

금속형 사용후핵연료 관리모형에 대한 핵임계도 분석

신희성, 김익수, 이원경, 신영준, 노성기

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

금속형 사용후핵연료 관리모형으로 직경 3 cm, 길이 248.5 cm 인 금속봉을 19 개 장전한 캐니스터가 x-y 방향으로 무한 격자배열된 경우에 대해 캐니스터의 두께, 간격 및 외부의 공기중 수분농도의 변화에 따른 핵임계도 분석을 수행하였다. 미임계한계치($k_{eff}=0.95$) 근방에서 최대 핵임계도를 나타내는 각 인자값을 구하고, 미임계 상태를 유지하는 조건을 제시했다. 그 결과, 캐니스터의 두께가 7 mm 인 경우의 최대 핵임계도 값은 0.94401 ± 0.00050 으로서, 공기중 수분농도가 0.34 g/cm^3 이고 간격이 4.8 cm 인 경우에 나타났다. 8 mm 인 경우의 최대 핵임계도 값은 0.91182 ± 0.00050 이며, 캐니스터간의 간격이 4.4 cm 이고 공기중 수분농도가 0.35 g/cm^3 일 때 나타났다. 8 mm 캐니스터의 금속저장체 저장은 미임계 상태를 유지할 것으로 추정되었다.

1. 서론

사용후핵연료 차세대관리 공정개발의 일환으로 금속형 사용후핵연료가 밀집장전된 캐니스터(이하 ‘금속저장체’라 한다)을 가상하고, 금속저장체가 저장시설내에 격자배열되는 저장개념을 설정한 후, 이에 대한 핵임계 안전성 평가를 통하여 가상 사고시에서도 핵임계 안전성을 확보할 수 있는지를 평가하고 있다[1]. 즉, 핵임계도에 영향을 미칠 수 있는 캐니스터의 두께, 간격 및 외부조건이 핵임계도 관점에서 최악의 상태에 도달했을 때도 금속저장체의 저장시설이 핵임계를 유지할 수 있는지 평가하고 있다.

본 연구에서는 최대 핵임계도를 나타내는 사용후핵연료 조건을 결정하고, 이 사용후핵연료의 금속저장체가 x-y 방향으로 무한 격자배열된 저장모델에 대한 핵임계도 분석을 수행하여 최대

핵임계도 값에 도달했을 때의 금속저장체의 조건을 구하였다. 또한 미임계를 유지할 수 있는 저장조건에 대해 검토하였다.

2. 계산모델

금속저장체의 계산모델은 그림 1 과 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 사용후핵연료 금속봉은 반경이 3 cm 이고, 길이가 248.5cm 로서 캐니스터당 19 개씩 장전되어 있다. 1 개 캐니스터의 장전량은 2 개 사용후핵연료 집합체에 속한 악티나이드 핵종의 총량에 해당한다. 그림 1 에 제시된 금속저장체가 x-y 방향으로 무한 격자배열된 저장모델을 가정하고, 저장시설의 구조물은 무시하여 보수적인 핵임계도 분석이 되도록 하였다.

계산의 편의성을 위해 그림 2 와 같이 육각기둥 형태의 캐니스터를 동일 부피조건하에서 원기둥형태로 변형하여 핵임계 계산을 수행하였다. 실제 금속봉에는 미량의 란타나이드 핵종이 포함될 것이지만, 보수적인 핵임계도 관점에서 악티나이드 핵종만 고려하였다. 캐니스터의 재질은 철로 가정하였고, 캐니스터 내부는 수증기 포화 공기가 장입된 것으로 가정하였다.

3. 계산방법

핵임계도 계산에는 MCNP4B 코드[2,3]와 ENDF/B-VI 핵자료[2]를 사용하였고, 사용후핵연료에 존재하는 핵종량의 계산에는 ORIGEN2 코드[4]를 이용하였다. 보수적인 핵임계도 분석을 위해서는 사용후핵연료에 함유된 핵종의 보수적인 핵종량을 사용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 ORIGEN2 의 계산값을 참고문헌[1]에 제시된 43 개 핵종의 보정인자로 보정하여 사용하였다.

핵임계도에 영향을 미치는 인자는 캐니스터의 외부의 공기상태, 캐니스터 두께, 캐니스터 사이의 간격 등이 있다. 캐니스터의 두께는 얇을 수록 핵임계도가 높게 나타날 것이 자명하다. 개략적인 계산을 통하여 금속저장체 저장모델에 대한 핵임계도가 미임계한계치 ($k_{eff}=0.95$) 근방의 값을 갖을 때, 캐니스터의 두께는 대략 7 mm 라는 것을 확인하였다. 인자 수를 줄이기 위해 캐니스터의 두께는 7 mm 와 8 mm 로 고정하고 캐니스터 사이의 간격과 외부 공기중 수분농도 변화에 따른 핵임계도 분석을 수행했다.

4. 최대 핵임계도 사용후핵연료 조건결정

핵연료 설계자료를 근거로 연소도가 33 GWD/MTU 이고 초기농축도가 3.2, 3.3, 3.4 및 3.5 wt%인 경우와 36 GWD/MTU 이고 초기농축도가 3.5 wt%인 다섯 가지 사용후핵연료에 대해 냉각기간에 따른 핵임계도 계산을 수행하여 그림 3 에 나타냈다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 300 년까지의 냉각

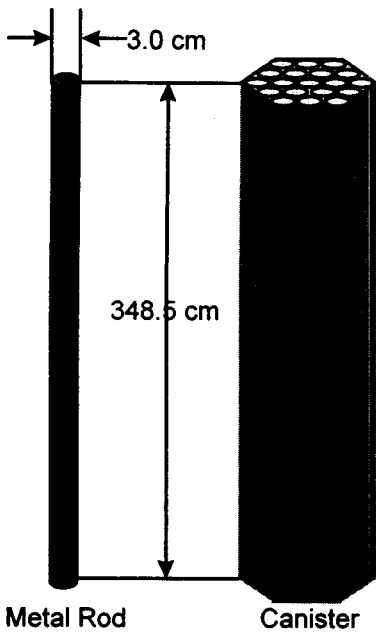


Fig. 1. Spent -Fuel-Metal Rod and Canister.

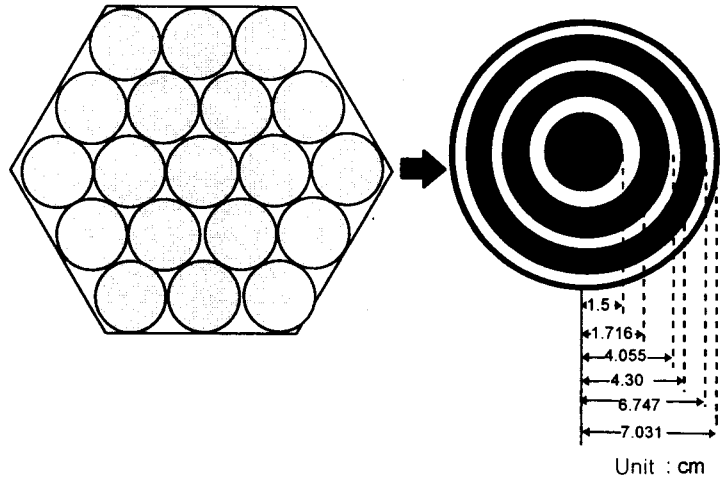


Fig. 2. Geometrical Model of the Canister Containing Metal Rods.

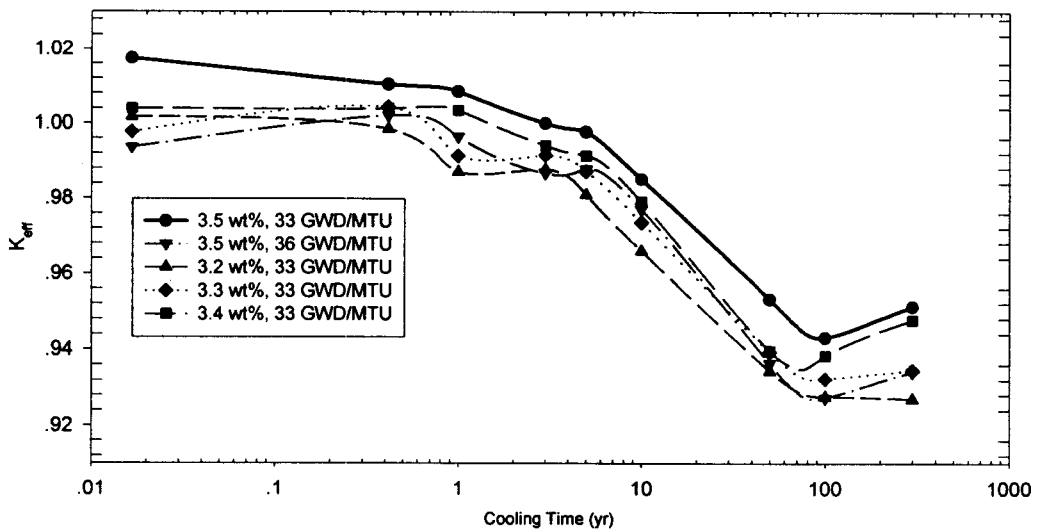


Fig. 3. K_{eff} for the Infinite Array of 5-mm-Thickness Canisters Containing Metal Rods Fabricated from Five Kinds of Spent Fuels.

기간에 걸쳐서 초기농축도 3.5 wt%, 연소도 33 GWD/MTU 인 경우가 가장 높은 핵임계도를 나타낸다. 이 사용후핵연료의 핵임계도를 냉각기간별로 비교해 보면 방출직후 근방에서 핵임계도가 높은 값을 보이고 있다. 최대 핵임계도를 나타내는 정확한 냉각기간을 찾기 위해서 1 시간에서 부터 100 일까지 세분하여 핵임계도를 계산하였다. 그 결과, 방출후 5 일이 경과되었을 때 가장 높은 핵임계도를 보였다.

5. 핵임계도 분석

최대 핵임계도를 나타내는 사용후핵연료(초기농축도 3.5 wt%, 연소도 33 GWD/MTU, 냉각기간 5 일)의 금속저장체 저장모델에 대한 핵임계도 분석을 수행하였다. 캐니스터의 두께를 7 mm 로 고정하고 공기중의 수분농도와 캐니스터의 간격을 변화시키면서 최대 핵임계도를 찾았다. 중성자 선원수를 1000 으로 택하여 캐니스터 사이의 간격, 0.0 cm, 2.0 cm, 4.0 cm, 6.0 cm, 8.0 cm, 각각에 대해서 수분의 농도를 변화시키면서 최대 핵임계도를 찾아 그림 5 에 나타냈다. 이 그림에서 알 수 있듯이 캐니스터 사이의 간격이 4 cm - 5 cm 근방에서 핵임계도가 대체로 큰 값을 보였다. 중성자 선원수를 50000 으로 증가시켜 캐니스터간의 간격 4 cm 와 5 cm 사이를 0.2 cm 간격으로 변화시키면서 정밀한 계산을 수행하여 최대 핵임계도를 찾아 그림 5 에 제시하였다. 계산결과를 종합하면 캐니스터의 두께가 7 mm 인 경우의 최대 핵임계값은 0.94401 ± 0.00050 으로서, 공기중 수분농도가 0.34 g/cm^3 이고 캐니스터 사이의 간격이 4.8 cm 인 경우에 나타났다.

캐니스터 두께가 8 mm 일 때 금속저장체 저장모델의 핵임계도가 최대값을 갖는 조건을 찾기 위해서 캐니스터의 두께가 7 mm 인 경우에 대한 핵임계도 분석에서 결정된 공기중 수분농도와 캐니스터 사이의 간격 근방에서 핵임계도 계산을 수행하였다. 이때의 계산결과는 그림 6 과 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 8 mm 인 경우의 최대 핵임계도 값은 0.91182 ± 0.00050 이며, 캐니스터 사이의 간격이 4.4 cm 이고 공기 중의 수분농도가 0.35 g/cm^3 일 때 나타났다.

캐니스터의 두께가 7 mm 와 8 mm 인 금속저장체 저장모델에 대한 핵임계도 값의 95% 신뢰구간에서의 최대값은 각각 0.945 와 0.913 이다. 전산코드의 계산오차와 기계적인 공차 등의 오차로 인한 핵임계도의 증가를 약 20 %로 가정하면, 7 mm 캐니스터의 경우에는 미임계 한계치 (0.95)를 초과하지만, 8 mm 캐니스터의 경우에는 미임계 상태를 유지할 수 있다. 따라서 앞에서 가정한 조건하에서 8 mm 두께의 캐니스터를 사용하면, 침수나 다른 사고로 인하여 금속저장체의 저장시설의 용량, 저장간격과 저장시설 내의 공기중 수분농도가 어떤 값으로 변하더라도 금속저장체 저장모델은 미임계 상태를 유지할 수 있다.

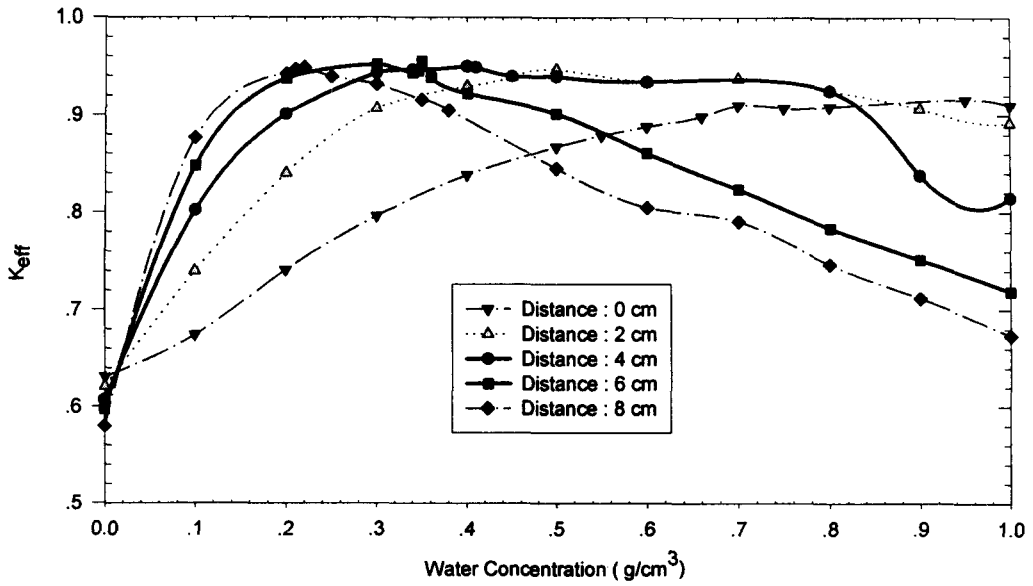


Fig. 4. K_{eff} for the Infinite Array of 7-mm-Thickness Canisters at Five Distances Between Canisters : 0 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm and 8 cm.

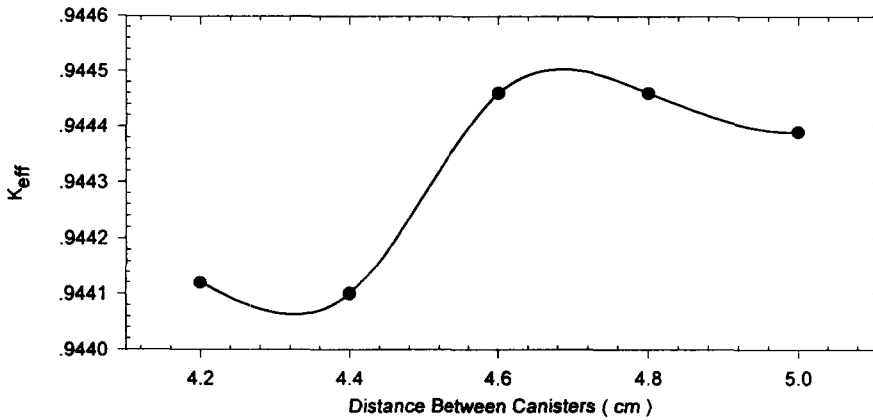


Fig. 5. K_{eff} for the Infinite Array of 7-mm-Thickness Canisters.

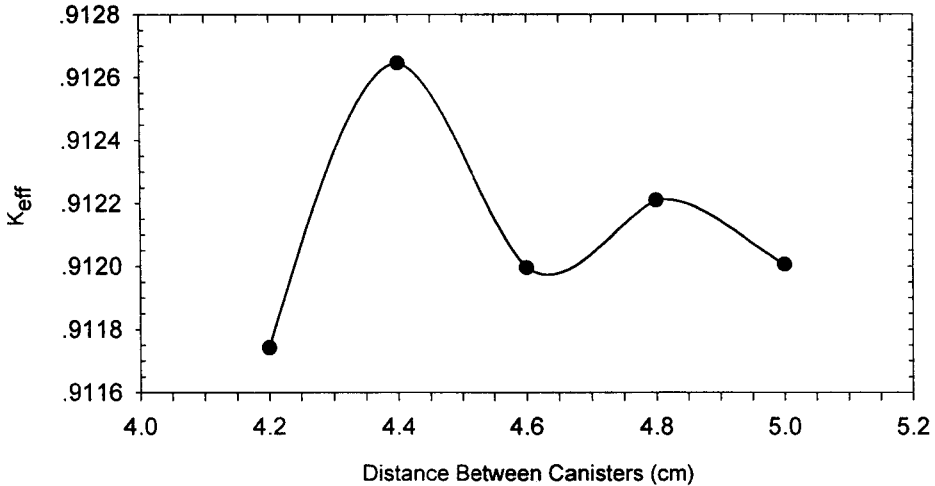


Fig. 6. K_{eff} for the Infinite Array of 8-mm-Thickness Canisters.

6. 결론

금속저장체가 x-y 방향으로 무한 격자배열된 저장모델에 대한 핵임계도 분석을 통하여 미임계 한계치 ($k_{eff}=0.95$) 근방에서 최대 핵임계도를 나타내는 조건을 결정하였다. 또한 이 연구에서 고려하지 못한 오차로 인한 핵임계도 값의 증가를 20 %라고 가정하여도, 8 mm 두께의 캐니스터를 사용한 금속저장체의 저장모델은 미임계 상태를 유지할 수 있다는 결론을 얻었다. 이 결과들은 금속저장체 저장방식의 설계에 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 앞으로 수행될 금속저장체 저장모델에 대한 구조적 및 열적 분석 결과와 금속봉 제조기술개발 결과를 종합하여 좀더 실용적인 금속저장체의 저장개념으로 개선해 나가야 할 것이다. 또한 핵임계도 계산코드의 계산오차를 정량적으로 결정하여 핵임계 안전성 확보의 신뢰성을 제고해야 할 것이다.

참고문헌

1. 노성기 외, "사용후핵연료 저장·수송 기술개발," 한국원자력연구소, KAERI/NEMAC/RR-166/96 (1995).
2. Judith F. Briesmeister, "MCNP - a General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625-M (1993).
3. Judith F. Briesmeister, "Introduction to MCNP," Los Alamos National Laboratory (1996).
4. G. Croff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175 (1980).