

일체형원자로 제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 설계 및 특성해석

論 文

52B-4-1

The Design, Fabrication, and Characteristic Experiment of Electromagnet to Control Element Drive Mechanism in System-Integrated Modular Advanced Reactor

許 炯* · 金 鍾 仁** · 金 建 中***
(Hyung Huh · Jong-In Kim · Kern-Jung Kim)

Abstract - This paper describes the finite element analysis(FEA) for the design of electromagnet for Control Element Drive Mechanism(CEDM) in System-integrated Modular Advanced Reactor(SMART) and compared with the lifting power characteristics of prototype electromagnet. A normal analysis was performed for the electromagnet. 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. As a result, it is shown that the characteristics of prototype electromagnet have a good agreement with the results of FEA. The thermal properties obtained here will be used as input for the optimization analysis of the electromagnet.

Key Words : Electromagnet Design, CEDM, FEA, Lifting Power, Thermal

1. 서 론

일체형원자로의 볼너트형 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, 이하 CEDM)는 원자로 집합체가 정상운전중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하여 노심 반응도를 적절히 제어하며, 또한 원자로 계통에 사고가 발생하여 긴급한 출력정지가 요구될 때, 제어봉을 신속하고 정확하게 원자로 내부로 삽입시켜 원자로를 정지시키는 장치로서 원자로 계통의 안전성과 직접 관련된 매우 중요한 기능을 가지고 있기 때문에 원자로의 다중 보호계통 중에서 일차 안전계통장치로 분류되고 있다.

CEDM 성능상 주요 요건인 제어봉의 삽입속도를 빠르게 하기 위하여 그림 1과 같이 상부 압력용기 밑에 고정 전자석을 설치하였다. 비상시 고정 전자석에의 전류를 차단함으로써 전자석의 기자력으로 결합해 있던 볼너트집합체가 스크류와 함께 노심 설계에서 요구되는 비상 삽입거리 만큼 빠른 속도로 낙하하여 노심을 아임계상태로 전환하게 된다. 원자로 기동시 스텝모터의 회전에 의하여 비상삽입길이 만큼 전자석의 가동자가 상승하여 고정자에 밀착되면 통전시켜 이후로는 오직 전자석 힘만으로 가동자를 결합시켜 계속해서 이 상태를 유지하여야 하는데 특히 주변 공간제약으로

인해 가능한 한 작으면서도 충분한 인력이 요구된다. 특히 장시간 연속적으로 전자석을 가동시켜야 하기 때문에 권선에서 발생하는 열해석도 중요하다[1]. 본 연구에서는 위와 같은 조건들을 만족시키는 볼너트형 CEDM용 전자석을 설계하였으며, 인력 및 열특성을 실제 제작된 시제품과 비교, 분석하였다.

2. 본 론

2.1 전자석의 설계

전자석의 설계는 전체 시스템의 일반적인 사양 즉 제어봉 볼너트집합체의 무게, 기하학적인 구조, 외력 등의 영향에 따라 전자석의 정격 추력, 전자석의 형태 등을 결정하고 분석적인 방법으로 전자석의 면적, 코어의 폭, 코일의 형태, 입력전류 등을 계산하였고, 수치해석적인 방법으로 전자석의 정적 및 동적인 특성을 조사하여 전체 시스템에 맞는 전자석을 설계하였다. 전자석의 성능은 전자석 자중에 대한 추력의 비와 단위하중을 들어 올리는 데 소요되는 전력량과의 비로 나타내는 데, 전자석의 효율을 향상시키기 위해서 좋은 코어의 재질(포화 자속밀도가 높은 것)과 고효율의 코일 재료가 사용하였다.

그림 1에서 전자석의 자속밀도를 $B \text{ Wb/m}^2$ 로 하고, 공극 공간에서 자속 확산이 없다고 가정하면, 공극 내부나 전자석, 고정앵커, 이동앵커 내부도 자속밀도는 일정하므로 B 이다. 즉, 정상자계에 저축되는 전체 에너지 W_H 는 다음과 같이 표시된다[2,3,4].

* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

** 準 會 員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博

接受日字 : 2002年 11月 27日

最終完了 : 2003年 2月 10日

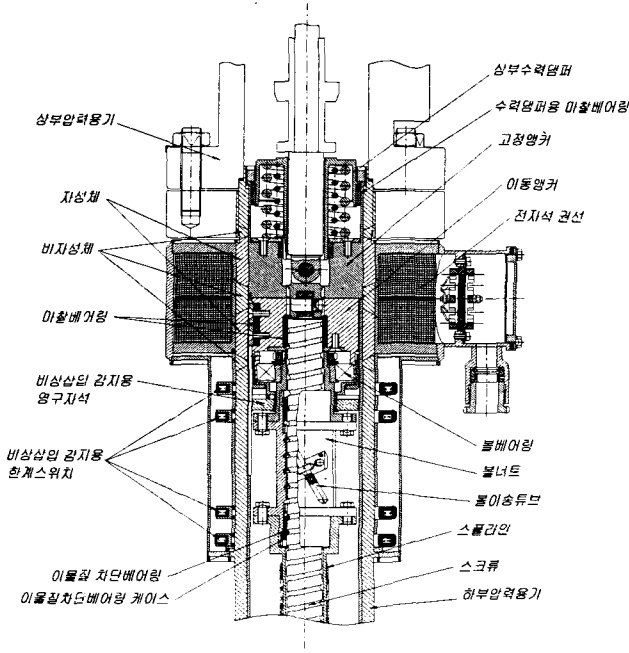


그림 1 전자석, 상부수력댐퍼 및 볼너트 스크류
Fig. 1 Ball nut screw-type CEDM

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} B \cdot H dv = \frac{1}{2} \int_{vol} \mu_0 H^2 dv = \frac{1}{2} \int_{vol} \frac{B^2}{\mu_0} dv$$

여기서, μ_0 는 진공중의 투자율, $H A/m$ 는 자계의 세기이다. 이 때 위 식에서 자계에너지의 증가량 dW_H 는 다음과 같다.

$$dW_H = FdL = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} SdL$$

여기서, S 는 철심의 단면적이다. 따라서,

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$$

여기서, 이 때 코일의 단위길이 당(1 m당) 권선수를 N , 코일의 전류를 I 라고 하면, 철심내의 자계의 세기는 NI 이므로, 철심의 자화곡선에서 자속밀도를 구할 수 있다. 이상의 식은 전자석에서 발생하는 흡인력으로 설계 추력이 결정되면 이 식에 의하여 철심 단면적이 결정되고, 이에 따라 공극에서 필요한 자속밀도를 발생하는데 필요한 기자력 M 을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$M = NI = R_m \Phi = \frac{l}{\mu_0 S} \Phi = \frac{l}{\mu_0 S} BS = \frac{Bl}{\mu_0} = HI$$

여기서, $R_m A \cdot T/Wb$ 은 리랙탄스(자기저항)이며, l 은 전체자료에 대한 공극의 길이, Φ 는 자속이다. 또한, 전자석의 윈도우 크기의 결정은 다음 식으로 결정하였다.

$$M = S_w \cdot k \cdot J$$

여기서, $S_w \text{ mm}^2$ 는 윈도우 면적, k 는 점적율, $J A/mm^2$ 는 전류밀도이다. 코일은 폴리이미드를 사용하여 정격 전류밀도를 $1.5 A/mm^2$ 로 하고, 점적율 k 는 0.5로 택했다. 윈도우 면적은 전자석의 형상을 최종적으로 결정하는 과정이므로, 이 형상에 따른 전자석의 특성 즉 추력, 누설자속, 코일 내부의 온도상승 등을 분석하여 선정하였다.

표 1은 설계 최적화를 통하여 결정된 설계사양으로 전자석 윈도우의 폭과 높이를 각각 46.5mm와 48mm로 선정하였다.

2.2 전자석 유한요소해석

축대칭 문제이기 때문에 2차원 형태로 등가변환하여 해석하였다. 이 축대칭 문제는 좌우 대칭이기 때문에 전체 해석 영역중 절반만 계산하여 해석시간을 줄였다. 해석 변수중 공극들은 shell로 정의하여 mesh generation시 문제점을 일소하였다. 유한요소해석은 전자기장 수치해석 전용 툴인 Maxwell-2D를 이용하여 계산하였다.

2.2.1 해석모델

그림 2는 전자석에 대한 2차원 해석모델로 이때 입력사양은 표 2와 같다.

표 1 최종 선정된 설계값
Table 1 Final design results

번호	항 목	치수	
1	Mover	내경	39mm
		외경	87mm
		길이	67mm
2	Stator	내경	39mm
		외경	92mm
		길이	67mm
3	Sleeve	내경	88mm
		외경	95mm
		길이	49mm
4	PRV	내경	95.2mm
		외경	115mm
		길이	49mm
5	Core	외경	252mm
		밀폭	19mm
		축폭	18mm
6	Coil	UP	46.5x48mm
		DN	46.5x48mm
7	요구 추력[kgf]	550 이상	
8	축공극[mm]	0.1이하	
9	측면공극[mm]	0.5	
10	점적율	0.5	

2.2.2 해석결과

그림 3은 위에서 결정된 전자석 형상에 대해 유한요소법으로 해석한 벡터 포텐셜의 최대값과 최소값을 30등분한 등전위선(equipotential line)이다.

그림 4는 전류밀도를 $0.5 A/mm^2$ 에서 $6 A/mm^2$ 까지 변화시키면서 추력을 계산한 결과로, $1.5 A/mm^2$ 에서 550kgf를 초과하는 것을 알 수 있었다.

표 2 기본적인 해석 조건
Table 2 Analytical conditions

해석 solver	Magnetostatic
해석좌표계	Axisymmetric
해석모델	Half
Shell	0.1mm 이하
경계조건	Dirichlet
Source	Upcoil=1.5 [A/mm^2]
Stator	STS304
Mover	STS304
Core	S20C

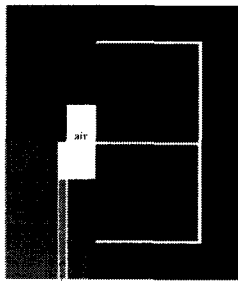


그림 2 2차원 해석모델
Fig. 2 2D-FEM model

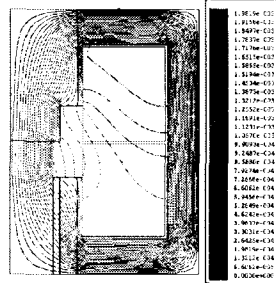


그림 3 전자석의 등자속선 분포
Fig. 3 Equiflux line distribution results of EM

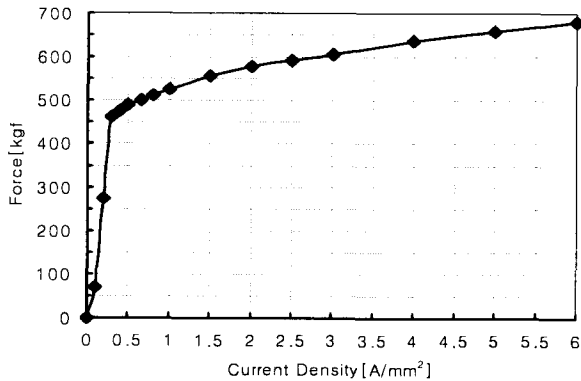


그림 4 전류밀도별 추력변화(공극:0.1mm)
Fig. 4 Lifting force results due to J input (airgap=0.1mm)

2.3 전자석 시제품의 특성시험

2.3.1 시험장치

전자석 시험장치의 구조는 그림 5와 같다. 전자석 시험장치 구조의 부품 명칭은 표 1에 나타내었다.

전자석 시험장치의 설치는 그림 6과 같이 전자석 장치의 하부 구조를 인장시험기 하부에 고정시키고 Load Rod 부분을 상부에 연결한다. 그리고, 주변 기기로 전류를 공급하는

Power Supply와 전압을 측정하는 Multimeter, 전자석 내부의 온도를 측정하는 Thermometer, 컴퓨터와 인터페이스 되어 있다.

전자석 시험방법으로 테스트를 시작하면 인장시험기의 스크류가 이동하면서 전자석 시험장치의 이동앵커와 고정앵커 부분의 간극이 벌어지게 된다. 이 간극이 생기면서 전자석 추력이 변하는데 이 변위에 대한 추력의 변화를 PC에서 데이터로 받아 저장하였다.

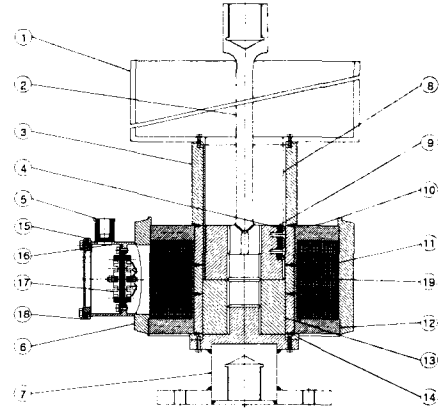


그림 5 전자석 시험장치 구조
Fig. 5 The schematics of EM experimental device

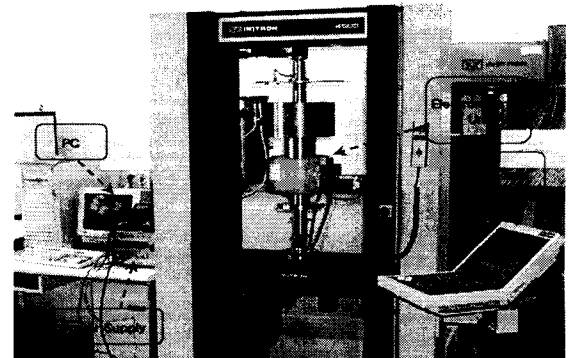


그림 6 인장시험기에 설치된 전자석 장치
Fig. 6 Photograph of EM device installed tensile tester

2.3.2 시험결과

그림 7은 전류밀도를 $0.5 \sim 3 A/mm^2$ 사이에서 변화시키면서 얻어진 추력곡선을 나타내고 있다.

전류밀도가 $0.5 \sim 3 A/mm^2$ 의 범위에 있을 때 최대추력은 400~600kgf 사이의 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 8은 전류밀도를 $3 A/mm^2$ 로 주고 전자석 내부 온도가 $28^\circ C$ 일 때와 $146^\circ C$ 인 경우의 추력변화 곡선을 나타낸 것이다. 여기서, 전류밀도를 $3 A/mm^2$ 로 일정한 전류를 공급하면 전자석 내부 온도가 시간에 따라 올라가며 내부 온도가 $146^\circ C$ 일 때 인장시험을 하여 추력을 비교하였다.

시험 결과에서 알 수 있듯이 설계온도범위에서는 전자석의 추력에 거의 영향이 없었다.

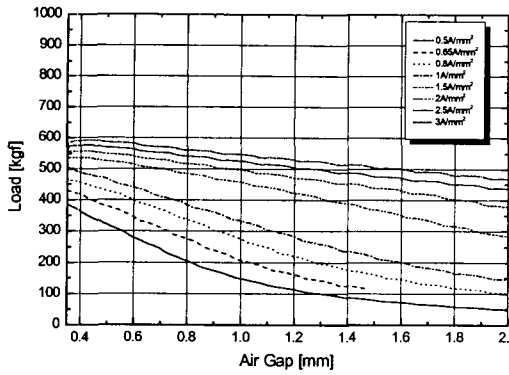


그림 7 전류밀도변화에 대한 추력
Fig. 7 Experimental results of lifting force at various J inputs

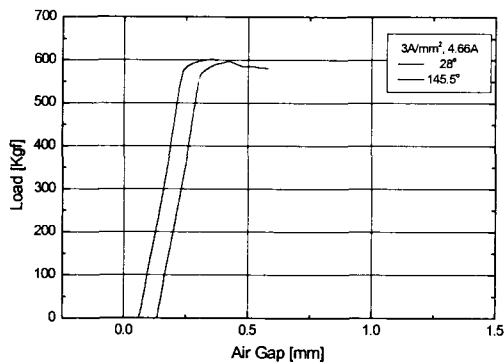


그림 8 온도에 따른 추력시험(J=3.0A/mm²)
Fig. 8 Experimental results of lifting force at each temperature as J=3.0A/mm²

2.3.3 해석결과와 시험결과와의 비교

그림 9는 상부권선에 인가하는 전류밀도값을 변화시키면서 시험값과 해석값을 비교한 것으로 초기에는 해석값이 시험값보다 약간 크게 나오지만, 전류밀도가 1 A/mm² 이후에는 5% 이내에서 잘 일치하고 있다. 이 때의 해석값과 시험값의 공극치는 0.1mm이하이다.

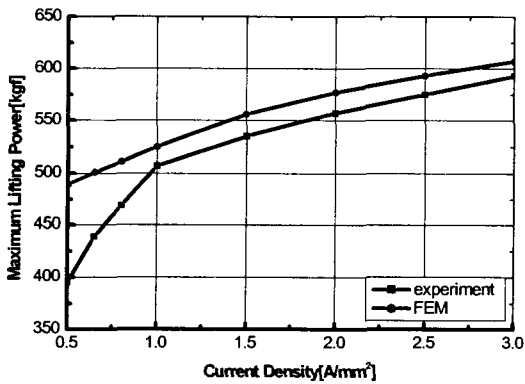


그림 9 해석값/시험값의 비교(공극실험치 및 해석치: 0.1 mm 이하)
Fig. 9 Comparison of calculated to measured lifting force at various J inputs

3. 열해석

3.1. 권선부의 $k_{insl.}$ 와 $\rho c_p insl.$ 결정

전자석 권선부의 온도 특성값들은 같은 환경 및 재질이 사용된 선형펄스모터의 권선부 온도특성 시험 결과를 이용하여 보수적으로 결정하였다.

그림 10은 온도특성시험에 사용된 권선부 단면의 개략도이고, 권선부의 사양은 표 1과 같다.

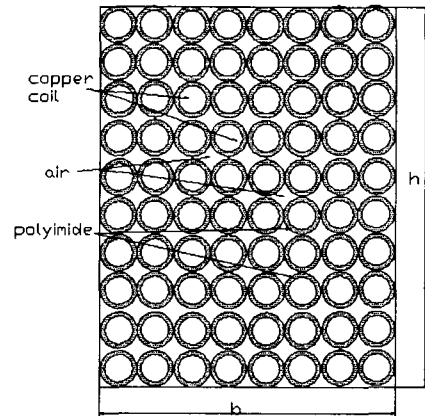


그림 10 권선부 단면의 개략도
Fig. 10 An FEM model for EM winding

표 3 권선부 사양
Table 3 Specification of winding

구분	Ø1.2 model
권선 직경[mm]	1.2
Turn수	484
b [mm]	46.5
h [mm]	24
점적율	0.49
절연한계	220°C
권선피복재	폴리이미드

표 4 유효전도율(폴리이미드와 공기층)
Table 4 Effective conductivity between air and insulation

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

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 대류열 전달계수(convection heat transfer coefficient; h)이다[5,6].

여기서, 권선의 절연피복재인 폴리이미드와 공기층의 유효열전도율 $k_{insl.}$ 은 2재질의 열전도율과 체적분율을 고려하여 결정하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

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

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

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.

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

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 총합 에너지평형을 적용하여 구할 수 있다.

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

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

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

이상의 과정을 통해 결정된 권선 발생열량 q 와 각 권선의 모델을 1차원으로 등가화하고 q 값과 실험결과를 식 (3)에 적용하여 결정된 권선에 대한 h 는 표 4와 같다. 이상과 같이 결정된 h 와 각 권선의 사양등을 식(2)에 적용하여 $\rho c_p insl.$ 을 $2.43 \times 10^6 \text{ [J/m}^3\text{ }^{\circ}C]$ 로 결정하였다. (이때 $T_i - T_{\infty}$ 는 $0.1^{\circ}C$ 로 고려하였다.)

3.2 열해석 조건

3.1 절에서 결정된 $k_{insl.}$ 와 $\rho c_p insl.$ 의 값을 동일한 조건으로 유한요소 해석 툴인 Flux-2D를 이용하여 정상상태와 과도상태에 대한 열해석을 수행하였다.

열해석 모델은 권선의 면적과 절연재의 면적을 등가화하여 그림 11과 같이 1/2모델로 구성하였으며, 권선부 표면에서의 경계조건은 Neumann Condition과 Convection Surface Condition을 적용하였다. 이상과 같이하여 결정된 모델의 열해석 조건은 표 5와 같다[7,8].

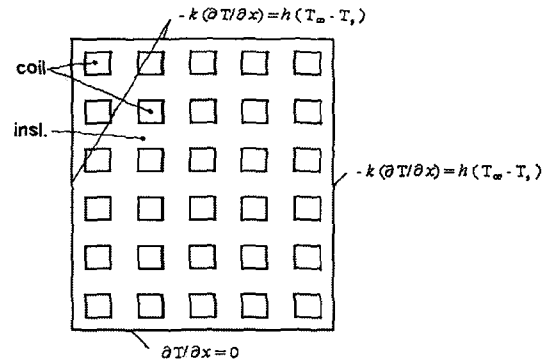


그림 11 2차원 열해석 모델
Fig. 11 2D-thermal FEM model

표 5 열해석 조건
Table 5 The condition of thermal analysis

구분	권선	φ1.2
해석영역		1/2
전류밀도[A/mm ²]		1.5
열원 [W/m ³]		56,232
대류열전달계수 [W/m ² °C]		14
주위온도 [°C]	Shell_1	50
	Shell_2	120
열전도도 [W/m°C]	Coil	387
	Insulation	0.124
	Shell_2	3,500
체적열용량 [J/m ³ °C]	Coil	3.48×10 ⁶
	절연재	2.43×10 ⁶

3.3 정상상태 열해석

각 모델의 주위온도는 실험조건과 동일하게 적용하였으며 표 5와 같은 조건으로 φ가 1.2mm인 폴리이미드 권선 모델에 대하여 열해석을 수행하였다.

그림 12와 13은 열해석 결과로 온도분포를 보면 72°C에서 120°C 사이로 권선의 피복재의 한계 허용온도인 220°C보다 훨씬 작음을 알 수 있다.

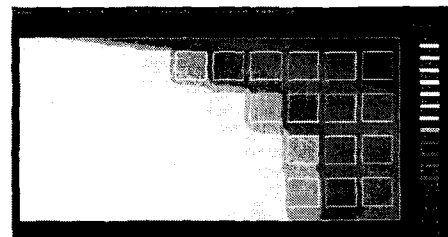


그림 12 온도분포 (1.5 A/mm²)
Fig. 12 FEM result at J=1.5 A/mm²

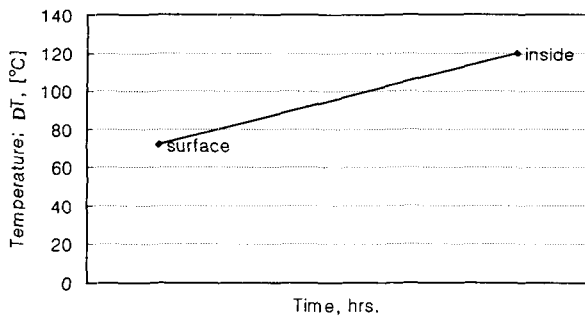


그림 13 여자전류 $1.5 A/mm^2$ 시 온도상승
 Fig. 13 FEM result between inside and outside of winding temperature at $J=1.5 A/mm^2$

3.4 과도상태 온도해석

그림 14는 3.1절 결정된 $\rho C_p insl.$ 의 값을 적용하여 권선부의 여자 전류밀도가 $1.5 [A/mm^2]$ 인 경우의 시간에 따른 권선 중심부의 온도변화와 실험결과를 비교한 그래프로 비교적 잘 일치됨을 알 수 있다.

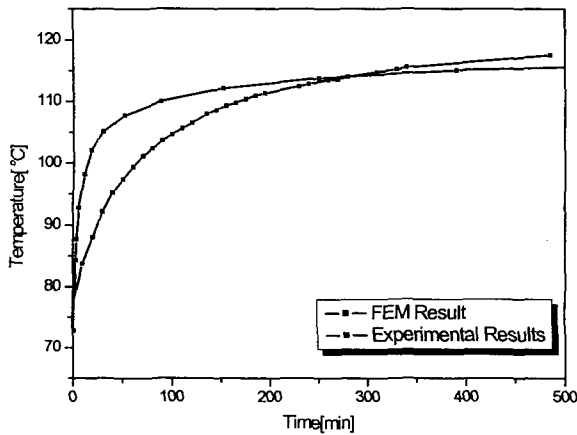


그림 14 시간에 따른 중심온도의 변화 ($1.5 A/mm^2$)
 Fig. 14 Transient FEM results with respect to winding max. temperature at $J= 1.5 A/mm^2$

3. 결 론

일체형원자로 SMART의 볼너트형 제어봉 구동장치에 장착되는 전자석을 설계하였으며 유한요소해석을 통하여 추력특성을 평가하였다. 또한 전자석의 권선부에 대한 열특성을 예측하여 설계 및 제작에 반영하고자 권선의 직경이 $\phi 1.2 [mm]$ 인 폴리아미드 모델에 대하여 실험으로 제시된 권선 복합절연층(폴리아미드-공기층)의 열특성값($k_{insl.}$ 및 $\rho C_p insl.$)을 보수적으로 결정하여 정상상태 및 과도상태에 대한 열해석을 2차원 유한요소법으로 수행하였다.

이에 대한 검증을 위하여 시제품을 제작하여 추력 및 열 특성 시험을 수행하였다.

전류밀도를 변화시키면서 시험값과 해석값을 비교한 결과 초기에는 해석값이 시험값보다 약간 크게 나오지만 전류밀도 $1 A/mm^2$ 이상인 경우 5% 이내에서 잘 일치하였다. 또한 권선부의 온도가 $100^\circ C$ 증가함에 따라 전압이 약 20% 증가하였지만 설계온도 범위내에서는 전자석의 추력에 거의 영향이 없었다.

여자 전류밀도를 $1.5 A/mm^2$ 로 유지하면서 전자석 권선에 대한 과도 열해석 결과 권선 절연 한계 허용온도인 $220^\circ C$ 보다 훨씬 낮은 $72^\circ C$ 에서 $120^\circ C$ 사이의 온도분포를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김지호 외, “볼스크류형 제어봉구동장치 개념설계”, KAERI/TR-1448/99, 1999.12.
- [2] 허 형 외, “제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 전자장 수치해석”, KAERI/TR-1352/99, 1999. 6.
- [3] 구대현, 강도현, 박정우, 김종무, 김종인, 박진석, “일체형원자로 냉각재 순환펌프의 전동기 설계 및 해석”, 98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.
- [4] 허 형 외, “SMART용 제어봉구동장치에 장착되는 잠금장치의 전자기 해석”, '98 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1998
- [5] J.P. Holman, “Heat Transfer” 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1995
- [6] Frank P.Incropera, David P. Dewitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [7] 허 형 외, SMART 제어봉구동장치의 선형펄스모터 열해석”, 99년도 한국원자력학회 춘계학술대회논문집, 1999.
- [8] 허 형 외, “Electromagnetic and Thermal Analysis of Squirrel Cage Canned Induction Motor for SMART Main Coolant Pump”, '99년도 대한전기학회 하계학술대회논문집, 1999

저 자 소 개



허 형(許炯)

1957년 6월 19일생. 1983년 광운공대 전기공학과 졸업. 1996년 충남대학교 전기공학과 석사 졸업. 1996년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-868-8097,

Fax : 042-868-8990

E-mail : hhuh@kaeri.re.kr



김 종 인(金鍾仁)

1955년 3월 7일생. 1979년 인하대 기계공학과 졸업. 1986년 프랑스 ENSM 대학원 기계공학과 졸업(공학). 1986년~현재 한국원자력연구소 기계공학연구부 책임연구원

Tel : 042-868-8646, Fax : 042-868-8990

E-mail : jikim@kaeri.re.kr



김 건 중(金建中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1980년~현재 충남대 전기공학과 정교수

Tel : 042-821-5659, Fax : 042-823-7970

E-mail : kjkim@ee.cnu.ac.kr