



## 등유 및 항공유를 사용한 격실 화재시험

방경식 · 이주찬 · 서중석 · 서기석 · 김형진\*

한국원자력연구원, \*방사성폐기물관리공단

### Compartment Fire Test Using Kerosene and Aviation Fuel

Kyoung Sik Bang · Ju Chan Lee · Chung Seok Seo · Ki Seog Seo · Hyung Jin Kim\*

KAERI, KRMC

#### 요 약

차량의 충돌에 따른 등유의 누출에 의한 화재와 항공기 충돌에 따른 항공유의 누출에 의한 화재 발생 시 격실의 개구부 크기에 따른 화염온도를 평가하기 위해 화원으로 등유와 Jet-A-1을 사용하고 개구부의 크기를 조절해 가며 격실화재시험을 수행하였으며, 가장 높게 측정된 시험결과의 조건으로 과도화재시험을 수행하여 금속저장용기가 화염온도에 미치는 영향을 평가하였다. 시험결과 등유보다 Jet-A-1의 열 방출속도 및 질량 연소속이 크게 나타났으며, Jet-A-1에서의 화염온도가 높게 측정되었다. 연료 소모율은 개구부의 크기가 클 경우 작은 경우보다 크게 나타났으며, 개구부의 크기가 클 경우 화염온도가 높게 측정되었다. 격실 내에 금속저장용기가 저장되었을 때는 저장용기가 화염으로부터 받는 열량만큼 화염의 온도는 낮아지는 것으로 나타났다.

#### 1. 서 론

Baltimore의 Howard Street railroad tunnel에서 2001년 7월 18일 발생한 화재사고 이후 미국의 NRC 주관으로 CNWRA 및 PNNL에서 TN-68-HI-STAR 100-LWT Cask를 대상으로 과도화재에 대한 평가를 수행하였으며<sup>1)</sup>, 2001년 9월 11일 발생한 항공기 테러 이후 Nevada 대학의 Greiner<sup>2)</sup> 및 SNL의 Lopez<sup>3)</sup> 등은 Jet 연료를 사용한 화재사고에 대한 연구들을 활발히 수행하고 있다. 본 격실화재시험 평가에서는 차량의 충돌에 따른 등유 누출에 의한 화재와 항공기 충돌에 따른 Jet 연료의 누출에 의한 화재에서의 화염온도를 평가 및 격실의 개구부 크기에 따른 화염온도를 평가하기 위해 격실조건에서 화원으로 등유와 Jet-A-1을 사용하고 개구부의 크기를 달리 적용하여 격실화재시험을 수행하였다. 또한, 가장 높게 측정된 시험결과의 조건을 적용하여 금속저장용기 축소 시험모델에 대한 과도화재시험을 수행하였다.

#### 2. 격실 화재시험

## 2.1 시험시설

격실화재시험을 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, inconnel-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.

격실 화재시험에 사용한 화원은 등유와 일반 항공기에 사용하는 Jet-A-1 두 종류를 적용하여 각각 시험조건을 바꾸며 3번씩 시험을 수행하였다.

Test-1은 격실에 등유 350 liter를 채우고 개구부의 크기를 50 cm(H) × 80 cm(W)로 적용하여 수행되었다. 이 연료량은 4 m × 3.5 m 크기의 pool에서 화재시험을 수행할 시 10 분간 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 등유 50 liter를 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 등유 50 liter를 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 24분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 611 °C로 측정되었다.

Test-4는 Jet-A-1 50 liter를 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 liter를 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 liter를 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 liter를 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. 격실에서  
의 화재 시 열 방출속도는 유효 연소열을 사용하여 아래의 식으로부터 계산할 수 있다<sup>4)</sup>.

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

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

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

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

Table 1은 화원으로 등유과 Jet-A-1을 사용했을 때 계산된 열 방출속도와 그에 따른 연료  
소모량을 보여주고 있다. 여기에서, 등유의 유효 연소열은 43,200 kJ/kg을 적용하였고<sup>5)</sup>,  
Jet-A-1의 유효 연소열은 한재섭의 논문<sup>6)</sup>에서 (주) SK로부터 ASTM 방법에 따라 수행한 품  
질검증 결과에서 산출된 43,333 kJ/kg을 적용하였다.

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

Table 1에서 보면 등유보다 Jet-A-1의 열 방출속도가 큼을 알 수 있다. 따라서, Jet-A-1의  
연소 시간이 등유보다 짧았으며, 그에 따라 Jet-A-1에서의 화염온도가 높게 측정되었음을  
알 수 있다. 개구부의 크기에 따른 연료 소모율은 개구부의 크기가 클 경우 작은 경우보  
다 큼을 알 수 있다. 따라서, 역시 개구부의 크기가 클 경우 화염의 온도가 높게 측정되었  
음을 알 수 있다.

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

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

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

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.

Table 1. Heat Release Rate and Mass Flow Rate

구 분	등 유		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

### 3. 결 론

차량의 충돌에 따른 등유 누출에 의한 화재와 항공기 충돌에 따른 Jet 연료의 누출에 의한 화재에서의 화염온도를 평가 및 격실의 개구부 크기에 따른 화염온도를 평가하기 위해 격실조건에서 화원으로 등유와 Jet-A-1을 사용하고 개구부의 크기를 달리 적용하여 격실화재시험을 수행하였으며, 가장 높게 측정된 시험결과와 조건을 적용하여 금속저장용기 축소 시험모델에 대한 과도화재시험을 수행하였다. 시험의 주요결과는 다음과 같다.

- i) 등유보다 Jet-A-1의 열 방출속도 및 질량 연소유속이 크게 나타났다. 따라서, Jet-A-1의 연소 시간이 등유보다 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.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 방사성폐기물관리기술개발사업 중장기기획과제(2009T100200033)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. NUREG/CR-6886, Spent Fuel Transportation Package Response to the Baltimore Tunnel Fire Scenario, 2006.
2. Greiner et al., "Thermal Measurements of a Rail-Cask-Size Pipe-Calorimeter in Jet Fuel Fires", ASME 2009 Summer Heat Transfer Conference.
3. Lopez et al., "Regulatory Fire Test Requirements for Plutonium Air Transport Packages: JP-4 or JP-5 vs. JP-8 Aviation Fuel", PATRAM 2010.
4. James G. Quintiere, Fundamentals of fire phenomena, Wiley, 2006.
5. NUREG-1805, Fire Dynamics Tools, U.S. NRC Washington, DC, October 2004.
6. 한재섭 외, 액적간격이 고정액적의 연소율상수에 미치는 영향에 관한 연구, 한국추진공학회지, Vol.6, pp 47~54, 2002.