

후방산란전자상을 활용한 사용후핵연료 소결체 분석

권형문, 서항석, 민덕기, 전용범
 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
diango@kaeri.re.kr

사용후핵연료 소결체의 기공을 분석을 위해 주로 광학현미경 사진이 활용되고 있다. 광학현미경 사진은 전자현미경 사진에 비해 기공과 UO_2 기지 사이의 명암이 분명하여 기공을 분석에 유리하다. 그러나 고연소도 핵연료의 경우, 조사경화로 인해 사용후핵연료 소결체의 시편준비 과정에서 기공이나 결정립 계면 근처의 결정립 일부 혹은 결정립 전체가 떨어져 나가는 현상이 발생할 가능성이 높으며 이런 인공적인 결함은 광학현미경 사진에서는 기공과 구별되지 않아 기공을 평가의 오차요인으로 작용될 수 있다. 광학현미경에 비해 초점심도가 깊은 전자현미경은 시료 표면의 굴곡을 이차전자상으로 보여주므로 인공적인 결함을 판단하기에 적합하다. 다만 이차전자상은 기공 부위의 일부를 밝게 보여주는데 이는 이차전자 검출기가 전자빔이 발생하는 시료의 상부에 위치하지 않고 시료 한쪽에 편향되게 설치되어 있기 때문이다. 이에 비해 후방산란전자 검출기는 시료 상부에 위치하며, 시료표면에 예각으로 발생한 인공결함을 표면과 유사한 명도로 보여주기 때문에 기공을 분석에 보다 적합할 것으로 예상된다.

- 기공율 분석

소결체 평균연소도 61.5 GWd/tU인 고연소도 시편의 반경방향 $r/r_0=0.8$ (0은 소결체 중심)의 같은 국부위치에서 광학현미경 사진과 이차전자상, 후방산란전자상을 촬영하고 이미지 분석을 수행하여 기공율을 평가하였다. 이미지 분석에는 Image-Pro Plus 5.1 프로그램을 사용하였다. 이차전자상과 후방산란전자상의 이미지 분석 결과, 기공율은 동일하게 5.6 %이었으나 광학현미경 사진 분석 결과, 기공율은 거의 두 배에 이르는 10.2 %이었다. 고연소도 핵연료의 경우 인공결함에 의한 오차요인이 매우 큰 것으로 판단된다.

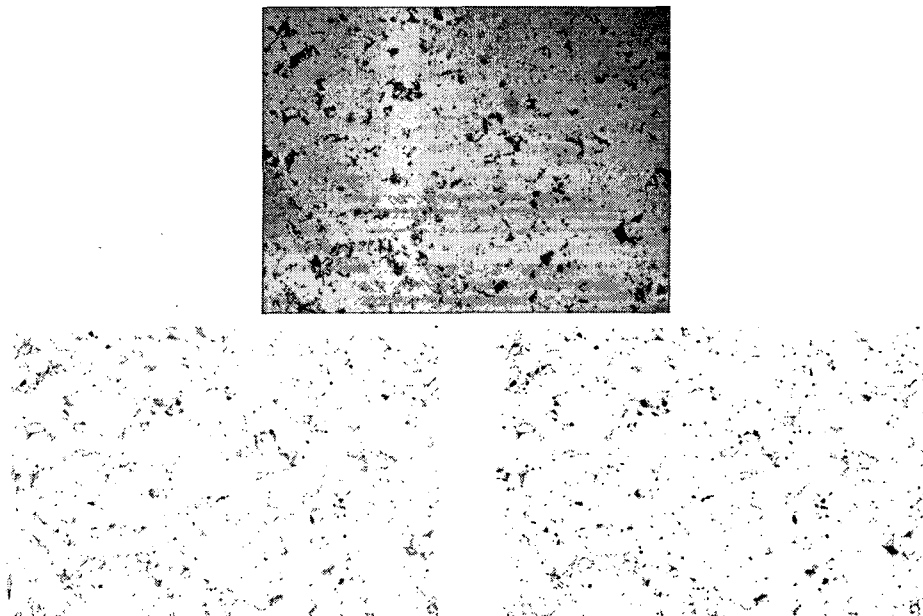


그림 1. 광학현미경 사진, 이차전자상과 후방산란전자상 비교, 500배(위, 왼쪽부터)

- 후방산란전자상의 결정립 크기 분석

사용후핵연료 소결체의 결정립 크기 분포를 분석하는 기존의 방법은 시료를 화학적으로 에칭한 후 광학현미경으로 관찰하는 방법이다. 고연소도 핵연료의 경우 소결체 중심부 위치에서 결정립 내에 다량의 미세 버블이 형성되어 화학적 에칭과 광학현미경 방법으로는 결정립을 분간하기 어렵지만, 다수의 후방산란전자상 이미지를 축적하면 결정립 계면을 분간할 수 있음을 확인하였다. 결정립 계면이 검출기 방향으로 입사되는 후방산란전자량을 감소시키는 역할을 하는 것으로 생각된다. 그림 2는 후방산란전자상으로 결정립을 확인한 사진이다.

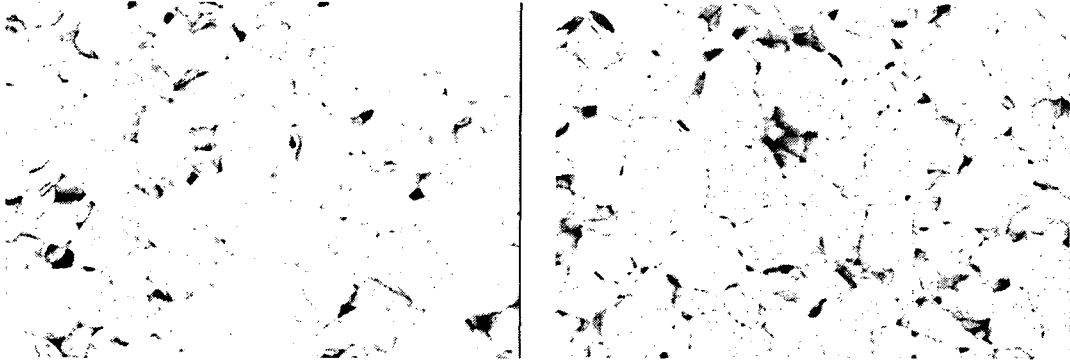


그림 2. 사용후핵연료 소결체의 후방산란전자상 (1500배, 1000배)

- 결론

고연소도 핵연료 소결체의 기공율을 이미지 분석으로 평가할 때, 광학현미경 사진은 시편준비 과정에서 발생하는 인공결함에 대한 한계를 지니고 있다. 이에 비해 후방산란전자상은 이러한 오차요인에 대해 광학현미경에 비해 덜 민감한 것으로 생각된다. 또한 여러번 후방산란전자상을 축적할 경우 결정립 계면을 확인할 수 있으며 계면 혹은 결정립 내에 기공이 어떻게 분포하는지 평가할 수 있다. 화학적 에칭법은 결정립 계면 뿐만 아니라 포어까지 확장시켜 원래의 기공 형태를 변형시키는 데 비해, 후방산란전자상은 기공의 형태를 그대로 유지한 채 입계면을 관찰할 수 있다는 장점을 갖고 있다.