

SMART용 냉각재순환펌프에 장착되는 농형유도전동기의 전자기 및 열해석

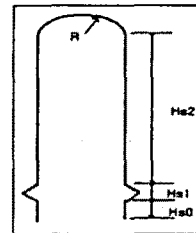
허형*, 구대현**, 강도현**
 *한국원자력연구소, **한국전기연구소

Electromagnetic and Thermal Analysis of Squirrel Cage Canned Induction Motor for SMART Main Coolant Pump

Hyung Huh*, Dae-hyun Koo**, Do-hyun Kang**
 *Korea Atomic Energy Research Institute, **Korea Electric Research Institute

Abstract - A squirrel cage canned induction motor for the main coolant pump of the integral reactor, SMART was designed, manufactured and tested. The motor was first designed using the equivalent circuit theory to determine major dimensions and then finalized through finite element analyses for electromagnetic and thermal characteristics. In order to verify the design methodology, a reduced scale canned induction motor was manufactured and tested. The experimental results have shown a good agreement with the analysis results.

2차원 유한요소 해석을 수행하였다. 보다 정확한 전동기특성을 예측하기 위하여 고정자 코일단과 회전자 권선의 단락환(end ring)부분의 전자기적 특성은 3-D 해석결과와 실험치를 이용하여 보정을 하였다. 본 유한요소 프로그램해석에 사용된 상당 고정자 End Leakage Inductance는 식(1)을 이용하여 구하였다.



$$L_e = \frac{1.34 \mu_0 W^2 (l_e - 0.64 T)}{b} \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 $4\pi \times 10^{-7}$, W 는 직렬 상당 Turn 수,

b 는 극수, $T = \frac{\pi D_i}{2p}$ (D_i = 고정자 내경),

$L_e = 2dl + k_s$, $dl = 0.010 \sim 0.040$ [m] (전동기 크기에 의존), $k_s = 1.16$ (2극), 1.2 (4극과 6극),

1.25 (8극)이다. 해석상의 변수값들은 표 1에 실었다. 그림 1은 2차원 FEM 해석결과로 자속밀도 분포도이고, 그림 2는 공극에서의 자속밀도이다.

고정자의 총 슬롯은 24개, 회전자 총슬롯이 28개이며, 고정자의 재질은 S12의 규소강판, 회전자는 축

과 일체형으로 도전율이 1.1×10^6 [Ω/m]의 자성체인 SUS430을 사용하였다. 고정자와 회전자에는 각각

도전율이 1.1×10^6 [Ω/m]인 비자성체인 SUS403의 can으로 둘러싸여 있으며, 회전자 bar와 단락환은

도전율 5.8×10^7 [Ω/m]의 Cu를 사용하였다. 그림 3은 등가회로도법에 의한 계산결과이고, 그림 4~6은

유한요소해석에 따른 결과값으로 그림 4는 Torque 특성, 그림 5는 Power-factor 특성, 그림 6은 효율

특성을 각각 나타낸다. 그림 4의 Torque특성에서

1. 서론

일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프(MCP)는 원자로에 설치되는 위치적 제약 때문에 수직으로 설치되어 작동하는 축류형 펌프로서 원자로의 환형 덮개에 볼트로 고정되며 원자로가 정상운전 중일 때 노심에서 가열된 물을 증기발생기로 순환시키는 역할을 한다. 냉각재순환펌프에 사용될 전동기는 구조가 간단하고 유지보수가 불필요한 유도전동기가 사용되며 회전자가 일차냉각수 속에서 회전하는 캔드모터가 채택되었다. 회전자는 원자로 내부압력 등을 고려하여 성층이 없는 solid-type의 구조이며, 900[rpm]과 3600[rpm]에서 운전이 가능하도록 VVVF 인버터로 구동된다.

본 연구에서 전동기의 설계는 등가회로도법 해석으로 주요치수를 결정하고 유한요소법으로 전동기특성 및 열해석을 수행하여 확정하였다. 설계와 해석의 타당성을 검증하기 위하여 30[kW]급 시제품 전동기를 제작하여 토크특성, 전류, 효율, 역율, 온도특성 등을 측정하고 해석결과와 비교·검토하였다.

2. 유한요소법에 의한 전동기해석

등가회로도법으로 설계된 전동기의 치수를 이용하여

최대값은 236[N·m], 기동시는 약 99[N·m]로 나타났으며, 기동시의 최대전류는 약 405[A]로 나타났다. 그림 6의 역률은 기동시 29[%], 최대값이 약 80[%]로 나타났으며, 그림 7의 효율은 최대값이 약 90[%]로 나타났다. 전체적으로 등가회로도와의 비교해 볼 때 Torque 값은 기동시와 최대값에서 다소의 차이가 나고 있으며 전동기의 효율도 FEM결과의 경우 90[%], 등가회로도법에서는 약 82[%]로 다소 차이가 나고 있지만 정적점에서 출력, Torque, 전류값은 거의 일치하고 있음을 알 수가 있다.

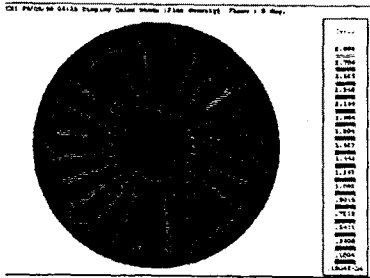


그림 1 자속밀도 분포도

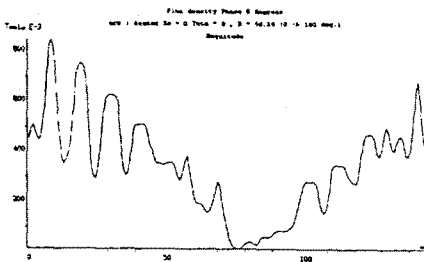


그림 2 공극자속밀도

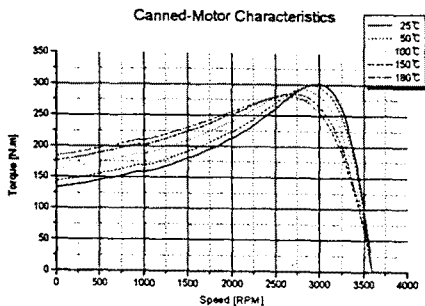


그림 3 등가회로도법에 의한 토크 특성

표 1. Variable Control

Variables	Value	Remarks
VoltageLine	340(V)	Rated line-to-line applied voltage
Frequency	60(Hz)	Rated source frequency
I1Line	76.9(A)	Rated line current
Period	2	Ratio of entire motor area to the solved field domain
PolePairs	1	Number of pole pairs
Turns	32	Number of turns in series per phase
DensityPerAmp	27004 [A/m ²]	Equivalent stator slot current density for unit input phase current
Length	0.45(m)	Axial length of the core
StatorSlots	24	Number of stator slots
RotorSlots	28	Number of rotor slots
DiaBore	0.095(m)	Diameter of stator bore
EffecCap	0.00324 (m)	Effective air gap
StackFactor	0.95	Stack factor of stator lamination
PitchFactor	0.846	Fractional pitch factor of stator winding
R1	0.0651 [Ω]	Stator resistance per phase under rated running temperature
MechLoss	145(W)	Mechanical loss at 60 Hz
StrayLoss	0.01	Stray loss at rated running condition given as percent of rated output
CoreLoss	348(W)	Core loss at rated running condition
L1End	3.49575x e-4(H)	Stator end leakage inductance per phase
RingArea	0.000221(m ²)	Area of rotor end ring
RingResis	2.07e-8 [Ω/m]	Resistivity constant of rotor end ring under running temperature
MdiaRing	0.0795 (m)	Mean diameter of rotor end ring
SkewFactor	0	Skew factor, measured in rotor slots

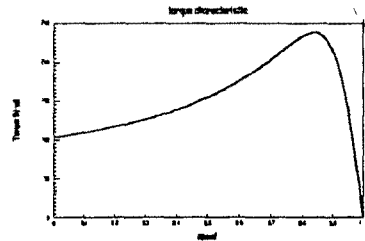


그림 4 Torque/Speed 특성곡선

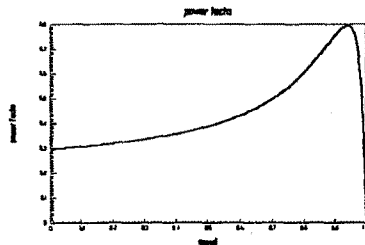


그림 5 power-factor/speed 특성곡선

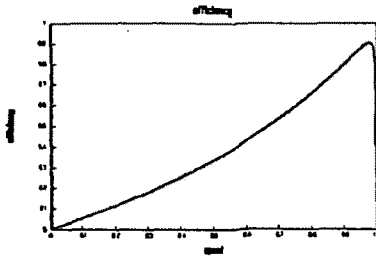


그림 6 효율/speed 특성곡선

3. 냉각계순환펌프용 전동기 열해석

SMART용 MCP전동기는 고온의 원자로 내부에 설치되어 운전되기 때문에 열해석은 반드시 검토하고 넘어가야 할 사항이다. 전동기 열해석은 유한요소 해석프로그램인 Flux-2D를 이용하여 모델링을 하였다. 표 2는 MCP용 전동기 열해석 조건을 나타낸 것으로, 정격 29(kW)에서는 전류밀도가 4.63 [A/mm²]으로 해석을 하였으며 과부하시에는 이에 해당하는 고정자 동손치로 해석을 하였다.

열해석은 다음 3가지에 대하여 분석을 하였다.

- i) 슬롯내부가 슬롯함침용 Epoxy등의 Filler없이 공기로 구성된 경우
- ii) 슬롯내부를 슬롯함침용 Epoxy로 함침하여 빈 공기가 없는 경우
- iii) 슬롯내부를 슬롯함침용 Epoxy로 함침하지만 테프론과 Epoxy가 접촉하지 않는 경우

특성해석은 29(kW), 36(kW), 38(kW)의 3가지로 분석을 하였으며 가장 부하가 많이 걸리는 38(kW)에 대한 특성을 그림 7에 나타내었다.

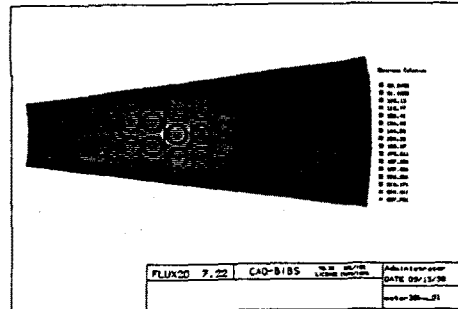
결과에서 열적특성이 가장 나쁜 것은 슬롯내부를 충전물없이 공기로만 채웠을 경우로 가장 높은 온도는 약 227(°C)로 나타났다. 이와 반대로 열적 특성이 가장 좋은 것은 슬롯내부를 Epoxy로 슬롯내부를 채웠을 경우로 가장 높은 온도는 약 100.5(°C)로 나타났다. 하지만 실제로 Teflon으로 절연된 권선을 Epoxy로 함침할 경우 Teflon과 Epoxy는 결합하지 못하고 이 둘사이에는 미세한 공간이 생기므로 그림 7(d)에서 알 수 있는 바와 같이 권선 최고 온도는 약 122.4(°C)로 나타나 Epoxy로 완전히 채웠을 때보다 약 22(°C)가량 온도가 상승함을 알 수 있었다.

이상의 결과에서 슬롯내부에서 공기는 발열의 주 원인이므로 최대한 제거를 할 필요가 있음을 알 수 있다. 정격 29(kW)시 Epoxy가 코일 절연물과 접촉하지 않고 약 0.15(mm)떨어져 있다고 가정할 경우 권선의 온도는 약 110(°C)가량 온도가 상승하였다. 이상의 결과를 비교한 것을 그림 8에 나타냈으며, 표 3은 슬롯내부의 코일을 16코일과 32코일을

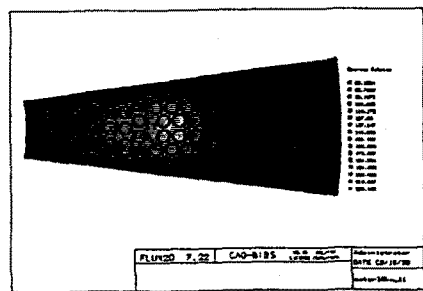
비교, 분석한 표로 역시 온도상승의 주 원인은 공기임을 알 수 있다. 이상의 결과로 냉각수의 온도가 평균적으로 85(°C)일 때 함침물인 Epoxy가 코일 절연물과 접촉하지 않고 약 0.15(mm)떨어져 있다고 가정할 경우, 정격점이나 과부하시인 약 38(kW)에도 사용에는 큰 문제가 없음을 알 수가 있었다.

표 2 고정자 열해석조건 (정격: 29(kW), 전류밀도 4.63[A/mm²])

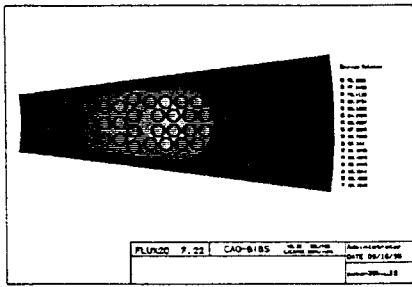
구분	29(kW)	36(kW)	38(kW)	
손실 [W]	고정자 동손	46.7	64	69
	Can 손실	114	114	114
	철 손	25	24	24
절연도율 [W/m°C]	Can	15.1		
	Stator	42.5		
	Coil	387		
	Glass Fiber	1.4		
	Teflon	0.2		
	Nomex	0.105		
	Epoxy	0.5		
	Air	0.0263		
냉각수 온도 (°C)	공극부분	85		
	철심부분	85		
대류열전달계수 [W/m ² °C]	Gap	4.677		
	외표면	987		



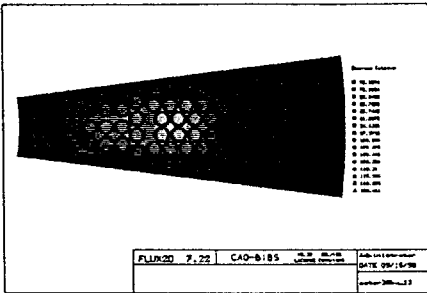
(a) 충전물 : 공기, Coil수 : 16



(b) 충전물 : 공기, Coil수 : 32



(c) 충전물 : Epoxy, Coil수 : 32



(d) 충전물 : Epoxy, Coil수 : 32
[Coil주위 : 0.15mm 공기층 존재]
그림 7 Canned-motor 온도특성

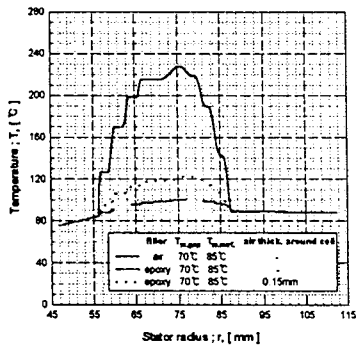


그림 8 canned-motor 권선온도 특성
[38kW, 충전물:공기, 32-coil]

표 3 고정자 권선 온도비교 [단위: °C]

구 분	29 [kW]		36 [kW]		38 [kW]	
	권선수		권선수		권선수	
	16	32	16	32	16	32
Air	192.9	180.6	233.9	216.8	245.8	227.3
Epoxy	95.6	94.8	100.4	99.2	101.9	100.5
Epoxy (공기층:0.2mm)	112.7	-	123.8	-	127.0	-
Epoxy (공기층:0.1mm)	105.0	-	113.2	-	115.7	-
Epoxy (공기층:0.15mm)	-	109.7	-	119.6	-	122.4

4. 결 론

일체형원자로 SMART의 냉각재순환펌프에 장착되는 canned 농형유도전동기의 설계와 해석의 타당성을 검증하기 위하여 축소모델 시제품 전동기의 토크특성, 전류, 효율, 역율, 온도특성등을 시험하였다. 시험결과 최대토크, 기동토크값 및 효율에서 약간의 오차는 있지만 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하는 결과를 제시하였다. 여기서 구한 토크특성 및 열특성값등은 추후 모터의 설계최적화를 위한 입력으로 활용될 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김종인 외, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, KAERI/RR - 1889/98, 1999.3
- [2] 장문희 외, "테마기획-중소형 일체형원자로 SMART 개발", 대한기계학회 기계저널, Vol.39, No. 4. 1999. 4.
- [3] 박근배 외, "중소형 일체형원자로 기계구조설계개발", KAERI/RR-1711/96, 1997.
- [4] 구대현, 강도현, 박정우, 김종무, 김종인, 박진석, "일체형 원자로 냉각재 순환펌프의 전동기 설계 및 해석", 98년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 1998.
- [5] 허 형 외, SMART 제어봉구동장치의 선형펄스모터 열해석", 99년도 한국원자력학회 춘계학술대회논문집, 1999.
- [6] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996.
- [7] J.P. Holman, "Heat Transfer", 7th ed., McGraw-Hill Book Co., 1995.