

전류용량증대에 따른 온도대책을 위한 배선용 차단기 열설계

강한영*, 이종철*, 이석원, 김영근*, 이상돈**, 신영준*
 *LG산전(주) 전력연구소, **LG산전(주) 차단기설계팀

Thermal Design of MCCBs for increasing the Rated Current

Han-Young Kang, Jong-Chul Lee, Seog-Won Lee, Young-Geun Kim, Sang-Don Lee, Young-Jun Shin
 LG Industrial Systems, R&D Center

Abstract - 최근 모든 산업분야에서 축소화 및 대용량화가 요구되고 있으며, 전력기기 분야에서도 보다 작은 크기의 제품에 보다 큰 용량의 전류를 차단 또는 통전시키는 제품 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 발열밀도가 높은 전력기기의 실정 설계에는 높은 정확도를 가지며, 그리고 효율적인 열설계가 가능한 방법이 점점 중요해지고 있다. 본 연구에서는 전력기기 열설계를 위한 해석적 방법을 구축하기 위하여 기초현상 파악 등에 적합한 3차원 CFD(Computational Fluid Dynamics) 상용 프로그램과 설계 초기 단계에서 parameter 검토 등 근본적인 설계에 적합한 열회로망법을 이용하여 자체 개발한 프로그램을 이용하여 배선용 차단기의 열설계에 관하여 검토하였다.

FLOTHERM 등을 해석에 적용하고 있다. 또한 전기회로의 오옴의 법칙 (Ohm's law)과 유사하게 열전달 법칙을 구성하여 구하고자 하는 대상을 블록으로 분할하고 열평형식을 계산하는 열회로망법 (Thermal Network Method)도 이용되고 있다. 하지만 3차원 해석 프로그램도, 간단하게 열회로망을 구성하여 계산하는 프로그램도 모두 적절한 평가가 이루어져야만 사용할 수 있으며, 두 가지 방법을 조합하여 사용하면 더욱 효율적인 열설계를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 해석적 방법을 배선용 차단기 열설계에 적용하고자 3차원 CFD 프로그램인 ICEPAK과 자체 개발한 열회로망 프로그램인 TEMPIS를 이용하여 전력기기의 온도장을 해석하여 실험결과와 비교하고, 효율적인 열설계 방법을 확립하고자 한다.

1. 서 론

최근 모든 산업분야에서 축소화 및 대용량화가 진행되고 있으며, 전력기기 분야에서도 보다 작은 크기의 제품에 보다 큰 용량의 전류를 차단 또는 통전시키는 제품 개발이 진행되고 있다. 이로 인하여 제품 단위 면적당의 발열밀도가 증가되므로, 제품의 신뢰성 및 성능을 좌우하는 방열설계를 정밀하면서도 효율적으로 행함으로써 개발 비용의 감소 및 개발 기간을 단축할 수 있어 그 중요성은 점차 증대되고 있는 실정이다 [1].

기존의 전력기기 개발에서는 주로 경험과 시행착오 (trial and error)로부터 얻어진 데이터를 이용하였으나, 현재의 효율적인 방열설계를 위해서는 검증된 해석적 방법이 요구되며, 컴퓨팅 기술의 발전과 더불어 3차원 CAD와 연결한 기초현상을 파악할 수 있는 정밀한 프로그램 및 여러 가지 설계변수를 고려할 수 있는 프로그램이 이용되고 있다 [2].

전력기기는 기종에 따라 주회로 (main circuit)를 흐르는 정격전류 (rated current)가 다르지만, 정격전류의 대용량화에 따라 배선용 차단기 (Molded Case Circuit Breaker, MCCB)는 800 A 이상, 진공차단기 (Vacuum Circuit Breaker, VCB)는 2500 A 이상의 정격전류를 채택한 제품이 개발되고 있다.

전류기기의 발열은 크게 주열발열 (Joule heating) 과 유도발열 (Induction heating)의 두 가지로 분류할 수 있다 [3]. 유도발열은 비용면에서 제한은 있지만 재료의 선정 등으로 어느 정도 감소시킬 수 있으나, 주열발열은 통전전류의 제곱에 비례하므로 현재 상용되고 있는 구리를 사용하는 경우 평균 100 W 정도의 열이 발생한다. 더욱이 접촉 및 접촉 연결부가 많은 차단기의 경우 추가적인 열원 (Heat source)의 고려가 필요하며, 이에 대한 측정 및 예측도 상당히 중요하다 [4]. 하지만 이러한 모든 조건을 충족시키는 프로그램은 아직 개발되어 있지 않은 실정이며, 현재 전자계 해석 프로그램인 MAXWELL, FLUX 및 구조 해석용 프로그램인 ANSYS, 그리고 상용 CFD 프로그램인 FLUENT, PHOENICS, STAR-CD 등이 이용되고 있고, 근래에 출시된 열설계 전용 프로그램인 ICEPAK,

2. 주회로의 발열현상

모든 전력기기는 제품의 안전성, 신뢰성을 갖추기 위하여 IEC, UL, ANSI 등의 국제 규격 및 수출국 요구 사항을 만족시켜야 한다. 이 중 온도상승에 관한 것은 시정 온도한계 (Temperature limits)를 설정하여 규제하고 있다 [5]. 하지만 고정된 열원에서 외부로의 열의 흐름을 파악하는 일반적인 열전달 현상과는 달리 전력기기의 열전달 현상은 전류가 흐르는 모든 회로에서 열이 발생하며 (live conduction), 접촉부 및 접속부의 전기접촉저항 (electrical contact resistance)에 의한 발열과 열접촉저항 (thermal contact resistance)에 의한 열흐름이 매우 복잡하다. 주회로를 흐르는 전류에 의한 발열량은 주회로의 전기저항을 이용하여 주열발열량으로부터 얻을 수 있다.

$$Q = I^2 R_{ac} \tag{1}$$

$$R_{ac} = R_{dc20} [1 + \alpha_{20} (T_1 - 20)] \tag{2}$$

$$R_{dc20} = \rho_{20} \frac{l}{A} \tag{3}$$

여기서 Q는 발열량[W], I는 전류[A], R은 저항[Ω], α는 온도저항계수, ρ₂₀은 20°C에서의 도체의 비저항 [I/°C], l은 도체의 길이[m], A는 도체의 통전 단면적 [m²]을 나타낸다.

발열현상의 원인인 주회로의 전기저항은 도체가 가지고 있는 비저항에 의한 체적저항 (bulk resistance)과 접촉 및 접속부에서 발생하는 접촉저항 (contact resistance)으로 나눌 수 있다. 접촉저항은 전류가 접촉 요소를 통과할 때 발생하는 집중저항 (constriction resistance)과 접촉면의 산화막과 같은 피막에 의한 피막저항 (film resistance)로 구분되며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다 [1,4,5].

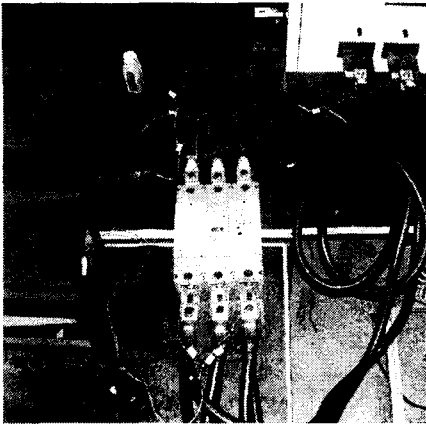


사진 1 온도상승실험 장치구성

$$R_c = \frac{\rho}{2na} + \frac{\sigma_0}{n\pi a^2}$$

$$n = n_0 H^{0.625} F^{0.2}$$

$$a = \sqrt{\frac{F}{n\pi\xi H}}$$

$$\xi \approx 0.45$$

(4)

3. 온도상승 실험

온도상승시험과 병행하여 발열 메커니즘과 열전달 메커니즘을 파악하고 수치해석 시 경계조건 부여와 결과의 검증에 위해서 주회로 저항측정 및 온도측정을 하였다. $10^{-7}\Omega$ 차원의 전기저항측정을 위해서 Progamma社의 Microhmmeter MOM200A와 Keithley社의 Multimeter 2700, 그리고 측정된 데이터를 처리하기 위해서 National Instrument社의 GPIB-USB-B를 사용하였다 [6]. 온도측정을 위해서 T-type과 K-type의 열전대 (thermocouple)와 YOKOGAWA社의 Hybrid recorder를 사용하였으며, 가시화를 위하여 적외선 카메라를 이용한 측정도 병행하였다 (사진 1). 온도상승실험은 IEC 60943, 60947-2에 의거하여 실시하였고, 1시간에 1°C 이상의 온도변화가 없을 경우를 정상상태 (Steady state)로 판단하였다. 규격에서 요구하는 온도측정 부위는 라인부와 로드부의 단자부이지만, 내부의 발열 및 방열 특성을 파악하기 위하여 그림 1과 같이 MCCB 내부 21개 및 기타 3개 등 총 24개의 열전대를 부착하여 온도를 측정하였다. 또한 온도상승 실험 전후 및 중간의 저항을 측정하여 규격조건만족여부를 확인하였고, 온도와 저항과의 관계를 검토하였다.

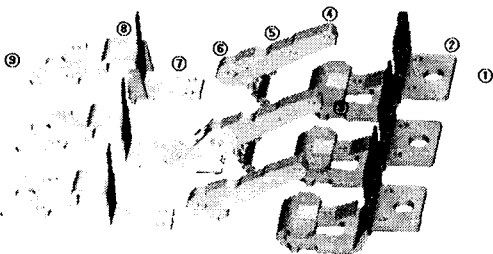


그림 1 MCCB 내부 온도측정 부위

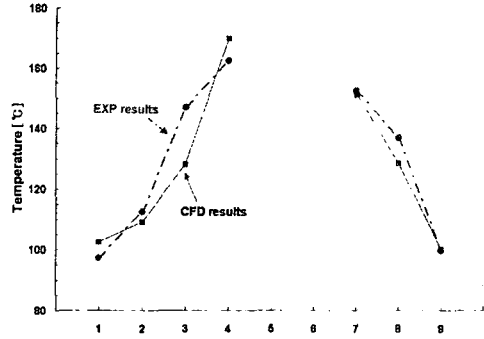


그림 2 실험결과와 해석결과(ICEPAK) 비교

4. 결과 및 고찰

ICEPAK은 유한체적법(Finete Volume Method)을 사용하는 상용 CFD 코드로서 전기, 전자장비의 열설계에 초점을 맞추어 Fluent社에서 개발하였다. 해석에 사용할 MCCB를 모델링하기 위하여 설계시 작성한 Pro-Engineer 데이터를 사용하였고, 열유동 특성이 첨예한 중요영역에는 격자를 조밀하게(enhanced grid) 분포시키고, MCCB 주변의 덜 중요한 부분은 생긴격자(coarse grid)를 분포하게 하여 계산시간을 가능한 줄이고자 하였다. 최종적으로 계산에 사용된 격자수는 약 650,000개이다.

그림 2는 3차원 상용 프로그램인 ICEPAK과 실험결과를 비교한 것이다 [7]. 접촉저항이 열원으로 작용하는 접점 근처(④)에서는 온도가 170°C~180°C 정도까지 상승함을 알 수 있으며, 주회로 전체에서 해석결과가 실험결과와 만족할만한 비교를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 수치해법 및 경계조건이 해석대상에 적합하게 사용되었음을 확인하였고, 이를 바탕으로 온도 저감을 위한 아이디어를 도출하여 해석을 통해 어느 정도 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있으리라 판단하였다.

그림 3은 현재 상태보다 온도를 낮추기 위하여 주회로를 개선한 모델을 계산한 결과를 나타내고 있다. 먼저 기업의 보안 문제상 개선안을 그림으로 보일 수 없음을 안타깝게 생각하며, 외부 냉각장치를 설치할 수 없는 즉, 순수한 자연대류 조건에서 온도평형을 이루는 MCCB의 특성상 한 부분의 차지만으로는 온도를 하강시킬 수 없었다 (그림 4). 이러한 계산을 통해서 MCCB의 열설계에서는 주회로 전체에서의 전류밀도의 고려가 필요함을 알았으며, CFD를 이용한 해석방법 이외에 열회로방법을 이용한 방법이 유용하리라 판단하였다. 아래에는 열회로방법을 이용한 해석방법 및 결과에 관하여 설명한다.

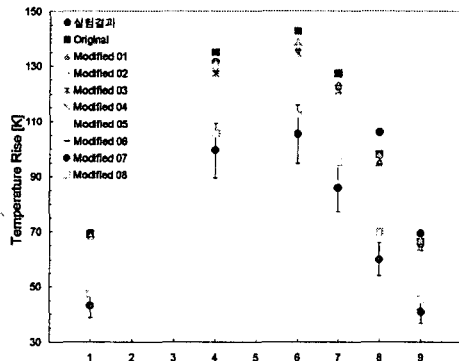


그림 3 단자부 온도저감을 위한 계산결과

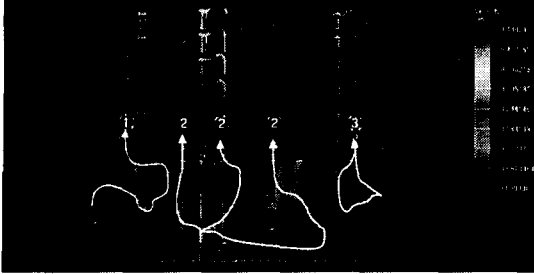


그림 4 MCCB 내부 자연대류 유동형상

최근의 열해석 방법은 CFD 등의 상세한 열유체 해석으로부터 얻은 정보를 기초로 하여 열회로망법 모델링에 의한 컴팩트 열모델화를 도모함으로써 두 가지 모두의 장점을 겸비하는 방향으로 추진되고 있다. 즉 열회로망법이 가지고 있는 시스템화 방법에 의하여 제품 크기나 발열량이 다른 기종이 많은 제품에 대하여 설계 초기단계에서 신속한 온도 검증, 열문제 검토 등에 의하여 해석 품질 표준화 및 신속한 해석이 가능하다. 표 1에 CFD와 열회로망법의 특징을 나타내었다.

그림 4에 실험 및 ICEPAK 해석 조건과 동일한 조건에서 자체 개발한 열회로망법을 이용한 프로그램인 TEMPIS에 의한 계산결과를 비교하였다. ICEPAK보다 결과가 좋은 이유는 입력에 필요한 데이터를 실험 및 ICEPAK 결과를 이용해서 경제조건으로 부여했기 때문이다. 표 1에 나타난 바와 같이 열회로망법을 이용한 프로그램의 장점은 어느 모델에 결과를 검증한 이후에는 여러 변수를 변화시켜 가면서 매우 빠른 시간 내에 신뢰성 있는 결과를 낼 수 있다는 것이다. 본 연구에서도 TEMPIS를 이용하여 해석 모델의 최적값을 찾는데 이용하였고, ICEPAK을 이용했을 때와는 비교도 되지 않은 정도의 빠른 시간 내에 많은 변수를 변경시켜 가면서 계산을 수행할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 전류통전 시 배선용 차단기 내부의 온도예측을 위하여 3차원 상용 프로그램과 열회로망법을 이용한 자체 개발한 프로그램을 이용하였다. 이를 실험결과와 비교하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 3차원 상용 CFD를 프로그램으로 해석한 결과는 특별한 경계조건 없이도 실험결과와 10% 내외의 오차를 나타내는 합리적인 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 위의 절차를 통한 모델에 온도저감을 위한 여러 가지 변화를 고려한 해석을 통하여 규격에 적합한 형상을 찾을 수 있었다.
- 3) 열회로망법을 이용한 프로그램을 통한 계산으로는 신속하면서도 신뢰성 있는 계산결과를 도출하였다.

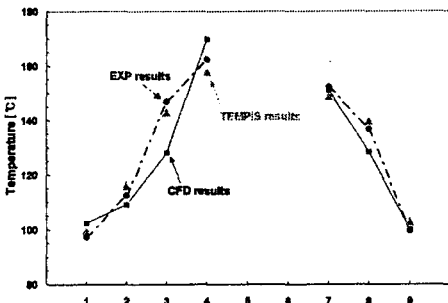


그림 5 열회로망법에 의한 계산결과 비교

4) 3차원 해석과 열회로망법을 적절히 융합하여 열설계에 반영하면 신속하면서도 정확한 열설계를 이룰 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 일본전기학회, “중전압 스위치기어의 방열기술”, 전기학회 기술보고, 제839호, 2001
- [2] 青木 久美 등, “CFD와 절점회로망법 (MelTHERFY)를 이용한 컴팩트 열해석 수법”, Tecno-Frontier Week 2002, A-2, A2-2 1~A2-2-8, 2002
- [3] Davies, E. J., “Conduction and induction heating”, IEE Power Engineering Series 11, ISBN 0 86341 174 6, 1990
- [4] Slade, P. G., “Electrical contacts”, Marcel Dekker, New York, 1999
- [5] IEC 60943, “Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipments, in particular terminals, 2nd edition”, 1998
- [6] Shea, J. J. and Bindas, J. J., “Measuring molded case circuit breaker resistance”, IEEE Trans. on Component, Hybrid and Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 196~202, 1993
- [7] 박성규, 이종철, 김윤제, “접촉저항이 배선용 차단기 내부 온도상승에 미치는 영향”, 한국에너지공학회지, 제13권, 제1호, pp. 12~19, 2004

표 1 CFD와 열회로망법의 특징 비교

	CFD에 의한 열유체 해석	회로망법에 의한 열유체 해석
특징	-CAD-like 해석모델 작성 -온도·풍속분포, 방사의 각 모드의 상세 가시화 -충분한 해석결과 데이터, 정보	-모델화의 자유도가 높고, 실험식·정수의 도입이 가능 -검증 정수화된 소수의 노드 계산이므로 계산시간이 적음 -단시간에 많은 parameter 재계산 가능 -취급하기 쉬운 양의 결과 데이터
과제	-격자생성·계산 시에 노하우와 많은 시간이 필요 -많은 parametric study를 하는데는 부적합 (machine resource·계산 시간적인 과제)	-모델화의 과정에서 열전달의 전문적 지식이 필요하고, 해석 정밀도에 영향을 미침 -모델의 타당성 검증이 특별히 필요
적용	-기초현상의 상세연구, 파악·고정밀도 검증, 확인 단계에 적합	-제품의 초기 검토 단계에 차원 계산, parametric study 검토 등 보다 근본적인 설계 작업에 적합