

펄스파워용 커패시터의 고에너지밀도화 기술 및 활용 분야

이병윤, 정진교, 이우영, 박경엽
한국전기연구원

Technology of High Energy Desity for Pulsed Power Capacitor and Its Applications

B. Y. Lee, J. K. Chong, W. O. Lee, K. Y. Park
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 펄스파워를 발생시키기 위한 에너지 저장장치의 하나로, 최근 국내외에서 사용이 증가하고 있는 고전압 커패시터에 대하여 금속증착기술의 적용, 절연설계, 체부도 및 단말부 처리기술 등에 의한 고에너지밀도화 기술과 활용 분야에 대하여 소개하고자 한다. 특히, 최근 국산화 개발에 성공한 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터에 대하여 선진 외국사제품과의 비교를 통해 국내 기술 수준을 살펴보고, 펄스파워용 커패시터의 고에너지밀도화에 대한 전망과 시장 규모 등에 대하여도 기술하고자 한다.

1. 서 론

본 논문에서는 펄스파워[1]를 발생시키기 위한 에너지 저장장치의 하나로, 최근 국내외에서 사용이 증가하고 있는 고전압 커패시터에 대한 고에너지밀도화 기술과 활용 분야에 대하여 소개하고자 한다. 먼저 각종 펄스파워용 에너지 저장방식에 대하여 간단히 소개하고, 에너지밀도에 대한 정의를 살펴보며 에너지 저장장치로서의 커패시터에 대한 고에너지밀도화 기술에 대하여 정리한다. 대표적으로 금속증착기술의 적용, 절연설계, 체부도 및 단말부 처리기술 등에 의한 펄스파워용 커패시터의 고에너지밀도화 과정을 기술한다. 특히, 최근 국산화 개발에 성공한 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터에 대하여 선진 외국사제품과의 비교를 통해 국내 기술 수준을 살펴보고 보완 및 개선해야 할 점 등을 검토해본다. 그리고 향후, 펄스파워용 커패시터의 고에너지밀도화에 대한 전망과 시장 규모 등을 알아보고 마지막으로 각종 활용 분야에 대한 소개로 마치고자 한다.

2. 펄스파워용 에너지 저장장치로서의 커패시터

펄스파워란 저출력 에너지원으로부터 에너지 저장장치에 에너지를 저장하고, 저장된 에너지를 스위칭 동작에 의해 파형발생장치를 거쳐 순간적으로 방출하여 부하에 펄스형의 에너지를 공급하는 것으로, 에너지의 시간적인 이용형태에 따라서 좁게는 $ns \sim \mu s$ 의 초고속 에너지 영역을 가리키는 경우가 많으나 넓게는 정상에너지 즉 전력계통에서 이용하고 있는 에너지를 제외한 모든 에너지를 펄스파워에 포함시킬 수 있다. 이 때, 에너지를 저장하는 방법으로 코일의 인덕턴스를 이용한 유도에너지 저장방식, 회전운동에너지를 이용한 저장방식, 화학에너지 저장방식과 본 고에서 다루고자 하는 고전압 고에너지밀도 커패시터를 이용한 정전에너지 저장방식 등이 있다. 에너지의 저장과 발생 관점으로부터 살펴본 비교를 표 1에 보인다.

에너지밀도는 펄스파워용 커패시터의 주요 평가 항목 중의 하나로 에너지를 얼마나 효율적으로 저장할 수 있는 가를 나타내는 지표이다. 일반적으로 커패시터의 저장에너

표 1. 에너지 저장시스템의 비교 요소

	정전 에너지	유도에너지		단극발전기	화학에너지
		상전도	초전도		
에너지저장 밀도 (J/m^3)	$10^4 \sim 10^5$	40×10^6	40×10^6	10^8	10^{10}
저장시간	분~시	초	분~시	분	-
방출시간	$0.1 \sim 10ms$	0.1 $\sim 10ms$	$\sim 1\text{초}$ $\sim \text{시간}$	$1 \sim 100ms$	0.1ms
가능한 저장 에너지	$\sim 60MJ$	$\sim 100M$ J	$\sim MJ$ $\sim \text{수GJ}$	$\sim 100MJ$	$\sim 100MJ$

지 Es 는 정격전압 V 와 정전용량 C 가 주어지면 다음의 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

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

에너지밀도는 크게 단위중량당 저장에너지와 단위부피당 저장에너지로 평가되고 있다. 즉, 커패시터의 총중량을 W_t 라고 하고, 커패시터의 총부피를 V_t 라고 가정하면 무게와 부피에 대한 에너지밀도는 각각 식(2) 및 식(3)를 이용하여 구할 수 있다.

$$E_W = \frac{Es}{W_t} = \frac{CV^2}{2W_t} \quad (2)$$

$$E_V = \frac{Es}{V_t} = \frac{CV^2}{2V_t} \quad (3)$$

여기에서 E_W 와 E_V 는 각각 중량에 대한 에너지밀도와 부피에 대한 에너지밀도를 나타낸다.

아래의 표 2는 펄스파워용 고전압 커패시터의 향후 에너지밀도 변화 추이를 보인 것으로 2030년의 경우 단위부피당 에너지밀도가 $65.0 MJ/m^3$, 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

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

3. 고에너지밀도화 기술

3.1 커판시터 전극방식에 의한 고에너지밀도화

펄스파워용 커판시터의 대표적인 전극방식으로는 박막 전극방식과 금속증착전극방식을 들 수 있다. 박막전극형 커판시터는 주로 재질이 Al인 수 μm 두께의 금속박과 수 μm 내지 수십 μm 두께의 유전체를 겹쳐서 소요의 정전 용량이 얻어지도록 길이와 폭을 결정하고 권취하여 제작하고 있다. 반면에 금속증착전극형 커판시터는 유전체 표면에 Al, Zn 또는 이들의 합금을 200~300 \AA 두께로 증착시켜 전극을 형성하고 박막전극형 커판시터와 같이 소요의 정전용량이 얻어지도록 길이와 폭을 결정하고 권취하여 제작하고 있다. 따라서 금속증착전극형 커판시터는 사용되는 전극의 양이 대폭 줄어들게 되어 커판시터의 무게를 감소시킴으로써 에너지밀도를 향상시키고 있다. 또한 금속증착전극형 커판시터는 절연파괴시에 박막전극형 커판시터와 같은 완전단락의 형태로 되지는 않는다. 이것은 자기회복특성에 기인한 것으로 금속증착전극형 커판시터의 경우 유전체에 절연파괴가 발생하더라도 일반적으로 자기회복을 반복하면서 파괴가 서서히 진전하기 때문이다. 이 사이에 절연유 등의 분해가스에 의해 내압이 상승하여 서서히 케이스가 변형된다. 이 케이스의 변위를 이용하여 전류 통로를 자체적으로 차단하는 안전장치를 내장하고 있는 것도 있다.

박막전극구조를 이용한 커판시터의 경우, 현재 사용되는 유전체를 이용하여 달성할 수 있는 최대 에너지밀도가 약 0.3 [kJ/kg] 정도로 예상된다. 반면에 금속증착전극 구조 방식의 커판시터는 현재 상업적으로 약 0.6~0.7 [kJ/kg]의 에너지밀도를 갖는 제품이 이용 가능하며 1.0 [kJ/kg]의 에너지밀도를 갖는 커판시터도 개발 단계에 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 에너지밀도가 높은 펄스파워용 커판시터를 개발하기 위해 서는 금속증착전극 구조가 적합하다는 것을 알 수 있다.

3.2 절연설계에 의한 고에너지밀도화

커판시터의 절연설계는 연면절연설계와 관통절연설계로 나눌 수 있는데 이를 각각 대하여 살펴보기로 한다. 먼저, 커판시터의 연면절연설계에서는 연면 마진을 결정하게 되는데 연면 마진이란 그림 1에 보인 바와 같이 유전체 표면에 전극을 형성하기 위한 금속이 증착되지 않은 부분을 가리키는 것으로 연면으로의 절연파괴를 방지할 목적으로 절연거리를 확보하기 위해 마련해 둔 것이다. 이 부분이 너무 적으면 전극을 인출하기 위해 형성된 메탈스프레이(metal spray) 면과 증착 전극 사이, 또는 증착 전극 간에 연면절연파괴가 발생할 가능성성이 매우 높아진다. 따라서 인가전압에 따라 연면 마진의 폭을 결정할 수 있는 설계 데이터가 요구된다. 이와 같은 데이터를 확보하기 위해 절연유중 및 기중에서 연면절연파괴 시험을 실시하여 연면 마진에 따른 연면방전전압을 구했으며 이와 같이 실험적으로 구해진 데이터를 연면 마진의 폭을 결정하는데 이용하고 있다.

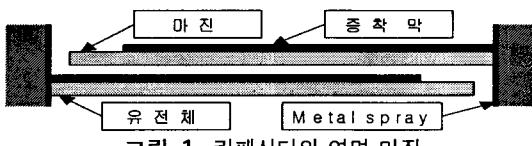


그림 1. 커판시터의 연면 마진

다음으로는 관통절연설계로 유전체의 단위 두께 당 절연내력을 설계하는 단계이다. 커판시터의 에너지밀도를 높이기 위해서는 무엇보다도 저밀도, 고유전율, 고절연내력 등의 특성을兼비한 유전체가 요구된다. 현재로서는 이러한 조건을 모두 만족하는 유전체는 아직 개발되어 있지 않지만 폴리프로필렌(Polypropylene)과 같은

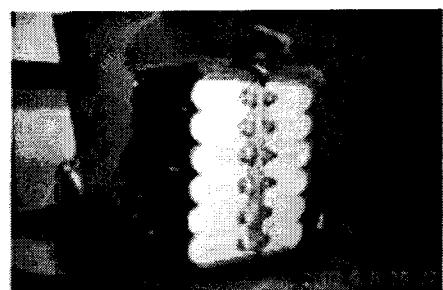
절연내력이 우수한 플라스틱 필름 유전체의 개발로 고전압화가 어느 정도 가능하게 되었다. 그러나 폴리프로필렌 필름은 비유전율이 2.2 정도로 그다지 크지 않기 때문에 절연내력은 낮지만 비유전율이 약 6.0 정도인 크라프트지와 겹쳐서 펄스파워용 커판시터의 복합유전체 구조로 널리 이용되고 있다.

펄스파워용 커판시터의 고전압화, 고에너지밀도화, 장수명화를 달성하기 위한 유전체 구조를 결정하기 위해 유전체의 전체 두께에 대한 폴리프로필렌 필름의 두께 비율을 변화시킨 다수의 소형 모델 커판시터를 제작하여 충전 및 방전 시험을 수행하였다. 충전 및 방전시험은 커판시터에 대하여 충전전압을 설정하고 2000회의 충전 및 방전시험을 수행한 후 커판시터에 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 결과로부터 절연내력과 에너지밀도 측면에서 모두 우수한 유전체 두께 비율을 결정하였다.

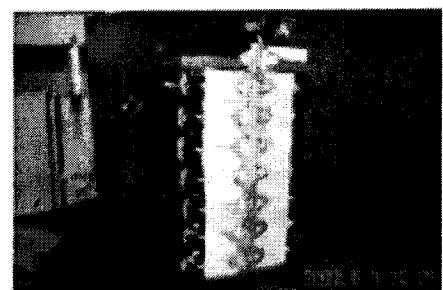
3.3 체부도와 단밀부처리기술에 의한 고에너지밀도화

일반적으로 커판시터를 구성하는 단위 소자는 원통형의 Bobbin에 유전체를 권취한 후 커판시터의 체적을 감소시키기 위해 Bobbin을 제거하고 소자를 단단히 놀려서 Bobbin이 차지하던 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 커판시터 설계 시에 반영하고 있다.

한편 Termination이란 권취하여 제작한 단위 소자로부터 전극을 인출하기 위한 과정을 의미하며 펄스파워용 커판시터는 일반적으로 그림에 보인 바와 같이 메탈 스프레이(metal spray) 방식을 취하고 있다. 본 연구에서는 그림 2에서와 같이 전면 메탈스프레이 방식과 부분 메탈스프레이 방식을 각각 검토하였다.



(a) 전면 metal spray 방식



(b) 부분 metal spray 방식

그림 2. metal spray 방식의 비교

체부도와 Termination 방식을 종합적으로 검토하기 위해 전면 메탈스프레이 방식과 부분 메탈스프레이 방식 각각에 대하여 체부도를 변화시켜가면서 모델 커패시터를 제작한 후, 충전 및 방전 수명 시험을 실시하였다. 그 결과 충전 및 방전 수명 특성이 우수하면서 에너지밀도를 향상기킬 수 있는 최적의 체부도와 Termination 방식을 결정하였다. 참고로 부분 메탈 스프레이 방식으로 제작된 모델 커패시터가 전면 메탈스프레이 방식의 커패시터 보다 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.

4. 국내기술현황 및 향후 전망

국내에서도 과학기술부 민군겸용기술개발사업의 일환으로 1998년 말부터 4년여의 연구기간을 거쳐 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터 개발에 성공하였다 (2). 그럼 표 3은 개발된 22kV 50kJ 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터의 외관을 동급의 선진사 제품과 비교한 것이고 표 3은 에너지밀도 측면에서 비교한 것이다. 표 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 개발된 제품이 외국의 선진사 제품과 비교하여 단위중량당 및 단위부피당 에너지밀도 측면에서 모두 우수한 것으로 드러났다.

현재, 에너지밀도 측면에서는 0.7kJ/kg까지 상업화가 완료되었으며 1.0kJ/kg의 경우는 상품화를 위한 연구를 진행하고 있다. 전압의 경우는 단일품으로는 최대 125kV까지 생산한 실적이 있다.

최근, 고전압 고에너지밀도 커패시터에 대한 국내외의 수요가 점차 증가하고 있는 점, 점단군수장비에의 응용으로 선진국들이 고전압 고에너지밀도 커패시터와 관련된 기술의 이전을 기피하고 있는 점에 비추어 볼 때, 고전압 고에너지밀도 커패시터의 국산화 개발은 그 의미가 매우 크다고 할 수 있겠다.

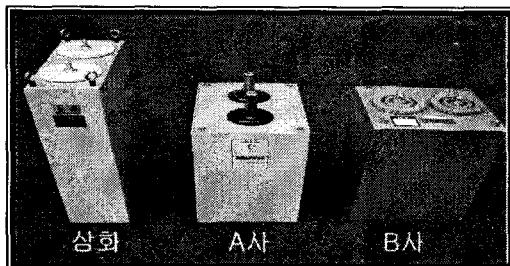


그림 3. 국내외 동급 커패시터의 외관 비교도

표 3. 국내외 동급 커패시터 제품의 에너지밀도 비교

	삼화콘덴서	M사	T사
정격	22kVDC 206f	22kVDC 206f	22kVDC 209f
치수(mm)	430×175×670	408×305×485	368×340×505
중량(kg)	70.6	83.7	76.4
부피(cm ³)	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. 주요 활용 분야

펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터가 활용되고 있는 대표적인 분야를 정리하면 다음과 같다.

- 전설 분야

- 암반발파장치의 전원용

- 연구 분야

- 고전압 발생장치

- 전력계통에서 사고 발생시 고장전류를 차단하기 위한 전력용 차단기 성능평가 시험 설비

- 낙뢰에 의해 전력계통에 침입하는 뇌씨지 억제용 피뢰기 시험설비

- 핵융합 장치용 캐퍼시터 뱅크

- 초강자장 발생장치

- 전자기속기

- 유전자 조작 연구 설비

- 산업 분야

- 나노 분말 제조 장비의 전원장치

- 자석을 만드는 착자기술 분야의 전원장치

- 의료분야

- 의료기기의 전원장치

- 군수 분야

- 비행체(전투기, 인공위성 등)

- 전열화학포

- 레이저/레이더 등 각종 고성능 군수 장비의 전원장치

6. 결 론

본 논문에서는 국내 독자기술로 설계 및 제작하고 수평평가 시험을 거쳐 신뢰성을 확인함으로써 개발한 펄스파워용 고전압 커패시터에 대한 고에너지밀도 기술에 대하여 살펴보았다. 그리고 현재 상용화되어 있는 동급의 외국 제품과 비교하여 평가한 결과, 단위중량 당 에너지밀도와 단위부피당 에너지밀도 측면에서 모두 개발된 제품이 앞서는 것으로 확인되었다. 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 불모지나 다름없었던 고전압 고에너지밀도 커패시터의 국산화 시대를 맞이하게 되었고 현재, 나노분말 제조장치와 암반발파장치 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 0.7kJ/kg의 에너지밀도를 갖는 커패시터의 상품화에 성공하였으며 1.0kJ/kg의 에너지밀도에 해당하는 모델 커패시터도 상품화를 위한 연구를 진행 중에 있다. 향후, 이를 커패시터에 대한 충전 및 방전 시험을 완료한 후 결과를 분석하고, 1.0kJ/kg의 에너지밀도를 커패시터의 상업화를 달성하기 위해 필요한 보완 조치를 다각도로 검토하여야 할 것이다. 또한, 커패시터의 ESR(Effective Series Resistance) 및 ESL(Effective Series Inductance) 저감 기술을 확보하고 보다 고에너지밀도를 갖는 커패시터를 개발하기 위해서는 국내의 커패시터 제작 관련 설비투자, 신소재의 개발 등이 종합적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

[1] 柳父悟, “パルスパワー技術とその應用”, Ohm사, 1992

[2] “고전압/초고용량 캐퍼시터 개발”, 과학기술부 민군겸용기술개발사업 보고서, 2002