

< 논문 >

냉각날개를 갖는 외전형 BLDC 모터의 열유동 해석

강수진* · 이관수† · 왕세명** · 심호경**
(2007년 4월 27일 접수, 2007년 7월 30일 심사완료)

Thermal and Flow Analysis of Outer-Rotor Type BLDC Motor with Cooling Blades

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

Key Words : BLDC Motor (BLDC 모터), Cooling Blade (냉각날개), Cooling Hole (냉각구멍), Flow Analysis (유동해석), Thermal Flow(열해석), Outer-Rotor Type(외전형)

Abstract

In this paper, thermo-flow characteristics of an outer-rotor type BLDC motor are numerically analyzed using three-dimensional turbulence modeling. On the rotor of the BLDC motor, cooling blades and cooling holes are existed for the enhanced cooling performances. Rotating the blades and holes generates axial air flow streaming into inner rotor side and passing through stator slots, which cools down stator by forced convection. Operating tests are performed and the numerical temperature fields are found to be in good agreement with experimental results. A new design of the BLDC motor has also 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
E	: 총에너지 [m^2/s^2]
G_k	: 난류 운동에너지 생성률 [W/m^3]
k	: 열전도계수 [$W/m \cdot K$]
k	: 난류 운동에너지 [m^2/s^2]
\dot{m}	: 질량유량 [kg/s]
p	: 압력 [Pa]

S_h	: 단위 체적당 열발생률 [W/m^3]
T	: 온도 [$^{\circ}C$]
u	: 속도 [m/s]
x	: 거리 [m]

그리스문자

ϵ	: 난류 운동에너지 소산율 [m^2/s^3]
θ	: 냉각날개 각도 [$^{\circ}$]
μ	: 점성계수 [$kg/m \cdot s$]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
ω	: 각속도 [rpm]
τ_{ij}	: 전단 응력 [Pa]

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0426 FAX : (02)2295-9031

* 한양대학교 기계공학과
** 광주과학기술원 기전공학과

하첨자

air	: 공기
eff	: 유효

i, j : 무의미 지수
 t : 난류

1. 서론

모터는 자계에서 전류가 흐를 때 발생하는 전자 기장의 작용을 이용하여 회전력을 발생시킴으로써, 전기 에너지를 기계 에너지로 변환하는 기기이다. 그러나 이러한 모터의 원리는 도체에 전류가 흐를 때 줄열(Joule's heat)로 발생하는 손실인 동손(銅損; copper loss)과 회전으로 인해 철심 내의 자계가 변할 때 발생하는 손실인 철손(鐵損; iron loss)을 모터에 발생시킨다. 이와 같은 손실들은 모터에 열원(heat source)으로 작용하기 때문에 모터에서 열문제는 손실 문제 즉 효율 문제와 직접적인 관련이 있다. 또한 모터 전체의 수명을 좌우하게 되는 절연체의 수명은 아레니우스 식(Arrhenius equation)에 의거하여 온도가 10°C 높아질 때 절반으로 감소한다.⁽¹⁾ 따라서 모터의 고효율성과 장기수명을 도모하기 위하여 모터의 유동 및 열거동을 파악하는 것은 매우 중요하다.

모터의 열이나 유동에 관한 연구는 크게 집중열량법을 이용한 열회로망법과 전산 열유체 해석 방법의 두 가지를 사용하여 진행되어 왔다. Lee 등⁽²⁾은 열회로망법을 이용하여 강제 냉각 채널이 있는 인덕션 모터의 온도장을 계산하였다. 전산 열유체 해석 방법을 사용하여서는 Biswas 등⁽³⁾이 대형 모터의 고 레이놀즈 수에서의 열유동 해석을 실시하였고, Lee 등⁽⁴⁾은 FEM 방법을 사용하여 인덕션 모

터의 온도 상승에 관하여 2차원적으로 해석하였다. Yang 등⁽⁵⁾은 485 kW급 모터를 3차원 모델링하고 FVM 방법으로 수치 해석하여 냉각설계의 변수가 되는 요소를 도출하였다. 그러나 위에 기술한 논문들은 모두 전폐형(totally-enclosed type)이면서 내전형(內轉形; inner-rotor type)인 모터에 관한 것으로, 용도에 따라 달라지는 모터의 다양한 형태에 비해 전폐형·내전형이 아닌 형태의 모터에 대한 연구는 부족하다. 전폐형·내전형이 아닌 모터의 예로, 세탁기에 쓰이는 모터는 고토크에 대한 요구에 따라 큰 회전자 반지름을 가지기 위해 회전자가 고정자 바깥쪽에 위치하는 외전형(外轉形; outer-rotor type) 모터를 사용한다.⁽⁶⁾ 또한 이 외전형 모터는 회전자가 고정자를 덮는 형태가 되어 세탁기 캐비닛 내에 별도의 케이싱 없이 개방형(open type)으로 설치된다. 이와 같은 세탁기용 개방형·외전형 모터에 관하여 Hong 등⁽⁷⁾은 열유동 해석을 통한 최적 냉각 구조에 관한 다구체 해석을 수행하였으나, 그의 연구는 모터 각 부분의 온도장이나 유동장의 특성에 대한 분석 내용이 없고, 단지 냉각에 대한 기여율이 큰 인자를 찾는 데 그쳤다.

본 연구에서는 직접 구동 세탁기에 사용되는 외전형·개방형이면서 팬 일체형인 BLDC(BlushLess Direct Current) 모터의 유동장과 온도장을 파악하기 위하여 3차원으로 모델링하여 수치 해석하고, 대상 모터를 같은 조건 하에서 실제 구동하여 측정된 온도를 수치 해석 결과와 비교한다. 또한 회전자에서 변화시킬 수 있는 세 가지 설계 인자(냉각구멍의 배열, 냉각구멍의 넓이, 냉각날개의 각

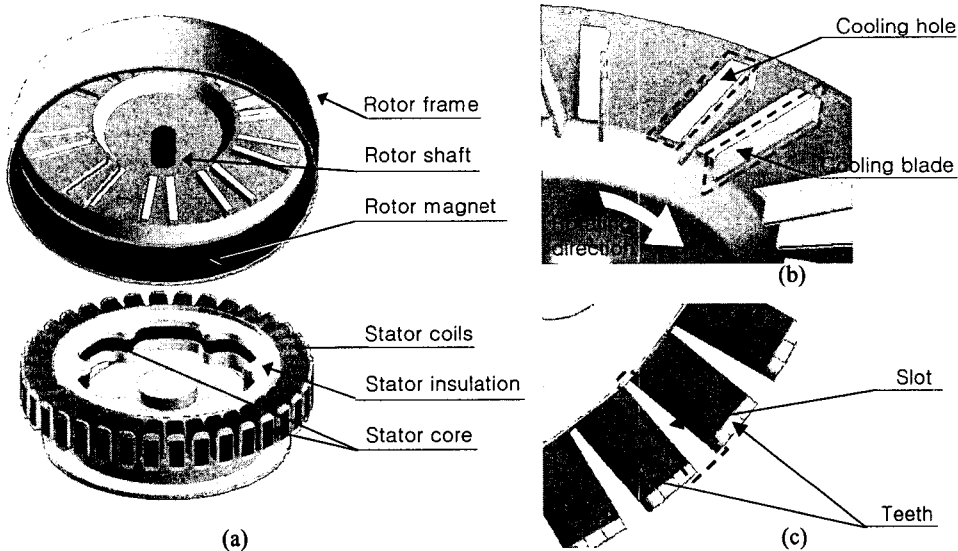


Fig. 1 Schematic diagram of BLDC motor

도)에 대한 유동과 유량의 영향을 조사하며, 이러한 분석을 통하여 개선모델을 제시한다.

2. 수학적 모델링 및 검증

2.1 해석 대상

본 연구에서 고려하는 BLDC 모터는 Fig. 1(a)와 같이 회전자가 고정자의 외곽에서 도는 외전형이며, 케이징(casing)이 없는 개방형 모터이다. 대상 모터는 일반적인 모터와 비교하면 높이에 비해 지름이 커 납작한 형태로 박형(薄形)으로 분류된다. 모터의 회전자(rotor)는 얽어놓은 보울(reverse bowl) 또는 뚜껑 형태의 프레임(frame)과 자석(magnetic)으로 구성되며, 프레임 상부에는 프레스 가공으로 생성된 20개의 냉각날개(cooling blade)와 냉각구멍(cooling hole)이 두 개씩 쌍을 이룬 배열로 Fig. 1(b)과 같이 존재한다. 이와 같은 회전자의 형태 때문에 본 모터를 팬 일체형이라 부른다. 고정자(stator)는 Fig. 1(a)와 같이 적층 철판으로 만들어진 전자석의 철심이 되는 코어(core), 코어와 코일(coil)을 분리 해주는 절연체(insulation), 절연체 위에 36개로 나누어져 감겨진 코일로 이루어져 있으며, Fig. 1(c)와 같이 각각의 코일이 감긴 부분은 치(teeth)라하고, 치와 치 사이의 공간은 슬롯(slot)이라 부른다.

회전자와 고정자는 반지름 방향으로 2 mm, 축 방향으로 약 30 mm 떨어져 회전한다.

연구대상 BLDC 모터는 개방형으로 모터의 열 유동 수치 해석을 위해서는 해석영역을 한정하여야 한다. 본 연구에서의 열 유동 해석영역은 Fig. 2와 같이 육면체 공간 안의 BLDC 모터와 작동유체인 공기로 정하였다. 이 해석영역은 실험을 실시한 실험 장비와 같은 크기와 조건으로, 외부와 육면체 공간 안 사이에는 공기의 유입이나 유출은 없다. 회전축 방향은 그림과 같이 z 방향이다.

2.2 기본가정 및 지배방정식

BLDC 모터를 해석하기 위하여 도입된 가정은 다음과 같다.

1) 유체의 흐름은 3차원, 정상, 비압축성, 난류 유동이다.

2) 물성치는 온도에 따라 변하지 않는다.

3) 중력은 무시한다.

해석할 모터의 상태는 1200 rpm으로 고속 회전에 의한 난류 발생이 예상되어 standard k-ε 난류모

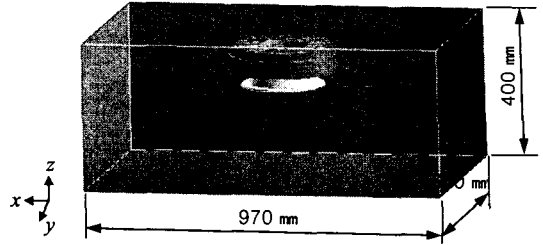


Fig. 2 Computational domain for the present study
 델을 사용하였다. 열유동 해석에 사용된 지배 방정식은 다음과 같다.

(1) 작동 유체 (공기)

연속 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \rho f_i \quad (2)$$

k-ε 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$+ C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

여기서, G_k 는 난류운동에너지의 생성을 나타내는 항이고, μ_t 는 난류점성계수로 식 (5)와 같다. 난류모델에서 사용된 모델 상수 값들은 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ 이다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i (\rho E + p) \right] = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + (\tau_{ij})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \quad (6)$$

식 (6)에서 E는 총에너지를 나타낸다.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad (7)$$

Table 1 Boundary conditions and heat generation rate

rotor wall	$\omega_z = 1200 \text{ rpm}$
stator wall / outer wall	$u_x = u_y = u_z = 0$
rotor wall / stator wall	$\frac{\partial T}{\partial x_i} = 0$
outer wall (top/side)	$T = 26.5^\circ\text{C}$
outer wall (bottom)	$T = 25.8^\circ\text{C}$
coil volumetric heat generation rate	$S_h = 173000 \text{ W/m}^3$

(2) BLDC 모터

코어부 전도 방정식:

$$k_{radial} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + k_{axial} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

코일부 전도 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_h = 0 \quad (9)$$

코어와 코일을 제외한 부분의 전도 방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (10)$$

2.3 경계조건

해석영역 내의 유동은 모터 전자기력에 의한 회전자 회전으로 발생하는 순환 기류로, 유동 입·출입 조건이 아닌 회전하는 벽에 대한 조건이 필요하다. 따라서 회전자의 모든 벽에 대하여 1200 rpm의 회전 속도를 주었고, 고정자와 외벽은 정지된 벽으로 조건을 주었다. 온도 조건으로는 외곽의 직육면체 벽의 경우 등은 경계조건을 사용하였고, 코일을 체적 발열로 처리하였다. 나머지 모터의 벽들은 단열이라고 가정하였다. 이를 정리하면 Table 1과 같다.

2.4 모터의 열전도 계수와 열원 구성

고정자 코어는 적층 구조로 되어 있어 적층 방향의 열전도 계수는 반지름 방향의 것과 다르므로 이방성 열전도 계수를 사용하였다. 그 값들은 축방향 열전도 계수는 $k_{axial} = 25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 를, 반지름 방향의 열전도 계수는 $k_{radial} = 1.97 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 를 각각 사용하였다. 고정자 코일의 경우는 치(teeth) 한 개에

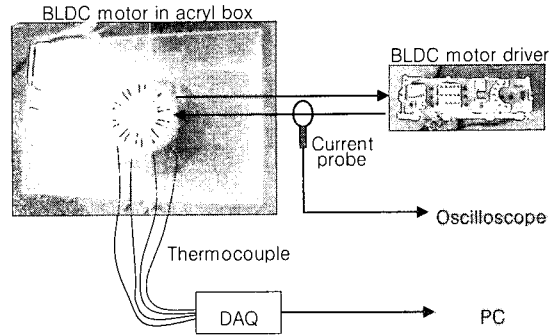


Fig. 3 Experimental apparatus for measuring ampere and temperature

얇은 권선이 100여 회 조밀하게 감겨 방사형으로 균등 분포되어 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 1차 동손이라 하고, 회전자 자계를 형성하는 도선에서 발생하는 Joule 열을 2차 동손이라고 한다. 본 연구 대상 모터는 회전자의 자계를 영구자석으로 형성하였기 때문에 2차 동손은 존재하지 않고, 1차 동손만 존재한다. 또한 영구자석을 사용하는 모터의 경우 1차 동손이 전체 손실의 80~90%를 차지하므로⁽⁸⁾ 나머지 손실인 철손, 기계손, 표류부하손의 경우 본 연구에서 고려하지 않았다.

고정자 코일에서 발생하는 Joule 열은 모터를 실제 1200 rpm으로 구동시켜 측정된 상전류(phase current)를 이용하여 계산하였고, 이렇게 계산한 Joule 열은 코일 체적에서 균일하게 발열되는 열원으로 생각하였다.

2.5 수치해법

본 연구의 3차원 열유동 해석을 위하여 유한체적법을 사용하였다. 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘⁽⁹⁾을 선택하였으며, 지배 방정식의 대류항들은 수렴성을 좋게 하기 위하여 1계 상류 도식(first order upwind difference scheme)⁽⁹⁾을 이용하여 이산화 하였다. 모터의 회전을 구현하는 방법으로는 MRF(Multiple Reference Frame) 모델링⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 회전자 외곽과 고정자 외곽, 고정자 코일의 크고 작은 등근 형태에 맞추기 위하여 격자는 사면체 격자를 주로 사용하였고, 벽 근처에서는 프리즘 격자와

혼합해 사용하였다. 격자 의존성을 검사하기 위하여 격자를 260만 개부터 480만 개까지 늘리며 조사하였고, 320만 개 이하의 경우 수렴하지 않았으며, 320~480만 개까지는 정성적으로 동일하며 정량적으로도 큰 차이가 없는 결과를 얻었다. 따라서 해의 정확성, 수렴성, 계산시간을 고려하여 320만 개의 격자를 사용하였다. 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식, 난류운동에너지 소산율 방정식, 에너지 방정식의 해를 상용코드인 FLUENT를 이용하여 구하였다.

2.6 BLDC 모터 작동 실험 및 검증

본 연구에서는 수치 해석을 위한 기본 정보 수집과 온도장 결과의 검증을 위하여 실제 BLDC 모터에 대해 구동시험을 실시하였다.

전류는 동손을 계산하기 위한 기본 정보이다. BLDC 모터는 모터에 부착된 속도 센서로 회전 속도를 얻고 이를 바탕으로 제어부에서 공급 전류를 조절하여 회전 속도를 제어하기 때문에 전류는 회전 속도에 따라 달라진다. 따라서 실험을 통하여 BLDC 모터가 1200 rpm으로 구동될 때의 전류를 측정하였다. 온도 측정은 수치해석결과의 검증뿐 아니라 수치해석 영역에서 외곽이 되는 acryl box와 바닥면의 온도 경계 조건을 선택하기

위하여 측정하였다.

측정을 위한 시험 장치는 수치해석 대상과 동일한 BLDC 모터, 모터 드라이버, 아크릴 상자와 열전대(Omega, Kapton insulated thermocouple wire, K-type, 8 gage), 데이터 획득 장치(National Instruments, PCI-6036E, SCXI-1000, Labview Full Dev.), PC 그리고 전류 프로브(HP, AC/DC Current Probe/bnc), 오실로스코프(Tektronics, TDS2014B)로 Fig. 3과 같이 구성하였다. 전류는 모터의 회전 속도가 1200 rpm에 도달하고 난 후의 3상 전류의 평균값을 측정하였다. 온도 측정은 실험 시작 시부터 실시하였고, 측정 온도 편차가 0.2°C 이하인 상태가 20분 이상 지속될 경우 열적 정상 상태로 판단하여 사용할 데이터를 습득하였다. 정상상태로 판단되는 시점은 모터 구동 시작 후 70분부터였다.

온도장 실측 결과와 수치 해석 결과를 비교하면 코일부에 있어서 0.7°C 이하의 온도차로 해석 결과와 비교적 잘 일치하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 및 냉각 형태 분석

본 연구대상 BLDC 모터는 유동의 입·출구는 없으며, 모터가 회전하면 뚜껑 형태의 회전자 윗면에 방사형으로 분포된 냉각구멍과 냉각날개에 의해 Fig. 4와 같은 유동이 발생한다. 이러한 회전자로부터 유발된 유동이 개방형 모터가 위치한 공간 내의 공기를 순환시킨다.

모터가 회전하면 회전자 표면에서는 회전 속도와 동일한 속도의 유동이 발생하며, 이러한 유동에 의해 에크만 층(Ekman layer)이 형성되어 원판 윗면과 아랫면 근처의 공기는 원판의 외각으로 수

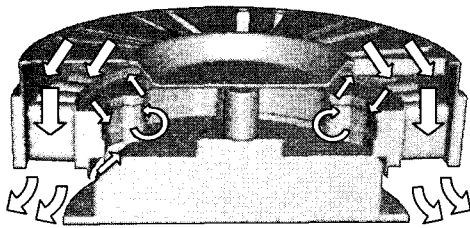


Fig. 4 Air flow of BLDC motor

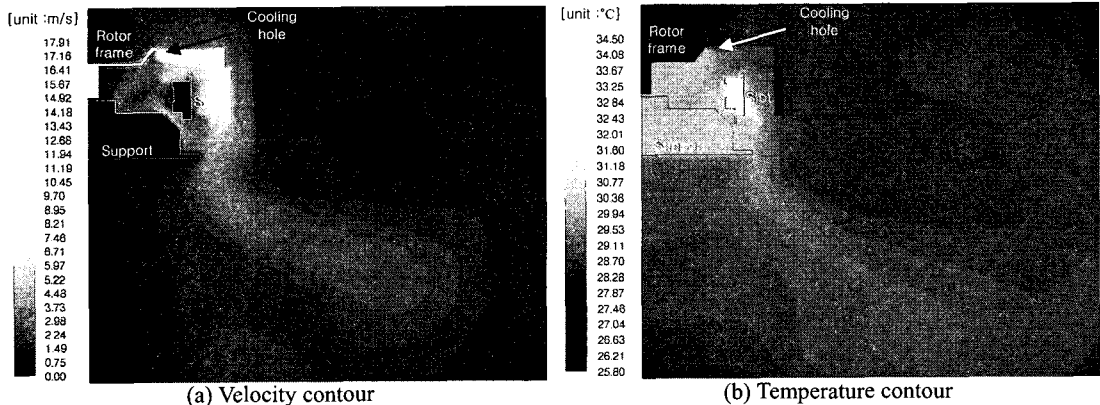


Fig. 5 Velocity and temperature contours of reference model in x-z plane ($y=0$ mm)

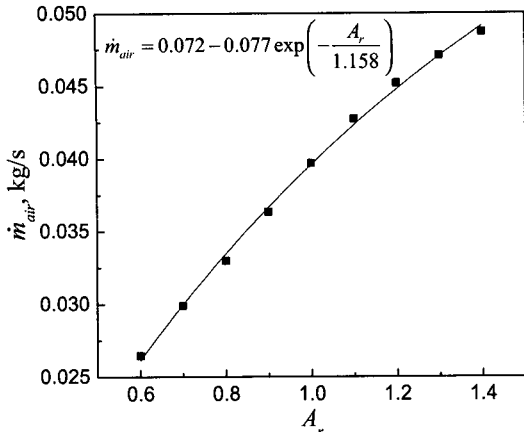


Fig. 6 Effect of the cooling hole area ratio on the mass flow rate

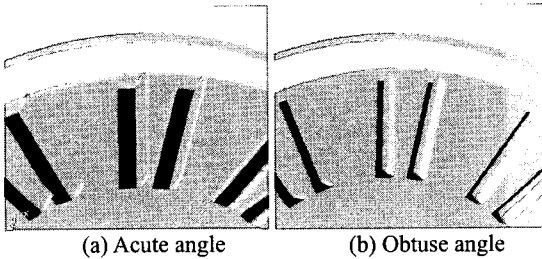


Fig. 7 Cooling blade angle

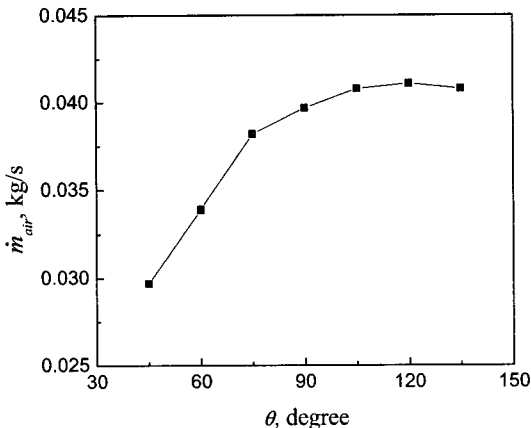


Fig. 8 Effect of the cooling blade angle on the mass flow rate

송된다. 또한 냉각날개의 뒤쪽인 흡입 측(suction side)에는 음압이 발생하고, 이곳의 바로 옆에 냉각구멍이 있기 때문에 회전을 하게 되면 냉각구멍을 통하여 뚜껑 형태 회전자 안쪽으로 공기가 흡입된다. 이러한 두 가지 효과에 의하여 공기는 회전자 윗면의 냉각구멍으로 들어오고 외곽으로 수송되며, 회전자 옆면을 만나서 아래쪽으로 흐른다. 상하 유동으로 고정자를 냉각시키는 공기 유량의

약 86%가 회전자 상부에 위치한 냉각구멍으로 유입되는 공기이며, 나머지는 압력차에 의해 고정자와 받침대 사이의 틈새로 들어온 공기이다. 회전자 안쪽으로 들어와 위에서 아래로 이동하는 기류를 살펴보면 코일이 감겨있는 치(teeth) 사이의 영역인 슬롯(slot)을 통하여 지나간다. 고정자와 회전자 사이 회전을 위한 간극(gap)도 존재하지만, 2 mm로 매우 좁기 때문에 간극에서는 1200 rpm 회전을 따르는 회전유동이 대부분이고 유량의 상하 이동 통로로는 이용되지 않는다.

온도장은 열원인 코일에서 열이 발생하여 전도를 통하여 절연체를 지나 코어와 받침대로 전달되고, 회전자의 회전으로 유발된 해석영역 내의 순환기류로 인한 강제대류 열전달로 형성된다. Fig. 5에 $y=0$ 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°C로 가장 높았다. 회전자 내부로 들어와서 고정자를 냉각하고 나가는 공기의 열전달률은 65.34 W이다. 이 값은 코어에서 발생하는 전체 발열량인 100 W의 65%에 해당하는 양이다.

본 모터는 회전자 회전에 의한 축 방향 공기 유량이 많이 발생하였고, 이 공기 유동이 열원인 코일을 강제 냉각시키는 효과도 컸다. 외전형/팬 일체형 모터의 냉각성을 향상시키기 위해서는 이러한 축 방향 냉각공기의 유량을 증대시켜 강제대류를 활성화 하는 것이 중요하다.

3.2 설계인자 영향도 분석

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

3.2.1 냉각구멍의 배열

대상 모터는 회전자를 외곽에 위치시키기 위하여 하나의 뚜껑형태로 만들었고 냉각을 위해 그 뚜껑에 구멍을 내고 냉각날개를 만들었다. 이러한

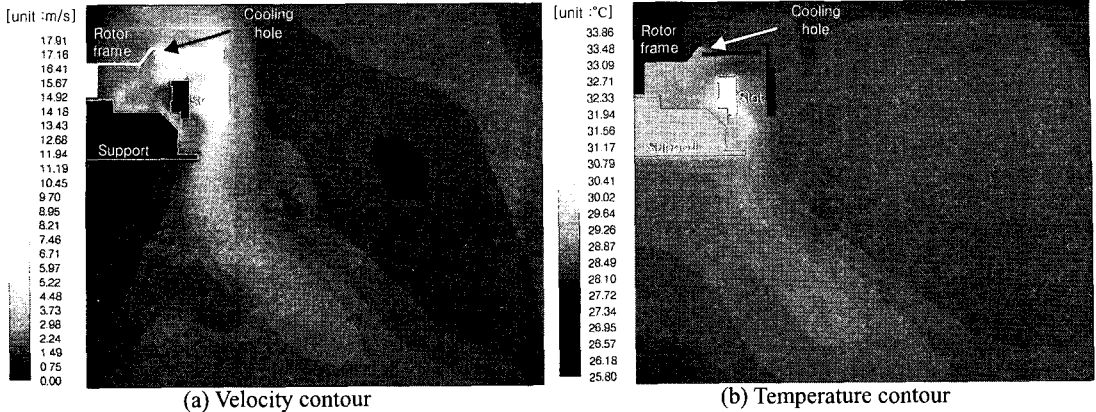


Fig. 9 Velocity and temperature contours of new model in x - z plane ($y=0$ mm)

뚜껑에 강도를 보강하기 위해 리브(rib)를 만들었는데 그로 인하여 날개는 2개가 쌍을 이룬 형태로 배열되어 있다. 리브로 인하여 불균일 배열인 기준모델과 배열을 균일하게 한 모델의 유량을 비교하여 보면 균일한 배열이 불균일한 기준모델에 비하여 1.5% 증가하였다. 그러나 그 양은 미미하므로 강도를 높이기 위한 구조물을 위해 냉각날개의 배열을 바꾸는 것은 냉각에 큰 영향을 주지 않는다.

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 대상 모터는 프레스 가공을 통하여 냉각구멍을 만들 때 동시에 그 부분을 꺾어서 냉각날개를 만들기 때문에 냉각날개가 커지면 동시에 냉각구멍도 커져서 유량 증가 효과를 감소시킨다. 기준모델의 냉각구멍 넓이에 대한 변경모델의 냉각구멍 넓이의 비를 냉각구멍 넓이 비, A_r 이라고 할 때 Fig. 6은 냉각구멍 넓이 비에 대한 공기 질량유량의 변화를 나타낸 것이다. 냉각날개와 냉각구멍의 넓이가 넓어질수록 냉각 유량은 많아지지만, 유량의 증가 폭은 넓이가 넓어질수록 감소한다. 이 수치 해석 결과에 대하여 지수 함수 형태의 근사곡선을 구하면 냉각구멍 넓이 비가 5일 때 최대값으로 수렴하지만, 회전자 프레임에서 잘라낼 수 있는 냉각구멍의 크기는 한계가 있기 때문에 냉각구멍 넓이 비에는 제한 조건이 따르며 본 대상모델의 경우는 그 비를 1.4까지 늘릴 수 있다.

3.2.3 냉각날개 각도

프레임과 냉각날개가 이루는 각도를 냉각날개 각도라고 할 때, Fig. 7(a)의 프레임에 냉각날개가 가까운 예각의 경우는 90° 인 기준모델에 비해 유량이 급격하게 감소하며, Fig. 7(b)와 같은 둔각의 경우는 기준모델에 비해 유량이 증가한다. 냉각날개 각도와 냉각구멍을 통과하는 질량유량의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 증가 효과를 보이는 둔각 구간에 대하여만 2차 회귀모형으로 분석하면 125° 부근에서 유량의 최대값을 가진다. 냉각날개 각도가 125° 인 경우, 냉각날개 각도가 직각인 기준모델이나 예각 모델들보다 유입되는 공기의 유선이 매끄럽게 이어진다. 또한 이 각도에서 날개 하부에 발생하는 음압의 분포가 다른 모델 보다 넓게 분포함을 확인할 수 있었다.

3.2.4 개선모델과 기준모델의 비교

설계인자 분석 과정을 통하여 냉각구멍 넓이 비가 1.4이고 냉각날개 각도가 125° 인 모델을 개선 모델로 도출하고, 이를 수치 해석적으로 열유동장을 분석하였다. Fig. 9에 개선모델의 $y=0$ 단면에 대한 속도 분포와 온도 분포를 보였는데, 이를 Fig. 5와 비교하여 보면 상하 유동의 강도가 더 강해졌음을 확인할 수 있다. 냉각구멍을 통과하는 공기 질량유량은 0.0398 kg/s에서 0.05170 kg/s로 30% 증가 하였다. 대류를 통한 열전달률은 70.65 W로 기준모델의 65.34 W에 비해 8.1% 향상되었다.

4. 결론

본 연구에서는 외전형 BLDC 모터의 유동장 및

온도장에 관하여 3차원 수치모사를 수행하고, 설계인자인 냉각구멍의 배열과 냉각날개와 냉각구멍의 크기, 냉각날개의 각도의 변화에 따른 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 회전자 냉각날개와 냉각구멍의 회전 효과에 의하여 회전자 안쪽으로 들어오는 유동이 발생하고, 이 유동이 고정자 코일을 냉각시킨다.

(2) 냉각구멍의 배열은 유량이나 열전달에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 냉각날개와 냉각구멍의 넓이가 넓어질수록 냉각 유량은 증가하였다. 특히 냉각날개의 각도가 예각일 때는 급격한 유량 감소를 가져왔지만, 둔각일 때는 완만한 유량 증가를 가져왔으며 그 각도가 125°일 때 유량의 최대값을 가졌다.

(3) 개선모델(냉각구멍 넓이 비 1.4, 냉각날개 각도 125°)은 기준모델에 비해 유량이 30% 증가하고, 대류 열전달률이 8.1% 상승하였다.

후 기

이 논문은 2006년 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. and 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. and 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. and Jung, W., 2003, "a Study on Improvement of an Eclectic Motor Thermal Performance Using CFD," *Proceedings of the KSME 2003 Fall Annual Meeting*, pp. 261 ~ 265.
- (6) Kenjo, T. and Nagamori, S., 2003, *Brushless Motors - Advanced Theory and Modern Applications*, Japan: Sogo Electronics Press, pp. 296~298.
- (7) Hong, S. W. and 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.
- (8) Negrea, M., Rosu, M., 2001, "Thermal Analysis of a Large Permanent Synchronous Motor For Different Permanent Rotor Configurations," *Proceedings of International Electric Machines and Drives Conference 2001. IEMDC 2001*, pp. 777~781
- (9) Patankar, Suhas V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Mcgraw-Hill, pp. 67~126.
- (10) Böhm, M., Wechsler, K., Schäfer, M., 1998, "a Parallel Moving Grid Multigrid Method for Flow Simulation in Rotor-Stator Configurations," *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Volume 42, Issue 1, pp. 175-189.