

# Thin Film capacitor의 연구 동향

이 병 윤

(전기연구원 선임연구원)

## 1. 서 론

전기회로는, 저항(R), 인덕턴스(L), 커패시턴스(C)에 의해서 구성되는데 커패시터는 그 가운데, 커패시턴스를 집중정수로서 갖는 전기기기이다. 커패시터의 기능은 이 커패시턴스가 원래 갖는 여러 가지의 전기적 성질을 활용함으로써 얻어지는 것으로 다음과 같이, 그 성질에 따라 여러 가지 용도로 이용되고 있다.

(1) 교류전압을 가하는 경우, 흐르는 전류위상이 90° 앞서는 성질

이것은 역률 개선과 조상용으로서 현재, 가장 많이 이용되고 있는 성질이다. 이 성질은 바꾸어 말하면 커패시터는 음의 리액턴스를 갖는다. 즉 인덕턴스를 상쇄시키는 성질을 갖는다고 하는 것으로, 커패시터를 선로에 직렬로 삽입하여 사용함으로써 전압강하를 보상하거나 전압변동을 경감시키거나 또는 송전용량의 증대를 피하는 것이 가능하다.

(2) 리액턴스가 주파수에 반비례하는 성질

이 성질을 활용하면 써지 흡수효과를 얻을 수 있으며, 또 리액터와 조합시켜서 필터설비를 구성하여 고조파의 흡수효과를 얻을 수 있다.

(3) 직류전압을 가한 경우, 전하를 축적하는 성질

이 성질을 활용하면 축적된 전하를 방전시켜서 충격전압과 충격전류를 얻을 수 있다.

(4) 그 외의 성질

위와 같은 성질들 외에 리액턴스를 고정시켜 분압기로서 사용하는 예 등이 있다.

위에서 기술한 바와 같이 커패시터는 여러 가지 성질을 가

진 중요한 전기기기의 하나로 각각의 성질을 활용하여 여러 용도로 이용되고 있다.

그동안 커패시터는 신뢰성의 향상, 소형화, 저손실화 등을 달성하기 위해 많은 노력을 기울여 왔는데, 전극 측면에서는 금속증착전극 기술의 이용, 유전체 측면에서는 폴리프로필렌과 같은 플라스틱 필름의 이용 등을 들 수 있다. 본 고에서는 응용분야 측면에서 Thin Film 전력용 커패시터와 Thin Film 펄스파워용 커패시터로 나누어 위와 같은 기술 동향을 소개하기로 한다.

## 2. Thin Film 전력용 커패시터의 기술동향

OF(Oil Filled)식 전력용 커패시터는 1933년에 일본에서 개발 및 실용화되었다. 이 OF식 커패시터는 커패시터의 내부가 공기와 직접 접촉하지 않도록 고안한 것으로 전력용 커패시터의 보수가 용이하다.

당초, 커패시터의 유전체는 절연지와 광물유를 조합시킨 것이었는데, 이후, 신뢰성의 향상, 소형화, 저손실화 등을 위해 여러 측면에서 개선이 가해졌다. 또, 최근에는 지구의 환경을 고려한 불연성 커패시터가 개발되고 있다. 여기에서는, 유입식 커패시터용 유전체 구성의 변천과 커패시터의 난연화 및 불연화의 변천에 대하여 소개한다.

### 2.1 유입식 커패시터 유전체 구성의 변천

그림 1에 각종 유입식 커패시터의 유전체 구성을 보인다.

#### 2.1.1 절연지 커패시터

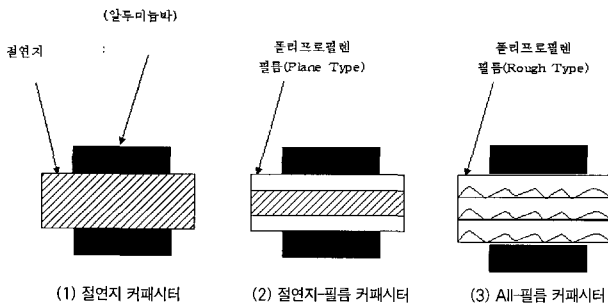


그림 1 유입식 커패시터 유전체 구성의 변천

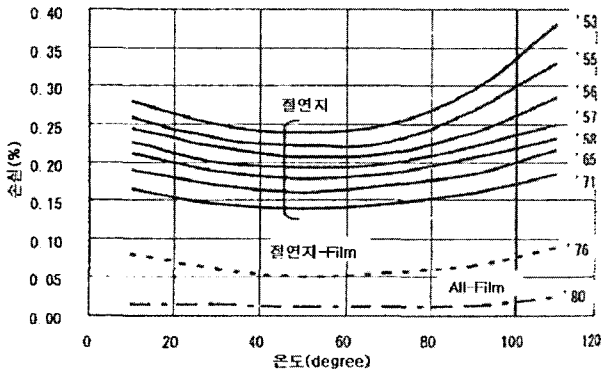


그림 2 유입식 커패시터의 손실-온도 특성의 변천

당초에는 고압 케이블용 절연지를 얇게 제작한 크라프트지와 광물유가 사용되었다. 그 후, 절연지에 함유된 불순물의 영향이 분석되면서 수지분등을 제거하여 유전특성을 크게 개선시켰다. 손실 - 온도 특성의 예를 그림 2에 보인다. 또한, 절연유도 광물유로부터 보다 유전율이 크고 불연성의 특성을 가진 폴리염화페닐이 사용되게 되었다.

### 2.1.2 절연지 - 필름커패시터

절연지로는 전기적인 특성을 개선시키는데 한계가 있었기 때문에, 손실이 작고, 절연내력이 뛰어난 플라스틱필름의 적용이 검토되어 일본에서는 1967년에 진상용 커패시터로서 실용화 되었다. 절연지 - 필름커패시터용 절연유로는 폴리염화페닐이 사용되었으나 1972년의 규약 이후 알킬나프탈렌 등의 방향족계 탄화수소유로 전환되었다.

### 2.1.3 All - 필름커패시터

절연지 - 필름커패시터의 경우는 절연유의 함침성을 향상시킬 목적으로 절연지를 필름에 삽입하였으나, 손실 측면에서는 절연지를 사용하지 않는 쪽이 바람직하다. 이를 위해, 유전체를 모두 필름으로 구성하되 어떻게 하면 소자내부까지

절연유를 침투시킬 수 있는가라고 하는 측면에서 검토가 이루어졌다. 그 결과 필름 표면과 전극용 알루미늄박 표면을 거칠게 하는 등의 연구에 의해 일본에서는 1974년에 All - 필름 커패시터가 실용화 되었다. 그 결과, 그림 2에 보인 것처럼, 초기의 절연지 커패시터에 비하여 손실이 약 1자리 정도 개선되었다.

또 최근에는 이 All - 필름커패시터의 알루미늄박 전극 대신에 절연지에 금속을 증착하여 전극으로서 사용하는 절연유 함침 자기회복형의 커패시터도 사용되고 있다. 증착전극이 매우 얇기 때문에, 유전체의 일부에서 절연파괴가 발생한 경우, 파괴점 근방의 미소면적의 증착금속이 소실되어 순간적으로 절연성능을 회복하는 기능을 가지고 있다.

### 2.1.4 커패시터의 난연화 및 불연화의 변천

전력용 커패시터에 사용되는 절연재료는 탈기 및 탈습처리가 되고, 커패시터의 케이스도 완전 밀봉구조이므로 그 특성이 장기간에 걸쳐 안정하게 유지되어 신뢰성이 매우 높다. 그러나 사용 중에 가해지는 과전압과 열에 의한 스트레스, 사용 환경 조건 등에 의해 성능이 떨어져 절연파괴에 이르는 경우도 없지는 않다. 유입식 커패시터의 경우, 만일 이와 같은 고장이 발생하면, 절연유가 분해, 가스화하고 내압상승에 의해 케이스 파괴되며 최악의 경우에는 화재에 이르는 경우가 있다. 이와 같은 사고를 미연에 방지할 목적으로 내부압력 상승으로 동작하는 보호접점 등을 설치하고 있으나, 화재가 발생할 가능성이 있기 때문에, 방재성이 강하게 요구되는 사용자를 위해 커패시터의 난연화 및 불연화가 시도되어 왔다.

#### (1) 폴리염화페닐함침 커패시터

난연성 커패시터로서는 1960년대 초에 폴리염화페닐을 절연유로 사용한 커패시터가 처음 실용화 되었다. 그러나 이 폴리염화페닐(PCB)은 공해문제를 유발시켰기 때문에 1972년에 제조 및 사용이 금지되었으며, 이에 따라 폴리염화페닐 함침 커패시터도 제조 및 사용이 금지되었다.

#### (2) SF6 가스 절연식 커패시터

폴리염화페닐 함침 커패시터의 제조 및 사용이 금지된 이래, 전력용 커패시터의 유전체 구성에 변화가 있었고, 절연유도 주로 방향족 탄화수소계의 합성유가 사용되었다. 이와 같이 불연 혹은 난연화의 요구에 대응하지 못한 상태가 10년 이상 계속되었는데, 1960년대 후반이 되어, 그때까지 차단기(GCB)와 개폐장치(GIS)에 채용되어 왔던 SF6가스를 충전한 가스 절연식 커패시터가 개발 실용화되었고, 불연화에 대응할 수 있게 되었다.

#### (3) 몰드식 커패시터

최근의 난연성 커패시터로서는 SF6가스 절연식 커패시터 이외에 몰드식 커패시터가 실용화되고 있다. 이것은 가스 절연식 커패시터에서 사용되고 있는 것과 동일한 소자를 SF6

가스 대신에 수지로 몰드시킨 것이다.

### 2.1.5 커패시터의 친환경화

최근, 지구 온난화 방지 및 지구자원의 유효 활용이 세계적으로 강력히 주장되고 있다. 그러나 앞서 기술한 바와 같이 난연성·불연성의 전력용 커패시터는 SF6가스 절연식 커패시터가 지구온난화 방지의 관점에서부터 또 몰드식 커패시터는 지구자원의 유효 활용 관점에서부터 좋지 않은 것을 인식하고 대체 제품의 개발을 강하게 추진하고 있다.

#### (1) N2가스 절연방식 커패시터

SF6가스는 1997년의 지구온난화 방지회의(COP3)에서 온실효과 가스로 지정되어 온실효과 가스의 대상이 아닌 N2가스를 사용한 커패시터가 개발 및 실용화 되고 있다.

N2가스는 SF6가스에 비하여 절연내력이 떨어지므로, 용기가 커질 수밖에 없는데, 소형화를 도모하기 위해, 소자의 주위를 몰드시키고 케이스 간의 대지 절연부에만 N2가스를 사용하는 등의 연구가 진행되고 있다.

## 3. Thin Film 펄스파워용 커패시터의 기술동향

커패시터가 펄스형의 에너지를 발생시키기 위한 에너지 저장장치로 사용된 것은 1924년 독일의 E. Marx에 의해 개발된 고전압 임펄스 발생장치인 듯하다. 초기의 에너지 저장용 커패시터는 그 크기가 매우 컸으나, 제2차 세계대전을 전후하여 독일에서 개발된 금속증착기술과, 1970년대에 우수한 품질과 저가의 플라스틱 필름이 유전체로 사용되면서 커패시터의 소형화가 탄력을 받기 시작하였다. 그 결과, 1970년대 후반 들어서는 저압 커패시터에 증착필름 커패시터의 사용이 일반화되기 시작하였다.

한편, 1990년대 들어 고전압 커패시터에 금속증착기술이 적용되면서 고전압 커패시터의 소형화 및 고에너지밀도화가 본격적으로 가능하게 되었고, 현재는 상업적으로 0.6~0.7 kJ/kg의 에너지밀도를 갖는 에너지저장용 커패시터가 이용 가능하게 되었다.

최근 국내외에서 펄스파워용 에너지 저장장치로 바로 이 고전압 고에너지밀도 커패시터에 대한 수요가 증가하고 있는데, 그동안 국내에서는 이와 관련된 설계 및 제작기술이 없었기 때문에 전량 외국으로부터 수입하여 사용해 왔다. 선진국에서는 이미 펄스파워용 커패시터의 고전압 고에너지밀도화에 성공하여 0.6~0.7 kJ/kg의 에너지밀도를 갖는 커패시터를 상품화하여 시장을 선점하고 있으며 더구나 고전압 고에너지밀도 커패시터가 미래형 첨단 무기 등에 응용되면서 관련 기술의 이진을 기피할 뿐만 아니라 용도에 대한 규제도 가지고 있는 실정이었다.

국내에서는 1998년말부터 약 4년여에 걸쳐 한국전기연구

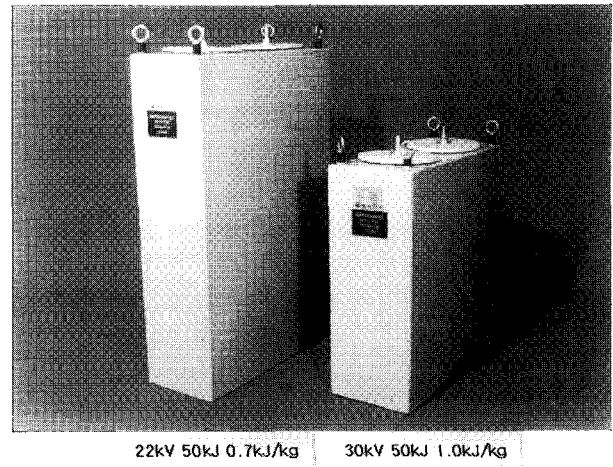
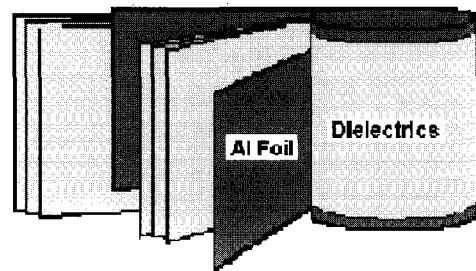
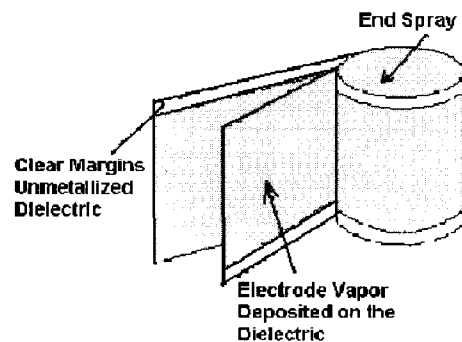


그림 3 개발된 펄스파워용 금속증착전극형 고전압 고에너지밀도 커패시터



(a) 박막전극 구조(foil type electrode structure)



(b) 금속증착전극 구조(metallized type electrode structure)

그림 4 펄스파워용 커패시터 전극 구조

원과 삼화콘덴서공업주식회사(대표이사 이근범)가 공동으로 정부의 지원을 받아 독자적인 설계 및 제작기술을 이용하여 펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터의 국산화 개발에 성공하였다. 그림 3은 개발된 펄스파워용 금속증착전극형 고전압 고에너지밀도 커패시터의 외관을 보인 것이다. 개발된

제품의 사양을 살펴보면 최대정격전압은 30kV이고, 현재까지 약 0.7kJ/kg의 에너지밀도를 갖는 커패시터의 상품화에 성공하였으며 1.0kJ/kg의 에너지밀도에 해당하는 커패시터도 상품화를 위한 연구를 진행 중에 있다.

펄스파워용 커패시터의 고전압화 및 고에너지밀도화에 요구되는 핵심기술로는 금속증착기술, 절연설계기술, 단말부처리기술, 제작공정기술 및 수명평가기술 등을 들 수 있다. 먼저, 금속증착기술은 펄스파워용 커패시터의 전극형성 방식과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로, 펄스파워용 커패시터의 대표적인 전극방식으로는 그림 4에 보인 바와 같이 박막전극 방식과 금속증착전극방식을 들 수 있는데, 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 제작하는 반면에 금속증착전극형 커패시터는 금속증착기술을 이용하여 유전체 표면에 Al, Zn 또는 이들의 합금을 200~300Å 두께로 증착시켜 전극을 형성하고 박막전극형 커패시터와 같이 소요의 정전용량이 얻어지도록 길이와 폭을 결정하고 권취하여 제작하고 있다.

따라서 박막전극형 커패시터에 비하여 금속증착전극형 커패시터의 전극 두께는 약 수백 배 정도로 얇기 때문에 소요되는 전극의 양이 대폭 줄어들게 되어 커패시터의 무게를 감소 시킴으로써 에너지밀도를 향상시키고 있다. 또한 금속증착전극형 커패시터는 절연파괴 시에 박막전극형 커패시터와 같은 완전단락의 형태로 되지는 않는다. 이것은 금속증착전극형 커패시터의 대표적인 특성인 자기회복특성에 기인한 것으로 유전체에 절연파괴가 발생하더라도 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.

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

- 건설 분야
  - 암반발파장치의 전원용
- 연구 분야
  - 고전압 발생장치
  - 전력계통에서 사고 발생시 고장전류를 차단하기 위한 전력용 차단기 성능평가 시험 설비
  - 낙뢰에 의해 전력계통에 침입하는 뇌서지 억제용 피뢰기 시험설비
  - 핵융합 장치용 커패시터 뱅크

- 초강자장 발생장치
- 전자가속기
- 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 및 레이더 등 각종 고성능군수장비의 전원장치

펄스파워용 고전압 고에너지밀도 커패시터의 국내시장규모는 2003년도 약 200억, 2006년도에는 약 700억 정도로 예상되며 세계시장규모는 2003년도에 약 4000억, 2006년도에는 약 8000억 정도로 예상되고 있다. 그러나 점차 활용분야가 넓어지게 되면 그 수요는 크게 증가할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

이상과 같이, Thin Film 전력용 커패시터의 최근의 동향으로서, 유입식 커패시터 유전체 구성의 변천, 커패시터의 난연화 및 불연화의 변천과 친환경을 고려한 불연성 커패시터에 대하여 개요를 소개했다. 이후에 난연성 및 불연성 커패시터는 방재성이 요구되는 설비에 공급될 것으로 기대되고 있다. 마지막으로, 현재 국내에서 점차 수요가 증가하고 있는 Thin Film 펄스파워용 커패시터의 기술동향에 대하여 기술하였다. 펄스파워용 커패시터의 설계 및 제작기술은 민수 분야는 물론이고 특히 군수분야에서 반드시 확보하여야 할 기술로 인식되고 있는 가운데, 순수 국내기술로 개발에 성공함으로써 향후, 산업발전과 국방 자주화를 위한 토대를 구축하는데 크게 기여할 것으로 기대된다. □

#### 〈 저 자 소 개 〉



**이병윤(李秉潤)**

1967년 11월 9일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 동 대학원 졸업(공학). 1996년 2월~현재 한국전기연구원 전력연구단 신전력기연구그룹 선임연구원.