

FRAPCON 3.5 코드를 이용한 PWR 고연소도사용후핵연료의 열화거동 평가

윤형주, 박광현*

경희대학교, 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732

*kpark@khu.ac.kr

1. 서론

국내 원자력발전소의 사용후핵연료 (Used Nuclear Fuel, UNF) 소내저장능력이 2024년이면 한계에 도달하여, 최악의 경우 UNF의 저장문제로 인해 원자력발전소의 운전이 불가능해지는 상황이 올 수 있다. 이를 대비하여 UNF의 장기 건식저장에 대한 준비가 필요하고, 그에 대한 정확한 안전성 평가들이 중요하다. 특히, UNF의 열적 및 구조적 안전성평가는 장기 건식저장하는 동안 발생하는 피복관의 외부표면온도의 변화 또는 피복관의 Hoop stress의 변화 등 여러 가지 열화 현상들을 예측하고 UNF의 열적 및 구조적 열화 거동을 파악하여 안전성의 규제요건을 만족하는지를 확인해야 한다. 그러므로 본 연구는 핵연료봉의 열화 거동에 대한 예측 프로그램인 FRAPCON 3.5 코드를 이용하여 원자로에서 연소 및 냉각한 뒤 장기건식저장을 하였을 때 핵연료의 열적 및 구조적 열화 거동을 예측하였다.

2. 본론

2.1 PWR 고연소도 UNF의 구성

본 연구에서 모델링한 고연소도 핵연료의 유형은 Arkansas Nuclear One-Unit 2 reactor CE 표준형 16X16 PWR 핵연료집합체를 토대로 [1], 국내 PWR 핵연료집합체에 맞는 구조로 수정하여 PWR 핵연료봉을 설정하였다. 핵연료봉을 원자로에서 조사하는 동안 이 핵연료봉은 최종적으로 평균연소도 57,770 MWD/MTU까지 연소하였고, 평균 선형열생성률을 2.75 kW/ft에서 6.95 kW/ft까지 설정하였다. 특히, 이 고연소도 UNF를 원자로로부터 인출한 후 10년까지 습식 저장하였고 100년까지 건식 저장하도록 추가적으로 설정하였다. 이 핵연료봉의 주요 사양은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 핵연료봉의 피복관 재료로서 PWR에서 이용하는 Zircaloy-4와 Zirlo, optimized Zirlo를 각각 적용하였다.

Table 1. Major specifications of PWR assembly

Variable	Description	Value
dco	Cladding outer diameter	0.382 (inches)
totl	Total (active) fuel length	12.5 (feet)
enrch	Fuel U-235 enrichment	3.48 (a/o)
icm	Cladding type	Zry-4
		Zirlo
		Optimized Zirlo

2.2 운전 및 저장조건의 적용

PWR 핵연료봉을 다음과 같은 3단계를 통해 FRAPCON 모델링을 수행하였다; (1) 원자로 내에서 핵연료봉을 고연소도(57,770 MWD/MTU)까지 연소하였고, (2) 습식저장조건으로 고연소도로 조사된 UNF를 저장하였으며, 마지막으로 (3) 건식저장조건으로 고연소도로 조사된 UNF를 저장하였다. 이러한 조건들에 대한 주요 설정들은 Table 2와 Fig. 1에서 볼 수 있다. 특히, 이 고연소도 UNF를 원자로로부터 인출한 후 10년까지 습식저장, 그리고 100년까지 건식저장하는 동안 설정해야 할 선형열생성률을 계산하기 위해 ORIGEN-ARP 코드를 이용하였다. 이 코드로부터 원자로조사기간과 습식 및 건식저장기간 동안 발생하는 Total power들을 계산하였고, 이를 토대로 FRAPCON 코드에 필요한 선형열생성률을 Fig. 1과 같이 계산하였다.

Table 2. Major parameters of 3 conditions

Variable	Description	Value
p2	Coolant system pressure during reactor operation	2250.0 (psia)
p2	Coolant system pressure during pool and storage	14.7 (psia)
tw	Coolant inlet temperature during reactor operation	554.0 (°F)
tw	Coolant inlet temperature during pool storage	120.0 (°F)
tw	Coolant inlet temperature during dry storage (°F)	572.0, 491.1,
		412.7, 368.9,
		333.5, 296.1,
		261.2, 235.6,
		223.6, 212.0,

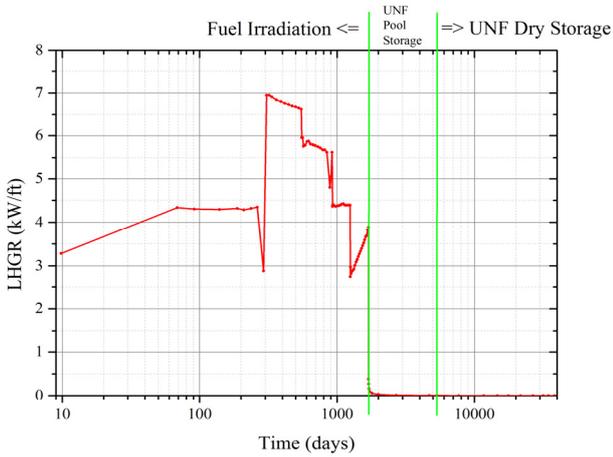


Fig. 1. Linear Heat Generation Rate (LHGR) with time.

2.3 코드계산결과 및 분석

Fig. 2는 Zircaloy-4와 Zirlo, optimized Zirlo 피복관들을 각각 적용한 PWR 핵연료봉의 3가지 환경조건들에서 최대출력을 가지는 axial node를 기준으로 한, 시간에 따른 3가지 피복관들의 외부 표면온도 변화그래프들을 보여주고 있다. 본 연구에서의 고연소도 UNF를 건식저장을 하는 동안 3가지 피복관들의 온도가 572°F(300°C) 이하로 유지하고 있기 때문에 규제 측면에서 보면 피복관 최대허용온도인 400°C(752°F)을 초과하지 않는 정상적인 저장 상태로 볼 수 있었다.

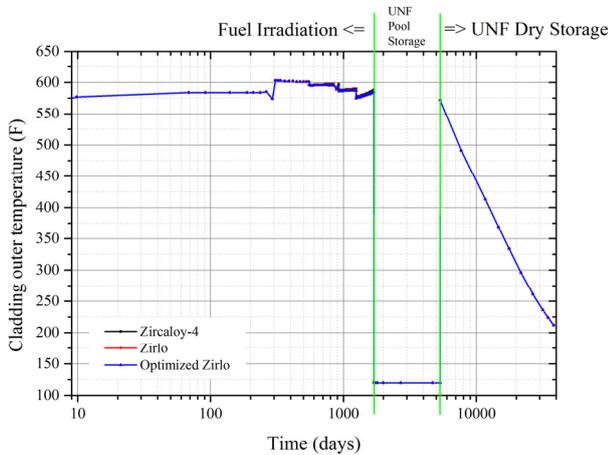


Fig. 2. Cladding outer temperature with time.

Fig. 3은 Zircaloy-4와 Zirlo, optimized Zirlo 피복관들을 각각 적용한 PWR 핵연료봉의 3가지 환경조건들에서 최대출력을 가지는 axial node를 기준으로 한, 시간에 따른 3가지 피복관들의 Hoop stress 변화그래프를 보여주고 있다. 본 연구에서의 고연소도 UNF를 건식저장을 하는 동안 피복관의 Hoop stress가 Zircaloy-4 피복관의 경우 7,411 psi(51.10 MPa) 이하, Zirlo 피복관의 경우 7,731 psi(53.30 MPa) 이하, optimized Zirlo 피복

관의 경우 7,701 psi(53.10 MPa) 이하로 유지하고 있기 때문에, 규제 측면에서 보면 피복관 최대허용 Hoop stress인 90 MPa를 초과하지 않는 정상적인 저장 상태로 볼 수 있었다.

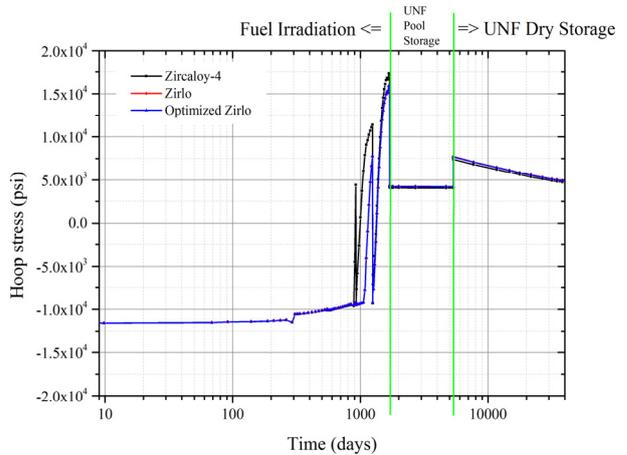


Fig. 3. Cladding Hoop stress with time.

3. 결론

FRAPCON 3.5 코드를 이용하여 PWR 고연소도 핵연료봉을 다음과 같은 3단계를 통해 열적 및 구조적 열화 거동을 예측하였다; (1) 원자로 내에서 핵연료봉을 고연소도로 연소하였고, (2) 습식저장조건으로 고연소도로 조사된 UNF를 저장하였으며, 마지막으로 (3) 건식저장조건으로 고연소도로 조사된 UNF를 저장하였다. 그 결과로는 건식저장조건에서 안전성을 규제하는 피복관의 최대허용온도와 최대허용 Hoop stress 이내로써, 본 연구에서 제시하는 PWR 고연소도 UNF를 건식 저장함에 있어 열적 및 구조적 안전성을 확보하였음을 알 수 있었다.

4. 참고문헌

- [1] K.J. Geelhood and W.G. Luscher, "FRAPCON-3.5: Integral Assessment", NUREG/CR-7022 Vol. 2 Rev. 1, PNNL-19418 Vol. 2 Rev. 1 (2014).