

Analysis of Opening Characteristics for Puffer GCB

金 烘 權* · 鄭 鎮 教** · 朴 敬 燁***
(Hong-Kyu Kim · Jin-Kyo Jung · Kyong-Yop Park)

Abstract - This paper presents the calculation of opening characteristics for puffer GCB with the equations of the flow field and the motion of the driving mechanism. To obtain the stroke curve, the motion equation is solved simultaneously with the Euler equations. For a given piston location, the flow field is solved. The pressure inside the puffer chamber is then used to calculate the moving velocity and the new position of the piston. The FVFLIC method is employed to solve the axisymmetric Euler equations and the motion equation is solved by the Runge-Kutta method. The method is applied to the puffer GCB model and the stroke curve and the pressure rise in puffer chamber under no load condition are compared with the measured ones.

Key Words : opening characteristics, puffer GCB, driving mechanism, Euler equation, FVFLIC method

1. 서 론

파퍼식 가스 차단기(Puffer GCB: puffer gas circuit breaker)는 파퍼실의 압축에 의해 발생한 강한 유동을 극간의 아크 쪽으로 불어서 아크를 소호하는 방식이며[1,2], 아크 소호 능력이 자력 소호 방식에 비해 뛰어나기 때문에 초고압용 차단기에는 대부분 이 방식을 사용하고 있다. 차단기의 사고 전류 차단은 전기적 입력에너지가 낮은 전류 영점 부근에서 이루어지며, 전류 영점 이후에 아크열에 의한 분해 가스가 신속히 배출되어 절연성능이 우수한 양질의 SF₆ 가스로 채워져서 아크의 재발호가 일어나지 않으면 차단 성공에 이르며, 극간에 절연성능이 낮은 고온의 분해가스가 충분히 배출되지 않고 잔류하고 있으면 아크의 재발호가 발생하여 차단에 실패하게 된다. 따라서 가스 차단기의 차단특성 해석을 위해서는 공간 상의 가스 밀도, 온도 분포 파악을 위한 유동 해석이 필수적이다[3,4].

차단부의 유동 해석 시에는 조작 기구에 의해서 가동부가 이동하기 때문에 이동 경계조건을 고려하여야 한다. 차단부 내의 유동 해석에 관한 대부분의 연구는 차단기의 동작특성을 나타내는 스트로크 곡선을 시험에서 구하여 해석 시 이용하였으며[5,6], 동작특성 해석 시에는 차단부 형상을 단순화하여 파퍼실의 압력을 구하고 있다[7,11].

스트로크 곡선은 시간에 따른 가동부의 위치를 나타내는 곡선이며, 차단기 설계 단계에서는 이 곡선의 특성을 알 수

없기 때문에 차단기 설계 시에 CAE 기법을 적용하기 위해서는 동작특성을 고려한 차단 특성 해석이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 파퍼식 가스차단기의 동작특성 해석을 위해서 유동 해석 방정식과 운동방정식을 결합하여, 시간에 따른 가동부의 위치를 수치 해석적으로 구한다. 유동 해석을 위한 기본 방정식으로는 축대칭 오일러 방정식을 이용하며, 수치 유동 해석기법으로는 계산량이 적고 충격파의 영향을 비교적 정확히 고려할 수 있는 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법[8,9,10]을 적용하였다. 열가스 유동의 경우 아크에 의한 유동에의 영향을 에너지 주입법에 의해 고려하였다. 운동 방정식은 조작기의 조작력, 마찰력, 파퍼 반발력 등으로 구성된 뉴턴의 제2운동법칙으로부터 구하여지며, 이 방정식을 해석하기 위해 Runge-Kutta 법을 이용한다. 본 연구에 의한 동작특성 해석 방법을 실제 파퍼식 가스차단기에 적용하여 계산된 스트로크 곡선과 시험에 의해 구하여진 곡선을 비교한다.

2. 해석 지배 방정식

2.1 파퍼식 가스 차단기의 구조

그림 1은 파퍼식 가스 차단기의 차단부 기본 구조를 보여준다. 차단 과정에서 조작기의 구동 메커니즘에 의해 그림의 빗금 친 부분이 왼쪽 방향으로 이동하며, 그림2에서와 같이 가동부와 피스톤 간의 상대운동에 의한 파퍼실의 압축에 의해 압축가스가 극간의 아크 쪽으로 강하게 불어가서 아크를 소호하게 된다. 가동부를 이동시키는 조작기는 현재 유압식, 공압식 및 스프링 방식이 채택되고 있으며, 초고압 차단기의 경우에는 유압식 혹은 공압식이 많이 사용되고 있다.

* 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 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 그룹長
 接受日字 : 2002年 6月 19日
 最終完了 : 2002年 7月 20日

그림3은 본 연구에서 적용한 공압식 조작기의 구조를 보여주며, 차단기의 개극동작 시에는 공압 실린더에 공기가 주입되어 압력상승이 일어나며, 이 상승압력은 공압 피스톤을 이동시킨다. 이 때 회전 링크에 의해 차단부의 가동부가 아래 방향(그림1에서는 왼쪽방향)으로 이동하면서 차단과정이 이루어진다. 또한 투입 스프링이 압축되고, 스트로크가 끝나 는 지점에 기계적인 충격을 감소시키기 위한 완충장치인 dashpot이 작동하게 된다.

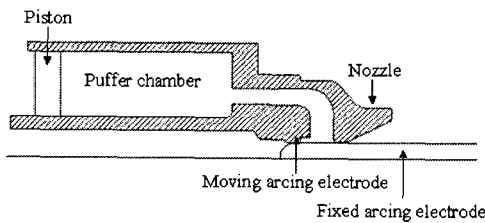
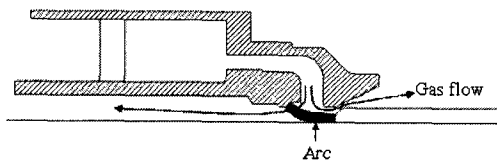
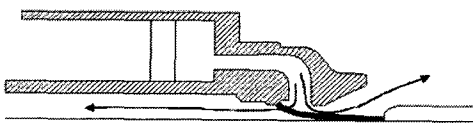


그림 1 파퍼식 가스차단기의 차단부 구조
Fig. 1 Structure of puffer type GCB



(a) 전극이 노즐 목을 빠져 나가는 시점



(b) 전극이 노즐 목을 충분히 벗어난 시점

그림 2 파퍼식 가스차단기의 차단 과정
Fig. 2 Interruption principle of puffer GCB

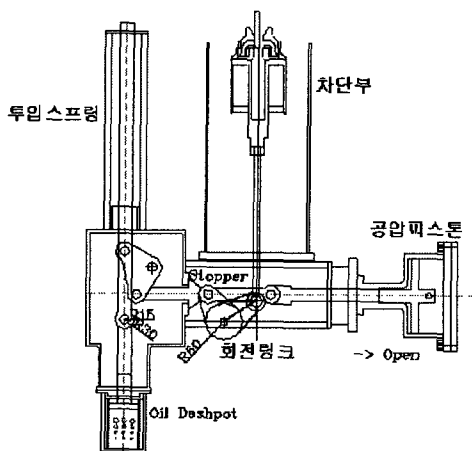


그림 3 공압식 조작기의 구조
Fig. 3 Structure of pneumatic operating mechanism

2.2 유동 해석 지배방정식

차단기 내의 유동 해석 시에는 축대칭을 가정한 유동 해석을 수행하여도 큰 오차가 없으며, 축대칭인 경우의 오일러 방정식은 원주 방향으로의 변화가 없다고 가정하기 때문에 원주 방향 성분이 없는 다음의 식으로 표현이 된다[10].

질량 보존 법칙 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \tag{1}$$

z방향 운동량 보존 :

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + J_r B_\theta \tag{2}$$

r방향 운동량 보존 :

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{U}) = -\frac{\partial P}{\partial r} - J_z B_\theta \tag{3}$$

에너지 보존 :

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \vec{U}) = -\nabla \cdot (P \vec{U}) + S_e \tag{4}$$

여기서 u, v [m/s]는 z 와 r 방향의 속도 성분, $\vec{U} = [u, v]$, ρ [kg/m³]는 밀도, P[N/m²]는 압력, E[J/kg]는 비총에너지(specific total energy), S_e [J/kg·s]는 에너지 소스 항을 나타내며, J_z, J_r [A/m²]은 z와 r방향의 전류밀도, B_θ [T]는 원주방향의 자속밀도를 나타낸다.

구하여진 유동 변수로부터 압력을 구하기 위해서 다음의 일반적인 기체 상태방정식이 이용된다.

$$P = R Z \rho T \tag{5}$$

여기서 R은 상온에서의 기체상수[J/kg·K], T[K]는 온도, Z=Z(P,T)는 압축도(compressibility)이며 온도와 압력의 함수로서 냉가스의 경우에는 이상기체를 가정하면 압축도는 1 이 된다.

2.3 동작특성 해석을 위한 운동방정식

차단부 내의 유동 해석 시에 시간에 따른 가동부 위치를 나타내는 스트로크 곡선은 대부분 시험으로부터 구하여 이용하고 있다. 하지만 차단부 형상이 바뀌면 파퍼실 내의 압력 상승치가 변하여 파퍼 반발력이 바뀌며, 따라서 같은 조작력을 가지고서도 가동부에 작용하는 유효 힘이 바뀌어 스트로크 곡선은 동일하지 않게 된다. 운동 방정식은 조작기의 조작력, 마찰력, 파퍼 반발력 등으로 구성된 뉴턴의 제2 운동법칙으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다[11].

$$F_{op} = M \frac{d^2 x}{dt^2} + F_{rep} + F_{etc} \tag{6}$$

여기서 F_{op} 는 조작기에서 출력되는 힘[N], F_{rep} 는 파퍼실 내의 압축에 의한 파퍼 반발력(repulsion force), F_{etc} 는 joint 부분의 마찰력, 투입 스프링에 의한 힘, dashpot에 작용하는 힘 등 기타 작용하는 힘을 나타내며, M [kg]은 가동부 질량, x [m]는 가동부 변위, t [s]는 시간을 나타낸다.

파퍼 반발력 F_{rep} 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_{rep} = P_{pis} \times S_h \quad (7)$$

여기서 P_{pis} 는 피스톤 전면의 압력, S_h 는 피스톤 단면적 [m^2]을 나타낸다.

조작기에서 출력되는 힘 F_{op} 는 조작기의 조작 메커니즘 해석을 통해 구할 수 있지만, F_{etc} 는 해석적으로 구하기 어려운 여러 가지 힘 성분을 포함하고 있다. 따라서 전체 조작 메커니즘에서 F_{etc} 를 일정하다고 가정하면 운동방정식은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$F_{rod} = M \frac{d^2x}{dt^2} + F_{rep} \quad (8)$$

여기서 F_{rod} 는 조작기로부터 가동부를 이동시키는 로드(rod)에 작용하는 유효 힘(effective force)을 나타내며, 이 힘은 차단부 가동부에 직접 작용하는 힘이다.

3. 유동 방정식과 운동 방정식을 이용한 동작특성 해석

3.1 스트로크 곡선 계산

식(6) 혹은 (8)에 의해서 시간과 변위와의 관계를 구하면 조작기의 조작력과 차단부의 이동특성 간의 관계를 알 수 있다. 식(6)의 여러 가지 힘 성분 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 파퍼 반발력이며, 이 힘을 구하기 위해서는 파퍼실 내의 압력이 계산되어야 한다. 파퍼실 내의 압축된 가스는 가동아크 접점이 분리되기 전에는 전극과 노즐목 사이의 좁은 공간(0.5~1mm) 사이로 유동이 형성되어 흐르며, 전극이 노즐목을 빠져나간 후에는 초음속 유동에 의한 충격파가 발생하여 노즐 하류장의 유동 특성에 따라서 파퍼실 압력이 크게 영향을 받는다. 따라서 파퍼실 내의 정확한 압력 상승 계산을 위해서는 유동의 변화가 생기는 해석 영역을 고려한 유동 해석이 필요하다.

그림 3은 유동해석과 운동 방정식 해석을 결합하여 동작 특성 해석에 의해 스트로크 곡선을 구하기 위한 순서도를 나타낸다. 식(6)의 운동 방정식을 풀기 위해서 Runge-Kutta 법을 적용하며, 이 식으로부터 시간에 따른 이동 변위를 나타내는 스트로크 곡선이 구하여진다. 이동 변위가 계산되면 유동 해석 영역 중에서 이동하는 부분을 이동시킨다. 실제 차단부에서는 가동아크전극과 노즐이 이동하지만, 해석의 편의를 위해서 형상이 간단한 피스톤과 고정아크전극이 이동하는 것으로 가정한다. 이동 변위에 따른 해석 영역이 정의 되면 유동해석을 통해서 파퍼실 및 피스톤 전면의 압력이 계산되며, 피스톤 전면의 압력을 이용하여 파퍼 반발력을 계

산한 후, 다시 식(6)을 해석한다. 이러한 계산 과정을 미리 지정된 스트로크까지 진행한다.

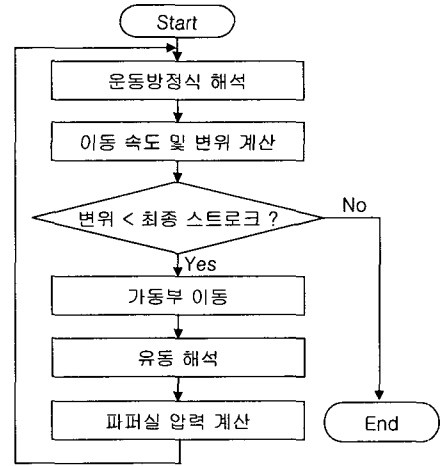


그림 4 동작 특성 해석 순서도

Fig. 4 Flow chart for analysis of operating characteristics

3.2 차단부 내의 유동 해석

3.2.1 가동부 모의

차단부 내의 유동 해석 시에는 가동부 이동에 따른 이동 경계 조건, 초음속 유동에 의한 충격파 발생, 노즐 등의 복잡한 형상 고려 등 CFD(computational fluid dynamics)를 이용한 해석 시 상당히 어려운 점들이 있다. 본 연구에서는 이러한 조건들을 비교적 정확히 고려할 수 있는 FVFLIC법을 적용하여 차단부 내의 유동 해석을 수행한다. 이 방법은 임의 형상의 격자를 사용할 수 있고, 계산량이 유한체적법, 유한차분법 등에 비해 적으며, 충격파에 의한 영향을 비교적 정확히 고려할 수 있으며, 경험에 의한 인공점성항을 사용하기 때문에 인공점성 계수에 따라서 계산 결과가 약간씩 달라지지만 차단부 내의 전체적인 유동장 분포 해석에는 적합하다[10].

가동부에 의한 영향을 고려하기 위해서 이동 격자를 사용하는 경우, 해석된 유동변수들을 이용하여 격자를 이동시키면서 해석을 진행하여야 하며, 적절한 격자 생성 기법과 격자의 재 정렬 등에 많은 계산량과 시간이 많이 필요하다. 차단부에서 파퍼실은 형상이 간단하기 때문에, 본 연구에서는 피스톤 전면에 위치한 셀(cell)의 체적 압축비를 이용하여 파퍼실 압축을 모의하는 방법을 사용한다. 이 방법은 질량보존법칙을 만족하며, 파퍼실과 같이 한 방향으로의 유동이 주된 경우에는 정확한 방법이다[12].

가동부 이동에 따른 피스톤 경계면에 위치한 셀에서의 밀도는 그림 5와 같이 피스톤 이동에 따른 체적 감소비를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\rho^{n+1} = \rho^n V^n / V^{n+1} \quad (9)$$

여기서 ρ^n , V^n 은 스텝 (n)에서의 피스톤 전면 셀의

밀도 및 체적이며, ρ^{n+1}, V^{n+1} 은 스텝 (n+1)에서의 피스톤 전면 셀의 밀도 및 체적이다.

피스톤의 이동 속도는 운동방정식으로부터 구할 수 있으며, 그림6의 피스톤 전면에 위치한 가상셀(ghost cell)의 속도조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{U_g + U_b}{2} = U_p \quad (10)$$

여기서 U_g 는 피스톤 앞부분의 가상셀의 축방향 속도, U_b 는 피스톤 전면셀의 축방향 속도, U_p 는 운동방정식에서 구하여진 피스톤 이동속도를 나타낸다.

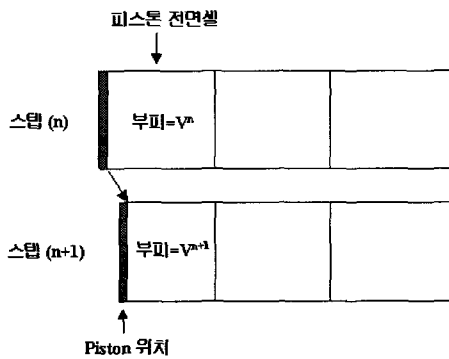


그림 5 피스톤 이동 및 압축 과정
Fig. 5 Simulation of piston movement and compression of puffer chamber

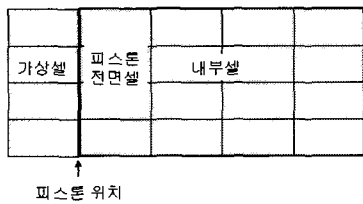


그림 6 내부셀 및 가상셀 정의
Fig. 6 Definition of inner cell and ghost cell

3.2.2 아크 모델링

열가스 해석 시 고온의 아크 플라즈마에 의한 유동의 영향을 고려하기 위해서는 아크 특성을 표현하는 아크 모델과 유동 해석 모델을 결합한 해석이 필요하다. 아크에 의한 유동의 영향은 에너지 보존식에서 에너지 소스항으로 표현이 되며, 본 연구에서 유동 해석의 목적은 아크 영역의 물리적 특성을 구하는 것이 아니라 파이프 내의 압력을 구하기 위한 것이기 때문에 아크에 의한 노즐 clogging 및 아크 영역에서 파이프 방향으로의 back-flow 정도를 고려할 수 있으면 충분하다고 판단된다. 따라서 여기서는 이러한 영향만을 고려하기 위해서 에너지 소스항 계산 시에 에너지 주입법[13,14]을 사용한다. 이 방법은 전기적 입력 에너지인 주울 발열을 계산하여, 이 중 복사에 의해 방출되는 에너지를 제외한 나머지를 아크 영역에 대입하는 방법이다. 아크 영역에서의 총 입력에너지는 다음과 같다.

$$Power = (1 - \alpha) \times V_{arc} \times I_{arc} \text{ [Watt]} \quad (11)$$

여기서 $V_{arc}[V], I_{arc}[A]$ 는 각각 아크 전압 및 아크 전류를 나타내며, α 는 입력전력 $V_{arc} I_{arc}$ 중에서 복사에 의해서 방출되는 에너지 비율이며, 차단기 아크의 경우 0.5~0.8 정도의 값을 가진다[15].

또한 식(4)의 각 셀에서의 에너지 소스항 S_e 는 다음과 같다.

$$S_e = (1 - \alpha) \times \sigma E^2 \quad (12)$$

여기서 $\sigma = \sigma(T,P)[mho/m]$ 는 셀의 전기전도도, E 는 전장세기[V/m]를 나타낸다.

에너지 주입법을 적용한 연구[13,14]에서는 전장세기를 실험에서 구한 값을 이용하여 일정하다고 가정하여, 아크 전압을 전장세기와 극간의 길이와의 곱으로부터 구하였지만, 실제로 알고 있는 값은 시간에 따른 아크 전류 파형이며, 따라서 아크 전압은 구하여야 하는 변수이다. 그리고 아크 영역의 셀에 에너지 소스 S_e 를 대입하기 위해서 미리 설정한 아크 영역 내의 셀에 식(11)에서 구한 총 입력에너지를 균등히 나누어 대입하고 있다.

본 연구에서는 극간의 전장세기를 일정하다고 가정하지 않고 유한 요소법에 의해 아크 영역 내의 전장 해석을 통해 전류 밀도 분포를 구한 후, 각 셀의 Ohmic heating의 총합이 총 전력과 같다는 조건 하에서 아크 전압을 구한다. 전장 세기는 다음의 전류 연속식 및 옴의 법칙에서 구하여진다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (13)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (14)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (15)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (16)$$

여기서 \vec{J} 는 전류 밀도[A/m²], ϕ 는 포텐셜을 나타낸다.

식(16)을 유한요소법에 의해 해석 시, $\sigma \neq 0$ 인 영역에 대해서만 해석을 하여야 하지만, 계산의 편의를 위해 해석 영역은 고정시켜 두고, σ 가 0인 요소에는 매우 작은 값의 전기전도도를 입력하여 해석하면 해석 영역을 바꿀 필요 없이 해석이 가능하다.

한편 해석 시에 알고 있는 값은 아크 전류이며, 전장 해석 시에는 양극 및 음극의 전위차를 알아야 한다. 이를 위해서 다음의 경계 조건을 이용하여 전장 해석을 한 후, 총 전력을 계산하여 아크 전압을 계산한다.

$$\phi_a = 1 [V] \quad (17)$$

$$\phi_c = 0 [V] \quad (18)$$

ϕ_a, ϕ_c 는 해석 시 경계조건으로 부여되는 양극 및 음극의 전위값이며, 이 값으로부터 전장 해석을 하면 전위차가 1[V]인 경우의 전장의 세기가 계산되어진다. 전위차가 1[V]

인 경우의 전장의 세기를 \vec{e} 라고 하고, 실제 전극간의 전위차를 V_{arc} [V]라고 하면 실제 전극간의 전장의 세기는

$$\vec{E} = V_{arc} \vec{e} \quad (19)$$

가 된다.

아크 전압 V_{arc} 를 계산하기 위한 아크 영역의 총 전력은 다음 식으로 표현이 된다.

$$\begin{aligned} P &= \int \sigma E^2 dV = \int \sigma (V_{arc} e)^2 dV \\ &= V_{arc} I_{arc} \end{aligned} \quad (20)$$

따라서 극간의 전압은 다음 식으로 계산된다.

$$V_{arc} = \frac{I_{arc}}{\int \sigma e^2 dV} \quad (21)$$

아크 전압이 구하여지면 전장 세기는 식(19)에 의해 계산되며, 이로부터 식(12)에 의해서 아크 영역의 각 셀의 에너지 소스항을 계산할 수 있다.

3.2.3 SF6 가스 물성치

본 연구에서 적용된 가스 차단기는 내부에 SF₆ 가스로 충전되어 있으며, 아크 플라즈마 영역 및 고온 가스에 대한 SF₆ 가스의 물성치는 Libermann 데이터[16]를 이용한다. 프로그램 내에서는 온도 및 압력에 대해서 가스의 밀도, 엔탈피, 전기전도도, 압축도 등의 여러 가지 데이터를 테이블 형식으로 저장하여, 주어진 온도 및 압력에 대해서 내삽(interpolation)에 의해 물성치를 구하도록 하였다.

4. 사례 연구

본 연구에 의한 동작 특성해석 방법을 실제 차단기 모델에 적용하여 그 결과를 검토한다. 대상 차단기는 170kV급 SF₆ 파퍼식 가스 차단기이며, 총 스트로크 길이는 160[mm], 초기 충전 압력은 5기압이며, 차단부 형상은 그림7과 같다. 식(6)을 이용하여 스트로크 곡선을 구할 경우에는 접촉 마찰력, joint 부분의 결합력, dashpot 및 스프링에 작용하는 힘 등을 조작기구 메커니즘 해석을 통해 구하여야 하지만, 이들 힘을 모두 정확히 구하기는 매우 어려우며, 따라서 여기서는 시험에 의해서 가동부에 작용하는 유효 힘을 구하여 식(8)로부터 스트로크 곡선을 구한다. 유효 조작력은 시험에 의해 측정된 스트로크 곡선으로부터 각 시간별로 가속도를 구하여 가동부 질량을 곱하여 구하였으며, 그림8은 구하여진 유효 조작력의 파형을 보여주며, 이 때 가동부 질량은 약 20[kg]이다.

그림 9는 아크의 영향을 무시한 무부하 시의 스트로크 곡선을 비교한 것이며, 해석 및 시험에 의한 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림8에서 시간 약 16[ms]를 기준으로 가속 구간($F_{rod} > 0$)과 감속 구간($F_{rod} < 0$)이 나누어지며, 그

림 9의 스트로크 곡선에서 가속 구간과 감속 구간의 경계점인 변곡점이 약 16[ms] 부근에 있음을 확인할 수 있다.

그림10은 피스톤 전면에서 계산된 압력 상승치를 시험 결과와 비교한 것이며, 이 값 또한 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 보듯이 노즐 및 가동아크전극 등의 가동부에 직접 작용하는 유효 조작력만 정확히 구할 수 있으면 스트로크 곡선 및 파퍼실 압력 상승치를 정확히 계산할 수 있음을 알 수 있다. 그림11은 시간에 따른 마하수 분포를 보여주며, 그림에서 보듯이 마하수 1 이상인 초음속 유동이 형성됨을 알 수 있다. 그림10에서 압력 상승이 최대인 시간은 약 28[ms]이며, 전극이 노즐 복 위치를 벗어나서 충분한 유도가 형성되어 있음에도 이 시점까지 파퍼실의 압력 상승이 계속 이루어지는 이유는 충격파 발생 지점에서 상류장의 유동 정보가 하류장으로의 전파 과정 시 불연속 면이 발생하기 때문이다.

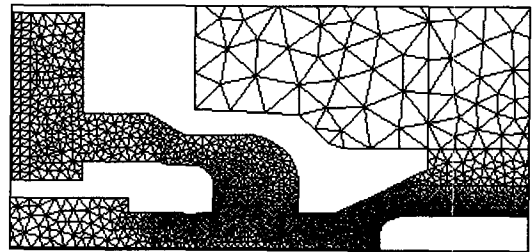


그림 7 해석 모델의 차단부 형상
Fig. 7 Geometry of analyzed GCB model

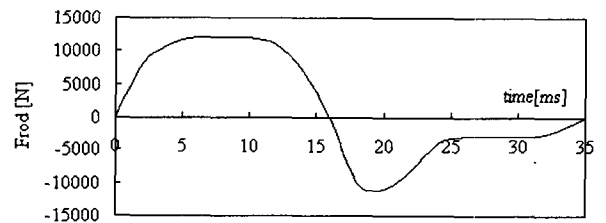


그림 8 가동부에 작용하는 유효 조작력 F_{rod}
Fig. 8 Profile of effective force acting on the moving part

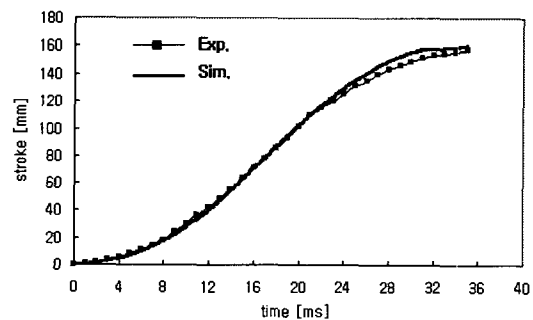


그림 9 무부하 시의 스트로크 곡선 비교
Fig. 9 Comparison of stroke curve under no-load condition

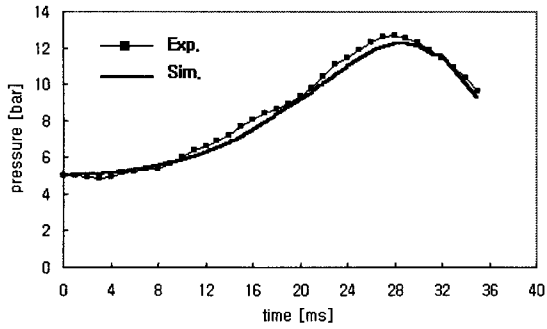
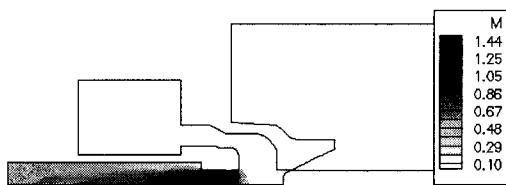
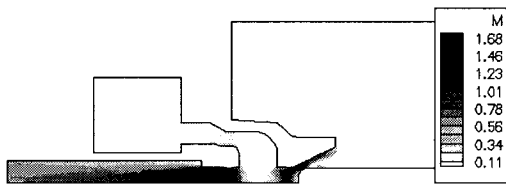


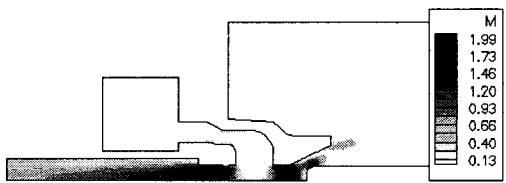
그림 10 무부하 시의 피스톤 전면 압력 상승 비교
 Fig. 10 Comparison of pressure rise in front of piston under no-load condition



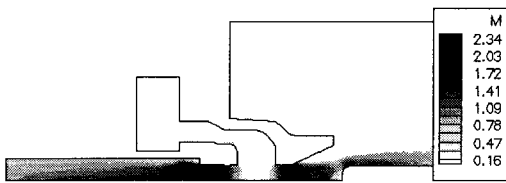
(a) Time = 16.6 [ms]



(b) Time = 18.5 [ms]



(c) Time = 20.3 [ms]



(d) Time = 25.9 [ms]

그림 11 시간에 따른 마하수 분포
 Fig. 11 Distribution of mach number with respect to time

그림 12는 아크가 존재하는 유부하 시의 스트로크 곡선을 무부하 시의 결과와 비교한 것이다. 아크에 의한 노즐 봉쇄 효과와 열가스가 파퍼실 방향으로 역류하는 영향에 의해서 그림 13에서 보듯이 파퍼실의 압력은 무부하 시보다 더 높아지며, 이로 인한 파퍼 반발력의 증가로 유부하 시의 스트

로크는 무부하시보다 적어지게 된다. 유부하 및 무부하시의 스트로크 곡선의 차이가 크지 않은 이유는 조작기의 조작력이 충분히 커서 파퍼 반발력에 의한 영향이 크게 나타나지 않은 것으로 생각된다. 그림 14는 시간에 따른 가스 온도 분포를 보여주며, 20,000[K] 이상의 고온 가스가 극간에 분포하고 있으며, 전극이 노즐목을 빠져나간 후에도 고온 가스에 의한 노즐 봉쇄 현상이 일어남을 볼 수 있다.

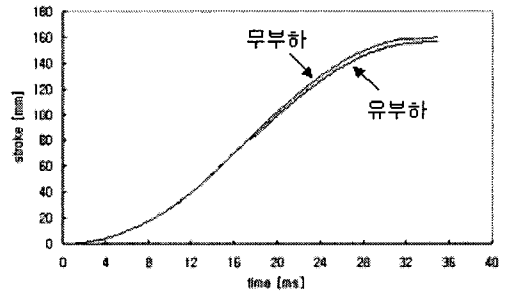


그림 12 유부하 및 무부하 시의 스트로크 곡선 비교 (계산결과)

Fig. 12 Comparison of stroke curve for load and no-load condition(calculated)

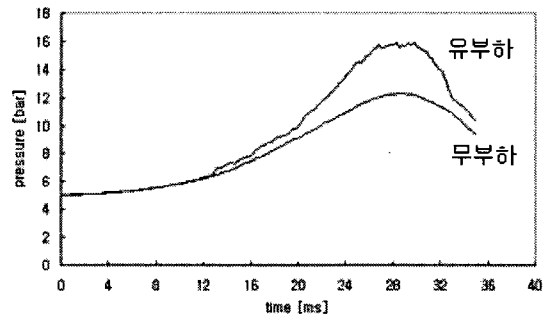


그림 13 유부하 및 무부하 시의 피스톤 전면 압력상승 비교 (계산결과)

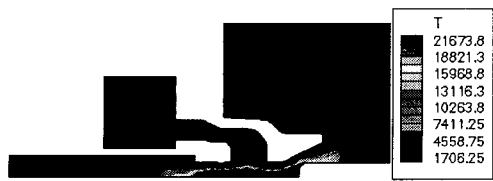
Fig. 13 Comparison of pressure rise in front of piston for load and no-load condition(calculated)



(a) time = 16.6[ms]



(b) time = 18.5[ms]



(c) time = 20.3[ms]



(d) time = 25.9[ms]

그림 14 시간에 따른 온도분포

Fig. 14 Temperature distribution with respect to time

5. 결 론

본 논문에서는 파퍼식 가스 차단기의 동작 특성 해석을 위해서 운동 방정식과 유동해석 방정식을 이용하여 스트로크 곡선을 구하였다. 운동 방정식 해석을 통해 구하여진 이동변위로부터 가동부를 이동시킨 후 유동 해석을 수행하고, 유동 해석을 통해 구하여진 파퍼실 압력을 이용하여 다시 운동 방정식을 해석함으로써 시간별로 이동 변위 및 파퍼실 압력을 구할 수 있다. 사례 연구에서는 가동부 각 부분에 작용하는 모든 힘을 정확히 해석하기가 어렵기 때문에 유효 조작력을 시험에서 구하여 단순화된 운동 방정식을 이용하였다. 해석 및 시험에 의해 구하여진 스트로크 곡선 및 파퍼실 압력 상승치는 비교적 잘 일치하며, 본 논문에 의한 동작특성 해석 방법과 조작 기구 메커니즘 해석 방법을 적절히 결합하면 차단기 설계 시에 매우 유용할 것이다.

감사의 글

본 논문은 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Kunio Nakanishi, "Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers", *MARCEL DEKKER, INC.*, 1991.
 [2] H.M. Ryan and G.R. Jones, "SF₆ SWITCHGEAR", *Peter Peregrinus Ltd.*, 1989.
 [3] J.Y. Trépanier, X. D. Zhang, H. Pellegrin, R. Camarero, "Application of computational fluid dynamics tools to circuit-breaker flow analysis",

IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 10, No. 2, pp. 817-823, 1995.
 [4] 김홍규, 신승록, 정현교, 김두성, 권기영, "Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석", *대한전기학회 논문지* Vol. 48B, No. 7, pp. 233-239, 2000년 4월.
 [5] M. Okamoto, M. Ishikawa, K. Suzuki, H. Ikeda, "Computer simulation of phenomena associated with hot gas in puffer-type gas circuit breaker", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 6, No. 2, pp. 833-839, 1991.
 [6] H. Ikeda, M. Ishikawa, and S. Yanabu, "Analyses of axial energy distribution in decaying arc of SF₆ gas circuit breaker", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. PS-14, pp. 395-401, Aug. 1986.
 [7] T. Onchi, H. Endo, N. Takao, S. Sugiyama, "Calculation of the operating characteristics for 3 poles 1 driving GCB", *電氣學會開閉保護研究會*, SP-00-19, pp. 59-64, 2000.
 [8] R.A. Gentry, R.E. Martin and B. Daly, "An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems", *J. Computl, Phys.*, Vol. 1, pp. 87-118, 1966.
 [9] Y. Zhao and D.E. Winterbone, "The Finite Volume FLIC Method and its Stability Analysis", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 37, No. 11, pp 1147 - 1160, 1995.
 [10] 신승록, 김홍규, 정현교, "Modified FLIC법과 아크 모델을 이용한 차단기 내의 아크 유동 해석", *대한전기학회 논문지* Vol. 49B, No. 3, pp. 172-170, 2000년 3월.
 [11] X. Chen, Z. Ma and P. Siary, "Theoretical and experimental study on the opening characteristics of puffer circuit breakers", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 147, No. 2, March 2000.
 [12] 김홍규, 박경엽, 배채운, 조경연, 정현교, "아크플라즈마와 유동간의 상호작용을 고려한 열가스 유동해석", *대한전기학회 논문지*, Vol. 51B, No. 3, pp. 107-115, 2002년 3월.
 [13] 池田久利, 岡本優, 石川雅之, 柳父悟, "パシファ式ガス遮断器消弧室の絶縁的遮断性能の解析", *電學論 B*, 108 卷 3 号, 昭 63, pp. 125-131.
 [14] 森正, 鈴木克巳, 三宅信之, 松下耕三, 岩本勝治, "超高壓ガス遮断器の小形化への適用技術", *電氣學會開閉保護研究會*, pp. 41-50, 1994.
 [15] P.chevrier, M.Barrault, c.Fievet, J.Maftoul and J.M. Fremillon, "Industrial applications of high-,medium- and low-voltage arc modelling", *J.Phys., D: Appl. Phys.*, 30, pp. 1346-1355, 1997.
 [16] Frost, L. S. and Liebermann, R. W., "Composition and Transport Properties of SF₆ and their Use in a Simplified Enthalpy Flow Model", *Proc. IEEE*, 59(4), 474-485, 1971.

저 자 소 개



김 홍 규(金 洪 柱)

1969년생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(석사). 2001년 서울대 공대 전기공학부 대학원 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 선임연구원.

Tel : (055) 280-1568, Fax : (055)280-1589

E-mail : kimhk@keri.re.kr



정 진 교(鄭 鎭 敎)

1967년 생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사).

현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 선임연구원.

Tel : (055) 280-1564, Fax : (055) 280-1589

E-mail : jkchong@keri.re.kr



박 경 업 (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 : (055) 280-1561, Fax : (055)280-1589

E-mail : kypark@keri.re.kr