

## Evaluation of Chemical Durability of Vitrified Forms for Simulated Radioactive Waste Using Product Consistency Test(PCT) and Vapor Hydration Test(VHT)

### Product Consistency Test(PCT)와 Vapor Hydration Test(VHT)를 이용한 모의 방사성폐기물 유리고화체의 화학적 내구성 평가

**Cheon-Woo Kim**, Ji-Yean Kim, Sung-Jun Maeng, Jong-Kil Park and Tae-Won Hwang  
Nuclear Environment Technology Institute, P.O.Box 149, Yuseong, Daejeon, Korea

[cheonkim@khnp.co.kr](mailto:cheonkim@khnp.co.kr)

김천우, 김지연, 맹성준, 박종길, 황태원

한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 대전광역시 유성우체국 사서함 149호

(Received December 29, 2005 / Approved April 25, 2006)

#### Abstract

Two candidate glasses, AG8W1 and DG-2, have been developed for vitrifying the mixture of low activity resin, zeolite and Dry Active Waste(DAW), and DAW solely, respectively. In order to evaluate the chemical durability of the glasses, two different leaching tests, Product Consistency Test(PCT) and Vapor Hydration Test(VHT), have been performed. As the results of PCT performed from 7 to 120 days, the leach rates of B, Na, Si and Li in the glasses were much lower than those of the benchmark glass(SRL-EA). As the results of VHT performed for 7 days, the leach rates were 2 and 10 g/m<sup>2</sup>/day for AG8W1 and DG-2, respectively. The results of VHT met the regulatory guideline(<50 g/m<sup>2</sup>/day) for the low activity glasses of Hanford in the USA. Consequently, two candidate glasses to be used at a commercial operation in the future showed that their chemical durability is satisfactory according to the results of two leaching tests.

**Key Words** : Vitrification, Vitrified Form, Leaching Test, PCT, VHT

#### 요약

저방사성폐수지, 제올라이트, 가연성잡고체 혼합폐기물을 유리화하기 위해서 AG8W1 후보 유리와 가연성잡고체 단독으로 유리화하기 위하여 DG-2 후보유리가 개발되었다. 두 후보유리의 화학적 내구성을 평가하기 위하여 PCT와 VHT 침출시험이 수행되었다. 7일 PCT 침출시험 수행

결과 AG8W1과 DG-2의 주요 원소별 침출률은 기준유리(benchmark glass : SRL-EA) 보다 낮게 나타남을 알 수 있었고 미국 Hanford 유리고화체 규제치 2 g/m<sup>2</sup> 보다 낮은 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 120일 동안의 시험에서도 주요 원소인 B, Na, Si, Li가 SRL-EA 보다 낮게 나타남을 볼 수 있었다. VHT 침출시험 수행결과 AG8W1, DG-2의 침출률(leach rate)은 각각 2 g/m<sup>2</sup>/day, 10 g/m<sup>2</sup>/day 로써 미국 Hanford 규제치 50 g/m<sup>2</sup>/day 보다 낮은 결과를 나타냈다. 결과적으로 유리화 시설 상용운전 시 사용예정인 이들 후보유리들의 침출은 안정화되어 있었으며 화학적 내구성이 우수함을 알 수 있었다.

**중심단어** : 유리화, 유리고화체, 침출시험, PCT, VHT

## 1. 서론

산업사회로의 급속한 발달과정에서 가정은 물론 산업현장, 병원, 발전소 등에서 다양한 폐기물들이 발생되므로 이들이 자연환경과 인간에게 영향을 주지 않도록 하는 안전한 처리기술이 요구되고 있다. 그래서 유해성물질들이 자연환경과 인간에게 노출되는 것을 방지하고 물리·화학적으로 견고한 매질 안에 영구적으로 가두어두는 안전한 처리기술로 유리화(Vitrification)가 널리 응용되고 있다. 특히, 국내에서는 원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성 폐기물을 기존의 처리방식이 아닌 물리·화학적으로 내구성이 뛰어나고, 감용 효과가 뛰어나며 또한 처리비용이 상대적으로 경제적인 유리화 기술로 처리하기 위해 후보유리를 개발하고 있다[1]. 방사성폐기물 유리고화체는 처분환경에서 방사성물질을 환경에 누출시키지 않고 장기간 보존하는 화학적 내구성이 다른 재료들 보다 뛰어난 장점을 가진다. 때문에 유리는 현존하는 재료 중 방사성폐기물 처리 매질로 가장 각광을 받고 있다. 본 연구에서는 원자력발전소에서 발생되는 저방사성폐수지, 무기이온교환체(Zeolite), 가연성잡고체(Dry Active Waste: DAW)를 혼합 또는 단독으로 유리화 하기위해 두 가지 후보유리 즉, AG8W1과 DG-2를 개발하였다. AG8W1은 저방사성 폐수지, 무기이온교환체(Zeolite), DAW가 일정하게 혼합된 폐기물 처리용 유리조성이며, DG-2 유리는 가연성잡고체(DAW) 중 PVC함유 재료를 제외한 10여종을 혼합하여 유리화하기 위해 개발한 유리조성

이다. 이 두 가지 개발 유리조성들에 대한 화학적 내구성을 평가하기 위해 국제적으로 인증된 침출시험법들을 적용하였다.

유리고화체의 화학적 내구성 평가는 여러 가지 조건하에서 수행되는 침출시험 수행을 통하여 가능하다. 유리고화체의 화학적 내구성 평가를 위해 제안되어 있는 침출시험 방법들은 여러 종류가 있으나 권장되는 침출시험법만 있을 뿐 규정되어 있는 표준 시험법이 없기 때문에 시험수행이 간단하면서도 장기적인 내구성을 평가할 수 있는 침출시험법 선택이 매우 중요하다[2].

본 연구에서는 두 후보유리인 AG8W1과 DG-2에 대한 화학적 내구성을 평가하기 위한 방법으로 90℃와 200℃ 환경에서 단기간에 유리고화체의 화학적 건전성을 평가하는 US DOE Product Consistency Test(PCT)와 Vapor Hydration Test(VHT)를 사용하여 미국 내에서 규제하고 있는 각각의 기준치들과 비교하였다. PCT는 각 원소별로 침출률을 계산하는 시험법이며 VHT는 유리고화체 전체에 대한 침출률을 평가할 수 있는 시험법이다. PCT시험을 90℃에서 하는 배경은 방사성유리고화체를 저장 및 처분하였을 때 주변에 있는 물이 끓는점까지 상승하였다가 다시 온도가 하강하여 90℃ 정도 되면 물이 유리고화체에 액체상태로 접촉할 수 있게 될 것이라는 경우를 모사한 것이다. 일반적으로 유리고화체를 담고 있는 급속용기가 깨졌을 경우 주변에 물이 있다면 물과 유리고화체가 접촉할 수 있는 가능한 초기온도를 90℃라고 보는 것이다. 200℃에서 수행하는 VHT 시험은 물

의 끓는점 이상 상태인 수증기가 유리고화체를 기체 상으로 접촉할 경우를 고려한 침출시험법이다[3][4].

## II. 실험 방법

### 가. 유리고화체 제조

각 후보유리의 품질을 실험실적으로 평가하기 위해서 화학약품(raw chemical)을 사용하여 유리조성 배치를 만들었다. 사용한 화학약품들은 제조회사들이 제공한 순도를 기준으로 사용량이 조절되며 98% 이상의 순도를 지니는 화학약품을 사용하였다. 유리 조성을 위해 사용한 화학약품들은  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $CeO_2$ ,  $CoCl_2$ ,  $Cs_2CO_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2CO_3$ ,  $Li_2CO_3$ ,  $MgO$ ,  $MnO_2$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $NiO$ ,  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $VO_2$ ,  $ZrO_2$  등이다. 두 후보유리에 대한 자세한 조성은 Table 1에 나타내었다. 각 후보유리 별 조성에 맞게 만들어진 화학약품 배치를 잘 혼합한 후 점토 도가니(clay crucible)에 옮겨 담아  $MoSi_2$  발열체 전기로(KFC-220, 고려전기)의 온도인  $1,150^\circ C$ 에서 1시간 용융하였다. 온도가  $1,150^\circ C$ 에 도달한 후 45분이 경과되면 점토 도가니를 꺼내어 석영봉(quartz rod)을 이용하여 용융유리를 균질하게 혼합한 뒤 다시 전기로에 넣은 후  $1,150^\circ C$ 에서 15분 동안 용융한 다음 흑연몰드에 부어 냉각하였다. 냉각된 유리고화체 시료는 시험목적에 맞게 사용하였다.

Table 1. Compositions of vitrified forms.

	후보유리 조성	
	AG8W1	DG-2
$Al_2O_3$	12.3	7.07
$B_2O_3$	9.97	11.29
CaO	4.82	9.77
$Fe_2O_3$	1.78	0.35
$K_2O$	1.63	4.47
$Li_2O$	1.24	5.25
MgO	2.12	4.63
$Na_2O$	17.57	10.06
$P_2O_5$	0.4	0.82
$SiO_2$	43.14	41.25
$TiO_2$	1.24	3.09
$ZrO_2$	0.93	1.13
기타	2.86	0.82

### 나. 침출특성 시험

유리고화체의 화학적 내구성 시험으로서 PCT 침출시험은 최소 7일 또는 수백일 기간동안 유리고화체 내 원소들의 침출거동을 기준유리(benchmark glass)와 비교하는 시험이다. 시험수행에 사용한 후보유리는 AG8W1과 DG-2이며 미국 Savannah River Laboratory(SRL)에서 제조하고 제공한 기준유리인 SRL-EA(Environmental Assessment) 유리고화체를 함께 사용하였다. PCT를 수행하기 위해  $149 \mu m$  (100 mesh)체를 통과하고  $74 \mu m$  (200 mesh)체 위에 걸러진 유리고화체 분말시료 5 g 정도를 취한 다음 스테인레스강(SUS 304L) 용기(Fig. 1)에 넣고 유리고화체 분말시료의 10배에 해당하는 ASTM Type I 탈이온수로 채운 다음 밀봉하였다. 이 경우 유리고화체 시료의 표면적과 침출수의 체적비(SA/V)는  $2000 m^{-1}$ 이다. 미리  $90^\circ C$ 로 예열된 오븐에 넣고 7, 30, 60, 120일 침출시일이 지난 후 꺼내어 침출수 중 1ml를 취해 1%  $HNO_3$  20 ml 용액이 담긴 vial에 담아 유리고화체로부터 침출되어 나온 원소들의 침출률을 SRL-EA 기준유리의 침출률과 비교하였다. 또한, 남아 있는 침출수는 실온으로 냉각시켜 즉시 pH를 측정하였다. 유리고화체에서 침출되어 나온 침출수에 존재하는 주요 성분들의 정량분석을 위하여 ICP-AES(OPTIMA 3300DV, Perkin Elmer)와 ICP-MS(Elan 6000, Perkin Elmer)를 이용하였다.

두 번째 침출시험법으로는 Vapor Hydration Test(VHT)를 수행하였다. 침출시험에 사용한 유리고화체 시편은  $10 \times 10 \times 1.5 mm^3$ 으로 모든 면을 600grit의 SiC paper로 연마하였다. 연마한 유리고화체 시편

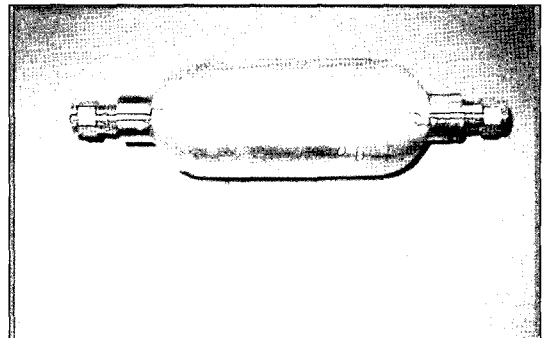


Fig. 1. PCT bottle and glass powder samples for leach test

을 탈염수와 아세톤으로 충분히 세척한 후 Parr 22ml T304 stainless steel vessel에 시편을 Fig. 2와 같이 고정한 후 탈염수 0.25ml를 채워서 200±2℃에서 7 일 동안 시험하였다. 시험을 마친 유리고화체 시편은 각 부분의 침출상태를 광학현미경으로 측정한 후 침출률(leach rate)을 구하였다. 본 VHT 시험은 University of Missouri-Rolla의 Graduate Center for Materials Research에서 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

가. PCT 침출시험 평가

후보유리 2종(AG8W1 & DG-2)과 기준유리(SRL-EA) 1종의 침출시험을 7일부터 120일까지 수행하여 침출수의 pH 변화를 비교해 보았다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 120일 까지 pH는 순수(DI water)의 초기

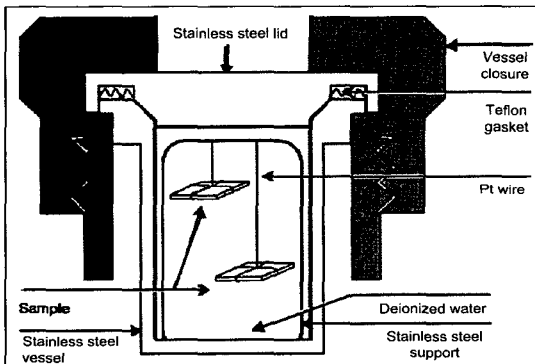


Fig. 2. Apparatus for conducting VHT

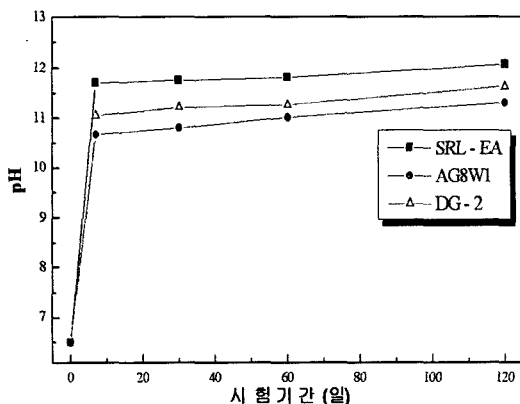


Fig. 3. PCT pH variations for 120 days (DI water initial pH : 6.5)

pH인 6.5에서부터 증가한 후 지속적으로 증가하는 추세를 보였다. 그러나 후보유리 AG8W1과 DG-2의 침출수 pH는 기준유리(SRL-EA)의 침출수 pH에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 시험에 사용된 세 유리고화체 시료의 침출수 pH가 침출초기부터 10이상으로 나타났는데 이는 pH 완충작용을 하는 silicic acid가 유리고화체로부터 빠져나온 후 유리고화체 매질에 존재하는 Na이 다른 원소에 비해 상대적으로 많이 용출되었기 때문으로 판단된다(Table 2, 3 & 4의 Na 농도 참조). 이와 같이 pH 10 이상의 염기용액은

Table 2. Summary of 90℃ PCT leach rate data for AG8W1

	7day	30day	60day	120day
pH	10.66	10.80	11.00	11.30
Concentration(ppm)				
B	52.5	75.6	109.2	84
Na	147	237.3	302.4	308.7
Si	84	96.6	88.2	86.1
Li	2.52	6.3	6.3	8.4
Normalized concentration(g/l)				
B	1.695	2.442	3.527	2.713
Na	1.128	1.094	2.320	2.368
Si	0.417	1.820	0.437	0.427
Li	0.438	0.479	1.094	1.458
Leach rate(g/m <sup>2</sup> /day)				
B	0.121	0.041	0.029	0.011
Na	0.081	0.030	0.019	0.010
Si	0.030	0.008	0.004	0.002
Li	0.031	0.018	0.009	0.006

Table 3. Summary of 90℃ PCT leach rate data for DG-2

	7day	30day	60day	120day
pH	11.04	11.20	11.26	11.62
Concentration(ppm)				
B	65.31	93.66	84	127.47
Na	123.06	179.55	163.8	245.7
Si	19.11	106.05	98.28	98.49
Li	1.89	28.56	29.19	49.56
Normalized concentration(g/l)				
B	1.86	2.67	2.40	3.64
Na	1.65	2.41	2.19	3.29
Si	0.10	0.55	0.51	0.51
Li	0.09	1.17	1.20	2.03
Leach rate(g/m <sup>2</sup> /day)				
B	0.133	0.045	0.020	0.015
Na	0.118	0.040	0.018	0.014
Si	0.007	0.009	0.004	0.002
Li	0.006	0.020	0.100	0.008

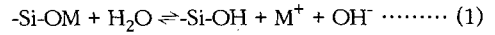
**Table 4. Summary of 90°C PCT leach rate data for SRL-EA**

	7day	30day	60day	120day
pH	11.69	11.74	11.80	12.07
<b>Concentration(ppm)</b>				
B	579.6	462	525	1417.5
Na	1627.5	1284.15	1701	3399.9
Si	913.5	1012.2	982.8	1449
Li	1841.7	149.31	102.75	262.5
<b>Normalized concentration(g/l)</b>				
B	17.125	13.651	15.512	41.883
Na	13.458	10.619	14.066	28.11
Si	4.220	4.676	4.540	6.694
Li	94.403	7.653	6.189	13.455
<b>Leach rate(g/mi/day)</b>				
B	1.223	0.228	0.129	0.175
Na	0.961	0.177	0.117	0.117
Si	0.301	0.078	0.038	0.028
Li	6.743	0.128	0.052	0.056

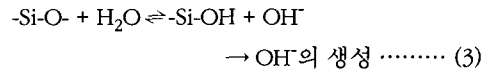
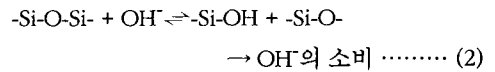
유리고화체의 침출을 증가시켜 다른 원소의 침출 농도를 급격히 증가시킨다. 이후에는 이온교환반응에 의한 수산화이온(OH<sup>-</sup>)의 생성에 의해 느리게 pH가 서서히 증가하게 된다. 일반적으로 수용액 중 유리고화체 침출 과정에서 많이 일어나는 화학반응은 아래 식(1), (2), (3)에서 표현한 바와 같이 이온교환반응

과 Si-O-Si 결합이 끊어져 -Si-O가 용액으로 빠져 나오는 실리카 침출반응이 있다[5].

〈 이온 교환반응 〉



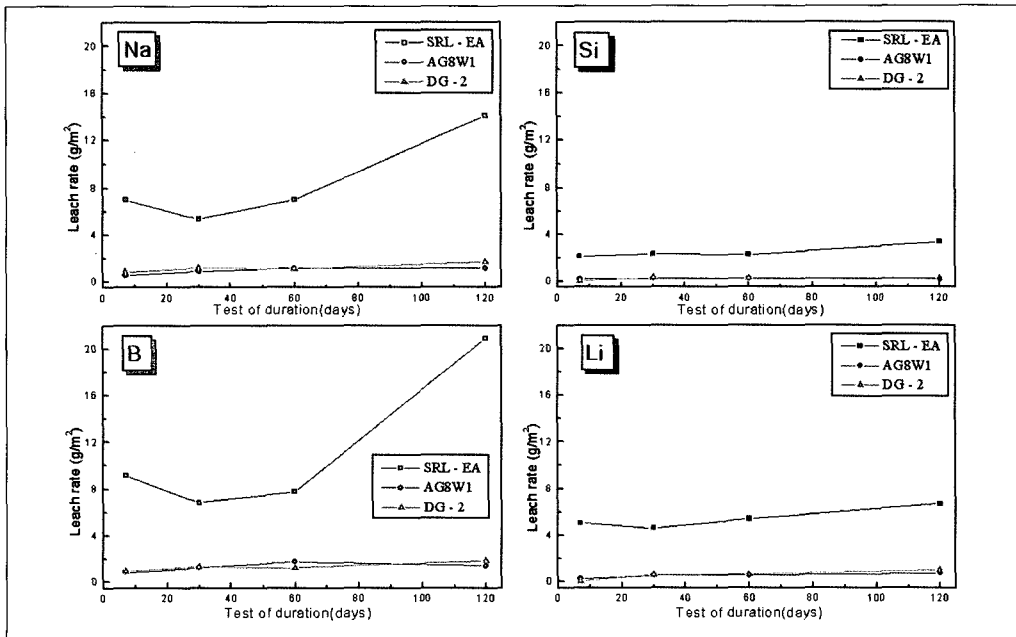
〈 실리카 침출반응 〉



이온교환반응은 OH<sup>-</sup>를 형성하므로 pH를 증가시키는 역할을 하지만, 실리카 침출반응은 OH<sup>-</sup>의 소비, 생성이 연속적으로 일어나 침출용액의 pH를 감소시킨다.

유리고화체의 내침출성을 상호비교하기 위해 식(4)를 이용하여 침출률을 구하였다.

$$NL_i = \frac{C_i \times V}{f_i \times SA} \dots\dots\dots (4)$$



**Fig. 4. Leach rates of AG8W1 and DG-2 compared with SRL-EA**

여기서,

- $NL_i$  : 정규화된 원소 의 침출률,  $g/m^2$
- $C_i$  : 침출된 원소 의 농도,  $g/m^3$
- $V$  : 침출수의 부피,  $m^3$
- $f_i$  : 침출 전 원소 의 질량분율
- $SA$  : 시편의 표면적,  $m^2$

위의 식(4)를 이용하여 AG8W1, DG-2와 SRL-EA의 120일에 대해 즉시 냉각시켰을 때의 pH 값과 분석결과에 따른 농도(ppm)와 정규화시켰을 때의 농도를 정리하여 Table 2, 3 & 4에 나타내었다. AG8W1, DG-2 그리고 기준유리(SRL-EA)에 대해 7일부터 120일까지 PCT 수행 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4의 그래프에서 보듯이 개발한 후보유리들이 기준유리보다 우수한 내침출 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, AG8W1 후보유리의 경우

DG-2 후보유리에 비해 네 가지 원소들의 침출저항력은 상대적으로 우수한 것임을 알 수 있었다.

Na, B와 Li이 비슷한 침출률을 보인 반면 Si는 낮은 침출률을 보이고 있다. 이는 침출초기 이온교환에 의해 침출 경계면의 Si가 silanol의 구조로 바뀌므로 인해 장기간으로 가더라도 안정화된 것으로 판단된다. 또한, PCT 침출률은 후보유리의 비가교 산소(Non-bridging Oxygen)가 많을수록 높게 나타난다. 비가교 산소(NBO)가 AG8W1은 57이고 DG-2는 73으로 AG8W1보다 DG-2가 더 많다[6]. 결론적으로 7일간 수행한 PCT 시험에 의한 화학적 내구성이 우수한 유리고화체를 나열하면 AG8W1, DG-2 그리고 SRL-EA 순인 것으로 나타났으며 후보유리내의 각 원소별 침출률은 SRL-EA 보다 우수하고 미국 Hanford 고/저준위 유리고화체 규제치인  $2 g/m^2$  보다 낮게 나타났음을 알 수 있었다.

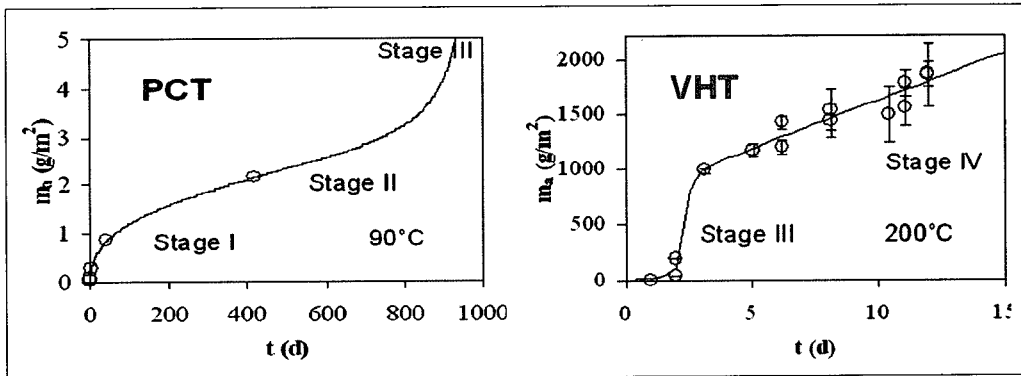


Fig. 5. Comparisons of corrosion stages of glass in PCT and VHT

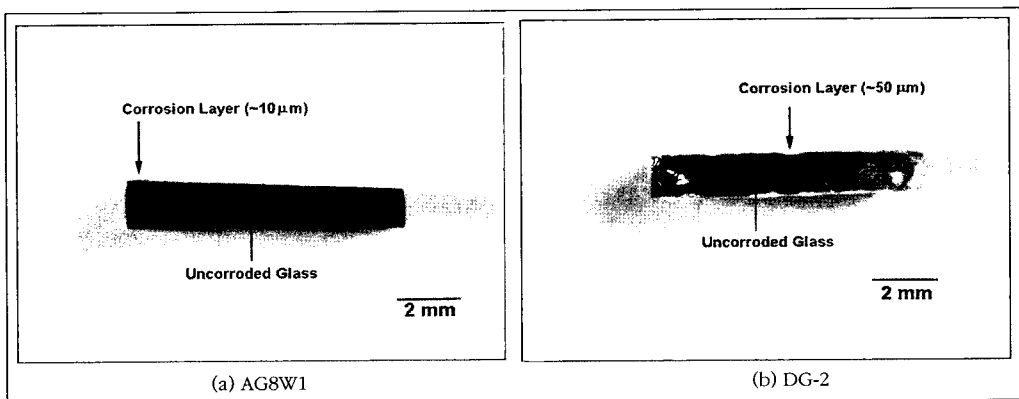


Fig. 6. Optical micrographs of the cross section of test samples after VHT at 200°C for 7 days

### 나. VHT 침출시험 평가

VHT는 PCT의 장기간 수행시 나타나는 현상을 단 기간에 관찰할 수 있을 뿐만 아니라 유리의 다단계 침출현상을 관찰할 수 있는 장점이 있다. Fig. 5를 보면 PCT와 VHT에서의 유리고화체 침출과정을 여러 단계로 나타내었다. 일반적으로 PCT 시험법에서 장기간(1,000일)동안 나타나는 Stage I, Stage II, StageIII까지만 볼 수 있으나 VHT 시험법에서는 단 기간동안 높은 증기압에서 StageIII와 StageIV까지 나타남을 알 수 있다. Stage I 에서는 물이 유리고화체 속으로 침투하여 유리고화체중의 변형체와 이온 교환 반응을 일으켜 알칼리 수산화물을 형성하여 용액의 pH가 증가하는 단계이다. Stage II에서는 유리고화체 용해가 주된 반응으로 유리고화체의 표면층이 파괴되기 시작하여 침출수의 pH가 증가함에 따라 용해속도는 증가하지만 농도가 포화되면서 감소하는 단계로 여기까지는 빨리 진행되는 단계이다. StageIII에서는 침출된 고화체의 내부나 표면에 난용성 화합물의 침전에 의해 유리고화체 침출을 억제하는 층이 형성되는 과정으로 침출의 억제정도는 억제하는 층의 성질이나 침출환경에 따라 다소 달라진다. StageIV에서는 유리고화체의 용해와 변화된 생성물의 침전이 균형을 이루게 된다. 따라서 침출수의 농도가 일정하게 유지되고 침출이 일정한 속도로 진행되는 단계이다[7][8].

AG8W1과 DG-2의 VHT시험법을 수행한 유리고화체 시편의 모양은 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 유리고화체 시편에 나타난 침출층을 토대로 침출률(leach rate, ma)을 구하기 위해 다음과 같은 식(5)를 이용하였다.

$$m_a (g/m^2) = \frac{1}{2} \rho (d_i - d_r) = \frac{m_i}{2\omega_i l_i} \left( 1 - \frac{d_r}{d_i} \right) \quad (5)$$

여기서,

$m_i$  = 초기 유리고화체 질량 (g)

$\omega_i, l_i$  = 유리고화체의 넓이와 길이 (mm)

$\rho$  = 유리고화체의 밀도 (g/cm<sup>3</sup>)

$d_i$  = 초기 유리고화체의 두께 (mm)

$d_r$  = 유리고화체 층의 평균 두께 (mm)

Fig. 6에서 유리고화체의 단면을 보면 AG8W1에서는 침출된 층이 10  $\mu$ m 정도이며 DG-2는 침출된 층이 50  $\mu$ m 정도인 것을 광학현미경을 통하여 측정할 수 있었다. 이 침출된 층의 결과로 AG8W1과 DG-2 유리고화체의 VHT 침출률을 계산한 결과 AG8W1은 2 g/m<sup>2</sup>/day 이고 DG-2는 10 g/m<sup>2</sup>/day 로 평가되었다. VHT 시험을 통하여 AG8W1은 DG-2 보다 상대적으로 내구성이 우수한 유리고화체임을 알 수 있었다. 또한, 이 결과들은 미국 Hanford 저방사성 유리고화체 침출률 규제치인 50 g/m<sup>2</sup>/day 이하를 만족하므로 화학적 내구성이 우수한 것임을 알 수 있었다.

### V. 결론

7일 PCT 시험법을 이용하여 AG8W1과 DG-2 유리고화체내의 B, Na, Si, Li에 대한 침출률을 분석한 결과 기준유리(SRL-EA)의 침출률 보다 낮음을 알 수 있었다. 또한, 미국 Hanford 유리고화체의 규제치인 2 g/m<sup>2</sup> 보다 훨씬 낮은 결과를 나타내었다. 120일까지 수행한 PCT 시험에서도 B, Na, Si, Li의 침출률은 기준유리(SRL-EA) 원소들 보다 낮게 나타남을 알 수 있었다. VHT 시험법을 이용하여 AG8W1과 DG-2 유리고화체에 대한 침출률(leach rate)을 분석한 결과 2와 10 g/m<sup>2</sup>/day 으로서 미국 Hanford 규제치 50 g/m<sup>2</sup>/day 보다 낮은 결과를 나타내었다. 향후 상용유리화 시설에서 사용예정인 이들 후보유리들은 국제적인 유리고화체 기준치들을 모두 만족하므로 화학적 내구성이 우수함을 알 수 있었다. 결과적으로 원전발생 방사성폐기물 유리화를 통하여 유해물질들이 환경으로 누출되는 것을 차단할 수 있는 견고한 유리고화체를 만들 수 있게 되므로 유리화 기술은 보다 안전하고 효율적인 방사성폐기물 관리에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] 김천우, 최관식, 박종길, 신상운, 송명재, "방사성폐기물 유리화-환경 친화적 처리 기술," 세라미스트, 3(6), pp. 55-66(2000).

- [2] 서용칠, 이규성, 유종익, 장민, “방사성폐기물 함유 유리고화체의 화학적 안정성 평가를 위한 공정시험법 개발에 관한 연구,” 연세대학교 환경과학기술연구소, 최종보고서, pp. 1-2(2001).
- [3] C.W. Kim, C.S. Ray, D. Zhu, D.E. Day, D. Gombert, A. Aloy, A. Mogaš-Milanković and M. Karabulut, “Chemical Durable Iron Phosphate Glasses for Vitrifying SBW Using Conventional and CCIM Techniques,” J. of Nucl. Mater., 322, pp. 152-164(2003).
- [4] C.W. Kim and D.E. Day, “Immobilization of Hanford LAW in Iron Phosphate Glasses,” J. of Non-Crystalline Solids, 331, pp. 20-31(2003)
- [5] L.L. Hench and Martin J.R, Wilson, “Nuclear Waste Glass Interfaces After One Year Burial in Stripa, Part 4 : Comparative Surface Profiles,” J. of Nucl. Mater., 136, pp. 218-228(1985)
- [6] K. Vinjamuri, S.T. Wood and L.O. Nelson, GLASSFORM-Version 1.1 : An Algorithm for Generating Preliminary Glass Formulations for Waste Streams, INEEL/EXT-98-00269, August(2000).
- [7] W. B. White, “Corrosion of Glass, Ceramic and Ceramic Superconductor,” Noyes Publ., Park Ridge, New Jersey(1992)
- [8] Pavel Hrma, “Glass Formulation for Vitrification of HLW and LAW,” PNNL, Battelle, Richland(2005)