

전동 골프카용 전동기 냉각성능에 대한 고찰

이창준[†]·권기영*·유성래*·이승구*

Cooling Performance Analysis of the Motor for Golf-car application

Chang-Jun Lee, Ki-Yeoung Kweon, Sung-Lay Ryu and Seung-Kuh Lee

Key Words: CFD(전산유체공학), Motor(전동기), Cooling Performance(냉각성능)

Abstract

In this study, we performed the CFD analysis to predict the cooling performance of the motor for golf-car application. The motor for the golf-car is different from the general motors in the cooling method and the operating condition. So, it is important to predict the motor's temperature generated by the electric losses. We investigated the inner temperature rise using the unsteady state analysis and compared with the experiment for the reliability evaluation of the CFD results through the present study.

기호설명

B_m : 최대자속 밀도 (Wb/m^2)
 f : 자속의 주파수 (Hz)
 J : 전류밀도
 k_e : 철심 종류와 크기에 따라 결정되는 상수
 k_h : 자성체 종류와 크기에 따른 상수
 n : Steinmetz 지수, 1.5 ~ 2.5
 P_c : 철손 (W/m^3)
 P_{cu} : 동손 (W/m^3)
 P_e : 단위 체적당 와전류손 (W/m^3)
 P_h : 단위 체적당 히스테리시스손 (W/m^3)
 t_w : 철심의 두께 (m)

V : 철심의 체적 (m^3)

ρ_c : 도체의 저항

1. 서론

전동기는 신뢰성이 높은 동력원의 하나로 산업 전반에 걸쳐 다양한 요구에 맞게 설계 제작되고 있으며 최근에는 소형화, 경량화, 대용량화 및 고속화 경향이 두드러지게 나타나고 있다. 이에 전동기 회사에서는 제품의 효율을 높이고 원가를 낮추기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

전동기가 소형화되면 같은 손실(열원)에 대해 방열면적이 줄어들게 되어 전동기 내부온도가 높아지게 되고 전동기의 용량이 커지거나 고속으로 운전하면 발생하는 손실이 더 커지게 되므로 내부온도가 상승하게 된다. 이런 내부온도의 상승은 절연파괴로 이어질 수 있기 때문에 절연물의 수명과 과부하율의 한계에 대해 각국의 공업규격에는 전동기 권선의 온도상승 허용한계가 명시되어 있다. 우리나라 역시 한국공업규격의 일반용 저압 3상 유도전동기(KS C 4202)에 온도상승 허

[†] 이창준, (주) 효성 중공업연구소
E-mail : cj2004@hyosung.com
TEL : (055)268-9935 FAX : (055)268-9926
* (주) 효성 중공업연구소

용한계가 명시되어 있다. 이런 이유로 설계시 내부 온도 상승에 대한 예측이 필요하며 냉각 설계가 잘 된 전동기는 적은 유량의 공기로 동일한 냉각 성능을 얻을 수 있으므로 권선 및 회전자 온도 감소에 의한 동손(저항손실) 감소로 효율도 높아진다. 그러므로 동작의 안정성과 신뢰성을 갖춘 고품질의 전동기를 만들기 위하여 냉각설계가 매우 중요하다.

전동기의 열해석은 기본적으로 3차원 문제이다. 전자장 해석의 경우는 적층철심만이 자기회로의 경로이므로 축방향 자장성분을 무시하고 2차원으로 풀 수가 있으나, 열문제에 있어서는 축방향으로의 열유속성분이 비교적 크고 전동기 내부의 모든 부분과 공기가 열경로(thermal path)를 형성하기 때문에 2차원으로는 정확한 해를 구하기 어렵다. 과거에는 열전달 기본식에 실험적인 요소를 고려하여 전동기의 열해석을 접근하였으나[1-4], 최근 컴퓨터의 발전과 수치해석 기법의 진보로 인하여 전동기를 전산 열유체 해석 방법으로 내부온도 분포를 해석하고 있다[5].

본 연구에서는 42V 4P 5kW급 전동 골프카용 전동기를 3차원으로 모델링하여 이를 상용코드인 Fluent를 이용하여 해석을 수행하였다. 또한 시험을 통해 해석에 대한 신뢰성을 평가하였다.

2. 해석 조건 및 모델

2.1 전동기 냉각 구조 및 모델링

골프카용 전동기에 대한 구조는 fig.1에서 보는 바와 같이 고정자에 권선이 감겨져 있고 회전자에는 영구 자석이 있는 영구 자석형 전동기로 회전자는 고속으로 회전하고 고정자 철심과 권선에서 손실이 발생하여 열원으로 작용한다. 발생된 열은 고정자와 맞붙어 있는 프레임으로 전도를 통해 전달이 되고 프레임 표면에서는 자연 대류 및 강제 대류 조건에 의해 냉각이 된다. 이런 냉각 구조를 가진 전동기의 경우는 내부 블로워 또는 외부 블로워에 의해 냉각이 되는 일반 전동기에 비해 내부 온도 상승에 따른 문제가 발생될 우려가 높으며, 프레임의 방열면적에 대한 평가도 반드시 필요하다.

Fig. 2는 해석 전동기에 대한 격자 결과를 나타낸 것으로 해석의 편의성 및 시간적 제약을 감안하여 고정자 권선의 엇갈려 감겨진 부분인 엔

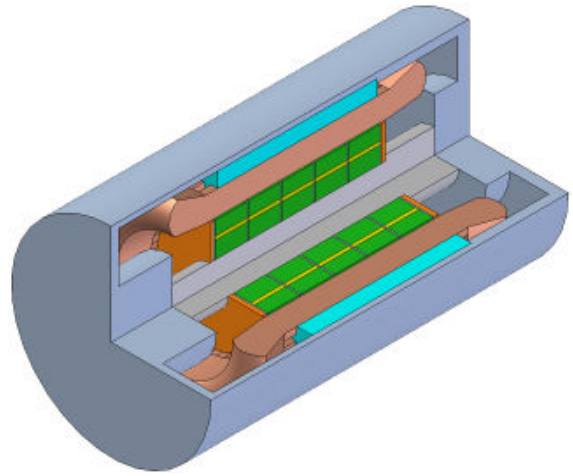


Fig. 1 3D model of the motor for golf-car

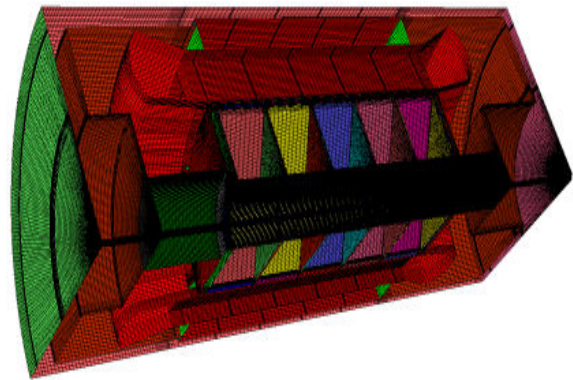


Fig. 2 3D grid model

드 와인딩에 대해 단순화 작업을 하였으며 해석 결과에 큰 영향을 주지 않는 형상에 대해서도 간략화하였다. 고정자 철심, 권선 등의 절연물에 대해 함께 고려하여 모델링을 하였으며 고정자와 회전자 사이의 공극(air-gap)에 대해서는 협소한 공간적 영향을 고려하여 세밀한 격자를 생성하였다. 해석 격자는 총 130만 개의 육면체(hexa) 사용하였다.

2.2 열원 (Heat Source)

전동기의 온도 상승의 원인이 되는 손실은 철손, 동손, 기계손 등이 있으며 그 중에서 내부 온도 상승에 크게 기여하는 손실은 철손과 동손이다.

철손은 철심 내부의 자속이 시변일 때 히스테리시스손(hysteresis loss)과 와전류손(eddy current loss)로 구성된다. 와전류손은 철심 내부에서 시변 자속에 의하여 유기된 전류가 형성되어 발생한

다. 와전류는 철심 내부의 에너지를 소비할 뿐만 아니라 철심 내부 자속을 감소시키는 현상을 초래한다. 자속 감소 현상과 와전류를 줄이기 위하여 철심을 성층하거나 철심의 저항률이 높은 자성 재료를 사용한다.

와전류손은 철심의 두께, 자속의 주파수, 최대 자속 밀도, 철심의 체적에 관계된다. 따라서 자속을 정현파로 가정하면 단위 체적당 와전류손 P_e 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \quad [W/m^3] \quad (1)$$

$$k_e = \frac{t_w^2 \pi^2}{4\rho_c} \quad (2)$$

히스테리시스손은 철심의 자구가 반전될 때 완전히 방향이 반대로 되지 않는 자성체의 성질에 의하여 발생한다. 때문에 자성체는 히스테리시스 현상을 갖고 그의 손실이 존재한다. 히스테리시스손은 최대자속 밀도, 자속의 주파수, 철심의 체적에 관계되고 단위 체적당 히스테리시스손 P_h 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_h = k_h f B_m^n \quad [W/m^3] \quad (3)$$

자성체의 철손 P_c 은 히스테리시스손과 와전류손의 합으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_c = k_h f B_m^n + k_e f^2 B_m^2 \quad (4)$$

전동기의 동손 P_{cu} 는 도체에 전류가 흘러 주울열로 발생하는 손실이며 전동기의 계좌 권선과 전기자 권선에서 주로 발생하며, 도체의 저항에 비례하고 전류밀도의 제곱에 비례하여 다음과 같은 식으로 예측할 수 있다. 고주파 전류가 인가되면 표피효과에 대한 저항증가분도 고려해야 한다.

$$P_{cu} = \rho_c J^2 \quad [W/m^3] \quad (5)$$

Table 1은 당사가 보유하고 있는 등가회로법 프로그램을 통해 나온 전동기 손실값에 대해 나타내었다.

Table 1 Electric losses at efficiency 90% [W]

동손	철손	합계
338	162	500

2.3 경계조건

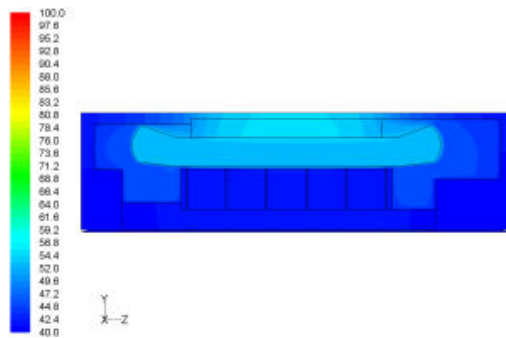
해석의 빠른 수렴성을 고려하여 fig. 2와 같이 1/4 Periodic 모델에 대해 격자를 생성하였으며 내부 회전자는 Moving Wall 조건을 사용하여 1800 rpm에서의 유동장을 모사하였다. 내부 열해석을 위해 고정자부 및 회전자부의 열전달계수를 축방향과 반경방향에 대해 고려하였으며 외부 프레임에 대해서는 강제 대류를 고려한 대류 열전달 계수를 사용하였다. 내부 손실은 고정자 철심과 권선에서만 발생한다고 가정하여 손실 분배를 하였으며 효율 90%인 경우에 대해 비정상 상태 해석을 수행하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

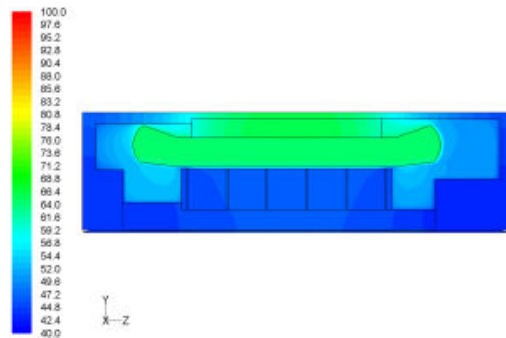
Fig. 3은 전동기 내부 및 외부 프레임에 대해 해석을 통한 운전시간별 온도분포를 보여주고 있다. 내부팬 또는 외부팬에 의한 강제냉각방식이 아닌 자연냉각방식이기 때문에 고정자의 철심과 권선에서 발생된 열이 대부분 프레임을 통해 전달되며, 손실부에서 온도 상승이 크게 되는 것을 확인할 수 있다. Table 2를 보면 평균온도 상승치는 고정자 권선부에서 57.0℃로 가장 높게 나왔으며 고정자에서 전도로 열전달되는 프레임 역시 41.2℃로 높은 온도 상승치를 보여주고 있다. 운전시간별 주요부 온도 상승 변화 추이는 fig. 4에 나타내었으며 각 주요부 온도 상승치는 전동기 냉각설계 기준을 충분히 만족하는 것을 확인하였다.

Table 2 Average temperature rise after 30 minutes operate (ΔT , ambient temperature 40℃)

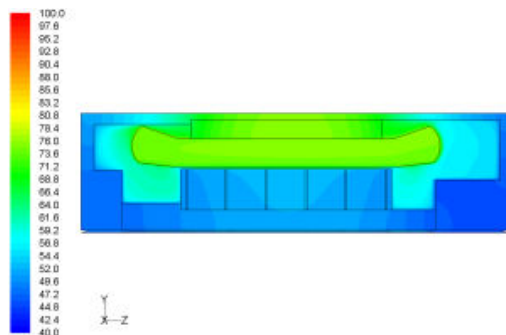
주요부	회전자 철심	회전자 자석	고정자 권선	고정자 철심	프레임 표면
평균온도	29.9℃	30.0℃	57.0℃	54.7℃	41.2℃



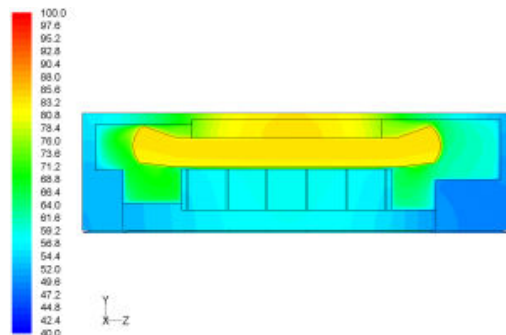
(a) Operating time 5minutes



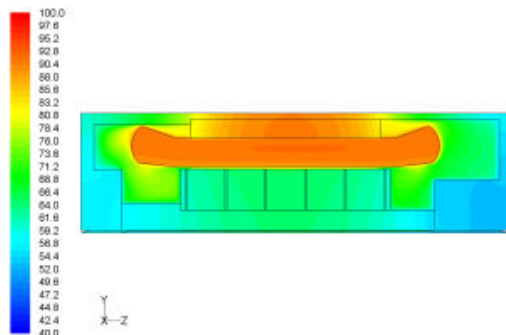
(b) Operating time 10minutes



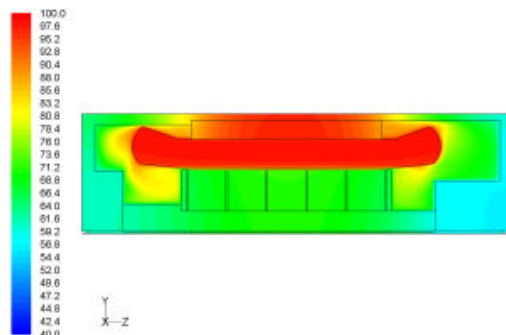
(c) Operating time 15minutes



(d) Operating time 20minutes



(e) Operating time 25minutes



(f) Operating time 30minutes

Fig. 3 Motor temperature contour as operating times

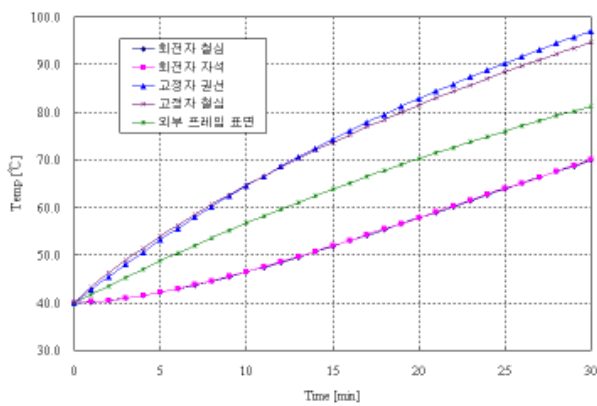


Fig. 4 Average Temp. rise during a operation

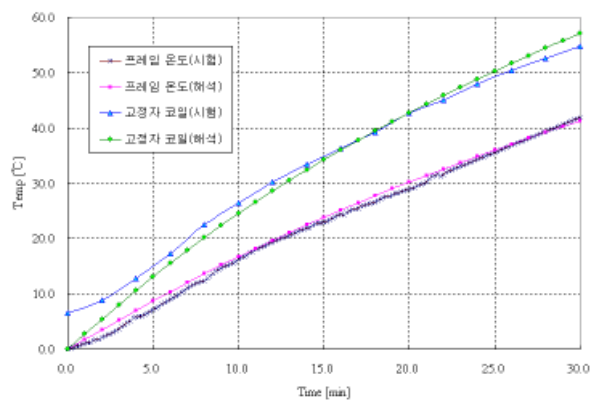


Fig. 5 Temp. rise(ΔT) of CFD and experiment

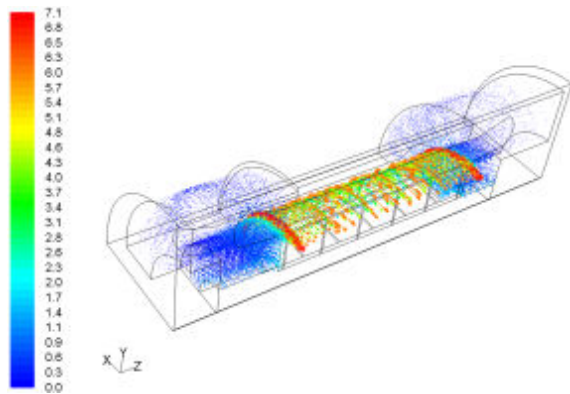


Fig. 6 Inner velocity vectors

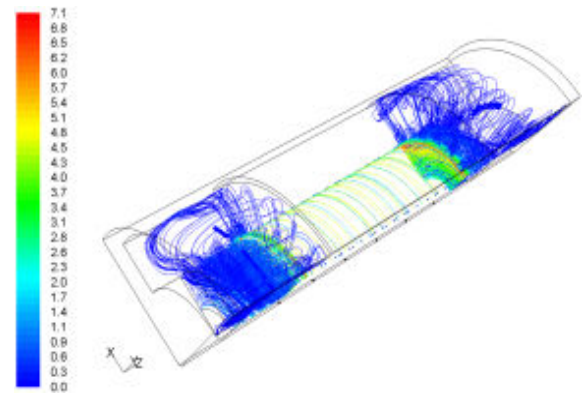


Fig. 7 Inner Stream lines

고정자 권선 및 외부 프레임에서 측정한 온도 상승치 시험결과와 해석 결과를 비교한 fig. 5를 보면 전체적으로 일치하는 경향을 보여주고 있으며 초기 고정자 권선의 온도가 해석값에 비해 높은 이유는 기동 후 부하를 주는 시간의 영향 때문이다. 또한 속도 벡터 분포를 보면 회전자 및 축의 회전에 의해 회전 방향으로 유동장이 발생하고 발생한 유동은 유선 분포에서 보는 것처럼 내부에서 순환한다.

4. 결론

비정상 열유동 해석 결과 고정자 권선의 평균 온도 상승치가 57.0℃로 가장 높은 온도를 보였으며 각 주요부의 평균온도 상승치는 전동기 냉각 설계 기준을 충분히 만족했다. 회전자는 내부 손실이 없고 고속 회전의 영향으로 고정자에 비해 상대적으로 낮은 온도 분포를 나타내었으며 시험결과와 비교한 그림을 보면 해석 결과가 비교적 정확하게 일치하는 경향을 볼 수 있으며 비정상 상태 열유동 해석에 대한 타당성을 확인할 수 있다. 전체적으로 현재 냉각 방식으로 전동기 내부 발열부를 냉각시키는데 문제가 없을 것이라 판단된다.

후 기

이 연구(논문)은 산업자원부 산하 에너지관리공단의 지원으로 수행하는 전동 고효율 고품질 구동시스템 개발의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Yoon, M. K., 1997, "A Study on Heat Transfer Characteristics of Small Enclosed Inductor Motor," *Ph.D thesis, Seoul National University*.
- (2) Lee, Y. S., 1998, "Thermal Analysis of Induction Motor with Axial Cooling Channels in Stator and Rotor," *Ph.D thesis, Seoul National University*.
- (3) Lee, Y. S. and Hahn, S. Y., 1999, "전동기의 열해석 기술," *Proceedings of KIEE*, Vol. 48, No. 9, pp. 12~17.
- (4) Chang, K. C., Bang, D. J. and Kang, D. H., 1999, "전동기 열해석 기술," *Proceedings of KIEE*, Vol. 48, No. 9, pp. 25~31.
- (5) Yang, P. S., Lee, H. J. and Jung, W. B., 2003, "A Study on Improvement of a Electric Motor Thermal Performance Using CFD," *Proceedings of the KSME 2003 Autumn Annual Meeting*, pp. 261~265.