工學碩士 學位論文

초고속 Marx 발전기 개발에 관한 연구

A Study on the Development of an Ultra-fast Marx Generator

指導教授 吉 暻 碩

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

申 光 澈

本 論文을 申光澈의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長: 工學博士 李 成 根 @

- 委員:工學博士 吉 暻 碩
- 委員:工學博士張樂元

2006年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

申 光 澈

목 :

목 차
그림 및 표 목차
Abstractv
제 1 장 서 론1
1.1 연구배경
1.2 연구목적 및 내용
제 2 장 이 론
2.1 Marx 발전기 해석5
2.2 초고속 Marx 발전기의 특성 이해
제 3 장 설계 및 제작
3.1 직류 고전압 전원장치
3.2 트리거 회로
3.3 Marx 챔버

	및 고찰	실험	4 장	제
	과 변위시	통작영역	4.1 동	
53	3	출력 특성	4.2 출	
<i>5</i> 6	론	결	5 장	제
	헌	문	고	참

그림 및 표 목차

<그림목차>

그림	2.1	충격전압 발생장치의 등가회로
그림	2.2	표준 충격전압 파형(1.2/50 µs)
그림	2.3	6단 Marx 발전기의 기본회로9
그림	2.4	Marx 발전기의 사진
그림	2.5	Marx 발전기의 충·방전 모드
그림	2.6	과도파형 발생회로
그림	3.1	고속 Marx 발전기의 구성도
그림	3.2	트리거 갭의 형상
그림	3.3	트리거 팬던트의 사진
그림	3.4	트리거 팬던트의 출력파형
그림	3.5	트리거 발전기 회로
그림	3.6	TR-148 출력파형
그림	3.7	트리거 발전기 출력 파형
그림	3.8	시제작 트리거 발전기의 사진
그림	3.9	Marx 모듈의 사진
그림	3.10	Marx 발전기의 회로도
그림	3.11	커패시터와 인덕터
그림	3.12	절연물의 사진
그림	3.13	Marx 발전기의 단면도38
그림	3.14	단별 SVB 와 트리거 전압 파형 예40
그림	3.15	전해액 저항 분압기와 pick up 코일의 사진43
그림	3.16	SF ₆ 1.0 kgf/㎡에서 출력과형 예44
그림	3.17	SF6 압력에 따른 Marx의 동작특성45
그림	3.18	N2 압력에 따른 Marx의 동작특성47

그림	3.19	Marx 발전기 조립 및 시험	48
그림	4.1	Marx 전달특성 ······	50
그림	4.2	Marx의 동작특성 …	51
그림	4.3	Marx의 시간지연과 변위시간	52
그림	4.4	Marx 발전기의 출력전압 전류 파형	55

<표 목 차>

표 3.1	고속 Marx 발전기 사양
표 3.2	충전 전원장치 사양
표 3.3	트리거 변압기 사양
표 3.4	SF6 압력에 따른 갭의 방전 전압
표 3.5	N ₂ 압력에 따른 갭의 방전 전압
표 3.6	커패시터의 특성
표 3.7	단별 SBV 및 트리거 시험 전압 결과41
표 3.8	SF6 압력에 따른 Marx의 동작특성45
표 3.9	N2 압력에 따른 Marx의 동작특성46

A Study on the Development of an Ultra-fast Marx Generator

by Goang-Chul, Shin

Department of Electrical & Electronics Engineering The Graduate School of Korea Maritime University Busan, Republic of Korea

Abstract

This paper dealt with a new battery-powered ultra-fast Marx generator to apply to pulse-power equipment. The final objection of this thesis is to provide design and construction rules for the Marx generator having characteristics of 80 J and 800 kV.

To develop the type of Marx generator, I prefabricated a prototype generator with 20 ns risetime, 500 kV output, and 10 kA discharge current. The generator has ten 4.2 nF / 50 kV capacitor banks and stably works under a pressure of 3 kgf/cm SF₆.

From the analysis on the prototype generator, I was able to decide a trigger circuit with high repetition rates, gas pressure ranges, and pulse measurement sensors.

The finally developed Marx generator can produce 84 J and 800 kV with 20 ns risetime. It consists of 16-4.2 nF / 50 kV capacitor banks

connected with isolated spark gaps. Each bank is completely modular and can be easily unplugged for maintenance. The trigger circuit can operate at a repetition of 1 pps. and N_2 instead of SF_6 gas in insulation system of the enclosure was used to improve repetition rates of the triggering.

Further studies on low-impedance tubes, such as virtual cathode oscillator (Vircator) and the Magnetically Insulated Line Oscillator (MILO), should be followed to apply the Marx generator widely to ultra-wideband (UWB) radars, electronic weapons, and plasma radiation sources.

제1장서론

1.1 연구배경

펄스파워란 저장된 전자 에너지(Electro-Magnetic Energy)를 시공간 적으로 압축·중첩하여 매우 짧은 시간에 대전력을 발생시켜 부하 측에 에너지를 공급하는 장치로서, 과학기술의 진보로 인해 고전압 방전공학, 원자핵공학, 물리학, 환경공학 등 많은 공학 분야에 이용되고 있다. 이는 Laser, Microwave, X-ray, Plasma, 입자 Beam의 발생 및 전자가속 등에 사용되고 있으며, 최대전력의 순시치는 10 TW 이상에 달한다. 이러한 거 대한 전자 에너지 시스템은 시스템내의 도체를 중심으로 생각하면 고전압 대전류 시스템으로 분류되고 유전체를 중심으로 하면 고전계, 고자계 시

많은 펄스파워 분야에서도 20세기 초의 Marx에 의해 고안된 고전적 Marx 발전기는 전력기술 분야에서 수 μs의 펄스폭에 수 MV의 임펄스 전압에 의한 절연내력 시험 등에 많이 적용이 되고 있으며, 이는 커패시 터의 충전시간 등의 한계로 인해 단발(Single shot) 펄스를 만들어 내며 동작시간의 불안정(변위시간)과 함께 장비가 매우 큰 단점을 가지고 있다. 현재, 과학기술의 진보와 함께 핵융합 및 가속, 이온 및 전자가속 등의 여 러 분야에서 빠른 반복률을 가진 초고속 Marx 발전기(Wave erection generator)의 수요가 증가되고 있는 추세에 있다. 특히 소재산업과 반도체 산업 등의 발달로 인해 소형화가 가능하게 되었다.

Marx 발전기는 많은 펄스파워 용도에 자주 사용되며, 특히 자체 임피 던스보다 낮은 부하에 최대전력을 공급하는 PFN(Pulse Forming

- 1 -

Network)에 적용되고 있다. 최근에는 Marx 발전기가 표준화되고, 상업적 으로 유용한 소자들에 의해 더욱 콤팩트하게 제작되고 있다. 그러나 국내 에서는 본 기술 분야가 많이 활성화 되어 있지 않고 소재산업 등의 개발 도 미흡하여 많은 부품을 수입에 의존해야 하는 상황이다.

본 연구는 1 pps의 펄스 반복률을 가진 4.2 nF의 커패시터를 10단으로 구성한 500 kV급과 16단으로 제작된 800 kV급 초고속 Marx 발전기의 설 계 및 제작 기술에 대하여 연구하였다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구의 목적은 반복 가능하고 큰 진폭과 충격 전압·전류를 출력할 수 있는 Marx 발전기의 개발이며, 소형·경량 및 경제적 방법으로 시동 갭을 스위치로 동작하는 구성이다.

Marx 발전기의 출력은 고해상도의 레이더나 전자무기 등에 적용되며, 이 를 위해서는 광대역 주파수를 여기하기 위한 전압의 빠른 상승시간을 얻 는 것이 필요하다. 저항을 통해 병렬로 커패시터를 충전하고 출력단자에 각 단의 출력전압을 더하기 위해, 직렬로 시동 갭 스위치를 사용하여 커 패시터를 일시적으로 방전시킨다. 표류 정전용량과 내부 각 단의 커패시 터에 대한 적절한 설계로 초고속 자외선 에너지를 통해 시동 갭을 커플링 함으로써 단위 펄스 에너지에서 수 ns의 상승시간으로 수 백 kV의 출력 전압을 유기할 수 있다^[2].

본 연구에서는 50 kV, 4.2 nF의 커패시터를 10단으로 구성하여 1 pps의 펄스 반복률을 가지는 500 kV급과 16단으로 구성한 800 kV급의 초고속 Marx 발전기를 개발하였다.

연구 내용으로는 전통적 방식의 Marx 발전기의 고찰을 통해 Marx 발 전기의 원리를 이해하고 초고속 동작원리를 비교, 분석하여 구체적인 설

- 2 -

계방법과 특성평가에 대하여 고찰하였다.

첫째, 발전기 모듈의 구성과 시험방법 등을 분석하고 각 단의 커패시 터와 병렬 충전용 인덕터를 구성하는 절연물의 절연성능과 트리거 스위치 의 가스압력 상태에 따른 자가 절연파괴전압(Self Breakdown Voltage) 특성을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 특히 Marx 발전기의 내부 절연 가스압과 충전전압과의 상관관계를 나타내는 안전운전 특성곡선의 도출이 무엇보다 중요하다.

둘째, 초고속 Marx 발전기의 성능평가에 중요한 요소이며, 출력 변위 시간의 불안정 요인이 될 수 있는 트리거 회로에 대한 많은 연구가 우선 되어야 한다. 즉, 트리거용 시동 갭 소자의 선정과 트리거 변압기의 설계 도 매우 중요하고 반도체 소자의 최적 선정에 의한 안정화된 회로 구성방 법도 고려되어야 한다.

셋째, 커패시터 1단에 50 kV의 고전압이 충전되므로 빠른 반복률을 가 진 충전장치의 선정과 기기의 신뢰성과 인명사고를 방지하기 위한 접지회 로의 설계는 무엇보다 중요하다. 특히 소형화를 위해서 소자의 선정과 절 연특성을 고려한 설계는 필수적이라 할 수 있다.

넷째, Marx 발전기의 성능평가를 위해 출력전압 및 전류의 측정방법 에 대해서 많은 고찰이 있어야 하며, 부하저항으로 사용되는 더미저항의 설계와 교정방법 등도 고려되어야 한다.

마지막으로 본 연구에서 제작된 장비는 초고속의 고전압 대전류가 출 력되므로 이로 인하여 발생하는 과도 서지나 노이즈에 의해 제어회로와 오실로스코프 등 측정 장비가 파손되는 것을 방지하기 위한 대책인 차폐 와 접지기술을 통해 장치의 신뢰성을 향상시켰다.

본 연구에서 최종적으로 제작된 500 kV급과 800 kV급 초고속 Marx 발전기는 상승시간이 약 20 ns 이하이며, 출력전압 효율은 약 70% 이상 의 특성을 나타내었다. 본 결과를 바탕으로 향후 더 큰 에너지와 더 높은 출력전압의 Marx 발전기 개발과 사용부품의 국산화율을 높일 수 있는 기 초를 마련하였다.

제 2 장 이 론

2.1 Marx 발전기 해석

2.1.1 충격전압 파형의 발생

충격파란 급격하게 파고치까지 상승했다가 서서히 영으로 감소하는 인 위적으로 인가한 비주기성 단방향 과도전압으로 정의한다. 충격전압의 발 생원리는 커패시터에 전하를 충전한 후, 충전된 전하를 폐회로를 통하여 방전함으로써 필요한 파형의 전압을 얻는 방법으로 등가회로는 그림 2.1과 같다.



그림 2.1 충격전압 발생장치의 등가회로 Fig. 2.1 Equivalent circuit of Impulse voltage generator

고전압 발생장치로부터 고전압이 공급되면 충전저항 Rc를 통하여 커 패시터 C에 충전된다. C의 전압이 E가 되었을 때에 방전전극 G를 통하 여 LR_S + R₀ 회로에 C의 전하를 방전시키면 회로정수에 따라 R₀단자에 충격전압이 발생한다. 그림 2.1의 회로에서 방전전극 G의 방전 시 저항을 무시하면 다음식이 성립한다.

- 5 -

$$L\frac{di}{dt} + (R_{s} + R_{0})i + \frac{1}{C}\int_{0}^{t}i dt = E$$
(2.1)

R_S + R₀ = 0로 놓고, 초기조건 t = 0에서 방전 전극이 트리거 된다고 할 때, R의 3가지 조건에 대하여 식 (2.1)을 풀면

(a)
$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$
 일 때, 이 때는 비진동으로 발생되는 전압에 관한 해는

$$\mathbf{e} = \mathbf{i}\mathbf{R}_{0} = \mathbf{E}\frac{\mathbf{R}_{0}}{\mathbf{R}} \cdot \frac{\mathbf{a}}{\beta} \left\{ \boldsymbol{\varepsilon}^{(\alpha - \beta)t} - \boldsymbol{\varepsilon}^{(\alpha + \beta)t} \right\}$$
(2.2)

로 되며 전압파형은 급상승 후 서서히 감쇄되는 형태로 된다.

(b) $\mathbf{R} = 2\sqrt{\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{C}}}$ 일 때, 이 경우는 임계감쇄진동으로 발생되는 전압은 $\mathbf{e} = \mathbf{E} \frac{\mathbf{R}_0}{\mathbf{R}} \cdot 2\mathbf{a} \cdot \mathbf{\epsilon}^{-\alpha t}$ (2.3)

(c) R<2√ L/C 일 때, R²4L² 부족감쇄진동 즉, 진동성분을 포함하는 서지를 발생시키며, 진동에 관한 해는 아래와 같다.

$$\mathbf{e} = \mathbf{E} \frac{\mathbf{R}_{0}}{\mathbf{R}} \cdot 2 \frac{\mathbf{a}}{\omega} \cdot \varepsilon^{-\mathbf{a}t} \sin \omega t$$
(2.4)

여기서,
$$a = \frac{R}{2L}$$
, $\beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ 이다.

표준 서지전압파형은 회로에서 R이 크고 L을 작게 하여 식 (2.2)를 만 족하면 2개 시정수를 갖게 되므로 필요한 파두장과 파미장을 얻을 수 있 다. 표준 서지전류파형은 식 (2.3)를 그리고 감쇄진동파형의 발생에는 식 (2.4)를 만족하도록 한다^{[3]~[5]}.

- 6 -

식 (2.3)을 만족하는 임계감쇄 진동파형으로 일컬어지는 충격파는 파두 장의 길이에 따라서 뇌충격파와 개폐 충격파로 대별된다. 송·배전계통을 자주 교란하는 뇌격에 의한 뇌임펄스 전압과 차단기 등의 개폐동작에 의 해 발생되는 개폐 충격전압은 상황에 따라 크게 변동하나 시험 목적상 이 들 충격전압을 임의적으로 모의할 필요가 있다. 파두장이 1 μs이하의 충격 전압을 뇌충격전압으로 하는데, 대부분의 경우에 규약 파두장 T₁은 1.2 μs 이며, 규약 파미장 T₂를 50 μs이며 IEC 61000-4 규격에서는 T₁±30%, T₂ 에 대해서는 ±20%의 허용오차를 인정하고 있다^[6]. 이러한 충격전압은 파두장과 파미장 T₁/T₂로 표시하게 되는데 현재 표준 뇌충격 전압은 그 림 2.2에 나타낸 바와 같이 1.2/50 μs의 전압을 규정하고 있다.



그림 2.2 표준 충격전압 파형(1.2/50 µs) Fig. 2.2 Standard impulse voltage waveform(1.2/50 µs)

여기서, $T_1 = 1.67 \times t = 1.2 \ \mu s \pm 30\%$, $T_2 = 50 \ \mu s \pm 20\%$

2.1.2 전통적 방식의 Marx 발전기

앞서 언급한 일단의 충격전압 발생회로는 초고압 스위칭에서 시동 갭 을 사용해야만 하고, 초고압에 따른 회로 구성요소의 크기가 커지게 된다. 또한 C를 충전하기 위해 필요한 높은 직류전압을 구성하기 어렵고, 방전 시 구조물로부터 코로나 방전이 생기지 않아야 한다는 점에서 초고압의 충격전압 장치 제작에 단일회로 사용은 불가능하다.

따라서 고저항을 통해 다수의 커패시터를 병렬로 충전시키고 시동 갭을 통해 직렬로 방전시키는 구조가 Marx에 의해 처음 제안되었다. 현재는 여러 가지 다단회로가 사용되고 있으며 기본 원리는 같다.

Marx 발전기의 충격전압 발생원리를 설명하기 위해 6단의 전형적인 Marx 발전기를 그림 2.3에 나타내었다.

직류 고전압으로 방전저항 R₂와 충전저항 R₁을 통해서 동일한 용량의 각 단의 커패시터 C들을 병렬로 충전한다. 충전시간 동안 접지전위를 유지하 기 위해 R₁이 R₂보다 더 크게 구성하고 충전전압은 부극성으로 충전되지 만 출력은 정극성으로 발생한다. 충격전압 발생기의 트리거, 즉 방전은 최 하단 갭 SG1의 절연파괴에 의해 개시되며 동시에 상부의 모든 갭들이 절 연파괴를 일으킴으로 Marx 동작이 수행된다. 점선으로 나타낸 표류 정전 용량을 고려하지 않는 기존 이론에 따르면 이러한 급속한 절연파괴는 두 번째 이상의 시동 갭에 높은 과전압에 의해 동작한다. 즉 최하단의 첫 번 째 갭이 트리거될 때 A점의 전위는 -V에서 0으로 급격히 변화하게 되므 로 B점은 전위가 +V로 상승하게 된다. H점이 충전전위 -V로 유지해 있 다면 갭 SG2 사이에는 2배의 높은 전압이 나타나게 되고, 이 전압이 갭 의 절연파괴를 유도한다. 이때 I점은 2배 전압이므로 C점에 충전전위가 유지된다면, 갭 SG3의 양단은 3배 전압의 전위를 갖게 된다.



그림 2.3 6단 Marx 발전기의 기본회로 Fig. 2.3 Basic circuit of a six-stage Marx generator

H점과 C점의 전위는 서로 저항 R₁으로 접속되어 있으므로 각각 근접 된 지점 A점과 B점을 쫓아가기 때문에 이러한 해석은 옳지 못하다. 또한 이 회로의 출력전압은 구조 특성상 충전전압의 극성과 반대의 극성을 갖 는 것을 알 수 있다. 실제적으로 유의해야 할 점은 SG2가 SG1이 절연파 괴되는 이격거리보다 약간 더 넓게 설치를 해야 한다는 것이다. 그렇지 않으면 다단회로를 동작시킬 수 없다. 회로내의 표류 정전용량 C_i, C_s, C_g 를 가정하는 것으로 적절한 해석이 가능하게 된다. 커패시터 Ci는 인접한 단에 걸리는 전계에 의해 형성되며 Cg는 두 단 사이에 걸쳐서 형성하는 것으로 같은 의미를 갖는다. Cs는 시동 갭 사이의 표류 정전용량이다.

여기서 저항 R₁을 개방회로로 간주할 수 있다면 H점의 전위는 비교적 큰 표류 정전용량에 의해 다소간 고정되게 된다. B점과 C점의 커패시터 C_i를 무시하고 방전 커패시터 C가 C_s, C_g와 비교하여 매우 크다는 것을 고려하 면 H점은 C_s와 C_i//C_g에 의해 구성되는 용량성 분압기의 중간점으로 볼 수 있다.

그러므로 A점의 -V로부터 0으로의 전압 상승은 H점의 전위를 -V로부터

$$V_{H} = -V + V \left(\frac{C_{s}}{C_{i} + C_{s} + C_{g}} \right) = -V \left(\frac{C_{i} + C_{g}}{C_{i} + C_{s} + C_{g}} \right)$$
의 전위로

상승시킨다. 따라서 SG2의 전위차는

$$V_{SG2} = V - V_{H} = V \left(1 + \frac{C_{i} + C_{g}}{C_{i} + C_{s} + C_{g}} \right)$$
 (2.5)

만약 C_s가 0이라면 SG2의 양단에 걸리는 전압은 그 최대치 2배가 된다. 그러나 이 시동 갭의 표류 정전용량을 무시할 수가 없고, 단 커패시터 C_i, C_g가 모두 0이라면 V_{SG2}는 V가 되어 갭의 절연파괴는 불가능하게 된다. 그러므로 갭의 표류 정전용량은 Marx 출력에 부정적 영향을 미치게 되고 단 커패시터는 우호적인 상황을 제공한다는 것은 명백하다.

실제적으로 위의 식 (2.5)의 결정되는 상황은 근사적이고 표류 정전용 량들이 저항을 통해서 방전을 하기 때문에 매우 과도적 효과가 발생함을 알 수 있다. 보통 C_i, C_g 값들이 수 십 pF 정도로 적으므로 충·방전에 대한 시정수는 10~100 ns 로 작다. 결국 SG2 갭 간에는 매우 짧은 시 간에만 전압이 나타나므로 수 십 ns 이내에 절연파괴가 일어난다. 그 이 후의 상단 갭에는 출력단자 M이 아직 영전위에 머물러 있다는 사실에서 알 수 있는 바와 같이 과도과전압이 걸리게 되며 이를 수반하는 전압은 저항 R₂에 축적된다. 이 방법으로 직렬갭이 회로를 구성하여 단자 M에는 (n단의 경우) nV의 전압을 얻게 된다.

일관된 Marx 동작을 위해서는 첫 번째 갭 SG1의 이격거리를 다른 갭 보다 약간 짧게 처리하여 제일 먼저 트리거가 되도록 해야 한다. 갭축을 하나의 수직면 상에 놓아 첫 번째 갭에서의 불꽃방전에 의한 자외선 방출 이 다른 갭을 조사시킬 수 있도록 배치해야 한다. 이렇게 함으로써 전극 에서 방출된 전자들이 과전압이 걸리게 되는 짧은 시간 동안에 절연파괴 를 가속화할 수 있다. 만약에 첫 번째 갭이 전기적으로 트리거 되지 않는 다면 그곳에 자외선을 조사시켜 트리거의 일관성과 출력전압의 안정성을 도모할 수 있다^{[3],[5],[7],[8]}.



(a) 6단 300 kV급(KERI)



(b) 4 MV급(고창 765 kV 실증시험장)

그림 2.4 Marx 발전기의 사진 Fig. 2.4 Photographs of Marx generators 앞에서 언급한 바와 같이 전통적인 방식의 Marx 발전기들이 전력기기 등의 절연내력시험 전원으로서 많이 활용되고 있으며, 1.2/50μs의 표준 뇌충격 전압파형으로서 수백 kV에서 수 MV에 이르기까지 다양하게 제 작되어 활용되어 지고 있으며, 그림 2.4는 전통적 방식의 Marx 발전기의 제작품을 보여준다.

2.2 초고속 Marx 발전기의 특성 이해

2.2.1 Marx 발전기 기본

Marx 발전기는 커패시터에 임의의 전압레벨로 충전한 뒤 빠르게 방 전하여 매우 높은 전압레벨로서 빠르게 부하에 에너지를 전달하는 커패시 턴스 에너지 저장장치이다.

전통적인 Marx 발전기는 그림 2.5에서 보는 바와 같이 저항을 이용하 여 n개의 커패시터에 병렬충전 방식으로 전압 V로 충전한다.

트리거 순간 초단의 갭 전압이 급격히 0으로 떨어지고 자가 방전의 반작 용의 영향으로 인해 남아있는 단의 스위치들을 통해 전압이 상승한다.

커패시터는 순간적으로 직렬로 연결되고 이론적으로는 n×V의 전압으로 부하에 전달되는데 이때의 등가회로는 그림 2.5와 같다. 출력 스위치는 Marx가 충전모드일 때에 부하로부터 절연되고, 방전시에는 에너지가 부 하로 전달될 때까지 Marx의 발생을 돕는다. 충전저항은 방전시 출력전압 과 충전전원장치의 전기적 절연협조 역할을 담당하게 된다^[9].



그림 2.5 Marx 발전기의 충·방전모드 Fig. 2.5 Charging and discharging mode of a Marx generator

2.2.2 Marx 발전기 형식

Marx 발전기의 다양한 형식을 분류하기 위해 크게 4가지의 기본형, 즉 대형, 중형, 콤팩트형, 반도체형(Solid-state) 발전기로 대별되며, 특징 은 다음과 같다.

(1) 대형 Marx 시스템 : Z-machine이나 대형 HPM 시스템과 같은 고에 너지를 발생시키며 큰 시험공간이 요구된다. 이들은 비교적 긴 주기의 시간에 수 MV의 고전압과 수 MJ의 에너지가 출력되며, 펄스의 상승 시간은 수 십 ns ~ 수 µs이다. 큰 에너지로 인해 매우 느린 반복률을 가지며, 일반적으로 싱글-동작의 기능을 한다.

- (2) 중형급 Marx 시스템 : 수 백 kV ~ 수 MV에 이르는 큰 데스크탑식 과 소형룸에서 사용되는 것으로 분류되며, 에너지는 수 MJ로 적다. 펄 스폭은 수 십 ns ~ 수 십 μs로 다양하나 상승시간은 수 십 ns이고 펄 스 반복률은 수십 Hz로 다소 빠르게 동작한다.
- (3) 콤팩트형 Marx 발전기 시스템 : 포터블형에서 데스크탑식의 소형으로
 10 J에서 1 kJ 이하의 낮은 에너지로 동작하지만, 수 백 kV에서 수
 MV에 이르는 고전압을 출력하며 수 백 Hz의 빠른 반복률을 가진다.
- (4) 반도체형 발전기 시스템 : 수 kV의 전압과 1 J 이하의 저장 에너지로 동작하는 PCB에 장착된 형을 말하며, 상승시간은 100 ps 정도이고 반 복률 또한 10~100 kHz의 고속 Marx가 이 형에 포함된다고 볼 수 있다.

콤팩트형이나 반도체형은 매우 좁은 펄스폭으로서 매우 낮은 변위시간 과 고속의 반복률로 직접 부하에 전달하기 위해 설계되어지며, 이 부하들 에는 UWB 안테나, 전파방해 시스템, 펄스 레이더 시스템 등이 있다.^[1]

2.2.3 Marx 발전기 트리거 기술

Marx 스위치의 선택은 동작전압과 펄스 반복 주파수, 수명, 기타 스위 칭 관련 요소들에 의해 결정한다. 반도체형 스위치는 저전압의 영역에서 많이 사용되나 많은 Marx 발전기들은 보통 시동 갭을 많이 사용하게 된 다. 시동 갭 기술은 보통 액체나 기체 충전상태에서 많이 사용되고 이 매 질은 냉각과 스위칭 특성을 고려하여 많이 적용되며, 고속 반복률은 스위

- 14 -

칭 영역에서의 열을 제거하고 전압 회복능력을 빨리하기 위해 매질의 이 동에 의해 결정된다.

액체 충전형은 전기 절연유나 물이 많이 사용되나, 다른 액체도 체택 될 수 있으며, 이 시스템은 열적 팽창을 억제하는데 매우 탁월한 능력을 보이지만 오염물을 제거하기 위해 펌프나 필터를 부착해야 하고 부피나 복잡한 구조를 가져야 하는 문제점들이 있다.

기체 충전 시스템은 반복률이나 시동 갭 수명, 안전성 등을 고려하여 다양한 종류의 가스를 사용할 수 있으며 고속 반복률이 요구되는 Marx 시스템에는 동작 이후의 그것의 절연능력을 빨리 회복하는 능력을 가진 N₂, SF₆, H₂ 등이 이용된다^{[8]~[12]}.

2.2.4 Marx 반복률

펄스파워 시스템의 중요한 변수는 동작 후 재충전하고 다시 동작하는 데 걸리는 시간이다. 중·대형 Marx 시스템은 보통 충전용 전원장치의 용량과 부하의 열적 평형을 고려하여 낮은 반복률을 가진다.

콤팩트형이나 반도체형의 Marx 시스템은 동작시 적은 에너지를 저장하므 로 부피가 적고 전형적으로 아주 좁은 펄스폭으로 아주 큰 피크 전압을 출력하므로 열적 특성에 큰 문제는 없으므로 평균 에너지를 부하에 빨리 전달하기 위해 빠른 반복률이 요구된다. 높은 반복률은 충전전원 장치의 한계와 스위치의 회복시간이 중요한 변수로 작용하게 된다.

회로 구조상 저항 충전장치는 매우 낮은 반복률을 가진다. Marx 시스 템의 충전시간은 동작 전에 대략 시정수 2n²RC의 시간이 필요하므로 충 전효율이 낮다. 따라서 고속 Marx 시스템에서는 저항대신에 인덕터를 적 용하여 빠르고 충전의 효율을 높일 수 있다.

Marx 발전기의 단을 구성하는 두 개의 인덕터 상호 커플링으로 더 높

은 반복률을 가질 수 있으며, 개별 인덕턴스가 충전기간에는 적고, 방전시 에는 크므로 충전은 매우 빠르게 방전시에는 절연의 효과를 가진다.

2.2.5 Marx 설계 방법

부하저항 R인 싱글루프 RLC Marx회로의 등가 리액턴스 L_{eq}, 등가 커 패시터를 C_{eq}라 하면, 감쇄진동회로에서의 진동주기는 식 (2.6)과 같고, Marx 임피던스는 식 (2.7)과 나타낼 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{L_{eq}C_{eq}}$$
(2.6)

$$Z = \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}}$$
(2.7)

임계진동은 식 (2.8) ~ (2.10)과 같이 최대 전압 파고치와 오버슈트를 적 절히 조절함에 의해 설정이 가능하다. FWHM(Full Width at Half Maximum) 펄스폭은 감쇄진동의 반주기의 약 80%이며, n이 Marx의 총 단수로 V_{charge}가 Marx 입력전압일 때 이론적 방정식은 식 (2.9) 및 식 (2.10)과 같다.

 $Z = R/2 \tag{2.8}$

$$T_{\text{pulse}} = 0.8 \pi \sqrt{L_{\text{eq}} C_{\text{eq}}}$$
(2.9)

$$V_{out} = 0.7 \text{ nV}_{charge}$$

$$(2.10)$$

그러므로 Marx 설계는 먼저 다음과 같은 방법으로 수행한다.

- 1. 원하는 T_{pulse}, V_{out}, R을 선택한다.
- 2. 식 (2.7) ~ (2.9)를 이용하여 L_{eq}와 C_{eq}를 구한다.

- 16 -

3. 식 (2.10)을 이용하여 Marx 단수와 충전전압 V_{charge}를 결정한다.
 4. 식 (2.11)과 (2.12)를 이용하여 각단의 인덕턴스와 커패시턴스를 구한다.

$$L_{\text{stage}} = L_{\text{eq}} / n \tag{2.11}$$

$$C_{stage} = nC_{eq}$$
(2.12)

2.2.6. 파형 발생 원리

그림 2.6에서는 표류 정전용량이 추가된 과도전압 발생회로를 나타낸 다. 일반적인 Marx 회로는 스위치들을 연속적으로 강제적인 스위칭을 하 지 않으므로 시스템 동작에 있어서 일시적 변위시간이 포함되고 불규칙하 게 동작된다.

과도파형 발생 Marx 발전기는 첫 단의 스위치를 닫은 이후 표류 정전용 량이 스위치가 트리거되기 전까지 각 연속 스위칭의 한쪽을 접지로 유지 한다. 전압파형은 전계를 상승시키면서 부하로 급격히 전달되며, 수 백 kV의 출력전압이 수 ns의 시간안에 변위시간 없이 부하로 연속 스위칭됨 을 알 수 있다.

결론적으로 Marx 발전기는 전압 체배의 가장 효율적인 장치이고 짧은 펄스폭의 펄스 발전기로서의 Marx는 전압효율과 오버슈트사이의 균형에 기인해 임계진동 부근에서 동작한다. 과도 발생과형 Marx 발전기는 빠른 상승시간을 요하는 부하에 아주 적합하다고 생각된다^[8].



그림 2.6 과도파형 발생회로 Fig. 2.6 Transient wave erection voltage generator

제 3 장 설계 및 제작

본 연구에서는 콤팩트형 이동식으로 배터리 전원에 의해 구동되는 500 kV, 52.5 J의 고속 Marx 발전기를 제작하였다.

Marx 챔버와 그 구동회로인 트리거 발전기는 외경 218 mm와 길이 778 mm의 스테인레스 챔버에 조립하였으며, 수리 및 교환이 용이하도록 모듈 로 제작하였다. 2개의 50 kV, 2.1 nF의 커패시터는 시동 갭을 중심으로 대 칭으로 배치하고, 충전용 인덕터와는 환상구조로 설계하였다.

시동 갭들은 자외선 조사가 용이하도록 중앙에 정렬하고 SF₆ 가스로 절 연하였다. 모든 Marx 발전기의 조립품은 외경 211 mm, 길이 495 mm의 에폭시 재질의 절연 파이프에 내장하였다^{[13]~[20]}.



그림 3.1 고속 Marx 발전기의 구성

Fig. 3.1 Configuration of the fast Marx generator

Marx 초단의 50 kV 트리거 회로는 노이즈나 스위칭 잡음으로부터 제 어 기기나 측정 장치를 보호하기 위하여 Marx 챔버 바로 밑에 고정하였 으며, 충전용 전원장치나 방전회로, 가스압 제어회로 및 그밖에 제어회로 는 19"표준 랙 케이스에 설치하였다. 그림 3.1은 제작한 고속 Marx 발전 기의 전체 구성도이며, 구체적인 사양은 표 3.1과 같다.

표 3.1 고속 Marx 발전기의 사양

	Ş
항 목	사 양
캐패시터/단	4.2 nF(2.1 nF×2) / 단
충·방전용 인덕터	$40 \sim 60 \mu\mathrm{H}$
충전 에너지	52.5 J @50 kV
충전 전압	$50 \mathrm{kV}_{\mathrm{Max}}$
등가 캐패시턴스	420 pF
치미 츠러거아	500 kV
여내 컬릭신법 	@무부하(400 kV 이상)
최대 출력전류	20 kA
Marx 임피던스	20 Q
상승 시간	20 ns 이하
펄스 폭	30 ns 이상
절연 가스	SF ₆ 가스

Table 3.1 Specification of the fast Marx generator

3.1 직류 고전압 전원장치

초고속 Marx 발전기의 충전을 원활히 하고 고속 충·방전, 즉 높은 반복률을 수행하기 위해 정전압, 정전류 제어가 가능한 SMPS(Switching Mode Power Supply) 방식의 고전압 전원회로가 요구된다. 최대 충전전압이 50 kV이고 Marx 충전모드에서의 총 커패시터가 42 nF(4.2 nF × 10단 병렬구성)이며 반복률을 1 pps로 하여 식 (3.1)을 이용하 여 계산하여 장치의 출력전류를 설정할 수 있다.

$$I = C \cdot V/t = 42 \times 10^{-9} \times 50 \times 10^{-3} / 1 \sec = 2.1 \text{ mA}$$
(3.1)

위 식에서와 같이 반복률을 높이는 경우는 충전 전원장치의 전류용량 도 매우 커지므로 본 장비에서는 경제적 측면을 고려하여 50 kV/2 mA급 의 전원장치를 적용하였으며 장치의 사양은 표 3.2와 같다

표 3.2 충전 전원장치 사양

	Table 3.2	Specifications	of	the	charging	power	supply
--	-----------	----------------	----	-----	----------	-------	--------

항 목	사양
입력 전압	DC 24 V ±10 %
출력 전압 / 전류	DC 0 \sim 50 kV / 2 mA, 100 W
전압 안정화율	부하시험 : 전부하시 0.002 % 이내 전압변동 : ±10% 변동시 ±0.01 % 이내
전류 안정화율	부하시험 : 전부하시 0.05 % 이내 전압변동 : 전부하시 ±0.05 % 이내
리 플	전 전압 0.05 % p-p 이내
के छ	85 % 이상
안 정 도	30분 동작후 0.01 % 이내
제어 특성	정전압 정전류 제어 방식
보호 회로	과전압 과전류 보호회로 내장
제 작 사	컨버테크 (한국)

고속 Marx 발전기는 반복률이 높고 일정한 피크 출력을 얻기 위해서 는 정전압 특성이 우수해야 하며 급속충전에 의해 커패시터의 파손이나 Marx 모듈 내부의 절연파괴가 일어날 수 있으므로 정전류로 충전이 되어 야 한다. 특히 충전시 Marx 내부의 불필요한 방전이나 Marx 진행시 발 생하는 서지나 노이즈에 의한 오동작이나 고장의 원인이 될 수 있으므로 보호회로의 구성도 매우 중요하다.

고전압 전원장치의 입력전원은 배터리(12 V, 10 Ah)를 사용하였으며, DC 24 V를 구현하기 위하여 2개를 직렬로 구성하였다. 충전기는 DC 24 V/10 A의 직류 전원장치를 적용하였다.

전원장치의 출력은 세라믹 커패시터의 급속한 충전을 방지하기 위해 20 kΩ/100 W의 충전저항을 설치하고, 비상시나 사고시 커패시터 내부의 충 전 에너지를 방전하기 위해 1 MΩ/150 W의 방전저항을 삽입하였다.

충·방전모드 절환 스위치로서 고전압 스위치(K62C841-KILOVAC)를 적용하였으며, 커패시터의 충전전압을 정확히 모니터링하기 위해 1000 : 1
저항 분압기를 설치하였다. 이들 충·방전 저항, 스위치 및 분압기는 모두 최대 50 kV의 고전압 상태에서 동작하므로 고전압 환경에도 안정한 동작을 할 수 있도록 각 부품들을 에폭시로 진공 함침하여 절연처리를 하였다.

고전압 출력은 RG-58 동축 케이블로서 M-콘넥터를 이용하여 출력단 자와 Marx 발전기의 충전 단자에 접속하였다.

3.2 트리거 회로

고속 Marx 발전기의 변위시간이 없는 안정된 동작 수행은 첫 단의 시 동 갭을 정확히 방전함으로써 이루어지는데, Trigatron, Laser-trigger, Field-distortion 방식으로 분류될 수 있다. 소형 Marx에는 Trigatron 방 식이 많이 활용되고 있으며, 그림 3.2와 같이 양극(anode)과 음극 (cathode), 그리고 트리거-핀이라 불리는 세 번째 전극이 있으며 이 트리 거-핀과 음극 사이에 방전이 일어나 시동 갭이 방전된다.



그림 3.2 트리거 갭의 형상 Fig. 3.2 Typical shape of a trigger gap

초기 방전이 고전계가 집중된 양극과 음극 사이에서 플라즈마를 발생 시켜 결국 메인-갭이 방전을 일으키게 한다. 이 방식은 트리거를 위한 고 전압 펄스를 만들기가 용이한 장점이 있는 반면, 스위칭을 위해 두 번의 방전이 필요하므로 높은 변위시간이 필요하다는 단점이 있다^[2].

3.2.1 트리거 팬던트(Trigger Pendant)

트리거 발전기의 동기신호를 입력하는 장치로서 배터리를 전원으로 사용하여 Marx 진행시 서지나 노이즈 등으로부터 오동작을 막을 수 있으며, 외형은 그림 3.3과 같다.

- 23 -







후면에 있는 외부전원 DC 24 V와 팬던트 내부전원 즉, 배터리 4.5 ~ 5 V 전원을 전면의 스위치로 선택할 수 있다. 트리거 사이클을 1 ~ 10 Hz까 지 선택하고 트리거 수를 Thumb-wheel 스위치로 선택하고 스타트 버턴 을 누르면 출력펄스가 후면의 BNC 컨넥터를 통해 출력된다.

트리거 사이클과 수는 내부의 마이크로프로세스를 통해 출력이 되며 출력 BNC는 50 Ω의 임피던스를 갖는다. 출력파형은 그림 3.4에서 나타낸 다. 그림 3.4(a)는 무부하시 팬던트의 출력을 측정한 파형으로써 180 V의 전압으로 상승시간은 약 0.1 μs 정도이다. 그러나 그림 3.4(b)처럼 신호 입 력 임피던스가 50 Ω인 트리거 발전기를 연결한 후 팬던트 출력(Ch1)과 트리거 발전기 출력(Ch2)을 측정한 결과 펜던트 출력은 130 V로 떨어진 것을 알 수 있으며, 이 파형에서 펜던트 신호와 트리거 발전기의 출력 파 형과는 약 0.8 μs의 시간지연이 발생함을 알 수 있다.



그림 3.4 트리거 팬던트의 출력파형 Fig. 3.4 Output waveforms of the Trigger Pendant

3.2.2 트리거 발전기(Trigger Generator)

트리거 발전기는 트리거 팬던트의 출력 신호나 외부의 임의 동기 신호 에 의해 Marx 발전기 초단에 설치된 트리거 핀과 음극 사이에 동작시간 이 0.1 μs 이하의 부극성의 50 kV 고전압을 인가하여 초단을 방전하게 하 는 장치이다. 특히, 외부 서지나 노이즈의 영향으로부터 발전기의 안정적 인 동작을 위해 그 신호입력을 50 Ω의 TTL 신호로 처리하였으며 그 회 로구성은 그림 3.5와 같다.

BNC1의 단자에 팬던트 출력인 100 Vpk의 신호가 입력되면 Q1과 Q2 의 FET소자를 통해 Q4의 IGBT(IRF450)소자의 게이트에 ON 신호를 주 어 트리거 변압기인 PT1(TR-148A / PerkinElmer)의 일차측과 직렬로 연 결된 컨버터3으로부터 400 V로 충전된 1.88 μF의 커패시터를 단락하게 되 어 PT1의 1차측에 피크전류가 흐르게 된다.



그림 3.5 트리거 발전기 회로 Fig. 3.5 Circuit diagram of the trigger generator

- 26 -

이 때 RT2의 2차측의 고압권선에 12 kV의 고전압이 유기되어 트리거 시동 갭(GP-91 / PerkinElmer)의 트리거 핀에 공급된다. 컨버터4에 의해 10 kV로 충전된 0.1 µF의 커패시터와 직렬로 연결된 PT2(Ratio 1 : 5)의 일차측에 피크전류가 흘러 출력에 약 50 kV의 고전압이 유기되어 초단에 공급된다. 이때의 동작파형을 그림 3.6과 3.7에 나타낸다.





PT1의 사양은 다음 표 3.3과 같다.

표 3.3 트리거 변압기 사양

Table 3.3	Specifications	of the	trigger	transformer
	<u> </u>		~~~	

하 목	사 양
출력 피크 전압	12 kV
일차측 방전 캐패시터	0.5 µF
최대 입력 직류 입력 전압	400 V
일차측 피크 전류	120 A
상승 시간(10 ~ 90 %)	0.35 µs
펄스 폭 (50 % amp.)	0.5 µs
턴 비율	30:1
크 기	1.93″ 길이 * 1.25″ 외경

표 3.3에 나타난 PT1의 특성이 그림 3.6에서 보는 바와 같이 아주 양 호한 출력이 나타남을 알 수 있다. 즉 상승시간이 약 0.2µs이고 피크 전 압이 약 13kV로 출력되고 펄스폭이 약 1µs 정도로 측정이 되어졌는데 이는 PT1의 1차측에 연결된 커패시터가 방전 커패시터보다 약 3배가 크 게 설계된 때문이다.

이것은 트리거 변압기의 출력을 상승시간이 아주 적게 하기 위하여 공심 으로 제작했기 때문에 1차와 2차의 결합계수가 떨어져 충분한 1차 전류를 흘려주지 못하면 2차측에 원하는 파형을 발생하기가 어렵다.

10 kV / 5 kA의 정격을 가진 트리거 시동 갭은 A단자(Adjacent electrode)에 정극성, O단자(Opposite electrode)에 부극성의 전원이 인가 된 상태에서 트리거 단자(Trigger probe)에 정극성의 신호를 인가하는 A-Mode로 동작하며 O단자에 연결된 PT2의 권선을 역으로 하여 부극성 의 고압 출력이 그림 3.7에서 보는 바와 같이 약 100 ns의 상승시간과 50 kV로 출력 되었다.

출력 펄스 변압기는 트로이덜 코어(T-106-6/AMIDON/미국) 6개를 접합하여 고압 열수축 튜브로 절연처리 후 1차 권선을 0.8 mm의 테프론 전선 8가닥으로 4턴을 감고, 그 위에 또 고압 열수축 튜브로 절연처리 후 2차 권선으로 0.8 mm의 테프론 전선 1가닥을 25턴을 감고서 루미나 필름 으로 절연처리 하였다.

PT1과 트리거 시동 갭 사이에 1,800 pF/30 kV의 커패시터와 출력 펄 스 변압기와 Marx 챔버 1단의 트리거 핀 사이에 있는 2,100 pF/60 kV의 커패시터는 시동 갭의 방전 시 발생하는 서지가 제어회로 쪽으로 전달되 어 제어회로의 반도체 등의 파손원인이 되므로 이를 저지하는 Blocking-capacitor로써 설치하였다.

그림 3.9는 트리거 발전기의 제작사진을 나타낸 것으로, 그림 3.8(f),(g),(h)의 중간부분에 설치된 엔지니어링 플라스틱으로 가공된 원통 형의 박스 내부에는 출력 펄스 변압기와 Blocking-capacitor가 설치되고 실리콘으로 몰딩하여 절연을 하였으며, 부품들 간의 전선 길이는 펄스의 상승시간과 밀접한 관계가 있으므로 최대한 짧게 처리하여 제작하였다.



그림 3.8 시제작 트리거 발전기의 사진 Fig. 3.8 Photographs of the prototype trigger generator

3.3 Marx 챔버

Door-nob형 커패시터(50 kV / 21 nF-TDK)와 30 ~ 50 μH의 충전 인덕 터가 병렬충전이 되는 구조로 방사형으로 구성하고, 중간에 시동갭 스위 치는 동축, 일렬로 그림 3.9와 같이 배치하였다.

각 단의 커패시터가 충·방전시 단간에 절연내력을 확보하기 위해 회로 접속용 동판은 에폭시로 몰딩 하였으며 모든 단 고정용 애자를 포함한 모 든 절연체는 테프론 및 엔지니어링 플라스틱으로 가공하고 모듈 조립시 소요되는 모든 볼트류는 황동으로 처리하였다.



그림 3.9 Marx 모듈의 사진 Fig. 3.9 Photograph of the Marx module

3.3.1 Marx 구성도

앞서 언급한 바와 같이 커패시터 각 단의 충전용 저항 대신에 인덕터 Lc로 대체되었고, 회로상의 Rc와 Ls는 각각 선저항과 선인덕터에 해당하 고 Cp와 Lp는 출력측 단자 인출구와 동축 케이블의 표류정전용량 및 선인 덕터에 해당된다^[16]. 이 네 가지의 요소들은 Marx의 효율을 저하시키는 요소들로서 제작과정에서 이를 줄일 수 있는 설계가 요구된다.



그림 3.10 Marx 발전기의 회로도 Fig. 3.10 Circuit diagram of the generator

3.3.2 시동 갭 선정

그림 3.10의 SW1 ~ SW16에 대한 시동 갭의 선정은 Marx 동작에 아 주 중요한 변수로 작용하므로 특히 구갭의 간격을 결정하기 위해서 SF₆, N₂ 등의 절연가스 압력에 따른 다양한 갭 간격의 방전 전압을 도출하기 위해 20 Φ의 반구에 대한 시험을 수행하였다. 그 결과는 표 3.4 및 표 3.5 와 같다.

표 3.4 SF₆ 압력에 따른 갭의 방전 전압

가스종	青:SF ₆	SF ₆ 주위온도, 습도 : 28℃ 95%			단위 : kV		
구 간격	0.5kgf/cm²	1.0kgf/cm²	1.5kgf/cm²	2.0kgf/cm²	2.5kgf/cm²	3.0kgf/cm²	
0.5 mm	6.9	9.7	10.1	12.5	14.8	17.0	
1.0 mm	12.2	16.8	19.1	26.4	28.2	34.7	
2.0 mm	24.9	33.9	38.2	51.5	54.1	67.0	
3.0 mm	37.2	49.5	55.2	72.3	84.5		
4.0 mm	48.6	64.1	77.2	91.2			
5.0 mm	58.5	76.0	89.0				
6.0 mm	70.1	88.0					

Table 3.4 Discharge voltage of the sphere gap as a function of SF_6 pressure

본 실험으로부터 10단의 Marx 발전기의 최대 충전전압이 50 kV인 점 을 감안하면 다소의 여유를 두고 2단에서 10단 사이의 갭 간격을 2.5 mm 로 하였다. 1단의 시동 갭은 2단의 2.5 mm에서의 방전 전압보다 약 1.2배 정도로 갭 간격을 조정하면 실험적으로 3mm정도가 된다.

챔버의 가스압력은 최대 3 kgf/cm로 결정하였으며, 시동 갭은 Cu-W(70%~30%)을 직경 20 mm의 반구로 제작하였다. 가압된 SF6 가스챔버 내에서 전극 표면의 돌기나 가스중에 불순물 등으로 인가 전계가 높아지 고 이로 인해 섬락전압에 영향이 현저하게 나타나므로 구의 가공 후 표면 다듬기 작업을 통해 아주 높은 곡면율을 유지해야 한다^[5].

현재까지 절연기체 중에서 가장 좋은 절연내력을 가진 것으로서 SF₆ 가스 많이 활용이 되고 있으며, 특히 소형의 고속 콤팩트형 Marx 발전기 제작에 있어서는 아주 많이 활용이 되고는 있지만 인체에 유해할 뿐만 아 니라 환경오염의 원인이 될 수 있으므로 인체에 무해한 질소 가스도 많이 활용이 되고 있는 추세이다. 따라서 질소 가스에 대해서도 상기의 실험을 수행하였으며, 결과는 표 3.5와 같다.

표 3.5 N₂ 압력에 따른 갭의 방전 전압

Table 3.5	Discharge	voltage	of	the	sphere	gap	as	а	function	of	N_2
	pressure										

가스종	류 : N ₂	주위온도	., 습도 : 2	단위 : kV		
구 간격	0.5kgf/cm²	1.0kgf/cm²	1.5kgf/cm²	2.0kgf/cm²	2.5kgf/cm²	3.0kgf/cm²
0.5 mm	4.3	7.0	8.8	11.1	13.8	15.6
1.0 mm	6.7	10.2	12.7	15.9	19.0	21.1
2.0 mm	12.3	16.6	20.1	25.0	29.0	31.6
3.0 mm	16.9	22.8	27.4	32.2	38.4	41.4
4.0 mm	21.3	28.4	34.4	40.1	47.6	51.1
5.0 mm	25.6	33.4	40.1	48.4	53.4	60.4
6.0 mm	29.9	38.3	46.3	55.6	61.0	69.1

16 단의 Marx 발전기의 최대 충전전압이 50 kV인 점을 고려하면 다소 의 여유를 두고 2 단에서 16 단 사이의 갭 간격을 4~4.5 mm로 하였다. 1 단의 시동 갭은 2 단의 4~4.5 mm에서의 방전 전압보다 약 1.2 배 정도 로 갭 간격을 조정하여 실험적으로 약 6~6.5 mm로 하였다. 챔버의 가스 압력은 최대 3.5 kgf/cm으로 결정한다.

- 34 -

3.3.3 커패시터 및 인덕터

고속 Marx 발전기의 에너지 저장소자인 커패시터는 크기가 작고 손실 이 적으며, 높은 전압-커패시터 특성을 가진다. 커패시터에 대한 낮은 온 도특성을 가지는 필름 커패시터나 세라믹 커패시터가 많이 사용되고 있으 며, 제작품에서는 TDK(일본)의 Door-nob형의 FHV-12AN 세라믹 커패 시터를 사용하였으며 특성은 표 3.6과 같다.

표 3.6 커패시터의 특성

Table 3.6	Characteristics	of	the	charging	capacitor
				0 0	

항 목	사 양
온도 사용 정격	-35 ~ 85 ℃
정격 전압	DC 50 kV
절연 저항	100,000 M Ω_{min}
캐패시턴스	2100 pF
캐패시턴스 허용 오차	±10 %
유전정접(tanδ)	Y5S : ±22 %(-35 ~ 85 ℃, 25 ℃)
온도 특성 변화율	$3pC_{max}$ at 50 % of V_R
교류 코로나 시작 전압	No 방전 at 1.5 * V _R
외형(Φ(외경) * T(두께) * L(총길이)) mm	60 * 29 * 33

Marx 발전기의 커패시터에 병렬로 충전하는 용도로 사용되며 동작시 에는 매우 큰 임피던스를 갖는 중요한 역할을 담당하는 소자로서 인덕터 는 공심(Air core) 인덕터이며, 약 30~50μH의 값을 갖는다. 이는 단층 원통형 코일의 인덕턴스 계산식에 의해 설계된다.

$$L = 10^{-7} \lambda \{ (2\pi RN)/L \}$$
(3.2)

여기서, R : 원통의 반경 [mm], L : 코일의 축길이 [mm], N : 총 권선 수 [T], λ : 장강 계수 (d = 2R)

식 (3.2)로부터 지름이 46 mm이며 길이가 41 mm인 엔지니어링 플라스 틱에 0.8 mm 테프론 전선으로 50 턴을 권선한 후, 열수축 튜브로 절연처 리 하였다. 그림 3.11은 제작한 커패시터와 인덕터의 사진을 나타낸다.





그림 3.11 커패시터와 인덕터 Fig. 3.11 Photographs of the capacitor and inductor

3.3.4 절연대책

Marx 발전기가 충전기간 동안 단과 단 사이에 아주 좁은 공간에서 높 은 전계가 형성되고 기립 동작하는 순간에 매우 높은 전계가 모듈에 형성 되므로 방전이 일어나므로 철저한 절연 대책이 요구된다.

각 단을 연결하는 동판을 에폭시로 코팅하여 사용하였으며 단과 단을 지 지하는 애자류는 전부 엔지니어링 플라스틱으로 표면 절연거리를 크게 가 져가기 위해 주름(creepage distance)을 설계하여야 한다. 그림 3.12에는 본 연구에서 제작한 각종 절연물의 사진을 나타내었다.



(a) 에폭시 몰딩 처리된 회로 접속용 동판





(b) 각종 고정용 볼트 및 단 지지용 애자류(MC)





(c) 충전 및 트리거 Feed-through(MC)

그림 3.12 절연물의 사진 Fig. 3.12 Photographs of the insulators

3.3.5 Marx 모듈 조립시험



그림 3.13 Marx 발전기의 단면도 Fig. 3.13 Cross section view of the Marx generator

Marx 발전기 조립은 먼저 각종 입·출력 단자, 오-링 등을 이용하여 완벽히 실링처리를 한 후 1단의 각 부품을 조립하고 트리거 시동 갭의 갭 간격을 3.5 mm로 설정하고 SBV(Self Breakdown Voltage)가 2에서 10단 의 2.5 mm 갭의 SBV보다 약 1.2 배가 유지될 수 있도록 간격을 설정해야 한다. 만약 이 간격 설정이 바르지 못하면 Marx 안전 동작영역이 많이 줄어들게 되므로 Marx의 효율을 높일 수가 없다.

2단 이후의 갭 조정은 2.5 mm로 하되 단마다 SBV와 트리거 동작을 수행하여 오실로스코우프의 파형을 면밀히 검토하고 마지막 단의 갭 조정 은 상부의 실드로 인해 조정이 난해하므로 3~4 mm로 다소 넓게 배치가 되어도 무관하다. 모듈 조립 시 각 단별로 SBV와 트리거 동작을 확인하 고 그 출력 전압 파형과 결과를 그림 3.14와 표 3.6에 정리하였다.

조립 시 시행하는 단별 시험은 기중에서 시행하는 만큼 더미저항의 위 치나 방향등에 따라서 출력파형은 많이 왜곡되어 측정될 수 있기 때문에 항상 더미저항의 위치는 Marx 모듈에 가장 가까이 위치시켜야 하며, 또 한 Marx 출력 주파수가 매우 크기 때문에 접속 전선의 길이에 따라서도 많은 차이가 발생한다. 그러므로 동판 등을 이용하여 라인의 인덕턴스를 최소화 하는 구조를 만들어야 한다. 또 시험장의 온・습도의 영향이나 구 갭간에 불순물등의 영향으로 인해 SBV 시험 결과에 엄청난 차이를 보일 수가 있으므로 항온・항습의 청정 룸에서 시험을 수행해야만 한다.

구 잽간의 거리 조정은 버니어-켈리퍼스와 같은 계기로도 측정이 가 능하지만 구 표면을 상하게 할 수 있으므로 삼가하고 섬락전압인 SBV의 시험치가 구갭 간 거리 조정의 양·부를 판명할 수 있는 가장 손쉽고 정 확한 방법이라 할 수 있다. 그리고 SBV시험은 앞서 언급한 바와 같이 환 경의 영향을 많이 받으므로 몇 회를 반복해서 시험하여 그 평균값으로 결 과를 도출해야 한다^[22].

- 39 -



그림 3.14 단별 SVB와 트리거 전압 파형 예 Fig. 3.14 Typical voltage waveforms of SVB and Triggering at each stage

트리거 시험 전압은 SBV 값의 약 80%정도의 전압에서 시행하였으 며, 그림 3.14와 표 3.7에서와 같이 Marx 모듈 조립과정에서 체크한 출력 전압이 아주 양호함을 알 수 있다.

출력전압 측정은 CuSO4 용액으로 제작된 수저항에 분압기를 설치하여 제 작된 전해액 분압기로 측정하였으며 이 분압기의 임피던스가 약 140 요의 저항치를 가지는 더미 저항으로도 사용된다. 이 때의 분압비는 고전압 프

- 40 -

로브(P6015A, Tektronics)를 조정하여 그 분압비가 약 250:1로 나타났으 며 분압기 출력에 100:1 감쇄기를 설치하여 측정하므로 그림 3.14의 파형 최대치에 약 25,000을 곱하여 표 3.6의 출력전압을 산출하였다.

단수	SBV 시험시 출력 전압(kV)	6kV충전시 출력 전압(kV)
1	10.13 - 9.0	5.63
2	15.35 - 7.4	10.05
3	22.48 - 7.5	15.53
4	28.85 - 7.6	20.38
5	37.23 - 7.5	26.48
6	40.53 - 7.5	32.20
7	47.25 - 7.5	37.45
8	52.98 - 7.6	41.55
9	58.00 - 7.6	45.43
10	61.88 - 7.7	49.55

표 3.7 단별 SBV 및 트리거 시험 전압 결과 Table 3.7 Test voltage results of SVB and Triggering at each stage

3.3.6 Marx 출력 측정

고속 Marx 발전기의 출력은 상승시간이 매우 짧고 Marx 기립 동작시 발생하는 서지나 노이즈의 영향으로 인해 정확한 전압, 전류 파형을 측정 하기는 매우 어렵다.

전압 측정은 대형이나 중형급에서는 D-Dot 센서를 챔버에 내장하지만, 콤팩트형이나 반도체형의 Marx 발전기는 설치공간도 없을 뿐만 아니라 펄스의 상승시간이 너무 빨라 정확한 측정이 어려우므로 더미저항의 역할 을 분담하는 저항 분압기를 많이 사용한다.

저항 분압기에는 고체형 분압기와 전해액 분압기로 대별된다. 고체형 분 압기는 에폭시 수지에 흑연분말을 섞어 만든 고체저항, 금속피막저항등이 많이 이용된다. 구조는 간단하나 응답성이 떨어지고 고전압 대전류에 대 해 저항치가 변하는 결점이 있다.

전해액 분압기는 파이렉스 유리나 아크릴 등의 절연통 안에 CuSO₄, Na₂S₂O₃, 5H₂O 등의 전해액을 봉입하여 저항 분압기로 사용한다. 파이렉 스 유리의 2중 원통에 CuSO₄ 용액을 봉입하여 내측이 분압기이다. 외측 이 전해액층은 분압기 본체의 대지용량을 감소시켜 응답특성의 향상과 동 시에 유도 장해에 대한 쉴드의 역할도 한다. 분압기의 저압부는 용액중에 놓여진 원판 전극으로서 구성되고 이것과 대지 전극 간에 용액 저항에 의 하여 분압한다. 전해액의 저항은 온도에 의해서 변화하나 분압비는 보상 되어 일정하다^[1].

전해액 분압기는 0.25 ns의 상승시간의 측정도 가능하나 분압비가 1/50 ~ 1/1,000 정도로 적어 다음 단에 2차 분압기나 감쇄기를 설치해야 한 다. 본 실험에서는 외경 50 mm, 길이 450 mm : 1.5 mm의 분압비를 가지 며 측정결과, 250 : 1로 나타났다.

전류의 측정은 Pick up 코일을 사용하였으며, 원리적으로 Rogowski 코일과 동일하나 코일이 집중적으로 감겨져 있다. 소형으로 좁은 공간에 설치 할 수 있는 것이 장점이고 REB, LIB등의 펄스 전류측정에 많이 이 용된다. 상승시간은 아주 빠른 ns 이하로 할 수 있다.

본 실험에서는 지름 10 mm 원통에 5 요의 저항을 병렬로 접속하여 전 류를 전압으로 변환하여 측정하였다.

이렇게 제작된 전해액 저항 분압기와 Pick up 코일로 교정하여 Marx 발전기의 출력 전압과 전류를 측정하였으나, Marx 출력의 상승시간이 매 우 빠르고 서지나 노이즈로 인해 정확도는 다소 떨어진다. 제작품의 사진 을 그림 3.15에 나타내었다.





그림 3.15 전해액 분압기와 pick up 코일의 사진 Fig. 3.15 Photographs of the electrolyte divider and the pick up coil

3.3.7 가스 충전 시험

Marx 모듈을 조립한 후 절연체를 설치하고 외부 실드를 조립하는 과 정에서 오-링 등을 이용하여 가스가 누설이 일어나지 않도록 완벽하게 실링처리를 한다. 챔버 내부에 SF6 가스의 압을 조절함에 의해 Marx의 안전 동작 영역을 도출할 수 있으며, 즉 가스압에 따른 자가방전 영역 (Self Breakdown Region), 안전 트리거 영역(Normal Operating Region), 트리거가 되지 않는 차단영역(cut-off Region)을 도출하는 시험을 수행하 여 다음 그림 3.16과 표 3.7과 같은 결과를 얻었다. 이 결과치는 가스압과 충전전압의 상관관계를 나타내 주는 것으로서 향후 Marx의 원할한 운용 과 Marx 특성을 결정하는 아주 중요한 자료이다.





Trigger : 27.5 kV/9.72 V

그림 3.16 SF₆ 1.0 kgf/c㎡에서 출력파형 예 Fig. 3.16 Typical output waveforms at a pressure of SF₆ 1.0 kgf/c㎡

그림 3.16에서 나타난 전압은 140 요의 전해액 저항 분압기의 분압비 250:1과 함께 2차에 100:1 감쇄기를 사용하여 측정하였다. SF6 가스압력 에 대한 Marx 발전기의 동작 특성을 표 3.8과 그림 3.17에 나타내었다. SF6 가스를 절연체로 이용하였을 경우, 반복률 시험에서 좋은 Marx 특성 을 보여주지 못했다. 즉, 한번 방전이 일어난 뒤에 가스 전자들의 전리현 상에 의해 이온이 분리되어 회복하는데 많은 시간이 걸려 빠른 반복률을 가진 Marx 동작에서는 채택이 불가능하였다. 따라서 본 연구에서 N₂ 가 스를 이용하여 같은 커패시턴스와 인덕턴스로 16 단의 800 kV의 Marx 발 전기를 제작하였다.

표	3.8	SF6	압력에	따른	Marx의	동작특성
---	-----	-----	-----	----	-------	------

가스압력 차단영역 E-E(Min) 시험전압 E-E(Max)SBV (kgf/cm^2) (kV)(kV)(kV)(kV)(kV)11.4 14.3 17.0 17.90.0 8.5 0.2 12.0 14.717.420.7 21.8 17.020.2 0.4 18.6 24.0 25.50.6 19.5 21.4 23.2 27.6 29.0 0.8 22.525.630.4 32.0 24.1 1.0 24.025.8 27.532.7 34.4 1.228.0 28.8 29.6 35.2 37 1.4 29.0 30.3 31.6 37.5 39.5 1.630.5 32.0 33.5 39.8 41.9 1.832.0 33.9 35.7 42.4 44.6 2.0 36.5 38.2 45.4 47.8 37.4 2.6 42.5 46.3 50.0







3.3.8 N2 가스를 이용한 16단의 800 kV Marx 발전기

SF6 가스를 이용한 Marx 발전기와 똑 같은 소자로서 16 단의 발전기
를 제작하였다. SF6 가스 충전형과 동일하나 갭간격은 실험으로부터 표
3.5의 N₂ 압력 상태 하에서의 제 1단은 6 mm, 2 ~ 5단은 4 mm, 6 ~ 10단
은 4.5 mm, 11 ~ 16단에서는 5 mm 정도로 설정하였다. 조립 완료후 N₂
가스를 충전한 후 압력에 따른 Marx 동작 특성을 표 3.9 및 그림 3.18에
나타내었다.

표 3.9 N₂ 압력에 따른 Marx의 동작특성

Table 3.9	Operation	characteristics	of	the	Marx	as	а	function	of	N_2
	pressure									

가스압력 (kgf/cm²)	차단영역 (kV)	E-E(Min) (kV)	시험전압 (kV)	E-E(Max) (kV)	SBV (kV)
0.0	7.4	9.9	12.3	14.8	14.5
0.5	10.34	13.7	17.2	20.6	20.2
1.0	12.9	17.2	21.5	25.8	25.3
1.5	15.1	20.2	25.2	30.3	29.7
2.0	17.9	23.9	29.8	35.8	35.1
2.5	19.9	26.6	33.2	39.9	39.1
3.0	22.5	30.1	37.6	45.1	44.2
3.5	25.5	34.0	42.5	51.0	47.0
4.0	28.8	38.4	48	57.6	50.0
4.5	30.0	40.0	50.0	60.0	50.0



그림 3.18 N₂ 압력에 따른 Marx의 동작특성

Fig. 3.18 Operation characteristics of the Marx as a function of $N_{\rm 2}$ \$pressure

그림 3.19는 N2 가스 충전형 Marx 발전기의 외형을 나타낸다.



(a) 4단 조립시험



(b) 12단 조립시험



(c) 전체 조립시험(d) 전제 완성품그림 3.19 Marx 발전기 조립 및 시험Fig. 3.19 Construction and test of the Marx generator



- 48 -

제 4 장 실험 및 고찰

본 연구에서 제안한 콤팩트형 초고속 Marx 발전기 제작에 있어서 중 요한 요소들은 고전계에 대한 절연해석과 함께 기계적 구조 설계가 우선 시 되어야 한다. 또한 안정된 Marx 동작으로 짧은 변위시간을 가져야 하 므로 트리거 발전기의 스위칭 동작이 Marx 출력에 많은 영향을 미친다.

본 장에서는 Marx 안전 동작 영역과 변위시간에 대해서 실험하고 출 력 전압 및 전류의 특성에 대해서 기술하였다.

4.1 동작영역과 변위시간

고속 Marx 발전기는 충전용 인덕터를 이용해 병렬로 전단의 커패시터 에 충전하며 완료 후 제 1단에 설치된 트리거 시동 갭에 트리거 신호를 인가해 주 전극의 방전을 일으키고 이로서 전체 Marx 파형이 발생하는 메커니즘으로서 이때 트리거에 의해 주 전극 사이에 전류가 흐르는데 이 때의 전달 특성 곡선은 그림 4.1에 나타내었다.

방전을 유도하기 위해 필요한 최소의 트리거 전압이 주 전극의 충전전 압(E-E)일 때 인가되어 나타나는 특성을 그림 4.1에 보여준다. 트리거가 불안정한 왼쪽부분의 cut-off 영역, 중간부분의 Normal operating 영역과 두 전극 사이에 과전압으로 기인한 Self-Breakdown 영역으로 구분된다. 트리거 갭의 원활한 동작에 필요한 최소의 트리거 전압을 V_{Tmin}으로 정 의하고 E-E_{max}는 Self-방전 전압의 약 80%의 전압으로, E-E_{min}은 E-E_{max}의 약 1/3정도로 나타난다.



그림 4.1 Marx 전달특성 Fig. 4.1 Transfer characteristics of the Marx generator

특히 Marx 발전기는 시간지연이나 변위시간을 최소화하기 위해서 SBV의 약 60 ~ 80 %의 주 전극 전압에서 사용하는 것이 중요하다. 여기 서 시간지연(tad)은 그림 4.2에서 보는 바와 같이 트리거 시동 갭의 방전 과 Marx의 동작 사이의 시간을 말하며, 시간지연은 E-E 전압의 함수로 서 트리거 형상이나 전압 파형에 따라 많이 달라질 수도 있다. 이를 최소 화하기 위해서는 트리거 전압의 상승속도를 빠르게 한다거나 E-E 전압의 가장 높은 지점에서 Marx 동작을 수행할 필요가 있다^[23].

변위시간(tj)는 트리거 시간에서 동작과 동작 사이의 변위를 말하며, 이 시간을 줄이는 방법은 트리거 발전기의 상승시간을 줄이는 것이다. 그 림 4.3에서 Marx 발전기 동작시의 시간지연과 변위시간에 대해 확인할 수 있다.



그림 4.2 Marx의 동작특성 Fig. 4.2 Operation characteristics of the Marx generator

본 실험에서 트리거 구동 신호 발생기인 트리거 팬던트의 출력파형과 Marx 수저항의 출력을 가지고 실험을 하였으며, 막스 발전기의 구조상 트리거 출력파형을 직접 측정하기가 난해하므로 그림 3.4(b)의 팬던트 출 력과 트리거 출력과의 시간지연이 약 0.8μs로 측정이 되었다. 그 결과 근 거로 하여 그림 4.3의 파형에서 총 Marx 시간지연은 약 0.2μs, 변위시간 은 약 0.1μs 이하로 측정이 되었다.



그림 4.3 Marx의 시간지연과 변위시간 Fig. 4.3 Time delay and transition time

반복률 시험에서는 SF6 가스를 이용했을 경우 1회 동작 이후 재충전 중에 자체방전이 발생하여 반복률 시험을 수행하지 못했으나 이온의 회복 속도가 늦다는 점을 확인하는 결과이다.

N₂ 가스를 이용하여 1 pps의 반복률 시험을 수행할 수 있었다. 이는 고속 반복률을 요하는 Marx 발전기에서는 N₂ 가스가 SF₆ 가스보다 더 효과적이라 볼 수 있다.

4.2 출력 특성

4.2 nF의 커패시터를 16 단으로 제작하여 800 kV급 콤팩트 Marx 발전 기의 출력특성은 그림 4.4와 같다. 출력 전압의 상승시간은 약 20 ns, 펄스 폭은 약 50 ns로 측정이 되었으며, 효율은 75 %로 우수한 Marx 특성을 나타내었다.





(c) $N_2~2.5\,kgf\,/\,\text{cm}^2$



그림 4.4 Marx 발전기의 출력전압, 전류 파형 Fig. 4.4 Voltage and current waveforms of Marx generator

제 5 장 결 론

본 연구에서는 전통적 방식의 저항 충전식 Marx 발전기와 인덕터 충 전방식의 고속 컴팩형 Marx 발전기의 동작원리를 해석하고 설계 및 제조 기법을 확립하였다. 실험적 연구로부터 총 에너지가 52.5 J인 10 단 500 kV 출력의 SF6 가스 충전형 배터리 전원 초고속 Marx 발전기와 84.0 J인 16 단 800 kV급의 N₂ 가스 충전형 1 pps의 반복률을 가진 Marx 발전기를 제작하였으며, 세부적 결론은 다음과 같다.

- Marx 챔버의 각종 부품에 대한 가공 및 조립기술, 특히 고전계에 대 한 절연해석과 많은 실험을 통해 취득한 절연 가스 상태에서의 시동 갭 의 섬락 조건들과 여러 가지 PFN 설계기술을 확보하였다.
- 2. 시제작한 SF6 가스 충진형 10단 Marx 챔버는 80% 이상 효율을 나타 내었지만, 반복률에서는 동작 후 재충전 기간에 전자의 전리현상 등으로 제기능을 발휘하지 못했다. 따라서 N₂ 가스 충전형 16단 800 kV급의 Marx 발전기를 제작하여 측정한 결과, 출력효율은 75%이었으며 50 kV 의 충전전압에서 1 pps의 반복률을 나타내었다.
- 3. 고속 Marx 발전기에서 변위시간을 최소화하기 위해 트리거 발전기의 전압 상승시간을 최소화하였다. 마이크로프로세서를 이용한 트리거 팬던 트의 제작과 10 kV급의 트리거 제어용 전자회로들을 PCB상에 집적화시 켜 전체 트리거 발전기를 소형화하여 0.1 μs 이하의 변위시간을 가진 Marx 출력을 얻을 수 있었다.

- 56 -

4. Marx 발전기의 출력 전압과 전류의 측정을 위해 전해액 분압기와
D-dot 센서, Rogowski 코일과 Pick up 코일에 대한 연구를 수행하여 수
ns 이하의 펄스전압·전류의 측정기술을 확보하였다.

본 연구를 통해 개발된 컴팩형 초고속 Marx 발전기는 고전압의 펄스 파워분야는 물론 전자물리, 살균처리의 환경산업 및 전자무기와 같은 국 방관련 산업에도 충분히 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 이형호, "고전압 대전류 펄스파워 기술", 한국전기연구원 전력기기연 구부, pp.51~55, 1997.
- [2] J. R. Mayes, W. J. Carey, W. C. Nunnally and L.Altgilbers, "Sub-Nanosecond Jitter Operation of Marx Generators", Physical Electronics, L.C. Austin, Texas 78734, IEEE, 2002.
- [3] Paul W. Smith, "Transient Electronics Pulsed Circuit Technology", John Wiley & Sons Ltd, pp.220~225, 2002.
- [4] 길경석 "선박전기설비 시험용 조합형 써지 발생장치의 제작과 특성" 한국박용기관학회지, 21권 4호, pp.338~392, 1997.
- [5] 이복희 역, "고전압대전류공학", 청문각, pp.64~96, 1993.
- [6] IEC Publication 61000-4-1, part 4, Testing and Measurement Techiquies, 1998.
- [7] 최영욱, "충격 전압 발생기 개발 연구", 한국전기연구원 고전압연구실, pp.19~37, 1992.
- [8] E. Kuffel and W.S.Zaengl, "High Voltage Engineering", Pergamon Press, pp.65~72, 1984.
- [9] W.J. Carey and J.R. Mayes, "Marx Generator Design and Performance", Physical Electronics, L.C. Austin, Texas 78734, IEEE, 2002.
- [10] J. R. Mayes, M.B.Lara, M.G.Mayes and C.W.Hatfield, "An Enhanced MV Marx Generator for RF and Flash X-Ray Systems", Physical Electronics, L.C. Austin, Texas 78734, IEEE, [Air Force contract FA9200-04-C-035], 2002.
- [11] M.B.Lara, J. R. Mayes, M.G.Mayes and C.W.Hatfield, "A Modular Compact Marx Generator Design for The Gatling Marx Generator System", Physical Electronics, L.C.Austin, Texas 78734, IEEE, [Air Force contract FA9200-04-C-0325], 2002.
- [12] J. R. Mayes, M.G.Mayes, and M.B.Lara, "A Novel Marx Generator Topology Design for Low Source Impedance", Physical Electronics, L.C. Austin, Texas 78734, IEEE, [Air Force contract F33615-02-C-2279], 2002.

- [13] M.G. Grothaus, W.J.Moran and L.W.Hardesty, "High-Repetition Rate Hydrogen Marx Generator", Proc. of the 20th Power Modulator Symposium, June 1992.
- [14] S.L.Moran, M.G. Grothaus, and L.W.Hardesty, "Five Pulse, 10GW, High-Repetition-Rate Hydrogen Spark Switch Experiment", Proc. of the 20th Power Modulator Symposium, June 1992.
- [15] J.O'Loughlin, J.Lehr, D.Loree, "High Repetition Rate Charging a Marx Type Generator" presented at the 13th IEEE International Pulsed Power Conference, 2001.
- [16] L. Veron and J.C. Brion, "Experiment Study of a Repetitive Marx Generator", IEEE, 2003.
- [17] D.Goerz, T.Ferriera, D.Nelson, R.Speer and M.Wilson, "An Ultra-Compact Marx-type High-voltage Generator", IEEE, 2002.
- [18] A.J.Dragt and J.M.Elizondo, "Compact Battery-Powered, 400kV, 40-Joule Marx. Generator", IEEE, 2002.
- [19] J. R. Mayes, W. J. Carey, W. C. Nunnally, and L.Altgilbers, "The Gatling Marx Generator System", IEEE, 2002.
- [20] M.M.Kekes, "High Repetition Rate Compact Marx Generator", IEEE, 2003.
- [21] B.A.Frungel, "High Speed Pulse Technology", Acadmic Press LTD, 1965.
- [22] 태양엔지니어링, "Mini Marx Generator", p.214, 2005.
- [23] PerkinElmer, "Mannual of 778Triggered Spark Gaps".