'88 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 전자기 및 열해석

Electromagnetic and Thermal Analysis of Electromagnet for SMART Control Element Drive Mechanism

허 형, 김지호,박진석, 김용완, 김종인
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART의 볼너트-스크류형 제어봉구동장치에 장착되는 전자석을 개념설계하고, 관련한 전자기 및 열해석을 수행하였다. 이를 위하여 해석 모델을 개발하고, 이에 대한 기본적인 이론을 정립하였다. 전자석에 추력이 발생하는 설계변수를 도출하고, 추력발생경향을 2, 3차원 유한요소법으로 해석하여 설계 최적치를 계산하였다. 전자석은 원자로 운전중 항상 여자되어 있는 상태이기 때문에 열발생에 의하여 권선의 온도가 절연재의 허용온도를 넘지 않는 것도 중요하기 때문에 폴리이미드 -공기층의 복합으로 이루어져 있는 시제 권선을 대상으로 유한요소 열해석도 병행하였다. 여기서 구한 설계변수들은 추후 전자석의 설계최적화를 위한 입력으로 활용될 것이다.

Abstract

A numerical electromagnetic and 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 electromagnetic analysis of the electromagnet was developed and theoretical bases for the model were established. Design parameters related to thrust force were identified, and the optimum design point was determined by analyzing the trend of the magnetic saturation with finite element method. Also it is important that the temperature of the electomagnet 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 electromagnetic and thermal properties obtained here will be used as input for the optimization analysis of the electromagnet.

1. 서론

일체형원자로 SMART는 기동시 핵반응 열을 이용하고, 무붕산 노심설계의 채택으로 반응도 제어가 제어봉만으로 수행되어야 하므로 미세조정이 가능한 제어봉구동장치가 필요하며, 또한 비상시 노심이 손상되지 않도록 제어봉을 신속하게 노심내로 삽입시키는 비상정지운전 기능을 보유하고 있어야 한다. 특히 비상정지운전시 요구시간 즉, 원자로가 비상정지상황이 발생하여 노심의 손상이 발생되지 않는 시점내에 제어봉이 노심내로 삽입되어야 한다. 비상정지를 유도하는 힘은 자중, 스프링 복원력 혹은 공기의 저장에너지 등을 이용하는 데, 일체형원자로 SMART의 볼너트-스크류형 제어봉구동장치에서는 비상시 제어봉의 삽입속도를 빠르게 하기 위하여 해제스프링(스크램스프링)과 상부압력용기 밑에 고정전자석을 설치하였다. 즉, 정상운전시 항상 압축상태에 있던 해제스프링의 복원력과 고정전자석에의 전류를 차단함으로서 전자석의 자기력으로 결합해 있던 볼너트집합

체가 스크류와 함께 노심설계에서 요구되는 비상삽입거리 만큼 빠른 속도로 낙하하여 노심을 아임계상태로 전환하게 된다[1][2]. 이 중 전자석은 정상운전시 스텝모터의 회전에 의하여 비상삽입길이 만큼 상승하여 접근한 앵커 집합체를 기자력만으로 결합시켜 계속해서 이 상태를 유지하는 역할을 하기 때문에 충분한 추력이 요구된다. 또한, 장시간동안 연속적으로 전자석을 가동시켜야 하기 때문에 권선에서 발생하는 열의 해석도 중요하다.

본 연구에서는 SMART용 볼너트-스크류형 제어봉구동장치의 전자석 개발을 위한 전자기 및 열전도 수치해석을 수행하였다. 전자석에 추력을 발생하는 설계변수를 도출하고, 추력발생경향을 유한요소법으로 해석하여 설계 최적치를 계산하였다.

2. 전자기해석

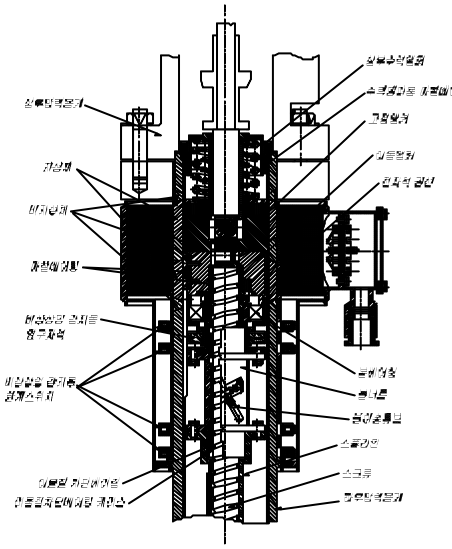

그림 1 전자석, 상부수력댐퍼 및 볼너트-스크류

전자석의 설계는 전체시스템의 일반적인 사양 즉 제어봉 볼너트집합체의 무게, 기하학적인 구조, 외력등의 영향에 따라 전자석의 정격추력, 전자석의 형태등을 결정하고 분석적인 방법으로 전자석의 면적, 코어의 폭, 코일의 형태, 입력전류 등을 계산하며 수치해석적인 방법으로 전자석의 정적 및 동적인 특성을 조사하여 전체 시스템에 맞는 전자석을 설계하게 된다.

전자석의 성능은 전자석 자중에 대한 추력의 비와 단위하중을 들어 올리는 데 소요되는 전력량과의 비로 나타내는 데 전자석의 효율을 향상시키기 위해서 좋은 코어의 재질(포화자속밀도가 높은 것)과 고효율의 코일 재료가 사용되어야 한다.

그림 1에서 전자석의 자속밀도를 $B\ [Wb/m^2]$로 하고 공극공간에서 자속확산이 없다고 가정하면, 공극 내부나 전자석, 고정앵커, 이동앵커내부도 자속밀도는 일정하므로 B이다.

즉, 정상자계에 저축되는 전체에너지 W_H는 다음과 같이 표시된다.[3]

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

$B=\mu_0 H$ 인 관계에서 식(1)은

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

또는

$$W_H = \frac{1}{2}\int_{vol} \frac{B^2}{\mu_0}\, dv \qquad (3)$$

와 같다. 여기서 μ_0는 진공중의 투자율(permeability), $H\,[A/m]$ 는자계의 세기이다.
이 때 식(3)에서 자계에너지의 증가량 dW_H 는

$$dW_H = FdL = \frac{1}{2}\,\frac{B^2}{\mu_0} SdL \qquad (4)$$

이며, S 는 철심의 단면적이다. 따라서

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \qquad (5)$$

이다. 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 식(5)는 전자석에서 발생하는 흡인력으로 설계추력이 결정되면 이 식에 의하여 철심단면적이 결정되고, 이에 따라 공극에서 필요한 자속밀도를 발생하는 데 필요한 기자력 M 을 다음과 같이 결정할 수 있다.[4]

$$M = NI = R_m \Phi = \frac{l}{\mu_0 S}\Phi = \frac{l}{\mu_0 S} BS = \frac{Bl}{\mu_0} = Hl \qquad (6)$$

여기서 R_m $[A \cdot T/Wb]$은 리액턴스(자기저항)이며, l은 전체자로에 대한 공극의 길이, Φ는 자속이다.
또한, 전자석의 윈도우 크기의 결정은 다음 식으로 결정된다.

$$M = S_\omega\, k\, J \qquad (7)$$

여기서 $S_\omega\,[mm^2]$는 윈도우 면적, k 는 점적율, $J\,[A/mm^2]$ 는 전류밀도이다.

가.전자석 2,3 차원 해석모델 [5][6]

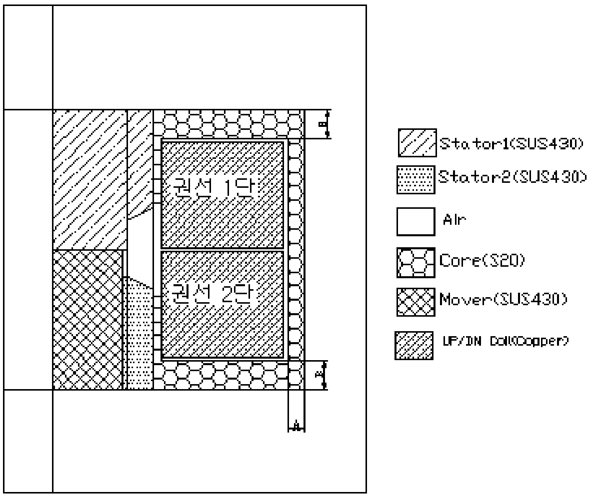

그림 2 전자석의 2차원 전자기 해석 모델

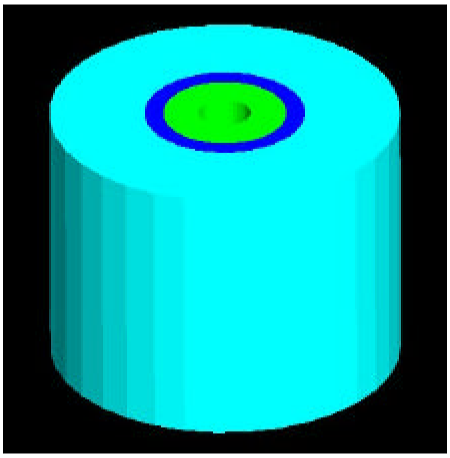

그림 3 전자석의 3차원 전자기 해석 모델

그림 1의 볼너트-스크류형 제어봉구동장치 전자석의 기능상 요구조건과 공간제약 문제등의 설계변수를 고려하면서 설계추력을 구할 수 있는 해석모델을 개발하였다. 그림 2는 전자석 2차원 해

석모델로 3차원 공간문제에 있어 1개의 축방향에 대해 어떤 물리적 상태가 무한히 동일 상태로 유지되는 경우에는 이를 2차원 문제로 흔히 다루고 있기 때문에 전자석에 대한 추력계산은 3차원 형태를 2차원 축대칭 형태로 등가변환한 것이다. 축대칭문제는 좌우 대칭이므로 전체 영역의 반만을 해석하면 되므로 계산시간을 줄일 수 있는 이점이 있다. 그림 3은 등가변환없이 실제 Full-scale 3차원 해석모델로 2차원 해석모델과의 계산오차를 비교하기 위한 것으로 계산시간은 2차원 해석보다 20배 이상으로 많이 소요되었다.

나. 해석모델의 변수

전자장 수치해석용 툴인 Maxwell-2D/3D를 이용하여 다음과 같은 순서로 계산하였다.

① 해석 solver : Magnetostatic

② 해석좌표계 : RZ-plane

③ 해석모델 설정(define model-draw model)

④ materials 설정 -BH Curve 작성, 재료입력

⑤ boundaries/sources 설정 - balloon, current

⑥ executive parameter 설정

⑦ 해석방법(선택사항)설정

⑧ 해석수행

⑨ post-processing

표 1 전자석의 설계치수

번호	항 목		치수
1	가동자 (Mover)	내경	37mm
		외경	88mm
		길이	87mm
2	Stator1	내경	37mm
		외경	115mm
		길이	87mm
3	Stator2	내경	88mm
		외경	174mm
		길이	79mm
4	Core	외경	230mm
		A	6mm
		B	10mm
5	Coil	UP	47x41mm
		DN	47x41mm
6	가동부 총중량[Kgf]		250
7	요구 추력[N]		2500 이상
8	축공극[mm]		0.1이하
9	측면공극[mm]		0.35
10	점적율		0.85

표 1은 분석적인 방법으로 결정된 전자석의 설계치수로 수치해석을 위한 입력으로 사용되었으며 그림 4로 materials 설정에 있어 입력된 자료이다.

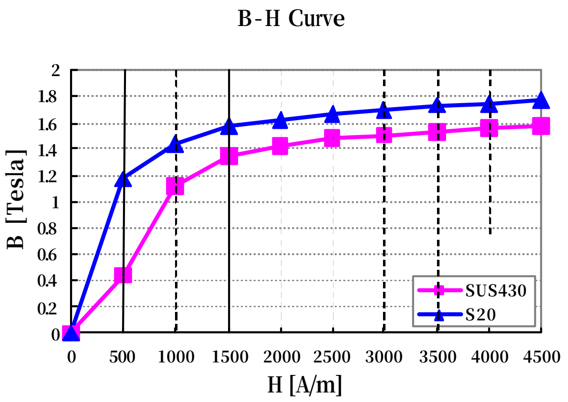

그림 4 SUS430/S20의 B-H 곡선

다. 2차원 모델 전자기해석결과

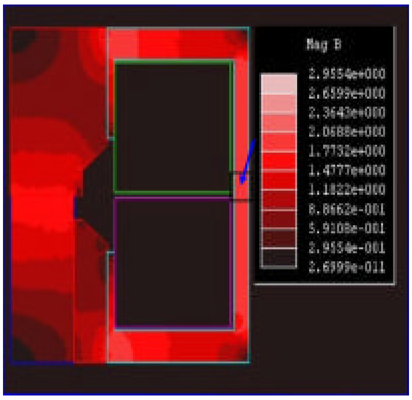

그림 5 전자석의 자속밀도분포
(전류밀도: 1[A/mm^2])

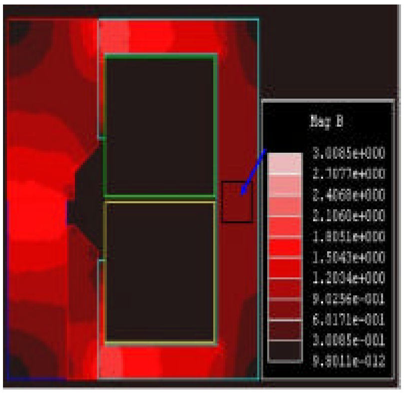

그림 6 전자석의 자속밀도분포
(전류밀도: 1[A/mm^2])

(1)core housing 두께 증가 경우

그림 5는 전자석의 자속밀도분포를 계산한 것으로 core 부분이 입력전류밀도 1 [A/mm^2] 적용시 박스화살표된 지역이 2[T]에서 2.3[T]로 그림 4의 B-H 특성곡선 최대값 이상으로 심하게 포화되는 것을 알 수 있다. 이런 경우에는 많은 자속들이 추력보다는 열손실로 변화되기 때문에 설계를 변경하여야 한다. 따라서 각 부위의 적정 자속밀도를 유지하면서 공간제약조건도 만족하는 최적조건을 찾기 위하여 코어 하우징의 두께를 표시하는 "A"와 "B"를 증가시키면서 추력의 변화를 계산하였다. 우선 그림 2에 표시된 "A"의 두께를 4[mm] 씩 증가시키면서 즉 최외각 반경을 115[mm]에서 127[mm]까지 변화시키면서 계산한 결과는 그림 7과 같다. 그림 6은 "A"를 12[mm]증가시킨 계산결과로 화살표박스지역의 포화정도가 표 2와 같이 현저히 개선됨을 알 수 있으나 추력의 증가는 4[mm] 증가시킨 경우에서만 가장 많이 증가하였다.

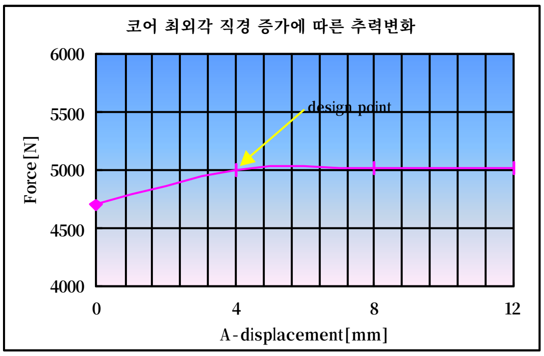

그림 7 전자석 코어 "A"의 두께 증가에 따른 추력변화

반경 / items	코어의 A 두께 변화			
	0	4	8	12
	r115	r118	r123	r127
추력	4700	5006	5016	5018
자속밀도 포화도	2.3	1.8	1.3	1.0

표 2 코어 "A" 증가에 따른 변화

또, 그림 2에 표시된 "B"의 두께를 상하로 2[mm] 씩 증가시키면서 계산한 결과는 그림 7과 같다. 이 계산은 그림 7에서 찾아낸 설계점을 기준으로 계산하였다. 포화정도는 표 3에서와 같이 현저히 개선됨을 알 수 있으나 추력증가에는 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

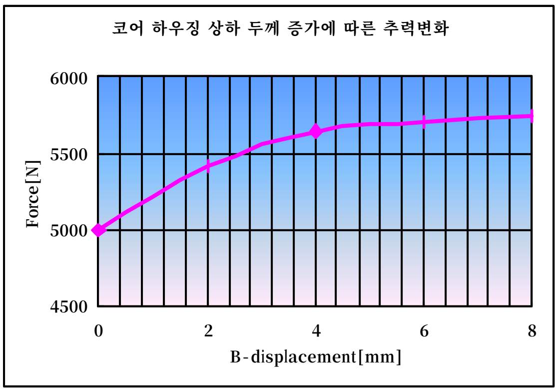

그림 8 전자석 코어 "B"의 두께 증가에 따른 추력변화

번경 / items	코어의 B 두께 변화				
	0	2	4	6	8
	L106	L110	L114	L118	L122
추력	5006	5417	5648	5701	5738
자속밀도 포화도	2.1	1.8	1.6	1.3	1.1

표 3 코어 "B" 증가에 따른 변화

(2)전류밀도별 추력변화

이 계산도 그림 7에서 찾아낸 설계점을 기준으로 계산하였다. 일반적으로 전류밀도가 증가하면 추력도 증가하지만 현재 설계점에서의 포화에 대한 여유도가 충분치 않으므로 많은 부분이 열로 변환될 것으로 사료된다. 현재 설계값인 1 $[A/mm^2]$ 의 전류밀도에서 증가시킬 경우에는 열해석을 통하여 결정하는 것이 바람직하다. 그림 8는 전류밀도를 1 $[A/mm^2]$에서 6 $[A/mm^2]$까지 변화를 시키면서 추력의 변화를 계산한 것으로 증가하는 양상이 둔화된 것을 알 수 있으며 그림 10은 6 $[A/mm^2]$ 의 전류밀도를 입력한 계산결과로 많은 부위가 과포화되어 있음을 알 수 있다.

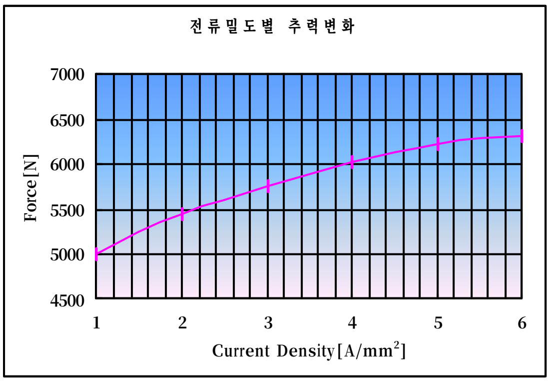

그림 8 전류밀도별 추력변화

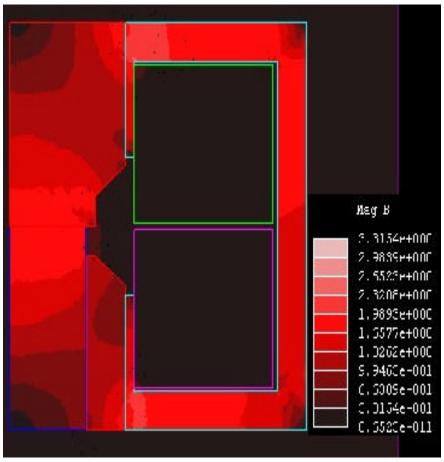

그림 10 전류밀도 6[A/mm2]일 때 자속밀도분포

라. 3차원 모델 전자기해석결과

(1)전자석 권선의 단면적을 증가시키는 경우

전자석의 권선의 단면적을 증가시키기 위하여 공간제약조건상 축방향 길이로만 증가시켜 추력의 변화를 계산하였다. 즉 축방향 길이를 상하로 5[mm]씩 20[mm]까지 증가시켜 보았다. 그림 11은 그림 7에서 결정된 모델에 대하여 전류밀도는 1 $[A/mm^2]$를 입력하고 전자석의 축방향 상하길이를 증가시키면서 추력변화를 계산한 결과로 전자석의 상하길이 증가가 추력변화에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그리고 2차원과 3차원 전자기해석결과의 오차는 5% 이내로 2차원 모델링이 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 그림 12는 동 모델에 대한 3차원 해석결과로 자속밀도분포를 나타내고 있다.

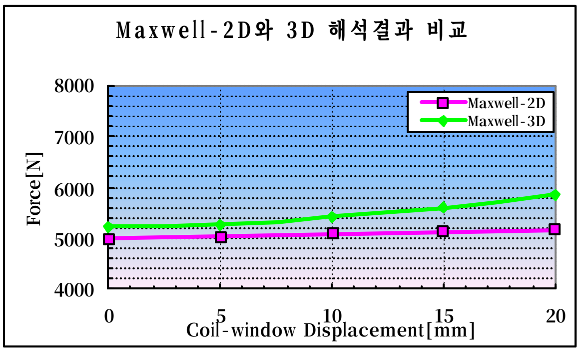

그림 11 2차원 과 3차원 전자기해석 결과

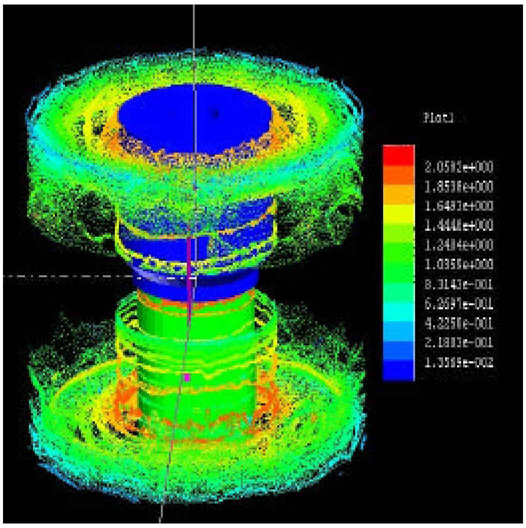

그림 12 3차원 해석결과(자속밀도분포)

3. 열해석 [7][8][9]

가. 열전달 기본식

열전도에 대한 비율방정식인 Fourier 법칙에 따라서 온도분포 $T(x)$를 가지는 1차원 평면벽에 대한 비율방정식은 식 (8)과 같다.

$$q_x'' = -k\frac{dT}{dx} \qquad (8)$$

여기서, k는 열전도도(thermal conductivity, W/m℃)이며, 대류열전달에 대한 적절한 비율방정식은 식 (9)로 표현된다.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \qquad (9)$$

즉, 대류 열유속(heat flux) q''는 표면온도 T_s와 유체온도 T_∞와의 차이에 비례한다. 이 식을 Newton의 냉각법칙이라 하고 비례상수 h는 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient, W/m^2℃)라고 한다. 식 (8)의 1차원 Fourier 법칙은 3차원 직교좌표계의 일반적인 열방정식 (10)과 같다. 정상상태의 조건에서는 에너지 저장량의 변화가 없으므로 식 (10)의 우변은 0이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \qquad (10)$$

나. 정상상태 열해석 [10][11]

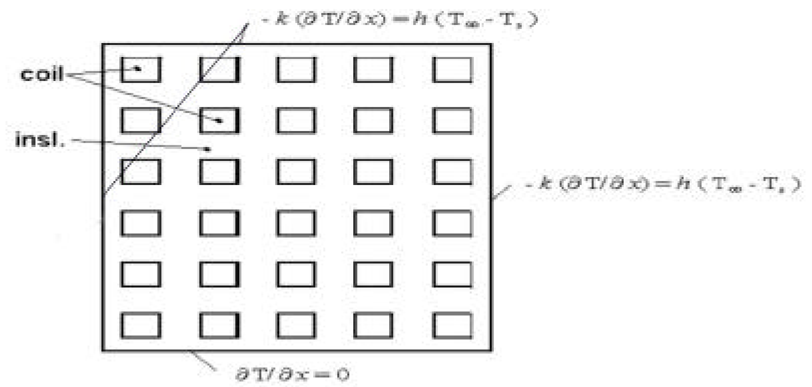

그림 13 열해석모델

선형컴프레서의 권선에 대한 실험결과를 통하여 검증된 $k_{insl.}$과 $\rho c_{p\,insl.}$의 값을 같은 환경의 전자석에 적용하여 권선부의 열특성 해석을 수행하였다. 열해석모델은 권선의 면적과 $insl.$의 면적을 등가화하여 그림13과 같이 1/2모델로 구성하였으며 권선부 표면에서의 경계조건은 Neumann Condition과 Convection Surface Condition을 적용하였다. 열원은 $\dot{q} = J^2 \cdot \rho_{coil}\,[W/m^3]$ 에 의해 계산된 값이다. 이상과 같이 구성된 해석모델의 열해석을 수행하기 위한 조건은 표 4와 같다.

각 모델의 주위온도는 실험조건과 동일하게 적용하였으며 표 4와 같은 조건으로 열해석을 수행하여 ϕ가 1.2mm, k=0.7인 폴리이미드 권선 모델에 대한 열특성을 파악하였다.

그림 14는 열해석 결과로 온도분포를 보면 112 ℃ 에서 88℃ 사이로 권선의 피복제의 허용온도 한계인 220 ℃보다 훨씬 작음을 알 수 있다. 이 해석결과는 기초 열해석으로서 권선에 대한 열영향을 1차적으로 보수적인 조건들을 이용하여 계산한 것으로 추후 열특성값들에 대한 보다 정당적인 실험 및 비교 작업이 필요하다.

표 4 열해석 조건

구 분 ＼ 권선		φ 1.2
해석영역		1/2
전류밀도[A/mm^2]		1
열 원 [kW/m^3]		251
대류열전달계수 [W/m^2℃]		14
주위온도 [℃]	Shell_1	50
	Shell_2	120
열전도도 [W/m℃]	Coil	387
	Insulation	0.124
	Shell_1	0.124
	Shell_2	200
체적열용량 [J/m^3℃]	Coil	3.48×10^6
	insl.	2.43×10^6

그림 14 전류밀도 1[A/mm2]인 경우 온도분포

4. 결 론

일체형원자로 SMART의 제어봉구동장치에 장착되는 전자석의 설계와 관련하여 전자기적 해석을 하였다. 이 해석을 위하여 전자석을 2차원 등가모델과 3차원 모델로 기능상 요구조건과 공간제약 조건내에서 이용 가능한 각 설계변수들에 대하여 추력발생특성을 해석하였다. 해석결과 설계요구추력을 만족시켰으며 일부 자속밀도가 과포화되는 부위는 자로면적을 조정하여 설계에 반영시켰다. 또한,전자석 권선부에 대한 열특성을 예측하여 설계 및 제작에 반영하고자 권선의 직경이 φ 1.2[mm]인 폴리이미드 모델에 대하여 열해석을 하였다. 선형컴스포머의 실험결과로 제시된 권선복합절연층(폴리이미드-공기층)의 열 특성값을 토대로 정상상태의 열해석을 2차원 유한요소법으로 수행하였다. 해석결과 권선피복재 허용 한계온도인 220℃보다 훨씬 낮은 112 ℃ 에서 88℃ 사이의 온도분포를 나타내었다. 이 해석결과는 기초 열해석으로서 권선에 대한 열영향을 1차적으로 보수적인 조건들을 이용하여 계산한 것으로 추후 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 1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1999/99, 1999.3

[2] 장문희 외, "테마기획-중소형 일체형원자로 SMART 개발", 대한기계학회 기계저널, Vol.39, No. 4, 1999. 4.

[3] Takashi Kenjo, "Stepping Motors, and Their Microprocessor Controls, 2nd ed., Oxford Univ. Press, 1994

[4] 장기찬 외, "한국형 원자로의 제어봉 구동용 선형전동기 설계에 관한 연구", 99년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999.

[5] 구대현, 강도현, 박정우, 김종무, 김종인, 박진석, "일체형원자로 냉각재 순환펌프의 전동기 설계 및 해석", 99년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999.

[6] 허 형 외, "SMART용 제어봉구동장치에 장착되는 잠금장치의 전자기 해석", '99 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1999

[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

[9] 방덕제 외, "A Study on Temperature Rise of Linear Pulse Motor of CEDM", 99년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999

[10] J.P. Holman, "Heat Transfer"' 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1995

[11] Frank P.Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.