

# Ceramic Capacitor

이병호 강주석  
포항공과대학교 신소재공학과

## 1. 서론

Capacitor란 전기를 저장할 수 있는 장치로서 우리나라 말로는 콘덴서 혹은 축전기라고 한다. 가장 기본적인 capacitor의 모양은 평행한 두 도체 전극 사이에 유전체를 삽입하는 것이다.

전극으로는 모든 도체가 가능하나 제조 공정상 값이 싸고 납땀성 등 가공성이 우수하며 산화가 잘 되지 않는 기본적인 특성을 갖추어야 한다. 필름형 capacitor의 전극으로는 알루미늄과 아연이 사용되고 세라믹capacitor에서는 은, 구리, 니켈, 팔라듐이 사용된다. Electrolyte capacitor에서는 알루미늄, 탄탈륨 등이 사용되고 있다.

유전체와 전극으로 구성된 기본단위를 소자(Element)라고 한다. 용량을 증가시키기 위하여 소자의 구조를 적층형으로 만드는 한 편 전자기에 사용되는 capacitor는 1개의 소자로 구성되는 제품이 일반적이거나 전력용 capacitor에서는 수십 개의 소자를 직,병렬로 결선하여 필요한 용량으로 구성하고 있다. 단소자 제품의 세라믹 capacitor의 용량단위가 피코파라드(pF)인 반면 다소자 제품의 필름콘덴서의 용량단위는 마이크로파라드( $\mu$ F)가 쓰이고 있다.

제품을 소형화하기 위하여 유전체와 전극을 일체화 시킨 금속 증착 필름 capacitor가 일반화되어 있다. 동일 용량을 기준으로 하면 유전체의 두께와 제품의 크기(체적)는 제품에 반비례한다.

콘덴서가 전기를 저장하는 기본원리는 유전체의 분극현상 때문이다. 외부의 전기장이 없는 상태에서는 유전체내부의 electric dipole이 무질서

하게 분포되어 절연체와 같은 성질을 갖고 있으나 전극에 전압을 가하여 전계가 발생하게 되면 dipole가 자기장의 방향으로 정렬이 된다.

이런 현상을 분극현상이라고 하며 분극현상이 강할수록 유전율이 높아진다. 분극현상이 발생하게 되면 한쪽 전극에는 plus전하가 반대쪽 전극에는 minus전하가 밀집하게 되어 전기를 저장할 수 있게 되는 것이다.

최초의 capacitor의 형태를 띤 라이덴병(Leyden jar)은 1745년 독일 발명가인 Ewald Georg von Kleist에 의하여 발명되었다. 이 라이덴병은 물을 채운 유리병에 코르크막개 중앙으로 도선을 삽입하여 물에 닿도록 한 후 정전기를 충전시키는 단순한 형태였다. 그 후 유리병의 내, 외부에 주석박을 입혀 극성이 서로 다른 전하를 충전시키고 도선을 서로 연결하여 충전된 전하를 방전시키는 완전한 형태의 capacitor로 발전하게 되었다.

이렇듯 초기의 capacitor는 종이, 운모, 유리 같은 유전율이 약 10 정도인 재료들이 사용되었다. 그러나 1943년 유전율이 1200~1500정도인 rutile ( $TiO_2$ )이 새로운 capacitor의 유전체로 등장하게 되면서 초기에 사용되었던 유전체들은 사라지게 되었다. 현재에는 이 보다 더 높은 유전율을 가지는 ceramic들을 만들어서 사용하고 있다.

1990년대 중반에 들어와서는 pager나 휴대폰 같은 이동통신제품의 발달로 인하여 전자 부품의 소형화 및 고용량화가 요구되었다. 이에 따라 유전체와 전극을 적층하여 용량을 크게 증가시

키는 MLCC(Multilayer ceramic capacitor)같은 것의 수요가 증가하고 있다.

이제 capacitor에서 유용한 유전체의 성질과 다양한 capacitor들에 대해 알아보도록 하겠다.

## 2. 유전체(dielectric material)

### 1) Permittivity

유전율(Permittivity :  $\epsilon$ )이란 유전체(Dielectric Material), 즉 부도체의 전기적인 특성을 나타내는 중요한 값으로서 외부의 전기장의 변화에 대해 물질 내부의  $+ -$  moment가 얼마나 민감하게 잘 반응(정렬)되는지의 정도를 유전율이라고 표현할 수 있다.

평행한 두 도체의 Capacitance는 다음 식으로 표현된다.

$$C = \epsilon \frac{A}{h} \quad (\text{식 1})$$

$\epsilon$  : permittivity

A : 도체 전극의 면적

h : 전극간의 간격

위 식에서도 보여지듯이 유전율은 capacitance와 비례하므로 capacitor에서 중요한 parameter가 된다.

비유전율은 진공상태에서의 유전율에 대한 상대적인 값을 구한 것이다. 유전율과 비유전율 모두 복소수로 나타내어진다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (\text{식 2})$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$\epsilon_r$  : Relative permittivity

여기서 허수 부분인  $\epsilon_r''$ 은 loss factor라 칭하며 다음과 같다.

$$\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \tan \delta \quad (\text{식 3})$$

그리고 진동수가  $\omega$  인 교류전압을 걸어줬을 때의 전류 I는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} I &= j\omega \epsilon_r C U \\ &= j\omega \epsilon_r' C_0 U + \omega \epsilon_r'' C_0 U \quad (\text{식 4}) \end{aligned}$$

여기에서 허수가 있는 부분은 capacitive lossless를 나타낸 것이고 뒷부분은 resistive loss를 나타낸 것이다.

또한, 유전체의 natural frequency를 고려하면 permittivity는 다음과 같다.

$$\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\gamma\omega} \right\} \quad (\text{식 5})$$

$$\epsilon_r' = 1 + \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \left\{ \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \right\} \quad (\text{식 6})$$

$$\epsilon_r'' = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \left\{ \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2} \right\} \quad (\text{식 7})$$

이처럼 유전체에서 유전율은 내부 진동수에 따라 변할 수 있으므로 제품을 디자인 할 때 신중하게 고려해야 한다.

### 2) Polarization

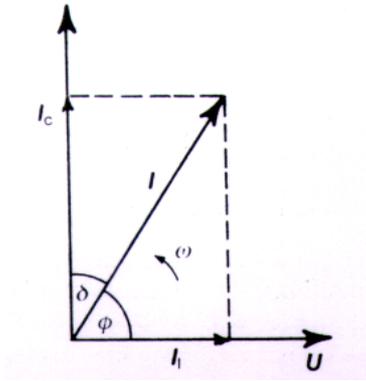
Capacitor가 충전되는 동안에는 전기장에 의한 polarization으로 인하여 에너지가 저장되고, 방전되는 경우는 반대의 효과가 나타나므로 polarization은 capacitor에서 중요한 요소이다.

Polarization은 외부 전기장 E와 선형적인 관계를 가진다.

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (\text{식 8})$$

그리고 교류전압을 걸어줬을 때의 polarization은 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T UI dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \sin \omega t I_0 \cos(\omega t - \delta) dt \\ &= \frac{1}{2} U_0 I_0 \sin \delta \quad (\text{식 9}) \end{aligned}$$



<그림 1> 실제 capacitor에서 Phasor diagram

$$I_0 = \frac{I_c}{\cos \delta} \quad (\text{식 10})$$

$$I_c = \omega U_0 C \quad (\text{식 11})$$

$$I_0 = \frac{\omega U_0 C}{\cos \delta} \quad (\text{식 12})$$

(식 9)와 (식 12)에 의해서

$$\bar{P} = \frac{1}{2} U_0 \omega C \tan \delta \quad (\text{식 13})$$

가 된다.

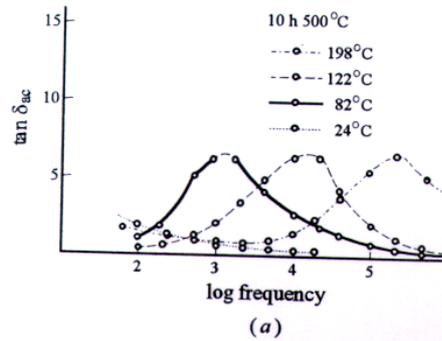
### 3) 유전 손실(Dielectric loss)

#### (a) Temperature의 영향

유전 손실이 높으면 이 에너지 손실이 열로 변화해서 capacitor의 온도를 상승시키기 때문에 바람직하지 못하다. 세라믹 표면에는 높은 수준의 결함이 존재하기 때문에 기공 (pore)은 손실에 중요한 원인이 된다. 만약 외부환경과의 접촉에 의해 유전체내의 기공들이 수분을 흡수하고, 특히 용해성 이온들이 고상으로부터 용해된다면 유전 손실은 증가하게 된다. 또, 높은 electric field 하에서는 기공내의 가스들은 이온화 되어 플라즈마를 형성하므로 기공표면에서 국부적인 열이 발생할 가능성과 아울러 유전 손실이 증가하게 된다.

#### (b) frequency의 영향

유전 손실을 나타내는 loss factor와 frequency간의 관계를 나타내는 식 7을 다시 고찰해 보자. 식 7을 그래프로 나타내면 그림 2와 같다.



<그림 2> 주파수에 따른 손실

우선  $\omega_0 > \omega$  인 경우에 polarization이 즉각적으로 일어나므로 손실이 거의 없다. 그리고  $\omega_0 < \omega$  인 경우에는 polarization이 field보다 훨씬 느리게 일어나서, dipole들이 field를 따라서 움직일 수 없다. 하지만  $\omega_0 \approx \omega$  인 경우에는 dipole이 field를 따라서 움직일 수 있으므로 가장 큰 손실이 발생하게 되는 것이다.

#### 4) Breakdown

Breakdown이란 capacitor에 모여있던 에너지들이 빠른 방전을 통하여 열이나 기계적인 스트레스 같은 것으로 전화되어 나타나는 현상이다.

이러한 Breakdown은 금속의 전극들 사이의 저항이 낮은 경로를 통해서 일어나는 현상으로 Breakdown에 견디는 Breakdown strength가 중요한Term으로 작용한다. 이러한 Breakdown strength가 높은 물질로는 glasses, polymer, single crystal 등이 있다. Breakdown strength는 유전체 내부가 균일하지 못할수록 커지는 경향이 있다. 즉, 유전재료에서 가능한 Impurity를 없애면 Breakdown strength를 높일 수 가 있을

것이다. Breakdown을 일으키지 않는 범위에서의 working voltage를 나타낸 식은 다음과 같다.

$$V_m = E_b h / \eta \quad (\text{식 14})$$

여기서  $V_m$  는 Working voltage,  $E_b$  는 breakdown field,  $\eta$  는 safety factor를 나타낸다. 그렇다면 이제 구체적인 breakdown mechanism에 대해서 알아보자.

#### (a) Electrical breakdown

먼저 breakdown이 일어나는 조건은 외부 field가 가해졌을 때 전자가 conduction band로 전이하거나 이온화에 의하여 더 많은 전자들을 발생시켜 다른 원자들간의 충돌을 위한 에너지가 공급되는 mechanism을 통해 일어난다. 즉, 가해진 field가 국부적으로 집중되는 현상이 일어나면 breakdown을 일으킬 수 있다. 이러한 국부적인 field의 집중은 유전체의 구조적인 특징이나 결함으로 인해 발생할 수 있다. 이러한 것들이 breakdown strength에 미치는 영향에 대해서 자세하게 알아보자.

먼저 cavity는 유전체의 field를 낮추고, 표면의 크랙은 특정 부분에 높은 field를 가지게 하는 돌출부를 제공한다. 그리고, breakdown strength는 실제의 경우 유전체의 두께나 면적에 관계한다. 이것은 면적이 증가됨에 따라 결함이 포함될 확률이 커지게 되고 두께의 증가에 따라 결함 가까이 존재하고 있는 field의 영향을 받기 때문이다.

유전체의 두께에 의한 영향에 관한 식은

$$E_{bh} = kh^y \quad (\text{식 15})$$

이 때  $k$ 는 상수이고  $y$ 는 0.3~0.4의 값을 가지는 지수이며  $E_{bh}$ 는 breakdown field를 말한다. 마찬가지로 면적에 의한 breakdown strength의 영향을 알아보면

$$E_{ba} = \gamma - \Sigma \log A \quad (\text{식 16})$$

이 때  $\gamma$ 는 단위면적당 breakdown strength,  $\Sigma$ 는

세라믹의 경우 1~10 MV/m의 상수이다. 이 두식을 결합하면

$$E_b = k' h^y (1 - \Sigma \log A) \quad (\text{식 17})$$

이때의  $k'$ 은 단위면적당 유전율로서 앞의 식의  $k/\gamma$ 를 가리킨다. 그리고  $\Sigma = \Sigma / \gamma$ 이다. breakdown strength에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 전극의 가장자리부분으로 이것은 유전체의 가장자리 부분을 두껍게 하거나 구부러주어 제거될 수 있다. 이러한 모양의 유전체가 바로 나중에 이야기 할 High Power Capacitor의 주요한 특징중의 하나이다.

#### (b) Electrochemical breakdown

전기 화학적인 breakdown은 온도나 주파수에 관계하는 breakdown이다. 고온에서 가해지는 field에서 이동하는 이온에 의해서도 발생하기도 한다. 이러한 전기 화학적 breakdown은 전극간의 단락 또는 다른 전극에서의 이온의 축적이나 고갈 등을 일으키고, 전극 부식을 일으키거나 높은 국부적인 field를 형성시킬 수 있다. 그러므로 오랜 시간 사용되면 이러한 breakdown때문에 전극이 열적 파괴를 일으키게 된다.

### 3. Capacitor의 종류와 특성

#### 1) non-ceramic capacitor

non-ceramic capacitor에 대해서 먼저 알아보자. 4가지의 non-ceramic capacitor를 소개하면 유전체의 종류에 따라서 Polymer-film capacitor, Aluminium electrolytic capacitor, Tantalum electrolytic capacitor, mica capacitor등으로 분류할 수 있다. 각각에 대해 좀 더 자세하게 알아보자.

##### a) Polymer-film capacitor

Polymer-film capacitor는 capacitor 시장의 25%~50%정도를 차지하고 있는 capacitor이다.

Polystyrene capacitor, polyester film capacitor, polypropylene capacitor 등이 주로 쓰이고 있다. Polystyrene capacitor의 예를 들면  $\tan \delta < 10^{-3}$  으로 매우 작은 값을 지닌다. 통신장비로 frequency-selective circuits에 주로 쓰인다. 다른 capacitor들은 fluorescent lighting unit의 power-factor correction으로 쓰이거나 washing machine에 쓰이는 medium type electric motor에 start/run circuitry에 쓰인다. 또는 main lead로 수신되는 radio frequency를 막아주는 filter circuit에 쓰이기도 한다.

#### b) Aluminium electrolytic capacitors

전해콘덴서 또는 케미콘(chemical condenser)이라고도 부른다. 이 콘덴서는 유전체로 얇은 산화막을 사용하고, 전극으로는 알루미늄을 사용하고 있다. 유전체를 매우 얇게 할 수 있으므로 콘덴서의 체적에 비해 큰 용량을 얻을 수 있다. 특징은 극성(플러스 전극과 마이너스 전극이 정해져 있다)이 있다는 점이다. 일반적으로 콘덴서 자체에 마이너스측 리드를 표시하는 마크가 붙어 있다. 또, 가할 수 있는 전압, 용량(전기를 축적할 수 있는 양)도 표시되어 있다. 이 콘덴서는 1 $\mu$ F 부터 수천  $\mu$ F, 수만  $\mu$ F 라는 식으로 비교적 큰 용량이 얻어지며, 주로 전원의 평활회로, 저주파 바이패스(저주파 성분을 어스 등에 패스시켜 회로 동작에 악영향을 주지 않는다) 등에 사용된다. 단, 코일 성분이 많아 고주파에는 적합하지 않다(이것을 주파수 특성이 나쁘다고 말한다).

#### c) Tantalum electrolytic capacitor

단순히 탄탈 콘덴서(tantalum condenser)

라고도 부르며, 전극에 탄탈륨이라는 재료를 사용하고 있는 전해 콘덴서이다. 알루미늄 전해콘덴서와 마찬가지로, 비교적 큰 용량을 얻을 수 있다.

그리고 온도 특성(온도의 변화에 따라 용량이 변화한다. 용량이 변화하지 않을수록 특성이 좋다고 말한다), 주파수 특성 모두 전해콘덴서보다 우수하다. 알루미늄 전해콘덴서는 크라프트(kraft)지 등에 전해액이 스며 들게 한 것을 금속 알루미늄으로 삽입하여 감아 붙인 구조로 되어 있지만, 탄탈 전해콘덴서의 경우는 tantalum powder 를 소결하여 굳혔을 때에 나오는 빈틈을 이용하는 구조로 되어 있어, 두루마리 구조가 아니므로 앞서 언급한 바와 같이 특성이 우수하다(알루미늄 전해 콘덴서와 비교했을 때). 이 콘덴서도 극성이 있으며, 통상, 콘덴서 자체에 +의 기호로 전극을 표시하고 있다. 가격은 전해콘덴서보다 비싸기 때문에 온도에 의한 용량변화가 엄격한 회로, 어느 정도 주파수가 높은 회로 등에 사용한다.

또한, 알루미늄 전해콘덴서에서 발생하는 spike 형태의 전류가 나오지 않으므로 신호 파형을 중요시하는 아날로그 신호계에는 탄탈 콘덴서를 사용하는 것이 좋다. 스파이크와 같은 불요 파형이 문제가 되지 않는 경우에는 전해 콘덴서로도 충분하다.

#### d) Mica capacitor

유전체로 운모(mica)를 사용한 콘덴서이다. 운모는 온도계수가 작고 안정성이 우수하며, 주파수 특성도 양호하기 때문에, 고주파에서의 공진회로나 필터회로 등에 사용된다. 또한, 절연내압도 우수하므로 고압회로에도 사용된다.

이전에는 진공관식 무선송신기 등에는 흔히 사용되었다.

결점으로는 용량이 그다지 크지 않고, 비싸다는 것이다.

## 2) Ceramic capacitor

### a) Dielectric의 분류

Dielectric material은 비유전율이나 dissipation factor, 온도 계수 등의 factor를 가지고 3가지의 class로 분류할 수 있다. 먼저 class I의 Dielectric material은 기본적으로 낮거나 중간 정도의 비유전율을 가진다. 대략 5~500 정도를 말한다. 또한 dielectric loss가 매우 작아 dissipation factor인  $\tan \delta < 0.003$  정도이다. Temperature coefficient가  $+100 \sim -2000 \text{ MK}^{-1}$  정도로 온도계수가 매우 안정적이다. 대표적인 material로는 Rutile, Alumina, Clay, BeO, AlN 등이 있다. 이들은 유전 손실이 작고 안정적이며 값이 싸기 때문에 high voltage capacitor에 주로 쓰인다.

다음으로 Class II의 Dielectric material은 비유전율이 앞의 class I의 경우보다 약 10배 정도 큰 값인 2000~20000 정도의 값을 가진다. 비유전율이 커짐에 따라 dielectric loss도 커지게 되는데  $0.003 < \tan \delta < 0.03$  정도의 값을 지닌다. 또 이 계열에 속하는 물질들은 온도나 field의 세기, 진동수에 따라 성질들이 잘 바뀐다. BaTiO<sub>3</sub>가 대표적인 물질이며, 대부분 ferroelectric에 속하는 물질들이다.

마지막으로 Class III에 속하는 물질들은 class II와 성질이 비슷하지만 작동하는 전압이 2~25V이며 이 전압을 넘어서면 저항이 급감하는 성질을 지닌다. 즉, 매우 높은 유전율을 갖는 물질로서 높은 전압에서는 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 그러나 충전 용량이 매우 커서 이 성질을 이용하는 물질에 많이 사용되고

있다.

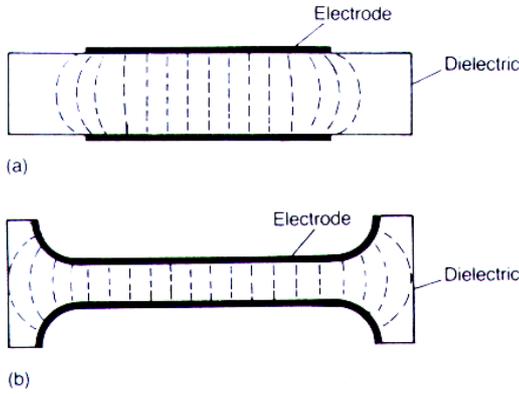
### b) High voltage & High power capacitor

#### (1) High voltage capacitor의 특성

High voltage capacitor는 사용 전압이 5 ~ 400 kV 정도이고 capacitance는 1 ~ 10000 pF 정도인 capacitor를 말한다. 이때의 electric loss는 0.1 ~ 2 % 정도이다. 이것은 위에서 말한 Polymer capacitor와 비교하면 그 성질을 잘 알 수 있다. Polymer capacitor의 일종인 Polyester capacitor는 사용 전압이 50 ~ 1000 V 정도이고 capacitance가 0.0022 ~ 10  $\mu\text{F}$  정도로 고분자 capacitor에 비해 High voltage capacitor는 견딜 수 있는 전압이 100배 가량이나 된다. 즉, 보통의 capacitor로는 견딜 수 없는 높은 전압이 유지되어야 하는 곳에서 이 High voltage capacitor가 쓰인다.

2) High voltage capacitor에서 고려해야 하는 점  
capacitor가 높은 전압 하에서도 견딜 수 있는 조건을 찾아내려면 우선 Breakdown voltage에 대해서 고려해 봐야 한다. 앞에서 설명했듯이 breakdown은 capacitor에 모여있던 에너지들이 빠른 방전을 통하여 열이나 기계적인 스트레스 같은 것으로 전화되어 나타난다. 이러한 Breakdown은 금속의 전극들 사이의 저항이 낮은 경로를 통해서 일어나는 현상이다. 특히 중요한 것은 Breakdown strength는 유전체 내부가 균일하지 못할수록 커지는 경향이 있다는 것이다. 즉 유전체에 인가되는 field가 균일하지 못할수록 breakdown이 잘 일어나게 된다. 간단히 평행한 평면의 capacitor의 경우를 생각해 보자. 다음의 그림을 보면 (a)의 경우 평행한 capacitor의 경우 중심부분의 field는 일정하다는 것을 알 수 있다. 하지만 끝부분에 가까이 가게 되면 인가되는 field는 중심부분의 대략 2배가 된다. 이렇게 field가 큰 부분이 존재하면 설

명했듯이 균일하지 못한 field가 형성되어 breakdown strength가 줄어들게 되는 것이다.



<그림.3>(a)일반적인 capacitor의 field line

(b)high voltage capacitor의 field line

이러한 현상을 보정하기 위해 capacitor의 끝부분을 (b)의 경우와 같이 구부려 주면 일정한 field가 존재하게 된다. 뿐만 아니라 capacitor의 path length를 증가시켜 주게 되고 breakdown strength또한 증가하게 되는 것이다. Surface breakdown에 대해서도 생각해 주게 되면 surface breakdown은 낮은 field하에서도 일어날 수 있다. 유전체가 높은 permittivity를 가지고 공기 중에 있는 습기와 만나게 되면 전류가 그 습기를 따라서 움직이게 되는 현상 때문에 낮은 field하에서도 breakdown이 발생하게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 high-power capacitor에서는 glaze나 polymeric substance로 높은 유전율을 가지는 유전체를 캡슐화시켜 주기도 한다.

Breakdown을 막아주기 위해서 capacitor의 모양을 변형 시켜주는 것 이외에 유전체 속의 cavity를 없애 주어야 하며, pore와 high field구역에 의한 plasma discharge를 없애주기 위해서 일정한 density를 가지게 해야 한다. 이러한 High-power capacitor에 쓰이는 유전체들은 주로 class I에 속하는 dielectrics들이다. 다시 한

번 이러한 class I의 dielectrics들의 주요한 parameter들을 생각해 보면 capacitance가 2pF에서 12nF사이의 물질들이다. Peak voltage는 3kV 정도이고 dissipation factor인  $\tan \delta$ 는 0.0005에서 0.001사이의 낮은 값을 가지는 material들이다.

High-power capacitor를 만들기 위해 먼저 power dissipation을 고려해보자.

Average power dissipation을  $\bar{p}$  라고 하면,

$$\bar{p} = IU \tan \delta \quad (\text{식 } 18)$$

이때의 I 와 U 는 전류와 전압의 rms양이다. 이 식은 다음의 식에 의해서

$$I = 2\pi f UC \quad (\text{식 } 19)$$

$$C = \epsilon \frac{A}{h} \quad (\text{식 } 20)$$

$$\bar{p} = 2\pi f U^2 \epsilon \frac{A}{h} \tan \delta \quad (\text{식 } 21)$$

이때 capacitor로부터 surface로 나가는 열을 생각하면 위 식은

$$\Delta T \propto f U^2 \frac{\epsilon}{h} \tan \delta \quad (\text{식 } 22)$$

즉, 이 식을 보면 온도 상승은 permittivity와 frequency에 비례하고 두께에 반비례한다는 것을 알 수 있다. 그리고 전극에 의한 power dissipation을 알아보면

$$\bar{p}_e = R_e I^2 \quad (\text{식 } 23)$$

이때의  $R_e$  는 전극의 저항을 나타내는 값이다. 전극에 의한 power dissipation을 다시 한번 나타내어 보면

$$\bar{p}_e = R_e 2\pi f C \bar{p}_m \quad (\text{식 } 24)$$

이때의  $\bar{p}_m$  은 maximum power rating을 나타

내는 값이다.

교류전류 하에서는 가운데 부분의 back e.m.f가 surface부분보다 더 크게 되어 길이에 따른 current density가 중심부터 바깥쪽으로 갈수록 증가하게 되는 'skin effect'가 형성되게 되는데  $R_e$  는 이러한 skin effect에 의해서 영향을 받게 된다. 이것을 조금 더 고려해 보면 아래의 식과 같다.

$$\rho_s = \frac{\rho}{\delta_s} \quad (\text{식 25})$$

$\rho$  는 volume resistivity,

$\delta_s$  는 skin depth를 말하는 값으로 이때의  $\rho$  는 frequency에 의해서 영향을 받는다. 그러므로 이를 무시한 새로운 parameter 인  $\rho_s$  '를 사용해 나타내면,

$$\rho_s = \rho_s' f^{1/2} \quad (\text{식 26})$$

이것을 종합하면

$$\overline{P_e} \approx 2\pi f^{3/2} \rho_s' \overline{CP_m} \quad (\text{식 27})$$

즉, 이것은 주파수의 범위에 따른 고려를 말하는 것이다. 즉 주파수가 1Mhz이하이면 dielectric loss에 의한 것이 주가 되지만 더욱더 큰 주파수하에서는 skin effect에 의한  $R_e$  의 loss를 고려해야 한다는 것이다.

### 3) High voltage capacitor의 응용

High voltage capacitor는 여러 가지 분야에서 활발하게 응용되고 있다. High voltage capacitor의 응용분야를 설명해 보았다.

- a) DC power supplies
- b) Live-line indication
- c) Electrostatic Spray Gun
- d) Bypass, coupling And smoothing circuitry
- e) Medical scanner And X-ray power

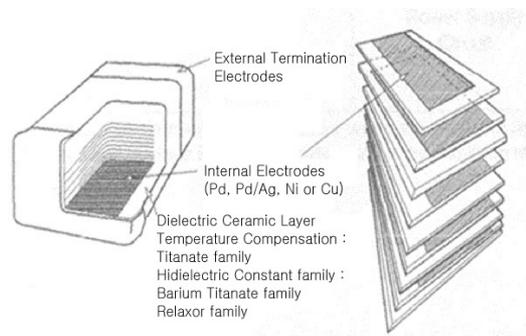
sources

- f) HF coupling
- g) Fast repetition pulse circuitry
- h) TIG welding (arc initiation)
- i) Laser pulse circuitry
- j) Electrostatic copying machines

### c) Multilayer capacitor

#### 1) MLCC란?

유전체 파우더를 tape casting 등으로 수  $\mu\text{m}$  두께로 성형하여 그 위에 전극을 입힌 후, 이것을 여러 층 적층하여 소성한 ceramic capacitor로, 소형으로 대용량의 정전용량을 얻을 수 있다. 주로 휴대전화, 노트북 및 PDA 등 휴대기기에 사용되며 MLCC의 종류는 용도에 따라 온도보상용의 산화티탄계와 고유전율용의 티탄산바륨계로 구분할 수 있으며, 내부전극에 따라 Pd, Pd/Ag, Ni, Cu MLCC로 구분하거나 소자의 크기로도 구분한다. 휴대전화, 노트북 및 PDA 등 휴대 기기들이 점점 소형화, 박형화 되고 있기 때문에 작은 면적의 PCB 배선판에 많은 양의 부품을 탑재하는 SMD(Surface Mounting Device)화가 이루어지고 있다. Capacitor의 경우 세라믹 재료를 이용하여 SMD화 한 것이 MLCC이다. MLCC란 아래의 그림에서 보듯이 얇은 세라믹 유전체 층과 내부 전극을 상호 교대로 적층시킨 구조로 되어 있다.



<그림 4>Multilayer Capacitor

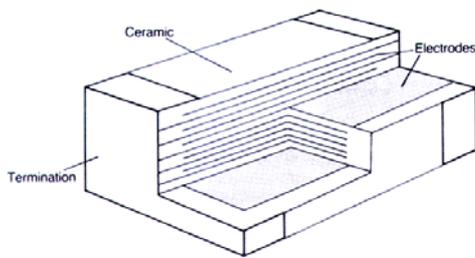
이렇게 적층시키는 이유를 알아보도록 하자. 다음 식은 MLCC의 capacitance를 나타낸 식이다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r (n-1) \frac{A}{d} \quad (\text{식 } 28)$$

- $\epsilon_0$ : 진공중의 dielectric constant
- $\epsilon_r$ : 유전체의 dielectric constant
- n: MLCC의 적층수 A: 내부전극의 면적
- d: 유전체의 두께

이 식에서 알 수 있듯이 간단하게 capacitance를 높이기 위해서는 A를 크게 하거나 d를 작게 해야 하지만 현실적으로 single plate device의 면적을 증가시키는 것은 불가능하므로 capacitor를 적층시키면 capacitance를 높일 수 있다. 이렇게 부피적인 효율을 증가시켜 단위 부피당 더 큰 capacitance를 얻을 수 있다.

MLCC는 다음 그림과 같이 세라믹 유전체와 내부 전극, 그리고 termination으로 이루어진다.



<그림 5> MLCC의 구조

## 2) MLCC의 구조

### a) 유전체

유전체는 높은 dielectric constant가 요구되므로 주로 ferroelectric material이 사용되어진다

### b) 전극

전극은 내부전극과 외부 전극으로 나뉠 수 있는데 내부 전극은 산화를 방지하기 위해 고가의

귀금속인 palladium을 사용해 왔지만 최근의 고용량화, 소형화 요구에 따라 palladium보다 저렴한 silver/palladium mixture 나 nickel, copper를 사용하는 경향이 있다.

### c) External Termination

Termination이란 그림에서도 볼 수 있듯이 ceramic과 전극을 연결하는 역할을 한다. 일반적으로 disk capacitor의 경우에는 전극과 termination이 같다. 고로 termination pattern area와 그 위치에 따라서 capacitance값을 결정할 수 있다. 그리고 termination material과 disk 사이의 계면은 보통 glass-ceramic reaction을 사용한다. 이것은 dielectric constant와 loss factor에 영향을 주지 않기 위해서 이다. MLCC에서는 반면 termination이 낮은 전기저항으로서 내부전극과 연결하는 기능을 한다.

Ceramic body와 termination사이에는 강한 결합을 위한 다양한 물질들을 사용한다.

대부분의 termination은 800°C에서 fire되어지며, 이때 glass는 녹고 ceramic과의 결합이 형성된다. Termination area는 작고, chip과 termination의 부착이 상당히 강해야 하기 때문에 process를 잘 조절해야 한다.

## 3) MLCC 유전체 재료

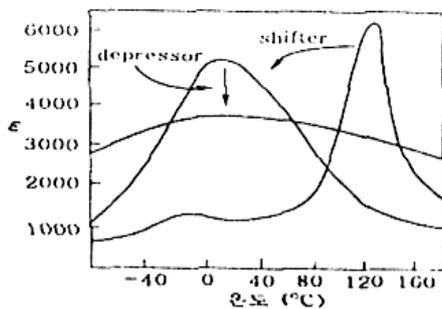
기존에 사용하던 MLCC는 온도 보상용 재료와 high dielectric constant계의 두 종류로 구분된다.

### a) 온도 보상용 재료

원래 세라믹 유전체는 온도가 변함에 따라 dielectric constant가 변하는 성질을 지닌다. 하지만 온도 보상용 재료란 dielectric constant가 500이하에 온도에 따른 변화가 비교적 적고, 전압 의존성이 낮아 고주파대까지 사용이 가능한 재료를 말한다. 이러한 재료로는  $TiO_2$ 나  $MgTiO_3$  및 기타의 금속 화합물을 주 원료로 하고 있다.

b) High dielectric constant material(강유전체)

고유전율계 재료라고도 불린다. 상대적으로 높은 (500이상의) dielectric constant를 가지지만 온도 특성에 따른 변화율이 크고 교류, 직류전압 하에서 dielectric constant와 유전 손실의 변화가 큰 단점을 가지고 있다. 주로 BaTiO<sub>3</sub>를 사용하는데 이러한 유전체의 특성을 제어하는데는 크게 두 가지의 방법이 있다. 첫번째 방법은 BaTiO<sub>3</sub>의 큐리 온도를 이동시켜 dielectric constant를 조정하는 것이다. 이를 위해서 첨가되는 additives를 shifter라고 하는데 보통 BaSnO<sub>3</sub>, BaZrO<sub>3</sub>, CaZrO<sub>3</sub>, CaSnO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>3</sub>등을 사용한다. 두 번째 방법은 온도에 따른 dielectric constant의 변화 curve의 peak부분을 평탄하게 만들어 온도 변화에 따른 용량의 변화를 완화시키는 방법이다. 이러한 경우에 첨가하는 additives를 depressor라고 한다. 대표적인 material로서는 CaTiO<sub>3</sub>, MgTiO<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>(SnO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, MgSnO<sub>3</sub> 등을 사용하고 있다. 다음 그림은 BaTiO<sub>3</sub>의 온도에 따른 dielectric constant가 depressor나 shifter를 첨가했을 때 어떻게 변하는 지를 나타낸 것이다.



4) MLCC재료의 최근 경향

삼성전기(www.sem.samsung.co.kr)가 고주파(주파수 사용범위 1GHz이상) 기기용 동(Cu)전극 MLCC(적층 적층세라믹 콘덴서)의 양산에

성공했다. MLCC는 모든 전자회로에 기본적으로 적용되는 부품으로, 각종 전자제품에 수십 개에서 수백 개 까지 적용되고 있으며 전체 시장규모는 연간 7조원에 달하고 있다. 동(Cu)전극 MLCC는 최근 IMT2000, 블루투스 등 고주파 통신기기 시장의 새로운 형성에 따라 등장한 신제품으로 기존 MLCC보다 10배 이상 비싼 고가의 기술 집약 제품이다. 삼성전기가 이번에 개발한 동(Cu)전극 MLCC는 기존의 파라데이나 니켈전극제품이 가지는 저항(ESR : 등가직렬저항)의 1/3 밖에 되지 않는 초저저항을 가지는 고주파 기기용 MLCC이다. 삼성전기 김중희 그룹장은 " 동(Cu)은 저항과 용량변화가 적다는 장점을 가지고 있으나, 타 금속보다 낮은 녹는점을 가지고 있고 고온에서 쉽게 산화되기 때문에 고도의 제조기술이 없이는 MLCC전극으로 적용이 불가능 하다."고 전하며 " 이를 방지하기 위해 1000도 이하의 저온 소성기술과 원자재 조성기술을 독자 개발했으며, 특히도 출원했다."고 말했다. 현재 동(Cu)전극 MLCC는 이러한 기술 장벽 때문에 삼성전기를 비롯한 일본의 두 업체 정도만이 대량양산에 성공했으며, 삼성전기는 이번 동(Cu)전극 MLCC의 조기출시를 통해 첨단 통신시장을 선점하고 세계 1위 도약의 기반을 다질 것이라고 전했다. 삼성전기는 다양한 기종의 동(Cu)전극 MLCC샘플을 국내외 업체에 제출해 승인을 진행 중이며, 월1억 개의 전용생산 능력을 구비하고 시 양산을 실시 중이다. 현재 전 세계 MLCC시장은 일본이 80%이상 독점하고 있으며, 삼성전기는 작년도 5천억 가까운 매출을 올리며 세계 3위의 MLCC 공급업체로 성장했다. 올해 MLCC의 세계 시장 규모는 7조원 정도로 추산되고 있으며, 매년 15% 정도의 성장을 거듭하고 있는 초대형 부품시장이다.

<http://finance.daum.net/stock/trend/news>

[/edaily/20010426/Edaily/v1392723.html](http://edaily/20010426/Edaily/v1392723.html)

삼성전기의 고주파 기기용 Cu전극 MLCC의 양산기술에 대한 기사이다. MLCC의 내부전극은 앞서도 말했듯이 귀금속인 Pd를 많이 쓰고 있다. 하지만 저가 금속인 Ag-Pd나 Ni 또는 Cu로 대체시키는 경향이 있다.

#### 1) Ag-Pd 전극

MLCC의 소성 과정에서 내부전극과 유전체를 동시에 소성하므로 소성 온도가 높은 유전체의 전극으로 낮은 녹는점의 물질을 사용할 수 없다. 대표적인 전극물질로 사용하는 Pd는 녹는점이 1552°C이지만, Ag는 녹는점이 961°C로 낮은 단점이 있다. 그러므로 고가인 Pd에 저가인 Ag를 비율이 높은 Ag-Pd전극을 사용하고 있다. 또는 소성 온도를 낮추기 위해서 powder의 미세화, 소결조제의 첨가, Pb계 복합 Perovskite재료의 개발 등의 방법들을 사용하여 저온에서 소결 가능한 유전체를 개발하고 있다.

#### 2) Ni 전극

Ni전극은 소형인데다 절연저항 및 breakdown voltage가 높으며 단자전극의 극성이 없는(위에서 설명한 polymer-film capacitor와 비교해서) 성능면에서 뛰어난 성질을 가지고 있다. 그리고 가격면에서도 Pd전극이나 Ag-Pd전극보다 우수하다. 하지만 Ni전극이 공기 중에서 산화되기가 쉬워 산소 분압이 낮은 환경이 필요하다. 그러나 그런 분위기에서 소성하게 되면 세라믹스가 환원되어 전기적 성질이 떨어진다고 한다. 고로 유전체 재료가 내환원성을 가지게 만들어야 하는 단점이 있다.

#### 3) Cu 전극

이것이 삼성전기에서 만들고자 하는(2001년 3월)Cu 전극이다.Cu 내부전극을 사용하면 교류 전압에 대한 용량의 변화와 손실의 폭이 적다는 점과 Bisa전압에 의한 용량변화가 적은 장점을 가진다. 그러나 소성 과정에서 Ag-Pd의 저온 소성 기술과 Ni 전극의 내환원성이 모두 요구되는 고도의 제조기술이 요구된다. 또, 최근(2001년 5월) 삼성전기에서 MLCC의 층수를 높이려는 시도를 하고 있다.

삼성전기가 전자제품에 '감초'격으로 들어가는 MLCC(적층 세라믹 콘덴서) 제품의 500층 쌓기에 도전한다. 3일 삼성전기에 따르면 지난 2월 2.5m 높이 안에 400층의 세라믹을 쌓아넣은 MLCC 제품 양산에 들어간데 이어 올해 안에 500층 짜리 대용량 제품을 개발키로 했다.

<http://kr.news.yahoo.com/headlines/tc/20010503/ked/2001050311384960972.html>

MLCC의 층을 쌓아 올림으로서 용량이 커지고 소형화 되어 전자제품의 소형화를 가능하게 만들고 있다.

## 4. 결론

지금까지 capacitor의 기본적인 이론과 capacitor에서 중요한 유전체의 성질에 대해서 알아보았다. 그리고 대표적인 capacitor인 non-ceramic capacitor와 ceramic capacitor의 종류와 특히 ceramic capacitor인 High power capacitor와 Multi-layer ceramic capacitor의 소개, 이론 및 응용과 최근의 연구 경향에 대해서 소개하였다. 최근 정보통신장비나 산업 전자 제품 등의 개발에 있어서 소형화,저가화,고 용량화의 경향을 뒷받침하는데 있어서 capacitor의 개발이 필수적이게 되었다 High power capacitor의 경우에는 높은 전압 하에서 견디기 위해 전극의 edge부분을 구부려 균일한 field를

만든다든지 유전율이 좋고 온도에 의해 덜 영향을 받고, 특히 Loss factor가 작은 유전체를 사용하는 것이 좋다. MLCC는 최근 귀금속인 Pd 대신에 Ag-Pd전극이나 Ni전극, Cu전극들을 사용하고 저가화를 꾀하고 있으며 전극을 이렇게 교체하는 데는 유전체의 내환원성의 증가 및 낮은 소성가공온도를 요구하는 고도의 제조 기술이 요구된다.

### 참고문헌

1. A.J.Moulson and J.M.Herbert, 'Electroceramics Materials, Properties, Applications', page 189~205
2. 한문희, '고주파 대용량 세라믹 콘덴서 개발 및 응용(II)에 관한 최종 보고서' 1996
3. 전자공학회지, page 680 ~ 686, 1998
4. <http://finance.daum.net/stock/trend/new/edaily/20010426/Edaily/v1392723.html>
5. <http://kr.news.yahoo.com/headlines/tc/20010503/ked/2001050311384960972.html>
6. 세라미스트 제3권 2부, page 69-79, 2000
7. Charles S.Walker, 'Capacitance, Introduction and Crosstalk Analysis', Artech House
8. Bernard Grob, 'Basic Electronics'
9. 한국경제신문 2001년 5월 3일 기사.
10. D.S Campbell and J.A.Hayes, 'Capacitive and Resistive Electronic Component', Vol 8