

**SMART 제어용구동장치의 선형펄스모터 열해석**

**Thermal Analysis of Linear Pulse Motor for SMART Control Element Drive Mechanism**

허 형, 김지호, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

장기산, 강도연

한국전기연구소

경남 창원시 성주동 28-1

**요 약**

제어용구동장치에 사용되는 선형펄스모터는 원자로 운전중 항상 여자되어 있는 상태이기 때문에 열발생에 의하여 권선의 온도가 절연체의 허용온도를 넘지 않는 것이 중요하다. 본 연구에서는 직경이 다른 3개의 코일선으로도 선형펄스모터의 권선을 제작하여 여자전류를 변화시키면서 권선 내부의 온도를 측정하였다. 코일선 절연체는 테프론-유리섬유-공기층의 복합으로도 이루어져 있기 때문에 열적 물성치를 실험적으로 결정하기는 쉽지 않다. 따라서, 본 연구에서는 시제 권선을 대상으로 유한요소 열해석 모델을 개발하고 해석결과와 실험치를 비교하는 방법으로도 복합 절연체의 정준 열적 물성치를 구하였다. 여기서 구한 절연체의 열적 물성치는 추후 모터의 설계최적화를 위한 입력으로도 활용될 것이다.

**Abstract**

It is important that the temperature of the motor windings be maintained within the allowable limit of the insulation, since the linear pulse motor of CEDM is always supplied with current during the reactor operation. In this study three motor windings were fabricated with three different diameters of coil wires, and the temperatures inside the windings were measured with different current values. As the insulation of the windings is composed of teflon, glass fiber, and air, it is not an easy task to determine experimentally the thermal properties of the complex insulation. In this study, the thermal properties of the insulation were obtained by comparing the results of finite element thermal analyses and those of experiment. The thermal properties obtained here will be used as input for the optimization analysis of the motor.

**1. 서론**

일체형원자로 SMART의 제어용구동장치(Control Element Drive Mechanism; CEDM)는 기계적인 구동 부위가 없이 선형펄스모터(Linear Pulse Motor; LPM)를 이용하여 전자력만으로 제어용을 구동한다. 설계온도는 350°C, 설계압력은 17.0 MPa이고, 정상운전시 외부환경은 매질은 공기, 온도는 50°C 까지, 압력은 대기압에서 400Pa까지, 습도는 88%까지이다. 사고시 외부환경은 매질은 증기 및 증기/물 혼합형태, 온도는 30분동안은 220°C 근처(단기영향)이고, 5시간동안은 100°C 근처(장기영향)이며, 압력은 20분동안 3.0MPa까지 가능(단기영향)하고, 습도는 100%까지 견딜 수 있도록 설계된다[1][2][3]. 이러한 운전조건내에서 운전중에 모터의 권선에서 발생하는 저항열 때문에 온도가

상승하게 되며 이도 인하여 권선의 접연피복이 열화되어 모터가 손상될 수 있다. 권선 직경과 점적을, 접연피복의 제질, 여자전류 등 권선의 사양에 따라 온도특성은 다양하게 변화되므로 선형점 스포터를 비롯한 전기기기 권선부의 온도특성을 예측하여 권선의 설계 및 제작이 이루어져야 한다. 권선부의 온도특성은 기기의 제작·운전에 앞서 열해석을 통해 예측할 수 있으며 이때 권선부를 구성하고 있는 각각의 제질에 대한 열적 특성이 정확하게 고려되어야 한다. 그러나 각 제질에 대한 열적 특성을 파악하고 있더라도 접연층과 용기층이 차지하는 편적 등을 정확히 알 수 없기 때문에 권선부의 열해석이 어려움이 따른다. 하지만 teflon-glass fiber-용기층의 세 제질을 한 제질도 고려하고 이 때의 열특성을 가정하면 열해석을 수행할 수 있으나 신뢰성 있는 열적 특성값을 가정하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서, 본 연구에서는 시제 권선을 대상으로 유한요소 열해석 모델을 개발하고 해석결과와 실험치를 비교하는 방법으로 복합 접연체의 평균 열적 물성치를 구하였다.

## 2. 본론

### 가. 실험용 권선 제작

#### (1) 접연체

LPM에 사용될 접연체는 내열성, 우수한 접연성, 구조재로서의 강도 특성, film가용성, 화학안정성 및 정밀가용성등과 같은 특성이 요구된다. 현재 전기기기의 접연체로 사용되는 접연체를 표 1과 같다. CBN은 내부의 냉각수의 온도가 최대 약 180℃ 정도이므로 표 1의 220℃급 이상의 접연내역을 가진 접연체를 사용해야 한다. 특히 요구된 점적률도 고려하면 가장 적합한 접연피복은 polyimide이다.

표 1. 모터용 접연체의 내열특성

허용온도 [℃]	130	155	180	220	300	400
접연체 종류	-polyvinyl-ester -epoxy -phenol	-polyamide -NE epoxy -NE phenol	-silicone -polyimide -polyamide (Novek)	-teflon -silicone -polyimide (kapton)	-teflon -silicone	-teflon

#### 나. 권선 설계

LPM용 권선은 표 1에 나열된 220℃급 이상의 접연체로 피복된 동선으로 설계된 750 μm<sup>2</sup>의 권선상에 가능한 많은 권선수가 나오도록 제작하였다. 제작된 권선의 제원은 표 2와 같다

표 2. 각 권선의 제원

접연체 종류	허용온도 [℃]	코일직경 [mm]	권선수 [회]	점적율 <sup>1)</sup> [%]	전류밀도 <sup>2)</sup> [A/mm <sup>2</sup> ]
glass fiber + teflon	400	0.7	435	22	6.1
	400	1.0	285	31	4.3
	400	1.2	265	40	3.3
polyimide	220	1.0	550	58	2.3

<sup>1)</sup> 권선상 750[μm<sup>2</sup>]  
<sup>2)</sup> 2,000[AT]일 때의 평균전류밀도

다. 권선 온도 해석

(1) 열전달 기본식

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

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

여기서,  $k$ 는 열전도도(thermal conductivity,  $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ )이며, 대류열전달에 대한 적절한 비유방정식은 식 (2)도 표현된다.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \tag{2}$$

즉, 대류 열유속(heat flux)  $q''$ 는 표면온도  $T_s$ 와 유체온도  $T_\infty$ 와의 차이에 비례한다. 이 식을 Newton의 냉각법칙이라 하고 비례상수  $h$ 는 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient,  $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ )라고 한다.

식 (1)의 1차원 Fourier 법칙은 3차원 직교좌표계의 일반적인 열방정식 (3)과 같다. 정상상태의 조건에서는 에너지 저장량의 변화가 없으므로 식 (3)의 우변은 0이 된다[5][16].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3}$$

(2) 권선실험모델의 해석 및 실험

LPM 권선부의 열특성실험을 위하여 제작된 모델은 동선의 직경이 0.7mm, 1.0mm, 1.2mm도 3종이며, 권선부는 그림 1과 같다. 동선은 절연체도 피복되어 있으며 권선부의 단면 개략도는 그림 1(a)와 같다. 그리고 표 3은 각 권선부에 대한 사양을 나타낸다.

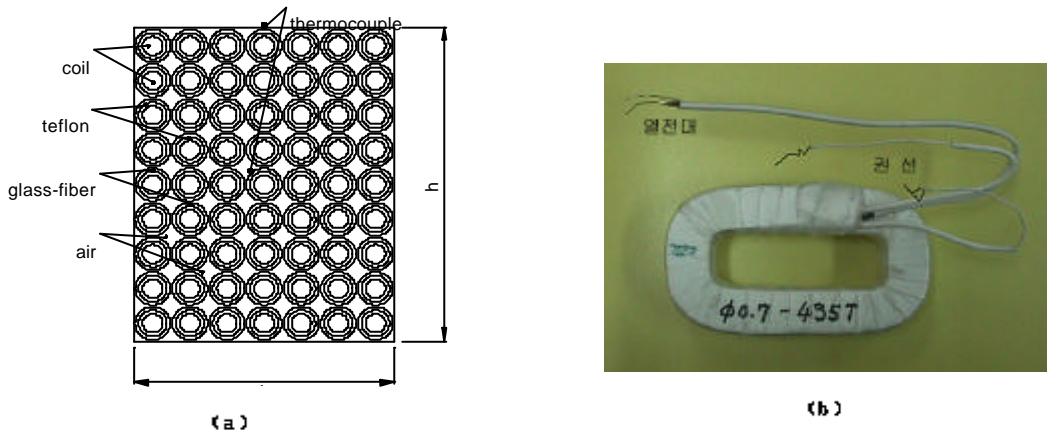


그림 1. 권선부 단면의 개략도 및 제작품

표 3. 권선부 사양

구분	φ0.7 model	φ1.0 model	φ1.2 model
동선 직경[mm]	0.7	1.0	1.2
Turn수	435	286	266
b [mm]	25	23	25
h [mm]	30	30	30

동선은 teflon과 glass fiber도 이중피복되어 있으며 코일사이에는 미세한 공기층이 존재한다.

점적율은  $\phi$ 가 1.2mm인 경우  $k=0.4$ 도 최대이며,  $\phi$ 가 1.0mm인 경우는  $k=0.34$ ,  $\phi$ 가 0.7mm인 경우는  $k=0.23$ 도 나타나 코일의 직경이 클 수록 점적율이 크다.

(3) 열특성 실험

각 모델의 여자전류의 변화에 따른 열특성을 파악하기 위해 750[AT]과 1,000[AT]의 전류도 각각 여자시켜 실험을 하였다. 권선의 중심부와 표면에 열전대(thermocouple)를 설치하여 권선의 온도를 측정하였으며 실험은 권선 중심부와 표면의 온도가 포화되어 정상상태에 도달하기까지, 즉 정상상태가 될 때까지 수행하였다. 본 실험을 통해 권선이 정상상태에 도달할 때까지 소요되는 시간, 권선 중심부와 표면의 온도변화경향 및 포화온도를 파악하였다. 열특성 실험조건은 표 4와 같으며 표 5는 각 권선의 온도가 포화되기까지 소요된 시간을 나타낸다.

표 4. 실험조건

구분	$\phi 0.7$ model		$\phi 1.0$ model		$\phi 1.2$ model	
	750 (1.72)	1,000 (2.30)	750 (2.53)	1,000 (3.38)	750 (2.82)	1,000 (3.76)
전류밀도 [A/mm <sup>2</sup> ]	4.48	5.87	3.23	4.30	2.48	3.32
주위온도 [℃]	27.6	26.4	26.2	26.2	26.3	26.5

표 5. 권선온도 포화시간

구분	$\phi 0.7$ model	$\phi 1.0$ model	$\phi 1.2$ model
750AT	1시간 40분	2시간	1시간 10분
1,000AT	1시간 47분	1시간 40분	1시간 23분

그림 2와 3은 코일이  $\phi 0.7$ mm와  $\phi 1.0$ mm인 경우에 대한 시간변화에 따른 권선의 중심부와 표면의 온도변화의 경향을 측정한 것이다. 각 권선부의 여자전류에 따른 포화온도는 표 5와 같다. 각 모델 중에서  $\phi 0.7$ mm(435turn) model의 온도분포가 가장 높았으며,  $\phi 1.2$ mm(265turn) model의 온도분포가 가장 낮았다.

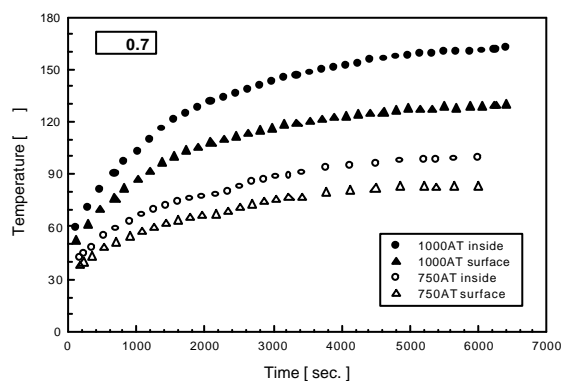


그림 2.  $\phi 0.7$  model의 시간에 따른 권선 중심부와 표면의 온도변화

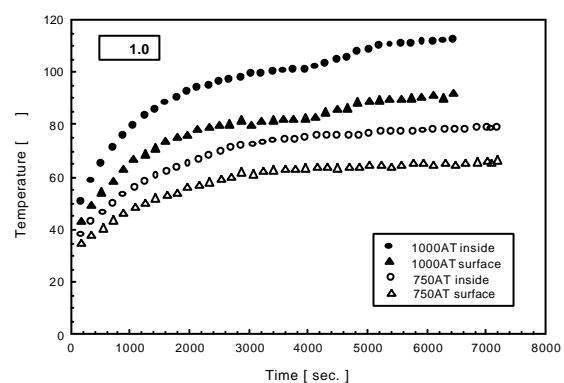


그림 3.  $\phi 1.0$  model의 시간에 따른 권선 중심부와 표면의 온도변화

표 5. 권선의 포화온도

구분	φ0.7 model		φ1.0 model		φ1.2 model	
전류 [AT] ([A])	750 (1.72)	1,000 (2.30)	750 (2.53)	1,000 (3.38)	750 (2.82)	1,000 (3.76)
표면온도 [°C]	82.6	128.4	66.2	81.5	54.3	71.5
중심온도 [°C]	89.3	162.0	78.6	112.5	60.7	86.5

이상의 실험결과를 이용하여 teflon-glass fiber-용기층으로 된 세제집을 한계집도 고려하여 열특성을 가정할 수 있다. 권선부에서의 열전달은 권선으로부터 권선부 외표면으로의 전도열전달, 권선 외표면으로부터 주위도의 대류열전달이므로 열해석에 요구되는 열특성은 열전도도(thermal conductivity;  $k$ )와 체적열용량(volumetric heat capacity;  $\rho c_p$ ) 및 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient;  $h$ )이다. 체적열용량은 열에너지를 저장하는 물질의 능력을 의미하며 비정상상태(과도상태)에 대한 열해석을 수행할 때 요구되는 열특성이다. 따라서 동선 접연피복재와 코일 사이의 용기층을 한계집도 고려한 경우(이하  $insl$ )의 열전도도( $k_{insl}$ )와 체적열용량이 결정되어야 하며 권선부 표면에서의 대류열전달계수가 결정되어야 한다.

권선을 제외한 부분의 열전도도  $k_{insl}$ 은 권선의 직경, 점적을 그리고 접연피복의 두께를 포함한 권선의 직경 등을 고려하여 식 (4)와 같이 결정할 수 있으며 φ1.2mm(265turn) model을 대상으로 하였다.

$$k_{insl} = \frac{(k_{air} \frac{A_{air}}{A_{insl}}) + (k_{teflon} \frac{A_{teflon}}{A_{insl}}) + (k_{g.f.} \frac{A_{g.f.}}{A_{insl}})}{3} \quad [W/m^{\circ}C] \quad (4)$$

여기서,  $k_{air}$ : 용기의 열전도도 [ $W/m^{\circ}C$ ],  $A_{air}$ : 권선부 단면에서 용기층이 차지하는 면적 [ $m^2$ ],  $A_{insl}$ : 권선부 단면에서 권선을 제외한 면적 [ $m^2$ ],  $k_{teflon}$ : teflon의 열전도도 [ $W/m^{\circ}C$ ],  $A_{teflon}$ : 권선부 단면에서 teflon이 차지하는 면적 [ $m^2$ ],  $k_{g.f.}$ : glass fiber의 열전도도 [ $W/m^{\circ}C$ ],  $A_{g.f.}$ : 권선부 단면에서 glass fiber가 차지하는 면적 [ $m^2$ ]이다. 식 (4)도 결정된  $insl$ 의 열전도도  $k_{insl}$ 은 0.1376 [ $W/m^{\circ}C$ ]이다. 체적열용량  $\rho c_p$ 은 다음 식 (5)를 사용하여 결정할 수 있다.

$$\frac{\rho c_p insl V_{insl}}{h A_s} \ln \frac{T_f - T_{\infty}}{T - T_{\infty}} = t \quad [sec] \quad (5)$$

여기서,  $V_{insl}$ : 권선부 단면에서 권선을 제외한 부분의 체적 [ $m^3$ ],  $A_s$ : 권선부 외표면적 [ $m^2$ ],  $T_f$ : 권선부 초기온도 [°C],  $T_{\infty}$ : 권선부 주위온도 [°C],  $T$ : 권선부 최종온도 [°C],  $t$ :  $insl$ 이  $T$ 온도에 이드는데 소요되는 시간 [sec]이다. 식 (5)를 통해 알 수 있듯이  $\rho c_p$ 을 결정하기 위해서는 대류열전달계수  $h$ 가 우선적으로 결정되어야 하며 이는 총합에너지정형을 적용하여 구할 수 있다. 즉, 앞서 언급한 식 (1)과 같이 권선에서 발생한 열량은 권선부 외표면에서 대류에 의해 방출되는 열량과 같으며 이를 다시 나타내면 식 (6)과 같다.

$$q = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad [W] \quad (6)$$

권선에서 발생한 열량  $q$ 는 단위체적당 발생열량인  $\dot{q}$ 와 권선의 체적  $V_{coil}$ 의 곱으로도 이때  $T_s$ 는 권선부의 외표면 온도이다.  $\dot{q}$ 는 권선의 전류밀도  $J$ 와 저항률  $\rho_{coil}$ 의 함수도 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\dot{q} = J^2 \cdot \rho_{coil} \quad [W/m^3] \quad (7)$$

그리고  $V_{coil}$ 은 권선부의 길이  $L$ 과 권선의 단면적  $A_{coil}$ 의 곱이며, 이때  $L=90mm$ 도 고려하였다. 이상의 과정을 통해 결정된 권선발생열량  $q$ 는 표 6과 같다.

표 6. 권선의 사양에 따른 발생열량

전 류	$q$ [W]		
	$\varnothing 0.7$ model	$\varnothing 1.0$ model	$\varnothing 1.2$ model
750AT (1.7241A)	6.878	4.854	3.828
1000AT (2.2888A)	12.231	8.807	6.806

각 권선의 모델을 1차원으로 등가화하고  $q$ 값과 실험결과를 식 (6)에 적용하여 각 권선에 대한  $k$ 를 결정하였으며 그 결과는 표 7과 같다. 그 결과를 살펴보면 각 모델마다  $k$ 값이 약간씩 차이를 보이는데 이것은 실험실 주위환경의 영향인 것으로 판단된다. 그리고 권선의 사양에 따라 발생 열량이 달라 권선부 외표면의 온도가 달라지게 되며 자연대류의 효과도 변하게 되므로 권선의 온도도 대류열전달계수  $k$ 에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 결정된  $k$ 와 실험을 통해 파악된 권선부의 온도, 그리고 각 권선의 사양 등을 식 (4)에 적용하여  $\rho C_p k_{ind}$ 을  $2.43 \times 10^6$  [ $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ]로 결정하였다. (이때  $T_f - T_\infty$ 는  $0.1^\circ C$ 도 고려하였다.)

표 7. 대류열전달계수

전 류	$k$ [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]		
	$\varnothing 0.7$ model	$\varnothing 1.0$ model	$\varnothing 1.2$ model
750AT (1.7241A)	13.4	13.88	14.3
1000AT (2.2888A)	12.77	15.3	16.2

(4) 열해석

(가) 정상상태 열해석

이상과 같이 실험결과를 통해 결정된  $k_{ind}$ 와  $\rho C_p k_{ind}$ 의 값을 적용하여 권선부의 열특성 해석을 수행한 후 해석결과와 실험결과를 비교·검토하여 결정된  $k_{ind}$ 와  $\rho C_p k_{ind}$ 에 대한 타당성을 검증하였다. 열해석모델은 권선의 면적과  $z_{ind}$ 의 면적을 등가화하여 그림 4와 같이 1/4모델도 구성하였으며 권선부 표면에서의 경계조건은 그림 4에 나타난 바와 같이 Neumann Condition과 Convection Surface Condition을 적용하였다. 이상과 같이 구성된 해석모델의 열해석을 수행하기 위한 조건은 표 8과 같다. 열원은 식 (7)에 의해 계산된 값이며, 대류열전달계수  $k$ ,  $z_{ind}$ 의 열전도도  $k_{ind}$ , 그리고  $z_{ind}$ 의 체적열용량  $\rho C_p k_{ind}$ 는 실험결과를 통해 결정된 값이다. 각 모델의 주위온도는 실험조건과 동일하게 적용하였으며 권선의 절연계질에 따른 정상상태에서의 열특성을 비교하기 위하여 teflon과 glass fiber의 열전도도, 이 두 계질의 열전도도 평균치인  $k=0.8$  [ $W/m \cdot ^\circ C$ ], 그리고  $k_{ind}$ 를 적용하여 열해석을 수행하였다.  $k_{0.1515}$ 는 권선 각 모델의 실험결과와 온도분포의 오차가 가장 작은 열전도도를 해석을 통해 결정한 값이다.

이상과 같은 조건으로도 열해석을 수행하여 권선 각 모델에 대한 열특성을 파악하였으며 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 먼저  $z_{ind}$ 의 열전도도를  $k_{0.1515}$ 도 고려하여 해석을 수행한 경우의 권선부의 온도분포는 그림 5~10과 같다. 온도분포는 실험결과와 마찬가지로 여자전류가 1,000[AT]인  $\varnothing 0.7$  model이 가장 높게 나타났으며 여자전류가 750[AT]인  $\varnothing 1.2$  model이 가장 낮게 나타났다.

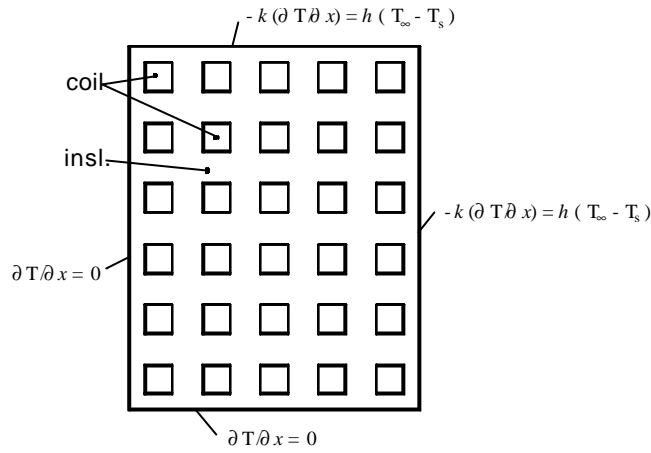


그림 4. 열해석모델

표 B. 권선의 열해석조건

구분	∅0.7 model		∅1.0 model		∅1.2 model	
해석영역	1/4		1/4		1/4	
전류 [ AT ]	750	1000	750	1000	750	1000
열원 [ kW/m <sup>2</sup> ]	457	812	237	421	141	251
대류열전달계수 [ W/m <sup>2</sup> °C ]	13.4	12.77	13.88	15.3	14.3	16.2
주위온도 [ °C ]	27.6	26.4	26.2	26.2	26.3	26.5
열전도도 [ W/m°C ]	Coil	387				
	Teflon	0.2				
	G. fiber	1.4				
	k <sub>0.8</sub>	0.8				
	k <sub>insl.</sub>	0.1376				
체적열용량 [ J/m <sup>3</sup> °C ]	Coil	3.48 × 10 <sup>8</sup>				
	insl.	2.43 × 10 <sup>8</sup>				

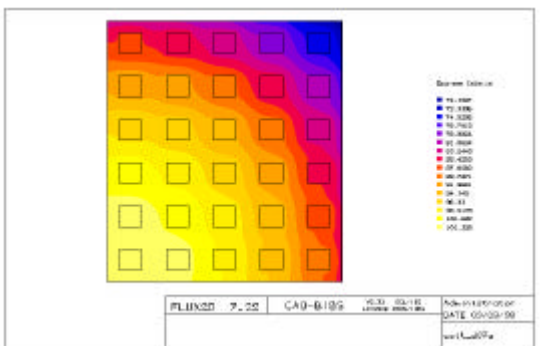


그림 5. ∅0.7 model의 여자전류가 750[AT]인 경우의 온도분포

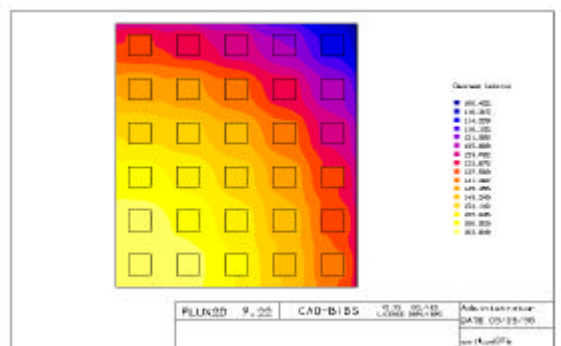


그림 6. ∅0.7 model의 여자전류가 1000[AT]인 경우의 온도분포

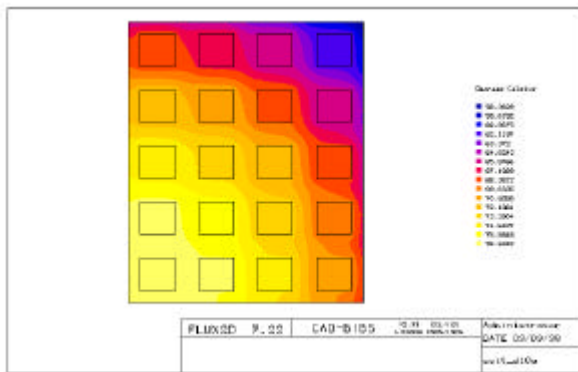


그림 7.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 750[AT]인 경우의 온도분포

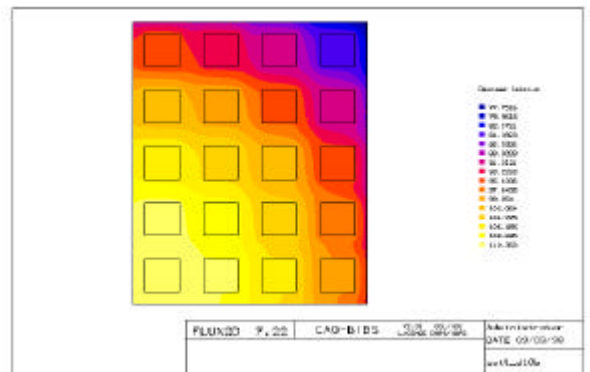


그림 8.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 1000[AT]인 경우의 온도분포

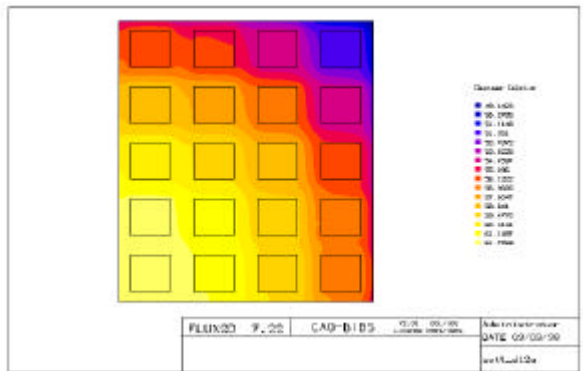


그림 9.  $\phi 1.2$  model의 여자전류가 750[AT]인 경우의 온도분포

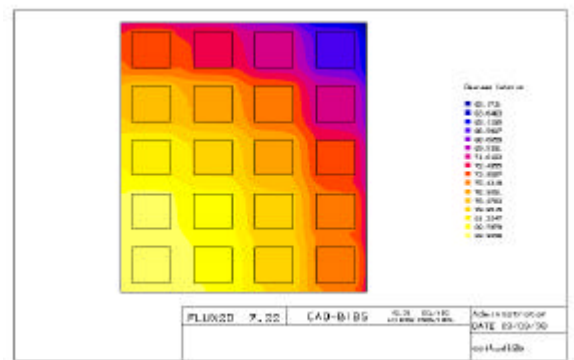


그림 10.  $\phi 1.2$  model의 여자전류가 1000[AT]인 경우의 온도분포

model별  $zms$ 의 제직변화에 따른 권선 중심부와 표면에서의 온도상승을 해석하고 실험결과와 비교하여 그림 11에서 그림 15까지에 나타내었다. 실험을 통해 파악된 권선부 표면의 온도는 그림 1에 명시한 지점에서 측정된 온도이므로 해석결과에서는 해석모델 좌측상단 모서리의 온도를 권선의 표면온도도 고려하였다. 여자전류별 온도상승은 해석결과와 실험결과 모두  $\phi 0.7$  model이 가장 크게 나타났고,  $\phi 1.2$  model이 가장 작게 나타났다. 이와 같이 권선의 직경이 클수록 온도상승이 작은 것은 앞서 언급한 바와 같이 권선의 점적율이 커져  $zms$ 의 전도열저항이 작아지기 때문이며 각 모델의 온도상승에 대한 해석결과와 실험결과를 요약하여 표 8에 나타내었다.

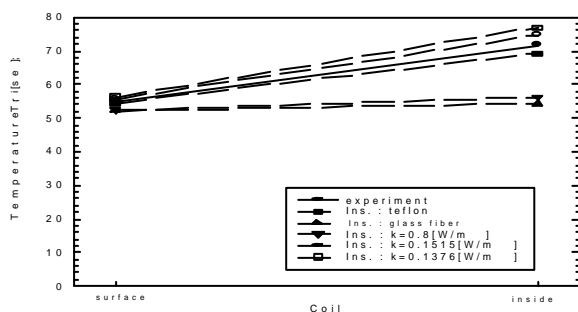


그림 11.  $\phi 0.7$  model의 여자전류가 750[AT]인 경우의 온도상승

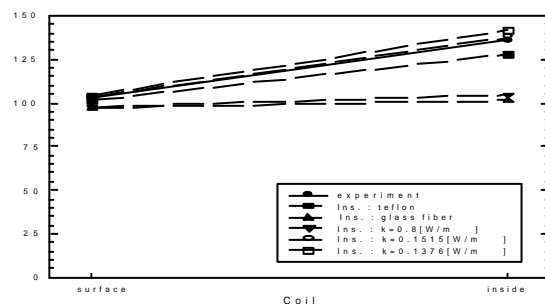


그림 12.  $\phi 0.7$  model의 여자전류가 1000[AT]인 경우의 온도상승



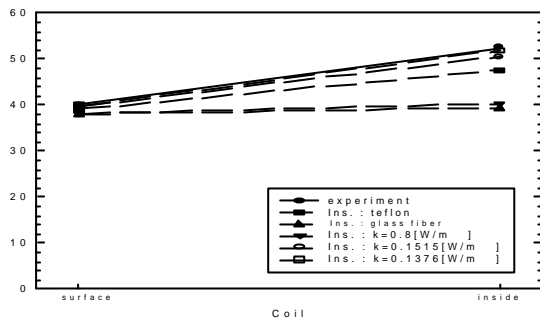


그림 13.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 750[AT]인 경우의 온도상승

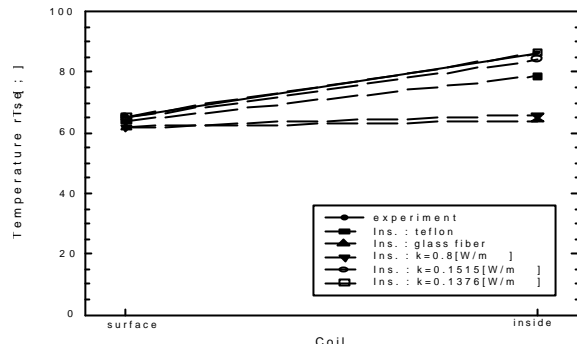


그림 14.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 1000[AT]인 경우의 온도상승

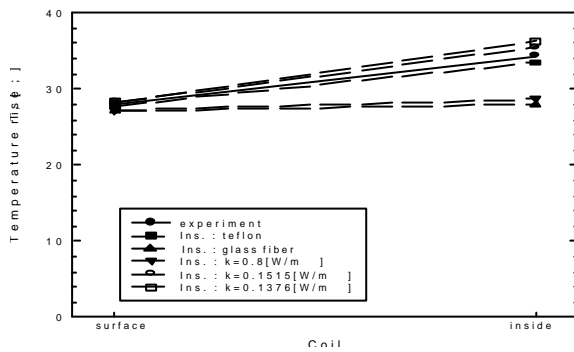


그림 15.  $\phi 1.2$  model의 여자전류가 750[AT]인 경우의 온도상승

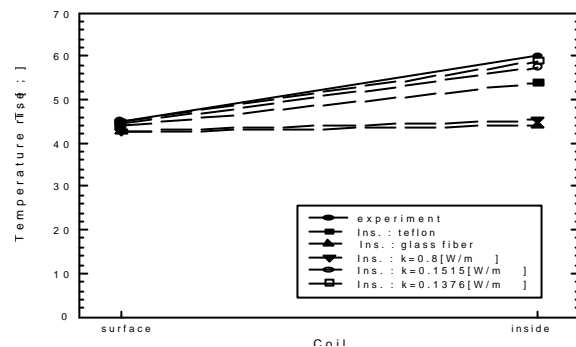


그림 16.  $\phi 1.2$  model의 여자전류가 1000[AT]인 경우의 온도상승

표 B. 절연재의 종류에 따른 권선의 온도상승

구분			$\phi 0.7$ model		$\phi 1.0$ model		$\phi 1.2$ model		오차 [%]
			750AT	1000AT	750AT	1000AT	750AT	1000AT	
온 도 상 승 [ $^{\circ}$ C]	실험	표면	55.0	103.0	40.0	65.3	28.0	45.0	-
		중심	71.7	135.6	52.4	86.3	34.4	60.0	
	teflon ( $k=0.2$ )	표면	54.5	101.4	39.1	63.8	27.8	43.9	-10
		중심	69.3	127.7	47.6	78.8	33.5	53.8	
	glass fiber ( $k=1.4$ )	표면	52.1	97.2	38.1	61.8	27.1	42.6	-27
		중심	54.4	101.3	39.4	64.1	28.0	44.1	
	$k_{0.8}$	표면	52.3	97.6	38.2	62.0	27.2	42.7	-25
		중심	56.3	104.6	40.4	66.0	28.7	45.3	
	$k_{0.1515}$	표면	55.6	103.4	39.7	64.8	28.2	44.5	$\pm 4$
		중심	74.7	137.4	50.6	84.2	35.5	57.4	
	$k_{ins.}$ ( $k=0.1376$ )	표면	56.2	104.3	39.9	65.3	28.3	44.8	$\pm 7$
		중심	77.0	141.5	51.9	86.4	36.3	58.9	
주위온도 [ $^{\circ}$ C]			27.6	26.4	26.2	26.2	26.3	26.5	-

(나) 과도상태 온도해석

실험으로 결정된 권선부  $insl$ 의 체적열용량  $\rho c_p insl$  값의 타당성을 검토하기 위해  $\rho c_p insl$ 를 권선의 각 모델에 적용하여 과도해석을 수행한 후 시간에 따른 권선의 중심부와 표면의 온도변화수치를 실험결과와 비교하였다. 이때  $insl$ 의 열전도도는  $k_{0.1516}$ 도 고려하였다. 비교한 결과를 모델별도 여자전류별도 그림 17에서 그림 24까지에 권선 중심부와 표면의 온도변화경향 나타내었다. 각 모델의 온도변화 경향을 살펴보면 해석결과와 실험결과가 다소 차이는 있으나 실험을 통해 파악된 각 모델의 온도가 포화되는 시간부근에서의 온도변화 기울기는 0.0002~0.001도 나타나 해석과 실험결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

따라서 권선표면이 *teflon*과 *glass fiber*도 이중 피복되어 있는 권선부의 열특성에 대한 해석을 수행하기 위하여  $insl$ 의 체적열용량을  $\rho c_p insl = 2.43 \times 10^6 [J/m^3 \cdot ^\circ C]$ 도 결정한 것은 타당하다고 사려된다.

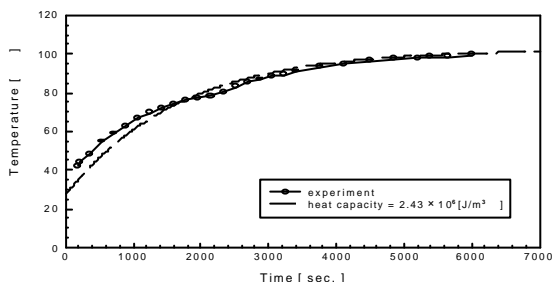


그림 17.  $\phi 0.7$  model의 여자전류가 750[A]일 때 시간에 따른 중심온도의 변화

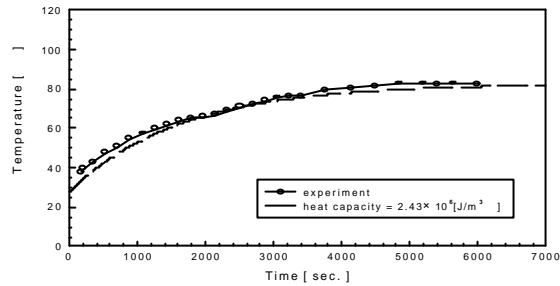


그림 18.  $\phi 0.7$  model의 여자전류가 750[A]일 때 시간에 따른 표면온도의 변화

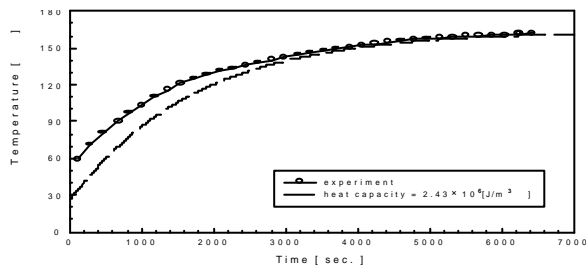


그림 19.  $\phi 0.7$  model의 여자전류가 1000[A]일 때 시간에 따른 중심온도의 변화

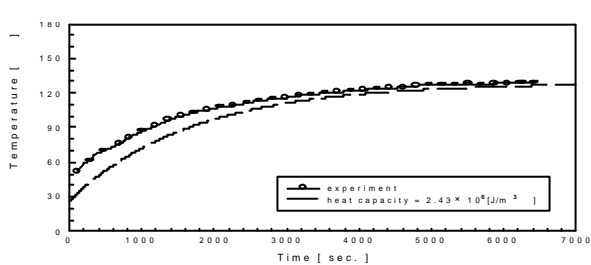


그림 20.  $\phi 0.7$  model의 여자전류가 1000[A]일 때 시간에 따른 표면온도의 변화

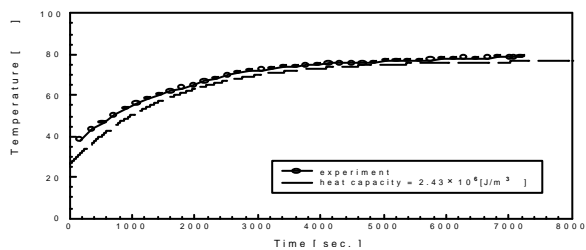


그림 21.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 750[A]일 때 시간에 따른 중심온도의 변화

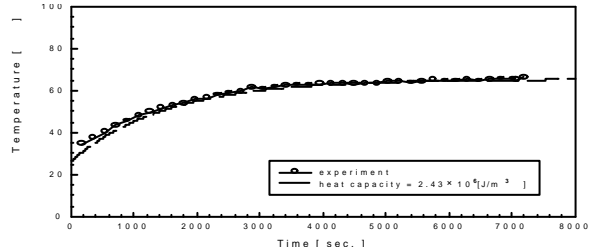


그림 22.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 750[A]일 때 시간에 따른 표면온도의 변화

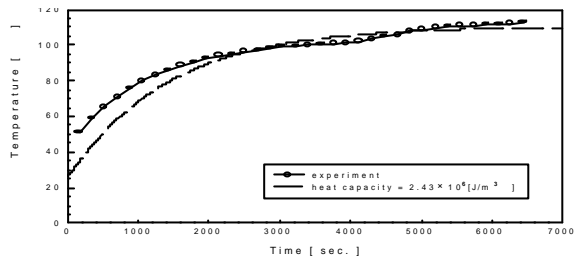


그림 23.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 1000[AT] 일 때 시간에 따른 중심온도의 변화

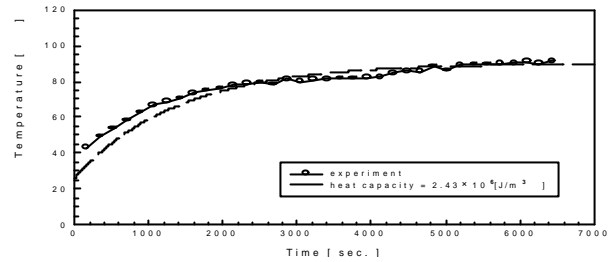


그림 24.  $\phi 1.0$  model의 여자전류가 1000[AT] 일 때 시간에 따른 표면온도의 변화

### 3. 결론

일체형원자도 SMART의 제어용구동장치에 장착되는 선형절스모터의 고정자권선부에 대한 열특성을 예측하여 설계 및 제작에 반영하고자 권선의 직경이 다른 3개( $\phi 0.7\text{mm}$ ,  $\phi 1.0\text{mm}$ ,  $\phi 1.2\text{mm}$ )의 실험모델을 제작하여 여자전류의 변화에 따른 열특성을 실험하였다. 실험결과를 토대로 열해석 모델을 개발하여 정상 상태 및 과도상태의 열해석을 2차원 유한요소법으로도 수행하고, 해석결과와 실험결과가 잘 일치하는 신뢰성있는 권선복합절연층(테프론-유리섬유-용기층)의 열특성값( $k_{ins}$ ,  $h$ ,  $\rho c_p$ )을 제시하였다. 여기서 구한 절연체의 열특성값은 추후 모터의 설계최적화를 위한 입력으로도 활용될 것이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] 김종인 외, 일체형원자도 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR-1888/88, 1988.3
- [2] 장문희 외, "테마기획-중소형 일체형원자도 SMART 개발", 대한기계학회 기계저널, Vol.38, No. 4, 1988. 4.
- [3] 김지호 외, "SMART용 선형절스모터형 제어용구동장치의 설계", 88년도 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1988.
- [4] 장기찬 외, "한국형 원자도의 제어용 구동용 선형전동기 설계에 관한 연구", 88년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1988.
- [5] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1986
- [6] J. P. Holman, "Heat Transfer" 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1985