

언더필이 적용된 μ BGA 솔더 접합부의 열피로특성

고영욱* · 김종민** · 이준환* · 신영의*

*중앙대학교 공과대학 기계공학부

**오사카대학 공학연구과 생산과학과

Thermal Fatigue Characteristics of μ BGA Solder Joints with Underfill

Young-Wook Koh*, Jong-Min Kim**, Jun-Hwan Lee* and Young-Eui Shin*

*Dept. of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

**Dept. of Manufacturing Science Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita 565-0871, Japan

Abstract

There have been many researches for small scale packages such as CSP, BGA, and Flipchip. Underfill encapsulant technology is one of the latest assembly technologies. The underfill encapsulant could enhance the reliability of the packages by flowing into the gap between die and substrate. In this paper, the effects of underfill packages by both aspects of thermal and mechanical reliabilities are studied. Especially, it is focused to value board-level reliability whether by the underfill is applied or not. First of all, The predicted thermal fatigue lifes of underfilled and no underfilled μ BGA solder joints are performed by Coffin-Manson's equation and FEA program, ANSYS(version 5.62). Also, the thermal fatigue lifes of μ BGA solder joints are experimented by thermal cycle test during the temperature, 218K to 423K. Consequently, both experimental and numerical study show that μ BGA with underfill has over ten times better fatigue life than μ BGA without underfill.

* Corresponding author : shinyoun@cau.ac.kr

(Received July 11, 2002)

Key Words : Micro ball grid array, Solder joints, Underfill, Temperature cycle, FEA

1. 서 론

고성능, 초소형, 고입·출력단자에 대한 필요성이 증가함에 따라 전자산업분야를 비롯한 항공우주, 통신 및 기타 응용분야에 있어서도 Ball Grid Array(BGA)와 Chip Scale Package(CSP), Flip Chip과 같은 고집적, 고신뢰성의 패키징 체제에 대한 요구가 급증하고 있다. 최근 들어 실제 제품에 적용되기 시작한 BGA와 플립칩 기술은 이러한 요구에 부합하는 차세대 기술이라 할 수 있을 것이다. 이에 따라, BGA와 CSP와 같은 고집적 패키지에 관한 연구가 다양한 관점에서 진행되고 있으며, 그 연구의 핵심이 되는 솔더 접합부의 신뢰성은 전자부품의 수명에 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 솔더 접합부의 열피로 특성과 수명에 미치

는 영향에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다¹⁾.

BGA/CSP 패키지 적용에 있어서 가장 큰 관심사 중의 하나는 보드 레벨 신뢰성(Board Level Reliability)이다. 강한 충격, 제품 내·외부의 진동, 굽힘과 같은 기계적 자극뿐만 아니라 규칙적인 온도변화에 의해서도 솔더 접합부에는 점소성 변형이 발생하게 된다. 이는 대부분 패키지를 구성하고 있는 이종재료 사이의 열팽창계수의 차이에 근거한 것으로 재료 전체에 대한 총체적인 열변형으로 이어진다. 즉, 이러한 변형을 고려한 보드 레벨 신뢰성에 대한 필요성이 대두되었고 최근 몇 년간의 활발한 연구와 노력으로 인하여 많은 신뢰성의 향상을 얻을 수 있었다. 하지만, 더욱 작아진 BGA/CSP 접합부는 기존의 패키지와 달리 또 다른 기계적 응력에 따른 결점을 나타내게 되었다²⁾.

BGA 타입 패키지의 보드 레벨 신뢰성에 영향을 미

치는 주요원인인 Standoff height는 보드와 패키지간의 간격을 말하는데, 이 간격이 점차 줄어드는 추세에 따라 보드와 패키지간의 솔더 접합부는 물리적/열적 스트레스에 더욱 민감해지고 이는 곧 수명 감소라는 결과를 나타낸다. 이러한 솔더 접합부의 신뢰도를 향상시킬수 있는 주요 기술 중 한가지는 언더필(underfill) 기술을 사용하는 것이다. 언더필은 다이와 substrate 사이의 열용량 차이와 물리적 충격에 의해 발생하는 스트레스를 분산시켜 주는 역할을 한다³⁾. 지금까지 보고된 여러 연구결과에 따르면 언더필이 적용된 BGA는 언더필이 적용되지 않은 BGA와 비교하여 높은 열피로 수명을 보이고 있다⁴⁾.

본 연구에서는 미세 피치 패키지의 하나인 μ BGA 패키지 어셈블리를 사용하여, 언더필의 유무에 따른 주기적 열 사이클에 대한 피로 수명을 평가하였다. 이를 위해 이론적 접근 방법의 하나로써 열피로 파단이 예상되는 솔더 접합부 계면에 집중된 응력과 변형율의 분포를 유한요소해석을 통해 살펴보았으며, 여기서 얻어진 소성변형을 진폭 값을 Coffin-Manson 피로 수명예측식에 적용하여 이론적 피로 수명을 예측하였다. 또한, 이론적 결과에 대한 실험적 검증을 병행하기 위하여 실제 언더필 적용 유무에 따른 패키지 어셈블리에 대해, 열 사이클 실험을 수행하여 이론적 피로수명과 실제 실험에서의 피로수명을 비교, 검토하였다. 주기적 열 피로를 받은 시편의 단면은 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 온도 사이클 시험(Thermal cycle test)

본 시험에 사용된 48μ BGA는 Sn-37Pb 공정 솔더가 적용된 패키지로 패키지면적 대비 칩면적이 큰 CSP 계열이며 현재 휴대용 셀룰러폰에 실제 사용되고 있는 것이다. 시험시편은 active ball 40개와 nonactive ball 8개로 구성되어 있으며, 실제 온도 사이클 시험 후 검토될 대상은 active ball이다. Fig. 1에 시험에 사용된 패키지 세부구조와 각 구성요소의 크기를 나타내었다.

온도 사이클 시험을 위해 언더필이 적용된 시편과 그렇지 않은 시편 모두 air-to-air 온도 사이클링 챔버에 넣었다. 48μ BGA 시편에 적용된 온도범위는 208~423K이며 최고/최저온도 유지시간은 5분이며, 한 사이클이 수행되는데 소요되는 시간은 총 30분으로 설정

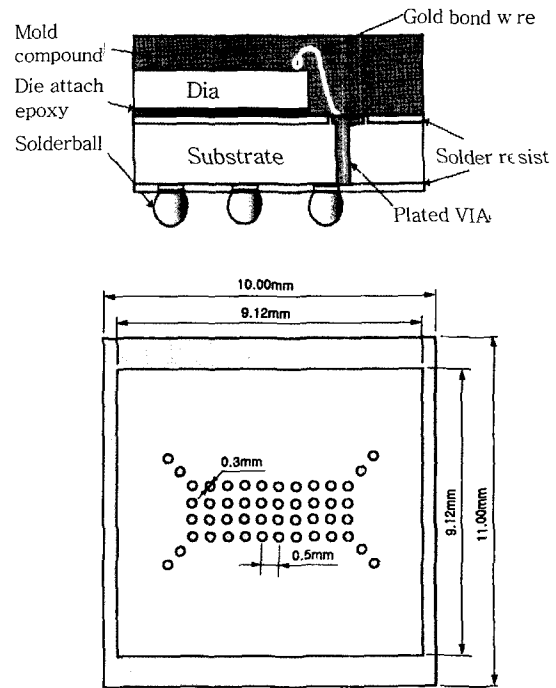


Fig. 1 Cross sectional view of μ BGA package and package outline

하였다.(Fig. 3)⁶⁾ 온도 사이클 시험을 거친 시편은 SEM을 통해 솔더 접합부의 조직변화 및 피로파괴 정도를 관찰하고 열피로 수명을 검토하였다.

2.2 유한 요소 해석(FEA, Finite Element Analysis)

Darveaux는 온도 사이클 조건 하에서의 BGA 솔더 접합부 신뢰성에 대한 유한요소해석 방법론을 제시하였다⁷⁾. 모델링을 통한 시뮬레이션의 목적은 온도 사이클 시 솔더 접합부에 누적되는 점소성 변형률을 알아내는데 있다. 본 연구에서는 유한요소해석을 위한 도구로써 ANSYS 5.62 프로그램을 사용했으며, 열해석을 감안하여 JCG 솔버를 채택했다. 모델링은 4×10 열의 BGA 패키지가 PCB 위에 접합된 구조를 대상으로 하였고, 모듈 전체는 대칭구조이므로 1/4 모듈만 모델링하였다. 모델의 구성은 해석의 용이성을 고려하여 결과값의 오차범위가 최소화되는 조건 내에서 인캡슐런트, 실리콘 칩, 구리패드, 솔더 접합부, 언더필의 총 6가지 재료로 단순화 시켰다. Fig. 2는 3차원으로 모델링된 BGA 패키지의 1/4형상과 세부 모델링을 나타낸 것이다.

솔더를 제외한 모든 재료는 등방성 탄성재료로 가정하였으며, 솔더는 높은 유연성과 낮은 항복강도의 특성을 보이므로 온도 의존적인 항복관계를 선형으로 가정하였다. 본 유한요소해석에서 사용된 시편의 각 치료별

물성을 Table 1에 나타내었다⁵⁾.

해석의 경계조건으로는 전체 모델에서 절단면에 존재하는 $x=0$ 인 노드, $y=0$ 인 노드, $z=0$ 인 노드를 각각의 축의 방향에 대하여 고정시켰으며, 좌표축에 원점이 되는 노드 또한 모든 방향에 대하여 고정하였다. 하중 조건으로는 시간에 따른 온도변화를 테이블 형식으로 완전한 3사이클을 가하고 모든 노드에 균일한 온도가 발생하도록 설정하였다. 시간에 따라 모델에 가한 온도 사이클곡선은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1 Material properties of μ BGA package

	ρ (kg/mm ³)	E (GPa)	C.T.E(ppm)	ν
Encapsulant	1.870E-6	2.54	16.9	0.4
Si Chip	2.330E-6	131	2.7	0.3
Cu Pad	8.960E-6	120	17	0.35
Sn-Pb	8.400E-6	32	24.7	0.38
Underfill	1.810E-6	9	26	0.3
PCB	1.920E-6	22.5	36	0.3

* ρ :밀도, E:탄성계수, C.T.E:열팽창계수, ν :포의송비

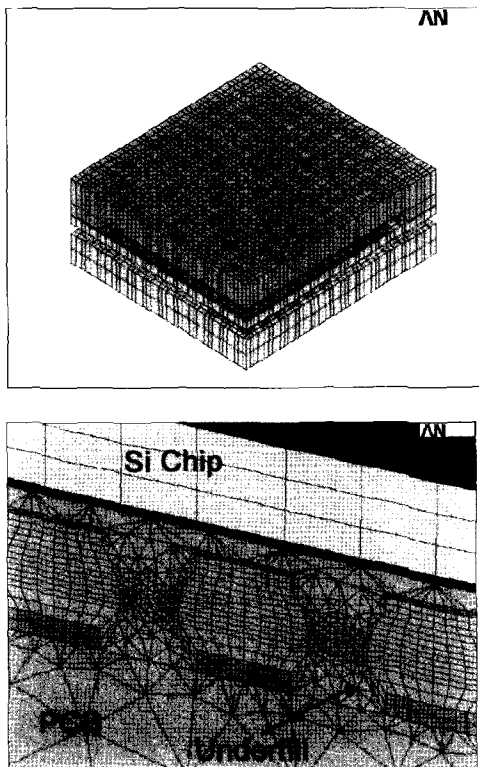


Fig. 2 A finite element model of the underfilled μ BGA package

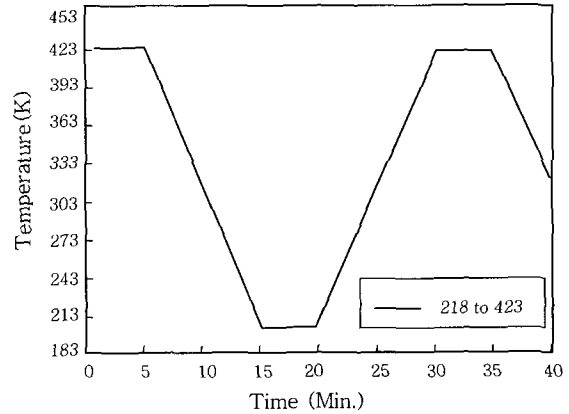


Fig. 3 Temperature profile of thermal cycle test

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 유한 요소 해석 결과 및 열피로 수명 예측

유한요소해석을 통해 나타난 각 구성 부위에서의 응력 분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 실리콘 칩, Fig. 4(b)는 언더필, Fig. 4(c)은 FR-4 PCB, Fig. 4(d)는 솔더 접합부에서의 응력 분포를 각각 나타낸다. 각 요소에서의 응력 분포를 살펴보면 솔더 접합부에서는 상부 서브스트레이트와 공정 솔더 계면 부위에, PCB에서는 가장 안쪽에 있는 솔더와 접하게 되는 부분에서 최대의 응력이 집중하게 됨을 알 수 있다. 언더필 부위의 응력분포를 분석해보면 패키지 내부에서의 응력이 상당부분 완화된 것을 볼 수 있으며, 이는 언더필의 낮은 탄성계수와 열팽창계수가 언더필 상부 실리콘 칩과 하부 PCB사이에서의 열팽창계수 차이로 인한 응력 집중을 분산시켜주기 때문으로 사료된다.

유한요소해석을 이용하여 구해진 솔더 접합부의 최대 소성 변형율을 Coffin-Manson의 Low Cycle 피로 수명식에 적용하여 솔더 접합부의 파괴수명(N_f)을 계산하였다⁸⁾. 파괴수명은 접합부의 형상에 의존하며, 상당소성변형율(equivalent plastic strain), 반복주파수, 온도의 폭 등에 의해 결정된다. 피로상수는 기존에 발표되었던 Sn-37Pb 솔더의 피로상수 $a=0.49$, $C=0.24$ 를 사용하였다⁸⁾. 해석결과 언더필이 공급된 패키지의 경우 언더필이 공급되지 않은 패키지에 비해 14 배 큰 파괴수명을 나타내었으며, 이는 언더필이 솔더접합부에 집중되던 응력을 분산시켜 상대적으로 더 작은 소성변형을 일으키기 때문인 것으로 사료된다. 해석결과 얻어진 소성변형률진폭 값과 Coffin-Manson 식에 의해 계산된 N_f 값은 Table 2에 나타내었다.

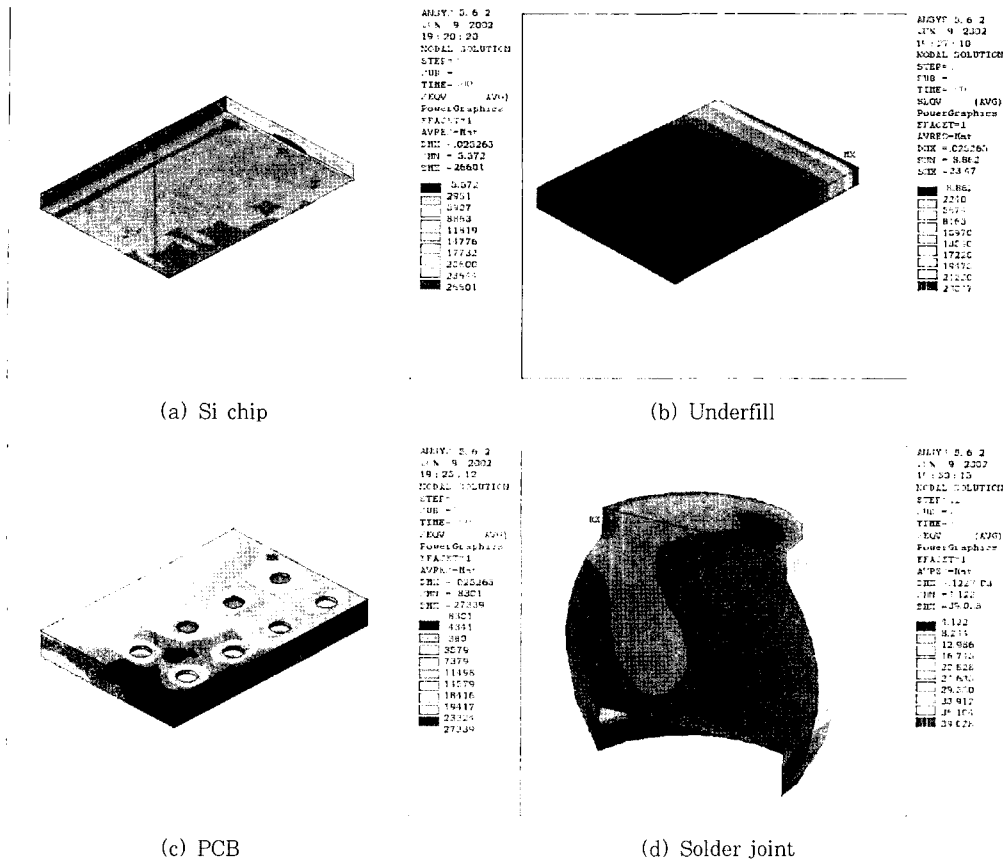


Fig. 4 Stress distributions in package assembly

Table 2 Plastic strain amplitude and fatigue life (cycle) of solder joint

	without underfill	with underfill
$\Delta \epsilon_p$	0.008045	0.002188
N_f	1022.3	14574.7

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C$$

여기서,

- N_f : 피로수명
- α, C : 피로상수
- $\Delta \epsilon_p$: 소성변형률진폭

3.2 온도 사이클 실험 결과

실제 제품에 사용된 Sn-37Pb 솔더의 경우 제품의 사용으로 주기적인 열피로를 받으면 솔더의 낮은 용점으로 인해서 상온에서도 소성변형이 발생되며, 결정립의 조대화화 확산에 의한 내부 기공발생 등으로 솔더 접합부가 쉽게 취약해지는 경향이 있다. 언더필이 공급되지 않은 48μBGA 시편의 경우 Fig. 5(a)에서 보는

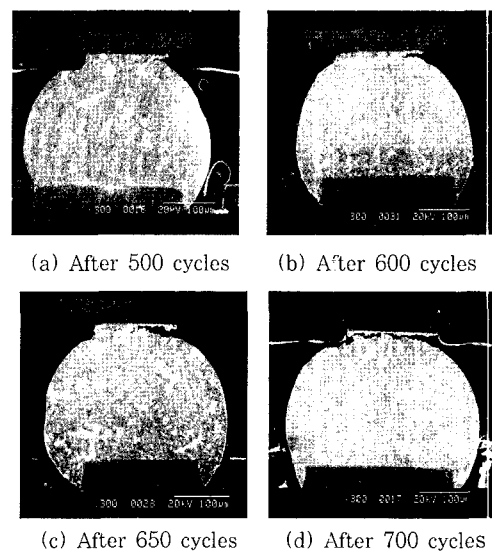


Fig. 5 Cross sectional view of solder joint without underfill(thermal cycling between 208K and 423K)

것과 같이 500 사이클을 전후로 초기균열이 나타났고, 600 사이클이 지난 후 약 30%(Fig. 5(b)), 650 사이클이 지난 후 살펴보면 Fig. 5(c)에 나타난 것처럼 균열이 솔더 상단 계면을 따라 50% 이상 상당히 진행

되고 있음을 알 수 있었다. 약 700사이클에 이르면 Fig. 5(d)에 보여지는 것처럼 솔더 상단부에 피로 파괴로 인한 완전한 파단이 일어난 것을 확인할 수 있었다. 반면 같은 조건에서 온도사이클을 실행한 언더필이 공급된 시편의 경우 언더필이 공급되지 않은 시편과 동일한 사이클 내에서는 별다른 피로 파괴의 징후가 보이지 않았으며, Fig. 6(a)에서 보는 것과 같이 4300 사이클이 경과된 후에도 솔더 접합부에 별다른 열피로 수명의 저하에 따른 파괴 징후가 나타내지 않는 것을 볼 수 있었다. 온도 사이클이 진행됨에 따라 Fig. 6(b)에서 보이는 것처럼 5100 사이클 전후에 초기균열이 나타났고, 5200 사이클이 지난 후 살펴보면 Fig. 6(c)에 나타난 것처럼 균열이 솔더 상단 계면을 따라 50% 이상 진행 된것을 알 수 있었다. 약 5300사이클에 이르면 Fig. 6(d)에 보여지는 것처럼 솔더 상단부에 피로 파괴로 인한 완전한 파단이 일어난 것을 확인할 수 있었다.

현재까지 여러 연구결과에 따르면, 언더필이 공급된 어셈블리의 경우 258~398K의 온도사이클 범위에서 약 15~20배 이상의 피로 수명의 연장을 기대할 수 있다³⁾. 하지만 본 실험에서 언더필의 유무에 따른 피로 수명을 실험 데이터에 근거에 비교해 보면, 언더필이 공급된 패키지의 경우 약 10배 정도의 피로수명의 연장을 보였다. 이는 본 실험에 사용된 패키지의 구조가 일반 등방형 BGA 구조와 달리 4×10열에 따른, 칩과 솔더접합부에 대한 응력의 집중이 높아졌기 때문으

로 사료된다. 또한 본 실험에 적용된 온도 사이클 조건이 이전 연구에 많이 사용된 온도폭보다 큰 218~423K의 온도폭으로 인해 열피로 수명의 단축이 야기되었고, 그에 따라 이전의 연구결과와는 다소 차이가 나는 실험결과를 나타낸 것으로 사료된다. 유한요소 해석에 의한 N_f 측정결과와 마찬가지로 언더필이 적용된 BGA 패키지는 열피로 실험에서도 두드러진 보드 레벨 신뢰성의 증가를 나타내었고, 이런 신뢰성 향상의 주요인은 언더필 재료인 에폭시의 낮은 열팽창계수에 의해 실리콘 다이와 하부 기판의 열팽창의 불일치가 완화되는 것으로 판단된다.

균열이 발생된 시점으로부터 솔더 조직에 대해 금속학적 측면에서 검토해보면 언더필이 적용되지 않은 시편의 경우 사이클이 증가할수록 Sn-Pb 리치(rich)상이 뚜렷해지거나, 솔더 조직내 그레인 사이즈의 변화는 크지 않았다. 그러나 언더필이 공급된 시편의 경우 피로 수명은 확연한 증가를 보이고 있지만, 사이클이 증가함에 따라 솔더 조직내 그레인 사이즈가 조대 해지며 솔더 범프 형상도 안정성을 잃어가고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 언더필로 인한 솔더 내부의 열방출이 억제되기 때문에, 이런 열적 영향에 따른 솔더 조직내 결정입자의 조대화로 인한 야금학적 취약성이 나타나는 것으로 판단되며 이에 대한 더 많은 연구가 필요할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 μ BGA 솔더 접합부의 장기 신뢰성에 미치는 언더필 영향에 대해, 온도 사이클 실험과 유한요소해석을 통해 검토하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 언더필이 공급된 BGA 패키지의 경우 언더필이 공급되지 않은 패키지에 비해 솔더 접합부의 열피로 수명이 평균 10배 이상 증가하였다. 이는 언더필이 패키지 와 하부 기판 사이의 열적 변화와 물리적 충격에 따른 응력을 분산시켜 주는 역할을 수행한 것으로 판단된다.
- 2) 유한요소해석 결과 열피로수명은 언더필이 공급된 패키지의 경우 언더필이 공급되지 않은 패키지에 비해 솔더 접합부의 열피로 수명이 약 15배 이상 증가하였다. 이는 언더필로 인해 소성 변형을 진폭의 값이 감소하여 열피로 수명을 향상시킨 것으로 사료된다.
- 3) μ BGA의 보드 레벨 구성물 중 언더필 재료인 에폭시 계열의 낮은 CTE에 의해 실리콘다이와 하부 기판 사이의 열팽창 불일치가 완화됨으로 주기적 열사이클로 인한 열피로 파괴에 있어서 두드러진 신뢰성의 향상을 보였다.

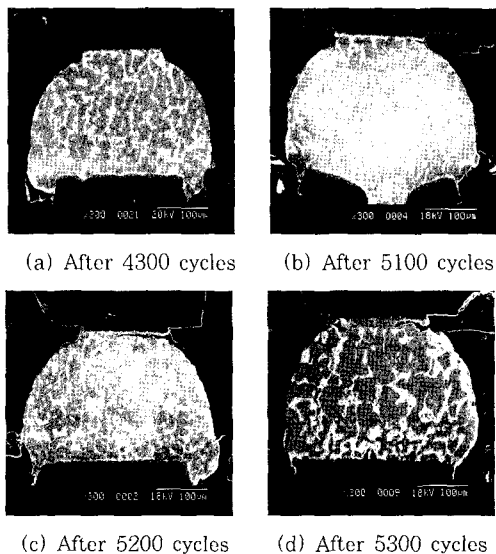


Fig. 6 Cross sectional view of solder joint with underfill(thermal cycling between 208K and 423K)

참 고 문 헌

1. T. Chung, G. Haskell : Trends in Microelectronics Packaging and Interconnection, Semiconductor Electronics, (1996), A1~A5
2. T. Doba : Current Underfills for CSP and BGA, IEEE Int'l Symp on Electronic Materials & Packaging, (2000), 240-242
3. L. Fan, Z. Zhang, C. P. Wong : Effect of Filler of Underfill Encapsulant on Reliability Performance, IEEE Int'l Symp on Advanced Packaging Materials, (2001), 218-223
4. T. Burnette, Z. John, T. Koschmieder, and W. Oyler : Underfilled BGAs for Ceramic BGA Packages and Board-Level Reliability, IEEE Electronic Components and Technology Conference, (2000), 1221-1226
5. 김종민 : 클래드 다이패드를 이용한 TSOP 솔더접합부의 수명예측 및 품질 향상에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위 논문, (1998), 16-46 (in Korean)
6. John H. Lau : Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip, and Fine Pitch SMT Assemblies, McGraw-Hill
7. Darveaux, R. : Solder Joint Fatigue Life Model", Proc. The Metallurgical Society Annual Meeting, Orlando, (1997), 213-218
8. Y.Kariya, H.Kagawa and M.Otsuka : Effect of Strain Rate, Hold Time and Third Element on The Fatigue, Mate 99, January 29-30