

KSC-7 수송용기의 건식조건에 대한 열적 건전성 평가

이주찬, 방경식, 이홍영, 도재범, 노성기
한국원자력연구소

요 약

본 연구에서는 7개의 PWR 사용후핵연료집합체를 운반할 수 있는 KSC-7 수송용기의 건식수송조건에 대한 열적 건전성을 평가하였다. 수송용기 축소모델을 제작하여 열시험을 수행하였고 또한, 시험조건과 동일한 조건으로 열전달해석을 수행하여 두가지 결과를 비교 분석함으로써 시험 및 해석결과에 대한 신뢰성을 검증하였다. 신뢰성이 검증된 해석방법을 이용하여 수송용기 본체 및 핵연료집합체에 대한 열전달해석을 수행함으로써 방사선차폐체 및 핵연료봉에 대한 열적 건전성을 입증하였다. 또한, 수송용기의 온도상승에 따른 구조적 건전성을 평가하기 위한 열응력해석을 수행하였다.

1. 서론

원자로에서 조사된 사용후핵연료는 장기간 강한 방사선과 붕괴열이 방출된다. 따라서 사용후핵연료를 안전하게 운반하기 위하여 수송용기는 방사선차폐의 건전성, 격납경계의 유지 및 내부 붕괴열의 적절한 방출 등의 설계기준을 만족하도록 설계 제작되어야 한다. IAEA 규정 및 국내 원자력법규에서 수송용기는 정상수송조건뿐만 아니라 가상 사고조건에서도 열적으로 안전하게 설계되어야 한다고 엄격하게 규정하고 있다. 수송용기의 열적인 건전성을 유지시키기 위해서 정상조건에서는 핵연료에서 발생하는 붕괴열을 적절하게 전달시켜야 하며, 화재사고조건에서는 외부로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 용기 내부의 온도를 가능한 낮게 함으로써 설계압력 유지 및 차폐체의 건전성을 유지시켜야 하는 양면적인 설계 요구사항을 갖는다.

KSC-7 수송용기는 핵연료를 담은 내부공간(cavity)에 물을 채우는 습식(wet type)과 불활성기체를 채우는 건식(dry type)을 겸용할 수 있도록 설계하였다. 습식의 경우 냉각수 온도상승으로 인한 내부압력이 높게 올라가는 단점이 있어 최근에는 내부 핵연료의 온도가 다소 높게 올라가더라도 건식을 사용하는 것이 세계적인 추세이다. 사용후핵연료가 공기에 의해 냉각되는 경우 지르칼로이와 UO_2 의 산화를 야기시켜 피복관의 균열이 발생할 수 있으므로 건식조건에서는 불활성기체(헬륨 또는 아르곤)를 충전한다.

2. KSC-7 수송용기의 개요

그림 1은 수송용기의 개략도이며, 수송용기는 뚜껑을 포함한 용기본체와 충격완충체 및 결속장치 등으로 구분된다. 수송용기 본체는 핵연료를 담은 7개의 핵연료장전통(fuel basket)과 감마선차폐체, 중성자차폐체 및 구조재 그리고 뚜껑(lid) 등으로 구성된다. 수송용

기의 주요 구조재로는 스테인레스강, 감마선차폐체로는 납, 그리고 중성자차폐체로는 실리콘 복합체를 사용하였다. 실리콘복합체는 중성자차폐 성능은 우수하나 열전도율이 낮은 단점을 가지고 있다. 따라서 중성자차폐체 내부에 열전도성이 좋은 전열동판을 부착하고 또한, 수송용기 외부표면에 스테인레스강 냉각판을 부착하여 적절한 열전달이 이루어지도록 하였다.

운반대상 핵연료의 설계기준은 연소도 50,000 MWD/MTU, 냉각기간 1.5년인 PWR 핵연료집합체로 하여 핵연료집합체 7개에서 발생되는 붕괴열은 32.3 kW로 설정하였다.

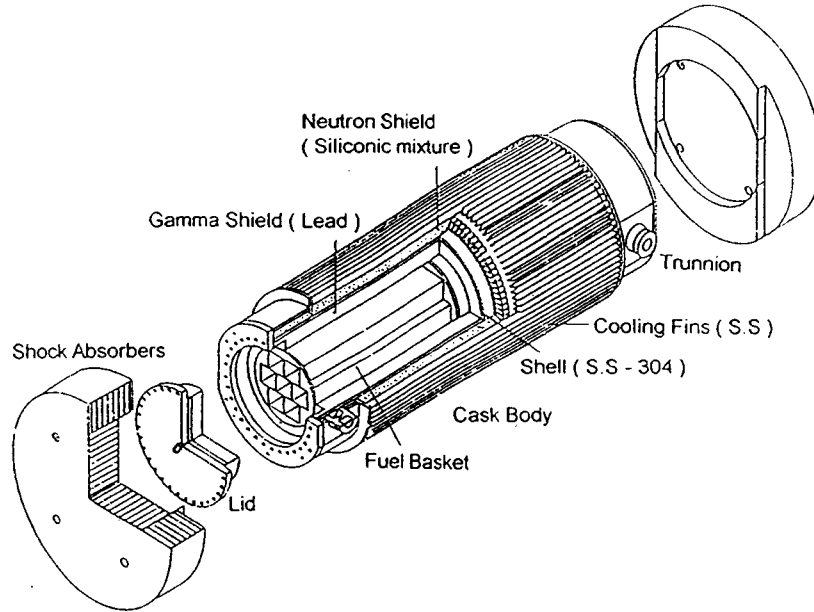


그림 1. Configuration of KSC-7 Shipping Cask.

3. 축소모델 열시험

수송용기의 열적 건전성을 입증하고 열해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 축소 모델을 제작하여 열시험을 수행하였다. 수송용기는 직경에 비하여 길이가 길고 상·하부에 나무로 된 충격완충체를 부착하므로 열전달은 주로 원주방향으로 일어나게 된다. 따라서 일반적으로 용기 길이방향으로만 축소시킨 모델로써 열시험을 수행한다. KSC-7 수송용기의 열시험모델은 단면은 실제 용기와 같게 하고 길이방향만 1/8로 축소시켜 양 끝단을 단열처리함으로써 가능한 실제 용기에 가까운 열전달현상이 일어나도록 제작하였다.

주변온도 38°C의 고온조건에 대하여 수송용기 내부에 공기 또는 헬륨가스를 채우는 건식 조건에 대한 열시험을 수행하였다. 또한, 축소모델에 대하여 시험조건과 동일한 조건으로 열전달해석을 수행하였으며, 표 1은 시험결과와 해석결과를 비교하여 나타내었다. 표의 결과에서 수송용기 주요부위 온도는 해석치가 시험치보다 다소 높으나, 전체적으로 두가지 결과가 서로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 열시험 및 해석결과에 대한 신뢰성이 입증됨을 알 수 있다.

표 1. Comparisons of Temperatures between the Thermal Test and Analysis

Location \ Temp.(°C)	Air cavity		Helium cavity	
	Test	Analysis	Test	Analysis
Max. fuel rod	448	451	416	437
Inner shell	129	130	126	130
Lead	115	121	112	121
Intermediate shell	108	115	106	115
Silicone mixture	102	104	101	104
Cask surface	97	98	97	98
Ambient	38			

4. 열전달해석

수송용기 내부 cavity에 냉각매체로 헬륨가스를 채우는 건식조건에 대하여 법규에서 규정하고 있는 정상수송조건 및 가상 화재사고조건에 대한 열해석을 수행하였다. 정상수송조건은 주변온도가 38°C이고 태양열유속이 최대인 고온조건이며, 화재사고조건은 고온조건하에서 800°C 화재가 30분동안 진행된 후 자연냉각되는 조건이다.

열전달해석은 2단계로 수행하였으며, 수송용기 본체의 온도분포는 HEATING-7.2 코드를, 핵연료집합체의 온도분포는 COBRA-SFS 코드를 이용하여 계산하였다. 그림 2는 수송용기 본체의 열해석모델이며, 핵연료는 실제 핵연료와 동일한 단면적을 갖도록 등가 반지름으로 모델링하였다. 해석모델에서 핵연료로부터 발생된 붕괴열은 내부공간의 냉각재에 의한 대류 및 복사열전달, 본체의 각 차폐체 및 구조체를 통한 열전도 그리고 용기표면에서의 대류 및 복사에 의하여 외부로 열전달이 일어난다. HEATING-7.2 해석에서는 핵연료봉의 상세한 온도분포 계산이 불가능하기 때문에 전산프로그램 COBRA-SFS 코드를 이용하여 핵연료집합체에 대한 열해석을 수행하였다. 그림 3은 핵연료집합체의 subchannel 해석모델을 나타내고 있다. COBRA-SFS 코드는 열수력해석 전용코드로서 열전도해석에는 한계가 있다. 따라서 해석모델에서 수송용기 본체는 생략하고 내부 shell만을 고려하였으며, 내부 shell에서의 경계조건은 HEATING-7.2 코드를 이용하여 얻은 inner shell의 온도값을 고려하였다. PWR 핵연료집합체는 17x17 배열을 가지나 이와 같은 조건에서는 전산코드 기억용량의 한계가 있어 8x8 배열로 단순화시켜 모델링하였다. 8x8 배열 해석모델에서는 핵연료봉의 등가방사율(equivalent emissivity)을 고려하여 최대 핵연료봉의 온도가 17x17 배열인 경우와 같은 값을 갖도록 하였다. 핵연료집합체 7개에서의 붕괴열은 32.3 kw로 하여 모든 핵연료봉에서의 붕괴열은 일정한 것으로 가정하였다.

열전달해석 결과 정상수송조건에서 핵연료봉의 최대 온도는 냉각재로 헬륨가스를 사용할 경우 473°C로 나타났으며, 이 온도는 건식조건에서 핵연료봉의 최대 허용온도 532 °C보다 낮으므로 핵연료봉에 대한 열적 건전성이 유지되는 것으로 나타났다. 그림 4는 화재사고조건시 수송용기 주요 부위의 온도분포를 나타내고 있다. 납차폐체의 최대온도는 268°C까지 상승하였으며, 이 온도는 납의 용점온도인 327 °C 보다 낮은 온도로서 사고에서도 감마선 차폐체의 건전성이 유지되고 있음을 알 수 있다. 화재사고조건시 핵연료봉의 최대온도는 504°C로 역시 허용온도 650°C보다 낮으므로 핵연료봉의 건전성도 입증되었다.

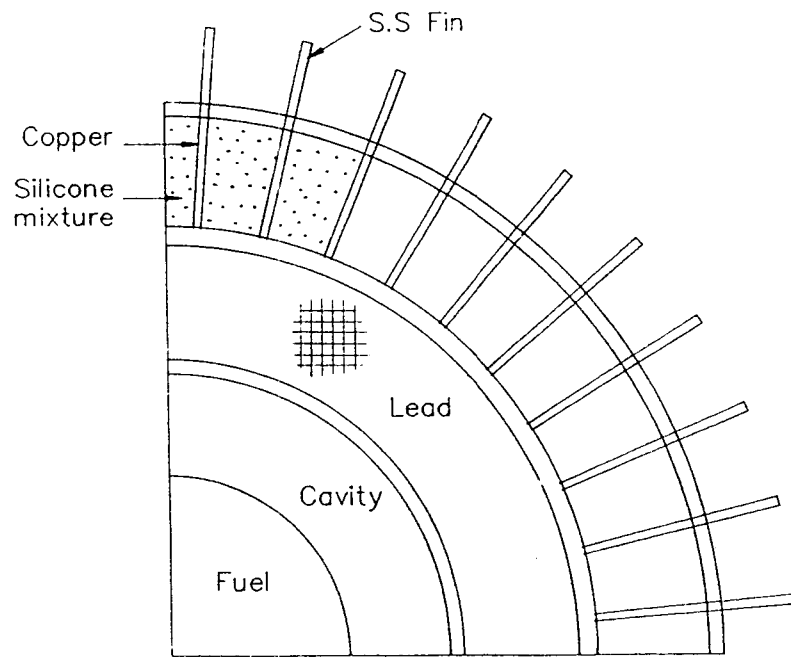


그림 2. Thermal Analysis Model for Cask Body.

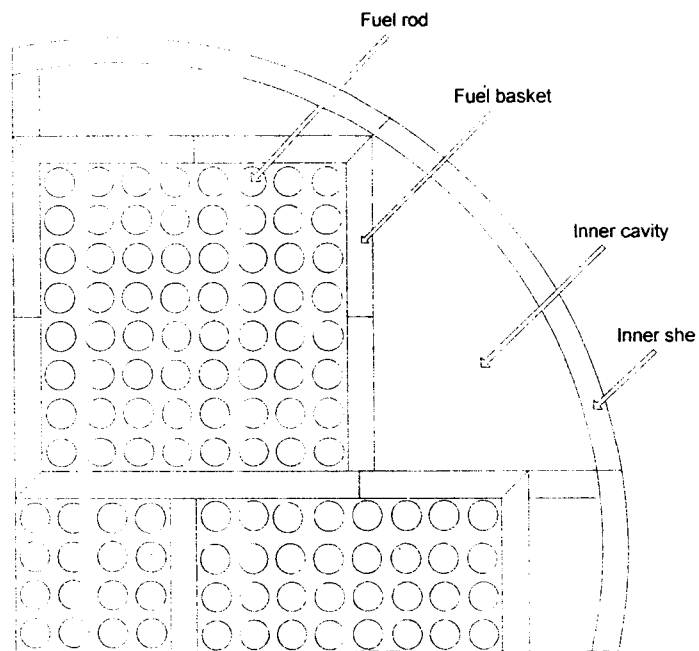


그림 3. Thermal Analysis Model for Fuel Assembly.

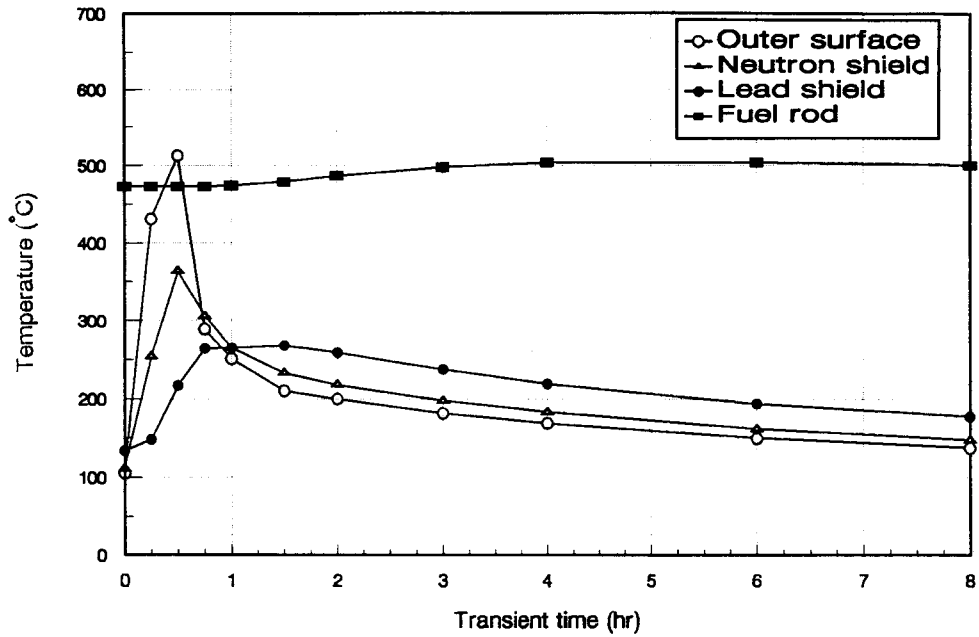


그림 4. Temperature Profiles under Fire Accident Condition.

5. 열응력해석

수송용기의 온도변화로 인한 구조적 건전성을 평가하기 위하여 열전달해석에서 구한 온도를 기준으로 열응력해석을 수행하였다. 열응력해석은 범용 구조해석 program인 ABAQUS 코드를 사용하였다.

정상조건에서 수송용기의 구조재인 스테인레스강이 항복을 일으키지 않아야 함으로 탄성 해석을 수행하였다. 응력의 분류 및 평가기준은 ASME Sec.III에 의거 2차응력(secondary stress)을 구하였으며, 표 2는 정상조건에서의 해석결과를 나타내고 있다. 표 2에서 최대 응력강도는 97 MPa로서 허용응력강도(3Sm)인 414 MPa에 비하여 훨씬 낮으므로 수송용기가 구조적으로 건전함을 알 수 있다.

표 2. Summary of Maximum Stress Intensities under Normal Condition

Location	Calculated (MPa)	Allowable (MPa)	Temperature(°C)
Inner shell	97	414	105
Interm. shell	97	414	131
Outer shell	93	414	73

사고조건에서는 수송용기의 격납경계(containment boundary)를 이루고 있는 내부 shell이 항복(yield)을 일으키지 않아야 함으로 내부 shell은 탄성해석으로 기타 구조재 및 납차폐체는 탄소성해석으로 하였다. 표 3은 용기 주요 부위에서의 해석결과를 과도시간에 따라 나타내고 있다. 해석결과에서 최대 응력강도가 허용응력강도(Su)에 비하여 낮으므로 화재사고 조건에서도 수송용기의 구조적 건전성이 입증되었다.

표 3. Summary of Maximum Stress Intensities under Fire Accident Condition

Part Time(hr)	Inner shell		Interm. shell		Outer shell	
	Calculated (MPa)	Allowable (MPa)	Calculated (MPa)	Allowable (MPa)	Calculated (MPa)	Allowable (MPa)
0.5	35	452	302	481	276	394
1.0	219	441	301	475	230	437
1.5	292	440	222	467	228	439
2.0	290	460	134	444	232	446
3.0	301	454	156	449	189	448
4.0	296	454	162	449	183	451
Max.	301	454	302	481	232	451

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 축소모델에 대한 열시험 및 열해석 결과를 비교 분석한 결과 두가지 결과가 서로 잘 일치하였으며, 따라서 시험 및 해석결과에 대한 신뢰성이 입증되었다.
- 2) 수송용기의 감마선 차폐체인 납의 최대온도는 268℃로 납의 용점온도인 327℃ 보다 낮은 온도로서 화재사고에서도 납차폐체의 건전성이 입증되었다.
- 3) 핵연료봉의 최대온도는 정상조건에서는 473℃, 화재사고조건에서는 504℃로 나타났으며, 이들 온도는 허용온도보다 낮으므로 핵연료봉에 대한 건전성도 보장되는 것으로 나타났다.
- 4) 열응력해석을 수행한 결과, 정상조건 및 화재사고조건에서 수송용기의 구조재인 스테인레스강의 응력강도가 허용치 이하로 만족하여 구조적 측면에서도 건전성이 입증되었다.
- 5) 따라서 KSC-7 수송용기는 냉각재로 불활성가스를 사용하는 건식조건에서 열적 건전성이 입증됨을 알 수 있다.