

## 포항방사광가속기 킥커 대출력 펄스전원장치 운전특성

남상훈, 정성훈, 고인수  
포항가속기연구소, 포항공과대학교

### OPERATING CHARACTERISTICS OF THE PLS INJECTION KICKER MODULATOR

S. H. Nam, S. H. Jeong, I. S. Ko  
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, Pohang 790-784, Korea

**Abstract** - The Pohang Light Source (PLS) is a third generation 2 GeV synchrotron machine. An injection kicker modulator is positioned in the PLS storage ring tunnel. The kicker modulator is driving four kicker magnets simultaneously. The kicker magnets produce magnetic field to deflect the stored beam orbit in the storage ring closer to the injected beam from the PLS beam transfer line. The injected beam then falls into the storage ring beam dynamic aperture. The current kicker modulator was upgraded and installed on August 1995. Since then, the kicker modulator has shown very reliable and stable performance. The kicker modulator specifications are ~6.0  $\mu$ s full width, ~24 kA peak current, and 10 Hz repetition rate. Output current waveform is a half sinusoid. Two thyatron switches (EEV CX-1536AX) are used in the kicker modulator. Total accumulated thyatron heater run hour is about 15,000 hours as of May 1998. Measurement result of spatial magnetic field distribution in the kicker magnet shows good uniformity

표 1. 2 GeV 운전에서의 킥커 모듈레이터의 사양

Parameter	Specification
Peak Current:	24.06 kA
Pulse-Width:	6.0 $\mu$ s
FWHM:	4.0 $\mu$ s
Flat-top Width (< 0.2%):	200 ns
Repetition Rate:	10 Hz
Peak Charging Voltage:	16.5 kV
Total System Inductance:	1.17 $\mu$ H
Total Load Inductance:	0.867 $\mu$ H
Total Stray Inductance:	0.303 $\mu$ H
Total System Capacitance:	3.2 $\mu$ F
Energy per Pulse:	435.6 Joule
Maximum Operable Beam Energy:	2.0 GeV

### 1. 서론

포항가속기연구소는 제 3세대 방사광 가속기이다. 선형 가속기에서 방출된 2억 전자볼트의 전자빔은 빔 전송선을 통해 저장링으로 전송된다. 빔 전송선으로부터 올라오는 빔은 킥커전자석에 의해 저장링의 빔 운동 범위로 들어오게 된다. 4대의 킥커전자석이 저장링의 빔 궤도를 변형시키는데 사용되는데, 정상궤도의 빔을 선택 전자석의 벽 가까이로 근접시켜서 입사되는 빔과 함께 저장링의 빔 운동범위 내로 들어가게 한다. 단 한대의 킥커 모듈레이터가 4대의 킥커전자석을 구동하는데 사용되며, 4대의 전자석에 똑같은 전류를 정확한 시간에 공급한다. 바람직한 전류의 형태는 반파형현파이다.

### 2. 입사용 킥커모듈레이터

#### 2.1 일반

그림1은 킥커 모듈레이터의 회로구조를 나타냈다. 입사용 킥커 모듈레이터는 기본적으로 간단한 직렬 공진 회로이다. 전자석을 구동하기 위한 킥커 모듈레이터의 사양은 표 1에 나타나 있다. 역 에너지 분산구조(Dds1 와 Rds1, Dds2 와 Rds2)는 주 커패시터와 병렬로 연결되어 순방향으로 충전되는 에너지는 유지시키며 주 커패시터에 역으로 충전되는 전압을 방전시킨다. 역전압의 빠른 방전은 다음 펄스 이전에 주 커패시터를 일정한 초기조건으로 만들며 또한 충전되는 동안에 생기는 고전압 직류전원장치의 침투전류를 감소시키는데 필요하다.

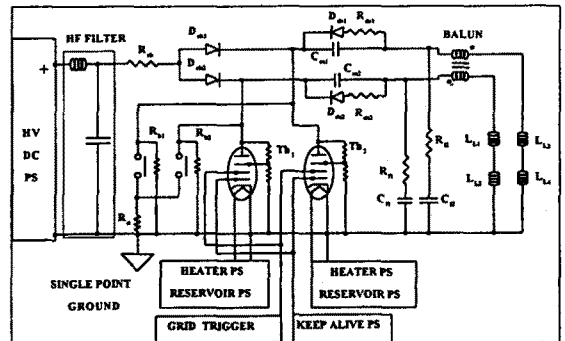


그림 2. 킥커 모듈레이터의 회로 구성도.

- HV DC PS: High Voltage DC Power Supply (30 kV, 8kJ/s)
- Cm1, Cm2: Main Capacitor (1.6  $\mu$ F, 30 kV, 80 % reversal each)
- Lk1, Lk2, Lk3, Lk4: Kicker Magnet (0.867  $\mu$ H each)
- Rn, R2: Surge Suppression Resistor(5 $\Omega$ )
- Cn, C2: Surge Suppression Capacitor (178 nF each)
- HF Filter: High Frequency Filter/ Rch: Charging Resistor(60 $\Omega$ )
- Rb1, Rb2: Bleeding Resistor(20M $\Omega$ ) Dch1, Dch2: Charging Diode
- Rds1, Rds2: Discharge Resistor(2 $\Omega$ ) Dds1, Dds2: Discharge Diode
- Th1, Th2: EEV CX1536AX Thyatron Rd: Dump Resistor(5k $\Omega$ )

직렬로 연결된 RC회로(Rf1 and Cf1, Rf2 and Cf2)는 전자석부하와 병렬로 연결되어 방전이 끝난 후 부하 전류의 연속성을 유지하게 한다. 부하전류를 유지함으로

서 사이라트론과 커패시터에 급격한 역전압이 인가되는 것을 최소화 할 수 있다. 사이라트론은 역으로 도통하지 않으므로 전체 역전압은 사이라트론에 의해 통제된다. 하지만, 회로구성상 최대로 생성될 수 있는 -16 kV의 역전압은 사이라트론이 견딜 수 없으며, 커패시터의 수명도 큰 영향을 받게된다. 따라서 사이라트론과 커패시터의 역전압을 감소시키는 것은 이런 종류의 공진회로에서는 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와같이 역전압의 감소는 역 에너지 분산구조와 과도현상 억제구조로 구현되었다. 키퍼 모듈레이터를 보조하는 장치로서는 사이라트론 전원장치와 사이라트론 트리거증폭기, 측정감지장치와 기구 제어장치 등이있다. 기구 제어장치는 마이크로 프로세스를 이용하여 시스템을 관리한다. 기구 제어장치는 모든 전원장치의 필요한 전압과 전류, 보호장치와 저장링 제어실과의 통신상태를 표시한다. 표준IEEE 422 포트가 주 통신의례로서 사용된다. 고전압 전원장치와 기구 제어장치는 저장링의 RF건물에 위치하여 빔 운전 중에도 운전자가 자유롭게 접근할 수 있다. 다른 장치들은 불필요한 기생 인덕턴스나 커패시턴스를 줄이기 위하여 부하인 마그네트에 가까이 설치 되어있다

사용된 사이라트론은 EEV CX1536A로 최대 전류 10 kA와 250 MW 최대출력을 낼 수 있다. 표 1에 나타났듯이 2 GeV에서 요구되는 부하 전류는 24.06 kA이다. 2개의 사이라트론이 사용되므로 각각의 사이라트론에 흐르는 최대전류는 12.03 kA이다. 그러므로, 우리는 최대정격보다 높은 상태로 사이라트론을 구동하고 있다

## 2.2 입사용 키퍼 모듈레이터의 성능

그림 2는 측정된 부하전류를 보여준다. 측정된 최대 부하전류는 충전 전압 16 kV일 때 22.8 kA이다. 역으로 흐르는 전류는 7  $\mu$ s 부근에서 2.2 kA이다. 측정된 전체 펄스 폭과 FWHM은 각각 6.32  $\mu$ s, 4.08  $\mu$ s였다. 회로의 부하전류파형은 완전한 대칭이 아니며 역전류가 흐르고 있다. 역 전류는 RC과도현상 억제회로에 의한 것으로 부하전압 과도상태와 사이라트론의 역전압을 감소시키기 위하여 RC회로에 있는 에너지를 이용하여 부하전류의 연속성을 유지시켜 준다. RC과도현상 억제회로가 없으면, 이 역전압은 사이라트론이 견딜 수 있는 최대허용치 10 kV보다 크게 된다. 사이라트론에 인가되는 전압을 측정 한 것이 그림 3에 나타나있다. 그림 3의 (a)는 10 Hz운전되는 동안에 사이라트론에 인가되는 전압을 보여준다. 사이라트론에 인가되는 전압은 주 커패시터의 충전전압 16 kV와 같다. 사이라트론이 접호될 때, 커패시터의 에너지는 급속히 방전되며 사이라트론의 전압은 거의 0전위로 떨어진다. 사이라트론이 도통할 때 시간축으로 확장하여 본 파형이 그림 3의 (b)에 나타나있다. 그림에서, 사이라트론의 역전압이 10 kV보다 작음을 분명히 알 수 있다.

입사용 키퍼 모듈레이터는 1995년 8월에 설치되었다. 사이라트론의 히터 운전시간은 1995년에 2,500시간, 1996년에 5100시간, 1997년에 6100시간이다. 총 운전시간은 1998년 5월까지 15,000시간이다. 설치한 이후 현재까지 몇 번의 고장이 기록되었다. 하지만, 사이라트론이나 주 커패시터, 고전압 전원장치에서는 어떠한 심각한 문제도 발생하지 않았다. 대부분의 고장은 강한 스위칭 잡음이 통신과 제어회로에 영향을 줌으로써 발생하였다. 이런 종류의 고장은 복귀버튼을 눌러주면 해결되는 간단한 문제들로서 전체 입사시간을 지연시키지 않았다. 그 외에는 사이라트론 트리거 증폭기의 고장이 2번 발생하였다. 트리거증폭기의 고장은 반도체소자인 IGBT를 교체하는 것으로 해결되며 소요되는 시간은 약 3시간 정도이다. 입사용 키퍼 모듈레이터의 전체적인 성능은 높은 신뢰성과 안정된 운전 성능을 보여주었다. 키퍼 모듈레이터가 정상적으로 동작할 때의 운전조건이 표 2에 나타나있다. 표 2의 변수들은

표1이 보여준 변수와 차이가 나는 부분만 열거하였다. 표 2에 주어진 최대출력전류에서, 2.0 GeV의 전자빔이 약 14 mm(11.13mrad) 범프된다.

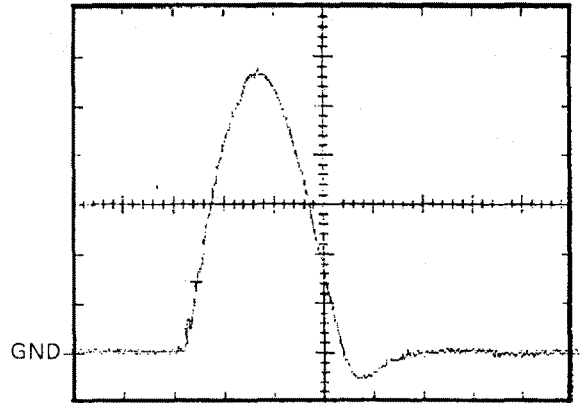
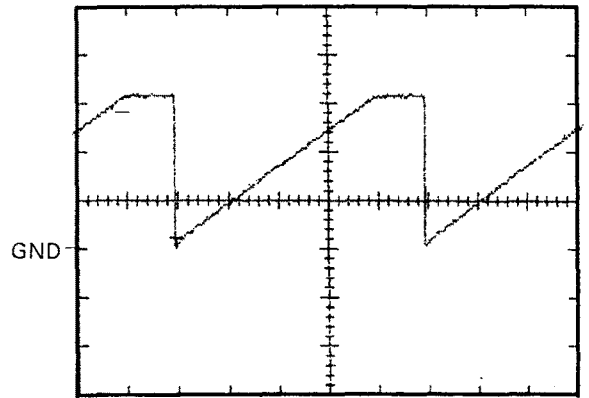
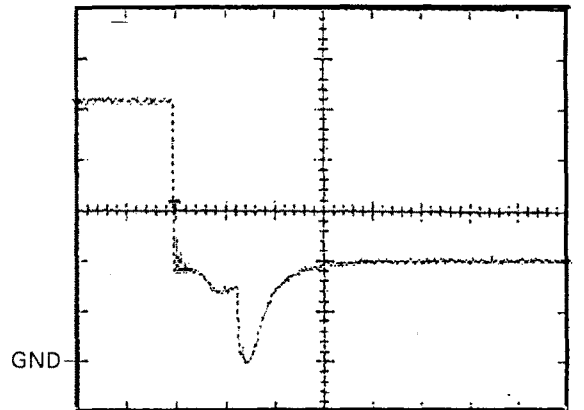


그림. 2 측정된 부하전류 (16 kV 충전)  
(4 kA/Div., 2 $\mu$ s/Div.). 22.8 kA peak,  
6.32  $\mu$ s pulse-width, 4.08  $\mu$ s FWHM



(a) 10 Hz운전시 전압  
(5kV/Div., 20 ms/Div.) 16kV peak



(b) (a)의 확장 (5kV/Div., 2 $\mu$ s/Div.)

16kV peak  
그림. 3 사이라트론 전압의 실험결과  
(16 kV 충전)

표 2. 입사용 키퍼 모듈레이터의 정상운전조건

Parameter	Operating value
Charging voltage [kV]:	11 - 12
Peak output current [kA]:	16 - 18
Thyratron No. 1:	
Heater Voltage [V]:	6.23
Heater Current [A]:	88.5
Reservoir Voltage [V]:	6.3
Reservoir Current [A]:	7.2
Thyratron No. 2:	
Heater Voltage [V]:	6.22
Heater Current [A]:	90.6
Reservoir Voltage [V]:	6.3
Reservoir Current [A]:	7.13

### 3. 키퍼 전자석

표3은 2 GeV 저장링 운전에서의 키퍼 전자석의 주요 변수들을 나타낸 것이다. 키퍼 전자석의 공간 자장분포와 전자석이 운전 가능한 최대전류 특성을 연구하였다. 그림 4는 키퍼 전자석의 코어구조와 자장측정 축을 나타낸 것이다. 코어의 재질은 MN-80C페라이트이다. 자속 감지기와 적분기를 사용하여 자장을 측정하였다. X축과 Z축을 따라 측정된 자장분포는 전자석의 전부분에 걸쳐 매우 균일하게 측정되었다. 그림 5는 Z축 방향의 자장 분포도이다. 그림 6은 전자석에 공급되는 전류를 증가시키면서 측정된 최대자속밀도의 변화를 그래프화한 것이다. 그림에서 보듯이 자성체는 12 kA부근에서 포화되기 시작한다. 이 측정을 통하여, 현재의 키퍼 전자석으로 12 kA까지 운전이 가능하다고 결론 지을 수 있다. 이 최대 운전전류는 2 GeV의 빔을 21 mm 또는 16.7 mrad 범프할 수 있다. 21mm범프는 2.0 GeV에서의 '요구사양이다. 2.0 GeV 보다 높은 에너지를 갖는 전자빔을 입사하기 위해서는 키퍼 전자석의 코어를 더 큰 것으로 교체하여야 한다.

표 3. 키퍼 전자석 사양

변 수	사양
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

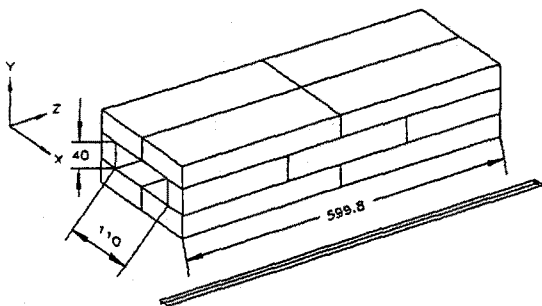


그림 4 키퍼 전자석의 코어구조.

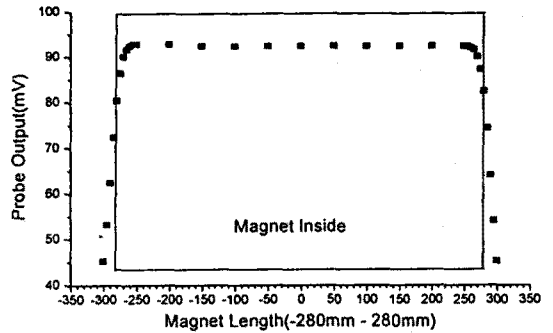


그림 5 키퍼 전자석의 Z축 공간자장분포.

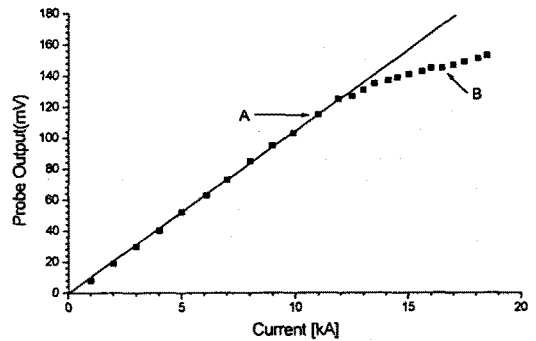


그림 6 키퍼 전자석의 최대전류 대 최대 자속밀도.

### 3. 결 론

입사용 키퍼 모듈레이터가 1995년 8월에 설치되었다. 키퍼 모듈레이터는 4대의 키퍼 전자석을 구동하여 입사되는 전자빔이 저장링의 빙 운동궤도에 들어가게 한다. 총 운전시간은 1998년 5월까지 약 15,000시간으로 매우 안정된 운전을 하고있다. 실험결과는 현재의 키퍼 전자석에서 자장의 평형도가 매우 만족스럽고 최대전류 12 kA까지 운전할 수 있음을 보여준다. 이 최대 운전 전류로 2 GeV의 전자빔을 21 mm 또는 16.7 mrad 범프할 수 있다.

#### [참고문헌]

- [1] John Milburn, "Model bump magnet design parameters", PAL Engineering Note IN-002, June 1992.
- [2] John Milburn and Namsoo Shin, "Injection system parameter list", PAL Engineering Note IN-007, July 1992.
- [3] S. H. Nam, S. H. Jeong, S. H. Han, J. H. Suh, and K. M. Ha, "Kicker magnet modulator in 2 GeV Pohang Light Source", 4th Int. Conf. on Synchrotron Radiation Sources, Kyungju, Korea, Oct. 1995.