

PWR 사용후핵연료 집합체 연료봉 인출 방식 분석

김영환, 박근일, 이정원, 이영순, 이도연, 김수성
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 yhkim3@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로 전해환원 공정의 전처리를 위해서는 사용후핵연료 집합체 해체, 연료봉 인출, 인출연료봉 절단을 하는 기계적 전처리가 선행되어야 한다. 일반적으로 전처리공정은 습식방식 과 건식방식에 따라 연료봉의 인출유무가 결정된다. 건식공정인 파이로 공정은 건식공정으로서 기계적전처리의 후속공정과 연계하여 효율적인 측면에서 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구는 고효율 전처리공정의 설계를 위해서 단위공정의 일부인 PWR 사용후핵연료봉 인출방식의 타당성을 분석하였다. 이를 위해서 사용후핵연료 집합체 전체와 인출 후 밀집된 연료봉의 절단력과 원형 도를 비교 분석하였다. 또한 연료봉 인출을 위한 기술적 방법을 비교하였다. 이를 위해 영상처리로 인출하는 비전 방식과 지그를 이용한 기계적 방식을 분석하였다. 후속공정인 탈피복 공정을 고려하여 반응효율, 공급원료 순도, 생산효율, 기계적 탈피복의 유무, 장소의 제한성 그리고 절단면 형상 등의 측면에서 연료봉 인출방식 선정기준을 마련하였다. 사용후 핵연료 인출방식의 분석을 통하여 상기 분석결과들은 사용후핵연료 핵연료주기 건식공정의 전처리 공정 설계에 활용할 수 있다.

2. 본론

2.1 SF 집합체 와 인출 연료봉

SF 집합체에서 핵연료봉을 인출하기 위해서 집합체 절단과 인출 후 밀집연료봉 절단의 원형도와 절단력을 비교하였다. 이 분석의 목적은 기계적 탈피복을 고려했을 때 연료봉의 절단 단면의 형상이 원형도를 유지해야 하는 조건(원형도 90% 이상)을 충족하는지와 연료봉을 절단했을 경우 집합체 절단과 인출 후 밀집연료봉의 소요되는 효율적인 절단력을 비교하고자하는 것이다. 그림 1에서 집합체를 경사절단 하는 힘은 식 1과 같다.

$$P_{A-1} = P_A \cdot \cos\theta \dots\dots\dots (1)$$

그림 2에서 밀집연료봉을 수직 절단하는 힘은

식 2와 같다.

$$P_C = \frac{\tau \cdot \pi \cdot (d_2^2 - d_1^2)}{4} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $P_C = P_A$ 이고, $\cos \theta$ 에서 $\theta < 90^\circ$ 이면 식 3과 같다.

$$\therefore P_C > P_{A-1} \dots\dots\dots (3)$$

그림 1에서 연료봉 단면형상은 연료봉 처짐 량, 즉 $\zeta = L \cdot \tan\alpha$ 만큼 기울어져 절단되므로 연료봉 단면 형상이 찌그러진다. 따라서 동일한 절단 힘을 가했을 때, 집합체를 경사절단 하는 힘이 집합체를 수직 절단하는 힘보다 작고, δ 만큼 기울어져 절단되므로 집합체 절단 방식은 연료봉 형상이 찌그러진다. 집합체 절단과 인출 후 밀집연료봉 절단의 원형도와 절단력 비교결과 집합체 절단 보다 인출 후 밀집연료봉 절단 방식이 절단을 위한 힘이 효율적이고 사용후 핵연료 로드컷(Rod-cuts)의 원형도가 우수하다.

[P_A : 집합체 수직 절단 힘, P_{A-1} : 집합체 경사 절단 힘, P_C : 밀집연료봉을 수직 절단하는 힘, d_2 : 연료봉 외경, d_1 : 연료봉 내경, δ : 연료봉 처짐 량, α : 연료봉 처짐 각, θ : 절단 경사각]

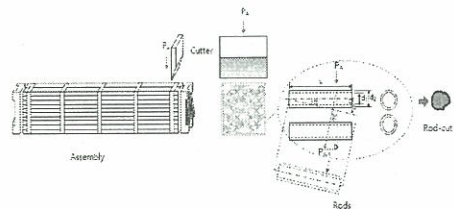


Fig. 1. PWR SF assembly cutting for decladding

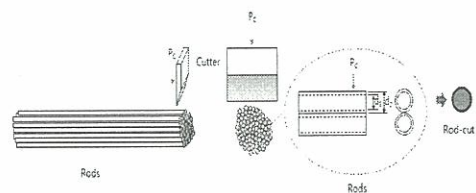


Fig. 2. Consolidated rods cutting after extraction for decladding

2.2 인출기술의 방법적 비교

SF 집합체로부터 연료봉을 인출하는 기술로 영상처리방식인 비전방식(VISION)과 기계적 구조로 이루어진 기계식 연료봉 인출방식(JIG)을 비교하였다(그림 3, 그림 4). 표 1에서 보면 비전방식이 집합체 종류별로 인출할 수 있는 포괄적인 기능을 가지고 있으나, 다중 연료봉 인출 시 연료봉간의 간격이 작으므로 콜릿(collet) 부분의 설계가 어려움이 있으며, 정밀한 제어방식이 요구되는 센서 등이 방사선환경에서 취약하다. 그러나 비전방식 보다 기계식 연료봉 인출방식이 구조적으로 간단하고 방사선환경에서 고장률이 적다. 또한 다중 연료봉을 인출할 때 연료봉들을 잡을 수 있는 구조가 단순하다. 따라서 기계식 연료봉 인출방식이 비전방식보다 연료봉 인출방식으로 양호하다.

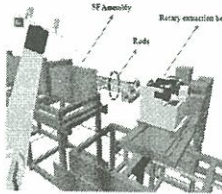


Fig. 3. Vision method

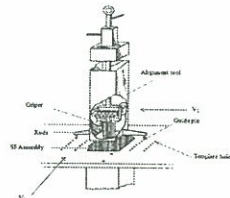


Fig. 4. Jig method

Table 1. Comparison of vision and jig methods for rod extraction

내용	VISION 방식(영상처리)	JIG 방식(기계식)
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 너트소켓은 교체주기 - 집합체 종류별로 인출할 수 있는 포괄적 - 다양한 연료봉 발생 시 다른 영상틀과 함께 인출 등의 취급이 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> - 단순한 기계적 방법에 의한 인출로 구조가 간단함 - 고장률이 낮음 - 차폐 구조를 필요 없음 - 다중 연료봉을 인출할 때 연료봉들을 잡을 수 있는 구조가 단순함
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 정밀한 제어방식이 요구됨 - 센서 등이 취약함 - 방사선 차폐구조재가 요소별로 많이 필요함 - 장치의 고장률이 높음 - 장치의 공간이 큼 - 다중 연료봉 인출 콜릿 설계가 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> - 지그를 일정한 주기로 교체하여야 함 - 집합체별로 지그를 제작하여야 함

2.3 인출장치의 선정기준

SF 집합체로부터 연료봉을 인출하는 방식의 타당성 기준을 그림 5에 나타내었다. 후속공정에 미치는 인자로는 반응효율, 공급물질의 순도, 생산량, 기계적 탈피복장치의 사용유무, 핫셀공간의 제한유무 그리고 절단단면의 형상정도이다. 따라서 후속공정을 고려한 인출장치의 필요성 요건으로는 후속공정의 반응효율이 높게 요구되거나, 후속공정의 로드컷 공급물질 순도가 높게 요구되거나, 후속공정의 생산량이 높게 요구되거나, 기계적 탈피복 장치가 필요하고 후속공정의 장치크기

가 제한이 있는 경우 그리고 후속공정에서 로드컷의 단면 원형유지도가 높게 요구되는 경우이다. 또한 후속공정을 고려한 인출장치의 불필요성 요건으로는 후속공정의 반응효율이 낮게 요구되거나, 후속공정의 로드컷 공급물질 순도가 낮게 요구되거나, 후속공정의 생산량이 낮게 요구되거나, 기계적 탈피복 장치가 요구되지 않고 장치크기가 제한을 받지 않을 때, 그리고 후속공정에서 로드컷의 단면 원형유지도가 낮게 요구될 때 이다.

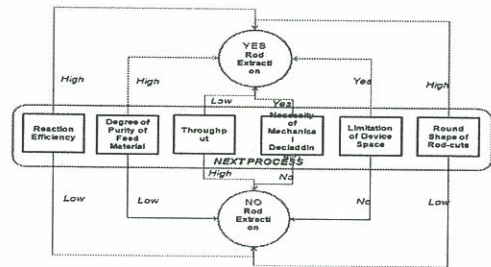


Fig. 5. Reference diagram for rod extraction selection

3. 결론

PWR 사용후핵연료 집합체 연료봉 인출방식의 타당성 분석을 위해서 집합체 절단과 인출 후 밀집연료봉 절단방식, 그리고 비전방식과 기계적 인출방식을 분석하였다. 그 결과, 집합체 절단 보다 인출 후 밀집연료봉 절단 방식이 절단을 위한 힘이 효율적이고 사용후핵연료 로드컷(Rod-cuts)의 원형도가 우수하였다. 기술적 방법에서 기계식 연료봉 인출방식이 비전방식보다 연료봉 인출방식으로 양호하였다. 또한 후속공정인 탈피복 공정을 고려하여 연료봉 인출방식 선정기준을 마련하였다. 이상과 같은 SF 집합체 연료봉 인출방식 분석결과와 PRIDE의 전처리 시설에 적용될 SF 연료봉 인출장치의 설계에 활용될 수 있다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 시행한 원자력 중장기 연구사업의 일환으로 수행하였습니다.

5. 참고문헌

[1] B. D. Cul, "Advanced head-end processing of spent fuel," 2004 American Nuclear Society Winter Meeting, Washington DC, Nov., 16, 2004.