

대형공간환기용 축류팬에 사용되는 밀폐형 모터의 열신뢰성 분석

이 태 구, 허 진 혁*, 문 선 애*, 유 호 선**, 문 승 재***, 이 재 현****
한양대학교 산업과학연구소, *한양대학교 대학원 기계공학과, **숭실대학교 기계공학과,
***한양대학교 공과대학 기계공학부

Thermal Reliability Analysis of a Closed Type Motor in an Axial Fan for the Large Space Ventilation

Tae-Gu Lee, Jin-Huek Hur*, Sun-Ae Moon*, Hoseon Yoo**, Seung-Jae Moon***, Jae-Heon Lee****

ABSTRACT: The thermal reliability of the closed-type BLDC motor for the high speed axial fans is analyzed by a numerical method in this dissertation. 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. The experiment for measuring the surface heat flux of the electronic components is carried out to apply the boundary condition of numerical study. 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.

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

1. 서론

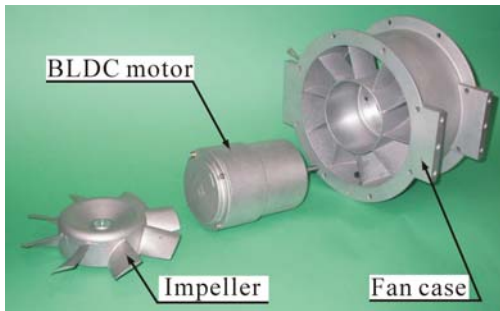
축류팬은 환기, 배기 및 통풍 등의 목적으로 사용되는 유체기계로서 가전제품, 자동차 엔진 등에 쓰이는 소형 팬으로부터 공장, 터널, 지하철 등의 환기에 쓰이는 대형 송풍기에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 호텔로비, 대규모 실내 체육관 및 박물관 등과 같은 대공간의 온도성층화 방지 및 환기성능 개선 등을 목적으로 널리 적용

되고 있다.

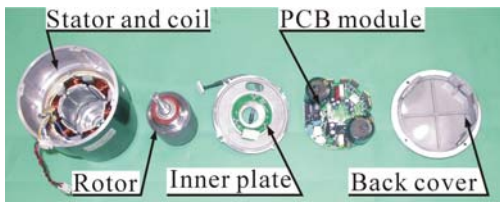
최근에는 브러시가 없는 BLDC(Brushless DC) 모터를 채용한 가변풍량형 축류팬이 개발되고 있다. BLDC 모터는 진동 및 소음이 작아 호텔이나 박물관 등의 조용한 환경을 요하는 축류팬에 적합하며 일반적으로 신뢰성이 높다. 또한 일정속도 및 속도제어가 용이하기 때문에 에너지 절감의 효과도 얻을 수 있다.

BLDC 모터는 일반적으로 모터부와 PCB 모듈부가 밀폐구조 일체형으로 되어있다. 따라서 BLDC 모터 운전시 모터내부에서 발생된 열이 원활하게 배출되지 못하여 고온열에 의해 PCB 전자부품이 고장날 수 있다.⁽¹⁾

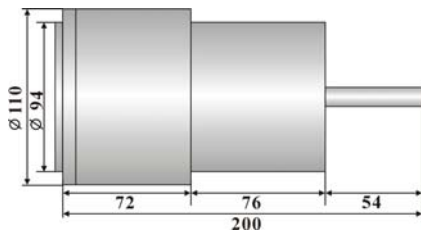
† Corresponding author
Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2220-4425
E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr



(a) Axial fan parts



(b) BLDC motor parts



(c) Dimensions of BLDC motor

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

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

본 연구에서는 수치적인 방법을 이용하여 BLDC 모터가 축류팬에 설치되어 운전될 때 주위온도에 따른 PCB 내부온도를 예측하였다. 또한 모터 주위온도와 PCB 내부온도와의 상관관계를 도출하고 이를 통해 가속수명시험을 통해 도출한 PCB 내부온도에 따른 수명식을 모터 주위온도에 따른 수명식으로 치환하여 수명을 분석하였다.

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 이중 BLDC 모터는 축류팬을 구동시키는 구동부이다.

본 연구의 연구모델인 BLDC 모터의 모델명은 MB1-8855-J01이며 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 있다.

연구 모델로 사용된 BLDC 모터는 Fig. 1(c)와 같이 길이 200 mm, 직경 110 mm의 치수를 가지며 정격 회전수는 5,000 rpm, 가변 회전수는 2,000 ~ 5,000 rpm의 범위를 갖고 있다.

3. PCB 내부온도에 따른 BLDC 모터의 수명식

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

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

여기서, $T_{in}[^{\circ}\text{C}]$ 은 열신뢰성 분석의 대상이 되는 PCB 내부온도를 나타낸다. 따라서 BLDC 모터의 수명식은 PCB 내부온도의 함수로 표현되며 수명과 온도는 서로 반비례되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. PCB 내부온도 예측을 위한 열 및 유동 수치해석

4.1 해석영역

고속 축류팬에 설치된 BLDC 모터 주위의 유동 및 내부 온도를 예측하기 위한 해석 영역을 Fig. 2에 나타내었다. 해석영역을 살펴보면 경계

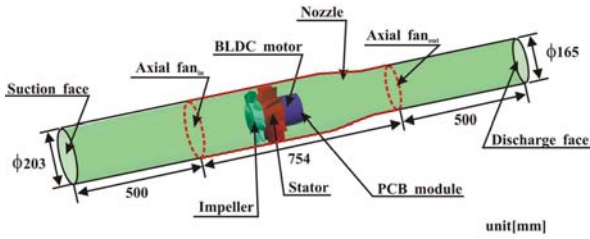


Fig. 2 Schematics of the solution domain in the present study.

조건 설정의 타당성 및 해석결과의 정확성을 보장하기 위하여 실제 축류팬의 입구 및 출구를 연장하였다. 따라서 총 해석영역은 길이 1,754 mm 및 직경 203 mm의 치수를 갖고 있으며 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.

4.2 지배방정식

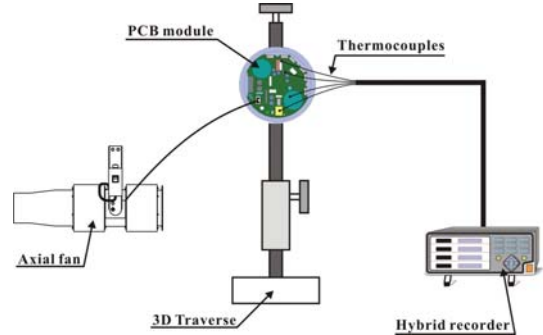
수치해석을 위해 사용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식 및 난류운동에너지 소산율방정식을 사용하였다. 그리고 난류모델로는 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.^(3,4)

4.3 경계조건 및 격자계

고속팬용 밀폐형 BLDC 모터의 기류 및 온도를 해석하기 위한 경계조건을 Table 1에 나타내었다. 흡입면에는 압력경계조건이 적용되었으며 토출면에서는 출구경계조건이 사용되었다. 임펠

Table 1 Boundary conditions of the model adopted in the present study

Location	Condition
suction face	$T_{in}=21, 35, 50^{\circ}\text{C}$
discharge face	outflow
momentum source	$\vec{B} = -\rho(2\vec{\omega} \times \vec{W} + \vec{w} \times \vec{w} \times \vec{r})$, $n = 5,000 [\text{rpm}]$
wall	$u = v = w = 0$



(a) schematics of experimental setup



(b) locations for measuring the surface temperature

Fig. 3 Experimental setup for measuring the surface temperature

러 회전에 의한 운동량 상승은 내부 운동량의 생성향으로 처리하였으며, 각 벽면에서는 점착조건을 적용하였다. PCB 전자부품에서 발생하는 내부 발열 조건은 앞에서 열유속 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 각각 내부 발열 조건으로 부여하였다.

5. 수치해석의 타당성 평가

5.1 온도해석 타당성

PCB 전자부품의 표면온도분포를 측정하기 위한 실험 장치를 Fig. 3과 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 PCB만을 해석영역으로 설정하여 실험과 동일한 조건에서 수치해석을 수행하였다. 이때 실내 조건은 온도, 상대습도 그리고 기류속도가 각각 24.5°C , 40% 그리고 $0 \sim 0.01 \text{ m/s}$ 이었으며 정상상태 도달 후 1분 간격으로 10회씩 측정하여 평균하였다.

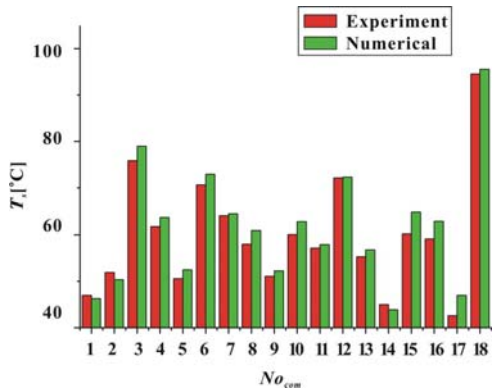


Fig. 4 Comparison of the temperature of the electronic components by experimental and numerical methods.

실험 및 수치해석을 통해 도출된 각 전자부품 위치별 표면온도 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 수치해석 결과가 실험결과에 비해 전반적으로 1 ~ 2°C 정도 높게 예측되는 것으로 나타났다. 이는 각 전자부품의 물성치 차이와 접촉 열저항에 의한 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 그러나 수치해석 결과와 실험 결과의 오차는 최대 10% 이내에서 비교적 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있어 본 연구의 온도예측은 타당하다고 사료된다.

5.2 유량해석 타당성

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

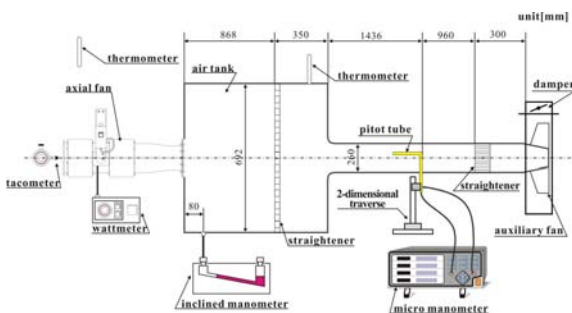


Fig. 5 Experimental setup for measuring the discharge air flow of the axial fan with rotational speed.

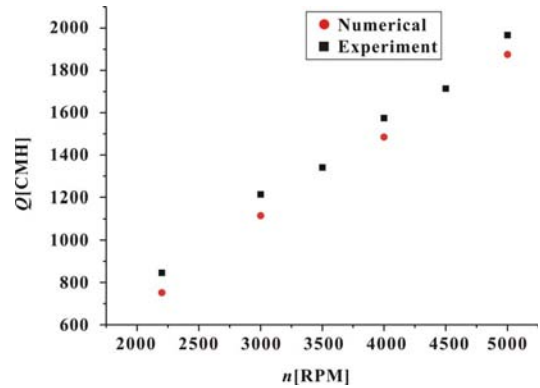


Fig. 6 Discharge air flow rate with rotational speed by experimental and numerical results.

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

본 연구에서는 고려된 주위환경은 크게 3가지 경우를 고려하였다. 기존 연구에 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. 7에 나타내었다. 전

자부품의 표면온도는 약 50 ~ 110℃ 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 사료된다. 또한 중력방향 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 내부온도 T_{in} 은 다음과 같이 PCB 내부 공기의 체적평균온도로 정의된다.

$$T_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n G_i T_i}{G} \quad (2)$$

여기서 T_{in} 은 PCB가 존재하는 내부공간의 내부온도를 나타내고 G 는 PCB 내부공기 체적을 나타내며 G_i 및 T_i 는 각각 내부공기의 각 격자영역에서의 체적 및 온도를 나타낸다. BLDC 모터 주위공기온도가 21℃일 때, PCB 내부온도(T_{in})를 계산한 결과 약 73.4℃로 예측되었다.

또한 BLDC 모터 주위온도가 35℃일 경우 PCB 전자부품의 표면온도를 Fig. 8에 나타내었다. 전자부품의 표면온도는 약 80 ~ 120℃ 정도로 예측되며 마찬가지로 캐패시터, 써미스터, 시멘트 레지스터와 필름 캐패시터의 온도가 다른 전자부품에 비해 높은 것을 알 수 있다. BLDC 모터 주위공기온도가 35℃일 때, PCB 내부온도를 계산한 결과 약 87.54℃로 예측되었다.

마지막으로 BLDC 모터 주위의 공기 온도가 50℃인 경우 이때 PCB 전자부품의 표면온도를 예측하여 Fig. 9에 나타내었다. 전자부품의 표면온도는 약 90 ~ 130℃ 정도로 예측되며 마찬가

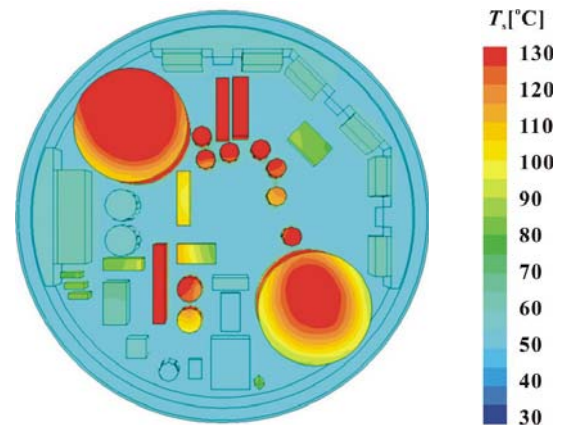


Fig. 7 Distributions of the surface temperature of the PCB module with the T_{∞} of 21℃.

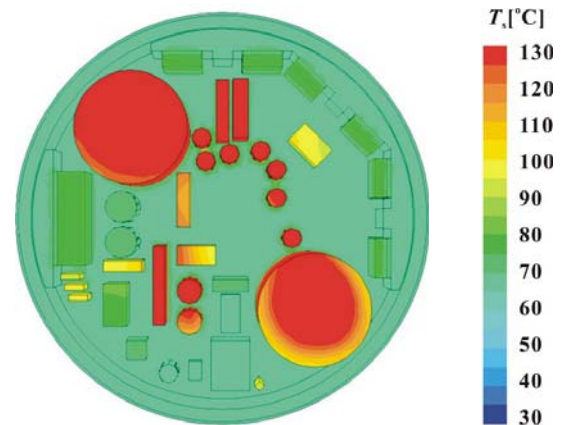


Fig. 8 Distributions of the surface temperature of the PCB module with the T_{∞} of 35℃.

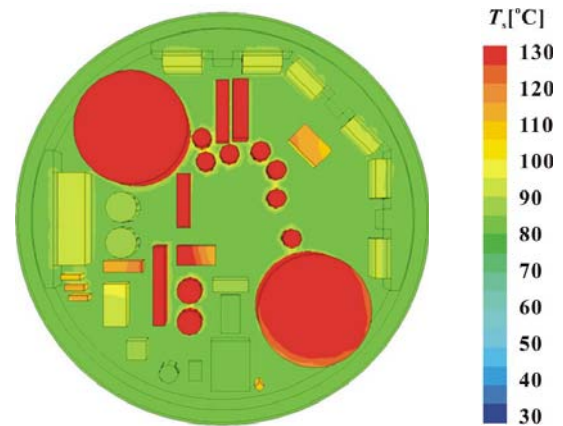


Fig. 9 Distributions of the surface temperature of the PCB module with the T_{∞} of 50℃.

지로 캐패시터, 써미스터, 시멘트 레지스터와 필름 캐패시터의 온도가 다른 전자부품에 비해 높은 것을 알 수 있다. BLDC 모터 주위공기온도가 50℃일 때, PCB 내부공기의 평균 온도를 계산한 결과 약 102.4℃로 예측되었다.

BLDC 모터로 유입되는 주위공기의 온도에 따른 PCB의 내부온도는 주위온도가 21℃의 경우 73℃로 증가하며 이후 주위온도가 35℃ 및 50℃로 증가함에 따라 PCB 내부온도 또한 각각 87.5℃ 및 102.4℃로 증가되는 경향을 보이고 있다. 여기서 모터 주위온도 상승에 따라 PCB 내부온도 상승이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있는데 이를 선형화된 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_m = T_\infty + 52.44 \quad (3)$$

6.2 모터 주위온도에 따른 BLDC 모터의 열신뢰성 분석

BLDC 모터의 설치 환경에 따른 PCB 내부온도를 예측하였으며 모터 주위온도와 PCB 내부온도와의 상관관계를 식(3)과 같이 도출하였다. 따라서 가속수명시험을 통해 도출된 PCB 내부온도에 따른 수명식 식(1)에 식(3)을 대입하면 다음과 같이 BLDC 모터 주위온도에 따른 수명식으로 치환할 수 있다.

$$\ln L = -17.44 + \frac{0.751}{8.62 \times 10^{-5} \times (325.4 + T_\infty)} \quad (4)$$

즉 식(4)의 수명식을 사용하면 PCB 내부온도를 예측하지 않고도 본 연구모델 BLDC 모터의 수명을 도출할 수 있다. 최종적으로 식(4)를 이용하여 앞에서 고려된 주위환경에 따른 BLDC 모터의 열신뢰성을 분석하였다. 주위온도는 21℃인 경우 PCB 내부온도는 73.4℃으로 예측되며 수명은 2,239 [h]로 계산되었다. 또한 주위온도는 35℃인 경우 PCB 내부온도는 87.5℃으로 예측되며 수명은 863 [h]로 계산되었다. 마지막으로 모터 주위온도가 50℃인 경우 PCB 내부온도는 102.4℃으로 예측되었으며 수명은 328 [h]로 계산되었다. 모터 주위온도가 증가함에 따라 BLDC 모터의 수명이 감소되는 경향을 보이고 있다. 이

는 모터 주위온도 증가에 따른 PCB 내부 온도 또한 선형하게 증가하여 열적으로 굉장히 열악한 상황해서 운전되기 때문에 열화가 촉진되어 고장이 발생된 것으로 사료된다.

7. 결론

본 연구에서는 수치적인 방법을 이용하여 PCB 내부온도를 예측하였으며 PCB 내부온도에 따른 수명식을 모터 주위온도에 따른 수명식으로 치환하여 수명을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모터 주위온도가 21, 35 및 50℃일 때 PCB 내부온도는 각각 73.4, 87.5 및 102.4℃로 예측되었다.

(2) 모터 주위온도와 PCB 내부온도의 상관관계를 통해 모터 주위온도에 따른 수명식은

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

로 도출되었다.

(3) 모터 주위온도가 21, 35 및 50℃일 때 도출된 수명은 각각 2,239, 863 및 328 [h]로 산정되었다.

참고 문헌

- (1) Ali J., Practical Guide to the Packaging of Electronics : Thermal and Mechanical Design and Analysis, Marcel Dekker, INC, 2003.
- (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. 116-1176.
- (3) Raily, J. W., 1984, Computational methods in turbomachinery, Mechanical Engineering Publications, London.
- (4) Kim, K. Y., Kim, J. Y. and Chung, J. Y., 1997, Three-dimensional analysis of the flow through an axial-flow fan, Journal of KSME, Vol. 21, No. 4, pp. 541-542.
- (5) KS B 6311, 2002, Testing methods for industrial fans.