

전자제어모듈의 신뢰성보증 사례

정 문식¹⁾, 박 정원²⁾

요 약

일반적으로 제어시스템은 독립된 기능을 갖는 전자제어모듈들로 구성되고, 제어시스템의 보수에 있어서 최소 교체단위가 전자제어모듈이기 때문에 제어시스템의 신뢰성을 평가하는 것은 전자제어모듈의 신뢰성을 평가하는 것으로부터 출발한다. 전자모듈의 신뢰성을 평가할 때 주로 사용하는 평가척도는 MTBF이고, 제조업체에서는 일반적으로 MIL-HDBK-217의 수명예측방법을 이용하여 산출한 MTBF를 제시하고 있다. 하지만 현장의 구매자들은 물론 전자모듈을 개발하는 엔지니어도 MIL-HDBK-217 데이터를 이용한 계산만으로 산출한 MTBF가 실제 사용할 때와 큰 차이가 없는지 확인하기를 원한다. 본 논문에서는 이러한 요구에 따라서 MIL-HDBK-217의 수명예측 방법을 이용하여 예측한 수명을 가속수명시험을 통하여 보증하는 방법을 제시하고, 제시한 방법을 실제 국내에서 제작한 2종류의 전자제어모듈에 적용한 사례를 기술하였다. 국내에서 제작한 2종류의 전자제어모듈에 대하여 본 논문에서 제시한 보증시험방법에 따라서 시험한 결과 신뢰수준 60%에서 예측 수명을 보증할 수 있었고, 보증시험 후에 수명을 추정하기 위하여 추가적으로 장시간 시험하여 수명을 추정한 결과 추정된 수명이 MIL-HDBK-217을 이용하여 예측된 수명에 비하여 2.86~3.40배 길게 나타났다.

I. 서론

최근 들어 전자기술의 발달로 종래의 전기식 제어시스템이 전자식 제어시스템으로 집약화, 소형화되고 있으며, 대형제어시스템의 핵심을 담당하고 있는 전자제어시스템의 신뢰성 확보가 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 이러한 시스템은 독립된 기능을 갖는 전자모듈로 구성되고, 시스템의 고장은 전자모듈의 고장에 의존하기 때문에 시스템의 신뢰성을 평가하는 것은 전자모듈의 신뢰성을 평가하는 것에 의존한다. 하지만 전자모듈은 여러 종류의 부품으로 구성되므로 전자모듈을 평가하기 위해서는 여러 부품들에 대한 평가기술이 밑바탕이 되어야 한다.

전자제어모듈의 MTBF를 산출하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 방법은 MIL-HDBK-217을 이용한 예측방법이다. 실제로 대부분의 전자제어모듈 제조업체가 MIL-HDBK-217을 이용하여 산출한 MTBF를 제품 사양에 제시하고 있다. 하지만 현장의 구매자들과 전자모듈을 개발하는 엔지니어들은 MIL-HDBK-217 데이터를 이용한 계산이 얼마나 현실성이 있을 것인가에 의구심을 가지고 있으며 예측된 MTBF가 실제 사용할 때의 MTBF와 큰 차이가 없는지 확인하기를 원한다.

본 논문에서는 가속수명시험기법을 이용한 전자제어모듈의 보증시험방법을 제시하고, 제시한 방법을 실제 국내에서 제작한 2종류의 전자제어모듈에 적용한 사례를 기술하였다. 또한 보증시험 후에 수명을 추정하기 위하여 추가적으로 장시간의 시험을 수행하고, 시험으로부터 얻어진 데이터로부터 전자제어모듈의 수명을 추정한 후 예측수명과 비교 분석하였다.

1), 2) 산업기술시험원, 서울특별시 구로구 구로3동 222-13

II. 본론

1. 전자제어모듈의 신뢰성평가(수명예측) 방법

전자제어모듈의 신뢰성을 평가하는데 있어서 모듈을 구성하는 전자부품들의 수명은 (1)식과 같은 누적분포함수를 갖는 지수분포를 따르고, 서로 독립이라고 가정한다.

$$F(t) = 1 - \exp(-t/\theta) \quad (1)$$

여기서, θ 는 MTBF이다. 이와 같은 가정하에 다음과 같은 2가지 방법에 의하여 전자모듈의 신뢰성을 평가할 수 있다.

(1) MIL-HDBK-217을 이용한 예측방법

미 국방성에서는 30여년 동안 부품의 현장데이터를 수집하고 분석하여 부품의 고장률(MTBF의 역수)을 산출하고, 부품의 고장률에 영향을 미치는 여러 가지 요인을 분석하여 부품의 고장률을 보정할 수 있는 모델을 제시하였다[1]. 이 모델의 일반적인 형태는 (2)식과 같다.

$$\lambda_i = \lambda_{ib} \pi_{iQ} \pi_{iE} \pi_{iT} \dots \quad (2)$$

여기서, λ_i 는 부품 i 의 고장률, λ_{ib} 는 부품 i 의 기본 고장률, π_{iQ} 는 품질팩터, π_{iE} 는 환경팩터, π_{iT} 는 온도팩터이다(고장률을 보정하기 위한 팩터들은 이외에도 여러 가지 팩터들이 있다).

이론적인 예측방법에서는 (2)식을 이용하여 각 부품의 고장률을 계산하고, 계산된 고장률을 이용하여 (3)식과 같이 전자제어모듈의 고장률을 예측한다.

$$\lambda_M = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i \quad (3)$$

여기서, λ_M 은 전자모듈의 고장률, n 은 부품의 종류 수, n_i 는 부품 i 의 수, λ_i 는 부품 i 의 고장률이다.

(2) 가속시험을 통한 평가방법

가속시험은 시험시간을 단축시키기 위하여 정상사용조건보다 높은 스트레스 조건에서 시험한 후 가속계수를 이용하여 가속조건에서의 시험데이터를 정상사용조건에서의 데이터로 환산하고 환산된 데이터를 분석하여 정상사용조건에서의 MTBF를 평가하는 방법이다. MTBF를 평가하기 위한 시험은 그 목적에 따라서 신뢰성적합시험(Reliability Compliance Test)과 신뢰성결정시험(Reliability Determinant Test)의 2종류로 분류할 수 있다.

MTBF를 보증하기 위하여 실시하는 신뢰성적합시험은 다음과 같은 절차에 따라서 시험을 실시한다.

① 시험조건은 전자제어모듈의 최대 허용 사용온도를 시험온도로 정한다. 최대 허용 사용온도는 전자모듈을 구성하는 부품들의 최대 허용 사용온도에 의존한다.

② 정상사용조건과 시험조건 사이의 가속계수를 구한다.

③ 다음과 같은 시료수의 전자모듈을 시험온도에서 T시간 동안 시험한다(T는 (4)식의 시료수와 현실적인 시간의 제약을 고려하여 결정).

$$n \geq \frac{\chi^2(\beta, 2c+2)}{2(af/\theta)T} \quad (4)$$

여기서, c 는 허용 고장수, θ 는 목표 MTBF, $(1-\beta) \times 100\%$ 는 신뢰수준이다.

④ n 개의 시료를 T시간동안 가속조건에서 시험하여 c 개 이하의 고장이 발생하면 $(1-\beta) \times 100\%$ 의 신뢰수준에서 전자제어모듈이 목표 MTBF를 만족한다고 볼 수 있다.

MTBF를 추정하기 위하여 실시하는 신뢰성결정시험은 다음과 같은 절차에 따라서 시험하고, 시험결과 얻어진 데이터를 분석한다.

- ① 시험조건은 전자제어모듈의 최대 허용 사용온도를 시험온도로 정한다.
- ② 정상사용조건과 시험조건 사이의 가속계수를 구한다.
- ③ n 개의 시료를 시험하여 얻은 데이터를 통하여 다음과 같이 MTBF를 추정한다[2].

$$\text{고장이 발생한 경우: MTBF} = \left\{ \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)T \right\} \cdot af/r \quad (5)$$

$$\text{고장이 발생하지 않은 경우: MTBF} = (2nT) \cdot af/\chi^2(0.5; 2)$$

여기서, t_i 는 가속조건에서의 고장시간, T 는 시험시간, af 는 가속계수, n 은 시료수, r 은 고장수이다.

위와 같은 신뢰성적합시험 및 신뢰성결정시험을 수행하는데 있어서 문제는 가속계수를 어떻게 산출하는가이다. 부품의 경우 가속계수를 구하는 방법은 여러 스트레스 수준에서 시험하고, 시험으로부터 얻은 데이터를 통하여 수명과 스트레스 사이의 관계식을 추정함으로써 가속계수를 산출한다. 하지만, 모듈의 경우 모듈 가격이 고가이므로 부품의 경우와 마찬가지로 여러 수준에서 많은 시료를 가지고 시험하기에는 어려움이 따른다. 그렇지만, 모듈은 여러 부품들로 이루어져 있고, 스트레스를 인가하는 경우 결국 모듈을 구성하는 부품들이 가속되는 것이므로 부품들의 가속계수를 통하여 모듈의 가속계수를 산출할 수 있다.

부품들의 가속계수 관련한 정보로부터 모듈의 가속계수를 산출하는 방법으로는 여러 가지 제시된 방법[3,5~7]들이 있지만 본 연구에서는 MIL-HDBK-217의 예측수명과 비교하기 위하여 MIL-HDBK-217의 예측수명을 이용하여 다음과 같이 산출하였다.

$$af = \lambda_a / \lambda_u \quad (6)$$

여기서, λ_a 는 MIL-HDBK-217을 통하여 예측한 가속조건에서의 예측고장률, λ_u 는 MIL-HDBK-217을 통하여 예측한 정상조건에서의 예측고장률이다.

2. 신뢰성 보증사례

(1) 대상 모듈

국내 제조업체에서 생산한 모듈에 대하여 앞에서 제시된 모듈의 신뢰성 평가방법을 적용하여 모듈의 신뢰성을 평가하였다. 시험대상으로 삼은 모듈은 분산제어시스템(DCS)용 디지털 입력 모듈(Digital Input Module, DIM)과 디지털 출력 모듈(Digital Output Module, DOM)이다.

<표 1> DIM 모듈의 사양

번호	항 목	사 양
1	입력접수	32점(8점 Common)
2	절연방식	Photo Coupler
3	입력전압	Low : 4V, High : 16V
4	외부접속방식	Terminal Block
5	소비전력	5V, 0.5A
6	크기(Board)	233.5 x 220mm
7	보드 ID 설정방법	Back Plane 이용 Auto setting
8	사용 IC Type	CMOS IC
9	사용(보관)온도	0~60(-30~85)℃
10	습도	5~90%(non-condensing)

DIM은 외부(현장)에서 입력되는 디지털 입력신호를 받아들이는 모듈로 사양은 다음 <표 1>

과 같다. DOM은 외부(현장)로 출력되는 디지털 출력신호를 현장으로 출력시키는 모듈로 사양은 다음<표 2>와 같다.

<표 2> DOM 모듈의 사양

번호	항 목	사 양
1	출력접수	32점(8점 Common)
2	절연방식	Photo Coupler 및 Relay 절연
3	출력형식	Relay 출력 2A
3	Relay 사양	구동전류 : 10mA, 부하최대전류 : 25mA
4	외부접속방식	Terminal Block
5	소비전력	5V: 0.5A, 15V : 0.2A
6	크기(Board)	233.5 x 220mm
7	보드 ID 설정방법	Back Plane 이용 Auto setting
8	사용 IC Type	CMOS IC
9	사용(보관)온도	0~60(-30~85)℃
10	습도	5~90%(non-condensing)

(2) MIL-HDBK-217을 이용한 이론적인 수명예측

앞에서 언급한 MIL-HDBK-217 예측방법을 이용하여 DIM과 DOM모듈의 MTBF를 산출하였다. 기준온도를 30℃라고 하였을 때 DIM과 DOM의 MTBF는 다음과 같이 예측되었다.

DIM 모듈의 MTBF : 116475.5h(13.3년)

DOM 모듈의 MTBF : 124766.3h(14.2년)

(3) 가속수명시험을 이용한 신뢰성평가

1) 시험 계획

시험대상 모듈의 MTBF를 평가하기 위하여 시료의 수 및 시험시간의 제한에 따라 제1단계로 목표 MTBF를 보증하기 위한 시험을 실시하고, 이 시험이 성공적으로 마치는 경우 제2단계로 MTBF를 추정하기 위한 시험을 실시한다. 이 때 목표 MTBF는 MIL-HDBK-217을 이용하여 예측된 MTBF로 정한다.

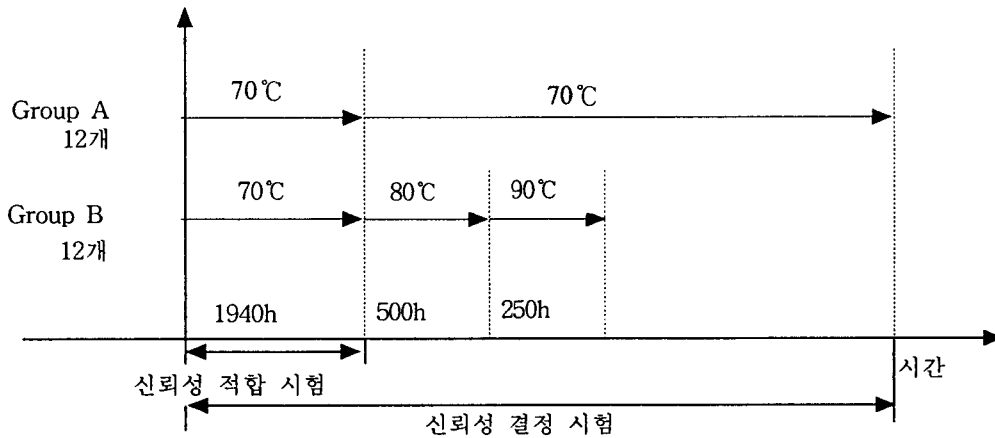
제1단계 시험은 신뢰성적합시험으로 미국방성 규격인 MIL-HDBK-217에 의하여 예측된 MTBF를 보증하기 위하여 실시한다. 시험 시간은 1940시간을 실시하고, 온도조건은 70℃, 동작 상태에서 실시한다.

제2단계 시험은 1단계 시험이 종료된 후 이어서 신뢰성결정시험을 실시한다. 이는 가속수명 시험을 통하여 해당 모듈의 수명이 얼마나 되는지를 결정할 목적으로 실시한다. 신뢰성 결정 시험은 시료를 2 부분으로 나누어 진행한다. 한 부분은 일정한 온도조건(70℃)에서 시험을 실시하고, 다른 한 부분은 단계적으로 온도를 높이면서 시험을 실시한다.

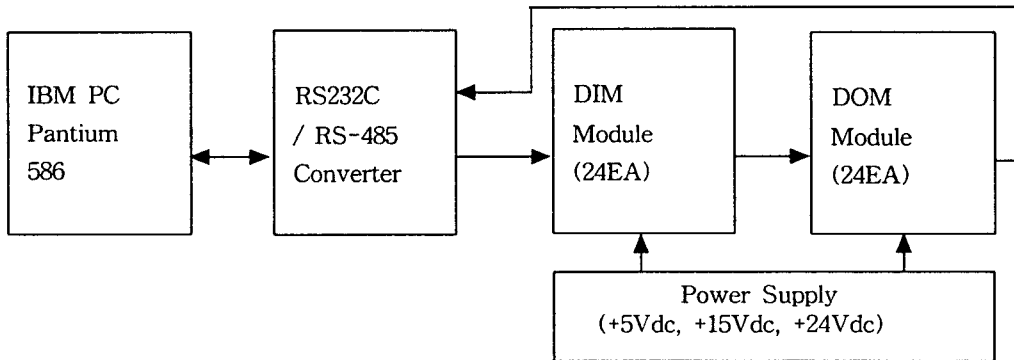
이 때, 시료수는 (4)식에 의하여 계산한 결과 DIM은 24개, DOM은 21로 결정되었으나, DIM과 DOM의 기능점검을 위해서는 동일한 수의 모듈이 필요하므로 24개로 정하였다. 단, 신뢰수준 60%에서 합격판정기준 c는 0을 적용하였다. 즉, 24개를 시험하여 한 개의 모듈도 고장이 발생하지 않아야 목표 MTBF를 만족한다고 볼 수 있다.

이와 같은 시험 진행과정을 <그림 1>에 나타내었다. 시험 중에 모듈의 기능은 연속적으로 모니터링하여 정확한 고장시간을 알 수 있도록 하였다. 디지털 입·출력 모듈의 기능은 크게 상위 블록(block)과의 통신기능, 신호 입출력 기능 및 신호 입출력에 대한 절연기능 등을 들 수 있는데 위의 기능 중 통신기능과 신호입출력 기능을 시뮬레이터를 통하여 연속 측정하여 데이터 파일로 저장하고 문제가 발생하면 에러 발생 내용과 발생 시간을 기록하도록 하였다.

모듈 기능의 점검은 다음과 같은 방법으로 하였다. DIM, DOM 모듈은 디지털 입·출력 모듈로서 DIM모듈에 디지털 입력을 인가할 수 있고 DIM모듈의 출력은 다시 DOM 모듈의 입력으로 인가한다. DOM 모듈의 출력과 DIM 모듈의 입력상태를 상호 비교하여 DIM, DOM 모듈의 이상 여부를 판단한다. 이를 위하여 시험용 시뮬레이터를 제작하고 모듈의 특성을 연속적으로 점검할 수 있도록 하였다. 시뮬레이터의 구성도는 <그림 2>와 같다.



<그림 1> Group별 시험계획



<그림 2> 기능점검용 시뮬레이터 구성도

① 입력신호의 모의 구현

입력신호를 모의로 구현하여 DIM모듈에 인가하고, 시간경과에 따른 신호의 변화를 미리 정하여 입력한다. 입력신호는 8CH를 1Byte로 결정하여 4Byte의 신호(32CH)를 입력하며 입력신호의 순서는 00 → 55 → AA → 00 의 순서로 인가한다. 입력변화 시간은 10초로 한다.

0000 0000(binary) → 0101 0101 → 1010 1010 → 0000 0000

② 출력신호의 측정, 수집, 보관

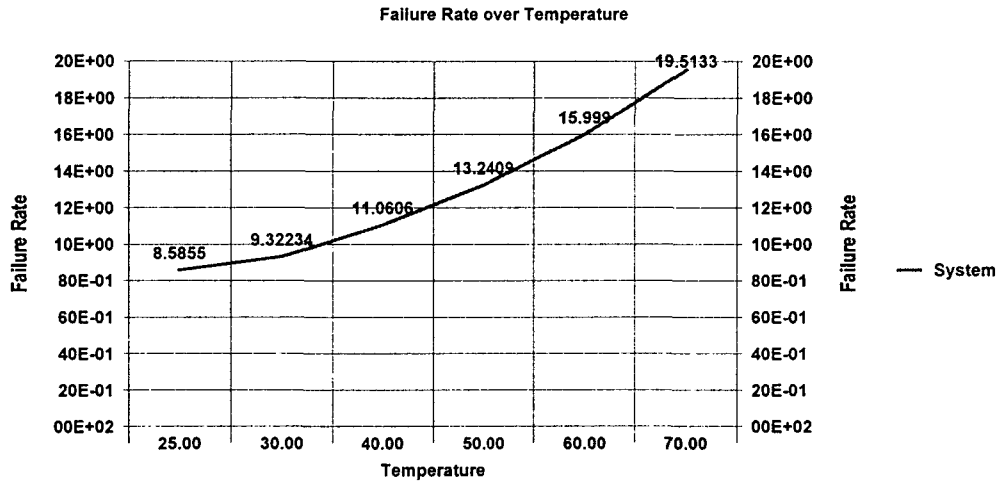
DOM 모듈로부터 출력되는 신호를 자체의 통신 포트를 통하여 PC에 데이터 파일로 보관한다. 이때 입력신호와 비교하여 변화(에러 발생)가 있는 데이터만을 저장한다. 모듈의 기능인 통신기능과 입출력기능의 점검은 저장 파일로부터 이상여부를 판단한다.

2) 가속계수 산출

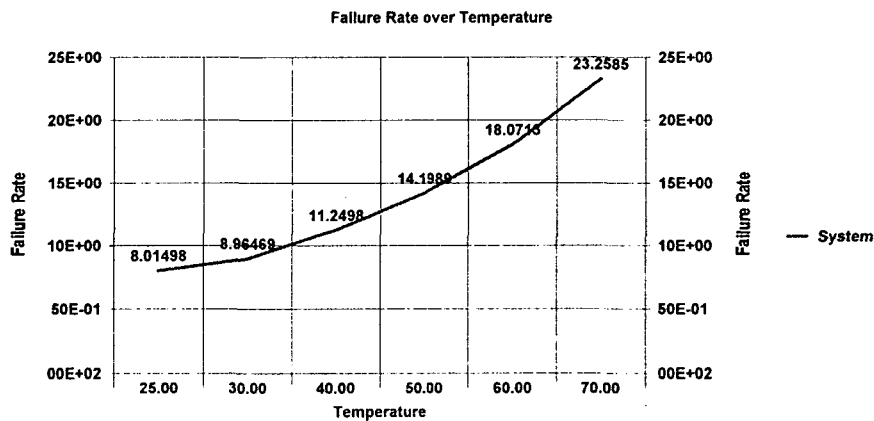
이 두 모듈에 대하여 MIL-HDBK-217에 의하여 온도에 따른 고장률을 예측한 결과 각각 <그림 3>, <그림 4>와 같았다. 단, 환경조건은 G_B(Ground Benign), 품질팩터는 모두 상용수준으로 정하였다. <그림 3>과 <그림 4>로부터 두 모듈의 25℃와 70℃사이의 가속계수를 구하면 다음과 같다.

$$af_{DIM} = 19.5433(\times 10^{-6}h) / 8.5855(\times 10^{-6}h) = 2.3$$

$$af_{DOM} = 23.2585(\times 10^{-6}h) / 8.01498(\times 10^{-6}h) = 2.9$$



<그림 3> DIM 모듈의 예측고장률



<그림 4> DOM 모듈의 예측고장률

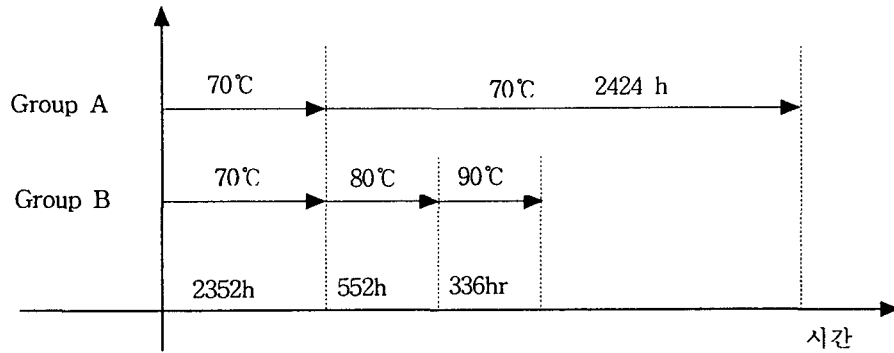
3) 시험결과 및 분석

시험계획에 따라 DIM, DOM 모듈에 대한 시험을 2단계로 구분하여 가속수명시험을 실시하

였다. 시험 중 시험장비 운용상의 문제로 시험 일정이 계획과 다르게 진행되어 실제로 시험한 시간은 <그림 5>와 같았다.

① 신뢰성적합시험

시험 시료인 DIM, DOM 모듈 각각 24모듈을 보증시험을 위하여 1940시간동안 70℃의 항온기에서 시험한 결과 각 모듈에 있어서 기능에 이상을 발견하지 못하였다. 이와 같은 시험결과로부터 시험한 모듈이 MIL-HDBK-217을 이용하여 예측한 MTBF를 가짐을 알 수 있었다.



<그림 5> 그룹별 시험한 시간 계획표

② 신뢰성결정시험

신뢰성적합시험이 끝난 모듈에 대하여 이어서 시험을 계속 실시하였다. 시험결과는 다음 <표 3>과 같았다.

<표 3> DIM, DOM 모듈 가속수명시험 결과표

	1차시험		2차시험		3차시험		비 고
Group A	시험시간	2352hr	시험시간	2424hr	시험시간	-	시험 중도절단
	가속조건	70℃	가속조건	70℃	가속조건	-	
	시험결과	양호	시험결과	양호	시험결과	-	
Group B	시험시간	2352hr	시험시간	552hr	시험시간	336hr	가속조건100℃에서 통신 에러 발생(약1일 정상동작후 에러 발생)
	가속조건	70℃	가속조건	80℃	가속조건	90℃	
	시험결과	양호	시험결과	양호	시험결과	양호	

<표 3>에서 Group B의 시료에 대하여 100℃에서 시험을 할 경우 에러가 발생한 것은 모듈에 사용된 IC(CPU)의 보증온도 초과로 인하여 동작에 오류가 발생된 것으로 판단되었다. <표 3>의 결과로부터 DIM 및 DOM 모듈에 대한 MTBF를 구하면 다음과 같다. 시험 중 고장이 발생하지 않았으므로 (5)식의 고장이 발생하지 않은 경우에 대한 식을 적용하여 MTBF를 구한다.

$$\text{DIM : MTBF의 추정치} = 2 \cdot (129830.4 + 66902.4 + 18547.2 + 14112) / 1.386$$

$$= 331013\text{h(약 38년)}$$

$$\text{DOM : MTBF의 추정치} = 2 \cdot (163699.2 + 84355.2 + 25171.2 + 20160) / 1.386$$

$$= 423355.8\text{h(약 48.3년)}$$

위 추정치는 MTBF에 대한 점추정치이고, MTBF에 대한 신뢰수준 60%와 90%에서의 신뢰한을 구하면 <표 4>와 같다.

<표 4> MTBF 신뢰하한

신뢰수준	DIM 신뢰하한 추정치	DOM 신뢰하한 추정치
60%	250701.6h(28.6년)	320640h(36.6년)
90%	99519.3h(11.4년)	127282.3h(14.5년)

4) 수명예측 방법별 비교분석

앞에서 추정한 모듈의 MTBF를 추정방법별로 비교하면 <표 5>과 같다.

<표 5> 수명추정방법별 전자제어모듈의 MTBF 비교표

시료	MIL-217에 의한 추정	가속수명시험방법	비 고
DIM-501	13.3년	38년(28.6년*)	2.86배** (2.15배**)
DOM-501	14.2년	48.3년(36.6년*)	3.40배** (2.58배**)

* 신뢰수준 60%, 구간추정의 신뢰하한

** (가속수명시험에 의한 MTBF) / (MIL-217에 의한 추정 MTBF)의 비율

위 표에서 보면 가속수명시험에 의하여 얻어진 수명이 MIL-HDBK-217F에 의해 추정된 값에 비하여 2.86~3.40배(신뢰수준 60%, 구간추정의 신뢰하한의 경우 : 2.15~2.58배) 길게 나타났다.

5) 추정된 수명과 시험시간의 비교

하지만 제시한 방법에서도 모듈의 개수가 적은 것이 아니기 때문에 제조업체 입장에서는 시험비용이 부담으로 남게된다. 시험비용을 구분하면 크게 시험모듈비용, 시험장비 사용료, 시험시간으로 구분될 수 있는데 시험장비 사용료나 시험시간의 경우에는 부품을 시험할 때도 소요되는 비용이므로 모듈을 시험할 때 특히 부담이 되는 비용은 시험모듈비용이다. 그러나 본 논문에서 시험한 예를 보면 보수적으로 생각하여 DIM과 DOM의 MTBF 추정치로서 90%신뢰하한을 사용하였을 때 99519.3h(11.4년)과 127282.3h(14.5년)이 된다. 이 MTBF를 시험시간과 비교하면 <표 6>과 같다.

<표 6> 시험시간과 MTBF의 비교

	DIM	DOM
신뢰성적합시험	$(1940h \cdot 2.3)/99519.3h=0.045$	$(1940h \cdot 2.9)/127282.3h=0.044$
신뢰성결정시험	$(4776h \cdot 2.3)/99519.3h=0.110$	$(4776h \cdot 2.9)/127282.3h=0.109$

<표 6>에서 보면 모듈 1개당 시험시간은 수명에 비하여 상대적으로 매우 짧은 것을 볼 수 있다. 시험은 모듈의 사용조건 범위내에서 실시되므로, 수명에 비하여 상대적으로 매우 짧은 기간동안 시험한 모듈은 다시 사용가능하다. 오히려 충분한 번인을 통하여 초기 결함이 제거되었다고 볼 수 있으므로 시험을 거치지 않은 모듈보다 신뢰성이 높을 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 가속수명시험을 이용하여 MTBF를 보증하는 방법을 제시하였다. MIL-HDBK-217을 이용한 MTBF 예측방법은 이론적으로 계산하기 때문에 현실성이 떨어지고, 모듈

에 대하여 부품의 가속수명시험과 같이 여러 수준에서 시험하여 모듈의 MTBF를 추정하는 것은 비용이 너무 많이 들기 때문에 본 논문에서 제시한 방법을 사용하면 두 방법의 단점을 보완할 수 있을 것이다. 제시한 보증시험방법을 실제 국내 제조업체에서 제작한 2종류의 제어모듈에 적용하여 예측한 수명을 보증할 수 있었으며, 보증시험 후에 추가적으로 장시간 시험하여 얻어진 데이터를 이용하여 수명을 추정한 결과 예측수명보다 2.86~3.40배 길게 나타났다.

참고문헌

- [1] MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 1991.
- [2] Tobias, P. A. and Trindade, D. C., Applied Reliability, 1986.
- [3] IBM, Power Supply Evaluation Plan.
- [4] Nelson, W., Accelerated Testing, John Wiley & Sons, 1990.
- [5] Hart, L.(1987), "Reliability of an Electronic Assembly: A Case History," IEEE Trans. on Reliability, Vol.36, No.4, 385-389.
- [6] Moura, E. C.(1991), "How to Determine Sample Size and Estimate Failure Rate in life testing", ASQC Basic Reference in Quality Control : Statistical Techniques, Vol. 15.
- [7] Moura, E. C.(1992), "A Method to Estimate the Acceleration Factor for Subassemblies", IEEE Trans. on Reliability, Vol. 41, No.3, 396-399.