철도차량용 IPMSM의 Water-cooling Jacket 설계 연구

A Study on the Water-cooling Jacket Design of IPMSM for Railway Vehicles

박 찬 배* · 이 준 호* · 이 병 송*
 (Chan-Bae Park · Jun-Ho Lee · Byung-Song Lee)

Abstract - In this paper, the basic design study of a water-cooling jacket, which have reported no cases for applying to railway traction motors so far, were conducted for applying to Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) for railway vehicles. The basic thermal characteristics analysis of the 110kW-class IPMSM was performed by using 3-dimentional thermal equivalent network method. The necessary design requirements of the water-cooling jacket were derived by analyzing the results of the basic thermal properties. Next, the thermal characteristics analysis technique was established by using the equivalent model of the solenoid-typed pipe to be installed on the inside of the water-cooling jacket for 110kW-class IPMSM. Finally, a design model of 6kW-class water-cooling jacket was derived through the analysis of various design parameters.

Key Words : Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM, Water-cooling jacket, Pipe, Railway vehicle

1. 서 론

최근 견인전동기의 경우, 전동기 내부의 온도 분포 및 열적 특성에 대한 관심이 고조되고 있는데, 이는 견인전동기의 고효율, 소형 경량화와 밀접한 관련이 있다. 특히 철도차량의 경우, 견인전동기는 차상 설비로 제작이 되기 때문에 고효율화 및 소형 경량화가 필수적이다. 철도차량용 견인전동기는 철도 차량의 하부에 위치한 대차(Bogie)의 차축에 설치된다. 철도 궤도 환경의 영향으로 차량의 운영 시 먼지가 많이 날리게 되고, 이러한 운영 환경 때문에 외부로부터 견인전동기로 이물질의 출입을 원천적으로 막을 수 있는 전폐형 전동기가 주로 적용되고 있다. 하지만 이러한 전폐형 전동기는 열적으로 냉각이 어려워지는 문제를 갖고 있기 때문에 회전자에 영구자석이 매입되는 구조를 갖는 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)에 있어서는 불리한 구조라 할 수 있다. 특히 요즘과 같이, 견인전동기의 소형화/경량화가 크게 요구되고 있는 시장에서 IPMSM의 경쟁력을 갖기 위해서는 열 문제를 해결할 수 있는 별도의 냉각장치에 대한 연구가 필요하다.

일반적으로 견인전동기의 냉각방식은 냉매의 종류에 따라 공랭식, 수냉 및 유냉식으로 구분할 수 있으며, 냉각 통로의 열 방산의 형식에 따라 자유 통풍형, 외피표면 냉각형 및 입출구관 통풍형으로 구분할 수 있으며, 냉매의 이송방식에 따라 온도차에 의한 자연대류를 이용하는 자연형과 회전자 자체의 작용에 의한 자력형 및 별도 장치에 의한 타력형으로 구분할 수 있다[1]. 그림 1은 견인전동기의 냉각방식 분류를

보여준다. 아직까지는 국내 철도차량용 견인전동기에 수냉각방식이 적용된 예가 없는 상황이다. 따라서 본 논문에서는 철도차량 견인용 110kW급 IPMSM에 타력 통풍형 방식 중 수냉각방식을 적용할 것을 고려하였다. 먼저 3차원 열등가회로방법을 이용하여 110kW급 IPMSM의 기본적인 열 특성 분석을 수행하였으며, 기본적인 열 특성 결과를 분석하여 이에 필요한 수냉각장치의 설계 요구사항을 도출하였다. 마지막으로 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket의 다양한 설계 파라미터 분석을 통하여 6kW급 Water-cooling Jacket의 기본 설계를 수행하였다.

그림 1 견인전동기의 냉각방식 분류

Fig. 1 Classifications of cooling method for traction motors

* Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : cbpark@krii.re.kr

* Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : September 9, 2013; Accepted : September 13, 2013

2. 철도차량 건인용 110kW급 IPMSM의 기본 열특성 분석

본 논문에서는 110kW급 IPMSM의 열해석을 위하여 집중정수법을 기반으로 전동기의 전반적인 온도 분포 및 열의 흐름 등을 파악하고, 열 등가회로망 상의 각 부분에서의 열전달 파라미터 및 손실과 같은 열원 도출 시에는 분포정수법을 이용하는 하이브리드 프로세스를 적용하였다. 표 1은 본 논문에서 고려된 110kW급 IPMSM의 주요 사양 및 열원으로 이용될 손실값을 보여준다[2]. 그림 2는 본 논문에서 적용된 110kW급 IPMSM 열해석 기법의 순서도 및 IPMSM의 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망을 보여준다[3]. 표 2는 IPMSM 제어체적에 근거하여 형상과 재질을 고려한 주요 열전달계수(전도/대류 열전달계수)를 보여준다[4]. 그림 3은 110kW급 집중권 IPMSM의 정격운전(2400rpm) 하에서 150분 동안의 과도 열해석 결과를 보여준다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 150분 동안의 운전으로도 IPMSM의 각 부분의 온도가 포화가 되지 않고 여전히 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 설계된 110kW급 IPMSM의 경우, 권선방식이 집중권이며 냉각방식이 고려가 되지 않은 전폐형 모델의 IPMSM이며, IPMSM 내부에서 발생한 열을 외부로 강제적으로 배출할 수 있는 채널이 충분히 고려되지 않았기 때문이다.

표 1 110kW급 IPMSM의 주요 사양

Table 1 Main specifications of 110kW-class IPMSM

항목	값	단위
슬롯수 / 극수	9 / 6	-
IPMSM 크기	직경 316 / 높이 280	mm
평균 토크 (2400/6000rpm)	433.3 / 142.3	Nm
철손 (2400/6000rpm)	1.245 / 1.768	kW
영구자석 와전류손 (2400/6000rpm)	0.238 / 3.010	kW
동손 (2400/6000rpm)	1.052 / 1.052	kW
출력 (2400/6000rpm)	110 / 89	kW

그림 2 110kW급 IPMSM 열해석 개념

Fig. 2 Concept of thermal analysis of IPMSM

표 2 110kW급 IPMSM의 주요 열전달계수

Table 2 Main thermal transfer coefficient of 110kW-class IPMSM

항 목		열전달계수 [W/m ² ℃]
구성품	재질	
프레임	Al6061	167
고정자(Radial)	Si-steel (S08)	25
고정자(Axial)	Si-steel (S08)	1.75
코일	Copper	398
회전자	Si-steel (S08)	25
영구자석	NdFeB(N38EH)	7.6
샤프트	Iron	50
프레임 지그	SUS304	16
공극		65.04
프레임 → 내부 공기		10
고정자 요크 → 내부 공기		10
고정자 슈 → 내부 공기		20
엔드 코일 → 내부 공기		15
회전자 → 내부 공기		20
영구자석 → 내부 공기		20
샤프트 → 내부 공기		10
프레임 → 외부 공기		100
샤프트 → 외부 공기		17

그림 3 110kW급 IPMSM 모델의 온도상승 특성(2400rpm)

Fig. 3 Temperature rising properties of 110kW IPMSM model (2400rpm)

3. IPMSM용 Water-cooling Jacket 열해석 및 설계 기법 연구

3.1 등가 파이프 모델 내부의 유체 유동 및 열전달 특성

IPMSM용 Water-cooling Jacket 설계에 앞서서, Water-cooling Jacket용 등가 파이프 모델 내부에서의 유체의 유동 특성 및 열전달 특성을 분석하기 위한 이론을 먼저 정리하고자 한다. 일단 본 논문에서는 수냉각을 위한 파이프의 단면 형상은 원형만을 고려하였다[5][6]. 파이프 안에서의 유동에서 V_m 은 유체의 평균속도이다. 단면에서의 평균 온도 T_m 은 유체 단면에서 평균온도로 볼 수 있다. 평균속도 V_m 은 일정하지만 평균온도 T_m 은 유체가 가열되거나 냉각되면 파이프

를 따라 변한다. 따라서 파이프에서 정상유동일 때 유체로의 열전달량은 다음 식 (1)과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{q}_s A = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \quad (1)$$

여기서 파이프의 입구와 출구에서 T_i 와 T_e 는 평균 유체온도이다. 본 논문에서는 파이프 표면의 조건으로 표면온도가 일정($T_s = \text{일정}$)하다고 근사시켰으며, 열전달률은 식 (2)와 같으며, 이때 파이프의 출구에서 평균 유체온도는 식 (3)과 같다.

$$\dot{Q} = hA\Delta T_{\text{ln}} \quad (2)$$

$$T_e = T_s - (T_s - T_i)e^{-hA/mC_p} \quad (3)$$

그림 4에서 보는 바와 같이, 유체와 표면사이의 온도차이는 유동방향으로 지속적으로 감소하고, 감소량은 식 (3)의 지수의 크기에 의존한다. 이 무차원 매개변수는 전달단위수라 불리어지고, NTU라 표기되는 열전달 시스템 성능의 척도이다. $NTU > 5$ 인 경우에 유체의 출구온도는 거의 표면온도와 동일하게 되어 $T_e \approx T_s$ 가 성립한다[7]. 길이가 L 인 파이프에서 유체가 흐르는 동안 압력강하는 식 (4)와 같으며, 여기서 f 는 마찰계수, D 는 파이프의 지름이다. 특정한 압력강하 ΔP 을 극복하기 위해 필요한 펌프동력은 식 (5)를 이용하여 계산이 가능하며, V 는 파이프를 지나는 체적유량이다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_m^2}{2} \quad [N/m^2] \quad (4)$$

$$W_{\text{pump}} = \dot{V} \Delta P = \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \quad [W] \quad (5)$$

그림 5는 파이프 유동에서 유동방향으로 마찰계수와 대류 열전달계수의 변화 특성을 보여준다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 마찰인자와 열전달계수는 경계층의 두께가 0인 파이프

그림 4 균일한 표면온도의 경우 파이프에서의 평균 유체온도의 변화

Fig. 4 Variations of the average fluid temperature in the pipe on the condition of uniform surface temperature

입구에서 더 높고, 완전 발달된 값으로 점차적으로 감소한다. 따라서 압력강하와 열유속은 관의 입구에서 더 높고, 입구영역의 효과로 전체 파이프에서 평균 마찰계수와 열전달계수를 향상시키지만 긴 파이프에서는 무시할 만하다. 원형 파이프에서 유체역학적으로 또 열적으로 발달중인 층류유동에 대하여 평균 Nu(Nusselt)수는 다음 식 (6)과 같이 주어지며, 매끈한 원형 파이프에서 완전 발달된 난류유동의 마찰인자 f 와 Nu수에 대한 관계식은 식 (7), 식 (8)과 같다.

$$Nu = 1.86 \left(\frac{Re Pr D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (Pr > 0.5) \quad (6)$$

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6) \quad (7)$$

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad \left(\begin{array}{l} 0.5 \leq Pr \leq 2000 \\ 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \end{array} \right) \quad (8)$$

그림 5 파이프에서 유동방향으로 마찰계수와 대류열전달계수의 변화($Pr > 1$)

Fig. 5 Variations in the friction and convection thermal transfer coefficients to the flow direction in the pipe ($Pr > 1$)

3.2 Water-cooling Jacket 설계 모델 및 열전달 특성 도출

본 논문에서는 110kW급 IPMSM용 냉각장치로써 고정자 코어 외면을 감싸는 구조인 솔레노이드 타입의 파이프 구조를 갖는 Water-cooling Jacket를 검토하였으며, 내부 파이프의 구조에 따라 1 채널 타입과 2 채널 타입의 Water-cooling Jacket를 검토하였다. 그림 6은 본 논문에서 고려한 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket의 형상을 보여준다. Water-cooling Jacket용 파이프 내부에서의 유체 유동 및 열전달 특성을 분석하기 위한 경계조건은 다음과 같다[8].

- Water-cooling Jacket 내부에 위치한 파이프의 주변온도는 균일하다.

- ii) 파이프의 내부 표면은 매끄럽다.
- iii) 파이프 내부에서의 유속은 위치에 관계없이 일정하다.

(a) 2 채널 스크롤노이드 타입

(b) 1 채널 스크롤노이드 타입

그림 6 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket

Fig. 6 Water-cooling Jacket models for 110kW-class IPMSM

표 3은 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket의 기본 사양을 보여준다. 파이프 재질은 열전도도가 높은 구리이며, 파이프의 총 길이는 8.8[m]로 1 채널 모델과 2 채널 모델을 검토하였다. 냉각수로 사용되는 물의 체적평균온도인 47.5[°C]에서의 물성치를 표 4에 정리하였다. 그림 7은 Water-cooling Jacket 내부에 위치한 파이프 내부에서 냉각수의 유속 변화에 따른 각 특성 파라미터의 분석 결과를 보여준다. 그림 7(a)는 Nusselt 수의 변화를 보여주며, 파이프의 직경이 커질수록 느린 유속에서도 난류가 발생되며, 파이프의 길이와 관계없이 파이프의 직경이 동일하면 Nusselt 수가 같음을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 냉각수의 출구 온도 변화를 보여주며, 파이프의 주변 온도가 75[°C]이므로 냉각수의 출구 온도도 75[°C] 근처에 도달되도록 설계하는 것이 냉각수의 열흡수량 증대에 도움이 될 것이다. 그러기 위해서는 파이프 내부에서의 유동은 난류일 경우가 가장 효과적이나, 파이프의 열흡수 요구량 및 냉각수 순환용 펌프의 용량 등을 고려하여 선정해야 한다. 그림 7(c)는 NTU의 변화를 보여준다. NTU는 전달단위수라고도 하며, 열전달 시스템의 성능

의 척도이다. 일반적으로 $NTU > 5$ 인 시스템의 경우, 열전달의 한계점을 넘어섰다고 볼 수 있다. 그림 7(c)에서 보는 바와 같이, 파이프의 길이가 짧거나 직경이 클수록 $NTU < 5$ 인 시스템으로 설계가 용이함을 확인할 수 있다. 그림 7(d)는 냉각수의 열흡수율의 변화를 보여주며, 모델 1은 파이프 2개의 채널에서의 냉각수의 열흡수율을 합한 값이며, 모델 2는 파이프 채널 1개에서의 냉각수의 열흡수율 값이다. 그림 7(d)에서 보는 바와 같이, 파이프의 직경이 클수록 냉각수의 열흡수율이 높아지며, 긴 채널의 파이프 1개를 이용하는 것이 짧은 채널의 파이프 2개를 이용하는 것보다 냉각수의 열흡수율이 높아진다는 것을 확인할 수 있다. 또한 파이프의 직경이 커질수록 냉각수의 유속의 작은 변화에도 열흡수율의 변화율이 커지며, 냉각수의 유동이 난류인 영역에서의 열흡수율이 급격히 커진다는 것을 확인할 수 있다. 추가로, 110kW급 IPMSM의 기계적 손실을 제외한 전자기적 손실에 의한 열 발생량의 총합은 최고속도인 6000rpm에서 약 5.83[kW] 이므로, Water-cooling Jacket의 열흡수량을 6[kW]로 제한할 필요가 있다. 이는 냉각수 순환을 위한 펌프의 요구 용량과도 관계가 있는 부분이므로 경제적인 측면도 함께 고려되어야 한다[9][10]. 결국 Water-cooling Jacket의 파이프 내부에 흐르는 냉각수의 속도가 0.35[m/s]일 때 파이프의 압력강하는 2023[N/m²]이며, 파이프 내부의 마찰을 이기기 위해서는 적어도 56[W] 이상의 펌프 동력이 필요하겠다. 따라서 상기의 결과를 토대로 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket의 설계 모델을 도출하였으며, 표 5에 정리하였다.

표 3 Water-cooling Jacket의 기본사양

Table 3 Specifications of Water-cooling Jacket

항 목	모델 I	모델 II	단 위
파이프 재질	Copper	Copper	-
프레임 재질	AL6061	AL6061	-
총 파이프 길이	4.4x2EA (2 채널)	8.8 (1 채널)	m
파이프 직경	5~10	5~10	mm
냉각수 입구온도	20	20	°C
파이프 주변 온도	75	75	°C

표 4 냉각수의 물성치 (47.5°C)

Table 4 Physical properties of cooling water

항 목	값	단 위
밀도	988	Kg/m ³
일정 압력하에서의 비열	4177	J/kg °C
열 전달률	0.642	W/m °C
Pr(Prandtl) 계수	3.75	-
비체적	6.62E-7	m ² /s

(a) Nu수 변화 특성

(b) 출구온도 변화 특성

(c) NTU 변화 특성

(d) 열 흡수량 변화 특성

그림 7 파이프 내부 냉각수의 유속변화에 따른 특성 파라미터 분석 결과

Fig. 7 Analysis results of characteristic parameters by flow velocity increasing on the inside of the pipe

표 5 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket의 설계 결과

Table 5 Design results of Water-cooling Jacket for 110kW-class IPMSM

설계 항목	결과	단위
형식	Model 2(1 채널)	-
파이프 길이	8.8	m
파이프 직경	10	mm
유속 제한	0.35	m/s
유량	1.65	l/min
냉각수 입구온도	20	℃
NTU 제한	5	-
냉각수 출구온도	75	℃
열 흡수량 제한	6	kW
파이프의 압력 강하	2023	N/m ²
펌프 동력	56	W

5. 결 론

최근 철도차량용 건인전동기의 고효율화 및 소형 경량화에 대한 관심이 커져감에 따라, 본 논문에서는 아직까지 국내 철도차량용 건인전동기에 적용된 예가 없는 Water-cooling jacket을 IPMSM에 적용하기 위한 Water-cooling Jacket 기본 설계 연구를 수행하였다. 따라서 철도차량 건인용 110kW급 IPMSM에 대하여 먼저 3차원 열등가회로방법을 이용하여 IPMSM의 기본적인 열 특성 분석을 수행하였으며, 기본적인 열 특성 결과를 분석하여 이에 필요한 Water-cooling Jacket의 설계 요구사항을 도출하였다. 다음으로 110kW급 IPMSM용 Water-cooling Jacket의 내부에 설치될 솔레노이드 타입의 파이프에 대한 등가 파이프 모델을 이용한 열특성 분석 기법을 정립하고, 다양한 설계 파라미터 분석을 통하여 6kW급 Water-cooling Jacket의 기본 설계 모델을 도출하였다. 향후 본 연구를 통하여 확보된 6kW급 Water-cooling Jacket 모델을 110kW급 IPMSM 시제품에 적용하여 IPMSM 구동 중의 열 특성 분석 연구에 활용할 계획이다.

References

- [1] A. F. Armor, and M. V. K. Chari, "Heat flow in the stator core of large turbine-generators by the method of three dimensional Finite Elements (Part II : Temperature distribution in the stator iron)," IEEE Transactions on PAS, PAS-95(5), pp. 1657-1668, 1976.
- [2] C.B Park, H.W. Lee, B. S. Lee, "A Study on the Reduction of the Stator Iron Loss on Permanent Magnet Synchronous Motor for light Railway Transit Propulsion System," Journal of the Korean Society for Railway, Vol.15, No.4, pp. 376-380, 2012.
- [3] C.B Park, H.W. Lee, B. S. Lee, "Investigation of a thermal analysis method for IPMSM in railway vehicles, Journal of the Korean Society for Railway,"

Vol.16, No.2, pp. 99-103, 2013.

- [4] C. B. Park, "A Study on the Thermal Characteristics of 110kW-class IPMSM for Light Railway Transit using the 3-Dimensional Thermal Equivalent Network considering Heat Source by Iron Loss Density Distributions," The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.62, No.7, pp. 1038-1044, 2013.
- [5] Y. Bayazitoglu and M. N. Ozisik, "Element of Heat Transfer." New York : McGraw-Hill, 1988.
- [6] F. Kreith and M. S. Bohn, "Principles of Heat Transfer : 5th edition," St. Paul, MN : West Publishing, 1993.
- [7] T. Jokinen and J. Saari, "Modeling of the coolant flow with heat flow controlled temperature sources in thermal networks," IEE Proceeding of Electrical Power Applications, Vol.144, No.5, 1997.
- [8] J.H. Choi, S.M. Jang, C. Han, J.H. Ahn, K.H. Sim, "Electromagnetic loss and thermal analysis on high speed PM motor for turbo compressor," KIEE Summer Conference 2012, pp. 618-619, 2012.
- [9] J. Driesen, R. J. M. Belmans, and K. Hameyer, "Finite-element modeling of thermal contact resistances and insulation layers in electrical machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, No.1, pp. 15-20, 2001.
- [10] Batchelor, G. K., "An Introduction to Fluid Dynamics," Cambridge University Press, 1967.

저 자 소 개

박 찬 배

2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2013년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 건인용 회전기, 선형기 설계 및 무선급전시스템

이 준 호

1989년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학 박사 수료. 1998년 일본 Kanazawa 국립대학교 졸업(공학박사). 1998년~2005년 미국 University of Virginia 기계항공공학과 연구원. 2005년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 자기부상제어, 에너지 저장시스템, 기계시스템제어.

이 병 송

1991년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 한국고속철도 건설공단 철도차량 R&D 센터 선임연구원. 1998년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원. 관심분야는 철도차량용 추진시스템 제어.