

Nd:YAG 레이저의 공정변수가 스텐실 절단면에 미치는 영향

Influence of process parameters on cut edges of stencil by Nd:YAG laser

한국기계연구원 레이저기술연구그룹 이제훈, 서정, 김정오
경북대학교 기계공학과 신동식*

I. 서론

스텐실은 PCB 기판상에 전도성 회로를 제작하기 위하여 페이스트를 도포하는 공정에 필수적으로 사용되어 지는 패턴이 형성된 마스크이다. 스텐실은 일반적으로 스텐레스 박판에 포토리소그래피 공정을 이용하여 패턴을 형성한 후에 부식 공정으로 재료를 제거하여 제작되어 진다^{1),2)}. 이러한 화학적 공정은 최근 환경문제가 크게 대두됨에 따라 환경친화적인 공정으로의 대체가 시급히 요구되고 있는 실정이다. 레이저를 이용한 스텐실 제작 공정은 정밀 절단에 의하여 패턴이 제작되기 때문에 공정이 기존의 방식과 비교하여 매우 단순하며, 환경친화적인 공정으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 스텐실 제작시의 주요 공정 변수들이 절단면의 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 신경회로망 이론을 이용하여 절단 특성을 예측함으로써 최적의 가공 조건을 산출하는데 기여하고자 하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 사용된 재료는 스텐실 제작용 스텐레스 강판(SS304-0.15t)를 사용하였으며, 레이저는 TEM₀₀ mode의 Nd:YAG 펄스 레이저를 사용하였다. 광학계는 초점거리 40mm인 절단헤드를 사용하였다^{2),3)}. 주요 공정 변수로는 레이저 출력, 펄스 반복율, 펄스폭 그리고 절단 가스압을 들 수 있으며 실험조건은 Table 1과 같다. 또한 절단면 측정은 표면거칠기(Surface roughness)를 중심으로 하였으며 비접촉식 3차원 광학 조도측정기를 사용하였다.

실험을 통해 측정된 값은 신경회로망 학습이론(Neural network)에 의거하여 표면 거칠기를 학습하였으며 임의의 입력조건에 대한 예측값과 실제 실험값을 비교하였다. 신경회로망으로는 오차역전파 함수(Error Back-Propagation)^{4),5),6)}를 사용하였으며 Table 1의 조합된 변수를 Table 2의 조건으로 학습하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

본 실험은 출력에 따른 절단성을 규명하기 위해 출력을 4W에서 32W 까지 변화

시키면서 실험하였다. Fig. 1은 출력에 따른 절단폭이며 Fig. 2는 출력에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과로서 출력이 증가함에 따라 표면거칠기가 줄어 들었으나 임계값을 넘으면 다시 증가함을 알 수 있다. 이는 저출력 영역에서는 좁은 절단폭과 용융액의 높은 표면 장력으로 인하여 용융액이 절단하부로 원활히 분출되지 않았으며 이때 절단부 하단에 응고되어 드로스를 형성하는 부분도 발생한 반면, 고출력영역에서는 용융면적이 넓어 지면서 용융액이 전부 제거 되지않고 하부에 재응고 되었으며 절단면의 줄무늬가 조대해지는 현상이 발생하였다. 이때 적정출력은 24W로서 표면거칠기 $1.03\mu\text{m}$, 절단폭 $78\mu\text{m}$ 를 나타내었다.

이러한 표면거칠기를 향상시키고 절단폭을 감소하기 위하여 Fig. 3의 마스크를 사용하여 실험하였다. Fig. 3의 마스크는 레이저 빔 가장자리의 불균일하고 낮은 출력밀도 영역을 차단하여 열영향부와 부분 표면 용융을 감소시키는 역할을 한다.

Fig. 4는 마스크에 따른 표면거칠기를 나타낸 것으로서 사각 마스크가 직선 구간에서 중심선 평균거칠기(Ra)가 $0.858\mu\text{m}$ 로서 가장 우수하였다. 그러나 실제 가공에서의 다양한 형상 절단을 고려하여 호환성이 뛰어난 원형 마스크를 선정하여 실험하였으며 이때의 표면거칠기는 $0.985\mu\text{m}$ 이다.

절단가스의 동적 에너지는 슬래그의 제거에 큰 영향을 미치고 있다. 가스의 속도 및 비중이 클수록 용융된 모재에 닿는 모멘텀(Momentum) 및 가스의 견인력이 커져 슬래그의 제거에 영향을 준다¹⁾. Fig. 5는 가스압에 따른 표면조도로서 4bar에서 16bar 까지 변경해가며 실험한 결과 12bar에서 $0.643\mu\text{m}$ 로서 가장 낮은 표면 조도를 나타내었으며 이는 가스압이 상승함에 따라 용융모재가 원활히 제거되었음을 알 수 있다.

본 실험에서는 절단속도에 따른 절단성을 평가하기 위해 절단속도를 0.5m/min에서 2.0m/min까지 변화시키며 실험을 하였다. Fig. 6은 절단속도에 따른 표면 거칠기를 나타낸 것으로 실험범위내의 조건에서는 저속일수록 표면거칠기가 우수함을 알 수 있으며 0.5m/min에서 표면거칠기는 $0.649\mu\text{m}$ 를 나타내었다. 절단속도가 빠르면 용융금속이 절단부에서 제거된 흔적이 뚜렷히 남게되어 결국 표면거칠기가 저하되는 결과를 낳는다. 즉 이때 온도구배가 너무 급격하게 형성되어 응고가 그만큼 빠르게 되어 표면장력으로 인한 보상이 이루어지지 않게 된다⁷⁾.

펄스폭(Pulse width)이 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 절단속도의 영향 분석 실험에서 도출된 조건하에서 펄스폭을 0.09ms에서 0.17ms 까지 변화시키며 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 펄스폭에 따른 절단면의 표면 거칠기로서 펄스폭이 증가함에 따라 포물선 형상을 보여주고 있다. 절단부는 높은 침투출력(Peak Power)에서는 큰 온도구배를 가지는 용융부가 순간적으로 분출되면서 깊은 골을 형성하였으며 낮은 침투출력에서는 깊은골은 형성되지 않았으나 용융물의 흐름방향이 일정하지 않고 상대적으로 불규칙적이었다. 본 실험에서 펄스폭 0.14ms에서 표면조도 $0.597\mu\text{m}$ 그리고 절단폭은 $78\mu\text{m}$ 를 나타내었다. Fig. 8은 본 실험에서 도출된 적정변수를 이용해 제작

한 샘플로서 양호한 품질의 제품을 제작할 수 있었으며 스텐실뿐만 아니라 다양한 분야의 정밀가공도 가능함을 보여주고 있다.

임의의 조건에서 표면 거칠기를 예측하기 위한 방법으로 신경회로망 학습법⁶⁾을 이용하였으며 100만 번의 학습을 통한 최종 오차에너지(Error Energy) 0.0054를 나타내었다. Fig. 9는 위의 학습을 통해 얻을 수 있는 연결강도와 미학습 입력변수의 행렬곱 즉, 예측값(Prestimated value)과 실제 측정값(True value)값과 비교한 결과로서 측정값의 83%가 신경회로망에 의한 예측값과 비교하여 0.2 μ m이내의 오차를 나타내고 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기존의 스텐실 제작 공정인 부식공정을 Nd:YAG 레이저를 이용한 정밀 절단 공정으로 대체하기 위하여 레이저 절단 공정의 주요 변수들이 절단 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 주요 공정 변수로는 레이저 출력, 펄스 반복율, 펄스폭, 절단 속도 그리고 절단 가스압이 있으며, 이들이 절단면의 표면 거칠기에 미치는 영향을 실험 결과를 통하여 분석하였다. 또한, 신경회로망 이론을 접목하여 최적의 공정 조건을 예측할 수 있는 가능성을 제시하였으며 실험 결과와 비교 분석하였다.

참고문헌

1. 신동식, 이제훈, 한유희, 이영문: Nd:YAG 레이저를 이용한 스텐실 절단 공정, 한국레이저가공학회지, Vol. 3, No. 3, pp. 13~19, 2000
2. 이제훈: "PCB 제작에의 레이저 응용기술", Workshop 발표자료, 한국기계연구원, 2001
3. 이제훈, 신동식, 김정오, 이영문: Nd:YAG 레이저를 이용한 스텐실 제조 공정의 절단폭 예측, 한국레이저가공학회 추계학술발표대회 개요집, 11. 2000
4. Simon Haykin, "Neural Networks": Prentice Hall International Editions, pp.161~175, 234~230, 751~756, 1999
5. S.Y.kung, "Digital Neural Networks": Prenticehall international, Inc., pp. 184~192, 1993
6. 이현엽, 문경일: "MATLAB을 이용한 퍼지뉴로", 아진, pp. 245~281
7. 한유희: 레이저 절단, 한국레이저가공학회지, Vol. 2, No. 1, 1999

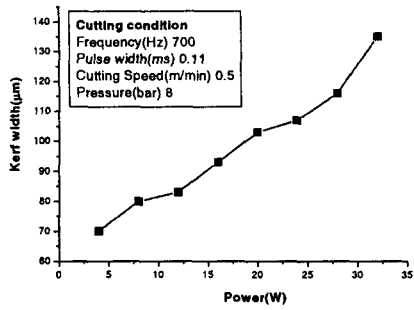


Fig. 1. Kerf width as a function of laser power.

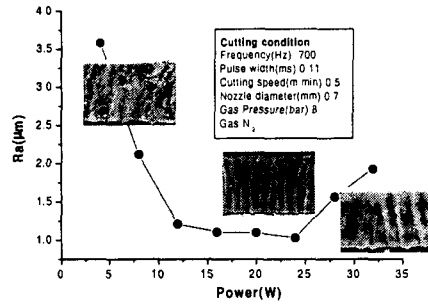


Fig. 2. Cut edge roughness as a function of laser power

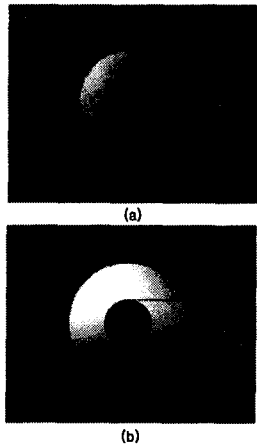


Fig. 3. Photos of (a)circular, (b)quadrangular mask.

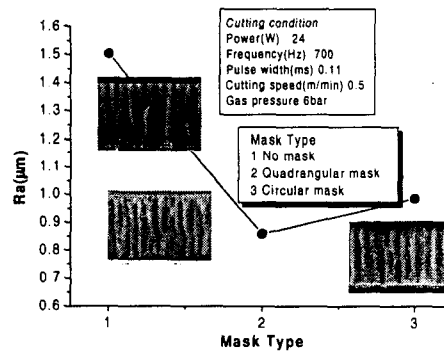


Fig. 4. Effect of different mask type on cut edge roughness.

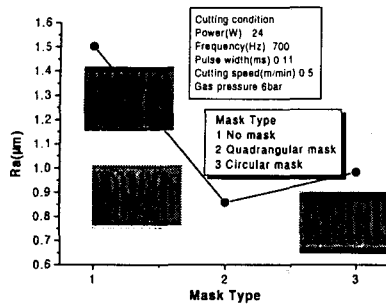


Fig. 5. Cut edge roughness as a function of cutting gas pressure.

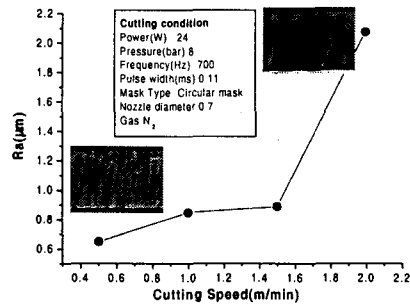


Fig. 6. Cut edge roughness as a function of cutting speed.

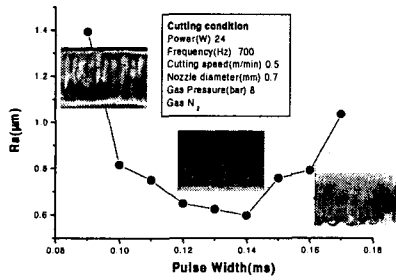


Fig. 7. Cut edge roughness as a function of pulse width.

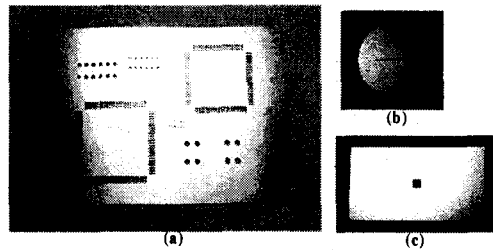


Fig. 8. Samples with optimal conditions (a) Stencil, (b)Optical slit, (c)Mask.

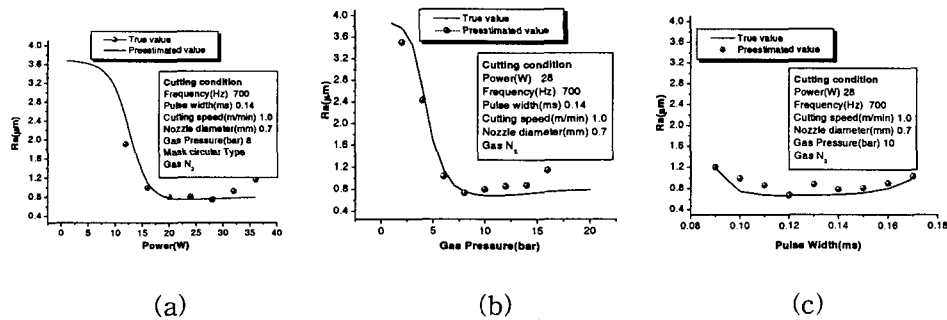


Fig. 9. Comparison of preestimated value and true value on variation of (a)Power, b)Gas pressure, c)Pulse width

Table 1. Experimental conditions.

| Parameter | value |
|----------------------------------|---|
| Gas Pressure(bar)-N ₂ | 2~16 |
| Frequency(Hz) | 700 |
| Nozzle gap(mm) | 0.1 |
| Mean Output Power(W) | 4~32 |
| Pulse width(ms) | 0.09~0.17 |
| Cutting speed(m/min) | 0.5~2 |
| Mask type | No mask Circular mask Quadrangular mask |

Table 2. Learning conditions.

| Parameter | Value |
|-------------------------------|--|
| Number of hidden layer | 2 |
| Weight | W _{ki} (20×6), W _{jk} (17×21) W _{ij} (1×18) |
| Learning rate (initial,final) | (0.2, 0.05) |
| Momentum (initial,final) | (0.1, 0.05) |
| Number of learning | 1000000 |

Table 3. Optimum conditions of thin stainless steel(SUS304-0.15t) cutting.

| Input | | Output | | |
|----------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------|
| Parameter | value | Roughness (μm) | Kerf width (μm) | Dross level |
| Gas Pressure(bar) | 8 | 0.597 | 78 | 1 |
| Frequency(Hz) | 700 | | | |
| Nozzle gap(mm) | 0.1 | | | |
| Mean Output Power(W) | 24 | | | |
| Pulse width(ms) | 0.14 | | | |
| Cutting speed(m/min) | 0.5 | | | |
| Mask type | Circular type | | | |