

펄스중첩기술을 적용한 펄스형 Nd:YAG 레이저의 효율개선

곽병구, 정종한, 이동훈, 홍정환, 김희제, 조정수
부산대학교 전기공학과

Efficiency Improvement of Pulsed Nd:YAG Laser using Pulse Superposition Technique

B.G. Kwak, J.H. Jung, D.H. Lee, J.H. Hong, H.J. Kim, J.S. Cho

(Abstract)

In this study, we designed the pulse superposition network consisting of a six-mesh and a three-mesh network, and fabricated the electrical power supply and the single elliptical resonator. We have developed a technique forming the step-pulse shape of pulsed Nd:YAG laser by using one shot multivibrator and have studied on the effect of two pulses superposition for the output and efficiency improvement of pulsed Nd:YAG laser by superposing a sinusoidal pulse on a main pulse.

1. 서 론

최근 레이저를 이용한 산업용 가공기술은 급속히 진보되어 왔으며, 정밀도나 경제성 등 여러 가지 면에서 재래식 기술을 압도하여 특히, 정밀가공 분야에서 널리 이용되고 있다. 레이저 가공은 가공면이 섬세하고 정밀하다는 것과, 국부적으로 순간가열이 가능하여 열에 예민한 피가공물의 다른 부분에 손상을 입히지 않기 위해 채 작업을 할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다[1-4].

레이저 가공에 있어서는 가공재질에 따라 같은 입력에너지가 인가되더라도, 열-물리적 상호작용의 관계로 인해 레이저 광의 펄스형상이 가공성능에 크게 영향을 미치고 있다고 보고하고 있다[5, 6].

본 연구에서는 가공재질에 따라 가공효율을 좌우할 수 있는 플래쉬램프의 전류 펄스형상 및 레이저 광 펄스의 형상을 정밀하게 제어하고 다양한 형상으로 만들 수 있는 펄스형성 기술을 개발하기 위해 다단계회로 회로망 방식을 사용하였다. 주 회로는 LC회로망으로 구성되는 6단계회로 회로망(Six-mesh network)방식으로 구성하여 펄스의 전 주기에 걸쳐 출력이 거의 동일한 0.8ms의 구형파를 얻었고, 중첩회로는 3단계회로 회로망으로 구성하여 0.2ms의 정현파를 만들었다. 주 회로에서 형성한 구형파상에 중첩회로에서 얻은 정현파를 중첩시켜 계단형의 펄스를 발생시켰다. 그리고, 중첩회로에서 얻은 정현파 형상의 중첩펄스의 지연시간(delay time)을 원샷 멀티바이브레이터(One Shot Multivibrator)를 이용하여 자유자재로 변화시키면서, 가공성능 및 가공의 질을 좌우할 수 있는 플래쉬램프의 전류 펄스형상 및 레이저 광 펄스의 형상을 다양하게 제어하였다.

2. 본 론

2.1. 전원장치 구성

그림 1은 본 연구에서 사용한 펄스형 Nd:YAG 레이저의 전원장치의 개략도이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전원장치는 크게 세는(Xe) 플래쉬램프를 예비점동시키기 위한 시머회로(simmer circuit), 시머시동기(simmer starter), 충전전원(charging power supply), 6단계회로 회로망으로 구성된 주 회로, 3단계회로 회로망으로 구성된 펄스중첩회로 및 중첩펄스의 지연시간을 자유자재로 제어하기 위한 원샷 멀티바이

브레이트(Dual retriggerable single shot multivibrator : 74LS123)로 구성된 펄스중첩 제어회로로 이루어진다. 인덕턴스 L은 큰 펄스전류가 흐를때 자기포화를 방지하기 위해 공심 솔레노이드로 제작하여 가변될 수 있도록 하였다. 트리거 방식은 플래쉬램프의 수명연장, 램프상태의 제어, 효율상승 및 인가전압의 저전압화 등 많은 이점을 가지는 시머(simmer)방식을 이용하였다[7].

회로의 개략적인 동작은 다음과 같다. 충전전원 및 시머전원에 의해 플래쉬램프 양단에 약 1kV의 직류 바이어스전압이 인가된 상태에서 시머시동기를 트리거시키면 램프에 감겨있는 트리거링(trigger ring)에 의하여 램프에 약한 스트리머방전이 유기된다. 이 상태에서 SCR1의 게이트에 트리거신호를 가하면 주 회로의 C에 저장된 충전에너지가 램프에 방전된다. SCR1의 턴온(turn on) 순간을 펄스중첩 제어회로에서 감지한 후, 일정시간 후에 SCR2의 게이트에 턴온신호를 보내게 된다. 즉, 중첩파형의 지연시간을 제어하여 임의의 지연시간 후에 중첩파형을 주파형위에 인가함으로써 원하는 형상의 계단형 펄스를 얻을 수 있다.

펄스 지속시간을 더욱 정밀하게 제어하고, 광 펄스의 상부를 평평한 형상으로 만들기 위해 다단계회로 회로망이 사용된다. 다단계회로 회로망의 주 이점은 일정파워의 긴 정상모드 레이저 펄스를 만들 수 있다는 것이다. 대부분의 다단계회로 회로망은 복합정수 전송선로(Lumped constant transmission line)인 E형 회로를 사용한다. 이 구성에서 각 메쉬의 커패시턴스 C는 동일하고, 인덕턴스 L은 거의 동일한 값을 가진다.

다음은 회로망의 특성 임피던스에 의해 결정되는 복합형 E 송전선로의 근사방정식을 나타내며, 이들 방정식의 순서에 따라 다단계회로 회로망을 설계한다[7].

$$\begin{aligned} Z_0 &= (L_T / C_T)^{1/2} & (1) \\ t_p &= 2(L_T / C_T)^{1/2} & (2) \\ C_T &= t_p / 2 Z_0 & (3) \\ L_T &= t_p Z_0 / 2 & (4) \\ V &= (2 E / C_T)^{1/2} & (5) \\ i_p &= V_0 / 2 Z_0 & (6) \end{aligned}$$

- 단, Z_0 : 회로망의 특성 임피던스
 L_T : 전 인덕턴스
 C_T : 전 커패시턴스
 t_p : 펄스폭
 V : 충전전압
 E : 램프 입력에너지
 i_p : 최대 전류

본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 주회로는 6단계회로 회로망으로 구성하여 펄스의 전 주기에 걸쳐 출력이 거의 동일한 구형파를 얻었다. 주 회로는 각 메쉬의 커패시터 $C_1 \sim C_6$ 의 값을 $60 \mu F$, 인덕터 $L_1 \sim L_6$ 의 값을 $80 \mu H$ 로 하였고, 이때 얻어진 전류 펄스파형의 펄스폭 t_p 는 $0.8ms$ 이었다. 중첩회로는 3단계회로 회로망으로 구성하여 거의 정현파 형상을 얻었다. 중첩회로는 각 메쉬의 커패시터 $C_{10} \sim C_{30}$ 의 값을 $40 \mu F$, 인덕터 $L_{10} \sim L_{30}$ 의 값을 $30 \mu H$ 로 구성하였고, 이때 얻어

진 전류 펄스파형의 펄스폭 t_p 는 0.2ms이었다.

2.2. 펄스중첩 제어회로

3단매쉬 회로망으로 구성하여 증첩회로에서 얻은 0.2ms의 정현파를 주 회로에서 형성한 구형파상에 중첩시켜 계단형의 펄스를 발생시키기 위해, 트리거 발진기인 원소 멀티바이브레이트를 사용한 펄스중첩 제어회로를 구성하였다. 그리고, 증첩회로에서 얻은 정현파 형상의 증첩펄스의 지연시간을 원소 멀티바이브레이트를 이용하여 자유자재로 변화시키면서, 가공 효율을 좌우할 수 있는 플래쉬램프의 전류 펄스형상 및 레이저 광펄스의 형상을 다양하게 제어하였다.

그림 2는 증첩회로에서 얻은 정현파 형상의 증첩펄스의 지연시간을 제어할 수 있는 원소 멀티바이브레이트의 동작파형을 나타낸다. 그림 2에서 파형 A는 SCR1의 턴온(Turn on) 신호이고, B는 SCR1의 턴오프를 감지한 후 멀티바이브레이트에서 출력되는 트리거 펄스이며, C는 트리거 펄스에 의해 제어되는 SCR2의 턴온 신호를 나타낸다. 그림 1의 회로에서 SCR1이 턴온되면 주회로의 구형파 형상의 전류펄스가 플래쉬램프에 인가되고, 펄스중첩 제어회로에서 SCR1의 턴오프를 감지하여 트리거 펄스를 출력한다. 이 트리거 펄스가 멀티바이브레이트의 다른 입력단자에 다시 입력되면, SCR2의 턴온 신호가 출력되어 최종적으로 증첩회로의 정현파 형상의 전류펄스가 플래쉬램프에 증첩되게 된다.

이 때, 주파형의 인가 후 증첩파형이 인가될 때까지의 지연시간 t_d 는 트리거 펄스의 펄스폭 T를 조정함으로써 변화시킬 수 있는데, 이것은 원소 멀티바이브레이트 외부에 가변저항과 콘덴서를 부착시킴으로써 가능하다. 본 연구에서 사용한 74LS123의 트리거 펄스폭은 다음 식과 같이 구해진다.

$$T = 0.45 R_x C_x \quad (7)$$

R_x : 외부 부하 저항값
 C_x : 외부 부하 콘덴서값

2.3. 실험 결과

그림 3은 입력에너지 E=100J, 충전전압 V=645V일 때, 입력에너지의 인가방식에 변화시키면서 관측한 플래쉬램프 구동회로의 전류 펄스파형들을 비교한 것이다. 플래쉬램프의 전류 펄스파형은 펄스 변류기(Pearson Electronics Co. Ltd.)와 디지털 오실로스코프(Lecroy 9310AM, 400MHz)를 이용하여 관측하였다. 그림에서 파형 A는 주회로의 C₁-C₆의 값을 공히 80μF로 하여 여기에 100J의 입력에너지를 모두 입력하고, 증첩회로는 동작시키지 않은 경우에 해당한다. 파형 B는 주회로의 C₁-C₆의 값은 모두 60μF, 증첩회로의 C₁₀-C₃₀의 값을 모두 40μF로 한 후, 주회로에는 75J, 증첩회로에는 25J의 입력에너지를 각각 인가한 경우의 전류 펄스파형이다. 그림 3의 B파형에서 75J에 해당하는 주파형상에 25J에 해당하는 증첩파형을 지연시간을 달리하여 임의의 시점에 부가함으로써 Nd:YAG 레이저의 출력 및 효율개선에 미치는 펄스중첩의 영향을 관찰하기 위해 반복적으로 실험을 행하였다.

그림 4는 증첩파형의 지연시간 t_d 를 변화시키면서 관측한 대표적인 전류파형을 나타낸다. 그림에서 펄스 전류파형 A, B 및 C는 지연시간 t_d 가 각각 0μs, 150μs 및 250μs인 경우에 대응한다. 단, SCR1의 턴오프를 증첩제어회로에서 감지할 때까지의 시간 및 멀티바이브레이트의 출력 지연시간 등은 작으므로 무시하였다.

그림 5는 입력에너지 E=100J에서 증첩파형의 지연시간 t_d 를 0~1ms의 범위내에서 변화시키면서 측정된 레이저 빔의 출력에너지를 나타낸다. 그림에서 증첩을 사용하지 않고 100J의 입력에너지를 모두 주회로에만 인가한 경우, 레이저 빔의 출력에너지는 약 957mJ로 나타났고, 두 펄스의 증첩에 의한 경우, 레이저 빔의 출력에너지는 약 756~1001mJ의 범위내에서 나타났다. 증첩에 의한 레이저 빔의 출력에너지는 증첩파형의 지연시간 t_d 가 약 230μs보다 큰 경우는 감소하지만, t_d 가 약 230μs보다 작은 경우 증가하는 경향을 나타내며, 증첩을 사용하지 않은 경우와 비교하면 최대 4.5%의 출력 및 효율개선이 얻어졌다.

3. 결 론

본 연구에서는 다단매쉬 회로망 방식으로 설계한 펄스형 Nd:YAG 레이저를 구성하여 플래쉬램프의 전류 펄스형상 및 레이저 광 펄스의 모양을 제어할 수 있는 펄스형성기술을 개발하였고, 증첩펄스의 지연시간 변화에 의해 얻어진 계단형 펄스의 형상에 따른 레이저 출력률 서로 비교, 검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주 회로를 6단매쉬 회로망 방식으로 구성하여 펄스의 전 주기에 걸쳐 출력이 거의 동일한 0.8ms의 구형파를 얻었고, 그 위에 증첩회로에서 얻은 0.2ms의 정현파 형상의 증첩펄스를 원소 멀티바이브레이트를 이용하여 지연시간을 자유자재로 변화시키 가며 증첩시킴으로써, 가공재질에 따라 가공효율을 좌우할 수 있는 플래쉬램프의 전류 펄스형상 및 레이저 광펄스의 모양을 다양한 형상으로 제어할 수 있는 펄스형성 기술을 개발하였다.

(2) 동일한 입력에너지를 증첩없이 인가한 경우와 증첩에 의해 계단형 펄스로 인가한 경우의 레이저 출력률 비교한 결과 증첩펄스의 지연시간이 230μs 이상이면 그 영향 손실로 인해 레이저 빔의 출력에너지는 증첩을 하지 않은 경우가 더 크게 나타났으나, 증첩펄스의 지연시간이 230μs 이내이면 레이저 출력에너지는 증첩을 사용한 경우가 더 크게 나타났다.

(3) 증첩에 의한 레이저 빔의 출력에너지는 증첩을 사용하지 않은 경우와 비교하면 최대 4.5%의 출력 및 효율개선이 얻어졌다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kenichi Iga et al., Fundamentals of Laser Optics, Plenum Press, New York and London, 1994, pp. 13-15
- [2] Donald C. O'shea et al., Introduction to Laser and Their Application, Addison-Wesley Publishing Company, 1977, pp. 256-261
- [3] Yasutomo Fujimori, "Laser Material Processing in Electric Industries", Proceeding of Lamp '92, Nagaoka, pp. 981-986, 1992
- [4] 田幸敏治 外 7人, レーザハンドブック, 朝倉書店, 1982, pp. 691-703
- [5] A. L. Petrov et al. "New Advances in Industry Application of YAG Pulse Lasers", Proceeding of Lamp '92, Nagaoka, pp. 993-997, 1992
- [6] Kayukov S. V. et al., "The influence of Laser Radiation Pulse Shape on the Spot Weld Parameters", Proc. Int. Conf. New Advance in Welding and Allied Processes, May, Beijing, China, pp. 187-191, 1990
- [7] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, 1995, pp. 48-50, pp. 114-116, pp. 341-348

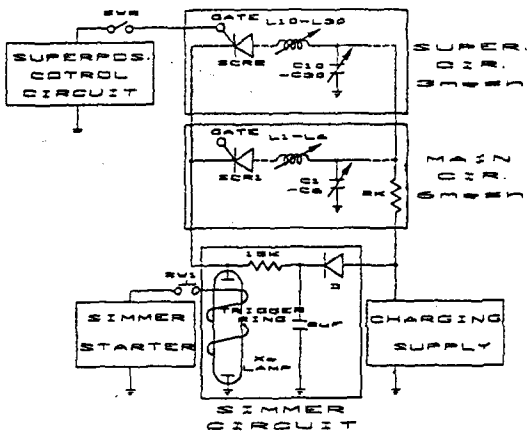


Fig. 1 The schematic diagram of two pulses superposition network

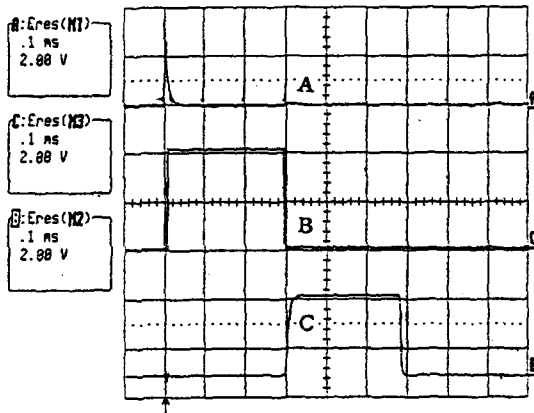


Fig. 2 The operation waveforms of the one shot multivibrator

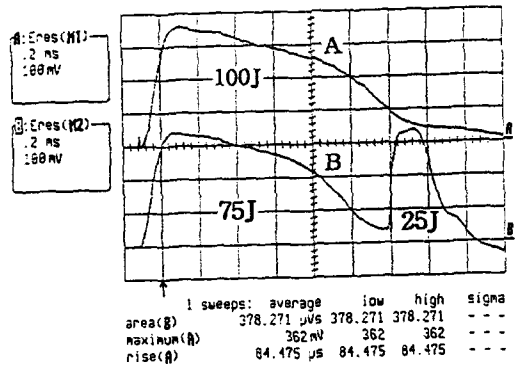


Fig. 3 The Comparison of the current waveshapes according to applied method of input energy E

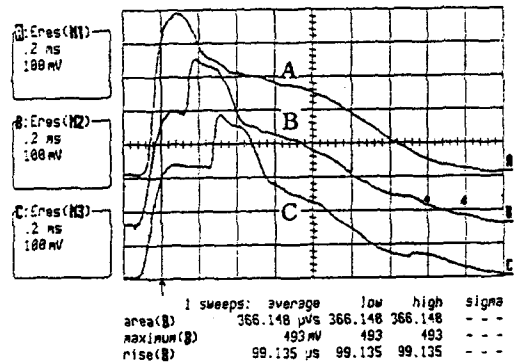


Fig. 4 Typical current waveshapes obtained as varying delay time t_a

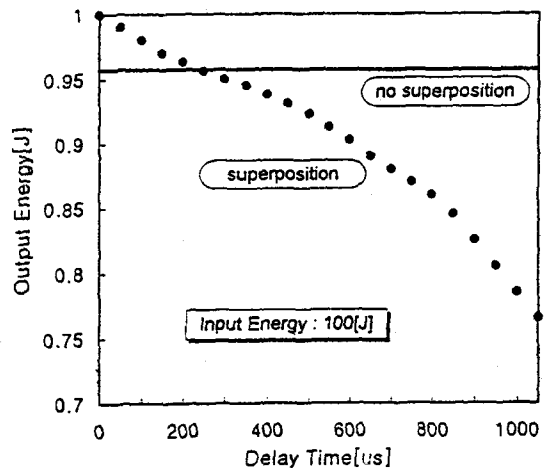


Fig. 5 The laser output measured as varying the values of delay time t_a