

동력분산형 고속 전철의
견인전동기 냉각 시스템 해석 및 설계기술 연구
**Analysis of the Cooling System for Traction Motors
of the High-Speed EMU**

서장호* 이상엽* 정현교**
Seo, Jang-Ho Lee, Sang-Yub Jung, Hyun-Kyo

ABSTRACT

To cope with the demagnetization risk of permanent magnets used in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(IPMSM), an accurate iron analysis and thermal analysis are very important. In this research, to calculate thermal increment of IPMSM for high-speed traction motor, we will extract losses of IPMSM considering the condition of field weakening control. Then we will input the calculated losses such as iron loss and copper loss as the thermal sources. Based on magnetic filed and thermal analysis, we will support the design of IPMSM for high-speed train.

1. 서 론

최근 철도 차량용 견인 전동기 경우, 전동기 내부의 온도 분포 및 열적 특성에 관한 많은 관심이 고조되고 있는데 이는 견인전동기의 고효율, 소형경량화와 밀접한 관련이 있다. 또한 전동기의 용량이 커지거나 고속 운전 상황이 되면 그만큼 발생하는 손실의 양이 커져 내부의 온도 상승의 요인이 되므로 견인전동기 개발 시 열해석을 통한 냉각설계의 중요도가 점차 큰 비중을 차지하고 있다.

따라서 본 연구를 통해 최고속도 400km/h급 철도 차량용 견인전동기 열해석 기술을 개발하고 견인전동기 냉각방식 선정 및 냉각 시스템 설계지원을 목표로 하고 있다. 본 연구에서는, 구동상황을 고려한 정확한 발열량을 수치해석적 기법을 적용하여 추출하고 이를 열해석 알고리즘의 입력으로 이용하여 전동기의 온도상승을 예측하고자 한다. 전동기의 온도해석 측면에서는 2차원 열전도 방정식을 이용한 수치해석적 기법과 전체적인 열의 흐름을 파악하기 위한 열등가회로망 법을 개발한다. 개발된 온도 해석 기법을 실 구동 환경에 적용하여 전동기 국부 온도상승을 예측하고 시제품 온도 실험 결과를 통하여 열해석 기법을 보정하여 견인전동기 냉각 설계 및 제작특성지원을 수행한다.

* 서울대학교, 전기역학 연구실, 정회원
E-mail : jangho78@elecmech.snu.ac.kr, 1stonion@elecmech.snu.ac.kr
TEL : (02)880-7262 FAX : (02)878-1452
** 서울대학교, 전기역학 연구실, 정회원
E-mail : hkjung@snu.ac.kr

2. 본 문

2.1 연구의 필요성

전동기의 역사는 매우 오래되었고 그 기원은 19세기 전반의 수많은 전자 현상의 발견으로까지 거슬러 올라간다. 직류 전동기나 유도 및 동기 전동기 등 대부분이 19세기 후반에 연구 개발되었고 20세기 초에 실용화 되었다. 이후 현재까지 재료 및 구조, 구동회로, 제어법 등 모든 방면에서 그 성능이 향상되고 있다. 특히, 1920년대부터 1970년경에는 근대 산업의 발전과 함께 각종 전동기는 대용량화, 소형 경량화, 고출력화 및 고효율화 등의 요구사항을 실현하는 과정에서 많은 발전을 이루었다. 그 후 반도체 소자의 발전에 따라 인버터 등 전력 변환기의 고성능, 저ripple와 제어용 마이크로 프로세서를 이용한 제어 기술의 실용화에 동반하는 전력용 전자공학 기술의 급속한 진보를 배경으로 전동기는 새로운 발전 단계에 들어가고 있다.

전동기는 전원의 종류와 구동원리에 따라 크게 직류전동기, 유도전동기, 영구자석형 동기 전동기로 구분할 수 있다. 직류 전동기는 역사적으로 가장 오래되었고 제어 성능이 우수하여 가변속 전동기로 널리 사용되었다. 하지만 구조상 기계적인 정류 기구를 가지기 때문에 정기적인 보수, 점검이 요구되고, 고속 구동에 어려운 점이 있어, 근래에는 유도기나 동기기를 이용한 가변속 구동 시스템에 대체되어 가고 있다. 유도 전동기는 구조가 간단하고 강건하며, 인버터에 의한 구동 시스템에 관한 연구가 오래되었기 때문에 그 완성도가 높다. 그러나 저속 운전 영역에서는 효율이 낮고 구동 원리로 볼 때 항상 슬립이 존재하고 이에 비례하여 회전자 내부에서는 항상 동손이 발생한다. 영구 자석형 전동기는 계자 자속이 외부 전원에 의존하지 않고 회전자의 영구 자석에 의해 공급되기 때문에 효율, 출력 밀도가 타 전동기에 비해 월등히 높다. 또한 에너지 밀도가 높은 NdFeB와 같은 희토류 계열 자석 재료의 개발이 활발히 진행되고 있기 때문에 산업계 각 분야에서 시스템의 효율성, 신뢰성을 향상시키기 위해서 기존 시스템을 영구자석형 전동기 시스템으로 대체 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 전기자동차 하이브리드 전기자동차, 연료전지 자동차, 철도 차량, 풍력 발전 시스템, 전기 추진 선박, 잠수함, 냉장고, 에어컨용 컴프레서 및 청소기에 이르기까지 영구자석 전동기의 응용 분야는 급속도로 증가되고 있다[1]-[5]. 특히 전기자동차, 철도 차량용 구동 분야에 적용되는 전동기로 1990년대 초까지는 유도 전동기와 영구자석 전동기가 비슷한 비율로 이용되었으나 하이브리드 차량 개발이 본격화된 1990년대 후반부터는 영구자석 전동기가 주류를 이루고 있으며, 2000년도 이후에는 전기 자동차용 구동 모터로서 영구자석형 전동기만이 개발되고 있을 만큼 그 중요성은 증대되고 있다.

이렇듯, 각 산업 분야에서 신뢰성, 효율성이 높은 동력원으로서 광범위하게 사용되는 영구자석형 전동기이지만 여타의 다른 전동기와 마찬가지로 절연물에 따라 온도 상승의 한계가 정하여져 있고 절연 파괴의 대부분이 코일에서 발생한다. 또한 구동 온도의 상승은 영구자석의 영구 감자 현상을 초래하게 되고 이는 전동기의 영구적인 성능 감소를 야기하게 된다. 따라서 영구자석형 전동기를 제작할 때에는 설계 단계에서 전동기 내부의 온도 상승을 예측할 수 있어야 한다. 그리고 최근에는 재료비 절감을 위한 소형 경량화, 부하의 용량 증가에 의한 대용량화 그리고 산업의 요구에 따른 고속화 등의 개발 경향으로 영구자석형 전동기가 제작되고 있는데, 이럴수록 전동기 내부의 온도는 더욱 상승하게 되므로, 온도 분포 예측을 위한 열해석 기법 개발이 필요하다고 할 수 있다. 또한, 대용량화, 소형 경량화 및 고속화 이외에도 철도 차량용 견인 전동기 적용시 반드시 요구되는 동작의 안전성과 신뢰성을 갖춘

고품질의 전동기가 제작되기 위해서는 내부의 동작 온도가 낮은 상태에서 유지 될 수 있도록 효과적인 방열 설계가 이루어져야 한다. 이를 위해 전동기 각부의 열전달 기구를 정확하게 이해하는 것이 필요하고 코일의 온도 상승을 최소화 하는 이상적인 방열 설계를 위해 열저항과 열원의 모델로부터 전동기 내부의 정확한 온도 분포를 예측 할 수 있어야 한다.

2.2 전동기의 발열량 계산

우선 전동기 내부의 온도 분포를 예측하기 위해서는 정확한 발열량 계산이 필요하며, 영구자석형 전동기의 발열은 고정자 코일에서 발생하는 동손에 의한 발열과 철심의 자속 밀도 변화에 의해 발생하는 철손에 의한 발열로 나누어 볼 수 있다. 먼저 동손에 의한 발열은 고정자 코일의 상저항 계산을 통해 가능하며 그 식은 아래와 같다.

$$R_s = \rho_c N_{ph} \frac{2\{l + (r_s + d_s)p_c\}}{f_s A_s n_p} \quad (1)$$

여기서 ρ_c : 고정자 권선의 비저항률, l : 축방향 길이, r_s : 고정자 내경,
 d_s : 슬롯 깊이, P_c : 코일 피치[rad], N_{ph} : 상당 직렬 턴수, n_p : 병렬 회로수

최근 고효율, 소형모터의 개발에 힘입어, 전동기의 정확한 철손 예측을 위한 많은 노력을 기울이고 있다. 철손은 전동기 코어에서 자속 밀도의 시간의 변화율에 영향을 받는다. 전통적인 철손 계산법에서 철손은 기본 주파수에 의한 손실만 고려하였고 식은 다음과 같다.

$$P_i = P_h + P_c = k_h f B_m^\alpha + k_e f^2 B_m^2 \quad (2)$$

f , B_m : 자속밀도의 주파수와 최대값
 k_e , k_h : 와류손 상수, 히스테리시스 손실 상수

이러한 전통적인 방법은 자속 밀도의 변화가 정현적이라고 가정한다. 하지만 실제 전동기에서는 국부적인 자속 밀도의 포화 현상과 입력 전류의 시간 고조파 성분으로 인해 자속 밀도에는 많은 고조파 성분이 있다. 따라서, 자속 밀도의 기본과 성분만으로 철손을 계산하는 전통적인 방식으론 정확한 철손 계산을 기대할 수 없다.

자속 밀도의 파형에서 고조파 성분을 고려하기 위해선, 고정자, 회전자 코어에서 시간에 따른 자속 밀도의 파형 변화를 계산해야 한다. FEM을 수행하여 한 주기 동안 각 요소에서의 자속 밀도의 변화를 시간에 따라 저장하고, Discrete Fourier Transform (DFT)을 수행하여 자속 밀도의 시간에 따른 변화를 주파수 좌표로 변환하여 각 고조파 성분에 해당하는 자속 밀도의 크기를 추출한다. 각 요소의 철손은 Epstein 테스트에서 얻은 철손 데이터 곡선을 이용하여 계산되는데, 실험으로 구한 철손 데이터 곡선은 현실적으로 유한한 데이터이기 때문에, spline 함수와 같은 보간법을 이용하여 전 주파수 영역에서의 철손 데이터 곡선을 계산해야 한다. 이렇게 얻어진 철손 데이터 곡선과 각 요소에서 DFT로 계산된 주파수별 자속 밀도의 최대치로 요소별 철손을 구한다. 전체 철손은 전동기 코어, 자석에 있는 각 요소의 철손의 합으로 계산한다. 그림 1에서 전체 철손 계산의 흐름도를 나타내었다.

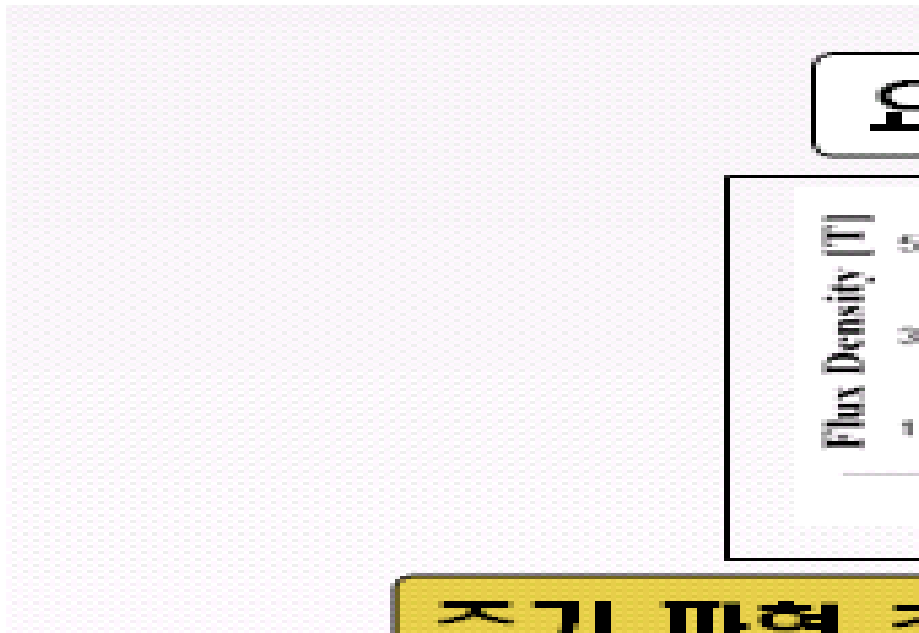


그림 1. 전동기의 전체 철손 계산의 흐름도

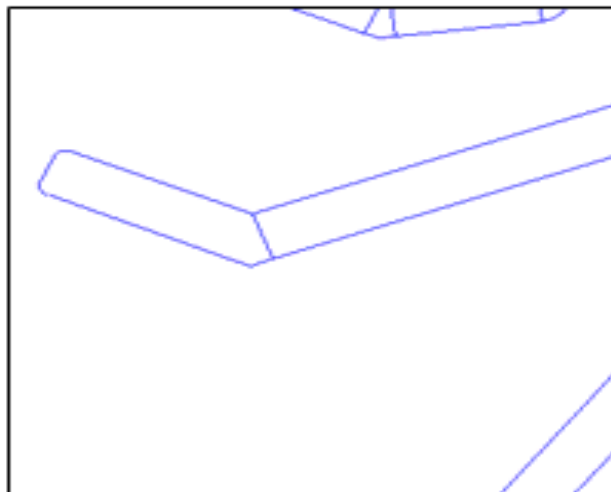


그림 2. 해석 모델(매입형 영구자석 전동기) 감자 발생 가능 위치

한편, 견인 전동기 적용시에 영구자석형 전동기는 장시간의 고속 고회전 운전중 영구 자석의 감자(Demagnetization) 현상이 발생할 수 있고 이를 정확히 예측하기 위해 회전자 철심에서의 철손 해석이 필요하다. 그림 2에 매입형 영구자석 전동기에서 자석의 감자 발생 가능 위치를 별표로 도시하였다. A와 B자석의 브리지와 가까운 부분에서 감자가 발생할 수 있으며 상대적으로 회전자 표면에서 멀리 떨어진 C자석에서는 감자 현상이 발생하지 않는다. 그림 2에 번호로 표시한 각 회전자 영역 별로 고속 운전 상황(I_{ds} :大, I_{qs} :小)에서의 자속 밀도 변화 양상을 그림 3에 나타내었다. 동기기에서 회전자는 회전 자계와 동일한 속도로 회전하기 때문에 이상적으로는 회전자 내부에서의 자계 변화는 없어야 하지만 회전자 위치에 따라 슬롯과 치로 구성되는 고정자 자기 회로가 변하기 때문에 그림에서와 같이 회전자 철심에서 자속 밀도의 변화가 발생하게 된다. 특히 3,4,8,9번의 자속 밀도 변화가 크며 브

리지부인 1,2번은 자계 포화가 매우 심한 부분이기 때문에 상대적으로 그 변화폭이 작게 나타나고 있다. 전체적으로 회전자 철심에서의 자속 변화폭은 약 0.3[T] 이내로 고정자의 자속 변화폭보다는 작지만 기본 주파수 성분이 전원 주파수의 9배이기 때문에 적은 자속 변화에도 큰 철손이 발생하게 된다. 상용 프로그램인 JMAG을 이용하여 해석 모델의 고속 운전 상황에서의 철손 해석을 수행하였으며 해석 결과를 그림 4에 나타내었다. 공극에서 가까운 회전자와 고정자의 표면에서 철손 발생이 크며 특히 브리지부와 가까운 A와 B자석 주위의 철심에서의 철손이 크게 발생함을 확인할 수 있다.

따라서, 전동기 설계시 회전자 내부에서 발생하는 철손으로 인한 자석의 열감자 현상을 고려하여 장시간의 고속 운전에서도 안정적인 성능을 보장할 수 있는 회전자 형상 설계에 주안점을 두어야 하며 이를 위한 정확한 철손 계산이 필수적임을 확인할 수 있다.

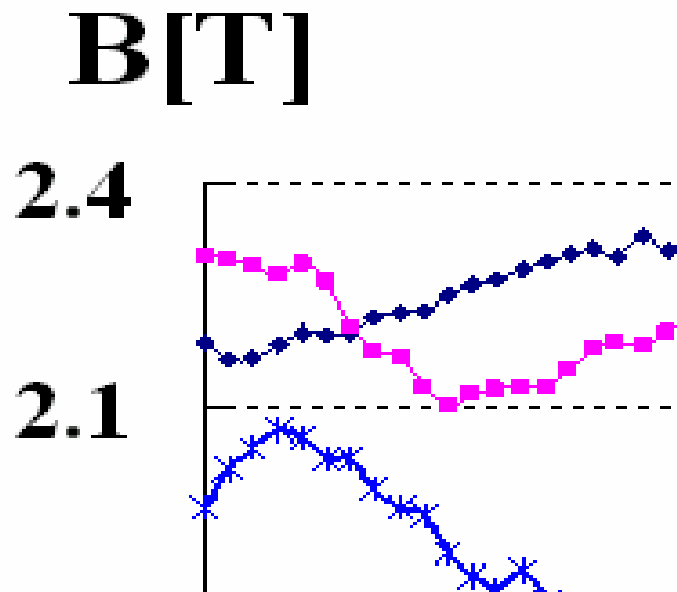


그림 3. 그림 2에 나타낸 회전자 영역별 자속 밀도 변화

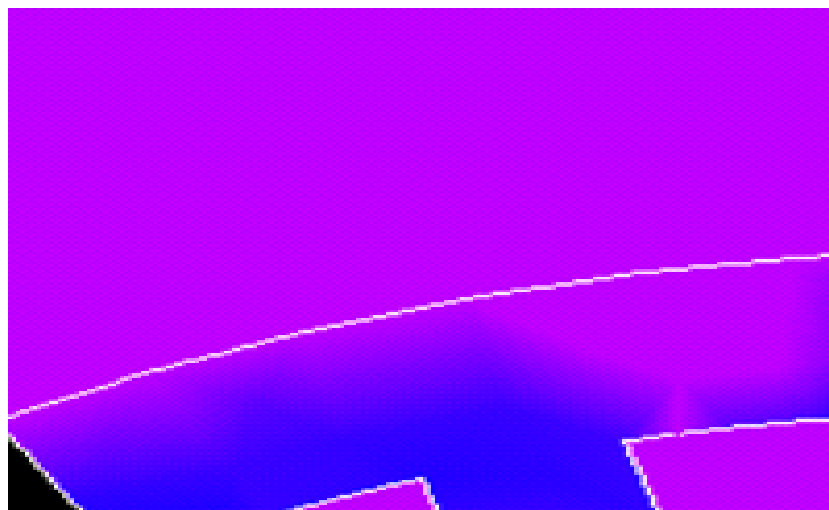


그림 4 해석 모델의 철손 해석 결과(JMAG)

2.3 전동기 열해석 기법

영구자석형 전동기를 포함한 모든 회전기는 복잡한 열전달 경로와 열적 장벽 및 비균질적 물질로 구성된 온도 제한을 가진 열교환기라고 볼 수 있다. 따라서 이에 대한 열적 접근은 전기공학, 열전달 및 생산 공정 등을 모두 포함함을 의미한다. 전동기에서 절연물의 수명과 과부하의 한계 수준, 제어의 정밀성등은 온도에 의해 민감하게 영향을 받으므로 전동기의 온도를 정확하게 해석한다는 것은 매우 중요하다.

열해석의 방법으로는 크게 집중정수법과 분포정수법으로 나뉘는데 전자의 경우는 대개 열회로망법(TNM : Thermal Network Method)으로 많이 알려져 있고, 후자는 유한 요소법(FEM)이나 유한 차분법(FDM)등이 대표적인 구현 방법으로 알려져 있다. 열회로망법은 그림 5에 나타내었듯이 전동기 내의 모든 주요 부분을 온도 절점으로 모델링 하고 전동기 내부의 전기적 손실(동손과 철손)에 의한 열원은 그 절점에서의 점원(point source)으로 치환하여 절점에서의 온도값을 각 부근의 평균 온도로 근사화 하는 방법이다. 계산시간이 빠르지만 전동기의 복잡한 형상을 여러개의 열저항으로 단순화 하기 때문에 이론적으로 근사값이며 해석시에 오차를 포함하게 된다. 유한요소법은 형상이 복잡하거나 비선형 물질 특성을 가지게 되는 경우, 그리고 본 연구에서와 같이 철손을 고려한 온도 해석을 수행시 요소별로 열원을 인가하기가 매우 유용하기 때문에 전기기기의 열해석법으로 각광을 받고 있다. 따라서 본 연구를 통해 앞서 언급한 최신 철손 해석 기법을 적용하여 전동기 내부의 온도 분포를 2차원 수치해석 기법을 적용하여 모의하고 또한 열등가회로망법을 적용하여 전동기의 3차원적인 온도 분포를 해석하고자 한다.

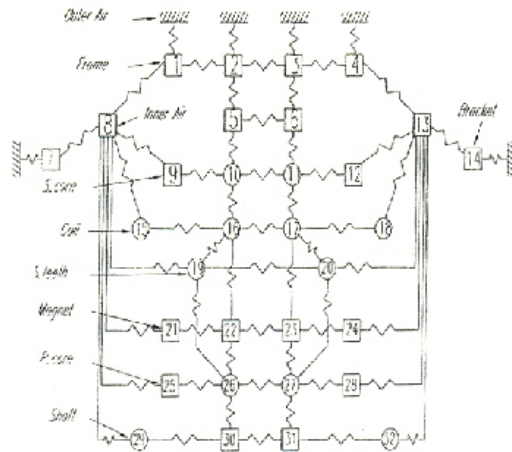


그림 5. 전동기의 열등가 회로망 예시

3. 결론

본 연구에서는 최고속도 400km/h급 철도 차량용 견인전동기 열해석 기술을 개발하고 견인전동기 냉각방식 선정 및 냉각 시스템 설계지원을 목표로 하고 있다. 초고속 전철 및 차량에 적용되는 고에너지 영구자석형 동기 전동기의 온도상승계산을 위하여, 구동상황을 고려한 정확한 발열량을 수치해석적 기법을 적용하여 추출하고 이를 열해석 알고리즘의 입력

으로 이용하여 전동기의 온도상승을 예측하고자 한다. 전동기의 온도해석 측면에서는 2차원 열전도 방정식을 이용한 수치해석적 기법과 전체적인 열의 흐름을 파악하기 위한 열등가회로망 법을 개발한다. 개발된 온도 해석 기법을 실 구동 환경에 적용하여 전동기 국부 온도 상승을 예측하고 시제품 온도 실험 결과를 통하여 열해석 기법을 보정하여 견인전동기 냉각 설계 및 제작특성지원을 수행한다. 향후 지속적인 연구 개발을 통해 등가회로망법, 유한 요소법을 이용한 열 해석 기술 확보가 기대되고 전동기의 손실 요소인 철손, 동손의 측정 기술을 갖추므로써, 이로 인한 발열량의 계산이 가능해지며 이를 통한 전체 시스템의 열 해석을 수행할 수 있고, 따라서 견인 전동기의 냉각 특성을 고려한 냉각 시스템 설계 기술이 확보되리라 예상 한다

4. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도 A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Mihai Coanescu, Ali Keyhani, "Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for Automotive Applications," *IEEE*, 2000.
- [2] C. C. CHAN, "The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles," *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, Vol. 90, No. 2, February 2002.
- [3] Tatsuo Tetatani, Kohjiro Juramochi, "Development of Toyota Mild Hybrid System (THS-M) with 42V PowerNet," Toyota Motor Corporation, 2003.
- [4] Jiabin Wang et al. "Three-Phase Modular Permanent Magnet Brushless Machine for Torque Boosting on a Downsized ICE Vehicle," *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, Vol 54, 2005, pp 809-816.
- [5] Jahns T.M., Seok-Hee Han, El-Refaie A.M., Jei-Hoon Baek, Aydin M., Guven M.K., Soong W.L., "Design and Experimental Verification of a 50 kW Interior Permanent Magnet Synchronous Machine", *Industry Applications Conference, 2006*, Vol. 4, pp. 1941 - 1948, 2006.