

# 유한요소법에 의한 VCB 접속부의 대전류에 대한 전열해석

강우종\* · 허 훈\* · 강경록\*\*

(1998년 1월 27일 접수)

## Electro-thermal Analysis of Contacts and Connections in VCB under High Electric Current by Finite Element Methods

Woo-Jong Kang, Hoon Huh and Kyeong-Rok Kang

**Key Words :** Electro-thermal Analysis(전열해석), Electric Contact Resistance(접촉전기저항), High Electric Current(대전류)

### Abstract

A large electric system of a vacuum circuit breaker(VCB) has been studied for the electro-thermal analysis by finite element methods. Since the heat generation in VCB causes not only energy loss but deterioration of the VCB system with oxidization of parts, the overheating of the system must be prevented. For the analysis, a finite element formulation is derived for both electric analysis and thermal analysis that are coupled together. Two sets of formulations are uncoupled after finite dimensional approximation. First, the electric potential is obtained for the entire field and scaled to the given electric current. The electric field obtained is then used to calculate the heat generation in the VCB system including contacts and connections for the calculation of the temperature distribution in the entire domain. The finite element analysis is carried out to study the effect of shapes and locations of contacts and connections. From the results, the existing VCB has been modified to enhance its capacity with reduction of heat generation and temperature elevation.

### 1. 서 론

전기적인 도체에 통전이 될 경우 주열효과에 의하여 도체 내에서는 발열을 하게 된다. 또한 이러한 도체들이 서로 접촉하고 있을 경우, 미시적인 접촉 표면의 거칠기에 의하여 실제 접촉 면적은 외관상의 접촉면적보다 훨씬 작아지게 되고, 또한 접촉 표면에는 산화, 부식, 이물질 등에 의하여 전류의 흐름을 방해하는 피막이 형성되므로, 통전이 가능한 면적(a-spot)은 아주 작게되어 접촉면에서

상당한 전기저항을 갖게 된다. 이와 같은 접촉저항의 영향으로 접촉부에서는 큰 전위차가 생기게 되며 많은 양의 열이 발생되는 원인이 되고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 현상을 응용한 가공방법이 전기저항 점용접이지만, 진공차단기(VCB: Vacuum Circuit Breaker)와 같은 대전류 송전시스템에서는 이러한 현상이 최대한 억제되어야 한다. 진공차단기는 전기적인 회로에 과부하가 걸릴 경우 이를 차단하는 장치로서 에너지전달의 효율성을 위하여 도전률이 높고 경제적인 구리 또는 구리 합금을 이용하여 시스템을 구성하고 있지만, 대전류가 흐르기 때문에 작은 전기저항으로도 많은 열이 발생하고 온도가 상승하게 된다. 시스템의 온도상승은 결국 에너지의

\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*LG산전주식회사

손실을 가져오며 시스템의 각 부품들의 산화와 부식이 쉬워져, 전기저항이 증가하게 되므로 시스템의 전기저항은 기계적으로 나빠지게 된다. 이러한 현상은 진공차단기의 수명에 중대한 영향을 주므로 시스템의 전기저항을 최소화하는 것은 절대적이다. 전기저항은 시스템의 체적전기저항과, 각 연결 접촉면에서의 접촉전기저항으로 구성된다. 접촉전기저항은 많은 설계변수에 의해 영향을 받게되므로 이러한 송전시스템의 발열을 줄이기 위해서는 체적전기저항보다는 연결 접촉부에서의 접촉전기저항을 줄이는 것이 보다 효과적이다. 따라서 국부적인 전류의 집중현상과 접촉면의 산화 및 부식과 같은 접촉전기저항 증가의 원인이 되는 설계상의 문제점을 파악하여 시스템의 과열을 방지해야 한다. 이를 위하여 우선 접점에서 전기저항에 따른 발열기구와 열전달기구에 관한 정확한 해석이 선행되어야 한다.

접촉전기저항을 고려한 전열해석은 수학적 모델링의 어려움으로 인하여 이론적으로 확립된 편은 아니지만, Bowden<sup>(2)</sup>과 Greenwood<sup>(3)</sup>는 전기도체에서의 전류흐름 및 온도영향에 대한 연구를 수행하였으며, Nied<sup>(4)</sup>는 유한요소법을 이용하여 전기접촉 문제를 해석하였다. Fried<sup>(5)</sup>와 Robertson<sup>(6)</sup>은 접촉에서의 열전달을 유한요소법을 통하여 계산하였고, Crane<sup>(7)</sup>, Hisakado<sup>(8)</sup> 및 Sano<sup>(9)</sup> 등은 피막과 접촉 표면의 거칠기 및 접촉면의 경사 등이 접촉전기저항에 미치는 영향을 연구하였으며, Rice 등,<sup>(10)</sup> Houchens 등,<sup>(11)</sup> Nied<sup>(12)</sup>는 접촉전기저항 및 상변태 등을 고려한 유한요소해석을 통하여 전기저항 적용점에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 송전시스템의 전위분포 및 전기저항에 의한 발열 등의 전기해석과 열해석을 동시에 수행할 수 있는 3차원 유한요소 프로그램을 개발하였다. 개발된 유한요소 프로그램은 전기접촉부의 접촉전기저항과 체적전기저항을 고려한 전위분포와 전류분포의 해석, 전기저항에 의한 발열량, 이에 연결된 시스템의 열해석 등을 수행할 수 있으며, 특히 실제응용대상인 VCB 시스템의 설계변경에 적용하였다. VCB 시스템의 각 접촉 및 접속부위의 전기저항에 따른 발열량을 계산하고, 각 부위의 발열량에 따른 전체시스템의 온도분포 및 온도상승효과를 정량적으로 해석하였다. 해석결과로부터 각 부위의 체결구조 변경, 발열량 조절, 과열부분에의 냉각핀 부착 등의 설계변경을 수행하여 기존 VCB

시스템의 통전용량을 성공적으로 향상시킬 수 있다.

## 2. 전기 및 열전달 해석을 위한 유한요소 수식화

전도체에 전류가 흐르면 자체의 체적전기저항 및 접촉전기저항때문에 주열효과로 인한 열이 발생한다. 이러한 열의 발생으로 인한 온도분포를 구하기 위해 먼저 전도체에서의 전기해석을 수행하여야 한다. 전기해석은 주어진 조건하에서 전위분포를 구하고 이로부터 전류분포를 구하는 과정이 포함된다. 구하여진 전류분포를 이용하여 단위체적당의 발열량을 계산하고 계산된 발열량을 열전달방정식에 이용하여 시스템내의 온도분포를 구한다.

### 2.1 전기해석

전도체내의 전위분포는 Laplace 방정식으로 해석할 수 있으며, 해석에 필요한 지배방정식 및 경계조건은 아래와 같이 식 (1) 및 식 (2)로 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \right) = 0 \text{ in } D \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} n_i = -\sigma_0 (V - g_i) \text{ on } \partial D \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 전위이며,  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, T)$ 는 전기도도도로 위치와 온도의 함수이다.  $\sigma_0$ 는 일반적 경계조건을 처리하기 위한 계수로서 경계조건의 종류에 따라 다른 값을 갖는 상수이고,  $g_i$ 는 경계조건으로 주어진 전위 값이다. 전도체내의 각 점에서의 전류밀도 및 전류는 각각 식 (1)과 식 (2)로부터 구하여진 전위분포를 이용하여 식 (3)과 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$J_i = -\sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$I = \int_A J_i n_i dA \quad (4)$$

여기서,  $n_i$ 는 전류가 통과하는 단면  $A$ 의 수직벡터이다. 전류밀도  $J_i$ 는 오옴의 법칙으로부터 식 (3)으로 표현할 수 있고, 특정 단면을 흐르는 전류의 양은 일정하다는 조건 및 식 (4)로부터 주어진 전류 값에 대한 전류밀도를 역으로 계산할 수 있다. 이때, 주열열에 의한 단위체적당 발열량은 식 (5)

로 표현된다.

$$f = \sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{\partial V}{\partial x_j} \quad (5)$$

상기 해석으로부터 전위분포, 전류밀도분포, 전기저항에 의한 발열량 등을 구할 수 있으며, 구하여진 발열량은 열전달해석에서 발열항에 대입하여 온도분포를 구할 수 있다.

### 2.2 열전달해석

열전달해석을 위한 지배방정식 및 경계조건은 아래와 같이 식 (6), 식 (7) 및 식 (8)로 주어진다. 열전달방정식은 고체내의 열 분포를 구하므로 시간천이항중 대류항은 소거되었으며, 발열항  $f$ 는 식 (5)에서 구하여지는 전기저항에 의한 단위체적당 발열량이다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + f \text{ in } D \quad (6)$$

$$k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} n_i = -k_o(T - g_2) + h \text{ on } \partial D \quad (7)$$

$$T = T_o \text{ in } D \text{ at } t = t_o \quad (8)$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 비열이며,  $k_{ij}$ 는 열전달계수를 나타내며  $k_o$ 는 일반적 경계조건을 처리하기 위한 계수이다.  $h$ 와  $g_2$ 는 대류 열전달계수와 경계조건으로 주어진 온도이며,  $T_o$ 는 초기온도를 나타낸다.

### 2.3 유한요소 수식화

전기 및 열전달해석 문제의 수식화를 위하여 가상일의 원리를 이용하여 식 (1)과 식 (6)을 적분방정식형태의 범함수로 만들면 각각 식 (9) 및 식 (10)과 같이 된다.

$$\int_D \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \right) \bar{V} dD = 0, \quad \forall \bar{V} \quad (9)$$

$$\int_D \left( \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) \bar{T} dD = \int_D \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \bar{T} dD + \int_D f \bar{T} dD, \quad \forall \bar{T} \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)에 부분적분과 발산정리를 적용하고 경계조건을 대입하면 각각 다음과 같은 식 (11)과 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$\int_D \sigma_{ij} \frac{\partial V}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x_i} dD + \int_{\partial D} \sigma_o V \bar{V} dD$$

$$= \int_{\partial D} \sigma_o g_1 \bar{V} dD, \quad \forall \bar{V} \quad (11)$$

$$\int_D \left( \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right) \bar{T} + k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} dD + \int_{\partial D} k_o T \bar{T} dD = \int_D f \bar{T} dD + \int_{\partial D} (k_o g_2 + h) \bar{T} dD, \quad \forall \bar{T} \quad (12)$$

위에 유도된 적분방정식형태의 유한요소 수식화는 유한요소를 이용하여 유한차원 근사할 수 있으며 실제문제에서는 상기 두식은 서로 연계되어 있으나, 증분해석에서는 상기식을 비연계시켜 순차적으로 해를 구할 수 있다. 결과식으로 전위와 온도에 관한 행렬방정식을 유도할 수 있다.

## 3. 해석결과 및 설계변경

앞에서 유도된 유한요소 수식화를 기초로 하여 전기해석과 열전달해석을 할 수 있는 3차원 유한요소 프로그램을 개발하였다. 유한요소는 8절점 brick 요소를 사용하였으며, 접촉부위는 인위적으로 가상요소를 침입하여 상당하는 전기적, 기계적 물성치를 부과하였다. 특히, 접촉부위의 a-spot 효과를 유한한 연속함수로 표현하기 위하여 전기저항 및 열저항의 평균치를 대입하였다. 개발된 유한요소 프로그램은 VCB 모델에 적용하여 이용하였다. VCB 모델의 해석에서는 제품의 품질기준이 정상상태에서의 온도로 나타내어지므로 정상상태의 해석을 수행하였다. 일반적으로는 접촉면에서 접촉압력 및 온도가 증가함에 따라 불순물이 접촉점에서 제거되며, 접촉점들이 무너져서 접촉전기저항은 감소하게 된다. 접촉열저항은 접촉전기저항의 경우와 같이 접촉력이 증가함에 따라 그 값이 감소한다. VCB 온도해석의 경우에는 모든 부품들이 견고히 체결되어 있다고 가정하였으며 접촉력과 그에 따른 접촉열저항은 일정하다고 가정하여 문헌의 자료를 발체하여 사용하였다.<sup>(13)</sup> 체결이 견고히 이루어지지 않았을 경우를 가정하여 접촉열저항을 크게한 경우 온도분포는 큰 차이를 보였으며 체결이 견고히 이루어졌다고 가정하여 접촉열저항을 특정값 이하로 하였을 경우에는 온도분포는 별 차이가 없었다.

VCB의 해석에 이용된 물성치는 다음과 같다.

구리의 전기 비저항 : 1.7241  $\mu\Omega\text{cm}$

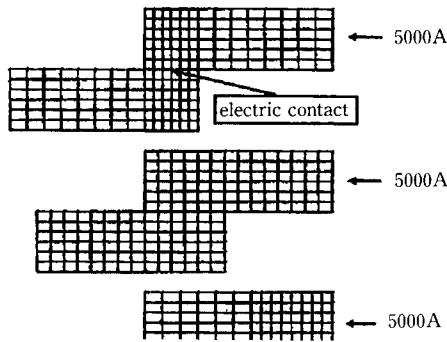
구리의 열전도계수 : 385 W/m<sup>2</sup>K

구리표면의 열전달계수 : 9.0 W/m<sup>2</sup>K

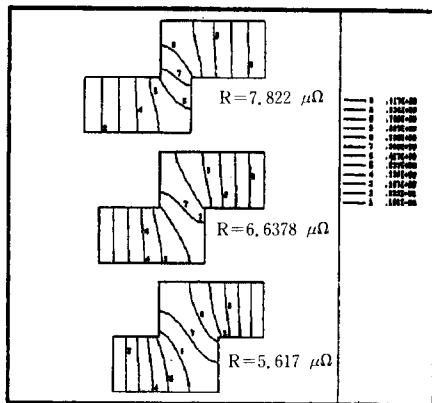
구리표면의 접촉열전달계수 : 100,000 W/m<sup>2</sup>K

**Table 1** Electric contact resistance between contact surfaces of connecting parts in VCB.

Contact parts	Electric contact resistance ( $\mu\Omega$ )
Current in bus-bar & bulb	0.5
Bulb & Clamp	3.5
Clamp & Shunt	0.5
Shunt & Current out bus-bar	0.5



**Fig. 1** Finite element mesh to calculate the electric constriction resistance with the change of the apparent contact area.

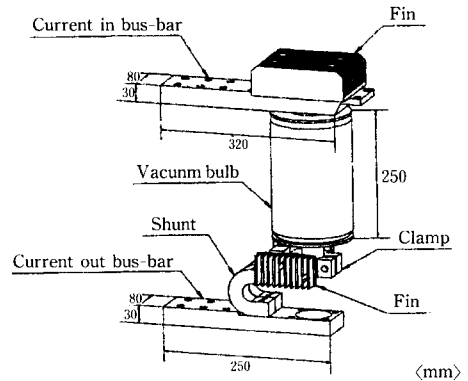


**Fig. 2** Distribution of the electric potential with the change of the apparent contact area.

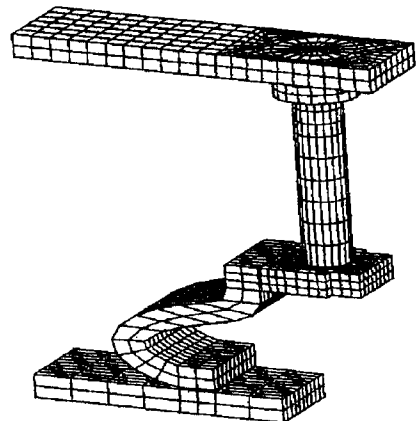
주위온도 : 20°C

VCB의 해석에 이용한 각 접촉부위의 접촉전기 저항은 실험에 의하여 측정된 평균값을 이용하였으며, 크기는 다음의 Table 1과 같다.

Fig. 1은 접촉면적과 전기저항과의 관계를 알아



**Fig. 3** Schematic diagram of VCB system.



**Fig. 4** Finite element mesh of VCB.

보기 위하여 똑같은 두개의 구리판을 접촉 면적이 각각 2 cm<sup>2</sup>, 3 cm<sup>2</sup>, 4 cm<sup>2</sup>가 되도록 겹쳐놓은 후, 5000 A의 전류를 통전시킨 경우에 대한 유한요소 모델이다. Fig. 2에서와 같이 접촉면적이 감소할수록 전기저항은 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 전기저항 증가의 원인은 접촉면에서 전류의 흐름이 급격히 바뀌면서, 수축저항(constriction resistance)이 증가하기 때문이다. 이러한 수축저항은 접촉면적이 작아질수록 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 접촉면적과 전기저항 사이에는 선형적인 비례식이 성립하지는 않은 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 VCB의 각 부분의 개략적인 모양 및 명칭을 나타낸 그림이며, Fig. 4는 이것을 단순화하여 3차원 유한요소 모델링한 것이다. VCB는 크게 상부단자, 하부단자, 클램프, 션트, 진공벌브 등의 부품으로 구성되어 있으며, 과부하가 걸리게 되면

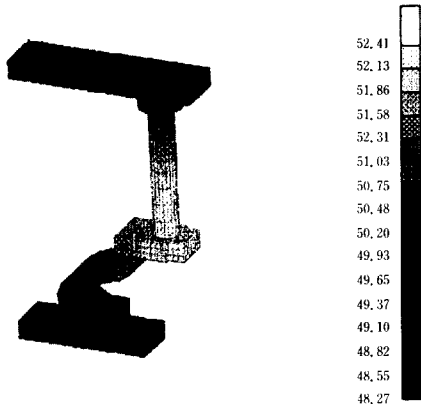


Fig. 5 Temperature distribution in VCB model with the electric current of 2000 amperes.

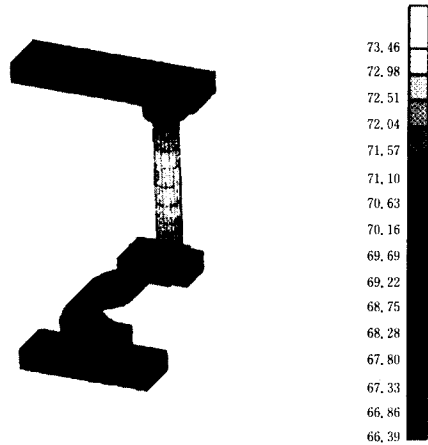


Fig. 7 Temperature distribution in VCB model with the electric current of 3150 amperes neglecting the electric contact resistances.

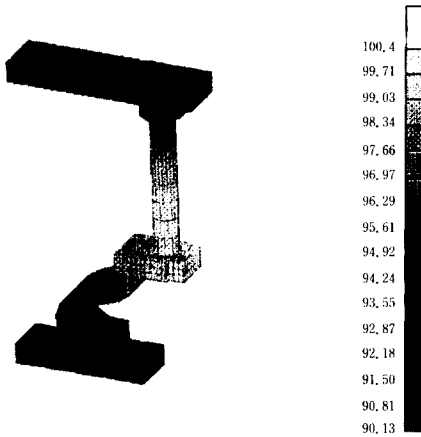


Fig. 6 Temperature distribution in VCB model with the electric current of 3150 amperes.

진공벌브 안의 접촉이 기구학적으로 떨어지게 되어 전류를 차단하게 된다. VCB 시스템은 공간적으로 제한을 받고 있어 작게 할 수 없으며, 크게 만드는 데에도 문제가 있다. 따라서 과열이 되는 부분에 적절한 냉각방법을 도입할 수 없으며 냉각핀을 부착하는 정도가 가능하다. Fig. 3은 각 부위의 온도가 기준 온도범위보다 적절히 작게 하기 위하여 냉각핀을 부착한 그림이며 실제로는 이에 관한 설계가 수반되어야 한다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같이 모델링되어진 시스템에 2000 A의 전류가 흐를 경우 시스템의 온도분포를 나타낸 그림이다. 이 때 주위로부터 최고 32.4°C의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

위와 같은 시스템에 전류를 3150 A로 증가시킬 경우 Fig. 6에서 보는 바와 같이 온도상승은 주위

로부터 80°C에 이르게 된다. 즉, 시스템의 용량 증대로 인하여 약 50°C정도의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 가장 큰 발열이 생기는 부분은 클램프와 벌브와의 접촉부인 것을 알 수 있다.

Fig. 7의 경우는 Fig. 6과 비교하여 볼 때 시스템 내의 각 접촉부에서의 접촉전기저항을 무시하고 체적저항만에 의한 온도상승을 본 것이다. 시스템의 체적전기저항은 약 8 μΩ이며, 이로 인한 온도상승은 최고 온도가 주위로부터 약 53°C 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 시스템의 용량증대로 인한 약 50°C정도의 온도상승중 약 30°C의 온도상승은 접촉전기저항으로 인한 효과에 의한 것을 알 수 있다.

체적전기저항으로 인한 온도상승은 재료의 도전을 및 시스템의 기하학적인 형상에 관계하기 때문에 재료의 도전을 증가시켜서 억제할 수 있지만, 경제적인 이유로 구리 또는 구리합금을 이용하고 있다. 따라서 시스템의 발열을 줄이기 위해서는 체적전기저항을 줄이는 것보다 접촉전기저항을 줄이는 것이 보다 바람직하다. 또한 시스템의 형상 가능한 한 수축저항(constriction resistance)이 작게 설계되어야 한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 접촉전기저항을 고려하지 않았을 때와 고려하였을 경우에 시스템의 전위분포를 나타낸 그림이다. 접촉전기저항을 고려하지 않았을 경우 전압강하가 시스템에 균일하게 발생하는 것을 볼 수 있지만, 접촉전기저항을 고려하였을 경우에는 각각의 접촉부에서 보다 큰 전압강하가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 클램프부분의 큰 접

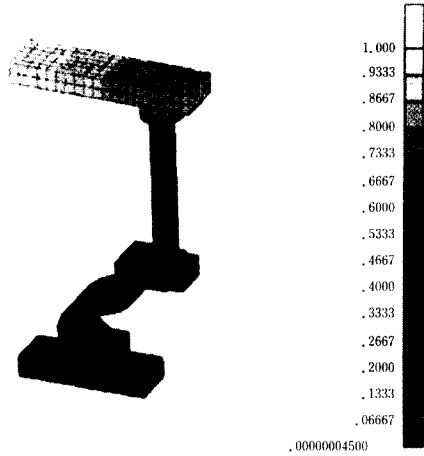


Fig. 8 Distribution of electric potential in VCB model neglected the electric contact resistances.

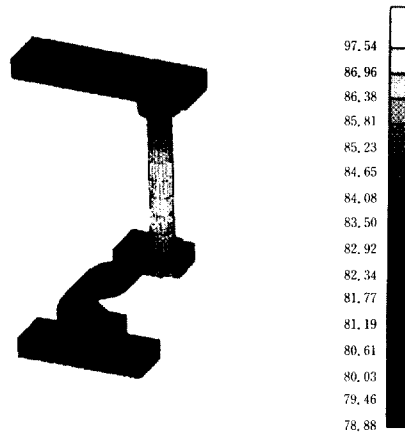


Fig. 10 Temperature distribution in VCB model with the electric current of 3150 amperes when the contact resistance in the clamp is reduced by a amount of  $2 \mu\Omega$ .

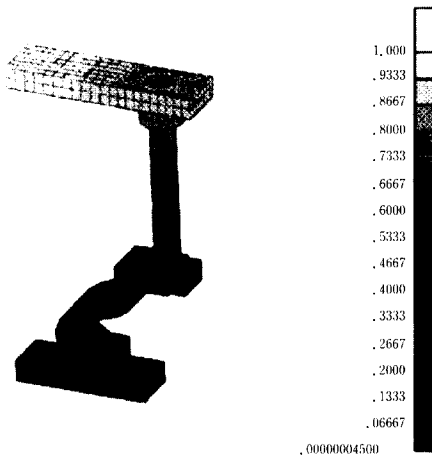


Fig. 9 Distribution of electric potential in VCB model included the electric contact resistances.

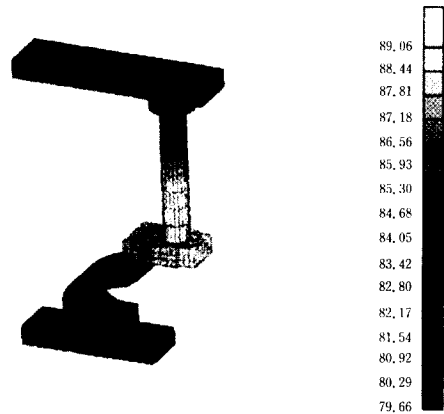


Fig. 11 Temperature distribution in VCB model with the electric current of 3150 amperes when the clamp and the current-in busbar are cooled by fins.

축전기저항의 영향으로 인하여 이 부분에서의 전압 강하가 상대적으로 가장 큰 것을 볼 수 있으며, 따라서 이 부분에서의 발열도 다른 부분에 비해 크게 된다.

Fig. 10은 클램프와 벌브의 접촉전기저항을  $2 \mu\Omega$  감소시켰을 경우에 온도분포를 나타낸다. 이 경우 시스템의 온도는 주위로부터 최고  $67^\circ\text{C}$  상승하였다. 즉, 클램프에서  $2 \mu\Omega$ 의 접촉전기저항 감소로 시스템은 전체적으로 약  $13^\circ\text{C}$ 의 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이 때에는 클램프보다는 진공벌브에서 온도상승이 더 크게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 시스템의 상부단자 및 클램프부분에

방열핀을 설치하였을 경우이며 주위로부터 최고  $69^\circ\text{C}$  상승한 것을 알 수 있다. 방열핀효과를 유한 요소해석하기 위하여 열저항을 측정하였으며, 측정 결과 상부단자에 위치한 방열핀의 경우 열저항이  $1.22^\circ\text{K/W}$ 이었으며, 클램프부분의 방열핀은 열저항이  $4.34^\circ\text{K/W}$ 이었다. 이와 같은 방열핀의 열저항을 고려하기 위해서 방열핀이 위치한 부분의 대류열전달계수를 조정하여 대류경계조건으로 처리하였다. 방열핀의 설치로 인하여 시스템은 약  $10^\circ\text{C}$ 의 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

이상의 해석을 통하여 클램프부분의 접촉전기저항이 시스템의 과열에 큰 영향을 주게 되는 것을

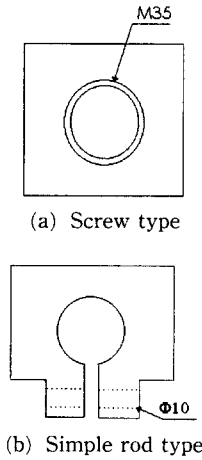


Fig. 12 Schematic diagram of the VCB clamp.

알 수 있었다. 따라서 이 부분의 설계변경을 통하여 접촉전기저항을 감소시켜 시스템의 과열을 방지할 필요가 있다. 그 방법으로써, 나사형태의 접촉을 단순봉형태의 것으로 바꾸는 것이 바람직하다. 즉, 기존의 클램프 형상인, Fig. 12(a)와 같은 나사형태의 접촉은 설계상의 공차로 인하여 실제의 접촉면적은 외관상의 접촉면적에 비해 매우 적게 된다. 따라서 이 부분의 접촉을 Fig. 12(b)와 같은 단순봉형태의 것으로 바꿔 접촉면적을 늘림으로서 접촉전기저항을 줄일 수 있다. 단순봉형태의 접촉 시에는 클램프의 안쪽 면에서 진원도 및 직경도가 좋아야하므로 리이머 가공을 할 필요가 있으며, 은도금 등을 통하여 접촉면의 산화 및 부식을 방지해야 한다. 시스템의 다른 부분의 접촉부에서도 이와 같이 평편도를 향상시키는 등의 가공정밀도를 유지하여 접촉전기저항을 줄여야 한다. 이와 같은 설계변경을 통하여 접촉전기저항을 줄이고, 방열핀을 설치하여 시스템의 열방출량을 늘이는 방법으로 시스템의 과열을 방지할 수 있다.

#### 4. VCB 설계시의 고려사항

##### 4.1 가동단자의 형상

VCB 밸브부품의 가동단자는 외력을 크게 받는 부품이어서 나사형태로 체결되었으나, 나사형태는 접속부의 전기저항이 크므로 전류에 의한 발열량이 과대하게 된다. 나사형태는 가용 접촉면적이 평평한 봉에 비하여 50%정도이고, 암나사와 수나사에 허용공차가 있으므로 기밀한 접촉이 유지되기 어렵

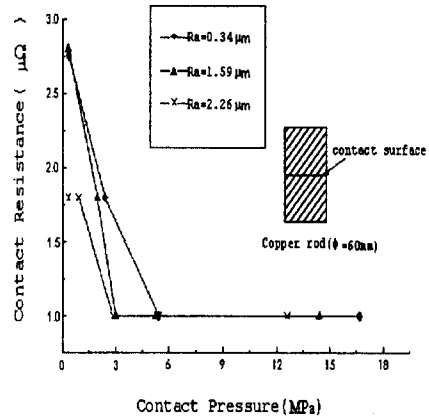


Fig. 13 Variation of electric contact resistance with respect to the applied contact pressure.

다. 또한 나사형태는 완전한 축대칭이 되지 않아 암나사와 수나사는 평행하지 않으므로 접촉 면적은 더욱 줄어들게 되어 전기저항은 증대되고 발열량은 따라서 과대하게 된다. VCB 설계시 가동단자는 가능한 한 나사형태에서 단순봉형태로 변경하는 것이 바람직하며 단순봉의 진원도와 직경도가 보장되어야 한다.

##### 4.2 전기접속부의 표면 및 접촉하중

전기적 접속부의 표면은 가능한 표면조도가 좋아야 할 뿐 아니라 접촉면의 평편도가 좋아야 한다. 현실적으로 접촉표면의 전 부분이 상호 접촉하기는 거의 불가능하며, 접촉면의 일부가 상호 접촉하게 되는데 부품 가공시에 평편도를 높이면 접촉면적을 크게 할 수 있고 a-spot의 총 면적을 크게 할 수 있다. 그러나 Fig. 13에서 보는 바와 같이 표면조도의 크기는 접촉하중이 클 경우 접촉전기저항에 큰 영향을 주지 않는다.

또한 접촉면에서의 산화, 부식정도는 전기 저항에 큰 영향을 주게 되지만, 접촉 하중이 어느 정도 이상이 되어 이러한 산화, 부식에 의한 피막이 깨어질 경우 전기저항은 거의 변화가 없기 때문에 충분한 접촉하중이 필요하게 된다.

#### 5. 결론

진공차단기와 같은 송전시스템에서는 전기저항을 작게 하여 에너지전달의 효율성을 높이고, 또한 시스템의 주열효과로 인한 발열을 줄이는 것이 중

요한 관건이 된다. 이와 같이 대전류가 흐르는 시스템에서는 체적전기저항으로 인한 온도상승이 있게 되지만, 여기에 접촉부의 기하학적인 형상이나 산화, 부식, 이 물질 등에 의한 접촉전기저항을 고려하게 되면 실제의 발열은 더욱 커지게 된다. 따라서 진공차단기의 용량증대로 인한 온도상승 문제를 해결하기 위해서는 각 접촉부의 접촉능력을 향상시킬 필요가 있으며, 또한 적절한 방열핀의 설치로 온도상승을 억제해야 한다.

본 논문에서는, VCB 시스템의 높은 발열의 원인이 되고 있는 벌브와 클램프의 접촉부분을 나사산형태의 것에서 단순봉형태의 접촉으로 바꾸어 접촉저항을 낮출 수 있었고, 또한 방열효과를 높여 온도상승을 억제하였다. 또한 VCB 시스템의 효과적인 설계를 위하여 시스템의 전기 및 열전달해석을 위한 3차원 유한요소해석 프로그램을 개발하여 시스템의 기하학적인 형상에 따른 전기저항의 변화, 발열정도 및 온도분포를 예측하였다.

### 참고문헌

- (1) Holm, R., 1967, *Electric Contacts*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- (2) Bowden, F. P. and Williamson, J. B. P., 1958, "Electrical Conduction in Solids-I. Influence of the Passage of Current on the Contact Between Solids," *Proc. Royal Soc. of London* 246 : 1-12.
- (3) Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P., 1958, "Electrical Conduction in Solids-II. Theory of Temperature-dependent Conductors," *Proc. Royal Soc. of London* 246 : 13~31.
- (4) Nied, H. A. and Schlanser, C. A., 1984, "The Thermo Structural Analysis of Electric Contacts Using a Finite Element Model," *IEEE Trans.*, Vol. CHMT-7, pp. 112~124.
- (5) Fried, E., 1969 "Thermal Conduction Contribution to Heat Transfer at Contacts," in *Thermal Conductivity* ed. by R. P. Tye, Vol. 2.
- (6) Robertson, S. R., 1982, "A Finite Element Analysis of the Thermal behavior of Contacts," *IEEE Trans.*, Vol. CHMT-5, No. 1, pp. 3~10.
- (7) Crane, G. R., 1981, "Contact Resistance on Surface with Nonuniform Contaminant Films," *IEEE Trans.*, Vol. CHMT-4, No. 1, pp. 5~9.
- (8) Hisakado, T., 1977, "Effect of Surface Roughness and Surface Films on Contact Resistance," *Wear*, Vol. 44, pp. 345~359.
- (9) Sano, Y., 1985, "Effect of Space Angle on Constriction Resistance and Contact Resistance for the Case of Line Contact," *IEEE Trans.*, Vol. CHMT-8, pp. 228~234.
- (10) Rice, W. and Funk, E. J., 1967, "An Analytical Investigation of the Temperature Distributions During Resistance Spot Welding," *Welding Journal*, Vol. 46, No. 4, pp. 175~186.
- (11) Houchens, A. F., Page, R. E. and Yang, W. H., 1977, "Numerical Modeling of Resistance Spot Welding," in *Numerical Modeling of Manufacturing Processes* ed. by Jones, R. F., Armen, H. and Fong, J. T., pp. 117~129.
- (12) Nied, H. A., 1984, "The Finite Element Modeling of the Resistance Spot Welding Process," *Welding Research Supplement*, pp. 123~132.
- (13) *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, 1985, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.