한국소성가공학회 2003년도 추계학술대회 논문집 pp.101~106

세라믹 그린시트의 미세 비아홀 펀칭 공정 연구

신승용*·주병윤*·임성한**·오수익***

A study on micro punching process of ceramic green sheet

S.Y. Shin, B.Y. Joo, S.H. Rhim 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 ceramic thickness, and tool size. 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, green sheet, burr formation, shear fracture behavior

1. 서 론

최근 IT산업 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. 마이크로 펀칭의 응용예로는 잉크젯 프린트 헤드 노즐 및 전자 회로 LTCC기판 제작 등이 있다.

LTCC(Low temperature co-fired ceramic)[1]는 글라스나 세라믹과 같은 재료를 혼합하며 요구되는 전기적 특성을 고려한 두께로 제작하며, 재료 특성상 비교적 성형 온도 범위가 낮고 도체 저항이 적으며, 인쇄 해상도가 높다. 또한 한번의 성형 공정으로 소성(燒成)이

* 서울대학교 대학원
** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
*** 서울대학교 기계항공공학부

가능하며 유전체의 두께 조절이 용이한 장점을 가지고 있어 antenna switch module, chip duplexer 등 이동통신 단말기용 부품과 MAP sensor, air bag sensor, engine control unit module 등 자동차 전장용 부품 등에 다양하게 응용된다.

LTCC 기판 제작 공정에서 비아 홀 가공은 소성(燒成) 공정 이전에 이루어진다. 이 때 바인더로 묶여 있는 입자상태의 세라믹을 쉽게 다루기 위해, 세라믹을 PET 시트에 테이프 캐스팅(tape casting)하여 사용한다. PET 시트에 세라믹을 캐스팅한 이중 시트(double layer sheet)를 그린시트(green sheet)라 한다. 펀칭 공정과 회로 인쇄 공정 후 각층을 쌓아 회로를 3차원적으로 구성하는 적층 공정이 진행된다. 이 적층 공정에서 PET시트는 제거되고 결국 세라믹과 도체 금속만이 회로에 남게 된다. 따라서 LTCC 기판 제조 공정에 있어 각 층의 회로를 전기적으로 연결하는 직경 80~300㎛의 비아홀 형성이 필요하며 이를 위한 마이크로 펀칭 기술이 중요한 역할을 차지하게 된다.

두께 수㎜ 이상인 금속 소재의 펀칭에서 양질의 홀을 얻기 위해서 주요한 공정 조건으로 간극 대 시트 두께 비(c/t, c: radial clearance, t: sheet thickness)를 사용하며 대개 3~12.5% 정도로 결정한다. 이상의 일반적인 공정 조건은 금속 재료로 된 단일시트 소재의 마이크로 홀 가공에서도 잘 적용되었다.[2] 그러나 이종재료로 구성된 그린시트의 마이크로 펀칭에서는 간극 대 시트 두께 비 조건 만으로는 홀의 품질을 조절할 수 없었으며 다양한 공정조건에 대한 연구가 필요함을 확인하였다.[3]

이에 본 연구에서는 다양한 공정조건 하에서 이종재료로 구성된 그린시트의 마이크로 펀칭 실험을 수행하고 세라믹과 PET시트의 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 기초 자료를 제공할 수 있을 것이다.

2. 실험과정

연구에 사용된 마이크로 펀칭 시스템[4]은 Fig.1 왼쪽에 있는 장비로 high precision linear motion guide system 을 적용하여 수 ㎜ 의 펀치 행정 동안 1㎛ 이하의 직진 정밀도를 가진다. 또한 two-way imaging system을 이용해 반경 방향 1㎛의 간극 위치정렬(tool alignment)이 가능하다.

시편은 Fig.1의 오른쪽에서와 같이 세라믹과 PET로 구성된 그린시트이다. 세라믹은 Al_2O_3, SiO_2, B_2O_3, CaO 등의 혼합물로 소성(燒成)전의 상태로 요구되는 전기적 특성에 따라 다양한 두께로 PET시트에 테이프 캐스팅 된다. 본 연구에서는 펀칭 후 회로 인쇄 등의 후속 공정을 고려하여 PET시트 두께는 76㎛로 고정하고 다른 공정변수를 변화시키며 펀칭 실험을 수행하였다. 그린시트는 세라믹의 제어를 위해 세라믹 부분을 위로 위치하였다.

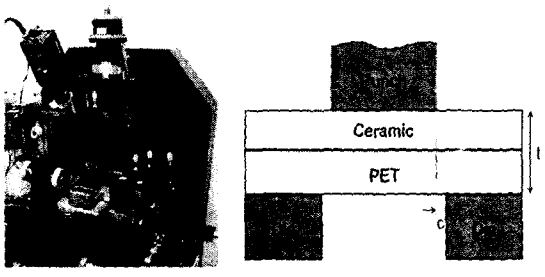


Fig. 1 Micro punching system & schematic view of punching process

일반적인 금속 소재의 마이크로 홀 가공에서는 홀 내면의 균일성과 버의 크기나 형상이 홀의 평가의 기준이 된다. 우선 홀 내면의 균일성에 초점을 맞춘 공정조건을 사용하며 부수적인 버의 발생이 과도할 경우에는 전해연마 또는 기계적 연마 등의 후처리 공정으로 이를 제거하게 된다. 그러나 그린시트 펀칭에서는 세라믹과 PET의 소재 특성상 버를 제거하는 후처리 공정이 거의 불가능하다. 따라서 홀 내면의 균일성과 버의 최소화 이 두 가지 조건을 모두 만족시킬 수 있는 공정 조건의 결정이 필요하다. 이를 위한 기초 연구로 세라믹 두께, 펀치 크기, 간극 이 세 가지 조건을 독립 변수로 하여 펀칭 실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table.1 과 같다.

Table 1 Experimental condition 1

Variable	Ceramic sheet	Punch diameter	Clearance
	37~150㎛	200~300㎛	5~10㎛

공정 중 세라믹과 PET 두 소재의 상호작용을 관찰하고 이것이 전단파괴 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해, 세라믹-PET의 이중 그린시트와 PET만으로 된 단일시트 이 두 가지 경우에 대해 interrupted test[5]를 수행

하였다. 실험 조건은 Table.2와 같다.

Table 2 Experimental condition 2

Ceramic sheet	PET sheet	Punch diameter	Clearance
45㎛	76㎛	100㎛	5㎛

관찰점의 위치는 하중-변위 곡선(load-displacement curve)을 근거로 결정 하였다. 그린 시트의 경우 가공 깊이 23㎛(G-I), 45㎛(G-II), 60㎛(G-III), 75㎛(G-IV)인 지점을 선정하였고, PET 단일 시트의 경우 10㎛(P-I), 20㎛(P-II), 40㎛(P-III), 60㎛(P-IV), 70㎛(P-V)인 지점을 선택 하였다. 이때의 하중-변위 곡선은 Fig. 2 와 같다.

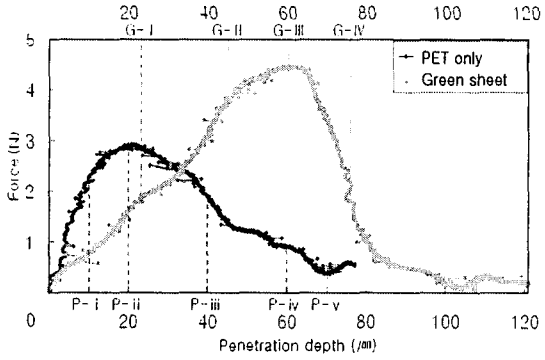


Fig. 2 Load-Displacement curve

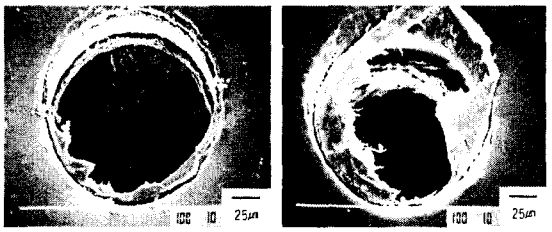
가공된 홀의 측정을 위해 본 연구에서는 Sectioning 방법과 Silicon rubber replica(Repliset-F5, Struers. Co)를 사용하였다. Silicon rubber는 유체 상태로 홀의 내부에 충전되고 시간이 지나 굳은 후 떼어내게 된다. Interrupted test의 결과물은 Sectioning 방법으로 시편을 만들었으며 홀 내부 벽면은 Silicon rubber replica를 사용하여 시편을 만든 후 각각 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 그린시트 펀칭 실험에서 발생하는 버는 금속 소재에서 얻어지는 일반적인 버와 달라 정량적인 측정이 어렵다. 따라서 그린시트 하단부의 버의 특징적인 형상만 주사전자현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

공정조건에 따른 펀칭 실험과 interrupted test의 결과를 분석하여 그린시트의 비아홀 펀칭 가공 시 발생하는 버와 공정변수와의 관련성을 밝히고, 그린시트의 전단파괴거동을 고찰 하였다.

3.1 공정변수와 버 형성 관계

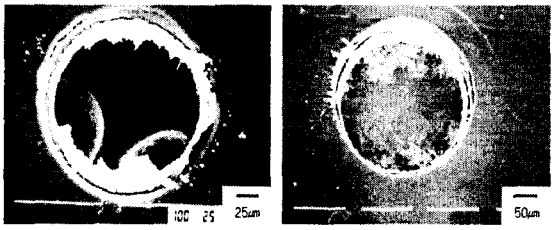
세라믹 시트 두께를 변수로 실험한 결과 Fig.3과 같이 세라믹 시트의 두께가 증가할수록 버의 크기는 증가 하였다.



(a) 37㎛ (b) 150㎛

Fig. 3 SEM view of punched via holes(lower side view) with different ceramic sheet thickness (punch-to-die clearance 10㎛, punch diameter 150㎛)

이러한 결과는 PET의 전단 파괴가 세라믹 시트의 두께와 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 대개 단일 시트 펀칭의 경우 시트의 상·하 양쪽에서 전단파괴 현상이 나타지만 이종 그린시트의 경우 이와 다른 파괴거동을 보이는데 이는 PET 윗면에 위치한 세라믹의 영향 때문이다.

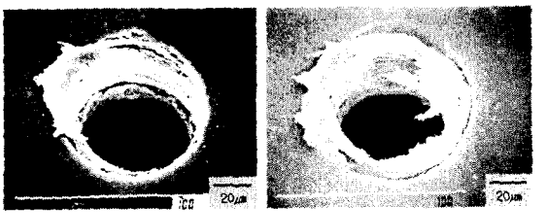


(a) 200㎛ (b) 300㎛

Fig. 4 SEM view of punched via holes(lower side view) with different punch diameters (ceramic thickness 150㎛, punch-to-die clearance 10㎛)

펀치 크기를 변수로 실험한 결과 간극(clearance)의 절대량이 동일함에도 펀치의 크기가 작아질수록 버의 크기는 증가하였다. 이는 펀치의 크기가 작아질수록 상대간극과 l/d ratio의 증가를 가져오기 때문이다.

Fig. 5는 세라믹 45㎛, PET 76㎛인 그린시트에 80㎛



(a) c/t : 4.1% (b) c/t : 8.2%

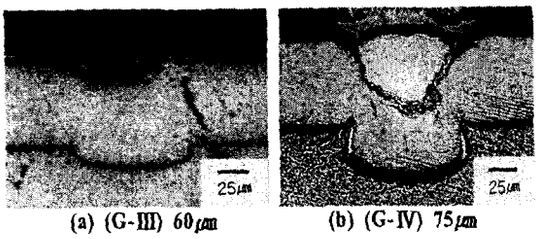
Fig. 5 SEM view of via holes (lower side view) with different clearances (ceramic thickness 45㎛, punch diameter 80㎛)

직경의 펀치로 펀칭 실험한 것으로 간극 변화시(5~10 ㎛) 버의 형상을 관찰한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 간극이 증가할수록 버의 크기가 커짐을 알 수 있다. 이는 펀칭 공정에서 펀치와 다이의 간극이 커지면 전단력이 소재에 집중적으로 전달되지 못해 전단파괴 거동이 제대로 일어나지 않기 때문이다.

이종 그린시트 펀칭에서 위의 세 가지 공정조건에 따른 실험 중 특이한 것은 세라믹 시트의 두께가 두꺼워질수록 버의 크기가 증가한다는 것이다. 이에 대한 연구를 위해 Interrupted test를 수행하여 전단거동을 살펴보았다.

3.2 그린시트 펀칭시 전단 거동

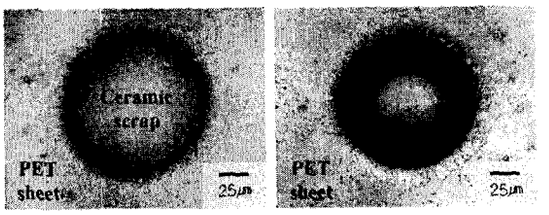
펀칭 공정 중 그린시트의 전단거동을 관찰하기 위해 Interrupted test를 수행하였다. 비교 관찰을 위해 세라믹-PET로 구성된 이중 그린시트와 PET단일시트 각각에 대해 실험한 후 결과들을 정리하였다.



(a) (G-III) 60㎛ (b) (G-IV) 75㎛

Fig. 6 Section view of green sheet punching

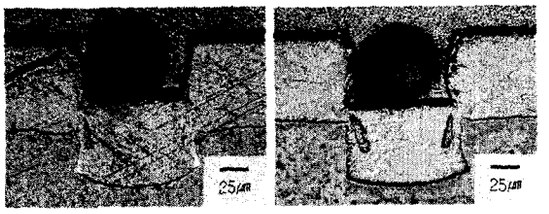
먼저 Fig. 6은 그린시트에 대한 결과이다. 가공 깊이가 G-III일 때 Fig. 6 (a)와 같이 PET의 상단부에서는 펀치와 세라믹스크랩의 하방운동에 의해 소재가 압축된 현상만 나타나고 전단파괴 현상은 아직 나타나지 않는다.(Fig.7) 반면, PET 하단부에서는 다이와의 접촉면에서 전단파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다.



(a) ceramic scrap stuck in PET (b) ceramic scrap removal (by ultrasonic cleaning)

Fig. 7 PET upper side (penetration depth 60㎛)

이어 공정을 더 진행하게 되면 PET의 전단 파괴가 본격적으로 발생하게 된다. G-IV의 경우 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 PET시트의 하단부에서는 전단파괴가 상당히 진행된 반면 상단부에서는 여전히 전단파괴 거동은 관찰되지 않는다.



(a) (P-IV) 60㎛ (b) (P-V) 70㎛

Fig. 8 Section view of PET single sheet punching

하지만, PET 단일시트 펀칭 실험에서는 그린시트의 펀칭 결과와 달리, Fig.8에 보이는 바와 같이 금속 소재의 단일시트 펀칭 결과와 유사하게 시트의 윗부분과 아랫부분 전 영역에 걸쳐 전단파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다.

위의 두 실험 결과에서 전단 파괴 거동이 상이하게 나온 이유는 세라믹 소재의 영향 때문이다. 즉 그린시트의 경우 펀치의 압축력에 의해 치밀화 된 세라믹이 펀치면

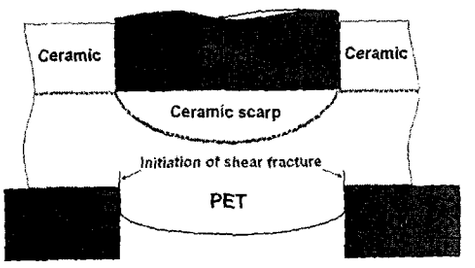
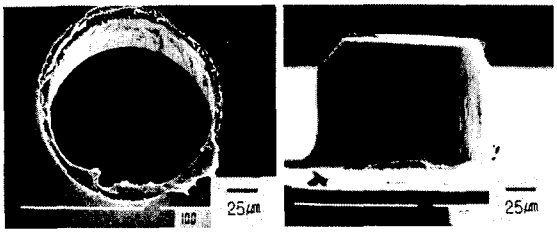


Fig. 9 Schematic view of shear fracture process

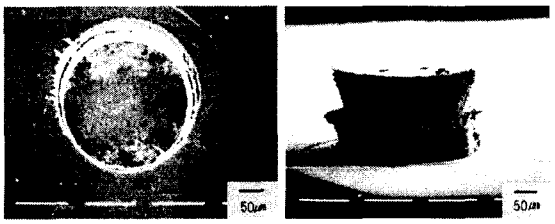
에 붙어 Fig. 9와 같이 PET시트의 윗면에 마치 펀치처럼 작용하기 때문이다. 이 둥근 형상의 세라믹 스크랩으로 인해 펀치의 모서리는 직접 PET시트 윗면에 닿기 힘들어 지고 이로 인해 전단력이 충분히 집중되지 못하게 된다. 따라서 PET시트의 윗부분은 과도한 변형 하에 펀칭이 진행되게 된다.



(a) Original hole image (b) Replicated hole image

Fig. 10 PET single sheet punching (punch-to-die clearance 10㎛, punch diameter 150㎛)

그린시트와 PET 단일시트의 펀칭 결과는 홀 내부에 Silicon rubber replica를 충전하여 얻은 3차원 이미지를 통해 확인할 수 있다. Fig.10은 PET 단일시트의 펀칭 결과로 비교적 매끄러운 전단 가공면을 확인할 수 있으며 직경의 변화도 거의 없다.



(a) Original hole image (b) Replicated hole image

Fig. 11 Ceramic and PET green sheet punching (punch-to-die clearance 10㎛, punch diameter 300㎛)

반면 그린시트의 경우 상층 세라믹 영역의 홀 내부 직경이 펀치 진행 방향에 따라 작아지는 것을 Fig. 11(b)에서 확인할 수 있다.

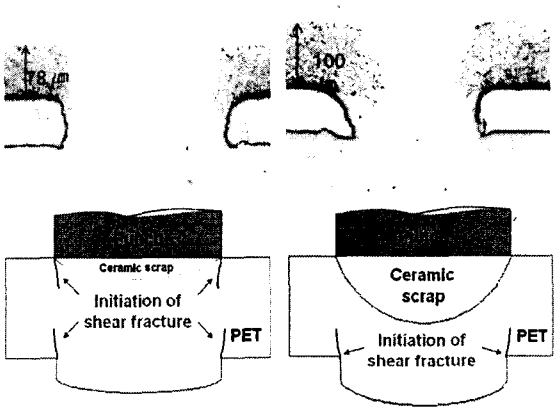
4. 결론

펀칭 공정을 이용한 LTCC 비아홀 가공에서 균일한 내면과 버 최소화 조건을 찾기 위한 연구로서 다양한 공정 조건에 따른 펀칭 실험과 interrupted test를 수행하였다. 실험결과 분석을 통해 일반적인 홀 가공이나 금속 소재 단일 시트의 마이크로 펀칭과는 다른 결론을 얻을 수 있었다.

그린시트의 비아홀 펀칭 가공 시 발생하는 버의 크기는 세라믹 시트의 두께가 두꺼워질수록 증가하였다. 또한, 펀치 크기가 작아질수록 그리고 간극이 커질수록 버의 크기는 증가하였다.

펀칭시 전단파괴 거동은 펀치면에 위치하는 세라믹 스크랩의 양과 형상에 따라 달라졌다. 세라믹 시트의 두께가 얇아지면 Fig. 12(a)처럼 PET시트의 상단부에서도 전단력의 집중이 커지게 되어 비교적 깨끗한 홀을 얻을 수 있게 되었으나, 세라믹 시트의 두께가 두꺼워지면 PET시트 상단에서는 충분한 전단력이 집중되지 못하고 과도한 변형을 수반하며 펀칭이 진행되어 결국 이로 인해 큰 버의 생성을 초래하였다.

추후 연구에서 추가적인 실험과 세라믹, PET 두 소재의 물성에 대한 연구를 체계적으로 수행하고, 그린시트의 펀칭시 소재의 전단거동을 모델링하고 버의 생성을 정량화 한다면 LTCC 기판의 제품 특성을 향상시키고 불량률을 낮추기 위한 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.



(a) Ceramic 78㎛ (b) Ceramic 100㎛

Fig. 12 shear fracture behavior with different ceramic thickness (punch-to-die clearance 10㎛, punch diameter 300㎛)

후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대 신기술 개발 사업으로 진행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Y. Wang, 2002, "Research of LTCC/Cu, Ag multilayer substrate in microelectronic packaging", Materials Sciense 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) 신승용, 임성한, 오수익, 2002, "비아홀 펀칭 가공시 전단 파괴 거동 연구", 한국소성가공학회 2002년도 추계학술대회, pp. 207~210.

(4) B. Y. Joo and S.I. Oh, 2001, "Development of micro punching system", Annals of the CIRP Vol 50/1/200, pp. 191~194.

(5) M. Li, 2000, "Micromechanisms of deformation and fracture in shearing aluminum alloy sheet", International Journal of Mechanical Sciences Vol 42, pp. 907~923.