한국생산제조시스템학회지 Vol.21 No.3 2012. 6. pp. 408~414
Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers

스크린 인쇄용 미세 범프 금속마스크의 변형특성 해석

이기연*, 이혜진+, 김종봉++, 박 근+++

(논문접수일 2012. 05. 22, 수정일 2012. 06. 11, 심사완료일 2012. 06. 13)

Deformation Analysis of a Metal Mask for the Screen Printing of Micro Bumps

K. Y. Lee*, H. J. Lee+, J. B. Kim++, K. Park+++

Abstract

Screen printing is a printing method that uses a woven mesh to support an ink-blocking stencil by transferring ink or other printable materials in order to form an image onto a substrate. Recently, the screen printing method has applied to micro-electronic packaging by using solder paste as a printable material. For the screen printing of solder paste, metal masks containing a number of micro-holes are used as a stencil material. The metal mask undergoes deformation when it is installed in the screen printing machine, which results in the deformation of micro-holes. In the present study, finite element (FE) analysis was performed to predict the amount of deformation of a metal mask. For an efficient calculation of the micro-holes of the metal mask, the sub-domain analysis method was applied to perform FE analyses connecting the global domain (the metal mask) and the local domain (micro-holes). The FE analyses were then performed to evaluate the effects of slot designs on the deformation characteristics, from which more uniform and adjustable deformation of the metal mask can be obtained.

Key Words : Metal mask(금속 마스크), Screen printing(스크린 인쇄), Micro bumps(미세 범프), Finite element analysis(유한요소해석), Sub-domain analysis(부영역 해석기법)

1. 서 론

스크린 인쇄(Screen printing)는 각종 휴대용 멀티미디어 기기, OLED, 태양전지 및 플렉시블 소자 등 다양한 분야의 제조 과정에서 널리 활용되는 공정이다[1~3]. 최근 각종 전자제품들의 경박 단소화되는 추세에 부응하기 위해 제품 생산에 이용되는 패키징 기술의 고집적화와 피치의 미세화가 요구되고 있으며, 이는 기존의 접합 공정을 소형화하는데 어려움을 극복하고 정밀 미세 범프(bump)의 형성 기술개발과 신뢰성 확보라는 중요한 과제를 갖고 있다[4,5].

스크린 인쇄 공정은 접합 및 인쇄 재료로 사용되는 솔더 페이스트(Solder paste)와 이를 도포하는데 이용되는 스퀴지(Squeegee), 그리고 설계된 패턴이 각인되어 있는 금속마스크 등의 공정 도구를 이용하여 이루어지는 공정으로써 페이스트 재료, 인쇄 조건, 패턴 설계 및 환경 변수 등 다양한 공정 요인들이 복합적으로 작용하여 인쇄 성능을 결정한다. 최근에는 스크린 인쇄 공정

* 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원
+ 한국생산기술연구원 미래융합연구그룹
++ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
+++ 교신저자, 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (kpark@seoultech.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

의 성능 및 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어왔으며, 상기 인자들이 인쇄 성능이 미치는 영향에 대한 연구가 발표되고 있다. 다양한 인자들 중 특히 솔더 페이스트의 유동 특성, 용융 현상 및 솔더 재료에 따른 접합특성 등 솔더 페이스트 관점의 연구가 중점적으로 진행되고 있다[6~8].

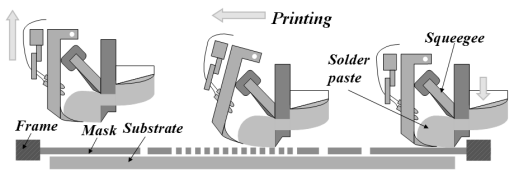
이러한 솔더 페이스트, 인쇄 조건 등의 공정 요인들에 대한 연구가 활발하게 진행되는 반면, 금속마스크의 변형이 인쇄 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 현재 미비한 수준이다. 스크린 인쇄 공정에 이용되는 금속마스크는 고유의 형상특성으로 인하여 자중에 의해 발생하는 휨과 처짐을 방지하기 위해 일정한 틀에 설치하는 양축 인장(Biaxial tension) 과정을 거치게 되며, 이 과정에서 금속마스크에는 변형이 발생되어 스크린 인쇄의 불량을 유발할 수 있다.

본 연구에서는 스크린 인쇄용 금속 마스크의 인장과정에 의한 변형을 분석하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 또한 금속마스크 중심부의 패턴 영역 중 변형 방지를 위해 미세 구멍 주변에 성형되는 슬롯이 변형에 미치는 영향을 분석하였다.

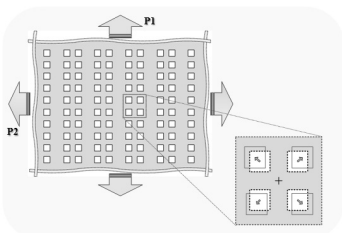
2. 스크린 인쇄용 금속 마스크의 특성

2.1 스크린 인쇄 공정 개요

Fig. 1(a)에 스크린 인쇄 공정을 도시하였다. 스크린 인쇄 공정은 전자제품들의 패키징 공정에서 본딩용 미세 범프의 형성을 위해 이용된다. 패턴이 인쇄될 기판 위에 다수의 미세 구멍 등이 형성된 금속 혹은 나일론 마스크를 장착하고 롤러 또는 패드를 이용하여 솔더 페이스트를 마스크를 통해 기판에 충진시킨 후 페이스트를 리플로우하여 미세 범프를 형성하는 직접 인쇄 공정이다. 또한 인쇄를 위해 두께가 얇은 마스크를 기판 위에 위치시키는 과정에서 자중에 의해 마스크에 발생하는 휨



(a) The screen printing process



(b) Deformation of micro-holes

Fig. 1 Schematic configuration of the screen printing process

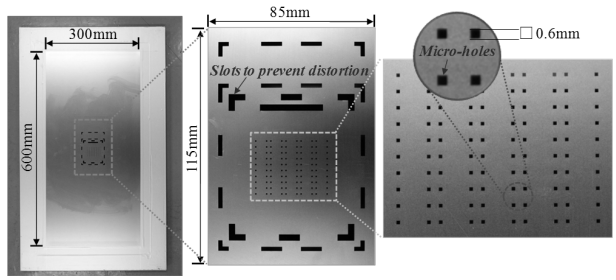


Fig. 2 Metal mask used for the screen printing process

또는 처짐을 방지하기 위해 일정한 틀(Frame)에 고정시키는 인장과정을 거친다. 이러한 인장 과정은 Fig. 1(b)에 도시한 것 같이 마스크에 존재하는 미세 구멍의 변형을 유발한다. 인쇄용 마스크의 변형은 페이스트 재료, 인쇄 조건, 환경 변수 등과 함께 스크린 인쇄 성능을 결정하는 주요 인자로 분석되며, 특히 수 ㎛ 이내의 정밀도가 요구되는 미세범프의 형성시 향상된 신뢰성을 얻기 위해서는 인장에 의해 발생하는 변형을 고려한 마스크의 설계가 수반되어야 한다.

2.2 스크린 인쇄용 금속 마스크 형상특성

일반적으로 스크린 인쇄 공정에 사용되고 있는 금속 마스크는 Fig. 2와 같이 금속 박판의 중앙에 미세 구멍이 규칙적인 배열로 군집되어 있는 형상특성을 갖는다. 본 연구에 이용된 스크린 인쇄 공정용 금속 마스크는 100㎛ 두께를 갖는 박판 금속소재를 사용하여 제작되며, 전체 마스크 300×600mm² 영역 중 마스크 중심부의 85×115mm²의 국부 영역에 미세 범프를 형성하기 위한 미세 구멍(0.6×0.6mm²)들이 형성된다. 또한 미세 구멍 주변에는 인장에 의해 발생하는 각 방향의 변형을 방지하기 위한 변형 방지용 슬롯이 가공되어 있다.

3. 금속 마스크 변형 해석

3.1 마이크로 인장 시험

스크린 인쇄 공정에 이용되는 금속 마스크는 압연공정에 의해 생산된 100㎛ 두께의 금속 박판에 식각(Etching)공정을 수행하여 미세 구멍 및 패턴을 형성하는 방법으로 제작된다. 이때 금속 박판은 압연(Rolling) 공정에 의해 성형되며, 성형과정에서 내부에 존재하는 불순물이나 편석이 압연방향으로 늘어나기 때문에 판의 압연방향 및 표면에 직각 방향으로 판의 강도, 탄성계수 등의 물성이 현저히 다른 이방성을 나타낸다. 따라서 정확한 유한요소해석 결과를 얻기 위해서는 이러한 재료의 이방성이 해석에 적용되어야 한다. 본 연구에서는 금속마스크의 재료인 SUS305 금속 박판에 대한 마이크로 인장시험을 수행하여 방향에 따른 정확한 물성정보를 획득하였다.

Fig. 3 에 마이크로 인장시험 구성을 도시하였으며, Table 1

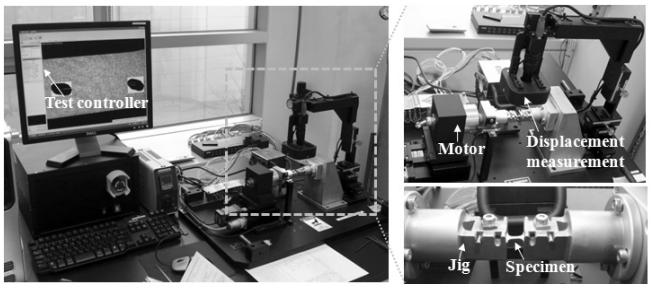


Fig. 3 Experimental setup for the micro tensile test

Table 1 Specifications of the micro tensile tester

Specification	Values
Maximum load	50kgf
Full stroke	20mm
Specimen width	1~20mm
Length	10~25mm
Stroke resolution	30㎛
Maximum velocity	35mm/min
Displacement measurement	Linear-scale optical microscope

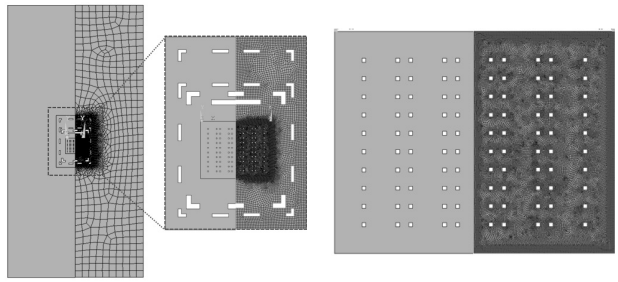
Table 2 The results of the micro tensile tests

	E [GPa]			Sy [GPa]		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Average	140.82	144.254	157.289	1.329	1.301	1.343
Deviation	3.878	3.778	3.013	0.014	0.015	0.012

에는 인장시험기의 제원을 정리하였다. 인장시험은 압연방향의 0°, 45°, 90°의 각도를 종방향으로 갖는 3종류의 시편을 제작하여 진행되었으며, 각 방향별 시편에 대해 7개의 유효데이터를 획득하였다. 획득한 데이터의 유효성을 분석하기 위하여 군내 편차와 군간 편차를 계산한 결과, 항복응력(S_y)과 탄성계수(E)의 군간편차는 각각 평균대비 2.95%, 5.89%로 계산되었으며, 최대 군내편차 대비 S_y는 2.59배, E는 2.24배로 확인되어 획득한 이방성 물성이 유효하다고 판단하였다. Table 2에 마이크로 인장시험 데이터의 방향별 평균값과 표준편차를 요약하였다.

3.2 부영역 해석기법을 적용한 유한유소모델

본 연구에서는 금속마스크의 인장시 발생하는 변형을 예측하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS™를 사용하여 해석을 수행하였다. 대칭성을 고려하여 전체 마스크 모델의 1/2 형상에 대해 유한요소 모델을 생성하였으며, 또한 미세 구멍이 존재하는 금속 마스크의 형상특성을 고려하여 부영역(Sub- domain) 해석기법을 적용하였다. 부영역 해석기법은 전체 해석영역(Global analysis domain)의 해석결과와 관심영역인 국부 해석영역(Local analysis domain)의 해석을 연계하는 기법으로 성긴 격자구성을 갖는 전체 영역 대비 조밀한 격자로 이루어진 국부영역에서 주요 해석 결과가 계산됨으로써 관심영역에서의 해석 결과를 향상된 해석속도로 더욱 정확하게 획득할 수 있다[9].



(a) Global coarse model **(b) Refined sub-model**

Fig. 4 Finite elements model for the sub-modeling application

Fig. 4의 (a)와 (b)에 각각 전체 영역 모델과 국부 영역 모델을 도시하였다. 격자분할은 8절점 쉘(Shell) 요소를 이용하여 수행되었으며, 부영역으로는 전체 영역 중 미세 구멍이 형성되어 있는 국부 영역을 지정하여 전체 영역대비 3.6배 조밀한 격자모델을 생성하였다.

3.3 경계조건 및 재료 물성

Fig. 5에 해석 모델에 적용되는 경계 조건을 도시하였다. 금속 마스크의 인장 과정은 금속 박판이 수직방향으로 변형되는 것을 방지하기 위하여 일정한 틀(Frame)에 장착하여 수행된다. 이렇게 금속 마스크가 고정되어 인장이 이루어지는 과정을 해석에 모사하기 위하여 금속 마스크 모델 외곽의 네 꼭지점에 휨을 방지하는 Z 변위 구속조건과 중심부에 금속마스크의 절대 이동을 방지하는 Y 변위 구속조건을 적용하였다. 또한, 인장에 의한 각 방향에 대한 인장하중 P1, P2는 금속 마스크의 인장 전후 상대거리 측정과 해석을 비교하는 일련의 과정을 통하여 6.92MPa, 4.34MPa로 각각 설정되었으며, 국부영역의 외곽에 부영역 경계조건(Cut- boundary condition)을 설정하여 전체영역 해석결과 중 변위결과가 해당 절점에서 보간되어 변위 경계조건으로 설정되도록 하였다.

마이크로 인장시험을 통해 획득한 판형 SUS305의 이방성 물성과 푸아송 비(Poisson's ratio) 0.25를 재료물성으로 적용하였으며, 45° 방향의 탄성계수를 식 (1)에 대입하여 전단계수 57.70GPa을 얻을 수 있다. 여기서 E는 탄성계수, ν는 푸아송 비이다.

$$G_{xy} = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)} \tag{1}$$

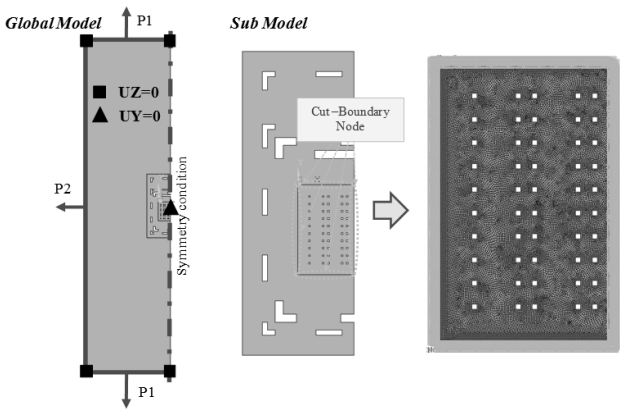


Fig. 5 Boundary conditions for the biaxial FE analysis

3.4 마스크 인장과정 유한요소해석 결과

Fig. 6에 인장에 의해 금속 마스크 내부에 발생하는 von-Mises 등가 응력 분포를 도시하였다. 마스크에 인가되는 응력 및 변형은 슬롯과 미세구멍이 형성되어 있는 영역에서 지배적으로 발생하기 때문에 패턴이 존재하는 85×115mm²의 부영역을 중점적으로 검토하였다. 슬롯의 세로방향 모서리(A부)에서 응력 집중이 확인되었으며, 최대 등가응력은 392.3MPa로 예측되었다. 이는 금속 마스크 재료 SUS305의 항복강도 1301MPa의 30.2% 에 불과하며, 이에 따라 금속 마스크 변형이 탄성영역에서 발생함을 확인하였고 미세 구멍의 변형으로 인한 금속 마스크의 설계 보정이 탄성 구조해석을 통해 수행될 수 있음을 판단하였다.

Fig. 7에 금속 마스크 변형 예측을 위한 결과추출 방법을 도시하였다. 금속 마스크의 변형 예측은 미세 구멍의 크기 변형 및 중심 위치 이동을 분석하여 이루어진다. 이 결과들은 미세 구멍의 모서리를 이루는 절점들에서 변위 데이터를 획득함으로써 계산된다. 즉, Fig. 7(a)와 같이 미세 구멍의 각 모서리를 4등분하여 총 16개 절점에서 변위 데이터를 획득한 후 이를 이용해 Fig. 7(b)에 도시된 것과 같이 미세 구멍의 각 방향별 평균

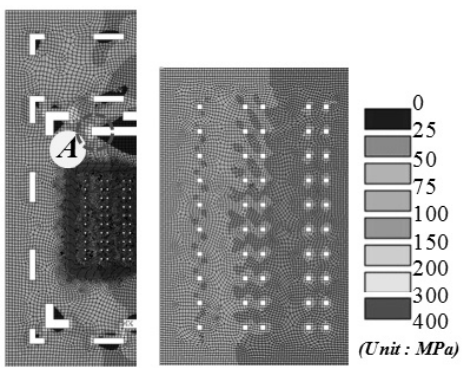
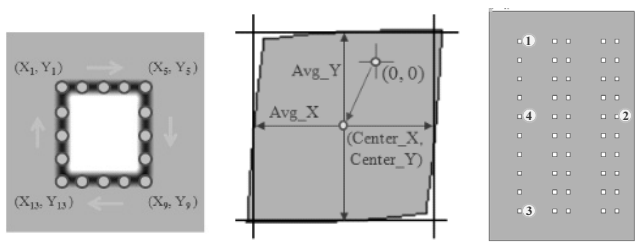


Fig. 6 Internal equilibrium stress of the deformed metal mask

변형량과 중심 위치의 이동량을 계산하였고, 계산된 결과는 정량적인 비교를 수행하기 위하여 변형률로 변환되었다. 또한, 각 대칭성을 고려하여 생성한 1/2 모델에서도 5×10개에 이르는 많은 수의 미세 구멍으로 인해 전체에서 미세 구멍의 변형에 대한 위치의 영향을 확인 할 수 있는 4개의 위치를 선정하여 해석 결과를 확인하였다. Fig. 7(c)에 선정된 미세 구멍의 위치를 도시하였다.

Table 3에 변형된 금속 마스크의 미세 구멍의 크기 변화에 대한 예측 결과를 정량적으로 비교하였다. X방향 변형률은 위치에 따라 0.033~0.073%의 분포를 보였으며, 중심에 가장 근접한 위치 2의 미세 구멍에서 가장 높게 나타났고, 중심과의 거리가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었다. 반면 Y방향의 변형률은 0.051~0.105%로 상대적으로 높게 나타났다. 위치별로 비교하면 위치 2의 미세 구멍에서 가장 낮게 나타났고 거리가 증가할수록 Y방향 변형률이 증가하여 X방향 변형률과 반대 경향이 발생함을 확인하였다. 또한, 가장 근접한 위치 2에서 두 방향의 변형률의 비율이 1.431로 확인되어 유일하게 Y방향 대비 X방향의 변형률이 높게 발생함을 확인하였다.

Table 4에는 미세 구멍의 중심 위치 이동률에 대한 결과를 정량적으로 비교하였다. 중심 위치의 이동량은 0.51~4.55㎛



(a) **(b)** **(c)**

Fig. 7 Data extraction method for the deformation results: (a) sample points, (b) strain calculation, (c) reference points

Table 3 Strain for the hole shapes at thr 4 reference points

No.	ε_X (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon_X/\varepsilon_Y$
1	0.033	0.105	0.314
2	0.073	0.051	1.431
3	0.048	0.093	0.516
4	0.056	0.083	0.674

Table 4 Strain for the center positions at the 4 reference points

No.	X (%)	Y (%)
1	0.0224	0.0361
2	0.0260	0.0843
3	0.0215	0.0324
4	0.0242	0.0367

의 분포를 보였으며, 이를 변형률로 환산한 경우 0.02~0.09% 이내로 나타났다. X방향 중심이동 변형률의 경우 전반적으로 0.02~0.03% 이내의 값을 보인 반면 Y방향 변형률의 경우 0.03% 이상으로 나타났으며, 특이 중심과 인접한 2번 지점에서 0.08% 이상으로 높게 나타났다. 상기 결과는 Table 3에 제시된 미세구멍의 변형률 결과와 다소 다른 경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 상기 예측 결과를 바탕으로 인장에 의해 발생하는 금속마스크의 미세 구멍 변형에 대한 설계보정을 수행하기 위해서는 미세 구멍의 변형률과 중심 위치 이동률에 대한 분석이 각각 수행되어야 함을 알 수 있다.

4. 슬롯 설계에 따른 금속 마스크 변형 해석

4.1 변형방지 슬롯의 형상설계 방안을 위한 해석 모델

금속 마스크의 인장시 미세 구멍의 변형에 대한 슬롯 설계의 영향을 분석하기 위해 기존의 금속 마스크에서 슬롯을 제거 혹은 추가하여 해석 모델을 수정하였다. Fig. 8에 수정된 6개의 금속 마스크 모델을 도시하였다. 해석 모델은 슬롯이 전혀 존재하지 않는 경우(모델 1)부터 외곽에 슬롯을 추가한 경우(모델 2), 외곽 안쪽 코너에 슬롯을 성형한 경우(모델 3), 외곽의 슬롯과 미세 구멍 사이에 추가적으로 슬롯을 성형한 경우(모델 4)로 구분하여 슬롯을 증가시키며 모델을 생성하였다. 추가적으로 슬롯의 비대칭적인 분포에 대한 영향을 파악하기 위해 모델 4를 변형한 모델 5와 모델 6을 생성하여 동일한 조건하에 해석을 수행하였다.

4.2 슬롯 패턴에 따른 변형 해석 결과

Fig. 9 에 다양한 슬롯형상의 모델에 따른 등가응력 분포 결과를 도시하였다. 슬롯이 존재하지 않는 모델 1은 미세 구멍에서 최대응력이 발생함을 확인하였고, 그 외의 모델에서는 주변부의 슬롯에서 최대응력이 발생함을 알 수 있었다. 6가지 모델에서 발생한 최대 응력은 130.9~363.7MPa 의 사이로 확인되었으며, 슬롯의 수가 증가할수록 최대응력이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 슬롯이 증가됨에 따라 해당 위치에서 응력집중 효과가 발생하기 때문으로 판단된다. 반면 미세 구멍이 존재하는 영역에서의 최대응력은 130.9~245.7MPa로 확인되어 슬롯 증가에 따른 응력 증가 효과가 완화됨을 확인할 수 있었다. 또한 모든 슬롯 설계 조건에 대해 금속 마스크에 발생하는 등가응력은 SUS305의 항복 응력의 10.1%~28.0%에 불과하여 모든 슬롯 설계 모델에서 탄성변형이 발생함을 확인할 수 있었다.

각 금속 마스크 모델의 변형해석에 대한 미세 구멍의 변형률과 중심 위치 이동률 결과를 Fig. 10에 그래프로 비교하였다. 모든 모델에서 미세구멍의 변형은 1㎛ 이내로 발생하였으며, Fig. 10(a)로 부터 슬롯의 수가 점차 증가하는 모델 1, 2, 3, 4의 결과 순으로 미세 구멍에 대한 각 방향의 변형률이 감소함을 확인하였다. 어떠한 슬롯도 성형되지 않은 모델 1 대비 가장 많은 슬롯이 추가된 모델 4에서 최대 31.2%의 변형률 감소가 확인되어 슬롯이 변형 방지에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 변형방지용 슬롯 패턴의 대칭적 분포에 대한 영향을 확인하기 위해 모델 5, 모델 6의 변형 결과를 확인하였다. 상대적으로 길이가 긴 장축방향(Y)에 슬롯이 추가로 형성되어있는 모델 5에서 Y방향 변형률이 X방향 변형률 대비 1.46배로 양방향의 변형률 편차가 가장 작은 반면, 단축방향(X)에 슬롯이 추가된 모델 6에서는 양방향의 변형률비가 7.02배로 확인되어 변형률 편차가 오히려 증가함을 확인하였다.

상기에서 확인된 변형 경향은 중심위치의 이동률 결과인 Fig. 10(b)에서도 동일하게 확인되었다. 슬롯의 수가 점차 증가하는 모델 1, 2, 3, 4 순으로 양방향의 중심이동률이 모두 감소

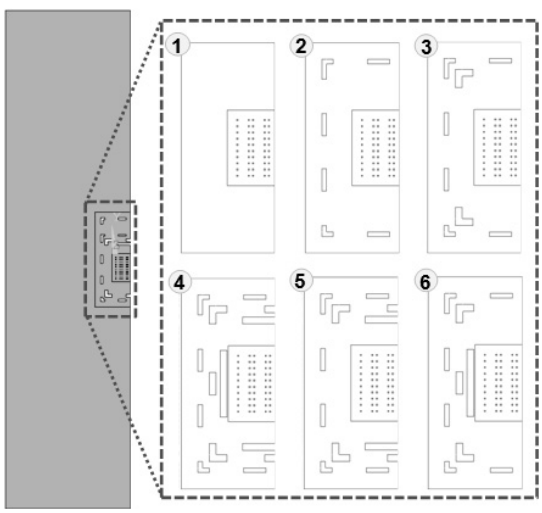


Fig. 8 Simulation models for various slot designs

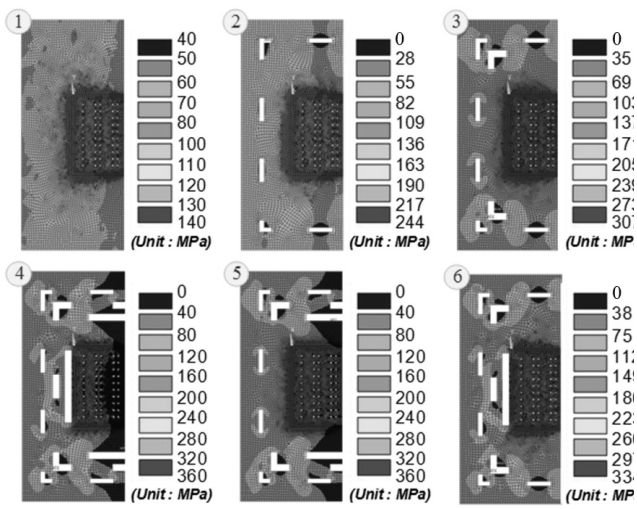
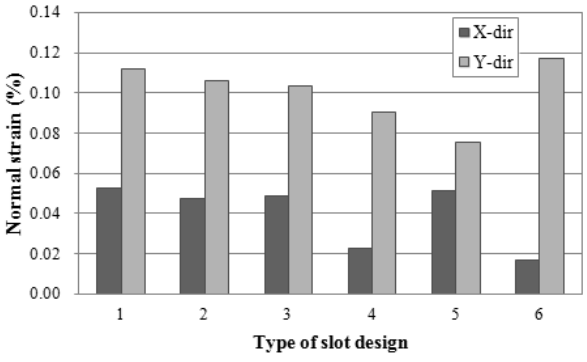


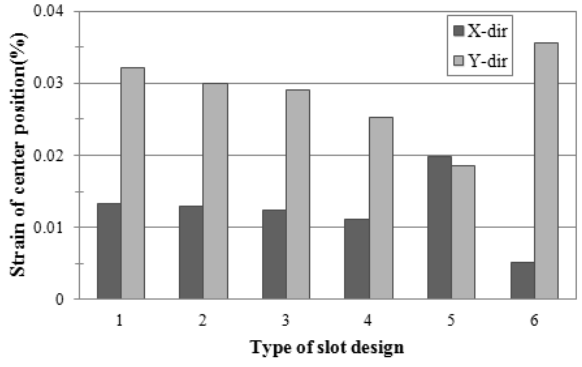
Fig. 9 Equilibrium stress distributions for various slot designs

하였으며, 모델 1 대비 모델 4의 중심위치 이동률이 19.8% 감소함을 확인하여 변형방지용 슬롯이 미세 구멍의 중심위치 이동에도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한, 미세구멍의 변형률과 마찬가지로 장축방향(Y)에 슬롯이 추가된 모델 5에서 Y방향과 X방향의 중심위치 이동률 비는 0. 94배로 가장 작았으며, 상대적으로 길이가 짧은 단축방향(X)에 슬롯을 추가한 모델 6에서는 중심위치 이동률의 비가 6.88배로 나타나면서 두 방향의 중심위치 이동률 편차가 확연히 증가했음을 알 수 있었다.

금속 마스크의 형상 보정은 미세 구멍이 성형된 패턴 영역의 비율을 조정하는 방식으로 이루어질 수 있다. 이러한 형상 보정 방법으로 인해 금속 마스크의 각 방향별 변형률의 편차가 가장 작게 나타나는 슬롯 패턴이 형상 보정을 위한 마스크 설계에 가장 적합하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 해석을 수행한 모델 중 변형률과 중심위치 이동률에서 각 방향별로 편차가 가장 작게 나타난 모델 5의 슬롯 패턴이 설계 보정을 고려하였을 때 가장 적합한 변형방지용 슬롯 설계라고 판단하였다. 또한, 미세 구멍의 중심위치 이동량이 최대 5.4㎛까지 발생하여 미세 구멍의 최대 변형량 대비 7배 이상의 크기임을 확인함으로써 금속 마스크의 변형에 의한 설계 보정은 미세 구멍의 변형보다 중심 위치를 중점적으로 고려하는 것이 중요하다고 판단하였다.



(a) Strain for the hole size



(b) Strain for the hole center position

Fig. 10 Comparison of stain results with various slot designs

5. 결 론

본 연구에서는 스크린 인쇄 공정에 이용되는 금속 마스크의 설치 과정에서 인장에 의해 발생하는 변형을 해석적으로 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 금속 마스크의 인장해석 결과 미세구멍의 형상변형은 위치에 따라 0.03~0.1% 정도로 발생되었고, 미세구멍 중심위치의 편차는 0.02~0.08%로 발생하는 것으로 예측되어 미세범프의 형상 및 위치정밀도에 영향을 미침을 확인하였다.
(2) 미세범프의 형상 및 위치변화를 감소시키기 위해 일반적으로 변형방지용 슬롯을 사용하는데, 본 연구에서는 변형방지 슬롯이 추가된 모델에 대하여 유한요소해석을 진행하였고, 슬롯이 추가됨에 따라 미세 구멍의 변형률이 최대 31.2% 감소함을 확인하였다. 또한 미세 구멍의 중심위치 이동량이 미세 구멍의 최대 변형량 대비 7배 이상의 크기임을 확인함으로써 금속 마스크의 변형에 의한 설계 보정은 미세 구멍의 변형보다 중심 위치를 중점적으로 고려하는 것이 중요하다고 판단하였다.
(3) 상기 결과를 바탕으로 다양한 형태(모델 1~6)의 슬롯설계에 대한 유한요소해석을 수행한 결과 5번 모델의 경우 X방향과 Y방향간의 변형률 편차(5.78%)가 가장 적어 변형 방지를 위한 마스크 형상보정에 가장 유리함을 확인하였다.

상기 결과를 반영하여 5번 모델의 금속마스크에 중심이동 변형률을 보정한 치수(5.78%만큼 축소)로 제작하면 스크린 프린팅 공정에서의 미세범프의 위치정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 서울테크노파크의 차세대패키징 공정・장비 실용화 사업과 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) Crawford, G. P., 2005, *Flexible flat panel display*, John Wiley & Sons, New York.
(2) Pardo, D. A., Jabbour, G. E., and Peyghambarian, N., 2000, “Application of Screen Printing in the Fabrication of Organic Light-emitting Devices,” *J. Adv. Mater.*, Vol. 12, No. 17, pp. 1249~1252.
(3) Krebs, F. C., Fyenbo, J., and Jorgensen, M., 2010, “Product Integration of Compact Roll-to-roll Processed

Polymer Solar Cell Modules: Methods and Manufacture using Flexographic Printing," *J. Mater. Chem.*, Vol. 20, No. 41, pp. 8994~9001.

(4) Lee, J., Cho, S., Lee, Y., Kim, K., Cheon, C., and Jung, J., 2005, "Aging Characteristics of Sn-1.8 Bi 0.7-Cu0.6 in Solder," *J. Microelecton Packag. Soc.*, Vol. 12, No. 4, pp. 301~306.

(5) Ko, Y. K., Shin, Y. S., Yoo, S., and Lee, C. W., 2009, "Via Filling Technique with Molten Solder and Low Temperature Solder Bump for 3D Packaging," *Proc. 2009 Fall Conf. Kor. Soc. Prec. Engng.*, pp. 699~700.

(6) Seo, W. S., Min, B. W., Park, K., Lee, H. J., and Kim, J. B., 2012, "Improvement of Filling Characteristics of Micro-bumps in the Stencil Printing Process," *Jour. of KSMTE,* Vol. 21, No. 1, pp. 26~32.

(7) Kim, M., Ahn, B., and Jung, J., 2001, "A study on Melting Phenomena of Solder Paste," *J. Microelecton Packag. Soc.*, Vol. 8, No. 1, p. 5~11.

(8) Evans, J. W., and Beddow, J. K., 1987, "Characterization of Particle Morphology and Rheological Behavior in Solder Paste," *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.*, Vol. 10, No. 2, pp. 224~231.

(9) Loomanm, D., 2007, "Submodeling in ANSYS Workbench," *ANSYS Advantage*, Vol. 1, No. 2, pp. 34~36.