

고연소를 위한 이중구조 혼합산화물 핵연료소결체

김용덕, 이광호, 신호철
한국전력공사

Duplex Mixed-Oxide Fuel Pellet for High Burnup

Y.D. Kim, G.H. Lee, H.C. Shin
Korea Electric Power Corporation

요 약

종래의 핵연료소결체가 혼합산화물 혹은 이산화우라늄중 한가지 핵연료만으로 구성된 것과 달리 내부를 저농축 이산화우라늄 핵연료로 채우고 그 외부를 링형태의 혼합산화물 핵연료로 둘러싼 이중구조를 특징으로 한다. 이러한 형태의 핵연료소결체는 중심영역의 핵분열반응률 저임으로써 핵분열 기체생성, 핵연료봉 중심온도와 평균온도를 낮추어 준다. 이는 핵분열 기체방출을 낮추어 혼합산화물 핵연료봉 성능을 향상시키고 방출 연소도를 증가시키는 효과가 있다.

1. 서 론

원자력선진국에서는 우라늄자원의 효율적 활용과 고준위 방사성폐기물 감량을 위해 사용 후 핵연료로부터 플루토늄을 회수하여 이를 혼합산화물 핵연료 형태로 재사용하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다.

혼합산화물 핵연료는 이산화우라늄 핵연료와 유사한 핵적·재료적 특성을 보유하고 있으나, 이산화우라늄 핵연료에 비해 낮은 열전도 특성과 많은 초기 개방기공(Open porosity)을 갖는 단점이 있다. 혼합산화물 핵연료의 낮은 열전도도는 핵연료소결체 중심온도와 온도구배를 증가시킨다. 핵연료소결체 중심부분의 높은 온도는 핵연료소결체 팽윤과 핵분열 생성 기체 방출의 일차적 원인이 된다. 핵연료소결체 팽윤은 이산화 연료입자내부에 기체성 및 고체성 핵분열 생성물의 축적에 기인하며 지속적인 팽윤은 핵연료와 피복관이 접촉하는 PCI(Pellet-Cladding Interface) 현상을 유발한다. 이러한 PCI 현상은 접촉부위에 기계적 응력과 조사부식을 가하여 핵연료소결체를 격리하는 피복관 내부를 재료적으로 취약하게 만든다.

핵연료 입자(Grain) 내부의 핵분열성 동위원소(U-235, Pu-239 혹은 Pu-241)의 핵분열 반응시 부산물로 발생하는 핵분열 생성기체는 대부분 제논(85%)과 크립톤(15%)로 구성되고, 이들은 입자내부에서 입자경계(Grain boundary)로 확산되어 기공(Void)을 형성한다. 핵분열 생성기체의 입자내부에서 입자경계로의 확산속도는 핵연료 온도에 따라 증가한다. 이들은 서로 연결된 기체기포(Interlinked gas bubbles)나 균열(Crack)을 경로로 하여 핵연료소결체 밖으로 방출됨에 따라 핵연료봉의 내압을 증가시킨다.

핵연료소결체내에서의 극심한 온도구배는 열적응력으로 작용하여 높은 온도의 내부영역을 소성적 변형을 일으키고, 상대적으로 낮은 온도의 외부영역에 균열을 발생시킨다. 또한 방사

선에 조사된 균열파편들은 피복관 내부에 집착하여 핵연료 내부에서 발생한 열전달을 저해하고 조사부식을 유발한다.

실제로, 혼합산화물 핵연료는 핵적으로 고연소 운전에 유리한 특성을 가지고 있음에도 불구하고, 상기에 언급한 문제점으로 인하여 방출연소도를 35,000MWD/MTU로 제한하고 있다.

2. 이중구조 혼합산화물 핵연료소결체

본 논문에서는 종래의 핵연료소결체가 혼합산화물 혹은 이산화우라늄중 한가지 핵연료만으로 구성된 것과 달리 내부를 저농축 혹은 천연 이산화우라늄 핵연료로 채우고 그 외부를 링형태의 혼합산화물 핵연료로 둘러싼 이중구조를 특징으로 한다.

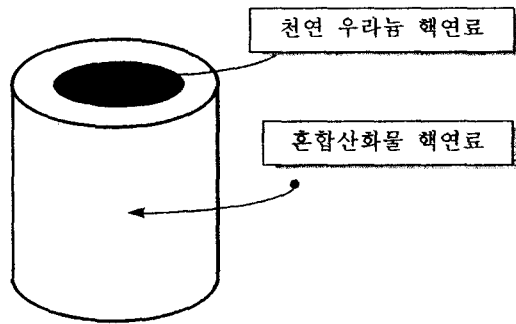


그림 1. 이중구조 혼합산화물 핵연료소결체

3. 결과

이중구조 핵연료소결체의 중심영역에 상대적으로 핵분열 동위원소 존재비가 낮은 천연 이산화우라늄 연료를 이용함으로써 이부분의 핵분열 반응률을 줄인다. 따라서 핵연료소결체 내의 출력밀도 분포는 기존의 균질 핵연료소결체에 비하여 외부영역에서 약간 높고 내부영역에서는 상당히 낮다. 이는 종래의 균질 핵연료소결체에 비해 중심온도를 그림 2에서 보여주는 바와 같이 200 ~ 300 °F 정도 낮추어 주며 핵연료소결체 반경방향에 따른 온도구배도 완만해지는 효과가 있다. 또한 핵연료소결체의 평균온도는 그림 3에서와 같이 전체 주기 동안 기존에 비해 약 50 °F정도 낮다.

핵연료소결체 내부영역의 낮은 핵분열 반응률은 전체 핵분열 기체생성률을 감소시키고, 소결체 내부의 낮은 온도는 핵연료 입자내에 축적된 핵분열 기체를 입자경계로 확산시켜 궁극으로 방출되는 율을 감소시킨다. 그림 4는 연소도의 함수로 핵분열 기체 방출율이 기존에 비해 감소하는 효과를 보여 준다.

방출되는 핵분열 기체들은 핵분열소결체 균열경로나 서로 연결된 기체기포를 따라 이동하여 소결체외부의 개방기공이나 결함부위를 통하여 방출됨으로써 피복관 내압을 증가시키는데 영향을 미친다. 따라서 낮아진 핵분열 기체 방출율은 그림 6에서와 같이 종래 균질 핵연료소결체에 비해 비해 낮은 피복관 내압을 유지시킨다.

핵연료소결체의 팽윤은 온도가 연소도에 따라 증가한다. 이중구조의 핵연료소결체의 중심온도와 평균온도가 기존 소결체에 비하여 낮으므로 그림 6에서와 같이 핵연료소결체의 팽윤을 줄이는 효과가 있다.

이상의 이중구조 혼합산화물 핵연료소결체의 특성을 종합하면 중심영역의 핵분열반응률 줄임으로써 핵분열 기체생성, 핵연료봉 중심온도와 평균온도를 낮추어 준다. 이는 핵분열 기체방출을 낮추어 혼합산화물 핵연료봉 성능을 향상시키고 방출 연소도를 증가시킨다.

참고문헌

1. Sultan M. Rizvi. et al, "MOX Fuel Operational Experience in The BEZNAU Unit 1 Nuclear Power Plant", ANS Topical Mtg. on Advanced Rx. Physics, Apr. 11-15, 1994
2. R. C. Liikala et al, "Lattices of Plutonium-Enriched Rods in Light Water-Part II : Theoretic Analysis of Plutonium-Fueled Systems", *Nucl. Tech.*, 15, 272 (1972)
3. Salim N. Jahshan et al, "An Evaluation of The Deployment of AIROX-Recycled Fuel in Pressurized Water Reactor", *Nucl. Tech.*, 106, 350 (1994)
4. Gerhard J. Schlosser et. al, "Experience in PWR and BWR Mixed-Oxide Fuel Management" *Nucl. Tech.*, 102, 54 (1993)

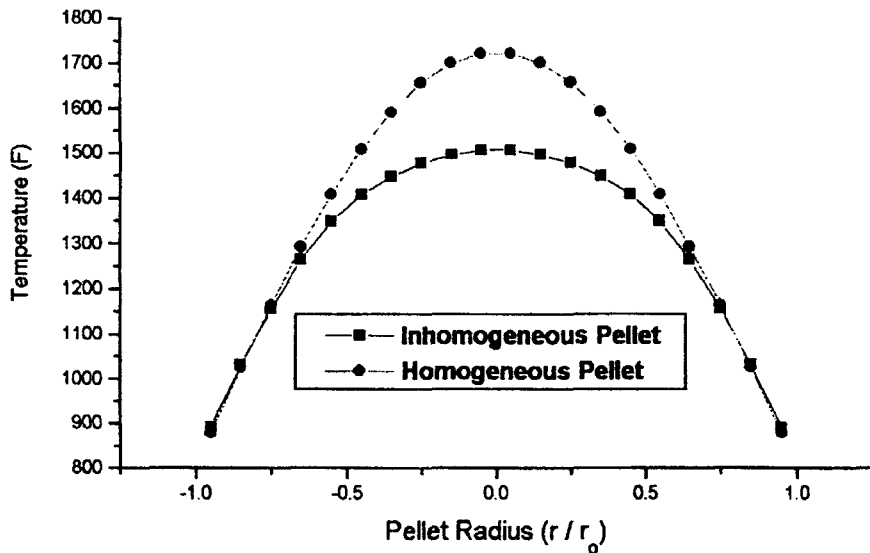


그림 2. 핵연료소결체내 온도분포

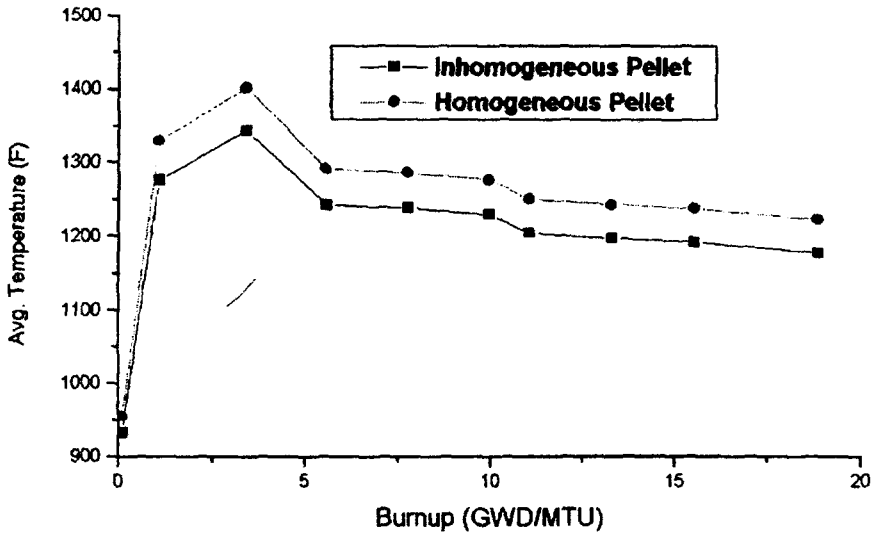


그림 3. 연소도에 대한 핵연료소결체 평균온도 변화

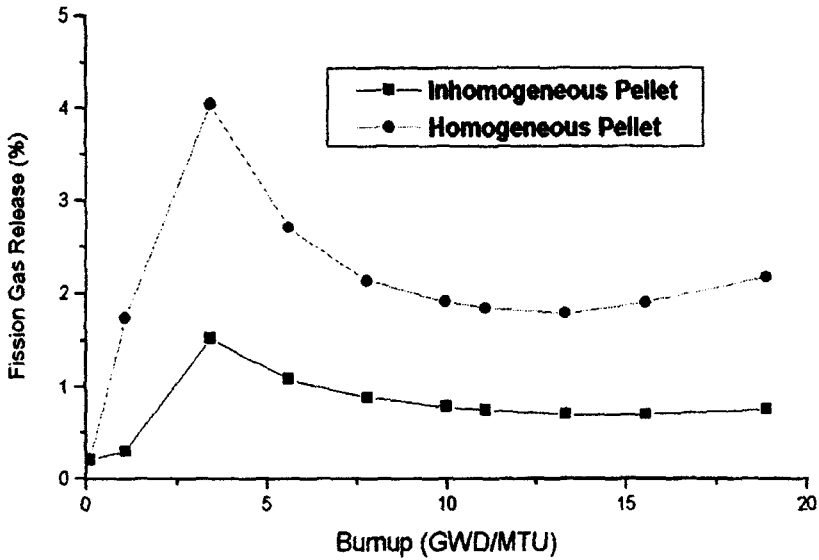


그림 4. 연소도에 대한 핵분열 기체 방출율 변화

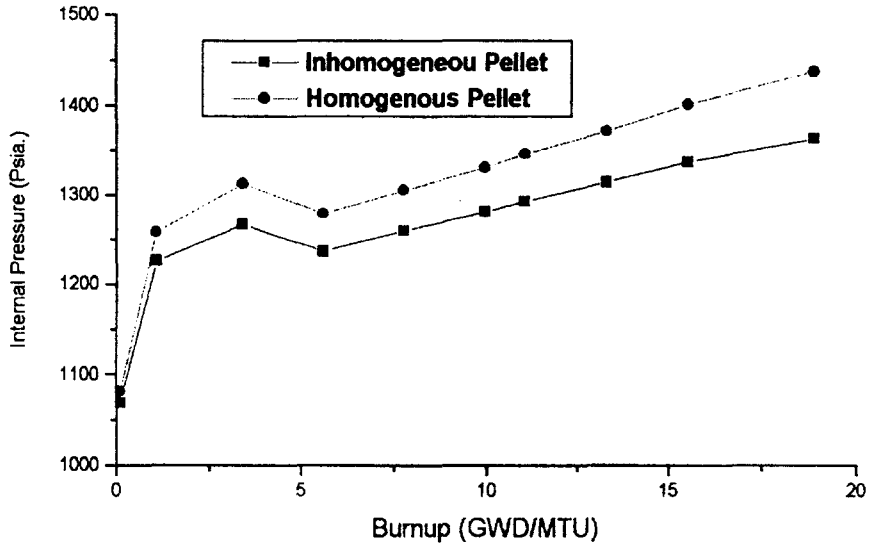


그림 5. 연소도에 대한 핵연료봉 내압 변화

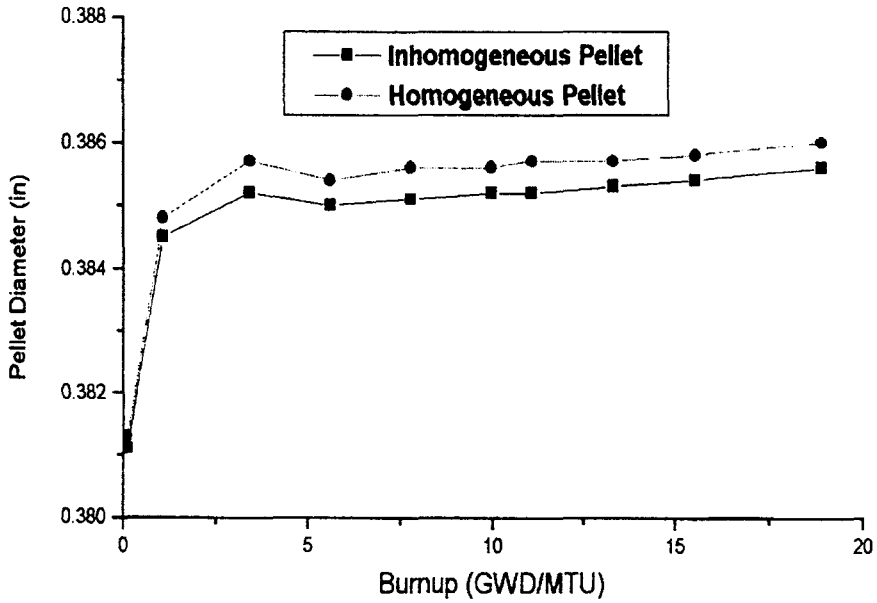


그림 6. 연소도에 대한 핵연료소결체 반경길이 변화