

Al₂O₃ 세라믹의 미세구멍 가공에 관한 연구

윤 혁 중*/대전기능대학, 임 순 재**/한국표준과학연구원, 이 동 주***/충남대학교

A study on the micro hole machining of Al₂O₃ ceramics

H. J. Youn* , S. J. Lim** , D. J. Lee***

Abstract

This paper describes result of experiment of parameters affecting the micro hole drilling using laser such as energy, pulse, drilling time, kind of assisting gas and it's pressure.

The result reveals that parameter value of 0.08J, 20Hz, dwell time of 300 microseconds can be a good machining condition to make micro hole diameter range of 50-70 μm. Assistant gas such air, O₂, Ar, N₂ was adapted.

Assistant gas of air makes heat affected zone enlarge due to burning of material, also it makes hole irregular and damage because of refusion stick to caused by chemical reaction with Al₂O₃ ceramic material. O₂(99.9%) has good characteristic to get good drilling and smooth surface on pressure of 0.2kg/cm², but it is expensive. Ar, N₂ makes material burn and crack severely and proved to be an appropriate but, Ar was better than N₂.

1. 서 론

레이저에 의한 구멍가공은 소재 표면에 고밀도의 에너지빔을 집속·조사하여 이때 용융기화된 부분을 보조가스를 이용하여 구멍가공하게 된다. 보조가스는 렌즈보호와 가공 보조의 역할을 겸하는데, N₂, Ar, He 등의 불활성 가스를 사용하는 경우와 O₂, air 등의 산화가스를 사용하여 연소 반응을 이용하는 경우가 있다. 알루미늄(Al₂O₃)같은 세라믹은 깨지기 쉽고¹⁾ 가공상 난삭재로 알려져 왔으며, 레이저에 의한 구멍가공 방법으로는 조사된 레이저 빔으로 증발을 시켜 제거하는 방법²⁾과 용융 후 가스 압력으로 액체가 층류유동 형태로 불어내는 방법³⁾이 있다.

레이저를 이용한 구멍가공에 있어 가공변수로는 레이저빔,^{4) 6)} 가공속도^{7) 8)}, 보조가스^{9) 10)}, 초점거리^{11) 13)}등이 있으며 이에 대한 연구들이 활발히 진행되어 왔다.

본 연구에서는 반도체 검사기에 사용되는 Al₂O₃ 세라믹 박판 레이저 구멍가공에 대한 가공 조건, 보조가스 종류, 보조가스 압력 등이 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 가 공 변 수

본 실험에서는 세라믹 미세 구멍 가공의 최적조건을 찾기위해 레이저 에너지, 가공주파수, 조사시간 등을 가공변수로 하였다. 또한, 가공변수의 가변범위는 레이저 에너지가 0.05~3J, 가공주파수 10~50Hz, 조사시간 100~500 μs로 하였고, 보조가스 종류별로 가공압력과 공급방법 등의 변화를 주면서 가공구멍의 크기와 열영향부를 측정·평가하였다.

2.2 시료 물성 및 실험장치

가공시료의 물성은 Table 1과 같으며, 실험장치는 영국 Lumonics사의 최대평균출력 35W YAG레이저로 제원은 Table 2와 같다.

Table 1. Properties of hot pressed Al₂O₃ ceramics

density	3.8 g/cm ³	sublimation	1333 Cal/g	compressive strength	24,000 kg/cm ²
melting point	2050 °C	specific heat	0.19 Cal/g°C	cubical resistivity	10 ¹¹ Ω·cm
boiling point	2980 °C	thermal conductivity	0.03Cal/cm·sec·°C	Material Size	L*W*T 11*30*05
melting latent heat	225 Cal/g	absorption coefficient	0%	coefficient of thermal expansion	6.7~7.6 ×10 ⁻⁶ /°C
vaporization latent heat	1138 Cal/g	tensile strength	2500 kg/cm ²	Moh's hardness	9

Table 2. Specification of laser system (MS 35 LD, Lumonics C.O., UK)

Max power	35W	pulse repetition rate	50HZ
Drilling thickness	0.001 to 4	pulse Duration	0.1mm.sec
Hole Diameter	> 0.003mm	Lamp	100 or 50(μ F)
Max speed	50 hole/sec	X,Y table	1 μ m/100mm
Max energy	1.5 J	Demensions	1450 \times 200 \times 130

측정장치는 Table 3과 같은 미국 ROI사의 optical measurement inspection system을 이용하였다.

Table 3. Measurement system (ROI C.O., USA)

Travel size(mm)	100 \times 200 \times 200 (X,Y,Z)
Resolution	0.001 - 0.0002mm
A wide of Video monitor	5 \times to 350 \times macro optics 5 \times to 8000 \times micro optics

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공 변수에 따른 가공형상

본 연구에서는 가공표면을 초점위치 0(zero)으로 놓고, 알루미늄이나 세라믹 박판 ($t=0.5\text{mm}$)을 소재로 하였다. Fig.1은 레이저를 이용하여 미세 구멍 가공시 레이저 빔의 진행상태를 보여준다.

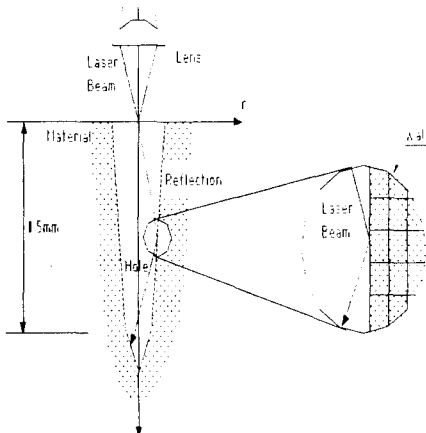


Fig. 1 Ray trace of simulation model

가공조건을 변화시켜가면서 얻은 구멍치수를 근거로하여 정리한 것이 Fig.2로써 가공조건 범위는 O : 0.05J, \times : 0.08J Δ : 0.11J의 레이저 에너지로, 주파수는 20Hz, 조사시간 300 μ s로 조사시의 구멍형상을 보여주고 있다.

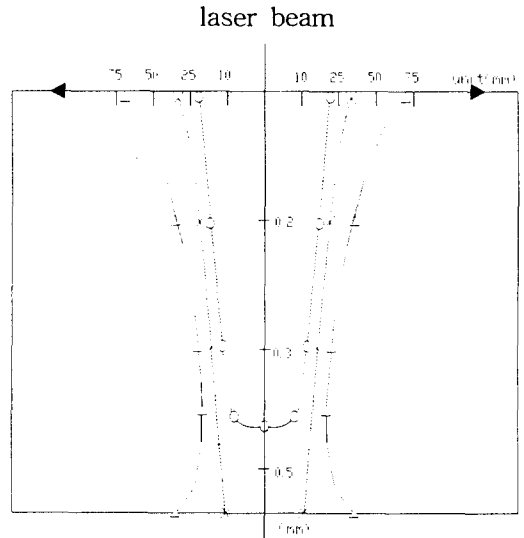


Fig. 2 Simulated hole features

실험결과는 Fig.2와 같이 윗면의 구멍직경 75 μ m정도 아랫면의 구멍직경 45 μ m정도의 구멍 형상을 얻는데, 레이저 에너지 0.08J, 주파수 20-30Hz, 조사시간 300 μ s로 나타났다.

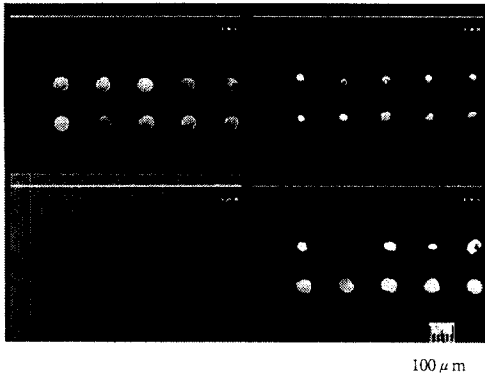
3.2 보조가스가 구멍특성에 미치는 영향

보조가스의 종류는 air, O₂, Ar, N₂ 그리고 보조가스없는 경우로 실험하였고, 이때 가공조건은 레이저 에너지 0.08J, 주파수 20Hz, 조사시간 각 300 μ s, 500 μ s로 하였으며, 그 결과 시료 윗면의 구멍직경과 아랫면의 직경 및 형상을 비교하였다. Fig.3(a)은 air를 사용한 결과로써 구멍크기가 일정하지 않고, 용융후 슬래그가 달라붙고 표면 상태가 매끄럽지 못한 것을 볼 수 있다.

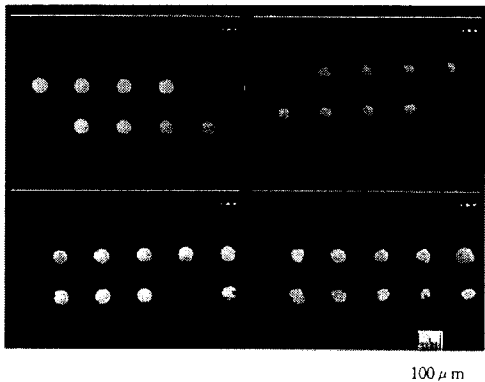
Fig.3(a)에서 윗부분은 조사시간 300 μ s이고, 아랫부분은 조사시간 500 μ s이며, 왼쪽은 소재 윗면의 구멍형상을, 오른쪽은 소재 아랫면의 구멍형상을 나타낸다. 여기에서 레이저 빔의 조사시간이 길면 구멍형상이 아랫면에서 크고, 불규칙한 형상으로 가공됨을 알 수 있었고, 열 영향 부위가 넓고 burning현상도 넓고 깊게 나타났다.

Fig.3(b)에서는 O₂를 사용한 결과 구멍형상이 매끄럽게 나타나고 burning현상도 줄어드는 반면 레이저 빔의 조사시간 300 μ s, 500 μ s를 비교한 결과 소재 윗면의 구멍형상은 거의 차이가 없는 데, 아랫면의 구멍형상은 크기의 차이가 많이 났다.

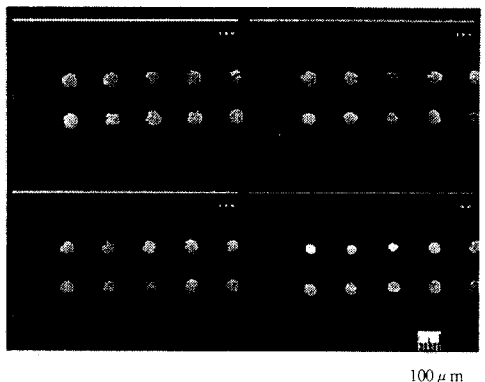
미가공된 부분은 수백개의 구멍 가공시에도 나타나는데, 에너지를 증가 시키던가, 주파수를



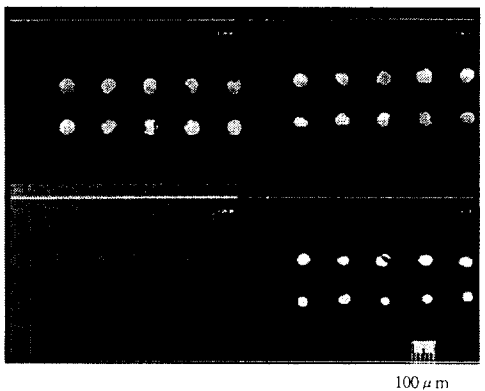
(a) Photo of Air



(b) Photo of O₂



(c) Photo of Ar



(d) Photo of N₂

Fig.3 Dependence of hole on kind of assistance gas

증가시켜야만 재 가공되었고, 구멍형상이 커짐을 발견할 수 있었다. 이는 소재의 결합력이 크고, 결정이 단단하기 때문이라고 추측된다. 또한, 보조가스로 air나 O₂ 를 사용시 용융후 재응고 과정에서 표면장력으로 인한 구멍주위가 솟아 올라오는 경향도 파악되었다. 이때의 보조가스압은 1 kg/cm²으로 실험하였다. Fig.3의 (c)와 (d)는 불활성 가스인 Ar와 N₂를 사용하여 실험한 결과인데 Fig.3(c)의 왼쪽 상단부는 조사시간 500 μ s, 하단부는 조사시간 300 μ s일때의 가공상태이며, 용융현상은 air나 O₂보다 적으나 균열이 많이 발생하고 있으며, 아랫면의 구멍형상은 조사시간 500 μ s에서 구멍형상이 커짐을 볼 수 있다. Fig.3의 (d) N₂역시 균열이 나타나고 burning 현상이 나타나는 것을 확인하였다.

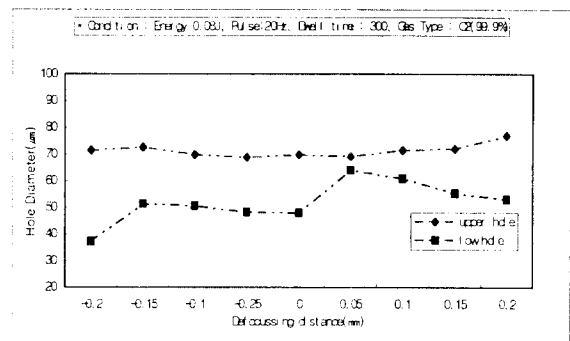


Fig. 4 Dependence of hole Diameter on defocus length

Table 4 Data of hole size on defocus length(unit : μ m)

hole no. head meter	hole no.										Avg	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
+0.20	top	80	75	71	80	73	75	80	75	80	80	76.9
	bottom	0	0	60	40	50	60	50	60	0	52	53.1
+0.15	top	75	78	73	70	71	71	73	72	70	68	72.1
	bottom	0	60	55	48	60	60	51	58	50	0	55.3
+0.10	top	70	71	71	71	70	75	71	70	73	72	71.4
	bottom	0	68	68	61	58	60	70	52	0	50	60.9
+0.05	top	72	77	65	72	71	70	70	70	70	55	69.2
	bottom	68	68	0	60	60	68	60	68	65	60	64.1
0	top	70	67	68	65	70	70	78	71	69	70	69.8
	bottom	42	40	50	55	45	55	29	49	50	65	48.0
-0.05	top	70	68	70	70	65	68	70	68	70	70	68.9
	bottom	0	30	50	60	45	40	60	60	50	40	48.3
-0.10	top	70	70	70	70	72	70	70	68	68	70	69.8
	bottom	28	55	40	50	40	60	60	55	60	58	50.6
-0.15	top	76	70	75	74	70	71	72	76	72	70	72.6
	bottom	42	62	64	62	42	58	52	48	0	32	51.3
-0.20	top	72	70	72	71	70	70	72	72	70	75	71.4
	bottom	39	36	32	48	38	38	26	38	42	36	37.3

Fig.4와 Table 4는 초점거리에 따른 구멍의 크기와 가공형상을 보여주는 것으로 초점위치가 O(zero) 즉, 소재표면에서 작은 구멍형상을 볼수 있으며 초점거리가 +방향보다 -방향으로 진행되는 것이 구멍가공이 잘 되나 초점거리 -0.20에서 아랫면 구멍형상이 최소가 됨을 보여주는데 이는 초점 위치에서 구멍형상이 작아짐을 보여준다.

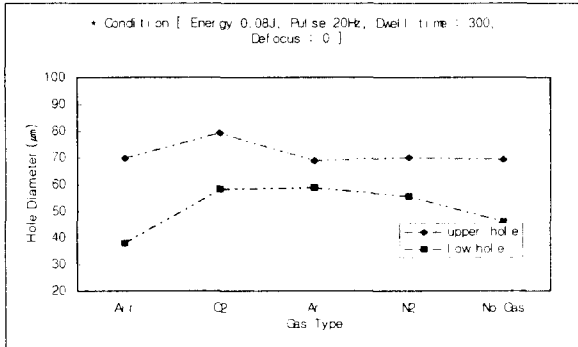


Fig. 5 Dependence of hole diameter a kind of assistance gas on dwell time 300 μs

Table 5 Data of hole size on dwell time 300 μs (unit : μm)

gas type	hole no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg
		Air	top	70	68	70	71	70	71	70	70	70
Air	bottom	40	31	40	35	32	32	32	48	40	50	38.3
O ₂	top	80	80	78	80	79	80	78	80	78	80	79.3
O ₂	bottom	60	60	59	62	0	0	60	60	56	50	58.4
Ar	top	70	70	69	70	62	70	69	70	70	70	69.0
Ar	bottom	55	49	50	60	58	62	60	60	69	65	58.8
N ₂	top	73	71	80	58	65	70	64	80	60	80	70.1
N ₂	bottom	55	53	68	70	63	48	53	46	50	50	55.6
no gas	top	68	68	70	70	70	68	70	70	71	69	69.4
no gas	bottom	46	43	47	48	47	45	46	46	48	45	46.1

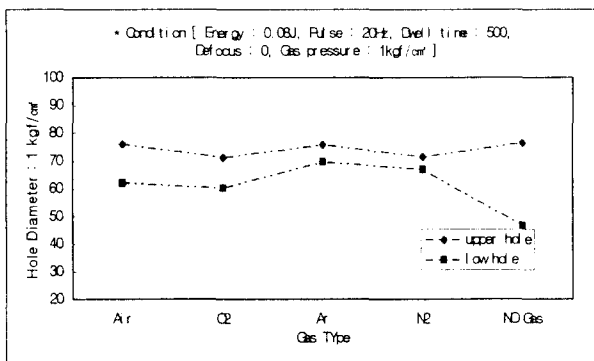


Fig.6 Dependence of hole diameter a kind of assistance gas on dwell time 500 μs

Fig.5와 Fig.6에서는 조사시간 300 μs와 조사시간 500 μs에서 보조가스 종류별 가공상태를 보여주는데, 보조가스 사용시 용융후 불어내기 때문에 구멍편차가 재공고 과정에서 심하게 나타나며, 보조가스없이 가공된 면은 구멍형상의 편차가 적게 나타나는데, 구멍주위에 균열이 많이 발생됨을 볼수 있었고, 가공표면 상태는 O₂사용시에 가장 매끄러운 표면을 얻을수 있다.

Table 6 Data of hole size on dwell time 500 μs (unit : μm)

gas type	hole no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg
		Air	top	78	80	75	68	70	73	80	80	81
Air	bottom	50	43	60	45	65	70	78	70	70	70	62.1
O ₂	top	70	78	70	70	71	72	70	70	70	70	71.1
O ₂	bottom	62	70	70	65	0	88	71	61	50	65	66.9
Ar	top	78	80	70	80	78	70	70	80	77	74	75.7
Ar	bottom	81	70	66	75	67	70	70	60	72	65	69.6
N ₂	top	70	70	69	65	70	70	78	70	78	74	71.4
N ₂	bottom	69	60	69	70	70	65	70	62	62	72	66.9
no gas	top	77	75	76	77	78	77	75	76	77	75	76.3
no gas	bottom	47	54	47	43	43	45	48	48	45	46	46.6

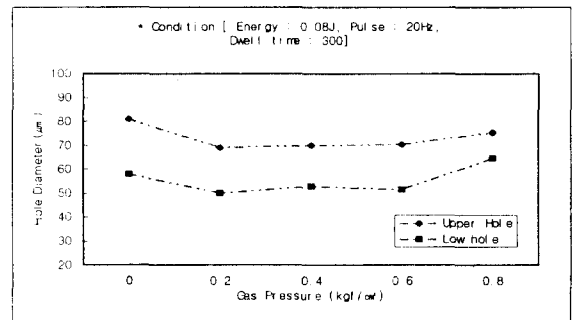


Fig. 7 Dependence of hole diameter on gas supply pressure of upper direction

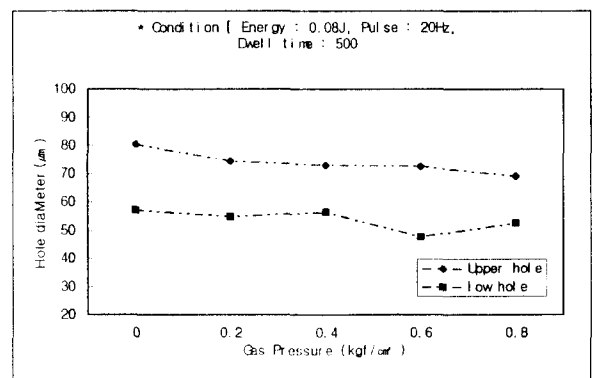


Fig. 8 Dependence of hole diameter on gas supply pressure of upper and low direction

Table 7 Data of hole size on gas supply of upper direction pressure (unit : μm)

P(kg/cm ²)	hole no										Avg	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0	top	80	78	82	85	80	80	80	80	85	80	81.0
	bottom	60	60	62	60	52	60	59	60	55	52	58.0
0.2	top	71	70	61	69	69	70	70	71	70	70	69.1
	bottom	55	58	55	60	56	41	0	60	55	60	50.0
0.4	top	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70.0
	bottom	70	60	65	50	0	50	55	60	68	50	52.8
0.6	top	65	63	71	70	70	70	75	70	80	70	70.4
	bottom	60	0	0	70	68	58	68	60	68	63	51.5
0.8	top	78	71	76	72	75	70	78	80	78	75	75.3
	bottom	70	60	60	70	60	60	65	70	70	60	64.5

Table 8 Data of hole size on gas supply of upper and low direction (unit : μm)

P(kg/cm ²)	hole no										Avg	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
0	top	80	80	80	81	82	80	80	80	80	80	80.3
	bottom	60	60	58	61	48	50	60	60	55	60	57.2
0.2	top	80	70	80	70	74	65	75	80	75	75	74.4
	bottom	60	70	40	40	50	69	61	50	53	0	54.8
0.4	top	75	70	69	72	75	70	73	75	76	75	73.0
	bottom	47	55	65	60	65	55	60	50	49	58	56.4
0.6	top	75	85	72	71	70	69	70	70	72	71	72.5
	bottom	32	33	68	0	30	60	40	50	52	65	47.8
0.8	top	70	70	71	70	72	69	70	65	69	65	69.1
	bottom	65	20	23	70	0	58	60	60	65	0	52.6

Fig.7과 Fig.8에서는 보조가스로 O₂를 사용하여 공급방법을 상방향 공급과 상하방향 공급으로 실험하였고, 압력의 변화를 주면서 실험 하였다. 조사시간은 300 μs 로 Fig.7은 상방향 Fig.8은 상하방향에서의 가공결과를 보여준다. 이때 보조가스압이 0.2kg/cm²에서 표면상태가 거의 표가 나지 않을 정도로 열영향이 적고 매끄러운 표면상태가 되었으며 압력이 높아질수록 구멍형상은 크게 변화가 없으나 용융깊이가 깊어짐을 확인할 수 있었다. 또한, 가스공급 방법에서 상방향 공급보다 상하 방향에서 공급한 것이 아랫면 구멍형상에서 편차가 심하게 나타났고, 실험결과 상방향에서 공급하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한, 보조가스 압력의 변화에 따른 미세 구멍가공에서의 특성도 적합한 조건이 존재함을 알았다.

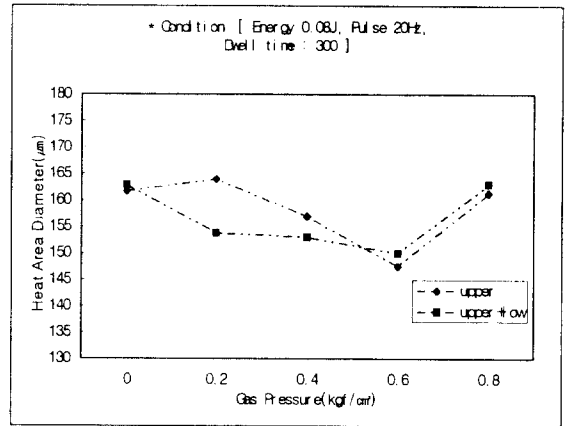


Fig. 9 Dependence of heat effect area on gas supply pressure of upper and upper + low direction

Fig.9와 Table 9,10에서 조사시간 300 μs 으로 보조가스를 상방향에서 공급과 상하방향에서 공급하여 실험하고, 열영향부를 측정하고 결과 열영향부에서 크기의 편차는 상방향보다 상하방향에서 보조가스를 공급한 것이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 결국 보조가스의 압력 변화에서는 보조가스의 압력이 커질수록 구멍형상의 변화는 크지 않지만 열영향부에서 깊이가 깊어진다는 것을 알았고, O₂ 압력 0.2kg/cm²에서 표면상태가 가장 우수함을 확인하였다.

Table 9 Data of heat area hole size on gas supply of upper direction (unit : μm)

P(kg/cm ²)	hole no										Avg
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	172	156	158	170	175	155	173	154	150	154	161.7
0.2	160	160	160	160	160	170	170	170	170	160	164.0
0.4	160	165	165	165	160	160	150	150	150	145	157.0
0.6	140	140	150	170	150	140	140	150	155	140	147.5
0.8	150	180	160	160	160	160	161	170	172	140	161.3

Table 10 Data of heat area hole size on gas supply of upper+low direction (unit : μm)

P(kg/cm ²)	hole no										Avg
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	164	169	165	157	167	167	161	158	160	161	162.9
0.2	160	130	180	160	150	150	148	150	160	150	153.8
0.4	155	150	160	160	150	155	150	150	160	140	153.0
0.6	130	140	180	140	150	140	170	160	150	140	150.0
0.8	140	170	160	170	170	180	170	160	150	160	163.0

4. 결 론

본 연구에서는 Al_2O_3 세라믹 박판에서의 미세구멍 가공에 있어서 가공조건, 초점거리, 보조가스 종류 및 압력이 미치는 영향에 대하여 실험한 결과는 다음과 같다.

1) 알루미늄 구멍가공의 적절한 가공조건에서는 레이저 에너지 0.08J, 주파수 20Hz, 조사시간 300 μ s, 보조가스 종류 O_2 가스압력 0.2kgf/cm²로 나타났다.

2) 초점위치에 따라 구멍형상과 크기가 변화됨을 확인할 수 있었다.

3) 보조가스의 종류에 있어 가스공급이 없는 경우는 크기가 비교적 일정한 구멍을 얻었으나, 형상이 매끄럽지 못하였고, 가스압이 높으면 용융후 재응고 과정에서 편차가 심하고, 0.2kgf/cm²에서 가장 양호한 표면을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1) Paek, u.-c. and Gagliano, F.P., "Thermal Analysis of Laser Drilling Processes", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-8, 1972, pp.112-119.

2) Dabby, F.W. and Paek, u.-c., "High-Intensity Solid Material", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-8, 1972, pp 106-111.

3) Von Allmen, M., "Laser Drilling Velocity in Metals" Journal of Applied Physics, Vol. 47, 1976, pp 5460-5463.

4) Risch, T.K. and Lanb, B., "General Model for Thermochemical Ablation into avacuum", Journal of themophysics and Heat Transfer, Vol.4, No3, 1990, pp 278-284.

5) Wei, P.S. and Ho, J.Y., "Energy Considerations in High-Energy Beam Drilling", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.33, No10, 1990, pp.2207-2216

6) Modest, M.F. and Abakiams, H., "Evaporative Cutting of a Semi-Infinite Body With a Moving Cw Laser", ASME Journal of Heat Transfer, Vol.108, 1986, pp 602-607.

7) Roy, S., and Modest, M.F., "Three-Dimensional Conduction Effects During

Evaporative Scribing With a CW Laser, " Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.4, No2, 1990, pp. 199-203.

8) Bang, S.Y. and Modest, M.F., " Multiple Reflection Effects on Evaporative Cutting With a Moving CW Laser, " ASME Journal of Heat Transfer, Vol.113, No.3, 1991, pp. 663-669.

9) Chen, S. L., and Steen, W. M., " The Theoretical Investigation of Gas Assisted Laser Cutting," In the Proceedings of ICALEO', 91, 1992, pp. 221-230.

10) S. J. NA, " Effect of Shielding Gas Pressure in Laser Cutting of Sheet Metals" ASME, Vol.111, 1989, pp. 314-318.

11) Biyikli, S. and Modest, M.F., "Beam Expansion and Focusing Effects on Evaporative Laser Cutting", ASME Journal of Heat Transter, Vol.110, 1988, pp. 529-532.

12) Borkin, A.G., Drobyazko, S.V., Levchenko, E.B., Senatorov, Y.M., and Turygin, A.Y., "Self-focusing and Waveguide Propagation of Radiation in the Case of Deep Penetration of a Metal by a Laser Beam" Soviet Journal of Quantum Electronics, Vol. 15, 1985, pp. 1515-1523.

13) 森田昇. 외1, " ヤラミクスの レーザ" 穴あけにおける 焦点位置カ" 加工穴 形状に 及ぼす 影響 journal of the Ceramic Society of Japan 102, (2) 1994, pp. 189-193.