

가속수명시험에 의한 고속팬용 밀폐구조형 BLDC 모터의 열신뢰성 분석

이태구[†], 문종선^{*}, 유호선^{*}, 이재현^{**}

한양대학교 대학원 기계공학과, ^{*}승실대학교 기계공학과, ^{**}한양대학교 공과대학 기계공학부

Thermal Reliability Analysis of BLDC Motor in a High Speed Axial Fan by the Accelerated Life Test

Tae-Gu Lee[†], Jong-Sun Moon, Hoseon Yoo^{*}, Jae-Heon Lee^{**}

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

^{**}Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received September 27, 2005; revision received October 28, 2005)

ABSTRACT: In this paper, thermal reliability of a closed type BLDC (Brushless DC) motor for high speed axial fan was analyzed by the accelerated life test. The closed type BLDC (Model No. MB1-8855-J01) motor was controlled by PCB module, which was composed of various electrical components. The failure of the closed type BLDC motor happened in PCB module due to high temperature. Failure mechanism of the closed type BLDC motor appears to be electrolyte dry out of capacitor. The accelerate life test was performed in temperature stress of 85°C and 105°C, respectively. The failure data from the accelerated life test were analyzed and the life in each stress level was estimated with 960 h and 261 h. At last, both life expression according to operating temperature of PCB module and life of the closed type BLDC motor in normal condition (50°C) were suggested.

Key words: BLDC motor(Brushless DC 모터), Accelerated life test(가속수명시험), Thermal reliability(열신뢰성), Failure mechanism(고장 메커니즘), Life time(수명)

기 호 설 명

E_a : 활성화 에너지 [eV]
 F : 누적 고장분포 함수
 k : 볼츠만 상수 [eV/K]
 L : 특성수명 [h]
 m : 형상모수

T : 온도 [K]
 t : 시간 [h]

그리스 문자

α : 대상 제품에 따른 상수
 η : 척도모수

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2293-5169

E-mail address: mybluetear@freechal.com

1. 서론

축류팬은 환기, 배기 및 통풍 등의 목적으로 사

용되는 유체기계로서 가전제품, 자동차 엔진 등에 쓰이는 소형 팬으로부터 공장, 터널, 지하철 등의 환기에 쓰이는 대형 송풍기에 이르기까지 폭넓게 사용되고 있다. 호텔로비, 대규모 실내체육관 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 에너지절감의 효과도 얻을 수 있다.

BLDC 모터의 운전 및 속도제어는 모터 내부의 PCB 모듈에 의해 이루어지기 때문에 일반적으로 모터부와 PCB 모듈부가 밀폐구조 일체형으로 되어 있다. 따라서 BLDC 모터 운전시 모터 내부에서 발생된 열과 PCB 모듈에서 발생된 열은 원활하게 배출되지 못하고 고온열에 의해 PCB 전자부품이 고장날 수 있다. 또한 모터가 주기적으로 운전된다면 PCB 모듈의 각종 전자부품은 열팽창 및 열수축으로 인한 열응력에 의하여 리드 프레임(lead frame)부에 크랙이 발생되어 고장날 수 있다.^(1,2)

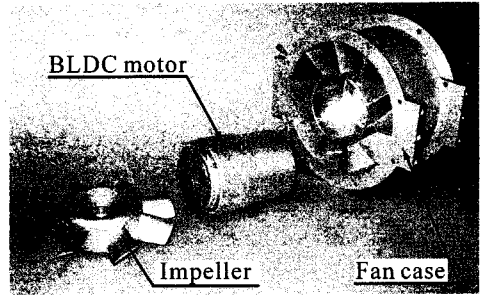
따라서 본 연구에서는 고속 축류팬에 사용되는 BLDC 모터의 고장원인 및 메커니즘을 규명하고 가속수명시험에 의한 열신뢰성을 분석하고자 한다.

2. 연구모델

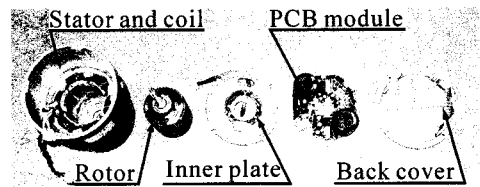
본 연구에서 연구모델로 채택된 BLDC 모터를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에서 보듯이 축류팬(axial fan)은 팬케이스(fan case), BLDC 모터, 임펠러(impeller)로 구성되며, 이 중 BLDC 모터는 축류팬을 구동시키는 구동부이다.

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.

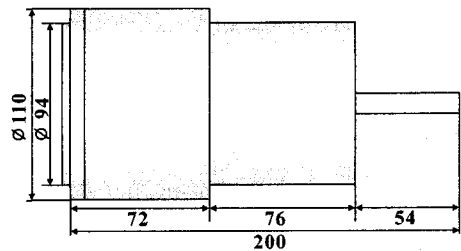
연구모델로 사용된 BLDC 모터는 Fig. 1(c)와 같이 길이 200 mm, 직경 110 mm의 치수를 가지며 정격회전수는 5,000 rpm, 가변회전수는 2,000~5,000 rpm의 범위를 갖고 있다.



(a) Axial fan parts



(b) BLDC motor parts



(c) Dimensions of BLDC motor

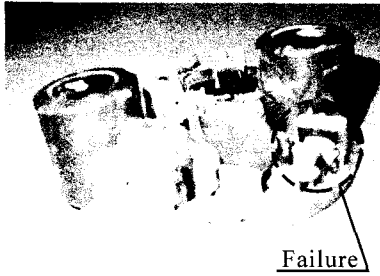
Fig. 1 Schematics of axial fan and BLDC motor [Unit: mm].

3. BLDC 모터의 고장 메커니즘

3.1 열화 및 열응력에 의한 고장

BLDC 모터는 밀폐 일체형으로 되어 있어 열적으로 열악한 상황에 놓여 있으며 대공간의 열환경개선을 위해 사용될 때는 천장부에 장착되기 때문에 여름철 열성층화 현상에 의해 45℃ 이상의 고온환경에서 운전된다. 열화와 열응력에 의한 고장사례를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 과다열에 의해 PCB 모듈 전자부품이 고장나는 사례를 보여준다.

PCB 모듈의 각종 전자부품은 이중 급속 간의 상이한 열팽창계수로 인해 발생하는 열응력에 의하여 Fig. 2(b)와 같이 전자부품 리드프레임에 크



(a) Failure of PCB module by temperature



(b) Failure of chip lead frame by thermal stress
 Fig. 2 Failure of BLDC motor by temperature and thermal stress.

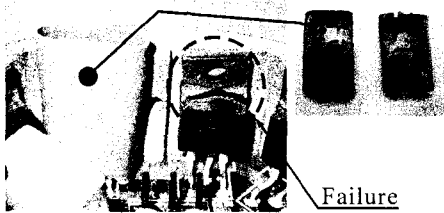


Fig. 3 Failure of transistor of BLDC motor by insulation material gradual failure.

랙이 발생되어 피로고장이 발생되었다.

3.2 절연물 열화에 의한 고장

BLDC 모터 내부에서 발생한 과다열이 외부로 원활하게 제거되지 못하여 PCB 모듈 전자부품과 방열판 사이의 절연물이 열화되어 Fig.3과 같은 고장이 발생되었다. 이와 같이 열적으로 열악한 상황에서 발생하는 고장은 전기회로적인 측면에서의 설계기술에만 의존하고, 열적 신뢰성 측면에서의 설계기술을 거의 고려되지 않았기 때문이다.

4. BLDC 모터의 열유동 경로

BLDC 모터의 제어부인 PCB 모듈의 열내구성

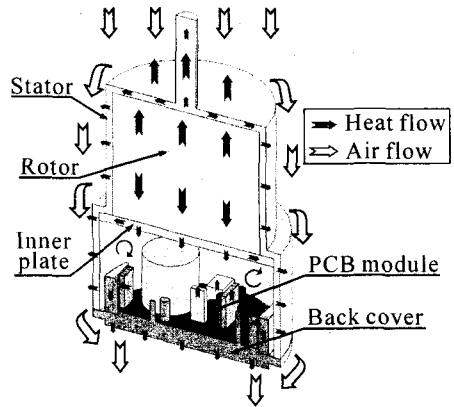


Fig. 4 Heat flow and air flow of BLDC motor.

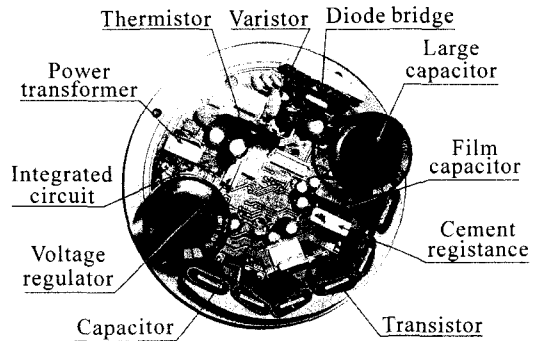


Fig. 5 Details of PCB module.

을 분석하기 위하여 모터 내부 및 PCB 모듈에서 발생하는 열의 이동경로 및 기류의 이동경로를 파악하여야 한다.⁽³⁾ Fig.4는 BLDC 모터의 단면을 나타내며 여기서 짙은색 화살표는 열의 이동경로를 나타내며, 속이 빈 화살표는 기류의 이동경로를 나타낸다. 모터에서 주 발열원은 로터 및 PCB 모듈의 전자부품이다.

로터에서 발생한 열은 모터의 상부 및 하부로 전달된다. 상부로 전달된 열은 전도에 의해 스테이터로 전달되어 팬에 의해 유입된 외부 기류에 의해 냉각되어 제거된다. 하부로 전달된 열은 인너 플레이트로 전달되며 밀폐된 PCB 모듈 내부에 정체된다. 또한 PCB 모듈의 전자부품에서 발생하는 열의 일부는 PCB 모듈과 인너 플레이트 사이에서 정체되며 일부는 하부의 백커버 및 측면의 스테이터로 전달되어 외부 기류에 의해 냉각되어 제거된다.

로터 및 PCB 모듈 전자부품에서 발생한 열은

PCB 모듈 내부는 정채되어 과열되며 열적으로 열악한 상황에서 전자부품의 고장이 발생된다. 열적 고장발생의 주원인이 되는 PCB 모듈의 전자부품의 종류를 Fig. 5에 나타내었다.

5. 열신뢰성 분석이론

고장이 주로 열에 의해 발생하는 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 우선적으로 적절한 열신뢰성 분석이 수행되어야 한다.

분석절차를 대략적으로 살펴보면 먼저 제품의 고장 메커니즘을 재현할 수 있는 가속수명시험을 수행하여 고장 데이터를 얻는다. 이어서 획득한 고장 데이터에 적합한 수명분포모형을 결정하고, 가속성 성립 여부를 검증한다. 가속성 검증이 끝나면 수명 스트레스 관계식을 이용하여 제품의 특성 수명식을 도출한다. 도출한 수명식을 이용하면 정상 작동온도에서 제품의 수명산정이 가능하며, 제품의 열신뢰성을 예측할 수 있다.

5.1 가속수명시험

가속수명시험은 제품의 고장 메커니즘과 고장 데이터를 단기간 시험을 통해 획득하는 데 유용하다. 가속수명시험은 제품의 고장 메커니즘에 따른 가속 스트레스를 선정하고, 스트레스 수준 및 시험시료수를 결정하여 수행한다.

가속 스트레스는 필드 고장을 재현할 수 있는 고장 메커니즘을 고려하여 선정한다. 제품의 고장 원인을 정확하게 파악하여 가속 스트레스로 선정해야 가속수명시험이 유효할 수 있다. 예컨대, 제품의 주요 고장 메커니즘이 온도와 습도에 의해 발생하면 가속 스트레스는 온도와 습도로 선정해야 할 것이다.

가속 스트레스 수준은 가속효과가 충분히 나타날 수 있는 수준에서 결정해야 한다.^(4,5) 또한 스트레스의 최고수준은 재료의 특성에 1차적으로 의존하므로 재료의 특성을 정확하게 파악해야 한다. 어느 제품을 온도 스트레스를 부과하여 가속수명시험을 한다고 할 때 스트레스 수준을 제품의 작동온도를 넘는 범위에서 결정하면 시험이 무의미해질 것이다.

가속수명시험은 시험시간과 시료수가 많을수록, 통계적 추정치의 정밀도가 높아지는 것이 사

실이지만 시험시간과 시료수를 무한정 증가시켜 시험을 하는 것은 많은 제약이 따른다. 고장 데이터를 분석하기 위해서는 각 스트레스 수준에서 2개 이상의 고장 데이터가 얻어지도록 시료수를 결정하며, 수명분포모델의 적정성을 평가하기 위해서는 3개 이상의 고장 데이터가 얻어지도록 시료수를 결정한다.

5.2 수명분포모델 결정

제품의 고장 데이터가 획득되면, 획득된 데이터의 특성에 적합한 수명분포를 결정해야 한다. 수명분포모델은 와이불(Weibull) 분포, 지수(Exponential) 분포, 정규(Normal) 분포, 대수정규(Lognormal) 분포 등의 분포모델이 있으며, 고장 데이터를 수명분포에 적합시켰을 때 AD(Anderson Darling) 지수가 가장 작을수록 적합한 수명분포모델이 된다.⁽⁶⁾

AD 지수는 실험 등을 통해 얻은 데이터와 이들을 적합한 직선의 대응점, 또는 경험적 누적분포함수와 이론적 분포함수의 차이를 측정하는 값이며 분포의 꼬리부분에 큰 가중치를 가지도록 하여 적합된 직선과 도시된 점과의 가중된 제곱거리를 구한 값이다.

5.3 가속성 검증

가속수명시험 수행 후 각각의 가속 스트레스 수준에 대한 가속성 검증이 필요하다. 가속성 검증은 각 스트레스 수준에서 획득한 고장 데이터를 수명-누적고장 분포함수 확률지에 타점하여 각각의 직선이 동일한 기울기를 가지게 되면 가속성이 성립한다고 볼 수 있다.

예를 들어 와이불 분포의 경우 형상모수(shape parameter), 대수정규분포의 경우 척도모수(scale parameter)가 동일한지를 확인함으로써 검증할 수 있다.⁽⁷⁾ 여기서 누적고장분포 함수 $F(t, m, \eta)$ 는 다음과 같다.

$$F(t, m, \eta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

여기서 t , m 및 η 는 각각 시간, 형상모수 및 척도모수를 나타낸다.

5.4 특성수명 산정

특성수명은 지수분포와 와이블 분포에서 누적 고장확률이 62.3%인 시점을 의미한다. 특성수명은 수명 스트레스 관계식에 적정한 변수를 대입하여 수명식을 도출하면 관심있는 온도조건에서의 특성수명을 구할 수 있다.

가속수명시험의 가속인자가 온도일 경우 수명 스트레스 관계식은 주로 Arrhenius 관계식을 널리 사용하며 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$L = a \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

여기서 L 는 특성수명을 의미한다. a 와 E_a 는 각각 대상제품에 따른 상수와 활성화 에너지를 나타내며, k 와 T 는 각각 볼츠만상수($=8.61710 \times 10^{-5}$ [eV/K])와 절대온도를 나타낸다.

6. 표면온도 측정실험

6.1 실험장치 및 방법

PCB 모듈 전자부품의 온도분포를 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 6과 같이 구성하였다. 실험장치는 BLDC 모터, 열화상카메라(thermal camera), 하이브리드 레코더(hybrid recorder) 및 컴퓨터로 구성된다. 열화상카메라를 통해 PCB 모듈 표면의 온도분포를 파악하고 주요 발열원에 예측하였다.

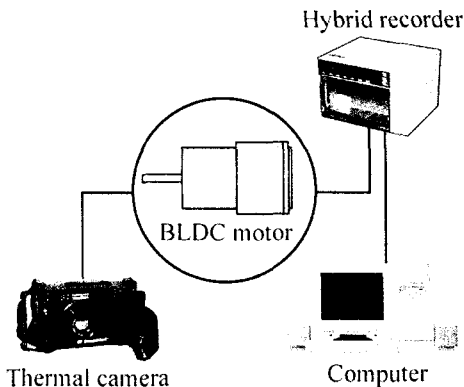


Fig. 6 Experimental apparatus for measuring temperature.

주요 발열원의 온도분포는 20여 개의 열전대를 PCB 모듈 표면에 부착하여 이를 하이브리드 레코더를 이용하여 측정하였다. 측정된 데이터는 컴퓨터에 저장된다.

6.2 결과 및 고찰

온도측정 실험은 열화상카메라와 열전대를 이용하여 측정하였다. 온도측정을 위한 BLDC 모터 형상과 열화상카메라를 이용한 BLDC 모터의 온도측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 먼저 열화상카메라를 이용하여 Fig. 7(a)와 같이 BLDC 모터에서 PCB 모듈을 분리시킨 후 모터를 60분 정도 가동시켜 표면온도를 측정하였다. Fig. 7(b)에서 보듯이 온도분포는 28~53°C 정도를 나타내고 있다.

PCB 모듈에서의 주요 발열원은 전력변압기(power transformer), 집적회로(integrated circuit), 서미스터(thermistor) 및 전압 레귤레이터(voltage

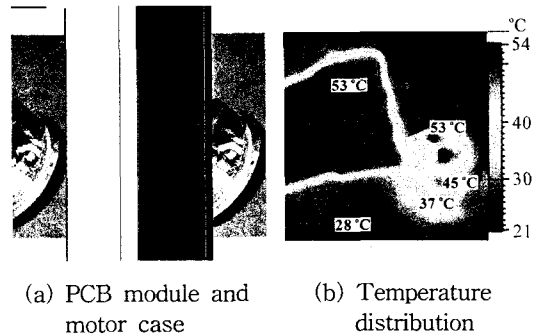


Fig. 7 Temperature distribution of PCB module and motor case.

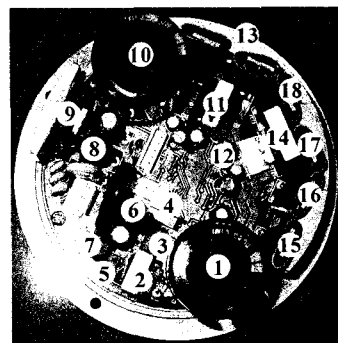


Fig. 8 Locations of temperature measuring for PCB module and motor case.

Table 1 Temperature distribution of PCB module

Location	T [°C]	Location	T [°C]
1	34.4	10	27.0
2	39.5	11	32.8
3	47.0	12	33.1
4	41.7	13	28.3
5	38.0	14	27.8
6	40.0	15	31.5
7	35.5	16	32.0
8	32.0	17	31.6
9	30.0	18	32.8

regulator) 등의 전자부품이 집중된 영역임을 알 수 있다. PCB 모듈 전자부품에 열전대를 부착한 위치 및 온도측정 결과를 Fig. 8과 Table 1에 나타내었다. 열화상카메라를 통해 예측된 주요 발열 부품의 영역 ②~⑤의 온도분포는 38~47°C 정도로 나타나고 있다.

트랜지스터(transistor)가 부착된 영역 ⑮~⑰의 온도는 약 31°C이며 인접한 방열판 영역 ⑬의 온도는 약 28°C 정도로 트랜지스터에서 발생한 열은 방열판을 통해 원활하게 전달되고 있다.

7. 가속수명시험

7.1 실험장치 및 방법

본 연구에서는 밀폐형 BLDC 모터의 주 고장 메커니즘은 고온에 의한 PCB 모듈 전자부품의 파국고장 및 열화에 의한 고장으로 판단됨으로 가속 스트레스로 온도를 선정하였다. 밀폐형 BLDC 모터의 가속수명시험을 수행하기 위한 시험장치를 Fig. 9와 같이 구성하였다. 시험장치는 축류팬, BLDC 모터, 항온챔버, 전류계 및 타이머로 구성된다.

가속 스트레스 수준은 PCB 모듈에 부착된 전자부품의 작동온도범위를 넘지 않는 수준으로 본 연구에서는 85°C와 105°C의 두 수준으로 결정하였다. 또한 각 스트레스 수준에서 수명분포모델의 적정성을 평가할 수 있는 최소수준을 고려하여 총 시료수를 7개로 결정하였으며, 85°C의 스트레스 수준에 4개의 시료를, 105°C의 스트레스 수준에 3개의 시료를 배분하여 실험하였다.

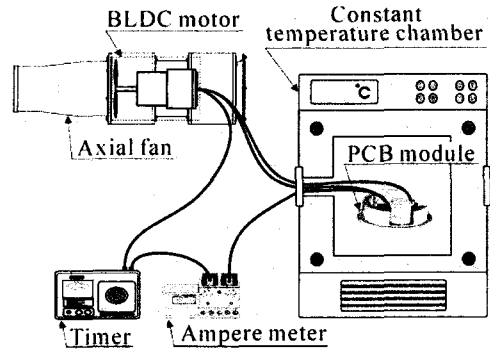


Fig. 9 Experimental apparatus for accelerated life test.

밀폐형 BLDC 모터의 주 고장 메커니즘을 고려하여 본 연구에서는 모터에서 PCB 모듈을 분리하여 실험을 수행하였다. 분리된 PCB 모듈은 항온챔버 안에 장착되어 각 스트레스 수준에서 가속되며, 모터의 정격부하를 부과하기 위해 모터 축류팬에 장착하여 외부에서 가동하였다. 전류계를 이용하여 모터의 정격전류를 실시간 측정하고 그 신호를 타이머로 보내어 시간을 측정하게 하였다. 모터가 고장나게 되면 전류가 흐르지 않게 되어 전류계에서 전류가 검출되지 않는 신호를 타이머로 보내 결국 타이머의 작동이 멈추고, 그 시간까지를 고장시간으로 결정하였다.

7.2 실험결과 및 고찰

7.2.1 고장 데이터

밀폐형 BLDC 모터 내부 PCB 모듈을 가속수명시험한 결과를 Table 2에 나타내었다. 85°C의 스트레스 수준에서 실험한 4개의 시료들은 각각 950, 988, 912, 922시간에서 고장이 발생하였으며,

Table 2 Result data of accelerated life test

Specimen number	Stress level [°C]	Failure time [h]	Failure component
1	85	950	capacitor
2	85	988	
3	85	912	
4	85	922	
5	105	266	
6	105	257	
7	105	251	

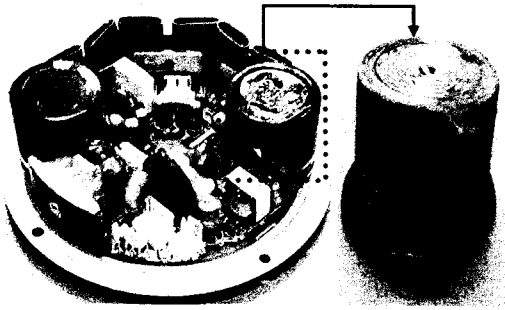


Fig. 10 Failure of capacitor.

105°C의 스트레스 수준에서 실험한 3개의 시료들은 각각 266, 257, 251시간에서 고장이 발생하였다. 각 스트레스 수준에서 고장은 비슷한 시간대에서 발생하였으며, 스트레스 수준을 20°C 증가시켜 실험하였을 때 수명은 거의 1/4로 줄어들었다.

가속수명시험의 결과, 대부분의 고장은 PCB 모듈에 부착된 콘덴서에서 발생하였다. 따라서 PCB 모듈에 부착된 콘덴서가 열적으로 가장 취약하고 BLDC 모터 고장의 주요 인자라고 사료된다. 고장이 발생한 콘덴서의 모습을 Fig. 10에 나타내었다. 콘덴서는 전기를 축적하는 기능과 직류전류를 차단하고 교류전류를 통과시키려는 기능을 갖는 전자부품으로, 양의 전류가 인가되어 있는 얇은 알루미늄 호일과 음의 전류가 인가되어 있는 얇은 필름으로 이루어져 있다. 콘덴서는 고온의 환경에서 장시간 사용되는 동안 전해액이 고온의 열에 의해서 소손되어 얇은 알루미늄 호일이 절연과 파괴되어 고장이 발생된 것으로 판단된다.

7.2.2 가속성 검증

본 연구에서는 가속수명시험을 통해 획득한 고장 데이터를 여러 가지 고장분포에 적합시켰다. 밀폐형 BLDC 모터의 고장 데이터를 고장분포 모델에 적합시킨 결과 각 분포 모델별 AD 지수를 Table 3에 나타내었다. 표에서 보듯이 와이블

Table 3 Compatibility of failure distribution by Anderson-Darling (AD) index

Distribution model	AD index	Stress level [°C]
Weibull	2.616	85
Exponential	3.570	
Normal	2.624	
Log-normal	2.623	

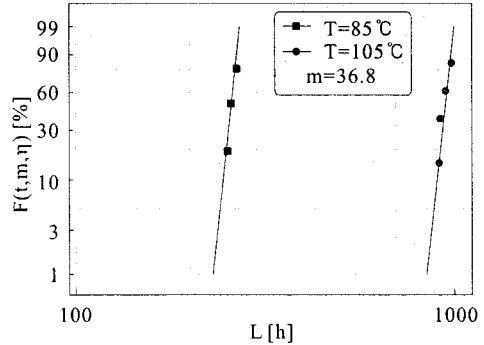


Fig. 11 Verification of accelerability.

분포의 AD값이 가장 작아 본 연구에서는 와이블 분포를 수명분포모델로 결정하였다. Fig. 11은 온도가 85°C와 105°C의 가속수준에서 수명에 따른 누적고장률 분포를 나타낸다. 여기서 가속인자인 85°C와 105°C의 스트레스 수준에서 형상모수가 36.8로 동일하고, 추정된 각 스트레스 수준별 직선의 기울기가 동일함을 볼 때 가속성이 성립한다는 것을 확인할 수 있다.

7.2.3 특성수명식 도출

본 연구에서는 가속수명시험을 통해 얻어진 수명데이터를 이용하여 PCB 모듈의 작동온도에 따른 수명식을 도출하였다. Arrhenius 관계식(2)의 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같다.

$$\ln L = \ln \alpha + (E_a/kT) \tag{3}$$

식(3)에서 제품의 특성상수 $\ln \alpha$ 와 활성화 에너지 E_a 를 구하면 작동온도에 따른 수명식을 예측할 수 있다. E_a 와 $\ln \alpha$ 값은 가속수명시험을 통해 얻은 수명 데이터를 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서 E_a 와 $\ln \alpha$ 값을 각각 0.76 eV와 -17.78 h로 산정하여 다음과 같은 특성수명식을 도출하였다.

$$\ln L = -17.78 + (8829/T) \tag{4}$$

여기서 L 은 PCB 모듈의 특성수명이고, T 는 PCB 모듈의 작동온도를 나타낸다.

7.2.4 BLDC 모터의 열신뢰성

Table 4에 각 스트레스 수준과 정상 작동온도에서 산정된 BLDC 모터 PCB 모듈의 수명을 나

Table 4 Life time with operating temperature

Operating temperature [°C]	Life time [h]
50	14,045
85	960
105	261

타내었다. 가속수명시험을 통해 얻은 총 7개의 고장 데이터를 분석한 결과, 85°C와 100°C에서 각각 960 h와 261 h의 수명이 산출되었다. 스트레스 수준을 85°C에서 20°C 증가시킨 105°C의 경우 85°C에서의 수명보다 약 1/4 정도로 감소하였다. 이는 전자부품, 특히 알루미늄 콘덴서의 온도가 10°C 증가하면 수명이 1/2로 줄어든다는 10°C 법칙을 상기해 볼 때 유사한 결과를 나타낸다.

본 연구에서 도출한 수명식(4)을 이용하면 실제 관심있는 정상 사용온도 조건에서 밀폐형 BLDC 모터 PCB 모듈의 수명을 산정할 수 있다. 하지만 여기서 온도는 밀폐된 PCB 모듈 내부의 작동 온도를 나타낸다.

기존의 연구를 통해 주위온도가 22°C인 정상 상온상태에서 밀폐된 PCB 모듈 내부의 작동 온도를 측정할 결과 약 50°C를 나타내었다.⁽⁹⁾ 이는 PCB 내부 고온의 열이 외부로 원활하게 전달되어 냉각되지 않고 내부에 정체된 결과이다. 따라서 정상 상온상태에서 운전되더라도 실제 PCB 모듈의 작동 온도는 약 50°C이며, 이를 가속수명시험을 통해 도출한 수명식에 대입한 결과 14,045 h의 수명을 얻었다.

특히 BLDC 모터가 장착된 기류유인팬이 대형 용접공장과 같이 열성충화 문제가 발생하는 작업장에서 운전될 경우 모터의 열적 수명은 더욱 감소할 것으로 판단된다. 따라서 밀폐형 BLDC 모터의 열신뢰성 향상이 요구된다. 추후 BLDC 모터의 고장원인이 되는 콘덴서의 열적 사양을 증가시키거나, 밀폐된 BLDC 모터 커비에 냉각유로를 채용하는 방법 등을 통하여 모터의 열신뢰성 개선에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

8. 결 론

본 연구에서는 가속수명시험에 의한 고속팬용 밀폐형 BLDC 모터(모델명: MB1-8855-J01)의 열신뢰성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) BLDC 모터의 제어부인 PCB 모듈의 전력

변압기, 집적회로, 서미스터 및 전압 레귤레이터 등에서 표면온도 분포는 38~47°C 정도를 나타내어 열집중이 발생되고 있다.

(2) 밀폐형 BLDC 모터 PCB 모듈을 85°C와 105°C에서 가속수명시험한 결과 각각 912~988시간, 251~266시간의 수명이 산출되었다. 또한 고장부품은 모두 PCB 모듈에 부착되어 있는 콘덴서이며, 고장 메커니즘은 콘덴서의 전해액 소손에 의한 절연파괴 고장으로 사료된다.

(3) 가속수명시험을 통해 얻은 밀폐형 BLDC 모터의 고장 데이터는 와이블 분포에 적합하며, $\ln L = -17.78 + (8829/T)$ 의 특성수명식을 도출하였다.

(4) 50°C인 정상 운전조건에서 PCB 모듈의 수명을 산정한 결과 밀폐형 BLDC 모터의 특성수명은 14,000시간 정도로 예측된다.

참고문헌

1. Bajenescu, T. I. and Bazu, M. I., 1999, Reliability of electronic components, Springer, New York.
2. Jamnia, A., 2003, Practical guide to the packaging of electronics, Marcel Dekker INC., New York.
3. Ozisik, M. N., 1993, Heat conduction, John Wiley & Sons, Inc., New York
4. Nelson, W., 1990, Accelerated testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Meeker, W. Q. and Hahn, G. H., 1985, How to plan an accelerated life test: Some practical guidelines, The ASQC Basic References in Quality Control: Statistical Techniques, Vol. 26, No. 10, pp. 157-172.
6. Park, J. W., 2004, Accelerated life test, RARC, pp. 4-47.
7. Seo, S. G., 2001, Reliability analysis by minitab, Ire tech inc., pp. 163-235.
8. Yoon, G. W., 2003, Explanation of reliability, Korea agency for tech. and standards, pp. 13-67.
9. Lee, T. G., 2004, Thermal reliability analysis of a BLDC motor in high speed axial fan, Proceedings of the SAREK, pp. 215-233.