

플립칩의 설계변수 변화에 따른 보드레벨 플립칩에서의 낙하충격 수명예측이수진^a, 김성걸^{a*}**Prediction of the Impact Lifetime for Board-Leveled Flip Chips by Changing the Design Parameters of the Solder Balls**Soo Jin Lee^a, Seong Keol Kim^{a*}^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*Received 30 December 2014
Revised 15 January 2015
Accepted 22 January 2015*Keywords:*Flip chips
Impact life time
Drop simulations
Solder balls
UBM
Design parameters**ABSTRACT**

The need for drop simulations for board-leveled flip chips in micro-system packaging has been increasing. There have been many studies on flip chips with various solder ball compositions. However, studies on flip chips with Sn-1.0Ag-0.5Cu and Sn-3.0Ag-0.5Cu have rarely been attempted because of the unknown material properties. According to recent studies, drop simulations with these solder ball compositions have proven feasible. In this study, predictions of the impact lifetime by drop simulations are performed considering Cu and Cu/Ni UBMs using LS-DYNA to alter the design parameters of the flip chips, such as thickness of the flip chip and size of the solder ball. It was found that a smaller chip thickness, larger solder ball diameter, and using the Cu/Ni UBM can improve the drop lifetime of solder balls.

1. 서론

최근 전자제품의 소형화에 따라 사용자의 부주위로 인한 낙하 충격빈도가 증가하고 있다. 이러한 충격이 빈번해 지면서 전자기기 내부에도 큰 충격이 가해져 파손되는 경우가 크게 증가하고 있다. 따라서 공학적 측면에서 효율적인 방법을 적용한 시뮬레이션을 통한 낙하충격해석의 필요성이 대두되고 있다. 기존의 연구들은 솔더볼 조성에 대해 다양한 충격해석을 수행하고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 305 솔더볼(Sn-3.0Ag-0.5Cu)^[1]의 경우, 최근 여러 연구 등을 통해 비교적 정확한 물성치를 제공^[2-4]하고 있어, 이에 따라 305 솔더볼을 가진 보드 레벨의 플립칩 충격수명해석에

대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 305솔더볼을 가진 보드 레벨의 플립칩에 대해 솔더볼의 설계 매개변수 변화에 따른 외재적 해석 방법을 적용하여 낙하충격수명해석을 수행하고자 한다.

외재적 방법을 이용한 낙하충격해석은 내재적 방법^[5,6]보다 실제 실험조건과 동일하게 직접 프로그램 내에서 구현하기 때문에 보다 신뢰도가 높다. 일반적으로 ANSYS LS-DYNA 상용프로그램을 사용하며, 이때 DESIGN MODELER를 이용해 플립칩 패키지를 모델링한다. 수명예측은 변형률 수명(strain life)에서 해석을 진행하며 그 방법으로는 MORROW방법과 SWT방법이 있다. 본 논문에서는 압축강도를 유리하게 작용하는 SWT방법을 이용한다. 기

* Corresponding author. Tel.: +82-10-6801-9940

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: rhett@seoultech.ac.kr (Seong Keol Kim).

존의 연구^[7]에서는 기준 모델을 한 가지로 한정하여 수명해석을 진행하여 칩 패키징 규격 변화에 따른 수명의 경향성을 볼 수 없었다. 본 연구에서 적용할 플립칩의 설계 매개변수로는 칩두께와 솔더볼 지름으로 선택하였으며, 각 설계 매개변수에 따른 보드레벨 플립칩에서 충격수명 변화의 경향을 알아보려고 한다. 또한, UBM (Under-bump metalization)은 Cu UBM과 Cu/Ni UBM 두 가지를 고려하여 UBM에 따른 충격수명 변화를 살펴본다. 궁극적으로는 305 솔더볼을 가진 보드레벨 플립칩에서 충격수명에 미치는 요인 중 충격수명에 유리한 최적의 조건을 파악하고자 한다.

2. 보드레벨 플립칩 모델링

2.1 해석 대상

낙하충격 수명해석 하고자 하는 대상은 Fig. 1과 같으며, Table 1에서는 PCB 보드(board), 305 조성의 솔더볼을 갖는 플립칩 등으로 구성된 반도체 패키지의 크기를 나타내고 있다. 본 연구에서는 JEDEC 실험 규격에 명시된 낙하 시험의 규격에 따라 해석대상을 선정하였다.

2.2 모델링

PCB보드와 플립칩, 그리고 솔더볼 등을 실제와 동일하게 모델링 할 경우, 요소(element) 수가 너무 많아 해석의 어려움이 발생하였다. 이는 각 칩(chip)별 솔더볼의 배열(array)은 14×14, 즉 196개로 구성되는데 모든 솔더볼을 실제 형상과 같이 구형으로 모

델링 할 경우 요소 수가 크게 증가한다. 특히 솔더볼과 칩의 접합부, 솔더볼과 PCB보드의 접합부에서 요소의 크기가 작아지고 그 숫자가 증가함에 따라 많은 문제가 실제 해석 수행할 때 발생하였다. 문제점을 해결하기 위해서 기존 연구를 토대로, 낙하충격 수명 해석의 중점적인 대상인 파손예상지점의 솔더볼만 실제 형상과 동일하게 구 형태로 모델링을 하고 이를 제외한 모든 솔더볼을 직육면체의 형태로 하였다^[8,9]. Fig. 2는 관심 해석대상인 솔더볼에 대해, 기존의 직육면체 형상을 구의 형태로 다시 모델링 한 모습을 보여준다. 요소 수를 줄임으로써 해석시간의 단축과 파손예상지점 솔더볼에 대한 해석결과의 정확도 향상을 구현하였다.

Fig. 3은 반도체 패키징 전체를 모델링한 후 격자(mesh)를 나타낸 그림이다. 각 부분을 동일한 격자 크기로 해석을 실행할 경우, 네가티브 볼륨(negative volume)의 문제점이 발생하여 해석이 수행되지 않았다. 이에 플립칩을 격자물체크기(mesh body size) 0.3 mm으로, 솔더볼은 격자엣지크기(mesh edge size) 0.06 mm로 각 부분에 따라 해석에 적합한 격자 크기를 조절하여 해석을 시도하였다.

2.3 매개변수

플립칩의 설계 매개변수로는, 일반적으로 칩 두께(thickness of chip), 칩 크기(chip size), 솔더볼의 크기(size of solder ball), 솔더볼의 배열(array of solder ball), 솔더볼의 피치(pitch of solder ball) 등 5가지이나, 국내 후공정 전문업체인 N사로부터 플립칩 솔더볼 수명에 영향을 더 크게 미치는 변수로, 칩의 두께 및 솔더볼의

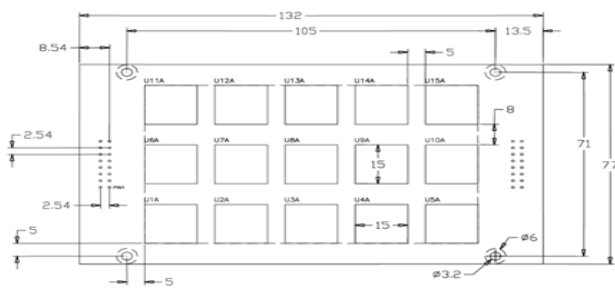


Fig. 1 Schematic diagram of pcb board, flip chips and solder balls packaging

Table 1 Sizes of PCB board, flip chips and solder balls packaging

Item	Dimension
PCB board (mm)	132×77×1
Chip (mm)	5.6×5.6×0.3
Ball size (mm)	0.25×0.167
Ball pitch (mm)	0.15
Number of array (ea)	14×14

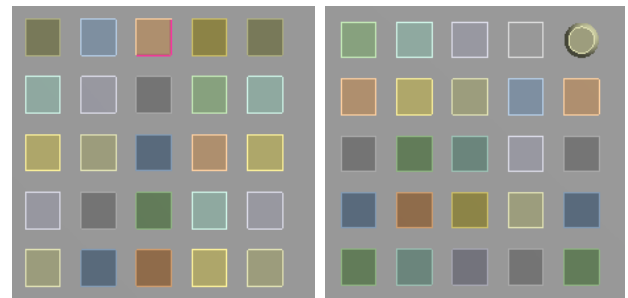


Fig. 2 Remodeling of the solder balls

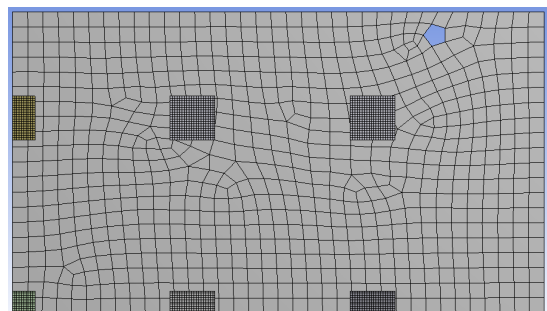


Fig. 3 Meshed model of packaging with flip chips

지름 등 2개를 매개변수로 선정하여 해석을 수행하였다. Table 2는 플립칩의 솔더볼 관련 설계 매개변수이며, 각 항목별 값들은 N사에서 제공받았다. 기존 연구에서 사용한 오리지널 모델(original model)에서, 칩 두께는 0.3 mm으로, 솔더볼의 지름은 0.25 mm로 고정되어 있으나, N사에서 플립칩 설계시 적용할 수 있는 매개변수의 값으로, 칩두께는 0.2 mm에서 0.5 mm로 0.1 mm씩 증가시키면서 모델링을 하였고, 솔더볼 지름은 0.2 mm부터 0.35 mm까지 바꾸어 가며 해석을 진행하였다⁶⁾.

Table 3은 칩 두께별 및 솔더볼의 크기를 나타내고 있다. Fig. 4는 그에 따른 유한요소 모델링을 보여주고 있으며, 모델 4부터

Table 2 Modified design parameters of flip chips with solder balls

(mm)	Chip size	Chip thickness	Ball size	Ball pitch	Ball array
Original	5.6×5.6	0.3	0.25	0.4	14×14
Model 1	5.6×5.6	0.3	0.2	0.4	14×14
Model 2	5.6×5.6	0.3	0.3	0.4	14×14
Model 3	5.6×5.6	0.3	0.35	0.4	14×14
Model 4	5.6×5.6	0.2	0.25	0.4	14×14
Model 5	5.6×5.6	0.4	0.25	0.4	14×14
Model 6	5.6×5.6	0.5	0.25	0.4	14×14

Table 3 Modified design parameters of chip thickness

(mm)	Chip thickness	Ball size
Original	0.3	0.25
Model 4	0.2	0.25
Model 5	0.4	0.25
Model 6	0.5	0.25

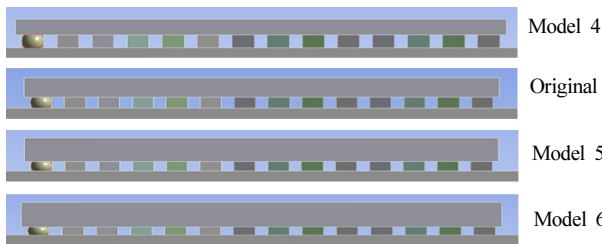


Fig. 4 Modelings of packagings by changing thickness of flip chips

Table 4 Modified design parameters of sizes of solder balls

(mm)	Chip thickness	Ball size
Original	0.3	0.25
Model 1	0.3	0.2
Model 2	0.3	0.3
Model 3	0.3	0.35

모델 6까지 칩 두께가 두꺼워지는 것을 확인할 수 있다.

Table 4는 솔더볼의 크기 변화를 보여주고 있고, Fig. 5는 그에 따른 모델링을 나타내고 있으며, 모델 1부터 모델 3까지 솔더볼 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

3. 외재적 방법에 의한 낙하충격해석

3.1 해석조건

외재적 방법을 적용한 해석을 수행할 때, PCB보드, 솔더볼, 플립칩 등의 재료 물성치가 필요하며, 각각의 값은 Table 5와 같다.

해석시간의 효율성을 위해 PCB보드의 상하좌우 대칭 형태임을 고려해 Fig. 6과 같이 1/4로 모델링을 하였다. 이에 대칭면에 위치한 플립칩과 PCB 보드의 각 단면에 X축 및 Y축 방향의 고정 조건을 추가하였고, 나사 구멍 부분은 Z축 방향의 고정조건을 주었다. 또한 이 부분에 충격가속도 1,250 G 값을 +Z축 방향으로 부가하였다⁷⁾.

3.2 해석결과

낙하충격해석을 위해 필요한 모든 조건들을 입력하고, 해석을 수

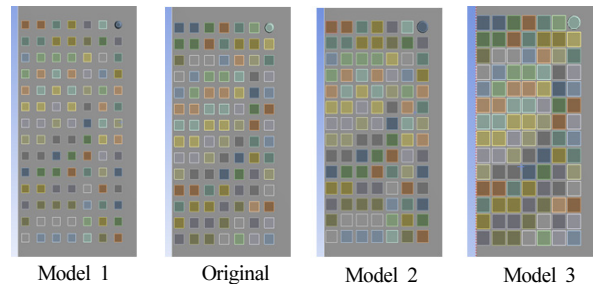


Fig. 5 Modelings of packagings by changing sizes of solder balls

Table 5 Material properties of the PCB, chips and solder balls⁷⁾

Item	Type	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength (MPa)	Density (kg/mm ³)
PCB	FR4	22,000	0.280	60.0	1.90E-6
Solder	SAC	48,000	0.300	35.1	7.40E-6
Chip	Silicon	131,000	0.278	60.0	2.33E-6

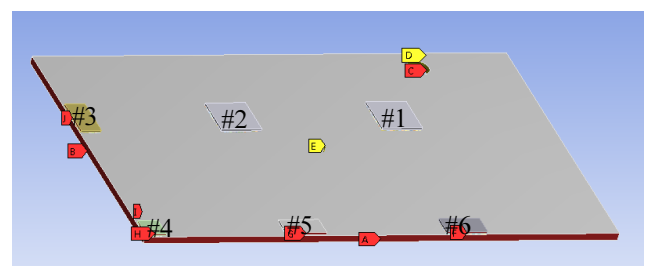


Fig. 6 Supporting and loading conditions

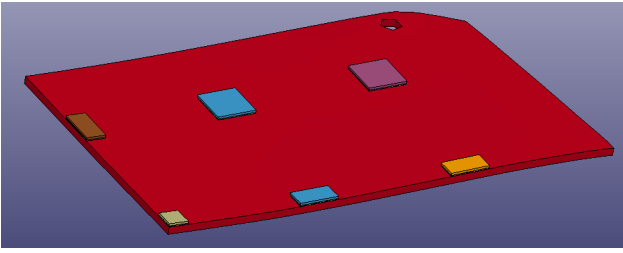


Fig. 7 Result of drop simulation for PCB board with flip chips

Table 6 Result of drop simulation by changing chip thickness

Chip number	Chip thickness (mm)	Pressure (MPa)			
		0.2	0.3	0.4	0.5
#1		-67.263	-57.744	-78.527	111.54
#2		-74.239	-94.469	70.669	86.918
#3		-54.852	61.947	85.62	103.34
#4		62.497	95.852	101.08	137.27
#5		34.579	53.077	51.334	57.774
#6		38.14	48.179	-50.591	55.917

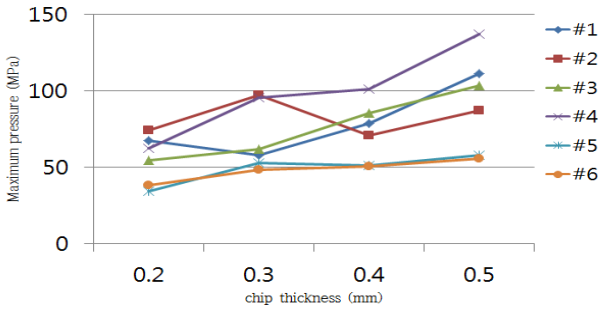


Fig. 8 Maximum pressure in a solder ball of each chip on PCB board by changing chip thickness

행하면, Fig. 7과 같이 PCB보드가 휘어지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 실제 해석결과 동영상상을 통해, 나사구멍 쪽에 응력이 집중됨을 확인 할 수 있었다.

본 해석을 통해 Table 6과 Fig. 8에서 제시된 바와 같이 각 칩에서 칩 두께에 따른 솔더볼에 작용하는 최대 압력 값을 보여주고 있다. 낙하충격시 각 칩의 솔더볼에 작용한 압력값을 계산한 이유는 낙하충격수명을 예측할 때 사용되는 중요 요소이기 때문이다. 해석 결과를 통해 일반적으로 플립칩의 두께가 증가할수록 각 칩에서의 솔더볼에 작용하는 압력 값이 증가하는 경향을 보인다.

Table 7과 Fig. 9는 각 칩에서 솔더볼 크기에 따라 솔더볼에 작용하는 최대압력 값을 나타내고 있다. 일반적으로 솔더볼의 크기가 증가할수록 압력 값이 감소하는 경향을 보였으나, 두 번째 및 여섯 번째 칩에서는 솔더볼의 크기가 증가할수록 감소하다가 0.3 mm에서 0.35 mm로 증가시 압력이 다소 증가함을 나타내었다.

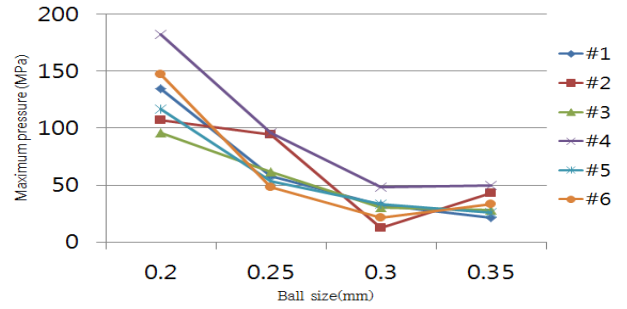


Fig. 9 Maximum pressure in a solder ball of each chip on PCB board by changing ball size

Table 7 Result of drop simulation by changing ball size

Chip number	Ball size (mm)	Pressure (MPa)			
		0.2	0.25	0.3	0.35
#1		134.85	-57.744	32.659	-21.166
#2		-107.13	-94.469	-12.347	-43.275
#3		96.156	61.947	-30.552	28.269
#4		182.45	95.852	48.35	49.32
#5		116.42	53.077	33.286	25.522
#6		147.44	48.179	21.671	32.961

4. 내재적 방법에 의한 낙하충격수명해석

4.1 해석방법

외재적 방법에 의해 낙하충격해석에서 도출한 압력 값을 내재적 방법에 의해 낙하충격 수명예측 해석을 수행할 때, 입력하중으로 부가해 해석을 진행한다. 이때 해석 방법에는 크게 MORROW 방법과 SWT(Smith watson topper)방법이 있는데, MORROW 방법은 수명 해석시 물체에 같은 압축응력과 인장응력이 작용했을 때 압축수명을 유리하게 적용시키지 않아 SWT방법을 채택하여 수명해석을 진행하였다⁷⁾.

낙하충격 수명예측해석 수행할 때, 입력해야할 재료 물성치는 솔더볼에 작용하는 하중이 항복강도 이상의 값이기 때문에 변형률 수명 곡선을 사용하여 해석을 수행하였다. 기존 연구의 경우 305 솔더볼 조성의 소성영역 물성치가 비교적 정확하지 않아 새로운 연구 논문들을 참고하여 물성치를 수정하였다²⁻⁴⁾. Table 8의 경우, 좌측 영역이 기존 연구에서 사용된 값이며 우측 항목이 새롭게 수정 입력된 값이다. 표에서 알 수 있듯이 물성치의 차이를 보이고 있으며, 이러한 요인이 솔더볼 수명에 큰 영향을 끼치는 것을 확인하고 해석을 실시하였다.

4.2 해석조건

해석을 수행하기에 앞서 UBM을 고려한 모델링을 실시하였다.

Table 8 Material properties of solder ball with 305 composition for simulation of impact life time^[10-12]

	Previous researches	Latest researches
Strength Coefficient (MPa)	29.1	29.1
Strength Exponent	-0.076	-0.076
Ductility Coefficient	0.325	0.2
Ductility Exponent	-3428	-0.57
Cyclic Strength Coefficient (MPa)	93.3	200
Cyclic Strain Hardening Exponent	0.26	0.026
Young's Modulus (MPa)	48,000	54,000
Yield Strength (MPa)	22.6	25.3

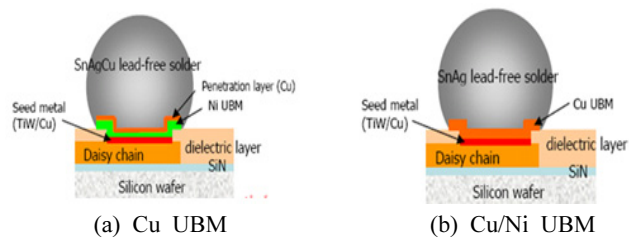


Fig. 10 Structure of a solder ball by the UBM compositions

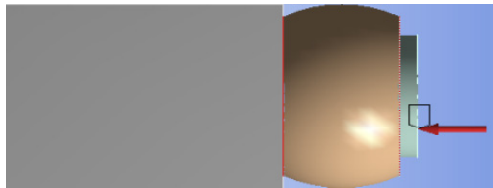


Fig. 11 Loading condition on the modeling for life prediction simulation^[15]

UBM은 솔더볼의 접합을 용이하게 하면서 이온 물질 확산을 막아 칩 손상을 방지하는 역할을 하는 적층막이다. UBM의 조성 또한 솔더볼의 수명에 영향을 줄 것으로 예상하여, 본 연구에서는 첫째, 구리 조성 UBM(Cu UBM)과 둘째, 구리와 니켈 조성 UBM(Cu/Ni UBM) 등 두 가지로 나누어 해석을 진행하였다. Fig. 10에서 (a)는 구리만 사용한 형상이며 (b)는 구리와 니켈을 사용한 형상이다^[7].

각 칩에서 응력이 가장 많이 작용하는 솔더볼에 대해, 경계 및 구속조건을 부여하고, 외재적 방법에 의한 해석에서 도출된 압력 값을 솔더볼에 작용하는 힘으로 적용하였다. Fig. 11에서 PCB 보드와 솔더볼 사이에 접합면은 고정 조건(fixed condition)을 사용하였으며 화살표 방향으로 솔더볼 윗면에 압력을 부가하였다.

4.3 칩 두께별 낙하충격 수명예측해석 결과

칩 두께별 솔더볼의 수명해석 결과는 Table 9 및 Fig. 12에 제시

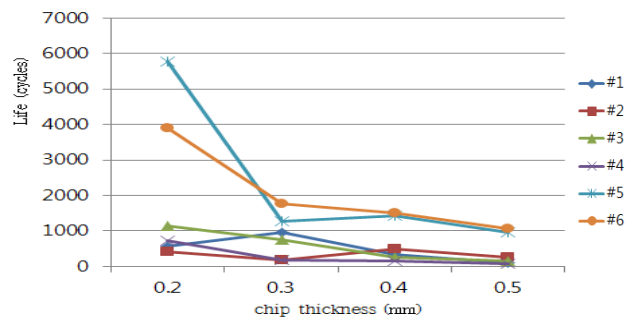
Table 9 Results of simulations on life prediction by changing chip thickness

(a) Cu UBM (life cycles)

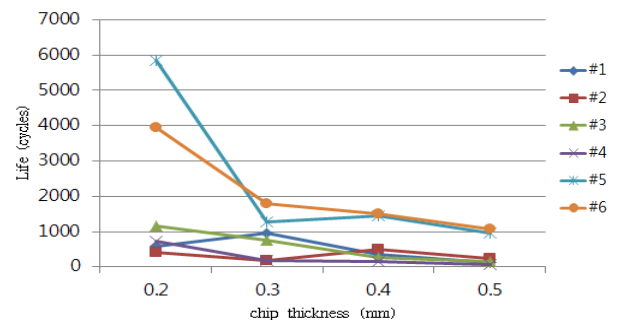
Chip number	Cycles (Cu UBM)			
	0.2	0.3	0.4	0.5
#1	575.65	956.29	346.63	112.09
#2	416.31	190.67	489.27	249.39
#3	1136.9	756.18	261.82	142.99
#4	734.27	181.97	153.47	63.771
#5	5776.6	1270.8	1423.7	954.62
#6	3890	1769.4	1496.4	1065.5

(b) Cu/Ni UBM (life cycles)

Chip number	Cycles (Cu/Ni UBM)			
	0.2	0.3	0.4	0.5
#1	582.16	967.29	350.49	113.31
#2	420.97	192.77	494.78	252.15
#3	1150.1	764.81	264.73	144.55
#4	742.64	183.97	155.15	64.228
#5	5839.3	1285.6	1440.4	965.6
#6	3938.1	1790.3	1513.9	1077.8



(a) Cu UBM (life cycles)



(b) Cu/Ni UBM (life cycles)

Fig. 12 Prediction of drop life time in a solder ball of each chip on PCB board by changing chip thickness

하였으며, 0.2 mm의 칩두께를 갖는 모델을 제외하고, 칩두께가 증가할수록 수명이 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 Table 9의 결과

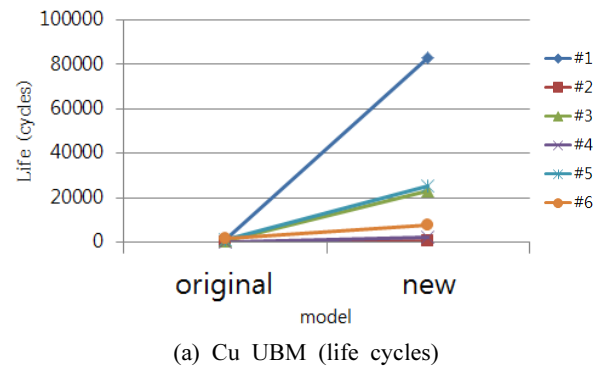
Table 10 Results of simulations on life prediction by changing solder ball size

(a) Cu UBM (life cycles)

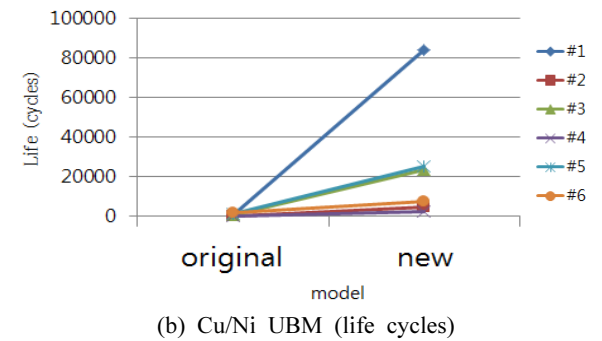
Chip number	Ball size (mm)	Cycles (Cu UBM)			
		0.2	0.25	0.3	0.35
#1		66.227	956.29	7137.5	42483
#2		127.44	190.67	961.57	2570.2
#3		180.13	756.18	9201.2	12461
#4		37.66	181.97	1748	1632.6
#5		97.95	1270.8	6645.4	18846
#6		55.326	1769.4	3816.6	6894.6

(b) Cu/Ni UBM (life cycles)

Chip number	Ball size (mm)	Cycles (Cu/Ni UBM)			
		0.2	0.25	0.3	0.35
#1		66.718	967.19	7229.8	43151
#2		128.84	192.77	986.81	2601.1
#3		182.11	764.81	9322.8	12631
#4		37.884	183.97	1768.6	1651.8
#5		98.996	1285.6	6730.8	19114
#6		55.688	1790.3	3875.8	6983.5

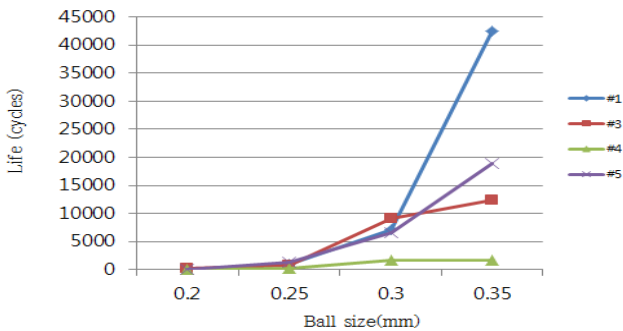


(a) Cu UBM (life cycles)

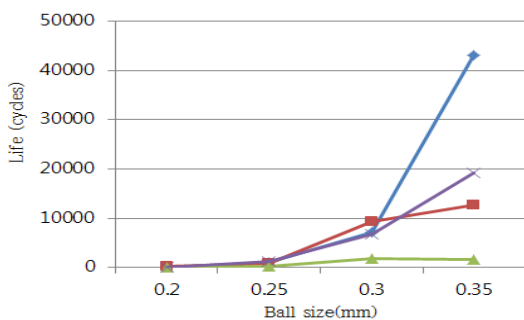


(b) Cu/Ni UBM (life cycles)

Fig. 14 Comparison of prediction of drop life time in a solder ball of each chip on PCB board for an original model and a new model



(a) Cu UBM (life cycles)



(b) Cu/Ni UBM (life cycles)

Fig. 13 Prediction of drop life time in a solder ball of each chip on PCB board by changing solder ball size

에서 알 수 있듯이 구리 UBM의 경우 보다 구리/니켈 UBM 조성의 경우가 수명에 좀 더 유리함을 확인 할 수 있었다.

4.4 솔더볼 크기별 수명예측해석 결과

솔더볼 크기에 따른 수명해석 결과는 Table 10과 Fig. 13와 같이 나타났으며, 솔더볼의 지름이 증가할수록 수명이 증가하는 경향을 보여주었다. 앞의 칩 두께별 수명해석 결과와 마찬가지로 구리 UBM의 경우 보다 구리/니켈 UBM 조성의 경우가 수명에 유리한 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 플립칩의 설계 매개변수 중 낙하충격수명에 가장 크게 영향을 미치는 칩 두께와 솔더볼의 크기 등 두 가지 설계 매개변수를 변화시키면서 낙하충격 수명예측해석을 실시하였다.

해석결과, 플립칩이 있는 보드 레벨의 반도체 패키징을 낙하시킬 때 가장 안전한 모델은, 칩 두께는 얇게, 솔더볼의 지름은 크게 설계되어야 한다. 후공정 전문 기업인 N사로부터 주어진 솔더볼의 설계 매개변수를 적용한 본 해석 결과를 토대로 가장 얇은 칩 두께인 0.2mm와 가장 큰 솔더볼의 지름인 0.35mm를 적용하여 새로운 모델(new model)을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 새로운 모델과, 칩두께가 0.3mm이고, 솔더볼의 지름 0.25mm인 기존의 오리지널 모델과의 낙하충격 수명예측 해석결과 값을 Fig. 14에 비교 분석하였으며, 새로운 모델에 대한 수명예측 해석 값이 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 구리 UBM조성의 솔더볼

의 경우보다 구리/니켈 UBM조성의 경우가 솔더볼 수명에 유리한 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, S. K., Kim, K. L., Bae, J. G., Park, S. H., Lee, D. G., 2009, Dynamic Analysis of Flip Chips with Solder Balls with Two Different Compositions, Korea Society for Precision Engineering Conference, 207-208.
- [2] Chaosuan K., Yukio, M., Yoshiharu, M., 2002, Low-Cycle Fatigue Behavior of Sn-Ag, Sn-Ag-Cu, and Sn-Ag-Cu-Bi Lead-Free Solders, Journal of Electronic Materials, 31:5 459.
- [3] Yoshiharu, K., Takuya, H., Shinichi, T., Masamoto, T., Masahisa, O., 2004, Effect of Silver Content on the Shear Fatigue Properties of Sn-Ag-Cu Flip-Chip Interconnects, Journal of Electronic Materials, 33:4 326-327.
- [4] Yoshihiko, K., Yoshiharu, K., Yuji, O., 2012, Influence of Cyclic Strain-Hardening Exponent on Fatigue Ductility Exponent for a Sn-Ag-Cu Micro-Solder Joint, Journal of Electronic Materials, 41:3 582-586.
- [5] Kim, S. K., Lim, E. M., 2012, Board Level Drop Simulations and Modal Analysis in the Flip Chips with Solder Balls of Sn-1.0Ag-0.5Cu Considering Underfill, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21:2 225-231.
- [6] Kim, S. K., Lim, E. M., 2011, Dynamic Reliability of Board Level by Changing the Design Parameters of Flip Chips, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:5 559-563.
- [7] Jang C. M., Kim, S. K., 2013, The Prediction of Impact Life Time in Solder Balls of the Board Leveled Flip Chips by Drop Simulations, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23:3 237-242.
- [8] John, H. L. P., Che. F. X., 2006, Drop Impact Analysis of Sn-Ag-Cu Solder Joints using Dynamic High-strain Rate Plastic Strain as the Impact Damage Driving Force, Electronic Components and Technology Conference, 3-4.
- [9] Kim, J. Y., 2008, A study on Reliability of Flip-chip Solder Joints with Lead-free Sn-1.2Ag-0.7Cu and Sn-2.5 at solders, Thesis for a Master, Seoul National University of Technology, Republic of Korea.
- [10] Blattau, N., Hillman, C., 2005, A Comparison of the Isothermal Fatigue Behavior of Sn-Ag-Cu to Sn-Pb Solder, Proceedings of SMTA International Annual Conference, 3-16.
- [11] O'Keefe, M., Vlahinos, A., 2009, Impacts of Cooling Technology on Solder Fatigue for Power Modules in Electric Traction Drive Vehicles, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Conference Publications, pp. 1182-1188.
- [12] O'Keefe, M., Vlahinos, A., 2009, Sensitivity of Solder Joint Fatigue to Sources of Variation in Advanced Vehicular Power Electronics Cooling, ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition, 5:13-19 45-53.
- [13] Siewert, T., Liu, S., Smith, D. R., Madeni, J. C., 2002, Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders, Report on Properties of Lead-free Solders, Release 4.0, National Institute of Standards and Technology & Colorado School of Mines, USA
- [14] Ha, S. S., Ha, S. O., Jang, J. K., Kim, J. W., Lee, J. B., Jung, S. B., 2009, Failure Behaviors of Flip Chip Solder Joints Under Various Loading Conditions of High-speed Shear Test, International Journal of Modern Physics B, 23:6 1809-1815.
- [15] Popelar, S., Roesch, M., 2000, Flip Chip Reliability Modeling Based on Solder Fatigue as Applied to Flip Chip on Laminate Assemblies, The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, 23:4 462-468.