

## 수치해석에 의한 고속팬용 밀폐구조형 BLDC모터의 열신뢰성 분석

문 선 애, 이 재 현<sup>\*†</sup>

한양대학교 대학원 기계공학과, <sup>\*</sup>한양대학교 공과대학 기계공학부

### Thermal Reliability Analysis of BLDC Motor in a High Speed Axial Fan by Numerical Method

Sun-Ae Moon, Jae-Heon Lee<sup>\*†</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea*

*<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea*

(Received September 2, 2009; revision received December 29, 2009)

**ABSTRACT:** The thermal reliability of the closed-type BLDC motor for the high speed axial fans is analyzed by a numerical method in this paper. Since the module and the motor part are combined in a closed case, the heat generated from a rotor in the motor and the electronic components in the PCB module can not be effectively removed to the outside. Therefore the module will easily fail by high temperature. The accelerated-life testing was accomplished to formulate the life equation and numerical method is used to predict the inside temperature of the PCB module, which is one of the life equation parameter according to the environment. When the environment temperature of BLDC motor is 21, 35 and 50 °C, the temperature in the PCB space is predicted as 73.4, 87.5 and 102.4 °C. Then the life time with the temperature are calculated as 2,239, 863 and 328 hours.

**Key words:** BLDC motor(Brushless DC motor), Thermal reliability(열신뢰성), Axial fan(축류팬), Accelerated-life testing(가속수명시험)

#### 기 호 설 명

$G$  : PCB 내부 공간 체적 [ $m^3$ ]  
 $L$  : 특성수명 [h]  
 $T$  : 온도 [K]  
 $n$  : 회전수 [rpm]  
 $\dot{q}$  : 열유속 [ $W/m^2$ ]  
 $\vec{r}$  : 위치벡터 [m]  
 $\vec{U}$  : 회전에 따른 절대속도벡터 [m/s]  
 $\vec{V}$  : 절대속도벡터 [m/s]

$\vec{W}$  : 상대속도벡터 [m/s]  
 $u, v, w$  :  $x, y, z$  방향 속도 [m/s]

#### 그 리 스 문 자

$k$  : 난류운동에너지 [ $m^2/s^2$ ]  
 $\epsilon$  : 난류운동에너지 소산율 [ $m^2/s^3$ ]  
 $\Omega$  : 각속도 [rad/s]  
 $\vec{\omega}$  : 각 가속도 벡터 [m/s]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/s]  
 $\mu$  : 층류점성계수 [kg/(m · s)]  
 $\mu_t$  : 난류점성계수 [kg/(m · s)]  
 $\mu_{eff}$  : 유효점성계수 [kg/(m · s)]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0425 ; Fax.: +82-2-2220-4425

E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

$C_\mu, C_e, \sigma_l$  : 난류상수

$\alpha_k, \alpha_\epsilon$  : 유효 Prandtl수의 역수

하첨자

$i_n$  : PCB 공간

$\infty$  : 흡입공기

1. 서 론

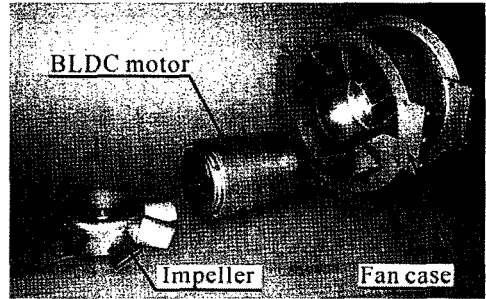
축류팬은 환기, 배기 및 통풍 등의 목적으로 사용되는 유체기계로서 가전제품, 자동차 엔진 등에 쓰이는 소형 팬으로부터 공장, 터널, 지하철 등의 환기에 쓰이는 대형 송풍기에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 호텔로비, 대규모 실내 체육관 및 박물관 등과 같은 대공간의 온도성층화 방지 및 환기성능 개선 등을 목적으로 널리 적용되고 있다.

최근에는 브러시가 없는 BLDC(Brushless DC) 모터를 채용한 가변풍량형 축류팬이 개발되고 있다. BLDC 모터는 진동 및 소음이 작아 호텔이나 박물관 등의 조용한 환경을 요하는 축류팬에 적합하며 일반적으로 신뢰성이 높다. 또한 일정속도 및 속도제어가 용이하기 때문에 에너지 절감의 효과도 얻을 수 있다.

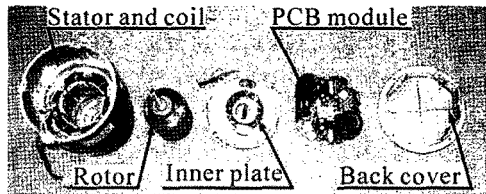
BLDC 모터는 일반적으로 모터부와 PCB 모듈부가 밀폐구조 일체형으로 되어있다. 따라서 BLDC 모터 운전 시 모터내부에서 발생된 열이 원활하게 배출되지 못하여 고온열에 의해 PCB 전자부품이 고장날 수 있다.<sup>(1)</sup>

짧은 시간 동안 제품의 고장 메커니즘을 분석하고, 이를 설계에 반영하여 제품의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 가속수명시험이 수행되어야 한다. 가속수명시험을 통해 도출한 수명식으로 해당제품의 열신포성을 분석하기 위해서는 전자부품이 작동되는 PCB 공간온도에 대한 검토가 이루어져야 한다. 그러나 대부분의 전자제품 PCB 공간온도를 측정하기가 용이하지 않다. 특히 본 연구모델인 BLDC 모터의 경우 실험적으로 측정하기가 곤란하며, 주위 환경에 따라 PCB 공간온도 또한 변화되기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

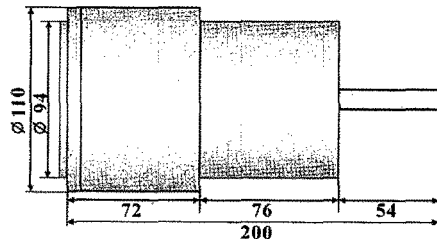
본 연구에서는 수치적인 방법을 이용하여 BLDC 모터가 축류팬에 설치되어 운전될 때 주위온도에 따른 PCB 공간온도를 예측하였다. 또한 흡입공기온도와 PCB 공간온도와의 상관관계를 도출하고 이를 통해 가속수명시험을 통해 도출한 PCB 공간온도에 따른 수명식을 흡입공기온도에 따른 수명식으로 치환하여 수명을 분석하였다.



(a) Axial fan parts



(b) BLDC motor parts



(c) Dimensions of BLDC motor

Fig. 1 Schematics of axial fan and BLDC motor [unit : mm].

2. 연구 모델

본 연구에서 연구모델로 채택된 BLDC 모터를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에서 보듯이 축류팬(axial fan)은 팬케이스(fan case), BLDC 모터, 임펠러(impeller)로 구성되며, 본 연구의 연구모델인 BLDC 모터는 Fig. 1(b)에서 보듯이 스테이터(stator), 코일(coil), 로터(rotor), 인너 플레이트(inner plate), PCB 모듈 및 백커버(back cover)의 일체형 밀폐구조로 구성되어 있었다. BLDC 모터는 Fig. 1(c)에 나타난것과 같이 길이 200 mm, 직경 110 mm의 치수를 가진다. 정격 회전수는 5,000 rpm, 가변 회전수는 2,000~5,000 rpm의 범위를 갖고 있다.

3. PCB 공간온도에 따른 BLDC 모터의 수명식

기존 연구결과에 의하면 본 연구에서 고려된 BLDC 모터의 경우 가속수명시험을 통하여 구한 고장데이터 및 아레니우스 수명-스트레스 관계식을 이용하여 PCB 공간온도에 따른 BLDC 모터의 수명식을 도출하였으며 수명식은 다음과 같다.<sup>(2)</sup>

$$\ln L = -17.44 + \frac{0.751}{8.62 \times 10^{-5} \times (273 + T_{in})} \quad (1)$$

여기서,  $T_{in}[^{\circ}\text{C}]$ 은 열진피성 분석의 대상이 되는 PCB 공간온도를 나타낸다. 따라서 BLDC 모터의 수명식은 PCB 공간온도의 함수로 표현된다.

4. PCB 공간온도 예측을 위한 열 및 유동 수치해석

4.1 지배방정식

일반적으로 회전기계에 의한 유동을 해석하는 경우 유동장을 정상상태로 고려할 수 있고, 경계조건을 결정하기가 쉽다는 장점 때문에 대부분 상대좌표계를 사용하여 해석한다.<sup>(3)</sup> 본 연구에서는 축류팬 유동을 3차원 비압축성 정상유동으로 간주하고 절대좌표계와 상대좌표계를 사용하였다.

수치해석을 위해 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식 및 에너지방정식을 사용하였으며 고정부(stationary zone)는 절대좌표계(stationary reference frame)의 절대속도에 의한 지배방정식이 사용되었고 회전부(roating zone)는 상대좌표계(rotating reference frame)의 상대속도에 의한 지배방정식이 사용되었다. 절대속도 및 상대속도에 의한 지배방정식은 Table 1와 Table 2에 각각 나타내었다. 지배방정식의 자세한 유도과정은 참고문헌에서 볼 수 있다.<sup>(2,3)</sup> 난류모델로는 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 각 식에서의 기호선정은 일반적인 교과서에서의 예를 따랐다.<sup>(4)</sup> 회전에 의한 원심력과 Coriolis 힘은 운동량방정식의 생성항  $\vec{B}$ 의 형태로 나타나게 된다.

회전을 고려하기 위한 상대속도 개념을 Fig. 2에 도시하였다. 여기서  $\vec{W}$ ,  $\vec{V}$  및  $\vec{U}$ 는 각각 상대속도벡터, 절대속도벡터 및 회전에 따른 절대속도벡터를 의미하며 이때  $\vec{U}$ 는 각속도  $\vec{\omega}$ 와 위치벡터

Table 1 Governing equations and coefficients with respect to stationary reference frame

---

Continuity equation ;

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

X-momentum equation ;

$$\text{div}(\rho v_x \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} v_x)$$

Y-momentum equation ;

$$\text{div}(\rho v_y \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v_y)$$

Z-momentum equation ;

$$\text{div}(\rho v_z \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} v_z)$$

Turbulent kinetic energy equation ;

$$\text{div}(\rho k \vec{V}) = \text{div}(\alpha_k \mu_{eff} \text{grad} k) + G_k - \rho \epsilon$$

Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy ;

$$\text{div}(\rho \epsilon \vec{V}) = \text{div}(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \text{grad} \epsilon) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Energy Equation ;

$$\text{div}(\rho \vec{V} T) = \text{div} \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma_1} + \frac{\mu_t}{\sigma_1} \right) \text{grad} T \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

where,

$$\vec{V} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$C_\mu = 0.845, C_{1\epsilon} = 1.42, C_{2\epsilon} = 1.68$$

$$\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.393$$


---

$\vec{r}$ 의 곱으로 나타내며 상대속도벡터  $\vec{W}$ 는 식(2)과 같이 표현된다.<sup>(3)</sup>

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} = \vec{V} - (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (2)$$

4.2 해석영역 및 경계조건

고속 축류팬에 설치된 BLDC 모터 주위의 유동

Table 2 Governing equations and coefficients with respect to rotating reference frame

Continuity equation ;

$$\text{div}(\rho \vec{W}) = 0$$

X-momentum equation ;

$$\text{div}(\rho w_x \vec{W}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } w_x) + B_x$$

Y-momentum equation ;

$$\text{div}(\rho w_y \vec{W}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } w_y) + B_y$$

Z-momentum equation ;

$$\text{div}(\rho w_z \vec{W}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w_z) + B_z$$

Turbulent kinetic energy equation ;

$$\text{div}(\rho k \vec{W}) = \text{div}(\alpha_k \mu_{eff} \text{grad } k) + G_k - \rho \epsilon$$

Dissipation rate equation of turbulent kinetic energy ;

$$\text{div}(\rho \epsilon \vec{W}) = \text{div}(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \text{grad } \epsilon) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Energy equation ;

$$\text{div}(\rho \vec{W} T) = \text{div} \left[ \left( \frac{\mu}{\sigma_t} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \text{grad } T \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

where,

$$\vec{W} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$$

$$\vec{B} = B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k} = -\rho(2\vec{\omega} \times \vec{W} + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r})$$

$$\vec{\omega} = (0, 0, \Omega) \quad \vec{r} = (x, y, z)$$

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad n = 5000 [rpm]$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$C_\mu = 0.845, \quad C_{1\epsilon} = 1.42, \quad C_{2\epsilon} = 1.68$$

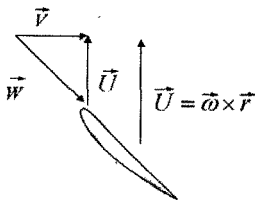
$$\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.393$$


Fig. 2 Schematic diagrams for concept of relative velocity formulation.

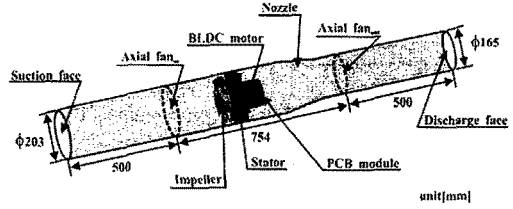


Fig. 3 Schematics of the solution domain in the present study.

Table 3 Boundary conditions of the model adopted in the present study

Location	Condition
suction face	$T_{in} = 21, 35, 50 \text{ } ^\circ\text{C}$
discharge face	outflow
Impeller surface	$\vec{W} = k = e = 0$
Wall	$\vec{V} = k = e = 0$

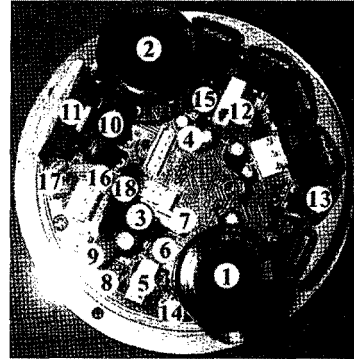


Fig. 4 Locations for measuring heat flux.

및 내부 온도를 예측하기 위한 해석 영역을 Fig. 3에 나타내었다. 해석영역을 살펴보면 경계조건 설정의 타당성 및 해석결과의 정확성을 보장하기 위하여 실제 축류팬의 입구 및 출구를 연장하였다. 임펠러 회전에 의해 기류가 흡입면(suction face)을 통해 유입되며 임펠러 및 고정익(stator)에서 압력이 상승되고 기류의 직진성이 보장되어 토출면(discharge face)을 통해 유출된다. 이때 고정익을 지난 기류는 BLDC 모터 케이스 주위를 흘러 모터 내부에서 발생하는 열을 냉각시키는 역할을 하게 된다. 상대좌표계가 적용되는 회전부는 임펠러가 있는 부분이며 나머지 부분에는 절대좌표계가

Table 4 Heat flux data of the electronic components

No.	Electronic components	$q''$ [ $W/m^2$ ]	No.	Electronic components	$q''$ [ $W/m^2$ ]
1	large capacitor	195	10	coil	390
2	large capacitor	195	11	diode	301
3	middle capacitor	480	12	cement resistance	422
4	small capacitor	330	13	transistor	230
5	power transformer	275	14	resistance	137
6	IC chip	368	15	film capacitor	360
7	voltage regulator	380	16	TVR varistor	453
8	small IC chip	270	17	ceramic capacitor	269
9	inductor coil	293	18	NTC thermistor	850

적용된다.

수치해석 적용시 지배방정식과 함께 정의되는 경계조건은 해석영역 입구 및 출구, 내부벽면 및 임펠러 표면에 경계조건을 부여하였으며 이를 Table 3에 나타내었다. 입구에는 유입공기의 온도조건을 적용하였고, 출구는 유출경계조건(outflow)을 적용하였다. 고정영역의 내부벽면, 임펠러 커버, 고정익 표면 그리고 모터표면에는 절대속도  $\vec{V}=0$ 인 벽면 경계조건(wall boundary condition)을 적용하였고 임펠러 표면에는 상대속도  $\vec{W}=0$ 인 벽면경계조건을 적용하였다.

Fig. 4에 나타낸 각 전자부품에서의 열유속 측정 결과를 Table 4에 나타내었다. 열유속 측정에 사용된 열유속계는 측정범위, 민감도 및 정확도가 각각  $0\sim 2,000 W/m^2$ ,  $1 W$  및  $\pm 1\%$ 이며 미국 LINEAR LABORATORIES사에서 제작되었다. PCB 전자부품에서 발생하는 내부 발열 조건은 Table 4를 이용하여 각 위치에 발열 조건으로 부여하였다.

본 연구에서는 수치해석을 위하여 상용 프로그램인 Fluent 6.3을 사용하였으며 이때 사용된 격자계는 비정렬격자계로 사용된 제어체적의 수는 약 170만개이다. 수렴조건은 반복계산시 각 종속변수에

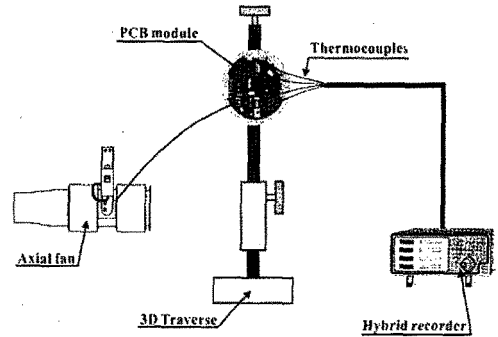


Fig. 5 Experimental setup for measuring the surface temperature.

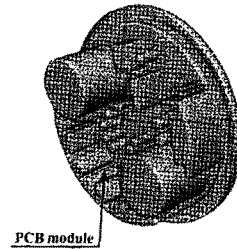


Fig. 6 Grids of the PCB module.

대하여 잉여값(residual)이  $1.0 \times 10^{-3}$ 이하일 때 수렴하였다고 판정하였으며, 약 8,500회의 반복계산으로 수렴된 결과를 얻을 수 있었다.

## 5. 수치해석의 타당성 평가

### 5.1 온도해석 타당성

PCB 전자부품의 표면온도분포를 측정하기 위한 실험 장치를 Fig. 5와 같이 축류팬(axial fan), BLDC 모터, 하이브리드 레코더(hybrid recorder) 및 열전대(thermocouple)로 구성하였다. 열전대를 PCB 전자부품 표면에 부착하여 모터를 운전시킨 후에 하이브리드 레코더를 이용하여 표면온도를 측정하였다. 또한 수치해석은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 PCB만을 해석영역으로 설정하여 실험과 동일한 조건에서 수치해석을 수행하였다. 각 전자부품의 벽면에서는 점착조건을 적용하였다. PCB 전자부품에서 발생하는 내부 발열 조건은 Table 5에 나타낸 바와 같이 유속 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 각각 내부 발열 조건으로 부여하였다. 또한 각 전자부품의 열전도계수를 내부 구성 물

Table 5 Heat generation conditions of the electronic components

Electronic components	$q'''$ [W/m <sup>3</sup> ]	Electronic components	$q'''$ [W/m <sup>3</sup> ]
large capacitor	143,150	diode	3,200,250
middle capacitor	670,830	cement resistance	770,110
small capacitor	760,540	transistor	4,150,100
power transformer	380,400	resistance	1,380,350
IC chip	805,100	film capacitor	75,000
voltage regulator	1,220,100	TVR varistor	415,300
small IC chip	1,300,500	ceramic capacitor	485,400
inductor coil	1,050,100	NTC thermistor	1,650,200
coil	470,300		

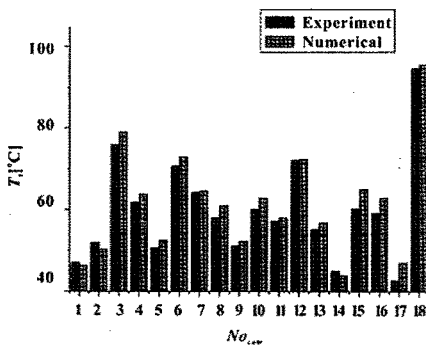


Fig. 7 Comparison of the temperature of the electronic components by experimental and numerical methods.

질 및 두께를 고려하여 총괄 열전도 계수로 계산하여 적용하였다. 이때 실내 조건은 온도, 상대습도 그리고 기류속도가 각각 24.5 °C, 40% 그리고 0~0.01 m/s이었으며 정상상태 도달 후 1분 간격으로 10회씩 측정하여 평균하였다.

실험 및 수치해석을 통해 도출된 각 전자부품 위치별 표면온도 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 그래프 가로축의 값은 Fig. 4에 나타낸 것과 동일한 측정위치를 뜻한다. 수치해석 결과가 실험결과

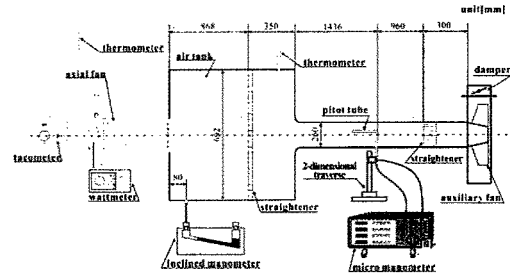


Fig. 8 Experimental setup for measuring the discharge air flow of the axial fan with rotational speed.

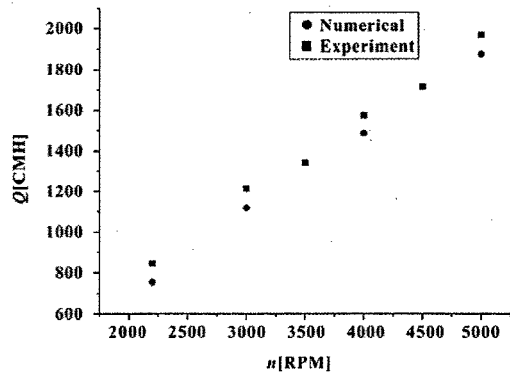


Fig. 9 Discharge air flow rate with rotational speed by experimental and numerical results.

에 비해 전반적으로 1~2 °C 정도 높게 예측되는 것으로 나타났으나 수치해석 결과와 실험 결과의 오차는 최대 10% 이내에서 비교적 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있어 본 연구의 온도예측은 타당하다고 판단된다.

### 5.2 유량해석 타당성

본 연구에서 고려된 축류팬의 회전수별 토출풍량을 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 8에 나타내었다. 본 실험장치는 KS규격(KS B 6311)에 의거하여 피 시험팬의 입구 정압과 출구 정압을 모두 동일한 상태로 유지시킬 수 있는 등압형 실험장치를 사용하였다.<sup>(5)</sup>

BLDC 모터의 회전수에 따른 토출풍량을 실험 및 수치적으로 도출하여 각각의 값을 Fig. 9에 나타내었다. 토출유량 측정은 2,200, 3,000, 3,500, 4,000, 4,500 및 5,000 rpm의 6가지 경우의 회전수

에서 측정하였으며 수치해석은 2,200, 3,000, 4,000 및 5,000 rpm의 4가지 경우의 회전수에서 수행되었다. 그림에서 보듯이 회전수가 증가함에 따라 토출 유량은 비교적 선형하게 증가하고 있으며 800~2,000 CMH의 유량 분포를 보이고 있다. 전반적으로 수치해석에 의한 결과가 실험에 의한 결과보다 다소 낮게 예측되고 있는데 이는 실험 오차, 수치해석 오차 및 임펠러 형상 차이에서 오는 오차로 기인되고 있다고 판단된다. 그러나 실험과 수치해석의 오차는 최대 8% 이내이며 정성적인 경향이 거의 일치하고 정량적인 값도 매우 유사함을 알 수 있기 때문에 본 연구의 유량 예측은 타당하다고 판단된다.

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1. 주위 온도에 따른 PCB 공간온도

본 연구에서는 고려된 주위환경은 크게 3가지 경우를 고려하였다. 기존 연구 결과에 의하면 일반적으로 지하주차장의 실내온도는 21 °C, 대공간 천장 영역의 온도는 35 °C 그리고 제조 공장 천장 영역의 온도는 50 °C로 검토된 바 있기 때문에 이에 근거하여 BLDC 모터 PCB 내부 온도를 예측하였다.

먼저 주위온도가 21 °C인 경우 PCB에 부착된 전자부품의 표면온도를 Fig. 10에 나타내었다. 전자부품의 표면온도는 약 50~110 °C 정도로 예측되며 캐패시터, 써미스터, 시멘트 레지스터와 필름 캐패시터의 표면온도가 다른 전자부품에 비해

다소 높은 것을 알 수 있다. 이 전자부품들은 열전도계수가 다른 전자부품에 비해 상대적으로 낮기 때문에 열이 원활하게 전달되지 못하여 온도가 증가된 것으로 판단된다. 또한 증력방향 하부에서 상부로 갈수록 표면온도가 높아지는 경향을 나타내는데 이는 PCB 내부는 밀폐된 공간이기 때문에 자연 대류 열전달의 특성이 강하여 부력 효과에 의해 고온 공기가 상부로 이동되기 때문이다. 따라서 같은 캐패시터라 하더라도 상부 캐패시터의 표면온도가 하부에 비해 다소 높음을 알 수 있다. 또한 트랜지스터와 다이오드에는 방열판이 부착되어 있고 방열판은 외부의 BLDC 모터 케이스와 접촉되어 있으며 방열판 재질과 모터 케이스 재질은 열전도계수가 높은 알루미늄으로 구성되어 있다. 따라서 트랜지스터와 다이오드에서 발생된 열은 외부로부터 흡입된 공기에 의해 냉각되어 원활하게 제거되고 있음을 알 수 있다. PCB 공간온도  $T_{in}$ 은 식(3)에 나타낸 바와 같이 PCB 내부 공기의 체적평균온도로 정의된다. 체적평균온도는 본 연구에서 PCB 내부 공기온도를 대표할 수 있는 온도를 도출하고자 정의한 온도이다. 본 연구모델은 일반적으로 축류팬에 설치되어 운전되는데 임펠러 회전에 의해 유입되는 공기는 축류팬이 설치된 주변환경에서의 온도이다. 그러나 수명식에 적용되는 작동온도는 PCB 모듈이 동작되는 PCB 내부의 온도이다. PCB는 모터 내부에 설치되어 있고 모터는 밀폐되어 있으므로 내부 발열에 의해 PCB 내부의 온도는 항상 유입온도보다 같거나 높은 상황에 놓이게 된다. 한편 PCB 내부온도는 대부분 공간 천장에 설치되어 있기 때문에 실험을 통해 측정하기가 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 BLDC 모터의 작동온도, 즉 PCB 내부 공기의 온도를 예측하기 위해 수치적인 방법을 적용하였다. 수치해석 결과 PCB 내부 공기의 온도가 각 위치에서 다양하게 예측되어 대표성을 부여할 수 있는 온도가 요구되었고 이에 체적평균온도를 정의하였다.

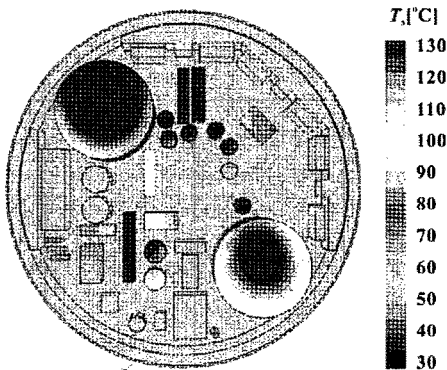


Fig. 10 Distributions of the surface temperature of the PCB module with the  $T_{\infty}$  of 21 °C.

$$T_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i T_i}{G} \quad (3)$$

여기서  $T_{in}$ 은 PCB가 존재하는 공간의 내부공기 온도를 나타내고  $G$ 는 PCB 내부공기 체적을 나타내며  $G_i$  및  $T_i$ 는 각각 내부공기의 각 격자영역에

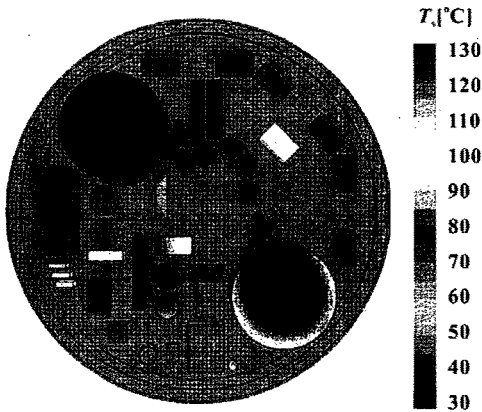


Fig. 11 Distributions of the surface temperature of the PCB module with the  $T_{\infty}$  of 35 °C.

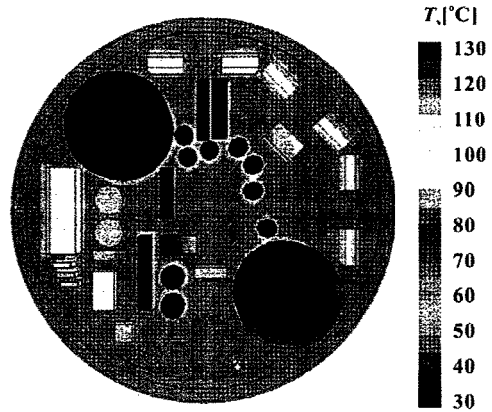


Fig. 12 Distributions of the surface temperature of the PCB module with the  $T_{\infty}$  of 50 °C.

서의 체적 및 온도를 나타낸다. BLDC 모터 주위 공기온도가 21 °C일 때, PCB 공간온도( $T_m$ )를 계산한 결과 약 73.4 °C로 예측되었다.

또한 BLDC 흡입공기 온도가 35 °C일 경우 PCB 전자부품의 표면온도를 Fig. 11에 나타내었다. 전자부품의 표면온도는 약 80~120 °C 정도로 예측되며 마찬가지로 캐패시터, 써미스터, 시멘트 레지스터와 필름 캐패시터의 온도가 다른 전자부품에 비해 높은 것을 알 수 있다. BLDC 모터 주위 공기온도가 35 °C일 때, PCB 공간온도를 계산한 결과 약 87.54 °C로 예측되었다.

마지막으로 BLDC 모터 주위의 공기 온도가 50 °C인 경우 이때 PCB 전자부품의 표면온도를 예측하여 Fig. 12에 나타내었다. 전자부품의 표면온도는 약 90~130 °C 정도로 예측되며 캐패시터, 써미스터, 시멘트 레지스터와 필름 캐패시터의 온도가 다른 전자부품에 비해 높은 것을 알 수 있다. BLDC 모터 주위공기온도가 50 °C일 때, PCB 내부공기의 평균 온도를 계산한 결과 약 102.4 °C로 예측되었다.

BLDC 모터로 유입되는 주위공기의 온도에 따른 PCB의 공간온도는 주위온도가 21 °C의 경우 73 °C로 증가하며 이후 주위온도가 35 °C 및 50 °C로 증가함에 따라 PCB 공간온도 또한 각각 87.5 °C 및 102.4 °C로 증가되는 경향을 보이고 있다. 여기서 흡입공기온도 상승에 따라 PCB 공간온도 상승이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있는데 이를 선형화된 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_m = T_{\infty} + 52.44 \quad (4)$$

## 6.2 흡입공기온도에 따른 BLDC 모터의 열신뢰성 분석

BLDC 모터의 설치 환경에 따른 PCB 공간온도를 예측하였으며 흡입공기온도와 PCB 공간온도와의 상관관계를 식(4)과 같이 도출하였다. 따라서 가속 수명시험을 통해 도출된 PCB 공간온도에 따른 수명식 식(1)에 식(4)를 대입하면 다음과 같이 BLDC 흡입공기온도에 따른 수명식으로 치환할 수 있다.

$$\ln L = -17.44 + \frac{0.751}{8.62 \times 10^{-5} \times (325.4 + T_{\infty})} \quad (5)$$

즉 식(5)의 수명식을 사용하면 PCB 공간온도를 예측하지 않고도 본 연구모델 BLDC 모터의 수명을 도출할 수 있다. 최종적으로 식(5)를 이용하여 앞에서 고려된 주위환경에 따른 BLDC 모터의 열신뢰성을 분석하였다. 주위온도는 21 °C인 경우 PCB 공간온도는 73.4 °C로 예측되며 수명은 2,239 h로 계산되었다. 또한 주위온도는 35 °C인 경우 PCB 공간온도는 87.5 °C로 예측되며 수명은 863 h로 계산되었다. 마지막으로 흡입공기온도가 50 °C인 경우 PCB 공간온도는 102.4 °C로 예측되었으며 수명은 328 h로 계산되었다. 흡입공기온도가 증가함에 따라 BLDC 모터의 수명이 감소되는 경향을 보이고 있다. 이는 흡입공기온도 증가에 따른 PCB 내부 온도 또한 선형하게 증가하여 열적으로 굉장히 열악한 상황에서 운전되기 때문에 열화가 촉진되어 고장이 발생된 것으로 판단된다.



## 7. 결 론

본 연구에서는 수치적인 방법을 이용하여 PCB 공간온도를 예측하였으며 PCB 공간온도에 따른 수명식을 흡입공기온도에 따른 수명식으로 치환하여 수명을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 흡입공기온도가 21 °C, 35 °C 및 50 °C일 때 PCB 공간온도는 각각 73.4 °C, 87.5 °C 및 102.4 °C로 예측되었다.

(2) 흡입공기온도와 PCB 공간온도의 상관관계를 통해 흡입공기온도에 따른 수명식은  $\ln L = -17.44 + \frac{0.751}{8.62 \times 10^{-5} \times (325.4 + T_{\infty})}$  로 도출되었다.

(3) 흡입공기온도가 21 °C, 35 °C 및 50 °C일 때 도출된 수명은 각각 2,239, 863 및 328 h로 산정되었다. 특히 예상수명이 328 h로 산정된 경우는 흡입공기온도가 50 °C일 때, 즉 PCB 공간온도가 102.4 °C인 경우로서 여름철 열성증화 현상에 의해 찬장온도가 50 °C 이상 높아진 제조공장 특히 제철공장 또는 소결공장에 설치된 경우이다. 현재 연구단계에서는 전술한 장소에 설치된 제품이 실제 단기간에 고장이 발생하여 그 원인을 분석하고자 하였으

며 향후 연구단계에서는 수명을 연장할 수 있는 개선방안을 도출하고 도출된 여러 가지 개선방안에 따른 예상수명을 예측하는 연구가 진행될 계획이다.

## 참고문헌

1. Ali, J., 2003, Practical Guide to the Packaging of Electronics : Thermal and Mechanical Design and Analysis, Marcel Dekker, INC.
2. Lee, T. G., 2005, Thermal reliability analysis of BLDC motor in high speed axial fan by the accelerated life test, Journal of the SAREK, Vol. 17, No. 12, pp. 1169-1176.
3. Ryu, I. K., 2003, Airflow characteristics with impeller design and noise characteristics with arrangement of silencer in an axial turbo fan, MS thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.
4. Vavra, M. H., 1974, Aero-thermodynamics and flow in turbomachines, Robert E. Krieger Publishing Company, New York, pp. 107-119.
5. Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-Hill, New York.