□ 特輯 : 新電氣電子材料

유 전 재 료

金 昊 起
(韓國科學技術院 敎授)

■차 례■

1. 기초이론 및 정의
1.1 절연비저항
1.2 Dielectric Constant(ε_r) and Dissipation Factor($\tan\delta$)
2. Capacitor Ceramics and Piezoelectric Ceramics
2.1 Ferroelectricity
2.2 Capacitor Ceramics
2.3 Piezoceramics
참고문헌

1 기초이론 및 정의

유전재료는 넓은 의미로 보아 절연재료(insulators)를 포함시켜 고찰되므로 정확히 한계를 짓기가 어려워진다. 절연재료는 전기적으로 부도체를 의미하며, 전기적으로 서로 다른 potential을 갖는 도전성 물질을 분리시키는 역활을 하고, 접촉에 의한 사고를 방지하기도 한다. 유전재료는 electric field와 절연재료 사이에 일어나는 교호작용, 즉 polarization이 중요한 역활로 등장할 때 유전재료라 불리어진다.

따라서 절연재료의 특성을 강전류의 이용에 우선순위를 두는 반면, 유전특성은 high frequency 또는 capacitor에로의 응용에 중점을 두게 된다.

이러한 절연재료 및 유전재료의 재질은 ceramic 또는 glass와 같은 무기재료나 plastic과 같은 유기재료, 나아가 fluid 및 gas 상태에서도 찾을 수 있게 된다. 어느 특정한 용도에의 응용에는 이러한 전기적 특성 이외에도 기계적, 열적 특성 및 주위의 환경과 분위기에 대한 내구성 뿐만 아니라 더 나아가 제조공정상의 문제점들도 대두된다.

우선 중요시되는 유전재료에 있어서의 전기적 특성은 다음과 같이 나타난다.

1.1 절연비저항(Specific Insulation Resistance ; ρ_D)

이것은 시료의 크기가 $(1\times1\times1)cm^3$인 것을 기준한 저항을 말하며, 단위는 $[\Omega\cdot cm]$로 표시된다. 이 ρ_D는 측정온도(℃), 측정주파수(Hz), 그리고 amplitude에 비례한다. ρ_D의 역수인 $\frac{1}{\rho_D}=\sigma$로 전기전도도를 표시하며, 이때의 단위는 $[\Omega\cdot cm]^{-1}$이 된다. 절연재료에 필요한 ρ_D값은 10^{10} $[\Omega\cdot cm]$로 나타나고, 가능한 높은 ρ_D가 직류(DC)에서 요구된다. 이때의 물리적 조건은 valence band와 conduction band와의 energy gap($\varepsilon_g \geqq 3$ eV)이 넓어야 하며, ionic 또는 electronic에서 charge carrier concentration이 적어야 되고, 이때의 mobility도 낮아야 된다.

절연재료에 있어서의 전기전도도는 electric field가 낮은 범위($E\leqq10^7$V/m)에서 대개 ohm의 법칙에 지배를 받는다. 이 전기전도도를 $\sigma=\Sigma\eta_i e_i\mu_i$로 표시하며, 이때 η_i는 charge carrier i(electron, hole, ion)의 concentration, e_i와 μ_i는 이때의 charge와 mobility를 각각 나타낸다. 온도가 낮은 범위, 즉 상온에서의 전기전도도는

상당히 낮은 편으로, ionic part는 특히 낮은 mobility에, 또한 electronic part는 charge carrier의 낮은 density에 기인한다.

온도에 따른 ionic conductivity의 함수관계는 ;

$$\sigma_{ion} = \sigma_o e^{-\omega_{ion}/KT}$$

로 표시되며, 여기서 ω_{ion}은 ionic transport를 위한 activation energy, K는 Boltzman 상수, σ_o는 온도에 민감하지 않은 material constant를 나타낸다. electron 또는 hole에 의한 conductivity는 thermal equilibrium 상태에서 band gap(E_{gap})이 큰 경우에는 crystal lattice에 도입된 impurity에 좌우된다. 이때 conduction mechanism이 크게 2가지로 분류되는데, 하나는 charge transport가 conduction band에서 일어나는 경우이며, 또 다른 하나는 hopping에 의한 경우이다. 유전재료 내에 donor concentration η_D가 존재하고, 이때의 energy level ω_D($\omega_D \gg KT$)가 conduction band 하단부에 위치한다면, thermal activation에 대한 해는 ;

$$\eta_c = \eta_D \cdot e^{-\omega_D/KT}$$

로서, 그 만큼의 electron이 conduction band에 generation된다. 이때 conductivity는 ;

$\sigma_D = \eta_D \cdot e \cdot \mu \cdot e^{-\omega_D/KT}$가 되며, 유사한 방법으로 hole conductivity도 고찰이 가능하다.

hopping에 의한 electronic conductivity에 있어서, electron이 어느 한 localized energy level에서, 이웃한 level로 이동함으로써 전도가 이루어진다. 그것은 이 두개의 이웃한 energy level이 서로 다르기 때문에, hopping에 필요한 activation energy가 결부된다.

1.2 Dielectric Constant(ε_r) and Dissipation Factor(tan δ)

두 개의 전극(electrode)으로 이루어진 capacitor의 capacitance를 vaccum에서 C_0라 하면, 이 capacitor 내에 dielectrics를 채워 넣었을 때의 capacitance는 증가되어 이때의 값을 C로 표시한다. C와 C_0의 상관관계 ;

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0} > 1$$

에서 ε_r을 dielectric constant(relative)라 하여 material constant로 표시된다. 여기서 capacitor에 sine波의 전압을 가하게 되면 ;

$$U = U_0 e^{j\omega t}$$

로 표시되고, 이때 흐르는 current는 ;

$$I = I_c + I_v = (j\omega c + \frac{1}{R})U$$

로 나타낸다. $I_c = j\omega c U$로 capacitive current, 즉 voltage와의 phase difference(90°)를

$$I_v = \frac{U}{R}$$

로써 ohmic current를 나타내고, 전압과 동일한 phase를 갖는다. 이 ohmic current가 joule's heat를 유발시키게 되는데 이때의 함수관계를 ;

$$\tan\delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{\omega CR}$$

로 나타내게 되어, energy loss의 함수관계로 dissipation factor를 나타낸다. 이 dissipation factor tan δ는 모든 energy loss에 관계되는 process를 포함한다.

특히 high frequency에의 응용에서 dielectric property 규명에 dielectric constant의 complex 개념을 생각하게 되어 ;

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$$

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r'}{\varepsilon_r''} \quad (j = \sqrt{-1})$$로 나타낸다.

dielectric constant ε_r이 dielectric material의 polarizability에 대한 교호작용을 나타내며, electrical flux density는 ;

$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$; vaccum

$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$; with dielectrics로 나

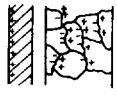
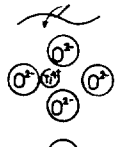
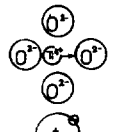
Polarization Mechanisms		Dielectrics	ε_r
Space Charge-Polarization		Polar Plastics (ex. Polycarbonate)	2···4o
Orientation-Polarization		Ferroelectrics (ex. $BaTiO_3$)	2o···1oooo
Ionic-Polarization		Ionic crystal Paraelectric Substanceses (ex. $SrTiO_3$)	5···1oooo
Electronic-Polarization		Unpolar Substanceses (ex. Polyethylene)	2···2o

그림 1. Mechanisms in dielectrics

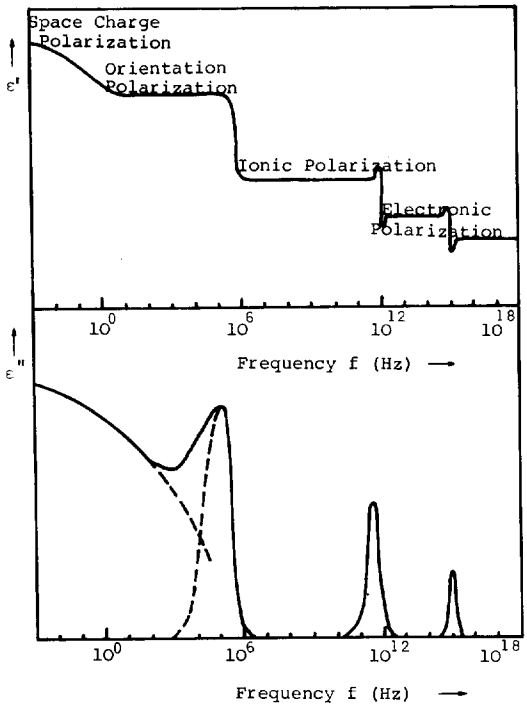


그림 2. Frequency dependence of several contributions to the polarizability and dissipation factors

타내게 되어 polarization은 ;

$$\vec{P}=(\varepsilon_r-1)\varepsilon_0\vec{E}=X_{el}\cdot\varepsilon_0\cdot\vec{E}$$

로 나타내며, 여기서 X_{el}를 electrical susceptibility라고 한다. 이때의 ε_r 또는 X_{el}은 tensor로 표기된다. polarization P는 unit가 charge/area로 정의되고, 이것은 electric dipolemoment를 volume에 대하여 나타내게 된다. 서로 다른 dielectric polarization mechanism이 그림 1에 기술되는데 이것은 어느 특정한 frequency 범위에서 적용된다. 따라서 frequency에 따른 dissipation factor 관계를 그림 2에서 보여준다.

2 Capacitor Ceramics and Piezoelectric Ceramics

2.1 Ferroelectricity

Ferroelectricity 특성은 polar material중에서 어느 온도범위 내에서의 electrical flux density D와 electric field strength E와의 상관관계를 하나의 hysteresis curve로 표시할 수 있는 특성을 말한다. 이때의 ferroelectricity 표기는 ferromagnetism에서 유사한 방법으로 표기되었지만, iron(Fe)과는 아무런 관계가 없는 상태이다.

Ferroelectric hysteresis curve는 그림 3 (a)와 같이 나타나고, 측정회로는 그림 3 (b)와 같이 나타난다. (Sawyer-Tower circuit). oscilloscope의 수직표기는 capacitor C_x에서 electrical flux density D의 charge에 비례하고, 수평방향의 편차는 field strength $\vec{E}$에 비례한다.

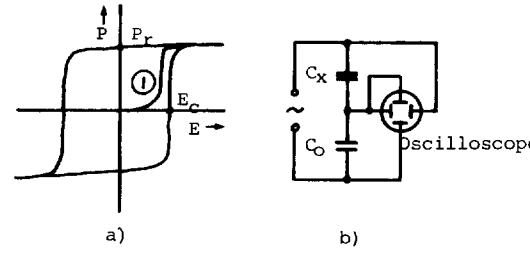


그림 3. a) Ferroelectric hysteresis (① new curve).
b) Sawyer-tower circuit

Ferroelectrics에서 언제나 적용되는 것은

$$D(E)=P(E)+\varepsilon_0\vec{E}$$

로서, field $\vec{E}=0$에서 나타나는 polarization P_r을 remanence polarization이라 하며, polarization $P=0$에서 나타나는 feld E_c를 coercive field strength라 표기한다. effective dielectric constant는 다음과 같은 함수관계로 표시되어 ;

$$D=\varepsilon_{reff}\cdot\varepsilon_0\vec{E}\approx P(E)$$

측정 field의 amplitude와 ferroelectric material의 history에 관계된다. 이에 따라 high signal 또는 low signal dielectric constant로 분리하고, dissipation factor tan δ는 field amplitude의 증가에 따라 마찬가지로 증가하게 된다. 따라서 hysteresis curve의 area가 energy loss의 기준이 된다. remanence polarization P_r이 온도가 증가함에 따라 감소하고, 어느 특정한 온도, 즉 curie temperature(T_c)에서 사라진다. curie point에서 material 특성이 ferroelectric에서 paraelectric state로 전환된다. 이 관계를 그림 4에서 보여준다.

Low signal permittivity ε_r이 curie point에 가까와질 수록 증가되고, 그 이상의 온도에서 다시

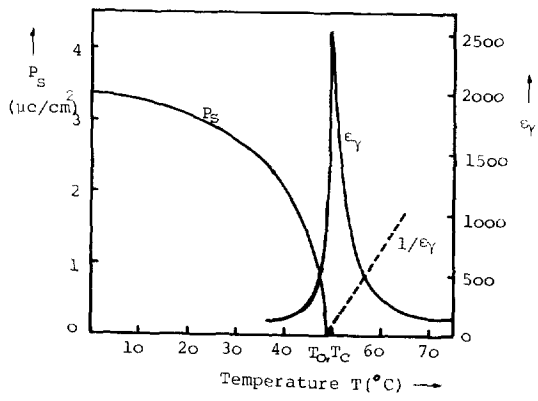


그림 4. TGS singlecrystal에서 spontaneous polarization Ps, dielectric Constant ε_r과 $1/\varepsilon_r$의 온도 특성

감소되는 함수관계가 ;

$$\varepsilon_r(T)=\frac{C}{(T-T_o)^n},\quad T>T_c$$

로 나타내는 것을 그림 4에서 보여준다. curie point에서 ε_r이 maximum을 나타내고, 대부분의 ferroelectric material에서 Curie-Weiβ law가 성립되어 이때 n=1이 적용된다. 이때 C는 Curie-Weiβ constant를 나타내고, T_o가 curie-Weiβ temperature를 나타내며, 이때 $T_o \leqq T_c$관계를 이루게 된다.

Ferroelectric 특성의 기본은 spontaneous polarization(P_s)에 기초를 두며 curie point 이하의 온도범위에서 phase transition이 발생하고, 이때 crystal lattice 내에 있는 unit cell의 결정상태 변화, 즉 결정 symmetry가 감소되어 spontaneous permanent dipolemoment를 형성하는데 있다. crystal의 deformation, 또는 spontaneous polarization은 일단 아주 작은 범위내에서 ferroelectric domain을 형성하게 되고, domain의 배열은, 전기적, 기계적 energy를 최소화시키는 범위에서 이루어진다.

Spontaneous polarization의 생성 mechanism은 ordnungs type과 deformation type으로 분류된다. ordnungs type은 어느 특정한 ion들이 많은 층을 이루면 존재하고, T_c 이상에서는 statistic하게 분포되어 있게 된다. curie point를 넘어서 냉각됨에 따라, 어느 한 ordnung이 형성되어 하나의 dipole moment를 이루게 된다. 이와 같은 ordnungs type의 polarization을 갖는 crystal의 대표적인 예가 KH_2PO_4(kalium dihydrogenphosphate)이다. deformation type의 대표적인 예는 $BaTio_3$이며, 이것의 perovskite structure를 그림 5에 나타낸다. curie point 이상에서의 crystal symmetry는 cubic을 나타내고, curie point(T_c=120℃)이하로 냉각되면 tetragonal phase는 transition이 일어나게되어, 이때 ferroelectric property를 나타낸다. 이때 Ti^{4+}-ion이 본래의 위치로 부터 C-axis에 평행하게 deformation을 이루어, 하나의 permanent dipole moment를 C-axis 방향으로 나타내게 된다. $BaTiO_3$에 있어서의 phase transition은 더욱 낮은 온도에서 다시 일어나며 이때의 transition point는 5℃ 전후(orthorhombic)와 다시 −80℃ 전후(rhombohedral)에서 일어난다. 이 관계도 그림 5에서 보여준다.

Ferroelectric material에서의 polarization은 unit cell에서 평행이면서 또한 동일한 방향으로 dipole이 배열되어 있는 반면, 이웃한 unit cell에서의 dipole 배열이 antiparallel한 경우를 보게 되며(그림 6), 이러한 경우를 antiferroelectric material이라 부른다. paraelectric phase에서 antiferroelectric phase로 transition이 일어날 경우, 역시 ε_r의 maximum을 초래하지만 spontaneous polarization(P_s)를 수반하지는 않는다. 이러한 antiferroelectric material의 대표적인 예는 ammonium dihydrogenphosphate($NH_2H_2PO_4$)와 $PbZrO_3$를 들 수 있다.

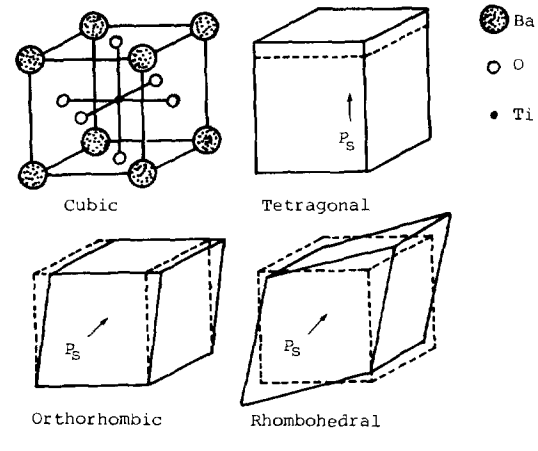


그림 5. Perovskite structure of $BaTiO_3$ with phase transition in different temperature

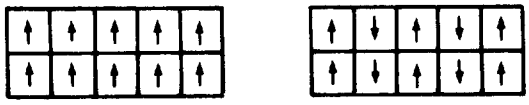


그림 6. Dipole orientation of ferroelectric phase (a) and antiferroelectric phase (b)

Ferroelectric material의 공업적 응용에 대해서는 표 1에 나타나 있다.

$BaTiO_3$-ceramics에 있어서의 높은 dielectric constant는 ceramic capacitor로의 이용에 기초를 이루고, semiconducting bariumtitanate에서의 polarization과 space charge와의 교호작용을 온도에 따라 이용하는 PTC-resistor 관계는 실제 전자회로에의 이용도가 상당히 크다.

또한 ferroelectric material은 piezoelectric 특성을 나타내므로 특히 electromechanical transformer에의 이용에 중요한 역할을 한다. ferroelectric ceramics는 우선 소결이 된 후에 piezoelectric 특성을 나타내지 않는데 이는 crystalline과 domain의 statistical한 분포에 의한 것으로서, curie point 이상의 온도에서 poling을 한 후에 predominent direction이 형성된다.

2.2 Capacitor Ceramics

Capacitor ceramics는 이미 오래 전부터 사용되어 왔다. 이것에 대한 특성은 기계적, 화학적 안정도(stability) 이외에 높은 전기절연성 뿐만 아니라 electrical breakdown에 대한 耐久性도 요구된다. 근래의 ceramic capacitor用으로는 높은

표 1. Some technical important ferroelectrics

Ferroelectrics	Chemical Composition	Tc(°C)	Application
1) Ordnung Type:	C_4		
Seignette-Salt	$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	(−18)	Buzzer
Triglycinsulfate (TGS)	$(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$	24 49	Pyrodetector
Kaliumdihydrogenphosphate	KH_2PO_4 KD_2PO_4	−150 −60	Electrooptical Modulator
2) Deformation Type:			
Barium Titanate	$BaTiO_3$	120	Ceramic Capacitor PTC-Resistor
Lead Zirconate-Lead Titanate	$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$	380	Piezoelectric Transformer
Lithiumniobate	$LiNbO_3$	560	
Lithiumtantalate	$LiTaO_3$	1,210	
PLZT-Ceramics	$(Pb_xLa_{1-x})(Zr_yTi_{1-y})O_3$	665	Electrooptic Device

정전용량(capacitance)에 의하여 상당히 높은 dielectric constant를 갖는 ferroelectric material 또는 이와 유사한 재료가 이용된다. 이와같은 ferroelectrical substance에 대한 온도특성의 예를 $BaTio_3$의 경우에 대하여 그림 7에서 보여준다.

1) Low K—Ceramics

Dielectric constant(ε_r)가 약 500전 후 인 capacitor ceramics를 low K—ceramics라 하고, 이 경우 서로 다른 ε_r값을 갖는 ceramics를 혼합해서, 서로 다른 crystal phase로 이루어진 ceramics를 말한다. 이때 ε_r의 mixed rule이 Lichtenecker's rule로 적용되어 logarithmic mixed rule이 ;

$$\log \varepsilon_r = C_1 \log \varepsilon_{r1} + C_2 \log \varepsilon_{r2} + \cdots\cdots$$

으로 표시된다. low K dielectrics로 이루어진 type 1 ceramic capacitor의 온도특성(temperature coefficient)이 상당히 중요한 역할을 하며, temperature-compensation 회로인 oscillator circuit에의 이용도에 지대한 역할을 한다.

Dielectric constant ε_r값이 20~200 정도에 이르는 소재는 주로 rutile(TiO_2) structure에 의해 이루어진다. rutile structure가 갖는 온도특성이 curie-Weiβ law에 근사한 관계를 이루지만, curie temperature가 분명하지 않고(−1600℃로 추정), 여러 특성으로 미루어 보아 ferroelectric property와는 다른 것으로 나타난다. low K dielectrics의 표기방법이 temperature coefficient에 따라

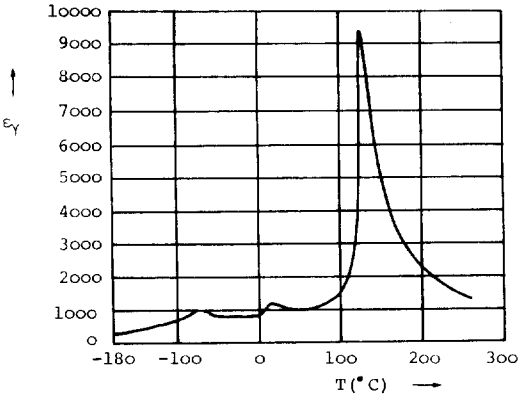


그림 7. Temperature characteristic of $BaTiO_3$ — ceramics

"negative(N)"와 "positive(P)"로 구별하여 alphabet N과 P를 사용한다. 이에 관한 특성을 table 2에서 보여준다.

2) High K—Ceramics

Dielectric constant ε_r이 약 500 이상인 경우를 high K—ceramics로 정의하며, $BaTiO_3$의 ferroelectric property를 주로 이용하게 된다. 이에 따라 hysteresis 특성이 polarization과 electric field E에서 뚜렷이 나타나고, 높은 field를 가한 경우 spontaneous polarization의 poling 방향이 부분적으로 변화됨에 따라 effective dielectric constant가 상대적으로 증가되는 경우를 보게된다.

High K—ceramics에서의 온도특성은 $BaTiO_3$의 ferroelectric property에 지대한 영향을 받게

표 2. Physical properties low K-ceramics

Material	Temp. Coefficient Class	Dielectric Constant (Er)	Dissipation factor (tan δ. MHz)	Breakdown Voltage (1min)
Steatite (normal)	P 100	5~7	$12\cdot10^{-4}$	34KV
Mg-titanate	P033			
	(NPO)	12~40	$3\cdot10^{-4}$	15KV
TiO_2+other oxide	P100	25~40	$3\cdot10^{-4}$	15KV
	(NPO)			
TiO_2(Rutile)	N330~N750	40~60	$6\cdot10^{-4}$	15KV
$SrTiO_3+CaTiO_3$	N1500~N5600	60~200	$15\cdot10^{-4}$	7KV

되는데, $BaTiO_3$ base solid solution batch를 이루는 정도에 따라 온도특성이 변화된다. 이때 주로 사용되는 element가 Strontium(Sr), Calcium (Ca), Lead(Pb), Bismuth(Bi), Zirconium(Zr), Tin(Sn)등으로 이루어진다.

표 3에서 high K—ceramics에 대한 전기적 특성을, 그리고 그림 8에서 high K—ceramics를 이용한 type 2 capacitor의 온도특성을 보여준다.

표 3. Electrical property of $BaTiO_3$ base high K-ceramics

Material: Ba TiO_3Solid Solution
1) Dielectric Constant (ε_r): 2000~6000
2) Temperature Characteristic($\Delta\varepsilon_r/\varepsilon_{r,20}$)
   +10%
   :
   −40%
3) Dissipation Factor (tan δ, 1 KHz):
   $10\sim15\cdot10^{-3}$

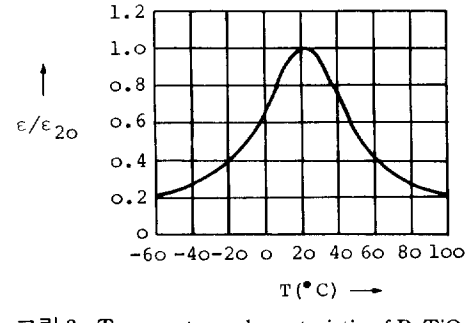


그림 8. Temperature characteristic of $BaTiO_3$ — mixed ceramic

2.3 Piezoceramics(壓電 Ceramics)

앞에서 보았듯이 ferroelectric material에서는 spontaneous polarization 효과가 일어나고 crystal lattice내에 dipole structure가 존재하게 된다. 소결이 끝난 직후에는 dipole character를 나타내지 않는데, 이것은 crystal lattice내의 orientation

표 4. Electrical properties of piezocramics

Main Component			$BaTiO_3$	$PbTiO_3$	$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$	$PbNb_2O_6$
Curie Temp.	Tc	°C	120	500	360	500
Dielectric Constant	ε_{33}^T		1000	130	1700	250
	ε_{11}^T		1000	180	1730	250
Dissipation factor	tanδ	10^{-3}	10	3	20	6
Specific Resistance	ρ_D	Ω.cm	10^{12}	10^{11}	10^{14}	10^{12}
Density	γ	$g.cm^{-3}$	5.4	7.7	7.6	5.8
Piezomodule	d_{33}	$10^{-12}m.V^{-1}$	100	39	370	80
	d_{31}	"	−40	−4.2	−170	−10
	d_{15}	"	220	360	580	115
Voltage Constant	g_{33}	$10^{-3}Vm/N$	14	33	25	36
	g_{31}	"	−5	−3.5	−11	−4.5
	g_{15}	"	22	28	38	−50
Coupling factor	K_{33}	"	0.40	0.40	0.70	0.38
	K_{31}	"	0.14	0.04	0.34	0.04
	K_{15}	"	0.40	0.33	0.68	0.33
	K_p	"	0.25	0.07	0.60	0.07
Elastic Coefficient	S_{33}^E	$10^{-12}m^2/N$	9	8.4	19	21
	S_{11}^E	"	8.5	7.8	16	25
	S_{44}^E	"	20	30	47	55
Mechanical-quality factor	Qm	"	350	1200	70	10

이 grain과 grain 사이에서 statistic하게 분포되어 있기 때문이다. ferroelectric property에 있어서의 중요한 특성 중에 하나가 orientation의 방향을 강한 field의 영향으로 변환시킬 수 있다는 것이다. 표 4에 대표적인 piezoceramics의 특성을 나타낸다.

이와 같은 piezoelectric material의 mechanism을 나타내는 함수관계는 ;

$$S=S^E \cdot T+d \cdot E$$

$$D=\varepsilon^T \cdot E+d \cdot T$$

S ; relative deformation

T ; elastic stress

E ; electric field

D ; dielectric deformation

S^E ; elastic constant under the constant electric field

d ; piezomodule

ε^T ; dielectric constant under the constant elastic stress

여기서 mechanical force가 piezoelectric material에 작용되면 electric current가 형성되며, 이에 대한 inverse effect도 가능한 것이 특징이다.

Piezoelectric 특성을 나타내는 몇가지 상수들이 사용되는데, 표 4에 나타난 상수관계를 간략하게 기술하면 다음과 같다.

a) Dielectric constant는 대개 ε^T로 나타내고, 외부의 force를 zero로 고정시킨 상태에서 대개 300~3000 정도를 나타낸다.

b) Dissipation factor tan δ 는 대개 $1 \sim 30 \cdot 10^{-3}$ 범위에 들고,

c) Mechanical quality factor는 10~3000 정도로 나타나고,

d) Piezoelectric constant는 대개 longitudinal effect에서 ; $d_{33}=100 \cdot 10^{-12}$ C/N을 나타내고,

e) Piezoelectric activity는 흔히 coupling factor K로 표시되고 다음과 같은 함수관계를 갖는다.

$$K^2=1-\frac{\varepsilon^S}{\varepsilon^T}$$

Piezoelectric constant와의 관계를 표시하면,

$$K^2=\frac{d^2}{\varepsilon^T S^E}$$

Coupling factor는 electric→mechanic에 의해 하나의 energy transformation의 기준이 된다. lead titanate와 lead zirconate가 이루는 solid solution 관계를 그림 9에서 보여주는데, 높은 온도에서 cubic perovskite structure를 갖는 것을 알 수 있다.

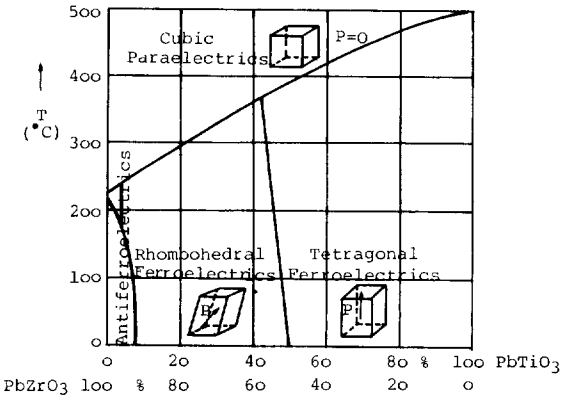


그림 9. Phasediagram of solid solution $PbZrO_3$ — $PbTiO_3$

Lead zirconate와의 solid solution에서 maximum 10% 까지의 lead zirconate에 의해 antiferroelectric phase를 나타낸다. 이것은 nonpolar하며 piezoelectric effect를 나타내지 않는다. 다른 solid solution 범위에서는 ferroelectric 특성을 갖으며, 이때의 modification이 2가지로 분리되는데, 하나는 tetragonal phase이며, 다른 하나는 rhombohedral phase를 symmetry로 갖는다.

Piezoceramics의 application은 상당히 다양하여, ignite element, frequency filter, high voltage transformer, buzzer, ultrasonic 등으로 이용도가 광범위하며, 앞으로도 계속 증가되는 추세에 있다.

참고문헌

1) B.Jaffe, W.R. Cook, and H.Jaffe: Piezoelectric Ceramics, Academic Press, London (1971).
2) IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics (1961), Porc. IRE 49 (1961) 1161.
3) Smolenski, G.A. and Krajnik, N.N.: Ferrolelektrika und Antiferroelektrika, B.G. Teubne, Verlagsgesellschaft, Leipzig (1972).
4) Ch. Kittel: Introduction to Solid Solution Physics, John Wiley Inc., N.Y. (1976).
5) H.H. Martin: Die Ferroelektrika, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig (1964).
6) E. Fatuzzo Und W.Merz: Ferroelectricity, North Holland Publishing Comp., Amsterdam (1967).