레이저빔을 이용한 알루미나(Al_2O_3)와 폴리머재료의 천공에 관한 연구

연세대학교 금속공학과,
삼성 SDI 생산기술연구소*
신재호, 김도훈 정재훈*, 노철래*, 김광일*

1. 서 론

최근 전자, 항공, 의학산업 등의 발달로 인하여 수~수십㎛ 정도의 작은 크기의 구멍을 요하는 전자제품, 의학관련용품 등 레이저에 의한 천공의 응용사례가 증대되고 있다. 최근의 전자기기는 휴대형 제품으로 경박단소화, 고기능화가 요구되어지게 되었으며, 무선통신 단말기, 디지털 캠코더, 휴대용 컴퓨터 등 가볍고 작은 기기를 중심으로 인쇄회로기판(PCB : Printed Circuit Board) 의 응용분야가 급속하게 커져나가고 있다. 또한 잉크젯프린터 헤드 노즐(nozzle)에 잉크가 작은 구멍을 통해 뿜어져 나올 수 있도록 25~100㎛ 사이의 구멍을 뚫어 600 dpi 정도 이상의 프린터를 생산하고 있으며 항공산업관련 분야에 터빈 블레이드(turbine blade) 그리고 의용 재료로 쓰이는 폴리머 계열의 재료에 수십㎛ 정도로 천공을 수행하여 혈관 성형술(angioplasty operations)을 시술하고 있다.

레이저에 의한 천공기구는 원칙적으로 집속된 레이저빔을 천공구역에 조사시켜 그 구역의 재료를 증발시켜 재료를 제거시키는 방법이며, 재료의 증발에 의존하므로 용접 혹은 절단보다 큰 에너지를 요하게 된다.[1),2)] 이때 레이저의 에너지가 크면 천공구역에서 과열된 증기는 이온화가 이루어지며, 이들 증기와 프라즈마의 압력과 속도는 매우 크고 빨라 떨어져 나가는 재료들의 제거에 도움을 준다.[3)] 재료에 따른 증발에 의한 재료의 제거는 레이저 에너지가 크다고 많은 것은 아니며 레이저 에너지의 증가에 따라 증가되다가 어떤 극대값을 가지며, 그 후 다시 작아지게 된다. 따라서 레이저에 의한 천공에서는 계속적인 증발 및 프라즈마에 의한 불꽃형성이 있어 에너지 효율이 떨어지므로 지속파 레이저보다는 펄스 당 첨두출력이 큰 펄스 레이저를 사용한다.[4)] 본 연구에서는 다기능 재료로 폭넓게 사용되고 있는 알루미나(Alumina,Al_2O_3)와 반도체 및 인쇄회로기판, 잉크젯 노즐 등 수 많은 응용사례를 보이고 있는 폴리이미

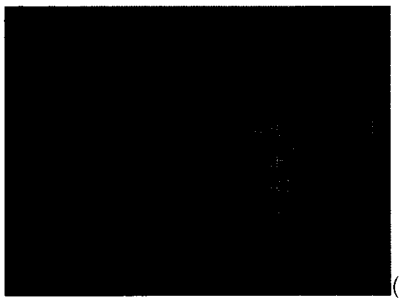
드(polyimide)[5]그리고 순환계 심장혈관 막힘(blockage)의 금속 스텐트(metal stent)와 함께쓰는 도뇨관(catheter)의 PTFE(Polytetrafluorethylene)에 대해 10.6㎛의 파장을 갖는 CO_2 레이저와 Nd:YVO_4 레이저를 frequencytripling한 355㎚파장의 UV 레이저를 사용하여 천공을 수행하였다. 따라서 높은 생산성을 갖는 CO_2 레이저와 우수한 정밀성을 갖는 UV 레이저에 의한 천공 현상을 규명하여 다양한 산업현장에 더욱 적합한 결과를 유추하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 세 가지로 알루미나는 순도 92%, 두께 600㎛ 이며 크기는 50㎜ × 50㎜ 이다. 폴리이미드(Polyimide)의 경우는 Hitachi사의 제품으로 두께가 약 75㎛±4㎛이고, PTFE (Polytetrafluorethylene)는 신체적합용 도뇨관(catheter)으로 쓰인 튜브(tube)형상으로 외경 약 1.7㎜, 내경 약 1.6㎜ 이며 두께는 약 50㎛ 정도이다. 이러한 재료에 10.6㎛ 파장의 CO_2 레이저와 355㎚ 파장의 UV 레이저를 사용하여 구멍직경(hole size)을 구현하는 공정조건을 구하고, 천공시 구멍 내부에서의 상태를 예측하며 각 변수에 따른 천공 특성을 분석하는데 의의를 갖는다. Fig. 1에 각 재료에 레이저천공을 수행한 사진을 나타내었고, Table 1에 각 재료의 특성을 나타내었다.

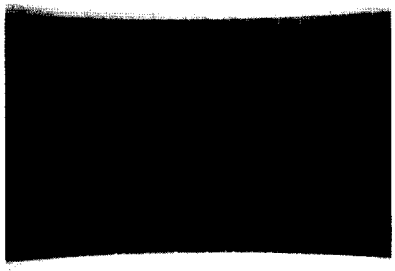
Table1. Characteristics of Al_2O_3,Polyimide, PTFE

Alumina content(%)	92	
Density (g/㎤)	3.78	
Water absorption(%)	0	
Hardness	75	
Poisson ratio (20℃)	0.24	
Elastic modulus(20℃)	45×10^6 psi	
Coefficient of thermal expansion (10⁻⁶/℃)	7.8	
Thermal conductivity(W/m K)	11.3	
	1.4	2.19
	0.31	0.01
	74.5	58
	120	9
	7.2	250
	2.5	0.46
	89.6	5
	0.41	0.46
	3.8×10^{15}	7.4×10^{15}
	3.5	2.1



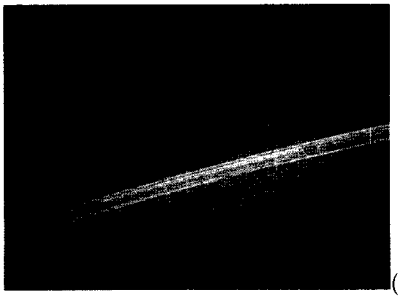
(×1)

(a) Al_2O_3



(×1)

(b) Polyimide



(×1)

(c) Catheter

Fig.1 Photograph of holes in materials by Laser beam

그리고 Table 2 에 레이저 시스템 사양과 Fig. 2

에 실험 구성도를 나타내었다.

Table2. Specification of CO_2 laser , UV laser

	CO_2 laser	UV laser
Laser	Coherent K-150	AVIA 3000
Laser power(W)	150	3
Beam waist diameter($1/e^2$)	7.0 ± 0.5 mm	2.7 ± 0.1 mm
Beam divergence (full angle)	2.3±0.3 mrad	< 0.3 mrad
Spot size (㎛)	80㎛	10㎛

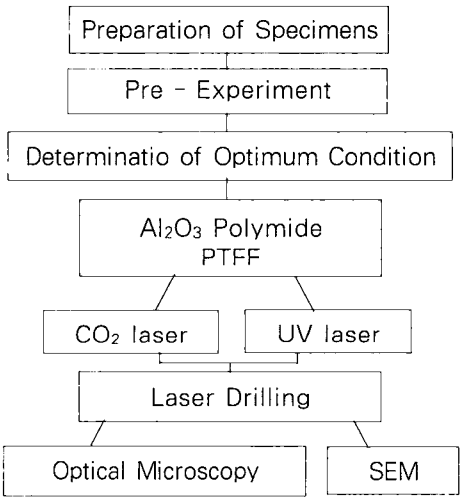


fig.2. Flow chart of experimental procedures

크게 두 가지 조건을 설정하여 동일 작용시간에 따른 펄스 수를 조절하였고, 동일 펄스 수에 따른 작용시간을 조절한 것을 바탕으로 펄스 수와 주파수, 펄스에너지 등에 따른 구멍 위.아래 부분과 구멍 벽면 상태를 예측하고자 하였다. 광학현미경으로 레이저빔에 의해 생긴 시편의 거시적인 형상을 살펴보고, 저배율·고배율 현미경을 통해 위·아래 구멍형상 및 구멍벽면을 관찰하였다. 천공된 시편의 벽면을 보기 위해 emery paper #100 위에 다이아몬드 페이스트를 사용하여 연마하였으며, 정확한 천공부의 관찰과 레이저 천공후에 수반되는 미세 결함에 상세한 관찰을 위해 주사전자 현미경 (SEM) 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 레이저 천공 후에 천공상태의 양호성의 판단 기준으로 천공부의 균열(crack), 부스러기(debris), 되 튀는 것(spatter), 열영향구역(recast layer) 등이 적은 것을 삼았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 CO_2 레이저빔에 의한 알루미나의 천공

Fig. 3 은 레이저빔 주사시 100pulse로 펄스 수를 고정하고 작용시간을 0.2초, 0.1초, 0.05초로 조절한 결과를 나타낸 것이다.

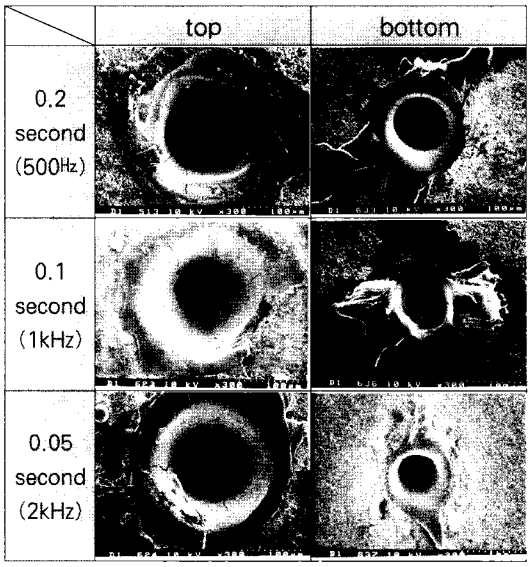
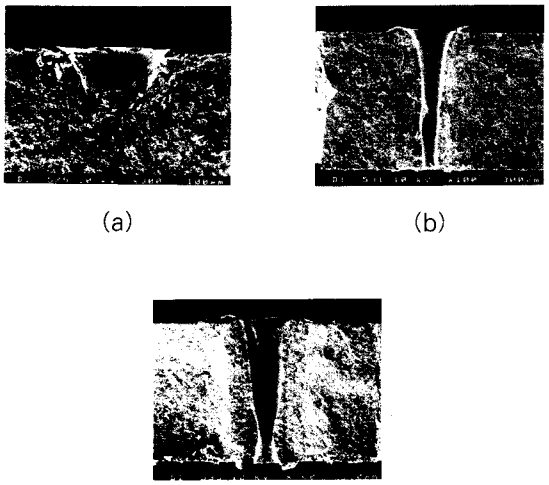


Fig.3 SEM micro-structure (CO_2 laser-Al_2O_3)

주파수를 변화시키고 동일한 펄스 수를 재료 위에 인가하게 되면 재료와 펄스와의 작용시간이 달라지게 된다. 위의 조건에서는 작용시간이 짧아질수록 비교적 양호한 천공부를 관찰할 수 있다. 레이저 에너지가 열에너지로 바뀌는 것은 순간적이므로 한 면에 일차원적으로 조사된 레이저빔에 의한 열이 t 시간 내에 침투된 깊이는 다음 식과 같다.

$$x \cong 2\sqrt{kt} \quad \cdots\cdots (1)$$

k는 재료의 열 확산도이다. 즉 시간이 짧아질수록 레이저빔에 의한 열이 침투된 깊이 역시 짧아져 열영향구역이 적어지면서 급속한 재료의 제거가 이루어지는 것으로 사료된다. 그리고 같은 조건에서의 벽면 상태를 관찰하였는데 Fig. 4에 펄스 수에 따른 벽면 상태의 변화에 대해 나타내었다.



(a) (b)

(c)

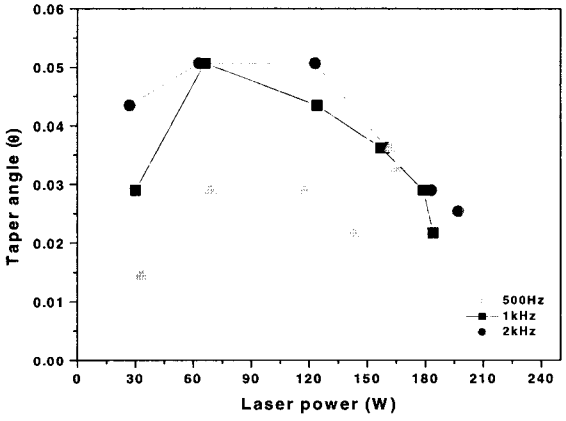
Fig.4 SEM micro-structure of Hole wall by (a)10pulse (b)100pulse (c)1000 pulse (CO_2 laser-Al_2O_3)

펄스 수가 증가함에 따라 천공깊이가 증가하고 열영향구역이 넓어지며 입술모양 등의 결함이 더욱 증가하는데 레이저빔에 의한 열전달이 많아져 재료 내부에서 제거되는 양이 많아지고 증발에 의한 증기압(vapor pressure)과 반충압력(recoil pressure)이 커져 열적 손상 및 기계적 손상이 증가된 것으로 사료된다. 강한 레이저 펄스 인가시 레이저 유도 충격(laser induced shocks)이 생성되며 이러한 충격파는 큰 온도편차와 매우 빠른 조성물질이 증발하는 현상에 기인한다. 이 충격파는 충격에너지(shock energy)가 충분히 크다면 재료에 충격을 주고 재료내부로 전파되어 파괴(fracture)를 유도하여 균열(crack)의 원인이 된다[6]. 또한 구멍의 경사(taper)는 반응지역인 구멍 아래 부분에서 구멍입구 방향으로 용융물이 구멍 밖으로 밀려나가고 연속적인 레이저 펄스로 인해 보다 많이 진행을 하게 되어 그 결과 구멍 부식의 변화로 인해 경사가 형성되어 구멍 입구가 점점 커지게 된다. 경사각은 다음과 같은 수식을 이용하여 구할 수 있다.

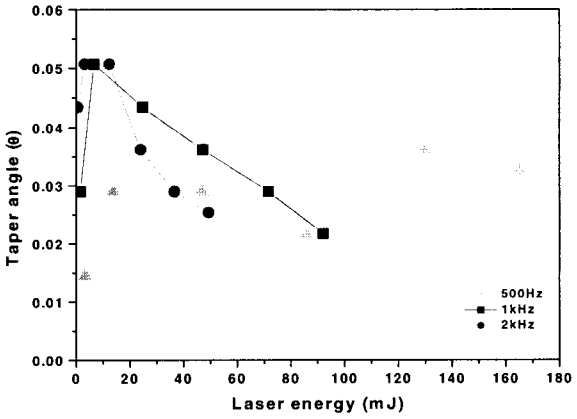
$$\tan\theta = \frac{D_1 - D_2}{2h} \quad \cdots\cdots (2)$$

D_1 는 위의 천공 직경이고 D_2 는 아래의 천공 직경을 h는 천공부의 높이를 나타낸다.

이러한 경사는 먼저 레이저 파워와 레이저 에너지 값이 증가함에 따라 경사각 역시 어느 정도 증가하다가 다시 작아지는 것을 Fig. 5에서 볼 수 있다. 이러한 현상은 위·아래 천공직경의 차이가 레이저 파워와 레이저 에너지 값이 증가함에 따라 증가하다가 계속된 레이저빔 주사에 의해 재료 외부로 분출 및 제거되는 양이 많아져 그 차이가 줄어들고 또한 레이저 파워와 레이저 에너지 값이 증가함에 따라 천공깊이가 더욱 깊어지므로 위와 같은 결론을 얻을 수 있다고 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 5 Taper angle vs (a) Laser power (b) Laser energy(CO_2 laser-Al_2O_3)

다음은 동일한 작용시간에서 펄스 수를 변화시켜 천공부의 상태를 관찰하고자 하였다. 작용시간을 0.2초로 고정시키고 레이저빔의 펄스 수를 100pulse, 200pulse, 400pulse로 조절하여 Fig. 6에 나타내어 보았다.

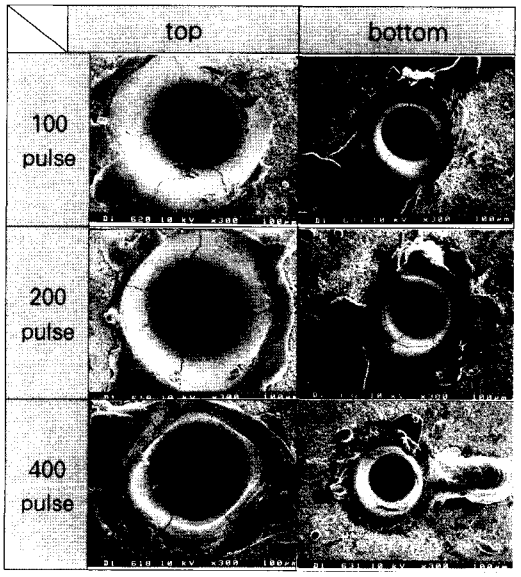
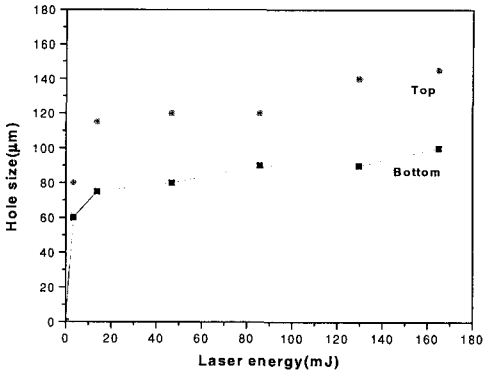


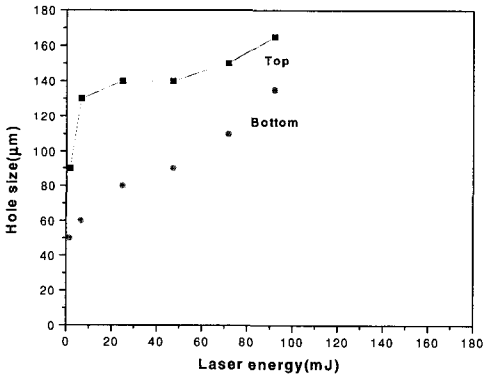
Fig. 6 SEM micro-structure (CO_2 laser-Al_2O_3)

펄스 수가 증가함에 따라 양호하지 못한 천공부가 관찰되었다. 즉 펄스 수가 증가함에 따라 펄스 당 에너지는 감소되어 많은 균열과 부스러기가 생기고 결국에는 낮은 펄스 당 에너지에 의해 천공이 되지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 펄스 당 에너지는 펄스의 첨두출력(peak power)에 펄스 폭을 곱하면 구할 수 있다. 같은 작용시간에서 펄스 수가 증가한다는 것은 곧 주파수가 증가한다는 것이고 이는 짧은 펄스 주기(pulse period)와 짧은 펄스 폭(pulse width)을 의미하므로 결국 펄스 당 에너지가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에 레이저 에너지에 따른 천공직경, 펄스 수에 따른 천공직경의 변화에 대해 나타내어 보았다.

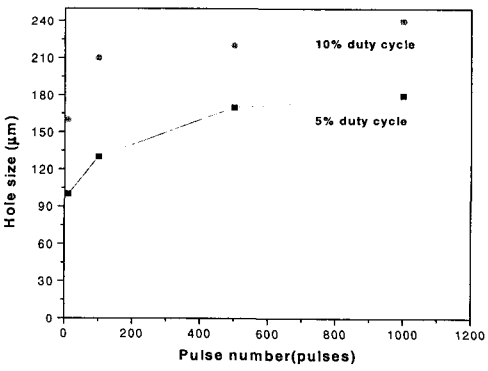


(a)

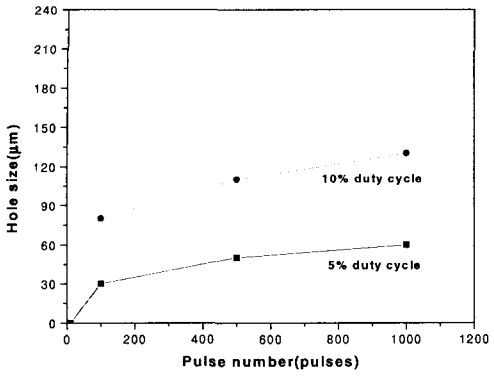


(b)

Fig. 7 Laser energy vs Hole size (CO_2laser-Al_2O_3)(a) 500Hz (b) 1kHz



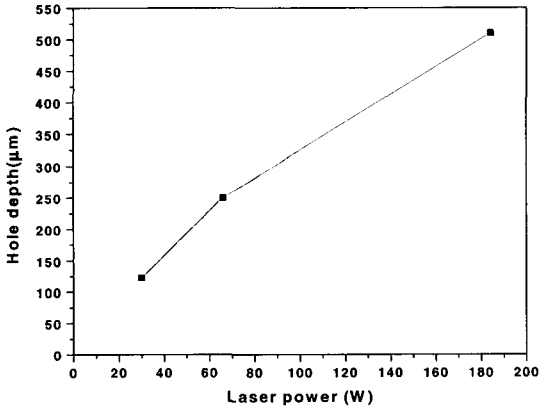
(a)



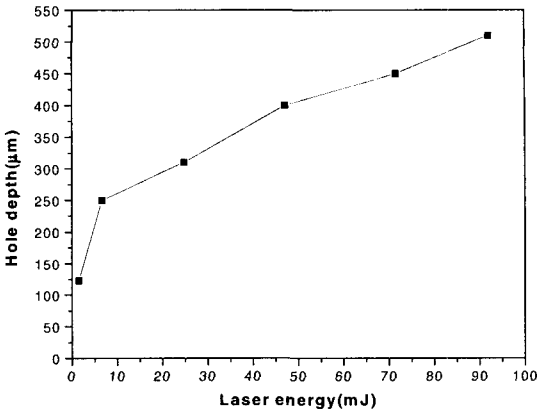
(b)

Fig. 8 Pulse number vs Hole size (CO_2 laser -Al_2O_3) (a) top (b) bottom

또한 Fig. 9에는 1kHz 10 pulse에서 레이저 파워와 천공깊이, 레이저 에너지와 천공깊이와의 관계를 나타내었다. 레이저 파워와 레이저 에너지가 증가함에 따라 재료내부에서 충분한 열이 발생되고 비등점 이상으로 온도가 증가되어 결국 용융 및 증발되는 양이 많아져 재료 밖으로 분출 및 제거되는 양이 많아졌기 때문에 천공깊이가 증가된 것으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 9 Hole depth vs (a)Laser power (b)Laser energy (CO_2 laser-Al_2O_3)

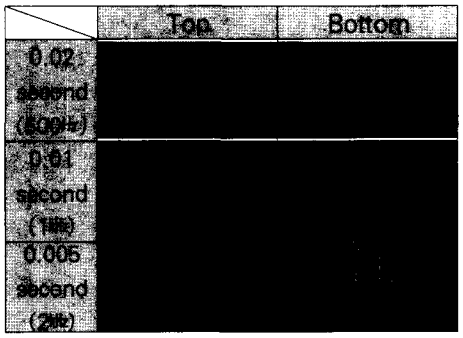


Fig.10 Hole size vs Interaction time(CO_2laser-Polyimide)

3.2 CO_2 레이저빔에 의한 폴리이미드의 천공

Fig. 10에 5% duty cycle(pulsewidth/pulse\period), 10pulse 하에서 작용시간에 따른 천공직경의 변화를 관찰하였다.

앞서 기술한 바와 같이 작용시간이 짧아질수록 열영향구역이 적어지고 천공부 주위에 튀는 것(spatter)이 적어지는 것을 관찰 할 수 있다. 그리고 Fig. 11에 천공직경과 펄스 수와의 결과를 나타내었고 Fig. 12에 천공직경과 레이저 에너지와의 관계를 나타내었다.

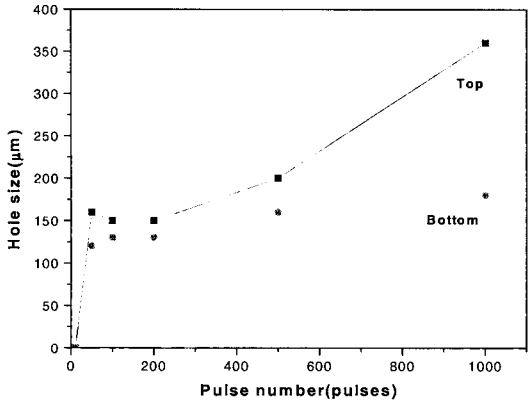
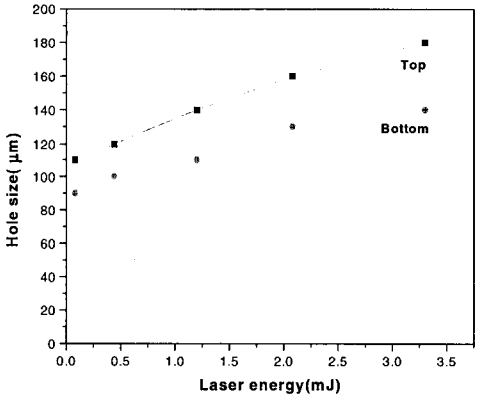
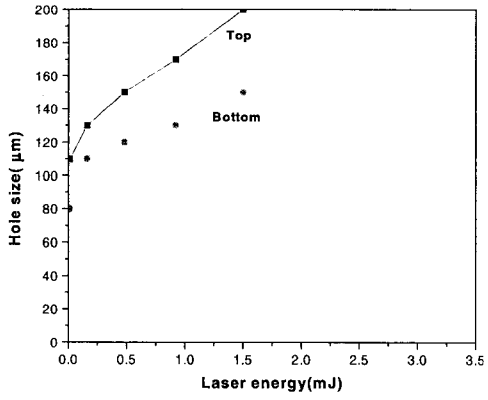


Fig.11 Hole size vs Pulse number(CO_2 laser-Polyimide)



(a)



(b)

Fig.12 Laser energy vs Hole size
(a) 500Hz (b) 1kHz (CO_2 laser-Polyimide)

3.3 CO_2 레이저빔에 의한 PTFE의 천공

Fig. 13에 CO_2 레이저빔에 의한 PTFE 재료의 천공직경과 작용시간과의 결과를 보였고 Fig. 14에 천공직경과 레이저 에너지와의 결과를 나타내었다.

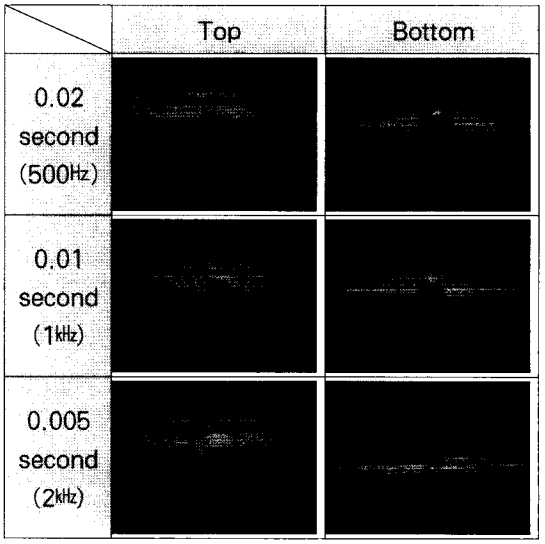
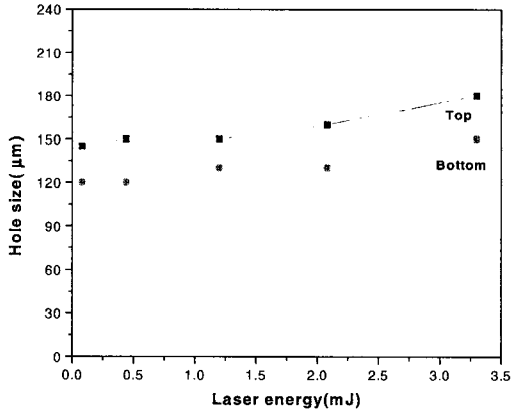
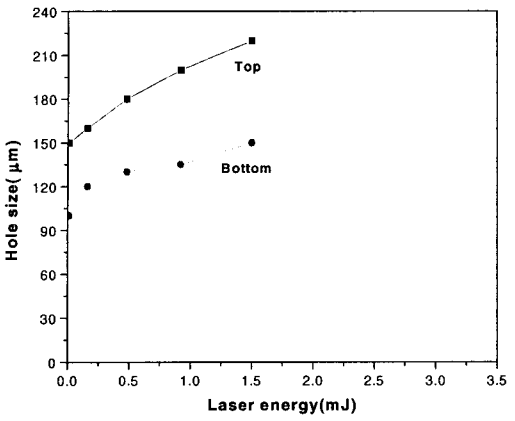


Fig.13 Hole size vs Interaction time
(CO_2 laser-PTFE)



(a)



(b)

Fig.14 Laser energy vs Hole size
(a) 500Hz (b) 1kHz(CO_2 laser-PTFE)

이와 같이 CO_2 레이저빔에 의한 재료가공은 CO_2 레이저빔의 파장과 재료의 고유진동수가 공진(resonance)되어 격자진동(lattice vibration)을 여기(excite)시켜 열적인 성질로 재료를 가공시키므로 생산성은 뛰어난 장점은 갖지만 정밀한 부품이 요구되는 곳에는 비교적 적합하지 못하다.

3.4 UV 레이저빔에 의한 알루미나의 천공

Fig. 15에 작용시간에 따른 레이저 파워와 천공깊이에 대해 나타내었고 Fig. 16에는 펄스 수에 따른 천공직경의 변화에 대해 나타내었다.

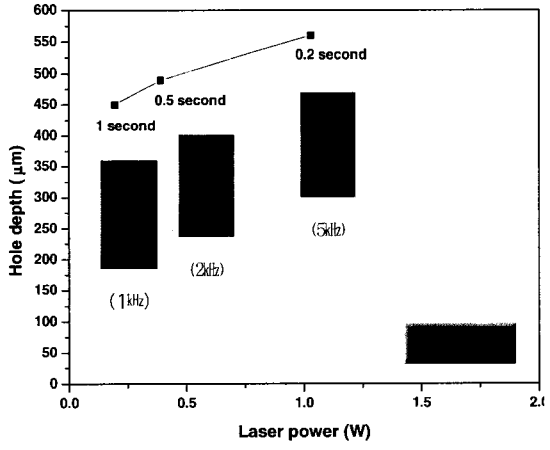
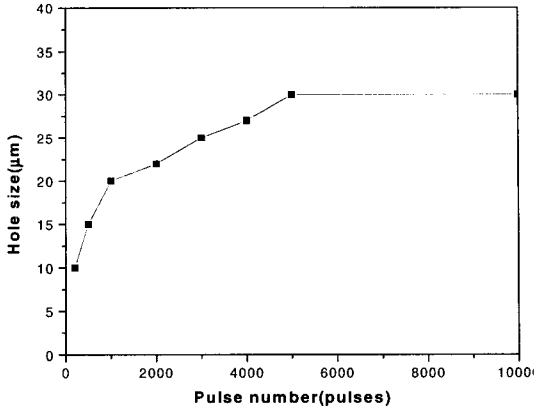
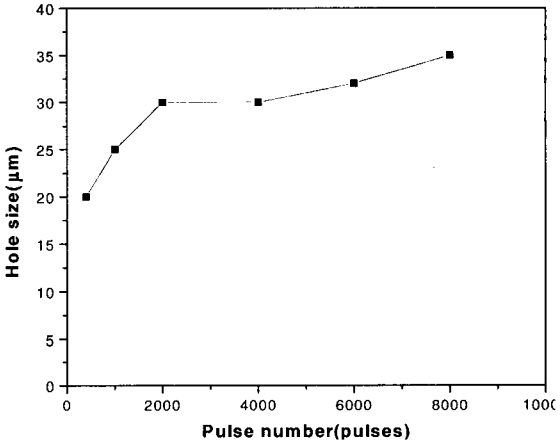


Fig.15 Laser power vs Hole depth as interaction time



(a)



(b)

Fig.16 Pulse number vs Hole size
(a) 1kHz (b) 2kHz(UV laser-Al_2O_3)

앞서 기술했듯이 펄스 수가 증가함에 따라 레이저빔에 의한 열전달이 커져 재료 내에 용융 및 증발되어 제거되는 양이 많아졌기 때문이라고 사료된다. Fig. 17에 펄스 수를 1000pulse로 고정시킨 후 작용시간을 1초, 0.5초, 0.2초로 변화시켜 천공부를 관찰하였다.

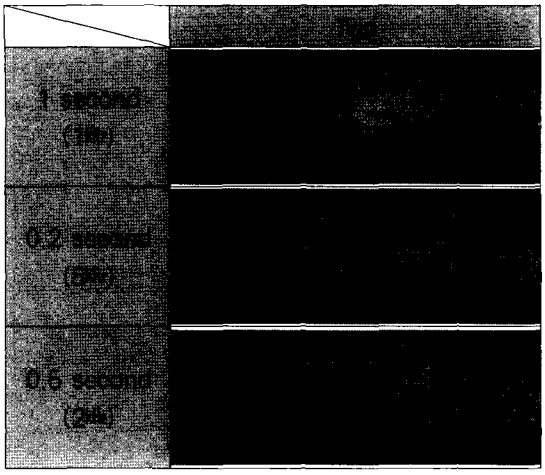


Fig.17 Hole size vs interaction time (UV laser-Al_2O_3)

짧은 작용시간에서 급속하게 재료가 제거되고 열영향구역이 적어지면서 깨끗한 천공구역을 얻을 수 있다.

3.5 UV 레이저빔에 의한 폴리이미드의 천공

Fig. 18에 100pulse에서 레이저 에너지와 천공직경에 관한 결과를 사진과 함께 나타내었다.

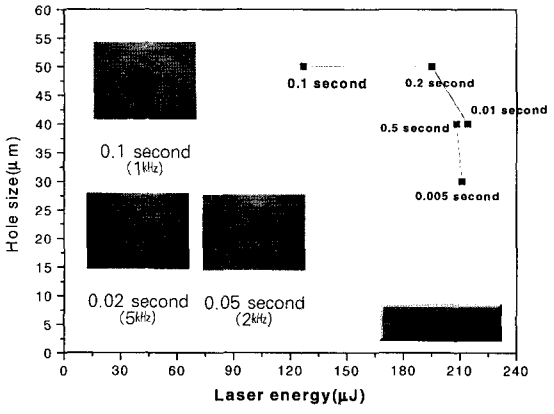


Fig. 18 Laser energy vs Hole size (UV laser-Polyimide)

또한 Fig. 19에 펄스 수에 따른 천공직경의 변화를 나타내었으며 Fig. 20에는 0.1초의 작용시간 하에서 100pulse로 천공을 수행한 결과를 나타내었다.

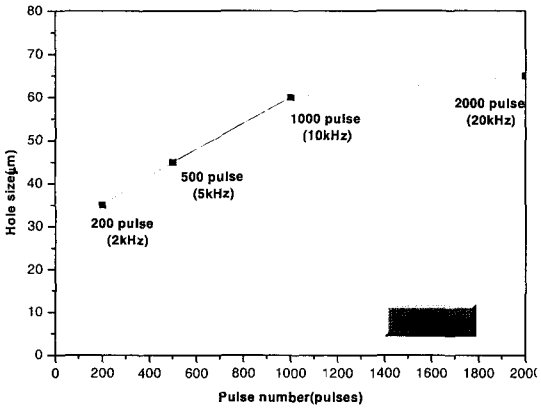


Fig. 19 Pulse number vs Hole size

100 pulse

Fig.20 SEM micro-structure(UV laser-Polyimide)

3.6 UV 레이저빔에 의한 PTFE의 천공

PTFE의 형상이 튜브(tube) 모양이기에 레이저빔에 의한 초점을 맞추기 힘들고 이에 따른 변수 설정에 세심한 주의가 필요하다.

Fig. 21에 레이저 에너지에 따른 천공직경의 관계를 Fig. 22에 100pulse 하에서 작용시간에 따른 천공구역의 변화를 살펴보았다.

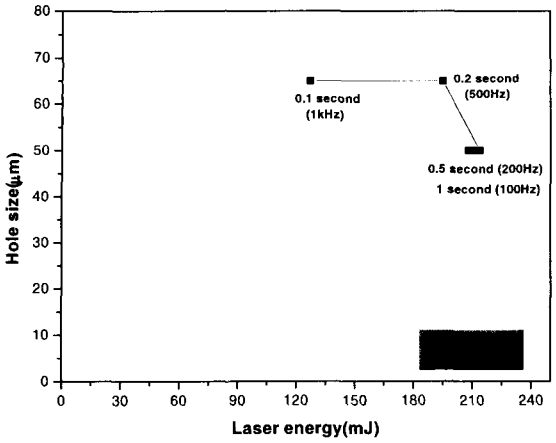


Fig.21 Laser energy vs Hole size(UV laser-PTFE)

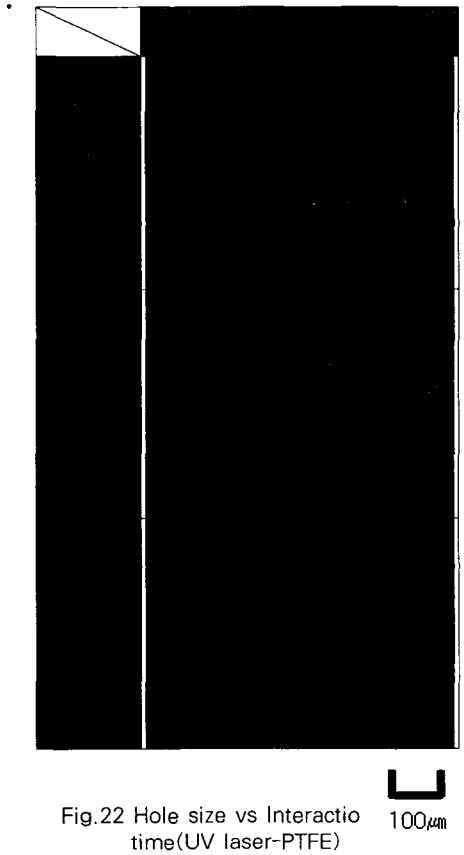


Fig.22 Hole size vs Interactio time(UV laser-PTFE)

또한 Fig. 23에서는 펄스 수에 따른 천공직경의 변화를 살펴보았다.

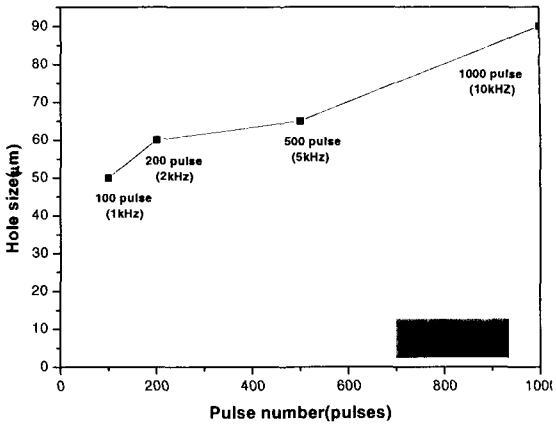


Fig.23 Pulse number vs Hole size(UV laser-PTFE)

UV 레이저빔에 의한 재료가공은 짧은 파장에 의한 높은 photon 에너지를 얻어 재료의 결합강도(bon dingstrength) 를 끊는 photo-chemica processing에 의해 깨끗하고 정밀한 천공구역을 얻을 수 있다.

4. 결 론

CO_2 레이저빔과 UV 레이저빔을 이용한 비금속 재료(세라믹, 폴리머 재료)의 천공에 대해 실을 하였다.알루미나(Al_2O_3)와 PTFE (Polytetrafluoethylene) 그리고 폴리이미드(Polyimide)에 대해 레이저 천공을 수행한 결과를 다음과 같이 정리하여 요약할 수 있다.

1) 동일펄스 수 작용시간을 조절한 조건에서는 작용시간이 짧을수록 양호한 결과를 보였다. 같은 duty cycle(=power) 조건에서 작용시간이 짧을수록 레이저빔에 의한 열전달 시간이짧아지면서 열영향구역이 적어지고 그 결과재료의 제거가 급속히 이루어졌기 때문이라 사료된다.
2) 동일작용시간 펄스 수를 조절한 조건에서는 작용시간이 클수록 양호한 결과를 보였는데 작용시간이 클수록 펄스 당 에너지가 커져 재료가 증발되어 제거되는 양이 증가했기 때문이라 사료된다.

3) 약 50㎛ 이상의 천공직경을 필요로 하는 곳에는 CO_2 레이저가, 약 50㎛ 이하에 깨끗하고 아주 정밀한 천공부를 필요로 하는 곳에는 UV 레이저빔에 의한 가공이 적합할 것이라고 사료된다.

참고문헌

1. Un-Chul PAEK, Francis P. Gagliano : Thermal analysis of laser drilling processes" IEEE journal of quantum electronics vol.8, no.2 pp112~119 (1972)

2. John F. Ready : 'Industrial applications of Lasers" Academic press, Inc. pp 398~407(1972)

3. Friedrich Dausinger : "Drilling of high quality micro holes" section B-ICALEO pp1~10 (2000)

4. 김도훈 : "레이저 가공학" pp 296~297 경문사. 1990

5. Rong Gu, Jim Angell, and Rich Hunter "Micro manufacturing polyimide by TEACO_2 laser vs excimer laser" section B-ICALEO pp81~87 (1999)

6. C. L. Chan, J. Mazumder : "One dimensio nal steady state model for damage by vaporization and liquid expulsion due to laser - materials interaction" , J. Appl. Phys.62(11). pp 4579~4586 (1987)