사용후 핵연료 장기 건전성평가 종합시험장치(SFFA) 개념설계

김대호, 신창환, 양용식, 국동학, 권형문, 장정남, 최종원
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111
kdh@kaeri.re.kr

1. 서론

경수로원전의 사용후핵연료는 원자로에서 수중저장조로 옮겨져 수중환경 속에서 냉각되어진다. 국내원전의 사용후핵연료 습식저장용량 한계 도달에 따른 문제해결을 위해 장기건식저장방식을 유력한 대안으로 고려하고 있다. 건식저장시스템 적용에 앞서 사용후핵연료의 건전성 평가가 우선되어야 한다. 사용후핵연료의 이동 혹은 저장중 발생할 각종 열화기구에 대한 거동을 평가모델 및 코드를 통하여 예측하고, 실제 사용후핵연료를 사용한 시험분석을 통하여 예측한 값을 검증하고 종합평가하는 일련의 과정이 필요하다. 즉, 사용후핵연료가 저장기간이 종료된 시점까지 저장초기의 건전성을 잘 유지할 수 있는 지를 평가하는 기술이 검증되고 확보되어야 장기건식저장이 가능하다.

사용후핵연료의 장기건식저장을 위해서는 저장대상인 사용후핵연료의 핵적, 물리적·화학적, 재료적 특성파악이 선행 되어야 한다. 따라서, 단기간의 열화가속시험을 통해 사용후 핵연료의 성능시험자료를 생산하여 장기간의 저장수명 동안의 재료적 취화정도를 예측하고, 장시간 동안 사용후핵연료가 건전성을 유지할 수 있는 조건들을 제시할 수 있다. 본 가속화 종합시험을 통하여 사용후핵연료 건식저장 시스템의 인허가에 필요한 기초자료를 생산함으로써 건식저장 시스템의 상용화에 적극 활용하고, 향후 국내 저장시스템을 수출하기 위한 기초기반 성능자료생산 및 고유 평가방법을 확보하여 기존 외국 상용시스템과의 기술경쟁력 확보를 목적으로 연구가 진행되고 있다.

2. 본론

2.1 종합시험장치(SFFA) 구성

건식 저장환경에서 사용후핵연료의 복합적인 열화거동을 연구하기 위하여 실제 사용후핵연료봉을 사용하는 종합시험장치(Spent Fuel Integrity Test Facility under Accelerator Condition, SFFA)의 개념설계를 수행하였다.

종합시험장치의 구성은 크게 Outer Vessel, Inner Vessel, Heater, 계측부 및 제어부로 구분할 수 있다. 대략 3년간의 시험기간을 고려하여 각각의 기능은 시험요건, 재료의 적용특성 및 인.허가 등의 제반 사항이 반영되어야 한다. 본 시험장치는 PIEF 15m 저장수조에서 설계기준으로 600℃ 내부온도를 3년간 유지해야 함으로 시험장치의 기본적인 종합성능에서 차폐, 단열 및 계측 등의 기능이 수반되어야 한다.

- ○ Outer Vessel : 차폐, 기계적강도, 단열
- ○ Inner Vessel : 밀폐, 열적내구성, Junction
- ○ Heater : 열분포(출력), 내구성, 계장위치
- ○ 계측 및 제어부 : Power, RMS, 비상조치 등
- ○ 기타 : 수조 내 설치 및 크레인 등 Handling

2.2 종합시험장치(SFFA) 기술요건

종합시험에 사용될 국산 사용후핵연료는 저연소도(45,000 MW/d/MTU 이하) 핵연료를 대상으로 기본적인 열화단위 메커니즘 시험을 우선하게 된다. 본 시험은 고온/고방사선/불활성기체 분위기에서 수행하게 됨으로 다음과 같은 장치설계에 필요한 기본적인 요건이 필요하다.

- ○ Basic Information
  - 6 spent fuel rod & 1 dummy rod
  - 600℃ & 3 years operation
  - helium atmosphere & 1 atm
- ○ Thermal Design
  - 600℃(core) ~ 40℃(coolant)
  - heater capacity(about 10 kW)
  - insulator thermal conductivity < 0.05 W/m.K
- ○ Mechanical Design
  - limited weight < 5 ton
  - seismic : axial 0.2g, horizontal 0.3g
  - gas & water proof
  - easy handling & setup structure
- ○ Shielding Design
  - limited in water condition
  - lead for emergency work
- ○ System Control Design
  - controllers for gas(MFC), water out(pump), power(PID), on-line remote monitoring, etc.
  - instruments for T/C, pressure, moisture, radiation monitoring, etc.
  - emergency safety shutdown system

2.3 종합시험장치 설계

기본적인 설계요건을 반영한 개념도는 Fig. 1

과 같다. 시험연료봉 장입 등의 모든 작업이 수중에서 이루어지고 작업에 따른 Handling 여건이 반영되어야 함으로 종합시험장치의 개념설계시 설치 및 운전에 따른 작업 동선을 반영하였다.

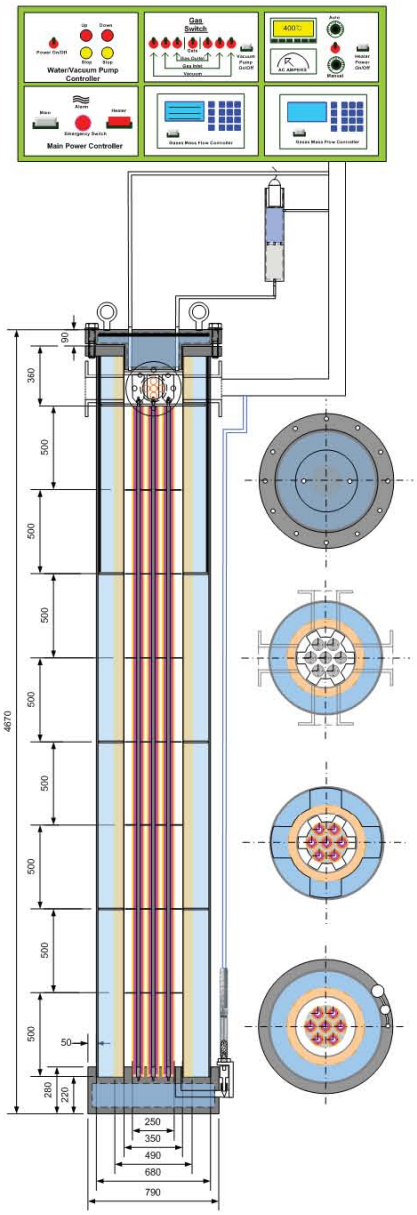

Fig 1. 장기건식저장 종합시험장치(SFFA) 개략도.

참고로 개념설계시 반영된 구조물을 기본으로 횡방향의 열출력에 따른 구조물의 열손실을 계산하였다. 이는 열출력 입력을 결정하고 Heater 제작 등의 기초자료로 제공된다.

○ input
- helium gas temperature 600℃
- coolant temperature 40℃
- ss thermal conductivity k_{ss} = 20 W/m.K
- insulator#1 thermal conductivity k_{ins} = 0.044 W/m.K
- insulator#2 thermal conductivity k_{ins} = 0.2 W/m.K
- helium heat coefficient $h_{_he}$ = 40 W/m^{2}K
- water heat coefficient $h_{_wa}$ = 400 W/m^{2}K

○ Calculation Q(heat loss)

$$Q = \frac{T_{helium} - T_{water}}{R_h + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_w}$$

where $R_h = \frac{1}{2\pi r_0 H h_{he}}$, $R_1 = \frac{1}{2\pi H k_1} ln\frac{r_1}{r_0}$,

$R_2 = \frac{1}{2\pi H k_2} ln\frac{r_2}{r_1}$, $R_3 = \frac{1}{2\pi H k_3} ln\frac{r_3}{r_2}$,

$R_4 = \frac{1}{2\pi H k_4} ln\frac{r_4}{r_3}$, $R_w = \frac{1}{2\pi r_2 H h_w}$

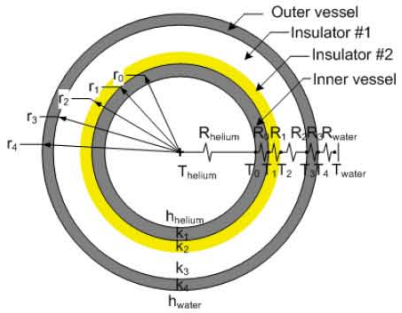

Fig 2. 종합시험장치 2차원 열손실 계산모델.

Fig. 2를 이용해 계산된 열손실 값은 1.47 kW로 확인되었다. 상세한 3-D 해석을 통해 열손실 및 열해석이 수행될 예정이며 이후 최적화 설계가 진행될 예정이다.

3. 결론

사용후핵연료 저장조의 포화상태를 대비하여 장기 건식저장 기술의 확보를 위해 개발된 사용후핵연료의 열화거동 등의 단기적인 열화가속시험을 위한 종합시험장치(SFFA)의 개념설계가 수행되었다. 시험에 따른 각종 제반사항과 기술적 요건이 반영되었으며, 기본적인 열적해석과 구조적 해석이 수반되었다. 이후 열적, 기계적 해석 등의 상세분석을 통하여 최적화된 종합시험장치가 개발될 예정이며, 최적화 설계시 고연소도 사용후핵연료의 적용경우를 대비하여 기술적요건의 검토가 함께 고려될 예정이다.

4. 참고문헌

[1] 신창환 외, 사용후 핵연료의 장기건전성 종합시험장치를 위한 열해석, 한국방사성폐기물학회 2011 추계학술발표회 논문집.