

# Prototype 모델 MDU의 신뢰도 예측

김주년\*, 정혜승\*\*, 이재득\*\*\*

## Reliability Prediction of Prototype Model MDU

Joon-yun Kim\*, Hae-seung Jung\*\*, Jae-Deuk Lee\*\*\*

### Abstract

Prototype model of MDU(Master Data Unit), to be employed on KSLV-I, has been developed and tested being interfaced with other units. Before stepping into the development of engineering and flight model phases, we have carried out reliability prediction of prototype MDU in order to assure availability of the unit. This paper describes the method of reliability prediction of prototype MDU and prediction results based on MIL-HDBK-217F, 'Electronic Reliability Design Handbook'.

### 초 록

KSLV-I에 탑재를 위한 주 데이터 장치(MDU)의 초기개발모델이 제작되었으며 인터페이스시험이 수행되었다. MDU의 엔지니어링 및 비행모델 제작을 수행하기 이전에 MDU 초기 모델에 대한 발사체 탑재 가용성을 확인하기 위하여 신뢰도 예측을 수행하였다. 본 논문은 전장품의 신뢰도 예측에 활용되는 MIL-HDBK-217F를 근간으로 MDU 개발 모델의 신뢰도 예측 방법에 대해 기술하였으며 신뢰도 예측결과를 기술하고 있다.

키워드 : 주 데이터 장치(MDU, master data unit), 신뢰도 예측(reliability prediction), 실패율(failure rate), 군사핸드북-217F(MIL-HDBK-217F), 군사핸드북-338B(MIL-HDBK-338B)

## 1. 서 론

KSLV-I 상단부 원격측정 데이터를 처리하기 위한 MDU의 개발모델 제작을 완료하였으며 인터페이스 및 성능시험을 완료하였다. MDU는 비행 중 발사체의 원격측정데이터를 지상으로 전송하므로 발사체 전장품 중에서 매우 중요한 부분품이다. MDU의 실제 발사체 적용의 가능성을

검토하기 위하여 MDU의 신뢰도를 예측할 필요가 있다. 본 논문에서는 MIL-HDBK-217F를 근간으로 MDU의 구성 부품레벨의 신뢰도 예측을 수행하였다. 부품의 상위레벨 개념의 장치 신뢰도 예측은 MIL-HDBK-338B의 신뢰도 예측 방법에 따라 신뢰도를 예측하였다. 신뢰도 예측의 간편화를 위하여 신뢰도 관점에서 중요한 부품 및 연결부를 중점으로 신뢰도를 예측하였다. 그리고

\* 전자그룹/jnkim@kari.re.kr

\*\*\* 전자그룹/jdlee@kari.re.kr

\*\* 전자그룹/hsjung@kari.re.kr

신뢰도 예측 결과를 토대로 하여 실제 MDU의 신뢰도를 향상 방안에 대해서도 기술하였다.

## 2. 발사체에서의 전장품 신뢰도

1980년부터 1999년까지의 전 세계 발사체 실패 사례를 살펴보면 추진기관으로 인한 실패가 약 56%가량 차지하고 있다. 그 다음으로 실패가 많은 부분은 항법과 분리 장치로써 약 10%씩 차지한다[1]. 그리고 전기부분에서는 약 2%가량 차지한다. 분류상 Avionics로 되어 있는 실패 사례 중 실제 전장품의 실패는 전체 avionics 실패 중 최소 1/3가량 될 것으로 사료된다. Avionics의 실패 중 1/3을 전장품의 실패로 가정하면, 실제 전장품의 실패사례는 전체 실패 중 5% 가량을 차지한다. 그러므로 발사체에 탑재될 전장품의 신뢰도는 매우 중요하므로 신뢰도 확보가 필수적이다. 특히 신뢰도 확보를 위하여 정량적인 신뢰도 분석이 필요하며 신뢰도의 향상을 위한 노력도 매우 중요하다. 이와 같은 일련의 신뢰도 분석 및 향상을 위한 노력을 통하여 발사체 전체 신뢰도 향상을 기대할 수 있다.

표 1. 발사체 서브시스템의 실패 (1980-1999)

Launch Vehicle Subsystem Failures, 1980-1999								
Country	Propulsion	Avionics	Separation	Electrical	Structural	Other	Unknown	Total
U.S.	15	4	8	1	1	1		30
CIS/USSR	33	3	2			1	19	58
Europe	7	1						8
China	3	1			2			6
Japan	2	1						3
India	1	1	1	1		1		5
Israel	1							1
Brazil	2							2
N. Korea							1	1
Total	64	11	11	2	3	3	20	114

## 3. 용어정리

- $\lambda_P$  부품의 실패율(failure rate)
- $\pi_T$  온도인자(temperature factor)
- $E_a$  유효 활동 에너지(effective activation energy)
- $C_1$  복잡도 실패율(complexity failure rate)
- $C_2$  패키지 실패율(package failure rate)
- $\pi_E$  환경인자(environment factor)
- $\pi_L$  학습인자(learning factor)
- $\pi_Q$  품질인자(quality factor)
- $\pi_b$  베이스 실패율(base failure rate)
- $\theta_{JC}$  케이스 접한 온도 저항(junction-to-case thermal resistance( $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$ ))
- $T_c$  케이스 온도( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_j$  높은 케이스 접합온도(worse case jn. temp.)
- $\pi_P$  능동 핀인자(active pins factor)
- $\pi_K$  탈부착인자(mating/unmating factor)
- $N_1$  Wave Soldered Functional PTH (Printed Through Holes)
- $N_2$  Hand Soldered PTH

위의 변수들 중 환경인자, 학습인자 그리고 품질인자는 본 신뢰도 예측에서 부분품들의 신뢰도 예측에 공통적으로 적용된다.  $\pi_E$  즉 환경인자는 MIL-HDBK-217F에 따르면 응용분야에 따라 항공기, 우주비행체, 미사일, 대포등으로 구분하는데, 본 탑재장치와 가장 관련 부분은  $M_L$  즉 미사일 발사체(Missile Launch)에 해당한다. 또한  $\pi_E$ 는 소자 종류에 따라(예: microcircuits, 다이오드, 스위치, 등) 값이 바뀐다. 본 논문에서 언급한 소자들은 모두 전자회로 소자이므로 참고문헌에 따라  $\pi_E$ 를 12로 설정하였다.  $\pi_L$  즉 학습인자는 부품이 개발된 후 사용된 연한에 따라 변하는 인자로서 본 논문에서 사용된 부품은 모두 2년 이상 지나 성능이 충분히 검증된 것으로 판단하여 학습인자  $\pi_L$ 을 1.0으로 설정하였다.  $\pi_Q$  즉 품질인자는 제조된 소자가 어떤 규격을 만족하는지에 따라 다르며, 본 논문의 부품들은 모두 Class B를 만족하면서 MIL-STD-883 스크린을 거친 부품으

로 가정하여 2.0을 적용하였다[2].

#### 4. 탑재 전장품의 신뢰도 예측 방법 및 결과

MDU는 KSLV-I의 상단 원격측정 데이터를 수집하여 지상으로 송신하는 임무를 수행한다. MDU는 마더보드상에 DSP를 비롯하여 데이터를 처리하는 CPU보드, 원격측정 데이터를 송신하는 PCM(Pulse Code Modulation)보드, 검증위성 데이터 수집과 MIL-STD-1553B를 이용한 데이터를 수집하는 통신보드, 아날로그 데이터를 획득하는 DAQ보드, 그리고 전원보드로 구성되었다. 신뢰도 예측에 사용한 수식은 모두 MIL-HDBK-217F를 기본으로 하였으며, MDU를 구성하는 주요 부품들과 PCB 그리고 연결부에 대해 신뢰도를 예측하였다. 각 부품들의 신뢰도 계산 결과를 이용하여 전체 MDU의 신뢰도를 예측하였다.

##### 4.1 128K×32bits SRAM 신뢰도 예측

MDU에 사용된 주 메모리로는 White Electronics사의 SRAM WS128K32G2/FP가 사용되었으며, 이 소자에 대한 신뢰도 예측은 다음과 같다. 메모리 소자들은 수식 (1)을 이용하여 부품의 실패율을 구한다.  $\lambda_{cyc}$ 은 ROM일 경우 부품의 읽기와 쓰기에 따른 부품의 실패율이므로 RAM의 경우에는 적용되지 않는다.

$$\lambda_p = (C_1\pi_T + C_2\pi_E + \lambda_{cyc})\pi_Q\pi_L \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \quad (1)$$

$C_1$ 은 메모리의 크기와 종류에 따라 다르게 설정된다. MIL-HDBK-217F에 따르면, 부품의 용량이 4배 증가할 때 마다  $C_1$ 은 약 2배가량 증가한다. MDU에 사용된 주 메모리로 총 4Mbits의 크기와 MOS의 SRAM을 사용하였으므로  $C_1$ 은 약 0.124가 된다.

$\pi_T$ 는 수식 (2)와 같고, 미사일 발사체의 경우  $T_c$ 의 값은 60으로 적용한다.  $\theta_{JC}$ 의 값은 평면패

키지(flat package)인 SRAM 소자 경우 10을 적용한다. 소모 전류는 부품 데이터자료에 나타난 0.02A를 적용하였다.  $T_j$ 는 수식 (3)으로부터 구한다.

$$\pi_T = 0.1 \times \exp\left(\frac{-E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298}\right)\right) \quad (2)$$

$$T_j = T_c + \theta_{JC}P = 60 + 28 \times 5 \times 0.02 = 64 \quad (3)$$

계산결과  $T_j$ 의 값이 64이고 MIL-HDBK-217F에서는 해당  $E_a$ 을 0.50로 제시하고 있다. 그러므로  $\pi_T$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \pi_T &= 0.1 \times \exp\left(\frac{-0.5}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{64 + 273} - \frac{1}{298}\right)\right) \\ &= 0.94 \end{aligned}$$

패키지 실패율 즉  $C_2$ 는 다음 수식 (4)로 부터 계산되는데 사용 핀의 수와 패키지 타입에 따라 달라진다. 위 SRAM은 SMT(Surface Mount Tech.), hermetic소자이며, NP(number of function pins)가 57이므로 계산하면  $C_2$ 는 약 0.025가 된다.

$$C_2 = 2.8 \times 10^{-4} (N_p)^{1.08} \quad (4)$$

환경인자, 학습인자, 그리고 품질인자는 동일하게 적용한다. 식 (1)에 따라 SRAM의 실패율을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_p &= (0.124 \times 0.94 + 0.025 \times 12) \times 1 \times 2 \\ &= 0.83312 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \end{aligned}$$

그러므로 SRAM의 신뢰도는  $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(10 \times 0.83312/10^6)} = 0.9999916$ 이다[3].

##### 4.2 512K×8bits Flash ROM 신뢰도 예측

MDU에 사용된 ROM 소자는 White Electronics사의 WMF512K8-60DEM5 플래쉬 ROM을 사용하였다. 플래쉬 ROM 메모리에 대한

신뢰도 예측은 다음과 같다.

플래쉬 ROM의 신뢰도 예측 방법은  $C_1$ 과  $\lambda_{cyc}$  변수를 제외하고는 SRAM의 신뢰도 예측방식과 동일하게 사용한다. 메모리 크기의 변수  $C_1$ 은 플래쉬 메모리 크기가  $256K < B < 1M$ 일 때 해당 값인 0.0068 보다 약 2배 큰 값 즉 약 0.0136 정도로 예상한다.  $\lambda_{cyc}$  값은 식 (5)로부터 구한다. 플래쉬 ROM의 제조 형태(type)가 미지수일 때 FLOTOX(Floating Gate Tunnel Oxide)의 해당 값을 사용한다[2].

$$\lambda_{cyc} = \left( A_1 B_1 + \frac{A_2 B_2}{\pi_Q} \right) \times \pi_{ECC} \quad (5)$$

$A_1$ 은 ROM의 수명동안 프로그램밍 횟수에 대한 변수이다. 프로그램 횟수를 500~1,000회 정도라 가정하면 이에 해당 값으로 MIL-HDBK-217F에서 0.0068로 제시하였다.

$B_1$ 과  $B_2$ 은 메모리 크기와  $T_j$ 에 의해 정해지는 값으로 다음의 수식으로 구할 수 있다. MIL-HDBK-217F에서  $B_2$ 의 값은 ROM의 형태를 모를 경우 영(zero)으로 가정하도록 하였다.

$$\begin{aligned} B_1 &= \left( \frac{B}{16000} \right)^{0.5} \times \left( e^{\left( \frac{-0.15}{8.63 \times 10^{-5}} \left( \frac{1}{T_j + 273} \times \frac{1}{333} \right) \right)} \right) \\ B_2 &= \left( \frac{B}{64000} \right)^{0.5} \times \left( e^{\left( \frac{-0.15}{8.63 \times 10^{-5}} \left( \frac{1}{T_j + 273} \times \frac{1}{303} \right) \right)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이 식으로부터  $B_1$ 은 아래와 같이 17.83이 된다.

$$\begin{aligned} B_1 &= \left( \frac{4 \times 10^6}{16000} \right)^{0.5} \times \left( e^{\left( \frac{-0.15}{8.63 \times 10^{-5}} \left( \frac{1}{64 + 273} \times \frac{1}{333} \right) \right)} \right) \\ &= 17.83 \end{aligned}$$

$A_2$  인자는 ROM의 수명보다 많은 수의 프로그래밍 회수가 요구될 때 적용하는 값으로 MDU에서는 초과하지 않으므로 0의 값을 가진다.

한편  $\pi_{ECC}$ 는 ROM내의 ECC(Error Correction Code)의 유무에 따라 결정되는 값이며, ECC 기능이 없는 소자 경우에는 1.0이다.

그러므로  $\lambda_{cyc}$  값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{cyc} &= \left( A_1 B_1 + \frac{A_2 B_2}{\pi_Q} \right) \times \pi_{ECC} = (0.0068 \times 17.83) \times 1.0 \\ &= 0.123 \end{aligned}$$

그러므로 이 플래쉬 ROM의 실패율과 신뢰도는 아래와 같다. 아래 계산 결과에서 나타난 바와 같이 ROM과 RAM의 신뢰도는 거의 유사한 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned} \lambda_p &= (0.0136 \times 0.94 + 0.025 \times 12 + 0.12) \times 1 \times 2 \\ &= 0.8655 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda t} = e^{-(10 \times 0.8655/10^6)} \\ &= 0.999991346 \end{aligned}$$

### 4.3 FPGA 신뢰도 예측

MDU에 사용된 FPGA(Field Programmable Gate Array)는 Xilinx사의 QPRO 시리즈 소자 중 PGA(Pin Grid Array) 패키지인 XQ4005와 XQ4013E 두 가지 형태이다. FPGA의 신뢰도는 MIL-HDBK-217F에 기술한 바와 같이 'Micro-circuits, Gate Arrays'의 범주로 분류되면 식 (7)으로부터 구할 수 있다.

$$\lambda_p = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \quad (7)$$

본 논문에서는 XQ4005를 기준으로 신뢰도를 예측하였다. XQ4005 FPGA의 게이트 수는 5,000이고 이에 해당하는 부품 복잡도 실패율  $C_1$ 의 값으로 MIL-HDBK-217F에서는 0.0034로 제시한다. 온도인자  $\pi_T$ 는 ROM과 동일하게 0.94를 사용한다. FPGA 핀 수가 156이지만 실제 사용하는 핀 수는 40~60핀 정도임을 고려하여 패키지 실패율  $C_2$  계산 결과 0.025가 되었다.

그러므로 FPGA 자체의 부품 실패율은

$$\begin{aligned} \lambda_p &= (0.0034 \times 0.94 + 0.025 \times 12) \times 1 \times 2 \\ &= 0.60 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \text{ 이 된다.} \end{aligned}$$

FPGA를 구동하기 위해서는 클럭(clock or oscillator)이 필요하며 이 부품의 신뢰도는

FPGA의 신뢰도 계산에 포함되어야 한다. MDU에서는 20MHz 클럭을 주로 사용하는데 이 부품의 실패율은 수식(8)으로 구한다.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \quad (8)$$

클럭은 MIL-HDBK-217F의 Quartz Crystals의 변수 값을 따른다. 그러므로 베이스 실패율  $\lambda_b$ , 품질인자  $\pi_Q$ 와 환경인자  $\pi_E$ 는 앞의 메모리와 FPGA의 값과 다르다. 클럭의 베이스 실패율은 주파수에 따라 다른데 20MHz 클럭의 실패율은 0.026이다. 군사규격 부품 클럭의 품질인자는 1.0, 환경인자는 32이다. 클럭의 환경인자 값이 매우 큰 이유는 미사일과 발사체 등 응용에서 발사 시 진동에 의한 주파수의 변화(drift)가 발생할 가능성이 많기 때문인 것으로 사료된다.

20MHz 클럭의 실패율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_p &= \lambda_b \pi_Q \pi_E = 0.026 \times 1.0 \times 32 \\ &= 0.832 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \end{aligned}$$

클럭을 포함하는 FPGA의 전체 신뢰도는  $R(t) = e^{-(10 \times (0.6 + 0.832)/10^6)} = 0.99998586$ 이다. 그리고 MDU에는 FPGA가 3개 사용되므로 전체 신뢰도는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left(\sum_{i=1}^3 \lambda_i t\right) = (0.99998586)^3 \\ &= 0.99995758 \end{aligned}$$

#### 4.4 프로세서 신뢰도 예측

MDU에 사용된 SMQ320C32 DSP의 프로세서의 신뢰도 계산 방법은 앞의 microcircuits와 동일하다. 부품 복잡도 실패율  $C_1$ 은 processor 경우 비트 폭과 소자 형태에 따라 다른데 MOS이면서 32비트 프로세서인 경우 MIL-HDBK-217F에서는 0.56을 제시하였다. 그 외의 변수들은 메모리 경우와 동일하다.

프로세서 부품의 실패율은 다음의 수식으로 예측할 수 있으며 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_p &= (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L \\ &= (0.56 \times 0.94 + 0.032 \times 12) \times 1.0 \times 2.0 \\ &= 1.8028 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \end{aligned}$$

또한 프로세서는 50MHz로 작동되는데 50MHz 클럭의 신뢰도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_p &= \lambda_b \pi_Q \pi_E = 0.032 \times 1.0 \times 32 \\ &= 1.024 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \end{aligned}$$

프로세서의 신뢰도는 FPGA 경우와 마찬가지로 프로세서와 클럭의 신뢰도의 곱으로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\lambda t} = e^{-(10 \times (1.8028 + 1.024)/10^6)} \\ &= 0.99997155 \end{aligned}$$

#### 4.5 연결부(Interconnect) 및 커넥터 신뢰도 예측

MDU처럼 마더보드 상에 각 보드가 장착되는 경우에는 보드의 상호 연결(interconnection)부와 커넥터의 신뢰도 역시 함께 고려하여야 한다.

##### 4.5.1 커넥터 신뢰도 예측

MDU의 보드 전원 보드는 전원 공급에 필요한 12핀만 사용되고 다른 보드 2종은 유효 핀 수가 46개 이므로 신뢰도 예측을 위해 3개의 보드에 대해 핀 수를  $(46 \times 2 + 12)/3 = 35$ 개로 적용하여 근사적으로 계산하였다.

연결 커넥터의 실패율은 식(9)와 같다.

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_K \pi_P \pi_E \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours} \quad (9)$$

기본 실패율  $\lambda_b$ 는 커넥터의 재질에 따라 달라지는데, MDU에 사용되는 커넥터는 Airborn사의 제품으로 glass로 제작되어 매우 높은 신뢰도를 가진다. 커넥터의 기본 실패율은 식(10)으로 계산하며 결과는 다음과 같다.

$$\lambda_b = 0.02 \times \exp\left(\frac{-1592.0}{T_0 + 273}\right) + \left(\frac{T_0 + 273}{423}\right)^{5.36} \quad (10)$$

$$= 0.000108$$

탈부착인자  $\pi_K$ 는 탈부착 회수의 함수이며, 실제 MDU 장치는 1000시간당 탈부착을 50회 이상 하는 것으로 가정하여 계산하였다. 이때 MIL-HDBK-217F에서 이 변수 값은 4.0이다.

능동 핀인자  $\pi_P$ 는 수식 (11)로 계산한다.

$$\pi_p = \exp\left(\frac{N-1}{10}\right)^{0.51064} \quad (11)$$

보드의 능동핀수를 공히 35핀으로 계산한 결과 능동 핀인자 값은 6.475332이다. 커넥터에서의 환경인자 값은 미사일/발사체 경우 27이다.

위 식으로부터 커넥터 한 개의 실패율과 신뢰도는 다음과 같다.

$$\lambda_p = 0.000108 \times 1 \times 6.475332 \times 27$$

$$= 0.01888207 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

$$R(t) = e^{-(10 \times 0.01888)/10^6} = 0.999999811$$

MDU에는 총 6개 커넥터가 사용되었으므로 커넥터의 총 신뢰도는 다음과 같다.

$$R(t) = \exp\left(\sum_{i=1}^6 \lambda_i t\right) = (0.999999811)^6$$

$$= 0.999998867$$

#### 4.5.2 연결부의 신뢰도 예측

연결부는 커넥터를 이용하여 상호 연결되는 부분이며 실패율은 수식 (12)로 계산한다.

$$\lambda_p = (\lambda_b (N_1 \pi_C + N_2 (\pi_C + 13))) \pi_Q \pi_E \quad (12)$$

$$\text{Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

연결부에서의 기본 실패율은 PTH(Printed Through Holes)의 PCB로 제작될 경우 0.00041이다. 본 응용에서는  $N_1$ 은 해당사항이 없으며  $N_2$ 만 유효한데, 각 커넥터마다 35핀으로 계산하였다. 복잡도인자  $\pi_C$ 는 PCB의 레이어 장수에

따른 값이다. MDU에서는 8층 기판을 사용하였으므로 레이어는 8이고, 이에 해당하는 값은 도표로부터 2.4이다. 품질인자  $\pi_Q$ 는 MIL-SPEC에 준하는 작업을 수행하는 것을 고려하여 이에 해당값 1.0을 적용하였다. 환경인자는 커넥터와 동일하게 27을 적용하였다. 연결부의 실패율은 다음과 같다.

$$\lambda_p = (\lambda_b (N_1 \pi_C + N_2 (\pi_C + 13))) \pi_Q \pi_E$$

$$= 0.170478 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

한편 커넥터 1개당 신뢰도는 0.99989이며 전체 6개의 연결부에서의 신뢰도는 아래와 같다.

$$R(t) = \exp\left(\sum_{i=1}^6 \lambda_i t\right) = (0.9999989)^6 = 0.999968566$$

커넥터와 연결부를 고려한 전체 신뢰도는  $R(t) = R_{\text{connect}} \times R_{\text{interconnect}} = 0.999968461$ 이다.

#### 4.6 PCB 보드의 신뢰도 예측

CPU 보드의 PCB의 holes 개수는 220개가량 된다. CPU 보드의 PCB 실패율은 앞의 연결부와 동일하게 계산한다.

$$\therefore \lambda_p = (\lambda_b (N_1 \pi_C + N_2 (\pi_C + 13))) \pi_Q \pi_E$$

$$= 0.000041 \times 220 (2.4 + 13) \times 1.0 \times 27$$

$$= 3.75 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

CPU 보드의 PCB 제작 신뢰도는  $R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(10 \times 3.75/1000,000)} = 0.9999625$ 이다.

CPU 보드의 계산방식과 동일한 방법으로 다른 보드들의 신뢰도를 계산한 결과 위성 인터페이스 보드와 1553 인터페이스 보드의 신뢰도는 각 0.9999975와 0.9999889이다. 그러므로 MDU 3개 보드의 PCB 제작 신뢰도는 각 신뢰도의 곱으로부터 구할 수 있으며 계산 결과 신뢰도는 0.9999489이다.

#### 4.7 아날로그 회로부의 신뢰도

원격측정 데이터를 송신기에 입력하기 위해서는 선변조 필터(pre-modulation filter)와 신호 크기 조절 증폭기를 거쳐 2Vp-p로 출력된다. 선변조 필터는 6차 Bessel 필터로 이루어졌는데, 연산 증폭기 3개가 사용되었으며, 신호 크기 조절을 위해 연산증폭기 2개가 사용되었다. 이외의 소자들은 제외하고 연산증폭기 5개로 국한하여 신뢰도를 예측하였다.

연산증폭기의 실패율은 다음 수식 (13)과 같다.

$$\lambda_p = C_1 \pi_T \pi_Q \pi_L \quad (13)$$

MDU 연산증폭기 실패율 계산에 필요한 정보가 부족하여 MIL-HDBK-217F의 LM741 예를 계산에 활용하였다. LM741 연산증폭기 핀 수 14, 전력 소모량 0.35W, 칩 면적 0.0065in<sup>2</sup>,  $\theta_{JC}$  19.4 (°C/W),  $T_J$  72°C이며 실패율과 신뢰도는 다음과 같다.

$$\lambda_p = 0.01 \times 3.1 \times 1 \times 1 = 0.031 \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(10 \times 0.031/10^6)} = 0.99999969$$

연산증폭기 5개의 신뢰도는

$$R(t) = \exp\left(\sum_{i=1}^5 \lambda_i t\right) = 0.99999845 \text{ 이다.}$$

#### 4.8 전력부의 신뢰도

전력부의 신뢰도 계산에 사용된 부품으로 EMI 필터와 DC/DC가 고려되었다. 본 논문에서는 Interpoint 회사의 부품을 사용하였으며, Interpoint사에서 제시한 MTBF(Mean Time Between Failure)는 다음 도표 2와 같다.

표 2. Interpoint사 전력소자의 MTBF

Model#	Grade	25°C	30°C
MTR2805S	/883	1,359,407	1,222,675
MHF+2815D	/883	2,345,850	892,013
MTR28515T	/883	1,164,369	1,051,430
FMH-461	/883	2,692,150	2,443,960
FMC-461	/883	1,404,207	1,292,611

MTBF와 실패율의 관계는 다음 식 (14)와 같고 신뢰도의 관계는 식 (15)와 같다[3]

$$MTBF = \frac{T(t)}{r}, \quad \lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (14)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(t/MTBF)} \quad (15)$$

이때,  $T(t)$ 는 전체 동작시간(total operating time),  $r$ 은 실패횟수(number of failures)이다.

MDU 제작에 사용된 부품으로는 표 2에서 MTR28515T와 FMC-461이며, 작동온도가 30°C일 때 전력부 신뢰도는 다음과 같다.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{10}{1,222,675} + \frac{10}{1,292,611}\right)} = 0.999984$$

#### 4.9 전체 신뢰도 예측 결과

전체의 신뢰도는 각 신뢰도의 곱으로 나타낼 수 있으며, 전체 신뢰도 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(t) &= R(RAM) \times R(ROM) \times R(FPGA) \\ &\quad \times R(CPU) \times R(intreconnects) \times R(PCB) \\ &\quad \times R(Analog) \times R(Pwr) \\ &= 0.999991668 \times 0.999991345 \times 0.999958 \\ &\quad \times 0.99997155 \times 0.999968461 \times 0.9999489 \\ &\quad \times 0.99999845 \times 0.999984 \\ &= 0.999840184 \end{aligned}$$

각 부분품의 신뢰도와 연결부, PCB 등 전체적인 요소들을 고려한 신뢰도 계산결과 MDU의 신뢰도는 10시간 운용 조건하에서 약 0.9998로 예측되어졌다. 다음 그림 7은 MDU 부품별 신뢰도를 도식화하였으며, 그림 8은 MDU의 신뢰도를 0~100시간 임무시간을 고려하여 도식화하였다. 그리고 그림 9는 MDU의 신뢰도를 작동시간 대비 신뢰도의 경향을 도식화하였다.

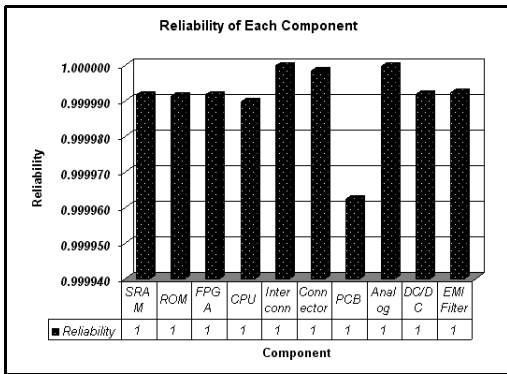


그림 1. MDU 소자들의 신뢰도표

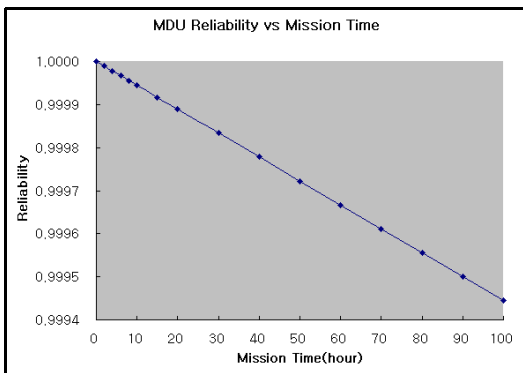


그림 2. MDU 신뢰도와 임무시간 관계

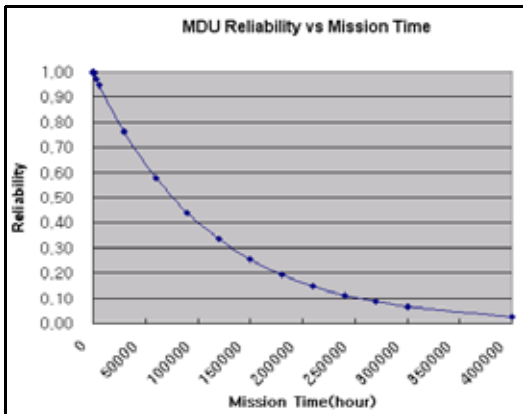


그림 3. MDU 신뢰도와 작동시간 관계

## 5. 결 론

MDU의 신뢰도 계산 결과 10시간의 임무기간 동안 약 0.99984의 값을 가지는 것으로 예측되었다. 이는 발사체 중요 전장품의 신뢰도로써 적절한 것으로 사료된다. MDU의 신뢰도를 저하시키는 가장 주된 부품으로는 PCB 부분임이 확인되었다. 그러므로 향후 MDU EM 및 FM 모델 제작시 PCB 패턴을 최소화하고, 상호연결부를 최소화 하면 신뢰도는 향상 될 수 있을 것이라 사료된다. 특히 제작 공정 중 연결부와 PCB의 제조공정에 상당한 주의를 기울여야 하며 엄격한 품질관리가 요구된다. 그 다음 신뢰도 감소 요인 인으로는 DC/DC 변환기, EMI 필터, 그리고 고속으로 작동하는 CPU 소자인 것으로 예측되었다. 전원 소자의 신뢰도를 높이기 위해서는 소자의 작동온도를 낮추는 것이 유리하며, CPU의 신뢰도를 높이기 위해서는 성능을 만족하는 한도 내에서 작동주파수를 낮추는 것이 유리하다.

향후 연구 방향으로는 신뢰도를 높일 수 있는 방법에 대한 연구가 요구되며, 신뢰도 최적화 연구가 요구된다. 한편 MIL-HDBK-217F의 전장품 신뢰도 계산에 사용되는 BellCore, CNET, China 299B을 통한 신뢰도 예측 결과와 MIL-HDBK-217F 결과와 비교를 통해 각 계산방법의 결과에 대한 비교분석 연구도 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. <http://www.aero.org>.
2. DoD USA, "MIL-HDBK-217F Reliability Prediction of Electronic Equipment", 1991.
3. DoD USA, "MIL-HDBK-338B Electronic Reliability Design Handbook", 1998.