

레이저 절단에서 광소자를 이용한 가공공정 모니터링
Process Monitoring in Laser Beam Cutting
by Photo Diode

김봉재*, 장육진*, 김재도**

* : 인하대학교 기계공학과 대학원

** : 인하대학교 기계공학과

ABSTRACT

On-line process control equipment for CO₂ laser cutting is unavailable for industrial application. The major part of the industrial cutting machines are regulated off-line by highly educated engineers. The quality inspection of the sample is visual and referred to different quality scales. Due to lack of automation potential laser users hesitate to implement the cutting method. The first step toward an automation of the process is development of a process monitoring system and the research is concentrated on the area of on-line quality detection during CO₂ laser cutting. The method bases on the detection of the emitted light from the cut front by photo diode. The signal from photo diode has been undertaken from Fourier analysis and statistical analysis. As a result, it is possible to estimate striation pattern according to beam travel speed.

I. 서론

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

레이저 절단가공을 국내에서도 수년전부터 산업 현장에서 사용하고 있지만 가공변수의 복잡성과 다양성 때문에 레이저 절단의 자동화는 충분히 이루어지지 않은 상태이다. 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 이유는 고품질의 가공제품을 원하는 잠재적인 레이저 가공기의 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]

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. 이 연구는 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]

II. 실험장치

1. CO₂ 레이저 가공기

본 연구에 이용한 레이저 시스템은 (주) 한광의 최대

출력 1.5 KW의 CO₂ 레이저를 사용하였다. 레이저 발진기는 일본의 Matsushita 사의 Panasonic 제품이고 사용한 레이저 시스템 사양은 표 1에 나타나 있다.

Table 1. Specification of CO₂ laser system.

Rated power (KW)	1.5
Power Stability (%)	±2
Beam wave length (mm)	10.6
Beam diameter (mm)	22
Assistant Gas	O ₂
Beam mode	TEM ₀₀ *
Lens type	ZnSe
Lens focal length (mm)	190.5

2. 실리콘 (Si) 포토다이오드

실험에 사용된 실리콘 포토다이오드는 Kodenshi Corp. 제품으로 분광감도 영역이 450 - 1050 nm로 특히 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 재원과 특징은 표 2과 그림 1에 나타나 있다.

Table 2. Specification of Si photodiode.

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

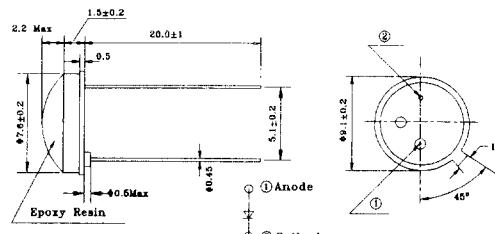


Fig. 1 Apparatus of photodiode.

3. 광전소자 증폭기

포토 다이오드에서 출력되는 전류신호를 처리하기 용이한 전압신호로 변환시키고, 전압신호에서 다시 필요한 성분만을 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 인터페

이스를 통해 발생되어지는 잡음을 제거를 위해 증폭기에 입력감도 조절스위치를 설치하였다. 그리고 증폭기로 +15V, 0V, -15V의 전원을 공급할 수 있는 장치를 제작하였다.

4. A/D 변환기

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

5. 필터 및 필터 홀더

레이저 절단 가공 중 발생하는 빛을 신호처리하기 위해서는 정제할 필요성이 있다. 이를 위해 ND 필터(Neutral density filter)가 이용되어졌다. 빛의 수집에 있어서 포토 다이오드의 선택과 함께 중요한 것이 포토 다이오드의 설치위치이다. 레이저와 재료사이에 발생하는 열 및 오염 물질로 인한 필터와 포토 다이오드의 손상을 극복할 수 있는 위치를 선택하여야 한다. 이를 위해서 포토 다이오드와 필터를 레이저 가공기의 빔 전달장치 끝 부분에 부착할 수 있는 장치를 개발하였다.

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. 다음 그림 2는 개발한 프로그램의 간략한 흐름도이다.

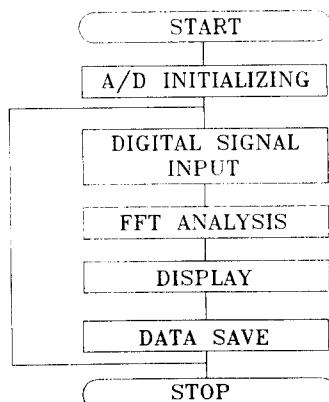


Fig. 2 Flow chart of signal processing program.

III. 실험 재료 및 방법

1. 실험 재료

실험에 사용된 철단 재료는 SPHC로 두께는 4.5 mm인 판재이다. KS 규격은 KS D 3501-83이며 열간 암연 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 표3는 SPHC 화학 성분이다.

Table 3 . Chemical composition of SPHC.

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

2 실험방법

2.1 센서의 선형성 실험

레이저 절단 가공 과정을 모니터링할 수 있는 센서 인포토 다이오드의 신뢰도를 구축하기 위해 센서의 선형성을 알 수 있는 실험이 이루어졌다. 이는 고정된 점광원으로부터 일정한 거리를 증가시켜가며 신호를 획득하여 이를 디지털 신호처리하고 평균을 구하는 방법이다. 획득되어진 데이터들이 Inverse-square law를 어느 정도 만족시키는지에 의해서 센서의 선형성에 관한 정보를 얻어 수 있다.^[13,14,15] 이러한 실험을 바탕으로 원하는 성질을 가진 포토다이오드를 결정할 수 있었다.

그림 3은 포토 다이오드의 제작사에 조사한 포토 다오의 특성곡선이며 그림 4는 선형성 실험을 통해 얻은 곡선이다.

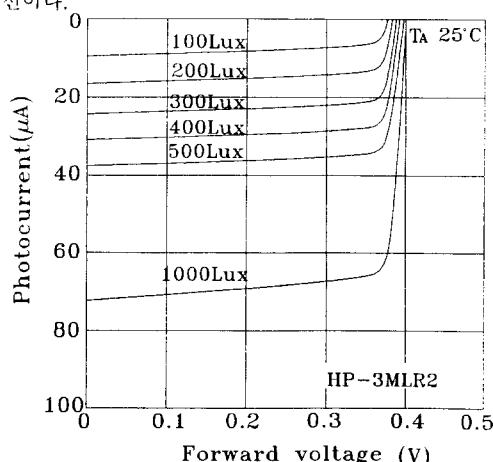


Fig. 3 Characteristic curve of the photodiode on the relation of photocurrent and forward voltage.

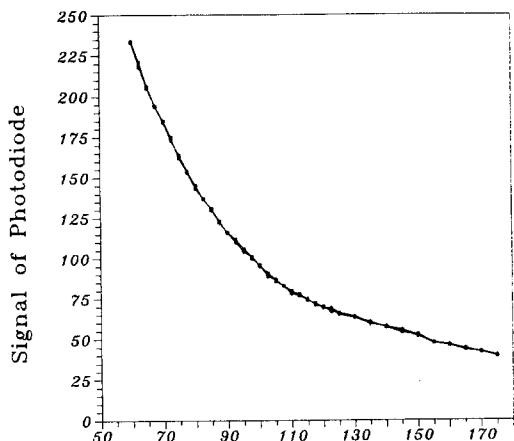


Fig. 4 The result curve of sensor linearity experiment.

2.2 레이저 절단 실험 및 신호획득

가. 절단 실험

레이저 절단 가공에는 많은 가공변수들이 존재한다. 이 중 가장 중요한 것은 레이저 출력, 빔 이송속도, 보조가스의 종류 및 압력 등을 들 수 있다. 본 실험은 여러 변수를 가급적 고정시키고 가공변수로는 빔 이송속도만 1000, 1500 2000, 2500 mm/min로 조정하여 반복 실험하였다. 표 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 모우드	TEM ₀₁
보조 가스 및 압력	O ₂ , 1 Kg/cm ²
초점 위치	0 (시편 표면)
집속렌즈 및 초점 거리	ZnSe, 7.5" (190.5 mm)
출력 파형	Continuous Wave

나. 신호 획득

레이저 절단 가공 중 발생된 빛은 ND필터를 거친 후 포토다이오드에 의해서 전기적 신호로 바꾸어진다. 발생된 전기 신호는 엠프를 통해 증폭되어지고 증폭된 아날로그 신호는 A/D 변환기를 통해서 2000 Hz 정도의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환되어진다. 변환되어진 신호는 FFT 변환을 통해 주기 영역에서 표시되어질 수 있도록 하였다. 그림 5는 레이저 절단에서 가공공정을 모니터링하는 실험 장치 개략도이다.

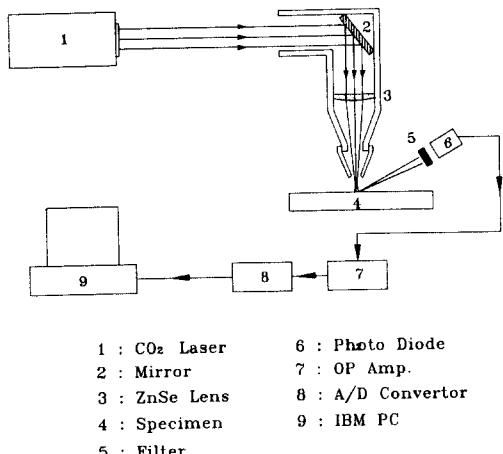


Fig. 5 Experimental setup for secondary light emission detection from laser cutting process.

2.3. 절단 품질 측정

실험 후의 시편의 분석은 표면 거칠기의 측정 및 시편의 조직검사로 구별될 수 있다. 표면 거칠기의 측정은 접촉식 측정장치인 일본의 Kosaka Laboratory 사의 제품으로 모델명 SurfCoder SE-30H를 이용하였다. 측정거리는 0.8 mm로 하였으며 Cut off 길이(λ_c)는 0.8 mm로 하여 Ra, Rmax, Rz를 측정하였다. 그럼 6은 각 절단 속도에 대한 표면 거칠기 측정의 결과 그래프이다. 절단면의 줄무늬 형상의 분포는 금속 현미경을 이용한 사진 판독으로 가능하였다. 또한 가공면에 수직인 방향의 촬영은 시편을 폴리싱하고 부식한 후에 이루어졌다. 이 방법으로 가공변질층의 두께와 드로스의 양을 관찰할 수 있었다. 가공변질층은 경도의 증가를 보이므로 이를 측정하기 위해 경도 시험기(Vickers microhardness tester)를 사용하였다.

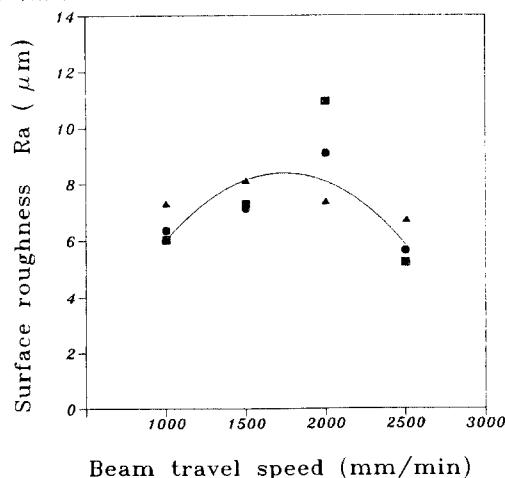
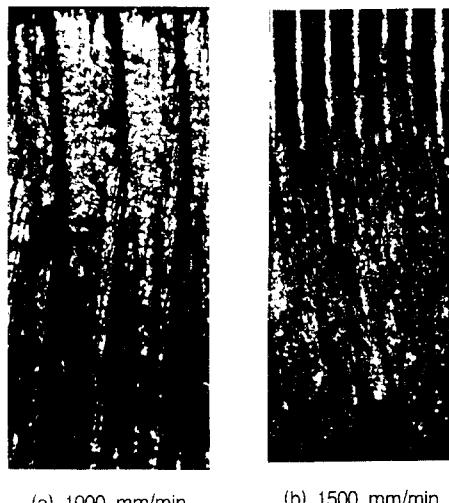


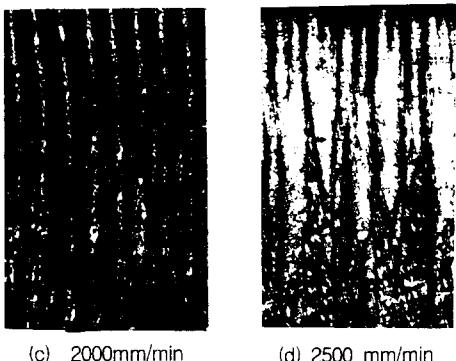
Fig. 6 Variation of surface roughness with the laser beam travel speed

IV. 실험 결과 및 고찰

1. 레이저 절단 실험 결과

레이저 절단 실험은 빔 이송 속도만을 변수로 하여 실시하였다. 사진 1은 빔 이송속도에 따른 절단면의 줄무늬 형상의 분포를 나타낸 것이다. 절단속도가 1000mm/min의 경우 줄무늬 형상의 간격이 비교적 큰 것을 알 수 있으며 약 0.4 mm 정도의 간격으로 균일하게 생겼음을 알수 있다. 이는 약 41Hz 정도의 속도로 생겨났다는 것으로 계산되어졌다. 같은 방법으로 절단속도 1500, 2000, 2500 mm/min에 대해서도 줄무늬 형상의 생성 속도가 104, 200, 350 Hz 정도임이 계산되어 졌다. 그러나 절단 속도가 2500mm/min의 경우는 절단의 속도가 너무 빨라 절단의 완전히 수행되지 않은 경우이다. 절단폭의 측정은 절단 시면을 수직인 방향으로 절단 후 금속 현미경을 이용한 사진으로 관찰 할수 있었다. 사진 2는 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. 가공 열에 의한 가공 변질층의 두께는 절단 속도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었고, 같은 속도의 절단 시편에서는 시편의 밑으로 갈수록 변질층이 두꺼워짐을 알 수 있었다.

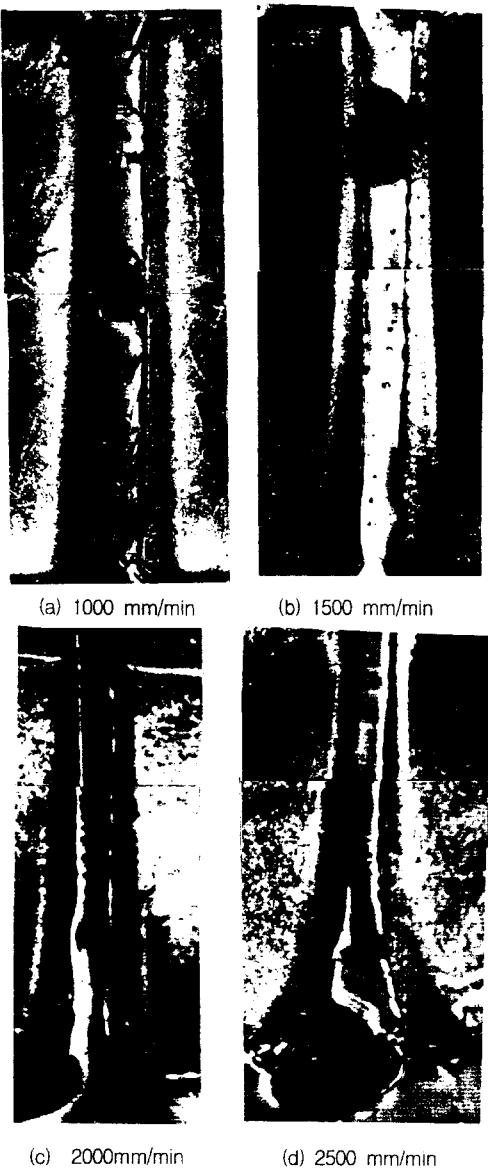




(c) 2000mm/min

(d) 2500 mm/min

Photo. 1 Laser cutting surface with beam travel speed.



(a) 1000 mm/min

(b) 1500 mm/min

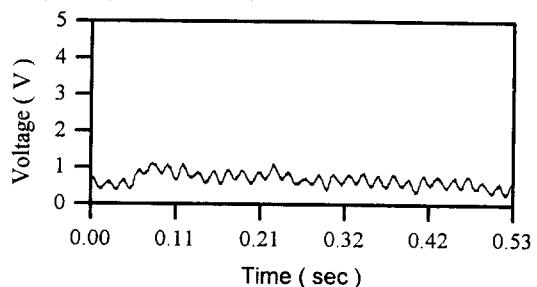
(c) 2000mm/min

(d) 2500 mm/min

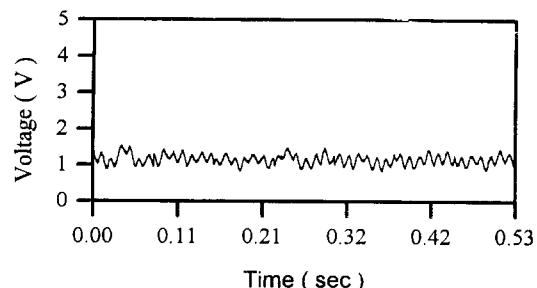
Photo. 2 Cross section of specimen as beam travel speed.

2. 전기적 신호

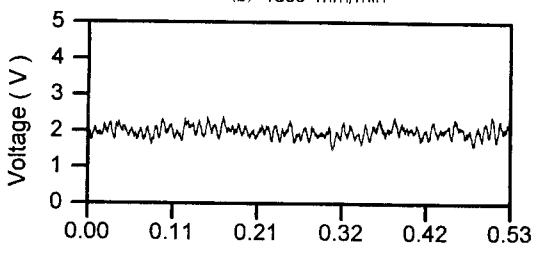
레이저 절단가공 중 획득한 신호를 각 절단 속도에 대해 그림 7에 나타내었다. 신호의 주기와 강도가 절단속도에 따라 변함을 알 수 있다. 절단속도가 2500 mm/min의 경우 신호의 주기와 강도가 경향을 벗어나고 있음을 볼 수 있다. 그림 8은 각 절단속도의 신호를 FFT 변환한 그림이다. 각 절단속도에서 발생되는 신호 변화의 주기가 존재하며 절단에서의 줄무늬 형상의 주기가 일치함을 볼 수 있다. 그러나 절단속도가 과도하게 빨라진 경우는 일치하지 않음을 알 수 있다.



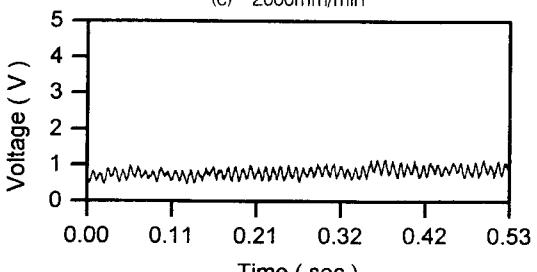
(a) 1000 mm/min



(b) 1500 mm/min



(c) 2000mm/min



Time (sec)

(d) 2500 mm/min

Fig. 7 Acquired signal by photodiode in time domain.

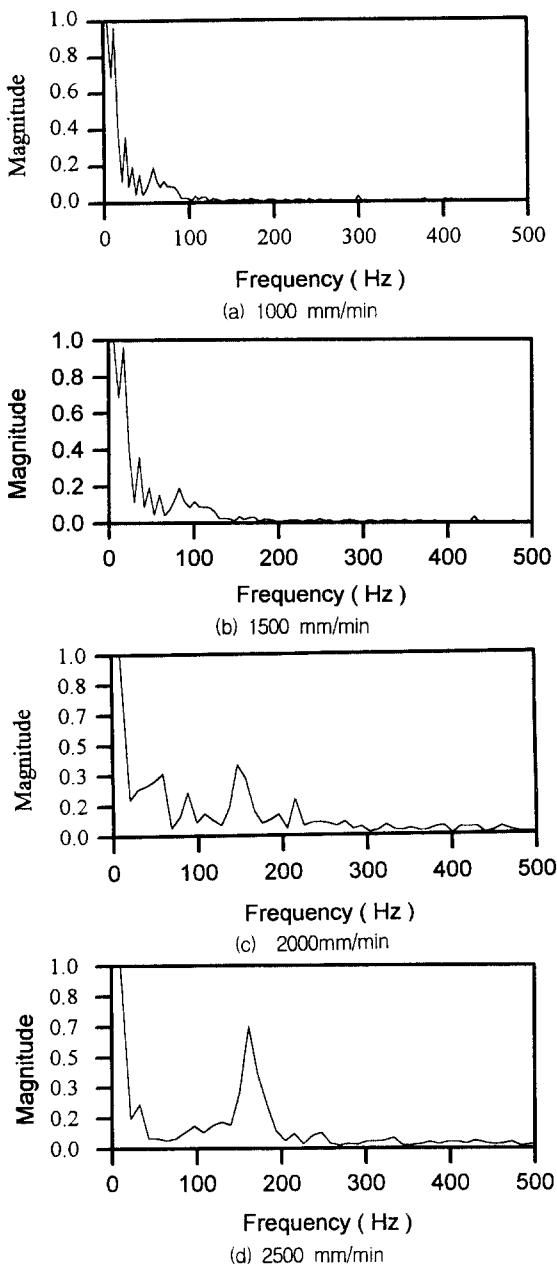


Fig. 8 FFT results.

V. 결론

본 연구는 레이저 절단 상태를 실시간으로 판단하고 절단 품질을 결정할 수 있는 시스템을 위한 가공변수의 영향을 광소자를 이용해서 모니터링 하는 것이다. 레이저 절단 가공시 빔의 이송속도는 가공 중 발생하는 빛의 변

화를 가지고 있으며 이는 모니터링 시스템에 의해서 관측할 수 있었다.

이를 정리하면

- (1) 정상적 가공조건 하에서 발생하는 레이저의 빛은 일정한 주기성을 갖는다.
- (2) 레이저 빔의 이송속도가 빠를수록 발생되어지는 신호의 강도는 세어짐을 알 수 있다.
- (3) 가공중 발생하는 빛의 변화의 주기는 절단면에서 생기는 줄무늬 형상의 주기와 일치한다.
- (4) 절단의 속도가 너무 빠른 경우는 절단이 이루어지지 않으며 절단시 발생하는 신호도 경향을 벗어난다.

VI. 참고 문헌

- [1] R. Walker, "Applying Multikilowatt CO₂ Lasers in Industry", Laser & Applications, Vol. 4, pp. 61-69, 1985.
- [2] D. Petrin 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, "Frature Charateristic of an Aluminum Oxide Celamic during CW Cabon Dioxide Laser Cutting", J. of Laser Application, Vol. 39/11, pp. 179-182, 1990.
- [6] H. Jorgensen and Flemming Oisen, "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", To be published at 3rd, 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 Hague, 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.