

## 800kV 가스차단기의 차단성능평가를 위한 수치해석 적용 - 유동특성

최영길\*, 송기동, 박경업, 신영준, V.V. Chulkov\*\*  
한국전기연구소 개폐장치연구팀, \*\*V.E.I Russia

The application of a numerical technique to the current interruption  
properties of 800kV gas circuit breaker - Characteristics of gas flow

Y. K. CHOI\*, K. D. SONG, K. Y. PARK, Y. J. SHIN, V. V. CHULKOV\*\*

Switchgear Research Team KERI, V.E.I. in Russia\*\*

### ABSTRACT

Recently, FLIC(Fluid In Cell) method has been widely used for the compressible flow computation. A program which adopts the FLIC method and can analyze the flow conditions with arc in the interrupter was developed in our team. It was applied to the 800kV class gas circuit breaker for flow conditions with arc, and the results are presented and discussed in this paper.

### 1. 서론

최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 수치해석에 의한 유동해석이 증가추세에 있다. 수치해석에 의한 이러한 접근은 시간 및 비용의 절감을 유도하고, 실험이 불가능했던 경우에 대해서도 검토를 가능케 하고 있다.

본 논문에서는 압축성 유동해석에 자주 이용되는 Fluid -In Cell(FLIC) 방식을 채택하고, 이것에 아크해석기능을 추가시킨 프로그램을 사용하여 무부하 및 유부하시의 800kV급 SF<sub>6</sub>가스 차단기내 유동해석을 실시한 결과를 제시한다.

### 2. 경계조건

수치해석 방법으로 어떤 유동문제에 대한 해를 얻기 위해서는 먼저 유체를 포함하고 있는 체적을 일정한 크기의 셀로 나누어 계산망을 구성하는데, 이러한 계산망은 Richard A.Gentry [1]에 의해 제시된 FLIC(Fluid In Cell)을 도입하였다. 여기서, 시간  $t = n\delta t$  에 대해서 각 셀은 다음과 같이 정의된다.

밀 도 :  $\rho_0^0$ , z-속도분 :  $u_0^0$   
r-속도분 :  $v_0^0$  비내부에너지 :  $I_0^0$

그러나, 사실상 Richard A.Gentry에 의해 전개된 차분방정식들은, 임의의 경계면과 이웃하지 않는, 내부셀에 대해서만 적용가능하여, 경계면에서는 다소 수정이 요구된다. 일반적으로 경계면에 있어서는 유입경계(input boundary), 유출경계(output boundary), 반향경계(reflective boundary)의 3가지 유형으로 크게 구분되며, 특히 반향경계의 경우는 적합한 가상셀을 도입하여 경계면상의 유동변수를 얻어 내어야 하는데, 이것은 유체가 흐르는 도중 임의의 장애로 발생하는 반향상태를 등가적으로 나타내는데 상당히 유효하다.

### 1) 유입경계 조건

임의의 계(system)의 상태가 어떠한 방향으로 진행할 것인지, 그 경로과정을 나타내기 위해서는 먼저, 열역학 제 2법칙으로부터 다음과 같은 엔트로피(entrophy)를 정의한다[2].

$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T} + ds_{irrev} \geq 0 \quad [Joule/K] \quad (1)$$

s: 계의 엔트로피,  $\delta q_{rev}$ : 가역과정으로 계에 더해진 증가열량

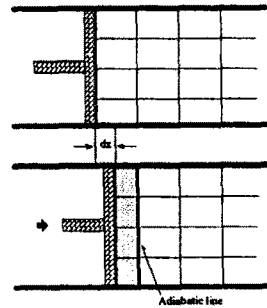


그림 1. 피스톤에 의한 압축과정

그런데, 파피식 차단부의 유동특성을 계산하기 위해서 유입 경계 조건으로, 미소시간  $\delta t$  동안 파피실린더내 피스톤의 압축과정이 그림 1에서의와 같이, 가능한 한 경계셀이 단일·가역 가능한 상태로 정의하였다. 이러한 상태는  $\delta q = 0$ ,  $ds_{irrev} = 0$  이므로, 식(1)로부터 식(2)를 유도할 수 있다.

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^\gamma = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$

이 관계식을 바탕으로 해서,  $\delta t$  동안 피스톤의 전진으로 인한 경계셀의 체적은 간격  $\delta x$  만큼 감소하고, 밀도는 오히려 증가하므로, 압축된 유입경계셀의 압력을 식(3)과 같이 구할 수 있었다.

$$p_2 = p_1 \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^\gamma \quad (3)$$

### 2) 반향경계 조건

계산영역내 흐르는 유체는 임의의 형상을 가지는 고체물에 의해 장애를 받으며, 이 때 유체와 고체물이 공통으로 공유하는 경계면에 대해서 적합한 경계조건을 적용하지 않으면 안된다.

다. 그림 2에 보는 바와 같이 가로막고 있는 장애물에 의해서 셀(i,j)와 셀(i+1,j)의 두 영역경계에서는 어떠한 질량, 에너지 흐름도 있을 수 없는 상태이므로, 셀(i,j)을 기준으로 경계상에 이러한 조건을 나타내기 위해서, 우선 경계면에 가장 인접한 고체영역에서의 셀(i,j)을 가상셀로 선정하고, 이 셀의 유동변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \rho_{i,j}^{n+1} &= \rho_{i,j}^{n+1}, & I_{i,j}^{n+1} &= I_{i,j}^{n+1}, \\ v_{i,j}^{n+1} &= -v_{i,j}^{n+1}, & u_{i,j}^{n+1} &= u_{i,j}^{n+1} \end{aligned} \quad (4)$$

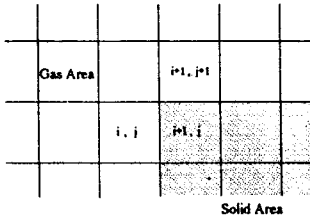


그림 2. 정상셀의 단순한 경계조건

그러나, 형상을 표현하기 위해서는, 일반적으로 복잡한 경계형상곡선을 따라 일련의 직선으로 간소화할 필요가 있다[1][3]. 이 때, 경계선에 의해 정상셀보다 작은 여러 형태의 부분셀이 형성되기 때문에, 이러한 부분셀에 대한 경계조건을 각각 마련해야 하는 어려움이 발생한다. 그러나, 실제 해석하고자 하는 차단부내의 형상은, 일부 모서리 곡면과 같은 국부적인 형상을 제외하고 나면, 단지 노즐부의 발산각에 의한 반향경계 조건만을 고려하게 되어, 형상에 따른 경계의 간소화를 피할 수 있다. 더우기, 이러한 일정한 기술기의 덕택으로 노즐발산 경계면은 동일한 경계조건을 갖도록 셀크기를 조절하여 나타낼 수 있으며, 이와 같은 경계조건을 만족시키는 경계면상에서의 해석을 다음과 같이 전개하였다.

대각선을 포함하는 셀에 바로 이웃하는 고체셀을 이 부분셀의 가상셀로 정의하고, 대각선에 대한 경계상의 조건식 (4)을 만족시키는 가상셀의 유동변수값을 구한다. 이를 위해, 우선 가상셀의 각 꼭지점으로부터 대각선에 수직인 거리로 직선을 내리고, 그림 3과 같이 동일 선상에서 이 직선선분과 같은 크기의 점들을 연결한 영상셀을 형성한다. 이 영상셀은 여러 내부셀들의 영역을 부분적으로 차지하고 있어 먼저, 각 셀의 점유적비  $s_i$  를 구하고, 이 값에 각 속도분을 곱한 대수합을 영상셀의 유동변수로 정의하며, 다음과 같다.

$$u_s = \sum s_i \cdot u_i, \quad v_s = \sum s_i \cdot v_i \quad (5)$$

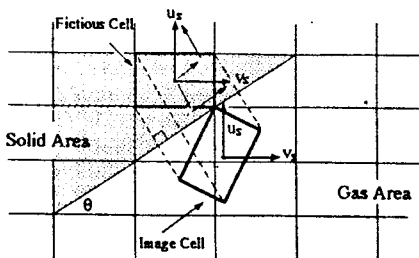


그림 3. 영상셀 형성

이렇게 얻어진 영상셀의 변수는 거울효과에 의해, 그림 3과 같이 대각선을 대칭으로 한 가상셀의 유동변수로 다시 정의하게 되는데, 이 때 대각 경계면에서의 유동상태를 나타내기 위해서는 역시 조건식 (4)를 만족시키지 않으면 안된다.

따라서, 그림 3으로부터 가상셀의 속도벡터를 성분분해하여 식(4)를 만족시키기 위해 전개하면, 다음과 같다.

$$u_{\perp} = v_s \cos \theta + u_s \sin \theta \quad (6)$$

$$v_{\perp} = v_s \sin \theta - u_s \cos \theta$$

여기서,  $u_{\perp}$ 는 대칭선에 평행한 속도성분,  $v_{\perp}$ 는 조건식 (4)를 만족하는 대칭선에 수직인 속도성분을 나타낸다. 식 (6)은 대각선을 대칭축으로 하는 가상셀의 속도벡터로, 이웃 내부셀과의 계산을 용이하게 하기 위해서 다시 실좌표 축방향으로 전환하면, 가상셀의 속도성분은

$$u' = v_{\perp} \sin \theta - u_{\perp} \cos \theta = v_s \sin 2\theta - u_s \cos 2\theta$$

$$v' = v_{\perp} \cos \theta + u_{\perp} \sin \theta = v_s \cos 2\theta + u_s \sin 2\theta \quad (7)$$

가 된다. 즉,  $u'$ 는 가상셀의 실좌표 축방향 속도성분,  $v'$ 는 실좌표 반경방향 속도성분이다. 따라서, 가상셀의 유동변수는

$$\begin{aligned} \rho_{i,j}^{n+1} &= \rho', & I_{i,j}^{n+1} &= I', \\ v_{i,j}^{n+1} &= v', & u_{i,j}^{n+1} &= u' \end{aligned} \quad (8)$$

으로 정의할 수 있으며,  $\rho'$ 는 영상셀 또는 가상셀의 밀도,  $I'$ 는 내부에너지를 나타낸다.

### 3. 아크해석

아크해석은 아크가 가스유동에 주는 영향을 예측하는데 있어서 주요 관심거리이다. 그리고, 절연회복 특성을 계산하기 위해서는 전류 영점에서 명확한 가스변수들의 값을 알아야 한다. 이러한 값들은 질량, 운동량, 에너지보존을 나타내는 미분방정식의 순서해를 통해서 얻어질 수 있다. 그러나, 이러한 방정식은 상당히 비선형성을 나타내고 있기 때문에 전반적인 계산은 시행할 수가 없으며, 특히 아크로부터 방사와 같은 일부 복잡한 방전상태는 수학적으로 정의하기가 어렵다. 따라서 아크 모델링도 산술상의 편의를 위해서 일부 단순화가 요구되는데, 다행히 몇몇 실험적 결과를 토대로 단순화를 시킬 수가 있었다. 기본적으로는, 아크모델링을 위해 Simplified Enthalpy Flow Arc Model[4]을 채택하고, 아크반경은 노즐목에서 이것을 측정하여 얻어진 J.J.Lowke[5]의 실험식

$$A = \sqrt{\frac{2zf}{\rho h v_s \sigma}} \cdot I$$

을 이용하였다. 여기서, A:아크단면적, h:엔탈피,  $\rho$ :아크의 가스밀도,  $\sigma$ :전기전도도, I:전류.

아크에 의한 냉가스에도 에너지 전달은 아크전류의 크기가 10kA 이하인 경우에 전극으로부터 전도에 의한 손실이 약 25%, 노즐벽면으로 흡수되는 손실이 약 15%, 가스의 대류에 의한 손실이 10%로, 그 나머지 50%는 방사에 의한 손실이며, 아크전류가 커질수록 방사에 의한 손실이 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 방사에너지를 계산하기 위해 R.W.Liebermann & J.J.Lowke의 이론적 계산결과를 토대로 한 net emission coefficient 데이터군을 이용하여 아크반경에 따라 적용하였다[6]

표 1 부부하 동작시 초기조건

온도	24.0° C
밀도	35.95kg/m <sup>3</sup>
압력	6.0 kgf/cm <sup>2</sup> (절대기압)
정격조작압력	15.0 kgf/cm <sup>2</sup>

#### 4. 유동해석 프로그램 적용

이상의 FLIC 기본원리와 경계조건을 실제 차단기에 적용하여 개구운동에 따른 무부하시에서 소호실 압력상승을 계산하였다. 그림 4은 유동해석을 위한 모델차단기내 소호부의 개략도를 나타내고 있으며, 구조적으로는 소호실의 가스압축이 가동부의 움직임으로 이루어지고 있으나, 해석상의 편의를 위해서 고정전극과 피스톤의 진행으로 대신 모의하였다. 그리고, 형상에 대한 계산망은 그림 5와 같이 구성하고, '0'을 가스, '1'을 고체, '2'을 부분셀로 표현하여 각 셀의 매질특성을 구분하였다.

한편, 표 1와 같은 초기조건에서 차단부 무부하 동작시의 스트로크, 그리고 파퍼실린더 내부와 고정점점 선단에서의 압력변화를 측정하였으며, 이것을 그림 6에 제시하고 있다. 여기서 얻어진 스트로크를 자체 개발한 유동해석 프로그램에 적용하여 무부하시의 압력을 계산하였으며, 그림 7에 파퍼실린더 내부의 압력계산 결과를, 그림 8에 고정점점 선단에서의 압력계산 결과를 각각 측정결과와 비교해 보여주고 있다. 자체개발 해석 프로그램에 의한 계산결과가 실험치에 비해 조금 높게 나타나고는 있으나, 큰 차이가 없으며, 이를 바탕으로 아크를 포함한 유부하시의 압력해석을 시도하여 그 결과를 그림 9에 제시하였다. 이러한 해석결과를 통해 얻어진, 유·무부하시 고정점점 선단으로부터 각도 60° 지점 근처에서의 밀도를 그림 10에 나타내었다. 이 지점은 전계가 가장 집중되어 절연회복에 가장 취약한 부분으로 차단기가 고정전류의 차단에 성공하기 위해서는 극간의 높은 전압적무를 견딜 수 있도록 무부하 및 유부하 차단시의 절연회복 특성을 향상시키는 것이 특히 중요하다. 그림 10에서, 무부하시 밀도는 노즐폭 통과이후 전반적으로 큰 변화를 나타내지 않고 있는데, 냉가스의 노즐발산 이후 발생하는 음속에도 불구하고 밀도저하를 나타내지 않아서, 이러한 변화는 진상소전류 차단성능에 나쁜 영향을 주지 않을 것으로 생각된다. 유부하시 밀도곡선은  $1-\frac{1}{6}$  cycle 전류의 전류영점

(25ms)부근에서 빠른 증가를 보여주고 있으며, 전류영점이후 차단을 위한 열적회복과 절연회복 특성에 긍정적인 현상임을 알 수 있다. 이 때 전류영점직후 노즐입구 압력이 1.57Mpa, 노즐목에서의 가스속도가 180m/s를 나타내었다. 이 값들은 열적회복 특성해석에 주요변수인 열전도 계수를 구하는데 필요하며, 이후 이러한 요소를 통해서 전류크기가 RRIV에 미치는 영향정도를 판단할 수 있을 것이다. 그림 11(a)은 무부하시 속도분포, 그림 11(b)는 아크해석을 통한 속도분포의 한 예를 나타낸다.

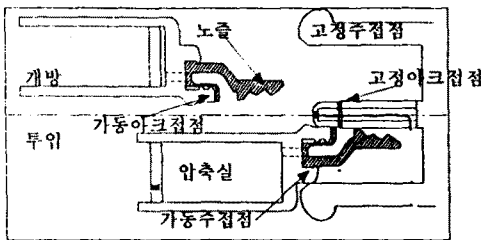


그림 4. 모델차단기내 소호부의 개략도

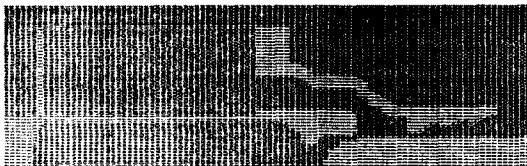


그림 5. 모델차단기의 유동해석을 위한 계산망

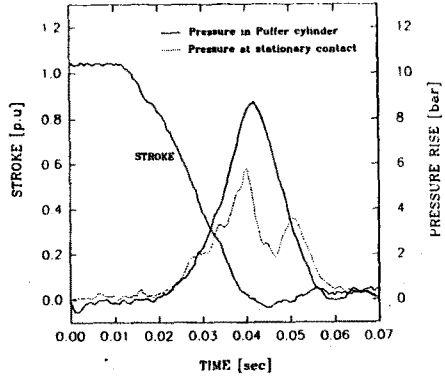


그림 6. 차단기의 무부하 동작시 측정치

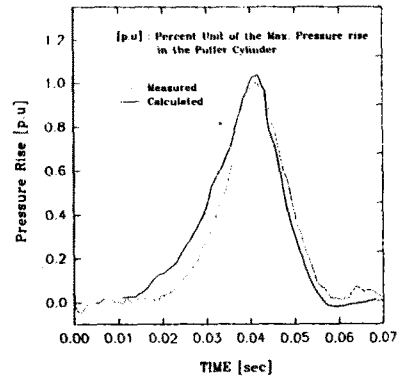


그림 7. 무부하시 파퍼실린더내 압력변화의 측정치와 비교

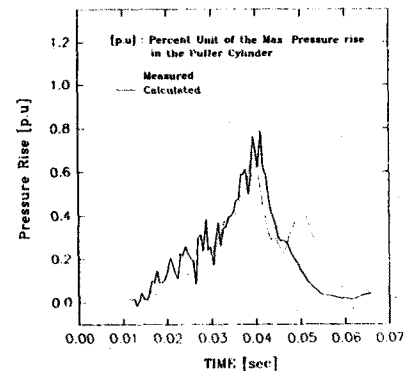


그림 8. 무부하시 고정점점 선단 압력변화의 측정치와 비교

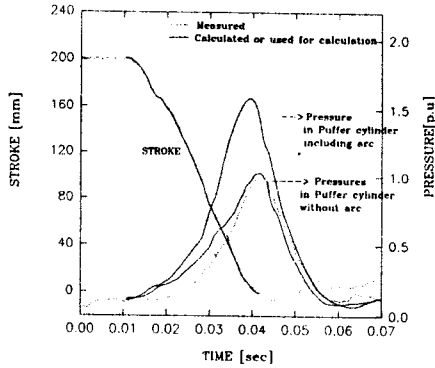


그림 9. 아크를 포함한 파퍼실린더내 압력변화 계산결과

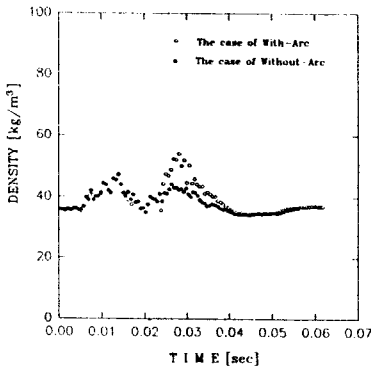


그림 10. 고정점점 선단 60° 지점 근처에서의 밀도



(a) 무부하시 속도분포(24.5ms)



(b) 유부하시 속도분포(24.5ms)

그림 11. 차단부내 속도분포 예

## 5. 결 론

본 연구에서는 간편하고, 신뢰성이 있는 FLIC법을 이용하여 가스차단기 소호부의 냉가스 및 열가스 유동해석을 실시하였다. 자체개발 해석 프로그램에 의한 무부하시 파퍼실린더내 및 고정점점 선단의 압력계산 결과가 실험치와 잘 일치하였으며, 이러한 결과를 토대로 아크모델링을 접목시켜 계산을 수행하였다. 이상의 결과로부터 개발된 프로그램이 전반적인 차단부내의 유체흐름을 이해하고 파악하는데 유용한 해석도구로 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 향후 과제로 해석상의 단순화로 아크 열해석이 현재로서는 상류장에서만 유효하므로 고정점점이 하류장을 충분히 빠져나간 시점에서도 유동분포를 해석할 수 있는 아크 열해석의 보완이 필요하다. 그리고, 이 프로그램을 많은 실험 데이터를 통해서 점진적으로 보완해 나간다면, 차단기의 전극 개극과정, 가스압축, 아크발생 등을 포함한 고온 열가스 흐름을 보다 세밀하게 분석할 수 있어 가스차단기의 설계·개발에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. Richard A.Gentry, Robert E.Martin, and Bart J.Daly, "An Eulerian Differencing method for Unsteady Compressible Flow Problems", J.COMPT. Phys., 1. P87-118, 1966.
2. John D. Anderson, "Modern Compressible Flow with Historical Perspective", McGraw-Hill Book Company
3. O.M Belotzerkovsky, Y.M Davydov, "Unsteady particle in cell method for gas dynamic problems", J comp. math and math. phys (Soviet Union), Vol.1, pp182-207, 1971
4. L.S Frost and R.W Liebermann, "Composition and Transport properties of SF<sub>6</sub> and their use in a simplified enthalpy flow arc models", Proceedings of The IEEE, Vol.59, No.4, April 1971.
5. D.T.Tuma, J.J.Lowke - J.Appl.Phys.Vol.46, p3361 1975
6. R.W. Liebermann and J.J.Lowke, "Radiation emission coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", J.Quant.Spectrosc.Radiat.Transfer, Vol.16, pp253-264, Pergamon Press 1976. Printed in Great Britain.
7. Hitoshi Mizoguchi, Mitsuru Toyoda, Hisatoshi Ikeda, "Interrupting capability of Gas Circuit Breaker Interrupting Chamber utilizing Arc Energy", 電氣學會論文集 B 113권 4호, 平成 5年, pp 351-360.
8. V.V.Chulkov, 신영준, 박경엽, 송기동, 최영길, "800kV 가스 차단기의 아크복성", 대한전기학회 하계학술대회 논문 C, 1995