

모의 사용후핵연료의 열전도도

강권호, 나상호, 박창제, 양재환, 김영희, 장석범
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 nghkang@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 열전도도는 사용후핵연료의 수송, 건식저장 및 처분장 설계에 필요한 주요 물성자료이다. 또한 노내에서 연소에 따른 열전도도의 변화는 핵연료의 온도구배, 냉각수로의 열전달량 계산 등에 필요한 자료이다. 그러나 사용후핵연료에는 많은 핵분열 생성물이 포함되어 있어 핵적인 성질은 물론 열 및 기계적 물성이 초기에 장전된 핵연료와는 많은 차이를 보일 것으로 예상된다. 특히 산화물핵연료 내에서 열확산은 1500 °C 이하의 온도범위에서는 격자진동에 의해 주로 이뤄지며, 이는 불순물이나 결함에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서 사용후핵연료의 연소도에 따른 열전도도 연구는 핵연료의 노내 건전성 뿐만 아니라 사용후핵연료의 안전한 관리를 위해서도 꼭 필요한 연구이다. 사용후핵연료의 높은 방사선 때문에 실험실 규모의 물성연구를 위해서는 차폐시설과 원격장치 등이 필요하여 시험을 다양하게 수행하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 사용후핵연료의 물성 연구를 위해서는 재료적 성질을 모사한 모의 핵연료를 이용한다. 모의 핵연료는 실제 사용후핵연료에 비해 제조가 비교적 간단하기 때문에 물성연구에 필요한 다양한 변수의 시료를 제조할 수 있어 사용후핵연료의 물성 예측 뿐만 아니라 물성에 미치는 변수의 영향도 확인할 수 있다.

본 연구에서는 사용후핵연료의 열전도도에 미치는 연소도의 영향을 파악하기 위해 3 at%, 6 at%, 12 at%에 해당하는 모의 핵연료를 이용하여 열확산도를 측정하였으며 이를 이용하여 열전도도를 계산하였다. 또한 열저항도를 이용하여 열전도도 모델을 제시하였다.

2. 실험 및 결과

본 실험에 사용된 재료는 3, 6, 12 at% 연소도에 해당하는 사용후핵연료 핵분열 생성물의 안정한 형태로 천연 UO₂ 분말과 혼합하여 모의 핵연료의 펠렛을 제조하였다. 모의 핵연료의 제조는 turbular 혼합기를 이용하여 핵분열생성물과 UO₂ 분말의 혼합, 300 MPa의 압력으로 성형, 1700 °C, 수소분위기에서 6시간 소결의 순으로 제조하였다. 열확산도는 Laser Flash 장치를 이용하여 상온에서 1473 K의 온도범위에서 측정하였다.

열전도도는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$k = \rho a c \dots\dots\dots(1)$$

여기서 ρ 는 밀도, a 는 열확산도, c 는 비열을 나타낸다.

열전도도는 기공에도 영향을 받기 때문에 기공도 5 (이론밀도의 95 %)를 기준으로 Loeb 식을 이용하여 환산하였다. 그림 1은 Laser Flash Apparatus를 이용하여 측정된 모의 사용후핵연료의 열확산도이다. 열확산도는 온도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 사용후핵연료의 온도가 증가할수록 결함이 많이 생성되어 격자진동에 의한 열확산이 줄어들기 때문으로 생각된다. 또한 연소도가 증가할수록 열확산도는 감소하는 것으로 나타났다. 이 또한 연소도가 증가할수록 핵분열생성물이 많이 포함되어있고 이로 인해 결함이 많이 형성되어 열확산이 줄어드는 것으로 생각된다. 그림 2는 식 1을 이용하여 이렇게 계산한 열전도도 나타낸 것이다.

그림 3은 자유전자에 의한 열전달이 활성화 되기 전까지의 온도 범위에서 열전도도의 역수인 다음 식으로부터 구한 열저항도를 나타낸 것이다.

$$k = 1/R = \frac{1}{A + BT} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 R 은 열저항도, A , B 는 상수 그리고 T 는 온도를 나타낸다. 본 실험에서 구한 모의 사용후핵연료의 열전도도는 다음과 같다.

$$k_{SS1} = \frac{1}{2.155 \times 10^{-4} T + 0.091} \dots\dots\dots (3)$$

$$k_{SS2} = \frac{1}{2.065 \times 10^{-4} T + 0.113}$$

$$k_{SS4} = \frac{1}{1.804 \times 10^{-4} T + 0.188}$$

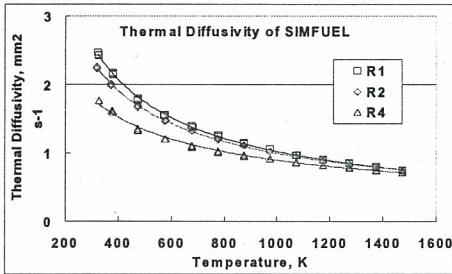


그림 1. 모의 사용후핵연료의 열확산도

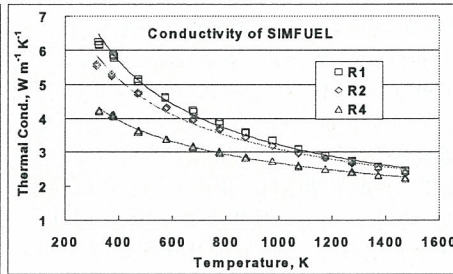


그림 2. 모의 사용후핵연료의 열전도도

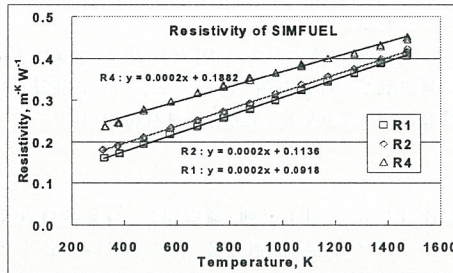


그림 3. 모의 사용후핵연료의 열저항도

3. 결론

본 연구에서는 사용후핵연료의 열확산도를 측정하였으며, 비열과 밀도를 이용하여 열전도도를 구하였다. 사용후핵연료의 열전도도는 온도 및 연소도가 증가할수록 감소하는 것을 확인하였다. 열전도도의 역수인 열저항도를 이용하여 열전도 모델을 온도의 함수로 구하였다. 본 연구 결과는 핵연료의 성능평가 뿐만 아니라 핵분열생성물이 존재하는 사용후핵연료의 중간저장 용기설계, 수송용기 설계, 처분장 설계 등에도 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

사사

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.