

ZCS공진형 컨버터를 적용한 고반복 대출력 펄스형 Nd:YAG 레이저 전원장치 개발

조기연 김은수 변영복 김희제* 박점문** 이현우**
한국전기연구소 부산대학교* 경남대학교**

Development of high repetition rate and high power pulsed Nd:YAG laser power supply using ZCS resonant converter

K.Y. Joe, E.S. Kim, Y.B. Byun, H.J. Kim*, J.M. Park**, H.W. Lee**
(KERI, Busan Univ*, Kyungnam Univ**)

<Abstract>

Zero current switching(ZCS) series resonant converter is used to control laser power density in a pulsed Nd:YAG laser power supply. The high power and high repetition rate pulsed Nd:YAG laser is designed and fabricated to control current pulse width and pulse repetition rate in the double elliptical laser oscillator. In order to find out operational characteristics of pulsed Nd:YAG laser, the electrical properties of driving power supply and laser output power are investigated and experimented by changing of the current pulse width from 200μS to 350μS(step 50μS) and pulse repetition range of 500pps (pulse per second) to 1150pps. From that result, we obtained maximum efficiency of 1.83% and maximum laser output of 220W at the condition of 350 μS and 1150pps with one Nd:YAG rod, and obtained that of more than 400W with two laser head connecting series.

1. 서론

회토류 원소인 Nd(Neodymium)의 3가 이온을 YAG(Yttrium Aluminum Garnet : $Y_3Al_5O_12$) 결정에 도우평시킨 Nd:YAG 레이저는 현재 최초로 레이저 작용이 발견된 투비 레이저와 함께, 고체 레이저의 주류를 이루고 있다.

열전도율이 높고, 기계적, 광학적으로 안정된 Nd:YAG 결정을 이용한 YAG 레이저는 CO_2 레이저에 비하면 파장이 짧으므로 보다 적은 점으로 집광시킬 수 있다. 또 CO_2 레이저에 비하여 소형, 저 가격, 사용의 편리성, 유지 및 보수의 용이함, 광 파이버에 의한 자동화가 가능한 장점이 있으며, 금속에의 흡수성이 우수하다. 또한 물질과 반응을 잘 하며, 파워전송, 집광 등이 통상의 광학부품으로 가능하여 다양한 분야에 적용되어 각광을 받고 있다.

레이저 가공을 대별하면 열가공과 화학가공으로 나누어진다. 열가공은 CO_2 레이저 및 YAG 레이저로 대표되는 가공이며, 화학가공은 Excimer 레이저로 대표되는 가공이다.

레이저 가공은 절단, 구멍뚫기, 용접, 표면개질, 혹은 트리밍, 스크라이빙, 마킹, 리페어링 등의 미세한 제거가공 등에 있어 많은 실용화가 이루어져 있다. 레이저 가공의 기본은 그 자

체의 높은 가공력, 즉 높은 파워밀도에 있고, 가공목적에 따라 파워밀도를 제어하는 것이 중요하다. 파워밀도의 제어는 레이저 출력의 펄스화에 의한 작용시간 제어 및 펄스의 반복율을 변화시키는 방법이 주로 적용된다.

본 연구에서는 이러한 파워밀도의 제어가 용이한 고반복, 고출력 펄스형 Nd:YAG 레이저를 자체로 설계 및 제작하기로 하고, 평균출력 약 250 W를 목표로 하였다. 이 목표를 달성하기 위하여 플레쉬램프(ILC 6F6) 두 개로 구성되는 이중 타원형 반사경 및 ZCS 공진형 컨버터 전원을 채용하여 전류의 펄스폭 및 펄스의 반복율을 가변시켜 가며, 전원장치의 전기적 특성 및 레이저 출력 특성을 조사연구하였다. 즉, 전류의 펄스폭은 250 μs에서 350 μs 까지 50 μs의 간격으로 가변시켜 가며, 펄스의 반복율은 400pps에서 1150pps 까지 가변시켜 가며 레이저 출력 특성을 조사하였다.

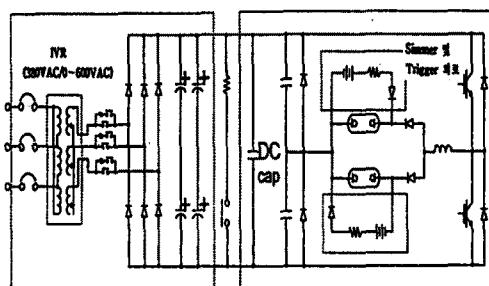


그림1. 펄스형 Nd:YAG 레이저 전원장치 구성도

2. ZCS 공진형 컨버터 적용 고반복 대출력 펄스형 Nd:YAG laser Power supply

Nd:YAG 레이저는 광제어성 및 신뢰성이 우수하여 대출력 고파워인 레이저 광이 얻어지므로 마이크로 가공용 레이저로 적합하며 트리밍, 마킹, 스팟트 용접등 온라인용 제조설비에 널리 이용되고 있다. 본 연구에 있어서는 천공과 절단 표면이 끼끄러운 금속을 대상으로 한것으로 방형파가 되는 Pulse 폭은 100μs~几ms정도, 레이저 광빔의 출력밀도는 10^7 ~ $10^8 (W/cm^2)$

정도를 요구하고 있다. 또한, 같은 평균출력 레이저 에너지에서는 한 개의 높은 에너지 펄스보다는 여러개의 에너지를 사용하는 것이 더욱 깊은 투과성과 양호한 결과를 주기 때문에, 본 연구에서 제작된 전원장치는 이러한 Pulse Forming Network를 구성하기 위해 고주파 화에 적합하고 스위칭 손실과 노이즈가 저감되며, 특히 적용 소자인 IGBT의 Turn-off시 Tailing current에 따른 손실을 저감시키기 위해 ZCS(Zero Current Switching)공진형 컨버터를 Laser Power Source에 적용시켜 일정 펄스폭의 주파수제어에 따른 출력제어를 할수 있도록 구성했다. Flash Lamp 여가용 Pulsed Nd:YAG Laser에서 적용된 전원장치의 주요구성은 그림1과 같이 정류부, ZCS공진형 컨버터부(Pulse Forming Network)와 Simmer 및 Trigger회로로 구성된다.

2-1 정류부

정류부는 3상 교류전압 조정기(IVR), 톱입천류 제한 및 삼상 Bridge Diode정류기, 평활용 콘덴서로 구성된다. 후반부의 공진형 컨버터에서 과도한 peak 전류를 출력하므로 이에 대응하기 위해 평활용 콘덴서와 병렬로 주파수 특성이 좋고, 대출력용인 DC캐패시터를 사용했다. 부하변화에 따른 입력전압 변동은 3상 교류전압조정기(IVR)로 미세조정 할수 있도록 했으며 이부분은 고역률 AC/DC컨버터 또는 강압형 Buck컨버터로 대체함으로써 적용할수 있다.

2-2 ZCS직렬공진형 컨버터 적용 Pulse Forming Network

ZCS직렬공진형 컨버터 적용 Pulse Forming Network는 그림2와 같이 스위칭소자(Q_1, Q_2)와 공진용 인덕터(L_r), 공진용 Capacitor(C_1, C_2)로 구성되고 스위칭 소자 및 Flashlamp에 흐르는 전류가 정현파형이기 때문에 원리적으로는 스위칭 손실이 없고, 고주파화에 적합하다. 또한 회로에 흐르는 전류가 정현파형이기 때문에 Flash Lamp에 급격한 Pulse가 가해지는 것을 막을수 있고, 컨버터에서 발생하는 잡음을 저감하는 등의 특징을 갖고 있다.

ZCS 직렬 공진형 컨버터의 출력특성은 (1)식과 같다.

$$P_{out} = 2f C_r V_{in}^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

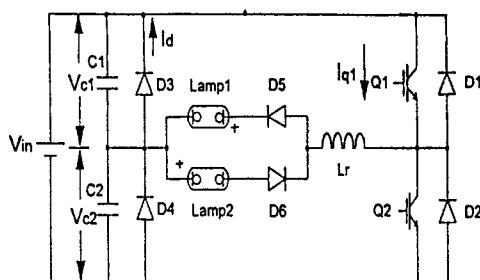


그림2. ZCS 직렬공진형 컨버터의 주회로도

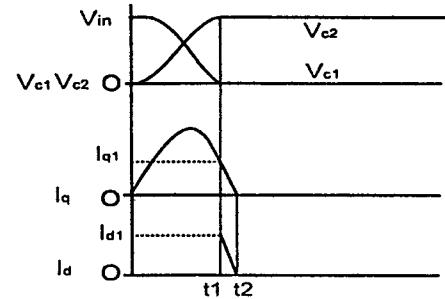


그림 3 ZCS 직렬공진형 컨버터의 각부파형

출력밀도 제어는 일정 펄스폭 및 주파수에서 공진형 인버터의 입력전압을 가변시켜 출력을 제어할 수 있는 방법과, 공진형 인버터의 스위칭 주파수를 저주파에서 고주파로 가변시켜 제어하는 두가지 방식을 제안할 수 있다. 하지만 주파수 제어의 경우 경부하에 따라 낮은 주파수로 이동하여 동작하는 경우, 저주파 스위칭 동작에 따른 동작 불안정과 Acoustic 노이즈가 발생되는 단점이 수반되므로 본 연구에서는 공진형 인버터 입력전압 (V_{in})을 가변시켜 제어하는 방식을 적용 했다.

회로의 동작순서를 간략하게 설명하여 보면 다음과 같다. 초기 상태로써 공진 캐패시터 C_1 이 공진형 인버터 입력전압 V_{in} 으로 충전되고, 공진캐패시터 C_2 에는 영전압으로 되어 있고, 스위칭소자 Q_1, Q_2 는 Off 상태로 Flash Lamp에 전류가 흐르지 않고 Simmer Trigger 된 상태에 있다고 가정한다. 스위칭소자 Q_1 을 On 시키면 $C_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow L_r \rightarrow D_5 \rightarrow Lamp 1 \rightarrow C_1$ 의 Loop 와 $V_{in} \rightarrow Q_1 \rightarrow L_r \rightarrow D_5 \rightarrow Lamp 1 \rightarrow C_1$ 의 Loop를 통해서 공진전류가 흐르고 에너지를 Flash Lamp 1에 공급 한다.

또 C_1 이 그림3에서처럼 t_1 시점에서 방전된후는 공진 인덕터 L_r 에 흐르는 전류는 $L_r \rightarrow D_5 \rightarrow Lamp 1 \rightarrow D_3 \rightarrow Q_1 \rightarrow L_r$ 의 Loop로 전류가 흘러 공진캐패시터 C_1 의 전압 V_{c1} 을 Zero로 공진캐패시터 C_2 의 전압 V_{c2} 를 입력전압 V_{in} 으로 Clamp 시킨다.

공진전류가 Zero로 된후 스위칭소자 Q_1 이 Off되면 좋지만 Flash Lamp의 특성상 Tailing Current가 계속해서 흐르므로, 계산된 ON Time 후 강제적으로 Off시키면, 이때의 공진전류는 $L_r \rightarrow D_5 \rightarrow Lamp 1 \rightarrow D_3 \rightarrow Vin \rightarrow D_2 \rightarrow L_r$ 로 흐르면서 공진전류를 Zero로 저감 시킨다.

이에 대한 각부 파형을 그림3에 나타냈다. 이때 Lamp2은 Diode D_6 에 의해 Blocking되어 있으므로 전류가 흐르지 않고 Lamp 1에만 에너지를 공급한다.

일정시간후에 Q_2 가 ON 되면 $C_2 \rightarrow Lamp 2 \rightarrow D_6 \rightarrow L_r \rightarrow Q_2 \rightarrow C_2$ 의 Loop와 $V_{in} \rightarrow C_1 \rightarrow Lamp 2 \rightarrow D_6 \rightarrow Q_2 \rightarrow Vin$ 의 Loop로 공진전류가 흐르고 공진인덕터 L_r 에는 전파는 반대 방향의 공진전류가 흘러 Lamp 2에 에너지를 공급한다. 또, 공진캐패시터 C_2 가 방전된 후 L_r 의 공진전류는 $L_r \rightarrow Q_2 \rightarrow D_4 \rightarrow Lamp 2 \rightarrow D_6 \rightarrow L_r$ 의 Loop로 흐르면서 Flash Lamp에 에너지를 방출하며 전류는 Zero로 감소된다.

공진캐패시터 C_1 의 양단전압 V_{cl} 은 D_4 때문에 V_{in} 으로 Clamp되고 이후 동작은 반복된다.
이에 대한 ZCS 직렬 공진형 컨버터의 Simulation 과정을 그림4에 나타냈다.

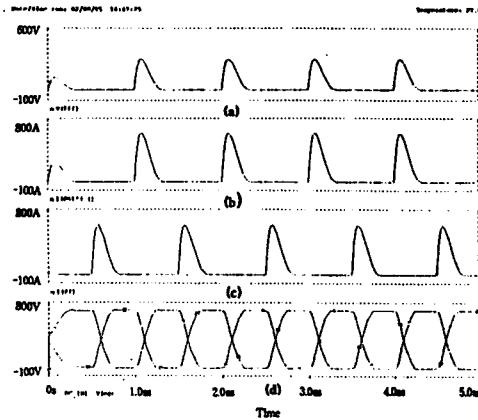


그림 4 ZCS 직렬공진형 컨버터의 모의파형

(a) Lamp1의 전압파형, (b) Lamp1의 전류파형
(c) Lamp2의 전류파형, (d) V_{cl}, V_{c2} 의 전압파형

2-3 Simmer 및 Trigger 회로

Simmer 및 Trigger 신호의 기능은 공진캐패시터(C_1, C_2)의 주 방전이 일어날 수 있도록 Lamp 전극사이에 streamer를 형성시키기 위한 것이다. 즉 Gas Column을 이온화시키기 위해 충분히 큰 크기의 전위 경도에 따라 Streamer가 형성된다. 이러한 Preheating 또는 Streamer를 형성시키기 위해서는 고압 Pulse Trigger 회로와 저압 Simmer 회로로 구분되며 이에 대한 회로구성을 그림 5에 나타냈다.

$D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}, R_s, TR_s$ 은 저압 Simmer 회로이고, TR_p, C_p 및 Push Button 스위치 PBS는 고압 Pulse Trigger 회로이다.

Streamer를 형성시키기 위한 Simmer 전류는 ($20\text{mA} \sim \text{수}\mu\text{A}$)가 요구되고, 저항 R_s 값을 가지고 제한하여 공급한다.

요구된 고압 Pulse Trigger 전압은 Lamp 압력의 증가와 재질 안 벽의 고열로 인한 소실로 산소 또는 물과 같은 오염 Gas의 증가에 따라 증가되기 때문에 신뢰성 있는 Trigger 회로설계는 주어진 Type의 Lamp를 Start 하기 위해 요구된 Trigger 전압보다 50% 이상 Margin을 두어 설계할 필요가 있다. 또한 이 Trigger Pulse가 Streamer를 형성시키기 위해 충분히 길지 않다면 Trigger 회로로 방전된 고압 Pulse에너지가 매우 크다 할지라도, 일정치 않게 그리고 불안정하게 동작될 수 있다.

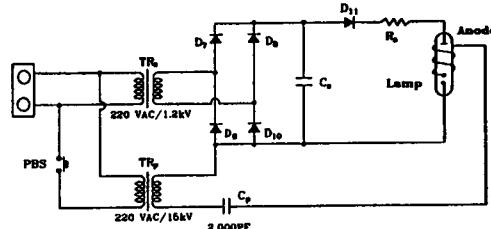


그림 5. 시머 및 트리거회로도

3. 레이저 공진기의 구성

본 연구에서 구성한 레이저 공진기는 중앙에 이중타원 구조의 반사경이 있고, 그 양가에 레이저 발진을 유도해 내기 위한 두개의 거울, 즉 전반사경(반사율 99.5 % 이상, 곡률반경 2 m인 오목거울) 및 부분 반사경(반사율 85 %의 평면거울)으로 구성된다.

광여기 시스템에는 Nd:YAG 로드를 광으로 여기시키는 플래쉬램프, 램프에서 방사되는 빛을 효과적으로 로드에 전달시키는 반사체 공동(Reflector cavity) 그리고, 레이저 빔을 발생시키는 활성매질인 Nd:YAG 로드로 구성된다.

플래쉬램프는 원하는 레이저 출력, Nd:YAG 로드의 길이와 직경, 수명등을 고려하여 그 규격을 결정해야 한다. 상기의 고려사항을 참고로 하여 ILC사의 6F6 Xe 플래쉬램프를 선택하였으며 그 외형치수 및 전기적 특성은 다음과 같다.

Bore Dia. : 6 mm Cooling : Water Cooled

Arc Length : 152.4 mm

Impedance Parameter K_o ($\Omega \text{ amp}^{0.5}$) : 34

Explosion Energy Constant $K_e = E/T^{0.5}$ Watt(sec)^{0.5}
 2.2×10^5

Maximum Peak Current (Amps) : 1100

Minimum Trigger Pulse : 18 kV, 0.6 μs

또, 레이저 발진용 Nd:YAG 로드의 특징은 다음과 같다.

Size : Dia. 6 mm x Arc Length 152.4 mm 1.0 % Nd

Dopant Flat/Flat AR Coating on both end faces

Parallelism : 10 seconds or less Flatness : $\lambda/10$ to $\lambda/20$

Damage Threshold : 5 to 50 GW/cm² for pulse operation

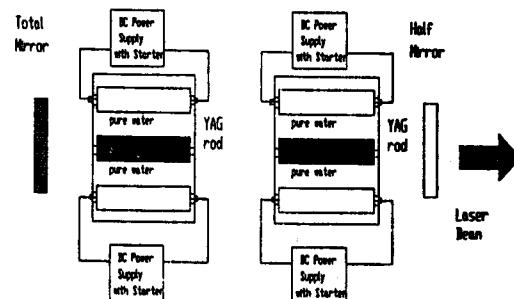


그림 6. 레이저공진기 구성의 개략도

광공진기중 레이저 헤드부는 이중타원형 반사경의 중앙에 레이저 로드, 양 가에 두개의 플래쉬램프가 놓이게 되는 이중 타원 구조로서 램프에서 나온 모든 발광은 이중 타원의 내부 금막코팅 반사경에 의하여 로드로 조사되게 되어 있다. 이중 타원은 단일 타원의 이심율(두 초점사이의 거리/장축의 길이)이 0.46이 되도록 직접 설계 및 제작하였다.

4. 실험결과

입력전력에 대하여 얻어지는 레이저빔 출력을 나타낸 것이 그림 7이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와같이 약 3kW 정도의 입력에서 발진을 시작하여 정격입력까지 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 램프의 입력을 더 증가시키고, 냉각수의 유속을 더 증가시킨다면 이 공진기에서 더 많은 출력을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 8에 각 입력에 따라 일정한 전류 폴스폭에서 폴스 반복율을 변화시켜 가며 얻어진 출력을 보인다. 또 그림 9에 일정한 반복율에서 전류 폴스폭을 가변시켜 가며 얻어진 출력을 보인다.

그림 10은 ZCS 직렬 공진형 컨버터 스위칭시 스위칭 소자에 걸리는 전압, 전류파형을 보여주고 있다. 스위칭시 급격한 전압 peak 값이나 Ringing이 발생되지 않았고, 전류파형에서도 공진에따른 정현파형이 발생됨을 볼 수 있다.

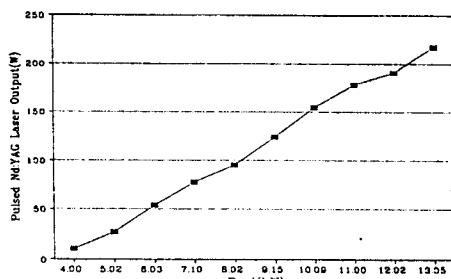


그림 7. 입력전력에 따른 레이저 출력특성

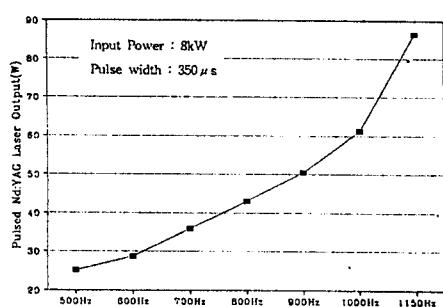


그림 8. 반복주파수의 변화에 따른 레이저 출력특성

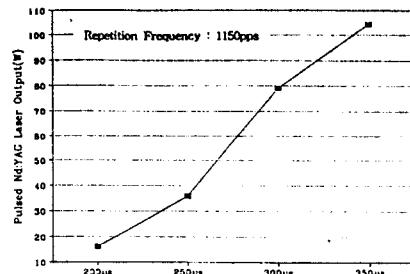


그림 9. 전류펄스폭 변화에 따른 레이저 출력 특성

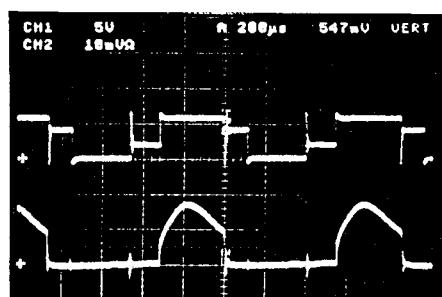


그림 10. ZCS 직렬공진형 컨버터 스위칭소자에 걸리는 전압 및 전류파형

(500V/div, 50A/div, 200μs/div)

5. 결론

가공용 레이저장치로서 다양한 분야에 적용되어 널리 애플리케이션으로 활용되고 있는 대출력 폴스형 Nd:YAG 레이저용 Power Supply 기술을 개발하기 위하여 레이저 공진기 및 냉각유로, ZCS 직렬 공진형 컨버터 방식을 적용한 Power Supply를 직접 설계 및 제작하였다. 이렇게 개발된 시제품의 동작특성을 확인하여 이중타원 레이저 헤드 한개로 최대출력 약 220 W를 달성하였다.

이러한 레이저 헤드를 공진기내에 직렬로 추가하면 추가시마다 그에 따른 출력경의 반사율을 조정해 줌으로서 그 배수의 출력을 얻을 수 있다. 따라서, 이 기술을 적용하면 1 kW급의 고반복 대출력 폴스형 Nd:YAG 레이저 시스템을 완성할 수 있으므로 이러한 시스템의 국내기술 차립을 이룩하였다.

참고문헌

- [1] 조기연, 김온수, “고주파 공진형을 이용한 교환기용 정류기 개발”
- [2] 김희제, 문덕쇠, 이홍식, “Nd:YAG 레이저 제작 및 응용기술” 전기학회지, 제 42 권, 제 3 호, 1993, pp 19-27
- [3] オプトロニクス社, “最先端レーザー技術集成” 1990