

## 금속용기 격실 화재시험 평가

방경석, 이주찬, 서중석, 서기석, 김형진\*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*방사성폐기물관리공단, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

[nksbang@kaeri.re.kr](mailto:nksbang@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

항공기 충돌에 따른 Jet 연료의 누출에 의한 격실 화재에서의 화염온도를 평가하기 위해 격실을 제작하고, 화원으로 Jet-A-1을 사용하여 개구부 크기에 따른 화재시험을 수행하여 화염온도를 평가하였다. 또한, 금속용기의 1/3 축소모델을 제작하여 격실 내에 설치한 후 화염온도가 가장 높게 측정된 화염 온도 조건을 적용하여 화재시험을 수행하였으며, 격실 화재시험에서 측정된 온도를 수송관련 법규에서 규정하고 있는 800 °C 조건으로 환산하여 금속저장용기가 800 °C 화염 속에서 노출된 시간을 평가하였다.

### 2. 화재시험

#### 2.1 시험시설

화재시험을 수행하기 위한 시험시설은 10 cm 두께의 경량 콘크리트를 사용하여 4 m(W) × 4 m(L) × 4 m(H) 크기의 격실로 제작되었으며, 격실의 정면과 후면에 40 cm(H) × 70 cm(W) ~ 50 cm(H) × 80 cm(W)로 크기를 조절할 수 있도록 개구부를 제작하였으며, 지붕에는 굴뚝의 효과를 나타내기 위해 30 cm 직경의 구멍을 내었으며, 격실 내의 화염온도를 측정하기 위해 ungrounded, inconel-sheathed, K-type 열전대를 격실 내부의 바닥으로부터 80 cm, 200 cm 및 320 cm 높이에 각 21개씩 총 63개를 설치하였다.

#### 2.2 화재시험

격실에서 발생하는 열전달현상은 상층부는 화원으로부터 질량과 에너지를 공급받아 인접한 벽면으로 전도와 복사에 의해, 격실 하층부로는 복사에 의해, 그리고 개구부로는 대류에 의해 에너지를 전달하게 된다.

화재시험에 사용한 화원은 일반 항공기에 사용하는 Jet-A-1을 적용하여 개구부의 크기를 바꾸며 시험을 3번 수행하였다.

Test-1은 Jet-A-1 50 litter를 격실에 채우고 개구부의 크기를 50 cm(H) × 80 cm(W)로 적용하여 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 15분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 618 °C로 측정되었다. Test-2는 개구부의 크기를 50 cm(H) × 80 cm(W)로 적용하고 격실 지붕의 30 cm 직경의 홀을 열고 Jet-A-1 50 litter를 격실에 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 12분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 692 °C로 측정되었다. Test-3에서 개구부의 크기는 40 cm(H) × 70 cm(W)를 적용하고 격실 지붕의 30 cm 직경의 홀을 열고 격실에 Jet-A-1 50 litter를 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 17분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 646 °C로 측정되었다.

Test-4는 금속용기 1/3 축소모델을 격실에 설치한 후 화염온도가 가장 높게 측정된 Test-2 조건을 적용하고, Jet-A-1 연료 170 litter를 적용하여 시험을 수행하였다. 시험결과 성염시간은 약 40분 정도 지속되었으며, 화염의 평균온도는 상부에서 약 701 °C로 측정되었고, 중앙부에서는 약 707 °C로 측정되었으며, 하부에서는 약 608 °C로 측정되었다. Test-2 조건의 성염 시간인 12분간의 화염온도와 비교해 보면, 상부에서 633 °C, 중앙부에서 621 °C 및 하부에서 510 °C로 Test-2 조건보다 낮게 측정되었다.

#### 2.3 열 방출속도 및 연료 소모량

격실 화재에서 화염의 온도에 영향을 미치는 중요한 요소는 열 방출속도이다. 격실에서의 화재 시 열 방출속도는 유효 연소열을 사용하여 아래의 식으로부터 계산할 수 있다[1].

$$\dot{Q} = \begin{cases} \dot{m}_f \Delta h_c, & \phi < 1 \\ \dot{m}_{air} \Delta h_{air}, & \phi \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\dot{Q}$ 는 열 방출속도(kW),  $\dot{m}$ 는 질량 연소 유속(kg/s),  $\Delta h$ 는 유효 연소열(kJ/kg)로서, 소비되는 공기의 단위 질량당 방출되는 유효 연소열은 3,000 kJ/kg 정도로 일정하게 유지되며,  $\phi$ 는 등가상

수이다.

Table 1은 화원으로 Jet-A-1을 사용했을 때 계산된 열 방출속도와 그에 따른 연료 소모량을 보여 주고 있다. 여기에서, Jet-A-1의 유효 연소열은 한재섭의 논문[2]에서 (주) SK로부터 ASTM 방법에 따라 수행한 품질검증 결과에서 산출된 43,333 kJ/kg을 적용하였다.

격실에서의 화재시험에서 연료는 50 liter를 사용하였으며, 화재 성장기와 쇠퇴기의 연료 소모량을 제외하면 성염상태에서의 연료 소모량은 약 45 liter 정도로 판단되며, 이 소모량을 고려하여 질량 연소유속과 열 방출속도를 평가하였다.

Table 1에서 보면 개구부의 크기에 따른 연료 소모율은 개구부의 크기가 클 경우 작은 경우보다 큼을 알 수 있다. 따라서, 역시 개구부의 크기가 클 경우 화염의 온도가 높게 측정되었음을 알 수 있다.

격실화재 시험결과 화염의 성염온도는 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다. NUREG-1805[3]에 따르면, 격실화재에서 화염의 온도는 8시간에 이를 때까지 점진적으로 증가하여 화염의 온도가 1,260 °C에 도달한다고 나타내고 있다.

금속용기는 격실 화재에서 화염으로부터 대류열 전달과 복사열전달에 의한 영향을 받게 된다. 따라서, 금속용기 1/3 축소모델이 격실 화재에서 화염으로부터 받는 열은 약 168 kJ/s로 평가되었다. 따라서, 격실 내 화염의 온도는 금속용기가 받는 열량만큼 화염의 온도가 낮아지는 것으로 판단된다.

금속용기 1/3 축소모델이 격실 화재에서 평균 672 °C의 화염 속에서 화재시험기간인 40분 동안 노출될 경우 받게 되는 열은 식 (2)와 같다.

$$Q_M = (hT_F + \sigma FT_F^4) A \frac{\tau_F}{M_M} \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $Q_M$ 은 모델이 받은 열(J/kg),  $h$ 는 대류 열전달계수,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $F$ 는 형태 계수,  $\tau_F$ 는 화재 시간,  $M_M$ 은 모델의 중량이다.

식 (2)로부터 모델이 받은 열은 165,838 J/kg으로 평가되었으며, 이것을 운반관련법규에서 규정하고 있는 800 °C의 화염 속에 노출될 경우 동일한 열을 받게 되는 화재시험 기간은 식 (3)으로부터 36분으로 산출되었다.

$$\tau_T = \frac{Q_M M_M}{A(hT_F + \sigma FT_F^4)} \dots\dots\dots (3)$$

Test-4에서 금속용기 표면 및 canister 표면의 온도는 각각 357 °C 및 247 °C로서 측정되었으며, O-ring의 온도는 171 °C로서 측정되었다. 따라서, 금속용기가 운반되는 조건에서의 격납 건전성은 유지될 것으로 판단된다.

Table 1. Heat Release Rate and Mass Flow Rate.

	Jet-A-1		
	Test-1	Test-2	Test-3
열 방출속도(kJ/s)	1,728	2,160	1,524
질량 연소유속(kg/s)	0.040	0.050	0.035
연소 시간(s)	900	720	1020
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	797.6	797.6	797.6
연소열 상수(k <sub>0</sub> )	0.070	0.088	0.099

Table 2. Fire Test Results of the Metal Cask.

Temperature (°C)			
Metal Cask		Canister	O-ring
Surface	Inside		
357	337	247	171

### 3. 결론

- 3.1 연료 소모율은 개구부의 크기가 클 경우 작은 경우보다 크게 나타났다. 따라서, 개구부의 크기가 클 경우 화염온도가 높게 측정되었다.
- 3.2 격실 내에 금속용기가 저장되었을 때 저장용기가 화염으로부터 받는 열량만큼 화염의 온도는 낮아지는 것으로 나타났다.
- 3.3 금속용기가 800 °C의 화염 속 30분간 견디어야 하는 수송조건에서 격납 건전성은 유지될 것으로 판단된다.

### 4. 참고문헌

- [1] James G. Quintiere, Fundamentals of fire phenomena, Wiley, 2006.
- [2] 한재섭 외, 액적간격이 고정액적의 연소율상수에 미치는 영향에 관한 연구, 한국추진공학회지, Vol.6, pp 47~54, 2002.
- [3] NUREG-1805, Fire Dynamics Tools, U.S. NRC Washington, DC, October 2004.