

**특집 : 펄스전원의 기술동향**

# 펄스파워시스템의 핵심부품 기술

송 병 문, Joel Ennis

(General Atomics Electronic Systems Inc., USA)

## 1. 서 론

지금까지 대용량 펄스파워 기술들은 대부분 군사분야인 미사일 Launcher, Aircraft Arrestor, 전자폭탄, 레이 및 레이저용 Gun 등에서 주로 연구 개발되어 사용해 오다가 정부주도의 원자력분야와 에너지분야에 이르기까지 널리 보급되었지만 일반인들에게는 매우 제한적인 기술분야였다. 그러나 소련의 붕괴 이후 미국의 주류 방위산업체들은 무기산업에서 적용하여 왔던 첨단 펄스파워기술들을 Demilitary화하여 의료분야, 반도체장비분야, Bio-Tech 분야로의 수요를 창출시킴으로써 새로운 큰 시장(Big-Market)을 형성하고 있다<sup>(1),(2)</sup>.

기술측면에서 보면 펄스파워를 응용한 기술들이 폭 넓게 잠재적인 시장을 확보할 가능성은 많지만 현재까지는 이 기술의 보급이 한계성을 지니고 있다. 그 이유는 펄스파워기술이 대량 생산보다는 대부분이 주문자 생산에 의해서 특수한 목적으로만 이루어졌기 때문에 제품의 표준화와 자동화가 미흡하게 되었다. 특히 일반 전원장치 산업과는 달리 사용전압을 사용하기 때문에 이로 인하여 요구되는 안전성의 확보가 우선 요구되고, 또 전원의 아킹(Arcing)으로 발생하는 문제로 인하여 특별한 실장기술이 요구되어 왔다. 그럼에도 펄스파워의 시장은 높은 부가가치를 창출할 분야로써 21세기의 커다란 기술 시장이라고 사료되며 선진국에서는 이를 위해 많은 기업들이 앞다투며 시장의 확대를 기대하며 연구개발에 많은 투자를 하고 있다.

펄스파워 시스템은 에너지 저장용 콘덴서, 에너지 흡수용 저항기, 대 전류용 퓨즈, 그리고 콘덴서 충전용 전원장치들로 구성되며 주로 부하조건에 따라 시스템의 특성이 결정되게 된다. 에너지 저장용 콘덴서 기술에 대하여는 에너지를 빨리 충전하고 방전할 수 있는 능력이 주 핵심이며, 이를 위해 각각의 콘덴서를 잘 표준화시켜서 최적의 형태로 실장(packaging)

할 수 있도록 설계하여야 한다. 또한 고 정밀 펄스를 얻기 위해서는 절연재료와 전극재료를 잘 조화시켜 제조함으로써 최적의 성능을 얻을 수 있게 된다<sup>(3)</sup>. 그 외에도 크기와 무게 그리고 가격을 줄일 수 있도록 새로운 기술이 요구된다. 에너지 흡수용 저항기(Energy-absorbing resistor)는 커다란 콘덴서뱅크나 저장용 콘덴서가 안전하게 방전할 수 있도록 전류제한을 위해 사용되고 있고, 또 대전류용 퓨즈(High current fuse)는 순간적인 수십 KA의 피크전류를 제한할 수 있도록 설계되어야 한다. 끝으로 콘덴서나 콘덴서 뱅크 충전용 고전압 전원장치는 펄스파워시스템의 핵심적인 부품으로서 부하에 따라 설계가 달라진다. 제어측면에서 보면 콘덴서가 부하이기 때문에 스위칭과 제어기술이 일반 전원장치와는 상이하게 다르다. 또한 고압에 따르는 노이즈, 높은 전압변환(High voltage conversion), 절연 및 냉각장치등 복합적인 요소들을 병행해서 설계되었을 때 그 성능을 발휘할 수 있게 된다<sup>(4)</sup>.

본 논고는 펄스파워시스템의 핵심 부품들의 기술적 특성을 파워펄스 산업을 주도하고 있는 미국의 General Atomics Electronic Systems Inc.(GA-ESI)사의 General Atomics Energy Products Division(GAEP, Maxwell Technologies 사를 2000년에 인수함)의 제품과 기술을 중심으로 논하고자 한다. 무엇보다도 현장실험을 통하여 얻어진 결과를 중심으로 에너지 저장용 콘덴서, 에너지 흡수용 저항기, 대 전류용 퓨즈, 그리고 콘덴서 충전용 전원장치들의 전기적특성과 연구방향에 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 펄스파워용 콘덴서(Charging Capacitor)

펄스파워용 콘덴서의 재료로는 오일내장용(oil-filled) 필름과 또는 종이 유전체가 널리 사용되고 있다. 특히 마이카 종이(Mica paper) 콘덴서가 군사 및 항공우주분야와 그리고 고온

응용분야에 널리 쓰이고 있다. 한편 세라믹(Ceramic) 콘덴서는 흔히 트리거 회로와 같이 에너지 저장에 매우 작은 분야에 일렉트로릭(electrolytic) 콘덴서는 주로 저전압 응용분야에 사용되고 있다. 이 장에서는 주로 대용량 펄스파워용 필름 콘덴서의 기술특성에 대하여 상세히 기술하고자 한다.

### 2.1 유효 사이클(Duty Cycle)

펄스파워용 콘덴서를 이해하는 데 있어서 유효 사이클은 매우 중요한 요소이다. 펄스파워 응용분야에서는 대부분이 폴스 폭이 좁기 때문에 유효 사이클(duty cycle)이 매우 낮고 그리고 단지 "Single-shot"란 개념으로 사용되어진다. 콘덴서를 제작할때는 응용분야에 따라 콘덴서의 재료(material)를 달리 사용함으로써 개발된다. 예를 들면 대형 의료장비(Medical Defibrillator)와 미 정부연구소에 있는 대용량 실험장 Physics Machine의 콘덴서의 경우에는 하루에 충전과 방전이 한번만 이루어지기 때문에 이 경우에는 셀프 열상승(Self-heating)을 무시하고 설계를 하게 된다. 그러므로 손실을 감수하면서도 가장 널리 이용되는 유전체 재료를 이용하여 콘덴서를 제작할 수 있지만 실제로는 주로 섬유성 종이(Cellulose paper)를 이용한 유전체 재료를 이용하여 콘덴서를 제작하고 있다. 한편 이동식 Medical Defibrillator와 같이 자주 사용되는 장비의 콘덴서는 열상승에 민감하므로 저손실용 Ferroelectric polymer polyvinylidene fluoride(PVDF)를 사용하여 콘덴서를 제작하여야 하고, 또 높은 permittivity 재료들을 사용하게 되면 콘덴서의 크기를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 가격을 낮출 수 있는 요인이 된다.

고속가속기분야와 같이 빠른 펄스의 반복 주기(High pulse repetition rate)가 요구되는 경우에는 셀프열상승을 고려하여 설계하여야 한다. 이 경우에는 일반적으로 Polypropylene 유전체재료를 사용하여야 한다. 그래야 열전달 길이를 최소화시킬 수 있고 알루미늄 호일(foil) 전극을 전기적인 그리고 열적인 도체로서 작동케하여 매우 높은 에너지밀도를 갖는 필름콘덴서를 얻을 수가 있다<sup>[1]</sup>.

### 2.2 수명(Lifetime)

펄스파워용 콘덴서의 수명은 일반적으로 "Shot" 또는 충전/방전 사이클 수에 의해서 결정된다. 제조기술 측면으로 보면 무엇보다도 콘덴서의 수명은 유전체에 인가된 전압의 강도와 유전체의 전기장(Electric field)의 세기에 따라 결정되며, 또 어떻게 유전체를 에이징(Aging)시키느냐에 따라 수도 결정된다. 그러므로 수명을 늘리기 위해서는 보다 두꺼운 유전체가 요구되며 실제적으로 체적과 무게가 큰 것일수록 수명이 길어지게 된다. 사용자 측면에서는 매 충전 사이클의 횟수와 과도 펄스방전수(Transient pulse discharge events)에 어떻게 운용하느냐에 따라 결정되기도 한다.

### 2.3 속도(Speed)

콘덴서의 방전의 속도는 펄스파워시스템의 성능에 매우 중요한 요소이기 때문에 콘덴서를 설계시 방전속도를 고려하여야 한다. 보통  $\mu s$ 정도의 빠른 특성을 갖은 방전 콘덴서는 기생인덕턴스를 최소화하도록 설계하여 하며 대략 수백 KA의 피크전류를 흘릴 수 있도록 설계하여야 한다. 한편 ms정도의 느린 특성을 갖은 콘덴서는 Vapor-doposited metetalization의 전극이 사용되어야 하며 대신에 셀프 힐링(Self-healing) 능력이 있어야 한다. 최근 대부분의 대용량 펄스파워 콘덴서의 연구개발은 방전이 빠르고 셀프 힐링을 갖는 10 - 100KV 콘덴서에 개발에 주력하고 있다.

### 2.4 전압(Voltage)

콘덴서의 동작전압은 콘덴서의 설계에서 가장 중요한 요소이다. 특히 고압 콘덴서인 경우에 수십 10kV에서 MV의 전압영역에서 동작하기 위해서는 단일 콘덴서로 제작하는 것이 아니고 많은 콘덴서들을 직병렬로 조합하여 인가전압을 높히게 된다. 여기서 각각의 콘덴서 전압이 foil 전극의 에지(edge) 부근에서 발생하는 전계 상승 때문에 하나 스택(stack)당 대략 10kV 정도로 제한하여 실장한다. 고압인 경우에는 각 층을 3~7 층으로 이루어진 유전체를 갖도록 설계하여야 하고 저압콘덴서에 대해서는 각 콘덴서 스택이 1~2 층으로 하여 매우 얇은 유전체를 갖도록 콤팩트하게 실장하여야 한다. 실제의 현장에서는 가장 낮은 전압의 응용분야에 대해서는 0.5 - 0.8 micron의 두께를 갖는 금속형 종이/폴리에틸렌 테레프탈레이트(Paper and Polyethylene Terephthalate, PET)가 널리 사용되고 있으며 1kV보다 낮은 전압의 분야에는 일렉트로릭(Electrolytic) 콘덴서가 사용되고 있다.

그림 1은 주문자생산으로 제작된 GAEP의 최신 고전압용 콘덴서의 외형사진을 보여주고 있다. 이 콘덴서는 4개의 15.6  $\mu F$ 가 내장되어 있으며 8.0 kV의 내압을 갖고 있다.

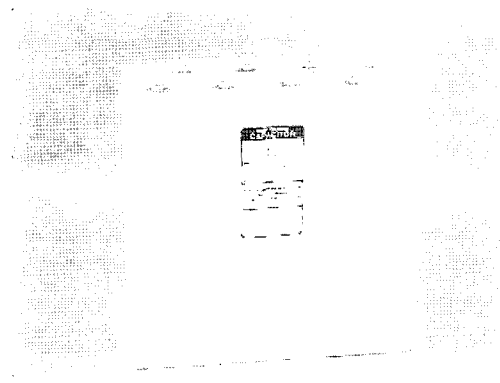


그림 1 GAEP에 의해서 제작된 고압콘덴서의 외형 (4 x 15.6  $\mu F$  - 8kV)

### 3. 고압용 저항기와 휴즈(Resistor and Fuse)

이 장은 에너지 흡수용 저항기와 휴즈에 대하여 간략히 기술한다. 이들 부품들은 일반적으로 충방전시에 전류제한을 목적으로 사용되며 특별한 재료나 실장기술이 없어도 부하의 전기적인 전압과 전류의 크기에 의해서만 결정된다.

#### 3.1 저항기(Resistor)

고압 에너지흡수용 저항기는 금속형 저항셀로 강한 프레임 틀에 실장되어야 하며 이들의 양쪽단자들이 각각 앵글 블라켓의 양면에 고정되어 단자 간에 분리되도록 설계되어야 한다. 표준화된 저항기의 프레임은 전압의 크기와 저항값에 따라 몇개 층으로 이루어지며 길이도 대략 6~48 인치에 이르기까지도 한다. 이 프레임은 저항기들을 지지하면서 전체적으로 시스템을 안정화를 추구하도록 설계되어야 한다.

저항기의 설계는 엘레멘트를 이루는 합금성분의 선정, 단면적, 길이, 폴더의 수(Turn-to-turn voltage gradient를 제어하기 위해)와 설치에 필요한 공간에 의해서 결정되어진다. 최근의 연구 동향은 어떻게 하면 낮은 인덕턴스를 갖고 또 작은 저항기를 만드느냐에 연구의 초점이 이루어지고 있으며 이와 병행해서 저항성이 높은 금속 합금, 고온 절연테이프 재료와 프레임에 대한 연구도 함께 진행되고 있다.

#### 3.2 휴즈(Fuse)

펄스파워용 휴즈들은 일반 상업용 퓨즈와는 달리 높은 전류 특성이 요구된다. 이들 휴즈들은 금속형 전선 엘레멘트들과 절연 플레이트간에 연결된 팬(Fan-folded)으로 구성되어 있으며 아아크(Arc)의 발생을 줄이기 위해 절연재료를 휴즈안에 삽입하도록 설계되어야 한다. 무엇보다도 동작할 수 있는 최대전압을 기준으로 하여 휴즈의 카트리지(Fuse cartridge)의 길이를 결정하고 또 흘릴 수 있는 와이어의 반경과 엘레멘트의 수를 설정하여야 한다. 동작범위를 넓히기 위해 멀티폴 휴즈를 사용하여 정상적인 휴즈동작 범위를 높여서 설계하는 것이 바람직하다.

최근의 연구개발은 휴즈의 실제 크기와 인덕턴스를 줄이는데 있고 또 고온에서 동작할 수 있도록 절연체와 내부 프레임간의 절연, 길이당 푸레시오버(Flashover)가 높은 카트리지 사용, 그리고 내부에 설치된 필터의 재료에 개발에 중점을 두고 연구가 진행되고 있다.

### 4. 콘덴서 충전용 전원장치 (Capacitor Charging Power Supply)

최근 콘덴서 충전용 전원장치의 기술개발은 스위칭 기술의 발달과 고효율 공진회로 개발로 인하여 다양한 응용분야에서

활용되고 있으며, 특히 레이저(Laser), 반도체공정을 위한 플래시 램프(Flashlamp), x-ray 발생기, 임펄스 발생기분야에서는 대부분 널리 이용되고 있다. 특히 이 전원장치는 부하로 연결된 콘덴서에 일정한 충전전류를 공급하며 충전전압, 캐패시턴스, 충전시간, 반복시간/유효 사이클 그리고 입력전압 조건에 따라 전원장치의 전기적 특성이 결정되게 된다. 그 외에도 펄스간의 반복성(Pulse-to-pulse repeatability), 정확성, 자체 고장진단기능 등을 고려하여 설계해야 한다. 이 장에서는 어떻게 전원장치를 설계하고 그리고 어떻게 전기적 특성을 결정하는 지에 대하여 기술하고 한다.

#### 4.1 파워정격(Power ratings)

펄스파워 전원장치의 파워정격 설정은 부하 조건로부터 출발한다. 먼저 파워시스템에 따라 필요한 충전 에너지량이 결정되면 충전에 필요한 콘덴서의 캐패시턴스가 결정되게 된다. 부하용 캐패시턴스가 결정된 후에 충전 파워(Charging power)를 지정된 충전시간내에 부하 콘덴서에 빨리 충전할 수 있도록 에너지 변환시간을(Time rate of change of energy)을 결정하여야 한다.

일반적으로 파워정격을 말할때는 두가지의 용어가 함께 사용된다. 하나는 피크파워(Peak power)이고, 다른 하나는 평균 파워(Average power)이다. 피크파워는 J/s(Joule per second)로 표현하며 캐패시턴스에 충전할 수 있는 최대 파워를 말하며 이 파워는 정전류로 콘덴서를 충전하는 동안에 최대전압이 인가되었을 때의 파워를 의미한다. 한편 평균파워는 현장에서 전원장치를 설계하고 제작하는 데 필요한 실제 크기와 부피를 결정하는 데 사용되는 단위이다. 일반적으로는 충방전의 데드시간(Dead time)과 휴지시간(Dwell time)을 고려하여 피크 파워정격의 반정도 이하에서 설정하여 설계를 한다.

그림 2는 펄스전원장치의 일반적 충전곡선을 보여주고 있다. 이 곡선은 일정한 전류로 콘덴서를 충전하는 전압과 충전 시간을 나타낸다. 피크파워 ( $P_{pk}$ )는 충전이 끝나는 시간 ( $t_c$ ) 시점에서 최대 충전전압 ( $V_0$ )이 얻어진다. 충전이 끝난 후에는 전원장치가 어느 정도의 휴지시간 ( $t_d$ )이 필요하다. 이 시간은 콘덴서가 완전히 충전된 후에도 일정한 전압을 유지하

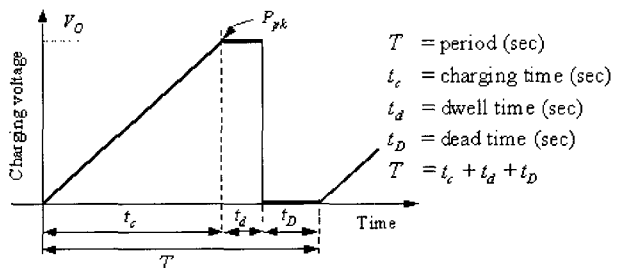


그림 2 일반적인 콘덴서 충전곡선

기 위해서는 약간의 에너지가 필요하므로 이 시간 동안에 일정한 전압을 공급하는 시간을 말한다. 또한 충전이 완료된 후에 전압장치의 출력을 정지시키는 데드시간 ( $t_d$ )이 필요하며 이것들을 조합하여 충전주기를 결정하게 된다.

충전곡선에서 휴지시간 ( $t_d$ )이 무시되는 경우에 최대 전압으로 충전되는 콘덴서를 생각해 보자. 이 경우에 충전시간은 부하용 콘덴서의 캐패시턴스와 출력 최대전압에 의해서 결정된다. 이때의 충전시간은 평균파워 정격에 의해서 쉽게 얻어진다.

$$t_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_o \cdot V_o^2}{P_{av}} [s] \quad (1)$$

여기서  $C_o$ 는 부하 콘덴서의 캐패시턴스,  $V_o$ 는 최대 충전전압을 나타낸다. 또한 피크전압 정격은 부하의 충전시간에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$P_{pk} = I_o \cdot V_o = 2 \cdot P_{av} = \frac{C_o \cdot V_o^2}{t_c} [W] \quad (2)$$

여기서  $I_o$ 는 최대 충전전압에서의 출력전류를 말한다.

#### 4.2 최대 반복주기(Maximum Repetition Rate)

펄스 전원장치의 최대 반복주기는 부하인 콘덴서에 저장된 에너지량에 따라 결정된다. 식 (3)은 그의 관계성을 나타내고 있다.

$$I_o = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_o \cdot V_o^2}{t_c} [A] \quad (3)$$

식(3)에서와 같이 부하의 콘덴서의 용량을 작게 할수록 펄스간 반복성(Pulse-to-pulse repeatability)을 높일 수 있으나 현재의 스위칭 기술로는 대략 2-4kHz 정도의 반복성을 갖는 장치들이 생산되고 있다<sup>(3)</sup>.

#### 4.3 출력전류(Output Current)

펄스전원장치에서는 부하의 콘덴서를 충전하기 위해서는 출력으로 일정한 정전류가 공급되어야 한다. 이때의 출력전류의 크기는 출력전압과 평균파워에 의해서 결정된다.

$$I_o = \frac{2 \cdot P_{av}}{V_o} \quad (4)$$

초기 충전에 있어서 콘덴서에 인가된 전압이 제로(Zero)이기 때문에 전원장치에서 공급하는 에너지도 또한 제로가 된다.

다. 충전이 시작되면서 콘덴서의 전압이 상승하여 정격전압(Full voltage)이 되었을 때 순시파워(Instantaneous power)는 피크가 되며 휴지시간이 무시되면 피크파워가 평균파워의 2배가 되게 된다.

#### 4.4 그외의 전기적 특성(Other Specifications)

위에서 기술한 주된 특성외에 필요한 전압 레귤레이션의 정도, 효율 및 역율, 외부에서 보호할 수 있는 인터락(Safety interlock)의 기능, 원격조정기능, 장치보호기능, 신호간의 인터페이스, 전선의 크기와 장치의 무게등 다양한 특성들이 결정되어야 한다.

#### 4.5 예(Example)

한 일례로 50kV급 콘덴서 충전용 10kJ/s 펄스파워 전원장치를 살펴보자. 표 1은 전원장치의 주요 전기적 특성을 나타내고 있다.

그림 3은 펄스전원장치의 출력전압과 인버터의 전류를 측정된 파형을 보여주고 있다. 충전방전동안에는 42.3nF의 부

표 1 50kV급 콘덴서 충전용 10kJ/s 파워 전원장치의 전기적 특성

Parameters	Specifications
Input voltage	208 VAC, 3ϕ
Peak input power	20 kW
Input efficiency	>90% @full power
Output voltage	0 - 50 kV
Output current	0.4 A
Average output power	10 kJ/s

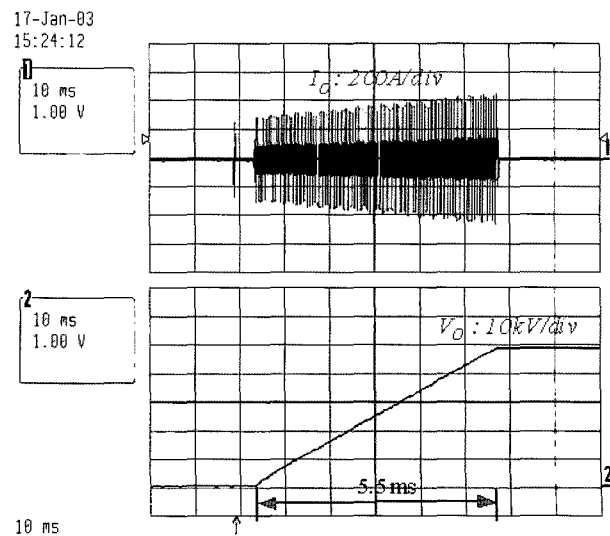


그림 3 펄스전원장치의 출력전압과 인버터의 전류파형

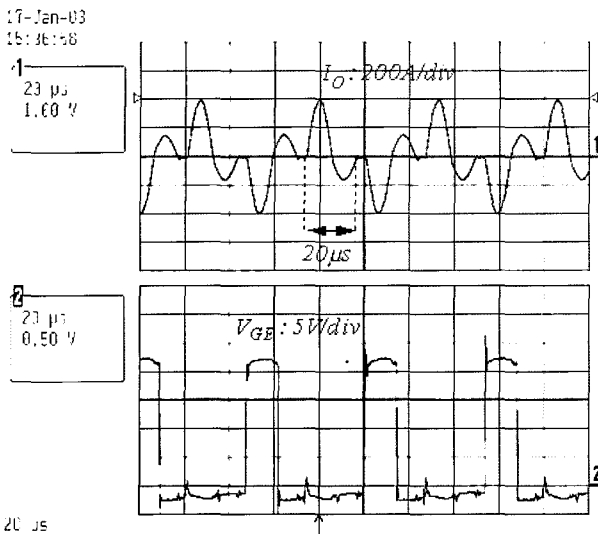


그림 4 공진회로에 흐르는 전류와 제어신호 파형

하용 콘덴서가 충전과 방전을 180Hz의 주기로 교대로 한다. 이때의 출력전압은 50kV로 유지되면서 출력전류는 300A에서 400A 까지 증가되기도 한다.

그림 4는 전원장치의 주된 회로로서 공진용 인버터회로가 널리 이용되는 데 공진회로에 흐르는 전류와 제어신호를 측정 한 파형이다. 일정 전류로 충전할 때 공진회로의 주파수가 50kHz로 설계되어 있으며 피크 공진전류는 400A로 설계되었다. 이 전류는 피이드백 제어기에 의해 내부적으로 조절되도록 설계되어 있다.

### 5. 결 론

이 논문은 펄스파워시스템을 이루는 주요부품들의 기술적 특성에 대하여 간략히 기술하였다. 특히 에너지 저장용 콘덴서, 에너지흡수용 저항기와 휴즈 그리고 펄스파워 전원장치에 대하여 기술하였으며 어떻게 이들 부품들이 주문자의 요구에 충족할 수 있는 가를 GA사의 기술을 토대로 고찰하였다. 지금까지의 펄스파워 응용기술들이 주문자의 요청에 따른 무기산업과 미 정부연구소 중심의 에너지산업 시장 중심으로 연구개발이 이루어져 왔지만 앞으로는 다양하게 반도체 장비산업, 바이오 산업 및 의료산업 시장에 이르기까지 다방면으로 확대될 무한한 잠재기능을 가질 것으로 예상된다. 특히 이 분야는 매우 부가가치가 다른 산업보다도 높기 때문에

한국의 기술여건상 세계시장을 선도할 수 있는 차세대의 핵심 기술분야의 하나가 되리라 기대된다.

### 참 고 문 헌

- (1) J. B. Ennis, B. M. Song, A. H. Bushnell, R. A. Cooper, J. Jichetti, F. MacDougall, R. McDowell, B. Andermatt, and J. Bates, "Custom Design of Components and Power Supplies for Pulsed Power Systems", Conf. Rec. of IEEE-IECON'2003, Nov. 2003, pp. 87-92.
- (2) J. B. Ennis, F. W. MacDougall, R. A. Cooper, J. Bate, and N. Ozkan "Recent Developments in Pulse Power Capacitors", in Conf. Rec. of 2nd International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications, Oct. 26-27, 2000, KERI, Korea.
- (3) "High Energy Capacitor Overview", General Atomics Energy Product Engineering Bulletin ([//www.ga-esi.com](http://www.ga-esi.com)), August 2002.
- (4) A. H. Bushnell, "Interfacing Pulsed Power Systems to Switching Power Supplies", in Conf. Rec. of IEEE International Power Modulator Conference, July 1-3, 2002 Hollywood, California, pp. 290-292.

### < 저 자 소 개 >



#### 송병문

1962년 8월 15일생. 충남대 전기공학과 졸업(학사, 석사). 1988년~1994년 한국전기연구원 연구원. 1994년 미국 Virginia Polytechnic Institute and State University(Virginia Tech, Blacksburg, Virginia)의 전기 및 컴퓨터공학과 (ECE) 졸업(공학박). 2000년~현재 General Atomics사에서 Staff Engineer. 현재 IEEE의 Senior Member, IEEE 전력전자관련 학회 Session Chair, 2004년 International Who's Who in Professional of the Member로 선정.



### Joel Ennis

Mr. Joel B. Ennis directs the engineering, marketing, and administration of the high voltage capacitor and power supply product lines at General Atomics Electronic Systems, Inc. (GA-ESI). These product lines were acquired from Maxwell Technologies by General Atomics in 2000 and then merged with GA-ESI, a GA affiliate company, in 2001. Under the tradename General Atomics Energy Products, the organization continues to develop new technology, engineer custom products, and manufacture high reliability hardware for pulse power applications. Amongst his many roles during 19 years with this organization, Mr. Ennis has served as Principal Investigator on several major energy discharge capacitor research and development programs, including Project Mile Run, which sought to develop novel dielectric materials. Mr. Ennis began his capacitor work at Hughes Aircraft Corporation after earning his Bachelor of Science in Physics from the California Institute of Technology in 1981.