

해석방법 검증을 위한 열 전달시험

Heat Transfer Test for Verification of Analysis Method

방경식, 이주찬, 구정희, 주준식, 서기석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한 번에 12다발의 사용후핵연료를 운반할 수 있는 KN-12 수송용기의 안전성을 입증하기 위하여 사용된 전산해석 코드 및 해석방법을 검증하고, 수송용기의 내부 및 외부의 온도분포를 확인하기 위하여 열 전달시험을 수행하였다. 열 전달시험은 단면이 실제 수송용기의 크기와 같고, 내부공간 높이를 1/8로 축소한 시험모델의 내부에 사용후핵연료를 모사한 전기히터를 사용하여 주변온도 38 °C의 조건에서 7일간 수행되었다. 열 전달시험 결과 수송용기 표면에서의 온도는 평균 74 °C로 측정되었으며, 열 전달시험과 같은 조건하의 열 해석결과에서는 75 °C로 계산되었으며, 열 전달시험 결과와 열 해석결과는 비교적 잘 일치하였다.

Abstract

The heat transfer test was conducted not only to verify the numerical tools and methods used for the safety proof of the real cask but also to determine of the internal and external temperatures of the KN-12 Shipping Cask which can carry 12 PWR spent nuclear fuels at one time. The test model was a one-eighth slice model , in that its exposed length is 1/8th of the height of the real casks cavity. The heat transfer test was performed for 7 days under an ambient temperature conditions of 38 °C by using the heat source with electrical heater. The temperature of the surface was 74 °C in the heat transfer test, and 75 °C in the analysis under the same conditions as the heat transfer test. Agreement between the heat transfer test and thermal analysis is relatively very good.

1. 서 론

국내 원자력발전소에서 연소한 후 방출되는 사용후핵연료의 발생량은 점차 누적되어가고 있으며, 현재 고리 원자력발전소 1, 2호기의 사용후핵연료 저장풀은 용량을 초과하고

있는 형편으로 한 번에 4다발을 적재할 수 있는 수송용기를 사용하여 같은 부지의 다른 호기로 운반하고 있으나, 이 역시도 누적되어 가고 있는 사용후핵연료의 양을 감당하지 못하여 운반 효율을 증대하기 위하여 한 번에 12다발을 운반할 수 있는 수송용기를 설계·제작하게 되었다.

원자력발전소에서 방출되는 사용후핵연료를 안전하게 운반하기 위한 수송용기를 개발하기 위해서는 국내·외 법규에서 명시하고 있는 규정에 따라 안전하게 설계되어야 하며, 수송용기의 안전성은 입증되어야 한다. 안전성을 입증하는 방법으로는 첫 번째, 안전성시험을 수행하여 입증할 수 있으며, 두 번째로는 대체 방법인 공학적 평가 또는 전산코드를 사용한 해석을 통해 입증할 수 있다[1~3].

한번에 12다발을 운반할 수 있는 KN-12 수송용기는 그 크기 및 중량이 엄청나기 때문에 안전성시험을 수행하기에는 현실적으로 많은 무리가 있으므로 대체 방법인 전산코드를 사용하여 안전성을 입증하였다. 따라서, 안전성 입증에 사용된 전산해석 코드 및 해석 방법을 검증하고, 수송용기의 내부 및 외부의 온도분포를 확인하기 위하여 단면이 실제 수송용기의 크기와 같고, 내부공간 높이를 1/8로 축소한 slice 모델을 사용하여 열 전달 시험을 수행하였다.

2. 열 전달시험

가. 시험모델

열 전달시험에는 그림 1과 같이 1/8 slice 모델이 사용되었다. 1/8 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 8.1톤이며, 모델 취급을 위해 몸체에 크레인 어댑터를 부착하였다.

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

열 전달시험에서 모델의 온도측정을 위해 스테인레스 강으로 외장된 직경이 1.6 mm인 K형 열전대 총 61개를 검·교정하여 3개의 단면방향으로 설치하였다[4]. 열전대는 핵연료 바스켓 표면 및 profile에는 spot 용접으로 부착되었으며, 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 곳을 prick punch를 사용하여 고정시켰다.

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 열 전달시험에서는 이러한 사항을 고려하여 식 1로부터 전기히터의 열 유량을 산출할 수 있었으며, 2.287 kW로 계산되었다.

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

여기서 , $Q = 13 \text{ kW}$ 실제 KN-12 수송용기의 열 유량
 $h_c = 4190 \text{ mm}$ 내부공간(cavity)의 높이
 $l_{AZ} = 3658 \text{ mm}$ 핵연료의 길이
 $l_F = 3409 \text{ mm}$ 충격 완충체 사이의 길이
 $f_c = h_c/l_F$ 교정계수

다. 측정시스템

열 전달시험에 사용한 온도측정시스템은 그림 2와 같으며, National Instruments Company에서 제작한 제품으로 열전대 탐지기, 신호 조절기, 아날로그/디지털 변환기 및 P/C로 구성된다.

열전대 탐지기는 32개의 열전대를 부착할 수 있는 SCXI-1303 모델 3개로 구성되어 있으며, $\pm 0.03 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하의 측정오차를 나타내고 있다. 열전대 탐지기에서 탐지된 신호는 모델 SCXI-1102인 신호 조절기를 통하여 filtering되고 증폭되어 아날로그/디지털 변환기로 전송되며, 이 과정에서의 오차범위는 $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 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. 열 전달시험

열 전달시험은 그림 3과 같이 열 환경시험설비의 지붕을 열고 크레인을 사용하여 slice 모델을 설비 내에 안착시킨 후 모델에 설치된 61개의 열전대를 열전대 탐지기에 연결하고, 12개의 전기히터로부터 나오는 전원 케이블을 슬라이드스(Slidacs)에 연결한 후 열 환경시험설비의 지붕을 닫은 후, 열 환경시험설비의 온도를 법규에서 규정하고 있는 38°C 로 설정하고 열 환경설비 및 전기히터를 가동하는 조건을 7일간 지속한 후 설비 및 전기히터의 가동을 중지하고 시험을 종료하였다.

마. 열 해석

Slice 모델에 대한 열 해석은 KN-12 수송용기의 해석에 사용된 LS-DYNA 전산코

드를 사용하여 동일한 모델링 기법을 적용하여 수행되었다. 열 유량은 열 전달시험과 같은 2.287 kW를 고려하였으며, 경계조건으로는 slice 모델 표면의 복사계수로 0.93을, 대류계수는 $1.312(\Delta T)^{0.33}$ 을 고려하였다.

3. 결과 및 토의

태양 열 유속이 없으며, 평온하고, 정지된 38 °C의 주변온도 및 2287 ±2W의 열 유량 조건을 7일간 지속한 열 전달시험에서 slice 모델의 열 평형은 그림 4와 같이 약 96시간이 경과한 후 도달되는 것으로 나타났으며, 시험결과 및 해석결과를 표 1에 요약하였다.

시험결과를 해석결과와 비교하여보면 일반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 수송용기 몸체에서의 온도는 해석결과보다 전반적으로 약 5~10 °C 낮음을 알 수 있으며, 이것은 해석이 보수적으로 수행되었기 때문으로 판단된다.

핵연료 바스켓에서의 온도는 해석결과가 시험결과보다 약 20~50 °C 더 높음을 알 수 있다. 이것은 실제 slice 모델에서는 핵연료 바스켓과 이를 유지시키기 위한 구조물 사이의 틈이 0.1~0.3mm로 측정되었지만, 해석에서는 이들 틈을 전반적으로 0.3 mm로 고려하였기 때문에 나타난 결과이다. 즉, 해석에서 너무 보수적으로 이들 틈을 고려하였기 때문에 slice 모델보다 열 저항이 커져 핵연료 바스켓 부분에서 예상된 온도가 보수적인 결과를 나타낸 것이다.

Slice 모델을 사용하여 38 °C 주변온도조건에서 수행한 열 전달시험에서 KN-12의 설계 요구사항 중 하나인 중성자 차폐체의 허용온도를 비교해 볼 수 있다. KN-12 수송용기의 중성자 차폐용으로 사용된 폴리에틸렌 rod의 사용온도 범위는 120 °C이하이다. 열 전달시험결과 폴리에틸렌 rod의 최고 온도는 79 °C로 측정되었다. 따라서, KN-12의 중성자 차폐체는 38 °C 주변온도조건 하에서 건전성이 유지되는 것으로 판단된다.

열 전달시험결과를 분석해 보면 slice 모델의 표면을 통해서 외부로 빠져나간 열 유량은 약 70%이며, 양쪽 끝에 설치된 단열재를 통해 외부로 빠져나간 열 유량은 약 30%로 나타났다. 그러나, 실제 KN-12 수송용기는 긴 원통형 실린더 형상을 하고 있기 때문에 대부분의 열은 표면을 통해서 빠져나가게 될 것이다. 따라서, KN-12 수송용기의 표면온도는 열 전달시험결과보다 약간 높을 것이라 판단되지만 폴리에틸렌의 안전 허용온도에는 아무런 영향을 주지 않으리라 판단된다.

4. 결 론

열 전달시험결과 및 해석결과를 비교를 통하여, KN-12 수송용기의 열 해석에 사용된 전산해석 코드 및 해석방법은 건전성을 입증하기에 충분함을 알 수 있었다. 또한, 중성자 차폐용으로 사용된 폴리에틸렌 rod는 38 °C 주변온도조건 하에서 충분히 건전성이 유지되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 과학기술부 고시 제 2001-23호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정".
2. IAEA Safety Series No. ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996 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.



(a) 몸체, 핵연료 바스켓, 전기히터.



(b) 절연체.

그림 1. KN-12 수송용기 1/8 Slice 모델.



그림 2. 측정 시스템.



그림 3. 열 환경설비 내의 시험모델.

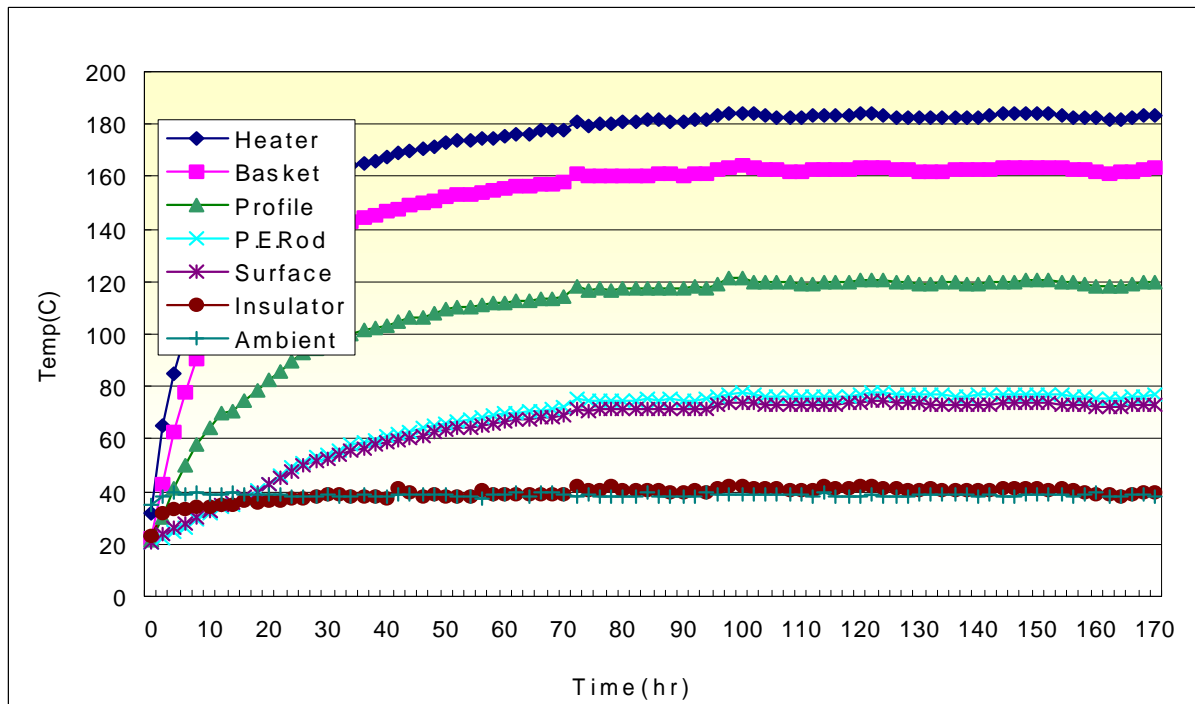


그림 4. 과도시간에 따른 온도변화.

표 1. Slice 모델에 대한 열 전달시험결과 및 열 해석결과 비교

Location		Temperature(°C)		
		Test	Analysis	Difference
Section I (상 부)	Basket	163	198	+ 35
	Profile	120	162	+ 42
	P.E. Rod	77	83	+ 6
	Surface	73	75	+ 2
Section II (중앙부)	Basket	133	138	+ 5
	Profile	129	129	0
	Surface	74	76	+ 2
Section III (하 부)	Basket	148	174	+ 26
	Profile	86	101	+ 15
	P.E. Rod	75	85	+ 10
	Surface	72	76	+ 4
Ambient		38±1	38	±1