

사용후핵연료봉 결함 부위에서의 방사선량 변화 평가

문주현 · 이상훈

동국대학교 에너지환경시스템학부

E-mail: jhmoon86@dongguk.ac.kr

중심어 (keyword) : 사용후핵연료봉, 결함 부위, 중성자선량, 감마선량,

서론

원자로에서 연소된 사용후핵연료에는 막대한 방사성 물질(핵분열생성물 등)이 포함되어 있어, 이것이 외부로 유출될 경우 사람과 환경에 큰 피해를 줄 수 있다. 이 때문에 국내 원자력발전소에서는 원자력법 시행령 제42조제1항, 시행규칙 19조, 시행규칙 제120조 별표 5 등에 따라 계획예방정비기간 중 주기적으로 사용후핵연료 결함여부를 검사하고 있다.

사용후핵연료 관리의 안전성과 효율성을 향상시키기 위해서는 사용후핵연료에 결함이 발생하였는지 여부와 결함이 발생한 경우, 결함위치를 신속히 탐지하여 적절한 조치를 취하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 사용후핵연료 결함여부를 보다 쉽게 판별할 수 있는 방법론을 개발하기 위한 일환으로서, 사용후핵연료 봉에 crack과 같은 미세 결함이 발생했을 때, 그 주변에 방사선량 변화가 있는지, 변화가 있다면 얼마인지를 평가하였다. 미세 결함이 발생하여 그 주변에 탐지가 가능한 수준의 방사선량 변화가 일어난다면, 방사선계측을 통해 이를 탐지함으로써 사용후핵연료의 결함 발생여부를 쉽게 판별할 수 있을 것이기 때문이다.

계산도구 및 방법

본 연구에서는 미세 결함 부위에서 방사선선량 변화에 대한 개념적 해석에 집중하기 위해, 사용후핵연료 집합체 대신에 사용후핵연료 봉을 평가의 대상으로 삼았다. 방사선원 평가, 기하적 구조 모델링 및 방사선량 평가를 위해 필요한 입력 자료는 고리3·4호기 핵연료봉 자료를 사용하였다.

방사선원 평가는 SCALE5.1 코드 패키지[1]에

있는 ORIGEN-ARP 코드[2]를, 방사선량 평가는 discrete ordinates 코드인 TORT[3,4]를 사용하였다. 반응단면적 라이브러리는 중성자 47군, 감마선 20군 구조의 BUGLE-96 라이브러리[5]를 사용했으며, 라이브러리 처리 프로그램인 GIP 프로그램[6]을 이용하여 TORT 코드의 입력 라이브러리 파일을 생성하였다. 선량환산계수는 ICRP-74 환산계수[7]를 적용하였다.

핵연료봉에 ① crack이 있는 경우와 ② crack이 없는 경우에 대한 기하학적 구조를 다음과 같이 모델링하였다. 핵연료봉 구조를 3개의 영역, 즉 UO₂ Pellet Region, Gap Region, Zircaloy Clad Region으로 단순화하고, 모양은 원통형으로 모델링하였으며, 핵연료봉은 냉각재로 둘러싸여 있다고 가정하였다. 핵연료봉 구조의 대칭성을 참고하여 TORT 계산에서는 $\theta(\text{theta})=0^\circ\sim 45^\circ$ (1/4 영역)이고, Z 축 길이는 1/2 영역만을 모델링하였다. Crack은 핵연료봉 피복재의 중앙지점에 길이 2cm, 폭 0.64cm, 깊이 0.57cm인 Crack 1개가 발생했다고 가정하였다. 이를 모델링하기 위해 TORT 코드의 (r, θ , z) 기하구조를 사용하여 Fig. 1과 같이 Crack의 모양 및 위치를 모델링하였다.

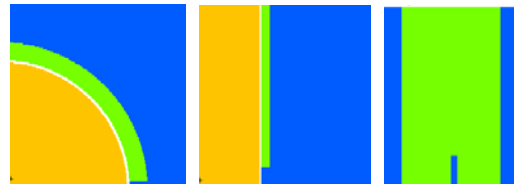


Fig. 1. Modelling for the Crack on Fuel Rod

결과 및 고찰

TORT를 이용한 방사선량 계산결과를 살펴보자.

우선 Crack 주위에서의 중성자선량 변화를 살펴보면 다음과 같다. $r=5.13\text{cm}$ 인 경우(Fig. 2 참조)에, Z 축을 따라서 crack 위치($Z: 0\sim 1\text{cm}$)에 가까이 갈수록 중성자선량이 증가하거나 감소하는 것을 알 수 있다. 중성자선량이 증가하는 경우는 crack이 fuel gap 충전기체인 He으로 구성되어 있다고 가정한 경우이고, 선량이 감소하는 경우는 crack에 냉각재가 들어가 있다고 가정한 경우이다. 선량 증가비율은 3.6%이고, 감소하는 비율은 -3.7%이다.

$r=9.7\text{cm}$ 인 경우(Fig. 3 참조)에, Z 축을 따라서 crack 위치($Z: 0\sim 1\text{cm}$)에 가까이 갈수록 중성자선량이 증가하거나 감소하는 것을 확인할 수 있다. 중성자선량이 증가하는 경우는 crack이 fuel gap 충전기체인 He으로 구성되었다고 가정한 경우이고, 선량이 감소하는 경우는 crack에 냉각재가 들어가 있다고 가정한 경우이다. 그런데, 선량 증가비율은 0.31%이고, 감소하는 비율은 -0.15%로서, 선량 증가비율 또는 감소하는 비율은 매우 작아진 것을 확인할 수 있다.

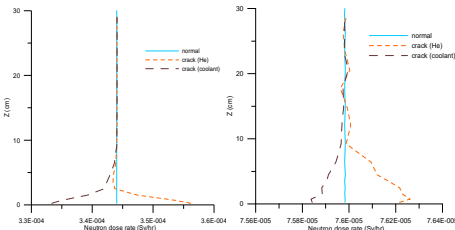


Fig.2 Neutron Dose($r=5.13\text{cm}$) Fig.3 Neutron Dose($r=9.7\text{cm}$)

Crack 주위에서의 감마선량 변화를 살펴보면 다음과 같다. $r=5.13\text{cm}$ 인 경우(Fig. 4 참조)에, Z 축을 따라서 crack 위치($Z: 0\sim 1\text{cm}$)로 가까이 갈수록 감마선량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. crack이 fuel gap 충전기체인 He으로 구성되었다고 가정한 경우가 crack에 냉각재가 들어가 있다고 가정한 경우보다 약간 더 증가하고 있다. 선량 증가비율은 각각 12.2% 및 10%이다. $r=9.7\text{cm}$ 인 경우(Fig. 5 참조)에, Z 축을 따라서 crack 위치($Z: 0\sim 1\text{cm}$)로 가까이 갈수록 감마선량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. crack이 fuel gap 충전기체인 He으로 구성되었다고 가정한 경우가 crack에 냉각재가 들어가 있다고 가정한 경우보다 약간 더 증가하고 있다. 선량 증가비율은 각각 0.59% 및 0.49%로서, 선량 증가비율은 매우 작아진 것을 확인할 수 있다.

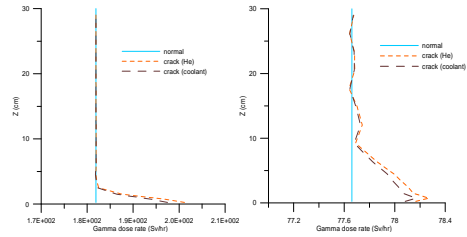


Fig.4 Gamma Dose($r=5.13\text{cm}$) Fig.5 Gamma Dose($r=9.7\text{cm}$)

결론

Crack 발생에 의한 선량 변화 거동을 살펴본 결과, Crack에 냉각재가 들어가거나 또는 그렇지 않은 경우에 따라서 감소되거나 증가하는 거동 또는 비율이 달라지는 것을 알 수 있으며, Crack으로부터 멀어짐에 따라서 선량 변화율이 매우 작아지게 됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 수행되었다.

참고 문헌

1. RSICC, CCC-732/SCALE Version5.1, Oak Ridge National Laboratory
2. I.C. Gauld & etc., ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing For Spent Fuel Depletion, Decay, And Source Term Analysis, ORNL/TM-2005/39, ORNL, November 2006.
3. W. A. Rhoades, The TORT Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code, ORNL-6268, ORNL, November 1987.
4. RSICC, CCC-543/TORT-DORT-PC, Oak Ridge National Laboratory
5. RSICC, DLC-185/BUGLE-96, Oak Ridge National Laboratory
6. W. A. Rhoades, The GIP Program for Preparation of Group-Organized Cross Section Libraries, ORNL, April 1978.
7. ICRP Publication 74, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP, 1996