

건식 재가공 핵연료 제조를 위한 핫셀용 고온소결로 개발

이정원, 이도연, 조광훈, 이재원, 류호진, 박근일
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
iwlee3@kaeri.re.kr

1. 서론

고방사성의 사용후핵연료를 해체하여 회수한 소결체를 산화/환원 처리하여 산화물전환체로 만든 다음, 기존의 중수로 핵연료 소결체 제조과정 흐름에 따라 건식 재가공 핵연료를 제조하게 된다. 핵연료 설계사양을 만족하는 고밀도의 재가공 소결체를 만들기 위해서는 산화물전환체 분말을 압분, 성형한 후, 약 1,700°C 이상의 고온에서 열처리해야만 하기에 고방사성의 핫셀(hot-cell) 내에서 전기로를 이용한 고온 가열은 많은 어려움이 따르며, 기술적 해법이 요구된다. 소결로는 통상 환원성분위기(수소)하, 고온에서 장시간 운용되므로 특수한 발열체 및 단열체가 요구되며 또한, 건식 재가공 핵연료 제조의 경우 고방사성의 사용후핵연료 물질을 직접 취급함으로써 사람의 접근이 불가능하여 차폐 및 밀폐된 한정된 공간인 핫셀에서 원격 취급기구로만 그 작업이 가능함으로 장비의 원격 운용 및 유지 보수성도 함께 고려되어야 하기 때문에 그 개발이 더욱 어렵다. 본 논문에서는 2,000°C까지 가열할 수 있는 핫셀용 고온 소결로의 개발에 대해 기술하고자 한다.

2. 고온 소결로 요건 및 설계

현재 확보된 핫셀 시설(IMEF, M6) 그리고 보조 장치 등을 고려하여, 건식 재가공 핵연료 압분체를 고온 열처리할 핫셀용 고온 소결로가 구비해야 할 주요 요건이 다음과 같이 도출되었다.

(가) 기능상 요건

- 성형체 6 kg 정도를 환원성 분위기에서 소결할 수 있어야 함.
- 배기가스 처리장치가 있어 배출되는 배기가스가 한계치를 넘지 않아야 함.

(나) 성능상 요건

- 소결로는 밀폐되어 가스 누설이 없어야 하고, 최대 13.8 kPa 압력에 견뎌야 함.
- 분위기 가스의 유량은 최대 30 L/min로 설계함.
- 소결 온도 1700°C, 최대 온도 1800°C로 설계함.
- 최대 가열 및 냉각 속도는 250 °C/hr로 함.
- 교체해야 할 부품들은 원격조작기로 교체 가능해야 함.
- 세슘(Cs) 포집이 가능해야 함.

상기와 같은 요건을 바탕으로 고온소결로의 설계사양이 다음과 같이 결정되었다.

(가) 일반적인 사양

소결로는 핫셀 내에서 UO₂분말을 소결하는데 안정적이어야 하며, 원격조작기(MSM; Master Slave Manipulator)로 운용되고 유지, 관리에 있어서 효과적이어야 한다. 소결로는 수직 원통형 방식으로 설계될 것이며 장치를 쉽게 수리할 수 있도록 입증된 기술에 의해서 설계된다.

(나) 소결로의 성능 및 사양

- Uniform zone 치수 : 직경 120 mm x 높이 60 mm 이내
- 최대 가열온도 : 2,000 °C
- 작업 온도범위 : 1,750 ±50 °C
- Uniform zone의 온도편차 : ±3 °C
- 최대 furnace 전력 : 25 kW

3. 고온 소결로 제작 및 성능시험

본 소결로는 영국의 AEA Technology에서 제작되었으며 상하 flange가 아래 위로 이동할 수 있으며, stainless-steel 재질로 이중 구조의 원통형 용기로 된 표면냉각 방식으로 구성되었다. 상단 flange에는 heater, 열전대의 경보 등을 조절하게 되는 전원 공급 장치들이 있으며, 배기관은 배출되는 물질이 잘 배출되도록 적당한 외형적 연결부분을 갖추었다. 그리고 하단 flange는 밀봉되는 flange가 적합하게 이동하여 밀봉될 수 있고, 아래쪽으로는 방열구조를 가진 crucible의 받침대로 구성되며, 이 flange는 ball-screw로 된 motor에 의해서 들어 올려지는 구조로 하였다. 이 장치는 냉각에 이어서 소결로의 고온 구역에서 시료를 바꾸어 줄 때, crucible를 낮추어 줄 수 있는 기능을 한다. 문을 열 때는 사고 방지를 위하여 연동장치가 있다. 소결로는 원통형의 tungsten 저항선으로 가열되며, 단열재의 안쪽 2개는 tungsten으로 하고, 나머지는 molybdenum으로 된 원통형 방열판 구조로 되어있다. 바깥쪽 층의 방열판은 약 700°C 부근에서 배출된 물질들의 응축이 방지되어 운전되도록 설계되었으며, 방열판은 용기(vessel)의 차가운 벽에 의한 열손실을 방지하는 alumina 단열층 또는 이와 동등한 역할을 할 수 있는 재질의 단열층으로 되어 있다. 완성된 소결로의 시운전 및 성능확인을 위한 시험이 Table 1과 같은 프로그램으로 핫셀에서 수행되었다. 그 결과, 2000°C까지 프로그램에 따라 잘 작동되었으며, 설계 요구온도 및 기타 조건들을 잘 만족하여 핫셀 운용 고온소결로가 성공적으로 개발되었음을 확인할 수 있었다.

Table 1 The program for the sintering run

Segment	Heating Rate (°C/min)	Duration (min)	Target Temperature (°C)
1	20		1750
2	HOLD	120	1750
3	10		2000
4	HOLD	30	2000
5	10		150

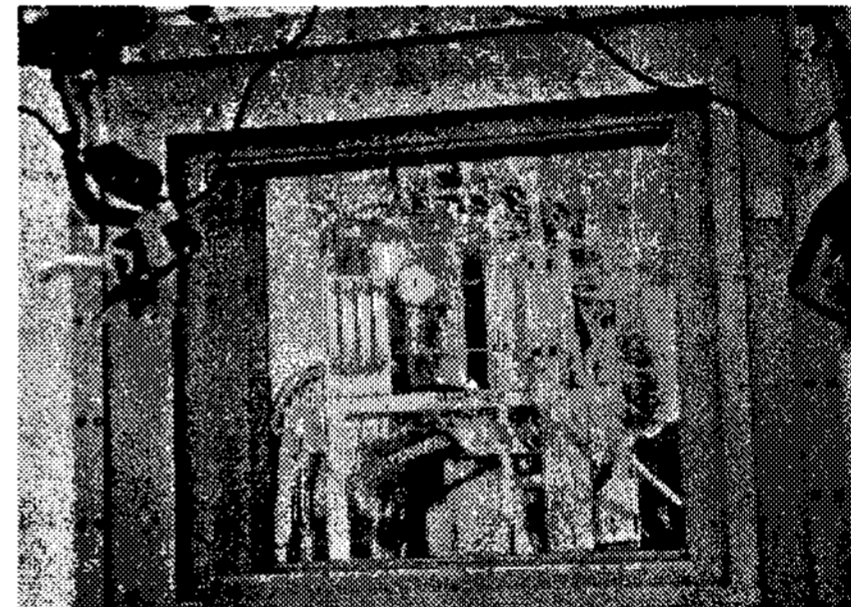


Fig. 1 The sintering furnace installed in a hot cell

4. 결론

원격 운용과 유지/보수를 고려해 한정된 공간인 핫셀에서 핵연료를 만들기 위한 제조장비를 개발한다는 것은 통상의 제조장비 개발과는 그 기본개념이 달랐으며, 더구나 조사후시험에 사용되는 핫셀용 시험기기와의 제조공정에 사용되는 공정장비라는 점에서 그 근본개념을 달리하는 것으로 국내에서는 개발 경험이 전무한 실정이었다. 그러나 본 고온소결로 장비개발을 통해 원격 취급 기구로 운용되고, 유지/보수되어야 하며, 동시에 고방사성 구역인 핫셀에서의 사용에 따른 여러 제한 요소들이 극복되어야 하는 핫셀용 제조장비 개발기술을 확보하게 되었다. 특히, 환원성(수소) 분위기에서 고온(2000°C)까지 가열되며 원격 운용과 수리가 가능해야 하는 고난도의 기술이 요구되는 본 소결로를 성공적으로 개발함으로써 축적된 기술과 개발 경험이 향후 pyroprocessing 기술 및 SFR 핵연료와 같은 미래형 핵연료 원격 장비 개발에 든든한 토대가 될 것이다.