

### CFD-CAD 통합해석을 이용한 전력기기 온도상승 예측

안희섭, 이종철, 최종용, 오일성  
LG 산전(주) 전력연구소

#### Prediction of temperature rise of Electric Switching Device Using CFD-CAD Integrated Analysis

Heui-Sub Ahn, Jong C.LEE, Jongung Choi, Il-Sung Oh  
Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems

**Abstract** - Higher current-rating and improved thermal performance are being sought for existing medium-voltage vacuum circuit breakers(VCB) in order to meet market needs which require to be compact and downsized. In this paper, thermal performance of medium voltage vacuum circuit breaker was investigated through experiments and numerical analysis. We changed several major parameters of current-rating and heat sink affecting on thermal behaviors in the breaker and observed the results. To predict the temperature distribution in complex three-dimensional(3-D) VCB components and gas, the commercial package was used to simulate conjugate heat transfer. Although some assumptions and simplifications were introduced to simulate the model, results from the computational model were in good agreement with actual temperature rise measurements obtained from experiments.

#### 1. 서 론

중전압(medium-voltage) 스위치기어(Switchgear, 개폐장치)는 산업분야에서 전력분야에 걸쳐 매우 광범위한 영역에 다양한 형태로 적용되고 있다. 한편, 고도 정보화 사회에 있어서는 안정적인 전력공급이 요구되며, 그 중에서 중전압 스위치기어의 중요성은 점점 높아지고, 기술의 고도화를 배경으로 장치·기기는 소형·고신뢰도화, 경제성의 향상이 도모되고 있다. 또한 중전압 스위치기어는 사람이 접근하기 쉬운 설비이기 때문에 조작성, 안정성, 환경조화성 등에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

현재 중전압 스위치기어는 점차 정격전류가 높아지는 추세이며 이와 반대로 제품의 크기는 점차 작아지고 있다. 축소화가 진행되면서 장치내부에서 발생하는 열의 처리가 커다란 문제점으로 대두되고 있다. 내부에서 발생하는 열을 충분히 외부로 방열하지 못하면 스위치기어 본체 및 수납기기의 열화를 앞당길 뿐만 아니라 중대한 사고의 요인이 된다. 예를 들면 도체의 과열은 절연과 피, 방전, 단락·지락 사고라는 커다란 사고로 연결되므로 국제규격에서는 각 부분의 온도상승치를 제한하고 있다. 대표적으로 IEC에서는 접촉부와 접촉부의 온도를 최대값으로 115℃, 105℃로 각각 규제하고 있으며 또한 주위온도와의 차이를 각각 75℃, 65℃로 규제하고 있다.

진공차단기(Vacuum Circuit Breaker)는 오일차단기(Oil Circuit Breaker)나 기중차단기(Air Circuit Breaker)에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 중전압분야에 널리 사용되고 있다[1]. 진공차단기에서는 전류를 차단하는 접점은 진공용기 내부에 있다. 접

점을 개폐할 때 접점의 이동거리가 상대적으로 작기 때문에 동급의 다른 차단기에 비해 축소화를 할 수 있다. 또한 진공에서 사고전류를 차단하기 때문에 차단 시 발생하는 아크를 소호하기가 상대적으로 쉽다. 이러한 장점을 가진 반면에 진공차단기는 최고 4000A까지의 큰 전류를 통전시켜야 하기 때문에 접점에서 많은 열이 발생하는 단점이 있다. 접점의 전기접촉저항(contact resistance)으로 인해 전류가 흐를 때 상당한 양의 주울열(Joule heating)이 발생한다. 접점이 위치해 있는 진공용기 내부에서 발생하는 열이 전체 열원의 약 70%를 차지하며 이 중에서도 접촉부에서 전기접촉저항 때문에 발생하는 열은 약 30%를 차지한다. 이러한 진공용기 내부에서 발생하는 열이 이동할 수 있는 유일한 통로는 진공용기의 상·하부에 연결되는 도체이다. 실제로 설계 시에도 이러한 진공용기 내부의 열을 외부로 많이 전달하기 위해서 정격전류에 비해 통전용량이 큰 도체를 사용하고 있다.

진공차단기 개발 시 열적인 측면에서는 정격전류의 상승에 의한 발열량의 증대, 축소화에 의한 열전달 촉진방법을 고려하여 설계를 해야한다. 그러나 이러한 열전달 메카니즘은 도체부 이외에도 주위 공기와 열 전달이 존재하기 때문에 쉽게 파악되지 않는다. 설계 시 직접 적용할 수 있는 일관성 있는 경향을 파악하기 위해서는 많은 경험과 실험을 수행하여 설계 데이터를 확보해야 한다.

이러한 열전달 메카니즘에 대한 데이터를 구할 수 있는 또 하나의 방법으로는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하는 해석적 방법이다. 전기장치의 열해석은 현존하는 다양한 열전달 향상 기술을 적용할 수 있는 분야의 하나로 많은 연구가 이루어지고 있다 [2]. 초기에는 노트북, 컴퓨터 등에 많이 적용되었지만 점차 그 응용분야가 확대되고 있다[3]. CFD를 이용한 차단기 내부의 열해석이 가능하다면 제품설계시간, 실험시간, 실험비용 등을 줄일 수 있으므로 많은 효과를 얻을 수 있다. 그러므로 차단기의 열해석은 반드시 수행되어야 할 연구 중의 하나이다. 본 연구에서는 자사제품의 진공차단기에 대한 온도상승 실험과 CFD를 이용한 수치해석을 수행하여 열전달 메카니즘에 대한 정립 및 CFD의 적용성에 대한 검토를 하였다.

#### 2. 온도상승 실험

실제적인 열전달 메카니즘을 파악하고 CFD의 해석결과와 비교하기 위한 데이터를 확보하기 위해 자사제품의 진공차단기에 대하여 온도상승실험을 수행하였다. 사용된 정격전류는 2000/2500[A]이며, 각각의 전류치에 대해 방열편을 부착, 제거하여 주요부위의 온도측정 실험을 행하였다. 그림 1은 실험에 사용한 자사제품의 차단기 구성도이다. 3상 분리형이며 진공용기, 진공용기와 연결되는 상·하부 도체 등 전류가 흐르는 모든 회로는 각 상간의 절연과 사용의 안정성을 위해 외함에 둘러싸여 있다. 접선은 전류가 흐르는 회로를 표시한 것이다.

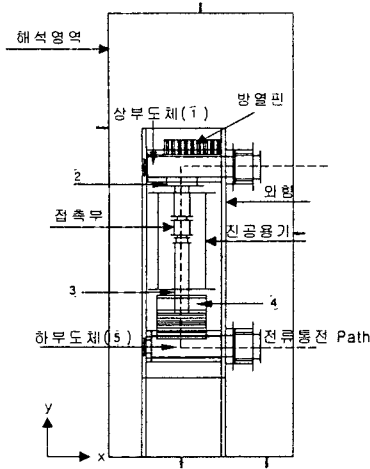


Fig. 1 Schematic Diagram of Vacuum Circuit Breaker

외함(enclosure)은 절연물질로 되어 있으며 상·하부에는 내부 도체의 냉각을 위해 공기가 통과할 수 있는 구멍이 뚫려있다. 본 실험에서는 외함으로 둘러싸인 내부의 온도를 측정하기 위해 외함의 한 측면을 절단한 후 주요 도체부에 T-type의 열전대를 부착하였다. 그림 1의 번호는 열전대를 부착한 위치를 나타낸다. 방열핀은 진공용기와 연결되는 상부 도체의 윗면에 부착하였다.

실험은 IEC-60694 규격에 의거하여 실시하였으며 1시간에 1(°C)이상의 온도변화가 없을 때 정상상태에 도달한 것으로 판단하였다.

온도상승 시험을 시작하기 전에 각 부분의 저항은 마이크로 오옴미터를 이용한 DC multi drop test를 사용하여 측정하였다. 전체회로의 총 저항은 약 15(μΩ)이었으며 진공용기 내부의 도체 및 접촉에 의한 저항은 약 10(μΩ)이었다(그림 1의 ② ~ ③ 사이). 서론에서 언급한 바와 같이 대부분의 열은 진공용기 내부의 도체로부터 발생하며 용기내부도체의 체적저항을 빼면 내부 접촉부에서의 접촉저항은 약 5(μΩ)정도가 된다.

### 3. 수치해석

차단기 내부의 발열과 열전달 메카니즘은 그 과정이 매우 복잡하기 때문에 내부의 온도를 예측하는 것은 쉽지 않다. 본 해석에서는 system-level의 thermal modeling을 바탕으로 열해석을 수행하였고 상용 프로그램인 ICEPAK이 사용되었다.

#### 3.1 지배방정식과 모델링

자연대류는 Boussinesq approximation를 사용하여 운동량방정식의 생성항으로 나타내었다[4].

$$(\rho - \rho_0)g = -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (1)$$

여기서  $\rho_0, T_0$ 는 기준밀도와 온도를 나타내며  $\beta$ 는 열팽창계수를 나타낸다.

회로를 구성하는 각각의 접촉부, 접촉부에서 발생하는 열접촉저항(thermal contact resistance)은 참고문헌[2]에서 제시된 식을 사용하여 계산하였다.

볼트에 의해 접촉된 부분에서 발생하는 전기접촉저항(electric contact resistance)은 식(2)에 의해 계산하였고 진공용기 내부의 접촉부의 전기접촉저항은 DC multi drop test로 측정을 하였다[5].

$$R_{e,c} = 88 \times 10^{-6} F^{-0.6} \quad [\Omega] \quad (2)$$

여기서,  $F$  : contact force

도체에 전류가 흐를 때 저항에 의해 발생하는 열량은 Joule heating에 의해 계산을 하였다. 본 연구에서는 온도 변화에 의한 저항의 변화를 고려하기 위해 저항은 다음 식을 사용하여 계산하였다[6].

$$R = \rho_e [1 + C(T - T_{ref})] \frac{L}{A} \quad [\Omega] \quad (3)$$

여기서,  $\rho_e$ : electrical resistivity

$C$  : temperature coeff. of electrical resistance

해석영역은 외함과 주위공기와의 열전달을 고려하기 위해 외함을 포함할 수 있도록 충분히 큰 영역으로 둘러싸여 있다(Fig. 1). 또한 해석영역으로 주위공기가 출입할 수 있도록 경계조건을 지정하였다(far field boundary condition)[7].

복사열전달은 표면에서만 발생하는 것으로 가정하였으며 이러한 가정은 진공이나 공기에서의 복사열전달을 해석시에는 타당한 가정이라 할 수 있다[4]. 온도균된 도체의 복사에너지는 복사계수가  $10^{-2}$  정도의 크기를 가지고 아주 미미한 양이므로 무시하였고, 외함의 외부표면에서 주위와의 복사열전달만을 고려하였다. 사용된 복사계수는 0.7이다.

### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서 수행한 실험결과와 해석결과를 그림 2에 나타내었다.

실험결과에서 방열핀이 없는 경우를 먼저 고찰하면 전류용량에 관계없이 두 경우 모두 진공용기내의 접촉부를 기준으로 하부(④, ⑤)의 온도가 상부(①, ②)보다 낮음을 알 수 있다. 이는 상부와 하부의 도체에서 대류에 의해 발생하는 열전달량의 차이라고 판단된다. 고온의 고체주위를 저온의 유체가 흐르면 고체에서 유체로의 대류열전달이 발생한다. 본 차단기의 경우에는 부력에 의해 외함의 하부구멍으로부터 상부쪽으로 유동이 발생한다(Fig. 3). 이로 인해 열경계층은 하부도체에서 발생하며 상부로 진행하면서 발달한다. 즉, 하부쪽의 공기의 평균온도가 상부쪽보다 상대적으로 낮다. 그러므로 하부쪽에서의 열전달이 상부보다 활발히 일어난다.

각각의 시험전류별로 방열핀이 있는 경우와 없는 경우를 비교해 보면 진공용기내부에 있는 접촉부에서 발생하는 열접촉저항의 영향을 파악할 수 있다. 그림 2에서 진공용기내부의 접촉부를 기준으로 상, 하부 도체의 온도 감소량이 차이가 난다. 방열핀이 없는 경우와 비교해 보면 상부에서는 온도감소가 약 8(°C) 정도이고 하부는 약 2 ~ 4(°C)정도 발생하였다. 이는 진공용기내부 접촉부의 열접촉저항때문에 나타나는 현상이라 판단된다.

열접촉저항은 전기접촉저항과 마찬가지로 두 접촉부가 접촉할 때 표면이 완벽하게 밀착되지 않으므로 발생하고 역할은 차이가 난다. 전기접촉저항은 전류가 통과할 때 열을 발생시키며 열접촉저항은 열의 이동을 방해하는 역할을 한다. 일반적으로 전기접촉저항이 큰 부분은 열접촉저항도 크다.

서론에서 언급한 바와 같이 열원의 30%정도가 진공용기내의 접촉부에서 전기접촉저항에 의해 발생한다. 또한 이 부분은 열접촉저항이 가장 큰 부분이므로 열전달에 악영향을 미치게 된다. 접촉부를 기준으로 하여 상부쪽은 열접촉저항이 거의 없으므로 방열핀쪽으로 쉽게 열이 흘러간다. 그러나 하부 도체쪽은 열의 이동경로중에

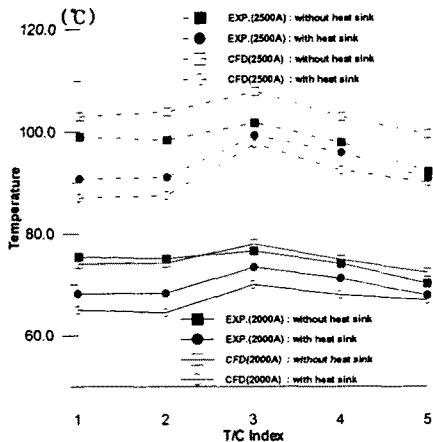


Fig.2 Comparison of Temperatures

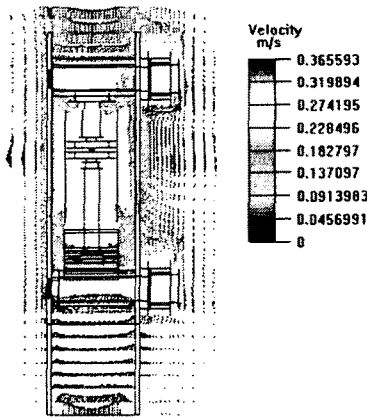


Fig.3 Velocity Vectors in the Breaker

Table 1. Comparison with Results between EXP. and CFD

	2000A		2500A	
	without fin	with fin	without fin	with fin
최대오차 (°C)	2.1	3.8	5.2	3.1
상대오차 최대비율 (%)	2.9	5.9	5.1	3.2

큰 열접촉저항이 있으므로 열이 쉽게 흐르지 못하게 된다. 동일한 시험조건(정격전류)이므로 방열핀의 유·무에 상관없이 발생하는 열량은 동일하나 방열핀쪽으로 흘러가는 열량은 상부와 하부에서 차이가 난다. 하부에서는 작은 양의 열량이 방열핀쪽으로 이동하고 나머지의 발열량은 하부도체의 온도를 상승시키게 된다.

차단기의 경우에는 동일한 제품에서 정격전류의 변화에 따른 온도상승은 일정한 관계를 가진다고 알려져 있다(8). 본 실험에서는 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{\Delta T_{2500}}{\Delta T_{2000}} = \left( \frac{I_{2500}}{I_{2000}} \right)^{1.6} ; \text{without fin} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta T_{2500}}{\Delta T_{2000}} = \left( \frac{I_{2500}}{I_{2000}} \right)^{1.7} ; \text{with fin} \quad (5)$$

위 식에서  $\Delta T$ 는 주변온도와의 차이를 나타낸다. 또한 전류가 25% 정도 올라가므로 방열핀의 유·무에 관계없이 전체적으로 온도가 20°C 정도 올라감을 알 수 있다.

표 1은 해석과 실험결과의 각 경우에 대한 최대온도차와 상대오차를 나타낸다. 상대오차율의 최대값은 최대온도차가 나는 부분에서  $(|T_{exp} - T_{cfd}|)/T_{exp}$ 의 백분율로 나타내었다. 상대오차율의 최대값은 약 6% 정도였고, 온도의 최대오차값은 약 5[°C] 정도였다. 따라서 본 해석에 사용한 계산모델은 타당한 것으로 판단되며 차단기내부의 온도장을 예측하는 데 유용하게 사용되어 질 수 있다.

## 5. 결 론

진공차단기의 온도상승시험과 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정격전류가 2000A에서 2500A로 상승함으로 인해 전체적인 온도가 약 20°C 정도 상승하였고 동일한 시료에서 정격전류와 주위온도를 제외한 온도상승값이 일정한 관계를 가짐을 알 수 있었다.

2. 상부쪽에 방열핀을 부착함으로 8~9°C 정도의 온도감소 효과를 보았다. 그러나 진공용기내의 접촉부의 열접촉저항으로 인해 방열핀의 효과는 하부도체까지 영향을 크게 미치지 못 하였다.

3. CFD 해석을 통하여 진공차단기 시스템 전체에 대한 열해석이 가능하였고 상대적인 오차는 5% 내외였다.

4. 향후 진공차단기의 열설계에 영향을 미칠 수 있는 설계변수(상·하부 도체 크기, 외함의 구멍크기 등)에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구에 도움을 주신 성균관대학교 기계공학부 김용제 교수님께 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEE Power Engineering Series 1.. "Power circuit Breaker Theory and Design", 1982
- [2] Lraus, A. D., Bar-Cohen, A., "Thermal analysis and Control Electric Equipment", pp:199-214, 1983
- [3] Ishizuka, M., Hayama, S., "Application of a semi-empirical approach to the thermal design of electronic equipment", 2000 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp:99-106
- [4] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 1996
- [5] IEC-60943.. "Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular terminals", 2th Edition, 1998
- [6] Holm, R., "Electric Contacts", 4th Edition, 1967
- [7] Hoffman, K. A., "Computational Fluid Dynamics for Engineers", 1993
- [8] 일본 전기학회 기술보고, "중전압 스위치기어의 방열기술", 제 839호