

Kerosene과 Jet 연료를 사용한 화염온도 평가

방경식, 이주찬, 김기영, 서중석, 서기석, 김형진*, 윤정현*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

*한국방사성폐기물관리공단, 대전시 유성구 대덕대로 1045

nksbang@kaeri.re.kr

1. 서론

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, 2001년 9월 11일 발생한 항공기 테러 이후 Nevada 대학의 Greiner 및 SNL의 Lopez 등은 Jet 연료를 사용한 화재사고에 대한 연구들을 활발히 수행하고 있다. 본 논문에서는 차량의 충돌에 따른 Kerosene 누출에 따른 화재와 항공기 충돌에 따른 Jet 연료의 누출에 따른 격실 화재에서의 화염온도를 평가하기 위해 격실조건에서 화원으로 Kerosene과 Jet-A-1을 사용하여 열 시험을 수행하였다.

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, inconnel-sheathed, K-type 열전대를 격실 내부의 바닥으로부터 80 cm, 200 cm 및 320 cm 높이에 각 21개씩 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 항

공기에 사용하는 Jet-A-1 두 종류를 적용하여 각각 시험조건을 바꾸며 3번씩 시험을 수행하였다.

Test-1은 격실에 Kerosene 350 ℓ를 채우고 개구부의 크기를 50 cm(H) × 80 cm(W)로 적용하여 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 ℓ를 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 ℓ를 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 24분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 611 °C로 측정되었다.

Test-4는 Jet-A-1 50 ℓ를 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 격실의 지붕의 30 cm 직경의 홀을 열고 Jet-A-1 50 ℓ를 격실에 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 12분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 692 °C로 측정되었다. Test-6는 개구부의 크기는 40 cm(H) × 70 cm(W)를 적용하고 격실 지붕의 30 cm 직경의 홀을 열고 격실에 Jet-A-1 50 ℓ를 채운 후 수행되었다. 시험결과 성염시간은 약 17분 지속되었으며, 상부에서 화염 평균온도는 약 646 °C로 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.

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_c = k_0 A_0 \sqrt{H_0} \Delta H_c$$

여기서, \dot{Q} 는 열 방출속도(kW), \dot{m} 는 질량 연소 유속(kg/m²·s), k_0 는 유효 연소율 상수(kg/s·m^{5/2}), A_0 는 연료 표면적(m²), H_0 는 개구부 높이(m)이며, ΔH_c : 유효 연소열(3,000 kJ/kg)이다.

표 2는 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[1], Jet-A-1의 유효 연소열은 한재섭의 논문[2]에서 (주) SK로부터 ASTM 방법에 따라 수행한 품질검증 결과에서 산출된 43,333 kJ/kg을 적용하였다. 일반 연료의 유효 연소율 상수는 0.5 ~ 0.8 kg/s·m^{5/2} 정도를 나타내고 있으며, Kerosene의 유효 연소율 상수는 0.7 kg/s·m^{5/2}을 적용하였다. 한재섭의 논문에서 Jet-A-1은 단일 연료액적의 연소와 관련 액적크기와 상관없이 일정한 유효 연소율 상수는 0.915 kg/s·m^{5/2}을 유지하였다고 하였다. 따라서, Jet-A-1의 유효 연소율 상수는 0.915 kg/s·m^{5/2}을 적용하였다.

표 2에서 보면 연료 소모율이 Kerosene보다 Jet-A-1이 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 화염온도가 높게 측정되었음을 알 수 있다.

격실에서의 화재시험에서 연료는 50 l를 사용하였다. 그러나, 표 2에서 보면 연료 소모량은 약 40 l 정도였다. 이것은 성염 상태에서 소모된 량으로 화재 성장기와 쇠퇴기의 연료 소모량을 계산하면 비슷하게 소모되었을 것으로 판단된다.

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.

3. 결론

i) Kerosene보다 Jet-A-1의 연료 소모율이 크게

나타났다. 따라서, Jet-A-1의 연소 시간이 Kerosene보다 짧았으며, 그에 따라 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) 격실에서 화재 시 화염의 성염온도는 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다.

4. 참고문헌

- [1] James G. Quintiere, Principles of fire behavior, Delmar Thomson Learning, 1998.
- [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.

Table 1. 성염온도 및 유지시간

연료종류	개구부 (cm ²)	성염온도 (°C)	성염시간 (min.)	연료량 (litter)
Kerosene	80 × 50	561	120	350
	80×50+굴뚝	675	15	50
	70×40+굴뚝	611	24	50
Jet A-1	80 × 50	618	16	50
	80×50+굴뚝	692	12	50
	70×40+굴뚝	646	17	50

Table 2. 열 방출속도 및 연료 소모량

	Kerosene		Jet-A-1	
	Test-2	Test-3	Test-5	Test-6
열 방출속도(kJ/s)	1485	1040	1941	1360
질량 연소유속(kg/s)	0.495	0.347	0.647	0.453
연료 소모율(kg/s)	0.035	0.025	0.045	0.031
연소 시간(s)	930	1380	720	1020
소모량(Litter)	40.1	41.7	40.5	40.2

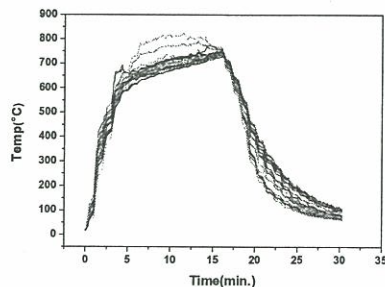


Fig. 1. Test-4의 상부 화염온도