2002 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

DUPIC 핵연료 열적 거동에 대한 열전도도 영향

The Effect of Thermal Conductivity on the DUPIC Fuel Behavior

송기찬, 문제선, 강권호

한국원자력연구소
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기준 조성 모의 DUPIC 핵연료를 이용한 열전도도 실험 자료에 근거하여 DUPIC 핵연료의 열전도도 모델을 제시하였다. 이 모델을 반영하여 수정된 중수로 핵연료 성능 평가 코드를 이용하여 정격 설계 출력 및 과출력 조건에서 DUPIC 핵연료 열적 거동을 해석하고, 동일 조건에서의 UO_2 핵연료의 거동과 비교 분석하였다. DUPIC 핵연료의 열적 거동 해석 자료는 조사후시험 자료와 비교한 결과 핵연료 중심 온도 및 핵분열기체 방출량이 보수적으로 일치하고 있음을 확인하였다.

Abstract

The thermal conductivity model of DUPIC fuel was proposed based on the experimental data obtained from reference simulated DUPIC fuel. Using the modified CANDU fuel performance code, the thermal behavior of DUPIC fuel was estimated under the conditions of the nominal design power envelope and high power envelope. These results were compared with the behavior of UO_2 fuel under the same conditions. Also, the estimated data of the centerline temperature and fission gas release volume of DUPIC fuel were compared with the post-irradiation examination data, and the conservative meeting point was observed.

1. 서론

DUPIC 핵연료의 기본 기하학적 설계는 43-핵연료봉 개량형 중수로 핵연료인 CANFLEX (CANDU Flexible) 모형을 채택하고 있다.[1] 이를 중수로에 장전하여 운전하기 위해서는 기존에 사용되고 있는 핵연료 및 핵연료 취급 계통과 기계적으로 양립할 수 있음을 입증하여야 하며, 대상 중수로의 정격 설계 출력 또는 과출력 조건에서의 운전에 따른 열적/기계적 부하에 대한 핵연료봉 및 다발의 건전성, 그리고 이에 따른 원자로의 안전성을 보장하여야 한다. DUPIC 핵연료가 이러한 요구 조건을 만족시킬 수 있는지를 입증하기 위해서는 DUPIC 핵연료봉의 성능 및 건전성 해석, DUPIC 핵연료 다발과 기존 핵연료 다발의 양립성 검토, 그리고 노외 실증 시험 등이 수행되어야 한다.[2]

일반적으로 CANDU 핵연료에서 요구하고 있는 소결체 제원은 밀도가 10.4±0.15 g/cm^{3}이고, 산소 대 우라늄 원소 비(O/U ratio)는 1.99~2.01이며, 평균 결정립 크기는 5 30 m이다. 또한, 소결체 내 온도 분포에 의한 열팽창 및 소성 변형을 수용하기 위해 소결체 양단에 디쉬(dish)를

두고 있으며, 소결체로부터의 치핑(chipping)을 방지하기 위하여 소결체 양단 모서리(chamfer)를 원주 방향으로 돌아가며 따놓고 있다. 이 밖에 shoulder 크기 및 소결체 길이와 직경 비(L/D) 등도 소결체 변형에 미치는 영향 및 경제성을 고려하여 설계하여야 한다.[3)]

DUPIC 소결체는 경수로 사용후핵연료를 탈피복시킨 후 OREOX 공정을 통해 얻어진 분말을 원료 물질로 하여 원통형으로 압분/소결하여 제조한다. 현재 조사시험용으로 제조하고 있는 DUPIC 소결체의 소결 밀도는 약 10.3 g/cm^3 정도이고, 결정립 크기는 약 5 m 정도이며, 소결체 표면은 무심 연마기로 연마하여 약 1.0 mAA 정도이다. 또한, 소결체 길이와 직경 비는 약 1.2 정도이다. DUPIC 핵연료 개발 시설(DUPIC Fuel Development Facility, DFDF)에서 제조되고 있은 DUPIC 소결체는 중수로 핵연료 제원을 충분히 만족하고 있으며, 소결체 결함 판정 기준에 부합되는 DUPIC 소결체만을 골라 성능 평가를 목적으로 하는 조사시험 등에 사용하고 있다.[4)] 그러나, 핵연료 성능 향상을 위한 현재의 연구개발 추세를 감안할 때 소결 밀도를 이론 밀도의 약 97% 정도까지 향상시킬 필요가 있으며, 핵분열기체 방출 등의 관점에서 10 m 이상의 조대 결정립을 가지는 DUPIC 소결체 제조에 대한 연구개발이 지속되어야 할 것이다.

DUPIC 소결체의 기준 조성은 핵분열 물질 조성 조절 방법에 근거하여 결정되었다. 여러 연소도를 지닌 사용후핵연료를 적절히 혼합하여 동위원소 조성의 편차를 최소화할 수 있도록 하였으며, 여기에 농축 우라늄 (SEU) 및 감손 우라늄(DU)을 적절히 섞어 정해진 양의 핵분열 동위원소를 함유하도록 하였다. DUPIC 핵연료 내에 포함된 기준 핵분열 물질 조성은 U-235가 1.0 wt%, Pu-239가 0.45 wt%가 되도록 결정하였다. 따라서, 약 90%의 사용후핵연료를 기준 조성을 만족시키는 DUPIC 핵연료를 제조하는데 사용할 수 있으며, 이 때 사용되는 SEU 및 DU의 양은 각각 7.8% 및 9.8%가 된다. 이와 같이 DUPIC 핵연료의 조성을 조절하고 연소성 독극물을 사용함으로써 기준 조성 DUPIC 핵연료의 핵적 특성을 천연 우라늄 핵연료와 비슷하게 가져가면서도 높은 방출 연소도를 기대할 수 있다.[5)]

DUPIC 핵연료의 중수로 내 거동 분석을 위해 중수로 핵연료의 성능 평가 코드인 ELESTRES 코드를 수정, 보완하였다. ELESTRES 코드는 중수로 핵연료의 노내 거동을 예측하기 위해 캐나다 AECL에서 개발된 전산 프로그램으로서 핵연료 형상, 물성, 운전 조건 등을 고려하여 핵분열기체 방출과 이에 따른 연료봉 내 기체 압력 변화, 반경방향 온도 분포, 피복관의 탄성 및 소성 변형을 예측하게 된다. ELESTRES는 1차원 열 생성, 온도 분포, 핵분열기체 방출, 열 전달 모델들과, 소결체 및 피복관의 2차원 응력 해석 모델로 구성되어 있다.[6)] 반경 방향 소결체 및 피복관의 온도, 핵분열기체 방출과 내압 변화, 피복관 주름(ridge) 부위의 strain이 주요 계산 인자들이며, 온도에 따른 소결체의 용융 여부, 내부 압력에 따른 피복관 파손 여부, 피복관 주름 부위 변형과 응력에 따른 SCC 파손 확률을 계산하여 원자로 내에서의 연료봉 건전성을 판단한다.

DUPIC 핵연료 성능 평가 코드로 사용하고자 하는 ELESTRES 코드는 UO_2 핵연료의 물성 특성 모델을 채택하고 있으므로, DUPIC핵연료의 열적 거동 특성을 평가하고 이에 대한 열전도도 영향을 분석하기 위하여 DUPIC 소결체의 열전도도 모델을 제시하고 관련 모듈을 수정 보완하였다. 수정된 코드를 이용한 DUPIC 핵연료의 열적 거동을 동일 조건에서의 UO_2 핵연료 거동과 비교 분석하였으며, DUPIC 핵연료의 조사후시험 자료와 비교 검증하였다.

2. DUPIC 핵연료의 열전도도 모델

핵연료의 열적 거동 분석을 위해 가장 중요한 것은 대상 핵연료의 열전도도를 구하는 것이다. DUPIC 핵연료의 열전도도를 중수로에 대한 양립성 연구 결과로부터 도출된 기준 조성을 모사한 모의 DUPIC 핵연료를 이용한 실험 결과에 근거하여 도출하였다.[7)] DUPIC 핵연료의 열전도도에

대한 원자로 내에서의 연소 효과를 고려하기 위하여 Lucuta 등이 제안한 식을 적용하였다.[8)]

이산화우라늄의 열전도도에 대해 Harding 및 Martin이 제안한 식을 참고하여 DUPIC 핵연료의 열전도도 식을 표현하면 다음과 같다.[9)]

$$K_{D0} = \frac{1}{A + BT} + \frac{C}{T^2}\exp\left(-\frac{D}{T}\right) \quad (1)$$

여기에서 K_{D0} = conductivity of unirradiated fully dense DUPIC fuel pellets [W/m-K]

T = temperature [K]

A, B, C and D = constants.

위의 식에서 상수 A, B, C 및 D는 기준 조성 모의 DUPIC 핵연료를 이용한 열전도도 실험 자료와 비선형 최소 자승법을 이용하여 구할 수 있다.[10)] 이를 통하여 조사되지 않은 DUPIC 핵연료의 열전도도를 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 그림 1에 표시하였다.

$$K_{D0} = \frac{1}{0.1044 + 2.058\times10^{-4}T} + \frac{1.327\times10^{10}}{T^2}\exp\left(-\frac{19359}{T}\right) \quad (2)$$

이산화우라늄 소결체에 대해 일반적으로 알려진 바와 같이, DUPIC 핵연료도 원자로 내에서 연소됨에 따라 방사선에 의한 손상 및 핵분열생성물 축적에 의해 열전도도가 감소하게 된다. 이러한 효과는 실험적으로 증명되어야 하겠지만 이산화우라늄 및 DUPIC 핵연료 모두가 동일하다고 가정하였다. 연소가 진행됨에 따른 온도, 방사선, 연소도 및 공극률의 효과를 고려하기 위하여 Lucuta 등이 제안한 식을 인용하면 연소도 효과를 고려한 DUPIC 핵연료의 열전도도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_D = K_{D0} \cdot f_d \cdot f_p \cdot f_m \cdot f_r \quad (3)$$

여기에서 f_d = effect of the dissolved fission products

f_p = effect of the precipitated fission products

f_m = effect of porosity

f_r = radiation effect

3. 노내 거동 분석

CANDU 원자로 내에서의 DUPIC 핵연료 성능 해석을 위한 설계 출력 이력을 생산하였다. DUPIC 핵연료가 장전된 월성 1 호기의 평형 노심 time-average 계산을 통해 얻어진 모든 DUPIC 다발의 출력을 연소도의 함수로 도시한 후, 각 연소도 시점에서의 최고 출력들을 이용하여 연소도에 대한 다발 출력 변화 곡선을 유도하는 방법으로 설계 출력 곡선을 구하였다. 따라서, DUPIC 다발 설계 출력 곡선은 연소도에 따른 다발 출력 변화를 대표적으로 나타낼 뿐만 아니라 평형 노심 time-average 계산에서 구해진 모든 다발 출력을 포함한다. 일반적으로 설계 출력 곡선을 구할 때의 제한 조건을 다음과 같이 설정하며, 이는 원자로 과도 상태 및 계측 오차를 고려하지 않은 것이다.[3)]

① 특정 시간에 원자로 내에 존재하는 모든 핵연료 다발의 99% 이상이 고출력 곡선(reference high power envelope) 내의 출력 및 연소도를 가진다.

② 특정 시간에 원자로 내에 존재하는 모든 핵연료 다발의 90% 이상이 정격 설계 출력 곡선(nominal design power envelope) 내의 출력 및 연소도를 가진다.

월성 1 호기의 평형 노심 time-average 계산에서 구해진 모든 DUPIC 핵연료 다발 출력 및 이를 이용하여 구해진 DUPIC 핵연료의 설계 출력 이력을 그림 2에 표시하였다. 정격 설계 출력 이력 곡선은 인근 채널에서의 핵연료 교체 시에 나타나는 출력 상승(power ripple)을 고려하지 않은 상태에서 구했으며, 이 곡선에서의 최대 다발 출력은 800 kW에서의 plutonium peak에 상응한다. 이와 같은 출력 상승을 고려하여 CANDU-6 원자로에서는 다발 최고 출력을 935 kW 이하로 제한하고 있어, 정격 설계 출력 곡선에서 plutonium peak 시에 나타나는 최대 출력을 935 kW로 수직 상승시켜 DUPIC 핵연료 다발의 과출력 곡선(reference high power envelope)을 구하였다.

이상과 같이 구해진 DUPIC 핵연료의 설계 출력 이력과 DUPIC 소결체 열전도도 모델을 고려하여 수정된 ELESTRES 코드를 이용하여 각 설계 출력 이력 하에서 DUPIC 핵연료의 열적 거동 해석을 수행하였다. 그림 3 ~ 그림 6에서 나타내고 있는 것은 위에서 구한 DUPIC 핵연료를 장전한 월성 1 호기의 정격 설계 출력 이력을 이용하여 DUPIC 핵연료 및 UO_2 핵연료의 연소도에 따른 소결체-피복관 열전달계수, 소결체 중심 온도, 핵분열기체 방출량, 그리고 소결체 끝단 부위(ridge)의 변위 변화를 비교한 것이다. DUPIC 핵연료봉 내에서의 피보관-소결체 열전달계수는 연소 초기에는 DUPIC 핵연료에서의 열전달계수가 일시적으로 UO_2 핵연료보다 큰 것으로 나타나나 연소가 진행됨에 따라 핵분열기체 방출 등의 영향으로 UO_2 핵연료 열전달계수의 약 1/2 정도로 감소하는 것을 볼 수 있다. 소결체의 중심 온도는 앞에서 제시된 열전도도 모델로부터 예상한 것처럼 DUPIC 소결체의 중심 온도가 UO_2 소결체 중심 온도보다 약 500 ℃ 정도 높게 나타난다. 이는 열전도도 및 핵분열기체 방출의 가속화에 의한 영향으로 판단된다. 그러나, 캐나다 AECL의 NRU 연구용 원자로에서 수행하고 있는 DUPIC 핵연료봉 조사시험 결과로부터 판단할 때, 여기에서의 온도 해석 결과는 상당히 보수적인 결과라고 생각할 수 있다. 그림 5의 핵분열기체의 방출량 해석 결과에 의하면 DUPIC 핵연료의 경우가 UO_2 핵연료에 비해 약 5 배 정도 많은 것으로 나타나며, 이 역시 NRU에서의 DUPIC 핵연료봉 조사시험 결과와 상당히 일치하고 있다. 그림 6의 소결체 반경 방향 변위 변화는 DUPIC 소결체에 대한 기계적 물성 모델과 연계하여 해석하여야 하므로 현재로서 큰 의미를 부여하기는 어렵다고 생각된다.

4. 결 론

DUPIC 핵연료의 열적 거동 특성을 분석하기 위하여 기준 조성 모의 DUPIC 핵연료를 이용한 열전도도 실험 자료에 근거한 DUPIC 열전도도 모델을 제시하였다. 이 모델을 반영하여 수정된 중수로 핵연료 성능 평가 코드를 이용하여 정격 설계 출력 및 과출력 조건에서 DUPIC 핵연료 열적 거동을 해석하고, 동일 조건에서의 UO_2 핵연료의 거동과 비교 분석하였다. DUPIC 핵연료의 열적 거동 해석 자료는 조사후시험 자료와 비교한 결과 핵연료 중심 온도 및 핵분열기체 방출량이 보수적으로 일치하고 있음을 확인하였다.

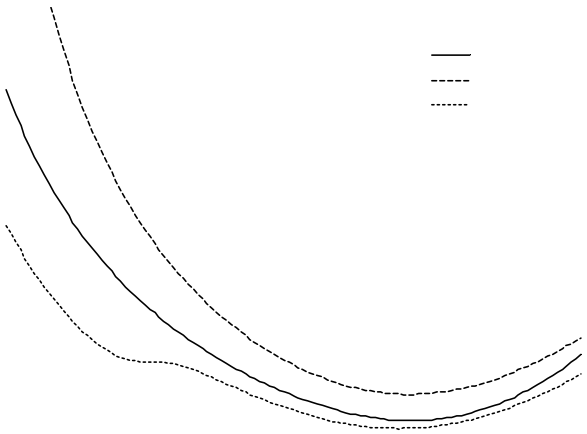
현재까지의 연구 결과로서 도출된 핵연료봉 설계 변경 사항은 없으며, DUPIC 핵연료봉 노내 성능 분석에서 문제점이 발견될 경우 설계 인자 민감도 분석을 통하여 설계 변경 사항을 도출하고 이를 고려한 최적 DUPIC 핵연료봉 설계를 수행하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발중장기계획사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

1. J.S. Lee et. al., “The DUPIC Alternative for Backend Fuel Cycle and Reactor Strategies,” Vienna, Austria (1997)
2. 석호천 등, 중수로용 개량 핵연료 기반 연구 및 실용화, KAERI/RR-2011/99, 한국원자력연구소 (1999)
3. 석호천 등, 중수로용 개량 핵연료 설계/해석, KAERI/RR-1624/95, 한국원자력연구소 (1995)
4. 이정원 등, DUPIC 핵연료 제조 및 공정 기술개발, KAERI/RR-2022/99, 한국원자력연구소 (1999)
5. 최항복 등, Sensitivity Study on DUPIC Fuel Composition, KAERI/TR-942/98 (1998)
6. M. Tayal, Modeling CANDU Fuel under Normal Operating Conditions, AECL-9331, Atomic Energy of Canada Limited (1986)
7. Kang, K.H., Song, K.C and Yang, M.S., “The Thermal Diffusivity of Simulated DUPIC Fuel for Irradiation Test,” Metals and Materials International, 7(3), 285-290 (2001)
8. Lucuta, P.G., Verrall, R.A, Matzke, H.j. and Hasting, I.J.,2nd. Int. Conf. On CANDU (ed., Voczar, P.G), 2, CNS, Toronto, Canada (1992)
9. Harding, J. H. and Martin, D. G. "Recommendation for the Thermal Conductivity of UO2," J. of Nucl. Mater., 166, 223-226 (1989)
10. Mathews, J.H. and Fink, K.D., Numerical Methods using MATLAB-3rd Ed., Prentice Hall, Inc, USA (1999)
11. Suk, H.C. et al., ELESTRES.M11K User’s Manual and Description, KAERI/TR-320/92 (1992)



1. DUPIC 핵연료의 열전도도 모델

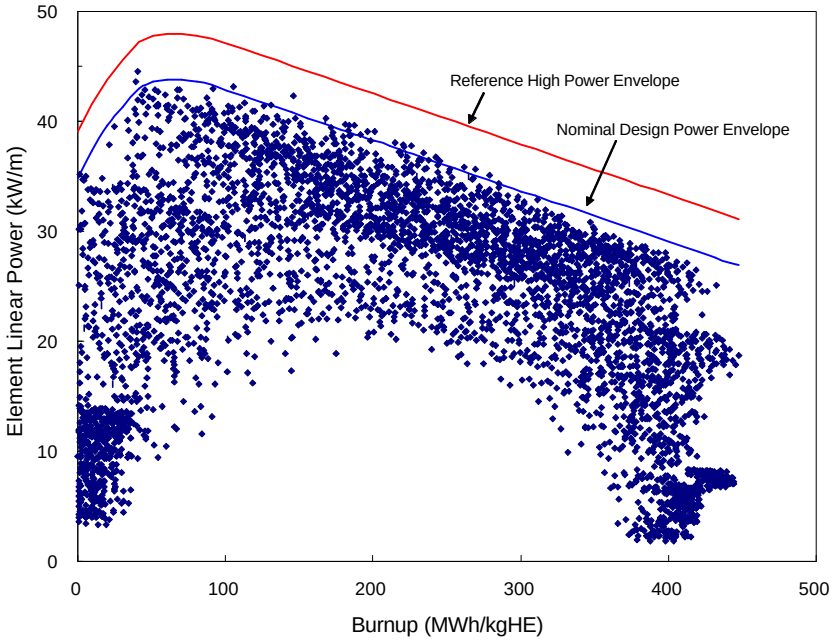


그림 2. DUPIC 핵연료의 정격 설계 출력 및 고출력 이력

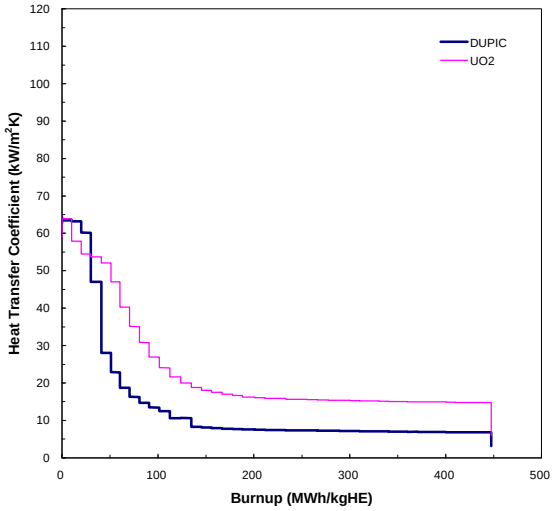


그림 3. 소결체-피복관 열전달계수 변화
(정격 설계 출력 조건)

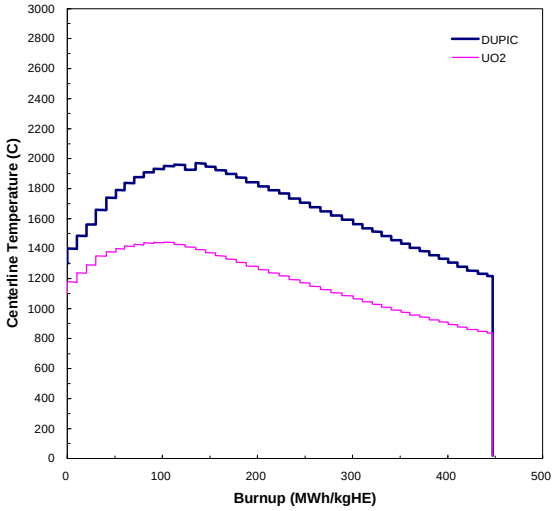


그림 4. 소결체 중심 온도 변화
(정격 설계 출력 조건)

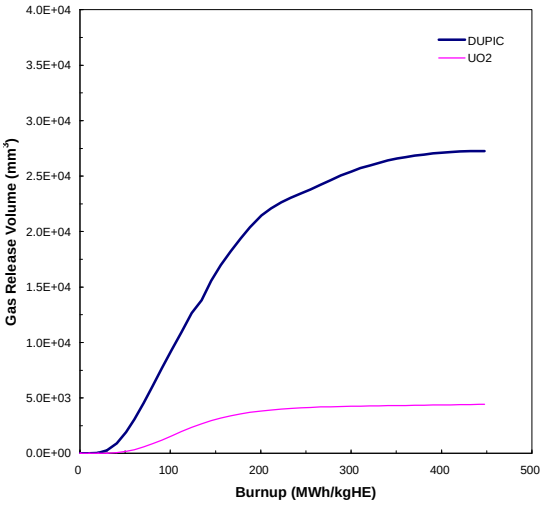


그림 5. 핵분열 기체 방출량 변화
(정격 설계 출력 조건)

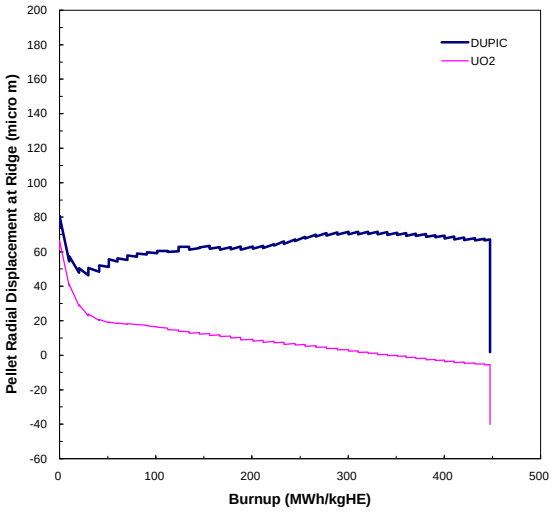


그림 6. 소결체 반경 방향 변위 변화
(정격 설계 출력 조건)