

SMART용 볼너트-스크류형 제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 열해석

허 형, 김지호, 김종인
한국원자력연구소

Thermal Analysis of Electromagnet for SMART Control Element Drive Mechanism

Hyung Huh, Ji-ho Kim, Jong-in Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract - A thermal analysis was performed for the electromagnet which is installed in the control element drive mechanism(CEDM) of the integral reactor SMART. A model for the thermal analysis of the electromagnet was developed and theoretical bases for the model were established. It is important that the temperature of the electromagnet windings be maintained within the allowable limit of the insulation, since the electromagnet of CEDM is always supplied with current during the reactor operation. So the thermal analysis of the winding insulation which is composed of polyimide and air were performed by finite element method. The thermal properties obtained here will be used as input for the optimization analysis of the electromagnet.

1. 서론

일체형원자로 SMART의 볼너트-스크류형 제어봉구동장치에서는 비상시 제어봉의 삽입속도를 빠르게 하기 위하여 그림 1과 같이 상부압력용기 밑에 고정 전자석을 설치하였다. 고정전자석에의 전류를 차단함으로써 전자석의 자기력으로 결합해 있던 볼너트집합체가 스크류와 함께 노심설계에서 요구되는 비상삽입거리 만큼 빠른 속도로 낙하하여 노심을 아임계상태로 전환하게 된다. 전자석은 원자로 기동시 스텝모터의 회전에 의하여 비상삽입길이 만큼 상승하여 접근한 앵커 집합체를 전자석 힘만으로 결합시켜 계속해서 이 상태를 유지하는 역할을 하기 때문에 충분한 추력이 요구되며 특히, 장시간 연속적으로 전자석을 가동시켜야 하기 때문에 권선에서 발생하는 열의 해석이 중요하다. 본 연구에서는 SMART용 볼너트-스크류형 제어봉구동장치의 전자석 개발을 위한 열전도 수치해석을 수행하였다.

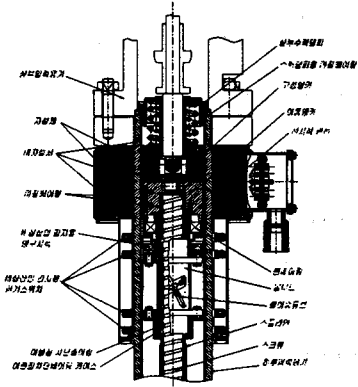


그림 1 전자석, 상부수력댐퍼 및 볼너트-스크류

2. 열해석

가. 권선부의 k_{insl} 와 $\rho c_p insl$ 결정

전자석 권선부의 온도 특성값들은 같은 환경 및 재질이 사용된 선형필스모터의 권선부 온도특성 시험 결과를 이용하여 보수적으로 결정하였다. 그림 1은 온도특성시험에 사용된 권선부 단면의 개략도이고, 권선부의 사양은 표 1과 같다.

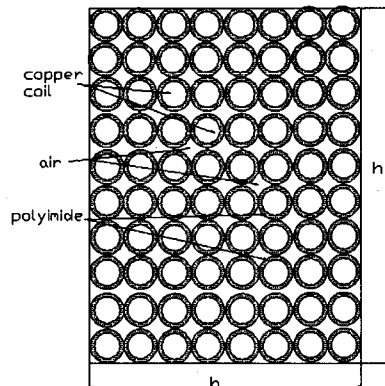


그림 3 권선부 단면의 개략도

표 1 권선부 사양

구분	Ø 1.2 model
권선 직경 [mm]	1.2
Turn수	596
b [mm]	47
h [mm]	20.5
점적율	0.68
절연한계	220℃
권선피복재	폴리이미드

권선부에서의 열전달은 권선으로부터 권선부 외표면으로의 전도열전달, 권선 외표면으로부터 주위로의 대류열전달이므로 열해석에 요구되는 열특성은 열전도도(thermal conductivity: k)와 체적열용량(volumetric heat capacity: ρc_p) 및 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient: h)이다. 여기서, 권선의 절연피복재인 폴리이미드와 공기층의 유효열전도율 $k_{insl.}$ 은 2재질의 열전도율과 체적분율을 고려하여 결정하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

$$k_{insl.} = \frac{(k_{air} \frac{A_{air}}{A_{insl.}}) + (k_{polyimide} \frac{A_{polyimide}}{A_{insl.}})}{2} \quad [W/m^{\circ}C] \quad (1)$$

여기서, k_{air} : 공기의 열전도도 [$W/m^{\circ}C$], A_{air} : 권선부 단면에서 공기층이 차지하는 면적 [m^2], $A_{insl.}$: 권선부 단면에서 권선을 제외한 면적 [m^2], $k_{polyimide}$: polyimide의 열전도도 [$W/m^{\circ}C$], $A_{polyimide}$: 권선부 단면에서 polyimide가 차지하는 면적 [m^2]이다.

표 2 유효전도율(폴리이미드와 공기층)

구분	열전도율 [$W/m^{\circ}C$]
폴리이미드	0.35
공기	0.0263
$k_{insl.}$	0.12414

체적열용량은 열에너지를 저장하는 물질의 능력을 의미하며 비정상상태(과도상태)에 대한 열해석을 수행할 때 요구되는 열특성이다. 체적열용량 $\rho c_p insl.$ 는 다음 식 (2)를 사용하여 결정할 수 있다.

$$\frac{\rho c_p insl. V_{insl.}}{h A_s} \ln \frac{T_i - T_{\infty}}{T - T_{\infty}} = t \quad [sec] \quad (2)$$

여기서, $V_{insl.}$: 권선부 단면에서 권선을 제외한 부분의 체적 [m^3], A_s : 권선부 외표면적 [m^2], T_i : 권선부 초기온도 [$^{\circ}C$], T_{∞} : 권선부 주위온도 [$^{\circ}C$], T : 권선부 최종온도 [$^{\circ}C$], t : $insl.$ 이 T 온도에 이르는 데 소요되는 시간 [sec]이다.

식 (2)를 통해 알 수 있듯이 $\rho c_p insl.$ 을 결정하기 위해서는 대류열전달계수 h 가 우선적으로 결정되어야

하며 이는 총합에너지평형을 적용하여 구할 수 있다.

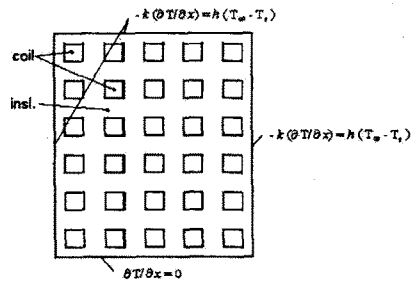
$$q = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad [W] \quad (3)$$

권선에서 발생한 열량 q 는 단위체적당 발생열량인 \dot{q} 와 권선의 체적 V_{coil} 의 곱으로 이때 T_s 는 권선부의 외표면 온도이다. \dot{q} 는 권선의 전류밀도 J 와 저항률 ρ_{coil} 의 함수로 식(4)와 같이 정의된다.

$$\dot{q} = J^2 \cdot \rho_{coil} \quad [W/m^3] \quad (4)$$

이상의 과정을 통해 결정된 권선발생열량 q 와 각 권선의 모델을 1차원으로 등가화하고 q 값과 실험결과를 식 (3)에 적용하여 결정된 권선에 대한 h 는 표 3과 같다. 이상과 같이 결정된 h 와 각 권선의 사양등을 식(2)에 적용하여 $\rho c_p insl.$ 을 2.43×10^6 [$J/m^3^{\circ}C$]로 결정하였다. (이때 $T_i - T_{\infty}$ 는 $0.1^{\circ}C$ 로 고려하였다.)

나. 열해석 조건



2절 가항에서 결정된 $k_{insl.}$ 와 $\rho c_p insl.$ 의 값을 동일한 조건으로 유한요소 해석 툴인 Flux-2D를 이용하여 정상상태와 과도상태에 대한 열해석을 수행하였다. 열해석모델은 권선의 면적과 절연재의 면적을 등가화하여 그림 2와 같이 1/2모델로 구성하였으며 권선부 표면에서의 경계조건은 Neumann Condition과 Convection Surface Condition을 적용하였다. 이상과 같이하여 결정된 모델의 열해석 조건은 표 3과 같다.

표 3 열해석 조건

구분	권선	Ø 1.2
해석영역		1/2
전류밀도 [A/mm^2]		1
열원 [W/m^3]		67740
대류열전달계수 [$W/m^2^{\circ}C$]		14
주위온도 [$^{\circ}C$]	Shell 1	50
	Shell 2	120
열전도도 [$W/m^{\circ}C$]	Coil	387
	Insulation	0.124
	Shell 1	0.124
	Shell 2	200
체적열용량 [$J/m^3^{\circ}C$]	Coil	3.48×10^6
	절연재	2.43×10^6

다. 정상상태 열해석

각 모델의 주위온도는 실험조건과 동일하게 적용하였으며 표 3과 같은 조건으로 ϕ 가 1.2mm, $k=0.68$ 인 폴리이미드 권선 모델에 대하여 열해석을 수행하였다.

그림 3과 4는 열해석결과로 온도분포를 보면 88℃에서 112℃ 사이로 권선의 피복재의 한계허용온도인 220℃ 보다 훨씬 작음을 알 수 있다.

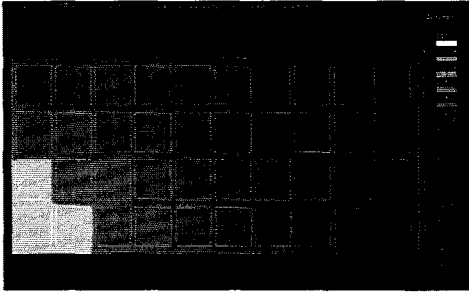


그림 3 온도분포 (1[A/mm²])

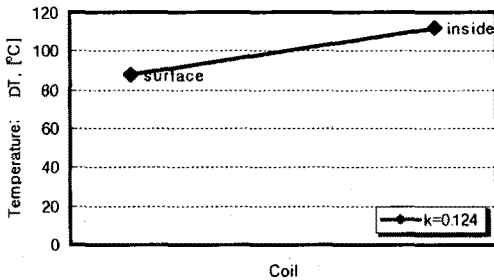


그림 4 여자전류 1[A/mm²]시 온도상승

다. 과도상태 온도해석

2절 가항에서결정된 $\rho c_p insl.$ 의 값을 적용하여 권선부의 여자전류밀도가 1 [A/mm²]인 경우의 시간에 따른 온도의 변화는 그림 5와 같다.

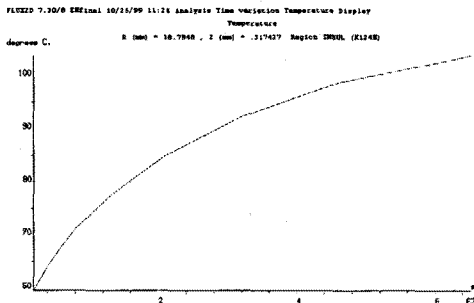


그림 5 시간에 따른 중심온도의 변화 (1[A/mm²])

4. 결론

일체형원자로 SMART의 제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 권선부에 대한 열특성을 예측하여 설계 및 제작에 반영하고자 권선의 직경이 ϕ 1.2[mm]인 폴리이미드 모델에 대하여 이미 실험으로 제시된 권선복합절연층(폴리이미드-공기층)의 열특성값($k_{insl.}$ 및 $\rho c_p insl.$)을 보수적으로 결정하여 정상상태 및 과도상태에 대한 열해석을 2차원 유한요소법으로 수행하였다.

전류밀도를 1[A/mm²]로 유지하면서 전자석 권선에 대한 과도 열해석 결과 권선 절연 한계 허용온도인 220℃보다 훨씬 낮은 88℃에서 112℃ 사이의 온도분포를 나타내었다.

추후 이 들 열특성값들에 대한 보다 정량적인 실험 및 비교 작업이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종인 외, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1 단계최종보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR - 1889/98, 1999.3
- [2] 장문희 외, "테마기획-중소형 일체형원자로 SMART 개발", 대한기계학회 기계저널, Vol.39, No. 4, 1999. 4.
- [3] 구대현 외 "일체형원자로 냉각재 순환펌프의 전동기 설계 및 해석", 98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.
- [4] 허 형 외, "SMART 제어봉구동장치의 선형필드모터 열해석", '99년도 한국원자력학회 춘계학술대회논문집, 1999.
- [5] 허 형 외, "SMART용 냉각재순환펌프에 장착되는 농형유도전동기의 전자기 및 열해석", '99년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999.
- [6] William H. Hayt, Engineering Electromagnetics, 4th edition, McGraw-hill, 1981
- [7] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1987
- [8] Fran P.Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [9] J. P. Holman, "Heat Transfer", 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1995