

## 수백 MW급 고집적 커패시터형 펄스전원 개발

김진성\*, 김성호, 양경승, 이영현, 김중수\*\*, 김영배  
\*국방과학연구소, \*\*한국전기연구원

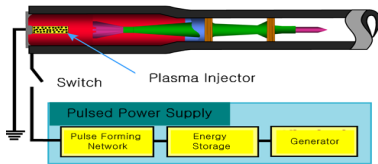
### Development of 100's MW Compact Capacitive Pulsed Power Supply

Jin Sung Kim\*, Sung Ho Kim, Kyung Seoung Yang, Young Hyun Lee, Jong Soo Kim\*\*, Young Bae Kim  
\*Agency for Defense Development, \*\*Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - In this paper, it is investigated to develop a compact 150kJ pulsed power supply to be operated on a vehicle. The goals of development are the maximum charging energy of 150kJ, the efficiency of energy transfer of >80%, the pulse forming of trapezoidal wave of 150~250MW, the consecutive charging rate of >several shots/min. The hierarchy and circuit of the pulsed power supply for optimization, high efficiency and minimization of volume are investigated and presented. And, the charging voltage, inductance and resistance of the compact pulsed power supply are studied and determined.

#### 1. 서 론

전열추진기술은 추진제 화학에너지와 펄스전력(Pulsed Power) 전기에너지를 이용하여 물체를 추진하는 기술이다. 펄스전력에 의해 발생하는 수만도 K 플라즈마(Plasma)를 이용하여 추진제의 점화 및 연소를 제어함으로써 추진성능을 향상시킬 수 있다. 전열추진가속 체계는 <그림 1>과 같이 구성되어 있다. 수십~수백MW 펄스전력 발생용 펄스전원장치(Pulsed Power Supply), 스위치, 펄스전력에 의한 저항열로써 플라즈마를 발생하는 플라즈마 발생기(Plasma Injector), 그리고 추진제, 가속기 및 발사체로 구성되어 있다. [1][2]



<그림 1> 전열추진체계 구성도

전열추진기술에는 펄스전원장치가 필수적이며 가속기의 규모, 기술구현 개념 및 방법에 따라 펄스전원장치의 성능과 규모가 달라진다. 국방과학연구소에서는 다양한 규모의 전열추진가속 연구를 위하여 연구용 2.4MJ 커패시터 펄스전원장치를 국내기술로 개발하여 사용하고 있다. 개발한 펄스전원장치는 다양한 목적의 실험연구용으로 구조 변경이 용이하고 유연하게 펄스파형을 제어할 수 있도록 제작되어 있다. 따라서, 특정 목적에 맞추어 최적화 되어있지 않기 때문에 부피와 중량이 커서 차량에 탑재하기에는 적합하지 않다.[3]

본 연구에서는 차량 탑재를 고려한 펄스전원장치 개발을 검토하고자 한다. 차량 탑재를 위해서는 펄스전원장치를 고집적화 하여야 한다. 고집적화를 위해서는 용도와 목적에 맞추어 펄스전원장치 세부규격을 최적화하고 에너지 전달효율을 극대화하여 필요한 펄스전원장치 규모를 최소화하여야 한다. 또한, 구성품을 최소공간에 배치하여야 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 운용 중인 펄스전원장치

현재 운용하는 펄스전원장치는 <그림2>와 같은 300kJ 커패시터뱅크를 8대 제작하여 단독 또는 병렬 운용하고 있다. 개발된 커패시터 펄스전원장치의 규격은 <표1>과 같다. <그림3>은 2대의 펄스전원장치를 사용하여 플라즈마 발생기에 공급한 펄스전력, 공급에너지 및 전류 실험결과 사례를 보여주고 있다.[2]

##### 2.2 고집적 펄스전원장치 개발 요구사항

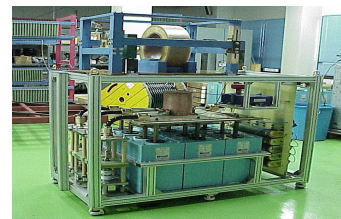
펄스전원장치를 차량에 탑재하기 위해서는 펄스전원장치를 고밀도로

제작하여 부피와 중량을 최소화 할수록 유리하며 급속 충전이 가능하여야 한다. 이를 위해서는 우선 필요한 전기에너지와 펄스전력파형을 정확하게 결정하고, 이를 기준으로 펄스전원장치의 세부규격을 최적화하여야 한다. 또한, 에너지 전달효율을 극대화함으로써 필요한 펄스전원장치의 규모를 최소화하여야 한다. 또한, 구성품을 최소공간에 배치하여야 한다. 이 경우 고전압, 대전류에 의한 전자파 장애와 절연과피 대책이 반드시 필요하다. 펄스전원장치 구성품은 성능대비 소형화된 첨단 제품이 유리하지만, 본 연구에서는 저렴한 상용품을 최대한 활용하고자 한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 펄스전원장치 개발 요구사항은 다음과 같다.

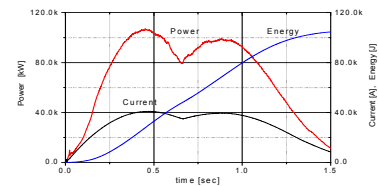
- o 최대충전용량 150kJ
- o 에너지 전달 효율 80% 이상
- o 침투출력 및 펄스폭 : 150~250MW, 2msec 이하
- o 최대충전전압 최소화
- o 펄스파형 : 구형파, 상승시간 0.1msec 수준
- o 연속 충전방전 속도 : 목표 미정(추후 결정)
- o 최악 운용 조건 : 부하의 단락 및 개방 상태
- o 에너지밀도 : 목표 미정(추후 결정)
- o 외부 충격 고려 : 목표 미정(추후 결정)
- o 상용 구성품 사용

<표 1> 300kJ 커패시터 펄스전원장치 규격

구분	내용
최대충전에너지	300kJ
최대충전전압	22kV
최대허용전류	140kA
커패시턴스	1.2mF(0.2mF*6개 병렬)
인덕턴스	20/40/80/160μH
스위치	TVS(Triggered Vacuum Switch)
크기(W×L×H)	1×1.7×1.8m



<그림 2> 300kJ 커패시터 펄스전원장치



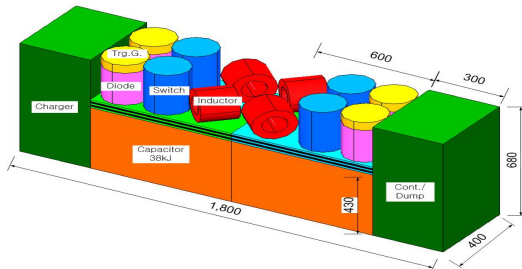
<그림 3> 실험파형(충전전압 14kV, 6kV)

##### 2.3 펄스전원장치 구성

커패시터 펄스전원장치는 설계 및 운영조건에 따라 차이는 있지만 기본적으로 RLC 직렬회로로 구성된다. 설계요구사항을 충족하기 위해서

는 펄스전원장치는 여러 개의 모듈로 병렬운용 되어야 할 것으로 판단 된다. 모듈 개수가 많을수록 구형과 펄스성형, 구성품 정격치, 유연한 운용성 등에서는 유리하지만 구조가 복잡하고 제어 및 신뢰도에서는 불리하기 때문에 모듈 개수를 적절하게 결정하여야 한다. <그림4>는 검토하고 있는 한 예로서 4개 모듈로 구성된 펄스전원장치의 개념도이다. 4개 모듈은 서로 다르게 제작될 수 있다. 상용 구성품을 기준으로 하였으며, 전체 부피는 0.5m<sup>3</sup> 이하, 중량은 400kg 이하로 예상하고 있다.

커패시터는 충전전압, 전류 정격치, 수명과 내부 기생저항 및 인덕턴스, 외형을 함께 고려하여 선택하여야 한다. 커패시터는 크기가 작은 여러 개의 커패시터 셀(Cell)을 직병렬로 연결하여 제작하므로 커패시터는 원하는 형태로 제작할 수 있다. 개념도의 커패시터 에너지 밀도는 0.8J/cc이다. 스위치는 내전압, 최대최소 운용전압, 전류(침투전류, Coulomb, Action Integral), di/dt, dv/dt 뿐만 아니라 절호방법, 제어 신뢰성, 내구성, 부피 등을 함께 고려하여 선택하여야 한다. 스위치로는 전제 부피를 최소화하고 역전류를 방지할 수 있는 펄스전력용 싸이리스터, TVS, VDAGS( Vacuum Diffusion Arc Switch) 등을 고려하고 있다. 크로바 다이오드(Crowbar Diode)는 스위치와 유사한 방법으로 선정하여야 한다. 스위치와 크로바다이오드 조립체는 조립, 배치에 의한 기생저항 및 인덕턴스, 전자파 및 전자력 영향을 최소화하기 위하여 전류흐름이 동축구조가 되도록 제작할 예정이다. 그리고 스위치, 다이오드, 커패시터 및 모든 구성품을 최대한 밀착시켜 배치함으로써 기생저항 및 인덕턴스를 최소화할 예정이다. 전류파형 제어를 위한 인덕터는 대전류에 의한 팽창력을 견디면서 저항감소에 유리한 폭이 넓은 젤롤(Jell Roll)형으로 제작할 예정이다. 인덕터는 상호간섭 및 다른 구성품에 미치는 영향을 최소화하도록 배치할 예정이다. 구성품을 연결하는 버스(BUS)는 표피효과에 의한 도체저항과 절연이격에 의한 기생인덕턴스를 최소화하기 위하여 최소 절연간격을 갖는 다층구조의 넓은 동판을 사용할 예정이다. 동판의 표면적을 증대하기 위하여 표면에 골을 파거나, 얇은 여러 개의 도체판을 복층으로 제작할 예정이다. 충전기는 에너지 밀도를 높일 수 있는 SMPS형 고전압충전기를 사용할 예정이며, 총용량은 25kWpk/12.5kWavg 이상이 되도록 용량이 작은 충전기를 여러 대 병렬 구성할 예정이다. 펄스전원장치 운용에 필요한 제어 및 안전장치의 제어 신호와 구동력은 전자파 간섭에 의한 오동작을 원천적으로 배제하기 위하여 광신호 및 공기압을 사용하고, 동작 진단을 위하여 전류센서를 모듈별로 설치할 예정이다. 펄스전원장치 운용환경에서 발생하는 외부 충격파를 차단하기 위하여 펄스전원장치는 3축 Wire Rope형 진동감쇠 부피 부착된 방진상자 내에 설치하여 운용할 예정이다.

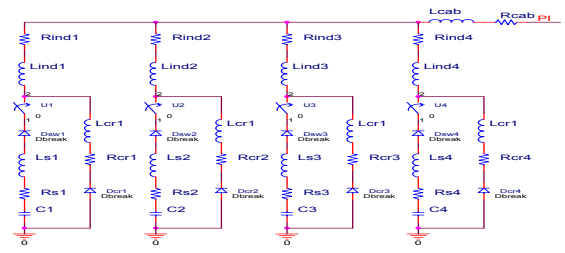


<그림 4> 150kJ 커패시터 펄스전원장치(4모듈 구성) 개념도

**2.3 모사실험 분석**

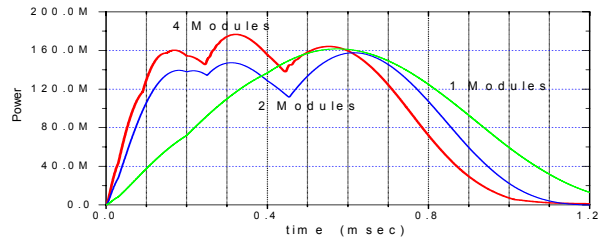
고집적 펄스전원장치 설계요구사항 충족을 위한 최적설계, 고효율화를 위하여 펄스전원장치 토폴로지를 다양하게 변화시키면서 Pspice 모사실험을 수행하였다. 스위치 1개를 사용하는 단단 L-C 사다리형 회로 및 단독모듈, 그리고 2모듈 또는 4모듈 병렬구성 등을 비교하였다. 부하는 플라즈마 발생기이며 전류크기에 반비례하는 시변 비선형 저항특성을 갖는다. 일반적으로 20~100mΩ 저항값을 갖는다. 본 연구에서는 Polyethylene 용발계를 사용한 직경5mm, 길이 30mm 모세관을 갖는 플라즈마 발생기 모델을 사용하였다. 단단 L-C 사다리형 회로는 구조가 복잡하고 L-C간 공진으로 효율이 50~60% 수준으로 매우 낮았다. 반면, 단독모듈, 2 또는 4모듈 병렬구조의 경우는 모두 80% 수준의 만족스런 결과를 얻을 수 있었다.

<그림5>는 4모듈로 구성된 펄스전원장치 회로이며 플라즈마 발생기 모델은 제외되어 있다. 모듈 개수가 감소할수록 커패시터가 병렬로 연결되기 때문에 인덕터를 제외한 저항, 인덕턴스 값은 감소하게 된다. 각각의 저항값은 목표효율 80%와 구성품 제작성을 고려하여 결정되었으며 향후 구성품 제작 목표값으로 사용할 예정이다. 커패시터스와 인덕터의 인덕턴스는 펄스전력 파형의 상승시간 목표치와 구형과 성형을 만족하도록 결정하였다. 4모듈 모두 충전전압을 동일하게 하였다.



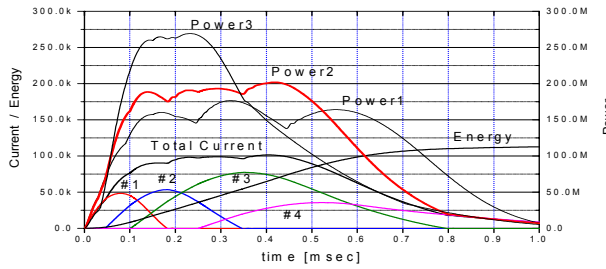
<그림 5> 4모듈로 구성된 펄스전원장치 회로도

<그림6>은 펄스전력 침투치 150MW 수준에서 모듈 개수 변화에 따른 펄스전력 파형을 비교한 결과이다. 모듈 개수가 증가할수록 펄스성형 정밀제어와 구성품 정격을 낮출 수 있는 장점이 있으나 구조가 복잡해지고 제어 신뢰성이 저하되는 단점이 있다. 단독 모듈의 경우 구형과 성형이나 상승시간을 충족할 수 없음을 알 수 있다.



<그림 6> 모듈 개수에 따른 펄스전력 파형 비교 : 충전전압 5kV

<그림7>은 4모듈 병렬 펄스전원장치의 펄스전력 침투치를 변화한 결과이다. 펄스전력 침투치를 150MW, 200MW, 250MW 수준으로 변화시켰다. 제시한 전류파형은 200MW 펄스전력 발생시 4모듈 각각의 전류파형과 전체가 합쳐진 부하전류 파형이다. 1번, 2번 모듈의 경우 파형 제어를 위한 인덕터가 불필요하다는 분석 결과를 얻을 수 있었다. 펄스전력 침투치를 변화하여도 전달에너지는 약120kJ 수준으로 유사하였으며, 충전전압은 5kV, 7kV, 11kV로서 펄스전력 침투치가 증가할수록 커패시터 충전전압도 증가하여야 한다.



<그림 7> 4모듈 펄스전원장치의 펄스전력 침투치 변화

**3. 결 론**

본 연구에서는 150kJ 에너지를 충전하여 150~250MW 구형과 펄스전력을 성형할 수 있는 차량탑재용 펄스전원장치개발 방안을 검토하였다. 본 연구결과는 고집적 펄스전원장치를 개발에 활용될 예정이다. 향후, 전자파 분포 해석을 통한 구성품 배치를 추가 검토하고, 구성 모듈 개수와 각각의 구성품 세부규격 목표치를 결정할 예정이다.

**[참 고 문 헌]**

[1] J. W. Jung, Y. H. Lee, K.S. Yang, J. S. Kim, J. H. Chu, "Overview of ETC Technology in Korea", IEEE Trans. on Magnetics, Jan. 2001, pp.39-41  
 [2] 김진성, 김성호, 이영현, 양정승, "추진제 접착용 플라즈마 인젝터의 특성 분석", 국방과학연구소 연구보고서, GSDC-419-041446, 2005. 1.  
 [3] G. Y. Sung, J. S. Kim, J. H. Chu, J. W. Jung, "Development of 2.4-MJ Capacitor Bank for Electrothermal Propulsion Technology", IEEE Trans. on PLASMA SCIENCE, Vol. 30, No. 5, Oct. 2002, pp.1789-1792