

80 MW 급 클라이스트론 성능시험을 위한 50 kV 인버터 시스템의 적용

장성덕, 손윤규, 오종석
포항공과대학교 가속기연구소

Application of 50-kV Inverter System for Testing a Characteristics of home-made 80-MW Pulsed Klystron

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

Abstract - 포항 방사광 가속기의 선형가속기는 2.5 GeV 전자빔용 마이크로웨이브의 발생을 위하여 80 MW 급 클라이스트론(klystron) 11대와 입사부용 65 MW 급 클라이스트론 1대를 사용한다. 80 MW 급 클라이스트론 200 MW(400kV, 500A, 평탄도 4.4 μ s)인 대출력 펄스 전원 공급 장치(modulator)가 요구된다. 모듈레이터 시스템 용 PFN(pulse forming network) 커패시터의 충전용 입력전원으로써 최대 출력전압 50 kV, \pm 0.5% 이내의 전압제어가 가능한 고전압 인버터 전원장치를 적용하여 PLS 선형가속기용 국산화 개발 클라이스트론 부하의 성능시험을 수행하였다. 국산화 개발된 S-band 펄스 클라이스트론은 고전압 길들이기 과정을 거쳐 최대 정격 출력 범전압 400 kV 이상까지 시험 완료하였다. 클라이스트론의 정확한 RF 출력성능의 측정을 위하여 방향성 결합기와 검파기를 설치하여 측정시스템의 성능을 개선하였다. 본 논문에서는 포항 방사광 가속기의 국산화 개발 1호 클라이스트론 부하의 성능시험을 위한 50 kV 급 인버터 시스템 적용과정에서 수행하였던 시험장치 개선과 PFN의 충전 특성을 분석하였다. 또한, 클라이스트론의 고전압 및 RF 길들이기 시험 결과에 관하여 고찰하고자 한다.

1. 서 론

포항 방사광 가속기의 국산화 개발 1호 클라이스트론은 선형가속기 2.5 GeV 전자빔용 마이크로웨이브의 출력 발생원으로 사용된다[1]. 선형가속기 본체에서 동작중인 가장 오래된 클라이스트론 튜브의 운전시간은 70,000 시간 이상으로 이는 정격 사양 수명의 약 200% 이상에 달하고 있다. 방사광 이용자에게 실험에 필요한 안정된 빔 공급을 위하여 가동 이력의 증가에 따른 고장 시 교체할 예비 클라이스트론 튜브를 확보하는 것이 필요하다. 2003년 10월 60 MW 급 이상의 출력파워를 목표로 S-band 펄스 클라이스트론의 국산화 개발 제작을 완료하였다. 기계적, 전기적인 설계 사양은 기존에 동작 중인 클라이스트론(Toshiba E3712)의 사양에 따른다. 국산화 개발 1호 클라이스트론 튜브를 조립하고 50 kV 급 고전압 인버터 전원장치를 적용하여 test lab에서 성능시험을 실시하였다. 포항 방사광 가속기의 대출력 펄스 고주파원으로 사용되는 클라이스트론 부하의 성능시험 과정에서 수행하였던 모듈레이터 시스템의 시험장치 개선과 클라이스트론의 고전압 및 RF 길들이기 시험 결과에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 펄스 전원 시험장치의 구성과 개선

2.1 장치구성

고출력 클라이스트론 튜브 시험용 150 MW 펄스전원 장치인 모듈레이터는 최대첨두전압 350 kV, 전류 420 A, 반복률 120 pps, 펄스폭 6.56 μ s(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.

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

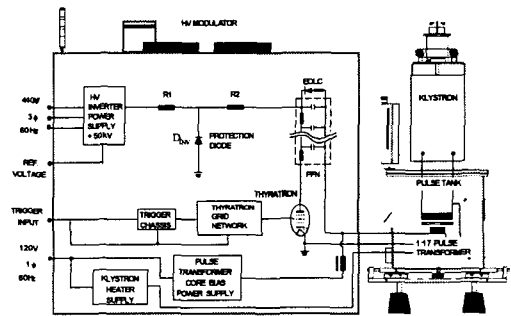


그림 1. 150 MW 모듈레이터에 대한 블록 회로도
Fig. 1. Circuit block diagram of a 150-MW modulator.

150 MW 모듈레이터를 사용하여 개발한 80 MW 급 클라이스트론 튜브의 성능시험을 위하여 1:17 펄스 트랜스포머를 사용하여 최대 펄스출력 200 MW까지 시험이 가능하도록 개선하였다.

표 1은 펄스 트랜스포머의 승압비 변화에 따른 150 MW 모듈레이터의 주요 운전 사양을 나타내고 있다.

표 1. 150 MW 모듈레이터의 주요 운전 사양
Table 1. Main operation parameters of a modulator

Parameters	150 MW for SLAC tube	200 MW for Toshiba tube
Pulse transformer ratio	15	17
Peak beam power (MW)	150	200
Average power (kW)	66	97
Peak beam voltage (kV)	350	400
Peak beam current (A)	420	500
Pulse repetition rate max. (Hz)	60	60
Pulse width (ESW) (μ s)	6.56	7.5
Flat -Top Pulse Width (<0.5%, μ s)	3.5	4.4
PFN impedance (Ω)	3.73	2.8

2.2 성능 시험 준비 및 장치개선

고전압 펄스파워 시스템 분야에 적용 가능한 대출력 고전압 전원장치의 설계핵심은 소형화와 고 효율화하는데 있다. 고전압 직류 충전 전원장치로 고전적인 공진 충전방식의 회로 대신에 인버터 전원 시스템을 적용하여 모듈레이터 시스템의 소형화를 실현하고, 최초로 test lab 에서 80 MW 급 국산화 클라이스트론 튜브의 정격 성능 시험을 수행하였다. 시험 할 클라이스트론 튜브와 전자석(93013PLS) 및 펄스 탱크를 조립하였다. 절연유 주입, 진공작업, 각종 케이블을 연결하고 시험을 위한 준비작업을 완료하였다. 고전압 성능시험을 위한 장치의 개선사항은 아래와 같다.

2.2.1 인버터 보호회로 개선

고전압 인버터 시스템의 적용에 있어서 출력부분에 그림 1과 같이 역전압과 부하단락 등에 대비하여 보호용 저항(R1,R2)과 다이오드(DINV)등의 보호회로를 설치하여야 한다. 저항 R1은 충전 시 전압강하가 적고, 출력 정류기를 통하여 흐르는 서지전류를 제한하도록 선정되어야 한다. 인버터 출력전압 35.5 kV, 6 Hz 에서 약 4시간 정도 운전 중에 운전전압이 약 6 kV로 떨어지는 현상이 관측되었다. 분리 후 진단결과 고압 HV 탱크 내의 고압단 정류 다이오드가 소손되었다. 동작 중인 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 1차로 무유도성 세라믹 저항(EREMA사, ER150AS, 27 Ω)을 조합하여 저항 R1(54 Ω)과 R2(54 Ω)를 교체하였다.

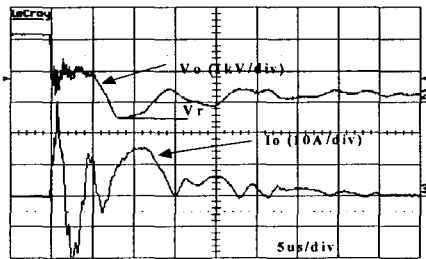


그림 2. PFN 충전전압과 인버터 출력전류
Fig. 2. PFN charging voltage (Ch2:1000X) and inverter output current (Ch3:20X).

그림 2는 보호용 저항으로 R1(10 Ω)과 R2(15 Ω)를 권선저항을 사용한 경우의 PFN 충전전압(21 kV)과 인버터 출력전류 파형을 보여 준다. 확대한 파형으로 역전압은 약 25%가 됨을 알 수 있다.

클라이스트론 부하의 정격 출력시험 사양을 충족하기 위하여 2차로 보호용 저항으로 R1과 R2를 개선하였다. 저항 R2는 인버터의 반복적인 역전압으로 인한 평균 소비전력에 견디도록 선정한다. 인버터 전원장치의 운전사양은 출력전압 50 kV, 용량 30 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. R2 는 27 Ω 저항 4개가 병렬로 된 것을 9개 직렬로 연결하여 합성 저항 값이 60.75 Ω 이고 전력용량은 5.4 kW가 되도록 구성하였다.

2.2.2 인버터 지령 충전 동작기능 추가

모듈레이터 PFN 충전용 직류전원부는 3상 440 V의 입력전압을 통하여 최대출력 50 kV, 0.32 A의 직류전원을 공급하는 고전압 인버터 전원장치이다. 역전압과 폴트 시 인버터 보호용 저항(R1,R2)과 다이오드(DINV) 등의 보

회회로를 개선하였음에도 불구하고 인버터를 40 kV 이상의 전압에서 운전 중 내부 고압 다이오드의 최고 윗단 부분이 단락되어 고장이 발생하였다. 또한, 진단 결과 중간부분에 있는 14개 다이오드의 특성도 많이 변하여 (순방향 저항이 많이 나빠짐) 다이오드를 교체하였다. 원인 조사를 위하여 보호용 다이오드를 PCB 형태의 fast type 다이오드 모듈로 교체하여 시험을 하였으나 관련이 없는 것으로 진단되었다.

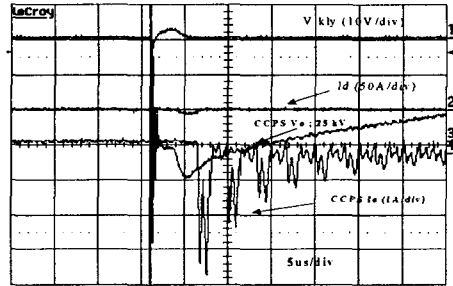


그림 3. 모듈레이터로부터의 reversal current 측정
Fig. 3. Reversal current measurement(Ch1 : modulator 출력전압 (10.150kX), Ch2 : protection diode 전류(50A/div) , Ch3 : CCPS return I(A/div) , Ch4 : CCPS output V).

그림 3은 모듈레이터로부터 보호용 다이오드로 환류하는 reversal current, 인버터 전압(25 kV)과 인버터 출력전류 측정 파형을 보여 준다. switching이 이루어진 직후에 인버터 쪽으로 역방향 전류가 흐르고 약 1.5us 후에 protection diode 쪽으로 역방향 전류가 흐른다. 출력전류 측정 결과 스위칭 동작 후 약 130 us 이후에 인버터 충전 전류가 흐르는 것을 관측할 수 있다. PFN 커패시터 전압(CCPS V)의 역방향 전압이 복귀하기 전에 인버터가 동작하여 출력전류가 3 A 까지 증가됨을 알 수 있다. 이것으로 인하여 고주파 변압기 2차단의 정류다이오드가 소손되어 고장이 발생한 것으로 진단되었다. 지령충전 기능을 위한 inhibit 회로와 auto dwell time 기능을 가지는 모듈을 추가하여 정상화 하였다. 정류 다이오드 소손 이외에도 고주파 변압기 2차측 권선이 소손되었는데 추정 원인은 2대 병렬 운전 시 어느 하나라도 인터록이 걸리면 운전을 정지해야하는데 정상적인 인버터의 동작으로 정지해 있는 인버터의 2차측 정류다이오드에 전압이 걸려 순환전류가 흘러 소손된 것으로 확인되었다. 인버터 전원장치의 고주파변압기 2차권선과 정류다이오드를 교환하였고, 그 외 출력전류 제한회로의 동작 기능의 조정을 통하여 현재 인버터 전원장치는 성능개선 후 클라이스트론 부하의 성능시험을 위하여 20 Hz에서 24시간 연속적으로 정상적인 가동을 하고 있는 상태이다.

2.2.3 RF 출력 측정 시스템의 개선

RF 출력의 정확한 측정을 위하여 방향성 결합기(directional coupler: WDK-C-039V5A)와 검파기(crystal detector)를 설치하였다. 그림 4는 클라이스트론 RF 출력 측정용 방향성결합기에 대한 접속도와 부품 사진이다. 결합도 70±0.5dB를 가지며, DC 블락(block), 로패스 필터(low pass filter), 감쇄기(attenuator), 검파기 구성된다. 감쇄기는 전송선로의 중간에 삽입하여 크기조절과 발전기와 부하와의 매칭용으로 사용된다. 식 (1)은 입력 파워에 대한 출력파워의 비, 즉 이득을 계산하는 식이다 [3].

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

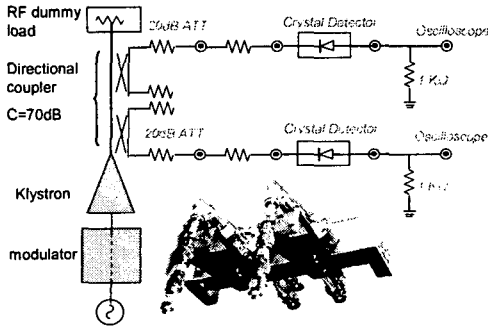


그림 4. 방향성결합기에 대한 접속도와 부품 사진
Fig. 4. Connection diagram and photos of a directional coupler.

검파기로부터 이중 차폐된 RF 케이블을 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 출력파워를 계산할 수 있다.

3. 성능 시험 결과

3.1 인버터 고전압 충전 특성과 출력 안정도 시험

인버터 전원장치의 장점은 캐패시터 충전전원으로써 지령충전이 가능하고, 빠른 시간 내에 에너지 저장용 캐패시터를 충전할 수 있는 정전류 전원의 기능을 가진다. 클라이스트론 시험용 직류전원부로 국산화 개발 인버터 전원장치(Dong-a Hightech CCPS, 50kV, 15kJ/s, 모델명:SMART-5015)를 사용하였다. 인버터 전원장치는 평균 출력 30 kJ/sec(15kJ/s 2대 병렬)로 하여 800 nF의 정전용량을 갖는 모듈레이터 PFN 커패시터 부하에 대해 출력 전압 42 kV까지 충전특성을 조사하는 실험을 하였다.

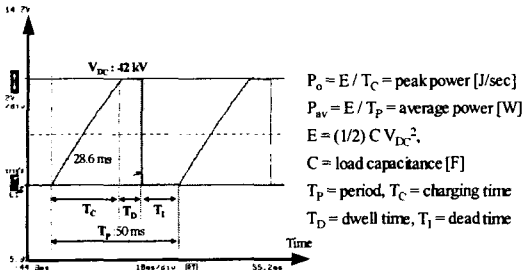


그림 5. PFN 캐패시터 부하에 충전되는 출력전압파형
Fig. 5. PFN charging voltage of an inverter system.

그림 5는 PFN 캐패시터 부하에 충전되는 직류 충전전압 파형을 보여준다. 그림에서 전원장치의 부하 캐패시터 $C_L(0.88 \mu\text{f})$ 에 목표로 하는 전압 $V_{DC}(42 \text{ kV})$ 를 충전 시간 $T_C(28.6 \text{ ms})$ 로 충전할 때의 최대전력은 식 (2)와 같이 표현되며, 평균출력은 식 (3), 충전시의 최대전류는 식 (4)와 같다.

$$P_{CH} = \frac{C_L V_{DC}^2}{2T_c} \quad [J/S] \quad (2)$$

$$P_{AV} = \frac{C_L V_{DC}^2}{2T_p} \quad [W] \quad (3)$$

$$I_{max} = \frac{2 \times P_{CH}}{V_{DC}} \quad [A] \quad (4)$$

이상의 관계식으로부터 계산 결과, 현재 동작 중인 인버터 시스템의 운전 전력은 각각 27 kJ/s, 15.5 kW 이고, 최대전류는 1.28 A가 된다[4,5]. 그림의 충전 전압 파형으로 부터 인버터의 제어신호는 PFN 전압까지 선형적으로 상승하는 충전시간(T_C), thyatron 스위치가 방전을 개시하기 전까지의 체류제한구역인 dwell 시간, 방전 후 스위치의 회복을 위한 출력제한구역인 inhibit신호 등의 기능이 잘 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 5의 인버터전원장치의 PFN 충전 전압에 대한 출력 안정도는 공진이 일어날 때마다 2차측 부하 커패시터에 전하가 충전되게 되는데, 1회 공진충전시의 충전 전하량(charge bucket)의 크기에 따라 영향을 받는다. 부하 커패시터의 용량의 크기에 따라 충전소요 시간이 달라지게 되며, 목표전압에 도달하여 유지하는 시간이 길수록 부하 커패시터에 저장된 에너지의 누설이 생기고 이에 따라 전압이 줄어들게 된다. 피드백 제어에 의해 저하된 전압만큼을 전원장치가 재충전하게 된다. 정전류 전원장치의 경우 출력전류가 일정하고 짧은 시간동안 충전이 이루어지기 때문에 정밀한 제어가 이루어지지 않을 경우 목표전압 이상으로 과 충전이 이루어질 수 있다. 개발된 본 전원장치는 refresh mode 기능을 정상화하여 추가한다면 출력전압을 일정하게 유지하여 전원장치의 출력안정도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 모듈레이터 출력 빔전압의 안정도를 측정하였다. 평균값(mean) 39.38 V에 대하여 peak-peak 간의 값은 320 mV로 출력 빔 안정도는 약 0.81%의 값을 나타내는 것으로 확인되었다.

3.2 출력 펄스폭에 따른 PFN 충전 전압 계산

각각 PFN의 단수 변화에 따른 출력 펄스 폭으로부터 PFN 충전전압을 계산하였다.

표 2. PFN 단수 변화에 따른 파라미터 계산 결과표
Table 2. Calculated parameters to PFN stage change

Nstage	Tp [us]	L [uH]	Zpfn [Ohm]	Zdy [Ohm]	Zkly_p [Ohm]	Vpfn [kV]
8	3.4	1.03	2.41	980.68	3.39	40.88
6	2.8	1.24	2.65	994.39	3.44	40.81
4	2	1.42	2.84	988.01	3.42	40.01

표 2는 PFN 단수 변화에 따른 파라미터 계산 결과표이고, 그림 6은 8단에 대한 계산을 위한 파형과 계산식을 보여준다. 펄스 폭은 최대 전압 크기의 75% 높이에서 측정된 값이다. 계산 결과는 실제 PFN 전압(인버터 전압)과 대체로 잘 일치함을 보여준다.

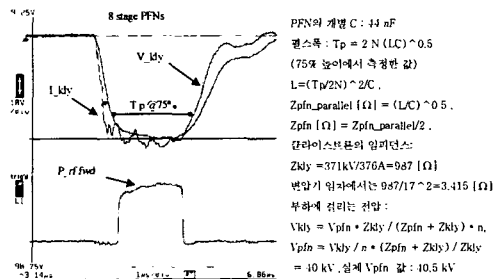


그림 6. PFN 8단에 출력전압과 펄스 폭
Fig. 6. Beam voltage and pulse width for 8 stage PFN.

3.3 고전압 인가 및 RF 출력 펄스 성능시험

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 시험은 용량성 분압기(capacitive voltage divider)의 교정, 고전압 상승시험 순서로 진행한다. 분압기의 출력은 케이블의 정전용량에 따라서 분압비가 변한다. 따라서, 측정 시 사용할 정확한 케이블 길이에 대한 교정 작업이 필요하다[6,7]. 출력 power의 정확한 측정을 위하여 동축 케이블 10.7 미터를 사용하여 최대 펄스전압 450 kV 급 분압기에 대한 교정 실험을 실시한다. 이 분압기의 교정 분압비는 10,150:1 이다. 분압기는 $10,000 \pm 5\%$ 의 정밀도를 가지므로 측정값은 오차범위 내의 값을 만족한다. 선형가속기용 설계 사양 80 MW 급의 국산화 개발 클라이스트론에 대한 고전압 시험을 수행하였다. 최대 정격 운전전압에 필요한 출력 빔 전압까지 시험하기로 하였다. 입력 펄스전원은 10단으로 된 2개의 병렬 PFN으로 구성된 150 MW급 모듈레이터를 사용하였다.

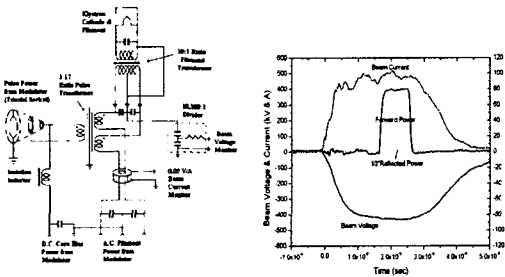


그림 7. 고전압 시험 회로도 및 출력파형
Fig. 7. Circuit diagram and output waveform for the high-voltage test.

그림 7은 고전압 시험용 회로도와 출력파형을 보여준다. 인버터 전원 입력전압(DCHV) 48 kV, 펄스 반복률 14 Hz, 펄스폭 2.8 μ s, RF의 펄스폭을 1 μ s에서 클라이스트론 부하단의 출력 전압(V_b), 전류(I_b) 파형을 나타내고 있다. 이것은 10,150:1의 용량성 분압기와 20:1의 변류기를 사용하여 측정된 값으로 최대전압 436 kV, 472 A, RF 출력 84 MW에 해당된다. 인버터 시스템을 적용한 모듈레이터 시험장치는 부하인 클라이스트론의 설계 사양 빔 전압인 400 kV 이상까지 정상 운전이 가능함을 보여준다.

클라이스트론 튜브의 RF 출력 성능시험은 입력 RF의 펄스폭을 1 μ s에서 3.0 μ s까지 변화시키면서 각각의 경우에 출력전압을 상승시키면서 RF power processing 시험을 진행한다. 현재 2.8 μ s까지 RF 출력 시험을 완료하였다.

4. 결 론

지금까지 대출력 클라이스트론 부하의 성능시험을 위한 펄스 전원장치의 장치구성 및 개선사항, 고전압 시험과 RF 시험 절차, 시험결과에 대하여 고찰하였다. Test lab에서 150 MW 모듈레이터를 사용하여 시험 환경을 구축하고 선형가속기 입사부용 국산화 개발 1호 80 MW 급 클라이스트론 튜브의 최대 전력 성능 시험을 진행하였다. 모듈레이터 제어용으로 PLC 시스템과 PFN 커패시터의 충전용 입력전원으로써 최대 출력전압 50 kV의 전압제어가 가능한 고전압 인버터 전원장치를 적용하였다. 실험 결과와 클라이스트론 부하를 사용한 고전압 성능시험을 통하여 인버터 전원 입력전압(DCHV) 48 kV, 펄스 반복

률 14 Hz, 최대 펄스전압 430 kV까지 성능 상 이상 없이 동작함을 확인하였다. RF의 펄스폭을 1 μ s에서 클라이스트론 RF 출력 84 MW까지 달성하였다. 인버터 전원장치를 적용한 경우 모듈레이터의 출력 빔전압의 안정도는 약 0.81%로 확인되었다. 이러한 출력 빔안정도에 의하여 고전압 인가 시험(HV aging) 및 RF 출력 펄스 시험(RF processing aging) 성능이 향상 되었다.

향후 계획으로는 모듈레이터의 PFN 단을 10단으로 조정하고 시험사양에 따른 클라이스트론의 RF 출력 성능시험을 계속 진행할 예정이다. 클라이스트론의 성능 측정에 대한 정확도를 높이기 위하여 전압, 전류, RF 시스템 측정기, 기타 측정장치 등에 대한 정확한 교정과 시스템 운용방법에 대한 연구가 향후 계속 진행되어야 할 부분이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Pohang Accerator 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] Eugene R. Bartleet, P.E. "Electronic Measurements and Testing," McGraw-Hill, Inc., pp. 13-15, (1992).
- [4] 손윤규, 오종석, 장성덕, 조무현, "대출력 고전압 35 kW, 50 kV 인버터 전원장치 개발에 관한 연구," 대한전기학회 학계학술대회 논문집 B, pp.992~995, 2001.
- [5] Aaron C. Lipponcott, "A Capacitor Charging Power Supply Using a Series Resonant Topology, Constant On-Time/Variable Frequency Control, and Zero-Current Switching", IEEE Transactions on industrial electronics, VOL.38, NO.6, 1991
- [6] G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz, W. H. Bostick et al., "Pulse Generators," McGraw-Hill Book Company, Inc., Part III, pp. 497-630 (1948).
- [7] Santokh S. Basi, "Semiconductor Pulse and Switching Circuits," John Wiley and Sons, Inc., 1980.