

스탬핑 순서가 미치는 미세요소 변형 수치해석

이창희*, 김용연#

A numerical deformation analysis of micro elements by stamping orders

Chang Hee Lee*, Yong Yun Kim#

ABSTRACT

In this paper, we study the mechanism of lead deformation by numerically simulating the stamping process by means of a commercial finite element code. It is very important to analyze effects that the lead shape makes on the lead deformation, because the lead shape is often modified in order to minimize the deformation or to increase the buckling critical load of the punch. Therefore the stamping process, first, numerically simulated by considering as a quasi-static problem. Second, the effect on the lead deformation due to the lead shape variation, a linear lead geometry and a bent lead, was numerically analyzed and discussed. Finally, the punching order was optimized for multi-lead generating stamping process. The results show that the bent lead is little bit more shifted than the linear lead after the punching process. But the bent lead is vertically less deformed than the linear lead. The punching order to successively generate the lead is good to keep the lead space uniform. The results will be very effectively applied for the design of the blanking or punching dies in industry.

Key Words : Stamping process(타발공정), Lead Frame(리드프레임), Finite Element Method(유한요소법), Punching order(펀칭순서), Semiconductor Package(반도체 패키지)

1. 서론

블랭킹, 커팅, 전단 가공은 소재를 절단하는 공정으로, 매우 널리 사용되고 있다. 블랭킹 후 잔류응력에 의하여 형상이 변형되고, 그 변형은 제품의 형상과 블랭킹 순서에 따라 큰 차이를 보이기 때문에, 블랭킹 공정에 관련하고 있는 많은 엔지니어들은 블랭킹 잔류응력에 의한 변형을 최소화하기 위

하여 깊은 관심을 가지고 있다. 일반적으로 블랭킹 공정에서 펀치가 소재에 유입되는 과정에서부터 소재를 밀어내기까지 펀치 저항력의 변화는 Fig. 1에 서처럼 네 단계로 구분될 수 있다. 펀치가 유입되는 단계에서 펀치의 저항력은 선형적으로 증가하고, 소재는 탄성변형을 한다. 다음은 저항력이 일정하게 유지되는 단계로, 소재는 비선형 탄성변형과 소성변형 영역에서 대변형을 일으킨다. 다음 단계

접수일: 2005년 7월 8일; 게재승인일: 2005년 10월 7일

* 충북대학교 정밀기계공학과 대학원

교신저자: 충북대학교 기계공학부

E-mail yykim@cbnu.ac.kr Tel. (043) 261-3353

에서는 저항력이 감소하고, 소재 내부에 미세 균열이 발생된다. 마지막 단계에서 소재의 저항력은 급격히 감소하고, 소재에 발생된 미세 균열이 발전되어 서로 연결됨으로서 파단면을 형성하고, 펀치는 블랭킹 소재를 밀어내게 된다.^{1,2} Fig. 2는 미세균열이 커팅 모서리 A와 B에서 시작되고 진전되어 파단에 이르는 과정을 표현한 것이다. 일반적으로 블랭킹에 의한 제품은 단단계 블랭킹 공정에 의하여 완성되기 때문에, 블랭킹 후 변형을 최소화하기 위해서는 블랭킹 순서를 최적화할 필요가 있다. 블랭킹 후 소재의 변형을 관찰하기 위해서 솔리드(solid) 요소에 의한 3차원 해석이 요구되나, 블랭킹 공정이 진행될 때, 소재는 대단히 복잡한 응력-변형 현상을 수반하고, 비선형 대변형을 일으키기 때문에, 탄성변형에서 절단까지 공정을 3차원으로 수치적 해석하는 것은 대단히 많은 계산시간을 요구할 뿐 아니라, 현실적으로 어려운 점이 많다. 이에 대한 수치해석은 대부분 축대칭 문제나 탄성영역에서 수행되었고, 3차원 해석에 의한 형상변형 해석은 극히 적을 뿐 아니라, 많은 유한요소를 요구하기 때문에 산업현장에서 적용하기는 불가능하였다. 이러한 스탬핑 공정을 고찰하기 위해서 Koga¹는 소성 변형가시화법(Visioplasticity)에 의한 실험을 통하여 대변형을 측정하고, 전단 변위에 의한 전단 크랙 형성과정을 유한요소법에 의하여 해석하였다. 또한 Hambl²는 탄성변형에서 파단까지 전 공정을 축대칭 문제를 해석하였을 뿐 아니라, 손상 및 크랙 형성에 의한 파단의 판단기준을 제시하였으나, 많은 계산시간을 요구하기 때문에, 전단공정에 의한 잔류응력에 의한 변형해석에 적용하기는 쉽지 않다. 그러나 축대칭 전단시 파단면을 시뮬레이션함으로써 향후 비대칭의 변형문제도 접근이 가능할 것으로 생각된다. 최근 Kim³은 블랭킹 시편을 취하여 전단 깊이를 측정하고, 평면변형을 문제를 해석하여 측정된 전단 깊이와 비교하고 대 격자(coarse mesh)로 가능한 전단 깊이를 적용하여 잔류응력에 의한 변형문제를 해석하였고, 생산되고 있는 리드프레임의 변형 결과와 비교하였다. 대변위 영역에서 2D 평면변형에 대한 블랭킹 공정을 비선형 대변위로 해석함으로써 소재에 손상이 발생하는 응력

집중 현상을 고찰하였고, 이에 대응하는 펀칭깊이를 3차원 문제인 반도체 부품인 리드프레임의 블랭킹 공정에 적용함으로써 미세형상의 변형을 고찰하였다. 본 논문에서는 세장비가 큰 초정밀 리드프레임을 가공함에 있어서 가공 변형을 최소화 할 수 있는 펀칭 순서를 해석하였고, 직선형 리드와 굴곡형 리드의 가공 후 잔류응력에 의한 리드 변형을 고찰하였다.

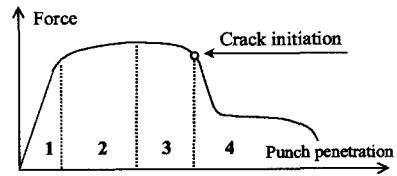


Fig. 1 Schematic diagram of punching forces vs. punch penetration

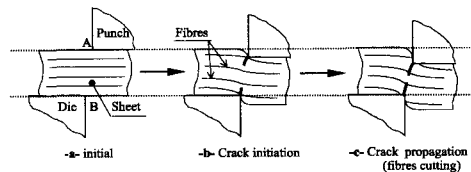


Fig. 2 Rupture of the sheet

2. 연구 배경

리드프레임, 콘벡터와 같은 반도체 및 전자부품은 박판전단공정에 의하여 원소재로부터 제품을 형성한다. 최근 리드프레임은 0.1mm - 0.3mm 두께를 갖는 동합금(Copper Alloy)이나 철계합금(Alloy42)이 원소재로 사용되고 있다. 리드프레임은 반도체 칩 단자로부터 신호를 인쇄회로기판(PCB board)에 전달하는 전기회로로 정의할 수 있고, 최근에는 소재 두께 대비 회로의 너비가 50%에 수준에 이르고, 리드의 변형 50 μ m이하를 요구하는 정밀한 제품이다. Fig. 3은 반도체 사각평면 패키지(Quadrilateral Flat Package)의 부품인 리드프레임이다. 리드프레임은 식각공정에 의한 화학적 부식 공정 또는 금형에 의한 스탬핑 공정으로 제작된다. 블랭킹 금형은

500여 부품으로 구성되고, 다단계 스탬핑 금형이다. 전기적 신호 회로인 리드의 너비가 소재 두께보다 작을 때, 가운데 리드 끝단부의 수평이동(shift)과 비틀림(twist)변형이 크게 된다. 리드의 변형은 직접적으로 리드와 리드가 서로 접촉하는 불량량이 발생하고, 리드 끝단 부의 도금성을 저하시키고, 반도체 패키징(packaging) 공정에서 금선 접합(gold wire bonding)의 접촉불량 및 금선의 인장력을 저하시켜 선의 형상(wire loop)이 한쪽으로 쏠리는 스위핑(sweeping) 현상을 초래하게 된다. 특히, tie bar 주위의 리드의 변형은 리드가 가장 길고, 금선의 길이도 가장 길기 때문에 굽힘 강성이 작아서, 스위핑도 커지게 된다. 또한 중심부 리드를 형성하는 리드 주위의 펀치는 좌굴강도가 가장 낮기 때문에 펀치의 좌굴 파손이 자주 발생하여 생산성 저하를 초래하였다. 따라서 직선형 리드로부터 굴곡 리드로 발전되고 있으며(Fig. 7), 굴곡 리드 주위 펀치에 대한 좌굴의 임계하중을 향상시킴으로서 미세 리드 프레임 스탬핑 금형 펀치의 좌굴파손을 발생하지 않았다.^{4,5}

따라서 본 논문에서는 리드의 형상 변화가 블랭킹 후 리드의 변형에 미치는 영향을 고찰하고, Fig. 3과 같은 100개 이상의 다수의 리드를 가공하는 스탬핑 금형을 설계^{6,7}하기 위해서 요구되는 미세 내

부리드 가공을 위한 최적 블랭킹 순서를 제시하였다.

3. 리드 변형의 유한요소 해석

3.1 FEM Modeling

블랭킹 공정을 유한요소법으로 해석하기 위해서, 다이(die), 스트리퍼(stripper), 펀치(punch)와 원소재의 접촉조건으로, 원소재가 펀치와 접촉하는 절점에 일정한 강제 변위를 주었고, 블랭킹되는 소재는 펀치와 완전히 접촉한다고 가정하였다.(Fig. 4) 블랭킹 면적이 클 경우 소재가 펀치로부터 분리되는 부분이 발생되지만, 펀치의 너비가 원소재 두께 정도로 좁을 경우 소재와 펀치는 완전히 접촉한다고 가정할 수 있다. 스트리퍼와 소재, 다이와 소재의 접촉조건도 변위구속으로 대체함으로서 해석 과정을 단순화 하였다. 해석프로그램은 유한요소법 상용 코드인 ANSYS를 사용하여 3차원 대소성 변형 요소를 선택하였다. 접촉면에서 공구와 소재의 마찰은 무시하고 강제 변위로 처리하였다.³ IC 리드 프레임의 소재는 동합금으로 OLIN 7025C이다. 두께는 0.127mm, 가로 x 세로는 50mm x 61.4mm, 탄성 계수 153600 MPa, 프와송비 0.23, 밀도 9.072×10^{-4} kg/mm³ 이고, 항복강도 220 MPa, 응력-변형률 선도는 Fig. 5와 같고, 입력 데이터는 Table 1과 같다.

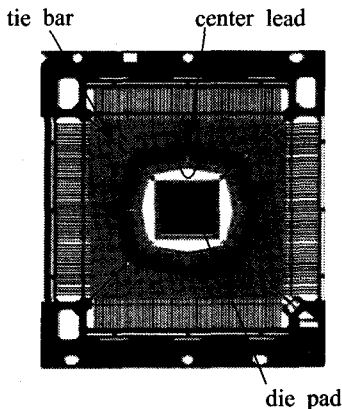


Fig. 3 208pin IC lead frame

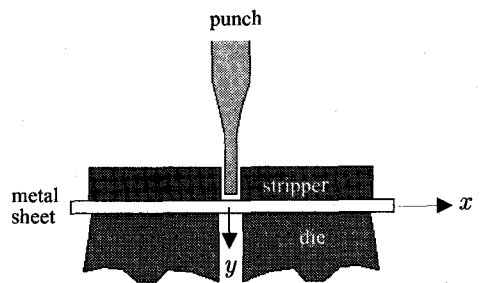


Fig. 4 Sketch of blanking dies

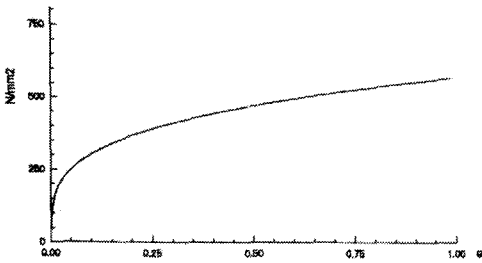


Fig. 5 Stress-strain curve of copper alloy

Table 1 Stress- strain input data [MPa]

ε	σ	ε	σ	ε	σ
0.001	153.6	0.071	364.8	0.221	456.4
0.011	249.9	0.091	383.7	0.251	471.4
0.021	284.9	0.111	399.5	0.311	492.4
0.031	308.4	0.131	413.1	0.391	515.8
0.041	326.4	0.151	425.2	0.481	538.0
0.051	341.1	0.191	446.0	0.711	582.4

3.2 리드변형 해석

리드프레임 전 공정을 해석하는 데는 많은 계산 시간이 요구되기 때문에, 단일 리드를 형성하기 위한 공정을 먼저 수치적으로 해석하였다. 최근 Kim⁴⁻⁵ 이 제시한 굴곡 리드는 펀치의 좌굴 임계하중을 높임으로서 전단 저항에 의한 펀치의 파손을 방지하여 초미세 리드 프레임을 프레스 공정에 의해 생산이 가능하게 하고 있다. 따라서 직선형 리드와 굴곡 리드의 형상에 대한 리드 변형양의 상대적 변화를 고찰하였고, 펀칭 순서가 리드 변형에 미치는 영향도 고찰하였다. 다수의 리드 형성에 대한 가장 기본적인 단위 공정은 2개의 리드 형성하기 위한 스탬핑 공정이다. 2개의 리드를 형성할 때 Fig. 6과 같이 4개의 펀치가 요구되는데 4개의 펀치를 동시에 블랭킹하는 것은 금형 공간의 구조적 제한 때문에 불가능하고, 연속적 4번의 펀칭이 요구된다. 펀치 4는 항상 마지막으로 사용되는 펀치이기 때문에 펀치 1, 펀치 2, 펀치 3에 대해 6 가지의 펀칭 순서의 조합을 생각할 수 있다. 따라서 여러 가지 펀칭 순서에 대해 리드 변형을 해석하고 다수의 리드 형성할 때 펀칭 순서가 리드 변형에

미치는 영향을 직선 리드와 굴곡선 리드에 대해서 고찰하였다. 수치적 해석에 3차원 8절점 솔리드 유한 요소를 사용하였고, 각각의 펀칭 순서에 대해 아래와 같이 8 단계의 준 정적(quasi-static) 해석을 연속적으로 하였다.

- 1 단계 : 펀치 1에 의한 블랭킹
- 2 단계 : 펀치 1과 접촉된 소재 제거 및 응력 풀림(relaxation)
- 3 단계 : 펀치 2에 의한 블랭킹
- 4 단계 : 펀치 2에 접촉된 소재 제거 및 응력 풀림
- 5 단계 : 펀치 3에 의한 블랭킹
- 6 단계 : 펀치 3과 접촉된 소재 제거 및 응력 풀림
- 7 단계 : 펀치 4에 의한 블랭킹
- 8 단계 : 펀치 4에 접촉된 소재 제거 및 응력 풀림

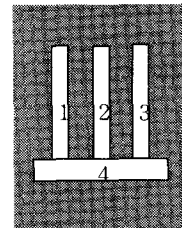


Fig. 6 Punch number diagram

4. 리드변형 및 펀칭순서 해석결과 및 고찰

4.1 단일 리드 변형 해석

Fig. 7에서 가운데 리드를 중심으로 왼쪽에 위치한 펀치가 1번 펀치이며, 오른쪽에 위치한 펀치가 2번 펀치이다. 수평방향의 변위를 "평면내의 변위(horizontal shift)"라 정의 하고, 그 가상 평면에 수직방향의 변위를 "수직변위(vertical deformation)"로 정의 하였다. 평면변위의 방향은 펀칭의 순서에 따라 영향을 받으며 항상 첫 번째 펀치의 방향으로 변위가 발생하였고, 평면 변형양은 좌우 대칭형상인 직선 리드는 펀칭순서에 관계없이 일정하게 변

형되었지만, 비대칭형인 굴곡 리드는 펀칭 순서에 따라 평면 변형의 크기가 달랐다. 리드는 펀칭순서에 관계없이 펀치의 전단 공정의 반대 방향으로 수직변위가 발생하였고, 굴곡 리드가 직선 리드보다 변형이 많이 발생 하였다. 변형에 대한 수치적 데이터는 Table 2 에서 보여준다. Fig. 7은 중앙부 리드의 형상에 대한 변형에 대한 수치해석에 따른 변형과 잔류응력의 분포를 보여준다.



Fig. 7 Lead deformation with respect to lead geometry of linear lead (left) and bent lead (right)

Table 2 Lead deformation for single lead (μm)

	linear lead		linear lead	
punching order	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$	$P_1 \rightarrow P_2$	$P_2 \rightarrow P_1$
horizontal shift	-69.4	67.3	-86.5	113.4
vertical deformation	20.3	14.8	26.1	54.5

4.2 다수 리드 변형 해석

리드는 전기적 신호를 전달하는 역할을 하기 때문에 리드와 리드가 서로 접촉하지 않아야 한다. 따라서 리드와 리드사이의 공간을 일정하게 유지하는 것이 무엇보다도 중요하다. 펀치의 순서는 리드 공간에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 다수의 리드를 형성할 때도 단일리드 형성 때와 같은 경향의 리드변위가 발생하는가, 아니면 다른 어떤 경향을 보이는가 하는 문제는 대단히 중요한 문제이다. 특히 대부분 펀칭 공정은 한번의 펀칭에 하나의 리

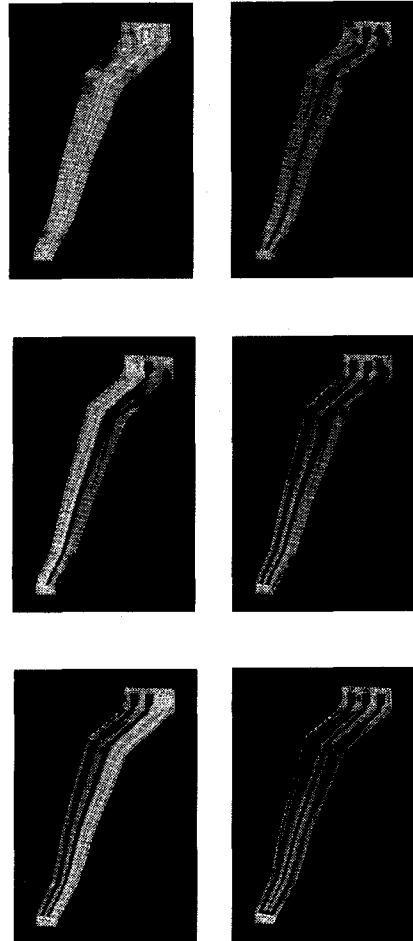


Fig. 8 FEM simulation of stamping process as for the punching order of p2-p1-p3-p4

드가 형성되나, 한번 펀칭으로부터 2개의 리드가 형성될 경우 최대 리드 공간과 최소 리드공간이 동시에 발생하게 된다. 또는 그 반대의 경우로 펀치 2 → 펀치 1 → 펀치 3 → 펀치 4 의 펀칭 순서로 가공되는 경우로, Fig. 8은 그에 대한 응력 분포의 변화와 리드 변형에 따른 리드 사이의 공간이 변화하는 결과를 보여주고 있다. 펀치 2의 자리에 최소의 리드와 리드 사이의 공간이 발생되고, 펀치 1과 펀치 3의 자리에 상대적으로 넓은 공간이 발생된다.

따라서 직선 리드 또는 굴곡 리드를 다수 형성

하는 스탬핑 공정은 2개의 리드형성시의 발생될 수 있는 6가지 펀칭순서 경우에 대해서 각각 리드 변형에 대한 해석을 하였다. 리드 변형이 가장 적은 중앙부 리드와 변형이 가장 심한 Tie Bar 주위의 리드를 선택하였고, 펀칭 순서 조합은 아래와 같다.

- case 1 : 펀치 1 → 펀치 2 → 펀치 3 → 펀치 4
- case 2 : 펀치 1 → 펀치 3 → 펀치 2 → 펀치 4
- case 3 : 펀치 3 → 펀치 1 → 펀치 2 → 펀치 4
- case 4 : 펀치 3 → 펀치 2 → 펀치 1 → 펀치 4
- case 5 : 펀치 2 → 펀치 3 → 펀치 1 → 펀치 4
- case 6 : 펀치 2 → 펀치 1 → 펀치 3 → 펀치 4

2 개의 리드를 형성할 때 리드는 첫 번째 펀치 방향으로 'shift' 되었다. 수평변위에 대해서 직선형 리드의 경우는 $6.6\mu\text{m}$ - $132.5\mu\text{m}$ 이고, 굴곡 리드의 경우는 $15.8\mu\text{m}$ - $137.6\mu\text{m}$ 의 분포를 보였다. 수직변위에 있어서, 순차펀칭의 경우 (case 1, case 3, case 4, case 6) 단일 리드의 형성할 때와 같이 펀치진행 반대방향으로 수직변위가 발생하였으나, 비순차 펀칭의 경우는 펀치의 진행 방향으로 수직 변위가 발생하였다. 이러한 현상은 한번의 펀칭으로부터 2개의 리드가 형성될 경우로서 펀칭할 때 스트리퍼가 리드 폭이 좁아서 충분히 지지하지 못하기 때문에 비틀림 변위가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 수직변위는 case 별로 직선 리드는 $4.2\mu\text{m}$ - $43.6\mu\text{m}$, 굴곡 리드는 $2.5\mu\text{m}$ - $35.5\mu\text{m}$ 의 분포를 보였다. 리드의 공간은 순차적 펀칭의 경우 잔류응력에 의한 리드 변형일

정하게 유지할 수 있으나, case 2와 5의 경우에는 최대 및 최소 리드사이의 공간을 발생시켰다.

Fig. 9로부터 case 1, case 2, case 3에 대하여 최종 잔류응력분포와 리드 변형을 볼 수 있다. Table 3은 펀칭순서의 경우에 따른 리드 끝 부분의 수평 변위와 수직변위를 나타내고 있다.

Table 3 Lead deformation for double lead (μm)

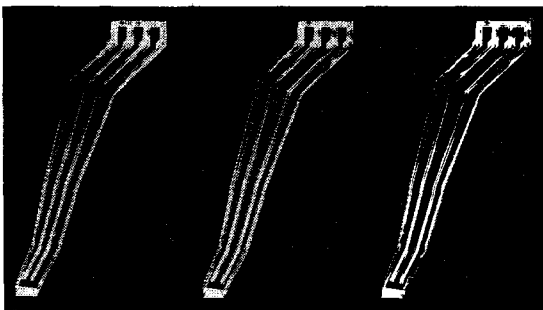
	Punching order	2→3→1		2→1→3	
	Lead no.	1	2	1	2
Linear	Horizontal shift	-7.5	6.6	-44.0	-54.7
Lead	Vertical deform.	11.1	-14.4	26.1	43.6
Bent	Horizontal shift	-83.9	25.9	-15.8	-65.5
Lead	Vertical deform.	9.9	-9.8	40.0	47.9

	Punching order	1→2→3		1→3→2	
	Lead no.	1	2	1	2
Linear	Horizontal shift	-132.5	-71.0	-69.8	9.9
Lead	Vertical deform.	33.5	26.5	11.4	-18.9
Bent	Horizontal shift	-137.6	-101.3	-89.5	-24.6
Lead	Vertical deform.	28.0	32.7	9.4	-7.4

	Punching order	3→2→1		3→1→2	
	Lead no.	1	2	1	2
Linear	Horizontal shift	34.1	35.9	9.1	-20.3
Lead	Vertical deform.	-4.2	-19.7	10.8	24.6
Bent	Horizontal shift	59.9	62.0	23.4	-33.9
Lead	Vertical deform.	40.0	47.9	17.1	35.5

5. 결론

결론적으로 굴곡 리드의 경우, 단일 리드를 형성할 때 평면변위와 수직변위에 있어서 직선 리드에 비해 변위가 큰 경향을 보였지만, 다수의 리드를 형성할 때 평면변위의 방향에 있어서 직선형 리드와 동일한 경향을 보이고 있고, 변위에 있어서도 큰 차이가 없는 경향을 보여주고 있다. 특히 수직



(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3

Fig. 9 Lead deformation for 2 lead generation

변위의 방향에 있어서도 굴곡 리드는 직선 리드와 같은 경향을 보였고, 스트리퍼가 리드를 지지하기가 용이하기 때문에 수직변위에서 굴곡 리드는 직선 리드보다 적었다. 리드공간의 문제 있어서, 펀칭 순서는 순차적 스탬핑이 이상적임을 알 수 있었고, 피할 수 없는 마지막 펀칭에 의한 상대적인 공간의 확대는 마지막 펀칭의 두께를 보정함으로써 리드공간을 균일하게 할 수 있을 것이다. 따라서 펀칭의 좌굴 파손에 안전하기 위해서는 좌굴 임계하중이 증가되는 굴곡 리드가 유리하고, 리드의 평면변위 및 수직 변위도 직선 리드와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. Koga, N., "An application of viscoplasticity to the analysis of shearing Phenomenon," Journal of the JSTP, Vol. 32, No. 364, 1991.
2. Hambi, R., "Finite Element Model fracture prediction during sheet-metal blanking processes," Engineering Fracture mechanics, Vol. 68, No. 3, pp. 365-378, 2001.
3. Kim, Y. Y., "A coarse Mesh Model for Numerical Analysis of Lead Frame Deformation Due to Blanking Residual Stress," JKSP, Vol. 22, No. 2, pp. 133-138, 2005.
4. Kim, Y. Y., Han, S. Y., "Lead Frame of a semiconductor device and a method for designing it," United States Patent 5808355, 1998.
5. Kim, Y. Y., Lee, D. H., "Local Buckling Analysis of the Punch in Stamping Die and Its Design Modification," JKSP, Vol.16, No. 3, pp. 25-29, 1999.
6. Hong, S. H., Han, S. Y., Kim, Y. Y., "A Study on Extraction and its Storage Method of Topological Information from Common 2-D CAD Using the Boundry-Representation Method," JKSP, Vol. 16, No. 9, pp. 25-33, 1999.
7. Kim, Y. Y., "A development of Design Dystem of the Progressive Stamping Dies by using Boundary Representation and its Application," JKSP, Vol. 22, No. 2, pp. 126-132, 2005.