

# SMART 원자로용 냉각제 순환펌프의 온도특성에 관한 연구

論 文  
49B - 5 - 5

## A Study on the Temperature Characteristics of Main Coolant Pump for System-integrated Modular Advanced Reactor

具大鉉\* · 方德濟\*\* · 姜道鉉\*\*\* · 金鍾仁§ · 曹允鉉§§  
(Dae-Hyun Koo · Deok-Je Bang · Do-Hyun Kang · Jong-In Kim · Yoon-Hyun Cho)

**Abstract** - The canned motor of 3-phase induction is used for main coolant pump (MCP). The type of motor is canned-motor that stator and rotor are welded by sealed can. So, cooling water flows in the air gap of the canned motor as an independent cycling cooling system from the air gap to yoke of the motor to prevent high temperature of stator can and to lubricate bearing. Heat exchange is occurred between cooling water in the air gap and cooling water from the exterior pump to prevent rising of temperature in the motor. It has to analyze the characteristics of can exactly because the loss and the heat in the can are very important to design MCP. Therefore, thermal analysis is studied considering the effect of eddy-current loss induced in the can.

**Key Words** : Canned-motor, FEM, Cooling water, Thermal Analysis, Heat Transfer

### 1. 서 론

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 용 냉각제 순환펌프는 원자로의 위치제한으로 인하여 수직으로 제작 및 설치가 된다.

냉각제 순환펌프용으로 사용되는 전동기는 유도기이며 원자로 특성상 한번 설치가 되면 유지 보수가 어렵기 때문에 베어링 윤활을 순수한 물로 사용한다. 이로 인하여 전동기 공극사이로는 베어링 윤활용 물이 흐르게 되며 이 물로부터 전동기를 보호하기 위하여 고정자와 회전자에 얇은 Can을 씌우게 된다. 전동기에 사용된 Can의 재질이 도전체이기 때문에 유도전동기 특성상 Can에서 발생한 와전류로 인하여 많은 열이 발생하게 된다. 이러한 열로 인하여 공극 사이로 흐르는 베어링 윤활용 물이 끓기 때문에 공극 내부로 순환하는 물을 냉각하기 위하여 외부에서 별도의 냉각장치를 이용하여 열교환이 이루어지도록 시스템을 구성을 하였다.

이러한 Can-type의 유도기는 일반 산업용 전동기와 달리 보통 화학물질을 전동기 내부를 통하여 운반하거나 지하수를 끌어올리는 심정펌프로 이용되고 있는데, 국내 Canned-motor의 자체 설계기술이 없기 때문에 현재 거의 수입하거

나 외국 선진제품을 모방하여 상품화하고 있는 실정이다.

MCP의 경우 역시 이런 특수한 Can이 존재하여 외부와 열교환을 하지만 냉각수의 온도상승이 불가피하게 되며, Can이외에도 전동기 운전시 전동기 내부에서 발생하는 각종 손실에 의해 전동기의 온도는 상승하게 된다. 특히 Canned-motor 고정자 권선은 구리선에 Glass-fiber로 1차 절연하고 Teflon으로 2차 절연한 후 최종적으로 에폭시로 함침하였다. 그러나 2차 절연재인 Teflon과 함침재인 에폭시는 재료특성상 밀착하지 않으므로 그 사이에 미세한 공기층이 존재하게 된다. 이러한 공기는 절연재보다 열전도율이 나쁘기 때문에 열적으로 취약하게 되어 전동기 권선온도 상승의 주원인이 된다.

이러한 온도상승은 시스템의 절연성능과 절연수명에 악영향을 미치게 되므로 전동기 설계시 열적 특성은 반드시 고려되어야 하며 설계된 전동기의 제작 및 운전에 앞서 운전 조건에 따른 온도특성을 예측하기 위해 전동기의 열해석이 무엇보다 우선 되어야 한다.

열해석시 전동기를 구성하는 각 부분의 재질별 고유한 열물성치(thermophysical properties)와 해석조건이 적용되어야 하며 또한 이러한 자료가 신뢰성이 있어야 한다. 하지만 전동기의 권선부와 같이 여러 재질이 복합적으로 조밀하게 구성된 경우, 실제와 동일하게 해석모델을 구성하기에 무리가 있기 때문에 열해석을 수행하기 위해 등가적으로 해석모델을 구성하여 열물성치를 적용하여야 한다. 그리고 대류열전달이 존재하는 표면에 대해서는 해석을 수행하기 위해 대류열전달계수가 요구되며 이 값은 운전조건에 따라 다양하게 변화되므로 실제조건과 근사하도록 정확히 결정되어야 한다. 즉 온도특성 해석시 재질별 열물성치와 대류열전달계수 등의 해석조건이 정확히 결정되어 해석모델에 적용되어야

\* 正會員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究GROUP 先任研究員

\*\* 正會員 : 三元冷熱ENGINEERING CO. 主任研究員

\*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics 研究GROUP長 · 工博

§ 正會員 : 韓國原子力研究所 動力爐開發TEAM 室長 · 工博

§§ 正會員 : 東亞大 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 1999年 11月 29日

最終完了 : 2000年 4月 12日

타당한 해석결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 원자로 냉각재 순환펌프용 Canned-motor를 대상으로 하여 실험과 해석을 통해 온도특성을 파악하고 그 결과를 비교·검토하여 해석기법의 타당성을 확보하였다. 그리고 본 연구에서 적용한 해석기법으로 원자로에서 실제 운전시에 대한 전동기의 온도특성을 예측하고 전동기의 열적 안정성을 검토하고자 하였다.

2. 대상 전동기의 사양 및 특징

공극과 고정자 외측을 순환하는 독립회로 냉각수와 원자로 외부의 냉각장치로부터 공급되는 외부회로 냉각수의 유동으로 인해 전동기의 냉각계통이 구성되며 고정자와 회전자 사이의 공극을 통과하면서 냉각작용을 수행하여 온도가 상승한 독립회로 냉각수는 고정자 외측으로 유입된다. 이와 같이 온도가 상승한 독립회로 냉각수는 그림 1의 고정자 외측의 외부회로 냉각수관 사이를 지나게 되며 이때 열교환이 발생하여 독립회로 냉각수는 온도가 낮아져 공극으로 다시 유입되고 외부회로 냉각수는 온도가 상승하여 전동기 외부로 방출되게 된다. 따라서 본 연구에서 대상으로 한 전동기는 이상과 같은 작용의 반복으로 인해 냉각효과를 경험하게 된다.

MCP는 원자로 냉각시와 과열시의 두가지 영역에서 동작을 해야 하기 때문에 두가지 영역을 만족시키기 위하여 VVVF 인버터로 구동을 한다. 원자로 냉각시는 MCP가 900[rpm]으로, 과열시에는 3,600[rpm]으로 동작하므로 이 때 인버터의 주파수는 15[Hz]와 60[Hz]로 구동한다. 고정자와 회전자에 부착되는 Can의 두께는 각각 0.6[mm], 0.5[mm]이며 사용된 재질은 MCP 내부의 압력에도 견딜수 있고 Can에서 발생하는 와전류를 줄이기 위하여 견고하면서도 자체 저항율이 큰 스테인레스재질을 사용하였다. 이상의 전동기 설계사양을 다음 표 1에 나타내었다.

표 1 전동기 설계사양

Table 1 Specification of design for canned-motor

구분		사양
정격출력		29 [kW]
극 수		2
주파수	냉각시	15 [Hz]
	과열시	60 [Hz]
정격전압		340 [V]
철심길이		450 [mm]
고정자	외경	225 [mm]
	내경	95 [mm]
회전자 외경		90 [mm]
슬롯수	고정자	24
	회전자	28
공극	기계	1.3 [mm]
	유효	2.5 [mm]
Can	고정자	0.6 [mm]
	회전자	0.5 [mm]

3. 대상 전동기에서의 열전달

전동기의 동손과 철손, Can손실 등에 의해 발생한 열은 공극과 고정자 외측 독립회로에서의 물의 유동으로 인한 대류에 의해 제거되는 열과 전동기 표면에서 대기로 방출되는 열과 같으며 전동기의 온도는 상승하다가 일정시간이 경과한 후 일정하게 유지되는 열적 평형상태인 정상상태에 도달하게 된다. 이와 같이 전동기가 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간은 전동기를 구성하고 있는 각 재질의 열용량에 직접적으로 관계되며 열용량이 클수록 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이는 열방정식인 식 (1)을 통해 확인할 수 있다[1,2].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

대류열전달이 존재하는 표면에 대해 에너지보존관계를 적용하면 식 (2)와 같으며 정상상태에 대해서 고려하면 우변은 영이 된다[1,2].

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

식 (1)과 식 (2)에서  $r$ 은 반경[m],  $k$ 는 열전도율 [ $W/m \cdot ^\circ C$ ],  $T$ 는 온도[ $^\circ C$ ],  $\phi$ 는 방위각[rad],  $\dot{q}$ 는 단위 체적당 발생열량 [ $W/m^3$ ],  $\rho$ 는 밀도 [ $kg/m^3$ ],  $c_p$ 는 비열 [ $J/kg \cdot ^\circ C$ ],  $V$ 는 체적 [ $m^3$ ],  $\dot{E}_g$ 는 에너지 생성량[W],  $h$ 는 대류열전달계수 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ],  $T_s$ 는 고정자 표면온도 [ $^\circ C$ ],  $T_\infty$ 는 주위온도 [ $^\circ C$ ]이며  $h$ 는 열해석시 요구되는 중요한 파라미터이다.

본 연구에서는 전동기의 고정자를 해석대상으로 하였으며 상기의 식에서  $T_\infty$ 와  $h$ 는 고정자 내외측을 순환하는 독

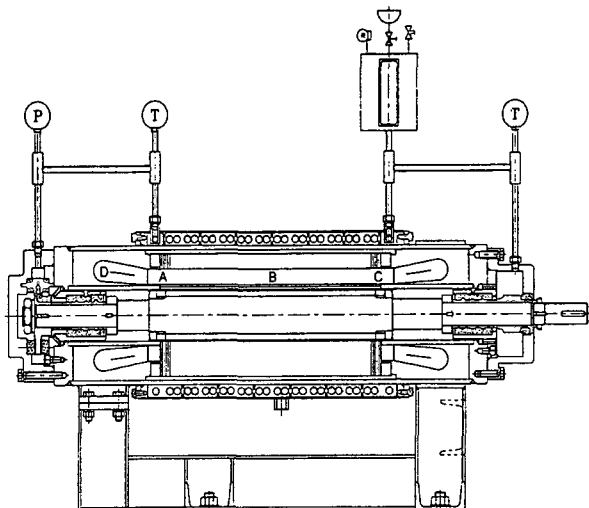


그림 1 Canned-Motor 단면도  
Fig. 1 Sectional view of canned-motor

립회로 냉각수의 특성에 의해 결정된다.

이상과 같이 열해석을 수행하기 위해 요구되는  $h$ 는  $k$ ,  $c_p$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ (점성계수; [N·s/m<sup>2</sup>]),  $v$ (유속; [m/s]),  $d$ (유로 직경; [m])의 함수로 많은 파라미터에 의존하므로 계산이 매우 복잡하다. 따라서 의존 파라미터를 줄일 수 있는 무차원 파라미터를 도입하면 계산을 간략화 할 수 있으며 이를 함수형식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$Nu = f(Re, Pr) \tag{3a}$$

$$h = f(Nu, d, k) \tag{3b}$$

여기서  $Re$ 는 Reynolds수,  $Pr$ 은 Prandtl수,  $Nu$ 는 Nusselt수로 식 (4), (5), (6)과 같이 각각 정의되며 전동기내 독립회로의 냉각수는 비원형 단면에서의 유동이므로 유로 직경  $d$ 를 수력직경  $d_h$ 로 고려하였다[3].

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{4}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \tag{5}$$

$$Nu = \frac{h d}{k} \tag{6}$$

#### 4. 온도특성 해석

이상과 같이 기술한 열전달관계식과 무차원 파라미터 등을 고려하여 대상 전동기에 대한 온도특성 해석을 2차원 유한요소 해석프로그램인 Flux2D를 이용하여 수행하였으며 해석결과를 실험결과와 비교하여 대상 전동기에 대한 해석 기법의 타당성을 검증하였다.

##### 4.1 해석모델

전동기내의 권선은 Glass-fiber로 1차 절연하고 Teflon으로 2차 절연한 후 최종적으로 에폭시로 함침하였다. 그러나 2차 절연재인 Teflon과 함침재인 에폭시는 재료특성상 밀착하지 않으므로 그 사이에 미세한 공기층이 존재하게 되는데 이와 같이 형상이 복잡하고 조밀한 부분을 실제적으로 고려하여 대상의 전체영역에 대해 해석모델을 구성하기에는 무리가 따른다. 즉 요소분할수가 많아져 해석시간이 많이 소요되거나 모델링 자체가 불가능하게 되는 등의 문제에 직면하게 된다.

따라서 본 연구에서는 해석모델을 고정자 전체의 1/24모델로 1슬롯에 대해 2차원으로 모델링하였으며 슬롯내의 실제 권선수는 64-코일이지만, 2차 절연재인 Teflon과 함침재인 에폭시사이 미세한 공기층이 존재하여 유한요소 해석에 어려움이 많기 때문에 2개의 코일을 합하여 1개의 코일로 변환시켜 32-코일로 하였으며 권선피복과 에폭시사이 존재하는 미세한 공기층의 두께를 0.15[mm]로 고려하였다. 고정자 권선의 1차 피복인 Glass-fiber에 피복된 2차 피복

Teflon의 두께는 매우 얇으므로 2차 피복 Teflon은 무시하고 해석모델을 구성하였다. 해석모델은 그림 2와 같으며 44,764절점과 22,331요소로 분할하였다.

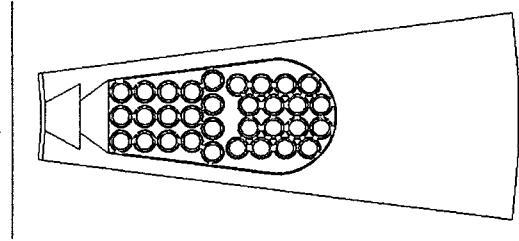


그림 2 해석모델  
Fig. 2 Model for thermal analysis

##### 4.2 해석조건

대상 전동기의 원자로 내에서의 실제 운전시에 대한 온도 특성 해석에 앞서 본 연구에서 적용할 해석기법의 타당성을 검증하기 위해 실험조건과 동일하게 해석조건을 적용하여 해석을 수행한 후 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 전동기의 29[kW] 정격운전시에 대한 실험조건은 표 2와 같다.

표 2 실험조건  
Table 2 Experimental condition

정격출력	29 [kW]
정격전압	340 [V]
전류밀도	4.63 [A/mm <sup>2</sup> ]
주 파 수	60 [Hz]
회 전 수	3,500 [R.P.M.]
외부회로 냉각수	입구온도 16 [°C] 유량 0.086764 [kg/s]

실험은 권선 각 지점의 온도, 독립회로와 외부회로 냉각수 온도가 포화되어 평형상태에 도달하기까지, 즉 정상상태가 될 때까지 수행하였다. 고정자 권선의 온도는 그림 1에 나타낸 A, B, C, D지점에 k-type 열전대(Thermocouple)를 설치하고 다점온도 측정장치(HR1300)를 사용하여 측정하였다. 온도특성 해석시 요구되는 전동기 권선과 철심, Can에서 발생하는 열량, 즉 손실은 전동기 사양과 운전조건을 통해 결정할 수 있으며 동손과 철손은 다음 식 (7), (8)과 같이 정의된다.

$$P_{cu} = \rho \int_V J^2 dV [W] \tag{7}$$

$$P_c = 4.97 \left( \frac{B_p}{B_0} \right)^{1.912} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{1.45} [W/kg] \tag{8}$$

여기서  $\rho$ 는 권선의 저항율,  $J$ 는 권선의 전류밀도,  $B_p$ 는 철심내부의 최대자속밀도,  $f$ 는 철심내부자속의 주파수,  $B_0$ ,  $f_0$ 는 기준 자속과 주파수이다.

고정자 내경측에 부착된 비자성 재질인 Can은 정지된 농

형과 같은 작용을 하는 것과 같으므로 Can의 저항을 1차적으로 환산하여 자화reactance와 병렬로 구성할 수 있다. 여기서 고정자철심과 접촉하고 있는 부분의 Can을 Bar부분으로 취급하면 다음 식 (9)로 나타낼 수 있으며 Can의 overhang부분을 endring부분으로 취급하면 다음 식 (10)으로 나타낼 수 있으므로 전체 Can의 저항은 다음 식 (11)과 같이 된다. 그러므로 Can에서 발생하는 손실값은 식 (12)와 같이 정의된다[5].

$$Can_{Bar} = \frac{m \times \rho \times (Ck_w)^2 \times L_1}{\pi \times D_1 \times Can_1} [\Omega] \quad (9)$$

$$Can_{Ring} = \frac{m \times \rho \times (Ck_w)^2 \times D_1 \times 0.637}{(Can_1 - L_1) \times Can_1} [\Omega] \quad (10)$$

$$Can_{Res.} = Can_{Bar} + Can_{Ring} [\Omega] \quad (11)$$

$$Can_{Loss} = \frac{mV^2}{Can_{res}} [kW] \quad (12)$$

여기서 m:상수, ρ:저항율, C:직렬도체수, k<sub>w</sub>:권선계수, L<sub>1</sub>:고정자 길이, D<sub>1</sub>:고정자 내경, Can<sub>1</sub>:Can 길이, Can<sub>r</sub>:Can 두께, V:인가전압이다.

그리고 독립회로와 외부회로의 냉각수 온도는 실험을 통해 파악된 냉각수 입출구 온도의 평균값으로 고려하였으며 대류열전달계수 h는 냉각수 유량과 식 (4), (5), (6)의 무차원파라미터를 이용하여 결정하였다. 실험을 통해 파악된 냉각수 온도와 유량은 표 3과 같으며 독립회로 냉각수의 유량에 의해 해석시 요구되는 고정자 내외표면의 대류열전달계수가 결정되므로 정확한 유량의 결정이 이루어져야 한다.

본 실험에서는 외부회로 냉각수와 열평형(heat balance)을 고려하여 표 3의 독립회로 냉각수의 유량을 결정하였으며 그 과정은 다음과 같다.

표 3 냉각수 온도와 유량  
Table 3 Temperature and flow rate of cooling water

외부회로 냉각수	출구온도	32 [°C]
	유량	0.086764 [kg/s]
독립회로 냉각수	입구온도	42 [°C]
	출구온도	32 [°C]
	유량	0.138822 [kg/s]

실험조건인 29[kW] 정격운전시의 전동기 전체손실(동손+철손+Can손실 등)은 약 6.2[kW]이며 실험을 통해 파악된 외부회로 냉각수측 교환열량은 약 5.8[kW]이었다. 따라서 전동기 전체손실 중 0.4[kW]는 전동기 표면에서 대기로 방출된 열량임을 알 수 있으며 약간의 오차는 있겠지만 외부회로 냉각수 교환열량과 열평형을 적용하여 독립회로 냉각수의 교환열량을 5.8[kW]로 고려하였다. 독립회로 냉각수의 유량은 식 (13)에 의해 결정되며 외부회로 냉각수의 교환열

량 같은 형식으로 표현하면 식 (14)와 같다.

$$q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (13)$$

$$q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,i} - T_{c,o}) \quad (14)$$

여기서 q는 냉각수 교환열량[W], ṁ는 냉각수 질량유량[kg/s], c<sub>p</sub>는 냉각수 비열[J/kg·°C], T는 냉각수 온도[°C] 그리고 하첨자 h는 독립회로, c는 외부회로, i는 입구, o는 출구를 나타내며 식 (13)에 의해 독립회로 냉각수의 유량이 ṁ<sub>h</sub> = 0.138822[kg/s]로 결정되었다.

그리고 본 연구에서는 열공학분야에서 열교환기의 해석 및 설계시 사용되는 ε-NTU(effectiveness-Number of Transfer Units)법을 이용하여 결정된 독립회로 냉각수 유량 ṁ<sub>h</sub>의 타당성을 검증하고자 한다[1].

NTU는 총합열전달계수(overall heat transfer coefficient) U[W/m<sup>2</sup>·°C], 독립회로 냉각수와 외부회로 냉각수의 열교환면적, 즉 외부회로 냉각관의 외표면적 A[m<sup>2</sup>], 그리고 양측 냉각수의 열용량율(heat capacity rate:[W/°C]) 중에서 작은 값인 C<sub>min</sub>의 함수로 식 (15)와 같이 정의된다.

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (15)$$

여기서 총합열전달계수 U는 독립회로 냉각수측 대류열전달계수 h<sub>h</sub> 그리고 외부회로 냉각수측의 대류열전달계수 h<sub>c</sub>, 냉각관 두께 δ, 냉각관 열전도율 k에 의해 식 (16)과 같이 정의되며 열용량율 C<sub>min</sub>는 식 (17)과 같다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_h} + \frac{\delta}{k} + \frac{1}{h_c}} \quad (16)$$

$$C_{min} = C_c = \dot{m}_c c_{p,c} \quad (17)$$

그리고 NTU는 유용도(effectiveness) ε와 열용량비(heat capacity ratio) C<sub>r</sub>에 의해 다시 식 (18)과 같이 정의되며 ε와 C<sub>r</sub>는 각각 식 (19)와 식 (20)과 같다.

$$NTU = -\ln \left[ 1 + \left( \frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \epsilon C_r) \right] \quad (18)$$

$$\epsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (19)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_c}{C_h} \quad (20)$$

식 (18)에 의해 NTU는 약 1.5로 결정되었으며 이를 식

(15)에 대입하여 냉각수의 열교환면적  $A$ 를 계산한 후 냉각관의 길이를 계산하였다. 이때 계산된 길이는 약 21.74[m]로 나타나 제작된 전동기의 실제 냉각관 길이 21.04[m]와 약 +3.3[%]의 오차를 보여 본 연구에서 결정된 독립회로 냉각수의 유량  $\dot{m}_h$ 가 타당함을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 결정된  $\dot{m}_h$ 와 무차원 파라미터를 이용하여 고정자 내외표면의 대류열전달계수를 결정하였으며 전동기 구성재료의 열물성치[4]등 열해석조건을 표 4에 나타내었다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 고정자와 회전자를 밀봉한 Can에서 발생하는 와전류에 의한 손실이 동손과 철손에 비해 월등히 크게 나타나 전동기 온도상승의 주 원인을 알 수 있다

표 4 실험조건을 고려한 고정자 온도특성 해석조건  
Table 4 Condition of analysis determined by the experimental data and the thermophysical properties of MCP

구분		29[kW] 정격부하시
손실 [W]	동손	46.7
	Can 손실	114
	철손	25
열전도율 [W/m°C]	Can	15.1
	철심	42.5
	코일	387
	Glass Fiber	1.4
	Teflon	0.2
	노맥스	0.105
	에폭시	0.5
	공기	0.0263
독립회로 냉각수 온도 [°C]	공극	36
	외측	36
대류열전달계수 [W/m²°C]	내표면	3175.5
	외표면	792.8
경계조건		Neumann condition / Convection surface condition

4.3 해석결과

상기에서 결정된 해석조건을 적용하여 대상 전동기의 고정자에 대한 온도특성 해석을 수행한 결과 다음 그림 3, 4와 같은 온도특성을 얻었다. 고정자의 온도분포는 그림 3에, 그림 4는 그림 3의 슬롯을 횡방향으로 1/2로 나누어 고정자 슬롯 내경에서 고정자 슬롯 외경쪽의 온도분포 특성을 나타낸 그림이다. 슬롯내부에서 절연피복과 에폭시 그리고 공기층이 존재하는 부분은 열전도율이 작아 열저항이 크기 때문에 상대적으로 열저항이 작은 철심과 권선부분에 비해 온도구배가 크게 나타났다. 해석을 통해 파악된 권선의 최고온도는 약 66[°C], 실험을 통해 그림 1에 나타낸 A, B, C지점에서 측정된 권선의 온도는 60[°C], 57[°C], 56[°C]로 나타났으며 이 결과들을 비교하여 다음 표 5에 나타내었다. 해석결과는 시험결과보다 6~10[°C]정도 높게 나타났으나 대상 전동기의 실제 운전시와 다른 용량의 전동기에 대해서도 본 연구에서 적용한 해석기법을 이용하여 온도특성을 예측하기

에는 무리가 없으리라 판단된다. 그리고 권선의 엔드링 부분인 그림 1의 D지점의 온도는 2차원으로는 해석이 불가능하므로 이에 대해서는 3차원해석을 통해 차후 연구를 수행할 예정에 있어 향후에는 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 실험을 수행한 결과 D지점의 온도는 약 125[°C]로 나타났으며 이와 같이 D지점의 온도가 A, B, C지점의 온도 보다 월등하게 높은 것은 권선 엔드링 주위가 열저항이 큰 공기이므로  $\Delta T$ 가 커지기 때문으로 판단된다.

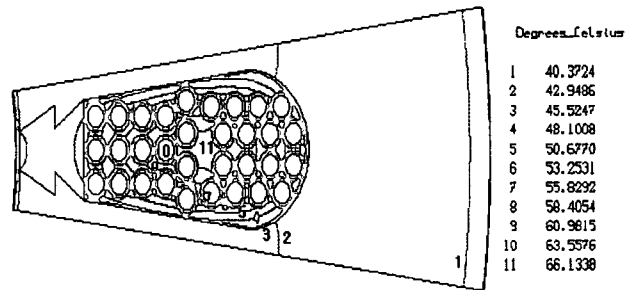


그림 3 고정자의 온도분포  
Fig. 3 Temperature distribution of the stator of MCP

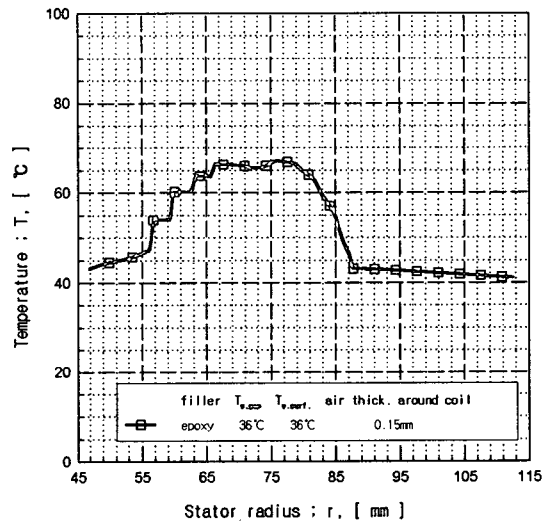


그림 4 고정자의 반경방향 온도특성  
Fig. 4 Temperature characteristics for the radial direction of the stator

표 5 고정자 권선온도의 실험결과  
Table 5 Temperature comparison with analysis and experiment of the stator coil

측정위치	권선온도 [°C]	$T_{\text{해석}} - T_{\text{실험}} [°C]$
	실험결과	
A 지점	60	6
B 지점	57	9
C 지점	56	10

5. 실제운전을 고려한 온도특성 해석

대상 전동기가 원자로 내에 설치되어 운전될 경우를 고려하여 앞에서 적용한 해석모델과 해석기법으로 해석을 수행한 결과, 실제운전시의 전동기의 온도특성을 예측할 수 있었다. MCP의 부하조건은 정격부하 29[kW]와 과부하조건인 36[kW], 38[kW]에서 전동기의 온도특성을 검토해 보았다. 실제운전시의 독립회로 냉각수의 유량은 1[m<sup>3</sup>/h], 외부회로 냉각수의 유량은 3.5[m<sup>3</sup>/h]이며 독립회로 냉각수의 온도와 유량, 무차원파라미터 등에 의해 고정자 내외표면의 대류열 전달계수가 결정된다. 실제운전을 고려한 해석조건은 표 6에 나타낸 과부하 운전시인 36[kW], 38[kW]의 동손과 철손, 냉각수 온도 그리고 대류열전달계수를 제외하고는 표 4의 해석조건과 동일하다.

표 6 실제운전을 고려한 고정자 온도특성 해석조건  
Table 6 Condition of analysis considering MCP operated in the reactor

구 분		29[kW]		36[kW]		38[kW]	
손 실 [W]	동 손	46.7		64		69	
	철 손	25		24		24	
냉각수 온도 [°C]	독립회로 (공극측/외측)	85/85	150/150	85/85	150/150	85/85	150/150
	대류열 전달계수	내표면 7311 외표면 1825		내표면 9059 외표면 2262		내표면 7311 외표면 1825	

실제운전시 외부회로 냉각수와 열교환에 의해 냉각된 독립회로 냉각수는 약 70[°C]로 공극으로 유입되고 공극을 지나면서 내부 Can과 열교환으로 인하여 냉각수의 온도가 약 98[°C]로 상승하는 것으로 고려하여 독립회로 냉각수의 평균 온도를 85[°C]로 해석하였다. 그리고 냉각수 온도가 과도하게 상승하였을 경우에 대한 온도특성을 예측하기 위해 독립회로 냉각수 온도를 150[°C]로 고려하여 해석을 수행하였다.

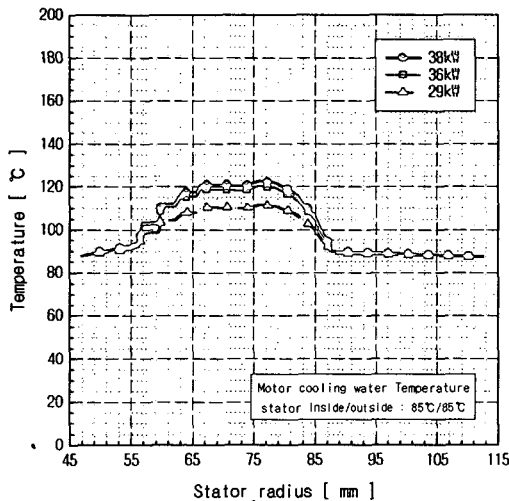


그림 5 고정자 반경방향 온도특성 [독립회로냉각수: 85°C]  
Fig. 5 Temperature characteristics for the radial direction of the stator [indep. circuit cooling water: 85°C]

독립회로 냉각수 온도가 85[°C]인 경우의 정격부하인 29[kW]와 과부하 운전시의 온도특성 해석결과를 고정자 반경에 따라 그림 5에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 정격부하 29[kW]의 권선 최고온도는 111.5[°C]로 나타났으며, 과부하시인 36[kW], 38[kW]의 권선 최고온도는 각각 120.2[°C], 122.7[°C]로 나타나 사용에 문제가 없음을 알 수가 있다.

독립회로 냉각수 온도를 150[°C]로 고려한 경우의 고정자 반경방향 온도분포를 그림 6에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 정격부하인 29[kW]의 권선 최고온도는 173.7[°C]로 나타났으며 과부하시인 36[kW], 38[kW]의 권선 최고온도는 각각 181.4[°C], 183.7[°C]로 나타나 절연계급이 C급이지만 사용된 절연물이 유리섬유와 테프론인 관계로 실제 약 300[°C]에도 사용에 문제가 없기 때문에 운전에는 큰 문제가 없음을 알 수가 있다.

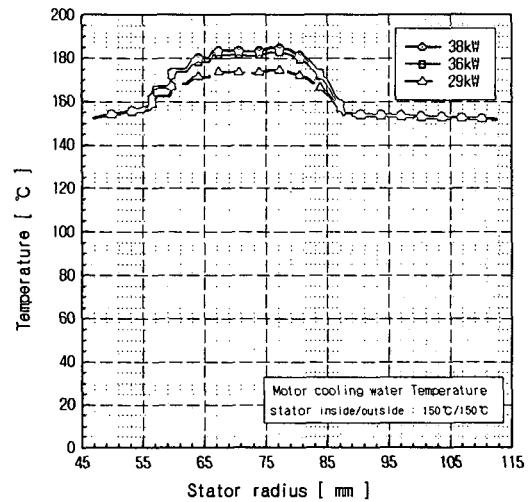


그림 6 고정자 반경방향 온도특성 [독립회로냉각수:150°C]  
Fig. 6 Temperature characteristics for the radial direction of the stator [indep. circuit cooling water: 150°C]

6. 결론

시험조건과 동일한 조건으로 29[kW]급 원자로 냉각재 순환펌프용 Canned-motor에 대한 온도특성 해석을 수행한 결과, 고정자 권선의 최고온도는 A, B, C지점의 온도가 각각 60[°C], 57[°C], 56[°C]로 나타난 실험결과보다 6~10[°C]정도 높은 66[°C]로 나타나 본 연구에서 온도특성 해석시 적용한 해석기법의 타당성을 확보할 수 있었다.

여기서 발생한 오차는 각종 물질특성에 대한 오차도 있을 수 있으며 특히 권선 절연물인 테프론과 합침재인 에폭시사이의 공극길이를 0.15[mm]로 설정하였지만 이보다 더 작을 수 있을 가능성도 존재할 수 있다. 그러므로 이에 대하여 보다 지속적으로 향후 연구가 이루어지면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 대상 전동기가 원자로 내에서 실제로 운전되는 경우를 고려하여 온도특성을 해석한 결과, 정격 및 과부하 운전시 모두 운전에는 문제가 없음을 예측할 수 있었으며 본 연구에서 제시한 해석기법이 다른 용량의 Canned-type 전동기의 운전조건에 따른 온도특성 해석시 적용되더라도 정확한 온도특성의 예측이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1998년에서 현재까지 한국원자력연구소의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참고 문헌

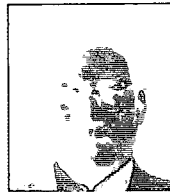
[1] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.

[2] J. P. Holman, "Heat transfer", 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1990.  
[3] Frank M. White, "Fluid mechanics", 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., 1995.  
[4] 日本熱物性學會, "Thermophysical Properties Handbook", 養賢堂, 1990.  
[5] C. G. Veinott, "Theory and Design of Small Induction Motor", McGraw-hill Book Company, Inc, New York, 1959.

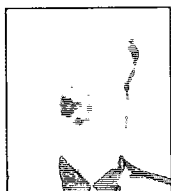
저자 소개



구대현 (具大鉉)  
1963년 9월 21일 생. 1989년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기연구소 산업전기연구단 Mechatronics연구그룹 선임연구원  
Tel : 0551-280-1486, Fax : 0551-280-1547  
E-mail : dhk371@keri.re.kr



김종인 (金鍾仁)  
1955년 3월 7일 생. 1979년 인하대 기계공학 대학 졸업. 1983년 ENSM, France졸업(석사). 1986년 ENSM, France졸업(공학박). 1986~현재 한국원자력연구소, 일체형원자로 주기기개발 과제책임자  
Tel : 042-868-8646, Fax : 042-868-8990  
E-mail : jikim@nanum.kaeri.re.kr



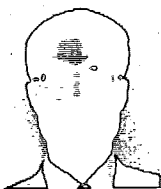
방덕제 (方德濟)  
1971년 5월 17일 생. 1996년 부경대 공대 기계설계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 냉동공조공학과 졸업(석사). 1998년~1999년 한국전기연구소 산업전기연구단 Mechatronics연구그룹 위촉연구원. 2000년~현재 삼원냉열ENG. 주임연구원

Tel : 051-263-3366, Fax : 051-266-3560  
E-mail : samwon@smipc.or.kr



조윤현 (曹允鉉)  
1961년 12월 25일 생. 1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1986. 2~1988. 2 삼성종합기술원. 1990. 3~1995. 2 한국전기연구소. 1995년~현재 동아대 공대 전기

공학과 조교수  
Tel : 051-200-7742, Fax : 051-200-7743  
E-mail : yhcho@daunet.donga.ac.kr



강도현 (姜道鉉)  
1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 동 대학원 전기공학과 (석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 (공학박). 1989~현재 한국전기연구소 선임연구원(Mechatronics연구그룹장)

Tel : 0551-280-1480, Fax : 0551-280-1547  
E-mail : dhkang@keri.re.kr