

## 실리카 유리의 전기이완 특성과 비선형적 전기전도도

신 동 옥

한양대학교 세라믹공정연구센터  
세라믹공학과  
(1999년 5월 24일 접수)

### Electrical Relaxation in Silica Glasses and Nonlinearity in Electrical Conductivity

Dong Wook Shin

Ceramic Processing Research Center,  
Department of Ceramic Engineering, Hanyang University  
17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea  
(Received May 24, 1999)

#### 초 특

실리카 유리에서의 이온전기전도 현상 또는 공간전하분극 현상은 최근 실리카 유리에서 광학적 비선형성을 유도하여 광스위치를 제작하고자 하는 공정에서 매우 중요시되고 있으며 실리카 유리에서 발생하는 공간전하분극 현상이 광학적 비선형성의 중심적인 기구로 대두되고 있다. 본 연구에서는 실리카 유리의 전기이완 혹은 유전이완현상을 관찰함으로써 Poling 과정에서 발생하는 실리카 유리의 전기전도도의 거동에 대하여 알아보았다. 광섬유의 클래딩이나 코어 재료로 쓰이는 여러 종류의 실리카 유리에 대하여 Poling 공정에서와 같이 DC 전압을 가하고 시편에서 발생하는 전기이완현상을 측정하여 이를 공간전하분극 이론을 이용하여 분석하였다. 본 실험에서 관찰된 바에 의하면 실리카 유리의 전기이완 스펙트럼에서 상대적으로 긴 시간영역에서 공간전하분극에 의한 전류강화가 발생하며 이로 인해 비선형적 전기전도도를 나타냄을 알 수 있었다. 또 이 전기이완을 유전이완의 유전손실로 변환하였을 때 유리의 종류에 따라 일정한 온도에서 최대값을 보이는 현상이 발견되었으며 이를 이론적으로 설명하였다.

#### ABSTRACT

The cause of optical nonlinearity induced in thermally poled silica glass is believed to be the space charge polarization. Since the second order optical nonlinearity (electro-optic effect) can be used in optical switches, the optical nonlinearity in silica glass has drawn a large attention. Space charge polarization occurs when an ionic conducting material is subjected to dc electric field by the blocking electrode. Thermal poling performed to induce the optical nonlinearity in silica glass is basically identical to the process generating space charge polarization. As a first step to understand the mechanism of space charge polarization in silica glass, hence the induced optical nonlinearity, the absorption currents as functions of time were measured for various types of silica glasses and analyzed by the theory of space charge polarization. It was found that the electrical relaxation exhibited a step by the space charge polarization in the relatively long time range, and dielectric loss peak showed a maximum at a specific temperature, which is depending on type of silica glass. It was turned out that this relaxation might be a cause of nonlinearity in electrical conductivity of silica glass.

**Key words :** Silica, Poling, SHG, Electro-optic, Polarization, Relaxation

#### 1. 서 론

실리카 유리는 일반적으로 수 ppm 이하의 매우 낮은 농도의 불순물을 포함하고 있으므로 광학적 투과성이 우수하며 기계적, 화학적으로 매우 안정한 재료라는 장점이 있어 광통신에서 쓰이는 광도파 매질, 즉 광섬유로 응용되어 왔다. 특히 최근에는 실리콘 기판 위에 반도체 공정을

이용하여 실리카 박막을 증착하고 건식식각하여 직접광학 소자를 제작하는 기술이 개발되어 각종 광섬유 소자의 기능을 대체하고 더 나아가 다양하며 복잡하면서도 작은 크기의 소자를 구현하는 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

실리카는 3차원적으로 균일(isotropic)한 구조를 가지고 있으며 centrosymmetry가 있으므로 2차 비선형 광학효과가 없다고 알려져 있어,<sup>2)</sup> 일반적으로 단지 빛이 전파되

는 매질로서의 역할만 담당하는 수동형 광학재료로 인식되어져 왔다. 그러나 최근 실리카 유리에서 강한 광학적 비선형성이 유도될 수 있으며 광스위치 재료로서 사용될 수 있다는 가능성이 입증되어 활발한 연구가 진행 중이다. 실리카 유리를 고온(약 200~300°C)에 유지시키면서 강한 전압(수 kV)을 가한 후, 전기장을 가한 상태에서 상온으로 냉각시키면 영구적인 2차 비선형 광학 효과가 유도되는 것으로 보고되어 있다.<sup>3,6)</sup>

실리카 유리에서 2차 비선형 광학 현상이 발생하는 원인은 강한 전기장에 의한 공간전하분극(space charge polarization)의 발생으로 추측된다.<sup>7,9)</sup> 실리카 유리는 이온 전도성을 가진 재료이고, 상온에서는 약  $10^{20}$  ( $\Omega\text{cm}$ )<sup>-1</sup> 정도의 매우 낮은 전기전도도를 가지고 있어 일반적으로 매우 우수한 절연체로 알려져 있다. 그러나 실제로 전류량이 작기는 하나 전기장이 가해졌을 때 전하의 움직임이 존재한다. 전류를 흘리는 전하나르케는  $\text{Na}^+$ 와 같은 알칼리 이온이나,  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ 와 같은 이온들로 알려져 있다. 이러한 실리카 유리에 금속 전극과 같은 차단전극(blocking electrode)을 이용하여 전기장을 가하면 양극 쪽의 실리카 유리 표면에 공간전하분극이 발생한다. 따라서 이러한 공간전하분극의 발생 과정과 거동을 이해하는 것이 광학적 비선형성의 발생원인에 대해 접근할 수 있는 첫발걸음이라 할 수 있다.

또한 1960~70년대에 걸쳐 전기용융법에 의한 실리카 유리의 제조와 관련하여 또 유리에서의 전기전도 현상 자체에 대한 연구를 목적으로 실리카 유리에서의 전기전도도 측정과 유전이완(dielectric relaxation) 현상이 연구되었으나 높은 전기저항으로 인해 정확한 측정이 어려웠으며 Owen 등이 보고한 바<sup>10)</sup>와 같이 비선형적 전기전도도와 비정상적으로 큰 유전손실이 관찰되는 등, 실리카 유리의 전기이완 및 유전이완 현상이 정확히 이해되지 않은 채 남겨져 있는 실정이다.

본 연구에서는 실리카 유리에서 고온 Poling 공정과 같이 고압의 전기장이 가해지는 상황에서 실리카 유리의 거동을 연구하기 위하여 dc 전기장 하에서 실리카 유리가 보이는 전기 이완(electrical relaxation)을 측정하여 분석하고 이를 이용하여 유전 이완(dielectric relaxation) 현상을 밝혀냄으로써 실리카 유리에서 전기전도현상에

대한 의문점을 밝혀내고 또 광학적 비선형성이 발생하는 재료적 변화에 대하여 연구할 수 있는 기초를 마련하고자 하였다.

## 2. 실험방법

일반적으로 실리카 유리는 자연산 석영을 정제하여 원료로 사용하는 I, II형과  $\text{SiCl}_4$ 를 원료로 하여 인공적으로 합성하는 III, IV형으로 분류된다. 광섬유의 코어나 클래드에 쓰이는 실리카 유리는 주로 III, IV형이거나 VAD(vapor axial deposition)에 의해 제조되는 것이다. 본 실험에서는 이러한 광섬유용 실리카 유리를 시편으로 하였다. Table 1은 실험에 사용한 시편의 종류와 조성을 나타낸 표이다. 합성 실리카는 통상 금속 불순물이 적고 III형인 Suprasil 2 실리카 유리는 IV형인 Suprasil W2 시편에 비하여 hydroxyl(OH)의 농도가 높은 것이 특징이다.

시편을 적당한 크기로 자르고  $\text{CeO}_2$  분말로 광학적 등급까지 연마하였다. 연마 시 발생하는 응력과 이 응력에 의해 축진된 물분자의 확산으로 인해 시편 표면에 화학적, 구조적 변화가 발생하게 된다.<sup>11)</sup> 이러한 표면층은 전기적, 유전적 특성을 측정하는데 오류를 발생시킬 수 있으므로 식각에 의해 제거되었다. 준비된 평판형 시편의 두께는 통상 50~150( $\mu\text{m}$ ) 정도였으며, sputtering으로 금속(Au 또는 Au/Pd) 전극을 양극, 음극, guard ring의 형태로 각각 증착하였다.<sup>12)</sup> Guard ring은 실리카와 같이 전도도가 극히 낮은 시편의 경우 발생할 수 있는 표면전류에 의한 오류를 방지하기 위하여 증착되었다. 시편의 전기이완은 dc 흡수전류법(absorption current method)에 의하여 측정되었으며 자세한 실험방법은 출판된 저자의 논문의 방법과 동일하다.<sup>13)</sup>

전기이완은 온도범위 100~400°C에서 측정되었으며 가해진 전기장은 실리카 유리의 유전파괴전압 보다 10배 이상 낮은  $10^5$ (V/cm) 이하로 하여 실리카 유리 내의 이온전도성에 의한 전도도를 측정할 수 있도록 하였다. 시편 이외의 측정 장치를 통해 발생할 수 있는 누설전류를 측정 한 후, 충전전류(charging current)와 방전전류(discharging current)를 연속적으로 측정하였다. 이들 충전전류와 방전전류는 이상적인 경우 일치해야 하므로 이들을

**Table 1.** Glass type, selected composition (ppm by weight), and fictive temperature(°C) of samples used in the experiment. Type III glass by hydrogen-oxygen flame hydrolysis of  $\text{SiCl}_4$ , Type IV by plasma fusion process of  $\text{SiCl}_4$ . Fictive temperatures shown in the Table are for as-received samples and measured from the peak position of the 2260 ( $\text{cm}^{-1}$ ) fundamental structural bands in the FTIR

Glass	Glass Type	Na	K	Li	Cl	Al	OH	$T_f$
Suprasil 2	III	0.04	<0.01	<0.05	-	0.1	1200	991
Suprasil W2	IV	0.04	<0.01	<0.05	~240	0.1	5	1052

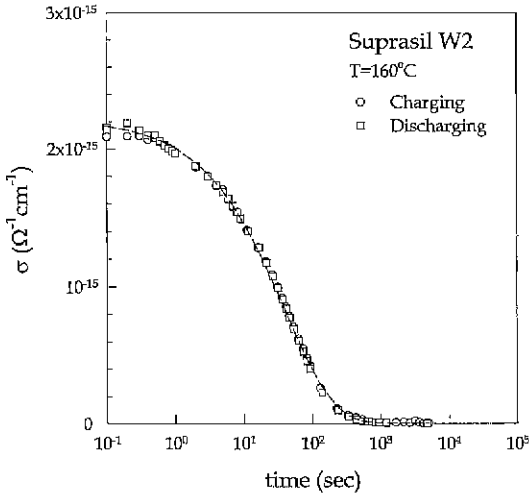


Fig. 1. Charging and discharging absorption current observed in Suprasil W2 as-received sample.

비교함으로써 측정 시 발생할 수 있는 시편-전극 계면의 전기화학적 반응 여부를 판단하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용한 시편들에서 측정되는 일반적인 충전전류와 방전전류의 한 예를 보여주고 있는데, 이들 두 전류가 일치하므로 시편-계면의 전기화학적 반응은 일어나지 않는 것으로 확인되었다. 충전전류와 방전전류를 측정하는 시간은 완전한 형태의 전기이완 곡선을 측정하기 위하여 매우 중요한 인자인데, 본 실험에서는 전기이완 현상 자체의 대부분 종료되어 정상상태에 도달할 때까지 충분한 시간 동안 측정하도록 하였다. 측정 시간은 다음과 같이 정의되는 유전체의 이완시간(relaxation time)  $\tau$ 의 10배로 하였다.

$$\tau = \frac{\epsilon_{\infty}\epsilon_0}{\sigma_{dc}} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{\infty}$ 는 실리카 유리의 유전상수,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전률,  $\sigma_{dc}$ 는 실리카 유리의 전기전도도를 의미한다. 측정된 전류는 미리 측정한 누설전류 만큼을 보정한 뒤, 식 (2)에 의해 표현되는 KWW식에 의하여 curve fitting하여 시간  $t=0$ (주파수  $f=\infty$ )에서의 전류  $I_{\infty}$ 와 시간  $t=\infty$ (주파수  $f=0$ )에서의 전류  $I_0$ 를 구하였다.

$$\frac{I(t) - I_0}{I_{\infty} - I_0} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\beta}\right] \quad (2)$$

여기서  $\beta$ 는 KWW 상수이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Suprasil W2의 충전전류(charging current)를

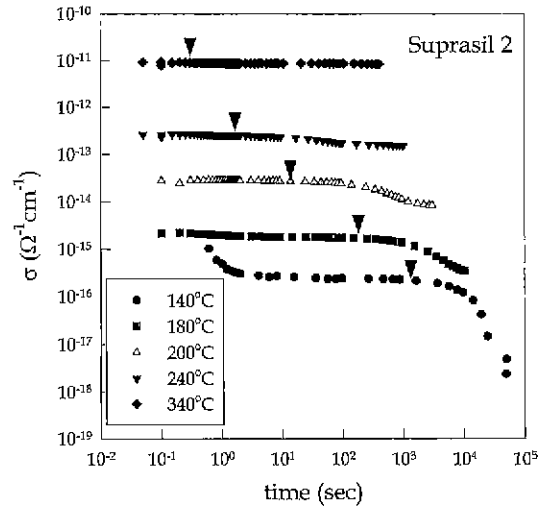


Fig. 2. The measured absorption current as a function of time at various temperatures for Suprasil 2(type III) silica glass.

측정하여 이를 전기전도도로 환산한 결과로 두 가지의 전기이완(electrical relaxation) 현상이 관찰되고 있다. 상대적으로 짧은 시간 영역에서 발생하는 I형과 상대적으로 긴 시간 영역에서 발생하는 II형으로 구분할 수 있으며, 시간-온도 중첩 원리(time-temperature superposition principle)에 의해 정의되는 바와 같이 각각의 이완 현상은 온도가 높아짐에 따라 짧은 시간 영역으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 2에서 표시된 각각의 충전전류에 역삼각형으로 표시된 부분이 개략적인 이완시간(relaxation time)으로서 식 (1)에서 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 전기전도도가 증가하여 이완시간은 점점 짧아짐을 볼 수 있다. 이와 같은 각 온도에서의 충전전류는 Fig. 3과 같이 시간-온도 중첩 원리에 의해 하나의 곡선으로 통합될 수 있다. Fig. 3에서는 I형과 II형의 전기이완 현상이 더욱 분명히 구분되며, 따라서 실리카 유리에서의 전기이완 현상은 두 개의 발생 기구가 작용하고 있는 것을 알 수 있다. I형 전기이완 현상은 실리카 유리에서 발생하는 전자분극과 이온분극에 의한 것으로 생각되며 짧은 시간(높은 주파수)에서 발생하므로 본 실험의 dc 흡수전류법 장치에 의해서 측정하는데는 한계가 있다. 이를 정확히 측정하기 위해서는 임피던스 분석법을 사용할 수 있으나<sup>13)</sup> 본 연구의 목표가 아니므로 측정하지 않았다.

II형의 전기이완 현상은 앞서 서론에서 언급한 공간전하분극에 의한 것으로 판단되며 실리카 유리와 같은 이온전도체에 전자전도체인 금속 전극과 같은 차단전극(blocking electrode)을 통해 전기장이 가해질 때 발생한다. 즉 가해진 전기장에 의해  $Na^+$ 와 같은 이온의 분포가

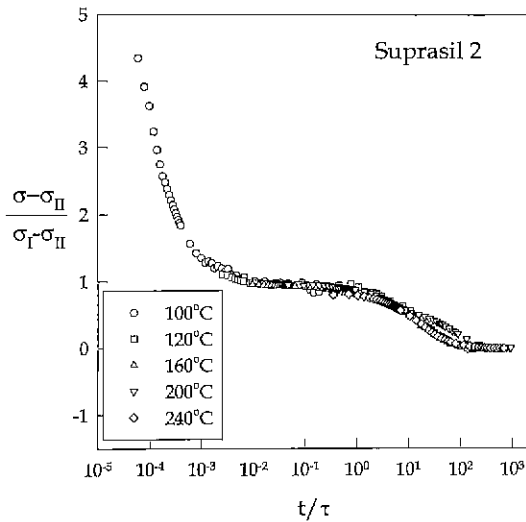


Fig. 3. Typical absorption current of Suprasil 2(type III) silica glass.

불균일하게 발달해 가는 과정에서 발생하는 것이다. 공간전하분극이 발생했을 때, 주어진 시간 t에서의 전하의 공간적인 분포  $n(x,t)$ 는 이론적인 계산을 통해 계산될 수 있는데,<sup>14)</sup> 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$n(x, t) = n_0(x) + n_1(x)e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$n_1 = \alpha \sinh(mx) \quad (4)$$

$$m^2 = \frac{\mu n_0 \zeta + i\omega}{D} \quad (5)$$

$$\zeta = \rho \frac{D}{L} \quad (6)$$

$$\alpha = -V_1 \left[ \sinh\left(\frac{mL}{2}\right) \left\{ \frac{(2\zeta)}{m^2} + \left( \frac{i\omega L}{\mu n_0} \right) \coth\left(\frac{mL}{2}\right) + \left( \frac{D\rho}{\mu n_0} \right) \right\}^{-1} \right] \quad (7)$$

여기서  $n_0$ 는 전하의 초기분포,  $\omega$ 는 각주파수,  $\mu$ 는 전하의 이동도(mobility),  $\rho$ 는 전극과 시편 사이의 계면이 가지는 차단도 상수(blocking parameter),  $L$ 은 시편의 두께,  $D$ 는 전하의 확산계수(diffusion coefficient),  $V_1$ 은 가해진 전압이다. 각주파수  $\omega$ 가 0인 dc 전기장 하에서  $Na^+$ 와 같은 양이온의 분포는 Fig. 4와 같은 좌우 대칭적인 전하분포가 예상된다. 즉 시편 내에  $Na^+$ 와 같은 양이온만 존재한다고 가정하면, 양극에서는 전하의 소진이 발생하며 음극에서는 전하의 축적이 발생하여 양극 쪽의 시편 내부에서 급격한 전압강하가 발생한다. 그러나 실제적인

요업학회지

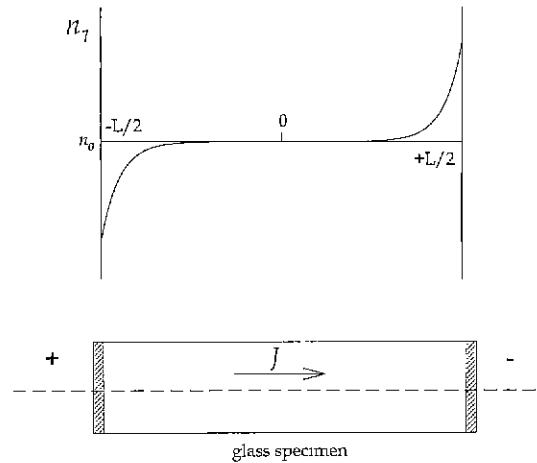


Fig. 4. Schematic illustration of sample dimensions and charge carrier density distribution after space charge polarization.

경우에는 전기장이 가해진 직후 양극에서 전하 소진층이 생성되면(Fig. 5) 이 부분의 전기저항의 상대적으로 높아 지므로 이 소진층에 인가되는 전기장이 매우 높아지며, 소진층을 제외한 시편의 다른 부분에서는 상대적으로 작은 전기장을 경험하게 된다. 따라서 양극 쪽에서 전하의 소진이 계속적으로 발생하지만 음극 쪽에서는 양극 측의 전하소진과 대칭되는 정도의 전하 축적이 발생하지 않게 될 것으로 생각된다. 외부에서 시편에 전압을 가하는 시간이 지나면서 이러한 현상은 더욱더 심화되며, 따라서 Proctor 등<sup>15)</sup>에 의해 보고된 바와 같이 전하의 공간적인 분포가 이론적으로 계산된 것과 같이 더 이상 좌우 대칭적이지 않으며 대부분의 전압강하는 양극에 가까운 부분에서 발생할 것으로 생각된다. Thermal poling 공정은 고온에서 일정 시간 동안 전압을 가한 이후, 전압이 시편에 가해진 상태에서 상온으로 시편을 냉각하므로, 이러한 전기장의 분포가 냉각된 시편에 그대로 남게 되며 상온에서 이온의 이동도는 극히 낮아지므로 초기의 균일한 분포로 복귀하지 못하고 시편 내부에 반영구적인 전

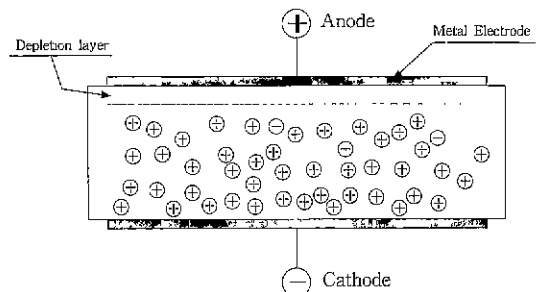


Fig. 5. Schematic illustration of the formation of the depletion layer by space charge polarization.

기장을 남기게 된다.

Fig. 3에서 나타난 전기이완 곡선에서, I형 전기이완 이후 축전전류가 도달하는 평형상태의 값으로부터 전기전도도  $\sigma_I$ 가 계산된다. 또 II형 전기이완 이후에 축전전류는 다시 평형상태의 값에 도달하는 양상을 보이며 이때의 전기전도도를  $\sigma_{II}$ 라고 명명한다. 이 두 가지의 전기전도도  $\sigma_I$ 와  $\sigma_{II}$ 를 Arrhenius형 그래프에서 비교하면 매우 흥미로운 결과를 얻을 수 있는데, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 즉  $\sigma_I$ 은 일반적으로 알려진 이온전도체가 보이는 직선적인 관계를 보이나(이온전도체의 경우  $\log\sigma-1/T$  graph의 고온영역에서 전도도 값이 직선에서 약간 벗어나게 되지만, 본 실험은 그와 같은 온도보다 낮은 영역에서 시행되었으므로 무시함),  $\sigma_{II}$ 는 Suprasil 2 실리카 유리의 경우 약 155°C 부근에서 전기전도도의 활성화 에너지가 변화하는 양상을 보인다. Arrhenius형 그래프에서 나타나는  $\sigma_I$ 와  $\sigma_{II}$ 의 차이를 이완강도(relaxation strength)라고 하며, 그 값 $\log(\Delta\sigma)=\log(\sigma_I)-\log(\sigma_{II})=\log(\sigma_I/\sigma_{II})$ 가 155°C에서 최대값을 보이게 된다. 이 이완강도는 다음에서 설명하는 바와 같이 유전체의 유전손실(dielectric loss) 피크의 최대값에 비례한다. DC 흡수전류법에 의해 측정된 전기이완 곡선을 시편의 크기와 무관한 전기전도도로 환산한  $\sigma(t)$ 로부터 다음과 같은 이상전류(anomalous current) 곡선  $\sigma_a(t)$ 을 정의할 수 있다.

$$\sigma_a(t) = \sigma(t) - \sigma_I(t) \quad \text{I형 이완} \quad (8)$$

$$\sigma_a(t) = \sigma(t) - \sigma_{II}(t) \quad \text{II형 이완} \quad (9)$$

이 이상전류 곡선은 식 (10)에 나타난 Hamon의 계산식<sup>17)</sup>

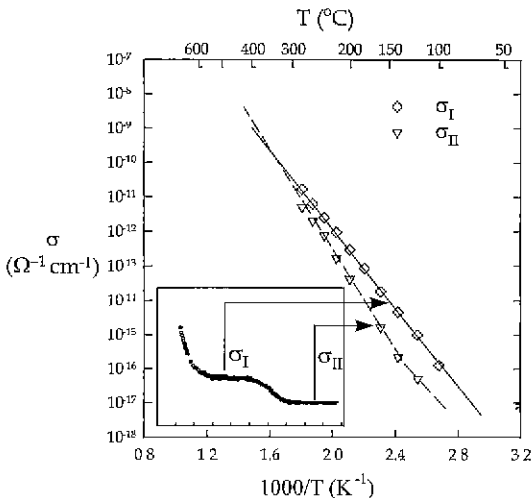


Fig. 6. Two types of conductivity taken from the plateau of absorption current in Suprasil 2(type III) silica glass

에 의해 유전손실 peak의 최대값  $\epsilon''_{max}$ 과 연계된다. 유전손실 peak의 최대값  $\epsilon''_{max}$ 는 주파수  $f=1/(2\pi\tau)$ 에서의 유전손실값을 의미하므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon''_{max} = \epsilon''_{f=1/2\pi\tau} = \frac{\sigma_a(0.2\pi\tau) \cdot \tau}{\epsilon_0 \epsilon_\infty} \quad (10)$$

이 식을 Fig. 3과 같은 두 개의 이완현상이 관찰되는 경우에 적용하기 위해서는, 이완시간  $\tau$ 에 대한 식 (1)에서  $\epsilon_\infty$ (주파수  $f=\infty$ 에서 실리카 유리의 유전상수)를  $\epsilon_s$ (주파수  $f=0$ 에서 실리카 유리의 유전상수)로 대체하여야 하는데, 실리카 유리에서는  $\epsilon_\infty \approx \epsilon_s$ 이므로,

$$\tau \approx \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{\sigma_{dc}} \quad (11)$$

$$\epsilon''_{max} = \frac{\sigma_a(0.2\pi\tau)\tau}{\epsilon_0 \epsilon_\infty} = \frac{\sigma_a(0.2\pi\tau)}{\sigma_{dc}} \quad (12)$$

와 같이 표현된다. 또  $\sigma_{dc}$ 는  $\sigma_{II}$ 로 대체되어야 하고,  $\sigma_a(t)$ 의 식을 단순한 지수함수적으로 감쇄하는 함수로 가정하면,

$$\sigma_a(0.2\pi\tau) = (\sigma_I - \sigma_{II}) \exp\left(-\frac{0.2\pi\tau}{\tau}\right) \quad (13)$$

식 (13)를 식 (12)에 대입하고 정리하면.

$$\epsilon''_{max} = a \left( \frac{\sigma_I}{\sigma_{II}} - 1 \right) \quad (14)$$

여기서, a는 상수이다. 식 (14)에 표현된 바와 같이 II형 전기이완에 의한 유전손실의 최대값은 Arrhenius형 그래프에서  $\sigma_I$ 와  $\sigma_{II}$ 의 차이에 직접적으로 비례한다. 전기이완 곡선으로부터 유전손실을 계산하는 식은 Hamon의 식을 사용하면 다음과 같다.

$$\epsilon'' = \frac{\sigma_a(0.1/f)}{2\pi f \epsilon_0} \quad (15)$$

주파수  $f=0.1/1$ 로 나타나며 전기이완 곡선을 식 (15)를 이용하여 유전손실로 환산하면 유전이완(dielectric relaxation)에 대한 정보를 얻을 수 있다 이 식에 의해 계산된 유전손실을 온도별로 그려보면 Fig. 7과 같이 나타나며 앞서 설명한 대로 Suprasil 2 실리카 유리의 경우 155°C 부근에서 유전손실이 최대값을 보인다.

전기전도도가 Arrhenius형 그래프에서 보이는 비선형적 특성과 유전손실이 특정한 온도에서 최대값을 보이고 일반 silicate 유리에서 관찰된 바와는 달리 높은 유전손실을 보이는 것은 이미 몇몇 연구자에 의해 보고된 바 있다.<sup>10,16,17)</sup> 즉 실리카 유리내에 알칼리와 같은 망목수식

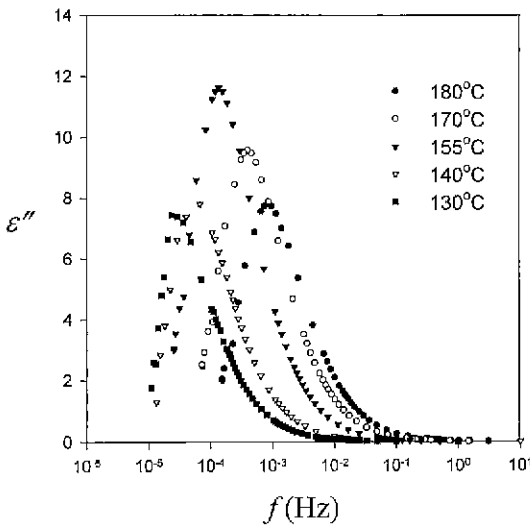


Fig. 7. Dielectric loss ( $\epsilon''$ ) at various temperature for Suprasil 2 (type III) silica glass

제(Network modifier)의 양이 감소될 때, 전기전도도는 감소하고 전기전도도의 활성화에너지는 증가하며, 유전 손실의 최대치가 감소하는 것으로 보고<sup>18)</sup>되고 있으나 실리카 유리에서만은 이와 같은 경향이 달라진다는 것을 보고하였다. 실제로 Fig. 7에 나타난 것과 같은 변화는 Owen 등이 보고한 바와 같이 주어진 주파수에서의 유전 상수가 일정온도에서 최대값을 보인다는 보고와 일치한다. 이와 같은 실리카 유리의 특이한 전기적, 유전적 특성은 현재까지 설명되고 있지 않으나, 본 연구에서는 이와 같은 실리카 유리의 특이성은 공간전하분극에 의한 것으로 분명히 밝혀졌다. 즉 Fig. 6에서 보는 바와 같이 일반적인 고주파 영역(짧은 시간 영역)에서 발생하는 전하분극 혹은 이온분극 이후에 관찰되는 전기전도도( $\sigma$ )는 직선적인 Arrhenius형 변화를 보이는 반면, 저주파수 영역(긴 시간 영역)에서 관찰되는 공간전하분극에 의한 전기전도도( $\sigma_0$ )는 비선형적인 Arrhenius형 변화를 보인다는 것이다.

#### 4. 결 론

Thermal poling에 의해 유도되는 실리카 유리의 2차 비선형광학효과는 광스위치로서의 응용성이 매우 높아 많은 관심을 끌고 있고, 비선형광학효과를 극대화하기 위한 노력이 경주되고 있다. 비선형광학효과를 극대화하기 위해서는 궁극적으로 이러한 현상이 발생하게 되는 원인을 이해하는 것이 선행되어야 한다고 사료된다. 본 연구에서는 이와 같은 실리카 유리에서의 비선형광학효과와 원인을 이해하기 위하여 우선 실리카 유리가 dc 전기장

하에서 보이는 전기적 반응을 살펴본 결과, 저주파수 영역에서 공간전하분극이 발생했으며 이와같은 공간전하분극에 의한 비선형적인 전기이완이나 유전이완현상이 기존의 실리카 유리의 특이성을 설명할 수 있음을 밝혔다.

한편 이와같은 공간전하분극과 광학적 비선형성의 관계는 좀 더 연구를 진행하여야 밝혀지리라 생각되지만, 일반적으로 광학적 비선형성이 매우 높은 전기장 하에 있거나 혹은 높은 강도의 빛에 의해 유도될 수 있다는 것이 알려져 있으므로 공간전하분극에 의해 형성되는 시편 표면의 높은 전기장이 이와 같은 현상에 깊이 관련이 있을 것으로 판단된다. 현재 이 두 현상의 관계에 대해서는 연구가 진행중이며 곧 연구결과를 발표하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터 세라믹공정연구센터의 지원과 한양대학교 교내연구비의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. M. Kawachi, "Silica Waveguides on Silicon and Their Application to Integrated-Optic Components," *Optical and Quantum Electronics*, **22**, 391-416 (1990).
2. J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals*, p. 241, Oxford University Press, London, 1967.
3. R. A. Myers, N. Mukherjee and S. R. J. Brueck, "Large Second Order Nonlinearities in Poled Fused Silica," *Opt. Lett.*, **16**, 1732-1734 (1991).
4. H. Nasu, H. Okamoto, K. Kurachi, J. Matsuoka, K. Kamiya, A. Mito and H. Hosono, "Second Harmonic Generation from Electrically Poled SiO<sub>2</sub> Glass: Effects of OH Concentration, Defects and Poling Conditions," *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 644-49 (1995).
5. T. Fujiwara, D. Wong, Y. Zhao, S. Fleming, S. Poole and M. Sceats, "Electrooptic Modulation in Germanosilicate Fiber with UV-excited Poling," *Electron. Lett.*, **31**, 573-575 (1995).
6. T. Fujiwara, M. Takahashi and A.J. Ikushima, "Large SHG in UV-poled Glass," Technical Digest of BGPP Conference(Joint conf. Amer. Ceram. Soc. and Opt. Soc. Am.) 290-292 (1997).
7. P. G. Kazansky, A. R. Smith, P. St. J. Russell, G. M. Yang and G. M. Sessler, "Thermally Poled Silica Glass: Laser Induced Pressure Pulse Probe of Charge Distribution," *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 269-271 (1996).
8. H. Takebe, P. G. Kazansky, P. St. J. Russell and K. Mornaga, "Effect of Poling Conditions on Second Harmonic Generation in Fused Silica," *Opt. Lett.*, **20**, 468-470 (1996).

9. P. G. Kazansky, P. St. J. Russell and H. Takebe, "Glass Fiber Poling and Applications," *J. Lightwave Technol.*, **15**(8), 1484-1493 (1997).
10. A. E. Owen and R. W. Douglas, "The Electrical Properties of Vitreous Silica," *J. Soc. Glass Tech.*, **43**, 159-183 (1959).
11. H. Wakabayashi and M. Tomozawa, "Diffusion of Water into Silica Glass at Low Temperature," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(10), 1850-1857 (1989).
12. W. G. Amey and F. Hamburger, Jr., "A Method for Evaluating the Surface and Volume Resistance Characteristics of Solid Dielectric Materials," *Proc. ASTM*, **49**, 1079-1080 (1949).
13. D. W. Shin and M. Tomozawa, "The Electrical Resistivity of Silica Glasses," *J. Non-Cryst. Solids*, **163**, 203-210 (1993).
14. J. H. Beaumont and P. W. Jacobs, "Polarization in Potassium Chloride crystals," *J. Phys. Chem. Solids*, **28**, 657-684 (1967).
15. T. M. Proctor and P. M. Sutton, "Space Charge Development in Glass," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **43**(4), 173-175 (1960).
16. R. H. Doremus, "Ionic Transport in Amorphous Oxides," *J. Electrochem. Soc.*, **115**, 181-197 (1968).
17. J. H. Simmons, P. B. Elterman, C. H. Simmons and R. K. Mohr, "Dielectric Relaxation in High-Silica Borosilicate Glasses," *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**, 158-166 (1979).