

철손밀도 분포에 의한 열원이 고려된 3차원 열등가회로망을 이용한 경량전철 구동용 110kW급 IPMSM의 열 특성 연구

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

박 찬 배*
(Chan-Bae Park)

Abstract - A research on thermal analysis method is conducted for the characterization of heat generation during operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) for Light Railway Transits(LRT) in this paper. Efficient cooling of the heat generated in the IPMSM is important because the excessive heat generated from the winding, core and permanent magnet makes it harder for a long time continuous operation of IPMSM. Therefore, in order to analyze the heat generation characteristics of the 110kW-class IPMSM as advanced research for application the IPMSM to the cooling device, the heat transfer coefficients for each component of the 110 kW-class IPMSM were derived and the thermal equivalent network was configured to perform the thermal analysis in this study. Finally, the 110kW-class IPMSM prototype is made and a comparative verification between the test data and the thermal analysis results through its various performance tests are carried out.

Key Words : Interior permanent magnet synchronous motor, Thermal analysis, Thermal equivalent network method, Heat source, Loss density

1. 서 론

철도차량은 많은 수용인원을 탑승하고 고속으로 운전하기 위해서 제한된 공간에서의 높은 출력 밀도를 가지는 견인용 전동기를 필요로 한다. 최근 2층 열차, 저상 트램 등의 확산에 따라, 차량 바닥의 높이가 낮아짐에 따라 차량 하부에 장착되는 견인용 전동기의 설치 공간이 작아지고 있으며, 이에 따라 중량 및 점유공간을 최소화 할 수 있는 고효율밀도 견인 전동기의 요구가 커지고 있다. 현재 철도차량 분야에서는 견인전동기로 유도전동기가 대부분 적용되고 있으나, 유도전동기를 고효율밀도화 시키는데 한계가 있기 때문에 최근에는 철도차량용 견인 전동기로 높은 에너지밀도를 가지는 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)가 연구되기 시작했다[1][2].

일반적으로 PMSM의 구동 중에 권선, 코어, 영구자석에서 발생하는 과도한 열은 PMSM의 장시간 연속운전을 어렵게 만들기 때문에 PMSM의 구동 중 열발생을 최소화 시킬 수 있는 설계가 필요하며, 추가적으로 발생된 열을 효율적으로 냉각시킬 수 있는 냉각 채널 및 고성능 냉각 장치의 연구도 필요하다[3][4]. 최근 철도차량용 견인전동기의 경량화 요구가 커짐에 따라 견인용 PMSM의 고효율밀도화를 위해서 기존의 공기냉각방식이 아닌 냉매를 이용한 강제적인 냉

각방식의 적용이 요구되고 있으며, 이의 적용을 위해서는 PMSM의 구동 조건에 맞는 열해석이 PMSM의 설계단계에서 필수적으로 선행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 경량전철용 110kW급 매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)에 대한 열 특성 연구를 다루었다. Table 1은 본 논문에서 고려된 110kW급 IPMSM의 주요 사양을 보여준다. 열해석 방법은 전체 IPMSM 시스템에 대하여는 열등가회로망법 (Thermal Equivalent Network Method, TENM)을 사용하였으며, IPMSM의 각 부분을 3차원 체적으로 분할하여 열등가회로망을 구성하였다. 또한 IPMSM의 열해석 시 열손실에 해당하는 열원(Heat Source) 도출을 위해 유한요소법(FEM)을 이용하여 IPMSM의 손실을 계산하였으며, 고정자와 회전자 코어에서의 손실밀도(Loss density) 개념을 적용하여 현실성 있는 열원 도출법을 제안하였다. 마지막으로 경량전철용 110kW급 집중권 IPMSM의 시제품을 제작하고, 이의 다양한 성능 시험을 통하여 시험데이터와 열해석 결과의 비교 검증을 수행하였다.

2. 110kW급 IPMSM의 열해석 기법

2.1 IPMSM의 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망법

본 논문에서는 110kW급 IPMSM의 열해석을 위하여 집중수법을 기반으로 전동기의 전반적인 온도 분포 및 열의

* Corresponding Author : Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

E-mail : cbpark@krii.re.kr

Received : May 6, 2013; Accepted : June 3, 2013

흐름 등을 파악하고, 열 등가회로 상의 각 부분에서의 열전달 파라미터 및 손실과 같은 열원 도출 시에는 분포경수법을 이용하는 하이브리드 프로세스를 적용하였다. Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 IPMSM의 열해석 기법의 순서도를 보여주며, IPMSM의 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망을 구성하여 적용하였다. 일반적인 건인전동기의 경우, 냉각용 팬이 전동기의 외함 내부에 축방향으로 설치되며, 전동기 코어에 축방향으로 송풍홀을 통한 냉각 공기의 유로가 형성되기 때문에 축방향으로의 냉각 효과에 따른 전동기 각 부분에서의 온도 구배가 크게 발생할 수도 있는데, 이러한 전동기 모델에 2차원 열등가회로망을 적용하기에는 한계가 있었다. 추가적으로 IPMSM에서 대부분의 열이 발생하는 지점이 손실이 크게 발생하는 코일 및 공극과 접하는 코어 부분임을 감안할 때, 코일 및 공극과 접하는 코어 부분에서의 세분화된 열 분포 특성을 도출하는 것이 중요할 것이다[5]. 따라서, 본 논문에서 제시하는 미소 제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망법은 IPMSM의 공극과 접하는 고정자 티스 및 회전자 코어 외각 부분의 제어체적을 세분화하고 각 세분화된 제어체적간의 3차원 방향으로의 열등가회로망을 구성함으로써, 열해석 결과에 영향을 줄 수 있는 다양한 열저항들을 3차원 방향으로 고려하여 좀 더 현실적인 열 특성 결과 및 국부적인 온도 분포 결과를 도출할 수 있다는 장점을 갖고 있다[6]. Fig. 2는 IPMSM의 기존의 2차원 열등가회로망과 미소제어체적을 고려한 3차원 열등가회로망의 비교를 보여주며, Table 2는 본 논문에서 다루는 110kW급 집중권 IPMSM 3차원 열등가회로망의 구성 요소별 절점 분포를 보여준다.

표 1 110kW급 IPMSM의 주요 사양

Table 1 Main specifications of 110kW-class IPMSM

Contents	Value	Unit
Slots / Poles	9 / 6	-
Series Turns per Phase	19	Turns
Stator Outer Dia.	316	mm
Rotor Outer Dia	180	mm
Stack Length	280	mm
Permanent Magnet	NdFeB	-
Permanent Magnet Size	59.1x10	mm
Steel Lamination	S08(0.5)	mm

표 2 110kW급 IPMSM 3차원 열등가회로망의 구성 요소별 절점 분포

Table 2 Node distributions of each component in 3D thermal equivalent network of 110kW-class IPMSM

Component	Nodes	Component	Nodes
Open air	1	Frame	12
Inne air	2	Stator yoke	8
Stator teeth	16	Stator coil	4
Air-gap	4	Outer rotor	8
Magnet bridge	4	Inner rotor	4
Magnet	4	Shaft	6
End coil	2	Total	75

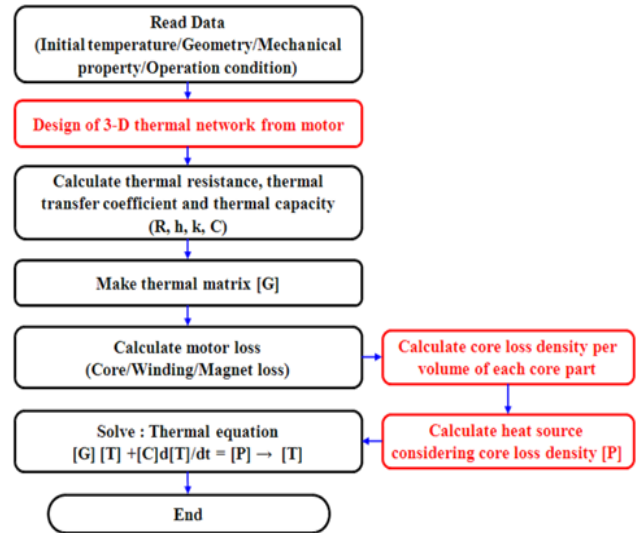


그림 1 IPMSM의 열해석 개념

Fig. 1 Concept of IPMSM thermal analysis

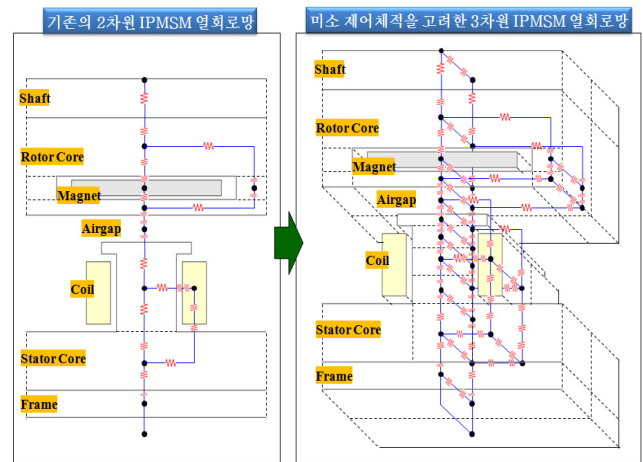


그림 2 미소 제어체적을 고려한 IPMSM의 3차원 열등가회로망[6]

Fig. 2 Three-dimensional thermal equivalent network of IPMSM considering small control volumes[6]

2.2 IPMSM의 철손밀도를 고려한 열원 도출

본 논문에서는 Fig. 3은 FEM 해석에 의한 110kW급 IPMSM에서의 회전속도에 따른 철손 분포를 보여준다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 철손은 주로 IPMSM의 고정자에서는 티스의 슈 부분에서 많이 발생되고, 회전자에서는 공극과 접하고 있는 바깥쪽 코어 부분과 영구자석 간의 브리지 공간에서 많이 발생된다[7][8]. 기존의 열등가회로망법을 이용한 IPMSM의 열해석을 수행할 경우, 철손에 의한 열원 도출 시 전체 철손을 계산한 후 전체 철손에 대하여 각 제어체적의 부피만큼만 각 제어체적에 손실로 할당하는 것이 일반적이다[9][10]. 이 경우 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 철손이 많이 발생하는 부분에 열원이 크게 입력되어야 하는데 그렇지 못해서 결국 코어에서의 온도 계산 시 적지 않은 오차를

수반하게 된다. 식 (1)은 기존의 열등가회로망법에서의 각 제어체적에 해당되는 철손에 의한 열원을 도출 식이다.

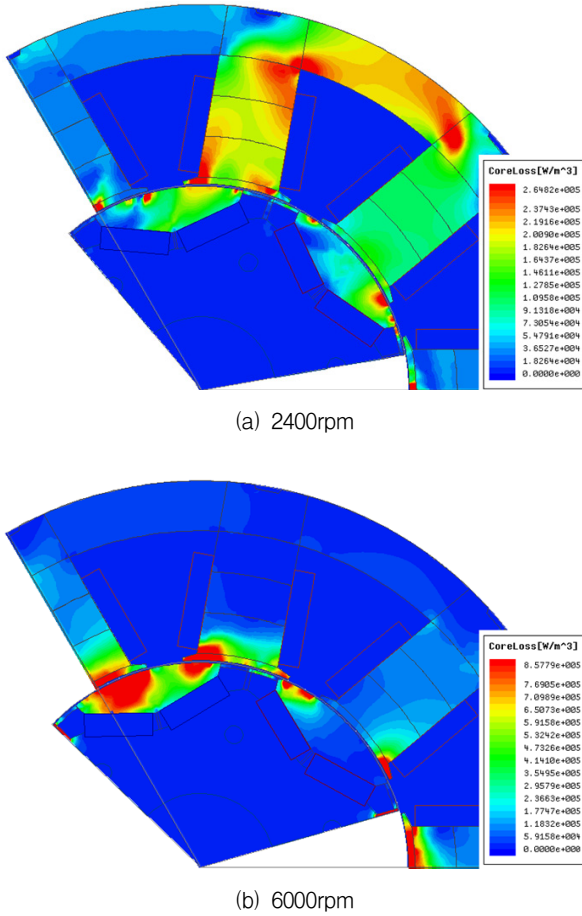


그림 3 110kW급 IPMSM에서의 회전속도에 따른 철손 분포 경향

Fig. 3 Core loss distribution trend in 110kW-class IPMSM by rotation speed variation

$$P_i = P_{total} \cdot \frac{V_i}{V_{total}} \quad (1)$$

여기서, P_{total} 은 IPMSM의 전체 철손 계산량이며, P_i 는 i 번째 제어체적에서의 철손량, V_{total} 은 IPMSM의 코어 전체 부피, V_i 는 i 번째 제어체적에서의 부피이다. 따라서 본 논문에서는 철손량으로부터 열원 배분 시 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위하여 FEM을 이용하여 IPMSM의 각 제어체적에서의 철손을 계산하고, 철손을 이용하여 각 제어체적에서의 철손밀도를 도출하여 열등가회로망의 열원으로 사용하는 방법을 제시하고자 한다. Fig. 4는 110kW급 IPMSM의 철손 밀도 계산을 위한 제어체적 분할 모델을 보여주며, 식 (2)는 각 제어체적에서의 철손밀도를 계산하는 식이다.

$$\rho_{i,coreloss} = \frac{P_{i,real}}{V_i} \quad (2)$$

여기서, $P_{i,real}$ 은 i 번째 제어체적에서의 실제 철손량이며, $\rho_{i,coreloss}$ 는 i 번째 제어체적의 철손밀도이다. 이와 같은 방법을 적용하게 되면, 실제로 철손이 많이 발생하는 부분과 적게 발생하는 부분과의 명확한 열원 차이를 보일 것이며, 이로 인해 결과적으로 IPMSM의 고정자와 회전자 코어에서의 보다 정확한 온도 분포 계산이 가능할 것이다. Table 3은 철손밀도를 고려한 110kW급 IPMSM의 열등가회로망에서의 손실 및 손실 분포를 보여주며, 공극과 가까운 코어 부분에서 철손밀도가 높으며, 회전속도가 높아지면 손실이 공극 부분으로 더욱 집중되는 경향이 있음을 확인할 수 있다.

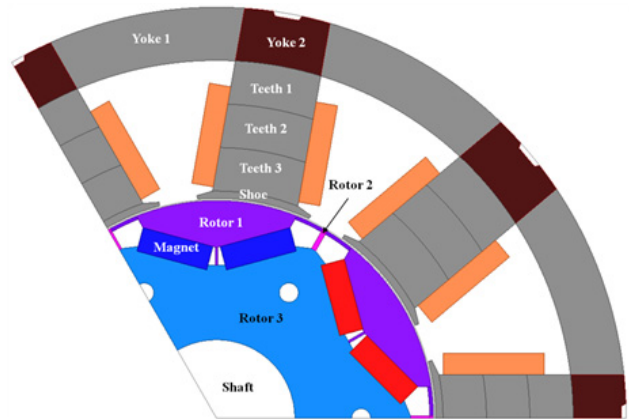


그림 4 110kW급 IPMSM의 철손밀도 계산을 위한 제어체적 분할 모델

Fig. 4 Control volume division model for core loss density calculation of 110kW-class IPMSM

표 3 철손밀도를 고려한 110kW급 IPMSM의 열등가회로망에서의 손실 및 손실밀도 분포

Table 3 Loss and loss density distribution in the TEN of 110kW-class IPMSM considering the loss density

Component	Area [mm ²]	Loss [W] (2400rpm / 6000rpm)	Loss density [W/m ²] (2400rpm / 6000rpm)	
Stator	Yoke 1	14835	318.03/388.63	21437/26196
	Yoke 2	6947	140.88/126.71	20280/18240
	Teeth 1	5848	171.48/182.69	29321/31237
	Teeth 2	5854	168.04/182.02	28705/31094
	Teeth 3	5862	192.36/328.42	32812/56022
	Shoe	1216	69.37/188.57	57037/155035
Rotor	Out. Rotor	5308	179.01/297.83	33727/56115
	Bridge	114	2.92/45.97	25611/403201
	In. Rotor	11437	3.26/27.33	285/2389
Magnet	3600	237.75/3010.2	66042/836167	
Winding(Coil)	7968	1052.4/1052.4	132078/ 132078	

3. 110kW급 IPMSM의 열해석 및 시제품을 통한 검증

3.1 110kW급 IPMSM의 열해석

본 논문에서는 경량전철용 110kW급 IPMSM 모델의 3차원 열등가회로망을 구성하여 열해석을 수행하였다. 먼저 110kW급 IPMSM의 각 매질에서의 열용량 도출을 위해 Table 4에 각 매질의 비열 및 밀도를 정리하였으며, IPMSM 제어체계에 근거하여 형상과 재질을 고려한 주요 열전달계수(전도/대류 열전달계수)를 도출하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 보는 바와 같이, 특이점은 IPMSM의 프레임으로 두랄루민을 사용하였으며, 열전도도는 $167\text{W/m}^2\text{C}$ 이다. 추가로 IPMSM의 성능시험 시 IPMSM 고정을 위한 프레임 지그를 열등가회로망에 고려하여 삽입하였으며, 지그의 재질은 SUS304이며, 열전도도는 $16\text{W/m}^2\text{C}$ 이다. 또한 공극에서의 대류열전달계수는 2400rpm의 회전속도에서 $65.04\text{W/m}^2\text{C}$ 이다. 공극에서의 대류 열전달계수는 Gazley의 고정자 슬롯의 치수에 따른 회전방향/축방향 유동을 고려한 실험적 결과를 참조하여 도출하였으며, 그 외의 대류 열전달계수는 자연대류 조건을 적용하여 도출하였다[6]. Table 5의 IPMSM 각 구성품간의 열전달계수가 고려된 열저항을 이용하여 열 컨덕턴스 행렬을 구성하였으며, Table 3의 철손밀도가 고려된 손실값을 이용하여 열원 행렬을 구성하였다. Fig. 5는 110kW급 집중권 IPMSM의 정격운전(2400[rpm]) 하에서 35분 동안의 과도 열해석 결과를 보여준다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 짧은 시간의 운전으로도 IPMSM의 각 부분의 온도가 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 설계된 110kW급 집중권 IPMSM의 경우, 냉각방식이 적용되지 않은 전폐형 모델의 IPMSM이며, IPMSM 내부에서 발생된 열을 외부로 강제적으로 배출할 수 있는 채널이 충분히 고려되지 않았기 때문이다. 특히 코일의 온도 상승폭이 크며, 고정자 코어의 온도 상승폭이 코일의 온도 상승폭과 큰 차이를 보이는 이유는 ① 권선 방식이 집중권이며, ② 권선 부분의 절연 및 진동 저감을 위한 함침이 과다하게 시행되어 권선의 동손에 의해 발생된 열이

표 4 110kW급 IPMSM 각 매질의 비열 및 밀도 특성
Table 4 Main material properties for 110kW-class IPMSM

Properties	Value	Unit
Frame/End cap specific heat	963	J/kg °C
Frame/End cap density	2710	Kg/m ³
Lamination steel specific heat	444	J/kg °C
Lamination steel density	7700	Kg/m ³
Copper specific heat	381	J/kg °C
Copper density	8978	Kg/m ³
Magnet specific heat	190	J/kg °C
Magnet density	7010	Kg/m ³
Shaft steel specific heat	480	J/kg °C
Shaft steel density	7978	Kg/m ³

권선 내에서 트랩되어 고정자 코어나 내측 공기를 통해 열 전달이 원활하게 이뤄지지 않았기 때문으로 판단된다. Fig. 5에 의하면 110kW급 집중권 IPMSM을 35분 이상 정격조건으로 연속 구동을 하면 IPMSM 권선에 적용한 절연등급(H종)의 허용온도 180[°C]를 넘게 되어 전동기 절연 성능에 문제가 발생할 것이므로 35분 이상의 열해석은 의미가 없을 것으로 판단되어 정상상태 열해석은 생략하였다. Fig. 6는 110kW급 집중권 IPMSM의 과도상태 열해석에 의한 구동 22분 후의 온도 분포를 보여준다. Fig. 6(a)는 IPMSM의 반경방향 횡단면에서의 온도 분포를 보여주며, Fig. 6(b)는 축방향 종단면에서의 온도 분포를 보여준다.

표 5 110kW급 IPMSM의 주요 열전달계수
Table 5 Main thermal transfer coefficient of 110kW-class IPMSM

Contents		Thermal transfer coefficient [W/m ² C]	
Components	Materials		
Conduction	Frame	Al6061	167
	Stator (Radial)	Si-steel (S08)	25
	Stator (Axial)	Si-steel (S08)	1.75
	Coil	Copper	398
	Rotor	Si-steel (S08)	25
	Magnet	NdFeB(N38EH)	7.6
	Shaft	Iron	50
	Frame Zig	SUS304	16
Convection	Air-gap		65.04
	From frame to inner air		10
	From stator yoke to inner air		10
	From stator shoe to inner air		20
	From end-coil to inner air		15
	From rotor to inner air		20
	From magnet to inner air		20
	From shaft to inner air		10
	From frame to outer air		100
	From shaft to outer air		17

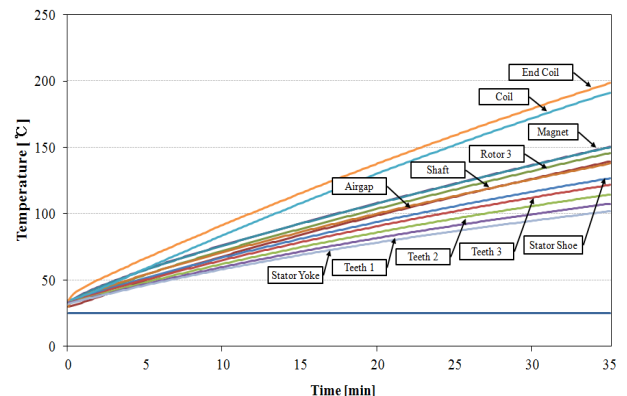


그림 5 110kW급 IPMSM의 정격운전 하에서의 과도상태 열해석 결과 (2400rpm, 35분 운전의 경우)

Fig. 5 Transient thermal analysis results under the rated operation of the 110kW-class IPMSM (2400rpm, 35 minutes operation)

3.2 110kW급 IPMSM 시제품의 온도시험을 통한 검증

본 논문에서는 경량전철용 110kW급 IPMSM 시제품을 제작하였다. IPMSM의 고정자는 9슬롯, 회전자는 영구자석형 6극으로 분수슬롯을 채용하고 치 집중권으로 제작을 하였다. Fig. 7은 제작이 완료된 110kW급 IPMSM Proto 및 IPMSM 각 부분에서의 온도 특성 계측을 위한 온도 상승 시험을 위한 Thermocouple의 설치 위치를 보여준다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 고정자 권선은 가는 구리선을 여러가닥 병렬로 사용하였기 때문에 IPMSM의 구동 시 구리선 간의 전자기적 힘에 의한 소음 발생원을 줄이기 위하여 권선 시험 후 절연지로 권선을 감싸고 진공함침을 시행하였다. 또한 IPMSM 시제품의 프레임은 전폐형으로 제작이 되었으며, 주요 성능시험을 위하여 간단하게 냉각채널의 고려없이 제작하였다. 또한 Thermocouple은 A상 권선과 B상 권선의 중앙 및 엔드 코일, 그리고 고정자 코어의 Teeth Shoe와 Yoke, 그리고 축방향으로 고정자 외면 중심, 외부 프레임 외면 중심에 부착하였다. 온도 측정데이터의 기록 및 저장을 위해 Yokogawa社의 MV2000을 사용하였으며, 외부 온도를 포함하여 총 8개의 채널을 이용하여 온도 변화에 대한 기록을 수행하였다. Fig. 8은 본 연구에서 제시한 110kW급 IPMSM의 열해석 결과의 검증을 위한 온도시험장치의 구성도를 보여준다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 110kW급 IPMSM 구동을 위한 인버터와 각종 데이터 계측을 위한 DAQ 시스템을 구축하고, 부하장치로 200kW급 다이내모 시스템(M-G Set)을 이용하였다.

일반적으로 경전철 또는 도시철도차량용 견인전동기는 일정 거리마다 정거장이 존재하는 관계로 장시간 연속운전에 노출되지 않는다. 따라서, 견인전동기에의 온도상승시험도 철도차량의 실 주행패턴을 고려하여 일정시간 동안 가속운전, 타행운전, 제동운전, 정지를 여러 번 반복하는 패턴으로 시행된다. 하지만 본 연구에서는 상기와 같은 운전 패턴이 가능한 제어기를 갖추지 못한 관계로 온도상승시험은 IPMSM을 정격속도 2400rpm에서 정격전류 307Arms로 약 22분간 인가하면서 수행하였다. 온도상승시험 결과, 제작된 IPMSM의 22분 뒤의 A상, B상 권선의 중앙부 온도는 약 144~145℃ 이며, 엔드 코일 부분은 A상, B상 권선 중앙부에 비하여 약 6~7℃ 이상 높았다. 고정자 코어 부분에서는 Shoe 부분이 약 98℃이며, Yoke 부분에서는 86℃까지 낮아졌으며, IPMSM의 외부 프레임은 약 51℃까지 낮아졌다. 전체적으로 20여분의 짧은 시간 동안 IPMSM의 고정자 권선 부분 온도가 급격히 상승하였는데, 이는 고정자 권선을 가는 소선 여러가닥을 병렬로 사용하면서 슬롯당 권선을 절연지로 감싸고 함침까지 실시한 관계로 고정자 권선에서의 열이 외부로 잘 전달되지 못하고 권선 내부에 축적된 것으로 보인다. Fig. 9 (a)는 110kW급 IPMSM의 권선부에서의 온도 시험값과 열해석 계산값의 비교를 보여주며, Fig. 9 (b)는 고정자 코어와 프레임에서의 온도 시험값과 열해석 계산값의 비교를 보여준다. Fig. 9에서 보는 바와 같이, 시험값과 열해석 계산값 사이에 온도 상승률이 유사한 패턴을 보이며, 값의 차이도 크지 않음을 확인할 수 있다. Table 6는 110kW급 IPMSM의 22분 구동 후의 각 측정 포인트에서의 온도 시험값과 열해석 계산값 사이의 비교 결과를 보여준다.

다. Table 6에서 보는 바와 같이, 권선부에서는 코일 중심부에서 상에 따라 최대 6.3%까지 차이가 발생했으며, 고정자 코어부에서는 요크에서 최대 5%의 차이가 발생했고, 프레임 부분에서는 최대 1.8%의 차이가 발생했다. 결론적으로 시험값과 비교해볼 때 계산값의 오차가 전체적으로 6.3% 미만 수준이며, 본 논문에서 제시한 철손밀도를 고려한 열등가회로방법에 의한 IPMSM의 열해석 기법에 대하여 유효성이 확보되었다고 볼 수 있겠다.

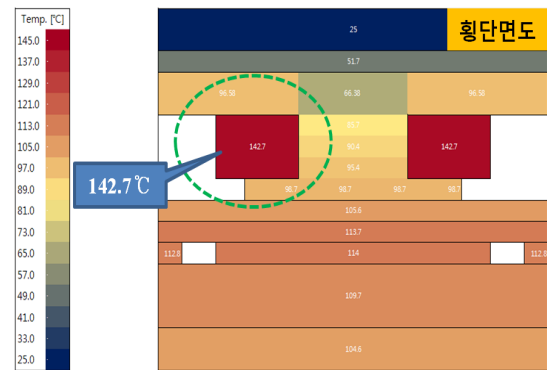
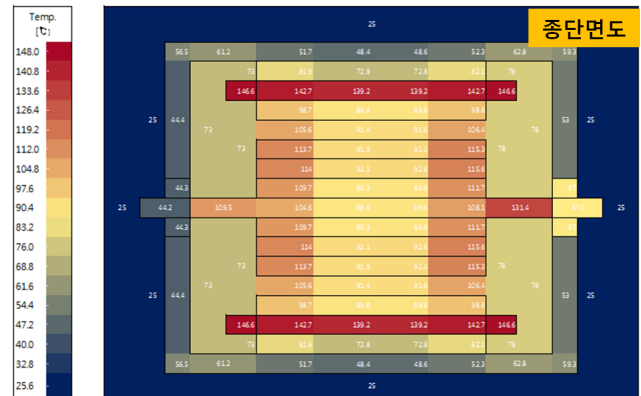


그림 6 110kW급 IPMSM의 과도상태 열해석에 의한 22분 운전 후의 온도 분포

Fig. 6 Thermal distribution of the 110kW-class IPMSM by the transient thermal analysis after 22 minutes operation

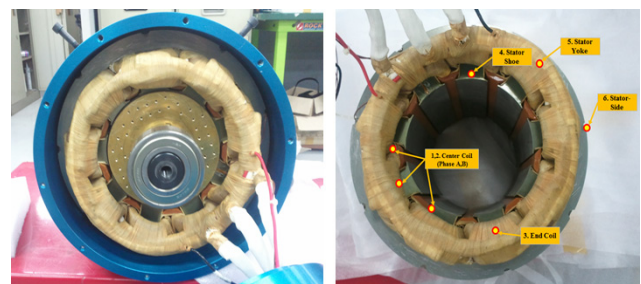


그림 7 110kW급 IPMSM Proto 및 온도계측 위치
Fig. 7 110kW-class IPMSM Proto and thermal measurement positions

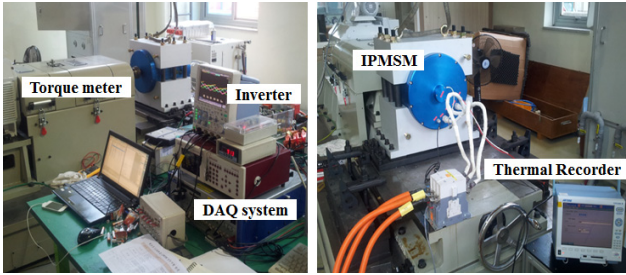
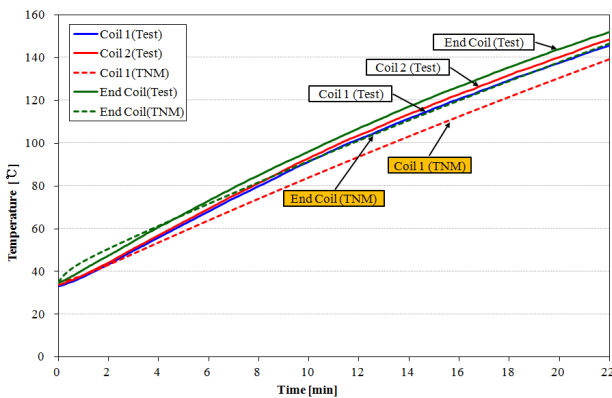
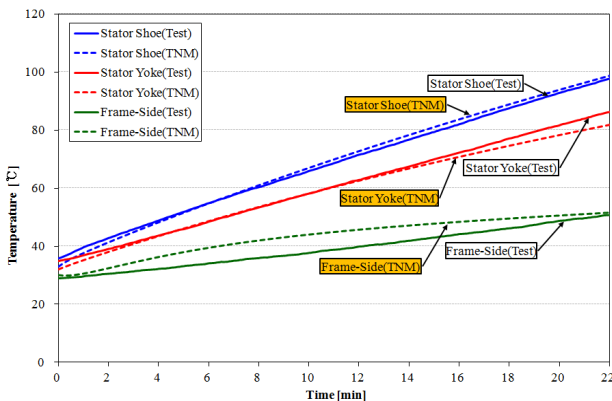


그림 8 시험 장치 구성도
Fig. 8 Composition of experimental equipments



(a) Coil



(b) Stator core and Frame

그림 9 110kW급 IPMSM 시제품의 온도 시험값과 열해석 계산값 비교

Fig. 9 Comparisons between thermal test and calculation values on the winding parts

5. 결론

본 논문에서는 경량전철용 110kW급 IPMSM에 대한 열 특성 연구를 다루었으며, 열해석 방법은 전체 IPMSM 시스템에 대하여는 열등가회로방법을 적용하였으며, IPMSM의 각 부분을 3차원 체적적으로 분할하여 열등가회로망을 구성하였다. 또한 IPMSM의 열해석 시 열손실에 해당하는 열원 도출을 위해 FEM을 이용하여 IPMSM의 손실을 계산하였으며, 고정자와 회전자 코어에서의 철손밀도 개념을 적용

하여 현실성 있는 열원 도출법을 제안하였다. 또한 본 논문에서 제시한 IPMSM의 열 해석 기법에 대한 검증은 위하여 경량전철용 110kW급 IPMSM의 시제품을 제작하고, 이의 온도상승시험을 통하여 시험데이터와 열해석 결과의 비교 검증을 수행하였다. 결과적으로, 경량전철용 110kW급 IPMSM 시제품의 권선부에서는 코일 중심부에서의 온도값이 해석값과 비교하여 상에 따라 최대 6.3%까지 차이가 발생했으며, 고정자 코어부에서는 요크에서는 최대 5%의 차이가 발생했고, 프레임 부분에서는 최대 1.8%의 차이가 발생했다. 결론적으로 온도상승 시험값과 비교해볼 때 계산값의 오차가 전체적으로 6.3% 미만 수준이며, 본 논문에서 제시한 철손밀도를 고려한 열등가회로방법에 의한 IPMSM의 열해석 기법에 대하여 유효성이 확보되었다고 볼 수 있겠다. 향후 본 연구를 통하여 확보된 열해석 기법을 통하여 다양한 용량의 철도차량 추진용 영구자석 동기전동기의 냉각장치 적용에 따른 열 특성 연구에 활용이 가능할 것으로 보인다.

표 6 110kW급 IPMSM의 22분 구동 후 온도 시험값과 열 해석 계산값의 비교

Table 6 Comparisons between thermal test and calculation values of 110kW-class IPMSM after 22 minutes operation

Measurement Point	Calculation [°C]	Test [°C]	Difference	
			[°C]	[%]
Coil 1 (Center)	139.2	145.8	6.6	4.5
Coil 2 (Center)	139.2	148.6	9.4	6.3
End Coil	146.6	152.2	5.6	3.7
Stator Shoe	98.7	97.7	1.0	1.0
Stator Yoke	81.9	86.2	4.3	5.0
Frame-Side	51.7	50.8	0.9	1.8
Out-Air	27.3	27.3	-	-

References

- [1] C.B Park, H.W. Lee, B.S. Lee, "Analysis of Eddy Current Loss on Permanent Magnets of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Transit," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 4, pp. 370-375, 2012.
- [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] J.W. Lim, J.H. Seo, S.Y. Lee, H.K. Jung, "Thermal Network Analysis of Interior Permanent Magnet Machine," 2009 Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp. 527-532, 2006.
- [4] S.M. Jang, J.C. Seo, H.W. Cho, Y.H. Jeong, "Analysis of thermal distribution for permanent magnet high speed motor," KIEE Summer Conference 2004, pp. 1073-1075, 2004.

- [5] J.H. Seo, "Thermal analysis and optimal design of Interior Permanent Magnet Motor for Vehicle Application," PhD Thesis, Seoul University, 2010.
- [6] 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.
- [7] Y.S. Lee, S.Y. H, "Thermal analysis technology of electric motors : Part 1," Proceedings of KIEE, Vol.48, No.9, pp.12-17, 1998.
- [8] C, Gazley, JR., "Heat-transfer characteristics of the rotational and axial flow between concentric cylinders," Transaction of the ASME, pp. 79-90, 1958.
- [9] K.C. Jang, D.J. Bang, D.H. Kang, "Thermal analysis technology of electric motors : Part 2," Proceedings of KIEE, Vol. 48, No. 9, pp. 25-31, 1998.
- [10] Y.S. Lee, "Thermal analysis of Induction Motor with Axial Cooling Channels in Stator and Rotor," PhD Thesis, Seoul National University, 1998.

저 자 소 개



박 찬 배 (朴 贊 培)

1975년 10월 23일 생, 2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사), 2013년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원, 2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원.