

유한요소법을 이용한 전동지게차용 3상 유도전동기 특성 해석 연구

김광수, 임종빈, 이상훈, 원성훈, 구대현*, 이 주
 한양대학교 전기공학과 에너지변환연구실, *한국전기연구원

The Study on the Characteristic Analysis of Three Phase Induction Motor For Electric Forklift Truck Using Finite Element Method

Kwangsoo Kim, Jong-Bin Im, Sang-hoon Lee, Sung Hong Won, Dae-Hyun Koo*, Ju Lee
 Dept. of Electrical Engineering at Hanyang Univ, *Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper analysis of the characteristics in the three phase induction motor for the electric forklift truck is researched. There are two kinds of the Finite element analysis method. First thing is time domain analysis by the time transient method. Second thing is frequency domain analysis by method which assumes applied voltage and current sinusoidal. Especially in case of the characteristic studies, electromagnetic analysis is performed about each prototype motors. The obtained results are compared and the result of the test is examined. We could know characteristics of each prototypes and verify the design program of the motor through FEM. Finally this paper shows the factors of discord results of the analysis.

지게차용 유도전동기 유압용(Model I) 과 주행용(Model II) 전동기에 대하여 유한요소해석 및 시제품을 제작하였다. 배터리를 사용하기 때문에 저전압/대전류 전동기로 제작되었다.

〈표1〉 해석 전동기 사양

스펙		Model I	Model II	
스테이터	외경	200		mm
	극수	4		
	적층길이	150	120	mm
	슬롯	36		
로터	강판	50PN595(S18)		
	슬롯	42		
공극		0.45		mm
농형부	도전율	55		%Cu

1. 서 론

최근 지게차용 전동기가 직류 전동기에서 교류전동기로 전환되고 있는 시점이다. 교류 전동기의 직류전동기에 비해 많은 장점이 있고 있기 때문이다. 여러 장점들로 인하여 지게차용 교류 전동기에 대한 연구가 필요하다. 또, 초기 전동기 설계 과정에서 전동기의 모든 파라미터를 집중적인 정수로 가정하여 특성해석을 수행하는 등가회로법이 사용되었다. 그러나 모든 전동기의 소형화, 고효율화가 시스템의 목표로 대두되면서 등가회로법의 한계가 드러나기 시작하였다. 이를 보완하기 위하여 유한요소법을 이용한 전자기 해석법이 연구되었는데, 현재는 컴퓨터 성능의 향상으로 인하여 더욱 더 가속화 되고 있다.

전동 지게차용 전동기는 유압 및 구동용에 사용되므로 고효율을 주된 목표로 하고 있으며 따라서 유한요소법에 의한 자속밀도 분포와 특성해석을 수행한 설계 검증이 필요하다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 유한요소해석 방법

유도전동기의 유한요소 해석법은 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 첫째는 시간차분법에 의한 시간도메인 해석법이고 두 번째는 $j\omega$ 법의 주파수 도메인 해석법이 있다.

먼저 $j\omega$ 법은 전압과 주파수 입력으로 하여 정상상태 해석하는 해석법으로 시간 변이항이 복소 주파수항으로 바뀌어 풀기 때문에 과도상태의 해석은 불가능하고 정상상태의 해석만 가능하고, 이 때 입력 전압과 전류를 모두 정현파라고 가정하기 때문에 고조파에 대한 해석은 불가능한 단점을 가지고 있지만 시간차분법에 비하여 해석 시간이 적게 걸린다는 장점을 가지고 있다. $j\omega$ 법의 지배방정식(1)과 전압 방정식(2)은 아래의 식과 같다.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] = \vec{J}_0 - j\sigma s \omega \vec{A} \quad (1)$$

$$V = R_m I_m + j\omega L_m I_m + E_m \quad (2)$$

시간차분법은 시간변이항을 그대로 계산하기 때문에 정상상태뿐만 아니라 과도상태의 해석도 가능하다. 그리고 정현파라고 가정하지 않기 때문에 기본과 뿐 아니라 고조파를 포함한 해석이 가능하다. 하지만 $j\omega$ 법보다 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

2.2 유도전동기 특성해석 및 시험

2.2.1 해석모델

상용 설계 프로그램을 이용하여 설계한 아래 표1의 사양을 바탕으로

2.2.2 해석 및 시험포인트 선정

전동기 운전 특성 곡선을 사용하여 전동기 특성을 잘 나타낼 수 있는 포인트를 선정하였다. 일반적으로 자속밀도가 최대가 되고 최대출력을 갖는 정토크 중단 포인트 또는 전압제한점에 해당하는 속도를 해석 기준점으로 잡는다. 또, 이 지게차용 전동기의 주 사용 포인트가 약계자 영역에 존재하는데 이 때문에 이 두 점을 기준으로 해석 포인트를 선정하고, 보다 신뢰성있는 자료를 위하여 추가적으로 두 포인트를 더 선정하였다.

정토크 중단점에서 경감을 고려하여 2 포인트, V/F일정 제어구간(속도 상승구간)을 1 포인트, 마지막으로 약계자 운전 구간을 1 포인트로 선택하였다.

〈표 2〉 각 전동기의 해석포인트(4 포인트)

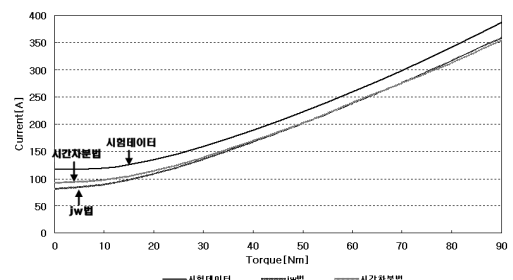
번호	전압[V]	주파수[Hz]	번호	전압[V]	주파수[Hz]
1	30	55	1	30	50
2	15	30	2	20	30
3	30	120	3	30	120
4	28	55	4	28	50

(a) Model I

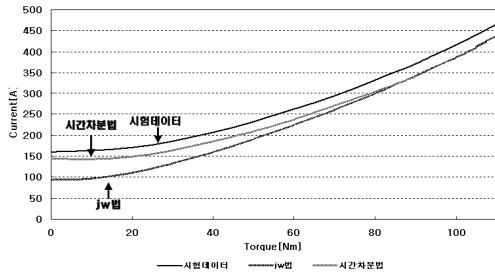
(b) Model II

2.2.3 유한요소해석 및 시험

다이나모 및 측정 장비들을 이용하여 앞에서 선정된 각 포인트에 대해 부하를 바꿔가면서 전동기의 특성을 측정하였다. FEM해석도 시험과 같은 방법으로 부하를 바꿔가면서 각 포인트에서의 특성값을 계산하고, $j\omega$ 법과 시간차분법 두 방법을 사용하여 시험결과와 비교하여 보았다.

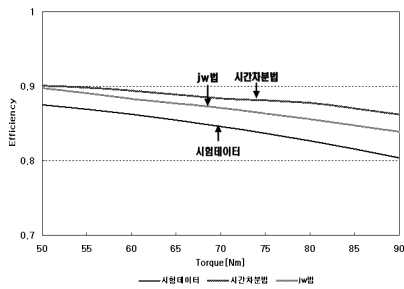


(a) Model I

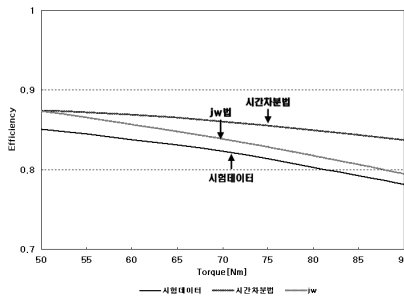


(b) Model II
<그림 1> 정토크 종단포인트에서의 전류 비교

위 그림은 정토크 종단 포인트에서의 전류값을 나타낸 그래프이다. 해석값과 시험값의 분석결과 시험값의 전류가 해석값보다 두 모델 모두 크게 나타났다. 정토크(80Nm)부근에서 약 8~10% 정도 크게 나타나고 있다. 이로 인하여 아래 그래프와 같이 시험값의 효율이 2~5% 정도 낮게 나타나고 있다.



(a) Model I



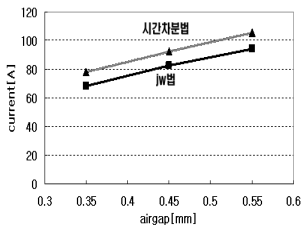
(b) Model II

<그림 2> 정토크 종단포인트에서의 효율 비교

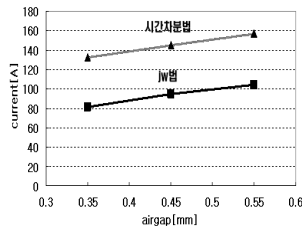
2.2.3 유한요소해석 및 시험결과 분석

앞의 전류증가 원인을 분석해보면, 첫째 공극의 증가, 두 번째 원인으로는 투자율 감소, 마지막으로 2차측 저항의 변화 이 세 가지 요인으로 추정할 수 있다.

각 요인에 대해 유한요소 해석을 통하여 그 영향을 알아보았다. 먼저 공극의 변화에 따른 무부하 전류를 비교하여 보았다. 공극이 1mm증가 시 전류가 8~9%정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 제조시 공극의 불균일로 인하여 공극이 증가함에 따라 자기 저항이 증가하여 전류가 증가하였을 가능성 존재한다는 것을 알 수 있다.



(a) Model I

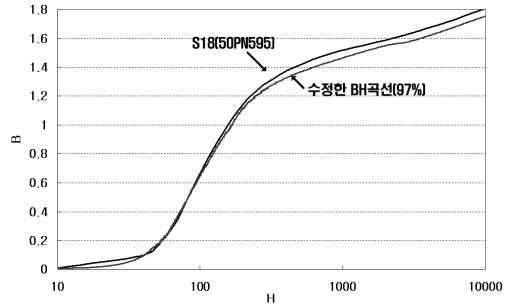


(b) Model II

<그림 3> 공극의 길에 따른 무부하 전류

기존 재질(S18)의 B-H곡선을 97%정도 낮추어 투자율을 감소시켜 무부하 전류를 비교하여 보았다. 투자율이 감소함에 따라 무부하 전류

10A정도 증가하였다. 이 결과는 고장자/회전자 타발시 자구의 변형으로 투자율이 감소하여 전류가 증가하였을 가능성도 존재한다는 것을 보여 준다.

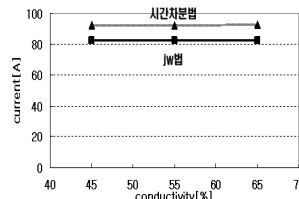


<그림 4> S18과 수정된 재질의 B-H곡선

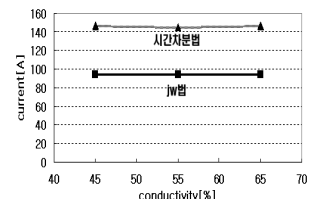
<표 3> 재질에 따른 Model I 의 무부하 전류

재질	무부하 전류[A]
S18	92.6
BH곡선 조정후	102.5

마지막으로 알루미늄 도전율(55%)라보고 도전율을 변화시켜 무부하 전류의 변화를 살펴보았다. 그 결과 비례추이현상에 의한 전류의 증가는 거의 보이지 않았다. 2차측 저항 변동에 대한 전류의 변화의 영향이 작다는 것을 판단 할 수 있다.



(a) Model I



(b) Model II

<그림 5> 도전을 변화에 따른 무부하전류 비교

3. 결 론

검증된 설계 데이터로 실제 전동기를 실제 제작하여 시험하고, 그 결과를 *jw*법과 시간차분법의 유한요소법을 통하여 비교하였다. 비교 포인트를 두 모델에서 각 4 포인트를 선정하여 각 포인트에서 특성을 비교하였다. 그 결과 전반적으로 시험값의 효율이 떨어지는 것을 발견할 수 있었고, 그 원인으로서는 전류의 증가로 판단되었다. 추후 개선될 모델의 연구를 위해 전류 증가의 원인을 분석한 결과 공극, 투자율, 2차측 저항이라고 판단하고 각 원인에 대해 유한요소법을 통하여 검증해 보았다. 그 결과 2차측 저항은 전류에 영향을 주지 않지만, 공극과 투자율의 변화가 전류에 영향을 주었을 것으로 판단되었다. 전동기 제작상의 오차가 발생한 것으로 보이며 이에 대한 제품 공정 연구가 필요할 것으로 사료된다.

두 유한요소법의 추이는 비슷하지만 결과 값에 차이가 존재하게 되는 데 주원인은 시간차분법은 인가전압에서 고조파를 고려하여 해석하지만, *jw*법은 고조파를 고려하지 않고 인가전압이 정현적이라고 가정하고 해석하기 때문이다. 이밖에 이 두 방법의 차이에 대한 다른 원인에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 에너지관리공단에서 시행한 프리미엄급 고효율 단상 유도전동기 설계/해석 사업으로 수행되었음. 과제번호(2005-01-0031-3-010)

[참 고 문 헌]

[1] S. Tandon, "Finite element analysis of induction machines" IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 18, 1982
 [2] R.Mertens, R.Belmans, K.Hameyer, "Combined time harmonic transient approach to calculate the steady-state behaviour of induction machines", International Conference IEMD '99, 1999