

탈피복에 공급하는 사용후핵연료봉 절단방식 분석

김영환, 박근일, 이정원, 이영순, 이도연, 김수성
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 vkhim3@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 절단방식의 특성을 달리한다. 특히, 건식공정인 파이로 공정은 건식공정으로서 기계적 전처리의 탈피복 공정효율과 연계하여 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구는 고효율 전처리공정의 설계를 위해서 단위공정의 일부인 PWR 사용후핵연료봉 절단방식의 타당성을 분석하였다. 이를 위해서 각 중 공구 사용에 따른 고려사항, 절단방식, 그리고 사용후핵연료봉 특성 등을 분석하였다. 또한 절단, 전단, 와이어컷, 그리고 수평식 슬릿 방식 등의 내구성, 구조, 소요시간, 기능, 취급성, 유지보수, 내방사성, 운전성, 장치크기, 동력, 가공도 그리고 탈피복 영향 등의 장단점을 분석하였다. 그 결과 유압동력의 사용을 전제하고, 기계적 탈피복을 고려하지 않을 때는 전단방식이 가장 유리함을 알 수 있었다. 사용후핵연료 절단방식의 분석을 통하여 상기 분석결과들은 사용후핵연료 핵연료주기 건식공정의 전처리 공정 설계에 활용할 수 있다.

2. 본론

2.1 공구 사용에 따른 절단방식의 고려사항

표 1 과 표 2에서 줄톱/연마식 톱은 핫셀 내의 대기 중이나 수중에서 사용후핵연료봉 절단을 위하여 광범위하게 사용되고 있다. 수중 절단은 절단시의 분진 확산 최소화 및 지르칼로이 미세 입자의 불꽃 발생 방지를 위하여 습식 방법으로 절단한다. 절단 휠을 용이하게 교환할 수 있고, 많은 양의 초미립자(1 μm 이하) 생성으로 지르칼로이 분말을 수집하고, 장비 주변의 분말 누적을 방지할 수 있도록 설계한다.

레이저 절단방식은 사용후핵연료봉 집합체의 구조물을 제거하기 위해 개발된 장비이며, 분진

발생 없이 절단이 가능하다. 유지 및 보수가 필요한 장비는 핫셀 외부에 설치하고, 파지 기구와 레이저 절단기는 핫셀 내부에 설치되어 있다. 단점으로는 절단 깊이의 미세한 제어가 불가능하고, 장비가 고가이다.

와이어 방식(Wire EDM)은 절단되는 금속에 의해 황동선 전극이 통과하고, 금속에 전자를 방출하여 절단하는 방식으로 전선은 금속체를 한번 통과한 후 폐기하는 방법이다. 전선직경은 φ 2~12 mm, 전선길이는 0~6,000 ft, 1 inch 두께의 스테인레스 스틸 절단속도는 28 inch/hr 이다.

전단/절단방식은 사용후핵연료 집합체 및 연료봉 절단을 위하여 펀치나 다이 같은 구조의 전단기로 전단하는 방식이다. 장점은 전단 장비로부터 제거가 어려운 미세 입자가 발생이 없다. 또한 전단 단면이 거칠고 무딘 단점이 있으나, 작동이 신속하고 생산성이 높다. 절단방식은 디스크 톱이나 가위 같은 구조로 절단하는 방식이다. 장점은 절단단면이 양호하고 정교한 절단에 사용하나, 미세 입자가 발생하는 문제점이 있다.

Table 1. Kinds of cutting tool for spent nuclear fuel rod.






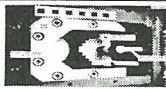
종류	절단공구	
줄톱/연마식 절단방식	 줄톱 방식	 연마방식
레이저 절단방식	 레이저헤드와 센서헤드	
Wire EDM 방식	 와이어 방식	
펀치, 디스크 쇼, 가위 절단방식	 디스크 쇼 방식	 펀치 방식

Table 2. Considerations of cutting tools for spent nuclear fuel rod.

방법	요약	고려사항
줄톱/연마식	- 핫셀 내의 대기 중이나 수중 사용.	- 절단부의 압착 우수 - 분진 과대 발생 - 분진 포집장치가 필요 - 윤활유의 사용 고려 - 모듈화를 고려
레이저	- 분진 발생 없음 - 절단 깊이의 미세한 제어가 불가능하고, 장비가 고가	- 재질, 두께, 속도 및 소요 전력량을 고려 - 핫셀 외부에 설치, 절단기는 내부에 설치함.
Wire EDM	- 전자 방출 절단 방식	- 핵연료 분진 축적 - 가동성모듈화를 고려
펀치, 디스크 쇼, 가위	- 장비로부터 제거가 어려운 미세 입자가 발생됨	- 길이와 압착을 고려 함 - 분진 포집 시스템 필요 - 윤활유 사용을 고려 - 모듈화를 고려

2.2 절단방식에 따른 분석

임의의 방향성을 갖는 절단, 펀치와 한 방향성을 갖는 전단, 와이어 방전가공을 이용한 와이어 절단, 그리고 본 과제 개발한 수평식 슬릿 방식을 대상으로 표 3과같이 장·단점을 분석하였다. 분석결과, 유압동력사용 전제하에서 기계식탈피복을 고려하지 않을 때에는 생산성이 높은 전단방식이 가장 유리함을 알 수 있었다.

Table 3. Analysis on criterion according to cutting methods (merits □, faults ○).

구분	절단	전단	와이어 컷	평식 슬릿
내구성	- 낮음	- 높음	- 낮음	- 낮음
구조	-비산, 쿨링	-단순함	-복잡함	-수집, 분리장치
소요 시간	-절단 시간이 소요됨	-높은 생산성으로 신속함	-커팅 시간이 소요됨	-직접 펠릿/철 분리
기능	-분진 비산	-왕복행정, 단순	-복잡한 형상가공	-다중슬릿, 커팅
취급	-양호	-양호	-어려움	-난이
유지 보수	-유지보수 용이	-유지보수 용이	-유지보수 어려움	-유지보수 용이
내방사성	-내방사성 좋음	-내방사성 좋음	-내방사성 약함	-내방사성 좋음
안전	-안전용이	-안전용이	-안전난이	-안전용이
장치 크기	-경량화 가능	-장치가 큼	-유틸리티 부가 큼	-경량화 가능
동력	-전기	-유압	-전기	-전기
가공도	-절단양호 -곡선, 직선 가공 용이 -정교함	-전단면 무뎠음 -취성 파괴, 거칠음	-절단양호 -고정밀 가공	-슬릿면 양호 -고정밀 Cutting면 양호
소요 동력	-적은 동력 소요	-많은 동력 소요	-적은 동력 소요	-적은 동력소요
탈피복 영향	-양호	-철 분리를 감소	-양호	-양호

2.3 사용후핵연료봉의 특성

사용후핵연료봉 절단 장치의 설계 및 제작을 위하여 절단하고자 하는 재료의 재질 및 특성 등을 파악하여야 한다. 사용후핵연료봉 재료의 기계적 성질, zircaloy tube의 규격, 물리적 성질, 핵연료 피복관 재질의 특성, pellet 규격 및 연료봉 속의 pellet과 pellet 사이의 공간(gap) 등은 표 4에서 보는 바와 같다. 지르칼로이는 지르코늄 합금의 일종이며, 원자로용 재료로서 고온수에 대한 지르코늄의 내식성을 개량할 목적으로 제작한 합금으로서 중성자 흡수 단면적이 작고 좋은 기계적 성질을 가지며, 관, 봉, 관 및 선 등으로 가공할 수 있다. 또한 노심 탱크, 연료피복 및 냉각관 구조 재료 사용한다.

Table 4. Physical properties for spent nuclear fuel rod.

구분	중량, kg/m	지르칼로이(zircaloy)				펠릿(pellet)		
		종류	OD	ID	T	OD	L	공간
인장강도	45.87	14 x14	10.16	8.296	0.617	8.05	10	0.178
항복강도	32.6	16 x16	9.52	8.38	0.57	8.05	10	0.173
연신율	20%	17 x17	9.5	8.537	0.571	8.05	10	0.165

3. 요약

유압동력사용 전제하에, 기계식탈피복을 고려하지 않을 때는 전단방식이 가장 유리함을 알 수 있다. 절단방식은 전단방식에 비해서 낮은 생산성이 단점이나, 높은 원형도의 연료봉 절단면이 요구되거나, 비산에 의한 칩 분리, 쿨링(cooling) 장치를 보완하면 절단방식이 유리하다. 또한 수평식 슬릿 장치는 커팅 블레이드의 낮은 내구성으로 생산성이 낮은 것이 단점이나 내구성이 강한 공구를 사용하여 처리 속도를 향상한다는 전제에서 실험적 검증의 확보, 그리고 별도의 복잡한 펠릿/철 분리 장치를 보완하면 수평식 슬릿 방식이 유리하다.

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.