

고연소도 UO_2 사용후 핵연료의 고온(1700℃) 가열시험 특성

김대호, 김선기, 양용식, 방제건, 송근우, 권형문
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
kdh@kaeri.re.kr

1. 서론

국산 UO_2 핵연료의 고연소도화가 진행되고 있으며, 추가적으로 출력 증강이 더불어 연구 진행되고 있다. 이러한 추세에 조사후 핵연료 가열장비(Post-Irradiation Annealing Apparatus)를 이용한 국산 고연소도 UO_2 사용후 핵연료의 과도조건에서 성능분석을 통한 안전성 시험이 수행되고 있다. 조사후 핵연료 가열장비(PIA)를 이용한 고연소도 UO_2 사용후 핵연료의 시간에 따른 고온가열시험을 통하여 핵분열기체의 방출거동과 미세조직의 거동변화를 관찰하였다. 1700℃ 가열에 따른 조직의 변화로 인해 분리된 핵분열 생성물의 확인시험이 EDS를 이용하여 실시하였다.

2. 실험 및 결과

본 시험에 사용된 시편은 울진 2호기에서 봉평균 57,000 MWd/MTU-rod avg.까지 연소된 핵연료로 국부연소도 65,000 MWd/MTU UO_2 소결체의 고형체 150 mg와 170 mg intermediate 부분을 사용하였다. 본 두개의 시편은 사용후 핵연료 가열시험장비(PIA)를 이용하여 핫셀 내에서 500℃, 800℃, 1000℃, 1200℃, 1500℃ 및 1700℃까지 각각 30분씩의 온도유지를 통하여 핵분열기체의 방출 거동을 실시간 확인하였으며, 이때의 가열분위기는 helium 150 ml/min 을 유지하였다. 두 번의 시험 전과정은 핵분열기체 방출거동 확인을 위해 ^{85}Kr 의 방출량을 베타 측정기와 감마 측정기를 이용하여 실시간으로 측정 하였으며, 가열시험이 종료된 후 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 미세구조의 변화를 관찰하였다. 특히, 시편 중 그림에서 보는 것과 같이 결정립경계에 분리된 이물질에 대해 EDS를 이용하여 성분분석 시험이 시행되었다. 시험결과 핵분열기체의 방출은 500℃, 800℃, 1000℃ 및 1200℃에서 각각 뚜렷한 방출거동을 보이나, 1500℃ 및 1700℃에서는 핵분열기체의 방출이 그림 1.과 같이 미미하게 나타났다. 온도상승에 따라 UO_2 기지 내에서의 확산계수가 틀러지게 되고, 이때 방출되는 핵분열기체의 양이 결정되어 진다. 1200℃ 이후 핵분열기체의 방출거동이 미미해지는 이유는 핵연료의 재구조화가 발생하는 시점으로 판단되며, 핵분열기체 및 핵분열생성물의 위치변화를 갖게 된다. 그림 2.와 같이 SEM 사진 분석결과 UO_2 기지 내에 많은 양의 방출되지 않은 핵분열기체가 남아 있는 것을 확인하였으며, 기지 내 pore에서 dissolution 된 핵분열생성물도 일부 관찰 되었다. 실제 가열조건에서의 온도가 상승하더라도 핵분열기체가 모두 빠져나오는 것이 아니라 일정한 확산도에 의해 방출되는 것임을 확인할 수 있다.

그림3.과 같이 시편의 결정립경계에 분리된 입자의 EDS 분석결과 시료의 방사선 activity가 너무 높아 분석감도의 정확도는 무척 낮지만 핵분열생성물 중 주요감마핵종인 Ru으로 확인되었다. 물론, 주요감마 방출 핵종인 Cs이나, Xe, Pt, Rh 및 Nd 등의 핵분열핵종이 나타나고 U이나 Pu 등도 함께 peak를 보이므로 정확한 정량적 분석을 위해서는 WDS가 함께 병행되어야 할 것으로 생각된다.

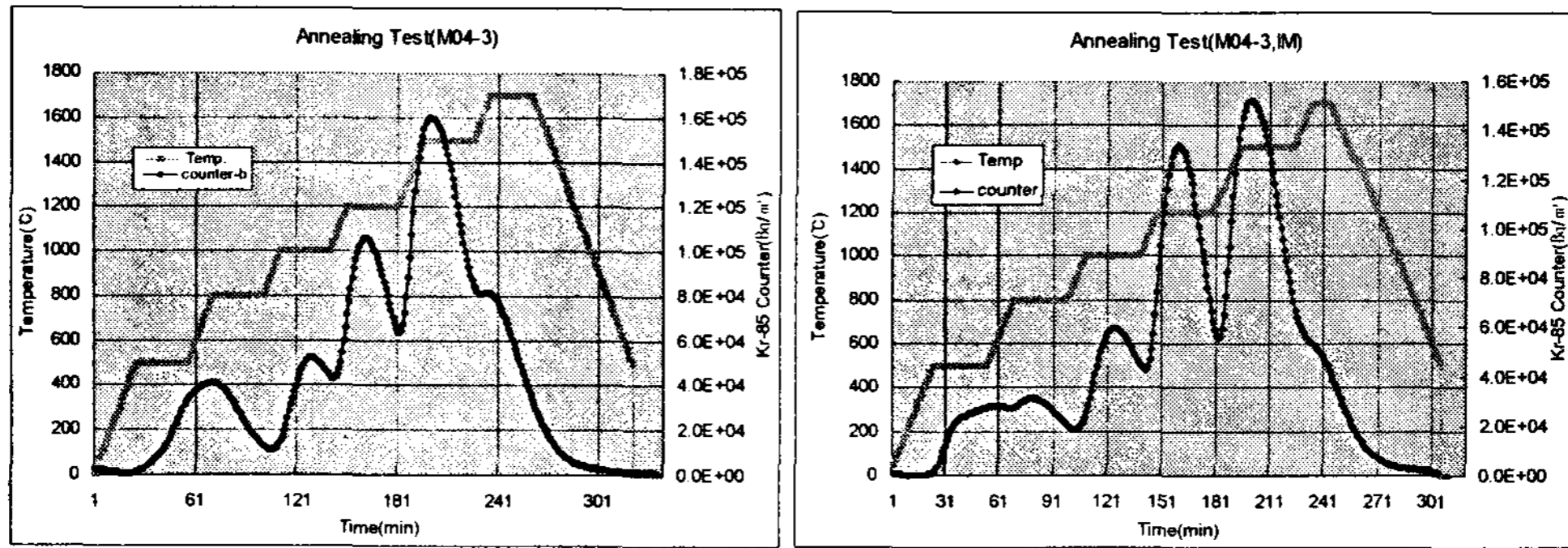


그림 1. 1차 및 2차 1700°C 가열시험에 따른 핵분열기체 ⁸⁵Kr의 방출거동

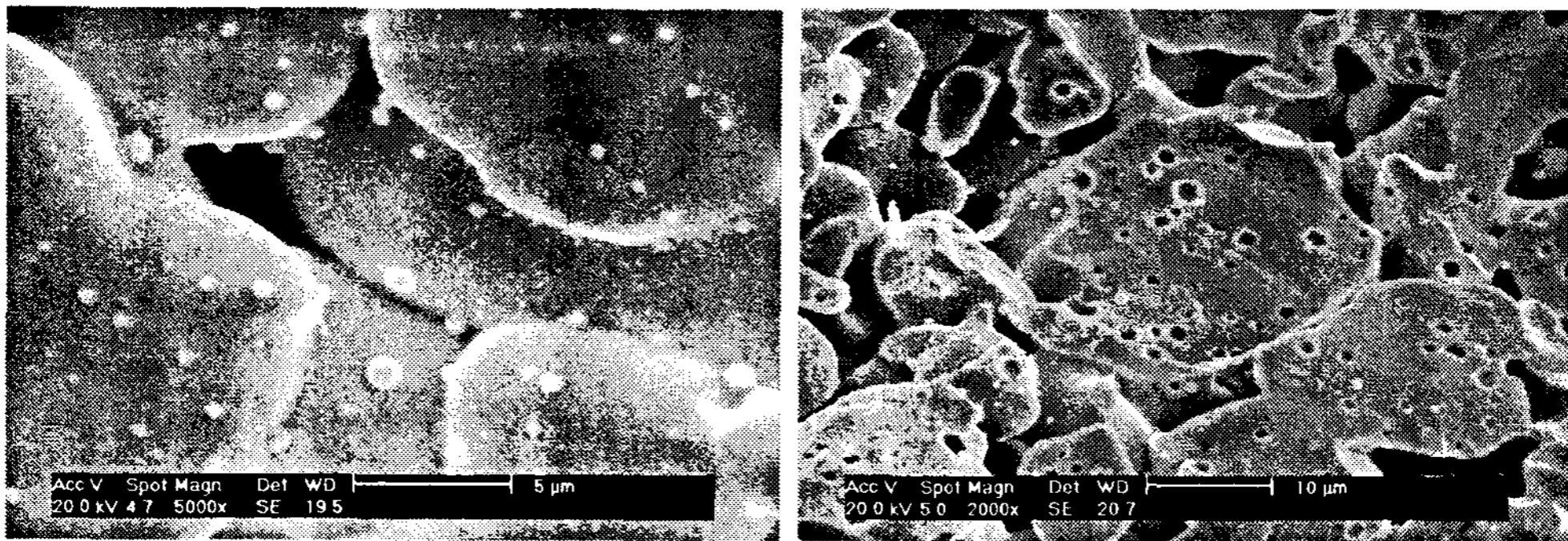


그림 2. 1차 및 2차 1700°C 가열시험에 따른 미세사진

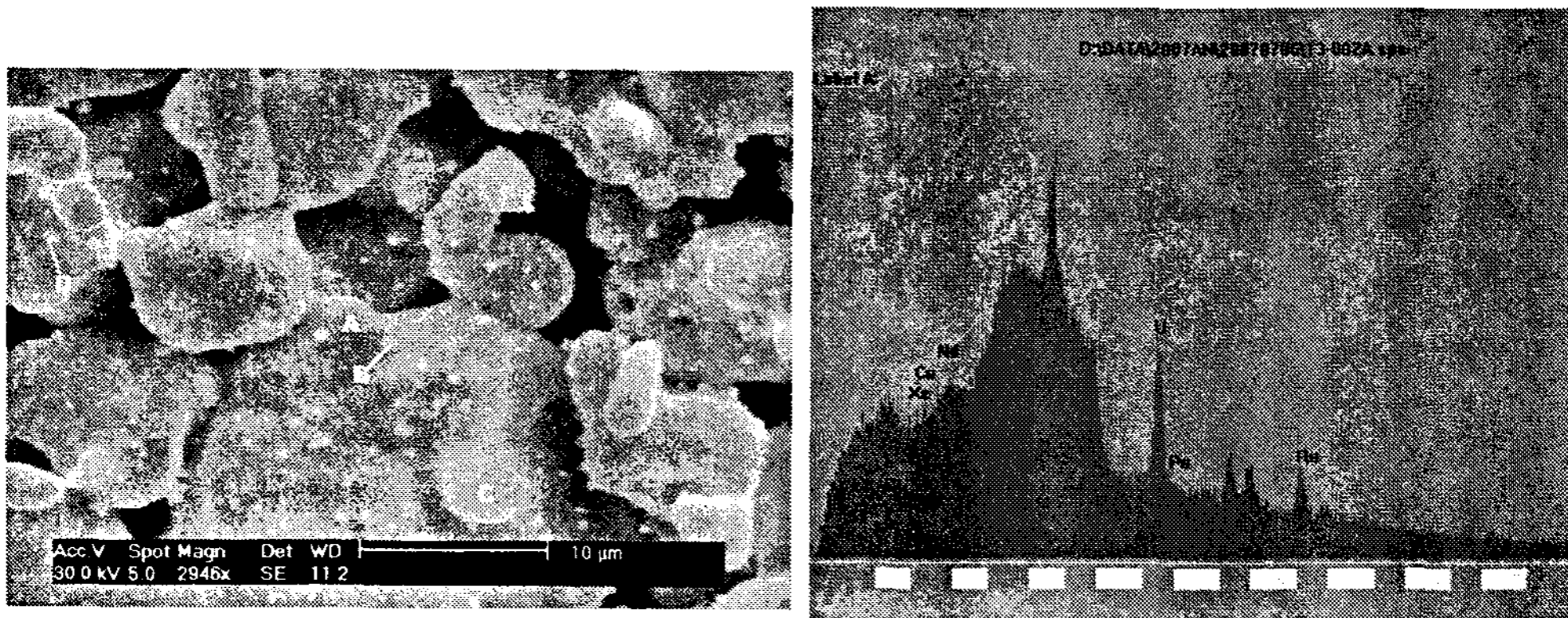


그림 3. EDS를 이용한 지정입자의 핵종분석 결과

3. 결 론

국산 고연소도 UO₂ 핵연료의 2회에 걸친 1700°C 핫셀 내 가열시험을 수행하여 핵분열기체의 방출거동과 SEM을 이용한 미세사진 분석과 EDS를 통한 핵종분석을 수행하였다. 가열시험결과 1200°C 이후 핵분열기체의 방출거동이 미미해지는 것으로 나타났고 UO₂의 재구조화가 발생하는 시점으로 판단다. 시편의 결정립경계에 분리된 입자는 EDS 분석결과 분석 정확도는 무척 낮지만 핵분열생성물 중 주요감마핵종인 Ru으로 확인되었다. 분석민감도를 높여 정확한 분석이 추가로 요구되며, peak에서 보이는 핵종의 정확한 정량적 분석을 위해서는 WDS가 함께 병행되어야 할 것으로 생각된다.