

(Th,U)O<sub>2</sub> 소결체의 열탄성 거동 해석  
Thermo-elastic Analysis of (Th,U)O<sub>2</sub> Pellet

김영민, 양용식, 이찬복, 김대호, 방제건, 정연호

한국원자력연구소

요 약

이산화우라늄 소결체, 이산화우라늄/이산화토륨의 이중구조 소결체, 이산화우라늄과 이산화토륨이 균질혼합된 소결체에 대한 온도와 원주방향응력을 선출력 300 및 500 W/cm에서 계산하였다. 계산은 유한요소모듈을 핵연료봉 분석코드인 INFRA에 삽입하여 수행하였다. 소결체는 탄성이라 가정하였고, 열 및 기계적 하중에 의한 소결체의 응력분포를 계산하였다. 이중구조 소결체의 온도가 다른 종류의 소결체의 온도 보다 매우 높았고, 소결체 중심으로 갈수록 상승폭이 더 크게 나타났다. 선출력 500 W/cm에서는 이중구조 소결체 중심의 온도는 이산화우라늄의 용융점에 도달하였다. 선출력 500 W/cm에서 crush 강도보다 훨씬 큰 인장응력이 이중구조 소결체의 이산화토륨 영역에 작용하였다. 이산화우라늄 소결체와 균질혼합된 소결체의 온도와 응력 차이는 크게 나타나지 않았다.

ABSTRACTS

The study calculated hoop stress and temperature distribution in the pellets with finite element program in fuel rod performance analysis code, INFRA. Pellets considered are pure UO<sub>2</sub>, duplex (35% UO<sub>2</sub>)/(65% ThO<sub>2</sub>) and blended (65% Th, 35% U)O<sub>2</sub> pellets. Stress and temperature were calculated at two levels of linear heat generation rate, 300 and 500 W/cm. All pellets were assumed to be elastic and to be loaded thermally and mechanically. Duplex pellet experienced the very high temperature in the inner UO<sub>2</sub> region, and therefore resulted in strong tensile stress to the outer ThO<sub>2</sub> region. There were no great differences in the temperature and hoop stress for pure UO<sub>2</sub> and blended (Th,U)O<sub>2</sub> pellets.

1. 서 론

토륨을 고연소도 핵연료로 사용하기 위한 연구가 최근에 진행되고 있다[1,2]. 토륨핵연료로 고려되고 있는 구조로 이산화우라늄과 이산화토륨을 일정비율로 혼합하여 제조한 소결체, 이산화우라늄 영역과 이산화토륨 영역으로 구분하여 제조하는 복합구조의 소결체 등을 들 수 있다. 토륨이 함유된 핵연료 소결체는 이산화우라늄 소결체와 비교하여 그 물질 특성과 배치가 달라진다. 특히 이산화우라늄 영역과 이산화토륨 영역으로 구분된 복합구조의 경우, 같은 양의 출력을 내기 위해서 이산화우라늄 핵연료의

우라늄 보다 고농축 우라늄이 사용되기 때문에 이산화우라늄 영역에서 큰 열이 발생하리라 예상된다. 이러한 지역적 열 발생과 물질간 다른 열 전달 특성에 따라 기존 이산화우라늄 핵연료와는 다른 열 부하가 예상된다. 토륨핵연료를 사용하기 위해서는 달라진 열적 거동이 핵연료 안전성에 문제를 일으키지 않는다는 것을 확인하여야 한다. 기본적으로 소결체 내에서의 온도 상승 정도와 열 하중에 따른 응력 변화를 평가하여야 한다.

본고에서는 유한요소모델과 핵연료봉 성능분석 코드를 이용하여 선출력에 따른 이산화우라늄 및 토륨핵연료 소결체의 온도와 원주방향응력 분포를 계산하여 분석하였다.

## 2. 해석

### 2.1. 유한요소모델 설정

소결체 및 피복관에 작용하는 열 및 기계적 하중을 그림 1에 나타내었다. 소결체 상부는 구속되지 않고 자유롭게 팽창한다고 가정하였다. 소결체와 피복관이 접촉되지 않았을 때, gap에서는 기체압력이 소결체 외면과 피복관 내면에 작용한다. 피복관 외면에는 냉각수 압력이 작용하고, 상부에는 축 방향 하중이 작용한다. 소결체 및 피복관에 대한 이차원 축대칭 유한요소모델을 그림 2에 나타내었다. 소결체는 반지름 방향으로 5개, 축 방향으로는 3개의 요소로 구분하였다. 피복관은 축 방향으로만 3개의 요소로 나누었다. 유한요소는 8 절점의 serendipity 요소로 선정하였다[3].

### 2.2. 계산절차

유한요소해석은 핵연료의 기계적 거동을 분석하는 유한요소분석모듈[4]을 핵연료봉 분석코드인 INFRA[5]에 삽입하여 수행하였다. 삽입된 유한요소분석모듈은 INFRA로부터 분석에 필요한 자료를 받아들이며 핵연료에 대한 기계적 거동을 분석한다.

분석 대상으로 한 소결체의 사양 및 관련 자료를 표 1에 나타내었다. 대상 소결체는 이산화우라늄 소결체, 이중구조 소결체, 균질혼합 소결체이다. 이중구조 및 균질혼합 소결체에서 이산화우라늄과 이산화토륨의 질량분율은 각각 35%와 65%로 하였다. 이중구조 소결체에서 반지름 0.235cm 이하의 내부는 이산화우라늄이고, 그 외부는 이산화토륨이다. 표 2에는 계산에 적용한 소결체 및 피복관에 작용하는 기체압력과 냉각수 압력을 나타내었다. 소결체는 탄성, 피복관은 탄소성으로 가정하였다. 이산화우라늄, 이산화토륨 및 지르칼로이-4에 대한 물질 특성은 MATPRO 자료를 이용하였고[6,7], 이산화우라늄과 이산화토륨 혼합물의 물질 특성은 Vegard 법칙을 적용하여 계산하였다[7].

## 3. 결과

그림 3과 4에 선출력이 300 및 500 W/cm일 때의 이산화우라늄 소결체, 이중구조 소결체, 균질혼합 소결체의 반지름 방향 온도분포를 각각 나타내었다. 선출력 300 및 500 W/cm일 때 모두 이산화우라늄 소결체와 균질혼합 소결체의 온도 분포는 거의 차이가 없다. 이중구조 소결체의 경우 다른 두종류의 소결체보다 온도가 크게 나타나고 있고, 그 상승 정도는 소결체 중심으로 갈수록 더 커지고 있다. 선출력이 500 W/cm일 때는 이중구조 소결체 중심의 온도가 표 1의 이산화우라늄의 용융점에 도달하고 있다. 이중구조 소결체의 경우 선출력 500 W/cm 이상에서 노심용융이 발생함을 알 수 있다.

그림 5와 6에 선출력이 300 및 500 W/cm일 때의 각 소결체에 대한 원주방향응력 분포를 각각 나타내었다. 온도분포 결과와 마찬가지로 이산화우라늄 소결체와 균질혼합 소결체의 응력 거동은 선출력 300 및 500 W/cm일 때 모두 유사하다. 이산화우라늄 소결체와 균질혼합 소결체의 경우, 표 1의 fracture strength 및 rupture modulus와 비교해 보면 선출력 300 W/cm에서 이미 소결체 표면에서 손상이 일어날 수 있음을 알 수 있다. 이중구조 소결체의 경우 반지름 방향으로의 응력 변화가 매우 심하고, 응력의 절대크기 또한 다른 두 종류의 소결체에서보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 선출력 300 및 500 W/cm일 때 모두 이산화우라늄 영역에서 큰 압축응력이 작용하고 있다. 선출력 500 W/cm일 때 이산화토륨 영역에 표 1의 crush strength 이상의 인장응력이 작용하고 있다. 이것은 선출력이 500 W/cm 이상이 될 때 소결체가 부수어 질 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결 론

이산화우라늄 소결체, 이중구조 소결체 및 균질혼합 소결체에 대한 반지름 방향의 온도와 원주방향 응력 분포를 계산하였다. 선출력 300 및 500 W/cm일 때 이산화우라늄 소결체와 균질혼합 소결체의 열 및 기계적 거동은 서로 유사하였다. 두 소결체 모두 선출력 300 W/cm에서부터 소결체 표면에서 균열이 발생한다고 예측되었다. 이중구조 소결체의 온도는 이산화우라늄 소결체 또는 균질혼합 소결체의 온도보다 훨씬 높게 계산되었고, 특히 선출력 500 W/cm 이상에서는 소결체 중심에서 용융이 발생할 수 있다고 예측되었다. 이산화토륨 영역에서 발생한 열 부하에 의해 이산화우라늄 영역에서는 큰 압축응력이 작용하였다. 선출력 500 W/cm일 때 이산화토륨 영역에 crush strength 이상의 인장응력이 작용하였다. 열 및 기계적 거동 측면에서는 이중구조 소결체가 가장 취약한 구조로 판단되었다. 이산화우라늄 소결체 및 균질혼합 소결체의 열 및 기계적 거동은 큰 차이가 없었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Lung, M. and O. Gremm, "Perspectives of the Thorium Fuel Cycle," *Nucl. Eng. Des.*, 180, pp. 133-146 (1998).
2. Lee, C.B. et al., "Evaluation of (Th,U)O<sub>2</sub> Fuel Usage in PWR," GLOBAL 2001, Paris, France (2001).
3. Cook, R.D., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 2nd ed., Wiley, New York (1981).
4. 권영두 외, 유한요소 분석모듈 기술개발, KAERI/CM-399/99 (2000).
5. 이찬복 외, "UO<sub>2</sub> 핵연료봉 성능해석 코드, INFRA 개발," 2001 추계원자력학술발표회 논

문집, 한국원자력학회 (2001).

6. Hagrman, D.T., editor, SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO -- A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis, NUREG/CR-6150 (1993).
7. Belle, J. and R.M. Berman, editors, THORIUM DIOXIDE: Properties and Nuclear Applications, DOE/NE-0060 (1984).

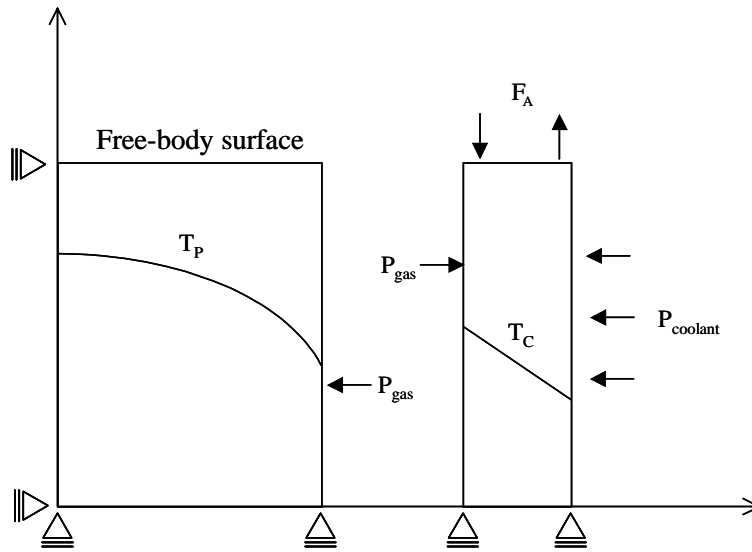


그림 1 소결체 및 피복관에 작용하는 열 및 기계적 하중

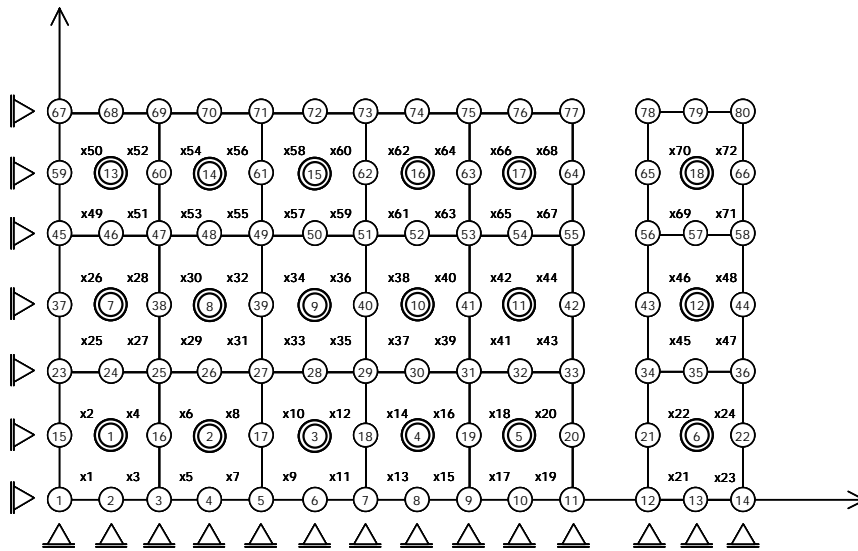


그림 2 소결체 및 피복관의 유한요소모델

표 1 PWR 핵연료의 주요 사양 및 자료

Cladding material	Zircaloy-4
Cladding outside diameter (mm)	9.50
Cladding inside diameter (mm)	8.36
Cladding thickness (mm)	0.572
Diametral gap thickness (mm)	0.165
Fuel pellet radius (mm)	4.10
Fuel pellet length (mm)	17.8
Fuel pellet true density (percent)	95.0
*UO <sub>2</sub> region in pellet radius (mm)	0 ~ 2.35
*ThO <sub>2</sub> region in pellet radius (mm)	2.35 ~ 0.410
Weight percent of UO <sub>2</sub>	35
Modulus of rupture of ThO <sub>2</sub> (MPa)	137 at room temperature, 20.4 μm grain diameter, 2.2% porosity
Fracture strength of UO <sub>2</sub>	131 at 1000 K, 5% porosity
Crush Strength of thoria pellet (MPa)	566
Melting point of UO <sub>2</sub> (°C)	2,847
Melting point of ThO <sub>2</sub> (°C)	3,367

\* (35% UO<sub>2</sub> / 65% ThO<sub>2</sub>)의 이중구조 소결체에 해당

표 2 소결체 및 피복관에 작용하는 압력

(단위: MPa)

Pellets \ LHGR <sup>1)</sup>	300	500
Pure UO <sub>2</sub>	7.6, 15.2 <sup>2)</sup>	7.6, 15.2
(65% Th, 35% U)O <sub>2</sub> Blended	7.6, 15.2	7.6, 15.2
35% UO <sub>2</sub> /65% ThO <sub>2</sub> Duplex	7.6, 15.2	7.6, 15.2

1) LHGR = Linear Heat Generation Rate (W/cm)

2) 앞의 숫자는 기체압력, 뒤의 숫자는 냉각수압력임.

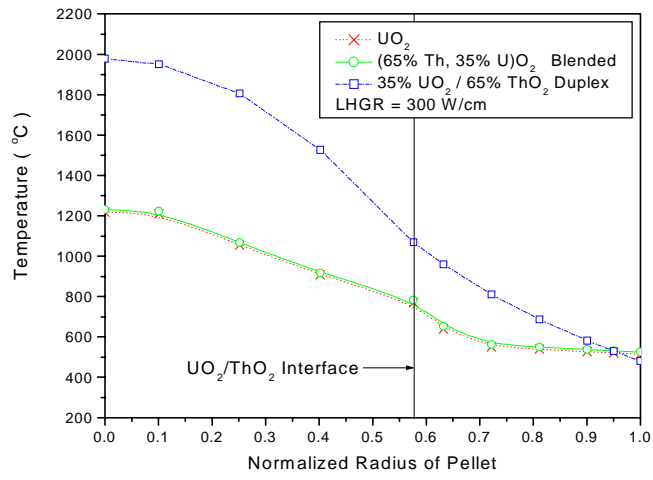


그림 3 선출력 300 W/cm에서의 핵연료 온도분포

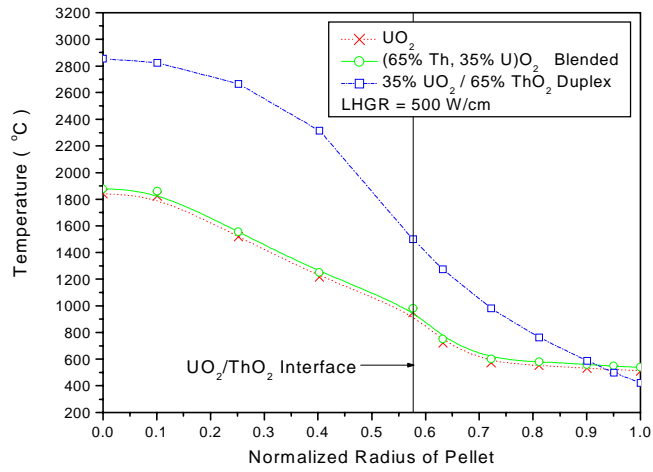


그림 4 선출력 500 W/cm에서의 핵연료 온도분포

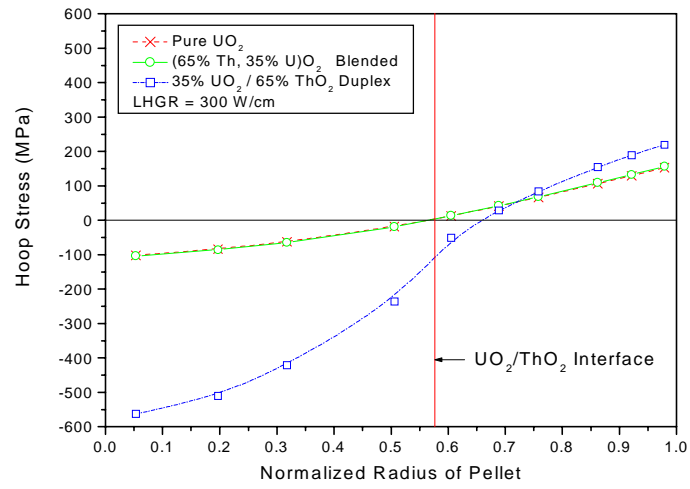


그림 5 선출력 300 W/cm에서의 원주방향응력 분포

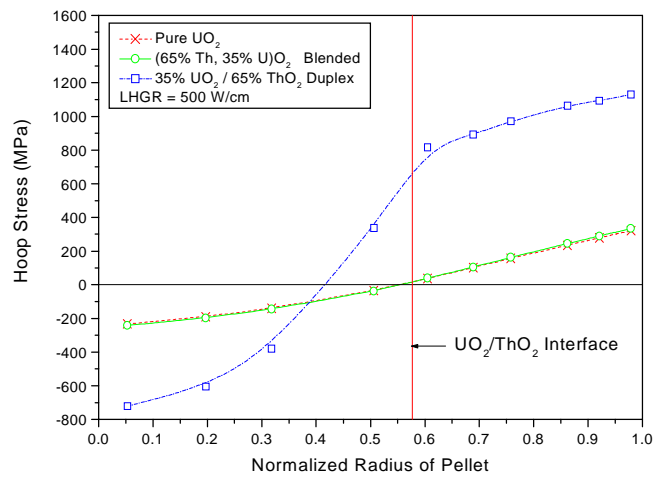


그림 6 선출력 500 W/cm에서의 원주방향응력 분포