

## 무부하시의 초고압 GCB의 파퍼실린더 내부의 상승압력 계산

박경엽<sup>o</sup> 송기동 최영길 신영준 송원표<sup>\*</sup> 강중호<sup>\*</sup>  
한국전기연구소 개폐장치연구팀

\* : 효성중공업(주) 기술연구소, \* : 현대중공업(주) 고압차단기부

### Calculation of Pressure Rise in the Puffer Cylinder of EHV GCB Without Arc

K.Y.Park<sup>o</sup> K.D.Song Y.K.Choi Y.J.Shin W.P.Song<sup>\*</sup> J.H.Kang<sup>\*</sup>  
Korea Electrotechnology Research Institute

\* : Hyosung Industries CO. R&D Dept.

\* : Hyundai Heavy Industries CO. H.V.Circuit Breaker R&D Dept.

#### Abstract

At present, the principle of puffer action in high current interruption is adopted in almost of the EHV(Extra High Voltage) and UHV(Ultra High Voltage) GCB(Gas Circuit Breakers). The thermal interruption capability of these GCBs critically depends on the pressure rise in the puffer cylinder at current zero. The pressure rise in the puffer cylinder depends on the puffer cylinder volume, flow passage and leakage area in the interrupter, stroke curve etc. Recently, commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) packages have been widely adopted to calculate the pressure distribution in the interrupter. However, there are still several problems with it, e.g. very expensive price, moving boundary problem, computation time, difficulty in using the package etc. Thus, the calculation of the puffer cylinder pressure in simple and relatively correct method is essential in early stage of GCB design. In these paper, the modelling technique and computed results for EHV class GCB (HICO, 145kV 40kA and 362kV 40kA GCB) are presented and compared with available measured results.

#### 1. 서론

SF<sub>6</sub> 파퍼차단기의 차단부 설계시 가장 먼저 고려하여야 할 사항은 100% BTF(Bus terminal fault)시험과 SLF(Short line fault)시험 및 진상소전류차단시험일 것이다. 이 중에서 BTF 차단능을 향상시키기 위해서는, 차단기의 극간에 높은 TRV(Transient recovery voltage)가 인가되기 이전에 가능하면 많은 열가스를 차단부의부로 배출시키는 것이 중요하며 이를 위해서는 노즐목의 직경을 크게 할 필요가 있다. 한편, SLF 차단능을 향상시키기 위해서는 차단순시의 전류0점에서의 파퍼실린더의 압력을 높게 유지하는 것이 관건이며, 이를 위해서는 파퍼실린더의 직경을 키우거나 피스톤의 이동속도를 증가시키며, 노즐목의 직경은 오히려 작게 하는 것이 바람직하다. 진상소전류차단 성능은 접점간의 절연강도에 직접 관계가 되므로 접점의 형상, 극간에 존재하는 SF<sub>6</sub>가스의 밀도분포 및 접점의 개극속도가 중요한 변수가 된다 [1, 2].

위에서 언급한 모든 현상들은 파퍼실린더내부의 압력상승과 밀접한 관련이 있기 때문에 파퍼실린더내부의 상승압력을 정확하게 계산하는 것은 차단기의 초기 설계단계에서는 아주 중요한 일이다. 근래에는 상용 유체해석용 프로그램 (예, PHOENICS, FLOW3D, STAE-CD, RAMPANT 등)을 이용하여 무부하시는 물론, 아크가 존재하는 경우에 대한 유동해석을 시도하고 있지만 아직은

여러가지 해결되어야 할 문제점들이 상당히 있다. 즉, 프로그램 구입비가 아직 고가인 점, 이동경계에 대한 해석의 어려움, 계산 시간이 오래 걸리고 사용하기가 어려운 점, 형상이 복잡해지거나 피스톤의 이동속도가 커질 때에 발생하기 쉬운 해의 수렴성 문제, 그리고 초음속영역에서 발생하는 충격파에 대한 해석문제 등이다. 따라서, 본 논문에서는 우선 무부하시의 파퍼실린더내부의 상승압력을 질량 및 에너지 보존법칙을 이용하여 간단하게 계산할 수 있는 과정을 소개하고 실험결과와 비교분석한다.

#### 2. 계산과정

그림 1은 초고압 GCB 차단부의 대표적인 형상중의 하나이다. 만약, 파퍼실린더 내부의 압력과 온도가 균일하게 분포되어 있다고 가정하면, 에너지 및 질량 보존법칙에 의해 파퍼실린더 내부의 압력을 구할 수가 있다. 우선, 파퍼실린더내부의 에너지균형을 생각해 보면 다음과 같다.

$$1) \text{ 시간 } dt \text{ 동안에 피스톤에 의해 행해진 일의 양} = P_1 W_1 A_1 dt$$

여기서, P<sub>1</sub>는 파퍼실린더의 압력 [N/m<sup>2</sup>], A<sub>1</sub>는 피스톤의 면적 [m<sup>2</sup>], 그리고 W<sub>1</sub>는 차단기의 스트로크 폭선으로부터 얻어지는 속도 [m/s]이다.

$$2) \text{ 내부에너지의 증가량} = d(M_1 C_v T_1)$$

여기서, T<sub>1</sub>는 파퍼실린더내부의 온도 [K], M<sub>1</sub>은 파퍼실린더 내부에 존재하는 가스의 질량 [kg], C<sub>v</sub>는 SF<sub>6</sub>가스의 정적비열 [J/(kg.K)]이다.

$$3) \text{ 시간 } dt \text{ 동안에 엔탈피의 형태로 파퍼실린더를 빠져나가는 에너지의 양} = F_1 A_k C_p T_1 dt$$

여기서, F<sub>1</sub>은 단위면적당의 질량손실률 [kg/(s.m<sup>2</sup>)], A<sub>k</sub>는 가스의 누설면적 [m<sup>2</sup>], C<sub>p</sub>는 SF<sub>6</sub>가스의 정압비열 [J/(kg.K)]이다. A<sub>k</sub>는 2가지로 나누어 생각할 수 있으며, 하나는 고정누설면적 A<sub>1</sub>이고, 나머지 하나는 시간에 따라 변하는, 즉 가동접점의 위치에 따라 변하는 변동누설면적 A<sub>2</sub>(t)이다. A<sub>2</sub>는 차단부의 각 부분에 대한 밀폐정도에 영향을 받으며 정확한 값을 계산하기가 어려우므로 대략적인 추정치를 사용한다.

$$1) - 3) \text{을 이용하면 파퍼실린더내부에 대한 에너지보존의 법칙으로부터}$$

$$P_1 W_1 A_1 = C_v \frac{d}{dt} (M_1 T_1) + F_1 A_k C_p T_1 \quad (1)$$

식 (1)에서 운동에너지의 형태로 파퍼실린더를 빠져나가는 에너지는 무시되었는데, 이는 누설질량의 속도가 초기에는 아주 작은 값이기 때문에 가능하다.

그리고, 질량보존의 법칙으로부터

$$\frac{dM_1}{dt} + F_1 A_k = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여  $F_1 A_k$ 를 소거하고 정리하면

$$P_1 W_1 A_1 = T_1 \frac{dM_1}{dt} (C_v - C_p) + C_v M_1 \frac{dT_1}{dt} \quad (3)$$

파퍼실린더내부의 가스가 등엔트로피과정 (Isentropic process)을 수행한다고 가정하면

$$\frac{dT_1}{T_1} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{dP_1}{P_1} \quad (4)$$

여기서  $\gamma$ 는 비열비 ( $=C_p/C_v$ )이다. 식 (3)과 식 (4)를 이용하면,

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\gamma}{V_1} (P_1 W_1 A_1 - \frac{P_1 A_k F_1}{\rho_1}) \quad (5)$$

여기서,  $V_1$ 과  $\rho_1$ 는 각각 파퍼실린더의 체적 [ $m^3$ ] 및 파퍼실린더내부의 밀도 [ $kg/m^3$ ]이다. 밀도  $\rho_1$ 은  $M_1$ 과  $V_1$ 으로부터 구해지며,  $V_1$ 은 스트로크곡선에 따라서 움직이는 피스톤의 속도에 의해 다음과 같이 시간에 따라서 감소한다.

$$\frac{dV_1}{dt} = -A_1 W_1 \quad (6)$$

단위면적당의 질량손실률  $F_1$ 은 파퍼실린더의 압력  $P_1$ 과 배기압력  $P_e$ 의 비에 의해 영향을 받으며, 파퍼실린더로부터 빠져나가는 가스가 Converging 노즐을 통과한다고 가정하면,  $(P_e/P_1)$ 이  $SF_6$ 가스에 대한 임계팽창비 (Critical expansion ratio, 즉 0.5878)보다 큰 경우에는

$$F_1 = \left( \frac{P_e}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[ \frac{2\gamma P_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}{\gamma-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

그리고  $(P_e/P_1)$ 이  $SF_6$ 에 대한 임계팽창비보다 작으면 노즐목에서 유동은 초음속상태에 있으며

$$F_1 = \left[ \frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \left[ \frac{2\gamma P_1}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

와 같이 된다.

### 3. 결과 및 검토

그림 2에 효성 145kV 40kA GCB에 대한 계산 및 측정결과를 스트로크곡선과 함께 나타낸다. 이 그림에서 계산치 및 측정치는 상당히 잘 일치하고 있으나 계산치의 피크치가 측정치보다 약간 높다. 이것은 계산과정에서  $SF_6$ 가스를 이상기체로 가정하였기 때문에 생기는 차이로 믿어진다. 실제로 압력이 높아질수록  $SF_6$ 가스의 특성은 이상기체의 특성에서 더욱 크게 벗어나므로 [3] 파퍼실린더내부의 압력이 높아질수록 기체의 비이상성을 고려할 필요가 있다 [4]. 그림 3에는 효성 362kV 40kA GCB에 대한 파퍼실린더내부의 압력상승에 대한 계산결과를 나타낸다. 이 모델에 대한 측정결과가 없기 때문에 직접 비교하는 것은 불가능하나 유사한 모델에 대한 일본에서의 측정결과와 비교해 볼 때 상당히 정확할 것으로 믿어진다.

### 4. 결론

국내의 초고압 GCB에 대해, 무부하시의 파퍼실린더내부의 상승압력을 질량 및 에너지 보존법칙을 이용하여 간편하게 계산할 수 있는 과정을 소개하고 측정결과와 비교분석하였다. 상용 유체 해석용 프로그램을 사용한 차단부내의 유동해석이 아직은 여러가지 문제점이 있어서 실용화 되기까지는 시간이 걸릴 것으로 예상이 되므로, 이 방법은 간편하면서도 상당히 정확하게 파퍼실린더내부의 상승압력을 계산할 수가 있으므로, 차단기의 초기설계단계에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 아크가 존재하는 경우에 대한 파퍼실린더내부의 압력계산도 가능하도록 프로그램을 확장한다면 효용성이 더욱 증가할 것으로 보인다.

### 참고문헌

- [1] "新しい世紀を迎える變電技術", 第38回 電源開發機器研究會, 東芝, 1991.12
- [2] H. Ikeda et al., "Development of large-capacity, SF6 gas interruption chamber and its application to GIS", IEEE Trans., Vol. PAS-103, No. 10, Oct. 1984
- [3] J. D. Anderson, "Modern compressible flow", McGraw-Hill Book Company, 1982
- [4] 平澤 邦夫, "SF6ガスの非理想性を考慮したノズル流計算" 일본전기관계학회 동해지부연학대회, 1974

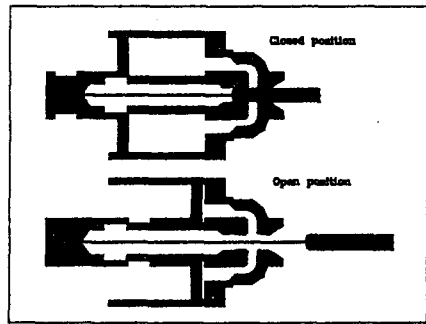


그림 1 초고압 파퍼형 GCB의 차단부 형상 (예)

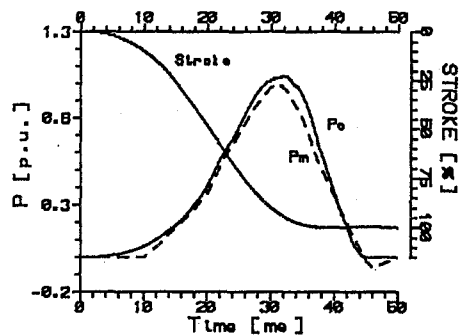


그림 2 효성 145kV 40kA GCB의 스트로크곡선, 파퍼실린더내부의 상승압력

Stroke : Stroke curve  
Pc : 계산결과  
Pm : 측정결과

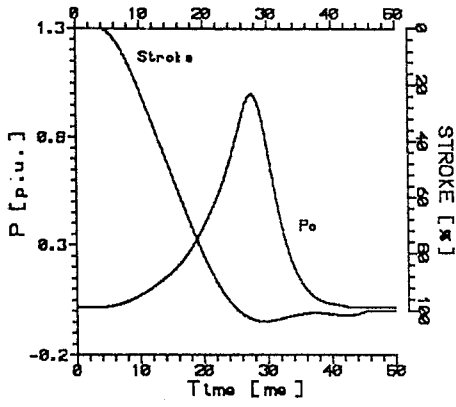


그림 3 효성 362kV 40kA GCB의 스트로크곡선 및 실린더내부의 상승압력

Stroke : Stroke curve  
Pc : 계산결과