

〈論 文〉

Nd : YAG레이저의 가공 파라미터가 절단 성능에 미치는 영향에 관한 연구

한응교* · 박두원** · 이범성** · 이명호*** · 임흥순****

(1991년 4월 12일 접수)

The Effects on Cutting Performance by Machining Parameters of Nd : YAG Laser

Eung Kyo Han, Too Won Park, Bum Sung Lee
Myung Ho Lee and Heung Soon Lim

Key Words: Nd : YAG Laser (Nd : YAG 레이저), Mean Power (평균 출력), Peak Power (최대 출력), Cutting Width (절단폭), Dross Length (드로스 길이)

Abstract

Generally, laser machines with high generated power can be developed by means of enhancing their mean power, since the enhancement of mean power exerts an influence on peripheral parameters and machining performance. In this research, we evaluate the various machining properties by the use of two machines which bear different mean power each other, so that we may study various effects of the enhancement of mean power. As a result, when the mean power comes to be enhanced to 75%, we obtain the increase of output energy up to 69% and of peak power more than 95%, and also obtaine almost twice of the cutting speed. Moreover we find the fact that if the test pieces have enough thickness in contrast with output energy, the pulse frequency moves toward the frequency bandwidth which takes proportion to the cutting speed mas well as to the amount of material removal per unit time. In addition it is finally obtianed that the laser machine with high output power yields small taper degrees at kerf parts, while it has large cutting widths and dross lengths.

기 호 설 명

A : 표면의 커프 폭
 B : 밑면의 커프 폭
 D : 시험편 관통 구멍직경

d : 빔 스폿 직경
 E_A : 저 에너지 준위
 E_B : 고 에너지 준위
 f : 주파수
 h : 프랑크 상수
 L : 렌즈의 초점길이
 M : 빔 확산기에 의한 증폭
 N_p : 시험편 통과 펄스 수
 Q : 단위 시간당 제거량

*정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

**한양대학교 대학원 정밀기계공학과

***서울산업대학 기계설계학과

****(주)현대 로보트

t : 시험편의 두께
 θ : 빔 확산 각도

1. 서 론

1960년 T.H. Maiman에 의한 루비 레이저의 발진이 성공한 이래 오늘날까지 다양한 재료와 방법에 의한 레이저의 발진이 개발되어 왔다. 레이저로부터 얻어진 광의 응용중 높은 에너지 밀도를 이용하는 가공에의 응용은 중요시 되어 실용화가 진행된 결과 YAG(yttrium aluminum garnet) 레이저 및 탄산가스(CO₂) 레이저 두 종류가 실용적인 레이저로 산업계에서 광범위한 가공분야에 응용되어 왔다⁽¹⁾.

최근 YAG 레이저 가공⁽²⁾은 IC의 후막, 박막저항과 칩(chip) 저항의 트리밍(trimming)을 중심으로 고주파를 이용한 IC 제조등 미세 가공에 응용⁽³⁾의 폭이 넓어지고 있으며, 다품종, 소량 자동 생산시대의 도래와 더불어 YAG 레이저의 대출력화 기술이 진보함에 따라 금속의 절단등 CO₂ 레이저가 우위를 차지하고 있는 응용 분야에서도 범위를 확대시키려는 노력을 기울이고 있다⁽³⁾⁽⁴⁾.

YAG 레이저를 이용하여 현재까지 실행되어 오고 있는 연구로서는 村川正夫의 “레이저 가공에 의한 Drossless 절단기술”⁽⁵⁾, 北側彰一 등의 “화인세라믹(Fine Ceramics)의 레이저 절단에 관한 연구”⁽⁶⁾ 등의 가공재 및 가공 기술에 관한 연구와 가공기 자체의 파라미터와 성능등에 관한 久保學의 “레이저 가공의 고속화와 제어”⁽⁷⁾ 木谷 基 등의 “레이저 절단의 적정 가공조건의 선정”⁽⁸⁾에 관한 연구가 진행되어 왔고, 출력이 보다 높은 가공기의 개발을 통하여 가공 범위의 확대와 가공 안정성을 꾀하여 왔다.

따라서 본 연구에서는 가공기 자체의 파라미터와 성능에 관한 연구로서 출력 에너지가 서로 다른 가공기를 사용하여 SUS 304 스테인리스 시험편을 관통, 절단하면서 출력 에너지와 최대 출력을 비교하여 보고, 시험편 관통시 주파수와 출력 에너지와의 관계, 시험편 관통시 용융 금속 제거량에 의한 절단 속도의 예측, 서로 다른 출력의 가공에 있어서 슬릿 절단 폭, 컵 폭, 드로스 길이, 절단면의 표면 거칠기 등을 비교하여 출력차에 따른 가공 특성을 고찰하였다.

2. 이 론

2.1 YAG 레이저의 파라미터

레이저가공기의 가공 파라미터는 레이저빔의 출력과 동등 혹은 그 이상으로 가공 능력 및 품질에 영향을 미친다⁽⁹⁾. Fig. 1에는 그 가공파라미터의 정의(定義)를 나타내고 있다.

(1) Beam 확장각

레이저빔의 지향성은 리반광에 비해 상당히 우수하지만, 광의 회절 현상에 의해 서서히 확장되어 간다. 이 확장각은 레이저 가공에 있어서는 집광한 경우의 빔 스폿 직경과 관계가 있고, 빔 스폿 직경 d 는 다음식으로 표현된다.

$$d = \frac{2L \cdot \theta}{M} \quad (1)$$

Fig. 2에는 빔 확장각에 대한 개략도를 나타냈으며, 뒷식에서 알 수 있듯이 확장각이 작을수록 작은 스폿을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(2) 빔모드

빔 모드란 빔 단면의 출력(power)분포를 말한다. 대표적인 모드로서 단일 모드(single mode)와

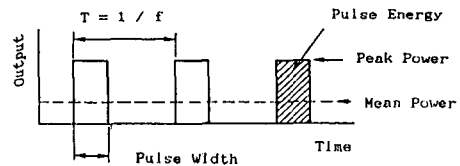


Fig. 1 Definition to parameters of YAG laser machining

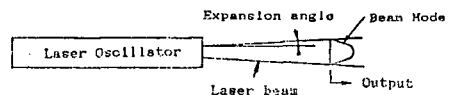


Fig. 2 Relation between expansion angle and laser beam

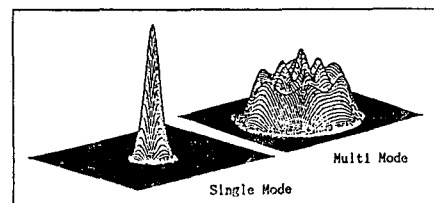


Fig. 3 Beam mode

다중 모드(multi mode)가 있다. 이것은 똑같은 출력의 경우, 단일 모드폭은 빔 중앙부에서의 에너지가 높으므로 집광한 경우 단위 면적당의 에너지가 크기 때문에 절단 가공등에 사용되고, 역으로 용접 가공의 경우에는 균일한 에너지 분포를 필요로 하므로 다중모드폭이 유효하다⁽¹¹⁾. Fig. 3은 빔 모드의 모식도 이다.

(3) 출력 에너지(Output Energy)

연속 발진과 펄스 발진의경우 레이저 출력의 표현 방법은 서로 다르다. 본 실험과 같은 펄스 발진의 경우에는 출력 에너지라 부르고, 단위는 주울/펄스(J/P)로 표현한다⁽¹²⁾. 출력 에너지로 표현하지 않는 경우, 주파수와 펄스폭에 의해 평균 출력은 변동하므로 출력 에너지를 적분한 평균 출력의 형태로 나타내는 경우도 있으며⁽¹³⁾, 최대 출력으로 출력 강도를 나타내는 경우도 있다⁽¹⁴⁾.

(4) 출력 밀도와 펄스 폭

이 두가지는 가공의 종류에 커다란 영향을 미치며⁽¹⁵⁾, Fig. 7은 이 양자의 조합에 의해 어떠한 가공이 가능한가를 표시한 것이다^(16,17) 일반저인 경향으로 드릴링(drilling), 절단은 열전도에 의한 손실을 적게하기 위해 펄스폭을 짧게, 용접, 열처리 는 열전도에 의한 가공 영역을 넓히기위해 펄스폭을 길게 설정한다⁽¹⁸⁾. 또 가공 규모(절단판 두께, 용접깊이)에 따라 Fig. 4의 사선내를 중심으로 펄스 폭, 전압, 반복 주파수등의 조건을 변화시킬 수도

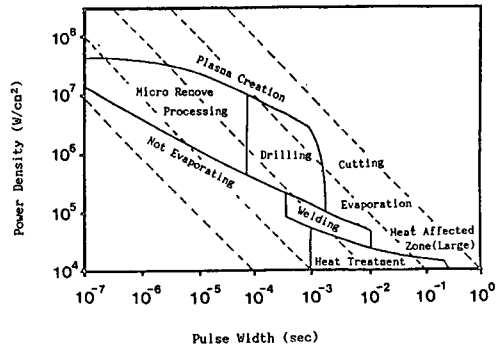


Fig. 4 Pulse width and power density

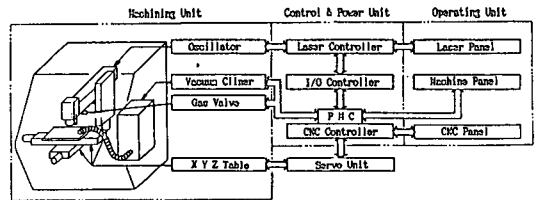


Fig. 5 Block diagram of control part

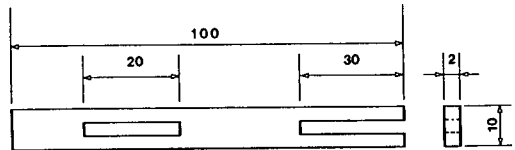


Fig. 6 Specimen for measurement (unit : mm)



Fig. 7 Specimen for measurement

있다⁽¹⁹⁾.

3. 실험장치

3.1 레이저 가공장치

본 실험에 사용한 YAG 레이저 가공장치는 평균 출력 에너지가 300W 및 450W인 가공기이고, 가공기의 기본구성은 레이저 제어장치(laser controller), 전원 공급장치(power supply), 냉각기(cooling unit) 및 광학 시스템으로 동일한 구성을 갖고 있다. Fig. 5는 가공기의 제어계 구성을 보여주며, 제어계는 가공부, 조절 및 전원부, 작동부로 구성된다.

3.2 시험편

본 실험에 사용한 시험편은 가로, 세로 100mm, 두께 2mm의 스테인레스 강 SUS304를 사용하였고, 슬릿 절단폭, 커프폭, 드로스 길이, 절단 면 거칠기등을 측정하기 위해 가공기내에 NC 프로그램을 구성하여 측정용 시험편 10×100mm(가로×세로)의 것을 제작 사용하였다. Fig. 6과 Fig. 7에 시험편의 형상을 나타내었고, Table 1에 SUS304의 구성성분을 나타냈다.

4. 실험방법

본 실험의 실험순서는 Fig. 8의 블록 선도에 나타냈다.

4.1 출력 에너지와 Peak power의 비교

평균출력 에너지가 각각 300W 450W 인 두 레이저 가공기를 이용하여 펄스폭 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 msec에서 10~300Hz 사이의 펄스 주파수를 변화시켜 가면서 각 가공기가 가질 수 있는 최대 전압하에서의 출력 에너지를 가공기 패널(panel)을 통하여 읽어낸다. 여기서 나온 펄스당 출력 에너지를 이용하여 출력 에너지와 펄스폭의 관계식에 의해 300W 및 450W 출력의 가공기의 최대 출력을 구

하여 평균출력이 서로 다른 두 가공기의 출력 에너지 특성과 최대 출력 특성을 비교한다.

4.2 시험편의 관통에 필요한 펄스 수와 주파수의 특성

상술한 4.1의 방법에 의해 구한 출력 에너지를 이용하여 SUS304 스테인리스 강(stainless steel) 2 mm'를 관통할 때까지의 펄스수를 300W 출력의 가공기와 450W 출력의 가공기로 각각 측정한다. 이때, 각 가공기의 가공조건은 동일하게 렌즈의 초점거리 100mm, 보조가스(assist gas)는 O₂로 5 Kgf/mm²의 압력을 이용하였으며, 렌즈의 초점은 재료의 표면에 고정시켜 가공을 실행하는 것으로 하였다. 측정방법은 각 가공기에 각각의 펄스폭과 주파수를 바꾸어 주면서 그 때의 출력 에너지로 펄스수를 고정시켜주고, 시험편의 상면에 레이저를 발진시키면 시험편의 하면으로 레이저광과 시험편의 마찰에 의한 불꽃이 시각적으로 관찰 된다. 이와 같은 실험을 반복하여 시험편을 관통할 수 있는 최소의 펄스수를 측정하여 출력 에너지가 서로 다른 두 가공기 사이의 펄스수와 주파수의 특성을 고찰한다.

4.3 시험편 관통시 단위 시간당 제거량에 의한 절단속도의 예측

상기 4.2 실험에 의해 얻어진 시험편의 관통구멍을 이용하여 두 가공기의 절단속도를 예측하기 위해 시험편에 레이저를 발진시켜 관통 구멍을 내는 과정에서 구멍내부의 용융금속이 단위시간당 얼마만큼 제거되는가 하는 단위시간당 용융금속의 제거량 Q를 식(2)에 의해 계산하고,

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot t \cdot f}{4Np} \quad (2)$$

출력이 서로 다른 두 가공기를 이용하여 SUS304 2mm' 시험편을 관통실험시와 똑같은 조건으로 절단하여 가면서 펄스폭과 주파수에 따른 최고 절단속도를 측정하여 절단속도와 구멍 관통시의 단위시

Table 1 Chemical composition of specimen

Composition Specimen	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS 304 (%)	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	8-10.5	18-20

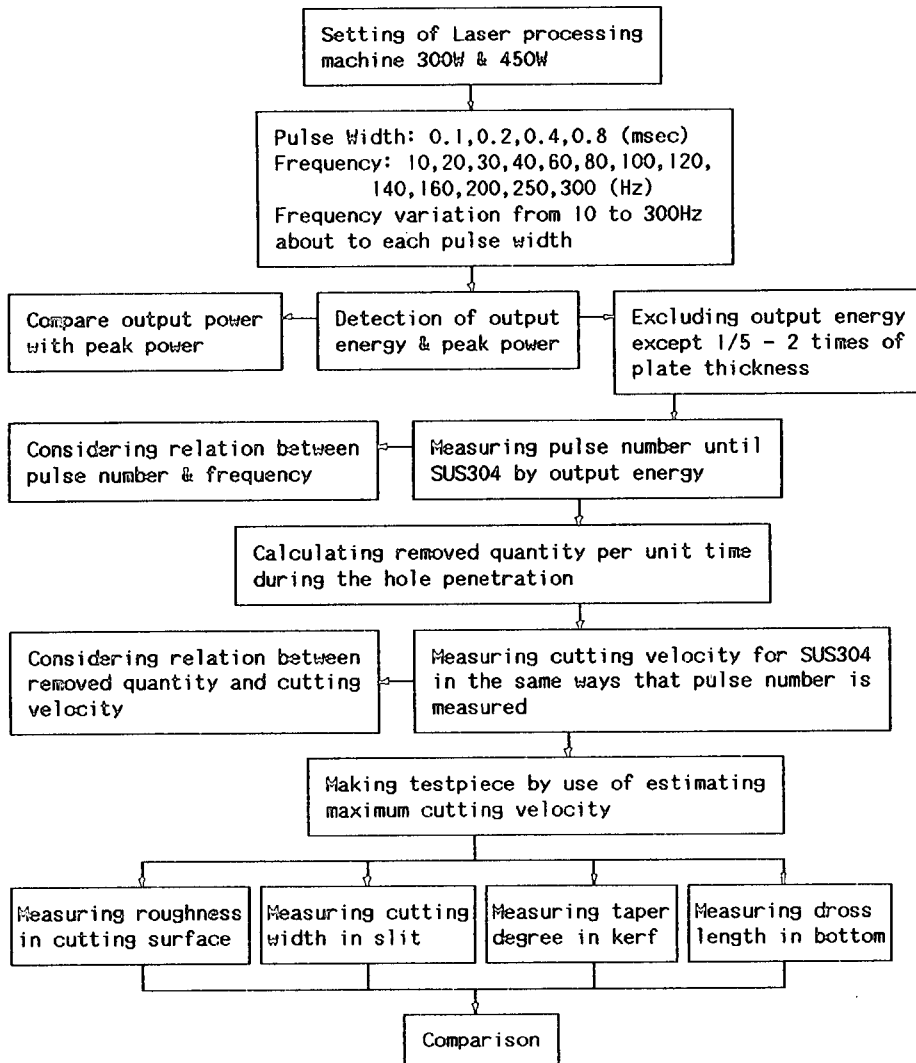


Fig. 8 Block diagram of experiment

간당 제거량과의 관계와 출력이 서로 다른 가공기 사이의 차이는 무엇인가를 고찰한다. 여기서 절단 속도의 측정방법은 구멍관통시 구한 최소의 펄스수로 시험편 상면에 레이저를 발진시켜 레이저광과 시험편 금속과의 마찰 불꽃이 시험편의 하면으로 나오는 것을 관찰하여 가며 가공기 조작 패널의 속도조절 레버를 회전시켜 가면서 최대의 속도를 측정한다.

4.4 슬릿폭, 커프폭, 드로스 길이, 절단면의 표면거칠기 비교

평균 출력이 서로 다른 두 가공기의 각 펄스폭 0.1, 0.2, 0.4, 0.8msec에 있어서의 최대 절단속

도로 SUS304 시험편을 가로×세로(10×100)mm의 시험편을 제작하여 여기에 슬릿과 커프(kerf)를 만들어 슬릿폭과 커프의 테이퍼(taper)도, 드로스 길이, 절단면의 표면거칠기 등을 측정하여 가공기 출력이 서로 다를때의 특성을 비교 검토하였다. 슬릿의 폭은 최소값과 최대값을 전자현미경을 통하여 30배의 배율로 관찰, 측정하고 커프의 테이퍼도는 슬릿폭의 측정과 동일한 방법으로 커프부의 상면과 하면을 측정하여 테이퍼도를 구하였으며, 드로스 길이도 전자현미경을 사용하여 측정하고, 절단면의 표면거칠기는 절단부의 상면에서 부터 0.2mm, 1.0mm, 1.8mm부분을 표면거칠기 측정기를 이용하여 측정하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 출력에너지와 최대 출력의 비교

Fig. 9는 펄스폭 0.1, 0.2, 0.4, 0.8(msec)의 주파수 변화에 따른 펄스당 출력 에너지 값을 그래프로 표시한 것이다. (a)는 평균 출력 300W의 것이고, (b)는 평균 출력 450W의 것이다. 기본적인 경향으로는 펄스폭이 커질수록 출력 에너지의 최대값이 상승함과 주파수가 낮아질 수록 펄스폭 사이의 출력 에너지 차가 현저해 짐을 볼 수 있었고 평균출력 300W인 가공기의 출력 에너지는 0.8msec에서 7.77의 값을 갖고, 평균출력 450W인 가공기의 출력 에너지는 마찬가지로 0.8msec에서 13.30을 나타냄을 보이고 있다.

Fig. 10은 각 출력 에너지 펄스 폭에 따른 최대

출력을 나타낸것이다. 출력 에너지값과는 달리 0.1 msec의 펄스 폭을 갖는 폭이 최대값을 가지며, 최대값 사이의 차이도 출력 에너지 만큼 현저하게 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이는 펄스 폭의 증가비율 보다 출력 에너지의 증가비가 낮기 때문이라고 생각 할 수 있다.

5.2 시험편의 관통에 필요한 펄스수와 주파수의 특성

Fig. 11은 SUS304 2mm^t를 관통 할 수 있는 최저 펄스수와 펄스 주파수의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 11과 5.3의 각 펄스 폭에 있어서의 최고 절단 속도와의 그래프 Fig. 12를 비교하여 보면 300W의 가공기의 경우는 모든 펄스 폭에 있어서 주파수 범위 60~100Hz 사이에 최저 펄스 수들이 밀집되어 있으며, 임의의 펄스 폭에 있어서 최고 속도를 갖

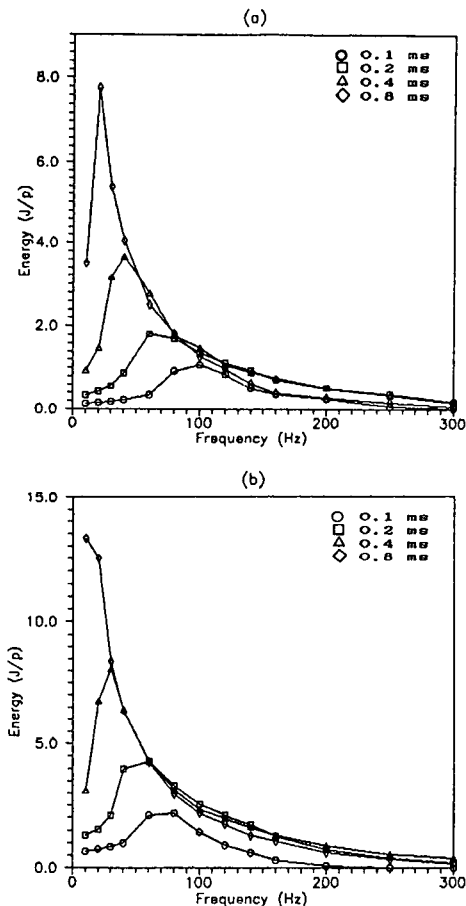


Fig. 9 Output energy comparison of laser machine with 300W and 450W

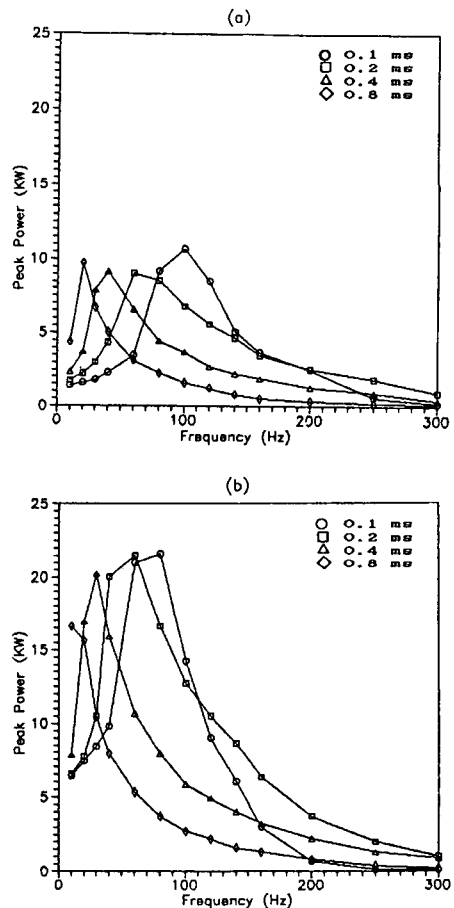


Fig. 10 Peak power comparison of laser machine with 300W and 450W

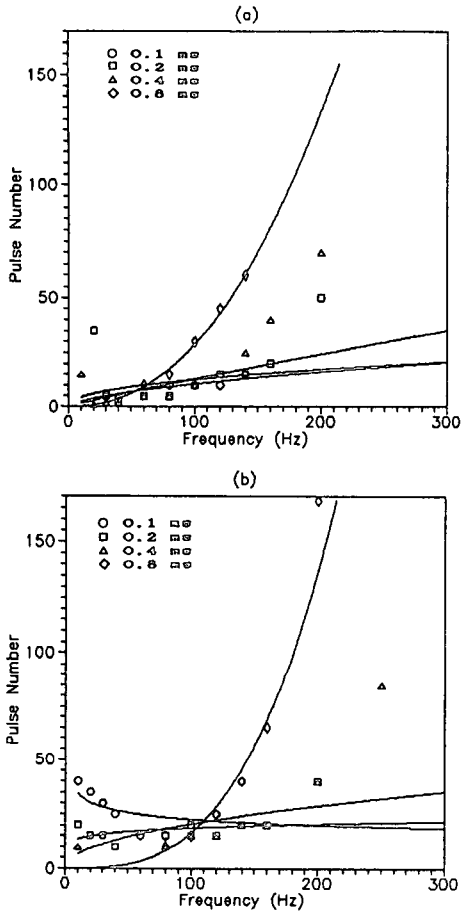


Fig. 11 Relation between pulse number and pulse frequency

는 주파수 범위도 최저 펄스 수들이 밀집되어 있는 주파수 범위와 거의 일치함을 볼 수 있었으며, 450W의 가공기의 경우에는 300W의 경우와 똑같은 현상을 보이나 펄스 주파수 범위가 80~120Hz로 보다 높은 주파수 영역을 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 출력에너지에 비교하여 시편의 두께가 상대적으로 두꺼우면 주파수는 출력에너지가 커지는 주파수 대역으로 옮겨감을 알 수 있었다. Fig. 13은 펄스수를 측정하는 데 사용한 시험편이다.

5.3 시험편 관통시 단위시간당 제거량에 의한 절단속도의 예측

Fig. 12는 주파수에 따른 절단속도의 분포를 나타낸 그림이고, Fig. 15는 제거량과 절단속도의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 15에 있는 X축의 제거량은 구성식(2)에 의해 구한 값으로서 절단을

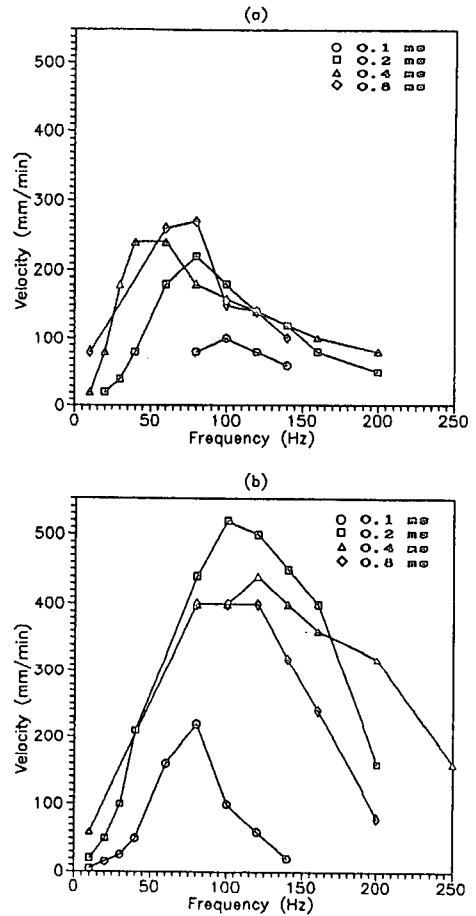


Fig. 12 Relation between cutting velocity and frequency

행하지 않은 상태에서 구멍을 관통할 때의 단위시간당 제거량을 계산한 것이다. Fig. 15의 (a)는 300W 출력의 가공기이고 (b)는 450W 출력의 가공기이다. (b)는 제거량과 절단속도의 관계가 거의 직선 비례적인 관계를 보이고 있으며 (a)는 (b)만큼은 안되지만 어느정도의 상관관계를 유지함을 볼 수 있다. 이는 평균출력이 300W 보다 450W 쪽이 크므로 출력의 안정성이 양호하고 가공의 활용영역이 광범위해지기 때문으로 보여진다. Fig. 14는 실제 절단속도를 얻기위해 사용한 시험편의 사진이다.

5.4 슬릿폭, 커프폭, 드로스 길이, 절단면의 표면거칠기 비교

실험전 펄스 피치(Pitch)가 큰 폭이 속도가 빠르다는 예상과 일치하여 Fig. 16의 펄스폭에 따른 슬

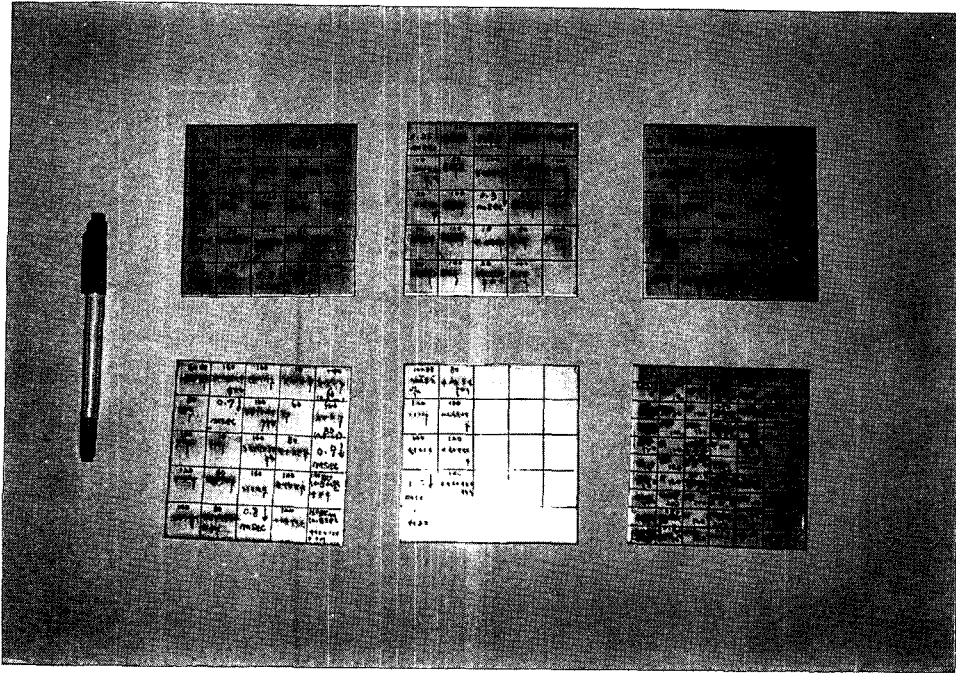


Fig. 13 Specimen for counting pulse number

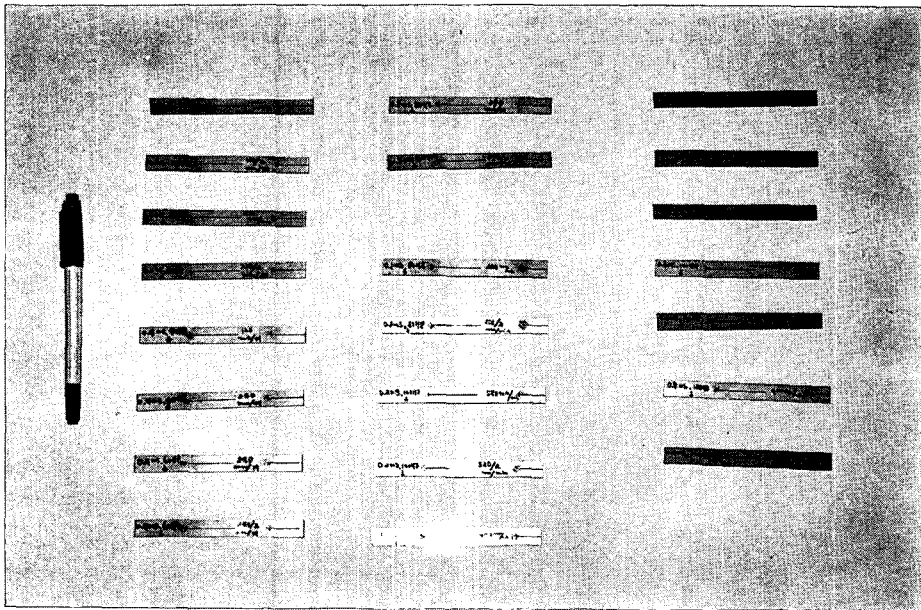


Fig. 14 Specimen for measuring cutting velocity

릿 절단폭의 최대값과 최소값의 차이가 출력이 큰 가공기 쪽이 크고, 펄스 폭에 따른 증감폭도 큼을 알 수 있었다. Fig. 19는 두 출력의 가공기에 대한 슬릿 절단폭의 확대 사진을 비교한 예이고, Fig.

17은 300W 가공기와 450W 가공기의 펄스피치에 대한 비교이다.

Fig. 18은 300W 가공기와 450W 가공기의 테이퍼도를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이

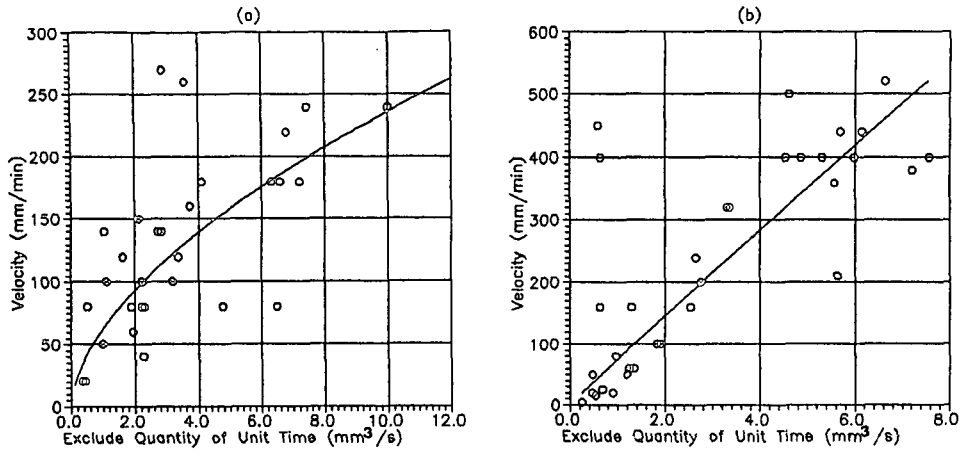


Fig. 15 Relation between velocity and Removed quantity of two laser machines.

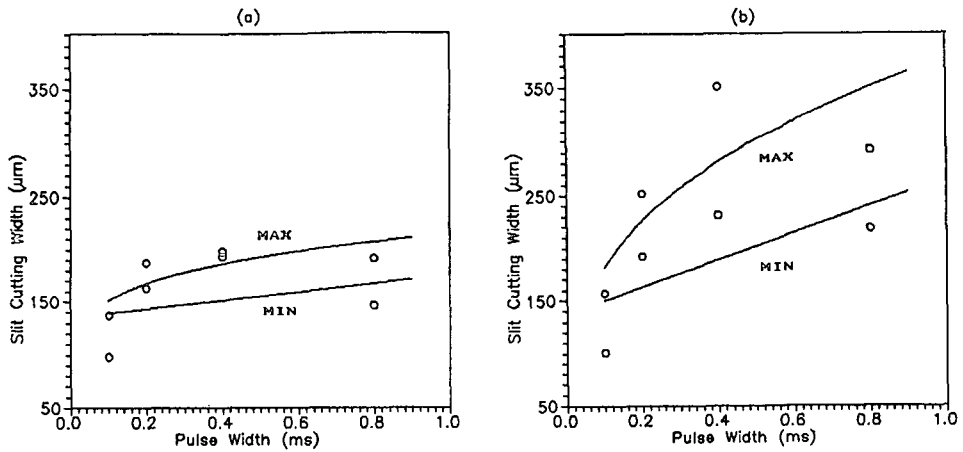


Fig. 16 Slit cutting width comparison of laser machine with 300W and 450W

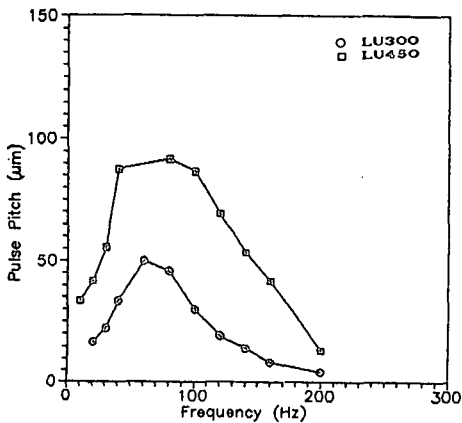


Fig. 17 Pulse pitch comparison of laser machine with 300W and 450W

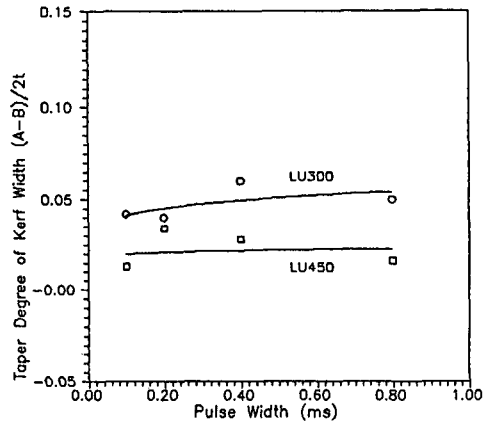


Fig. 18 Taper degree comparison of laser machine with 300W and 450W

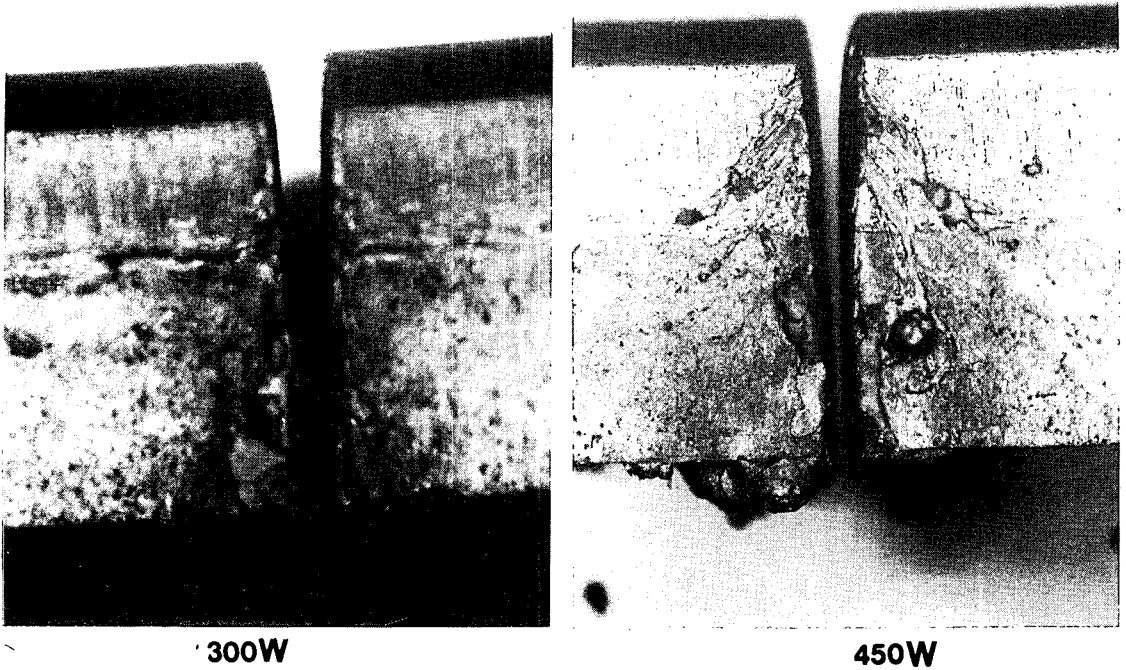


Fig. 19 Typical example of laser machine with 300W and 450W for kerf width

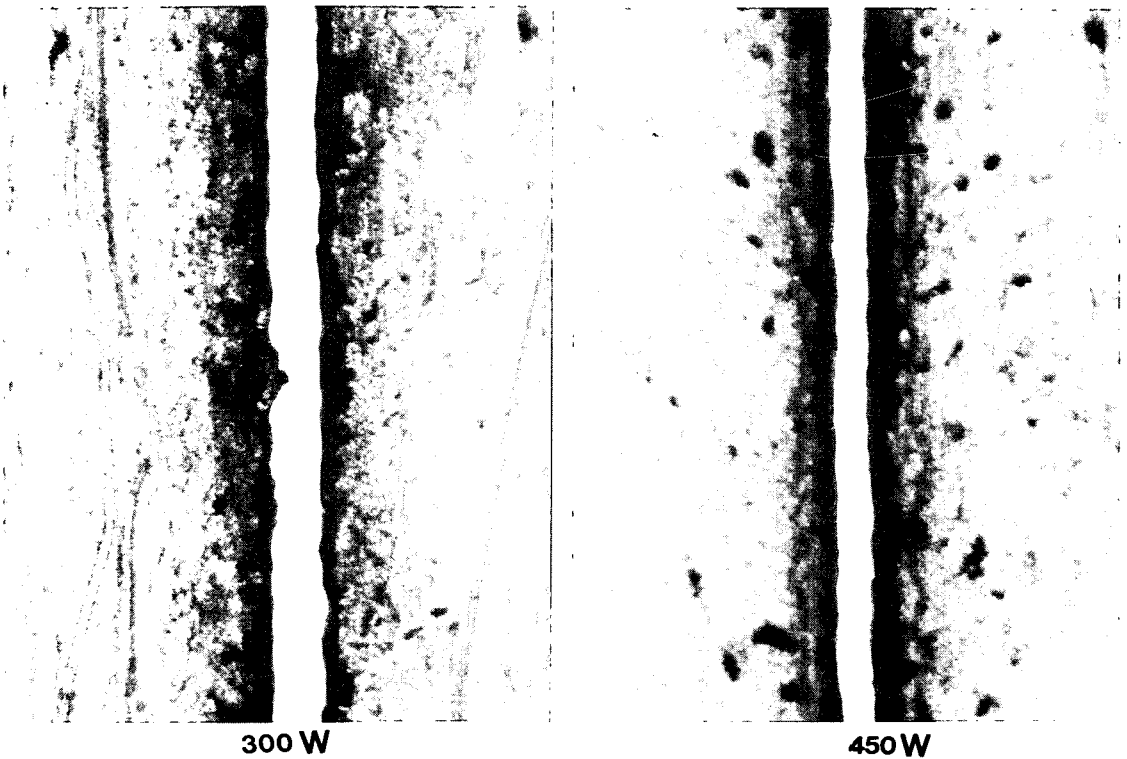


Fig. 20 Typical example of laser machine with 300W and 450W for slit cutting width

450W 출력의 가공기 쪽의 테이퍼도가 300W 출력의 가공기에 비해 작음을 알 수 있다. Fig. 20은 300W 출력의 가공기와 450W 출력의 가공기의 대표적인 커프부 사진의 비교에 이다.

또한 용융량이 많은 450W 출력의 드로스 길이가 큼을 Fig. 21에서 보이고 있으며, 펄스폭이 증가할 수록 감소하는 경향을 보이는 것은 슬릿의 절단폭이 어느정도 펄스폭에 따라 증가하므로 절단폭이 작은 쪽보다 큰 쪽이 보조가스인 산소압에 의한 영향을 많이 받기 때문으로 생각된다.

Fig. 22는 300W 출력의 가공기와 450W 출력의 가공기의 절단면의 표면 거칠기의 비교를 나타내고

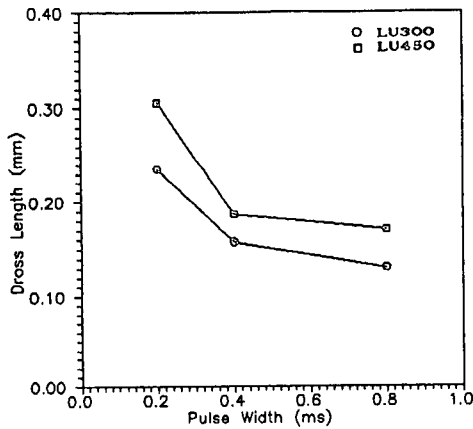


Fig. 21 Dross length comparison of laser machine with 300W and 450W

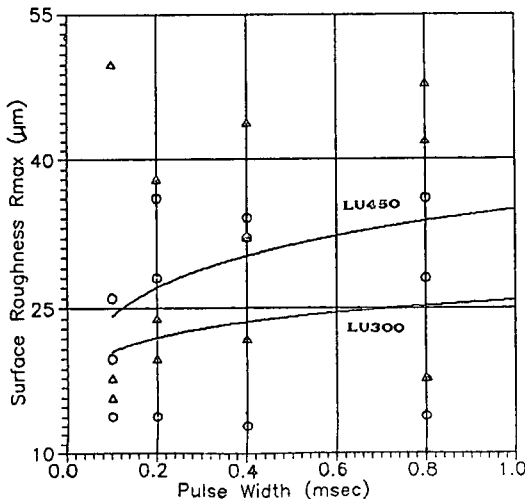


Fig. 22 Surface roughness comparison of laser machine with 300W and 450W

있다. 평균출력과 펄스 피치가 크고 절단속도가 빠른 450W 출력의 가공기 쪽의 절단면이 300W 출력에 비해 거칠음을 보여주고 있다.

6. 결 론

평균출력 에너지가 서로 다른 YAG 레이저 가공기를 이용한 스테인리스 절단 가공시 출력 에너지 변화가 절단성능에 미치는 영향과 절단 특성에 관한 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평균 power가 약 75% 향상된 값을 얻을 경우 약 69%의 출력에너지의 향상을 얻을 수 있으며, 최대출력은 임의의 펄스 폭에 있어서 거의 일정함을 알았다.

(2) 출력 에너지에 비하여 시편의 두께가 두꺼우면 주파수는 출력 에너지가 커지는 펄스 주파수 대역으로 옮겨 감을 알 수 있었다.

(3) 출력이 높은 가공기가 절단폭, 드로스 길이가 큰 반면 커프부의 테이퍼도는 작음을 알 수 있었다.

앞으로의 연구 과제로는 평균 출력을 향상시킴으로써 가공의 종류와 활용의 폭을 넓임과 동시에 그에 수반되는 가공부의 품질 향상에 관한 연구에 주목을 하였으면 한다.

참 고 문 헌

- (1) Schwarts, M.M., "Laser Welding and Cutting", W.R.C.Bulletin, Nov. 1971, No167, pp. 1~34.
- (2) Hoffman, M., 1979, "The Laser as an Industrial Cutting Tool" Metal Const, Vol.11, pp. 33~34.
- (3) Spalding, I.J., 1974, "Lasers-Their Applications and operational Requirements", Opt.and Laser Tech.,Dec. pp.263~272.
- (4) 韓應教 外3人 1987, "CW 레이저스펙트럼에 의한 고온에서의 표면변위測定에 관한 연구" 日本航空宇宙學會, 1987
- (5) 村川正夫, 1988, "레이저-가공에서의 드로스레스切斷技術" 日本工業大學應用機械工學.
- (6) 北側彰一, 外 2人 "ファインセラミックスのレーザー切斷に關する研究," 日立造船(株)技術研究所
- (7) 久保 學, 1989 "레이저-가공의 고속화와制御" 三菱電氣, 應用機械工學, 1989年 12月號
- (8) 木谷 基, 金岡 憂 "레이저-切斷의 適正加工條件의 選定", プレス 技術 第24卷 9號
- (9) Duley, W.W., 1983, Laser Processing and Analy.

- sis of Materials, Plenum Press
- (10) 日本物理學會編 1978, “レーザー-その科學技術にもたらしたもの, 丸善
- (11) W.Streifer.et al, 1988, IEEE, J.Quant, Electron., 883.
- (12) 大峯, 森安, 1986, “レーザー-の切断への應用, 塑性和加工”(日本塑性加工 學會誌), 27,307, 904~908
- (13) Arata, Y., Maruo, H., Miyamoto, I. et al, 1979, “Dynamic Behavior in Laser gas Cutting of Mild Steel”, Trans.JWRI, 8,2, 15-26
- (14) “レーザー-プロセッシング, 山中千代衛 外 9人著, 1990, 日本機械圖書株式會社.
- (15) “レーザー-の使い方と留意點”, 大竹祐吉 著 1986, オプトロニクス社
- (16) “レーザー-のはなし”, 小林春洋 著, 1986, 日刊工業新聞社,
- (17) “レーザー-技術入門”(利用技術と應用のすべて) 高岡降, 高橋 忠共著, 1986, 秋葉出版
- (18) 田代 1990, レーザ-加工工業による切断, 穴あけ加工機械技, 38-2, p. 30.
- (19) 木村, 1990, YAG レーザ-による加工の實際, ジョイテック別刷(レーザー-加工), p 58.