

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.12.1163>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

알루미노실리케이트 유리의 펨토초 레이저 나선형 드릴링 시 레이저 수직 이송 속도가 드릴링 가공 형상에 미치는 영향

이현민* · 이효승* · 문승재*†

* 한양대학교 기계공학과

Effect of Vertical Laser Drilling Speed on Drilling Shapes in Femtosecond Laser Helical Drilling of an Aluminosilicate Glass Substrate

Hyeon-Min Lee*, Hyoseung Lee* and Seung-Jae Moon*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received June 14, 2017; Revised September 27, 2017; Accepted September 29, 2017)

Key Words: Femtosecond Laser(펨토초 레이저), Laser Helical Drilling(레이저 나선형 드릴링), Aluminosilicate Glass(알루미나실리케이트 유리)

초록: 본 연구는 레이저를 이용한 유리 드릴링 가공 시, 높은 가공 정밀도와 표면 품질을 달성하기 위하여, 레이저 나선형 드릴링 가공시 레이저의 수직 이송 속도의 영향을 분석한다. 레이저의 수직 이송 속도에 따라서 나선형 층간 간격이 결정되며, 층간 간격은 홀의 관통여부와 홀의 표면 품질에 영향을 미친다. 실험에 사용된 유리는 400 μm 의 두께를 지닌 알루미나실리케이트 유리이며, 1552 nm의 파장 길이와 800 fs의 펄스 길이를 지닌 펨토초 레이저를 이용하였다. 실험에서 사용된 레이저의 출력에서의 어블레이션 깊이를 계산하였고, 이에 따른 드릴링에 필요한 레이저 수직 이송 속도를 계산하였다. 이론적 접근 방법의 정확성을 실험을 통해 검증하였으며, 레이저 수직 이송 속도에 따라 크랙과 칩핑, 열영향부에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다.

Abstract: The effect of the vertical speed of the laser head on the high geometrical accuracy and high quality of thru-holes is analyzed in the laser helical drilling of a glass substrate. The vertical speed of the laser head affects the helical layer pitch. This is a crucial parameter for determining the complete penetration and machining quality of thru-holes. An aluminosilicate glass substrate with a thickness of 400 μm was drilled via a femtosecond pulsed laser at a wavelength of 1552 nm and with a pulse duration of 800 fs. The laser vertical moving speed is theoretically obtained by the relation with the laser power and the ablation depth. This theoretical method is investigated by experimental results. The vertical speed of the laser head affects the formation of cracks, chippings and heat affected zone.

- 기호설명 -

V_{scan} : 레이저 스캐닝 속도
 $V_{\text{app_scan}}$: 적정 레이저 속도
 V_z : 레이저의 z축 이동 속도
 V_{app_z} : 레이저의 z축 적정 이동 속도
 HAZ : 열 영향부
 F_{th} : 어블레이션 임계 레이저 에너지 밀도
 F_a : 레이저 에너지 밀도

α : 흡수 계수
 CBEs : 전도대 자유 전자
 N : 나선형 층 개수
 L_d : 관통 홀 외곽선 가공 두께
 Φ : 레이저 빔 직경
 L_{scan} : 레이저 스캐닝 길이
 T : 유리 두께
 T_{scan} : 레이저 스캐닝 시간

1. 서론

† Corresponding Author, smoon@hanyang.ac.kr

플레이 부품에 많이 사용되고 있다. 하지만 수치 제어 드릴링 같은 기존 기계 가공 방법을 이용한 유리 가공 방법은 유리의 취성 성질에 의하여, 불규칙한 크랙, 치핑 등의 치명적인 결함을 유발한다. 이러한 기계 가공 방법의 문제점을 해결하기 위한 대안으로, 펄스 레이저 가공이 주목을 받고 있다. 펄스 레이저는 수백 펨토(10^{-15}) 초 동안 매우 작은 영역에 급격히 높은 에너지를 집중시킬 수 있다. 이러한 펄스 레이저의 특성은 투명한 물질에 대하여, 다광자 흡수 현상(Multi-Photon Absorption)에 의한 비선형적 포톤 흡수 과정을 유발시킴으로써, 유리를 가공할 수 있게 되었다.⁽¹⁻³⁾

스마트 폰이나 노트북과 같은 최근 전자기기 디스플레이 시장에서 사용되는 유리는 고강도 특성이 요구되고 있다. 특히 코닝(Corning®)사의 고릴라(Gorilla®) 글라스와 같은 알루미늄실리케이트(Aluminosilicate) 유리가 주목을 받고 있다. 최근 전자기기 산업 분야에서는 이 고강도 특성을 지닌 알루미늄실리케이트 유리를 특정 사용 목적에 따라 다양한 형태로 가공하는 방법이 요구되고 있다.

그동안 알려진 레이저 드릴링 방법은 단펄스 드릴링, 연속 펄스 드릴링, 트리패닝 드릴링과 나선형 드릴링의 방법이 있다.⁽⁴⁻¹¹⁾ 단펄스 드릴링과 연속 펄스 드릴링에서는 사용되는 레이저 빔 직경 정도의 작은 사이즈를 가진 관통 홀을 구현할 수 있으며, 높은 물질 제거율을 가진다. 트리패닝 드릴링과 나선형 드릴링의 경우는 일반적으로 홀 외곽 모서리를 도려냄으로써, 레이저 빔 직경보다 큰 관통 홀 가공이 가능하다. 트리패닝 드릴링의 경우, 레이저 빔이 원형의 경로를 따라, 가공면에 대한 수직 방향으로 단계적으로 내려오면서 관통 홀을 가공한다. 이에 따라 홀 내부 형상에 레이저의 수직 방향 이동 거리만큼의 단차가 발생한다. 반면, 나선형 드릴링의 경우, 레이저 빔이 연속적으로 내려오면서 단차 없이 관통 홀을 구현하게 되어, 트리패닝 드릴링에 비해 관통 홀 내부의 면 품질이 훨씬 우수하다.

레이저 드릴링 과정 중에 발생하는 주요 문제점은 레이저 빔에 의해 제거된 물질들이 홀 경계면 주변으로 재용융되어 축적되면서, 가공되는 물질의 광학 특성을 변화시킨다. 또한 이는 미세 크랙이나, 홀 내부의 경사각도, 스페터 현상들을 유발시키는 원인이 된다. 최근 이러한 문제점들을 해결하기 위한 다양한 연구들이 시도되었다.⁽¹²⁾ 제거

된 물질들이 홀 경계면에 축적되는 현상을 방지하기 위하여, 가공 조건을 최적화시키는 방법, 유동하는 기체나 액체 환경에서의 레이저 가공 방법 등이 연구되었다.^(13,14) 또한 트리패닝 드릴링의 경우, 가공 물질의 두께가 두꺼울수록, 홀 경계면 주위에 재용융되어 축적된 물질들에 의하여, 재료에 흡수되는 레이저 빔 에너지가 감소하게 된다. 감소되어 흡수된 에너지로 인해 홀 내부에 경사 각도가 증가하게 되어, 관통 홀의 입구와 출구의 직경이 다르게 되고, 가공 정밀도가 저하된다. 이러한 트리패닝 드릴링의 단점을 보완하기 위하여, 투명한 가공 재료의 가공 시에, 재료의 윗면이 아닌 바닥면부터 가공을 함으로써, 홀 내부에 발생하는 경사 각도를 줄일 수 있는 방법이 연구되었다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾

본 연구에서는 유리 재료를 관통하는 홀을 나선형 드릴링 기법을 사용하여 제작한다. 레이저 드릴링 가공에 의해 제작되는 홀의 가공 정밀도 향상을 위하여, 가공 재료의 바닥면부터 가공을 시작하는 방법과 동시에 가공 중에 제거되는 물질들의 재용융 및 축적을 방지하기 위하여, 유체의 유동 환경에서 레이저 드릴링이 실시된다. 레이저 헤드의 수직방향 이동 속도에 의해서 홀의 관통여부가 결정되며, 또한 이는 관통홀의 측면 및 품질에 영향을 미친다. 본 연구에서는 레이저 헤드의 수직 이송 속도가 홀의 관통과 품질에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 실험 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에는 $400\ \mu\text{m}$ 두께의 알루미늄실리케이트 유리기판이 사용되었다. 홀 가공에 사용된 레이저의 펄스길이는 $800\ \text{fs}$ 이며, 레이저의 파장은 $1550\ \text{nm}$, 빔의 직경은 $6\ \mu\text{m}$ 이며, 최대 에너지는 $30\ \mu\text{J}$ 이고, 최대 발진 주파수는 $660\ \text{kHz}$ 이다.

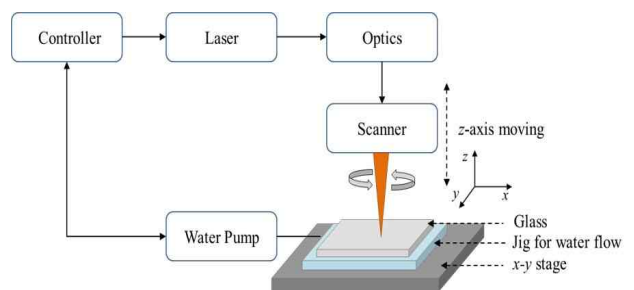


Fig. 1 Schematic diagram of the femtosecond laser machining system

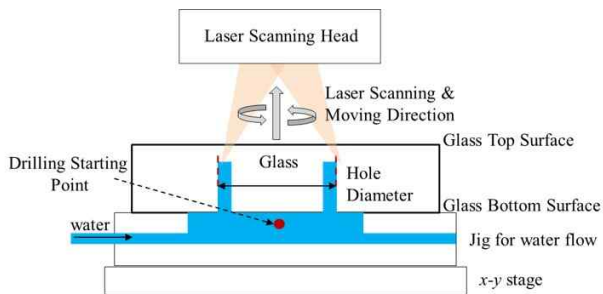


Fig. 2 Laser helical drilling process

유리기판의 윗면은 대기중에 노출되어 있으며, 아래면은 냉각과 레이저에 의해 제거된 유리 미세 입자들의 원활한 배출을 위하여 흐르는 물에 노출되었다. 레이저 에너지는 실험 직전에 측정되었고, 레이저에 의해 가공된 유리 표면의 관통 홀 형태는 공초점 레이저 스캐닝 현미경(Olympus Co., LEXT OLS 4100 model)으로 관찰하였다. 이 측정 장치는 분해능이 10 nm로써 가공 형상을 관찰하기에 충분한 분해능을 보유했다.

Fig. 2에 레이저 나선형 드릴링의 공정도를 나타내었다. 유리의 바닥면에는 유로가 형성되어 물이 흐르면서 가공된 유리 미세 입자들을 제거한다. 가공 시작시에 레이저 빔의 초점은 장착된 유리기판 아래면의 유로에 위치하게 되며, 가공 시작과 동시에 레이저 스캐닝 경로는 원형 형상을 그리며, 유리 가공면의 수직방향으로 유리기판 아래면에서 윗면 방향으로 이동한다. 결과적으로, 레이저 스캐닝 경로는 나선형 경로를 나타내게 된다. 레이저의 수직 방향 총 이동 길이는 가공 종료된 후, 레이저 원형 경로 내부에 남게 되는 원통형상의 잔여물이 추가적인 힘에 의한 제거가 아닌, 실험 장치 하단으로 자유 낙하되어 제거될 수 있도록 유리 두께인 400 μm 보다 충분히 긴 700 μm 로 설정되었다. 가공 도중에 흐르던 물은 유리기판이 관통되기 직전에 자동으로 멈출 수 있도록 제어된다. 이는 관통된 직후, 물이 유리기판의 윗면으로 넘치는 문제를 막기 위함이다.

본 연구에서 사용된 레이저 나선형 드릴링 방법에서 중요한 가공 변수로는 레이저 출력, 주파수, 레이저 헤드 수평 스캐닝 속도, 레이저 헤드 수직 방향 이동 속도 등이 있다. 그 중 레이저 헤드 수직 이동 속도는 홀의 관통 여부와 품질을 결정하는 중요한 변수이다. 나선형 층 간격이 레이저 헤드의 수직 이동 속도에 직접적인 영향을 받기 때문이다. 그 이유는 나선형 층 간격이 레이저 빔에 의해 발생하는 유리 내부의 어블레이션 가공 깊이보다 크다면, 각 나선형 층들이 서로 연결될 수

없게 되어, 가공 직후 내부 원통형 잔여물이 자유낙하로 제거될 수 없기 때문이다. 자유낙하로 제거되지 못하면, 추가적인 외부 힘에 의해 원통형 잔여물을 제거할 경우, 홀 경계면 주변으로 크랙과 치핑이 발생하여 표면 품질을 저하시키는 원인이 된다. 추가적으로, 레이저 빔은 유리의 설정된 수직방향 이동이 종료됨과 동시에 가공이 반드시 종료되어야만 한다. 그 이유는 수직방향 이동이 종료된 이후에도 유리의 윗면을 계속 조사하게 될 경우, 유리의 윗면에 열적 영향부가 형성이 되고, 이 열영향부 또한 홀 경계면 주위의 마이크로 크랙과 치핑을 발생시키는 주요 원인이 될 수 있다. 결국 나선형 층 간격이 어블레이션 가공 깊이보다 작게 설정이 되어야만, 나선형 층이 서로 충분히 연결되어 홀 관통을 구현할 수 있게 되고, 이와 더불어, 레이저 빔 이동 경로 상에서 초점간 간격이 충분히 겹치게 되어야 홀 관통이 구현될 수 있다. 사용된 빔 직경은 6 μm , 레이저 주파수는 660 kHz, 레이저 출력 변화 범위는 10에서 28.3 μJ 이다. 스캐닝 속도는 800 mm/s, 레이저의 수직 방향 이동 속도는 0.1에서 0.3 mm/s 사이에서 변화시켜가며 그 영향을 고찰하였다. 총 이동 거리는 유리기판 두께인 400 μm 의 1.75 배인 700 μm 로 충분히 확보하였다.

3. 결과 및 고찰

레이저 나선형 가공 방법의 가장 중요한 변수는 나선형 층 사이 간격이다. 먼저, 본 실험에서 사용된 레이저 출력 변화 범위에서 발생하는 어블레이션 깊이(L_{depth})는 식 (1)에 의해서 얻어진다.

$$L_{\text{depth}} = \alpha^{-1} \ln(F_a / F_{\text{th}}) \quad (1)$$

F_{th} 는 어블레이션 임계 에너지 밀도 [J/cm^2]이며, F_a 는 사용된 레이저 에너지 밀도, 그리고 α 는 실험에 사용된 유리물질의 흡수계수이다. 본 실험에 사용된 유리의 어블레이션 임계 에너지 밀도는 Fig. 3과 같이 D^2 방법에 의해 2.4 J/cm^2 로 계산된다.⁽¹⁸⁾ 흡수계수 α 는 전도대 자유전자 (CBE, Conduction band free electrons)의 확산 길이에 의해 결정된다고 알려져 있다. CBE 수명은 레이저 펄스 길이인 800 fs와 CBE 수명인 150 fs 함에 의하여 대략 950 fs으로 추정되며, 결과적으로 CBE의 확산거리는 CBE 확산속도인 1 nm/fs에 의해 950 nm로 계산된다.⁽¹⁹⁾ 이와 같은 이론적인 분석에 의하여, 어블레이션 가공 깊이는 레이저 에너지 밀도

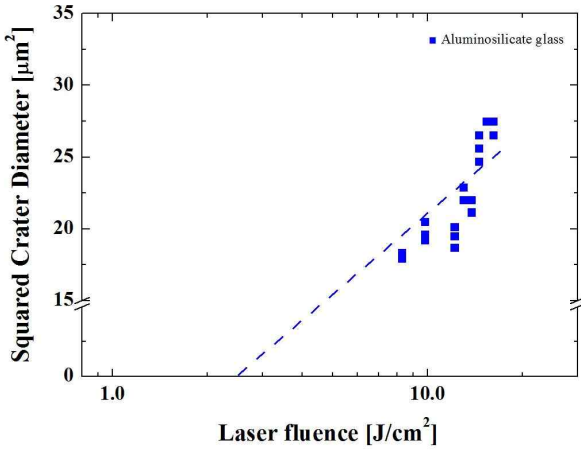


Fig. 3 Ablation threshold laser fluence determined by the D^2 method

가 106 J/cm^2 인 경우, 식 (1)에 의해 대략 $3.6 \mu\text{m}$ 의 어블레이션 깊이를 얻을 수 있다. 레이저 헤드의 수직방향 총 이송 거리인 $700 \mu\text{m}$ 를 어블레이션 가공 깊이로 나누게 되면, 대략 200층의 나선형 층(N)이 관통 홀 구현에 필요함을 알 수 있다. 따라서 식 (1)을 이용하여 홀관통에 필요한 연결 깊이를 알 수 있다.

이론적으로 계산되어 얻어진 나선형 200층은 각각 층들 사이가 서로 완전히 연결되어야 관통 홀이 구현되며, 홀 경계면 주위 표면품질도 좋아진다. 나선형 층의 완전한 연결을 위하여, 레이저 수직이동 속도를 조절하여 단펄스 레이저 가공이 아닌, 복수펄스 레이저 가공 방법을 구현한다. 선행 연구에 따르면 본 실험에 사용된 알루미노실리케이트 유리기관은 동일한 레이저 에너지 밀도에서 5번의 복수 펄스 레이저에 대해, 단펄스 가공 결과와 비교하여, 약 $1.5 \mu\text{m}$ 가 증가하였다.⁽²⁰⁾ 본 실험에서 사용된 레이저 빔 직경은 $6 \mu\text{m}$ 이다. 레이저 원형 평면 스캐닝 속도는 800 mm/s , 주파수가 660 kHz 일 경우, 원형 스캐닝없이 연속된 5번의 복수 펄스 레이저 가공과 가공 깊이면에서 동일한 효과를 얻을 수 있다. 레이저 스캐닝 속도가 800 mm/s 보다 빠르면, 각 층에서 발생하는 어블레이션 깊이가 얇아져, 층간 연결이 완전히 이루어질 수 없게 되고, 홀 관통이 구현되기 어렵다. 반대로, 레이저 스캐닝 속도가 800 mm/s 보다 느리면, 복수 펄스 개수가 증가하여, 어블레이션 깊이가 깊어지게 되고, 완전한 층간 연결이 될 수 있다. 하지만, 가공 시간이 증가하게 되는 단점이 발생하고 과도한 열의 전달로 결함이 증가하게 된다.

나선형 레이저 드릴링 가공 중, 레이저 스캐닝의 원형 경로는 제어 장치의 프로그램상에서, 관

통 홀 직경을 미세하게 감소와 증가를 지속적으로 반복하게 된다. 이러한 과정은 레이저에 의해 가공되는 홀 외곽선의 두께(L_d)를 증가시키는 효과를 가져오게 되고, 따라서 레이저에 의해 제거된 유리 미세 입자들이 원활하게 물의 유동에 의해 제거될 수 있도록 충분한 경로를 확보해준다. 본 실험에서는 홀외곽선 두께를 $30 \mu\text{m}$ 로 설정하였으며, 레이저 빔 직경(Φ)이 $6 \mu\text{m}$ 이므로, 레이저 스캐닝 경로는 5바퀴씩 증가와 감속을 반복하게 된다. 이와 같은 과정을 따라, 나선형 레이저 드릴링 가공 시, 레이저 스캐닝의 전체 경로(L_{scan})를 식 (2)에 따라 얻을 수 있다.

$$L_{\text{scan}} = a t \pi D L_d / \left\{ \phi \alpha^{-1} \ln(F_a / F_{\text{th}}) \right\} \quad (2)$$

여기서 a 는 완전한 관통 홀 구현을 위하여, 유리 두께 t 보다 충분히 긴 수직방향 이동거리를 확보하기 위하여 선정된 상수이며, 본 실험에서는 1.75로 설정되었다. N 은 레이저의 수직방향 이동거리를 어블레이션 깊이로 나누어 계산된, 나선형 층 개수이다. 만약 가공하고자 하는 관통 홀의 직경(D)이 1 mm 인 경우, 가공 중 발생하는 레이저 스캐닝 전체 길이 L_{scan} 는 대략 3100 mm 이며, 스캐닝 속도는 800 mm/s 이므로, 스캐닝에 필요한 시간은 약 4 s 이다. 앞서 언급한 바와 같이, 가공된 홀 경계면 주위에 마이크로 크랙 또는 치핑이 없도록 가공하기 위해서는 레이저 원형 평면 스캐닝과 레이저 헤드 수직방향 이동은 동시에 정지해야만 한다($T_{\text{scan}}=T_z$). 따라서 완전한 관통과 좋은 가공 품질을 달성하기 위한 수직방향 이송 속도 V_{app_z} 는 식 (3)에 의하여, 0.18 mm/s 로 계산된다.

$$V_{\text{app}_z} = V_{\text{scan}} \phi \alpha^{-1} \ln(F_a / F_{\text{th}}) / \pi D L_d \quad (3)$$

레이저 헤드의 수직방향 적정 이동속도 V_{app_z} 는 레이저 출력 에너지 변화에 따라 변하게 된다. 즉, 레이저 출력 에너지가 증가하게 되면, 어블레이션 가공 깊이는 증가하게 되고, 나선형 가공에 필요한 나선형 층 개수는 감소하게 된다. 그러므로 관통 홀은 좀더 빠른 속도와 시간으로 가공될 수 있다. 추가적으로, 레이저의 수직방향 이송 속도가 계산된 적정 이송 속도 V_{app_z} 보다 낮다면, 나선형 층 사이의 간격이 좀더 좁아지게 되고, 각 나선형 층에서 발생한 어블레이션 가공 형상이 서로 조밀하게 연결될 수 있으므로, 관통 홀의 내부 측면 품질이 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 이용한 레이저 나선형 드릴링에서

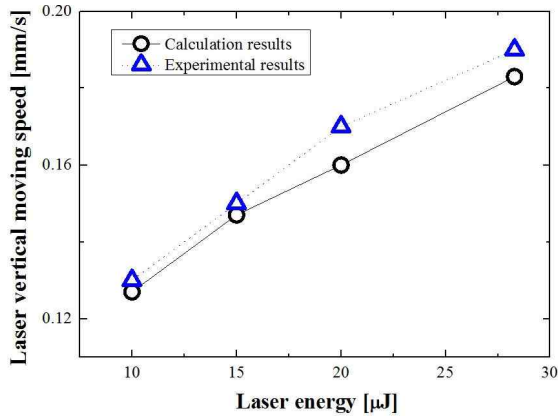


Fig. 4 Experimental and calculation results of $V_{app,z}$ for the thru-holes

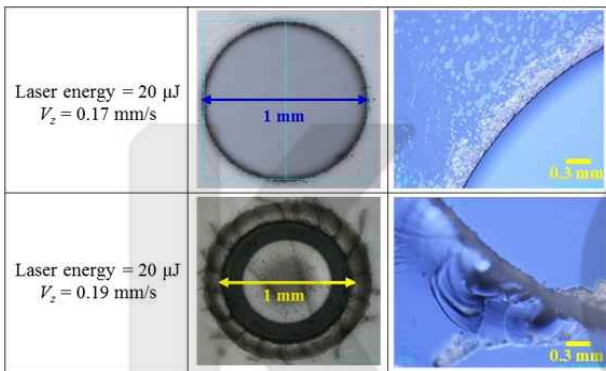
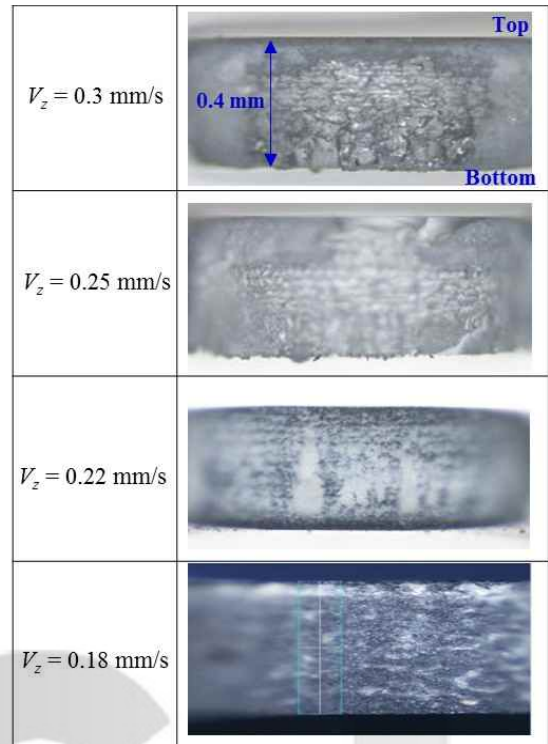


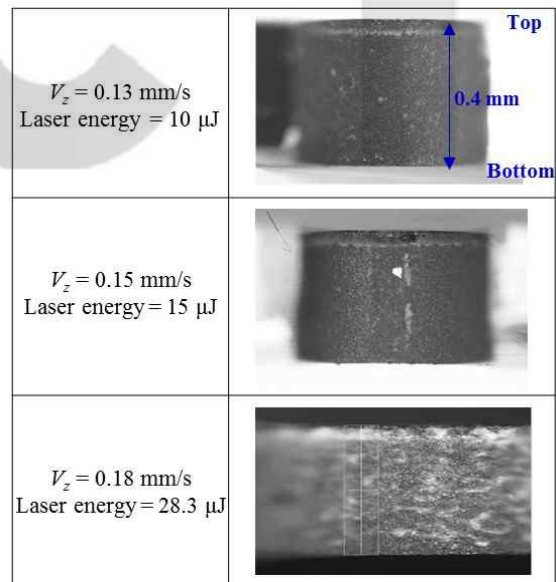
Fig. 5 Top view of thru-holes with varying V_z

레이저 출력과 레이저의 수직 방향 이송 속도 (V_z)를 변화시켜가며 실험을 진행하였다. 레이저 출력에 따라 어블레이션 깊이가 달라지며, 이는 레이저 헤드의 이동속도에 영향을 미치기 때문이다. 각 레이저 출력에서 레이저 헤드 수직 이동 속도, V_z 실험 초기 값은 식 (3)에 의해 계산된 값으로 시작하였다. Fig. 4는 이론에서 얻어진 레이저 헤드 수직 이동 속도, V_z 와 실험에서 관통 홀이 실제 구현된 레이저 헤드 수직 이동 속도, V_z 값을 비교한 그래프이다. 실험 결과와 계산 결과의 차이는 약 0.01 mm/s 이내이며, 변화하는 경향은 두 값이 매우 유사하였다.

Fig. 5에 관통된 홀의 표면 상태 관찰 결과를 나타내었다. Fig. 5에서 위 사진은 식 (3)에 의해 얻어진 레이저 헤드 수직 이동 속도, V_z 로 가공된 관통 홀의 표면 상태이며, 아래 사진은 계산된 레이저 헤드 수직 이동 속도 V_z 이상으로 가공했을 경우, 표면 상태를 보여준다. Fig. 5의 위 사진에서는 크랙과 치핑 현상들은 발견되지 않으며, 홀 경계면 주위로 제거된 유리 이물질들이 점착된 모습이



(a)



(b)

Fig. 6 Surface morphology due to variation of (a) V_z and (b) laser energy

관찰되었다. Fig. 5의 아래의 표면 상태에서는 관통 홀 경계면 주위로 열영향부, 크랙, 거대한 치핑 현상들이 발견되었다. 그 원인은 레이저 헤드의 수직방향 이송 속도가 빠르기에, 각 나선형 층의 어블레이션 가공 형상이 충분히 연결되지 않았기 때문이다. 또한, 유리 바닥면에 흐르는 물이 홀 외곽

선 L_d 을 따라서 유리 윗면으로 충분히 상승되지 못하기에, 냉각 효과가 부족하였고, 레이저에 의해 제거된 유리 입자들이 충분히 제거되지 못하였기 때문에, 관통 홀 외곽 면 주위에 열 집중 현상이 발생하였다.

Fig. 6은 레이저 헤드 수직 이송 속도를 달리하여 관통된 홀을 유리 두께 방향으로 절단하여 측정된 홀 측벽 내부를 관찰한 결과이다. Fig. 6(a)는 레이저 에너지가 $28.3 \mu\text{J}$ 일 때, 식 (3)에서 계산된 $V_{\text{app},z}$ 0.18 mm/s 에서부터 속도를 점점 증가시켰을 경우의 표면 품질을 보여준다. 이송 속도가 점점 증가할수록 나선형 층 사이의 간격이 어블레이션 가공 깊이보다 크기 때문에, 각 나선형 층은 충분히 연결되지 못하였고, 이에 따라 관통 홀 내부 측벽에 불규칙하게 유리 조각들이 떨어져 나가게 되어, 치핑 현상이 발생하였다. 반면, Fig. 6(b)에서도 확인할 수 있듯이, 레이저 에너지 변화에 따라 식 (3)에 의해 계산된 적정 레이저 헤드 수직 이송 속도에서는 우수한 단면 표면 품질을 달성할 수 있었다. 식 (3)에 의해 계산된 수직방향의 적정 이동 속도 $V_{\text{app},z}$ 에서는 어떠한 치핑도 발견되지 않았고, 나선형 층도 관찰되지 않았다. 이는 각 나선형 층 사이가 충분히 연결되었음을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 펄스 레이저를 이용한 나선형 드릴링에서 레이저 헤드의 수직 이송 속도의 영향을 실험적으로 고찰하였다. 레이저의 나선형 드릴링 방법에서 가장 중요한 가공 변수는 어블레이션 깊이와 나선형 층 사이의 간격이다. 먼저 실험에서 사용된 레이저 출력 변화에 따른 어블레이션 깊이를 이론적 접근방법을 통해 계산하였다. 그 다음으로 나선형 드릴링의 관통 형상을 구현하기 위하여, 어블레이션 깊이는 나선형 층 사이 간격보다 반드시 길어야만 하므로, 나선형 층 사이 간격은 레이저의 수직방향 이송 속도로 결정되었다. 결국 어블레이션 깊이와 나선형 층 사이의 간격, 두 개의 변수 상관관계에서 얻어진 레이저의 수직방향 이동 속도에 따라 홀의 관통 여부와 홀 품질이 결정된다. 생산성의 향상을 위하여 이 속도보다 빠른 속도로 가공을 진행하면, 나선형 층사이의 간격이 어블레이션 깊이보다 증가하게 되어, 나선형 층 사이가 연결되지 않기 때문에, 열 집중 현상 및 크랙과 치핑 등이 발생되어 품질이 저하되었다. 반면 이론 값에 의한 가공 결과에서는 치핑과 크랙은 전혀 발견되지 않았다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 지원으로 진행되었습니다.(No. NRF-2016R1D1A1B03935556).

참고문헌 (References)

- (1) Lenzner, M., Krüger, J., Sartania, S., Cheng, Z., Spielmann, C., Mourou, G., Kautek, W. and Krausz, F., 1998, "Femtosecond Optical Breakdown in Dielectrics," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 80, No. 18, pp. 4076-4079.
- (2) Downer, M. C., Fork, R. L. and Shank, C. V., 1985, "Femtosecond Imaging of Melting and Evaporation at a Photoexcited Silicon Surface," *J. Opt. Am. B*, Vol. 2, No. 4, pp. 595-599.
- (3) Liu, X., Du, D. and Mourou, G., 1997, "Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses," *IEEE J. Quantum. Electron.* Vol. 33, No. 10, pp. 1706-1716.
- (4) Dubey, A. K. and Yadava, V., 2008, "Laser Beam Machining — A Review," *Int. J. Mach. Tools. Manuf.*, Vol. 48, No. 6, pp. 609-625.
- (5) Kling, R., Dijoux, M., Romoli, L., Tantussi, F., Sanabria, J. and Mottay, E., 2013, "Metal Micro Drilling Combining High Power Femtosecond Laser and Trepanning Head," *Proc. of SPIE*. Vol. 8608 86080F-1-14.
- (6) Zhang, H., Di, J., Ming Z., Yan, Y. and Wang, R., 2015, "An Investigation on the Hole Quality during Picosecond Laser Helical Drilling of Stainless Steel 304," *Appl. Phys. A*, Vol. 119, No. 2, pp. 745-752.
- (7) Li, L., Low D. K. Y., Ghoreishi, M. and Crookall, J. R., 2002, "Hole Taper Characterization and Control in Laser Percussion Drilling," *Ann. CIRP*, Vol. 51, No. 1, pp. 153-156.
- (8) Yan, Y., Ji, L., Bao, Y. and Jiang, Y., 2012, "An Experimental and Numerical Study on Laser Percussion Drilling of Thick-Section Alumina," *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 212, No. 6, pp. 1257-1270.
- (9) Low, D. K. Y., Li, L. and Byrd, P. J., 2000, "The Effects of Process Parameters on Spatter Deposition in Laser Percussion Drilling," *Opt. Laser Tech.*, Vol. 32, No. 5, pp. 347-354.
- (10) Mishra, S. and Yadava, V., 2013, "Modeling and Optimization of Laser Beam Percussion Drilling of Thin Aluminum Sheet," *Opt. Laser Tech.*, Vol. 48, pp. 461-474.
- (11) Sezer, H. K., Li, L., Schmidt, M., Pinkerton, A. J. and Anderson, B. and Williams, P., 2006, "Effect of Beam Angle on HAZ, Recast and Oxide Layer

- Characteristics in Laser Drilling of TBC Nickel Superalloys,” *Int. J. Mach. Tool Manuf.*, Vol. 46, No. 15, pp. 1972~1982.
- (12) Mishra, S. and Yadava, V., 2015 “Laser Beam Micro Machining (LBMM) – A Review,” *Opt. Lasers Eng.* Vol. 73, pp. 89~122.
- (13) Tsai, C.-H. and Li, C.-C., 2009, “Investigation of Underwater Laser Drilling for Brittle Substrates,” *J. Mater. Process. Tech.* Vol. 209, No. 6, pp. 2838~2846.
- (14) Wlodarczyk, K. L. and Brunton, A., Rumsby, P. and Hand, D. P., 2016, “Picosecond Laser Cutting and Drilling of Thin Flex Glass,” *Opt. Lasers Eng.* Vol. 78, pp. 64~74.
- (15) An, R., Li, Y., Dou, Y.-P., Fang, Y., Yang, H. and Gong, Q.-H., 2004, “Laser Micro-Hole Drilling of Soda-Lime Glass with Femtosecond Pulses,” *Chin. Phys Lett.* Vol. 21, No. 12, pp. 2465~2468.
- (16) Hwang, D. J., Choi, T. Y. and Grigoropoulos, C. P., 2004, “Liquid-Assisted Femtosecond Laser Drilling of Straight and Three-Dimensional Microchannels in Glass,” *Appl. Phys. A.* Vol. 79, No. 3, pp. 605~612.
- (17) Li, Y., Itoh, K., Watanabe, W., Yamada, K., Kuroda, D., Nishii, J. and Jiang, Y., 2001, “Three-Dimensional Hole Drilling of Silica Glass from the Rear Surface with Femtosecond Laser Pulses,” *Opt. Lett.* Vol. 26, No. 23, pp. 1912~1914.
- (18) Momma, C., Nolte, S., Chichkov, B. N., Alvensleben, F. v. and Tünnermann, A., 1997, “Precise Laser Ablation with Ultrashort Pulses,” *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 109-110, pp. 15~19.
- (19) Liu, J. M., 1982 “Simple Technique for Measurements of Pulsed Gaussian-Beam Spot Sizes,” *Opt. Lett.* Vol. 7, No. 5, pp. 196~198.
- (20) Ben-Yakar, A. and Byer, R. L., 2004, “Femtosecond Laser Ablation Properties of Borosilicate Glass,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, No. 9, pp. 5316~5323.

K C I