

## 서브 나노초의 전자총 펄스 특성에 관한 연구

손윤규\*, 장성덕, 오종석  
포항공과대학교 가속기연구소

### A study on sub-nanosecond pulser characteristic of electron gun

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

**Abstract** - An electron gun system for a nanosecond pulse linac has been built and tested. The gun grid is driven with a grid pulser, which consists of an avalanche transistor pulser and parallel triode amplifier. The amplifier is installed in an end hole of the electron gun and provided for power amplification and polarity change of the output pulses of the avalanche transistor pulser. An output pulse of 200 V and 2 ns FWHM was obtained by using the grid pulser of can type transistors. Measurements with a test bench show that the electron gun can deliver 2 ns pulse width with currents larger than 3A.

## 1. 서 론

전자 빔을 발생시키는 선형가속기 입사기 전단의 전자총은 나노 초 이하의 그리드 트리거 펄스를 필요로 한다. 저장링 RF 주기가 2 ns인 점을 감안하면 입사 효율 면에서 더 작은 전자빔 펄스폭이 유리하다. 나노 초의 펄스를 만들기 위해 동축케이블과 NPN 트랜지스터를 이용하였다. 펄스를 생성하기 위해서는 동축케이블이 갖는 고유한 특성임피던스를 이용하고, 케이블의 길이를 다르게 하여 길이 변화에 따른 펄스폭을 측정하였다. 스위치로는 NPN 트랜지스터를 다단직렬로 연결하여 사용하였다. 트랜지스터는 아바란치 항복영역에서 사용하고 출력임피던스 변화에 따라 생성되는 펄스전압을 측정하였다. 특히 짧은 펄스폭을 요구하는 시스템에서 스위치의 상승시간은 곧 펄스폭에 영향을 주게 되어 빠르게 스위칭 되는 것을 사용하여야 한다. 본 논문에서는 펄스를 만드는데 중요한 인자인 NPN트랜지스터와 동축케이블을 이용한 펄스폭 생성에 관한 실험과 그 결과를 보이고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 전자총 시스템

포항 방사광 가속기의 입사기 전단에 설치되어있는 전자총은 triode type으로 애노우드, 캐소우드, 그리드로 구성되어있다. 캐소우드와 애노우드간의 가속전압 -80 kV, 최대방출 전류 5 A, 최소펄스 폭 <1ns, 최대 반복율 100 Hz의 기본 파라메타를 가지고 있으며  $5 \times 10^{-9}$  torr 고진공을 유지하는 진공시스템으로 되어있다. 그림 1은 전자총을 구성하고 있는 주변회로를 보여주고 있다. 전자총은 열음극에서 발생된 전자를 집속전극을 거쳐 애노우드로 가속이 이루어지며 캐소우드는 dispenser type로 히터에 의해 직접가열되며 그리드는 캐소우드에서 발생된 전자를 제어한다. 캐소우드와 애노우드 전극간에 직류고저압은 애노드를 +접지로 다른 전원과는 절연이 되도록 사용하고 있다. 캐소우드와 그리드 전극사이에는 바이어스 직류전원을 인가하여 초기 빔을 cut-off시키고 있다. 표 1은 전자총의 파라메타를 보여주고 있다.[1]

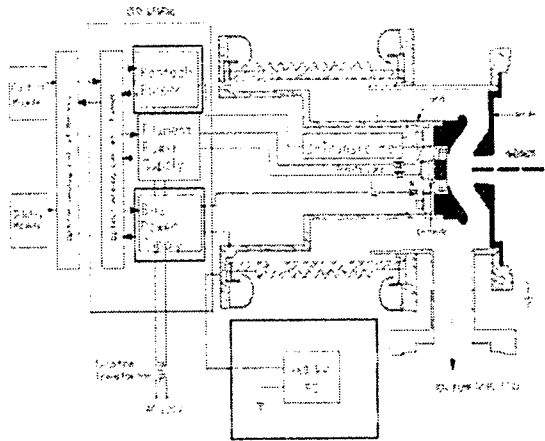


그림 1 조립된 전자총 본체와 주변 시스템

표 1 전자총 파라메타

Parameter	Unit	Value
Peak beam current	A	>2
Beam voltage	kV	-80
Pulse width(FWHM)	ns	2
Repetition rate	Hz	10
Time jitter	ps	<40
Cathode diameter	mm	16
Grid Bias voltage	V	50-500
High voltage insulation	Air	
Grid driver	Line type pulse with avalanche Tr	
Cathode material	Dispenser	

### 2.2 서브 나노 초 펄서

전자총의 그리드 트리거 펄서는 에너지를 저장하는 동축케이블과 방전스위치인 트랜지스터로서 구성되어있다. 펄스를 생성하는 스위치인 NPN트랜지스터는 2개의 N형 반도체 사이에 얇은 P형 반도체를 접합한 것이다. 에미터와 베이스를 같은 전위로 하여 콜렉터에 정(+)전압을 인가하면 베이스와 콜렉터 PN접합에 역 전압이 가해진다. 이 부분의 전계가 트랜지스터에서 고유한 어떤 값에 도달하면 일차항복이 발생하고 전류에 의한 전압이 거의 일정하게 되는 제너특성이 나타난다. 이 현상은 전류가 많아지지 않으면 안정적으로 되지만 트랜지스터에 흐르는 전류가 더욱 증가하면 이차 항복으로 이동하고 콜렉터와 에미터 간에 내전압이 급격히 감소하고 단락상태로 된다. 콜렉터와 에미터 간에 걸어진 전압을 급격히 상승시키면 콜렉터에 큰 전류가 흐르게 되어 제너전압에 도달하게 되는데 트랜지스터가 급격히 동등되

는 통전상태가 된다. 트랜지스터에 따라 이 제너전압이 수 백 볼트 이상이 된다. 전자총에서 사용하는 그리드 펄스는 캐소우드와 그리드 간에 인가하는 전압의 크기에 따라 인출 빔전류에도 영향을 준다. 여기서는 트랜지스터의 2차 항복전압의 영역을 이용하였다. 표 2는 나노 초 펄서의 사양을 보여주고 있다.

표 2 서브 나노 초 펄서파라메타

Parameter	Symbol	Value
Pulse output voltage		1 kV @50 Ω
Rise time	ns	0.7
Pulse length	ns	< 1, 1, 2, 5, 10
Polarity		Negative
Trigger		Requires 5 V into 50 Ω
Jitter	ps	10 RMS
Trigger delay	ns	20 direct mode
Input power supply	VAC	230

### 2.3 펄스회로 설계

펄스를 생성하는 회로에서 스위치인 아바란치 트랜지스터는 그림 2와 같이 다단으로 직렬로 연결하였다. 스위치의 끝단은 에너지를 저장하는 동축케이블이 연결되어 있다. 펄스폭은 동축케이블의 길이에 따라서 정해진다.

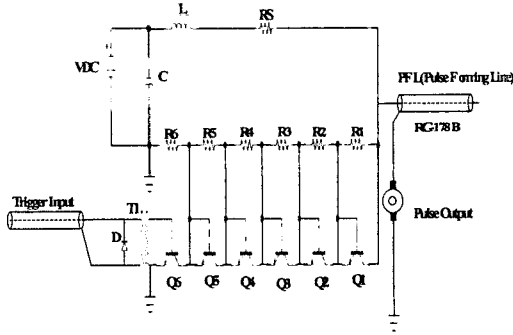


그림 2 그리드 펄서

그리드 펄서에서 요구되는 출력전압은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.[2]

$$V_{ava} = n \times V_{avat} \quad \text{-----식(1)}$$

$$Q_{COX} = C_{COX} \times V_{ava} \quad \text{-----식(2)}$$

$$\frac{dQ_{COX}}{dt} = I_p \quad \text{-----식(3)}$$

$$V_p = I_p \times Z_L \quad \text{-----식(4)}$$

- n : 트랜지스터의 개수
- $V_{avat}$  : 아바란치 트랜지스터의 전압
- $C_{COX}$  : 동축케이블의 커패시턴스
- $Q_{COX}$  : 동축케이블의 충전전하
- $V_p, I_p$  : 출력전압과 전류
- $Z_L$  : 부하임피던스

식(1)은 출력펄스의 평균전압이며 식 (2)는 에너지 저장용 동축케이블에 저장되는 전하를 구하는 것이다. 그리드 펄서에 사용한 NPN 트랜지스터는 ZETEX사의 ZTX 415와 ZTX 300 두 종류를 사용하여 실험을 하였다. 나노 초의 펄스를 만드는 PFL(Pulse Forming

Line)로는 동축케이블 RG-178 B/U를 사용하였다. 동축케이블의 특성임피던스는

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{60\epsilon r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} [\Omega] \quad \text{-----식(5)}$$

로 나타낼 수 있다. 펄스폭은

$$t_w = 2\sqrt{LC} = 2CZ = \frac{2L}{Z} [\mu s] \quad \text{-----식(6)}$$

이며, 펄스폭에 따른 동축케이블의 길이는

$$LC = \left(\frac{t_w}{2}\right)^2 [F.H] \quad \text{-----식(7)}$$

로 나타낼 수 있다.

펄스폭에 해당되는 동축케이블의 길이는 식 (7)을 이용하여 계산하면 된다.

실험에서는 최대 10 ns를 정하고 5, 2, < 1 ns로 4가지로 하여 실험을 하였다. 그림 3은 케이블 길이를 각각 다르게 하여 측정된 펄스폭을 보여주고 있다. 라인타입에서 펄스를 만드는 회로는 일반적으로 PFN이라는 L과 C를 조합하여 사용하게 된다. 여기서는 동축케이블의 중간선로의 끝을 개방상태로 하고 케이블의 바깥부분의 실드 선을 출력으로 하면 절연체가 유전율을 갖는 커패시터로 된다. 즉 케이블의 중간선로는 인덕턴스인 L에 해당되고 실드선과 실드선간이 커패시터인 C로 된다. 케이블의 길이를 각각 다르게 하면 선로의 길이에 따른 인덕턴스와 커패시턴스 값이 커지게 되어 실제 펄스폭도 늘어나게 된다. 그러나 케이블이 갖는 특성임피던스는 케이블의 길이에 관계없이 일정하다. 그림 4는 실제 전자총에서 인출되는 빔 전류를 측정하는 것이다.

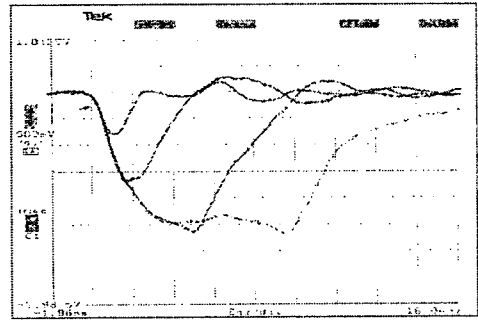


그림 3 케이블 길이에 따른 펄스 폭 측정

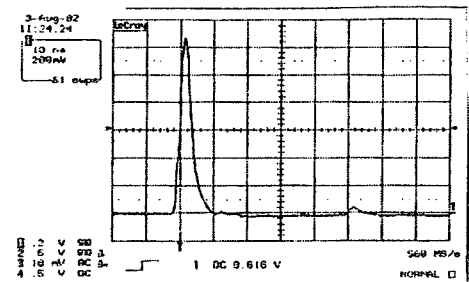


그림 4 출력 빔 전류파형

전자총의 그리드 캐소우드(Y-824)간 임피던스는 대략 12 Ω으로 측정이 되었다. 펄서의 출력임피던스는 50 Ω이므로 임피던스의 정합이 되지 않는다. 임피던스 정합을 위해 펄서와 전자총 그리드 전극 간에 직렬로 임피던스 정합 변압기를 사용하기도 한다. 케이블의 길이가 길어지면 케이블의 커패시턴스가 커지게 되어 부하임피던스와와의 합성 병렬임피던스는 작아진다. 실제 운전에 있어서 펄스폭에 따라 펄스 전류가 다르게 되는데 10 A

에서는 대략 12 Ω 정도이고 1 A에서는 50 Ω의 임피던스를 갖는다.

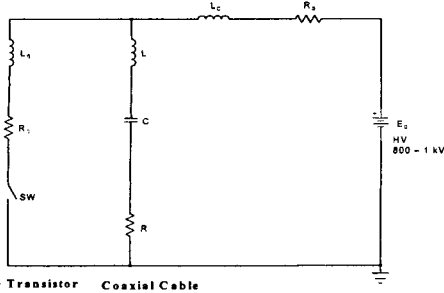


그림 5 펄서회로의 등가회로

전자총 그리드 펄서회로에서는 동축케이블의 길이를 50 cm에서 5cm까지 변화시키면서 측정 시 출력파형을 그림 3과 같이 나타내었다. 앞에서 설명한 바와 같이 동축케이블을 짧게 한 경우에는 케이블 내를 전달하는 시간이 짧기 때문에 펄스의 평탄부가 없고 파형이 삼각형에 가까워진다. 이 경우 동축케이블의 등가회로는 본래의 형태인 그림 5와 같이 LC회로로 근사적으로 나타낼 수 있다. 2ns 이하의 펄스를 만드는 충전용 동축케이블은 길이가 짧고 케이블의 인덕턴스 L이 트랜지스터 리드선에 분포하는 인덕턴스 L보다 작아야 된다. 라인타임 펄서에서는 본래 펄스폭을 정하는 것은 PFN에 대응하는 동축케이블의 길이이지만 선형가속기의 그리드 펄서는 이 케이블의 길이가 짧기 때문에 스위치의  $L_0$ 나 내부저항  $R_0$ 는 동축케이블 L에 대하여 상대적으로 크게 된다. 이 때문에 이들 값도 펄스폭을 결정하는 중요한 요인이 된다. 펄스폭이 긴 경우는 동축케이블의 L-C등가회로가 연속적으로 병렬로 접속되는 구조가 되기 때문에 출력펄스를 계산하기 위해서는 연립미분방정식으로 수치계산을 하였다. 계산된 결과로부터 동축케이블을 10단의 L-C회로로 근사하고 수치 계산한 결과를 컴퓨터 전산모사를 통하여 그림 6에 표시한 것처럼 실험파형에 가깝게 재현하였다. 그림 5에서 회로를 간략화 하기위해서 트랜지스터의 리드선의 인덕턴스  $L_0$ 와 내부저항  $R_0$ 는 전류에 따라 일정한 것으로 하였다. L과 C는 각각은 동축케이블의 인덕턴스와 커패시턴스이고 저항 R은 펄서의 부하저항이다. 쇼크코일  $L_c$ 의 인덕턴스와 분배저항  $R_d$ 는 큰 값을 가지기 때문에 이곳에 흐르는 전류를 펄스전류와는 무관하다. 스위치로 사용하는 트랜지스터의 경우는 직렬로 하여 사용하는데 스위치가 온이 되었을 때 인덕턴스는 트랜지스터 소자 하나당 2 nH정도이며 스위치와 직렬로 연결된 저항은 스위치 도통시의 저항 값을 등가적으로 표시한 것이다. 등가저항은 스위치를 구성하고 있는 PC기판의 패턴저항과 선로저항을 포함하며 대략 1 Ω 이하의 값을 갖는다.[3][4]

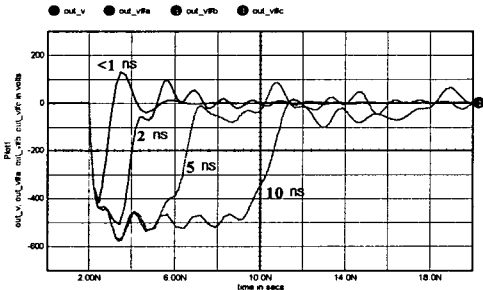


그림 6 길이변화에 따른 펄스 폭 변화

2.3.1 실험회로

실험회로로는 일반 PCB에 NPN트랜지스터를 직렬로 다단으로 실장하고 여기에 에너지를 저장하는 동축케이블을 연결되어있다. 실험회로로는 그림 7과같이 트랜지스터 4 - 6개를 직렬로 연결하였다. 동축케이블에 저장된 에너지는 스위치에 의해 방전이 되고 부하로 그 에너지가 전달된다. 그리드 펄서출력은 부 전압의 펄스전압을 생성하게 되어있다.(그림 3참조) 이 전압은 전자총의 그리드에 인가되고 최종적으로는 그림 4와 같이 정전압의 펄스 빔전류를 출력한다. 그림 7은 실제 제작한 펄서의 그림이다.

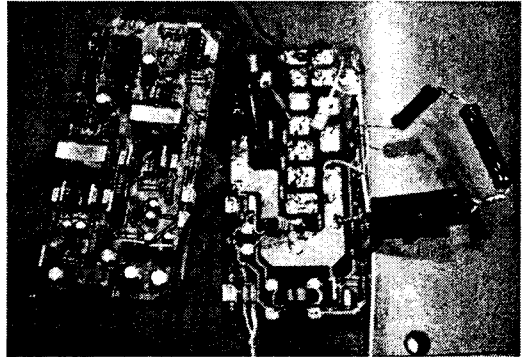


그림 7 실제 제작한 펄서

실험에 사용된 전원은 직류전원 1 kV을 스위칭모드 전원으로 제작하여 공급하였다. 부하로는 50 Ω, 2 W의 무유도 저항을 사용하였다. 펄스는 생성하는 동축케이블의 길이를 각각 변화시키면서 그 때의 펄스폭과 상승시간을 측정하고 부하 저항(25 Ω-50 Ω) 을 달리하면서 측정시험을 진행하였다.

3. 결 론

전자총의 그리드 트리거 펄스는 빠른 상승시간과 펄스폭이 1 ns이하의 것을 요구한다. 수 ns이하의 펄스를 만들기 위해 스위치로는 아바란치 트랜지스터를 사용하였다. 펄스폭과 펄스에너지를 결정하는 PFL의 동축케이블의 길이를 계산하고 실험을 통하여 계산결과를 확인하였다. 시험결과 아바란치 트랜지스터의 상승시간은 1 ns로 확인 되었다. 펄서회로에서 펄스폭에 영향을 미치는 중요한 인자로는 PCB패턴의 인덕턴스와 커패시턴스, 부하임피던스와 펄서회로간의 임피던스 매칭 등을 열거할 수 있다. 또한 측정시에 주의하지 않으면 발생하는 측정오차도 무시할 수 없다.

[참 고 문 헌]

[1] 손윤규,박성주, “고전압 nano-second펄스 전자총에 관한연구”, 대한전기학회 하계학술대회는문집C, pp1391-1393, 1995.  
 [2] Y. Otake, Y. ogawa, S. Ohsawa, “Short pulse grid pulser for an electron gun of the KEK positron generator”, The 6th Symp. on Accelerator Science and technology, pp65-67, 1987  
 [3] Fulkerson, E.S.; Booth, R. “Design Of Reliable High Voltage Avalanche Transistor Pulsers”, Power Modulator Symposium, 1994., Conference Record of the 1994 Twenty-First International, 27-30 Jun 1994  
 Page(s): 101-103  
 [4] Fulkerson, E.S.; Norman, D.C.; Booth, R. “Driving Pockels cells using avalanche transistor pulsers”, Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11th IEEE International , Volume: 2, 29 Jun-2 Jul 1997  
 Page(s): 1341-1346 vol.2