

## Taper phenomenon of UV-laser punching process on zero-shrinkage substrate

Ik-Jun Ahn, Dong-Hun Yeo<sup>\*,†</sup>, Hyo-Soon Shin<sup>\*</sup> and Kwang Bo Shim

Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

<sup>\*</sup>Korea Institute of Ceramics Engineering and Technology, Icheon 17303, Korea

(Received November 9, 2015)

(Revised November 20, 2015)

(Accepted November 30, 2015)

**Abstract** With the miniaturization with both high functionality and high integrity of the probe cards, the highly precise laser punching on the zero-shrinkage high strength substrate has attracted more attention recently. Taper occurrence during laser-punching on green sheets appears as a problem in process. The size (diameter) difference between the entrance hole and the exit hole in tapered holes appeared to be inversely proportional to the hole size itself. To suppress taper occurrence, two-stage punching was adopted as the size of second hole was varied from 70  $\mu\text{m}$  to 79  $\mu\text{m}$  when punching 80  $\mu\text{m}$  via holes on the substrate with thickness of 380  $\mu\text{m}$ . The minimal taper ratio of 11.9 % appeared with second hole size between 70 to 79  $\mu\text{m}$  before sintering. Taper ratio reduced to 7 % after zero-shrinkage sintering. The size difference between first hole and second hole appeared minimal when the size of second hole was 95~97 % to that of first hole.

**Key words** UV-Laser, Taper, First hole, Second hole, Zero-shrinkage

## 무수축 기판 상에 UV 레이저 가공에 의한 Taper 현상

안익준, 여동훈<sup>\*,†</sup>, 신효순<sup>\*</sup>, 심광보

한양대학교, 신소재공학부, 서울, 04763

<sup>\*</sup>한국세라믹기술원 이천분원, 엔지니어링세라믹센터, 이천, 17303

(2015년 11월 9일 접수)

(2015년 11월 20일 심사완료)

(2015년 11월 30일 게재확정)

**요약** 프로브카드의 소형화, 고기능화, 고집화에 따라 고강도 무수축 기판에 레이저 가공 공정을 이용한 미세 홀 천공에 대한 관심이 높아지고 있다. 그린 상태에서 레이저 펀처로 미세 홀을 천공 시 테이퍼 현상이 중요한 공정 문제가 되고 있다. Entrance hole과 exit hole의 크기 차이는 홀 크기가 작을수록 커지고, 홀 크기가 커질수록 작아지는 경향을 나타내었다. 테이퍼 현상을 개선하기 위해 second hole 가공 공정을 적용하였다. 기판의 두께가 380  $\mu\text{m}$ 인 기판 상에 80  $\mu\text{m}$  홀 천공 시 최적의 second hole 크기를 찾기 위해 70~79  $\mu\text{m}$  홀을 천공하였을 경우 76  $\mu\text{m}$ 와 77  $\mu\text{m}$ 에서 테이퍼는 11.9 %로 가장 낮게 나타났다. 천공된 무수축 기판을 소결한 후에는 테이퍼가 7 %로 개선되었다. First hole 크기와 비교하였을 때 second hole 크기는 first hole 크기의 약 95~97 % 일 때 테이퍼가 가장 적었다.

### 1. 서론

전자부품 및 모듈의 집적도가 높아질수록 회로를 연결하는 패턴은 미세해지고 홀 크기는 작아지게 된다[1, 2] 반도체 칩 검사용으로 사용되는 수직형 프로브카드(probe card)에 적용되는 가이드 기판은 단위면적당 고밀도의 수십  $\mu\text{m}$  미세 홀을 정밀하게 천공하여야 하는 제품이며

주로 가공성이 우수한 소결체 세라믹 소재가 적용되고 있다. 그러나 두께가 얇고 많은 미세한 홀이 정밀하게 천공되어야 하므로 소결후 가공은 많은 시간과 경비를 필요로 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 그린 상태의 세라믹 시트(sheet)를 가공하여 소결하는 방법으로 공정을 개선하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

현재까지 그린시트의 가공은 기계적 가공과 레이저 가공 공정이 적용되고 있는데, 기계적 가공의 경우, 그린시트에 초경 소재의 펀칭 핀(punching pin)을 이용하여 기계적인 방법으로 비아 홀(via hole)이나 가이드 홀(guide hole) 가공을 진행하는 것이다. 그러나 기계적 가공 방법

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-31-645-1301

Fax: +82-31-645-1311

E-mail: ydh7@kicet.re.kr

은 80  $\mu\text{m}$ 보다 작은 홀은 가공이 불가능한 단점이 있다. 그러므로 최근 수직형 브로브카드의 홀 크기가 점점 작아지고 있어 레이저 가공 공정을 적용하는 사례가 증가하고 있다[3]. 또한 고집적화에 따른 소결 후 홀의 위치 정밀도를 확보하기 위해 수평의 수축율을 영의 값으로 구현이 가능한 고강도 무수축 기관 기술[4, 5]에 대한 관심이 높아지고 있다.

레이저로 미세 홀을 가공하는 경우 기관 상부 홀(entrance hole) 크기에 비해 하부 홀(exit hole) 크기가 줄어드는 테이퍼(taper) 현상이 필수적으로 발생한다. 이러한 현상은 순간적인 높은 레이저 열에너지를 이용하여 시트 상에 가공하는 홀 부분을 증발 및 기화시켜 홀을 천공하는 과정에서 발생한다[6, 7] 시트의 윗면에서 아래부분으로 갈수록 레이저 열에너지가 침투되는 양이 줄어들기 때문에 발생하며, 시트가 두꺼울수록 시트 윗면 홀 크기와 아랫면 홀 크기 차이가 커지게 된다. 시트의 소재 특성이나 시트의 두께에 따라 테이퍼 현상이 차이가 있으며, 열전도도가 높은 재료일수록 천공되어야 할 원래의 크기보다 더 크게 홀이 천공된다[8, 9].

본 연구에서는 anorthite 결정화 유리(glass-ceramics)와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말을 혼합 사용하여 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 그린시트를 제조한 후 알루미늄 그린시트와 교대 적층하여 무수축 기관을 제작하였다. 제조된 무수축 기관 상에 UV-레이저를 이용하여 홀을 천공하는 공정에서 발생하는 테이퍼 현상을 개선하기 위하여 최적의 미세 홀 천공을 위한 조건을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

LTCC 그린시트를 제작하기 위하여 사용된 anorthite 결정화 글라스 조성은  $\text{CaO}$ (27.4),  $\text{SiO}_2$ (60.8),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (11.8) (괄호안은 wt%)이며, 평균입도는 4.6  $\mu\text{m}$ 이다. 결정화 글라스와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (AES-11, Sumitomo, Japan) 파우더를 6.5 : 3.5 비율로 혼합하여 슬러리를 제조하였다. 분산제 BYK-111(BYK Chemical, Germany)을 0.6 wt%를 첨가하여 슬러리의 분산성을 확보한 후 PVB(poly vinyl butyral, BM-SZ, Sekisui, Japan) 결합제와 DBP(dibutyl phthalate, Daejung Chemical and Metals Co. Ltd., Korea) 가소제를 사용하여 가소제/결합제 비를 0.45, 바인더 함량은 37.4 vol%인 조건에서 슬러리를 제조하였다. 이때 PVB 바인더는 톨루엔과 에탄올을 6 : 4의 비율로 혼합한 용매에 녹여 사용하였다[10, 11]. 무수축 공정을 실현하기 위한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  시트는  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (AES-11, Sumitomo, Japan) 파우더를 사용하였으며, PVB 바인더 함량을 40 vol% 첨가하였고 그 외의 조건은 LTCC 슬러리 배치 조건과 동일하였다. 그린시트는 comma의 잭에 의해 시트

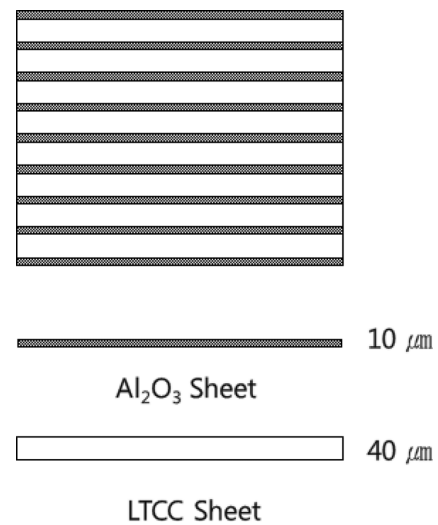


Fig. 1. Schematic structure of zero-shrinkage substrate.

두께를 제어하는 comma coater(Coating machine, INNOSYM, Korea)를 사용하여 성형속도를 2 m/min으로 LTCC 시트는 두께 40  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  시트는 두께 10  $\mu\text{m}$ 로 각각 성형하였다. 제작한 두 종류의 시트는 Fig. 1과 같이  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{LTCC}/\text{Al}_2\text{O}_3$  구조로 알루미늄 시트 9장, LTCC 시트 8장을 적층한 후 WIP(warm isostatic press)를 사용하여 32 MPa 압력으로 70°C에서 압착하였다. 압착된 그린 바를 절단하여 두께가 380  $\mu\text{m}$ , 크기는 50 × 50 mm인 무수축 기관을 제작하였다. 제작한 무수축 기관에 355 nm 파장의 UV-레이저(Model 5330HE, ESI, USA)를 사용하여 미세 홀을 천공하였으며, 천공방식은 레이저를 홀의 내부에서 바깥쪽으로 회전함으로써 기관의 한 부분에 레이저가 장시간 조사되는 영역을 최소화하는 소위 'circle type' 방식으로 진행하였다. 미세 홀을 천공하기 위하여 레이저 빔의 출력을 1~5 watt로 변화하면서 천공하였으며, 천공하고자 하는 홀은 반복적으로 회전하여 천공하였으며, 반복되는 횟수를 revolution으로 표기하였다.

천공된 무수축 기관을 탈바인더(burn-out)을 위하여 600°C까지 4시간 승온 후 1시간 유지하였으며, 875°C에서 2시간 소결을 진행하였다. 소결된 무수축 기관은 천공된 홀의 테이퍼 발생 정도를 확인하기 위하여 기관 단면을 연마한 후 camscope(SOME TECH, Korea)를 이용하여 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

직경 80  $\mu\text{m}$ 의 홀을 레이저 출력 1 watt에서 5 watt까지 변화하면서 천공하였을 때 상부 홀과 하부 홀의 크기를 Fig. 2에 나타내었다. 80  $\mu\text{m}$  크기의 홀 천공을 위한

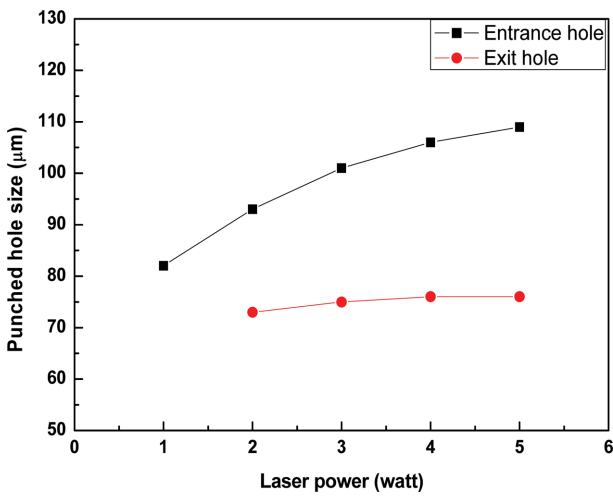


Fig. 2. Punched hole sizes of entrance and exit holes with variation of UV-laser powers.

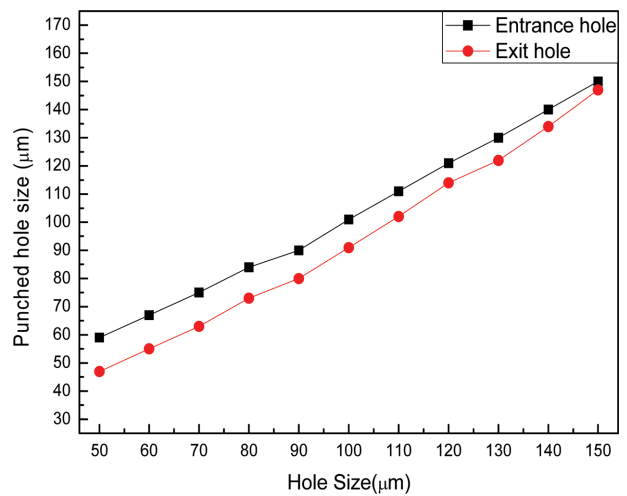


Fig. 3. Punched hole sizes of entrance and exit holes with variation of hole size by laser punching process.

레이저빔 회전수인 revolution은 20으로 고정하였으며, 레이저의 출력이 증가함에 따라 기판 상부 홀과 하부 홀 크기 차이가 증가하고 있어, 테이퍼 현상이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 레이저 출력 1 watt의 경우 홀 천공을 위한 revolution이 20 이내일 때는 천공하는 홀이 기판의 윗면에서 아랫면까지 완전히 천공되지 않았으며, 레이저 출력이 2~5 watt일 경우에는 하부 홀 직경은 크게 변화하지 않았으나, 레이저 출력이 증가할수록 상부 홀 크기가 증가하여 상부 홀과 하부 홀의 차이도 증가하는 경향을 나타내었다. 출력 5 watt의 경우 상부 홀의 직경은 109 μm, 하부 홀 직경은 75~76 μm로 천공되어, 두 홀의 편차는 약 30%를 나타내었다. 따라서 레이저 출력이 낮을수록 테이퍼 편차를 줄일 수 있음을 알 수 있었으며, 상부 홀의 경우 1 watt 조건에서 직경 80 μm에 가장 근접하였지만 홀의 윗면에서 아랫면까지 완전히 천공이 되지 않아 레이저 출력 값은 2 watt로 고정하였다. 홀 천공을 위한 레이저빔 회전수인 revolution의 경우 10회~50회 범위에서 천공하였다. revolution이 10일 경우 출력 1 watt 경우와 같이 홀이 완전히 천공되지 않았으며, revolution이 20 이상에서는 천공되는 홀의 크기 변화가 없었으므로 revolution은 20으로 설정하였다.

Fig. 3은 무수축 기판에 레이저 펀치로 홀 천공 시 홀 크기에 따른 테이퍼 현상을 나타내는 상부 홀과 하부 홀 크기 변화를 나타내었다. 천공되는 홀 크기에 따라 상부 홀과 하부 홀의 크기가 다르게 천공되었으며, 홀 크기가 작을수록 상부 홀과 하부 홀 크기와의 차이는 커지고, 홀 크기가 커질수록 상부 홀과 하부 홀 간의 크기 차이는 작아지는 것을 볼 수 있다. 50 μm 홀을 천공할 경우 상부 홀의 직경은 59 μm, 하부 홀의 직경은 47 μm를 나타냈으며, 이에 대한 편차는 약 20%의 차이를 나타내었다. 가장 큰 홀인 직경 150 μm의 홀 천공 시 상부

홀 직경은 150 μm, 하부 홀 직경은 147 μm로 두 홀 간의 직경 편차는 2%까지 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 레이저를 이용하여 홀을 천공하는 경우 레이저 빔이 조사되는 부분의 온도가 급격히 올라가게 되어 용융됨과 동시에 증발됨으로써 홀 부분이 제거되어 천공하게 된다. 레이저를 조사하여 기판의 바닥부분까지 완전히 천공되는 동안 기판 표면이 바닥면에 비해 레이저에 노출되는 시간이 상대적으로 길게 되어 오랫동안 레이저의 영향을 받게 된다. 따라서 홀의 직경이 작을수록 레이저가 조사되는 영역이 작아지게 되어 기판 표면의 경우 직접 레이저가 조사되는 부분의 인접부분도 레이저의 영향을 받아 바닥면에 비해 넓은 영역이 레이저의 영향으로 인하여

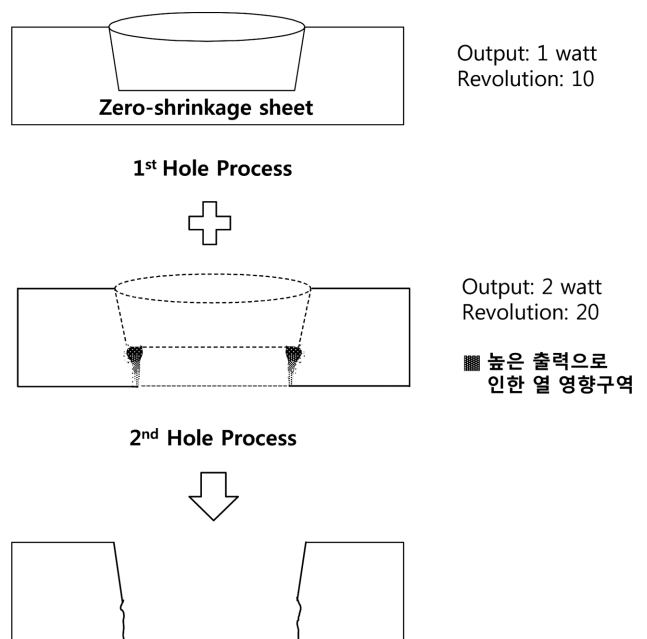


Fig. 4. Schematic of second hole process by UV-laser.

천공되는 것에 기인한 것으로 사료된다. 이때 기관 표면의 홀의 크기와 바닥면의 홀 크기 편차가 커진다. 이러한 테이퍼 현상은 홀의 크기가 적을수록 커진다.

테이퍼 현상인 상부 홀과 하부 홀 간의 크기 차이를 줄이기 위하여 Fig. 4와 같이 second hole process를 적용하였다. 이것은 천공하고자 하는 홀에 레이저로 1차 천공한 후 출력을 높여 동일한 홀을 재천공하여 기관 윗면과 아랫면의 홀 크기 차이를 줄이는 방법이다. 기관 윗면에 처음 천공하는 홀을 first hole, 그리고 상부 홀과 하부 홀의 차이를 줄이기 위해 재천공하는 홀을 second hole로 표기하였다. First hole을 천공한 후 출력을 높여 second hole을 동일한 크기로 천공하게 되면 하부 홀은 커지게 되지만 높은 출력으로 인해 상부 홀 크기도 동시에 커지게 된다. 따라서 상부 홀 크기가 영향을 받지 않으면서 하부 홀 크기를 넓힐 수 있는 최적화된 second hole 가공 크기를 찾아가 하였다.

직경이 80  $\mu\text{m}$ 인 홀을 second hole을 적용하지 않고 출력 2 watt, revolution을 20으로 천공할 경우 상부 홀 직경은 93  $\mu\text{m}$ , 하부 홀 직경은 73  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 테이퍼 현상을 개선하기 위해 first hole을 1 watt, revolution을 10으로 천공한 후 second hole을 적용하여 출력 2 watt, revolution을 20으로 천공하였다. First hole을 80  $\mu\text{m}$ 로 천공한 후 second hole 크기를 70~79  $\mu\text{m}$ 로 적용하여 천공하였을 때 Fig. 5에서와 같이 second hole 직경이 76~77  $\mu\text{m}$ 일 때 상부 홀은 84  $\mu\text{m}$ , 하부 홀은 74  $\mu\text{m}$ 로 두 홀의 크기 차이가 가장 작게 나타났다. 70  $\mu\text{m}$ 부터 75  $\mu\text{m}$ 까지 상부 홀과 하부 홀 간의 편차가 줄어들다가 다시 78  $\mu\text{m}$  이후는 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 second hole이 80  $\mu\text{m}$ 에 근접할 경우 first hole 크기와 같아지게 되어 레이저의 높은 에너지의 열 영향으로 상부 홀 크기가 증가된 것으로 사료된다. First

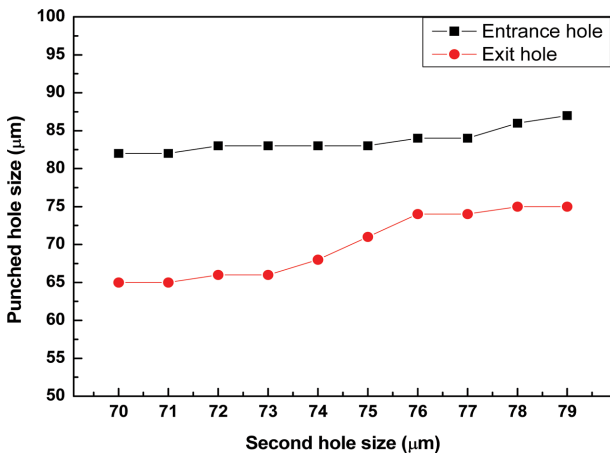


Fig. 5. Punched hole size of entrance and exit holes with variation of second hole size on zero-shrinkage substrate by UV-laser.

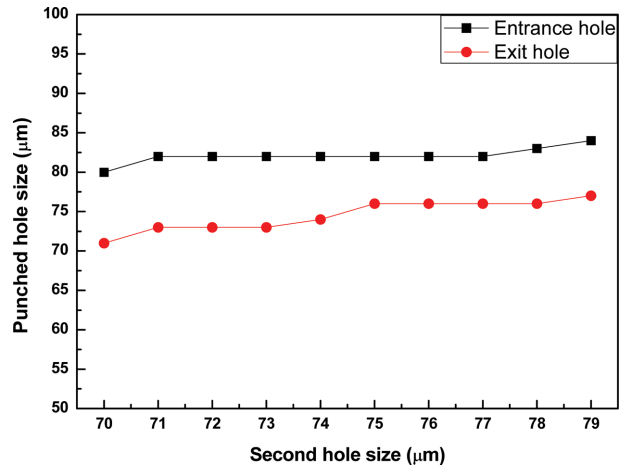


Fig. 6. Punched hole sizes of entrance and exit holes after zero-shrinkage sintering with variation of second hole sizes.

hole 크기와 비교하여 second hole 크기가 약 95~97 % 일 때 두 홀 간의 차이가 가장 적었으며, 이러한 현상은 다른 크기의 홀 천공에서도 확인하였다.

천공한 무수축 기관을 소결한 후 상부 홀과 하부 홀의 차이를 Fig. 6에 나타내었다. 무수축 기관이 소성하는 동안 수평방향인 x-y축 방향으로는 수축하지 않고 두께 방향인 z축으로만 약 40 % 수축하는 과정에서 기관 상부의 홀 크기는 거의 변화가 없었으나, 기관 하부 홀 크기가 커지게 되어 기관 상부 홀과 하부 홀 간의 차이가 개선되었으며, second hole 크기가 75  $\mu\text{m}$ , 76  $\mu\text{m}$ , 77  $\mu\text{m}$ 에서 두 홀 간의 차이가 가장 적게 나타났다. 상부 홀과 하부 홀의 크기 차이인 테이퍼 %를  $(1 - (\text{하부 홀 크기} \div \text{상부 홀 크기})) \times 100 \%$  식을 이용하여 가장 편차가 적은 홀 크기인 76  $\mu\text{m}$ , 77  $\mu\text{m}$ 를 소결 전과 비교하면 소결 후 두 홀 간에 차이가 약 7%까지 줄어드는 것을 확

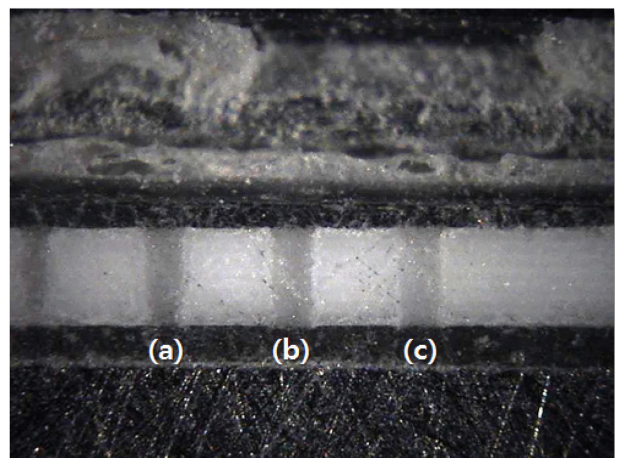


Fig. 7. Optical image of cross section of holes punched by laser punching in a zero-shrinkage substrate; (a) a hole punched normally with hole size of 80  $\mu\text{m}$ , (b) that punched by second hole process with hole size of 74  $\mu\text{m}$ , (c) that punched by second hole process with hole size of 76  $\mu\text{m}$ .

인할 수 있었다.

Fig. 7은 소결된 무수축 기판 상에 천공된 홀 단면을 camscope를 이용하여 광학이미지로 나타내었다. Fig. 7(a)의 경우 80  $\mu\text{m}$ 의 홀을 레이저를 이용하여 일반적인 천공방법으로 천공한 홀의 단면으로 기판 윗부분인 상부 홀에서 아랫부분인 하부 홀까지 사선으로 좁아지는 테이퍼 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)의 경우 second hole process를 적용하여 홀을 천공하였으나 최적화 되지 않은 second hole size로 천공한 홀의 단면이다. Fig. 7(a)와 비교하여 기판의 아랫부분인 하부 홀 크기가 커져 테이퍼 현상이 개선된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)는 상부 홀과 하부 홀 편차가 가장 적은 홀 크기인 76  $\mu\text{m}$  홀 단면을 나타내었으며, 시트 상부 상부 홀부터 시트 하부의 하부 홀까지 수직에 가깝게 천공되어 Fig. 7(a)와 비교하여 테이퍼 현상이 확연하게 개선된 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 와 LTCC 파우더를 comma coater를 이용하여 40  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  두께의 그린시트로 각각 제작한 후 적층 및 압착하여 무수축 기판을 제작하였다. 무수축 기판 상에 레이저를 이용하여 미세 홀 천공과정에서 발생하는 테이퍼 현상을 개선하기 위해 second hole을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

레이저 출력이 높을수록 상부 홀과 하부 홀 간의 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 출력 변화에 따른 하부 홀 크기는 변화가 거의 없었으나 상부 홀 크기는 출력이 높아짐에 따라 천공되는 홀 크기가 증가하였다.

테이퍼 현상을 개선하기 위해 second hole 공정을 적용하여 80  $\mu\text{m}$  홀을 천공시 최적의 second 홀 크기를 찾기 위해 70~79  $\mu\text{m}$  홀을 천공하였을 경우 76  $\mu\text{m}$ 와 77  $\mu\text{m}$ 에서 테이퍼% 값이 11.9%로 가장 낮았으며, 천공된 무수축 기판을 소결한 후에는 테이퍼 값이 7%로 줄었다. First hole 크기와 비교하여 second hole 크기는

first hole 크기의 약 95~97% 일 때 테이퍼가 가장 적게 나타났다.

#### References

- [1] H. Sohn, D.-S. Shin and J. Choi, "Characteristics of direct laser micromachining of IC substrates using a nanosecond UV laser", J of KSLP 15 (2012) 7.
- [2] B. Adelman and R. Hellmann, "Rapid micro hole laser drilling in ceramic substrates using single mode fiber laser", J. Mater. Process. Technol. 221 (2015) 80.
- [3] Y. Zhang, Y.Q. Wang, J.Z. Zhang, Y.S. Liu, X.J. Yang and Q. Zhang, "Micromachining features of TiC ceramic by femtosecond pulsed laser, Ceramics International 41 (2015) 6525.
- [4] T.-J. Jo and D.-H. Yeo, "Control of De-lamination phenomena in LTCC zero-shrinkage by glass infiltration method", Trans. Electr. Electron. Mater. 12 (2012) 23.
- [5] T. Rabe, W.A. Schiller, T. Hochheimer, C. Modes and A. Kipka, "Zero shrinkage of LTCC by self-constrained sintering", J. Appl. Ceram. Technol. 2 (2005) 374.
- [6] S. Mishra and V. Yadava, "Modelling of hole taper and heat affected zone due to laser beam percussion drilling", Mach. Sci. Technol. 17 (2013) 270.
- [7] Y.Z. Yan, L.F. Ji, Y. Bao and Y.J. Jiang, "An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina", J. Mater. Process. Technol. 212 (2012) 1257.
- [8] J.G. Kim, W.S. Chang, B.S. Shin, J.W. Chang and K.H. Whang, "Blind via hole Drilling Using DPSS UV laser", J. of KSLP 6 (2013) 9.
- [9] S. Mishra and V. Yadava, "Finite element (FE) simulation to investigate the effect of sheet thickness on hole taper and heat affected zone (HAZ) during laser beam percussion drilling of thin aluminium sheet", Lasers in Eng. 30 (2015) 341.
- [10] A. Tabari and A. Ahmad, "A semicontinuous approach for heterogeneous azeotropic distillation processes", Comput. Chem. Eng. 73 (2015) 183.
- [11] Z.Y. Zhu, L. Wang, Y.X. Ma, W.L. Wang and Y.L. Wang, "Separating an azeotropic mixture of toluene and ethanol via heat integration pressure swing distillation", Comput. Chem. Eng. 76 (2015) 137.