

열회로방법을 이용한 전력기기 온도예측 프로그램 개발

이종철, 안희섭, 최종용, 오일성
LG산전(주) 전력연구소

Development of Program for the Temperature Rise Prediction of electrical equipment Using Thermal Network Method

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

Abstract - 최근 컴퓨팅 기술의 발전으로 3차원 복합 열전달(conjugate heat transfer) 문제를 계산하는 수치해석 기술이 어느 정도 가능해 졌지만, 실제적인 전력기기 내부의 온도분포를 수치적으로 계산하는 것은 탑재된 구성요소의 다양한 크기와 형상으로 인한 매우 복잡한 경계조건을 수반하고 조밀한 격자를 요구하기 때문에 공학적이 아니다. 이를 위하여 해석적 모델을 수립하여 전력기기 열설계를 위한 수치적 해석에 적용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 열회로방법(Thermal Network Analysis, TNA)을 이용하여 전력기기 내부의 온도분포를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 전류가 흘러 열이 발생하고 소산되는 주회로 성분들을 각각의 노드로 분할하는 절차를 확립하였고, 열접촉저항과 주열열을 적절히 선정함으로써 실제 전류가 흐르는 회로망 내 온도분포를 계산하였다.

1. 서 론

최근 들어 전자·전기기기는 고속화 및 집적밀도의 증대화 및 소형·경량화에 의해 발열밀도가 증가하고 있다. 특히 전력기기에는 도체부, 접촉부 등에서 발생하는 손실에 의하여 온도가 상승하게 되는데 새로운 제작기법과 운전설비의 발전과 더불어 온도문제의 중요성이 커지고 있다.

온도상승은 전기적 접촉을 구성하는 기본적 요소에서 상대적으로 높은 온도를 초래한다. 높은 온도에서는 산화되고 싶고, 저항이 증가하여 추가적인 발열을 유발하여 훨씬 더 높은 온도가 되기 때문이다. 또한 그러한 온도상승은 접속단자와 연결된 다른 도체부에 영향을 미치며, 일정한 기기특성을 나타낼 수 있도록 접속부의 구성재료가 부적당한 것에 대한 대책이 필요하다. 이것이 불충분하면 접속부는 시스템의 수명보다 먼저 회복능의 손상을 입을 수 있다.

따라서 전력기기의 신뢰성 및 성능을 좌우하는 방열설계를 정밀화하고 효율적으로 수행할 수 있는 해석기법의 개발의 중요성이 증대되고 있다. 최근 컴퓨팅 기술의 발달과 더불어 열해석 기술은 간단한 모델에서의 해석적 수법에서부터 3차원 복합열전달 문제의 계산이 가능한 정밀도가 높은 수치기법 등이 가능하게 되었다. 하지만 실제적인 전력기기 내부의 온도분포를 3차원 수치기법으로 계산하는 것은 탑재된 구성요소의 다양한 크기와 형상으로 인한 매우 복잡한 경계조건을 수반하고 조밀한 격자를 요구하기 때문에 공학적이 아니다. 근래에는 복잡한 시스템의 유한요소법(Finit Element Method, FEM) 모델링의 대안으로 열저항을 고려한 단순 모델링 접근법[1]이 도입되고 있다. 적용분야는 주로 모델링이 복잡하고 변수가 많아서 다양한 해석이 필요한 시스템인 경우가 많다.

본 연구에서는 전도, 대류, 복사에 대한 열전달의 기본형태가 모두 취급되고, 복잡한 기기에서도 대응될 수 있는 열회로방법(Thermal Network Analysis, TNA)을 이용하여 전력기기 내부의 온도분포를 예측할 수 있

는 프로그램을 개발하였다. 전류가 흘러 열이 발생하고 소산되는 주회로 성분들을 각각의 노드로 분할하는 절차를 확립하였고, 열접촉저항과 주열열을 적절히 선정함으로써 회로망 내 온도분포를 계산하였다.

2. 열회로방법과 열저항식

2.1 열회로방법

전기·전자기기의 열해석을 위한 여러 가지 해석적, 수치적 방정식에 대하여 회로망모델을 이용한 방법은 단순하면서도 신뢰성있는 도구로서 사용될 수 있다. 열회로방법은 열과 전기흐름이 같은 형태의 방정식으로 표현될 수 있다는 사실을 기초로 한다. 해석대상을 몇 개의 블록으로 분할한 후, 각 블록과 블록간에 단일 요소의 조합으로부터 구성되는 물리모델에 대한 열평형 방정식을 행렬식이나 반복법을 이용하여 계산한다. 이 때 나타나는 온도차, 열유속, 열저항 등은 전기회로 이미지로 나타낼 수 있다. 예를 들어 식(1)의 열전도를 표현하는 푸리에의 법칙은 오옴의 법칙(Ohm's law)을 나타내는 식(2)와 같은 형태임을 알 수 있다. 따라서 열유속(heat flux) q 와 온도 T 는 각각 전기적 성질을 표현하는 전류밀도 J 와 전압 V 과 같으며, 또한 열저항과 전기저항을 나타내는 성분도 동일한 표현을 하는데 사용된다. 실제 열특성을 전기적 특성으로서 나타낸 것을 표 1에 정리하였다.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

$$J = \sigma \frac{dV}{dx} \tag{2}$$

열회로방법의 특징은 분할되는 노드점에 대하여 좌표 데이터를 입력할 필요가 없기 때문에 설계자가 다루기 쉽고, FEM의 프로그램에 비하여 복잡한 문제를 고속으로 계산을 할 수 있다. 또한 온도계산을 행할 때 열회로방법에서는 열저항의 개념을 이용하기 때문에 기기의 냉각 대책에 유효하며, 특히 복잡한 구조를 한 전기기기 등의 경우, 데이터 작성의 수고를 생각하면 이 방법으로 온도계산을 실시하는 것이 공학적이라고 할 수 있다.

Table 1. Equivalent quantities between thermal heat conduction and Ohm's law[2].

	Reality	Model
P	Power[W]	Current[A]
T	Temperature[K]	Voltage[V]
R	Thermal resistance[L/kA]	Electrical resistance[$\rho l/A$]

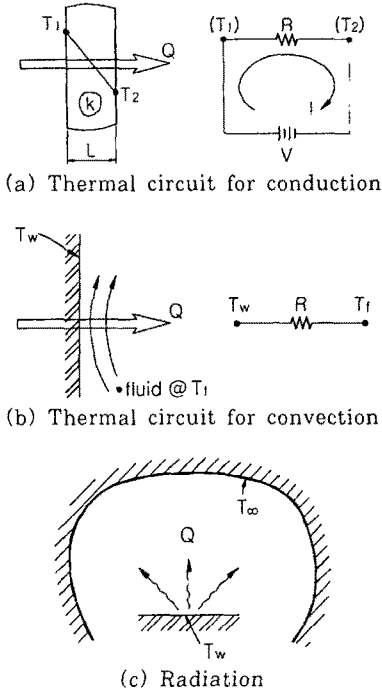


Fig. 1 Three modes of heat transfer and thermal circuit.

2.2 열저항의 정의

열전달의 주요 기구인 전도, 대류, 복사에 대한 메커니즘과 열회로도를 Fig. 1에 나타내었다[3]. 열전도는 시간적으로는 정상상태(steady-state)이며 공간적으로는 1차원이라고 생각하여 식(1)의 푸리에의 법칙을 적용하고 식(2)의 오옴의 법칙과 비교하면 전류 i 는 열류(heat flow) q_x , 전압차 V_1-V_2 는 온도차 T_1-T_2 에 대응한다. 따라서 전기저항 R 에 대응하는 전도열저항(conductive thermal resistance)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{cond} = \frac{\Delta x}{kA} \quad (3)$$

이와 같이 열저항을 전기저항처럼 취급하여 구성된 회로를 등가열회로(equivalent thermal circuit)라고 한다. 또한 식(4)의 뉴턴의 냉각법칙으로부터 대류열저항(convective thermal resistance)을 정의하면 식(5)와 같다.

$$q_{conv} = hA(T_w - T_f) = \frac{T_w - T_f}{1/hA} \quad (4)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (5)$$

복사의 경우는 식(6)의 스테판-볼츠만(Stefan-Boltzmann law)의 법칙으로부터 유효열전달계수 h_r 를 도입하면 식(8)와 같은 형태로 복사열저항(radiative thermal resistance)을 정의할 수 있다.

$$q_{rad} = \epsilon \sigma A (T_w^4 - T_\infty^4) = \epsilon \sigma A (T_w^2 + T_\infty^2)(T_w + T_\infty)(T_w - T_\infty) \quad (6)$$

$$h_r = \epsilon \sigma (T_w^2 + T_\infty^2)(T_w + T_\infty) \quad (7)$$

$$R_r = \frac{1}{h_r A} \quad (8)$$

2.3 지배방정식

위의 식들을 이용하여 시스템에서의 일반적인 1차원 에너지 평형방정식을 구하면 아래와 같다.

$$\rho A \Delta x C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \sum (q_{cond} + q_{conv} + q_{rad}) \quad (9)$$

정상상태일 때 $\partial T / \partial t = 0$ 이므로, 유한차분법으로 나타낼 경우 i 번째 요소 또는 노드는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_i = \frac{k_i A_{ij}}{x_i - x_j} (T_i - T_j) + h_i A_{ij} (T_i - T_j) + \epsilon_i A_{ij} (T_i^4 - T_j^4) \quad (10)$$

식(10)을 열저항의 개념을 도입하여 다시 정리하면 식(11)과 같다.

$$Q_i = \frac{T_i - T_j}{R_{cond}} + \frac{T_i - T_j}{R_{conv}} + \frac{T_i - T_j}{R_{rad}} \quad (11)$$

식(11)에서 아직 정의되지 않은 열원인 Q_i 는 발생 열원이 되는 전기접촉저항(R_{ec}), 통전시 부피저항(R_{iv})과 열저항이 되는 열접촉저항(R_{ic})으로 구성된다. 이렇게 구성되는 방정식은 연립1차 형태이며, 이를 행렬식을 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 온도예측 프로그램은 전력기기 주회로 각 부분의 온도를 구하는 방법으로 열회로방법(Thermal Network Analysis, TNA)을 이용하였다. 프로그램 검증하기 위해 참고문헌[2]에 소개된 해석해(analytical solution)를 계산할 수 있도록 프로그램밍하여 얻은 결과와 상용 열전달 해석 프로그램인 ICEPAK[4]을 이용한 결과를 열회로방법으로 계산한 것을 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 해석대상은 길이 1[m], 0.01[m]×0.01[m]의 사각 구리도체이며, 통전 전류는 300[A]이다.

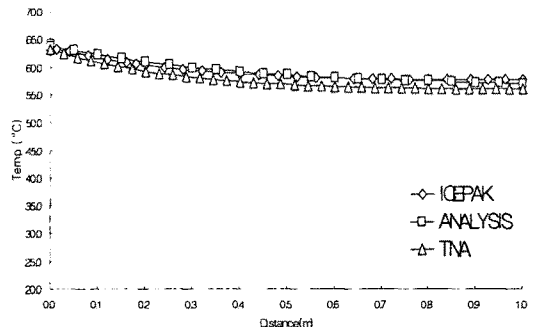


Fig.2 Comparison of temperature results for IEC-60943 example

Input data	
All number of material	18
Current [A]	2000
Ambient temperature [celsius]	20

Convection switch	
Start	End
On	On
Off	Off

Boundary condition	
Temperature at start [celsius]	78
Temperature at end [celsius]	75
Electrical contact resistance at inlet [ohm]	0

Material number	
Heat conductivity [W / (m ² K)]	307
Heat convection coefficient [W / (m ² K)]	5
Electric resistivity [ohm * m]	1.75e-008
Length [m]	0.015
Conduction area [m ²]	0.003526
Perimeter of material [m]	0.2104666
Convection area [m ²]	0
Electrical Rc between next material [ohm]	0
Thermal Rc between next material [W / (m ² K)]	0

Fig. 3 The property setting dialog.

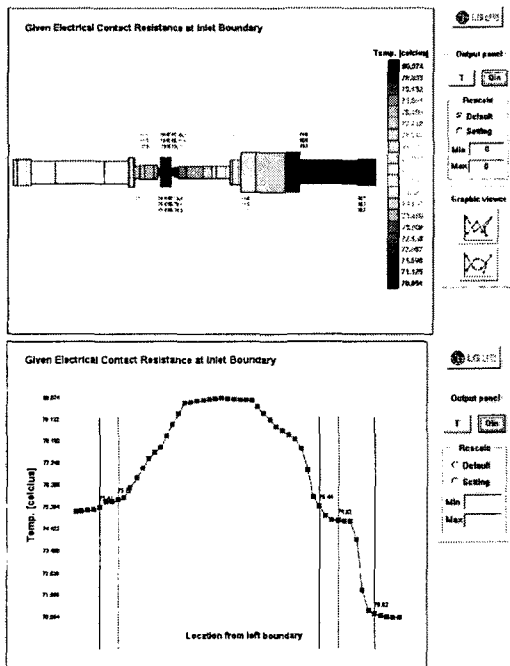


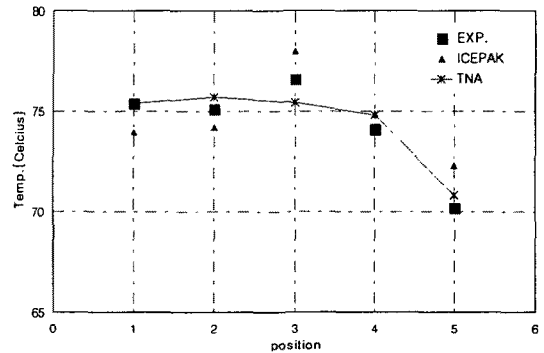
Fig. 4 The distribution and graph of temperature through main circuit of VCB.

복잡한 구성의 회로를 갖는 임의의 전력기기에서 발생하는 열전달 현상을 해석할 수 있도록 프로그래밍된 열회로방법을 이용한 TNA는 사용자 편의를 증대시키기 위해 Windows 환경을 기본으로 GUI 환경을 구축하였으며, 프로그램을 구성하기 위해 Visual C++을 사용하였다. TNA는 회로 내부의 정상상태 온도장에 대한 열해석 소프트웨어이며, 상용코드에 비해 신속하면서도 충분한 신뢰성을 갖는 해를 구할 수 있다. 또한, 전도, 대류, 복사의 영향을 모두 고려할 수 있으며, 사용된 도체나 주위 기체의 물성치, 형상의 변화 등이 있을 경우 간단히 값을 변화시켜서 해석해 볼 수 있는 장점이 있다.

해석결과를 판독하기 위하여 온도분포와 그래프를 볼 수 있도록 자체적인 post processor를 내장하였다. 구성된 열회로망에 대한 행렬(matrix)을 통해 구하며, 전기 및 열접촉저항을 모두 계산하여 고려할 수 있으며, 다수의 접촉점에 대한 해석이 가능하다.

실제적인 전력기기 온도장을 해석하기 위하여 자사 제품인 진공차단기(vacuum circuit breaker)의 주회로를 열회로망으로 구성하여 계산을 수행하였다. 통전전류는 2000[A]이며, 발열원을 위한 저항에 대한 산정은 온도상승실험에서 측정된 접촉저항과 이론식(5)에서 구한 것을 비교하여 대입하였다. Fig. 3은 초기데이터와 물성치를 입력하는 화면을 나타내며, 각 요소에 대한 물성치를 대입한 후 계산을 수행하면 Fig. 4와 같은 온도분포와 그래프를 얻을 수 있다.

이에 대한 검증을 위하여 같은 조건에서 수행한 온도 측정실험 데이터, 그리고 ICEPAK을 사용한 해석결과와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 실험결과와 비교하여 정성적·정량적으로 타당함을 알 수 있으며, 본 연구에서 사용한 열회로망방법과 프로그램의 유효성을 알 수 있다.



4. 결 론

본 연구에서는 통전시 전력기기 내부 온도예측을 위하여 열회로방법을 이용한 프로그램을 개발하였다. 정격전류가 2000[A]인 진공차단기 주회로의 열해석을 수행하여 실험결과와 비교한 결과 타당한 결과를 얻었으며, 개발된 프로그램의 타당성과 적용성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 성균관대학교 기계공학부 김윤제 교수님께 감사 드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Ellison, G. N., "Thermal Computations for Electric Equipment", Van Nostrand Reinhold Company, 1984
- [2] IEC-60943, "Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular terminals", 2nd Edition, 1998
- [3] Incropera F. P., Dewitt, D. P., "Fundamental of Heat and Mass Transfer", 4ed, John Wiley and Sons, 1996
- [4] Fluid Dynamics, Inc., "ICEPAK Manual", 1995
- [5] Slade, P. G., "Electrical Contacts", Marcel Dekker, Inc., 1999