

비선형광학 단결정 KTP의 상전이 및 완화특성에 관한 연구

최 병 춘*

Phase Transition and Relaxation Properties of Nonlinear-Optical KTP

Single Crystal

Byung-Chun Choi*

요 약

비선형광학 단결정 KTP에 대해 고온 분말 X-선 회절실험과 복소 유전상수 측정실험 등을 수행하였다. 고온 분말 X-선 회절 실험 결과를 Lipson 과 Cohen의 해석적 방법을 사용하여 분석하였으며, 그 결과 900°C 이하의 온도에서는 어떠한 구조상전이라도 없음을 확인하였다. 그리고 KTP는 900°C 이상에서 구조상전이가 있으며, 상전이 온도 이상의 온도영역에서도 직방정계(orthorhombic)에 속함을 확인하였다. 한편, 복소 유전상수 측정결과를 현상론적인 유전완화식에 적용하였으며, 이로부터 K⁺ 이온의 hopping에 의한 KTP의 유전완화 mechanism 은 -78°C 부터 200°C까지 단일모드로 Cole-Cole relation을 만족함을 알았다. 이때 완화시간은 Vogel-Fulcher relation을 따르고 있으며, 200°C 이상의 온도영역에서는 hopping mechanism과 더불어 열적으로 활성화된 확산 mechanism이 KTP의 전도특성을 지배하는 것으로 보인다.

Abstract

We have carried out the measurements of complex dielectric constants with impedance/gain-phase analyzer using capacitor method and the experiments of high temperature X-ray powder diffraction with X-ray diffractometer using $\theta-2\theta$ scan method for the KTP single crystal which has the premium nonlinear optical properties. From the results of high temperature X-ray powder diffraction experiments, we have found that KTP does not undergo structural phase transition below 900°C. It is clear that KTP undergoes structural phase transition around 900°C and belongs to orthorhombic above 900°C still. However, we have applied phenomenological relation of dielectric relaxation to the results of complex dielectric measurement and have found that relaxation mechanism of KTP well satisfies the Cole-Cole relation over the temperature range from -78°C to 200°C. And also the relaxation time well satisfies the Vogel-Fulcher relation. It is regarded that the hopping and thermally activated diffusion mechanism may control the conduction behavior of KTP above 200°C.

1. 서 론

KTP(KTiOPO₄) 단결정은 우수한 비선형광학 특성 때문에 전기광학 장치 및 광도파관, laser 장치 소자로서의 응용성이 높이 평가되고 있고,^[1-4] 현재 상업적으로 Nd:YAG laser의 SHG 발생소자로 널리 쓰이고 있다.

* 부경대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Pukyong National University)

<접수일자 : 1998년 10월 15일>

KTP는 점군이 mm2(공간군 Pna2₁)인 직방정계(orthorhombic) 구조이고 격자상수는 $a=12.832\text{\AA}$, $b=10.5813\text{\AA}$, $c=6.4004\text{\AA}$ 이며, 단위 세포당 8개 분자가 들어 있다.^[2,5] 구조적 특징으로서는 c 축 방향을 따라 TiO₆ 팔면체들이 PO₄ 사면체에 의해 분리되어 사슬(chain)구조를 이루고 있다.^[2,5] 이러한 사슬구조 속에서 TiO₆ 내의 Ti-O의 비대칭 결합효과가 KTP 단결정이 큰 비선형광학계수 및 전기광학계수를 가지는데 기여하는 것으로 알려져 있다.^[1,2] KTP 단결정은 1172°C 근방에서 녹으면서 분해되는 것으로 알려져 있고,^[6] 주로 flux 법이나 hydrothermal 법으로 결정을 성장시킨다. 성장된 결정은 0.35 μm~4.5 μm 파장영역에서 투명하며 눈으로 보기에 색깔이 없이 투명하다.^[7,8] 특히 flux 법으로 얻은 KTP 단결정의 경우에 Q-switching된 Nd:YAG laser를 사용했을 때 380MW/cm²의 입사파에 대해 59% SHG 변환효율을 보이는 경우도 있음이 보고된 바 있다.^[3]

KTP 단결정의 유전적 특성에 관한 연구는 여러 연구자들^[9-15]에 의해 수행되었으나 고온 영역에서의 X-ray 실험은 전혀 이루어지지 않았으며, 600°C 이하에서의 유전완화 mechanism에 대한 연구는 Choi 등^[14,15]에 의한 연구를 제외하고는 거의 없는 상태이다. 이에 본 연구에서는 KTP의 상전이 및 구조, 유전완화 특성 등에 대한 보다 나은 이해를 위해 flux 법으로 성장시킨 KTP 단결정에 대한 고온 분말 X-선 회절실험과 600°C 이하 온도영역에서의 복소 유전상수 측정을 수행하였다.

II. 실험 방법

실험에 사용한 KTP 단결정은 본 실험실에서 flux법으로 전형적인 직방정계 KTP 단결정으로 잘 성장시킨 것으로 사용하였으며, 그 성장조건 및 morphology 특성 등에 관해서는 이미 보고한 바 있다.^[8]

먼저 시료 결정을 분쇄하여 분말로 만든 다음, 분쇄 과정에서 결정분말에 생길 수 있는 strain을 제거하기 위해 800°C에서 1시간 동안 공기분위기에서 열처리 한 후에 $\theta-2\theta$ scan 법으로 X-선 회절 실험을 하였다. 이때 사용한 X-선 회절기는 RIGAKU GDX-1193A 였다. 측정각의 범위는 $2\theta=10^\circ \sim 160^\circ$ 범위였고, 0.002° 간격으로 2초씩 step scanning을 하였다. 출력은 30kV×10mA 으로 하고 Cu-target에서 발생한 X-

선에 Ni-filter를 사용하였다. 측정 온도는 실온에서 1000°C까지 100°C 간격으로 측정하였다. 각 측정 온도에서는 충분히 열적 평형 상태에 도달하도록 기다려 측정하였다.

복소 유전상수 측정용 시료는 c 축에 수직인 면을 절단하여 연마한 평행판 결정을 사용하였다. 시료의 두께는 0.5mm였고, 전극의 넓이는 15mm²이었다. 사용한 전극은 Pt paste였으며, 전극의 잔여 저항효과를 줄이기 위해 800°C에서 1시간 동안 열처리하였다. 복소 유전상수 측정을 위해 Hewlett Packard 사의 Impedance/ Gain-Phase Analyzer (HP4194A)를 사용하였다. 전기로 내의 온도조절을 포함한 측정의 모든 과정은 IEEE-488 interface 카드를 이용하여 personal computer로 제어하였다. 측정장치의 온도 편차는 ±0.3°C 였다. 전기로 속의 시료는 HP standard test cable 과 10cm 길이의 백금선으로 연결하였으며, 이때 residual inductance는 1.1 μH 였다. 측정온도 범위는 실온에서 1000°C까지 1°C 간격으로 측정하였으며, 한 측정온도에서 100Hz~15MHz 사이의 51가지 주파수에 대해 측정하였다. 유전상수의 계산에서 residual impedance 효과^[18]를 고려하였다.

III. 결과 및 논의

1. 고온 분말 X-선 회절실험

그림 1은 온도에 따른 KTP 단결정 분말의 X-선 회절무늬 변화를 나타낸 것이다. 1000°C 까지 회절무늬가 예리하게 나타나고 있으므로 다른 연구자들이 우려하는 열적 분해에 의한 유리상으로의 전이는 일어나지 않았음을 알 수 있다. 또한 900°C 이상에서 peak의 변화가 있으며, peak의 수가 줄어들고 있는 것으로 보아 이 부근에서 구조상전이가 있을 것을 예측할 수 있고, 그 변화는 보다 높은 대칭성을 갖는 쪽으로 일어날 것으로 기대된다. 한편 800°C까지는 peak의 상대적 인 intensity만 변화를 보이고 있어 구조변화를 동반하지 않는 내부 격자요동만이 온도증가에 따라 활발해지고 있음을 보여준다.

Miller 지수는 관측한 $\sin^2\theta$ 값과 면간 관계식(Bragg 법칙)이 내포하고 있는 상호관계를 이용하여 구하는 Lipson의 해석적 방법^[16]을 사용하여 구할 수 있고 직방정계에서는 다음과 같이 주어진다.

$$\sin^2\theta_{hkl} = q_{hkl} = Ah^2 + Bk^2 + Cl^2 \quad (1)$$

여기서 $A = \lambda^2/4a^2$, $B = \lambda^2/4b^2$, $C = \lambda^2/4c^2$ 이다.

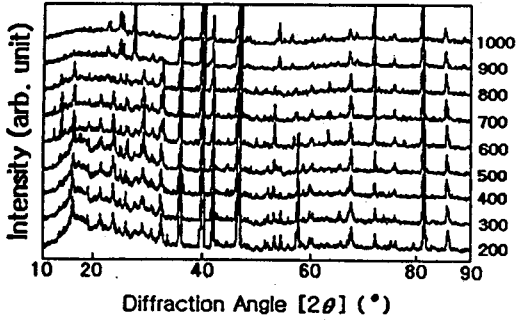


그림 1. 온도에 따른 KTP 단결정 분말의 X-선 회절무늬.
Fig. 1. X-ray diffraction patterns of KTP single crystal powder as varying with temperature.

실온에서 측정된 KTP 단결정의 회절 peak 들에 대해 Miller 지수를 결정해 본 결과 평균 0.2%의 오차 이내에서 모든 회절 peak 들이 (1)식을 만족하였고, 이 결과는 JCPDS 및 다른 연구자들의 결과^[6]와 잘 일치하고 있으며, Masse등^[17]이 예견한 존재 가능한 약한 회절 peak 까지 모두 확인하였다.^[8] 뿐만 아니라 1000°C까지의 모든 X-선 회절 무늬들은 (1)식을 잘 만족하였고 모든 peak 들에 대해 직방정계의 Miller 지수를 결정할 수 있었다. 따라서 KTP는 1000°C 까지 결정계 (crystal system)는 변화없이 직방정계를 유지한다고 할 수 있고, 900°C 이상에서는 같은 직방정계 내에서 점군만 달라지는 구조로 상전이가 일어난다고 말할 수 있다.

각 온도에서 KTP 단결정의 격자상수는 (1)식을 적용하여 구한 Miller 지수를 이용하여 해석적 방법에 의한 Cohen의 최소자승법^[18]으로 구할 수 있다. 직방정계에 대한 Cohen의 외삽함수는 다음과 같다.

$$\sin^2\theta = D\alpha + C\beta + B\gamma + A\delta \quad (2)$$

여기서, $D = \lambda^2/4a^2$, $C = \lambda^2/4b^2$, $B = \lambda^2/4c^2$, $A = D/10$ 이고, $\alpha = h^2$, $\beta = k^2$, $\gamma = l^2$, $\delta = 10\cos^2\theta \sin\theta$ 이다. 필요한 상수 A, B, C, D 값들은 다음의 표준방정식들로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma \alpha \sin^2\theta &= D\Sigma \alpha^2 + C\Sigma \alpha\beta + B\Sigma \alpha\gamma + A\Sigma \alpha\delta \\ \Sigma \beta \sin^2\theta &= D\Sigma \alpha\beta + C\Sigma \beta^2 + B\Sigma \beta\gamma + A\Sigma \beta\delta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Sigma \gamma \sin^2\theta &= D\Sigma \alpha\gamma + C\Sigma \beta\gamma + B\Sigma \gamma^2 + A\Sigma \gamma\delta \\ \Sigma \delta \sin^2\theta &= D\Sigma \alpha\delta + C\Sigma \beta\delta + B\Sigma \gamma\delta + A\Sigma \delta^2 \end{aligned}$$

Miller 지수에 (2)식과 (3)식을 적용하여 구한 격자상수는 실온에서 $a=12.8274\text{\AA}$, $b=10.5862\text{\AA}$, $c=6.4009\text{\AA}$ 였다. 이 결과는 Tordjman 등^[5]의 결과와 잘 일치하고 있다. 온도에 따른 KTP 단결정의 격자상수 및 단위포의 부피변화를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

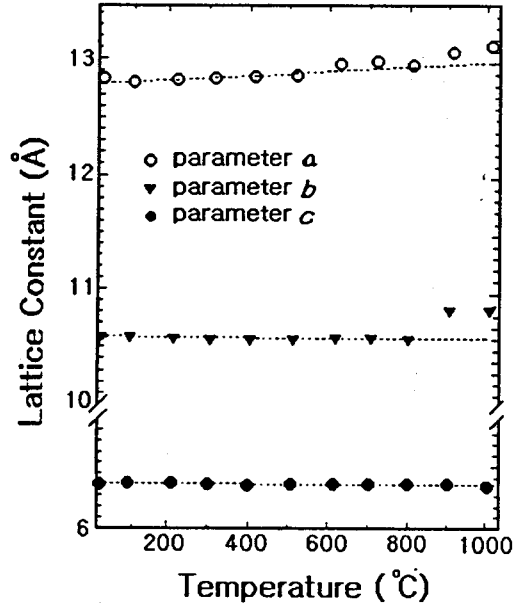


그림 2. KTP 단결정 격자상수의 온도에 따른 변화.
Fig. 2. Temperature dependence of lattice parameter of KTP single crystal.

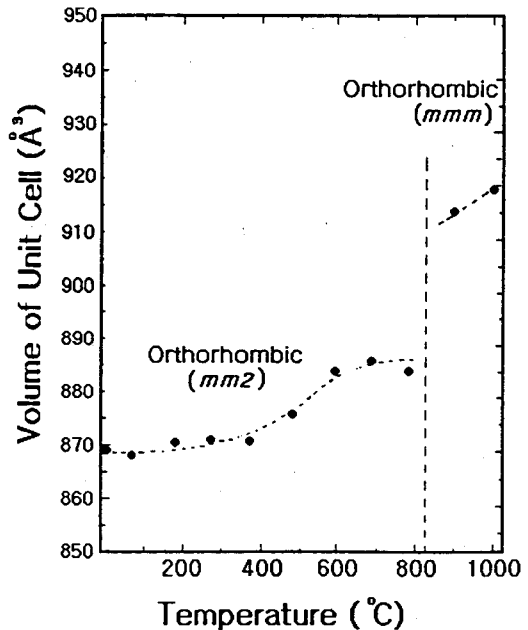


그림 3. KTP 단결정 단위포 부피의 온도에 따른 변화.
Fig. 3. Temperature dependence of unit cell volume of KTP single crystal.

그림 2에서 보면 900°C 근방에서 격자상수 c 의 불연속 변화는 없지만 격자상수 b 에서는 불연속 변화가 두드러지게 나타나고, 격자상수 a 에서도 약간 보인다. 그러나 그림 3에서 보면 단위포의 불연속적인 부피변화는 900°C에서 현저하게 나타나고, 이로 미루어 보아 900°C 근방에서 구조상전이(transition)가 있음을 알 수 있다. 한편 900°C 이하의 온도영역에서는 구조상전이가 있음을 보여주는 어떠한 증거도 보이지 않는다.

본 연구에서 적용한 해석적방법^[16,18]에 의한 구조해석 결과에 따르면 KTP는 상전이 온도 이하에서 점군이 mm2로 다른 연구자들의 실온에서의 결과^[5]와 잘 일치함을 알 수 있었고, 상전이 온도 이상에서도 모든 회절 peak에 대해 직방정계의 점군 mmm에 해당하는 Miller 지수들을 결정할 수 있었다. 지금까지 상전이 온도 이상에서의 구조는 고온에서의 열적인 분해효과 때문에 확인할 수 없다고 알려져 있었고,^[11] 다만 몇몇 연구자들에 의해 mmm의 대칭구조를 가질 것으로 제안된 바 있을 뿐이었다.^[11,19] 그림 1에서 900°C 이상에서의 회절무늬는 유리상이 아닌 결정상 회절무늬를 보여주고 있으며, 이는 분해가 일어나더라도 국소적인 변화만 있고 그 효과가 그리 크지 않음을 알려 준다.

한편 그림 2에서 상전이 온도 이하에서의 점군의 기울기로부터 KTP 단결정의 선형열팽창 계수를 구하였고, 그 값은 $\alpha_{11}=2.705 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{22}=3.235 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, $\alpha_{33}=3.290 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 으로 다른 강유전체 결정들보다 큰 값을 보이고 있음을 알았다.

2. 유전완화 특성

그림 4에 KTP 단결정의 온도에 따른 유전완화 스펙트럼을 보였다. X-선 회절실험 결과에서 이 온도영역에서는 상전이가 없음이 명백하다. 따라서 이 유전이상(transition)은 상전이와 관련이 없는 결정 내부의 국소적인 요동에 의해 발생하는 유전완화 현상으로 보는 것이 타당하다. 이 유전완화 현상은 이미 보고되어 있는 500°C 부근에서의 유전완화와 연결되어 있다. 그리고 이 현상은 c 축 방향으로만 일어나고 a 또는 b 축 방향으로서는 관측되지 않는다. 따라서 이 유전완화 현상은 KTP에서 강하게 나타나는 c 축 방향의 초이온전도 특성과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다.

이제 이 유전완화 현상을 현상론적인 완화식으로 해석해 보자. 그림 4에서 허수부(ϵ'')의 대칭성으로부터 다음과 같은 Cole-Cole type^[20]의 유전완화식을 고려

할 수 있다

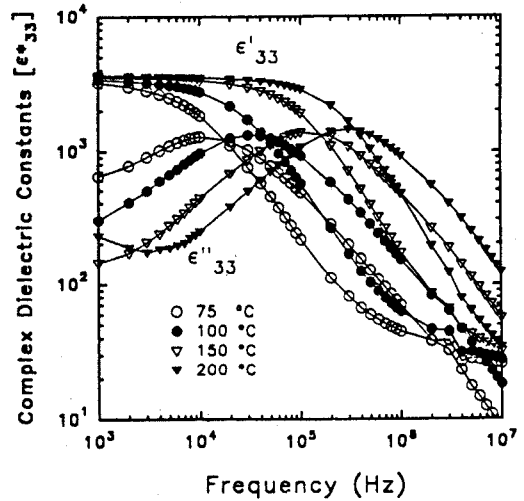


그림 4. KTP 단결정의 유전완화 스펙트럼.

Fig. 4. The spectrum of dielectric relaxation for KTP single crystal.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau_p)^{1-\alpha}} \quad (4)$$

여기서 τ_p 는 온도의존성이 있는 완화시간이고, ϵ_0 와 ϵ_{∞} 는 각각 저주파수 및 고주파수 극한에서의 유전율이다. 식 (4)에서 지수 α 는 $0 < \alpha < 1$ 사이의 값을 가지며, 온도의존성이 있는 것으로 간주되고, $\alpha \rightarrow 0$ 의 극한에서 Debye type으로 환원된다. 이 α 가 Cole-Cole plot의 반원호의 원점이 실수축 아래로 내려간 기울기, $\tan(\alpha\pi/2)$ 를 결정한다.

식 (4)를 실수부와 허수부로 분리하여 나타내어 보면

$$\begin{aligned} \epsilon'(\omega) &= \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})[1 + (\omega\tau_p)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)]}{1 + (\omega\tau_p)^{2(1-\alpha)} + 2(\omega\tau_p)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)} \\ \epsilon''(\omega) &= \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})(\omega\tau_p)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + (\omega\tau_p)^{2(1-\alpha)} + 2(\omega\tau_p)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)} \end{aligned} \quad (5)$$

로 쓸 수 있다. 식 (5)의 유전손실(ϵ'') peak는 α 값이 커짐에 따라 보다 완만해 진다는 점을 제외하고는 Debye type과 똑같이 대칭적인 peak 모양을 보여주므로 Cole-Cole 관계식을 Debye-like 완화식이라고 부른다. 이 Cole-Cole type 완화식의 유전손실 스펙트럼

으로부터 완화시간 분포함수 $f(\tau)$ 는

$$f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(\alpha\pi)}{\cosh[(1-\alpha)\ln(\tau/\tau_p)] - \cos(\alpha\pi)} \quad (6)$$

로 정의 된다.^[20]

그림 5를 보면 명백하게 Debye 관계식보다는 Cole-Cole 관계식을 따르고 있음을 알 수 있다. Cole-Cole plot이 가능한 400°C 까지의 data로부터 얻은 Cole-Cole 완화식의 상수 값들을 온도에 따라 정리하여 표 1에 나타내었다.

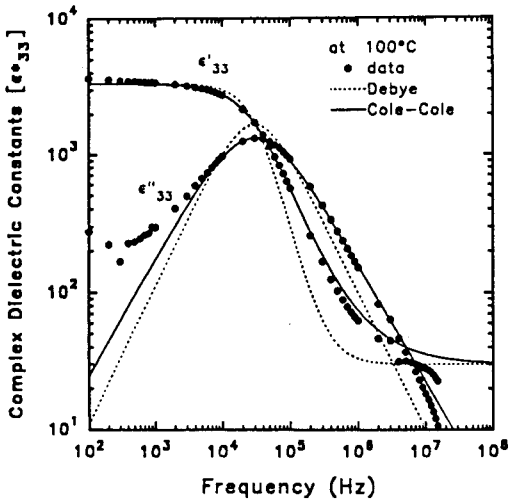


그림 5. 100°C 유전완화 스펙트럼에 대한 유전완화식의 비교.
Fig. 5. The comparison between dielectric relaxation equations for the dielectric relaxation spectrum of 100°C.

표 1. Cole-Cole 완화식에서 구한 유전완화 상수값.
Table 1. The value of dielectric relaxation parameters obtained from the Cole-Cole relation

Temp.(°C)	α	$\omega_p(\text{kHz})$	$\tau_p(\mu\text{sec})$	$\Delta\epsilon$
75	0.145	12	13.3	3220
100	0.145	30	5.30	3320
125	0.145	65	2.45	3420
150	0.140	110	1.45	3480
175	0.140	190	0.84	3540
200	0.140	265	0.60	3575
225	0.130	370	0.43	3610
250	0.125	500	0.32	3650
275	0.110	620	0.26	3700
300	0.100	750	0.21	3740
325	0.090	860	0.19	3780
350	0.085	970	0.16	3820
375	0.080	1050	0.15	3860
400	0.075	1140	0.14	3930

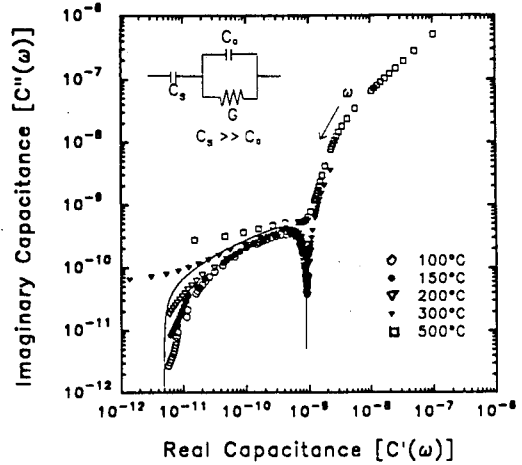


그림 6. 복소 capacitance의 log-log plot. 실선은 (8)식을 fitting한 것이다.

Fig. 6. The log-log plot of complex capacitance. The solid line indicates the fitting of eq. (8).

그림 6의 삽입그림에서 한 개의 C_0 -G 회로에 직렬로 C_s 가 연결된 등가회로를 생각하자. 이 경우 C_0 -G 회로는 상대적으로 전도가 잘 되는 시료의 hopping barrier에 대응되고, C_s 는 시료의 potential barrier에 대응되는 물리적 의미를 갖는다. 이 등가회로의 복소 impedance 및 복소 capacitance 는

$$Z(\omega) = \frac{1}{i\omega C_s} + \frac{1}{G + i\omega C_0} \quad (7)$$

$$C(\omega) = \frac{1}{i\omega Z(\omega)} \quad (8)$$

로 쓸 수 있다.

그림 6은 500°C까지의 $C'(\omega)$ 과 $C''(\omega)$ 를 log-log plot 으로 본 것이다. 그림에서 실선은 (8)식을 fitting한 것이다. 그림에서 300°C 이하에서는 모든 data들이 하나의 master curve, 즉 식 (8)의 fitting에 잘 맞아 들어가고 있다. 따라서 이 온도영역에서는 유전완화가 등가회로와 같은 hopping에 의한 단일 mechanism에 의해 지배되고 있음을 의미한다. 그러나, 300°C 이상에서는 저주파 쪽으로 급한 증가가 있고, 고주파 쪽에서의 모양도 master curve를 벗어나 증가하는 양상이다. 이는 새로운 유전완화의 생성이 아니라 온도의 증가에 따른 전도 이온의 열적인 활성화 때문

에 전체 주파수 영역에서 이온이 확산하는 거동으로 바뀌어 가고 있음을 시사한다.

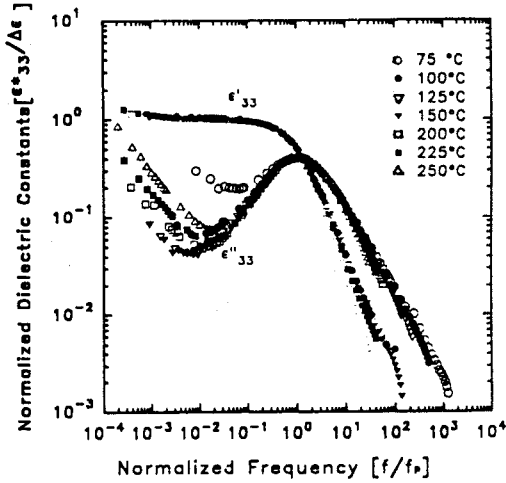


그림 7. 규격화된 유전완화 스펙트럼.

Fig. 7. The normalization of dielectric relaxation spectrum.

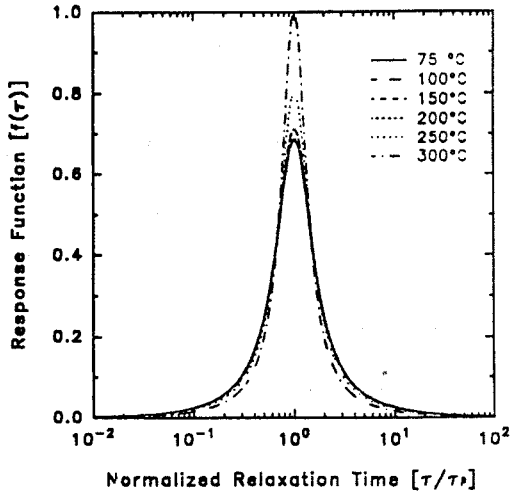


그림 8. 유전완화의 완화시간 분포함수 $f(\tau)$.

Fig. 8. The distribution function $f(\tau)$ of relaxation time in dielectric relaxation of KTP.

그림 7은 300°C 이하의 온도영역에서 그림 4의 유전완화 스펙트럼을 규격화 시켜 나타낸 것이다. 그림에서 $\Delta\epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_\infty$ 는 유전강도(dielectric strength)를 나타내고, f_p 는 유전상수 허수부의 peak 주파수를 나타낸다. 역시 온도변화에 관계없이 모든 data들이 저주파

확산을 제외하고 단일 curve로 나타나는 것은 이 hopping mechanism이 단일 모드를 가지고 있으며, 같은 모양의 완화시간 분포함수로 표현됨을 의미한다. 완화시간의 분포함수는 Cole-Cole 모드에서 (6)식으로 주어지므로, 표 1에 있는 값들을 이용하여 구한 분포함수 $f(\tau)$ 를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보면 200°C 이하에서 분포함수가 동일하고, 온도가 증가할수록 분포함수의 폭이 좁아지고 예리해 지면서 Debye type으로 진행된다. 따라서 이제는 보다 엄밀하게 200°C 이하 온도영역에서 유전완화 mechanism이 동일하다고 보아야 한다. 이 유전완화는 K' 이온의 hopping에 의한 것으로 보아지는데,^[14,15] 이온의 활성화 거동은 Arrhenius relation, $\tau_p = \tau_0 \exp(\Delta E/k_B T)$ 을 따르는 것이 아니라 다음과 같은 Vogel-Fulcher relation^[21,22]

$$\tau_p = \tau_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{T - T_0}\right) \quad (9)$$

을 만족하는 것으로 보인다.

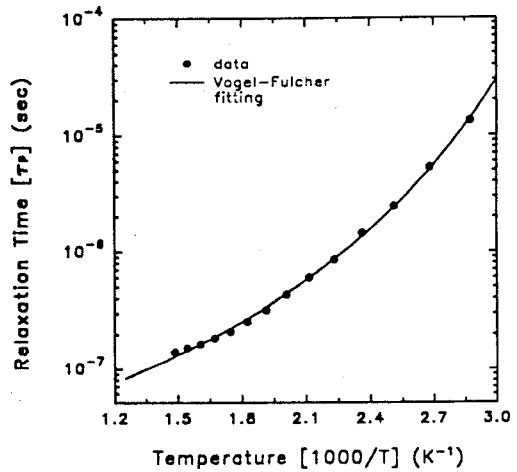


그림 9. 온도에 따른 완화시간의 변화. 실선은 (10)식을 fitting한 것이다.

Fig. 9. The temperature dependence of relaxation time τ_p . The solid line indicates the fitting of eq. (10).

그림 9는 표 1에 나타낸 완화시간을 온도의 역수로 그려본 것이다. 그림에서 실선은 Vogel-Fulcher relation인 식 (9)의 양변을 로그를 취해 fitting한 것으로 그 결과는 다음과 같다.

$$\ln(\tau_p) = -17.91 + \frac{955.3K}{T - 195.1K} \quad (10)$$

여기서 완화가 freezing 되는 온도는 $T_0=195K$ ($-78^\circ C$)임을 알 수 있다. Shaldin 등^[11]이 pyro-current 측정을 통해 KTP의 경우 초전도이온 상으로의 전이가 $-73^\circ C$ 부근에서 일어날 것으로 예견한 결과와 잘 일치하는 값이다. 따라서 KTP의 초이온전도 특성이 c 축 방향으로 열려 있는 TiO_6 의 사슬구조 통로를 따라 hopping 하는 K^+ 이온의 전도특성^[2] 때문에 기인한다면 이러한 K^+ 이온의 hopping이 유전완화 현상을 유발하게 될 것이고, 이 유전완화 현상은 freezing 온도 $T_0=-78^\circ C$ 부터 나타나게 될 것이다. 그리고 이 hopping mechanism 은 $200^\circ C$ 까지 단일모드로 이루어져 있고, 그 이상의 온도영역에서부터는 이온이 열적으로 활성화된 확산 mechanism이 전도특성을 지배하게 된다고 볼 수 있다. Risk 등^[4]의 결과에 따르면 SHG power는 $-73^\circ C \sim 200^\circ C$ 영역에서 최대로 나타난다고 알려져 있는데 이 온도영역이 본 실험에서 확인한 단일모드 유전완화 mechanism이 존재하는 온도영역과 일치하고 있는 사실은 매우 흥미있는 점이다. 즉, SHG mechanism 과 hopping mechanism이 어떠한 연관성이 있는 것처럼 보인다. 이 점은 앞으로 실온 이하의 저온 영역에 대한 측정을 통해 보다 심도있는 연구가 필요하다.

IV. 결론

우수한 비선형광학 특성을 지닌 KTP 단결정에 대해 고온 분말 X-선 회절실험과 복소 유전상수 측정실험 등을 수행하여 그 결과로부터 다음과 같은 사실을 알았다. 첫째 고온 분말 X-선 회절 실험 결과로부터 KTP는 $900^\circ C$ 이상에서 구조상전이가 있음을 Lipson 과 Cohen의 해석적 방법을 사용하여 알았고, 상전이 온도 이상의 온도영역에서도 직방정계에 속함을 확인하였다. 그리고 $900^\circ C$ 이하의 온도에서는 어떠한 구조상전이라도 없음을 확인하였다. 둘째, K^+ 이온의 hopping에 의한 초이온전도 특성에 기인한 KTP의 유전완화 mechanism 은 $T_0=-78^\circ C$ 부터 $200^\circ C$ 까지 단일모드로 Cole-Cole relation을 만족한다. 이때 완화시간은 Vogel-Fulcher relation을 따르고 있으며, $200^\circ C$ 이상의 온도영역에서는 열적으로 활성화된 확산 mechanism이 KTP의 전도특성을 지배하는 것으로 여겨진다.

감사의 말씀

본 연구는 1995년도 학술진흥재단 지방대 육성과제 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] F.C.Zumsteg, J.D.Bierlein and T.E.Gier, J. Appl. Phys. **47**, 4980(1976)
- [2] J.D.Bierlein and H.Vanherzeele, J. Opt. Soc. Am. **B6**, 622(1989)
- [3] T.Y.Fan, C.E.Huang, B.Q.Hu, R.C.Eckardt, Y.X.Fan, R.L.Byer and R.S. Feigelson, Appl. Opt. **26**, 2390(1987)
- [4] W.P.Risk, R.N.Payne, W.Length, C.Harder and H.Meier, Appl. Phys. Lett. **55**, 1179(1989)
- [5] I.Tordjman, R.Masse and J.C.Guitel, Z. Kristallogr. **139**, 103(1974)
- [6] J.C.Jacco, G.M.Loiacono, M.Jaso, G.Mizell and B.Greenberg, J. Cryst. Growth **70**, 484(1984)
- [7] R.A.Laudise, R.J.Cava and A.J.Caporaso, J. Cryst. Growth **74**, 275(1986)
- [8] Byung-Chun Choi, Jeong-Bae Kim, Soo-In Yun and Jung-Nam Kim, Kor. Appl. Phys. **6**, 27(1993)
- [9] V.K.Yanovskii and V.I.Voronkova, Phys. Stat. Sol. (a)**93**, 665(1986)
- [10] B.C.Choi, J.B.Kim, B.M.Jin, S.I.Yun and J.N.Kim, J. Kor. Phys. Soc. **25**, 327 (1992)
- [11] Yu.V.Shaldin and R.Poprawski, J. Phys. Chem. Solids **51**, 101(1990)
- [12] G.M.Loiacono and R.A.Stolzenberger, Appl. Phys. Lett. **53**, 1498(1988)
- [13] J.Mangin, G.Jeandel and G.Marnier, Phys. Stat. Sol. (a)**117**, 319(1990)
- [14] B.C.Choi, J.B.Kim and J.N.Kim, Solid State Commun. **84**, 1077(1992)
- [15] Byung-Chun Choi, Jeong-Bae Kim and Jung-Nam Kim, Ferroelectrics **155**, 183(1994)
- [16] H.Lipson, Acta Crystallogr. **2**, 43(1949)

- [17] R.Masse and J.C.Grenier, Bull. Soc. Fr. Mineral Crystallogr. **94**, 437(1971)
- [18] M.U.Cohen, Rev. Sci. Instr. **6**, 68(1935); **7**, 155(1936)
- [19] Y.K.Yanovskii, V.I.Voronkova, A.P.Leonov and S.Yu.Stefanovich, Sov. Phys. Solid State **27**, 1508(1985)
- [20] K.S.Cole and R.H.Cole, J. Chem. Phys. **9**, 341(1941)
- [21] H.Vogel, Phys. Z. **22**, 645(1921)
- [22] G.S.Fulcher, J. Am. Ceram. Soc. **8**, 339(1925)

 著 者 紹 介



최병춘

1957년 5월 19일생

1993년 부산대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학박사, 고체물리 실험 전공)

현재 부경대학교 물리학과 조교수로 재직중

주관심분야: phase transition, electrical characteristics of material, ferroelectric thin films.