

Waste Form의 붕괴열에 따른 캐니스터 최대온도 평가

이주찬, 서중석, 방경식, 서기석, 김호동
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
siclee@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로 공정물질은 waste form 형태로 제조, 밀봉/포장하여 안전하게 저장 관리되어야 한다. Waste form의 제조 과정에서 공정물질의 loading률은 waste form의 발생량과 처분밀도에 직접적으로 영향을 미치므로 최적의 loading률은 waste form을 안전하고 효율적으로 관리하기 위한 중요한 요소가 된다. Waste form의 단위체적 당 방사능과 붕괴열이 최적의 loading률을 결정하는 중요한 변수가 되며, 따라서 waste form의 붕괴열에 따른 열평가가 필요하다. 본 연구에서는 파이로 공정 waste form 캐니스터의 열전달해석을 수행하여 붕괴열에 따른 캐니스터의 centerline 및 표면온도를 평가하였다.

2. 본론

2.1 열전달 지배방정식

Waste form은 그림 1과 같이 원통형 캐니스터에 저장되며, 원통형 구조를 갖는 waste form 캐니스터에서의 열전도 지배방정식은 다음과 같이 표현된다[1].

$$\frac{\partial T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{g(r,t)}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

긴 원통형 좌표에서는 축방향의 열전도는 무시되고 반경 방향의 열전도만 고려된다. 또한, 열발생이 균일한 정상상태라 가정하면 $g(r,t) = g_0, \frac{\delta T}{\delta t} = 0$ 이므로 열전도 방정식은 다음과 같이 단순화된다.

$$\frac{dT}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{g_0}{k} = 0 \quad (2)$$

위의 식을 2번 적분하면 다음과 같이 일반해를 구할 수 있다.

$$T(r) = \frac{-g_0 r^2}{4k} + C_1 \ln r + C_2 \quad (3)$$

2.2 열해석 모델링

Waste form 캐니스터의 열해석을 위한 전산 프로그램은 FLUENT를 사용하였다. Waste form 캐니스터는 원통형 구조이며, 열해석 모델은 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 캐니스터는 일반적으로 널리 사용하는 150 리터 용량의 표준형 캐니스터로서 외경이 430 mm, 길이가 1,340 mm이며, 두께 6 mm의 스테인리스강으로 구성된다. 캐니스터에 장전되는 고화체는 glass waste form과 glass-bonded ceramic waste form을 고려하였다. Glass waste form은 용융상태의 glass를 캐니스터에 주입하여 캐니스터와 waste form 사이에 gap이 없으나 ceramic waste form 등은 ingot 상태의 waste form을 캐니스터에 장전하므로 canister와 waste form 사이에 5 mm의 gap을 고려하였다.

Waste form 캐니스터에서의 열전달 모드는 waste form을 통한 열전도, waste form과 캐니스터 내벽 사이의 공기층을 통한 대류 및 복사, 캐니스터 벽을 통한 열전도, 캐니스터 외부 표면으로부터 대기로의 대류 및 복사열전달로 구분된다. 캐니스터 주변의 대기온도는 27 °C로 가정하였다. 캐니스터 내부의 붕괴열이 오랫동안 지속된다고 가정하여 정상상태(steady state)의 온도분포를 계산하였다. 캐니스터 1개의 붕괴열은 0.25 ~ 3.00 kW를 고려하였다.

2.3 해석결과 및 평가

Fig. 2는 붕괴열의 변화에 따른 glass 및 ceramic waste form 캐니스터의 centerline 온도와 캐니스터의 표면온도를 보여주고 있다.

캐니스터 당 붕괴열이 3 kW인 경우 glass waste form의 최대온도는 508 °C인 반면, ceramic waste form의 최대온도는 450 °C로 나타났다. Ceramic waste form의 경우 캐니스터와 고화체 사이에 5 mm의 air gap이 있지만 고온에서는 복사열전달 영향이 크고 glass의 열전도도가 ceramic 보다 낮기 때문에 고온에서는 glass waste form의 온도가 ceramic waste form에 비하여 높게 나타났다.

프랑스의 La-Hague의 유리고화시설은 150리터 캐니스터 이용하여 glass waste form을 포장하였으며, 캐니스터의 최대 붕괴열을 3 kW로 설정하였다. 미국 INEEL의 유리화폐기물 저장시설 타당성 분석보고서 등에 따르면 Glass 및 glass-bonded ceramic waste form의 최대온도는 glass의 전이온도인 400 ~ 500 °C 이내로 제한하고 있다. 붕괴열이 3 kW인 경우 glass waste form의 최대온도가 508 °C로 계산되었으므로 최대 붕괴열은 3 kW를 넘지 않아야 한다.

본 연구에서 계산된 온도는 캐니스터가 대기 중에 노출된 조건이며, 저장시설 또는 저장용기에 장전된 경우에는 캐니스터의 온도는 더 높게 상승할 것이다. 따라서 안전 여유도와 보수성을 감안하여 캐니스터의 최대 붕괴열을 2 kW로 설정하였다.

그림 3은 캐니스터의 붕괴열이 2.0, 2.5, 3.0 kW일 경우 캐니스터 표면온도에 따른 centerline의 온도를 보여주고 있다. Glass waste form의 경우 붕괴열이 2.0, 2.5, 3.0 kW에서 centerline의 온도는 canister 표면온도에 비하여 각각 194, 243, 291 °C 만큼 높게 나타났다. Centerline의 온도를 450 °C로 제한하기 위한 캐니스터 표면의 온도는 붕괴열이 각각 2.0, 2.5, 3.0 kW인 경우에 236 °C, 207 °C, 159 °C로 계산되었다. 따라서 붕괴열에 따른 캐니스터의 표면온도 제한치를 예측할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 waste form 캐니스터의 붕괴열에 따른 캐니스터의 centerline 온도 및 표면온도를 평가하였다. Waste form의 제한온도를 400 ~ 500 °C로 고려하여 캐니스터의 최대 붕괴열을 2 kW로 설정하였다. Waste form의 표면온도에 따른 centerline의 온도를 평가함으로써 붕괴열에 따른 캐니스터 표면온도 제한치를 예측할 수 있었다.

본 연구결과는 파이로 공정 waste form의 loading를 결정, 캐니스터 운반용기 또는 저장시스템의 열전달해석을 위한 기본 자료로 활용될 예정이다.

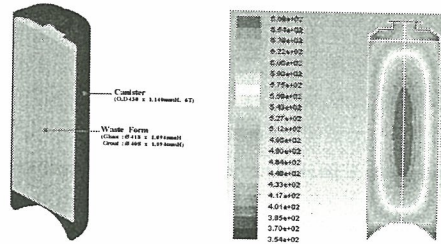
4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 “원자력 연구개발

사업”의 일환으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] Yunus A. Cengel, "Heat Transfer : A Practical Approach", 2nd Ed., Mc Graw Hill, 2003.



(a) Canister (b) Temp. contour
Fig. 1. Waste form canister & temperature.

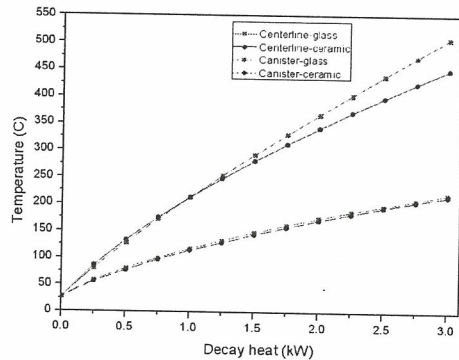


Fig. 2. Canister temperature profiles as a variation of decay heat.

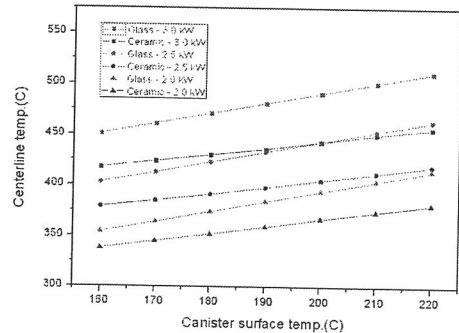


Fig. 3. Centerline temperature profiles as a variation of surface temperatures.