

## The effect of $Al_2O_3$ on the isokom temperatures in soda-lime glass

Seung Min Kang<sup>†</sup> and Chang-sam Kim<sup>\*</sup>

International Graduate School of Design Convergence, Hanseo University, Seosan 31962, Korea  
<sup>\*</sup>Industry-Academic Cooperation Foundation, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

(Received May 17, 2022)  
(Revised May 23, 2022)  
(Accepted June 2, 2022)

**Abstract** The effect of  $Al_2O_3$  on isokom temperatures in soda-lime glass is estimated by comparing calculated isokom temperatures using viscosity model proposed by Lakatos. Substitution of  $SiO_2$  with  $Al_2O_3$  by 0.5 mol% raises the isokom temperatures by 3.1, 3.3, 3.6 and 7.2°C at the viscosity of  $\log \eta = 12.3, 10, 6.6$  and 1 (Pa·s), respectively. Meanwhile, replacing 0.5 mol% of CaO with  $Al_2O_3$  raises the isokom temperatures by 1.6, 2.3, 4.1 and 17.7°C at the viscosity of  $\log \eta = 12.3, 10, 6.6$  and 1 (Pa·s), respectively.

**Key words** Soda-lime glass, Viscosity, Isokom temperature, Lakatos model,  $Al_2O_3$

## 소다석회유리에서 $Al_2O_3$ 가 isokom 온도에 미치는 영향

강승민<sup>†</sup>, 김삼삼<sup>\*</sup>

한서대학교 국제디자인융합전문대학원, 서산, 31962

<sup>\*</sup>한서대학교 산학협력단, 서산, 31962

(2022년 5월 17일 접수)  
(2022년 5월 23일 심사완료)  
(2022년 6월 2일 게재확정)

**요약** 소다석회유리에서  $Al_2O_3$ 가 isokom 온도에 미치는 영향을 Lakatos 모델을 이용하여 분석하였다.  $Na_2O$ 와  $CaO$ 의 함량이 같고  $SiO_2$ 의 양이 0.5 mol% 감소하고  $Al_2O_3$  양이 0.5 mol% 증가했을 때 isokom 온도는  $\log \eta = 12.3, 10, 6.6, 1$ 에서 각각 3.1, 3.3, 3.6, 7.2°C 높아졌다. 한편,  $SiO_2$ 와  $Na_2O$ 의 함량이 같고  $CaO$ 가 0.5 mol% 감소하고  $Al_2O_3$ 가 0.5 mol% 증가한 경우는  $\log \eta = 12.3, 10, 6.6, 1$ 에서 각각 1.6, 2.3, 4.1, 17.7°C isokom 온도가 높아졌다.

### 1. 서론

알루미나( $Al_2O_3$ )는 유리 형성제와 망목수식제의 중간적 성질을 가지는 산화물로서 Al이 4배위인 경우 Si의 반경과 유사하여 망목구조의 Si를 Al로 대체할 수 있다. 소다석회유리에  $Al_2O_3$ 가 첨가되면 비가교산소가 Al-O-Si 교차결합을 이루어 유리의 연결성이 증가된다. 따라서  $Al_2O_3$ 가 소다석회유리에 첨가되면 점도와 탄성률이 올라가고 열팽창률이 감소한다. 일반적인 소다석회유리에는  $Al_2O_3$ 가 0~2% 함유되어 있으며, 소량이지만 유리 점도에 상당한 영향을 미치고 있다.

점도는 유리 제조공정에서 관리해야 할 중요한 인자이

며, 온도에 따라서 변하는데 양질의 유리 제품을 제조하기 위해서는 공정 중의 최적 점도가 유지되어야 한다. 유리 점도는 유리 구조와 유리형성산화물의 분자간 인력에 의해서 결정되기 때문에 조성에 따라서 큰 차이가 나타난다. 현재까지 유리 조성에 따른 유리 점도를 추정하기 위한 많은 연구가 있었다[1-6]. 이러한 이유는 유리 조성을 분석하여 유리 점도를 미리 추정할 수 있으면 제조공정을 효율적으로 운전할 수 있어 에너지를 절약하고 제품의 질을 높일 수 있기 때문이다.

여러 점도 추정 모델 중에서 소다석회유리에 가장 널리 사용되는 것은 Lakatos[2]와 Fluegel[5]이 발표한 것이다. 소다석회유리의 주요 성분은  $SiO_2, Na_2O, CaO, MgO, Al_2O_3, K_2O$ 이며,  $SiO_2, Na_2O, CaO$ 가 96~98%를 차지한다. 최근 Kang 등은 소다석회유리에서 주성분인  $Na_2O$ 와  $CaO$ 가 점도에 미치는 영향을 Lakatos 모델

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: topazksm@naver.com

로 정량적으로 분석하여 보고하였다[6]. 본 연구는  $\text{Na}_2\text{O}$ 와  $\text{CaO}$  다음으로 소다석회유리 점도에 영향을 미치리라 예상되는  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 양을 1~2 mol% 변화시키면서 점도곡선을 Lakatos 모델로 구하여, 4개의 특정 점도에서의 isokom 온도 변화를 분석한 결과이다. 이러한 결과를 활용하면 미세한 조성 변화가 유리 점도에 미치는 정도를 예측할 수 있어 유리제조공정의 효율성을 향상시킬 것으로 기대된다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용한 소다석회유리의 조성을 Table 1에 정리하였다.  $\text{SiO}_2$ 는 71~72 mol%,  $\text{CaO}$ 는 11.5~13.5 mol%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 는 1.0~2.0 mol%로 변화시켰다. 그 외의  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 각각 13.0, 1.0, 0.5 mol%로 고정하였다.

Lakatos 모델에서 점도는 아래 Vogel-Fulcher-Tammann 식에 의해서 계산하였다[2].

$$\begin{aligned} \log \eta &= A + B/(T - T_0) \\ A &= -2.4550 + \sum a_i \cdot P_i \\ B &= 5736.4 + \sum b_i \cdot P_i \\ T_0 &= 198.1 + \sum t_i \cdot P_i \end{aligned}$$

여기서  $a_i$ ,  $b_i$ , 그리고  $t_i$ 는 Lakatos additive parameters로 Table 2에 정리하였고,  $P_i$ 는 각 첨가산화물의  $\text{SiO}_2$ 에 대한 몰 비이다.

Table 1  
Planned compositions for calculating the isokom temperatures  
(unit: mol%)

No.	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$
1-1	71.0	13.0	13.5	1.0	1.0	0.5
1-2	71.0	13.0	13.0	1.5	1.0	0.5
1-3	71.0	13.0	12.5	2.0	1.0	0.5
2-1	71.5	13.0	13.0	1.0	1.0	0.5
2-2	71.5	13.0	12.5	1.5	1.0	0.5
2-3	71.5	13.0	12.0	2.0	1.0	0.5
3-1	72.0	13.0	12.5	1.0	1.0	0.5
3-2	72.0	13.0	12.0	1.5	1.0	0.5
3-3	72.0	13.0	11.5	2.0	1.0	0.5

Table 2  
Lakatos additive parameters

Component	$a_i$	$b_i$	$t_i$
$\text{Na}_2\text{O}$	1.4788	-6039.7	-25.07
$\text{K}_2\text{O}$	-0.8350	-1439.6	-321.00
$\text{MgO}$	-5.4936	6285.3	-384.00
$\text{CaO}$	-1.6030	-3919.3	544.30
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.5183	2253.4	294.40

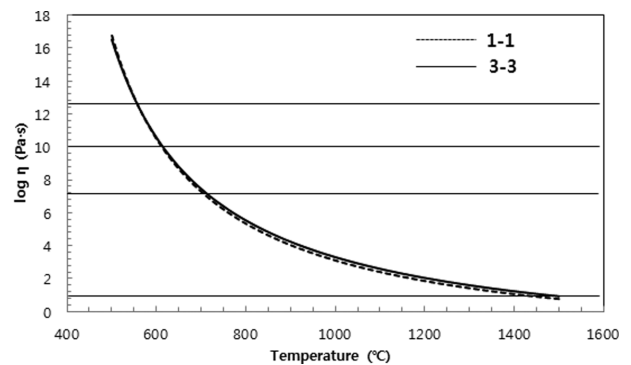


Fig. 1. Viscosity plots of No. 1-1 and No. 3-3 using Lakatos model.

## 3. 결과 및 고찰

Table 1의 1-1과 3-3의 점도곡선을 Fig. 1에 플롯하였다. Figure 1에서 가로선은  $\log \eta$ 가 1, 6.6, 10, 12.3을 가리킨다. Isokom 온도는 특정 점도에서의 온도이기 때문에 가로선이 점도곡선과 만나는 점이 각 조성의 isokom 온도이다. 1-1과 3-3의  $\log \eta = 12.3$ 에서 isokom 온도는  $562.5^\circ\text{C}$ 로 같고, 그 보다 높은 점도에서는  $\text{CaO}$ 가 13.5 mol%로 3-3 보다 2 mol% 많은 1-1의 isokom 온도가 높고, 낮은 점도에서는  $\text{SiO}_2$ 와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 많이 함유된 3-3의 isokom 온도가 높아, 두 점도곡선은  $\log \eta = 12.3$ 에서 교차하고 있다. 이러한 변화는  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  및  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 점도에 미치는 정도가 온도에 따라 다르기 때문이다. 이러한 현상을 정량적으로 분석하기 위해서 각 조성의 4개 지점에서의 isokom 온도를 Table 3에 정리하였다. 또한 Table 3에는 각 조성의  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ,  $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$  비도 정리하였다.

Figure 2는  $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$  비에 따른 각 조성의 isokom 온도 변화이다.  $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$  비가 커짐에 따라서, Fig. 2에서 실선 화살표가 표시하는 것과 같이 유리 전이점인  $\log \eta = 12.3$ 과  $\log \eta = 10$ 에서의 isokom 온도는 높아지며, 유리가 자중에 의해서 변형을 일으키기 시작하는 Littleton 연화점인  $\log \eta = 6.6$ 과  $\log \eta = 1$ 에서의 isokom 온도는 반대로 낮아졌다.  $(\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2$  비가 같은 경우( $\text{SiO}_2$  함량이 같은 경우)는 점선 화살표가 표시하는 것과 같이  $\text{CaO}$ 가 줄고  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 늘어남에 따라서 모든 isokom 온도가 높아졌다. 점도에 따라서 isokom 온도가 높아지는 정도에는 차이가 있어,  $\text{CaO}$ 가 0.5 mol% 감소하고  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 0.5 mol% 증가함에 따라서  $\log \eta = 12.3, 10, 6.6, 1$ 에서 각각 1.6, 2.3, 4.1,  $17.7^\circ\text{C}$  높아졌다. 이 결과 소다석회유리에서  $\text{CaO}$  대신  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 늘어났을 때 점도 변화에 미치는 영향은 온도가 높아짐에 따라서 커지는 것을 알았다.

Table 3

Isokom temperatures of the planned compositions at log η = 1, 6.6, 10 and 12.3 (Pa·s) and ratios of major chemical components

Composition	log η = 1	log η = 6.6	log η = 10	log η = 12.3	CaO/SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	(CaO + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/SiO <sub>2</sub>
1-1	1419	730	611.8	562.5	0.190	0.014	0.204
1-2	1436	734	614.1	564.1	0.183	0.021	0.204
1-3	1454	738	616.4	565.7	0.176	0.028	0.204
2-1	1429	731	610.8	560.9	0.182	0.014	0.196
2-2	1447	735	613.1	562.5	0.175	0.021	0.196
2-3	1465	739	615.3	564.1	0.168	0.028	0.196
3-1	1440	731	609.8	559.4	0.174	0.014	0.188
3-2	1457	735	612.1	560.9	0.167	0.021	0.188
3-3	1475	739	614.3	562.5	0.160	0.028	0.188

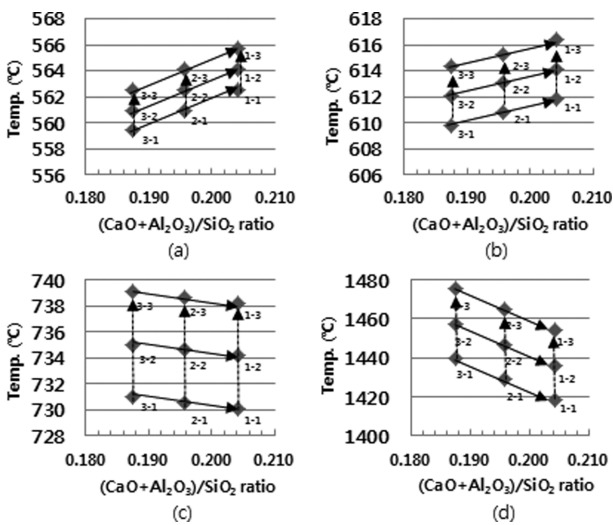


Fig. 2. Variation of isokom temperatures of the planned compositions according to the (CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/SiO<sub>2</sub> ratio.

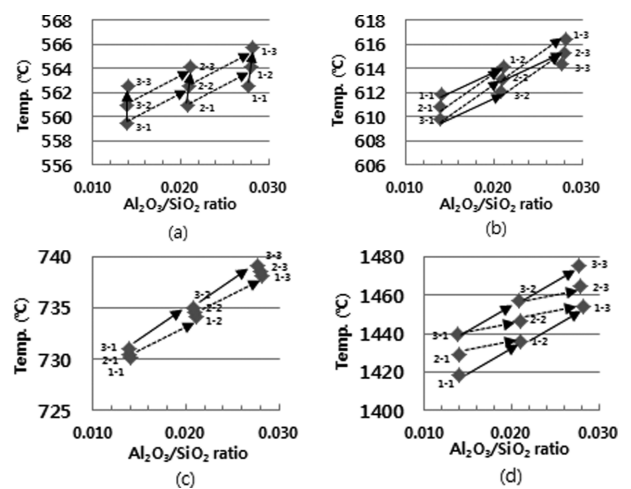


Fig. 4. Variation of isokom temperatures of the planned compositions according to the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio.

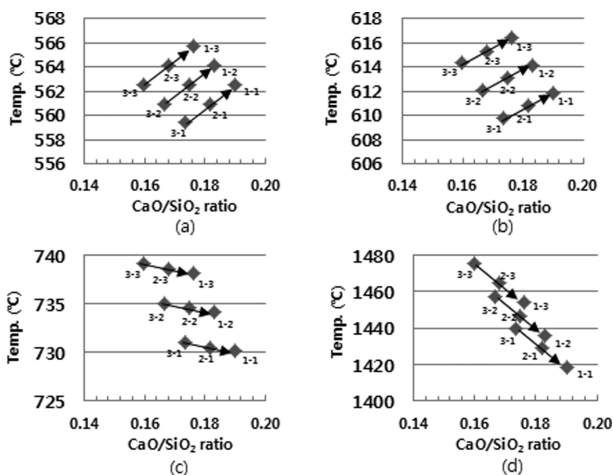


Fig. 3. Variation of isokom temperatures of the planned compositions according to the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio.

Figure 3은 CaO/SiO<sub>2</sub> 비에 따른 각 조성의 isokom 온도 변화이다. Na<sub>2</sub>O와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 같고 SiO<sub>2</sub>의가 0.5 mol% 줄고 대신 CaO가 0.5 mol% 증가했을 때, 그림의 화살표와 같이 log η = 12.3과 10에서 각각 1.6,

1.0°C 높아지고, log η = 6.6과 1에서 각각 0.5, 10.5°C 낮아졌다. 이 결과는 이전에 보고한 소다석회유리에서 SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO 함량 변화에 따른 점도 변화 결과와 일치하며, CaO가 낮은 온도에서 비가교산소를 연결하는 작용을 할 수 있어 저온에서의 점도를 높였기 때문이다 [6,7]. 또한 Fig. 2에서 (CaO + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/SiO<sub>2</sub> 비가 커짐에 따라서 저온에서는 isokom 온도가 높아지고 고온에서는 낮아지는 것도 CaO의 이러한 작용 때문이라 사료된다.

Figure 4는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비에 따른 각 조성의 isokom 온도 변화이다. Na<sub>2</sub>O와 CaO의 함량이 같고 SiO<sub>2</sub>의 양이 0.5 mol% 감소하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 양이 0.5 mol% 증가했을 때 isokom 온도는 그림에서 점선 화살표와 같이 log η = 12.3, 10, 6.6, 1에서 각각 3.1, 3.3, 3.6, 7.2°C 높아졌다. 이 때의 isokom 온도 변화를 Fig. 4의 실선 화살표로 표시한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 CaO를 대체했을 때의 변화와 비교하면, log η = 12.3과 10에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 SiO<sub>2</sub>를 대체했을 때 isokom 온도가 조금 더 높아지고, log η = 6.6과 1에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 CaO를 대체했을 경우 isokom 온도가 더 상승하는 것을 알 수 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 유리형성체와 망목수 식체의 중간적 성질을 가지는 산화물로서 Al이 4배위인

경우 Si의 반경과 유사하여 망목구조의 Si를 대체할 수 있어 비가교산소를 줄이고 유리의 연결성을 증가시켜 모든 온도 구간에서 isokom 점도를 높인다. 반면 CaO는 저온에서는 isokom 온도를 낮추고 고온에서만 높이기 때문에  $Al_2O_3$ 와 CaO가 함유량에 따라서 저온에서와 고온에서의 점도 변화가 다르게 나타나는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

소다석회유리에서 중간산화물인  $Al_2O_3$  함량이 isokom 온도에 미치는 영향을 Lakatos 모델을 이용하여 정량적으로 분석하였다. 그 결과,  $Na_2O$ 와 CaO의 함량이 같고  $SiO_2$ 의 양이 0.5 mol% 감소하고  $Al_2O_3$  양이 0.5 mol% 증가했을 때 isokom 온도는  $\log \eta = 12.3, 10, 6.6, 1$ 에서 각각 3.1, 3.3, 3.6,  $7.2^\circ C$  높아졌다.  $Al_2O_3$ 가 CaO를 대체했을 때와  $Al_2O_3$ 가  $SiO_2$ 를 대체했을 때를 비교하여,  $\log \eta = 12.3$ 와 10에서는  $Al_2O_3$ 가  $SiO_2$ 를 대체했을 때 isokom 온도가 조금 더 높아지고,  $\log \eta = 6.6$ 과 1에서는  $Al_2O_3$ 가 CaO를 대체했을 경우 isokom 온도가 더 상승하는 것을 알았다. 이것은  $Al_2O_3$ 는 유리형성체와 망목수식체의 중간적 성질을 가지며 망목구조의 Si를 대체할 수 있어 모든 온도 구간에서 isokom 점도를 높이나, CaO는 저온에서는 isokom 온도를 낮추고 고온에서만 높이기 때문이라 사료되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 소재부품개발소재부품패키지형 기술개발사업(“미세플라스틱 저감을 위한 초경량 고강도 유리제조 기술 개발”, 과제번호; 20010268)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- [ 1 ] S. English, “The effect of composition on the viscosity of glass”, J. Soc. Glass Technol. 8 (1924) 205.
- [ 2 ] T. Lakatos, L.-G. Johansson and B. Simmingskold, “The effect of some glass components on the viscosity of glass”, Glass Technol. 13 (1972) 88.
- [ 3 ] K.I. Braginskii, “Calculation of the viscosity of glass as a function of temperature”, Glass Ceram. 30 (1973) 451.
- [ 4 ] K.C. Lyon, “Prediction of the viscosity of soda-lime-silica glasses”, J. Res. Nat. Bur. Standards A. 78A (1974) 497.
- [ 5 ] A. Fluegel, D.A. Earl, A.K. Varshneya and D. Oksoy, “Statistical analysis of viscosity, electrical resistivity, and further glass melt properties. High temperature glass melt property database for process modeling”, T.P. Seward III and T. Vascott Ed. (The Am. Ceram. Soc., Westerville, Ohio, 2005) Ch. 9.
- [ 6 ] S.M. Kang and C.S. Kim, “The effect of  $SiO_2$ ,  $Na_2O$ , and CaO on the isokom temperatures in soda-lime glass”, J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 32 (2022) 12.
- [ 7 ] A. Fluegel, “Glass viscosity calculation based on a global statistical modelling approach”, Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol. A. 48 (2007) 13.