IMC의 영향에 따른 Flip-Chip Bump Layer의 열변형 해석

이태경¹ · 김동민¹ · 전호인¹ · 허석환² · 정명영^{3,†}

¹부산대학교 차세대전자기판회로학과, ²삼성전기(주), ³부산대학교 인지메카트로닉스공학과

Analysis on the Thermal Deformation of Flip-chip Bump Layer by the IMC's Implication

Tae Kyoung Lee¹, Dong Min Kim¹, Ho In Jun¹, Seok-Hwan Huh² and Myung Young Jeong^{3,†}

¹Education program for samsung advanced integrated circuit, Pusan National University, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

²SEMCO ACI Division, 333 Noksan Sanupjoonggro, Gangseo-gu, Busan 618-819, Korea

³Department of Cogno-Mechatronics Engineering, Pusan National University, Jangjeon 2-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

(2012년 9월 3일 접수: 2012년 9월 17일 수정: 2012년 9월 27일 게재확정)

초 록: 최근 전자 제품의 소형화, 박형화 및 집적화에 따라 칩과 기판을 연결하는 범프의 미세화가 요구되고 있다. 그러나 범프의 미세화는 직경 감소와 UBM의 단면적 감소로 인하여 전류 밀도를 증가시켜 전기적 단락을 야기할 수 있다. 특히 범프에서 형성되는 금속간화합물과 KV의 형성은 전기적 및 기계적 특성에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 플립칩 범프의 열변형을 분석하였다. 우선 TCT의 온도조건을 통하여 플립칩 패키지의 열변형 특성을 분석한 결과, 범프의 열 변형이 시스템의 구동에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 그리고 범프의 열변형 특성에 큰 영향을 미칠 것을 생각되는 IMC층의 두께와 범프의 직경을 변수로 선정하여 온도변화, 열응력 및 열 변형에 대한 해석을 수행하였으며, 이를 통하여 IMC층이 범프에 영향을 미치는 원인에 대한 분석을 수행하였다.

Abstract: Recently, by the trends of electronic package to be smaller, thinner and more integrative, fine bump is required. but It can result in the electrical short by reduced cross-section of UBM and diameter of bump. Especially, the formation of IMCs and KV can have a significant affects about electrical and mechanical properties. In this paper, we analyzed the thermal deformation of flip-chip bump by using FEM. Through Thermal Cycling Test (TCT) of flip-chip package, We analyzed the properties of the thermal deformation. and We confirmed that the thermal deformation of the bump can have a significant impact on the driving system. So we selected IMCs thickness and bump diameter as variable which is expected to have implications for characteristics of thermal deformation. and we performed analysis of temperature, thermal stress and thermal deformation. Then we investigated the cause of the IMC's effects.

Keywords: Flip-chip, IMC, TCT, Diffusion, Thermal deformation, FEM

1. 서 론

플립칩 기술이란 전기적 장치나 반도체 소자들을 다양한 재료(솔더 범프, 전도성 고분자 필름, paste 등) 및 방법(증착법, 도금법, screen printing 등)을 이용한 접착을 통하여 칩의 표면이 기판을 향하도록 하여 칩을 기판에 실장하는 기술이다.¹⁾ 이러한 플립칩 기술은 기존의 주변 정렬 방식을 가지는 와이어 본딩 기술에 비해 패키지 점 유면적을 크게 줄일 수 있고 외부 잡음, 전기용량 및 인덕턴스 값을 기존의 패키지에 비하여 월등히 감소시킬 수 있으며, 전기적 지연을 줄일 수 있는 장점이 있어 산업적으로 널리 활용되고 있다.

플립칩 기술은 낮은 작동온도에서 더 효과적으로 전기

적 신호의 송수신이 가능하며 노이즈가 적기 때문에 효율적인 기능을 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 플립칩의 수명 향상을 기대할 수 있다. 그러나 플립칩은 시스템의 구동에 따라 발열이 필연적으로 증가하게 되고, 열팽창계수(CTE)가 상이한 재료들이 적층된 구조로 구성되어 있기 때문에 모듈내의 불균일한 온도분포를 형성하여 서로 다른 물질 간의 계면에서 균열과 박리와 같은 문제점들이 발생하게 된다.²⁻³⁾

따라서, 플립칩 내의 전기적 집적에 의해 생성된 열전달 메커니즘을 파악하고, 이에 따른 열저항 및 열응력을 최소화하는 것이 플립칩 패키징에 있어서 우선시 되어야 하는 부분이다.

특히, 전자 제품의 소형화, 박형화 및 집적화에 따라 칩

[†]Corresponding author

E-mail: myjeong@pusan.ac.kr

과 패키지 기판을 전기적으로 연결하는 범프의 미세화가 요구되고 있으며, 이에 따른 범프의 기계적 특성에 대한 문제가 현재 큰 관심을 받고 있다.⁴⁻⁶⁾

이러한 범프의 미세화는 직경 감소와 금속하부층(Under Bump Metallurgy, UBM)의 단면적 감소로 인하여 전류밀도를 증가시키게 되고, 이는 일렉트로마이그레이션(Electromigration, EM)에 의한 전기적 단락을 야기시킬 수 있다. 또한 범프의 접합에 따른 금속간화합물(Intermetallic Compound, IMC)과 커켄달보이드(Kirkendal void, KV)의 형성은 패키징에 있어서의 전기적 및 기계적 특성 저하에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. 그리고 이와 같은 문제점들에 대한 원인을 분석하고 개선방안을 마련하고자 기계적, 열적 및 전기적 특성 평가에 관한 연구가 관심을 받고 있으며, 현재 우수한 특성을 가지는 범프를 구현하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.⁷⁻¹⁴⁾

범프의 경우, 온도의 상승으로 인하여 열확산으로 취약한 성질을 가지는 IMC층의 성장이 이루어지게 되고, 이는 재료의 열팽창계수의 차이에 따른 균열 및 박리를 촉진시킬 수 있다. 그리고 범프 층에 있어서 높은 전류 밀도에 따른 급속한 원자의 이동은 범프층의 경계부분에 void의 형성을 촉진시키고 기계적 특성을 크게 저하시킬 수 있다.

본 논문에서는 유한 요소 해석을 이용하여 거시적 관점에서 플립칩 패키지의 발열에 따른 열변형 특성을 해석하고, 미시적 관점으로 솔더 범프의 열변형 특성에 큰 영향을 미칠 것을 생각되는 IMC층의 두께와 범프의 직경을 변수로 선정하여 온도변화, 열응력 및 열변형에 대한 해석을 수행하였다. 그리고 이를 통하여 IMC층이 범프에 영향을 미치는 원인에 대한 분석을 수행하고자 한다.

2. 이론적 배경

플립칩은 칩, 솔더범프, 패키지 기판, 솔더볼 및 메인보드로 크게 구분할 수 있다.

패키지의 설계에 있어서 칩은 Joule heating에 따라 하나의 열원으로 작용하게 되고, 발생하는 열은 칩과 패키지 기판을 연결하는 솔더 범프에 의해 이동하게 된다. 그리고 이동된 열은 메인보드와 패키지 기판을 연결시키는 역할을 하는 솔더볼에 의해 메인보드로 빠져나가게 되는 것이다. 따라서 이상적으로 시스템이 구동되기 위해서는 각 요소들에 있어서 전기적 및 기계적 특성이 뒷받침되어야 하며, 특히 솔더 범프나 솔더볼에 있어서의 적절한 전기적 및 기계적 특성은 반드시 필요한 부분이다.

플립칩 패키지의 발열특성을 분석하기 위한 기본적인 열전달 메커니즘은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, 3가지의 기본적인 물리적 현상(전도, 대류, 복사)에 의해 열전달을 구성하게 된다.

플립칩의 열원에서 생성된 열은 전도에 의해 범프, 패키

Fig. 1. Heat transfer mechanisms.

Fig. 2. Typical FCBGA structure and thermal path.

지 기판, 솔더볼로 전달되고, 열이 분배되어진다. 그리고 주위 매개체(공기)에 의한 대류에 의해 열이 이동하여 소산된다. 그러나 플립칩의 경우, 절대온도의 차이가 작기 때문에 복사에 의한 열은 무시할 수 있다. 또한 칩의 패키징이 이루어지게 되면, 내부 유동 움직임이 적어지게 되어 전도를 통하여 대부분의 열전달이 이루어지게 된다.

플립칩 내에서 발생된 열의 전달특성을 평가하기 위하여 칩으로부터 메인보드까지의 전체 열 저항을 분석할 필요성이 있다.

본 연구에서는 우선 플립칩 패키지 전체에 대한 모델링을 시행하고, 그에 따른 열전달 특성을 분석하였다.

열전달 특성분석을 위한 시뮬레이션은 유한 요소 해석을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 열해석의 간소화를 위해 실제 플립칩의 구조를 Fig. 2과 같이 모델링하였다.

그리고 플립칩은 서로 다른 재료의 층이 적층된 구조를 가지게 된다. 따라서 재료마다 응력에 따른 열팽창의 정도에 영향을 미치게 되는 탄성계수, Poisson's ratio, 열팽창계수의 값이 차이가 나게 된다. 이에 따라 서로 다른 열응력이 가해지게 되고, 접합층의 경계부분에서 서로 다른 방향 및 크기로의 열변형을 일으킨다. 그리고 이러한 영향은 균열이나 박리를 발생시키는 결과를 가져올 수 있다.

3. FCBGA 패키지의 열해석

3.1. 플립칩 구조에 따른 열해석

플립칩 패키지의 열변형 특성을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같은 패키지 모델을 기준 모델로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 3. Studied FCBGA package.

Fig. 4. Mesh generation of FCBGA.

본 논문에서는 Comsol Multiphysics의 Joule heating and thermal stress module을 이용하여 식(1)과 (2)를 통하여 선형탄성모델로 time dependent 해석을 하였다.

$$-\nabla \cdot \sigma = F_V \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_{trans} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (2)$$

우선 IMC의 형성에 따른 플립칩 패키지에 있어서의 열변형 특성을 분석하였으며, 부분 모델링을 통한 범프의 열변형특성을 분석하였다. 그리고 플립칩 패키지의 열변형 특성 분석을 위하여 Fig. 4와 같이 기존의 모델의 모델링 작업과 격자를 생성시킨 후 그에 따른 열소산 특성을 분석하였다. 역학적 모델은 Fig. 3에 제시한 플립칩 패키지의 모델에 나와 있는 치수의 형태로 모델링을 하였으며, 중앙을 기준으로 symmetry 해석을 수행하였다. stress free state은 플립칩 패키지가 대칭되는 부분을 고정시키고 그 외의 부분은 free 상태로 조건을 부여하였다. 그리고 사용된 모델의 재료 특성은 Table 1에 나타내었다.

본 논문에서는 FCBGA 패키지의 열변형을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 통한 TCT(Thermal Cycling Test)의

Table 1. Material properties of thermal analysis model¹⁵⁾

	Si	underfill	FR4	SAC305
Density [kg/m ³]	2330	1400	1900	7380
Thermal conductivity [W/m °C]	148	0.24	0.294	50
Heat capacity [J/kg °C]	712	1150	970	232
Elastic modulus [GPa]	163	6.60	22.0	51
Poisson's Ratio	0.278	0.25	0.390	0.36
CTE [10 ⁻⁶ /°C]	2.6	33	50	40

Fig. 5. TCT profile.

온도조건을 이용하였다. TCT는 상온(25°C), 고온(125°C) 및 저온(-40°C)의 구간을 형성하였다. 그리고 승온, 냉각 및 유지시간은 300s으로 일정하게 구현하였으며, 총 5700s의 평가시간을 설정하였다. 앞에서 언급한 자료를 토대로 하여 시뮬레이션에 이용된 TCT profile은 Fig. 5와 같으며, 그에 따른 FCBGA 패키지의 열변형 특성의 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 가열 및 냉각의 과정을 거치

(a) The end of the low-dwell-temperature period

(b) The end of the high-dwell-temperature period

(c) The end of the last cycle

Fig. 6. Simulated thermal deformation behavior of FCBGA.

면서 FCBGA 패키지의 열팽창 및 열수축이 지속적으로 진행됨을 확인할 수 있었으며, 마지막 TCT cycle의 -40°C 에서 $32.8\ \mu\text{m}$, 125°C 에서 $49.1\ \mu\text{m}$, 25°C 에서 $4.1\ \mu\text{m}$ 의 열변형이 나타남을 확인하였다. 그리고 FCBGA 패키지의 층을 연결하는 솔더 범프의 위치에 대한 열응력 및 열변형을 분석하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 가열 및 냉각이 반복적으로 이루어질 때, 범프가 칩의 중심부분에서부터 바깥쪽에 위치할수록 많은 열응력이 가해지게 되고 최대 $75.4\ \text{MPa}$ 의 열응력이 나타났다. 그에 따라 열에 의한 변형량이 크게 나타남을 확인할 수 있었으며 최대 $11.7\ \mu\text{m}$ 의 열변형이 나타났다. 이는 반복적인 열변형으로 인하여 FCBGA 패키지의 시스템 구동에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

본 논문에서는 범프 내에서의 열확산에 따른 원자이동으로 인하여 생성되는 IMC층이 범프의 열변형 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되기 때문에 IMC층의 형성에 따른 열변형 분석을 수행하였다.

3.2. IMC층의 형성에 따른 FCBGA 패키지의 열해석

유한요소해석을 위하여 기존의 FCBGA 패키지의 범프에 $2\ \mu\text{m}$ 의 IMC층을 형성하였으며, IMC의 형성이 범프

(a) Von Mises stress according to bumps

(b) Total displacement according to bumps

Fig. 7. Thermal analysis of bumps.

(a) The end of the low-dwell-temperature period

(b) The end of the high-dwell-temperature period

(c) The end of the last cycle

Fig. 8. Simulated thermal deformation behavior of FCBGA with IMC.

에 미치는 영향을 앞 절과 비교하여 추가적인 분석을 수행하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 마지막 TCT cycle의 -40°C 에서 $33.3\ \mu\text{m}$, 125°C 에서 $55.5\ \mu\text{m}$, 25°C 에서 $7.3\ \mu\text{m}$ 의 열변형이 나타남을 확인하였다. 그리고 IMC의 형성에 따른 FCBGA의 열변형이 고온인 125°C 에서 $6.4\ \mu\text{m}$, 상온인 25°C 에서 $3.2\ \mu\text{m}$ 의 열변형 증가가 나타났다. 그리고 IMC층이 FCBGA 패키지의 범프에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타내었다.

해석 결과, IMC가 형성된 범프의 경우, IMC가 형성되지 않은 범프에 비해 발생하는 열응력이 최대 $144.5\ \text{MPa}$ 의 열응력이 나타났으며, 이에 따라 $14.2\ \mu\text{m}$ 의 열변형이 나타났다. 이는 IMC층의 형성이 범프 열변형에 있어서 큰 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

따라서, 범프에 형성되는 IMC층에 대한 보다 세부적인 분석이 요구되며, IMC층의 두께와 범프의 직경을 변수

(a) Von Mises stress according to bumps with IMC

(b) Total displacement according to bumps with IMC

Fig. 9. Thermal analysis of bumps with IMC.

로 선정하여 그에 따른 열응력 및 열변형 특성 시뮬레이션을 수행하였다.

4. IMC의 두께와 범프의 직경에 따른 열해석

앞 절에서 FCBGA의 범프에 대한 IMC층의 영향을 분석하였다. IMC의 존재 유무에 따라 범프와 IMC층의 경계부분에서 큰 열응력이 발생하여 열변형량이 크게 증가

Fig. 10. Flip-chip bump modeling.

Fig. 11. Current density of bump layers.

(a) Temp. distribution according to IMC thickness

(b) Von Mises stress according to IMC thickness

(c) Total displacement according to IMC thickness

Fig. 12. Thermal analysis according to IMC thickness.

함을 파악할 수 있었다.

본 논문에서는 범프에 형성되는 IMC층의 세부적인 분석을 하기 위하여 IMC층의 두께를 구조적 변수로 선정하여 그에 따른 열해석을 수행하였으며, 해석구조를 Fig. 10에 제시하였다.

우선, IMC층의 두께에 따른 범프의 열해석을 위하여 1 μm , 2 μm , 2.5 μm , 3 μm 의 IMC층을 가지고 있는 4가지 모델을 구현하였다. 그리고 각각의 모델에 대하여 1.5A의 전류를 3600s의 시간 동안 인가시켰을 때 발생하는 열응력 및 열변형에 대한 열해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12(a)의 그래프에서 전류의 인가에 따라 IMC층 부분에서 발생하는 발열이 IMC층의 두께가 증가할수록 크게 상승함을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 12(b)와 Fig. 12(c)에서 발열에 따라 IMC층의 경계부분에서 발생하는 열응력과 열변형이 IMC층의 두께가 증가함에 따라 선형

(a) Temp. distribution of bump layers

(b) Von Mises stress of bump layers

(c) Total displacement of bump layers

Fig. 13. Thermal analysis of bump layers.

Table 2. Material properties of IMC¹⁶⁾

	Ni ₃ Sn ₄
Density [kg/m ³]	8650
Thermal conductivity [W/m °C]	19.6
Heat capacity [J/kg °C]	444
Elastic modulus [GPa]	142.7
Poisson's Ratio	0.33
CTE [10 ⁻⁶ /°C]	13.7

적으로 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. IMC층이 3 μm 일 때, 가장 발열이 활발히 일어나며, 그에 따른 열응력 및 열변형이 402.3 MPa, 0.0345 μm 으로 가장 큰 값을 나타내었다.

또한 범프를 구성하는 층의 열응력 및 열변형 특성에 대한 분석결과를 Fig. 13에 제시하였다. 그리고 IMC이 미

(a) Temp. distribution according to diameter of bump

(b) Von Mises stress according to diameter of bump

(c) Total displacement according to diameter of bump

Fig. 14. Thermal analysis according to height of bump.

치는 영향을 분석하기 위하여 Ni_3Sn_4 의 재료물성값을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 13은 3 μm 의 IMC가 형성된 범프의 구조를 나타내고 있다. 이는 IMC층을 형성하는 Ni_3Sn_4 의 낮은 열전도도에 의해 IMC층의 두께가 두꺼워질수록 전기적 및 열적 저항값이 증가하게 되고, IMC의 경계부분에서 Joule heating이 크게 발생되어 두께에 따른 온도 상승이 크게 나타나게 된다고 판단된다. 그리고 이와 같은 IMC층의 영향은 범프 내에 void의 형성을 촉진시키고, void의 성장에 영향을 미치게 되어 범프 내부에 균열 및 박리의 문제를 야기시킬 수 있다고 사료된다.

본 논문에서는 낮은 열전도도를 가지는 Ni_3Sn_4 로 구성된 IMC가 형성된 범프의 미세화에 따른 열변형 특성을 분석을 추가적으로 수행하였다. 가장 열변형이 크게 나타났던 3 μm 의 IMC층이 형성된 범프의 직경을 160 μm , 140 μm , 120 μm , 100 μm 의 변수로 설정하였으며, 1.5A의 전류를 인가하였을 때, 범프의 높이에 따른 열변형 특성을 평가하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

해석 결과, 범프의 직경이 낮아질수록 발열이 증가하여, 열응력 및 열변형이 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 범프의 직경이 160 μm 에서 100 μm 으로 낮아짐에 따라 25.4°C의 온도증가를 보였다. 열응력의 경우, IMC층의 경계부분에서 가장 높은 값을 보였으며, 범프의 직경이 작아짐에 따라 118.4 MPa의 응력이 더 부가됨을 확인할 수 있었다. 그리고 열변형 역시 IMC의 경계부분에서 가장 큰 변형이 나타남을 확인하였으며, 직경 감소에 따라 열변형이 17.5% 증가됨을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 플립칩 범프의 열변형을 분석하였다. 우선 TCT의 온도조건을 통하여 IMC의 영향에 대한 플립칩 패키지의 열변형 특성을 평가하였다.

그 결과, IMC가 존재하지 않았을 때에는 최대 75.4 MPa의 열응력이 나타났다. 그리고 열변형의 경우, 최대 11.7 μm 의 열변형을 나타내었다.

반면 IMC의 형성에 따른 플립칩 패키지의 열변형 특성은 최대 135.2 MPa의 열응력과, 14.2 μm 의 열변형을 보였다.

또한, IMC가 존재하지 않는 플립칩의 경우, 범프의 위치 및 TCT cycle에 따른 열응력변화가 15 MPa로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 IMC가 형성된 플립칩 범프의 경우, 범프의 위치에 따른 최대 열응력이 26.2 MPa로 큰 차이를 보였다. 그리고 TCT cycle에 따라 네 번째 TCT cycle에서 열응력 및 열변형의 정도가 기존의 TCT cycle에 비해 크게 높아짐을 볼 수 있었다.

그리고 범프의 열변형 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 IMC층의 두께를 변수로 선정하여 보다 세부적인 온도변화, 열응력 및 열변형에 대한 해석을 수행하였다.

그 결과, IMC층의 두께가 증가할수록 범프층의 온도가 84.7°C에서 147.0°C로 상승하였다. 이에 따라 발생된 열응력은 172.2 MPa에서 402.3 MPa로 상승하였으며, 열변형 역시 0.0109 μm 에서 0.0345 μm 으로 변형량이 증가되었다. 또한 범프의 미세화에 따른 열해석 결과, 높이가 낮아질수록 높은 발열로 인하여 열응력 및 열변형이 118.4 MPa과 17.5%의 증가를 확인하였다.

본 논문에서는 범프의 미세화로 인하여 전류밀도가 증가되고, 발열에 따른 IMC층의 높은 열응력 및 열변형이 플립칩 패키지의 시스템 구동에 문제를 발생시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 그리고 범프의 미세화에 따른 copper post, 범프의 직경과 높이의 상관관계, 범프의 형상에 따른 열변형, 범프의 사이즈에 따른 open size의 최적화에 대한 분석이 추가적으로 요구된다. 그리고 실제 Cu/IMC 계면에서의 열저항이 크게 나타남에 따라 이 경계면에서의 발생하는 온도상승에 대한 문제를 분석할 필요가 있다고 판단된다. 또한 범프에 형성되는 Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn_4 , Ag_3Sn 과 같은 IMC층에 대한 범프의 변형특성을 분석하고, 형성된 IMC층에 대한 영향에 대한 분석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세 계수준의 연구중심육성사업(WCU)(R31-20004)으로부터 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. F. Coombs, "Printed Circuits Handbook", McGraw Hill Book Co., Chap.3, (2007).
2. Y. Song, S. B. Lee, S. H. Jeon, B. S. Yim, H. S. Chung and J. M. Kim "Underfill Flow Characteristics for Flip-Chip Packaging", J. Microelectron. Packag. Soc., 16(3), 39 (2009).
3. J. H. Ann, K. S. Kim, Y. C. Lee, Y. Kim and S. B. Jung "Regulation in Shear Test Method for BGA of Flip-chip Package", J. Microelectron. Packag. Soc., 17(3), 1 (2010).
4. J. U. Knickerbocker, *et al.*, "three-dimensional silicon integration", IBM Journal of Research and Development, 52(6), 553 (2008).
5. Sakuma, K. *et al.*, "Characterization of Stacked Die using Die-to-Wafer Intergration for High Yield and Throughput", Proc 58th Electronic Components and Technology Conf, Orlando, FL, pp.18-23 (2008).
6. J. W. Hwang *et al.*, "Fine pitch chip interconnection technology for 3D integration", Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 1399 (2010).
7. Y.- C. Chiou, Y.- M. Jen and S.- H. Huang, "Finite element based fatigue life estimation of the solder joints with effect of intermetallic compound growth", Microelectronics Reliability, 51, 2319 (2011).
8. C. Yu and H. Lu, "Growth Mechanism of the Cathode IMC Layer in Solder Bump Joints", Transactions of JWRI, Special Issue on WSE2011 (2011).

9. M. Huang, L. Chen, S. Zhou and S. Ye, "Effect of surface finish (OSP and ENIG) on Failure mechanism induced by electromigration in Sn-3.0Ag-0.5Cu flip chip solder interconnect", APM 2011 (2011).
10. A. Qasaimeh, S. Lu and P. Borgesen, "Crack Evolution and Rapid Life Assessment for Lead Solder Joints", Electronic Components and Technology Conference (2011).
11. C. G. Song and S. H. Choa, "Numerical Study of Warpage and Stress for the Ultra Thin Package", J. Microelectron. Package. Soc., 17(4), 49 (2010).
12. M. O. Alam, H. Lu, C. Bailey and Y. C. Chan, "Finite-element simulation of stress intensity factors in solder joint intermetallic compounds", IEEE Trans Device Mater Rel, 9(1), 40 (2011).
13. Y. M. Jen, Y. C. Chiou and C. L. Yu, "Fracture mechanics study on the intermetallic compound cracks for the solder joints of electronic packages", Eng Fail Anal, 18, 797 (2011).
14. T. T. Nguyen, D. Lee, J. B. Kwak and S. Park, "Effects of glue on reliability of flip chip BGA packages under thermal cycling", Microelectronics Reliability, 50(7), 1000 (2010).
15. S. Deplanque, W. Nuchter, B. Wunderle, R. Schacht and B. Michel, "Lifetime prediction of SnPb and SnAgCu solder joints of chips on copper substrate based on crack propagation FE-analysis", Proc. Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 2006. EuroSime 2006. 7th International Conference on, Como, 1, IEEE (2006).
16. C. C. Lee, P. J. Wang and J. S. Kim, "Are Intermetallics in solder joints Really Brittle?", Proc. 57th Electronic Components and Technology Conference(ECTC), Reno, NV, 648, IEEE (2007).