

大出力 Pulse Power의 研究動向

工學博士 李 柱 熙

目 次

- 1. 序 言
- 2. 同軸型 Marx發生器의 性能
- 3. 大強度電子 Beam Diode
- 4. 研究對象의 周邊技術
參考文獻

1. 序 言

지난 15年間, Pulse Power의 技術은 相對論的 電子 Beam發生器의 大出力化를 可能하게 하므로써 急速度로 發達하였고, 또한 物理 및 工學의 各分野에서 應用되고 있다. 특히, 核融合, 레이저의 勵起·點火, Ion Beam의 加速등에 대한 應用은 Pulse Power의 最新技術의 結晶體로 評價되고 있다.

初期에 있어서는 英國 AWRE(Atomic Weapons Research Establishment)의 J.C. Martin과 그들의 그룹에 의하여 研究開發되었으나 1960年代의 後半까지는 ~300KV, ~10KA의 水準에 있었다. 最近은 2MV, 15MA, 1MJ (Sandia Lab., EBFA-I)으로 大型化되었다.

大出力 Pulse의 發生方法은 Marx 發生器와 Tesla transformer등이 利用되고 있으나, Marx發生器는 10⁻⁹秒 領域의 Pulse發生, 低出力 Imp. 큰 Energy의 出力, 높은 效率等의 利點이 있는 關係로 一般의으로 使用되고 있다.

Marx發生器는 지금까지 高電壓分野에서 衝擊電壓發生裝置로 오래동안 愛用되어 이에 대한 技術은 어느 程度 確立되어 있다. 그러나 高電壓, 大Energy의 出力을 갖는 10⁻⁹秒幅의 Pulse를 發生시키기 위하여는 새로운 Pulse Power技術의 開發이 必要하게 된다.

(※註)本稿는 1980年 11月 26日(水)에 電氣會館 大講堂에서 開催한 當學會 第30回 定期總會 및 學術講演會에서 發表한 講演全文으로 會員 여러분께 有益한 參考資料가 되리라 믿어 이에 紹介하는 바임.

특히, 高電壓, 低 Impedance의 系統을 實現시키기 위하여 高誘電率, 高絶緣耐力의 誘電體를 材料特性의 性能限界에서 使用하는 技術, 즉, 콘덴서 등의 充電體絶緣에 使用하는 絶緣油의 絶緣耐力은 $Ft \leq A_1^{10} = 0.5^{11}$ 을 適用하는 것 등이다. 여기서 F는 絶緣耐力(MV/cm), t는 時間(μ s), A는 斷面積(cm^2)이다.

또한 數 nH의 低 Inductance와 壽命 > 10⁹ Shot의 高壓 Switch의 開發도 主要한 對象의 하나이다. 電極構造의 開發과 充填 gas의 壓力의 制御에 依하여 數 nS의 Jitter와 100Hz²⁾의 Switch系統이 實驗에 成功하고 있다.

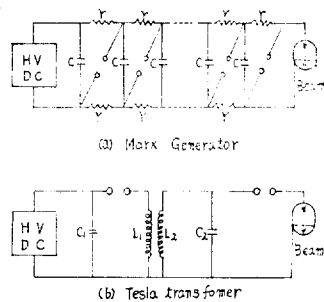


그림 1. Pulse Power Generator

大出力 Pulse Power로서의 主要한 要件은, 短時間內에 全 Energy를 放射할 수 있는 Pulse wave의 制御技術이다. Marx發生器의 出力端子에 PFL(Pulse Forming Line)을 負荷하여 Pulse를 整形하는 方法과 Marx發生器의 構造를 整形할 수 있겠음 改良한 直接驅動方式 등이 있다. 直接驅動하므로써 PFL에 再充電하는데 따른 效率의 低下와 設備의 龐大를 抑制할 수 있는 利點이 있다.

直接驅動方式으로 된 ~2MV 同軸構造의 Marx發生器³⁾로, ~60nS(FWHM)의 擬似矩形 Pulse를 얻은 例가 있다.

本稿에서는, 大出力의 Pulse Power를 짧은 幅의 矩形波로 發生시킬 수 있는 同軸型 Marx發生器와 關心의 對象이 되고 있는 Pulse Power의 周邊技術의 開發動向에 對하여, 이의 概略을 記述하고자 한다.

2. 同軸型 Marx發生器의 性能

化學레이저의 點火用으로 開發된 同軸型 Marx發生器는 KREBA No. 1, 2, 3까지이며 이의 概略圖와 主要性能은 그림 2와 表 1에 表示함과 같다.

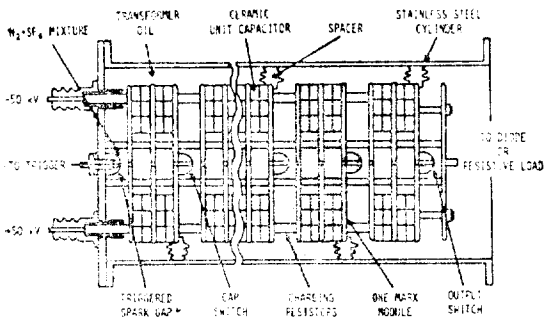


그림 2. KREBA No. 2의 構造

表 1. KREBA No. 1, 2, 3 特性

KREBA	#1	#2	#3
Nominal;			
Voltage(KV)	600	1,000	2,560
Energy(j)	180	1,010	2,210
Matching res.(Ω)	28.5	38	53
Cylinder;			
Dimension(mmφ × mm)	260φ × 1,455	566φ × 2,670	560φ × 4,740
Volume(cm³)	77.2	671.5	1,166.8
Bank charging;			
Scheme	series	double series	double series
Voltage(KV)	+60	±50	±80
Resistor(KΩ)	10	10	100
Capacitor;			
Unit cap.(nF)	BaTiO ₃	SrTiO ₃	BaTiO ₃
per module(nF)	2.5(30KV)	1.0(25KV)	2.7(40KV)
(ea)	16	324	64
no. module	10	10	16
Total cap.(nF)	1	2.025	0.675
(ea)	160	3,240	1,024
Gap switch;			
gap press.(atm)	2.5(N ₂)	4(SF ₆ /N ₂)	2(SF ₆)
Spacing(mm)	10	upper 15 middle 18 lower 10	10
Insulating oil;			
Capacity(l)	50	550	

構造는 10~16개의 Module을 SuS-304의 圓筒에 內藏한 同軸構造이다. 各 Module은 殘留 Inductance가 적은 磁器콘덴서와 Gap Switch를 同心圓筒狀으로 配置하고 內部 Impedance가 數 10 ohm(最小化)되겠끔 設計되었다.

Energy 蓄積用의 콘덴서는 BaTiO₃ 또는 SrTiO₃系의 Ceramic Condenser이며, Marx中心軸에 놓인 Gap Switch의 周邊에 2개를 直列로 한 組의 Module을 構成하였다. 콘덴서는 ~6mm 두께의 Al板사이에 固定되어 있다.

各 Module은 Lucite Rot로 締付하고, Module과 圓筒의 間隙은 Lucite Spacer로 調整되어 있다. 圓筒內部的 充電體는 高壓絶緣油(JIS 2號)로 絶緣하고 이의 絶緣耐力的 限界는 Pulse 幅 50nS를 基準하여 F=~0.74MV/cm를 設計되었다.

Gap Switch는 半球狀圓筒의 黃銅 Rot와 Al平板 또는 黃銅 Rot-Rot의 構造이며 Acrylic圓筒과

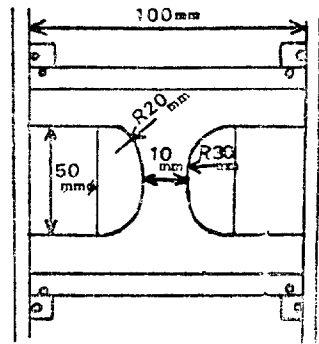


그림 3. KREBA No. 3의 Gap Switch

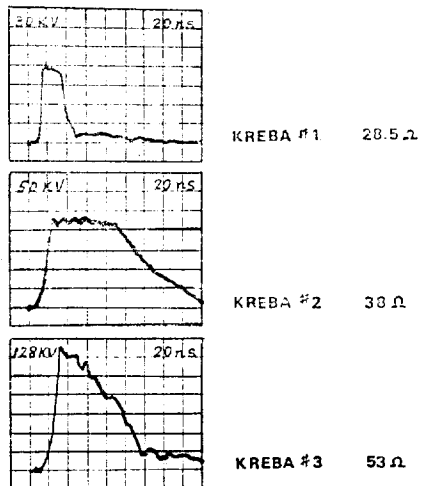


그림 4. KREBA의 出力波形

O-Ring에 [依하여 高壓絶緣油로부터 隔離되었다. Gap Switch는 N_2 , SF_6/N_2 또는 SF_6 gas로 充填되어 ~3氣壓에서 放電電壓을 調整하고 있다.

그림 4는 Marx發生器에 整合되는 Diode를 負荷하였

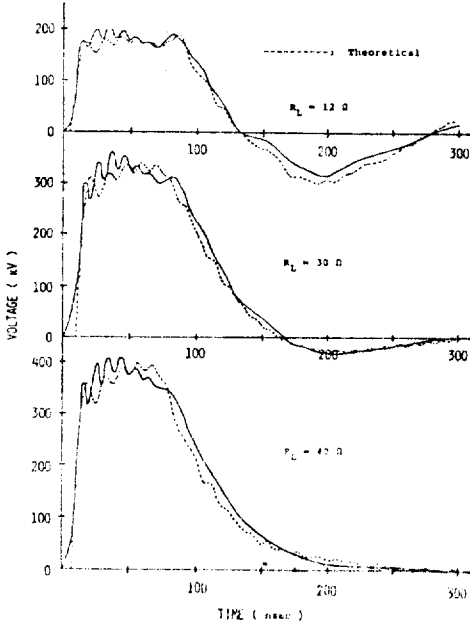


그림 5. KREBA No. 1의 出力波形 理論과 實測의 比較

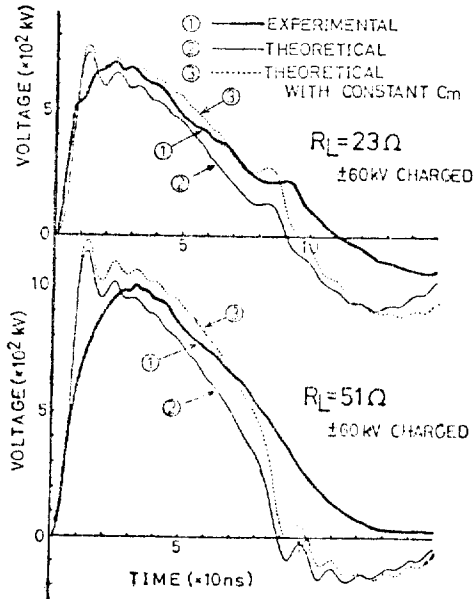


그림 6. KREBA No. 3의 出力波形, BaTiO₃系의 Ceramic Cond를 使用했을때 理論과 實測의 比較

을때 出力 Pulse의 波形이며, 通常의 Marx에서 發生하기 어려운 Rise time이 빠른 ~20nS의 擬似矩形波이다. 이때 整合 Impedance는 ~50Ω이다.

그림 5는 同軸型 Marx 發生器에 대하여 開發된 Simulation Code에 依한 Pulse Wave의 計算結果와 測定值의 比較이다. 計算에 使用된 Channe Inductance는 ~28nH/cm, 浮遊容量은 ~0.1nF이다.

BaTiO₃系의 Ceramic Condenser는 印加電壓의 上昇에 따라 靜電容量이 減少되므로, Simulation에서는 이의 效果를 考慮하여야 한다. 그림 6은 이에 對한 計算值와 測定值의 比較이다.

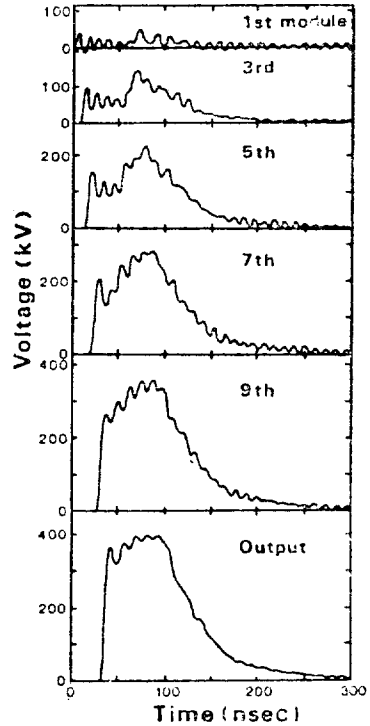


그림 7. 各 module에서 發生된 電壓波形 KREBA No. 2

3. 大強度電子 Beam Diode

Marx發生器의 蓄積 Energy를 有效하게 電子 Beam으로 變換하기 위한 裝置는 J.C. Martin 등이 開發한 Diode가 지금까지 一般의으로 使用되고 있다.

그림 8은 筆者가 化學레이저의 點火에 使用한 Flangeless型의 構造⁴⁾이며, 電極面積이 넓은 電界放出型이다.

電子銃의 構造에 따라 Beam-Energy의 密度와 Beam의 質이 決定되어, 이것은 Pulse Power研究의 主要對象이 된다. 1966년에 Graybill과 Nablo에 依하여 처

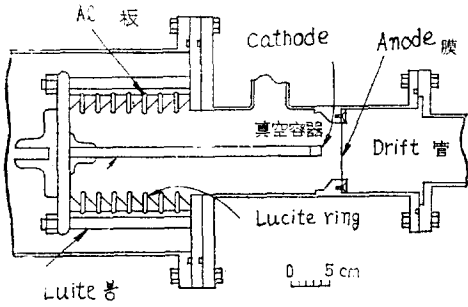
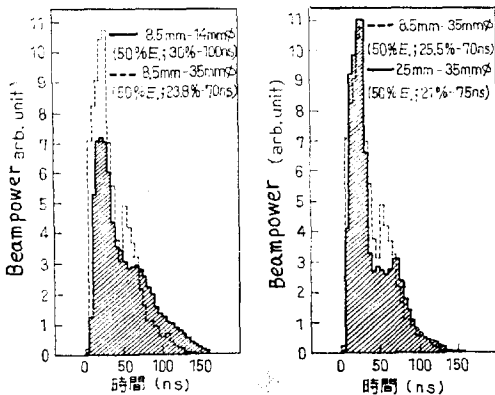


그림 8. KREBA No. 1의 Diode構造

음으로 相對論的 電子 Beam의 實驗觀測이 報告된 以後 急速히 發達하였다. Anode膜을 通過하여 金屬 Drift管을 傳播하는 Beam의 特性은 Plasma Confinement, Ion Beam加速等の 技術을 發展시켰고, 特大出力레이저의 勵起·點火의 手段으로 注目되고 있다.

Diode內部에 있어서 電子 Beam의 舉動은, 理論과 實驗의 兩面에서 많은 研究報告가 있어서 이의 基本 Mechanism은 ① Cathode Plasma에 依한 Child-Langmuir式의 修正, ② 電子 Beam電流의 自己磁界에 依한 電子軌道와 Pinch效果, ③ Anode Plasma와 Ion電流의 形成等으로 整理되어 있다. 그러나 電子 Beam舉動의 複雜性 때문에 工學的인 面에서는 不明確한 點이 많으며, 特大 레이저 點火의 Diode特性은 電極構造와 Beam의 Power 및 Energy의 動特性間의 相關關係가 研究의 對象이 되고 있다.

KREBA No. 1 (4.6KV, 2.5KA)으로 Beam特性을 測定한 바에 依하면, Beam Pattern은 $WK/AK \leq 1$ 의 關係에 依存되는 것이 밝혀졌다. 여기는 WK는 Anode壁과 Cathode의 距離, AK는 Anode膜과 Cathode의 距離이다.



(a) AK 8.5mm을 一定하게 徑 14mmφ 徑 35mmφ으로 變化
(b) 徑 35mmφ을 一定하게 AK 8.5mm과 AK 25mm으로 變化
그림 9. 電極定數와 Power Histogram의 依存性

Beam Power의 時間變化는, 電極定數(Cathode 半徑 / AK)를 變數로 하였을때, AK를 一定하게 하고 Cathode半徑만을 變化시키면 半徑이 클 수록 Power의 Histogram은 增加하고 全 Energy의 時間幅은 좁아진다. 反對로 Cathode半徑을 一定하게 하고 AK를 變化시켰을때 Power Histogram은 減少하고 Energy의 時間幅은 넓어져서 이들의 關係는 電極定數에 깊게 依存된다.

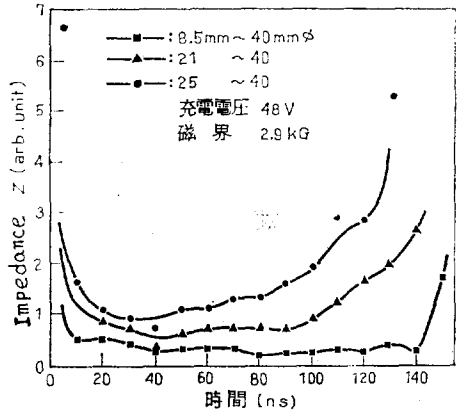


그림 10. Diode Impedance의 時間變化

또한 Diode Impedance의 時間變化는 初期狀態 安定 및 回復狀態의 세 形態로 區分되며 그림 10에서 알 수 있는 것처럼 最大 Energy를 放射하는 安定狀態의 持續時間은 Cathode半徑 보다 AK의 依存度가 더욱 깊고 AK가 짧을 수록 길어진다. 이 特性은 Plasma의 形成時間을 表示하는 初期狀態와 함께 放射되는 電子 Beam Power의 時間變化가 電極定數에 依하여 制御될 수 있음을 表示한다. 實驗에서 얻은 Plasma의 成長速度는 $2 \sim 4 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 이다.

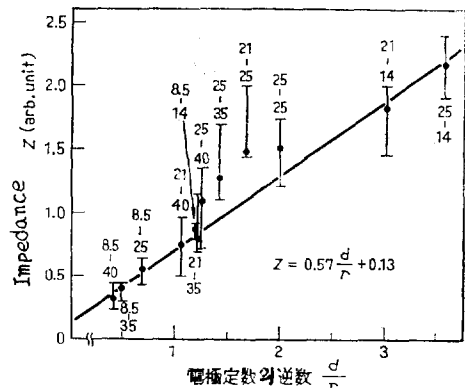


그림 11. Diode Impedance와 電極定數의 逆數와 의 依存性

Diode Impedance의 安定狀態에 있어서 Ohm値와 電極定數의 逆數와의 依存關係는 그림 11과 같고 이의 實驗式은 $Z = 0.57 \frac{d}{r} + 0.13$ 이다. 여기서 Z는 Diode Impedance, r는 Cathode의 半徑, d는 AK이다. 電極定數는 적을 수록, 即 r에 比較하여 d가 클수록 高 Impedance쪽에 있으므로 發生 Power의 變動이 큰 것임을 表示한다.

4. 研究對象의 周邊技術

Pulse Power의 研究課題로 가장 興味를 集中시킨 것을 Pulse Power와 關聯이 깊은 최근의 Symposium에서 調査하면 다음같이 要約된다. Symposium은 1979年 7月 12~14日 Lubbock에서 개최된 IEEE 2nd Inter. Pulsed Power Conf.와 1980年 6月 3~5日 Orlando에서 개최된 IEEE 14th Pulse Power Modulator Symposium이다.

가. Gap Switch; MV級의 高電壓에서 反復開閉가 可能하고, 低 Jitter를 얻기 위하여, 檢討되는 項目은 ① 電極의 構造, 材質, 腐食, ② Gas Flow Geometries, ③ 冷却의 必要性 ④ Switch Recovery 등을 對象으로 삼고 있다.

Triggering은 Ruby레이저 또는 Rare-gas halide레이저, Flash X-ray등으로 Pre-ionization하는 方法에 對하여 많은 研究가 進行되고 있다. 特히 Sandia研究所의 Nean 등은 SF₆絶緣 Gap Switch에 FXR으로 Pre-ionization을 하여 1.3μs의 低 Jitter를 얻었음을 報告하고 있다³⁾.

構造는 Air의 Vortex Flow가 可能하겠끔하여 超音速 Vortex Flow로서 反復開閉能力을 向上시키는 方向으로 研究가 集中되어, P.I의 J.T. Naff는 20KA의 Pulse에 대하여 1KHz보다 더 많은 反復開閉를 報告하고 있다.

나. 새로운 Switching 方法: Gap Switch는 反復開閉의 限界가 있을 것에 對한 代案으로 Thyatron의 研究도 活潑하게 進行되고 있으나 MV, KA水準의 Pulse를 開閉한 報告는 아직없다. Naval Surface Weapons Center (USA)에서 推進중인 E-Beam Controlled Repetitive Switch도 興味の 對象이 되고 있다.

다. 要素(Component); MHz의 反復開閉에 대하여 部品의 高信賴度を 檢討하기 위한 研究課題도 많이 報

告되고 있다. 特히 Capacitor의 耐力, Switch의 Electro Mechanical Shock 등이다.

라. 其他: Pulse Power의 大出力化와 數個의 並列 Beam을 集合할 必要性에 따라 電子 Beam의 輸送路를 만들기 위한 Magnetic Insulation 研究도 主要한 研究의 對象이다. 또한 核融合을 目標로한 加速器의 大型化는 더욱 加速되어서, Sandia研究所(USA)의 EBFA-II 計劃⁶⁾(Module數=36~72, 電壓=4MV, Energy=3.5MJ, Power 100TW)과 I.V. Kurchatov研究所(USSR)의 ANGORA-5 計劃⁷⁾(Module 數=48, 電壓=2MV, Energy=4.8MJ, Pulse 幅=90μs FWHM)이 先頭에서 競合하고 있다.

參 考 文 獻

1. J.C. Martin; "Nanosecond Pulse Techniques," SSWA/704/49, AWRE, Aldermaston, England, 1970.
2. G.J. Rohwein, M.T. Buttram, & K.R. Prestwich; "Design and Development of a 350KV, 100pps." SAND-77-1282C, Sandia Lab. Albuquerque, U.S.A.
3. M. Obara, Y. Sakato, C.H. Lee, T. Hashimoto, & T. Fujioka; "Low-Impedance, Coaxial-Type Marx Generator with a Quasi-Rectangular Out-put Waveform" IEEE 2nd Inter. Pulsed Power Conf., Lubbock, Texas, U.S.A. (June 12~14, 1979) IEEE Cat. No. 79, CH1505-7
4. 李柱熙 等: "레이저 點火用大強度電子 빔 Diode의 特性", 日本電學誌, 論文-C, 1980. 9
5. E.L. Neau; "X-Ray Triggered in SF₆ Insulated Spark Gaps," IEEE, 14th Pulse Power Modulator Symposium, June 3~5, 1980, Orlando, Florida, U.S.A.
6. T.H. Martin; "Pulsed Power for Fusion" IEEE 2nd Inter. Pulsed Power Conf., Lubbock, Texas U.S.A. (June 12~14, 1979) IEEE Cat. No. 79 CH1505-7
7. S.V. Basenkov, et al; "Accelerator Module of ANGARA-5," ibid., IEEE Cat. No. 79 CH1505-7