

## 파이로공정 폐기물 포장용기의 설계요건 분석 및 열전달 평가

이주찬, 방경식, 서중석, 서기석, 박근일

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

siclee@kaeri.re.kr

### 1. 서론

파이로공정 폐기물은 안정한 형태의 waste form(고화체)으로 제조, 밀봉/포장하여 저장 관리되어야 한다. 본 연구에서는 미국 NRC 10 CFR 60.135 등의 규정과 지침을 기준으로 파이로 폐기물 포장용기의 설계요건을 분석하였다. 또한, 붕괴열에 따른 캐니스터의 열전달해석을 수행하여 waste form의 허용온도 기준을 만족하는 최대 붕괴열과 캐니스터 표면온도를 설정하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 Waste Form 포장용기의 설계기준

표 1은 미국 NRC의 10 CFR 60.135[1]와 DOE/RW-0351[2]에 제시된 고준위폐기물 포장용기의 설계기준을 요약하였다. 10 CFR 60.135에서는 waste form 형태를 입자, 연소성, 액체, 폭발성, 발화성 혹은 화학적 반응물질을 제외한 안정한 고체로 규정하고 있다.

Table 1. Design criteria for HLW waste.

항 목	설계기준	비고
Waste form 형태	입자, 연소성, 액체, 폭발성, 발화성, 화학적 반응물질을 제외한 안정한 고체	
Canister 체적/중량	150리터, Max. 400 kg	
Waste form 체적	캐니스터 내부용적의 80%	내압상승 방지
Canister 내부압력	150 kPa (Borosilicate glass waste form)	수분함량, 화학반응
Waste form 발열량	2 kW(설계기준), 3 kW(최대)	프랑스 AVH canister
Waste form 허용 온도	Glass waste form : 500 °C	유리의 전이온도
	Glass bonded ceramic waste form : 500 °C	

Waste form 포장용기의 설계요건은 UC-C, UC-V 캐니스터를 기준 모델로 평가하였다.

UC-C/V 캐니스터 설계기준 발열량은 2 kW, 최대 허용 발열량은 3 kW으로 고려하였다. UC-C/V 모델은 waste form의 적재용량을 400 kg로 제한한다. 또한 적재 부피도 중량의 규제요건과 동일한 기준으로 캐니스터 내부 부피의 80 % 이내로 제한한다. 캐니스터의 나머지 20 %의 용적은 내부의 수분 혹은 공기의 열팽창에 의한 내부 압력의 상승방지를 위한 완충공간이다. Borosilicate glass waste form 적재 캐니스터의 내부 압력을 150 kPa(1.5 kg/cm<sup>2</sup>) 이하로 제한하고 있다.

#### 2.2 Waste Form 포장용기의 열전달 평가

Waste form 캐니스터의 열전달해석을 수행하여 허용온도 기준을 만족하는 최대 붕괴열과 캐니스터 표면온도 계산하였다. 150 리터 용량의 표준형 캐니스터를 대상으로 하였으며, 캐니스터는 외경이 430 mm, 길이가 1,340 mm이며, 두께 6 mm의 스테인리스강으로 구성된다. 캐니스터에 장전되는 고화체는 glass waste form과 glass-bonded ceramic waste form을 고려하였다. 그림 1은 캐니스터의 열전달해석 모델을 나타낸다. 캐니스터에서의 열전달은 waste form과 캐니스터 벽을 통한 열전도, waste form과 캐니스터 내벽 사이의 공기층을 통한 대류 및 복사열전달 등으로 구분된다. 캐니스터 주변의 대기온도는 27 °C, 캐니스터의 붕괴열은 0.25 ~ 3.00 kW를 고려하였다.

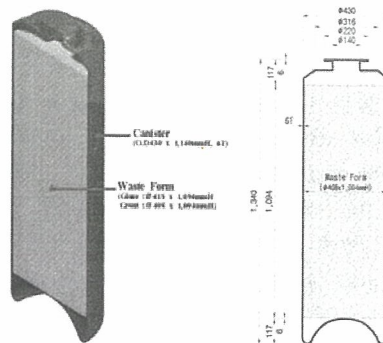


Fig. 1. Waste form canister

그림 2는 붕괴열에 따른 캐니스터의 centerline 온도와 표면온도를 보여주고 있다. 캐니스터의 붕괴열이 3 kW인 경우 최대온도는 glass waste form의 경우 508 °C, ceramic waste form의 경우 450 °C로 나타났다. Ceramic waste form의 경우 캐니스터와 고화체 사이에 5 mm의 air gap이 있지만 고온에서는 복사열전달 영향이 크고 glass의 열전도도가 ceramic 보다 낮아서 고온에서는 glass waste form의 온도가 ceramic waste form에 비하여 높게 나타났다.

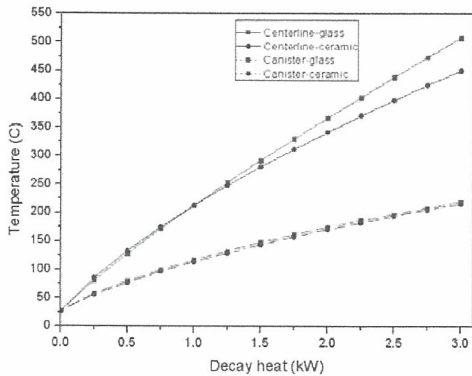


Fig. 2. Canister temperature profiles as a variation of decay heat.

프랑스 La-Hague의 유리고화시설은 150리터 glass waste form 캐니스터의 최대 붕괴열을 3 kW로 설정하였다. 미국 INEEL의 유리화폐기물 저장시설 타당성 분석보고서 등에서는 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 kW 이내로 설계되어야 한다. 여기에서 계산된 온도는 캐니스터가 27 °C의 대기 중에 노출된 조건이며, 저장시설 또는 저장용기에 장전된 경우 캐니스터의 온도는 더 높게 상승할 것이다. 따라서 안전 여유도와 보수성을 감안하여 캐니스터의 최대 붕괴열을 2 kW로 설정하는 것이 타당한 것으로 분석되었다.

그림 3은 캐니스터의 붕괴열이 2.0, 2.5, 3.0 kW일 경우 캐니스터 표면온도에 따른 centerline의 온도를 보여주고 있다. Centerline의 온도를 450 °C로 제한하기 위한 캐니스터 표면의 온도는 붕괴열이 각각 2.0, 2.5, 3.0 kW인 경우에 256 °C, 207 °C, 159 °C로 계산되었다. 따라서

waste form의 저장 허용온도를 만족시키기 위한 캐니스터의 최대 붕괴열은 2 kW, 붕괴열 2 kW에서 캐니스터의 최대 표면온도는 250 °C로 설정하였다.

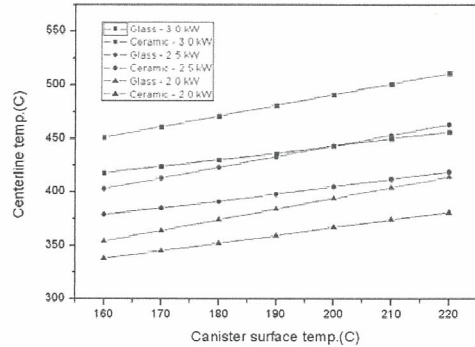


Fig. 3. Centerline temperature as a variation of surface temperatures.

### 3. 결론

본 연구에서는 미국 NRC 10 CFR 60.135 등의 규정과 지침을 기준으로 파이로 폐기물 포장용기의 설계요건을 분석하였다. 또한, 붕괴열에 따른 캐니스터의 centerline 온도 및 표면온도를 평가하였다. Waste form의 제한온도를 400 ~ 500 °C로 고려하여 캐니스터의 최대 붕괴열을 2 kW로 설정하였다. 붕괴열 2 kW에서 캐니스터의 최대 표면온도는 250 °C로 설정하였다. 본 연구결과는 파이로공정 waste form의 loading를 결정, 캐니스터 운반용기 또는 저장시스템의 열전달해석을 위한 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 “원자력 연구개발 사업”의 일환으로 수행되었습니다.

### 5. 참고문헌

[1] US 10 CFR Part 60.135, "Criteria for the Waste Package and Its Components", 2011.  
 [2] DOE/RW- 0351, "Waste Acceptance System Requirement Document", 1998.