論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(2), 172-180(2016)
DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.2.172
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

# 신뢰성 수명예측 도구 Sherlock을 이용한 큐브위성용 임무보드의 고장 메커니즘별 수명예측

전수현**, 권예하***, 권형안***, 이용근****, 임인옥****, 오현웅*

# Life Prediction of Failure Mechanisms of the CubeSat Mission Board using Sherlock of Reliability and Life Prediction Tools

Su-Hyeon Jeon**, Yae-Ha Kwon***, Hyeong-Ahn Kwon***, Yong-Geun Lee****, In-OK Lim****
and Hyun-Ung Oh*
Chosun University*,**, Exleet Co., Ltd.***, Hanwha Thales****

## ABSTRACT

A cubesat classified as a pico-satellite typically uses commercial-grade components that satisfy the vibration and thermal environmental specifications and goes into mission orbit even after undergoing minimum environment tests due to their lower cost and short development period. However, its reliability exposed to the physical environment such as on-orbit thermal vacuum for long periods cannot be assured under minimum tests criterion. In this paper, we have analysed the reliability and life prediction of the failure mechanisms of the cubesat mission board during its service life under the launch and on-orbit environment by using the sherlock software which has been widely used in automobile fields to predict the reliability of electronic devices.

## 초 록

극초소형 위성으로 분류되는 큐브위성의 경우, 저가/단기간 개발목표 충족을 위해 일반적으로 진동 및 열 환경 규격을 만족하는 상용부품을 선정하여 제작하고 최소한의 검증시험을 통해 발사 및 궤도 운용을 실시한다. 하지만 제한된 회수로 지상에서 실시된 환경시험만으로 장시간에 걸친 궤도상 열진공과 같은 물리적 부하 환경에 노출된 임무보드의 신뢰성을 보장할 수 없다. 본 논문에서는 현재 자동차 분야에서 탑재 전자기기 신뢰도 예측에 폭넓게 활용중인 신뢰성 수명예측 상용도구인 Sherlock을 적용하여 큐브위성용으로 제작된 전자보드를 대상으로 발사 및 궤도환경에서의 고장 메커니즘 별 수명예측 및 임무기간동안의 신뢰도를 분석하였다.

**Key Words :** Printed Circuit Board(인쇄 회로 기판), Life Prediction(수명 예측), Reliability(신뢰도), Sherlock(셜록)

† Received : September 30, 2015 Revised : January 22, 2016 Accepted : January 26, 2016
* Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

# Ⅰ. 서 론

위성은 발사과정에서 추진부의 분사 및 대기와의 충돌에 의해 발생하는 넓은 주파수 영역대의 소음 및 진동, 페어링-위성체 분리에 의한 충격, 엔진 추력에 의한 정적 가속과 점화 및 분리과정, 돌풍 등에 의한 동적가속이 조합된 준정적 하중 등의 발사 환경을 경험하게 된다. 이러한 과정에서 발생하는 소음 및 진동은 발사체 내부로 전달되어 위성체 및 위성 본체 내부의 전장품을 가진하게 되며, 전장품 내부의 PCB(Printed Circuit Board) 및 이에 부착된 전기 소자(Electronic Component)에 영향을 미쳐 전장품의 기능저하 및 파괴를 유발한다. 또한 위성용 전장품이 온도차가 극심한 궤도 열 환경에 노출될 경우, PCB와 전장 부품의 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 차이에 의해 솔더 접합부(Solder Joint)나 PTH(Plated Through Hole) 부위에 피로가 발생하게 되고 이는 균열로 발전하여 종국에는 고장에 이르게 된다[1-3]. 따라서 임무기간 동안 다양한 환경요인들에 의해 일부 부품에서 고장이 발생할 경우, 위성 전체의 임무 실패를 야기할 수 있기 때문에 초기 설계단계부터 해석 및 다양한 시험들을 통해 높은 신뢰성을 만족시킬 수 있는 전장품 설계가 이루어져야 한다.

상용급 위성에 적용되는 부품의 경우, 고 신뢰도를 만족시키기 위하여 군용급 이상의 우주급 부품을 사용하지만, 극초소형 위성으로 분류되는 큐브위성의 경우, 저가/단기간 개발목표를 충족시키기 위해 진동 및 열환경 규격을 만족하는 상용부품을 사용하게 된다. 이러한 상용부품의 우주임무 적용을 위해서는 임무의 중요도, 임무기간, 시스템 신뢰성 요구조건 등에 따라 상용부품의 우주급 적용가능성을 검증하는 것이 필수적이나[4], 큐브위성 개발에 있어서는 저가 및 단기 개발 목표구현을 위해 적용 부품에 대하여 최소한의 검증시험만을 실시하고 발사 및 궤도 운용을 하게 된다. 하지만 지상에서 실시되는 제한된 환경시험만으로 장시간에 걸친 궤도상 열진공과 같은 물리적 부하 환경에 노출된 임무보드의 신뢰성을 보장할 수 없으며, 이를 보상하기 위해 장시간의 시험을 수행하는 것은 막대한 비용과 시간이 따르기 때문에 효율적이지 않다. 또한, 시험 도중 일부 부품이 파손될 경우 전자 장비의 재설계 및 재시험이 수행되어야하므로 추가적인 개발 비용 및 일정이 소요된다. 따라서 초기 설계 단계에서부터 시뮬레이션을 통해 전자 장비가 겪게 될 환경스트레스에 대한 신뢰성 및 수명을 예측함으로써 고장가능성이 높은 대상을 사전에 탐지를 하고 개선을 한다면 상기와 같은 문제들을 해결할 수 있다.

본 논문에서는 큐브위성 STEP Cube Lab. [5]의 주요 임무 탑재체 중 국내에서 상용부품을 적용하여 개발한 MEMS 추력기 제어모듈을 고장메커니즘 별 수명예측 분석 대상으로 선정하였다. MEMS 추력기 모듈은 본 큐브위성의 주요 탑재체 중 하나로 궤도상에서 MEMS 공정에 대한 기술검증이 주요 임무 목적이다. MEMS 추력기의 경우 연구실 수준에서 추력기에 대한 기능검증이 기 수행된 제작품을 그대로 적용하였으나, 이를 제어하기 위한 MEMS 추력기 제어 보드의 경우 본 큐브위성의 구조적/전기적 인터페이스에 부합하는 설계가 요구되었다. 따라서, 이를 만족하면서 제작비용 절감을 위해 환경 규격을 만족하는 상용 부품들을 선정하여 MEMS 추력기 제어보드를 자체적으로 개발하였으며[6], 인증 시험과 수락 시험을 통해 모든 요구 규격을 만족시킴으로써 제작품에 대한 구조적/열적 안정성을 검증하였다. 하지만, 지상에서 수행된 환경시험만으로 장시간에 걸친 궤도상에서의 MEMS 추력기 제어보드의 수명을 보장할 수 없다.

이러한 문제점을 해결하기 위해, DfR Solutions 사의 Sherlock[7] 소프트웨어를 통해 모의 사용 환경을 적용하여 MEMS 추력기 제어보드에 대한 고장까지의 시간을 예측하였다. Sherlock 소프트웨어는 실제 수명 모델을 구축하기 위해 고장물리(Physical of Failure, PoF)를 사용하는 신뢰성 및 수명예측 도구로써, 전자 보드의 설계 파일(Gerber File, ODB++)로부터 분석 모델을 신속하고 간단하게 생성이 가능하여 분석 모델을 구축하는데 소요되는 시간을 단축시킬 수 있고, 문제를 일으킬 수 있는 시나리오를 사전에 시뮬레이션 함으로써 고장 위험을 초기에 인지하고 신속한 대응책을 마련할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 상기에서 소개한 Sherlock 소프트웨어를 이용하여 전자 보드의 수명에 영향을 미치는 솔더 접합부 건전성 평가를 통해 MEMS 추력기 보드가 겪게 되는 환경스트레스에 대하여 신뢰성을 분석하였다. 우선적으로, 기 수행되었던 MEMS 추력기 제어보드의 환경시험 규격을 적용하여 고장 메커니즘 별 고장률을 확인하였으며, 이로부터 검증된 제어 보드가 장시간의 임무기간 동안 궤도환경에 노출됐을 때의 수명예측 및 신

뢰도 분석을 통해 임무 보드의 설계 및 제작의 타당성을 검토하였다.

## II. 본 론

### 2.1 MEMS 추력기 모듈

#### 2.2.1 MEMS 추력기 모듈 개요

Figure 1은 STEP Cube Lab.의 주요 임무 탑재체인 MEMS 추력기 모듈이 큐브위성의 하단부에 배치된 형상을 나타낸다. MEMS 추력기 모듈은 고체 추진제가 내장된 MEMS 추력기와 이를 제어하기 위한 MEMS 추력기 제어보드로 구성되어 있으며, Fig. 2와 같이 전기적 연결을 제공하는 스프링 핀 위에 MEMS 추력기를 올린 후 MEMS 추력기 커버를 이용하여 추력기 고정 및 서로 간의 통전이 가능하도록 구성하였다. MEMS 추력기는 마이크로 노즐, 마이크로 점화기, 추진제를 보관하는 챔버 레이어가 적층되어

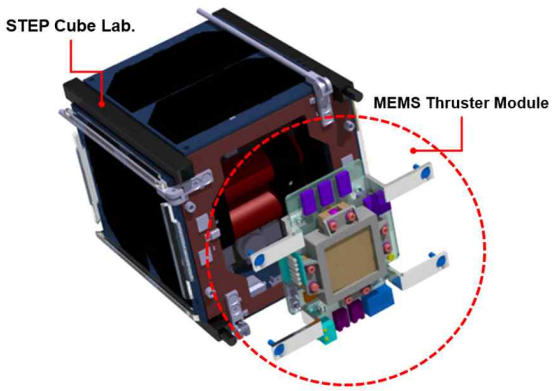



Fig. 1. MEMS Thruster Module Location on the CubeSat

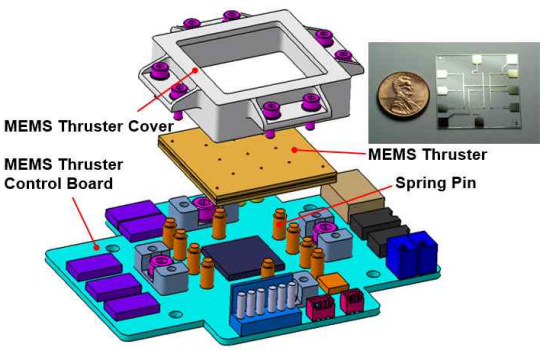



Fig. 2. Exploded View of the MEMS Thruster Module

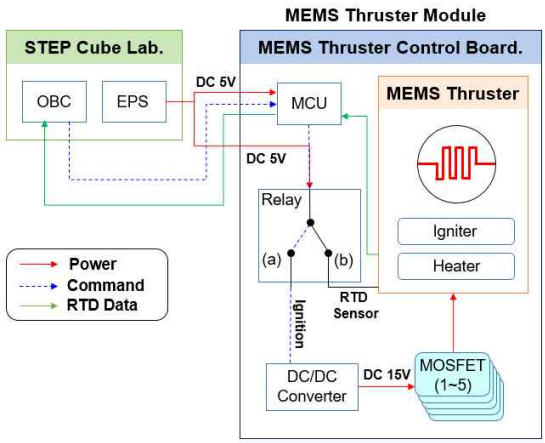
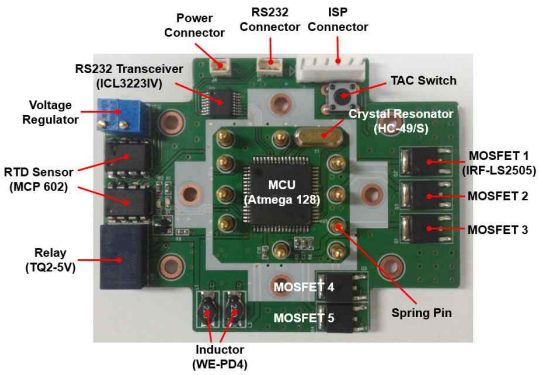



Fig. 3. Electronic Block Diagram of MEMS Thruster Module

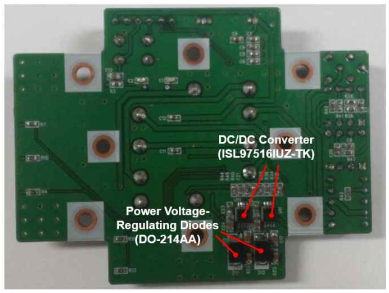
있으며 마이크로 점화기에 전압 인가를 위한 전기접속 패드부 10개가 MEMS 추력기 하부에 위치해 있어 스프링 핀과 접촉된다. MEMS 추력기 제어보드의 경우, 마이크로 점화기의 온도 정보 획득을 위한 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서 회로, 추력기 점화를 위해 5V 전압을 15V로 승압하기 위한 DC/DC 컨버터 회로, RTD 센서 데이터와 추력기 점화 제어를 위한 메카닉 릴레이 회로로 구성되어있으며, 이에 대한 전기적 블록 선도를 Fig. 3에 나타내었다. MEMS 추력기 모듈은 STEP Cube Lab.에 탑재된 EPS(Electrical Power System) 보드로부터 DC 5V 전압이 인가되면 MEMS 추력기 제어보드의 MCU와 릴레이, 스프링 핀으로 인가되며, 릴레이가 (b)접점에 연결이 되어있을 경우 RTD 센서회로와 연결되어 마이크로 점화기의 저항 값을 바탕으로 온도 데이터를 수집하게 된다. 이 때, OBC로부터 점화 명령이 전해지면 릴레이는 (a)접점으로 연결이 되며, DC/DC 컨버터를 통해 MEMS 추력기 점화에 필요한 전압 15V로 승압하여 MEMS 추력기에 인가되는 회로이다.

#### 2.2.2 MEMS 추력기 제어보드

Figure 4는 Fig. 3의 전기적 블록 선도를 토대로 환경조건을 만족하는 상용 부품들을 선정하여 제작된 MEMS 추력기 제어보드의 형상을 나타낸다. MEMS 추력기 제어보드의 크기는 80mm 62mm×1.6mm이며, 무게는 26.5g이다. 또한, MEMS 추력기 제어 보드에 사용된 라미네이트 재질은 FR-4이며, 라미네이트 양면에 0.5oz의 구리도금을 도포하여 서로 간에 전기적 연결이 가능하도록 하였다. 제어보드를 구성하는 여러




(a) Top View



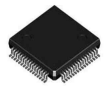
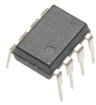
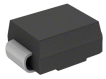
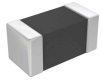

(b) Bottom View

Fig. 4. MEMS Thruster Control Board Configuration

유형의 리드 형태를 갖는 상용 부품들은 Fig. 4와 같은 위치에 배치하였으며, PCB와의 접합재료로써 무연 솔더 합금이 사용되었다. 이 때, 솔더 접합부의 두께는 스루홀 부품에는 1.6mm, 표면 실장 부품에는 0.13mm가 각각 적용되었다.

Table 1은 선정된 부품들에 대한 형상, 패키지 유형, 실장 방법을 나타낸다. 본 제어 보드에 사용된 전자 부품의 실장 방법 중에서 스루홀(Through Hole, TH) 실장 기술의 경우, 기판의 구멍에 부품의 리드를 삽입하여 납땜이 이루어지기 때문에 표면 실장 부품을(Surface Mounted Device, SMD) 기판 표면에 부착시키는 표면 실장 기술(Surface Mount Technology, SMT)에 비해 우수한 기계적 결합을 제공하는 반면, 기판에 홀을 마련해야하기 때문에 기판 양면에 소자를 배치할 수 있는 공간이 협소해지는 단점이 존재한다. 이와 반대로, 표면 실장 부품은 스루홀 부품에 비해 작고 가벼우며 기판 표면에 직접적으로 납땜할 수 있기 때문에 기판의 양면에 더 많은 부품을 실장 할 수 있으나, 리드가 없는 패키지를 사용할 경우 타 부품들에 비해 솔더 접합부

Table 1. Part Lists Summary

| Part | Config. | Package Type | Package Mount |
|---|---|---|---|
| MCU (U1) |  | 64-lead TQFP | SMT |
| RTD Sensor (U10, U15) |  | 8-lead PDIP | TH |
| Relay (U16) | | 10-lead DIP | TH |
| Voltage Regulator (VR1, VR2) | | 3-lead DIP | TH |
| MOSFET (Q1~Q5) | | D2PAK | SMT |
| RS232 Transceiver (U2) | | 16-lead TSSOP | SMT |
| Inductor (L1, L2) | | DFN | SMT |
| Crystal Resonator (Y1) | | 2-lead DIP | TH |
| DC/DC Converter (U11, U14) | | 8-lead MSOP | SMT |
| Diode (D12, D13) |  | C-BEND | SMT |
| Capacitor /Resistor (C1~C25 /R1~R23) |  | 2-lead DFN | SMT |
| TAC Switch (SW1) | | 4-lead DIP | TH |
| Spring Pin (T1~T10) | | 1-lead DIP | TH |

의 견고성이 취약하여 고장까지의 사이클 수가 줄어드는 단점이 존재한다.

이와 같이, 패키지 유형에 따라 적용되는 솔더 접합부의 유형이나 솔더의 양은 부품의 접합 강도를 좌우하며 이는 동일한 환경조건에서도 서로 다른 고장모드를 가질 수 있기 때문에 전자 보드

의 신뢰성 향상을 위해 솔더 접합부의 피로수명에 미치는 영향성을 분석하는 것은 중요한 요인으로 작용한다. 따라서, 본 논문에서는 MEMS 추력기 제어보드의 수명을 결정하는 솔더 접합부에 대한 피로 해석을 중점적으로 수행하였다.

### 2.3 Sherlock을 이용한 MEMS 추력기 제어보드의 수명 및 신뢰도 예측

Figure 5는 Sherlock을 이용하여 MEMS 추력기 제어 보드의 부품 정보(크기, 위치 등), 솔더 마스크(Solder Masks), 드릴 홀(Drill Holes), 구리 레이어(Copper Layers), 스택업 데이터(Stackup Data) 등의 정보들이 포함된 설계 파일과 각 부품에 대한 패키지 정보 입력을 통해 구축한 해석 모델을 나타낸다. 하지만, Sherlock은 타 유한요소해석 도구와 달리 전자 기기에 대한 신뢰성 및 수명예측이 주 목적이기 때문에 Fig. 1의 형상과 같이 발사환경에서 추력기로 전달되는 발사하중 저감을 위해 적용된 플렉셔(Flexure) 형태의 델린 소재 브래킷[6]의 모델링 구축에 어려움이 존재한다. 따라서, Fig. 5와 같이 델린 브래킷이 제어 보드와 체결이 이루어지는 4 곳의 체결 홀을 강체구속 조건으로 설정하였으며, 상기의 조건은 실제 장착조건보다 최악의 조건이기 때문에 신뢰도 분석을 수행함에 있어 문제가 없다. 따라서 상기의 해석 조건을 토대로 발사 및 궤도환경에서의 고장 메커니즘 별 수명예측 및 임무기간동안의 신뢰도 분석을 수행하였다. 이 때, 고장 메커니즘은 외부 스트레스 및 사용 환경 조건의 변화에 따라 물리적, 화학적, 기계적 등으로 대상 아이템이 고장을 일으키는 것을 의미한다.

#### 2.3.1 발사 하중에 대한 구조건전성 분석

발사과정에서 PCB 기판에 진동이 발생할 경우 전체적인 또는 국부적인 변형을 일으키게 되고, 기판과 소자 사이에 상대적인 변위가 발생한다. 이러한 현상이 반복적으로 지속될 경우 PCB와 소자 사이에 전기적, 기계적, 열적 연결을 제공하는 솔더 접합부 부위 또는 리드 선(Lead Wire)에 피로가 누적되어 솔더 접합부의 파손 및 리드선의 결손으로 이어지며, 이와 같이 진동으로 유발된 솔더 접합부 및 리드선의 피로는 진동 유형 및 레벨, PCB 기판의 크기 및 모양, PCB 기판 재료, 구속 조건, 부품 재료 및 위치, 솔더 접합부의 재료 및 구조 등에 의해 영향을 받게 된다.

발사 환경 하에서 MEMS 추력기 제어보드의 신뢰성 및 피로수명 예측을 위해서, 본 논문에서는 제어보드의 발사환경 검증을 위해 수행하였던

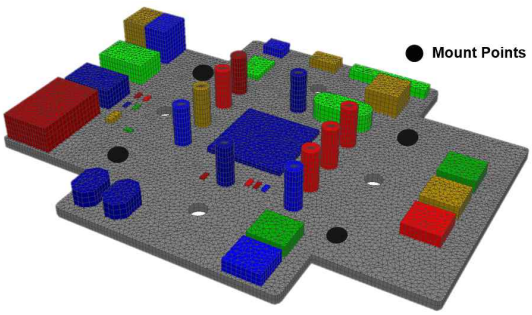



Fig. 5. Analysis Model of MEMS Thruster Control Board using Sherlock Software

Table 2. Qualification Test Level

| Sine Vibration (Direction: X, Y, Z) [-9dB → -6dB → -3dB → Full Level] | | |
|---|---|---|
| Frequency (Hz) | Amplitude (g) | Sweep Rate |
| 5 | 1.3 | 2oct/min |
| 8 | 2.5 | |
| 100 | 2.5 | |
| **Random Vibration (Direction: X, Y, Z) [-9dB → -6dB → -3dB → Full Level]** | | |
| Frequency (Hz) | Amplitude (g /Hz) | Sweep Rate |
| 20 | 0.009 | 120 sec |
| 130 | 0.046 | |
| 800 | 0.046 | |
| 2000 | 0.015 | |
| **Sine Burst (Direction: X, Y, Z)** | | |
| Amplitude (g) | Duration | |
| 12 | 6 cycle @ full level (800ms) | |

Table 3. Acceptance Test Level

| Random Vibration (Direction: X, Y, Z) [-9dB → -6dB → -3dB → Full Level] | | |
|---|---|---|
| Frequency (Hz) | Amplitude ($g^2$/Hz) | Sweep Rate |
| 20 | 0.026 | 60 sec |
| 50 | 0.16 | |
| 800 | 0.16 | |
| 2000 | 0.026 | |
| **Sine Burst (Direction: X, Y, Z)** | | |
| Amplitude (g) | Duration | |
| 18.75 | 6 cycle @ full level (800ms) | |

Table 4. Vibration Analysis Results

| After Qualification Test | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ref Des | Side | Max. Disp. (mm) | | | Max. Strain | | | Failure Prob. (%) |
| | | SB | RV | SV | SB | RV | SV | |
| D13 | BOT | 1.2e-3 | 3.9e-2 | 3.6e-4 | 4.0e-6 | 1.4e-4 | 1.2e-6 | 0.0 |
| L2 | TOP | 1.2e-3 | 3.8e-2 | 3.5e-4 | 1.2e-3 | 1.4e-4 | 1.1e-6 | 0.0 |
| Q4 | TOP | 1.1e-3 | 3.5e-2 | 3.2e-4 | 1.1e-3 | 7.3e-5 | 6.9e-7 | 0.0 |
| C25 | BOT | 1.0e-3 | 3.3e-2 | 3.0e-4 | 2.1e-6 | 8.9e-5 | 6.8e-7 | 0.0 |
| D12 | BOT | 9.3e-4 | 3.0e-2 | 2.8e-4 | 2.8e-6 | 1.0e-5 | 9.6e-7 | 0.0 |
| L1 | TOP | 8.8e-4 | 2.9e-2 | 2.6e-4 | 1.9e-6 | 8.6e-5 | 5.9e-7 | 0.0 |
| C24 | BOT | 9.8e-4 | 2.8e-2 | 2.9e-4 | 2.4e-6 | 8.3e-5 | 7.1e-7 | 0.0 |
| C22 | BOT | 8.8e-4 | 2.7e-2 | 2.6e-4 | 1.8e-6 | 6.5e-5 | 5.3e-7 | 0.0 |
| Q5 | TOP | 9.0e-4 | 2.7e-2 | 2.7e-4 | 3.0e-6 | 1.1e-4 | 8.9e-7 | 0.0 |
| T5 | TOP | 1.0e-3 | 2.7e-2 | 3.1e-4 | 2.8e-6 | 9.4e-5 | 8.3e-7 | 0.0 |
| After Qualification Test + Acceptance Test | | | | | | | | |
| D13 | BOT | 1.2e-3 | 5.7e-2 | 3.6e-4 | 4.0e-6 | 2.2e-4 | 1.2e-6 | 0.0 |
| L2 | TOP | 1.2e-3 | 5.7e-2 | 3.5e-4 | 3.6e-6 | 1.6e-4 | 1.1e-6 | 0.0 |
| Q4 | TOP | 1.1e-3 | 5.2e-2 | 3.2e-4 | 2.3e-6 | 1.1e-4 | 6.9e-7 | 0.0 |
| C25 | BOT | 1.0e-3 | 4.9e-2 | 3.0e-4 | 2.4e-6 | 1.2e-4 | 6.8e-7 | 0.0 |
| D12 | BOT | 9.4e-4 | 4.5e-2 | 2.8e-4 | 3.3e-6 | 2.1e-4 | 9.6e-7 | 0.0 |
| L1 | TOP | 8.8e-4 | 4.4e-2 | 2.6e-4 | 1.9e-6 | 1.6e-4 | 5.9e-7 | 0.0 |
| C24 | BOT | 9.8e-4 | 4.2e-2 | 2.9e-4 | 2.4e-6 | 1.3e-6 | 7.1e-7 | 0.0 |
| C22 | BOT | 8.8e-4 | 4.0e-2 | 2.6e-4 | 1.8e-6 | 9.7e-5 | 5.3e-7 | 0.0 |
| Q5 | TOP | 9.0e-4 | 4.0e-2 | 2.7e-4 | 3.0e-6 | 1.6e-4 | 8.9e-7 | 0.0 |
| T5 | TOP | 1.0e-3 | 4.0e-2 | 3.1e-4 | 2.8e-6 | 1.5e-4 | 8.3e-7 | 0.0 |
| SB: Sine Burst, RV: Random Vibration, SV: Sine Vibration | | | | | | | | |

진동시험규격을 바탕으로 해석을 수행하였다. 이 때, Sherlock은 솔더 접합 공정에서 발생하는 Void 형성 및 불충분한 솔더 양 등 품질 결함에 관한 해석은 수행하지 않으며, 최적화된 솔더 접합부 품질을 가정하여 보드 신뢰성을 예측한다. 해석 수행 시, 우선 MEMS 추력기 제어보드에 인증 시험 시 누적된 피로에 대해 메커니즘 별 고장률을 확인하였으며, 인증 시험을 경험한 동일 보드에 수락 시험을 추가적으로 수행했을 때 발생되는 고장률을 확인하였다. 상기의 분석을 위해 적용한 발사환경 시험규격은 Tables 2와 3에 나타내었으며, 이에 대하여 MEMS 추력기 제어보드의 고장까지 걸리는 시간을 예측하기 위해 Sherlock은 피로파괴에 대한 전자소자의 안전성 평가가 가능한 Steinberg[8]의 실험식을 사용하여 계산한다.

Table 4는 Table 2의 인증시험규격을 MEMS 추력기 제어보드의 각 축에 적용했을 때 국부적인 변형이 크게 발생하는 부품들을 선정하여 정리한 해석 결과를 나타낸다. 상기의 해석 결과로부터, MEMS 추력기 제어보드는 준정적 하중 하에서 약 0.001mm, 랜덤진동 하에서 약 0.04mm의 최대 변위가 Power Voltage-Regulating Diode(D13)와 Inductor(L2) 에서 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 솔더 접합부의 피로수명에 영향을 미칠 수 있음을 예측할 수 있다. 또한, 정현파진동 하에서도 랜덤진동 해석결과와 동일한 지점에서 최대 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있으나, 변위 발생량의 경우 MEMS 추력기 제어보드의 1차 모드가 정현파 진동의 주파수 대역보다 높은 주파수에서 발생하기 때문에 랜덤진동해석 결과와 달리 미소한 변위가 발생하였다. 따라서 상기의 진동환경이 발생되는데 소요되는 시간은 짧고 보드의 변위 발생량도 적기 때문에 MEMS 추력기 제어보드를 구성하는 모든 상용부품에 대해서 고장 발생률이 0%로 신뢰도가 100%임을 확인하였으며, 이는 인증수준의 시험을 수행하는데 제어보드의 구조적 설계가 문제가 없음을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 비행모델 단계에서는 최종 모델에 가해지는 환경적 스트레스를 최소화하기 위해 인증 시험을 경험한 전자 보드를 비행 모델에 탑재하지 않는 것을 요구하지만, 저가 및 단기 개발이 목표인 큐브위성의 경우 추가적인 비행 모델을 개발하는데 어려

Table 5. Thermal Analysis Results

| Ref Des | Max. DT | 3 cycle | 8 cycle |
|---|---|---|---|
| | | Probability of Failure (%) | |
| C13 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C15 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C17 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C18 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C20 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C22 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C23 | 70 | 6.77e-12 | 1.83e-10 |
| C1~C12 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| C14 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| C16 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| C19 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| C21 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| C24 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| C25 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| R1~R23 | 70 | 2.70e-12 | 7.28e-11 |
| T1~T10 | 70 | 1.68e-12 | 4.52e-11 |
| VR1, VR2 | 70 | 3e-13 | 8.2e-12 |
| Y1 | 70 | 2.33e-13 | 6.36e-12 |
| U10, 15 | 70 | 7.77e-14 | 2.03e-12 |
| U16 | 70 | 6.66e-14 | 1.84e-12 |
| U2 | 70 | 4.44e-14 | 1.14e-12 |
| U1 | 70 | 3.33e-14 | 8.44e-13 |
| SW1 | 70 | 0 | 7.77e-14 |
| U11, 14 | 70 | 0 | 2.22e-14 |
| D1, D2 | 70 | 0 | 1.11e-14 |
| L1, L2 | 70 | 0 | 0 |
| Q1~Q5 | 70 | 0 | 0 |

움이 존재한다. 따라서, 별도의 전자 보드 교체 없이 인증시험 이후 보드에 잔여 스트레스가 존재하는 상태에서 수락시험을 수행하더라도 문제가 발생하지 않는지 추가적으로 해석을 통해 검토하였으며, 그 결과 Table 4와 같이 보드에서 발생하는 변위 발생량은 이전에 수행했던 해석 결과보다 증가하였으나 모든 부품의 고장률은 0%로 보드 수명에는 큰 영향을 미치지 않으며, 동일 보드로 인증 및 수락 수준의 시험을 수행하더라도 높은 신뢰도를 만족함을 확인하였다.

### 2.3.2 궤도 열환경에 대한 구조건전성 분석

온도차가 극심한 궤도 열환경 및 전원의 On/Off와 같은 반복된 온도변화에 노출될 경우, 전자 부품과 PCB 기판은 서로 다른 열팽창계수 차이로 인해 변형을 일으키게 되고 이러한 반복적인 변형이 지속됨에 따라 솔더 접합부에 피로가 발생하여 결국 파손에 이른다. 열적 솔더 접합부의 피로는 최고 온도, 최저 온도, 최고 온도 유지 시간, PCB 기판의 재질 및 두께, 부품 형상 및 재질, 솔더 접합부의 재료 및 구조 등에 의해 영향을 받는다.

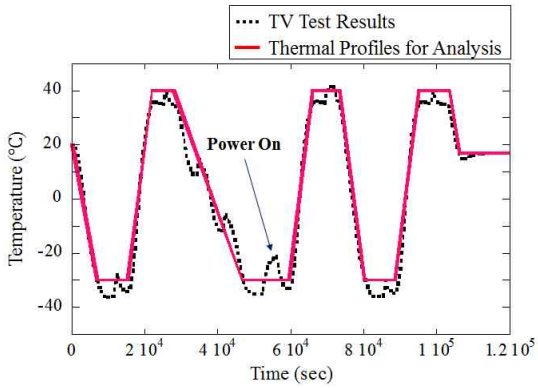



Fig. 6. Tailored Thermal Profile based on the Thermal Vacuum Test Result

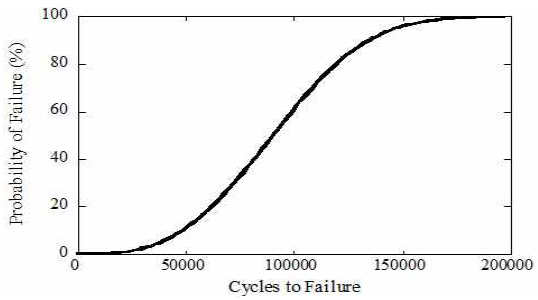



Fig. 7. Probability of Failure for Cycles to Failure

열 환경에 대한 MEME 추력기 제어 보드의 솔더 접합부 피로 해석을 위해 인증 수준의 열진공시험에서 획득된 제어 보드의 시험 데이터를 기반으로 해석을 수행하였다. Fig. 6은 열진공 시험 프로파일( 35℃, 3Cycle)에 대하여 획득된 MEMS 추력기 제어보드의 온도 데이터를 기반으로 수정한 해석 열 프로파일을 나타내며, 이에 대한 솔더 접합부의 피로 해석을 수행한 결과를 Table 5에 고장률이 높은 순으로 정리하였다. 이때, MEMS 추력기 제어보드를 구성하는 모든 소자의 솔더 접합부가 0%에 가까운 고장률을 보임을 확인하였다. 또한, ECSS (European Cooperation for Space Standardization)에서 요구하는 8Cycle의 열진공 시험규격[9]을 따를 경우 상기에서 수행된 해석결과보다 다소 높아진 고장률을 보이지만 보드의 수명에 크게 영향을 미치지 않는 수준임을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 7과 같이 반

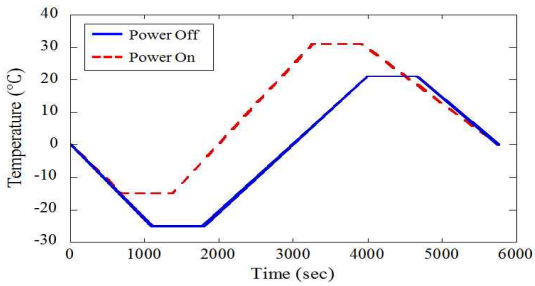



Fig. 8. Thermal Profile according to Power On/Off in On-orbit

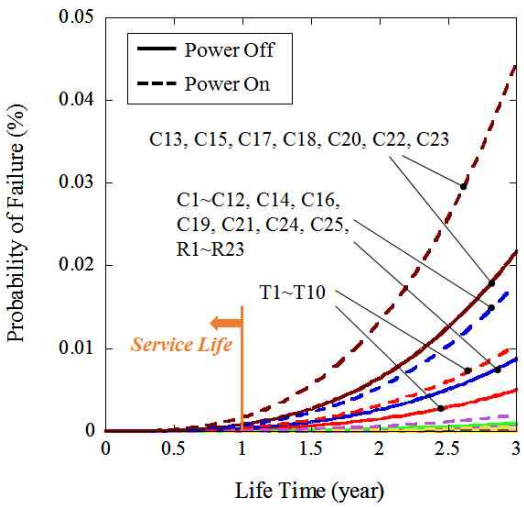
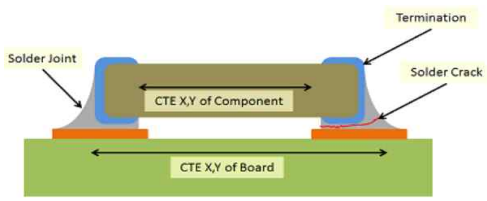



Fig. 9. Probability of Failure for Life time of Failure Mechanisms of MEMS Thruster Control Board

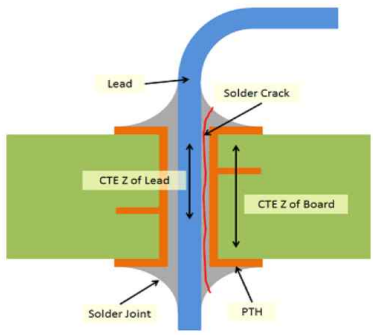
복되는 열 주기가 증가될수록 MEMS 추력기의 고장률 또한 증가하게 되며, 20만 이상의 열 주기를 경험하게 될 경우 100%의 고장률이 발생함을 확인할 수 있다.

상기와 같이 지상에서 실시되는 제한된 횟수의 열진공 시험만으로 장기간 동안 노출되는 궤도 열환경에서의 MEMS 추력기 제어보드의 신뢰성을 보장할 수 없다. 따라서 열 해석으로부터 획득된 MEMS 추력기 제어보드의 궤도 운용 온도 프로파일에 5℃의 해석 마진을 적용하여 궤도 운용 동안의 MEMS 추력기 제어보드의 신뢰도 및 수명 예측을 분석하였다.

Figure 8은 열 해석으로부터 획득한 지구 한 바퀴를 공전하는데 경험하게 되는 전원인가여부에 따른 MEMS 추력기 제어보드의 온도 프로파일을 나타내며, Fig. 9는 상기의 온도프로파일에 대하여 MEMS 추력기 제어보드의 고장 메커니즘




(a) Surface Mount Solder Fatigue




(b) Through Hole Solder Fatigue

Fig. 10. Solder Joint Fatigue according to Package Type [10]

별 임무 수명에 대한 고장률 그래프를 나타낸다. Fig. 9로부터 MEMS 추력기 제어보드를 작동할 경우 임무 기간 동안 발생되는 고장률은 제어보드의 미 작동 경우보다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 주로 높은 고장률을 보이는 고장 메커니즘으로는 리드가 없는 패키지인 Capacitor & Resistor와 스프링 핀의 솔더 접합부임을 확인할 수 있었다. Capacitor와 Resistor의 경우, Fig. 10 (a)와 같이 PCB 기판과 소자의 열팽창계수 차이를 흡수할 수 있는 리드 프레임 없이 PCB 기판과 직접적으로 실장이 이루어지기 때문에 솔더 접합부에 가장 많은 응력이 작용하여 짧은 피로수명을 보인 것으로 사료된다. 하지만, 우수한 기계적 결합을 제공하는 스루 홀 타입의 스프링 핀에서도 고장률이 발생되었으며, 이는 PCB 기판의 수직 방향 열팽창 계수가 상대적으로 큰 PCB 재질이 선정이 되어 Fig. 10 (b)와 같이 스프링 핀의 리드와 PCB 기판 간의 열팽창 계수 차이로 인해 동일한 열 주기에 대해 스프링 핀 솔더 접합부에 피로가 빨리 발생되는 것으로 판단된다.

따라서, 상기의 임무 환경에 대하여 MEMS 추력기 제어 보드의 솔더 접합부에서 발생하는 고장률을 개선하기 위해, 소자의 열팽창계수와 차이가 적은 PCB 재질을 선정하거나 솔더 접합부

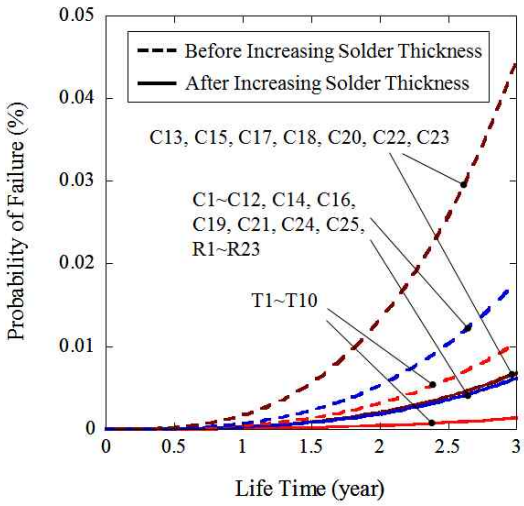



Fig. 11. Probability of Failure for Life Time according to increasing the Solder Joint Thickness

의 두께를 증가시키는 방법 등이 있다. 하지만, 본 논문에서는 PCB 재질 변경 없이 솔더 접합부의 두께 증가에 의한 고장률을 확인하였으며, Fig. 11에 두께 증가에 따른 고장 메커니즘 별 고장률을 나타내었다. 여기서, 솔더 접합부의 두께 증가에 따른 고장률 저감을 확인하기 위해 Fig. 9에서 MEMS 추력기 제어보드의 전원을 작동시켰을 때 높은 고장률을 보이는 Capacitor & Resistor 및 스프링 핀과 비교하였으며, 0603타입의 Capacitor & Resistor의 솔더 접합부 두께를 0.13mm에서 0.17mm, 0805 타입의 Capacitor 솔더 접합부 두께를 0.13mm에서 0.21mm, 스프링 핀의 리드( 1mm) 삽입을 위한 스루홀의 직경을 1.2mm에서 1.8mm로 증가시킬 경우 Fig. 11과 같이 전반적으로 동일한 임무 수명에 대해서 소자들의 고장률이 감소됨을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 9에서 임무기간 1년에 대하여 0.0017%의 가장 높은 고장률을 보이는 0805타입의 Capacitor 소자들이 솔더 접합부 두께의 증가로 인해 0.00026%의 6배 감소된 고장률을 확인할 수 있었으며, 이로부터 현재 설계된 MEMS 추력기 제어보드의 솔더 접합부의 두께를 향상시킨다면 기존보다 높은 신뢰도를 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

## References

1) Jeong, S. Y., Oh, H. U., Lee, K. J., and Kim, B. S., "Mechanical Stability Analysis of PCB and Component for Launch and On-orbit Environment based on Fatigue Failure Theory and FEM", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 39, No. 10, 2011, pp.952~958.

2) Jung, I. H., Park, T. W., Han, S. W., Seo, J. H., and Kim. S. H., "Structural Vibration Analysis of Electronic Equipment for Satellite under Launch Environments", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 8, 2004, pp.120~128.

3) Oh, J. U., Kang, W. H., Lee, H. J., Ahn, Y. C., Lee, J. Y., and Shin, S. W., "Thermal Fatigue Life Prediction for Surface Mount Solder Joint using the Energy Partitioning Approach", *Proceedings of the KSAE Annual Spring Conference*, 2006, pp.1068~1079.

4) Cho, Y. J., Lee, C. H., Lee, C. W., and Hwang, D. S., "Application and Verification Trend of COTS PEM Devices in Space Program", *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 6, No. 1, 2008, pp.65~73.

5) Kwon, S. C., Jung, H. M. Ha, H. W., Han, S. H., Lee, M. J., Jeon, S. H., Park, T. Y., Kang, S. J., Chae, B. G., Jang, S. E., Oh, H. U., Han, S. H., and Choi, G. H., "Preliminary System Design of STEP Cube Lab. for Verification of Fundamental Space Technology", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 5, 2014, pp. 430~436.

6) Jang, S. E., Han, S. H., Kim, T. G. and Lee, J. K., "Structural Design and Verification of MEMS Solid Thruster for CubeSat Application", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 5, 2015, pp. 432~439.

7) http://www.dfrsolutions.com

8) Dave S. Steinberg, "Vibration Analysis for Electronic Equipment", *Willey-Interscience Publication*, 2000, 3rd edition.

9) European Cooperation Space Standardization (ECSS-E-10-03A): Testing.

10) https://www.linkedin.com/pulse/through-hole-vs-surface-mount-solder-fatigue-gil-sharon