

A study on High Voltage Squarewave Pulse Generator

金永培[†] · 柳泓濟^{*} · 金鍾洙^{**}

(Young-Bae Kim · Hong-Je Ryu · Jong-Soo Kim)

Abstract - This paper presents the generation of the high voltage squarewave pulse using distributed RLC circuit. The demonstrated test was performed with the distributed RLC circuit which consists of the resistance, the inductance and the capacitance. Pspice simulation was also conducted about the experiment circuit. The result of the experiment was in good agreement with the result of the simulation. Theoretical analysis of the initial peak value at the squarewave pulse was derived from the results of the experiment and simulation. Additionally, the characteristics of the time delay was analyzed about the spherical gap switch and the surface discharge gap switch, respectively. It is concluded that the surface discharge gap switch is better than the spherical gap switch to reduce the time delay.

Key Words : Pulse generator, Spark gap, Squarewave, High voltage

1. 서론

고전압 전원은 반도체, 환경, 의료, 전기재료, 박막제조 등 각각의 산업에 필수적인 요소기술이다.[1-5] 이러한 전원기술은 적용대상에 따라 전압, 전류, 파형, 주파수, 전력이 요구되고 이에 적합한 유효한 효과를 얻기 위하여 전원제작 기술력이 뒷받침 되어야 한다.[6-7] 그러므로 전원의 제작 기술은 항상 개발의 필요성이 대두되고 있는 매우 중요한 분야이고 계속해서 발전해 오고 있다. 그 중 하나로서 X-ray 발생기, 펄스형 마그네트론과 같이 구형파 형태의 펄스모양을 요구하는 펄스파워 응용분야에는 flat-top 형태의 구형파 펄스가 요구되며, 이를 위해서는 최근 개발이 활발히 이루어지고 있는, 반도체 방식의 펄스전원장치가 사용될 수 있다. IGBT와 같은 반도체 스위치를 직병렬 구조로 적층연결하여 원하는 펄스 모양을 발생시키는 반도체 방식의 펄스전원장치는 구형파 형태의 펄스 모양과 펄스폭, 펄스전압의 크기와 반복을 등을 자유롭게 제어할 수 있으며, 반영구적인 사용이 가능한 장점을 지니게 된다. 그러나 이러한 반도체 방식의 펄스전원 장치는 그 구현이 까다롭고 비용이 많이 요구되어 고가가 되며, 반도체 소장의 직병렬 운전을 위한 극한 기술이 요구되는 단점을 지니게 된다.

본 논문에서는 간단한 펄스 중첩의 형태로 인가되는 새로운 구형파 펄스 파워 발생기에 대하여 기술하였다. 제안한 방식은 기존의 Marx Generator를 수정하여 다단의 펄스를

중첩함으로써 궁극적으로 간단하게 구형파 형태의 flat top 출력 펄스를 발생시킬 수 있는 장치이다. 이러한 구조는 간단하여 저가이며, 복잡한 제어를 요구하지 않는 장점을 지니게 된다. 그리고 설계된 새로운 구형파 펄스 발생장치는 간단한 실험을 통하여 그 성능이 검증되는 것을 보였으며, 향후 구형파를 요구하는 저가의 펄스파워 응용분야에 효과적으로 적용될 수 있음을 보였다. 또한 효과적인 구형파 발생을 위한 새로운 연면방전스위치를 설계 제작하여 기존의 스파크 갭스위치를 사용하는 방식을 대체할 경우 각 적층회로에 설치되어 있는 스위치의 Jitter를 줄일 수 있는 기술적 장점을 보였다.

2. 파형발생의 원리

발생할 펄스의 조건은 구형파이면서 초기에 진동(overshoot)하는 파형(그림 1)을 발생하기 위해서는 그림 2와 같은 회로를 이용하면 된다. 부하 저항 R에서 볼때 초기에는 가까운 거리에 있는 C에서 R,C방전을 하고, 그 다음에는 먼 거리에 있는 L,C에서 시정수만큼의 시간차를 가지면서 순차적으로 방전을 하는 회로를 사용하였다.

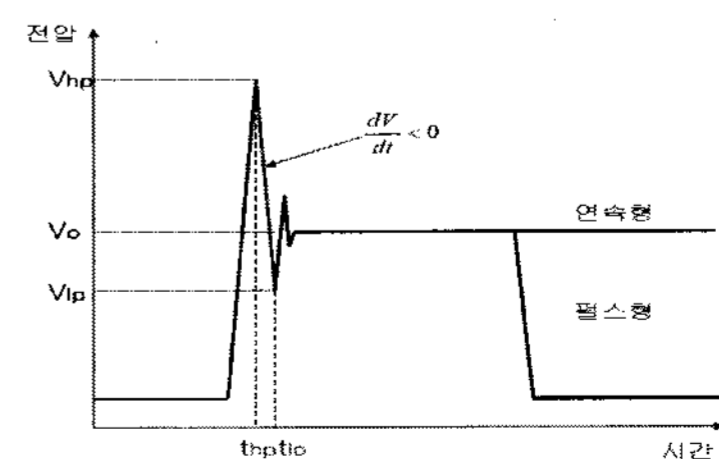


그림 1 펄스 조건

Fig. 1 Condition of the pulse waveform

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 先任技術員

E-mail : ybkim@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

^{**} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

接受日字 : 2008年 3月 25日

最終完了 : 2008年 5月 14日

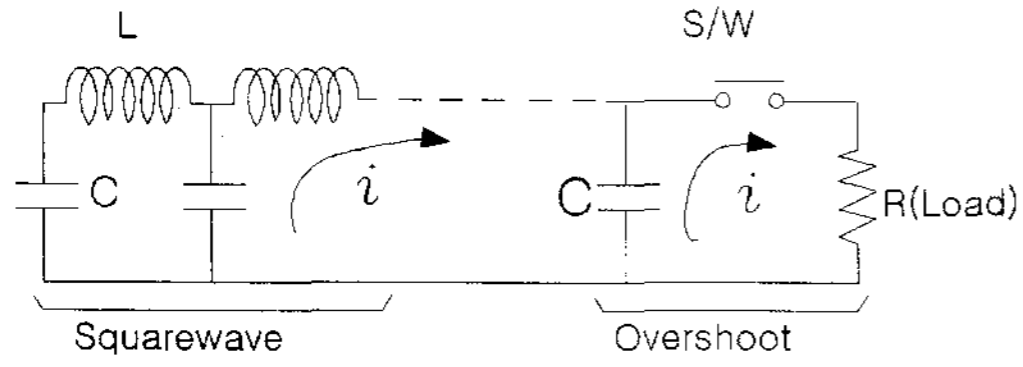


그림 2 파형 발생의 원리도
Fig. 2 Principle of wave generation

시뮬레이션은 Pspice 프로그램을 이용하여 각 소자의 특성값을 임의로 바꾸어서 수행한 결과 커패시터는 2nF, 인덕터는 10μH가 적당한 것을 알 수 있었다. 그리고 부하 저항은 150Ω 과 커패시터는 230pF이 적합 하였다.

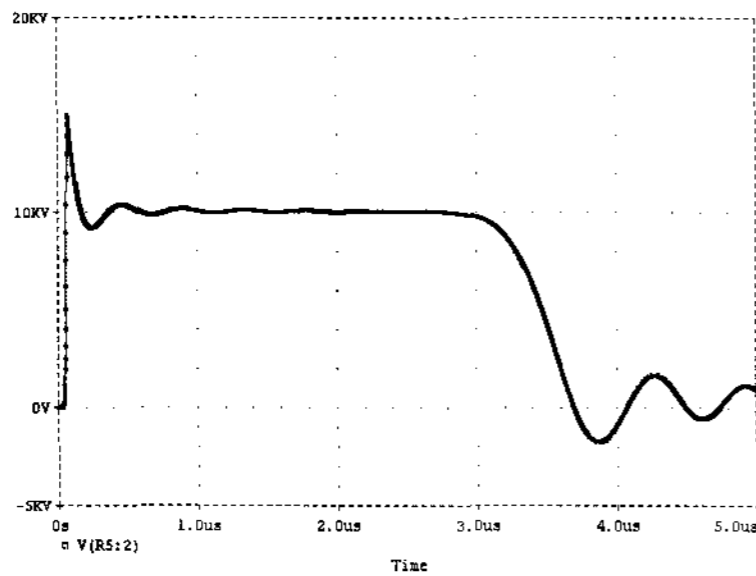


그림 3 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation result

실제 구형파 발생 장치의 회로도에는 그림 4와 같이 L,C의 분포정수회로를 이용하여 그림 5와 같은 구형파를 발생한다.

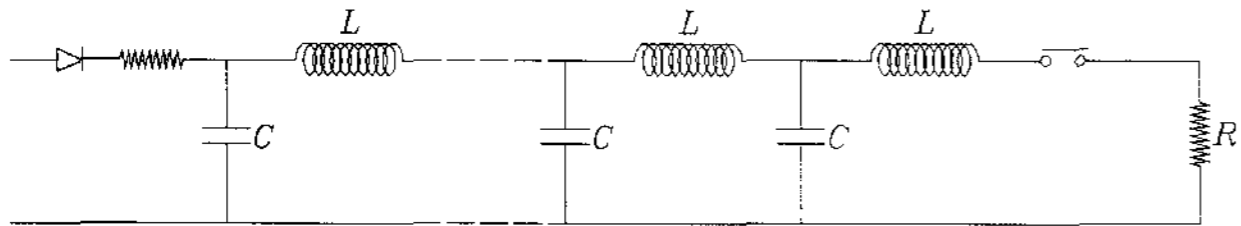


그림 4 구형파 발생 분포정수 회로도
Fig. 4 Squarewave generation distribution essence schematic

또한 펄스의 지속시간은 커패시터의 병렬연결 개수에 비례한다. 커패시터의 갯수를 n 이라 하면 펄스의 지속시간은 $t=2(n-1)\sqrt{LC}$ 로 나타난다[8].

그런데, 그림 1에서 주어진 파형의 조건이 구형파의 전단부분이 overshoot하는 파형이어야 하기 때문에, 그림 2에서와 같이 부하저항 R에서 가까이 있는 커패시터측의 인덕터를 제거하며 그림 1에서와 같은 파형을 성형 할 수 있다.

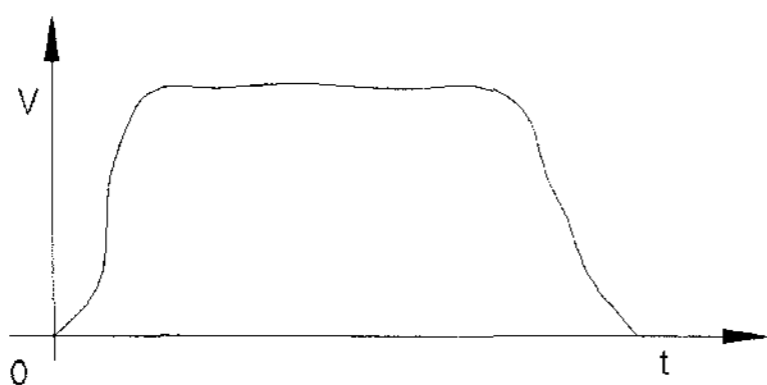


그림 5 구형파 전압 파형
Fig. 5 Squarewave

3. 구형파 전원장치 제작

3.1 스파크갭 스위치

트리거트론 스파크갭(trigatron spark gap)이라고도 한다. 이 갭 스위치는 광전리(photo ionization)에 의한 코로나 방전을 통해 갭이 터지도록 하는 구조의 고전압 스위치이다. 트리거 특성은 전극에 가해지는 전압 극성에 따라 변한다. 예를 들면 방전 전압이 수십 kV인 갭 스위치에서는 그림 6 과 같이 트리거전극이 정, 그림에서 하부에 있는 주전극이 부극성일때, 즉 양자간에서 방전이 일어나기 쉬운 때에 시동 시간과 시간 변동이 가장 작다. 시동 전극 주위의 절연물 뚜게를 작게하면 특성이 나빠지며, 주전극 갭길이가 너무 크면 시동 특성이 현저히 나빠지므로 이런 것에 주의하면 시간 변동을 수 ns이내로 억제할수 있다. 이처럼 편리하고 간편하게 사용 할수 있고, 아주 높은 전압까지 사용할 수 있는 특성이 있는 반면에, 방전시간의 늦음과 광음이 발생하는 단점이 있다.

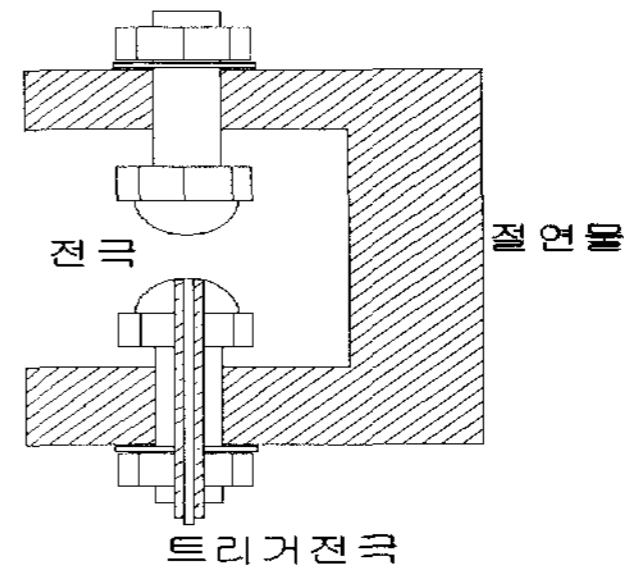


그림 6 스파크갭의 구조
Fig. 6 Structure of spark gap

3.2 연면 방전을 이용한 갭 스위치(surface flashover gap switch)

그림 7과 같이 유리 또는 세라믹 과 같은 절연체의 표면에 전극 A,B를 설치하고 전압을 인가하면, 고체 유전체의 비유전율은 공기의 유전율을 보다는 크므로 전속(electric flux)은 대부분 고체 유전체속을 통과한다. 이때 그림과 같이 전속이 고체 유전체와 공기중을 통과하면 고체 유전체속을 통과하는 전속이 더 길다. 그러므로 A,B전극 사이의 전압이 비교적 낮을 때에도 공기 부분에는 큰 전위경도(electric potential gradient)가 나타나 옆면 방전이 쉽게 일어난다.

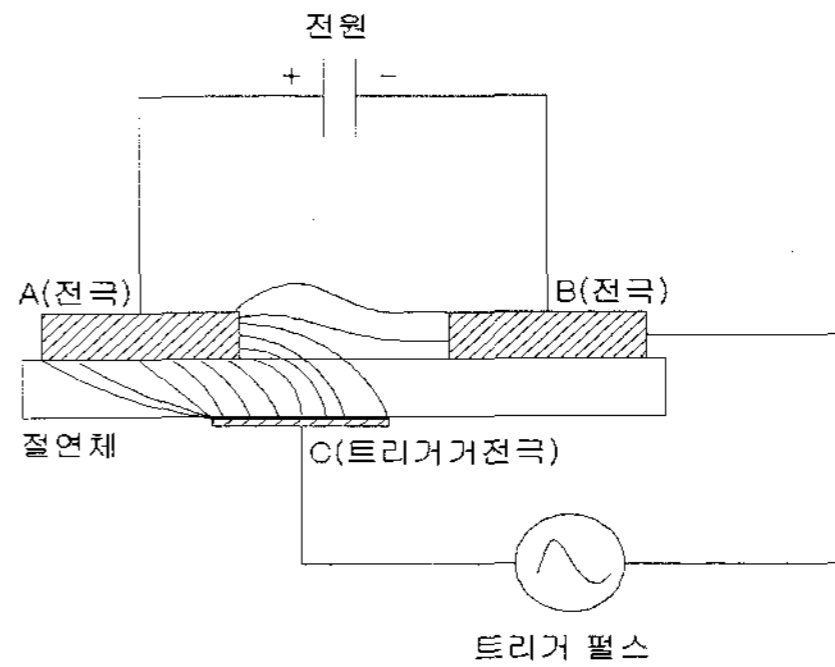


그림 7 연면방전 스위치의 원리
Fig. 7 Principle of surface flashover switch

또한 고체 유전체의 A전극 측에는 +전하가 축적되어 있고, B전극 측에는 -전하가 축적되어 있는 상태에서 C전극에 펄스 전압을 가하면 축적된 전하가 한층 더 높아져 이로 인해 고체유전체 표면으로 연면 방전이 일어난다.

연면 절연과피전압을 V_s 라 하면 $V_s = KC^{-3/5} d^{1/4}$ 로 주어진다. 여기서 d는 고체 유전체의 연면거리, $K \approx 74$, C는 유전체의 단위면적당 정전용량이고 $C = \epsilon/d$ 이다. C가 크면 V_s 가 낮아지는 것은 앞서 설명한 것처럼 정전용량으로 인한 전압 분압이 이루어져 공기에 걸리는 전압이 높기 때문이다[8].

3.3 구형과 발생기 조립

구형과 발생기의 조립은 그림 9와 같이 커패시터 12개 와 인덕터 11개를 1모듈(module)씩 하여 2모듈을 2층으로 쌓아서 설치하고, 접지 저항 10kΩ을 사용하여 1단과 2단을 연결하였다.

커패시터는 무라다사의 30kV 2nF의 세라믹 커패시터 24개를 사용하였으며, 인덕터는 직경 2mm 동에나멜선을 지름 30 mm, 30회를 감아서 10μH 22개를 제작 하였다. 트리거 스위치는 연면 방전 스위치를 2개 제작하여 설치 하였다(그림 6과 같은 구조의 갭 스위치도 2개 제작 하였습). 또한 각 커패시터 사이에 설치 되는 인덕터는 상호 인덕턴스가 발생하는 것을 억제하기 위해서 서로 방향을 어긋나게 설치 하였다.

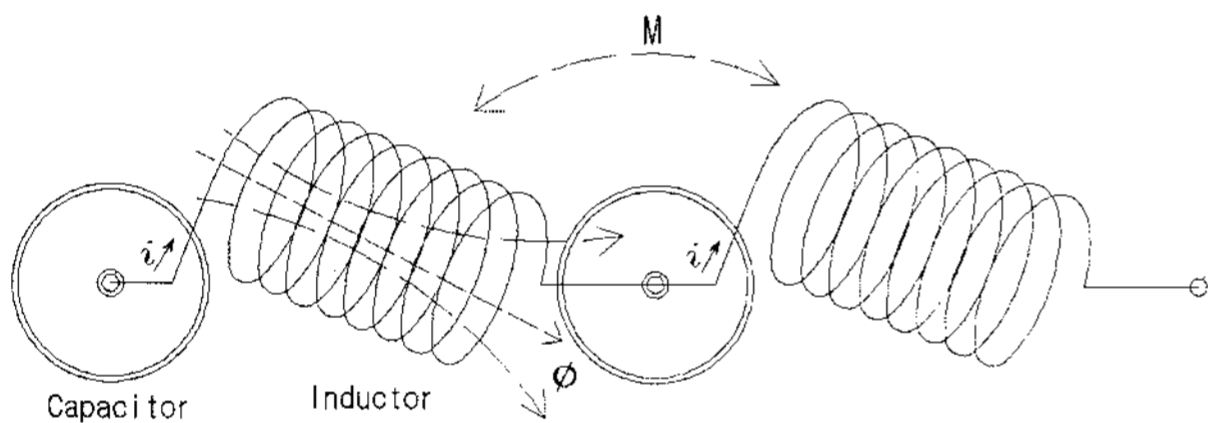


그림 8 인덕터 설치 구조
Fig. 8 The fabricated inductor



그림 9 제작한 구형과 펄스 전원장치
Fig. 9 The fabricated squarewave power supply

4. 실험 및 결과 고찰

직류 고전압 발생기를 이용하여 15kV를 충전하여 실험 결과와 시뮬레이션이 일치하는가를 확인 하였으며, 또한 트리거 스위치를 구갭스위치와 연면방전스위치 2종류를 제작하여 동작 특성 등을 비교 실험 하였다.

그림 10에서 보는 바와 같이 구갭스위치는 동작 할 때에 delay가 심하게 발생하는 것을 알수가 있으며, 매번 실험시마다 Jitter가 발생 하였다. ch1은 2층으로 쌓은2개 모듈의 전압파형(최종 출력파형)이고, ch2는 1stage 모듈 전압파형이다. ch1 파형의 모양은 갭스위치가 동작할 때 에 시간차가 나는 것으로서 delay가 많이 발생하는 것을 볼수가 있다.

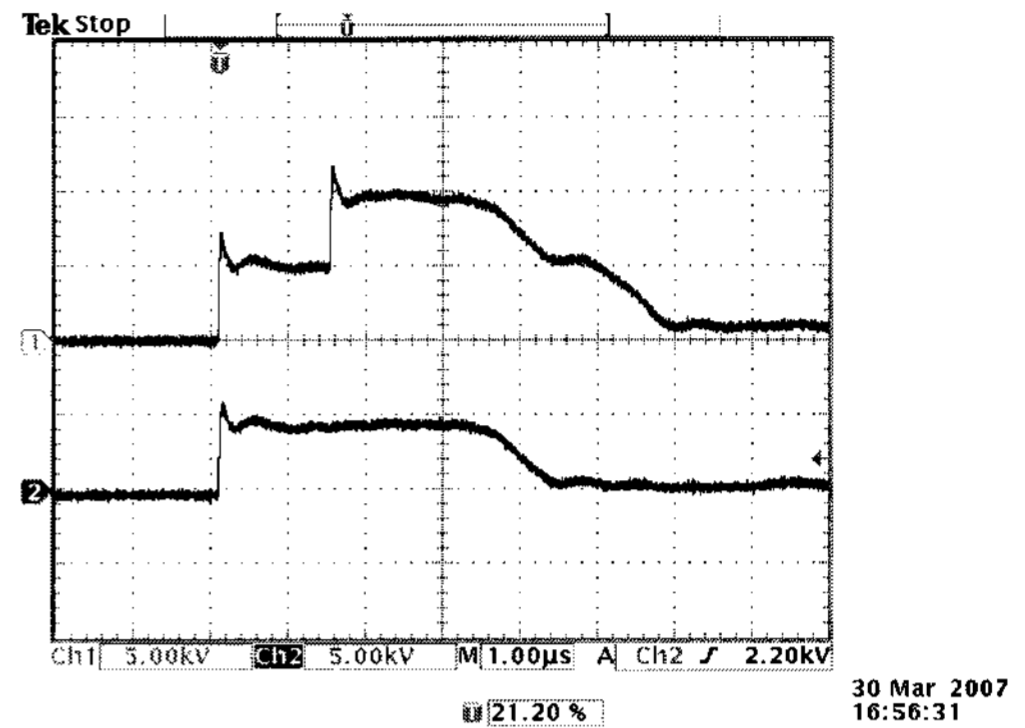


그림 10 구갭 스위치의 delay(ch1:2모듈 전압, ch2:1모듈 전압파형)

Fig. 10 The delay time of gap switch

그림 11는 트리거 스위치를 연면방전 스위치를 사용한 결과이다. 오실로그래프에서 ch1은 구형과 발생기의 2모듈의 전압파형이고 ch2는 1모듈의 파형인데, 1모듈과 2모듈과의 delay는 약 40ns가 발생하는 것을 알수가 있다. 이러한 현상은 매번 발생하는데, 막스발생기의 갭 스위치의 특성인 것이다. 1단 스위치에 트리거 신호를 주면 2단 스위치에서는 그 2배의 전압이 발생하면서 순차적으로 방전스위치가 동작하는 것이다.

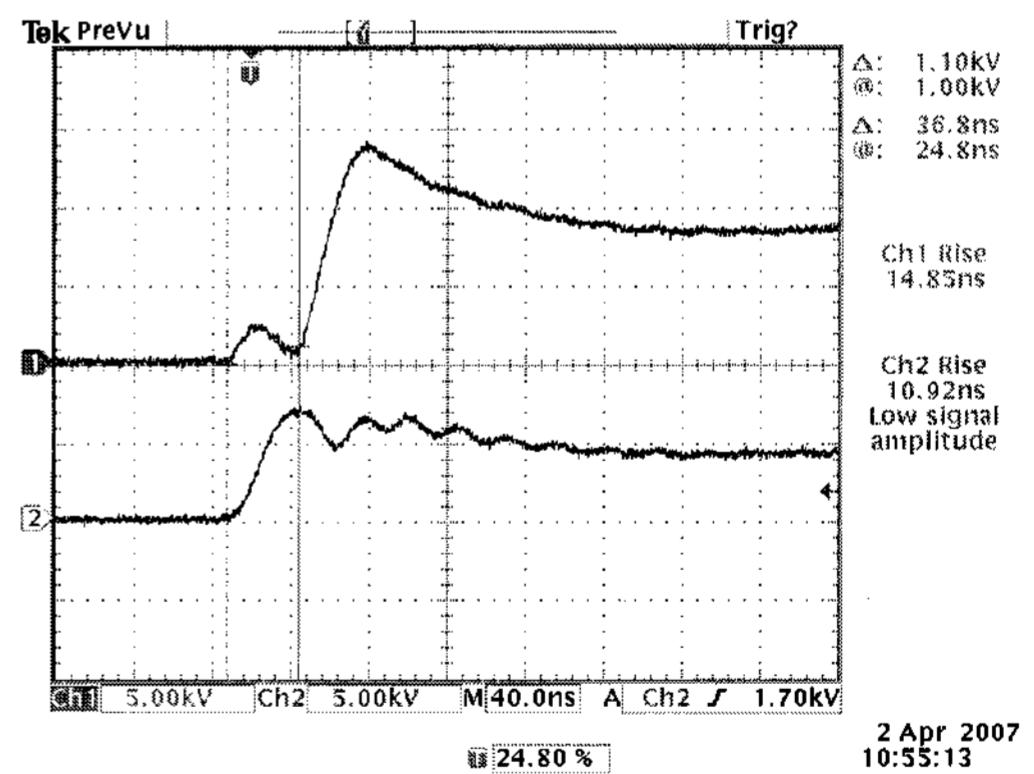


그림 11 ch 1: 2단 모듈 전압 파형, ch2: 1모듈 전압 파형
Fig. 11 ch1:The voltage waveform of 2 stage module.
ch2:The voltage waveform of 1 stage module

그림 12는 구형과 발생기의 최종 출력 파형을 측정 한 것이며, 그림 13은 dV/dt를 측정 한 파형으로 $dV/dt = 9.5kV/46ns = 206V/ns$ 가 발생하였다. 이결과는 그림 1의 조건을 만족하는 결과이다.[오실로그래프 중에서 그림 10는 구갭 스위치를 사용한 파형이고, 그림 11, 12, 13 은 연면방전 갭 스위치를 사용한 파형임]

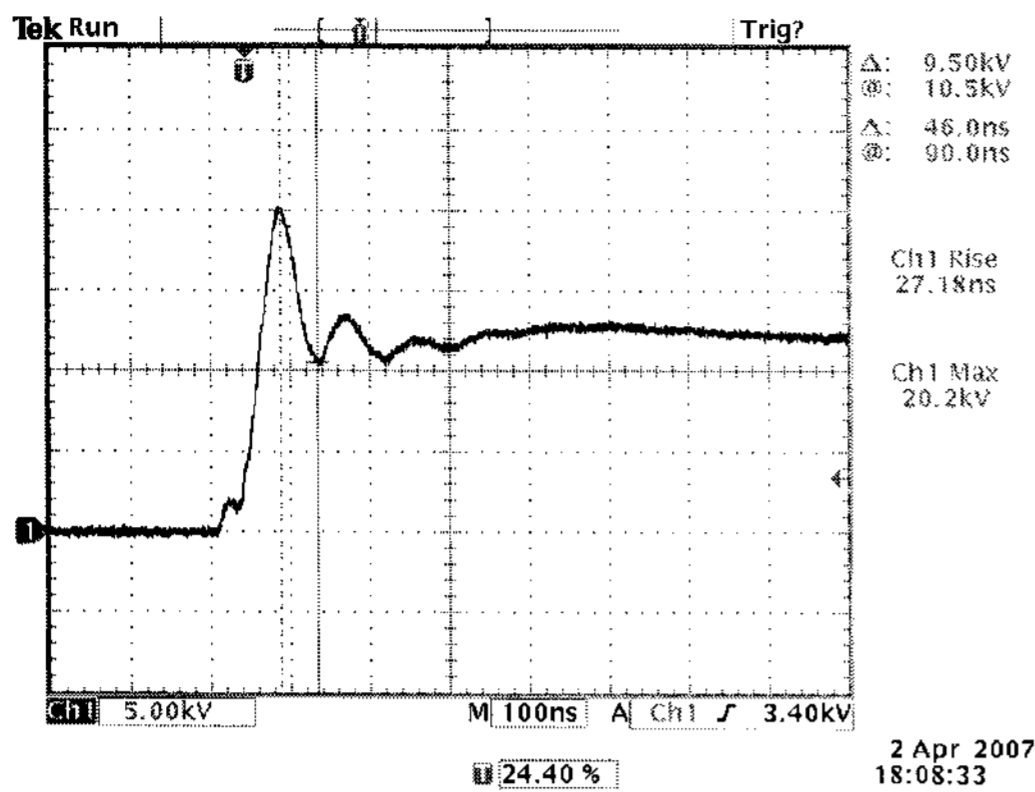


그림 13 dv/dt 파형
Fig. 13 dv/dt waveform

6. 결 론

본 논문에서는 Marx Generator의 전압파형을 개선하기 위하여 간단한 파형 중첩을 통하여 구형과 발생이 가능한 새로운 구형과 펄스전원 발생장치에 대하여 연구하였다. 제안된 방식은 고가의 반도체 스위치 소자를 이용한 펄스전원 장치에 비하여 간단하고 저렴한 펄스전원발생장치의 형태로 구현이 가능하며 간단한 구조로 인해 제어 또한 복잡하지 않은 장점을 가지는 것을 보였다. 또한 제안한 방식에 효과적으로 적용 가능한 새로운 연면방전 스위치를 설계 제작하였으며, 스파크 갭을 사용한 구형과 펄스발생장치와 그 결과를 비교하였다. 실험과 시뮬레이션을 통하여 제안한 구형과 펄스발생장치는 펄스의 상단이 편평한 flat top 펄스의 발생이 가능하며, 기존의 Marx Generator의 단점을 보완 할 수 있었으며 이러한 장점으로 X-ray, 마그네트론과 같이 구형과 형태의 펄스를 요구하는 분야에 효과적으로 적용 가능함을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] Takao Namihira, Shunsuke Tsukamoto, Douyan Wang, Hideo Hori, Sunao Katsuki, Reuben Hackam, Hidonori Akiyama, Masaru Shimizu, and Kenichi Yokoyama, "Influence of gas flow rate and reactor length on NO removal using pulsed power", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 28, no. 4, pp. 592-598, Aug. 2001.

[2] Erwin H. W. M. Smulders, Bert E. J. M. van Heesch, and Sander S. V. B. van Paasen, "Pulsed power corona discharges for air pollution control", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 26, no. 5, pp. 1476-1484, Oct. 1998.

[3] B. M. Penetrante, M. C. Hsiao, B. T. Merritt, G. E. Vogtlin, and P. H. Wallman, "Pulsed corona and dielectric barrier discharge processing of NO in N₂", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 26, pp. 3719-3721, 1996.

[4] Giorgio Dinelli, Luigi Civitano and Massimo Rea, "Industrial Experiments on Pulse Corona

Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ from Flue Gas", *IEEE Ind. Applicat.*, vol. 26, no. 3, pp. 535-541, May/June 1990.

[5] J. Sidney Clements, Akira Mozuno, Wright C. finney, and Robert H. Davis, "Combined Removal of SO₂, Nox, and Fly Ash from Simulated Flue Gas Using Pulsed Streamer Corona", *IEEE Ind. Applicat.*, vol. 25, no. 1, pp. 62-69, Jan./Feb. 1989.

[6] Geun-Hie Rim, Evgeny P. Pavlov, Hong-Sik Lee, Jongsoo Kim, and Young-Wook Choi, "Pulse forming lines for square pulse generators", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 196 - 200, 2003

[7] Young-Wook Choi, In-Wha Jeong, Geun-Hie Rim, E. P. Pavlov, Chang-Sik Choi, Hong-Ki Chang, Mee-Hye Woo and Seong-Poong Lee, "Development of a Magnetic Pulse Compression Modulator for flue gas treatment", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. 30, No. 5, pp. 1632-1636, 2002.

[8] High Voltage Engineering, E.Kuffel & W.S. Zaengl, 1984

저 자 소 개



김 영 배 (金永培)

2006년 경남대학교 전기공학과 졸업.
현재 동 대학원 전기공학과 재학중
1982년~현재 한국전기연구원 선임기술원
관심분야 : 고전압발생, 고전압측정
Tel : 055-280-1535,
Fax : 055-280-1433,
E-mail : ybkim@keri.re.kr



류 홍 제 (柳泓齊)

1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004-2005 University of WInconsin Madison 방문연구원. 1996년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 펄스전원기술팀장(책임연구원)



김 종 수 (金鍾洙)

1982년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1991년 경남대학교 공과대학 전기공학과 졸업(석사), 1999년 경남대학교 공과대학 전기공학과 졸업(박사), 1982년~ 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원.