

Analysis of microstructure for glass-ceramics made of silicate glasses containing EAF dust

H.S. Kim and S.G. Kang*

Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea

(Received July 6, 2006)

(Accepted July 25, 2006)

Abstract Microstructures of free surface and interior of glass-ceramics obtained by heat treating silicate glass specimen containing electric arc furnace dust (EAF dust) were observed. The crystallization temperature, T_c of glassy specimen was measured around 850°C from the result of different thermal analysis so heat treatment temperature to obtain glass-ceramic specimen was selected as 950°C for 1 hr. Glass specimens containing 50 wt% dust were amorphous, while glass specimens containing 70 wt% dust showed spinel crystal peaks in XRD results. In case of glass-ceramic specimens, spinel crystalline phase was appeared with willemite, and willemite crystal peak intensity increased with increasing dust contents. The fractured surface of glass specimens containing 50 wt% dust was smooth like mirror surface, but that containing 70 wt% dust showed spinel crystals of 10 μm size in glass matrix. In case of glass-ceramic specimens, ZnO crystal particles of 2~5 μm size were produced in free surface and glassy phase, spinel and willemite crystal phases existed in interior. There were no crystals in glasses containing 50 wt% dust, while glass containing 70 wt% dust had 14 vol% crystals. Crystallinity of glass-ceramic specimens containing 50 and 70 wt% dust were 19 and 43 %, respectively. When microstructures of glass and glass-ceramic specimens were observed through SEM after TCLP experiment, glass specimens showed flaking phenomenon while glass-ceramic specimens showed a slight corrosion evidence without any cracks.

Key words Glass, Glass-ceramics, EAF dust, Crystallization

제강분진이 첨가된 규산염계 결정화유리의 미세구조 분석

김환식, 강승구*

경기대학교 첨단산업공학부 신소재공학전공, 수원, 442-760

(2006년 7월 6일 접수)

(2006년 7월 25일 심사완료)

초 록 제강분진(EAF dust, 이하 더스트)이 첨가된 규산염계 유리 프리트를 용융하여 유리 시편을 제조하고, 이를 열처리하여 결정화 시킨 후 표면 및 내부의 미세구조를 관찰하였다. 제조된 유리의 DTA 분석결과 결정화온도(T_c)는 850°C 부근이었으며 이로부터 열처리 온도를 950°C로 정하였다. XRD 분석결과 더스트가 50 wt% 들어간 유리시편은 비정질 상태였으나 70 wt% 들어간 유리시편은 spinel 결정상이 나타났다. 결정화유리시편은 spinel 및 willemite 결정상이 함께 나타나며 더스트의 첨가량이 증가할수록 willemite 결정상이 증가하였다. 더스트의 함유량이 50 wt%인 유리시편의 경우 연마된 절단면이 거울 표면같이 매끄러운 상태였으나 70 wt% 첨가된 경우에는 유리질의 모상(glass matrix)내에 최대 10 mm 크기의 spinel 결정상이 존재하였다. 결정화유리시편의 경우에는 자유표면에 2~5 μm 크기의 ZnO 결정입자들이 생성되었고, 내부에는 유리상, spinel 그리고 willemite 결정상이 혼재하였다. 더스트가 50 wt% 첨가된 유리는 결정입자가 존재하지 않았으나 70 wt% 첨가된 유리시편에는 14 %의 결정이 존재하였다. 더스트가 50 및 70 wt% 첨가된 결정화유리시편의 결정화도는 각각 19 및 43 % 이었다. 결정화 전후 시편들을 TCLP 용액에 18시간 담근 후 SEM을 통하여 미세구조를 관찰했을 때 유리시편에는 균열이 발생하였으나, 결정화유리시편의 경우 침식흔적은 나타났으나 균열은 존재하지 않았다.

*Corresponding author

Tel: +82-31-249-9767

Fax: +82-31-244-8241

E-mail: sgkang@kyonggi.ac.kr

1. 서 론

고철을 주원료로 하여 강을 생산하는 전기로 제강법은 그 용해과정에서 고철 소비량 대비 약 1.5 wt%의 분진을 발생시키는데, 이 분진을 다른 종류의 분진과 구별해서 전기로제강분진, EAFD(Electric Arc Furnace Dust; 이하 더스트)라고 한다. 최근들어 철강제품의 종류가 다양화되고 고급화됨에 따라 발생하는 더스트의 성분도 점차 유해화 되고 있다[1].

더스트는 현재 거의 전량 매립에 의하여 폐기 처분되고 있는 실정이지만[2], Pb, Cd, Cr 등의 인체 및 환경에 유해한 중금속을 함유하고 있어 시간 경과에 따른 유해성분 용출의 우려가 있으므로 매립하기 전에 안정화 처리를 해야 한다[3].

안정화 처리방법으로는 포졸란 반응을 이용하여 중금속을 고정화 시키는 방법[4]이나 습식처리공정으로 안정화시킨 후 점토와 혼합 소결하여 전자재를 제조하는 방법[5, 6] 등이 다양하게 연구되고 있다. 한편 더스트를 유리 프리트와 혼합, 용융하여 유리화 시킨 후 열처리하여 결정화시킴으로써 고강도의 결정화유리 제품(glass-ceramic)을 제조하는 연구도 활발히 진행되고 있다. Pelino[7]는 SiO₂를 주성분으로 하는 유리에 더스트를 첨가한 후 열처리 하였을 때 spinel상이 생성됨을 확인하였고, Cheng[8]은 더스트가 포함된 유리를 결정화시키면 중금속 용출이 감소되는데 이는 불안정한 유리 망목구조에 있는 중금속 이온이 안정한 결정상으로 생성되기 때문이라고 발표하였다.

본 실험에서는 더스트를 규산염계 유리 프리트와 함께 용융하여 유리화 시킨 후 이를 다시 열처리하여 결정화시키는 과정에서 시편 내부 및 자유표면의 결정상 및 미세구조 변화를 XRD 및 SEM을 이용하여 분석하였다. 결정화시편에 대해 EDS 분석으로 모상 및 결정입자에 대한 성분 분포를 고찰하였으며, 결정화 시켰을 때의 산에 대한 화학적 내구성 증진 효과를 미세구조 관찰을 통해서 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 ZnO가 32.8 wt%, Fe₂O₃가 24.6 wt%

함유된 더스트와 SiO₂를 주성분으로 하는 규산염계 유리 프리트(이하 프리트)를 원료로 사용하였다. 더스트, 프리트 그리고 유리 시편의 조성을 Table 1에 나타내었다. 유리 프리트에 더스트를 첨가하여 3차 증류수를 사용하여 24시간 동안 습식볼밀을 통하여 혼합하였다. 혼합된 분말을 알루미늄 도가니에 넣고 전기로에서 7°C/min 속도로 승온시켜 1350°C에서 1시간 동안 용융한 후 공기중에서 스테인리스 강판에 부어 유리시편을 제조하였다. 더스트의 첨가량이 50 및 70 wt%인 유리시편에 대하여 각각 SD50G, SD70G라고 명명하였다. 프리트 및 SD70G 시편을 45 µm로 분쇄한 후 DTA/TG (Differential Thermal Analysis/Thermogravimetric Analysis; STA 409 C/CD, Netzsch Co.) 분석을 행하여 유리의 열적 거동을 고찰하였다. 결정화유리시편은 4.0 mm 크기의 유리시편들을 알루미늄 기판에 올려놓고 전기로에서 7°C/min 속도로 승온시켜 950°C에서 15시간 동안 열처리하여 제조하였다. 더스트의 첨가량이 50 및 70 wt%인 결정화 유리시편을 각각 SD50X, SD70X라고 명명하였다. 제조된 유리 및 결정화유리의 결정상 분석은 XRD(X-ray Diffractometer; D/MAX-C, Rigaku Co.)를 사용하여 5°/min 속도로 2θ = 20~70° 범위에서 측정하였다. 시편의 미세구조는 FESEM(Field Emission Scanning Electron Microscope; JSM-6500F, JEOL Co.)을 통하여 관찰하였고 결정상의 성분 분석은 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy; Oxford EDS 7557, Oxford Co.)을 사용하였다. 결정화도는 Image Analyzer를 사용하여 glass matrix 내의 결정상의 면적 분석결과로부터 계산하였다. 유리 및 결정화시편을 pH = 2.8인 TCLP 용액에 담근 후 18시간 교반한 뒤 초음파 세척기로 시편을 세척한 후에 그 미세구조를 FESEM을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. DTA 분석

유리시편의 열적거동 특성을 확인하기 위하여 프리트와 SD70G에 대하여 DTA 분석을 행하고 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 프리트의 경우 온도증가에 따른 질량변화가 거의 없으며 DTA 곡선 상에서 600°C 부근에

Table 1
Compositions of silicate glass frit and EAF dust (wt%)

	SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	ZnO	K ₂ O	MgO	BaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	PbO	SO ₃	Ig. loss
EAF dust	3.6	-	3.5	5.0	1.5	32.8	2.5	3.2	-	0.1	0.3	0.3	2.4	24.6	2.6	3.4	14.2
Glass frit	58.3	6.1	2.4	10.6	6.7	7.9	4.3	0.8	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-
SD50	31.0	3.0	3.0	7.8	4.1	20.4	3.4	2.0	1.5	0.1	0.1	0.1	1.2	12.3	1.3	1.7	7.2
SD70	20.0	1.8	3.2	6.7	3.1	25.3	3.1	2.5	0.9	0.1	0.2	0.2	1.6	17.2	1.8	2.4	10.0

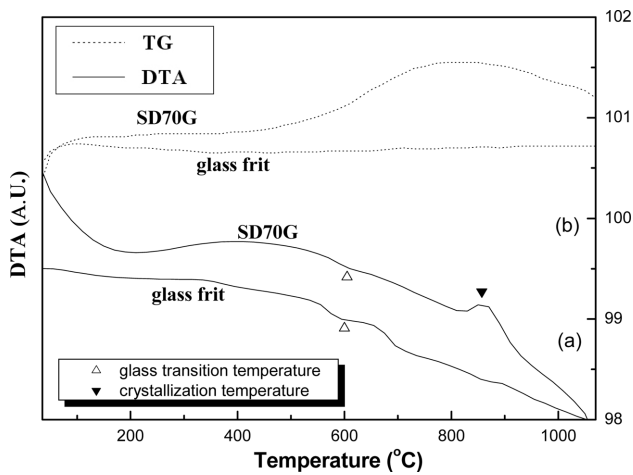


Fig. 1. DTA curve of silicate glass frit and SD70G specimen.

서 유리전이온도 T_g 를 나타내는 흡열피크(Δ)가 나타났다. 한편 SD70G의 경우 600°C 부근에서 T_g 가 나타나고, 850°C 부근에서는 무게감량과 함께 결정화온도, T_c 를 나타내는 발열피크(▼)가 나타났다[9]. 본 실험에서는 유리를 결정화시킬 때 충분한 열에너지를 공급하기 위하여 DTA 분석에서 얻어진 결정화온도 850°C 보다 100°C를 높은 950°C로 열처리 온도를 정하였다[10].

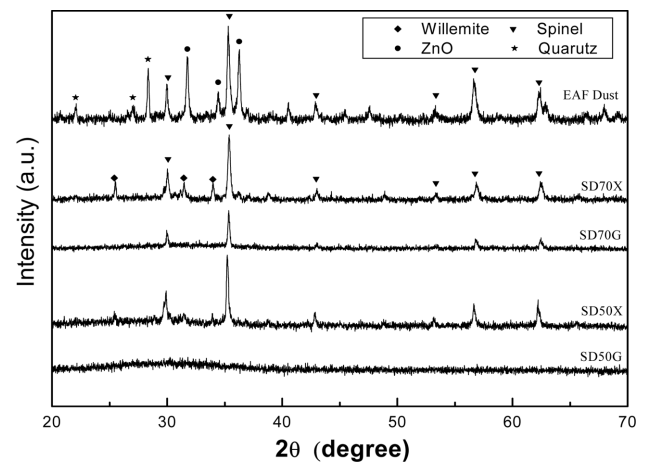


Fig. 2. XRD result of EAF dust, glass and glass-ceramic specimens.

3.2. XRD 분석

규산염계 유리 프리트에 더스트를 첨가한 후 용융하여 제조된 유리시편과, 이를 열처리하여 결정화시킨 결정화 유리 시편에 대하여 XRD 분석을 행하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

더스트가 50 wt% 첨가된 유리시편, SD50G의 경우

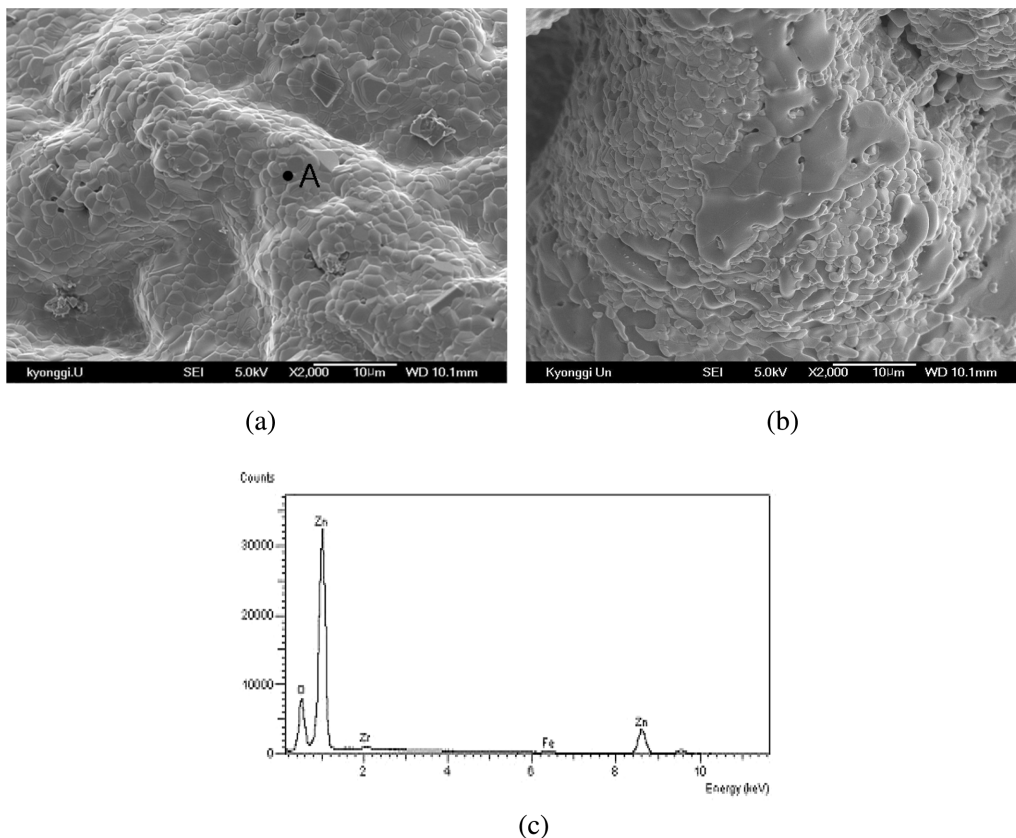


Fig. 3. SEM image of free surface for (a) SD50X and (b) SD70X. Also EDS result of point A is shown in (c).

전형적인 비정질의 회절패턴을 보였고, 이를 결정화시킨 SD50X는 spinel과 함께 약간의 willemite(Zn_2SiO_4) 피크를 나타내었다. 더스트가 70 wt% 첨가된 유리 시편, SD70G에서는 spinel 결정상이 나타났으며, 이를 950°C에서 15시간 동안 열처리를 하여 제조된 결정화 유리 시편, SD70X에는 spinel 결정상 뿐만 아니라 willemite 결정상도 함께 나타났다. 더스트의 첨가량이 증가함에 따라서 결정화 시편의 willemite 피크가 증가함을 알 수 있다. SD70G 시편은 유리제조 후 열처리를 하지 않은 것인데도 결정상이 존재한다 (c). 이는 첨가된 더스트에 포함되어 있는 다량의 Zn와 Fe 성분 때문으로 사료된다. 즉 용융체에 대한 용해도 한계 이상이 첨가되어 녹지 못한 일부 Zn와 Fe 성분이 결정상으로 석출된 것으로 보인다.

3.3. 미세구조 관찰

제조된 유리 표면은 전자현미경으로 5000배 확대하여 관찰하여도 결정상이 없는 거울표면과 같이 매끄러운 상태였다. 유리시편을 열처리하여 제조된 결정화 유리의 자유표면에 대한 미세구조 관찰결과를 Fig. 3에 나타내었다. 더스트 함량이 50 wt%인 결정화 시편, SD50X의

경우 표면전체에 평균 2~3 μm 크기의 입자들이 존재한다(a).

표면 입자의 성분을 확인하기 위하여 A 부분에 대한 EDS 분석을 한 결과, 주성분이 Zn임을 확인할 수 있었다(c). 더스트 함량이 70 wt%인 결정화 시편, SD70X의 경우 ZnO 입자 중 일부는 5~7 μm 로 크게 성장한 것이 관찰된다(b).

표면과 내부층이 함께 나타난 결정화유리시편의 파단면 관찰사진을 Fig. 4(a)에 나타내었다. 시편 표면은 ZnO 결정입자로 덮여져있고, 표면 부위 아래 시편 내부는 모상내에 결정입자들이 분포되어 있다. 시편 내부 부분만을 확대한 Fig. 4(b)를 관찰하면 모상내에 분포된 결정입자들의 형상을 뚜렷이 볼 수 있다. 모상내의 M 부분에 대하여 EDS로 분석한 결과인 Fig. 4(c)를 보면, 주성분은 Si 이고 Zn, Na, Ca, Fe 등이 함유되어 있는 것으로 보아 단일결정상이 아닌 유리상임을 알 수 있다. 모상내에 존재하는 결정입자들은 Fig. 2의 XRD 결과로부터 spinel 또는 willemite 상일 것으로 판단된다(결정화유리시편의 EDS 결과는 Fig. 6에 나타내었다).

Fig. 3 및 4에서 관찰한 바와 같이 결정화유리시편에서 ZnO 결정상이 표면에만 존재하는 것은, 더스트가 함유된 유리시편을 950°C/15 h로 열처리하게 되면, 더스트

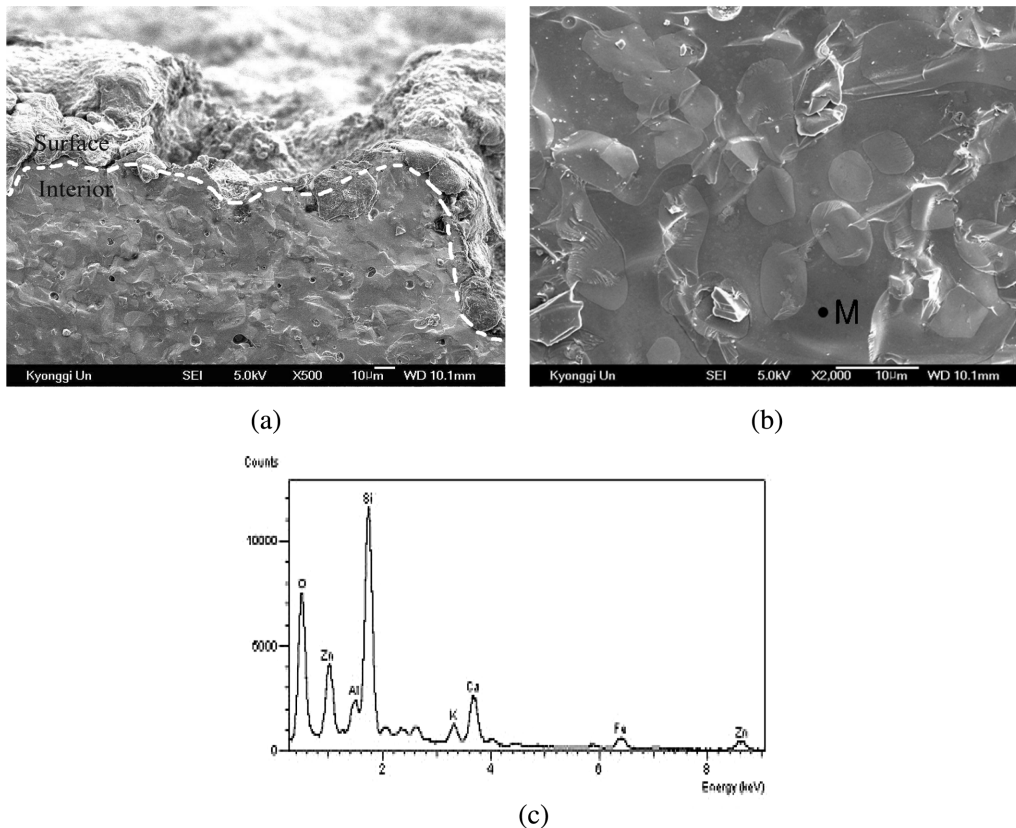


Fig. 4. (a) Fractured surface of SD70X showing free surface at the upper and interior at the bottom part of the picture. (b) Magnified picture of interior part of SD70X. (c) EDS result of point M.

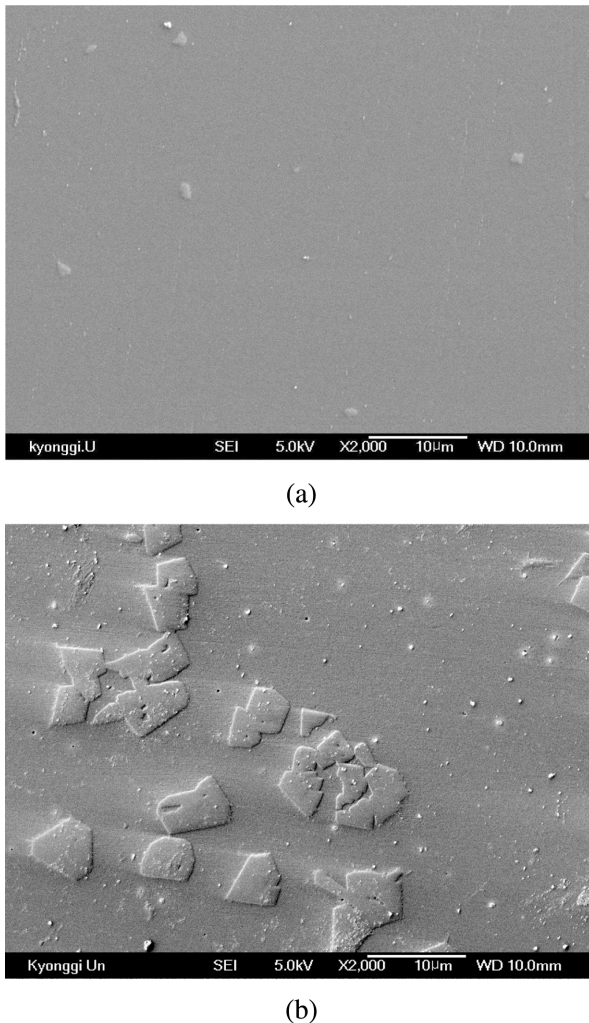


Fig. 5. Polished surface of glass specimens of (a) SD50G and (b) SD70G.

에 포함되어 있던 중금속들 중 가장 휘발성이 강한 Zn 성분이 시편 밖으로 빠져나오면서 일부가 표면에 증착되기 때문에 사료된다. 이와같이 더스트가 함유된 유리를 결정화시킬 경우, 시편 표면에 ZnO 층이 형성되기 때문에, 시편의 중금속 용출량을 측정하는 TCLP 실험에 있어서 표면효과를 고려하여 분석할 필요가 있다[11].

더스트가 포함된 유리 시편의 절단면을 연마하여 미세구조를 관찰하고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 더스트가 50 wt% 첨가된 유리시편, SD50G에서는 마이크론 크기의 결정입자는 관찰할 수 없고 단지 마이크론 크기 이하의 결정입자가 드물게 보인다. 이 관찰 결과는 XRD 분석에서 비정질 회절 패턴만 나타났던 결과[Fig. 2(a)]와 일치한다. 더스트가 70 wt% 첨가된 유리시편, SD70G는 열처리를 행하지 않은 것이지만 모상내에 결정상이 존재함을 확인할 수 있으며, 그 결정상은 Fig. 2의 XRD 결과로부터 spinel 상임을 알 수 있다. 유리시편을 열처리하지 않아도 결정상이 존재하는 것은 유리제

조시 용융공정에서 더스트가 과량 첨가되면 더스트에 함유되어있는 스피넬상이 용융체에 대한 용해도 한계를 초과함으로써 일부 그대로 냉각되어 잔존하기 때문으로 생각된다.

더스트가 50 wt% 첨가된 결정화 유리시편, SD50X의 미세구조 각 부분에 대한 EDS 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 사진 (a)의 M 부분을 EDS로 분석한 결과 (b) 주성분은 Si 이면서 다양한 금속이 검출되는 것으로 보아 유리상으로 판단된다. S로 표시된 결정입자는 주성분이 Zn과 Fe 이므로(c), 결정상은 ZnFe_2O_4 조성의 spinel로 추정된다. 또한 W로 표시된 결정입자의 주성분은 Zn과 Si로 나타났고(d), 이로부터 해당 결정상은 willemite (Zn_2SiO_4)로 판단된다. 결정화된 시편에 존재하는 입자들이 spinel과 willemite 상인 것은 [Fig. 2(c) 및 (d)]의 XRD 분석결과와도 일치한다.

Fig. 6의 SEM 사진에서 spinel 상과 willemite 상은 육안으로 쉽게 구별될 수 있다. 일반적으로 다결정체 시편을 연마하게 되면 경도가 낮은 결정입자는 주변 입자에 비해 더 많이 연마되거나 혹은 패인 흔적이 남게된다. Spinel의 모스경도는 6.5로서 willemite의 5.5 보다 경도가 높으며[12], 따라서 연마흔적이 남아있는 입자는 willemite 상으로, 연마흔적이 없이 깨끗한 입자는 spinel 상으로 판단할 수 있다.

더스트가 70 wt% 첨가된 유리의 결정화 시편, SD70X에 대한 SEM 및 EDS 분석을 행한 결과, SD50X 시편과 비교할 때 모상에 대한 결정입자의 점유율이 높아졌을 뿐, 생성 상의 형상이나 종류는 유사하였다.

결정화유리시편의 연마면에 대한 SEM image 및 EDS를 이용한 원소 분포분석(mapping) 결과를 Fig. 7 및 8에 나타냈다. 더스트가 50 wt% 첨가된 유리시편, SD50G에서는 Si 성분(b)이 모상에 주로 분포하며 또한 Zn이 주성분인 입자 (d)에도 일부 존재함을 알 수 있다. 따라서 결정화유리의 미세구조는 유리질 모상내에 Fe가 주성분인 spinel 결정상(c)과 Zn 성분 및 Si 성분으로 이루어진 willemite 결정상(b, d)으로 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7의 EDS 결과로부터 spinel 입자는 Fe_3O_4 로 추정되지만, spinel 결정상은 Fe_3O_4 와 ZnFe_2O_4 가 있으며, 두상은 XRD 분석으로는 피크위치가 매우 유사하여 구별하기 어렵다. 실제, 결정화유리시편의 미세구조 [Fig. 6(c)]에서 spinel 입자는 ZnFe_2O_4 로 되어 있음을 확인한 바 있다. SD70X 시편에서는 SD50X보다 더 많은 결정입자가 생성되었으나[Fig. 8(a)] 결정상 종류는 유사하였다. 특히 willemite 결정상(b, d)은 더스트의 첨가량과 함께 증가하였으며, 이는 Fig. 2의 XRD 결과에서도 확인할 수 있다.

유리 및 결정화된 시편들에 대한 결정화도를 측정하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. SD50G의 경우에는 결

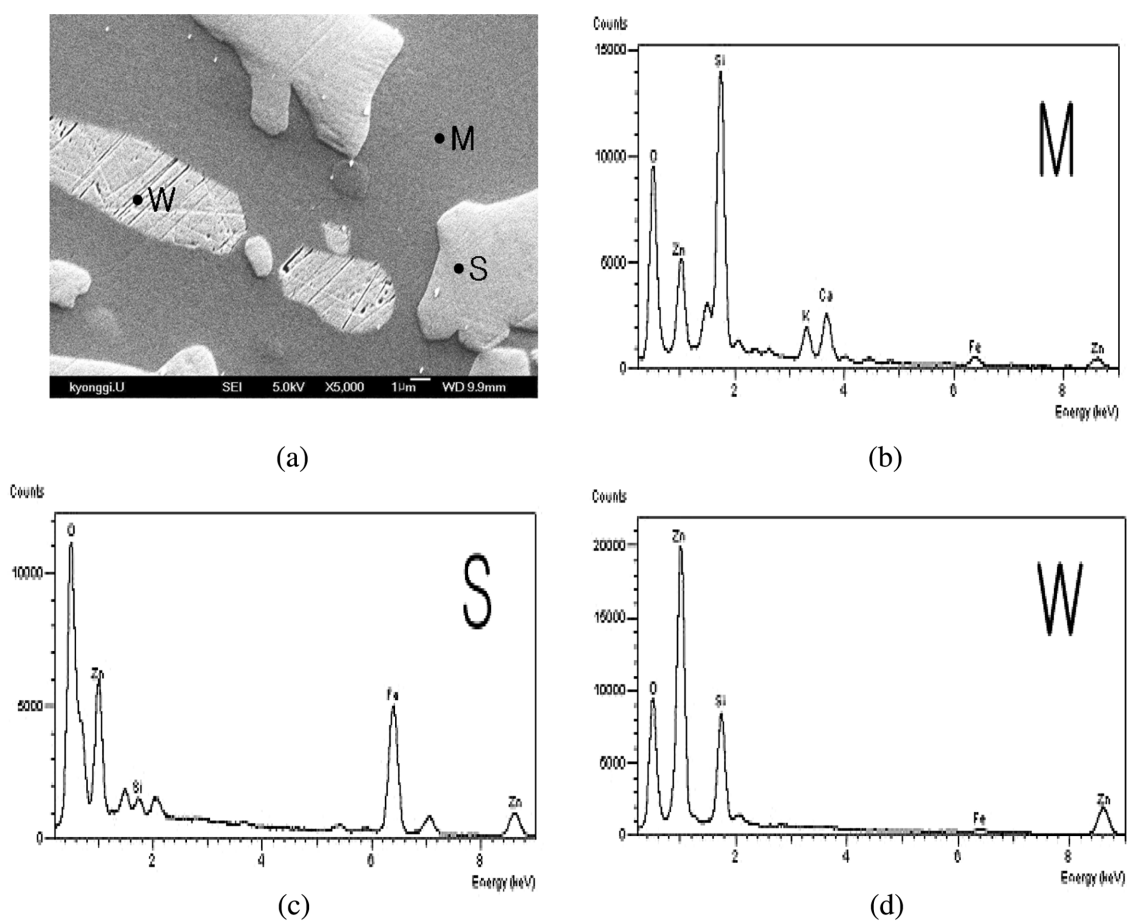


Fig. 6. SEM micrograph of SD50X is shown in (a), and EDS results of point M, S and W are indicated in (b), (c) and (d) respectively.

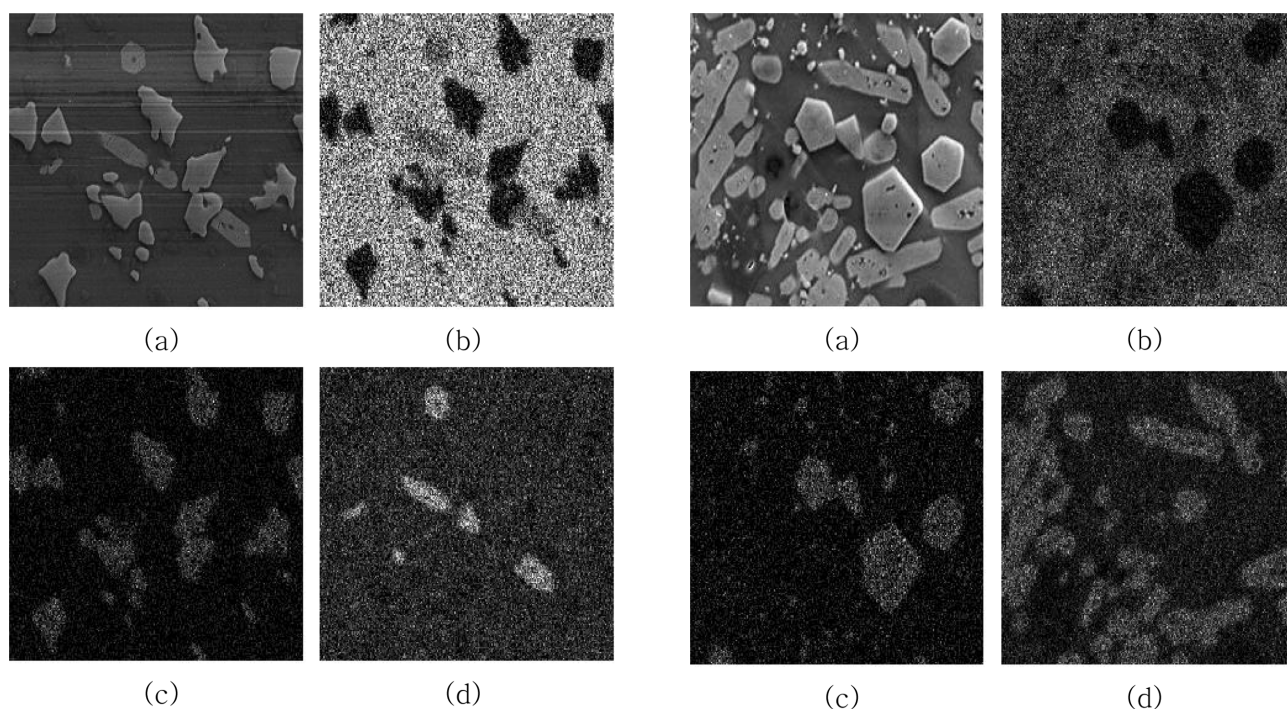


Fig. 7. EDS mapping data of SD50X; (a) SEM image, (b) Si, (c) Fe, and (d) Zn.

Fig. 8. EDS mapping data of SD70X; (a) SEM image, (b) Si, (c) Fe, and (d) Zn.

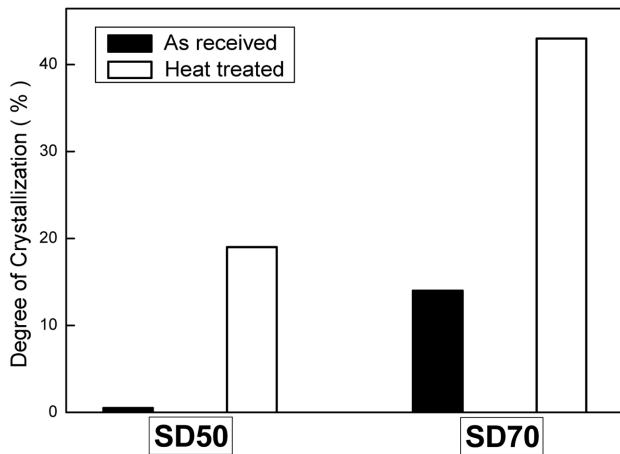


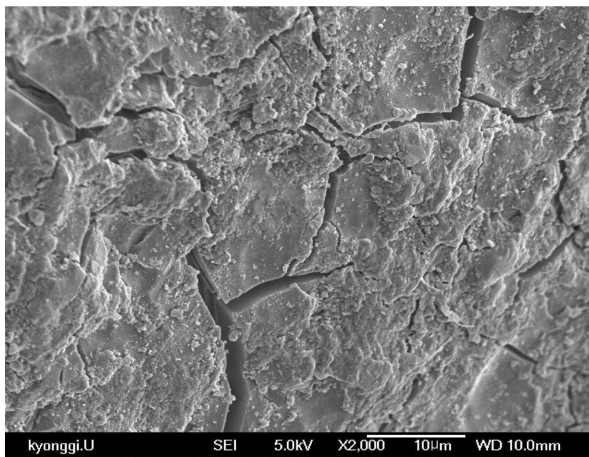
Fig. 9. Percent degree of crystallization per cut section area of sample.

정화도가 0 %에 가까웠지만, SD50X 시편의 경우에는 spinel 및 willemite 결정상을 합친 결정화도가 19 %로

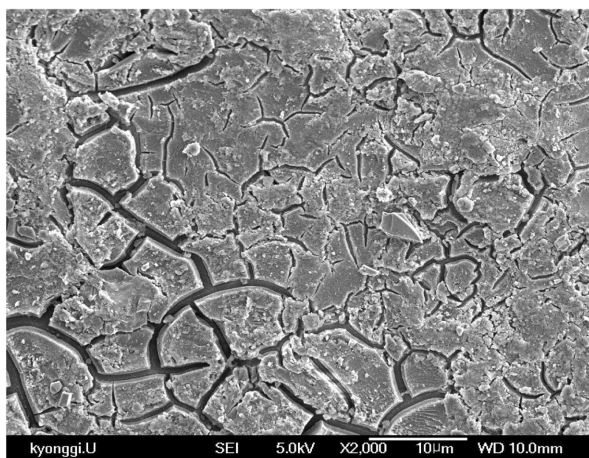
나타났다. SD70G의 경우 결정화도가 14 %로 나타났고, SD70X의 경우에는 결정화도가 43 %로 3배 이상 증가하였다.

유리 및 결정화시편들의 산 용액에 대한 용출특성을 미세구조 관점에서 분석하기 위하여 각 시편에 대한 TCLP 실험을 행한 뒤 표면현상을 관찰하였다. SD50G와 SD70G 시편에 대하여 TCLP 용액에서 18시간 담근 후, 그 표면상태 관찰결과를 Fig. 10에 나타내었다.

TCLP 실험을 거친 SD50G와 SD70G 시편 모두 표면에 균열이 심하게 발생한 것을 알 수 있다. Kim[11] 등은 두 시편에 대한 TCLP 용출시험결과 상당량의 중금속 성분이 용출된다고 발표하였다. 규산염계 유리 시편은 일반적으로 산 용액에 대한 화학적 내구성이 우수한 것으로 알려져 있으나, 더스트를 첨가하면 더스트에 포함되어 있는 Na, Ca, Mg, Fe, Zn 등의 성분들이 용융 과정에서 유리망목구조를 깨뜨리는 수식제(modifier) 역할을 하게 되어 유리의 화학적 내구성을 약화시키게 되

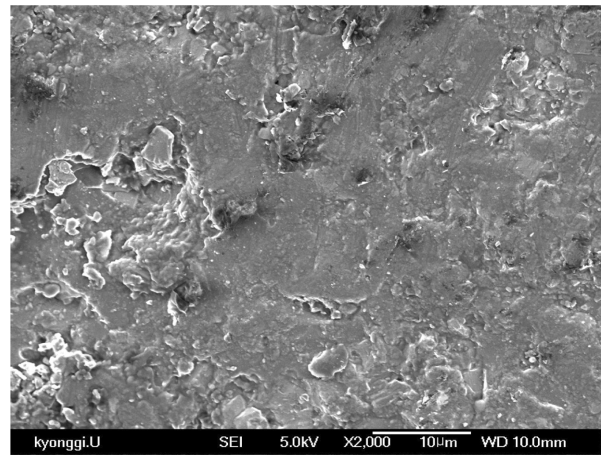


(a)

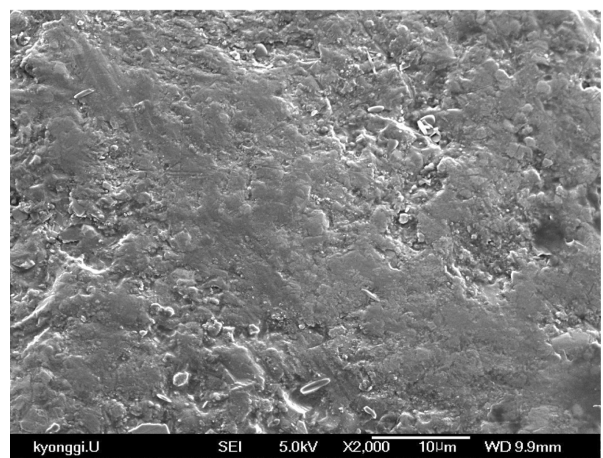


(b)

Fig. 10. Surface morphology of glass specimens for (a) SD50G and (b) SD70G after TCLP test for 18 h.



(a)



(b)

Fig. 11. Surface morphology of glass-ceramic specimens for (a) SD50X and (b) SD70X after TCLP test for 18 h.

므로 시편 표면에 상당한 균열이 생성되는 것으로 판단된다.

유리시편을 결정화 시킨 시편, 즉 SD50X 및 SD70X에 대하여 TCLP 실험을 18 h 동안 행한 뒤 시편의 표면상태를 관찰하여 Fig. 11에 나타내었다. 두 시편 모두 표면이 구성 성분의 용출로 인하여 거칠어지긴 하였으나 유리시편과 비교할 때 균열이 전혀 발생하지 않았다. 유리시편을 결정화시킨 결정화 유리(glass-ceramics) 제품은 유리에 비해 화학적 내구성이 크게 향상된다. 그 이유는 같은 조성의 유리구조에 비하여 결정구조가 열역학적으로 더 안정하기 때문이며 또한 유리 질 모상에 결정상이 형성되면 압축응력이 발생하여 중금속 용출을 억제하기 때문으로 사료된다. 유리질을 결정화시켜 화학적 내구성을 향상시킬 때 고려해야 할 또 다른 인자는 상의 종류이다. 본 실험에서 생성되는 spinel과 willemite 상의 경우 spinel의 화학적 내구성이 더 우수하다[12]. 따라서 willemite 보다는 spinel 상 생성을 더 많이 유도하면 화학적 내구성이 우수한 결정화유리를 제조할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

구산염계 유리 프리트에 Zn와 Fe를 주성분으로 하는 전기로 제강분진을 50 및 70 wt% 첨가한 후 용융하여 유리시편을 제조하고, 이를 950°C/15 h으로 열처리하여 결정화유리시편을 얻은 후 각 시편들의 결정상의 변화 및 화학적 내구성을 및 미세구조 관찰을 통하여 고찰하였다. 유리시편에는 더스트가 50 wt% 첨가되었을 때는 비정질이였지만 70 wt% 첨가되었을 때는 spinel 결정이 발생하였다. 결정화유리시편의 미세구조는 더스트 첨가량에 관계없이 유리질 모상, spinel 그리고 willemite 상으로 구성되어 있으며, 더스트 첨가량의 증가와 함께 willemite 결정상이 증가하였다. 유리시편은 표면에 결정입자 없이 매끄러운 형상을 나타냈지만 결정화유리시편의 경우 표면이 ZnO로 덮여져 있어 열처리 공정 동안 Zn 성분이 휘발되어 표면에 증착된 것으로 판단된다. TCLP 실험을 행한 유리시편의 미세구조 관찰결과 균열이 심하게 발생하였으나 결정화유리시편에는 균열이 존

재하지 않았으므로, 결정화 공정을 통하여 화학적 내구성이 향상됨을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2005학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] T.C. Son, "Recycling and soluble problem of EAF dust", Environment VIP Report 33 (1998) 1.
- [2] Toshio Matsuoka, "New technology for treating electric arc furnace dust", Iron and Steel Engineer (1991) 37.
- [3] Y.J. Kwon, Y.T. Kim, K.G. Lee, Y.J. Kim, S.G. Kang and J.H. Kim, "Stabilization behavior of heavy metals in the EAF dust-clay body mixtures at various sintering conditions", J. Kor. Ceram. Soc. 39[8] (2002) 728.
- [4] Massazza, F., "Chemistry of pozzolanic additives and mixed cement", Cemnto (1976) 3.
- [5] Y.J. Kwon, Y.T. Kim, K.G. Lee, Y.J. Kim, S.G. Kang, J.H. Kim and M.S. Park, "Lightweight aggregate bloating mechanism of clay/incinerated ash/additive system", J. Kor. Ceram. Soc. 38[9] (2001) 811.
- [6] T.H. Um, Y.T. Kim, K.G. Lee, Y.J. Kim, S.G. Kang and J.H. Kim, "Properties of heavy metal adsorption of clay minerals", J. Kor. Cer. Soc. 39[7] (2002) 663.
- [7] M. Pelino, A. Karamanov, P. Piscicella, S. Crisucci and D. Zonetti, "Vitrification of electric arc furnace dusts", Waste Management 22 (2002) 945.
- [8] T.W. Cheng, "Effect of additional materials on the properties of glass-ceramic produced from incinerator fly ashes", Chemosphere 56 (2004) 127.
- [9] Y. Masauki, "Glasses", Translated to Korean by W.H. Kang, *et al.*, Chungmoongak, Korea (2002) p.34.
- [10] T.W. Cheng and Y.S. Chen, "On formation of CaO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics by vitrification of incinerator fly ash", Chemosphere 51 (2003) 817.
- [11] H.S. Kim, S.G. Kang, Y.T. Kim, G.G. Lee and J.H. Kim, "Heavy metal leaching characteristics of silicate glass containing EAF dust", J. Kor. Ceram. Soc. 43[2] (2006) 136.
- [12] E. Bright Wilson, Jr. Handbook of chemistry and physics 74th Edition, CRC Press, USA (1993) p.4-112, 113, 137, 140.