

LTCC 기판의 미세 비아홀 펀칭 중 공정 변수의 영향 평가

백승욱* · 임성한* · 오수익* · 윤성만** · 이상목*** · 김승수***

Evaluation of punching process variables influencing micro via-hole quality of LTCC green sheet

S. W. Baek, S. H. Rhim, S. I. Oh, S. M. Yoon, S. Lee, S. S. Kim

Abstract

LTCC(Low temperature co-fired ceramic) is being recognized as a significant packaging material of electrical devices for the advantages such as relatively low temperature being needed for process, low conductor resistance and high printing resolution. In the process of LTCC electrical devices, the punched via-hole quality is one of the most important factors on the performance of the device. However, its mechanism is very complicated and optimization of the process seems difficult. In this paper, to clarify the process, via-hole punching experiments were carried out and the punched holes were examined in terms of their burr formation. The effects of thickness of PET sheet and ceramic sheet and punch-to-die clearance on via-hole quality were also discussed. Optimum process conditions are proposed and a factor κ is introduced to express effect of the process variables.

Key Words : LTCC(Low temperature co-fired ceramic), green sheet, PET(Polyethylene Terephthalate), ceramic, relative clearance, relative thickness

1. 서론

이동 통신을 포함한 여러 산업 분야에서 생산되는 전기·전자 제품을 소형화하고 방열 특성 등을 향상시키기 위한 하나의 방안으로 각종 센서 모듈 제작에 사용되는 기존의 PCB 기판 대신 LTCC (Low temperature co-fired ceramic)기판^[1]을 사용하는 연구와 노력이 많이 시도되고 있다. 하나의 기판에 수평적으로 전기회로를 연결하는 PCB 기판 방식에 비해 여러 층의 LTCC 기판에 수직적인 회로 구성을 하여 3 차원적으로 모듈을 제작함으로써 집적도를 높이고 부품의 크기를 최소화하고 있다. 특히 LTCC 는 글라스나 세라믹과 같은

재료를 바인더와 혼합하여 가공하므로 기존의 세라믹 기판보다 성형 온도 범위가 낮고 도체 저항이 작으며, 인쇄 해상도가 높은 장점을 가진다.

이러한 LTCC 공정의 특성 상 기판의 층간 회로 연결을 위해 은(Ag) 등의 도체 금속으로 채워지는 비아홀(via-hole)을 가공하는 것은 각 기판을 적층하는 공정과 더불어 매우 중요하다. 비아홀 가공을 위한 펀칭 공정은 세라믹의 소성(sintering) 전에 이루어지므로 재료의 손상 방지와 용이한 취급을 위해 세라믹을 PET 시트 위에 테이프 캐스팅하여 사용한다. 이와 같이 세라믹과 PET 의 두가지 재료로 구성된 이중시트를 그린시트(green sheet)라고 한다.

펀칭 가공된 홀의 품질은 홀 내부 단면의 직진도 등의 형상과 버 생성 정도에 의해 결정된다. 특히 기판간 전기회로 연결 역할을 하는 비아홀

* 서울대학교 기계항공공학부

** ㈜아이엘텍

*** 한국생산기술연구원

가공의 경우 발생한 버는 세라믹과 PET 의 분리 작업중 홀 내부의 충전물(은)도 같이 제거되는 불량률을 초래하므로 버 생성에 미치는 공정 변수의 영향을 평가하여 이를 최소화하는 연구가 필요하다.

이전 연구^[2]를 통해, 변형 거동이 서로 다른 두 재료의 이중 시트(이하 그린시트라 함)의 펀칭이 금속 단일 재료의 펀칭 공정과는 전단 변형 기구가 다르고 이에 따라 가공된 홀의 품질에 미치는 공정변수의 영향도 많이 다름을 확인했다. 따라서 일반적인 금속 단일 시트의 펀칭 연구에서 공정변수로 거의 유일하게 사용하는 공구 간극(punch-to-die clearance)외에 펀치 직경 대비 공구 간극, 각 재료의 두께 등이 비아홀 품질에 미치는 영향 등도 평가하고 이를 정량화하는 작업이 매우 중요하다. 그러나 금속 재료와는 달리 세라믹과 PET 의 특성 상 버 크기 측정과 내부 단면 관찰이 매우 어려우므로, 본 연구에서는 공정 변수를 달리하여 여러번의 펀칭 실험을 수행한 후 공정 중 측정된 펀치의 하중-변위 곡선 양상과 최대 하중의 크기, PET 버의 관찰을 통해 각 공정 변수가 비아홀의 품질에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 또한 도출된 결과를 이용하여 여러 공정 변수를 하나의 공정 평가 상수로 표현할 수 있는 방안을 제시하고 이의 타당성을 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

미세 비아홀 펀칭 실험은 양안영상획득 장치(two-way image acquisition module)^[3]를 장착한 미세 펀칭 시스템^[4]을 사용하여 이루어졌다. 또한 펀칭 공정시 하중과 변위 데이터를 획득하기 위해 NI(National Instrument)사의 DAQ(Data Acquisition)장비를 사용한 측정 시스템을 제작하여 사용했다. 펀칭 공구로는 무심연마(centerless grinding) 방법으로 가공된 텅스텐 카바이드(tungsten carbide) 펀치와 방전가공으로 가공된 텅스텐 카바이드 다이를 사용했다.

시편은 Al_2O_3 , SiO_2 , B_2O_3 와 바인더의 혼합으로 구성된 소성 이전의 세라믹과 PET(Polyethylene Terephthalate)가 사용되었다.

실험에 사용된 펀치의 직경은 100 μm , 150 μm , 200 μm 의 세 가지이며 펀치와 다이의 공구간극(c:

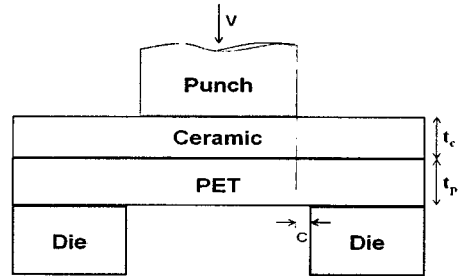


Fig. 1 Schematic diagram of Punching process

radial clearance)은 각각의 펀치 직경에 대해 동일하게 5 μm 가 되도록 하였다. PET 시트는 두께 38 μm 와 75 μm 의 두 가지를 사용했으며 세라믹 시트는 주어진 PET 시트에 대해 각각 40 μm , 60 μm , 80 μm , 100 μm 의 네가지 두께의 시편을 사용했다.

각 실험에 대해 하중-변위 곡선을 얻었으며 버의 관찰을 위해 PET 시편 표면을 금으로 코팅한 후 SEM(Scanning Electron Microscope) 관찰을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 세라믹 시트 두께에 따른 영향

세라믹 시트 두께의 영향을 살피기 위해 펀치 직경과 PET 두께, 그리고 공구간극을 일정하게 한 다음 세라믹 시트의 두께를 40, 60, 80, 100 μm 로 변화시켜 펀칭 실험을 수행하였다.

Fig.2 는 PET 의 두께가 38 μm 로 일정하고 세라믹 두께를 변화시킨 그린시트를 100 μm 직경의 펀치로 가공하였을 때의 펀치의 하중-변위 곡선을 보여준다. 세라믹 두께의 증가에도 펀치에 걸리는 최대 하중의 크기는 변화가 없다. 이는 그린시트의 세라믹이 소결 처리 전의 알루미늄 입자 등을 바인더(chemical binder)로 느슨하게 결합한 상태로 가공되어 펀칭 하중에 영향을 거의 주지 않았기 때문이다. 다만 이전 연구 결과^[2]와 마찬가지로 세라믹의 두께가 증가하면 공정 중 펀치 하단부에 형성되는 세라믹 스크랩(scrap)의 양이 커지고 형상도 쪼개 형태가 되어 펀치에 의한 PET 의 전단이 지연되는 현상이 나타났다. Fig.3 은 PET 하단부에서 SEM 을 이용해 홀 형상을 관찰한 결과로 상기 공정 조건에서 큰 버는 발생하지 않았음을 보여준다.

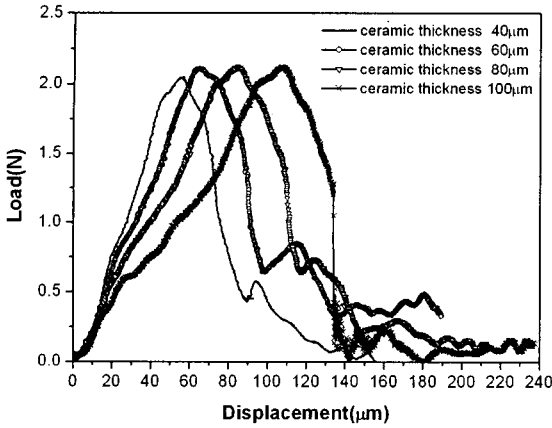


Fig. 2 Load-displacement curve (punch diameter: 100 μm , PET: 38 μm , clearance: 5 μm)

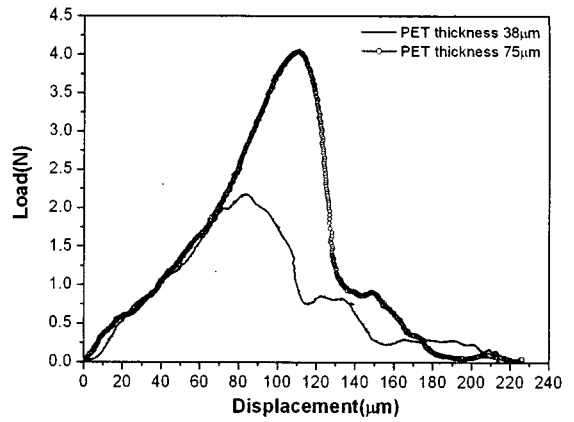


Fig. 4 Load-Displacement curve (punch diameter: 100 μm , ceramic: 80 μm , clearance: 5 μm)

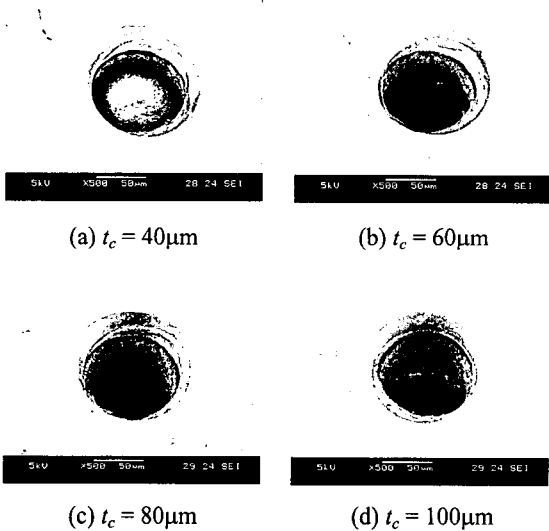


Fig. 3 SEM view of punched hole with different ceramic thickness with punch diameter of 100 μm , PET thickness of 38 μm and clearance of 5 μm

3.2 PET 시트 두께에 따른 영향

PET 시트 두께의 영향을 살피기 위해 펀치직경과 세라믹 두께, 그리고 공구간극을 일정하게 하고 PET 시트의 두께를 38, 75 μm 로 바꾸어 가며 펀칭 공정을 수행하였다.

하중-변위 곡선(Fig.4)으로부터 PET 의 두께 증가로 최대 하중이 크게 증가한 것을 확인할 수 있으며, 이는 실제 전단 파괴로 인한 펀치 하중

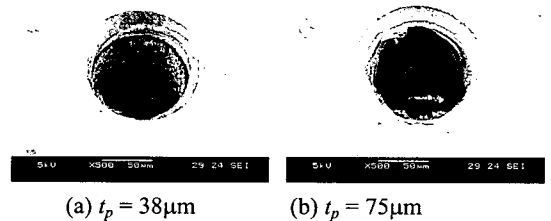


Fig. 5 SEM view of punched hole with different PET thickness with punch diameter of 100 μm , PET thickness of 38 μm and clearance of 5 μm

발생이 세라믹시트가 아닌 PET 시트에서만 발생했기 때문으로 판단된다. PET 두께가 38 μm 인 경우 최대 하중은 펀치가 세라믹시트를 관통한 후 PET 시트 상단부에 도달했을 때 발생했으나, PET 두께가 75 μm 인 경우에는 최대 하중이 PET 시트 상단부에서 30 μm 지점에서 펀치에 부딪힌 것을 확인할 수 있다. 이는 PET 의 두께가 클수록 펀치 하단부에 생성된 썩기 형태의 세라믹 스크랩(scrap)의 영향이 커져 PET 시트에 펀치의 전단력이 정확히 전달되지 않고 펀치와 다이의 간격이 좁혀진 후에 비로소 인장력에 의해 PET 시트가 파괴되었기 때문이며, 이는 이전 연구^[2]에서도 확인되고 있다. 따라서 PET 의 두께 증가로 인해 그린시트의 전단 파괴 거동이 달라지는 현상을 확인할 수 있다. 관찰된 홀 형상에서도 이를 확인할 수 있다. Fig.5(b)에서 보듯이 PET 두께가 큰 경우 상

대적으로 PET 두께가 작은 경우(Fig.5(a))보다 버의 형상이 톱니 형태에 가까운 것을 확인할 수 있으며 이는 전단보다는 인장에 의해 PET 시트에 인열(tearing)에 가까운 파괴가 일어났기 때문이다.

상기 실험 결과에서는 버의 크기가 비교적 크지 않았으나 아직 세라믹과 PET의 분리 작업 중 잘못 제거되는 비아홀 내부의 충전물(은)의 양과 버 크기에 관한 연구 결과가 없어 홀 품질의 좋고 나쁨을 판단하기는 쉽지 않다.

3.3 펀치직경(상대간극)에 따른 영향

공구간극(c)을 $5\mu\text{m}$ 로 일정하게 하고 펀치 직경의 크기만 다르게 하여 펀칭 실험을 수행한 결과 펀치 직경이 큰 경우에 작은 직경의 펀치를 사용한 경우보다 상대적으로 좋은 품질의 홀을 얻을 수 있었으나 (Fig.7), 이는 주어진 공구 간극이 일정하여 실제 펀치의 크기에 따른 상대간극을 계산하였을 경우 펀치 직경이 큰 경우가 상대간극 값이 더 작았기 때문이다. 따라서 펀치직경 대비 간극의 크기인 상대간극($c_r = c/d$)을 사용하는 것이 타당하다. 다시 계산된 상대간극은 Table 1과 같다.

Table 1 Relative clearance for different punches with constant clearance of $5\mu\text{m}$

Punch diameter (μm)	Relative clearance $c_r \times 100$ (%)
100	5.0
150	3.3
200	2.5

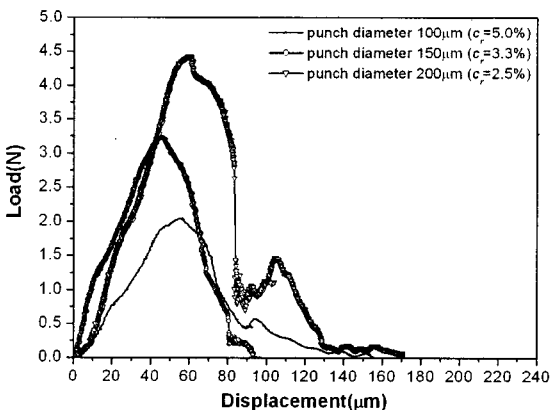


Fig. 6 Load-Displacement curve (PET: $38\mu\text{m}$, ceramic: $80\mu\text{m}$, clearance: $5\mu\text{m}$)

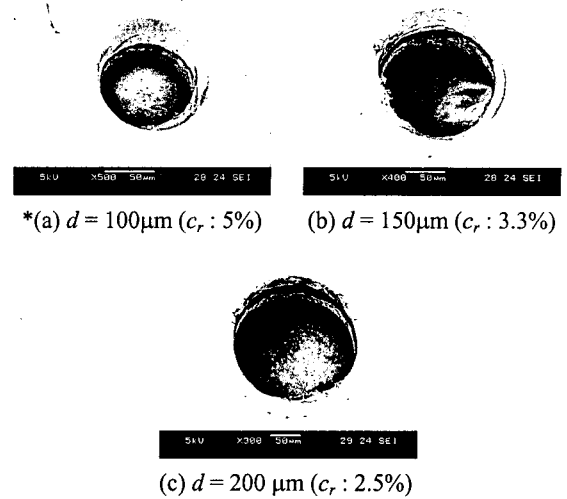


Fig. 7 SEM view of punched hole with different relative clearance (PET: $38\mu\text{m}$, ceramic: $40\mu\text{m}$, clearance: $5\mu\text{m}$)

상대간극이 작아짐에 따라 펀치로부터 PET 시트에 전단력이 잘 전달되어 전단 파괴가 보다 용이하게 일어나게 된다. 하지만 상대간극의 크기는 펀치와 다이의 고정도 정렬 문제와 펀치의 마모 문제로 인해 제한된다. 일반적인 금속 재료의 펀칭에서 간극의 크기는 펀치직경에 대해 5% 내외가 적당한 것으로 알려져 있다.

하지만 그린시트의 펀칭의 경우 상대간극이 5%인 경우(Fig.7 (a))에도 버가 비교적 많이 발생하는 것으로 보아 Fig.7(b)와 (c)에서 처럼 더 작은 상대간극으로 펀칭을 할 필요가 있다. 다만 펀치와 다이의 정렬 문제 때문에 상대간극을 너무 작게 하는 것은 쉽지 않다.

3.4 홀품질 유지를 위한 공정조건 도출

지금까지 세라믹 시트의 두께, PET 시트의 두께, 상대간극과 같은 공정 변수가 비아홀 펀칭 공정에 어떠한 영향을 주는가에 대한 개별적인 분석을 하였다. 그러나 실제 펀칭 공정에서는 모든 공정 변수가 유기적인 영향을 주므로, 가능하다면 모든 변수들을 포함하는 하나의 인자를 정의하여 이 값에 따른 펀칭 결과를 정리하고 이를 공정 최적화의 단서로 제공하는 것도 의미있다고 여겨진다.

일반적인 금속 재료의 펀칭에서 간극과 시트의 두께와의 상관 관계가 중요하듯이^[5] 이종재료의

이중시트로 이루어진 비아홀 펀칭의 경우에도 상대간극과 각 재료의 두께의 관계가 중요하리라 판단된다. 이에 본 연구에서는 여러 가지 조건의 펀칭 실험 결과를 바탕으로 버의 크기가 적게 나오는 조건들을 조합하여 이의 경향을 반영할 수 있는 경험 상수(κ)를 도입하였다.

$$\kappa = \frac{c_r}{t_r} = \frac{c/d}{t_c/t_p}$$

여기서 d 는 펀치직경, c 는 간극, t_c 와 t_p 는 각각 세라믹과 PET의 두께를 나타낸다.

본 연구에서 얻은 실험 결과들에 경험 상수식을 적용하여 계산한 결과, κ 값은 대략 0.010 ~ 0.094 사이의 값을 가졌다. Fig.8에서 보듯이 κ 값이 0.030 보다 작은 경우 비교적 좋은 품질의 홀을 얻을 수 있었다. 반면 0.030 이상에서는 다소 크게 버가 발생했다. 비록 실험 개체수와 역학적 설명이 부족하지만, 그린시트의 비아홀 펀칭 공정을 설계할 때 공구간극과 펀치직경을 고려한 상대간극, PET 두께와 세라믹 두께를 고려한 상대두께를 이용해 경험상수 κ 값을 도입하여 양질의 홀 품질을 얻을 수 있는 적정 공정 조건의 범위를 얻는 것이 타당하다는 것을 확인하였다.

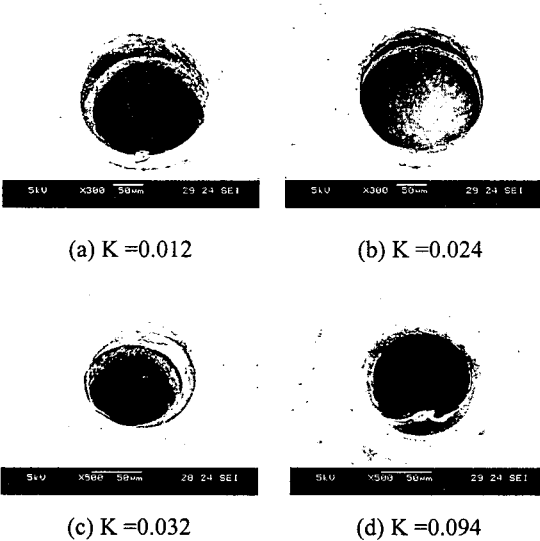


Fig. 8 SEM view of punched hole with different κ 's

4. 결론

그린시트의 비아홀 펀칭에서 세라믹 두께, PET

두께 그리고 펀치직경에 따른 상대간극이 버의 발생과 홀의 품질에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 관찰했다. 세라믹 두께는 PET 시트의 크기와 함께 그린시트의 전단 변형에 영향을 주고 PET 두께는 펀치의 최대 하중 크기와 관련 있음을 확인했다. 금속 단일 재료의 일반적인 펀칭에서 사용되는 공구간극 혹은 상대간극 5%를 비아홀 펀칭에 적용한 경우 양질의 홀 품질을 얻을 수 있음도 확인했다. 상대간극이 2.5%~3.5%일 때 비교적 양질의 홀을 얻을 수 있었다.

끝으로 주요한 인자들의 상관관계를 경험상수(κ)로 정의하여 홀의 품질과 관련시키는 방법을 제안하였다. LTCC로 제작된 기판 한 층의 두께가 40~100 μm 인 경우에 대해 κ 값이 0.030 이하인 공정 조건에서 비교적 버가 적은 홀을 얻을 수 있음을 실험적으로 관찰하였다.

경험상수에 의해 공정 조건을 개선하는 방법을 일반적인 공정 상태에 대해 적용하기 위해서는 더 많은 경우의 실험과 비아홀 펀칭 기구에 대한 연구가 더 필요하리라 판단된다.

후 기

본 연구에 도움을 주신 한국생산기술연구원 주관의 Milli-Structure 사업단 관계자 여러분들께 감사드립니다.

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) S.Y. Shin, S.H. Rhim, B.Y. Joo and S.I. Oh, 2004, "Thickness effect of double layered sheet on burr formation during micro via-hole punching process", Trans. Materials Processing, Vol.13, pp.65-71.
- (3) B. Y. Joo, S. H. Rhim, S. I. Oh, 2004, "Design of two-way image acquisition system for 25 μm tool alignment in the micro hole punching", Trans. Materials Processing, Vol 13.
- (4) B.Y. Joo and S.I. Oh, 2001, "Development of micro punching system", Annals of the CIRP Vol.50, pp. 191~194.

- (5) 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.