

설계절차를 이용한 고효율 산화장치에 대한 최적설계 Optimum Design on the High-Throughput Vol-oxidizer Using Design Process

*#김영환¹, 정재후², 박병석³, 김기호⁴
*#Y. H. Kim¹, J. H. Jung², B. S. Park³, K. H. Kim⁴
1, 2, 3, 4 한국원자력연구원

Key words : Oxidation, U₃O₈, Design, Throughput, Spent F uel, Rods-cuts, Thermal, Analysis, Lengths, Powders

1. 서론

한국원자력연구원은 사용후핵연료 처리의 일환으로 헤드엔드 공정을 개발하고 있다. 전 공정의 단위공정으로서 수십 킬로그램을 취급할 수 있는 고효율 탈피복/분말화 산화장치를 금속전환로에 U₃O₈을 공급하기 위하여 개발되고 있다.

본 논문에서는 산화와 회수율이 높은 고효율 탈피복 분말화 장치 설계를 다루고 있다. 장치설계를 위해서 설계절차를 제시하였다. 설계절차는 주요메커니즘고안, 공학설계, 3D 열구조 해석과 장치검증시험의 4단계로 구성된다.

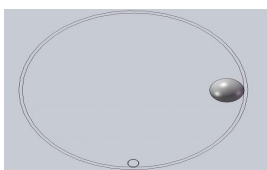
주요메커니즘 설계를 위해서 기계적 방식과 화학적방식을 분석하였다. 분석결과를 통해서 불낙하와 회전방식을 채택하였다. 이 방식을 토대로 탈피복과 분말화 효율의 향상을 고려한 주요 메커니즘을 고안하였다. 이 장치는 핵과 분말을 각각 독립적으로 회수할 수 있다. 공학설계단계에서 사용후핵연료 5, 20, 50, 100kg의 무게변화량과 로드컷 길이 1, 3, 5, 7, 10cm에 대한 변화량에 따라서 로드컷이 차지하는 볼륨이론식을 계산하고 장치크기를 설계하였다. 3D 모델링의 열적, 구조해석을 수행하기 위해 SolidWorks Office Premium 2007®, COSMOSMotion®을 사용하였다. 장치검증시험을 위하여 장치를 제작하였으며, 성능시험을 수행하였다.

2. 주요메커니즘고안

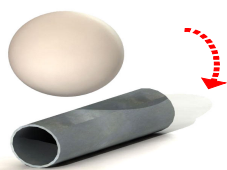
그림 1과 같이 불낙하와 드럼 회전방식을 선정하였다. 또한 탈피복 및 회수율향상을 위하여 세라믹볼이 사용되었다. 메시형반응기가 회전하는 동안 세라믹볼이 연료봉에 충격을 가한다. 연료봉 안에 있는 펠릿은 세라믹볼에 의해서 깨지고 연료봉 밖으로 나온다. 또한 펠릿 조각들은 세라믹 볼의 충격에 의해서 더욱 미세하게 파괴된다. 미세한 펠릿조각들은 산소와 쉽게 반응하여 분말이 되며, 메시를 쉽게 투과하기 때문에 회수율은 향상된다.



a) Inside of reactor as a mesh type



b) Position of ball



c) Impact direction on hull

Fig. 1 Thermal stress analysis of ball on the hull.

또한 회수율을 최대로 하기 위해서 Air locker가 설치되었다. 가열로 하단부분의 X, Z, Y 위치에서 진동효과가 가장 높은 Z 방향 위치가 선정되었다.

핵분열성 가스 생성물을 쉽게 배출하기 위하여 진공시스템이 설계되었다. 진공시스템에서 고온열(1250℃)로 인한 가스포집용 진공펌프의 손상을 방지하기 위해서 쿨링 팬(Cooling fan)이 설치된다. 또한 일정한 온도와 진공을 유지하는 컨트롤 방식(PID, Feedback system)이 고려되었다.

3. 공학설계

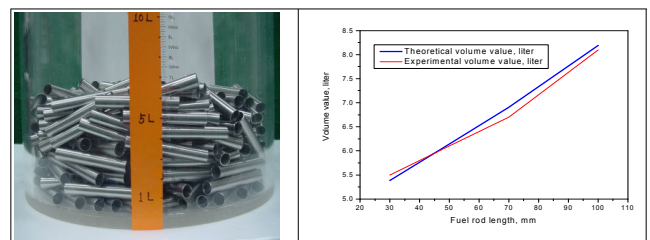
메시형 반응기크기를 예측하기 위해서 1 ~ 20cm 길이를 갖는 연료봉(20 ~ 100개)을 사용하여 벌크(Bulk)볼륨과 콤팩트(Compact)볼륨이 측정되었고, 볼륨상수 값이 계산되었다. 연료봉 체적은 사용후핵연료 연료봉(고리 1호기 14x14, 45,000 MWD/MTU)의 크기를 고려하였다. 무게(5 ~ 100kg)에 따라서 펠릿 개수가 계산되고, 볼륨상수 값이 반영되었다.

또한 볼륨상수 값이 고려된 연료봉 체적에 안전계수 값(U₃O₈ 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_i: 이론체적, f_i: 벌크 팩타, D: 로드컷 직경, L_i: 로드컷 길이, N_i: 로드컷 수)

3D 모델링의 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 2-a). 그림 2-b는 연료봉길이가 70mm 일때 이론값과 실험값이며, (S/F 20kg) 오차율은 0.3%이다.



a) Volume of rod-cuts

(b) Results

Fig. 2 Comparison of experimental and theoretical results (length: 70 mm, S/F 20 kg).

그림 3 과 같이 산화와 회수율 향상을 위한 주요 메커니즘은 이론식(식1)과 솔리드 워크스(SolidWorks) 프로그램에 의해서 설계되었다. 또한 500℃에서 핵분열성 물질이 쉽게 배출되기 위하여 진공 메커니즘이 설계되었다.

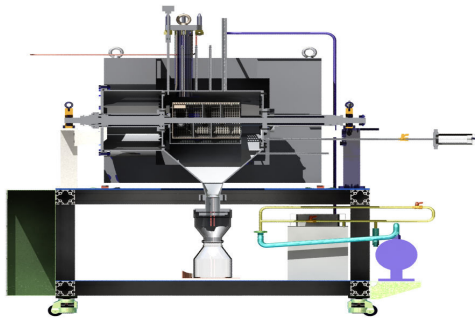


Fig. 3 Oxidation main mechanism with vacuum system.

4. 열 구조 해석

3D 모델링의 열해석을 수행하기 위해, SolidWorks Office Premium 2007®이 사용되었고, 열전달 해석을 위하여 COSMOSMotion®, COSMOSWorks Advanced Professional 2007®, COSMOSFloWorks 2007®이 사용되었다.

탈피복/분말화 일체형 핵심 장치의 부품들(회전축, 메시, 세라믹 볼, 챔버, 히터부)은 재질 특성이 반영되었다. 또한, 열해석은 온도 조건과 구조적 특징에 따라 수행되었다.

해석의 목적은 온도 및 히터의 간격 변화에 대해 반응기 내부의 온도 특성을 분석하는 것이다. 또한 온도가 변화(1100, 1200, 1300, 1400, 1500℃)되는 동안에 열전달의 특성이 분석되었다(그림 4) 반응기에 대한 히터간격이 35mm일 때 히터의 온도 변화에 따른 반응기의 내부온도는 다음과 같다. 외부(Heating)온도의 증가에 따라 반응기내부 온도는 비례적인 증가추세를 보이고 있다.

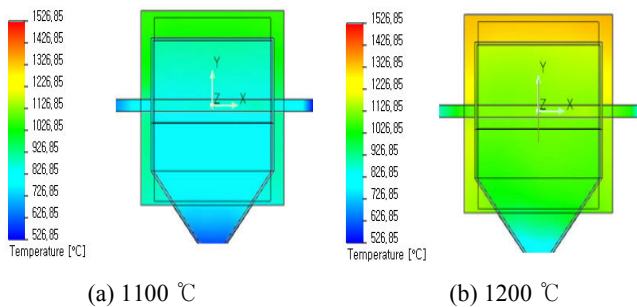


Fig. 4 Temperature in the reactor (Out-Temp.: 1100, 1200 °C).

5. 장치성능의 검증실험

탈피복/분말화 일체형 핵심장치는 제작되었다(그림 5). 이장치는 연료산화 핵심장치와 분말/Hull 회수 핵심장치, 진공시스템으로 구성된다(1250℃, 1torr.)

메시형 반응기의 재질은 인코넬 601이 사용되었고, 히터부는 분할/슬라이드 기능을 갖고 있다. 탈피복/분말화 일체형 핵심장치를 이용하여 성능실험이 수행되었다(SF 20kg 용량/크기 : H 132 x L44 x W88 mm).

산화 핵심장치의 blank 성능시험에서, 내부온도는 500℃까지 승온시키는데 약 100분이 소요되었으며, 진공은 1Torr가 잘 유지되었다.

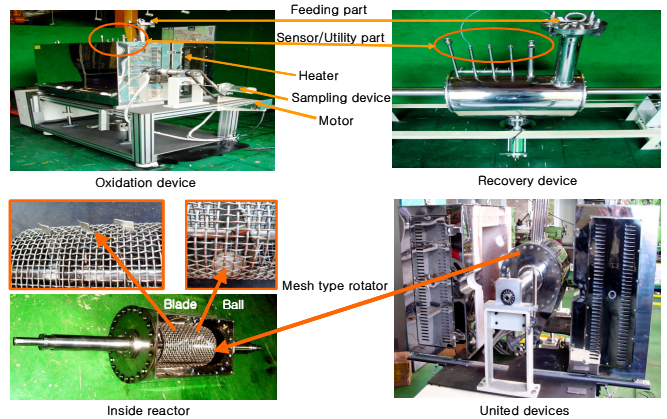


Fig. 5 Oxidation device and recovery device.

6. 결론

사용후 절단연료봉을 동시에 탈피복 및 분말화할 수 있는 탈피복/분말화 장치가 개발되었다. 이장치는 크게, 산화핵심장치와, 회수 핵심장치로 구성된다.

설계를 위하여 ball drop과 회전형 rotary kiln방식이 선정되었다. 또한 회수와 산화율을 향상시키기 위하여 세라믹볼과 블레이드, 분말수집기를 갖는 주요메커니즘이 고안되었다.

반응기크기를 알기 위해 이론식이 도출되었고, S/F의 무게별, 길이별, 반응부의 볼륨이 계산되었다. 또한 이론식의 검증에 위하여 아크릴을 사용하여 연료봉의 볼륨이 측정되었으며, 이론값과 실험값의 오차율은 0.3%가득다.

히터의 간격 증가에 따른내부 온도 분포는 차이가 없었다(1077~1338 K). 그러나 반응기의 바닥부와 회전축에서 열전달에 의해서 내부 온도 분포는 차이가 있었다. 또한 반응기에 대한히터 간격이 35mm일 때 외부(Heating)온도의 증가에 따라 반응기내부 온도는 비례적인 증가추세를 보여 주었다.

산화 핵심장치의 blank 성능시험에서, 내부온도는 500℃까지 승온시키는데 약 100분이 소요되었으며, 진공은 1Torr가 잘 유지되었다. 제시된 설계절차들은 스케일 업을 위한 고효율 탈피복/분말화장치의 설계에 활용될 수 있다.

참고문헌

1. T. Nishimura, Y. Sakamura, T. Inoue, " Conceptual design study of pyroprocessing facilities for LWR MOX fuel using electro-reduction and electrorefining techniques," Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct. 9-13, 218 (2005).
2. Z. Liu, D.S. Cox, R.D. Barrand, et al., "Particle size distributions of U3O8 produced by oxidation in air at 300-900 oC," The 13th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society, Saint John, New Brunswick, Canada Jun. (1992).
3. G. Uchiyama, S. Torikai, M. Kitamura, et al., "Outline of an experimental apparatus for the study on the advanced voloxidation process," JAERI-M, 90-016, Jan. (1990).
4. K.A. Peakall, J.E. Antill, "Oxidation of uranium dioxide in air at 350-1000 #," Journal of Nuclear Materials, 2 [2], 194-195 (1960).