

도시철도차량 표준전동차용 견인전동기의 유한요소 해석에 의한 설계특성 검증

이수길^υ, 왕종배, 김명룡, 박현준
한국철도기술연구원 열차추진제어연구팀

Design Property Proof of Traction Motor for Urban Transit EMU by FEM Analysis

S.G Lee^υ, J.B. Wang, M.Y. Kim, H.J. Park
Korea Railroad Research Institute,

Abstract - In this paper, the results of FEM electromagnetic analysis performed in the standardization development of traction motor for EMU are reviewed. The selection of optimal design parameter and performance analysis are proven through the complement of the circuit parameters on the basis of performance test for developed traction motor.

1. 서 론

도시철도 표준전동차용 견인전동기는 기동 및 상구배에서 큰 토크를 발생시키고, 속도제어가 용이하며, 광범위한 속도범위에서 고효율 운전이 가능하고, 빈번한 기동과 정지에 따른 과부하와 전원전압의 급변에도 잘 견딜수 있는 전기적 특성을 구비해야 한다. 그리고 진동, 충격 및 더닐내 먼지 등의 악조건 하에서도 충분히 견뎌야 한다. 이와 같은 철도차량용 견인전동기의 운전특성, 중요 제약조건 및 설계 고려사항은 철저한 분석을 통해 설계특성으로 반영되어 최종 요구성능을 만족할 수 있어야 하며, 이를 위해 유한요소해석을 이용한 개발단계에서의 설계 최적화 검토 및 성능특성의 검증이 필요하다.

본 연구에서는 도시철도 표준전동차용 견인유도전동기의 국산화 개발에 적용된 최적의 설계 파라메타 선정 및 특성해석을 위한 유한요소 전자계 해석 결과를 제시하고자 한다. 대상기기는 도시철도차량 표준 사양을 만족하는 정격출력 200kW, 3상 4극 농형 유도전동기로서 인버터 구동을 고려한 200 Class 절연시스템으로 컴팩트하게 설계되었다. 정확한 해석을 위해 설계특성을 1/2 모델에 반영하여 회전자 Bar의 형상 최적화를 검토하였다. 그리고 견인전동기의 특성시험 결과를 바탕으로 End Coil 과 End Ring 부분의 회로정수 보정을 실시하여 설계단계에서의 최적설계 파라메타 도출과 특성해석의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 전자계 지배 방정식

전자장 해석은 일반적으로 주어진 경계조건을 Maxwell 방정식을 이용하여 해석한다. Maxwell 방정식은 모든 광범위한 전자장의 현상을 지배하는 기본 방정식들로 구성되어 있으며 미분형과 적분형으로 구분되어 있지만, 정자장(Magnetostatic) 문제에서 지배 방정식을 도출하기 위하여 유한요소법에서 이용되는 미분형 Maxwell 방정식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\nabla \times (\nu \cdot (\nabla \times \vec{A})) - \vec{J} = 0 \quad (1)$$

ν 는 $1/\mu$ 이며 A 는 vector potential 이다. 여기서 해의 유일성을 위해 아래와 같은 Coulomb gauge를 사용한다.

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (2)$$

2 차원 문제에서 있어서 식 (2)를 만족하려면 A의 z성분만 존재하는 것으로 가정한다.

$$\begin{aligned} \vec{A}_x &= 0 \\ \vec{A}_y &= 0 \\ \vec{A}_z &= \vec{A}(x,y) \end{aligned} \quad (3)$$

해석 모델에 대하여 Z축 방향으로의 길이가 충분히 길고 전류는 Z축으로만 흐른다고 가정하면 XY 평면의 2차원 문제로 해석이 가능하다. 유한요소법에 의하여 해석 영역을 유한개의 삼각요소로 분할 후, 각 요소에서의 자기 Vector Potential \vec{A}^e 는 1차 형상함수 \vec{N}_i^e 를 사용하여 근사화 한다.

$$\vec{A}^e(x,y) = \sum_{i=0}^n \vec{N}_i^e(x,y) \cdot \vec{A}_i \quad (4)$$

여기서

- n : 전체절점수
- A_i : 절점 i에서의 자기 벡터 Potential
- $\vec{N}_i(x_i, y_i) \dots = \{ 1 : i = j \ 0 : i \neq j \}$

식 (1)을 정리하면 아래와 같다.

$$\vec{R} = \int_{\Omega} [\nabla \times (\nu \cdot (\nabla \times \vec{A})) - \vec{J}] \cdot \vec{W}_i \cdot \vec{Z} \, dx dy \quad (5)$$

(i=1,2,3,.....,n)

여기서 W_i 는 가중 함수(Weighting Function) 이다. 가중잔차법에서는 잔차(Residual)를 0으로하는 해를 구하면 이것이 원래 식에서 구하려고 하는 해라 할 수 있다.

$$\vec{R} = 0 \quad (6)$$

식 (5)에서 아래와같은 vector 항등식을 적용하고 식 (6)에서 가중함수를 형상 함수로 이용하는 Galerkin 법을 사용하여 정리하면 식 (10)을 유도할 수 있다. 해석하고자 하는 시스템에서의 경계 조건은 아래와 같이 적용된다.

- 1) 고정 경계조건(Dirichlet Boundary Condition)

$$\vec{A} = \vec{g}(x,y) \quad (7)$$

$$\vec{W}_i = \vec{N}_i^e = 0 \quad (8)$$

- 2) 자연 경계조건 (Homogeneous Neumann Boundary Condition)

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

위와 같이 이산화과정을 거치면 각 절점에서 자기 Vector Potential A_j 를 미지수로 하는 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$[S_{ij}] [A_j] = [F_i] \quad (10)$$

i, j=1, 2, 3, ..., n

$$S_{ij} = \int_{\Omega} \nu \cdot \left[\frac{\partial \vec{N}_i^e}{\partial x} \cdot \frac{\partial \vec{N}_j^e}{\partial x} + \frac{\partial \vec{N}_i^e}{\partial y} \cdot \frac{\partial \vec{N}_j^e}{\partial y} \right] dx dy \quad (11)$$

$$F_i = \int_{\Omega} \vec{N}_i^e \cdot \vec{J} \, dx dy = 0 \quad (12)$$

i=1, 2, 3, ..., n

2.2 견인전동기의 유한요소 해석

2.2.1 견인전동기 해석모델

일반전동기의 해석모델은 전체 모델의 1/4모델만 해석하여도 가능하지만 표준전동차용 견인전동기 해석모델은 큰 단절계수를 가지고 정밀한 해석을 위해 1/2 모델로 하여 해석하였다. 전자계의 특성해석을 위해 종합 전자장 해석프로그램인 Flux2D를 사용하였다. 견인전동기는 전동기의 크기에 비하여 공극부분에 많은 요소분할이 이루어져야 하는데, 이는 에너지가 전달되는 공극이 정밀 분석의 대상이 되기 때문이다. 특히, 공극 전체를 해석대상에 포함시켜 회전자가 회전할 경우 각 위치에서의 특성을 계산하기 위한 것이며, Flux2D에서는 "Moving AirGap"이라는 조건을 이용하여 해석하였다. 표준전동차용 견인전동기의 설계사양은 아래 표 1과 같다.

표 1. 표준전동차용 견인전동기 설계사양

구 분	설계치수	구 분	설계치수
정격출력	200kW	극수	4 극
주파수	66.5 Hz	전압	1100 V
고정자 슬롯	60 개	회전자 슬롯	52 개
공극	1.5 mm	결선	Y
적층길이	220 mm	고정자 외경	510 mm
회전자 외경	313.5mm	병렬회로수	2
고정자통풍구	48	회전자통풍구	12
Core 재질	S-23	코일당 턴수	8

2.2.2 견인전동기 유한요소 해석

표 1을 이용하여 실제에 가까운 유한요소 해석을 하기 위해 전원을 외부 소스로 공급할수 있게 하였으며 그림 1은 정현파 입력 해석시 사용되는 외부 회로도이며, 이것은 Flux2D의 'cirflu'라는 외부회로를 모델링하는 모듈을 사용하였다.

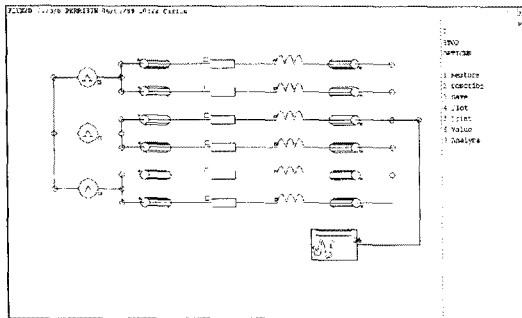


그림 1. 외부회로를 이용한 전원입력 회로

그림 1의 외부회로는 실제 모터에 입력되는 전원과 적층길이 만큼의 권선 저항, 모터의 엔드부쪽 권선의 저항 성분 및 리액턴스 성분, 그리고 회전자 엔드링부의 동바와 동바 사이(Inter Bar)의 저항과 리액턴스 성분을 입력한다. 외부회로에서 입력되는 데이터는 실제 견인전동기 특성에 많은 영향을 미치며 이런 데이터를 얼마나 정확히 입력하는가에 따라서 견인전동기의 유한요소 해석의 정확도를 높일 수 있다. 그중에서도 엔드링 쪽의 데이터값은 많은 오차를 포함할 수 있는데 본 논문에서 사용한 수식은 Flux2D 제작회사가 제안한 방법을 사용하였다.

· 엔드링 인터바 리액턴스

$$R_{eri} = \frac{1}{N_r} \cdot \frac{\rho mp}{e_{eq} h} (D_r - D_i) \left[\frac{D_i^{(2p)} + D_r^{(2p)}}{D_r^{(2p)} - D_i^{(2p)}} \right] \quad (13)$$

N_r : 동바 개수

ρ : 엔드링 저항률
 p : 쌍극 수 (4극일 경우 2)
 e_{eq} : 엔드링 등가 두께
 h : 엔드링 높이
 D_r : 엔드링 등가 직경
 D_i : 엔드링 내경

· 엔드링 인터바 리액턴스

$$X_{eri} = \pi \cdot \frac{\mu_0 \omega}{N_r} \cdot (D_e - h_{eq}) \cdot \lambda_{eri} \quad (14)$$

$$\lambda_{eri} = 0.365 \text{Ln} \left[\frac{3\pi \left(\frac{D_e - h_{eq}}{h_{eq} + e_{eq}} \right)}{4} \right] \quad (15)$$

$$X_{eri} = \pi \cdot \frac{\mu_0 \omega}{N_r} (D_e - h_{eq}) \cdot 0.365 \text{Ln} \left[\frac{3\pi \left(\frac{D_e - h_{eq}}{h_{eq} + e_{eq}} \right)}{4} \right] \quad (16)$$

D_e : 엔드링 외경
 D_{rext} : 회전자 외경
 h_p : 동바 등가높이
 D_r : hp 중심을 기준으로한 회전자 직경
 h_{eq} : 엔드링 등가 높이
 e_{eq} : 엔드링 등가 폭

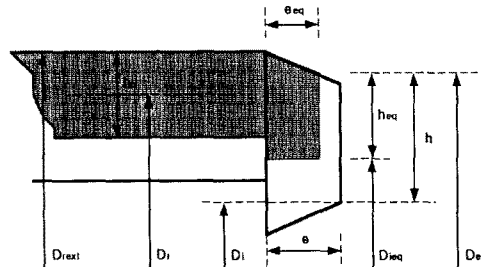


그림 2. 엔드링 및 동바의 등가적 치수

견인전동기에 사용된 해석 파라메타들은 실제 설계프로그램을 이용하여 설계된 수치를 이용하였으며, 별도로 요구되는 파라메타는 Flux2D 제작회사에서 제안한 방법을 사용하였으며 중요해석 파라메타는 표 2와 같다.

표 2. 표준전동차용 견인전동기 해석 파라메타

구 분	해석입력	구 분	해석입력
주파수	66.5	입력전압	315V
동바저항률	3.032E-8	각상저항	0.0079
각상턴수	40	슬롯	0.015
엔드턴 R	0.01224	엔드턴 X	0.00198
엔드링 R	7.2E-7	엔드링 X	1.8E-8

2.2.3 견인전동기 유한요소 해석 결과

표 2를 파라메타를 이용하여 표준전동차용 견인전동기를 해석하였으며, 그림 3은 등자속선도를 나타낸다.

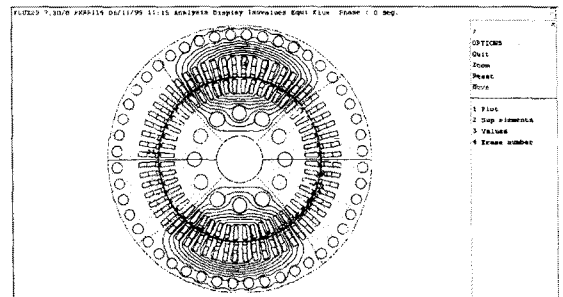


그림 3. 정격상태에서의 등자속선도

설계 견인전동기는 2극을 형상화 하였으나, 등자속선도의 대칭성을 고려하여 4극을 표시하였다. 자속분포는 설계상태에서의 예상과 거의 비슷한 형태를 취한다. 통풍홀 부근에서는 자속이 통풍홀면을 타고 흐름을 알 수 있다. 공극부의 자속은 전동기의 출력에 영향을 많이 미치며, 설계치 공극자속밀도는 0.6 Tesla 실효치이며, 최대치는 약 1.8 Tesla 이다. 그림 4는 공극에서의 자속밀도 분포를 나타낸다.

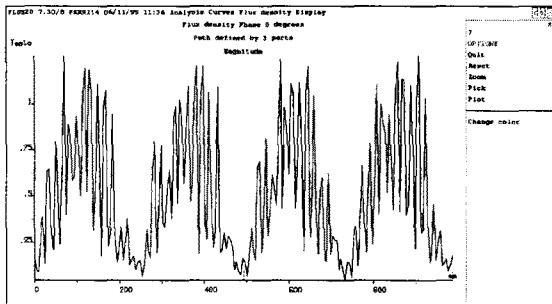


그림 4. 공극에서의 자속밀도 분포

그림 4에서 보듯이 공극에서의 실효치 자속밀도는 약 0.6 Tesla 이며 최대 자속밀도는 약 1.8 Tesla 이며, 이 값은 설계 예상치와 거의 일치한다. 견인전동기 해석 결과는 입력 전력이 약 212670 W 이며, 입력전류는 132A, 출력 토오크는 1000N.m 이다. 이 결과는 견인전동기 특성시험결과와 비교를 해보면, 입력 전력이 210 kW, 입력전류는 121A, 출력 토오크는 980N.m 이다. 해석결과와 특성시험 결과는 상당부분 일치하고 있다. 위와 같이 설계 프로그램 특성과, 특성시험 결과를 이용하여 해석결과를 검토한 후, 설계 최적화를 위해 누설구 높이, 2차 도체 형상의 영향 등을 검토하였다.

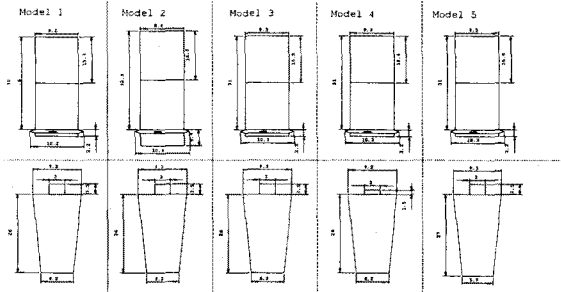


그림 5. 회전자 동 bar의 해석 모델

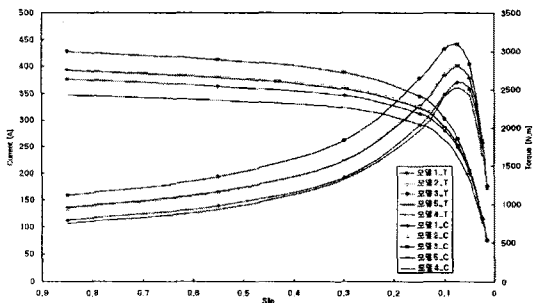


그림 6. 동 bar의 변화에 따른 토크-전류 특성비교

해석모델은 회전자 슬롯의 단면적을 일정하게 하고 치의 자속밀도를 낮게, 치폭은 위 아래가 일정하게 유지하면서 슬롯의 폭을 좁게 하고 길이를 조정하여 해석하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 5종류의 모델을 선정하였다. 고정자 슬롯 높이는 32.8 - 38mm의 범위이고, 고정자의 슬롯폭은 8.2 - 8.3mm의 범위이다. 모델 3이 현재 제작된 전동기 회전자 동바 모델이다. 그림 6은 그림 5에서 제시된 5개의 모델을 이용하여 동바의 영향으로 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 모델 3의 경우 정격 슬립에 정격 토오크가 거의 일정하지만 최대 토오크가 3000N.m로 최대이다. 그림 7은 견인전동기 과도특성 해석 결과를 나타내고 있다. 정상상태 해석에서의 토오크가 1000N.m 이었고, 과도특성 포화 토오크는 약 900N.m - 1000N.m 정도일 것으로 추정된다. 정확한 해석을 위해서는 더 많은 시간을 계산하여야 한다. 과도 특성 Time Step 입력조건을 0.000672 sec로 하였다.

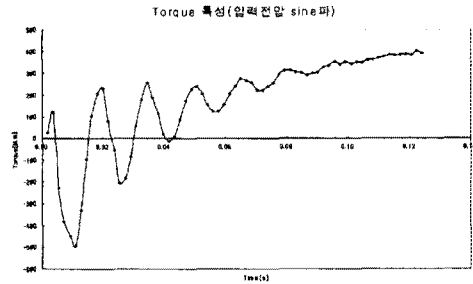


그림 7. 견인전동기 과도 토크 특성

3. 결 론

본 논문에서는 도시철도 표준전동차용 견인전동기의 설계특성 검증을 위해 설계단계에서의 유한요소 전자기 해석에 의한 설계 파라메타 최적화 연구와 제작된 시제품을 대상으로 특성시험에 의한 성능평가를 수행하였다. 이들 성능평가 자료를 이용하여 견인전동기 제작전 해석 단계에서 제시된 설계 파라메타의 보완 및 각종 설계특성을 검증할 수 있었으며, 철도차량용 견인전동기의 최적 설계 및 특성해석 기법을 확립할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] PAUL L. COCHRAN: Polyphase Induction Motors.
- [2] Robert W. Smeaton: Motor application and maintenance handbook, Allis-Chalmers Manufacturing Company, 1969
- [3] Vlado Ostovic: Computer-aided Analysis of Electric machines, Prentice Hall, 1994
- [4] 제우 Computer/ Magsoft: 96 전자장 해석 기술 세미나, 1996.
- [5] 제우 Computer/ Magsoft: Induction Motor Tutorial, 1996
- [6] 新良, 東覺: 유도전동기의 과도현상 및 이상현상의 직접적 simulation, 三夢電氣技報, 48, No.10, 1177 (1974).
- [7] IEC 349: Rules for Rotating Electrical Machines for Rail and road Vehicles.
- [8] IEEE Std.112.1991: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors.
- [9] 한국철도기술연구원, '98 도시철도차량 표준화, 국산화 연구: 추진 제어장치연구개발(전동차 AC견인전동기 표준설계)결과보고서.
- [10] 건교부, 도시철도 표준화, 국산화 연구: 성능시험기준(안).
- [11] 홍익대학교, 견인전동기 특성검증을 위한 성능시험 및 해석기법 연구 결과보고서.