

열팽창 분사식 가스차단부의 소호실내 압력상승 계산

최영길, 오연호, 신영준, 박경엽, 김희진(#), V.V.Choulkov(##)

Calculation of Pressure Rise in a Thermal-expansion Type Arc Chamber

Y.K.Choi, Y.H.Oh, Y.J.Shin, K.Y.Park, H.J.Kim(#), V.V.Choulkov(##)
KERI, KwangMyung Co.(#), V.E.I

Abstract - Recently SF₆ gas circuit breakers utilizing the thermal-expansion principle are increasingly used in distribution power system. Active researches and developments have been conducted to reduce the size and weight, and to improve the interrupting performance of the circuit breakers.

It was first developed a programme which could show the hot gas flowing into the thermal-expansion arc chamber. This programme, using so-called FLIC method basically, adopted 'Simplified Enthalpy Arc Model' which was somewhat modified to estimate the arc quenching process. The computation by it was compared with the measured results of the pressure rise in the chamber, and both showed fairly good agreement.

서 론

지금까지 차단기의 차단동작시 아크소호에 이롭지 않는 것으로 여겨진 아크의 노즐분쇄가 열팽창 분사식 가스차단기에서는 전류영점 전후에서 오히려 차단능력을 높일 수 있다[1]. 따라서, 아크소호현상에 대한 이론적 해석시에도 반드시 노즐분쇄효과를 고려하지 않으면 안 된다. 그러나, 해석상에서 아크소호과정 및 노즐분쇄효과를 처리하기가 그렇게 쉽지 않다.

본 논문에서는 먼저 열팽창 분사식 가스차단기의 유동 해석을 위해서 FLIC법을 도입하고, 아크변수; 아크반경, 아크저항, 아크전압 등을 계산하여 아크의 직경을 고려한 노즐분쇄효과와 아크에너지에 의한 소호실 압력상승을 살펴보았다.

지배방정식

유체해석은 압축성 유체해석 FLIC법을 기초로 해서, 차단기의 개극동작시 아크에너지를 간략히 모의할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 그 지배방정식은 다음과 같다[2].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= - \operatorname{div}(\rho \vec{u}) + \dot{m} \\ \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} &= - \operatorname{grad} p - \rho(\vec{u} \operatorname{grad}) \vec{u} \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} &= - \vec{u} \operatorname{grad}(\rho h) + \operatorname{div}(p \vec{u}) \\ &\quad + \sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

where, p = pressure
 ρ = gas density
 \vec{u} = gas flow velocity
 h = enthalpy of gas
 E = electrical field strength
 σ = electrical conductivity
 T = gas temperature

그림 1은 계산에 이용된 열팽창분사식 가스차단부의 축대칭 격자모델이다.

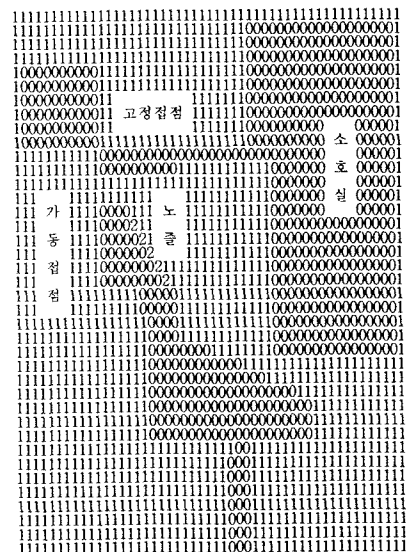


그림 1. 열팽창분사식 가스차단부의 축대칭 격자모델

아크모델링

소호실에 미치는 아크의 영향을 파악하는데는 정확한 아크변수를 구하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서, 압력과 온도에 따른 SF6 가스의 기체특성은 [3]를 참고하였으며, Simplified Enthalpy Arc Model을 채용하여 아크를 다음과 같이 가정하고, 간략화 하였다.

- 1) 아크는 두 아크접점간의 길이를 가지는 원통형이다.
- 2) 아크압력은 인접한 주위 압력과 동일하다.
- 3) 아크온도는 아크영역 전반에 걸쳐서 동일하다.
- 4) 가스는 노즐에서 축방향으로 일정한 압력경도를 가지고 흐른다.

위와 같은 가정을 바탕으로 해서, 먼저 아크직경은 다음 식(1)을 통해서 구한다[4].

$$D = k \cdot (l/p)^{1/4} (I/10^3)^{1/2} / 2 \quad (1)$$

여기서 $l(z)$ = 두 접점간 길이(단위는 cm), p = 아크압력(단위는 기압), I = 아크전류(단위는 A).

그리고, Ohm의 법칙과 더불어 식(1)에서 얻어진 아크반경과 SF6가스특성을 이용하여 식(2)를 만족하는 아크온도를 주어진 아크압력에서 수치해석적으로 반복연산하여 구한다.

$$\begin{aligned} f(T) &= 1 - \frac{\text{output energy}}{\text{input energy}} \\ &= 1 - \frac{h \cdot \rho \cdot u \cdot A}{V \cdot I} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 식(2)의 가스속도 $u(z)$ 는 가정 4)항에 의해서 다음의 식(3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$M^2 = [2/(\gamma - 1)] [(p_0/p)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1] \quad (3)$$

단, M = Mach Number, p_0 = 초기압력, γ = 비열비 이상으로, 아크의 온도가 구해지면, 이와 동시에 아크압력과 아크온도에 대응하는 아크의 전기전도도가 [2]를 통해서 얻어지므로, Ohm 법칙의 적용으로 아크저항, 아크전압을 구할 수 있다.

$$J = \sigma \cdot E$$

따라서, Enthalpy Arc Model을 토대로 아크반경, 아크온도, 아크저항, 아크전압의 아크변수를 주어진 고장전류에 대해서 결정하였다.

아크의 직경을 고려한 소호실의 압력상승 계산

제안된 아크모델은 시간에 대한 고장전류치의 증감에 따라서 아크경을 변화시키고, 아크저항에 의한 아크 발열량이 주어진 전류에 대해서 결정되기 때문에 아크경의 변화를 고려한 아크의 발열량은 아크의 발열영역에 대해서 단위체적당 발열량으로 전환하여 각 해당격자에 적용하였다. 이 때, 아크에너지는 가동점점의 노즐봉쇄로 인해 열팽창실로 빠르게 전달되어 충분한 압력상승을 형성하고, 이후 전류영점에서 효과적인 차단을 시도한다.

그림 2는 열팽창분사식 가스차단기의 소호실내 압력상승을 측정된 결과이며, 그림 3은 해석치와 비교해 보여 주고 있다.

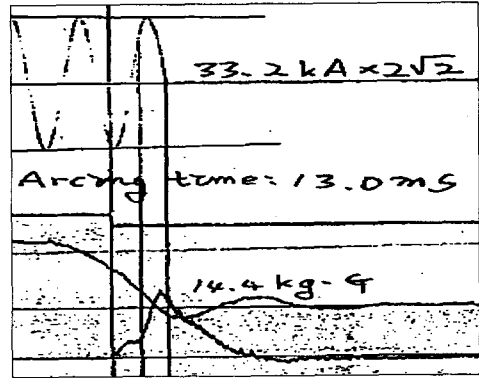


그림 2. 열팽창식 가스차단기의 소호실내 압력상승 측정

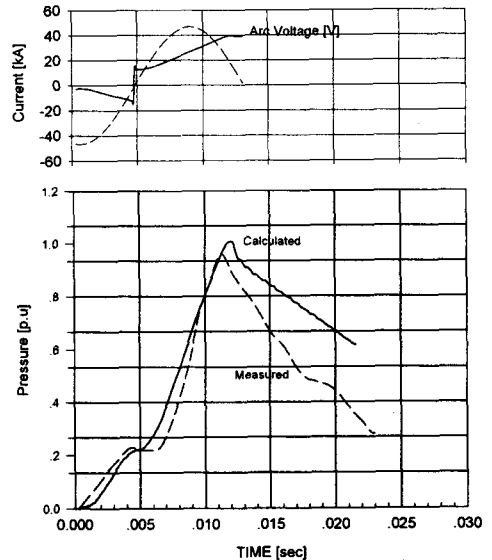


그림 3. 소호실 압력상승 해석치와 실험치의 비교

소전류 영역일 때 압력상승 지연을 제외하면, 전반적으로는 실험치와 해석치간에 큰 차이가 없으며, 아크의 직경을 고려한 아크에너지의 소호실내 압력상승계산에 대한 그 유효성을 잘 보여주고 있다.

본 아크모델을 통해서 그림 1구조의 열팽창실내 온도 파급 상태를 살펴볼 때, 전류영점에서 상대적으로 저온의 가스들이 먼저 팽창실을 빠져나와 가동접점 부근의 고온 열가스를 소호하는 현상을 볼 수 있었다. 또한, 약 1800°K이하까지는 이온·해리가 거의 발생하지 않는 SF₆가스특성을 비쳐볼 때[1], 차단이후 열팽창실내 평균 온도상승을 적정치까지 충분히 유지하는 용적을 피할 경우, 열팽창실의 용적최적/최소화를 얻을 수 있을 것이다. 본 열팽창실은 차단이후 5ms에서 평균온도상승치가 약 1200°K정도 나타내었다. 그림 4은 아크에너지를 보여주고 있다[5].

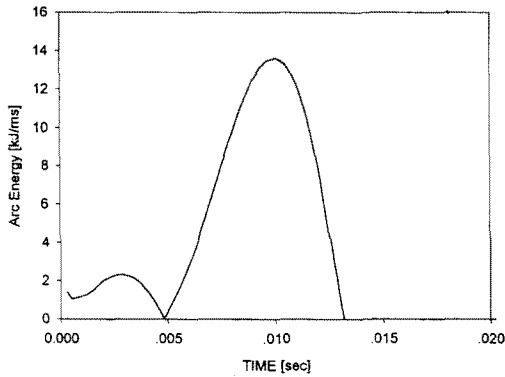


그림 4. 아크에너지 (Arcing Time = 13ms)

결론

유동해석을 위한 FLIC법을 기초로 Simplified Enthalpy Arc Model을 채용하여 아크경을 고려한 노즐목 봉쇄와 아크에너지에 의한 소호실의 압력상승을 계산하였다.

이상의 결과로부터 다음과 같이 결론을 얻었다.

- 1) 소호실의 압력상승에 대한 실험치와 해석치의 상당한 일치는 제안된 아크모델의 유용성을 잘 보여주고 있다. 본 열팽창실의 구조를 바탕으로 한 가스차단기는 정격전압 25.8kV, 차단전류 33.2kA까지 충분히 차단하였다.
- 2) 열팽창 분사식 가스차단기의 차단성능은 아크발열량에 비례하므로, 전류영점이전의 아크발열량으로부터 소호실내 압력이 차단가능한 정도까지 상승할 수 있도록 노즐목 통과이전 시간을 충분히 부여하는 것이 중요하다.
- 3) 전류영점 차단이전 약 1ms정도부터는 팽창실의 높은 압력에 의한 가스발산이 시작되어야 하며, 이것으로서 고온 아크/열가스를 극간으로부터 불어내어, 차단직전 소호성능에 유리하도록 설계하는 것이 중요하다. 이와 동시에 소호실내 아크에너지의 적절한 흐름을 유도하여, 상대적으로 보다 저온의 가스가 차단직전부터 극간에 흘러나올 수 있는 형상구현 역시 중요한 것으로 여겨진다.
- 4) 아크에너지의 전송과정을 제대로 구현하기란 결코 쉽지 않다. 본 연구에서는 Simplified Enthalpy Arc model을 채용하여 열팽창 소호실에 적용하고 있기 때문에 대

전류영역에서는 유효하지만, 소전류영역에서는 다소 미진하다. 이러한 부분에 대한 개발이 더욱 요구된다.

Reference

- [1] Y.Ueda, H.Sasao, Y.Mural, K.Yoshinaga, S.Tominaga, "Self-flow generation phenomena in a gas circuit breaker without puffer action", IEEE trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.8, pp 3888-3898. 1981
- [2] C.B.Ruchti, L.Niemeyer, "Ablation controlled arcs", IEEE Trans on Plasma science Vol. PS-14, No.4 August 1986.
- [3] L.S Frost and R.W Liebermann "Composition and transport properties of SF₆ and their use in a simplified enthalpy flow arc model", Proc. IEEE, 59(4), pp.474-485, 1971
- [4] J.J Lowke, H.C Ludwig, "A simple for high current arcs stabilized by forced convection", Journal of Applied Physics, Vol.46, No.8, pp 3352-3360, 1975.
- [5] "아크경을 고려한 열가스 유체해석과 GCB 차단성능 평가", 일본전기학회연구회자료 SP-94-62
- [6] T.Ushio, S.Tominaga, H.Kuwahara, T.Miyamoto, Y.Ueda, H.Sasao, "SLF interruption by a gas circuit breaker without puffer action", IEEE trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.8, pp 3801-3810. 1981
- [7] Y.Ueda, Y.Murai, A.Ohno, T.Tsutsumi, "Development of 7.2kV-63kA advanced puffer gas circuit breaker", IEEE trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, No.6, pp 1504-1510. 1982
- [8] V.V. Chulkov, 최영길, 송기동, 박경엽, 신영준, "800 kV 가스차단기의 아크특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp 1287-1289, 1995
- [9] 최영길, 송기동, 박경엽, 신영준, V.V. Chulkov, "800 kV 가스차단기의 차단성능평가를 위한 수치해석 적용", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 C, pp1888-91, 1996
- [10] 최영길, 송기동, 신영준, 박경엽, "과파식 차단부의 냉가스 유동해석기법에 관한 연구", '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp104-108, 1997.