

## SF<sub>6</sub> 파퍼차단기의 수학적 모델링 II : 영전류 영역

박경엽<sup>o</sup> 신영준 장기찬 송기동  
한국전기연구소 개폐장치연구팀

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

K.Y.Park<sup>o</sup> Y.J.Shin K.C.Chang K.D.Song  
Korea Electrotechnology Research Institute

#### Abstract

In designing SF<sub>6</sub> puffer circuit breakers, analyzing arc behavior during current zero region and thermal recovery characteristics after current interruption is very important. In this paper, a mathematical arc model based on the integral method has been used to analyze them. The pressure rise in the puffer chamber and the distributions of pressure, density, velocity and enthalpy inside nozzle are calculated and analyzed at current zero region. The influence of fault current magnitude and change of di/dt at current zero on the interruption capability of puffer circuit breakers is investigated. Finally, the calculated results are compared with the available results from experiment.

#### 1. 서론

SF<sub>6</sub> 파퍼차단기를 설계하는데 있어서, 대전류영역에서의 아크 해석도 중요하지만 보다 중요한 것은 전류가 차단되는 시점을 전후한 영전류영역에서의 아크해석과 전류차단후의 열적회복특성에 대한 해석이다. 본 논문은 93년 하계학술대회에서 발표한 "SF<sub>6</sub> 파퍼차단기의 수학적 모델링 I : 대전류 영역" [1]의 후속편으로 전류0점에서의 아크특성과 전류차단후의 아크의 열적회복특성에 대해서 주로 분석한다. 즉, 전류0점에 있어서의 파퍼실린더내의 상승압력, 노즐내의 유동의 압력, 밀도, 속도 및 엔탈피 분포 등을 계산하여 분석하며, 고장전류의 크기, 전류0점에 있어서의 di/dt의 변화가 차단성능에 미치는 영향도 분석한다. 마지막으로, 본 논문에서도 참고문헌 [1]과 마찬가지로 실험결과와의 비교를 위해 Noeske 등 [2]이 사용했던 GE의 모델차단부를 선택하여 계산을 하며, 이 계산결과를 입수가 가능한 실험결과와 비교분석한다.

#### 2. 아크모델

본 논문에서 사용하고 있는 영전류영역이란 고장전류가 전류0점을 향해 접근할 때에, 아크전압이 크게 변화하기 시작하는 시점으로부터 전류차단후의 수 10 μs 까지를 말한다. 영전류영역에서의 아크모델은 대전류영역에서의 아크모델 [1]과 근본적으로는 차이가 없다. 따라서, 참고문헌 [1]에서 기술한 파퍼실린더, 아크 및 외부유동에 대한 지배방정식들이 그대로 적용이 가능하다. 그러나, 전류0점에서 전류가 차단된 후에는 아크의 수평이 필요하다. 즉, 전류0점 이전에는 고장전류가 주어지는데 비해, 전류가 차단된 후에는 전압, 즉 과도회복전압이 주어지므로 이에 대한 고려가 요구된다. 만약 일정한 dv/dt를 가진 과도회복전압(Transient recovery voltage)이 인가된다고 가정하면, 아크주

전체에 대한 저항을 ( $=1/(\sigma^*A_c\theta_s)$ ) [1] 계산할 수 있으므로 아크전류를 구할 수 있다.

#### 3. 결과 및 고찰

##### 1) 파퍼실린더내부의 압력상승

아크가 존재하는 경우의 파퍼실린더 내부의 압력상승은 피스톤의 단면적과 이동속도, 전류의 크기, 노즐의 형상, 노즐내벽의 용삭 등에 의해 결정된다. 그리고, 위의 변수들의 어떤 조합에서 노즐상류장의 압력이 파퍼실린더의 압력보다 커지게 되면 유동이 노즐로부터 실린더쪽으로 거꾸로 흐르게 되며 (역류), 이 역류하는 가스량 및 에너지의 양이 파퍼실린더의 압력 및 온도에 크게 영향을 미치게 된다 [1, 3]. 특히, 대전류인 경우에 아크의 직경이 노즐목의 직경과 같아질 수도 있는데 이를 노즐이 폐색되었다고 하며 (Blocked nozzle or nozzle blocking), 이 노즐폐색이 생기게 되면 역류에 의한 가스량 및 에너지의 양이 최대가 된다. 그림 1은 전류크기를 변화시켰을 때의 전류0점에서의 파퍼실린더 내부의 압력을 나타내며, 측정결과 (Curve 1)는 전류치가 약 12kArms, 계산결과 (Curve 2)는 전류치가 약 7.5kArms 정도부터 파퍼실린더 내부의 상승압력의 기울기가 증가하기 시작한다. 이것은 노즐내부에서 발생한 역류에 의한 영향으로 믿어진다.

##### 2) 노즐내의 유동해석

통상, 노즐내의 아크 및 외부유동은 역류가 발생하게 되면 준정상상태 (Quasi-steady state)에서 벗어나게 된다. 즉, 어떤 시점에서의 아크의 특성은 그 이전까지의 아크특성에 영향을 받게 된다. 따라서 차단전류의 크기가 전류0점에 있어서의 공기역학적인 저항들에 미치는 영향을 조사해 보는 것은 의미가 있는 일이다. 그림 2는 차단전류가 10.0kArms에서 22.5kArms까지 변화할 때, 전류0점에서의 압력, 밀도, 엔탈피 및 속도의 노즐내 분포를 나타내고 있으며, 전류0점에 있어서의 이들 물리량들이 전류크기에 크게 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 그림 2a를 보면, 전류0점에서의 파퍼실린더 내부의 압력은 차단전류가 커질수록 증가한다. 따라서, 차단순간의 di/dt를 일정하게 한다면 파퍼차단기의 차단용량은 차단전류가 증가할수록 커진다. 한편, 노즐내벽의 용삭에 의해 상승한 외부유동의 온도는 차단부의 절연회복특성에 심각한 영향을 미칠 수가 있다. 왜냐하면, 이 고온가스가 차단부의 열적회복이 끝난 후에도 계속 노즐내부에 잔류하고 있으면 극간의 절연회복성능은 상당히 저하되기 때문이다. 그리고, 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 노즐내부의 충격파의 발생위치는 차단전류가 증가할수록, 즉 전류0점에서의 파퍼실린더의 압력이 증가할수록 노즐하류방향으로 이동하게 되며, 차단전류가 어떤 한계치 이상이 되면 노즐을 완전히 벗어나게 되며, 이 경우 노즐출구쪽에서의 유동은 초음속으로 된다.

##### 3) 열적회복성능

**전류크기가 RRRV (Rate of Rise of Recovery Voltage)에 미치는 영향**

전류크기가 RRRV에 미치는 영향을 계산하여 실험치와 비교하였으며 그 결과를 그림 3에 나타낸다. 이 때, 전류0점에서의  $di/dt$ 는 일정하게 유지하였으며 합성시험법을 모의하여 계산하였다 (그림 4 참조). RRRV의 임계치는 전류차단후에 흐르는 영점후 전류 (post-zero current)의 형상 및 크기를 조사하여 결정하였다. 그림 5는 전류크기가 20.2kArms, 전류0점에서의  $di/dt$ 가  $-20A/\mu s$ , 아크시간이 8.5ms인 합성시험인 경우의 영점후전류파형의 계산결과를 보여주고 있다. 그림 5에서 임계RRRV는 Curve 3과 Curve 4의 중간치인 4.14 kV/ $\mu s$ 로 볼 수 있다. 그림 3의 임계 RRRV의 계산치와 실험치를 비교해 보면, 계산치는 전류크기의 증가에 따라서 계속 증가하는데 비해, 실험치는 약 20kArms까지는 증가하나 그 이상인 경우에는 더 이상 증가하지 않고 있다. 이에 대한 원인으로서는, 약 26.5kArms에서 측정된 실험결과에 대한 신뢰성문제와 아주 큰 전류영역에서의 본 모델의 유효성문제를 제기할 수 있을 것 같다. 우선, 26.5kArms에서 측정된 실험결과와 20.2kArms까지의 기본적인 추세와는 상당히 다르며, 20.2kArms와 26.5kArms 사이에 오직 한개의 측정결과만 있어 이 결과에 대한 신뢰성에 다소 의문이 있을 수 있다. 한편, 전류가 커지면 아크에 의한 아크점점의 용손량이 증가하게 된다. 이 용손된 아크점점은 금속증기상태로 노출내에 존재하게 되며 전류0점후의 극간의 열적회복성능 또는 절연회복성능에 크게 영향을 미치게 된다. 그러나, 본 아크모델에서는 이러한 현상을 충분히 고려하지 못하고 있다.

그림 6은 직접시험을 모의한 경우의 임계RRRV 계산결과를 보여주고 있다. 이 경우에는 전류0점에서의  $di/dt$ 가 전류크기증가에 따라 증가하므로 임계RRRV는 전류가 커짐에 따라 완만하게 증가하다가 전류크기가 어느 정도 이상이 되면 더 이상 증가하지 않게 된다.

**$di/dt$ 가 RRRV에 미치는 영향**

전류크기는 일정하게 유지한 상태에서, 합성시험법을 이용하여 전류0점에서의  $di/dt$ 만 변화시킬 때의 임계RRRV의 변화를 그림 7에 나타낸다. 차단전류 (60Hz)의 크기는 20.2kArms이며 0.5 사이클 동안 통전시키며, 주입전류는 주파수가 1500Hz, 주입시점은 8.167ms이며 주입전류의 피크치는 각각 1061A, 1592A, 2122A 및 2653A (각각 전류0점에서의  $di/dt$   $-10A/\mu s$ ,  $-15A/\mu s$ ,  $-20A/\mu s$ ,  $-25A/\mu s$ 에 해당)이다. 그림 8은 전류0점에서의 아크열반경을 나타내며  $|di/dt|$ 가 증가함에 따라 아크열반경은 증가한다. 전류0점에서의 아크열반경이 커지면 아크저항이 감소하게 되어, 만약 차단전류의 크기가 일정하다면,  $|di/dt|$ 가 증가함에 따라 차단기의 열적회복성능은 감소하게 된다.

**4. 결론**

아크모델을 이용하여 Noeske 등의 모델파파차단기 [2]에 대한 차단성능을 계산하여 실험결과와 비교분석하였다. 그리고, 전류0점에서의 유동특성이 그 이전의 전류크기에 크게 영향을 받기 때문에 파파차단기의 차단성능해석을 위해서는 차단기의 아크시간 전체기간 동안에 대한 아크해석이 필수적이다.

**참고문헌**

- [1] 박 경엽 외, "SF<sub>6</sub> 파파차단기의 수학적 모델링 I : 대전류영역", 93년 하계학술대회
- [2] H.O.Noeske et al., "Application of arc-interruption fundamentals to nozzles for puffer interrupters, EPRI report, EL-3293, 1983, California, USA

[3] 溝口均外, "アークの熱エネルギーを利用したガス遮断器消弧室の遮断性能", 電學論B, 113卷4号, 平成5年

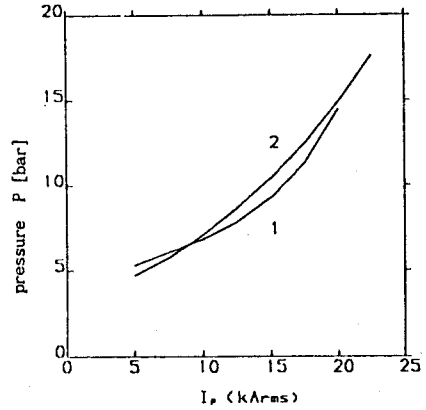


그림 1 전류크기에 따른 전류0점에서의 파파실린더 내의 압력상승

Curve 1 : 실험결과 [2]  
Curve 2 : 계산결과

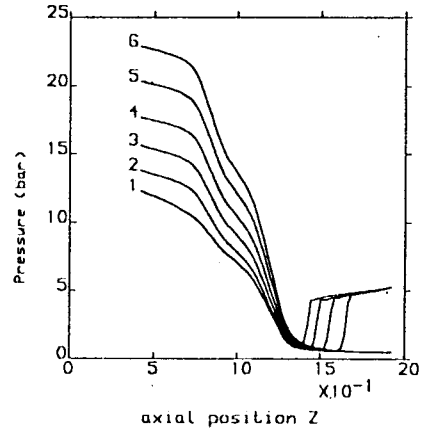


그림 2a 압력

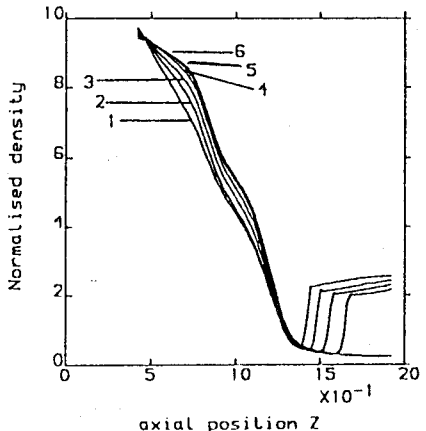


그림 2b 밀도

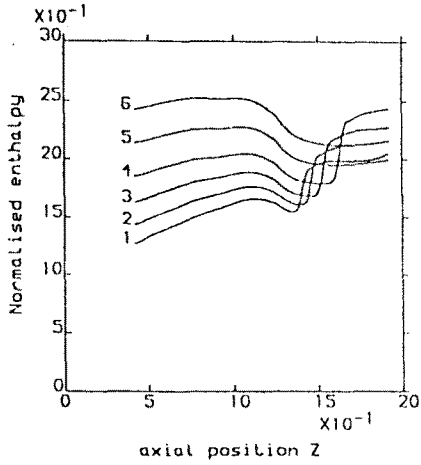


그림 2c 엔탈피

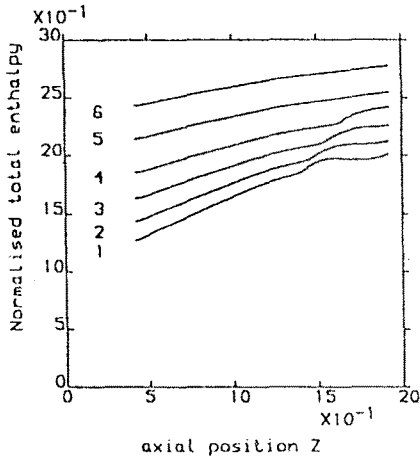


그림 2d 전체 엔탈피

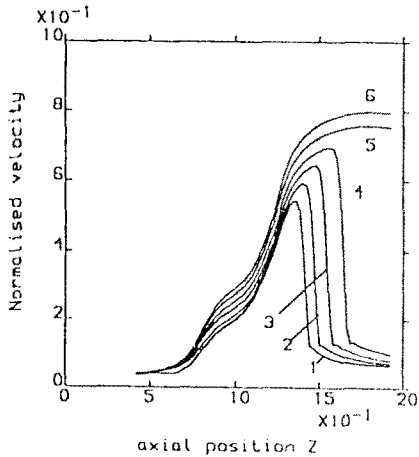


그림 2e 속도

그림 2 전류크기에 따른 전류0점에서의 유동특성

Curve 1 : 10.0kArms      Curve 2 : 12.5kArms  
 Curve 3 : 15.0kArms      Curve 4 : 17.5kArms  
 Curve 5 : 20.2kArms      Curve 6 : 22.5kArms

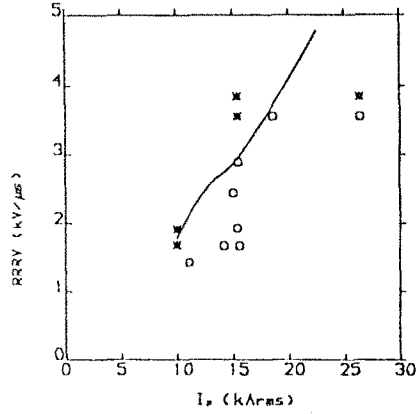


그림 3 전류크기에 따른 열적 회복성능

(1) Curve : 계산결과  
 (2) \* : 차단실패 [2]  
 (3) o : 차단성공 [2]

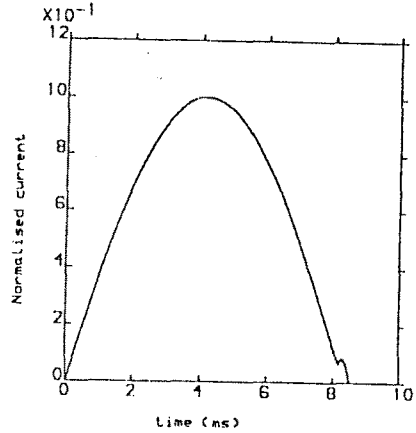


그림 4a 차단전류 파형 (아크시간 : 8.5ms)

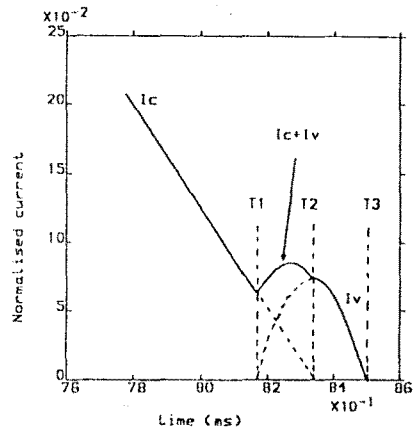


그림 4b 전류0점 부근의 전류파형  
 (Ic : 60Hz Current, Iv : Injected current)

그림 4 합성시험시의 전류파형  
 (아크시간:8.5ms, 전류크기는 28567A에 정규화된 값임)

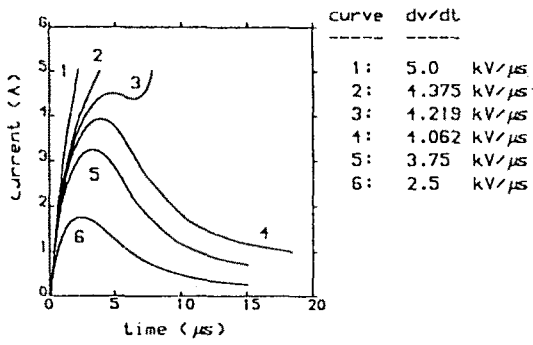


그림 5 20.2kArms시의 영점후전류  
(전류0점에서의 di/dt : -20A/μs,  
아크시간 : 8.5ms, 합성시험법)

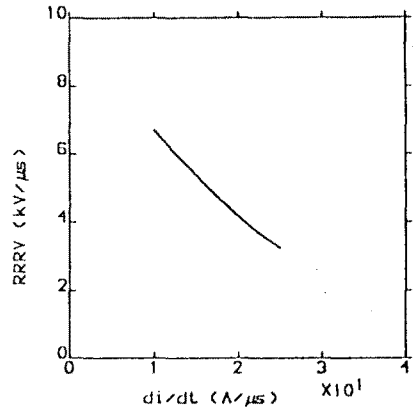


그림 7 di/dt의 크기에 따른 열적회복성능  
(아크시간 : 8.5ms, 합성시험법)

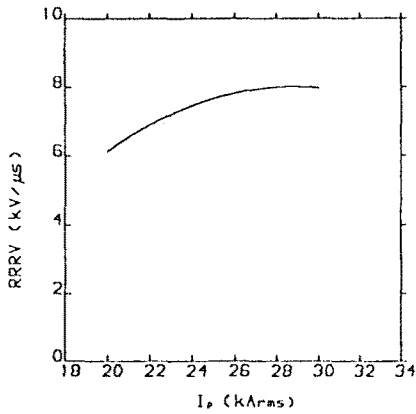


그림 6 직접시험시의 전류크기에 따른 열적회복성능  
(아크시간 : 8.33ms)

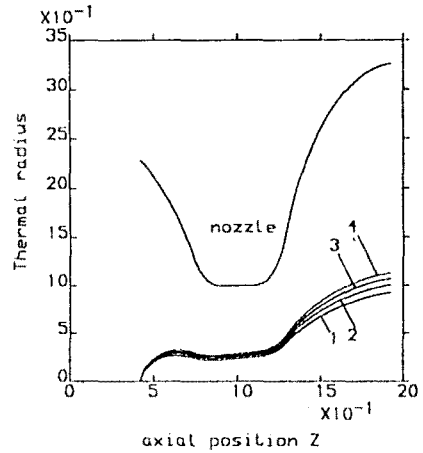


그림 8 아크열반경  
(아크시간 : 8.5ms, 합성시험법)  
Curve 1 : di/dt = -10A/μs  
Curve 2 : di/dt = -15A/μs  
Curve 3 : di/dt = -20A/μs  
Curve 4 : di/dt = -25A/μs