

사용후핵연료 무게와 로드컷 길이에 따른 고효율 탈피폭/분말화 일체형 장치의 스케일 업 설계 연구

김영환, 정재후, 박병석, 황정식, 윤지섭, 김호동
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

yhkim3@kaeri.re.kr

1. 서론

탈피폭/분말화 일체형 장치는 일단 사용후 핵연료봉인 로드컷(연료봉+펠릿)을 탈피폭과 분말화를 동시에 처리하고, 차세대 공정장치의 “전기 금속환원 장치”에 U_3O_8 의 균질화 된 미세분말을 만들어 공급하는 산화 장치이다. 또한, 본 장치의 전 공정(Pre-process)인 사용후핵연료봉 절단 장치를 이용하여 핵연료봉을 일정한 간격으로 절단하고 절단된 로드컷(Rod-cuts)을 분장치 속에 투입한다. 투입된 연료봉내의 펠릿(pellets)을 분말화 하기위하여 가열장치의 유틸리티를 이용하여 일체형 장치에 고온 열과 공기를 공급하면서 UO_2 펠릿을 균질화된 U_3O_8 으로 분말화하고, 헐(Hull)로부터 분말을 분리하는 장치이다. 또한 산화공정 중에 공기분위기와 진공 상태에서 핵분열성 물질을 제거한다. 탈피폭/분말화 일체형 장치의 사용후핵연료 무게와 로드컷 길이에 따른 탈피폭/분말화 일체형 장치의 스케일 업(Scale-up)설계 연구목적은 고효율 탈피폭/분말화 일체형 장치의 스케일 업용 데이터를 얻기 위한 것이다. 이를 위해서 사용후핵연료 5kg, 20kg, 50kg, 100kg의 무게 변화량과 로드컷의 3cm, 5cm, 7cm, 10cm의 길이에 대한 변화량에 따라서 로드컷이 차지하는 볼륨을 예측할 수 있는 이론식을 도출하고, 장치크기를 도식화하였다. 이론식 값들의 도식화를 위해 3D모델링 프로그램(Solid works)을 사용하였다. 도식화 결과, 사용후핵연료 무게와 로드컷의 길이에 따라서 탈피폭/분말화 일체형 장치의 반응부와 장치크기를 예측 할 수 있었다. 또한 이론적으로 도출된 결과 값에 대해 검증실험을 수행하였다. 본 과제 수행을 통해 획득한 3차원 스케일 업 모델 데이터는 향후, 고효율 탈피폭 분말화 일체형 장치의 설계 및 특성 파악을 위한 재활용 가치로 역할을 할 것이다.

2. 로드컷 볼륨 예측 이론식 도출

볼륨 크기를 예측하기위하여 1~20cm 길이를 가진 각각의 소량(20~100개)의 로드컷에 대한 벌크(Bulk)볼륨과 컴팩트(Compact)볼륨을 비이커를 이용하여 측정하고 볼륨 상수 값을 실험적으로 얻었다. 또한 (Spent fuel) 펠릿의 크기(고리 1호기 14x14, 45,000 MWD/MTU)를 고려하여 무게별로 펠릿 개수를 계산하고, 볼륨상수 값을 반영하여 의 무게별 연료봉 체적을 계산하였다. 또한 회전반응부 크기를 알기 위하여 연료봉체적, U_3O_8 체적에 안전계수 값(1.5)을 적용하여 로드컷 볼륨 예측 이론식을 도출(식1)하였다. 100kg의 장치크기를 산출하기위하여 기존에 제작된 S/F 20kg용 시험 장치와 이론으로 산출된 반응기크기의 비로 장치의 지름 크기비와 길이 크기 비 그리고 지름 크기 비를 계산하였다.

$$V_t = f_i \times L \times n \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (1)$$

(V_t : 이론체적, f_i : 벌크 팩터, d : 로드컷 직경, L : 로드컷 길이, n : 로드컷 수)

3. 회전반응부 크기 및 장치 크기 3D 도식화

회전반응부 크기 및 장치 크기의 3D 도식화를 수행하기 위해, 솔리드 워크스(SolidWorks) 프로그램을 사용하였다. 3D 모델링의 목적은 로드컷 볼륨 예측 이론식을 이용하여 반응부의 체적과 분말을 수집하는 반원형 분말 트레이(Tray) 및 분말수집기(Collector)의 볼륨을 S/F 무게별, 로드컷 길이별로 3D도식화를 위한 것이다. 특히 반응부의 체적을 구하기 위하여 고정조건

으로 내경 300mm에서 로드켓을 반응기에 50%로 채웠을 때를 가정하였다. 분말 반원형 트레이 볼륨의 3D 도식화를 위해서 분말이 트레이 밑 부분까지 쌓일 때를 고정조건으로 하였다. 이 목적은 각 대상에 대한 분말받침부의 반경을 결정하기위한 것이다. 또한 분말배출밸브 상부의 분말콜렉터(Collector)의 볼륨의 고정조건은 분말 배출구 직경을 100mm 하였다. 상기 3D 도식화를 수행하는데 있어 신뢰성 높은 형상 값을 얻기 위해 로드켓 볼륨 예측 이론식을 바탕으로 3차원 형상 모델링을 구현하였다.

4. 이론적 3D 도식화 체적의 실험적 검증

도식화의 검증실험을 수행하기위해서 S/F의 이론적 볼륨을 고려하여 5kg, 20kg, 50kg, 100kg의 아크릴 용기를 제작하였으며, 로드켓 길이별, S/F 무게별, 로드켓 수량을 100개에서 4740개까지 제작하였다. 로드켓의 재질은 SUS304를 사용해서 실제 지르카로이(Zry-4)튜브의 크기와 동일한 사이즈(OD:10.7mm)로 제작하였다. 또한 아크릴 반응기의 표면에는 볼륨을 측정할 수 있게 스케일을 표시하였고, 반응기크기별로 계산된 로드켓의 수량을 상부에서 쏟아 부었으며, 쌓인 로드켓의 볼륨을 측정하였다

5. 결론

볼륨예측 이론식을 도출하기위하여 S/F 펠릿의 분말화 체적팽창 계수를 2.7로 반영하였다. 또한 S/F 펠릿의 무게변화에 따른 로드켓의 길이별 수량을 계산하고, 로드켓 길이 3cm, 5cm, 7cm, 10cm의 벌크 팩타(Bulk factor)를 각각 2.1, 2.4, 2.7, 3.2로 고려하여 볼륨예측 이론식을 도출하였으며, S/F 무게별, 길이별, 회전반응부의 볼륨을 계산하였다. 또한 장치 전체크기는 반응부의 이론적으로 계산된 볼륨과 기존에 실험용으로 제작된 20kg용 S/F 탈피복/분말화 일체형 장치의 크기 비를 고려하였다. 그 결과, 장치 길이, 높이, 폭의 크기비가 각각 2.77, 5.6, 4.38로 조사되었다. 이론식을 검증하기위하여 아크릴 용기(5kg, 20kg, 50kg, 100kg)와 로드켓 튜브를 제작하여 S/F 무게별, 로드켓 길이별로 볼륨을 측정한 결과(그림1), 그림2와 같이 잘 일치됨을 알 수 있었다. S/F 무게별, 로드켓 길이별, 회전반응부의 크기 및 장치 크기의 이론식 도출과 3D 도식화, 검증실험 결과들에 의해서 최적화된 장비를 예측함으로써 시간 및 시행착오에 의한 손실을 최소화하고 장비의 효용가치를 극대화 할 수 있을 것이다.

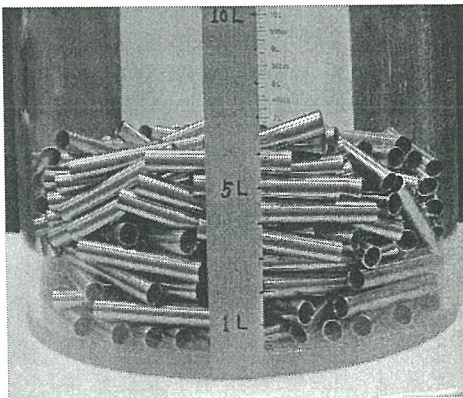


그림 1 로드켓 길이 70mm의 볼륨(S/F 20kg)

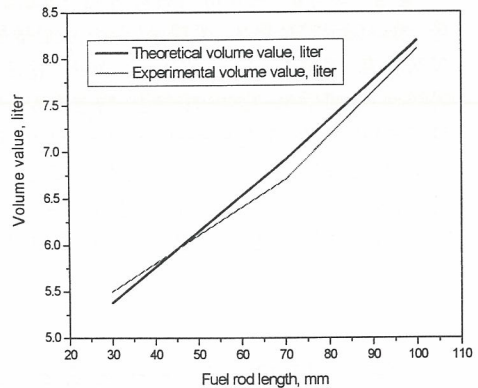


그림 2 로드켓 길이 70mm의 이론값과 실험값 (S/F 20kg)