

전기 접촉저항에 대한 MCCB의 온도 상승 연구

박성규, 이종철*, 김윤제**
성균관대학교 대학원, LG 산전*, 성균관대학교**

A study on the Temperature Rise of a MCCB for the Electrical Contact Resistance

S.-K. Park, Jong-Chul Lee*, Youn J. Kim**
Graduate School, SungKyunKwan University
LG Industrial Systems*, SungKyunKwan University**

1. 서론

MCCB (Molded Case Circuit Breaker)는 절연 용기 (molded case) 내에 개폐기구, 트립 (trip)장치 등을 일체로 조립한 것으로, 과부하 및 단로 등의 이상 상태시 자동적으로 전류를 차단하는 기기이다. 오늘날 고도 정보화 사회에서는 안정된 전력공급이 요구되고 있으며, 기술의 고도화를 배경으로 소형화, 신뢰도 및 경제성 향상이 도모되고 있다. 이와 함께, MCCB는 전력 공급장치분야 뿐만 아니라, 산업분야 전반에 걸쳐 매우 광범위하게 적용되고 있다.

현재 MCCB는 정격전류가 점차 높아지는 추세이며, 이와 반대로 제품의 크기는 점차 소형화되고 있다. 소형화가 진행되면서 장치 내부에서 발생하는 열처리가 중대한 문제점으로 대두되고 있다. 에너지 전달의 효율성을 위하여 MCCB 주회로의 도체는 도전율이 높고 경제성이 우수한 구리 또는 구리합금을 이용하지만, 전류의 제곱에 저항의 곱으로 표현되는 주열발열(Joule Heating)에 의해 온도가 상승하기 때문에 정해진 정격전류에서는 주회로의 전기저항에 의하여 제품의 작동온도가 결정된다. 이러한 온도상승은 에너지 손실을 의미하며, 각 부품의 산화와 부식을 촉진하여 전기저항이 증가하게 된다. 또한 일정온도 이상 상승하게 되면, 제품자체 규격에 위배되고, 제품의 치명적인 결함의 원인이 되기도 한다. 특히, 국부적인 문제점을 파악하여 접촉면의 산화 및 부식과 같은 접촉저항 증가의 원인이 되는 설계상의 문제점을 파악하여 시스템의 온도상승을 방지해야 한다. 국제규격에서는 온도상승치를 제한하고 있는데, 대표적으로 IEC (International Electrotechnical Commission)에서는 접속부와 접촉부의 최대온도를 115°C, 105°C로 각각 규제하고 있으며, 또한 주위온도와의 차이를 각각 75°C, 65°C로 규제하고 있다.

기기에 대한 열유동 해석 기술은 단순 모델에 대한 해석적 기법에서 시작하여 최근에는 컴퓨터를 사용한 수치해석을 이용하여 복잡한 모델에 대해 비교적 단시간에 정밀도가 높은 해석이 가능하게 되었다. 이로 인해, 제품설계시간, 실험시간, 실험비용 등을 줄일 수 있으므로 많은 효과를 얻을 수 있다. 특히, 전기 및 전자 부품의 방열설계를 위한 범용 소프트웨어로는 ICEPAK¹⁾, ANSYS, CFD-ACE 등이 이용되고 있다.

본 연구에서는 ICEPAK을 이용하여 정격전류 800A에서의 MCCB 내부 온도장을 파악하고, 온도상승이 가장 크게 일어나는 가동부 (Fig. 1 참조)의 접촉저항이 MCCB 내부 온도

상승에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 이를 위해 온도상승 실험과 ICEPAK을 이용한 수치해석을 수행하였고, 실험과 수치해석의 결과를 비교하여 ICEPAK의 적용성을 검토하였다. 또한, 가동부 접촉저항 변화에 따른 MCCB 주회로 온도상승과의 관계를 고찰하였다.

2. 실험

본 연구에서는 실제적인 열전달 메카니즘을 파악하고, ICEPAK의 해석결과와 비교하기 위한 데이터를 확보하기 위해 MCCB에 대한 온도상승 실험을 수행하였다 (Fig. 2 참조). 사용된 정격전류는 $800A \pm 5A$ 이며, T/R 단자와 시료의 연결을 위해 $250mm^2$ KIV Cable 2개를 사용하였다. Fig. 3은 실험에 사용한 MCCB의 구성도이다. 3상 분리형이며, 전류가 흐르는 모든 회로는 안정성을 위해 외함에 둘러싸여 있다. 외함은 절연 용기 (molded case)로 되어 있으며, 후면에는 내부 도체의 냉각을 위해 공기가 통과할 수 있는 구멍을 만들었다.

실험은 IEC-60694 규격에 의하여 실시하였으며, 1시간에 $1^\circ C$ 이상의 온도변화가 없을 때 정상상태에 도달한 것으로 판단하였다. 온도상승 실험을 시작하기 전에 주회로 저항, 점점의 접촉저항, 가동부의 접촉저항을 DC Multi-Drop Tester를 사용하여 측정하였다. 각 부위에 대한 온도측정을 위해 열전대 (thermocouples)를 부착시켜 실험을 수행하였고, 실험 후 투입상태에서 24시간 자연냉각 후 전체저항과 접촉저항을 측정하였다. 이때, 주위온도의 변화를 최소화하기 위하여 오일 (oil) 속에서 측정하였다.

3. 수치해석

MCCB 내부의 발열과 열전달 메카니즘은 그 과정이 매우 복잡하기 때문에 내부 온도를 예측하는 것은 쉽지 않다. 지배방정식은 다음과 같은 Reynolds 수 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 자연대류를 구현하기 위하여 부력에 의해 발생하는 유동을 표현할 수 있는 Boussinesq 근사법을 사용하였다²⁾.

연속방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\rho u_m u_i + p \delta_{mi} - \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_m} + \frac{\partial u_m}{\partial x_i} \right) \right) = S_i^u \quad (2)$$

에너지방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_m} \left(\rho u_m T - k \frac{\partial T}{\partial x_m} \right) = S^T \quad (3)$$

여기서,

ρ : density, δ_m : Kronecker delta,
 u : velocity, x : coordinate system,
 T : temperature.

도체에 전류가 흐를 때 체적저항에 의해 발생하는 열량은 주울발열(Joule heating)에 의하여 식 (4)와 같이 계산하였으며³⁾, 온도변화에 따른 도체의 저항을 식 (5)를 이용하여 계산될 수 있도록 경계조건을 설정하였다.

$$Q = I^2 R \quad [W] \quad (4)$$

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (5)$$

여기서,

I : current, R : resistance,
 ρ_T : resistivity at temperature T , α : temperature resistance coefficient,
 ρ_0 : resistivity at temperature T_0 , T_0 : initial temperature.

해석영역으로는 외함파 주위공기와의 열전달을 고려하기 위해 외함을 포함하는 큰 영역을 선정하였다 (Fig. 4 참조). 또한, 해석영역으로 주위공기가 출입할 수 있도록 경계조건을 지정하였다⁴⁾.

일반적으로, 복사열전달은 물질이 갖고 있는 전자에너지가 전자기파의 형태로 방출, 흡수 되어 물질 내부에너지의 변화를 수반하는 현상을 말한다⁵⁾. 본 연구에서는 표면에서의 복사만 고려하였으며, 주위 공기는 복사에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 MCCB 내 온도장 해석을 위해 실제 모델과 동일한 치수와 구조로 모델링하였고, 완성된 모델을 근거로 격자를 생성하였다. 격자생성은 ICEPAK 내의 자동격자 생성법을 사용하였다. 자동생성법은 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 격자 생성시 불균일 격자를 부여하였다. 가장 큰 관심대상인 도체부와 형상의 특징에 따라 내부도체 접촉부에는 조밀격자 (enhanced grid)를 분포시켜 좀 더 정확한 해를 얻고자 하였고, 비관심대상인 해석영역 윗부분은 산재격자 (coarse grid)를 분포시켜 계산시간을 단축시키고자 하였다 (Fig. 5 참조). 격자 형태는 육면체 비정렬구조 (unstructured hexagonal shape)로 하였고, 생성된 요소(elements)는 861,227개이고, 절점 (nodes) 수는 900,736개이다.

4. 결과 및 고찰

위에서 언급한 실험방법으로 수행한 결과와 실험조건과 동일하게 ICEPAK을 이용하여 수치해석을 수행한 비교 결과를 Table 1에 기술하였다. 실험결과와 수치해석 결과의 최대오차는 13% 정도이지만, 평균오차는 5% 범위 안에 있음을 알 수 있다 (평균오차 4.53%). 이 결과로 볼 때, ICEPAK을 이용한 수치해석 결과값이 실제로 수행한 실험값과 큰 오차를 갖지 않는다는 것을 알 수 있다. 이와 같이, ICEPAK은 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 복잡한 형상을 갖는 모델 해석시 다수의 cell 수에 의해 해석시간이 길어지게 된다. 이를 보완하기 위하여 ICEPAK에서 제공하는 상세기법이 아닌 단순기법을 사용하여 계산을 수행하였다. 단순기법과 상세기법의 격자구성도와 해석결과값의 비교를 Figs. 5와 6에 기술하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 격자를 30% 줄이고도 근사치의 결과값을 얻을 수 있었다.

이러한 결과를 기초하여, 본 연구에서는 ICEPAK을 사용하여 가동부 접촉저항이 MCCB 내부에 미치는 영향을 고찰하였고, 가동부 접촉저항과 내부온도의 적합한 관계식을 도출하였다.

가동부 전기접촉저항은 각 상 (R, S, T) 마다 10%에서 50%까지 감소시키면서 수치해석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 2에 기술하였다. 이러한 결과를 이용하여 가동부 접촉저항과 온도의 관계는 curve fitting을 사용하여 다음식과 같은 상관식을 구하였다.

가동부 :

$$\Delta T_{m.p.} = 135.9 + 10.97 \ln R_{m.p.} \quad (6)$$

위의 방법을 사용하여 가동부 접촉저항과 load · line부 온도의 관계를 다음방정식으로 표현하였다.

Load 부 :

$$\Delta T_{l_1} = 53.55 + 9.014 \ln R_{m.p.} \quad (7)$$

Line 부 :

$$\Delta T_{l_2} = 83.3 + 6.948 \ln R_{m.p.} \quad (8)$$

여기서,

$\Delta T_{m.p.}$: temperature change of movable part,

ΔT_{l_1} : temperature change of load part,

ΔT_{l_2} : temperature change of line part,

$R_{m.p.}$: resistance of movable part.

Figure 7에는 MCCB 내부유동을 보여주고 있다. MCCB 내부 유동은 크게 ① Load측 유동, ② 조립부 gap에서 내부로 유입되는 유동, ③ line측 유동으로 분류할 수 있다. Figure 8은 MCCB 내부 온도분포를 나타내고 있는데, MCCB 내부공기 온도는 약 130 ~ 140℃이고, 가동부에서 온도가 급격히 상승함을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 이 부분에서 저항이 가장 크기 때문에 유발된다고 할 수 있다.

5. 결 론

MCCB의 온도상승 실험과 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ICEPAK 해석을 통하여 MCCB의 열해석이 가능하였고, 최대오차는 13%였지만, 평균 오차는 5% 이내의 신뢰성을 구현할 수 있었다.
- 2) 계산시간의 간략화를 위해 단순기법을 사용하였을 경우, 상세기법을 사용한 경우와 근사 값을 얻을 수 있었다.
- 3) 가동부의 접촉부가 다른 부위보다 10~20℃정도 온도상승이 더 일어나며, 가동부 접촉 저항을 감소시키는 것이 MCCB 내부 온도상승 억제에 효과적이라는 것을 확인하였다.

향후에는 MCCB 내부 온도상승 억제를 위하여 접촉저항을 감소시킬 수 있는 형상 개발 연구가 필요하다.

참고문헌

- 1) ICEPAK User Seminar : Advanced Technology Engineering Service (ATES), 2001.
- 2) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P. : "Fundamental of Heat and Mass Transfer" , Wiley, 4th Edition, New York, 1996.
- 3) Shea, J. J. and Bindas J. J. : "Measuring Molded Case Circuit Breaker Resistance" , IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 196~202, 1993.
- 4) Hoffman, K. A. : "Computational Fluid Dynamics for Engineers" , EESbooks, New York, 1993.
- 5) Slade, P. G. : "Electrical Contacts" , Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.

Table 1. The comparison of an interpreting data and experiment data.

No.	experimental	computational	error (%)
1	89.2	78.52	13.602
2	169.6	167.8	1.0727
3	164.2	161.2	1.8610
4	164.1	154.7	6.0763
5	236.2	227.4	3.8698
6	200.7	209.1	4.1854
7	170.1	164.4	3.4672
8	191.7	197.0	2.7647
9	136	141.3	3.8971
10	155.6	152.8	1.8325
11	161.3	168.3	4.3397
12	94.7	101.7	7.3918

Table 2. Temperature at movable part (R, S, T).

가동부 접촉온도 (°C)					
R 상		S 상		T 상	
R(W)	T(°C)	R(W)	T(°C)	R(W)	T(°C)
2.24	201.1	3.87	250.7	3.42	215.3
2.02	199.6	3.48	248.5	3.08	213.2
1.79	198.0	3.10	246.2	2.74	211.1
1.57	196.6	2.71	243.9	2.39	208.9
1.34	195.0	2.32	241.7	2.05	206.7
1.12	193.5	1.94	239.5	1.71	204.6

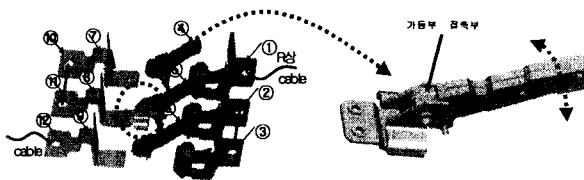


Fig. 1 The modeled movable part.

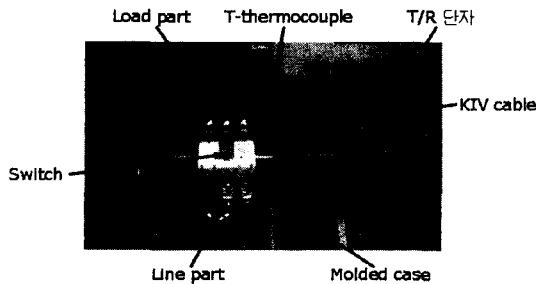


Fig. 2 Schematic of experimental set-up.

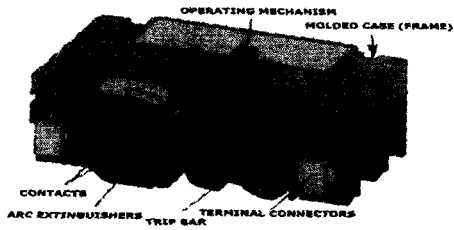


Fig. 3 Schematic diagram of a molded case circuit breaker.

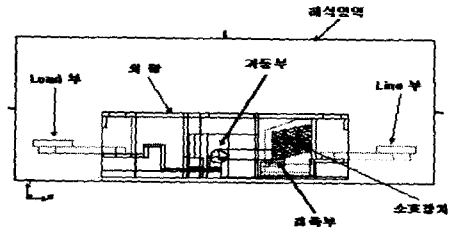
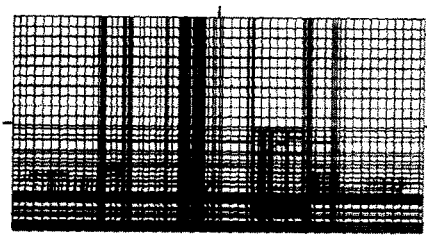


Fig. 4 Schematic of the modeled domain.



(a)



(b)

Fig 5. Comparison of detail and simple grid systems:
 (a) detail grid systems (num cells : 1,180,000), (b) simple grid system (num cells : 624,000).

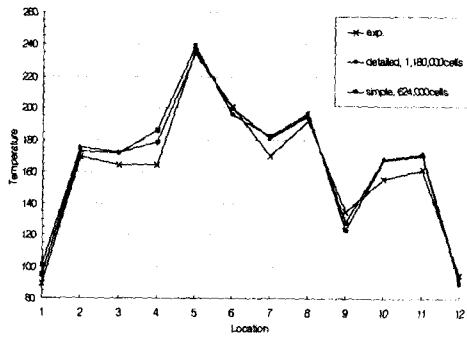


Fig. 6 Comparisons of temperature distribution at different locations.

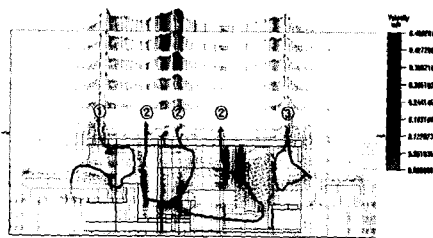


Fig. 7 Contour of velocity distribution in the MCCB.

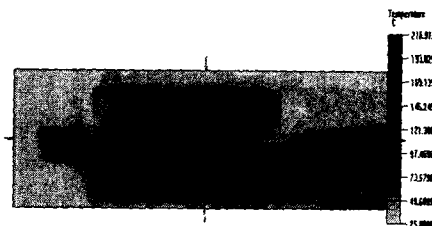


Fig. 8 Contour of temperature distribution in the MCCB.