

우주용 CCGA에서 Staking 적용에 따른 진동 및 열 특성 연구

정명득^{*,1)} · 정성훈¹⁾ · 홍영민²⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

²⁾ LIG넥스원(주) 생산8팀

Study on Vibration and Thermal Characteristics Applying Staking to CCGA Package for Space Applications

Myung Deuk Jeong^{*,1)} · Sunghoon Jung¹⁾ · Young Min Hong²⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ PBA & Mechanical Production, LIGNex1 Co., Ltd, Korea

(Received 23 June 2020 / Revised 7 September 2020 / Accepted 25 September 2020)

Abstract

This paper describes the staking effect for Ceramic Column Grid Array(CCGA) packages used for satellites. Reflow Soldering Process suitable for CCGA package with back structure was set as the process development goal to meet European Cooperation for Space Standardization(ECSS) standard. After analyzing the staking effect according to the type of CCGA, it is verified by applying it to the CCGA Reflow Soldering Process. In order to confirm the validity of the staking effect analyzed in terms of vibration and thermal characteristics, it is verified through actual specimen production. It analyzes the cause of crack occurrence in the CCGA package and estimates the crack generation point using previously acquired inspection data.

Key Words : Corner Staking, CCGA Package, Reflow Soldering Process, Crack, Vibration

1. 서론

기존의 군사용 전자부품에 비해서 우주용 전자부품(EEE-Parts)은 radiation 규격, 등으로 인해 고가이며 공급원도 다양하지 못한 실정이다. 또한 반도체 기술이 발달함에 따라 전자부품들이 고 집적화되고 있다.

그 중에서도 대표적인 소자 중의 하나가 FPGA(Field

Programmable Gate Arrays)이다. 여러 가지 FPGA 패키지(Package) 중에서 민간분야 및 군사용으로 많이 사용되는 것은 PBGA(Plastic Ball Grid Array), CBGA(Ceramic Ball Grid Array), CGA(Column Grid Array)와 CCGA(Ceramic Column Grid Array)가 많이 사용되고 있는 추세이다¹⁾. 일반적으로 CCGA는 CTE(Coefficient Thermal Expansion) 특성이 BGA보다 우수하므로 우주용으로 널리 사용되어진다^{2,3)}.

즉, CCGA의 컬럼(Column) 높이는 BGA의 Ball 높이보다 약 3배 길다. Solder 컬럼의 길이가 긴 CCGA가

* Corresponding author, E-mail: jsjj@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

PCB in-plane 방향의 강성이 낮아 열 변형에 더 유연하므로, Solder Joint 부위의 응력이 낮아져 피로수명이 길다고 알려져 있다⁴⁾.

본 논문은 우주용 CCGA 패키지에 staking을 적용하여 Reflow Soldering 공정에서 요구되는 진동 및 열 특성에 관한 연구로서, 2장 이론 및 연구배경, 3장 진동 및 열 특성 해석, 4장 실험방법, 5장 결과, 6장 고찰 및 7장 결론 순으로 구성하였다.

2. 이론 및 연구 배경

2.1 Reflow Soldering 공정

2.1.1 개요

CCGA는 컬럼이 배면에 위치하므로 대개 Reflow Soldering을 사용한다. Reflow Soldering 공정은 Fig. 1과 같은 검증 과정을 거쳐서 개발된다. 그림에서 staking은 대상부품에 따라 적용되지 않을 수도 있다.

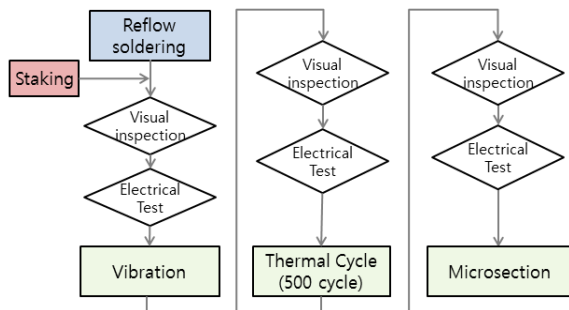


Fig. 1. Verification flow of CCGA reflow soldering

Table 1. Inspection criteria

검사 항목	요구규격	검사 방법	비고
육안검사	-	현미경	40배
Tilt	5° 이하	광학검사기	
Misplacement	기둥 직경의 15 % 이하	X-RAY	CT
Void	기둥 단면적 지름의 25 % 이하	X-RAY	CT
Crack	Solder Fillet의 Critical Zone 25 % 미만	현미경	100 배율

Reflow Soldering 공정 요구규격은 ECSS(European Cooperation for Space Standardization) 문서에⁵⁾ 의거 개발하였으며, 이에 따른 검사항목은 Table 1과 같으며, 진동 및 열주기 시험 규격은 Table 4 및 Table 7과 같다.

2.1.2 마이크로섹션(Microsection)

마이크로섹션은 균열(Crack)을 관찰하기 위해 사용하는 일종의 파괴검사이다. 마이크로섹션은 그라인딩(grinding) 방법으로 1차 그라인딩(다이아몬드 사용), 2차 그라인딩(샌드페이퍼 사용), 3차 폴리싱(polishing; 알루미늄 파우더 사용) 순으로 진행되었다.

2.2 Staking 공정

Staking 재료는 위성사업 헤리티지에 적용되었던 EC2216을 사용하였다. 이 재료는 우주급 Outgasing 요건인 TML(Total Mass Loss), CVCM(Collected Volatile Condensable Materials)을 만족한다.

Staking 공정에 대한 일습씨(Workmanship) 기준은 3가지, i) 측면 접합길이는 75 % 이상, ii) 납땜부위에 닿지 않을 것, iii) 리드의 stress relief를 방해하지 않을 것이다. 일습씨는 “단단함(firmness) 정도는 손가락 또는 비금속 probe로 접촉면에 압력을 가했을 때 부품면/PCB면에서 분리되지 않을 것”으로 확인하며, 둘 다 국내 위성개발 헤리티지를 인용하였다.

Staking 공정에 대한 단독 검증은 Fig. 2와 같이, staking 후 진동(Vibration) 시험과 열주기(Thermal Cycle) 시험을 거친다. 여기서, 진동시험은 Sine Vibration과 Random Vibration으로 구분되고 열주기 시험은 500회이다. 진동 및 열주기 시험 규격은 Table 4 및 Table 7과 같다. 일반적으로 staking은 무게 5 g 이상인 부품에 적용하도록 권장하고 있다⁶⁾.

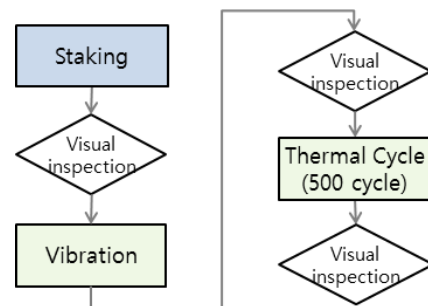


Fig. 2. Verification flow of staking process

2.3 연구 배경

초기에 Table 2 처럼 3가지 CCGA 패키지에 대해 staking을 적용하지 않고 Reflow Soldering 공정 검증을 수행하였다.

Table 2. Comparison of CCGA packages

종류	컬럼 개수	컬럼 높이	무게[g]
CCGA255	255	유사	7
CCGA624	624		13
CCGA1509	1509		35

Fig. 3은 공정 검증을 위해 제작된 시편 사진으로, 왼쪽부터 CCGA255, CCGA1509 및 CCGA624 순이다. 그림 하단부는 각 CCGA에 대한 마이크로섹션 절단면을 보여주고 있다.

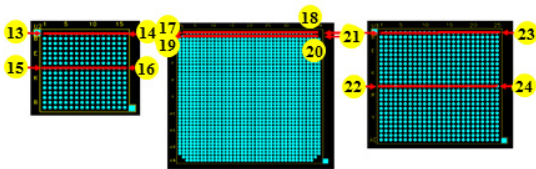


Fig. 3. Fabrication photo of CCGA packages

Table 3은 진동 및 열주기 시험 후 균열 검사를 위한 마이크로섹션 결과이다. 표에서 CCGA1509에 대한 절단면은 17~20이며, 균열이 100 % 발생하였다. 한편, CCGA255와 CCGA624는 균열이 발견되지 않았다. 여기서, 100 %는 주어진 컬럼에 대해 완전히 균열이 발생한 것임을 의미한다.

초기 진동해석 결과, 진동 해석 마진(Margin)이 충분하지는 않았으나, 열 특성 저하가 우려되어 staking 적용을 고려하지 않았다. 그러나 실험결과 CCGA1509만이 균열이 발생하였다. 균열 원인 분석 결과, 진동

시험 도중에 균열이 이미 발생하였고 열주기 시험을 통하여 균열이 증식한 것으로 확인되었다. 즉, 진동시험을 만족하기 위해 구조 보강이 필요했으므로 staking 적용을 고려하게 되었다.

Table 3. Microsection Results(3 CCGA)

시편/절단면	마이크로섹션 결과		
	균열	Void[%]	
(Test II-2)	13	특이양상 없음	8.12
	14	특이양상 없음	8.76
	15	특이양상 없음	6.67
	16	특이양상 없음	4.67
	17	균열 확인됨(100 %)	13.40
	18	균열 확인됨(100 %)	4.64
	19	균열 확인됨(100 %)	2.68
	20	균열 확인됨(100 %)	8.50
	21	특이양상 없음	10.43
	22	특이양상 없음	10.78
	23	특이양상 없음	5.33
	24	특이양상 없음	11.95

3. 진동 및 열 특성 해석

앞서 연구배경에서 언급했듯이 CCGA 중에서 컬럼 개수가 많고 가장 무거운 CCGA1509에 균열이 발생하였으며, 이에 대한 대책으로 staking 적용에 따른 주요 특성 분석이 필요하였다.

무게 기준으로 볼 때 CCGA1509는 staking이 권장되었으나, 열 특성 측면에서 볼 때 CCGA staking은 반드시 유리한 것만은 아닌 것으로 알려져 있다⁷⁾. 이에 따라, staking 적용에 따른 진동 및 열 특성 해석을 수행하였다.

3.1 진동 특성 해석

우주환경에서 진동 규격은 주로 발사체에 의해 결정되며, 그것은 일반 군사용 진동규격보다 더 엄한 편이다. 또한, 공정개발 적용되는 환경시험 규격은 구성

품(Unit) 규격보다 엄한 편이다. 즉, 공정개발에 적용되는 규격이 가장 높으며, 구성품, 장치, 부 시스템 및 시스템 순으로 낮아진다.

진동시험은 Sine Vibration과 Random Vibration이 있으며, 그 중에서 더 가혹한 Random Vibration에 대해서만 언급한다. Table 4는 Random Vibration 시험 규격이다.

Table 4. Requirements of random vibration test

Perpendicular to PCB		Parallel to PCB	
Range(Hz)	PSD Level	Range(Hz)	PSD Level
20~100	+6 dB/oct	20~100	+6 dB/oct
100~500	1.0 g ² /Hz	100~800	1.0 g ² /Hz
500~2000	-6 dB/oct	800~2000	-6 dB/oct
Global : 28.5 g r.m.s		Global : 27.1 g r.m.s	
Duration : 5 minutes per axis			

Fig. 4는 CCGA1509에 대한 Random Vibration에 대한 피로 수명 해석 모델로서, CCGA1509 모서리 4곳에 corner staking을 적용하였다. CCGA 패키지에서 진동 영향은 상호 연관성이 높은 것으로 알려져 있다^[8,9].

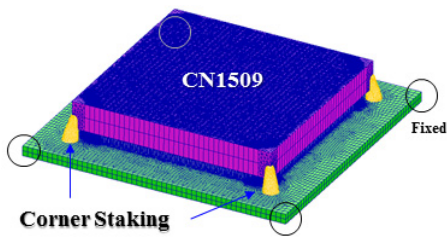


Fig. 4. Corner staking modeling

Table 5는 사용된 staking 재료의 물성이다.

Table 5. Staking material characteristics

Material	Elastic Modulus (MPa)	Shear Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Density (kg/m ³)	CTE (ppm)
EC2216 B/A Epoxy	565.6	192.4	0.47	1170	134 E-06

Fig. 5는 3가지 CCGA에 대해 고유 진동수 해석 및 스트레스(Stress) 분석결과이다. Fig. 5는 staking 미적용 시 3종의 CCGA에 대한 고유진동수 해석 결과로서, CCGA1509의 고유 진동수(897 Hz)가 다른 두 부품들에 비해 1.5배~2배 낮음을 확인 할 수 있었다. Staking을 적용한 경우, CCGA1509의 고유진동수 해석결과는 960.02 Hz로서 약 60 Hz 증가하였다.

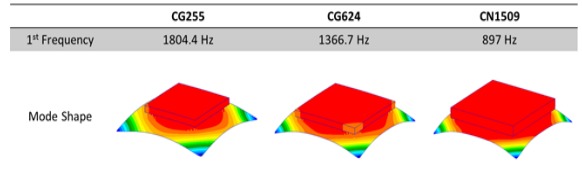


Fig. 5. Natural frequency analysis

Table 6은 staking 미적용 시 CCGA 3종에 대한 스트레스 해석결과로서, 동일 하중 조건(28.5 grms)에서 CCGA1509에 작용하는 스트레스가 타 부품들에 비해 약 2배 이상 높게 나타났다. 즉, CCGA1509가 구조적으로 가장 취약함을 알 수 있다. CCGA1509에 대해 staking을 적용한 경우 최대 스트레스는 34.4 MPa 이었으며, staking 미적용 시 보다 13.8 MPa 낮게 해석되었다.

Table 6. Stress analysis results

종류	Max. Disp. RMS(1σ)	Max. Stress RMS(1σ)	Max. Strain RMS(1σ)	Max. Accel. RMS(1σ)
CCGA 255	0.0063 mm	12.6 MPa	5.31E-4	82.25 g
CCGA 624	0.0125 mm	25.8 MPa	9.38e-4	93.04 g
CCGA 1509	0.0332 mm	48.2 Mpa	2.02E-3	107 g

3.2 열 특성 해석

위성은 진공상태에서 운용되므로 열적 특성이 지상 장비보다 더 열악하다. 시험 온도 범위도 넓은 뿐 아니라 그 cycle 수도 많은 편이다. 우주용 구성품에 대한 열주기 시험 cycle은 대략 20회 정도로서, 본 공정 개발에 적용된 500 cycle에 훨씬 못 미친다.

Table 7은 열주기 시험에 대한 규격이며, 실제 -60 °C ~ +105 °C 범위에서 500 cycle 시험한다.

Table 7. Requirements of thermal cycle test

항목	시험 규격	측정 값
온도 범위	-55 °C ~ +100 °C	-60 °C ~ +105 °C
온도 변화율	10 °C/min 이하	6.61 °C/min
Soak Time	15분 이상	20.5분

온도 변화에 따른 PCB와 부품 간의 CTE mismatch로 Solder Joint에 스트레스가 반복적으로 인가된다³⁾. 또한, CCGA 패키지에 대한 thermal cycling에 의한 CCGA 패키지의 고장(failure)은 밀접한 연관이 있다^{7,9)}. Fig. 6은 PCB와 CCGA1509사이의 CTE 해석 모델로서, Table 3과 같은 열주기 시험 규격을 적용하여 staking 적용 유·무에 따른 피로 수명 분석을 수행하였다.

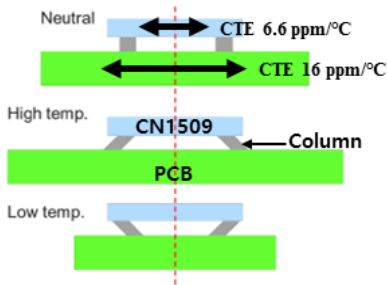


Fig. 6. CTE analysis model @solder joint

Fig. 7은 staking 적용 유·무에 따른 thermal cycling에 의한 피로 수명 예측 결과로서, Modified Engelmaier's Fatigue Model을 사용하였다.

$$\Delta\gamma = C \frac{L_D}{h_s} \Delta\alpha \Delta T \quad (1)$$

여기서, $\Delta\gamma$: Determine the strain range, C : correction factor that is a function of dwell time and temperature, L_D : diagonal distance, α : CTE, ΔT : temperature cycle, h_s : solder joint height 이다.

모델 식에서 ΔT 는 165[°C]이며, 1 cycle은 1.8[hour]로 가정하여 수행한 해석결과이다. 고장 확률 1 %일

때, CCGA1509의 피로 cycle 수는 staking 미적용 시 1127 cycle, staking 적용 시 904 cycle 임을 알 수 있다. 즉, staking 적용이 열 특성 측면에서는 불리한 것으로 나타났다.

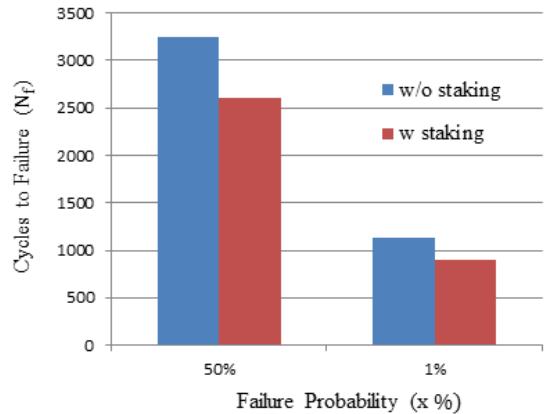


Fig. 7. Failure analysis

3.3 해석 결과 종합

진동 및 열 특성 측면에서 staking 적용 유·무에 따른 영향을 종합해 볼 때, staking 적용이 진동측면에서 유리하나, 열 특성 측면에서 불리한 것으로 나타났다. Staking 적용으로 인해 열주기 환경에서의 CCGA1509 피로 수명은 저하되었으나, 열주기 시험 규격이 500 cycle인 점을 감안할 때, 904 cycle에서 1 % 고장 확률은 수용 가능하므로 staking을 적용하는 것으로 최종 판단하였다.

4. 실험 방법

위에서 해석한 결과를 바탕으로 Reflow Soldering 공정을 통하여 staking 적용 유·무에 따른 CCGA1509에 대한 검증을 수행하였으며, 본 논문에서는 균열 관점에서 중점적으로 관찰하고자 한다.

4.1 시편 제작

공정 개발 규격 상, 부품은 각 2개 이상 사용해야하므로 Fig. 8과 같이 PCB 2장(Test II-5, Test II-6)을 제작 하였으며, 각 PCB마다 하나의 CCGA1509는 staking 미적용하고, 다른 하나는 모서리 4곳에 corner staking을 적용하였다.

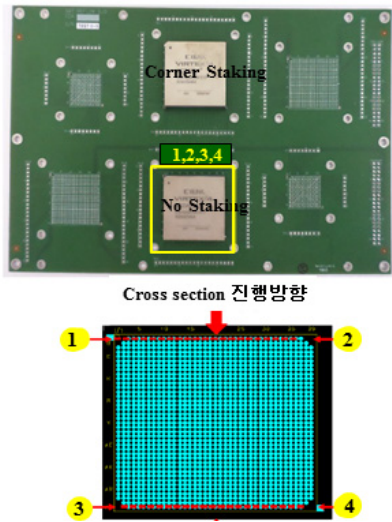


Fig. 8. Fabrication photo of CCGA1509

4.2 Coner staking 사진

Fig. 9는 실제 모서리 4곳에 corner staking을 적용한 사진이다. 모델링 결과를 반영하여 공정하였으며, staking 일습씨 기준을 충족하였다.

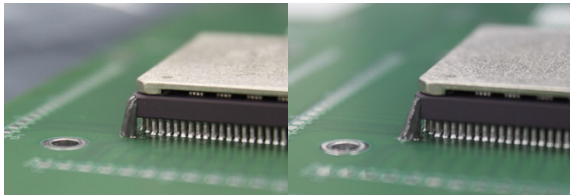


Fig. 9. Photo of CCGA1509 corner staking

5. 결 과

5.1 마이크로섹션 결과

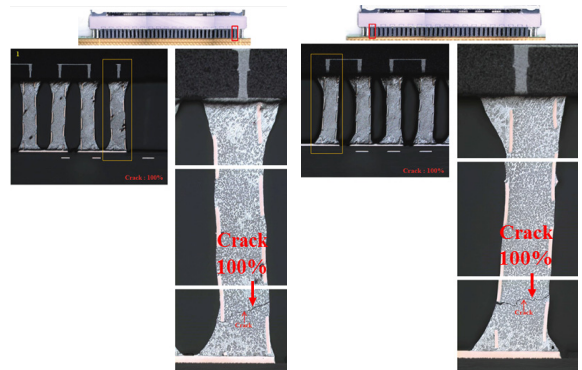
Table 8은 2가지 PCB에서 Staking을 적용하지 않은 CCGA1509에 대한 마이크로섹션 결과이다. 검사대상 컬럼에서 균열이 25 %를 초과하면 규격 불만족이다.

Test II-5 시편 전체 컬럼에서 균열이 발생한 것은 12개(100 %(6개), 34.2 %(1개), 25 % 미만(5개))이다. Test II-6 시편 전체 컬럼에서 10개(100 %(2개), 36.5 % (1개), 82.95 %(1개), 25 % 미만(6개)) 균열이 발생하였다. 반면, staking을 적용한 CCGA1509 2개는 균열이 발견되지 않았다.

Table 8. Microsection results of CCGA1509

시편/절단면	마이크로섹션 결과		
	균열	Void(%)	
Set #1 (Test II-5) No-Staking	1	균열 확인됨(100 %)	6.49
	2	균열 확인됨(100 %)	6.80
	3	균열 확인됨(100 %)	3.47
	4	균열 확인됨(100 %)	3.56
Set #2 (Test II-6) No-Staking	5	균열 확인됨(36.5 %)	7.60
	6	균열 확인됨(82.9 %)	11.1
	7	균열 확인됨(100 %)	6.04
	8	균열 확인됨(100 %)	12.9

Fig. 10은 2장의 PCB에서 staking을 적용하지 않은 CCGA1509에 대한 사진으로 균열이 선명하게 보인다. Table 8에서 Test II-5의 1번과 Test II-6의 7번 컬럼을 확대한 사진이다.



(a) Test II-5_1

(b) Test II-6_7

Fig. 10. Microsection photo of CCGA1509(No staking)

5.2 실험 결과

Corner staking을 적용한 CCGA1509 2개는 균열이 발견되지 않았으며, staking을 적용하지 않은 CCGA1509 2개는 위 Table 8과 같이 균열이 발생한 것이다. 이는 진동 및 열 특성 해석에 잘 부합하는 결과임을 알 수 있다. 100 % 균열은 대부분 모서리에서 발생한 것으로 볼 때, corner staking이 유효한 것으로 판단하였다.

6. 고찰

균열이 발생한 시점을 예측하기 위해 마이크로섹션 결과, 100 % 균열에 해당하는 컬럼(Fig. 10(a) Test II-5_1번)에 대해서 진동시험 후 검사결과와 열주기 시험 후 검사결과를 역 추적하여 조사하였다.

6.1 열주기 시험 후 검사 결과 추적

Fig. 11은 열주기 500회 시험 후 미리 검사했던 Test II-5_1번 컬럼이다. 100배율 현미경 사진이며 100 % 균열이 이미 발생하였음을 알 수 있었다.

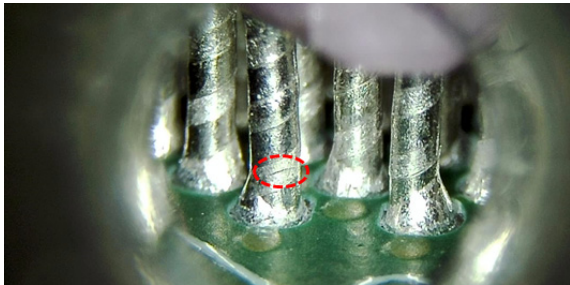


Fig. 11. Photo of crack after thermal cycle test

6.2 진동시험 후 검사 결과 추적

진동시험 순서는 Z→X→Y축 순으로 진행하였다. Fig. 12는 위와 동일한 컬럼(Test II-5_1번)에 대해 Z축(수직축) 진동시험 후 균열 검사 결과로서, 미세한 균열이 관찰되고 있다. 그 후 수평축인 X, Y축 진동시험 후에도 균열이 계속 유지되었으며, 크게 증식되지 않은 것으로 확인 되었다. 균열 발생 부위도 Solder Joint가 아니고 컬럼 부위임을 알 수 있다.

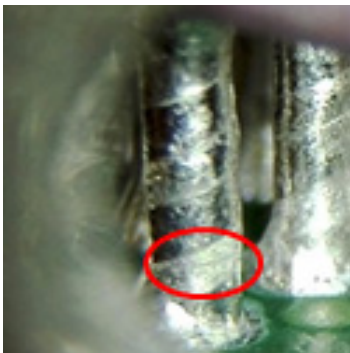


Fig. 12. Photo of crack after z-axis vibration test

6.3 요약

Staking을 적용하지 않은 CCGA1509에 대한 균열발생 메커니즘(Mechanism)을 살펴보면, 먼저 시험한 Z축 진동시험 도중 미세한 균열이 발생하기 시작했으며, X 및 Y축 진동시험 동안 균열이 유지되면서 크게 증식되지 않은 것으로 확인된다.

그 후 열주기 500회를 거치면서 100 % 균열이 발생한 것으로 고찰되었다.

7. 결론

Corner staking 적용 유·무에 따른 CCGA1509에 대한 진동 및 열 특성 해석을 통하여 그 영향성을 분석하였으며, 실제 시편제작 함께 Reflow Soldering 공정 검증 절차를 거쳐, 그 해석결과가 타당함을 보였다. 즉, CCGA 패키지에 대한 staking 효과가 확인되었다.

또한, coner staking을 적용한 CCGA1509는 균열이 발생하지 않았으며, 아울러 Table 1에 주어진 모든 검사항목에 대한 기준을 충족시켰다.

Corner staking이 적용된 CCGA1509는 우주 발사 및 운용환경 하에서도 정상동작 가능성을 보였으며, 향후 우주급 장비 개발 간 많은 활용이 기대된다.

References

- [1] Xiaorui Lv, et al., "Reliability Study of the Solder Joints in CCGA Package during Thermal Test," 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, pp. 854-857, May 2014.
- [2] Teng Sue Y., "Brillhart Mark. Reliability Assessment of a High CTE CBGA for High Availability Systems," In Proceeding of the Components and Technology Conference, Vol. 52, No. 2002, pp. 611-616, 2002.
- [3] Martin Hart, "CCGA Solder Column - Reliable Solution for Absorbing Large CTE Mismatch," European Microelectronics and Package Conference, Vol. 2015, No. 9, pp. 1-5, 2015.
- [4] Dr. Mark Fan, "FEA Stress Analysis for the Comparison of BGA and CGA," NASA Electronic Parts and Packaging(NEPP), pp. 1-3, August 1999.

- [5] ESA, "High Reliability Soldering for Surface Mount and Mixed Technology," ECSS-Q-ST-70-38C, European Cooperation for Space Standardization, Jul. 2008.
- [6] ESA, "Manual Soldering of High-Reliability Electrical Connections," ECSS-Q-ST-70-08C, European Cooperation for Space Standardization, Mar. 2009.
- [7] Rajeshuni Ramesham, "Thermal Cycling Testing to Failure of a Ceramic Column Grid Array Package for Space Applications," Pan Pacific Microelectronics Symposium, Vol. 2017, No. 2, pp. 1-10, 2017.
- [8] Zezheng Li, et al., "Effect of Random Vibration Load on Flat Cover and T-shaped Cover in CCGA Package," 20th International Conference on Electronic Packaging Technology, Vol. 2019, No. 8, pp. 1-6, 2019.
- [9] Tao Lu, et al., "Vibration and Thermal Fatigue Reliability of CCGA Components," 20th International Conference on Electronic Packaging Technology, Vol. 2019, No. 8, pp. 1-4, 2019.