

연구논문

펨토초 레이저 어블레이션을 이용한 알루미나 세라믹 기판의 정밀 마이크로 드릴링

김성훈*, 손익부, 노영철, 이종민, 정성호

광주과학기술원, 고등광기술연구소

Precision microdrilling of alumina ceramic substrates by femtosecond laser ablation

S. h. Kim*, I. B. Sohn, Y. C. Noh, J. M. Lee and S. h. Jeong

GIST, APRI

ABSTRACT

The characteristics of femtosecond laser ablation of Al_2O_3 for precision microfabrication are studied experimentally. Specifically, the process time during femtosecond laser drilling of microholes with sub-100 μm diameter are investigated for varying laser fluence, scan speed and beam path designs like trepanning with continuously changed start points. The accumulation of sub-micrometer size particles within the hole and the deterioration of edge clarity and roundness for decreasing hole diameter are examined and through process optimization the microdrilling with good hole quality is achieved using a femtosecond laser system (repetitionrate 1 kHz, wavelength 785 nm, pulse duration 185 fs).

1. 서 론

세라믹은 자동차 엔진이나 브레이크 라이닝, 열교환기, 전기절연체, RF 소자를 위한 전자기판 등과 같은 매우 많은 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 세라믹은 그 성질이 극히 단단하고, 내열성(1600~1700°C)이 우수하며, 금속보다 좋은 내마모성을 가진다. 전자회로에 주로 사용되는 알루미나(Al_2O_3)나 베릴리아(BeO) 그리고 질화알루미늄(AlN) 등의 세라믹은 높은 전기저항성과 절연내구력(dielectric strength)을 가지며, 열전도가 뛰어나고 열부하(thermal load)에 대한 안정성이 매우 우수하다. 예를 들면 알루미나의 경우 10 kV/mm의 절연내구력과 28 W/m \cdot K의 열전도도를 가진다.¹

최근의 정보통신 분야의 발달에 기인한 모바일 전자기기나 부품 등에 대한 수요 증가는 더 높은

밀도의 마이크로 전자회로 패턴 구현이나 더 작은 비아홀 그리고 더 짧게 단락 시킨 구조 등을 제조할 수 있는 기술을 요구한다. 그러나 기계적인 펀칭이나 다이아몬드 드릴링과 같은 전통적인 기술로 가공 가능한 구조물의 크기는 100~200 μm 로 제한적이며, 또한 공구의 과도한 마모를 발생시키거나 가공을 위한 공구 제작의 필요 혹은 가공 재료의 깨짐 등과 같은 심각한 문제를 야기시킨다.

지난 십여년간 다양한 재료의 드릴링과 구조물 가공에 대한 극초단 레이저 펄스의 사용은 활발히 연구되었다.²⁻⁵ 그런데, 단순히 레이저 펄스의 충격에 의한 드릴링 방법인 퍼커션 드릴링(percussion drilling) 만으로는 높은 품질과 정밀도 및 빠른 가공을 성취하기는 어려웠다. 그러므로 트레패닝(trepanning)이나 헬리컬 드릴링(helical drilling)과

같은 새로운 기술들이 발전되었고, 이런 기술의 적용을 통해 금속이나 반도체 그리고 세라믹 등의 재료의 홀 가공시 홀의 원형도나 표면 품질 그리고 홀 테두리의 예리한 정도가 크게 향상될 수 있었다.⁶⁻⁷ 펨토초 레이저 펄스를 이용한 세라믹의 가공에 대한 연구는 일본 게이오 대학의 Obara 그룹에서 펨토초 레이저 펄스 조사 후 AlN 세라믹의 조성 변화에 대한 연구를 수행하였으며,⁸ 일본 오사카 대학의 Izawa 그룹에서는 Al₂O₃ 세라믹의 어블레이션 임계값(ablation threshold)를 에너지 밀도에 대한 어블레이션 비율 (ablation rates)과 어블레이션 직경(ablation diameter)의 측정으로 구하였으며, 150 μm 두께의 기판에 드릴링을 수행하였다⁹. 또한 독일의 Schulz 그룹의 경우 UV 레이저에 대한 세라믹 가공을 언급하였으며, UV의 경우 파장이 짧고, 광자 에너지(3에서 7 eV 정도)가 커서 세라믹 등의 단단한 재료의 가공에 주요할 수 있지만 흡수율이 낮은 질화물 계열의 재료일 경우엔 가공을 위해서 보다 높은 에너지 밀도(100 J/cm²)가 요구된다¹⁰.

그럼에도 불구하고, 펨토초 레이저의 경우 광자 에너지(1.6 eV)는 UV에 비해 낮지만, 매우 짧은 펄스폭에 의한 다광자 흡수(multiphoton absorption)를 통해 낮은 출력에서 높은 정밀도로 가공이 가능하며, 점차 낮은 반복율에 대한 개선이 이루어지고 있어 빠르고, 정밀한 세라믹 가공에 대한 기대가 가능하다. 또한, 앞선 많은 연구들에선 마이크로 전자 부품이나 전자 회로 등에 주로 쓰일 수 있는 세라믹 기판의 마이크로 드릴링에 대한 연구가 체계적이고 구체적으로 다루어지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 펨토초 레이저 어블레이션을 이용한 산화알루미늄 기판의 마이크로 드릴링에 대한 연구를 수행하였다. 마이크로 드릴링시 구체적으로 드릴링 시간과 가공된 홀의 원형도에 대해 주로 조사되었으며, 각각의 가공된 홀들은 주로 갈바노 스캔 시스템을 이용해 가공되었다. 또한 각각의 결과들은 주사전자현미경을 통해 평가되었다.

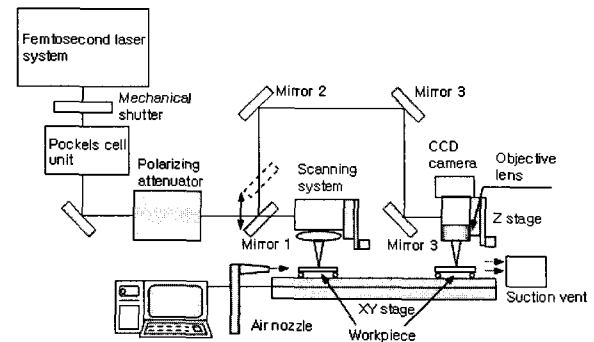


Fig. 1 Schematic diagram of the femtosecond laser micromachining system.

2. 본 론

2.1 실험방법

Figure 1은 세라믹 기판의 마이크로 드릴링 가공을 위한 실험장치의 개략도이다. 본 연구에서는 상업용 타이타늄-사파이어 레이저 시스템(파장 785 nm, 펄스폭 185 fs, 반복주기 1 kHz, Cyber Laser Inc., FS-IFRIT)과 레이저 빔을 시편 표면에 수직으로 도달시키는 텔레센트릭 렌즈(Telecentric lens f=80mm, SillOptics, Germany)가 장착된 갈바노 스캐너(resolution=12 μrad , repeatability=20 μrad , Superscan-15, RAYLASE, Germany) 그리고 정밀 XYZ 이송계를 이용하여 일반 대기 중에서 트래패닝 방법으로 크기 약 60~350 μm , 세장비 약 3.5 정도의 홀들을 드릴링 하였다. 레이저 빔의 경로를 차단하거나 레이저 펄스의 수를 제어하는데 기계식 셔터나 혹은 포켈셀(Pockels cell)이 사용되었으며, 레이저 펄스의 에너지는 반파장 플레이트(half-wave plate)를 회전시키면서 얻어지는 편광에 기인한 투과효과를 이용해 변화시켰다. 또한, 레이저 펄스 에너지는 1 μJ 에서부터 670 μJ 까지 연속적으로 변화시킬 수 있다. 레이저 어블레이션 중 발생하는 미소입자들은 압축공기 노즐과 흡입구를 이용해서 제거되었으며, 이때 가공시편은 XY 이송계에 단단히 부착되어 압축공기의 분사로 인한 움직임을 최소화하였다. 가공시편은 표면이 연마된 산화알루미늄 기판(산화알루미늄(Al₂O₃): 순도=96 %, 두께: 200~500 μm , 표면 거칠기(Ra)= 0.3 μm , NIKKO company, Japan)이 사용되었다.

또한 드릴링 시간의 측정을 위해 스톱워치가 이용되었고, 시간측정은 레이저 빔이 표면에 조사되는 순간부터 가공시편 뒤로 레이저 빔이 확연히 보이는 순간까지로 정했다. 마이크로 홀의 원형도와 단면 윤곽은 주사전자현미경을 이용해 검토되었으며, 모든 가공 단계는 CCD 카메라를 이용해 화면에 모니터 되었다.

2.2 결과 및 고찰

깨끗한 실린더형 홀이나 원뿔형 홀 또는 완전히 뚫리지 않고 중간에 막힌 홀과 같은 여러 형태의 마이크로 홀은 많은 전자 응용분야에서 요구되고 있다.11 본 연구에서 채택한 갈바노미터 시스템은 상대적으로 얇은 기판에 마이크로 홀을 빠르게 뚫는데 매우 효과적이다. 더욱이 초점 심도가 약 380 μm 정도의 텔레센트릭 렌즈에 기인하여 레이저의 에너지 밀도(laser fluence= J/cm^2)를 조절할 경우 약 500 μm 두께의 세라믹 기판을 시편 표면에 대해서 거의 90도에 가까운 홀 벽을 가지는 마이크로 홀의 드릴링이 가능하다. 또한 이 광학계의 초점 직경은 마이크로 드릴링으로 적용 가능한 약 8 μm 정도($1/e$)이며 이는 에너지 밀도 102 J/cm^2 이하 영역에서 에너지 밀도를 변화시키면서 대략 10개 정도의 펄스를 세라믹 재료에 조사한 후 얻어진 어블레이션 직경들을 측정하고, 수학적 계산을 통하여 얻을 수 있다¹². 더불어 시편에 조사시킬 수 있는 레이저 빔의 조사패턴을 유연하게 변화시킬 수 있고 빠른 가공이 모두 가능하므로 펄초 레이저를 이용한 마이크로 드릴링 기술을 향상시키기 위해 갈바노스캐너가 채택되었다.

트래패닝 드릴링에서 레이저 빔은 중앙의 시편 조각이 떨어질 때까지 원형을 따라 가공시편을 조사한다. 따라서 상대적으로 큰 홀은 홀의 입구 형상이 원과 같아진다. 일반적으로 갈바노미터가 수백 마이크로미터 직경을 가지고 원형의 빔 경로에 대해 프로그램 될 때, 그것은 두 개의 조향미러의 기울어지는 각도의 변화에 따라 시편 위에 많은 XY 방향의 벡터를 생성한다. 그러나 드릴링 하고자 하는 홀의 직경이, 현재의 경우, 약 60 μm 이하보다 작게 되면, 갈바노 시스템이

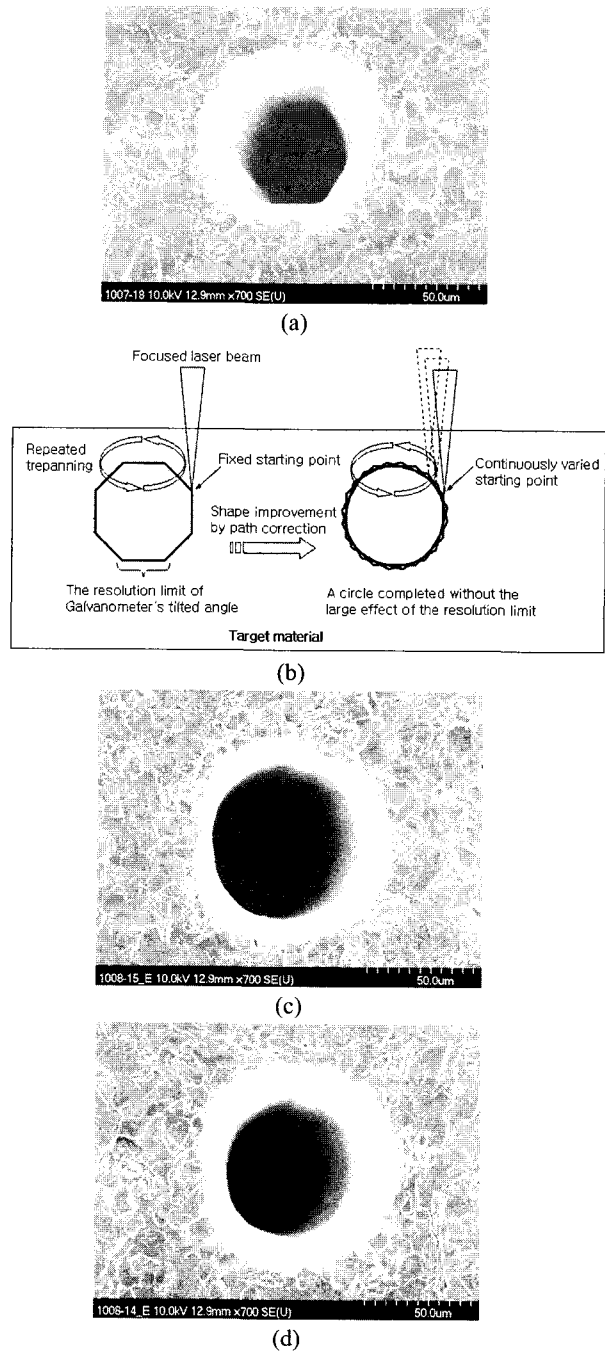


Fig. 2 (a) Electron micrographs of the microholes in alumina ceramic (thickness=200 μm) drilled at the conditions of laser fluence =240.7 J/cm^2 without changing the starting point. (b) schematic diagram to improve hexagonal hole shape. Improved circularity of the holes by continuously varying the starting point of irradiation for the laser fluence=(c) 268.6 J/cm^2 , and (d) 178.1 J/cm^2 . Scan speed=1 mm/s, for all the holes and the diameters of the holes for (a), (c) and (d) are approximately 58, 70, and 60 μm, respectively.

약 1 μm 정도의 높은 분해능을 갖는다 할지라도 직선이나 사각형의 가공이 아닌 원형일 경우, 원형의 빔 경로를 그려야 하므로 두 개의 미러가 동시에 움직여야 하며, 사용된 스캔 시스템의 최소 스캔속도가 1 mm/s 이기 때문에 60 μm 이하의 원형 경로를 따를 수가 없게 된다. 그 결과로 Fig 2 (a)에서와 같이 육각형 모양의 홀이 만들어지게 된다. 따라서 더 작은 홀의 경우에서도 원형도 증가한 홀을 만들기 위해서는 원의 시작점을 레이저 빔의 조사 경로를 따라 연속적으로 변화시켜 육각형의 형상이 매끄럽게 변화되도록 한다. 이러한 접근에 대한 방법은 Fig. 2 (b)에 설명되었다. Figure 2 (c)와 (d)는 이러한 접근 방법을 통해 가공된 마이크로 홀을 나타내며, 가공 조건은 레이저 밀도 268.6 J/cm^2 와 178.1 J/cm^2 이고 같은 스캔속도=1 mm/s 에서 가공이 이루어졌다. Figure 2 (c)와 2 (d)에서 홀의 직경은 대략적으로 70 μm 와 60 μm 이다.

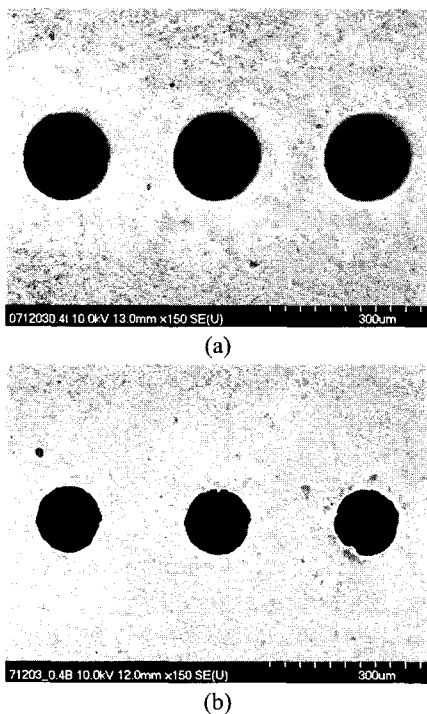


Fig. 3 Scanning electron microscope images of the (a) entrance and (b) exit sides (thickness=400 μm) drilled at the conditions of laser fluence=241.7 J/cm^2 , scan speed=1 mm/s. The entrance and exit diameters are approximately 175 and 130 μm , respectively. The processing time was about fifty seconds per hole.

Figure 3 (a)는 400 μm 두께의 알루미나에 드릴링 된 마이크로 홀을 보여준다. 가공 조건은 레이저 에너지 밀도 241.7 J/cm^2 , 스캔속도 1 mm/s 이다. 상대적으로 큰 홀에 대해 시작점을 연속적으로 바꾸는 방법을 사용하지 않더라도 매우 깨끗하고 원형도가 좋은 홀을 얻을 수 있다. 하지만 대부분의 경우 시작점을 연속적으로 바꾸는 방법을 적용하였으며, 홀이 원형에 가깝게 되도록 만들기 위해 최소 20번 정도의 시작점을 바꾸는 것이 적용되었다. 주사전자현미경 사진을 통해 입구와 출구의 직경이 대략적으로 각각 175 와 130 μm 임을 보인다. 홀 입구와 출구의 형상은 거의 원형에 가까우며, 홀의 테두리 역시 예리하게 가공되어 마이크로전자 부품이나 소자 등에 이용시 문제가 되는 홀 주변의 원하지 않는 용융층이나 재적층된 미립자들의 층은 관찰되지 않는다.

드릴링 과정 중 생성되는 많은 미립자들은 다른 재료의 펄소 초 어블레이션 가공에서도 중요하다. 이 미립자들은 입사된 레이저 빔이 표면에 완벽하게 도달되지 못하게 만들 수 있으며 드릴링 효율을 현저하게 감소시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 어블레이션에 의해서 발생된 미소 입자들을 에어노즐을 통해 압축공기를 세라믹 기판 위에 불어주고 가공시편의 반대쪽에는 흡입 시스템을 설치하여 제거하였다.

레이저 응용 분야에서 가장 어려운 문제 중 하나가 바로 생산성의 증가이다. Nd-YAG나 이산화탄소 레이저와의 경쟁을 위해서는 펄소 초 레이저 머시닝의 높은 생산성 성취는 매우 중요하다. 앞에서 설명한 바와 같이 드릴링 시간의 측정은 스톱워치를 이용해 수행되었다. 하지만 펄소 초 레이저를 이용한 드릴링 시간은 수 초에서 수백 초로 상대적으로 길기 때문에 스톱워치를 이용해서 충분히 수행될 수 있으며, 측정에 대한 오차는 대략적으로 5% 내외이다.

Figure 4 (a)와 4(b)는 두께 200 ~ 500 μm 범위의 알루미나 기판의 드릴링 시간을 보여주며, 동일한 가공속도 1 mm/s에, 레이저 에너지 밀도는 각각 241.7 과 329 J/cm^2 가 적용되었다. Figure 4 (a)에서 보는 바와 같이 200 μm 두께의 기판에

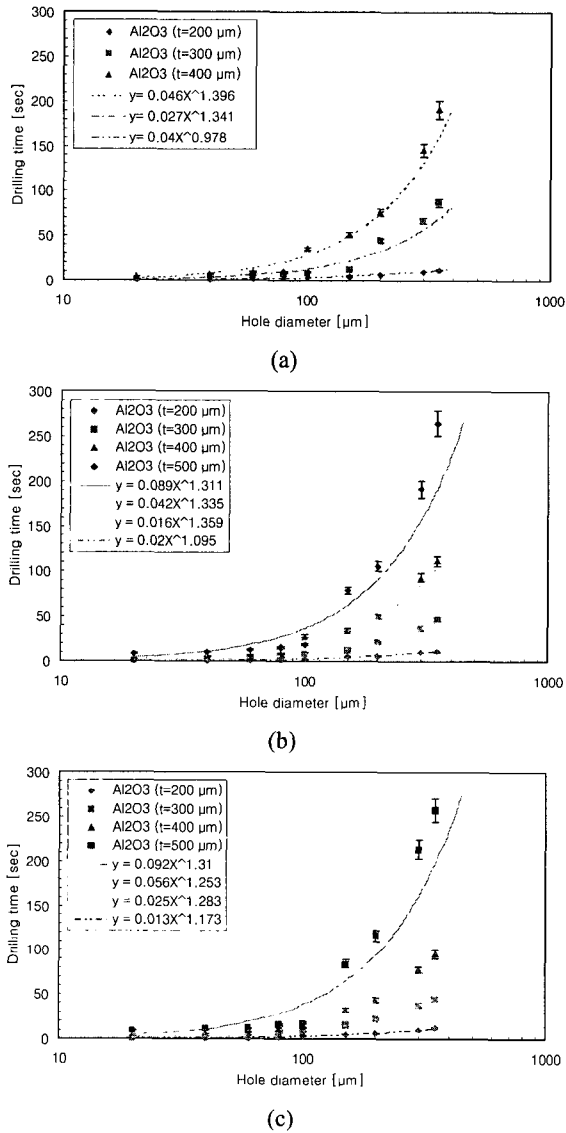


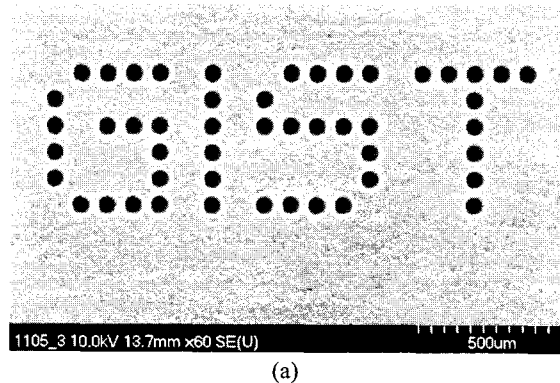
Fig. 4 Drilling time of alumina substrates with different thickness. The process conditions are (a) laser fluence=241.7 J/cm², scan speed=1 mm/s, (b) laser fluence=329 J/cm², scan speed=1 mm/s, (c) laser fluence=329 J/cm², scan speed=2 mm/s. The solid and dashed lines represent the fits to exponential functions.

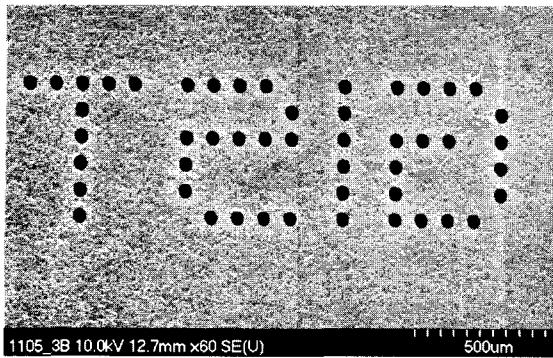
대한 드릴링 시간은 12초 미만이며, 이러한 조건에서 가공된 홀은 입구와 출구 모두 좋은 원형도를 갖는다. 그러나 300 μm 두께의 기판에 대해서는 드릴링 시간이 직경의 증가와 더불어 빠르게 증가한다. 또한 이러한 경향은 두께가 증가할수록 더욱더 두드러지는데, 레이저 에너지 밀도가 329 J/cm²로 증가될 때 두께 400 μm의 기판에 대해 드릴링 시간은 1.7배의 비율로 감소한다.

하지만 펄초 레이저 드릴링이 실용화되기 위해서는 드릴링 시간은 더욱더 감소해야만 한다. 그럼에도 불구하고 펄초 레이저를 이용한 알루미나 세라믹 기판에 직경 100 μm 이하의 마이크로 홀 드릴링은 상대적으로 얇은 기판에 대해 여전히 매력적인 기술일 수 있다. 예를 들면, 두께 300 μm나 또는 이보다 얇은 기판에 대해 기계적 드릴링과 같은 다른 기술들은 더 많은 시간이 걸릴 수 있으며, 특별히 펄초 레이저 가공의 경우 매우 깨끗하고 예리한 원 둘레의 모서리와 홀 안쪽의 매끄러운 면을 얻을 수 있다.

Figure 4 (c)는 스캔속도가 두 배일 때의 드릴링 시간을 보여준다. 이 결과를 Fig. 4 (b)와 비교했을 때, 드릴링 시간은 모든 두께에 대해서 약간씩 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 스캔속도가 증가하게 되면 가공시편에 도달하는 각 위치에서의 에너지 밀도는 감소할 것이다. 하지만, 스캔속도의 증가로 가공시편이 레이저 빛에 더 빈번하게 노출되기 때문에 가공시편에 도달되는 전체 에너지 밀도는 거의 같을 것으로 볼 수 있다. 그러나 더 빈번한 노출에 의해 가공시간이 좀더 줄어든 것으로 보인다. Figure 4 (a), 4 (b) 그리고 4 (c)의 결과로부터, 더 높은 레이저 에너지 밀도와 더 빠른 스캔속도에서 더 빠른 드릴링은 성취될 수 있다.

Figure 5 (a)와 5 (b)는 레이저 에너지 밀도 241.7 J/cm², 스캔속도 1 mm/s 에서 가공된 두께 200 μm의 알루미나 기판 위에 가공된 홀들의 배열이며, 이러한 홀의 전체 가공시간은 1분 38초였다.





(b)

Fig. 5 Scanning electron microscope images of the (a) entrance and (b) exit sides (thickness=200 μm) drilled at the conditions of laser fluence=241.7 J/cm^2 , scan speed=1 mm/s. The entrance and exit diameters are approximately 70 and 50 μm , respectively. The drilling time was about twoseconds per a hole.

3. 결론

알루미나 세라믹에 대해 갈바노 스캐너를 이용한 펄초 레이저 드릴링 특성에 대한 연구가 수행되었으며, 가공된 마이크로 홀은 가시적인 표면 손상이 없이 매끄러운 측면 벽과 깨끗한 테두리를 보였다. 마이크로 일렉트로닉스에 유용한 크기인 약 100 μm 직경의 마이크로 홀은 갈바노 스캐너를 이용해 약 60 μm 의 최소 사이즈를 가지고 쉽게 드릴링 될 수 있다. 홀 가공시 원형도를 향상시키기 위해서는 최초 레이저 빔이 가공 시편 표면에 조사될 때 그 시작점이 트래킹 도중 고정되지 않고 계속적으로 바뀌면 가능하며, 이러한 가공방법은 다른 세라믹 가공의 적용에도 유용할 것으로 본다.

참고문헌

- 1) W. Perrie, A. Rushton, M.Gill, P. Fox, W.O'Neill, "Characterisation of ultrafast microstructuring of alumina (Al_2O_3)," Proc. SPIE Vol. **5714**, 43, 2005.
- 2) B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, and A. Tünnermann. "Femtosecond,

picosecond and nanosecond laser ablation of solids," Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. A **63**, 109-115, 1996.

- 3) S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B. N. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling, "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," J. Opt. Soc. Am. B **14**, 2716-2722, 1997.
- 4) F. Dausinger, "Femtosecond technology for precision manufacturing: Fundamental and technical aspects," *3rd International Symposium on Laser Precision Microfabrication, Osaka, 2002 Proc. of SPIE* **4830**, 471-478, 2003.
- 5) J. Kaspar and A. Luft, S. Nolte and M. Will, E. Beyer, "Laser helical drilling of silicon wafers with ns to fs pulses: Scanning electron microscopy and transmission electron microscopy characterization of drilled through-holes," J. Laser Appl. **18**, 85-92, 2006.
- 6) S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, A. Ostendorf, C. Fallnich, F. von Alvensleben, and H. Welling, "Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling," Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process. A **68**, 563-567, 1999.
- 7) J. Radtke, Ch. Föhl, K. Jasper, and F. Dausinger, "Helical drilling of high quality micro holes in steel and ceramics with short and ultrashort pulsed lasers," *15th CLEO/Europe, Munich 2001, Proceedings WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, 331-340, 2001.
- 8) Y. Hirayama, H. Yabe, and M. Obara, "Selective ablation of AlN ceramic using femtosecond, nanosecond, and microsecond pulsed laser," J. of Appl. Phys., **89**, 2943-2949, 2001.
- 9) K. Nagashima, S. Member, M. Hashida, M. Katto, M. Tsukamoto, M. Fujita, Y. Izawa, "Femtosecond laser ablation of Al_2O_3 ceramics," Transactions of the Institute of Electrical Engineering of Japan. C, **124**, 388-392, 2004.

- 10) J. Meijer, K. Du, A. Gillner, D. Hoffmann, V.S. Kovalenko, T. Masuzawa, A. Ostendorf, R. Poprawe, W. Schulz, "Laser machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons," *CIRP Annals-Manuf. Tech.*, **51**, 531-550, 2002.
- 11) C. Föhl, D. Breitling, K. Jasper, J. Radtke and F. Dausinger, "Precision drilling of metals and ceramics with short and ultrashort pulsed solid state lasers," *Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, Isamu Miyamoto, Yong Feng Lu, Koji Sugioka, Jan J. Dubowski, Editors, *Proc. of SPIE Vol. 4426*, 104-107, 2002.
- 12) J.M. Liu, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," *Opt. lett.*, **7**, 196-198, 1982.