

# 다단메쉬 및 펄스중첩법을 적용한 펄스형 Nd:YAG의 Surfacing Process

정 종환, 홍 정환, 김 동현, 김 희제, 조 정수

## Surfacing Process of Pulsed Nd:YAG laser by using Multiple mesh and Pulse Superposition Technique

J. H. Joung\*, J. H. Hong, D. H. Kim, H. J. Kim, J. S. Cho  
Dept. of Electrical Eng. Pusan National Univ.

**Abstract** - In this study, we designed multiple mesh circuit consisting of 3-6 meshes and pulse superposition one consisting of a 3 mesh, and fabricated the electrical power supply and the single elliptical resonator. We developed the two pulse superposition technique forming the step pulseshapes of pulsed Nd:YAG laser with single shot multivibrator and 2 SCRs. Laser beam generated by multiple mesh circuit and superposition one respectively irradiated target surface to analyze process state of surface with spark and vapor. And it was obtained experimental results that all superposition meshes had common points which the best efficiency was obtained at delay time 0[μs], followed by, no superposition and obtained at delay time 250[μs].

재어를 위해 중요한 정보가 된다[5].

본 연구에서는 집중된 후의 레이저출력을 1[J/pulse], 펄스지속시간을 메쉬수에 따라 다단메쉬는 0.6-0.85[ms], 중첩메쉬는 0.15-0.2[ms]로 설정하였다. 타겟은 비교적 낮은 출력에너지로써 타겟표면을 뚜렷하게 관측할 수 있는 비금속 후막의 OHP film 을 선정하였다. 그리고, 입력에너지가 동일한 조건에서 다단메쉬 및 중첩메쉬를 구성하고 발생하는 다양한 레이저빔의 펄스형상을 성형하여 각각 타겟 상에 1샷(shot)을 조사하였다. 그리고, 더욱 명확한 현상을 파악하기 위해 3샷으로 투사하였을 경우의 펄스형상에 따른 스파크와 증발에 의한 특성을 파악하였다.

### 2. 다단메쉬 및 펄스중첩회로

#### 2.1 다단메쉬회로(multiple mesh circuit)

그림 1은 다단메쉬회로망 및 Nd:YAG 레이저의 전원회로이다. 그림 1과 같이 다단메쉬는 4 - 6단메쉬를 구성하였다. 다음은 회로망의 특성임피던스에 의해 결정되는 군사방정식을 나타내며, 이들 방정식에 따라 다단메쉬 회로를 설계하였다[3].

### 1. 서 론

본 연구의 Geusic에 의해서 최초의 Nd:YAG 레이저가 개발된 이후로 세계 여러나라에서 지속적인 연구개발이 이루어져 왔으며, 현재 이들 레이저는 다방면으로 광범위하게 이용되고 있다. 고해이저로써의 Nd:YAG 레이저는 펄스발전, 연속발전 모두 가능하며, 특히 Q스위치 YAG레이저는 IC(integrated circuit) 기판에 손상없는 패턴형성(pattern generation), 금 혹은 구리를 이용한 박막도재, 탄탈륨(tantalum)이나 니크롬을 이용한 μm단위의 박막저항을 형성할 수 있을 뿐만 아니라 도재와 도재사이 증발에 의한 갭(gap)을 넣어서 임의의 패터셔형성도 가능하다. 또한 다른 가공수단으로써는 가공하기 어려운 수 μm정도의 정밀도를 요하는 소자의 정밀가공, 마킹, Drilling, Cutting, Welding, Heat treatment 등에 크게 기여하고 있다 [1-3]. 펄스형 Nd:YAG 레이저는 시간적·공간적 코히런스 및 고정도를 가지며 매우 작은 스폿사이즈에 집중될 수 있도록 해주며, 특히 강력하고, 순간적인 극부적 열작용은 피가공물질의 결정구조와 상호작용을 일으켜 극부적인 변화를 초래한다. 이 극부적인 변화는 피가공물질의 종류, 펄스직경, 펄스지속시간, 온도에 따라 다르며, 타겟의 변형을 초래할 수 있는 스파크와 타겟으로부터의 증발을 동반한다[5]. 레이저 재료 가공에 있어서, 펄스형 레이저가공은 평균출력이 그다지 높지 않더라도 높은 피크치에 의해 펄스지속시간 동안 재료에 입사된 레이저빔의 에너지전달 효율뿐만 아니라 가공성능의 결과에 상당한 영향을 준다. 따라서, 가공현상의 세밀한 관찰, 특히 타겟상에 발생하는 현상은 더욱 우수한 가공

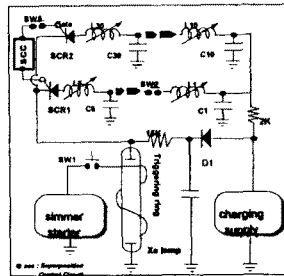


그림. 1 다단메쉬 및 Nd:YAG 레이저 전원장치

$$Z_n = (L_T / C_T)^{1/2} \text{-----(1)}$$

$$t_p = 2 \cdot (L_T \cdot C_T)^{1/2} \text{-----(2)}$$

$$C_T = t_p / 2 \cdot Z_n \text{-----(3)}$$

$$L_T = t_p \cdot Z_n / 2 \text{-----(4)}$$

$$V = (2 \cdot E / C_T)^{1/2} \text{-----(5)}$$

$$i_p = V_0 / 2 \cdot Z_n \text{-----(6)}$$

- 단,  $Z_n$ : 회로망의 특성임피던스[Ω]
- $L_T$ : 다단메쉬의 총인덕턴스[μH]
- $C_T$ : 다단메쉬의 총커패시턴스[μF]
- $t_p$ : 전류펄스폭[s], V: 충전전압[V]
- E: 플래쉬램프 입력에너지[J]
- $i_p$ : 플래쉬램프에 흐르는 최대전류[A]

## 2.2 타겟특성

그림 2에는 타겟의 형상에 관한 그림이다. 여기에서 타겟의 두께는  $90[\mu\text{m}]$ 이며, 흑색 부분은 타겟 최대의 에너지 흡수를 고려해서  $9[\mu\text{m}]$ 의 탄소카본을 부착시켰다.

- ① 타겟종류 : Overhead Projectors  
(O.H.P A4 :  $210\text{mm} \times 297\text{mm}$ )용 필름
- ② 타겟두께 :  $90[\mu\text{m}]$
- ③ 탄소카본두께 :  $9[\mu\text{m}]$

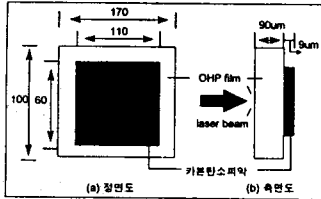


그림. 3 타겟의 특성

## 2.3 펄스중첩회로(pulse superposition network)

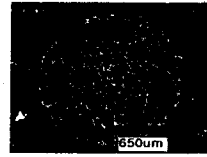
중첩하지 않았을 경우에 대한 다단계위의 가공특성적 차이점의 유무를 알기 위해 그림 1에서와 같이 주회로는 3단, 6단계위를 각각 구성하였으며, 중첩회로는 공통으로 3단계위를 구성하였다. 다단계위의 주회로에  $75[\text{J}]$ , 중첩회로에  $25[\text{J}]$ , 총  $100[\text{J}]$ 의 입력에너지로 다단계위와 동일한 입력에너지를 인가하였다. 중첩펄스는 다단계위에서 형성된 전류펄스파형 상단부에 중첩회로에서 형성한 전류펄스를 싱글 쇼트 멀티바이브레이터(single shot multivibrator : 74LS123)를 이용하여 지연시간(두개의 SCR간의 턴온신호의 시간차)이  $0, 250[\mu\text{s}]$ 가 되도록 계단형 전류펄스를 생성하였다. 중첩펄스의 지연시간을 이 두가지로 설정한 이유는  $\text{Nd:YAG}$ 의 자연방출수명 시간  $\tau_f$ 가  $230[\mu\text{s}]$ 이므로  $\tau_f$  이내에 중첩시켰을 경우와 이 시간보다 이후 즉 자연방출 시간보다 긴  $250[\mu\text{s}]$ 로 중첩시켜서 타겟에 투사했을 경우의 스파크와 증발에 의한 타겟표면의 변화특성을 비교하기 위함이다.

## 3. 표면 가공특성 비교

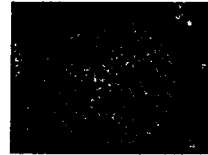
### 3.1 다단계위 상호간의 표면 특성 비교

그림 1과 같이 다단계위는 4, 5, 6단 계위를 구성하여 동일한 입력에너지  $100[\text{J}]$ 를 인가하였다. 이때, 1계위당  $80[\mu\text{F}]$ 의 커패시터와  $80[\mu\text{H}]$ 의 인덕터값을 설정하여 펄스폭 약  $0.6\text{--}0.85[\text{ms}]$ 를 얻었다. 집속렌즈로는(초점거리  $10[\text{cm}]$ , 투과율  $99.5[\%]$ )를 사용하였고, 집속된 광을 직접 타겟에 1샷 조사하였을 경우, 각각의 계위에 동일한 입력에너지를 인가하였을 때 발생하는 현상이 그림 4이다. 그림 4(a)는 4단계위, (b)는 5단계위, (c)는 6단계위로 조사한 경우에 해당하는 타겟표면의 현미경사진(대물렌즈배율 :  $\times 5$ , 대안렌즈배율 :  $\times 10$ )을 나타낸다. 그림 4에서 계위수가 증가할수록 동일한 입력에너지임에도 불구하고, 레이저빔의 직경이 각각  $1.3, 1.24, 1.14[\text{mm}]$ 로 감소함을 알 수 있으며, 레이저빔 직경이 클수록 집광된 빔 스폿사이즈가 작아지는 것을 보여주고 있다[7]. 이는 마이크로미터 단위의 정밀도를 요하는 가공에서는 매우 큰 영향을 발생시킬 수 있으므로 고려할 요소이다. 직경내의 표면크랙은 원 중심으로 갈수록 균일크랙에서 집중크랙으로 발전하는 모습을 관찰할 수 있다. 따라서, 계위 수는

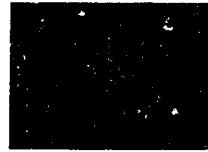
집속광의 직경, 가공표면 중심에서의 크랙밀도와는 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.



(a) 4mesh



(b) 5mesh



(c) 6mesh

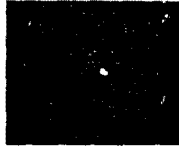
그림 4. 다단계위의 타겟표면사진

### 3.2 3단계위 및 중첩회로에 의한 표면 특성 비교

주회로의 3단계위는 1계위당  $60[\mu\text{F}]$ 의 커패시터,  $80[\mu\text{H}]$ 의 인덕터로서 펄스폭은  $0.4[\text{ms}]$ 이며, 2계의 중첩회로는 1계위당  $20[\mu\text{F}]$ 의 커패시터,  $30[\mu\text{H}]$ 의 인덕터로서 펄스폭은  $0.15[\text{ms}]$ 이며, 입력전압  $V_0=913[\text{V}]$ 를 인가한 상태에서 피가공 재질에 레이저빔을 1샷 조사한 경우의 타겟표면이 그림 5이다. 그림 5의 (a), (c)는 3단계위 상단부에 3단중첩파형의 지연시간을 각각  $0, 250[\mu\text{s}]$ 로 인가한 경우에 해당하며, 그림 (b)는 중첩하지 않고 3단계위에  $100[\text{J}]$ 의 에너지를 모두 인가한 경우이다. 그림 5에서 3단계위일 때 원 중심의 가공형태(스파크와 증발에 의한 타겟상에 발생하는 표면용융상태)를 관찰해 보면 그림 (a)의 중첩파형의 지연시간이  $0[\mu\text{s}]$  일 때 표면용융상태에 기인하는 가공효율이 가장 우수함을 알 수 있으며, 다음에는 그림 (b)의 3단 무중첩파형, 그림 (c)의 중첩파형의 지연시간이  $250[\mu\text{s}]$  순서임을 명백히 관찰할 수 있다. 이것은 같은 입력에너지임에도 불구하고, 무중첩파형보다 중첩을 시킨 것이 표면용융상태에 기인하는 효율면에서 우수하며,  $250[\mu\text{s}]$ 보다 중첩파형이 지연되면 오히려 중첩의 효과가 없어져 효율이 감소함을 가지적으로 확인할 수 있다. 또한, 그림 5(a)의 스파크와 증발에 의한 타겟은 용융된 필름(melted film)과 그 주위를 둘러싼 용융되지 않고 탄 부분(burned film)으로 구성된다.



(a) 중첩펄스의 지연시간이  $0[\mu\text{s}]$



(b) 무중첩 3단계쉬

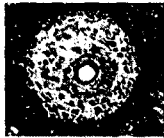


(c) 중첩펄스의 지연시간이 250[μs]

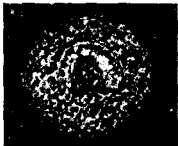
그림. 5 3단계쉬와 중첩펄스로 조사한 경우의 타겟표면

### 3.3 6단계쉬 및 중첩회로에 의한 표면 특성비교

주회로의 6단계쉬는 1메쉬당 60[μF]의 커패시터, 80[μH]의 인덕터로서 펄스폭은 0.85[ms]이며, 그때의 중첩회로는 1메쉬당 40[μF]의 커패시터, 30[μH]의 인덕터로서 펄스폭은 0.2[ms]이며, 입력전압  $V_0=646[V]$ 를 인가한 상태에서 타겟에 레이저빔을 3샷 조사한 경우의 타겟 표면상태가 그림 6이다. 그림 6은 그림 5와 마찬가지로 (a), (c)는 6단계쉬 위에 3단 중첩파형의 지연시간을 각각 0, 250[μs]로 인가한 경우에 해당되며, 그림 (b)는 중첩하지않고 6단계쉬에 100[J]의 에너지를 모두 인가한 경우이다. 그림 6에서, 6단계쉬일 때 원 중심의 가공형태를 기준으로 보면 1 샷에 비해서 더욱 뚜렷한 형상을 관찰할 수 있다. 그림 6(a)의 중첩파형의 지연시간이 0[μs]일 때 표면용융상태에 기인하는 가공효율이 가장 우수함을 알 수 있으며, 다음에는 그림 (b)의 3단 무중첩파형, 그림 (c)의 중첩파형의 지연시간이 250[μs] 순서임을 관찰할 수 있으며, 이 결과는 3단 메쉬와 동일하다. 그리고, 중첩파형의 지연 시간이 250[μs]인 타겟에서 가공효율이 가장 낮은 이유는 Nd:YAG의 자연방출 수명시간이 230[μs]이므로 이 수명시간보다 이후에 중첩시키면 자연히 상위 증위로 천이한 입자밀도가 확률적으로 기저증위의 흡수현이 입자밀도보다 감소하기 때문에 효율이 감소하게 된다.



(a) 중첩펄스의 지연시간이 0[μs]



(b) 무중첩 6단계쉬



(c) 중첩펄스의 지연시간이 250[μs]

그림. 6 6단계쉬와 중첩펄스로 조사한 경우의 타겟표면

한편, 타겟에 레이저빔이 조사되었을 때, 표면현상의 변화를 다음과 같이 관찰하였다. 레이저빔 집중시 3단계쉬의 가공표면의 크랙은 6단계쉬보다 조밀할 뿐만 아니라 밀집경이 크게 나타났다. 이것으로부터 3단계쉬는 크랙의 균일성에 기인하여 피가공재질에 거의 균일한 에너지가 필요한 가공에 적합한 것으로 추정되며, 그 중에서도 중첩파형의 지연시간  $t_d$ 가 0[μs]인 3단계쉬는 크랙의 균일성과 동시에 용융상태가 필요한 가공에 적합한 것으로 추정된다. 또한, 그림 7, 9에서 그림 (a)의 스파크와 증발에 의한 타겟은 용융된 흙(melted film)과 그 주위를 둘러싼 응축되지 않고 탄부품(burned film)으로 구성된다. 이러한 표면현상은 타겟의 직접적 용융이 필요한 가공에 적합한 것으로 추정되며, 그림 (c)는 타겟에만 영향을 미치는 가열, IC기판의 패턴형성이나 박막저항의 트리밍과 같이 작업시에는 작업대에는 거의 영향을 미치지 않는 가공에 무중첩메쉬보다도 더욱 적합한 것으로 추정된다.

## 4. 결 론

(1) 4, 5, 6단계쉬의 다단계쉬를 형성하여 0.6-0.85[ms]에 해당하는 정현파에서 구형파 펄스형상까지 여러 가지 펄스형상을 얻을 수 있었으며, 또한 다단계쉬회로에서 형성된 펄스상부에 펄스중첩법을 적용하여 형성된 펄스를 중첩시켜 여러 가지의 계단형 펄스형상을 얻을 수 있었다. 이기술은 SCR의 개수를 3개이상 사용함으로써 보다 다양한 펄스형상을 얻을 수 있으므로 향후, 가공목적에 적합한 펄스형상을 자유재로 구사할 수 있다.

(2) 중첩하지않은 경우, 4, 5, 6단의 다단계쉬에 대한 레이저빔을 직접 타겟에 1 shot 조사한 결과 메쉬수가 증가할수록 동일한 입력에너지임에도 불구하고, 레이저빔의 직경이 각각 1.3, 1.24, 1.14[mm]로 감소하였고, 직경내의 표면크랙이 원 중심으로 갈수록 균일크랙에서 집중크랙으로 발전하는 모습을 관찰할 수 있었다. 따라서, 메쉬 수는 집중광의 직경, 가공표면 중심에서의 크랙밀도와는 밀접한 관계가 있음을 가시적으로 확인 가능하였다.

(3) 3단계쉬 및 6단계쉬의 상단에 펄스중첩시켰을때, 레이저빔을 타겟에 각각 1, 3샷조사한 경우, 가공 표면 중심의 가공형태(스파크와 증발에 의해 타겟상에서 발생하는 표면용융상태)를 관찰해 보면 중첩파형의 지연시간이 0[μs]일 때 표면용융상태에 기인하는 가공효율이 가장 우수함을 알 수 있었으며, 3단 무중첩파형, 중첩파형의 지연시간이 250[μs] 순서임을 명백히 관찰할 수 있었다. 이것은 같은 입력에너지임에도 불구하고, 무중첩파형보다 중첩시킨 것이 효율이 더욱 우수하였으며, 250[μs]보다 중첩파형이 지연되었을 때 중첩의 효과가 없어 효율이 감소함을 가시적으로 확인할 수 있었다.

## [Referencel]

[1] F. Arecchi and E. Schulz-Dubois, "Laser Handbook", NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY, 1972, pp. 1579-1581, 1632-1642.  
 [2] A.L. PETROV et al., "New Advances in Industry of YAG Pulse Lasers", Science and Applications, Vol.2, pp. 993-998, 1992.  
 [3] Koehner, W., "Solid-State Laser Engineering, SpringerVerlag, New York, Heidelberg, 1996, pp. 51-52, 341-343.  
 [4] 오프로텍스社, "最先端レーザーテクノロジー集", 1990.  
 [5] Goldman, L., "Applications of the Laser", CRC PRESS, 1974, pp. 14-17, 49-52.  
 [6] 광학연구 5권, "PFN 모의를 통한 펄스형 Nd:YAG 레이저동작특성의 최적화", 전기학회논문지, 45권, 제 12호, pp. 1801-1807, 1996.  
 [7] 김 도욱, "레이저가공학", 경문사, 1990, pp. 153-156.