

## 격실 화재에서의 화염온도 평가

방경식, 이주찬, 김기영, 서중석, 서기석, 김형진\*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

\*한국방사성폐기물관리공단, 대전시 유성구 대덕대로 1045

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

### 1. 서 론

차량의 충돌에 따른 Kerosene 누출에 의한 화재와 항공기 충돌에 따른 Jet 연료의 누출에 의한 격실 화재에서의 화염온도를 평가하기 위해 격실 조건에서 화원으로 Kerosene과 Jet-A-1을 사용하여 과도화재시험을 수행하였으며, 금속저장용기의 축소모델을 격실 내에 설치한 후 가장 높게 측정된 시험결과와 조건으로 과도화재시험을 수행하여 금속저장용기가 화염온도에 미치는 영향을 평가하였다.

### 2. 열 시험

#### 2.1 시험시설

열 시험을 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 21 개씩 총 63개를 설치하였다.

#### 2.2 열 시험

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

열 시험에 사용한 화원은 Kerosene과 일반 항공기에 사용하는 Jet-A-1 두 종류를 적용하여 각각 시험조건을 바꾸며 3번씩 시험을 수행하였다.

Test-1은 격실에 Kerosene 350 litter를 채우고 개구부의 크기를 50 cm(H) × 80 cm(W)로 적

용하여 수행되었다. 이 연료량은 4 m × 3.5 m 크기의 pool에서 화재시험을 수행할 시 10분간 연소할 수 있는 양으로 격실화재 시 약 20분 정도 연소할 것을 기대하였으나 상부 평균 약 561 °C의 온도가 약 2시간 정도 지속되었다. Test-2에서는 화염온도를 좀 더 높이기 위해 개구부의 크기는 50 cm(H) × 80 cm(W)를 적용하고 격실의 지붕에 굴뚝 효과를 내기 위해 설계한 30 cm 직경의 홀을 열고 Kerosene 50 litter를 격실에 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 15분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 675 °C로 측정되었다. Test-3은 개구부의 크기는 40 cm(H) × 70 cm(W)를 적용하고 격실 지붕의 30 cm 직경의 홀을 열고 격실에 Kerosene 50 litter를 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 24분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 611 °C로 측정되었다.

Test-4는 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-5는 50 cm(H) × 80 cm(W)를 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-6은 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-7은 금속저장용기 1/3 축소모델을 격실에 안착한 후 화염온도가 가장 높게 측정된 Test-5 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-5 조건의 성염 시간인 12분간의 화염온도와 비교해 보면, 상부에서 633 °C, 중앙부에서 621 °C 및 하부에서 510 °C로 Test-5 조건보다 낮게 측정되었다.

2.3 열 방출속도 및 연료 소모량

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

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

여기서,  $\dot{Q}$ 는 열 방출속도(kW),  $\dot{m}$ 는 질량 연소유속(kg/s),  $\Delta h$ 는 유효 연소열(kJ/kg)로서, 소비되는 공기의 단위 질량당 방출되는 유효 연소열은 3,000 kJ/kg 정도로 일정하게 유지된다.  $\phi$ 는 등가상수로서 식(2)로부터 결정되며,  $s$ 는 화학량론으로 식(3)으로부터 산출될 수 있다.

$$\phi = \frac{s \dot{m}_f}{\dot{m}_{air}} \dots\dots (2)$$

$$s = \frac{\Delta h_c}{\Delta h_{air}} \dots\dots (3)$$

Table 1은 화원으로 Kerosene과 Jet-A-1을 사용했을 때 계산된 열 방출속도와 그에 따른 연료 소모량을 보여주고 있다. 여기에서, Kerosene의 유효 연소열은 43,200 kJ/kg을 적용하였고[2], Jet-A-1의 유효 연소열은 한재섭의 논문[3]에서 (주) SK로부터 ASTM 방법에 따라 수행한 품질검증 결과에서 산출된 43,333 kJ/kg을 적용하였다.

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

Table 1에서 보면 Kerosene보다 Jet-A-1의 열 방출속도가 큼을 알 수 있다. 따라서, Jet-A-1의 연소 시간이 Kerosene보다 짧았으며, 그에 따라 Jet-A-1에서의 화염온도가 높게 측정되었음을 알 수 있다. 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[2]

에 따르면, 격실화재에서 화염의 온도는 8시간에 이를 때까지 점진적으로 증가하여 화염의 온도가 1,260 °C에 도달한다고 나타나고 있다.

금속저장용기가 격실 내에서 화염으로부터 받는 열은 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$Q_C = \left( \pi DL + 2 \times \frac{\pi D^2}{4} \right) \sigma F T^4 \dots\dots (4)$$

여기서,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann constant, F는 형태계수이다. 식 (4)로부터 금속저장용기가 격실 내에서 화염으로부터 받는 열은 약 115 kJ/s로 계산되었다. 따라서, 격실 내 화염의 온도는 금속저장용기가 받는 열량만큼 화염의 온도가 낮아지는 것으로 판단된다.

3. 결 론

- i) Kerosene보다 Jet-A-1의 열 방출속도 및 질량 연소유속이 크게 나타났다. 따라서, Jet-A-1의 연소 시간이 Kerosene보다 짧았으며, Jet-A-1에서의 화염온도가 높게 측정되었다.
- ii) 연료 소모율은 개구부의 크기가 클 경우 작은 경우보다 크게 나타났다. 따라서, 개구부의 크기가 클 경우 화염온도가 높게 측정되었다.
- iii) 격실 내에 금속저장용기가 저장되었을 때 저장용기가 화염으로부터 받는 열량만큼 화염의 온도는 낮아지는 것으로 나타났다.

4. 참고문헌

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

Table 1. Heat Release Rate and Mass Flow Rate.

	Kerosene		Jet-A-1	
	Test-2	Test-3	Test-5	Test-6
열 방출속도(kJ/s)	1,714	1,155	2,160	1,524
질량 연소유속(kg/s)	0.040	0.027	0.050	0.035
연소 시간(s)	930	1380	720	1020
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	820	820	797.6	797.6
연소열 상수(k <sub>0</sub> )	0.070	0.075	0.088	0.099