

사용후핵연료 저장조 냉각기능 상실시 핵연료 거동 연구 현황

방제건, 김대호, 김현길, 김건식, 전태현
 한국원자력연구원 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111
 jgbang@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료 저장조의 안전성에 대한 관심은 그동안 원전의 안전성에 비교하여 매우 미미하였다. 후쿠시마 원전사고 이후 원자력 발전소 운영의 패러다임이 안전 최우선으로 변화함에 따라 사용후핵연료 저장조의 안전성 평가 및 강화도 절실하게 요구되고 있다. 그러나 사용후핵연료 저장조의 냉각기능 상실관련 사고 시 시나리오별 및 피복판과 UO_2 소결체의 시간에 따른 열화 거동관련 기초자료가 매우 부족하므로 이를 보완할 시험자료 확보가 매우 시급하다.

이를 위해 지금까지의 국내의 연구현황 및 시험자료를 분석, 저장조 사고 시나리오 정립, 다양한 핵연료 분위기에서의 소결체 및 피복판 단위시험 및 종합시험을 수행하여 사용후핵연료 저장조의 안전성 강화에 필수적인 핵심자료를 확보하고자 한다.

2. 본론

2.1 국내의 연구현황

2.1.1 국내 연구현황

국내에서는 수조내 사용후핵연료의 붕괴열 분포 해석과 같은 핵적 특성에 대한 연구는 있었지만, 저장조의 냉각기능 상실사고 시 사용후핵연료 거동 및 파손조건에 대한 시험 및 평가한 적은 없으며, 다만 사용후핵연료 저장조 사고를 모의할 수 있는 MELCOR-SFP 코드를 NRC로부터 도입하여 코드검증을 위한 국제공동연구에 참여하려는 단계에 있다.

냉각제상실사고시 핵연료 소결체와 피복판의 산화거동에 대한 핵연료개발 및 안전성연구로 지속적인 연구를 수행하고 있으며, 이 실험결과는 저장조 냉각기능 상실시 사용후핵연료의 손상 거동에 대한 자료로 활용될 수 있다. 핵연료 피복판의 공기중 산화거동시험을 통해 산화율이 온도에 따라 급격히 증가하게 된다는 것을 알 수 있었으며, 특히 900℃ 이상에서는 수 시간 안에 완전산화이 이루어져 피복판 부스러지는 현상을 알 수

있었다. 그림 1은 UO_2 소결체가 공기중에서 온도 범위 350-500℃에서 일정한 온도조건을 유지하면서 U_3O_8 로의 산화되는 과정을 보여준다.

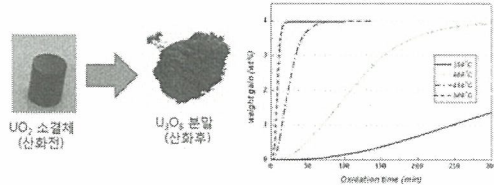


Fig. 1. Oxidation Behavior of UO_2 pellets in air at 350-500℃[1].

2.1.2 국외 연구현황

미국 Sandia 연구소에서는 사용후핵연료 저장조의 냉각수 상실사고시 지르코늄 핵연료피복판의 화재발생 가능성에 대한 대형 실험연구를 수행중에 있다. 최근에는 화재발생 전과를 연구하기 위한 5다발에 대한 시험을 수행하였다.

독일 Karlsruhe 연구소의 Steinbruck 등은 [2-3] 공기분위기, 수증기분위기, 공기와 수증기 혼합분위기에서 피복판의 산화시험을 수행하였다. 시험장비로는 TG, steam furnace, 혼합분위기에서 산화시험을 위한 BOX 시험장비를 사용하였으며, 각각의 분위기에 따라 600-1500℃ 온도범위에서 산화시험을 수행하였다. 그림 2는 질소의 영향을 보여주는 실험 결과이다. 질소는 산화시 산소의 결핍시 피복판의 열화를 가속시킨다.

2.2 사용후핵연료 저장조 냉각기능 상실시 핵연료 거동

사용후핵연료 저장조에서 냉각상실 사고가 발생할 원인은 항공기 충돌사고, 지진, 전원상실, 또는 냉각장치 고장 등이다. 이에 따라 저장조 또는 라이너 균열, 냉각계통 배관 파단, 냉각펌프의 정지, Spray 정지, Ventilation 팬 고장 등으로 저장조 내부 냉각수가 외부로 유실되거나 혹은 증발되어 핵연료가 공기 중에 노출될 수 있다. 이로 인해 핵연료의 온도가 상승하게 되고 핵연료 화

재 또는 파손의 우려가 있다. 원자로심내의 핵연료는 파손이 되더라도 핵분열생성물의 외부 누출이 다중방호벽에 의해 차단되지만 사용후핵연료 저장조내 핵연료의 경우 외부로 다량 배출 가능성이 있다.

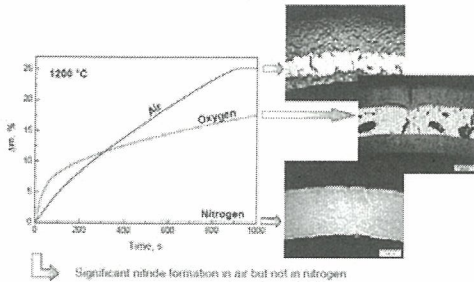


Fig. 2. Oxidation of Zircaloy-4 in O₂, N₂, and air.

위에 기술된 다양한 요인으로 저장조의 냉각기능이 상실될 때, 각 사고에 의한 시나리오에 따라 저장조 냉각수 증발속도, 핵연료봉 노출 부위의 길이 및 산화반응에 의한 온도상승 등이 결정된다. 지금까지 주로 연구된 원자로 노심사고 조건인 수증기 분위기나 사용후핵연료 건식저장 조건인 공기 분위기와는 매우 다른 것으로 두가지 분위기를 중첩한 것보다 더 복잡하다. 각 분위기 조건에서 일어나는 핵연료 피복관 및 소결체의 산화반응 및 사고유형을 표 1에 정리하였다.

Table 1. Oxidation reactions and accident types of nuclear fuel pellet and cladding at various conditions.

	수증기 분위기	저장조 분위기	공기 분위기
피복관 산화	$Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$	$Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ $Zr+O_2 \rightarrow ZrO_2$	$Zr+O_2 \rightarrow ZrO_2$
소결체 산화	$4UO_2+H_2O \rightarrow U_4O_9+ H_2$	$4UO_2+H_2O \rightarrow U_4O_9+ H_2$ $3UO_2+O_2 \rightarrow U_3O_8$	$3UO_2+O_2 \rightarrow U_3O_8$
사고 유형	수소폭발 가능	수소폭발 및 피복관 화재 가능	피복관 화재
핵분열생성물 방출	상대적으로 작음	상대적으로 큼	상대적으로 큼

2.3 사용후핵연료 저장조 냉각기능 상실사고시 핵연료 파손 거동 시험

사용후핵연료 저장조의 냉각기능이 상실되면 핵연료는 먼저 공기중에 누출되고, 수증기 분위

기, 공기와 수증기 혼합분위기에 놓이게 된다. 이러한 핵연료 노출부위에서의 분위기에 따라 사용후핵연료의 손상거동이 달라지므로 이들 분위기 및 핵연료온도를 고려한 시험조건을 수립하여 1차적으로 소결체 및 피복관에 대한 단위시험을 수행중에 있다. 이후 유형별 대표 사고시나리오를 모사하는 종합시험을 수행코자 시험장비를 현재 설계중에 있다.

3. 결론

후쿠시마 원전의 저장조 수소폭발 및 화재사고를 계기로 본격적인 사용후핵연료 저장조의 안전성 연구의 필요성이 대두되었다. 원자로내에서의 핵연료 거동에 대한 연구는 지속적인 연구를 통해 많은 시험자료 및 거동모델을 개발하였으나 사용후핵연료 저장조내 핵연료의 안전성 시험결과는 매우 미미한 실정이다.

사용후핵연료 저장조의 냉각기능 상실시 핵연료 분위기 및 거동에 대한 시나리오를 설정하고, 외국의 연구사례 및 실험결과를 분석하여 시험계획을 수립하였다. 사용후핵연료 저장조의 안전성 강화에 필수적인 핵심자료를 소결체 및 피복관에 대한 단위시험 및 종합시험을 통해 확보하고자 하며, 이들 자료는 사용후핵연료 저장조 사고분석 및 안전대책 수립에 활용되고 원자력 발전의 사회적 수용성에도 크게 기여할 것이다.

4. 참고문헌

- [1] 김건식의, "Oxidation behavior of (U,Gd)O₂ pellets in air at 350-700°C," 2001년 원자력학회 춘계 논문집.
- [2] M. Steinbrück, "Separate-effects tests on hightemperature oxidation of zirconium alloys in various atmospheres", Workshop on Computational and Experimental Studies of the LWR fuel element behaviour under beyond design basis accidents and reflood conditions, Moscow, 27-28 July 2009.
- [3] M. Steinbrück & M. Bottcher, "Air oxidation of Zircaloy-4, M5and ZIRLOTM cladding alloys at high temperatures", Journal of Nuclear Materials 414 (2011).