

본 연구는 "1995년도 교육부 학술 연구 조성비(ME95-E-14)"의 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계 제위께 감사드립니다.

레이저 절단에서 광소자를 이용한 가공공정 모니터링

장 옥진*, 김 봉 채*, 김 재 도**

Process Monitoring in Laser Beam Cutting by Photo Diode

Chang Ook-Jin*, Kim Bong-chae*, Kim Jae-Do**

ABSTRACT

On-line process control equipment for CO₂ laser cutting is not available for industrial applications. The major part of the industrial laser cutting machines are adjusted off-line by highly educated engineers. The quality inspection of the sample is visual and referred to different quality scales. Due to the lack of automation the potential laser users hesitate to implement the cutting method. The first step toward an automation of the process is the development of a process monitoring system and the research is concentrated on the area of on-line quality monitoring during CO₂ laser cutting. The method is based on the detection of the emitted light from the cutting front by photo diode. The developed monitoring system consists of the OP Amplifier, A/D convertor, power supply and PC. The signal from the photo diode has been undertaken from Fourier analysis and statistical analysis with real time. The photograph of striation pattern was taken by metallurgical microscope. As a result, it is possible to predict the striation pattern according to the beam traveling speed.

Key Words: Process monitoring (가공공정 모니터링), Laser cutting(레이저 절단), Photo diode(광소자), Striation pattern(줄무늬 형상)

1. 서론

레이저 절단가공은 전체 레이저 가공의 약 75% 를 차지하고 있다. 판재에 대한 레이저 절단은 기존의 가공속도가 느리고 생산효율이 떨어지는 산소-아세틸렌 절단이나 플라즈마 절단의 대안책으로 적용 범위가 넓어지고 있다.^(1,2)

레이저 절단가공을 국내에서도 수년전 부터 산업 현장에서 사용하고 있지만 가공변수의 복잡성과 다양성 때문에 레이저 절단의 자동화는 충분히 이루어지지 않은 상태

이다. 현재 박판 재료의 2차원적 레이저 절단은 대부분 숙련된 전문가에 의해, 수동적 방법으로 수행되고 있다. 절단가공에 있어서 초기 최적 가공조건은 장시간 사용하는 동안에는 무의미하며, 절단가공 제품에 대한 균일한 고품질을 보장하지 못한다. 이런 이유로 고품질의 가공제품을 원하는 잠재적인 레이저 가공기 사용자들이 레이저 절단 가공의 이용을 주저하게 하는 원인이 된다. 절단해야 할 판재는 두꺼워지고 가공형상은 복잡한 것이 많아지기 때문에 정확한 가공변수를 제어할 필요성은 더욱 커지고 있다.^(3,4,5)

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

이러한 레이저 가공의 장애요인을 개선하고 레이저 절단에 대한 신뢰도를 향상시키는 방법이 바로 자동 공정 제어 시스템(on-line process control system)을 통한 레이저 가공 공정의 자동화이다. 자동 공정 제어 시스템을 이루기 위한 가장 중요한 요소는 바로 레이저 절단이 수행되어지는 동안 절단 품질을 감지해 낼 수 있는 센서 시스템의 개발이다. 본 논문은 레이저 절단 가공에 있어서 품질 결정 요소를 감지할 수 있는 센서 시스템의 개발과 이를 이용한 절단 품질의 판단 및 개선에 연구 목적을 두고 있다. 레이저 절단시 방출되어지는 빛을 감지하여 신호처리하고 절단 품질과 상관 관계를 규명하여 레이저 절단 자동 공정 제어 시스템의 기초를 마련하고자 한다.^[6-12]

2. 실험장치

2-1. CO₂ 레이저 가공기

본 연구에 이용한 레이저 시스템은 (주) 한광의 최대출력 1.5kW의 CO₂ 레이저를 사용하였다. 레이저 발전기는 일본의 Matsushita 사의 Panasonic 제품이고 사용한 레이저 시스템 사양은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Specification of CO₂ laser system

Rated power (kW)	1.5
Power Stability (%)	±2
Beam wave length (μm)	10.6
Unfocused beam diameter (mm)	22
Assistant Gas	O ₂
Beam mode	TEM ₀₁
Lens type	ZnSe
Lens focal length (mm)	190.5

2-2. 실리콘 (Si) 포토다이오드

실험에 사용된 실리콘 포토다이오드는 Kodenshi Corp. 제품으로 분광감도 영역이 450 - 1050nm로, 850 nm의 파장영역에서 감도가 최대가 되며 입사광량에 대한 출력 전류의 직진성과 고속의 응답성을 가지고 있다. 온도에 의한 변화가 적고, 암전류(dark current)가 적으며 잡음특성(NEP)도 우수하다. 본 실험에 사용된 실리콘 포토다이오드의 제원과 특징은 Table 2와 Fig. 1에 나타나 있다.

2-3. 광전소자 증폭기

포토다이오드에서 출력되는 전류신호를 처리하기 용이한 전압신호로 변환시키고, 전압신호에서 다시 필요한 성

Table 2 Specification of Si photodiode

Type	HP-3MLR2
유효면적 (mm)	3.2x3.2
분광감도 (nm)	450 - 1050
출력전류 (Amps/Watt)	0.30
암전류 (nA)	5
잡음동가전류 (A)	1x10 ⁻⁷

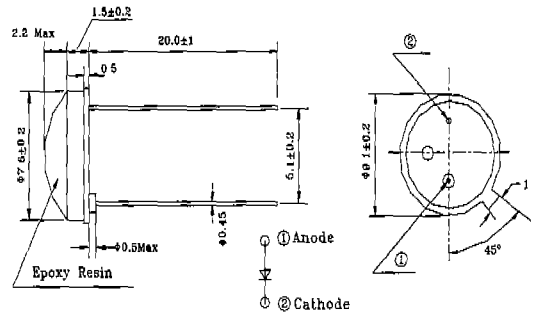


Fig. 1 Apparatus of photodiode

분만을 골라내는 작업이 필요하다. 이를 위해 증폭시 노이즈가 상대적으로 적은 LM308N을 이용한 신호 증폭기를 제작하였다. 증폭기는 2000KΩ의 반고정 저항을 이용하여 증폭 범위를 조정할 수 있도록 하였으며 인터페이스를 통해 발생되어지는 잡음의 제거를 위해 증폭기에 입력감도 조절 스위치를 설치하였다. 그리고 증폭기로 +15V, 0V, -15V의 전원을 공급할 수 있는 장치를 제작하였다.

2-4. A/D 변환기

축차비교형 A/D 변환기를 사용하였으며 이것은 중간 속도에서부터 고속의 A/D 변환을 수행하는 기술을 이용한 것이다. 이는 이진코드로 입력 신호에 근사화하는 것으로 가장 양호한 근사화가 이루어질 때까지 코드의 각 비트를 계속적으로 수정하는 방법이다.

2-5. 필터 및 필터 홀더

레이저 절단 가공 중 발생하는 빛은 포토다이오드의 수광 영역을 넘는 밝은 빛이므로 ND필터를 사용하여 빛의 밝기를 줄여야 한다. 이를 위해서 ND 필터(Neutral density filter)를 사용하였다. 빛의 수집에 있어서 포토다이오드의 선택과 함께 중요한 것이 포토다이오드의 설치위치이다. 레이저와 재료사이에서 발생하는 열 및 오염물질로 인한 필터와 포토다이오드의 손상을 극복할 수 있

는 위치를 선택하여야 한다. 이를 위해서 포토다이오드와 필터를 레이저 가공기의 빔 전달장치 끝 부분에 부착할 수 있는 장치를 설계, 제작하였다.

2-6. 신호 획득 및 FFT 변환 프로그램

A/D변환기에서 변환된 디지털 신호를 획득하여 저장할 수 있는 프로그램을 386 PC 환경 하에서 QUICK BASIC V 4.5를 이용하여 개발하였다. 획득된 신호는 그래픽 모드 하에서 모니터 상에 출력되며, 주파수 분석을 위해 FFT 변환이 실시간으로 수행되어진다. Fig. 2 는 개발한 프로그램의 간략한 흐름도이다.

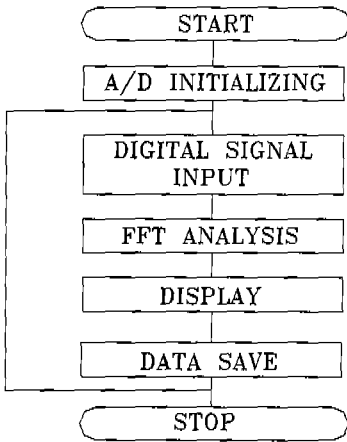


Fig. 2 Flow chart of signal processing program

3. 실험 재료 및 방법

3-1. 실험재료

실험에 사용된 절단 재료는 SPHC로 두께는 4.5mm인 판재이다. KS 규격은 KS D 3501-83 이며 열간 압연 연강(Hot-rolled mild steel)으로 분류되어진다. 인장강도는 270 N/mm² 이상이고, 연신율은 두께 4.0mm 이상의 판재에 대해 31% 정도이다. 주요 사용용도는 일반 기계 부품 재료로 이용되고 있다. 다음 Table 3은 SPHC 재료의 화학 성분이다.

3-2. 센서의 선형성 실험

레이저 절단 가공 과정을 모니터링할 수 있는 센서인 포토다이오드의 신뢰도를 구축하기 위해서 센서의 선형

Table 3 Chemical compositions of SPHC

Specimen	Composition (wt %)			
	C	Mn	P	S
SPHC	0.15	0.6	0.05	0.05

성 실험을 하였다. 이는 고정된 점광원으로부터 일정한 거리를 증가시켜 가며 신호를 획득하여 이를 디지털 신호 처리하고 평균을 구하는 방법이다. 획득되어진 데이터들이 Inverse-square law를 어느 정도 만족시키는지에 의해서 센서의 선형성에 관한 정보를 얻을 수 있다.^(13,14,15) 이러한 실험을 바탕으로 원하는 성질을 가진 포토다이오드를 결정할 수 있었다. Fig. 3은 포토다이오드의 특성곡선이며 Fig. 4는 선형성 실험을 통해 얻은 곡선이다.

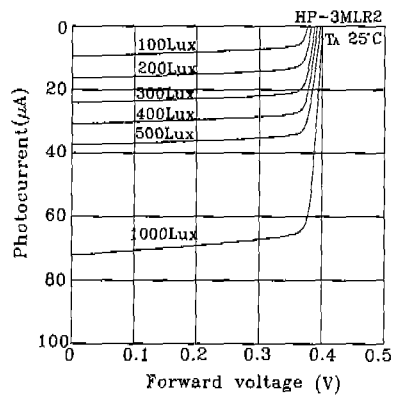


Fig. 3 Characteristic curves of the photodiode on the relation of photocurrent and forward voltage

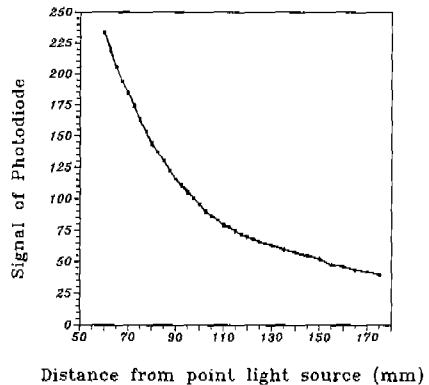


Fig. 4 The experimental result of sensor linearity

3-3. 절단 실험

레이저 절단 가공에는 많은 가공변수들이 존재한다. 이중 가장 중요한 것은 레이저 출력, 빔 이송속도, 보조가스의 종류 및 압력 등을 들 수 있다. 본 실험은 여러 변수를 가급적 고정하고 가공변수로는 빔 이송속도 1000, 1500, 2000, 2500mm/min, 보조가스 압력을 0, 0.5, 1, 1.5, 1.8, 2.4kgf/cm²로 조정하여 반복 실험하였다. Table 4는 고정된 실험의 조건들이다.

Table 4 Conditions of laser cutting experiment

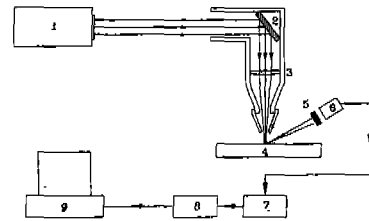
절단 재료 및 두께	SPHC (4.5 mm)
CO ₂ 레이저 출력	1200 W
빔 모드	TEM ₀₁
보조가스 종류	O ₂
초점 위치	0 (시편 표면)
집속렌즈 및 초점 거리	ZnSe, 7.5" (190.5 mm)
출력 파형	Continuous beam

3-4. 신호 획득

가공 중 발생한 빛은 ND필터를 거친 후 포토다이오드에 의해서 전기적 신호로 바뀌어진다. 발생된 전기 신호는 증폭기를 통해 증폭되어지고 증폭된 아날로그 신호는 A/D 변환기를 통해서 2000Hz 정도의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환되어진다. 변환되어진 신호는 FFT 변환을 통해 주기 영역에서 표시되어질 수 있도록 하였다. Fig. 5의 a)와 b)에 실험 장치 개략도와 포토다이오드와 ND필터 홀더를 나타냈다.

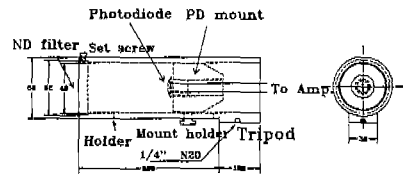
3-5. 절단 품질 측정

실험 후의 시편의 분석은 표면 거칠기의 측정 및 시편의 조직검사로 구별될 수 있다. 표면 거칠기의 측정은 접촉식 측정장치인 Surfcoeder SE-30H를 이용하였다. 측정 방향은 레이저 빔의 이송 방향과 평행하도록 하였다. 측정거리는 0.8mm로 하였으며 Cut off 길이(λ_c)는 0.8mm로 하여 Ra, Rmax, Rz를 측정하였다. Fig. 6에는 각 절단 속도에 대한 중심선 표면 거칠기(Ra) 측정 결과를 나타내었고 최소 자승법을 이용하여 곡선 보간을 하였다. 절단면의 줄무늬 형상의 분포는 금속 현미경을 이용한 사진 판독으로 가능하였다. 또한 가공면에 수직인 방향의 촬영은 시편을 플리싱하고 부식한 후에 이루어졌다. 이 방법으로 가공면질층의 두께와 부유물 등이 절단면과 밀면에 부착된 드로스(Dross)의 양을 관찰할 수 있었다.



- 1 : CO₂ Laser
- 2 : Mirror
- 3 : ZnSe Lens
- 4 : Specimen
- 5 : Filter
- 6 : Photo Diode
- 7 : OP Amp.
- 8 : A/D Converter
- 9 : IBM PC

a) System configuration



b) Photodiode holder

Fig. 5 Experiment setup for secondary light emission detection from laser cutting process

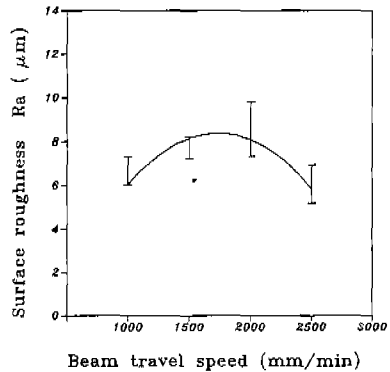


Fig. 6 Variation of surface roughness with the laser beam travel speed

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 레이저 절단 실험 결과

레이저 절단 실험은 빔 이송 속도만을 변수로 하여 실시하였다. Fig. 7은 속도에 따른 절단면의 줄무늬 형상의 분포를 나타낸 것이다. 절단속도가 1000mm/min의 경

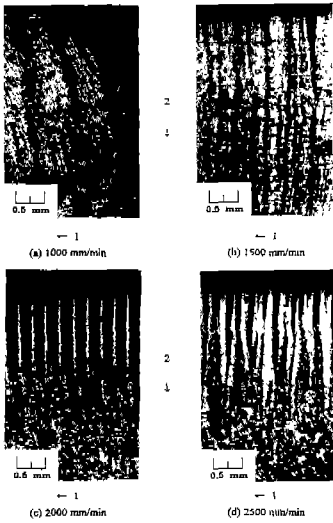


Fig. 7 Laser cutting surface with beam travel speed
(arrow 1 : Direction of beam travel)
(arrow 2 : Direction of laser beam)

우 줄무늬 형상의 간격이 비교적 큰 것을 알 수 있으며 약 0.4mm 정도의 간격으로 균일하게 생겼음을 알 수 있다. 이는 약 41Hz 정도의 속도로 생겨난 것으로 계산되었다. 같은 방법으로 절단속도 1500, 2000, 2500mm/min에 대해서도 줄무늬 형상의 생성 속도가 104, 200, 350 Hz 정도임이 계산되었다. 그러나 절단 속도가 2500mm/min의 경우는 레이저빔의 이송 속도가 너무 빨라 절단이 완전히 수행되지 않은 경우이다. 절단이 이루어지지 않은 경우 줄무늬 분포가 불균일하여 규칙성을 찾기가 어려워 사진 판독에 의한 줄무늬의 분포 주기 계산을 정확히 하기 어려웠다.

절단폭의 측정은 절단 시편을 수직인 방향으로 절단 후 금속 현미경을 이용한 사진으로 판독할 수 있었다. Fig. 8은 각 절단 속도에 대한 절단폭의 크기와 가공변질층의 존재를 나타낸 것이다. 절단폭은 절단 속도가 증가할수록 감소함을 알 수 있었다. 또한 절단 속도가 너무 빨라 절단이 완전히 수행되지 않은 경우는 드로스의 양이 이상적으로 증가함을 알 수 있었다. 가공열에 의한 가공 변질층은 국부적인 열처리 효과로 인해 미소한 구역에서 마르텐사이트 조직이 존재하여 경도 증가를 나타내는 구간이다.^[6] 가공 변질층의 두께는 절단 속도가 증가함에 따라 감소함을 사진을 통해 알 수 있었고, 같은 속도의 절단 시편에서는 시편의 밑으로 갈수록 변질층이 두꺼워짐을 알 수 있었다.

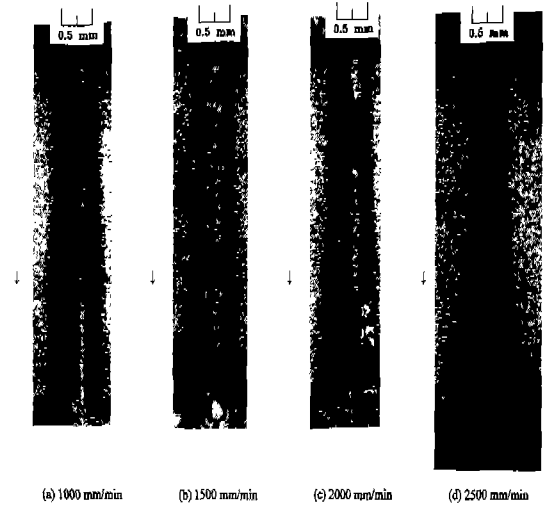


Fig. 8 Cutting cross section of specimen as beam travel speed
(arrow : Direction of laser beam)

4-2. 전기적 신호

레이저 절단가공 중 획득한 신호를 각 절단 속도에 대해 Fig. 9에 나타내었다. 신호의 주기와 강도가 절단속도에 따라 변함을 알 수 있다. 절단이 안정적으로 수행되는 조건에서는 절단속도가 증가함에 따라 발생 신호 전압의 절대적인 크기가 증가함을 볼 수 있다. 신호의 주기도 역시 빨라짐을 알 수 있다. 이는 절단속도가 빨라질수록 절단면 아래로 흩어지는 빛의 양보다 절단면 위로 반사되는

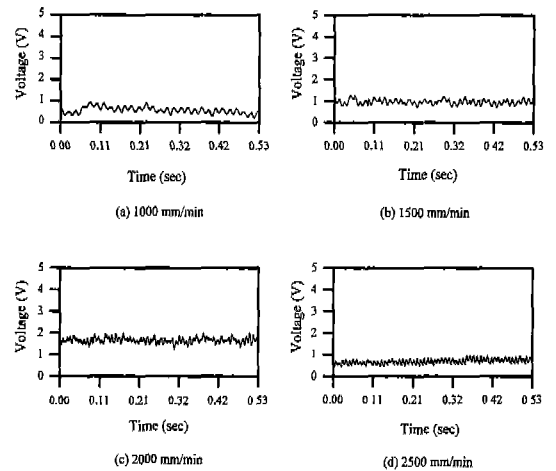


Fig. 9 Experimental results in time domain

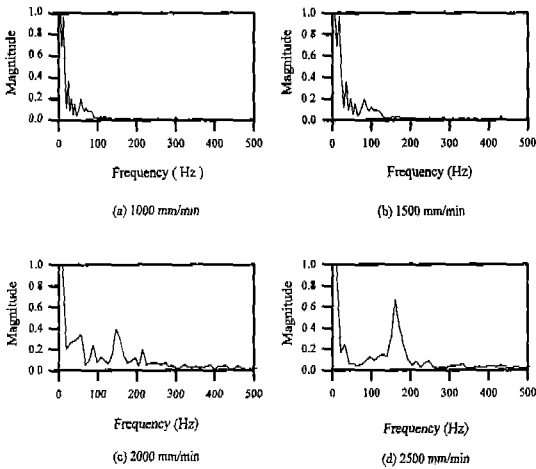


Fig. 10 FFT results of acquired signals

양이 많아지기 때문이다. 또한 절단 속도가 더욱 빨라질 경우에는 절단면에서 발생하는 드로스가 레이저 빛을 흡수하여 발생 신호 전압의 크기가 작아진다. 절단속도가 2500mm/min의 경우 신호의 주기와 강도가 경향을 벗어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 각 절단속도에서 획득한 신호를 FFT 변환한 그림이다. 각 절단속도에서 발생하는 신호 변화의 주기가 존재하며 절단에서의 줄무늬 형성의 주기와 같은 경향을 가지고 증가함을 알 수 있다. 줄무늬의 발생은 절단면의 용융층의 발생과 성장 소멸의 주기에 의하여 만들어진다. 용융층의 성장 주기는 레이저 빛의 흡수량의 변화를 가져 오고 이에 따라서 발생 신호 전압의 주기와 절단면의 주기가 같은 경향을 보인다. 그러나 절단속도가 과도하게 빨라진 경우는 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 절단면의 용융층에서 흡수되는 빛의 양이 일정하지 않고 발생하는 증기에 의한 레이저 빛의 산란으로 인한 현상이다.

4-3. 보호가스의 영향

레이저 절단 품질과 보호가스와의 관계를 알아보기 위해 가스압을 변화시켜 가며 실험한 결과를 Table 5에 정리하였다. 가스압이 0kgf/cm²인 가공에서는 절단이 수행되지 않았고, 가스압이 너무 작거나 높은 경우에도 절단은 양호하지 못하고 드로스가 발생하였다.

발생한 전기적 신호는 각 조건(가스압, 절단속도)에 따라서 4회씩 실험하였고 그 산술 평균을 Fig. 11에 나타내었다. 보호가스 없이 가공한 경우의 신호는 플라즈마의

Table 5 Cutting result according to shielding gas pressure

Gas Pressure (kg/cm ²)	이송 속도 (mm/min)	평균 절단폭 (mm)	절단 품질
0	1000	0	×
	1500	0	×
	2000	0	×
	2500	0	×
0.5	1000	0.47	△(dross)
	1500	0.42	△(dross)
	2000	0.51	△(dross)
	2500	0.42	×
1	1000	0.44	○
	1500	0.47	○
	2000	0.541	○
	2500	0.515	△(dross)
1.5	1000	0.56	○
	1500	0.58	○
	2000	0.43	○
	2500	0.56	△(dross)
1.8	1000	0.62	△(dross)
	1500	0.44	△(dross)
	2000	0.41	△(dross)
	2500	0.38	△(dross)
2.4	1000	0.56	△(dross)
	1500	0.49	△(dross)
	2000	0.76	△(dross)
	2500	0.46	△(dross)

○ : good, △: fair, × : bad

발생으로 인해 세기와 변화가 큰 신호가 발생하였으며 절단이 원활히 수행되지 않는 조건에서도 경향이 벗어나는 신호가 발생함을 알 수 있었다. 가공이 양호하게 이루어지는 조건에서 발생하는 신호는 빔의 이송속도에 따라 빛의 세기가 커짐을 알 수 있었다.

5. 결론

광소자를 이용하여 레이저 절단가공중 절단 상태를 모니터링한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정상적 가공조건 하에서 발생하는 레이저의 빛은 일정한 주기성을 갖는다.
- (2) 레이저빔의 이송속도가 빠를수록 발생되어지는 신호의 강도는 세어진다.
- (3) 가공중 발생하는 빛의 변화의 주기는 절단면에서 생기는 줄무늬 형성의 주기와 거의 일치하였다.
- (4) 레이저빔의 이송 속도가 너무 빠른 경우는 절단이 이루어지지 않았으며 절단시 발생하는 신호도 경향을 벗어난다.
- (5) 보호가스 없이 가공을 수행하는 경우에는 절단은 수행되지 못하였고 플라즈마 발생으로 빛의 변화의 주기

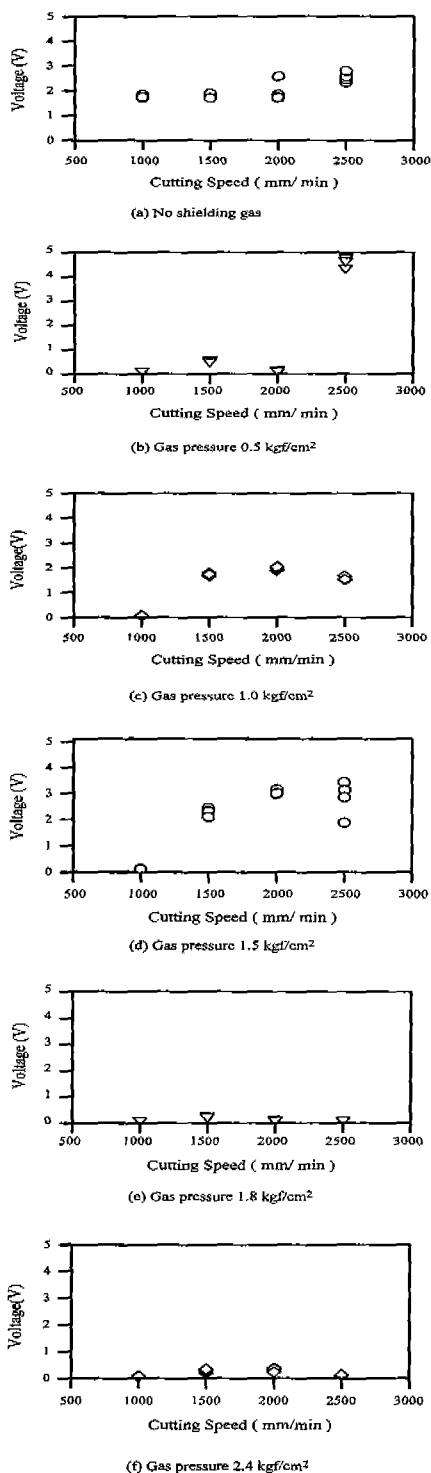


Fig. 11 Mean signal distribution with gas pressure

가 큰 신호가 획득되었다.

(6) 절단이 양호하게 수행되는 가스압에서는 절단속도의 증가에 따라 신호의 세기가 증가하는 경향을 발견할 수 있었고, 절단이 원활히 수행되지 못하는 가스압에서 획득된 신호는 경향을 벗어나며 이를 감지할 수 있었다.

참고 문헌

1. R. Walker, "Applying Multikilowatt CO₂ Lasers in Industry", Laser & Applications, Vol. 4, pp. 61-69, 1985.
2. D. Petrinf and E. Beyer, "Laser Beam Cutting of Stainless Steel", Draft of IE, pp. 1-23, 1991.
3. Eckhard Beyer and Peter Abels, "Process Monitoring in Laser Materials Processing", Proceeding of LAMP '92, pp. 433-438, June, 1992.
4. F. N. Birkett, D. P. Herbert and J. Powell, "Prevention of Dross Attachment during Laser Cutting", Proc. 2nd Int. Conf. Lasers in Manufacturing pp. 63-66, 1985.
5. R. N. Smith and D. A. Kaminski, "Fracture Characteristic of an Aluminum Oxide Ceramic during CW Carbon Dioxide Laser Cutting", J. of Laser Application, Vol. 39/11, pp. 179-182, 1990.
6. H. Jorgensen and Flemming Olsen, "Process Monitoring during CO₂ Laser Cutting", Proceeding of SPIE, pp. 198-208, January, 1991.
7. Jorgensen, H., Kechemair, D and Olsen, F. O, "On-line Detection of the Cut Quality during CO₂ Laser Cutting", International Beam Technology Conference, Karlsruhe Germany, 13-14 March, 1991.
8. M. Hansmann, I. A. Decker and J. L. Ruge, "Direct Observation of the Laser Cutting Process", Proceeding SPIE Vol. 801, High Power Lasers, The Hauge, pp. 337 - 341, 31 March - 3 April, 1987.
9. M. Hansmann, I. A. Decker and J. L. Ruge,

- "On-Line Control of the Laser Cutting Process by Monitoring The Shower of Sparks", Proceeding of Conference Power Beam Technology, pp. 440-445, September, 1986.
10. F. O. Olsen, K. E. Anderson, N. Raben and F. B. Thomassen, "Investigation in Methods for Adaptive Control of Laser Cutting", Proceeding of LAMP'87, pp. 267-272, 1987.
 11. F. O. Olsen, H. Jorgensen, C. Bagger, T. Kristensen and Ole Gregensen, "Recent Investigation in Sensorics for Adaptive Control of Laser Cutting and Welding", Proceeding of LAMP'92, pp. 405-414, June, 1992.
 12. F. O. Olsen, "Recent Development in Laser Cutting", Poto Elektronik Magazin, Vol. 6, no. 7, pp. 1-6, 1990.
 13. Eugene Hecht, "OPTICS", 2nd Edition, Addison-Wesley publishing company, 1987.
 14. Max Born and Emil Wolf, "Principles of Optics", 6th Edition, Pergamon Press, 1980.
 15. Claus Bagger and Flemming Olsen, "On-Line Photo Diode Monitoring of The CO₂ Laser Welding Process", Proceeding of 3rd Conf. Laser Material Processing in the Nordic Countries-Lappeenranta Finland, pp. 189-197, 1991.
 16. 조용무, "레이저 빔을 이용한 적층사출금형에 관한 연구", 인하대학교 박사학위논문, pp. 26 - 30, 1994.