

HEPA 여과소재를 용융 처리하여 제조한 붕규산 유리매질의 특성

Characteristics of Borosilicate Glass Media Fabricated by Melting HEPA Filter Media with Inorganic Additives

김 인태, 김 환영, 박 근일, 박 현수, 김 준형
한국 원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

원자력 시설에서 공조시스템의 최종 정화장치로 사용되고 있는 고성능 공기여과기의 여과소재에 각종 무기첨가제를 혼합하여 다양한 유리매질들을 제조하고 이들의 물리화학적 특성을 비교 분석하여 폐여과소재의 안전 처리 또는 알파폐기물용 유리고화 매질로의 활용 가능성을 알아보았다. 유리매질의 특성으로 밀도, 미세경도, 열팽창성, 결정상 및 단기 침출특성을 시험하였다. 제조한 매질들은 대부분이 무정질의 유리체를 형성함을 확인하였고, PCT법을 이용한 단기 침출시험시 모든 유리매질이 비교용 EA 유리보다 내침출성이 우수하였다. 밀도, 미세경도 및 열팽창계수는 외국의 고준위용 유리매질과 비슷한 값을 가졌다.

Abstract

HEPA filters are widely used in the nuclear fields as a final off-gas cleaning unit. To assess the applicability of vitrification technology either to treat used filter media or to produce borosilicate glass medium for the solidification of alpha-contaminated wastes, various waste glasses of different compositions were fabricated by melting mixture of HEPA filter media and inorganic additives. Physicochemical properties such as microhardness, density, thermal expansion, and short-term leaching behavior were characterized. XRD analysis showed that amorphous glasses were formed for a wide range of mixing ratio. Leach resistances, measured by PCT-B leach tests, were superior to that of EA (Environmental Assessment) glass. Other properties were similar to those of glass media used for the vitrification of high-level radioactive wastes in foreign countries.

1. 서 론

원자력 시설의 환기계통 및 배기체 처리계통에는 최종 정화장치로서 고성능 공기여과기 (high efficiency particulate air filter, 이하 'HEPA 여과기'로 칭함)가 주로 사용되고 있다. HEPA 여과기의 특성 및 여과소재의 처리기술 현황은 다음과 같다.^{1,2,3,4}

HEPA 여과기는 보통 프레임 (목재 또는 스테인레스강), 여과소재 및 분리재로 구성되어 있다. 목재프레임은 0.75" 두께의 합성목 (particle board)을 페놀수지로 접합한 것이다. 근래에 들어와서는 스테인레스강을 많이 사용하는데, 사용후에는 여과소재를 분리한 후에 재사용 하기도 한다. 여과소재는 1970년 대에는 알루미늄 실리케이트 유리섬유를 사용하였으나, 요즘에는 붕규산 유리 (borosilicate glass) 섬유가 대부분을 차지한다. 한편 분리재는 여과면적을 크게 하기 위해 여과소재를 층을 쌓아서 놓을 때 여과소재 사이에 넣는 것으로서 예전에는 crysolite 석면재 ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)를 사용하였으나 현재는 주로 알루미늄 판으로 제조한다. 기타 물질로는 여과소재나 가스켓을 프레임에 부착하기 위해 접착제 및 방수제를 사용한다.

현재 사용된 HEPA 여과기는 성분별 분리없이 압축처리하여 드럼에 넣은 후 콘크리트 등으로 밀봉하는 처리방식을 많이 사용한다. 미국 Rocky Flat 연구소에서는 1970년대에 알루미늄 실리

케이트 계통의 여과소재 및 crysolite 석면 분리재를 불밀하여 분쇄한 후 1,050°C에서 용융시켜 유리고화 처리하는 실험을 실시하였다. 별도로 첨가제를 넣지 않은 경우에는 용융되지 않은 고형체(non-molten hard block)가 형성되었으나, 여과소재 70wt%에 첨가제 (B_2O_3 20wt%, Na_2O 10wt%)를 혼합하여 용융한 결과 성형이 가능할 정도로 쉽게 부을 수 있는 용체가 형성되었다. 고형물의 특성분석은 실시되지 않았다. 또한 HEPA 여과기의 직접적인 처리방법은 아니나 미국에서는 방사성 원소의 군사적 목적으로 사용할 때 또는 핵연료를 재처리할 때에 발생하는 HEPA 여과소재를 강산으로 녹여서 Pu 등의 원소를 회수하기 위한 연구를 많이 수행하였다.

본 연구에서는 고준위 폐기물을 유리고화 처리하는 외국 상용시설의 경우 현재 대부분이 고화용 유리매질로 붕규산유리를 사용하고 있으며, HEPA 여과기의 여과소재가 붕규산유리로 구성되어 있는 점에 착안하여 향후 사용후 핵연료 차세대관리 및 재활용과 관련된 시설의 배기체 처리 공정에서 발생할 것으로 예상되는 HEPA 여과소재를 안전처리 또는 고준위/알파오염 폐기물의 유리고화용 매질로의 활용 가능성 여부를 알아보았다.

2 실험

2.1. 실험재료의 특성

유리매질 제조연구에 사용된 HEPA 여과소재는 국내의 HEPA 여과기 전문제조업체에서 직접 인수한 사용하지 않은 새 것 (Borosilicate Glass 재질, Model HB 5306)으로서 기공은 0.33~10 μm 였다. 습식법으로 무기물 조성을 분석한 결과 미국 Savannah River 연구소의 DWPF 시설에 사용되는 새 HEPA 여과소재에 비해 Si (약 6wt%), Na (약 2wt%), Mg (0.5wt%)의 함량이 약간 낮았고 B, Al, Ba, Ca, Zn이 1.0~2.5wt% 정도 높았으나 전체적으로 HEPA 여과소재의 제조 조성 범위 내에 있었다. 유리 조성중 CaO, MgO, Al_2O_3 들은 주로 액상온도, 작업온도에서의 점도조절, 내구성 보완 등을 위해 백운석 ($CaCO_3$, $MgCO_3$)이나 알루미나 (Al_2O_3)의 형태로 미량 첨가된다. 특히 Ca성분의 경우에는, Si와 용제(flux) 만으로도 용융은 용이하게 되나 만들어진 유리가 물에 녹을 정도로 내수성이 없으므로 내수/내구성을 향상시키기 위하여 첨가된다. 또한 Zn도 화학적 내구성의 증대 및 팽창성을 낮추는 효과를 갖는다.^[6]

첨가제는 유리의 망목구조 형성이온 및 수식이온들의 무기화합물로서 특급시약류 (최저순도 98% 이상)를 사용하여 중금속 및 기타 불순물이 가능한 적게 혼입되도록 하였으며, HEPA 여과소재 분말과의 혼합 및 용융시 균질성을 유지할 수 있도록 미세분말 형태의 시약을 사용하였다. 첨가한 무기화합물중 Si, B, Zr, Al은 산화물 형태를, Na와 Li은 탄산염 형태를 사용하였다.

2.2. 유리매질의 제조 및 가공

HEPA 여과소재 분말에 첨가제의 종류와 혼합비를 변화시키면서 표 2-1과 같은 조성의 다양한 유리매질을 제조하였다. BG1R 계열은 HEPA 여과소재에 특정조성의 첨가제를 혼합한 것이며, BG2R은 BG1R중 B의 일부를 Al로, BG3R은 BG2R중 Si의 일부를 Zr로, BG4R은 BG3R중 Al의 일부를 Na로 대체한 경우이다.

유리매질의 제조절차는 다음과 같다. 표 2-1의 조성에 따라 여과소재 분말과 첨가제를 섞고 잘 혼합한 후 용융용 내열도가니에 넣는다. 미리 1,300°C로 유지시켜 놓은 전기로에 내열도가니를 넣고 약 2시간 30분 동안 가열, 용융시킨다. 용융물을 사각형 스테인레스강 형틀 (W15 x L150 x D20 mm)에 부어 성형시킨 후 서냉로에서 냉각시킨다. 서냉로의 온도는 550°C에서 5시간 유지후 자연냉각 되도록 제어하였다.

제조한 유리매질의 특성분석을 위한 시편은 다음과 같이 가공하여 제조하였다. 분말시편으로 가공할 경우에는, 유리매질을 disc mill로 미분쇄한 후에 체질하여 PCT 침출시험에 적합한 입도분포의 분말시료로 만든 후 표면을 에탄올로 세척하여 사용한다. 체질 후 남은 분말은 다시 disc milling 하여 XRD 및 EPMA 분석용 시료로 사용한다. 판상시편으로 가공할 경우에는, 제조한 유리매질을 저속 diamond saw를 이용하여 약 10 mm 두께로 절단하고 #150~#1,200 사포를 순차적으로 사용하여 표면을 매끈하게 1차 가공한 후 1 μm diamond paste로 polishing 한다. 표면에 묻어있는 미세분진을 제거하기 위해 초음파 세척기로 1차 세척하고 에탄올로 2차 세척한 후 110°C에서 건조시킨 다음 미세구조 분석과 기타 침출시험용 시편으로 사용한다.

Table 2-1. Chemical composition of base-glasses incorporating HEPA medium and additives

ID	BG1R5	BG1R6	BG2R5	BG2R6	BG3R5	BG3R6	BG4R5	BG4R6
Component	62,8	53,0	62,8	53,0	62,8	53,0	63,2	53,3
SiO ₂	0,5126	0,5241	0,5126	0,5241	0,4861	0,5031	0,4894	0,5058
B ₂ O ₃	0,1923	0,1757	0,1658	0,1547	0,1658	0,1547	0,1669	0,1555
Na ₂ O	0,1098	0,1058	0,1098	0,1058	0,1098	0,1058	0,1199	0,1137
Li ₂ O	0,0107	0,0085	0,0107	0,0085	0,0107	0,0085	0,0108	0,0086
CaO	0,0432	0,0408	0,0432	0,0408	0,0432	0,0408	0,0435	0,0410
MgO	0,0017	0,0020	0,0017	0,0020	0,0017	0,0020	0,0017	0,0020
Fe ₂ O ₃	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010	0,0009	0,0010
Al ₂ O ₃	0,0351	0,0417	0,0616	0,0626	0,0616	0,0626	0,0460	0,0503
ZrO ₂	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0269	0,0214	0,0270	0,0215
ZnO	0,0235	0,0279	0,0235	0,0279	0,0235	0,0279	0,0237	0,0281
BaO	0,0237	0,0281	0,0237	0,0281	0,0237	0,0281	0,0239	0,0283
K ₂ O	0,0192	0,0227	0,0192	0,0227	0,0192	0,0227	0,0193	0,0229
TiO ₂	0,0268	0,0213	0,0268	0,0213	0,0268	0,0213	0,0270	0,0214
ID	BG05	BG06	BG07	BG08	BG05R	BG06R	BG07R	BG08R
Component	80	80	70	50	82,8	82,0	71,9	51,9
SiO ₂	0,4939	0,5139	0,5172	0,5587	0,5113	0,5265	0,5314	0,5796
B ₂ O ₃	0,1803	0,1903	0,1990	0,2064	0,1866	0,1949	0,2045	0,2142
Na ₂ O	0,0823	0,0723	0,0632	0,0602	0,0809	0,0740	0,0650	0,0560
Li ₂ O	0,0500	0,0400	0,0450	0,0500	0,0210	0,0166	0,0187	0,0210
CaO	0,0353	0,0253	0,0371	0,0258	0,0365	0,0259	0,0381	0,0268
MgO	0,0025	0,0025	0,0022	0,0016	0,0026	0,0026	0,0023	0,0016
Fe ₂ O ₃	0,0013	0,0013	0,0011	0,0008	0,0013	0,0013	0,0012	0,0008
Al ₂ O ₃	0,0530	0,0530	0,0464	0,0332	0,0549	0,0543	0,0477	0,0344
ZrO ₂	0,0005	0,0005	0,0005	0,0003	0,0006	0,0006	0,0005	0,0004
ZnO	0,0355	0,0355	0,0311	0,0222	0,0368	0,0364	0,0319	0,0230
BaO	0,0358	0,0358	0,0313	0,0224	0,0371	0,0367	0,0322	0,0232
K ₂ O	0,0290	0,0290	0,0253	0,0181	0,0300	0,0297	0,0260	0,0188
TiO ₂	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003
ID	BG09	BG10	BG11	BG12	BG09R	BG10R	BG11R	BG12R
Component	50	60	35	30	52,9	62,8	36,9	30,9
SiO ₂	0,6087	0,5404	0,6536	0,6112	0,6442	0,5653	0,6896	0,6296
B ₂ O ₃	0,1314	0,1477	0,1370	0,2089	0,1391	0,1545	0,1446	0,2151
Na ₂ O	0,0702	0,0742	0,0641	0,0271	0,0633	0,0689	0,0534	0,0279
Li ₂ O	0,0750	0,0600	0,0650	0,0490	0,0321	0,0254	0,0278	0,0204
CaO	0,0158	0,0390	0,0111	0,0445	0,0167	0,0407	0,0117	0,0458
MgO	0,0016	0,0019	0,0011	0,0009	0,0017	0,0020	0,0012	0,0010
Fe ₂ O ₃	0,0008	0,0010	0,0006	0,0005	0,0009	0,0010	0,0006	0,0005
Al ₂ O ₃	0,0332	0,0398	0,0232	0,0199	0,0351	0,0416	0,0245	0,0205
ZrO ₂	0,0003	0,0204	0,0002	0,0002	0,0004	0,0213	0,0003	0,0002
ZnO	0,0222	0,0266	0,0155	0,0133	0,0235	0,0279	0,0164	0,0137
BaO	0,0224	0,0269	0,0157	0,0134	0,0237	0,0281	0,0165	0,0138
K ₂ O	0,0181	0,0217	0,0127	0,0109	0,0192	0,0227	0,0134	0,0112
TiO ₂	0,0003	0,0004	0,0002	0,0002	0,0003	0,0004	0,0002	0,0002

2.3. 특성 분석

제조한 유리매질의 특성을 알아보기 위해 내침출성 (PCT-B법), 밀도 및 미세경도, 열적 특성 (열팽창계수 및 전이온도) 및 결정상 분석 시험을 실시하였다.

침출시험은 단기가속법인 PCT-B 방법⁶⁾으로 2차 증류수를 침출제로 사용하여 90℃에서 7일간

실시하였다. 침출액으로 녹아나온 유리성분의 양은 ICP-MS로 정량 분석하여 구한 후 다음과 같은 식을 사용하여 침출속도 및 침출분율을 구하였다.

○ 침출분율 (Fraction Leached)

$$\text{Fraction leached} = M_{t_j} - M_{a_j} \quad (1)$$

○ 침출속도 (Leach Rate)

$$\text{Leach Rate} = M_{t_j} / (f_j \cdot SA \cdot t) \quad (2)$$

밀도는 침수법으로 측정하였다. 또한 집중된 외부의 기계적인 하중에 대한 대상물질의 강도를 나타내는 미세경도 (microhardness)는 Vicker's Microhardness 측정계 (CLARK Co., Model MHT 1 Knoop Indentor)로 측정하였다. Vicker's 경도계는 첨단각도가 136°인 등변의 피라미드형 다이아몬드로 대상물질에 힘을 가했을 때 나타나는 눌린 자국의 대각선 길이로부터 미세경도를 구하는 장치이다. 결정상 파악을 위한 X선 회절 (XRD ; X-ray Diffractometer) 분석은 일본의 Rigaku 기기를 사용하여 실시하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. HEPA 여과소재의 특성

HEPA 여과소재는 판상 (mat 형태)으로 되어 있으므로 bulk density가 낮아서 그대로 용융 실험에 사용할 경우에는 많은 부피를 차지하여 한번에 제조 가능한 유리매질의 양이 극히 적은 단점이 있기 때문에 열특성 분석실험을 통해 분말화 가능성을 알아보았다. 그림 3-1은 HEPA 여과소재의 열특성곡선을 나타낸 것으로 공기 분위기에서 10°C/min의 속도로 1300°C까지 승온한 후 이 온도에서 유지했을 때의 결과이다.

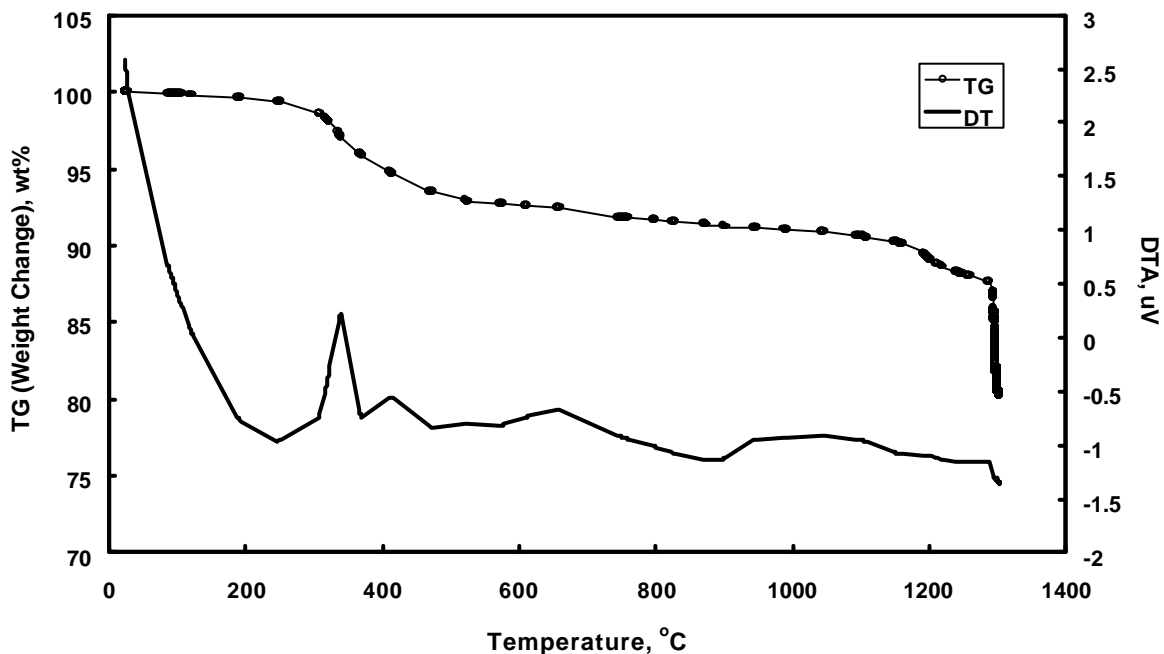


Figure 3-1. TG/DT analysis of new HEPA filter medium

HEPA 여과소재의 무게는 약 250~525°C 및 1100~1300°C (경과시간 225분)의 온도 범위에서 주로 감소하였다. DTA 곡선을 보면 250~525°C에서는 발열반응이 일어나면서 무게가 감소하는데 이는 여과소재에 포함된 polyamide 계통의 유기첨유재가 산화분해 반응을 일으키기 때문으로 판단된다. 상온에서 525°C까지 약 7.12%의 무게 감량이 있었으며 이후 1100°C까지는 미세하게

감량이 진행되었다. 1100℃ 이후에는 상당히 감량이 진행되었는데 DTA 곡선으로 보아 1000 ~ 1100℃ 사이에서 용융이 시작되는 것으로 판단되며 이후 총 10.34%의 감량이 있었고 최종무게는 초기의 약 80% 정도에서 안정화되었다.

여과소재가 열처리한 후에도 유리 특유의 무정질 (amorphous) 구조를 유지하는지 알아보기 위해 500℃에서 30분간 열처리한 여과소재를 대상으로 X선 회절분석을 실시하였다. XRD 분석은 여과소재가 열처리한 후에도 유리 특유의 무정질 (amorphous) 구조를 유지하는지 알아보기 위해 500℃에서 30분간 열처리한 여과소재를 대상으로 X선 회절분석을 실시하였다. XRD 분석은 Cu-α target을 사용하여 2θ가 20~80° 범위에서 주사속도 4°/min로 하였는데, 실험결과 특정 피크 (결정상)가 나타나지 않았다. 따라서 500℃에서 30분간 열처리하여도 여과소재는 무정질인 유리 특성을 그대로 유지함을 알 수 있었다.

위의 결과를 바탕으로 HEPA 여과소재의 부피를 줄이기 위한 열적 전처리는 500℃ 항온에서 30분간 가열하여 휘발분 및 유기물을 제거한 후 disc mill로 분쇄하여 분말화한 후 유리매질 제조 실험에 사용하였다.

3.2. 제조한 유리매질의 특성시험

3.2.1. X선 회절분석

유리매질을 대상으로 한 XRD 분석조건은 HEPA 여과소재 분석때와 같은데 2θ는 10 ~ 80° 범위에서 실시하였고 그 특성곡선의 일부를 그림 3-2에 나타내었다. 분석결과 그림 3-2의 BG11, 12과 같이 정상적으로 주조가 가능했던 매질들은 XRD pattern이 특정 피크가 없이 완만한 곡선을 이루므로 유리구조에서 관찰되는 전형적인 무정형 (amorphous)의 유리질이 형성되었음을 확인하였다. 균질하게 용융체가 형성되지 않았던 BG-11R과 12R은 주조가 가능했던 부분만을 채취하여 분말상으로 가공한 후 XRD 분석을 실시한 결과, BG12R은 무정질이었으나 BG11R은 단일 피크를 보였는데 피크를 해석한 결과 SiO₂/Al₂O₃ = 50/50인 aluminium silicate상으로서 유리화 반응이 완료되지 못했음을 알 수 있었다. 이는 반응온도가 용융에 필요한 온도보다 낮았기 때문으로 생각된다.

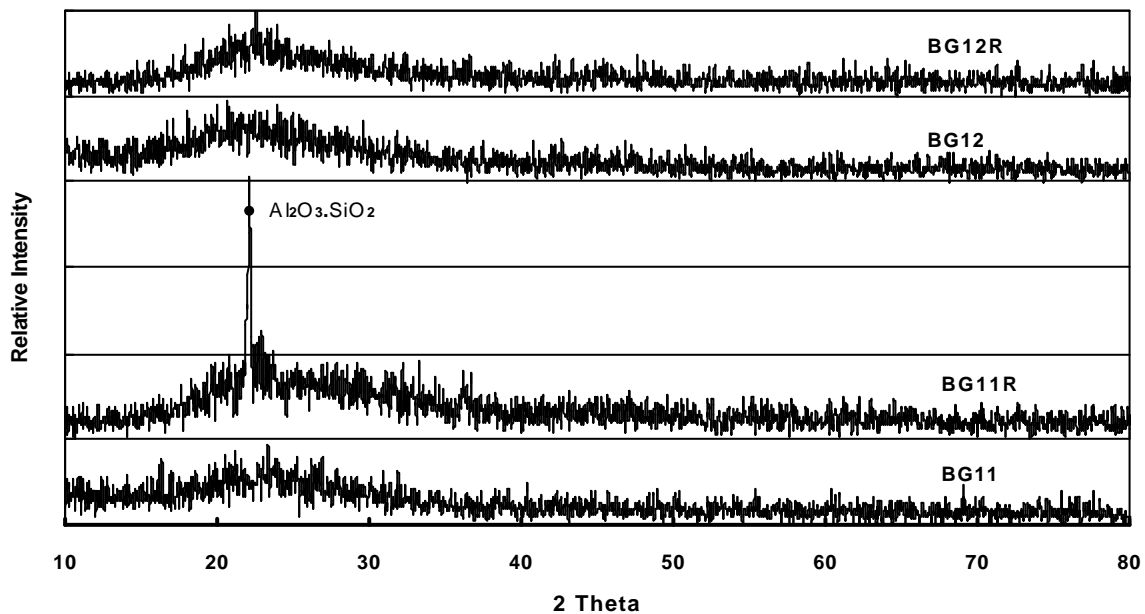


Figure 3-2. XRD pattern of sample base glass media

3.2.2. 밀도

제조한 유리매질의 밀도를 측정한 결과 2.40~2.57 g/cm³의 범위에 존재하였는데 이를 CVS-II 모델¹⁰⁾로 계산한 결과와 함께 그림 3-3에 나타내었다. 균질한 용융체를 형성한 유리매질의 경우 계산치와의 편차가 ±3% 이내에 존재하였으나, 균질한 용융체를 형성하지 못하여 주조가 거의 불가능했던 BG11R, BG12R의 경우에는 상당한 차이를 나타내었다. 따라서 균질한 유리매질

의 경우에는 화학조성을 이용한 밀도 추산방식이 유용함을 알 수 있었다. 계산치를 평가해보면, B를 Al로 대체한 경우에는 두 원소의 성질이 비슷하고 원자량의 차이가 크지 않아서 밀도변화가 거의 없으나, Si를 Zr로 대체한 경우에는 원자량 및 원소/산화물 질량비의 차이가 상당히 커서 밀도가 증가함을 알 수 있다.

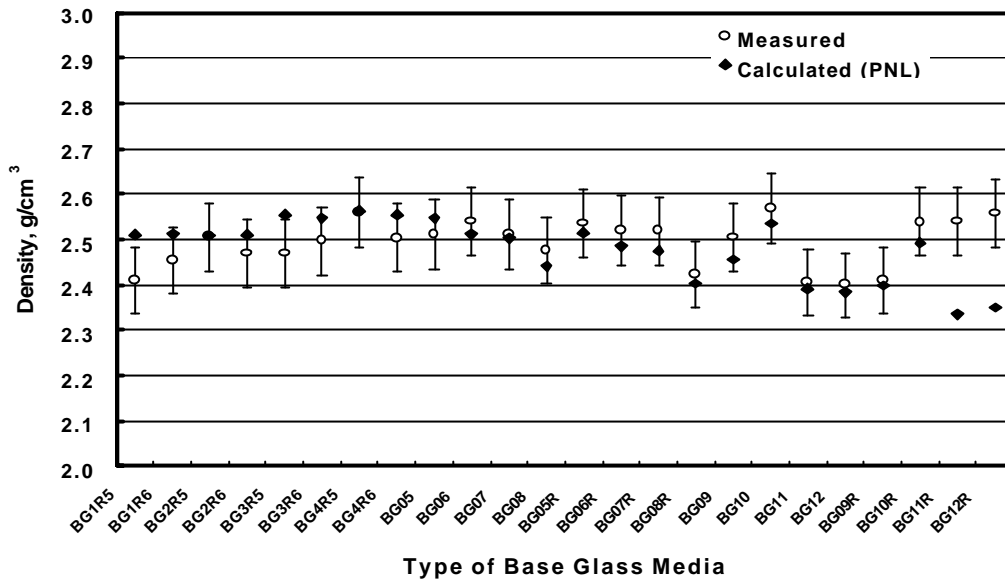


Figure 3-3. Density of base glass media (Error bound: $\pm 3\%$ from measured value)

3.2.3. 미세경도

미세경도 측정 결과를 표 3-1에 나타내었다. 분석조건은 하중 300g, 접촉시간 10초로 주고 실시하였다.^[8] 고준위 폐기물 고화용 유리매질인 프랑스 R7T7 유리의 경도는 9.1 GPa, 미국 PNL 76-68 유리는 6.2 GPa의 경도를 갖는 것으로 알려져 있는데^[9,10] 본 연구에서 제조한 유리매질은 5.3~5.9 GPa로 이들보다 경도가 낮았다.

Table 3-1. Microhardness of base glass media

Type of base glass	Microhardness, GPa	Type of base glass	Microhardness, GPa	Type of base glass	Microhardness, GPa
BG1R5	5.44	BG05	5.60	BG09	5.67
BG1R6	5.48	BG06	5.75	BG10	5.52
BG2R5	5.41	BG07	5.77	BG11	5.92
BG2R6	5.61	BG08	5.76	BG12	5.73
BG3R5	5.32	BG05R	5.77	BG09R	5.77
BG3R6	5.59	BG06R	5.70	BG10R	5.67
BG4R5	5.43	BG07R	5.50		
BG4R6	5.50	BG08R	5.52		

3.2.4. 열특성 분석

유리의 용융, 성형시 냉각과정 또는 고준위 폐기물 유리고화체와 같이 장기보관시 발열에 의한 온도변화가 있는 경우에는 유리매질이 온도에 따라 어느 정도 팽창하는가 하는 문제가 품질 보증 및 장기안전성 측면에서 중요하게 되는데 이는 열팽창계수를 측정, 평가하면 알 수 있다.

제조한 유리매질을 대상으로 TMA를 이용하여 10°C/min로 승온시키면서 열팽창특성을 측정한 결과의 일부를 그림 3-4에 나타내었다. 열팽창곡선은 그림과 같이 저온역과 고온역으로 나눌 수 있는데, 저온역의 팽창으로부터 고온역의 팽창으로 변하는 경우에는 유리의 열이력에 따라 다

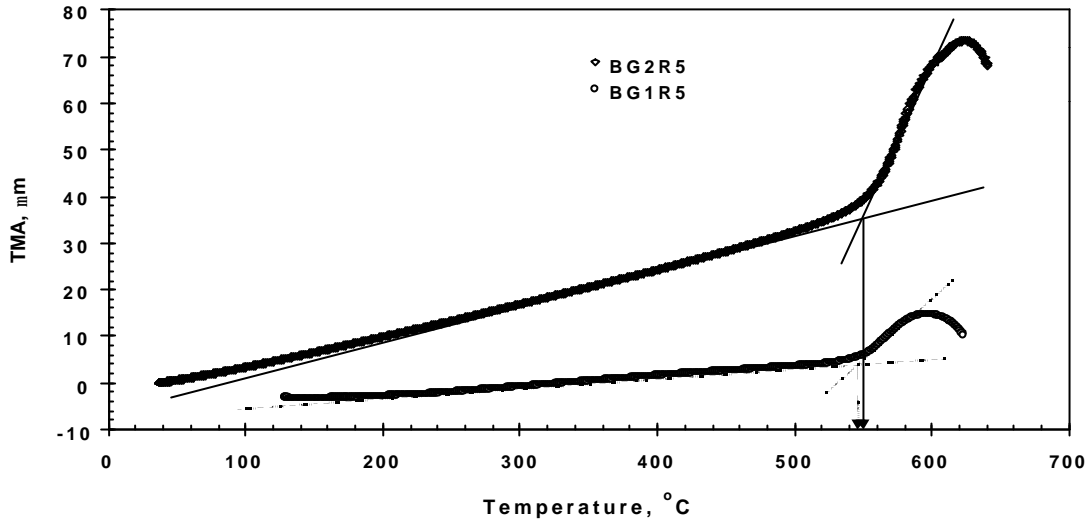


Figure 3-4 Thermal expansion curves of sample base glass media

른 곡선을 보이며 고온팽창의 최고점은 팽창이 정지하는 곳으로서 연화점이라 생각되고 있다. 서냉유리의 팽창곡선에서 보이는 변곡점은 같은 유리에 대해서는 정확한 재현성을 가지며 유리전이점 (T_g)에 해당한다. 따라서 T_g 이하에서는 고체유리, T_g 이상에서는 과냉각 액체라고 할 수 있으며, 기계적 거동으로는 T_g 이하에서는 탄성변형, T_g 이상에서는 점성변형이 일어난다.^{[1])} 본 연구에서 제조한 유리매질들은 저온 영역에서는 $4.6 \times 10^{-6} \sim 7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 고온 영역에서는 $3.4 \times 10^{-5} \sim 7.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 의 열팽창계수를 나타내었다.

3.2.5. 단기 침출시험 (PCT-B)

PCT-B 방법에 따라 2차 증류수를 침출제로 하여 90°C에서 7일간 내침출 특성을 실험하고 유리매질 종류별로 구성원소의 침출분율을 계산한 결과는 그림 3-5와 같다. 용융온도와 점도의 감소를 위해 첨가하는 용제성분 (Li, Na)은 유리구조에 약하게 결합되어 있어서 수화반응에 의해 쉽게 침출제로 녹아 나오며, Ti와 Zr은 유리의 망목구조를 형성하며 내침출성이 높은 물질이므로 잘 녹아 나오지 않았다. 붕규산 유리의 주요성분인 Si와 B는 침출분율이 10^{-3} order 정도였다.

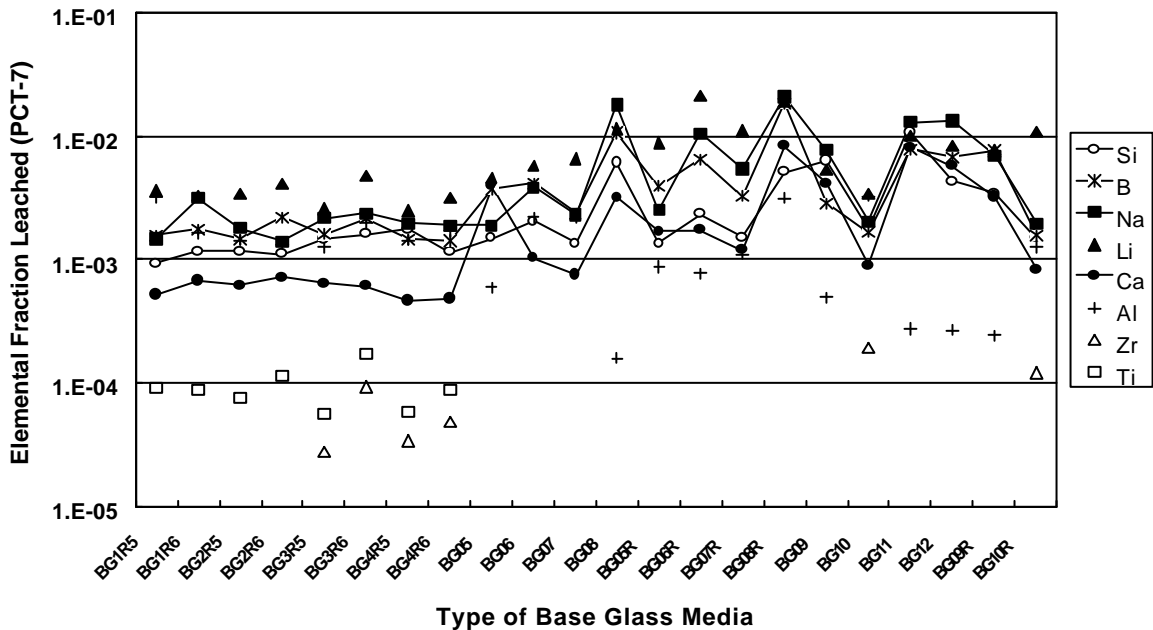


Figure 3-5. Leaching characteristics of base glass media (PCT, 7days, 90°C)

4. 결 론

사용한 HEPA 여과소재를 고온에서 용융시켜 처리하거나 또는 알파폐기물용 유리고화 매질로의 활용 가능성을 알아보기 위해 첨가제의 종류 및 양을 다양하게 변화시키면서 유리매질을 제조하고 특성 시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

- 1) 여과소재와 무기첨가제의 혼합물들을 대부분이 1300°C에서 완전용융되어 균질한 매질을 형성하였으며, 주조가 정상적으로 진행된 매질들은 안정한 무정형의 유리체를 형성함을 X선 회절분석을 통해 확인하였다.
- 2) 유리매질의 밀도는 2.40~2.57 g/cm³, 미세경도는 5.3~5.9 GPa를 나타내었고, 열팽창계수는 저온 영역에서는 4.6x10⁻⁶~7.5x10⁻⁶ K⁻¹, 고온 영역에서는 3.4x10⁻⁶~7.2x10⁻⁶ K⁻¹를 나타내어 내열특성이 우수하였다.
- 3) PCT-B법에 의한 단기 침출시험 결과 총괄 침출속도가 10⁻¹ g/m².day 범위에 존재하였으며, 유리 구성원소들의 내침출성도 비교용 EA 유리보다 우수하였다.
- 4) 제조한 유리매질들의 물성은 전반적으로 외국의 고준위 폐기물 유리고화용 매질과 비슷한 특성을 나타내어서 HEPA 여과소재를 고온 용융하여 안전처리 또는 알파폐기물 유리고화용 매질로의 활용 가능성이 충분히 높음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

Nomenclature

- SA : Surface area of specimen, m²
M_{i,t} : Weight of component i in the leachate at sampling time t, g
M_{i,0} : Initial weight of component i in the specimen, g
f_i : Weight fraction of component i in the specimen
t : Leaching test time, day

참고문헌

1. K.N. Brewer and J.A. Murphy, "HEPA Filter Dissolution Process", US Patent A7933144, 1992.
2. G.G. Hawley, The Condensed Chemical Dictionary, 10th Ed., Van Nostrand Reinhold Company, pp. 593, New York, 1981.
3. A.J. Johnson and L.Q. Fong, "Waste Incineration and Immobilization for Nuclear Facilities", RFP-2783, Rockwell International, Rocky Flats Plant, 1978.
4. C.A. Cicero, "HEME and HEPA Filter Element Dissolution Process (U)", WSRC-TR-92-549, Westinghouse Savannah River Company, 1992.
5. 이 정훈, 유리공학, 반도출판사, 서울, 1989.
6. C.M. Jantzen, "Nuclear Waste Glass Product Consistency Test- Version 7.0", WSRC-TR-90-539, Rev.3, Westinghouse Savannah River Company, 1994.
7. P.R. Hrma and G.F. Piepel, "Property/Composition Relationships for Hanford High-level Waste Glasses Melting at 1,150°C", Pacific Northwest Lab., PVTD-C95-02.01B, Nov. 1994.
8. 김 준형 외, "방사성 폐기물 관리 기반기술 개발 - 방사성 폐기물 감용고화기술 개발 (II)", 한국원자력연구소, KAERI-NETEC/RR-177/96, 1996.
9. L. Michaux, E. Mouche, and J.-C. Petit, "Geochemical Modelling of the Long-term Dissolution Behavior of the French Nuclear Glass R7T7", Applied Geochemistry, Suppl. Issue No.1, pp.41-54, 1992.
10. W. Lutze and R.C. Ewing, Radioactive Waste Forms for the Future, North-holland physics publishing, N.Y., 1988.
11. 김 병호, 유리공학, 청문각, 서울, 1996.