

재생발포유리의 물리적 특성에 관한 연구

조해용^{1*}, 김형주¹, 장필규¹, 최창하¹, 이수원²

A Study on the physical characteristics of foaming glass by recycling waste glass

Hae-Yong Cho^{1*}, Hyung-Ju Kim¹, Pil-Kyu Chang¹,
Chang-Ha Choi¹ and Soo-Wohn Lee²

요약 본 연구에서는 폐유리를 여러 가지 조건으로 시편 1에서 5까지 발포실험을 하여 발포유리의 pH, 밀도, 열전도도, 압축강도 그리고 흡음률을 측정하였다. 시편별 pore크기는 시편 1의 pore가 가장 적게 발포되었고, 시편 5의 경우 pore크기가 시편 1보다 3배 이상 크게 발포되었다. pore크기가 시편 5에서 가장 크게 발포되었지만, 밀도가 낮은 것 외에는 압축강도와 흡음률의 결과가 최종목표에 미달하였고, 시편 1의 경우에는 밀도가 최종목표 0.8g/cm³보다 우수한 0.58g/cm³로 나타났고, 압축강도의 경우도 최종목표보다 높은 22kg/cm³로 나타났으며, 흡음재로서의 흡음률은 시편 1의 경우 NRC 0.68로서 최종목표인 NRC 0.7에 근접하는 결과를 얻었다.

Abstract In the study of foaming a general waste glass, sample 1 to 5 were made in a various foaming conditions, measurements of pH, density, compressive strength, thermal conductivity, and the sound absorption rate were carried out. Sample 1 showed the most small pore, and Sample 5 showed pores of 3 times larger than that of Sample 1. In terms of pore size, Sample 5 was foamed mostly well, but except lower density compressive strength, efficiency of sound absorption, testing in sound room were obtained below the minimum values is lower. In the case of Sample 1 it showed 0.58g/cm³, but the final target value was 0.8g/cm³. In the case of compressive strength it showed 22kg/cm³, which is above value of the final target. The efficiency of sound absorption of Sample 1 showed NRC 0.68, which is close to the final target of NRC 0.7.

Key Words : recycling waste glass, foaming glass

1. 서론

최근 들어 폐기물 재활용에 관한 관심이 크게 높아지고 있다. 광물과 산림 등의 원자재 자원이 점점 더 고갈되어지고 있으며, 쓰레기의 소각, 매립 등의 처분이 갈수록 어려워지고 있는 실정이다. 특히 폐유리의 경우 원료물질 자체가 값싸고, 분리수거 등 전처리 비용이 높아 상대적으로 부가가치가 낮기 때문에 선진국보다 재활용이 매우 미흡한 실정이다.

그래서 정부는 폐유리의 재활용을 높이기 위해 공병보증금제를 도입[1]하여 실시하고 있으나 아직까지 약

60%정도 밖에 회수되고 있을 뿐만 아니라 폐유리를 이용한 발포기술도 선진국에 비해 매우 낮은 수준이다[2].

최근 선진 국가에서는 폐유리를 다양한 분야에 재활용하기 위한 많은 연구[3-5] 등이 활발히 수행되고 있다. 폐유리 재활용 기술은 파유리를 신병 및 기타 유리제품(유리단섬유, 유리비드, 유리공예품)의 원료로서 이용하는 수준을 넘어서, 이미 공예품에서 건축 및 토목재료에 이르기까지 다양한 활용기술이 연구개발 되어 상용화 되고 있다[6].

발포유리는 내부에 존재하는 균일하고 다공성의 open cell로 인해 내습, 내열, 내식, 단열, 흡음 등의 특성을 가지고 있기 때문에 석유화학공장의 설비, LNG의 액화탱크 및 냉동 창고의 보냉재, 연들의 라이닝, 건축용단열재와 흡음재 등으로 선진국에서는 오래전부터 사용되어지고 있다. 국내의 경우 화학공정에 사용되는 단열재의 수

¹선문대학교 환경공학과

²선문대학교 전자재료공학과

³교선저자 : 조해용(chohy@sunmoon.ac.kr)

요가 증가되고 있으나 외국으로부터 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 앞으로 다양한 분야에서 발포유리제품의 수요가 급격히 증가될 추세에 대비하여 제품의 국산화를 위한 제조기술에 대한 연구가 매우 시급한 실정이다[7].

따라서 본 연구는 발포유리의 물리적 특성을 분석하여 식물식재용 인공 토양재, 건축용 단열재, 흡음재 등으로 폐유리가 재활용되는데 기초 자료로서 제공하고자 하는데 목적을 두고 있다.

2. 실험방법

2.1 시편의 조성

실험에서 사용된 폐유리는 판유리를 사용하였다. 폐유리의 입자가 너무 크면 팽창성이 나쁘게 된다. 따라서 발포유리의 부풀림 현상도 좋게 하면서 발포제와의 혼합을 균일하게 하기 위해서 평균 입도가 대략 10 μ m~89 μ m가 되도록 미분쇄를 하였다. 본 연구에서는 재활용측면을 고려하여 폐유리를 가능한 최대량으로 많은 양을 함유하도록 시도하였으나, 폐유리가 60wt.% 이상 함유되면 토련기에서 시편이 갈라지는 현상이 일어나기 때문에 60wt.%로 정하였다. 시편의 조성을 살펴보면(Table 1) 1Kg 기준으로 폐유리 60wt.%, 제올라이트 25wt.%, 탄산칼슘 4wt.%, 규산소다 5wt.%로 혼합하고 발포제인 NaOH와 물의 함유량의 비율을 1%에서 5%까지 첨가하여 발포변화 상태를 분석하였다.

표 1. 폐유리 발포 시 조성비

Sample	The Mixture Ratio
Sample 1	폐유리 60wt.% + 제올라이트 25wt.% + 탄산칼슘 4wt.% + 규산소다 5wt.% + Water 5wt.% + 가성소다 1wt.%
Sample 2	폐유리 60wt.% + 제올라이트 25wt.% + 탄산칼슘 4wt.% + 규산소다 5wt.% + Water 4wt.% + 가성소다 2wt.%
Sample 3	폐유리 60wt.% + 제올라이트 25wt.% + 탄산칼슘 4wt.% + 규산소다 5wt.% + Water 3wt.% + 가성소다 3wt.%
Sample 4	폐유리 60wt.% + 제올라이트 25wt.% + 탄산칼슘 4wt.% + 규산소다 5wt.% + Water 2wt.% + 가성소다 4wt.%
Sample 5	폐유리 60wt.% + 제올라이트 25wt.% + 탄산칼슘 4wt.% + 규산소다 5wt.% + Water 1wt.% + 가성소다 5wt.%

2.2 시편의 제조과정

분쇄한 폐유리를 사용하여 다음과 같은 3단계 과정으로 시편을 제조하였다. 1단계 과정으로 시료의 혼합은 건식혼합과 습식혼합을 하였는데, 건식혼합은 폐유리, 제올라이트를 사용하였고, 습식혼합은 발포제 NaOH, Na₂SiO₃, 물을 사용하였다. 2단계 과정은 시료의 형태 제작으로 건식혼합과 습식혼합 방법을 통해서 혼합 후 볼밀을 이용하여 30분 이상 분쇄와 동시에 균일하게 혼합을 하여, 토련기에 넣어 1HP의 압력을 가하여 일정한 형태를 만들었다. 3단계 과정은 발포하기 위해 전기로에 시편을 넣고, 온도는 5 $^{\circ}$ C/min 속도로 750 $^{\circ}$ C까지 승온 시킨 후 50분간 유지하고 서냉하여 시편을 제조하였다.

2.3 물리적 특성분석

본 실험에서는 발포제를 NaOH를 사용하였고, 폐유리와 발포제의 배합량에 따라 Cell의 형태, pH, 강도, 열전도, 흡음률 등을 조사하였다. pH측정은 공정시험방법에 의한 전처리 후 Micro Processor pH Meter (SP-2200)으로 측정하였고[8], 열전도율은 제조한 시편을 110x60x40mm 크기로 만들어 Thermal conductivity measurement system으로 전도율을 측정하였다. 압축강도는 각 sample을 30x30x30mm 크기로 만들어 Instron dynamic material tester로 측정하였고, 흡음률은 Acoustic Duct를 이용하여 측정하였다[9]. 두개의 마이크로폰을 이용하는 임피던스관을 사용하였다[10]. 250Hz-6300Hz까지의 1/3 octave band 중심 주파수범위에서 흡음재의 흡음률을 측정하였다. 또한 각 시료의 두께는 1cm로 제작하였으며, 시료배후에 공기층을 1cm로 유지하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 pore 형태의 분석

폐유리의 발포는 여러 가지 요인에 의해 pore의 크기가 영향을 받을 수가 있다. 그 중 가장 중요한 변수로는 발포제의 종류와 함유량에 따라서 내부의 pore 상태가 현저한 차이를 나타낸다. 폐유리 자체만으로 가스발생이 부족하므로 발포유리를 제조할 때 발포제를 첨가가 되는 양에 따라 cell의 모양과 발포형태가 다르게 나타난다. 그림 1은 5개의 sample을 발포한 pore의 크기를 나타낸 것이다. 발포제 NaOH를 1wt.%로 가장 적게 첨가된 Sample 1의 경우에는 Pore Size가 다른 4개의 Sample보다 적게 발포되었으나, 시편의 강도에 있어서 가장 강하게 나타났

다. NaOH가 5wt.%로 발포제가 가장 많이 첨가된 Sample 5는 pore size가 Sample 1보다는 현저하게 크게 나타났다. 그러나 Sample 5 경우 발포상태는 양호하나 강도가 약해 잘 부서지는 경향이 있다. 페유리에 발포제 NaOH를 6wt.% 이상 첨가하면 pore size는 크게 팽창하여 건축자재나 인공토양으로 활용할 수 없을 정도로 강도가 약하게 나타났다.

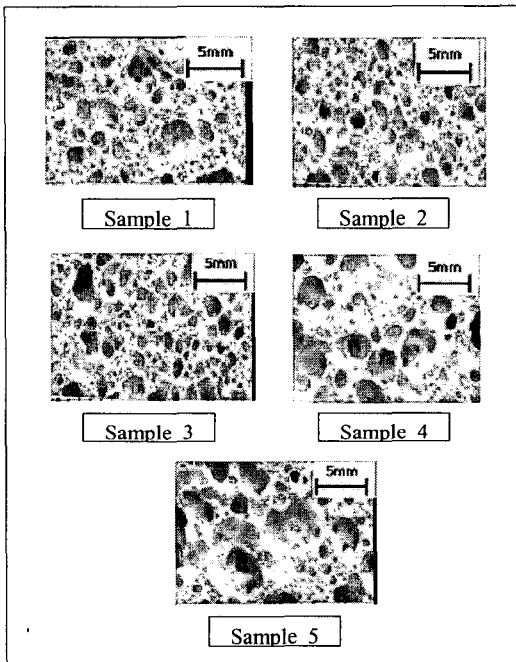


그림 1. 페유리의 발포

3.2 pH, 밀도, 압축강도의 분석

발포제 NaOH 양에 따른 Sample의 pH의 변화를 측정한 결과치는 9.78에서 11.04로 나타났다. 일반적으로 식물이 생육하는데 있어서 토양의 pH가 5.8에서 8.0사이를 요구된다. NaOH 1wt.%를 첨가한 Sample 1은 pH 9.78로 가장 낮게 나타났고, NaOH 5wt.%로 첨가한 Sample 5의 경우는 pH 11.04로서 가장 높았다.

일반적으로 발포유리는 약알칼리성으로 보이며, 발포제 NaOH의 첨가량에 의해 강알칼리성으로 나타나는 경향이 있다. 발포된 시편은 전반적으로 pH가 높기 때문에 오염된 산성토양에 혼합하여 토양개량제로 이용할 수 있고, 또한 발포유리는 다공성이며 무게가 가볍기 때문에 경량인공토로 개발하여 일반토양과 혼합하여 인공지반과 옥상녹화용으로 이용이 가능할 것으로 사료된다.

밀도의 경우 발포상태에 따라서 변화가 심하게 나타난

다. 표 2는 NaOH 양에 따른 시편의 밀도를 나타내었다. NaOH의 함유량에 따라 1wt.%~5wt.% 범위에서 밀도는 0.58g/cm³에서 0.38g/cm³ 까지 감소하는 경향을 보인다. 발포제의 영향은 NaOH가 적게 함유된 Sample 1의 경우 0.58g/cm³로 발포되어 pore size가 적어 밀도가 높았지만, Sample 5의 경우 pore size가 크기 때문에 밀도가 0.38g/cm³로 낮게 나타났다. 이는 NaOH의 함유량이 높아질수록 용융상 형성이 증가하며 표면에 형성된 용융상이 발포된 기체를 내부에 포집하여 큰 기공을 형성하였기 때문인 것으로 볼 수 있다. NaOH가 높을수록 발포가 잘되어 pore size가 커지면서 기공률의 증가 때문에 밀도가 낮아진다.

압축강도의 경우 발포된 pore size에 크게 영향을 받는 것으로 알 수 있다. 발포된 pore size가 적은 NaOH 1wt%의 경우 22kg/cm² 정도로 나타났지만, pore size가 큰 NaOH 5wt.%의 경우 9kg/cm²로 낮게 나타났다. 발포유리의 pore size는 NaOH 5wt.%가 가장 크게 발포되었지만 단열재 및 흡음재, 기타 건축자재로 활용할 경우 강도가 너무 낮아서 적합하지 않을 것으로 사료된다.

표 2. 발포유리의 pH, 밀도 및 압축강도 분석

Sample	pH	Density (g/cm ³)	Compressive Strength	
			Size(mm)	Strength(kg/cm ²)
Sample 1	9.78	0.58	30x30x30	22
Sample 2	10.24	0.50	30x30x30	29
Sample 3	10.34	0.46	30x30x30	19
Sample 4	10.51	0.41	30x30x30	12
Sample 5	11.04	0.38	30x30x30	9

3.3 열전도의 분석

열전도율은 밀도와 밀접한 관계가 있으며, 일반적으로 발포유리의 경우 밀도가 감소할수록 열전도율도 감소하는 경향으로 나타났다. 시편을 30mm x 30mm x 30mm 크기로 만들어 측정한 결과가 표 3과 같이 나타났다. 발포제 NaOH가 1wt.%첨가 되었을 경우 0.121W/m·K 이었고, 5wt.%의 경우 0.065W/m·K로 나타났다.

표 3. 발포유리의 열전도 분석

Sample	Size(mm)	Time (s)	Reproduction (%)	Conductive (W/m·K)
Sample 1	110×60×40	100	± 4	0.121
Sample 2	110×60×40	100		0.142
Sample 3	110×60×40	100		0.152
Sample 4	110×60×40	100		0.912
Sample 5	110×60×40	100		0.065

3.4 흡음률

Sample 1의 시편은 NaOH가 1wt.% 함유된 것으로 2000Hz에서 3000Hz 사이에서 NRC 0.6 이상 높게 나타났고, 3000Hz 이상에서는 NRC 0.5 이하로, 1000Hz 이하의 저주파에서는 NRC 0.2~0.3 정도이고, Sample 1의 평균은 NRC 0.27이다. Sample 2의 시편은 NaOH가 2wt.% 함유된 것으로 5000Hz 이상에서 NRC 0.5 이하였고, 5000Hz 이하에서는 NRC 0.2~0.3 정도로 낮게 나타났다. Sample 2의 경우에는 평균치가 NRC 0.21이었다. Sample 3의 시편은 NaOH가 3wt.% 함유된 것으로 5000Hz 이상에서는 NRC 0.4 이하를 나타냈고, 5000Hz 이하에서는 Sample 2와 같은 NRC 값을 나타냈다. Sample 3의 평균은 NRC 0.24이다. Sample 4의 시편은 2000Hz 이상에서는 NRC 0.5 이상 나타났지만 2000Hz 이하에서는 다른 Sample에 비해 많이 낮아지는 경향을 보인다. Sample 4의 평균은 NRC 0.21이다. Sample 5의 시편은 평균 NRC 0.12로 매우 낮게 나타난다.

NaOH의 양에 따라 sample을 5가지 나누어 측정결과 NaOH가 1wt.% 함유된 sample 1이 평균NRC 0.271로 높게 나타나고 NaOH가 5wt.% 함유된 Sample 5가 평균 NRC 0.12로 가장 낮게 나타났다. 그 이유는 Sample 1 시편의 경우 pore size가 작은 기공을 많이 발포되고 흡음면적도 커지므로 흡음률의 다른 sample 보다 높고, Sample 5 시편의 경우는 발포상태에서 pore size가 너무 크고 흡음단면적이 적어서 낮은 흡음률을 보이는 것으로 사료된다.

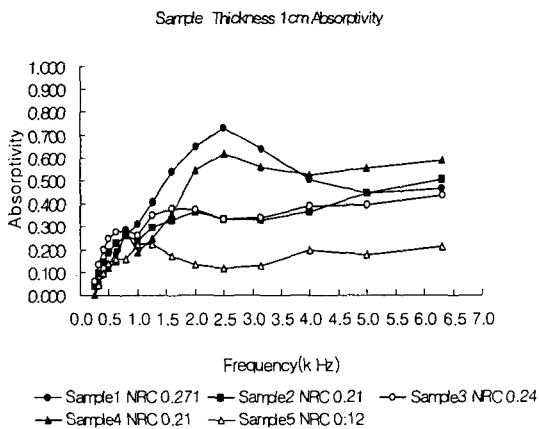


그림 2. 발포유리와 흡음분석

4. 결론

폐유리가 다양한 분야에서 재활용할 수 있도록 하기

위해 여러 가지 조건으로 Sample을 발포시킨 후 발포 유리의 pH, 밀도, 압축강도, 열전도, 흡음률 등 물리적 특성을 측정한 결과가 다음과 같다.

Sample별 Pore size는 Sample 1의 pore가 적게 발포되었고, Sample 5의 경우 pore size가 Sample 1보다 3배 이상 크게 발포되었다. pore size는 Sample 5가 가장 발포가 크게 되었지만, 밀도가 낮은 것 외에는 압축강도, 흡음률에서의 결과가 NRC 0.7에 미달하였고, Sample 1의 경우에는 밀도가 최종목표 0.8g/cm³ 보다 우수한 0.58g/cm³로 나타났고, 압축강도의 경우도 최종목표보다 높은 22kg/cm³로 나타났으며, 흡음재로서의 흡음률은 Sample 1의 경우 NRC 0.68로 최종목표치 NRC 0.7에 근접하는 결과를 얻었다.

폐유리에 발포제를 첨가하여 발포한 결과를 보면 비중이 가벼워서 옥상녹화에 인공토양으로 사용이 가능하고, 단열과 흡음이 효과가 상당히 있어서 건축분야에 단열재나 흡음재로 사용이 가능한 것으로 판단되며, 기존의 제품에 비해 가격이 저렴하여 상품화를 하면 경쟁력이 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- [1] 이남춘 외 7, "폐기물처리재활용", 동화기술, pp.153-158, 1998
- [2] 환경부, "환경백서", pp. 509-556, 2003
- [3] Morgan, J. S., Wood, J. L., Bradt, R. C.: "Cell Size Effects on the Strenght of Foamed Glass", Mater. Sci. Eng. 47, 1, 37, 1981
- [4] Ihara Chikuro Kogyo, "Foamed glass with good physical properties", JP 59092944, 1984
- [5] Asahi Chem. Ind., "Inorganic foamed glasspp product production", JP60235743, 1986
- [6] 김진용, "폐유리로부터 발포유리 제조 시 물리적 특성에 관한 연구", 선문대학교 석사학위 논문 1-16, 2003
- [7] 이철태, "폐유리 리사이클링-발포유리 제조 기술과 전망", 공업화학회지 Vol. 3 No. 2, pp. 1-14, 2000
- [8] 정우용, "공정시험법, 수질오염, 폐기물, 토양오염", 동화기술(주), PP. 439-441, 2001
- [9] 조해용, 최창하, 이수완, "폐유리를 이용한 흡음재 개발", 환경부, pp. 30-54, 2004

조 해 용(Hae-Yong Cho)

[정회원]



- 1982년 2월 : 성균관대학교 조경학과 (학사)
- 1990년 4월 : 베를린공과대학교 자연환경계획학과 (석사)
- 1994년 7월 : 베를린공과대학교 자연환경계획학과 (박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 환경공학과 부교수

최 창 하(Chang-Ha Choi)

[정회원]



- 1989년 1월 : 스트라스부르그대학교 음향학 (박사)
- 1989년 3월 ~ 1996년 2월 : 국방대학연구소 선임 연구원
- 1986년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 환경공학과 부교수

김 형 주(Hyung-Ju Kim)

[준회원]



- 2004년 2월 : 선문대학교 환경공학과 (학사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 환경공학과 (석사과정)

이 수 완(Soo-Wohn Lee)

[정회원]



- 1977년 2월 : 한양대학교 재료공학과 (학사)
- 1980년 2월 : 한양대학교 재료공학과 (석사)
- 1985년 7월 : 일리노이주립대학교(공학박사)
- 1988년 1월 ~ 1993년 2월 : NIST 연구원
- 1993년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 전자재료공학과 (교수)
- 2005년 1월 ~ 현재 : 산학기술학회 회장

장 필 규(Pil-Kyu Chang)

[준회원]



- 2003년 2월 : 선문대학교 환경공학과 (학사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 환경공학과(석사과정)