

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(12), 1048-1058(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.12.1048

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

신뢰성 수명예측 도구 Sherlock을 활용한 랜덤진동에서의 BGA 및 TSSOP 솔더 접합부의 구조 신뢰성 평가

박태용*, 박종찬**, 박 훈***, 오현웅****

Structural Reliability Evaluation on Solder Joint of BGA and TSSOP Components under Random Vibration using Reliability and Life Prediction Tool of Sherlock

Tae-Yong Park*, Jong-Chan Park**, Hoon Park*** and Hyun-Ung Oh****

Department of Aerospace Engineering, Chosun University*, ****

Korea Aerospace Research Institute(KARI)**

Danam Systems Inc.***

ABSTRACT

One of the failure mechanism of spaceborne electronics is a fatigue fracture on solder joint under launch random vibration. Thus, a necessity of early diagnosis through the fatigue life evaluation on solder joint arises to prevent such potential risk of failure. The conventional life prediction methods cannot assure the accuracy of life estimation results if the packaging type changes, and also requires much time and effort to construct the analysis model of highly integrated PCB with various packaging types. In this study, we performed life prediction of PCB based on a reliability and life prediction tool of sherlock as a new approach for evaluating the structural reliability on solder joint, and those prediction results were validated by fatigue tests. In addition, we also investigated an influence of solder height on the fatigue life of solder joint. These results indicated that the Sherlock is applicable tool for evaluating the structural reliability of spaceborne electronic.

초 록

우주용 전자제품의 주요 고장 메커니즘 중 하나는 발사진동에 의한 기관의 반복적인 굽힘에 의한 솔더 접합부 피로파괴이며, 상기의 잠재적 위험요소에 대해 피로수명 평가를 통한 조기 진단의 필요성이 증대되고 있다. 종래 연구에서 제안된 솔더부 수명예측 기법은 실장기법이 달라지면 예측결과의 정확성을 장담할 수 없으며, 다수의 실장기법이 적용된 고집적 기관의 유한요소모델 구축에 많은 시간과 노력이 수반되는 단점이 있다. 본 연구에서는 기존 연구의 한계점 극복을 위해 우주용 전자제품 구조 신뢰성 평가의 새로운 접근법으로 상용 신뢰성 수명예측 도구인 Sherlock을 이용한 기관의 수명예측을 실시하고 발사진동 수명시험을 통해 분석결과의 타당성을 검증하였다. 또한 전자소자 및 솔더 높이에 따른 피로수명 영향성 분석을 통해 Sherlock이 우주용 전자제품의 구조 신뢰성 평가에 있어서 유용한 도구임을 입증하였다.

† Received : July 15, 2017 Revised : November 3, 2017 Accepted : November 6, 2017

**** Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

Key Words : Spaceborne Electronics (우주용 전자제품), Random Vibration (랜덤진동), Structural Reliability (구조 신뢰성), Fatigue Life (피로수명), Solder Joint (솔더 접합부)

1. 서 론

우주용 전자제품은 인공위성이 목적하는 임무수행을 위한 기능을 제어하는 역할을 담당한다. 최근 우주개발 분야에서는 위성의 임무능력 향상과 함께 발사비용 절감을 위해 가능한 탑재 전자제품의 성능을 비롯해 공간 활용도를 극대화하고자 전자제품 PCB 기판에 BGA(Ball Grid Array) 패키지 및 TSOP(Thin Small Outline Package) 등 표면실장형의 고집적 IC 소자가 적용되기 시작했다[1-3]. 이는 종래 우주용 전자제품에 적용되어 왔던 DIP(Dual In-line Package) 및 PGA(Pin Grid Array) 등 관통실장형에 비해 고집적도를 비롯해 기판 양면을 모두 활용 가능한 장점으로 우주임무에 활발하게 적용되고 있다.

우주용 전자제품의 경우, 발사 진동환경 하에서 PCB기판의 반복적인 굽힘에 따라 기판과 전자소자 간의 상대변위가 반복된다. 이로 인해 솔더 접합부 및 리드선에 응력이 계속적으로 발생함에 따라 종국에는 피로파괴를 유발하게 된다. 이러한 발사진동환경은 궤도 열주기 환경에 비해 지속시간은 약 수분 내외로 짧음에도 불구하고 PCB기판이 수십~수십만 사이클의 진동 거동을 반복하기 때문에 열주기 환경과 함께 전자제품의 주요 고장메커니즘 중 하나로 작용한다. 종래 발사환경을 고려한 우주용 전자제품의 구조설계는 일반적으로 Steinberg의 피로파괴 이론[4]에 근거한 경험식을 통해 PCB기판의 허용변위를 산출하고, 최대변위에 대한 구조 안전성 만족여부를 평가하는 형태로 수행되어 왔다[2-3]. 일례로 Lee et al.[2]은 상기의 Steinberg 이론을 활용하여 우주용 전자제품인 RDU(Remote Driver Unit)의 구조적 안전성 평가를 실시하였다. Oh et al.[3]은 동일한 접근법으로 큐브위성용 전자제품 PCB기판의 구조 안전성 평가를 수행하였다. 그러나 Steinberg 이론에 기초한 설계 방법의 경우, 소자 위치가 PCB 경계에 근접할수록 산출된 허용변위가 과도해지며, 솔더접합부에 대한 피로인자를 고려하지 않기 때문에 솔더 파손까지의 잔여수명 파악이 어려운 한계점이 존재하게 된다. 그러므로 점차 복잡화, 다양화되는 인공위성의 임무성공률 향상을 위해서는 상기와 같은 구조 안전성 평가만이 아닌 피로수명 예측을 통한 전자제품의 잔여 임무수명을 파악하는 것이 필수적이다. 특히 BGA 및 TSOP와 같은 표면실장형

소자의 경우, 실장구조 상 종래 관통실장형 소자에 비해 발사환경에서의 기계적 신뢰성 측면에서 더욱 취약하기 때문에 상기의 피로수명이 더욱 중요한 설계인자로 작용한다.

이와 관련하여 종래 전자제품 솔더접합부의 구조 신뢰성 관련 연구는 주로 실제 소자 실장구조가 반영된 상세 유한요소모델을 토대로 이론적 해석을 통해 고장메커니즘 및 주어진 하중조건 하에서의 잔여 피로수명을 예측하고, 실험을 통해 수명예측 기법의 유효성을 검증하는 방식으로 이루어졌다[5-7]. 대표적인 예로 Yu et al.[5]은 SAC305 솔더가 적용된 BGA 패키지에 대한 랜덤진동시험 및 Miner's Rule에 기초한 솔더접합부의 수명분석을 실시하고, 예측된 피로수명이 시험결과와 유사함을 입증하였다. Mathew et al.[6]은 우주 발사체용 고체연료 로켓 부스터의 탑재 전자제품의 잔여 임무수명 예측을 위해 실제 비행을 통해 획득된 랜덤진동으로부터의 솔더 접합부의 응력을 계산하고 Basquin 방정식을 토대로 솔더부의 피로수명을 산출하였다. 그러나 기존 연구들 대부분이 특정한 소자 실장기법에 국한되기 때문에 실장기법이 변경될 경우 예측 결과의 신뢰도를 보장할 수 없으며, 적용 기법 별로 수명예측 결과에 차이가 존재하는 등 신뢰도 있는 전자제품 설계기준 제시가 미비한 상태이다. 또한 전자소자의 수가 증가할수록 기존에 제시된 유한요소법에 기초한 수명분석을 수행하기에는 기판의 분석 모델 구축에 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 우주용 전자제품의 기계적 신뢰성 예측을 위해 다양한 실장구조를 갖는 고집적화 기판에 대한 고신뢰도 수명예측 기법 및 이에 기초한 설계절차 구축이 필요성이 점차 증대되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 우주용 전자제품 솔더 접합부의 구조 신뢰성에 있어서 상술한 종래 연구의 한계점을 극복하기 위하여 현재 자동차 등 다양한 분야에서 전자제품의 통합적 수명예측에 폭넓게 사용되고 있는 상용 해석도구인 Sherlock[8]을 활용하였다. Sherlock의 경우, 고장물리 (PoF: Physics of Failure)에 기초하여 실제 탑재 전자부품의 실장구조에 기인한 고장 메커니즘 별 고 신뢰도 수명 예측 및 다양한 기술적 분석이 가능할 것으로 판단되나 국내 우주분야에서 거의 알려져 있지 않은 상황이다. 본 연구에서는 우주용 전자제품의 예시로 선정된 PCB시편에 대하여 상기의 Sherlock을 활용하여 발사 진동환경에 대한 솔

더 접합부의 피로수명 예측을 실시하였다. 또한 상기 수명예측 결과의 타당성 검토를 위해 PCB 시편의 발사진동 수명시험을 실시하고 전자소자 실장기법 및 장착위치에 따른 피로수명 및 솔더접합부 단면 분석을 실시하였다. 최종적으로 솔더접합부의 높이에 따른 피로수명 영향 분석을 수행하였다. 이를 통해 Sherlock이 우주용 전자제품의 구조 신뢰성 분석에 있어서 유용한 활용 가능성 및 피로수명 예측의 유효성을 검토하였다.

II. 본 론

2.1 신뢰성 수명예측 도구 Sherlock

신뢰성 수명예측 도구인 Sherlock은 고장물리(PoF, Physics of Failure)에 기초하여 전자제품의 사용 환경별 고장메커니즘의 과학적 이해를 바탕으로 시간의 흐름에 따라 고장이 어떻게 발생하고 진전되며, 궁극적으로 어느 시점에 어떤 형태로 결함이 나타날지를 산술적으로 예측이 가능하다. 또한 PCB기판의 설계 파일 (Gerber File, ODB++)과 S/W에 내장된 전자소자의 데이터베이스로부터 분석 모델을 구축하여 모델링에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있어 종래의 솔더 접합부에 대한 피로수명 해석방법과 비교하여 더욱 실제에 가까운 설계가 가능하며, 전자소자의 실장구조에 기인한 고장 메커니즘 별 수명 예측 및 위험요소 조기진단 등 다양한 기술적 분석이 가능하다.

Sherlock의 활용 사례 중 하나로, 미국 국방기업 중 하나는 MIL-217-MTBF(Mean Time Between Failure) 기법으로 생산된 제품에 대해 10년 동안 10%의 고장확률이 있을 것으로 예측하였으나, 실제 현장에서 예측된 기간보다 더욱 짧은 기간에 고장이 발생하는 문제점이 존재하였다. 반면 Sherlock을 활용한 솔더 접합부 피로수명 분석결과, 해당 제품이 4.5년이 지난 시점에 10%의 고장률이 발생할 것으로 분석되었으며, 이후 실제 현장에서 4.9년에 10% 고장률을 나타내어 상기의 Sherlock을 활용한 분석결과 유효성을 입증하였다[8]. 이는 종래 통상적으로 적용되어 왔던 MIL 217, SR-332, 등과 같은 MTBF 고장률 예측 기법은 단지 부품만을 평가하는 계리적(Actuarial) 모델이며, PCB 수준 및 외부 환경조건이 고려되지 않음에 기인한 결과이다.

2.2 진동 피로수명 예측 이론

기존의 우주용 전자제품 설계에 적용되어 왔던 Steinberg 이론의 경우, 총 4 방향의 모서리가 단순 지지 경계조건을 갖는 직사각형의 PCB기판이라는 가정조건 하에서 기판의 동적 거동을 설명한다. 따

라서 진동 환경에서 굽힘 거동에 따른 PCB기판의 형상은 이상적인 반 정현파 형태이며, PCB 중심부에서 최대 변위가 발생하는 단순한 모드 형상을 갖는다는 전제조건을 토대로 허용변위를 산출한다. 이때문에 상기 이론은 비대칭의 경계조건에 따라 복잡한 모드 형상을 갖는 PCB기판의 곡률과 변곡점을 설명하기에 한계점이 존재한다. 또한 PCB 상에 장착된 소자의 위치를 상수로 고려하여 허용변위를 계산하게 되는데, 전자소자의 사이즈가 증가하거나 소자 장착위치가 PCB기판의 중심으로부터 멀어질수록 위치상수 값이 기하급수적으로 증가하여 허용변위가 과도해지는 단점이 존재한다.

상기 기존 Steinberg 이론의 이론적 한계점을 극복하기 위해 최대 주 PCB 변형률의 관점에서 피로수명 평가가 가능한 Modified-steinberg 이론이 제안되었으며 현재 Sherlock에서는 이를 토대로 피로수명 평가를 수행하고 있다[9]. 상기 이론은 Steinberg 이론의 허용변위를 PCB기판의 임계 주 변형률인 ϵ_c 로 대체하고, 기판의 허용변위 계산 시 오차를 야기하는 위치상수 등의 주된 인자를 제거하여 식 (1)과 같이 구성된다.

$$\epsilon_c = \frac{\xi}{c \sqrt{l}} \quad (1)$$

여기서, ξ 는 PCB기판의 허용 주 변형률을 의미한다. C 와 l 은 소자 실장기법에 따른 상수 및 전자소자의 길이로 식 (2)에서 사용된 것과 동일한 상수이다. 상기의 ξ 값은 IPC-9704A[10]에 기술된 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$\xi = \sqrt{\frac{2.35}{t}} (1900 - 300 \log(\dot{\epsilon})) \quad (2)$$

여기서, t 는 PCB기판의 두께, $\dot{\epsilon}$ 는 기판의 변형속도를 의미한다. 상기 식 (1)과 (2)를 이용해 계산된 임계 PCB 주 변형률을 토대로 Fatigue-Damage Method 기반의 식 (3)을 이용하여 솔더부의 피로주기 N_f 를 계산한다.

$$N_f = N_c \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{\max}} \right)^b \quad (3)$$

여기서, N_c 는 랜덤진동에 의한 솔더 접합부의 임계 피로주기이며, Steinberg가 제안한 2,000만 주기를 적용한다. ϵ_{\max} 는 PCB에서 발생하는 최대 주 변형

를 의미하며, b 는 솔더 재료의 S-N선도로부터 도출된 피로지수를 의미한다.

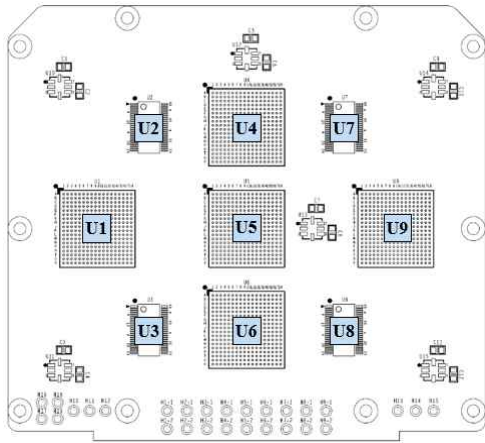


Fig. 1. PCB Layout and Component Locations

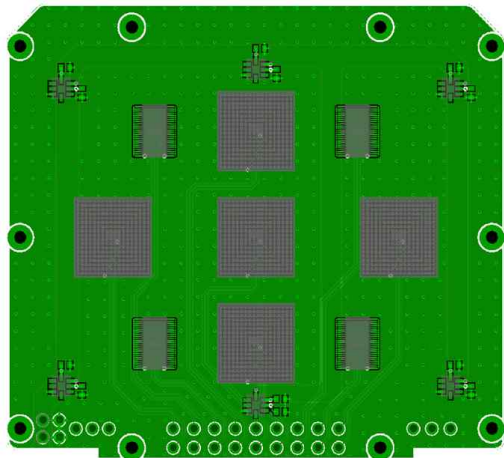


Fig. 2. Gerber Design File of PCB Specimen

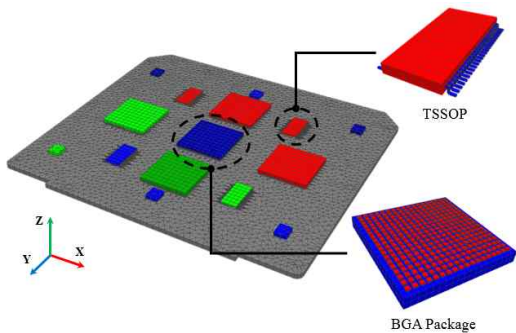


Fig. 3. Detailed Finite Element Model of PCB Generated by Using Sherlock

2.3 Sherlock을 활용한 PCB의 솔더 접합부 구조 신뢰성 예측

2.3.1 PCB 분석모델 구축

Figure 1은 본 연구에서 솔더 접합부의 구조 신뢰성 분석을 위하여 선정된 PCB 시편의 레이아웃 정보를 나타낸다. PCB 기판은 FR-4 소재로 사이즈는 $121\text{mm} \times 107.3\text{mm} \times 1.65\text{mm}$, 무게는 약 65.6g 이다. 경계 조건은 총 10군데의 M3 볼트 체결부로 구성된다. 일반적으로 우주용 전자제품에 탑재되는 PCB 기판은 전자에 의한 대전현상을 막기 위해 절연보호코팅을 적용하나, 본 연구에서의 PCB시편은 피로시험을 목적으로 하였기에 상기의 코팅처리를 수행하지 않았다. Table 1은 상기 PCB기판에 실장된 전자소자의 제원정보를 나타내며, 324-Pin PBGA (Plastic Ball Grid Array) 패키지 5개(U1, U4, U5, U6, U9)와 48-Pin TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package) 4개(U2, U3, U7, U8)를 적용하였다. 상기 선정된 두 종류의 소자는 우주용 전자제품 PCB에 주로 적용되는 소자 형태 중 비교적 크기가 크며, 다수의 솔더 접합부 및 리드선이 PCB기판의 표면에 실장되어 발사 환경에 대한 신뢰성 측면에서 취약할 수 있는 대표적인 실장 구조이다. 또한 우주용 전자제품에 일반적

Table 1. Components Specifications

Comp. No.	Configuration	Properties
U1, U4, U5, U6, U9		Package Type: BGA Pin Count: 324 Mount: SMT Size [mm]: $19 \times 19 \times 1.6$ Weight [g]: 1.4 Solder: Sn-Pb37
U2, U3, U7, U8		Package Type: TSSOP Pin Count: 48 Mount: SMT Size [mm]: $12.5 \times 6.1 \times 1.1$ Weight [g]: 0.283 Lead: Copper Solder: Sn-Pb37

Table 2. Random Vibration Specifications

Frequency [Hz]	PSD [g^2/Hz]	Grms
20~60	+3dB/oct	20
60~1,000	0.273	
1,000~2,000	-6dB/oct	

Table 3. Material Properties Applied to PCB Analysis Model

Material		Elastic Modulus [MPa]	Shear Modulus [MPa]	Poisson Ratio	Density [kg/m ³]
PCB (FR-4)		31,893	13,866.5	0.15	2,477
BGA Package	Component	15,168	6,320	0.2	1,900
TSSOP	Component	11,700	4,500	0.3	2,940
	Lead (Copper)	113,000	42,164.2	0.34	8,900
Solder (Sn-Pb37)		29,379	10,801.1	0.36	8,490

으로 적용되는 Sn-Pb37 조성비의 유연 솔더를 적용하여 소자를 기판에 실장하였다.

Figure 2는 PCB 시편의 Gerber 설계 파일을 나타낸다. 그리고 Sherlock 상에서 상기의 Gerber 파일을 이용하여 구축한 유한요소모델을 Fig. 3에 나타내었다. 상기 모델은 총 8,268개의 20절점 2차 6면체 요소 및 20,330개의 15절점 2차 5면체 요소로 구성되며, 총 절점 수는 116,585개이다. 또한 PCB 기판의 Hole 체결부의 경계 절점과 중앙에 별도로 생성된 절점을 강체요소로 연결하고, 중앙 절점에 3자유도(Tx=Ty=Tz=0)의 변위 구속조건을 부여하였다. 전자소자의 경우, Sherlock S/W 내부의 소자 데이터베이스를 이용하여 BGA 소자의 총 324 개의 솔더 볼과 TSSOP 소자의 총 48 개의 Gull-wing 리드 프레임 등 실제 기하학적 형상이 그대로 유한요소 모델에 반영된 것을 알 수 있다. 따라서 Sherlock을 활용할 경우, 다양한 실장구조를 포함한 고집적 PCB기판을 신속하게 구축할 수 있으며, 복잡한 유한요소모델 구축에 소요되는 시간과 노력을 줄일 수 있음을 알 수 있다. Table 2는 PCB기판에 적용된 랜덤진동 규격을 나타내며, 우주용 전장품 검증을 위한 일반적인 랜덤진동 규격 중 하나를 적용하였다. Table 3은 PCB 분석모델에 적용된 물성치 정보를 나타낸다.

2.3.2 랜덤진동 피로수명 예측

Sherlock을 이용해 구축된 PCB기판의 분석 모델을 이용하여 발사진동 피로수명 예측을 실시하였다. 우선, Sherlock S/W에 내장된 상용 유한요소해석 툴인 CalculiX를 적용하여 구조해석을 실시하고, 이 결과로부터 Sherlock상에서 피로수명 예측을 실시하게 된다. Fig. 4는 PCB기판의 1차 고유진동수인 632.26Hz에서의 모드 형상을 나타내며, 상기 모드에서 기판의 변위가 가장 극심하여 솔더접합부의 피로수명에 지배적인 영향을 미치게 된다. 따라서 PCB 랜덤진동 해석 또한 상기의 Out-of-Plane 방향인 Z축에 대하여 실시하였다.

Figure 5는 20Grms의 랜덤진동 입력에 대한 PCB의 RMS 주변형률 응답의 Contour를 나타낸 것

이다. 실장된 9개의 소자 중에서 주로 변위가 가장 극심한 PCB 중심부에 위치한 U5 BGA 소자에서 최대 변형률이 발생하며, 이를 통해 U5 소자가 솔더부의 피로파괴에 있어서 가장 취약할 것임을 예상할 수 있다. Figs. 6(a) 및 (b)는 랜덤진동 입력에 대하여 Sherlock으로부터 예측된 각 소자 별 고장률의 시간이력 및 솔더접합부 파손까지 소요되는 시간을 각각 나타낸다. Fig. 5의 분석결과로부터 예상한대로 총 9개 소자 중, U5가 가장 먼저 고장률이 100%에 도달하였으며, 솔더의 예상 파손 시점은 약 6.69시간으로 예측되었다. 따라서 발사진동 수명시험에서는 상기 U5 소자에 대한 솔더부의 피로파괴 거동을 중점적으로 관찰하였다.

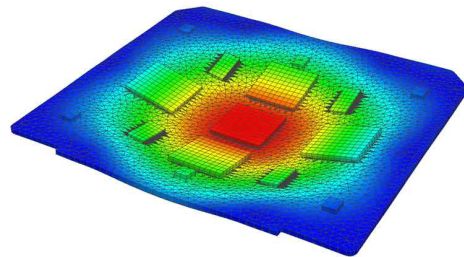


Fig. 4. 1st Mode Shape at 632.26Hz

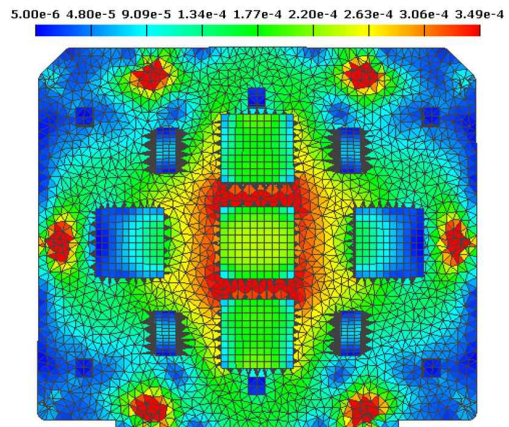
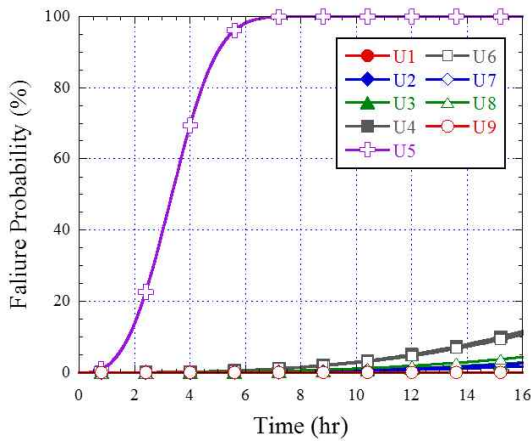
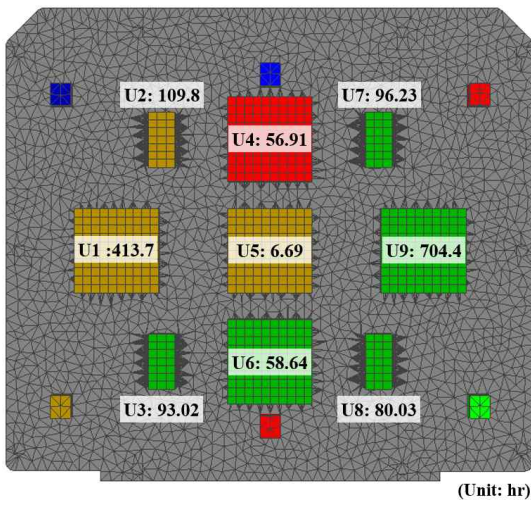


Fig. 5. RMS Strain Contour of PCB for Random Vibration along Z-axis



(a)

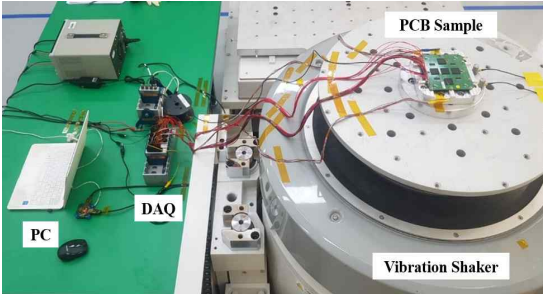


(b)

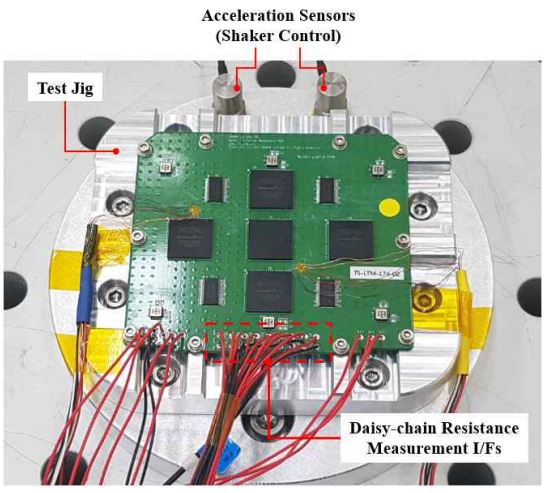
Fig. 6. Life Prediction Results of PCB for Random Vibration along Z-axis ((a) Time Profile of Failure Probability, (b) Estimated Time to Failure)

2.4 PCB 시편 랜덤진동 수명시험

상기 Sherlock을 활용한 수명 예측결과를 검증하고자 총 2장의 PCB시편을 제작하고 랜덤진동 수명 시험을 실시하였다. Fig. 7는 시험구성을 나타내며, 진동시험기(IMV사, J260/SA78M)를 이용하여 Table 3에 정의된 20Grms 규격의 랜덤진동을 PCB의 Z축 방향에 대해 소자의 피로파괴 시점까지 인가하였다. 본 시험에서는 PCB상에 실장된 9개 소자의 피로수명 평가를 위해 Fig. 8과 같이 각 소자에 대한 모든 솔더를 단일 회로로 연결하는 Daisy-chain 회로를 적용하고 랜덤진동 하에서 회로의 저항 변화를 DAQ 장비(National Instruments사, NI-9219)를 통해 측정



(a)



(b)

Fig. 7. Launch Vibration Life Test Set-up ((a) Overall Configuration, (b) Close-up View of PCB Specimen)

및 모니터링하였다. 측정 장비의 오차범위 및 성능을 고려하여 각 소자의 초기 Daisy-chain 저항 값은 모두 50Ohm으로 설정하였으며, 50 Sample/sec의 속도로 저항 데이터를 수집하였다.

진동환경에서 솔더에 최초 균열 발생 시부터 반복되는 기판의 굽힘 거동에 따라 균열은 진전되며, 최종 파손시점까지 Daisy-chain 저항 값은 계속적으로 증가하게 된다. 상기 저항증가에 따른 솔더 파손기준의 경우 IPC-9701A[11]에서는 초기저항에서 20% 증가한 값이 5회 이상 연속으로 발생 시, 또 다른 설계 기준인 IPC-SM-785[12]에서는 200Ω 이상 시로 정의하고 있다. 이 밖에도 선행연구[13-14]마다 별도의 저항 기준을 두고 시험을 수행한 사례도 있었다. 그러나 상기 열거된 기준 모두 솔더 파손여부를 판단하는 Daisy-chain 저항 값이 도출된 근거가 불명확한 한계점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 Daisy-chain 회로가 완전히 개방되어 저항치가 무한대에 이르는 시점

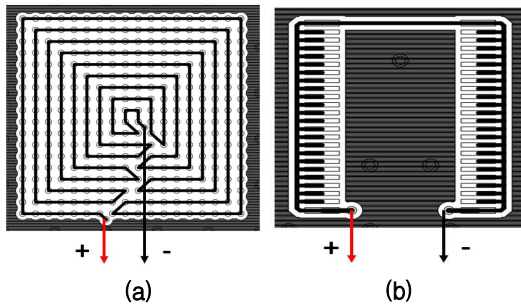


Fig. 8. Daisy-chain Circuit Applied to Components ((a) BGA Package, (b) TSSOP)

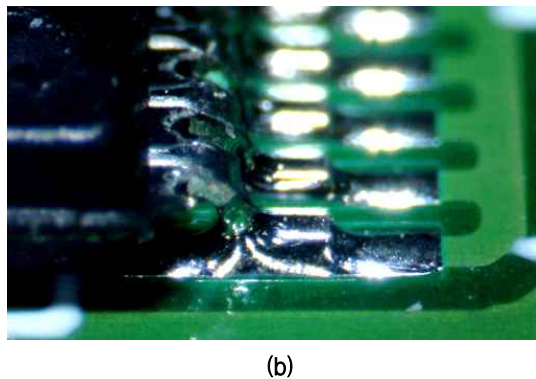
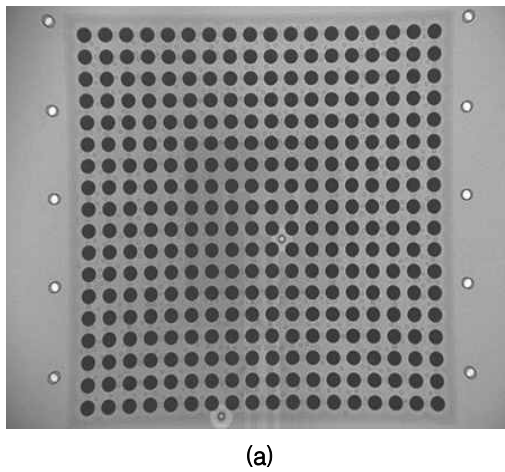


Fig. 9. Inspection Results After Manufacturing PCB ((a) X-ray Image of BGA Solder Array (U5), (b) Optical Image of Gull-wing Leads (U3))

즉, 시험장비의 최대 측정한계인 10.5kΩ에 도달 시 솔더에 완전히 파손이 발생한 것으로 간주하고, 이를 기준으로 솔더부의 피로수명을 평가하였다.

시험 전에 제작된 PCB시편의 전체 소자에 대한 실장상태를 검사하였으며, Fig. 9는 이에 대한 U5와 U3 소자에 대한 검사결과를 대표적으로 나타낸다.

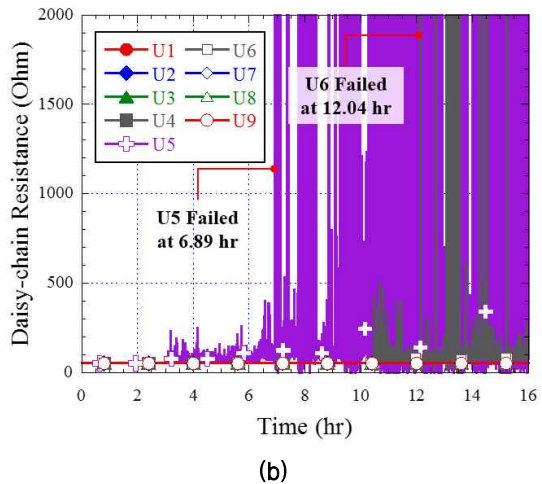
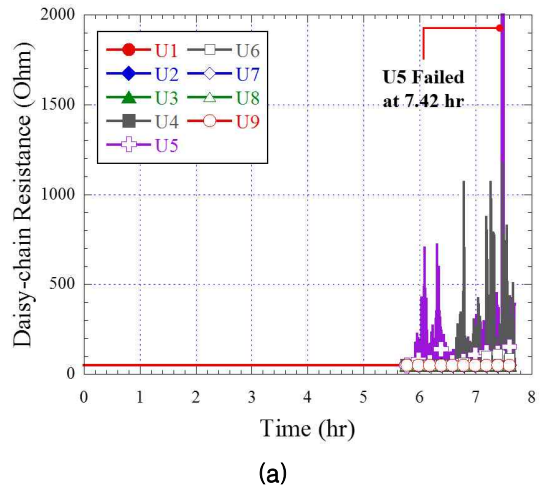


Fig. 10. Time Profile of Daisy-chain Resistance of Each Components during Vibration Test ((a) 1st PCB Specimen, (b) 2nd PCB Specimen)

BGA 소자의 경우, 실장 후에는 육안으로 각 솔더를 확인하기에 어려움이 있어 이를 비파괴적인 방법으로 검사하고자 Fig. 9(a)와 같은 X-ray 촬영을 수행하였다. 그림과 같이 모든 BGA 솔더 볼이 정상적인 형태 및 사이즈로 실장되어 있음을 확인할 수 있었다. TSSOP 소자는 모든 리드 및 솔더접합부가 소자의 외곽에 노출되므로, Fig. 9(b)와 같이 광학 현미경 촬영을 통해 정상적으로 실장되었음을 확인하였다.

Figure 10은 PCB시편 각각에 대해 시험동안 9개 소자로부터 획득된 Daisy-chain 저항의 시간이력을 나타낸 것이다. 1번 PCB 시편은 총 7시간 40분간 시험을 수행하였으며, Fig. 10(a)의 시험결과로부터 U5 소자가 약 5.9시간 시점부터 저항치가 상승하기 시작하였다. 그리고 약 7.42시간 시점에 측정 한계인

10.5k Ω 에 도달하여 솔더가 완전히 파손에 이른 것으로 판단하였다. 또한 U6 소자가 약 6.7시간 시점부터 저항 값이 증가하였으며, 시험 중에 저항 값이 약 1.1k Ω 까지만 상승하여 솔더가 완전히 파손되지는 않았으나 일부 균열이 진전되었을 것으로 판단하였다. 이후 2번 PCB 시편은 16시간 동안 시험을 진행하였

다. Fig. 10(b)의 시험결과로부터 U5 소자는 약 6.89 시간에 저항치가 측정범위를 벗어나 솔더가 최종 파손되었으며, 1번 PCB 시편의 U5 소자의 파손 시점과 0.53시간의 차이만을 보여 서로 유사한 경향성을 나타내었다. 또한 시험시작 약 10.2시간이 지난 시점에 U6 소자에서 저항 값이 증가하기 시작하여 약 12.04

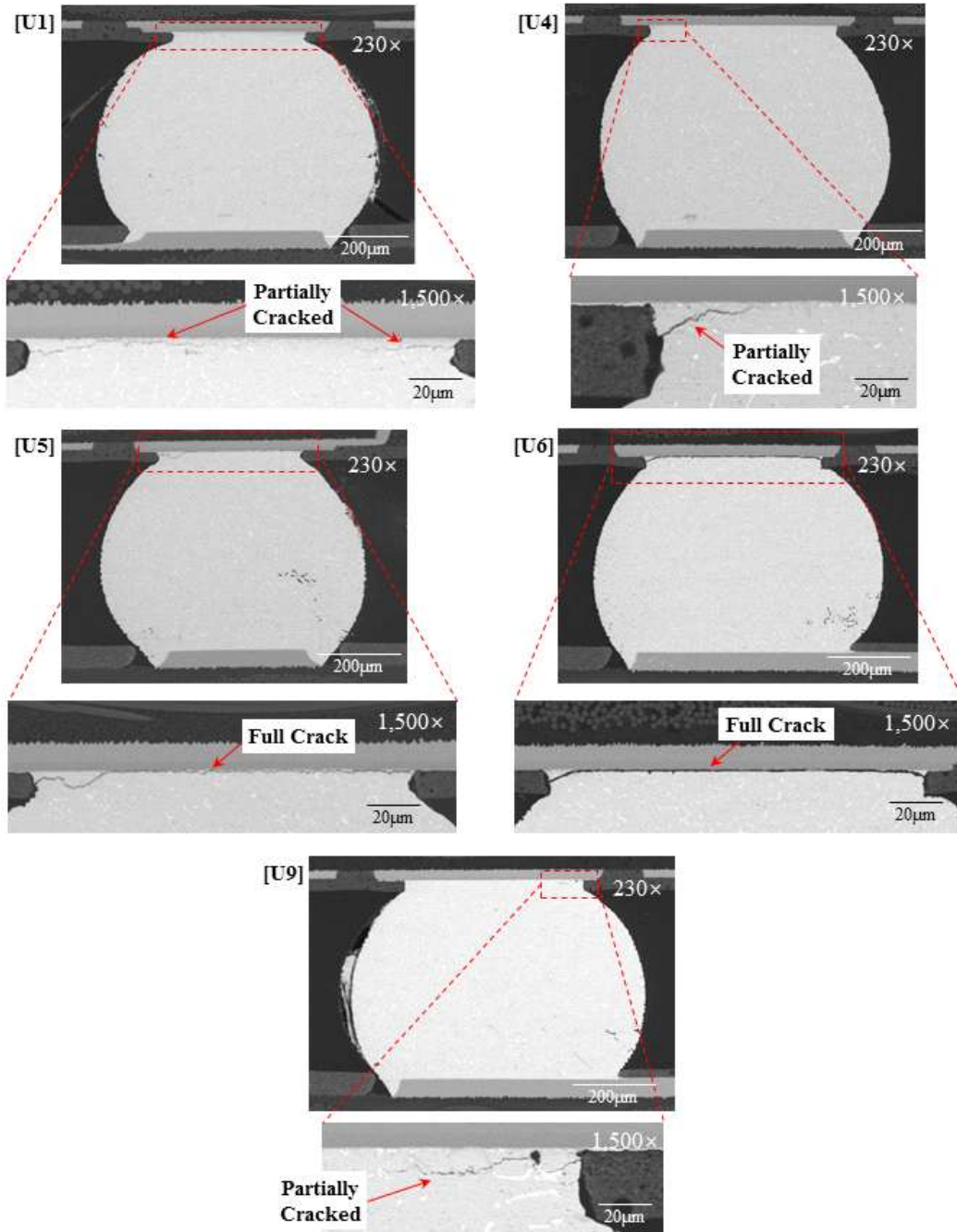


Fig. 11. SEM Images of BGA Solder Balls After Vibration Test of 2nd PCB Specimen

시간에 파손기준에 이르렀다. PCB 시편 1번과 2번 모두 U5, U6 소자 외 나머지 7개 소자는 Daisy-chain 저항 변화가 없었으므로 파손이 발생하지 않았다고 판단되나, 이에 대한 검증은 위해 총 9개 소자에 대한 단면 분석을 실시하였다.

2.5 솔더접합부 SEM 단면 분석 및 시험결과 고찰

상기 수명시험 이후, 최종적인 솔더 파손여부를 확인하기 위해 모든 PCB 시편에 대한 솔더접합부의 단면을 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)으로 촬영하고 파손상태를 확인하였다. Figs. 11 및 12는 전체 촬영결과 중 2번 PCB 시편의 BGA 및 TSSOP에 대한 SEM 단면 형상을 각각 나타낸다. SEM 촬영은 가속전압 20kV 및 렌즈와 물체간 거리 (Working Distance: WD)는 10.49mm인 조건에서 수행하였다. U5 및 U6 소자의 경우, Fig. 10(b)의 Daisy-chain 저항측정 결과로부터 예상대로 솔더가 완전히 파손(Full Crack)이 발생하였으며, 주로 응력이 집중되는 솔더와 소자의 Cu Pad 사이 경계를 따라 균열이 진전되어 기존 연구에서 알려진 솔더의 파괴 메커니즘과 동일한 형태로 파손이 발생했음을 알 수 있었다[1,7]. 그러나 나머지 U1, U4 그리고 U9 소자는 시험 중에 아무런 저항

변화가 없었음에도 불구하고 솔더 가장자리에 일부 균열(Partially Cracked)이 발생하였다. 이러한 이유는 진동시험 시 사용한 저항 모니터링 장비의 측정 정확도에 한계가 있어, Fig. 11과 같이 일부 진전된 균열에 따른 미세한 저항 변화는 감지하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 상기 BGA 소자 외에 4개의 TSSOP 소자는 Fig. 12와 같이 16시간의 랜덤진동 이후에도 솔더나 리드에 균열이 전혀 관찰되지 않아 진동환경에서 생존한 것으로 판단하였다.

Table 4는 PCB 시편에 실장된 9개 소자에 대한 수명예측 및 진동시험 결과, 그리고 SEM 분석을 통해 확인된 솔더부의 균열진전 상태를 정리하여 나타낸 것이다. 우선, U5 소자에 대해 예측된 피로수명과 실험결과에서 나타난 솔더의 완전 파손시점의 차이는 1번 PCB가 약 3%, 2번 PCB가 약 6.9%로 나타나 Sherlock을 이용한 예측결과와 유사함을 알 수 있었다. 그러나 U6 소자의 경우, 예측된 피로수명인 58.64시간에 비해 약 4.87배 빠른 시간에 완전히 파손이 발생하였다. 이 밖에도 U1, U4 및 U9 소자에서도 솔더에 부분적인 균열이 발생하였으며, 최초 균열 발생 후 완전 파손에 이를 때까지의 시간을 감안하더라도 예측된 수명에 비해 빠른 시간에 균열이 시작된 것으로 판단된다. 이와 같은 결과가

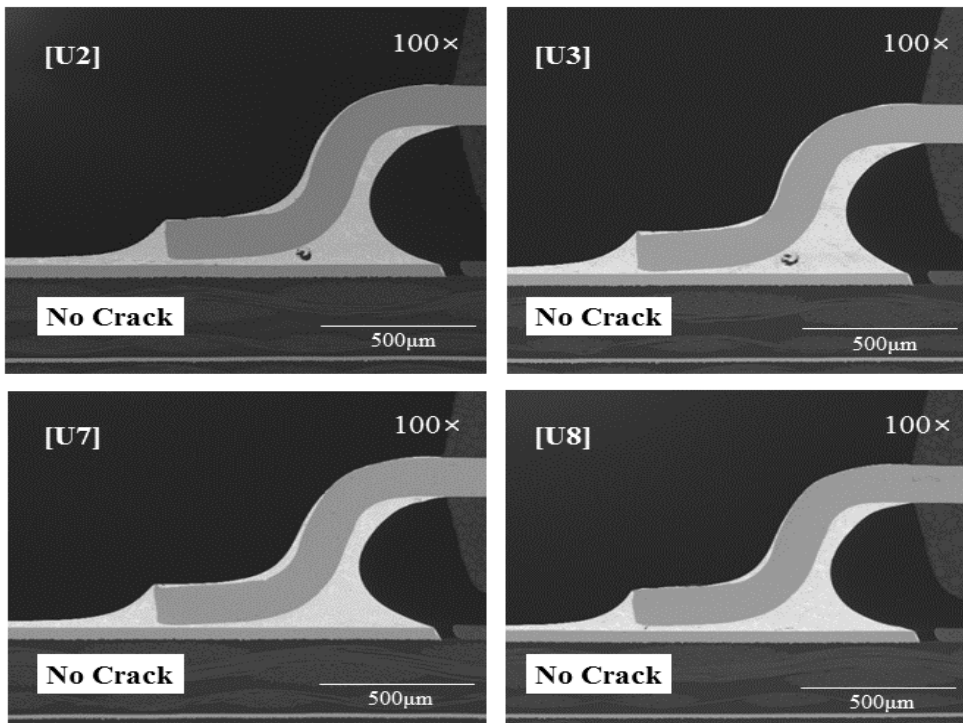


Fig. 12. SEM Images of Leads and Solder Joints of TSSOP After Vibration Test of 2nd PCB Specimen

Table 4. Comparison Between Life Prediction and Test Results of Failed Components

Component No.	Prediction [hr]	Test			
		1 st PCB Specimen		2 nd PCB Specimen	
		Fatigue Life [hr]	Remarks	Fatigue Life [hr]	Remarks
U1	413.7	< 7.67	Partially Cracked	< 16	Partially Cracked
U2	109.8	> 7.67	No Crack	> 16	No Crack
U3	93.02	> 7.67	No Crack	> 16	No Crack
U4	56.91	< 7.67	Partially Cracked	< 16	Partially Cracked
U5	6.69	6.89	Full Crack	7.42	Full Crack
U6	58.64	< 7.67	Partially Cracked	12.04	Full Crack
U7	96.23	> 7.67	No Crack	> 16	No Crack
U8	80.03	> 7.67	No Crack	> 16	No Crack
U9	704.4	< 7.67	Partially Cracked	< 16	Partially Cracked

발생한 이유는 PCB 중앙에 위치한 U5 소자에 균열이 발생함에 따라 초기 상태와 경계조건이 달라지면서 주변에 위치한 나머지 4개 BGA 소자의 피로 주기가 가속화되었기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 실제 전장품 임무 시에는 핵심소자 하나만 파손이 발생하더라도 전체 시스템의 기능에 있어서 심각한 문제를 야기할 수 있기에 주로 첫 번째 고장이 예상되는 소자에 대해 중점적으로 고장메커니즘 분석을 수행한다. 이 점을 고려했을 때 비록 부분 균열이 발생한 소자들의 정확한 균열 시작시점은 Table 4의 결과만으로는 파악이 어려우나, 가장 먼저 솔더가 완전히 파손된 U5 소자에 대한 예측과 시험결과간의 유사성으로부터 Sherlock을 이용한 수명예측 접근법이 충분한 유효성을 갖는 것으로 판단된다. 또한 PCB기판의 수명시험 시에는 솔더에 최초 균열 발생 및 균열 진전에 따른 미세한 저항변화를 감지하고자 할 경우, 보다 정밀한 저항 측정 장비를 사용하는 것을 권장한다.

2.6 솔더 높이에 따른 구조 신뢰성 분석

SEM 촬영을 통해 PCB시편에 적용된 BGA 솔더의 높이는 0.46mm로 확인되었다. 그러나 소자를 기판에 조립하는 제작 공정에 따라 솔더의 형상에 다소 차이가 있을 수 있으며, 특히 솔더의 높이가 발사진동에서의 구조 신뢰성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 U5 소자를 대상으로 BGA 솔더 볼 어레이의 높이 변화에 따른 발사진동 수명분석을 실시하였다. Fig. 13은 BGA 솔더의 높이가 0.21~0.61mm까지 변화함에 따른 분석결과를 나타낸다. 주로 솔더의 높이가 높아질수록 피로수명이 증가하는 경향성을 나타낸다. 이는 솔더의 높이가 증가할수록 강성이 낮아져 진동환경에서 PCB기판의 굽힘 거동에 대해 유연성을 갖기 때문이며, 높이 0.61mm에서 솔더의 피로수명이 0.21mm일 때와 최대 2.53배까지 피로수명이

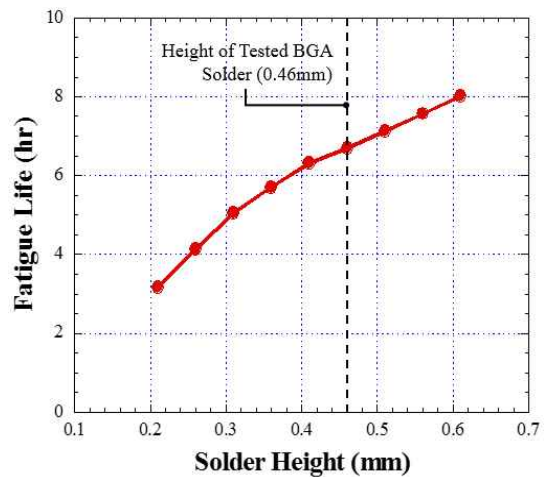


Fig. 13. Life Prediction Results of U5 Component According to Various Heights of Solder Joint

증가함을 알 수 있었다. 따라서 Sherlock을 활용할 경우 솔더접합부를 비롯한 전자소자의 형상에 따른 기계적 신뢰성 파악에 있어서 용이하며, 기존 유한요소법에 기초한 수명예측 기법들에 비해 효율적으로 수명분석이 가능함을 알 수 있었다.

III. 결 론

본 연구에서는 우주용 전장품의 발사진동 환경에서의 임무 신뢰성과 관련하여 기존 연구의 기술적 한계점을 극복하고 보다 신뢰도 있는 전장품 설계 접근법으로서 신뢰성 수명예측 도구인 Sherlock을 이용하여 우주용 전장품의 예시로 선정된 PCB기판의 솔더접합부 피로수명 예측을 실시하였다. 예측 결과로부터 가

장 먼저 파손이 발생할 것으로 예상된 U5 소자의 피로수명이 약 6.69시간으로 나타났다. 상기 예측결과 입증을 위해 PCB 시편의 발사진동 수명시험 및 단면 SEM촬영을 실시하였으며, 각 소자에 대한 Daisy-chain 회로 저항 측정법에 기반한 U5 소자의 파손 시점은 수명 예측결과와 최대 6.9%의 차이만을 보여 Sherlock이 전장품 솔더접합부에 대한 수명예측 있어서 유효함을 입증하였다. 최종적으로 소자 두께 및 솔더 높이에 따른 피로수명 영향성 분석을 통해 Sherlock이 우주용 전장품의 구조 신뢰성 분석에 있어서 유용하며 신뢰도 있는 예측결과를 제공 가능함을 입증하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부, 한국형발사체개발사업의 지원으로 수행됨(No. 2016M1A3A1A02021176).

References

- 1) Kim, Y. K, and Hwang, D. S., "PBGA Packaging Reliability Assessments under Random Vibrations for Space Applications", *Microelectronics Reliability*, Vol. 55 No. 1, 2015, pp. 172~179.
- 2) Lee, S. S., Park, T. W., Seo, J. H., Han S. W., and Kim, S. H., "Structural Vibration Analysis of Electronic Equipment for Satellite under Launch Environment", *Key Engineering Materials*, Vols. 270-273, 2004, pp. 1440-1445.
- 3) Oh, H. U., Jeon S. H., and Kwon, S. C., "Structural Design and Analysis of 1U Standardized STEP Cube Lab for On-Orbit Verification of Fundamental Space Technologies", *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing* Vol. 2 No. 3, 2014, pp. 239-244.
- 4) Steinberg, D. S., *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, Wiley-Interscience Publication, New York, 2000
- 5) Yu, D., Al-Yafawi, A., Nguyen, T. T., Park S., and Chung, S., "High Cycle Fatigue Life Prediction for Pb-free BGA under Random Vibration Loading", *Microelectronics Reliability*, Vol. 51, 2011, pp. 649-656
- 6) Mathew, S., Das, D., Osterman, M., and Pecht, M., "Virtual Remaining Life Assessment of Electronic Hardware Subjected to Shock and Random Vibration Life Cycle Loads", *Journal of the Institute of Environmental Sciences and Technology*, Vol. 50 No. 1, 2007, pp. 86-97
- 7) Cinar, Y., Jang, J., Jang, G., Kim, S., and Jang, J., "Effect of Solder Pads on the Fatigue Life of FBGA Memory Modules under Harmonic Excitation by using A Global - local Modeling Technique", *Microelectronics Reliability*, Vol. 53, 2013, pp. 2043-2051
- 8) <http://www.dfrsolutions.com/>
- 9) G. Caswell, "17 Equations That Changed the World-There's More Than That!!! Part-1", <http://www.dfrsolutions.com/hubfs/17-Equations-that-Changed-the-World-Part-II.pdf?t=1493389984552>
- 10) Joint IPC/JEDEC Standards(IPC/JEDEC-9704A): Printed Circuit Assembly Strain Gage Test Guideline
- 11) IPC Standards(IPC-9701A), Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments
- 12) IPC Standards(IPC-SM-785), Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments
- 13) Qi, H., Plaza, G., Ganesan, S., Osterman, M., and Pecht, M., "Reliability Assessment on Insertion Mount Assembly under Vibration Conditions," *Proceedings of 57th IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 2007, pp. 407-414
- 14) Lau, J. H., Hoo, N., Horsley, R., Smetana, J., Shangquan, D., Dauksher, D. Love, Menis, I., and Sullivan, B., "Reliability Testing and Data Analysis of Lead-Free Solder Joints for High-density Packages," *Soldering & Surface Mount Technology*, Vol. 16 No. 2, 2004, pp. 46-68.