

산화속도 및 회수율 향상을 위한 고효율 장치 핵심 메커니즘 설계

김영환¹ · 박병석¹ · 정재후¹ · 윤지섭¹ · 황정식²

Design on Main Mechanism of High Throughput Device for Enhancement of Oxidation and Recover Rate

Y. H. Kim, B. S. Park, J. H. Jung, J. S. Yoon, J. S. Hwang

Abstract

In this paper, we designed the main mechanism of high throughput device for rod-cuts of spent fuel. For this, we analyzed the mechanical methods(slitting, ball mill, roller straightening) and chemical methods(muffle furnace, rotary kiln). As the results, methods of ball drop and rotary drum for concepts design were selected in the analysis step. For enhancement of oxidation rate, we devised the blades on the reactor with mesh type. Also, for enhancement of decladding rate, we designed ball size and rotation reactor with mesh type and devised the vacuum system for fission products. Mechanisms of oxidation and recovery can simultaneously handle the rod-cuts of spent fuel and independently recover. The results of mechanism design can be used for scale-up of high throughput device.

Key Words : Mechanism, Oxidation, Recovery, Vol-Oxidizer, Design, High Throughput, Decladding.

1. 서론

원자력 발전소에서 발생한 사용후핵연료는 해마다 증가되고 있다. 본 연구의 목적은 스케일 업을 위한 실증용 엔지니어링 규모의 수평식 공기 산화로를 설계하기 위한 것이다. 본 논문에서는 대용량의 사용후 절단연료봉(cladding + pellets)의 탈피복&분말화 장치 설계를 위해 고효율 핵심장치 메커니즘을 설계 하고자 한다. 고효율 탈피복/분말화 공정 핵심장치는 사용후 핵연료 모의 연료봉을 동시에 탈피복 및 분말화 할 수 있는 일체형 기술로서 Scale-up을 할 경우 100 kgHM/day 용

량을 처리할 수 있는 대용량의 장치이다. 단일 공정 장치에서 절단 연료봉의 펠릿을 산화 분말화 하고, 피복재와 분말을 독립적으로 회수하는 탈피복/분말화 일체형 장치의 주요 핵심 메커니즘 고안하였다. 이를 위해 기계적 탈피복 방식(slitting, ball mill, roller straightening 등)과 화학적 탈피복 방식(muffle furnace, rotary kiln 등) 등을 분석하였다. 그 결과, ball drop과 rotary drum의 회전 방식이 채택되었다. 이를 바탕으로 회수메커니즘은 절단 연료봉의 탈피복을 향상시키는 구조로 설계하였고, blade의 회전에 의한 펠릿 분말의 휘

1 한국원자력연구원 핵주기 시스템 공학개발부

2 충남대학교 대학원

저음의 구조는 절단연료봉의 산화 및 휘발성 핵분열 생성물 배출을 증대하는 구조로 설계하였다.

2. 최대 산화속도/회수율 요건 도출

산화효율을 높이기 위해서 메시형 반응기 외부에 블레이드를 고정하여 반응기 회전에 의해 작은 펠릿 조각들을 휘저어줌으로써 산화효율을 높여주는 구조로 고안하였으며, 탈피복율을 최대로 하기 위하여 메시형 반응기의 회전에 따라 반응기 내 모의 연료봉에 충격을 가하는 볼 방식을 채택하였다. 또한 메시 반응기 밖으로 나온 산화분말을 회수하기 위해서 수동레버를 전후로 180° 동작시키며 분말 수집기를 뒤집는 구조를 고려하였으며, 산화효율 과 분말 회수율의 향상을 위하여 가열기 하부에 Z 방향으로 진동하는 Air-locker 방식을 적용하였다.

2.1 반응기 외부 블레이드에 의한 산화속도 증대

그림 1과 같이 산화온도 500°C에서 연료봉 내부의 펠릿이 산화반응 중에 분말수집기 위로 떨어져 작은 펠릿 조각들이 남아 있을 때, 메시형 반응기 외부에 고정되어 있는 블레이드가 회전하며 휘저어줌으로써 산화속도가 높아지는 효과를 고려하였다. 즉, 메시형 반응기 외부에 일정간격으로 넓게 고정되어 있는 블레이드들은 반응기 측면에서 볼 때 시계방향(정회전)으로 회전하면서 펠릿 조각들을 휘저어 주는 구조가 되도록 고안하였다.

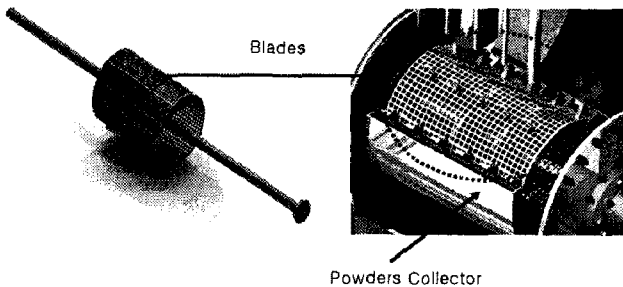
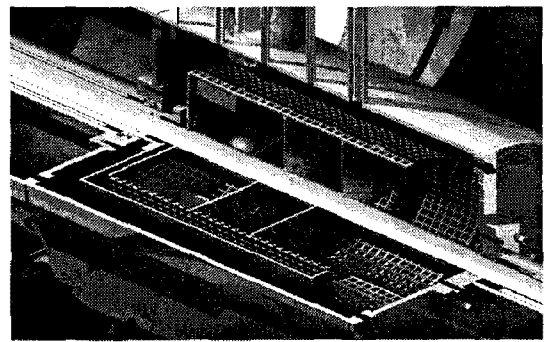


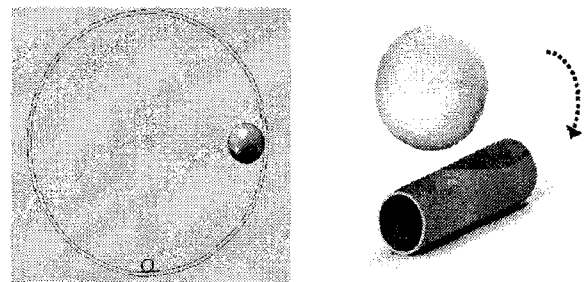
Fig. 1. Blades on the reactor with mesh type.

2.2 탈피복 효율 향상을 위한 세라믹볼 방식 적용

그림 2 (a, b, c)와 같이 탈피복 및 회수율향상을 위하여 반응기 내의 세라믹 볼이 반응기 내벽의 9시 지점에서 중력방향으로 구름 충격을 가함으로써 모의 연료봉 내부의 펠릿들을 깨어주는 효과를 기대하였다. 특히 이 효과는 연료봉 내부에서 깨어져 밖으로 나온 펠릿 조각들과 산소접촉면적을 크게 함으로써 산화효율을 증대시킬 수 있다.



a) Inside of reactor with mesh type.



b) Position of ball c) Impact direction on hull

Fig. 2. Thermal stress analysis of ball on the hull.

2.3 수동레버와 분말수집기의 반회전 구동 기구

그림 3과 같이 펠릿들이 산화가 종료된 후, 분말들이 담겨지는 분말수집기가 반응로 외부 좌측에 있는 수동 레버의 작동에 의해 분말회수 용기로 모아지는 구동기구를 착안하였다. 고안된

분말수집기의 반회전 구동기구는 미산화된 펠릿 조각들이 반응기 메시를 통과하여 온도가 낮은 부분인 배출밸브의 하단으로 떨어져 산화가 일어나지 못하는 것을 방지하는 효과가 있다.

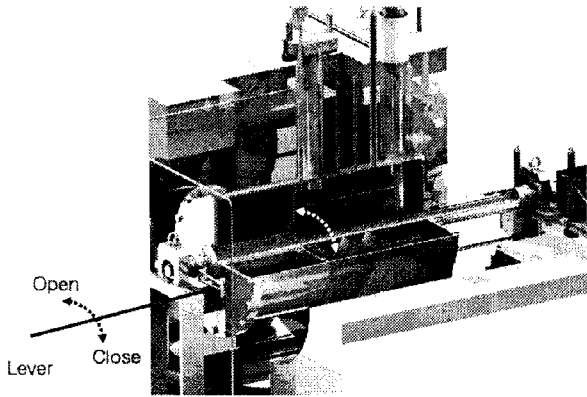


Fig. 3. Motion of powders collector by manual lever.

2.4 Air locker 진동 방식을 이용한 산화 및 회수를 향상

볼트 풀림을 가져올 수 있는 바이브레이터 진동방식 보다는 볼트 풀림 영향을 덜 주는 Air locker 방식을 선정하였다. 또한 가열로 하단 부분의 X, Z, Y 위치에서 진동효과가 가장 높은 Z 방향 위치를 선정하였다. 또한 Air locker 진동 방식은 산화 중에 Air locker를 작동하여 산화효율을 높여주며, 산화 종료 후, Air locker를 동작시켜 분말의 회수율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

3. 연료 산화 및 분말회수 메커니즘 설계

산화 후 메시형 반응기 내에 있는 스크류의 정회전에 의해 펠릿의 산화가 진행되고, 산화 종료 후에 역회전에 의해 Hull이 분리되는 구조를 반영하였고, 핵분열성 가스 생성물의 포집 및 회수를 위해 500°C에서 산화 후에 핵분열성 가스 포집하

는 진공시스템을 설계하였다. 또한 설계 툴(SOLID Works)과 해석 툴(COSMOS Works)을 이용하여 탈피복/분말화 일체형 핵심 장치의 열적 구조적 분석을 수행하였고, 그 결과를 토대로 연료 산화와 Hull 분말/회수 메커니즘을 3차원 모델링으로 설계하였다.

3.1 메시형 반응기 스크류의 정회전과 역회전 구조 반영

그림 4와 같이 반응기 좌측면에서 볼 때 메시형 반응기가 시계방향(정회전)으로 회전하면 반응기 내부에 있는 세라믹 볼이 Hull에 구름충격을 가하면서 동시에 미 산화된 펠릿 조각들이 밖으로 흘러나오지 않도록 하였다. 또한 산화된 분말이 자동으로 반응기 안쪽으로 모아져, 공기 중 산소와 500 °C 온도에 의해 메시 밑으로 떨어지는 구조를 반영하였다. 산화 종료 후, 반응기 좌측면에서 볼 때 메시형 반응기가 반시계 방향(역회전)으로 회전하면 Hull이 스크류 나선에 따라 Hull 회수 용기 쪽으로 배출되는 구조를 반영하여 설계하였다.

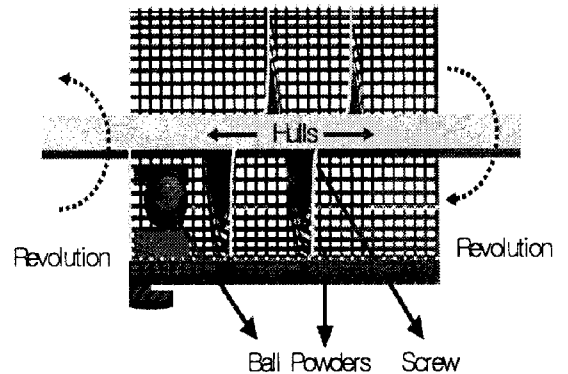


Fig. 4. Direction of hulls and powders by rotation of reactor with mesh type.

3.2 500 °C 산화후 핵분열성 가스 포집용 진공시스템 설계

산화 후에 메시형 반응기를 역회전시켜 Hull을

회수하고, 핵분열성 가스 생성물을 포집/ 회수하기 위하여 단계별로 일정한 온도와 진공을 유지하는 컨트롤 방식(PID, Feedback system)을 고려하였다. 또한 반응기를 계속 정회전 시켜 진공라인으로 Fission products를 배출하고 난 후, 분말을 회수하는 메커니즘으로 설계하였다. 1250℃의 반응기내 고온 가스가 라인필터 밖으로 배출되어 고온 열로 인한 가스포집용 진공펌프의 열 손상을 방지하기 위해서 진공라인 상에 쿨링 팬(Cooling fan)을 설계하여 온도를 강하시키는 구조로 하였다.

3. 3 연료 산화와 Hull/분말회수 메커니즘 설계

그림 5 와 그림 6과 같이 최대 산화속도/회수율을 고려하여, 고안된 메커니즘을 반영하였고, 기계설계 도구인 Solid works를 이용하여 연료산화 및 Hull/분말 회수 메커니즘을 3D로 설계하였다. 또한 500℃에서 Hull을 회수하고 난 후, 핵분열성 물질을 포집/회수하기 위하여 온도를 단계적으로 올리면서 진공분위기를 만들어 주는 메커니즘을 설계하였다.(온도 1250 ℃, 진공도 1 Torr).

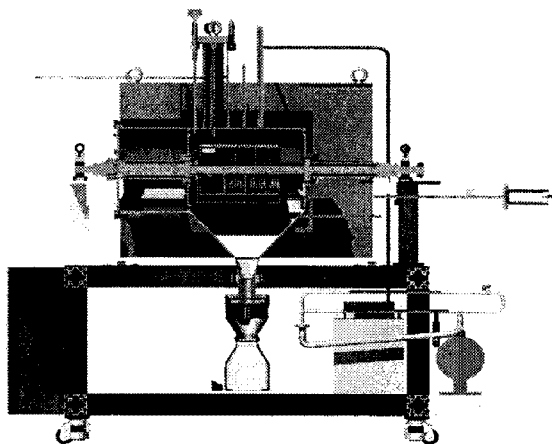


Fig. 5. Mechanism for fuel oxidation.

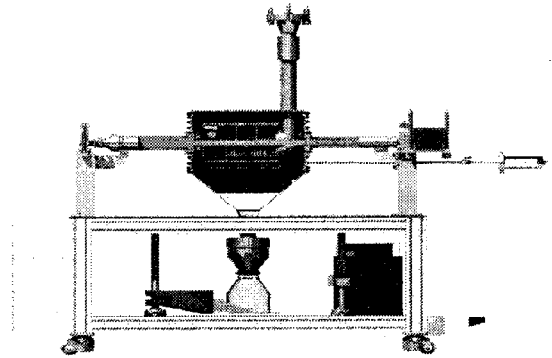


Fig. 6. Mechanism for powders recovery.

4. 결론

사용후 절단연료봉을 동시에 탈피복 및 분말화할 수 있는 일체형 메커니즘을 고안·설계하였다. 일체형 장치의 핵심구조는 크게 모의 연료봉을 산화시키는 산화핵심장치와, Hull 과 분말을 독립적으로 분리/회수하는 분리회수 핵심 메커니즘을 선정하여 각각에 대한 독자적인 기능 과 서로 연계되는 구조로 고안하였다. 또한 ball drop의 기계적 탈피복 방식과 회전형 rotary kiln의 확학적 방식의 장점을 결합한 분석결과를 반영하였다. 또한 고안된 기본개념을 바탕으로 연료 산화 및 Hull/분말회수 메커니즘은 연료봉의 탈피복 증대 효과를 고려하였고, 탈피복된 펠릿의 산화율 증가 및 분말입도 크기를 조절하고 피복재와 분말의 독립적 회수가 가능하게 설계하였다.

참고문헌

- (1) J.A. Stone, "Vol-oxidation Studies with UO₂Reactor Fuels" ANS, Meeting on Fuel Cycles for Eighties, DP-MS-80-9, Sep.-Oct.(1980).
- (2) U. Gunzo, K. Masafumi and T. Takesh, "Development of Vol-oxidation Process for Tritium Control in Reprocessing.", JAERI-M, 91-199, November(1991).