

BLDC 모터 내 열·유동 해석

김민수[†] · 이관수^{*}

Numerical investigation of thermo-flow characteristics in BLDC motor

Min-Soo Kim and Kwan-Soo Lee

Key Words : BLDC motor(BLDC 모터), Rotating flow(회전유동), Motor cooling system(모터 냉각 시스템), Motor thermal management(모터 열관리)

Abstract

A computational study of BLDC motor is presented to elucidate thermo-flow characteristics in winding and bearing with heat generation. Rotation of rotor and blades drives influx of ambient air into the rotor inlet and the inflow rates are predicted more at the front-side inlet than at the rear-side, which can be ascribed to the different pressure distribution. Recirculation zone appears in the tiny interfaces between windings, however, showing the enhanced cooling performance due to the higher velocity distribution near the rotor wall. In contrast, flow separation and incline angle of bearing groove, and relatively slower velocity distribution cause poor cooling performance and therefore the redesign of the bearing groove is significantly required.

1. 서론

모터 부하에 의한 열발생은 모터의 효율과 회전속도 및 베어링의 윤활에 큰 영향을 주어 운전 시뿐만 아니라 정지 시의 열적 노화를 유발하여 모터 성능에 큰 악영향을 주며, 합선에 의한 고장의 원인이 된다. 또한 권선부의 온도가 10°C 높아짐에 따라 모터 절연부의 수명은 약 1/2로 감소하기 때문에 모터 냉각 시스템 및 모터 내 열관리는 성능뿐만 아니라 모터 수명을 결정하는 매우 중요한 요소이다⁽¹⁾. 그러나 기존의 모터 열관리 기술은 주로 경험에 의존하고 있으며, 모터의 전자기 해석에 의한 열원 특성만을 규명하여 모터 냉각 시스템에서 가장 중요한 열 및 유체 특성에 대한 해석이 명확하게 이루어지지 않고 있다.

회전부와 고정부에 의해 모터 내 유체 유동은 회전유동문제로 해석될 수 있으며, 회전유동에 대한 기존의 문제는 압축기, 터보 장치, 펌 등의 많은 공학적 응용 문제에 적용되어 왔다. Imao et al.⁽²⁾은 회전하는 실린더에서 회전 속도에 따른 불안정성, 난류 강도의 영향에 대해 조사하였으며, Inamuro et al.⁽³⁾은 실린더와 회전하는 원판의 상대속도에 따른 유동 특성을 분석하였다. Sobolik et al.⁽⁴⁾은 내부 실린더가 회전하고 외부 실린더는 고정된 환형 실린더(concentric cylinder)에서 테일러수에 따른 유동 불안정성에 대해 연구하였으며, Hwang and Yang⁽⁵⁾은 Sobolik 과 유사한 형태의 실린더에서 축방향 유동에 의한 영향을 조사하였다. 그러나 위의 연구들은 유동 분석에만 한정되어 있고 열적 특성에 대해서는 고려하지 않았기 때문에 모터 설계 시 발열부에 의한 영향을 고려하기 힘들다. 회전 유동문제에서 유동 특성과 열적 특성을 동시에 고려한 연구들은 다음과 같다. Char and Hsu⁽⁶⁾와 Yoo⁽⁷⁾는 환형 실린더에서 자연대류에 의한 영향을 조사하였으며, Yuan et al.⁽⁸⁾은 disk cavity 에서 레이놀즈 수와

* 한양대학교 기계공학부

E-mail : ksleehy@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0426 FAX : (02)2295-9021

† 한양대학교 대학원 기계공학과

간극에 따른 영향을 비교하였다. 그러나 이들이 고려한 모델은 2 차원 모델이기 때문에 전자는 축방향 유동을, 후자는 원주 방향 유동에 따른 영향을 고려할 수 없다. Raimundo et al.⁽⁹⁻¹⁰⁾은 실린더에서 원판의 회전에 의한 영향을 3 차원 모델을 이용하여 해석하였으며 이를 실험을 통하여 검증하였다. 그러나 이들은 실린더 내에 유동 장애물이 없는 이상적인 형상을 연구했으며, 본 연구에서와 같이 권선부에 의해 유동 장애가 발생하는 모터의 경우에는 적용하기 어렵다. Nakahama et al.⁽¹¹⁾은 전기자동차(electric vehicle)에 쓰일 BLDC 모터 내 권선부 온도를 낮추기 위해 유동 해석을 하여 내부 유로와 리브(rib)의 기울기를 이용한 성능 향상방안에 대해 제시하였다. 그러나 이 연구는 유동해석에만 한정하여 열적 특성은 고려하지 않았고, 성능 향상을 위한 설계인자를 유로에만 한정하였다. 결국, 위에서 언급한 기존의 연구들은 내부에 삽입물이 없는 이상적인 원통의 회전유동 문제들이 대부분이며, 이에 따라 모터 내부의 권선부와 같은 삽입물에 의해 유동에 장애가 발생하는 경우에 적용하기는 어렵다. 또한 유체 유동뿐만 아니라 발열부에 의한 열해석이 병행되어 있는 연구도 찾아보기 힘들며, 열해석이 유동장을 이용한 상사해석에 대한 내용이다.

따라서 본 논문에서는 내부 돌출 발열부를 갖는 모터 내 회전 유동을 3 차원 해석하여 유동 장애물이 있는 회전유동과 발열부에 의한 열 특성을 분석하고, 이를 이용하여 모터의 성능을 향상시킬 수 있는 모터 냉각 시스템을 검토하고자 한다.

2. 해석대상 및 수치해석방법

2.1 해석대상

본 연구에서의 해석 대상인 모터는 Fig. 1 과 같이 크게 회전부(rotor part), 고정부(stator part) 및 베어링부(bearing part)로 구성된다. 회전부는 회전자와 영구자석으로 이루어지며 회전자는 20 개의 유동 입구(inlet)와 날개(blade)를 갖고 있어 팬 역할을 하며 회전자 내부에 영구자석이 설치되어 있다. 고정부는 철심과 철심을 감싸고 있는 절연부 및 권선부로 이루어지며 대부분의 열은 권선부의 동손에 의해 발생된다. 실제로 철손에 의한 열발생도 고려하여야 하지만 자기장 해석결과 철손에 의한 영향은 동손에 비해 매우 작기 때문에 본 연

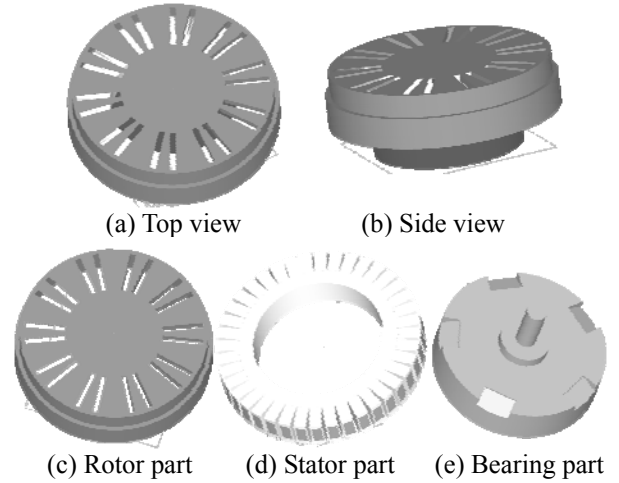


Fig. 1 Schematic diagram of the motor and each part

구에서는 이를 무시한다. 베어링부는 회전부를 구동하는 축과 볼베어링으로 구성되어 있으며 5 개의 홈(groove)이 있어 유체의 유·출입이 가능하다.

2.2 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서 해석모델 내의 유동 특성을 수치적으로 조사하기 위하여 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 3 차원 정상상태, 비압축성 난류 유동
- (2) 작동 유체는 단상이며 물성치는 일정
- (3) 자연대류와 복사 열전달은 무시
- (4) 고체의 접합부에서의 접촉 열저항은 무시

해석하고자 하는 모터 내 유동은 모터 전체 크기와 회전속도를 고려하였을 경우, 완전 발달한 난류 유동이므로 RNG k- ϵ 모델을 사용하였으며 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동량 에너지 방정식, 난류운동량 에너지 소산율 방정식 및 에너지 방정식이다.

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\epsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 G_k \frac{\epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (4)$$

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + (\tau_{ij})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

여기서

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$G_k = 2\mu_t S_{ij} S_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad \eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (8)$$

$$C_1 = 1.42, C_2 = 1.68, C_\mu = 0.0845, \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 1.393, \beta = 0.012, \eta_0 = 4.38 \quad (9)$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}, \quad k_{eff} = k_f + \frac{C_\mu \mu}{Pr}, \quad \mu_{eff} = \mu + \frac{\mu}{0.9} \quad (10)$$

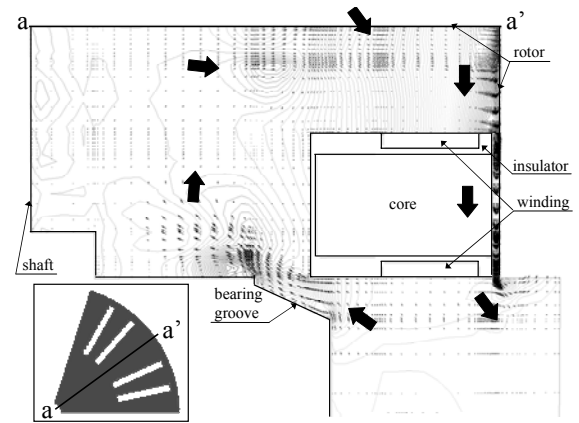
본 연구의 모터는 전체의 1/5 만을 해석하여도 전체 영역의 모사가 가능하기 때문에 격자 및 계산 시간을 고려하여 해석 영역을 고려하였다. 수치 해석 시 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 각 지배방정식의 대류항과 에너지 방정식은 그 정확도를 높이기 위해 2 계 상류도식을 이용하여 이산화하였다. 격자는 해의 정확성, 수렴성 및 계산 시간을 고려하여 총 1,282,122 개의 격자를 선택하였으며, 계산의 정확도를 높이기 위해 경계면 부근의 격자를 조밀하게 하였다. 반복 계산 시 종속 변수들의 수렴 정도는 종속 변수의 상대 오차의 최대값이 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류 방정식 및 에너지 방정식의 경우 10^{-6} 이하일 때 수렴된 것으로 판정하였다.

본 연구의 모터에서 수치 모델링의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하여 모터 내부의 온도를 측정하였다. 실험에 의한 데이터와 표준 k- ε 모델, RNG k- ε 모델, Realizable k- ε 모델과 비교하였다. 난류 모델의 비교 결과, RNG k- ε 모델의 경우에 가장 오차가 작았으며 따라서 이를 이용하여 열 및 유동 해석을 실시하였다.

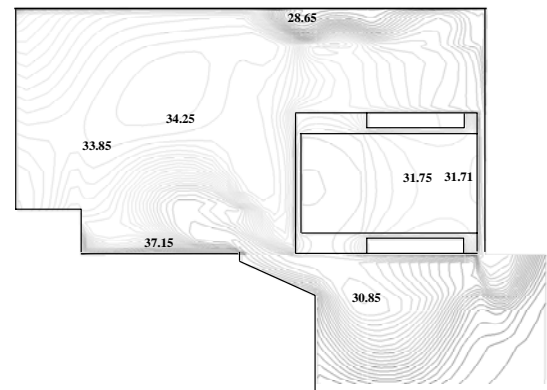
3. 결과 및 고찰

3.1 모터 내 유동 및 열분포

대부분의 연구에서 모터 내 열발생의 경우, 베어링부 온도보다 권선부의 온도에 의한 영향이 더 지배적이다⁽¹⁾라고 하고 있으며, 특히 Maru and Zotos⁽¹²⁾는 베어링의 온도조차도 마찰이나 기계적 부하의 영향보다는 권선부의 열발생이나 주변 공기 온도의 영향을 더 크게 받는다고 하였다. 그러나 본 연구의 실험결과를 살펴보면 권선부의 온도보다 베어링부의 온도가 더 높게 나타나고 있으며 이에 따라 베어링부의 열발생이 모터 성능에 더 큰 영향을 줄 것이라 판단된다. Fig. 2(a)는 $\varphi = 36^\circ$ 단면(a-a')에서의 속도 벡터와 정압 등고선을 나타내고 있다. 로터의 유입구로 들어온 유체는 로터 회전에 의한 원심력으로 인하여 로터 외곽으로 흐르게 되고 외곽벽을 따라 아래쪽으로 흘러서 권선부의 열을 냉각시키고 빠져나간다. 베어링 부의 경우, 내부 압력 감소로 인하여 베어링 홈을



(a) Pressure contour and velocity vector



(b) Temperature contour (unit: °C)

Fig. 2 Flow and temperature field in a-a' section

통해 외부 유체가 유입되며 이는 베어링에서 발생하는 열을 냉각시키고 상부로 이동한다. 로터의 빠른 회전(1200 rpm)으로 인하여 로터 주위의 유체는 빠르게 회전하게 되고 이에 따라 Fig.2(b)에 나타난 것과 같이 로터에 근접한 권선부는 쉽게 냉각되어 낮은 온도 분포를 나타낸다. 그러나 베어링부의 경우, 베어링 홈이 발열부에 근접해 있어 유입되는 유체의 온도가 로터 유입부의 유체 온도보다 더 높고 유입시 베어링의 발열 표면에서 유체가 박리되어 냉각 성능이 불량하다. 또한 축의 회전에 의한 영향이 적기 때문에 유체의 속도도 상대적으로 느리다. 이런 특성 때문에 Fig. 2(b)와 같이 베어링 부의 온도가 권선부의 온도보다 전체적으로 더 높으며 효율적인 냉각을 위해서는 베어링 홈의 재설계가 요구된다.

3.2 로터 입구 열 및 유동분석

로터 입구는 Fig. 3 과 같이 4 개(전체 20 개)로 구성되며 2 개가 한 쌍을 이루고 입구 날개(blade)는 위에서 보았을 경우 입구의 왼쪽에 위치한다. 본 연구에서는 각 쌍에서 왼쪽에 위치한 입구를 전입구(front-side inlet), 오른쪽에 위치한 입구를 후입구(rear-side inlet)라 명명하였다. 한 쌍에서 각

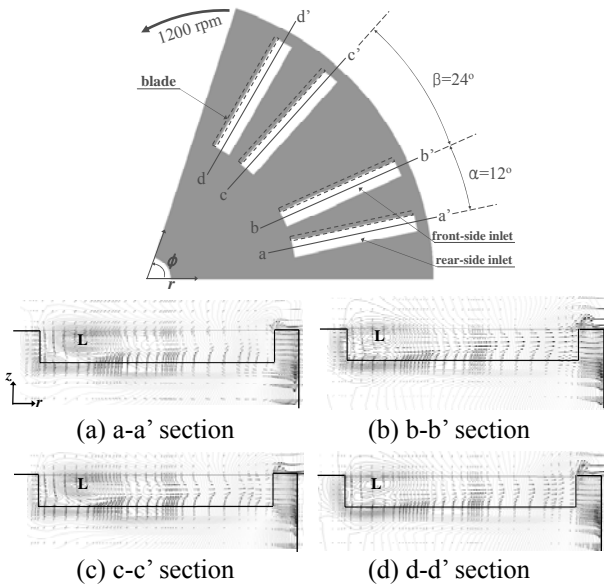


Fig. 3 Flow field around the rotor inlet

입구의 사잇각(α)은 12° 이고 다음 쌍까지의 사잇각(β)은 24° 이다. 입구 주위에서 많은 압력 변화가 있으며 특히 입구에서 반지름 방향으로 최외곽과 최내곽에서 압력 불균일이 생기고 압력 구배는 전 입구에서는 최외곽부분에서, 후입구에서는 최내곽에서 상대적으로 큰 압력 구배를 나타낸다. 이는 로터의 회전에 의한 원심력 때문에 로터 외부의 유동은 반지름 방향 외곽으로 흐르게 되어 로터 외부의 반지름 방향 최외곽에서는 상승기류가, 최내곽에서는 하강기류가 주를 이루기 때문이다. 따라서 입구에서 반지름 방향 최내곽에서는 유입하는 유동이 최외곽에서는 상대적으로 유출하는 유동이 생기며, 로터 내부에서는 이와 반대로 최외곽에 모인 유체가 endwall effect 에 의해 밑으로 향하여 권선부 쪽으로 흐르게 되고 그 일부는 입구 최외곽에서 재유출된다. Fig. 3 의 (a) ~ (d)는 각 입구의 정중앙 단면에서의 유동장을 보여주고 있는데 각 입구쌍끼리의 유동장은 매우 흡사하나 한 쌍에서의 전입구와 후입구의 유동장은 조금 다르다. 전입구와 후입구 모두 로터 내부 반지름 방향 안쪽의 낮은 압력으로 인하여(그림에서 L 로 표시된 부분) 반지름 방향 안쪽으로 대부분의 유동이 들어와 원심력에 의해 내부의 외곽으로 유동이 흐른다. 대부분의 유동이 외곽으로 집중되어 endwall effect 에 의해 로터 내부의 최외곽에서의 압력은 매우 높아지고 이에 따라 외곽 로터 벽을 따라 유동의 대부분이 아랫방향으로 흐르게 된다. 그러나 이때 로터 외부의 반지름 방향 최외곽의 압력 구배가 커져 입구에서 유체가 재유출하게 된다. 결국 후입구의 내부 반지름 방향 안쪽에서 압력

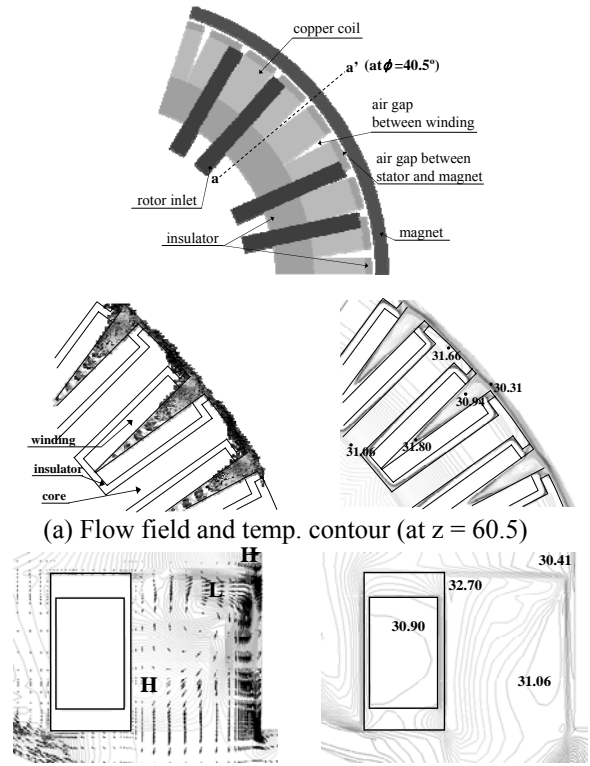


Fig. 4 Flow field and temp. contour around the winding

구배가 훨씬 더 크고 외부 반지름 방향 최외곽에서의 압력구배는 작기 때문에 전입구보다 약 3 배 정도 많은 유량이 들어온다. 즉 전입구의 경우 후입구에 비해 유입량도 적을 뿐만 아니라 유출량도 더 크기 때문에 전체유입량은 더 적다. 따라서 더 많은 유체를 내부로 유입시키고, 외부로 유출되는 유량을 줄이기 위해서는 로터 입구 위치를 반지름 방향으로 더 안쪽에 위치시킬 필요가 있다. 또한 입구에서의 유입량을 고르게 하기 위해서는 지금과 같이 입구를 쌍으로 하지 않고 각 입구의 각도를 고르게 분배해야 한다.

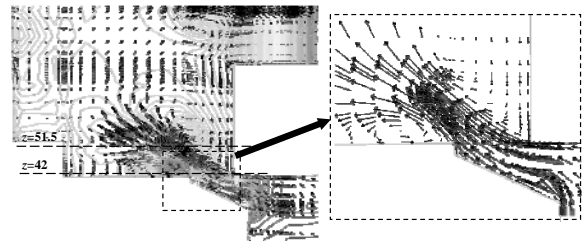
3.3 권선부 열 및 유동분석

권선부는 동손에 의해 열이 발생되고 있으며 이 열을 효율적으로 냉각시키기 위해서는 발열부에서의 유체 속도가 커야 할 뿐 아니라 발열부 표면에서 유체의 박리를 최소화해야 한다. 권선부는 Fig. 4 와 같이 구성되며 유체 유동 경로는 영구자석과 고정부사이의 유동경로, 권선부사이의 유동경로로 나눌 수 있다. Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이 영구자석과 고정부 사이에서는 영구자석의 회전으로 인하여 대부분의 유동이 영구자석을 따라 회전하며 속도도 매우 크다. 그리고 권선부사이의 유동은 영구자석을 따라 흐르는 유동이 권선부 사이의 최외곽 절연부에 충돌하여 압력이 높아지고 그 반대

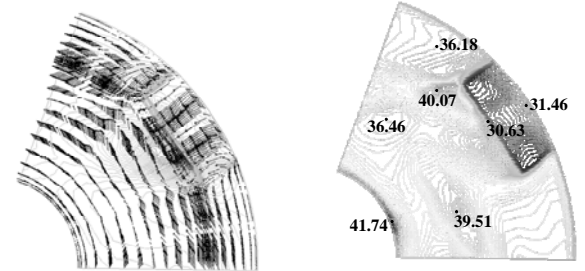
편 절연부는 압력이 낮아져 권선부 사이의 반지름 방향 최외곽에서는 유체가 뭉들게 된다. 따라서 권선부 사이의 반지름 방향으로 내부에는 유체 유동이 더 적고 권선부 발열부의 영향으로 더 높은 온도를 보인다. 이런 권선부 사이의 유동 특성은 Fig. 4(b)와 같이 권선부의 상부에서 유동을 불안정하게 하여 상부에서 시계 방향의 재순환 영역을 발생시켜 하부보다 상부의 온도를 높게 한다. 그러나 권선부 주위의 실험 측정 및 수치해석 시 온도가 높지 않은 것으로 판단할 때, 권선부 주위의 유동은 회전하는 로터 및 영구자석에 매우 근접하여 주변 유체 속도가 빠르기 때문에 유체 박리에 의한 영향이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 따라서 권선부의 경우, 권선부 사이의 재순환 영역을 제거해서 성능 향상을 얻을 수는 있으나 큰 성능 향상을 기대할 수는 없다.

3.4 베어링 주변 열 및 유동분석

베어링부도 권선부와 같이 열을 발생시키나 실제 권선부에 비해서는 매우 적은 양의 열이 발생한다. 그러나 본 연구에서의 수치 및 실험 결과, 권선부보다 베어링부의 온도가 더 높게 나타났다. 이는 Fig. 5(a)의 유동장 해석 결과처럼 베어링 홈을 통해 유입된 유체가 베어링 표면부로 흐르지 못하고 박리되기 때문이다. 유체가 유입되는 베어링 홈이 Fig. 5(a)의 오른쪽 그림과 같이 경사져 있으며 홈의 끝부분과 베어링 표면이 90°의 각을 이루기 때문에 유입 유체는 홈의 경사각을 따라 흐르고 홈의 끝부분에서 박리되어 표면부에는 유체의 흐름도 적고 국소적인 재순환 영역이 발생한다. 따라서 유입 유체는 열이 발생하는 베어링 전체 표면을 냉각시키지 못하고 홈 주변의 적은 부분만 냉각시키게 된다. 베어링부의 유체 유동은 위에서 말한 홈의 경사각을 따르는 유동과 박리뿐만 아니라 로터 회전에 의해 영향을 받는다. Fig. 5(b)를 살펴보면 로터의 회전에 의해 대부분의 유체가 회전 방향으로 편중되어 흐르는 것을 알 수 있다. 베어링 표면부($z = 42$)에서는 홈의 경사각과 박리에 의해 유량이 적어 효율적으로 냉각되지 않아 표면의 온도가 높고 국소적으로 고온지점(hot spot)이 나타났다. Fig. 5(c)는 베어링 표면에서 10 mm 위 지점($z = 51.5$)에서의 속도장 및 온도 분포를 보여주는데 홈을 통해 들어온 유체가 회전에 의해 편중됨을 잘 나타낸다. 특히 홈 주위의 온도가 유체 유입온도와 거의 같은 온도를 보이는데 이는 유체가 홈 경사각의 영향을 크게 받음을 나타낸다. 결국, 베어링부에서 냉각효율을 높이기 위해서는 첫 번째, 유입 유체의 베어링 표면에서의 박리를 없애고,



(a) Pressure contour and velocity vector (at $\phi = 36^\circ$)



(b) Flow field and temperature contour (at $z = 42$)



(c) Flow field and temperature contour (at $z = 51.5$)

Fig. 5 Pressure contour and temp. contour around the bearing part

두 번째 홈경사각을 재조정하여 유체의 흐름을 베어링 표면으로 유도하고, 세 번째 로터 회전에 의한 영향을 이용해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 BLDC 모터의 내부 유동 및 열분포에 대해 분석하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 로터입구에서의 전입구와 후입구의 다른 압력 분포로 인하여 후입구가 전입구보다 유입량이 더 많다.
- (2) 반지름 방향 안쪽에는 하강기류가 외곽에는 상승기류가 생기기 때문에 유입량을 늘리기 위해서는 로터 입구 위치를 반지름 방향 내부로 이동시켜야 한다.
- (3) 권선부 사이에서는 국소적인 재순환 영역이 나타난다. 그러나 권선부에서 대부분의 유동은 로터를 따라 회전하며 유속도 매우 빠르기 때문에 냉각효율이 우수하다.
- (4) 베어링 홈에서 유입되는 유체는 박리, 홈경사각에 의한 효과, 권선부에 비해 상대적으로 느린

속도에 의해 베어링부에서 가장 높은 온도분포를 보인다.

(5) 베어링부의 냉각성능을 높이기 위해서는 유체 박리와 홈경사각 효과 제거 및 회전효과 이용 등을 통한 베어링 홈의 재설계가 요구된다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적 설계기술연구센터(iDOT)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Austin H. Bonnett, 2001, "Operating temperature considerations and performance characteristics for IEEE 841 motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 4, pp. 1120-1131
- (2) Shigeki Imao, Motoyuki Itoh, and Takeyoshi Harada, 1996, "Turbulent characteristics of the flow in an axially rotating pipe", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 17, No. 5, pp. 444-451
- (3) Takaji Inamuro, Akimasa Yamaguchi, and Fumimaru Ogino, 1997, "Fluid flow in a rotating cylindrical container with a rotating disk at the fluid surface", Fluid Dynamics Research, Vol. 21, No. 6, pp. 417-430
- (4) V. Sobolik, B. Izrar, F. Lusseyran, and S. Skali, 2000, "Interaction between the Ekman layer and the Couette-Taylor instability", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 24, pp. 4381-4393
- (5) Jong-Yeon Hwang, and Kyung-Soo Yang, 2004, "Numerical study of Taylor-Couette flow with an axial flow", Computers & Fluids, Vol. 33, No. 1, pp. 97-118
- (6) Ming-I Char, and Yuan-Hsiung Hsu, 1998, "Numerical prediction of turbulent mixed convection in a concentric horizontal rotating annulus with low-Re two-equation models", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 12, pp. 1633-1643
- (7) Joo-Sik Yoo, 1998, "Mixed convection of air between two horizontal concentric cylinders with a cooled rotating outer cylinder", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, No. 2, pp. 293-302
- (8) Z. X. Yuan, N. Saniei, X. T. Yan, 2003, "Turbulent heat transfer on the stationary disk in a rotor-stator system", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 12, pp. 2207-2218
- (9) A. M. Raimundo, L. A. Oliveira, and A. R. Figueiredo, 2002, "Numerical simulation and experimental validation of heat transfer within rotating flows for three-dimensional non-axisymmetric, turbulent conditions", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 40, No. 6, pp. 821-840
- (10) A. M. Raimundo, L. A. R. Figueiredo, and A. Oliveira, 2002, "Heat transfer measurements in a rotor-stator system with three-dimensional non-axisymmetric flow conditions", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, No. 1, pp. 47-58
- (11) Takafumi Nakahama, Katsumi Suzuki, Shozo Hashidume, Fuminori Ishibashi, and Masami Hirata, 2006, "Cooling airflow in unidirectional ventilated open-type motor for electric vehicles", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 645-651
- (12) B. Maru and P. A. Zotos, 1989, "Anti-friction bearing temperature rise for NEMA frame motors", IEEE Transaction on Industry Applizations, Vol. 25, No. 5, pp. 883-888