

파퍼식 차단부의 냉가스 유동해석기법에 관한 연구

최영길, 송기동, 신영준, 박경엽
한국전기연구소

A Study on the Computational Technique of Cold Gas Flow in Puffer Interrupter

Y.K.Choi, K.D.Song, Y.J.Shin, K.Y.Park
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The puffer type GCB(gas circuit breaker) has been widely used in modern transmission power system. Understanding the motion of cold SF₆ gas flow is essential for the better design of those GCB's. For this purpose, a program using the so-called FLIC(Fluid-In-Cell) method has been developed and applied to a puffer type GCB. The calculated results are compared with those from the measurement and the computation by commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) package 'RAMPANT' and show fairly good agreement.

1. 서 론

현재, 전력용 차단기의 주류인 파퍼식 가스차단기(이하 GCB)의 기술개발은 신뢰성향상, 소형화를 주목적으로 하고 있어, 차단점절수의 감소를 가능도록 하는 초고압대용량 차단부의 개발이 적극적으로 진행되고 있다.

차단기의 절연회복 특성파악은 초음속 기류해석으로 인해서 고도의 해석기술이 필요하다. 사실, 정적인 가스 절연특성은 오랜 기간동안 꾸준히 발전해 온 전계해석에 힘입어 이미 그 해석기술력이 상당히 확립되어 왔으나, 차단기에서는 그 주요 책무인 차단동작시의 절연특성이 중요한 과제이기 때문에 현실적으로는 가스분사를 고려한 동적인 가스절연특성 파악이 오히려 필요하다.

지금까지 유체해석과 관련하여 여러 기법이 제안되고 있지만, 본 논문에서는 FLIC법(Fluid in Cell)을 채용하였으며, 이것으로 얻어진 무부하 동작상태에서의 해석결과를 실측치와 비교하여, 소전류차단시 동적 절연차단성능평가의 기초자료 획득 가능성에 대한 그 유효성을 나타내고자 한다. 또한, 상용 프로그램을 이용하여 상호간의 결과를 보완할 수 있는지를 검토하였다.

FLIC법은 초음속을 포함하는 압축성유체해석을 대상으로 해서, 충격과전후의 흐름을 안정하게 해석하는 것으로 이미 잘 알려져 있다. 따라서, 이 기법을 먼저 소개한다.

2. 냉가스 유동해석

2.1 자배방정식

- 질량보전식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v r)}{\partial r} = 0$$

- 축방향 운동량보전식 :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u \cdot v r)}{r \partial r} = - \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot v r)}{r \partial r} = - \frac{\partial P}{\partial r}$$

- 에너지보전식 :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h \cdot v r)}{r \partial r}$$

$$= \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(P u)}{\partial x} + \frac{\partial(P v r)}{r \partial r} + Q$$

ρ	밀 도	h	엔 탈 피
u	축방향(x)의 유속		
v	반경방향(r)의 유속		$h = C_v T + P/\rho$
P	압 力		
Q	발 열 환	C_v	정적비열
t	시 간	T	온 도

2.2 해석기법(FLIC 법)[1]

1) 계산망(The Computing Mesh)

어떤 유동문제에 대한 해를 얻기 위해서는 먼저 유체를 포함하고 있는 체적을 일정한 크기의 셀로 나누는데, 전형적인 계산망을 그림 1에 나타나 있다. 일반적으로, 임의의 셀(i, j)의 중심은 $(i + \frac{1}{2})\delta z, (j + \frac{1}{2})\delta r$ 에 위치하며, 좌표계에 따라 표 1과 같이 정의한다.

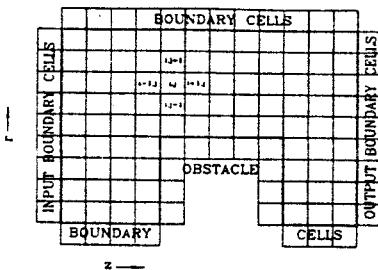


그림 1 전형적인 계산망(Computing Mesh)

표 1 매쉬 셀의 형상

구 분	직각좌표계	원통좌표계
체 적 (V_i)	$\delta r \delta z$	$2\pi(j + \frac{1}{2}) \delta r \delta z$
단면적 (S_j^z)	δr	$2\pi(j + \frac{1}{2}) \delta r^2$
단면적 ($S_{j+1/2}^r$)	δz	$2\pi(j + 1) \delta r \delta z$

여기서 (S_j^z)는 z -방향으로 유동에 대해 개방된 셀(i,j)와 셀($i+1,j$)사이의 경계면적이고, ($S_{j+1/2}^r$)는 r -방향으로 유동에 대해 개방된 셀(i,j)와 ($i,j+1$)사이의 경계면적이며, (V_i)는 셀(i,j)의 체적이다. 유체의 상태를 나타내기 위해서 사용된 기본적인 변수들은 밀도 ρ , 축방향 유체속도 u , 반경방향 유체속도 v , 비내부에너지(specific internal energy) I 이다.

2) 차분방정식(The Difference Equations)

시간 $t = n\delta t$ 에서 다음의 값들을 각 셀에 정의한다.

$$\text{밀도} : \rho_i^n$$

$$z\text{-속도분} : u_i^n$$

$$r\text{-속도분} : v_{ij}^n$$

$$\text{비내부에너지} : I_i^n$$

$t = (n+1)\delta t$ 동안에는 아래의 과정으로 계산된다.

첫번째 단계 : ρ_i^n , I_i^n 와 상태방정식을 이용하여 각 셀에 대한 압력 P_i^n 를 먼저 계산한다. 그 다음으로 경계면상의 값(이하 중도값(intermediate values))들을 아래의 관계식들을 통해 얻는다.

$$\hat{u}_{ij}^n = u_i^n - \frac{\delta t}{\rho_i^n \delta z} [P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n + B]$$

$$\hat{v}_{ij}^n = v_{ij}^n - \frac{\delta t}{\rho_i^n} \left\{ \frac{1}{2V_j} [S_{j+1/2}^r (P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n) - S_{j-1/2}^r (P_{i,j-1}^n - P_{i,j}^n)] + B \right\}$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_i^n &= P_i^n - \frac{\delta t}{\rho_i^n V_j} \{ P_{i+1/2,j}^n (\hat{v}_{i,j+1/2}^n - \hat{v}_{i,j-1/2}^n) \\ &\quad + S_j^n [\hat{u}_{i+1/2,j}^n P_{ij}^n - \hat{u}_{i-1/2,j}^n P_{ij}^n] \} \end{aligned}$$

$$P_{i+1/2,j} = \frac{1}{2} (P_{ij} + P_{i+1,j}), P_{i-1/2,j} = \frac{1}{2} (P_{i-1,j} + P_{ij})$$

점성항 B는 작은 영역에서 차분방정식의 신뢰성을 확보하기 위해 부가되는 인위적인 점성항(artificial viscosity term)이다.

두번째 단계 : 이번 단계에서는 전달효과(transport effects)를 계산한다. 셀과 셀사이를 흘르는 유량은 해당 셀의 밀도에 비례하므로, 시간증분 δt 동안에 면적 S_j^n 를 횡단하는 유량을 $\Delta M_{i+1/2,j}^n$ 라 하고, $S_{j+1/2}^r$ 를 횡단하는 유량을 $\Delta M_{i,j+1/2}^n$ 이라고 할 때 셀 i,j 의 우측 경계면상을 통과하는 유량(mass flow)은

$$\begin{aligned} \Delta M_{i+1/2,j}^n &= S_j^n \rho_i^n \hat{u}_{i+1/2,j}^n \delta t \quad (\hat{u}_{i+1/2,j}^n > 0) \\ &= S_j^n \rho_{i+1,j} \hat{u}_{i+1/2,j}^n \delta t \quad (\hat{u}_{i+1/2,j}^n < 0) \end{aligned}$$

셀 ij 의 상단 경계면상을 통과하는 유량(mass flow)은

$$\begin{aligned} \Delta M_{i,j+1/2}^n &= S_{j+1/2}^r \rho_{ij}^n \hat{v}_{i,j+1/2}^n \delta t \quad (\hat{v}_{i,j+1/2}^n > 0) \\ &= S_{j+1/2}^r \rho_{i,j+1} \hat{v}_{i,j+1/2}^n \delta t \quad (\hat{v}_{i,j+1/2}^n < 0) \end{aligned}$$

세 번째 단계 : 이상을 통해서, 셀 i,j 에서의 밀도에 대한 새로운 값은 질량보존의 법칙을 적용함으로써 얻어진다. 즉,

$$\begin{aligned} \rho_i^{n+1} &= \rho_i^n + \frac{1}{V_j} (\Delta M_{i,j-1/2}^n + \Delta M_{i-1/2,j}^n \\ &\quad - \Delta M_{i,j+1/2}^n + \Delta M_{i+1/2,j}^n) \end{aligned}$$

여기서, 경계면상을 통과하는 질량은 첫번째 단계에서 구한 속도성분과 비에너지의 중도값을 동시에 수반한다고 가정하여, 운동량과 에너지의 수송을 다음을 통해서 얻는다. 만약 셀 ij 의 네개의 변을 그림 2와 같이 번호를 붙이면, 다음과 같이 함수 $T_{ij}(K)$ 를 정의할 수 있다.

$T_{ij}(k) = 1$: 변 k 를 횡단하여 셀(i,j) 안으로 유체가 흘러들어갈 경우.

$T_{ij}(k) = 0$: 변 k 를 횡단하여 셀(i,j) 밖으로 유체가 흘러나가는 경우.

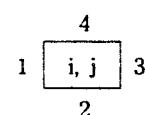


그림 2. 유량을 계산하기 위한 셀 ij 의 4개의 변

따라서, 시간 $(n+1)\delta t$ 에서의 속도성분과 단위질량당 에너지는 다음의 관계식을 이용해서 얻어진다.

$$v_{ij}^{n+1} = \frac{1}{\rho_{ij}^{n-1} V_j} \{ T_{ij}(1) \tilde{v}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n + T_{ij}(2) \tilde{v}_{i,j-1}^n \Delta M_{i,j-1/2}^n \\ - T_{ij}(3) \tilde{v}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n - T_{ij}(4) \tilde{v}_{i,j+1}^n \Delta M_{i,j+1/2}^n \\ + \tilde{v}_{ij}^n [\rho_{ij}^n V_j + (1 - T_{ij}(1)) \Delta M_{i-1/2,j}^n + (1 - T_{ij}(2)) \Delta M_{i,j-1/2}^n \\ - (1 - T_{ij}(3)) \Delta M_{i-1/2,j}^n - (1 - T_{ij}(4)) \Delta M_{i,j+1/2}^n] \}$$

$$u_{ij}^{n+1} = \frac{1}{\rho_{ij}^{n-1} V_j} \{ T_{ij}(1) \tilde{u}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n + T_{ij}(2) \tilde{u}_{i,j-1}^n \Delta M_{i,j-1/2}^n \\ - T_{ij}(3) \tilde{u}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n - T_{ij}(4) \tilde{u}_{i,j+1}^n \Delta M_{i,j+1/2}^n \\ + \tilde{u}_{ij}^n [\rho_{ij}^n V_j + (1 - T_{ij}(1)) \Delta M_{i-1/2,j}^n + (1 - T_{ij}(2)) \Delta M_{i,j-1/2}^n \\ - (1 - T_{ij}(3)) \Delta M_{i-1/2,j}^n - (1 - T_{ij}(4)) \Delta M_{i,j+1/2}^n] \}$$

$$E_{ij}^{n+1} = \frac{1}{\rho_{ij}^{n-1} V_j} \{ T_{ij}(1) \tilde{E}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n + T_{ij}(2) \tilde{E}_{i,j-1}^n \Delta M_{i,j-1/2}^n \\ - T_{ij}(3) \tilde{E}_{i-1,j}^n \Delta M_{i-1/2,j}^n - T_{ij}(4) \tilde{E}_{i,j+1}^n \Delta M_{i,j+1/2}^n \\ + \tilde{E}_{ij}^n [\rho_{ij}^n V_j + (1 - T_{ij}(1)) \Delta M_{i-1/2,j}^n + (1 - T_{ij}(2)) \Delta M_{i,j-1/2}^n \\ - (1 - T_{ij}(3)) \Delta M_{i-1/2,j}^n - (1 - T_{ij}(4)) \Delta M_{i,j+1/2}^n] \}$$

여기서, E_{ij}^n 은 총에너지를 말한다. 비내부에너지(specific internal energy)는 다음의 관계식에서 얻어진다.

$$I_{ij}^{n+1} = E_{ij}^{n+1} - \frac{1}{2} (u^2 + v^2)_{ij}^{n+1}$$

3. 압력측정시험[3]

3.1 압력측정 시스템

800kV 40kA 모델 가스차단부의 파퍼실린더내부와 고정아크접점선단의 압력변화를 측정하기 위해서 2개의 압

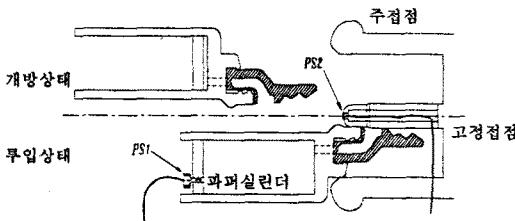


그림 3. 압력센서 취부도

력센서를 그림 3과 같이 취부하였으며, 센서로는 각각 스트레인 게이지형(Druck사 PDCR 200)과 반도체형(Toyota사 PSY-3)을 선정하였다. 각 센서는 차압을 정밀하게 측정할 수 있는 소형으로, 특히 고정아크접점에 취부된 압력센서(PSY-3)는 고정아크접점 선단의 형상변화를 최소화하기 위해서 압력측정면의 직경이 3.0mm인 극소형을 사용하였다. 그리고, 모델차단부는 고압의 밀폐된 탱크내에 설치되어 있기 때문에, 먼저 내부와 외부가 전기적으로 연결되도록 탱크상부 단자대에 압력센서의 리드선을 연결하고, 이것에서 발생하는 출력신호를 모델차단기의 외부로 전달하였다. 접점의 개극속도와 변위는 LVDT형 스트로트 센서를 통해 얻을 수 있었다.

그림 4는 개략적인 측정시스템의 구성도를 나타내고 있다. 그림 4의 증폭기(AMP)는 저역주파수 통과필터 기능(100Hz Cut-Off)을 가진 직류증폭기로, 각 센서로부터 나오는 신호를 증폭하여 오실로스코프 Tektronix 2440에 접속시킴과 동시에, GPIB를 통하여 PC컴퓨터와 데이터 및 정보교환을 할 수 있도록 하였다.

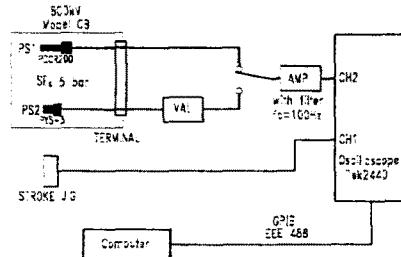


그림 4. 측정시스템 전체구성도

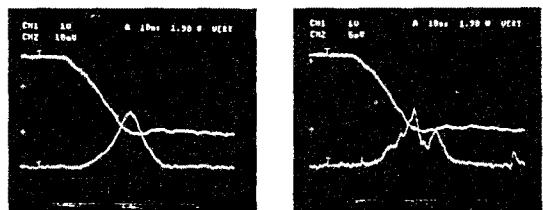


그림 5. 파퍼실 내부와 고정접점 선단의 압력측정결과

3.2 압력상승 측정결과

측정시스템을 이용하여 정격조작압력 15kg/cm² G로 차단기가 동작했을 때, 파퍼실린더내부와 고정아크접점 선단에서의 압력변화를 그림 5에 보여주고 있다. 정격조작압력 무부하 동작시험에서 파퍼실린더의 내부압력상승 최고치는 8.8기압정도로 개극행정이 완료되는 시점에서 얻어졌으며, 이것은 파퍼식 가스차단기의 전형적인 압력상승 특징으로, 이 때의 평균 개극속도는 7.7m/s를 나타내었다.

4. 상용프로그램을 이용한 냉가스 유동해석 적용

그림 6은 800kV급 40kA 모델차단부의 파퍼실린더내부와 고정아크접점 선단에서 측정한 압력치, 그리고 stroke곡선을 보여주고 있다. 가스차단기의 냉가스 유동해석은 일반 상용프로그램을 통해서도 그 접근이 가능하며, 그 중 RAMPANT ver 3.1을 이용하여 압력변화를 계산하였다. 그러나, RAMPANT ver 3.1은 이동격자형성이 불가능하여 stroke곡선에 따른 피스톤의 이동과 고정접점의 이동을 모의할 수는 없었다. 따라서, 그림 6의 개리거리에 따른 파퍼실린더내 압력상승 측정결과를 그림 7에서와 같이 노즐상류장의 입력조건(피스톤)으로 적용하고, 이 때의 고정아크접점 선단의 압력변화를 살펴보았다.

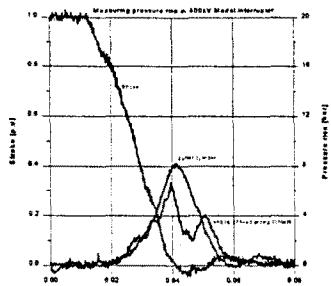


그림 6. 정격조작압력에서의 측정결과

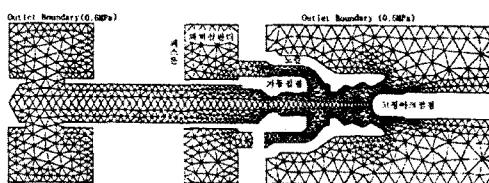


그림 7. RAMPANT에서의 입력조건과 계산격자

그림 8은 RAMPANT ver 3.1의 해석결과를 보여주고 있으며, 측정치와 잘 일치있음을 알 수 있다. 파퍼식 차단부의 빠른 압축과정은 노즐목 등의 일부분에서 shock wave(충격파)를 발생시키는데, 해석시에는 보다 세밀히 충격파를 형성시키는 것이 중요하다. 그것은 충격파의 형성이 충격파후방의 밀도분포에 상당한 영향을 주기 때문이다. 따라서, 차단부의 노즐목에서 일어나는 충격파의 그 형성과정은 후방의 고정접점 선단의 밀도와 압력 등에 중요한 요인이 된다.

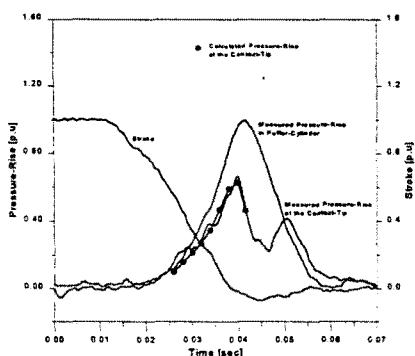


그림 8. RAMPANT에 의한 냉가스 유동해석 결과

5. 해석결과와 측정치의 비교

FLIC 기본원리를 모델 가스차단기에 적용하여 개극운동에 따른 무부하시에서의 파퍼소호실 압력상승을 계산하였다. 구조적으로는 소호실의 가스압축이 가동접점의

표 2. 무부하 동작시의 초기조건

온도	24.0 °C
밀도	35.95 kg/m³
압력	6.0 kgf/cm²
정격조작압력	15.0 kgf/cm²

움직임으로 이루어지고 있으나, 해석상의 편의를 위해서 고정전극이 이동하는 것으로 대신 모의하였다. 또한, 표 2은 무부하 동작시의 초기조건으로, 3절에서 구한 stroke 측정곡선을 자체 개발한 유동해석 프로그램에 적용하였다. 그림 9은 파퍼실린더 내부의 압력상승 결과를, 그림 10은 고정접점 선단에서의 압력상승 결과를 측정치와 비교해 보여주고 있으며, 자체개발 프로그램에 의한 이상의 결과가 실험치와 잘 일치하고 있다.

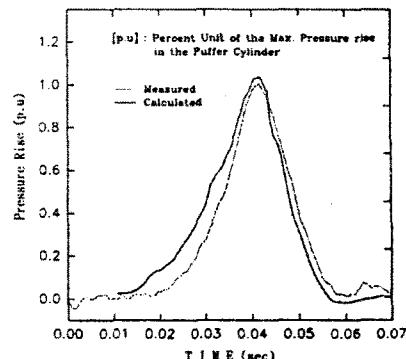


그림 9. 무부하시 파퍼실린더 내부 압력변화의 측정치와 계산치 비교

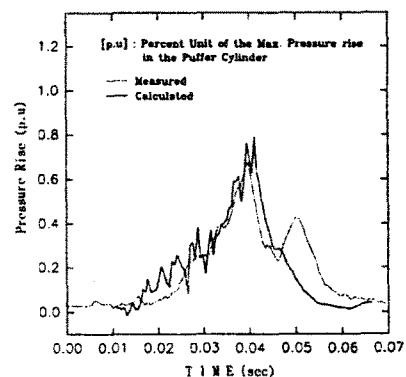


그림 10. 무부하시 고정접점 선단 압력변화의 측정치와 계산치 비교

소전류차단에서는 아크에너지률 거의 무시할 수 있을 만큼 적기 때문에 냉가스증 즉, 무부하상태에서의 절연

문제로 처리될 수 있지만, 차단기의 고전압화를 지향하는 경우 소전류차단시의 높은 회복전압은 차단직후 짧은 개리거리에도 전극간의 절연내력부족에 의해서 재점호 또는 재발호를 발생하고, 연이어 높은 써지전압을 유발하여 오히려 가장 과혹한 차단책무가 된다. 따라서, 차단 성능향상을 꾀하기 위해서는 전극부근에서의 가스밀도를 높이고, 전계를 완화시켜 개극직후의 짧은 극간거리에도 절연회복특성을 개선하는 것이 과제이다. 이러한 관점에서, 자체개발 해석프로그램에서 얻어진 결과의 일치는 절연회복 특성개선을 위한 해석기술에 더한층 신뢰성을 엿보여 주고 있다.

6. 결 론

이상의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자체적으로 유동해석 프로그램을 개발하고, 이것을 모델 가스차단기에 적용한 결과, 무부하동작시 파퍼실린더 내부 및 고정접점 선단에서의 압력상승 측정치와 잘 일치하였다.
- 2) 자체개발 프로그램은 사각격자로 형상을 구성하기 때문에 실형상 구현에 다소의 한계를 가지고 있어, 파퍼실린더내부의 압력상승 측정치를 입력조건으로 상용프로그램 RAMPNAT에 적용하였으며, 자체개발 프로그램의 결과보다 안정된 형태의 결과를 얻었다.
- 3) 그러나, 상용프로그램 RAMPNAT는 아직까지 이동격자의 불능으로 파퍼실린더의 가압과정을 실현할 수 없어, 임의의 정격조작압력에 대한 파퍼실린더의 압력상승 예측 등을 얻기 위해서는 여전히 자체개발 프로그램을 이용하여야 하며, 이것으로 얻어진 파퍼실린더내부 압력상승을 상용 프로그램의 입력조건으로 이용함으로써, 상호보완한다면, 보다 정확한 유체흐름을 파악할 수 있을 것이다.
- 4) 이와 같이 무부하 동작시의 측정치와 계산치의 일치는 차단부내 형상개선(노즐형상, 상류장 길이, 파퍼실린더 단면적 등) 및 유체흐름을 파악하는데 유용한 해석도구로서, 차단부의 설계변수를 검증하는데 유용할 것이며,
- 5) 또한, 가스밀도분포를 전계해석과 상호연관하여 전계 완화를 구현함으로써 동적절연회복특성을 개선할 수 있을 것이다.

Reference

- [1] R.A Gentry, R.E Martin and B.J Daly, "An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems", J.Comp.Phys.v.1, pp 87-118, 1966
- [2] 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

- [3] 장기찬, 송기동, 정진교, 박경엽, 송기동, "800kV 차단부의 무부하 압력상승 측정", 대한전기학회 추계학술대회, 1995
- [4] "超高壓 大容量 ガス遮断器開発における 氣流解析技術の適用", 전기학회연구회자료 개폐보호연구 (HV-89-91)
- [5] 전기학회기술보고 제 497호 1994 (일본)
- [6] V.V. Chulkov, 최영길, 송기동, 박경엽, 신영준, "800 kV 가스차단기의 아크특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp 1287-1289, 1995
- [7] 최영길, 송기동, 박경엽, 신영준, V.V. Chulkov, "800 kV 가스차단기의 차단성능평가를 위한 수치해석 적용", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 C, pp1888-91, 1996