

## 대전력 펄스의 고속 스위칭 연구

이 석 우, 이 영 호, 하 성 호  
국방과학연구소

### A Study on Fast Switching System for High Power Pulse

Seok Woo Lee, Young Ho Lee, Seoung Ho Ha  
Agency for Defense Development

**Abstract** - In this paper, we designed and fabricated a fast switching system for high power pulse.

This system consists of a voltage conversion circuit, high voltage charging circuit, trigger circuit, and discharging circuit.

Especially discharging line is designed by strip-line for low inductance and resistance. The experimental result is that current slew rate of the system is 6.67kA/86ns and this result is fully qualified for initiating EBW or EFI

#### 1. 서 론

다양한 전기, 전자 응용분야에서 고속으로 응답하는 전류 펄스를 필요로 하는 경우가 있다. 특히 로켓모터 점화장치, 전자식 안전장전장치등에 사용되는 EBW (Exploding Bridge Wire)나 EFI(Exploding Foil Initiator)와 같은 특수한 기폭관(initiator)의 경우 대전류를 고속(수십 ns정도)으로 인가하여야 하는 전기적 점화특성을 요구한다.

본 논문에서는 상기와 같은 종류의 기폭관의 전기적 점화특성을 만족시키기 위하여 대전류 처리가 가능하고 대전력 펄스를 기폭관에 방전시킬 수 있도록 점화장치를 설계, 제작하고 대전력 펄스의 고속 스위칭 응답특성을 측정하였다.

#### 2. 점화시스템 설계 및 제작

외부환경에 의한 RF 잡음, 자연계에서 발생할 수 있는 EMP(electromagnetic pulse)등의 전자계 잡음 영향을 최소화시키기 위해서 EBW나 EFI와 같은 기폭관은 그림 1과 같이 빠른 상승시간(risetime)의 대전류 펄스가 전달되어야만 점화 작동이 이루어진다. 일반적으로 EFI와 같은 기폭관을 점화시키기 위한 시스템의 설계 요구사항은 대체로 다음과 같다.

- (a) 2.0kV 이상의 점화 전압
- (b) 4kA 이상의 동작 전류 (risetime < 100ns)
- (c) 시스템의 방전회로 저항은 0.01Ω이하
- (d) 시스템의 방전회로 인덕턴스는 50nH 이하

따라서 상기의 점화특성을 만족시키기 위한 시스템의 설계를 위해 시스템의 선로저항, 인덕턴스를 최소화시키고 내부 턴-온(turn-on)저항이 낮은 고속방전용 대전력 스위치, 내부 인덕턴스 성분이 낮은 고전압 캐패시터를 사용하였다.

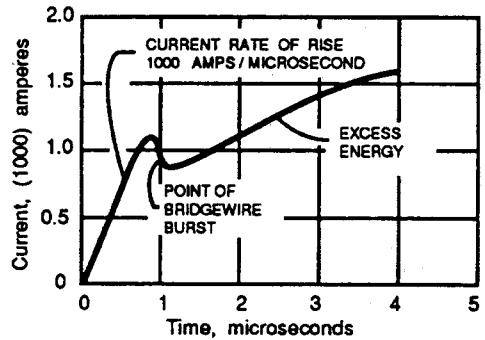


그림 1. EBW의 current trace

시스템은 고전압 유도를 위한 송압부, 고전압의 에너지를 저장하는 충전부, 점화트리거부, 방전부로 구성되어 있고 대전력용 고속방전을 위해 스파크-갭(spark-gap) 스위치를 적용하였다.

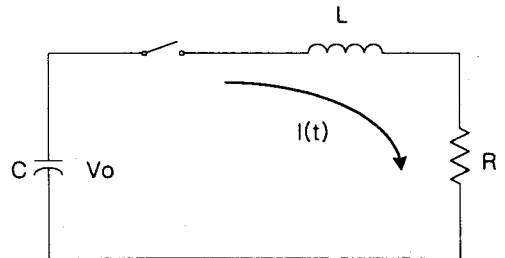


그림 2. 시스템의 방전부 등가회로

그림 2에서 spark-gap이 이상적인 스위치라고 가정하고 등가회로의 선로전체 저항 R이 방전회로의 임계 임피던스인  $2\sqrt{L/C}$  보다 작을 때 스파크-갭 스위치 도 동시에 방전전류  $I(t)$ 는 식(1)과 같고 파형은 그림 3과 같이 감쇄비(damping ratio)가  $\zeta$ 이고  $w$ 의 주파수를 갖는 감쇄 진동(underdamped oscillation)인 ring-down 이 발생한다.

$$I(t) = \frac{V_0}{wL} e^{-\frac{\zeta w}{\sqrt{1-\zeta^2}}t} \sin(wt) \text{ ----- (1)}$$

전류파형의 주파수  $w$ , 감쇄비  $\zeta$ 는 식(2), 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$w = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{-----(2)}$$

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \text{-----(3)}$$

C : 회로 캐패시턴스, farad  
 V<sub>0</sub> : C 에 충전된 전압, volt  
 R : 회로 저항, ohm  
 L : 회로 인덕턴스, henry

위 식에서 회로저항은 회로패턴의 저항과 스위치 도통 저항을 포함한 값이며, 회로인덕턴스는 회로패턴과 스위치 및 캐패시터의 자체 인덕턴스를 포함한 값이다.

대전류, 고속 스위칭 응답특성을 구현시키기 위해서는 특히 회로의 전체 선로저항 R, 선로전체 인덕턴스 L이 극히 작은 값이어야 하는데 방전회로의 인덕턴스 L과 저항 R에 대한 계산식은 식(4), 식(5), 식(6)과 같이 방전전류 파형의 정(+)전류 정점값 비(peak ratio), 정점값간의 주기로 나타낼 수 있다.

$$PR = \frac{I_{ppk1}}{I_{ppk2}} \text{-----(4)}$$

$$L = \frac{T^2}{C(4\pi^2 + (\ln PR)^2)} \text{-----(5)}$$

$$R = 2L \frac{\ln PR}{T} \text{-----(6)}$$

I<sub>ppk1</sub> : 첫번째 정(+)전류 정점값, ampere  
 I<sub>ppk2</sub> : 두번째 정(+)전류 정점값, ampere  
 T : 정(+)전류 정점값간의 시간, sec

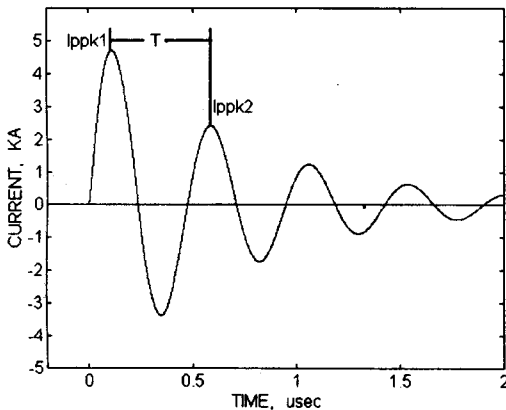


그림 3. 그림 2의 방전전류 파형

방전회로에서 대전력 펄스를 부하에 손실없이 고속으로 전달될 수 있도록 하기 위해 선로를 strip-line으로 설계하여 선로의 인덕턴스 및 저항을 극소화 시켰다.

그림 4와 같은 형태의 strip-line의 인덕턴스 L<sub>p</sub>는 저임피던스 부하에 대해 식(7)과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$L_p \approx \mu_0 \left( \frac{ld}{w} \right) \text{-----(7)}$$

μ<sub>0</sub> : 자유공간의 permeability (= 4π nH/cm)  
 l : strip-line의 길이, cm  
 d : strip-line의 폭, cm  
 w : 절연재의 두께, cm

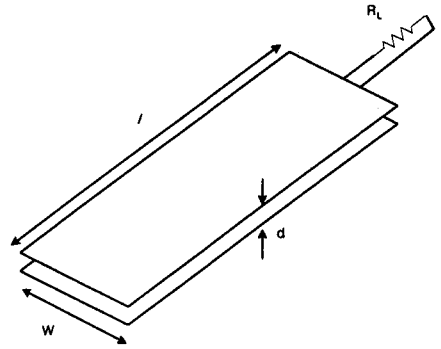


그림 4. strip-line의 구조

본 연구에서는 길이가 16cm, 폭이 25.4mm, 두께가 3 mil 인 polyimide에 두께가 1 ounce인 copper foil을 에칭시킨 구조로 인덕턴스 성분을 약 4nH 이하로 설계하여 실험에 사용하였다.

### 3. 실험 및 결과 고찰

본 연구의 시스템에 적용된 점화 및 방전회로는 그림 5와 같이 고전압 캐패시터, 대전력용 spark-gap 스위치, strip-line, 트리거 트랜스포머등으로 구성되어 있으며 부하로는 CVR(Current Viewing Resistor)을 이용하였다.

실험에 사용한 spark gap은 EG&G 사의 GP-486으로 <표 1>과 같이 동작전압 범위는 2~4kV이며 최대 도통전류는 10kA까지 흘릴 수 있으며 턴-온 상태의 저항값은 15~30 mΩ이다. 고전압 캐패시터는 nickel foil type의 KMR1X6258SP-1 0.209uF(CUSTOM사)를 사용하였다.

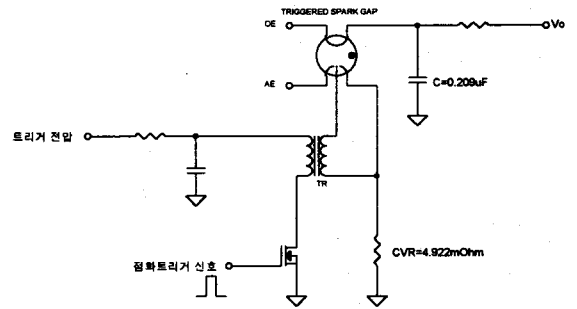


그림 5. 실험에 사용한 점화회로

<표 1> spark-gap 스위치 GP-486의 동작 특성

작동전압	Static Breakdown 전압(SBV)	트리거 전압 min.	peak 펄스전류	스위칭 시간
kV	kV	kV	kA	μs
2.0~4.0	4.5	2.0	10	0.07

20V, 10 $\mu$ s의 펄스 폭을 가진 점화트리거 신호가 입력 되면 트리거 트랜스포머의 출력 펄스에 의해 spark gap 스위치가 턴-온 되어 그림 6과 같이 방전부의 부하에 전류가 흐르게 된다.

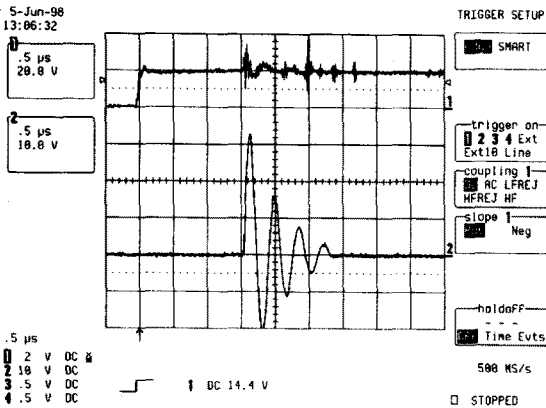


그림 6. 점화트리거 입력신호와 방전출력 파형

그림 7은 충전전압  $V_0$ 가 2500V일 때 디지털 오실로스코프(Lecroy, 9374)로 2 $\mu$ s 동안 CVR에 흐르는 방전 전류의 전압파형을 측정 한 결과를 나타내었다.

4.922m $\Omega$ 의 CVR (T&M Research사)를 사용하여 CVR에 흐르는 전류를 측정 한 결과 그림 8과 같이  $I_{pp1}$ ,  $I_{pp2}$ 은 각각 6666.5A, 3301.5A이며, 정점 전류값의 주기 T는 370ns로 측정되었다.

따라서 식(4), 식(5), 식(6)으로부터 시스템의 인덕턴스 L과 저항 R을 산출한 결과 각각 16.39nH, 62.25m $\Omega$ 으로 나타났다.

여기서 인덕턴스 L은 스파크-갭 스위치 및 고전압 캐패시터의 자체 인덕턴스를 포함한 값이다. 부품의 인덕턴스는 10nH 이하라고 알려져 있기 때문에 스트립라인의 인덕턴스는 수 nH이다. 그러므로 스트립라인의 인덕턴스 설계치인 4nH 값과 부합한다. 또한 방전전류가 흐르기 시작하여  $I_{pp1}$ 에 도달하기까지의 risetime을 측정 한 값은 86ns로서 이는 기폭관 EFI에 요구되는 current slew rate인 4kA/100ns 이상의 대전력 고속 스위칭 응답특성을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

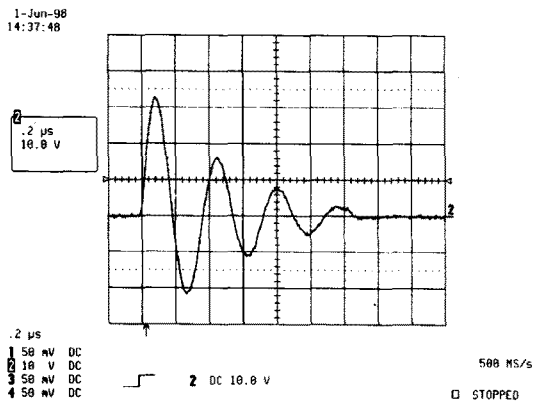


그림 7. 충전전압이 2500V 일 때 CVR에 흐르는 전류의 출력전압 파형

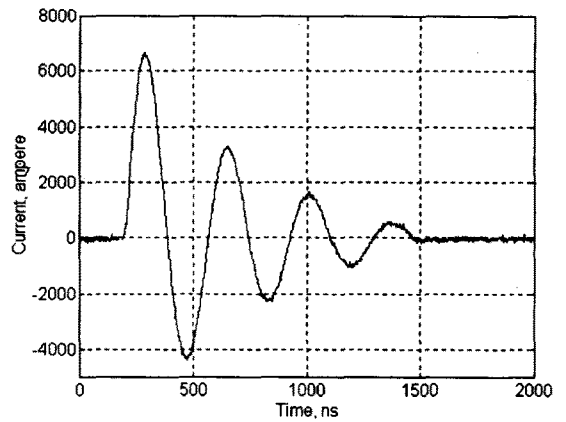


그림 8. 그림 7의 방전전류 변환 파형

#### 4. 결론

본 연구에서는 100ns이하의 고속 스위칭과 4kA이상의 대전력 펄스를 요구하는 시스템을 만족시키기 위해 시스템의 방전선로를 strip-line으로 설계하여 인덕턴스를 수 nH 이하로 구현시켜 제작하였으며, 대전력용 spark-gap 스위치를 적용하여 실험한 결과 설계 요구조건을 충분히 만족하는 6.67kA/86ns의 특성을 얻을 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] L.M.Earley and G.L.Scott, "Low cost, 3KV, triggered, stripline, surface-discharge switch", SAND-90-2881C, Sandia National Lab.
- [2] Frank, B. pollard and Jack H. Arnold, Jr., Aerospace ordnance handbook, Prentice-Hall, Inc., 1966.
- [3] 손윤규, 김광기, 박상욱, 조부현, "Triggered Spark Gap의 고전압 방전제어 특성 연구", 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1816-1818, 1997.
- [4] EG&G Electronic Components, Triggered surface mount switch, 1990.