

# 펄스 레이저 안정화 및 ablation 공정계측기술 연구

## Study on pulse laser intensity stabilization and monitoring of laser ablation processing

연세대학교 기계공학과 곽승우, 한재원

### I. 서론

펄스 레이저를 이용한 초미세 가공 중 어블레이션(ablation)은 펄스 레이저의 강력한 침투출력을 재료 표면에 집속하여 재료 물질을 미세하게 제거하는 공정이다. 이 공정에 있어서 가공의 질은 레이저 광, 가공할 재료, 가공 표면의 상태 등의 가공 공정변수에 의해 결정되므로 나노기술의 산업적 응용에서 요구되는 정밀한 가공을 위해서는 공정변수의 실시간 계측 및 제어 기술이 필수적이다. 레이저 가공의 정밀도를 향상시킬 수 있는 많은 가공 공정변수 중 레이저는 가공의 도구로 사용되는 가장 중요한 변수이며, 펄스 레이저의 출력 변동은 나노기술에서 요구되는 정밀도를 떨어트리는 요소로 작용할 수 있다 따라서 레이저의 출력을 안정화하면서 공정의 실시간 가시화를 통하여 가공의 효율을 향상시켜야 한다

따라서 본 연구에서는 펄스 레이저의 출력을 안정화시키기 위해 요구되는 각 펄스의 침투출력을 측정하였으며, 각 펄스의 오차를 보상하는 방식인 PID 제어 기법을 광학적 시스템에 적용하기 위한 알고리즘을 연구하였다 또한 레이저 가공 공정계측을 위하여 레이저 유도 플라즈마 분광분석 기법의 적용 타당성을 확인하고, 고주파수의 레이저 가공기를 이용하여 니켈을 가공하면서 레이저 유도 플라즈마 분광분석 기법을 이용하여 니켈의 특성 분광선(characteristic peak)를 측정하였다

### II. 실험재료 및 방법

#### 2.1 펄스 레이저의 출력 측정

펄스 레이저의 출력을 측정하는 방법으로는 열량계(calorimeter)를 이용하여 평균 출력을 측정하는 방법이 있다 하지만 가공에서 사용되는 출력은 평균 출력이 아닌 각 펄스 레이저의 출력이다. 따라서 펄스 레이저의 출력을 제어하기 위해서는 각 펄스 레이저의 출력을 측정하여야 한다 하지만 펄스 레이저의 펄스폭은 ns단위로 짧은 시간폭을 가지고 있으며, 그 시간동안 침투출력을 측정하는 것은 어렵다. 따라서 각 펄스 레이저의 침투출력을 측정하기 위하여 피크홀드(peak and hold)검출기를 구성하였다. 피크홀드검출기는 외부에서 들어오는 펄스 레이저 신호와 동일한 시점을 가진 신호를 이용하여 펄스 레이저 신호를 추적하고 레이저 펄스 신호의 최고점에서 원하는 일정 시간동안 펄스의 피크를 지연을 시켜주는 전자 장비이다 Analog device사의 PKD01EF로 장비를 구성하였고, 최대 신호 획득 시간은 45 $\mu$ s이다 이 장비와 함께 실험에 사용된 레이저는 Quantel international사의 YG661-10 Nd YAG 레이저로 파장은 532nm이며, 펄스폭은 10ns이고, 펄스 반복율은 10Hz, 출력 변동률은 5%미만이며, 레이저의 출

력을 1.19W로 설정하였다 펄스 레이저의 첨두출력과 동일한 출력과 동일한 시점을 가지는 신호로는 레이저의 Q-switch 신호를 이용하였고, 실험의 개략도는 Fig 1과 같다.

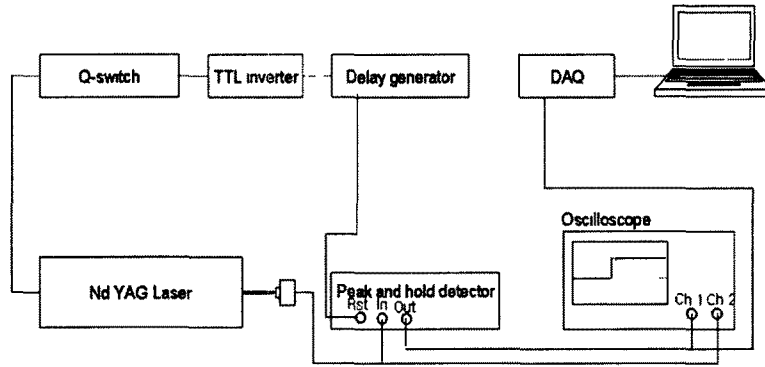


Fig 1 Pulse laser peak intensity measurement schematics

펄스 레이저의 신호는 포토다이오드(photodiode)검출기를 통하여 얻었고, 이 신호는 피크홀드검출기의 입력신호로 들어가게 된다. 한편 펄스 레이저와 동일한 신호 발생 시점을 가진 Q-switch 신호는 펄스 지연기(delay generator)를 통해 50ms의 지연시간을 가지고 피크홀드검출기의 초기화 신호로 입력했다. 레이저 펄스의 피크 출력과 동일한 지연된 신호는 피크홀드검출기의 출력신호로 나와 오실로스코프로 확인이 되며, 이 신호를 DAQ보드와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 데이터를 획득하였다.

획득한 데이터 중 최초 500개의 데이터를 가지고, 광학적인 방식으로 펄스 레이저의 출력을 안정화시키기 위한 알고리즘을 구성하였다 펄스 레이저의 출력에 있어서 이전 펄스와 현재의 펄스 사이에는 서로 상관관계가 없으므로, 현재의 펄스 레이저의 출력을 가지고 다음 펄스 레이저의 출력을 예측할 수 없다. 따라서 알고리즘은 펄스 레이저의 출력을 평균하여 평균값을 기준으로 조정하고 오차를 보상하는 되먹임제어기의 한 종류인 PID 제어기 방식을 사용하였으며, 광학적인 방식은 광학 감쇄기의 원리를 이용하였다 선형 편광된 빛을 위한 광학 감쇄기는 반파장판(half-wave retardation plate)과 편광자(polarizer)로 구성이 되며, 입사하는 빛의 편광 방향과 반파장의 광축사이에 이루어지는 각도 $\theta$ 로 인하여 반파장판을 통과하는 빛의 출력은  $\cos^2(2\theta)$ 에 의존하게 된다.<sup>1)</sup> 이를 통하여 회전시킬 반파장판의 각도를 알 수 있으며, PID 제어기에 적용하였다. 알고리즘에 사용된 PID 제어기는 비례모드, 적분모드, 미분모드 세 가지의 모드를 사용하며 비례모드는 설정값과의 오차에 비례하여 제어를 하게 되며, 적분모드는 오차의 누적에 비례하여 제어를 실행하고, 미분모드는 출력과 설정값 사이의 오차의 변화율을 보고 제어입력을 결정하여 주는 방식이다 이 세 가지 모드를 가지고 제어기의 출력이 결정되며, 제어기의 출력은 다음과 같이 정의 된다

$$m = K_p(X_{\varphi} - x) + \frac{1}{T_I} \int (X_{\varphi} - x) dt + T_D \frac{d(X_{\varphi} - x)}{dt}$$

이 때,  $m$ 은 제어기 출력,  $X_{sp}$ 는 설정값,  $x$ 는 입력값,  $K_p$ 는 비례이득,  $T_I$ 는 적분시간,  $T_D$ 는 미분 시간을 의미한다. 알고리즘에 사용된 PID 제어기의 블록선도는 Fig. 2로 표현되며, 설정값과 들어온 레이저의 평균 출력과의 오차에 비례하여 제어기의 출력이 결정되어, 제어기의 출력을 광학 감쇄기의 원리를 이용하여 반파장판을 회전시킨다 새롭게 입사되는 펄스 레이저의 출력은 평균 출력에 의해 회전된 반파장판에 의해 조절이 되며, 이 때 다시 발생하는 조정된 펄스 레이저의 출력과 설정값과의 오차에 대하여 제어기는 오차를 보상하여 다시 반파장판을 회전 시키게 된다.

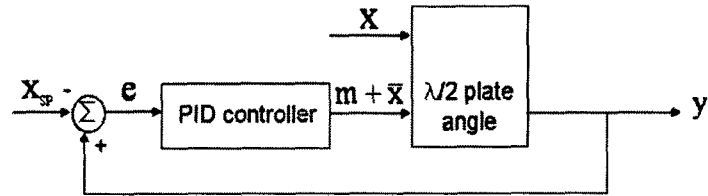


Fig 2 PID control block diagram

최초 광축의 각도를 0으로 했을 때, 이를 기준으로 돌아가는 광축의 각도는 다음과 같이 정의 된다

$$\theta_n = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[ \frac{X_{sp}}{K_f(y_{n-1} - X_{sp}) + \frac{1}{T_I} \int (y_{n-1} - X_{sp}) dt + T_D \frac{d}{dt} (y_{n-1} - X_{sp}) + \bar{x}_n} \right]$$

여기서  $y$ 는 조정된 펄스 레이저의 출력이다

따라서 최종적으로 조정된 레이저의 출력은 광학 감쇄기의 이론의 기초가 되는 Malus law에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$y_2 = x_2 \cos^2(2\theta_1)$$

이 원리를 이용하여 피크홀드검출기의 얻어진 데이터를 평균하는 데이터 수를 10개로 설정하였다. 평균이 된 결과와 이전 출력과 설정값 사이의 오차에 비례하여 반파장판을 회전시킨 결과를 10개씩 평균하여, 조정된 펄스들의 평균이 원하는 설정 출력이 되도록 하였다

## 2.2 어블레이션 공정 계측을 위한 레이저 유도 플라즈마 분광분석

레이저 유도 플라즈마 분광분석(Laser-induced breakdown spectroscopy)은 강력한 펄스 레이저가 시료에 조사되어 발생하는 플라즈마 상태의 원자나 이온에서 발산하는 빛의 분광분석을 하는 기법이다. 물질을 이루고 있는 각각의 원자들은 에너지를 받으면 높은 에너지 상태로 전이되며, 전이된 원자는 빛을 발산하면서 안정된 에너지 상태로 돌아오는데, 특정한 에너지 준위들 사이에서 전이가 일어나기 때문에 고유한 파장의 빛을 발산하게 된다.<sup>2)</sup> 따라서 각각의 물질들이 이루고 있는 특성 분광선(characteristic peak)은 서로 다른 파장에서 나타나기 때문에 이를 통하여 물질이 이루고 있는 성분을 알 수 있게 된다 결국 각 물질이 이루고 있는 특

성 분광선이 다르므로 가공 재료가 가진 여러 가지 물질의 성분을 복합적으로 확인할 수 있으며, 이를 이용하여 다층 구조의 가공의 경우 분광선의 변화를 실시간 계측하여 가공층의 전이 상태 및 가공 물질의 가공 상태를 정성적으로 실시간 계측할 수 있다

레이저 유도 플라즈마 분광분석 기법의 실험을 위하여 사용된 가공기는 EO technics사의 UD 7176 laser micro machining이다. 이 장비는 Spectra physics 사의 HIPPO Nd YAG laser를 장착하고 있으며, 파장은 355nm, 펄스폭은 12ns, 펄스 반복율은 50kHz, 집속된 레이저의 지름은 갈바노 거울(galvano mirror)의 경우 30μm, 집속렌즈를 사용했을 경우 10μm이며 평균 출력 4.2W에서 실험을 수행하였다. 분광분석을 위한 분광기는 BWTEK사의 BTC111E를 사용하였고, 측정파장 범위는 280~780nm, 분해능은 0.35nm이며, 실험에 사용된 집적시간은 9ms로 설정하였다. 플라즈마 플럼에서 발생하는 빛을 효율적으로 분광기로 넣어주기 위하여 렌즈와 광섬유(optical fiber)를 결합할 수 있는 광학계를 구성하였다. 구성한 광학계는 레이저의 가공에 적용할 수 있도록, 지름 1inch 초점거리 5cm, 지름 0.5inch 초점거리 2.5cm의 렌즈로 소형으로 제작하였다

공정 계측의 적용을 위한 레이저 유도 플라즈마 분광분석 기법의 적용 타당성을 검증하기 위해 조사된 레이저가 가공 물질에 플라즈마를 형성할 수 있는지를 확인하기 위하여 여러 가공 물질에 대한 물성 데이터<sup>3)</sup>를 확보하고, 플라즈마 형성을 위한 문지방 에너지 밀도(threshold fluence)를 계산하였다

Element	T <sub>b</sub> (K)	T <sub>f</sub> (K)	ρ(g/cm <sup>3</sup> )	L <sub>v</sub> (J/g)	C <sub>p</sub> (J/Kkg)	K(W/mK)	a(cm <sup>2</sup> /s)	F <sub>th</sub> (J/cm <sup>2</sup> )
Al	2543	931	2.70	9462	900	210.00	0.8642	2.6016
Cr	2473	2133	7.19	5945	461	69.1	0.2085	2.1379
Co	3373	1766	8.80	3280	440	69.21	0.1787	1.3368
Cu	2855	1356	8.96	5234	385	385	1.1161	5.4272
Au	2973	1336	19.32	1738	132.3	301	1.1776	3.9916
Fe	3073	1808	7.90	6615	440	76.2	0.2192	2.6803
Pb	2023	600	11.34	850	129	17.6	0.1203	0.3662
Mo	5833	2893	10.30	5610	255	145	0.5521	4.7031
Ni	3653	1728	8.88	5862	460	60.7	0.1486	2.1982
Si	2873	1687	2.49	10614	670	84	0.5035	2.0543
Ag	2466	1233.8	10.50	2332	234	419	1.7053	3.5028
W	6203	3643	19.3	4009	134	163.3	0.6314	6.7351
Zn	1180	692.5	7.10	1754	389.8	112.2	0.4054	0.8686

T<sub>b</sub>, boiling point, T<sub>f</sub>, melting point, ρ, density, L<sub>v</sub>, latent heat of evaporation,

L<sub>f</sub>, latent heat of fusion, C<sub>p</sub>, specific heat, K, thermal conductivity, a, thermal diffusivity

Table 1 Materials properties and threshold fluence of metal materials

문지방 에너지 밀도는 다음의 식으로 계산이 되었다.

$$F_{th} = \rho L_v a^{-\frac{1}{2}} t_e^{\frac{1}{2}}$$

이 때, ρ는 재료의 밀도이고, a는 열확산율(thermal diffusivity) ( $a = \frac{K}{\rho C_p}$ 로 K와 C<sub>p</sub>는 열전도

울과 비열이다),  $t_e$ 는 레이저의 펄스폭이다.<sup>4)</sup> 설정된 레이저의 에너지 밀도는 집속렌즈와 갈바노 거울을 사용한 가공의 경우  $106.95 \text{ J/cm}^2$ ,  $11.88 \text{ J/cm}^2$ 로 계산되었으며, table 1에서와 같이 12ns의 펄스폭을 가진 레이저의 경우 table 1의 금속들은  $10 \text{ J/cm}^2$  미만의 낮은 문지방 에너지 밀도를 가진다. 실험에 사용된 니켈의 문지방 에너지 밀도는  $2.1982 \text{ J/cm}^2$ 로 레이저의 출력은 플라즈마를 형성하기에 충분한 에너지를 가졌다는 것을 알 수 있었고, 니켈의 분광 분석을 수행하였으며, 니켈의 특성 분광선을 확인하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 펄스 레이저의 출력 측정

피크홀드검출기를 이용하여 측정된 9000개의 펄스 레이저 출력 중 최초 500개의 펄스 레이저 출력으로 PID 제어를 적용시켜 결과를 확인하였다. PID 제어기의 비례이득은 0.7로 하였으며 적분시간은 1000, 미분시간은 0.0001로 설정을 하였고, 조정될 설정 출력은 1.5V로 하였다. Fig 3은 10개씩 평균한 데이터를 480개 얻은 결과를 평균으로 나누어 표준화 된 값을 나타내는 결과이다. 제어가 되지 않은 경우 평균 1.6453V, 표준편차 0.0163, 백분율 0.9884%의 변동률을 보였으며, 제어가 된 펄스 레이저는 평균 1.5003V, 표준편차는 0.0078, 백분율은 0.5207%의 변동률을 보였다. 결과적으로 조정을 한 경우 표준편차는 52% 줄었으며, 백분율은 47% 줄어들었다.

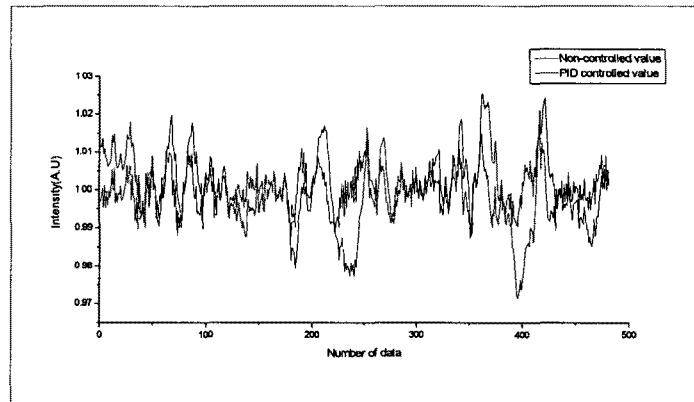


Fig 3 Comparison of averaged pulse laser intensity

#### 3.2 Ablation 공정 계측을 위한 레이저 유도 플라즈마 분광분석

Fig. 4(a)와 (b)는 450-600nm의 파장 영역에서 니켈의 분광 스펙트럼이다 (a)와 (b)는 갈바노 거울을 이용한 주사방식과 집속렌즈를 이용한 작업대 이송방식에서의 스펙트럼이며, 출력과 무관하게 동일한 특성 분광선을 보였다. 측정 영역에서의 니켈의 특성 분광선(characteristic peak)은 471.56nm, 508.22nm, 547.76nm의 파장에서 나타났으며, 니켈의 특성 분광선인 471.5762nm, 508.111nm, 547.6904nm와 흡사한 파장에서 나타났다. 참조한 데이터와 비교하였을

때 나타난 파장의 오차는 열적효과로 인한 분광선의 이동현상으로 판단된다.

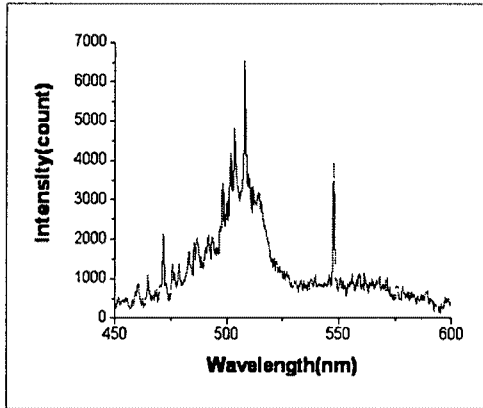


Fig 4(a) Using galvano mirror, measured LIBS spectra of Nickel

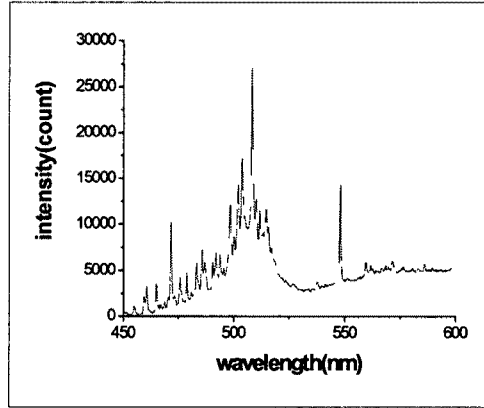


Fig 4(b) Using micro objective lens, measured LIBS spectra of Nickel

#### IV. 결론

본 논문에서는 펄스 레이저의 출력 변동을 안정화시키기 위하여 각 펄스 레이저의 출력을 측정하기 위한 피크홀드검출기를 제작하였고, 이를 이용하여 10Hz로 동작하는 펄스 레이저의 각 펄스 침투출력을 측정하였다. 측정된 데이터와 광학 감쇄기 이론을 이용하여 PID 제어를 통한 출력 변동을 안정화시키기 위하여 알고리즘을 구성하였다

레이저 가공의 가공공정 계측을 실시간 수행하기 위하여 각 가공물질에 대한 물성 데이터를 통해 문지방 에너지 밀도를 계산하였고, 레이저 유도 플라즈마 분광 분석의 적용 가능성을 확인하였다 레이저 유도 플라즈마 분광 분석을 위하여 광학계를 설계하였으며, 니켈의 분광 스펙트럼을 관측하였다. 그 결과 특성 피크를 471.56nm, 508.22nm, 547.76nm의 파장에서 확인하였고, 재료가 가진 물질에 따라 가지고 있는 고유한 특성 분광선 통해 레이저 가공 상태를 실시간 계측할 수 있음을 확인하였다

#### V. 참고문헌

1. Brian H Kolner, "Intensity noise enhancement in the half-wave plate/polarizer attenuator", OPTICS LETTERS, Vol 16, No.11, June 1, 1991
2. John R. Dean, "Atomic absorption and plasma spectroscopy", WILEY, pp.37~41, 1997
3. Ross, Robert B, "Metallic materials specification handbook", Chapman & Hall, pp.1~615, 1992
4. L M Cabalin, J.J. Laserna, "Experimental determination of laser induced breakdown thresholds of metals under nanosecond Q-switched laser operation", Spectrochimica Acta Part B, Vol. 53, pp 723~730, 1998