

플립칩 패키지에서 UBM 및 IMC 층의 형상 모델링

신기훈*, 김주한⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 22)

Solid Modeling of UBM and IMC Layers in Flip Chip Packages

Ki-Hoon Shin*, Joo-Han Kim⁺

Abstract

UBM (Under Bump Metallurgy) of flip chip assemblies consists of several layers such as the solder wetting, the diffusion barrier, and the adhesion layers. In addition, IMC layers are formed between the solder wetting layers (e.g. Cu, Ni) and the solder. The primary failure mechanism of the solder joints in flip chips is widely known as the fatigue failure caused by thermal fatigues or electromigration damages. Sometimes, the premature brittle failure occurs in the IMC layers. However, these phenomena have thus far been viewed from only experimental investigations. In this sense, this paper presents a method for solid modeling of IMC layers in flip chip assemblies, thus providing a pre-processing tool for finite element analysis to simulate the IMC failure mechanism. The proposed modeling method is CSG-based and can also be applied to the modeling of UBM structure in flip chip assemblies. This is done by performing Boolean operations according to the actual sequences of fabrication processes

Key Words : Flip Chip(플립칩), UBM(하부 금속층), IMC(금속간 화합물), Solid Modeling(솔리드 모델링)

1. 서론

반도체 칩 부품들의 고집적화, 경량화, 소형화를 위해 현재 플립칩(FC, Flip Chip)접합 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 플립칩 방식에서는 칩에 UBM(Under Bump Metallurgy)과 솔더 범퍼를 형성한 후 칩을 뒤집어서 지지층(substrate)에 직접 연결하게 된다. 여기서 UBM 이란 칩의

AI 패드 혹은 지지층의 Cu 전극 상에 직접 솔더또는 Au 범퍼를 형성하기 어렵기 때문에 칩과의 접착이 용이하고, 칩으로의 솔더 확산을 방지하도록 전극과 범퍼간에 형성하는 다층 복합 금속층을 의미한다. 즉 UBM은 일반적으로 솔더와 접합되는 젖음층(wetting layer), 솔더의 칩 전극으로의 확산을 방지하는 확산방지층(barrier layer), 그리고 칩 전극과 접합을 용이하게 하는 접합층(adhesion layer)으로 구성되어

* 서울산업대 기계공학과

⁺ 교신저자, 서울산업대 기계공학과 (joohankim@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

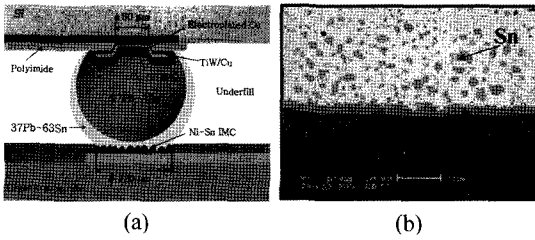


Fig. 1 TiW/Cu UBM structure(1,2)

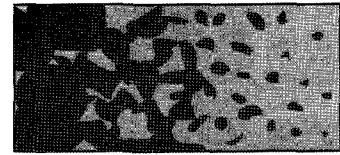


Fig. 2 Microstructure of IMC

2. 기반연구

2.1 복합재의 CSG 기반 표현

복합재 형상 모델은 형상 내부에 재질성분 및 미세결정구조 정보를 가지고 있는 3차원 모델로 정의될 수 있다. 본 논문에서는 CAD 분야에서 널리 사용되고 있는 CSG(Constructive Solid Geometry) 표현법⁽⁷⁾을 임의 형상의 복합재 모델링에 확장 적용하는 방법을 소개하겠다.

먼저 단순한 복합재 형상 모델은 곱공간 $T(=E^3 \times R^n)$ 의 부분집합 $(G, M(G))$ 으로 정의된다. 여기서 $G(\subset E^3)$ 는 복합재의 기하학적 형상을 표현하며, $M(G)(\subset R^n)$ 은 형상 G에 매핑된 재질성분 정보의 집합을 나타낸다. 예로 Fig. 3-(a)는 열보호층을 가지는 압력관 모델로 반경방향으로 재질성분이 메탈에서 세라믹으로 연속적으로 변화한다. 즉 기존의 형상 모델에 식(1)과 같은 재질성분 함수 F를 부여함으로써 복합재 형상모델을 표현할 수 있다.

$$F = [v_{metal}, v_{ceramic}] = [f(R), 1 - f(R)] \quad (1)$$

위 식에서 v_{metal} 과 $v_{ceramic}$ 은 반경 R에서 메탈과 세라믹의 부피분율(v %)을 의미하며, f는 일반적으로 다항식 형태의 함수로 3차 이내의 함수가 주로 사용된다. 만약 복합재 형상 모델이 n개의 성분 재료로 구성된다면 각 성분의 부피분율은 다음 식(2)와 같이 그 합이 항상 1이 되어야 한다.

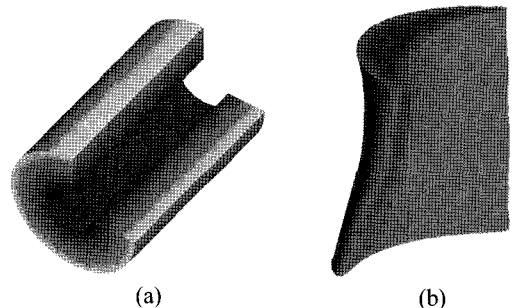


Fig. 3 Heterogeneous primitives

있다. 현재 대표적으로 사용되고 있는 UBM 시스템으로는 Cr/Cr-Cu/Cu, TiW/Cu, Al/NiV/Cu, electroless Ni/Au 시스템 등 네 가지가 있는데, Fig. 1-(a)는 Nah⁽¹⁾ 등의 연구에서 사용한 TiW/Cu UBM 및 Ni/Cu substrate 시스템을 보여주고 있다. 특히 Fig. 1-(a)에서는 솔더 젖음층(Cu, Ni)과 Pb-Sn 솔더가 반응하여 그 경계에 Cu-Sn, Ni-Sn 금속간 화합물(IMC, Intermetallic Compound)이 형성되어 있음을 알 수 있다. Nah 등이 SEM-EDX를 통하여 분석한 결과에 의하면 칩 쪽의 Cu에는 Cu₃Sn 그리고 지지층 쪽의 Ni 근처에서는 Ni₃Sn₄ 화합물이 각각 형성되었다(Fig. 1-(b)).

현재까지 플립칩의 수명과 관련하여 솔더 접합부의 신뢰성 분석 및 평가에 많은 연구들이 진행되어 오고 있다. 많은 연구를 통해 플립칩의 파괴 현상은 주로 솔더의 비선형 소성 변형 및 크리프 변형의 누적에 의한 피로 파단으로 알려져 있다⁽³⁻⁶⁾. 또한 실제 파손된 대부분의 플립칩에서는 IMC 층의 크랙이 관찰되고 있는 데, 이는 IMC 층에서의 때 이른 취성파괴에 기인한다고 볼 수 있다. 특히 실장 신뢰성 테스트에서는 electromigration 및 thermomigration에 의한 원자 확산으로 IMC 층의 성분 변화가 발생하며, 이는 결과적으로 솔더 조인트의 피로파괴를 가속화 시킬 수 있다.

실제 IMC 층의 성분을 SEM-EDX 등으로 분석한 이미지를 모델링 하면 Fig. 2에서와 같이 여러 성분 재질간의 연속적인 변화로 나타낼 수 있다. 하지만 현재까지 이러한 IMC 층을 모델링 할 수 있는 CAD 툴은 존재하지 않기 때문에 이를 모델링하고 유한요소해석으로 연결할 수 있는 CAD 툴의 개발이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 성분 분포의 연속적인 변화를 모델링할 수 있는 솔리드 모델링 기법을 소개하고, 이를 플립칩 모델링에 적용한 예를 소개하고자 한다.

먼저 2장에서는 기반연구로 복합재의 CSG 기반 표현법 및 영역 근사화에 대해서 소개하고, 3장에서는 실제 플립칩의 모델링 과정을 자세히 소개하겠다. 마지막으로 4장에서 모델링 과정을 요약하고 결론을 도출하였다.

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (2)$$

마찬가지 방법으로 Fig. 3-(b)는 금속표면에 얇은 세라믹 코팅막을 가지는 터빈 블레이드 형상모델로 재질성분이 외부 표면으로 부터의 거리를 매개변수로 하여 정의된다.

일단 단순한 복합재 형상 모델이 위의 방법으로 생성되면, CSG 형상 모델링과 마찬가지로 좀 더 복잡한 형상 모델은 단순한 형상 모델 간에 불리언(Boolean) 작업을 적용하여 Fig. 4와 같이 표현한다. 특히 제한된 방법은 각각의 이방성 형상 경계면에서 재질성분의 연속성을 보장하는데 초점을 맞추고 있다.

Fig. 4에서 불리언 작업에 의해 생성되는 형상 모델은 두 하위 형상 모델 정보, 경계면에서의 재질성분 블렌딩 정보 등을 가지고 있다. 여기서 블렌딩 정보는 두 하위 형상 모델 간의 교집합 영역에 대한 가중치(weighting factor) 및 경계면으로 부터의 최단 직교거리를 매개변수로 하는 가중함수(distance-based weighting function) 등으로 구성된다.

2.2 영역 근사화(Discretization)

영역 근사화란 연속적인 재질성분의 변화를 가지는 복합재 형상 모델을 계단모양(stepwise)의 재질성분 변화를 가지는 형상 모델로 변환하는 과정을 의미한다⁽⁸⁾. 이러한 영역 근사화는 유한요소 해석을 위한 모델의 생성 및 실제 생산을 위한 공정계획에 반드시 필요하다. 근사화 과정의 첫 단계로 먼저 형상 모델 내의 재질성분 함수를 Fig. 5에서와 같이 허용 가능한 오차 범위(ϵ)에서 계단모양의 불연속 함수로 변환하게 된다. Fig. 5는 근사화정도 $r = 0.2(20\%)$ 로 포물선 재질성분 함수를 근사화 시키는 ceil(floor) 근사화 및 중간

(intermediate discretization) 근사화 과정을 보여주고 있다.

두 번째 단계로 정규화된 불리언 작업(교집합 및 차집합)을 순차적으로 적용하여 모델의 형상을 Fig. 6과 같이 분해하게 된다.

이러한 형상의 분해와 동시에 각 분해 영역에서의 물성치(탄성계수, 푸아송 비, 열팽창계수)를 계산할 필요가 있다. 성분 재료의 물성치 평가 규칙으로 대표적인 것들은 Table 1과 같다.

2.3 유한요소모델링

Fig. 7은 영역 근사화 및 물성치 평가를 통해 분해된 형상 모델로부터 해석을 위해 생성된 유한요소모델을 보여주고 있다⁽⁹⁾. 메쉬생성 알고리즘은 단면정보의 추출, 경계곡선(곡

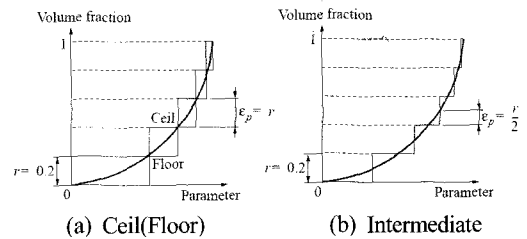


Fig. 5 Discretization of composition function

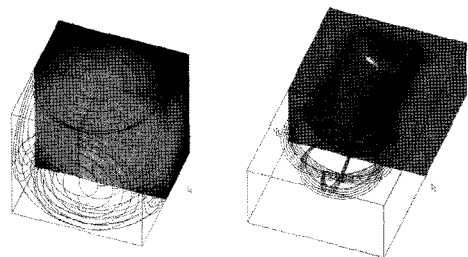


Fig. 6 Discretization of geometry

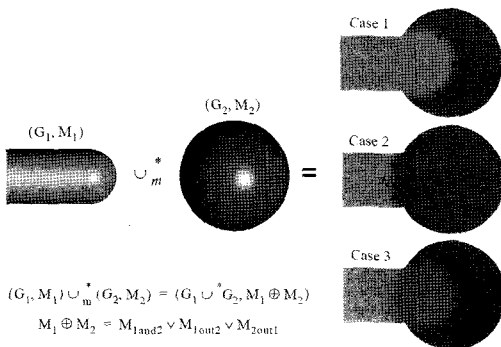


Fig. 4 Union between two primitives

Table 1 Property estimation rules

Volume Fraction	Micromechanical Models
$v < 0.1$ $v > 0.9$	Dilute approximation method
$0.1 \leq v \leq 0.3$ $0.7 \leq v \leq 0.9$	Kerner's equation, Mori-Tanaka method, Tamura method, Self-consistent method, Modulus based rules, Voigt and Reuss models
$0.3 \leq v \leq 0.7$	Fuzzy logic method

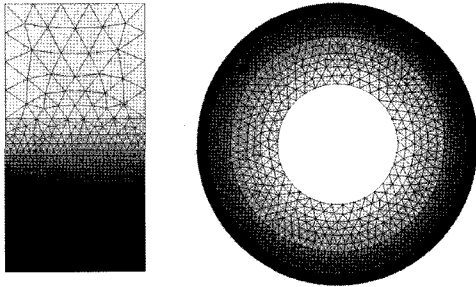


Fig. 7 Finite element modeling

면)의 분할 및 경계 노드의 생성, 지역 메쉬의 생성, 메쉬 결합 등의 4단계로 구성되며, Fig. 7에서와 같이 재질성분이 동일한 영역을 구분하여 메쉬를 생성할 수 있는 장점이 있다.

3. 플립칩의 솔리드 모델링

3.1 UBM 및 IMC 모델링

실제 실리콘 칩위에 Al 전극, 폴리이미드 보호층 및 UBM을 형성하는 공정에는 마스크를 이용한 광노광기술(photo-lithography), 식각(etching), 스퍼터링(sputtering), 전기도금(electroplating) 및 무전해 도금 등 다양한 방법이 사용되고 있다⁽¹⁰⁾.

Fig. 8은 CSG 기반 모델링 기법을 적용하여 실제 공정 순서를 따라 플립칩 UBM을 모델링하는 과정을 보여주고 있다. 먼저 Fig. 8-(a)는 실리콘 칩과 Al 전극 모델을 각각 생성한 후 Fig. 4에 소개된 유니언(합집합) 작업을 이용하여 두 형상을 합치는 과정을 보여주고 있다. 여기서는 경계블렌딩을 사용하지 않고 단순히 교집합 영역의 재질성분으로 실리콘을 선택하게 되면 합쳐진 형상모델을 얻을 수 있다. 동일한 유니언 작업을 보호층, 접합층, 확산방지층, 젖음층에 대해서 수행하면 Fig. 8-(b)와 같은 완벽한 UBM 형상 모델을 얻을 수 있다.

다음 단계로 솔리드 모델과 UBM 모델을 합치는 과정을 수행함에 있어서는 전술한 바와 같이 그 경계에 성분이 연속적으로 변화하는 IMC 구간이 있다. 그러므로 유니언 작업과 더불어 UBM의 젖음층으로 부터의 거리를 매개변수로 하는 경계 블렌딩을 수행하여 Fig. 9-(a)와 같은 형상을 얻었다. 본 예에서는 경계 블렌딩 함수로 1차함수를 사용하였지만, 실제 SEM-EDX 결과를 토대로 적당한 블렌딩 함수를 선택할 필요로 있다. Fig. 9-(b)은 동일한 작업을 지지층에도 적용하여 최종적으로 완성된 단일 솔리드 접합 형상 모델을 보여

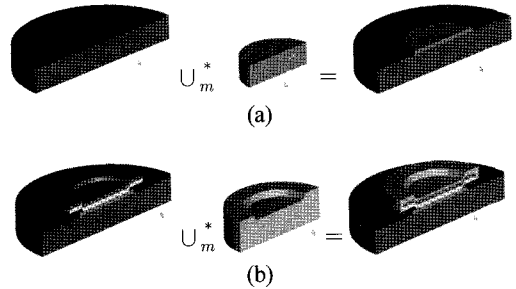


Fig. 8 UBM modeling

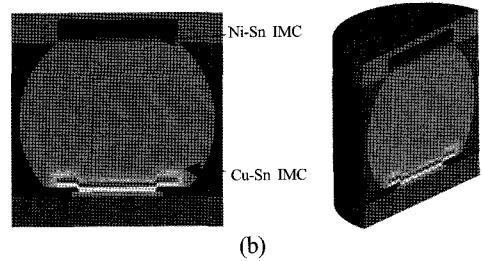
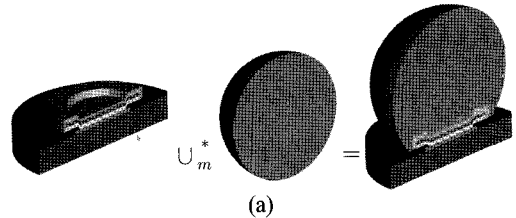


Fig. 9 IMC modeling

주고 있었다. 최종 형상에는 전술한 바와 같이 Cu-Sn 및 Ni-Sn 등 두 개의 IMC 층이 존재한다.

3.2 IMC 영역의 근사화

일단 형상 모델이 완성되면, 유한요소 해석을 위한 모델의 생성 및 실제 생산을 위한 공정계획에 사용할 수 있도록 영역 근사화 작업을 거치게 된다. Fig. 10-(a)은 근사화 정도 $r = 0.1(10\%)$ 로 근사화된 UBM 형상모델을 보여주고 있다. Fig. 10-(b),(c)에서는 1차 경계블렌딩 함수를 사용한 경우와 2차 경계블렌딩 함수를 사용한 경우를 비교하고 있는 데 근사화된 IMC 층의 형상에 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

전술한 바와 같이 이러한 형상의 분해와 동시에 각 분해 영역에서의 물성치(탄성계수, 푸아송 비, 열팽창계수)는 Table 1에있는 물성치 평가규칙을 적용하여 계산한다. 예로 Modulus 기반 규칙을 사용하면 혼합영역에서의 열팽창계

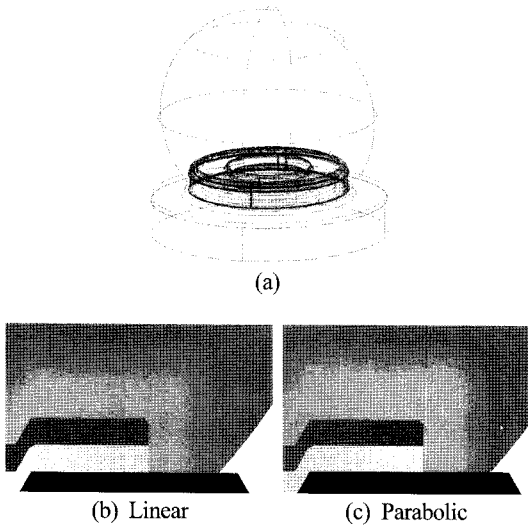


Fig. 10 Region discretization of UBM

수는 식(3)과 같이 계산된다.

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \alpha_i E_i}{\sum_{i=1}^n V_i E_i} \quad (3)$$

3.3 유한요소 모델의 생성

Fig. 11은 영역근사화된 UBM 모델로부터 단면정보의 추출, 경계곡선(곡면)의 분할 및 경계 노드의 생성, 지역 메쉬의 생성, 메쉬 결합 등의 4단계를 거쳐 생성한 유한요소 모델을 도시하고 있다.

현재 ACIS(Spatial Technologies Inc.)(11) 커널 루틴과 비주얼 C++ 언어를 사용하여 CSG 기반 복합재 형상 모델러의 원형이 구축되어 있다. 형상 및 성분재질의 표현을 위한 GUI에는 OpenGL 라이브러리를 사용하였다.

4. 결론

현재까지 많은 연구를 통해 플립칩의 파괴 현상은 주로 솔더의 비선형 소성변형 및 크리프 변형의 누적에 의한 피로 파단으로 알려져 있다. 또한 실제 파손된 대부분의 플립칩에서는 IMC 층의 크랙이 관찰되고 있는데, 이는 IMC 층에서의 때 이른 취성파괴에 기인한다고 볼 수 있다. 특히 실장 신뢰성 테스트에서는 electromigration 및 thermomigration에 의한 원자 확산으로 IMC 층의 성분 변화가 발생하며, 이

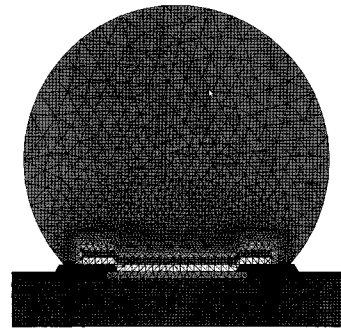


Fig. 11 Finite element model of UBM

는 결과적으로 솔드 조인트의 피로파괴를 가속화 시킬 수 있다.

실제 IMC 층의 성분을 SEM-EDX 등으로 분석하면 불규칙적인 혼합 입자가 경계층에 걸쳐 연속적으로 퍼져있는 형상이다. 하지만 현재까지 이러한 IMC 층을 모델링 할 수 있는 CAD 툴은 존재하지 않기 때문에 이를 모델링하고 유한요소해석으로 연결할 수 있는 CAD 툴을 본 논문에서 소개하였다.

제안된 방법에서는 CAD 분야에서 널리 사용되고 있는 CSG 표현법을 임의의 형상의 복합재 모델링에 확장 적용하였다. 또한 유한요소 해석을 위한 모델의 생성 및 실제 생산을 위한 공정계획에 사용할 수 있는 분해 모델의 생성을 위해 영역 근사화 과정을 도입하였다.

제안된 모델링 방법을 유한요소해석과 연결한다면, 현재까지 실험적으로만 분석이 가능했던 플립칩 솔더 접합부의 IMC 파괴현상을 컴퓨터로 시뮬레이션하여 플립칩의 수명 예측에 활용할 수 있으리라 판단된다.

후 기

본 논문은 서울특별시 전략산업 혁신클러스터 육성 사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합공정 및 장비개발)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Nah, J. W., Kim, J. H., Lee, H. M. and Paik, K. W., 2004, "Electromigration in flip chip solder bump of 97PB-3Sn/37Pb-63Sn combination structure," *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 129~136.

- (2) Jang, S. Y., Wolf, J., Kwon, W. S. and Paik, K. W., 2002, "UBM(Under Bump Metallization) Study for Pb-free Electroplating Bumping: Interface Reaction and Electromigration," *2002 Electronic Components and Technology Conference*.
- (3) Kim, J. W., Kim, D. G., Hong, W. S. and Jung S. B., 2005, "Evaluation of Solder Joint Reliability in Flip Chip Packages during Accelerated Testing," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 34, No. 12.
- (4) Lau, J. and Liu, K., 2004, "Global Trends in Lead-free Soldering-Part I and II," *Advanced Packaging*.
- (5) Shed, A., 2004, "Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joint," *54th ECTC*, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 737~746.
- (6) Hossain, M. and Agonafer, D., 2004, "Strain based Approach for Predicting the Solder Joint Fatigue Life with the Addition of Intermetallic Compound using Finite Element Modeling," *2004 International Society Conference on Thermal Phenomena*, pp. 358~367.
- (7) Shin, K. H. and Dutta, D., 2001, "Constructive Representation of Heterogeneous Objects," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 205~217.
- (8) Shin, K. H. and Dutta, D., 2002, "Process Planning for Layered Manufacturing of Heterogeneous Objects Using Direct Metal Deposition," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 330~344.
- (9) Shin, K. H., 2005, "Adaptive Mesh Generation for Finite Element Analysis of Functionally Graded Materials," *Proceedings of 2005 ASME IMECE*, Orlando, FL, Nov. 5-11, 2005.
- (10) Kim, J. H., Song, C. S., Kim, J. H., Kim, J. H. and Jang, D. Y., 2007, "The Parametric Influence on Focused Ion Beam Processing of Silicon," *Transactions of KSMTE*, Vol. 16, No. 2, pp. 70~77.
- (11) *ACIS Geometric Modeler: Application Guide*, 1995, Spatial Technology Inc.