

레이저를 이용한 드릴링 기술



황 경 현
(가공기술실장)

- '76. 2 서울대학교 공과대학 기계공학과 졸업
- '78. 2. KAIST 기계공학과 졸업(석사)
- '86. 2. 미국 O.S.U. 기계공학과 졸업(박사)
- '78.-현재 한국기계연구소 책임연구원

관심있는 분야: 레이저 가공



이 성 국
(가공기술실 연구원)

- '83. 2 아주대학교 기계공학과 졸업
- '85. 8 KAIST 기계공학과 졸업(석사)
- '85. 9-현재 한국기계연구소 연구원

1. 서 론

레이저 빔의 에너지 밀도가 $10^6 \sim 10^7 \text{W/cm}^2$ 정도가 되면 용융계면이 내부로 이동됨과 동시에 표면온도가 비등점 이상이 되어 재료가 증발하게 된다. 레이저 드릴링은 이러한 성질을 이용하는데 접촉이 없기 때문에 구멍의 오염을 줄일 수 있고 세라믹스, 다이아몬드 등의 취성재료를 천공할 수 있고 열변형구간(HAZ)을 매우 적게 할 수 있어 매우 작은 구멍을 얇은 판에서 천공할 수 있는 장점이 있다. 레이저에 의한 천공에서는 재료의 증발이 요구됨으로 다른 방법들 보다 더욱 큰 에너지가 필요하다. 레이저 에너지가 크므로 표면에서 과열된 증기는 이온화가 이루어지며 이들 증기와 플라즈마의 압력은 크고 초음속이므로 용융금속 및 증발되는 재료의 제거에 도움이 된다.

그러나 이때 발생하는 플라즈마가 많은 경우에는 에너지를 흡수, 반사 및 산란시킴으로 레이저 에너지의 입사를 차단시킨다. 따라서 레이저에 의한 천공에서는 큰 에너지의 반복되는 Q-Switched Nd:YAG 레이저 또는 펄스형의 레이저가 바람직하다. 현재 시계공업에서 사용되는 루비 부품의 천공에는 레이저가 사용되며 가는 와이어를 신선하는데 사용하는 다이아몬드의 경우에는 레이저로 구멍을 만든 후 정밀연마를 수행한다. 금속 재료의 경우에는 요업 재료와 같이 흔하게 사용되지는 않는다. 그러나 기계적으로 천공이 힘든 위치 또는 공구가 표면처리 상태를 손상시키는 경우에 사용된다. 예로서 항공기 산업에서 특수강으로된 터어빈 블레이드와 연소실의 라이닝, 제트 엔진의 작은 냉각홀등의 천공에 사용된다.

2. 드릴링 Mechanism

레이저 빔의 세기에 따라 조사된 빔은 공작물에 여러가지 형태로 작용된다. 에너지 밀도를 증가시키면 용융점까지 온도가 상승하고 용해 선단이 재료속으로 전파되어 간다.

표면온도가 증발온도까지 상승하면 증발 선단이 재료속으로 움직이기 시작하고 용융물층의 두께를 감소시킨다. 그럼에도 불구하고 빠른 증발이 일어나면 두께가 Rykalin과 Uglov에 의해 평가된 얇은 유막에 의해 증발 표면이 앞서간다. 증발선단에 의해 발생된 구멍이 깊어지면 조사된 빔은 좀더 효과적으로 흡수되고 모든 면이 얇은 유막으로 덮히게 된다.

증발하는 증기와 이 막사이의 상호작용은 flushing 역학을 만들게 되고 그 근처에서 유체가 구멍 밖으로 휩쓸리게 되어 수직으로 천공하는 경우 구멍의 밑바닥에 유체가 떨어지는 것을 방지하여 구멍이 형성된다. 레이저로 드릴링을 하면 모든 부분이 증발되는 것이 아니다. 구멍의 표면 위에 있는 용융물은 뜨거운 빛을 내는 작은 구형태로 축출된다. 구멍이 표면에서 만들어지면 증기는 Crater의 출구쪽으로 흐름을 유도하는 압력을 형성하게 된다.

이 흐름은 Crater의 경계면을 따라 형성된 용융물의 약간 부분을 이송시킨다. 고온의 축출물의 소나기 같은 뿔(spark)이 발생하는 flushing 공정이 재료의 증발되지 않은 상태의 Droplet를 제거하여 모든 물질이 증발되는 것보다 더 많은 재료 제거를 할 수 있다.

3. 레이저 발진기 및 광학기구

드릴링에 사용되는 레이저는 루비, Nd:YAG, Nd:glass, CaWO₄ 레이저와 펄스 형태로 발진되는 CO₂ 레이저가 사용된다. 루비 레이저를 이용하면 에너지 밀도가 10⁶W/cm²까지 올라가고 표면온도가 10,000°C까지 가열된다. 광축에서 r만큼 떨어진 곳에서 에너지 밀도 I(r)는 회절이론으로부터

$$I(r) = I_0 \left(\frac{2J_1(\pi Dr/\lambda f)}{\pi Dr/\lambda f} \right)^2$$

$$I_0 = \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{\lambda^2 f^2} P$$

D : 빔 직경

f : 초점거리

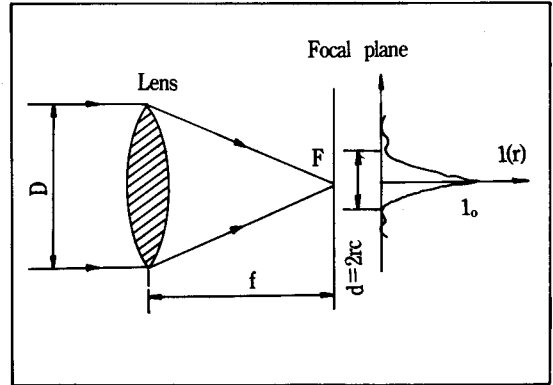


그림 1) Focal plane에서 출력분포

r₀를 I(r)이 최초로 0이 되는 점이라고 하면

$$r_0 = 1.22 \frac{\lambda f}{D}$$

이로부터 초점에서의 spot 직경은

$$d = 2.44 \frac{\lambda f}{D}$$

로 간주할 수 있다.

반면에 빔 퍼짐각 θ 를 가진 레이저 빔이 초점거리 f인 렌즈에 의해 집속된다면 focal plane에서 Spot 직경은 $d = 0.2f\theta$ 이 된다.

그러므로 레이저 빔의 빔 퍼짐각은

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

예를들어 Ruby 레이저의 경우 빔직경은 10mm 이고 빔퍼짐각이 10⁻⁴ rad이므로 spot 직경은 1 μm이며 CO₂레이저는 27μm 엑사이머 레이저(193 nm)는 0.4μm이다. 그러나 실제로는 다중 모드 발진과 off-axis 발진때문에 빔퍼짐각은 10⁻²~10⁻³ rad이고 초점거리가 10mm인 렌즈로 집속한다고 하더라도 Spot 직경은 100μm이다. Spot 직경보다

작은 직경의 천공은 시작점의 값이 출력 밀도 안에 존재하는 작업이면 가능하다. CO₂ 레이저의 파장은 고체 레이저보다 크지만 빔퍼짐각이 적기 때문에 Spot 직경은 고체 레이저와 비슷하다. YAG 레이저로 고속 천공을 하기 위한 광학 부품 개선의 예를 들어 본다. 고반복률 YAG 레이저로 성능이 좋은 레이저 빔을 얻기 위하여 rod의 모드 합성과 열 뒤틀림(distortion)이 고려되어야 한다. 망원경 구조를 가진 cavity가 모드 체적을 향상시키기 위하여 적용되는데 열적으로 안정성을 가져올 수 있고 효율을 증가시킬 수 있다. YAG 레이저의 cavity 구조는 그림2와 같다.

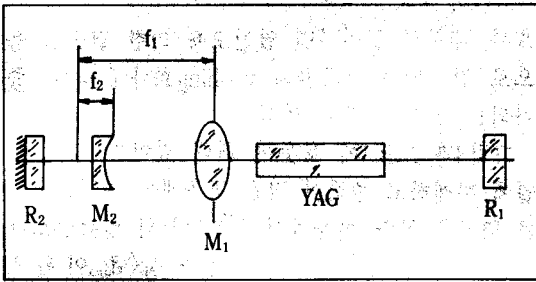


그림2) YAG 레이저의 cavity구조

광학 공진 Cavity 안으로 망원경을 집어넣으면 Cavity 길이를 연장하는 것과 마찬가지이며 Self-Aperture 원리에 의해 모드 선택이 결정된다. 대등(equivalent) Cavity 길이는 기하광학이론에 의해 계산될 수 있다. 이러한 계산은 왼쪽에서 오른쪽으로 계산된다.

C를 거울 R₂와 렌즈 M₂ 사이의 거리라고 하고 M₂에 해당되는 상 R₂의 위치를 찾아내야 하는데 이때 R₂는 물체로 볼 수 있으며 M₁에 해당되는 상(R₂)의 위치로 볼 수 있다.

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \text{로 부터}$$

$$\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C} = -\frac{1}{f_2}$$

$$C_2 = -\frac{Cf_2}{C+f_2}$$

C₂는 R₂의 상 거리이며 음수이다. 마찬가지로

$$C_1 = f_1 - c \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 = \frac{f_1}{f_2}$$

C₁는 R₂의 상 거리이다.

f₁는 f₂보다 훨씬 크므로 C₁는 음수이다. 즉 R₂의 상으로 망원경의 왼쪽에 있으며 Cavity의 크기가 증가하게 된다.

4. 공정 변수 및 특성

주요 공정 변수로는 출력, 파장, 작용 시간, 광학 기계, 직경, 빔 퍼짐성에 관련된 Cavity optics, 공작물의 열 특성, 펄스 레이저인 경우 펄스 폭과 반복율 등이다.

가공 판단 기준으로는 구멍 직경, 구멍 깊이, 구멍 형태, 중횡비, 재구조층, 표면 상태와 재료 제거율 등이다.

구멍 깊이는 어떤 한계점까지 에너지 밀도가 증가하면 커지는데 Hamilton과 James에 의하면 두께/총 투입 에너지가 5×10⁶W/cm²일 때 최대라고 한다.

이보다 낮으면 과다 에너지는 전도와 용융에 의해 손실되고 높으면 가스 파손과 이온화에 의한 플라즈마에 의해 손실된다. 구멍 깊이는 초음파 진동에 의해 증가될 수 있는데 Mori와 Kumehara는 5J 펄스 루비 레이저를 사용하는 경우 공작물을 진동시켜 25μm 크기의 초음파 진동을 줌으로써 구멍 깊이를 10% 증가시켰다. 구멍 직경은 조사된 빔 직경에 관련이 있는데 Cavity optics, Focusing optics와 레이저 파장에 의해 빔 직경은 결정된다.

Chun와 Rose에 의하면 첫 100μsec 동안에 레이저 펄스를 지속시켜 줌으로써 재료의 질량이 천천히 감소된다. Spitz에 의하면 제거되는 재료의 양은 다음과 같다.

$$V = V_0 [1 - \exp(-\beta S)] \dots \dots \dots (1)$$

V₀: 무한정 조사에 의한 한계 제거 체적

S: 조사 횟수, β: 상수

Andrew 등에 의해 측정된 천공 속도는 열손실이

없다고 가정하여 증기/액체 계면의 속도 V_{ss} 는

$$V_{ss} = \frac{(1-R) I}{[\rho H_v + \rho C_p (T_v - T_0)]} \dots (2)$$

로 표시된다.

여기서

I: 출력밀도, ρ : 밀도, H_v : 증발잠열, C_p : 비열
 T_v : 증발온도, T_0 : 최초온도, R: 반사율

이 공식은 천공이 증발에 의한 경우만 유효하다. 도표1에 증발에 필요한 시간을 열거한다. 이러한 값들은 펄스 루비, Nd:glass, Nd:YAG 레이저와 간단한 광학기계를 이용하여 얻을 수 있는 값들이다.

도표 1) 증발에 필요한 시간

종 류	출 령 밀 도(W/cm ²)		
	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
납	118	1.18	0.012
Zn	128	1.28	0.013
Mg	245	2.45	0.024
Ni	1840	18.4	0.0184
Iron	1860	18.6	0.186
Al	2670	26.7	0.267
Molydenum	5560	55.6	0.556
Cu	8260	82.6	0.826
Tungsten	10460	104.6	1.05

재료가 증발될 수 있는 최대깊이는 에너지 평형 방정식으로 부터

$$d_{max} = \frac{E_0}{A\rho [C(T_v - T_0) + H_v]}$$

C: 비열, T_v : 증발온도, T_0 : 주변온도

H_v : 증발잠열, ρ : 밀도,

E_0 : 레이저 에너지, A: 빔이 전달되는 면적

예를들어 $\rho=2.7\text{g/cm}^3$, $C=0.97\text{J/g}^\circ\text{C}$, $T_v - T_0=2447^\circ\text{C}$, $H_v=10,900\text{J/g}$ 인 알루미늄을 10J의 출력을 가진 루비 레이저로 10⁻³cm² 면적에 조사하면 최대 증발 깊이는 0.28cm가 되나 실제로는 반사, 플라즈마

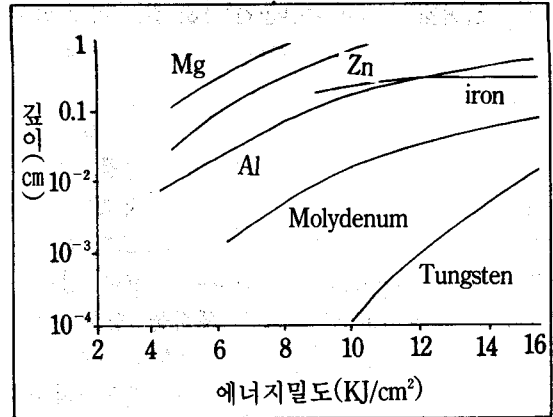


그림 3) 에너지 밀도에 대한 깊이(700 μs , Nd:glass 사용)

효과, 내부로 들어가면 열전도에 의한 열손실 등으로 감소되나 용융물의 flushing 효과에 의해 증가되는 성질을 갖고 있다.

그림3과 도표1에 보듯이 최대 깊이는 주로 잠열에 비례하고 출력이 적은 경우에는 열전도도가 큰 역할을 한다. 예를들어 알루미늄의 열확산도가 철보다 크므로 출력이 적은 경우는 $d_{Al} < d_{iron}$ 이 된다. 그러나 출력이 커지면 증발 잠열이 큰 역할을 하게 되어 $d_{Al} > d_{iron}$ 이 된다. 재료제거에 최적은 높은 peak power가 아니다. Q-Switched 레이저를 이용하면 조그만 부분만 증발이 된다. 레이저 펄스가 가해지면 표면으로부터 약간의 재료가 제거된다. 이 물질들은 조금 이온화해서 고온의 흡수 plasma를 만들어 낸다.

이렇게 하여 레이저가 효과적으로 표면에 도달되는 것을 막는다.

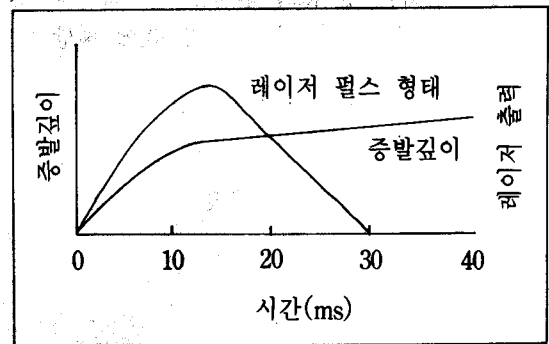


그림 4) 레이저 출력 형태와 증발 깊이

여기서 평평한 구간은 플라즈마에 의해 차단되는 구간이다. 그후에 플라즈마가 확대되고 통과되면 좀 더 깊게 제거된다. 그러므로 Q-Switched 레이저에 의해 제거된 재료 양은 어느 정도 제한되어 있다. 이러한 펄스 레이저는 드릴링이나 절단에는 잘 이용되지 않는다. 도표2에는 높은 출력, 짧은 펄스와 깊고 낮은 출력에 대한 구멍 깊이를 보여준다.

도표 2) 출력과 펄스 변화에 대한 깊이 변화

재 료	$10^9\text{W/cm}^2, 44\text{ns}$	$8 \times 10^9\text{W/cm}^2, 660\mu\text{s}$
스테인레스 Steel	0.00011	0.061
Brass	0.00025	0.078
Al	0.00036	0.078
Cu	0.00022	0.090
Ni	0.00012	0.058

윗표에서 보는 바와 같이 Bulk 물질에 대해서는 짧은 시간의 레이저가 덜 효과적이다. Naval Research Lab에서 $1-2\text{MW/cm}^2$ 를 가진 적외선 펄스로 시험하는데 CO_2 레이저가 사용되었다. 펄스 지속 시간은 5ms이고 Al 합금에 조사된 빔이 흡수되면 백열색의 Al 입자들이 표면에서 튀다. plume 형태를 고속 촬영기로 찍으면 그림 5와 같다.

약 1.71초후에 Plume은 decouple되기 시작하는데 plume에 의한 감소때문이다. 약 1ms후에는 plume은 완전히 decouple되고 이때는 레이저 빔이 표면에 거의 전달이 되지 않는다. 이때 표면에서는 더이상 백열의 입자가 발생되지 않고 plume은 레이저 쪽으로 전파해가면서 레이저 출력 밀도가

낮은 위치로 움직인다. 4.54초후에는 레이저 빔은 표면에 다시 couple되고 5.14초까지 couple되어 있다. 모든 plume은 레이저 펄스가 다시 들어올 때까지 재빨리 없어진다. MgO는 plume 발생, decoupling, plume확산, recoupling하는데 5ms가 걸린다. 반면에 graphite, fiberglass epoxy는 펄스 발생내 계속해서 표면에 남아 있다. 레이저에 대한 최적 펄스 작동시간은 공작물에 따라 다르다. Pulse duration이 특별한 재료의 최적값을 초과하면 레이저 에너지는 플라즈마에 흡수되어 쓸데없는 에너지가 될 것이다. 레이저 천공에는 CW 레이저와 펄스 레이저가 사용되는데 펄스에 의한 것이 열전달에 의한 손실면에서 좀더 효과적이다. 레이저에 의한 드릴링의 경우 단일파에 의한 깊이는 그렇게 크지 못하다. 충분히 큰 깊이를 얻기 위해서는 반복해서 조사가 되어야 한다.

루비 레이저로 단파에 의해서 1mm정도가 적당한 값이다. (1ms에 1J이 10^{-3}cm^2 에 집중된 경우이다.) 루비 레이저 펄스에 의한 Al 판에 증발된 구멍의 단면적 발전 과정이 30mm 초점거리의 렌즈를 사용한 경우 그림 6과 같다.

구멍은 테이퍼를 가지게 되는데 구멍이 깊어지면서 직경이 감소한다. 반복되는 레이저 펄스가 똑같은 면적에 전달되면 더 깊은 구멍이 뚫어진다. 그림 7에는 구멍 깊이와 샤프어에 대한 펄스 조사횟수를 보여준다.

이때 레이저는 2J의 에너지로 1.5ms 동안 작동시킨 것이다.

그림7에서 보는바와 같이 펄스수가 30번 될때까지 구멍 깊이가 커지지만 30번이 넘으면 거의 변하지 않는다. 작동이 포화되면 다른 작동조건을

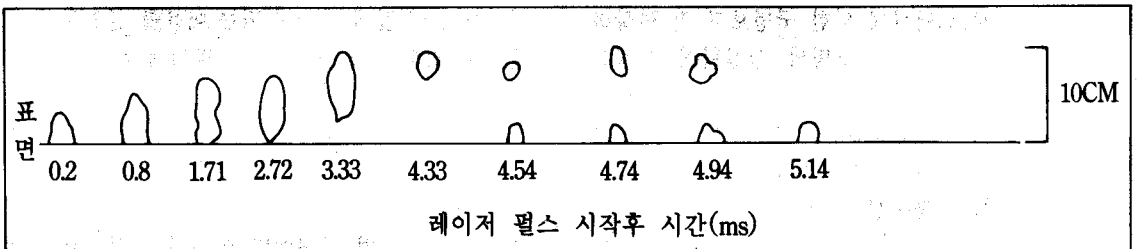


그림 5) 레이저 펄스후 시간에 따른 plume 변화

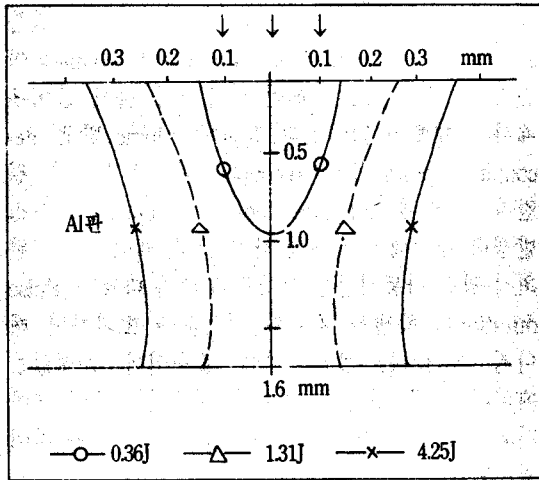


그림 6) 구멍깊이와 루비 레이저에 의한 사파이어 구멍드릴에 필요한 펄스수

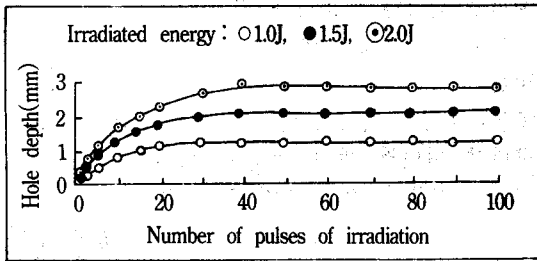


그림 7) 펄스수와 구멍 깊이

변경시켜 예를들면 조사되는 에너지가 초점 위치등을 변경시키면 천공에 다시된다. 그림 8에 YAG레이저에 의한 다이아몬드의 천공시 여러번 조사에 의해 포화된 뒤 작동조건을 변화시키면 구멍이 더 깊어지는 것을 보여준다.

단파에 의한 구멍 가공보다는 낮은 에너지로 여러번 하는 것이 유리하다.

다파(multi pulse) 천공의 결과에 의한 구멍은 테이퍼가 덜지고 단파에 의한 구멍보다 잘 형상화된다. 레이저로 천공된 구멍의 형상학적 특징은 aspect ratio에 의한 기술이 잘 되는데 세라믹에서는 25이상의 aspect ratio를 가질 수 있고 보통의 금속은 8-12정도이다. 보통의 aspect ratio의 한계는 광학기계, 빔의 광특성, 재료의 광반응에 의해 결정된다. 좁은 수렴각에 의한 집중된 빔은 큰 초점 길이를 갖고 큰 aspect ratio의 구멍을 만들

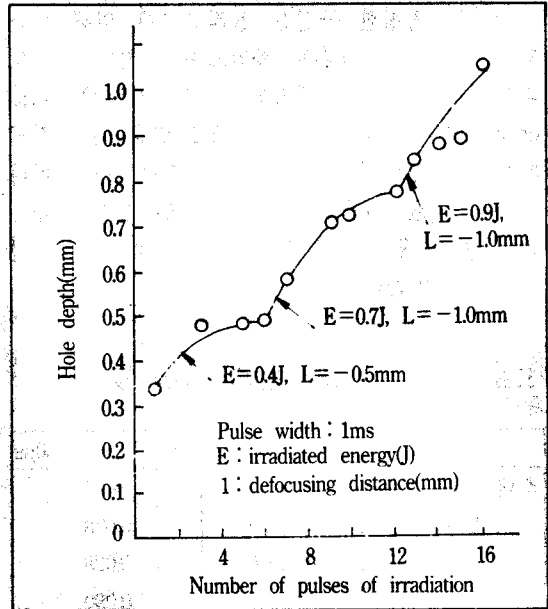


그림 8) 변하는 작동조건하의 작업특성

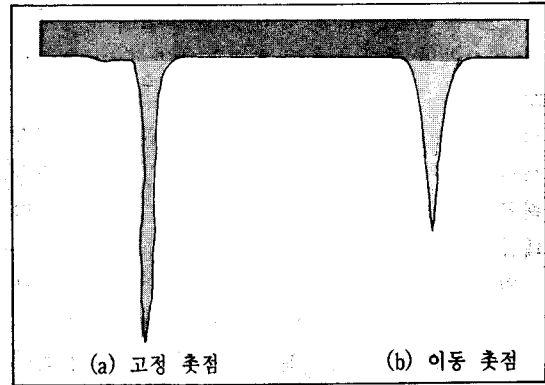


그림 9) 루비 레이저에 의한 사파이어 천공

수 있다. 낮은 열 확산도는 높은 ratio를 얻는데 유리하다. 더구나 "light pipe" mechanism은 빔 초점 깊이보다 더 깊게 천공이 되는 이유를 설명해 준다. 레이저 빔의 다중 반사는 구멍벽에 의해 형성되는데 좁은 입사각에서 구멍의 밑바닥까지 광 에너지가 전달되는 것으로 간주된다. 구멍깊이, 제거양과 구멍의 형태는 초점거리, 초점위치와 출력등에 의해 영향을 많이 받는다. 그러므로 적당한 작동조건은 작업 목적뿐만 아니라 작업 되어져야 할 재료의 질과 크기에 따라 택해져야 한다.

렌즈의 초점위치와 공작물 표면사이의 위치관계는 만들어지는 구멍 형태와 크기에 많은 영향을 준다. 일반적으로 초점이 표면보다 아래쪽에 있으면 원추형(conical)의 구멍이 생긴다. 초점이 표면위에 있으면 구멍은 중간 부위에서 조금 커지고 초점이 표면 밖에 있으면 구멍은 표면쪽에서 커진다. 그림9에는 루비 레이저에 의한 샤파이어 천공을 보여준다.

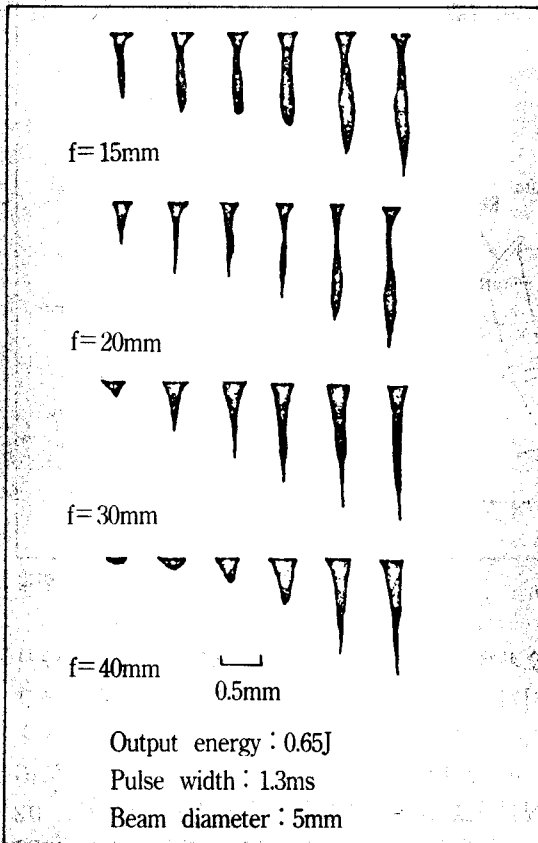


그림 10) 이동 초점거리와 구멍형태

(a)에서 보는바와 같이 천공 초기에 초점이 표면위에 있으면서 정지해 있는 경우이며 (b)는 펄스마다 초점이 구멍의 밑바닥에 오도록하여 천공한 것으로 변하게 되면 초점 이동에 따라 매우 다르게 된다. 초점이 변하게 되면 천공 될려고 하는 표면위의 구멍 직경 뿐만 아니라 구멍 깊이와 모양도 변하게 된다. 그림10은 샤파이어가 초점

거리를 바꾸는 경우 형태의 변화이다. 제거되는 양과 깊이는 렌즈의 초점거리에 반비례한다.

반복조사인 경우는 구멍의 표면 직경이 크게 변하지 않고 초점거리가 적으면 구멍은 중앙에서 커지고 깊어진다. 초점거리가 커지면 구멍은 원추형이고 깊어진다. 그래서 반복조사는 작은 직경의 구멍을 깊게 천공하는데 효과적이다.

취성재료를 드릴링할때 (다이아몬드, 루비, 샤파이어, 세라믹스) 펄스당 조사에너지가 크면 열변형을 때문에 크랙이나 깨짐이 발생된다. 일반적으로 레이저 장비는 컨덴서 전압을 변화 시킴으로써 출력을 조절한다. 그렇지만 이 경우 펄스폭이 변하게 되면 레이저 빔의 퍼짐각과 spot 직경이 변하게 되어 출력도 변하게 된다. 구멍깊이와 제거되는 양은 출력의 증가와 함께 변하는데 제거되는 양은 깊이 변화보다 큰 비율로 변하며 중앙에서 구멍이 커진다. 레이저 가공은 레이저가 여러가지 광학기구를 사용하기 때문에 여러가지 형태의 천공을 할 수 있다. 그림 11은 특별한 천공 방법을 보여준다. (a)는 1mm에서 12mm까지의 diaphragm을 만드는데 convergent lens를 결합한 원추 렌즈를 사용한다.

그림(b)에서 보는 것과 같은 columnar 렌즈를 사용하면 똑바른 슬릿을 만들 수 있다. (c)에서와 같이 레이저 빔을 나누면 한번에 여러구멍을 뚫을 수 있고 곡면 속으로 수직인 구멍을 뚫을 수 있다. Convergent 렌즈의 축은 레이저 빔축을 돌릴 수 있도록 설계되어 있고 초점의 궤적은 F_1 과 F_2 를 지나는 원을 그린다. 그림(d)에 회전렌즈(rotational lens)에 의한 빔 휘 원리를 보여준다. 연속적으로 발견되는 레이저는 펄스 레이즈가 원주에 많은 구멍을 천공할 수 있는 것과 마찬가지로 scoop-out, 절단과 천공을 할 수 있다.

5. 용 용

레이저 드릴링 응용 분야중 하나가 신선용 다이아몬드 다이제작이다. 통상적으로 다이아몬드다이는 다이아몬드 paste로 처리된 강으로 된 바늘을 기계적으로 왕복시켜서 만들어지며 하나의 구멍을

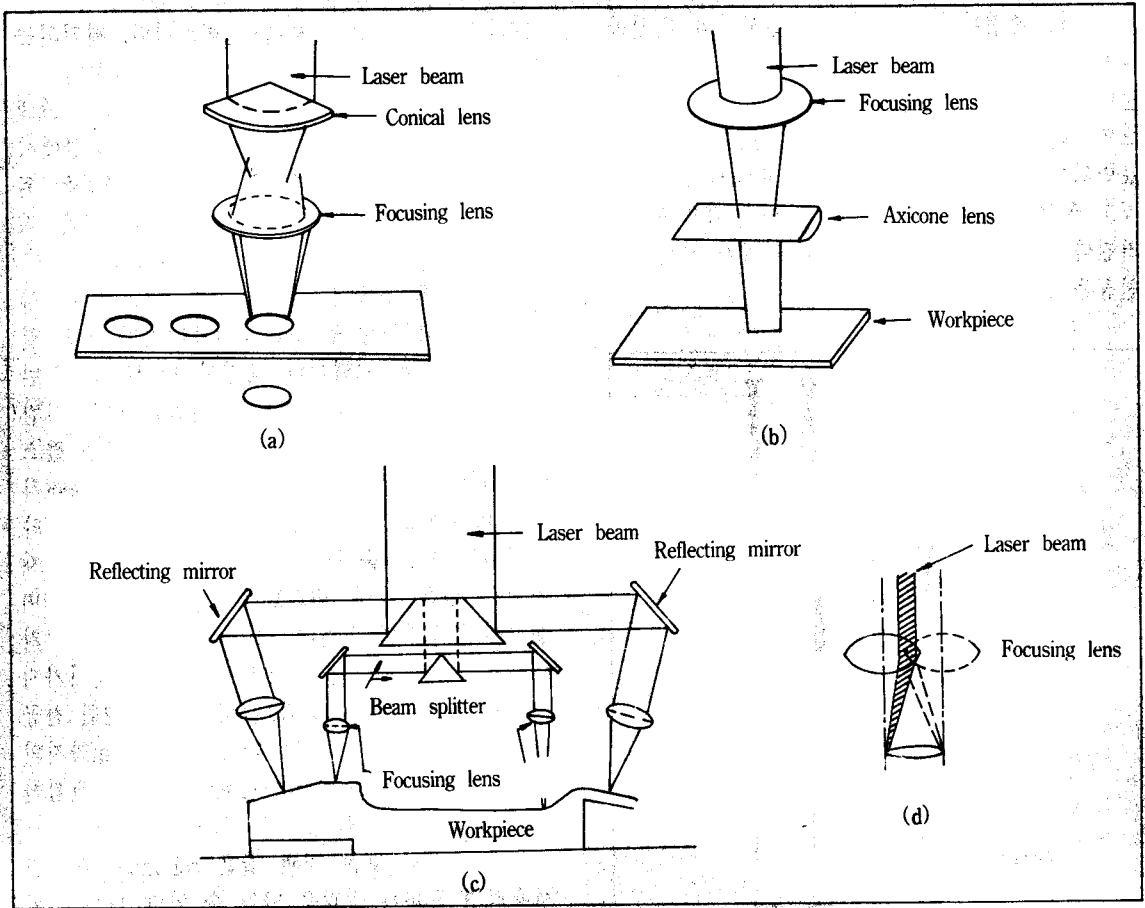


그림 11) 특별한 천공 방법

뚫는데 10시간 이상이 소요된다. 첫시도는 루비 레이저를 이용하여 1965년 Western Electric이 시작하였으며 일 캐럿의 다이아몬드를 10분 이내에 천공할 수 있었다. 이때 조건을 다이의 전면은 250 펄스, 후면은 300 펄스로 2-3J의 출력으로 펄스폭 0.6ms와 펄스주기 1PPS를 사용했다. 현재는 루비, YAG, glass, CaWO₄ 레이저를 사용하여 0.01-1mm 사이의 구멍을 뚫는다. 레이저 드릴링은 시계 베어링용 구멍을 천공하는데도 이용된다. 시계 베어링은 이전에는 여러가지 크기와 형태를 가진 인조 루비를 사용했으나 0.3mm 두께의 돌을 직경 70-90 μm의 끝은 구멍을 파서 손목 시계의 베어링에 이용하는 것이 보편적이다 이러한 드릴링을 레이저에 의해 수행하면 40-60μm의 직경이 기계

오차까지 포함해서 필요하다. 스위스 시계회사에서 시계 베어링용 드릴을 시도했는데 처음에는 초당 2.5구멍씩 루비 레이저를 이용하여 천공을 했다. YAG 레이저가 빠른 반복율을 갖고 있으므로 YAG 레이저로 교체되었으며 사용된 YAG 레이저는 0.2 J의 출력을 갖고 펄스폭은 0.2ms 펄스주기는 20PPS 일때 속도는 초당 6-10 구멍을 뚫을 수 있다.

이러한 속도로 하면 연간 생산량이 2억개 이상이 될 수 있고 제조단가를 낮추는데 매우 효과적으로 볼 수 있다. 스테인레스강 드릴링은 금속을 레이저 가공하는데 가장 발전된 형태이고 화학 섬유용 Spinerettes 제조에 이용되며 1963년 소련에서 처음 이용되었다.

이때 루비 레이저가 사용되었고 55μm 직경의

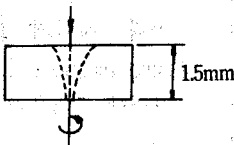
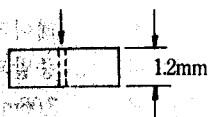
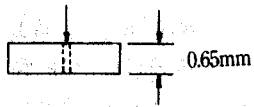
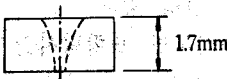

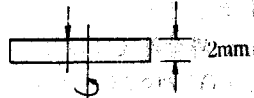
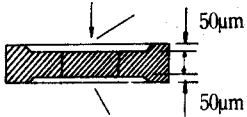
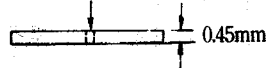
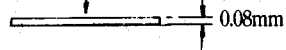
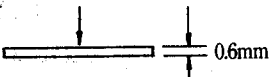
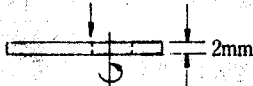
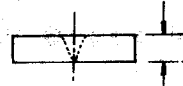
<p>(a) Material-Sapphire</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 0.14mm(outlet) 0.25mm(inlet)</p> <p>Time required for drilling : 60sec. When a hole with an obtusely curved line is to be made.</p>	<p>(b) Material Alloy(silver/copper)</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 0.1mm Time required for drilling : 4sec</p>	<p>(c) Material-Sintered hard alloy</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 90μm Time required for drilling : 4sec.</p>
<p>(d) Material-Alumina</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 0.1~0.2mm (outlet)</p> <p>Time required for drilling : 40 sec. Rotational drilling</p>	<p>(e) Material-Nickel</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 30μm Time required for drilling : 5 sec, Drilling at a low speed</p>	<p>(f) Material-Tool steel</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 3mm Time required for drilling : 120sec. in the process of drilling, the optical axis and the rotation axis of a workpiece are set out of coaxial alignment with each other and the workpiece is rotated.</p>
<p>(g) Material-Stainless steel</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 40μm Time required for drilling : 2sec. To make Hole A and Hole B coaxial. Drilling is carried out after components are assembled.</p>	<p>(h) Material-Beryllium</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 0.15μm Time required for drilling : 20sec.</p>	<p>(i) Material-Stainless steel</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 5μm(outlet) 10μm(inlet) Time required for drilling : 80 sec. Drilling with the purpose of minimizing hole diameter</p>
<p>(j) Material-Ceramic</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 0.4~0.6mm (outlet) 1mm(inlet) Time required for drilling : 10sec.</p>	<p>(k) Material-Alumina</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 0.7mm (outlet) 0.9mm(inlet) Time required for drilling : 10sec. In the process of drilling, a condensing lens is shifted out of horizontally coaxial alignment and the workpiece is rotated.</p>	<p>(l) Material-Ruby</p>  <p>Diam. of the hole drilled : 50μm (outlet) 60μm(inlet) Time required for drilling : 10sec. To make a well-shaped hole, a condensing lens is shifted out of coaxial alignment and is rotated.</p>

그림 12) 여러가지 천공

구멍을 0.3mm 두께로 0.7J의 에너지로 천공하였다. 진직도를 높이기 위해 초점 위치를 공작물의 0.06 mm 아래에 두었고 판의 두께의 90%는 거의 직선으로 유지된다. 이러한 방법은 아직도 소련에서 사용되고 있으며 생산성 증가를 위해 개발을 거듭하고 있다. 2mm 두께의 stainless steel를 루비 레이저로 천공한 경우 천공되는 구멍의 직경은 조사되는 에너지에 비례한다.

2mm 두께를 통과하는데 필요한 펄스 수는 감소한다. 구멍의 형태도 렌즈의 초점 길이에 따라 변하고 초점거리가 증가하면 원추형이 된다. 20-60 μ m의 구멍이 10 펄스(10-30 초정도 시간 필요)에 의해 천공된다. 유리나 세라믹 같은 비금속 재료는 10.6 μ m 파장의 CO₂ 레이저를 쉽게 흡수한다. 그러므로 CO₂ 레이저는 이러한 재료들을 쉽게 가공한다.

또한 CO₂ 레이저로 플라스틱을 어느 정도까지 드릴링할 수 있는데 4-hole nylon 단추를 1초에 1,000개 꼴로 천공할 수 있고 aerosol 노즐이 0.1초에 천공이 되며 0.25mm 두께의 Mylar film을 1초에 10,000개 꼴로 0.3mm 직경의 구멍을 뚫을 수 있다. 콘택스 렌즈의 중앙에 1초당 하나씩 0.1mm 구멍을 뚫을 수 있고 외측에서 담배 필터로 1초에 2개씩 천공가능하며, 진드 sprinkling에 사용되는 플라스틱 튜브의 구멍을 뚫을 수 있고 자동차 산업에 필요한 고무, 어린이 젓병을 천공하는데 이용될 수 있다.

1초에 제트 엔진 가이드 베인의 Ni-base 합금 부품(두께 1.4mm)을 0.35~0.45mm 직경으로 천공할 수 있다. 그림12는 LAY 504(Toshiba YAG 레이저)에 의한 여러가지 천공을 보여 주며 (f)에 보여주듯이 광축을 고정시키고 작업물을 회전시켜 큰 직경의 천공을 할 수 있다.

③ 펄스 CO₂ 레이저를 이용한 세라믹스 드릴링 : 미소 전자산업이나 세라믹스 업계에서 세라믹 스크라이빙이나 천공은 중요한 응용분야이다. 보통의 가공방법에 의해서는 큰 aspect ratio를 가진 세라믹 가공을 할 수 없다. 구멍이 발화되기 전에 천공이 될 수 있고 구멍 위치와 직경의 허용 오차는 발화공정(firing process)에서 없어질 수 있다.

레이저를 이용한 드릴링은 25:1까지 할 수 있다. 이런 높은 aspect ratio는 특별한 드릴링 위치까지의 레이저의 조사효과에 의한다. 레이저 드릴링은 증발과 폭발적 축출(explosive ejection)에 의한다. 3.06mm 두께의 세라믹 가공에 515초가 걸렸고 펄스 폭은 2.2ms이며 반복률은 88PPS이다. 미소 크랙은 HAZ안에서 검출되었으며 구멍의 입구 근처에서 볼 수 있다. 미소 크랙은 CaO, TiO를 가진 알루미늄과 지르코니아에서 발견된다.

레이즈 펄스가 끝날때 급속냉각이 일어나 미소 크랙이 있는 고형층(solidified layer)을 만든다. 표3에 펄스폭을 1.8ms-9.2ms로 변화시키고 반복률을 70PPS로 한 경우 드릴링 결과이다. 그림13에서 보듯이 펄스폭이 증가하면 드릴링시간 또한 증가하게 되는데 어떤 펄스 아래에서는 구멍을 완전하게 가공할 수 없다. 결국 펄스폭은 구멍크기와 질에 영향을 준다.

표 3) Cordierite Ceramics에서 드릴 크기에 대한 펄스폭의 변화

(Cordierite 두께 5.23mm, 주기 70 pps)

펄스폭	최대출력 (W)	드릴 시간 (S)	구멍 크기	
			입구(mm)	출구(mm)
8.8	43.8	34	1.12	0.82
7.8	46.7	32	1.10	0.83
6.6	53.0	29	1.04	0.67
5.3	56.6	20	0.08	0.63
4.8	58.1	19	0.63	0.39
3.5	60.4	12	0.62	0.28
2.8	71.4	-	않됨	않됨

④ 세라믹과 실리콘의 레이저 가공 : 취성재료 가공에는 두가지 방법이 있는데 강제 축출(expulsion)과 증발(evaporation)에 의한 재료제거와 열응력을 발생시켜 기계적으로 판을 부수는 방법이 있다. 모두 정밀가공을 하기 위해서는 연삭이 필요하다. Al₂O₃의 경우, 드릴링은 광학 시스템에 따라 다르나 250 μ m까지 가능하고 열응력에 대해 약하기 때문에

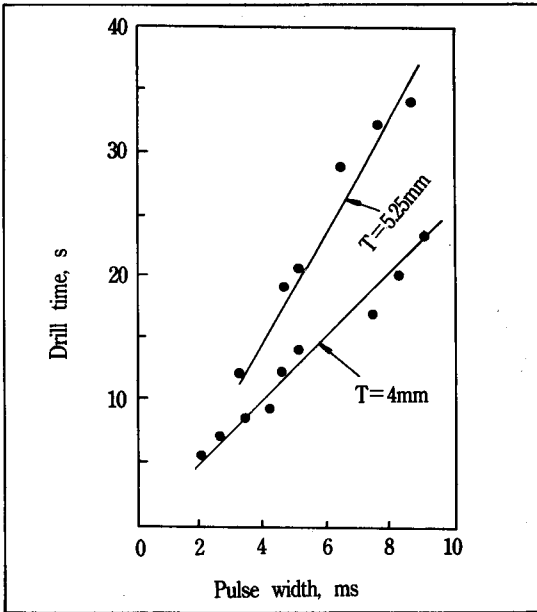


그림 13) 천공을 위한 펄스폭과 드릴링 시간관계

크랙이 생기지 않도록 펄스 레이저를 이용하는 것이 바람직하다. 드릴링 시간은 0.2초보다 적으며 에너지 밀도는 $10^5 - 10^6 \text{W/cm}^2$ 이다.

일반적으로 구멍벽은 고형 용융물로 덮혀 있는데 Nd:YAG에 의한 구멍에서는 거의 크랙이 없는데 CO_2 레이저에서는 작은 droplet로 덮혀 있다. 매우 높은 밀도의 에너지 (10^6W/cm^2 이상)를 가함으로써 용융물이 없어질 수 있다. 액체의 축출 가능성은 노멀라이즈된 흡수율(normalized absorption)으로 부터 계산된다.

$$B = \frac{K \alpha E_v}{C_p I} \quad (4)$$

K: 열전단율, α : 흡수율, E_v : 잠열, C_p : 비열,

I: 세기

B가 0.1보다 적으면 액체 축출에 의한 것이고 그렇지 않으면 증발에 의한 것이라고 할 수 있다. $250\mu\text{m}$ 보다 큰 구멍은 보통 trepanning으로 하는 것이 바람직하고 대체할 수 있는 기술로는 초음파 드릴링이 있는데 구멍당 가공시간은 30초 정도로 제조단가가 3배정도이다. 이 기술을 이용하면 용융물이 없는 정확한 구멍을 뚫을 수 있다.

기계적 방법은 fixture에 정착되어야 되는데 이 경우 시간이 2분 정도 걸리고 세척을 해야 한다. 절단은 3-5mm/sec로 할 수 있는데 비교될 수 있는 가공공정은 다이아몬드 톱으로 0.4-0.5mm/sec로 절단이 가능하며 가공정도는 $5\mu\text{m}$ 정도이다.

6. 제한조건

실제 구멍을 레이저로 천공하는데는 여러가지 제한이 있다.

한정된 레이저 에너지가 첫번째 이유이고 두 번째는 구멍의 입구 주위에서 재료의 재응고이며 이 결과로 crater-like lip이 생긴다. 이것은 구멍에서 증발되고 축출된 재료가 처음으로 찬 표면에 부딪히면 쉽게 응고 되기 때문이다.

이러한 lip들은 제거될 수 있는데 하나의 공정이 더 필요한 단점이 있다. 직선으로 된 구멍을 만들기 위해 레이저의 일시적이고 국부적인 조절을 잘 해야 한다. 특히 레이저는 TEMOO모드를 사용해야 한다(좋은 균일성, 우수한 품질의 광학기구). 마지막 제한은 구멍벽의 표면 조도이다. 특히 다이아몬드와 같은 단단한 재료에 대해서는 레이저에 의해 만들어진 구멍을 매끈하게 손질해야 하기 때문에 마무리 공정이 필요하다.