

## 배선용 차단기 방열성능 향상 연구

박성균\*, 이종철<sup>†</sup>, 김윤제\*

\*성균관대학교 기계공학부, <sup>†</sup>LG산전\*

## A Study on the Heat Removal Performance in a MCCB

S.-K. Park\*, J.-C. Lee<sup>†</sup>, Youn J. Kim\*

\*School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University

<sup>†</sup>LG Industrial Systems

### 1. 서 론

정보화 사회가 진척될수록 안정적인 전력공급이 요구되고 있으며, 이로 인한 배선용 차단기(Molded Case Circuit Breaker, MCCB)의 중요성은 점점 높아지고 있다. 차단기는 전력계통에서 매우 중요한 역할을 하는 전력기기로서 정상 작동시에는 전류를 안정적으로 수용가에 공급해야 하며, 사고 발생시에는 신속하게 전류를 차단하여 사고 전파를 최소화하는 역할을 해야 한다. 따라서, 차단기는 매우 광범위한 영역에서 다양한 형태로 적용되고 있고, 기술의 고도화를 배경으로 소형화·고신뢰도화·경제성 향상이 도모되고 있다. 현재 국내외 차단기 시장 추세는 정격전류의 크기가 증가되더라도 불구하고 설치공간 및 디자인 등의 문제로 인하여 소형화를 요구하고 있다. 소형화에 따른 배선용 차단기 내부에서 발생하는 열을 효율적으로 처리하는 것은 중요한 과제이다. 왜냐하면, 방열이 충분하지 못하면 차단기의 열화를 앞당길 뿐만 아니라 제품 사고의 원인이 되기도 한다. 따라서, 국제기관인 IEC에서는 접속부와 접속부의 최고온도를 105℃, 115℃, 최고허용온도를 65℃, 75℃로 규제하고 있다<sup>1)</sup>.

차단기 개발시 열적인 측면에서는 정격전류 상승에 의한 발열량의 증대 및 소형화에 따른 열전달 촉진방법도 고려하여 설계해야 한다. 그러나, 열전달 메카니즘은 도체부 이외에도 주위 공기와 열전달이 존재하기 때문에 쉽게 파악할 수 없다. 설계시 직접 적용할 수 있는 일관성있는 경향을 파악하기 위해서는 많은 경험과 실험을 통한 설계자료 확보가 필요하다. 하지만, 실험에 의하여 열전달 메카니즘을 규명하는 일은 많은 시간과 비용이 소비되는 단점이 있다. 이러한 열전달 메카니즘에 대한 데이터를 구할 수 있는 또 하나의 방법으로 전산유체역학(computational fluid dynamics)을 이용하여 방열특성을 규명하는 방법이 있다. 전기 장치의 열해석은 다양한 열전달 향상 기술을 적용할 수 있는 분야의 하나로 많은 연구가 수행되어 왔다. 초기에는 노트북, 컴퓨터 등에 많이 적용되었지만, 점차 그 응용분야가 확대되고 있다. 상용코드를 이용하여 차단기 내부의 열해석을 수행한다면 제품설계시간, 실험시간 및 비용 등을 줄일 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 상용코드인 ICEPAK<sup>2)</sup>을 이용하여 배선용 차단기 내부의 온도장을 해석하고자 한다. 특히, 열전달 메카니즘에 대한 정립 및 방열성능을 향상시킬수 있는 방법을 모색하고자 한다.

## 2. 관련이론

### 2.1 접촉 저항 메카니즘

매끈하게 가공된 면이라 할지라도 실제 접촉하는 면적은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 극히 일부분만이 접촉한다. 또한 이렇게 접촉되고 있는 면적도 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 금속간의 접촉이 이루어지는 금속접촉 (metallic contact), 전류가 터널효과 (tunnel effect)에 의하여 쉽게 통과할 수 있을 정도의 얇은 피막으로 덮힌 반도체 부위 (semiconducting spot), 그리고 전류가 거의 통하지 못할 정도의 두꺼운 피막으로 덮힌 부분 (thick film area)으로 나눌 수 있다<sup>3)</sup>. 따라서 실제 접촉면은 외관상의 접촉면보다 매우 작으며, 또 그 중에 일부 (metallic contact, semiconducting spot)만이 전기적으로 전도가 가능함을 알 수 있다. 이로 인해 기기 내부의 접촉부에서는 좁은 면적을 통하여 전기가 흐르게 되므로 큰 저항이 생기게 되고, 주울발열 (Joule heating)에 의해 많은 열이 발생하게 된다.

$$Q = I^2 R \quad (1)$$

접촉저항은 접촉압력의 영향을 크게 받는다. 접촉압력의 증가에 따라 각 접촉점들의 크기는 크게 변하지 않으나, 접촉점들의 수는 접촉압력에 비례하여 증가한다<sup>4)</sup>. Fig. 3에 도시한 바와 같이 접촉면압이 작은 범위에서는 새로운 접촉점들이 생기기 때문에 기존 접촉점들의 성장이 상쇄되어 큰 변화가 없지만, 접촉면압이 더욱 증가하면 생성된 접촉점들이 합쳐지기 때문에 접촉점의 수는 감소하지만 접촉면적은 빨리 증가하게 된다.

### 2.2 접촉면에서의 열전달

접촉부에서의 열저항은 접촉면적이나 접촉재료의 열 및 물리적인 특성, 그리고 접촉부에 갇힌 유체의 영향을 받게 된다. 이러한 열전달은 고체 전도 (solid conduction), 유체 전도 (fluid conduction) 및 복사(radiation)에 의해서 이루어지지만 고체 전도에 의한 효과가 가장 크게 나타나므로 본 연구에서는 고체 전도에 의한 열전달 영향만을 고려하였다.

특정한 문제의 경우, 접촉면에서의 열전달을 정량적으로 예측할 수 있는 해석적 방법이 있지만, 일반적으로 적용할 수 있는 해석적 방법이 아직 없기 때문에 실험적인 접근법이 많이 사용되고 있다.

### 2.3 총발열량과 방열성능

총발열량 (Q)은 각 구성 부위로부터의 발열량 합계로 나타낼 수 있다. 온도상승 평균치를  $\Delta T$ 라고 하면, 이 때 성립하는 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta T = Q / \alpha A \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 평균열통과율, A는 실제 방열 표면적을 각각 나타낸다. 계산된  $\Delta T$ 는 설계상 온도상승 허용치 이하로 설정되어야 하는데, 초과될 경우에는 재설계가 요구된다<sup>5)</sup>.

## 3. 수치해석

### 3.1 지배방정식

배선용 차단기(MCCB) 내부의 발열과 열전달 메카니즘은 그 과정이 매우 복잡하기 때문

에 내부 온도를 예측하는 것은 쉽지 않다. 차단기 내의 열유속 특성을 해석하기 위하여 지배방정식은 다음과 같은 텐서형태로 나타낼 수 있다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

운동방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{u_i} \quad (4)$$

에너지방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + S_h \quad (5)$$

위 식에서  $S_{u_i}$ 와  $S_h$ 는 각각 소스항을 나타내며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$h = C_p T + \frac{1}{2} u_i u_i$$

$$\tau_{ij} = -(\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$q_j = -\left( \frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j}$$

$$S_{u_i} = -\frac{2}{3}(\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

$$S_h = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{2} u_i u_i \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)$$

### 3.2 수치해석 기법

해석에 사용된 차단기의 단면도는 Fig. 4에 나타내었다. 전류는 기기 내부의 도체를 따라  $x$ -방향으로 이동하게 되는데, 기기 내부의 도체는 하나의 도체가 아니라 여러 개의 도체 집합이므로 도체간 접속부에는 큰 저항이 발생하게 된다. 특히 Fig. 4의 접속부(A)와 접촉부(B)에서 가장 높은 저항값을 갖게 된다. 접속부와 접촉부를 제외한 다른 부분에서는 볼트 접속을 하고 있는데, 볼트에 의해 접속된 부분에서 발생하는 접촉저항은 식 (6)에 의해 계산할 수 있다. 본 연구에서는 볼트에 의한 접촉저항은 크지 않기 때문에 무시하였다.

$$h_c = 0.55 \frac{k}{\sigma} m \left( \frac{P_a}{H} \right)^{0.85} \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \quad (6)$$

여기서,

$k$  : thermal conductivity,  $H$  : hardness

$\sigma$  : RMS roughness,  $P_a$  : pressure

$m$  : RMS slope of contacting asperities

복사열전달은 물질이 갖고 있는 전자에너지가 전자기파의 형태로 방출, 흡수되어 물질의 내부에너지 변화를 수반하는 현상을 말한다<sup>6)</sup>. 본 연구에서는 표면에서의 복사만 고려하였으며 주위 공기는 복사에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 진공이나 공기에서의 복사열전달을 해석시에는 타당한 가정이라 할 수 있다<sup>7)</sup>. 또한, 차단기와 주위공기와의 열전달을 고려하기 위해서 차단기와 차단기를 포함하는 주변을 해석영역으로 선정하였다.

### 3.3 격자계 구성

배선용 차단기 (MCCB) 내 온도장 해석을 위한 격자생성은 ICEPAK 내의 자동격자 생성법을 사용하였다. 자동격자 생성법은 경계격자의 분포로부터 내부 격자를 자동으로 생성할 수 있는 장점이 있는 반면, 문제의 성질이나 형상의 특징에 따라 내부 격자점 조절에 사용자 의도를 반영시킬 수 없거나 크게 제한을 받는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 격자 생성시 비정형 격자 (unstructured grid)를 부여하였다. 가장 큰 관심대상인 도체부와 형상 특징에 따른 내부도체 접촉부에는 조밀격자 (enhanced grid)를 분포시켜 정확한 해를 얻고자 하였고, 그 외 부분에는 성긴격자 (coarse grid)를 분포시켜 계산시간을 단축하였다. 또한 경계면에서의 정확한 해를 위하여 O-grid 기법을 사용하였다. Fig. 5는 도체에서 완성된 격자를 보여주고 있다.

## 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 MCCB 내부의 온도장을 고찰하기 위하여 전자장비 열설계 프로그램인 ICEPAK을 사용하였고, 정확한 예측을 위하여 실제 모델과 동일한 크기와 형상으로 모델링하였다. 접촉점과 접촉점에는 각각 접촉저항값 4.2 W, 접촉저항값 9.5 W를 적용하였다. 또한, line부와 load부 끝단에서의 복사와 전도에 의한 열손실을 고려하기 위하여 경계조건에 -20 W를 적용하였다 (본 연구에서는 이 상태를 기준상태로 설정하였다). 또한 방열성능 향상을 위하여 다음 6가지 경우를 고려하였다. 각각의 경우에 대한 온도 측정점은 Fig. 6에 도시하였고, case별 상태는 다음과 같다.

**Case 1.** 기준상태

**Case 2.** 기준상태, (1)(7) 하부에 도체 삽입 (두께 5mm 증가).

**Case 3.** 기준상태, (6) 하부에 도체 삽입 (두께 5mm 증가).

**Case 4.** 기준상태, (3) 하부에 도체 삽입 (두께 5mm 증가).

**Case 5.** 기준상태, (5) 상부에 도체 삽입 (두께 5mm 증가).

**Case 6.** 모든 Case 적용.

MCCB는 3상 전류가 흐르는데 S상에서 가장 높은 온도를 갖기 때문에 S상을 기준으로 정하는 것이 일반적이다. Fig. 7은 S상에서의 각 case별 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 case 1에서의 온도가 가장 높고, case 6에서의 온도가 가장 낮음을 알 수 있다. 그러나, 각 case 별로 도체를 삽입한 부분에서는 온도가 낮아졌지만 case 6을 제외하고 case 1~5에서의 전반적인 온도분포, 특히 로드부와 라인부에서의 온도변화는 미세하다는 것을 알 수 있다. 즉, 도체를 국소적으로 삽입하는 것은 국소적인 부분에서의 온도하락에는 영향을 미친다 할지라도 기기 내부의 전체적인 온도하락에는 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 case 1과 case 6에서의 3상 온도분포를 비교하였다. R, S, T상에서는 약간의

온도차이를 보이지만, case 1과 case 6을 비교하면 온도차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 도체를 많이 삽입했음에도, 온도상승 억제 효과가 크지 않는 것은 삽입된 도체가 전류의 흐르는 통로에 영향을 미치지 못하기 때문이라고 판단된다. 즉, case 1과 case 6의 전류밀도가 크게 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 9는 case 6에서의 내부 온도분포를 나타낸다. 그림에서 보듯이 접속부와 가동부에서 최고온도를 보이며, 내부온도는 약 120~140℃의 값을 나타내었다.

Fig. 10은 전, 후면부에 각각 3개, 측면부에 각 4개씩 환기구를 설치하였을 경우 (case 7)의 온도분포를 나타낸다. Fig. 9와 비슷한 온도분포를 보이며, 전면부와 후면부 아래부분에 공기가 유입되어 온도가 감소함을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 배선용차단기 내부의 방열성능을 향상시키고자 온도장 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기기 내부의 온도 상승 억제를 위해 6가지 경우를 고려하였다. 일정 두께의 도체를 삽입했을 경우 국소적인 방열성능 향상에는 도움이 되었으나, 기기 내부의 전체적인 온도분포에는 큰 영향을 미치지 못하였다.
- 2) 전면부, 측면부, 후면부에 환기구를 설치하였을 경우 최고온도는 6℃, 부분적으로는 2~8℃ 정도의 방열성능 향상 효과를 얻을 수 있었다. 따라서, 방열기 내부의 기류 제어를 위한 환기구의 형상 및 위치 설정에 관한 추가적인 연구가 향후에는 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) IEC-60943, : "Guidance Concerning the Permissible Temperature Rise for Parts of Electrical Equipments, in particular Terminals", 2nd Edition, 1998.
- 2) ICEPAK User Seminar : Advanced Technology Engineering Service, 2001.
- 3) T. Hisakado, : Effect of Surface roughness and Surface films on Contact Resistance," Wear, Vol. 44, pp. 345-359, 1977.
- 4) Green, J. A. : Paper 65-Lub-10, ASLE-ASME Lubrication Conference San Francisco, 1965.
- 5) Keiji Mashimo, Yukihiko Saita, Ken Koizumi, Hideki Nakazato, : "Heat Transfer Analysis for Vehicle Electronic Parts", 古河電工時報 제 110호, 2002.
- 6) Slade, P. G., : "Electrical Contacts", Marcel Dekker, Inc. NewYork, 1999.
- 7) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., : "Fundamental of Heat and Mass Transfer", Wiley, 4th Edition, New York, 1996.

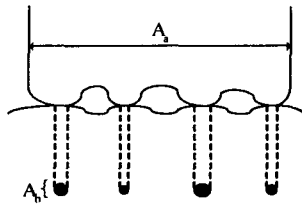


Fig. 1 True contact area in apparent contact surface

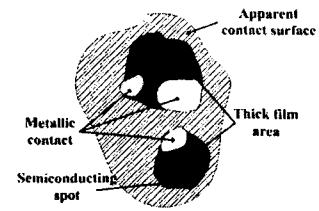


Fig. 2 Three different contact areas

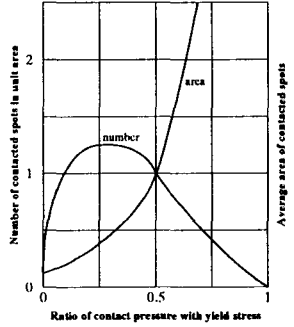


Fig. 3 True contact area and the number of spots varying with the average contact pressure (relative to sign 0)

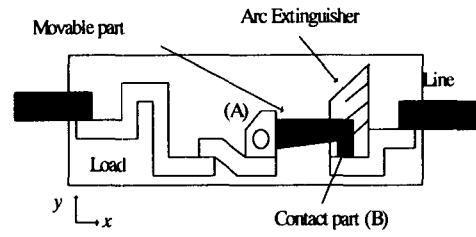


Fig. 4 Schematic diagram of the molded case circuit breaker



Fig. 5 Grid systems

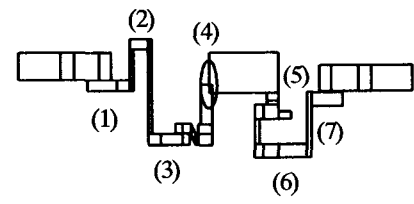


Fig. 6 Measurement points in the MCCB

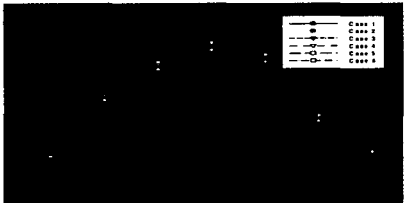


Fig. 7 Temperature distribution at S-pole

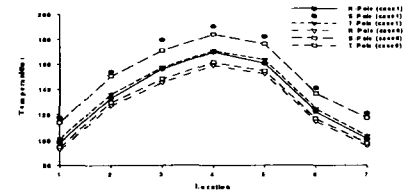


Fig. 8 Comparison of the temperature distribution results between the case 1 and case 6

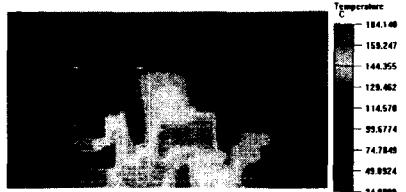


Fig. 9 Contour plot of temperature distribution in the MCCB (case 6)

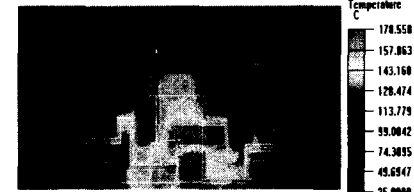


Fig. 10 Contour plot of temperature distribution in the MCCB (case 7)