

In-wheel 전동기의 열 등가회로 해석 및 유한요소해법을 이용한 열해석

김규섭*, 이병화*, 홍정표*, 남 혁**
 한양대학교*, LG전자**

Thermal Analysis using Thermal Equivalent Circuit Analysis and Finite Element Method of In-wheel Motor

Kyu-Seob Kim*, Byeong-Hwa Lee*, Jung-Pyo Hong*, Hyuk Nam**
 Hanyang University*, LG Electronics**

Abstract - A thermal equivalent circuit of IPMSM considering eddy current loss of PM and core loss of rotor is proposed. This thermal equivalent model is represented by the thermal resistances and thermal capacitances. In order to determine the factor of each parameter, a heating test is processed. Additionally, the eddy current loss of PM is calculated by a transient 3D finite element analysis. Finally, this thermal equivalent model is verified by a temperature test in a 25kW 12-pole/18-slot IPMSM with varying load.



〈그림 1〉 In-wheel 전동기

1. 서 론

최근 전자동차와 로봇의 개발에 따른 산업 및 수송 분야에서 전동기에 대한 관심이 증가 되고 있다. 특히 전자동차에는 각 바퀴에 전동기가 직접 위치하여 작동을 하는 In-wheel 시스템의 전동기가 개발되고 있다. In-wheel 시스템의 전동기와 같은 견인 전동기는 전류밀도가 크며 이로 인한 동손, 고속 동작에 의한 철손과 마찰손이 발생하고, 또한 영구자석에 의한 와전류손이 발생한다. 냉각이 정상적으로 이루어지지 않았을 경우, 손실에 의한 온도증가는 코일의 절연파괴, 영구자석의 감자와 같은 현상을 유발하며 이는 기대수명의 기하급수적인 감소를 가져온다. 따라서 전동기에 대한 열원의 양과 열의 발산에 대한 분석이 필수적이다.

이를 해석하기 위하여 3차원 유한요소해석인 CFD가 사용되고 있다. 하지만 CFD는 3차원 해석의 단점인 해석시간의 문제를 가지고 있으므로 본 논문에서는 CFD와 열 등가회로해석을 사용하여 해석 및 실험값과 비교하였다. 열 등가회로 해석의 장점은 계산시간이 짧고 측정이 어려운 회전자와 영구자석의 온도까지도 예측이 가능하다. 특히 대류계수의 값이 상수이기 때문에 전동기의 치수정보만으로도 온도를 예측할수 있어서 설계 시 온도를 고려한 설계가 가능하다.

2. 본 론

2.1 열 등가회로

전동기의 원통형 3차원 모델의 열저항을 축방향과 반경방향의 2차원 모델로 등가화 할 수 있다. 실제로 1차원 비정상 열전도 방정식에 대한 온도분포는 선형적이지 않다. 그러나 본 논문에서는 집중변수 모델을 이용하여 온도를 산정하므로, 물체의 최고 온도가 아닌 평균온도가 필요하다. 따라서 물체의 최고온도에서 평균온도까지의 온도 차이를 보정하는 열저항을 계산해야 한다.

2.1.1 대상 전동기

해석 및 실험에 사용될 전동기는 In-wheel 타입의 IPMSM으로 사양은 <표 1>과 같다. 그리고 <그림 1>은 In-wheel 전동기의 외부 형상이다.

〈표 1〉 In-wheel 전동기 사양

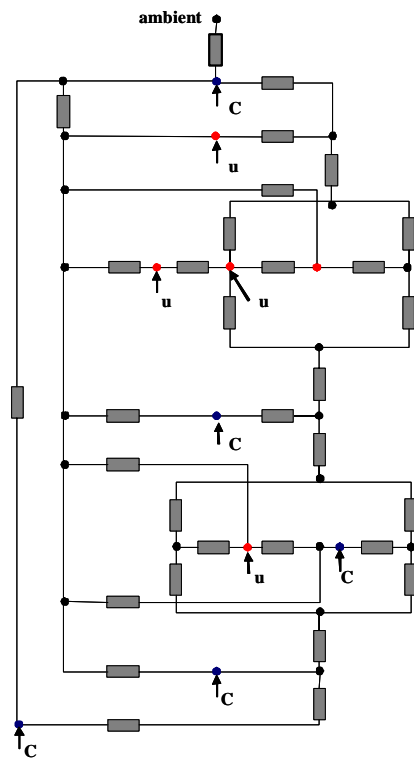
	단위	값	비고
최대정격	kW	25	연속정격 10kW
최대속도	rpm	5000	기저속도 1250rpm
고정자 외경	mm	300	분할코어
회전자 외경	mm	221	회전자 편심
공극 길이	mm	0.8	
적층 길이	mm	50	
극수	-	12	
슬롯수	-	18	집중권
냉각 방식	-	공냉식	

2.1.2 열저항 산정

IPM 전동기를 원통형 모델로 등가화 하였기 때문에 열저항을 구할 수 있다. 반경방향의 열저항은 병렬회로와 같고 축방향의 열저항은 직렬회로와 같으므로, 결과적으로 반경방향의 열전도도가 축방향의 열전도도보다 크다. 따라서 본 논문에서는 축방향과 반경방향의 열전도도를 고려하여 열저항을 산정하였다.

2.1.3 열 등가회로 구성

전동기 각 부분마다 열저항과 캐패시터, 열 소스를 산정하여 열 등가회로를 구성하였다. 온도는 전압으로 표현되었고 열 소스는 전류 소스로 표현되었다. 세가지 요소로 구성된 열 등가회로는 <그림 2>와 같다.



〈그림 2〉 열 등가회로

2.2 손실 산정 및 열해석 결과

전동기가 연속 정격인 1250 rpm으로 회전할 때 손실을 계산하였다. 이를 열 증가회로에 반영하면 시간에 따른 전동기의 온도변화를 알 수 있다.

2.2.1 동손 산정

고정자 권선에서 발생하는 손실을 식을 사용하여 계산하였다.

$$P_{cu} = m_p I^2 R_{cu} \quad (W) \quad (1)$$

2.2.2 철손 산정

철손은 철심 내부에서 생기는 손실로서 외부의 자계를 (+), (-)로 번갈아 걸어주게 된다면 재질 내부에 철손이 발생하게 된다. 즉 철손은 물질 내부의 자속밀도와 주파수에 비례한다. 철손 해석 방법은 자속밀도에 따라서 철손의 값이 변화하기 때문에 유한 요소해석을 통하여 각 요소에서의 자속밀도 분포를 계산한다. 주파수 별 철손을 계산하여, 고조파 성분을 포함한 각 요소 별 철손을 계산한다. 마지막으로, 각 요소 별 철손을 합산하여 전체 모델에 대한 철손을 산정한다.

2.2.3 영구자석 와전류 산정

변압기의 철심에는 사인과 모양으로 변하는 교류자기장이 통하므로, 철심은 도체이기 때문에 내부에 맴돌이전류가 생겨 맴돌이 손실이 발생한다. 맴돌이 손실의 크기는 자속과 주파수 각각의 제곱에 비례한다.

2.3 3차원 유한요소법

유한요소법을 사용하여 열해석을 수행하여 각 부분의 온도를 산정해 보았다.

2.3.1 유한요소법

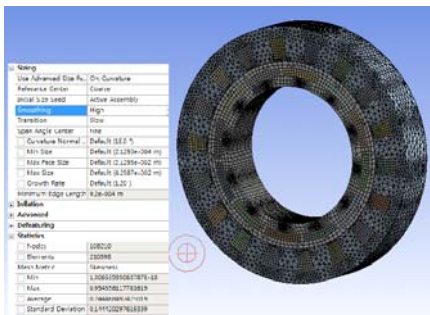
유한요소법(Finite Element Method : FEM)은 수치해석법을 이용하여 공학해석을 하는 것이다. FEM은 그 이름 그대로 유한의 (Finite) 사이즈의 요소(Element)로 연속체를 분할하고, 전체는 요소의 집합체로써 표현하는 방법(Method)이다.

2.3.2 지배방정식

대상이 되는 공학문제(물리현상)의 종류에 따라 이를 풀기 위한 기초 방정식을 지배방정식이라 한다. 이 식에 특정의 경계조건이나 기초조건을 부여하여 해를 구하는 것이 해석의 목적이다. 일반적으로 공학문제에 있어서는 해석대상은 연속체로 간주된다. 연속체는 무한개의 점의 집합이므로 미지 물리량은 영역전체에 걸쳐 완전히 연속한 량 즉, 좌표의 함수로 표현된다. 그 결과 연속체 문제의 지배방정식은 일반적으로 편미분 방정식이 된다.

2.3.3 CFD를 이용한 열 해석

<그림 3>은 등가화 한 전동기를 프로그램으로 모델링 한 그림이다. 이를 열 해석하기 위해서는 메쉬를 잘 선정해주어야 한다. 요소의 수가 너무 많으면 해석 시간이 너무 오래 걸리고 너무 적으면 결과의 오차가 많이 나게 된다. 따라서 적절한 메쉬 수를 조절하여 해석하여야 한다.

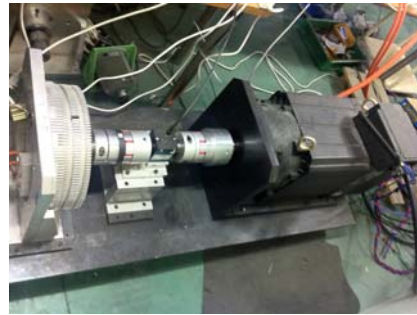


<그림 3> 3차원 CFD

2.4 실험을 통한 비교 및 검증

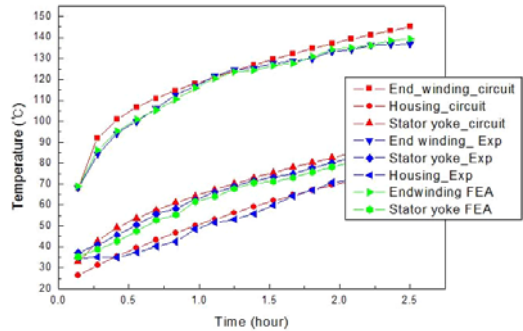
실험을 위하여 <그림 4>과 같이 실험장비를 구성하였다. 부하 시 전동기의 온도를 측정하기 위해 DC Power Supply 를 통해 전원을 공급하였으며, Oscilloscope를 통해 정확한 전류 입력을 확인하였다. 또한, 전동기의 측정하고자 하는 위치에 Thermo couple 와를 연결하여 Thermo couple를 통해 온도를 측정하였다.

회전자는 온도 측정이 어려우므로, 하우징과 고정자를 중심으로 써모 커플 와이어를 연결하였다. 속도는 정격 속도인 1250rpm, 부하는 76 Nm에서 시행하였으며, 10초마다 포화 시까지 측정하였다. 연속정격일 경우 즉 온도가 포화되었다고 판단했을 때까지 2시간 30분가량 측정하였다.



<그림 4> 정격부하시 온도포화 실험

2.4 결과



<그림 5> 열포화 실험 해석 결과

<그림 5>는 열 증가회로와 3차원 CFD, 실험을 통한 온도 비교결과 그래프이다. 온도는 엔드와인딩, 고정자의 요크와 하우징을 비교하였다. 각 부분의 온도는 오차가 5% 내외로 발생하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 In-wheel 전동기의 열해석을 열 증가회로 해석과 이를 실험을 통해 검증하였다. 해석 결과, 열 증가회로와 FEM 모두 실험과 비교해 5%내외의 오차를 보여 두 해석방법 모두 신뢰할 수 있는 결과가 나왔다. 그러나 FEM은 해석하는데 열 증가회로에 비해서 상당히 많은 시간이 들고, 모델을 설계하고 메쉬를 설정하기 까지도 많은 시간이 들었다. 따라서 열해석의 경우 단시간 내에 해석이 가능한 열 증가회로를 사용하는 것이 전동기의 열적 특성 경향을 살펴보는 것이 더 유용하다.

[참 고 문 헌]

[1] P. H. Mellor, D. R. Roberts, D. Turner, "Lumped Parameter Thermal Model For Electrical Machines of TEFC Design", IEE Proceedings-B, vol.138, no. 5, September 1991

[2] J. Lindstrom, "Thermal Model of a Permanent-Magnet Motor for a Hybrid Electric vehicle", Research Report, Dept. of Electric Power Eng., Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, April 1999.

[3] Z.J. Liu, D. Howe, P. H. Mellor, M. K. Jenkins, "Thermal Analysis of Permanent Magnet Machines", in Proc. Sixth International conference on Electrical Machines and Drives, 1993, pp 359-364

[4] Liang Fang, Jae-woo Jung, Jung-Pyo Hong and Jung-Ho Lee, "Study on High Efficiency Performance in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with D"ouble-layer PM Design, IEEE Trans. on Magnetics, VOL. 44 , 4393~4396, 2009.02