

폐형광등 유리를 활용한 고굴절 글래스비드의 제조 연구

이기현* · §이동훈* · §§송영준** · 김창권***

*서울시립대학교, **강원대학교, ***한국조명재활용공사

A Basic Study for Manufacturing High Refractive Beads from the Waste Fluorescent Glass

Gee Hun Lee*, §Dong Hoon Lee*, §§Young Jun Song** and Chang Kwon Kim***

**University of Seoul*

***Kangwon National University*

****Korea Lighting Recycling Corporation*

요 약

본 연구는 폐형광등을 사용하여 고굴절 유리비드를 제조하기 위한 최적 조건 도출을 위해 진행되었다. 제작된 유리비드는 XRD 분석과 더불어 물리·화학적 분석을 통해 유리비드의 굴절률 및 공기혼합비율, 방출속도에 따른 영향을 조사하였다. 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같다. 형광등 재활용유리로 제작된 글라스 비드와 일반 재활용 유리로 제작된 글라스비드 시료를 XRF 분석결과 일반 재활용 유리로 제작된 글라스비드에 CaO가 11.7 wt% 함유되어 있는 반면 형광등 재활용 유리로 제작된 글라스비드에는 CaO 7.8 wt% 함량 비중과 비교해 3.9 wt% 함량 비중이 더 높은 것으로 분석되었다. 또한 형광등 재활용 유리로 제작된 글라스비드에는 일반 재활용 유리로 제작된 글라스비드에 함유되지 않은 ReO₂ 0.0108 wt%, BaO 0.071 wt%, NiO 0.0039 wt%가 함유되어 있는 것을 알 수 있었다. 일반 재활용 유리로 제작된 글라스 비드와 폐형광등을 재활용하여 유리로 제작된 글라스비드의 Refractive Index 비교 시 폐형광등으로 제작된 유리비드가 일반 재활용 유리로 제작된 글라스비드보다 더 작은 입자 크기분포와 높은 굴절률을 갖는 것을 알 수 있었다. 결론적으로 폐형광등 재활용 유리를 구상 형태의 글라스비드로 제작하기 위하여 Kiln 방식의 공정에서는 공기 혼합비율 1.7, 화염온도조건 940°C 20 m/sec 조건에서 가장 높은 생성율을 확인할 수 있었다.

주제어 : 공기혼합비율, 굴절률, 배출률, 유리비드, 폐형광등

Abstract

This study was carried out to get the optimum conditions for manufacturing high refractive glass beads from waste fluorescent lamp glass. Chemical composition, X-ray diffraction pattern, particle size distribution, refractive index of glass beads, and the effect of air mixing ratio and ejection rate were investigated. The obtained results are as follows. The X-ray diffraction pattern and chemical composition of glass beads made of waste fluorescent glass are similar to common glass except ReO₂ 0.0108 wt%, BaO 0.071 wt%, NiO 0.0039 wt% and CaO 7.8 wt% but 11.7 wt% of common glass. The glass beads made

· Received : May 21, 2020 · 1st Revised : May 28, 2020 · 2nd Revised : June 1, 2020 · Accepted : June 9, 2020

§ Corresponding Author : Dong Hoon Lee (E-mail : dhlee@uos.ac.kr)

School of Environmental Engineering, University of Seoul, 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

§§ Co-corresponding Author : Young Jun Song (E-mail : yjsong64@kangwon.ac.kr)

Advanced Materials Engineering, Kangwon National University, KNU Samcheok Campus, 346 Jungang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do 25913, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

of waste fluorescent lamp glass have the narrower particle size distribution of and the higher refractive index than the glass beads made of common glass. The optimal conditions of kiln operation for manufacturing glass beads from waste fluorescent lamp glass are 20 m/sec of ejection rate, 1.7 of air mixing ratio, and 940°C of temperature.

Key words : Air Mixing Ratio, Ejection Rate, Glass Beads, High Refractive, Waste Fluorescent Lamp

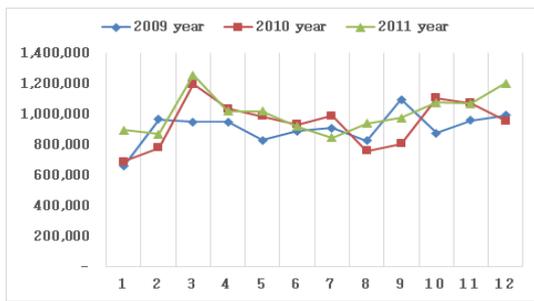
1. 서 론

폐형광등은 자원순환정책에 따른 자원회수 품목임에도 국내에서 적정처리 되는 양은 35.7백만개 정도에 불과하며 연간 1억 개 이상의 폐형광등이 무단으로 폐기되고 있다¹⁾.

서울시의 경우 주거지역 증가로 Fig. 1에서 보듯 폐형광등의 폐기량은 매년 지속해서 증가되고 있다. 그러나 2012년도 이후 부터는 정부와 조명업계·협회·재활용 업체간에 처리비에 따른 갈등이 발생하면서 전국적인 발생량은 2013년 60.4톤/일, 2014년 148톤/일, 2015년 48톤/일, 2016년 177.5톤/일, 2017년 147.2톤/일, 2018년 89.9톤/일 인데 비하여 폐형광등 재활용 업체의 처리실적은 2013년~2017년까지는 정확한 수량이나 물량이 확인되지 않으며 2018년 처리실적으로 148톤/년 정도만 확인되고 있다²⁾. 서울시를 대상으로 면적별·건물수 고려하여 국가 건물관리 규정에 정해진 건물면적별 조명설치 기준에 따라 조명설치 물량을 산출할 경우 Fig. 2에서와 같이 약 8,178만개로 산출된다³⁾.

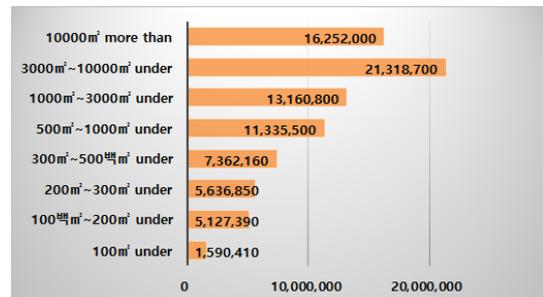
폐형광등은 유리, 알루미늄, 구리, 세라믹, 주석, 플라스틱과 납, 수은 및 희토류로 구성된 형광체 파우더로 구성되어 있고 처리 및 재활용을 위해서는 유해물질을 제거하지 않으면 환경오염원이 된다⁴⁾. 폐형광등은 전체 조성

물의 85% 이상이 유리 성분으로 구성되어 있다. 국내에서 사용하고 있는 폐형광등유리의 화학적 조성은 SiO₂ 70.2%, NaO 15.9%, CaO 5.68%, MgO 3.12%, K₂O 1.12%로 나타났으며, Al₂O₃ 2.21% 및 기타 성분들로 구성되어 있다⁵⁾. 높은 에너지비용을 들여서 재활용공정으로 정제된 유리는 현재 일반적 추세로 일반포장용, 콘크리트용, 아스팔트용, 보도블럭용등 대부분 저가의 골재대용으로 사용되고 있다⁶⁾. 폐형광등은 독일의 Herborn GmbH 기술도입을 통해 구축된 수도권, 영남권, 호남권의 폐형광등 재활용처리 시설에서 유리알루미늄을 회수하고 있다⁷⁾. 특히 유리는 Fig. 3과 같이 재활용공정을 거



*source: Korea Lighting Recycling Association (unit: EA)

Fig. 1. Monthly collection ratio of waste fluorescent lamps in Seoul.



*source: Lee Gee Hun 2013, Metropolitan Landfill Report (unit:EA)

Fig. 2. Estimated amount of waste fluorescent lamps in Seoul.



Fig. 3. Fluorescent lamp recycling facility (company of C).

Table 1. Annual lane repainting market size by OECD countries (estimated)

Country	Repainting extension (km/yr, 50% presume)				1 year repainting cost (KRW 100 million)				
	Express way	National road	Provincial road	Other	Express way	National road	Provincial road	Other	Total
Japan	2056	27716	64688	511981	93	1003	2341	18525	21962
USA	36683	12149	935839	2290778	1665	440	33861	82887	118853
England	1878	24519	-	-	85	887	0	0	972
France	5825	4449	188983	333175	264	161	6838	12055	19319
Germany	6459	19695	89036	206500	293	713	3222	7472	11699
Italy	3350	10750	73700	156050	152	389	2667	5646	8854
Spain	1513	11767	69401	250527	69	426	2511	9065	12070
Netherlands	1329	1231	3901	63187	60	45	141	2286	2532
Norway	-	5223	22167	19518	0	189	802	706	1697
Sweden	1029	6806	41453	244139	47	246	1500	8834	10627
Swiss	906	8955	25904	-	41	324	937	0	1302
Denmark	604	1315	-	35285	27	48	0	1277	1352
Greece	599	4650	15433	37800	27	168	558	1368	2122
New Zealand	-	5438	41811	-	0	197	1513	0	1710
Luxembourg	74	419	946	1175	3	15	34	43	95
Mexico	4587	20406	42538	121931	208	738	1539	4412	6898
Belgium	882	6450	675	69000	40	233	24	2497	2794
Slovakia	210	1769	1809	23616	10	64	65	854	993
Iceland	21	2193	1503	2757	1	79	54	100	234
Ireland	449	2204	5816	39479	20	80	210	1428	1739
Australia	25709	90648	-	320068	1167	3280	0	11581	16028
Austria	860	5240	11820	44377	39	190	428	1606	2262
Czech Republic	388	3125	24368	37460	18	113	882	1355	2368
Canada	8500	43000	57500	595500	386	1556	2081	21547	25569
Turkey	1064	15671	16078	161522	48	567	582	5844	7041
Portugal	1369	3127	2210	4375	62	113	80	158	414
Poland	741	8907	76877	121042	34	322	2782	4380	7517
Finland	405	6666	6783	25607	18	241	245	927	1432
Hungary	781	3515	11585	85775	35	127	419	3104	3685
Chile	-	-	-	-	0	0	0	0	0
Slovenian	385	410	2568	16074	17	15	93	582	707
Israel	233	3071	-	6109	11	111	0	221	343
Estonia	-	2007	6239	21149	0	73	226	765	1064
Total	108884	363485	1841622	5845949	4942	13152	66635	211524	296254

*source: Korea Construction Life Environment Testing Institute (2018)

치면서 수은등을 포함한 유해물질을 제거 후 Glass Cullet 상태로 분쇄되어 저가의 유리 원료로 판매된다. 특히 차

선도색 재료로의 활용은 매우 유용한 재활용방안으로 전 세계 도로 차선재료 및 도색 시장 규모는 Table 1에서 보

는 바와 같이 연간 29조 원 정도이다. 개발도상국가를 포함 전 세계적인 대 도시화 추세로 도로의 길이는 계속 증가하고 있다. 그러나 도로차선에 혼합재인 글라스비드는 유럽, 중국, 미국등 일부 국가에서만 생산되고 있어 재활용유리를 활용하여 글라스비드를 개발시 폭넓은 시장을 바라볼 수 있다.

도로차선은 운전자에게 자연광 혹은 조명에 의해 발현되는 색으로 시각 정보를 제공하기 위해 흰색, 황색 및 청색 등 안료(pigment)를 도로노면에 접착 및 도장하여 시공된다⁸⁾. 도로차선의 시인성은 빛을 입사된 방향으로 재반사시키는 ‘재귀반사성(retro-reflectivity)’에 의해 좌우되며 도로표시나 차선의 재귀반사성은 그 안에 도포되어 있는 글라스비드(glass beads)의 특성에 좌우된다⁹⁾. 최근 들어 국내에서는 도로 차선에 시공되는 도로의 반사도를 높이기 위하여 고품질 글라스비드를 혼합하여 시공하고 있는 추세이다¹⁰⁾. 조명용으로 사용하는 형광등은 제품 특성상 굴절능력이 우수한 유리 소재로 제작된다. 따라서 폐형광등 유리를 도로용 글라스비드로 재활용에 관한 연구는 의미 있는 일이라 생각된다.

2. 연구 재료 및 방법

유리를 구상 형태의 글라스비드로 제작하기 위해서는 1300°C 이상 고온으로 가열하여 비정질 상태에서 용융 표면장력에 따라 구형화 하는 직접 제조법과 간접법으로는 전처리 공정에서 분쇄된 유리입자를 특정입도로 선별하고 입자들을 고온의 연소 가스 기류 중 부유시켜 가열 부분에서 재 용융하고 표면장력에 따라 구상화되어 냉각

부분에서 연화점 이하로 냉각시킨 후 분급기를 통해 구상 형태의 유리를 포집하는 Kiln 제조법이 있다¹¹⁾.

본 연구에서는 Table 2에 나타난 바와 같이 폐형광등을 1차 파쇄 후 제거하여 알루미늄과 플라스틱 그리고 미분을 제거한 후 켈릿을 가열하여 수은을 제거하고 Fig. 4의 장치를 이용하여 2차파쇄-분급공정을 거쳐 입도를 106µm~850µm로 만든 다음 용융공정을 거쳐 글라스비드를 제작하였다.

Fig. 4의 2차 파쇄장치(왼쪽)의 분쇄유리를 Shaft Kiln Glass Melting Equipment 주입구(E)를 통하여 Kiln내부 용해로(D)로 유입되도록 하였다. 용해로 내부는 유리입자와 Kiln내벽 사이의 용착을 방지하기 위하여 카본블랙, 질화 붕소 등으로 코팅 처리하였다. 공기 중에 부유하며 용융과 재용융 과정을 거친 입자들은 용융상태에서 회전하며 구상형태로 변화하며 Cyclone을 거쳐 글라스비드 상태로 출구(S)로 배출하게 된다. 구상화 공정을 거쳐 생산된 글라스비드는 시료측정규격을 KS L 2521을 기준에 따른 시험공정을 적용하였다. 도로안전표시를 위한 재귀 반사도가 높은 글라스비드를 제조하기 위해서는 글라스비드의 굴절률을 높이는 것이 중요하다. 그 이유는 차선 재료의 시인성은 광학적 거동과 직결되기 때문이다. 매질에 따른 빛의 굴절률과 속도에 대해 나타난 Snell의 법칙은 ‘두 점을 지나는 빛의 경로는 진행시간이 최소가 되는 경로이다’라는 페르마의 원리로 유도되었다. 굴절률 n_2 가 n_1 보다 클 때, n_1 의 매질을 지나는 빛이 n_2 의 매질로 진행할 경우, 빛의 속도가 v_1 에서 v_2 로 감소하면서 최단 경로로 굴절이 일어난다.

Table 2. Experiment contents

Fluorescent lamp	
1 Step Crushing	Glass (Cullet)
Screen (Glass) →	↕ ← Screen (Al, Plastic, Powder)
Heating	Mercury removal
2 Step Crushing	Crushed glass (Particle)
Cyclone Heating (Particle surface heating)	Crushed glass (Particle→Bead)
Cooling	Glass Bead
Analysis	XRF, SEM, ICP

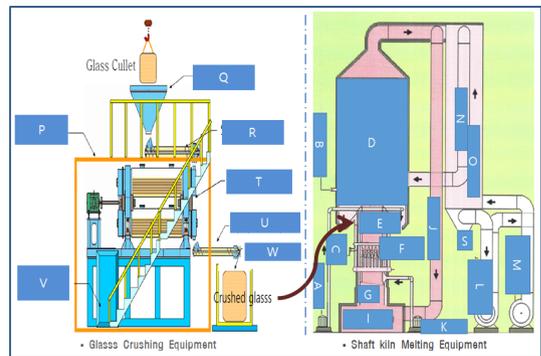


Fig. 4. Glass Crushing & Glass melting process (company of L).

Snell의 법칙에 의한 상대 굴절률(relative refractive index)을 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2; \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Fig. 5에서 θ_1 은 입사각, θ_2 는 굴절각, n_1 은 매질 1의 굴절률, n_2 은 매질 2의 굴절률, v_1 은 매질 1에서의 속도, v_2 은 매질 2에서의 속도이다¹²⁾.

현재 국내에서 운영되고 있는 폐형광등 재활용 처리 공정과 연계한 도로용 차선에 적용할 글래스비드 공정은 Fig. 6와 같다.

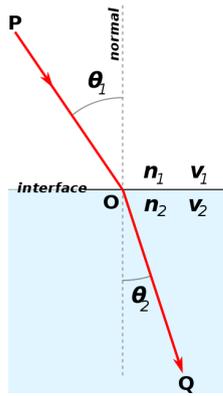


Fig. 5. Snell's Law Model.

3. 결과 및 고찰

3.1. 폐형광등 유리 원료의 화학조성

글래스비드 형태로 가공 전 입자상태의 폐형광등 유리의 화학적조성을 ICP분석 결과 SiO₂ 70.2 wt%, Na₂O 15.9 wt%, CaO 5.68 wt%, MgO 3.12 wt%, Al₂O₃ 2.21 wt% 외 13가지의 혼합물질로 구성되어 있다. 특히 As₂O₃

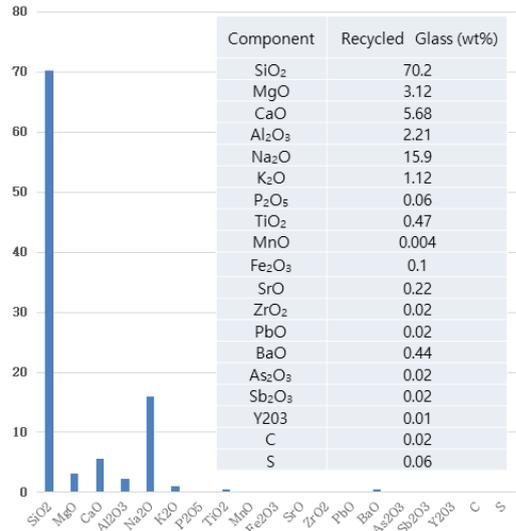


Fig. 7. Chemical composition of law material glass made from fluorescent lamp powder (ICP).

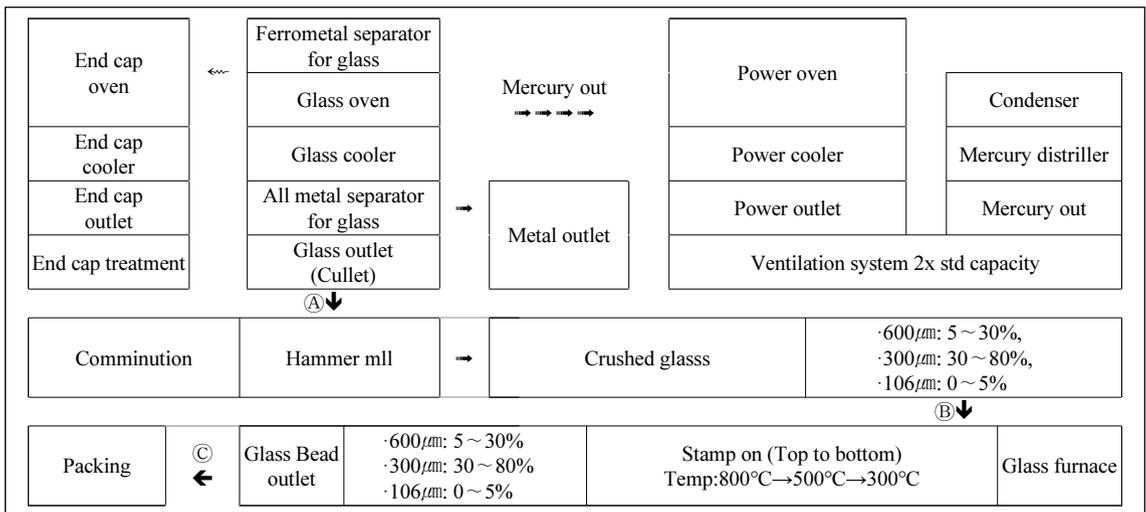


Fig. 6. Recycling glass bead process flow.

0.02 wt%, Sb₂O₃ 0.02 wt%, Y₂O₃ 0.01 wt%가 함유되어 있어 재활용과정 중 형광체가 완전히 제거되지 않고 일부가 잔류하고 있음이 Fig. 7과 같이 확인되었다.

3.2. 글래스비드의 화학조성

글래스비드의 화학조성을 XRF로 분석한 결과 SiO₂, MgO 함량은 유사성을 보였지만 CaO 함량은 일반 유리로 구상화된 글래스비드는 11.7 wt%, 폐형광등 재활용유리로 제작한 글래스비드 7.8 wt%로 분석되었다. 폐형광등 재활용유리는 일반유리와 비교해 ReO₂ 0.0108 wt%, BaO 0.071 wt%, NiO 0.0039 wt%가 추가적으로 함유되어 있음을 Fig. 8과 같이 확인하였다.

XRD 분석결과 글래스비드와 일반 유리로 제작된 글래스비드 모두 Fig. 9와 같이 25°부근에 폭이 넓은 peak이 관찰되어 두 종류 모두 비정질 상을 나타내고 있다. 두 종류 모두 한 가지 peak외에 다른 peak이 나타나지 않으므로 결정성의 이물질이나 이차상이 포함되어 있지 않음을 알 수 있다. 높은 에너지로 Crushing, Melting 공정을 거친 후 다른 이차상이 생성될 수 있음에도 불구하고 단봉의 peak을 잘 유지하고 있는 것으로 확인하였다. 그러나 XRD 패턴에서 보여지는 노이즈의 정도가 약간 다른 것을 확인할 수 있는데 이는 형광등 재활용 유리로 만든 글

래스비드에 함유되어 있지 않은 ReO₂, BaO, NiO가 일반 유리로 제작된 글래스비드에 조성되어 있는 것이 원인으로 판단된다¹³⁾.

SEM 분석결과 Fig. 10에서 일반유리로 제작된 글래스비드는 a)-3는 직삼각형과 사각형 형태의 결정질 결합 형태의 구조가 있지만, 형광등 재활용유리 b)-3에는 그러한 패턴이 확인되지 않았다. 일반유리로 만든 글래스비드와 재활용유리로 만든 글래스비드의 이러한 외형상 차이점이 굴절율과의 상관관계가 있는 것으로 확인되었다. 세척 공정을 거치지 않은 폐형광등 재활용 유리를 사용하여 제조된 비드 표면에는 Fig. 11a)-2와 같이 불순물이 일부 부착되어있는 상태가 확인되며, Fig. 7의 재활용 유리로 제작된 글래스비드의 화학물 조성분석에서 확인할 수 있듯이 고용점에서 유리와 결합되어 탈착되지 않은 Y₂O₃와 같은 형광체로 판단된다. 이는 현재의 폐형광등 재활용공정



※ Glass Bead (1): Waste fluorescent glass, Glass Bead (2): Ordinary glass

Fig. 8. Comparison of chemical composition between waste fluorescent lamp glass and ordinary glass (XRF).

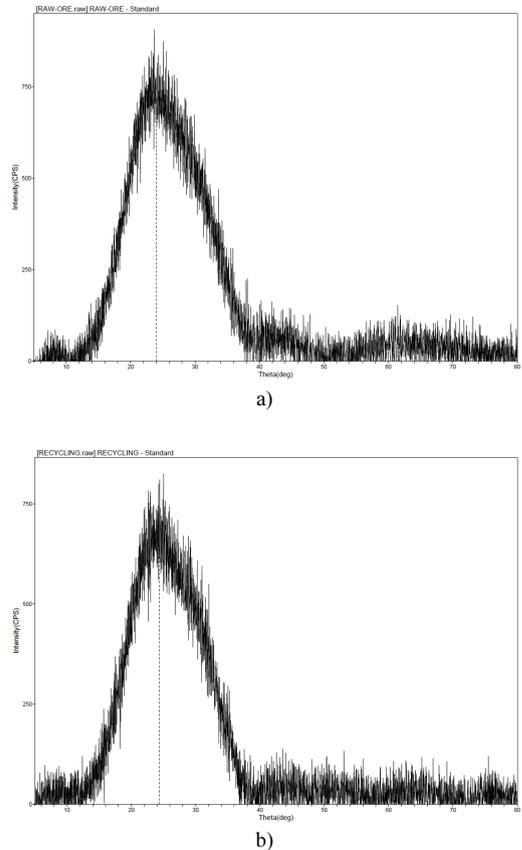


Fig. 9. X-Ray diffraction pattern of glass beads made of a) ordinary glass b) waste fluorescent lamps.

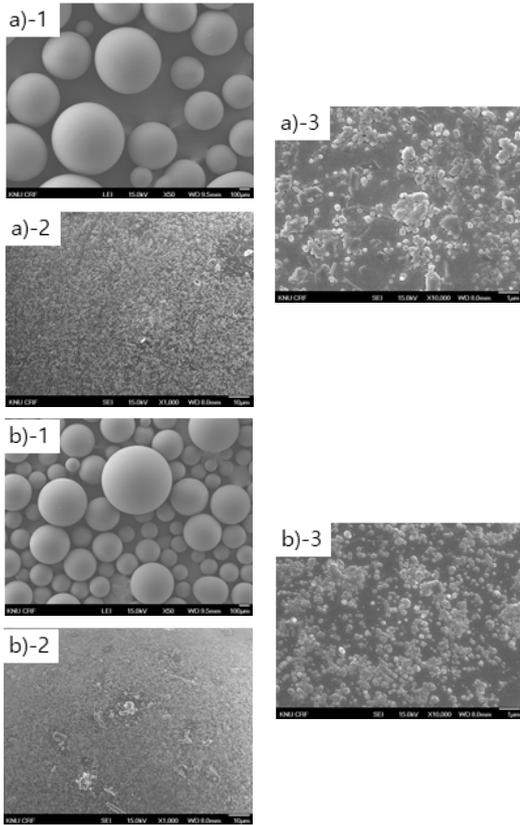


Fig. 10. SEM images of glass beads made of a) ordinary glass beads a)-1 100 μ m image, a)-2 10 μ m image, a)-3 1 μ m image b) recycled glass beads from waste fluorescent lamps b)-1 100 μ m image, b)-2 10 μ m image, b)-3 1 μ m image.

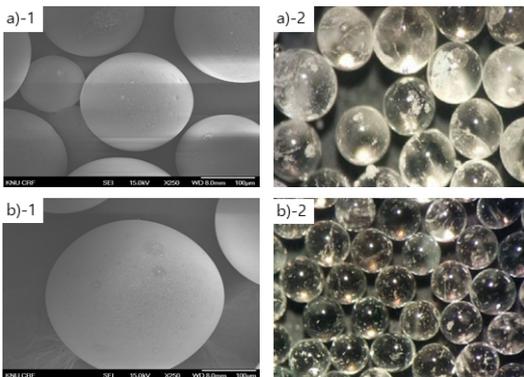


Fig. 11. SEM image of glass beads made of glass powder from waste fluorescent lamps, a) uncleaned glass powder a)-1, 2 100 μ m image, b) cleaned glass powder b)-1, 2 2100 μ m image.

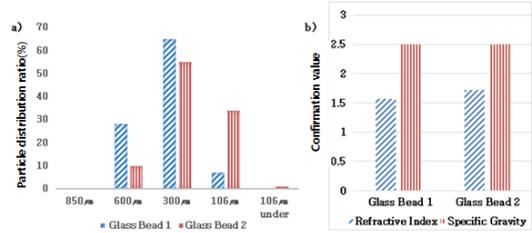


Fig. 12. Comparison of particles and refractive index of ordinary glass beads and waste fluorescent glass beads a) particle distribution rate, b) refractive index.

에서 생산되는 유리는 반드시 불순물 제거 공정을 거쳐야 글래스비드용 원료로 사용 가능함을 의미한다. Fig. 10 b)-2는 세척공정을 거쳐 불순물을 제거한 유리를 원료로 사용하여 제조한 글래스비드의 사진으로 불순물이 거의 포함되어 있지 않음이 관찰된다.

일반글래스비드의 입도분포는 600~850 μ m 28%, 300~600 μ m 65%, 106~300 μ m 7%인데 비하여 폐형광등 글래스비드 입자분포는 600~850 μ m 10%, 300~600 μ m 55%, 106~300 μ m 34%로 입자가 106~300 μ m 비중이 89% 정도로 높게 나타났으며, 이러한 결과는 폐형광등 재활용공정에서 가공된 Cullet 상태의 원료 유리를 글래스비드 제조 공정에 호환 사용될 수 있도록 미분쇄하는 처리 과정에서 기인하는 것으로 생각된다. 입도 분포의 크기는 분쇄과정에서 일반유리로 생산된 글래스비드의 분포와 동일하게 조정이 가능한 것으로 확인하였다. 전문측정기관에 의뢰한 침액을 활용한 측정 방식(KS L2521)으로 굴절률 측정 결과를 나타낸 Fig. 12에서는 일반 유리로 제작된 글래스비드 refractive index가 1호(1.50~1.64)로 평균값이 1.57인데 비교하여 형광등 재활용 유리로 제작된 글래스비드 refractive index는 2호(1.64~1.80)로 평균값1.72로 굴절률이 높은 특성임을 확인할 수 있었다. KS L2521 심사기준에 따른 비중은 일반유리로 제작된 글래스비드와 재활용유리로 만든 글래스비드 모두 2.5로 기준치 2.4가 넘는 것을 확인하였다. 도로차선 도색용 혼합제인 글래스비드 KS L252 기준인 비소(As) 200mg/Kg, 납(Pb) 200mg/Kg, 안티몬(Sb) 200mg/Kg과 비교해 재활용유리로 만든 글래스비드 측정치는 비소(As) 22mg/Kg, 납(Pb) 118mg/Kg, 안티몬(Sb) 45mg/Kg로 최대 함량 기준치에 미달하여 도로 차선 도색용 혼합제 글래스비드로 사용하는데 문제가 없음을 확인 하였다⁴⁾.

3.3. 글라스 비드 생성율과 킬른의 운전 조건

Kiln내부에는 연료가스와 공기가 혼합되어 연소되는 연소영역과 냉각영역이 구분되어 있으며 연소 영역의 온도는 1000°C~1200°C로 유지되고 냉각 영역의 온도는 400°C~600°C가 유지되도록 운전한다. 연소 영역의 온도는 공기혼합비와 매우 밀접한 상관관계를 가지므로 공기혼합비를 조절하여 연소부의 온도를 조절한다. 연소가 집중적으로 이루어지는 버너부에는 원료 유리를 분출시켜 주는 분출노즐이 법선방향으로 설치되어 있으며 노즐로부터 분출되는 원료유리와 공기혼합물의 속도가 높아지면 공기류의 회전속도가 높아져 원심력이 발생하고 용융된 유리입자는 로 벽과 충돌-응착하여 비드의 생산율을 낮추는 경향이 있다고 알려져 있다¹⁵⁾. 본 연구에서는 분출속도와 공기혼합비에 따른 비드 생산수율을 조사하여 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13의 결과에서 공기혼합 비율이 1.5~2.0에서 비드 생산수율이 90% 이상으로 양호하며 그중에서도 1.7인 경

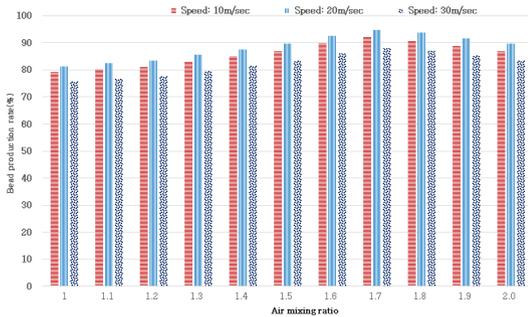


Fig. 13. Relationship among air mixing ratio, production rate of glass beads and ejection speed.

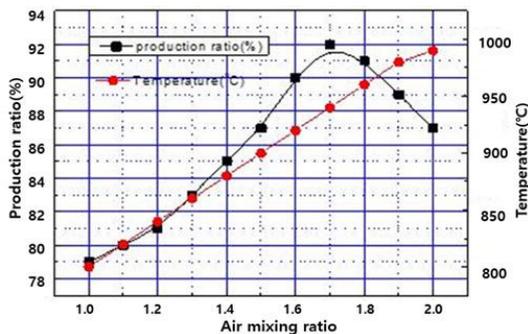


Fig. 14. Relationship among air mixing ratio, production ratio of glass beads and temperature.

우가 가장 양호한 생산수율을 나타냄을 알 수 있다. 동일 공기혼합비인 경우는 분출속도에 따라 비드의 생산수율이 달라지며, 대부분의 경우 분출속도 20m/sec의 경우가 생산수율이 가장 높고 다음으로 10m/sec > 30m/sec 순으로 생산수율이 높은 경향을 확인 할 수 있다.

Fig. 14는 공기배합비와 온도와 글라스비드의 생산수율의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림의 결과에서 공기혼합비율이 1.7일 때 로의 온도는 940°C 정도가 되고 생산수율은 92%로 최고치를 나타냄을 알 수 있다.

4. 결 론

형광등으로부터 회수되는 재활용 유리를 고부가치의 고굴절 글라스비드(high refractive glass beads)용 원료로 사용하기 위한 기초자료를 얻음 목적으로 수행된 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 일반유리로 제조된 글라스비드와 폐형광등유리로 제조된 글라스비드의 화학조성 중 SiO₂, MgO 함량은 비슷하지만, CaO함량은 일반유리로 제조된 글라스비드가 11.7 wt%, 폐형광등 유리로 제조된 글라스비드가 7.8 wt%로 분석되었으며, 폐형광등 유리로 제조된 비드에는 일반유리로 제조된 비드에는 없는 ReO₂ 0.0108 wt%, BaO 0.071 wt%, NiO 0.0039 wt%가 함유되어 있는 것을 확인하였다.
2. 형광등 유리로 제조된 글라스비드와 일반유리로 제조된 글라스비드 모두 25°부근에 폭이 넓은 peak가 관찰되어 두 종류 모두 결정성이 매우 낮은 상태임을 알 수 있었다.
3. 세척공정을 거치지 않은 폐형광등 재활용유리를 사용하여 제조된 글라스비드 표면에 불순물이 잔류함이 확인되었으며, 따라서 현재의 폐형광등 재활용공정에서 생산되는 유리는 반드시 불순물 제거공정을 거쳐야 글라스비드용 원료로 사용가능함을 의미한다.
4. 일반유리 비드의 입도분포는 600~850 μ m 28%, 300~600 μ m 65%, 106~300 μ m 7%인데 비하여 형광등 유리 비드의 입도 분포는 600~850 μ m 10%, 300~600 μ m 55%, 106~300 μ m 34%로 입자가 106~600 μ m 비중이 89% 정도로 높게 나타났다.
5. 일반유리로 제작된 글라스비드 Refractive Index가 1호

(1.50~1.64)로 평균값이 1.57인데 비교하여 형광등 재활용 유리로 제작된 글래스비드 refractive index는 2호 (1.64~1.80)로 평균값이 1.72로 굴절률이 높은 특성이 있음을 알 수 있었다.

6. 공기혼합 비율이 1.5~2.0에서 비드 생산수율이 90% 이상으로 양호하며 그중에서도 1.7인 경우가 가장 양호한 생산수율을 나타냄을 알 수 있었다. 동일 공기혼합비인 경우는 분출속도에 따라 비드의 생산수율이 달라지며, 대부분의 경우 분출속도 20m/sec의 경우가 생산수율이 가장 높고 다음으로 10m/sec > 30m/sec 순으로 생산수율이 높은 경향을 확인 할 수 있다.
7. 공기혼합비가 1.7일 때 킬른의 온도는 940°C 정도가 되고 생산수율은 92%로 최고치를 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 대학-기업간 산학협력 및 2018년도 혁신도시 공공기관연계 육성사업(과제번호 p0002063)의 연구비 지원과 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(과제번호 62201610153).

References

1. Kim, C. K., 2012 : Magement of Household Hazardous Waste, Sangmyung University, PhD thesis, pp.12-28,
2. Korea Environment Corporation, Korea resource reclamation information system <https://www.recycling-info.or.kr>, May 26, 2020.
3. Lee, G. H., 2013 : Landfill and surrounding environment ecosystem report on the behavior of mercury substances—Focusing on lighting equipment waste, Metropolitan Landfill Site Construction Report, pp.24-34.
4. Erhan, B. P., Muhammet, V. A., 2016 : Temperature Reduction of Concrete Pavement Using Glass Bead Materials, International Journal of Concrete Structures and Materials, 10(1), pp.39-46.
5. Park, Y. K., Ko, H. J., Kim, H. W., 2015 : An Effectiveness of Recycling Fluorescent Lamp with a Slag Stimulant, Korea Concrete Institute Conference Proceedings, pp.659-660.
6. Yoon, S. J., Park, J. M., 2012 : A Study on the Possibility of Concrete Using Waste LCD Glass Powder, Journal Of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 28(8), pp.95-102.
7. Lee, S. H., 2004 : Waste Fluorescent Light Management Plan in Producer Responsibility Recycling(EPR), Environmental Research Institute Kangwon National University Journal of Environmental Research, 21, pp.163-165.
8. Yu, I. G., Kim, J. W., Lee, S. H., 2007 : Improvement of the Road Markings Performance on National Highway, Korea Society of Transportation, pp.773-779.
9. Oh, H. U., 2007 : Retro reflectivity Performance Characteristics Under Environmental Road Conditions Based on Influencing Factors, Journal of the Korean Society of Civi Engineersd, 27(3D), pp.289-295.
10. Park, D. H., 2018 : Road visibility improvement and driving safety improvement technology development plan using external stimulus-sensitive materials, Korea Construction Life Environment Testing Institute, pp.34-40
11. Hahn, T. J, Choi S M., 2013 : Performance analysis modeling of axial direction direct flame rotary kiln reactors, The Korean Society of Combustion KOSCO Symposium, pp. 59-60.
12. Kang, B. G., Kang, S. G., 2019 : Trend in glass bead and regulation of road marking, and suggestions for preparing an autonomous vehicle age, Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, 29(5), pp.229-237.
13. Kim, S. S., 2001 : Studies on the structure of sodium borate glasses by hardness and refractive index, Chonnam National University Graduate School of Education, Master’s Thesis, pp.20-34.
14. Korea Institute of Cermic Engineering & Technology, 2016 : Certificate of Test, Certificate No. 2016-1132, p.1.
15. Cho, Y. J., 1990 : Development of Glass Bead Manufacturing System, Seoul Institute of Science and Technology, Korea Institute of Industrial Technology, pp.38-28.

이 기 현



- 서울시립대학교 친환경에너지연구센터 연구원
- 금호전기(주) 이사
- 현재 강원대학교 IPP센터 전담교수

이 동 훈



- 수도권 대체매립지확보추진단 단장
- 현재 서울시립대학교 환경공학부 교수



송영준

- 현재 강원대학교 신소재공학과 교수
- 현재 강원대학교 신소재공학과 학과장



김창권

- 상명대학교 경제학 박사
- (사)한국조명재활용협회 회장
- 현재 한국조명재활용공사(주) 회장