

포항방사광가속기 킥커 대출력 펄스전원장치

남상훈, 정성훈, 한성훈, 서재학, 하기만

포항가속기연구소, 포항공과대학교

KICKER MAGNET MODULATOR IN PLS

S. H. Nam, S. H. Jeong, S. H. Han, J. H. Suh, K. M. Ha
 Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, Pohang 790-784, Korea

Abstract - The 2.0 GeV Pohang Light Source (PLS) is consisted of a full energy Linac and a storage ring. Four kicker magnets are installed in the storage ring tunnel to move the stored beam orbit in the storage ring closer to the injected beam from the beam transfer line. The injected beam then falls into the storage ring beam dynamic aperture. A kicker magnet modulator drives all four kicker magnets to maintain field balance and also synchronized kick of the beam. The kicker modulator can handle 2 GeV full energy beam. The kicker magnet modulator is installed in the storage ring tunnel and under stable operation. Specification of the kicker magnet modulator is $\sim 6.0 \mu\text{s}$ pulse-width, 200 ns flat-top width with $\pm 0.2\%$ regulation, $\sim 24 \text{ kA}$ peak current, and 10 Hz repetition rate. Two thyratron switches (EEV CX-1536AX) are used in the system. In this article, design, and experimental results of the kicker magnet modulator are discussed.

1. 서 론

포항방사광가속기는 제 3세대 가속기로서 선형가속기와 저장링으로 이루어져 있다. 선형가속기의 전자총에서 발생된 전자빔이 선형가속기를 지나면서 2.0 GeV의 에너지를 갖도록 가속된 후, 범수송선을 통해 저장링으로 전송된다. 선형가속기는 지하에 위치하며 저장링은 지상에 위치하고 있다. 따라서, 선형가속기로부터 나오는 빔이 저장링에 입사되기 위해서는 수직 경로로 굴절된 후 이를 다시 수평 경로로 굴절시켜야 한다. 전자빔의 최종 위치는 저장링의 빔 저장궤도와 같은 높이에 일치해야 한다. 최종 단에서 전자빔을 굴절시키는 역할은 입사전자석(septum magnet)이 하게 된다. 이렇게 굴절된 전자빔이 저장링의 전자빔 운동 범위 내에 들어가도록 하는 것이 킥커전자석이다. 그림 1에 전자

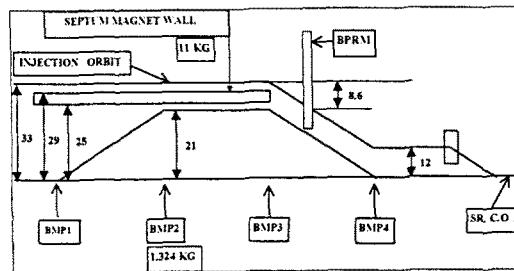


그림 1. 전자빔 입사 시 빔의 범프궤도 개념도
 (단위: mm)

표 1. 킥커전자석 사양

Parameter	Specification
Beam Energy	2.0 GeV
Bending Field	0.1324 T
Max. Relative Field Deviation	0.5 %
Max. Jitter between Magnets	6 ns
Number of Turns per Pole	1 turn
Resistance of Magnet @40 °C	8.28 mΩ
Inductance of Magnet	0.867 μH

빔의 범프궤도(Bump Orbit)에 대한 개념을 나타내었다. 입사되는 빔(그림1에서 Injection Orbit)은 초기에는 입사전자석의 얇은 벽(그림1에서 Septum Magnet Wall)으로 분리되어 있다. 저장링에서 정상궤도(그림1에서 SR C.O.)로 운동하고 있는 전자빔을 굴절시키기 위해 4대의 킥커전자석이 사용되는 데, 이를 킥커전자석은 전자빔의 운동궤도를 입사전자석의 얇은 벽 쪽으로 근접시켜서 입사되는 전자빔과 저장된 전자빔이 함께 저장링의 전자빔 운동 범위 내에 들어가게 한다. 그림 1에서 처음 두 개의 전자석(BMP1, BMP2)은 저장된 빔을 같은 양만큼 서로 반대 방향으로 굴절시켜, 결과적으로 원래의 빔 위치에서 전체적으로 21 mm 평행하게 이동시킨다. 다른 두 개의 자석(BMP3, BMP4)들은 이동된 빔 궤도를 원래의 궤도로 돌아가게 한다. 전자빔이 입사 시 전자빔의 형태와 위치를 관

축하기 위하여 빔형상 화면(BPRM)이 사용되며 21 mm 범프거리는 화면상에 8.6 mm 범위 이동으로 나타난다. 2.0 GeV 저장령 운전에서의 킥커전자석의 주요 변수들은 표 1에 주어져 있다. 단 1 대의 킥커 펄스전원장치가 4대의 킥커전자석에 흐르는 전류의 평형과 각각의 자석 사이의 시차를 맞추면서 구동하도록 사용된다. 킥커 펄스전원장치의 바람직한 출력 전류의 형태는 반 사인파이다. 이 펄스전원장치는 저장령 터널에 설치되어 2.0 GeV 운전에 사용되고 있다.

2. 이 론

4 대의 킥커전자석을 구동하는 킥커 펄스전원장치는 기본적으로 직렬 공진 회로이다. 출력 전류의 펄스 형태는 시스템의 인덕턴스 L_i 와 커페시턴스 C_i 그리고 저항 R 에 의해 결정된다. 충전 전압이 V_0 일 때 전류의 정규식은

$$i(t) = \frac{V_0}{\omega L_i} e^{-\left(\frac{R}{2L_i}\right)t} \sin(\omega t) \quad \text{이며}$$

$$\text{여기에서 } \omega = \sqrt{\frac{1}{L_i C_i} - \frac{R^2}{4L_i^2}} \quad \text{이다.}$$

출력 전류의 형태는 반 사인파이다. 시스템의 저항 성분이 낮다고 가정하면 펄스의 폭은

$$\text{Pulse-width} \approx \pi \cdot \sqrt{L_i C_i}, \text{로 주어진다.}$$

한 펄스의 에너지는 다음과 같다.

$$E_i = \frac{1}{2} C_i V_0^2$$

킥커전자석을 구동하기 위한 킥커 펄스전원의 사양은 표 2 과 같다.

3. 회로의 구현

그림 2는 킥커 펄스전원장치의 회로에 대한 구성도를 보여준다[1]. 킥커 펄스전원장치의 주요 부분으로는 고전압 전원장치(HVPS), 싸이라트론(Th₁, Th₂)과 커페시터(C_{m1}, C_{m2})가 있다. 고전압 전원장치는 일정 전류모드로 동작한다. 고전압 전원장치의 최대 출력은 30 kV에서 8 kJ/s이다. 싸이라트론은 EEV의 CX1536AX로 최대 10 kA의 출력 전류와 250 MW의 출력을 낼 수 있다. 킥커의 충전 구조는 충전 저항(R_{ch}), 충전 다이오드(D_{ch1}, D_{ch2})와 주 커페시터(C_{m1}, C_{m2})로 구성되어 있다. 킥커의 방전 구조의 주요부분은 싸이라트론, 역 에너지 분산 구조(D_{ds1} 와 R_{ds1}, D_{ds2} 와 R_{ds2})와 과도현상 억제구조(R_{f1} 와 C_{f1}, R_{f2} 와 C_{f2})로 구성되어 있다. 한번 충전된 후, 두개의 싸이라트론을 동시에 도통하여 주 커페시터의 에너지를 빠르게 부하(L_{L1}, L_{L2}, L_{L3}, L_{L4})로 방전한다. 이 회로에서의 부하는 킥커전자석으로 그림1의 BMP1-BMP4에 해당한다. 역 에너지

표 2. 2.0 GeV 킥커 펄스전원의 사양

Parameter	Specification
Peak Current	24.06 kA
Pulse-width	6.0 μs
FWHM	4.0 μs
Flat-top Width(<±0.2%)	200 ns
Repetition Rate	10 Hz
Peak Charging Voltage	16.5 kV
Total System Inductance	1.17 μH
Total Load Inductance	0.867 μH
Total Stray Inductance	0.303 μH
Total System Capacitance	3.2 μF
Energy per Pulse	435.6 Joule

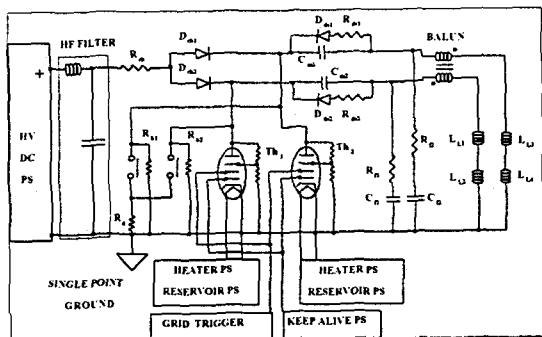


그림 2. 킥커 펄스전원장치 회로 구성도.

HV DC PS: High Voltage DC Power Supply (30 kV, 8kJ/s)

C_{m1}, C_{m2}: Main Capacitor (1.6 μF, 30 kV, 80 % reversal each)

L_{L1}, L_{L2}, L_{L3}, L_{L4}: Kicker Magnet (0.867 μH each)

R_{f1}, R_{f2}: Surge Suppression Resistor(5Ω)

C_{f1}, C_{f2}: Surge Suppression Capacitor (178 nF each)

HF Filter: High Frequency Filter/ R_{ch}: Charging Resistor(60Ω)

R_{b1}, R_{b2}: Bleeding Resistor(20MΩ) D_{ch1}, D_{ch2}: Charging Diode

R_{ds1}, R_{ds2}: Discharge Resistor(2Ω) D_{ds1}, D_{ds2}: Discharge Diode

Th₁, Th₂: EEV CX1536AX Thyatron R_d: Dump Resistor(5kΩ)

분산구조는 주 커페시터와 병렬로 연결되어 순방향으로 충전되는 에너지는 유지시키며 주 커페시터에 역으로 충전되는 전압을 방전시킨다. 역전압의 빠른 방전은 다음 펄스이전에 주 커페시터를 일정한 초기 조건으로 만들며 또한 충전되는 동안에 생기는 고전압 직류 전원장치의 과도한 충전 전류를 감소시키는데 필요하다. 직렬로 연결된 RC회로(R_{f1} 와 C_{f1}, R_{f2} 와 C_{f2})는 전자석 부하와 병렬로 연결되어 방전이 끝난 후에 부하 전류의 연속성을 유지하게 한다. 부하 전류를 유지함으로서 싸이라트론과 커페시터에 급격한 역전압이 인가되는 것을 최소화할 수 있다. 싸이라트론은 역으로 도통하지 않으므로 전체 역전압은 싸이라트론에 의해 통제된다. 하지만, 회로 구성 상 최대로 생성될 수 있는 -16 kV의 역전압은 싸이라트론이 견딜 수 없으며, 커페

시터의 수명도 큰 영향을 받게된다. 따라서 싸이라 트론과 커페시터의 역전압을 감소시키는 것은 이런 종류의 공진 회로에서는 매우 중요하다. 역전압을 감소시키는 것은, 앞서 언급한바와 같이, 역 에너지 분산구조와 과도현상 억제구조로 구현되었다.

4. 측정결과

실험에서 측정된 킥커 펄스전원장치의 전류가 그림 3에 보여졌다. 16 kV로 커페시터(C_{ml} , C_{m2})를 충전하였을 때 첨두 전류가 22.8 kA이다. 이 과정에서 나타난 바와 같이 약 7 μ s에서 2.2 kA의 역전류가 존재한다. 이 역전류는 과도현상 억제 구조(R_{fl} 와 C_{fl} , R_{cl} 와 C_{cl})에 의한 현상으로 전체적인 운전 조건에 큰 영향을 미치지 않았다. 영 전류에서 영 전류까지의 시간을 측정한 펄스 폭은 6.32 μ s이다. 앞에서 설명된 바와 같이 킥커 펄스전원의 출력전류 크기에 따른 범의 범프거리는 범형상 화면을 통하여 측정되며 21 mm 범프는 화면상에 8.6 mm로 나타난다. 2 GeV의 전자빔을 입사할 때, 각각 5 kA, 10 kA, 15 kA, 20 kA로 변화시키며 입사되는 전자빔의 위치변화를 범형상 화면(그림1의 BPRM)을 통해 관측한 것이 그림 4의 (a), (b), (c), (d)에 나타나 있다. 입사전자빔의 위치는 전류가 인가되지 않은 상태에서는 정 중앙에 위치하게 되며 전류가 증가함에 따라 중심으로부터 점차적으로 오른쪽으로 이동되는 것을 보여주고 있다. 여기서 눈금과 눈금사이의 간격은 5 mm로 실제 범프거리 12.2 mm에 해당한다. 범형상 화면에서 측정된 결과를 이용하여 실제 전자빔의 범프거리를 추정한 결과가 표 3에 있다. 표 3에는 또한 측정 범프거리를 이용하여 계산된 부하 킥커전자석에서의 자계의 세기, 각 전자석 당의 측정 및 계산된 전류치가 열거되었다. 표 3에서 전자빔의 범프량을 통해 계산된 전류량이 실제로 부하에 흐르는 전류의 량과 매우 잘 일치되고 있음을 알 수 있다. 계산된 전류 값과

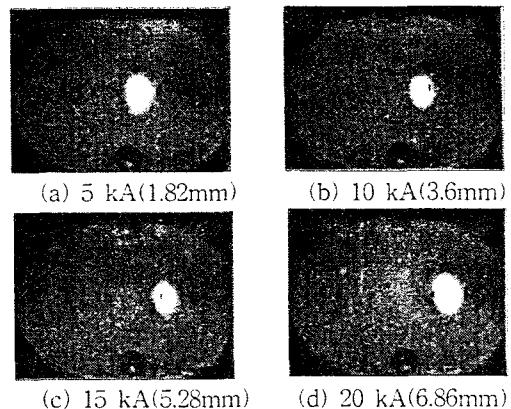


그림 4. 화면에 나타난 전류에 따른 범의 이동

측정된 전류값의 차이는 전자빔의 위치를 측정할 때 발생한 측정오차에 의한 것이라 생각된다. 현재 킥커 펄스전원장치는 2 GeV의 전자빔을 저장링에 입사할 때 평균적으로 17 kA의 전류를 킥커전자석에 공급하여 전자빔의 궤도를 15.11 mm 범프하고 있다. 이렇게 하는 이유는, 이 범프거리에서 전자빔의 입사효율이 가장 높았기 때문이다.

표 3. 킥커 전류에 따른 범프 거리

	Bump Distance (mm)	Calculated B field (T)	Kicker Magnet Current Calculated (A)	Measured (A)
5 kA	4.534	0.04	1276	1240
10 kA	9.03	0.08	2549	2480
15 kA	13.19	0.117	3717	3690
20 kA	17.12	0.151	4815	4860

5. 결 론

포항방사광가속기의 선형가속기에서 가속된 전자를 저장링에 입사하기 위한 킥커 펄스전원장치가 설계 및 제작되어 성공적으로 운전 중이다. 킥커 펄스전원장치는 2 GeV의 전자빔의 궤도를 최대 21 mm 범프시킬 수 있도록 제작되었다. 현재 킥커 펄스전원장치는 2 GeV의 전자빔을 저장링에 입사할 때 평균적으로 17 kA의 전류를 킥커전자석에 공급하여 전자빔의 궤도를 15.11 mm 범프하고 있다. 이 전류에서 범의 입사 효율이 가장 높았다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.H. Nam, et. al., "Kicker Magnet Modulator in 2GeV Pohang Light Source." 4th Int. Conf. on Synchrotron Radiation Sources, 1995 pp 237-244

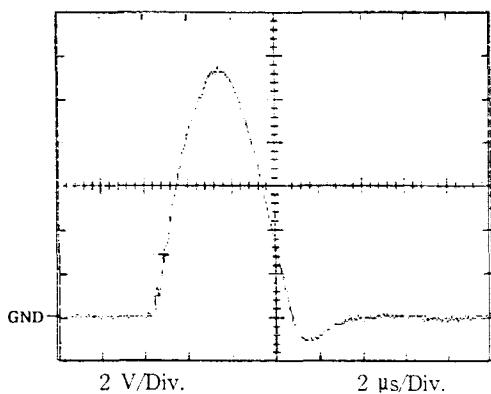


그림 3. 킥커 펄스전원장치의 출력전류 (@16 kV)
2 kA/V, 22.8 kA peak, 6.32 μ s pulse-width