

대출력 펄스 클라이스트론 부하의 성능시험

장성덕, 손윤규, 오종석
포항공과대학교 가속기연구소

Performance Test of High-Power Pulsed Klystron-Load

S. D. Jang, Y. G. Son, J. S. Oh
Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH

Abstract - 포항 방사광 가속기의 선형가속기는 2.5 GeV 전자빔 용 마이크로웨이브의 발생을 위하여 80 MW 급 클라이스트론(klystron) 11대와 입사부 용 65 MW 급 클라이스트론 1대를 사용한다. 80-MW 급 클라이스트론 부하를 구동하기 위하여 최대 펄스 정격출력 200 MW(400kV, 500A, 평탄도 4.4 μs)인 대출력 펄스 전원공급 장치(modulator)가 요구된다. 모듈레이터 시스템 용 PFN(pulse forming network) 커패시터의 충전용 입력전원으로써 최대 출력전압 50 kV, ± 0.5% 이내의 전압제어가 가능한 고전압 인버터 전원장치를 적용하여 클라이스트론 부하의 성능시험을 수행하였다. 클라이스트론의 RF 전력과 입력 빔의 특성을 정확히 측정하기 위하여 응답특성이 양호한 측정 장치와 정밀한 측정이 요구된다. 인버터 시스템의 적용에 따른 모듈레이터의 충전 특성을 파악하였으며, 방향성 결합기와 검파기를 설치하여 클라이스트론의 RF 출력을 측정하였다.

본 논문에서는 포항 방사광 가속기의 대출력 펄스 고주파원으로 사용되는 클라이스트론 부하의 성능시험 과정에서 수행하였던 시험장치 개선 및 특성 분석, 고전압(빔전압 320 kV) 및 RF 길들이기의 시험 결과에 관하여 고찰하고자 한다.

1. 서 론

포항 방사광 가속기의 선형가속기는 2.5 GeV 전자빔 용 마이크로웨이브의 발생을 위하여 80 MW 급 클라이스트론(klystron) 11대와 입사부 용 65 MW 급 클라이스트론 1대를 사용한다[1]. 선형가속기 본체에서 동작중인 가장 오래된 클라이스트론 튜브의 운전시간은 68,000 시간 이상으로 이는 정격 사양 수명의 약 200%에 달하고 있다. 방사광 이용자에게 실험에 필요한 안정된 빔 공급을 위하여 가동 이력의 증가에 따른 고장 시 교체 할 예비 클라이스트론 튜브를 확보하는 것 필요하다. 먼저 입사부용 65 MW 급 고출력 클라이스트론 튜브(SLAC 5045 klystron:622A)를 조립하여 test lab 에서 성능시험을 실시하였다.

본 논문에서는 포항 방사광 가속기의 대출력 펄스 고주파원으로 사용되는 클라이스트론 부하의 성능시험 준비 과정에서 수행하였던 측정기 교정과 시험장치 개선, 고전압 및 RF 전력 시험 결과에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 펄스전원장치구성 및 시험준비

2.1 장치구성

65 MW 급 고출력 클라이스트론 튜브(SLAC 5045:622A) 시험용 150 MW 펄스전원장치인 모듈레이터는 최대첨두전압 350 kV, 전류 420 A, 반복률 120 pps, 펄스 폭 6.56 μs(ESW)의 펄스출력을 가지며, 크게 직류전원부, 충전부, 방전부로 구성된다[2].

그림 1은 150 MW 모듈레이터에 대한 블록 회로도를 나타낸다.

직류전원부는 3상 440 V의 입력전압을 통하여 최대출력 50 kV, 0.32 A의 직류전원을 공급하는 고전압 인버터 전원장치이다. 인버터 전원장치의 장점은 캐패시터 충전전원으로써 지령충전이 가능하고, 빠른 시간 내에 에너지 저장용 캐패시터를 충전할 수 있는 정전류 전원의 기능을 가진다. 최대 50 kV 출력전압에서 ±0.5% 이내의 출력전압 제어가 가능하다.

충전부는 충전용 저항(R1, R2), 인버터 보호용 다이오드(D_{INV}), PFN커패시터, 펄스트랜스포머 회로로 구성되며, 인버터의 지령 충전에 의하여 PFN(0.044 uf, 50 kV, 10단 2개 병렬)은 인버터 출력전압으로 충전된다.

방전부는 싸이타트론(thyratron) 스위치의 트리거 동작에 의하여 펄스 트랜스포머를 통하여 부하로 에너지를 전달한다.

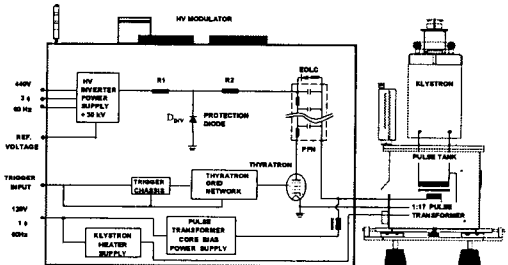


그림 1. 150 MW 모듈레이터에 대한 블록 회로도
Fig. 1 Circuit block diagram of a 150-MW modulator.

표 1은 150 MW 모듈레이터의 주요 설계 사양을 나타내고 있다.

표 1. 150-MW 모듈레이터의 주요 설계 사양
Table 1. Main specification of 150-MW modulator

Parameters	Designed
Peak beam power (MW)	150
Average power (kW)	66
Peak beam voltage (kV)	350
Peak beam current (A)	420
Pulse repetition rate max. (Hz)	60
Pulse width (ESW) (μs)	6.56
Flat -Top Pulse Width (<0.5%, μs)	3.5
PFN impedance (Ω)	3.73

2.2 성능 시험 준비 및 장치개선

Test lab 에서 입사부 용 65 MW 급 클라이스트론 튜브의 성능 시험을 진행하기 위한 준비작업을 하였다. 시험 할 클라이스트론 튜브(622A)와 전자석(SM166X) 및 펄스 탱크를 조립하였다. 절연유 주입, 진공작업, 각종 케이블을 연결하고 시험을 위한 준비작업을 완료하였다.

2.2.1 클라이스트론 히터전원 교정

클라이스트론 조립전과 후에 히터의 특성과약을 위하여 히터전원에 대한 교정과정을 거친다. 클라이스트론 히터 트랜스포머는 10:1의 비를 가진다. 튜브제작 회사에서 검사한 히터 트랜스포머 2차 측에서의 정격 히터전압 (Vh)과 전류(Ih)는 각각 11 V, 27 A이다. 그림 2는 클라이스트론 조립 후에 측정된 히터전압 대 전류 특성을 나타내는 그래프이다. 전압조정기에 클라이스트론 히터 부하를 연결하고 전압을 상승 및 하강 시키면서 펄스탱크 외부에서의 전압(Vt), 전류(It) 와 펄스탱크 내부에서 전압(Vf), 전류(Iff)를 측정하였다. 클라이스트론이 정격출력을 내는데 필요한 2차측 히터전류 2.7 A를 흘리기 위하여 펄스탱크 외부에서는 히터전류 2.8 A와 전압 114 V를 인가하여야 한다. 상승과 하강시, 그리고 냉각수 유무에 따른 값의 경향 변화는 없는 것으로 관측되었다.

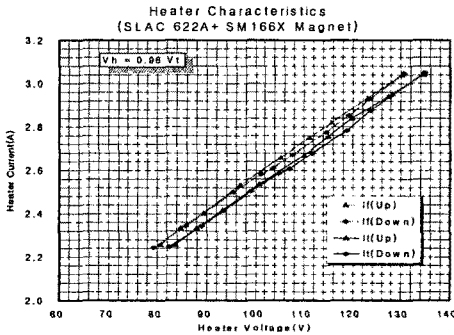


그림 2. 클라이스트론 히터전압 대 전류 특성 그래프

Fig. 2 Heater characteristics for a SLAC 5045 klystron.

2.2.2 인버터 보호회로 개선

클라이스트론 시험용 직류전원부로 인버터 전원장치(Maxwell CCPS, 50kV, 8kJ/s)를 사용하였다. 인버터 출력전압 35.5 kV, 6 HZ 에서 약 4시간 정도 운전 중에 운전 전압이 약 6 kV로 떨어지는 현상이 관측되었다. 분리 후 진단결과 고압 HV 탱크 내의 고압단 정류 다이오드가 소손되었다. 동작중 인 인버터 보호용 저항 R1(10 Ω)과 R2(15 Ω)는 권선저항(Ohmite, 225W, 10 Ω)으로 구성되어 있었다. 스위칭 시 유도성 저항의 인덕턴스 성분에 의한 유기 전압과 저항값이 작아서 인버터를 적절히 보호하지 못한다고 판단되어 무유도성 세라믹 저항(EREMA사, ER150AS, 27 Ω)을 조합하여 저항 R1(54 Ω)과 R2(54 Ω)를 교체하였다.

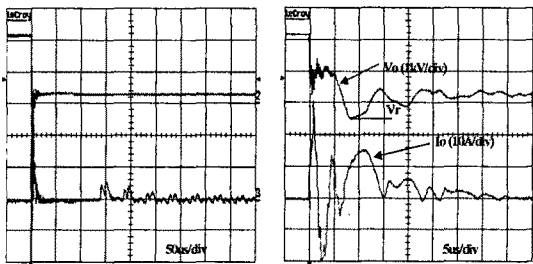


그림 3 PFN 충전전압과 인버터 출력전류

Fig. 3 PFN charging voltage (ch2:1000X) and inverter output current (ch3:20X).

그림 3은 보호용 저항으로 R1(10 Ω)과 R2(15 Ω)는 권선저항 사용한 경우의 PFN 충전전압(21 kV)과 인버터

출력전류파형을 보여 준다. 왼쪽파형은 스위칭 동작 후 약 130 us 이후에 인버터 충전전류가 흐르는 파형을 관측할 수 있다. 오른쪽 파형은 확대한 파형으로 역전압은 약 25%가 된다.

고전압 인버터 시스템의 적용에 있어서 출력부분에 그림 1과 같이 역전압과 폴트시 보호용 저항(R1, R2)과 다이오드(DINV)등의 보호회로를 설치하여야 한다. 저항 R1은 충전 시 전압강하가 적고, 출력 정류기를 통하여 흐르는 서지 전류를 제한하도록 선정되어야 한다. 저항 R2는 인버터의 반복적인 역전압으로 인한 평균 소비전력에 견디도록 선정한다. 인버터 전원장치의 운전사양은 출력전압 50 kV, 용량 8 kJ/sec 이고, 부하(PFN) 커패시터 용량 0.88 μF, 정상 동작시의 반복적인 역 전압(reversal voltage) Vr 은 최대 충전전압의 40 %로 선정하였다. 저항 R1은 27 Ω, 150 W를 2개 직렬로 하여 54 Ω, 300 W가 된다. R2는 27 Ω 저항 2개가 병렬로 된 것을 4개 직렬로 연결하여 합성 저항 값이 54 Ω 이고 전력용량은 1.2 kW가 되도록 구성하였다.

3. 성능 시험 결과

3.1 고전압 출력 시험

클라이스트론의 성능시험은 크게 고전압 인가 출력시험과 RF 출력 시험(RF power processing)으로 분류된다. 고전압 인가시험을 위하여 각종 모듈레이터 인터록 동작상태를 점검하고 시험을 진행하였다. 고전압 시험용량성 분압기(capacitive voltage divider)의 교정작업, 고전압 상승시험 순서로 진행 하였다.

분압기의 출력은 케이블의 용량에 따라서 분압비가 변한다. 따라서, 측정시 사용할 정확한 케이블 길이에 대한 교정작업이 필요하다[3,4]. 출력 power 의 정확한 측정을 위하여 동축 케이블 10.7 미터를 사용하여 최대 펄스전압 450 kV 급 분압기에 대한 교정 실험을 실시하였다. 그림 4는 펄스 측정용 분압기의 등가회로이다. 펄스 발생기로부터 분압기에 인가되는 기준 입력 전압을 측정하기 위하여 probe(Tektronix)를 접속하고 용량성 분압기의 출력단자(V_scope)를 통하여 전압신호의 크기를 측정하였다.

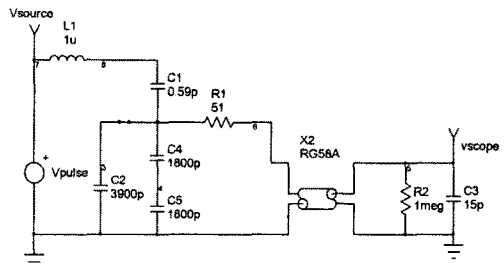


그림 4 분압기의 펄스 측정 용 등가 회로도

Fig. 4 Equivalent circuit for pulse measurements of CVD.

1000:1 probe를 사용하여 측정된 펄스 발생기 입력측의 전압(V_source)은 1.337 kV이고 오실로스코프 측정 임피던스 1 MΩ에서 측정된 펄스 발생기 입력 전압(V_scope)은 0.133 V이다. 따라서, 이 분압기의 교정 분압비는 10,045:1를 나타내었다. 분압기는 10,000 ± 5%의 정밀도를 가지므로 측정값은 오차범위 내의 값을 만족한다.

선형가속기 입사부 용 65 MW 급 클라이스트론 1대의 고전압 시험을 수행하였다. 선형가속기 빔입사 운전전압에 필요한 출력 빔 전압까지 시험하기로 하였다. 표 2는 65 MW 클라이스트의 설계 및 시험할 사양을 보여준다.

표 2. 65-MW급 클라이스트론의 사양

Table 2. Specification of 60-MW klystron (622A).

Parameters	Designed	To be tested
Operating frequency(MHz)	2856	2856
Gun voltage(kV)	350	320
Beam current(A)	405	256
Drive power(W)	277	545
Peak output power(MW)	63.2	45.2
RF pulse length(μsec)	3.5	3.0
Heater current(A)	27	27
Heater current(A)	11	11
Focus magnet current(A)	15	15

입력 펄스전원은 10단으로 된 2개의 병렬 PFN(pulse forming network)으로 구성된 150 MW급 모듈레이를 사용하였다. 그림 5는 고전압 시험 용 회로도와 출력파형을 보여준다. 인버터 전원 입력전압(DCHV) 35.5 kV, 펄스 반복률 6 Hz, 펄스폭 6.56 μs(ESW)에서 클라이스트론 부하단의 출력 전압(V_b), 전류(I_b) 파형을 나타내고 있다. 이것은 10,045:1의 용량성 분배기와 20:1의 변류기를 사용하여 측정된 값으로 최대전압 324 kV, 336 A에 해당된다. 이 결과 값은 선형가속기 2 GeV 운전시의 클라이스트론 빔 전압 운전범위 내에 해당된다.

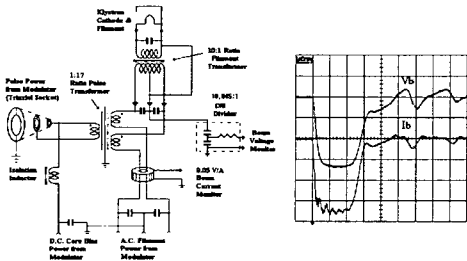


그림 5 고전압 시험 회로도와 출력파형

Fig. 5 Circuit diagram and output waveform for the high-voltage test (V_b: 10V/div, I_b: 5V/div, time: 2 μs/div).

3.2 RF 출력 펄스 성능시험

RF power processing 과정을 통하여 클라이스트론 튜브의 RF 출력 성능시험을 수행한다. 입력 RF의 펄스폭을 1 μs에서 3.0 μs까지 변화시키면서 각각의 경우에 출력전압을 상승시키면서 시험을 진행한다. RF 출력의 정확한 측정을 위하여 방향성 결합기(directional coupler: WDK-C-039V5A)와 검파기(crystal detector)를 설치하였다. 그림 6은 클라이스트론 RF 출력 측정용 방향성결합기에 대한 접속도와 부품 사진이다. 결합도 70±0.5dB를 가지며, DC 블락(block), 로패스 필터(low pass filter), 감쇄기(attenuator), 검파기로 구성된다. 부하저항(R_L) 1 kΩ을 사용한 검파기의 교정 데이터를 보면 클라이스트론 성능시험에 필요한 최대 80 MW 까지 측정이 불가능하다. 따라서, 검파기 교정 데이터의 측정범위를 키우기 위하여 감쇄비(10±1dB), 임피던스 50 Ω의 소전력 감쇄기(FA-S-1110F)를 추가하였다. 감쇄기는 전송선로의 중간에 삽입하여 크기조절과 발진기와 부하와의 매칭용으로 사용된다. 식 (1)은 입력파위에 대한 출력파위의 비, 즉 이득을 계산하는 식이다[5].

$$dB \text{ gain} = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

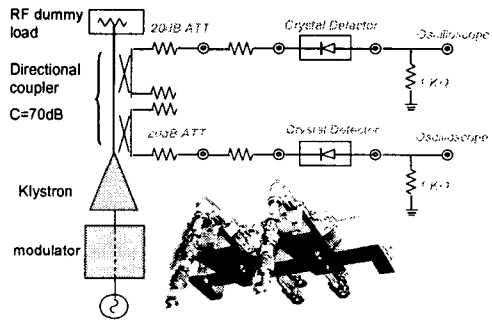


그림 6 방향성결합기에 대한 접속도와 부품 사진

Fig. 6 Connection diagram and photos of a directional coupler.

검파기로부터 이중 차폐된 BNC 케이블 10 미터를 사용하여 입사파(foward)와 반사파(reflected) RF 신호를 측정 할 수 있다. 오실로스코프의 50 Ω 임피던스를 통하여 전압신호 크기를 읽은 후 검파기의 교정 데이터 그래프로부터 출력파위를 계산 할 수 있다. 현재 60 MW 클라이스트론은 정확한 전자석 운전사양이 확인 된 후에 RF 성능시험을 진행할 예정이다.

4. 결 론

지금까지 대출력 클라이스트론 부하의 성능시험을 위한 펄스 전원장치의 장치구성 및 개선사항, 고전압 시험과 RF 시험 절차, 시험결과에 대하여 고찰 하였다. Test lab 에서 150 MW 모듈레이터를 사용하여 시험 환경을 구축하고 선형가속기 입사부 용 65 MW 급 클라이스트론 튜브의 성능 시험을 진행하였다. 모듈레이터 제어용으로 PLC 시스템과 PFN 커패시터의 충전용 입력전원으로써 최대 출력전압 50 kV 의 전압제어가 가능한 고전압 인버터 전원장치를 적용하였다.

클라이스트론 부하를 사용한 고전압 성능시험을 통하여 모듈레이터 PFN 전압(DCHV) 35.5 kV, 펄스 반복률 6 Hz, 펄스폭 6.56 μs(ESW)에서 부하단 전압 324 kV까지 성능상 이상 없이 동작함을 확인하였다. 따라서, 본 실험 결과는 선형가속기 2 GeV 운전시의 클라이스트론 빔 전압 운전범위에서 사용 가능함을 입증 할 수 있다.

향후 계획으로는 시험사양에 따른 클라이스트론을 사용한 RF 출력 성능시험을 실시 할 예정이다. 그리고, 클라이스트론의 성능 측정에 대한 정확도를 높이기 위하여 전압, 전류, RF 시스템과 측정기, 기타 측정장치 등에 대한 정확한 교정과 시스템 운용방법에 대한연구가 계속 진행되어야 할 부분이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pohang Accelerator Laboratory, POSTECH, "Design Report of Pohang Light Source," Revised Version, Jan. 1992
- [2] S.H. Nam, J.S. Oh, M.H. Cho, and W. Namkung, "Prototype Pulse Modulator for High Power Klystron in PLS Linac," IEEE Conf. Records of the 20th Power Modulator Symp., Myrtle Beach, SC, pp.96-99, 1992
- [3] G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz, W. H. Bostick et al., "Pulse Generators," McGraw-Hill Book Company, Inc., Part III, pp. 497-630 (1948).
- [4] Santokh S. Basi, "Semiconductor Pulse and Switching Circuits," John Wiley and Sons, Inc., 1980.
- [5] Eugene R. Bartleet, P.E. "Electronic Measurements and Testing," McGraw-Hill, Inc., pp. 13-15, (1992).