

## Three-Dimensional Finite Element Analysis of a Vacuum Interrupter

崔勝吉\* · 姜衡富\*\*

(Seung-Kil Choi · Hyung-Boo Kang)

**Abstract** - Vacuum interrupters have a special asymmetric electrode structure to generate an magnetic field and consequently to increase the interrupting ability. Accordingly 2-dimensional analysis has a large analysis error because radial flux can not be considered. In this paper, in order to analyse the electric field distribution of a vacuum interrupter with arc shield more accurately, 3-dimensional finite element method(FEM) is used. The induced 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 also show that the induced potential of shield causes electric field distortion so that the maximum value of electric field in a vacuum interrupter with arc shield is higher than that without one.

**Key Words** : Vacuum Interrupter, Arc Shield, Finite Element Method, Fixed Contact

### 1. 서 론

현재 송·배전 계통에서 사용되는 보호용 차단기는 아크 소호 매질에 따라 기중차단기, 가스차단기, 진공차단기등으로 분류된다[1]. 이 중에서 진공차단기는 진공이 갖는 뛰어난 절연 특성 및 확산 능력을 이용하여 아크를 소호시키는 것으로, 소형으로 고성능을 얻을 수 있고, 보수 점검이 용이하며 공해 요소가 없는 등의 우수한 장점을 지닌다. 국내에는 1980년대에 도입되어 현재 국내 배전전압(22.9kV)급의 개폐장치에 대부분 적용되고 있으나, 원천 기술이 없어 대부분의 핵심 부품을 수입, 조립하거나 기술제휴선의 도면을 입수하여 부품 일부를 제조하는 단계로서 해석 및 설계 측면의 기술은 더더욱 미흡한 상태에 있다. 또한 최근에는 전력계통 부하의 급증으로 인해 차단기의 고전압화, 차단용량의 증대화가 요구되고 있어 진공차단기의 전자계 현상에 대한 체계적, 정량적인 해석에 근거한 기반 해석 기술 확보가 절실하게 필요하다.

이와 같은 진공차단기의 고전압화, 대용량화를 위해서는 제일 먼저 진공 차단기의 구성 요소중 실제로 아크 소호가 이루어지는 진공 인터럽터의 절연 해석이 요구된다. 그러나 진공 인터럽터에는 전류 차단시 아크의 고열에 의해 발생한 급속 증기가 절연용기(insulating envelope) 내벽에 부착하여 절연 성능을 저하시키는 것을 방지하고자 차폐판(shield)을

설치하는데, 이 차폐판은 전기적으로 부유 상태(floating state)인 일체(一體)의 도체판으로 되어 있어 해석 경계 조건으로 고정 및 자연 경계 조건뿐만 아니라 별도의 등전위 경계 조건이 부여되어야 한다. 또한 진공 인터럽터가 정상 개극 상태일 경우에는 차폐판의 본래의 설치 의도와는 달리 차폐판에 일정한 값의 전위가 유기됨으로서 인터럽터 내부 전위 분포를 집중, 왜곡시켜 절연 성능을 저하할 가능성이 있어 이에 대한 해석적 방법에 의한 현상 규명이 필요하다[2]. 또한 진공 인터럽터의 전극은 사고 전류 차단시 발생하는 열적 아크에 특이한 자체 전극 형상으로 자계를 발생시켜 전자력에 의해 아크를 구동시킴으로서 차단용량을 증대시키기 위해 자계(magnetic field)를 발생시킬 수 있는 특이한 비대칭형상 구조로 되어 있어[3-6], 기존에 주로 사용하던 축대칭을 가정한 2차원 해석 방법으로는 반경 방향의 전위 변화를 고려할 수 없고 전극 형상의 완벽한 모델링이 어려워 정확한 전위 및 전계값을 계산하는 것은 불가능하다.

이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 복잡한 비대칭 전극 형상을 실질적으로 모델링하여 해석의 정밀도를 높이기 위하여 해석 기법으로 전계 해석용 3차원 유한 요소 프로그램을 적용하였으며, 부유 상태의 아크 차폐판에 유기되는 전위가 진공 인터럽터의 절연에 미치는 영향을 전위 및 전계 해석을 통해 검토하였다. 부유 상태에 있는 아크 차폐판에 유기되는 전위는 적절한 경계 조건을 부여하여 진공 인터럽터의 접점 간격을 1mm에서 12mm까지 변화시키면서 계산하였으며, 또한 부유 차폐판 구조가 있을 경우와 없을 경우의 2가지 진공 인터럽터의 모델에 대해 각각 전위분포 및 최대 전계값을 비교, 해석함으로써 인터럽터가 정상 개극상태(open state)일 때 차폐판이 절연(insulation)에 미치는 영향을 규명하였다.

\*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

\*\*正 會 員 : 漢陽大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受口字 : 1999年 2月 3日

最終完了 : 1999年 9月 21日

2. 유한요소 해석

2.1 지배방정식 및 정식화

본 논문에서 검토할 해석 모델인 진공 인터럽터의 전위 분포 및 전계를 해석하기 위한 지배 방정식은 Maxwell 방정식 및 보조 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도된다.

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = 0 \tag{1}$$

여기서,  $\epsilon$ 은 유전율,  $\phi$ 는 전위(potential)이다.

본 논문에서 다룰 모델인 진공 인터럽터와 같이 축에 대해 비대칭 형상의 유한요소 해석을 위해 식(1)을 3차원으로 전개하면 식(2)와 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial z}) = 0 \tag{2}$$

식(2)를 정식화하면 식(3)과 같은 전위  $\phi$ 에 대한 대칭행렬 방정식이 얻어진다.

$$[K] \{ \phi \} = \{ 0 \} \tag{3}$$

여기서  $[K]$ 는 시스템 행렬(system matrix)이다.

3차원 해석을 위해 1차 형상 함수를 가진 사면체 요소(tetrahedron element)를 적용하였을 때, 한 요소내의 임의의 점에서의 전위는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi = N_i(x, y, z) \sum_{i=1}^4 \phi_i^e \tag{4}$$

여기서  $N_i(x, y, z)$ 와  $\phi_i^e$ 는 각각 사면체 요소내  $i$ 번째 절점에서의 형상 함수와 전위이다. 또한 한 요소에서의 시스템 행렬  $[K]$ 는 다음과 같다.

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega_e} \epsilon \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz \tag{5}$$

유한요소망으로부터 식(5)의 시스템 행렬을 구하고, 모든 요소에 대하여 식(3)의 대칭행렬 방정식을 구하여 계산하면 각 절점에서의 전위를 계산할 수 있으며, 전계의 세기는 아래의 식 (6), (7), (8)에 의해 계산된다.

$$E_x = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{6}$$

$$E_y = - \frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{7}$$

$$E_z = - \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{8}$$

2.2 경계 조건

전계의 지배방정식의 해를 구하기 위한 해석 영역의 경계

조건은 일반적으로 아래와 같이 식(9) 및 식(10)의 고정 및 자연 경계조건으로 주어지며, 본 해석 모델인 진공 인터럽터의 차폐판과 같이 접지되어 있지 않거나 전원과 연결되어 있지 않은 도체는 등전위기는 하지만 그 값이 얼마인지는 주어지지 않는다. 따라서 이와 같이 동일한 전위값을 갖지만 어떤 값인지를 알 수 없을 경우에는 식(11)과 같은 등전위 경계 조건을 적용하여야 한다[7].

$$\phi = \phi_i \tag{9}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{10}$$

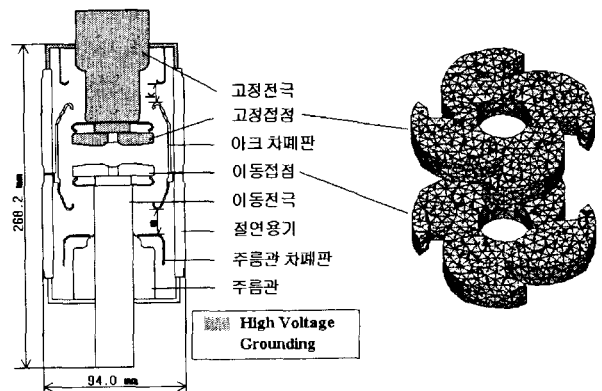
$$\phi_f = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \dots = \phi_k \tag{11}$$

여기서  $\phi_i$ 는 전원 또는 접지 전위를 갖는 기지의 값,  $\phi_f$ 는 부유 차폐판의 전위로 미지값이며,  $\phi_1 \sim \phi_k$ 는 부유차폐판에 위치한 유한요소 절점의 전위값이다. 즉 도체내 내부에 전기적으로 부유 상태(floating state)인 도체가 있는 경우에는 이 도체에 위치한 미지 절점은  $k$ 개 존재하지만 동일한 전위값을 가지므로 미지의 값은 하나만 존재하게 된다. 따라서 유한요소 해석시 계 방정식의 해를 계산할 때 부유 차폐판에 위치하는  $k$ 개의 절점에 대해서는 모두 동일한 하나의 값을 갖도록 경계 조건을 부여하여야 한다.

표 1 진공인터럽터의 사양

Table 1 Specifications of vacuum interrupter

정격전압	15 kV,rms
정격전류	1250 A
정격차단전류	25 kA
정격주파수	60 Hz
정격상용주파내전압	36 kV,rms
정격뇌충격내전압	95 kV,crest / 1.2x50 μ sec
개리거리	12 ± 1 mm



(a) 구조도 (b) 나선형 접점과 요소분할

그림 1 진공 인터럽터의 구조

Fig. 1 Vacuum interrupter construction

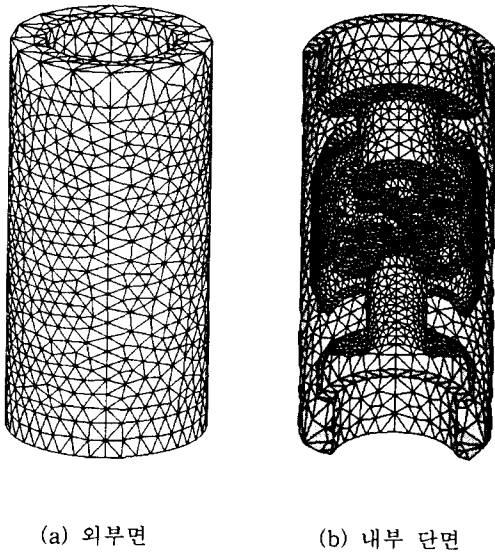


그림 2 3차원 유한요소분할

Fig. 2 3-dimensional finite elements discretization

### 3. 유한요소 해석모델

본 해석에 이용된 진공 인터럽터는 현재 국내 중전기 업체에서 해외 수출을 위해 개발중인 15kV, 25kA 정격의 모델로서 기본 사양 및 구조는 각각 표 1, 그림 1과 같다.

그림 1(a)와 같이 진공 인터럽터(vacuum interrupter)는 세라믹 재질의 절연용기(insulating envelope), 접점(contact), 아크 차폐판(arc shield)등으로 구성된다. 절연용기는 절연성능(insulation capacity)과 기밀성능(sealing capacity)을 동시에 만족시키는 알루미늄이나 세라믹을 사용하였으며, 용기 내부의 압력은 약  $10^{-6}$  torr 정도의 고진공 상태이다. 고정 접점 및 이동 접점은 전자구동력(electromagnetic force)에 의해 아크를 회전시킴으로서 아크 집중에 의한 금속 증기의 발생을 억제하여 차단 용량을 증대시키기 위해 그림 1(b)와 같은 나선형(spiral type) 구조로 되어 있다. 전류 차단시 발생하는 금속 증기의 절연 용기 부착에 의한 절연 성능의 저하를 방지하고자 설치된 아크 차폐판은 기계적으로는 절연 용기에 고정되어 있으나 전기적으로는 부유 상태(floating state)이며, 주름판 차폐판(bellows shield)은 금속 증기로부터 주름판을 보호하기 위해 사용한다.

본 해석에서 구하고자 하는 전위는 식(1)에서와 같이 매질의 유전율에 의해 좌우되는데, 해석에 적용된 알루미늄 세라믹 및 진공의 비유전율은 각각 9.1, 1.0 이다. 본 연구에서는 아크차폐판에 유기된 전위가 인터럽터 내부의 전계 분포에 미치는 영향을 규명하고자 아크 차폐판이 있는 경우와 없는 경우의 두가지 모델에 대해 각각 고정 도체에 정격 뇌충격전압인  $1.2 \times 50 \mu \text{sec}$ , 95kV의 파고치를 인가하고 이동 도체를 접지시킨 상태에서, 접점 간격(gap distance)을 1mm에서 12mm까지 변화시키면서 전위 및 전계를 해석하였으며, 해석 결과는 4장에 기술되어 있다.

유한요소 해석을 위한 요소분할은 전계의 집중에 의해 물

리적 특성의 변화가 심할 것으로 예견되는 고정전극, 이동전극 및 차폐판 부근을 국부적으로 세밀하게 분할하여 해석시간의 단축 및 계산정밀도 향상을 도모하고자 하였다.

그림 2는 접점 간격이 12mm 일 때의 3차원 모델의 요소 분할도로서, 요소망은 104,873개의 사면체 요소(tetrahedron element)와 20,839개의 절점(node)으로 구성되어 있다.

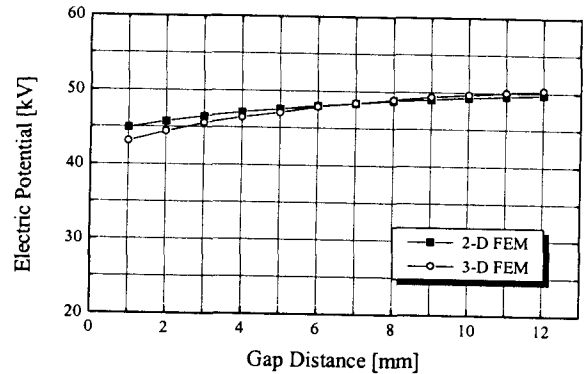


그림 3 접점 간극에 대한 아크 차폐판의 전위

Fig. 3 Electric potential of arc shield versus gap distance

### 4. 해석 결과 및 고찰

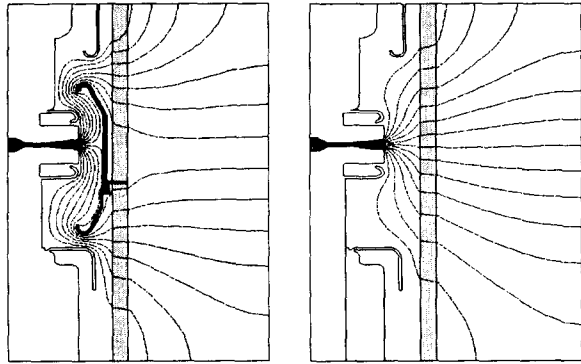
#### 4.1 아크 차폐판의 전위 해석

그림 3은 진공인터럽터의 고정접점에 95kV를 인가하고 이동접점을 접지전위로 하여, 접점 간격을 1mm에서 12mm까지 변화시키면서 2차원 및 3차원 유한요소 해석에 의해 얻어진 부유 차폐판의 유기 전위를 비교한 것이다.

그림 3의 결과와 같이 차폐판에 유기되는 전위는 2차원 해석에서는 44.9~49.7kV, 3차원 해석에서는 43.1~50.3kV 정도로 인가 전압의 50[%] 정도의 높은 전위가 유기됨을 알 수 있다. 이는 부유 상태(floating state)의 아크 차폐판이 제 3의 전극(third electrode)으로 작용하여 임의의 접점 간격일 때 고정접점과 차폐판, 차폐판과 이동접점사이의 정전용량(capacitance)의 분배에 따른 분압 효과에 의해 아크 차폐판에 일정한 전위가 유기되기 때문이다.

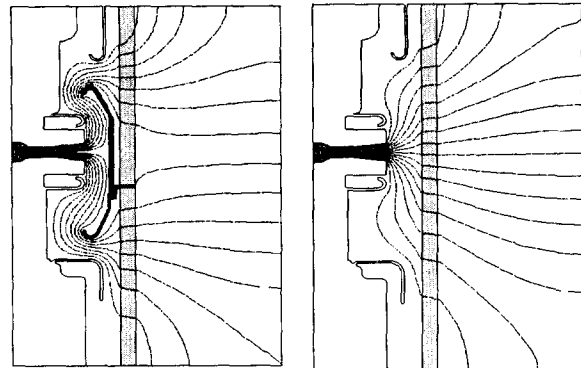
또한 그림에서와 같이 차폐판의 유기 전위가 접점간격이 길어질수록 증가하는 양상을 보이는 이유는 진공 인터럽터의 구조상 차폐판이 절연용기에 고정되어 있어 이동 접점이 이동하여 접점 간격이 길어지면 고정접점과 차폐판 사이의 거리는 변화가 없어 정전용량의 변화가 없는 반면에 차폐판과 이동접점 사이의 거리는 증가하여 차폐판과 이동접점 간에는 정전용량이 감소하게 되어 정전용량에 따른 분압 특성에 의해 결국 차폐판과 접지전위상태인 이동접점 사이의 전위차가 커지기 때문이다.

2차원 및 3차원 전위 해석을 통해 계산된 아크 차폐판의 전위값이 다소 차이가 나는 이유는 2차원 해석의 경우 축대칭을 가정하여 해석함으로써 정확한 전극 구조가 반영되지 않아 반경 방향의 전위 변화가 해석에 고려되지 않았기 때문



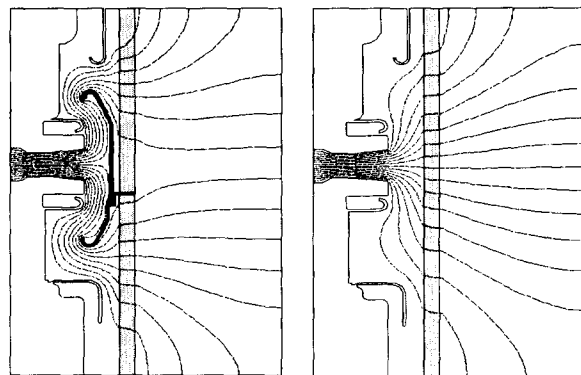
(a) with arc shield (b) without arc shield

그림 4 간극이 2mm일 때의 전위분포(2차원해석)  
Fig. 4 Potential distribution at 2mm gap(2-D FEM)



(a) with arc shield (b) without arc shield

그림 5 간극이 5mm일 때의 전위분포(2차원해석)  
Fig. 5 Potential distribution at 5mm gap(2-D FEM)



(a) with arc shield (b) without arc shield

그림 6 간극이 11mm일 때의 전위분포(2차원해석)  
Fig. 6 Potential distribution at 11mm gap(2-D FEM)

으로 생각된다. 따라서 진공 인터럽터와 같이 복잡한 비대칭형상의 전극 구조를 갖는 도체계의 전위를 보다 정확하게 계산하기 위해서는 전극 형상의 완벽한 모델링이 가능한 3차원 해석이 필요함을 알 수 있다.

#### 4.2 전위 분포 해석

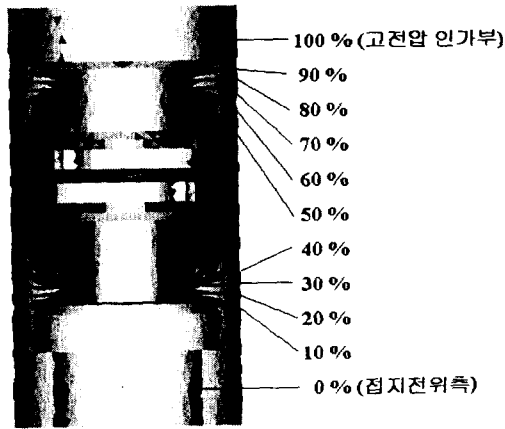
그림 4, 그림 5와 그림 6은 각각 접점 간격이 2mm, 5mm, 11mm일 때 고정접점에 뇌충격전압(lightning impulse voltage)의 파괴치 95kV를 인가하였을 때의 2차원 해석에 의한 인터럽터 내부의 전위 분포도로서, (a)는 차폐판이 있는 경우, (b)는 차폐판이 없는 경우에서의 특성을 나타낸 것이다. 분포도에서 등전위선간의 전위차는 고정접점과 이동접점 사이의 전위를 100%로 하였을 때 각각 6.67%이다.

그림 4, 그림 5 및 그림 6의 (a)와 (b)를 각각 비교하면 차폐판의 유무에 상관없이 고정접점과 이동접점사이의 전위 분포는 거의 동일한 양상을 보이고 있으나, 차폐판이 있는 경우에는 고정 접점과 이동접점 사이뿐만 아니라 차폐판 양쪽 선단부에서도 등전위선이 밀집하여 전계 집중이 일어남을 알 수 있다. 이러한 이유는 접점에 전위가 인가되면 4.1절에서의 결과와 같이 전기적으로 부유 상태(floating state)에 있는 차폐판에 유기된 인가전위의 약 50%정도의 높은 전위가 새로운 경계 조건으로 작용하여 진공 인터럽터 내부 전위 분포를 변화시키기 때문이다.

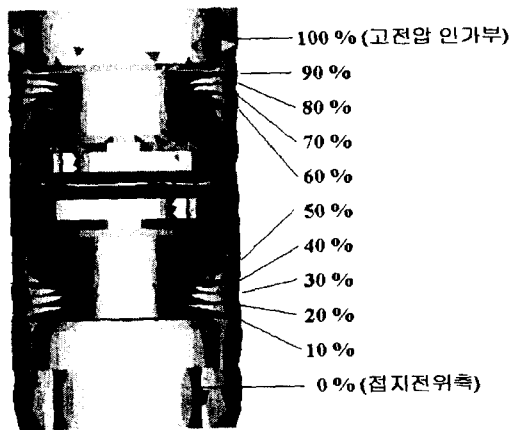
그림 4, 그림 5와 그림 6을 비교하여 보면 접점 간격이 길어질수록 고정접점과 이동접점 사이의 전계 집중이 완화된 것을 알 수 있다. 또한 차폐판이 있는 경우인 그림 4(a), 5(a)와 그림 6(a)의 차폐판 주변에서의 등전위선(equipotential line)의 간격을 비교해보면 고정 접점과 차폐판 사이보다 접지 전위의 이동접점과 차폐판 사이에서의 전계의 완화된 정도가 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

그림 7은 2차원 전위 해석에 사용한 조건과 동일한 상태에서 3차원 해석을 수행하였을 때 얻어진 진공 인터럽터 내부 단면의 전위 분포로서 그림 7의 (a)와 (b)는 각각 접점 간격이 5mm, 11mm일 때의 분포도이다. 분포도에서의 색상의 음영은 각각 10%의 전위차를 나타낸 것이다.

그림 7을 보면 2차원 해석에서 나타난 결과와 같이 차폐판이 있는 경우에는 고정접점과 이동접점 사이뿐만 아니라 차폐판 주변에서도 등전위선이 밀집되어 전계 집중이 형성됨을 알 수 있다. 인가 전위를 100%로 할 때의 그림 3에 나타나 있는 차폐판의 인가 전위를 비율로 표시하면 접점간격이 5mm일 때 49.52%, 11mm일 때 52.62%이 되므로 접점 간격이 5mm에서 11mm될 때 고정접점과 차폐판의 전위차는 5.9% 낮아지는 반면 차폐판과 이동접점의 전위차는 반대로 5.9% 높아짐을 알 수 있다. 본 해석 모델에서 접점간격이 0.0mm, 즉 고정접점과 이동접점이 붙어 있는 경우 고정접점측과 차폐판(그림 1(a)의 k), 차폐판과 이동접점측간(그림 1(a)의 m)의 최단 거리는 각각 10.8mm, 3.4mm이다. 따라서 이동접점이 5mm에서 11mm로 변화할 때 고정접점측과 차폐판 사이는 거리의 변화없이 전위차가 5.9% 감소하는 반면, 차폐판과 이동접점측 사이는 거리가 8.4mm에서 14.4mm로 71% 정도 길어지고 전위차는 5.9% 상승한다. 이러한 사실



(a) 간극이 5mm인 경우



(b) 간극이 11mm인 경우

그림 7 3차원 전위분포도

Fig. 7 Three dimensional potential distribution

로부터 접점 간격이 길어질 경우에는 고정 접점측과 차폐판 사이보다 이동 접점측과 차폐판사이의 전계 분포가 완화되는 경향이 클 것으로 생각된다. 즉 접점 간격이 길어지면 고정 접점측과 차폐판 사이의 거리의 변화가 없어 차폐판의 전위 상승에 따른 전위차의 감소에 의해서만 전계가 완화되는 반면, 이동 접점측과 차폐판 사이는 접점 간격이 길어지면 차폐판의 전위 상승에 의해 전위차는 다소 증가하나 거리의 증대에 의한 전계가 완화되는 경향이 큰 것을 알 수 있다.

### 4.3 전계 해석

그림 8은 식 (3)의 시스템 방정식에 식 (9)~식 (11)의 경계 조건을 부여하여 해석 모델의 모든 절점(node)에서 전위를 계산한 후, 식 (6)~식 (8)의 전계 수식에 전위값을 대입하여 계산된 전계값중 각 경우에 있어서의 최대 전계값을 비교한 것이다. 해석은 진공 인터럽터의 접점 간격을 변화시키

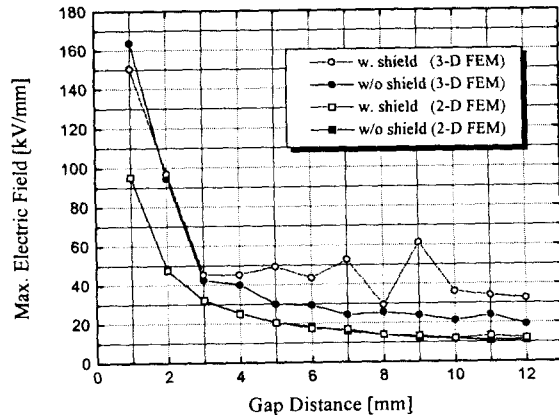


그림 8 접점 간극에 대한 최대 전계

Fig. 8 Max. electric field versus gap distance

면서 차폐판이 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 2차원 해석과 3차원 해석을 수행한 것으로 3차원 해석의 결과값은 2차원과 큰 차이를 보인다. 이와 같이 되는 이유는 3차원 해석의 경우에는 비대칭 전극 형상을 정확하게 모델링하여 해석함으로써 전극의 요철부분이 전계에 미치는 영향이 고려된 반면, 2차원 해석의 경우에는 축대칭 모델을 가정하여 해석함으로써 반경 방향의 전위 변화가 고려되지 않아 해석 오차를 수반하였기 때문으로 생각된다.

2차원 해석 결과를 살펴 보면 진공 인터럽터의 접점 간격이 5mm이하로 짧은 경우 최대 전계는 차폐판의 설치 여부에 관계없이 거의 동일한 값을 보이는 반면, 그 이상의 간격에서는 차폐판이 있는 경우의 최대 전계값이 없는 경우보다 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 접점 간격에 따른 최대 전계값은 차폐판이 있는 경우가 11.94~95.09kV/mm, 없는 경우가 10.86~95.09kV/mm 범위내에서 변화하며, 접점 간격이 11mm일 때 각각 13.24kV/mm, 10.86kV/mm로서 약 20%의 가장 큰 전계값의 차이를 보인다. 또한 2차원에서는 접점 간격이 길어지면 최대 전계값은 대체적으로 감소하는 양상을 보임을 알 수 있다.

반면에 3차원 해석 결과를 보면 접점 간격이 3mm 이하로 짧은 경우 최대 전계는 차폐판의 설치에 무관하게 거의 비슷한 값을 보이지만, 그 이상의 간격에서의 전계값을 비교하여 보면 차폐판이 없을 경우 간격이 길어지면 전계값은 완만하게 감소하는 형태를 보이는 반면 차폐판이 있는 경우에는 최대 전계값이 요동침을 볼 수 있어 접점 간격이 길어지더라도 최대 전계는 오히려 커질수 있음을 알 수 있다. 접점 간격이 2mm이상일 때 접점 간격에 따라 최대 전계값은 차폐판이 있는 경우가 29.17~96.75kV/mm, 없는 경우가 19.20~94.39kV/mm 범위내에서 변화하며, 접점 간격이 9mm일 때 가장 큰 전계값의 차이를 보였는데 차폐판이 있는 경우의 최대 전계값은 61.07kV/mm로서 없는 경우의 값 23.99kV/mm보다 약 2.5배 정도로 큰 전계값을 갖는다. 이와 같이 접점 간격이 짧은 경우 차폐판에 무관하게 비슷한 최대 전계값을 갖는 것은 고정접점과 이동접점 사이의 간격이 너무 짧아 최대 전계값이 인터럽터의 고정접점과 이동접점 사이에 분포하

기 때문으로, 이 때에는 차폐판의 유기 전위의 영향에 의해 인터럽터의 전위 분포가 왜곡되는 정도가 미소함을 알 수 있다. 반면에 차폐판이 있을 경우에는 접점간격이 길어지면 고정접점과 이동접점 사이의 길이는 증대되지만 전계값은 접점간격보다는 접점의 형상에 의해 크게 좌우되므로 차폐판과 상대하는 이동접점의 형상에 의해 진공 인터럽터의 내부 전계가 심하게 변화하기 때문으로 생각된다.

2차원과 3차원 해석을 비교하여 보면 접점 간격에 따른 전계값의 변화는 위에서 언급한 바와 같이 전극 형상의 구현 정도에 따라 상이한 결과를 보이지만, 차폐판이 있을 경우의 전계값이 없는 경우보다 거의 대부분 큰 경향임을 고려할 때 진공 인터럽터의 차폐판은 정상 개극상태에서는 절연에 나쁜 영향을 미침을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터 아크 차단시 급속 증기를 증착하여 절연 성능의 저하를 방지하고자 설치된 차폐판은 정상 개극 상태에서는 오히려 전계 집중을 발생하여 절연 성능을 저하시키고 있음을 확인할 수 있으며, 진공 인터럽터의 고전압화는 접점 간격의 증대만으로 이루어질 수 없음을 알 수 있다. 따라서 진공 인터럽터의 고전압화, 대용량화를 위한 절연 설계시에는 부유 차폐판의 유기 전위와 전극들의 형상 및 구조적 위치가 전계 분포에 미치는 영향을 정량적인 수치 해석을 통해 규명하여 설계에 반영하여야 할 것으로 생각된다. 그러나 본 해석에서 검토한 정상 개극 상태에서의 차폐판의 유기 전위 및 형상이 진공 인터럽터의 전계에 미치는 영향만은 아크 차폐판의 필요성에 대해 결론을 내리는 것은 시급한 면이 없지 않고, 향후 해석될 전류 차단 상태에서의 차폐판이 절연 성능에 미치는 영향도 함께 고려하여 이루어져야 한다고 생각한다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 부유 상태에 있는 차폐판이 진공 인터럽터의 절연 성능에 미치는 영향을 검토하고자 2차원 및 3차원 유한요소 프로그램을 적용하여 차폐판의 유기 전위를 해석하였으며, 차폐판이 있는 경우와 없는 경우의 전계 특성을 비교, 분석하였다. 전원 인가시 아크 차폐판에는 인가 전압의 약 50[%] 정도의 고전위가 유기되어 인터럽터 내부의 전계분포가 왜곡되었으며, 접점 간격이 길어지면 차폐판에 유기되는 전위도 함께 상승함을 확인할 수 있었다. 또한 차폐판이 인터럽터에 미치는 영향을 검토한 결과 차폐판이 있는 경우가 없는 경우보다 최대 2.5배 정도의 전계값을 가져, 개극 상태시에는 진공 인터럽터의 내부 전계가 차폐판에 의해 왜곡, 상승되어, 차폐판이 본연의 설치 목적에 반하여 인터럽터의 절연 성능을 저하시키는 주요한 요인으로 작용함을 알 수 있었다. 따라서 부유 전극 구조를 갖는 진공 인터럽터에서의 전계의 세기가 접점 간격보다는 상대하는 전극 형상 및 부유도체의 유기 전위에 의해 크게 좌우되는 점으로 보아, 접점 간격의 증대만으로는 절연 성능의 향상을 통한 차단기의 고전압화, 대용량화를 기대할 수 없으며, 복잡한 비대칭 전극 구조를 갖는 도체계의 절연 성능의 사전 검증은 위해서는 실제적으로 전극 형상을 구현할 수 있는 3차원 해석에 의한 검토가 필요함을 알 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초전력공동연구소 주관으로 이루어진 과제 (관리번호 : 98-075) 결과의 일부로 이에 감사드리며, 연구에 협조하여 주신 (주)광명기전 VI 연구팀에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Ruben D. Garzon, "High voltage circuit breakers : design and applications", Marcel Dekker, Inc., pp.129-194, 1997
- [2] 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
- [3] Kenji Watanabe, et al, "Technical progress of axial magnetic field vacuum interrupters", IEEE. Trans. Plasma Science, vol. 25, pp. 609-616, 1997
- [4] K. Nitta, et al, "Three-dimensional magnetic field analysis of electrodes for VCBs" IEEE. Trans. Power Delivery, vol. 12, pp. 1520-1525, 1997
- [5] 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
- [6] H. Okumura, E. Kaneko, "Recently developed vacuum interrupter construction and performance improvement" Toshiba Review, no. 141, pp. 5-10, 1982
- [7] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, pp. 175-179, 1986

### 저 자 소 개



#### 최 승 길 (崔勝吉)

1965년 5월 18일생. 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(석사). 1990년~1998년 (주)광명전기 기술연구소. 1995년~현재 동 대학원 박사과정  
Tel : (02) 2290-0344

E-mail : skc0386@hymail.hanyang.ac.kr

#### 강 형 부 (姜衡富)

전기학회 논문지 제48권 제2호 참조

Tel : (02) 2290-0344

E-mail : hbkang@email.hanyang.ac.kr