

A Pulse Power Supply for Metal Vapor Lasers

陳 瑛 泰[†] · 車 秉 憲^{*} · 李 興 浩^{**}
(Jeong Tae Jin · Byung Heon Cha · Heung Ho Lee)

Abstract - A reliable and compact pulse power supply using a thyatron and a magnetic pulse compression (MPC) circuit was developed for a metal vapor laser. The life time of the pulse power supply is expected to be much longer than that of a conventional thyatron-discharge type pulse power supply. A thyatron generated a long pulse of its conduction pulse width 500 ns and then it was compressed to less than 80 ns of its output voltage rise time by a three stage MPC circuit. This pulse power supply was applied to a laser plasma tube of 30 mm inner diameter and 1.5 m discharge length. It was operated several hundreds hours without any troubles.

Key Words : Thyatron, Pulse Power Supply, Magnetic Pulse Compression, Metal Vapor Laser

1. 서 론

금속증기레이저는 다양한 원소의 동위원소 분리, 알루미늄, 구리, 스테인리스 스틸 등의 초정밀 천공 및 절단, 세라믹과 실리콘 가공 또는 원자로 유지보수, 레이저 리소그래피(lithography), 실리콘 칩 표면 마킹(marking), 이온 주입된 반도체 표면의 어니일링(annealing) 등 산업계 여러 분야에서 널리 활용될 수 있으며 피부 반점 및 종양 제거 등과 같은 의료 분야, 대기 관측, 질량 분광 분석 등과 같은 과학기술 분야에서도 활용될 수 있다[1,2,3,4,5,6].

금속증기레이저 중 가장 널리 사용되는 것은 구리 증기 레이저와 금 증기 레이저이며 이들 레이저를 수 10 W 이상의 출력으로 레이저 발진시키기 위해서는 첨두(peak) 전압 10 kV~50 kV, 첨두 전류 100 A~10 kA, 펄스 폭 100 ns 이하, 펄스 반복율 1 kHz~20 kHz의 정격을 만족하는 펄스 전원이 필요하다[7,8].

이와 같은 고전압, 대전류, 고반복 초단 펄스를 얻기 위한 펄스 스위치로는 진공관, 전력반도체 스위치 등이 일부 사용되거나 연구되고 있지만[9,10] 사이라트론(thyatron)이 가장 널리 사용된다. 그러나 사이라트론은 동작 수명이 비교적 짧다는 단점이 있다. 금속 증기 레이저를 운용하는 비용의 상당한 부분이 사이라트론 교체 비용이며 특히 다수의 레이저 시스템을 고장으로 인한 중단 없이 장시간 운용하기 위해서는 사이라트론의 수명을 연장시키는 것이 필수적이

다[11,12].

최근 사이라트론의 수명을 연장시키기 위한 많은 연구가 수행되었으며 특히 자심(core)이 포화되기 전에는 매우 큰 임피던스를 가지다가 자심이 포화되면 임피던스가 급격히 낮아지는 특성을 갖는 자기 스위치(magnetic switch)의 특성을 이용한 자기펄스 압축기술(magnetic pulse compression technique)을 사이라트론과 병행하여 사용하는 방법이 널리 연구되고 있다[13,14,15,16,17,18,19,20].

본 연구에서는 고속 스위칭용 사이라트론과 고주파 특성이 우수한 Ni-Zn 계열 페라이트 코어를 가포화 인덕터의 자심으로 사용하는 3단 자기펄스 압축회로를 설계, 제작하였으며 내경 30 mm, 방전 길이 1.5 m인 레이저 플라즈마 방전관을 부하로 사용하여 제작된 펄스 스위치의 특성을 조사하였다.

2. 자기 펄스 압축 기술

2.1 C-L-C 공진회로 특성

그림 1과 같이 커패시터, 인덕터, 커패시터가 연결된 C-L-C 공진회로에서 $v_1(t)$, $v_2(t)$ 의 해는 각각 (1)식, (2)식에서 구할 수 있다.

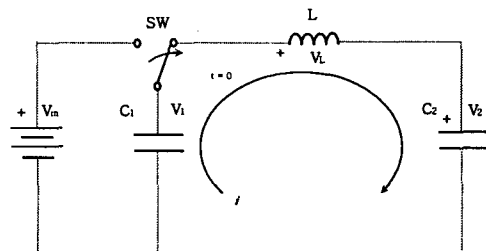


그림 1 C-L-C 공진회로
Fig. 1 A C-L-C resonance circuit

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國原子力研究所 先任研究員

E-mail : jtjin@kceri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國原子力研究所 責任研究員

^{**} 正會員 : 忠南大學 電氣工學科 教授

接受日字 : 2004年 10月 22日

最終完了 : 2005年 3月 4日

$$v_1(t) = V_m \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \cos \omega t + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) \quad (1)$$

$$v_2(t) = V_m \frac{C_1}{C_1 + C_2} (1 - \cos \omega t) \quad (2)$$

또한 그림 1에서 C_1 의 전하가 C_2 로 전부 이동하는데 소요되는 시간은 C_1, L, C_2 로 구성되는 직렬 LC 공진회로의 공진주기 T 의 $\frac{1}{2}$ 인 $\frac{1}{2}T$ 가 되며 이때 C_2 의 전압은 최대가 된다. 즉, 시간 t_g

$$t = \pi \sqrt{LC_1}, \quad \text{단, } C_1 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3)$$

일때 $v_2(t)$ 가 최대가 된다. 한편 C_1 에 축적된 에너지가 C_2 로 전송되는 양은 축전기의 크기 비율에 따라 달라지며 전송 효율 η 는 (4)식과 같이 C_1 에 축적된 에너지 $E(C_1)$ 과 C_2 로 전송된 에너지 $E(C_2)$ 의 비로 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{E(C_2)}{E(C_1)} \quad (4)$$

한편 C_2 로 전송된 에너지 $E(C_2)$ 는 C_2 에서의 전류와 전압을 곱한 값을 적분하여 구할 수 있으며 (5)식과 같은 결과를 얻을 수 있다. (5)식에서 $C_1 = C_2$ 이면 전송 효율이 100%가 되며, $C_1 \gg C_2$ 이면 V_2 가 $2V_m$ 으로 2배 전압 증폭되고 $C_2 = \frac{2}{3}C_1$ 이라면 에너지 전송효율 96%, 전압 증폭률 1.2배가 됨을 알 수 있다.

$$E(C_2) = 2V_m^2 \frac{C_2}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \quad (5)$$

2.2 자기펄스압축

2.2.1 자기펄스압축 원리

자기펄스 압축기술은 강자성체가 포화되면 투자율이 매우 작아지는 현상을 이용하여 펄스를 압축하는 기술로서 그 동작원리는 다음과 같다[14,15].

그림 2와 같이 기본 C-L-C 공진회로가 2단 (2-stage) 직렬로 연결되어 있을때 C_1 이 V_m 으로 충전된 후 스위치 SW2가 닫히면 $C_1-SW_2-L_1-C_2$ 로 구성되는 폐회로가 만들어져서 전류가 흐르기 시작한다. 이때 전제 조건으로는 L_2 의 포화되기 전 인덕턴스가 L_1 의 포화 인덕턴스보다 적어도 20배 이상으로 충분히 커서 L_1 이 포화된 순간에 L_2 쪽으로 거의 무시할 만큼 작은 전류만이 흐를 수 있어야 한다. 이윽고 C_1 의 전하가 전부 C_2 로 이동하면 V_2 전압은 최대가 되며 그 순간에 L_2 가 포화되도록 설계를 한다면 L_2 의 비투자율이 포화되기 전에 비하여 수 천배 작아지므로 L_2 의 포화인덕턴스도 수 천배 작아지고 따라서 L_1 의 포화 인덕턴스보다 수 십배 ($\frac{\text{수천배}}{20\text{배이상}}$) 작아지게 된다. 커패시터 C_1 ,

C_2, C_3 는 에너지 전송 효율을 최대로 하기 위하여 같은 용량 값 C 를 갖는다고 가정하였다.

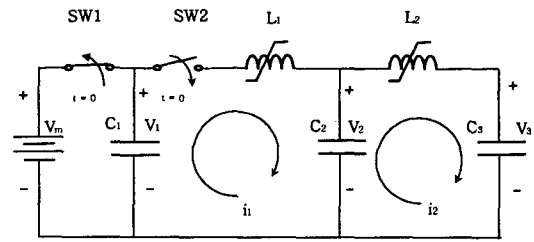


그림 2 2단 C-L-C 공진회로

Fig. 2 A 2-stage C-L-C resonant circuit

그림 2에서 i_2 의 첨두 전류값 i_{2m} 과 i_1 의 첨두 전류값 i_{1m} 의 비율로 표현되는 전류 증폭률 $\frac{i_{2m}}{i_{1m}}$ 은 (6)식으로 표현할 수 있으며 펄스 압축률 G 는 (7)식으로 표현할 수 있다.

식 (6), 식 (7)로부터 그림 2의 자기펄스 압축 회로는 수 $\sqrt{10}$ 배 만큼 전류를 증폭할 수 있고 동시에 펄스폭을 수 $\sqrt{10}$ 배 만큼 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있다.

$$\frac{i_{2m}}{i_{1m}} = \frac{V_m \sqrt{\frac{C_1}{L_2}}}{V_m \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}, \quad C_1 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (6)$$

$$G = \frac{\pi \sqrt{L_1 C_1}}{\pi \sqrt{L_2 C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}, \quad C_1 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (7)$$

2.2.2 가포화 인덕터 포화 특성

가포화 인덕터 (saturable inductor)는 자심 (core)이 포화되기 전에는 인덕턴스가 매우 크고 자심이 포화되면 인덕턴스가 급격히 감소되는 일종의 인덕터이다. 가포화 인덕터의 포화 시간 τ_{SAT} 는 (8)식과 같이 나타낼 수 있다[14]. (8)식에서 알 수 있는바와 같이 가포화 인덕터의 포화시간은 코일 권선 수 N , 자심 단면적 A 및 자심의 자속 밀도 변화량 ΔB 에 비례하며 가포화 인덕터에 인가되는 평균 전압 V_m 에 반비례한다.

$$\tau_{SAT} = \frac{2NA(\Delta B)}{V_m} \quad (8)$$

3. 펄스 전원장치의 설계, 제작

3.1 설계 목표

펄스 전원을 설계하기 위해서는 먼저 사이라트론의 통전 시간 및 펄스 전원의 출력 전압 상승시간을 정해야 한다.

일반적으로 금속 증기 레이저를 효과적으로 레이저 발진시키기 위해서는 30 ns ~ 100 ns의 짧은 전압 상승시간을 가진 펄스 전압을 레이저 방전관에 인가시켜야 한다.

한편 사이라트론은 100 ns 이하의 스위칭이 가능하지만 100 ns 이하의 스위칭 조건으로 사이라트론을 동작시키면 그 수명이 급격히 감소한다. 예로서 스위칭 펄스폭 50 ns, 펄스 반복을 10 kHz로 사이라트론을 동작시키면 그 수명은 약 100 시간이다. 그러나 스위칭 펄스폭을 0.5 μs 이상으로 증가시켜 사용하면 이와 비슷한 조건에서 사용되는 레이저용 사이라트론의 평균 수명이 20,000 시간 이상이므로[7] 사이라트론 수명을 크게 연장시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 사이라트론과 레이저 방전관 사이에 자기펄스 압축회로를 추가하여 레이저용 펄스 전원을 구성하면 사이라트론의 스위칭 펄스 폭을 길게 할 수 있어 수명을 연장시킬 수 있음과 동시에 레이저 방전관에서 요구되는 전기적 정격을 만족시킬 수 있다. 표 1은 사용된 사이라트론의 전기적 특성표이다.

자기펄스 압축회로를 설계할 때 고려해야 할 중요한 사항으로는, 펄스 압축률이 증가할수록 자기펄스 압축회로의 손실도 증가하여 전체 펄스 전원의 효율이 감소하므로 설계에 있어서 타협이 필요하다. 즉 각 압축단의 자심 손실은 펄스 압축율의 제곱에 비례하여 증가하므로[18] 압축단을 많이 하여 순차적으로 펄스를 압축시키는 것이 손실을 줄일 수 있는 방법이다. 예로써 1단으로 12배 펄스 압축하는 경우와 3.5배씩 2단으로 펄스를 압축하여 12배 펄스를 압축하는 경우, 그리고 2.3배씩 3단으로 총 12배 펄스를 압축하는 경우를 비교해 보면 손실률이 1, 0.17, 0.1의 비율로 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 펄스 압축단을 3단 이상 증가시키는 경우 자심의 손실률은 약간 더 줄일 수 있지만 장치가 복잡해질 뿐 아니라 압축단의 증가에 따라 늘어나는 커패시터 등에 의한 손실도 증가하게 된다. 펄스 전원의 상세한 설계 값은 표 2와 같으며 펄스 전원장치의 구성도는 그림 3과 같다.

표 1 사용된 사이라트론의 전기적 특성
Table 1 The electrical characteristics of the thyatron

순방향 양극 첨두 전압	20 kVmax
역방향 양극 첨두 전압	10 kV
양극 첨두 전류	1 kAmax
양극 전류 상승율	> 100 kA/μs
양극 평균 전류	1.0 A
지터 (Time jitter)	3.0 ns
펄스 반복율	50 kHzmax

표 2 자기펄스 압축회로 설계 값
Table 2 The design parameters for the magnetic pulse compression circuit

펄스 전원장치 입력 전력	7 kW
사이라트론 인가 전압	15 kV
사이라트론 통전 시간	500 ns
펄스 전원 출력 전압 상승 시간	36 ns
압축단 수	3 단
각 압축단의 펄스 압축율	약 2.3
펄스 반복율	10 kHz

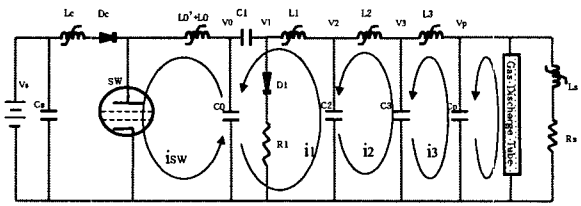


그림 3 제작된 펄스 전원장치 구성도
Fig. 3 The circuit diagram of the constructed pulse power supply

3.2 커패시터 용량 계산

커패시터 용량 C는 (9) 식에서와 같이 펄스전원장치에 투입되는 전력 P와 커패시터 충전 전압 V, 그리고 펄스 반복을 f 가 정해지면 구할 수 있다. 각 압축단의 커패시터는 용량이 같은 것을 써서 에너지 전송 효율이 최대가 되도록 하였다.

$$C = \frac{2P}{V^2 f} \tag{9}$$

그림 3에 표시된 펄스 전원장치의 동작은 다음과 같다. 왼쪽의 직류전원공급장치에 전원이 투입되면 C0와 C1은 Lc, Dc, L0' + L0, C0 및 Lc, Dc, L0' + L0, C1, D1, R1으로 구성되는 직렬 LC회로의 공진에 의하여 직류전원공급장치의 출력 전압 Vs의 2배 크기인 V0로 충전된다. C0, C1이 V0로 충전된 후 사이라트론 SW가 외부 트리거 신호에 의해 통전 되면 C0와 L0' + L0로 구성되는 LC 직렬공진회로가 형성되어 공진주기의 1/2이 경과하면 V1의 전압은 -2V0가 된다. V1의 전압이 -2V0가 되는 순간 가포화 인덕터(saturable inductor) L1이 포화되도록 L1을 설계한다면 직렬연결된 C1과 C0 양단에 축적된 전하는 C2로 이동하고 순차적으로 C3, Cp 로 이동하면서 펄스폭이 압축된다.

그림 3의 회로에서 C0와 C1을 직렬연결 했을 때의 직렬 합성용량을 Ct라고 하고 Ct, C2, C3,를 같은 용량값으로, 그리고 Cp의 용량을 C3 용량값의 2/3 크기로 한다면 Ct의 값은 (9)식에서 구할 수 있다.

(9) 식에서 투입 전력 P는 7 kW, 펄스 반복을 f 는 10 kHz 로 정하였다. 또한 Ct 양단에 인가되는 전압은 입력 직류전원장치에서 공급되는 7.5 kV의 전압이 Cs - Lc - Dc - (L0'+L0) - C0,C1 등으로 구성되는 LC공진회로에서 2배, SW, (L0'+L0) 및 C0로 구성되는 LC Inversion 회로에서 2배 증폭되므로 7.5 kV x 2 x 2 = 30 kV가 된다. 이 값을 (8) 식에 대입하면 Ct 는 약 1.56 nF이 되므로 C0, C1의 용량은 각각 3.12 nF이 된다. 제작 편의상 C0, C1은 용량 3 nF인 커패시터를 사용하였으며 C2 및 C3는 용량 1.56 nF, 그리고 피킹 커패시터 (peaking capacitor) Cp는 용량 1 nF인 커패시터를 사용하였다. 피킹 커패시터 Cp의 용량을 앞단의 커패시터 용량보다 작게 하면 에너지 전송효율은 나빠지지만 Cp에 충전되는 전압 상승률이 빨라지고, 전압 진폭이 증가하는 장점이 있다[21]. 이와같은 장점은 궁극적으로 레이저 발진 효율을 증가시킨다.

3.3 가포화 인덕터 제작

가포화 인덕터용 자심(core)은 비 저항율이 커서 와전류 손실(eddy current loss)이 비교적 적은 Ni-Zn 계열 페라이트 CMD 5005 (National Magnetics Group model)를 사용하였다. CMD 5005 재질은 펄스 에너지가 작으면서 빠른 펄스 상승률과 빠른 펄스 반복율이 요구되는 장치에 적당하다. 표 3은 CMD 5005의 특성표이며 그림 4는 3단 MPC 회로이다. 그림 4 에서 n번째 단의 가포화 인덕터 Ln의 코어 부피 Volume_{core} 은 (10) 식에서 구할 수 있다[15].

$$Volume_{core} = \frac{energy \cdot gain^2 \cdot \pi^2 \cdot \mu_0 \cdot (\mu_s \cdot P_f + 1 - P_f)}{4 \cdot (\Delta B_n)^2 \cdot P_f} \quad (10)$$

(10)식에서

- energy : 펄스 하나의 에너지
- gain : 펄스 압축률
- μ_0 : $4\pi \times 10^{-7}$
- μ_s : 자심이 포화되었을때의 비투자율
- P_f : 패킹 팩터
- ΔB_n : 가포화 인덕터 Ln의 자심 자속밀도 변화량이다.

표 3 페라이트 코어 CMD5005 특성표
Table 3 The characteristics of CMD 5005 ferrite material

초기 투자율 (μ_i)	1900
최대 투자율 (μ_m)	4000
포화자속밀도 (Bs), [Gauss]	3200
잔류자속밀도 (Br), [Gauss]	1800
보자력 (Coercive Force) (Hc), [Oersted]	0.17
비저항 (ρ), [Ohm-cm]	109
큐리 온도 (Curie Point) (Tc), [°C]	130

또한 가포화 인덕터의 코일 권선수 N_n 은 (11)식에서 구할 수 있다.

$$N_n = \frac{V_n \cdot \tau_{L_n}^{(s)}}{2 \cdot \Delta B_n \cdot A_{mm}} \quad (11)$$

(11)식에서

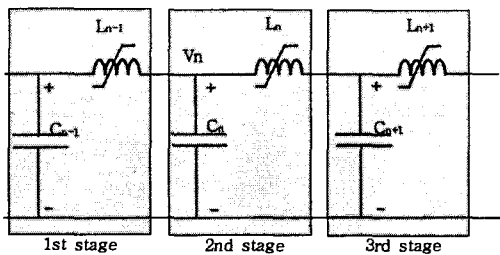


그림 4 3단 MPC 회로
Fig. 4 A 3-stage MPC circuit

- V_n : 가포화인덕터 Ln에 인가되는 전압
- $\tau_{L_n}^{(s)}$: 가포화 인덕터 Ln이 포화될 때까지 소요되는 시간
- ΔB_n : 가포화 인덕터 Ln의 자심 자속밀도 변화량
- A_{mm} : 자심 단면적

이다.

표 4는 앞에서 서술한 방법에 의해 설계된 가포화 인덕터의 정격이며 그림 5는 제작된 가포화 인덕터의 단면도이다. 그림 5에서 코일로 사용되는 도전체는 직경 1/4" 구리 파이프와 두께 2 mm 구리판이며 절연판은 두께 2 mm인 유리 섬유판이다. 자심과 자심 사이는 실리콘 고무 조각을 사용하여 3 mm 씩 이격시켜 냉각이 잘 이루어지도록 하였다. 그림 6은 제작된 자기펄스 압축장치의 모습이다.

표 4 가포화인덕터의 설계 정격
Table 4 The design parameters of the saturable inductors

	L1	L2	L3
자심 부피 (자심 개수)	316 cm ³ (4개)	316 cm ³ (4개)	316 cm ³ (4개)
권선 수	20 turns	9 turns	4 turns
포화인덕턴스	5440 nH	1102 nH	218 nH
가포화 인덕터를 흐르는 전류 폭	계산값	232 ns	92 ns
	측정값	240 ns	100 ns
	각단의 선로 인덕턴스 800 nH 고려한 계산값	246 ns	120 ns

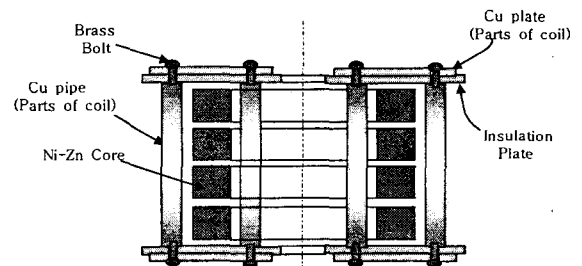


그림 5 제작된 가포화 인덕터 단면도
Fig. 5 A cross section of the saturable inductor

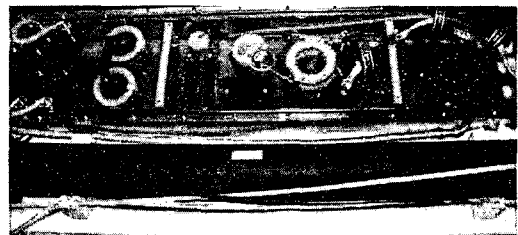


그림 6 제작된 자기펄스 압축회로의 모습
Fig. 6 A photograph of the constructed magnetic pulse compressor

4. 출력 특성

자기펄스압축회로의 각부분 펄스 전압은 고전압 탐침 (model P6015, Tektronix)을 사용하여 측정하였으며 전류는 전류 센서 (model 110, Pearson, U.S.A.)를 사용하여 측정하였다. 검출된 신호는 디지털 오실로스코프 (model DSA602A, Tektronix)를 사용하여 파형을 관측하였고 관측 결과를 바탕으로 자기펄스압축회로의 특성을 분석하였다.

그림 7 및 그림 8은 자기펄스압축회로의 각 부분 전압, 전류 파형을 동시에 측정한 모습으로서 펄스폭이 압축되는 모습을 볼 수 있다. 그림 9, 10, 11, 12는 각각 커패시터 C_1 , C_2 , C_3 , C_p 의 전압파형이며 그림 13, 14, 15, 16은 펄스 스위치 및 제 1, 제 2, 제 3 압축단에서의 전류 파형이다.

그림 9는 커패시터 C_1 과 가포화 인덕터 L_1 사이의 전압 파형이다. 직류 고전압 전원장치에서 공급되는 7.5 kV 직류 전압은 충전용 인덕터 L_c 를 거쳐 C_0 및 C_1 에 충전되면서 전압이 15 kV로 상승된다. C_0 에 충전된 전압은 사이라트론이 통전되면 극성이 반전되고 LC 공진 주기의 절반에 해당하는 시간이 경과하면 또다시 2 배 증폭되어 약 30 kV의 진폭을 가짐을 알 수 있다. 또한 시간축 -200 ns에서 시작하여 시간축 300 ns에서 최대 전압에 도달함을 알 수 있다. 이 시간은 C_0 의 전압이 완전히 반전되는 시간이며 또한 그림 13에서 알 수 있듯이 사이라트론이 통전되는 시간이다. 그림 13에서 전류의 펄스 폭도 500 ns 임을 확인 할 수 있다. 그림 10은 커패시터 C_2 의 전압파형이다. C_1 의 전압이 최대값에 도달한 시간 즉 300 ns 위치에서 전압이 급격히 상승하기 시작함을 알 수 있다. 최대 전압값에 도달할 때까지 경과한 시간은 240 ns이므로 펄스폭은 2.1 배 압축되었음을 알 수 있다. 이는 그림 14의 제 1 압축단 전류 파형에서도 확인할 수 있다. 그림 11은 커패시터 C_3 의 전압파형으로서 최대전압에 도달하는데 걸리는 시간은 100 ns이며 그림 15의 제 2 압축단 전류 폭 또한 100 ns 이다. 따라서 약 2.4 배의 펄스 압축이 이루어졌음을 알 수 있다. 그림 12는 커패시터 C_p 의 전압파형이고 그림 16은 제 3 압축단의 전류 파형으로서 최대전압에 도달하는 시간과 전류 펄스폭이 80 ns 이므로 펄스 압축율은 1.25 배임을 알 수 있다. 표 5는 제작된 자기펄스압축회로의 특성표이다.

파형 측정 결과에서 알 수 있듯이 자기펄스압축회로의 앞단은 펄스 압축률 및 전압 진폭이 설계값과 대체로 일치하지만 뒷단에서는 설계값과 일치하지 않음을 알 수 있다. 그 이유는 첫째 펄스폭이 압축될수록 코일 및 회로의 도체 표피효과가 증가하여 저항 손실이 많아지고, 둘째 자심의 자성체 손실 및 커패시터의 유전체 손실이 증가하기 때문이며, 셋째 펄스폭이 압축될수록 가포화 인덕터의 누설 인덕턴스 및 선로의 분포 인덕턴스가 상대적으로 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 특히 뒷단으로 갈수록 펄스폭의 압축이 어려운 이유는 각 압축단 사이의 선로 인덕턴스 등이 약 800 nH 가량 존재하기 때문으로 판단된다. 표 4에서와 같이 800 nH의 선로 인덕턴스는 5440 nH의 제 1단 가포화 인덕터의 포화 인덕턴스나 1102 nH의 제 2단 가포화 인덕터의

포화 인덕턴스에 비해서는 크기가 상대적으로 작아서 펄스 압축에 비교적 적은 영향을 미치나 제 3 가포화 인덕터의 포화 인덕턴스 값인 218 nH 보다는 4배 가까이 큰 값이므로 펄스 압축에 큰 장애를 주게 된다.

따라서 상기한 손실 및 누설 인덕턴스를 줄이기 위해서는 표면적이 넓은 코일을 사용하고 자심의 자성체 손실을 줄이기 위해서는 비저항율이 큰 자성체를 사용하는 것이 유리하다. 또한 커패시터는 고주파 특성이 우수한 것을 선택하여야 할 것으로 판단된다. 인덕터의 누설 인덕터를 줄이기 위해서는 패키징 팩터가 크도록 인덕터를 설계하여야 하며 코일은 균일하게 그리고 자심을 최대한 둘러싸는 구조로 인덕터를 제작하여야 할 것으로 판단된다. 또한 회로 인덕턴스를 줄이기 위해서 회로를 구성하는 도체는 최대한 넓은 것을 사용하며 선로간 거리를 최소로 줄여야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

사이라트론과 3단 자기펄스압축회로를 사용한 고전압, 고반복률 펄스 전원장치를 설계, 제작하였다. 제작된 펄스 전원장치는 투입전력 7 kW, 펄스 반복율 10 kHz, 출력펄스전압 26 kV, 출력전압 상승률 80 ns 의 특성을 가지며 펄스 압축률이 6.25인 자기펄스 압축회로를 사용함으로써 사이라트론에 가해지는 스위칭 스트레스를 대폭 완화시켰다. 따라서 사이라트론이 안정되게 동작함과 동시에 사이라트론의 수명을 대폭 향상시킬 수 있었다.

제작된 펄스 전원장치는 금속증기 레이저용 전원으로서 뿐만 아니라 엑사이머 레이저 등 다양한 종류의 기체 방전형 레이저 여기 전원, 공해물질 제거용 펄스전원 등의 분야에 널리 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

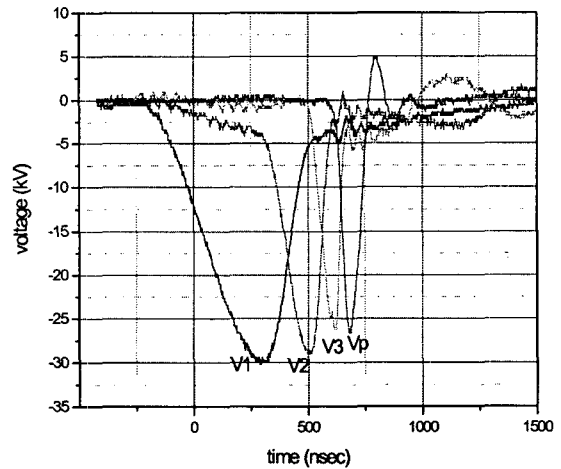


그림 7 자기펄스압축회로의 각부분 전압 파형
Fig. 7 The voltage waveform of the magnetic pulse compressor

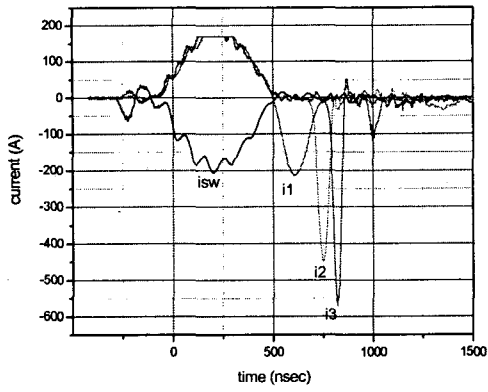


그림 8 펄스 스위치 및 각 압축단의 전류 파형
 Fig. 8 The currents waveform of the thyatron and the magnetic pulse compressor

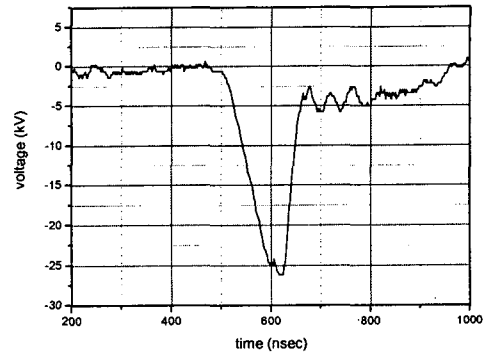


그림 11 전압 V_3 파형
 Fig. 11 The voltage waveform of V_3

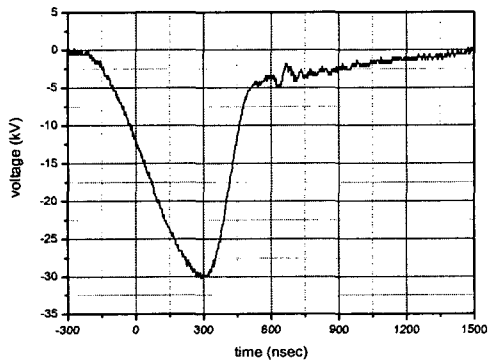


그림 9 전압 V_1 파형
 Fig. 9 The voltage waveform of V_1

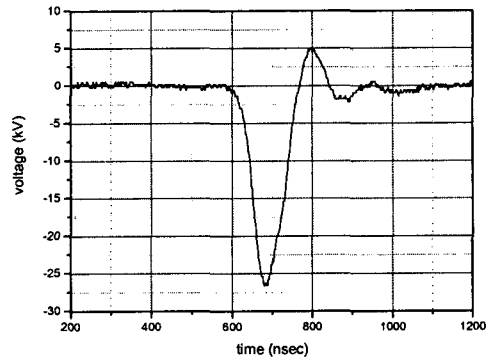


그림 12 전압 V_p 의 파형
 Fig. 12 The voltage waveform of V_p

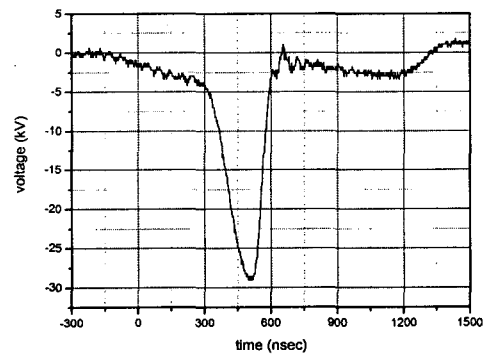


그림 10 전압 V_2 파형
 Fig. 10 The voltage waveform of V_2

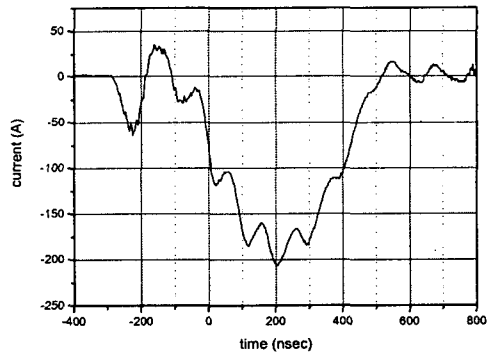


그림 13 사이라트론의 전류 i_{sw} 파형
 Fig. 13 The current waveform of i_{sw} through the thyatron

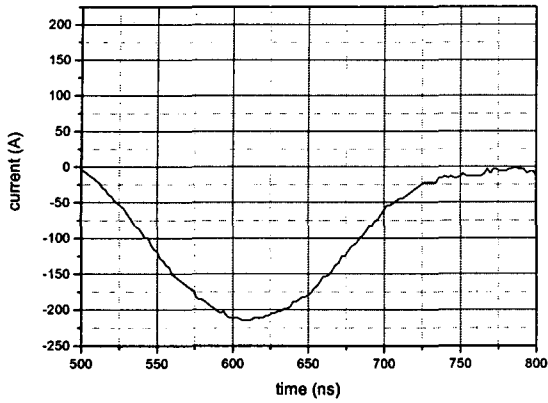


그림 14 제 1 압축단의 전류 i_1 의 파형
 Fig. 14 The current waveform of i_1 through the first stage of the MPC

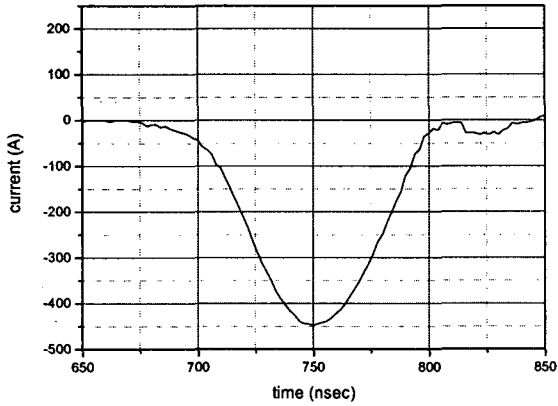


그림 15 제 2 압축단의 전류 i_2 파형
 Fig. 15 The current waveform of i_2 through the second stage of the MPC

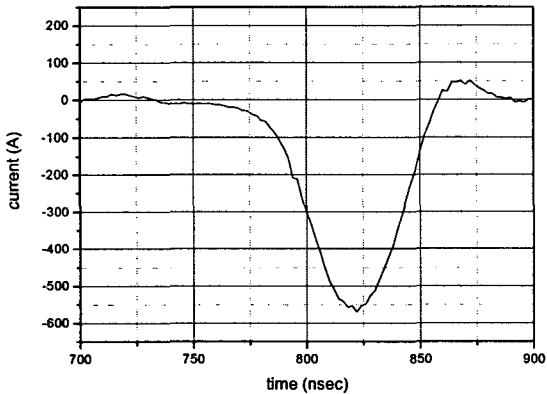


그림 16 제 3 압축단의 전류 i_3 파형
 Fig. 16 The current waveform of i_3 through the third stage of the MPC

표 5 제작된 자기펄스압축회로의 특성

Table 5 The characteristics of the constructed magnetic pulse compressor

		사이라 트론	제 1 압축단	제 2 압축단	제 3 압축단
펄스폭	목표값	500	218	95	41
	계산값	500	232	92	36
	측정값	500	240	100	80
펄스 압축율	목표값	-	2.3	2.3	2.3
	계산값	-	2.2	2.5	2.6
	측정값	-	2.1	2.4	1.25
전압 진폭	계산값	15 kV	30 kV	30 kV	30 kV
	측정값	-	30 kV	29 kV	26 kV
전송 효율	계산값	-	100%	100%	96%
	측정값	-	91%	99%	67%

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 2004년도 원자력연구개발사업과제의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Chris E. Little, Nikola V. Sabotinov, "Pulsed Metal Vapour Lasers", NATO Advanced Science Institutes Series, Pages 317-458, 1996.
- [2] A. Kearsley, "Copper vapor lasers", Proceedings of SPIE, High Power Gas Lasers, vol. 1225, pages : 270-276, 1990.
- [3] B.E. Warner, P.D. Weber, "High-power copper vapor lasers and their application to precision drilling and cutting", Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1993. LEOS '93 Conference Proceedings. IEEE , Pages: 782 -783, 1993 .
- [4] Y. Sano, N. Mukai, N. Aoki, C. Konagai, "Laser processing to improve residual surface stress of metal components", Advanced Applications of Lasers in Materials Processing/Broadband Optical Networks/Smart Pixels/Optical MEMs and Their Applications. IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings: , Pages: 30-31, 1996.
- [5] N.A. Lyabin, et al., "Development of industrial copper vapor lasers and their applications in techniques", International Conference on Lasers Proceedings, pages: 359-366, 1997.
- [6] R. Farlow, et al., "Micromachining of a piezo-composite transducer using a copper vapor laser", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on , Volume: 48 Issue: 3 , Pages: 639-640, May 2001.
- [7] S. Gabay, I. Smilanski, et al., "Stabilization of high-

power copper vapour laser", Optical and Quantum Electronics 23, pp S485, 1991.

- [8] Hironobu Kimura, et al., "Long Life of a Copper Vapor Laser", The Review of Laser Engineering, V.23, No.3, pp 210, March, 1995.
- [9] 진정태, 차병헌, 김철중, 이흥호, "진공관 전원방식 30 W급 구리증기레이저", Trans. KIEE. Vol. 52C, No. 12, Pages 568-572, DEC. 2003.
- [10] 진정태, 차병헌, 김철중, 이흥호, "IGBT를 사용한 금속 증기레이저용 펄스 전원", Trans. KIEE. Vol. 53C, No. 8, Pages 415-419, AUG. 2004.
- [11] Varian Eimac, "EIMAC power grid tubes and accessories", Quick Reference Catalog 489.
- [12] English Electric Valve Co., "EEV/M-OV Electron Tubes", Product Data.
- [13] W. S. Melville, "The use of saturable reactors as discharge device for pulse generators", IEE Proceedings Radio section, pp 185 - 207, 1951.
- [14] D. L. Birx, et al., "Basic principles governing the design of magnetic switches", Lawrence Livermore National Laboratory, UCID 18831, 1980.
- [15] H.C. Kirbie, "Magnetic switching", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-100910, 1989.
- [16] D.L. Birx, et al., "The use of magnetic compression based on amorphous alloys as drive for induction LINACS", Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-90788, 1984.
- [17] E. G. Cook, et al., "High average power magnetic modulator for copper lasers", IEEE 8th Pulsed Power Conference, pp 537, 1991.
- [18] H. Deguchi, et al., "Efficient design of multistage magnetic pulse compression", IEEE J. of Quantum Electronics, Vol 30, NO 12, pp2934-2938, 1994.
- [19] M.H. Cho et al., "Development of 2-stage magnetic pulse compression modulator", J. Accel. Plasma Res., Vol 1, No. 2, 58 - 65, 1996.
- [20] Young-Wook Choi, et al., "Development of a Magnetic Pulse Compression Modulator for Flue Gas Treatment", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 30, No.5, pp1632 - 1636, October 2002.
- [21] Questek, Inc., "The technology of V β ", Questek, Inc. Technical Note No. 9, April, 1990.

저 자 소 개



진 정 태(陳 埕 泰)

1961년 2월 15일 생. 1986년 경북대 전자공학과 졸업. 2000년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국원자력연구소 양자광학기술개발부 선임연구원.



차 병 헌(車 秉 憲)

1957년 8월 18일 생. 1981년 경북대 물리학과 졸업. 1983년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 물리학과 졸업(박사). 현재 한국원자력연구소 양자광학기술개발부 책임연구원.



이 흥 호(李 興 浩)

1950년 10월 28일 생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수.