' 2002 추계학술대회 논문집
한국원자력학회

INFRA-Th를 이용한 IFA-652.1 ThO_2-UO_2 핵연료 노내 거동 분석
(Analysis of IFA-652.1 ThO_2-UO_2 Fuel In-Pile Behavior Using INFRA-Th)

양용식, 이찬복, 방제건, 김대호, 김영민, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 사서함 105호 305-600

요 약

UO_2 성능 평가 코드인 INFRA의 주요 성능 모델들을 변경하여 ThO_2-UO_2 핵연료용 성능 평가 코드인 INFRA-Th를 개발하였다. 개발된 INFRA-Th를 이용하여 Halden에서 수행중인 IFA-652.1 4/5번 핵연료봉의 노내 거동을 분석하고 측정된 자료를 바탕으로 INFRA-Th 코드의 온도 및 봉내압 예측 검증을 수행하였다. 분석된 노내 측정자료에서는 두 핵연료봉 모두 큰 고밀화현상이 발생한 것으로 나타났으며 특히 5번 핵연료봉은 4번 핵연료봉과 동일하게 제작되었고 낮은 출력으로 유지되었지만 더욱 큰 고밀화현상이 나타났다.

정확한 제작 자료 및 출력자료를 바탕으로 수행된 INFRA-Th의 노내 핵연료 성능 예측에서는 4번 핵연료봉의 큰 고밀화, 핵연료 중심 온도, 봉내압 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났지만 5번 핵연료봉에서 발생한 대량의 고밀화를 낮게 평가하여 다소 낮은 온도와 높은 봉내압을 예측하였다.

Abstract

For the in-pile performance analysis of thoria-urania fuel, INFRA-Th version was developed by adding some performance model for ThO_2-UO_2 fuel into INFRA of UO_2 performance analysis code. Using INFRA-Th, IFA-652.1 rod 4&5 in-pile behavior analysis was performed and temperature & rod internal pressure prediction compared with measured data. From measured in-pile data, due to low initial fuel density, strong densification was observed. Especially, though rod 5 had the identical design with rod 4 and even more lower power level maintained during irradiation, more densification was observed in rod 5 than rod 4.

Based on the detail rod design information and power history measured in-pile, INFRA-Th shows good agreement for the strong densification, fuel temperature and rod internal pressure with rod 4's measured data. But in rod 5 case, due to under estimation of enhanced strong densification, lower fuel temperature and higher rod internal pressure predicted.

1. 서 론

핵연료 노내 거동을 관찰하기 위해 지속적으로 수행되고 있는 Halden project에서는 2000년부터 토륨 핵연료에 대한 연소실험을 수행하고 있다. 그 동안 토륨 핵연료가 우수한 노내 성능을 가진다는 연구결과[1]들은 꾸준히 발표되어 왔으나 체계적이고 종합적인 노내 거동 분석을 위한 실험을 수행하기 위해 IFA-652.1 실험이 시작되었다.

IFA-652.1 핵연료 집합체는 3종류의 토륨핵연료를 장전하여 2005년까지 약 45 MWd/kgOx 연소도를 목표로 실험이 수행되고 있으며 특히 4번 5번 핵연료봉은 ThO_2-UO_2 핵연료로서 ThO_2와 UO_2의 특성상 몇 가지를 제외한 대부분의 열적/기계적 거동이 UO_2 핵연료와 큰 차이를 보이지 않기 때문에 일반적인 UO_2 핵연료 성능 분석 코드의 개선을 통하여 노내 성능을 분석할 수 있다.

본 연구에서는 UO_2 핵연료용 성능평가 코드로 개발된 INFRA(INtegrated Fuel Rod Analysis)를[2] 개선하여 ThO_2-UO_2 핵연료 성능평가 코드인 INFRA-Th를 개발하고 IFA-652.1 집합체 4/5번 핵연료봉의 운전중 핵연료 중심온도 및 봉내압 측정자료를 이용하여 노내 거동을 분석하고 INFRA-Th의 온도 및 봉내압 예측 성능을 평가하였다.

2. IFA-652.1 실험

2000년부터 연소가 시작된 IFA-652.1 집합체 실험은 3가지 형태로 제작된 토륨핵연료의 노내 연소 거동을 관찰하기 위한 실험이다. 장전된 핵연료는 IM(Inner Matrix), IMT(Inner Matrix Thoria-dopped), T(Thoria) 핵연료이며 각각 1&2, 3&6, 4&5번 핵연료봉으로서 실험이 수행되고 있다(3번 핵연료 장전 안됨).

본 연구에서 성능 분석을 수행한 5번 핵연료봉은 4번 핵연료봉과 함께 ThO_2-UO_2 핵연료로서 제작되었으며 상세한 재원은 표1에 정리되어 있다.

4번, 5번 핵연료봉은 노내 연소중 핵연료 중심온도의 변화를 측정하기 위하여 핵연료 상단에 TF(Thermo couple)을 삽입하였으며 봉내압 변화의 측정을 위해 하단에 PF(Pressure Transducer)가 설치되어 있으며 특히 4번 핵연료봉 상단에는 핵연료 길이의 변화를 측정하기 위한 EF(Fuel Stack elongation)가 장치되어 있다. 핵연료 축방향으로는 3곳에 설치된 ND(Neutron Detector)를 통하여 핵연료 축방향 출력 분포를 측정한다. 그림 1에는 4,5번 핵연료봉에 대한 개략도가 나타나 있다.

3. INFRA-Th 코드

ThO_2-UO_2 핵연료 성능 분석을 위해 개발한 INFRA-Th 코드는 UO_2 핵연료용 성능 평가 코드인 INFRA 코드를 기반으로 하고 있다.

ThO_2-UO_2 핵연료의 성능 평가 코드는 대부분의 성능 모델들이 UO_2 핵연료용 코드의 성능 모델들을 활용할 수 있지만 핵연료 소결체의 열전도도, 열팽창, 반경방향 출력 및 연소도 분포, 핵분열 기체 방출등 주요 성능모델과 일부 물질 특성치(Melting temperature, specific heat, modulus of elasticity, emissivity)에서는 약간의 차이를 나타낸다.

따라서 ThO_2-UO_2 핵연료용 성능 모델들에 대한 개발/개선을 수행하였으며 변경된 성능 모

델들을 INFRA의 성능 모델과 교체하여 INFRA-Th를 개발하였으며 변경된 주요 성능 모델들은 다음과 같다.

3.1 열전도도

일반적으로 알려진 ThO_2-UO_2 핵연료의 열전도도는 UO_2 핵연료에 비해 다소 높은 것으로 나타나고 있으며 높은 열전도도는 동일한 설계/운전 조건에서 낮은 핵연료 온도를 유지시켜 핵연료의 성능/건전성을 향상시킬 수 있는 장점으로 작용한다.

100% TD, 비조사된 ThO_2-UO_2 핵연료의 열전도도는 다음과 같이 주어진다[3].

$$K^M_{Th/U} = \frac{1}{A(M) + B(M) \cdot T}$$

여기서

$$A(M) = \frac{1}{A_0 + A_1 \cdot M}, \quad B(M) = B_0 + B_1 \cdot M + B_2 \cdot M^2$$

A_0=46.948, A_1=-112.072,

B_0=1.597×10-4, B_1=6.736×10-4, B_2=-2.156×10-3

이다.

그러나 핵연료 제작 시에는 일정량의 기공(porosity)를 포함하도록 제작되며, 연소도 증가에 따라 감소하는 열전도도의 변화를 고려하기 위하여 연소도 인자와 기공 인자를 고려하였다.

기공인자는 다음과 같은 Maxwell-Euken correlation을 사용하고 있으며 ThO_2-UO_2 핵연료의 경우에 β의 값은 1.15로 제안되고 있다[4].

$$K_P = \frac{(1-P)}{(1+\beta P)}$$

여기서 P = Porosity fraction 이다.

연소도 인자는 연소도 증가에 따라 감소하는 정도가 UO_2 핵연료와 동일한 것으로 가정하고 Halden에서 제안한 UO_2 핵연료 열전도도 모델에서 유도된 식을 사용하였다.

$$k_B = \frac{k}{k_0}$$

여기서

k_B = Burnup factor at burup B (MWd/kgUO_2)
k = Halden thermal conductivity (kW/m.K)
k_0 = Halden thermal conductivity at zero burnup

이다.

연소도 인자 및 기공 인자를 고려한 최종 열전도도 식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_{total} = K^M_{Th/U} \cdot k_B \cdot k_P$$

3.2 열팽창

토륨의 열팽창률은 UO_2에 비해 다소 작은 것으로 알려져 있으며 ThO_2-UO_2가 혼합된 핵연료에서는 토륨과 우라늄의 몰비(M)에 따라 각 열팽창값의 비로서 나타낼 수 있다[3].

$$\left(\frac{\triangle L}{L_0}\right)_{ThO2-UO2} = Frac_{UO2} \cdot \frac{\triangle L}{L}_{UO2} + Frac_{ThO2} \cdot \frac{\triangle L}{L}_{ThO2}$$

3.3 소결체 반경방향 출력 및 연소도 분포

핵연료 반경방향으로의 핵분열 밀도 및 생성 핵종들의 변화로 인해 운전중인 핵연료의 반경방향 출력 및 연소도 분포는 변화를 일으키게 된다. 특히 소결체 가장자리에서는 U-238의 중성자 흡수로 생성된 Pu-239의 축적으로 인해 국부적인 연소도가 급격히 증가하게 되어 Rim 영역을 생성하게 된다. 그러나 ThO_2-UO_2 핵연료는 UO_2 핵연료에 비해 U-238의 함량이 적기 때문에 생성되는 Pu 핵종의 양이 적어서 소결체 가장자리에서 출력 및 연소도가 국부적으로 증가하는 현상이 줄어들게 된다[5]. 따라서 INFRA-Th에서는 ThO_2-UO_2 핵연료용 모델을 개발하여 사용하였으며 그림 2와 3에는 새로운 모델과 노심 코드 HELIOS의 예측 결과에 대한 비교가 나타나 있다

4. IFA-652.1 5번 핵연료봉 노내 거동

그림 4,5,6에는 실험 중 측정된 4/5번 핵연료봉의 평균 출력 및 중심온도, 봉내압의 변화가 나타나 있다. 출력은 4번 핵연료봉이 5번 핵연료봉에 비해 약 10% 정도 높게 나타났지만 실험 시작 후 약 60여일부터 5번 핵연료의 중심 온도가 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 낮은 연소도로 인해 핵분열 기체 방출과 같은 현상이 없다고 볼 때 초반에 발생한 고밀화 현상에 의해 나타난 차이로 판단된다.

즉 5번 핵연료봉이 4번 핵연료봉에 비해 더 많은 고밀화 현상이 발생하였기 때문에 4번 핵연료봉에 비해 넓은 갭이 존재하였고 동일 출력에서도 핵연료의 온도가 더 높게 나타나게 된다. 이러한 현상은 봉내압 측정자료에서도 알 수 있는데 동일한 출력 구간에서 4번 핵연료봉에 비해 5번 핵연료봉의 압력이 더욱 급격히 감소하고 있는 것은 급격한 고밀화로 인해 봉내 자유공간이 더욱 빨리 늘어나고 있는 것을 나타낸다.

일반적으로 고밀화 현상은 봉내압 측정자료로부터 계산하거나 핵연료 길이의 변화를 측정하여 최대 고밀화량 및 최대 고밀화가 발생한 시점을 결정할 수 있지만 현재 발표된 실험자료는 봉내압에 영향을 끼칠 수 있는 부수적인 요인(ex: bellows creep)들에 대한 정확한 평가가 이루어지지 않았기 때문에 봉내압 자료를 이용한 고밀화 현상에 대한 정량적인 평가는 불가능하였으며 5번 핵연료봉은 핵연료 길이 변화를 위한 측정 장비가 장착되지 않았기 때문에 4번 핵연료봉에 대한 최대 고밀화량만을 평가하였다.

4번 핵연료봉에서 측정된 핵연료 길이의 변화에서는 약 4㎜의 핵연료 길이 감소가 발생한 것으로 나타났으며 핵연료 전체 길이를 고려할 때 약 2.6 vol%정도의 부피감소가 나타난 것으로 나타났다. 그러나 5번 핵연료봉에서는 고밀화 현상이 더 많이 일어난 것으로 나타났으며 봉내압의 자료를 비교할 때 대략 1.2배 정도의 고밀화가 발생한 것으로 판단된다.

5. INFRA-Th 입력 작성

IFA-652.1 4/5번 핵연료봉의 실험 자료를 활용하여 INFRA-Th 코드의 핵연료봉 노내 거동 예측 성능을 검증하였다. 공개된 실험 자료가 핵분열 기체 방출이나 팽윤등의 영향이 거의

나타나지 않은 낮은 연소도 구간이기 때문에 핵연료 온도 예측 및 봉내압 예측등 열적 거동을 중심으로 평가를 수행하였다. 입력자료는 HRP(Halden Reactor Project)에서 발간된 보고서를 위주로 작성되었으며 출력이력 및 축방향 출력변화는 TFDB(Test Fuel Data Bank)에서 추출하여 사용하였다.

그림 7에는 실제 핵연료와 코드 모사를 위해 20개의 axial segment로 분할된 핵연료 구조와 함께 TFDB에서 제공되는 축방향 출력이 나타나 있다. 4개 구간에서 각 구간의 평균치로 제공되는 출력은 모사된 핵연료 구조에 그대로 입력되며 입력된 출력을 바탕으로 코드내에서 각각의 axial node에 맞게 출력을 계산하게 된다.

그러나 TFDB에서 제공하는 실제 측정치는 매 15분 마다 측정된 자료로서 직접적으로 코드의 입력으로 활용하기에는 너무 방대한 양의 자료이기 때문에 별도의 프로그램을 통하여 코드에 활용 가능한 범위로 추출/축약하는 과정을 필요로 하며 그림 8에는 이와 같은 과정을 거쳐 추출된 출력이력과 실제 출력이력이 비교되어 있다.

팽윤 계산을 위해 입력하는 swelling rate의 양은 Halden에서 제안하는 UO_2 핵연료의 값을 그대로 적용하였으나 연소도가 매우 낮아 팽윤의 영향이 거의 없기 때문에 오차는 무시할 수 있다.

팽윤 이외에 핵연료 온도에 영향을 끼칠 수 있는 주요 값들(반경방향 출력분포, 고밀화량, 핵연료 열전도도, 재배치량)은 초기 입력조건과 출력 이력을 토대로 INFRA-Th의 성능모델들에 의해 계산되는 값을 사용하였으며 측정된 핵연료의 온도는 코드에서 계산된 18번째 axial node의 중심온도와 비교하였다.

6. 결과 및 논의

그림 9와 10에는 실험 시작시 start-up기간중 측정된 핵연료 중심온도와 INFRA-Th 코드의 온도 예측치가 나타나 있다. 비교결과 두 핵연료봉 모두 측정치와 예측치가 잘 일치하는 것으로 나타나고 있는데 이러한 결과는 코드에서 예측한 초기 열전도도, 초기 갭 넓이 그리고 초기 운전 조건들이 적절하게 계산되고 있는 것을 나타낸다.

그러나 어느 정도 연소가 진행된 후 수행된 ramp test시의 온도예측 결과는 4/5번 핵연료봉 모두 실측치에 비해 낮은 온도를 예측하고 있는 것으로 나타났다(그림 11, 그림 12).

낮은 온도 예측의 원인 중 핵분열 기체 방출에 의해 감소하는 충진가스의 열전도도를 높게 평가하거나 소결체 열전도도의 변화를 높게 평가하는 등의 영향은 실험이 수행된 연소도가 매우 낮기 때문에 무시할 수 있으며 연소 초기에 변화하는 갭 넓이에 대한 정확한 예측이 이루어지지 않았기 때문에 발생한 오차로 판단된다.

일반적인 UO_2 상용핵연료의 경우 초기 갭 넓이가 대략 170㎛이며 고밀화 현상이 크지 않기 때문에 연소 초기 일부를 제외하고는 갭이 꾸준히 감소하는 것으로 나타나지만 4/5번 핵연료봉은 초기 밀도가 매우 낮아 고밀화 현상이 UO_2 핵연료에 비해 크게 발생하였으며 핵연료의 열팽창 또한 UO_2 핵연료에 비해 작기 때문에 실험 수행 기간 내내 코드가 계산하는 갭의 넓이가 180㎛이상인 것으로 나타났다. 여기서 INFRA-Th에 사용되고 있는 재배치 모델은 다양한 UO_2 핵연료 실험 자료를 이용한 검증결과 180㎛이 넘는 갭에서는 추가적인 relocation factor를 고려하도록 되어있으며 UO_2 핵연료의 경우 통상적으로 0.6의 값을 사용한다.

그림 13과 14에는 넓어진 갭을 고려하여 0.6의 relocation factor를 사용하여 재계산을

수행한 결과가 나타나있는데 4번 핵연료봉의 경우 실측된 온도와 잘 일치하는 것으로 나타났지만 5번 핵연료봉은 조금 낮은 온도를 예측하는 것으로 나타났으며 이는 5번 핵연료봉에서 더욱 많이 발생한 고밀화 현상을 실제보다 적게 평가하였기 때문이다.

INFRA-Th에서는 초기 밀도를 이용하여 최대 고밀화량을 계산하도록 되어 있으며 두 핵연료 모두 초기 밀도가 82%TD로서 최대 2.5 vol%의 부피 변화를 예측하였다. 4번 핵연료봉은 핵연료 길이 변화 자료를 통하여 2.6 vol%의 부피변화가 나타난 것이 확인되었으며 코드의 예측치와 잘 일치하지만 5번 핵연료봉은 4번 핵연료봉에 비해 많은 고밀화현상이 발생하여 코드의 예측결과와 다소 차이가 발생하였다.

그림 15와 16에는 두 핵연료봉의 봉내압 측정자료와 코드의 예측치가 비교되어 있다. 온도 결과와 마찬가지로 4번 핵연료봉의 봉내압 예측은 측정치와 잘 일치하고 있으나 5번 핵연료 봉의 측정치는 측정치에 비해 약간 높게 나타나고 있으며 이 또한 고밀화량을 적게 평가하는 데서 오는 오차이다.

7. 결 론

개발된 INFRA-Th를 이용하여 Halden에서 수행되고 있는 IFA-652.1 4/5번 핵연료봉에 대한 노내 거동을 분석하고 온도 및 봉내압에 대한 예측 성능을 검증하였다. 노내 거동 분석결과 두 핵연료봉 모두 낮은 초기 밀도로 인해 고밀화가 크게 발생한 것으로 나타났으며 초기 온도 결정에 크게 영향을 끼친 것으로 나타났다.

INFRA-Th를 이용한 4번 핵연료봉에 대한 성능 예측 검증에서는 ThO_2-UO_2 핵연료의 큰 고밀화와 작은 열팽창으로 인해 증가한 갭을 고려하여 계산한 결과 온도 및 봉내압을 정확히 예측하는 것으로 나타났다

그러나 5번 핵연료봉의 경우에는 코드가 예측한 일반적인 고밀화에 비해 큰 고밀화가 발생하였기 때문에 실측치에 비해 낮은 중심 온도와 높은 봉내압을 예측하였으나 추후 정확하게 평가된 봉내압 및 대량의 고밀화현상에 대한 분석자료가 추가될 경우에는 5번 핵연료봉의 노내 거동 또한 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단되며 고연소도에서의 실험 자료가 지속적으로 확보되면 팽윤, 핵분열 기체 방출과 같은 여러 현상들에 대한 종합적인 분석 및 검증도 수행될 것이다.

후 기

이 논문을 위해 측정 데이터 분석에 많은 도움을 주신 이병호 박사님께 감사드립니다.
본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

8. 참고 문헌

[1] C.B. Lee et al., "Evaluation of (Th,U)O_2 Fuel Usage in PWR", GLOBAL 2001, Paris, France (2001)

[2] 이찬복 외, “UO_2 핵연료봉 성능 분석코드 INFRA 개발”, 2001 추계학술대회 논문집, 227, 2001

[3] J. Belle and R.M. Berman, Thorium Dioxide: Properties and Nuclear Applications,

DOE/NE-0060, August 1984.
[4] Y. Yuan, P. Monnier, C.S. Rim and M.S. Kazimi, "Fission Gas Release Modeling for Thoria-Urania Fuels: A Preliminary Investigation", MIT-NFC-TR-022, 2000
[5] 이찬복 외, “경수로용 (Th,U)O_2 핵연료의 연소 특성 분석”, 2000 춘계학술발표대회 논문집, 2000.

표 1. IFA-652.1 핵연료봉 재원

Pellet diameter (mm)	8.19	Clad material	Zr-2
Pellet length (mm)	10.2	Clad inside diameter (mm)	8.36
Pellet density (%TD)	82	Clad outside diameter (mm)	9.5
U235 enrichment (wt%)	93	Clad thickness	0.57
ThO_2 contents (%)	88.3	Diametral gap (mm)	170
Dish depth (mm)	9.84e-3	initial gas/pressure (atm)	He/10
Dish spherical radius (mm)	18.1	Thermocouple diameter (mm)	1.8

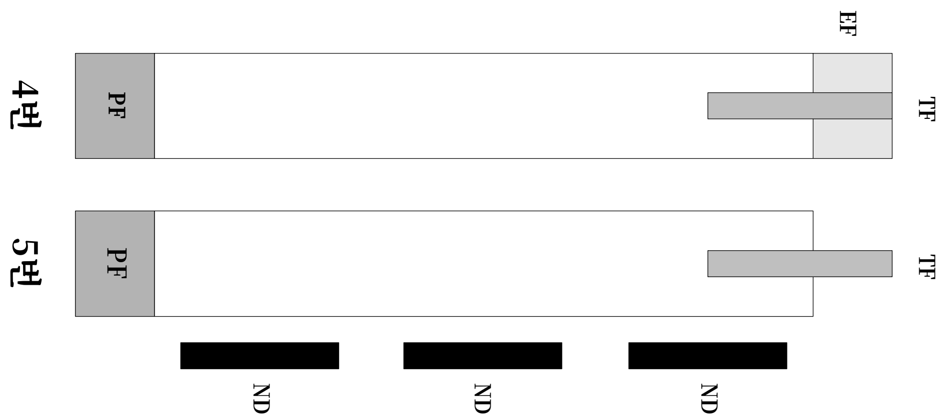

그림 1. IFA-652.1 4번,5번 핵연료봉 개략도

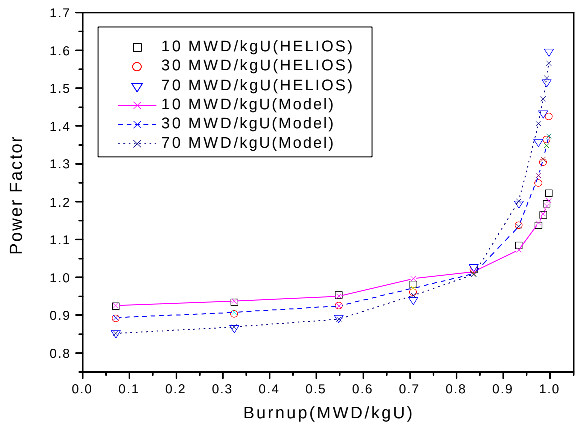

그림 2. INFRA-Th 핵연료 반경방향 출력분포 모델 평가

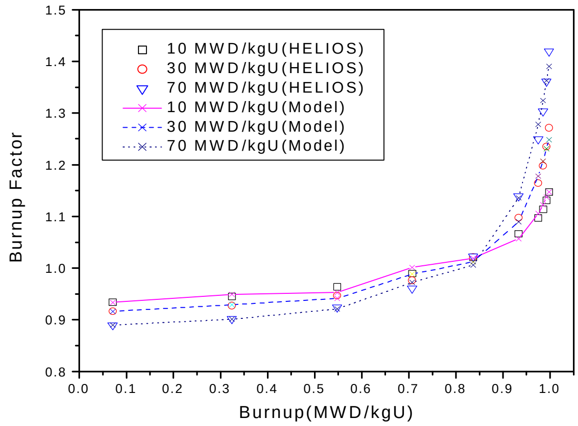

그림 3. INFRA-Th 핵연료 반경방향 연소도분포 모델 평가

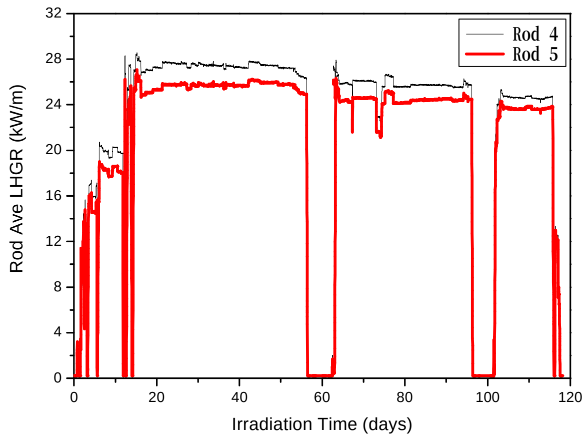

그림 4. 4/5번 핵연료봉의 평균 출력

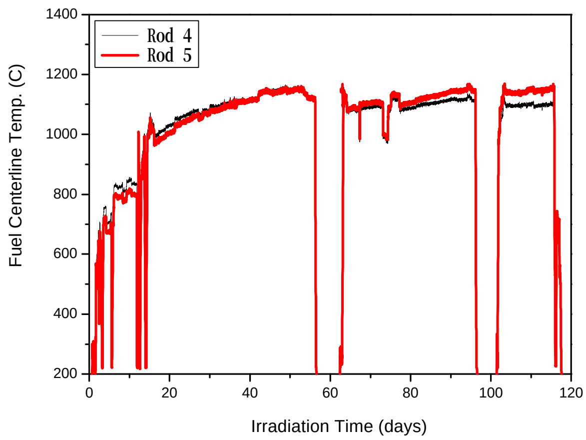

그림 5, 4/5번 핵연료봉 중심 온도의 변화 (측정치)

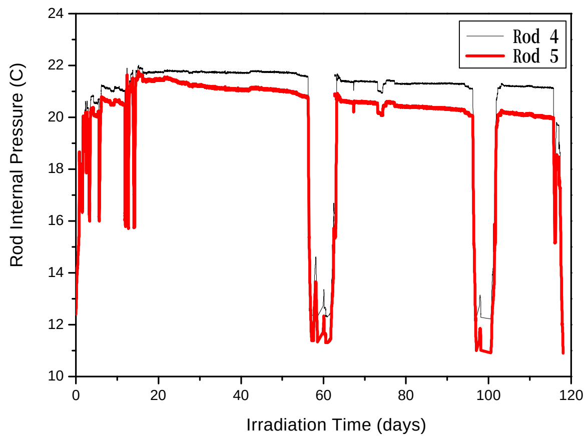

그림 6. 4/5번 핵연료봉 봉내압의 변화 (측정치)

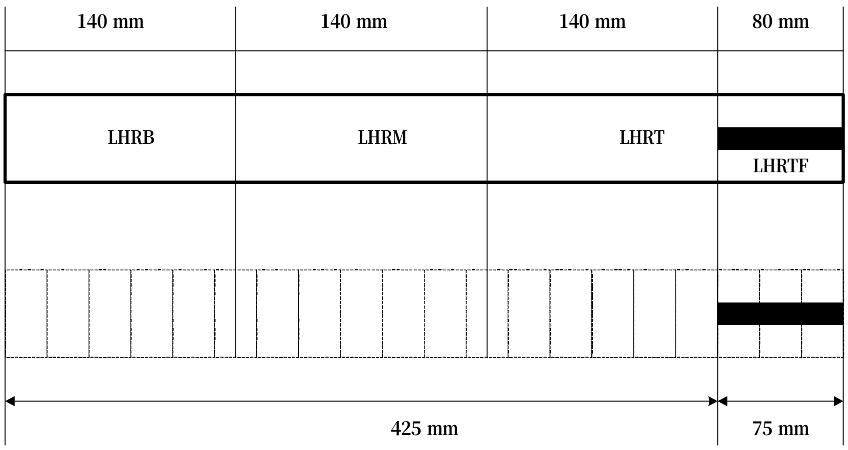

그림 7. 측정된 축방향 출력 분포의 적용과 모사된 핵연료 구조

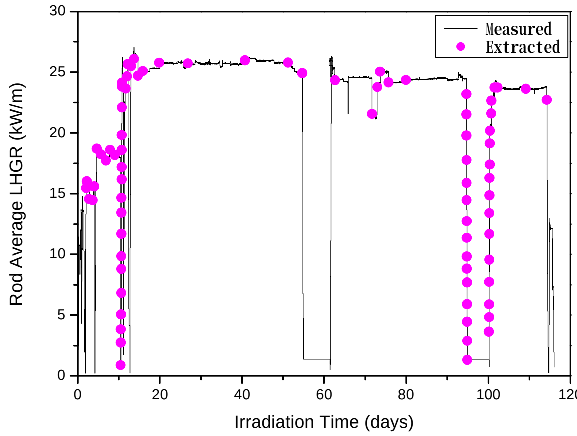

그림 8. 측정된 핵연료봉 평균 출력과 INFRA-Th에 사용된 평균 출력 (Rod 5)

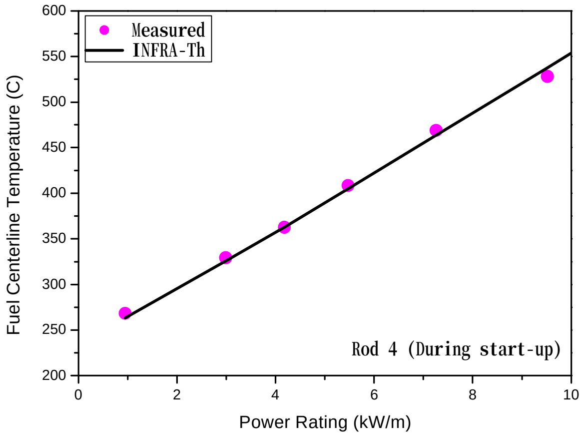

그림 9. start-up 기간동안 출력에 따른 핵연료 중심 온도의 변화 (Rod 4)

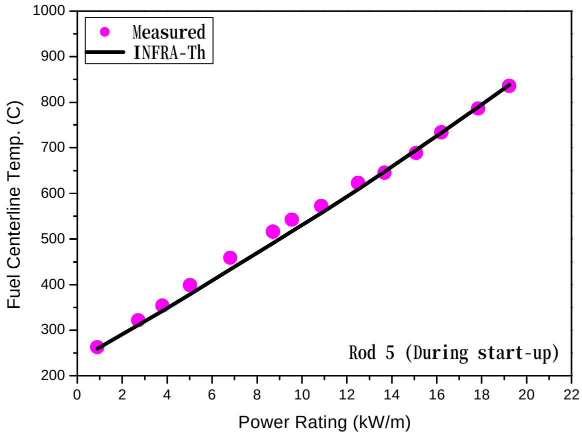

그림 10. start-up 기간동안 출력에 따른 핵연료 중심 온도의 변화 (Rod 5)

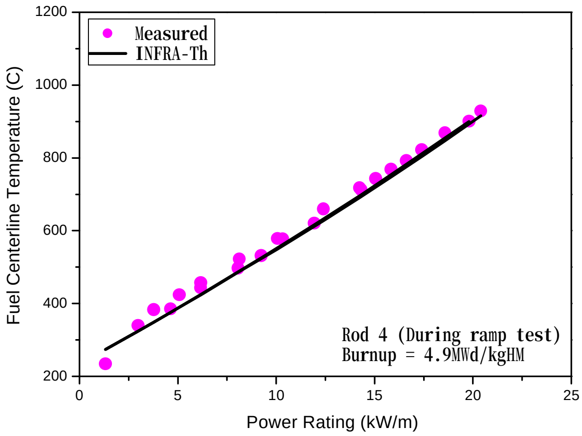

그림 11. ramp test시 출력에 따른 핵연료 중심온도의 변화 (Rod 4)

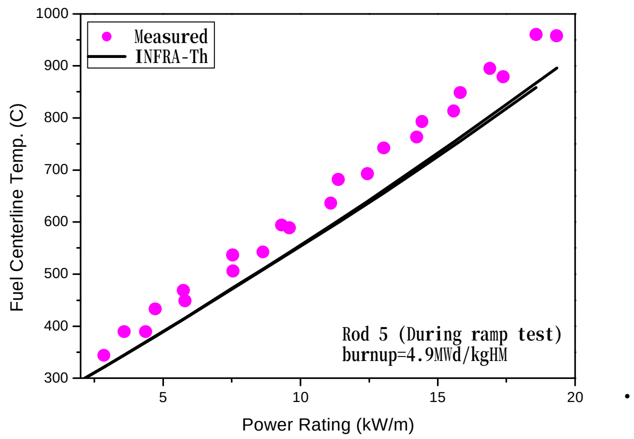

그림 12. ramp test시 출력에 따른 핵연료 중심온도의 변화 (Rod 5)

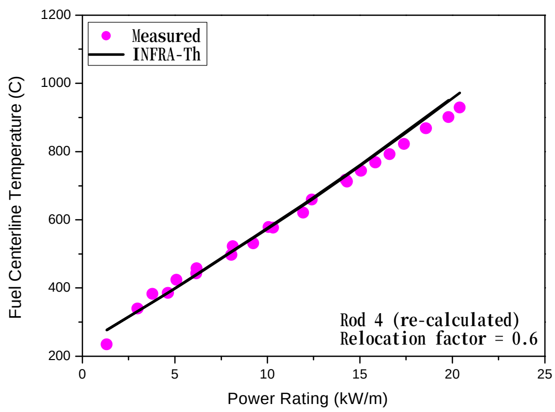

그림 13. ramp test시 INFRA-Th 재계산 결과 (relocation factor = 0.6, Rod 4)

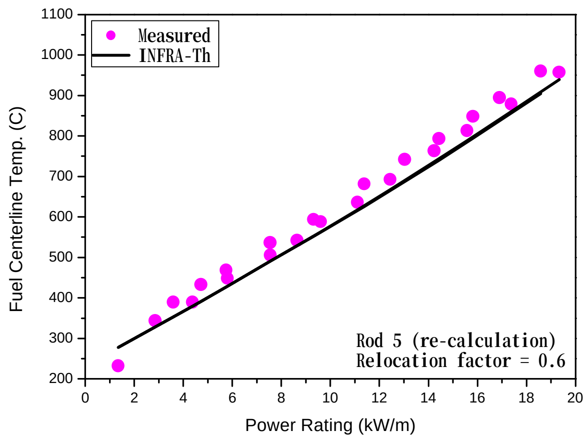

그림 14. ramp test시 INFRA-Th 재계산 결과 (relocation factor = 0.6, Rod 5)

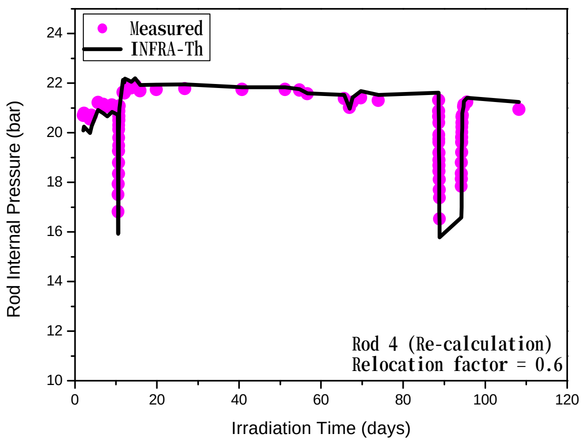

그림 15. 측정된 봉내압과 INFRA-Th 봉내압 예측치 (relocation factor = 0.6, Rod 4)

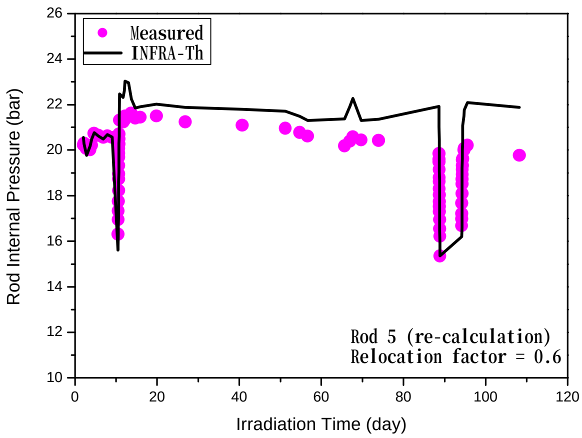

그림 16. 측정된 봉내압과 INFRA-Th 봉내압 예측치 (relocation factor = 0.6, Rod 5)