

일체형 원자로 냉각재 순환펌프의 전동기 설계 및 해석

구대현\*, 강도현\*, 박정우\*, 김종무\*, 김종인\*\*, 박진석\*\*  
 한국전기연구소\*, 한국원자력연구소\*\*

Design and analysis of MCP for SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)

Dae-hyun Koo\*, Do-hyun Kang\*, Jung-woo Park\*, Jong-mu Kim\*, Jong-in Kim\*\*, Park Jin-seok\*\*  
 K.E.R.I.\*, K.A.E.R.I.\*\*

Abstract

Canned-motor of 3-phase induction is to be used for MCP. Its design and analysis are performed considering the effect of eddy-current loss induced in the can. The effect of inverter of canned-motor is also considered as it is controlled by VVVF inverter for two operating points.

1. 서론

SMART 냉각재순환펌프(main coolant pump)는 그림 1과 같이 원자로에 설치되는 위치적 제약 때문에 수직으로 설치되어 작동하는 축류형 펌프로서 원자로의 환형덮개에 볼트로 고정되며 원자로가 정상운전 중일 때 노심에서 가열된 물을 증기발생기로 순환시키는 역할을 한다(그림 2). 냉각재순환펌프에 의해 증기발생기로 강제순환된 고온의 일차냉각수와 튜브시트 내부로 흐르는 이차냉각수와 열교환이 일어나며 자신은 온도가 낮아지게 된다. 온도가 낮아진 일차냉각수는 노심으로 순환되어 가열된 후 처음과 같이 냉각재순환펌프에 의해 증기발생기로 강제순환 된다. 이와같이 원자로 노심에서 발생하는 열원을 이용하여 증기발생기에서 증기를 발생하게 하는 매개체인 냉각수를 계속 순환시키는 목적으로 냉각재순환펌프를 사용한다. 펌프의 모든 부품들은 펌프 몸체 내부에 있기 때문에 원자로의 일차냉각수와 직접 접촉하지만 외부와는 격리되어 있다. 회전축은 펌프몸체의 외부로 나오지 않으므로 실(seal)을 위한 패키징이 필요없고 전동기의 회전자와 회전축이 일체이기 때문에 동력전달을 위한 연결부위가 없다. 회전축은 3개의 저널 베어링과 1개의 추력 베어링으로 지지되어 있다. 전동기는 캔드모터(canned-motor) 구조로서 회전자와 고정자가 밀봉캔으로 용접되어 있기 때문에 일차냉각수와 격리되어 있으며 전동기는 2단 변속운전을 할 수 있게 설계되었다. 원자로 외부에서 공급되는 보조 냉각수가 펌프 내부에 있는 독립순환 냉각장치로 유입되어 펌프내부에서 순환하는 냉각수와 열교환이 이루어지면서 전동기에서 발생한 열을 냉각시켜서 전동기의 온도가 상승하는 것을 방지하였다. 특히 캔드모터의 can에서 발생하는 와전류(eddy-current) 손실을 최소화 할 수 있는 최적설계를 수행하였다.

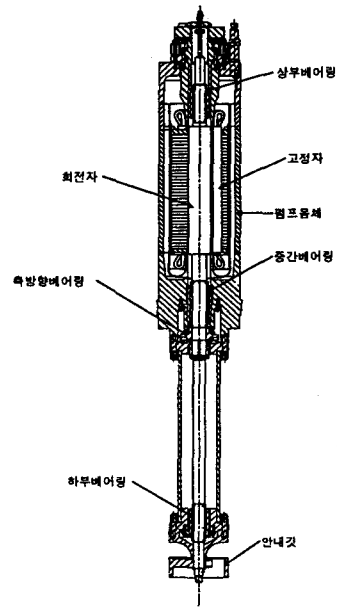


그림 1 SMART 냉각재순환펌프 개념도

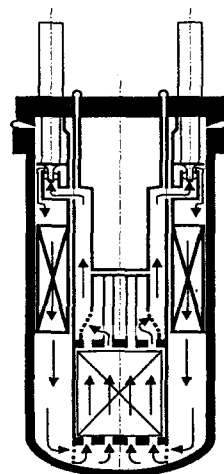


그림 2 원자로내에서의 일차 냉각수 흐름도

## 2. 냉각재순환펌프 설계

냉각재순환펌프의 유량과 수두는 원자로에서 요구되는 특성에 따라 정해지며 수두의 결정은 냉각재순환펌프가 노심에서 가열된 냉각수를 증기발생기로 강제 순환시킬 때 원자로 내부구조물 사이로 유동되면서 생기는 수력손실 등을 계산하여 구해진다. 그리고 유량은 원자로 노심의 입구온도와 출구온도 차이 및 원자로에서 요구되는 출력의 상관관계에서 결정된다.

펌프 운전시 펌프에 의해서 액체에 주어지는 동력을 수동력(water horse power :  $L_w$ )이라 하는데 이를 수식으로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$L_w = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102 \times 60} \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

여기서  $\gamma$  : 액체의 비중량 [ $\text{kg/m}^3$ ]

H : 전양정 [m]

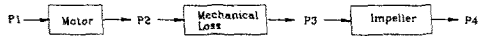
Q : 송출유량 [ $\text{m}^3/\text{min}$ ]

그리고 전동기에 의해서 펌프를 운전하는데 필요한 동력을 축동력(shaft horse power :  $L_s$ )이라 하며 수동력과 축동력의 관계식을 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_p = \frac{L_w}{L_s} \quad (2)$$

펌프의 제효율과 손실은 다음 그림 3에서와 같이 전동기에서 발생하는 손실( $\eta_{\text{Motor}}$ ), 회전자의 원활한 회전을 위한 기계적인 베어링에서 발생하는 손실과 회전차가 케이싱내의 유체를 헤치고 회전해야 하는데 따른 마찰손실등을 합친 기계손실( $\eta_{\text{Mechanical}}$ ), 그리고 펌프에 영향을 많이주는 수력손실( $\eta_{\text{Hydraulic}}$ )로 나눌수 있으며 (누설손실은 무시) 전체의 펌프손실은 다음 식(3)과 같다.

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Mechanical}} \cdot \eta_{\text{Hydraulic}} \quad (3)$$



$\eta_{\text{Motor}}$                        $\eta_{\text{Mechanical}}$                        $\eta_{\text{Hydraulic}}$

그림 3. 펌프 Motor 구성도

SMART 냉각재순환펌프에서 요구된 유량(Q)은 1982 [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] 이고 수두(H)는 13.5 [m] 이며 물의 비중( $\gamma$ )은 1,000 [ $\text{kg/m}^3$ ]이다. 그러므로 필요한 수동력은 위의 식(1)을 이용하면 다음과 같다.

$$L_w = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102 \times 60} = \frac{1000 \times 1983 \times 13.5}{102 \times 3600} = 73[\text{kW}]$$

기존의 펌프 축동력은 전동기손실이 작기 때문에 무시하고 기계손실, 수력손실, 체적손실만 고려하여 계산을 한다. 하지만 본 논문에서 사용된 MCP용 전동기 Type 은 유도전동기이며 고정자내부와 회전자표면에 얇은 can 으로 밀봉된 canned-motor이기 때문에 can에서 발생하는 손실이 상당히 크고 또한 슬롯형태가 기존 전동기와는 달리 회전자의 경우 완전 개방형 형태가 된다. 그리고 can에서의 손실을 줄이기 위하여 반경이 작고 길이가 긴 형태가 되는등 기존의 전동기와는 전혀 다른 형태이기 때문에 축동력 계산시에는 전동기의 손실을 반드시 고려해야 된다. 그러므로 여기서는 축동력이 아니라 전동기 입력 power [ $P_1$ ]를 중심으로 한 전체 효율이 고려해야 된다. 그러므로 전동기 손실, 기계적 손실, 그리고 수력학적 손실들을 고려한 전체 예상효율

( $\eta_{\text{total}}$ )을 43(%)로 설정하면 이론상 요구되는 수동력으로 부터 다음과 같이 전동기 입력 power를 구할 수가 있다.

$$P_1 = L_w / \eta_{\text{total}} \approx 170 [\text{kW}]$$

냉각재 순환펌프는 냉각시와 과열시 2가지 모드에서 동작해야 한다. 원자로 냉각시(20°C)에서 요구되는 전동기의 소비전력은 위에서 구한 것과 같이 170[kW]이며 회전수는 900[r.p.m]이며 이때의 주파수는 15[Hz]이다. 원자로 과열시(300°C)에서 요구되는 전동기의 소비전력은 128[kW]이며 회전수는 3600[r.p.m]이며 이때의 주파수는 60[Hz]이다. 전동기의 극수는 Can에서의 와전류손실을 최소로 하기 위하여 2극으로 설정하였으며 권선의 결선은 Y결선, 전동기의 효율은 0.8, 역률 0.8을 기준으로 설계를 하였다. 이상의 설계사양을 다음 표 1에 나타내었다.

표 1. MCP 설계사양

		설계 사양
냉각시 (20°C)	소비전력	170 [kW]
	주 파 수	15 [Hz]
과열시 (300°C)	회전 수	900 [r.p.m]
	소비전력	128 [kW]
	주 파 수	60 [Hz]
	회 전 수	3,600 [r.p.m]
전 압		380 [V]
상 수		3 상
극 수		2 극
효 율		0.82
역 률		0.71
결 선		Y-결선

표1의 MCP용 전동기 설계사양을 바탕으로 장하분배법을 이용하여 다음 표 2, 3과 같은 고정자와 회전자의 치수를 설계하였다. 본 논문에서 설계된 전동기는 전압형 인버터로 구동될 예정이므로 다음사항을 기준으로 전동기 설계를 하였다.

① 인버터로 구동하는 경우 인버터 출력파형에 포함되는 고조파의 영향으로 모터의 역률과 효율이 악화된다. 철손은 주파수와 자속밀도의 함수이므로 인버터의 일반적인 방식인 PWM인버터는 그 출력파형속에 초퍼 주파수를 포함하고 있고, 기본파에 비교하여 전압성분은 적지만 주파수가 높기 때문에 전동기를 구동하면 상당히 큰 철손이 발생하게 된다. 그러므로 비록 정동Torque가 작아지지만 고조파제거와 정현파를 위하여 내부의 reactance를 크게 해주었다.

④ 회전자의 표피효과(Skin-effect)를 이용하여 기동 Torque를 크게 얻을 수 있지만 본 논문의 전동기는 인버터 구동을 하기 때문에 Inverter로 구동하기 때문에 기동 Torque 문제가 없으므로 2차속 손실을 줄이기 위하여 표피효과를 최대한 줄이는 Slot 형태를 선택하였다.

③ 공극을 크게 설계 하였다. 공극이 커지면 공극이 적은것에 비하여 주 reactance의 변화가 적어지며 자기적 불균형과 기계적 안정성, 축 진동의 영향을 줄여줄게 된다. 그리고 고정자와 회전자 사이에 흐르는 냉각수의 원활한 흐름도 주된 이유중의 하나이다.

표 2. 고정자 설계 사양

고 정 자		치 수
슬롯	슬롯 수	36 slot
	상부 폭	1.07 [cm]
	하부 폭	1.53 [cm]
	Opening	0.0 [cm]
	Tip	0.3 [cm]
	Mouse	0.535 [cm]
	사다리 길이	2.63 [cm]
치	총 깊이	3.93 [cm]
	평균 폭	0.79 [cm]
권선	높이	2.63 [cm]
	내경	1.7 [mm]
	외경	1.9 [mm]
	절연 두께	0.2 [mm]
	단면적	2.27 [mm <sup>2</sup> ]
	재질	Cu
	저항률	0.0176 × 10 <sup>-6</sup> [Ω·m]
Yoke	깊이	5.18 [cm]
내경	내경	19.7 [cm]
	외경	38.5 [cm]

표 3. 회전자 설계 사양

회 전 자		치 수
슬롯	슬롯 수	29 slot
	상부 폭	1.0 [cm]
	하부 폭	1.0 [cm]
	Opening	1.0 [cm]
	Tip	0.0 [cm]
	Mouse	0.0 [cm]
	사다리 길이	1.51 [cm]
치	총 깊이	1.51 [cm]
	최대 폭	1.1 [cm]
	최소 폭	0.77 [cm]
	평균 폭	0.88 [cm]
	높이	1.51 [cm]
BAR	상부 폭	1.0 [cm]
	하부 폭	1.0 [cm]
	높이	1.51 [cm]
	면적	1.51 [cm <sup>2</sup> ]
End-ring	저항률	0.0176 × 10 <sup>-6</sup> [Ω·m]
	외경	19.34 [cm]
	내경	13.28 [cm]
	두께	2.3 [cm]
	폭	3.03 [cm]
	단면적	6.97 [cm <sup>2</sup> ]
Yoke	저항률	0.0176 × 10 <sup>-6</sup> [Ω·m]
	깊이	5.33 [cm]
내경	내경	5.65 [cm]
	외경	19.34 [cm]

### 3. 냉각재순환펌프 해석

본 논문에서 설계된 전동기의 해석은 정확도가 높은 T형 등가회로도법에 의하여 전동기 특성분석을 하였다. 본 논문의 전동기는 Canned-motor이므로 보다 정확한 해석을 위하여 Can에서 발생하는 Eddy-current 손실을 정확히 계산해야 된다. 하지만 Can에서의 정확한 Eddy-current의 손실계산은 쉽지가 않으므로 다음과 같이 등가회로상 간이 계산을 하여 Can 손실을 계산하고자 한다.

고정자 내경에 부착된 비자성 재질인 Can은 정지된 농형과 같은 작용을 하는 것과 같다. 그러므로 Can의 저항을 1차측으로 환산하여 자화reactance와 병렬로 구성할 수 있다. 여기서 고정자철심과 접촉하고 있는 부분의 Can을 Bar부분으로 취급하면 다음 식(4)로 나타낼 수 있으며 Can의 overhang부분을 endring부분으로 취급하면 다음 식(5)로 나타낼 수 있으므로 전체 Can의 저항은 다음 식(6)과 같이 된다. 그러므로 Can에서 발생하는 손실값은 식 (7)과 같다.

$$Can_{Bar} = \frac{m \times \rho \times (C k_w)^2 \times L_1}{\pi \times D_1 \times Cant} [\Omega] \quad (4)$$

$$Can_{Ring} = \frac{m \times \rho \times (C k_w)^2 \times D_1 \times 0.637}{(Canl - L_1) \times Cant} [\Omega] \quad (5)$$

$$Can_{Res.} = Can_{Bar} + Can_{Ring} [\Omega] \quad (6)$$

$$Can_{Loss} = \frac{m V^2}{Can_{res}} [kW] \quad (7)$$

여기서 m:상수, ρ:저항률, C:직렬도체수, k<sub>w</sub>:권선계수  
L<sub>1</sub>:고정자 길이, D<sub>1</sub>:고정자 내경, Canl:Can길이  
Cant : Can 두께

이상의 식을 살펴보면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 실제 Can에서의 손실영향은 Can<sub>Bar</sub>의 영향이

Can<sub>Ring</sub>보다 훨씬 클 것으로 판단되므로 식(4)의 Can<sub>Bar</sub>를 중심으로 분석해 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. Can에서 발생하는 손실을 줄일려면 식(7)에서 알 수 있는 바와 같이 고정자 단자전압은 일정하므로 Can의 저항을 증가시키면 Can 손실이 감소함을 알 수 있으므로 다음 사항을 실행하면 Can의 저항을 증가시킬 수 있다.

- ① 저항률이 높은 재질을 사용할 것
- ② 고정자 직렬 도체수를 증가시킬 것
- ③ 고정자 길이를 증가시킬 것
- ④ 고정자 직경을 감소시킬 것
- ⑤ Can 두께를 감소시킬 것

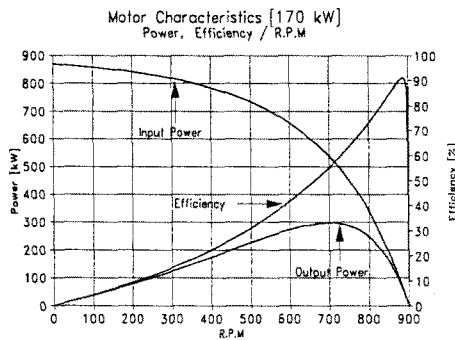
그러므로 기존의 전동기 설계시에는 고정자의 극간격과 길이비인  $\gamma = \frac{L_{ap}}{\tau}$  값이  $\gamma = 0.6 \sim 2.0$ 에서 결정되지만

본 논문의 MCP전동기의 경우에는 Can의 손실을 줄이기 위하여  $\gamma > 2$ 이상의 값을 설정하여 설계를 하였으며 Can재질은 저항률이 상당히 크고 두께가 작은 stainless 재질을 선택하였다. 위와같은 특성을 이용한 전동기의 특성해석을 한 결과를 다음 표4와 그림 4에 각각 나타내었다.

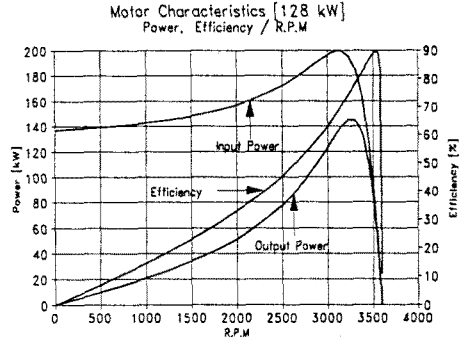
표 4. MCP용 전동기 특성

	출 력	
	140[kW]	105[kW]
고정자 상당 저항[Ω]	0.0644	0.0644
고정자 누설 reactance[Ω]	0.0805	0.3235
회전자 저항[Ω]	0.055	0.055
회전자 누설 reactance[Ω]	0.0303	0.1226
자화 reactance[Ω]	2.6	11.0
고정자 치자속밀도 [T]	1.58	0.41
회전자 치자속밀도 [T]	1.8	0.45
고정자 철심자속밀도 [T]	1.56	0.4
회전자 철심자속밀도 [T]	1.42	0.36
Can 손실 [kW]	6.2	6.2
철 손 [kW]	1.4	0.6
출력 [kW]	최대값	300
	정격값	140

이 표에서 알 수 있는 바와 같이 고정자 Can에서 발생한 Eddy-current 손실은 약 6.2(kW)로 나타났다. 이는 정격출력의 약 4.4(%)를 차지하기 때문에 전동기의 효율에 상당한 영향을 미치고 있으므로 전동기 특성 해석시에는 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 회전자 Can의 경우는 2차측 전류 주파수가 슬립주파수이므로 회전자 Can에서 발생하는 손실은 고정자 Can에 비하여 미미하므로 무시하였다. 그리고 그림 5는 설계된 전동기의 입력과 출력, 효율특성을 나타낸 그래프로서 15(Hz)에서는 최대출력값이 정격출력값의 2.1배, 60(Hz)에서는 1.4배로 나타나 부하변동이 거의 없는 펌프용으로는 만족한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) 입력Power:170 [kW], 주파수:15(Hz)



(b) 입력Power : 128(kW), 주파수 : 60(Hz)  
그림 4. 냉각용 순환펌프용 유도기 해석결과

4. 결론

본 논문에서는 PWM 전압형 인버터 구동에 대한 전동기 설계와 Canned-motor의 can에서 발생하는 Eddy-current 손실의 분석방법 및 Can에서 발생하는 손실을 최소화하는 설계방법에 대하여 알아보았다.

본 논문에서는 Can 해석을 정지한 농형으로 보아 해석한 저항을 1차측으로 환산하여 자화reactance와 병렬로 구성하여 해석을 하였으며 Can에서의 손실을 최소화할 수 있도록  $\gamma > 2$ 이상의 설계와 Can의 재질을 저항율이 높고 두께가 얇은 stainless를 사용하여 전동기를 설계하였다. 해석결과 고정자 Can에서의 발생하는 손실이 약 6.2(kW)로서 정격출력의 약4.4(%)를 차지하여 전동기 해석시 반드시 고려되어야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. P. L. Alger, "The Nature of Induction Machines", Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1965.
2. J.H. Kuhlmann, "Design of Electrical Apparatus", 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950.
3. C.G. Veinott, "Theory and Design of Small Induction Motor", McGraw-hill Book Company, Inc., New York, 1959
4. Paul L. Cochran, "Polyphase Induction Motor", Marcel Dekker, Inc, 1989
5. Charles G. Libby, "Motor Selection and Application", McGraw-hill Book Company, Inc., New York, 1960