

Analysis of the relationship between composition and viscosity of soda-lime glass bottles

Seung Min Kang[†] and Chang-Sam Kim^{*}

Dept. of Design and Engineering Convergence, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

*Industry-Academic Cooperation Foundation, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

(Received January 31, 2023)

(Revised February 6, 2023)

(Accepted February 9, 2023)

Abstract Forty Viscosity data of glass bottles fabricated in a glass bottle manufacturing plant for 4 years were calculated using Lakatos model. The relationship between the glass bottle compositions and viscosities at $\log \eta$ of 3, 6.6, 10 and 12.3 Pa·s was analyzed. MgO that was a component of the glass bottle showed the maximum coefficient of variation of 0.89, but it gave a very small change in the viscosity. CaO that was another component of the glass bottle lowered the isokom temperature because it tended to reduce the number of non-bridging oxygen at temperature below a softening point.

Key words Soda-lime glass, Viscosity, Composition, Isokom temperature, Lakatos model

소다석회유리병의 조성과 점도의 상관관계 분석

강승민[†], 김창삼^{*}

한서대학교 디자인공학융합학과, 서산, 31962

*한서대학교 산학협력단, 서산, 31962

(2023년 1월 31일 접수)

(2023년 2월 6일 심사완료)

(2023년 2월 9일 게재확정)

요약 유리병 제조 공장에서 생산한 유리 조성을 4년간 40 차례 분석하여 Lakatos 모델로 점도를 구하였다. $\log \eta$ 가 3, 6.6, 10, 12.3 Pa·s 일 경우의 isokom 온도를 구하여 조성과의 상관관계를 분석하였다. 조성에서 함량에 편차가 가장 큰 것은 MgO로 변동계수가 0.890이었다. 그러나 MgO 함량 편차가 점도 변화에 주는 영향은 제한적이었다. 반면 CaO는 연화점 이하에서 비가교산소를 감소시키는 작용에 의하여 isokom 온도를 낮추고 있었다.

1. 서론

유리병 소재로 일반적으로 사용되는 소다석회유리는 가장 오래된 유리의 하나로 성형이 용이하고 화학적 내구성이 뛰어나다[1]. 소다석회유리병 제조에 사용되는 원료의 70~80 wt.%는 재활용을 위해 수거된 파유리를 분쇄하여 사용하기 때문에 성분에 편차가 일어날 수 있다. 이러한 편차는 적정 공정 온도에서의 이탈을 유발하여 불량품 비율이 높아지는 원인이 된다. 성분 편차를 줄이는 것이 가장 효과적이거나 실제 공정에서 편차를 없애는 것은 매우 어렵기 때문에 편차를 사전에 파악하여 공정을

관리하는 것이 바람직한 방법이다.

이전 보고에는 유리병 제조 라인에서 원료 조성 변화를 1년간 조사하여 점도와의 관계를 분석하여 보고하였다[2]. 그러나 1년간의 데이터는 공정에서 일어나는 편차를 충분히 고려하지 못할 것으로 여겨진다. 따라서 여기서는 또 다른 유리병 제조 라인에서 4년 동안 40개 시편을 채취하여 정량분석한 후, 성분의 변화 추이를 조사하였다. 또한 정량분석한 데이터를 이용 Lakatos 모델을 사용하여 유리의 점도를 추정하고, 그 결과로 부터 용융온도, Littleton 온도, 딜레토미터 연화점, 어닐링 온도 등의 isokom 온도를 구하여 조성과의 상관관계를 분석하였다. 이러한 분석 결과는 유리병 제조 공정에서의 원료 및 공정 관리에 기여할 것으로 기대된다.

[†]Corresponding author

E-mail: topazksm@naver.com

2. 실험 방법

실험에는 2019년 2월부터 2022년 10월까지 소다석회 유리병 제조 공장에서 생산한 병을 분쇄하여 얻은 40개 시편을 사용하였다. 정량분석은 WD-XRF(S8-TIGER, Bruker)를 사용하였다. 정량분석에 의하여 SiO₂, Na₂O, CaO, MgO, Al₂O₃, K₂O, Fe₂O₃, BaO 함량을 얻었으나 Fe₂O₃와 BaO의 함량은 0.07 wt.% 이하의 소량으로 이후의 분석에서 제외하였다. 정량분석 결과에서 각 성분의 평균, 표준편차, 변동계수(표준편차/평균)를 구하였다.

Lakatos 모델을 이용하여 정량분석에서 얻은 6개 성분에서 각 시료의 점도를 계산하였다. 점도 계산은 아래의 Vogel-Fulcher-Tammann식을 사용하였다[3,4].

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

여기서 a_i, b_i, t_i는 Lakatos additive parameters이고, P_i는 각 첨가 산화물의 SiO₂에 대한 중량 비이다.

유리점도와 조성과의 상관관계를 분석하기 위해서 점도

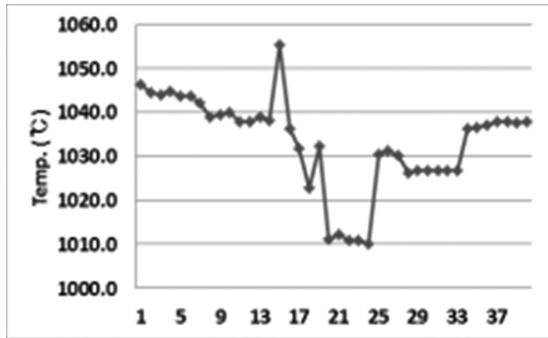
Table 1

A series of composition of glass bottles obtained for 4 years at a glass bottle manufacturing plant and isokom temperatures calculated at the viscosity of log η of 3, 6.6, 10, and 12.3 Pa·s (Compositions: wt.%, log η : Pa·s)

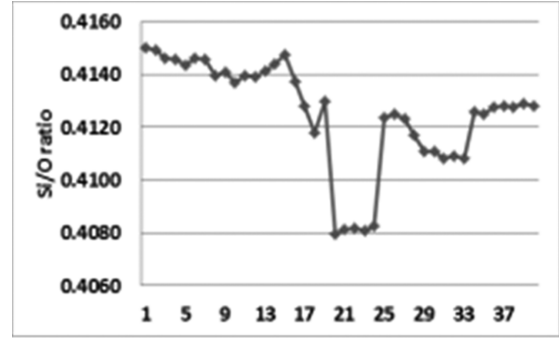
No.	Lot	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na-O	K-O	CaO	MgO	Si/O	(Si+Al)/O	1/Na	1/(Na+K)	log=3	log=6.6	log=10	log=12.3
1	1902	72.68	1.85	13.05	0.55	10.09	0.52	0.4150	0.4362	0.0766	0.0735	1046.4	737.1	609.6	556.8
2	1903	72.75	1.82	13.13	0.53	10.26	0.45	0.4149	0.4357	0.0762	0.0732	1044.4	736.4	609.5	556.9
3	1904	72.74	1.84	13.20	0.54	10.19	0.52	0.4146	0.4356	0.0758	0.0728	1044.1	735.9	608.9	556.3
4	1905	72.54	1.85	13.13	0.54	10.13	0.54	0.4146	0.4357	0.0762	0.0732	1044.9	736.3	609.2	556.4
5	1906	72.49	1.85	13.17	0.54	10.22	0.49	0.4143	0.4355	0.0759	0.0729	1043.7	735.9	609.1	556.6
6	1907	72.56	1.83	13.18	0.54	10.19	0.48	0.4146	0.4355	0.0759	0.0729	1043.7	735.7	608.9	556.3
7	1908	72.60	1.80	13.22	0.54	10.32	0.44	0.4146	0.4351	0.0756	0.0727	1042.2	735.2	608.8	556.4
8	1909	72.37	1.77	13.39	0.53	10.35	0.50	0.4140	0.4342	0.0747	0.0718	1038.9	733.3	607.4	555.2
9	1910	72.52	1.79	13.37	0.53	10.42	0.41	0.4141	0.4345	0.0748	0.0719	1039.4	733.8	608.0	555.9
10	1911	72.25	1.81	13.29	0.52	10.43	0.47	0.4137	0.4344	0.0752	0.0724	1040.0	734.4	608.5	556.4
11	1912	72.47	1.75	13.46	0.52	10.38	0.52	0.4139	0.4339	0.0743	0.0715	1037.9	732.8	607.0	554.9
12	2001	72.47	1.74	13.45	0.52	10.39	0.56	0.4139	0.4338	0.0743	0.0716	1037.9	732.8	607.0	554.9
13	2002	72.52	1.76	13.39	0.51	10.42	0.48	0.4141	0.4342	0.0747	0.0719	1039.0	733.6	607.8	555.6
14	2003	72.42	1.70	13.39	0.51	10.36	0.56	0.4144	0.4339	0.0747	0.0719	1038.3	733.0	607.1	554.9
15	2009	72.80	1.88	13.10	0.65	8.18	2.36	0.4147	0.4362	0.0763	0.0727	1055.4	736.1	603.3	548.0
16	2010	73.01	1.79	13.62	0.43	10.82	0.21	0.4137	0.4340	0.0734	0.0712	1036.4	733.2	608.4	556.8
17	2011	72.72	1.78	13.90	0.42	10.86	0.21	0.4128	0.4330	0.0719	0.0698	1031.7	730.4	606.5	555.2
18	2012	72.32	1.67	14.25	0.41	11.15	0.17	0.4118	0.4308	0.0702	0.0682	1022.9	726.0	604.0	553.4
19	2101	72.74	1.78	13.87	0.42	10.82	0.21	0.4130	0.4332	0.0721	0.0700	1032.3	730.6	606.6	555.3
20	2102	70.68	1.50	14.98	0.50	10.12	1.79	0.4080	0.4253	0.0668	0.0646	1011.2	715.4	592.8	541.8
21	2103	70.71	1.50	14.91	0.50	10.12	1.80	0.4081	0.4255	0.0671	0.0649	1012.2	716.1	593.2	542.2
22	2104	70.68	1.47	14.98	0.48	10.14	1.79	0.4082	0.4252	0.0668	0.0647	1010.9	715.3	592.7	541.8
23	2105	70.66	1.48	14.99	0.47	10.13	1.80	0.4081	0.4252	0.0667	0.0647	1010.9	715.4	592.7	541.8
24	2106	70.67	1.45	15.02	0.46	10.15	1.79	0.4082	0.4250	0.0666	0.0646	1010.2	714.9	592.5	541.5
25	2107	72.59	1.79	13.95	0.43	10.89	0.21	0.4124	0.4327	0.0717	0.0695	1030.5	729.8	606.2	555.0
26	2108	72.64	1.80	13.91	0.43	10.86	0.22	0.4125	0.4329	0.0719	0.0697	1031.4	730.3	606.5	555.2
27	2109	72.58	1.79	13.97	0.43	10.88	0.21	0.4123	0.4327	0.0716	0.0694	1030.2	729.6	606.0	554.9
28	2110	72.50	1.77	14.22	0.42	10.94	0.21	0.4117	0.4318	0.0703	0.0683	1026.3	727.3	604.4	553.5
29	2111	72.44	1.85	14.22	0.45	10.92	0.20	0.4111	0.4321	0.0703	0.0682	1026.9	727.6	604.7	553.8
30	2112	72.43	1.85	14.22	0.45	10.91	0.20	0.4111	0.4321	0.0703	0.0682	1026.9	727.6	604.7	553.8
31	2201	72.49	1.83	14.22	0.44	10.94	0.38	0.4108	0.4316	0.0703	0.0682	1026.8	727.7	606.6	553.7
32	2202	72.48	1.82	14.21	0.45	10.94	0.37	0.4109	0.4315	0.0704	0.0682	1026.7	727.6	604.6	553.6
33	2203	72.49	1.83	14.22	0.45	10.93	0.38	0.4108	0.4316	0.0703	0.0682	1026.8	727.6	604.6	553.6
34	2204	72.73	1.83	13.57	0.44	10.86	0.46	0.4126	0.4333	0.0737	0.0714	1036.4	733.6	608.8	557.1
35	2205	72.72	1.84	13.58	0.43	10.86	0.46	0.4125	0.4334	0.0736	0.0714	1036.5	733.7	608.9	557.1
36	2206	72.77	1.83	13.55	0.44	10.81	0.48	0.4127	0.4335	0.0738	0.0715	1037.1	733.8	608.8	557.0
37	2207	72.81	1.84	13.53	0.44	10.77	0.49	0.4128	0.4337	0.0739	0.0716	1037.8	734.1	609.0	557.1
38	2208	72.80	1.85	13.53	0.44	10.76	0.50	0.4127	0.4337	0.0739	0.0716	1037.9	734.2	609.0	557.1
39	2209	72.82	1.83	13.52	0.45	10.77	0.49	0.4129	0.4337	0.0740	0.0716	1037.7	734.1	608.9	557.0
40	2210	72.81	1.84	13.52	0.45	10.76	0.50	0.4128	0.4337	0.0740	0.0716	1037.9	734.1	608.9	557.0

에 $\log \eta$ 를 취한 값이 3, 6.6, 10, 12.3 Pa·s일 때의 isokom 온도를 구하였다. 한편, 망목형성제의 영향을 알아보기 위해서 $\Sigma Si/\Sigma O$ (이하, Si/O)와 $(\Sigma Si + \Sigma Al)/\Sigma O$ (이하, (Si +

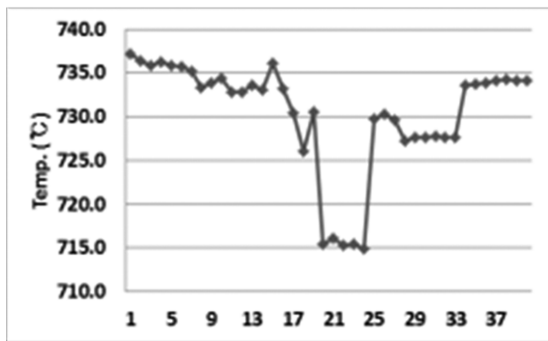
Al)/O를 구하였다. 또한 망목수식제의 영향을 알아보기 위해서 Na_2O 함량의 역수(이하, $1/Na$), Na_2O 와 K_2O 함량의 역수(이하, $1/(Na + K)$)를 구하였다. 또한 CaO 의



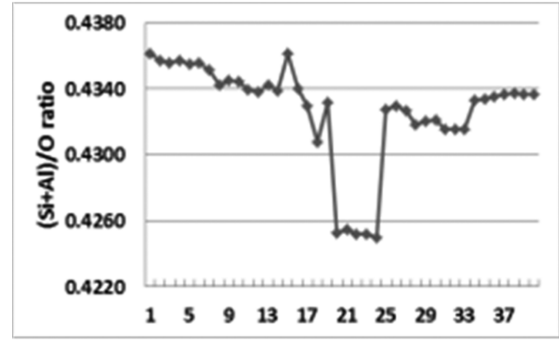
(a)



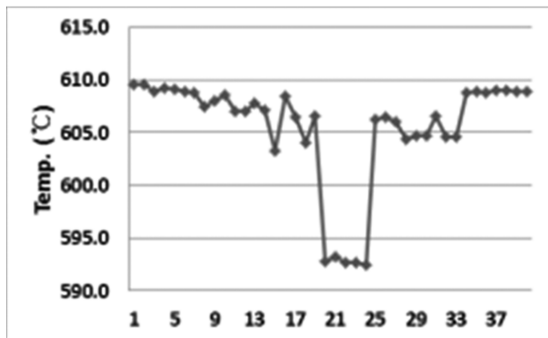
(a)



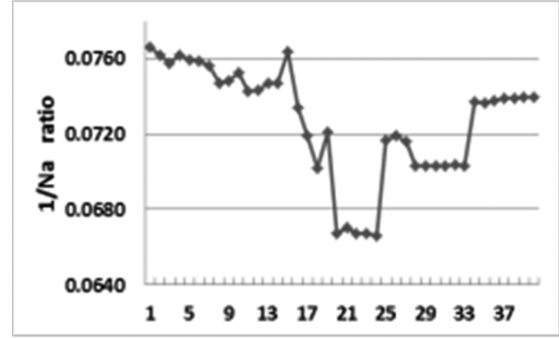
(b)



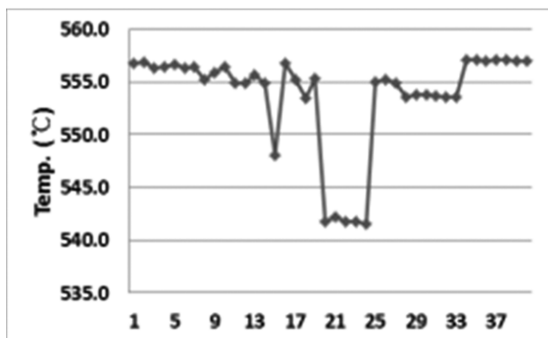
(b)



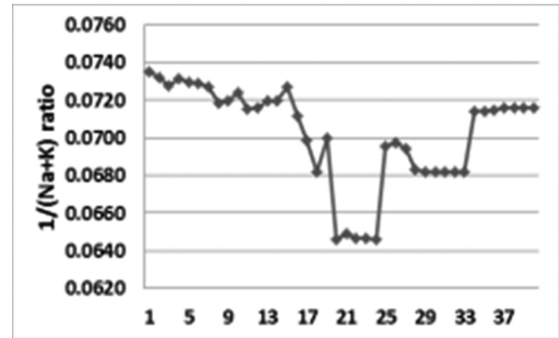
(c)



(c)



(d)



(d)

Fig. 1. Changes of isokom temperatures at (a) $\log \eta = 3$, (b) $\log \eta = 6.6$, (c) $\log \eta = 10$, and (d) $\log \eta = 12.3$ Pa·s.

Fig. 2. Changes of (a) Si/O, (b) (Si + Al)/O, (c) $1/Na$ and $1/(Na + K)$ ratio.

영향을 반영하기 위해서 실험 결과를 바탕으로 $(\text{Si} + \text{Al} - \text{Ca})/\text{O}$ 를 구하였다. 여기서 $(\text{Si} + \text{Al} - \text{Ca})/\text{O}$ 는 $(\Sigma\text{Si} + \Sigma\text{Al} + (3 \times \Sigma\text{Ca}/\text{Ca} \text{ 평균}) - 5)/\Sigma\text{O}$ 이다. Isokom 온도와 조성의 상관관계는 KESS(Korean Educational Statistics Software)의 엑셀 프로그램의 산점도로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

유리병 성분, SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO , MgO 를 분석한 결과와 Si/O , $(\text{Si} + \text{Al})/\text{O}$, $1/\text{Na}$ 값을 Table 1에 정리하였다. 또한 점도 $\log \eta$ 가 3, 6.6, 10, 12.3 Pa·s일 때의 isokom 온도를 정리하였다. 주성분인 SiO_2 , Na_2O , CaO 의 평균과 표준편차는 각각 72.36(0.65), 13.78(0.58), 10.51(0.49)이며, 이것의 변동계수는 각각 0.009, 0.042,

0.047이었다. 소량 성분인 Al_2O_3 , K_2O , MgO 의 평균과 표준편차는 각각 1.77(0.12), 0.48(0.05), 0.62(0.55)로, 이것의 변동계수는 각각 0.066, 0.109, 0.890이었다. 변동계수가 가장 큰 MgO 의 최소 함량은 0.20 g이고 최대 함량은 2.36 g이었다. 이렇게 큰 편차를 보이는 MgO 가 점도에 영향을 주는지를 확인할 필요가 있다고 생각되었다.

Table 1에 나타낸 점도 $\log \eta$ 가 3 Pa·s일 때는 소다석 회유리의 용융온도 부근이고, 6.6 Pa·s일 때는 유리가 자중에 의해서 변형을 일으키는 Littleton 온도 부근이다. 또한 10 Pa·s는 딜레토미터 연화점 부근이고, 12.3 Pa·s는 어닐링 온도 부근으로 유리 제조에 있어서 인지해야 하는 온도이다. Isokom 온도의 평균과 표준편차는 $\log \eta$ 가 3, 6.6, 10, 12.3 Pa·s에서 각각 1033.2(10.6), 730.3(6.3), 605.5(5.1), 553.7(4.8)이며, 이것의 변동계수는 각각 0.010, 0.009, 0.008, 0.009로 거의 차이가 없었다.

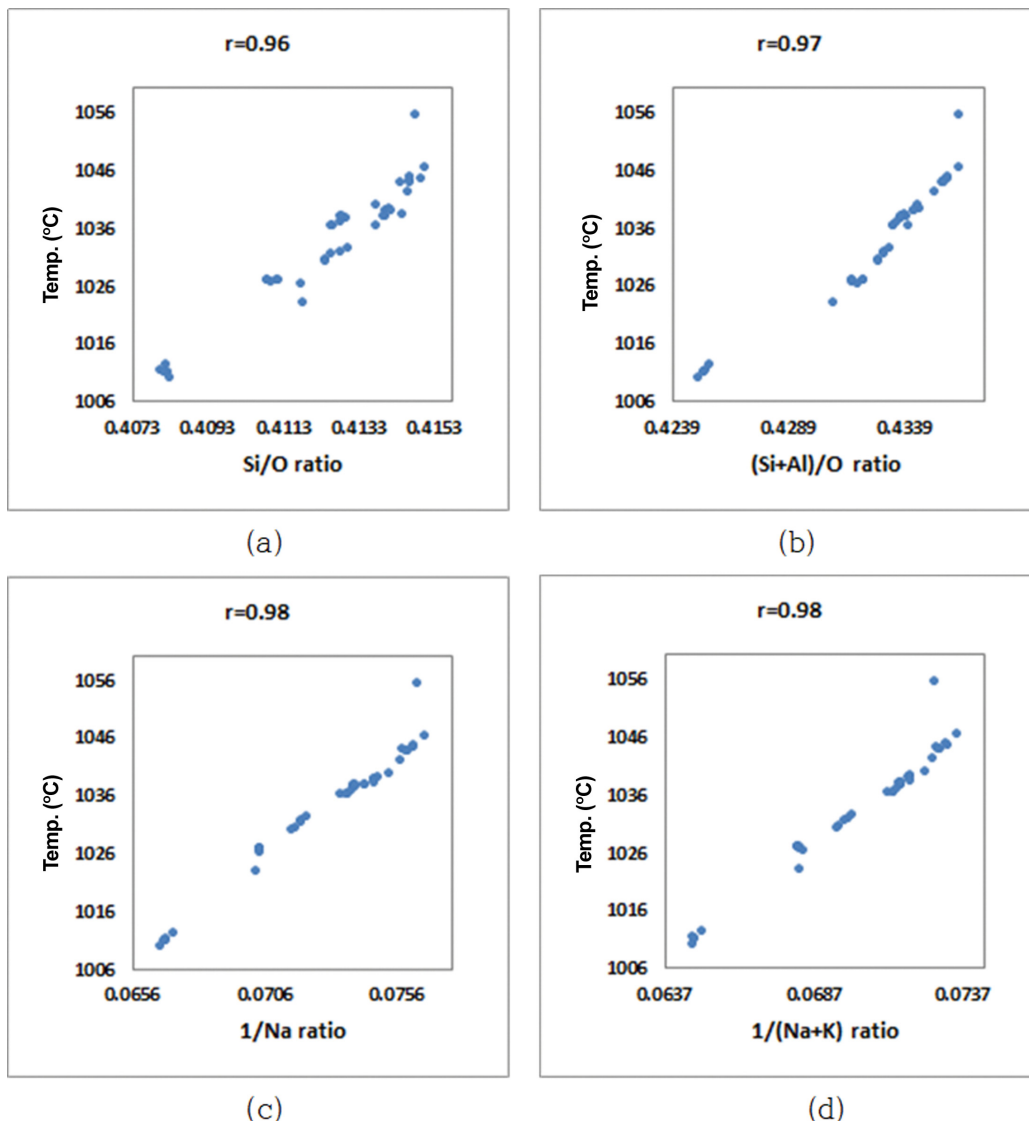


Fig. 3. Scatter plots between viscosity at $\log \eta = 3$ and (a) Si/O , (b) $(\text{Si} + \text{Al})/\text{O}$, (c) $1/\text{Na}$ and (d) $1/(\text{Na} + \text{K})$ ratio.

소다석회유리에서 망목구조를 이루는 주성분은 SiO_2 와 Al_2O_3 이다. 따라서 Si/O나 (Si + Al)/O 값은 커짐에 따라서 가교산소 수가 증가하기 때문에 isokom 온도가 높아지게 된다. Si/O 값이 0.5이면 SiO_4 사면체에 비가교산소 없는 완벽한 3차원으로 연속된 결정이고, 이 값이 0.4이면 SiO_4 사면체에서 3개의 가교산소와 1개의 비가교산소가 있는 2차원적 연속체가 된다.

Na_2O 와 K_2O 는 망목수식제로, 이들의 함량이 많아지면 비가교산소 수가 증가하여 isokom 온도가 낮아진다. 그러므로 이들의 역수 값을 취하여 Si/O와 같이, 값이 커짐에 따라서 isokom 온도가 높아지게 하여 비교를 용이하게 하였다.

CaO는 Ca가 2가 이면서 이온반경이 Na 이온과 비슷한 0.99 \AA 이기 때문에 전장강도(전하수/이온반경)가 Na의 2배 정도 크며, 연화점 이상의 높은 온도에서는 원자

간 거리가 길어져서 전장강도의 영향이 미치지 않고 망목수식제로 작용하여 비가교산소를 증가시키지만, 비교적 낮은 온도에서 원자간 거리가 가까워지면 전장강도의 영향으로 비가교산소를 감소시켜 isokom 온도를 높이는 작용을 한다[5,6]. MgO는 전하수가 2개 이면서 이온반경이 0.66 \AA 으로 작아 전장강도가 크고 4배위를 선호하여 조건에 따라서 망목형성제로도 망목수식제로도 작용한다. 특히 알루미늄실리케이트 유리에서 Al이 적으면 망목형성제로 작용하고, Al이 많고 다른 망목수식제가 적으면 망목수식제로 작용한다고 보고되었다[7].

Figure 1은 isokom 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 용융온도 부근인 $\log \eta$ 가 $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 와 Littleton 온도 부근인 $\log \eta$ 가 $6.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 에서의 점도 변화는 유사한 경향을 보이고 있었다. 딜레토미터 연화점 부근인 $\log \eta$ 가 $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 와 어닐링 온도 부근인 $\log \eta$ 가 $12.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 에서의 온

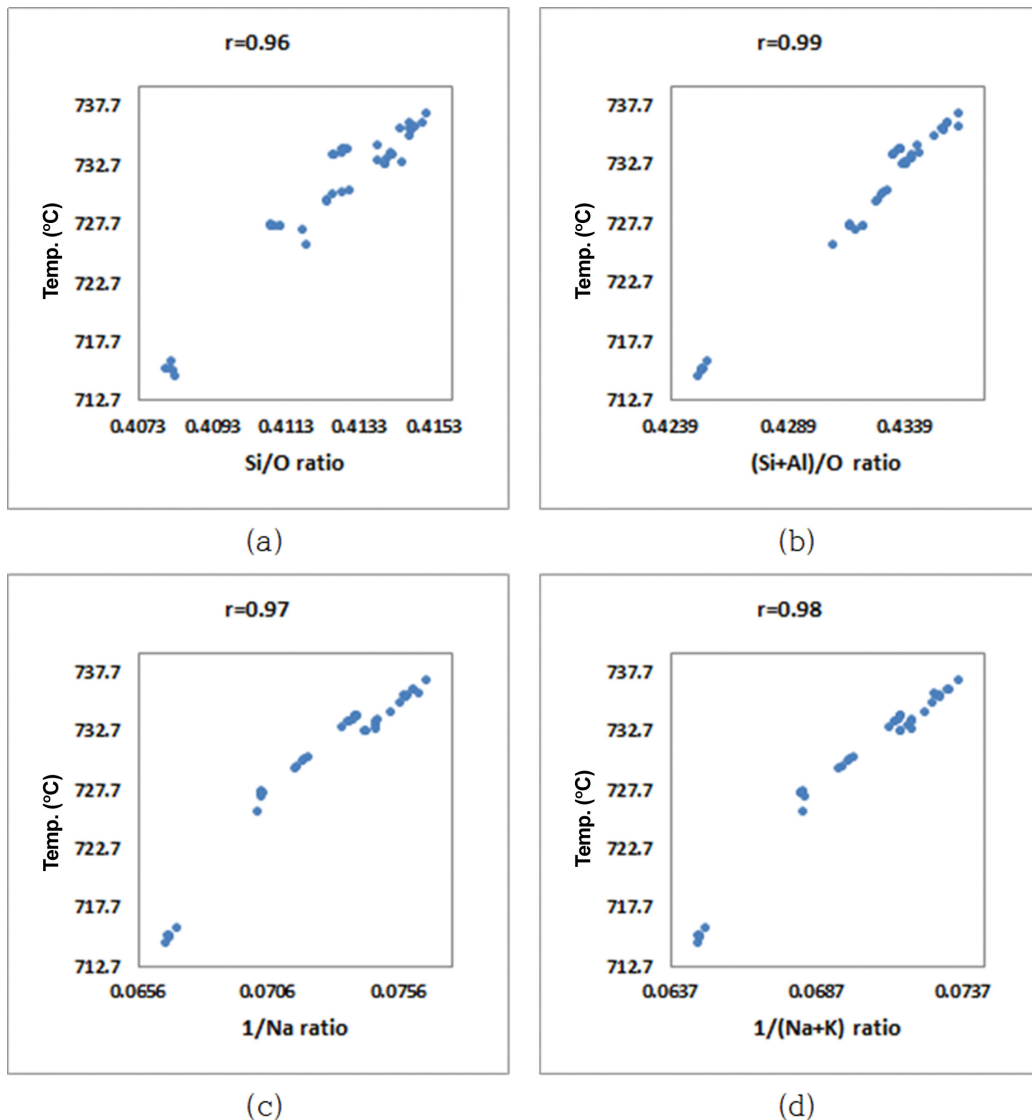


Fig. 4. Scatter plots between viscosity at $\log \eta = 6.6$ and (a) Si/O, (b) (Si + Al)/O, (c) 1/Na and (d) 1/(Na + K) ratio.

도 변화도 유사하였지만, No. 15의 isokom 온도는 $\log \eta$ 가 3과 6.6 Pa·s에서는 인접한 시편보다 높았으나 $\log \eta$ 가 10과 12.3 Pa·s에서는 인접한 시편보다 낮았다. No. 20~24 시편은 모든 isokom 온도가 다른 시편에 비하여 10°C 이상 낮았다. No. 20~24 시편들의 특징은 MgO의 함량이 1.80 g으로 평균인 0.62 g보다 3배 많은 것과 Na₂O의 함량이 14.91~15.02 g으로 평균인 13.78 g보다 약 9% 많은 것이다. MgO는 Al₂O₃가 적은 경우 망목형성제로 작용하여 isokom 온도를 높이거나 과량의 Na₂O의 영향이 커서 isokom 온도를 높이는 작용을 못한 것으로 생각되었다. 또한 No. 15에는 MgO 함량이 2.36 g으로 많음에도 불구하고 $\log \eta$ 가 10과 12.3 Pa·s에서는 인접한 시편보다 isokom 온도가 낮은 것에서도 MgO가 isokom 온도 변화에 주는 영향은 극히 제한적이라고 판단되었다.

Figure 2는 Si/O, (Si + Al)/O, 1/Na, 1/(Na + K) 값의 변화이다. 모든 그래프의 형태가 $\log \eta$ 가 3과 6.6 Pa·s일 때와 유사하였으며, $\log \eta$ 가 10과 12.3 Pa·s인 경우도 No. 15를 제외하면 매우 비슷하였다. 직관적으로는 어느 성분비가 점도와 상관관계가 있는지를 확인할 수 없었으므로 정확한 상관관계를 알아보기 위해서 각각의 상관계수를 계산하였다.

Figure 3은 $\log \eta$ 가 3 Pa·s에서의 Si/O, (Si + Al)/O, 1/Na, 1/(Na + K)와의 상관관계를 나타내는 산점도 그래프이고, 그림 위에 상관계수 r 을 표시하였다. 모든 조건에서 상관계수가 0.96 이상이었으나, 그림 우측 상단에 있는 No. 15 시편은 같은 양의 Si, Al, Na를 가진 시편보다 10°C 정도 isokom 온도가 높았다. Figure 4는 $\log \eta$ 가 6.6 Pa·s에서의 Si/O, (Si + Al)/O, 1/Na, 1/(Na + K)와의 상관관계를 나타내는 산점도 그래프이고, 그림 위

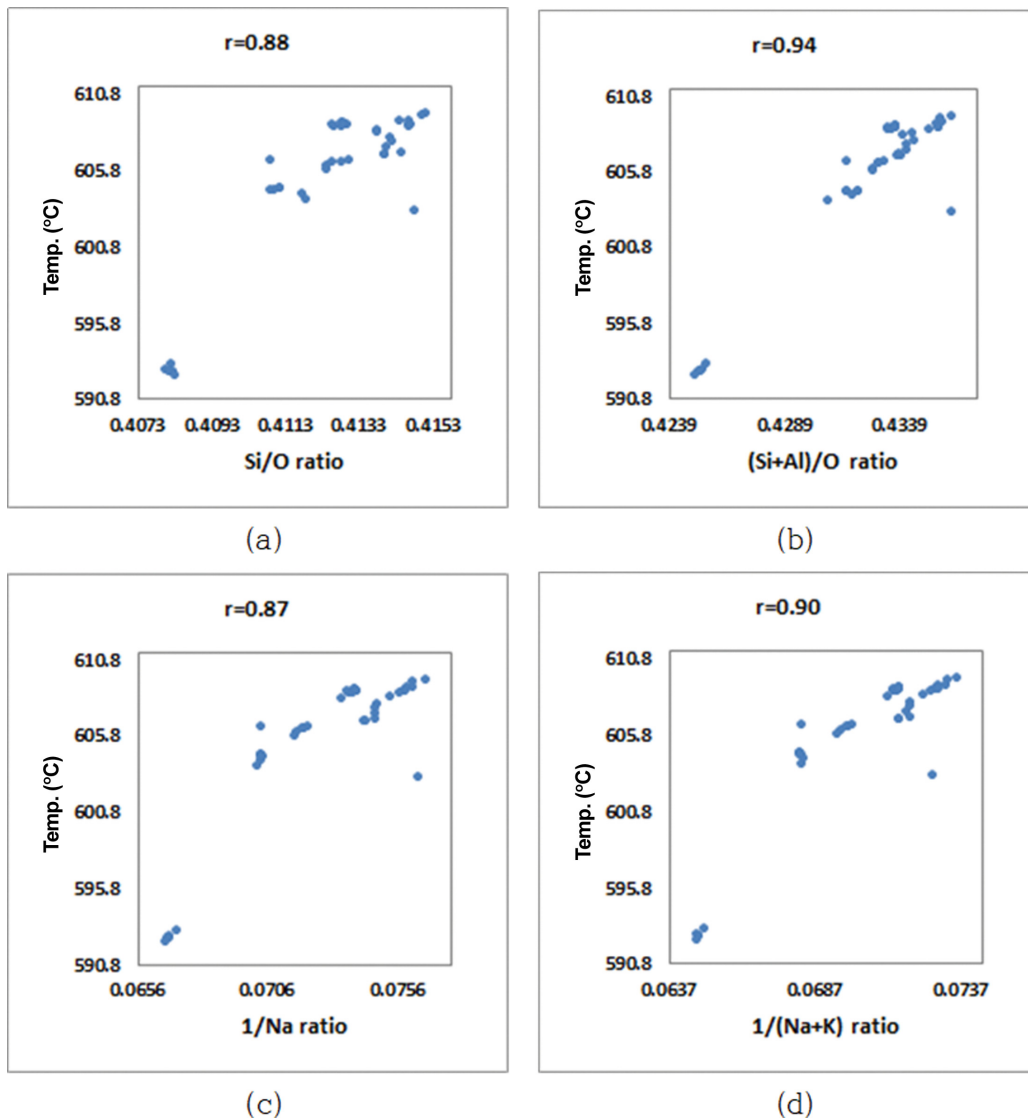


Fig. 5. Scatter plots between viscosity at $\log \eta = 10$ and (a) Si/O, (b) (Si + Al)/O, (c) 1/Na and (d) 1/(Na + K) ratio.

에 상관계수 r 을 표시하였다. 이것 역시 모든 조건에서 상관계수가 0.96 이상이었으며, 이 전에 보고한 결과와 마찬가지로 Si/O 값보다 (Si + Al)/O 값이 조금 더 밀접한 상관관계가 있었다[2].

Figure 5는 $\log \eta$ 가 10 Pa·s에서의 Si/O, (Si + Al)/O, 1/Na, 1/(Na + K)와의 상관관계를 나타내는 산점도 그래프이고, 그림 위에 상관계수 r 을 표시하였다. 그림 우측 중간에 떨어져 있는 점은 No. 15이다. No. 15는 망목형 성제인 Si와 Al 양이 비슷한 시편보다 6.5°C 정도 isokom 온도가 낮고, 망목수식제인 Na 양이 비슷한 시편보다는 5°C 정도 isokom 온도가 낮았다. Figure 6은 $\log \eta$ 가 12.3 Pa·s에서의 Si/O, (Si + Al)/O, 1/Na, 1/(Na + K)와의 상관관계를 나타내는 산점도 그래프이고, 그림 위에 상관계수 r 을 표시하였다. 이것 역시 그림 우측 중간에 떨어져 있는 점은 No. 15 시편이다. 비슷한 양의

Si와 Al을 함유한 시편보다 isokom 온도가 8°C 정도 낮았고, 비슷한 양의 Na를 함유한 시편보다 역시 8°C 정도 isokom 온도가 낮았다. Figure 5와 6에서의 No. 15 시편의 위치와 Fig. 3에서의 위치는 반대인 것을 알 수 있다. 즉 No. 15 시편은 비슷한 (Si + Al)/O과 1/Na 값을 갖는 시편보다 $\log \eta$ 가 3 Pa·s에서의 isokom 온도는 높고, $\log \eta$ 가 10 Pa·s과 12.3 Pa·s에서는 낮았다. 이러한 결과는 앞에서 서술한 바와 같이 CaO 때문이라 사료된다. No. 15의 CaO 함량은 8.18 g으로 평균인 10.51 g보다 22% 적었다. Si/O, (Si + Al)/O, 1/Na, 1/(Na + K) 값은 Ca의 영향을 전혀 고려하지 않았기 때문에 No. 15 시편과 같이 CaO 함량이 평균에서 크게 벗어나는 경우에는 잘 적용되지 않으리라 생각되었다. 따라서 $\log \eta$ 가 10과 12.3 Pa·s에서 점도와 조성과의 상관관계를 보다 정확하게 예측하려면 CaO의 영향을 고려할 필요가 있다

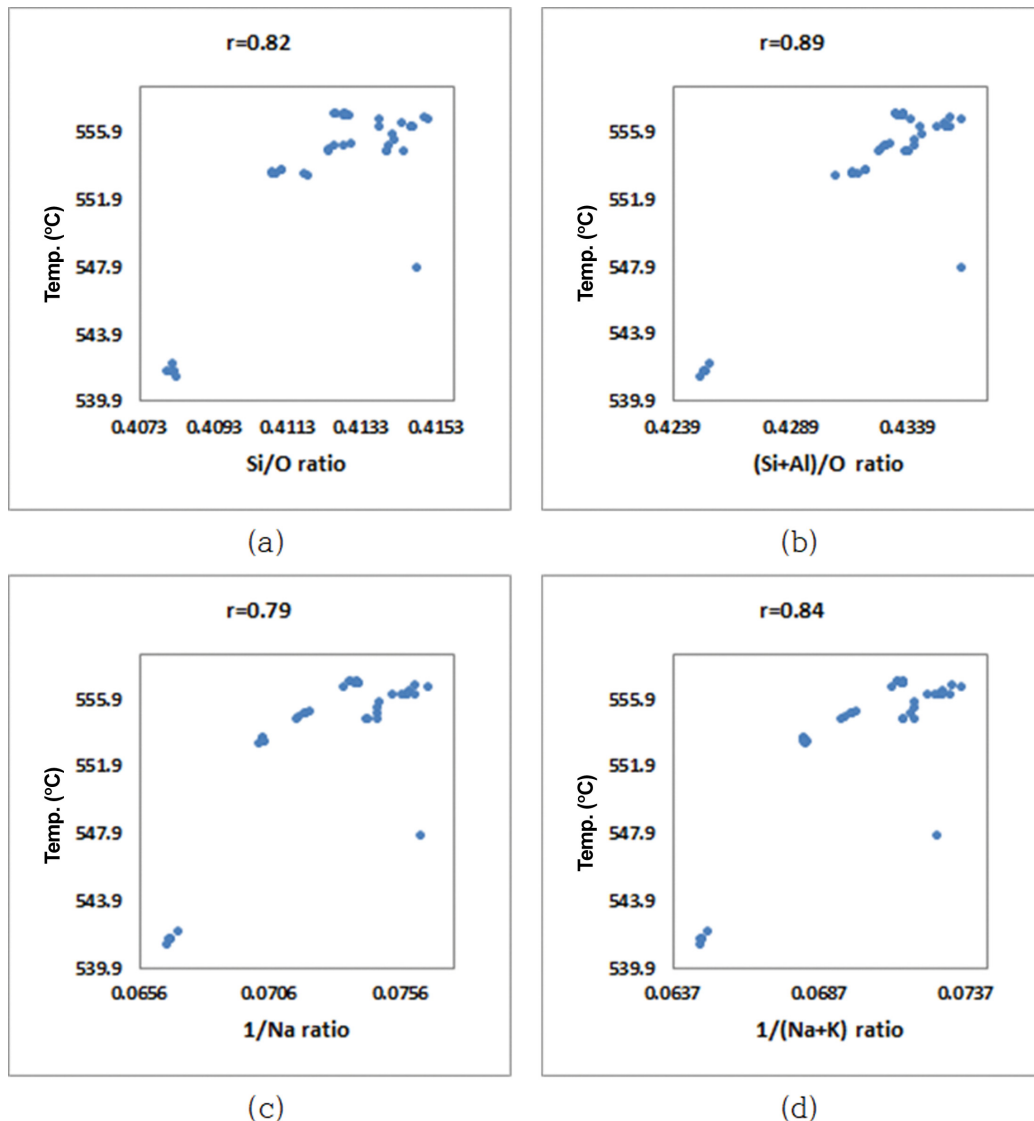


Fig. 6. Scatter plots between viscosity at $\log \eta = 12.3$ and (a) Si/O, (b) (Si + Al)/O, (c) 1/Na and (d) 1/(Na + K) ratio.

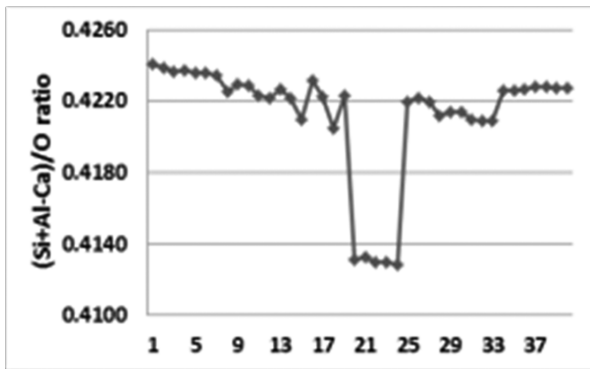


Fig. 7. Changes of (Si + Al-Ca)/O ratio.

고 판단되었다. CaO 양이 평균보다 적어짐에 따라서 가교 산소가 줄어든다고 가정하여 본 실험 결과를 바탕으로 (Si + Al-Ca)/O 관계식을 $(\Sigma Si + \Sigma Al + (3 \times \Sigma Ca/Ca \text{ 평균}) - 5)/\Sigma O$ 로 설정하였다. 이 실험식의 변화가 Fig. 7로, Fig. 1의 (c)와 (d)와 마찬가지로 No. 15 시편의 isokom 온도가 인접 시편보다 낮아졌음을 알 수 있다. Figure 7의 결과와 $\log \eta$ 가 10 Pa·s일 경우와 12.3 Pa·s인 경우의 isokom 온도와의 상관계수를 계산하니 각각 0.99와 0.97로, 고려하지 않은 경우보다 크게 향상되었다.

4년간의 조성을 분석한 결과 주성분인 SiO₂, Na₂O, CaO 중에서 CaO의 함량 편차가 가장 컸으며 평균보다 20% 적은 경우는 $\log \eta$ 가 6.6 Pa·s 이하에서는 isokom 온도가 높아지고, $\log \eta$ 가 10 Pa·s 이상에서는 isokom 온도가 낮아졌다. 다음으로 편차가 큰 것은 Na₂O로 평균보다 9% 많은 경우 isokom 온도가 10~30°C 낮아졌다. 함량의 편차가 가장 큰 성분은 MgO였으나 CaO나 Na₂O 비하여 isokom 온도 변화에 주는 영향은 제한적이었다. 이러한 분석 결과는 유리병 제조 공정에서 특정 성분이 평균보다 과다 또는 과소하게 첨가되었을 경우 isokom 온도 변화를 예측하게 하여 공정개선에 도움이 되리라 생각된다.

4. 결 론

소다석회유리병 제조 공장에서 생산한 유리병 조성을 4년간 40 차례 분석하여 Lakatos 모델로 점도를 계산하였다. 이렇게 구한 점도에서 $\log \eta$ 가 3, 6.6, 10, 12.3 Pa·s 일 경우의 isokom 온도를 구한 후, 조성 과 isokom

온도와의 상관관계를 분석하였다. 조성에서 양의 편차가 가장 큰 것은 MgO로 변동계수가 0.890이었다. SiO₂의 편차가 가장 작아 변동계수가 0.009이었다. 그러나 MgO 함량의 편차가 점도 변화에 주는 영향은 CaO나 Na₂O에 비하여 극히 제한적이었다. 반면 CaO의 변동계수는 0.047로 K₂O의 0.109와 Al₂O₃의 0.066 보다 작았으나 점도에 큰 영향을 주고 있었다. 이것은 CaO의 전장강도가 Na₂O나 K₂O에 비하여 커서 연화점 보다 낮은 온도에서는 비가교산소 양을 감소시키기 때문이라 사료되었다. 이러한 CaO 영향을 고려하여 실험 결과를 토대로 새로운 관계식을 작성함으로써 조성 과 점도와의 상관관계를 보다 정확하게 나타낼 수 있었다.

감사의 글

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

References

- [1] E.T. Kang, “Glass Science”, 1st ed. (Munundang, Seoul, 2020) p. 6.
- [2] S.M. Kang and C.S. Kim, “Analysis of the relationship between soda-lime glass composition and viscosity calculated by Lakatos model”, J. Korean Cryst. Growth Technol. Technol. 32 (2022) 1.
- [3] T. Lakatos, L.-G. Johansson and B. Simmingskold, “The effect of some glass components on the viscosity of glass”, Glass Technol. 13 (1972) 88.
- [4] K.I. Braginskii, “Calculation of the viscosity of glass as a function of temperature”, Glass Ceram. 30 (1973) 451.
- [5] A. Fluegel, “Glass viscosity calculation based on a global statistical modelling approach”, Glass Technol.:Eur. J. Glass Sci. Technol. A. 48 (2007) 13.
- [6] S.M. Kang and C.S. Kim, “The effect of SiO₂, Na₂O, and CaO on the isokom temperatures in soda-lime glass”, J. Korean Cryst. Growth Technol. 32 (2020) 12.
- [7] B. Deng, Y. Shi, Q. Zhou and M. Bauchy, “Revealing the structural role of MgO in aluminosilicate glass”, Acta Mater. 222 (2022) 117417.