

탈피복 기계 장치와 건식 분말화 장치 설계

Design of the Dry Powder Device and Slitting Machine Device

정재후, 윤지섭, 김영환, 이종열, 홍동희(한국원자력연구소)

Jae Hoo Jung, Ji Sup Yoon, Yong Hwan Kim, Jong Youl Lee, Dong Hee Hong(KAERI)

Abstract

Spent fuel decladding device and dry voloxidizer is to separate the spent pellet from spent fuel rod cut by 250 mm and to convert the spent pellet into powder form for reuse and/or disposal of the spent fuel. There are two methods in decladding and voloxidation of spent fuel, that is, wet method with chemical material and dry method with mechanical device. In this study, to examine the fuel rod decladding process and the pellet voloxidation process, the devices for the spent fuel decladding and the pellet voloxidation with dry method are developed. The decladding machine is designed to separate pellets from fuel rod by slitting device. And, the voloxidizer is designed to convert the spent pellet which is ceramic form into powder form by oxidation using the multi step mesh, vibrator, and air in the high temperature environment. The results of this study, such as operation condition etc., will be utilized in the design of the machine for demonstration.

Key words : Decladding, Voloxidation, Spent fuel rod, UO_2 Pellet, Oxidation, U_3O_8 Powder, Furnace.

1. 서론

사용후핵연료의 탈피복은 운전 방식에 따라 습식법과 건식법으로 분류하며, 건식법을 좀더 세분화하면 화학적 방법과 기계적 방법으로 분류한다. 화학적 탈피복은 화학 반응물과 연료 물질, 피복관 재료와의 화학반응을 기초로 탈피복을 하는 것이다. 기계적 탈피복은 도구를 사용한 물리적 힘에 의해 피복관을 제거하는 방법이다. 본 연구에서 채택한 탈피복 장치와 건식 분말화 장치는 여러 방법 중 건식 탈피복으로 공기 산화법을 모체로 하는 장치로써, 개념은 다음과 같다. 분리된 UO_2 pellet을 분말화 하기 위해 원통형의 수직 반응기 내부에 다단계 다공판 mesh 메카니즘을 장착하고, UO_2 의 산화반응에 요구되는 반응열을 공급하기 위해 반응기 내부에 원통의 가열로를 설치한다. 수직 반응기 내부에 다공판을 이용하며, 장치의 구동은 산소를 공급하고, vibrator의 진동을 가변화 할 수 있는 메카니즘을 이용하고, 반응기 내부에 설치된 다단계 다공판 mesh를 이용하여 충전된 물질의 상하 및 좌우 운동이 가능하도록 하였다. 즉, UO_2 pellet을 반응기에 투입한

후, UO_2 pellet을 공기 분위기에서 약 $500^{\circ}C$ 이상으로 가열함으로써 UO_2 pellet을 U_3O_8 분말로 산화시키는 것이다. 산화된 U_3O_8 분말은 용기에 수집되며, UO_2 pellet의 산화 분말 분리 공정을 하나의 반응기에서 반연속적으로 운전할 수 있도록 한 장치이다.

2. 국내·외 기술개발 현황

2.1. 국내 현황

탈피복 방법에는 여러 방법이 있지만, 한국원자력 연구소에서는 건식 탈피복 중에서 공기 산화법을 모체로 한 장치를 채택하고 있다. 원전연료봉으로부터 UO_2 pellet과 피복관을 서로 분리하기 위해 원통형의 수직 반응기 내부에 수직 스크류를 장착하고, UO_2 pellet의 산화반응에 요구되는 반응열을 공급하기 위해 반응기 내부에 역시 원통의 가열로를 이용한 장치이다. DUPIC(Direct use of spent PWR fuel in CANDU reactors)에서는 250 mm로 절단된 핵연료봉의 피복관을 탈피복 한 후, UO_2 pellet를 산화 환원로에 투입하여 분말화하는 방법을 사용하고 있다.

2.2. 국외 현황

미국의 ANL(Argonne National Lab.) West의 Inert Hot Cell인 Hot Examination Facility에 100 kgHM/batch 용량의 pilot scale의 급속전환 실증시설을 건설하기 위해 2004년 완료 목표로 현재 시설 설계 연구가 수행 중에 있다. 영국의 BNFL 사는 1963년부터 분말혼합 기술을 축적해왔으며, 1970~1988년까지는 Sellafield에 있는 원형고속증식로 시설에서 blending 기술을 적용하였다. 프랑스는 현재 Cadarache 시설에서 고속증식로형 혼합핵연료 제조 기술을 이용, 일명 Coca(Cobroyage Cadarache)공정을 사용한 15t HM/year 규모의 경수로형 혼합핵연료 제조시설을 갖추고 있다.

3. 탈피복 기계 장치와 건식 분말화 장치 설계

3.1. 탈피복 기계 장치

3.1.1. 탈피복 기계 장치의 주요 구성

탈피복 기계 장치의 설계도는 그림 1, 2에 나타내었다. 본 장치는 리이드 스크류, 구동모터, control box, hull 및 pellet 수집통, cutter blade, 탈피복 body부 등으로 구성되어진다.

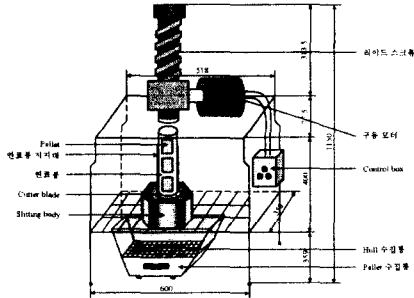


그림 1. 탈피복 기계 장치 입체도.

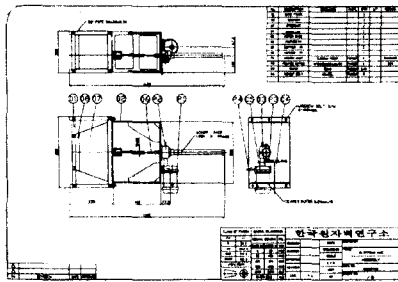


그림 2. 탈피복 기계 장치 설계도.

3.1.2. 탈피복 기계 장치의 주요 사양

장치의 규격으로는 높이 1150 mm, 길이 600 mm, 폭 350 mm 이다. 탈피복 할 핵연료봉의 길이는 250 mm 이며, 탈피복에 소요되는 힘은 286 kgf, 모터의 소요 동력은 0.106 kw, 탈피복 시간은 60초가 소요 되도록 설계하였다. Screw Jack의 특징으로는 스크류 너트부에 스크류 너트를 선택하여 부착이 가능하도록 되어있다. 스크류 축부의 재료는 탄소강이며, 회전 방지키를 부착하도록 설계하였다. 웜휠(worm wheel)부는 회전이 가능한 볼 베어링을 사용한다. 웜부는 고정도의 크롬 몰리브덴 강재를 사용하였다. 잭 케이스부는 경량으로 고내구성의 덕타일(ductile) 주철제를 사용하였다. 고정도는 웜기어와 사다리꼴 나사축으로 구성되어 있고, 행정(stroke) 내의 어떤 위치에도 역회전방지(self-locking)가 가능하도록 설계하였다. 감속 기구부는 그리스 윤활을 표준으로 하고, 부드러운 동작으로 수명 연장을 실현시킨다. 나사축을 보호하는 카바(bellows boot), 수동 조작용 핸들, 트러니언 베이스(trunnion base) 등 풍부한 선택 기능이 있다. SJ 32·traveling shaft는 탈피복 기계 장치에 부착되어 있으며, 절단된 핵연료봉을 탈피복 장치 body에 부착한 후 구동 모터에 의해 traveling shaft를 상하로 수직 운동을 하면서 핵연료봉으로부터 pellet을 탈피복 할 수 있는 메카니즘이다. SJ 32 Screw Jack는 U 상방향형(Upright type)과 I 하방향형(Inverted type)으로 구별할 수 있으며, 각 type 별 사양은 표 1, 2, 3, 4에 나타내었다.

표 1. 상방향형 (Upright type)의 사양.

| Stroke | U 상방향형 (Upright type) | | | | | | | | | |
|--------|---|------|-------------------------------------|------|---|------|-------------------------------------|-----|-----|-----|
| | N 회전방지키없음 (Prevent Key Not Included) | | | | k 회전방지키있음 (Prevent Key Not Included) | | | | | |
| | N 축보호카바 있음 N : N o Dustproof Cover | | B 축보호카바 있음 B: Dustproof Cover | | L 축보호카바 없음 N : N o Dustproof Cover | | B 축보호카바 있음 B: Dustproof Cover | | | |
| MIN. | MAX. | MIN. | MAX. | MIN. | MAX. | MIN. | MAX. | | | |
| 300 | 120 | 430 | 205 | 505 | 350 | 145 | 335 | 120 | 420 | 430 |

표 2. 하방향형 (Inverted type)의 사양.

| Stroke | I 상방향형 (Inverted type) | | | | | | | | | |
|--------|---|------|-------------------------------------|------|--|------|-------------------------------------|-----|-----|-----|
| | N 회전방지키없음 (Prevent Key Not Included) | | | | k 회전방지키있음 (Prevent Key Not Included) | | | | | |
| | N 축보호카바 있음 N : N o Dustproof Cover | | B 축보호카바 있음 B: Dustproof Cover | | LH 축보호카바 없음 N : N o Dustproof Cover | | B 축보호카바 있음 B: Dustproof Cover | | | |
| MIN. | MAX. | MIN. | MAX. | MIN. | MAX. | MIN. | MAX. | | | |
| 300 | 35 | 335 | 130 | 430 | 430 | 35 | 335 | 120 | 420 | 430 |

표 3. 상방향형 (Upright Lifting Type)에 대한 flowable side force.

| 행정(mm) Stroke | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 형번(Type No) | | | | | | | | |
| SJ32 | 20 | 15 | 12 | 10 | 8 | - | - | - |

표 4. 하방향형 (Inverted Lifting Type)에 대한 flowable side force.

| 행정(mm) Stroke | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 형번(Type No) | | | | | | | | |
| SJ32 | 18 | 14 | 11 | | | - | - | - |

3.1.3. 탈피복 기계 장치 설계

탈피복 기계 장치의 주요부 설계로써, 탈피복 장치의 body부는 구동 모터에 의해 리이드 스크류 잭이 상하 방향으로 움직이면서 핵연료봉이 탈피복 몸체를 통과하는 구조이며, cutting blade와 cutter guide roller로 되어 있다. 이들을 120°의 3 방향으로 분할하고, blade가 정확한 일직선 위에 놓이도록 한다. 재질은 고장력을 가진 황동강으로 진공 열처리와 연마를 하도록 설계하였다. 탈피복 jig부는 리이드 스크류 잭을 직선 운동으로 작동되도록 하고, 탈피복 핵연료봉의 크기는 직경 13.5 mm와 11.5 mm 이므로 이를 병행할 수 있도록 한다. 장치 작동시 흔들림으로 인한 cutter blade의 손상을 방지해준다. Base frame부의 크기(높이 1150, 길이 600, 폭 350 mm)와 장치의 무게는 300 kg, 탈피복 힘은 286 kgf, 모터 동력은 0.106 kw, 탈피복 시간은 60초 등을 감안하여 설계하였다. 재질은 steel plate 각 파이프, 앵글, L 형강 등을 사용하여 탈피복 시 한곳으로 집중하중이 걸리지 않도록 한다. 리이드 스크류 잭부는 gear motor, 감속기와 구동 모터로 구성되며, 사용 용량은 1 ton 미만, 탈피복 속도는 1분에 25 cm/rpm, 잭의 행정은 400, 감속비는 1/5, gear motor는 1/60의 감속비를 갖도록 설계하였다. 구동 모터부는 속도를 조절할 수 있는 인버터 가변제어 방식, 유지·보수를 고려하여 토글 클램프 방식으로 하였다. Control box부는 장치의 측면에 부착하고, 수동으로 조작할 수 있는 on-off 형식으로 하였다. Control box에 부착된 선들은 작업에 지장을 주지 않도록 하였다. 용기부는 탈피복된 hull과 pellet을 각각 분리하도록 하고, 다음 공정장치(건식 분말화 장치)로 용기를 이동할 수 있는 메카니즘을 설치하도록 설계하였다. 재질은 SUS 304, 매니퓰레이터의

취급 가능한 중량 15 kg 이내로 하며, 또한, 유지·보수를 고려하여 설계하였다.

3.2. 건식 분말화 장치

3.2.1. 건식 분말화 장치의 주요 구성

건식 분말화 장치의 설계도는 그림 3, 4에 나타나 있다. 본 장치는 air 공급부, 가열기(반응기), 1차 mesh, 2차 mesh, sintered filter, 주입 장치(feeder & hopper), 분말 포집 용기 및 각종 gage 등으로 구성되어 있다. 규격으로는 높이 1300 mm, 길이 700 mm, 폭 600 mm이며, 1회에 분말화 할 수 있는 용량은 20 kgHM/batch이다.

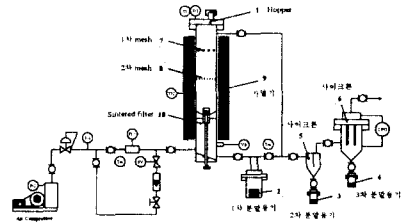


그림 3. 건식 분말화 장치의 P&I Diagram.

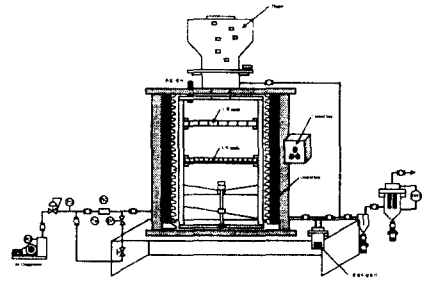


그림 4. 건식 분말화 장치 입체도.

3.2.2. 건식 분말화 기계 장치의 주요 사양

건식 분말화 기계 장치에 부착된 가열기(반응기)는 온도가 500 °C, 전원은 460 V의 3상으로써, 온도를 가변화 하도록 하였다. 1차 mesh는 직경 4 mm, 두께 3 mm, 직경과 직경 사이는 4 mm이며, 2차 mesh는 직경 20~30 mesh, 두께 3 mm의 다공판을 사용한다. Air 공급은 1~1.5 HP을 사용하며, 수분 제거용이 내장된 것을 사용한다. 주입 장치(feeder & hopper)는 20 kgHM/bath의 량을 주입할 수 있는 크기이며, 분말 포집 용기는 20 kgHM/bath의 량을 hopper를 통해 주입하여 분말했을 때의 분말량을 포집할 수 있는 크기로 하였다.

3.2. 건식 분말화 장치 설계

건식 분말화 혼합장치의 설계 요건으로써, 주요 대상은 수직형 다단 mesh부, heating부, vibrator부, air 공급부, 분말 회수 용기부 메카니즘 등으로 구성된다. 또한, 유지·보수를 고려하여 설계하였으며, 이들에 대한 상세한 설계 내용은 다음과 같다. 다단 mesh system부는 다단 수, mesh 재질, mesh 크기, inch 당 mesh 수량, 다단 형태 등을 고려하였다. Vertical furnace의 원기둥(3단 mesh 구조) 형태이며, 재질은 SUS 304를 사용한다. 다단별 mesh의 크기를 살펴보면, 1차 mesh는 직경 4 mm, 두께 3 mm, 직경과 직경 사이는 4 mm이며, 2차 mesh는 직경 20~30 mesh, 두께 3 mm의 다공판을 사용한다. UO_2 pellet을 분말했을 때 분말 입도가 20~100 μm (pellet를 분말화 하였을 때 분말된 입자가 이 범위 내에 들어오는 크기를 말함) 이내가 되어야 한다. Mesh의 결정은 inch 당 가로 세로의 철망의 수를 말하며, 형태는 원판형이다. 그림 5, 6은 1차 및 2차 mesh를 나타낸 것이다.

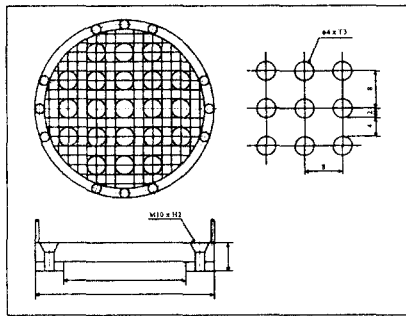


그림 5. 1차 mesh 설계도.

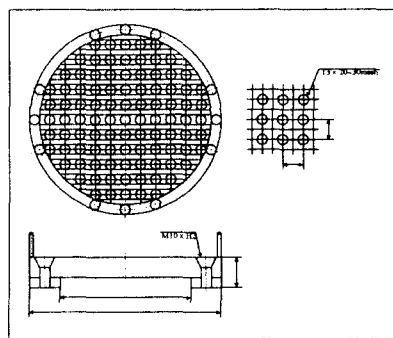


그림 6. 2차 mesh 설계도.

6. 결론

사용후핵연료의 탈피복은 습식법과 건식법으로 분류한다. 본 연구에서 채택한 건식법은 기계적 방법의 일환으로 탈피복은 핫셀 내에서 절단된 250 mm의 핵연료봉을 기계적인 도구를 사용하여 물리적 힘에 의해 핵연료봉으로부터 피복관과 pellet을 분리하는 것이다. 탈피복된 pellet를 건식 분말화 장치 속에 투입하여 수직형 다단 mesh와 heating, vibrator, air 공급 메카니즘 등을 이용하여 UO_2 를 U_3O_8 으로 산화하는데 UO_2 pellet을 공기 분위기에서 약 500 $^{\circ}C$ 이상으로 가열하여 산화시키며, 산화된 U_3O_8 분말은 수집용기에 수집할 수 있도록 하였다. UO_2 pellet의 산화 분말 분리 공정을 하나의 반응기에서 반연속적으로 운전할 수 있도록 설계하였다. 이들 장치를 이용한 탈피복과 건식 분말화 공정에 대한 운전조건 등의 시험결과와는 향후 이 공정의 실증시험을 위한 장치 설계 및 제작에 활용될 것이다.

참고 문헌

1. G.Matcheret and B.Gourgeois, "Mechanical decladding of stainless steel clad oxide fuels", ORNL-TR-2788, translation of CEA-R-4469, 1973.
2. K.Okada, "Separation method for a spent fuel rod", Japanese Patent No. 84140163, July 5, 1984.
3. 양명승 외, "핵연료제조 및 품질관리 기술개발," KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1986.
4. Y.Takashima, et al., "New concept on the head end of Purex process toward the next century", RECOD '87 Proceedings, 569(1987).
5. C.S.Choi et al., "Improvement of conversion and reconversion process for nuclear fuel", KAERI/RR-802/88 (1988).
6. K.W.Song and M.S.Yang, "Formation of columnar U_3O_8 grains on the oxidation of UO_2 pellets in air at 900 $^{\circ}C$ ", J. Nucl. Mater., 209, 270 (1994).
7. 정재후 외 "비산화식 (기계식) 모의 소결체 인출 장치 메커니즘 개발," KAERI/TR-1418/99, 한국원자력연구소, 1999.