

Quartz에서 cristobalite로의 전이에 미치는 미량성분의 영향

김 진, 이정훈
한국유리기술연구소, 인천, 402-130

Effects of impurities on transformation of quartz to cristobalite

Jin Kim and Jeong-Hoon Lee

Hankuk Glass Technical Research Institute, Incheon 402-130, Korea

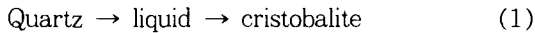
요 약 고순도 규사 원료를 열처리하는 경우, 불순물로 포함되어 있는 미량성분이 quartz의 전이과정에 미치는 영향 및 전이경로에 대하여 조사하였다. 미량성분의 영향을 조사한 결과, 규사 중의 미량성분 함량이 많아지면 cristobalite 생성량은 많아지며, quartz의 소멸온도 및 cristobalite의 생성온도는 낮아졌다. Quartz의 전이경로를 조사한 결과 quartz → 천이비정질상 → melt (T) 및 quartz → 천이비정질상 → cristobalite → melt (C)의 경로가 항상 공존하며, 미량성분이 적은 경우는 T 경로가 우세하지만, 미량성분이 많은 경우는 C 경로가 우세한 것으로 규명되었다. 또한 XRD를 이용한 결정질 함량의 분석 결과로부터 계산한 밀도와 pycnometer로 측정된 밀도를 비교한 결과 서로 잘 일치하였다. 규사를 용융하여 석영유리를 제조하는 경우, 특정온도에서 규사의 팽창 정도를 유추할 수 있을 것이다.

Abstract The effects of impurities of the quartz raw materials on the transformation of quartz to cristobalite were investigated. As the increase of impurities content, the amount of cristobalite crystal increased, whereas the fusion temperature of quartz and the formation temperature of cristobalite decreased. And the courses of the transformation of quartz to cristobalite were examined. The course of quartz → transitional noncrystalline phase → melt (T) and quartz → transitional noncrystalline phase → cristobalite → melt (C) were always coexisted on the transformation of quartz. In the case of high purity quartz raw material, the T course was predominant, while in low purity quartz raw material, the C course was predominant. And the calculated density of heat treated sand by the quantitative analysis of quartz and cristobalite phase by XRD is well agreed with the measured density by

pycnometer. On the melting process of quartz glass, the volume expansion of sand at a certain temperature can be estimated with the calculated density data.

1. 서 론

고순도 규사를 용융하여 석영유리를 제조할 때 규사 중에 존재하는 미량성분이 석영유리의 품질을 좌우할 뿐만 아니라, 승온시 규사의 구성성분인 quartz가 cristobalite로 전이하는 과정에서 발생하는 체적팽창에 큰 영향을 미친다. Quartz에서 cristobalite로의 전이에 대하여 Sosman[1]은 다음과 같은 2과정으로 분리하여 설명하였다.



이때 결정의 구조적인 관점에서 보면, (1)이 주반응이 될 것이라고 하였다. 이후 Chaklader와 Roberts[2-4]는 quartz에서 cristobalite로의 전이과정은 단지 (1)의 경로만을 따르며, 이 과정에서 나타나는 liquid를 천이비정질상(transitional noncrystalline phase)이라는 용어로 설명하였다. 또 실험을 통해 브라질 규사를 1600°C 공기 중에서 3시간 열처리할 때까지 cristobalite는 존재하지 않았으며 단지 30wt.%의 천이비정질상이 생성되었고, 이것은 밀도가 2.3g/cm³ 정도 되는 치밀한 비정질 실리카(dense vitreous silica)라고 보고하였다. 이에 대하여 Mackenzie[5]는 quartz의 용융점은 1400~1450°C 정도가 되며, 고점도의 액상인 용융생성물은 비정질 silica상으로 서서히 전이하게 된다고 보고하였다. 또한 1450~1700°C 범위에서 규사를 일정한 온도로 열처리한 경우 cristobalite와 유리상이 형성되었다고 보고한 바 있다.

한편 Grimshaw[7]는 고순도 규사에 CaO, MgO, TiO₂, Al₂O₃ 등이 미량 포함되어 있을 때 전이속도를 조사한 결과, MgO와 TiO₂ 보다 CaO가 전이속도를 빠르게 하였으며, Al₂O₃는 전이를 지연시키는 것으로 나타났다고 보고하였다. 또한 I. Fanderlik[6]은 규사가 산출되는 지역에 따라서 규사 중에 혼입되어 있는 미량성분의 함량이 달라지고, 따라서 열처리 과정 중 quartz에서 cristobalite로 전이되는 온도 및 결정생성량이 달라진다고 하는 사실을 XRD를 이용한 결정상 분석결과로 입증하였다. 이때 미량성분을 광화제(mineralizer)라고 설명하고 있는데, 이 광화제는 규사입자 표면에서 잘 wetting되어 공유될 수 있는 조건을 만들어 표면에너지를 줄여줄 뿐 아니라, 새로운 상인 cristobalite의 핵이 생성되기 쉽게 하여 준다.

상기의 실험들의 경우 자연산 원료를 직접 사용하였기 때문에 미량성분의 함량을 체계적으로 변화시켜서 실험하지는 못하였다. 따라서 본 연구에서는 고순도 규사와 저순도 규사를 혼합하여 규사 중의 미량성분을 체계적으로 변화시켜, 규사가 quartz에서 cristobalite로 전이할 때 미량성분이 미치는 영향 및 전이경로에 대해서 조사하였다. 또한 pycnometer를 이용하여 밀도값을 측정하였으며, 이 측정값과 결정상 분석결과로부터 계산한 밀도값을 비교하였다. 그리고 밀도값으로부터 비용적(specific volume)의 변화 및 체적변화율을 계산하여 규사의 용융과정 중에 발생하는 체적팽창 정도를 유추할 수 있는 방법을 확립하고자 하였다.

Table 1

Chemical composition and particle size distribution of quartz raw materials

		S grade	L grade
Impurity (ppm)	Al ₂ O ₃	28.72	775.80
	CaO	0.56	73.74
	Fe ₂ O ₃	0.43	28.59
	Li ₂ O	1.51	4.31
	Na ₂ O	1.21	337.00
	K ₂ O	0.84	120.46
	Total	33.27	1471.57
Particle size distribution (%)	300 μm <	0.5	1.4
	300 ~ 100 μm	98.1	96.6
	< 100 μm	1.4	2.0

2. 실험방법

2.1. 원료준비 및 열처리

본 실험은 미국 N사의 규사원료인 S급 및 L급 원료를 이용하여 실험을 수행하였다. 이 규사는 천연 광물인 규석을 분쇄 및 정제한 고순도 규사로서 Table 1에 그 입도분포 및 미량성분의 함량을 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이 S급 규사는 미량성분 함량이 33ppm 정도이고, L급 규사는 1472ppm 정도로 S급 규사가 더 고순도이다. 한편 두 원료의 입도분포는 모두 100~300 μm 범위의 것이 96% 이상으로 비슷하였다. 이와 같은 원료를 Table 2와 같이 조합하여 규사 중의 미량성분 함량을 33ppm에서 752ppm까지 변화시켜 출발원료를 준비하였다. 조합된 원료를 20g씩 취한 다음 혼합기에서 1시간씩 혼합하였다. 이 원료를 열처리하기 위해 두께 0.1 mm의 Mo sheet를 100 × 42mm로 절단하여

직경 20mm, 높이 42mm의 원통형 tube를 만들어 흑연판에 삽입하고 원료를 채운 후 열처리하였다.

열처리는 1300°C부터 1740°C 범위 내에서 소정온도까지 승온한 후 유지시간 없이 즉시 20°C/min 이상의 속도로 로냉하였다. 이때 700°C까지는 5°C/min 승온하면서 진공분위기, 700°C 이상에서는 3.3°C/min의 속도로 최고온도까지 승온하였으며, Ar 분위기 하에서 실험을 수행하였다.

2.2. 결정량 분석을 위한 검량선 작성

XRD를 이용한 결정의 정량분석 방법 중 조성이 같고 결정구조만 다른 경우 즉, quartz, cristobalite, trypdimite와 같은 동질이상 물질이 혼재되어 있는 경우에는 X-선 흡수 계수가 같으므로 미지 시료중 특정성분의 회절선 강도비로 결정상의 존재비를 유추할 수 있다[8]. 그러나 본 실험에서는 좀 더 정확

Table 2

Total impurities and mixing ratio of S and L grade silica sands

Name	Mixing ratio (wt%)		Total impurity (ppm)
	L grade	S grade	
I -30	0	100	33
I -180	10	90	177
I -320	20	80	321
I -470	30	70	465
I -610	40	60	609
I -750	50	50	752

한 실험을 위하여 내부표준시료법[3-4, 9]으로 결정량을 분석하였다.

Quartz의 표준시료는 규사를 이용하였으며, cristobalite의 경우에는 규사를 열처리하여 이용하였다. Mackenzie[5]는 브라질산 quartz를 1450°C에서 65시간 열처리하여 이용하였고, Chaklader[4]도 역시 브라질산 quartz를 1625°C에서 10시간 열처리한 후 다시 1650°C에서 5시간 열처리하고, 흑시 있을지도 모르는 잔류유리상을 제거하기 위하여 묽은 불산에서 10분간 처리하여 이용하였다.

본 실험에서는 cristobalite 표준시료를 얻기 위하여 위와 같은 연구결과를 참고하여 여러 가지 방법으로 열처리하였으며, 선행연구의 결과에 따라 열처리한 것보다 1675°C에서 4시간 또는 10시간 공기 중에서 열처리한 경우가 X-선 회절강도가 더 큰 것으로 나타났다(Table 3 참조). 1675°C에서 4시간과 10시간씩 각각 열처리한 것을 비교하면 X-회절강도가 비슷하거나 오히려 10시간의 경우가 약간 작은 경향이 있다. 이것은 cristobalite 중의 일부가 용융되기 시작하였기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 실험에서 cristobalite용 표준시료는 1675°C에서 4시간

열처리한 것을 취하였다.

한편 내부표준물질로는 ZnO를 선정하였으며, 이 이유는 ZnO peak가 quartz와 cristobalite의 측정대상 peak가 중첩되지 않고, 2θ 가 20~35° 부근에서 모두 측정이 가능하였기 때문이다. Quartz와 cristobalite의 표준시료를 3g이 되도록 비율을 변화시켜 조합한 다음, 내부표준시료인 ZnO를 전체의 30wt%가 되도록 하여 XRD 시료제조용 진동 mill에서 각각 2분간씩 혼합 및 분쇄하여 검량선 작성용 시료를 제조하였다. 제조된 시료는 XRD(CuK α)로 분석하였으며, quartz

Table 3

Heating conditions and net intensities for standard material of cristobalite

Heating condition		Net intensity (cps)
Temperature (°C)	Time (hr)	
1450	100	2070
1650	5	2610
1675	4	3090
1675	10	3080

의 경우 (101)면의 peak를, cristobalite의 경우 (101)면의 것을, 그리고 ZnO의 경우는 (002)면의 것을 대상으로 net area법으로 계산하여 검량선을 작성하였다.

2.3. 결정량 분석

2.1절의 방법으로 얻어진 시료의 결정량을 분석하기 위하여, 검량선 작성시의 실험조건과 동일하게 하여 ZnO와 분석대상 시료를 혼합한 다음 분쇄하여 XRD분석을 수행하였다. 이 결과를 정량분석용 검량선에 대입하여 quartz 및 cristobalite의 결정량을 분석하였다. 이때 결정상 이외에도 비정질상이 존재하는데, 이 중에는 결정이 용융되어 생성된 유리상과 결정의 전이과정중에 존재하는 천이비정질상이 독립적으로 또는 공존하고 있다. 본 연구에서는 결정량을 제외한 나머지를 유리상 and/or 천이비정질상으로 간주하였으며, 두 가지 상을 동시에 설명할 경우에는 비정질상이라 표기하였다.

2.4. 밀도, 비용적, 팽창률 조사

2.3절에서 얻어진 결정량 자료를 이용하여 다음과 같은 식으로 밀도를 계산하였다.

$$\rho_{\text{cal}} = \rho_Q \cdot i_Q + \rho_C \cdot i_C + \rho_G \cdot i_G \quad (3)$$

ρ_{cal} : XRD 분석결과로부터 계산한 밀도

ρ_Q, i_Q : Quartz의 밀도(2.649g/cm³) 및 분률

ρ_C, i_C : Cristobalite의 밀도(2.334g/cm³) 및 분률

ρ_G, i_G : 유리상 또는 천이비정질상의 밀도(2.202g/cm³) 및 분률

한편 열처리하여 얻어진 시료의 밀도를 알

아보기 위해 pycnometer를 이용하여 밀도를 측정하였다. 얻어진 밀도값으로부터 단위무게당의 체적으로 정의되는 비용적(specific volume) ν 및 체적변화율 β 를 계산하였다.

$$\beta = \frac{\nu_T - \nu_Q}{\nu_Q} \times 100 \quad (4)$$

ν_Q : Quartz의 비용적 (0.3775cm³/g)

ν_T : 온도 T일 때 측정시료의 비용적

3. 결과 및 고찰

3.1. 검량선

ZnO를 내부표준물질로 하여 검량선을 작성한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 가로축은 quartz와 cristobalite의 표준시료를 혼합한 중량비를 나타내었으며, 세로축에는 이 혼합비일 때 내부표준시료 ZnO의 X-선 회절강도에 대한 quartz와 cristobalite의 X-선 회절강도의 비를 나타낸 것이다. 이 두 직선으로부터 미지시료의 결정량을 계산할

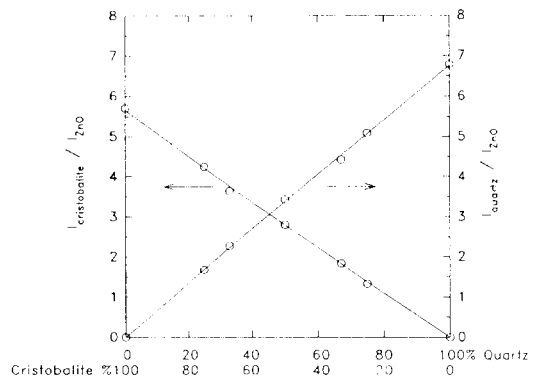


Fig. 1. Calibration curves of cristobalite and quartz for XRD quantitative analysis.

수 있었으며, 이 직선의 오차 범위는 $\pm 2\%$ 이내였다.

3.2. Quartz의 전이특성

미량성분 함량이 서로 다른 규사 원료에 대하여 열처리 온도 변화에 따른 quartz의 전이결정상 검토한 결과를 Fig. 2에 나타내었으며, Table 4는 quartz의 소실온도, cristobalite의 최초 생성온도 및 최대 생성량을 정리하였다. Cristobalite 관점에서 보면 (a) I-30의 경우는 불순물로 미량성분을 33ppm 함유하고 있는 원료로서 1640°C에서 cristobalite가 생성되기 시작하여 1670°C에서 16% 정도가 생성되었다. 이 보다 미량성분이 많은 (b) I-180의 경우에는 1615°C에서 생성되기 시작하여 역시 1670°C에서 56%가 존재하였다. 미량성분이 가장 많은 (f) I-750의 경우에는 cristobalite 생성온도가 훨씬 낮아져 1510°C부터 생성되기 시작하여 1670°C에서 최대로 91%가 존재하였다. 이와 같이 미량성분 함량이 증가하면 cristobalite 최초 생성온도는 1640°C에서 1510°C로 낮아졌지만, cristobalite의 최대 생성온도는 미량성분 변화량에 관계없이 모두 1670°C로 일정하였으며, 그 양은 16%에서 91%까지 증가하였다. 이번에는 quartz의 관점에서 살펴보면, 1400°C까지는 약 90% 이상이 존재하다가 열처리 온도가 증가하면 지속적으로 감소하다가 소실되었다. 먼저 (a) I-30의 경우에는 1720°C에서 완전 소실되었으며, 미량성분 함량이 증가할수록 이 온도는 계속 낮아지다가 미량성분이 가장 많은 (f) I-750의 경우에는 1615°C가 되었다. 이상의 결과로 볼 때 규사 중의 미량성분 함량이 많아지면 quartz 소실온도 및 cristobalite 생성온도는 낮아지고, cristobalite의 생성량은 많아진다. 즉, 규

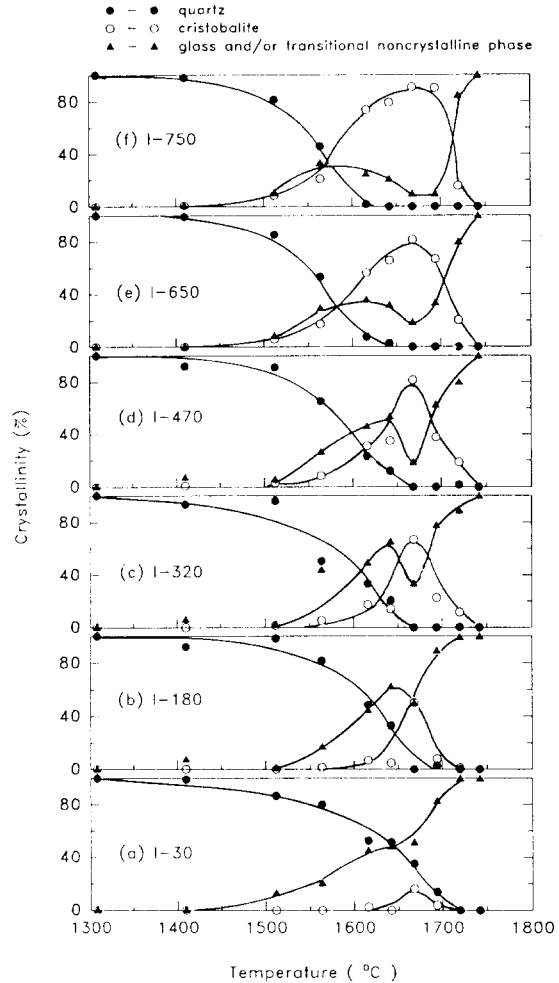


Fig. 2. Transformation behaviors of silica sands of various purity as a function of heating temperature.

사 중의 미량성분은 quartz가 cristobalite로 전이하는 과정중 반응촉진제 즉 광화제 역할을 하는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 2로부터 quartz가 용융되기까지의 경로를 추론해 보면, (a) I-30의 경우 온도가 상승되면 천이비정질상으로 전이되는 함량이 증가됨을 알 수 있다. 1670°C에서는 천이비정질상 중의 극히 일부만 cristobalite

Table 4

Comparison of quartz to cristobalite transformation behavior of silica sands of various purity

Sample	Cristobalite		Quartz
	Initial formation temperature (°C)	Content of cristobalite at 1670°C (%)	Fusion temperature (°C)
I -30	1640	16	1720
I -180	1615	56	1695
I -320	1565	67	1670
I -470	1565	82	1670
I -610	1510	82	1640
I -750	1510	91	1615

로 전이되었다가 소실되고, 대부분의 천이비정질상은 그대로 용융됨을 보여주고 있다. 그러나 미량성분이 가장 많은 (f) I-750의 경우도 온도가 상승함에 따라 quartz의 일부분이 천이비정질상으로 전이되지만, 대부분은 cristobalite로 전이되어 1650°C ~ 1700°C 범위에서는 천이비정질상이 불과 20% 정도만 존재하였다. 이상의 결과로 볼 때 quartz에서 cristobalite로의 전이과정에는 반드시 천이비정질상이 존재하며 미량성분의 함량에 따라 cristobalite의 생성량만 달라진다. 즉, quartz의 전이경로는 다음 2가지로 구분된다.

Quartz → 천이비정질상 → Melt (T)

Quartz → 천이비정질상 → Cristobalite → Melt (C)

이 두 가지 경로는 함께 공존하며 미량성분 함량이 적은 경우는 T경로가 지배적이고, 미량성분 함량이 많은 경우는 C경로가 지배적인 것으로 사료된다.

3.3. 밀도, 비용적, 팽창률

미량성분 함량이 서로 다른 규사 원료에 대하여 열처리 온도 변화에 따른 밀도변화를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 곡선중 미량성분이 가장 많은 I-750의 밀도변화곡선을 기준으로 최초 변곡점이 생기는 1615°C 이하 (이하 (a) 구간), 이 온도에서 두 번째 변곡점이 생기는 1695°C까지 (이하 (b) 구간), 그리고 두 번째 변곡점으로부터 결정이 모두 용해되는 1740°C (이하 (c) 구간)으로 구분하여 설명하면 다음과 같다. 먼저 (a)구간의 경우는 열처리온도가 상승됨에 따라 규사 중의 quartz가 주로 천이비정질상으로 전이되는 온도영역으로서 미량성분의 함량이 증가함에 따라 천이비정질상으로부터 cristobalite로 전이되는 양이 많아지기 때문에 밀도는 상대적으로 급격하게 감소된다. 한편 (b) 구간에서는 각 불순물 함량별로 cristobalite가 가장 많이 존재하는 온도영역이다. 미량성분이 적은 I-30, I-180은 cristobalite로 전이되는 양이 적기 때문에 이 구간에서도 밀도는 지속적으로 감소하지만, 미량성분이 많은 I-610, I-750의 경우에는 70% 이상이 cristobalite로 존재하기 때문에 2.3g/cm³ 정도

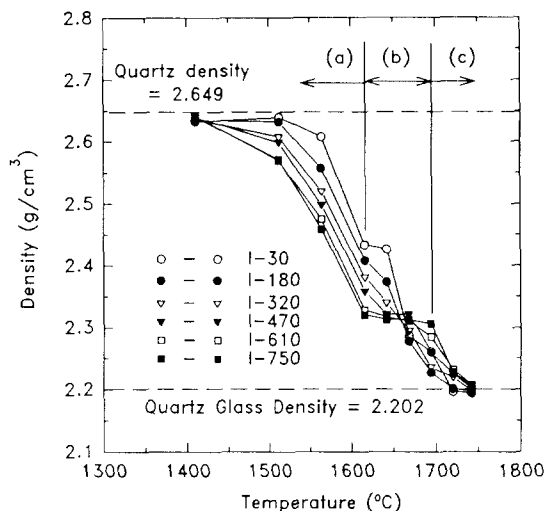


Fig. 3. Density variations of silica sands of various purity as a function of heating temperature.

에서 수평에 가까운 경사를 이룬다. 온도가 계속 상승되어 모든 결정이 녹기 시작하는 (c) 구간에 이르면 밀도는 다시 급격하게 감소하기 시작하며, 1740°C에서는 비정질상만이 존재하기 때문에 석영유리의 밀도에 근사한 2.2g/cm³에 이르게 된다. 이때 미량성분이 적은 I-30의 경우에는 밀도가 2.3g/cm³인 천이비정질상에서 밀도가 2.2g/cm³인 비정질상으로의 전이가 주과정이기 때문에 상대적으로 밀도감소의 곡선이 완만한 상태를 나타내며, 미량성분이 많은 I-750의 경우에는 밀도가 2.33g/cm³ 정도인 cristobalite에서 비정질상으로 전이되기 때문에 상대적으로 급격한 밀도감소 곡선을 나타내고 있다.

Fig. 4에는 quartz만이 존재하는 1410°C 및 각 구간에서 임의로 선정한 온도인 1565°C, 1670°C, 1695°C, 그리고 모든 결정이 용융되는 1740°C일 때 각각의 미량성분 함량에 따른 밀도변화를 나타내었다. 1410°C에서는 상전이가 일어나지 않았기 때문에 미량성분에

관계없이 밀도가 quartz의 밀도와 동일하지만, (a)구간인 1565°C에서는 미량성분이 많아지면 밀도가 급격하게 감소하고, (b)구간인 1670°C에서는 미량성분의 함량에 무관하게 밀도는 2.3g/cm³ 정도로 일정하였지만, (c)구간인 1695°C에서는 미량성분이 증가됨에 따라 밀도가 오히려 증가하고 있다. 이 결과는 Fig. 3에서 설명한 내용과 잘 일치함을 보여주고 있다. 이상을 정리하면 미량성분의 함량에 따라 밀도변화도 달라지며 미량성분이 적은 경우에는 전체 온도범위에서 역 S자 곡선으로 감소하지만, 미량성분이 많은 경우에는 1615~1695°C 부근에서 수평을 이루는 2단계 감소곡선을 나타내었다.

한편 결정상 분석결과를 식 (3)에 대입하여 밀도를 계산하였으며, 이 결과를 Table 5에 정리하였다. 이 결과에서 알 수 있듯이 밀도의 계산값과 측정값은 비교적 잘 일치하고 있다. 계산된 밀도값 또는 측정된 밀도값으로부터 비용적을 계산하고 이 비용적을

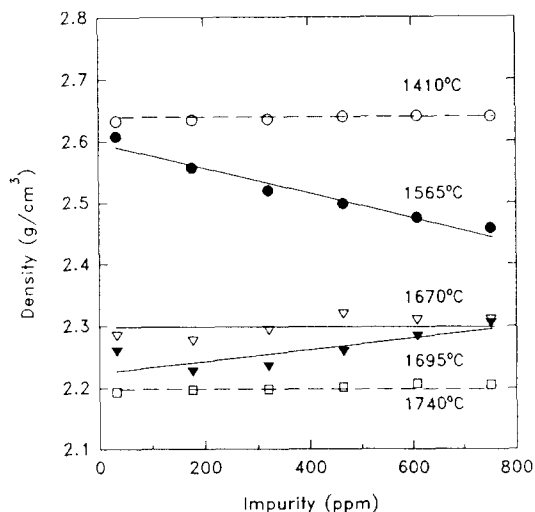


Fig. 4. Density variations of silica sands of various purity as a function of impurity content.

Table 5

Measured and calculated densities of silica sands of various purity heated at each temperature

Material	I - 30	I - 180	I - 320	I - 470	I - 610	I - 750
Temp. (°C)						
1410	2.633	2.635	2.636	2.640	2.641	2.640
	2.632	2.601	2.607	2.615	2.623	2.642
1510	2.640	2.632	2.608	2.599	2.570	2.572
	2.569	2.629	2.635	2.614	2.592	2.577
1565	2.608	2.557	2.520	2.498	2.475	2.458
	2.560	2.569	2.436	2.505	2.462	2.435
1615	2.433	2.408	2.381	2.358	2.328	2.320
	2.441	2.429	2.375	2.346	2.311	2.307
1640	2.426	2.373	2.340	2.322	2.316	2.313
	2.419	2.356	2.313	2.302	2.302	2.307
1670	2.286	2.278	2.295	2.321	2.311	2.312
	2.424	2.268	2.290	2.310	2.310	2.322
1695	2.261	2.228	2.236	2.260	2.285	2.306
	2.268	2.226	2.232	2.250	2.290	2.321
1720	2.197	2.201	2.219	2.225	2.232	2.227
	2.189	2.204	2.218	2.233	2.229	2.223
1740	2.194	2.197	2.198	2.201	2.207	2.205
	2.189	2.189	2.189	2.189	2.189	2.189

*상단 : measured, 하단 : calculated.

(4)에 대입하면 일정한 온도에서 quartz → cristobalite의 전이에 의한 체적팽창률을 구할 수 있다. Cristobalite의 생성량이 가장 많은 I - 750 시료를 1670°C에서 열처리한 경우의 예를 Table 6에 정리하였다. Table 6을 보면 측정한 밀도값과 계산한 밀도값으로부터 산출한 체적팽창률은 14% 정도로 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 XRD로 결정상을 분석한 결과로부터 밀도를 계산하면 quartz → cristobalite 전이에 의한 체적팽창률을 추정할 수 있음을 보여주고 있다. 단, 이

체적팽창률 변화는 cristobalite가 용융되어 시편의 수축이 일어나는 1670°C 이전의 온도 범위에서만 적용이 가능하다.

4. 결 론

고순도 규사원료를 열처리하는 경우 불순물로 포함되어 있는 미량성분이 quartz의 전이과정에 미치는 영향 및 전이경로에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 6

Measured and calculated density, specific volume and volume expansion of I-750 at 1670°C

	Measured	Calculated
Density (g/cm ³)	2.312	2.322
Specific volume (cm ³ /g)	0.4325	0.4307
Volume expansion (%)	14.6	14.1

1) 규사 중의 미량성분 함량이 많아지면 열처리시 cristobalite의 생성량은 많아지며, quartz상의 소멸온도 및 cristobalite의 생성온도는 낮아진다.

2) 규사 중의 미량성분 함량에 관계없이 천이비정질상은 항상 존재하며, 전이경로는 quartz → 천이비정질상 → melt (T)와 quartz → 천이비정질상 → cristobalite → melt (C)가 공존한다.

3) 규사 중의 미량성분 함량이 적은 경우에는 T 경로가 우세하며, 미량성분이 많은 경우에는 C 경로가 우세한 것으로 추정된다.

4) 규사 중의 미량성분이 적은 경우에는 밀도가 약 2.65g/cm³에서 시작하여 2.20g/cm³까지 지속적으로 감소하지만, 미량성분이 많은 경우는 1615~1695°C 범위에서 cristobalite가 주결정상이므로 이에 해당하는 2.3g/cm³ 정도의 밀도값을 유지하다가 cristobalite가 용융되는 1695°C 이상의 온도부터 급격하게 감소하여 역시 2.20g/cm³에 도달하는 2단계 감소 곡선을 나타낸다.

5) XRD로 분석한 결정량으로부터 계산한 밀도값과 pycnometer로 측정된 밀도값은 잘 일치하였으며, XRD로 결정량을 분석하면 일정한 온도에서 quartz → cristobalite 전이시 발생하는 체적팽창을 추론할 수 있다.

References

- [1] R.B. Sosman, Properties of Silica, Chapter V and VI. American Chemical Society Monograph Series, No. 37, (Chemical Catalog Co., Inc., New York, 1927) p. 60.
- [2] A.C.D. Chaklader and A.L. Roberts, Nature 183 (1959) 1252.
- [3] A.C.D. Chaklader and A.L. Roberts, J. Am. Ceram. Soc. 44 (1961) 35.
- [4] A.C.D. Chaklader, J. Am. Ceram. Soc. 46 (1963) 66.
- [5] J.D. Mackenzie, J. Am. Ceram. Soc. 43 (1960) 615.
- [6] I. Fanderlik, Silica Glass and Its Application Glass Science and Technology Vol. 11 (Elsevier, New York, 1991) p. 99.
- [7] R.W. Grimshaw, J. Hargreaves and A.L. Roberts, Trans. Brit. Ceram. Soc. 55 (1956) 36.
- [8] L. Alexander and H.P. Klug, Anal. Chem. 20 (1948) 886.
- [9] H.P. Klug, L. Alexander and E. Kummer 20 (1948) 607.