

레이저 미세 가공 공정에서 광센서를 이용한 선폭 예측을 위한 통계적 모델의 개발

박영환*, 이세현#

Development of Statistical Model for Line Width Estimation in Laser Micro Material Processing Using Optical Sensor

Young Whan Park* and Sehun Rhee#

ABSTRACT

Direct writing technology on the silicon wafer surface is used to reduce the size of the chip as the miniature trend in electronic circuit. In order to improve the productivity and efficiency, the real time quality estimation is very important in each semiconductor process. In laser marking, marking quality is determined by readability which is dependant on the contrast of surface, the line width, and the melting depth. Many researchers have tried to find theoretical and numerical estimation models for groove geometry. However, these models are limited to be applied to the real system. In this study, the estimation system for the line width during the laser marking was proposed by process monitoring method. The light intensity emitted by plasma which is produced when irradiating the laser to the silicon wafer was measured using the optical sensor. Because the laser marking is too fast to measure with external sensor, we build up the coaxial monitoring system. Analysis for the correlation between the acquired signals and the line width according to the change of laser power was carried out. Also, we developed the models enabling the estimation of line width of the laser marking through the statistical regression models and may see that their estimating performances were excellent.

Key Words : Laser Marking (레이저 마킹), Plasma (플라즈마), Optical Sensor (광센서), Line Width Estimation (선폭 예측), Statistical Regression Model (통계적 회귀모델), ANOVA (분산분석)

1. 서론

반도체 산업은 거의 모든 기계 및 전자 산업에 적용이 되는 핵심 부품산업으로 그 중요성이 날로 증대되고 있다. 또한 제품의 소형화에 의해 반도체의 회로는 집적화 되고 반도체 칩의 크기도 점점

작아져 플립 칩과 같은 패키징 공정 없이 웨이퍼 상태의 칩을 제품에 직접 이용하고 있다. 그러므로 반도체 웨이퍼에 직접 마킹을 하는 공정 기술이 산업적으로 요구되고 있다.

마킹은 제품에 대한 다양한 정보를 글자와 로고로 제품에 새기는 것으로 현재는 프린팅

접수일: 2004년 12월 14일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

교신저자: 한양대학교 기계공학부

E-mail srhee@hanyang.ac.kr Tel. (02) 2220-0438

(printing) 기법이나 레이저를 이용하여 새기는 (scribing) 기법 등이 많이 사용되고 있다. 그러나 웨이퍼 상태의 칩에는 레이저 마킹이 주로 사용되고 있다. 레이저 마킹은 고속, 고정도의 비접촉식 가공으로 영구적이라는 장점을 가지고 있어 반도체 산업에서 널리 이용되고 있다. 특히 칩의 표면에 수행하는 레이저 마킹은 칩 제작 공정중 거의 마지막 공정에 수행되는 공정이므로 마킹 공정중에 품질을 판단하는 것은 매우 중요하다. 마킹 공정에 있어서 그 품질은 가독성 (readability)으로 판단할 수 있으며 이는 마킹된 부분의 명암 대비 (contrast), 선폭, 깊이와 같은 것으로 정량적으로 표현될 수 있다. 그러므로 마킹 공정중에 선폭을 예측하는 것은 매우 중요하다.

레이저를 이용한 가공공정에 있어서 선폭의 예측은 레이저가 재료에 조사될 때 발생하는 온도 변화 및 상변화와 열전달에 밀접하게 관련되어 있다. Mazumder^{1,2} 는 레이저 가공공정에서 레이저와 재료간의 상호작용에 의한 증발과 용융재료의 분출에 의한 재료의 제거 비율을 1, 2 차원 모델을 이용하여 용융 깊이를 예측하였다. Modest³ 는 홈의 형상(groove shape) 을 3 차원 모델을 이용하여 예측하였으며, 연속 레이저, 펄스형 레이저, 그리고 Q-switching 된 레이저에 관한 어블레이션 과정 (ablation process) 를 비교 하였다. 수치적 모델 이외에 실제 실험을 통하여 형상을 예측하는 연구도 수행되었다. Zhou⁴ 는 아크릴 플라스틱과 같은 비금속 재료에 대한 절단깊이를 예측하는 이론적 모델을 제시하고 이를 실험 결과와 비교하여 이론식을 수정하였다. 실리콘 웨이퍼 가공에 관한 연구로서 Miyamoto⁵ 는 KrF excimer UV 레이저를 이용한 실리콘 웨이퍼의 드릴링에서 레이저 입열에 따른 드릴링 비율을 이론 및 실험치를 비교하였다. Gu⁶ 는 레이저를 이용한 웨이퍼 마킹에서 레이저 파워, 펄스 반복율, 겹침율 (overlap rate), 그리고 가공속도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그러나 지금까지의 연구는 이론적으로는 중요한 의의를 갖고 있으나 실제 시스템의 적용에는 한계가 있다. 그러므로 레이저 용접이나 절단과 같은 가공공정에서는 프로세스 모니터링 기법을 이용하여 가공형상을 예측하는 연구가 수행되었다. 레이저 가공에서 사용되는 프로세스 모니터링 방법으로는 음향방사 (acoustic emission), 가청 소리 (audible sound), 적외

선 계측 (infrared sensing) 혹은 자외선 계측 (ultraviolet sensing) 등과 같은 기법이 있으며⁷ 이 중에서 광계측 방법이 가장 많이 사용되고 있다. Tu⁸ 이나 Rhee⁹ 등이 광센서를 이용하여 레이저 용접부 형상을 예측하는 연구를 수행하였다. 회귀분석은 통계적으로 입력변수와 출력변수간의 상관관계를 수식으로 전개하여 줌으로써 다양한 가공특성의 예측에 사용되고 있다.^{10,11}

본 논문에서는 먼저 레이저 마킹중에 발생하는 플라즈마를 모니터링 하기 위한 계측 시스템을 구축한 후, 센싱된 신호를 이용하여 마킹부의 선폭을 예측하는 모델을 개발하였다. 레이저 마킹은 그 속도가 매우 빠르므로 마킹영역과 계측영역을 일치시키는 동축 모니터링 시스템을 구축하여 가공 공정 중 발생하는 플라즈마를 실시간으로 계측하였다. 실험을 통하여 마킹의 변수와 선폭 그리고 계측 신호와의 관계를 분석하였다. 그리고 이를 바탕으로 레이저 마킹부의 선폭을 예측하는 통계적 회귀 모델을 개발 하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

레이저 마킹 실험은 532 nm 의 파장을 갖는 green 레이저를 이용하여 수행하였다. 최대 출력은 3.4 W 급 레이저이다. 레이저 빔의 단면 출력 분포를 나타내는 횡모드는 가우시안 분포를 갖는 TEM₀₀ 모드를 사용하였다. 레이저의 출력 방법은 Q-switching 된 펄스(pulse) 형태로 발진되며, 초당 펄스의 반복율 (repetition rate) 범위는 1~100 kHz 이다. 레이저의 펄스 폭 (pulse width)는 반복율 7.5

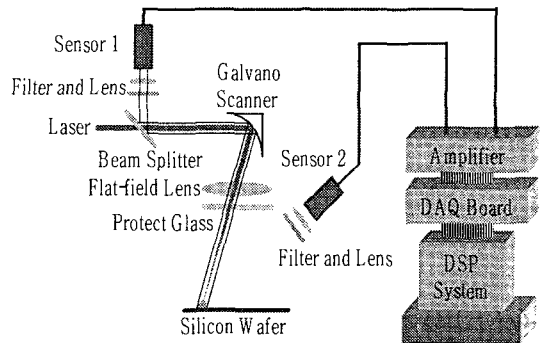


Fig. 1 Experimental Setup

kHz 에서 70 ns 이다. 실험에 사용된 레이저 세팅은 Fig. 1 과 같다.

Fig. 1 에서 보는 바와 같이 본체로부터 나온 레이저는 갈바노 스캐너 (galvano scanner)에 의해 마킹될 위치로 조사된다. 그리고 평면집광렌즈 (flat-field focus lens)를 통해 실리콘 웨이퍼에 집속이 되고 실리콘 웨이퍼에서는 마킹이 수행된다.

레이저 마킹은 빠른 속도로 진행되기 때문에 Fig. 1 의 센서 2 와 같이 외부에 센서를 설치하여 계측하는 경우는 센서가 마킹이 되는 점을 따라갈 수 있을 만큼 빠르게 이동시킬 수 없으므로 외부의 센서를 이용하여 모니터링 하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 Fig. 1 에서 센서 1 과 같이 갈바노 스캐너 뒤쪽에 센서를 설치하여, 갈바노 스캐너를 통해 반사되는 광신호를 모니터링하였고, 이를 통해 마킹영역을 실시간으로 계측할 수 있다. 이 경우 발진된 레이저와 동축(co-axial)으로 오는 빛을 계측하여야 하기 때문에 레이저의 빛과 레이저와 웨이퍼 간의 상호작용으로 발생하는 광신호를 분리하기 위한 빔 스피리터 (beam splitter) 를 설계하여 설치하고 그 후면에 센서 1 을 설치하였다. 센서 1 은 실리콘 포토다이오드 (Si photodiode) 로 반응 파장 영역 (response range) 는 450~1050 nm 이고, 최대 반응 파장은 900 nm 이다. 계측 센서는 광범위한 파장영역에서 반응하므로 레이저와 실리콘 웨이퍼간의 상호작용되는 빛을 받기 위해 532 nm 의 레이저 파장을 제거하는 장파장 투과 필터 (long pass filter)를 설치 하였다. 마킹부로부터 센서 1 과의 거리는 935 mm 였고, 효과적인 계측을 위해 센서 1 의 앞에 렌즈를 설치하였다. 센서의 신호를 계측하기 위한 샘플링 속도는 200 kHz 로 하여 계측하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

레이저 마킹에 있어서 제어 변수로 레이저의 출력, 마킹속도, 초점 거리 등이 있다. 본 실험에서는 레이저 마킹의 제어 변수와 마킹부와의 상관관계를 규명하고자 한다. 또한 마킹부의 제어 변수에 따른 계측 신호를 이용하여 마킹부의 품질과의 상관성을 밝히고자 한다.

본 실험에서는 마킹부 제어 변수로 레이저 출력을 이용하였다. 레이저 출력을 3 W 에서 1 W 까지 0.25 W 씩 변화하여 총 9 개의 수준으로 나누어

실험을 수행하였다. 레이저의 펄스 반복율은 10 kHz 로 수행하였고 한 실험에서 9 개의 라인을 만들었다. 각 실험당 6 번의 반복실험을 수행하였다.

마킹부의 품질을 나타내기 위한 변수로는 마킹부의 선폭을 이용하였다. 마킹에서는 글자 혹은 로고에 대한 인식율이 매우 중요하다. 인식율에 있어서는 마킹의 깊이 보다 선폭이 더 중요하므로⁶ 사람이 마킹부를 인식하기 위해서는 충분한 선폭을 가지고 있어야 한다. 선폭의 측정은 레이저 마킹 실험 시편을 광학 현미경을 이용하여 250 배 확대하였고, 이미지 프로세싱 (image processing) 소프트웨어를 이용하여 수행하였다. 9 개의 라인으로부터 얻어진 선폭과 광센서로부터 구한 계측 신호를 이용하여 상관 관계를 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레이저 출력과 선폭의 관계

레이저 출력 변화에 따른 마킹부 형상의 사진이 Fig. 2 에서 보여지고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 출력이 변함에 따라 얻어지는 마킹 형상이 달라짐을 알 수 있었다. Fig. 3 은 레이저 출력 변화에 따라 마킹 선폭의 평균값을 나타낸 그래프이다. 마킹시 어블레이션 (ablation) 되는 부피는 입열량과 비례관계가 있고, 부피를 나타내는 인자인 마킹 깊이와 마킹부 선폭이 입열량에 의해 커짐을 알 수 있다.⁵ 단위 시간당 입열량은 레이저 출력과 마킹 속도에 의존된다. 본 실험에서는 일정한 속도를 유지하면서 실험이 수행되었으므로 마킹부의 선폭은 레이저의 출력에 의해 결정된다.

Fig. 3 은 레이저 출력에 대한 선폭의 변화를 보여 주고 있다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이 마킹

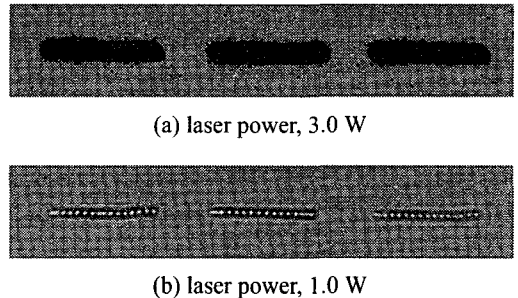


Fig. 2 Marking shapes for different laser powers

부 선폭은 레이저 출력이 커짐에 따라 선폭이 증가하고 있다. 레이저 출력이 낮은 1.0 W 에서 1.75 W 구간에서는 선폭이 급하게 증가하고 있으며, 이후의 구간에서는 완만하게 증가 하고 있다. 전체 레이저 출력에 대하여 다소 비선형적인 비례 관계가 있음을 알 수 있다.

마킹부의 선폭에 따른 사람의 가독성에 대해서는 마킹부의 선폭이 40 μm 이상인 경우는 거의 모든 조건에서 글자를 판독할 수 있었다. 그러나 30 ~ 40 μm 인 경우는 조명이나 반사의 조건에 따라 인식율이 떨어졌으며 30 μm 이하인 경우는 광학현미경으로는 마킹이 된 것을 알 수 있으나 실제 눈으로는 확인 할 수 없었다. 그러므로 사람이 인식할 수 있는 마킹을 위해서는 1.5 W 이상의 레이저 출력이 필요함을 알 수 있었다.

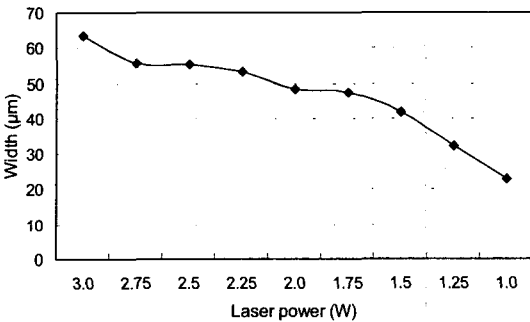


Fig. 3 Marking width according to laser power

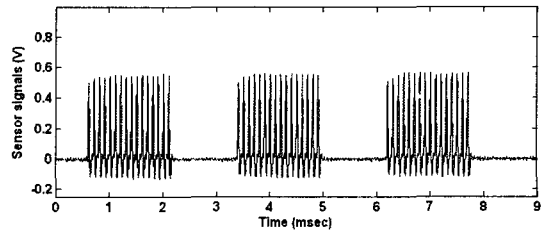
3.2 레이저 출력과 계측 신호와의 관계

일반적으로 광신호는 주변의 환경 특히 온도, 진동 그리고 조명과 같은 것에 영향을 받는다. 웨이퍼 레벨의 레이저 마킹은 반도체 공정중에 수행되며, 크린룸과 같은 주변 환경이 제어되는 곳에서 수행된다. 이 경우 광신호에 대한 계측 신호는 신뢰성과 안정성이 확보될 수 있다.

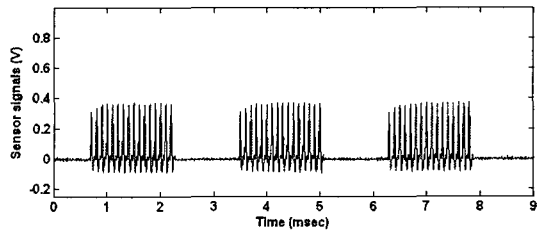
Fig. 4 는 레이저 마킹시 발생하는 플라즈마에 의해 광센서와 반응하여 계측된 신호를 보여주고 있다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 레이저가 발진하여 1 펄스에 의하여 마킹부에 점이 찍힐 때 마다 한 개의 피크점이 나타나는 신호가 발생한다. 이와 같은 점들이 연속적으로 발생하여 Fig. 2 와 같은 연속된 선을 이루어 마킹이 수행된다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 레이저의 출력이 변

함에 따라 센서의 신호도 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5, 6, 7 는 레이저 출력에 따라 발생하는 센서 신호의 피크 값의 평균과 각 펄스 신호의 합의 평균값, 그리고 각 센서의 피크 값의 평균에 대한 피크 값의 표준편차의 비를 각각 나타낸 그래프이다.



(a) laser power, 3.0 W



(b) laser power, 1.0 W

Fig. 4 Sensing signals for different powers

레이저의 파워가 커짐에 따라 재료의 입열이 커지게 된다. 그러므로 레이저와 실리콘 웨이퍼 간의 어블레이션 현상에 의해 제거되는 재료의 양이 많아지며, 이에 따른 레이저와 재료간의 상호작용(interaction)이 커지게 된다. 그리고 이에 수반된 플라즈마의 양이 커지게 되며 변화되는 플라즈마의 광 강도에 의해 센서의 계측 신호도 커짐을 알 수 있다. 그러므로 레이저의 출력이 커짐에 따라 센서의 신호가 커지며, 신호의 피크 값들이 커지며, 레이저가 조사 되는 동안에 발생하는 빛의 총 합도 커지게 된다. 그러나 피크 값의 평균에 대한 피크 값의 표준편차의 비는 작아지게 된다. 이 이유는 레이저의 출력이 커짐에 따라 레이저와 실리콘 웨이퍼간의 상호 작용이 안정적으로 발생하는 반면, 레이저의 출력이 적은 경우는 불안정한 상호작용으로 인하여 계측되는 신호는 피크값에 대해 상대적으로 표준편차의 값이 상승함을 알

수 있다.

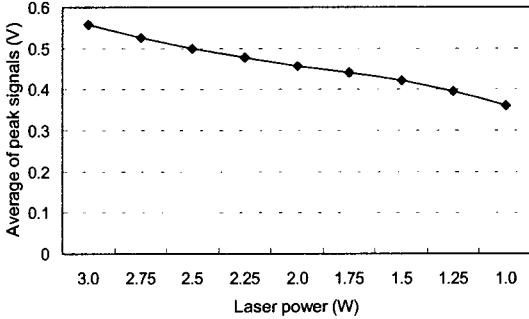


Fig. 5 Average of peak values in sensing signals according to laser powers

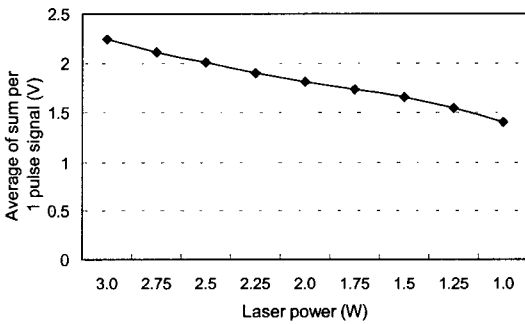


Fig. 6 Average of sum per 1 pulse signals according to laser powers

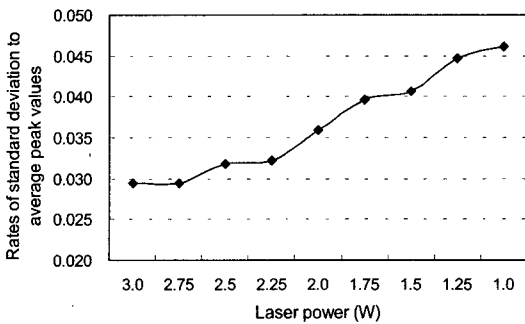


Fig. 7 Rates of standard deviations to average of peak values according to laser powers

실험결과에 의하면 레이저의 파워는 마킹 선포스와 센서 신호에 영향을 주고 있음을 밝혔다. Fig. 3 과 Fig. 5 ~ 7 에서 보면 레이저 파워가 변함에 따라 레이저와 웨이퍼 사이의 상호작용에 의한 모재의

상변화와 이에 수반된 어블레이션 메커니즘이 변화되었음을 의미하고, 이것에 의해 발생하는 광신호가 변화한다. 이에 따라 발생하는 마킹 선포스가 변화하며 센서의 신호도 레이저의 파워에 따라 일정한 관계를 얻을 수 있었다. 그러므로 센서의 신호를 이용하여 마킹부의 선포스를 예측할 수 있는 모델을 구성할 수 있다.

4. 레이저 마킹의 선포스 예측 모델

4.1 특징인자의 추출

3 장의 실험결과를 바탕으로 마킹부 선포스를 예측할 수 있는 모델을 구성하였다. 마킹부 선포스를 예측하기 위해서는 계측된 센서 신호로부터 특징인자를 추출하여야 한다. 3 장에서 보는 바와 같이 마킹부의 특징인자들은 레이저의 출력에 따라 마킹부의 선포스와 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다.

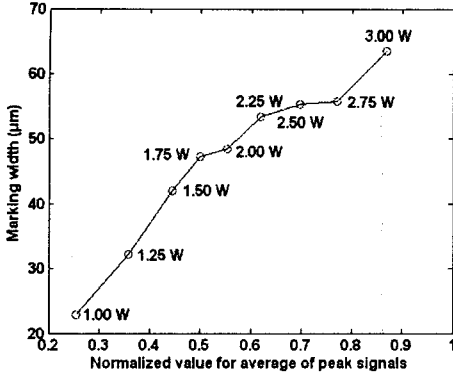
Fig. 5 ~ 7 에서 보는 바와 같이 마킹부의 특징인자들은 원 (raw) 데이터로부터 각각의 값을 계산하므로, 이를 이용하여 모델을 세우는 경우 각 값들에 의해 중요도가 변하게 된다. 그러므로 각 입력인자의 가중치를 일정하게 하기 위해서 각 특징인자를 0 ~ 1 사이의 값으로 표준화 (normalizing) 를 하여야 한다. 표준화를 위한 식은 식 (1)와 같다

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

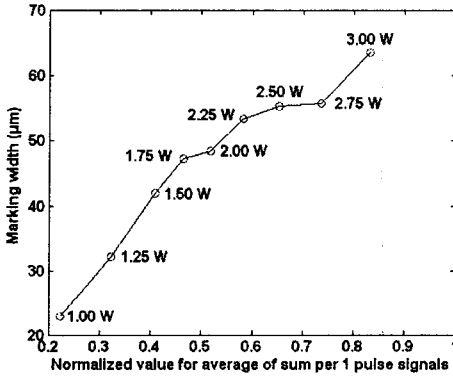
식(1) 에서 x_n 은 표준화된 특징인자이고 x 는 센서 신호로부터 얻는 특징인자의 값이다. x_{\min} 와 x_{\max} 은 미리 설정된 값이다. 레이저 출력이 0.5 W 인 경우, 아주 미세한 마킹이 이루어 지지만 그 이하의 경우에는 마킹이 이루어 지지 않으므로 본 연구에서는 x_{\min} 을 0.5 W 에서의 특징인자 값으로 하였다. x_{\max} 은 사용된 레이저의 최대 출력인 3.4 W 에서의 특징인자 값으로 설정하였다. 각 특징인자의 x_{\min} 와 x_{\max} 은 Table 1 과 같다.

식 (1)을 이용하여 구한 표준화된 특징인자의 값과 이에 따른 레이저 마킹의 선포스간의 관계를 Fig. 8 에 나타내었다. 각 신호와 마킹 선포스는 레이저 출력에 따라 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 그러므로 마킹 선포스를 예측하는 인자로서 각 표준화된 특징 인자가 유효한 인자임을 알

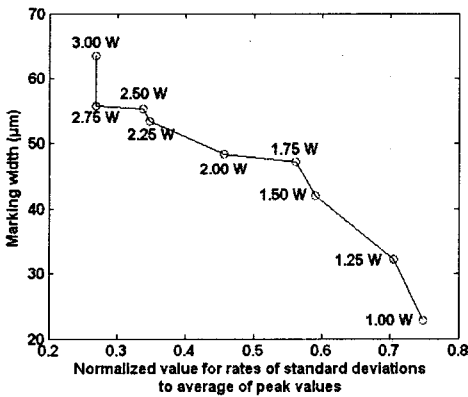
수 있다.



(a) Average of peak signals



(b) Average of sum per 1 pulse signals



(c) Rate of standard deviation to average of peak values

Fig. 8 Relationship between marking width and normalized feature values

Table 1 Each feature value for normalizing in equation

	Average of peak value (V)	Average of sum per 1 pulse (V)	Rates of standard deviations to average of peak values
x_{max} (laser power = 3.4 W)	0.6112	2.426	0.055
x_{min} (laser power = 0.5 W)	0.2912	1.0551	0.02

4.2 다중 선형 회귀 모델

4.1 절에서 언급한 센서의 표준화된 특징인자와 3 장에서 실시한 실험의 결과를 이용하여 레이저 마킹부 모니터링 신호를 이용한 마킹부 선폭 예측모델을 구성하였다. 6 개의 반복 실험 중 5 개는 회귀분석의 식을 구하는 데 이용하였고 나머지는 구하여진 회귀식을 검증하는데 이용하였다. 1 개의 실험당 총 9 개의 라인을 얻을 수 있다. 이중 같은 줄에 있는 3 개를 하나의 세트 (set)로 1 개의 데이터로 처리하였다. 그러므로 1 회의 실험당 3 개의 데이터 세트를 추출하여 내었다. 그래서 총 135 개의 데이터를 이용하여 회귀식을 구하였고, 27 개의 데이터를 이용하여 얻어진 회귀식을 검증하였다.

회귀식의 입력 인자로는 표준화된 1 펄스당 신호 함의 평균과 피크값의 평균값, 그리고 피크값의 표준편차와 평균값의 비로 설정하였고 각각을 x_1, x_2, x_3 로 나타내었다. 출력 인자로는 마킹부의 선폭으로 설정하였으며 이것은 \hat{y} 로 나타내었다. 입력 인자와 출력인자간의 관계를 다중 선형 회귀 모델 (multiple linear regression model)을 식 (2) 와 같이 구성하였다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (2)$$

위의 식에서 각각의 $\beta_0, \beta_1, \beta_2,$ 와 β_3 는 y 축 절편과 각 입력인자간의 계수로서 최소제곱법 (least mean square)의 방법으로 구하여진다. 각 계수의 값은 Table 2 와 같다. 각각의 입력 인자가 모두 표

준화되었으므로 위의 계수는 각 입력인자가 출력 인자에 미치는 영향력으로 판단할 수 있다. Table 2 에서 보는 바와 같이 입력 인자 중에서 피크의 평균값이 1 차 회귀모델에서는 가장 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Table 2 Coefficients for multiple linear regression model

β_0	β_1	β_2	β_3
26.01	6.34	43.05	-12.23

Fig. 9 는 회귀모델의 예측 성능을 보여주는 그림이다. Fig. 9 에서 x 축은 실제 계측을 통해 얻어진 마킹부 선폰을 y 축에는 식 (2)를 통하여 얻어진 회귀 모델의 예측 결과를 나타내고 있다. 실측된 레이저 마킹 선폰과 예측된 마킹 선폰 간의 선행적 비교를 보여주고 있다. 회귀 데이터에 대해서 1 차 회귀모델은 중간 부분에서는 실측치 보다 약간 낮게 그리고 끝 부분에서는 실측치 보다 약간 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 1 차식에 의한 분석이므로 입력변수에 대해 비선형적인 선폰을 갖는 결과에 대해서는 예측성능이 약간은 떨어진다고 볼 수 있다.

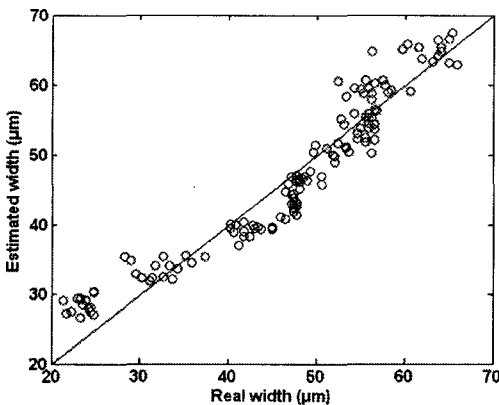


Fig. 9 Results of multiple linear regression model with regression data

Fig. 10 에서 회귀모델을 만드는데 사용하지 않았던 새로운 27 개의 데이터를 이용하여 예측 성능을 평가하였다. 이 경우도 회귀 데이터와 마찬가지로

로 가운데 구간에서는 약간 실측치 보다 낮게 끝의 구간에서는 실측치 보다 높게 예측하고 있다.

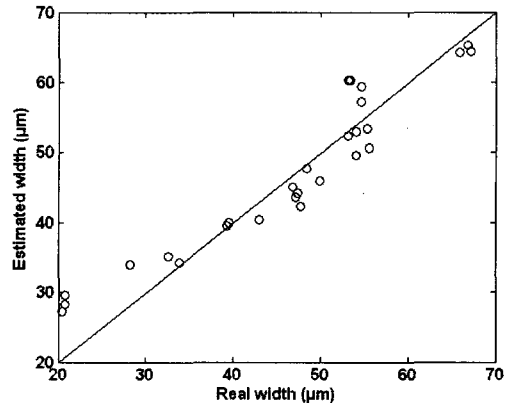


Fig. 10 Results of multiple linear regression model with evaluation data

다중 선형회귀 모델의 유의성을 판단하기 위해 분산분석 (analysis of variation : ANOVA)을 수행하였다. 분산분석의 결과는 Table 3 과 같다. Table 3 에서 DOF 는 자유도 (degree of freedom) 의 약자이고, SS 는 제곱합 (sum of square), MS 는 평균 제곱 (mean square) 의 약자이다. F_0 는 회귀의 평균 제곱에 대한 잔차의 평균제곱 비로서 F_0 의 값이 크면 클수록 회귀식의 정도(precision)가 좋다고 말할 수 있다. $F(0.05)$ 는 유의 수준 95% 에 대한 F-검정의 기각치 (critical value)로 F_0 가 $F(0.05)$ 보다 작은 경우 위의 회귀식은 95% 유의 수준에 대해 회귀 모델이 유의 하지 않음을 보여 준다. Table 3 에서는 F_0 가 $F(0.05)$ 보다 매우 크므로 다중 선형 회귀 모델이 입력변수에 대하여 출력 변수의 관계를 잘 설명해 주고 있다고 표현 할 수 있다.

Table 3 ANOVA of multiple linear regression model

	DOF	SS	MS	F_0	$F(0.05)$
Regression	3	17492.8	5830.9	464.9	1.26E-69
Residual	131	1642.7	12.5		
Total	134	19135.5			

4.3.2 차 다항 회귀 모델

다중 선형회귀 모델과 같은 방법으로 2 차 다

항회귀식모델 (2nd order polynomial regression model) 을 구하였다. 구성된 회귀식은 식 (3)와 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_1 x_2 + \beta_5 x_1 x_3 + \beta_6 x_2 x_3 + \beta_7 x_1^2 + \beta_8 x_2^2 + \beta_9 x_3^2 \quad (3)$$

각 계수의 값은 Table 4 와 같다. 각 입력인자가 출력인자에 미치는 영향력으로 피크의 평균값과 1 펄스당 신호 합 의 평균의 곱과 피크의 평균값과 1 펄스당 신호 합 의 평균의 제곱이 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Table 4 Coefficients for 2nd order polynomial regression model

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
-15.41	255.42	-108.45	29.89	-2892.31
β_5	β_6	β_7	β_8	β_9
-284.41	227.48	1229.85	1596.61	-20.01

Fig. 11 은 회귀모델을 구하기 위해 사용된 데이터를 이용하여 2 차 회귀모델의 예측성과 실제 측정된 값과 예측된 선폭 간의 선형적 비교를 한 그림이다. 회귀 데이터에 대해서 2 차 회귀모델은 1 차 회귀모델과는 달리 2 차항을 포함하고 있기 때문에 대체적으로 예측 성능이 좋음을 알 수 있다.

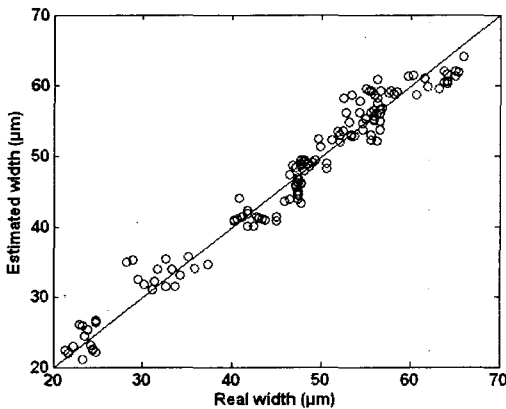


Fig. 11 Results of 2nd order polynomial regression model with regression data

Fig. 12 는 회귀모델을 구하는데 사용하지 않는 검증 데이터를 이용하여 예측 성능을 평가한 것을 보여주고 있다. 이 모델의 경우는 선폭이 큰 구간 다시 말하면 레이저 출력이 큰 구간에서는 약간 예측성능이 저하됨을 알 수 있다.

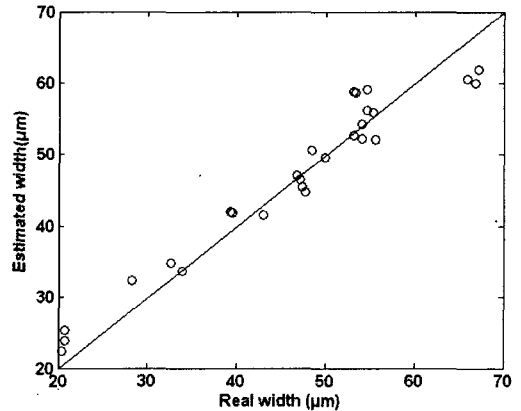


Fig. 12 Results of 2nd order polynomial regression model with evaluation data

2 차 다항 회귀 모델의 유의성을 판단하기 위해 분산분석표를 이용하여 F-검정을 수행하였다. 분산 분석의 결과는 Table 5 와 같다. Table 5 에서는 F_0 가 $F(0.05)$ 보다 매우 크므로 2 차 다항 회귀 모델은 매우 유의하며, 입력변수에 대하여 출력 변수의 관계를 잘 설명해 주고 있다고 표현 할 수 있다.

Table 5 ANOVA of 2nd order polynomial regression model

	DOF	SS	MS	F_0	$F(0.05)$
Regression	9	18435.6	2048.4	365.8	2.6E-85
Residual	125	699.9	5.59		
Total	134	19135.5			

4.4 다중 비선형 회귀 모델

다중 선형회귀 모델과 2 차 다항 회귀 모델 1 차, 2 차 회귀모델과 같은 방법으로 다중 비선형 회귀식 (multiple nonlinear regression model) 을 구하였다. 구성된 회귀식은 식 (4)과 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 \quad (4)$$

각 계수의 값은 Table 6 와 같다. 각 입력인자가 출력인자에 미치는 영향력으로 피크의 평균값을 자연 로그 취한 값이 가장 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Table 6 Coefficients for multiple nonlinear regression model

β_0	β_1	β_2	β_3
67.61	-2.725	31.83	-0.17

Fig. 13 은 회귀모형을 구하기 위해 사용된 데이터를 이용하여, 예측 성능과 선형적 비교한 것을 보여주고 있다. 회귀 데이터에 대해서 다중 비선형 회귀 모델은 기본적으로 비선형 모델이므로 비선형적 경향이 강한 마킹 선포에 대해 대체적으로 예측 성능이 좋음을 알 수 있다.

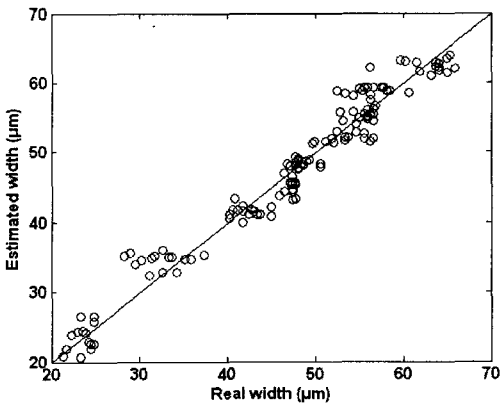


Fig. 13 Results of multiple nonlinear regression model with regression data

Fig. 14 에서 회귀모형을 만드는데 사용하지 않은 새로운 데이터를 이용하여 예측 성능을 평가하여 보았다. 이 경우는 선포이 큰 구간 다시 말하면 레이저 출력이 높은 구간에서는 약간 예측성능이 저하됨을 알 수 있다.

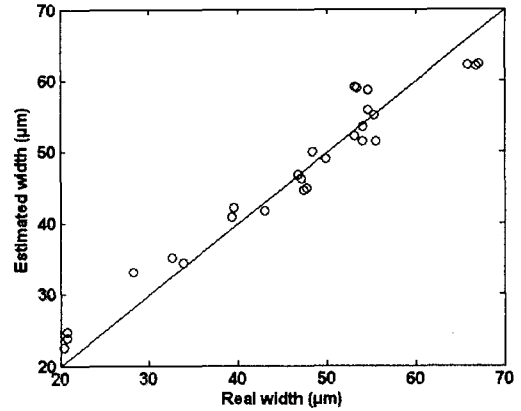


Fig. 14 Results of multiple nonlinear regression model with evaluation data

다중 비선형 회귀 모델의 유의성을 판단하기 위해 분산분석을 수행하였다. 분산분석의 결과를 통한 F 검정을 Table 7 과 같이 수행하였다. Table 7 에서 보는 바와 같이 F_0 가 $F(0.05)$ 보다 매우 크므로 다중 비선형 회귀 모델이 유의 함을 알 수 있다.

Table 7 ANOVA of multiple nonlinear regression model

	DOF	SS	MS	F_0	$F(0.05)$
Regression	3	18377.0	6125.6	1057.9	1.35E-91
Residual	131	758.5	5.8		
Total	134	19135.5			

4.5 각 회귀 모델의 성능 평가

일반적으로 회귀모델의 정도(precision)는 분산 분석에 의한 F 검정, 결정계수, 잔차평균제곱과 같은 것으로 사용되고 있다.¹² 본 연구에서 작성한 각 회귀모델은 분산분석의 결과 모든 회귀모델이 유의 함을 알 수 있다. 그러므로 각 회귀모델에 있어서 정량적인 평가를 위해 구성된 모델의 예측값의 평균 오차율 (average error rate)을 이용하여 각 모델의 성능을 비교 하였다. 이것은 식 (5)와 같이 구하여지며, 0 에 가까울수록 모델의 예측성능이 좋다.

$$AER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (5)$$

여기서 AER 은 평균 오차율이고, n 은 실험의 수 혹은 검증 데이터의 수이다. i 는 데이터의 번호이다. y 는 측정 데이터값이고 \hat{y} 는 각 모델에 의해 예측된 값이다.

Table 8 은 회귀 데이터에 대한 평균 오차율과 검증 데이터에 대한 평균 오차율을 보여 주고 있다. 회귀 모델중에서 회귀 데이터에 대한 평균 오차율은 2 차 회귀 모델이 가장 성능이 좋았으며, 다중 선형 회귀모델이 가장 그 성능이 떨어졌다. 그러나 회귀 데이터가 아닌 임의의 데이터가 입력이 되었을 때는 다중 비선형 회귀 모델이 가장 좋을 수 있었다. 그러나 두 모델의 경우에 있어서 평균 오차율의 차이가 0.002, 그리고 0.001 정도의 차이이므로 거의 비슷한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3 에서 보는 바와 같이 선펋은 레이저의 출력에 대해 약간은 비선형 적으로 증가하는 형태를 보이고 있으나 Fig. 5, 6, 7 의 계측 신호는 레이저 출력에 대해 거의 선형적인 관계를 보이고 있으므로 비선형적인 선펋을 1 차의 선형회귀 모델로 예측하는데는 한계가 있다. 그러므로 1 차 선형모델 보다 비선형 입력 변수가 있는 2 차 다항 모델과 다중 비선형 모델이 더 우수한 예측 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 8 Average error rate for each estimation model

	multiple linear regression model	2nd order polynomial regression model	multiple nonlinear regression model
regression data	0.073	0.042	0.044
evaluation data	0.097	0.064	0.063

5. 결론

레이저 마킹에서 실시간으로 품질에 대한 확신은 생산성의 극대화와 효율의 극대화에 있어서 매우 중요하다. 레이저 마킹 모니터링을 위한 계측 시스템으로는 웨이퍼 레벨의 레이저 마킹시 발생되는 어블레이션(ablation) 현상에 의한 플라즈마에

서 발생하는 빛을 포토다이오드를 이용하여 계측하였다. 레이저 마킹은 빠른 속도로 진행하므로 레이저 마킹 부분과 계측 부분을 일치시키기 위해 동축에서 계측하였다.

또한 마킹 조건에 따른 마킹부의 선펋과 센서 신호와의 관계를 규명하였다. 레이저의 출력에 따라 마킹부의 선펋이 커지며 이에 따른 레이저와 웨이퍼간의 상호작용이 상대적으로 크게 발생한다 이것은 광센서의 신호로 계측되며 이들간의 상관 관계를 실험을 통해 규명 하였다.

실험에서 얻은 결과를 이용해 마킹부 품질을 대표할 수 있는 인자인 선펋을 예측할 수 있는 통계적인 회귀모델을 구하였다. 모델로는 다중 선형 회귀 모델, 2 차 다항 회귀 모델, 다중 비선형 회귀 모델을 이용하였다. 각 회귀모델의 유의성을 판단하기 위하여 분산분석을 이용하여 검증하였고 모든 회귀 모델이 유의함을 알 수 있었다. 또한 선펋 예측의 정밀도를 정량적으로 판단하기 위해 각 모델에 대한 평균 오차율을 구하였고, 이 결과 2 차 다항 회귀 모델, 다중 비선형 회귀 모델이 우수한 예측 성능을 보이고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Chan, C. L. and Mazumder, J., "One-dimensional Steady-state Model for Damage by Vaporization and Liquid Expulsion due to Laser-material Interaction," Journal of Applied Physics, Vol. 62, No. 11, pp. 4579 - 4586, 1987.
2. Kar, A. and Mazumder, J., "Two-dimensional Model for Material Damage due to Melting and Vaporization during Laser Irradiation," Journal of Applied Physics, Vol. 68, No. 8, pp. 3884 - 3891, 1990.
3. Modest, M. F., "Three-dimensional, Transient Model for Laser Machining of Ablating/Decomposition Materials," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, No. 2, pp. 221 - 234, 1996.
4. Zhou, B. H. and Mahdavian, S. M., "Experimental and Theoretical Analyses of Cutting Nonmetallic Materials by Low Power CO₂-laser," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 2, pp. 188 - 192, 2004.

5. Miyamoto, I., Asada, S., Sano, T. and Ohmura, E., "High Speed Drilling of Thin Silicon Wafer by UV Laser," Proceeding of ICALEO 2001, M602, 2001.
6. Gu, B., "Laser Wafer Marking at Die Level," Proceeding of ICALEO 2001, M408, LMF Section D, pp. 54 - 58, 2003.
7. Sun, A., Kannatey-Asibu, E. and Gartner, M., "Sensor Systems for Real-time Monitoring of Laser Weld Quality," Journal of Laser Applications Vol. 11, No. 4, pp. 153 - 168, 1999.
8. Tu, J. F., Lankalapalli, K., Leong, K. H. and Gartner, M., "On-line Estimation of Laser Weld Penetration," Transactions ASME Journal of Dynamic Systems, Vol. 119, pp. 791 - 801, 1997.
9. Park, H. and Rhee, S., "Estimation of Weld Bead Size in CO₂ Laser Welding by Using Multiple Regression and Neural Network," Journal of Laser Applications, Vol. 11, No. 3, pp.143 - 150, 1999.
10. Bae, H. J. and Park, H. S., "Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 52 - 59, 2004.
11. Song, G. Y., Moon, H. Y., Park, B. G., Kim, S. C. and Lee, E. S., "A Study on the Tool Temperature Estimation for Different Cutting Conditions in Turning Using a Statistical Method," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 11, pp. 96 - 102, 2002.
12. Park, S. H., "Design of experiment," Minyoungsa, pp. 227 - 273, 2003.