

외전형 BLDC 모터의 열유동 해석

강수진[†] · 이관수* · 왕세명** · 심호경**

Thermal and Flow Analysis of Outer-Rotor Type BLDC Motor

Soojin Kang, Kwan-Soo Lee, Semyung Wang and Hokyoung Shim

Key Words : BLDC motor (BLDC 모터), Cooling blade (냉각날개), Cooling hole (냉각구멍), Outer-rotor type(외전형)

Abstract

In this paper, thermo-flow characteristics of an outer-rotor type of a BLDC motor are numerically analyzed using three-dimensional turbulence modeling. In an advance design of BLDC motor, cooling blades and holes are preferred for the enhanced cooling performances. Rotating the blades and holes generates axial air flow passing through stator slots, which cools down stator by forced convection. For the present study, a new design of the BLDC motor has been developed and major design parameters such as the arrangement of cooling holes, the area of cooling holes, and cooling blades and the cooling blade angle, are analyzed for the enhanced convective heat transfer rate. It is found that the convective heat transfer rate of the new BLDC motor model is increased by about 8.1%, compared to that of the reference model.

기호설명

A_r	:	냉각구멍 넓이 비
C_{1-2}, C_μ	:	난류 상수
\dot{m}	:	질량유량[kg/s]
u	:	속도 [m/s]
k	:	열전도계수 [W/mK]
k	:	난류 운동에너지 [m^2/s^2]
p	:	압력 [Pa]
T	:	온도 [°C]

그리스문자

ε	:	난류 운동에너지 소산율 [m^2/s^3]
θ	:	냉각날개 각도 [°]
μ	:	점성계수 [kg/m·s]
ρ	:	밀도 [kg/m ³]

하첨자

<i>air</i>	:	공기
------------	---	----

[†] 한양대학교 기계공학과

* 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0426 FAX : (02)2295-9031

** 광주과학기술원 기전공학과

1. 서론

모터는 전류의 자기 작용을 이용하여 전기 에너지를 기계에너지로 변환하는 기기이다. 모터는 자계에서 전류가 흐를 때 발생하는 전자기장의 작용을 이용하여 회전력을 얻는다. 이에 따라 모터에서는 동손(銅損; copper loss)과 철손(鐵損; iron loss)이 발생한다. 동손은 모터 내 도체에 전류가 흐를 때 줄열(Joule's heat)로 발생하는 손실이고, 철손은 회전으로 인하여 철심 내의 자계가 변하기 때문에 발생하는 손실이다. 이러한 손실들이 열원(heat source)으로 작용하여 모터의 온도는 상승하게 된다. 따라서 모터에서 열 문제는 손실 문제 즉 효율 문제와 직접적인 관련이 있다. 또한 모터에 사용되는 절연체 수명은 아레니우스 식(Arrhenius equation)에 의거하여 온도가 10°C 높아질 때 그 수명은 절반으로 감소한다⁽¹⁾. 따라서 모터에서의 유동 및 열의 거동을 파악하는 것은 효율과 수명에 있어서 매우 중요하다.

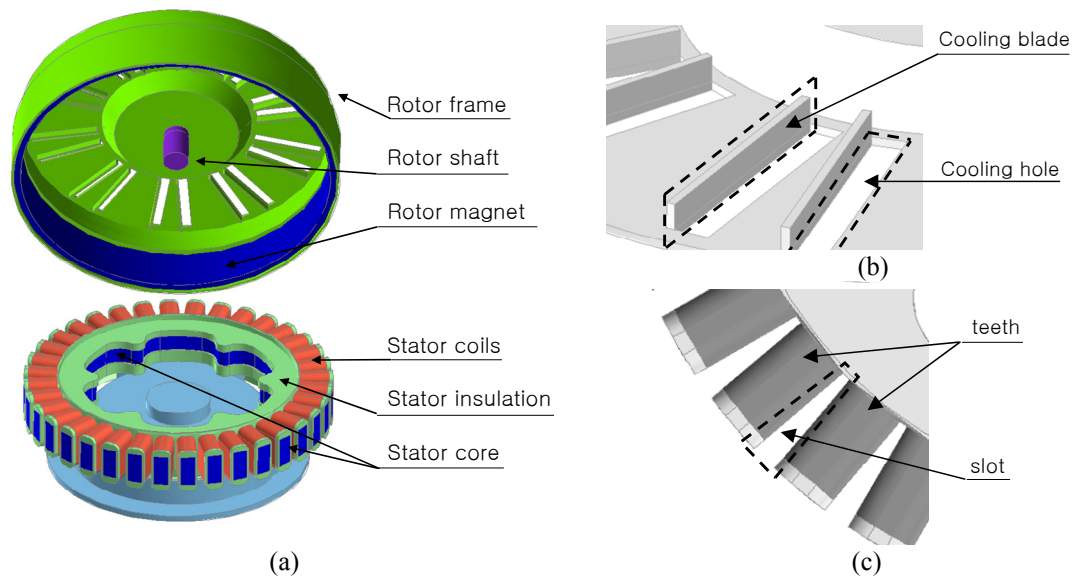


Fig. 1 Schematic diagram of BLDC motor

모터의 열유동 해석에 관한 연구들을 살펴보면, 크게 집중열량법을 이용한 열회로망법과 전산 열유체 해석 방법이 사용되고 있다. Lee 등⁽²⁾은 열회로망법을 이용하여 강제 냉각 채널이 있는 인덕션 모터의 온도장을 계산하였다. 전산 열유체 해석 방법을 사용하여 Biswas 등⁽³⁾은 고 레이놀즈 수에서의 열유동해석을 실시하였다. Lee 등⁽⁴⁾은 FEM 방법을 사용하여 인덕션 모터의 온도 상승에 관하여 2 차원적으로 해석하였다. Yang 등⁽⁵⁾은 모터를 3 차원 모델링하고 FVM 방법으로 수치해석하여 냉각설계의 변수가 되는 요소를 도출하였다.

그러나 위에 기술한 논문들은 전폐형(totally-enclosed type)·내전형(inner-rotor type) 모터에 관한 것으로 개방형(open type)이나 외전형(outer-rotor type) 모터에 대한 연구는 미비하다. 모터는 그 용도에 따라서 형태가 크게 달라질 수 있다. 그러한 예로 세탁기에 쓰이는 모터는 저속·고토크에 대한 요구에 따라 큰 회전자 반지름을 가지고 회전자가 고정자의 안쪽이 아니라 바깥쪽에 위치하는 외전형 모터를 사용 한다⁽⁶⁾. 이러한 외전형 모터는 회전자가 고정자를 덮는 형태가 되어 세탁기 캐비닛 내에 별도 케이싱 없이 개방형으로 설치된다. 이러한 개방형·외전형의 모터에 관하여 Hong 등⁽⁷⁾은 열유동 해석을 통하여 최적 냉각 구조에 관한 다구찌 해석을 수행하였다. 그러나 Hong의 연구는 모터 각 부분의 온도장이나 유동장의 특성에 대한 분석 내용이 없다. 본 연구에서는 직접구동 세탁기에 사용되는 개방형·외전형이고 팬 일체형인 BLDC

모터의 유동장과 온도장 파악을 위하여 3 차원으로 모델링하고 수치적으로 열유동을 해석하였고, 대상 모터를 같은 조건 하에서 실제 구동하여 측정된 온도를 수치해석 결과와 비교하였다. 또한 냉각구멍 배열과 냉각구멍 크기, 냉각날개가 이루는 각도 세 가지의 설계 인자에 변화에 따른 유동과 유량의 영향을 비교하였다. 이를 통하여 개선 모델을 도출하고 수치적으로 해석하여 기준모델과 유동장과 온도장을 비교하여 보았다.

2. 수치해법 및 검증

2.1 해석 대상

본 연구에서 고려하는 BLDC 모터는 Fig. 1 (a)와 같이 회전자가 고정자의 외곽에서 도는 외전형(outer-rotor type)이며, 개방형으로 모터의 케이싱(casing)이 없다. 또한 일반적인 모터와 비교하면 높이에 비해 지름이 큰 납작한 형태이다. 모터의 회전자(rotor)는 얹어놓은 보울(reverse bowl) 또는 뚜껑 형태의 프레임(frame)과 자석(magnetic)으로 구성되며, 프레임 상부에는 프레스 가공으로 생성된 20 개의 냉각 날개(cooling blade)와 냉각 구멍(cooling hole)이 두 개씩 쌍을 이룬 배열로 Fig.1 (b)과 같이 존재한다. 고정자(stator)는 Fig.1 (a)와 같이 전자석의 철심이 되는 적층 철판으로 만들어진 코어(core), 코어와 코일 (coil)을 분리 해주는 절연체(insulation), 절연체 위에 36 개로 나누어져 감겨진 코일로 이루어져있으며, Fig. 1 (c)와 같이 각각의 코일이 감긴 부분을 teeth, teeth와 teeth 사이의 공간을 슬롯(slot)이라 부른다.

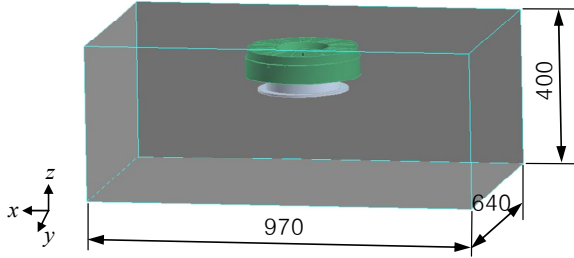


Fig. 2 Computational domain for the present study

회전자와 고정자는 반지름 방향으로 1 mm, 축 방향 상부에 약 30 mm 의 간격을 두고 회전하고, 하부는 회전자가 개방되어 있다.

해석영역을 한정하기 위하여 육면체 공간을 만들었고, 외부로부터 육면체 공간 안으로의 공기의 유입이나 유출은 없다. 이에 따라 열·유동 해석 영역은 Fig. 2 와 같이 육면체 공간 안의 BLDC 모터 와 작동유체 공기이다.

2.2 지배방정식

BLDC 모터를 해석하기 위하여 유동은 3 차원 정상상태 비압축성으로 고려하였고, 중력항은 고려하지 않았다. 1200 rpm 고속회전으로 인한 난류 발생이 예상되므로 standard k-ε 난류모델을 사용하였다. 열유동 해석에 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

(1) 작동 유체

연속 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

운동량 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \rho f_i$$

k-ε 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 G_k \frac{\epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i (\rho E + p) \right] = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + (\tau_{ij})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h$$

여기서,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad G_k = 2\mu_t S_{ij} S_{ij},$$

$$C_1 = 1.44, \quad C_2 = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_\epsilon = 1.3,$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

$$k_{eff} = k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

(2) BLDC 모터

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} = 0$$

2.3 경계조건

해석영역 내의 유동은 전자기력에 의한 회전자 회전으로 발생하는 순환기류이기 때문에 별도의 유동 경계조건은 필요 없다. 다만 회전자의 모든 벽들은 1200 rpm 으로 회전속도를 주었고, 해석영역을 한정된 직육면체의 벽들과 고정자의 벽들은 정지된 벽 경계조건을 사용하였다.

직육면체 경계 벽의 경우 등은 경계조건을 사용하였다.

2.4 수치해석

본 연구에서 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 지배 방정식의 대류항과 에너지 방정식은 1 계 상류도식을 이용하여 이산화 하였다. 회전자의 회전 구현을 위해서 MRF(Multiple Reference Frame) 모델링을 사용하였다. 격자는 사면체 격자를 주로 사용하였고, 벽근처에서는 프리즘 격자도 사용하였다. 총 격자수는 약 3,200,000 개이다.

2.5 모터의 열전도 계수와 열원 구성

고정자 코어는 적층 구조로 되어있어 적층방향의 열전도계수는 반지름 방향과 다르므로 이방성 열전도 계수 ($k_{axial} \neq k_{radial}$)를 사용하였다. 고정자 코일의 경우는 teeth 한 개에 얇은 권선이 100 여 회 조밀하게 감겨있어 방사형으로 균등 분포 되어 있으므로 여러 가닥의 권선을 하나의 체적으로 가정하였다.

열원이 되는 모터의 손실(loss)은 동손, 철손, 기계손, 표류 부하손으로 구성된다. 동손의 경우, 고정자 자계를 형성하는 도선에서 발생하는 Joule 열을 1 차 동손이라 하고, 회전자 자계를 형성하는 도선에서 발생하는 Joule 열을 2 차 동손이라고 한다. 본 연구 대상은 회전자의 자계를 영구자석으로 형성하여서 2 차 동손은 존재하지 않고, 1 차 동손만 존재한다. 철손, 기계손, 표류부하손의 경우 본 연구에서 고려하지 않았다.

모터를 실제 1200 rpm 으로 구동시켜 측정된 phase coil current 를 이용하여 고정자의 한 teeth 당 발생하는 Joule 열을 계산하였고, 이렇게 계산한

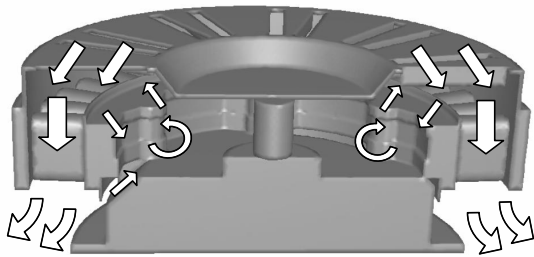


Fig. 3 Air flow of BLDC motor

Joule 열은 코일 체적에서 균일하게 발열되는 열원으로 생각하였다.

2.6 BLDC 모터 작동 실험 및 검증

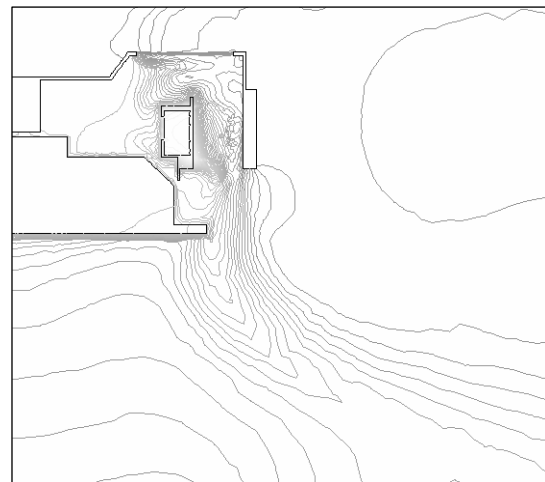
본 연구에서는 수치해석을 위한 기본정보 수집과 주요부에 대한 수치해석으로 얻은 온도장 결과를 검증하기 위하여 실제 BLDC 모터에 대한 구동시험을 실시하였다. 전류는 동손을 구하는 기본 자료가 되는데, BLDC 모터는 모터에 부착된 속도 센서를 통하여 회전 속도를 얻고 이를 바탕으로 제어부에서 전류를 조정하여 회전 속도를 제어하기 때문에 회전 속도에 따라 전류가 달라진다. BLDC 모터의 구동시험을 통하여 1200 rpm 에서의 전류를 측정하였고, 온도측정은 온도가 정상상태에 도달하였을 때 실시하였다. 정상 상태까지 소요시간은 약 70 분이였다.

측정을 위한 시험장치는 BLDC 모터, 모터 드라이버, 아크릴 상자와 SCXI(모듈형 USB DAQ 시스템), PC 그리고 전류 프로브(current probe), 오실로스코프(oscilloscope)로 구성하였다. 온도를 측정하기 위하여는 k-type 열전대를 사용하였다.

온도장 실측 결과와 수치해석 결과를 비교하면 코일부에 있어서는 0.7°C 이하의 온도차로 해석 결과가 비교적 잘 일치하였다.



(a) Velocity contour



(b) Temperature contour

Fig. 4 Velocity and temperature contours in x-z plane (y=0 mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 및 냉각 형태 분석

본 연구대상 BLDC 모터는 유동의 입출구는 없으며, 뚜껑형태의 회전자 윗부분에 냉각구멍과 냉각날개가 방사형으로 위치해 있어서 모터 회전자가 회전하면 모터 내외부의 전체 해석영역에 걸쳐 순환기류가 일어난다. 모터가 회전하면 회전자 표면에서는 고착 경계조건(no slip condition)에 의하여 회전 속도와 동일한 속도의 유동이 발생한다. 이러한 유체의 점성유동으로 에크만층(Ekman layer)이 형성되어 원판 윗면과 아랫면 근처의 공기는 원판의 외각으로 수송된다. 또한 원판부에 형성된 냉각구멍과 꺾인 냉각날개는 뚜껑형태 회전자 안쪽으로 공기를 흡입하는 효과를 낸다. 냉각날개의 뒤쪽인 흡입 측(suction side) 바로 옆에 냉각구멍이 있어서 회전을 하게 되면 냉각구멍으로 공기가 흡입된다. 이러한 두 가지 효과에 의하여 공기는 윗면의 냉각구멍으로 들어오고 에크만 층에 의해 외곽으로 수송되며, 회전자 옆면을 만나서 아래쪽으로 흐른다. 위에서 아래로 지나가면서 고정자를 냉각시키는 공기 유량의 약 86%가 회전자 상부에 방사형으로 분포된 냉각 구멍으로 유입된 공기이며, 나머지는 압력차에 의해 고정자와 받침대 사이 틈새로 들어온 공기이다. 회전자 안쪽으로 들어와 아래쪽으로 이동하는 기류를 살펴보면 코일이 감겨있는 teeth 와 teeth 의 사이 영역인 슬롯(slot)을 통하여 지나간다. 고정자와 회전자 사이 회전을 위한 간극(gap)도 존재하지만, 1 mm 로 매우 좁기 때문에 간극에서는 고착 경계조건에 의한 1200 rpm

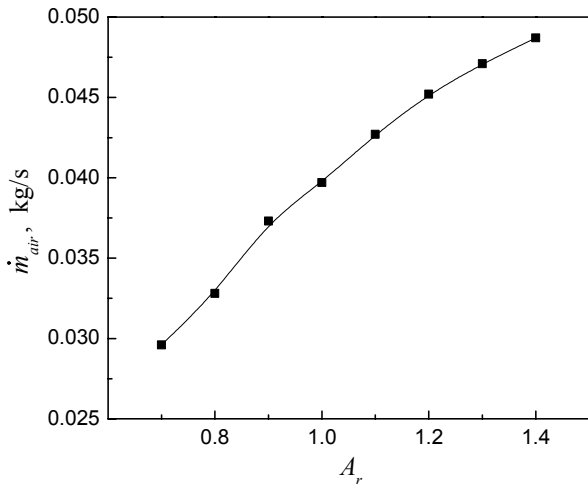


Fig. 5 Effect of the cooling hole area ratio on the mass flow rate

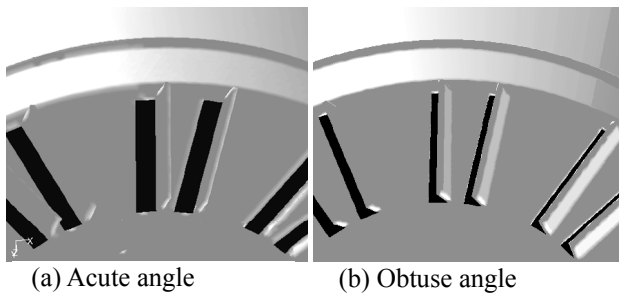


Fig. 6 Cooling blade angle

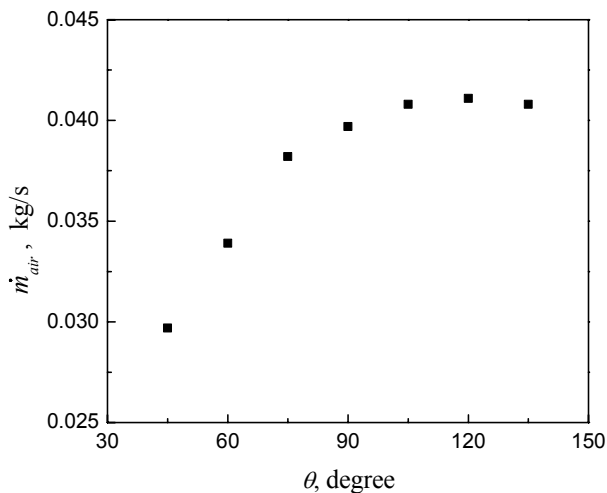


Fig. 7 Effect of the cooling blade angle on the mass flow rate

회전을 따르는 회전유동이 대부분이고 유량의 상하통로로는 이용되지 않는 것으로 나타났다. Fig.3 은 BLDC 모터의 단면을 나타내며 화살표를 이용하여 위에서 설명한 유동 경로를 나타내었다. 이러한 유동으로 전체 해석영역 내의 순환기류가 형성된다.

온도장은 열원인 코일에서 열이 발생하여 전도를 통하여 절연체를 지나 코어와 받침대로

전달되고, 회전자 회전으로 유발된 해석영역 내의 순환기류로 인한 강제대류 열전달로 형성된다. Fig. 4 에 $y=0$ 단면에 대한 속도 분포와 온도 분포를 보였다. 그림에서 보는 것과 같이 속도와 온도의 분포가 거의 일치하며 이는 활발한 강제대류의 영향으로 생각된다. 모터의 온도는 열원이 위치한 고정자 코일에서 34°C 로 가장 높았다. 회전자 형상 내부로 들어와서 고정자를 냉각하고 나가는 유량과 온도를 이용하여 구한 열전달률은 65.34 W 이다.

본 모터는 열원인 코일을 지나가는 공기 유량이 많고 그로 인해 강제 대류를 통한 냉각도 크다. 외전형/팬일체형 모터의 냉각성능을 향상시키기 위해서 냉각공기의 유량을 증대시켜 강제대류를 활성화 시키는 것이 중요하다고 생각된다.

3.2 설계인자 영향도 분석

유량 증가를 위해 영향도를 분석할 설계인자로 프레스 가공이 가능하면서도 개선할 수 있는 냉각구멍의 배열과 냉각구멍의 깊이, 냉각날개의 각도를 선택하였다. 대상모터는 강제대류의 영향이 크고, 온도 상승폭이 적은 관계로 온도를 특성값으로 하는 대신 냉각구멍을 지나 회전자 안쪽으로 들어가는 공기의 질량 유량을 특성값으로 하여 회전자 냉각 성능을 비교 하였다. 그리고 얻어진 개선모델과 기준모델 간의 열적 성능을 비교하였다.

3.2.1 냉각구멍의 배열

대상모터는 회전자를 외곽에 위치시키기 위하여 하나의 뚜껑형태로 만들었고 냉각을 위해 그 뚜껑에 구멍을 내고 냉각 날개를 만들었다. 이러한 뚜껑에 강도를 주기 위하여 리브를 만들었는데 그로 인하여 날개는 2 개가 쌍을 이룬 형태로 배열되어 있다. 리브로 인하여 불균일 배열이 된 기준모델과 배열을 균일하게 한 모델의 유량을 비교하여보면 균일한 배열이 불균일한 기준모델에 비하여 1.5% 증가하였다. 그러나 그 양은 미미하므로 강도를 위한 구조물을 위해 배열을 바꾸는 것은 냉각에 큰 영향을 주지 않는다고 생각한다.

3.2.2 냉각날개와 냉각구멍의 크기

냉각구멍을 통해 들어오는 공기 유량을 늘리는 방법으로 냉각날개와 냉각구멍의 크기를 크게 하는 방법이 있다. 냉각날개를 크게 하면 날개 후면에서의 음압의 크기가 커지고 그로 인하여

냉각구멍으로 유입되는 유량이 증대된다. 그러나 본 대상모터는 프레스 가공을 통하여 냉각구멍을 만들고 동시에 그 부분을 꺾어서 냉각날개를 만들기 때문에 냉각날개가 커지면 동시에 냉각구멍도 커져서 유량 증가 효과를 감소 시킨다. 기준모델의 냉각구멍 넓이에 대한 변경모델의 냉각구멍 넓이 비를 냉각구멍 넓이 비라고 할 때 Fig. 5 는 냉각구멍 넓이 비에 대한 공기 질량 유량의 변화를 나타낸 것이다. 이 수치해석 결과 들을 바탕으로 2 차 회귀모형분석을 실시하면 냉각구멍 넓이 비가 1.786 일 때 공기 질량유량이 0.0515 kg/s 으로 최대값을 가진다. 그러나 회전자 프레임에서 잘라낼 수 있는 냉각구멍의 크기는 한계가 있기 때문에 냉각구멍 넓이 비에는 제한 조건이 따르며 본 대상모델의 경우는 그 비를 1.4 까지 늘릴 수 있다.

3.2.3 냉각날개 각도

프레임과 냉각날개가 이루는 각도를 냉각날개 각도라고 할 때, Fig. 6 (a)의 프레임에 냉각날개가 가까운 예각의 경우는 90°인 기준모델에 비해 유량이 급격하게 감소하며, Fig. 6 (b)와 같은 둔각의 경우는 기준모델에 비해 유량이 증가한다. 냉각 날개 각도와 냉각구멍을 통과하는 질량유량의 관계를 Fig. 7 에 나타내었다. 증가 효과를 보이는 둔각 구간에 대하여만 2 차 회귀모형으로 분석하면 125°부근에서 최대값을 가진다.

3.2.4 개선모델과 기준모델의 비교

설계인자 분석 과정을 통하여 냉각구멍 넓이 비 1.4 / 냉각날개 각도 125°인 모델을 개선모델로 도출하고, 이를 수치해석적으로 열유동장을 분석하였다. 냉각구멍을 통과하는 공기 질량 유량은 0.0398 kg/s 에서 0.05170 kg/s 로 30% 증가하였다. 코일에서 나타나는 모터의 최고온도는 34.50°C 에서 33.86°C 로 온도 상승량이 줄어드는 향상된 냉각효과를 보였다. 대류를 통한 열전달률은 70.65 W 로 기준모델의 65.34 W 에 비해 8.1% 향상되었다.

4. 결론

본 연구에서는 외전형 BLDC 모터의 유동장 및 온도장에 관하여 3 차원 수치모사를 수행하고, 설계인자인 냉각구멍의 배열과 냉각날개와 냉각구멍의 크기, 냉각날개의 각도의 변화에 따른 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 회전자의 냉각날개와 냉각구멍의 회전효과에 의하여 회전자 안쪽으로 들어오는 유동이 발생하며, 이것이 고정자 코어를 지나가는 냉각유동이 되어 강제대류를 일으켰다.

(2) 냉각구멍의 배열은 유량이나 열전달에 큰 영향을 끼치지 않는다.

(3) 냉각날개와 냉각구멍의 넓이가 넓어질수록 냉각유량이 많아지지만 그 증가는 2 차 곡선의 성질을 보였다.

(4) 냉각날개의 각도가 예각일 때는 급격한 유량 감소를 가져왔지만, 둔각일 때는 유량 증가를 가져왔다. 그 각도가 125°일 때 최대값을 보였다.

(5) 개선모델(냉각구멍 넓이 비 1.4, 냉각날개 각도 125°)는 대류 열전달률이 8.1 % 상승하는 냉각성능 개선을 가져왔다.

후기

이 논문은 2006 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-042-D00026)

참고문헌

- (1) Andreas, J. C., 1992, *Energy-efficient electronic motors : Selection and Application*, Marcel Dekker, Inc., pp. 243~245.
- (2) Lee, Y., Hahn, S.-Y., Kauh, S.K., 2000, "Thermal analysis of induction motor with forced cooling channels", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 36, Issue 4, Part 1, pp. 1398 ~ 1402.
- (3) Biswas, D., Ishizuka, M., and Iwasaki, H., 2000, "Three-Dimensional Thermo Fluid Analysis of Large Scale Electric Motor", *Int. J. of Rotating Machinery*, Volume 6, Issue 6, pp. 433 ~ 444.
- (4) Lee, Y., Lee, H.-B., Hahn, S.-Y., Lee, K.-S., 1997, "Temperature analysis of induction motor with distributed heat sources by finite element method", *IEEE Trans. on Magnetics*, Volume 33, Issue 2, Part 2, pp. 1718 ~ 1721.
- (5) Yang, P., Lee, H., Jung, W., 2003, "A Study on improvement of a Eclectic Motor Thermal Performance Using CFD", *Proceedings of the KSME 2003 Fall Annual Meeting*, pp. 261 ~ 265.
- (6) Kenjo, T., Nagamori, S., 2003, *Brushless Motors – Advanced Theory and Modern Applications*, Japan: Sogo Electronics Press, pp. 296~298.
- (7) Hong, S. W., Jeon, S.M., 2003, "Numerical Study on the Cooling of Induction Motor In a Washing Machine", *Proceedings of the KSME 2003 Spring Annual Meeting*, pp. 266 ~ 271.