

진공 인터럽터의 차폐판이 전계 분포에 미치는 영향의 유한요소해석

논문
12-2-13

A Finite Element Analysis on the Influence of Shield of a Vacuum Interrupter on the Electric Field Distribution

최승길*, 강형부**

(Seung-Kil Choi*, Hyung-Bu Kang**)

Abstract

This paper describes the influence of floating arc shield on the electric field in a vacuum interrupter. The electric potentials of floating shield and electric fields in a vacuum interrupter are analysed by a finite element method at various gap distances from 1mm to 12mm. The electric potentials of floating shield was increased with the gap distance, which is because the relative position of shield is closer to the fixed contact so that the capacitance distribution inside interrupter is varied. The calculated results show that the maximum value of electric field in a vacuum interrupter with floating shield is nearly same to that without shield at short gap distance below 5mm, but at longer gaps more intensive electric field is achieved in interrupter with shield comparing with the model without shield, which is due to the influence of charged floating shield.

Key Words(중요용어) : Vacuum Interrupter(진공 인터럽터), Floating Arc Shield(부유 아크 차폐판), Finite Element Method(유한요소법), Fixed Contact(고정 접점)

1. 서 론

진공차단기는 1980년대 국내 교류계통에 적용되기 시작하여 약 20년동안 고신뢰성, 보수점검의 용이, 소형 및 경량등 많은 이점이 입증됨으로서 현재 국내 배전전압급의 개폐장치에 대부분 적용되고 있다. 최근에는 전력계통 부하의 급증으로 인한 차단용량 증가 및 핵융합로의 전원설비로서의 적용에 대한 필요성이 대두되어 소형, 고전압화를 위한 진공 절연의 연구, 차단전류의 증대를 위한 아크 차단현상의 연구 [1-3], 대전류 차단 방식 및 병렬 차단방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 진공이 갖는 전류 재단(current chopping) 현상에 의해 발생하는 개폐 서지(switching surge) 전압의 저감을 위해 다양한 전극 재료 개발이 이루어지고 있으며 [4-5], 특이한 전극 형상에 의해 발생시킨 아크 구동력을 이용하여 차단용량을 증대시키기 위한 검토가 이

루어지고 있다 [6-9].

진공 인터럽터(vacuum interrupter)의 소형화와 대용량화를 동시에 만족시키기 위해서는 무엇보다도 먼저 인터럽터의 기본 내부 구조와 복잡한 전극 형상(electrode configuration)에 의해 결정되는 전위 분포와 전계(electric field)의 해석 및 관련 실험을 통해 인터럽터의 절연 특성(insulation characteristics)을 이해하는 것이 요구된다.

일반적으로 진공 인터럽터의 내부에는 전류 차단(current interruption)시 발생하는 아크 플라즈마(arc plasma) 영역으로부터 비산하는 금속 증기 및 입자가 절연 용기의 내벽에 응결함으로써 발생하는 절연 용기(insulating envelope) 내벽 연면의 절연 성능 저하를 방지하기 위해 금속 재질의 아크 차폐판(arc shield)이 설치되어 있으며 [10, 11], 부유 상태의 차폐판은 전원 전압이 인가되면 등전위(equipotential surface)를 형성하여 진공 인터럽터의 전계를 집중, 왜곡시키기 때문에 진공 인터럽터의 전위 분포 및 전계를 해석하는 것이 용이하지 않다. 이에 본 연구에서는 부유 전극 구조를 갖는 인터럽터의 해석을 위해 2차원 유한요소 프로그램(finite element program)을 개발하여, 부유 전극의 전위값을 계산하고, 부유 차폐판이 있는 경우와 없는 경우의 진공 인터럽터에 대해 각각 전위 분포

* : 한양대학교 공대 전기공학과

** : 한양대학교 공대 전자전기공학부

(서울 성동구 행당동 17, Fax : 02-2297-1569 E-mail : skc0386@hymail.hanyang.ac.kr)

1998년 10월 26일 접수, 1999년 1월 27일 심사완료

및 전계를 해석하여 비교함으로써 인터럽터가 정상 개극상태(open state)일 때 부유 차폐판이 절연(insulation)에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 유한요소해석 및 해석 모델

2.1 지배방정식 및 경계조건

진공 인터럽터의 전위 분포 및 전계를 해석하기 위한 지배 방정식은 Maxwell 방정식 및 Poisson 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도된다(12).

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = -\rho \quad (1)$$

여기서, ϵ 은 유전율, ϕ 는 전위이며 ρ 는 전하밀도이다.

1차 시험 함수를 사용하여 Galerkin법을 적용하면 식(2)와 같은 계방정식을 구성할 수 있다.

$$[K] \{\phi\} + \{F\} = \{0\} \quad (2)$$

여기서, $[K]$ 는 계수행렬이며, $\{F\}$ 는 구동행렬이다.

정전계 지배방정식의 해를 구하기 위한 해석 영역의 경계조건은 일반적으로 식(3) 및 식(4)와 같이 주어진다.

$$\phi = \phi_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

여기서 ϕ_i 는 전원 또는 접지 전위를 갖는 기지의 값이며, 식(4)는 자연 경계 조건을 나타낸다.

본 연구의 해석 모델인 진공 인터럽터의 차폐판과 같이 전원 또는 접지와 연결되지 않은 부유 상태의 도체는 등전위(equipotential) 상태이지만 그 값이 주어지지 않는다. 따라서 차폐판과 같이 동일한 전위값을 갖지만 값을 알 수 없는 경우에는 아래와 같은 등전위 경계 조건을 적용하여 계방정식의 해를 구하여야 한다(13).

$$\phi_r = \phi_1 = \phi_2 = \dots = \phi_k \quad (5)$$

여기서, ϕ_r 는 차폐판의 전위로 미지값이며, $\phi_1 \sim \phi_k$ 는 차폐판에 위치한 유한요소 절점의 전위값이다. 즉, 도체계 내부에 부유 도체(floating conductor)가 있을 경우, 부유 도체에 위치한 미지 절점은 k 개 존재하지만 동일한 전위값을 가지므로 미지의 값은 하나만 존재하게 된다. 따라서 계방정식의 해를 구할 때 부유 도체에 대해서는 k 개의 방정식을 유도하는 대신 한 개의 식만을 적용시켜야 한다.

2.2 해석 모델

본 해석에 이용된 진공 인터럽터의 기본 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 진공인터럽터의 사양

Table 1. Specifications of vacuum interrupter

정격전압	15 kV,rms
정격전류	1250 A
정격차단전류	25 kA
정격주파수	60 Hz
정격상용주파수내전압	36 kV,rms
정격뇌충격내전압	95 kV,crest
개리거리	12 ± 1 mm

그림 1은 진공 인터럽터(vacuum interrupter)의 내부 구조로서 가스가 배기된 절연 용기(insulating envelope)내에 고정 접점(fixed contact), 가동 접점(moving contact) 및 아크 차폐판(arc shield)등으로 구성된다.

절연용기는 절연성능(insulation capacity)과 기밀성능(sealing capacity)을 동시에 만족시키는 알루미늄 세라믹을 재질로 사용하였으며, 용기 내부의 압력은 약 10^{-6} torr 정도의 고진공 상태를 유지하도록 되어 있다. 전극 및 접점은 충분한 탈가스 처리 후 용기내에 장착하며, 가동 접점은 금속 주름판(metal bellows)과 연결되어 진공을 유지하면서 접점의 개폐 동작이 가능하도록 설계되어 있다.

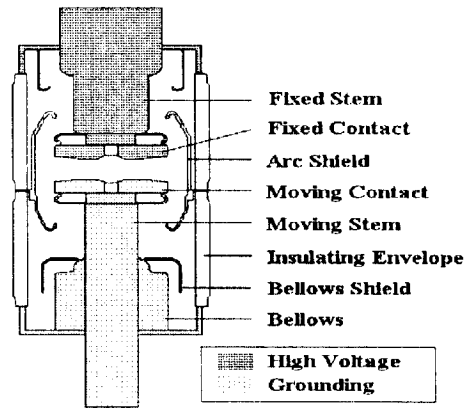


그림 1. 진공 인터럽터의 구조

Fig. 1. Vacuum interrupter construction

스테인레스강 재질의 아크 차폐판은 전류 차단시 발생하는 금속 증기의 절연 용기 부착에 의한 절연 성능의 저하를 방지하고자 설치하며, 주름판 차폐판(bellows shield) 또한 금속 증기로부터 주름관을 보호하기 위해 사용한다.

전계의 지배방정식인 식(1)과 같이 전위는 매질의 유전율에 의해 결정된다. 본 해석에 사용된 진공 인

터럽터 모델에서는 진공 및 세라믹이 절연 매질로 사용되며, 자연 경계 영역으로 대기 영역이 존재한다. 해석에 적용된 알루미늄이나 세라믹 및 진공의 비유전율은 각각 9.1, 1.0 이다. 본 연구에서는 아크 차폐판이 있는 경우와 없는 경우의 두 가지 모델에 대해 고정축 도체에 파고치 95kV의 정격 뇌충격 전압을 인가하고 가동축 도체를 접지한 상태에서, 접점 간극(gap distance)을 1mm에서 12mm까지 변화시키면서 진공 인터럽터의 전위 분포 및 전계를 해석하였다.

3. 시뮬레이션 및 고찰

3.1 유한요소 분할

유한요소법(finite element method)은 해석 대상 영역을 미소 영역으로 세분하고 분할된 각 영역에서의 함수를 단순함수로 근사시켜 이 근사함수가 주어진 방정식과 경계 조건을 만족하는 관계 조건을 찾아 분할된 각 미소 영역에 적용하여 관계방정식을 유도하고, 전 해석영역을 이 미소영역의 관계 방정식군의 집합에 의해 성립되는 해석장으로 취급하여 해를 구하는 방법이다.

따라서 유한요소 프로그램에 의해 구해진 해의 정밀도는 미소영역의 크기, 즉 요소 수에 의해 크게 좌우되므로 본 연구에서는 먼저 동일 해석 모델에 대해 요소 수를 변화시키면서 최대 전계값의 변화 추이를 검토하여 본 해석 모델에 대한 적정 요소 수를 도출하고자 하였다.

적정 요소수를 추정하기 위한 유한요소해석은 부유 차폐판 구조를 갖는 진공 인터럽터의 접점 간극이 12mm인 경우에 대해, 고정축 도체에 파고치95kV의 정격 뇌충격 전압(rated lightning impulse voltage)을 인가하고 가동축 도체를 접지한 상태에

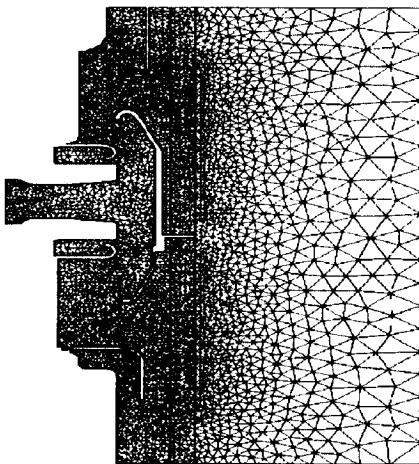


그림 2. 유한요소분할도(요소수 : 9697 개)
Fig. 2. Finite elements discretization

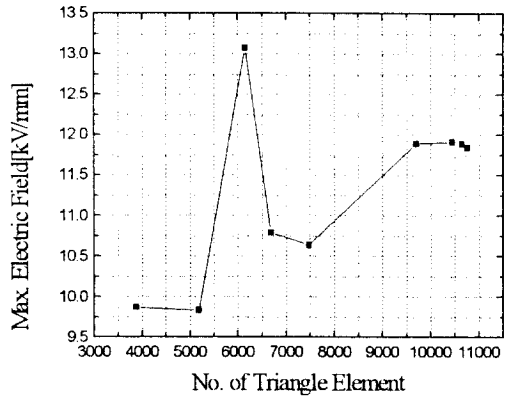


그림 3. 요소 수에 대한 최대 전계
Fig. 3. Max. electric field versus no. of finite elements

서 시뮬레이션하였다. 또한 진공 인터럽터는 좌우 대칭 구조이므로 인터럽터 내부 영역의 반을 해석 영역으로 하였고, 전계가 집중할 것으로 예상되는 도체 간 영역의 요소 분할이 조밀하게 되도록 요소분할을 하였으며, 자연 경계조건 영역인 외부 대기영역을 충분히 넓게 해석영역에 포함시켜 해석 오차를 줄이고자 하였다.

그림 2는 진공 인터럽터의 간극(gap distance)이 12mm, 요소수가 9,697개일 경우의 요소분할도이며, 그림 3은 해석 영역의 요소수를 3,871개에서 10,758개까지 변화시켰을 때의 최대 전계값의 변화를 나타낸 것이다.

그림 3에서 보듯이 본 해석 모델의 경우 요소수가 9,000여개 이하일 경우 진공 인터럽터 내부의 최대 전계값은 요소수에 따라 크게 변화하는 양상을 보이는데 반해, 그 이상의 요소수에 대해서는 최대 전계값이 포함되어 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 유한 요소 해석 기법 자체가 가지는 원리 특성상 해의 정밀도가 요소의 크기에 의존하기 때문이다. 본 해석에서는 이와 같은 분석 결과를 토대로 진공 인터럽터의 전위 분포 및 전계에 대한 모든 해석에 대해 영역을 11,000개 이상으로 요소 분할하여 해석함으로써 해석 오차를 최소화하고자 하였다.

요소수가 4,000개 정도일 경우 시뮬레이션 수행 시간은 약 3분, 11,000개 정도일 경우에는 약 6분 정도가 소요되었다.

3.2 아크 차폐판의 전위에 대한 시뮬레이션

서론에서 언급하였듯이 대전류 차단시 아크에너지에 의해 발생하는 금속 증기가 절연용기 내벽에 부착함으로써 일어나는 인터럽터의 절연성능 저하를 방지하기 위한 아크 차폐판(arc shield)은 전원 또는 접지와 연결되지 않은 부유 상태(floating state)에 있어 고정접점과 가동접점 사이의 제 3의 전극

(third electrode)으로 작용한다. 따라서 고정접점과 차폐판, 차폐판과 가동접점사이에는 전극의 위치 및 형상에 의해 정전용량(capacitance)이 분포함으로써 용량 분압에 의해 아크 차폐판에는 일정한 전위가 유지된다. 또한 유지된 아크 차폐판의 전위는 전위 분포를 변화시켜 전계 집중에 의한 인터럽터의 절연성능을 저하시킬 가능성이 있으므로 인터럽터 설계시 그 전위값을 예측하는 것이 절대적으로 필요하게 된다.

그림 4에 진공인터럽터의 고정 접점에 95kV를 인가하고 가동접점을 접지시킨 상태에서, 접점 간극을 1mm에서 12mm까지 변화시켰을 때 부유 차폐판에 유지되는 전위값을 나타내었다.

차폐판에 유지되는 전위는 그림 4와 같이 접점간극이 길어질수록 증가하는 양상을 보인다. 이는 진공 인터럽터의 구조상 차폐판이 절연용기에 고정되어 있기 때문에 가동 접점이 이동하여 접점 간극이 길어질 때, 차폐판과 가동접점 사이의 거리만이 증가함으로써 차폐판이 고전압측인 고정접점에 상대적으로 근접되어 정전용량에 따른 분압 특성이 변화하기 때문이다.

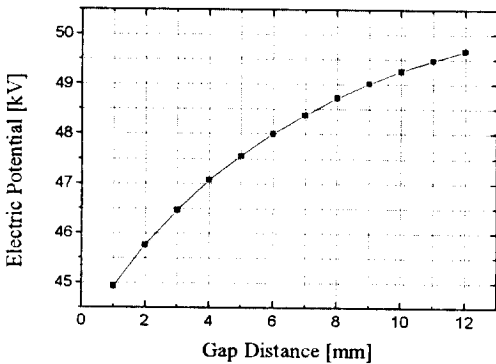


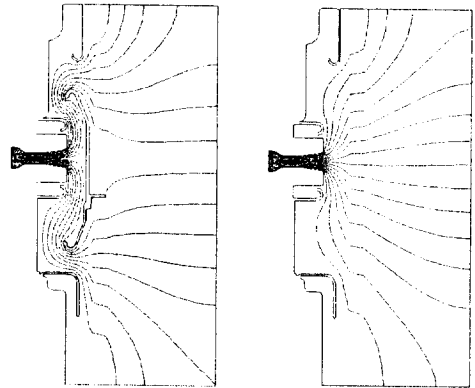
그림 4. 접점 간극에 대한 부유 아크차폐판의 전위
Fig. 4. Electric potential of floating arc shield versus gap distance

시뮬레이션 결과 얻어진 부유 차폐판의 전위는 접점 간극이 1mm인 경우 44.92kV, 12mm인 경우 49.67kV로 약 11% 정도의 큰 차이를 보였으며, 접점 간극에 따라 차폐판에 인가 전압의 약 47~52% 정도의 고전압이 유지됨을 알 수 있다. 따라서 부유 차폐판이 진공 인터럽터의 전계에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

3.3 차폐판이 전계에 미치는 영향의 시뮬레이션

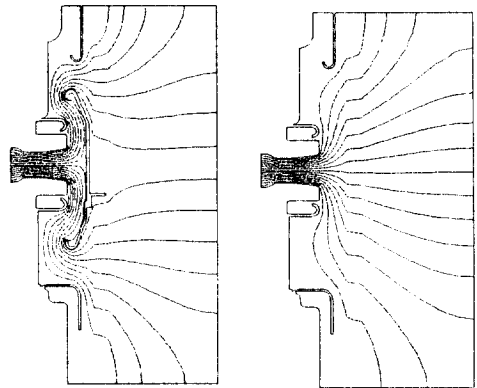
전 절에서 살펴본 바와 같이 진공 인터럽터 내부의 부유 차폐판에는 인가 전압의 약 50% 정도의 큰 전압이 유지되어 인터럽터 내부 전위 분포를 왜곡(dis-

tortion)시켜 전계집중을 발생시킬 가능성이 있다. 따라서 본 절에서는 차폐판이 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 고정접점에 파고치 95kV의 뇌충격전압(lightning impulse voltage)을 인가한 상태에서 접점 간극의 변화에 따른 인터럽터 내부의 전위 분포 및 전계를 비교 해석하였다.



(a) 차폐판이 있는 경우 (b) 차폐판이 없는 경우

그림 5. 접점 간극이 5mm일 때의 전위분포
Fig. 5. Potential distribution at 5mm gap



(a) 차폐판이 있는 경우 (b) 차폐판이 없는 경우

그림 6. 접점 간극이 11mm일 때의 전위분포
Fig. 6. Potential distribution at 11mm gap

그림 5와 6은 진공 인터럽터의 접점 간극이 각각 5mm, 11mm인 경우에 있어서 부유 차폐판이 있는 경우 (a)와 없는 경우 (b)의 전위 분포를 나타낸 것

으로, 부유 차폐판이 없는 경우에는 주접점 간극 사이에서 전계 집중(electric field concentration)이 이루어지는데 반해, 부유 차폐판이 있는 경우에는 주접점 간극뿐만 아니라 차폐판 양쪽 선단부에서도 동전위선이 밀집하여 상당한 전계집중이 형성됨을 알 수 있다. 이는 고전압 유기 상태에 있는 부유 차폐판에 의한 영향 때문으로 절연성능 저하를 방지하기 위해 사용한 차폐판의 본연의 목적에 반해, 정상 개극 상태에서는 차폐판이 오히려 인터럽터의 전계 집중을 유발하여 절연 성능을 저하시킴을 확인할 수 있다.

그림 5와 6을 비교하여 보면 접점 간극이 길어질수록 고전압이 인가된 고정 접점과 차폐판 사이보다 접지 전위의 가동접점과 차폐판 사이에서 전계가 완화되는 정도가 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이는 고정 접점과 차폐판 사이는 거리의 변화가 없으므로 차폐판의 전위 상승에 따른 전위차의 감소에 의해서만 전계가 완화되는 반면, 가동 접점과 차폐판 사이는 전위차는 증가하나 거리의 증대에 의한 전계 완화의 효과가 크기 때문으로 생각된다.

그림 7은 접점 간극 변화에 대한 차폐판이 있는 경우와 없는 경우 진공 인터럽터 내부의 최대 전계값을 비교한 것이다.

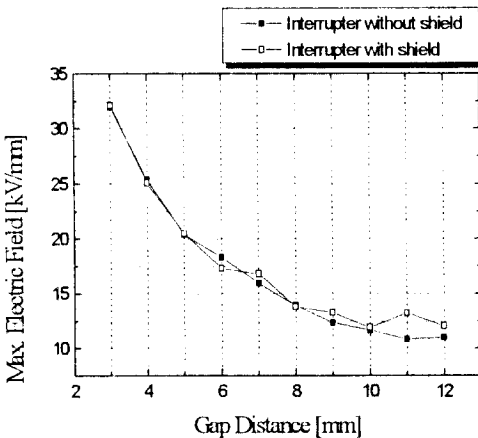


그림 7. 접점 간극에 대한 최대 전계
Fig. 7. Max. electric field versus gap distance

그림 7에서 보듯이 진공 인터럽터의 접점 간극이 5mm 이하로 짧을 경우 최대 전계는 차폐판의 설치에 무관하게 거의 동일한 값을 보이는 반면, 그 이상의 간극에서는 차폐판이 있는 경우의 최대 전계값이 없는 경우보다 최대 20% 이상의 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 양상을 보이는 이유는 접점 간극이 짧을 경우에는 주접점 간극이 너무 짧아 최대전계는 인터럽터의 주접점 사이에 분포하기 때문이며, 접점 간극이 클 경우에는 차폐판의 유기 전위가 인터

럽터 내부의 전계 왜곡에 크게 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 진공 인터럽터의 절연 성능은 접점 간극이 짧을 경우에는 주로 주접점의 형상 및 구조에 의존하여 결정되는데 반해, 접점 간극이 길 경우에는 주접점뿐만 아니라 제 3의 전극, 즉 부유 차폐판에 의해서도 상당한 제한을 받음을 알 수 있다. 따라서 아크 차폐판 구조를 갖는 진공 인터럽터의 대용량화를 위한 절연 설계시 부유 차폐판이 결정적인 제한 요소로 작용할 수 있음을 확인할 수 있다.

본 해석에서 검토한 정상 개극 상태에서의 차폐판의 유기 전위가 진공 인터럽터의 전계에 미치는 영향만으로 진공 인터럽터에서의 부유 차폐판의 필요성에 대한 결론은 시급한 면이 없지 않고, 향후 해석될 차단 상태에서의 차폐판이 절연 성능에 미치는 영향도 함께 고려하여 이루어져야 한다고 생각한다. 즉, 부유 차폐판 구조를 가지는 진공 인터럽터 설계 및 개발시에는 본래 차폐판의 설치 목적인 금속 증기 부착 효과에 대한 검토뿐만 아니라 실험 및 해석을 통해 정상 상태 및 차단 상태에서 차폐판이 진공 인터럽터의 내부 절연 성능에 미치는 영향을 함께 검토하여야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 부유 전극이 포함된 도체계를 해석하기 위한 유한요소 프로그램을 개발하여 진공 인터럽터의 차폐판이 전계 분포에 미치는 영향을 검토하였다. 전원 인가시 인터럽터 내부의 부유 상태의 아크 차폐판에는 정전 분압에 의해 인가 전압의 약 50% 정도의 고전위가 유기되어 인터럽터 내부 전계 분포를 왜곡시켰으며, 접점 간극이 길어지면 차폐판의 전위도 함께 상승하였다. 접점 간극이 5mm 이하로 짧은 경우 차폐판 설치에 무관하게 최대 전계는 거의 동일하였으나, 그 이상의 간극에서는 부유 차폐판이 있는 경우가 없는 경우보다 최대 20%이상의 큰 최대 전계값을 가짐으로서 정상 개극상태에서는 부유 차폐판이 본연의 설치 목적과는 반하여 절연 성능을 저하시키는 주요한 요인으로 작용함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초전력공동연구소 주관으로 이루어진 과제 결과의 일부로 이에 감사드립니다. (관리번호 : 98-075)

참고 문헌

1. M. Binnendijk, et al, "High-current interruption in vacuum circuit breakers", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, pp. 836-840, 1997.
2. K. Yokokura, et al, "Capacitor switch-

- ing capability of vacuum interrupter with CuW contact material", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, pp. 804-810, 1995.
3. M. Okawa, et al, "Development of vacuum interrupters with high interrupting capacity", IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 805-809, 1987.
 4. E. Kaneko, et al, "Possibility of high current interruption of vacuum interrupter with low surge contact material : improved Ag-WC", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, pp. 797-803, 1995.
 5. Ryuji Watanabe, et. al, "Electrical characteristics of Co-Ag₂Se electrode for low surge vacuum circuit breaker", J. Japan Inst. Metals., vol. 53, pp. 711-715, 1989.
 6. Ruben D. Garzon, "High voltage circuit breakers : design and applications", Marcel Dekker, Inc., pp. 182-192, 1997.
 7. Kenji Watanabe, et al, "Technical progress of axial magnetic field vacuum interrupters", IEEE Trans. Plasma Science, vol. 25, pp. 609-616, 1997.
 8. K. Nitta, et al, "Three-dimensional magnetic field analysis of electrodes for VCBs", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, pp. 1520-1525, 1997.
 9. M. Keidar, et al, "Voltage of the vacuum arc with a ring anode in a axial magnetic field", IEEE Trans. Plasma Science, vol. 25, pp. 580-585, 1997.
 10. H. Okumura, E. Kaneko, "Recently developed vacuum interrupter construction and performance improvement", Toshiba Review, no. 141, pp. 5-10, 1982.
 11. W. Widl, "The influence of the shield on the breakdown behavior of vacuum interrupter", Proceedings of the IXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp. 155-160, 1981.
 12. N. O. Sadiku, "Numerical techniques in electromagnetics", CRC Press, pp. 407-428, 1992.
 13. 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, pp. 175-179, 1986.