

배연용 축류팬의 내열 신뢰성 향상

허진혁, 허기무*, 문승재**, 이재현***

한양대학교 대학원 기계공학과, *(주)악시오나 에너지 코리아, **한양대학교 공과대학 기계공학부

Improvement of the Heat Resistance Reliability of an Axial Smoke Exhaust Fan

Jin-Huek Hur, Kimoo Heo*, Seung-Jae Moon**, Jae-Heon Lee***

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

*Acciona Energy Korea Inc, Seoul 135-839, Korea

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

(Received September 1, 2009; revision received October 12, 2009)

ABSTRACT: In this paper, the heat resistance reliability of an axial smoke exhaust fan was investigated. An axial smoke exhaust fan should be capable of operating at 250 °C for 2 hours. The heat resistance reliability was evaluated by the heat resistance reliability test. A B10 life with a 90% confidence level was estimated to be about 48 minute. The failure occurred in the motor due to high temperature. The main failure mechanisms of the motor were melting of bond and insulating paper and burning of insulating materials in the coil. The heat resistance reliability was improved by changing the way to unite the core and the coil and by replacing the insulating paper and the insulating materials of the coil. A B10 life with a 90% confidence level of a modified axial smoke exhaust fan was estimated to be over 120 minute.

Key words: Axial smoke exhaust fan(배연용 축류팬), Motor(모터), Heat resistance reliability(내열 신뢰성), B10 life(B10 수명)

기 호 설 명

- A : AD값
- B : 백분위 수명 [min]
- g : 목표수명 [min]
- h : 내열 신뢰성 시험시간 [min]
- i : 내열 신뢰성 시험 시료번호
- k : 와이블분포의 형상모수
- n : 내열 신뢰성 시험 시료수
- r : 예상고장갯수
- t : 시간 [min]
- x : 백분위

그 리 스 문 자

- α : 유의수준
- δ : 계수

하 침 자

- 10 : 10% 백분위
- 10, $CL0.9$: 신뢰수준 90%의 10% 백분위

1. 서 론

† Corresponding author

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

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

소방방재청의 화재통계에 따르면 2008년도에 우리나라에서 발생한 총 화재건수는 49,631건 이었으

며 화재로 인한 사상자는 2,716명에 이르렀다. 화재시 발생하는 인명피해의 대부분은 연기에 의한 질식이 원인이다. 따라서 화재시 발생된 연기를 적절히 배출시킬 수 있다면 인명피해를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 화재진압을 위해 출동한 소방관의 시야 확보에도 도움이 되어 신속한 화재진압 및 소방관의 안전에 기여를 하게 될 것이다.

배연용 축류팬이란 평상시에는 환기 또는 실내 공기순환등의 목적으로 사용되지만 화재시에는 배연을 목적으로 사용되는 유체기계로써 지하주차장, 터널, 체육관 및 관람시설등에 사용된다. 화재시 배연용 축류팬이 정상적으로 작동하여 적절한 배연을 하기 위해서는 고온환경에서의 원하는 시간 동안 작동할 수 있는 내열 신뢰성이 필요하다.

각 나라에서 정한 배연용 축류팬의 성능조건을 Table 1에 나타내었다. 우리나라의 경우 250 °C 온도환경에서 1시간이상 운전이 가능하여야 한다. 그러나 싱가포르나 영국과 같은 외국에서는 250 °C 온도환경에서 2시간 운전을 해야한다는 조건을 요구하며 싱가포르의 경우 위에 제시한 기준을 만족하지 못하는 제품은 사용을 하지 못하도록 규제하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러므로 국제적으로 성능을 인정받을 수 있는 제품이 되기 위해서는 250 °C 온도환경에서 2시간이상 운전이 가능한 내열 신뢰성의 확보가 필요하다.

본 연구에서는 배연용 축류팬으로 시판되는 기존 제품의 내열 신뢰성 분석을 통해 열적 고장원인 분석을 하고 기존제품의 주요고장부위를 개선한 개량형 배연용 축류팬을 제작하여 이의 내열 신뢰성을 평가하였다.

2. 배연용 축류팬

2.1 구조

본 연구에서 연구모델로 채택한 배연용 축류 팬을 Fig. 1에 나타내었다. 배연용 축류팬은 크게 소음기(silencer), 구동부(driving part) 및 노즐(nozzle)로 구성되어 있다. 구동부는 기류를 생성하는 역할을 하며 임펠러(impeller), 모터(motor) 및 팬케이스(fan case)로 구성된다.

배연용 축류팬에 사용되는 모터의 상세구조 및 구성요소를 각각 Fig. 2(a) 및 (b)에 나타내었다.

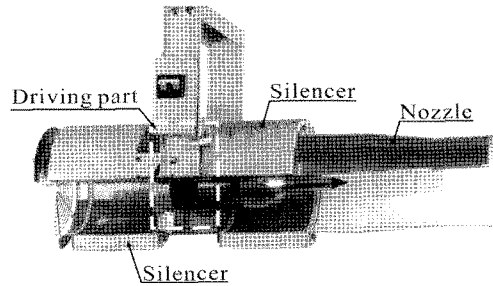
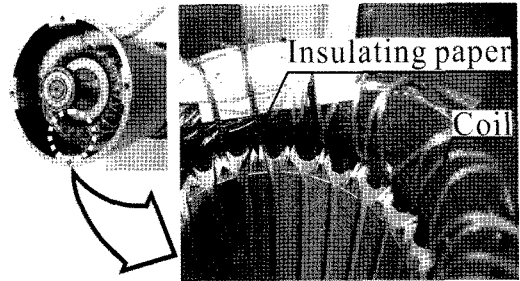
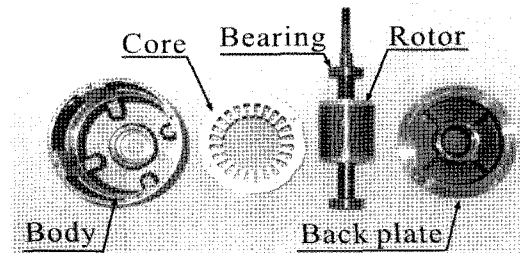


Fig. 1 Axial smoke exhaust fan.



(a) inner part of a motor



(b) parts of a motor

Fig. 2 Motor for an axial smoke exhaust fan.

Table 1 Standards for an axial smoke exhaust fan

Standard	Contents
PSB CP13 (Singapore)	Operating at 250 °C for 2h
BS 7346-2 (England)	Class A : Operating at 150 °C for 5h Class B : Operating at 250 °C for 2h Class C : Operating at 300 °C for 0.5h Class D : Operating at 300 °C for 1h Class E : Operating at 840 °C for 0.4h
NFSC 501 (Korea)	Operating at 250 °C over 1h

모터는 바디(body), 코어(core), 코일(coil), 절연지(insulating paper), 로터(rotor), 베어링(bearing) 그리고 백플레이트(back plate)로 구성되어 있다. 접착제를 이용하여 코일이 감겨진 코어와 바디를 결합하고 코어의 안쪽에는 두 개의 베어링이 장착된 로터가 위치하게 된다.

2.2 특 징

배연용 축류팬은 평상시에는 일반 축류팬과 같이 환기 또는 실내공기 순환 등을 목적으로 사용되지만 화재시 배연을 목적으로 하기 때문에 상온에서만 사용되는 일반 축류팬과 달리 250℃ 고온환경에서 일정시간 동안 운전이 가능하여야 한다. 따라서 배연용 축류팬에는 내열용 부품들이 사용된다. 노즐, 임펠러 및 팬케이스의 재질의 경우 일반 축류팬에는 플라스틱이 사용되나 배연용 축류팬의 경우 고열에 견딜 수 있는 알루미늄이 사용되며 모터에 전원을 공급하는 전선의 경우 일반 축류팬은 일반적으로 상온에서 사용하는 전선이 사용되나 배연용 축류팬의 경우 내열전선이 사용된다.

배연용 축류팬이 고온에서 운전될 경우 가장 취약할 것으로 예상되는 부품은 모터이다. 모터가 고온환경에서 작동될 경우 베어링 고착, 절연지 및 코일의 절연 파괴등에 의한 고장이 발생할 가능성이 높아지기 때문이다. 따라서 배연용 축류팬의 수명은 모터의 수명에 의해 결정될 것이다.

3. 내열 신뢰성 분석이론

3.1 분석절차

내열 신뢰성이란 제품이 고온환경에서 작동될 때의 신뢰성을 의미하며 제품의 내열 신뢰성을 분석하기 위한 절차를 Fig. 3에 나타내었다. 내열 신뢰성 분석은 크게 내열 신뢰성 시험(heat resistance reliability test)과 내열 신뢰성 추정(heat resistance reliability estimation)으로 나눌 수 있다. 내열 신뢰성 시험은 적용대상의 선정, 사용기간 척도의 선정, 사용조건의 규정, 고장의 규정, 시험에 사용될 시료수의 결정, 고온시험 수행 그리고 시료의 고장시간 기록의 순서로 이루어진다. 내열 신뢰성 추정은 시료의 고장시간을 기록한 수명자료의 적합도 검정을 통한 수명분포 모델의 결정 그리고 수명분포모델을 이용한 수명산정의 순서로 이루어진다.

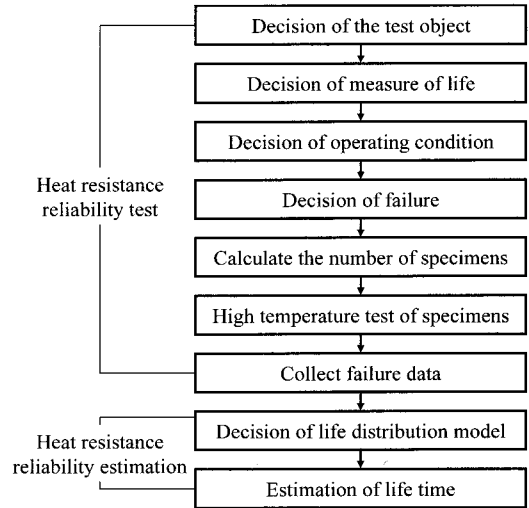


Fig. 3 Procedures of heat resistance reliability analysis.

3.2 시료수 결정

내열 신뢰성 시험에 사용할 시료수 n 을 결정하는 식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$n \geq \left[\frac{g}{h} \right]^k \times \frac{\chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2} \times \frac{1}{\ln(1-x)^{-1}} \quad (1)$$

여기서, g 는 목표수명, h 는 내열 신뢰성 시험시간, k 는 형상모수, r 은 예상고장갯수 그리고 x 는 수명의 백분위수를 나타낸다. χ_{α}^2 는 유의수준 α 의 카이제곱분포이며 유의수준 α 와 예상고장갯수 r 을 이용하여 카이제곱분포표에서 값을 찾는다.

식(1)에 의해 계산된 n 개의 시료에 대해 내열 신뢰성 시험을 수행하여 h 시간 동안 고장이 발생한 시료의 개수가 r 개 이하인 경우, 제품의 수명이 목표수명 g 이상임을 나타낸다.

3.3 수명분포 모델 결정

신뢰성 분석에 사용되는 수명분포 모델에는 많은 종류가 있으며 신뢰성 추정을 통해 보다 정확한 수명을 예측하기 위해서는 수명자료의 특성에 가장 적합한 수명분포 모델을 결정하여야 한다. 적합도 검정이라 수명자료가 어떠한 수명분포 모델에 가장 적합한지 판정하는 것으로 적합여부에 관한 검정

통계량 값으로 AD값(Anderson-Darling statistics)을 사용하며 AD값이 작을수록 수명자료의 특성에 적합한 수명분포 모델이다. AD값 A 를 구하는 식은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$A = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln f(t_i) + \ln(1-f(t_{(n-i+1)}))] \quad (2)$$

여기서 f 는 고장확률밀도함수, t_i 는 i 번째 시료의 고장시간 그리고 n 은 시료수를 나타낸다.

3.4 수명산정

제품의 수명은 내열 신뢰성 시험을 통해 얻은 수명자료 및 적합도 검정에 의해 결정된 수명분포 모델의 수명식을 이용하여 예측한다.

수명의 척도로는 평균고장시간(MTTF), 평균고장간격(MTBF) 그리고 Bx수명 등이 있다. 신뢰성 분석에서 일반적으로 가장 많이 사용하는 수명의 척도는 B10수명이며 B10수명이란 제품의 10%가 고장 날 때까지의 시간을 의미한다. 또한 B10수명의 신뢰수준이 90%라면 실제의 B10수명이 신뢰성 분석을 통해 예측한 B10수명보다 클 확률이 90%라는 것이다.

신뢰성 추정에 가장 널리 사용되는 수명분포 모델인 와이블분포를 따르는 신뢰수준 90%의 B10수명 $B_{10,CL0.9}$ 을 구하는 식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$B_{10,CL0.9} = \exp\left(-\frac{\delta - 2.25}{k}\right) \times B_{10} \quad (3)$$

여기서 δ 는 계수로서 식(3)으로부터 구하며 k 는 형상모수로서 반복계산을 통해 식(4)를 만족하는 k 값을 구한다. 그리고 B10은 식(5)로부터 구한다.

$$\delta = \frac{1.2816 \sqrt{0.621n^2 + 4.623n} - 1.282}{n - 1.183} + \frac{-0.453 + 2.25n}{n - 1.183} \quad (4)$$

$$\left[\frac{\sum_{i=1}^n t_i^k \ln(t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^k} - \frac{1}{k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) \right] = 0 \quad (5)$$

$$B_{10} = b \left[\ln\left(\frac{1}{0.9}\right) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (6)$$

여기서 t_i 는 i 번째 시료의 고장시간, n 은 시료수 그리고 b 는 척도모수이며 척도모수 b 를 구하는 식은 다음과 같다.

$$b = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

4. 내열 신뢰성 시험

4.1 시험장치

고온시험을 수행하기 위한 시험장치를 Fig. 4에 나타내었다. 시험장치는 고온챔버(high temperature chamber), 타이머(timer), 전류계전기(current relay) 및 컴퓨터(computer)로 구성된다. 제품의 사용조건인 250℃의 고온을 유지하기 위하여 챔버내 온도를 20℃~350℃의 범위에서 일정하게 유지할 수 있는 고온챔버를 선택하였다. 모터의 작동시간을 측정하기 위하여 타이머를 사용하였으며 전류계전기를 이용하여 모터에서 고장이 발생하였을 때 타이머가 멈추도록 하였다.

4.2 시험방법

본 연구에서는 배연용 축류팬을 내열 신뢰성 적용대상으로 하였으며, 고온환경에서의 수명에 무관한 소음기와 노즐을 분리한 후 내열 신뢰성 시험을

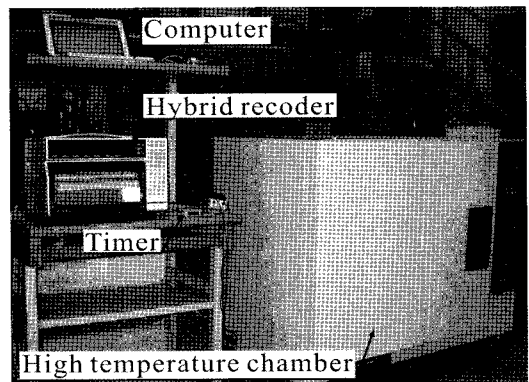


Fig. 4 Experimental setup for the heat resistance reliability test.

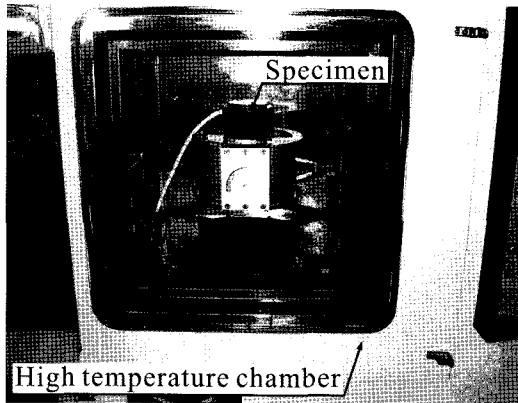


Fig. 5 Specimen in a high temperature chamber.

수행하였다. 사용기간의 척도로 시간[min]을 사용하였으며 제품의 사용조건은 250 °C 온도환경이다. 그리고 모터에 흐르는 전류가 0이 되었을 때를 고장으로 하였다.

모터에 공급되는 전류가 0이되면 타이머가 멈추도록 전류계전기를 설정한 후 고온챔버의 내부 온도를 제품의 사용조건인 250 °C로 설정한다. 고온 챔버의 온도가 250 °C에 이르면 시료를 고온챔버에 넣어 4시간 동안 고온 시험을 수행하며 본 연구에서 사용한 시료와 고온챔버를 Fig. 5에 나타내었다. 고장이 발생하여 타이머가 정지하면 타이머에 나타내어진 시간을 고장시간으로 기록한다. 위의 과정을 반복하여 각 시료에 대해 내열 신뢰성 시험을 수행하고 고장시간을 기록하여 내열 신뢰성 추정에 필요한 수명자료를 작성한다.

5. 결과 및 고찰

5.1 기존 배연용 축류팬

5.1.1 내열 신뢰성 분석

목표수명 g 는 120min, 내열 신뢰성 시험시간 h 는 240 min, 형상모수 k 는 1.2⁽⁷⁾, 예상고장갯수 r 은 0개, 수명의 백분위수 x 는 0.1 그리고 유의수준 α 가 0.1일 경우의 카이제곱분포 χ^2_{α} 는 4.605를 식(1)에 대입하여 계산된 시료수 n 은 10개이다.

Table 2에 내열 신뢰성 시험결과를 나타내었다. 가장 빨리 고장이 발생한 기존 배연용 축류팬의 고장시간은 45분이었으며, 평균고장시간은 83분이었다.

Table 2 Failure data of an existing axial smoke exhaust fan

Specimen number	Failure time[min]	Specimen number	Failure time[min]
1	45	6	85
2	59	7	87
3	72	8	99
4	83	9	101
5	85	10	115

Table 3 Anderson-Darling statistics according to life distribution model

Life distribution model	A
Exponential distribution	2.738
Weibull distribution	0.249
Normal distribution	0.266
Lognormal distribution	0.444

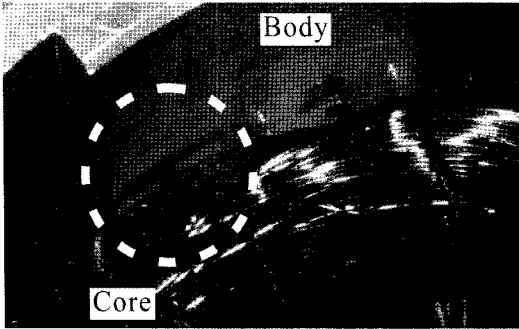
수명분포모델의 적합도 검정은 신뢰성데이터 분석에서 자주 사용되는 지수분포(exponential distribution), 와이불분포(Weibull distribution), 정규분포(normal distribution) 및 대수정규분포(log-normal distribution)에 대하여 수행하였으며, 각 수명분포모델에 대한 AD값을 Table 3에 나타내었다. 적합도 검정결과 와이불분포에서의 AD값이 가장 작게 나타났으므로 기존모터에 가장 적합한 수명분포는 와이불분포이다.

내열 신뢰성 시험결과를 이용하여 와이불분포를 다르는 기존 배연용 축류팬의 $B_{10, CI0.9}$ 를 추정된 결과 48분으로 예측되었다. 따라서 고장원인 분석을 통한 내열 신뢰성 향상이 필요할 것으로 판단된다.

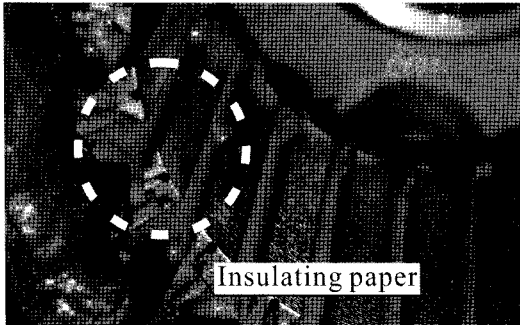
5.1.2 고장 메커니즘 규명

기존 배연용 축류팬의 고장은 모터에서 발생하였다. 기존모터의 고장 메커니즘으로는 코어를 바디에 고정시키는 접착제의 용융, 코어와 코일 사이에 사용되는 절연지의 용융 그리고 코일의 절연 파괴 등이 있었으며 이를 각각 Fig. 6(a), (b) 그리고 (c)에 나타내었다.

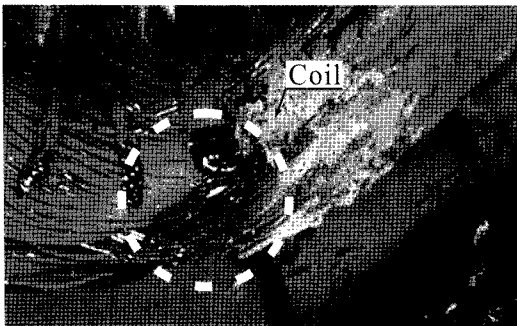
Fig. 6(a)를 살펴보면 코어를 고정시키는 접착제가 용융됨으로써 코어가 본래의 자리를 이탈하여



(a) melting of bond



(b) melting of insulating paper



(c) burning of insulating materials of coil

Fig. 6 Failure mechanisms of an installed motor.

바디에 긁힌 자국이 난 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)와 같이 절연지의 용융이 발생된 경우 용융된 절연지가 코어와 로터의 간극을 메워 로터의 회전운동을 방해하여 모터에 과부하가 발생하는 원인으로 작용하였으며 심할 경우 로터가 구속되는 현상이 발생하였다. Fig. 6(c)에서는 고온의 열에 의해 코일의 절연파괴가 발생하여 단락이 일어나 코일이 불에 탄 것을 확인 할 수 있다.

5.2 개량 배연용 축류팬

개량 배연용 축류팬이란 기존모터에 비해 내열 신뢰성이 향상된 개량모터를 장착한 배연용 축류팬이다.

5.2.1 개량사항

기존모터의 내열 신뢰성을 향상시키기 위해 접착제를 이용하여 바디와 코어를 본딩으로 결합하는 방법에서 바디와 코어에 구멍을 뚫고 바디와코어를 볼팅으로 결합하는 방법으로 변경하였다. 고온에서 절연지가 용융되는 문제를 해결하기 위해 기존에 사용하였던 허용온도 150℃의 폴리에스터 필름(polyester film) 재질의 절연지에서 허용온도가 400℃인 노맥스(Nomex) 재질의 절연지로 변경하였다. 그리고 코일의 절연파괴를 방지하기 위해 기존에 사용하였던 허용온도가 150℃인 절연코팅재를 사용한 PEW(polyester enamelled copper wire) 코일을 허용온도가 200℃인 절연코팅재를 사용한 AI-EIW(Polyester-imide overcoated with enamelled copper wire) 코일로 변경하였다.

5.2.2 내열 신뢰성 분석

개량 배연용 축류팬의 내열 신뢰성 시험결과 10개의 시료 모두 4시간의 내열 신뢰성 시험에서 고장이 발생하지 않았다.

모든 시료에서 고장이 발생하지 않았으므로 수명 자료가 없기 때문에 개량 배연용 축류팬의 정확한 수명은 구할 수 없으나, 시험결과를 통해 250℃ 온도환경에서의 수명이 2시간 이상임을 알 수 있다. 그러므로 기존 배연용 축류팬의 내열 신뢰성이 연구목적을 만족할 만큼 향상되어 목표수명인 2시간을 만족할 것으로 판단된다.

6. 결 론

배연용 축류팬의 고장분석 및 내열 신뢰성 향상에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 배연용 축류팬의 내열 신뢰성 분석을 수행한 결과 250℃ 온도조건에서 신뢰수준 90%의 B10수명은 48분으로 예측되어 목표수명인 2시간을 만족하지 못하였다.

(2) 기존 배연용 축류팬의 고장은 모터에서 발생하였다. 기존모터의 고장 메커니즘은 코어를 바

디에 고정시키는 접착제의 용융, 코어와 코일 사이에 사용되는 절연지의 용융 그리고 코일의 절연파괴로 분석되었다. 그러므로 바디와 코어의 결합방법, 절연지의 재질, 코일의 절연코팅재를 변경하여 내열 신뢰성이 향상된 개량모터를 제작하였다.

(3) 개량 배연용 축류팬의 신뢰성 시험 결과 모든 시료는 250 °C 온도조건하에서 4시간의 시험시간동안 고장이 발생하지 않았기 때문에 신뢰수준 90%의 B₁₀수명은 2시간 이상임을 알 수 있었다. 따라서 개량 배연용 축류팬의 수명은 목표수명인 2시간을 만족할 것이다.

참고문헌

1. PSB CP 13, 1999, Code of practice for mechanical ventilation and air-conditioning in buildings, Singapore Productivity and Standards Boards.
2. BS 7346-2, 1990, Specification for powered smoke and heat exhaust ventilators, British Standards Institution.
3. NFSC 501, 2004, Fire safety standard of smoke control equipments, Ministry of Government Administration and Home Affairs of Korea.
4. Ryu, D. S. and Chang, S. W., 2005, Novel concepts for reliability technology, Microelectronics Reliability, Vol. 45, pp. 611-622.
5. D'Agostino R. B., Stephens, M. A., 1986, Goodness-of-Fit Techniques, CRC press.
6. KS A IEC 61649, 2003, Goodness-of-fit tests, confidence intervals and lower confidence limits for Weibull distributed data, Korean Standards Association.
7. Agency for Technology and Standards, 2003, Handbook of reliability terminology, ATS.