 경우  $10^4$  정도)으로 움직인다해도 절연파괴 속도를 따라갈 수는 없다. 이것은 절연파괴 속도에 대해서 SF<sub>6</sub> 가스는 정지해 있다고 가정할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 절연파괴전압은 정지된 SF<sub>6</sub>가스내의 국부압력(local gas pressure) P, 국부전계(local electric stress) E<sub>0</sub>, 절연파괴 전계 (breakdown electric stress) E<sub>f</sub> 로 표현할 수 있다는 것이 기본 개념이다.

SF<sub>6</sub>가스의 절연파괴 전계 E<sub>f</sub>는 평균 값이 아니라 절연파괴가 최초로 일어날 수 있는 확률로부터 구해진다. 즉, 차단기의 가동 아크접점은 기계적으로 고정 아크접점과 강하게 맞물려서 이동하게 되어 차단기를 동작시킬 때마다 매번 아크 점접 표면은 다른 조건을 가지게 된다. 따라서, 절연파괴전압을 구하기 위한 조건을 설정하기 어렵기 때문에 절연파괴전압은 사용되지 않은 새 점접의 첫 번째 절연파괴 확률로부터

구한다. 첫 번째 절연파괴 강도의 확률분포를 구하기 위한 절연파괴 전압은 직경 70mm, 표면 거칠기  $\pm 10\mu\text{m}$ 인 평행 평판 전극을 사용하여 측정하며, 그림 3은 SF<sub>6</sub>가스의 첫 번째 절연파괴 강도의 웨이블 분포(Weibull distribution)를 보여주고 있다[3].

점접표면에서의 전계강도는 위치에 따라 변하기 때문에 점접표면에서의 절연파괴전압도 위치마다 다르다. 임의의 전계강도에 대해서 점접에서 차지하는 면적의 크기는 동일한 전계강도를 갖기 위한 평행평판 전극의 면적보다 훨씬 작다. 따라서, 절연파괴 강도는 평행평판을 사용하여 얻어진 그림 3의 값보다 훨씬 높아지게 된다. 이러한 현상을 점접 면적효과(electrode area effect)라 부르며, 소전류 차단성능을 평가하기 위해 사용된 관계식은 이러한 점접 면적효과를 고려하여 적용하여야만 한다.

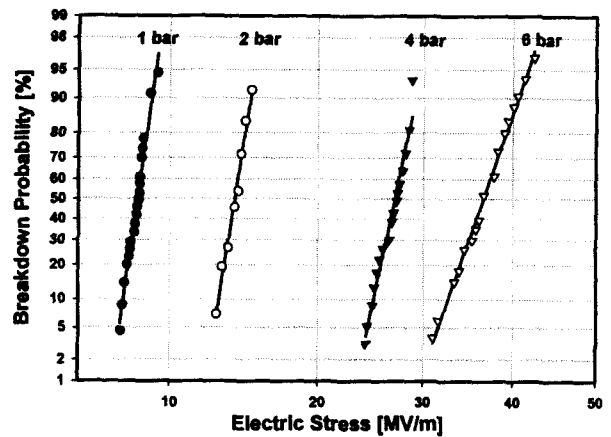


그림 3 SF<sub>6</sub>가스 중의 최초 절연파괴 강도의 Weibull 분포  
Fig. 3 Weibull distribution of the first breakdown probability in SF<sub>6</sub>

절연파괴 전계강도는 SF<sub>6</sub> 가스의 압력의 함수로 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_f = AP^n \tag{2}$$

여기서, A는 상수, n은 전극의 불평등전계 정도에 관계되는 상수이다. 점접사이의 절연파괴 전압 V<sub>bd</sub>는 식(3)으로 주어진다.

$$V_{bd} = 100 \frac{E_f}{E_0} \tag{3}$$

여기서, E<sub>0</sub>는 극간의 전위차가 100[V]일때의 국부 전계 값을 나타낸다. 식(2)와 식(3)을 조합하면 식(4)와 같다.

$$V_{bd} = 100 \frac{E_f}{E_0} = 100 \frac{AP^n}{E_0} \tag{4}$$

식(4)에서 SF<sub>6</sub>에 대한 압력과 밀도의 관계식으로부터 압력

P대신 밀도  $\rho$  를 사용하여 최종적으로 절연과피 전압을 식(5)와 같이

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E_0} \quad (5)$$

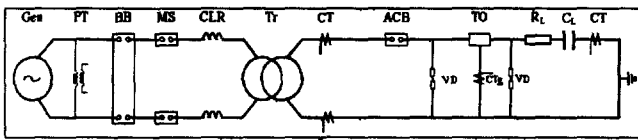
얻을 수 있다[3]. 여기서, a, b는 실험상수이다.

이상과 같이 실험적 접근방법에서는 식(5)의 실험상수 값을 수많은 실험으로 결정해야 하기 때문에 대단히 어려우며, 선진 외국의 차단기 제작업체에서는 기업비밀로 취급되고 있고 국내 제작업체에서는 본 연구의 값을 이용하고 있다.

식(5)로부터 차단기의 진상소전류 차단성능을 향상시키기 위해서는 가스밀도를 증가시키거나 스트로크(stroke)별 전계특성을 개선시켜야 한다는 것을 알 수 있다. 특히, 소전류 차단성능을 평가하는 데 있어서, 고정 아크점접 선단의 밀도 변화와 전계강도를 분석하는 것이 반드시 필요하다. 왜냐하면, 가스 차단부를 구성하고 있는 부분 중 고정 아크점접의 선단 부근에서는 초음속 유동과 충격파(shock wave)로 인하여 가스밀도가 급격히 감소하고 전계강도는 가장 커서 극간 절연 회복에 가장 취약하기 때문이다[4].

### 3. 소전류 차단시험

소전류 차단시험은 한국전기연구원의 대전력 단락시험설비를 이용하였으며, 그림 4는 시험회로도를 나타낸다.



Gen: 발전기, PT: 전압계, BB: back-up 차단기, MS: 투입스위치, CLR: 한류 리액터, TR: 변압기, CT: 검류기, ACB: 보조 차단기, TO: 피시품 차단기, RL: 부하측 저항, CL: 부하측 정전용량, VD: 분압기

그림 4 소전류 개폐시험 회로도

Fig. 4 Diagram of test circuit for small capacitive current interruption test.

차단성능 평가방법을 검증하기 위해 345kV급 파피형 SF<sub>6</sub> 가스차단기들이 사용되었지만, 차단성능 시험에서 차단실패한 차단기에 대해서만 검토되었다. 왜냐하면, 시험에 성공한 차단기보다는 실패한 차단기에 대해서 문제점을 파악하기가 쉬우며 평가결과에 있어서도 시험결과와 비교하는 것이 편리하기 때문이다. 소전류 차단시험은 국제규격(IEC)에 따라 차단기에 가장 가혹한 시험책무 4(test duty 4)번으로 시험전류 크기는 315A~346.5A 이며, 전류차단 후 차단기에는 식(6)

$$V(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} \times V_n \times (1 - \cos(\omega t)) \times F_k \times F_p \quad (6)$$

의 전압이 걸리게 된다. 여기서, V<sub>n</sub>는 차단기 정격전압, F<sub>k</sub>

는 전압계수(=1.2), F<sub>p</sub>는 차단기 점접 수(1점접 차단기인 경우=1.0, 2점접 차단기인 경우=0.55)를 나타낸다[5].

그림 5는 소전류 차단시험에서 전형적인 차단실패를 나타낸 것이다. 차단기는 ㉔시점에서 일단 전류를 차단한다. 하지만, 전류 차단 후 5.5ms에서 재발호가 일어난다. 이때의 전압 크기는 최대전압의 약 80%정도이다. 재발호가 발생하자 피시품 차단기에는 다시 전류가 ㉕기간 동안 흐르고, ㉕시점에서 점접거리가 더욱 벌어짐에 따라 전류를 차단하고 전압이 인가된다. 피시품 차단기에서 이러한 재발호는 총 15회의 차단 시험 중에서 6회 발생했다.

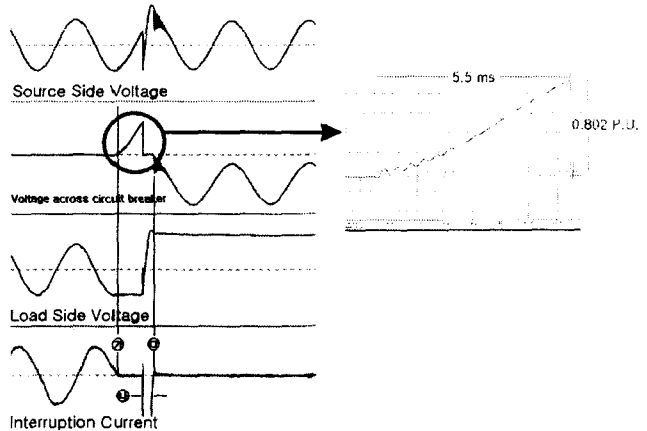


그림 5 소전류 차단시험에서 차단실패한 경우의 파형  
Fig. 5 An example of the failed test case of the small capacitive current interruption.

### 4. 평가방법의 적용

식 (5)로부터 차단기의 차단성능을 평가하기 위해서는 스트로크별로 가스밀도의 변화와 전계강도의 변화를 파악해야 한다는 것을 알 수 있다. 또한, 이미 2.2절에서 언급했듯이 차단기의 절연회복능력은 가장 취약한 부분인 그림 6과 같이 고정아크점접의 선단을 중심으로 이루어진다.

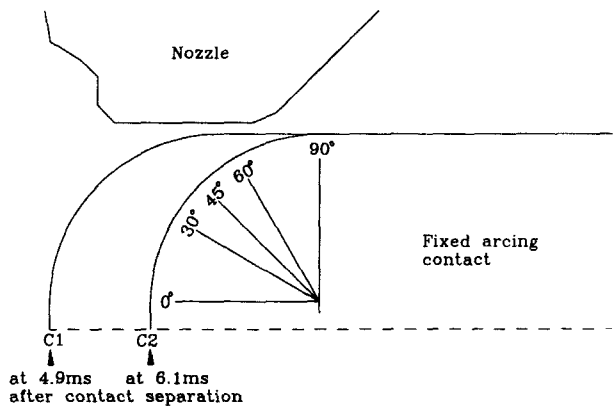


그림 6 고정 아크점접 선단부의 관측지점  
Fig. 6 Investigate region of the fixed arcing contact.

4.1 차단부내 유동해석

유동 중의 가스압력은 차단기의 초기 충전 가스압력과는 차이가 대단히 크며, 유동의 속도에 따라 크게 변한다. 또한, 접점상의 모든 위치에서 격렬하게 요동치는 가스 압력을 측정하는 것은 불가능하므로, 컴퓨터에 의한 유동해석이 반드시 필요하다.

차단부내의 유동해석을 위해서는 계산의 수렴성을 확보하면서 가동부의 이동을 모의 할 수 있어야 하고 복잡한 차단부의 형상을 모델링 할 수 있어야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 상용 CFD(computational fluid dynamic) 프로그램 "PHOENICS"가 사용되었다. 저자들은 이 상용 CFD 프로그램에 차단부의 이동, 경계조건, 차단부 형상, 스트로크 파형의 함수 SF<sub>6</sub> 가스의 물리적 특성 등 필요한 모든 사항들을 직접 사용자 프로그램(user subroutine)으로 작성하여 첨가시켰다[6].

그림 7은 피시폼 차단기의 파퍼 실린더 및 고정아크접점 선단의 압력상승을 측정결과와 해석결과를 비교한 것이다. 해석결과는 측정치와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 압력상승의 최대 값에서 해석결과는 측정결과보다 약 8% 높게 나타나고 있다. 이것은 실제 차단부에서 누설 량을 고려한다면 대단히 정확하다고 말할 수 있으며, 저자들의 경험에 비추어 냉가스 유동해석에서는 오차율이 최대 10%를 넘지 않는다[6].

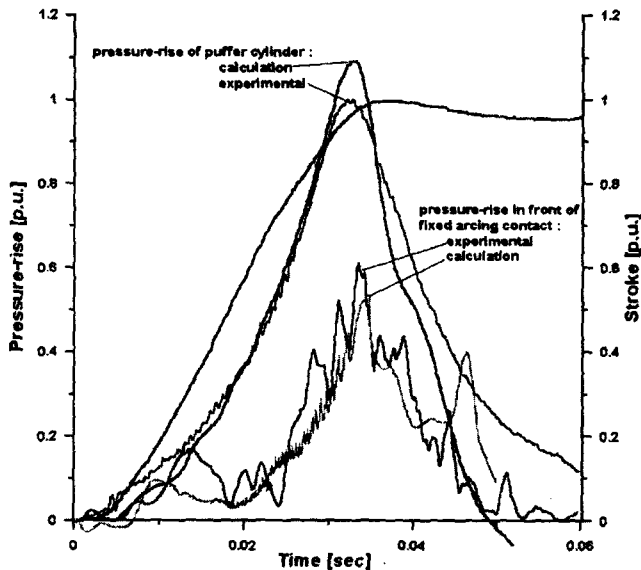


그림 7 압력상승의 비교 및 스트로크 곡선  
Fig. 7 Comparison of pressure-rise and measured stroke curve

4.2 차단부 전계해석

차단부의 전계해석은 매 시간마다(time step) 유동해석과 동시에 동일한 계산격자를 이용하여 수행되었다.

방전현상의 검토나 절연설계에 필요한 전계계산은 거의 전극(고전압 도체)에 전압이 주어진 때의 전계를 구하는 것이다. 이 때 공간의 전위 즉, 스칼라 포텐셜(scalar potential)  $\phi$

는 라플라스 방정식(Laplace's equation) 식(7)

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{7}$$

을 만족시키며,  $\phi$ 의 공간에서의 미분이 전계 E를 나타낸다. E의 성분은 식(8)

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z}, \tag{8}$$

이며,  $\phi$ 는 대지를 기준(영전위)으로 나타낸 것이다. 방정식을 풀기 위한 경계조건은 전극표면에서 식(9)

$$\phi = \text{일정(전극전압)} \tag{9}$$

이고, 전극이 몇 개있어도 각각의 전압 V1, V2, .....를 취한다.

식(7)과 (8)이 정전계를 풀 때의 기본 식이며, 전극배치나 문제조건에 따라 다른 식을 사용하기도 한다. 식(7)은 3차원의 직각 좌표계의 식으로 원통 좌표계나 구 좌표계에서는 다른 식으로 된다.

또한, 공간 전하가 존재할 때는 공간전하 밀도가  $q$ 인 경우, 식(7)의 우변을  $-q/\epsilon$  ( $\epsilon$ 은 매질의 유전율, 진공 중에서는  $\epsilon = \epsilon_0$ )로 치환하면, 프와송의 식(Poisson's equation)으로 된다. 절연물(유전체)이 기체와 고체 2종류 또는 그 이상인 때 (복합 유전체)는  $\epsilon$ 의 변화를 고려하여 식(10)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \tag{10}$$

으로 표현하여야 한다. 이 식의  $\epsilon$ 을 도전을  $\sigma$ 로 치환하면, 옴 법칙(Ohm's law)이 성립할 때 전류계의 식이 된다. 정전계를 도전지(conducting paper)나 전해액의 전류계로 모의하는 아날로그 법(일명 Field Mapping 법)은 이 원리를 이용한 것으로 전위를 측정하여 전계를 구하게 된다.

적용 식에 있어서도, 전류를 알고 있는 경우 식(11)

$$\nabla^2 \sigma \phi = 0 \tag{11}$$

에서 식(12)

$$J = \sigma E \tag{12}$$

를 풀어 전계를 구하는 것과, 두 전극에 인가된 전위차를 알고 있는 경우 식(13)

$$\nabla^2 \epsilon \phi = 0 \tag{13}$$

에서 식(14)

$$D = \epsilon E \tag{14}$$

를 풀어 전계를 구하는 방법이 있다.

이 중에서 저자들은 소전류 차단성능 해석에서는 식(14)를

적용하고 있으며, 아크가 존재하는 열가스 유동해석에서는 식 (12)를 사용하고 있다.

그림 8은 스트로크에 따른 고정 아크점점의 전계강도와 밀도의 변화를 나타낸 것이다.

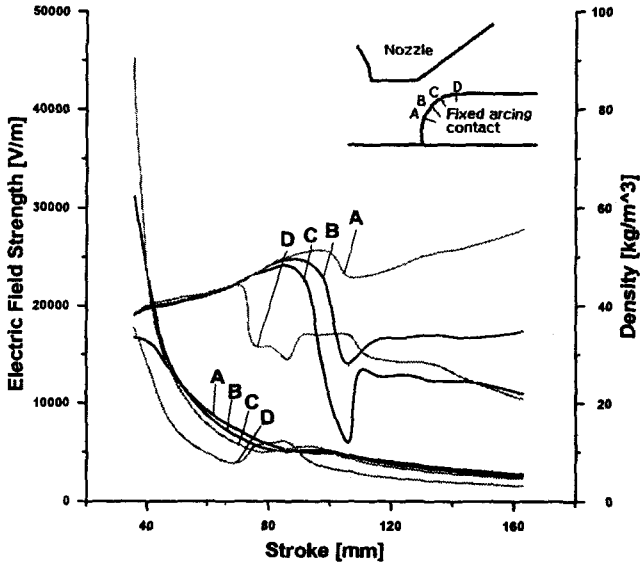


그림 8 스트로크에 따른 전계 및 밀도의 변화  
Fig. 8 Variation of electric field strength and gas density according to the stroke.

### 5. 결과 및 고찰

그림 9는 모델 차단기의 절연회복 특성을 시험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 9의 시험결과에서 점점 분리 후 시간 4.9~6.1ms사이에서 재발호가 발생했다. 이 시간동안에는 고정 아크점점의 90° 영역이 그림 6에 보여진 것처럼 노즐 목중심에서 노즐 하류장의 시작점에 위치하게 된다. 이 지점에서는 그림 10에 보여진 것처럼 가스유동은 마하 수 (mach number)가 1.0이상인 초음속 유동으로 발달해 있다. 그러한 초음속 유동은 고정 아크점점과 노즐 벽 사이에 충격파를 발생시키고 충격파는 가스밀도를 급격히 감소시켜 절연파괴를 일으키는 중요한 요소로 작용하게 된다.

한편, 그림 9에서 스트로크 중 "A"구간이 취약한 것으로 나타낸 절연회복의 해석결과는 시험결과의 취약부분 "C"구간을 넓은 범위에서 포함하고 있다. 따라서, 모델 차단기의 차단성능을 향상시키기 위해서는 충분한 여유를 고려하여 구간 "A"에서 충격파의 발생을 억제할 수 있는 노즐과 아크점점의 형상설계가 필요하다. 또한, 절연회복 특성은 차단기의 개극 속도와의 밀접한 관련이 있으므로 조작기의 조작력을 조절하여 적절한 개극속도를 선정하는 것도 매우 중요하다.

### 6. 결 론

설계단계에서 미리 차단기의 소전류 차단성능을 예측하는 것이 필요로 해서 시작된 본 연구는, 차단기의 이동을 모의함과 동시에 차단부내 유동해석[6]을 성공적으로 수행할 수 있게 되면서 비로소 완성할 수 있게 되었다. 또한, 저자들이 소

전류 차단성능을 예측하기 위해 적용해 왔던 두 가지의 평가 방법 중에서, 첫 번째 방법인 실험식을 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 차단부내 유동해석과 동시에 동일한 계산격자를 이용하여 전계를 계산할 수 있게됨으로써, 차단기의 극간 절연회복 특성을 사전에 파악할 수 있게 되었다.
- 2) 일련의 실험에서 얻어진 경험식 (5)를 적용하여, 모델 차단기의 소전류 차단성능을 예측한 결과, 시험결과에 나타난 취약지점을 충분히 포함하고 있다.
- 3) 따라서, 노즐과 아크점점이 존재하는 소호부의 설계 시에 상기의 취약지점이 고려될 것이며, 설계기준은 절연회복 능력에 절대적인 영향을 미치는 초음속 가스 유동에 의한 충격파의 형성을 조정하는 것이 될 것이다.

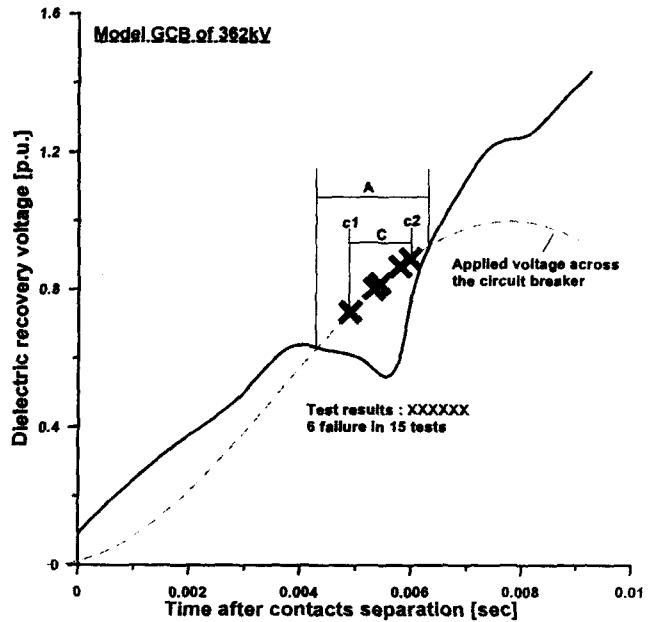
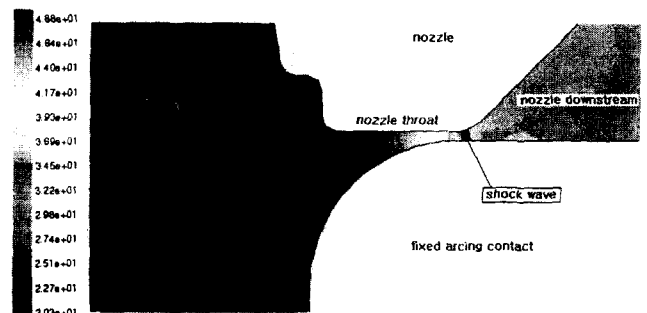
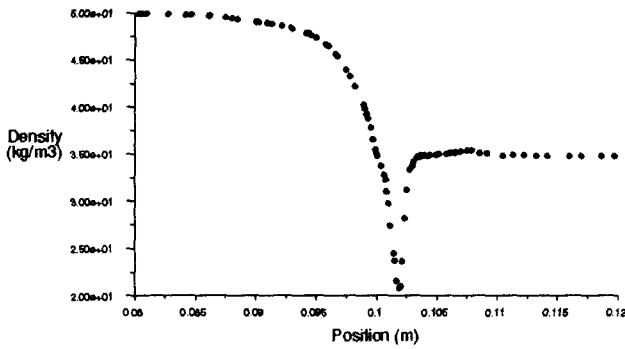


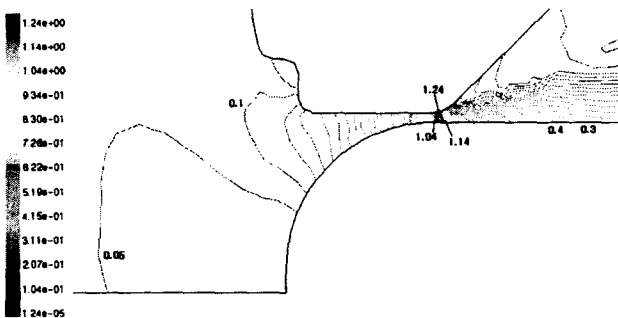
그림 9 모델 차단기의 절연회복특성  
Fig. 9 Characteristics of dielectric recovery on the model GCB.



(a) 가스밀도(gas density in kg/m<sup>3</sup>)



(b) 충격파 발생지점에서의 밀도분포(distribution of gas density at the point of shock wave)



(c) 마하 수(Mach number)

그림 10 노즐 하류장 시작점에서의 초음속 가스유동  
Fig. 10 Supersonic flow at the beginning point of nozzle downstream.

참 고 문 헌

- [1] Klaus Ragaller, Current Interruption in High-Voltage Networks, Plenum press, pp269-294, 1978.
- [2] Allan Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, John & Sons, Inc., pp92-122, 1991
- [3] F. Endo, M. Sato, et al., "Analytical Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF6 Gas Circuit Breakers", IEEE Transactions on Power Delivery, 89 WM 075-3, pp1731~1737, 1989.
- [4] T. Onchi, S. Sugiyama et al., "An Estimation of Current Breaking Performance of GCBs Using a Gas Flow Analysis", Proceedings of the XIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications GD 2000, Vol. 1, pp42~45, Sept. 2000.
- [5] S. Manganaro, A. Romiti, S. Rovelli, "Recent Experience with Synthetic Circuits for Capacitive Current Switching Tests on HV Circuit Breakers", IEEE/PES 1983 Winter Meeting, 83WM 125-2 pp1-8, 1983.
- [6] 송기동, 박경엽, 송원표, "초고압 가스차단부내의 냉가스 유동해석", 대한전기학회 논문지 49권 6호, pp387~394, 2000년 6월.

감사의 글

본 연구가 완성될 수 있도록 시험결과를 기꺼이 제공하신 (주)LG산전의 초고압 개발부에 깊이 감사드립니다.

저 자 소 개



송기동 (宋基東)

1963년 7월 5일 생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 3월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1563

E-mail : kdsong@keri.re.kr



이병운 (李秉潤)

1967년 11월 9일 생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 졸업(석사). 1997년 동대학원 졸업(공학박사). 1996년 2월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1565

E-mail : bylee@keri.re.kr



박경엽 (朴敬燁)

1957년 1월 3일 생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1978년 12월~1981년 5월 효성중공업(주) 전장설계부. 1981년 6월~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 그룹장(책임연구원).

Tel : 0551-280-1561.

E-mail : kypark@keri.re.kr



박정후 (朴正后)

1945년 4월 8일 생. 1975년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980년~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업(공학박사). 현재 부산대 공대 전자전기통신공학부 교수

Tel : 051-510-2369, Fax : 051-513-0212

E-mail : Parkch@hyowon.cc.pusan.ac.kr