

# 레이저 여기용 펄스전원의 개발

## Development of a pulsed power supply for Laser excitation

박득일\*, 박홍진, 이주희  
경희 대학교 전자공학과

고반복 레이저의 여기전원에 적합한 3단의 자기펄스 압축 시스템을 제작하고, 시스템의 특성을 고찰하였다. 자기 펄스 압축 시스템의 특성 파라메타는 펄스 변압기의 출력과 펄스파형에 대한 포화 인덕터의 단면적, 코일의 권수가 고려되었다. 실험 결과 3단의 자기 펄스압축 시스템의 최적 조건에서 펄스 압축비와 전류 이득은 각각 22, 20 이었다.

### 1. 서론

레이저의 고반복 여기전원으로서 필수조건은 빠른 스위칭과 장수명화이다. 더우기 엑사이머 레이저와 같이 빠른 rising-time의 여기전원을 필요로 할때 고반복 여기전원의 개발은 매우 중요한 과제이다[1]. 고반복 여기전원으로 현재 가장 많이 사용되는것은 Thyratron 이다[2]. 이것은 전극의 열화 및 봉입가스의 열화때문에[3] 시판되는 것들은 양극전압 40kV, 침투전류 15kA, 반복주파수 500Hz에서 수명은  $10^7 \sim 10^8$  shot으로 제한된다[4]. 이와같은 수명문제를 해결하기위하여 제안된것이 포화인덕터만 가지고 스위칭하는 Magnetic Pulse Compression (MPC) 방법이다[5]. 이 방법은 전체를 고체소자로 구성하므로 반영구적인 수명을 기대할수 있고, 우수한 포화특성을 가지는 포화인덕터를 사용하는 경우, 빠른 rising time의 스위칭을 할수 있으므로 엑사이머 레이저의 여기전원으로 매우 이상적

이다[6]. 본 연구에서는 레이저의 고반복 여기전원으로 적합한 MPC시스템을 제작하고, 그 특성을 고찰하였다.

### 2. MPC 방식의 펄스압축 시스템 설계

#### 2-1. 펄스압축 시스템

3단 펄스압축 시스템의 등가회로는 <그림 1>과 같이 펄스 변압기와 콘덴서  $C_1, C_2, C_3$  및 포화인덕터  $SI_1, SI_2, SI_3$ 로 구성된다. 각단의 콘덴서에서 에너지 전송은 포화인덕터의 스위칭 동작으로 지연전송을 하므로 전송되는 펄스의 폭은 순차적으로 압축되어 최종단에서 펄스폭은 좁고, 증폭된 펄스의 침투값을 얻게된다.

포화인덕터의 스위칭은 B-H 곡선의 특성으로 인해 일어난다. <그림 2> 와 같이 미포화 상태에서의 투자율은 A점에 있기 때문에 인덕턴스값은 크게되어 스위치 off의 역할을 하게되고, 포화되면 투자율은 B 지점으로 이동하여 인덕턴스 값이 작아지므로 스위치 on의 역할을 하게된다.

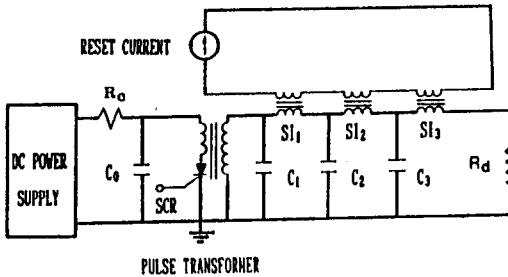


그림-1. Schematic diagram of Magnetic Pulse Compression system.

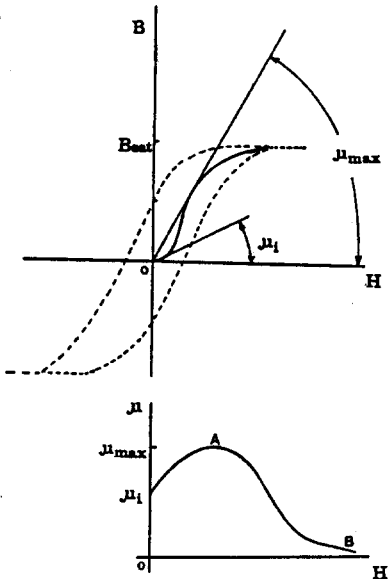


Fig 2. B-H and  $\mu$  curve of ferromagnetic material

Bsat : Saturation Magnetization  
Br : Remanent magnetization

<그림 1>에서  $C_0$ 를 충전한후 트리거 스위칭하면 펄스변압기를 통하여  $C_0$ 의 전하는  $C_1$ 에 이송된다. 이때 미포화 상태에 있던  $SI_1$ 이 포화되면  $C_1$ 의 전하는  $C_2$ 에 이송된다. 이러한 과정에서  $SI_1$ 의 포화인덕턴스  $L_{sat}$ 가  $L_0$ 에 비해서 충분히 작으면  $I_1$ 의 펄스폭은  $I_0$ 의 펄스폭 보다 좁게되어 펄스압축이 이루어진다.  $I_0$ 와  $I_1$ 의 각각의 펄스폭  $T_0$ 와  $T_1$ 이 (1)식과 같다면  $T_0$ 와  $T_1$ 의 비로 정의하는 펄스 압축비 CR(Compression ratio)는 (2)식과 같다.

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{C_0 \cdot C_1}{L_0 + C_1}}$$

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{L_{sat} + C_2}} \quad (1)$$

$$CR = \frac{T_0}{T_1} = \sqrt{\frac{L_0}{L_{sat}}} \quad (2)$$

또한 전류최대값  $I_0$ 와  $I_1$ 의 비로 정의되는 최대전류이득은 (3)식과 같다.

$$\frac{I_{0max}}{I_{1max}} = \sqrt{\frac{L_0}{L_{sat}}} \quad (3)$$

효율 좋게 에너지를 이송하기 위한 조건으로 (4)식을 만족하면 (2), (3)식에 의해 전류 펄스폭을 압축하고 전류최대치를 증가시킬수 있다.

$$L_{sat} \ll L_0 \ll L_{unsat} \quad (4)$$

2단 및 3단 에서도 같은원리로 펄스를 압축시킬수 있다.

2-2 시스템 파라미터 설계

<그림 1>에서 포화 인덕터의 단면적은 포화인덕터의 포화시간에 의해 결정된다. 1단에서는  $C_1$ 의 충전시간  $T_0$ 의 동안에  $SI_1$ 이 미포화 상태이어야 하므로  $SI_1$ 이 포화에 이르기까지 시간은  $T_0$  와 같다.  $T_0$ 의 경과후 미포화에서 포화에 이르기 위해서는 (5)식을 만족해야 하고, 이때의 포화인덕턴스는 (6)식과 같게된다.

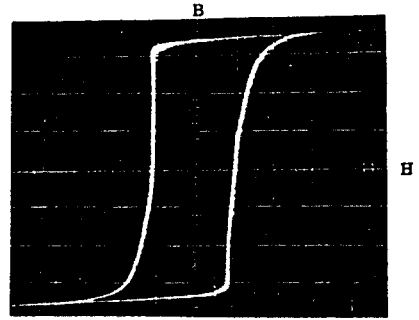
$$\int_0^{T_0} V dt = Nt \cdot At \cdot \Delta B \quad (5)$$

$$L_{sat} = \frac{\mu_0 \mu_{r, sat} At \cdot Nt^2}{\ell} \quad (6)$$

여기서  $A_t$ 는 자성체의 단면적,  $N_t$ 은 도선의 권수,  $V$ 는 포화 인덕터에 인가되는 전압,  $\Delta B$ 는 자속밀도의 변화량,  $\ell$ 은 자로의 길이.  $\mu_{r, sat}$ 는 자성체의 포화시 투자율이다. 강자성체의 포화자속밀도를  $B_s$ 라 하면  $\Delta B = 2B_s$ 로 근사화된다. (5)식에 의해 코아의 단면적  $A_t$ 는 (7)식과 같다.

$$A_t = \frac{V \cdot T_0}{\Delta B \cdot N_t} \quad (7)$$

사용한 포화인덕터의 단위 코아는 폭 2.5cm, 두께 22  $\mu m$ 인 Metglas 2605 S-2 를 내경 5cm 외경 9cm인 트로이드 형태로 제작하였다. 포화 인덕터는 포화 시간과 인덕턴스를 용이하게 조정할수 있도록 몇개의 단위 코아를 연결하여 사용하였다. 포화 인덕터에 사용되는 강자성체는 높은 투자율을 갖고, 히스테리시스곡선의 상승과 강하는 구형에 가깝게 달라야 이상적이다. 따라서 본실험에서는 <그림 3>과 같이 히스테리시스곡선의 상승과 강하가 매우 빠르고 폭이 좁은 2605 S-2 를 사용하였다. 본면서는 시스템 내의 인덕턴스에 영향을 주지않는 BaTiO<sub>3</sub>계의 세라믹 콘덴서를 병렬로 연결하여 사용하였다. 각 단의 전류는 Person Electronic INC.의 Current Transformer, 전압은 무유도저항을 사용하여 측정하였다.



B: 4 kG/div  
H: 0.06 Oe/div

Fig 3. Hysteresis loop of Metglas 2605 S-2

2-3. 펄스 변압기의 설계

<그림 1>과 같이 MPC 시스템의 전원은 펄스변압기와 SCR을 연결하여 구동하는 방식으로 설계하였고, 시스템에서 사용된 펄스변압기의 코아체적은 다음식 (8)에 의해 계산되었다[7].

$$A \cdot \ell = \frac{4 \pi \cdot 10^7 \cdot \mu_0 \cdot V \cdot t_d \cdot I_m}{(\Delta B)^2} \quad (8)$$

$\Delta B$  = 코아의 평균 자속 밀도의 변화량 (Gauss)

$A$  = 코아의 단면적 (cm<sup>2</sup>)

$\ell$  = 코아의 자로 (cm)

$\mu_0$  = 코아의 실효 투자율

$V$  = 펄스 전압

$t_d$  = 펄스 폭

$I_m$  = 자화 전류

펄스변압기는 히스테리시스 곡선이 각형이고 고 투자율의 특성을 갖는 코아를 사용해야하는데, 본 연구에서는 비교적 가격이 싼 Nippon Ferrite Z-11 코아 (체적 = 6280 cm<sup>3</sup>) 를 사용하였다. 이때 사용한 코아의 히스테리시스 곡선은 <그림 4>와 같다. 펄스변압기의 설

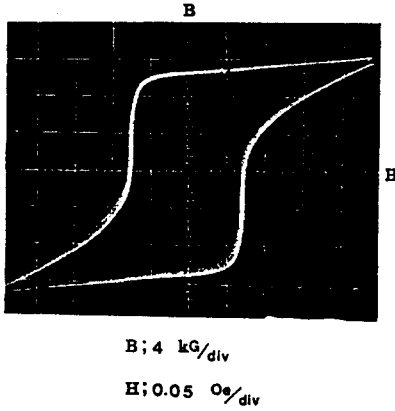


Fig 4. Hysteresis loop of Nippon Ferrite Z-11

계에서 코일의 권수에 대한 전압비는 식(9)에 의해 계산되며,  $V/T = 244$  [V]로서 1차측 권수는 9회, 2차측 권수는 126회였다.

이때 펄스변압기의 입력전원은 Slidac을 이용하여 0-2.2 kV로 변압시켰고, 2차측 출력전압은 30.8 kV로, 전압비는 1 : 14로 설계하였다.

$$V/T = \frac{\Delta B \cdot A}{10^8 \cdot t_d} \quad [V] \quad (9)$$

### 3. 펄스압축 시스템의 특성

포화인덕터 파라미터를 < 표-1 > 과 같이 최적조건에 고정하고, 1Ω의 저항을 부하로 사용하였을때 각단의 전류파형과 실험결과는 < 그림 5 >와 같이 초단 100 A, 10 μsec의 펄스폭을 갖는 전류가 최종단에서 2 kA, 0.45 μsec의 펄스로 압축되므로 이때의 최대전류이득과 펄스압축비는 각각 20, 22이다.

Table 1 Parameter of each-stage saturable inductor

	$N_t$	$N_c$	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$V_c$ (cm <sup>3</sup> )
SI <sub>1</sub>	20	8	40	880
SI <sub>2</sub>	5	4	20	440
SI <sub>3</sub>	1	3	15	330

$N_t$  : Conductor Turns  
 $N_c$  : Number of core  
 $A_c$  : Cross-section of core  
 $V_c$  : Volume of core

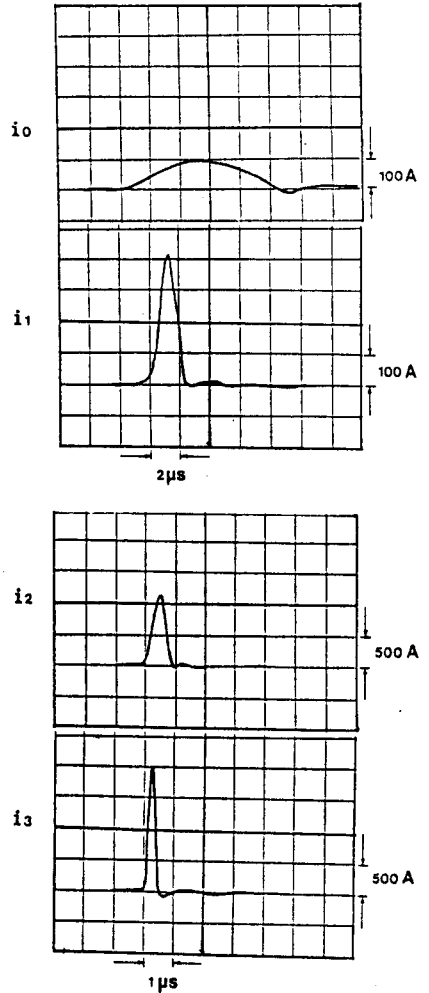


Fig 5. Current waveform of MPC system

### 4. 결 론

본 연구에서 제작한 MPC 방식의 펄스압축 시스템은 고반복 레이저의 여기에 적합한 시스템임을 실험을 통하여 확인하였다. 펄스압축 시스템의 각 단의 포화인덕터는 단면적과 권수가 각각 40cm<sup>2</sup> 20회, 20cm<sup>2</sup> 5회, 15cm<sup>2</sup> 1회에서 최적조건이었으며, 최적조건에서 초단 100 A, 10 μs의 펄스가 최종단에서 2 kA, 0.45 μs의 펄스로 압축되었다. 이때의 전류이득과 펄스압축비는 각각 20, 22 이었다.

참고문헌

- [1]. T. Shimada, M. Obara, and A. Noguchi, " An all solid-state magnetic switching exciter for pumping excimer lasers ", Rev. Sci. Instrum. 56(11), 2018, Nov. (1985).
- [2]. M. Obara, K. Midorikawa, and H. Tashito, " Pulsed Power Technology for pumping High-repetition-rated TEA CO<sub>2</sub> Lasers ", 레-사" 科學研究, No.8, 39 (1986)
- [3]. T. Shimada, and M. Obara, " Semiconductor Switched Magnetic Modulator for Repetition-Rate Laser", 5th IEEE Pulsed Power Conference 10-12, June (1985)
- [4]. Masataka Murahara et al., "エキシマ 레-사" 最先端 應用技術", 56 (1986)
- [5]. H. Tanaka, M. Obara, K. Midorikawa, H. Tashiro, and S. Namba, "Development of a High Repetition Rated TEA CO<sub>2</sub> Laser Excited by an All-Solid -State Exciter with a Magnetic Pulse Compressor", 레-사" 科學研究, No.9, p.46 (1987)
- [6]. I. Smilanski, S.R. Byron, and T.R. Burkes, "Electrical excitation of a XeCl laser using magnetic pulse compression" Appl. Phys. Lett., 40(7), 1, 547, April (1982)
- [7]. Frank B. A. Früngel, High Speed Pulse Technology, vol.1, Academic Press Inc., page 196~291, (1965)