

원자로 제어봉 구동용 선형전동기의 온도상승에 관한 연구

방 덕 제\*, 장 기 찬\*, 강 도 현\*, 김 종 인\*\*, 김 지 호\*\*, 허 형\*\*  
 \*한국전기연구소, \*\*한국원자력연구소

A Study on Temperature Rise of Linear Pulse Motor for CEDM

D. J. Bang\*, K. C. Chang\*, D. H. Kang\*, J. I. Kim\*\*, J. H. Kim\*\*, H. Huh\*\*  
 \*KERI, \*\*KAERI

**Abstract** - In this paper, we analogized effective thermal conductivity( $k_{eff}$ ) and effective heat capacity( $\rho c_{p,eff}$ ) of insulators and the air in coil portions of linear pulse motor for CEDM(Control Element Drive Mechanism). The errors of simulated results are under 1.6% when compared with experimental results. And we carried out temperature rise of linear pulse motor for CEDM by the experiment.

1000AT의 전류를 각각 여자시키며 시험을 수행하였다. 권선의 중심부와 표면에 열전대를 설치하고 다점온도 측정장치(HR1300)를 사용하여 권선의 온도를 측정하였으며 시험은 권선 중심부와 표면의 온도가 포화되어 평형상태에 도달하기까지, 즉 정상상태가 될 때까지 수행하였다. 본 시험을 통해 권선이 정상상태에 도달할 때까지 소요되는 시간, 권선 중심부와 표면의 온도변화추이 및 포화온도를 파악하여 표 3에 결과를 나타내었다.

1. 서 론

원자로 제어봉 구동용 선형전동기를 비롯한 전기기기의 온도특성을 예측하기 위해 열해석이 수행되는데 이때 기기를 구성하는 각 부분의 열적특성이 정확히 고려되어야 한다. 재질별 고유한 열적특성은 이미 알려져 있으므로 이 값들을 적용하여 열해석을 수행하면 타당한 해석 결과를 얻을 수 있다. 그러나 전동기의 권선부와 같이 여러 재질이 복합적으로 조밀하게 구성된 경우는 실제와 동일하게 해석모델을 구성하기에는 무리가 따르므로 열해석을 수행하기 위해 등가적으로 해석모델을 구성하여 열적특성을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 원자로 제어봉 구동용 선형전동기 권선부의 해석모델을 점적율을 고려하여 등가적으로 구성하였다. 권선부에서 권선을 제외한 부분인 권선피복과 권선 사이의 틈새에 존재하는 미세한 공기층을 1재질로 가정하고 피복과 공기층의 체적분율을 고려하여 1재질로 가정된 부분의 열적특성을 결정하였으며 결정된 열적특성의 타당성을 검증하기 위해 열해석 결과와 시험결과를 비교하였다. 그리고 제작된 전동기에 대한 시험을 수행하여 운전조건에 따른 온도특성을 파악하였다.

2. 권선부의 열적특성 결정

본 연구에서 대상으로 한 원자로 제어봉 구동용 선형전동기의 온도특성을 파악하기에 앞서 우선 서론에서 언급한 바와 같이 권선부의 열적특성을 결정하기 위해 권선부의 온도 특성시험을 수행하고, 시험결과를 토대로 권선부에서 권선을 제외한 부분(권선피복과 공기층)을 1재질로 고려하였을 때의 열전도율과 열용량 즉, 유효열전도율(Effective thermal conductivity:  $k_{eff}$ )과 유효열용량(Effective heat capacity:  $\rho c_{p,eff}$ )을 결정하고자 한다.

2.1 권선부의 온도 특성시험

온도 특성시험에 사용된 권선은 원자로 제어봉 구동용 선형전동기에 설치된 권선과 동일하며 그림 1과 같은 외형으로 되어 있다. 권선부의 단면을 개략적으로 나타내면 그림 2와 같이 권선, 권선피복(폴리이미드) 그리고 미세한 공기층으로 구성되어 있다. 권선부의 사양은 표 1과 같고 시험조건은 표 2와 같으며 권선에 750AT과

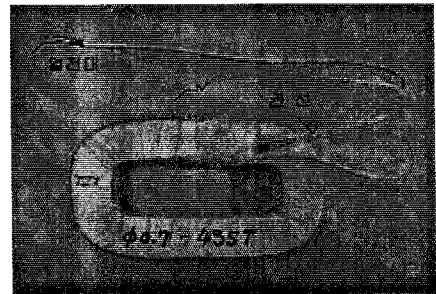


그림 1 권선부의 형상

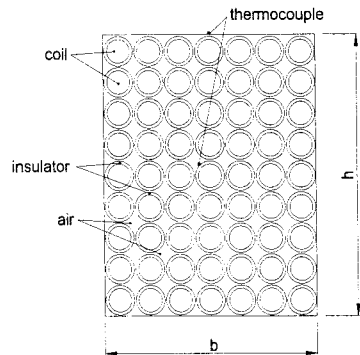


그림 2 권선부 단면의 개략도

표 1 권선부의 사양

구분	사양
권선 직경	1mm
Turn수	552
점적율	0.568
b	26mm
h	29mm
절연한계	220°C
권선 피복재	폴리이미드

표 2 시험조건

전류	1.3587 A (750 AT)	1.8116 A (1000 AT)
전류밀도 [A/mm <sup>2</sup> ]	1.73	2.31
주위온도 [°C]	15	12

표 3 실험결과

구분		750AT	1000AT
포화온도 [°C]	표면	36.2	49.0
	중심	39.0	54.3
포화시간		1시간 34분 (5640초)	1시간 42분 (6120초)

2.2  $k_{eff}$ 와  $\rho c_p$ 의 결정

권선의 절연피복인 폴리이미드와 공기층의 유효열전도를  $k_{eff}$ 은 2재질의 열전도율과 체적분율을 고려하여 결정하였으며 그 결과는 표 4와 같다.

표 4 절연피복과 공기층의 유효열전도율

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

본 연구에서 대상으로한 권선부와 같이 열발생이 존재하는 물체를 대기중이나 유체에 노출시키면 시간이 경과함에 따라 물체의 온도가 상승하게 되고 일정시간이 경과한 후에는 온도가 일정하게 유지된다. 이와 같이 물체가 열적 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간은 물체의 열용량에 직접적으로 관계되며 열용량이 클 수록 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이는 직교좌표의 열방정식인 식 (1)을 통해 확인할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

폴리이미드와 공기층의 유효열용량  $\rho c_p$ 은 시험결과와 에너지보존의 관계를 적용하여 결정할 수 있다. 즉, 권선부의 초기( $t=0$ ) 온도가  $T_i$ , 주위온도가  $T_\infty$ 일 때 권선에 전류가 여자되면 권선에서는 체적가열이 일어나고, 권선부 표면에서는 대류열전달이 발생하게 되므로 에너지보존관계를 적용하면 식 (2)와 같으며 정상상태에 대해서 고려하면 우변은 영이 된다.

$$\dot{E}_g - hA(T_s - T_\infty) = \rho c_p V \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

따라서 정상상태 열전달에 대해서 우선적으로 고려하여 상이에서 결정된  $k_{eff}$ 의 타당성을 검증하기 위해서는 열전달계수  $h$ 가 결정되어야 하는데 이는 권선부가 정상상태에 도달하였을 때의 시험결과를 알고 있으므로 표면에 너지평형을 적용하여 결정할 수 있다. 이때 열전달계수  $h$ 를 결정하기 위해서는 권선에서의 발생열량  $\dot{q}$

[W/m<sup>3</sup>]의 결정이 선행되어야 하며 이는 권선의 전류밀도와 저항률에 의해 계산된다. 상기의 과정을 통해 결정된  $\rho c_p$ 과 권선부 표면의 열전달계수  $h$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \rho c_p &: 6.57 \times 10^6 \text{ [J/m}^3\text{°C]} \\ h &: 11.3 \text{ [W/m}^2\text{°C]} \text{ --- 750AT} \\ &: 12.09 \text{ [W/m}^2\text{°C]} \text{ --- 1000AT} \end{aligned}$$

3. 권선부 온도특성 해석

2.2절에서 결정된  $k_{eff}$ 와  $\rho c_p$ 의 타당성을 검증하기 위해 시험조건과 동일한 조건을 적용하고 유한요소 해석 프로그램인 Flux2D를 이용하여 정상상태와 과도상태에 대한 열해석을 수행하였다.

3.1 해석조건

권선부의 여자전류가 750AT과 1000AT인 경우에 대한 해석을 수행하기 위해 표 5와 같이 해석조건을 적용하였으며 해석모델은 그림 3과 같다. 이는 실제 권선부 단면의 1/4모델로 권선의 면적과 권선피복재+공기층의 면적을 등가화하여 구성한 것이며 경계조건은 Neumann condition과 Convection surface condition을 적용하였다.

표 5 해석조건

구분	750AT	1000AT
열원 [W/m <sup>3</sup> ]	57,610	107,632
열전달계수 [W/m <sup>2</sup> °C]	11.3	12.09
주위온도 [°C]	15	12
열전도율 [W/m°C]	권선	387
	$k_{eff}$	0.12414
열용량 [J/m <sup>3</sup> °C]	권선	$3.48 \times 10^6$
	$\rho c_p$	$6.57 \times 10^5$

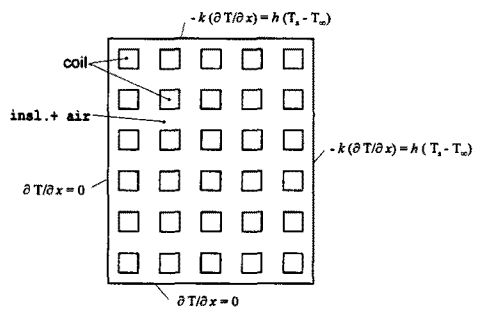


그림 3 해석모델

3.2 해석결과

3.2.1 정상상태 온도해석

여자전류가 750AT과 1000AT인 경우에 대한 정상상태 해석을 수행하여 권선부 중심과 표면에서의 온도분포를 파악하였다. 750AT인 경우, 권선의 중심온도는 38.96°C, 표면온도는 35.87°C였으며 1000AT인 경우는 권선중심이 53.94°C, 표면이 49.15°C로 나타났으며 그림 4와 표 6에 시험결과와 해석결과의 온도상승을 비교하여 나타내었다. 750AT인 경우의 해석결과는 실험결과와 1.55% 이내의 오차를 보였으며 1000AT인 경

위의 해석결과는 실험결과와 약 0.6%의 오차를 보여 원자로 제어봉 구동용 선형전동기 권선부에서 폴리이미드+공기층의 유효열전도율  $k_{eff}$ 를 0.12414[W/m<sup>2</sup>]로 결정한 것은 타당하다고 판단된다.

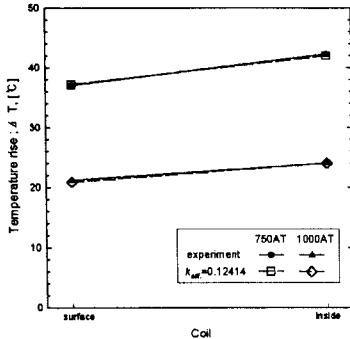


그림 4 1000AT인 경우의 온도상승

표 6 해석결과와 시험결과와의 비교

구분		750AT	1000AT	오차 [%]	
온도 상승 [°C]	실험	표면	37	-	
		중심	42.2		
	$k_{eff}$ (=0.12414)	표면	20.87	37.15	±1.55
		중심	23.96	41.94	
주위온도 [°C]		15	12	-	

### 3.2.2 과도상태 온도해석

2.2절에서 결정된  $\rho C_{p,eff}$ 을 적용하여 권선부의 여자전류가 750AT과 1000AT인 경우의 과도해석을 수행하여 파악된 권선 중심부와 표면의 온도변화추이를 실험결과와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 여자전류가 750AT, 1000AT인 경우 모두 실험결과와 잘 일치함을 보여 권선부 폴리이미드+공기층의 유효열용량  $\rho C_{p,eff}$ 를 657,000[J/m<sup>3</sup>°C]로 결정한 것은 타당하다고 판단된다.

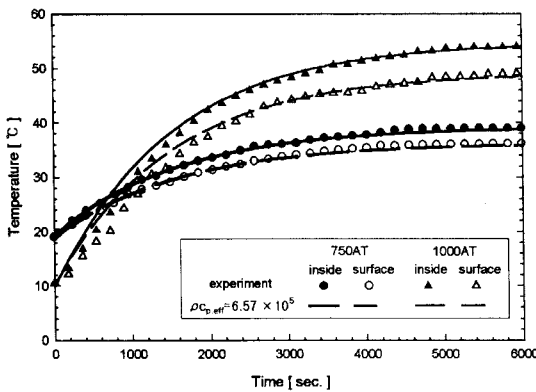


그림 5 시간에 따른 권선부의 온도변화

## 4. CEDM의 온도상승시험

본 연구에서 결정된 권선부의 열적특성을 적용하여 원자로 제어봉 구동용 선형전동기의 운전조건에 따른 온도

특성을 예측할 수 있다. 이를 위해서는 전동기 각부의 열적특성과 냉각수 온도, 외부고정자 내측면과 전동기 외표면의 열전달계수 그리고 권선부 주위 밀폐공간 등에 대한 열적특성이 고려되어야 한다.

공기층이 있는 밀폐공간 내에서는 Rayleigh수가  $Ra \leq 10^3$ 인 경우는 부력에 의한 유동이 약하여 전도열전달만이 존재하게 되므로  $Ra$ 의 크기가 우선적으로 검토되어야 하며 다음으로  $Nu$ 를 결정하여 밀폐공간 내의 열전달계수를 결정할 수 있다. 그러나 전동기 내부의 형상이 복잡하여 시험조건과 동일한 조건으로 해석을 수행하기 위해 무차원수를 결정하고 2차원으로 해석모델을 구성하기에는 무리가 따라 이 부분에 대한 연구는 차후 계속 수행할 예정이다. 원자로 제어봉 구동용 선형전동기(4상)의 온도특성을 실험적으로 파악하기 위해 A상과 B상에 1.5A의 전류를 연속적으로 통전시키면서 냉각수의 온도를 상온에서 170°C까지 상승시키며 시험을 수행하여 냉각수 출구온도, 전동기 외표면온도, 전류가 여자되는 권선부의 내부온도를 측정하였으며 그 결과는 그림 6과 같다. 이때  $T_a$ 는 주위온도,  $T_{wa}$ ,  $T_{wb}$ 는 권선 내부 온도,  $T_{out}$ 는 냉각수 출구온도,  $T_{aw}$ 는 냉각수 출구측의 외벽온도,  $T_{mw}$ 는 전동기 외표면온도를 나타낸다. A에서 B까지는 냉각수 입구온도를 상온에서 120°C까지 상승시킨 후 120°C의 냉각수 온도를 약 70분간 유지한 경우이며 B에서 C지점은 냉각수 입구온도를 120°C에서 150°C까지 C에서 D지점은 150°C에서 170°C까지 변화시키며 각 부의 온도상승을 측정된 결과이다. 냉각수 입출구의 온도차는 약 15°C 정도로 나타났으며 전류를 1.5A로 유지하고 있을 때의 권선온도  $T_{wa}$ ,  $T_{wb}$ 는 냉각수의 온도보다 약 30°C정도 낮게 나타나 제어봉을 1.5A로 유지할 경우, 권선의 온도는 절연한계인 220°C 이하이므로 절연에 문제가 없는 것으로 판명되었다.

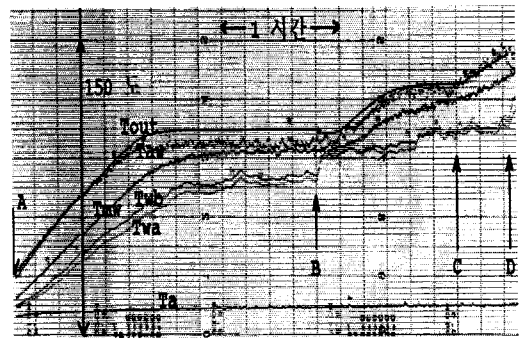


그림 6 CEDM의 온도상승시험

## 5. 결론

본 연구에서는 여러재질이 복합적으로 조밀하게 구성된 원자로 제어봉 구동용 선형전동기 권선부의  $k_{eff}$ 와  $\rho C_{p,eff}$ 를 제시하였으며 이 값을 적용한 해석결과는 실험결과와 약 1.6%정도의 오차를 보여 본 연구에서 제시한 열적특성의 타당성을 확보할 수 있었다. 권선의 전류를 1.5A로 유지하면서 전동기의 온도상승을 시험한 결과, 권선의 절연에는 문제가 없음을 알 수 있었다.

### (참고 문헌)

- [1] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [2] J. P. Holman, "Heat transfer", 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1990.