

## Development of High Voltage and High Energy Density Capacitor for Pulsed Power Application

李秉潤\* · 鄭鎮敎\*\* · 李佑暎\*\*\* · 朴敬燁<sup>§</sup> · 李洙徽<sup>§§</sup> · 金榮光<sup>§§§</sup>

(Byeong-Yoon Lee · Jin-Kyo Chong · Woo-Young Lee · Kyong-Yop Park · Soo-Hwi Lee · Young-Kwang Kim)

**Abstract** - This paper describes high voltage and high energy density capacitor developed for pulsed power applications. The rated voltage of the developed capacitor is DC 22 [kV], the capacitance is 206 [ $\mu$ F] and the energy density is about 0.7 [kJ/kg]. Polypropylene film and kraft paper were used as the dielectrics. The ratio of the thickness of each dielectric material which consists of the composite dielectric structure, stacking factor and the termination method were determined by the charging and discharging tests on model capacitors. In terms of energy density, the developed capacitor has higher energy density compared with the products of foreign leading companies. In addition, it has been proved that the life expectancy can be more over 2000 shots through the charging and discharging test. The voltage reversal factor was 20%. This capacitor can be used as numerous discharge applications such as military, medical, industrial fields.

**Key Words** : high voltage, high energy density, capacitor, pulsed power, charging and discharging test, voltage reversal factor

### 1. 서 론

펄스파워용 고전압 커패시터[1-6]는 커패시터에 전기에너지를 저장하였다가 수 ms 정도의 짧은 시간 내에 방출된 전기에너지를 이용하는 펄스파워 기술 분야에 사용되는 것으로 최근 국내외에서 그 수요가 점차 증가하고 있다. 펄스파워용 고전압 커패시터의 적용분야는 크게 민수분야와 군수분야로 구분할 수 있다. 민수분야로는 건설 현장에서 사용되는 암반파쇄 전원장치, 노분말 제조설비의 전원장치, 전력기기의 절연성능시험에 사용되는 고전압 발생장치와 같은 시험설비, 핵융합 연구설비[7] 등이 있으며 군수분야로는 전투기, 인공위성, 여객기와 같은 비행체, 전자/전열화학포의 전원장치 등을 들 수 있다. 특히 기동성이 요구되는 이동장비의 경우에는 고에너지밀도의 펄스파워용 커패시터가 요구되고 있다.

선진 외국에서는 이미 90년대 초부터 펄스파워용 고전압 커패시터에 금속증착기술을 적용하여 고에너지밀도를 달성함으로써 세계 시장을 선점해 왔다. 현재 상업적으로는 약 0.6~0.7 [kJ/kg]의 에너지밀도를 갖는 제품 양산에 성공하

여 판매하고 있고 지속적으로 에너지밀도를 향상시키기 위한 연구를 수행하고 있으며 2030년경에는 현재의 약 40배에 달하는 약 30.0 [kJ/kg]의 초고에너지밀도를 갖는 펄스파워용 고전압 커패시터 개발이 가능할 것으로 전망하고 있다.

그동안 펄스파워용 커패시터의 고전압화는 폴리프로필렌(Polypropylene)과 같은 절연내력이 우수한 플라스틱 필름[8-11] 유전체의 개발로 가능하게 되었고 고신뢰도화와 고에너지밀도화는 유전체 두께를 수  $\mu$ m까지 가능하게 한 박막 제조기술과 유전체 필름표면에 아연, 알루미늄 또는 이들의 합금을 진공상태에서 200~300 [A] 두께로 증착시켜 전극으로 이용하는 금속증착기술에 의해 달성되었다. 이에 따라 과거 수십 년 동안 수  $\mu$ m 두께의 알루미늄 박막전극이 펄스파워용 커패시터에 사용되어 왔으나 점차 금속증착전극으로 대체되어 왔다. 특히, 이러한 변화는 금속증착전극형 커패시터의 주요 특징인 자기회복특성(Self Healing)[12-20] 기능으로 인해 커패시터용 유전체의 단위 두께 당 설계전계강도를 향상시킬 수 있었던 점에도 기인하고 있다.

한편 국내에서는 90년대 말까지도 일부 저압 커패시터에는 금속증착기술을 이용한 커패시터가 생산되었으나 고전압 커패시터에는 여전히 박막 전극을 이용한 역률조정용 고전압 커패시터만이 생산되었을 뿐이며 에너지밀도도 0.1 [kJ/kg] 미만으로 세계 수준에 크게 미치지 못했다. 결국 가격 경쟁력 뿐만 아니라 고에너지밀도화와 같은 기술 경쟁력에서 모두 선진 외국에 비하여 열세를 면치 못했기 때문에 펄스파워용 고전압 커패시터가 생산되지 않아 외국으로부터 전량 수입하여 사용되어 왔다. 더구나 펄스파워용 커패시터가 고성능 군수장비의 핵심부품으로 사용되면서 선진 외국

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員

\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 先任研究員

\*\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 責任研究員

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 新電力機器그룹 責任研究員

§§ 非 會 員 : 三和콘덴서 R&D Center 研究2팀 次長

§§§ 非 會 員 : 三和콘덴서 R&D Center 研究2팀 代理

接受日字 : 2003年 2月 26日

最終完了 : 2003年 4月 3日

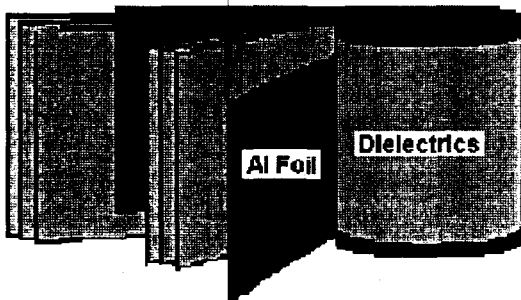
이 기술유출을 규제하는 품목으로 규정하여 기술이전을 기피할 뿐만 아니라 용도에도 제약을 가하는 등 국내 업체에게는 매우 취약한 기술 분야이었으며 사용자들에게는 커패시터의 공급이 원활하지 못한 상황이 지속되었다.

본 논문에서는 이와 같은 국내외의 현실을 직시하고 4년 여의 연구기간을 거쳐 개발에 성공한 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터의 설계기술, 제작기술 및 수명평가기술을 소개하고 그 결과를 제시하고자 한다.

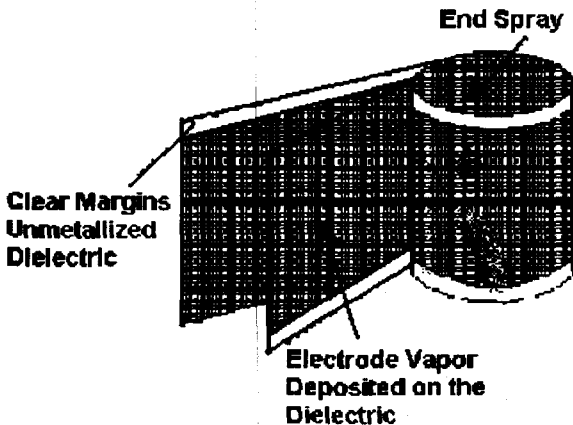
2. 펄스파워용 커패시터 설계기술

2.1 펄스파워용 커패시터 전극 구조

펄스파워용 커패시터의 대표적인 전극구조로는 박막전극 구조와 금속증착전극구조를 들 수 있다. 그림 1에 도시한 바와 같이 박막전극형 커패시터는 주로 재질이 Al인 수  $\mu\text{m}$  두께의 금속박과 수  $\mu\text{m}$ 내지 수십  $\mu\text{m}$  두께의 유전체를 겹쳐서 소요의 정전용량이 얻어지도록 길이와 폭을 결정하고 권취하여 제작하고 있다. 반면에 금속증착전극형 커패시터는 유전체 표면에 Al, Zn 또는 이들의 합금을 200~300 [Å] 두께로 증착시켜 전극을 형성하고 박막전극형 커패시터와 같이 소요의 정전용량이 얻어지도록 길이와 폭을 결정하고 권취하여 제작하고 있다. 표 1에 박막전극형 커패시터와 금속증착전극형 커패시터의 주요 특성을 비교하여 보았다.



(a) 박막전극 구조(foil type electrode structure)



(b) 금속증착전극 구조(metallized type electrode structure)

그림 1 펄스파워용 커패시터 전극 구조

Fig. 1 Electrode structure of capacitor for pulsed power application

표 1 전극구조에 따른 차이점

Table 1 Difference according to the electrode structure

구분 \ 전극구조	박막전극형 커패시터	금속증착전극형 커패시터
전극 재질	Al	Al, Zn, Alloy
전극 두께	수 $\mu\text{m}$	수 백 Å
Termination 방식	- Extended Foil Termination - Inserted Tap Termination	- End Spray Termination
Voltage Reversal Factor	100 [%]	20 [%]
에너지밀도	최대 0.3 [kJ/kg]	최대 1.0 [kJ/kg] (현재의 기술 수준)
기타 특성	소형화, 경량화, 고에너지밀도화 곤란	소형화, 경량화, 고에너지밀도화 가능

표 1에 제시한 바와 같이 박막전극구조를 이용한 커패시터의 경우, 현재 사용되는 유전체를 이용하여 달성할 수 있는 최대 에너지밀도가 약 0.3 [kJ/kg] 정도로 예상된다. 반면에 금속증착전극 구조 방식의 커패시터는 현재 상업적으로 약 0.6~0.7 [kJ/kg]의 에너지밀도를 갖는 제품이 이용 가능하며 1.0 [kJ/kg]의 에너지밀도를 갖는 커패시터도 개발 단계에 있는 것으로 보고 되고 있다. 따라서 에너지밀도가 높은 펄스파워용 커패시터를 개발하기 위해서는 금속증착전극 구조가 적합하다는 것을 알 수 있으며 본 연구에서도 이와 같은 방식을 선택하였다.

2.2 정전용량 설계[21,22]

일반적으로 커패시터는 소요되는 정전용량과 정격전압에 따라서 적당한 수의 단위소자를 직렬 또는 병렬로 접속하여 구성된다. 각 단위소자로는 커패시터 제조상의 편리성과 결선 후의 전압분담의 균일성 등을 피하기 위해 가능한 한 모두 등가의 소자를 이용되고 있다. 따라서 단위소자의 정전용량을  $C_e [F]$ , 병렬수를  $p$ , 직렬수를  $s$ 라 하면 커패시터 전체의 정전용량  $C$ 는 다음의 식(1)과 같이 주어진다.

$$C = \frac{p}{s} C_e [F] \tag{1}$$

여기에서 단위소체의 정전용량  $C_e$ 는 유전체의 비유전율을  $\epsilon$ , 유전체의 실효 폭을  $b [m]$ , 유전체의 길이를  $l [m]$ , 유전체의 두께를  $d [\mu\text{m}]$ 라고 하면 식(2)와 같이 주어진다.

$$C_e = \epsilon \epsilon_0 \frac{bl}{d\lambda H} [\mu F] \tag{2}$$

단,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율,  $\lambda$ 는 보정계수이며  $H$ 는 체부도에 따라 결정되는 값이다.

한편, 커패시터는 절연유를 포함하여 두 개 혹은 세 개의 유전율이 다른 복합 유전체구조로 설계되는 경우가 많기 때문에 복합 유전율을 평가해야 한다. 가령, 커패시터 전극 사이에 유전율과 두께가 다른 3개의 유전체가 직렬로 배치되어 있는 경우를 가정해보자. 이 때의 복합유전율을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 D}{d_1 \epsilon_2 \epsilon_3 + d_2 \epsilon_1 \epsilon_3 + d_3 \epsilon_1 \epsilon_2} \quad (3)$$

여기에서  $D = d_1 + d_2 + d_3$ 이다. 이와 같은 방법을 이용하여 복합유전체 구조의 복합유전율을 평가할 수 있으며 이 값을 정전용량 계산에 이용하면 된다.

### 2.3 연면 마진 설계

커패시터의 연면 마진은 그림 2에 보인 바와 같이 유전체 표면에 전극을 형성하기 위한 금속이 증착되지 않은 부분을 가리킨다. 이 부분은 커패시터의 설계에 있어서 연면으로의 절연파괴를 방지할 목적으로 절연거리를 확보하기 위해 마련해 둔 것이다. 이 연면 마진 부분이 너무 적으면 전극을 인출하기 위해 형성된 메탈스프레이(metal spray) 면과 증착 전극 사이, 또는 증착 전극 간에 연면절연파괴가 발생할 가능성이 매우 높아진다. 따라서 인가전압에 따라 연면 마진의 폭을 결정할 수 있는 설계 데이터가 요구된다. 본 연구에서는 이와 같은 데이터를 확보하기 위해 절연유중(S-Oil : 식물유) 및 기중에서 연면절연파괴 시험을 실시하여 그림 3과 같이 연면 마진에 따른 연면방전전압을 구했다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로는 유중과 기중에서 모두 직류 전압이 교류 전압에 비해 연면방전전압이 높았다. 또한, 연면 마진의 폭이 증가함에 따라 연면방전전압이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 실험적으로 구해진 데이터를 연면 마진의 폭을 결정하는데 이용하였다.

### 2.4 유전체 구조 설계

커패시터의 에너지밀도를 높이기 위해서는 무엇보다도 저 밀도, 고유전율, 고절연내력 등의 특성을 겸비한 유전체가 요구된다. 현재로서는 이러한 조건을 모두 만족하는 유전체는 아직 개발되어 있지 않지만 폴리프로필렌(Polypropylene)과 같은 절연내력이 우수한 플라스틱 필름 유전체의 개발로 고전압화가 어느 정도 가능하게 되었다. 그러나 폴리프로필렌 필름은 비유전율이 2.2 정도로 그다지 크지 않기 때문에 절연내력은 낮지만 비유전율이 약 6.0 정도인 크라프트지와 겹쳐서 펄스파워용 커패시터의 복합유전체 구조로 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 펄스파워용 커패시터의 고전압화, 고에너지밀도화, 장수명화를 달성하기 위한 유전체 구조를 결정하기 위해 유전체의 전체 두께에 대한 폴리프로필렌 필름의 두께 비율(Rd)이 각각 37 [%], 45 [%], 56 [%], 60[%], 80 [%], 100 [%]인 소형 모델 커패시터를 제작하여 충전 및 방전 시험을 수행하였다. 충전 및 방전시험은 커패

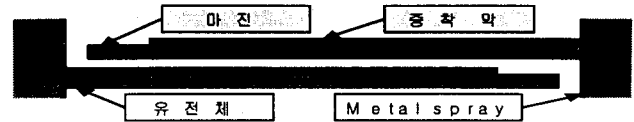


그림 2 커패시터의 연면 마진  
Fig. 2 Margin of Capacitor

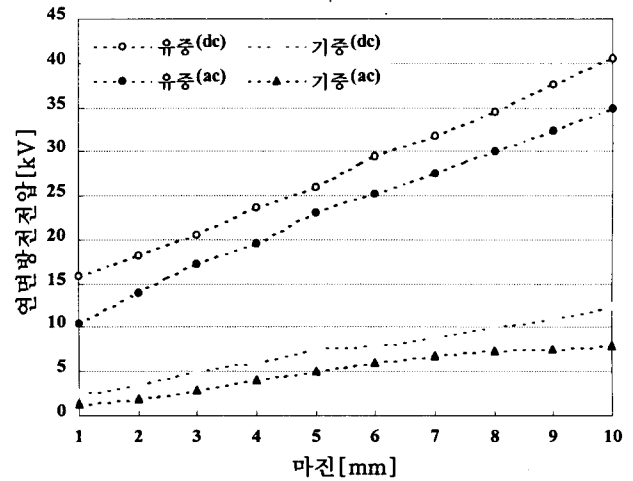


그림 3 기중 및 유중에서의 연면 마진과 연면방전전압 사이의 관계  
Fig. 3 The relationship between margin and surface discharge voltage in air and oil

시터에 대하여 충전전압을 설정하고 2000회의 충전 및 방전 시험을 수행한 후 커패시터에 이상이 없으면 충전전압을 상승시켜 다시 2000회의 충전 및 방전시험을 수행하는 식으로 진행하였다. 이와 같이 유전체의 단위 두께 당 인가되는 전위 경도를 변화시켜 가면서 각 충전전압에 대하여 충전 및 방전시험을 완료한 결과 Rd가 37 [%]와 60 [%]인 모델 커패시터가 단위 두께 당 인가되는 전위 경도가 가장 높게 나타났다. 그러나 에너지밀도 측면에서 비교를 해본 결과 Rd가 60 [%]인 모델 커패시터가 37 [%]인 것보다 약 20 [%] 정도 높았다. 따라서 본 연구에서는 Rd=60 [%]를 설계기준으로 설정하여 복합유전체를 구성하는 각 유전체의 두께를 결정하였다.

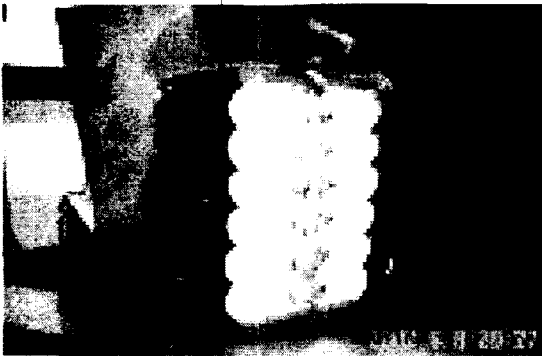
### 2.5 체부도 및 Termination

일반적으로 커패시터를 구성하는 단위 소자는 원통형의 Bobbin에 유전체를 권취한 후 커패시터의 체적을 감소시키기 위해 Bobbin을 제거하고 단단히 눌러서 Bobbin이 차지 하던 공간을 제거하고 있다. 이 때, 단위 소자를 누르는 정도를 체부도라고 하며 체부도를 나타내는 값이 작을수록 단위 소자를 더욱 단단하게 누른다는 것을 의미한다. 따라서 체부도를 작게 할수록 전극간의 거리가 감소하여 정전용량이 증가하게 된다. 체부도가 정전용량에 미치는 영향은 사전에 설계 인자를 도입하여 커패시터 설계 시에 반영하고 있다.

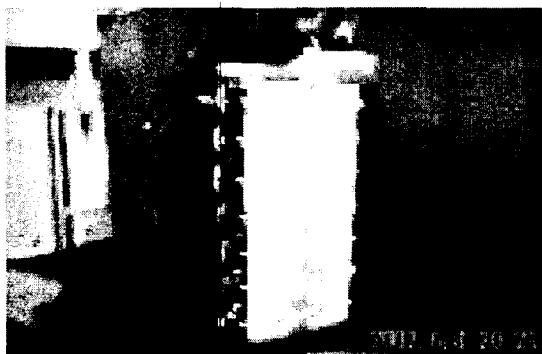
한편 Termination이란 권취하여 제작한 단위 소자로부터

전극을 인출하기 위한 과정을 의미하며 펄스파워용 커패시터는 일반적으로 그림 4에 보인 바와 같이 메탈 스프레이 (metal spray) 방식을 취하고 있다. 본 연구에서는 그림 4에서와 같이 전면 메탈스프레이 방식과 부분 메탈스프레이 방식을 각각 검토하였다.

체부도와 Termination 방식을 종합적으로 검토하기 위해 전면 메탈스프레이 방식으로 체부도가 100 [%]와 105 [%]인 모델 커패시터와, 부분 메탈스프레이 방식으로 체부도가 100 [%]와 105 [%]인 모델 커패시터를 제작한 후, 4 그룹으로 분류하여 충전 및 방전 수명 시험을 실시하였다. 그 결과 체부도가 105 [%]이고 부분 메탈 스프레이 방식으로 제작된 모델 커패시터가 가장 좋은 특성을 보였는데, 이것은 유전체 내부로 절연유의 침투 및 자기 소호 과정에서 발생한 가스 등의 배출이 용이하기 때문이라고 생각된다. 에너지밀도 측면에서도 전면 메탈스프레이 방식 보다는 커패시터 소자의 단말부 전극 인출용 금속의 양이 적게 소요되는 부분 메탈 스프레이 방식 쪽이 유리하기 때문에 본 연구에서도 이 방식으로 모델 커패시터를 제작하였다.



(a) 전면 metal spray방식(entire surface metal spray method)



(b) 부분 metal spray방식(partial surface metal spray method)

그림 4 metal spray 방식의 비교

Fig. 4 Comparison of method of metal spray

### 2.6 붓심 설계

그림 5의 좌측에 보인 붓심 형상이 기존에 사용하던 것으로 연면적거리가 69 [mm]로 약 DC 40 [kV]까지 적용 가능하였으나 볼트로 외부 도선과 체결하는 과정에서 비틀리는 힘이 작용하면 손상되는 경우가 발생하여 사용상 기계적

강도가 문제가 되었다. 따라서 사용전압을 높이고 기계적 강도를 향상시키기 위해서 그림 5의 우측에 보인 붓심 형상으로 개량 설계하였다. 이것은 연면적거리가 128 [mm]로 DC 70 [kV] 까지 사용 가능할 뿐만 아니라 기계적으로도 비틀리는 힘에 견딜 수 있도록 한층 강화되었다.

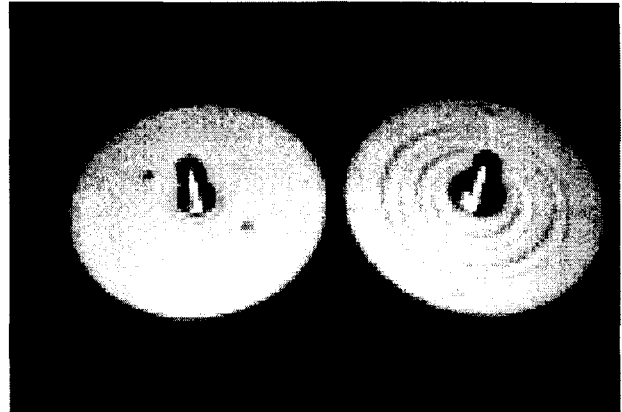


그림 5 붓심의 외관 비교

Fig. 5 Comparison of appearance of bushing

### 2.7 에너지밀도

에너지밀도는 에너지저장용 커패시터의 주요 평가 항목 중의 하나로 에너지를 얼마나 효율적으로 저장할 수 있는가를 나타내는 지표이다. 일반적으로 커패시터의 저장에너지  $E_s$ 는 정격전압  $V$ 와 정전용량  $C$ 가 주어지면 다음의 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$E_s = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4)$$

에너지밀도는 크게 단위중량당 저장에너지와 단위부피당 저장에너지로 평가되고 있다. 즉, 커패시터의 총중량을  $W$ 라고 하고, 커패시터의 총부피를  $V_t$ 라고 가정하면 무게와 부피에 대한 에너지밀도는 각각 식(5) 및 식(6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_w = \frac{E_s}{W} = \frac{CV^2}{2W} \quad (5)$$

$$E_v = \frac{E_s}{V_t} = \frac{CV^2}{2V_t} \quad (6)$$

여기에서  $E_w$ 와  $E_v$ 는 각각 중량에 대한 에너지밀도와 부피에 대한 에너지밀도를 나타낸다.

박막전극형 커패시터는 전극의 두께가 금속증착전극형 커패시터에 비하여 크기는 수백 배 정도 두껍기 때문에 전극 자체의 중량이 상당히 많이 나간다. 따라서 에너지밀도를 향상시키기가 매우 어렵다. 현재 판매되는 유전체를 이용하는 경우 현실적으로, 최대 0.3 [kJ/kg] 정도까지 달성할 수 있을 것으로 예상하고 있다. 반면에, 금속증착전극형 커패시

터의 경우에는 상업화 제품의 경우 약 0.7 [kJ/kg], 모델 커패시터의 경우는 약 1.0 [kJ/kg] 정도의 에너지밀도가 달성 가능하다.

한편, 아래의 표 2는 고전압 커패시터의 향후 에너지밀도 변화 추이를 보인 것으로 2030년의 경우 단위부피당 에너지 밀도가 65.0 [MJ/m<sup>3</sup>], 단위중량당 에너지밀도가 30.0 [kJ/kg] 까지 달성 가능한 것으로 전망하고 있다. 그러나 이와 같이 고에너지밀도를 갖는 고전압 커패시터를 개발하기 위해서는 저밀도, 고유전율, 고전계강도 특성을 갖는 신소재 유전체의 개발이 선행되어야 할 것이다.

표 2 향후 에너지밀도 변화 추이

Table 2 Trend of energy density in the future

년 도	2005	2015	2030
단위부피당 에너지밀도 [MJ/m <sup>3</sup> ]	1.5	13.0	65.0
단위중량당 에너지밀도 [kJ/kg]	1.5	6.0	30.0

### 3. 펄스파워용 금속증착전극형 커패시터 제조 공정

커패시터는 사용하는 유전체의 종류와 전극의 구조 등에 따라서 제조 방법이 다른데, 그림 6은 금속증착전극형 커패시터의 제작 공정을 보여주고 있다. 금속증착전극형 커패시터는 금속증착 필름 또는 금속증착 크라프트지를 소요되는 용량 및 전압이 얻어지도록 금속이 증착되지 않은 유전체와 증착시켜 권취하고, 건조시킨 후에 절연유에 함침시키는 구조로 사용재료의 대부분이 전극사이에 존재하기 때문에 사용재료의 특성 및 그 처리가 직접 기기 자체의 특성을 결정한다고 말해도 과언이 아니다. 그러므로 커패시터의 제조공정은 재료가 본질적으로 가진 뛰어난 특성을 어떻게 살려서, 수십 년 정도의 장기간에 걸쳐 유지시킬 수 있는가 라고 하는 관점으로부터 연구·검토하여 그 결과를 작업방법과 제조설비로 구체화시켜 확립되어 가고 있다.

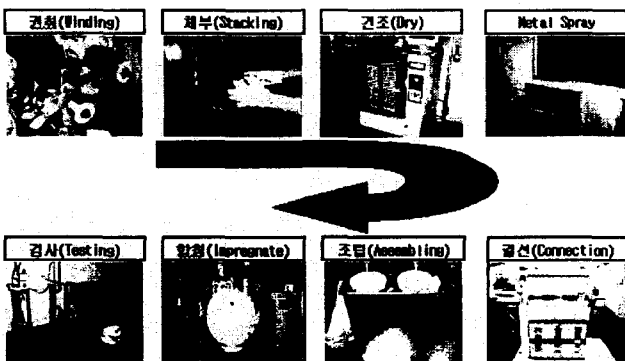
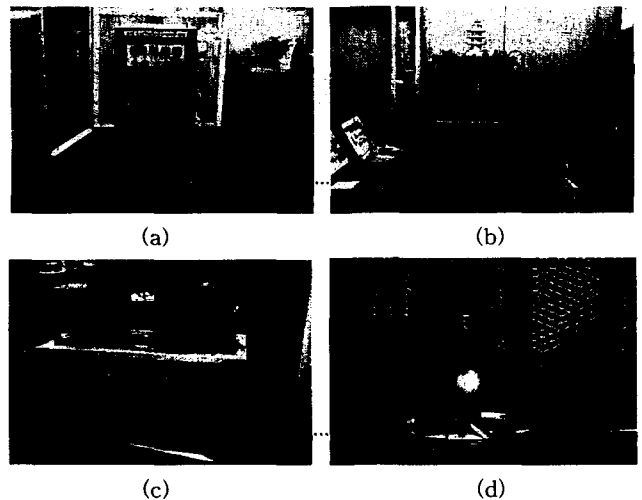


그림 6 금속증착전극형 커패시터 제조 공정  
Fig. 6 Manufacturing process of metallized electrode type of capacitor

### 4. 펄스파워용 금속증착전극형 커패시터 수명평가

#### 4.1 수명평가 시험 설비

그림 7은 커패시터의 수명을 평가하기 위한 설비의 주요 구성요소를 보여주고 있으며 그림 8은 시험회로도를 도시한 것이다. 수명평가의 주요 목적은 커패시터가 소요의 충전 및 방전 회수를 만족하는 가를 확인하는 것으로 최대 50 [kV]급 커패시터까지 시험이 가능하도록 제작하였다. 수명평가 설비는 크게 220 [V]의 단상 교류 전압을 단상 전파정류 장치를 거쳐 최대 50 [kV]까지의 직류전압으로 변경해주는 전원부, 커패시터를 충전시킬 때 사용되는 충전용 저항, 커패시터가 소요되는 충전전압으로 충전이 완료된 후 전원부로부터 차단하기 위한 단로스위치, 그리고 충전전압, 충전시간, 유지시간, 방전시간, 충전 및 방전 회수 등을 설정하기 위한 제어회로부, 방전용 200 [mΩ] 부하저항 4대, 방전용 부하 인덕턴스(20/40/80/120/160 [μH] Tab), 미세 조정용 부하인덕턴스(5/10/15/20/25/30/35/40/45/50 [μH] Tab), 소요되는 유지시간 종료 후에 방전을 개시하기 위한 신호를 출력하는 트리거 장치, 방전 구 갭 등으로 구성되어 있다. 또한 덤프 저항 및 덤프 스위치를 커패시터 양단에 설치하여 방전회로를 통한 방전이 실패한 경우라도 안전하게 커패시터에 저장된 에너지를 방출하도록 하였다.



(a) 제어회로(control panel)  
(b) 변압기(Transformer)  
(c) 부하저항 및 부하인덕터 (load resistor and load inductor)  
(d) 방전 구 갭 (sphere gap for discharge)

그림 7 50kV급 모델 커패시터 수명시험 설비  
Fig. 7 50kV class life test facility for model capacitor

#### 4.2 22 [kV] 206 [μF] 모델 커패시터의 수명 평가 시험

그림 9는 22 [kV] 206 [μF] 모델 커패시터의 외관도와 사양을 보인 것이다. 이것은 전열화학포의 전원장치에 실제로 사용되고 있는 커패시터와 동일한 사양으로 제작한 것으로 전극 구조는 금속증착 크라프트지에 폴리프로필렌 필름을 증착한 복합 유전체 구조로 구성하였으며 에너지밀도는 약

0.7 [kJ/kg]이다. 현재 선진 외국으로부터 수입되어 국내에서 사용되고 있는 상품의 에너지밀도가 0.6~0.7 [kJ/kg]인 점을 감안하면 거의 세계적 수준이라고 생각된다. 방전회로는 실제 사용 조건에 가깝도록 400 [mΩ]의 부하저항과 40 [μH]의 부하인덕턴스를 구 갭을 거쳐 커패시터와 직렬로 결선하여 구성하였으며 구 갭에 트리거 신호를 보내어 방전을 개시하였다. 커패시터는 정격인 22 [kV]의 전압으로 충전하였으며, 충전시간은 30 [sec], 유지시간은 10 [sec], 방전개시 후 재충전까지의 시간은 145 [sec]로 설정하여 총 2000회의 충전 및 방전시험을 수행하였다. 역전압은 20 [%] 이상 걸렸으며 방전전류의 최대치는 약 25.8 [kA]이었다. 그림 10은 방전시의 대표적인 전압 및 전류의 측정 파형을 나타낸 것으로 방전은 약 1 [ms]이내에 완료되며 방전전류의 주파수는 약 1.56 [kHz]이었다. 그림 11은 충전 및 방전 회수에 따른 정전용량의 변화 추이를 보인 것으로 전반적으로 큰 폭의 정전용량 감소를 보이는 부분을 찾아볼 수 없을 정도로 거의 평탄하다. 22 [kV] 206[μF] 모델 커패시터에 대한 충전 및 방전 시험을 종료한 후에 초기 정전용량 대비 정전용량 변화율을 산출한 결과 약 3 [%] 정도 감소한 것으로 드러났다. 일반적으로 금속중축전극형 커패시터의 경우, 2000회의 충전 및 방전 회수를 보장하고 있으며 초기 정전용량 값에 비하여 5 [%]이상 감소한 경우에 수명이 다한 것으로 간주하고 있으므로 위의 시험결과에 따르면 2000회의 충전 및 방전 시험에도 불구하고 여전히 사용 가능하다는 것을 확인할 수 있다[6].

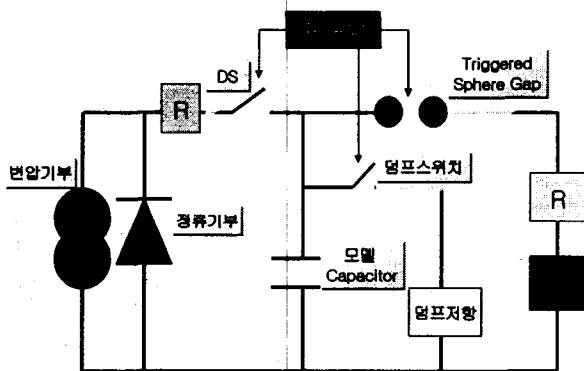
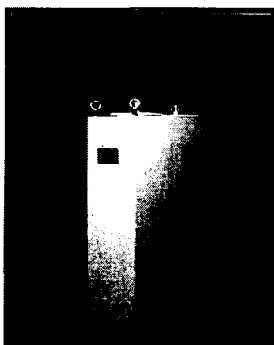


그림 8 50 [kV] 0.3 [A]급 수명시험설비의 회로도  
Fig. 8 Circuit configuration of 50 [kV] 0.3 [A] life test facility



정격	22kVDC 206μF
치수[mm]	430×175×670
중량[kg]	70.6
부피[cm <sup>3</sup> ]	50417.8
에너지밀도 [kJ/kg]	0.7
에너지밀도 [J/cc]	0.94
기대수명	2000회 이상

(a) 외관도(appearance) (b) 사양(specification)  
그림 9 22 [kV] 206 [μF] 모델 커패시터  
Fig. 9 22 [kV] 206 [μF] 0.7 [kJ/kg] model capacitor

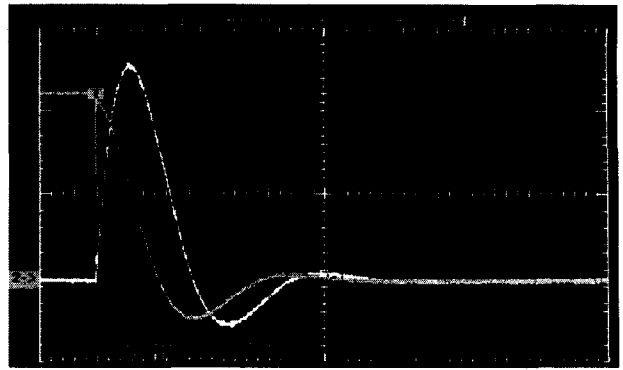


그림 10 방전 전압 전류 측정 파형  
Fig. 10 Measured discharging voltage and current wave forms

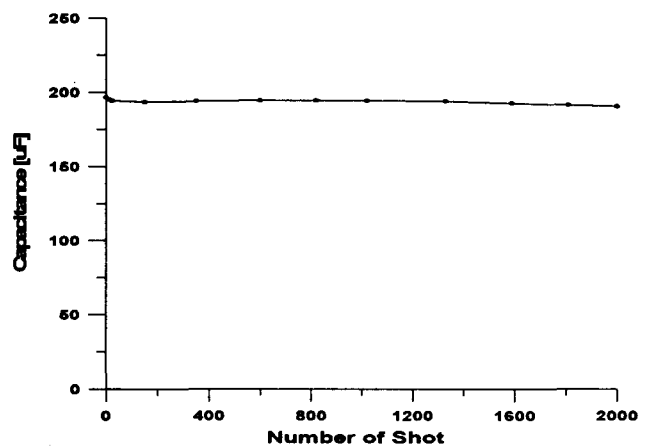


그림 11 정전용량 변화추이  
Fig. 11 Trend of change of capacitance

한편, 그림 12는 개발 제품의 외관을 비슷한 정격을 가진 선진 외국사의 제품들과 비교한 것이며 표 3은 단위 중량당 및 단위 부피당의 에너지밀도를 비교한 것이다. 표 3으로부터 본 연구에서 개발한 제품이 유사한 정격의 선진 외국 사들의 제품들에 비하여 동등 이상의 에너지밀도를 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

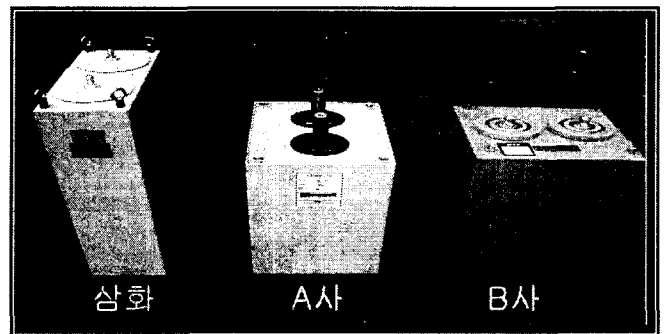


그림 12 개발 제품과 선진 외국사 제품과의 외관 비교  
Fig. 12 Comparison of appearances between developed capacitor and the products of foreign leading companies

표 3 개발 제품과 선진 외국사 제품과의 사양 비교

Table 3 Comparison of specifications between developed capacitor and the products of foreign leading companies

	삼화콘덴서	M사	T사
정격	22kVDC 206 $\mu$ F	22kVDC 206 $\mu$ F	22kVDC 209 $\mu$ F
치수[mm]	430×175×670	408×305×485	368×340×505
중량[kg]	70.6	83.7	76.4
부피[cm <sup>3</sup> ]	50417.8	60353.3	63185.6
에너지밀도 [kJ/kg]	0.7	0.6	0.66
에너지밀도 [J/cc]	0.94	0.83	0.80

5. 결 론

본 논문에서는 국내 독자기술로 설계 및 제작하고 수명평가 시험을 거쳐 신뢰성을 확인함으로써 개발한 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터에 대하여 기술하였다. 그리고 현재 상용화되어 있는 동급의 외국 제품과 비교하여 단위중량당 에너지밀도와 단위부피당 에너지밀도 측면에서 모두 개발된 제품이 앞서는 것으로 평가되었으며 그 비교 결과를 제시하였다. 개발된 커패시터의 주요 사양을 요약하면 정격전압이 22 [kV], 에너지밀도가 약 0.7 [kJ/kg], 충전 및 방전 수명이 2000회이다. 최근, 고전압 고에너지밀도 커패시터에 대한 국내외의 수요가 점차 증가하고 있는 점과 선진국들이 고전압 고에너지밀도 커패시터와 관련된 기술의 이전을 기피하고 있는 시점에서 본 연구 결과는 매우 의미하는 바가 크다 하겠다.

결국, 그동안 볼모지나 다름없었던 고전압 고에너지밀도 커패시터의 국산화 시대를 맞이하게 되었고 현재, 나노분말 제조장치 등의 민수 분야에 보급하고 있는 중이다. 특히, 고에너지밀도 커패시터를 각종 군수 분야에 적극적으로 활용할 수 있게 되어 선진국방을 위한 고성능 무기체계 개발은 물론 고부가가치 군사기술 및 장비의 수출 및 수입대체효과를 기대할 수 있게 되었다.

현재까지 약 0.7 [kJ/kg]의 에너지밀도를 달성하였으며 1.0 [kJ/kg]의 에너지밀도에 해당하는 모델 커패시터도 제품화를 위한 연구를 진행 중에 있다. 향후, 이들 커패시터에 대한 충전 및 방전 시험을 완료한 후 결과를 분석하고, 1.0 [kJ/kg]의 에너지밀도를 커패시터의 상업화를 달성하기 위해 필요한 보완 조치를 다각도로 검토하여야 할 것이다. 또한, 보다 고에너지밀도를 갖는 커패시터를 개발하기 위해서는 국내의 커패시터 제작 관련 설비투자, 신소재의 개발 등이 종합적으로 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지원 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행된 “고전압/초고용량 커패시터 개발” 과제의 연구 결과로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] J.B.Ennis, F.W.MacDougall, R.A.Copper, J.Bates, N.Ozkan, "Recent Developments in Pulse Power Capacitors", 2nd International Symposium on Pulsed Power and Plasma Applications, pp.24-29, 2001
- [2] Robert D. Parker, "Energy Storage Capacitors of Very High Energy Density", IEEE Trans. on Parts, Hybrids and Packaging, Vol PHP.13, No. 2, June, pp.156-165, 1977
- [3] Thomas H.G.G. Weise, Sigbert Jungblut, Frederick W. MacDougall, Xiao Hui Yang, "Characteristics and Performance of High Energy Density Capacitors Applied in the 30MJ Pulsed Power Supply System", 5th European Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Toulouse France April 10, 1995
- [4] Frederick W. MacDougall, Martin Hudis, Ronald Rice, Xiao Hui(Chip) Yang, "The Development and Performance of High Reliability, High Energy Density Pulsed Discharge Capacitors", Aerovox, 1996
- [5] "Metallized Electrode Capacitors for Pulsed Power Applications", Maxwell Capacitor Engineering Bulletin, 95-003
- [6] "General Information - Energy Storage Capacitors", Aerovox Group
- [7] D.W.Larson, F.W.Macdougall, X.H.Yang, P.E.Hardy, "The Impact of High Energy Density Capacitors with Metallized Electrode in Large Capacitor Banks for Nuclear Fusion Applications
- [8] 狩野順史, "コンデンサ用フィルムの 技術動向 ", OHM지, pp.36-40, 1988
- [9] 西松峯昭, " 直流送電用 直流コンデンサ 誘電体の 研究", Phd Paper, 1996, March
- [10] 鈴木速二의 2인, "フィルムコンデンサと その 使用事例", OHM지, pp.41-46, 1988
- [11] J.Samat의 4인, "The Development of Dielectric All-Film Capacitors and the Evaluation of Their Endurance", International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 15-06, 1986
- [12] D.G.Shaw, S.W.Cichanowski, A.Yializis, " A Charging Capacitor Technology - Failure Mechanism and Design Innovations ", IEEE Trans on EI Vol.16, No.5, 1981
- [13] "Charging Capacitors : Polarization and Leakage Currents", Maxwell Capacitor Engineering Bulletin

92-002, Maxwell Laboratories, Inc.

- [14] G.C.Montanari, D.Fabiani, "Searching for the Factors-which Affect Self-healing Capacitor Degradation under Non-sinusoidal Voltage", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.6 No.3, pp. 319-325, June 1999
- [15] W.J.Sarjeant, F.W.Macdougall, D.W.Larson, "Energy Storage in Polymer Laminate Structures-Ageing and Diagnostic Approaches for Life Validation", IEEE Electrical Insulation Magazine, pp.20-24, 1997
- [16] Y.Yoshida 외 6인, "Status Quo of Self-Healing Film Power Capacitors in Japan", International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 15-04, 1986
- [17] C.W.Reed, S.W.Cichanowski, "The Fundamentals of Aging in HV Ploymer-film Capacitors", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1 No. 5, pp.904-922, October, 1994
- [18] W.J. Sarjeant, "Capacitors", IEEE Trans on EI Vol.25, No.5, 1990
- [20] M.Nemamcha, J.P.Gosse, B. Gosse, "Discharges in All-PP Film Model Capacitors", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.28 No.3, pp. 315-323, June 1993
- [21] T. Longland 외, " Power Capacitor Handbook ", Mid-County Press, 1984
- [22] 大森武司 외, " 전력용 콘덴서 " 日新電氣株式會社, 1965

저 자 소 개



**이 병 윤(李秉潤)**  
 1967년 11월 9일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 졸업(석사). 1997년 동대학원 졸업(공학박). 1996년 2월~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹 선임연구원.  
 Tel : 055-280-1565, Fax : 055-280-1589  
 E-mail : bylee@keri.re.kr



**정진교(鄭鎭敎)**  
 1967년 10월 18일생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 선임연구원.  
 Tel:(055) 280-1564 , Fax:(055) 280-1589  
 E-mail : jkchong@keri.re.kr



**이우영(李佑暎)**  
 1957년 10월 2일 생. 1980년 경북대 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1982년~현재 한국전기연구원 신전력기기연구 그룹 책임연구원.  
 Tel:055-280-1572, Fax:055-280-1589  
 E-mail: wylee@keri.re.kr



**박경엽(朴敬燁)**  
 1957년 1월 3일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 전기공학과 졸업(공학박). 1978년 12월~1981년 5월 효성중공업(주) 전장설계부. 1981년 6월~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 신전력기기연구그룹 그룹장(책임연구원).  
 Tel : 0551-280-1561, Fax:055-280-1589  
 E-mail : kypark@keri.re.kr



**이수휘(李洙徽)**  
 1964년 3월 10일생. 1989년 광운대학교 전기공학과 졸업. 1998년 퓨즈 내장형 전력용 콘덴서 개발. 2002년 펄스파워용 금속중착전극형 고전압 고에너지밀도 커패시터 개발. 현재 삼화콘덴서공업주식회사 R&D Center 연구2팀장.  
 Tel : 031-330-5891, Fax : 031-339-0413  
 E-mail : shlee@samwha.com



**김영광(金瑩光)**  
 1973년 1월 28일생. 1999년 원광대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2002년 펄스파워용 금속중착전극형 고전압 고에너지밀도 커패시터 개발. 현재 삼화콘덴서공업주식회사 R&D Center 연구2 팀 연구원.  
 Tel : 031-330-5883, Fax : 031-339-0413  
 E-mail : gloria1973@hanmail.net