

플라즈마 용사된 세라믹 코팅층의 레이저 홈가공

방 세 윤*

Laser Engraving of Plasma Sprayed Ceramic Coatings

Se Yoon Bang*

ABSTRACT

Ceramic-coated anilox roll for printing is resistant to corrosion and wear, and hence has enhanced life and quality. Laser engraving is used typically for machining holes to store ink in this roll. Since engraved hole size and shape are directly related to laser processing parameters, it is necessary to know the relationships among these parameters. In this study, the parameters for engraving of plasma sprayed ceramic coatings with Nd:YAG laser were studied. Relationships between hole shape and processing parameters were analyzed. Cr₂O₃ ceramic was found to be most suitable for Nd:YAG laser engraving. It was found that hole depth can be increased by using higher energy pulses. Effect of using different assistant gases was small to the final results. For better results, it was suggested to use a very stable laser with shorter pulses and higher pulse energy.

Key Words: Laser engraving (레이저 홈가공), Ceramic coating (세라믹 코팅), Anilox roll (아니록스 롤), Nd:YAG Laser (Nd:YAG 레이저)

1. 서 론

세라믹 코팅된 인쇄용 anilox roll은 마모나 잉크에 의한 부식에 강하기 때문에 정밀 인쇄에 있어서 수명을 크게 증가시키며, 품질을 향상시킨다. 세라믹 roll은 hard chrome coating에 비해 (i)내식성이 우수하고 (ii)내마모성이 높으며 (20-50배) (iii)잉크의 전달성이 양호하고 (iv)잉크 및 풀의 낮은 점착성과 (v)인쇄 해상도가 높고 (vi)크롬 도금이 생략되는 등의 장점을 갖는다. 이러한 세라믹 anilox roll은 잉크의 저장을 위한 미세한 홈이 필

요하며, 가공방법에는 기계적으로 압입하여 홈을 형성시킨 금속 roll (engraved metallic anilox roll) 표면에 세라믹 코팅을 하거나 또는 금속 roll 표면에 세라믹 재료를 플라즈마 용사한 후 (plasma sprayed ceramic anilox roll) 표면을 레이저로 engraving하는 방법이 있다. 후자의 방법은 정밀도 및 가공된 홈의 품질이 중요시될 때 채택되는 가장 첨단인 방법이다. 일반적으로 engraved metallic anilox roll에 세라믹 코팅을 할 경우에는 Al₂O₃, Al₂O₃-TiO₂를 사용하며, laser engraved ceramic anilox roll의 경우에는 Cr₂O₃,

* 동국대학교 기계공학과

Cr₂O₃-SiO₂ 분말이 사용된다⁽¹⁾.

현재 세라믹 anilox roll의 레이저 engraving을 위해서는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저가 사용된다. CO₂ 레이저의 경우에는 일반적으로 4-10kHz의 pulse를 사용하며 세라믹에 대해서는 빔의 흡수율이 높아 효율적인 제거효과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. Nd:YAG 레이저는 파장이 짧아 보다 작은 spot size를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에, hole의 깊은 부분에서 국부적인 온도상승으로 인해 폭발적인 가스와 용융물의 분출이 일어날 수 있다. Paek과 Zaleckas의 연구⁽³⁾에서는 알루미늄의 scribing시, Nd:YAG 레이저가 CO₂ 레이저 사용시와 비교해 보다 매끄러운 edge부를 갖지만 표면에 원치 않는 debris를 남기는 것을 알았다. 이는 아마도 짧은 파장에서의 흡수계수(absorption coefficient)가 낮아 표면에서의 증발보다는 표면하 증발이 일어나고 결국 폭발에 의한 particle의 제거가 일어나기 때문으로 보인다. 그러나 상용의 roll 제조공정에서는 레이저 가공후 fine polishing을 거치게 되므로 사용상의 지장은 없다. Tönshoff 등⁽⁴⁾은 roll등의 레이저 engraving에 대한 연구에서 레이저빔을 roll 표면에 대해 경사지게 조사해 소기의 효과를 얻고 있다. Pulse형 Nd:YAG 레이저를 사용하였으며, 25Hz, 0.1ms의 펄스 지속시간, 펄스 파워 3kW의 조건으로 가공하고 있다. 이때 재료에 따라 용융재질의 분출 등 다양한 가공결과를 보인다.

본 연구에서는 상기 용도의 roll 가공을 위한 기본적인 가공변수를 파악하기 위해 세라믹 용사층의 레이저 홈가공(engraving)을 수행하고, 특히 레이저 가공조건이 플라즈마 용사된 Cr₂O₃ 세라믹 용사층과 Al₂O₃ 세라믹 용사층의 홈가공에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 사용 레이저를 Nd:YAG 레이저로 한정해, 각 변수의 영향을 검토하고 최적 가공조건을 찾아 보았다.

2. 실험

2.1 실험재료

레이저 홈가공을 위한 시편은 모두 세 가지로 SM45C의 모재 위에 플라즈마 용사로 세라믹 코팅층을 얻었다. SM45C는 비교적 가격이 저렴해 금속 roll의 모재로 널리 사용된다. 실험은 Cr₂O₃-5wt% SiO₂, Al₂O₃, Al₂O₃-2wt% TiO₂의 세 가지를 대상으로 하였으며, 플라즈마 용사된 시편을 1μm까지 polishing한 후 레이저 engraving

실험을 하였다. Cr₂O₃-5wt% SiO₂의 경우에 플라즈마 용사에 사용된 분말은 METCO 136 분말이다. 대표적으로 Cr₂O₃-5wt% SiO₂의 용사조건을 Table 1에 정리해 보인다.

Table 1 Parameters for plasma spraying of Cr₂O₃-5wt% SiO₂ ceramics⁽¹⁾

Powder			Grit Blasting		
Cr ₂ O ₃ -5SiO ₂			#48 Alumina		
Plasma Spraying					
Ar (l/min)	Current (A)	Distance (mm)	Spray rate (kg/hr)	Travel speed (m/min)	Overlap (mm)
50	500	75	0.82	600	0.1

2.2 레이저 가공 실험

실험에 사용된 Nd:YAG 레이저 가공기는 한국기계연구원 연구원의 보유장비를 이용하였으며; 레이저 발전부는 Lumonics사의 JK702 모델이다. 동 가공기는 특히 정밀 절단과 미세한 천공 작업시 spot size 및 beam divergence의 감소를 위해 공진기를 교체할 수 있게 되어 있으며, 정밀가공용 공진기의 평균출력은 75W, 펄스 에너지는 0.2~10J, 펄스폭은 0.5~5ms, 펄스반복율은 7~200Hz 이내에서 조정 가능하다. 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같다.

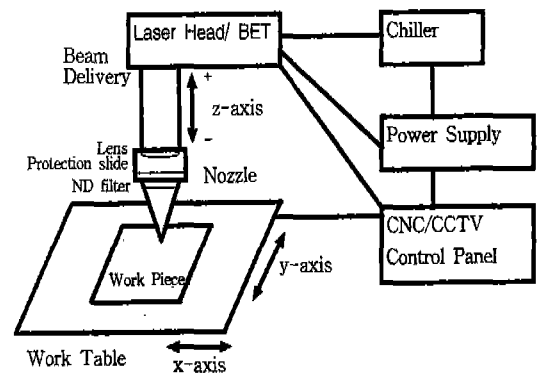


Fig. 1 Schematic diagram of laser engraving system

예비실험을 통해 사용 레이저의 출력 에너지가 가공 목적에 적합하지 않을 정도로 큰 것으로 판명되었다. 즉, 대

표적인 실험 조건에서의 출력에너지 값은 0.06J 로 정밀 가공용 공진기의 에너지 범위인 0.2~10J 보다도 order 가 하나 작아서 신뢰도 있게 반복 가능한 범위를 벗어나는 것으로 판단되었다.

이를 해결하기 위해 본 실험에서는 카메라용의 ND filter를 사용해 빔에너지를 약화시켜 사용하였다. 가스 노즐 내부의 렌즈와 protection slide의 아래 부분에 상용의 CCD 카메라용 ND filter를 삽입, 안정된 공진기 출력범위(0.2J)에서 시편에 조사되는 beam energy를 감소시켰으며 ND×4, ×8의 두 종류를 채택하였다. 카메라용의 ND filter는 사용범위가 가시광선 영역을 전제로 하고 있으며, Nd:YAG 레이저 파장(1.06μm)에서의 data는 구할 수 없어서 실험결과로 미루어 유추하였으며, 실제 가시광선 영역에서의 값보다 매우 적은 비율만 통과할 수 있었다.

레이저빔의 출력펄스는 발진램프에 주는 전류값을 펄스 형태로 제어함으로써, 즉 전류값의 상대적인 크기 H(%)와 펄스 지속시간 W(ms)를 변경함에 따라, 조정가능하다. 예비실험결과 Simple pulse-1 sector로 구성된 가장 단순한 형태의 펄스-의 사용시는 가공형상이 불량해, 본 실험에서는 complex pulse를 사용하였으며 3 sector로 이루어진 complex pulse가 만족스러운 결과를 주는 것으로 나타났다. 이 complex pulse를 사용할 때 출력되는 빔의 펄스형태는 거의 square wave 형상을 보임에 에너지 meter를 이용해 확인할 수 있었다. Fig. 2에 레이저 발진램프에 주는 제어 전류값의 펄스형태를 개략적으로 비교해 보이며, 이하의 실험 data는 3 sector의 complex pulse를 사용해 얻어진 것이다.

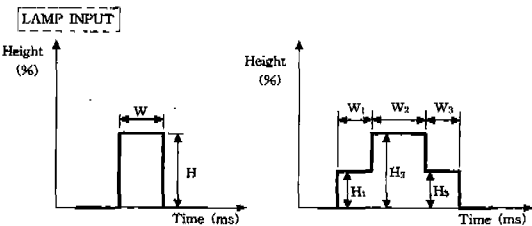


Fig. 2 One-sector simple pulse and three-sectors complex pulse

보조가스는 질소를 주로 사용하였으며, Ar과 dry air (습기를 제거한 압축공기) 사용시의 결과를 간단히 비교해 보았다. 가스압력의 영향은 다른 변수에 비해 미미한

것으로 판단, 0.2MPa에 고정하였다. 본 실험시에는 먼저 초점의 위치를 가변시켜가며 영향을 살펴보았으며, 이후에는 초점위치를 시편 표면에 고정한 상태에서 pulse energy를 변화해 가며 실험하였다. 초점의 위치는 시편 표면에서 0, 멀어지면 +, 재료 내부로 들어가면 - 의 값으로 나타났다.

Table 2에 Cr₂O₃-5wt% SiO₂ 세라믹의 레이저 가공 실험조건을 정리해 보인다. 표에 보인 data는 (i) 에너지 (J)값은 가공기에 장착된 에너지 meter에서 측정된 레이저 발진기에서의 출력에너지값이고, (ii) case 1은 초점 위치의 변화, case 2,3,4는 펄스당 에너지의 변화에 관한 것이다.

Table 2 Parameters for laser engraving

표준실험조건	시편= Cr ₂ O ₃ -5wt% SiO ₂ 세라믹										보조가스= 0.2MPa 질소									
	이송속도= 400mm/min										펄스반복율 R=30Hz									
	사용펄스= 3 sector로 구성된 complex pulse (sector 폭 1.0/1.7/1.0ms)																			
	Case 1 (ND×8 filter)					Case 2 (ND×8 filter)														
초점위치 z _r (mm)	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	f	g	h	0.0						
발진기 출력 에너지(J)	0.62	0.65	0.66	0.63	0.66	0.24	0.36	0.50	0.60	0.70	0.72	0.75	0.85							
	Case 3 (No filter)					Case 4 (ND×4 filter)														
초점위치 z _r (mm)	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	0.0				
발진기 출력 에너지(J)	0.01	0.02	0.04	0.02	0.05	0.065	0.09	0.14	0.03	0.05	0.06	0.10	0.19	0.25	0.45					

3. 실험 결과 및 검토

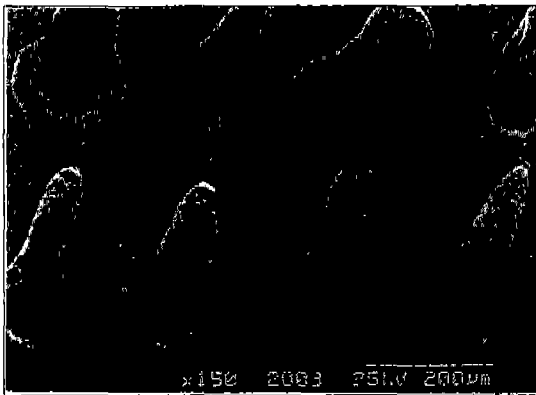
실험은 Cr₂O₃-5wt%SiO₂ 세라믹과 Al₂O₃ 및 Al₂O₃-TiO₂ 세라믹을 대상으로 하였으나, 거의 모든 실험결과는 Cr₂O₃-5wt%SiO₂ 세라믹을 기준으로 수행하였다. 본 논문에 보인 사진 또는 그림은 Cr₂O₃-5wt%SiO₂ 에 준한다.

3.1 Cr₂O₃ 세라믹

METCO 136계의 Cr₂O₃-5wt%SiO₂ 세라믹 시편의 경우 약 500μm 내외의 두꺼운 용사층을 갖고 있어 특별한 경우를 제외하고는 세라믹층내에서 흠이 가공되었으며 여러 가지의 경우에 대한 결과를 아래에 비교 정리해 보았다.

먼저 Fig. 3에 Table 2의 실험조건중 대표적인 조건 (2g)으로 레이저 가공된 시편의 흠형상 및 단면의 SEM 사진을 보인다. 그림의 위 사진은 위에서 내려다 본 형상이며, 아래 부분은 구멍의 중심을 따라 절단한 면에서의 형상이다. 흠의 형상은 표면에서 거의 원형을 하고 있는

며 모든 홈에서 분출된 세라믹 용융층이 구멍 주위의 표면에 re-deposition된 것을 볼 수 있다. 보통은 방사상으로 나타나지만 이 경우에는 한 방향으로 일정한 pattern을 보이고 있는데 이는 보조가스 노즐이 정확히 중심에 있지 않았던 때문으로 추정된다. 홈의 형상은 깊이와 직경의 비(aspect ratio)가 1보다 약간 큰 모습을 보이며 단면사진에서 구멍의 벽면이 매끄러운 것을 관찰할 수 있다. 확대해 살펴본 결과, 모든 홈에서 급속한 재응고시에 생성된 것으로 추정되는 crack이 관찰되었다. 이러한 광범위한 crack의 형성은 세라믹의 레이저가공시 보편적으로 관찰되는 것으로⁽⁵⁾, crack의 제거를 위해 pulse shape의 변화 등을 시도하여 보았으나 소기의 성과를 얻지는 못 하였다.



(a) top view



(b) cross-sectional view

Fig. 3 SEM photographs of laser engraved sample (case 2g) (ND×8 filter, velocity=400mm/min, focus at sample surface, pulse energy from resonator=0.75J, pulse width=1.0/1.7/1.0ms, 30Hz, assist gas=0.2MPa, N₂)

3.1.1 초점의 위치에 따른 홈형상 변화

실험시에는 먼저 CCD 카메라의 초점(Video Monitor 상에 재료 표면의 상이 가장 선명하게 맺히는 위치)을 결정한 후, z-축을 임의의 량 Δf만큼 변화시켜 가공했을 때 가장 원형에 가까운 형상을 얻는 위치를 구하였으며 이 위치를 Nd:YAG 레이저의 초점위치(z_f=0)로 간주하였다. 가공된 홈의 기하학적 크기-직경 및 깊이-의 측정은 SEM 관찰에 의하였다. 관찰된 SEM사진은 그 조건에서 가장 전형적인 형태를 선정, 측정한 것이다.

Fig. 4에 complex pulse, 30Hz의 조건으로 펄스당 발전기 출력에너지를 약 0.65J (레이저 발전기에서 나올 때의 값)로 고정하고 초점위치 z_f를 -200~200μm로 변화시킬 때(Table 2중 case 1), 홈의 직경(D) 및 깊이(H)의 변화를 보인다.

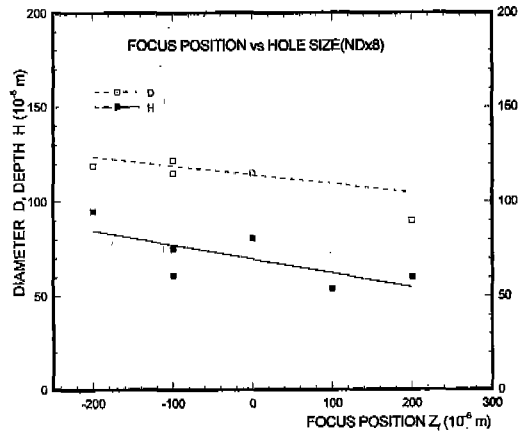


Fig.4 Effects of focus position on hole shape

평균적으로 ND×8 filter와 ND×4 filter 사용시에는 CCD camera의 초점에서의 이동거리 Δf=280μm일 때 표면의 홈형상이 원형에 가장 가깝고 홈의 깊이도 깊은 것으로 나타났으며, filter가 없을 때에는 Δf=180μm 정도가 가장 적절한 것으로 관찰되어 각각 이 위치를 Nd:YAG 레이저의 초점위치 z_f=0으로 간주하고 이하의 실험은 이 조건에서 수행되었다. ND filter는 두께가 일정한 glass plate 형태로 가장 바람직한 장착위치는 빔이 렌즈에 도달하기전 평행상태로 전송되는 경로상이지만, 가공기의 구조상 가스노즐 내부의 렌즈하단부 시편쪽으로 장착해야 하였다. 이 경우 렌즈를 거쳐 빔이 집중되

는 경로상에 위치하게 되므로 filter가 없는 경우에 비해 초점이 길어지게 된다. 이론적으로는 초점의 크기와 심도는 변하지 않고 초점거리만 늘어나게 된다. 실제 빈번히 filter를 장착/탈착해야 할 경우에는 빔이 렌즈에 도달하기 전 위치에 filter를 위치시켜서 filter위치의 영향을 없애야 할 것으로 판단된다.

실험결과 $z_f=100 \mu\text{m}$ 이상, 즉 초점이 재료 표면보다 위에 위치할 때(positive defocusing)에는 홈의 깊이도 얕아지고 표면에서의 형상과 홈단면의 형상도 일그러진다. 한편 $z_f=-200 \mu\text{m}$ 의 경우, 즉 초점이 재료 표면보다 내부에 위치할 때(negative defocusing)에는 SEM 관찰된 홈의 깊이는 가장 깊게 나타났지만, 표면의 홈형상이 원이 아닌 사각형에 가깝다. 일반적으로 z-축을 조정, positive defocusing하면 구멍의 직경은 증가되지만 빔이 급격히 산란되어 깊이가 작아지게 되고, 약간 negative defocusing하면 보다 깊은 hole을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있지만⁶⁾, 본 연구에서는 깊은 hole을 얻는 것이 목적이 아니고, 잉크의 전달성을 좋게 하기 위해 반구형 또는 AR(aspect ratio, 깊이/직경의 비)=1 내외의 홈을 가공하는 것이 주안점이므로 재료의 표면에 초점을 두고 가공함을 원칙으로 하였다.

3.1.2 펄스 에너지에 따른 변화

Fig. 5에 filter를 사용하지 않을 때의 시편 표면과 단면의 SEM 사진을 보인다. 표면에는 방사형 또는 어느 한 방향으로 홈 내부 분출층이 재응고되어 있으며 이 재응고층은 대부분 기공이 많다. 또한 어느 정도의 홈 깊이(Aspect ratio 1 정도)까지는 홈 벽면이 매우 거칠고 기공이 많이 관찰된다. 홈의 깊이가 보다 깊어지게 되면 비록 구멍 입구부위의 재응고층은 기공이 관찰되어도 내부 벽면은 매끄러워지며 전반적으로 기공 형태가 양호해진다. 펄스 에너지가 커지면 매우 깊은(약 $500 \mu\text{m}$ 까지) drilling(천공)이 이루어지며, taper가 작은 거의 수직에 가까운 구멍이 가공된다.

에너지가 작아 얕은 홈(약 $30\text{--}50 \mu\text{m}$ 까지)이 가공될 때에는 주로 순간적인 기화에 의해 재료가 가공되고 이때 선택적으로 기화되어 표면이 거칠게 나타나는 것으로 추정된다. 홈이 깊어지면($100\text{--}150 \mu\text{m}$ 까지) 이런 형태는 나타나지 않으며, 전반적으로 거칠고 porous한 형태를 갖는다. 이보다 깊어지게 되면 대부분의 벽면은 매끄러워지며 홈 입구 가까이에서 일부 기공층을 볼 수 있다. 이런 전반적인 변화가 에너지 증가에 의한 가공 mechanism의 차이에서 비롯되는지 또는 깊은 홈 내부의 용융층 분

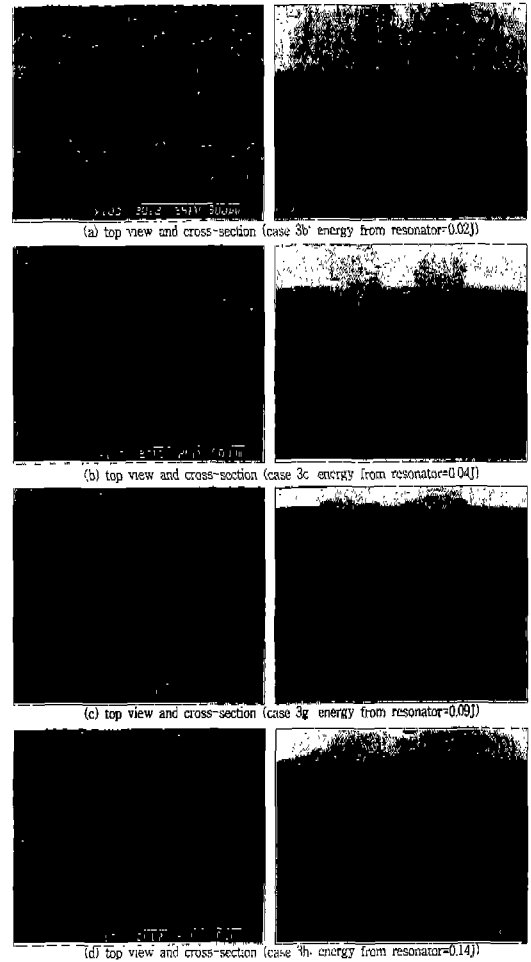


Fig. 5 SEM photographs of the specimen showing the effects of pulse energy on hole shape

출에 의해 벽면이 매끄러워지는가는 확실하지 않다.

일반적으로 Nd:YAG 레이저로 가공한 경우 CO_2 레이저에 비해 매끄러운 edge부를 갖지만 내부에서의 micro-explosion에 의해 표면이 원하지 않는 debris를 남기는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 본 연구에서도 홈 주위 표면에서의 debris는 피할 수 없으며 심한 경우 표면위로 $30 \mu\text{m}$ 까지, 구멍주위로 구멍직경의 2배 이상까지 되는 경우도 관찰되었다.

실제 실험에서 측정되는 에너지값은 레이저 발전기에서 나오는 빔의 에너지 값으로 실제 재료에 조사되는 레이저 에너지량은 이보다 적다. 실험결과를 비교해 보기 위한

변수로, 일반적으로 많이 사용되는 단위면적당 에너지 조사량⁽²⁾을 아래의 식을 이용해 계산하였다.

실험시 초점의 최소 직경(d)은 70 μ m 정도이다. 펄스 에너지를 E(J/pulse), 펄스폭을 W(ms), 펄스반복율(pulse repetition rate)을 R이라 하면;

$$\text{평균출력 } P_a = ER \text{ (Watts)} \quad (1)$$

$$\text{첨두출력 } P_{pk} = E/W \text{ (kW)} \quad (2)$$

$$\text{초점의 면적 } A = \pi d^2/4 \quad (3)$$

따라서 단위 면적당의 레이저빔 조사량 (또는 에너지밀도), I (W/cm²)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I = P_{pk}/A = E/(WA) \quad (4)$$

실제로 재료에 조사되는 값은 filter 사용시에는 일정비율만큼 감소되게 된다. 빔전송과정에서의 에너지 손실은 없고 filter를 사용할 경우에 filter부분에서만 에너지의 일부 흡수가 일어난다고 가정하였다. ND \times 8 filter의 경우 filter를 사용하지 않을 때(no filter)의 실험결과와 비교해 보면, 약 1/36 만큼 감소된다고 추정되며, 이 값을 이용해 시편에 조사되는 에너지밀도 $I_{ND\times 8}$ (= I/36) 값을 구하였다. 같은 방식으로 ND \times 4 filter의 경우 0.065J과 filter없을 때의 0.02J의 결과가 흡사한 것으로 판단해 0.02/0.065=4/13 만큼 감소하는 것으로, 즉 $I_{ND\times 4} = I/(4/13)$, 계산하였다. 펄스폭 W값은 Complex pulse의 경우 총 펄스폭(각 sector 폭의 합)을 이용하였으며 이 경우 펄스의 형태에 관한 정보는 포함되지 않는다.

Table 3에 위의 식을 이용해 계산된 시편에 조사되는 에너지밀도 I 와 가공되는 홈의 직경 및 깊이를 정리해 보이고, Fig. 6에 filter를 사용하지 않을 때와 ND \times 4, ND \times 8 filter를 사용할 때의 시편에 조사되는 에너지밀도 증가에 따른 홈형상변화를 보인다. 그림상의 에너지밀도값은 이렇게 구해진 실제 재료에 조사되는 에너지밀도값이고, 점선은 홈직경, 실선은 홈깊이의 변화를 나타내고 있다. 에너지의 증가에 의해 홈직경이 증가하기는 하지만 증가율은 크지 않다. 그러나 홈의 깊이는 에너지가 증가함에 따라 확연히 깊어지며 특히 다중반사(multiple reflections)효과에 의해 깊이의 증가를 가져오게 된다.^(7,8). 그림에서 ND filter 사용시의 에너지 투과량에 관한 실험적 오차가 있음을 감안하면, 에너지밀도와 홈직경, 깊이

의 변화 pattern은 세 경우 모두 아주 유사함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of irradiation energy and hole size

ND \times 8 filter												
Irradiation energy I (W/cm ²)	4.764	5.684	6.984	7.984	9.784	0.784	1.285	1.285	1.385	1.485	1.585	1.785
Hole dia. D (μ m)	81.0	81.0	85.0	88.0	102.0	82.0	85.0	85.0	81.0	88.0	90.0	90.0
Hole depth H(μ m)	27.0	37.0	54.0	41.0	71.0	27.0	54.0	64.0	81.0	85.0	100.0	109.0

ND \times 4 filter						No filter									
Irradiation energy I (W/cm ²)	1.284	1.884	2.684	4.184	7.284	1.085	1.885	3.984	1.485	2.885	3.985	4.285	4.685	6.385	9.585
Hole dia. D (μ m)	65.0	87.0	109.0	109.0	114.0	125.0	114.0	43.0	87.0	114.0	114.0	82.0	114.0	91.0	76.0
Hole depth H(μ m)	11.0	22.0	141.0	413.0	440.0	455.0	450.0	140.0	98.0	37.0	109.0	360.0	364.0	446.0	699.0

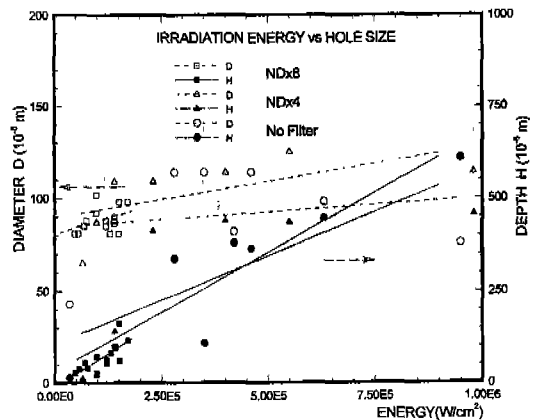


Fig. 6 Effects of pulse energy on hole shape

특히 에너지 밀도 I 가 1 \times 10⁶W/cm² 보다 작은 영역에서는 홈의 aspect ratio (AR: 깊이/직경의 비)가 1보다 작고, 벽면이 거칠며 기공이 많은 홈이 가공되었다. 에너지 밀도가 증가해 ($I \leq 3.5 \times 10^6$ W/cm²) 홈이 보다 깊어지게 되면 벽면의 기울기가 커지면서 매끄러워지며, 홈의 입구 부근 벽면에서 일부 기공층을 볼 수 있다. 에너지밀도가 보다 커지면 ($I \geq 3.5 \times 10^6$ W/cm²) 홈의 깊이는 다중 반사 효과에 의해 매우 깊어지며, AR이 3 이상의 깊고 taper가 아주 작은 거의 수직에 가까운 구멍이 가공된다.

깊이 100 μ m 이내의 원하는 홈가공에 필요한 에너지는 상대적으로 작은 값($\leq 2 \times 10^5$ W/cm²)이어서 사용하는 레이저의 최소 출력을 감소시켜야 했으며, 빔경로상에 일반 카메라용의 ND filter를 사용해 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이 범위에서는 레이저의 출력 안정성이

상대적으로 불량해 결과적으로 가공된 홈의 크기의 오차가 컸다. 따라서 이 경우와 같은 미세한 홈의 가공을 위해서는 빔출력이 아주 안정된 낮은 에너지 범위의 레이저 또는 Tönshoff 등⁽⁴⁾의 경우와 같이 보다 짧은 펄스와 높은 펄스에너지에 갖는 레이저가 필수적이다. 홈의 직경은 펄스당 에너지의 증가에 약하게 비례하지만, 앞에서 관찰된 바와 같이 초점의 위치변화에 의해 증감을 얻을 수 있다. 보다 확실하게는 렌즈의 교환에 의해 초점의 크기를 크게 하는 것이 가공된 홈의 직경을 증가할 수 있는 방법으로 추정된다.

3.1.3 보조 가스의 영향

보조가스가 홈가공에 미치는 영향을 살펴보기 위해 일정 조건에서 질소, Ar, dry air를 사용했을 때 표면의 형상을 Fig. 7에 비교해 보인다.

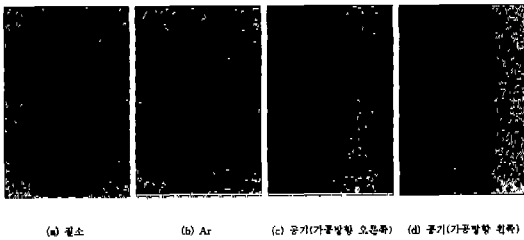


Fig. 7 Effects of assist gases

질소와 Ar의 경우는 표면에서의 모양 및 색이 거의 유사 하였으나 dry-air를 사용할 경우는 표면에서의 변색을 관찰할 수 있다. 이 표면변색은 용융 또는 기화된 재질과 dry-air 제트와의 상호 산화작용에 의한 것으로 보이며 특히 시편 이송방향에 대해 한쪽으로부터 (사진의 좌측) 치우쳐 나타나는 것은 제트의 방향이 정확한 동축이 아니고 한 쪽으로 치우쳐 있기 때문으로 여겨진다. 육안으로 관찰되는 이 변색이 표면흡수율에 영향을 미치는지의 여부 (앞열의 홈가공시 왼쪽 표면이 변색되며, 두 번째 열은 이 변색된 곳에 레이저로 홈가공하게 되므로) 를 확인하기 위해 광학현미경으로 관찰한 결과 변색에도 불구하고 레이저 가공된 홈의 형상은 차이가 없다. 이로 미루어 1.06 μ m의 near IR 파장의 Nd:YAG 레이저빔 영역에서의 흡수율은 동일한 것으로 판단할 수 있다. 시편의 x-축의 이송 방향을 반대로 하여 (앞열 가공후, 두 번째 열을 오른쪽에 가공하므로 변색되지 않은 원래의 시편 표면에 가공함) 가공한 결과 역시 동일한 것으로 미루어 표면 변색이 레이저 가공

에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

위의 결과를 종합해 볼 때 최소한 실험에 사용된 세 가지 보조가스- 질소, Ar, dry air- 의 차이는 없는 것으로 보이며, 고가의 Ar 대신 질소나 dry-air를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 Al₂O₃ 및 Al₂O₃-TiO₂ 세라믹

Al₂O₃나 Al₂O₃-TiO₂ 세라믹은 레이저 홈가공용의 세라믹 코팅층에는 적절하지 않고, 일반적으로 engraved metallic anilox roll의 세라믹 코팅용으로 사용되는 것으로 알려져 있다. 여기서는 간단히 이들 세라믹의 레이저 가공성 여부를 판단, 사용 가능한 세라믹의 범위를 조사해 보고자 하였다.

Al₂O₃나 Al₂O₃-TiO₂ 세라믹에 대해 레이저 가공 시도시, 완전히 똑같은 조건하에서도 가공되는 부분과 전혀 가공되지 않는 부분이 존재하였으며, 가공된 부분은 굉장히 깊게 천공-drilling 되어 반구 형태의 얇은 홈을 얻는 것은 불가능하였다. Al₂O₃-TiO₂ 세라믹은 육안으로 볼 때 색반점과 흰 부분이 불규칙하게 혼합되어 있으며, 이것이 표면에서의 빔에너지 흡수에 결정적인 영향을 미치고 있다. Al₂O₃ 세라믹의 경우는 전체적으로 흰 색이지만 metallic 입자-불순물이 random하게 끼어 있어 역시 표면에서의 빔흡수에 큰 차이를 끼치는 것으로 보인다. Cr₂O₃ 세라믹의 경우에는 이 불순물의 존재가 전체적으로 검게 보이는 표면에서의 빔흡수에 영향을 주지 못 하였지만, 상기 두 세라믹의 경우에는 심각한 영향을 미쳐 연마된 상태 그대로는 레이저 가공으로 repeatable한 결과를 얻을 수 없었다.

표면을 carbon으로 도포한 경우 빔흡수가 잘 되어 가공이 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 이를 입증하기 위해 흑색 paint를 spray한 후 레이저 가공을 시도한 결과, 빔에너지가 제대로 흡수되어 가공이 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 단, 홈의 형상은 다소 불규칙하고 홈테두리 부위에 용융부가 있으며 홈의 바닥 부근에 불규칙한 돌기부가 존재하고 있다. 이는 paint의 도포시 일정한 두께로 도포하는 것이 곤란해 빔흡수에 차이를 초래했을 수도 있고, 또는

Tönshoff 등⁽⁴⁾이 언급했듯이 hole 내부에서 국부적인 온도상승으로 인해 폭발적인 gas/용융물 분출이 일어난 결과로도 생각할 수 있다. 이에 대한 확실한 결론은 CO₂ 레이저를 이용한 실험과 비교후 알 수 있으리라 여겨진다.

이상의 결과를 종합할 때 Nd:YAG 레이저를 이용시에는 Al₂O₃ 및 Al₂O₃-TiO₂ 세라믹은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

플라즈마 용사된 ceramic 코팅층의 레이저 홈가공을 위해 세 가지 세라믹 용사 시편을 대상으로 최적 가공조건을 살펴보았다. 결과를 간단히 정리해 보면 다음과 같다.

(1) Nd:YAG 레이저 가공을 위해서는 Cr_2O_3 -5wt% SiO_2 계의 세라믹이 적합하다. Al_2O_3 및 Al_2O_3 -2wt% TiO_2 계의 세라믹은 연마상태 그대로는 표면의 위치에 따라 빔흡수에 큰 차이가 있어, carbon paint 등 빔의 흡수를 돕는 물질을 도포한 후 가공하는 것이 바람직하다.

(2) 실험결과 직경 80-120 μ m, 깊이 30-500 μ m까지의 가공이 가능하며, 깊이는 펄스당 에너지밀도를 증가함에 따라 깊어진다. 홈의 직경은 에너지밀도보다는 초점의 크기가 다른 렌즈를 이용해 조절할 수 있을 것으로 보인다.

(3) 홈의 형상은 표면에서 거의 원형이고, aspect ratio가 작은 경우 벽면이 거칠고 기공이 많이 관찰되며, aspect ratio가 커질 수록 벽면이 매끄러워진다.

(4) 보조 가스는 N_2 , Ar, dry air의 차이는 없는 것으로 판단되며, dry air 사용시 시편 표면이 변색되지만 가공형상에는 영향을 미치지 않는다.

참 고 문 헌

1. 충남대학교, 플라즈마 세라믹 용사법에 의한 Anilox Roll 제조기술 개발, 연구보고서, 상공자원부, 1993.
2. Chryssolouris, G., *Laser Machining: Theory*

and Practice, Springer-Verlag, 1991.

3. Paek, U. C. and Zaleckas, V. J., "Scribing of Alumina Material by YAG and CO_2 Lasers", *The American Ceramic Society Bulletin*, Vol. 54, pp585-588, 1975.
4. Tönshoff, H. K., Sturmer, M., Overmeyer, L., and von Alvensleben, F., "Lasertexturing of Technical Surfaces", *Laser und Optoelektronik*, Vol. 25, No. 2, pp56-61, 1993.
5. Affolter, P. and Schmid, H. G., "Processing of New Ceramic Materials with Solid State Laser Radiation", *SPIE Vol. 801, High Power Lasers*, pp120-129, 1987.
6. 한국기계연구소, 레이저를 이용한 가공기술개발 (II), 연구보고서, 과학기술처, 1990.
7. Ramanathan, S. and Modest, M. F., "CW Laser Drilling of Composite Ceramics", In *Proceedings of ICALEO'91, Laser Materials Processing*, Vol. 74, San Jose, CA, pp305-326, 1992.
8. Bang, S. Y., Roy, S. and Modest, M. F., "CW Laser Machining of Hard Ceramics - II. Effects of Multiple Reflections", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 14, pp3529-3540, 1993.