'95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

수송용기 Slice 모델에 의한 열전달시험

방 경 식
한국원자력연구소

요 약

PWR 사용후핵연료 집합체를 운반할 수 있는 수송용기를 개발하기 위하여 단면이 수송용기의 실제 크기인 slice 모델을 사용하여 법규에서 규정하고 있는 정상조건인 주변온도 38℃에서 냉각매체로 nitrogen 과 helium 인 경우에 대하여 열시험을 수행하여 수송용기의 열전달특성 및 핵연료봉의 건전성을 평가하였다. 열시험결과 내부핵연봉의 최대 온도는 각각 448℃ 와 416℃ 로 측정되었다. 이 값들은 핵연료봉의 건전성 유지에 필요한 허용치 이내 만족하는 것으로 수송용기의 열전달성능이 우수함을 입증하는 것이다.

Ⅰ. 서 론

원자력발전소에서 연소하여 방출되는 사용후핵연료를 수송하기 위한 수송용기는 내부핵연료에서 나오는 방사선과 고온의 붕괴열에 대하여 안전하게 유지되도록 설계되어야 한다. 따라서, 국내 원자력법 과기처고시[1], IAEA Safety Ser. No.6[2] 그리고 미국 10 CFR Part 71[3] 등에서 수송용기와 수송에 관련된 법규를 명시하여 준수하도록 규정하고 있다.

사용후핵연료를 수송하는 수송용기를 개발하는데 있어 가장 중요한 것 중의 하나는 핵연료봉의 온도이다. 수송용기는 정상조건하에서는 수송용기 내부의 핵연료로부터 나오는 고온의 붕괴열을 적절히 방출시켜 허용치 이내로 온도를 유지시켜야만 한다. 따라서, 사용후핵연료집합체 7 개를 운반할 수 있는 KSC-7 수송용기의 slice 모델을 설계하고 제작하여 주변온도 38℃ 에서의 열시험을 수행하였다. 그림 1은 충격완충체, 납차폐체, 냉각핀 그리고 silicone mixture 로 구성된 KSC-7 수송용기의 개요도이다.

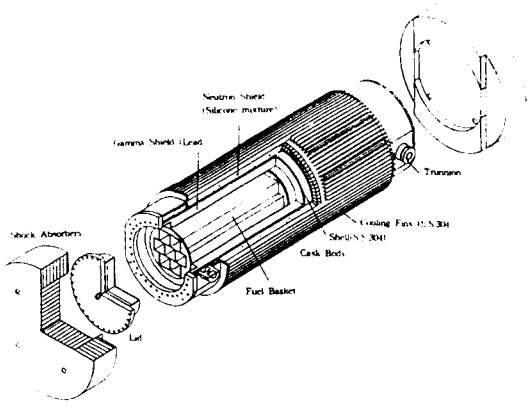

그림 1. Configuration of KSC-7 Cask

Ⅱ. 열시험

1. 모델 및 측정시스템

1.1. 시험모델

PWR 사용후핵연료 수송용기는 실제로 단면보다 길이가 약 3배 정도 크며, 실제 수송시 수평으로 운반되기 때문에 열시험에 있어서의 열적 거동은 주로 단면방향을 주요하게 고려하게 된다. 따라서, 시험모델은 반경방향은 실제 크기로 하고, 길이는 실제 수송용기의 1/8로 축소한 slice 모델로 제작하였다. 시험모델은 S.S-304 재질의 내부 shell, 납차폐체, 중간 shell, 중성자차폐체인 silicone mixture, 외부 shell 그리고 외각에 수직의 냉각핀으로 만들어졌다. 그리고, 각각의 층에 온도를 측정하기 위한 크로멜-알루멜 열전대(K type)가 그림 2에 나타낸 것처럼 원주의 θ = 0° , 90° , 180° 방향에 각 7절점씩 모두 21개가 부착되어 졌으며, 시험모델의 양끝단은 축방향의 열손실을 방지하기 위하여 단열재를 부착하였다[4]. 또한, slice 모델 내부에는 수송용기의 내부에 적재되는 사용후핵연료를 모사하기 위하여 전열히터를 사용하였으며, 전열히터는 6×6 rod array 7개로 구성되어 있으며, 각 rod array는 2㎾씩 모두 14㎾의 열유량을 갖도록 하였다.

1.2 시험시설

시험시설은 국내.외 원자력법규에서 규정하고 있는 38℃의 고온시험과 -40℃ 의 저온시험을 할 수 있도록 주변온도를 자동으로 제어하는 온도제어 시스템으로 구성되어졌으며, 4m×3m×3m의 직사각형 type의 시험실과 heater, damper, controll pannel, 초저온자동밸브 그리고 송풍기등으로 구성되어 있다.

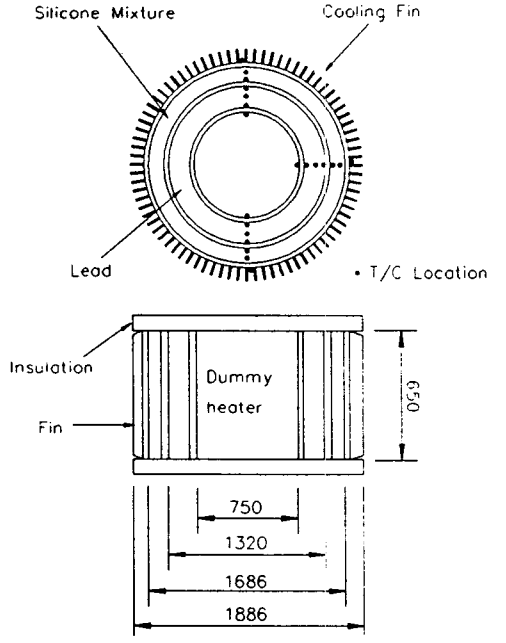

그림 2. Slice Model

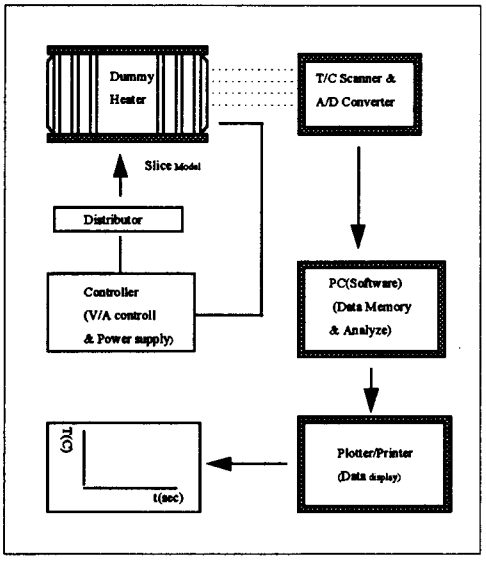

그림 3. Flow Chart of Measuring System

1.3 측정시스템

열시험을 위한 측정시스템은 그림 3에서와 같이 slice 모델, 열전대, 열전대 scanner, A/D converter, P/C, controller 그리고 distributor로 구성되어 있으며, Slice 모델과 전열히터에 부착된 열전대는 총 40 channel 까지의 온도를 측정할 수 있는 열전대 scanner 에 연결되어 지며, 열전대에 의해 측정된 온도는 열전대 scanner의 각 channel 을 통해 interface 인 A/D converter를 통하여 analog 신호가 digital 신호로 바뀌어 P/C 에 내장된 software에 의해 분석되어 지고 저장되도록 하였다. 전열히터는 controller를 통해 distributor에 의해 전원이 공급되게 하고 여기서 입력되는 전원의 power를 조절하여 전열히터의 열유량을 조절하도록 하였다.

2. 열시험

열시험은 열시험시설에 slice 모델을 수평으로 놓고 주변온도 38℃의 조건으로 수행하였다. 열시험전과 후에는 공기가압방식으로 뚜껑 및 밸브에 누설이 발생하는지의 여부를 확인하기 위해 누설시험을 수행하였다. 또한 시험전 열전대와 온도측정계통이 이상없이 작동하는 것을 확인한 후 모델의 온도분포가 정상상태에 도달할때까지 모델내부에 내장되어 있는 전기히터를 점진적으로 가열하였으며, 모델의 온도분포가 정상상태에 도달한 후 7일동안 정상상태를 유지하였다.

열시험은 두가지 방법으로 수행하였다. 하나는 수송용기 내부에 질소가스를 채운 경우이며, 다른하나는 헬륨가스를 채운 경우이다.

Ⅲ. 시험결과 및 토의

Slice 모델이 정상상태에 도달할때까지의 과도시간에 따른 온도분포는 그림 4, 5에 나타내었으며, 정상상태에서의 slice 모델의 각지점에서 측정된 최대온도는 표 1 및 그림 6에 나타내었다.

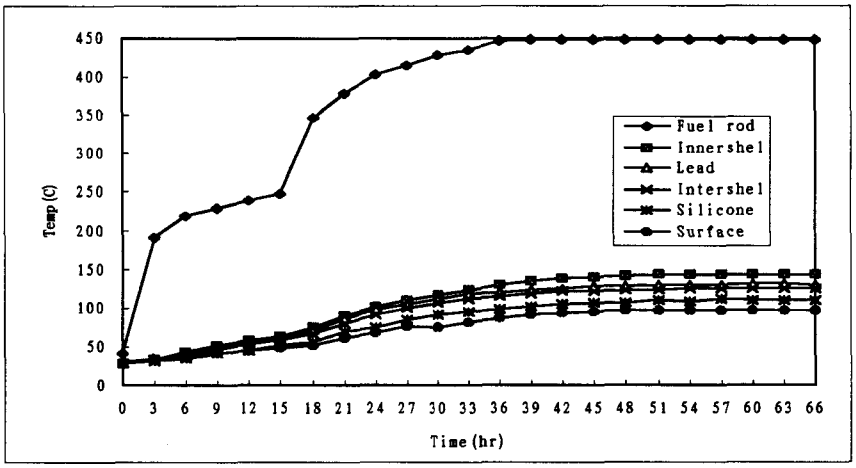

그림 4. Temperature Profile for the Slice Model in Nitrogen Cavity under Hot Condition

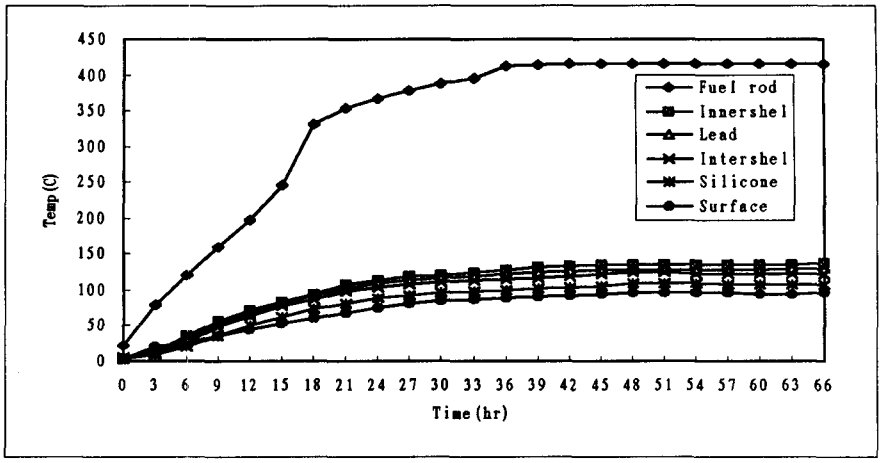

그림 5. Temperature Profile for the Slice Model in Helium Cavity under Hot Condition

표 2에서 보는바와 같이 수송용기 내부에 질소가스와 헬륨가스를 채웠을때 내부 핵연료봉 즉, 전기히터 표면에서의 최대온도는 각각 448℃ 와 416℃ 로 측정되었다. 이들 값은 핵연료봉의 cladding oxidation 가능성 온도인 532℃[5]보다 훨씬 낮은 값이다. 두가지의 가스를 사용한 slice 모델의 열전달특성에 대해 말하면, 수송용기 내부에 질소가스와 헬륨가스를 채웠을때 slice 모델의 온도분포는 거의 이상적으로 온도차이는 1℃ ~ 3℃ 였다. 그러나, 핵연료봉의 온도는 질소가스의 경우가 헬륨가스의 경우보다 약 30℃ 정도 높았다. 그것은 헬륨가스의 열전도도가 질소가스의 열전도도보다 약 5배 정도 크기 때문이다. 또한, 주요 차폐체인 납의 최대온도는 각각 115℃와 112℃로서 납의 융점 327℃ 보다 훨씬 낮으므로 수송용기의 차폐성능의 손실은 거의 없다.

따라서, 정상조건에서 수송용기의 열적건전성은 충분히 보장된다고 판단되며, 열전달성능은 우수하다고 판단된다.

표 1. Measured Temperatures of Slice Model in Thermal Test

Location	Temperature(℃)	
	Nitrigen	Helium
Max. Fuel Rod	448	416
Innershell	129	126
Lead	115	112
Intermediate-shell	108	106
Silicone Mixture	102	101
Surface	97	97
Ambient	38	38

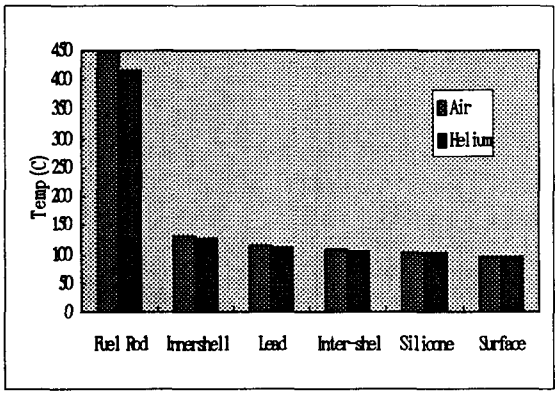

그림 6. Comparison of Slice Model Temperature between Ne and He Cavity

참고문헌

1. 과학기술처고시 제 85-8호, "방사성물질의 포장 및 운반에 관한 규정", 과학기술처, 1985.
2. IAEA Safety Series No.6, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1985 Edtion, IAEA, Vienna, 1990.

3. US 10 CFR Part 71, "Packaging and Transportation of Radioactive Material", USNRC, 1987.

4. J. P. Holman, "Heat Transfer", International Student Edition 4th Ed., 1976.

5. H. Abe et al., "Heat Transfer and Thermal Tests of a 100-Ton Class Drt-Type Spent Fuel Transport Cask", Proceedings of IAEA International Symposium on the PATRAM, 89, 1989.