

자계 분포시 열유동 현상 분석을 통한 결합계 해석

손락원, 장광용, 배재남, 김승주, 최승길*, 이주
한양대학교, 안산공과대학*

The coupling field analysis of a thermal transfer phenomenon by an magnetic field

Son Rak-won, Jang Kwang-yong, Bae Jae-nam, Kim Sung-ju, Choi Sung-gil*, Lee Ju
Hanyang University, Ansan College of Technology*

Abstract - In this article, we researched the characteristics of heat transfer of the bimetal for over-current protection device. Bimetal consists of two metals which have a different thermal expansion coefficient. To analyze the heat transfer characteristics, by using a bimetal which has a single metal, we analyzed the temperature distribution when bimetal acts a switch. As usual, heat source is applied to the bimetal. But, in the over-current protection switch, the current become heat source. So, by using the current as source, we performed the magnetic analysis and thermal analysis together.

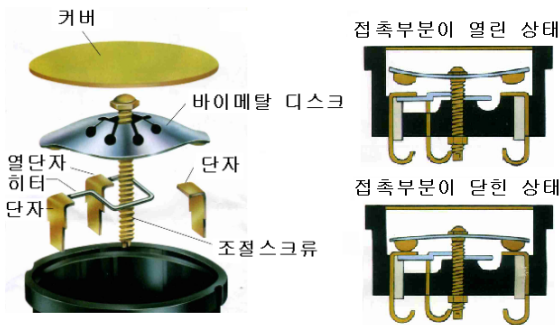
1. 서 론

온도 변화에 따른 두 금속의 열팽창 계수 차에 의해 동작하는 바이메탈은 접점의 접합 및 단락에 따라 온도 조절이 가능하기 때문에 전기다리미, 전기주전자와 같은 가정용 전기 기구 뿐만 아니라 전류제한기, 자동개폐기 등 다양한 곳에서 사용되고 있다. 이때 바이메탈은 열원에 의한 금속의 팽창을 변화에 의해 작동할 수도 있으나, 도체에 흐르는 전류로 인한 줄열에 의해 동작할 수도 있다. 특히 과전류 차단 스위치에서는 도체를 흐르는 전류에 의해 발생하는 열이 주된 열원이 된다. 따라서 본 논문에서는 전류에 따른 과전류 차단 스위치의 열특성을 보기 위해 도체에 흐르는 전류에 의한 줄열을 열원으로 하는 바이메탈의 열해석에 대해 연구하였다.

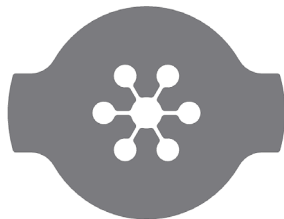
2. 본 론

2.1 바이메탈에서의 열전달 메커니즘

바이메탈은 두 도체의 열팽창 계수 차에 의해 동작하여 온도 조절 기능 및 스위치로서의 동작이 가능하다. 이 논문에서는 온도 조절 기능을 가진 일반적인 바이메탈이 아니라, 과전류 차단 스위치로서 동작이 가능한 바이메탈을 분석하기 위해 열해석을 시행하고자 한다. 해석 대상 모델인 바이메탈의 전체 구조도 및 동작 상태도, 단면도는 그림 1과 그림 2에 나타나 있다.



〈그림 1〉 과전류 제어 스위치의 전체 구조도 및 동작 상태도



〈그림 2〉 기존 바이메탈 모델의 단면도

본 논문에서는 전류를 소스로 한 자계해석 결과를 열해석과 연동하여 결과를 얻어냈다. 즉, 일반적으로 열원을 통한 열해석이 아닌 자계해석 및 열해석의 연성해석을 통해 바이메탈의 온도분포를 분석하였다.

2.2 유한 요소 모델링

전류에 따른 바이메탈의 온도 분포를 해석하기 위하여 자계해석과 열해석으로 나누어 유한요소 해석을 위한 지배방정식을 이끌어 내었다.

2.2.1 정자기역학

여기서는 해석의 편의를 도모하고 전류 분포의 양상만을 살펴보기 위해 전류를 소스로 하는 정자기 해석을 시행하였고 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = -J_0 \quad (1)$$

이때 μ 는 자기 투자율, A 는 자기 벡터 포텐셜, J_0 는 전류밀도가 된다.

2.2.2 열영역

전류 레벨에 따른 온도 분포가 어떻게 되는지 살펴보기 위하여 정적 해석을 하였고 방정식은 다음과 같다.

열의 이동 방식 중 전도는 푸리에 방정식, 대류는 뉴턴의 냉각법칙, 복사는 슈테판-볼츠만 법칙으로 나타낼 수 있고 위 현상을 종합하여 이때의 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\nabla \cdot k \nabla T + q = \rho c \frac{dT}{dt} + \rho c u \nabla T \quad (2)$$

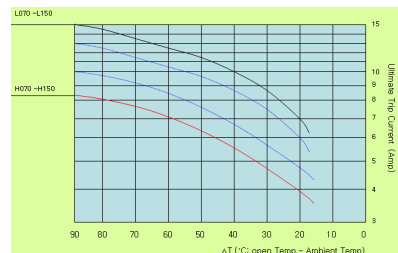
이때 k 는 열전도계수, T 는 온도, q 는 열원, ρc 는 열용량, u 는 속도를 나타낸다. 위 식의 각 항은 순서대로 전도현상, 단위체적 내부에서 발생하는 열, 단위체적 내부에서 저장되는 열, 대류현상을 나타내고 있다.

2.2.3 정자기역학과 열영역의 관계

정자기역학의 소스가 되는 전류를 통해 전류밀도를 구해낼 수 있다. 동일한 메쉬를 가지는 열영역의 소스로 전류를 이용한 줄열을 사용하여 연성해석을 하면 결과적으로 해석 대상에 대한 온도 분포를 구해낼 수 있게 된다. 이때, 연성해석 과정에서 2가지 방법을 고려할 수 있다. 첫 번째는 자계 영역을 해석하고 그 결과를 열해석에 이용하여 온도 분포를 구해내는 방법이다. 첫 번째 방법은 전기전도도 및 비투자율의 온도의존성을 고려할 수 없다는 단점을 지닌다. 두 번째는 자계 영역을 해석한 결과를 열해석에 이용하고 그 결과를 다시 자계 분포에 피드백하는 방법이다. 이 방법은 온도 변화에 의한 자계의 영향을 시뮬레이션 과정에서 계속 반영하여 보다 정밀한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 논문에서는 해석 과정에 있어 다소 오차가 있을지라도 온도 분포의 경향을 간단히 살펴보기 위해 첫 번째 방법을 이용하여 바이메탈의 온도 분포를 해석하였다.

2.3 유한요소 해석

앞에서 언급한 해석 대상에 대한 실제 특성 그래프를 그림 3에 나타냈다.



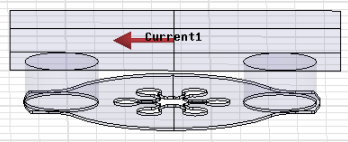
〈그림 3〉 바이메탈의 온도 대 동작 전류 곡선

그림 3을 살펴보면 H70~H150의 모델별 온도에 대한 동작 전류의 상관관계를 나타내고 있다. 또한, 다양한 동작 온도 범위를 요구하는 여러 응용분야에 적합한 바이메탈을 제작하려고 할 때, 미리 열해석을 통해 대략적인 설계가 필요함을 보여주고 있다. 따라서 유한요소 해석 부분에서는 형상의 변화를 통해 전류에 따른 온도 분포를 파악하고 어떤 경향을 띄는지 살펴보도록 한다. 이때 온도 분포를 얻기 위해서는 전류를 스스로 한 열해석이 필요하게 된다. 해석 과정에서는 구리 재질을 적용하고, 해석 대상의 형상을 바꾸어가면서 수렴하는 온도에 대해 검증하였다. 또한, 해석 대상인 바이메탈의 온도 특성을 보다 잘 살펴보기 위해 3차원 해석을 시행하였다. 바이메탈의 대류 계수는 $1 W/C/m^2$, 복사율은 0으로 설정하여 복사에 의한 열의 이동은 없다고 가정하고 해석하였다. 실온은 $25^{\circ}C$ 로 설정하였으며, 각 전류 레벨에 따른 온도 특성을 그래프로 나타내었으며, 구리 매질의 열특성은 표 1에 나타내었다.

<표 1> 매질의 열특성

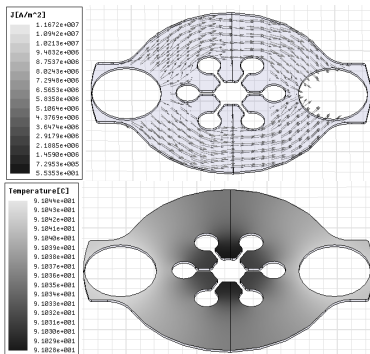
매질 특성	구리
열전도도 $k (W/mK)$	400
비열 $C_p (J/kgK)$	385
밀도 $\rho (kg/m^3)$	8933

그림 4는 전류를 인가한 모습을 나타낸 것이다.

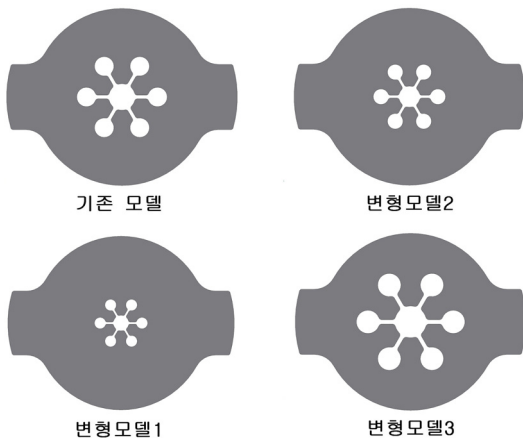


<그림 4> 전류 인가시 단면도

기본 모델에서 전류 10A가 흐를 때 전류 밀도 벡터 분포 및 열의 분포를 그림 5에 나타내었다.



<그림 5> 기존 바이메탈 모델에 대한 전류밀도 및 온도 분포



<그림 6> 기존 모델 및 변형 모델의 단면 비교도

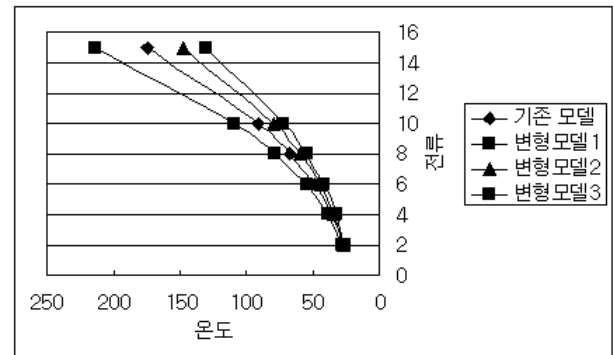
그림 6에서는 기존 모델 및 변형 모델 3종류에 대한 단면을 비교하였다. 기존 모델 중앙부의 홀의 크기 및 비율에 대해 변화를 준 변형모델

3개를 기존 모델에 대해 얼마나 온도 분포 차를 보이는지 비교하였다. 변형모델 3개에 대한 각각의 홀의 비율을 표 2에 나타내었다. 표 2는 바이메탈 중앙부의 홀이 기존 모델에 대해 얼마의 비율을 가지고 확대/축소되었는지를 나타내고 있다.

<표 2> 모델별 홀의 비율

	기본 모델	변형모델1	변형모델2	변형모델3
홀의 비율	1	0.6	0.8	1.2

기본 모델 및 변형모델 3종류에 각각 전류 2, 4, 6, 8, 10, 15A를 인가한 후 온도분포 특성을 알아보았다. 해석 과정에서 전류밀도 분포 및 온도 분포의 경향은 3가지 변형 모델 모두 기본 모델과 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 해석 과정에서 기본 모델 및 변형 모델의 온도 분포를 살펴보면, 기본 모델이 나타나 있는 그림 5에서처럼 온도 분포의 차가 큰 것으로 판단할 수도 있다. 하지만 실제로는 바이메탈의 부분별 온도차가 평균 $0.01^{\circ}C$ 내의 범위에 존재하였기 때문에 평균값을 간단히 취할 수 있었다. 구리를 재질로 사용한 경우의 온도분포에 대해 그림 7에 나타내었다.



<그림 7> 모델별 온도 분포 특성

유한요소 해석 부분에서는 기존 바이메탈 모델 및 변형된 바이메탈 모델의 전류별 온도 특성을 분석하였다. 바이메탈 자체의 열전도도나 비열, 밀도 등의 값을 알기 힘들어, 경향을 살펴보는 것에 치중하였다. 특히, 형상별로 전류에 따른 온도 분포가 상이하게 나타났으며, 전류에 따른 경향 또한 각각의 특징을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 논문에서는 언급하지 않았지만 대략 1MHz 이상되는 주파수에서 표피효과와 영향을 고려하여야 함을 미리 밝힌다. 이를 통해 전류를 스스로 하여 특정 온도에서 동작하는 바이메탈을 설계하는데 있어 자체해석 및 열해석의 연성해석이 필요함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

해석 대상에 주어진 전류 및 대류, 복사 조건 및 경계 조건은 동일한 상황에서 바이메탈의 각 모델별 형상 및 재질의 차이에 따라 각각의 전류별 정상 상태에 도달 후 최대 온도가 각기 달랐다. 또한 그 추이나 경향이 상이한 특성을 보여주는 것을 확인하였다. 이를 이용하여 특정 온도에서 작동하는 바이메탈을 설계하고자 할 때 형상 및 재질에 적절한 변형을 가하여 원하는 제품을 설계하는데 도움이 될 수 있음을 알았다. 그리고 열원이 존재할 때뿐만 아니라 전류를 스스로 하는 경우에도 연성해석을 통해 온도분포를 구해낼 수 있음을 확인하였다. 주파수가 영향을 미칠 경우에 발생하는 와전류 해석, 그리고 과도 응답 해석 등은 앞으로 세부적인 연구를 통해 알아보도록 하겠다. 추후 바이메탈 재질에 대한 보다 정확한 분석을 통해 다음 발표시 언급하도록 하겠다.

감사의 글

본 논문은 전력기반조성사업센터에서 시행한 Compressor 과전류 제어 스위치 개발 사업으로 수행되었음. 과제번호(R-2006-1-170)

[참 고 문 헌]

[1] P. K. Vong and D. Rodger, "Coupled Electromagnetic-Thermal Modeling of Electrical Machines"
 [2] N. Allen H. C. Lai D. Rodger and P. J. Leonard, "On the Validity of Two A-ψ Finite Element Formulations for Modelling Eddy Current Problems With Velocity"