

## 방사성고화체의 물리화학적 안정성 평가

### Evaluation on the Stability of Solidified Waste Forms

유영걸, 김기홍, 홍권표  
한국원자력연구소  
정의영, 고덕준  
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원

#### 요 약

중·저준위폐기물 처분장 인수조건 평가를 위한 미국 및 프랑스의 시험법을 사용하여 봉산 및 폐수지함유 시멘트 고화체와 파라핀 고화체의 안정성을 평가하였다. 고화체의 압축강도는 176.03 kgf/cm<sup>2</sup>(시멘트), 15 kgf/cm<sup>2</sup>(파라핀) 이상으로 미국 및 프랑스의 천층 처분장 인수기준치보다 높았다. 온도내구성시험에서는 고화체의 외관 및 부피변화는 없었으며 무게 감소는 평균 6.15% 이었다. 120일간의 내수성 시험에서 파라핀 고화체의 무게 감소는 8.85~5.14%, pH는 3.83이었다. 방사선 조사영향에서 흡수선량 10<sup>8</sup>rads에서 시멘트 고화체의 무게 감소를 보였으며, 고화매질인 파라핀왁스의 수소와 메탄의 G 값은 각각 2.65, 0.016 이었다.

#### Abstract

The stability of various waste forms to meet waste acceptance criteria was evaluated by using standard test methods of U.S.A and France. Compressive strength of waste forms were above 176.03 kgf/cm<sup>2</sup>(cement), 15 kgf/cm<sup>2</sup>(paraffin). In the thermal cycling test, there were no any change in their feature and volume, the loss of weight was 6.15% on the average. In the immersion test for 120 days, the loss of weight of paraffin waste form was 8.85 ~ 5.14% pH = 3.83. The G-Value of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in paraffin wax at 10<sup>8</sup>rads of exposure dose were 2.65, 0.016.

#### 1. 서 론

방사성 폐기물은 영구처분을 위하여 국가의 규제기관과 처분코자 하는 처분장에서 제시한 폐기물 수용기준을 준수할 수 있도록 제조하게 되며, 폐기물 수용기준은 처분시설의 가동동안 인간과 환경 보호 그리고 최대 300년간의 제도적 통제기간을 고려하여 처분장의 안전성 확보를 위하여 설정되어진다. 이때 폐기물 인수기준에서 요구하는 사항들은 국가 규정에서 최소화하여 규정하게 되고, 처분장에서는 국가규정과 처분환경조건을 고려하여 보다 더 엄격히 규정하고 있는 것이 일반적이다.

방사성 폐기물 고화체와 그의 고화용기는 방사성 핵종의 1차 누출 방어역할을 하는데 방사성 고화체는 폐기물의 종류, 폐기물의 물리화학적 성질, 핵종 및 고화매질에 따라 방사능 누출등의 특성들이 달라지게 되므로 폐기물 고화체와 포장물의 특성규명을 위하여 생물학적, 화학적, 물리학적, 방사학적 특성을 측정할 수 있는 신뢰성 있고 효율적인 방법들을 개발하고 있으며, 일부는 표준화되어 있는 실정이다.

폐기물 인수기준중 고화체의 안정성 평가와 관련하여 미국(NRC/BTP)은 폐기물의 종류와 고화매질에 따라 유리수, 압축강도, 방사성 영향특성, 미생물 영향 특성, 침출 특성, 내수성 및 내온도 주기성 등에 대하여 표준시험법을 제시하였으며, 또한 그의 기술기준치도 제시하고 있다. 그리고 프랑스(DRDD/ BECC)에서는 미국보다 매우 세밀하게 평가항목들을 분류하고 있으며, 평가시험들을 처분 환경과 처분방식에 맞게 표준화하고 있다.

일반적으로 압축강도(기계적 특성)는 적재내구 및 찢수 안정 그리고 충격에 매우 중요한 항목이며, 기타 특성평가 시험전후에 고화체의 안정성을 비교하거나 평가하는데 이용되기도 한다. 적재내구성은 저장, 취급, 수송 및 처분시 직면하게 될 압력을 이겨낼 수 있도록 적어도 6단 적재(IAEA 수송규정)에서도 안전한 지지력을 갖추어야 한다. 고화체는 경화나 저장동안 일어나는 화학반응, 방사선의 영향, 폐기물을 처분시켰을 때 물의 침입 등으로 인하여 수축 또는 팽윤되어 폐기물 고화체가 감당할 수 없는 압력에 이르면, 고화체는 변형되거나 파쇄될 수밖에 없다.

폐기물 고화체가 저장과 수송조건에 따라 0℃ 이하에 놓여질 경우 특히 시멘트 고화체에 있어서 이러한 낮은 온도에서 고화체가 동결되고 이에 수반되는 공극내의 수분과 폐기물 구성물질의 팽창으로 고화체에 손상이 발생할 수 있다. 계속되는 미세한 압박이 붕괴에 이루어질 수 있는 힘으로 작용할 수 있으므로 반복되는 동결-융해 주기하에서 고화체는 이를 이겨낼 수 있는 내온도 주기성을 갖고 있어야 한다.

보통 고화체는 처분장의 관리기간인 300년 동안 고화체내의 핵종들로부터  $10^7 \sim 10^8$  rads 정도의 피폭을 받는다고 가정한다. 따라서 고화체를 장기간 저장하거나 처분하는 경우에는 방사선(고화체내에 함유된 핵종들에 의한 것과 포장물 적재에 의한 타 포장물에 의한 외부 방사선)에 의하여 피폭되어 고화체의 팽윤, 수축 등으로 취약한 상태로 변화시키거나 고화체내의 수용상과 폐기물에서의 방사분해로 고화매질을 붕괴할 수 있을 정도의 압력을 야기시킬 수 있는 기체를 발생시킬 수 있다. 방사분해에 의한 붕괴를 이겨낼 수 있는 가는 고화체에 대한 가스투과성과 선량율에 의존된다. 즉 가스발생은 총 선량율에 의존하게 되고, 고화체로부터의 기체방출은 시간에 의존하게 된다.

따라서 본 연구에서는 미국과 프랑스 및 기타 국가에서 고화체의 안정성 평가에 활용되고 있는 시험법들을 이용하여 폐기물, 고화매질 및 시편 크기별로 고화체의 안정성을 상호 비교하였으며, 또한 시험조건을 서로 교차하여 고화체의 안정성을 평가하여 보았다.

## 2.. 실험

### 가. 고화체 시험시편 제조

#### (1) 시편의 재료

고화체 제조에 사용된 시멘트는 포틀란트 I형, 파라핀 왁스는 국내 원자력발전소에서 사용하고 있는 Aristowax 165(Fully Refined Paraffin Wax)와 순도 99.8%인 미세분말 형태의 봉산, 이온교환수지로는 IRN-150LC를 사용하였다.

## (2) 시멘트 고화체

고화체의 안정성 평가시험을 위한 고화체 제조는 KSL 5109(2001)에 기술된 혼합용기를 사용하였으며 또한 기술된 혼합시간 및 혼합속도에 따라 모의 고화체를 제조하였다.

이때 봉산함유 시멘트 고화체 제조를 위하여 봉산폐액은 70℃에서 봉산의 농도가 12 wt.%가 되도록 한 후, NaOH로 중화처리하여 pH가 8이 되도록 하였다. 고화 혼합비율은 무게비율로 봉산 농축폐액 / 시멘트 / 소석회 = 39.0 / 55.1 / 5.9(wt.%)로 하였다.

한편 폐수지함유 시멘트 고화체의 혼합비율은 폐수지 / 물 / 시멘트 / 소석회 = 9.40 / 22.11 / 61.69 / 6.68 wt.%이 되도록 하였다. 폐수지와 물의 비율을 결정하기 위하여 폐수지(IRN-150LC)의 수분함유율은 50.67 wt.%, 습윤수지의 진밀도는 1.1138 g/cm<sup>3</sup>, 수지사이의 공극율은 34.5%로 하였다. 따라서 수지내부의 물은 시멘트 고화에 참여치 않고 오직 수지사이의 공극에 존재하게 되는 물만 시멘트고화에 참여하는 것으로 계산하였다. 그리고 물은 100 ppm의 봉산을 함유하는 것으로 하였다.

## (3) 파라핀 고화체

Fig. 1의 반응용기에 먼저 파라핀왁스를 주입하여 완전히 녹인 후 투입구를 통해 봉산을 조금씩 넣으며 교반기를 사용하여 혼합하였다. 가열온도는 파라핀왁스의 전열 벽면에서의 탄화방지를 위하여 90~100℃를 유지하였고, 교반기의 교반속도는 약 180 rpm으로 하였다. 약 10분 동안 혼합시킨 후 완전하게 섞인 혼합물을 PE 원통형 몰드에 담아 약 15일간 경화시킨 후 몰드를 제거하여 시편을 제조하였다. 이때 봉산과 파라핀 왁스의 혼합비는 원자력발전소의 CDWS 운전기록을 참조하여 무게비(%)로 70 : 30으로 하였다.

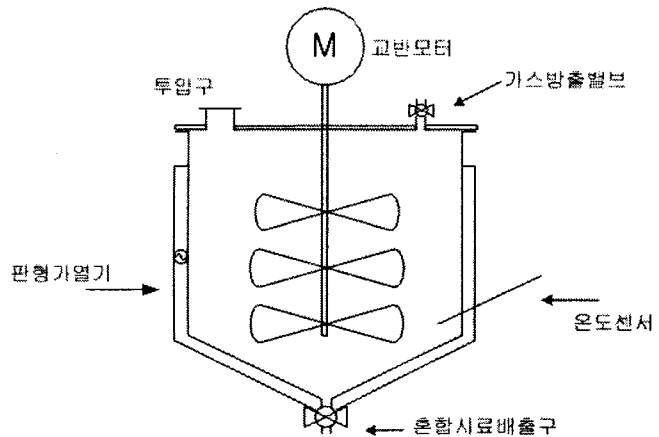


Fig. 1. Paraffin Wax Mixer

## (4) 고화체 시험시편의 크기와 갯수

각국의 압축강도, 내수성, 내온도주기성 및 내방사성 특성시험과 시험조건 변화시험을 고려하여 시험시편의 크기와 갯수를 결정하였다. 그리고 한 시험에 대하여 산술평균값을 얻도록 3개씩 시험시편을 취하였다.

### 나. 고화체의 안정성 평가시험

#### (1) 압축강도

압축강도 시험은 상온, 밀봉된 상태로 28일의 경화시간이 경과한 뒤 압축강도를 측정하였다.

압축강도 측정시험에 사용된 시험장비는 한국 대경테크(주)에서 제작한 30톤 용량의 시험장비로서 시험 전에 교정하였다.

시멘트와 같은 rigid형 고화체에 대하여서 미국(ASTM C-39)은 시편의 크기를 1.8 < 직경/높이(D/L) < 2.2, 재하속도는 0.24 ~ 0.34 MPa/s를, 프랑스(FT-02-010)에서는 직경/높이(D/L, D = 110mm) = 2.0, 재하속도는 0.5 MPa/s를 제시하고 있다.

한편 파라핀과 같은 flexible형 고화체에 대하여서는 미국(ASTM D-1074)은 시편의 크기를 직

경/높이(D/L) = 1, 재하속도는 0.05L mm/min를, 프랑스(FT-02-011)에서는 직경/높이(D/L, D = 80mm) = 1.5, 재하속도는 0.3L mm/min를 제시하고 있다.

본 평가시험에서는 상기 시험조건을 고려하여 압축강도를 측정하였다.

그리고 압축강도 계산은 아래 식과 같이 시편이 깨지는 순간 시편이 받은 힘(kgf)을 시편의 단면적(cm<sup>2</sup>)으로 나누어 계산하였다.

$$C = \frac{F}{S}$$

여기서

C : 압축강도, kgf/cm<sup>2</sup>

F : 힘, kgf

S : 단면적, cm<sup>2</sup>

#### (2). 온도 내구성

온도 내구성시험에 대하여 미국은 ASTM B-553, 프랑스에서는 FT-02-031를 적용하고 있다. 현재 ASTM B-553은 ASTM에서 사용하고 있지 않지만 NRC/BTP에서는 이의 사용을 권고하고 있다. ASTM B-553의 시험조건은 +22℃(1시간) → +60℃(1시간) → -30℃(1시간)을 1주기로 하여 총 30회의 주기 시험을 요구하고 있으며, FT-02-031에서는 +5℃(2시간) → -20℃(24시간) → +5℃의 동결과정을 1주기로 하여 총 5회를 수행한 후 이어서 +5℃(2시간) → +40℃(24시간) → +5℃의 용해과정을 1주기로 하여 총 5회를 시험토록 하고 있다.

따라서 본 평가시험에서는 상기 시험조건을 고려하여 내온도주기성 시험을 수행하였으며, 시험 전후의 시편의 칫수를 측정하여 무게 및 부피변화를 시험하였고, 육안관찰을 위하여 사진촬영을 하였으며, 시험이 완료된 후에는 압축강도를 측정하였다.

#### (3) 내침수성

현재 고화체의 침수 특성에 대하여서는 어떠한 시험법도 없다. 이에 따라 본 시험에서는 각국에서 표준시험법으로 채택하고 있는 침출시험법을 이용하여 내침수성을 시험하였으며, 시험(침출수 교체)전후의 칫수와 무게를 측정하여 무게 및 부피변화를 측정하였고, 침출수의 pH와 전기전도도를 측정하였다.

#### (4) 내방사성

방사선 고화체에 대한 방사선 조사 시험법으로 프랑스의 FT-05-030이 있다. 미국에서는 시험법은 없으나 NRC/BTP에서 이에 대한 입장을 제시하였다. 미국에서는 이온교환수지나 기타 유기물질을 함유하고 있지 않거나 예상되는 누적 피폭량이 10<sup>9</sup> rads 이상이 되지 않을 경우, 10<sup>8</sup> rads 까지, 프랑스에서는 10<sup>7</sup> rads까지 고화체 시편이 피폭될 때까지 조사하여 고화체의 건전성을 평가토록 하고 있다. 특히 프랑스에서는 조사 선량율을 5 x 10<sup>2</sup> < dose rate < 5 x 10<sup>3</sup> Gy/hr로 할 것을 요구하고 있다.

따라서 본 시험에서 방사선 조사는 Co-60(72,023.9 Ci)를 이용하여 5.43 x 10<sup>5</sup> rad/hr의 조사 선량율로 고화체의 피폭량이 10<sup>6</sup>, 10<sup>7</sup>, 10<sup>8</sup> rads가 될 때까지 조사하여 시험전후의 부피 및 무게 변화를 살펴보고, 압축강도도 측정하였다.

그리고 파라핀 왁스의 G 값을 얻기 위하여 파라핀왁스 1 g을 Break seal Ampule에 주입한 후에 1 x 10<sup>4</sup> mmHg의 진공으로 밀봉하였다. 총 선량은 10<sup>6</sup>, 10<sup>7</sup>, 10<sup>8</sup> rads로 하였다. 가스조성은 Precision Gas Mass Spectrometer(Finnigan MAT 271)로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 압축강도

시멘트 고화체의 압축강도는 시멘트의 종류나 성분뿐 아니라 시멘트와 물의 혼합비, 함유되는 폐기물의 양과 첨가제의 종류와 양에 의해서도 크게 달라진다. 그리고 경화시간, 수분 및 온도 등의 경화조건에 의해서도 영향을 받기도 한다. 이외에 고화체를 제조할 때 시멘트 반죽내에 포함되는 기포도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

시멘트 압축강도 측정시험은 일반적으로 최고 강도의 75%정도를 갖게 되는 28일 경화후에 수행하게 된다.

본 연구에서는 각국의 압축강도 측정시험법의 시험조건들을 종합적으로 비교평가 하기위하여 시멘트의 구조적 사항인 아닌 시험측정 영향인자들을 변화시켜 시멘트와 파라핀의 압축강도를 측정하였다.

Fig. 2와 3에 봉산함유 시멘트 고화체의 압축강도 시험결과 나타냈는데, Fig. 2 ~ 3에서 보듯이 176.03 kgf/cm<sup>2</sup> 이상이였다. Fig 2는 시편의 크기를 ASTM C-39와 FT-02-010의 시편조건을 만족토록 하여 시험한 결과인데 직경이 클수록 시편(높이/직경 = 2)의 압축강도는 작아짐을 보여주고 있다. Fig. 3은 ASTM C-39와 FT-02-010의 재하속도를 모두 포함하는 재하속도를 다양하게 변화시키면서 측정한 시험결과로써 재하속도가 클수록 압축강도가 증가함을 보여주고 있다.

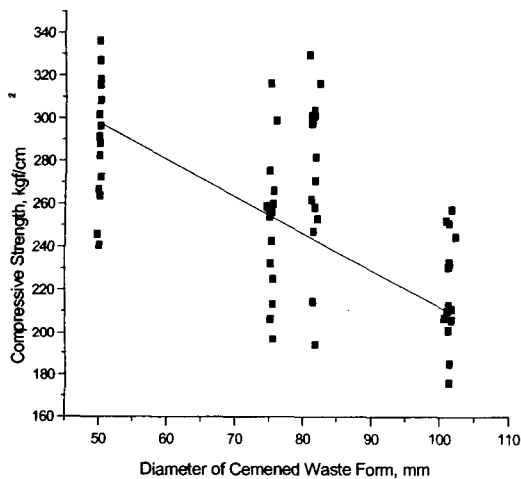


Fig. 2. Compressive Strength of Cement Waste Form Incorporated Borate waste with the Change of Diameter

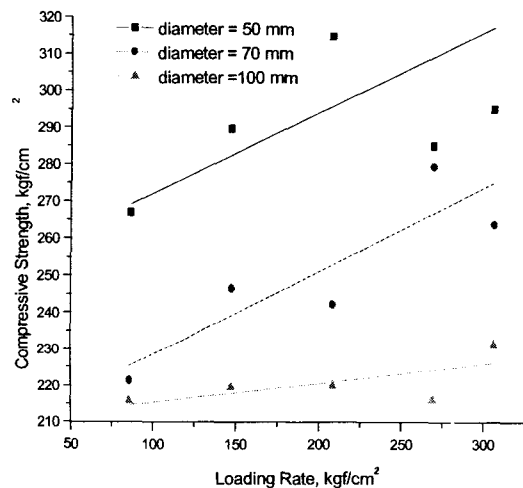


Fig. 3. Compressive Strength of Cement Waste Form Incorporated Borate Waste with the Change of Loading Rate

따라서 방사성 고화체의 압축강도를 측정할 경우 상기 두 측정시험법 모두 가능함을 알 수가 있고, 측정작업자의 방사선 피폭을 최소로 하기위하여 시편의 크기는 작게, 측정시간의 단축을 위하여 가급적 재하속도를 크게하는 것이 바람직 할 것으로 보인다.

한편 파라핀 고화체에 대하여 압축강도를 측정한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 보듯이

시멘트와 동일한 양상을 보였으며, 압축강도 값은  $15 \text{ kgf/cm}^2$  이상이었다. 이 값은 미국의 인수조건인  $4.08 \text{ kgf/cm}^2$ 의 대략 3.7배 정도이다. 본 시험 역시 ASTM D-1074과 FT-02-011의 시험조건과 재하속도를 포함하는 시험조건으로 얻은 결과이다.

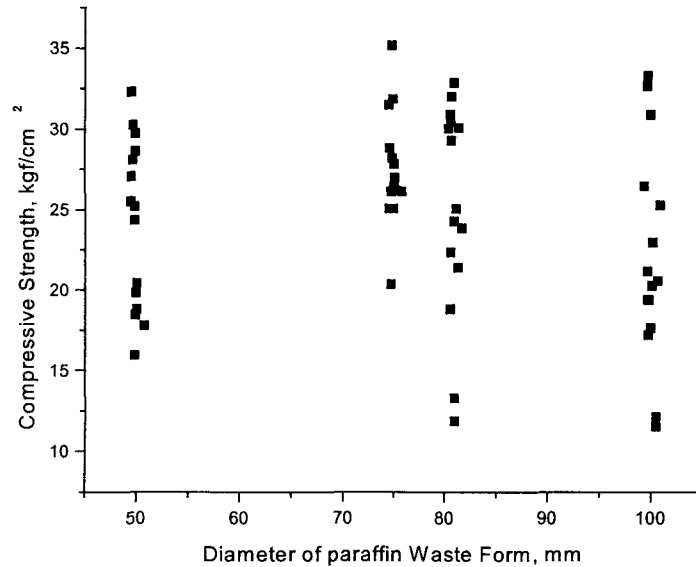


Fig. 4. Compressive Strength of Paraffin Waste Form  
Incorporated Borate waste with the Change of  
Diameter

#### 나. 온도내구성

온도내구성 시험동안 고화체의 다양한 미세 성분간의 열팽창계수차에 기인한 응력이 발생되며 이러한 응력에 의해 균열이 성장하여 고화체를 현저하게 약화시킨다. 시멘트 고화체의 경우에는 균열, 파쇄, 팽윤정도는 고화매질인 시멘트의 혼합량, 폐기물의 양, 폐기물과 시멘트간의 결합력, 고화체의 미세구조내에 미세한 성분의 구조와 형태와 같은 다양한 인자들에 의해서 영향을 받는다.

본 시험에서는 ASTM B-553의 시험조건인  $+22^\circ\text{C}$ (1시간)  $\rightarrow$   $+60^\circ\text{C}$ (1시간)  $\rightarrow$   $-30^\circ\text{C}$ (1시간)을 1 주기로 하여 총 30회의 주기 시험을 수행하였고, 또한 이와는 별도로 FT-02-031의 시험조건인  $+5^\circ\text{C}$ (2시간)  $\rightarrow$   $-20^\circ\text{C}$ (24시간)  $\rightarrow$   $+5^\circ\text{C}$ 의 동결과정을 1주기로 하여 총 5회를 수행한 후 이어서  $+5^\circ\text{C}$ (2시간)  $\rightarrow$   $+40^\circ\text{C}$ (24시간)  $\rightarrow$   $+5^\circ\text{C}$ 의 용해과정을 1주기로 하여 총 5회를 시험하였다. 폐수지 함유 시멘트 고화체 대하여 FT-02-031에 의한 시험결과를 Fig. 5와 6에 나타냈다.

시험후의 압축강도는  $165.06 \text{ kgf/cm}^2$  이상이었으며, 외관상 특이한 사항은 보이지 않았고, 부피변화는 거의 없었으며( $\pm 0.28\%$ ), 다만 무게변화가 있었으며 시험 후 무게는 평균 6.15%가 감소하였다.

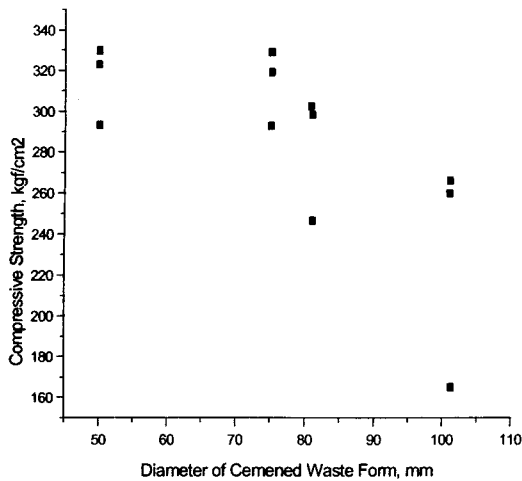


Fig. 5. Compressive of Cement Waste Form Incorporated Spent Resins After Thermal Cycling Test

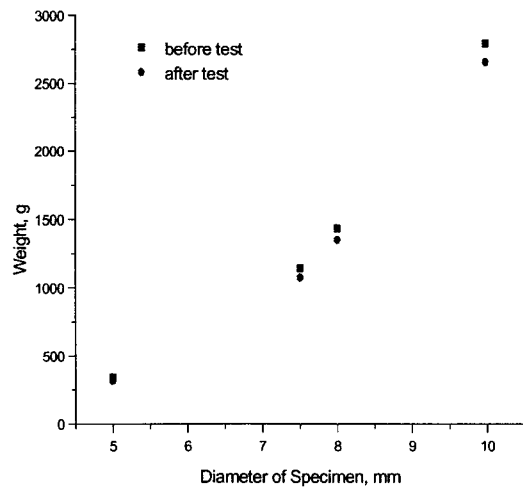


Fig. 6. Weight of Cement Waste Form Incorporated Spent Resins Before and After Thermal Cycling Test

본 시험결과 무게변화와 부피변화를 고려할 때 압축강도는 기준치를 상회하는 것으로 보아 고화체의 건전성을 유지하는 것으로 보인다. 그러나 프랑스 시험조건은 온화한 조건으로 간주되므로 보다 냉후한 시험조건으로 수분을 함유하고 있거나, 수분을 흡수할 수 있는 폐기물을 함유한 고화체에 대하여서는 내온도주기성시험에 의한 안정성평가가 이루어져야 하겠다는 판단이 든다.

#### 다. 내침수성

처분장내로 예상치 않게 지하수 등이 유입될 경우에 유입된 물은 고화매질 및 고화체내의 함유 물질과 상호작용하여 고화체에 부피변화 및 구조적 특성에 영향을 끼쳐 고화체가 균열, 파쇄, 팽윤될 경우에 처분장의 안전성에 중대한 영향을 미치기 때문에 침수시험은 고화체의 건전성을 평가해야 할 중요한 시험이다.

그러나 현재까지 침수시험에 대한 시험조건 및 절차 등이 없어 침출시험에 준하여 시험을 수행하거나 일정시간동안 물에 침수시켜 일정간격으로 고화체의 부피변화, 무게변화 등을 조사하게 된다.

본 침수시험에서는 침출시험(IAEA, FT 그리고 ANS 16.1)에 준하여 일정시간 간격으로 물을 교체하여 부피 및 무게변화를 살펴보았으며, 또한 교체 침수물의 pH와 conductivity 등을 측정하였다.

침수시험결과는 Fig. 7과 8에 시편의 크기에 따라 침수일수 경과일수별로 시편의 무게변화와 그때의 침수물의 pH를 나타냈다.

Fig. 7과 8에서 보듯이 시멘트 고화체는 침수시간의 진행에 따라 다소 무게가 감소하면서 pH는 증가하고 있음을 알 수 있는데 이는 시멘트의 다공부부분으로 물이 침투하여 들어가기 때문으로 보이면 pH는 시멘트로 침투한 물에 의하여 염이 용해되어 물속으로 빠져나오기 때문에 증가하는 것으로 보인다. 반면에 파라핀 고화체인 경우에는 고화체내로 침투한 물에 의하여 계속 봉산이 빠져나와 pH가 감소함을 알 수 있다. 시멘트에 비하여 파라핀 고화체의 무게 변화는 매우 빠른 것으로

로 보이며 비교적 물에 장기적으로 침수될 경우에는 구조적 문제점이 발생할 것으로 보인다.c

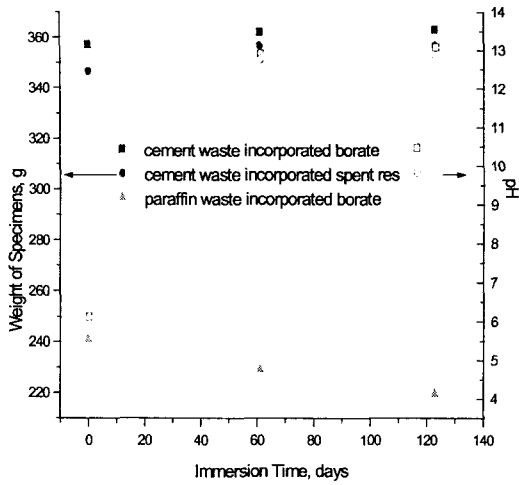


Fig. 7. Weight Change and pH in Immersion Test of various Waste Forms (D=50mm)

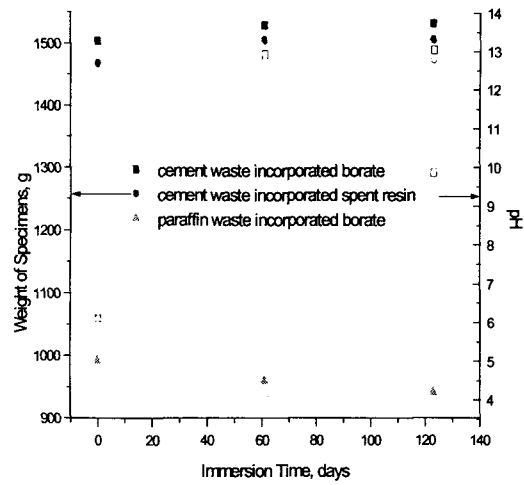


Fig. 8. Weight Change and pH in Immersion Test of various Waste Forms (D=80mm)

마. 내방사성

(1) 방사성고화체가 방사선 조사를 받으면 팽윤, 기체나 산의 생성, 휘발성 물질의 휘발 및 고화체의 열화등 직접적인 영향을 받게 되어 구조적 안정성의 저하뿐만 아니라 처분장의 불안정화도 초래할 수도 있다.

이에 따라 본 시험에서는 비교적 방사선에 취약성을 가질 것으로 예상되는 폐기물을 함유한 고화체(폐수지함유 시멘트 고화체)와 유기화합물이며 고화매질로 이용되고 있는 파라핀 고화체에 외부 방사선원으로 조사하여 그의 외관 및 압축강도 등을 측정하였다.

이때 방사선 조사는 Co-60(72,023.9 Ci)를 이용하여  $5.43 \times 10^5$  rad/hr의 조사선량율로 고화체의 피폭량을  $10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$  rads가 될 때까지 조사하였다.

조사후의 고화체 외관을 살펴보았을 때, 특별한 점은 없었으나, 파라핀 고화체중  $10^8$  rad의 조사를 받은 고화체의 외부 색깔변화가 있었다. 조사량에 따른 고화체의 무게 및 압축강도 측정결과를 Fig. 9 ~ 11에 나타냈다. 시멘트 고화체의 무게는 선량율에 따라 감소하였으며, 파라핀 고화체는 무게감소를 무시할 정도였다.

(2) 가스발생량

방사선 조사에 의해서 발생하는 대표적인 가스인 수소 및 메탄의 조성을 Table 1에 나타내었다. 방사분해 가스중 수소의 조성은 98.1 ~ 99.6 % 이었으며, 발생가스의 조성은 방사선 조사선량율에 따라 거의 변화가 없었다.



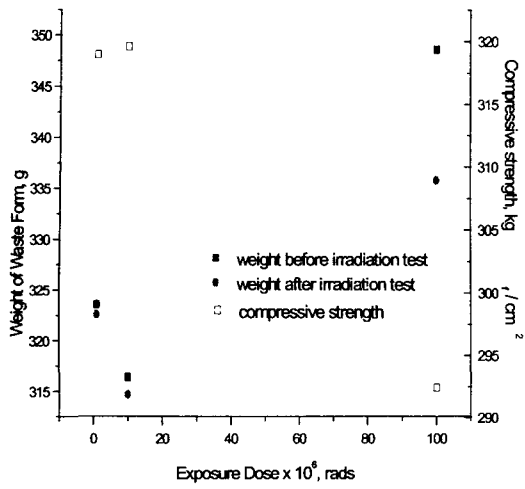


Fig. 9. Weight Change and Compressive Strength Before and After Irradiation Test of Cement Waste Form (D=50mm) Incorporated Borated Waste

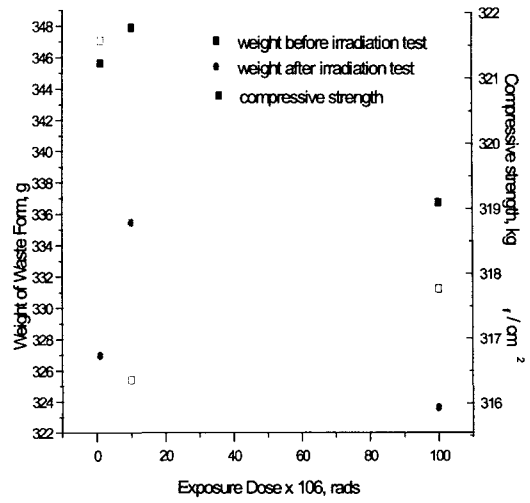


Fig. 10. Weight Change and Compressive Strength Before and After Irradiation Test of Cement Waste Form (D=50mm) Spent Resin

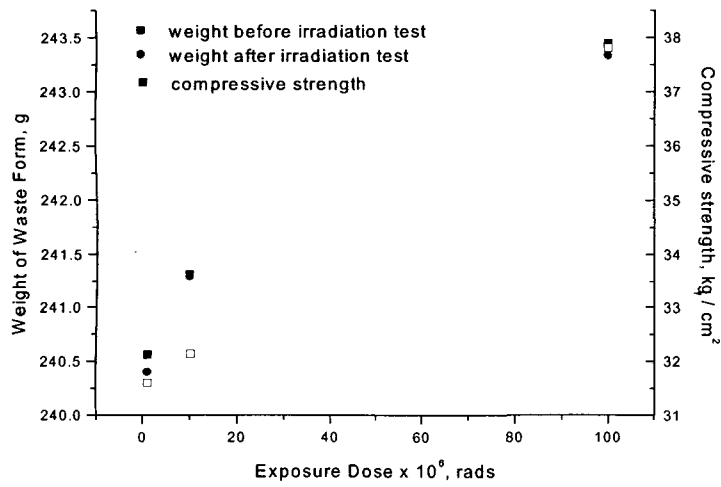


Fig. 11. Weight Change and Compressive Strength Before and After Irradiation Test of Cement Waste Form (D=50mm) Incorporated Borated Waste

Table 1. Gas Composition for  $\gamma$ -irradiation of Paraffin Wax

고화매질	총선량(kGy)	가스조성( Vol. %)	
		H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
파라핀 왁스	10	99.4	0.6
	100	99.6	0.4
	1000	99.4	0.6

파라핀 왁스의 가스 발생량을 Fig. 12에 나타내었다. 1 MGy에서 파라핀왁스의 수소 발생량은 6.6 cm<sup>3</sup>/g이었고 메탄가스 발생량은 0.039 cm<sup>3</sup>/g이었다.

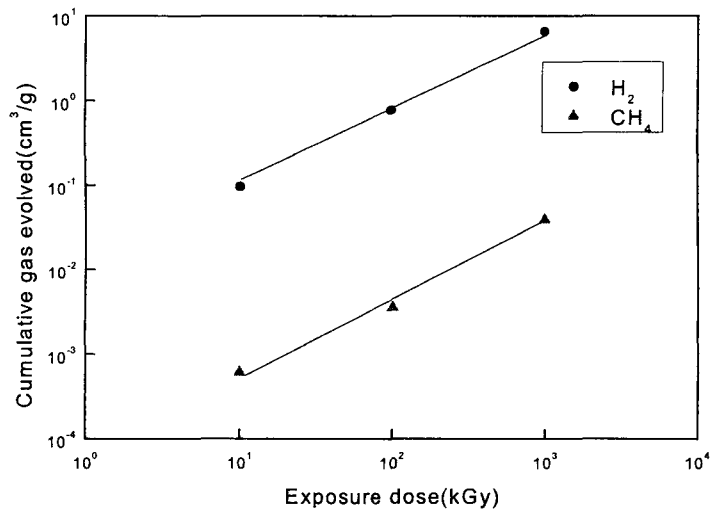


Fig. 12. Gaseous Products of Radiolysis Evolved from 1g of Paraffin Wax

방사선 조사에 의해서 발생하는 가스의 양을 나타내는 G-value는 아래 식을 이용하여 계산하였다. G-value는 매질에 누적되는 100 eV 에너지당 발생하는 총 가스분자 수를 나타낸다.

$$G(gas) = (P_f - P_i) \left( \frac{NV}{RT} \right) \left( \frac{100eV}{D} \right)$$

여기서,

G(gas) = total molecules evolved per 100 eV

P<sub>f</sub> = final pressure(atm)

P<sub>i</sub> = initial pressure(atm)

N = Avagadro's number, 6.02 x 10<sup>23</sup> /gmol

V = ampule free volume(cm<sup>3</sup>)

R = ideal gas constant, 82.057 atm · cm<sup>3</sup>/gmol, ° K

T = temperature, ° K

D = energy deposited, eV

위식에 의해서 계산된 흡수선량에 따른 수소 및 메탄의 G-value를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. G-values of Gas Evolution from Paraffin Wax

고화매질	총선량, x 10 <sup>6</sup> rads	G-value	
		G(H <sub>2</sub> )	G(CH <sub>4</sub> )
파라핀 왁스	1	3.84	0.024
	10	3.13	0.014
	100	2.65	0.016

#### 4. 결 론

원자력 발전소의 고화조건으로 제조된 봉산 및 폐수지함유 시멘트 고화체와 파라핀 고화체의 안정성 평가를 미국 및 프랑스의 시험법으로 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 시멘트 고화체와 파라핀 고화체의 시편의 크기(직경높이, 직경 변화), 재하속도 등을 다양하게 변화시키면서 측정된 압축강도는 미국 및 프랑스의 천층 처분장 인수기준치보다 매우 높았으며, 그의 압축강도는 각각 176.03 kgf/cm<sup>2</sup>, 15 kgf/cm<sup>2</sup> 이상이었다.

2) ASTM B-553의 시험조건으로 온도내구성을 평가한 결과, 폐수지함유 시멘트 고화체의 외관에 특이한 것은 보이지 않았으며, 부피 변화는 없었고, 무게 감소는 평균 6.15%이었으며, 압축강도는 165.06 kgf/cm<sup>2</sup> 이상 이었다.

3) 120일간의 내수성 시험에 따른 무게변화에서 시멘트 고화체는 증가하였으며, 파라핀 고화체는 감소하였는데 각각의 무게변화율은 1.61 ~ 1.87%, - 8.85 ~ - 5.14 이었다. pH는 초기 6.13에서 각각 13.09, 3.83으로 변화였다.

4) 방사선 조사영향은 흡수선량율이 증가함에 따라 시멘트 고화체의 무게는 감소하였으나 파라핀 고화체의 무게감소는 없었다. 고흡수선량에서는 파라핀 고화체의 외부 색깔은 눈에 띌 정도였다. 파라핀 왁스의 조사분해가스는 수소와 메탄이었으며 이중 수소가스가 99.4%를 차지하였다. 흡수선량 108rads에서 파라핀왁스의 수소와 메탄의 G 값은 각각 2.65, 0.016 이었다.