

탈피복-분말화 일체형 장치 설계 최적화 연구

김영환, 박근일, 이정원, 이영순, 이도연, 김수성, 정재후, 김기호

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

yhkim3@kaeri.re.kr

1. 서론

파이로 전해환원 공정의 원료물질을 제조하기 위해서는 먼저 사용후핵연료 봉의 탈피복 및 분말화 공정이 필요하며, 분말화 공정 후 동일한 반응기 내에서 폐피복관(hull)과 분말을 각각 독립적으로 회수하여야 한다. 본 연구에서 개발 중인 탈피복-분말화 일체형 장치는 투입된 사용후핵연료 봉(rod-cuts) 내의 핵연료를 약 500°C의 공기 분위기에서 분말화 하고 남은 폐피복관의 회수율을 높여 처리 용량을 증대시킬 수 있도록 설계되어야 한다.

따라서 본 장치의 최적 설계를 위해서 산화 공정에 의한 탈피복 및 분말화 개념을 도입하였고, 이를 위하여 스크루가 내장된 메시형 회전드럼 방식을 고안하였으며, 장치 설계의 최적화를 수행하고 모의시험을 통하여 성능을 평가하였다.

공학설계 단계에서 탈피복-분말화 일체형 장치의 3D 모델링은 SolidWorks Office Premium을 사용하였다. 모의 사용후핵연료 무게 변화량(5, 20, 50, 100kg)과 핵연료 봉(rod-cut) 길이 에 대한 변화량(1, 3, 5, 7, 10cm)에 따른 핵연료 봉이 차지하는 충전 부피 이론식을 계산하고, 최적의 장치 크기를 설계하였다. 아울러 폐피복관 회수율을 검증하기 위하여 탈피복-분말화 일체형 장치를 제작하였으며, 회전수와 폐피복관 무게에 따른 메시형 장치의 폐피복관 회수율 성능실험을 수행하였다.

2. 본론

2.1 일체형 장치 설계 조건

본 연구에서 설정한 메시형 장치의 설계조건은 회전수 3~5 rpm, 처리 용량 50 kgHM/batch, 폐피복관 회수율 100 %, 사용 온도 500°C, 연료봉 길이 50 mm, 전기용량 30 kw(100 A, 220 V, 3상) 등 이다.

2.2 일체형 장치 기본 개념

탈피복-분말화 일체형 장치는 스크루가 내장된 메시형 회전드럼 방식으로서(그림 1 참조), 핵연료봉은 메시형 장치의 시계방향의 회전에 의해 투입구의 안내를 받아 장치 내부로 투입된다, 연료봉이 투입된 후 산화에 의하여 탈피복-분말화가 일어나고, 분말은 메시 하부로 떨어지며 최종적으로 폐피복관만 남게 된다. 남은 폐피복관은 장치 역방향 회전에 의해 폐피복관 배출구로 배출된다. 또한 폐피복관 회수율을 최대로 하기 위해서 에어 락커(air locker)가 설치되었으며, 분말 및 폐피복관 회수가 용이하도록 장치 하단 부분의 X, Z, Y 위치에서 진동효과가 가장 높은 Z 방향 위치를 선정하였다.

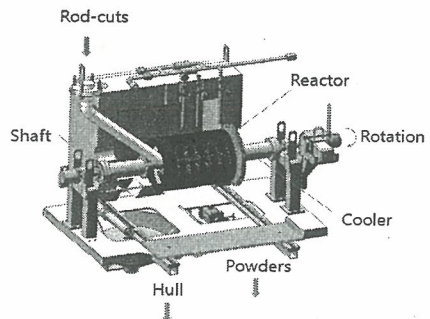


Fig. 1. Horizontal reactor with mesh type

2.3 장치 최적 설계

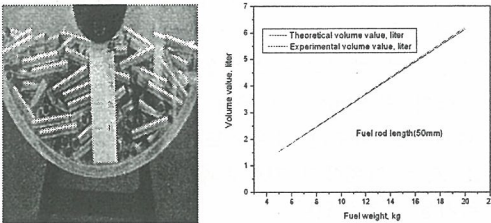
메시형 일체형 장치 크기를 예측하기 위해서 1~20cm 길이를 갖는 연료봉(20~100개)을 사용하여 벌크(bulk) 부피와 탭(tap) 부피를 측정하였고, 이를 통하여 부피 상수 값을 계산하였다. 본 연구에서 사용후핵연료 봉은 연소도 45,000 MWd/tU(고리 1호기, 14x14)를 기준으로, 핵연료 무게(5~100kg)에 따른 부피상수 값을 반영하였다.

또한 부피 상수 값이 고려된 연료봉 체적에 안전계수 값(U_3O_8 팽창계적: 1.5)을 곱하여 메시형 장치의 내부 용적을 계산하였는데, 메시형 장치 크기 계산을 위한 이론식은 다음과 같다.

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

(V_i : 이론체적, f_i : 벌크 팩터, D : 핵연료 봉 직경, L_i : 핵연료 봉 길이, N_i : 핵연료 봉 수)

3D 모델링을 통한 장치 설계 자료의 검증은 위해서 핵연료 5kg, 20kg, 50kg, 100kg을 충전할 수 있는 아크릴 용기를 제작하고, 연료봉은 길이별, 모의 사용후핵연료 무게별로 제작하였다 (연료봉의 수량 : 100개~4,740개). 모의 연료봉 재질은 SUS304이고, 크기는 Zry-4 튜브 직경(OD: 10.7mm)과 동일하며, 아크릴 용기에 연료봉을 채운 후 충전 부피를 측정하였다(그림 2-a 참조). 그림 2-b는 50mm 길이의 모의 사용후핵연료 봉 20kg(핵연료 기준)을 충전할 경우 이론값과 실험값이며, 오차율은 0.3%이다.



a) Volume of rod-cuts (b) Results
Fig. 2. Comparison of experimental and theoretical results

2.4 폐피복관 회수율 검증 시험

제작한 장치를 이용하여 모의 폐피복관 회수 성능시험을 수행하였다. 폐피복관 용량은 모의 사용후핵연료 기준 10 kg, 20 kg, 30 kg, 40 kg, 50 kg HM/batch까지 변화를 주어 폐피복관 회수율 실험을 수행하였다. 폐피복관 투입부터 배출까지 장치 회전수는 3~10 rpm까지 변화를 주었으며, 폐피복관 투입 대비 배출 무게를 로드 셀(load cell)에 의해 그래프 단위로 정량적으로 측정하였고, 폐피복관 투입, 배출시 진동은 주지 않았다. 폐피복관 회수율 성능시험 시스템은 그림 3과 같다.

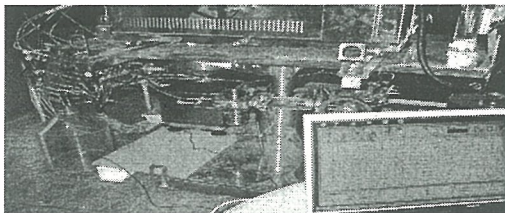


Fig. 3. Measurement system for hull recovery

그림 4에서 보는 바와 같이, 폐피복관 회수율

실험결과 연료봉 무게가 10~40kg 범위에서 3~5 rpm일 경우 폐피복관 회수율은 100%로 양호하였다. 그러나 회전수 10 rpm에서 40kg이상일 경우 회수율은 99%였다. 따라서 폐피복관과 분말 배출구 설계 시 분말 배출구 크기 대비 폐피복관 배출구 크기(기존 장치 설계 시- 폐피복관 : 분말=2 : 6.5) 비율을 30%이하로 설계하여야 한다.

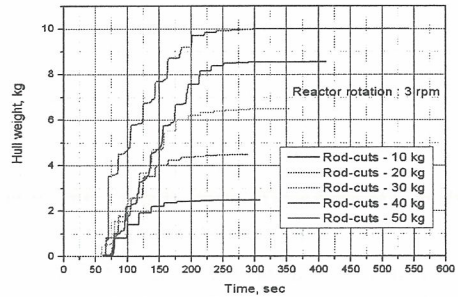


Fig. 4. Recovery weights of hull according to rod-cut weight at 3 rpm

3. 결론

사용후핵연료 봉을 최대로 충전하고 폐피복관 회수율을 높일 수 있는 스크루가 내장된 메시형 회전드럼 방식의 탈피복-분말화 일체형 장치 설계 최적화 연구를 수행하였다. 장치내부 크기를 이론식을 이용하여 계산하고 연료봉 충전 부피를 측정된 결과, 이론값과 실험값의 오차율은 0.3%이었다. 연료봉 무게 증가 및 회전수 변화에 따른 폐피복관 회수율을 측정할 결과, 반응기 회전수와 무게증가에 따라 폐피복관 회수율은 감소하였다. 즉 폐피복관 회수율을 증대시키기 위해서는 분말 배출구 크기 대비 폐피복관 배출구 크기 비율은 30%이하로 설계되어야 한다. 이상과 같은 설계 최적화 연구 결과는 PRIDE 및 ESPF 시설에 적용될 고효율 탈피복 분말화 일체형 장치의 설계에 활용될 수 있다.

4. 참고문헌

[1] J. A. Stone, "Vol-oxidation studies with UO₂ reactor fuels" ANS, Meeting on Fuel Cycles for Eighties, DP-MS-80-9, Sep.-Oct. (1980).
[2] K. Okada, "Separation method for a spent fuel rod", Japanese Patent No. 84140163, July 5, 1984.