

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

운반용기의 Pool Fire Test

Pool Fire Test for Shipping Package

방경식, 이주찬, 주준식, 서기석, 김호동
정성환, 이홍영*

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

한국수력원자력주식회사*
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한 번에 PWR 사용후핵연료 12다발을 운반할 수 있는 KN-12 운반용기의 1/8 slice 모델을 사용하여 open pool fire test 방법으로 화재시험을 수행하였다. 유효방사계수, 흡수계수 및 화염보다 차가운 표면으로부터의 복사 영향을 고려한 보상된 화염온도를 적용하여 열 해석을 수행하고 시험결과와 비교 분석한 결과 화재시험결과가 해석결과보다 높게 나타났으나, 과도시간에 따른 온도변화 경향은 매우 유사하게 나타났다. 이것은 해석에 적용된 매개변수들이 화재시험의 경우보다 보수적으로 적용되었기 때문에 나타난 결과로 판단되며, 화재시험에서 보다 적절한 자료를 생산하기 위해서는 향후 보다 많은 실험이 수행되어야 할 것이다.

Abstract

The open pool fire test was performed by using one-eighth slice model of the KN-12 Shipping Cask which can carry 12 PWR spent nuclear fuels at one time. The thermal analysis that was applied effective emissivity, absorptivity, and compensated flame temperature, which was considered effect by radiation from cooler surface, was conducted. The thermal analysis result was higher than fire test result, but the tendency of the temperature according to transient was very similar. It was because the parameter, which was used to thermal analysis, was applied more conservatively than the fire test. It is necessary that more experiments are carried out to produce more appropriate data in the fire test from now on.

1. 서 론

방사성 물질을 안전하게 운반하기 위한 운반용기는 과기부고시 제 2001-23호, IAEA Safety Series No. TS-R-1 및 10 CFR Part 71과 같은 법규에서 명시하고 있는 가상 사고조건인 주변온도 800℃의 열 조건에서 견딜 수 있도록 설계되어야 하며, 그러한 능력은 실제 열 시험을 통해서 또는 대체 방법인 전산코드를 사용한 공학적 평가를 통해 입증될 수 있다[1~3].

한번에 PWR 사용후핵연료 12다발을 운반하는 KN-12 운반용기는 그 크기 및 중량이 엄청나기 때문에 실제 용기를 사용하여 열 시험을 수행하기에는 현실적으로 많은 무리가 따르게 된다. 따라서, 전산코드를 사용하여 800 ℃ 열 조건에서의 운반용기 생존 능력을 입증하였으며, 생존 능력 입증에 사용된 전산해석 코드 및 해석방법을 검증하기 위한 열 시험을 수행하기 위하여 단면은 실제 수송용기의 크기와 같고, 내부공간 높이는 1/8로 축소된 slice 모델을 제작하였다. 법규에서 규정하고 있는 열 시험방법에는 furnace test 와 open pool fire test 방법이 있다. 그러나, Slice 모델을 시험할 만한 크기의 furnace 가 없기 때문에 open pool fire test 방법으로 화재시험을 수행한 후 시험 방법과 동일하게 모델링을 하여 수행한 해석결과와의 비교를 통해 해석 방법을 검증하고자 하였다.

국내·외 관련법규에서 화재사고에서의 조건은 화염의 방사계수가 0.9, 표면 흡수계수가 0.8, 화염의 온도 800 ℃에서 30분 이상이라고 규정하고 있다. 그러나, 실제 화재시험에 있어서의 화염은 공간 파동이 심하고, 불 균일하며, 통제하기 매우 힘들다. 따라서, 측정된 화염 온도 결과를 토대로 보상된 화염온도와 추론된 방사계수 및 흡수계수를 적용하여 해석을 수행하고 시험결과와 비교하였다.

2. 화재시험

가. 시험모델

화재시험에 사용된 slice 모델은 단면방향은 실제 수송용기와 동일하며, 축 방향은 실제 수송용기의 내부공간(cavity) 높이의 1/8로 축소되었으며, 축 방향의 열 전달을 최소화하기 위하여 세라믹 울을 사용하여 slice 모델의 양쪽 끝을 단열 시키고, 이 들을 고정시키기 위하여 판금피복으로 감싼 후 강 봉을 사용하여 slice 모델과 연결하였다. 몸체, 핵연료 바스켓, 전기히터 및 절연체를 포함한 slice 모델의 중량은 약 8.1 톤이며, 모델 취급을 위해 몸체에 크레인 어댑터를 부착하였다.

사용후핵연료 집합체 12다발로부터 발생하는 붕괴열을 모사하기 위해 핵연료 바스켓 내부에 전기히터를 사용하였다. 전기히터는 사각 튜브 형상을 하고 있으며, 핵연료 바스켓 내부에 삽입할 수 있도록 핵연료 바스켓 내부보다 약간 작게 제작되어 핵연료 바스켓 과 전기히터 사이는 약 3~5 mm의 일정한 공간을 유지하도록 하였다. 전기히터의 내부 공간은 축 방향의 열 전달을 방지하기 위하여 세라믹 울로서 채워졌으며, 전원 케이블은 절연된 양끝을 통하여 외부로 통과되었다.

화재시험에서 모델의 온도측정을 위해 스테인레스 강으로 외장된 직경이 1.6 mm인 K형 열전대 61개 및 화염의 온도측정을 위해 스테인레스 강으로 외장된 직경이 3 mm인 K형 열전대 23개를 검·교정하여 3개의 단면방향으로 그림 1과 같이 설치하였다[4]. 열전대

는 핵연료 바스켓 표면 및 profile에는 spot 용접으로 부착하였으며, moderate rod에는 홈을 파서 그 안에 설치하였다. Slice 모델 표면에는 지름 1.65 mm, 깊이 5 mm의 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하고 열전달을 향상시키는 밀봉재로 공간을 채운 후, 주변 네 곳은 prick punch 방법으로 고정하였으며, 모델 주변의 화염온도를 측정하기 위한 열전대는 모델로부터 10 cm, 20 cm 및 40 cm 떨어진 곳에 설치하였다.

나. 열 유량

KN-12 수송용기의 해석에서는 사용후핵연료 집합체 12다발로부터 발생하는 붕괴열을 13 kW로 고려하였다. 실제 수송용기에는 법규에서 규정하고있는 낙하사고 발생 시에 수송용기를 충격으로부터 보호하기 위해 뚜껑과 바닥에 충격 완충체가 부착된다. 그러나, 충격 완충체는 단열 효과를 가지고 있기 때문에, 수송용기의 내부에서 발생하는 붕괴열은 충격 완충체 사이의 자유표면으로부터 주변환경으로 방출된다. 따라서, 실제 수송용기의 내부 공간 높이의 1/8로 축소하여 제작된 slice 모델을 사용한 화재시험에서는 이러한 사항을 고려하여 다음과 같은 식으로부터 전기히터의 열 유량을 산출하였으며, 2.287 kW로 계산되었다.

$$Q_{EH} = Q \times ((hc/8)/l_{AZ}) \times f_c \dots\dots\dots (1)$$

여기서,	Q = 13 kW	.....	실제 KN-12 수송용기의 열 유량
	hc = 4190 mm	.....	내부공간(cavity)의 높이
	l _{AZ} = 3658 mm	.....	핵연료의 길이
	l _F = 3409 mm	.....	충격 완충체 사이의 길이
	f _c = hc/l _F	.....	교정계수

다. 측정시스템

화재시험에 사용한 온도측정시스템은 National Instruments Company에서 제작한 제품으로 그림 2에서와 같이 열전대 탐지기, 신호 조절기, 아날로그/디지털 변환기 및 P/C로 구성된다.

열전대 탐지기는 32개의 열전대를 부착할 수 있는 SCXI-1303 모델 3개로 구성되어 있으며, ±0.03 °C 이하의 측정오차를 나타내고 있다. 열전대 탐지기에서 탐지된 신호는 모델 SCXI-1102인 신호 조절기를 통하여 filtering되고 증폭되어 아날로그/디지털 변환기로 전송되며, 이 과정에서의 오차범위는 ±0.5 °C이다. 신호 조절기를 통하여 조정된 아날로그 신호는 NI6040E 모델의 아날로그/디지털 변환기에서 디지털 신호로 변환되어 P/C에 설치된 LabView 소프트웨어에 의해 분석되고 저장되며, 과도시간에 따른 온도변화를 모니터링하게 된다.

라. 화재시험

화재시험은 무연조건 하에서 open pool fire 방법으로 3.5 m × 4.0 m 크기를 가진 화재시험설비에서 수행되었다. 화재시험설비의 문을 열고 크레인을 사용하여 slice 모

델을 화재시험설비 내의 모델 supporter에 설치하였다. 모델 및 모델주변의 화염온도를 측정하기 위해 설치된 84개의 열전대와 12개 전기히터의 전원 케이블을 화염으로부터 보호하기 위해 그림 3에서와 같이 세라믹 튜브, 3M E-5A-3 Mat 및 세라믹 울을 사용하여 3중으로 처리한 후 열전대는 열전대 탐지기에, 12개의 전기히터로부터 나오는 전원 케이블은 전원 분배기(distributor)에 연결하였다. 화재시험에 있어서 전기히터로의 안정적인 전원 공급은 시험결과에 미치는 중요한 한 요소이다. 따라서, 전원 공급을 안정적으로 하기 위해 전기히터에 투입된 전원은 자동전압조정기를 거쳐 슬라이닥스(Slidacs)를 통해 전원 분배기로 연결하였다.

화재시험은 전기히터를 가동하여 태양 열유속이 없는 약 8 °C의 주변온도에서 slice 모델의 온도분포가 평형상태에 도달한 후 화재시험설비 pit 내에 물을 20 cm 높이로 채우고, slice 모델의 가장 낮은 바닥면과 등유의 높이가 1 m 이상 차이가 나도록 등유를 채워 약 38분 동안 수행되었다.

화재시험에서 측정된 화염의 온도는 모델 상부 방향에서 평균 542 °C, 중앙부 방향에서 평균 705 °C, 하부 방향에서 평균 764 °C로 측정되었다. 또한, 화재시험 후 냉각기간 동안의 주변온도는 모델 상부 방향에서 평균 12 °C, 중앙부 방향에서 평균 13 °C, 하부 방향에서 평균 20 °C로 측정되었다.

3. 열 해석

열 해석은 KN-12 수송용기의 해석에 사용된 LS-DYNA 전산코드를 사용하여 초기 조건과 경계조건을 제외하고, 화염온도는 보상된 화염온도가 적용되었으며, 화염방사계수는 유효방사계수가, 그리고 모델 표면흡수계수는 흑체의 경우로 적용되었다.

화염으로부터 모델 표면으로의 열 전달은 복사 및 대류 열전달에 의해 지배되며 다음 식으로 정의된다[5].

$$q = [\sigma (T_f^4 - T_s^4) / (1/\epsilon_f + (1/\epsilon_s) - 1)] + h(T_f - T_s) \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서, σ : Stefan-Boltzmann radiation constant($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)
 T_f : flame temperature(K)
 T_s : temperature of the model surface(K)
 ϵ_f : flame emissivity coefficient
 ϵ_s : emissivity coefficient of the model surface
 h : convective heat transfer coefficient($\text{W/m}^2 \text{ K}$)

가. 복사 열전달

화재시험에서의 복사 열전달은 화염의 방사계수, 화염의 온도 및 표면의 온도에 의해 지배된다. 법규에서는 화염의 방사계수를 0.9, 표면의 흡수계수를 0.8, 그리고 화염의 온도를 800 °C로 규정하고 있다. 그러나, 실제 pool fire에서의 화염의 방사계수는 화염의 두께에 의존하며, 화염의 두께에 따른 유효방사계수는 참고문헌 [6]으로부터 구할 수 있다. 따라서, 화염의 방사계수는 0.75가 적용되었으며, 표면의 흡수계수는 검게 그을렸기

때문에 흑체의 기준인 1.0이 적용되었다.

화재시험에서 화염의 온도를 측정하기 위해 설치된 열전대는 화염 안에서의 차가운 표면 및 표면 외부의 주변온도로부터의 복사에 의한 영향을 받기 때문에, 열전대에서 측정된 온도는 실제 화염의 온도가 아니라 많은 복사 열 손실이 반영된 온도이다. 이러한 복사 열 손실은 표면의 온도가 90 °C일 경우 약 15%, 820 °C일 경우 약 5~8%에 이른다고 평가되었다[7]. 따라서, 측정된 화염온도에 8%씩 보상하여, 모델 상부 방향은 585 °C, 중앙부 방향은 761 °C, 하부 방향에서 평균 825 °C로 적용되었다.

나. 대류 열전달

Burgess와 Fry는 70%의 연소효율과 분당 6mm의 연소효율을 가진 등유를 연료로 사용한 open pool fire의 경우에 화염의 기체속도에 대한 상관관계식을 개발하였으며, 이 상관 관계식으로부터 전형적인 화염의 기체속도는 6~12 m/s의 범위라고 하였다[8]. 이 경우 대류 열전달계수는 12 W/m² K로 평가된다. 그러나, 본 화재시험에서 사용된 화재시험설비에서는 화염으로부터의 매연을 방지하고자 연료의 완전연소를 위하여 물과 함께 강제 송풍을 하였으며, 이때 송풍기로부터의 속도는 20 m/s 이상이다. 따라서, 화재동안의 대류 열전달계수는 25 W/m² K가 적용되었다.

4. 결과 및 토의

시험결과와 해석결과를 비교하여보면 표 1에서와 같이 핵연료 바스켓과 Profile의 온도는 해석결과가 시험결과보다 약 20~50 °C 더 높게 나타났으나, 과도시간에 따른 온도 변화 경향은 그림 5~7과 같이 매우 유사하게 나타났다. 이것은 해석에 적용하기 위해 평가된 매개변수들이 실제 시험의 경우보다 보수적으로 적용되었기 때문으로 나타난 결과라고 판단된다. 이와 달리 중앙부와 하부에서의 표면온도는 해석결과보다 시험결과가 오히려 높게 나타났다. 이것은 slice 모델에 부착된 열전대가 화재시험시설에 설치될 때 움직임에 의해 접촉이 나빠졌거나, 아니면 높은 화염의 영향을 받은 다른 부분으로부터의 열 영향을 받았을 것으로 판단된다.

화재시험에 있어서 화염으로부터 모델로 유입되는 열 유속을 평가하기 위해서는 시험 모델 표면 및 시험모델 주변의 정확한 화염온도측정이 무엇보다 중요하다. Burgess는 화염온도는 시험모델로부터 50 cm 떨어진 곳에 설치한 열전대가 화염보다 차가운 모델표면으로부터의 복사에 의한 영향을 가장 적게 받는다고 하였다[6]. 실제로 본 화재시험결과로부터 보면, slice 모델표면으로부터 10 cm, 20cm, 40 cm 떨어진 곳에서의 화염온도는 상부에서 평균 476 °C, 518 °C, 679 °C로 나타났으며, 중앙부에서 641 °C, 688 °C, 827 °C로 나타났고, 하부에서는 slice 모델표면으로부터 10 cm 및 20cm 떨어진 곳에서의 화염온도가 평균 729 °C 및 798 °C로 나타났다. 따라서, 화재시험에서 화염의 온도를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 모델로부터 50 cm 떨어진 곳에 열전대를 설치하는 것이 바람직하다고 생각되며, 보다 적절한 자료를 생산하기 위해서는 향후 보다 많은 실험이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 과학기술부 고시 제 2001-23호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정".
2. IAEA Safety Series No. TS-R-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 2000 Ed.
3. U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, "Packaging of Radioactive Material for Transport and Transportation of Radioactive Material under Certain Conditions", as revised in Federal Register, Vol. 48, No. 165, 1983.
4. GNB report GNB B 170/99, Rev. 2, September 2000, "Safety Tests Program for Spent Fuel Shipping Cask CASTOR[®] KN-12.
5. J.P. Holman, "Heat Transfer", ISBN 0-07-Y66459-5.
6. M.H. Burgess, "Heat Transfer Boundary Conditions in Pool Fires", IAEA -SM-286/75P, 1986.
7. J.J. Gregory, R. MAta, and N.R. Keltner, "Thermal Measurements in a Series of Large Pool Fires", SNL, Albuquerque, NM, SAND85-0196,TTC-0659,UC-71, 1987.
8. Burgess, M.H., and Fry, C.J., "Fire Testing for Package Approval," Int. J. Radioactive Materials Transport, Vol. I, No. 1, pp. 7-16, Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, England, 1990.

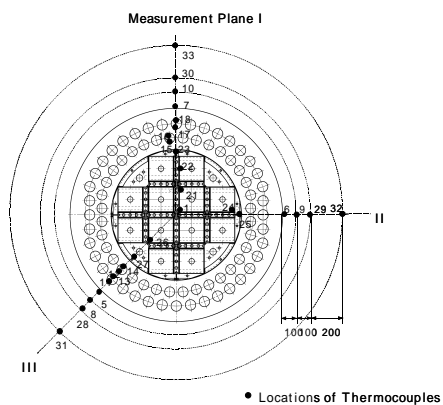


그림 1. 모델/화염온도측정위치



그림 2. 측정 시스템.



그림 3. 화재시험시설에 설치된 모델.



그림 4. 화염이 성염된 모습.

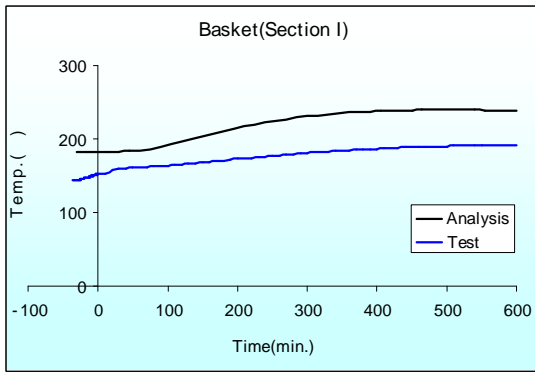


그림 5. Basket에서의 과도시간에 따른 온도변화.

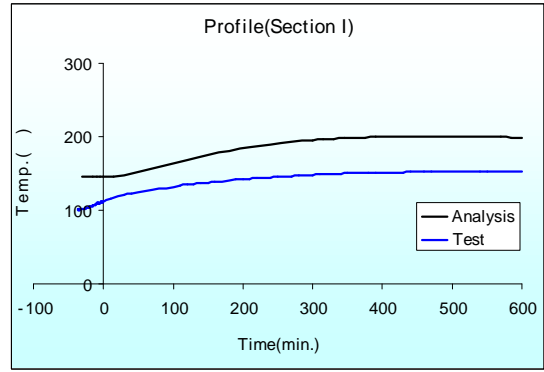


그림 6. Profile에서의 과도시간에 따른 온도변화.

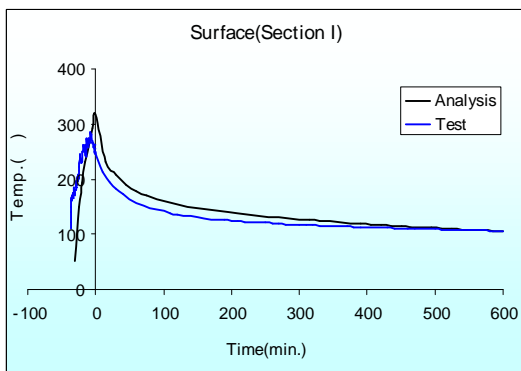


그림 7. 상부표면에서의 과도시간에 따른 온도변화.

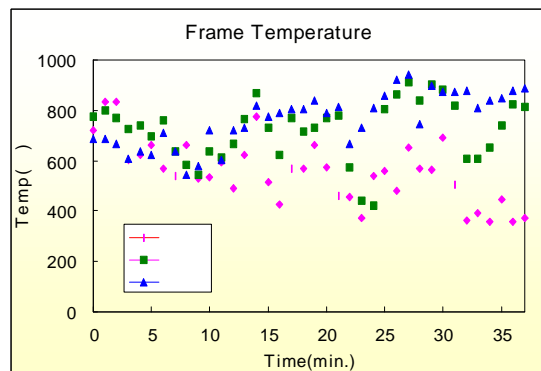


그림 8. 화재시험기간 동안 화염온도 변화.

표 1. Slice 모델에 대한 화재시험결과 및 해석결과 비교

Location		Test		Analysis	
		Max. Temp. (°C)	Time(h)	Max. Temp. (°C)	Time(h)
Section I (상 부)	Basket	192	11.33	240	8.25
	Profile	153	9.00	200	7.75
	P.E. Rod	124	3.17	164	1.75
	Surface	285	0.00	288	0.00
	Ambient	585		585	
Section II (중앙부)	Basket	163	9.83	188	5.50
	Profile	157	9.50	181	5.00
	Surface	371	0.00	306	0.00
	Ambient	761		761	
Section III (하 부)	Basket	183	9.50	220	6.90
	Profile	142	4.83	164	3.96
	P.E. Rod	136	2.33	162	1.89
	Surface	382	0.00	324	0.00
	Ambient	825		825	