

SMART 냉각재순환펌프용 농형유도전동기의 온도 특성해석
A FEM Thermal Analysis of Squirrel Cage Canned Induction Motor
for SMART Main Coolant Pump

허 형, 박진석, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로 SMART의 냉각재순환펌프에 사용될 캔드모터의 권선 열특성을 예측하여 권선에서 발생하는 열이 절연피복재의 허용온도를 넘지 않도록 최적의 설계조건을 설정하기 위하여 시제 권선을 대상으로 개발된 테프론-유리섬유-공기층의 복합 절연재의 평균 열적 물성치를 이용하여 온도 특성해석을 수행하였다.

Abstract

It is important that the thermal characteristics of the motor windings be estimated in order to maintain temperature within the allowable limit of the insulation, since the canned motor is always supplied with current during the pump operation. As the insulation of the windings is composed of teflon, glass fiber, and air, it is not an easy task to design optimally. A FEM thermal analyses of squirrel cage canned induction motor for SMART MCP were performed by using the thermal properties of complex insulation which have obtained by comparing the results of finite element thermal analyses and those of experiment.

1. 서론

SMART 냉각재순환펌프는 원자로에 설치되는 위치적 제약 때문에 수직으로 설치되어 작동하는 축류형 펌프로서 원자로의 환형 덮개에 볼트로 고정되며 원자로가 정상 운전 중일 때 노심에서 가열된 물을 증기발생기로 순환시키는 역할을 한다.

냉각재순환펌프용으로 사용되는 전동기는 유지 보수를 용이하게 하기 위하여 캔드모터를 사용하며 보일러의 일차냉각수가 베어링 윤활재로 사용된다.

이로 인하여 전동기 공극사이로는 베어링 윤활용 냉각재가 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 냉각재가 가열되기 때문에 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, 국내에서는 200kW급 이상 캔드모터 설계 및 제작 기술을 거의 보유하지 못하고 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 재료 특성상 밀착되지 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 운전조건에 따른 온도특성을 예측하기 위해 전동기의 열해석이 수행되어야 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 타당한 해석결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 전동기 열해석은 유한요소 해석프로그램인 Flux-2D를 이용하여 정격점인 180[kW]에서의 온도특성을 예측하고 전동기의 열적 안정성을 검토하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 캔드모터의 사양과 특징

MCP는 원자료가 정상운전 중일 때 그림 1과 같은 유로를 따라 노심에서 가열된 물을 증기발생기로 순환시키는 역할을 한다. MCP는 VVVF 인버터구동을 하여 저속(900 rpm)과 정상운전(3,600 rpm)의 2단 변속 운전모드가 제공된다.

이 때 인버터의 주파수는 각각 15[Hz]와 60[Hz]로 구동한다. 고정자에 부착되는 밀봉캔의 재질은 나이모닉(Nimonic)을 사용하고, 회전자에 부착되는 밀봉캔의 재질은 STS316L을 사용한다. 고정자의 슬롯(slot) 형상은 오픈 슬롯(open slot)이며, 회전자는 농형(squirrel cage)이다[1].

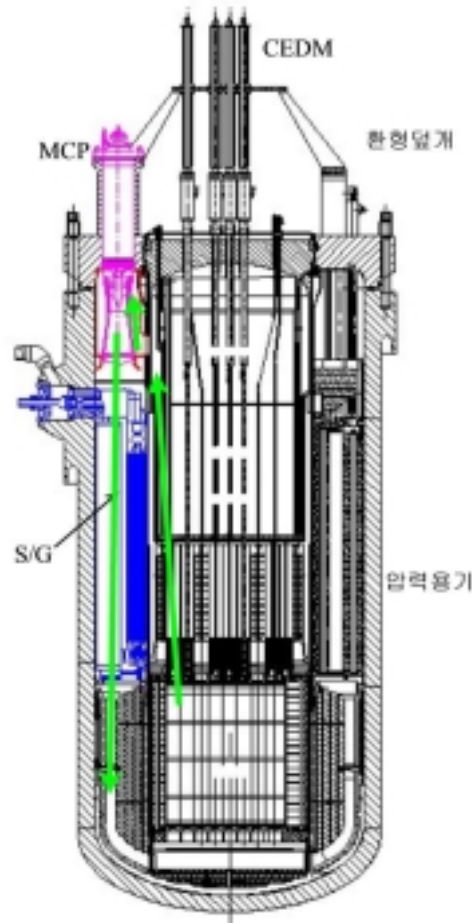


그림 1 일차냉각수 유동경로

전동기의 냉각은 전동기 냉각기를 이용하여 펌프 내부의 독립순환 회로의 일차 냉각수와 열교환을 함으로써 이루어진다.

즉, 공극과 고정자 외측을 순환하는 독립회로 냉각수와 전동기 냉각기로부터 공급되는 기기 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 2의 고정자 외측의 냉각기 냉각수관 사이를 지나게 되며 이때 열교환이 발생하여 독립회로 냉각수는 온도가 낮아져 공극으로 다시 유입되고 냉각기 냉각수는 온도가 상승하여 전동기 외부로 방출된다.

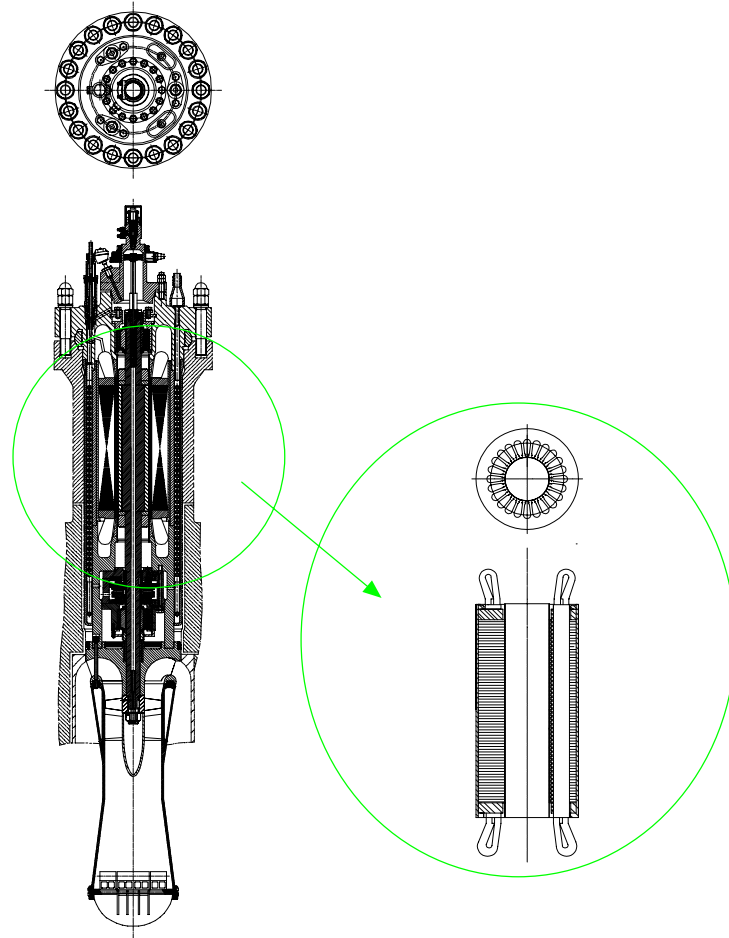


그림 2 MCP 집합체와 캔드모터 확대 도면

이상의 전동기 설계사양을 다음 표 1에 나타내었다.

표 1 전동기 설계사양

구 분	사 양	
정격출력	180 [kW]	
극 수	2	
주파수	저속운전모드	15 [Hz]
	정상운전모드	60 [Hz]
정격전압	400 [V]	
철심길이	750 [mm]	
고정자	외경	370 [mm]
	내경	190 [mm]
회전자 외경	184 [mm]	
슬롯수	고정자	36
	회전자	28
공극	기계	1.2 [mm]
	유효	3.0 [mm]
Can	고정자	0.8 [mm]
	회전자	1.0 [mm]

2.2 캔드모터에서의 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 재료의 열용량에 직접적으로 관계되며 열용량이 클수록 정상상태에 도달하기까지 소요되는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이는 열방정식인 아래 식을 통해 확인할 수 있다[2].

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \\ & = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

대류열전달이 존재하는 표면에 대해 에너지보존관계를 적용하면 다음 식과 같으며, 정상상태에 대하여 고려하면 우변은 영이 된다.

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

여기서, r 은 반경[m], k 는 열전도율[W/m·°C], T 는 온도[°C], ϕ 는 방사각[rad], \dot{q} 는 단위 체적당 발생열량[W/m³], ρ 는 밀도[kg/m³], c_p 는 비열[J/kg·°C], V 는 체적[m³], \dot{E}_g 는 에너지 생성항[W], h 는 대류열전달계수[W/m²·°C], T_s 는 고정자 표면온도[°C], T_∞ 는 주위온도[°C]이며 h 는 열해석시 요구되는 중요한 파라미터이다.

본 연구에서는 전동기의 고정자를 해석대상으로 하였으며 상기의 식에서 T_∞ 와 h 는 고정자 내 외측을 순환하는 독립회로 냉각수의 특성에 의해 결정된다.

이상과 같이 열해석을 수행하기 위해 요구되는 h 는 k , c_p , ρ , μ (점성계수;[N·s/m²]), v (유속;[m/s]), d (유로직경;[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 아래와 같다.

$$Nu = f(Re, Pr)$$

$$h = f(Nu, d, k)$$

여기서, Re 는 Reynolds수, Pr 은 Prandtl수, Nu 는 Nusselt수로 아래 식들과 같이 각각 정의되며 전동기내 독립회로의 냉각수는 비원형 단면에서의 유동이므로 유로직경 d 를 수력직경 d_h 로 고려하였다.

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

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

$$Nu = \frac{hd}{k}$$

2.3 온도특성 해석

이상과 같이 기술한 열전달관계식과 무차원 파라미터 등을 고려하여 대상 전동기에 대한 온도특성 해석을 2차원 유한요소 해석프로그램인 Flux2D를 이용하여 수행하였다.

2.3.1 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 1/36모델로 1슬롯에 대해 2차원으로 모델링하였으며 슬롯내의 권선수는 74-코일, 권선피복과 에폭시 사이에 존재하는 미세한 공기층의 두께를 0.1[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 57,379절점과 28,652요소로 분할하였다[3,4,5].

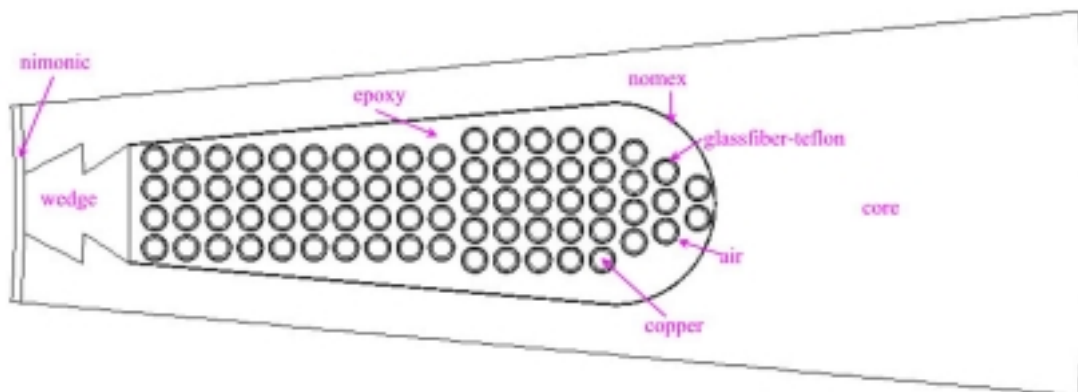


그림 3 2차원 권선 열해석모델

그림 3은 냉각재순환펌프용 농형유도전동기의 권선 열해석을 위한 2차원 해석모델로 3차원 공간 문제에 있어 1개의 축방향에 대해 어떤 물리적 상태가 무한히 동일 상태로 유지되는 경우에는 이를 2차원 문제로 흔히 다루고 있기 때문에 열해석은 36개 스톱중 1개 스톱에 대하여 해석하면 충분한 결과를 얻을 수 있으므로 1개 스톱만을 모델링하였다.

전동기 열해석은 유한요소 해석프로그램인 Flux-2D를 이용하여 해석하였다.

전동기 냉각은 고정자와 회전자 사이인 공극으로 순환하는 독립냉각수를 전동기 고정자 철심 외부로 순환시키며 이 순환되는 물은 다시 외부에서 공급되는 2차 냉각수로 인하여 열교환이 이루어진다. 고정자와 회전자 사이로 흐르는 독립회로의 냉각수의 유속은 약 1.32 [m/s], 공극입구에서 냉각된 냉각수의 온도는 약 64[°C], can을 거친 냉각수의 온도는 약 103[°C]로 예상을 하였다. 그러므로, 전동기 내부의 평균온도는 약 84[°C]로 설정을 하였다. 외부회로 냉각수의 유속은 1.73 [m/s]이며, 냉각수 입구에서는 60[°C], 냉각수 출구에서는 76[°C]로 예상하였으나 내부로 순환되는 물이 외부냉각수와 열교환이 이루어지므로 고정자 외부의 평균온도 역시 68[°C]로 설정을 하였다. 열해석은 정격점인 180[kW]에서 특성을 검토하였으며 각 부분의 손실인 고정자 동손, can 손실, 철손은 등가회로도에서 나온 결과 값들을 이용하였다.

2.3.2 손실계산

고정자의 열해석을 수행하기 위해서는 권선에서 발생한 동손과 철심에서 발생한 철손, 그리고 can손실을 파악하여 이를 해석모델에 적용하여야 한다.

우선 권선에서의 단위체적당 발생열량 즉 단위체적당 동손을 구해 보면 다음과 같다.

$$\dot{q} = J^2 \rho_{cu} [W/m^3]$$

가. 정격출력이 180[kW]인 경우

고정자 스톱당 도체수 2, 도체당 권선수가 37, 보통 전류밀도 J 는 3~5[A/mm²]로 하는 것이 보통이며, 권선 절연물이 H종으로 사용하고 수냉식일 경우 냉각이 어느 정도 잘된다고 가정하여 고정자 전류밀도는 4.5 [A/mm²]로 선정하였다.

동선의 경우는 아래 식으로 계산하였다. 우선 권선의 온도는 130°C 일 때 \dot{q} 를 구해 보면 권선의 저항률 ρ_{cu} 는 온도의 함수이므로 전류가 여자됨에 따른 권선의 온도상승을 고려하여 ρ_{cu} 를 결정하여야 할 것이다.

$$q = \dot{q} \times V$$

$$l_1 = L_c + (1.5 \sim 1.7) \times \tau, \quad \tau = \frac{2\pi r}{2p}, \quad \dot{q} = J^2 \rho_{cu, 130^\circ C},$$

철손의 경우는 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$P_c = 4.97 \left(\frac{B_p}{B_0} \right)^{1.942} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1.45} \times \frac{m}{N_1} [W/kg]$$

여기서, ρ 는 권선의 저항율, J 는 권선의 전류밀도, B_p 는 철심내부의 최대자속밀도(자계해석결과 =1.4 Tesla), f 는 철심내부자속의 주파수, B_0 , f_0 는 기준 자속과 주파수, m 은 고정자 철심 무게, N_1 은 고정자 스톱수이다.

고정자 철심의 무게를 계산하면,

$$m = \left(\frac{\pi}{4}\right)\{(D^2 - D_1^2) - (slot\text{면적}) \times 24\} \times L_c \times \rho$$

$$\therefore P_c = 4.97 \left(\frac{B_p}{B_0}\right)^{1.942} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1.45} \times \frac{m}{N_1}$$

can 손실의 계산은 다음과 같다.

고정자 내경에 부착된 비자성 재질 can은 정지된 농형과 같은 작용을 하므로 can의 저항을 1차적으로 환산하여 자화 reactance와 병렬로 구성 가능하다.

고정자 철심과 접촉하고 있는 부분의 can을 bar 부분으로 취급하면 다음 식과 같다.

$$can_{bar} = \frac{m \times \rho \times (CK_w)^2 \times L_1}{\pi \times D_1 \times can_t} \quad [\Omega]$$

can의 overhang 부분을 end-ring 부분으로 취급하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$can_{ring} = \frac{m \times \rho \times (CK_w)^2 \times D_1 \times 0.637}{(can_l - L_1) \times can_t} \quad [\Omega]$$

전체 can의 저항은 $can_{res} = can_{bar} + can_{ring}$ 로 can에서 발생하는 손실 값은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$can_{loss} = \frac{m \times V^2}{can_{res}} \quad [W]$$

여기서, m 은 상수, ρ 는 저항율, C 는 직렬도체수, k_w 는 권선계수, L_1 은 고정자 길이, D_1 은 고정자 내경, can_l 은 can의 길이, can_t 는 can의 두께이다.

2.3.3 온도특성값 계산

고정자를 구성하고 있는 각 부분의 열적특성을 적용하고 독립회로 냉각수가 순환하는 고정자의 내표면(공극측)과 외표면에서의 대류열전달계수를 적용하여야 한다.

동손과 철손, can손실 등은 등가회로도법에 의한 해석결과를 통해 결정할 수 있으며 절연재질이 나 철심, 권선 등 고정자를 구성하고 있는 재료의 열적특성은 각 재료별로 고유한 특성값이 알려져 있으므로 이를 이용하여 결정하였다.

정상상태 열해석시에는 열전도율만 고려하면 되지만, 비정상상태 열해석시에서는 밀도와 비열이 추가로 고려되어야 한다. 그리고 대류열전달계수는 앞서 언급하였듯이 *Reynolds*수, *Prandtl*수, *Nusselt*수 등의 무차원 파라메타를 이용하여 결정할 수 있다. 본 해석에서는 정상상태로 고정자의 열해석을 수행하였다.

열해석시 고정자 내표면과 외표면에서의 대류열전달계수 h 는 앞서 언급한 바와 같이 무차원수로 결정할 수 있으며 각 무차원수는 다음 식과 같이 정의되었다.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu}, Pr = \frac{\nu}{\alpha}, Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (1)$$

그리고 Nu 수는 $Nu = \frac{hD}{k}$ 와도 같이 정의되므로 대류열전달계수 h 는 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$h = \frac{Nu k}{D} \quad (2)$$

먼저 Re 수를 결정하기 위해서는 유속 V , 유로의 직경 D , 밀도 ρ 그리고 점성계수 μ 가 결정되어야 하며, 본 연구에서 대상으로 한 전동기는 수냉식이므로 적용되어야 할 유체의 특성값은 물의 특성값이다. 유속 V 는 아래 식에 의해 계산할 수 있으며 이때 $Q[m^3/h]$ 는 체적유량, $A[m^2]$ 는 유로 단면적이다.

$$V = \frac{Q}{A} [m/s] \quad (3)$$

고정자 내표면과 외표면에 흐르는 냉각수의 유량은 $5[m^3/h]$ 므로 냉각수 유량을 고정자 내측과 외측의 유로단면적으로 각각 나누면 고정자 내표면과 외표면에 흐르는 냉각수의 유속을 결정할 수 있다. 고정자 내측 유로단면적을 계산하면 $1,055 \times 10^{-6} [m^2]$ 이며, 외측 유로단면적은 cooler의 내경이 $16[mm]$ 로 $201.06 \times 10^{-6} [m^2]$ 이다. 고정자 내측과 냉각기 냉각수의 ρ 와 μ 은 다음과 같으며 이들은 온도에 따라 그 특성값이 약간씩 변화하게 된다.

$$\text{고정자 내측}(150\text{bar}) : \rho = 76.1531 [kg/m^3], \mu = 3.439 \times 10^{-4} [N \cdot s/m^2] : 83.5[^\circ C]$$

$$\text{냉각기}(5 \text{ bar}) : \rho = 979.0133 [kg/m^3], \mu = 4.1587 \times 10^{-4} [N \cdot s/m^2] : 68[^\circ C]$$

그리고, 고정자 내외측의 유동은 동심원관 내의 유동이므로 직경을 수력직경 D_h 로 고려하여야 하며, 고정자 내, 외측유로의 D_h 는 다음과 같으며, 따라서 이상의 값들을 식 (1)에 대입하여 Re 수를 결정할 수 있다.

$$D_{h, gap} = \sqrt{1,055 \times 10^{-6} / \pi} = 0.0183 [m], D_{h, os} = 0.016 [m]$$

물의 열적특성 data를 이용하여 고정자 내측 유로의 Pr 수는 2.11714, 외측 유로의 Pr 수는 2.646481로 결정하였으며, 이상과 같이 결정된 Pr 수를 식 (2)에 적용하여 Re 수를 계산하였다.

내측: $\nu = \frac{\mu}{\rho} = 352 \times 10^{-9} [m^2/s]$
 $R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} = 68,625$

$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} = 230$

외측: $\nu = \frac{\mu}{\rho} = 425 \times 10^{-9} [m^2/s]$
 $R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} = 65,129$

$N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^{0.4} = 241$

식 (2)를 이용하여 최종적으로 결정된 대류열전달계수 h 를 결정할 수 있는데, 이때 물의 열전도율 k 가 고려되어야 한다.

고정자 내측 냉각수의 열전도율 k_{gap} 은 $0.6770575[W/m^{\circ}C]$, 냉각기 냉각수의 열전도율 k_{os} 는 $0.6580542[W/m^{\circ}C]$ 로 계산되었으며, 따라서 고정자 내외측의 대류열전달계수는 다음과 같이 계산되었다.

$$h_{gap} = \frac{N_u \cdot k}{D} = 8,509 [W/m^2 \cdot ^{\circ}C]$$

$$h_{os} = \frac{N_u \cdot k}{D} = 9,912 [W/m^2 \cdot ^{\circ}C]$$

표 2는 이상과 같은 계산으로 얻어진 MCP용 전동기 열해석 조건들로, 정격 180[kW]에서는 전류 밀도가 $4.5[A/mm^2]$ 로 해석을 하였다.

표 2 고정자 열해석조건

구 분		정격 180[kW]
손 실 [W]	고정자 동손	81
	Can 손실	122
	철 손	2,742
열전도율 [W/m °C]	Can	15.1
	Stator	42.5
	Coil	387
	Glass Fiber	1.4
	Teflon	0.2
	Nomex	0.105
	epoxy수지	0.5
	Air	0.0263
냉각수 온도 [°C]	고정자내측	83.5
	냉각기	68
대류열전달계수 [W/m ² °C]	고정자내측	8,509
	냉각기	9,912

2.3.4 온도해석 범위

전동기 제작에 사용된 코일은 나동선에 유리섬유를 체크모양으로 편조하고 불소수지(테프론)를 도포한 뒤 450[°C]에서 열처리하여 특수 제작된 것으로 연속 400[°C]의 온도에서 코일의 절연이 파괴되지 않고 정상적인 전동기의 운전이 가능하다. 하지만 실제로 이 권선을 epoxy수지 수지(내열성 즉, 열변형온도 : 160°C~260°C)로 함침할 경우 불소수지 테프론과 epoxy수지 수지는 일부 접촉하지 못하고 이 둘 사이에 미세한 공기층이 생기는 단점을 고려하여 열해석을 수행하였다.

2.3.5 유한요소법 열해석 순서

Flux-2D 열해석 순서는 다음과 같다.

- i) 등가회로도법 해석에 의한 동손, 철손, can 손실값 계산
- ii) 열전도율 계산
- iii) 대류 열전달계수 결정
- iv) modeling - plane : 750 mm
- v) 모델 각 region에 특성값들을 부여
- vi) shell 정의 - ambient temperature 부여
- vii) mesh generation
- viii) solve
- ix) results analysis

표 3은 각 모델에 적용한 region의 특성값들이다.

표 3 모델 region의 특성값

Region	그림 5	
	material	characteristic
CAN	nimonic	power:2,742W
나동선	copper	power:81W
절연재1	공기	-
절연재2	glass-fiber+ teflon	-
고정자	SE15C	power:122W
함침재	epoxy수지	-
절연지	nomex	-
쌌기	glass-fiber	-
고정자내측	shell 선언	ambient T:64°C
고정자외측	shell 선언	ambient T:60°C

2.3.6 온도특성 해석결과

온도특성 해석은 정격출력 180[kW]에 대하여 해석하였으며, 74-코일 모델에서 함침재로 epoxy 수지를 채웠지만 epoxy수지가 코일 절연물과 접촉되지 않고 약 0.1[mm] 정도 이격되어 공기로 채워진 경우를 가정하여 해석하였다. 해석선 AB의 위치는 그림 4와 같이 정의하였다.

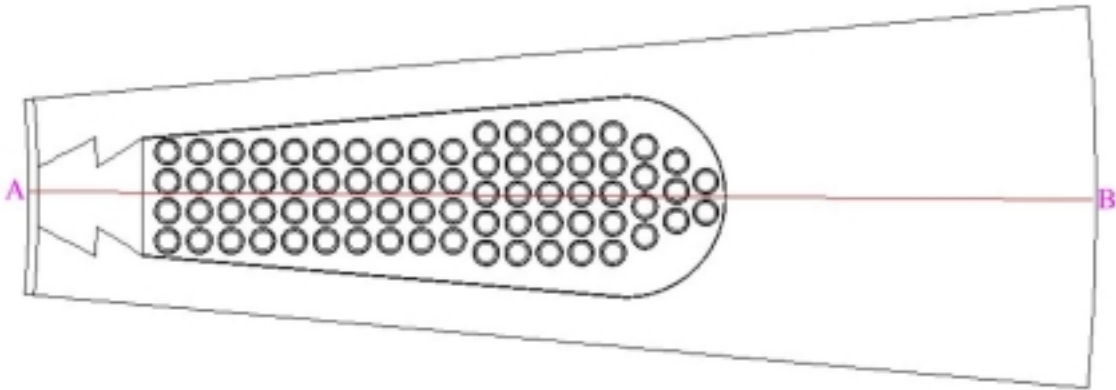


그림 4 해석선 AB의 정의

가. 180[kW] 정격출력 운전시 해석결과

상기에서 결정된 해석조건을 적용하여 대상 전동기의 고정자에 대한 온도특성 해석을 수행한 결과 다음 그림 5, 6, 7과 같은 온도특성을 얻었다. 그림 5, 6은 고정자의 온도분포이고, 그림 7은 슬롯의 횡방향으로 1/2로 나누어 고정자 슬롯 내경에서 고정자 슬롯 외경쪽으로 그림 4에서 정의된 해석선 AB의 온도분포 특성을 나타낸 것이다.

슬롯 내부에서 절연피복과 에폭시 수지 그리고 공기층이 존재하는 부분은 열전도율이 작아 열저항이 크기 때문에 상대적으로 열저항이 작은 철심과 권선부분에 비해 온도구배가 크게 나타났다. 해석을 통해 얻은 권선의 최고온도는 약 101°C 이다.

FLUENT 7.30/8 180KW0822 08/22/01 09:23 Analysis Display Isovalues Temperature

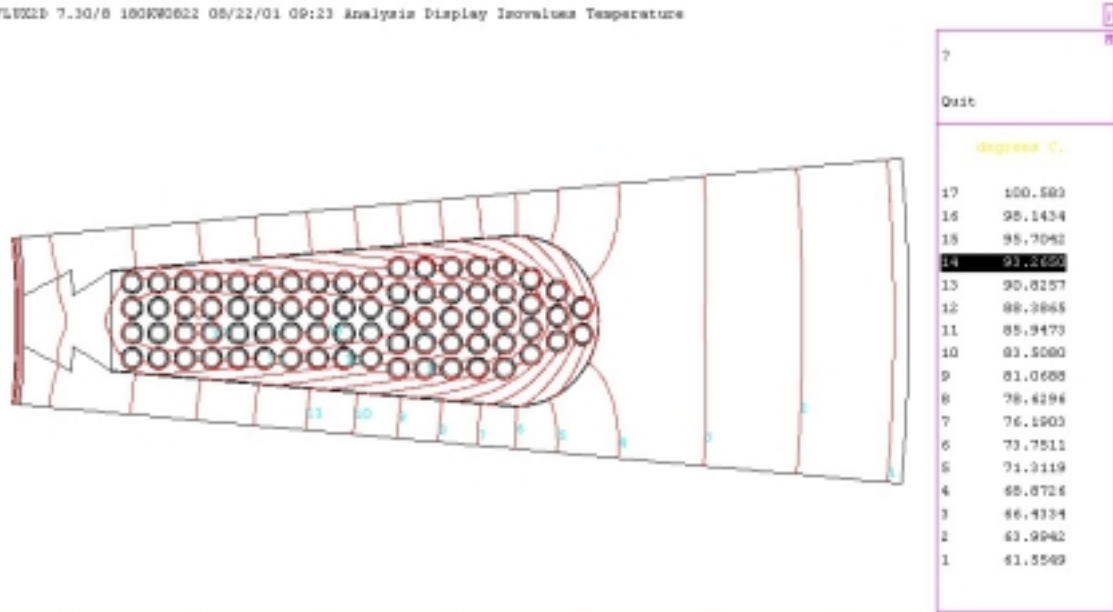


그림 5 180kW 정격운전시 고정자의 등온선분포

FLUENT 7.30/8 180KW0822 08/22/01 09:19 Analysis Display Color shade Temperature

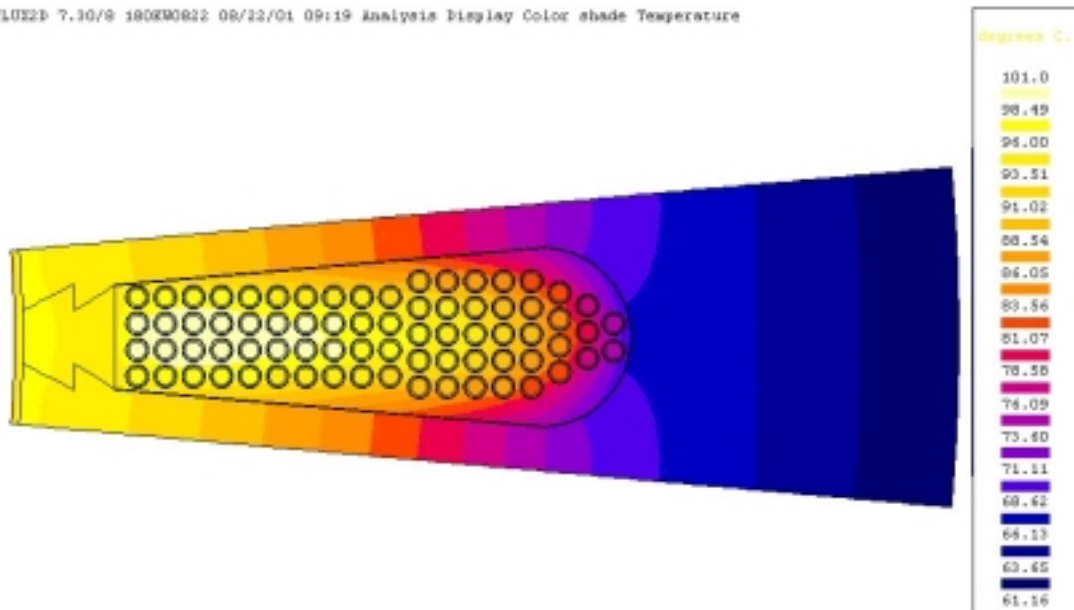


그림 6 180kW 정격운전시 고정자 온도분포(color shade)

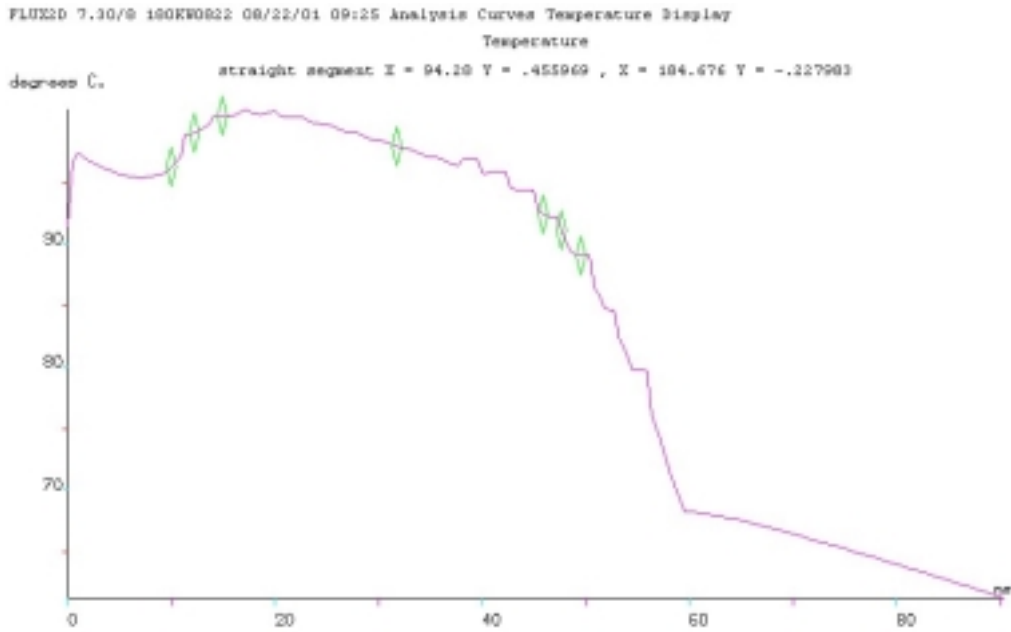


그림 7 180kW 정격운전시 고정자의 반경방향 온도특성

3. 결론

냉각재순환펌프에 장착되는 농형유도전동기의 주요 치수들은 등가회로도법 해석으로 결정되었으며 이들 설계치에 대하여 유한요소법으로 열해석을 수행하였다.

열해석은 실제 제작시 가능성이 가장 큰 경우 즉 고정자 스롯 내부의 권선을 함침재(에폭시 수지)로 함침시 권선의 절연피복재(그라스 파이버+테프론)와 함침재가 접촉되지 않아 약 0.1[mm]정도 떨어져 있다고 가정하여 해석하였다.

온도특성해석은 180[kW] 정격출력 운전시 분석하였다. 해석결과에서 열적특성이 가장 나쁜 것은 스롯내부의 권선 함침시 공기가 주된 온도상승 요인으로 함침시 최대한 제거할 필요가 있음을 알 수 있으며 냉각수의 온도가 평균적으로 68[°C]일 때 정격출력 운전시 권선 최고온도는 101[°C], 사용된 절연피복재(그라스파이버+테프론)가 실제 약 300°C에도 사용에 문제가 없기 때문에 운전에는 큰 문제가 없음을 예측할 수가 있었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] MCP(17.5/2006)의 핵심치수계산서, SMART-CD-CA630-11, Rev.00

[2] 송기동 외, “전자기 시스템의 결합문제 해석기술 동향”, 전기학회지, Vol.48, No. 9, 1999. 9

- [3] 구대현, 강도현, 박정우, 김종무, 김종인, 박진석, “일체형원자로 냉각재 순환펌프의 전동기 설계 및 해석”, 98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.
- [4] 허 형 외, “SMART 제어봉구동장치의 선형펄스모터 열해석“, 99년도 한국원자력학회 춘계학술대회논문집, 1999.
- [5] 허 형 외, “SMART용 냉각재순환펌프에 장착되는 농형유도전동기의 전자기 및 열해석“, 99년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999.