

미세 비아홀 펀칭 공정 중 이중 재료 두께에 따른 버 생성

신승용* · 임성한** · 주병윤* · 오수익***

(2003년 10월 9일 접수)

Thickness Effect of Double Layered Sheet on Burr Formation during Micro-Via Hole Punching Process

S. Y. Shin, S. H. Rhim, B.Y. Joo and S. I. Oh

Abstract

Recent electronic equipment becomes smaller, more functional, and more complex. According to these trends, LTCC(low temperature co-fired ceramic) has been emerged as a promising technology in packaging industry. It consists of multi-layer ceramic sheet, and the circuit has 3D structure. In this technology via hole formation plays an important role because it provides an electric path for the packaging interconnection network. Therefore via hole quality is very important for ensuring performance of LTCC product. Via holes are formed on the green sheet that consists of ceramic(before sintering) layer and PET(polyethylene terephthalate) one. In this paper we found the correlation between hole quality and process condition such as PET thickness and ceramic thickness. The shear behavior of double layer sheet by micro hole punching which is different from that of single layer one was also discussed.

Key Words : LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic), Via Hole, Ceramic, PET(polyethylene Terephthalate), Green Sheet, Burr Formation, Shear Fracture Behavior

1. 서론

최근 IT 산업 등의 발달로 기계 및 부품의 복합화, 다기능화 및 소형화가 요구되고 있으며, 이를 위한 미세가공이 중요한 기술로 각광 받고 있다. 마이크로 펀칭 기술 또한 기존의 에칭, 레이저 가공 등과 더불어 기능성 홀을 가공할 수 있는 미세가공 기술의 하나로써 환경 문제 개선과 생산 단가 저감 등의 요인으로 유사 가공 기술에 비해 주목을 받고 있다. 현재 마이크로 펀칭은 잉크젯 프린트 헤드 노즐 및 전자 회로 LTCC 기판의 비

아홀(via hole)가공 등에 사용되고 있다. LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic)⁽¹⁾는 글라스나 세라믹과 같은 재료를 혼합하여 요구되는 전기적 특성을 고려한 두께로 제작한다. 재료의 특성상 성형 온도 범위가 비교적 낮고 도체 저항이 적으며, 인쇄 해상도가 높은 장점을 가지고 있다. 최근 antenna switch module, chip duplexer 와 같은 이동통신 단말기용 부품과 air bag sensor, engine control unit module, MAP(Manifold Absolute Pressure) sensor 등 자동차 전장용 부품 등에 다양하게 응용되고 있다. LTCC 기판의 구조적 특징은 부품 크기의 최

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

소화 요구에 따라 여러 층을 쌓아 3 차원적으로 회로를 집적 하는 것이다. 이를 위해서는 층간 전기적 연결의 안정성이 요구되며 비아홀이 그 통로를 제공한다. LTCC 기판 제작에 있어 각 층 패턴에 가공하는 비아홀의 위치 정밀도(positional accuracy)와 각 층 비아홀 간의 위치 정렬(alignment)등이 중요한 설계 기술이 된다. 가장 중요한 것은 비아홀 속에 은 페이스트(silver paste)와 같은 도체 금속을 채워 넣을 때 불량 발생하지 않게끔 없이 깨끗한 홀을 가공하는 것이다. 따라서 마이크로 펀칭 기술을 이용한 비아홀 가공 시 버를 최소화 하는 공정 조건을 찾는 것이 중요하다.

두께 수 mm 이상인 금속 소재의 펀칭에서 양질의 홀을 얻기 위한 주요한 공정 조건으로 간극대 시트 두께 비(c/t ratio, c : radial clearance, t : sheet thickness)를 사용한다. 이러한 공정 조건은 금속소재 단일시트의 마이크로 홀 가공⁽²⁾에서도 잘 적용되었다. 그러나 이종재료로 구성된 그린시트의 마이크로 펀칭에서는 기존의 간극대 시트 두께 비 조건 만으로는 홀의 품질을 조절할 수 없었으며 다양한 공정조건에 대한 연구가 필요함을 확인하였다.⁽³⁾

이에 본 연구에서는 다양한 공정조건 하에 이종재료로 구성된 그린시트의 마이크로 펀칭 실험을 수행하고 세라믹과 PET 시트의 변형거동을 관찰하여 기존의 홀 가공 공정 조건을 보정할 수 있는 방안을 마련하고자 한다. 이러한 연구는 LTCC 기판의 제품 특성을 향상시키고 버 생성에 의한 기판 불량률을 낮추기 위한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

2. 이중 시트 펀칭 공정

기판에서 사용되는 세라믹은 보통 25~100 μ m 두께로 소결 전의 입자상태로 바인더에 의해 결합되어 있다. 따라서 공정 중 직접 다루기가 어려워 PET 시트 위에 테이프 캐스팅(tape casting)하여 사용한다. 세라믹과 PET 의 이중시트(double layer sheet) 즉, 그린시트(green sheet)의 펀칭 가공 시 중요한 공정변수로는 소재의 물성과 형상(t_c , t_p), 펀치와 다이 사이의 간극(c) 등이 있다. 세라믹과 PET 소재의 기계적 물성은 조성에 영향을 받지만, 세라믹의 경우 기판이 가져야 할 전기적 특성을 만족해야 하고 PET 의 경우 제조상의 어려움으로 한 가지 조성만을 사용하였다. 펀치와 다이의 공

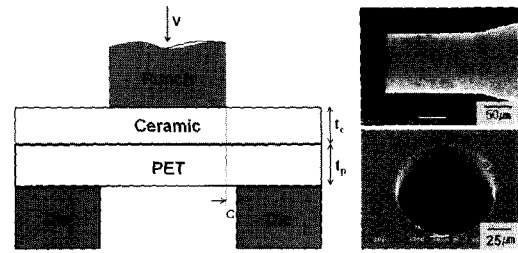


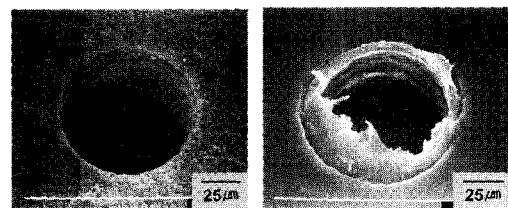
Fig. 1 Schematic of green sheet and punching tools

구 재료는 일반적으로 사용되는 초경합금을 사용하였다.

가공시 펀칭 속도는 $V = 120\text{mm/s}$ 였으며 이 때 평균 변형률 속도는 식(1)과 같이 펀칭 속도(V)와 간극(c)에 의해 계산된다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 펀칭 속도는 일정하게 한 후 간극만 바꾸어 실험하였으므로 평균 변형률 속도는 대략 $10^3 \sim 10^4\text{s}^{-1}$ 의 값을 갖는다.

$$\dot{\epsilon} = V/2c \quad (1)$$

일반적인 금속 소재의 마이크로 홀 가공에서는 홀 내면의 균일성과 버의 크기나 형상이 홀의 평가 기준이 된다. 우선 홀 내면의 균일성에 초점을 맞춘 공정조건을 사용하며 부수적인 버의 발생이 과도할 경우 전해연마 또는 기계적 연마 등의 후처리 공정으로 이를 제거하게 된다. 그러나 그린시트 펀칭에서는 세라믹과 PET의 소재 특성상 버를 제거하는 후처리 공정이 거의 불가능 하다. 따라서 홀 내면의 균일성과 버의 최소화 이 두 가지 조건을 모두 만족시킬 수 있는 공정 조건의 결정이 필요하다.



(a) Ceramic sheet (b) PET sheet

Fig. 2 SEM view of via hole ($d=100\mu\text{m}$)

Fig. 2는 그린시트를 펀칭한 후 세라믹과 PET 부분의 홀을 각각 관찰한 것이다. 세라믹 부분은 소성되지 않은 입자 상태이므로 버가 형성되지

않으며 비교적 깨끗한 홀을 얻을 수 있다. 홀의 상단부 직경이 하단부보다 감소하는 경향이 관찰되었지만 적층 공정에서 불량률 유발할 정도는 아니었다. 반면 PET 층에서는 하단에 비교적 큰 버가 발생하며 이로 인해 비아홀 속에 은 페이스트(silver paste)와 같은 도체금속을 채워 넣는 공정에서 불량률 유발하게 된다. 따라서 본 연구에서는 주요 공정 변수로 PET 시트 두께, 세라믹 시트 두께를 선정하고 PET시트의 버 형성 정도를 홀 품질로 정의하여 이종 시트 펀칭 실험을 수행하였다.

3. 실험 과정

실험에 사용된 세라믹은 Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 , CaO 등의 혼합물로 소결되지 않은 상태로 요구되는 전기적 특성에 따라 다양한 두께로 PET시트에 테이프 캐스팅 된다. 펀칭 시 그린시트는 세라믹 부분의 제어를 위해 PET 부분을 아래로 위치 하였다. 그린시트의 종류는 Table 1과 같이 세라믹 두께 2종류와 PET 두께 2종류를 조합한 4가지를 사용하였다.

Table 1 Green sheet data

Sheet number	Ceramic thickness (t_c)	PET thickness (t_p)
1	23 μ m	38 μ m
2	45 μ m	38 μ m
3	23 μ m	76 μ m
4	45 μ m	76 μ m

공구는 직경(d) 100 μ m, 200 μ m인 펀치와 5 μ m, 15 μ m 간극(c)의 다이 홀을 사용하였다. 사용된 마이크로 펀칭 시스템⁽⁵⁾은 수 mm의 펀치 행정 동안 1 μ m 이하의 직진 정밀도를 가진다.

또한 펀치 팁과 다이 홀을 동시에 겹쳐서 볼 수 있는 광학시스템을 적용해 반경 방향 1 μ m의 간극 위치정렬(tool alignment)이 가능하다.(Fig. 3)

가공 중 펀치 행정에 따른 하중을 관찰하기 위해 압전 하중 센서와 정전 용량 변위 센서를 사용하여 하중-변위 곡선을 측정하였다. 하중-변위 곡선상에 하중이 급격히 변화하는 지점을 관찰점

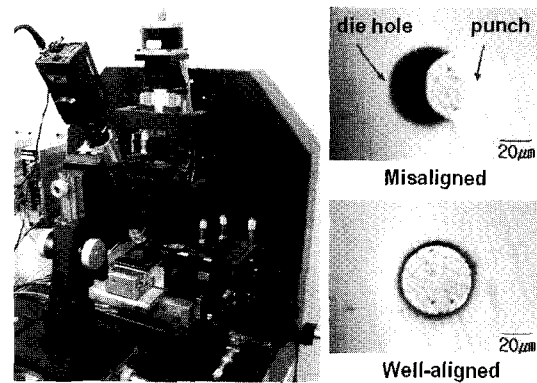


Fig. 3 Micro punching system⁽⁵⁾

으로 결정하여 세라믹과 PET 간의 상호 작용과 파단 거동의 관찰을 위해, 펀칭 과정이 종료된 후 펀치의 행정을 멈춘 후 그 단면을 관찰하는 interrupted test⁽⁶⁾를 수행하였다.

그린시트의 미세 비아홀 펀칭에서 발생하는 PET의 버는 재료적 특성으로 Fig. 2(b)와 같이 불균일한 형상을 띠며 정량적인 측정이 어려워 SEM(Scanning Electron Microscope)을 사용하여 정성적인 크기만 관찰하였다. interrupted test결과를 분석하기 위해 시편의 단면을 관찰 하였다. 가공된 홀의 내면 관찰을 위해 모사재(silicon rubber replica, Replise t-F5 Struers)를 사용 하였다. 유체 상태의 모사재를 가공된 홀 속에 충전하고 시간이 지나 굳은 후 이것을 홀에서 분리하여 SEM으로 관찰하였다.

4. 실험 결과

펀칭 가공시 간극 결정 요소로 간극 대 시트 두께 비 (c/t ratio)를 사용한다. 일반적으로 간극의 크기가 작거나 시트가 두꺼워 c/t 값이 작아지게 되면 버의 크기가 작아 지고 좋은 품질의 홀을 얻을 수 있다. 그러나 물성 차가 큰 재료들로 제조된 그린시트의 경우 시트의 두께는 세라믹과 PET의 두께를 더한 $t = t_c + t_p$ 이 되며, c/t조건은 $c/(t_c + t_p)$ 으로 나타내야 한다.

실험 결과 간극(c)이 작아져 c/t 값이 작아지게 되면 일반적인 경우와 같이 비교적 작은 크기의 버가 형성되었다. 그러나 시트 두께의 변화에 대해서는 PET시트의 두께(t_p)가 커질 경우 비교적 작은 크기의 버가 형성되었으나, 세라믹 시트의

두께(t_c)가 커지면 비록 c/t 의 값은 감소하지만 형성되는 버의 크기는 커지는 경향을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 PET와 세라믹의 두께가 각각 미세홀 펀칭에 어떠한 영향을 미치는 지를 서로 다른 방법을 사용하여 살펴 보았다.

4.1 PET 시트 두께의 영향

일반적으로 펀칭 가공에서 Fig. 4와 같이 크랙의 진행방향(crack propagation angle)과 펀치와 다이에서 생성 되는 크랙의 방향(diagonal angle)이 일치할 때 가공을 위한 펀치의 하중이 가장 작게 요구되며 최적의 간극(optimal clearance)이 된다.⁽⁷⁻⁸⁾ 그러나 간극이 적절하지 않으면 과도한 변형을 유발하게 되며 큰 버를 형성하게 된다.

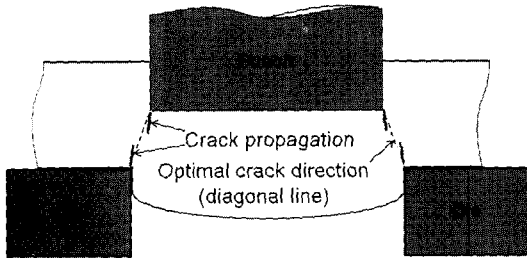


Fig. 4 Crack propagation angle and diagonal line

그런 시트 펀칭에서 간극의 영향을 보기 위해 Table 1의 네 가지 경우에 대해 펀칭을 수행하여 하중-변위를 측정하고 후 백분율로 환산된 펀치의 행정 대 하중으로 Fig. 5와 같이 도시하였다.

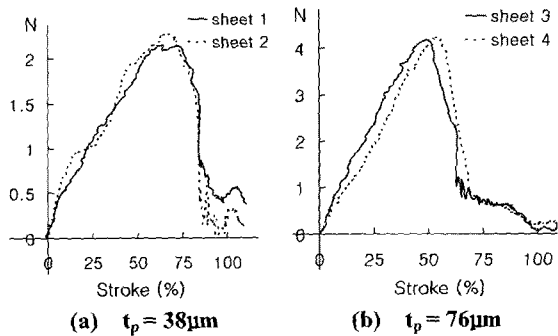
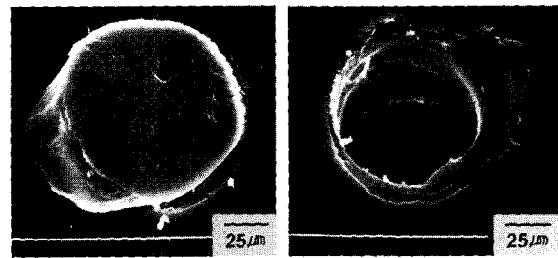


Fig. 5 Load - displacement curve($d=100\mu m, c=5\mu m$)

최대 하중은 Fig. 5에서와 같이 PET시트를 각각 $38\mu m$ (a) 과 $76\mu m$ (b)으로 고정하고 세라믹 시트의 두께를 각각 23, $45\mu m$ 으로 변화시켰을 때 큰 변화가 없었다. 이는 세라믹의 경우 소결하지 않은 입자 상태로 바인더에 묶여 있어 PET에 비해 강도가 작아 최대 하중이 비교적 강성이 큰 PET 시트의 두께에만 영향을 받았기 때문이다. 실제로 PET 두께가 증가했을 때 최대 하중의 크기는 세라믹 시트의 두께에 상관 없이 증가한 것을 Fig.5에서 확인할 수 있다.

PET시트의 두께가 증가할수록 펀칭에 작용하는 최대 하중도 증가하므로 PET 두께를 줄이면 최대 하중 증가로 인한 펀치 마모의 손실을 줄일 수 있다. 그러나 Fig. 6(a), (b) 에서 보이는 바와 같이 PET 두께가 세라믹 시트에 비해 상대적으로 얇을 경우 큰 버가 발생하는 경우를 관찰할 수 있었다.



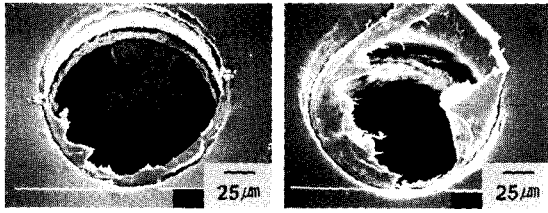
(a) $t_p = 38\mu m$ (b) $t_p = 76\mu m$

Fig. 6 SEM view of punched via holes with different PET sheet thickness ($d=100\mu m, c=5\mu m$)

4.2 세라믹 시트 두께의 영향

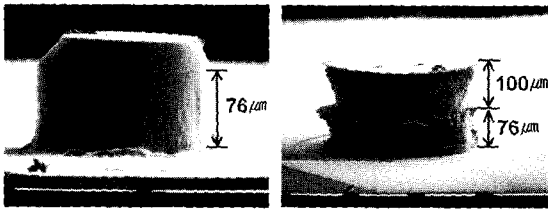
PET 시트 두께가 펀치의 최대 하중에 미치는 영향과는 달리 재료 특성 상 세라믹 시트의 두께가 펀치 하중에 미치는 영향은 적었다. 그러나 일반적인 경향과는 달리 세라믹 시트의 두께를 증가시켜 간극비(c/t)를 감소시켰을 때 Fig. 7에서 보듯이 큰 버가 형성되어 홀의 품질은 좋지 않게 나오는 것을 확인하였다.

일반적인 단일 시트 펀칭에서는 홀의 윗면과 아랫면의 직경이 비슷하거나 파단각(fracture angle)형성에 의해 아랫면, 즉 스크랩이 빠져나가는 쪽의 내부 직경이 큰 경향이 있다. 비아 홀 내부를 관찰하기 위해 모사재를 홀 속에 충전하여 굳은



(a) $t_c = 37\mu\text{m}$ (b) $t_c = 150\mu\text{m}$

Fig. 7 SEM view of punched hole with different ceramic thickness ($d=150\mu\text{m}$)



(a) PET single sheet (b) Green sheet

Fig. 8 Replicated hole image

후 떼어내어 SEM으로 관찰한 Fig. 8(a)의 PET 단일 시트 펀칭 결과에서도 위와 같이 홀 내부 직경이 비교적 균일한 것을 확인할 수 있다. 그러나 그린시트의 경우 Fig. 8(b)와 같이 비교적 균일하게 형성된 하층 PET 영역의 홀 내부에 비해 상층 세라믹 영역의 홀 내부 직경이 아랫면으로 갈수록 감소하는 것을 볼 수 있다.

그린시트 펀칭에서 세라믹 시트 두께의 증가로 인해 간극비의 감소함에도 버가 크게 나오는 것이 세라믹 영역의 홀 형상이 썩기 형태가 되는 것과 연관이 있는 것으로 판단되어, 세라믹 시트의 두께 변화가 펀칭시 파단거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 펀칭이 종료 되기 전 펀칭 행정을 멈추고 그 시편의 단면을 관찰 하는 interrupt-ed test⁽⁶⁾를 수행하였다.

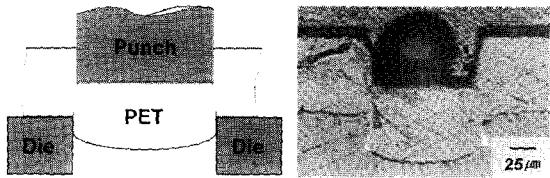
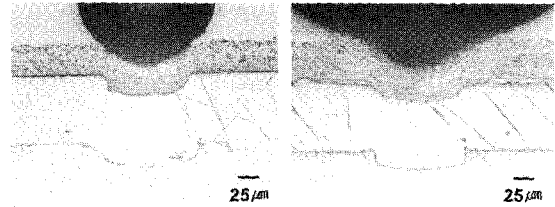


Fig. 9 Schematic and section view of PET single sheet

Fig. 9는 76 μm 두께의 단일 PET에 대해 interrupt-ed test를 수행한 결과이고, Fig. 10은 세라믹 시트의 두께 영향을 보기 위해 동일한 76 μm 두께의 PET 시트에 세라믹을 서로 다른 두께 23 μm 와 45 μm 로 테이프 캐스팅 한 후 펀치의 하층이 감소하기 시작하는 지점에서 펀칭의 진행을 멈춘 후 그 단면을 관찰한 것이다.

그린시트 펀칭에 앞서 Fig. 9와 같이 PET 단일 시트의 펀칭시 PET 소재의 파단 양상을 살펴 보았다. PET 단일시트는 펀칭시 펀치와 다이의 모서리가 소재에 직접 닿게 된다. 따라서 이 모서리를 통해 전단력이 충분히 집중되어 예상과 같이 비교적 깨끗한 홀을 얻을 수 있었다.



(a) $t_c = 23\mu\text{m}$ (b) $t_c = 45\mu\text{m}$

(Penetration depth 50 μm) (Penetration depth 63 μm)
Fig. 10 Section view of green sheet with different ceramic thickness($d = 100\mu\text{m}$, $c = 5\mu\text{m}$, $t_p = 76\mu\text{m}$)

그러나 그린시트의 경우 펀치면 아래 위치한 세라믹 시트로 인해 PET 시트 윗면에는 펀치가 직접 닿지 못하고 세라믹 스크랩이 중간에 놓이게 된다. 또한 Fig. 10에서 보듯이 세라믹 시트의 두께가 커질수록 세라믹 스크랩이 비교적 둥근 형태를 가지게 됨을 확인할 수 있다.

이러한 현상은 펀치와 PET 시트 사이에 형성된 세라믹 스크랩에 의해 PET 시트 윗면에 작용하는 전단력이 감소되고, 동시에 펀치면 아래에 위치한 세라믹의 일부가 펀칭 공정의 진행에 따라 반경방향으로 밀려나서 생긴 것으로 판단된다.

세라믹 시트의 두께가 얇은 경우 Fig. 10(a)와 Fig. 13(a)에서 보듯이 PET 시트 윗면에서 일부 전단의 흔적을 관찰할 수 있었다. 그러나 Fig. 10(b)와 Fig. 13(b)에서 보듯이 세라믹 시트의 두께가 커질 경우 PET 시트의 윗면에서 전단 현상은 나타나지 않았다. 이의 검증을 위해 펀치 깊이에 따른 하층을 측정된 결과 세라믹의 두께가 얇은 경

우(Fig. 11(a))와 두꺼운 경우(Fig. 11(b)) 펀치의 가공 깊이가 각각 50 μm , 63 μm 인 지점에서 하중 감소가 발생한 것을 확인하였다. 이는 세라믹이 두꺼울 경우 펀치가 13 μm 나 더 내려가서 비로소 파단이 시작된다는 것을 의미한다. 따라서 세라믹 시트의 두께가 클수록 펀치와 PET 시트 사이에 놓이는 세라믹 스크랩의 양이 증가하고 형상도 둥글게 되어 펀치가 PET 시트 윗면에 가하는 전단력이 감소하므로 더 많은 변형 후에 파단이 시작되는 것이다.

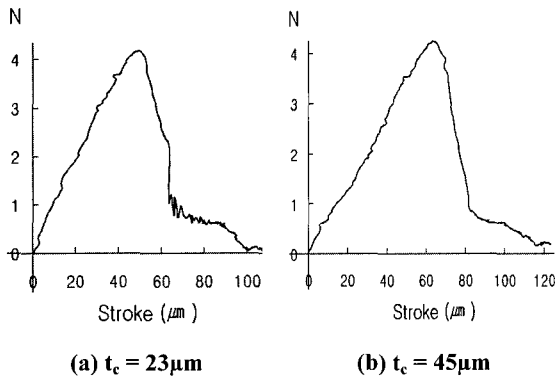


Fig. 11 Load-displacement curve with different ceramic thickness ($t_p=76\mu\text{m}$)

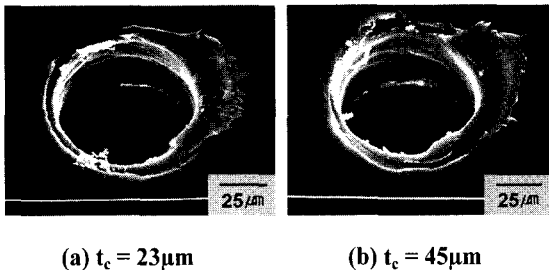


Fig. 12 SEM view of punched hole with different ceramic thickness(lower side view, $d=100\mu\text{m}$, $c = 5\mu\text{m}$, $t_p = 76\mu\text{m}$)

Fig. 12는 펀칭된 홀의 버를 관찰한 것으로 세라믹이 두꺼워 질수록 비교적 큰 버가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이런 현상은 PET시트의 두께가 76 μm 일 때 뿐만 아니라 Table 1의 시트 1, 2와 같이 PET 시트의 두께가 얇은 경우($t_p=38\mu\text{m}$)에서도 나타났다.

결국 세라믹의 두께가 얇아질수록 펀치와 PET 시트 사이에 형성되는 세라믹 스크랩의 양이 작아

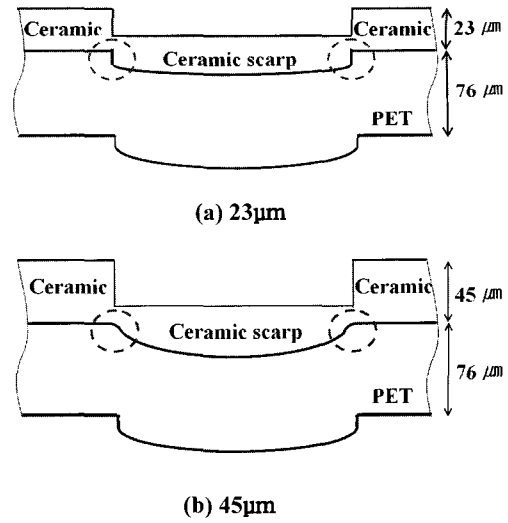


Fig. 13 Schematic view of green sheet with different ceramic thickness

져 Fig. 13(a)에 점선으로 표시한 부분과 같이 PET 시트 윗면에서도 전단 파괴가 일어날 가능성이 커지게 된다.

반면 Fig. 13(b)와 같이 세라믹 시트의 두께가 두꺼워지면 펀치와 PET 시트 사이에 많은 양의 세라믹 스크랩이 형성되어 PET 시트 윗면에 전단력이 충분히 전달되지 못하여 전단파괴가 시작되기 어렵다.

5. 결론

마이크로 펀칭을 이용한 LTCC 기관의 비아홀 가공시 버 생성 최소화 조건을 찾기 위한 연구의 일환으로서 공정 조건을 다르게 하여 펀칭 실험과 interrupted test 를 수행하였다. 가공 단면 관찰이 어려운 세라믹-PET 재료의 특성과 그린시트의 두께를 다양하게 제조하기 어려운 점 때문에 본 연구에서는 양질의 비아홀 가공에 필요한 공정 조건의 영향을 정성적인 면에서 확인하였다.

이상의 펀칭 실험 결과 분석을 통해 일반적인 단일시트의 미세 홀 가공과는 다른 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 간극 대 시트두께 (c/t) 조건은 시트의 총 두께가 $t = t_c + t_p$ 이므로 $c/(t_c + t_p)$ 으로 표현할 수 있으나 강도 차이가 큰 PET의 영향이 크게 작용하였고 세라믹 시트의 두께 영향은 일반적인 경우와 다르게 나타났다. 따라서 간극 대 시트두께 조

건(c/t)은 PET시트만을 고려한 c/t_p 로 공정 조건을 잡는 것이 합당하다.

(2) 그린시트의 비아홀 펀칭 가공 시 발생하는 버의 크기는 세라믹 시트의 두께가 두꺼워질수록 증가하였다. 펀칭시 전단파괴 거동은 펀치 면에 위치하는 세라믹 스크랩의 양과 형상에 따라 달라지기 때문이다. 세라믹 시트의 두께가 얇아지면 PET 시트의 상단부에도 전단력이 집중 되어 비교적 깨끗한 홀을 얻을 수 있게 된다. 하지만 세라믹 시트의 두께가 두꺼워지면 PET 시트 상단에서는 충분한 전단력이 집중되지 못하고 과도한 변형을 수반하며 펀칭이 진행되어 결국 이로 인해 큰 버의 생성을 초래하게 된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업의 도움을 받아 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. Wang, 2002, "Research of LTCC/Cu, Ag multilayer substrate in microelectronic packaging", Materials Science and Engineering B, Vol. 94, pp. 48~53.
- (2) J. H. Yoo, S. H. Rhim, B. Y. Joo, and S. I. Oh, 2003, "A study on shear fracture behavior in shear band during micro hole punching process", Proceedings of the KSTP '03 Spring annual meeting, pp. 230~235.
- (3) S. Y. Shin, S. H. Rhim and S. I. Oh, 2002, "A study on fracture behavior for via hole punching", Proceedings of the KSTP '02 Autumn annual meeting, pp. 207~210.
- (4) K. M. Roessig and J. J. Mason, 1999, "Adiabatic shear localization in the dynamic punch test, part I: experimental investigation", International Journal of Plasticity, Vol. 15, Issue 3, pp. 241~262.
- (5) B. Y. Joo and S. I. Oh, 2001, "Development of micro punching system", Annals of the CIRP Vol. 50/1/200, pp. 191~194.
- (6) M. Li, 2000, "Micromechanisms of deformation and fracture in shearing aluminum alloy sheet", International Journal of Mechanical Sciences Vol. 42, pp. 907~923.
- (7) R. Hambli and F. Guerin, 2003, "Application of a neural network for optimum clearance prediction in sheet metal blanking processes", Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 39, Issue 11, pp. 1039~1052.
- (8) F. Faura, A. Garcia and M. Estrems, 1998, "Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80~81, pp. 121~125.