

# SF<sub>6</sub> 파퍼차단기의 수학적 모델링 I : 대전류 영역

박경엽<sup>o</sup> 박종화 신영준  
한국전기연구소 대전력연구실

## Mathematical Modelling of SF<sub>6</sub> Puffer Circuit Breakers I : High Current Region

K.Y.Park J.H.Park Y.J.Shin  
Korea Electrotechnology Research Institute

### Abstract

A mathematical arc model based on the integral method has been developed to study the arc behaviour of SF<sub>6</sub> Puffer circuit breakers during high current period. The interaction between the compression chamber and the arc interrupter plays a critical role in determining the arc behaviour. Computations have been carried out for the puffer circuit breaker of Noeske et al. [1]. The aerodynamic behaviour and electrical characteristics of the puffer circuit breaker have been investigated. In addition, the pressure rise in the compression chamber and arc voltage have been computed and the results compared with the available experimental results of Noeske et al. [1]. Special attention has been paid to the presence of the shock.

### 1. 서론

SF<sub>6</sub> 파퍼차단기는 초고압 송변전계통에서 현재 전세계적으로 널리 사용되고 있다. 이런 형태의 차단기에서는, 아크를 소호하기 위한 SF<sub>6</sub> 가스압력을 파퍼실린더 내부의 피스톤의 이동에 의해 얻고 있으며, 대부분의 경우 이 파퍼실린더는 드 라발(De Laval) 노즐에 바로 연결된다. 피스톤에 의해 압축된 SF<sub>6</sub> 가스는 드 라발 노즐 내부에서 가속되어 접점의 개극에 의해 발생한 아크를 향해 분사된다.

노즐내부에 아크가 존재하게 되면 SF<sub>6</sub> 가스가 흐를 수 있는 통로의 단면적이 감소하게 되어 파퍼실린더 내부의 압력은 더욱 상승하게 된다. 또 PTFE 등과 같은 재질로 만들어 진 노즐인 경우에는, 아크에 의한 강한 방사때문에 노즐내벽으로부터 용삭(ablation)이 일어나며 이것이 어느정도 이상으로 커지게 되면 노즐목부분의 압력이 파퍼실린더 내부보다 높아져서 유동의 역류 현상이 일어나게 된다.

외부유동(external flow)은 노즐내벽의 용삭에 의해 발생한 증기와 SF<sub>6</sub> 가스가 완전히 섞인 상태라고 가정되며, 만약 유동의 역

류현상이 일어나게 되면 파퍼실린더의 압력은 피스톤의 이동뿐만 아니라 노즐내부로부터 파퍼실린더로 유입되는 질량 및 엔탈피의 양에도 영향을 받는다. 따라서 파퍼차단기의 열적회복특성은 파퍼실린더와 노즐사이의 상호작용에 크게 영향을 받으며 이 상호작용은 파퍼실린더와 노즐사이의 경계조건의 변화로 나타난다. 여러가지 다른 물리적 현상이 같은 지배방정식으로 표시될 수 있기때문에, 정확한 경계조건의 명시는 물리적으로 의미가 있는 결과를 얻기 위해서는 필수적이다. 1차원의 과도 노즐아크에 대한 지배방정식들은, 유동이 저음속이나 초음속이든 관계없이, 쌍곡선 편미분방정식으로 표현되며, 이 경우 경계조건들은 해석영역(solution domain)과 그 주변영역(surroundings) 사이에 정보가 어떻게 교환되는가를 조사함으로써 결정된다.

본 연구에서는 아크해석을 위해 경계층분법(boundary layer integral method)을 [2] 사용하였으며, 노즐의 용삭, 파퍼실린더 내부의 피스톤의 이동, 접점의 이동, 아크시간의 변화 등을 고려

하였다. 본 연구에 사용된 모델 파퍼차단기는 Noeske 등[1]이 사용한 G.E. 모델이며 (그림 1 참조) 이 모델차단기에 대한 주요 동작원리는 그림 2의 개략도와 같이 간단하게 묘사될 수 있다.

### 2. 파퍼차단기의 수학적 모델

#### 2.1 파퍼실린더

파퍼실린더 내부의 압력과 온도가 균일하게 분포되어 있다고 가정하면, 에너지 및 질량 보존법칙에 의해 파퍼실린더 내부의 압력 P<sub>1</sub>은 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\gamma}{V_1} (P_1 W_1 A_1 - \frac{P_1 A_k F_1}{\rho_1}) \quad (1)$$

여기서 W<sub>1</sub>은 피스톤의 속도, A<sub>1</sub>은 피스톤의 단면적, V<sub>1</sub>은 실린더의 부피, γ는 비열비, ρ<sub>1</sub>은 가스밀도 그리고 A<sub>k</sub>는 누설면적이다. 누설면적 A<sub>k</sub>는 고정누설면적 A<sub>r</sub>와 시간에 따라 변하는 누설면적 A<sub>v</sub>의 더한 값을 나타낸다.

F<sub>1</sub>으로 표시되는 단위면적당의 누설유동량은 파퍼실린더의 압력과 노즐출구에 있어서의 배기압력(P<sub>e</sub>)과의 비에 관계되며 다음과 같이 구해진다. 만약 (P<sub>e</sub>/P<sub>1</sub>)이 SF<sub>6</sub>에 대한 임계압력비(즉 0.5878)보다 크면

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

그리고 (P<sub>e</sub>/P<sub>1</sub>)이 SF<sub>6</sub>에 대한 임계압력비 보다 작으면

$$F_1 = \left[ \frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \left[ \frac{2\gamma P_1}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

와 같이 된다.

만약 아크가 노즐내에 존재하게 되면 파퍼실린더 내부의 온도 T<sub>1</sub>은 에너지 방정식으로부터 다음과 같이 구해진다. 즉

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{C_v M_1} [P_1 W_1 A_1 - RT_1 (F_1 A_r + F_2) + F_2 (h_{01} - h_0(1)) + P_1 h] \quad (4)$$

여기서 M<sub>1</sub>은 파퍼실린더 내의 가스의 질량, C<sub>v</sub>는 SF<sub>6</sub>의 정적비열, R은 SF<sub>6</sub> 가스에 대한 가스상수(약 56.9 J/(kg.°K)), h<sub>01</sub>은 실린더 내의 전체엔탈피 (즉 엔탈피와 운동에너지와의 합), h<sub>0</sub>(1)는 노즐 입구에 있어서의 전체엔탈피이다. 노즐입구에 있어서의 질량유동

을,  $F_2$ 는 다음식에 의해 구해진다.

$$F_2 = \rho_{\infty}(1)W_{\infty}(1)A(1)[1-\beta(1)] \quad (5)$$

여기서 (1)과  $\infty$ 는 각각 노즐입구 및 외부유동 (그림 2 참조)에 있어서의 물리량의 값들을 나타낸다. 따라서  $A(1)$ 은 노즐입구의 면적,  $\rho_{\infty}(1)$ 와  $W_{\infty}(1)$ 는 각각 노즐입구에 있어서의 외부유동의 밀도 및 속도,  $\beta(1)$ 은 노즐입구에 있어서의 아크열 면적( $\theta_s(1)$ 의 노즐입구의 면적에 대한 비를 나타낸다. 또한 엔탈피속(enthalpy flux)에 의해 파파실린더로 역류된 에너지의 양을 나타내는  $P_h$ 는 다음식에 의해 근사적으로 구해진다.

$$P_h = -C_h \rho_{\infty}(1)W_{\infty}(1)h_0(1)\Lambda_h \theta_s \quad (6)$$

여기서  $C_h$ 는 차단부의 형상에 따라 달라질 수 있는 상수이며 본 연구에 사용된 G.E.의 모델차단기인 경우  $C_h=0.4$ 로서 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 또  $\Lambda_h$ 는 엔탈피속 형상계수(enthalpy flux shape factor)이며  $\theta_s$ 는 아크열 면적(arc thermal area)[2]이다.

식 (4)에 의해  $T_1$ 이 구해지면 상태방정식

$$P_1 = \rho_1 R T_1 \quad (7)$$

으로부터  $P_1$ 을 구할 수 있게 된다. 여기서  $\rho_1$ 은 파파실린더에 대한 질량보존의 법칙

$$\frac{dM_1}{dt} = -F_1 A_f - F_2 \quad (8)$$

와 질량, 밀도 및 부피에 대한 관계식  $M_1 = \rho_1 V_1$ 으로부터 계산할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\frac{1}{V_1} [-\rho_1 W_1 A_1 + A_f F_1 + F_2] \quad (9)$$

## 2.2 아크 및 외부유동

아크가 존재하는 경우, 노즐내부는 편의상 2개의 영역으로 나눌 수 있다. 하나는 아크의 중심으로부터  $r_s = \sqrt{\theta_s/\pi}$ 로 정의되는 아크열 반경까지의 영역이고 (이하 아크열 영역이라고 부름), 나머지 하나는 그 이외의 영역을 뜻하는 외부유동 영역이다. 외부유동 영역에서는 물리량들의 반경방향의 경사는 무시할 수 있을 정도로 작다. 이들 2개의 영역에 대한 지배방정식들은 다음과 같이 유도될 수 있다.

연속방정식 (아크열 영역 및 외부유동 영역을 함께 고려함)

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_{\infty}(A-\theta_s)] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_{\infty} W_{\infty}(A-\theta_s)] = m_w \quad (10)$$

여기서  $m_w$ 는 단위길이당의 노즐벽의 용식량이다.

외부유동에 대한 모멘트 방정식

$$\rho_{\infty} \left( \frac{\partial W_{\infty}}{\partial t} \right) + \rho_{\infty} W_{\infty} \left( \frac{\partial W_{\infty}}{\partial z} \right) + \frac{m_w W_{\infty}}{A-\theta_s} = -\frac{\partial P_{\infty}}{\partial z} \quad (11)$$

외부유동에 대한 에너지 방정식

$$\rho_{\infty} \left( \frac{\partial h_0}{\partial t} \right) + \rho_{\infty} W_{\infty} \left( \frac{\partial h_0}{\partial z} \right) - \frac{\partial P_{\infty}}{\partial t} = \frac{m_w (h_w - h_0)}{A-\theta_s} \quad (12)$$

여기서  $h_0 = h_{\infty} + 0.5W_{\infty}^2$ , 그리고  $h_w$ 는 노즐내벽으로부터 용식된 단위질량의 증기를 노즐내벽의 온도까지 올리는 데 소요되는 엔탈피를 나타내며 참고문헌[3]에 의하면 노즐내벽의 온도를 1000K로 가정할 때 PTFE 노즐에 대한  $h_w$ 의 값은 1.05 MJ/kg 정도이다.

아크열 영역에 대한 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_{\infty} h_0 \theta_s] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_{\infty} W_{\infty} h_0 \Lambda_h \theta_s] - \rho_{\infty} \theta_s \frac{\partial h_0}{\partial t} - \rho_{\infty} W_{\infty} \theta_s \frac{\partial h_0}{\partial z} = EI - Q - \frac{m_w (h_w - h_0) \theta_s}{A-\theta_s} \quad (13)$$

여기서  $Q$ 는 단위길이당의 방사손실이며 국부에너지입력(local power input)  $EI$ 에 대해 다음과 같은 관계를 가진다.

$$Q = \alpha EI \quad (14)$$

여기서  $\alpha$ 는 상수이며 상류장 점점의 재질과 아크주위의 환경에 의해 정해진다 [4].

오음의 법칙

$$I = \sigma^* \Lambda_c \theta_s E \quad (15)$$

여기서  $\sigma^*$ 는 전기전도도이며  $\Lambda_c$ 는 콘덕턴스 형상계수[2]이다.

용식률  $m_w$ 는  $m_w = Q/h_0$ 에 의해 결정되며  $h_0$ 는 상태변환을 위해 소요되는 엔탈피와  $h_w$ 의 합이다. 마지막으로 상태방정식은

$$P_{\infty} = \rho_{\infty} R_{\infty} T_{\infty} \quad (16)$$

로 주어진다.

만약  $\Lambda_c$ 와  $\Lambda_h$ 의 값들이 주어지면, 식 (10) - (13)은 식 (14) - (16)의 관계식들을 대입하면 풀려지게 된다.  $\Lambda_c$ 와  $\Lambda_h$ 의 값들은 아크의 단위길이당의 동적 에너지손실(dynamic power loss)의 함수라고 가정되고 미분형의 아크 보존방정식들(arc conservation equation in differential form)을 풀어서 구할 수 있다.

## 3. 수치해석 방법

상기 지배방정식들은, 즉 식 (10) - (13)들은 쌍곡형 편미분 방정식이며 수치해석적인 방법으로 풀 수 있다. 본 연구에서는 시간에 관련되는 항에 대해서는 전진차분법, 대류에 관련되는 항에 대해서는 업윈드법(upwind scheme)을, 그리고 그 이외의 항에 대해서는 중심차분법을 사용한다.

식 (10) - (13)과 같은 비선형 편미분방정식에 대한 해를 확실하게 구할 수 있도록 하는 일반적인 안정조건(stability criteria)은 존재하지 않는다. 그러나 본 연구에서는 식 (10) - (13)들을 풀기 위해서 양적해법(explicit method)를 사용하고 있으므로 적어도 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건은 만족되어야 한다. 즉

$$\Delta T \leq \left| \frac{\Delta Z}{\Lambda_h W_{\max}} \right| \quad (17)$$

여기서  $\Delta T$ 는 시간간격(time step),  $\Delta Z$ 는 축방향 격자간격,  $W_{\max}$ 는 주어진 시각에서의 최대 축방향 속도이다. 식 (17)에 의해 구한  $\Delta T$ 는 선형 편미분방정식을 양적해법을 사용하여 푸는 경우에 주로 적용되며, 비선형인 경우에는 여기에서 구한  $\Delta T$ 에 어떤 상수  $\tau_1$  (0.0에서 1.0사이의 값)를 곱할 필요가 있다. 본 연구에서는  $\tau_1=0.2$ 로서 만족스러운 결과를 얻었다.

## 4. 초기조건 및 경계조건

식 (10) - (13)들을 풀기 위한 초기조건은 DC인 경우는 원칙적으로 임의의 값들을 사용할 수가 있다. 그러나 이 초기조건들을 적절히 잘 선정하면 계산시간을 절약할 수 있다. AC인 경우는 초기조건이 계산결과에 영향을 미칠 수 있으므로, 아주 작은 DC 유지전류(예를 들면 DC 1.0A)에 대한 계산결과를 초기조건으로 사용한다.

쌍곡형 편미분방정식인 경우, 해를 구하기 위해 요구되는 경계

조건의 수는 해석영역(즉 노즐내부)속으로 들어가는 특성방정식(characteristic equation)의 수에 의해 결정된다[5]. 본 계산의 경우 모두 4개의 특성방정식들이 존재하며, 첫째는 유체입자의 궤도선(pathline)을 나타내는 방정식과 같은  $dz/dt = W_{\infty}$  (①)이며, 둘째 및 셋째는 음의 전달(sound propagation)과 관련이 있으며  $dz/dt = W_{\infty} \pm C_{\infty}$  (②, ③)로 표시된다. 마지막으로  $dz/dt = \Lambda_h W_{\infty}$  (④)가 있으며 이는 유효속도  $\Lambda_h W_{\infty}$ 를 가진 아크 성분(arc element)과 관계된다[6].

유동이 저음속이면서 정상(즉 파피실린더로부터 노즐쪽으로 흐를 때)일 때는 노즐입구에서는 상기 4개의 특성방정식들중에서 3개(①, ②, ④)가 노즐내부로 들어간다. 따라서 3개의 경계조건들이 필요하며 이들은  $P_{\infty}(1) = P_1$ ,  $\rho_{\infty}(1) = \rho_1$  및  $r_s \approx 0$ 로 주어진다. 그리고 노즐출구에서는 단지 한개의 특성방정식만이(③) 노즐속으로 들어간다. 그러므로 노즐출구에서의 압력  $P_2$ 가 가스차단기의 충전압력과 같다는 사실이 이 한개의 경계조건이 된다.

유동이 초음속이면서 정상이면(즉 노즐출구에서) 또는 초음속이면서 역상(reverse flow)이면(노즐입구에서) 경계조건들은 필요하지 않으며 경계면에서의 물리량들은 인근 격자점에서의 값들로부터 외삽법에 의해 구할 수 있다. 그리고 노즐입구에서, 초음속이면서 정상인 경우와, 노즐출구에서 초음속이면서 역상인 경우는 실제 가스차단기에서는 고려할 필요가 없다.

유동이 노즐입구에서 저음속이면서 역상이면 한개(②)의 특성방정식이 노즐내부로 들어가며  $P_{\infty}(1) = P_1$ 이 경계조건으로서 이용된다.

## 5. 결과 및 고찰

아크가 존재하지 않는 경우(즉 무부하시)의 파피실린더의 압력상승은 피스톤의 이동뿐만 아니라 누설면적에도 관계된다. 누설면적중 일부는 차단기의 기밀정도에 관계가 된다. G.E.의 G-003 및 G-005 노즐(그림 3 참조)의 파피실린더내부의 압력 상승결과를 그림 4 및 그림 5에 나타낸다.

아크가 존재하는 경우의 G.E.의 G-005 노즐에 대한 계산결과를 보면, 전류피크치가 2.5 kArms보다 작으면 유동은 항상 정상방향이며 파피실린더내부의 압력상승은 완만한 편이다(그림 6의 Curve 1 참조). 전류를 2.5 kArms 이상으로 증가시키면 따라 노즐내부의 압력은 아크의 존재때문에 감소한 유효유동면적(effective flow area)과 노즐내벽으로부터 주입된 용삭증기때문에 빠르게 상승한다.

전류피크치가 15.0 kArms일 때는 역류의 영향이 눈에 띄게 나타나며(그림 7 참조) 파피실린더의 압력은 연달피속과 질량의 주입에 의해 급상승을 하게 된다(그림 6의 Curve 2 참조). 그러나 파피실린더의 압력상승은 이동점점의 선단이 초음속이 될만큼 충분히 커지는 못하므로 노즐의 하류장에 충격파가 발생하며 이 충격파는 파피실린더의 압력이 시간에 따라 상승함에 따라 노즐출구쪽으로 이동하게 된다(그림 7 참조).

만약 전류피크치가 충분히 크면(즉 20.2 kArms 이상) 역류의 영향이 아주 커서 파피실린더의 압력은 이동점점의 선단에서 유동이 초음속이 될만큼 충분히 상승하게 된다(그림 8 참조). 이 경우에는 노즐내부에는 충격파가 존재하지 않으며 전류가 피크일 때는 노즐목부분의 압력이 파피실린더의 압력보다도 약 6% 정도 높다(그림 8 Curve 3 참조).

아크열반경의 순시 축방향분포는 전류와 외부유동의 압력의 함수이다. 전류의 크기가 약 6kArms 이상이 되면 아크열반경은 전류의 크기에 거의 무관하게 되며 특히 노즐목부분에서 이 현상은 더욱 뚜렷하다(그림 9 참조). 이는 다분히 노즐내벽의 용삭현상에 기인한다. 전류크기가 증가함에 따라 용삭효과도 커지게 되어 노즐내부의 압력은 축방향 모멘트가 거의 없는 용삭된 물질에 의해 크게 증가하게 된다. 결과적으로 이 증가된 노즐내부의 압력은 아크열반경의 증가를 방해하게 된다. 그러므로, 이 경우에는, 아크전압은 전류의 크기와 콘덕턴스 형상계수만의 함수로 된다. 노즐입구에서의 아크열반경은 경계조건에 의해 크게 영향을 받는다. 즉 유동이 정상방향일 때는 아크가 점원(point source)에서 나온다고 가정하며(이는 경계층적분법의 기본이 되는 가정과 일치시키기 위해서임), 유동이 역류할 때는 아크열반경은 인근 격자점에서의 값들로부터 외삽법에 의해 구해진다.

전계의 세기, E,는  $i/(\sigma \Lambda_c \theta_s)$ 에 의해 결정된다. 전류피크치

크치 20.2 kArms에 대해 정규화된 순시전류치  $i=0.6, 1.0, 0.6$ (감소시) 및  $0.2$ (감소시)에서 계산된 축방향 전계분포를 그림 10에 나타낸다. 이 경우 E는 노즐목 부분에서 항상 최대임을 나타내고 있다. 전류피크치 20.2 kA에 대한 아크전압의 측정치와 계산치를 그림 11에 나타낸다. 정규화된 전류치가 0.3 이상이면 계산치와 측정치가 상당히 잘 일치하고 있다. 그러나 이 전류치가 0.3 이하로 되면 차이가 커지기 시작하는데 이에 대한 주된 이유는, 이 영역에서는 형상계수가 실재값과 큰 차이가 있기 때문으로 믿어진다.

## 6. 결론

대전류영역에 있어서의 SF<sub>6</sub> 파피차단기의 아크거동을 예측하기 위한 수학적 아크모델을 개발하였다. 본 모델에서는 파피실린더와 노즐사이의 상호작용, 아크자체와 외부유동과의 상호작용, 피스톤 및 가동점점의 이동 등이 고려되었으며 콘덕턴스 형상계수도 변동하고 있다. 본 모델을 Noeske 등이 그들의 실험을 위해 사용한 G.E.의 모델차단기에 적용하여 아크의 공기역학적 거동과 전기적 특성을 조사하고 그 결과를 그들의 실험결과와 비교고찰하였다.

전류피크치가 2.5 kArms 이하일 때는 유동이 항상 정상방향이며, 충격파가 노즐의 하류장에서 발생하고 가동점점의 선단에서 유동은 저음속이다. 이 경우 파피실린더 내부의 압력은 유동의 역류에 의한 영향이 미미하므로 시간에 따라 완만하게 상승한다. 전류피크치가 15.0 kArms일 때에는 유동의 역류효과에 의한 영향이 상당히 커져 노즐목부분의 압력이 파피실린더의 그것보다 커지기 시작한다. 그러나 파피실린더의 압력 상승은 가동점점 선단의 유동이 초음속이 될만큼 커지는 없다. 상기의 2경우 모두 노즐하류장에 발생하는 충격파는 파피실린더의 압력이 상승함에 따라 노즐출구쪽으로 이동하게 된다. 전류피크치가 20.2 kArms이면 가동점점선단의 유동은 초음속으로 되며 노즐내부의 유동은 노즐출구 바깥의 유동의 존재를 느낄 수 없게 된다.

끝으로 본 모델은 대전류 영역에 있어서의 아크거동해석에 주안점을 두고 있지만, 대전류기간에 있어서의 아크해석도 가능하므로 SF<sub>6</sub> 파피차단기의 설계시에 유용한 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 예를들면 노즐형상이 차단능력에 미치는 영향, 파피실린더의 압력상승치, 아크전압, 노즐내의 전계분포, 전류크기가 차단능력에 미치는 영향, 대전류영역에 있어서의 di/dt가 차단능력에 미치는 영향, 아크시간이 차단능력에 미치는 영향, 노즐의 봉쇄 및 해제가 아크특성에 미치는 영향 등이 있다.

## 참고문헌

- [1] H.O.Noeske et al., "Application of arc-interruption fundamentals to nozzles for puffer interrupters, EPRI report, EL-3293, 1983, California, USA
- [2] M.D.Cowley, "Integral method of arc analysis: Pt. 1", J.Phys. D: Appl. Phys., 1974, 7, pp. 2218-2231.
- [3] M.T.C.Fang and D.B.Newland, "DC nozzle arcs with mild wall ablation", J. Phys. D: Appl. Phys., 1983, 16, pp. 793-810.
- [4] D.C.Strachan, D.Lidgate and G.R.Jones, "Radiative energy losses from a high current air-blast arc", J. Appl. Phys., Vol. 48, No. 6, June 1977, pp. 2324-2330.
- [5] C.K.Chu, "Numerical methods in fluid mechanics, in Advances in Applied Mechanics", Vol. 18, New York, Academic Press.
- [6] K.Y.Park, "Mathematical Modelling of SF<sub>6</sub> Puffer Circuit Breakers", Ph. D. Thesis, Department of Electrical Engineering & Electronics, University of Liverpool, 1993.

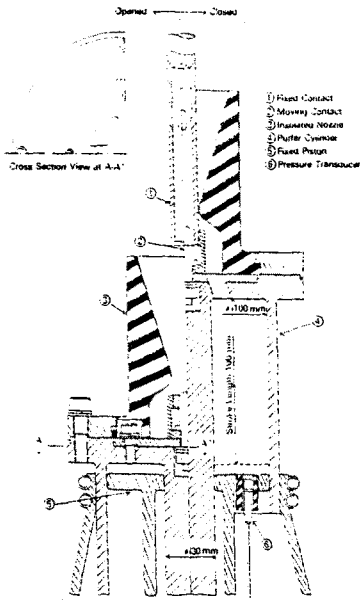


그림 1 Noeske 등이 사용한 모델 파피차단기

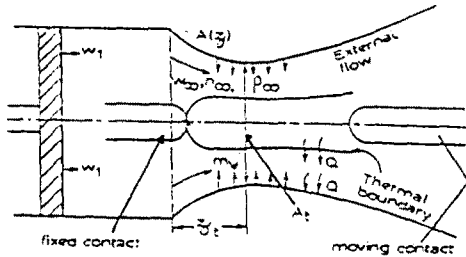
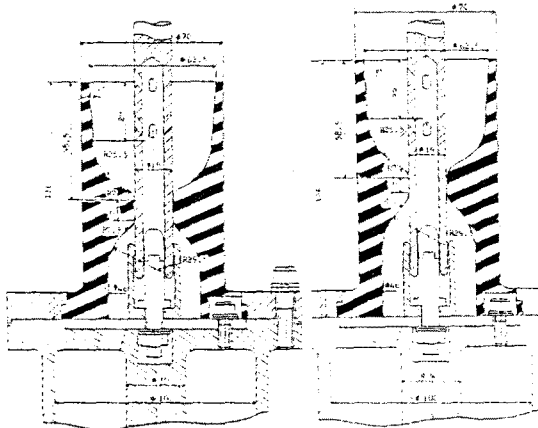


그림 2 모델 파피차단기의 개략도



G-003 노즐

G-005 노즐

그림 3 G-003 및 G-005 노즐의 형상

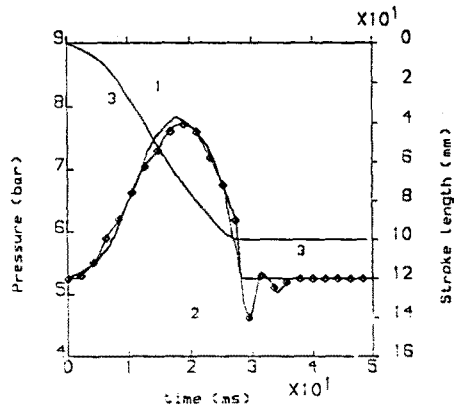


그림 4 파피실린더내 압력의 계산치 및 측정치 (G-003 노즐)

- (1) Curve 1 : 계산치
- (2) Curve 2 : 측정치 [1]
- (3) Curve 3 : 스트로크 Curve

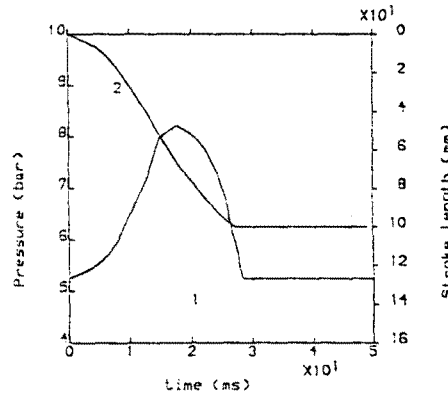


그림 5 파피실린더내 압력의 계산치 (G-005 노즐)

- (1) Curve 1 : 계산치
- (2) Curve 2 : 스트로크 Curve

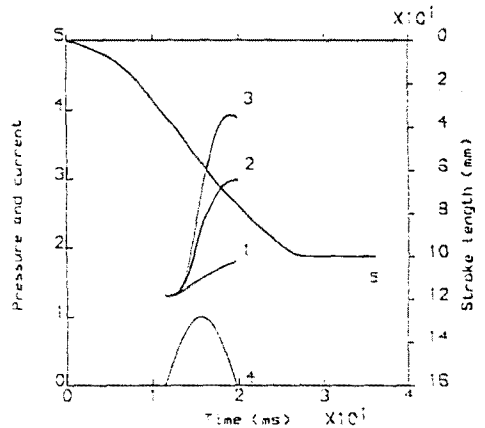


그림 6 여러가지 다른 전류피이크치에 대한 파피실린더내 압력의 시간에 따른 변화 (압력은 5.25 bar에 대한 정규화된 값임)

- (1) Curve 1 : 전류피이크치 2.50 kArms에 대한 압력
- (2) Curve 2 : 전류피이크치 15.0 kArms에 대한 압력
- (3) Curve 3 : 전류피이크치 20.2 kArms에 대한 압력
- (4) Curve 4 : 정규화된 전류
- (5) Curve 5 : 스트로크 Curve

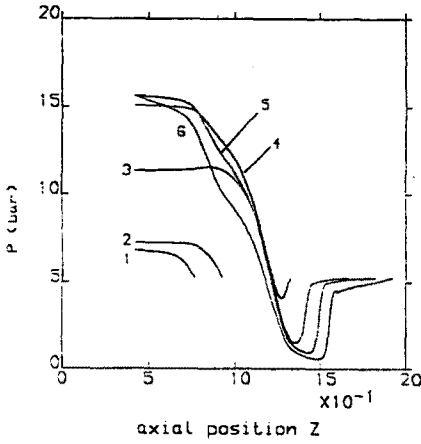


그림 7 전류피이크치 15.0 kArms에 대한 순시 축방향 압력분포

각 Curve에 상응하는 순시 정규화된 전류치  
 전류증가시 : (1) Curve 1 :  $i=0.2$   
 (2) Curve 2 :  $i=0.6$   
 (3) Curve 3 :  $i=1.0$   
 전류감소시 : (4) Curve 4 :  $i=0.6$   
 (5) Curve 5 :  $i=0.2$   
 (6) Curve 6 :  $i=0.0$

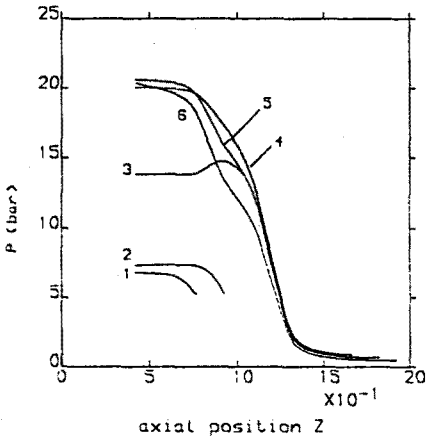


그림 8 전류피이크치 20.2 kArms에 대한 순시 축방향 압력분포

(각 Curve에 상응하는 순시 정규화된 전류치 : 그림 7 참조)

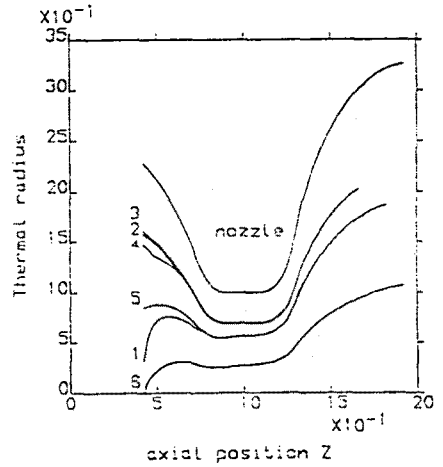


그림 9 전류피이크치 20.2 kArms에 대한 순시 아크열 반경 (각 Curve에 상응하는 순시 정규화된 전류치 : 그림 7 참조)

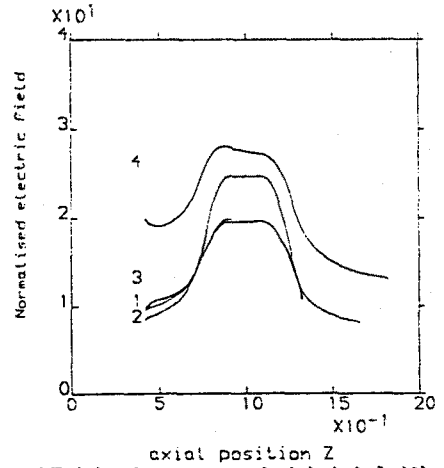


그림 10 전류피이크치 20.2 kArms에 대한 순시 축방향 전계분포

전류증가시 : (1) Curve 1 :  $i=0.6$  (2) Curve 2 :  $i=1.0$   
 전류감소시 : (3) Curve 3 :  $i=0.6$  (4) Curve 4 :  $i=0.2$

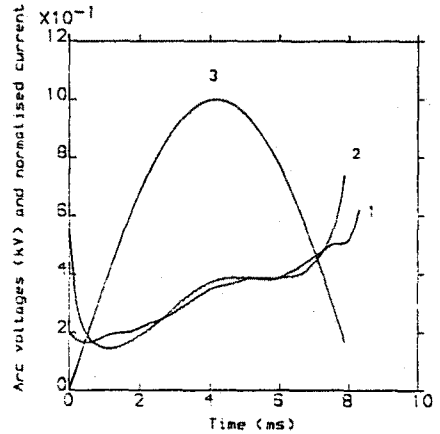


그림 11 전류피이크치 20.2 kArms에 대한 아크전압의 계산치 및 측정치

(1) Curve 1 : 측정치 [1]  
 (2) Curve 2 : 계산치  
 (3) Curve 3 : 정규화된 전류치