

# 고효율 사용후핵연료 탈피복/분말화 일체형장치의 모듈화 Modularization on the High-Throughput Vol-oxidizer for a Decladding and Vol-oxidation of Spent Fuel Rod-cuts

\*#김영환<sup>1</sup>, 정재후<sup>2</sup>, 김기호<sup>3</sup> 윤지섭<sup>4</sup>  
\*#Y. H. Kim<sup>1</sup>, J. H. Jung<sup>2</sup>, K. H. Kim<sup>3</sup>, J. S. Yoon<sup>4</sup>  
1, 2, 3, 4. 한국원자력연구원

Key words : Module, Design, Vol-oxidizer, Decladding, Throughput, Spent fuel, Rods-cuts

## 1. 서론

한국원자력연구원은 사용후핵연료 처리의 일환으로 헤드엔드 공정을 개발하고 있다. 전체공정의 단위공정으로서 금속전환로에 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>을 공급하기 위하여 수십 킬로그램을 취급할 수 있는 고효율 탈피복/분말화 산화장치가 개발되고 있다.

본 논문에서는 핫셀(hot-cell)환경에서 원격운전 및 유지보수가 용이하도록 고효율 탈피복 분말화 장치의 모듈화 설계를 다루고 있다. 장치의 모듈화 설계를 위해서 모듈대상을 분석하고 결정하였다. 이를 위해 절단 사용후핵연료봉의 기계적/화학적 탈피복 방식을 분석하고, 산화/회수율이 높은 핵심 메커니즘을 고안하여 제작하였다. 핵심장치의 성능평가와 메시형 반응기의 크기를 예측하는 이론식을 제시하고, 탈피복/분말화 장치의 기본개념을 도출하였다. 기본개념을 바탕으로 장치의 모듈대상을 선정/분석하여 최종, 고효율 사용후핵연료 탈피복/분말화 일체형 장치의 모듈화 대상은 4개의 주모듈과 11개의 세부모듈로 결정되었다. 원격 취급 및 유지보수성을 고려하였으며, 모듈식 탈피복/분말화 일체형 장치의 3D를 구축하였다.

## 2. High-throughput 장치 핵심 메커니즘 고안

High-throughput 탈피복/분말화 공정 핵심장치는 사용후핵연료 절단 연료봉(clad+pellets)을 헐(hull)과 분말로 분리/산화 시키는 연료 산화장치와 헐과 분말을 회수하는 회수장치이다.

단일 공정 장치에서 절단 연료봉의 펠릿을 산화 분말화 하고, 헐과 분말을 독립적으로 회수할 수 있는 일체형 메커니즘을 고안하기 위하여 기존 기계적 탈피복 방식(slitting, ball mill, roller straightening 등)과 화학적 탈피복 방식(muffle furnace, rotary kiln 등)의 장단점을 분석하였다. 분석 결과를 토대로 절단 연료봉의 탈피복 증대를 위하여 기계적 방식과 화학적 방식의 장점을 결합한 ball drop과 rotary kiln 회전방식을 선정하였으며, 산화 및 휘발성 핵분열 생성물 배출 증대를 위하여 blade의 회전에 의한 펠릿 분말의 교반 방식을 고려하였다. 또한 분말입도 크기 조절 기능과 피복재와 분말의 독립적 분리 회수기능이 부가된 탈피복/분말화 일체형 장치의 연료 산화 및 헐/분말회수핵심 메커니즘을 고안하였다.

## 3. 핵심장치 성능평가 및 탈피복/분말화 장치 개념설계

메시형 반응기크기를 예측하기 위해서 1~20cm 길이를 갖는 연료봉(20~100개)를 사용하여 벌크(Bulk) 볼륨과 콤팩트(Compact) 볼륨이 측정되었고, 볼륨상수 값이 계산되었다. 연료봉 체적은 사용후핵연료 연료봉(고리 1호기 14x14, 45,000 MWD/MTU)의 크기를 고려하였다. 무게(5~100kg)에 따라서 펠릿 개수가 계산되고, 볼륨상수 값이 반영되었다.

또한 볼륨상수 값이 고려된 연료봉 체적에 안전계수 값(U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 팽창계적: 1.5)을 곱하여 메시형 반응기 볼륨이 계산되었다. 메시형 반응기크기를 위한 이론식은 다음과 같다.

$$V_i = f_i L_i N_i \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

(V<sub>i</sub>: 이론체적, f<sub>i</sub>: 벌크 팩터, D: 로드컷 직경, L<sub>i</sub>: 로드컷 길이, N<sub>i</sub>: 로드컷 수)

3D모델링의 검증을 위해서 5kg, 20kg, 50kg, 100kg의 아크릴 용기가 제작되었다. 또한 연료봉은 길이별, S/F 무게별로 제작되었다(연료봉의 수량: 100개 ~ 4740개). 재질은 SUS304이고, 크기는 사용후핵연료용 지르카로이(Zry-4)튜브와 같다(OD:10.7mm). 연료봉으로 아크릴용기는 채워지고 연료봉의 볼륨은 측정되었다(그림 1-a). 그림 1-b는 연료봉길이가 70mm 일때 이론값과 실험값이며, (S/F 20kg) 오차율은 0.3%이다.

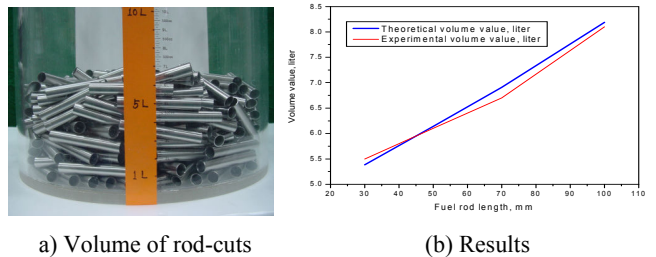


Fig. 1 Comparison of experimental and theoretical results

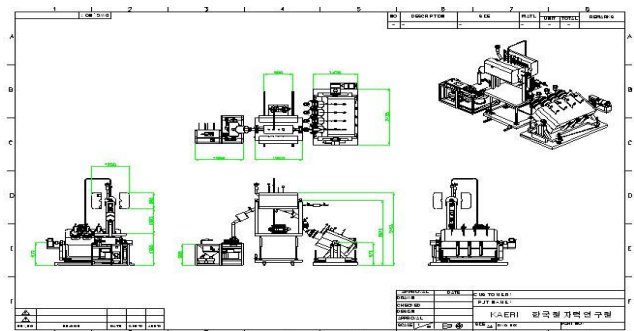


Fig. 2 Concept design of vol-oxidizer for decladding and oxidation 탈피복/분말화 산화/회수 핵심장치 성능평가를 위해 산화/회수 핵심장치를 제작하였고, 사용후핵연료 20kgHM 용량의 모의 연료봉(길이 7cm)을 사용하였다. 성능시험은 인코넬 600으로 제작한 반응기에 대해 진공도 1 torr(1/760mmHg) 및 유량 120cc/min의 산소분위기에서 1000℃까지 승온시켰다. 시험 결과, 진공도와 온도는 잘 유지되었으나, 슈퍼 칸탈 열선과 반응기 외벽에 부식이 발생하였다. 따라서 재료 수명을 고려한 내열 내부식성 재료를 조사/분석하여 설계에 반영하였다. 또한, 승온 시험 중 고온에 의한 반응기 회전부에 그리스(grease)가 누출되어 대안으로 air cooling 시스템을 고안하였으며, 상기 성능시험결과들을 반영하여 그림 413

2와 같이 공학규모 탈피복/분말화 일체형장치의 기본개념을 도출하였다.

#### 4. 모듈대상 결정 및 분석

원격 안전성과 유지보수성 확보를 위하여 작업환경과 장치구조, 경제성을 고려하여 기본 개념도에 반영하였다. 또한 모듈화 대상을 분석하여 대상모듈을 선정하였다.(표 2, 그림 3).

Table 1 Selection of module objects

주 모듈	세부모듈	수량
히터 모듈부	히터모듈(반자동)	2개
	에어 실린더 모듈	1개
반응 모듈부	Utility 모듈	1개
	반응기구동 모듈	1개
	반응기 모듈	1개
	나이프게이트 모듈	3개
	배출부 모듈	2개
장치 지지 모듈	반응기 지지 모듈	1개
	회전 플레이트	1개
전기/센서	전기 및 센서 모듈	1개
	원격취급 커넥터	7개

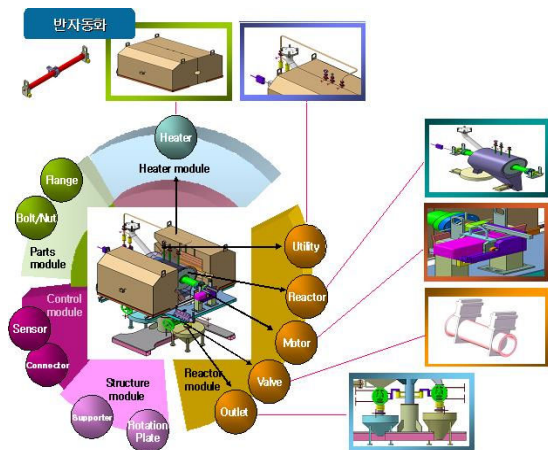


Fig. 3 Schematics of the main module objects

#### 5. 모듈식 탈피복/분말화 일체형 장치 3D

탈피복/분말화 일체형 장치의 모듈화를 위해 반응기 예측 이론식을 이용하여 산화장치의 장치 용량과 크기를 반영하였고, 원격작비 및 유지·보수 관련 등을 고려하여 모듈화 요건을 설정하고, 3D 설계를 수행하였다(표 2, 그림 4).

주 대상 모듈의 모듈화 내용은 다음과 같다. 반응기 구동 모듈부의 착·탈 부분은 베벨기어와 5°의 경사 플레이트 구조를 반영하고, 인양 고리에 의한 모터 모듈의 슬라이딩 운동으로 쉽게 유지 보수가 가능하게 설계하였다. 반응기 모듈은 사용후핵연료 50 kgHM/batch 규모로, 직경은 350 x 길이 400 mm로 결정하였고, 헐 및 분말이송을 위한 transfer slop angle를 45°로 하였다. 나이프게이트 밸브(knife-gate valve)모듈은 air cooling system 고려하였으며, 클램프 탈착 방식의 모듈화 개념 적용하였다. 배출부 모듈에서 분말용기(30L) 및 헐 용기(20L)의 용량을 결정하였다. 배출부 모듈은 플렉시블 및 welding 방법을 적용한 모듈 형태로 하였고, 배출부 모듈의 엔드캡 탈착을 전후슬라이드 방법으로 적용하였다. 장치전체의 유지 보수를 위하여 장치 전체가 하단부의 50cm 위치에서 180도 회전하는 plate 모듈을 고려하였

으며, 장치의 회전 위치 제어용 스톱퍼를 설치하였다.

Table 2 Specification of high-throughput vol-oxidizer

처리 용량	50 khHM/batch
사용 온도	500 °C
반응기 회전	3 - 5 rpm
장치 크기	(L) 1,400 x (H) 2,000 x (W) 1,500 mm
유지 보수	180도 회전, 반자동
모듈 기능	모듈별 분리 기능

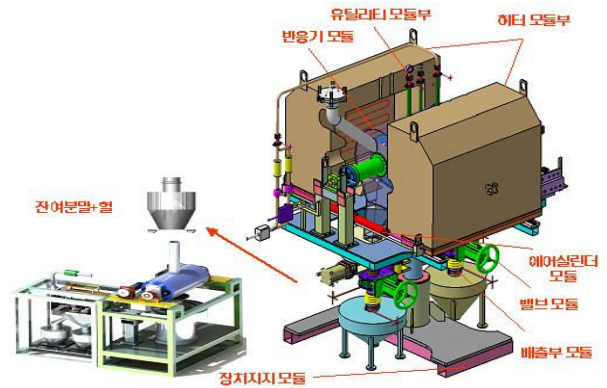


Fig. 4 3D(dimensions) design of high-throughput vol-oxidizer

#### 6. 결론

사용후 절단연료봉을 동시에 탈피복 및 분말화할 수 있는 모듈식 고효율 탈피복/분말화 장치가 개발되었다. 이장치의 개발을 위하여 원격안전성과 유지보수성을 고려하여 모듈 및 반자동화 대상을 분석하고, 결정하였다. 또한 모듈화설계를 위하여 원격 유지 보수 지침에 근거한 모듈화요건을 설정하고, 3D를 구축하였다. 탈피복 분말화장치의 크기는 제시된 반응기크기 예측이론식을 이용하여 산출되었다. 그 결과, 반응기 모듈은 사용후핵연료 50 kgHM/batch 규모로, 직경 350x길이400mm로 하였고, 헐 및 분말의 이송을 위한 transfer slop angle을 45°로 결정하였다. 배출부 모듈에서 분말용기(30L) 및 헐용기(20L)의 용량을 결정하였으며, 배출부 모듈은 플렉시블 및 welding방법을 적용한 모듈 형태로 하였다. 또한 배출부 모듈의 엔드캡 탈착을 전후슬라이드 방법으로 적용하였고, 엔드캡 모듈(용기, 수집기, 엔드캡 등)은 분말 비산에 대한 안전성을 고려하였다.

고효율 탈피복/분말화장치의 원격성 취급을 위해서 제시된 모듈화 방법들은 고방사선 환경의 핫셀 안에서 원격운전 및 유지보수가 용이하게 할 수 있는 핫셀 내 공정장치의 모듈화설계에 활용될 수 있다.

#### 참고문헌

1. C.T. Kring and S.L. Schrock, "Remote maintenance lessons learned on prototypical reprocessing equipment," Proceedings of 38th Conference on Remote Systems Technology, pp.23-27, (1990).
2. D. Peckner, and I. Bernstein, "Handbook of Stainless Steels", McGraw Hill, p.18-5, (1977).
3. T. Nishimura, Y. Sakamura, T. Inoue, " Conceptual design study of pyroreprocessing facilities for LWR MOX fuel using electro-reduction and electrorefining techniques," Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct. 9-13, 218 (2005).