‘2003 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

재장전 핵연료 시험자료를 이용한 INFRA 검증
(Verification of INFRA By Using Re-instrumented Fuel Test Results)

양용식, 이찬복, 김대호, 김영민, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 사서함 105호 305-600

요 약

상업용 원자로에서 68MWd/kgU, 57MWd/kgU까지 각각 연소된 핵연료들을 사용하여 제작되었으며 Halden 원자로에서 70MWd/kgU 이상의 연소도까지 재조사 시험이 수행된 두 개의 재장전 핵연료의 시험 결과를 이용하여 INFRA를 검증하였다. 두 연료봉 모두 핵연료 중심온도 측정을 위한 열전도대를 장착하였으며 봉내압 측정을 위한 압력계를 장착하였다.

검증을 위해서 상업용 원자로에서의 base irradiation 뿐만 아니라 연구로에서의 재장전 핵연료 시험을 평가할 수 있도록 INFRA를 개선하였다.

Base irradiation에 대한 정보와 초기 설계자료를 이용한 기존의 INFRA 예측치는 base irradiation 후에 수행된 조사후시험 결과와 잘 일치하였다.

상세한 제작 자료 및 운전 이력을 바탕으로 계산한 재장전 핵연료 시험의 중심온도, 핵분열 기체 방출량, 봉내압, 반경방향 연소도 분포 측정치 또한 개선된 INFRA가 정확히 예측하고 있는 것으로 나타났다.

Abstract

Two re-instrumented rods test results which were base-irradiated in commercial reactor up to 68MWd/kgU, 50MWd/kgU respectively and re-instrumented and then re-irradiated above 70MWd/kgU burnup in Halden reactor are used to verify INFRA. Both rods were equipped with a thermocouple to measure centerline temperature and with pressure gauge to measure rod internal pressure.

To verification, INFRA was modified to analysis re-instrumented fuel test in research reactor as well as base irradiation in commercial reactor.

With base irradiation information and fabrication data, existing INFRA shows good agreement with PIE results which performed after base irradiation. By using well characterized re-instrumentation information and exact power history, prediction of modified INFRA shows good agreement with measured centerline temperature, fission gas release, rod internal pressure and radial burnup distribution.

1. 서 론

경수로용 UO_2 핵연료의 고연소도/장주기 운전시 핵연료의 건전성 평가와 제반 문제점 해결을 위해서는 고연소도 환경하에서의 핵연료 시험 자료 확보가 필수적이다. 현재 HRP(Halden Reactor Project)를 비롯한 여러 핵연료 시험들은 짧은 시간에 고연소도 핵연료의 거동을 관찰하기 위하여 재장전(Re-instrument) 핵연료를 이용한 시험이 수행되고 있다.

일반적으로 재장전 핵연료는 상업용 원자로에서 연소 종료 후 인출된 핵연료를 이용하여 제작된 핵연료로서 노내 거동 관측에 필요한 여러 장비를 장착하고 있다. 그러나 기존에 개발된 UO_2 핵연료 성능평가 코드인 INFRA는 재장전 핵연료의 거동을 모사할 수 없기 때문에 재장전 핵연료를 이용하여 생산되는 다양한 데이터베이스를 이용한 검증 작업을 수행하는데 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 INFRA를 개선하여 재장전 핵연료의 노내 거동을 모사할 수 있도록 하였으며 HRP에서 수행된 재장전 핵연료 노내 시험 자료를 이용하여 INFRA 코드의 검증을 수행하였다.

2. Base irradiation 및 노내 시험 거동

2.1 핵연료봉 제작

1번 핵연료봉

1번 핵연료봉 제작에 사용된 핵연료는 ABB사의 8×8형 표준 BWR 핵연료로서 12주기에 걸쳐 Ringhals 1 원자로에서 연소된 후 인출되었으며 인출시 봉평균 연소도는 59MWd/kgU에 도달하였다. 핫셀로 이송된 핵연료는 핵분열 기체 방출량, 피복관 외면 산화막 두께 및 핵연료 반경등을 측정하였다. 표 1에는 수행된 조사후 시험의 결과가 나타나 있다.

1번 핵연료 제작을 위하여 축방향 연소도를 측정한 결과 첨두 연소도 68 MWd/kgU 부근의 핵연료 384㎜를 절단하여 핵연료 중심 온도 측정을 위해 핵연료 상단에 지름 2.5㎜, 깊이 45㎜의 구멍을 뚫어 열전도대를 삽입하였으며 핵연료봉 하단에 봉내압 측정을 위한 압력계를 장착하였다[1].

2번 핵연료봉

2번 핵연료봉 제작에 사용된 핵연료는 ABB사의 17×17형 표준 PWR 핵연료로서 Rinhals 3 원자로에서 연소되었다. 핵연료봉 제작전에 수행된 상세한 조사후시험 결과는 입수하지 못하였으나 핵분열 기체 방출은 2% 이하인 것으로 알려졌으며 봉평균 연소도는 55.6 MWd/kgU에 도달한 것으로 밝혀졌다.

2번 핵연료봉은 1번 핵연료봉과 동일하게 핵연료 중심온도 측정을 위한 열전도대와 압력계를 장착하였으며 연소도가 57MWd/kgU 인 핵연료 360㎜를 절단하여 제작되었다[2].

2.2 Base irradiation

Base irradiation 기간동안의 두 핵연료봉의 출력 이력은 비교적 상세하게 알려져 있으며 200 W/cm이하의 출력으로 운전되었다. 운전 중 축방향 출력의 변화는 핵연료 하단/중간/상단에서의 출력으로 제공되었으며 운전 기간중 축방향 출력의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

2.3 Halden 조사 시험

제작된 두 핵연료봉은 서로 다른 test rig에 장전되었으며 각각 100, 75여일동안 조사시험이 수행되었다. 앞에서 언급한 바와 같이 두 핵연료봉 모두 핵연료 열전도대와 압력계를 장착하고 있었지만 1번 핵연료봉은 68.3 MWd/kgU 연소도에서 봉내압이 압력계의 측정 한계를 넘어섰기 때문에 정확한 봉내압은 측정하지 못하였다[1].

2.4 조사후 시험

시험이 종료된 1번 핵연료봉은 조사후 시험이 수행되었다. 핵분열 기체 방출량 측정결과 약 16%의 핵분열 기체 방출이 관찰되었으며 반경 방향 연소도 분포 또한 측정되었다. 2번 핵연료봉에 대한 조사후 시험은 곧 수행될 예정이며 봉내압을 통한 평가 결과 낮은 핵연료 온도를 유지하였기 때문에 핵분열 기체의 방출은 거의 없는 것으로 나타났다.

3. 재장전 핵연료 모사를 위한 INFRA 개선

일반적인 노내 시험용 핵연료봉은 fresh fuel 및 피복관을 사용하여 핵연료를 제작하고 열전도대, 압력계, 반경변화 측정을 위한 sensor등을 장착하게 된다. 그러나 재장전 핵연료봉은 상업용이나 연구로용 원자로에서 연소가 끝난 핵연료봉을 이용하여 제작한 시험 연료봉으로서 일반 시험 연료봉과는 다른 여러 특성을 지니게 된다.

핵연료 성능 평가 코드를 이용한 평가 및 검증을 수행할 때에는 초기 핵연료 설계 자료 및 운전 조건, 출력 이력등을 이용하여 계산을 수행하게 되며 지속적으로 변화하는 핵연료의 거동을 계산하게 된다. 그러나 재장전 핵연료는 시험 핵연료봉 제작시점에서 핵연료 형태 및 설계 조건이 변하며 base irradiation이 수행된 원자로의 운전조건과 시험이 수행될 원자로의 운전 조건이 상이하기 때문에 이에 대한 변화를 모사할 수 있도록 코드의 개선이 필요하다.

따라서 재장전 핵연료의 거동을 모사할 수 있도록 INFRA를 개선하였으며 base irradiation 기간동안의 계산은 기존의 INFRA를 사용하였다.

그림 1에는 개선된 INFRA의 개략적인 흐름도가 나타나 있다. Base irradiation 기간동안의 계산 결과와 함께 새로운 조건에 대한 입력자료들을 초기 입력 조건으로 활용할 수 있도록 하였다.

4. INFRA 코드 및 입력 작성

4.1 INFRA 코드

INFRA는 고연소도 UO_2 핵연료의 성능 평가를 위해 개발된 코드로서 steady-state 및 slow transient 환경하에서의 핵연료 노내 거동을 모사할 수 있다. INFRA에 사용된 주요 열적 거동 모델은 다음과 같다.

고밀화 모델

고밀화 현상은 핵연료 제작시 존재하는 기공이 고에너지 핵분열 파편에 의해 파괴되면서 핵연료의 부피가 감소하고 밀도는 증가하는 현상이며 일반적으로 고밀화 현상은 초기 밀도, 기공 크기의 분포, 핵분열 밀도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

INFRA에 사용된 고밀화 모델은 fine pore 및 coarse pore의 분율을 고려하여 초기 밀도의 함수로서 최대 고밀화량을 계산할 수 있도록 하였으며 최대 고밀화량은 10 MWd/kgU으로 설정되어 있다[3].

팽윤 모델

핵분열이 진행되면서 소비되는 우라늄 원자에 비해 생성되는 핵분열 생성물들을 부피가 더 크기 때문에 핵연료의 부피는 점점 증가하게 되는데 이를 팽윤 현상이라 한다. 팽윤 현상은 핵연료 설계 및 운전 환경과 무관하게 연소도에 따라 선형적으로 증가하며 INFRA에서는 이러한 0.6 vol% per 10 MWd/kgU의 팽윤율을 기본값으로 사용하고 있으나 고연소도 환경하에서 증가하는 기체팽윤의 모사를 위해 연소도별 팽윤율을 입력할 수 있도록 하고 있다[3]. 그림 2에는 고밀화 모델과 팽윤 모델의 검증 결과가 나타나 있다.

열전도도 모델

INFRA에 사용되고 있는 핵연료 열전도도 모델은 KAERI에서 개발한 열전도도 모델과 2000년 제안된 Halden 열전도도 모델이 사용되고 있다[4].

핵분열 기체 방출 모델

INFRA의 핵분열 기체 방출 모델은 핵분열 기체가 방출되기 까지의 거동을 결정립내에서 생성된 핵분열 생성 기체가 결정립 경계로 이동하기 까지의 단계와 결정립계에 도달한 핵분열 기체가 외부로 방출되기 까지의 두 단계로 나누어 모사하고 있으며 결정립 크기의 변화를 고려할 수 있도록 독자적으로 개발된 모델을 채택하고 있다. 그림 3에는 그동안의 연구를 통하여 검증된 INFRA 핵분열 기체 방출 모델의 결과가 나타나 있다[3].

4.2 Base irradiation

재장전 핵연료의 정확한 노내 거동 예측을 위해서는 base irradiation 기간 동안의 거동에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다. 입수된 원자로 환경, 핵연료 설계 자료, 운전 중 봉평균 출력 및 축방향 출력변화 자료를 이용하여 INFRA의 입력을 작성하였으며 INFRA의 기본 성능 모델들을 사용하여 계산을 수행하였다.

1번 핵연료봉에 대한 INFRA의 계산결과 핵분열 기체 방출량, 피복관 외면 산화막 두께, 핵연료 평균 반경은 각각 4.7%, 38.5μm, 12.21㎜로 나타났다. 소결체/피복관 갭은 20μm 정도인 것으로 계산되었다. 핵분열 기체 방출량은 측정치보다 조금 높게 나타났으며 산화막의 두께는 5μm정도 높게 나타났는데 데이터베이스에서 제시하고 있는 운전 중 피복관 온도를 INFRA의 계산치가 조금 높게 예측하기 때문인 것으로 판단된다.

2번 핵연료봉에 대한 INFRA 계산결과 약 1.8%의 핵분열 기체가 방출된 것으로 나타났으며 소결체/피복관의 갭은 접촉되어 있는 것으로 나타났다. 2번 핵연료 제작 보고서에서도 2% 이하의 핵분열 기체가 방출되었으며 갭이 접촉되어 있는 것으로 나타났다.

4.2 재장전 조사 시험

재장전 핵연료에 대한 입력자료를 작성하기 위해서는 시험 핵연료봉 제작 보고서를 활용하였다. 시험 기간중 봉평균 출력이력 및 축방향 출력의 변화는 TFDB(Test Fuel Data Bank)를 사용하였지만 데이터베이스에 포함되어 있는 자료가 너무 방대하기 때문에 INFRA의 입력 가능 범위내로 축약하였다. 핵연료 하단/중간/열전도대끝/상단 위치에서 주어지는 축방향 출력의 분포는 제공된 위치에서 그대로 INFRA에 입력하였으며 각 축방향 segment의 출력은 주어진 위치에서의 출력을 이용하여 내삽하여 사용한다.

1번 핵연료봉은 전체 핵연료길이 384㎜를 8개의 동일한 길이를 가진 segment로 분류하여 계산을 수행하였으며 8번째 segment의 중심 온도와 측정된 온도를 비교하였다. 이때 실제 열전도대가 삽입되어 있는 길이와 8번째 segment의 길이가 약 3㎜의 오차가 발생하지만 전체 핵연료 길이를 고려할 때 거의 무시할 수 있다.

2번 핵연료봉은 전체 길이 360㎜를 9개의 segment로 분할하여 9번째 segment의 중심온도와 비교하였다. 이때에도 약간의 오차가 발생하기는 하지만 거의 영향을 끼치지 않는다.

원자로 운전 환경은 Halden 원자로의 기본값을 사용하였는데 냉각수는 D2O를 사용하였으며 냉각수 온도, 압력 및 유속은 각각 240°C, 34bar, 자연대류 조건이다.

5. 코드 검증 결과

그림 4와 5에는 INFRA를 이용하여 계산한 1번 핵연료봉의 핵연료 중심온도와 측정된 핵연료의 온도가 나타나 있다. 전 시험 구간에 걸쳐 5% 이내로 잘 일치하는 것으로 알 수 있다. 그림 6에는 시험 초기 두 번의 power-ramp 시험시 측정된 핵연료 중심온도와 코드의 예측치가 나타나 있는데 이 또한 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 실험 시작시 수행되는 power ramp 시험중 측정되는 중심 온도와 측정치가 잘 일치하는 것은 INFRA의 초기 갭 넓이 및 갭 환경, 소결체 열전도도에 대한 평가가 정확한 것을 의미한다.

그림 7과 8에는 시험 종료후 수행된 PIE를 통하여 측정된 핵분열 기체 방출량과 반경방향 연소도 분포가 코드의 예측치와 함께 나타나 있다. 핵분열 기체 방출량은 코드가 다소 높게 평가하고 있는 것으로 나타났으나 반경 방향 연소도는 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

그림 9에는 1번 핵연료봉과 마찬가지로 시험 초기에 수행된 power up-ramp시에 측정된 2번 핵연료봉의 중심온도의 코드의 예측치가 나타나 있는데 이 결과 역시 측정치와 잘 일치하고 있으나 다소 높게 예측하는 것으로 나타났다.

그림 10에 나타난 전체 시험구간의 핵연료 중심온도와 코드의 예측치에서도 코드의 예측치가 실측치에 비해 다소 낮은 값을 예측하고 있는 것을 알 수 있는데 다음과 같은 이유 때문인 것으로 판단된다.

그림 11에서 보면 2번 핵연료봉의 봉평균 출력이력과 측정된 핵연료 온도의 변화가 나타나 있는데 거의 일정한 출력에서 핵연료의 온도가 지속적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 코드의 예측은 출력이 일정할 경우 거의 동일한 온도를 예측하기 때문에 측정치와의 오차가 커지는 현상이 발생한 것이다.

연소도가 증가하는 핵연료에서 출력이 일정한 경우, 핵연료의 온도가 감소하는 현상은 갭 접촉이 발생하여 열전달이 증가하는 경우에 나타나기도 하지만 2번 연료봉의 경우 핵연료 제작당시에도 갭이 접촉되어 있었기 때문에 이러한 현상은 발생 할 수 없다. 시험 결과 보고서에서도 출력 및 온도 측정의 오차, 소결체 내부의 핵분열 기체 방출로 인한 소결체 열전도도의 개선등 온도가 하강하는 다양한 가능성을 고려하였지만 모두 영향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 2번 핵연료봉의 온도 거동에 대한 정확한 이유를 판단하기 위해서는 정확한 조사후시험 자료가 확보되야 할것으로 판단된다.

그림 12에는 2번 핵연료봉의 봉내압 측정치와 코드의 예측치가 나타나 있는데 다소 높은 봉내압을 예측하고 있으며 이는 핵연료의 온도를 높게 평가하기 때문이다.

6. 결 론

Halden에서 수행된 두 개의 재장전 핵연료를 이용하여 INFRA의 핵연료 온도, 핵분열 기체 방출등 열적 해석에 대한 검증을 수행하였다. Base irradiation 기간동안의 노내 거동 모사를 위해서는 기존의 INFRA를 사용하였으며 재장전 핵연료 시험자료의 검증을 위해 기조의 INFRA를 개선하여 핵연료 재원 및 운전조건의 변화를 모사할 수 있도록 하였다.

검증 결과, 70MWd/kgU 이상의 연소도까지 핵연료봉의 중심 온도 변화 및 핵분열 기체 방출, 반경방향 연소도 분포 측정치를 INFRA가 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 실측치와 다소 차이를 보인 결과에서는 상세한 조사후 시험 결과가 입수된다면 정확한 예측이 가능할 것으로 판단된다.

7. 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

8. 참고 문헌

[1] K. Ranta-Puska, "Fission gas release at Burnups from 50 to 90 MWd/kgUO2", EHPG, HPR-349. 1998

[2] IFE/KR/F-99/032. March 1999.

[3] C.B. Lee, "Improvement and Validation of Fuel Rod Performance Analysis Code, INFRA", IAEA CRP FUMEX-II Research Coordination Meeting, 2002, Vienna.

[4] 양용식 외, “INFRA 코드의 핵연료 온도 예측 성능 평가”, 2001 한국원자력학회 추계학술발표대회.

표 1. 1번 핵연료봉 base irradiation 조사후 시험 결과

	FGR(%)	Oxide (μm)	Clad Dia.(mm)
Measured	2.5 ~ 3.3	43	12.21 ~ 12.25

표 2. Base irradiation 계산 후 전달되는 결과와 변경되는 입력 자료

전달되는 계산 결과	변경되는 입력 자료
반경 방향 핵종 및 연소도 분포	충진가스 종류 및 압력
반경 방향 핵분열 생성물의 분포	핵연료 구조 (열전도대 모사)
반경 방향 기공 분포	핵연료 길이 및 반경
Cumulative FGR	냉각수 압력, 온도, 유량, 종류
변경된 핵연료 재원	초기 연소도
피복관 외면 산화막	갭 넓이

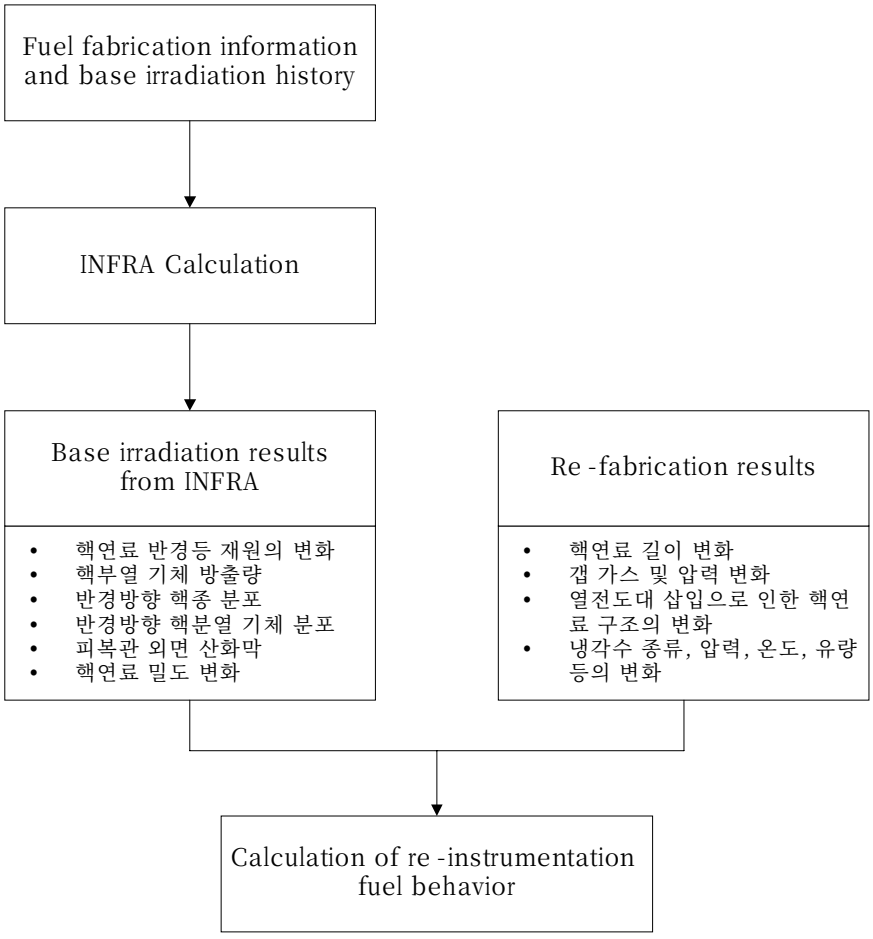

그림 1. 재장전 핵연료 거동 모사 개략도

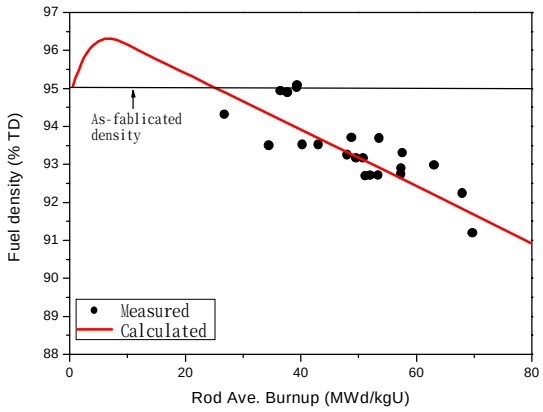

그림 2. INFRA 고밀화 모델 및 팽윤 모델 검증 결과

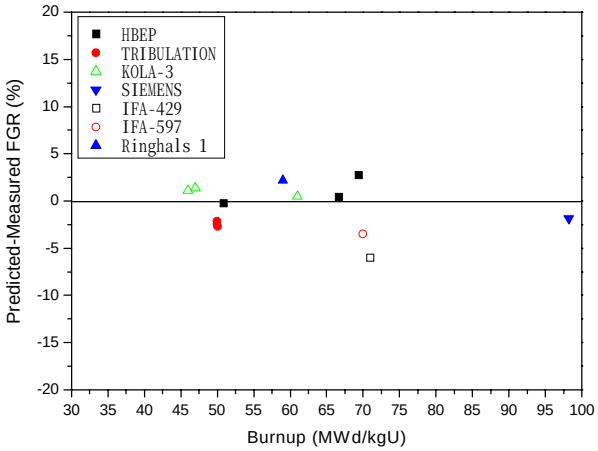

그림 3. INFRA 핵분열 기체 방출 모델 검증 결과

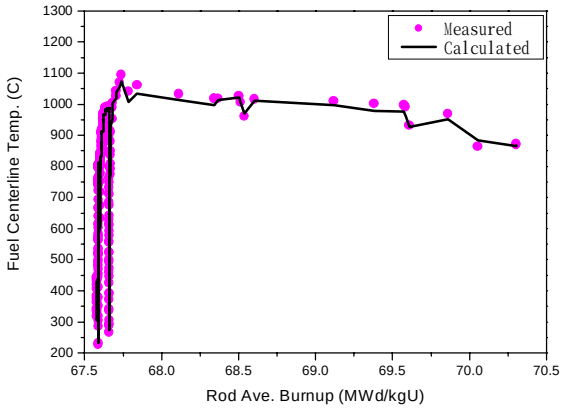

그림 4. 1번 핵연료봉 전 구간 온도 예측 결과

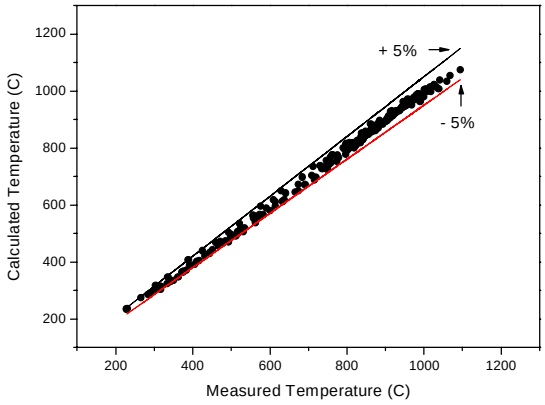

그림 5. 1번 핵연료봉 온도 검증 결과

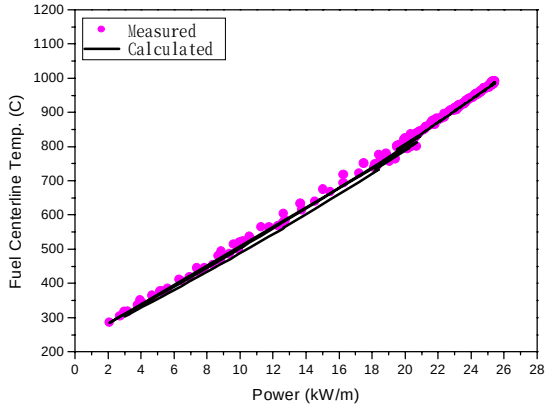

그림 6. 1번 핵연료봉 power-ramp test 결과 및 코드 예측치

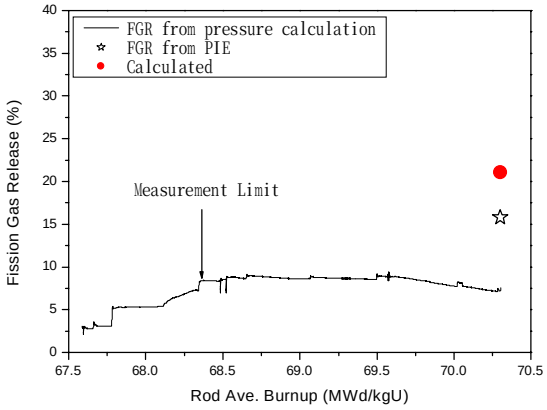

그림 7. 1번 핵연료봉 핵분열 기체 방출량 예측

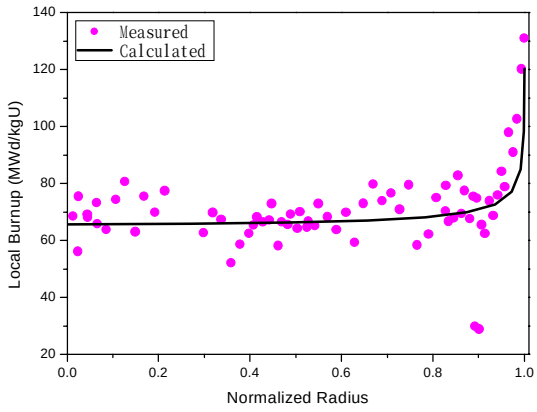

그림 8. 1번 핵연료봉 반경방향 연소도 분포 예측

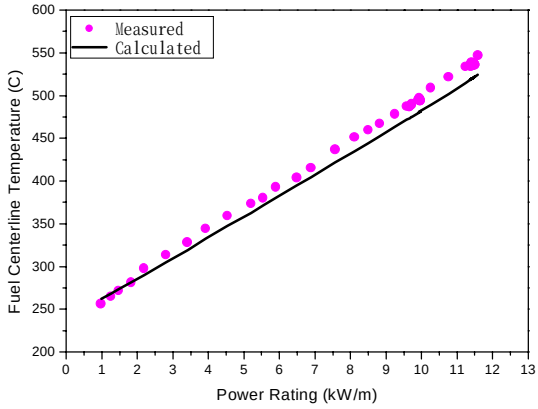

그림 9. 2번 핵연료봉 power-ramp test 결과

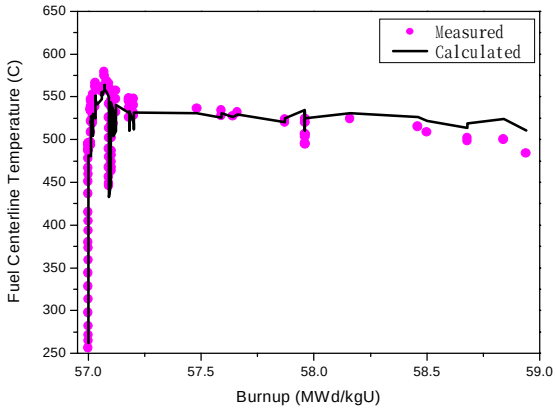

그림 10. 2번 핵연료봉 전 구간 온도 예측 결과

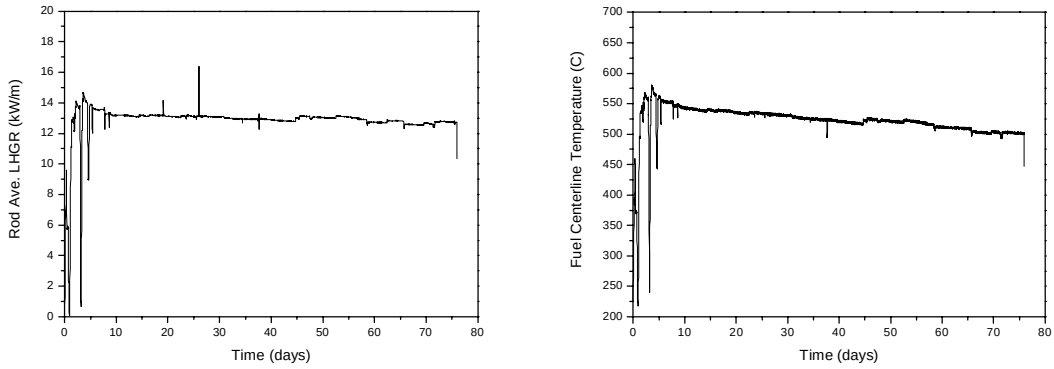

그림 11. 2번 핵연료봉 봉평균 출력이력 및 핵연료 중심 온도의 변화 (측정치)

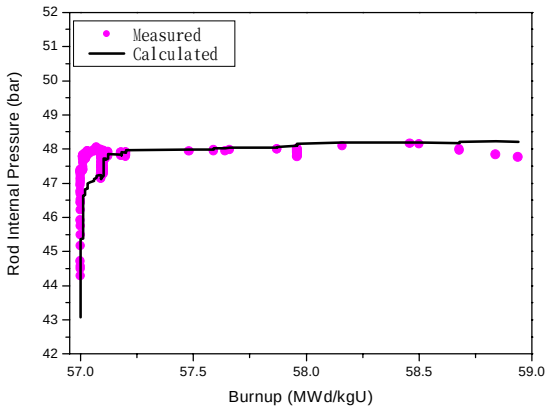

그림 12. 2번 핵연료봉 봉내압 예측 결과