

도시철도차량의 운행패턴을 고려한 견인용 IPMSM의 열 특성 분석

Thermal Characteristic Analysis of IPMSM for Traction Considering a Driving Pattern of Urban Railway Vehicles

박 찬 배[†] · 김 재 희* · 이 준 호*
(Chan-Bae Park · Jae-Hee Kim · Su-Gil Lee)

Abstract - In this paper, temperature change properties on the 210kW-class Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) are performed with the cooling performance of a water cooling device through the thermal characteristic analysis of the IPMSM considering a real driving pattern of urban railway vehicles. First, the thermal analysis modeling of 210kW-class IPMSM, which is an alternative to the conventional induction motor, and its water cooling device is conducted. Next, the thermal characteristic analysis of the IPMSM considering a real driving pattern of urban railway vehicles is performed using 2-Dimensional FEM tool. Finally, the calculated characteristic results are analyzed. Consequently, it is confirmed that the internal temperature of the 210kW-class IPMSM may be lowered to about 42~52% by maintaining the coolant flow rate of the water cooling device (Cross sectional shape of the pipe has 220mm width and 10mm height) for 0.2kg/s level.

Key Words : Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM, Water cooling device, Driving pattern, Urban railway vehicle

1. 서 론

최근 철도차량 분야에서 에너지 절감을 위해 다양한 구성 품의 경량화 연구가 활발히 진행되고 있다. 견인전동기 분야도 기존 제품 대비 고효율, 소형 경량화를 달성하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있지만, 대부분의 철도차량이 견인 전동기로서 근본적으로 유도전동기를 적용하고 있는 현실이 기에 효율을 높이고 경량화 시키는데 한계가 있다. 표 1은 일반적인 도시철도차량에 적용되고 있는 견인전동기의 현황 을 보여준다. 표 1에서 보는 바와 같이, 1세대 견인전동기에서 2세대 견인전동기로 넘어가면서 견인전동기의 사이즈를 줄여 출력밀도를 어느 정도 증가시킬 수 있었지만, 근본적으로 유도전동기를 적용하고 있기 때문에 현 시점에서는 대부분의 기술이 포화 수준에 도달되었다고 볼 수 있다. 따라서 3세대 견인전동기로 기존의 유도전동기 방식을 고집한다면 더 이상의 경량화가 어려워질 수 있다. 이미 전기자동차 분야에서는 유도전동기를 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)로 대체하면서 고효율 및 소형 경량화를 추가적으로 달성하고 있기 때문에, 철도차량용 견인전동기에서도 영구자석 동기전 동기의 적용이 시급하다고 볼 수 있다.

일반적으로, 철도차량용 견인전동기는 철도차량의 하부에 위치한 대차(Bogie)의 차축에 설치되며, 외부에 노출되는 구

조를 갖는다. 따라서 철도 궤도 환경의 영향으로 차량의 운 영 시 먼지가 많이 날리게 되고, 이러한 운영 환경 때문에 외 부로부터 견인전동기로 이물질의 출입을 원천적으로 막을 수 있는 폐쇄형 전동기가 주로 적용되고 있다. 하지만 이러한 전 폐쇄형 전동기는 외부와의 열교환을 위한 별도의 장치가 없으면 열적으로 냉각이 어려워지는 문제를 갖고 있기 때문에 회 전자에 영구자석이 매입되는 구조를 갖는 IPMSM에 있어서 는 불리한 구조라 할 수 있으며, 이러한 열 문제를 해결하기 위해 별도로 냉각장치의 추가적인 설치가 요구된다[1][2].

따라서 본 논문에서는 도시철도차량의 실제 운행패턴을 고려한 210kW급 수냉각장치 적용 IPMSM의 열 특성 분석 을 통하여 수냉각장치의 성능에 따른 IPMSM에서의 온도 변동 특성을 분석하고자 한다. 본 논문은 다음과 같은 구성 된다. 먼저 도시철도차량용 견인전동기로서 기존의 210kW 급 유도전동기를 대체할 수 있는 210kW급 IPMSM과 이의 냉각을 위한 수냉각장치의 열해석 모델링을 하고, 다음으로 2D FEM Tool을 활용하여 도시철도차량의 실제 운행패턴을 고려한 IPMSM의 열해석을 수행하고, 마지막으로 결과 분석을 하였다.

2. 해석 이론

2.1 도시철도차량 추진용 210kW급 IPMSM 모델 및 수냉각장치 적용 열해석 모델링

그림 1은 본 논문에서는 열해석을 위해 검토되는 도시철 도차량 추진용 210kW급 IPMSM의 단면도를 보여준다[3]. 표 2는 본 논문에서 고려된 210kW급 IPMSM의 주요 사양 을 보여준다. 표 2에서 보는 바와 같이, 210kW급 IPMSM의

[†] Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : cbpark@krii.re.kr

* Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : February 5, 2014; Accepted : February 27, 2014

정격속도(2400rpm)와 최고속도(6000rpm)에서의 발생토크는 849.5Nm/337.1Nm이며, 절연등급은 Class-H(180℃ 이하)이다.



본 논문에서는 210kW급 IPMSM의 열해석을 위해 그림 2와 같이 2D 해석 모델의 경계조건을 설정하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 해석 모델의 각 부분에서의 초기 온도는 25℃로 설정하였고, 외부 공기의 초기 온도도 25℃로 설정하였으며, 회전자와 고정자 사이의 공극에서 열 플럭스의 식을 간략하게 그림으로 표현하였다. 또한 회전자 내부에서 발생되는 열원에 의한 열 플럭스가 공극 방향으로 이동한다고 가정하였다. 일반적으로 공극에서의 열전달은 대류에 의한 열전달이 전도에 의한 열전달보다 지배적이다[4]. 따라서 본 논문에서는 210kW급 IPMSM의 공극에서의 온도 변화에 따른 대류 열전달계수를 도출하였다. 그림 3은 2400rpm에서의 공극에서의 온도 변화에 따른 대류열전달계수 변화 특성을 보여준다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 공극에서의 온도 25℃와 180℃ 사이의 평균값인 64.5 W/m²·℃를 본 논문에서의 210kW급 IPMSM 모델의 공극에서의 평균 대류 열전달계수로 선정하였다. 또한 본 논문에서는 2D 모델링으로는 표현하지 못하는 IPMSM의 축방향으로의 열전달도 고려하였다. IPMSM의 고정자와 회전자 코어 측면과 맞닿는 내부 공기의 초기 온도를 25℃로 설정하였고, 엔드 코일과 고정자 코어 측면 부분은 자연 대류로 가정하여 대류 열전달계수를 10W/m²·℃로 설정하였다. 회전자 측은 회전자 코어 반경과 회전자 코어 측면과 외함 측면 내측 사이 거리의 비에 따른 식을 통하여 계산하였으며, 본 논문에서 고려되고 있는 210kW급 IPMSM 모델인 경우 회전자 반경과 회전자 코어 측면과 외함 측면 내측 사이 거리의 비가 약 1 이상이기 때문에 0.06이상일 경우의 Free Disk식으로 계산이 가능하다. 따라서 회전자 코어 측면에서 외함 내부 공기로의 대류 열전달계수를 구하기 위한 계산식은 다음과 같다[5].

$$Nu_{f,d} = 0.0197(n+2)(n+2.6)^{-0.8} Pr^{0.6} Re^{0.8} \quad (1)$$

$$Nu = hD/k \quad (2)$$

표 1 도시철도차량용 견인전동기 현황

Table 1 Status of traction motors for urban railway vehicles

항목	1세대 전동기	2세대 전동기
모델		
전동기 Type	유도전동기	유도전동기
출력 (kW)	205	210
크기 (mm)	D520 x H270	D515 x H220
중량(외함 제외) (kg)	452	357
출력밀도 (kW/kg)	0.454	0.544
효율 (%)	93	93
냉각방식	자기공랭	자기공랭

여기서, Nu는 누셀수, n은 회전자 코어 측면과 외함 측면 내측 사이 거리의 비, Pr은 Prandtl수, Re는 Reynold수, h는 대류 열전달계수, D는 회전자 직경, k는 열전도율이다. 본

논문에서는 회전자 속도가 2400rpm 일 경우, 회전자 코어 측면의 대류 열전달계수는 14 W/m²·℃이다. 표 3에 본 논문에서 사용되는 210kW급 IPMSM의 주요 열전달계수를 정리하였다.

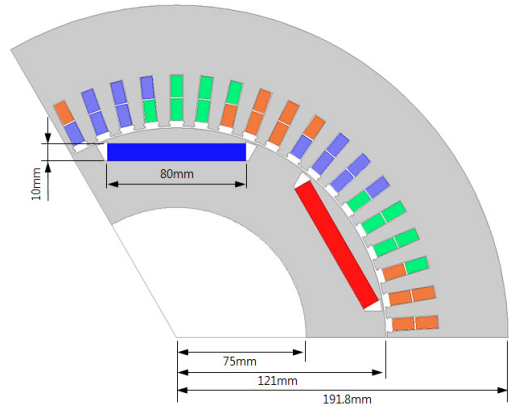


그림 1 210kW급 IPMSM 단면도

Fig. 1 Section view of 210kW-class IPMSM

표 2 210kW급 IPMSM의 주요 사양

Table 2 Main specifications of 210kW-class IPMSM

항목	값	단위
슬롯수 / 극수	54 / 6	-
IPMSM 크기	Dia. 383.6 / Stack 220	mm
영구자석 재질	Nd-Fe-B	
코일 절연	Class H	
평균토크(2400/6000rpm)	849.5 / 337.1	Nm
출력	210	kW
효율(2400/6000rpm)	97.9 / 96	%

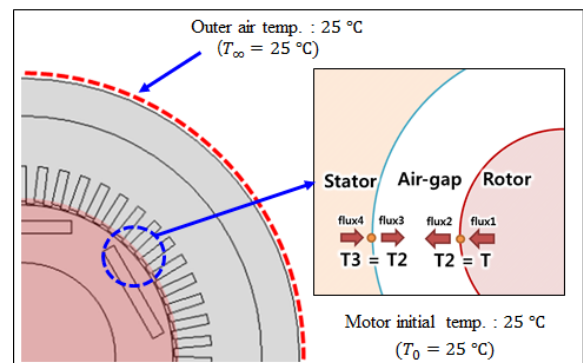


그림 2 IPMSM의 열해석을 위한 경계조건

Fig. 2 Boundary conditions for thermal analysis of IPMSM

2.2 도시철도차량의 운행 패턴을 고려한 해석 조건

일반적으로 철도차량용 견인전동기의 온도상승 시험은 실제 차량의 주행 조건과 동일한 조건으로 수행한다. 경전철이나 지하철과 같은 도시철도차량의 경우, 1~2km 내외의 정거장 사이를 주행, 타행, 제동, 정지하는 패턴으로 반복적

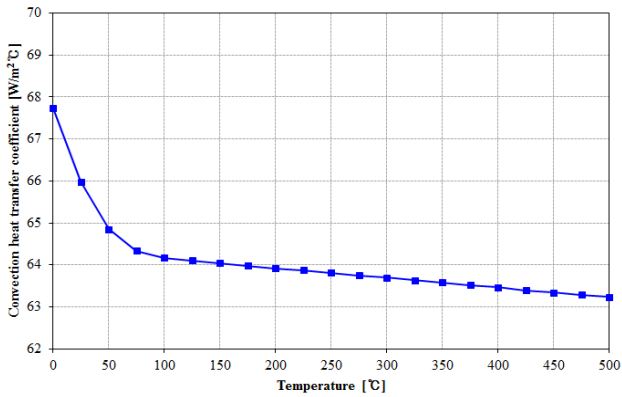


그림 3 2400rpm에서의 공극에서의 온도 변화에 따른 대류 열전달계수 변화 특성

Fig. 3 Variation characteristics of the convective heat transfer coefficient by temperature change at the air gap (@2400rpm)

표 3 210kW급 IPMSM의 주요 열전달계수

Table 3 Main heat transfer coefficients of 210kW-class IPMSM

항 목		열전달계수 (W/m²·°C)
구성품	재질	
프레임	SUS304	200
고정자/회전자	Si-steel (S08)	25
코일	Copper	400
코일 절연물	Mica	0.1625
	Epoxy resin	0.433
영구자석	NdFeB(N38EH)	7.6
샤프트	Iron	50
공극		64.5
프레임 커버 → 외부 공기		10
회전자 측면 → 내부 공기		14
고정자 측면 → 내부 공기		10

운행을 하게 되므로, 철도차량용 견인전동기의 실 온도상승 시험 시에도 일정 운전 패턴을 반복적으로 시행하면서 견인 전동기의 온도 상승값을 측정하는 방법을 적용한다[6][7]. 그림 4는 수냉각장치 적용 전 210kW급 IPMSM의 운행 패턴이 고려되지 않은 2400rpm 연속 정격 운전 시의 정상상태 열 분포 특성을 보여준다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 2400rpm의 연속 운전 시 정상상태에서 IPMSM의 모든 부분이 500°C 이상으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 IPMSM의 정격 운전 조건에서의 1시간 구동 시 과도상태 열 분포 특성을 보여준다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 1시간 구동 시에도 IPMSM의 코일과 영구자석 부분이 170°C 이상으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서의 IPMSM의 절연등급은 Class-C(180°C 이하) 이므로, 수냉각 장치의 적용없이 연속적으로 운전이 불가능함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 도시철도차량용 210kW급 IPMSM의 차량 실 운행 패턴을 고려한 열 해석을 수행하여 실제 운행 조건에서 발생할 수 있는 열 분포 특성을 살펴 보았다. 그림 6은 도시철도차량의 1분 가속, 1분 감속, 30초 정

차 순서를 갖는 등가 운행 패턴 1주기를 보여준다. 다음으로 차량 실 운행 패턴에 맞추어 IPMSM의 회전속도 변화에 따른 발생 손실을 도출하였다. 그림 7은 210kW급 IPMSM의 회전속도 변화에 따른 발생 손실 특성을 보여준다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 고정자, 회전자의 손실은 운전주파수 증가에 따른 히스테리시스 손실과 와전류 손실을 고려하였으며, 영구자석의 손실은 와전류손을 고려하였다. 또한 고정자 코일에서의 동손은 저항손실을 고려하였으며, 정전류 제어 방식을 고려하여 운전주파수 변동에 관계없이 일정한 동손이 발생하는 것으로 가정하였다. IPMSM의 정격속도 2400rpm에서 총 손실은 4.7kW이며, 최대속도 6000rpm에서 총 손실은 8.1kW이다.

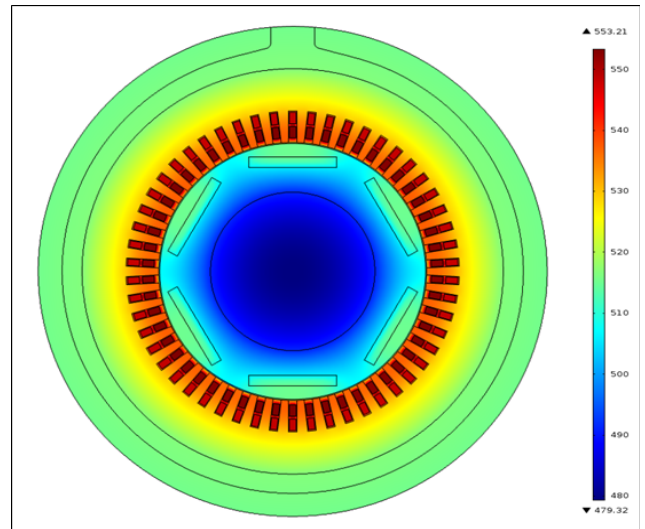


그림 4 210kW급 IPMSM의 연속 정격 운전 시의 정상상태 열 분포 특성(@2400rpm, 수냉각장치 적용 전)

Fig. 4 Steady-state thermal distribution during the continuous rated operation of 210kW-class IPMSM (@2400rpm, without the water cooling device)

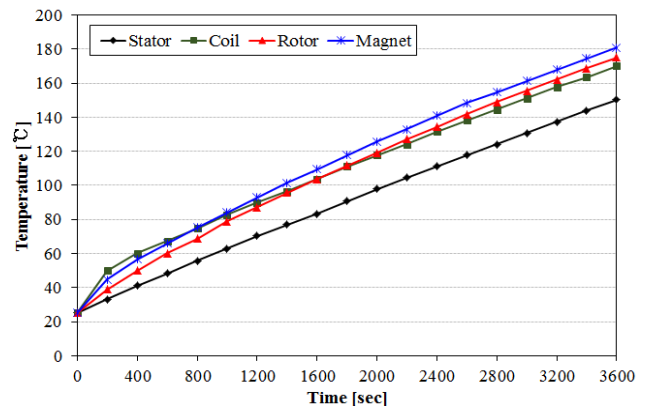


그림 5 210kW급 IPMSM의 1시간 정격 운전 시 과도상태 열 분포 특성(@2400rpm, 수냉각장치 적용 전)

Fig. 5 Transient thermal variation properties during 1-hour rated operation of 210kW-class IPMSM (@2400rpm, without the water cooling device)

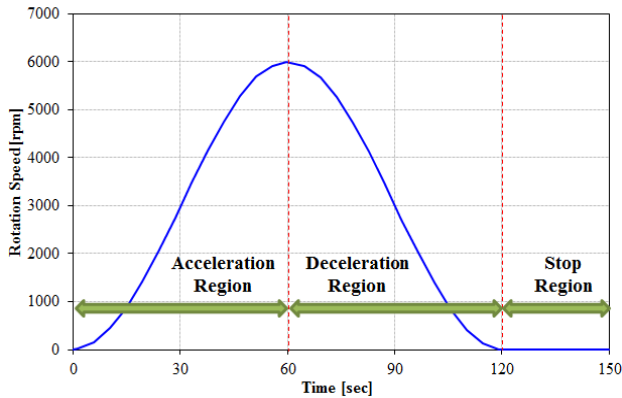


그림 6 도시철도차량의 등가 운행 패턴 (1주기)
 Fig. 6 Equivalent driving pattern of urban railway vehicles (1 period)

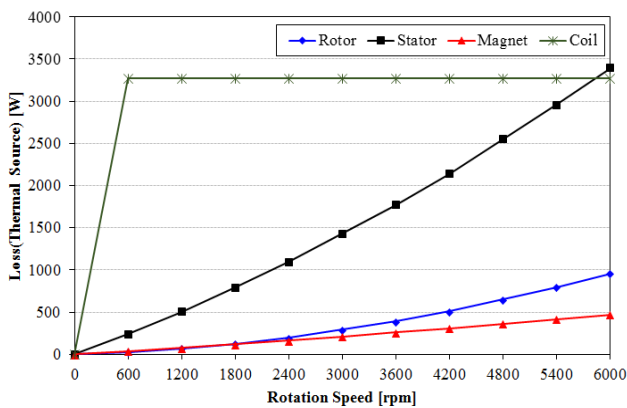


그림 7 210kW급 IPMSM의 회전속도 변화에 따른 발생 손실 특성
 Fig. 7 Loss variation characteristics by the rotational speed change of 210kW-class IPMSM

3. 해석 결과 및 분석

IPMSM에서 발생된 모든 손실이 열에너지로 전환된다고 가정하면, IPMSM의 각 부분에서 발생하는 손실을 해석 모델 각 부분의 열원(Heat source)으로 가정할 수 있다. 따라서 지금까지의 데이터를 바탕으로 2D FEM Tool을 활용하여 210kW급 IPMSM 모델에 수냉각장치를 추가하여 수냉각 장치의 설계 파라미터 변동에 따른 열해석 및 분석을 수행하여 IPMSM의 실제 운행 조건에서 발생될 수 있는 열 분포 특성을 살펴보았다. 여기서 도시철도차량의 총 운행 시간은 24개의 정거장을 그림 6과 같은 패턴으로 운행한다고 가정하여 1시간으로 설정하였다.

3.1 수냉각장치 적용 시 유동 단면 형상에 따른 열 분포 특성 분석

본 연구에서는 먼저 210kW급 IPMSM에 수냉각장치 적용 시 수냉각장치 내부 파이프의 유동 단면 형상에 따른 IPMSM 내부에서의 열 분포 특성을 분석하였다. 그림 8은

수냉각장치 적용 210kW급 IPMSM용 열해석 모델 및 수냉각장치 내부의 파이프 단면 형상을 보여준다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 수냉각장치 내부의 파이프 단면 형상은 직사각형이며, 일단 파이프 단면의 내측 폭은 적용된 210kW급 IPMSM의 적층높이와 동일한 22cm로 고정하였으며, 파이프 단면의 내측 최적 높이를 찾기 위한 열 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 수냉각장치 내부 파이프 입구로 들어가는 냉각수 초기 온도를 25°C로 설정하였으며, 파이프의 마찰에 의한 손실계산은 Churchill 모델을 이용하였다[8][9]. 파이프 내부면의 표면조도는 상업용 철의 조도인 0.046mm로 가정하여 계산하였으며, 파이프의 재질은 열전도도가 좋은 구리로 선정하여 물성치를 사용하였다.

먼저 수냉각장치의 유동 단면 형상에 따른 냉각 특성 분석을 위하여 파이프 단면 내측 높이를 8mm, 10mm, 12mm, 14mm로 변화시켜가면서 IPMSM 각 부분의 온도 변화 특성을 살펴보았다. 그림 9는 유량이 0.2kg/s일 때 파이프 단면 내측 높이 별 시간에 따른 영구자석의 온도 변화 특성을 보여준다. 일반적으로 Nd 계열의 영구자석은 고온 특성이 취약하며, 그림 5에서 보듯 영구자석의 온도가 다른 부분의 온도보다 높게 올라가는 특성을 보이고 있기 때문에 그림 9에

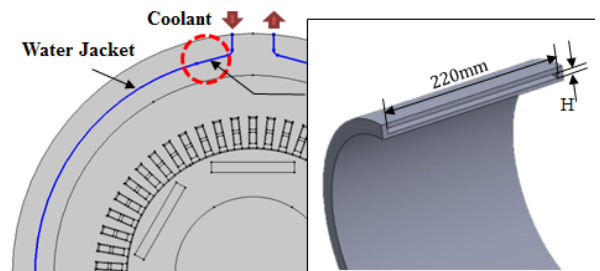


그림 8 수냉각장치 적용 210kW급 IPMSM용 열해석 모델 및 수냉각장치 내부의 파이프 단면 형상
 Fig. 8 Thermal analysis model of 210kW-class IPMSM with the water cooling device and the cross-sectional shape of the cooling pipe

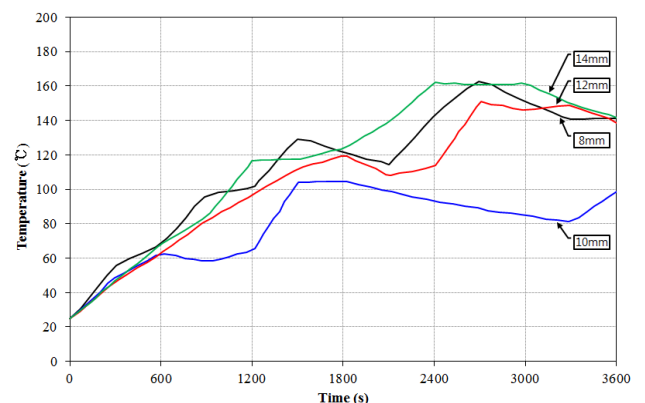


그림 9 유량이 0.2 kg/s일 때 파이프 단면 내측 높이 별 시간에 따른 영구자석의 온도 변화
 Fig. 9 Temperature variation properties of the permanent magnet by the time and the height change of the pipe cross-section inside (@0.2kg/s flow capacity)

서 영구자석의 온도 변화 특성을 살펴보았다. 그림 9에서 보는 바와 같이, 차량 실 운행 패턴을 고려하여 수냉각장치 적용 210kW급 IPMSM을 1시간 구동시켰을 경우, 파이프 단면의 내측 높이가 10mm일 때 영구자석의 최대 온도가 128.5℃로 가장 낮았다. 이는 파이프 단면의 내측 높이가 10mm인 경우에 파이프 내부로 흐르는 냉각수의 열흡수량이 가장 크다는 것을 의미한다. 결론적으로 파이프 단면의 내측 높이가 10mm인 수냉각장치 적용을 통하여 IPMSM의 1시간 구동 후 영구자석의 온도를 수냉각장치 적용 전 180℃에서 99℃로 약 81℃ 정도 낮출 수 있음을 확인하였다.

3.2 수냉각장치 적용 시 냉각수 유량 변동에 따른 열 분포 특성 분석

다음으로 210kW급 IPMSM에 수냉각장치 적용 시 냉각수 유량 변동에 따른 IPMSM 내부에서의 열 분포 특성을 분석하였다. 냉각수 유량의 변화는 정격운전 시 고려한 사항을 참고하여 0 ~ 0.2kg/s까지로 설정하였다. 그림 10은 수냉각장치 파이프 높이가 10mm이며, IPMSM의 1시간 구동 후의 파이프 내부를 흐르는 냉각수 유량의 변화에 따른 IPMSM 각 구성품의 온도 변화 특성을 보여준다. 그림 10에서 보는 바와 같이, 냉각수 유량이 증가될수록 IPMSM의 각 구성품의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 냉각수 유량이 0.2kg/s일 때 고정자 코어의 온도는 65℃, 고정자 코일의 온도는 80℃, 회전자 코어의 온도는 92℃, 영구자석의 온도는 약 99℃로 계산되었다. 냉각수 유량이 0.1kg/s보다 커지면서 IPMSM의 각 구성품의 온도의 변화가 급격하게 낮아지는 특성을 보였다. 이는 유량이 0.1kg/s보다 커지면서 수냉각장치 파이프 내부의 유동 형태가 층류에서 난류로 변경되는 전이영역으로 발전되고 있기 때문으로 판단된다. 그림 11는 수냉각장치 파이프 높이가 10mm인 경우의 냉각수 유량 0.2 kg/s일 때의 시간에 따른 IPMSM의 각 구성품의 온도 변화 특성을 보여준다. 그림 11에서 보는 바와 같이, IPMSM을 1시간 동안 구동하는 동안 고정자 코어의

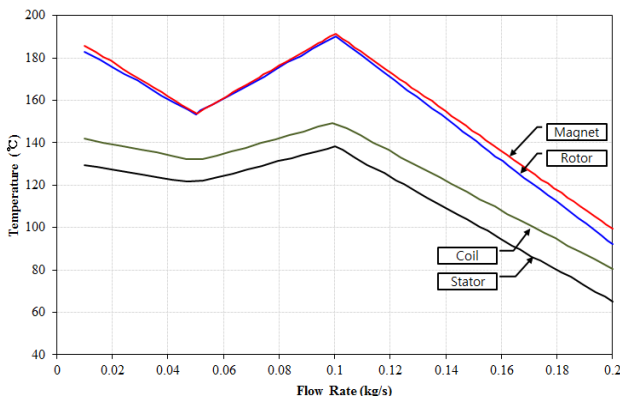


그림 10 냉각수 유량의 변화에 따른 IPMSM 각 구성품의 온도 변화(@파이프 높이 10 mm, 1시간 구동 후)

Fig. 10 Temperature variation properties of each component inside the IPMSM by the change of the coolant flow capacity (@10mm pipe height, after 1-hour operation)

온도는 최대 72.8℃, 고정자 코일의 온도는 최대 91.7℃, 회전자 코어의 온도는 최대 100.9℃, 영구자석의 온도는 최대 105.7℃로 계산되었다. 표 4는 수냉각장치 적용에 따른 210kW급 IPMSM 내부의 온도 상승 감소량을 보여준다. 표 4에서 보는 바와 같이, 210kW급 IPMSM에 파이프 높이가 10mm이며 냉각수 유량을 0.2 kg/s로 유지시킬 수 있는 수냉각장치를 적용함으로써 IPMSM 내부의 온도를 약 42~52%까지 낮출 수 있음을 확인하였다. 결론적으로 210kW급 IPMSM의 직사각형 파이프 형상을 가진 수냉각장치의 파이프 단면 내측 높이가 냉각수 유량을 변화시켜가면서 수치해석적 방법으로 IPMSM의 각 구성품의 온도 변화를 계산한 결과를 토대로 수냉각장치의 파이프 단면 형상을 폭 220mm, 높이 10mm로 결정하고, 냉각수의 유량은 0.2 kg/s 이상일 경우 온도상승 문제에 이상이 없을 것으로 판단된다.

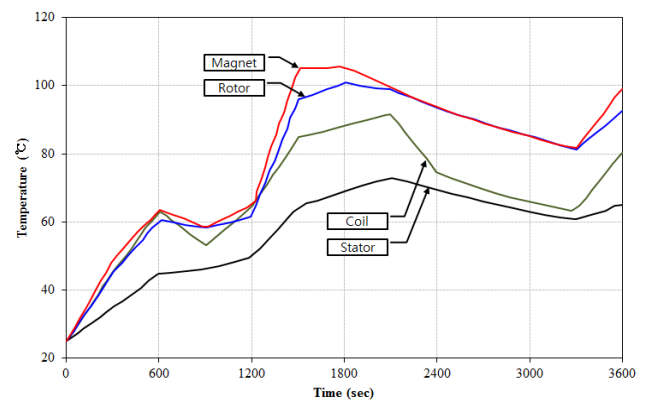


그림 11 냉각수 유량 0.2 kg/s일 때의 시간에 따른 IPMSM 각 구성품의 온도 변화(@파이프 높이 10 mm)

Fig. 11 Temperature variation properties of each component inside the IPMSM by the time change (@10mm pipe height, 0.2kg/s flow capacity)

표 4 수냉각장치 적용에 따른 210kW급 IPMSM 내부의 온도 상승 감소량

Table 4 Temperature decrease rate inside the 210kW-class IPMSM by application of the water cooling device

항목	온도 (°C)		온도 감소율 (%)
	수냉각장치 적용 전	수냉각장치 적용 후(10mm, 0.2kg/s)	
고정자 코어	150.4	72.8	▼ 52
코정자 코일	170.1	91.7	▼ 46
회전자 코어	175.2	100.9	▼ 42
영구자석	181.1	105.7	▼ 42

4. 결 론

본 논문에서는 도시철도차량의 실제 운행패턴을 고려한 210kW급 수냉각장치 적용 IPMSM의 열 특성 분석을 통하여 수냉각장치의 성능에 따른 IPMSM 내부에서의 온도 변화 특성을 분석하였다. 먼저 도시철도차량용 견인전동기로

써 기존의 210kW급 유도전동기를 대체할 수 있는 210kW급 IPMSM과 이의 냉각을 위한 수냉각장치의 열해석 모델링을 하고, 다음으로 2D FEM Tool을 활용하여 도시철도차량의 실제 운행패턴을 고려한 수냉각장치 적용 IPMSM의 열해석을 수행하였다. 수냉각장치의 유동 단면 형상에 따른 냉각 특성 분석을 위하여 파이프 단면 내측 높이를 변화시켜가면서 IPMSM 내부의 각 부분의 온도 변화 특성을 살펴보았으며, 다음으로 냉각수 유량 변동에 따른 IPMSM 내부에서의 열 분포 특성을 분석하였다. 결론적으로 210kW급 IPMSM에 파이프 단면 형상이 폭 220mm, 높이 10mm이며, 냉각수 유량을 0.2 kg/s로 유지시킬수 있는 수냉각장치를 적용함으로써 IPMSM 내부의 온도를 약 42~52%까지 낮출 수 있음을 확인하였다. 향후 수냉각장치가 적용된 210kW급 IPMSM 시제품 제작 및 온도상승 시험을 통하여 본 연구를 통하여 확보된 열해석 기법을 검증할 것이며, 이를 통하여 다양한 용량의 철도차량 추진용 영구자석 동기전동기의 냉각장치 적용에 따른 열 특성 연구에 활용이 가능할 것으로 보인다.

References

[1] C. B Park, H. W. Lee, and 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.

[2] 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.

[3] G. C. Jung, et al, "A design study on the torque ripple reduction of 210kW-class Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for railway vehicles," The Korean Institute of Electrical Engineers Spring Conference 2013, pp. 283-284, 2013.

[4] 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.

[5] J. M. Owen, et al, "Heat Transfer from an Air-Cooled Rotating Disk," Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, vol.336, pp. 453-473, 1974.

[6] C. B Park, H. W. Lee, and B. S. Lee, "Performance evaluation method and examples of the propulsion system for Electric Multiple Unit," The Journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.16, No.3, pp. 42-48, 2011.

[7] Y. J. Han, et al, "Temperature characteristics of traction motor in new and existed line," The Korean

Institute of Electrical Engineers Summer Conference 2005, pp. 1601-1603, 2005.

[8] S. W. Churchill and M. Bernstein, "A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in cross flow," Journal of Heat Transfer, vol. 99, pp. 300-306, 1977.

[9] 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(공학박). 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 차량 견인용 회전기, 선형기 설계 및 무선급전시스템



김 재 희

2003년 고려대 전기공학과 졸업(학사). 2010년 포항공대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2010년~2012년 삼성전자 선임연구원. 2013년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 배열 안테나, 모바일폰 안테나, 메타-재료의 설계 및 분석



이 준 호

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