

세라믹에 대한 수중 레이저 드릴링의 열영향 모델링 및 해석

Modeling and Analysis of Thermal Effects of Underwater Laser Drilling for Ceramics

김택구¹, 김주한^{2,✉}
Teak Gu Kim¹ and Joohan Kim^{2,✉}

¹ 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 (Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science and Technology)

² 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology)

✉ Corresponding author: joo Hankim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6314

Manuscript received: 2013.9.23 / Revised: 2013.11.8 / Accepted: 2013.11.12

In this work, modeling and analysis of thermal effects laser drilling under water for ceramics were presented. Laser is a unique tool for machining ceramics due to the characteristic of non-contact material removal. However, ablation by a laser often induces a thermal effect on the material and an increased heat-affected-zone or deposition of debris can be observed on the machined parts. The underwater surrounding improved a heat transfer rate to cooling down the machined part and could prevent any deposition of debris near the machined surfaces and edges. The heat modeling was applied to obtain the temperature distributions as well as temperature gradients between the material and surroundings. The cooling effect of the underwater laser drilling was improved and a more stable temperature distribution was calculated. The actual laser drilling results of ceramic laser drilling were presented to verify the effects of underwater laser drilling.

Key Words: Laser drilling (레이저 드릴링), Ceramic (세라믹), Water Surrounding (수중 환경)

기호설명

a = absorption coefficient

ρ = density of the substrate

C_p = capacity of the substrate

k = heat conductivity of the substrate

h = convection coefficient

T = temperature

Q = laser heat input

β = expansion coefficient

ν = viscosity of fluid

1. 서론

세라믹은 경량의 내마모성, 내부식성을 가진

재료이며 고온에서의 안정성이 여타 재료에 비하여 우수하기 때문에 항공, 발전 및 군사 분야의 각종 가혹환경에 적용되는 특수 재료로 주목을 받고 있다. 그러나 세라믹은 연성이 부족하여 연삭 이외의 기계적 가공이 어려운 단점이 존재한다. 또한 절삭가공에서 있어서도 공구와 세라믹과의 마찰에 의하여 공구팁이 손쉽게 손상될 수 있으며, 결과적으로 높은 가공비용이 소모된다. 기계적 가공을 수행하는 도중에 발생한 응력이나 충격으로 인하여 재료의 파단이 발생할 가능성도 존재한다. 이에 따라 세라믹가공을 위해 다양한 특수가공법이 연구되어 왔으며 그 중 하나가 레이저를 이용한 세라믹 미세 정밀가공이다. 레이저를 이용하여 세라믹 가공을 수행하는 것은 비접촉 고에너지 가공의 특성을 가지고 있으며 이에 상대적으로 기계

가공에 비하여 정밀 가공을 수행할 수 있는 특징이 있다.^{1,2} 또한 일반적인 기계적 가공을 통하여 세라믹에 홀 가공을 수행하는 경우에 생성되는 세라믹 홀의 크기는 일반적으로 수백 마이크로 이상이며 가공에 따라 재료의 파단이 빈번하게 일어난다. 그러나 레이저를 이용하여 세라믹 가공을 수행하는 경우, 레이저빔의 집속과 빔의 펄스 특성을 이용하여 이론적으로 레이저 스폿크기인 수 마이크로미터의 홀 가공이 가능하다.^{3,4}

대표적인 선행연구를 살펴보면, Tsai 등은 알루미늄과 LCD용 유리재질의 레이저 드릴링의 매커니즘을 제안하고, 레이저 가공을 수행하는 경우 균열의 생성을 억제할 수 있음을 보였다.⁵ Ng 등은 레이저의 피크파워와 펄스폭과 가공 홀의 형상에 대한 연구를 수행하였으며⁶ Voisey 등은 방열코팅이 된 세라믹 재질에 냉각을 위한 홀 가공을 레이저를 이용하여 수행하는 방안에 관하여 연구하였다.⁷ Low 등은 400W급 Nd:YAG 레이저를 이용한 세라믹 홀 가공을 수행함에 있어 보조가스의 사용에 의한 효과와 홀의 격자배열 가공에 관하여 연구하였다.⁸ Dhupal 등은 Nd:YAG 펄스레이저를 이용하여 실린더 형태의 산화알루미늄(Alumina, Al₂O₃)재질의 미세 홀 가공에 관하여 연구하였고, 단면의 형상에 관하여 고찰하였다.⁹ Perrie 등은 펜토초 레이저를 이용한 세라믹의 어블레이션 공정에 관하여 연구하였다.¹⁰ Williams 등은 산화알루미늄과 질화알루미늄의 레이저 가공을 수행함에 있어 CO₂ 레이저 공정과 엑시머 레이저 공정의 비교 및 각각의 특성에 관하여 연구 보고하였다.¹¹

일반적인 레이저 가공을 수행하는 경우 재료의 정밀 가공은 가능하지만 여전히 열응력에 의하여 미세 결함이 발생될 가능성이 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 공기중이 아닌 수중에서의 레이저 가공에 관한 연구가 제안되었다.¹²⁻¹⁴ 수중에서의 레이저 재료 가공은 그 공정 셋업상의 어려운 점이 존재하나 효율적인 재료의 냉각 및 기타 부산물의 재료표면에 대한 재흡착 방지 등 그 특유의 장점이 존재한다. 현재 보고된 세라믹의 수중 레이저 가공은 기계 가공을 통하여 가능한 크기의 레이저 홀 가공을 수행하거나, 수중 레이저 가공을 제안하는데 그치며 레이저에 의한 표면 가공 효과만을 제시하였다.¹² 이러한 이유로 세라믹의 수중 레이저 가공을 수행할 때 열적 영향이 저감된 상태에서의 레이저 세라믹 가공 공정을 연구할 필요성이 있다. 본 연구에서는 세라믹에 대한 수

중 레이저 정밀 가공에 있어 그 냉각효과를 모델링하고 실제 드릴링에 있어 그 효과가 어떻게 재료 가공에 영향을 미치는 지를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 수치적 모델링 및 해석

2.1 세라믹 레이저 드릴링의 열영향 모델링

고에너지, 고집속 레이저를 이용한 세라믹 가공은 재료에 잔류하는 열에너지가 크기 때문에 열응력을 발생시킬 수 있으며 재료 어블레이션에서 발생하는 부산물 흡착의 영향을 받는다. 이는 펄스당 에너지가 작거나 펄스폭이 큰 경우에도 적용된다. 때문에 세라믹의 가공을 위해서는 빔의 품질이 우수해야 하며, 레이저 빔의 에너지가 재료의 어블레이션에 최대한 이용됨과 동시에 어블레이션 후 신속한 열전달을 통해 가공면에 잔류하는 에너지를 저감시켜야 한다. 그러므로, 세라믹의 수중 레이저 가공에 있어서 열적 영향을 모델링하여 수치적인 경향을 예측하는 것이 공정 매커니즘의 이해와 적용을 위해 필요하다.

공정에 있어 모델링을 위해 재료 내부에서 열확산 지배 방정식을 적용하였으며 해석 대상의 경계조건 및 초기조건을 고려하였다. 레이저에 의해 어블레이션이 수행된 후 재료에 잔류하는 에너지의 온도 분포는 열확산 지배 방정식 (1)을 통해 수치해를 얻는 것이 가능하다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

여기서, C_p 는 재료의 열용량, ρ 는 밀도, K 는 열전도율이다. 해석에 사용되는 물성은 온도에 따른 함수로 가정하여 계산을 수행하였다. 어블레이션이 진행되는 과정에서 실제 물질 제거와 온도분포에 대한 해석을 동시에 수행하는 것은 여러 물리현상의 결합으로 인해 현실적이지 못하다. 본 연구는 물질 제거 후 레이저에 의한 가열 및 잔류열의 분포가 중요하기 때문에 가공에서 발생하는 현상들을 어블레이션 후 가공면의 열전달로 단순화하여 모델링하였다. 실험에서 사용된 펄스 레이저빔은 같은 평균출력을 가진 3W 연속파 레이저의 형태로 단순화하였고 이 에너지에 어블레이션된 홀의 열적 영향을 예상하였다. 단순화 과정에서 재료 내부에서 에너지 확산의 초기 조건을 직접 정의하기는 어려우므로 시편에 실제 입사하는 에너지를

고려하여 냉각 조건을 계산하기 위한 초기온도 분포를 적용하였다. 재료 주변의 유체 온도는 실내 온도와 동일한 300K인 것으로 가정하였다. 이러한 조건은 다음과 같은 식들로 나타낼 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + h(T - T_\infty) = aQ(x, y, t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (4)$$

$$T(x, y \rightarrow \infty, z \rightarrow -\infty) = 300K \quad (5)$$

$$T(t = 0) = 300K \quad (6)$$

여기서 수중 및 공기상의 열전달의 차이점은 자연 대류계수의 적용이다. 자연대류가 발생된다는 가정에서 그 값을 결정하는 대류의 레이리수는 식 아래의 식같이 표현된다. 이를 이용하면 계면에서 유체의 유동에 관한 정보를 근사적으로 수치화할 수 있으며 각각의 복합 열전달 계수의 계산에 이용할 수 있다.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (7)$$

여기서, β 는 유체의 체적 팽창 계수이고 ν 는 동점성 계수, α 는 열확산 계수이다. 이러한 관계를 적용하여 대류 열전달에 대한 누셀수(Nusselt number)와 레이리수의 관계를 바탕으로 아래 식을 통해 계산할 수 있다.

$$Nu_L = 0.54Ra_L^{1/4} \quad (8)$$

이를 통해 자연대류의 수치를 근사적으로 결정할 수 있었으며 해석에 적용하였다. 근사적 값은 수중 비등 등이 예상되어 발생하는 실제 대류 열전달 값보다 작을 것으로 추정된다.

2.2 열영향에 대한 수치적 해석

시뮬레이션은 레이저에 의해 가공된 재료의 단면의 온도분포를 결정하는데 사용되었으며 홀의 직경은 35 μm 인 것으로 설정하였다. 계산시간을 단축하기 위하여 홀을 중심으로 대칭인 구조를 가

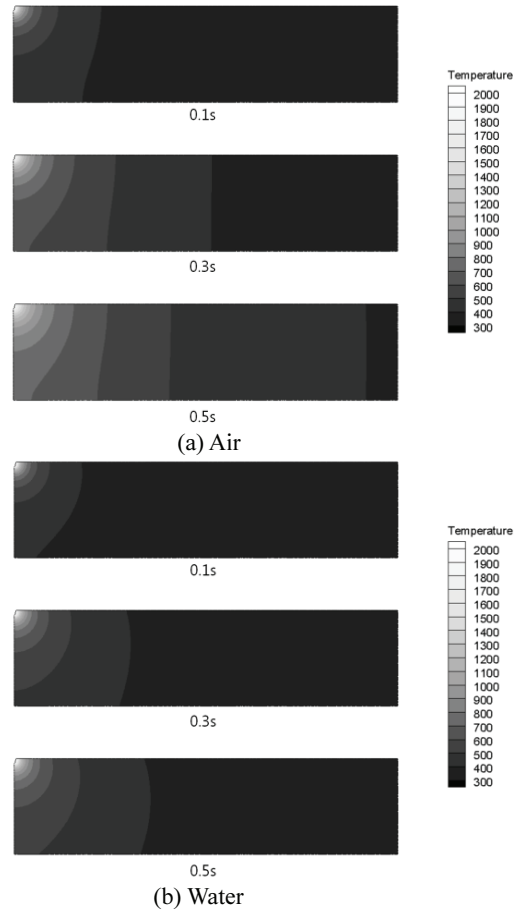
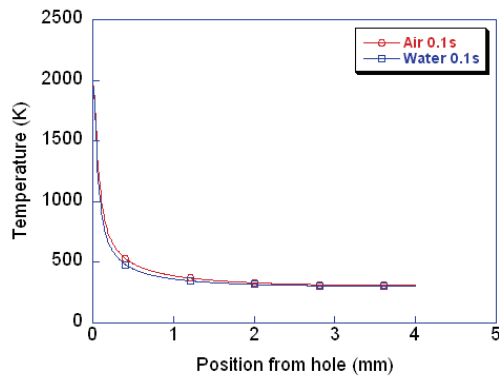
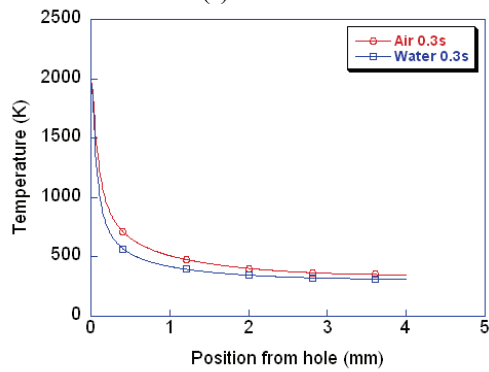


Fig. 1 Temperature distribution with respect to time

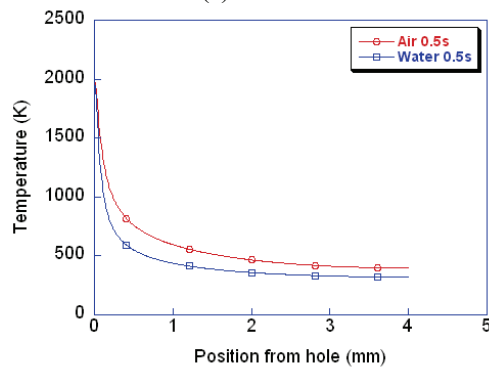
진 모델로 적용하였다. 레이저 스폿이 고정되어 있는 지점은 반사되는 레이저의 에너지 이외의 모든 에너지가 입사하는 것으로 가정하였다. 그러나 수중에서 가공을 수행하는 경우 물의 투과율에 의하여 실제 시편에 도달하는 에너지가 감소하게 되며 투과율에 따른 레이저 에너지 입사를 적용하였다. Fig. 1(a)은 세라믹 홀 가공 시 홀 주변에 온도 분포의 경향을 보이는 시뮬레이션 결과이다. 대기 조건에서 가공을 수행하는 것으로 가정하여 시뮬레이션 한 결과 재료 내부방향으로의 열의 확산이 더 넓으며 더 빠르게 수행됨을 알 수 있다. Fig. 1(b)에서는 수중에서 레이저 가공을 수행하는 경우를 모사한 결과를 나타내고 있는데 열 효과가 일정 깊이 이상으로 침투되어 있지 않으며 그 온도 상승의 분포도 공기중과 비교해 볼 때 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 생성되는 홀의 깊



(a) 0.1 sec



(b) 0.3 sec

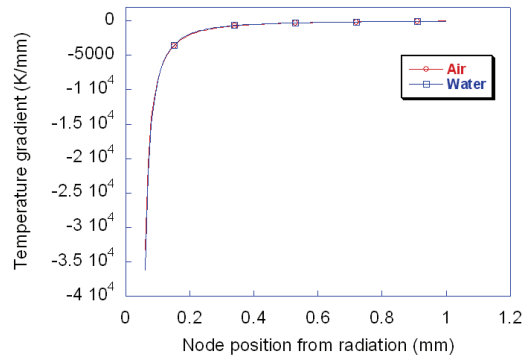


(c) 0.5 sec

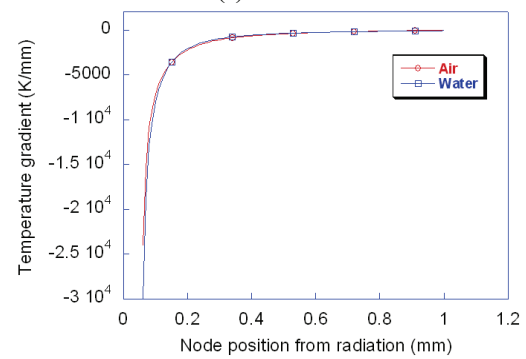
Fig. 2 Temperature profiles at the surface

이 방향에서도 같다. 이는 수중 레이저 가공을 수행하는 경우 홀 주변에서 유체의 유동이 활발하게 일어나 냉각되기 때문에 가공면에서 냉각효과가 더 뛰어나기 때문으로 판단된다.

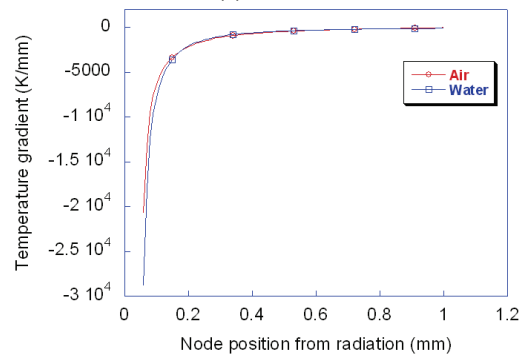
Fig. 2는 레이저로 가공되고 있는 홀 표면 온도에 대한 결과이다. 대기조건에서는 시간이 경과할수록 온도가 더 증가하며 홀 주변의 열 또한 넓게 확산되는 것을 확인할 수 있다. 또한 홀에서 멀리



(a) 0.1 sec



(b) 0.3 sec



(c) 0.5 sec

Fig. 3 Temperature gradients in laser drilling for ceramic

떨어진 부분의 온도 상승 또한 지속적으로 일어나고 있으며, 시간이 경과할수록 수중 가공을 모사한 경우와 온도 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 수중 레이저 가공을 모사한 결과의 표면 온도 분포는 매우 작게 변화하며, 대기조건에 비하여 더 작은 온도 변화를 보이고 있다. 공기중의 가공을 모사한 결과에서는 약 3 mm 지점 이후에 초기조건과 거의 동일한 온도분포를 보이며, 홀 주변에서 퍼지는 열 또한 더 적은 것으로 보인다.

또한 0.3초에서 0.5초간의 온도변화를 확인해 보면 더 대기조건의 경우에 비교하여 매우 작은 온도변화를 보이고 있다.

Fig. 3은 세라믹의 홀가공을 수행하는 경우 레이저에 의해 발생한 깊이 방향의 온도구배 그래프이다. 세라믹의 열전도도는 낮기 때문에 서로 다른 매질과 접하고 있는 경우에도 우수한 냉각성을 기대하기 어렵다. 때문에 깊이 방향으로의 온도구배는 거의 동일한 값을 보이고 있으며, 그 차이가 명확하지 않다. 또한 레이저 초점 부근에서 세라믹 내부의 온도구배가 매우 크며 그래프에서 그 차이를 명확하게 구분하기 어렵다. 그러나 시간이 경과할수록 공기와 물에 위치한 것으로 가정 한 세라믹 내부의 온도구배 차이는 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 레이저가 조사되는 0.1 mm 지점까지의 온도구배가 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 시뮬레이션의 모델링 결과를 종합해볼 때 수중에서의 세라믹 홀 레이저 가공은 열적 영향의 측면에서 볼 때 재료에 대한 작은 열영향과 낮은 온도구배를 제공함으로써 가공 후 결과에 있어 열적 효과를 감소시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

3. 세라믹 레이저 드릴링 실험 및 결과

모델링 및 수치해석을 통해 분석된 경향은 실제 실험을 통해 확인하였으며 이를 위해 레이저 실험 장치와 결과에 대한 분석이 다음과 같이 수행되었다.

3.1 실험 장치 및 조건

일반적으로 세라믹은 비금속 무기재료를 통칭하는 것이다. 이는 금속의 양이온이 산소와 결합한 형태인 산화물계 세라믹과 질소, 탄소등과 결합한 비산화물계 세라믹이 존재한다. 산화물계 세라믹은 대표적으로 알루미나(Alumina, Al₂O₃)가 있으며, 비산화물계는 질화알루미늄(AIN)이 존재한다. 본 실험에 사용된 세라믹(Alumina 96, MISUMI)은 다양한 산업에 있어서 기계재료로서 적용이 가능하다. 실제 실험에 사용된 세라믹의 형상은 가로 및 세로가 각 50 mm 이며 두께가 1 mm 이다.

본 연구에서는 세라믹의 수중 드릴링을 위하여 UV 펄스 레이저(Optowave, AWAVE-355 10W-30K)를 이용하였다. 본 레이저의 파장, 최대평균출력, 및 펄스폭은 각각 355 nm, 10 W, 50 ns이다. 실험 재

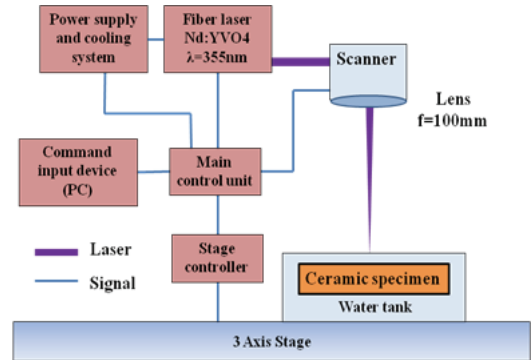


Fig. 4 Laser system setup

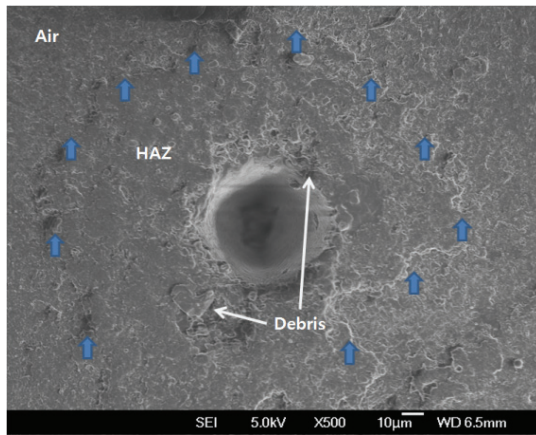
Table 1 Laser parameters for experiments

Condition	Air	Water
Repetition rate (kHz)	10~30	10~30
Pulse width (ns)	50	50
Average Power (W)	0.62~3.65	0.62~3.64
Fluence (J/cm ²)	2.19~4.02	2.19~4.02

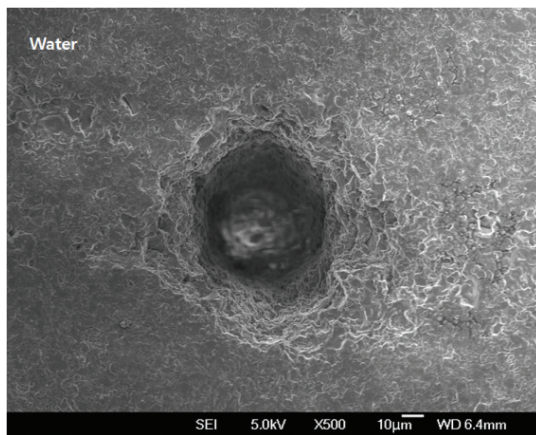
료로 쓰이는 세라믹의 광학특성에 비추어 볼 때 355 nm의 레이저를 이용하여 가공하는 것이 VIS 또는 NIR 레이저에 비해 유리하다고 볼 수 있다. 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같이 되어 있다. 세라믹의 표면은 수면으로부터 4 mm 깊이에 위치하고 있으며, 레이저의 실제 초점은 세라믹을 향하도록 되어 있다. 주 컨트롤러로 전달된 신호는 스캐너와 레이저 시스템, 스테이지를 컨트롤 하도록 구성되었다. 실험에 사용된 조건은 Table 1에 주어져 있다.

대기 조건과 수중에서 가공을 수행한 세라믹 표면의 분석 결과가 Fig. 5에 제시되어 있다. 이것은 대기조건(Fig. 5(a)) 및 수중(Fig. 5(b))에서 레이저 가공을 수행한 세라믹에서 열영향을 받은 부분과 그렇지 않은 부분의 비교를 위한 것이다. 세라믹은 열영향에 의하여 재결정되거나 온도구배가 크게 되면 열응력이 발생하여 파단되기 쉽다. 재결정된 세라믹은 충격에 취약하며, 일반적인 세라믹에 비하여 깨지기 쉬운 성질을 가지고 있다. 열영향부의 판독은 가공이 되지 않은 부분과의 차이를 비교하여 수행하였다.

대기중 가공 결과의 경우 홀의 직경은 레이저의 초점 크기와 거의 동일한 35~40 μm 가량이다 (Fig. 5(a)). 가공된 홀의 주변에는 공정 중 발생한 열에 의한 열영향부가 존재하였다. 일반적으로 생성된 열영향부는 생성된 홀 주변에 원형으로 형성



(a) In the air (depth=50 µm)



(b) Under water (depth=60 µm)

Fig. 5 SEM images of ceramic laser drilling

되지만 가공이 진행되는 도중 홀에서 밀려나온 세라믹이나 이물질이 부착되어 원형이 아닌 경우 또한 관찰되었다. 홀의 주변에는 이물질이 부착되어 있는데, 이는 세라믹이 가공됨과 동시에 홀에서 밀려나와 주변부에 부착된 것으로 보인다. 이러한 부분도 HAZ로 볼 수 있으며 이렇게 정의된 HAZ의 넓이는 수중과 비교했을 때 넓게 나타나고 있다. 또한 다수의 홀 주변에 부착된 세라믹의 데브리들이 관찰되었다. Fig. 5(b)에는 수중에서 레이저 세라믹 홀 가공을 수행한 결과이다. 대기조건에서 가공을 수행한 것에 비하여 홀의 크기가 다소 큰 것으로 측정되었다. 하지만 대기조건에서 가공한 시편과 다르게 열영향부의 넓이로 관찰되는 영역은 관찰할 수 없었다. 이는 물이 분출물의 재흡착을 방지하는 효과와 모재표면의 냉각된 효과가 동시에 작용된 결과로 판단된다. 결과적으로 일반적

인 공기중 레이저 가공과는 다르게 수중 레이저 가공을 수행하는 경우 레이저 가공이 열영향을 줄임과 동시에 미세 가공이 가능함을 보이는 결과이다. 또한 가공홀의 세장비를 비교하여 보았을 때 대기에서 보다 수중에서의 세장비가 20% 정도 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 실제 수중 레이저 가공에 있어 홀의 내부 반사가 수중 매질의 존재로 향상되어 깊은 홀 가공이 가능한 것으로 판단되었다. 덧붙여, 수중 가공시 레이저 조사 영역에서 기포의 생성이 관측되었으며 이는 기포 생성 후 조사되는 레이저 빔의 경로와 에너지 집속에 영향을 주어 다소 넓은 홀입구가 생성되었다. 정밀한 수중 가공을 위해서는 부수적으로 발생하는 버블의 제어가 필요하며 이것은 내부 강제 유동 장치의 고안 및 적용을 통해 어느 정도 그 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결론

본 연구에서는 수중 세라믹 홀 레이저 가공을 위한 재료의 열영향에 대한 수치적 해석 및 실험 결과를 제시하였다. 수치적 모델링을 통해 대기중과 수중 레이저 조사에 대한 열분포에 대한 결과를 얻을 수 있었으며 잔류 열분포 및 온도구배에 있어서 수중 가공이 좀 더 안정적인 분포를 얻을 수 있었다. 또한 수중에서 세라믹의 레이저 홀 가공은 일반적인 레이저 가공에 비하여 열적 영향부와 어블레이션으로부터의 부산물을 최소화시킬 수 있는 장점이 관찰되었다. 수중 가공에서는 수중 계면의 레이저 빔 통과로 인해 홀의 크기가 다소 커지는 결과를 얻었으나 일반적으로 레이저 가공에서 문제가 되는 열적 효과를 충분히 줄일 수 있었다. 이는 정밀 세라믹 레이저 가공에 있어서 열적 영향을 줄인 고품질 세라믹 가공이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, W., Jeon, Y., and Cho, S., "Analysis and Experiment of Ultrasonic Vibration Mechanism using

- PZT Actuator for Precision Laser Machining,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 12, pp. 1347-1352, 2011.
2. Cho, K.W. and Park, H. J., “Laser Drilling System for Fabrication of Micro via Hole of PCB,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 27, No. 10, pp. 14-22, 2010.
 3. Nedialkov, N., Sawczak, M., Jendrzewski, R., Atanasov, P., Martin, M., and Sliwinski, G., “Analysis of Surface and Material Modifications caused by Laser Drilling of AlN Ceramics,” Applied Surface Science, Vol. 254, No. 4, pp. 893-897, 2007.
 4. Ji, L., Yan, Y., Bao, Y., and Jiang, Y., “Crack-free Cutting of Thick and Dense Ceramics with CO₂ Laser by Single-pass Process,” Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, No. 10, pp. 785-790, 2008.
 5. Tsai, C. and Li, C., “Investigation of underwater laser drilling for brittle substrates,” Journal of materials processing technology, Vol. 209, pp. 2838-2846, 2009.
 6. Ng, G. K. L. and Li, L., “The Effect of Laser Peak Power and Pulse Width on the Hole Geometry Repeatability in Laser Percussion Drilling,” Optics & Laser Technology, Vol. 33, No. 6, pp. 393-402, 2001.
 7. Voisey, K. T. and Clyne, T. W., “Laser Drilling of Cooling Holes Through Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings,” Surface and Coatings Technology, Vol. 176, No. 3, pp. 296-306, 2004.
 8. Low, D. K. Y., Li, L., Corfe, A. G., and Byrd, P. J., “Spatter-free Laser Percussion Drilling of Closely Spaced Array Holes,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, No. 3, pp. 361-377, 2001.
 9. Dhupal, D., Doloi, B., and Bhattacharyya, B., “Pulsed Nd:YAG Laser Turning of Micro-groove on Aluminum Oxide Ceramic (Al₂O₃),” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 2, pp. 236-248, 2008.
 10. Perrie, W., Rushton, A., Gill, M., Fox, P., and O’Neill, W., “Femtosecond Laser Micro-structuring of Alumina Ceramic,” Applied Surface Science, Vol. 248, No. 1-4, pp. 213-217, 2005.
 11. Williams, O., Williams, M., Liu, C., Webb, P., and Firth, P., “Laser Micromachining of Polycrystalline Alumina and Aluminium Nitride to Enable Compact Optoelectronic Interconnects,” Proc. of 11th Electronics Packaging Technology Conference, pp. 920-925, 2009.
 12. Barnes, C., Shrotriya, P., and Molian, P., “Water-assisted Laser Thermal Shock Machining of Alumina,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, No. 12-13, pp. 1864-1874, 2007.
 13. Choo, K. L., Ogawa, Y., Kanbargi, G., Otrá, V., Raff, L. M., and Komanduri, R., “Micromachining of Silicon by Short-pulse laser Ablation in Air and Under water,” Materials Science and Engineering A, Vol. 372, No. 1-2, pp. 145-162, 2004.
 14. Musaev, O. R., Midgley, A. E., Wrobel, J. M., and Kruger, M. B., “Laser Ablation of Alumina in Water,” Chemical Physics Letters, Vol. 487, No. 1-3, pp. 81-83, 2010.