

폐 LCD 유리를 이용한 흡음특성을 갖는 붕규산유리발포체 제조

이철태

단국대학교 공학대학 화학공학과
(2016년 10월 10일 접수, 2016년 11월 3일 심사, 2016년 11월 15일 채택)

Preparation of Borosilicate Foamed Glass Body with Sound Absorption Characteristics by the Recycling Waste Liquid Crystal Display Glass

Chul-Tae Lee

Department of Chemical Engineering, Dankook University, Gyeonggi 31116, Korea
(Received October 10, 2016; Revised November 3, 2016; Accepted November 15, 2016)

초 록

폐 LCD 패널로부터 회수된 폐 붕규산유리를 이용하여 흡음특성을 갖는 알루미늄 함유 붕규산유리발포체의 제조 가능성을 조사하였다. 입도 325 mesh 이하의 크기로 분쇄 조절된 폐 붕규산유리분말 100 g에 대해 발포제로서 탄소분을 0.3중량 분율, Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , CaCO_3 를 각각 1.5중량 분율, 기공조절제로서 H_3BO_3 및 Al_2O_3 를 각각 6.0 및 3.0 중량 분율이 되도록 첨가한 원료 유리분말을 발포소성온도 950 °C에서 20 min간 발포를 진행함으로써 개기공률 45%를 갖는 발포체를 제조하였으며 이 경우 흡음률 0.5~0.7의 흡음 특성을 갖고 있음을 보여 주었다. 아울러 이 흡음성능을 지닌 알루미늄 함유 붕규산유리발포체는 밀도 0.21 g/cm³, 굽힘강도 55 N/cm² 이상, 압축강도 298 N/cm² 이상의 우수한 물성을 가지고 있어 다양한 용도에 내화학성 및 내열성의 흡음체로 사용될 수 있다.

Abstract

In this research, an alumino-borosilicate foamed glass with sound absorption property was prepared using the waste borosilicate glass obtained from the recycling process of waste liquid crystal display (LCD) panel. A 100 g of pulverized waste borosilicate glass with the particle size of under 325 mesh, was mixed with 0.3 g (wt/wt) of graphite, each 1.5 g (wt/wt) of Na_2CO_3 , Na_2SO_4 and CaCO_3 as a foaming agent, and 6.0 g (wt/wt) of H_3BO_3 and 3.0 g (wt/wt) of Al_2O_3 as a pore control agent. Following mixture was under the foaming process for 20 minutes at a foaming temperature of 950 °C. The result yielded the foaming agent with 45% of the opened porosity and 0.5-0.7 of the sound absorbing coefficient. This alumino-borosilicate foamed glass with the sound absorption property showed excellent physical and mechanical properties such as density of 0.21 g/cm³, bending strength of 55 N/cm² and compression strength of 298 N/cm² which can be ideally used as sound absorption materials with heat-resisting and chemical-resisting property.

Keywords: waste LCD panel, borosilicate foamed glass, sound absorption

1. 서 론

붕규산유리는 소다석회유리에 비해 높은 내식성과 기계적 강도를 가지고 있어 주로 이화학용 용기로 사용되어 왔지만, 최근에는 영상 매체기술의 발달에 따른 평판디스플레이 관벌용 유리로서 그 사용이 막대하다. 평판디스플레이 관벌용 붕규산유리의 사용량 증대는 사용 후 폐기 발생량의 증대로 이어진다. 특히 LCD 관벌은 이미 초기 보급 단계를 넘어 사용 후 폐기물이 발생하는 단계에 이르렀으며, 또한 관벌 생산과정에서도 공정폐기물로 발생하는 폐 붕규산유리가 수만 톤

에 이르고 있어 심각한 환경문제를 유발하고 있다. 이에 따라 LCD용 관벌 생산 업체나 그 관련 국가에서는 폐 전기전자제품의 관리 지침을 명시한 WEEE의 규정인 회수율 75% 이상, EPR 법적재활용률 65% 이상을 달성하기 위해서 LCD용 폐 관벌에서 발생하는 폐 붕규산유리의 재활용 방안 마련에 많은 노력을 하고 있다[1,2]. 폐 LCD용 관벌에서 발생하는 폐 붕규산유리의 재활용에 대해 이루어진 연구 사례는 (i) 액정, 박막 등 불순물을 물리화학적 방법에 의해 제거한 후 유리의 재사용[3-5], (ii) 야금공정, 용융공정, 소각공정, 시멘트 제조공정 등 고온 공정에 복합적 사용[6-8], (iii) 제품화로서 타일 제조[9] 등으로 구분될 수 있다. 그러나 폐 붕규산 유리를 관벌용 유리원료로서 재사용하는 (i)공정은 경제성, 효율성에서 배제되었으며, (ii)의 경우 부분적, 복합적으로 혼합사용이 보고되고 있으나 그 사용량은 지극히 소량이고 간헐적으로 사용되어 처리의 효율성이 문제시 되고 있으며, (iii)의 경우와 같이 유리자체의 재활용에 의한 타일 제조 등은 상대적

Author: Dankook University,
Department of Chemical Engineering, Gyeonggi 31116, Korea
Tel: +82-31-8005-3541 e-mail: chult823@dankook.ac.kr

부가가치가 너무 높다. 그러므로 아직까지 이들 세 가지 방안 중 어느 것도 실용화가 이루어지지 못하여, LCD 패널 제조공정상 발생하는 막대한 양의 폐 붕규산유리는 전량 소각되거나 매립되고 있는 실정이다.

폐 붕규산유리와 같은 유리질 계통의 폐기물이 효과적으로 재활용되지 못하고 있는 이유는 유리를 제조하는 원료의 가격은 저렴하지만 재활용을 위한 고온이 요구되는 등 전처리 비용이 높아 재활용에 의한 고부가가치 창출이 어렵기 때문이다. 이러한 여건 하에서 폐 붕규산유리와 같은 폐유리의 재활용 방안은 유리의 제조에 소요된 에너지를 그대로 보존한 상태로, 즉 재활용을 위한 추가적인 에너지를 가함이 없이 유리질 그 상태로 고부가가치를 갖는 제품으로 변환시키는 것이다. 이러한 관점에서 가능성 있는 방법의 하나가 발포유리의 제조이며 폐 붕규산유리의 경우도 적용 가능하다. 발포유리는 보온단열의 기능을 부여하는 독립된 기포가 형성된 다포체로서 고내열성 및 불연성인 까닭에 통상의 유기계 단열재에 비해 상대적으로 매우 고가인 보온단열재이다[10]. 통상의 소오다-석회유리 발포체는 건축용 보온단열재로 사용되고 있으며 화학적 내식성이 높은 붕규산유리로 제조된 발포체는 화학공정용 보온 단열재로 사용되어 오고 있다. 발포유리는 공히 유리 생산원료를 고온에서 용융하여 먼저 발포유리제조용 유리를 제조한 다음, 이 발포유리제조용 유리를 분쇄하고 발포제를 첨가하여 고온 발포공정에 의해 제조된다. 그러므로 발포유리는 매우 우수한 보온단열재이나 그 제조에 막대한 에너지가 요구되는 치명적인 약점을 갖는다. 이에 저자는 발포유리제조용 유리를 제조하는 용융과정을 거치지 않고 직접 다양한 폐 소다석회유리를 이용하여 발포유리를 제조하는 방안에 대한 연구를 진행한 바 있으며[11-12], 특히 폐 LCD 디스플레이의 재활용방안으로서 폐 LCD 디스플레이용 패널로 구성되는 붕규산유리를 대상으로 양질의 보온 단열 특성을 갖는 붕규산유리발포체 제조공정을 개발한 바 있다[13-15].

이에 본 연구에서는 폐 LCD 패널에서 발생하는 폐 붕규산유리의 재활용 효과를 더욱 높일 수 있는 방안으로 흡음 특성이 부가된 붕규산유리발포체의 제조 공정 개발을 시도하였다. 유리발포체가 보온단열의 특성을 갖는 것은 발포체 내의 기공이 폐기공으로 형성되기 때문에 이루어지는 것이며 실제 양질의 보온단열용 발포유리는 폐기공률이 전체기공의 95% 이상에 이른다. 그러나 붕규산유리발포체가 흡음의 특성을 갖기 위해서는 발포체 내에 개기공이 존재하여야 가능하며, 이러한 개기공의 형성은 이론적으로 거의 100%의 폐기공으로 생성되는 보온단열재용 유리발포체의 제조 메카니즘상으로 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 폐 LCD 패널에서 발생하는 폐 붕규산유리를 대상으로 붕규산유리발포체 내 개기공의 형성 조건, 개기공률에 따른 흡음 특성 등을 조사하여 흡음특성을 가진 붕규산유리발포체의 제조공정을 개발하고자 하였다.

2. 시료 및 실험

2.1. 폐 LCD 유리 시료의 준비

본 연구에서 흡음 특성을 갖는 붕규산유리발포체의 제조에 사용된 붕규산유리는 전보[16]의 연구결과에 따라 경북 영천 소재 재활용센터에서 폐기 발생된 폐 LCD TV로부터 제공된 폐 LCD 패널을 별도의 전 처리 없이 습식분쇄공정에 의해 회수된 폐 붕규산유리이다. 사용된 모든 폐 붕규산유리는 회수된 폐 붕규산유리를 미분쇄하여 325 mesh 표준체를 통과하는 입도를 갖는 것으로 조절하였다.

규산염화합물인 유리는 일반적으로 기계적 강도, 특히 경도(hardness)가 높기 때문에 분쇄공정에 다량의 에너지가 요구될 수 있으며 분쇄

가 쉽지 않다. 더구나 시료로 사용된 폐 LCD 유리는 그 경도가 특히 높은 알루미늄 함유 붕규산유리(alumino-borosilicate glass)로서 분쇄가 쉽지 않으므로 특성에 적합한 분쇄 공정을 사용하여야 한다. 본 연구에서 시료로 사용한 폐 LCD 유리의 분쇄 공정 및 조건은 전보[16]의 연구결과에 따라 알루미늄 불을 사용하는 불밀 분쇄를 하였으며, 분쇄입자의 크기는 43 μm 이하의 크기로 정하였다. 탄소발포제로는 입도 43 μm 이하의 크기로 조절된 Natural Graphite를 분쇄한 것으로 붕규산유리분말 100 g 중량당 0.3 g 첨가 사용하였다. 그리고 발포제로서 Na_2CO_3 , CaCO_3 및 Na_2SO_4 와 같은 금속염을 사용하였으며 붕규산유리분말 100 g 중량당 1.5 g 되게 첨가하였으며 이들의 입도도 공히 43 μm 이하로 조절하여 사용하였다. 발포체 내의 기공 조절제로 사용되는 ZrO_2 , MgO , H_3BO_3 , 및 Al_2O_3 등은 모두 시판용1급 시약을 사용하였다.

2.2. 미 분쇄된 폐 LCD 유리 시료의 화학조성

폐 LCD 유리 자체의 화학조성은 패널 제조사마다 약간의 차이가 있으며 발포공정은 원료 유리의 조성에 따라 많은 영향을 받는다[13-15]. 그러나 폐 LCD 유리를 원료로 사용하는 발포체 제조공정이 폐 LCD 유리의 작은 조성차이로 인해 제조 공정이 영향을 받는다면 실용화에 큰 장애가 될 것이며 본 연구에서는 이러한 조성차에 대한 영향이 최소화되는 발포유리제조공정을 제시하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 미분쇄된 폐 LCD 유리 분말의 화학조성은 전보[16]에 제시된 바와 같이 주요 구성 성분이 SiO_2 63~68 wt%, Al_2O_3 10~18 wt%, B_2O_3 3~10 wt%로 구성되는 알루미늄 함유 붕규산유리(alumino-borosilicate glass)라는 기본 조성의 범위에 포함됨이 확인되었다.

2.3. 흡음 특성을 갖는 붕규산유리발포체의 제조

준비된 폐 붕규산유리 분말을 사용하여 괴상 형태로 발포체 제조 실험을 시도하였다. 괴상의 발포체는 폐 붕규산유리분말에 발포제 및 기공조절제 등이 혼합된 원료 혼합물을 거푸집에 담아서 발포 소성하여 제조하였으며, 상세한 제조방법은 전보[16]와 동일하게 진행하였다. 입자의 크기가 43 μm 이하로 분쇄된 폐 LCD 유리 분말에 발포제로서 탄소재, 또는 금속염류 일정량, 소성시 소결효과를 극대화하기 위해 소결보조제 등을 첨가하고 가급적 균일하게 혼합한다. 이 원료 혼합물을 100 mm \times 100 mm \times 50 mm 크기의 뚜껑이 있는 거푸집에 담고 이를 일정온도로 조절된 예열영역(600~700 $^\circ\text{C}$), 발포소성 영역(850~1050 $^\circ\text{C}$), 안정화 급냉 영역(550~650 $^\circ\text{C}$) 및 서냉영역(40~400 $^\circ\text{C}$)으로 조절된 터널기른에 도입한다. 이후 터널기른에서 나온 발포체를 담은 거푸집에서 거푸집을 제거함으로써 완성된 발포유리블록을 얻는다.

2.4. 제조된 붕규산유리발포체의 개기공률 측정 및 흡음 성능 측정

설정된 실험조건하에서 제조된 모든 폐 LCD 유리 발포체의 밀도, 열전도도, 선열팽창계수, 굽힘강도, 압축강도 등의 물리화학적 특성은 ASTM규격, KS규격 또는 ISO규격에 준하는 바에 따라 실시하였다. 그 외의 일반적 분석 및 제시된 물성치는 통상의 과학적 분석방법 및 이론적 계산에 준하여 시행하였다.

발포유리의 공극률은 Archimedes 원리를 이용한 액중 칭량법에 따른 발포체의 건조질량 및 수중질량의 측정을 통해 열린 기공과 닫힌 기공 비율을 조사하였다. 조사방법은 KS L 3114에 따른 “내화 벽돌의 겉보기, 기공률, 흡수율 및 비중 측정방법”을 이용하였다. 겉보기 개기공률을 구하는 공식은 다음과 같다.

Table 1. Foaming Process Conditions for the Preparation of Foamed Borosilicate Glass Body by Using Waste Borosilicate Glass through the Production Process of LCD Panel

Variables	Conditions
Amount of Carbon as foaming Agent	Amorphous Graphite, Weight ratio of carbon to borosilicate glass 100 g = 0.3
Amount of Metallic Salt as Other Foaming Agents	Na ₂ CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , CaCO ₃ , Respectively, Weight ratio of Metallic Salt to borosilicate glass 100 g = 1.5
Preheating	Temperature = 600 °C, Holding Time = 30 min
Foaming Reaction	Temperature > 950 °C Holding Time = 20 min

$$\text{개기공률} = \frac{\text{젖은 시험편의 질량} - \text{건조된 시험편의 질량}}{\text{젖은 시험편의 질량} - \text{합침된 시료의 겉보기 질량}}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 개기공을 갖는 붕규산발포체 제조를 위한 발포화 공정 검토

폐 붕규산유리를 이용하여 흡음기능을 갖는 붕규산 유리발포체 제조의 핵심은 통상적인 유리의 발포화과정에서 형성되는 기공이 거의 대부분 폐기공으로 형성되는 것을 기공이 열려져 있는 개기공으로 형성되게 하는 것이다. 붕규산유리의 발포화 과정은 통상적 유리의 발포화 과정과 다를 바 없다. 그러므로 흡음성능을 갖는 붕규산 발포체의 제조공정 자체는 개기공을 갖는 붕규산발포체의 제조조건과 유사할 것이다. 개기공의 형성은 유리발포체 형성 메커니즘에 따라 폐기공을 갖는 발포체가 형성된 후 발포체 내에 형성된 폐기공 내 기체의 팽창에 따라 기공이 열리며 개기공을 갖는 발포체가 형성될 수 있다. 그러나 과도한 개기공의 형성은 발포체의 형태를 유지하는 폐기공의 팽창상태가 사라지는 바 유리발포체의 형태 자체가 와해되는 원인이 될 수 있다. 그러므로 흡음 특성을 부여하는 개기공을 갖는 붕규산유리발포체의 제조조건은 일단 폐기공을 갖는 붕규산유리발포체의 제조공정을 기반으로 검토되어야 하는 것이 합리적이다. 본 연구자는 전보 연구[15]에서 이미 폐 붕규산유리를 대상으로 단핵진 기공으로 형성된 보온단열재용 발포유리를 제조공정을 연구한 바 있다. Table 1은 전보[15]에서 제시된 바 있는 폐기공을 갖는 붕규산유리발포체의 제조 조건이다. 그러나 전보[15]의 연구에서 사용된 폐 붕규산유리는 LCD 패널 제조공장에서 발생하는 파쇄된 붕규산 유리로서 이는 본 연구에서 대상 시료로 하고 있는 폐기된 LCD TV로부터 회수된 LCD 패널을 직접 습식 분쇄하여 얻어진 폐 붕규산유리와는 물리화학적 차이점이 존재할 수 있다. 이에 연구자는 이와 같은 폐기된 LCD TV 용 패널로부터 회수된 폐 붕규산유리를 대상으로 Table 1의 조건을 적용하여 발포화 여부를 확인한 바 있으며 또한 기존의 발포제 및 발포조제와는 별도로 개기공 형성을 유발할 가능성이 있는 별도의 첨가제를 적용하여 개기공 형성의 가능성을 조사한 바 있다[16].

그 결과 전보[16]에 발표한 바와 같이 본 연구에서 사용될 대상 시료인 폐 LCD 패널을 습식 분쇄하여 얻어진 폐 붕규산유리의 경우도 발포화가 가능하며 또한 기공조절을 위한 첨가물로서 선정된 붕산 및 이산화규소를 첨가한 경우 동일한 발포온도 및 발포시간의 조건에서도 개기공의 형성이 가능함을 확인하였다. 이러한 결과는 폐 LCD TV 용 패널에서 회수된 폐 붕규산유리를 발포화하여 흡음성능을 갖는 발포체의 제조의 경우 기본적인 발포화 공정에는 Table 1의 발포조건이 적용가능하며, 발포화 공정에서 개기공의 형성 및 제어에, 시료의 성분비, 시료의 입도 성형 상태 등 여러 가지 변수조건들에 폐기공의 형성과 마찬가지로 영향을 받음을 의미한다. 이에 따라 발포체 내에 개

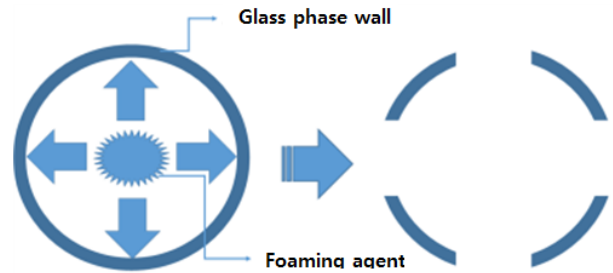


Figure 1. Mechanism for formation of opened pore in foaming process.

기공의 형성에 대해서는 다음과 같은 고찰이 가능하다. 유리질 발포체에서 기공의 형성은 두 가지 형태가 존재한다. 고온에서 유리구성 성분과 탄소발포제 및 다양한 발포조제의 화학적 반응을 통해 생성된 기체가 이들 발포제 및 발포조제를 감싸고 있던 용융 또는 연화된 유리의 표면을 팽창시키기만 하는 경우 독립된 폐기공이 형성되며 이러한 발포체는 보온 단열의 기능을 갖게 된다. 그러나 Figure 1에 나타난 바와 같이 생성된 기체가 용융 또는 연화된 유리의 표면장력을 뚫고 나오게 되는 경우 열린 기공 즉 개기공이 형성될 수 있게 되며 이러한 발포체는 본 연구에서 목적하는 바 흡음 특성을 갖는 발포체가 될 수 있다. 그러나 이러한 개기공을 갖는 발포체가 일정한 밀도를 갖는 발포체로 형성되기 위해서는 폐기공 속에 생성된 기체가 팽창 배출됨과 아울러 추가적인 특별한 조건을 갖추어야 가능하다. 첫째 용융된 유리의 점도가 일정 이상 값을 가지고 있어야 한다. 만약 점도가 너무 낮게 되면 폐기공 속에 생성된 기체가 용융된 유리 표면을 뚫고 배출된 후 기공이 금방 닫히게 되거나 또는 형성된 전체 기공이 붕괴될 가능성이 높기 때문이다. 그러나 또한 지나치게 높은 점도는 용융된 시료의 표면장력을 높여 발포화에 필요한 에너지가 많이 필요하게 되어 에너지 관점에서 효율적이지 못할 뿐 아니라 결과적으로 발포온도 조건이 상승하게 될 것이다. 두 번째로 용융 또는 연화된 유리 구성 성분들이 균일한 유리상태를 유지해야 될 것으로 사료된다. 이는 유리가 SiO₂를 포함한 다양한 종류의 산화물로 구성되어 있기 때문에 균일한 유리질 상태가 유지 되지 않는 경우 유리의 용융이 일정한 온도에서 이루어지는 것이 아니라 구성성분 마다 다르게 되어 발포과정에서 형성되는 기공의 균일성이 저하될 가능성이 존재하기 때문이다.

그러므로 붕규산유리발포체가 흡음 특성을 갖기 위해서는 발포소성 온도조건하에서 절대적으로 필요한 개기공 형성을 용이하게 할 수 있는 적절한 점도를 가져야 하며 균일한 유리질 형성이 될 수 있는 조성 조건이 형성되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 이러한 조건의 형성을 사용될 붕규산유리의 구성 원소를 중심으로 추가적인 성분의 첨가에 의해 이룰 수 있을 것으로 기대하며 이의 가능성을 타진하기 위해 추가적인 성분을 첨가에

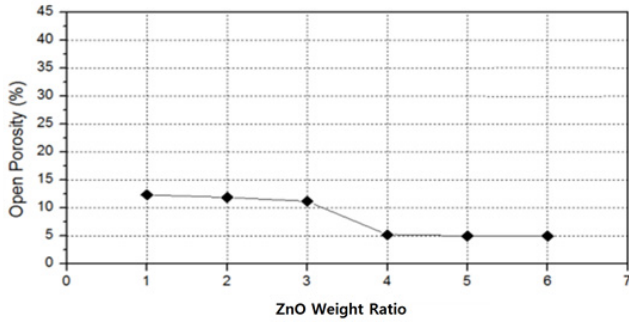


Figure 2. Effect of ZrO addition on the formation of opened pore in the borosilicate foamed body.

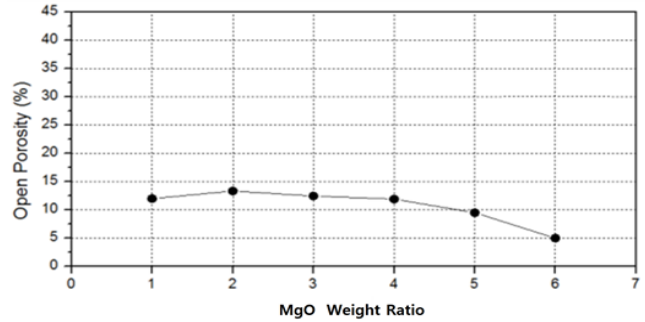


Figure 3. Effect of MgO addition on the formation of opened pore in the borosilicate foamed body.

다른 개기공의 형성을 조사하였다. 본 연구에서는 이러한 조건을 형성하기 위한 추가적인 성분으로서 ZrO_2 , MgO , Al_2O_3 및 B_2O_3 등 가급적 폐붕규산유리의 조성 성분을 선정하여 그 가능성을 타진하였으며 이는 기존 구성성분이 아닌 성분이 첨가되는 경우 고온에서 붕규산유리의 균일성 저하를 억제하고자 함에 있다.

3.1.1. 개기공 형성에 대한 ZrO_2 의 영향

폐 붕규산유리 구성성분의 하나인 ZrO_2 의 첨가가 발포체 내의 개기공 형성에 미치는 영향을 조사하였다. Figure 2는 폐 LCD 패널로부터 회수된 폐 붕규산유리를 대상으로 Table 1에 나타난 바와 같은 발포조건을 적용하며 추가적인 첨가물로서 ZrO_2 를 폐 붕규산유리 100 g에 대한 중량분율로서 1.0부터 6.0까지 함량을 달리하여 발포시킨 발포체의 개기공률(Open porosity)을 조사한 것이다. ZrO_2 의 첨가는 무첨가의 경우 평균적으로 개기공률이 10% 미만인 수준에 비해 상대적으로 개기공의 형성에 영향을 줄 수 있음이 확인되었다. 그러나 개기공의 형성에 효과적으로 작용하지 못하였을 뿐 아니라 그 첨가량이 증가할수록 오히려 개기공이 감소되어 졌으며, 발포소성 시간을 늘려서 발포화를 진행하였으나 이 경우는 발포화 자체도 제대로 이루어지지 않음을 확인하였다. 이는 ZrO_2 가 첨가됨에 따라 점도가 지나치게 높아지는 현상을 유발하게 되며 이에 따라 용융상태의 유리의 표면장력이 높아져 그 결과 발포화가 용이하게 진행되지 못한 것으로 판단된다. 따라서 ZrO_2 는 소량의 첨가라도 적절한 점도로 조절에 어려움이 있었으며, ZrO_2 의 첨가에 의한 개기공을 갖는 발포체의 제조는 여의치 못할 것으로 판단되었다.

3.1.2. 개기공 형성에 대한 MgO 첨가의 영향

Figure 3는 폐 LCD 패널로부터 회수된 폐 붕규산유리를 대상으로 Table 1에 나타난 바와 같은 발포조건을 적용하며 추가적인 첨가물로서 MgO 를 폐 붕규산유리 100 g에 대한 중량분율로서 1.0부터 6.0까지 함량을 달리하여 발포시킨 발포체의 개기공률을 조사한 것이다. MgO 은 유리화 과정에서 수식제로서 작용할 수 있는바 ZrO_2 의 첨가에 비해 상대적으로 점도 상승의 요인이 낮은 첨가제이다. MgO 의 이러한 물리화학적 특성으로 Figure 3에 나타난 바와 같이 MgO 은 2.0 중량분율까지 포함될 경우 개기공률이 14%까지 높아졌다. 그러나 3.0 중량분율 이상으로 첨가되는 경우 MgO 첨가량이 늘어날수록 개기공률이 감소하는 경향성을 나타내었으며 6.0 중량분율의 경우는 ZrO_2 의 경우의 수준까지 감소되었다. 따라서 MgO 의 미량 첨가는 개기공 형성에 양호한 효과를 부여하지만 이 역시 흡음제로서 작용할 수 있는 개기공을 형성하기에는 적절한 첨가물이 될 수 없음을 알 수 있었다.

3.1.3. 개기공 형성에 대한 Al_2O_3 첨가의 영향

Figure 4는 폐 LCD 패널로부터 회수된 폐 붕규산유리를 대상으로 Table 1에 나타난 바와 같은 발포조건을 적용하며 추가적인 첨가물로서 Al_2O_3 를 폐 붕규산유리 100 g에 대한 중량분율로서 1.0부터 6.0까지 함량을 달리하여 발포시킨 발포체의 개기공률을 조사한 것이다. Figure 4에서 나타난 바와 같이 첨가되는 Al_2O_3 는 ZrO_2 나 MgO 의 경우에 비해 상대적으로 효과적인 개기공 형성제로 작용함을 알 수 있었다. Al_2O_3 첨가량이 1.0 중량분율일 경우 개기공률 12%에서 4.0 중량분율일 때는 개기공률 25% 이상 높아짐을 확인할 수 있었다. 유리화 과정에서 수식제로 작용할 수 있는 MgO 에 비해 Al_2O_3 첨가는 오히려 용융상태의 유리질의 점도 상승에 기여할 것으로 기대되는 Al_2O_3 첨가가 그 량이 높아짐에 따라 개기공률이 높아지는 결과를 나타내었다. 이러한 결과에 대해 Al_2O_3 첨가는 용융된 유리상태의 점도 강하를 유발하여 개기공 형성을 유도하였다고 보기보다는 발포과정에서 기체의 팽창 배출 이후 형성된 개기공이 용융상태의 유리질에서 쉽게 붕괴될 수 있으나 Al_2O_3 존재는 용융 상태 유리질의 응고과정에서 형성된 개기공의 붕괴를 억제할 수 있는 점성을 유지 시켜줌으로써 결과적으로 높은 개기공률을 얻게 된 것으로 판단된다. 그러나 이 또한 과량으로 첨가되는 경우 ZrO_2 나 MgO 의 경우와 같이 발포화 초기단계의 개기공형성에 장애를 줄 수 있는 것으로 Al_2O_3 첨가량이 5.0 중량분율 이상의 경우 개기공률이 4.0 중량분율의 경우 보다 낮은 값을 나타내었다. 이는 Al_2O_3 첨가량 5.0 중량분율 이상의 조건에서 발포화를 진행하는 경우 발포화 시간을 늘려도 발포화가 잘 이루어지지 않는 결과는 발포화 기구를 고려한 측면에서 일치하는 결과로 판단된다. 따라서 Al_2O_3 첨가는 개기공 형성에 영향을 주는 첨가제로 작용할 수 있을 뿐만 아니라 발포과정에서 발포체의 차원적인 안정화 및 최종 발포체의 기계적 특성에도 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

3.1.4. 개기공 형성에 대한 B_2O_3 첨가의 영향

Figure 5는 폐 LCD 패널로부터 회수된 폐 붕규산유리를 대상으로 Table 1에 나타난 바와 같은 발포조건을 적용하며 추가적인 첨가물로서 B_2O_3 를 폐 붕규산유리 100 g에 대한 중량분율로서 1.0부터 8.0까지 함량을 달리하여 발포시킨 발포체의 개기공률을 조사한 것이다. B_2O_3 는 본질적으로 유리의 구성 산화물이므로 점도에 영향을 미칠 수 있으며 그 결과 점도변화에 따라 개기공률을 높일 수 있다. 또한 용융된 유리질 시료의 상태조작을 통해 기공을 제어할 수 있을 것으로 예측되는 첨가물이다. 특히 B_2O_3 첨가는 유리화 과정에서 유리의 연화점을 낮게 하고 1,000 °C에서 증기압이 나타나 발포소재에서 발생하는 기체이외 발포화에 따른 영향을 미칠 것이며 이에 따

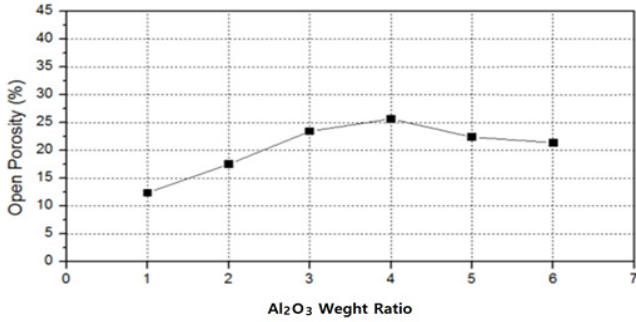


Figure 4. Effect of Al₂O₃ addition on the formation of opened pore in the borosilicate foamed body.

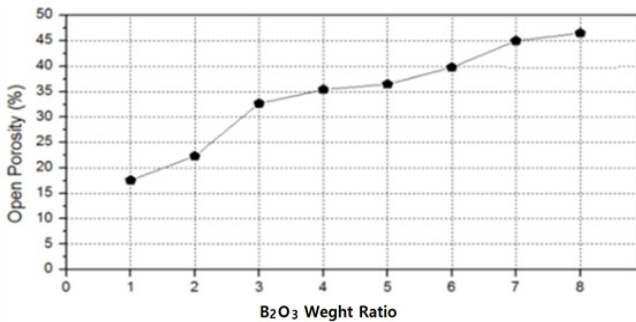


Figure 5. Effect of B₂O₃ addition on the formation of opened pore in the borosilicate foamed body.

라 다른 기공의 형태가 나타날 수 있는 바 이에 대한 구체적이고 세밀한 검토가 필요하다.

Figure 5에 나타난 바와 같이 B₂O₃의 첨가는 붕규산유리발포체 내 개기공 형성에 매우 효과적임을 알 수 있다. B₂O₃의 첨가량이 증가됨에 따라 개기공률도 높아졌으며 첨가량 6.0 중량분율의 경우 개기공률이 40% 이상 높아졌다. B₂O₃의 첨가량이 증가함에 따라 개기공률이 선형적으로 증가되는 경향성은 발포체의 단면을 관찰한 Figure 6에서 확인할 수 있다. Figure 6은 B₂O₃의 첨가량을 달리하여 얻어진 붕규산 유리 발포체의 단면 사진이다. Figure 6에서 볼 수 있는 바와 같이 붕규산유리발포체는 B₂O₃의 첨가량이 증가됨에 따라 개기공의 형성 과정이 폐기공속의 기체가 팽창되어 확장되는 메커니즘에 의해 이루어지는 것을 보여주고 있다. 따라서 B₂O₃의 첨가는 개기공의 조절의 핵심적인 역할을 하며 이 첨가량에 따라 발포체내의 개기공이 조절될 수 있음을 보여준다. 그러나 개기공률을 높이기 위해 B₂O₃의 무조건적인 첨가는 바람직하지 않은 것으로 보인다. 왜냐하면 일정량 이상의 B₂O₃ 첨가는 용융된 유리시료 내 기공의 크기 및 형태를 불균일하게 만들 수 있으며 또한 개기공의 크기 증가는 곧 붕규산유리발포체의 기계적 강도 약화로 이어져 흡음재로서의 상품 가치가 크게 떨어질 수 있다. 더구나 재료로서의 B₂O₃ 가격도 싸지 않아 과량의 첨가는 제품의 생산 경제성에 문제를 야기한다. 따라서 이러한 취약점을 보완하여 높은 개기공률을 유지하되 균일한 기공크기 및 형태를 가지는 붕규산유리발포체의 제조 조건에 중점을 두어야 할 것이다.

3.1.5. 개기공생성에 미치는 Al₂O₃와 B₂O₃ 혼합 첨가제의 영향

B₂O₃의 첨가는 개기공의 형성에 핵심적인 역할을 하며 이 첨가량에 따라 개기공률이 조절될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 개기공의 증가는 폐기공만으로 구성된 붕규산유리발포체

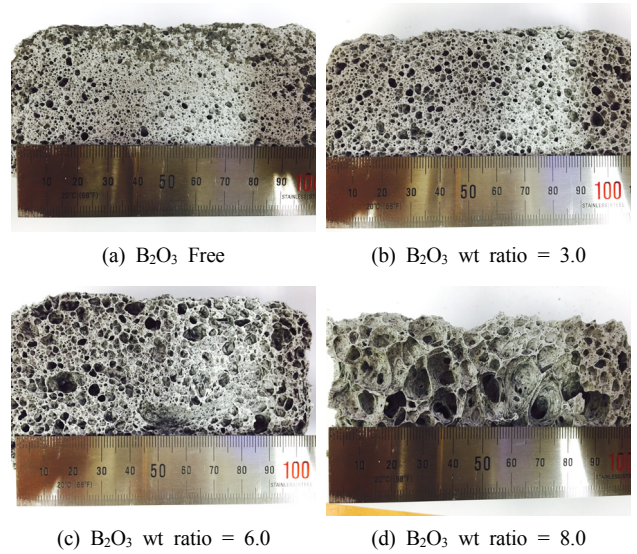


Figure 6. Pore structure formation behavior according to amount of B₂O₃.

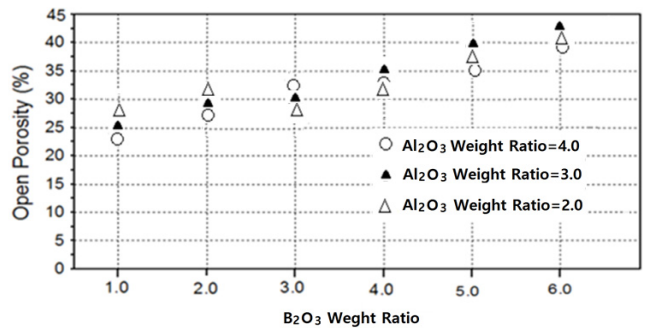


Figure 7. Effect of both B₂O₃ and Al₂O₃ addition on the formation of opened pore in the borosilicate foamed body.

에 비해 용융된 유리 시료 내 개기공의 크기 및 형태가 불균일하게 형성될 수 있으며, 개기공의 크기 증가는 곧 붕규산유리발포체의 기계적 강도 저하를 초래할 수 있게 된다. 실제 흡음특성을 지닌 붕규산유리발포체는 화력발전소 연돌의 라이닝제로 사용하기에 붕규산유리 자체의 본질적인 높은 부식성 등으로 최적의 특성을 가지고 있지만 연돌을 통과하는 빠른 유속의 배기가스에 의해 발포체의 급속한 마모화를 초래하게 된다. 그러므로 특히 연돌의 라이닝제로 사용하는 흡음특성을 지닌 붕규산 유리 발포체는 기계적 강도가 높지 않으면 취성화되어 흡음재로서의 상품 가치가 크게 떨어지게 된다. 본 연구에서는 이러한 점의 보완을 위해 Al₂O₃와 B₂O₃를 혼합하여 첨가함으로써 점도 및 용융상태 조작에 의해 개기공을 증대시키며 아울러 개기공화로 인한 기계적 강도 저하를 막을 수 있도록 하였다. Figure 7은 Al₂O₃의 첨가량을 앞서 B₂O₃의 첨가 시 개기공률이 증대되는 조건인 무게비 2.0 이상 4.0 이하의 조건 각각에 대해 B₂O₃의 첨가량을 변화시키며 발포시킨 발포체의 개기공률을 조사한 결과이다.

조사된 Al₂O₃의 조건하에서 B₂O₃의 첨가량이 증가할수록 어느 경우에서나 개기공이 증가하는 경향을 나타내었으나 B₂O₃만을 첨가하는 경우에 비해 Al₂O₃를 함께 첨가하는 경우는 기공의 크기 및 개기공도가 감소하였다. 또한 예상할 수 있는 바와 같이 B₂O₃ 성분의 존재하에 Al₂O₃의 양이 증가함에 따라 개기공률이 주어진 범위 내에서 증가

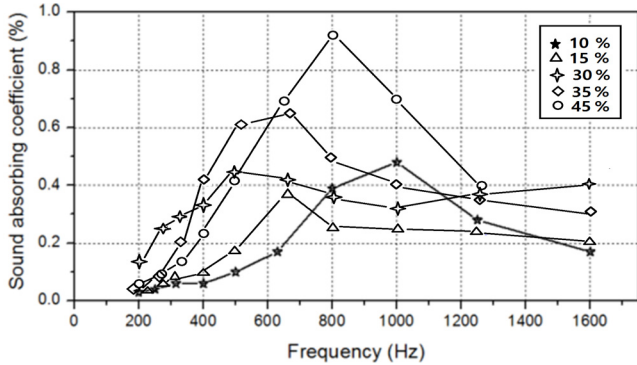


Figure 8. Sound absorbing behavior of borosilicate foamed glass body according to various frequency conditions.

하는 경향을 나타내었다. 또한 B₂O₃의 혼합비율을 높여준 결과 Al₂O₃만 첨가하였을 경우 보다 개기공률이 증가하였다. 이는 Al₂O₃만 첨가할 경우 점도가 너무 높아져 더 이상 개기공률이 증가하지 않았지만 B₂O₃의 추가적인 첨가로 인한 점도 강하로 폐기공의 막의 표면장력이 낮아져 기체의 배출이 용이해진 까닭으로 이해된다. 또한 반대로 B₂O₃만 다량 첨가하였을 경우 불균일한 형태의 기공이 형성되었지만 Al₂O₃의 혼합첨가로 인한 점도증가로 인해 균일한 형태의 기공이 형성되었다. 이러한 균일 기공의 형성은 전체적으로 발포체의 기계적 강도를 유지할 수 있게 하는 바 개기공 형성으로 인한 취성이 억제될 수 있게 된다. 따라서 Al₂O₃와 B₂O₃ 혼합 첨가로 인해 상호보완적인 효과로 개기공의 형성과 함께 기계적 강도도 함께 유지할 수 있는 흡음기능성을 갖는 붕규산발포유리의 제조가 가능함을 확인하였다. 이를 위한 Al₂O₃와 B₂O₃ 혼합사용 조건은 붕규산유리 100 g에 대한 B₂O₃의 첨가는 무게비로 5.0~6.0, Al₂O₃의 첨가는 무게비 3.0 조건의 조건이 적절하며, 이 조건의 경우 붕규산유리발포체 내의 개기공도는 35% 이상에 이를 수 있으며, 개기공이 균일하며 기계적 강도도 우수한 붕규산유리발포체가 제조될 수 있었다.

3.2. 기공률에 따른 흡음률

Al₂O₃와 B₂O₃ 두 성분을 복합적으로 첨가하는 경우 상호보완적으로 효과적인 개기공의 형성과 함께 기계적 강도도 함께 유지할 수 있는 흡음기능성을 갖는 붕규산유리발포체의 제조가 가능함을 확인하였다. 그러나 붕규산유리로 이루어진 붕규산유리발포체 내의 이러한 개기공의 형성이 흡음특성으로 연결되는가에 대해서는 제조된 발포체에 대해 직접적으로 흡음 측정을 통한 확인이 필요하다. 흡음특성은 개기공의 크기와 모양 형태에 따라 다양한 주파수 영역대에서 서로 다른 흡음능력이 나타날 수 있다. 이러한 흡음 거동은 발포체 내에 형성된 개기공의 구조특성에 기인하는 것으로 예측될 수 있으며 본 연구에서는 그중 개기공률이 흡음특성에 있어 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 바, 본 연구에서 제조된 다양한 개기공률을 갖는 붕규산유리발포체에 대해 각각의 개기공률에 따른 흡음능능을 시험하였다. Figure 8은 앞서 진행된 개기공을 갖는 붕규산발포체 제조 과정에서 얻어지는 발포체 시료들로부터 개기공률 각각 10, 15, 30, 35% 및 45% 갖는 붕규산유리발포체를 선정하여 이들을 대상으로 KS F 3503:2012에 따라 흡음시험을 실시한 결과이다. 본 연구에서 흡음능시험은 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 흡음시험을 위한 시료를 제작한 후 모두 공인시험기관인 한국의류시험연구원 산업환경연구센터(KATRI)에서 의뢰하여 공동으로 진행하였다. 시험 방법인 KS F

3503:2012에 따른 흡음시험은 수직입사흡음 시험이며 약 직경이 90 mm이며 두께가 30 mm인 붕규산유리발포체를 시험에 사용하였다.

일반적으로 재료가 비록 다공질형태로 존재한다고 하여도 개기공률이 15% 이하로 낮은 경우는 우리가 기대하는 흡음재료의 흡음률을 갖지 못하였다. 이는 개기공률이 낮으면 입사하는 음향이 그만큼 틈속의 벽과의 마찰로 인해 손실되는 에너지 값이 작아져 흡음률 또한 감소하기 때문이다. 따라서 개기공률이 높을수록 흡음률이 증가하는 경향을 갖는다. 본 연구에서 제조되는 개기공을 갖는 붕규산유리발포체의 개기공률 변화에 따른 흡음 특성은 Figure 8에 나타난 바와 같다. 전체적으로 개기공률이 높아짐에 따라 소리의 진동수에 따라 차이가 있으나 흡음률이 높아지는 경향을 나타내었다. 또한, 모든 개기공률의 조건에 관계없이 공통적으로 음의 일정 진동수에 이르기까지 진동수가 높아짐에 따라 흡음률이 높아져 최고점에 이른 후에 그 이상 진동수 조건에서는 진동수가 많아짐에 따라 흡음률이 감소하는 경향성을 나타내었으며 이러한 변곡적 현상은 개기공률이 높을수록 뚜렷하게 나타났다. 먼저 개기공률 10%를 갖는 붕규산유리발포체의 경우를 보면, 전체적인 경향성으로 흡음률은 대체적으로 주파수와 비례하여 높아지다가 약 1000 Hz에서 흡음률이 44%로 최고값을 나타내었다. 그리고 이후 주파수가 높아짐에 따라 조금씩 감소하는 경향이 보였다. 개기공률이 15%일 경우 흡음률은 개기공률 10%의 경우와 마찬가지로 주파수가 높아짐에 따라 흡음률이 증가하다가 620 Hz 영역에서 가장 높은 흡음률 40%를 나타내었으며, 800 Hz에서 1600 Hz에서는 흡음률이 25% 정도의 일정한 값을 나타내었으나 이 경우 최고 흡음률은 개기공률 10%에 비해 주파수 영역은 다르지만 상대적으로 낮게 얻어졌다. 즉 붕규산유리발포체의 경우 흡음의 특성이 단순히 개기공률에만 이루어지는 것이 아님을 보여주는 결과이다. 개기공률이 30%일 경우 흡음률을 개기공률 10% 또는 15%의 경우보다 높아짐을 확인할 수 있었다. 그러나 진동수 변화에 따른 흡음특성은 조사된 다른 개기공률 조건을 가진 발포체와는 달리 뚜렷한 변곡점을 나타내어 없이 다양한 주파수 영역에서 비슷한 흡음률을 나타내었다. 즉 개기공률 10%의 경우 주파수 1000 Hz에서, 15%의 경우 주파수 620 Hz에서 각각 특정 주파수에서 가장 높은 흡음률을 나타내는 형상과는 달리 측정된 다양한 주파수 영역에서 비교적 비슷한 흡음률을 나타내었다. 이러한 흡음 특성은 앞서 언급한 바와 같이 형성된 개기공만에 의해 흡음특성이 좌우되는 것이 아니라 개기공의 구조적 특성에도 영향을 받고 있음을 보여주는 것이라 판단된다.

개기공률이 35%일 경우로서 최고 620 Hz 지점에서 67%까지 가장 높은 흡음률을 나타내었다. 그리고 이후 주파수 영역대가 높아질수록 흡음률은 떨어졌지만 고주파 영역에서도 약 40% 흡음률을 나타내었다. 끝으로 개기공률이 45%인 발포체의 경우도 검토된 대부분의 경우와 마찬가지로 주파수가 점차 높아짐에 따라 흡음률이 올라가는 경향성을 보이고 있지만 개기공률 35%의 발포체에서는 800 Hz에서 흡음률이 급격히 떨어지는 것과는 달리 최대 92%까지의 흡음률을 보이고 있다. 이상의 이러한 결과는 개기공률이 높을수록 전체적인 흡음능력이 향상되는 경향성에 일치되는 결과로 볼 수 있으며 주파수가 600~800 Hz 영역에서 가장 높은 흡음률을 나타내었다. 이상의 결과들로 볼 때 첫째, 붕규산유리발포체에 개기공이 형성되는 경우 효과적으로 흡음특성을 나타내는 바 흡음특성을 갖는 발포유리로 사용할 수 충분한 기능성을 확인할 수 있으며, 둘째, 흡음률은 총괄적으로 개기공률이 높아짐에 따라, 음의 진동수가 높아짐에 따라 흡음률이 높아지는 흡음 특성을 나타내는 발포체가 될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 흡음률이 최고점을 나타내는 경향성은 개기공률의 변화와 선형적으로

Table 2. Physical Properties for Foamed Borosilicate Glass with Characteristics of Sound Absorption

Test (unit)	Measuring Method	Results	Commercial products
Linear Expansion Coefficient ($\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	ASTM	12.9×10^{-8}	
Density (kg/m^3)	ASTM	217	210~350
Compression Strength (N/cm^2)	ASTM	298	50
Bending Strength (N/cm^2)	ASTM	55	20

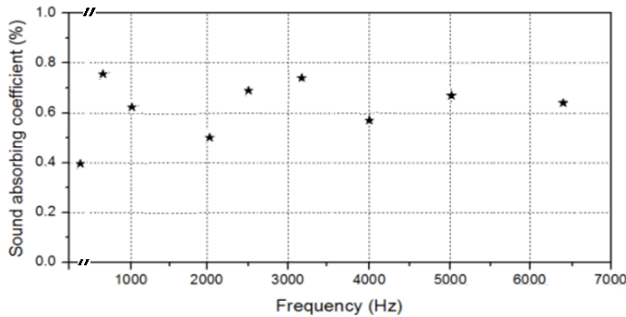


Figure 9. Sound absorbing behavior of borosilicate foamed glass body with 45% open porosity in the range of high frequency noise.

일치되지 않으며 이는 개기공의 직경, 개기공 거리, 기공의 형태 등 개기공 자체의 구조적 특성에 기인할 수 있는 것으로 판단된다.

3.3. 흡음성을 갖는 붕규산발포유리블럭의 성능 평가

붕규산유리발포체의 개기공률에 따른 흡음률 및 흡음특성이 예측됨에 따라 본 연구에서는 보다 고품질의 흡음특성을 갖는 붕규산유리발포체의 제조가능성을 검토하기 위해서 앞서 첨가물에 따른 개기공률 변화에 따른 흡음률 변화조건을 개기공률 45%가 얻어지는 조건으로 확장하여 발포체를 제조하고 그 발포체의 흡음률 기계적 특성을 조사하였다. 이 시험을 위한 시료는 발포체의 기계적 특성분석을 함께 진행되어야 하는 바 시험실규모의 크기인 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 거푸집을 사용하지 않고 이를 scale up하여 $350 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 크기의 거푸집을 사용하는 발포공정에 의해 제조한 것이다.

3.3.1. 발포블럭의 흡음재로서 성능 평가

성분변화에 따른 개기공률 생성 조건을 확장하여 개기공률 45%의 조건이 얻어질 수 있는 조건인 Al_2O_3 첨가량을 무게비 2.0 및 B_2O_3 첨가량을 무게비 6.0의 조건이 되도록 각각 첨가하여 45%의 개기공률을 갖는 붕규산유리발포체를 제조하고 그 특성을 조사하였다. 이에 따라 Figure 9는 scale up 실험을 통해서 제조된 개기공률 45%를 갖는 붕규산유리발포체를 고주파대역에서 흡음률을 측정된 결과이다. 흡음률은 측정된 주파수 범위인 1000에서 6500 Hz 범위에서 평균 65% 정도로 측정되었다. 전체적으로 흡음률을 조사한 결과 45% 이상의 개기공률을 가질 경우 기존 흡음제[17]와 정성적인 비교를 하여도 본 연구에서 제조된 붕규산유리 발포블럭이 흡음재로서 사용될 수 있는 충분한 가능성이 있는 것으로 기대된다. 상기한 바와 같이 다공질성 재료의 흡음 특성은 재료의 두께, 재료의 통기성 기공률, 튼의 형태와 배열, 재료 뒷면의 형태, 주파수 등에 따라서 달라진다. 재료의 두께가 두꺼울수록 중고음역에서 비교적 큰 흡음률 특성을 가지고 있지만 저음역에서는 다소 낮은 흡음률을 보인다. 그러므로 재료의 면적 및 시

공형태를 다르게 하여 현재까지 사용되어왔던 붕규산 발포유리의 두께를 50 mm로 규정하고 있는바 이 두께로 연돌에 라이닝 하여 설치하면 저음까지 흡음이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 상기 고찰한 바와 같이 본 연구에서 개발된 폐 LCD 판넬로부터 발생되는 폐 붕규산유리를 재활용하여 제조된 개기공을 갖는 붕규산유리발포체는 화력발전소 연돌에서와 같은 고진동수의 소음에는 물론 저진동수에 이르기까지 매우 효과적인 소음제거제로서의 성능을 발휘할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3.2. 흡음성을 갖는 붕규산발포체의 기계적 특성분석

Table 2는 앞서 scale up 실험을 통해 얻어진 개기공률 45%의 조건을 갖는 붕규산유리발포체에 대한 기계적 특성을 조사한 것이다. 제조된 붕규산 유리 발포체에 대한 기계적 특성분석은 결과의 신뢰도를 확보하기 위해서 외부분석기관인 한국건설생활환경시험원에 의뢰하여 측정하였다. 기계적 특성으로 조사된 주요 항목은 종래 흡음 특성을 갖는 유리발포체가 기계적 물성이 낮아 연돌에 적용이 어려웠던 점을 고려하여 밀도, 굽힘강도 및 압축강도 등이다. 시험결과 밀도는 $0.21 \text{ g}/\text{cm}^3$ 이하(상용 사용 목표치 : $0.2\sim 0.35 \text{ g}/\text{cm}^3$)이었으며, 굽힘강도는 $55 \text{ N}/\text{cm}^2$ 이상(상용 사용 목표치 : $20 \text{ N}/\text{cm}^2$), 압축강도 $298 \text{ N}/\text{cm}^2$ 이상(상용 사용 목표치 : $50 \text{ N}/\text{cm}^2$)로서 기계적 물성치는 상용 사용의 목표치를 상회하는 매우 우수한 기계적 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 현재 상용제품으로서 화력발전소 연돌에 부분적으로 설치되어 사용되고 있는 흡음제용 붕규산유리발포체의 문제점이 기계적 물성이 낮아 내구성의 문제로 인해 특별한 대안이 없음에도 그 사용이 기피되고 있는 문제점을 고려할 때, 본 연구에서 폐 LCD 판넬 유리를 재활용하여 개발된 붕규산유리발포체는 현재의 당면 문제를 해결할 수 있는 방안이 될 것으로 판단된다. 이는 기존의 붕규산유리발포체의 경우와는 달리 LCD 판넬용 유리는 그 구성성분면에서 알루미늄을 함유하는 붕규산유리라는 점이다. 즉 알루미늄 함유 붕규산유리(alumino-borosilicate glass)라는 점에 원인이 있는 것으로 사료된다. 이는 기존의 연돌용 흡음제로 사용된 붕규산유리발포체의 문제점을 개선하는 좋은 방안으로 판단되며 아울러 폐 LCD 판넬의 훌륭한 재활용 방안이 될 것이다.

4. 결 론

사용 후 발생되는 폐 LCD 판넬로부터 회수된 폐붕규산유리를 이용하여 양호한 흡음특성을 가지며 아울러 매우 우수한 기계적 특성을 가지는 붕규산유리발포체를 제조할 수 있는 공정이 아래와 같이 제안될 수 있으며 이는 폐 LCD 판넬 및 폐붕규산유리의 효율적인 재활용 방안의 마련에 기여할 것으로 판단된다.

1) 보온단열 기능을 발현하는 폐기공을 갖는 붕규산발포유리제조공정에서 발포용 원료유리분말에 기공조절제로서 B_2O_3 및 Al_2O_3 를 첨가함으로써 개기공을 갖는 붕규산발포체가 형성되며 이 개기공을 갖

는 붕규산발포체는 양호한 흡음 특성을 나타낸다.

2) 개기공이 형성된 붕규산유리발포체는 개기공률이 높아짐에 따라 흡음률이 높아지며, 음의 진동수가 높아짐에 따라 흡음특성이 높아지는 특성을 나타낸다.

3) 기공조절제 B₂O₃ 첨가량이 증가됨에 따라 개기공률도 증가되어 지나 일정 이상의 기공률은 발포체의 기계적 특성의 저하를 유발하므로 이 경우 기계적 물성의 보완은 Al₂O₃의 첨가로 이루어진다. 흡음 성능 부여를 위한 열려진 기공도와 기계적 물성의 유지를 위해서는 B₂O₃의 첨가량은 각각 원료유리분말 100 g에 대한 무게비로서 6.0, Al₂O₃의 첨가량은 무게비 2.0이 적절하다. 이 경우 발포체인 탄소첨가량 및 발포보조제로서 Na₂CO₃, Ca₂CO₃, Na₂SO₄ 첨가량의 조건은 변함 없으며 발포소성온도 열처리조건 등 제반조건은 폐기공의 붕규산 발포체 제조조건과 동일하다.

4) 상기조성의 원료유리 혼합물을 발포소성함으로써 45%의 개기공을 갖는 발포체가 형성되어 측정된 주파수 범위인 1000에서 6500 Hz 범위에서 흡음률이 평균 0.65 이상 측정되었다. 이러한 흡음 조건을 갖는 붕규산유리 발열체는 밀도는 0.21 g/cm³ 이하이었으며, 굽힘 강도는 55 N/cm², 압축강도 298 N/cm² 이상으로서 우수한 기계적 특성을 나타내었다.

감 사

본 연구는 단국대학교 2015년 교내 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 지원에 감사드립니다.

References

- G. C. Stevens and M. Goosey, Materials used in manufacturing electrical and electronic products. In: R.E. Hester and R.M. Harrison, (des.). *Electronic Waste Management*, 40-74, Royal Society of Chem., Cambridge, UK (2008).
- B. Kopacek, ReLCD : Recycling and re-use of LCD panels, *Proceedings of 19th Waste Management Conference of the IWMSA (Waste Con 2008)*, October 9-11, Durban, South Africa (2008).
- S. Kiyoshi and N. Tadashi, Method for treating waste liquid crystal panel, JP Patent 3 589 936 (2004).
- K. Yamabuchi, T. Komoda, K. Kaida, A. Izumi, T. Horiuchi, S. Takabe, and T. Katayama, Method and device for parting glass substrate, liquid crystal panel, and liquid crystal manufacturing device, PCT/JP2002/011540 (2003).
- H. Takatsu, Investigation activity and data on safety of liquid crystal materials, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **364**, 171-186 (2001).
- R. Martin, B. Simon-Hettich, and W. Becked, Safe recovery of liquid crystal displays (LCDs) in compliance with WEEE, *Electronics Goes Green 2004*, 147-151 (2004).
- R. Martin, Use of liquid crystal displays and methods for their utilization, EU. Patent 2 082 817(2009).
- LCD Industries Research Committee, Japan Electronics and Information Technology Industries Association, Recycling of LCD Panel, <http://home.jeita.or.jp/device/lirec/english/enviro/recycle.htm>.
- T. Honma, T. Ubusawa, T. Furuyama, A. Morikaku, and K. Tanaka, Process for recycling useful metal, JP Patent 2,241,381 (2008).
- C.-T. Lee, The recycling of waste glass: Manufacture of foamglass and its prospect, *Korean Ind. Chem. News*, **3**, 1-15 (2000).
- C.-T. Lee, Production process of foamed glass by compressive shaping, *Appl. Chem. Eng.*, **24**(3), 239-246 (2012).
- J. M. Kim, C.-T. Lee, Preparation of foamed glass block from recycled soda-lime-silicate glasses by chemical composition control, *Appl. Chem. Eng.*, **24**(4), 382-390 (2012).
- C.-T. Lee, J.-S. Lee, S.-Y. Lee, and M.-H. Jang, Physical and chemical properties of waste LCD glass as raw materials for the production of foamglass, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **20**(3), 266-272 (2009).
- C.-T. Lee, T.-M. Park, and J.-M. Kim, Foaming process of waste LCD glass for the recovery of valuable materials from waste LCD panel, *Appl. Chem. Eng.*, **23**(2), 195-203 (2012).
- C.-T. Lee, Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD, *J. Ind. Eng. Chem.*, **19**(6), 1916-1925 (2013).
- C.-H. Oh, Y.-K. Park, and C.-T. Lee, Preparation of feed glass materials for producing a foamed borosilicate glass body from waste LCD panel, *Appl. Chem. Eng.*, **27**(4), 371-379 (2016).
- DiSeven, Inc., Sound absorbing coefficients of materials, http://www.diseven.co.kr/bbs/board.php?bo_table=nosound&wr_id=13.