

고속 전철용 매입형 영구자석 전동기의 풍량에 따른 열해석

Thermal Analysis of Traction Motor in the High Speed Train with various Flow Rate

임재원†
Lim, Jaewon

이경표*
Yi, Kyung-Pyo

정현교**
Jung, Hyun-Kyo

ABSTRACT

Recently, Interior Permanent Magnet Machine(IPM) is widely used for traction motor in the high speed train. Higher efficiency and power density are the superb performance of IPM. Due to the high power density, however, it has lots of heat source which are originated from copper losses and core losses. These heat source can cause the permanent demagnetization in magnet and the loss of torque and power. To prevent the undesirable loss in the traction motor, the accurate loss calculation and the thermal analysis should be preceded. Especially, the end-winding area and permanent magnet area should be examined correctly.

In this paper, the electromagnetic fields were examined by finite element method to analyze the electromagnetic properties of IPM and thermal analysis are carried out with pre-calculated losses. To validate the analysis result, the experiment set with forced air cooling system is manufactured.

1. 서론

최근 동력 분산형 고속 전철용 견인전동기로 매입형 전동기를 채택하는 사례가 늘고 있다. 매입형 영구자석 전동기는 다른 전동기와 비교하여 볼 때, 높은 효율과 출력, 광범위한 속도영역을 갖고 있으며 고 출력밀도를 갖고 있다. 하지만 높은 출력밀도를 달성하기 위해서는 그에 따른 높은 손실을 수반하게 된다. 동손, 철손 등으로 표현되는 이러한 손실은 전동기의 열원으로 동작하게 되며, 이 열원은 회전자 내부에 매입된 영구자석의 영구 감자 문제와 온도 증가에 따른 저항의 증가에 인한 동손의 증가 등 전동기의 성능을 저해하는 요소로 작용될 수 있으며, 심한 경우 전동기의 영구적인 손상으로 이어질 수 있다. 이러한 전동기의 성능 저하를 막기 위해서는 정확한 손실 및 열원의 계산이 수행되어야 하며 냉각 시스템의 성능을 고려한 열 해석도 수반되어야 한다. 특히 전동기의 열원으로 동작하며 민감한 열적 특성을 보이는 엔드와인딩 부분과 영구자석 부분의 열해석은 전동기의 성능에 주요한 영향을 끼칠 수 있으므로 정확히 해석되어야 한다.

본 논문에서는 이용하여 매입형 영구자석 전동기의 전자계해석을 수행하였고 이 과정에서 구해진 철손, 동손 등의 손실 값을 이용하여 열 해석을 수행하였다. 매입형 영구자석 전동기의 냉각을 위해서 강제 송풍 시스템을 제작하였으며 열 해석과 실험과의 비교 분석을 통하여 풍량에 따른 열 해석을 검증하였다.

† 정희원, 서울대학교, 전기공학부, 박사과정
E-mail : einses@gmail.com
TEL : (02)880-7262 FAX : (02)878-1452

* 정희원, 서울대학교, 전기공학부, 박사과정

** 정희원, 전기공학부, 교수

2. 본론

2.1 열 해석 모델

매입형 영구자석 전동기(IPM : Interior Permanent magnet Motor)는 회전자 철심 내부에 영구자석이 매입되어 있는 형태의 전동기로 일반적으로 다른 전동기 유형보다 높은 효율과 출력을 가지고 있으며 광범위한 속도구간의 운전이 가능하고 제어특성도 우수한 것으로 알려져 있다. 제작된 매입형 영구자석 전동기의 회전자 단면은 그림 1에 나타내었다. 매입형 영구자석 전동기는 그 출력 밀도가 높아 철손 등의 열원에 의한 회전자에서의 온도 상승이 나타나는 경우가 있으며 이는 기기의 성능 저하로 이어지기도 한다. 회전자 내부에서 발생하는 열은 일반적으로 영구자석의 성능을 저하시키며 때에 따라서는 영구자석의 영구 손상까지 발생하기도 한다. 이와 같은 영구자석의 손상을 막기 위하여 회전자의 냉각은 필수적이다. 회전자의 냉각에는 공극면을 통한 냉각, 축을 통한 열 전도에 의한 냉각이 이루어지며 본 모델에서는 회전자에 통풍 홀을 구성하여 강제 송풍에 따른 추가적인 냉각이 이루어지도록 구성하였다. 냉각을 위한 공기는 전동기의 앞부분, 즉 부하측을 통해 전동기의 내부로 유입이 되며 전동기의 후면인 반부하측을 통해 배출되게 된다.

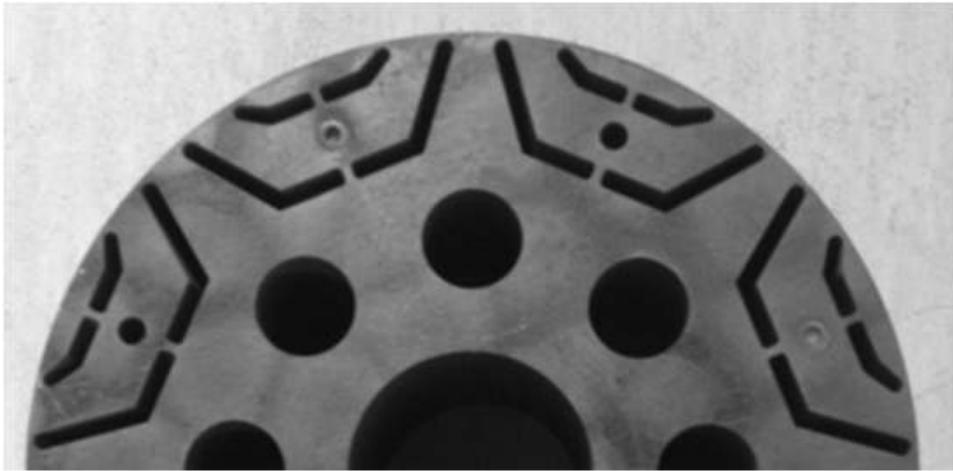


그림 1. 전동기 회전자 내부 단면

전동기의 내부로 유입된 공기는 가장 먼저 전동기의 가장 큰 열원중의 하나인 부하측의 엔드와인딩을 냉각하고 공극면과 회전자의 홀을 통과하며 회전자를 냉각한후 반부하측의 엔드와인딩을 냉각하게 된다. 따라서 위와 같은 형태의 냉각에서는 후면의 엔드와인딩 부분이 가장 높은 온도를 갖게 되며 이 때 권선의 열적 한도를 넘지 않도록 냉각 시스템이 설계되어야 한다. 또한 온도에 취약한 부분인 회전자의 경우도 영구자석이 허용하는 온도 범위내에서 동작하도록 구성하여야 한다.

전동기의 열 등가 회로 해석을 위하여 전동기의 회전자 부분을 단순화 하였는데 날개 모양으로 구성된 전동기의 자석부분은 원주 방향으로 균일한 형상을 갖는 것으로 구성하였으며 이에 따른 해석의 부정확성을 최소화 하기 위해 동일한 부피 및 동일한 자석 두께를 갖는 모델로 간략화 하였다. 영구자석의 경우 열 전도도는 회전자 철심을 구성하고 있는 철 재질과 크게 다르지 않으므로 위와 같은 영구자석 구조의 단순화는 해석의 정밀도에 큰 영향을 주지 않을 것이며 자석의 위치가 거의 동일하므로 위치에 따른 회전자 내의 온도 분포 해석에 큰 문제가 없을 것이다.

2.2 열 실험 구성

열 실험을 위해 전동기의 열적 취약부와 주요한 열원 부위의 온도 측정이 필요하며, 이때 센서의 부착 위치는 그림 2에 나타내었다. 엔드 코일 부분과 고정자 내부, 엔드캡 부분에 센서를 부착 하였으며

프레임 표면 등의 온도도 실험과 해석과의 비교를 위하여 온도 센서를 부착하였다.

매입형 영구자석 전동기의 정확한 열 해석을 위하여 먼저 프레임의 열 전달 계수를 추출하여야 하며 이는 철손의 영향을 배제하지 위해 동손만을 발생시켜 외기와 프레임 사이의 열전달 계수를 추출하였다. 3상 회로로 구성된 고정자의 권선에 균일한 동손을 인가하기 위해서는 고 전류 저속 구동이 유효하며 25rpm의 저속 구동 상태에서의 실험을 수행하였다. 철손의 경우 속도에 따라 증가 하는 경향을 보이므로 저속 구동을 통해 철손의 영향을 최대한 배제하여 실험을 수행하였다. 이때 실험에 사용된 전동기 실험 세트의 구성은 그림 3에 나타내었다. 전동기에 부하 조건을 적용하기 위하여 벨트 구조로 연결된 유도기를 함께 연결하여 구동하였으며 그때의 전류, 전압, 토크 등의 값은 제어 보드를 통하여 측정하였다. 또한 이때의 온도 분포는 각부에 연결된 센서를 통해 측정하였다.

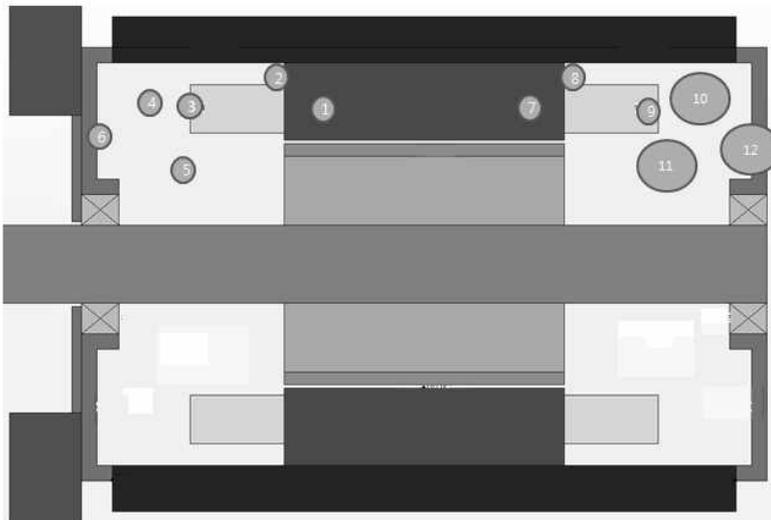


그림 2. 열 실험을 위한 센서 부착 위치

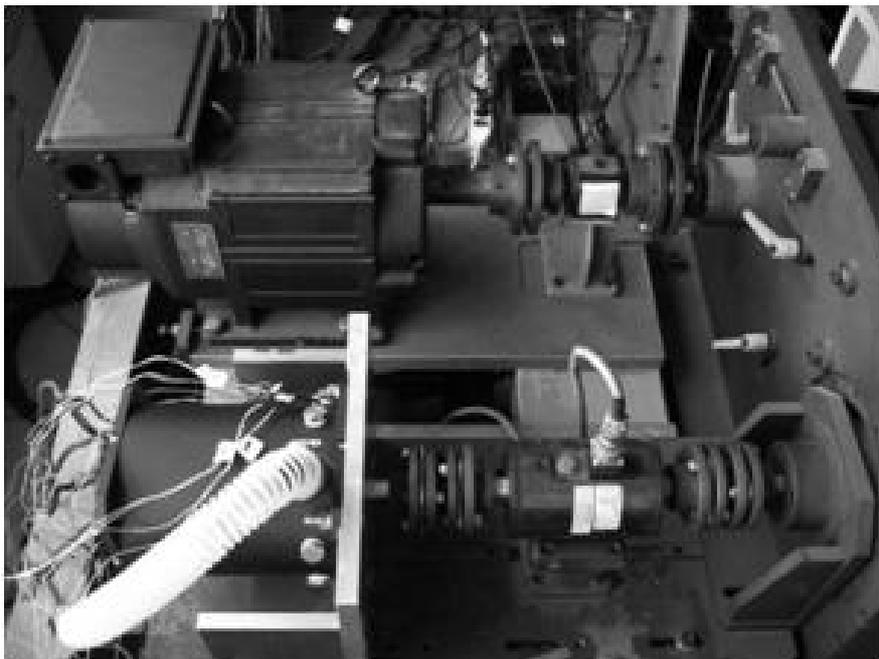
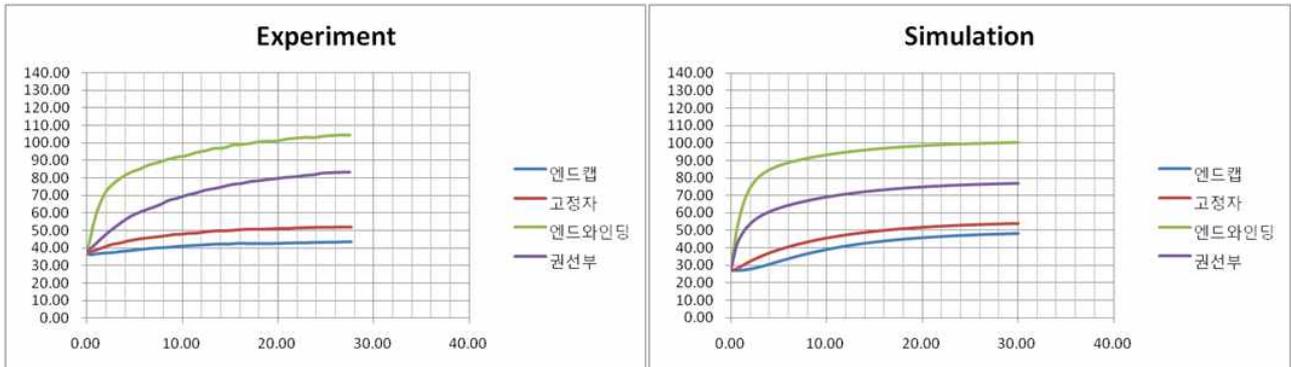


그림 3. 전동기 특성 실험 및 열 실험을 위한 실험 장비

2.3 열 실험 결과

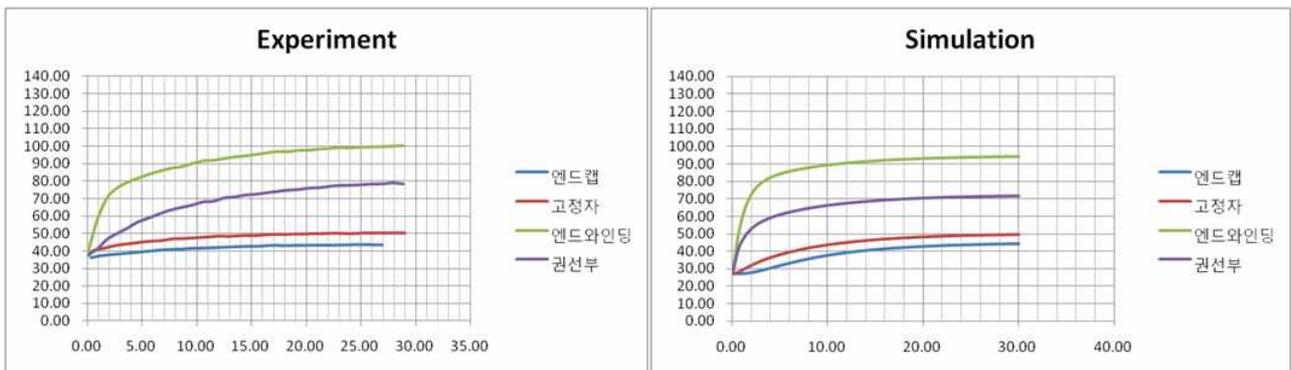
매입형 영구자석 전동기의 열 실험 결과는 그림 4에서 그림 7에 걸쳐 나타내었다. 3800rpm, 5000rpm 두 구동 조건과 0.035m³/s, 0.043m³/s의 두 가지 송풍 조건을 고려한 실험에 대한 결과이다. 각 실험 및 해석에 대해 전동기의 가장 중요한 열원이 되는 엔드 와인딩, 권선부의 온도를 표시 하였으며 비교를 위해 고정자 내부의 온도와 엔드 캡의 온도도 표기 하였다. 5000rpm으로 구동하였을 때 동손은 342W이며 3800rpm으로 구동 시 동손은 396W이다. 저속 구동 시 동손의 크기가 더 큰 이유는 고 토크 구동을 하기 때문이며 각각의 상황에 따른 철손도 유한요소 해석을 통해 적용하였다.



(a) 열 실험 결과

(b) 열 해석 결과

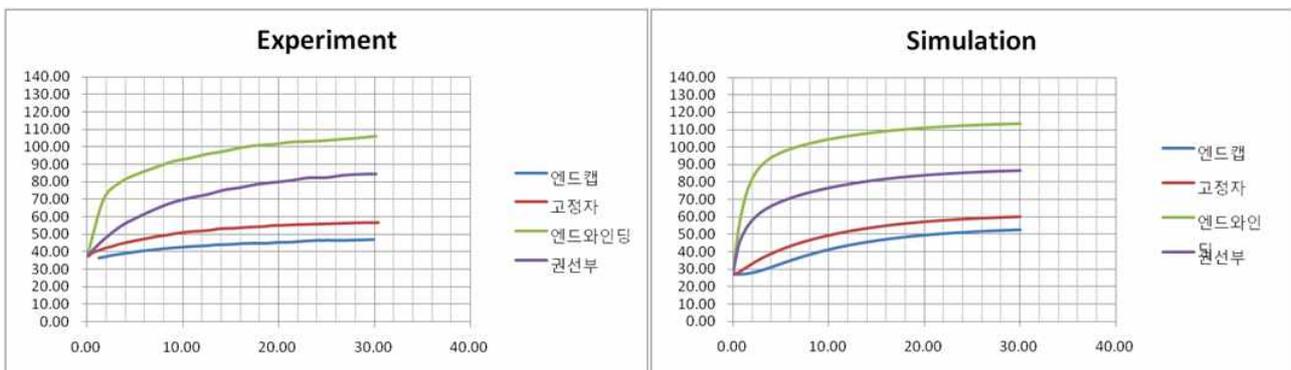
그림 4. 열 실험과 열 해석 값의 비교 (5000rpm, 0.035m³/s 냉각)



(a) 열 실험 결과

(b) 열 해석 결과

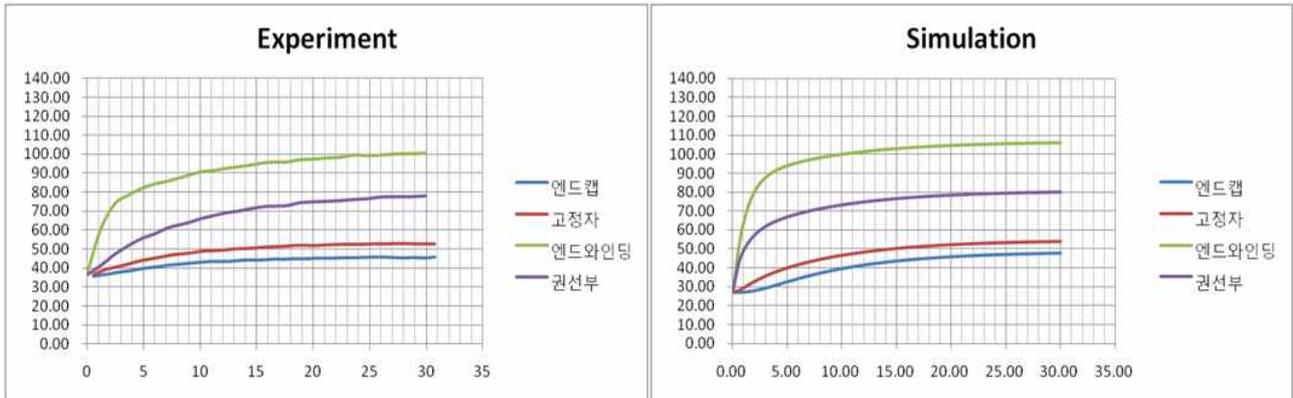
그림 5. 열 실험과 열 해석 값의 비교 (5000rpm, 0.043m³/s 냉각)



(a) 열 실험 결과

(b) 열 해석 결과

그림 6. 열 실험과 열 해석 값의 비교 (3800rpm, 0.035m³/s 냉각)



(a) 열 실험 결과 (b) 열 해석 결과
 그림 7. 열 실험과 열 해석 값의 비교 (3800rpm, 0.043m³/s 냉각)

표 1. 열 실험과 열 해석 값의 오차

	5000rpm, 0.035m ³ /s	5000rpm, 0.043m ³ /s	3800rpm, 0.035m ³ /s	3800rpm, 0.043m ³ /s
엔드캡	10.9	12.4	1.9	4.6
고정자	3.9	6.0	1.2	3.2
엔드와인딩	4.0	7.0	6.1	5.3
권선부	7.7	2.7	8.6	2.4

실험 결과에서 보이는 것처럼 각각의 실험에서 엔드 와인딩 부분, 반부하측 냉각공기가 배출되는 부분의 온도가 전동기 내에서 가장 온도가 높은 부분으로 나타났으며 모든 경우에 대해 권선의 절연한계인 120도를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다. 각 실험에서의 열 실험결과는 열 해석결과와 비슷한 온도 상승 추이를 가지고 있다고 할 수 있으며 각각의 열 실험과 열 해석과의 오차는 표 1에 표기 하였으며 엔드캡의 경우를 제외하면 대부분의 경우 5%내외의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 전동기의 속도와 송풍량에 따른 매입형 영구자석 전동기의 열 등가 회로해석을 수행하였다. 두 가지 속도에 대한 유한요소 전자계 해석을 수행하여 전동기의 열원으로 동작하는 동손과 철손 값을 계산하여 열 등가회로의 열원으로 적용하였으며 미리 수행된 동손 부하 실험을 통해 프레임의 열 전달 계수를 구하여 실제 해석에 적용하였다. 두 송풍 조건에 따른 열 해석은 열 등가회로 해석법의 특성상 약간의 오차가 존재 하기는 하지만 전동기의 열적 한계 내에서 동작 하는 것을 확인할 수 있었으며 이를 바탕으로 권선의 열적 한계 설계 및 영구자석의 온도에 따른 성능 저하에 대한 해석 및 영구자석 손상을 방지하는 설계에 도움이 될 수 있을 것이라고 기대된다.

4. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. P. Holman (2005), "Heat Transfer", 경문사.

2. Daryl L. Logan (2006), “Logan의 유한요소 첫걸음”, 시그마프레스
3. 이양수 (1998), “고정자와 회전자에 축방향 냉각 채널이 있는 유도전동기의 열해석”, 서울대학교 대학원