

INFRA 코드의 핵연료 온도 예측 성능 평가
(Assessment of INFRA Code in Fuel Temperature Prediction)

양용식, 이찬복, 방제진, 김대호, 김영민, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 사서함 105호 305-600

요 약

UO₂ 핵연료봉 성능 분석 코드인 INFRA 코드의 핵연료 온도 예측 성능을 평가하기 위해 Halden 연구로에서 핵연료봉의 연소중에 측정된 핵연료 중심 온도 자료와 비교하였다. 핵연료 중심 온도는 소결체의 열전도도도와 소결체/피복관 겹의 열전달계수에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 시험 자료와의 비교 결과 INFRA 코드가 핵연료봉의 온도 변화를 고연소도까지 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

Temperature prediction capability of the UO₂ fuel performance analysis code, INFRA was evaluated by using the measured fuel centerline temperature data in Halden reactor.

It was found that fuel centerline temperature is influenced primarily by thermal conductivity of the pellet and the pellet/cladding gap conductance. Comparison of INFRA prediction results with the measured temperature data showed that INFRA could predict the UO₂ fuel rod temperature up to high burnup reliably.

1. 서 론

노심내의 핵연료는 고온/고압/고방사선 환경하에서 연소되기 때문에 핵연료를 구성하고 있는 소결체와 피복관등의 핵연료 재료들은 많은 열적/기계적 변형을 일으킨다. 핵연료의 열적 거동은 열적변형 뿐만이 아니라 기계적 변형을 야기하는 중요한 원인으로서 작용하기 때문에 이에 대한 정확한 예측은 핵연료 건전성 평가에서 매우 중요하다.

핵연료의 온도는 핵분열 기체 방출, 봉내압의 평가, 핵연료의 열적 변형, 핵연료 용융 판단등 열적 거동 평가에 직접적인 영향을 끼치는 중요한 인자로서 정확한 온도의 예측은 핵연료 성능 평가 코드가 지녀야 할 중요한 요소이다. 본 연구에서는 연소중인 핵연료의 온도를 측정된 Halden 데이터베이스를 이용하여 현재 개발중인 INFRA(Integrated Fuel Rod Analysis) 코드[1]의 온도 예측 성능을 평가하였다.

핵연료 성능 평가 코드의 온도 예측은 소결체 열전도도 모델, 겹열전도도, 고밀화 및 팽윤, 피복관 변형등 여러 성능 모델들에 의해 영향을 받기 때문에 INFRA에 사용된 성능 모델 별로 각각 핵연료 온도에 주는 영향을 평가하였으며, FRAPCON-3 코드[2]의 예측치와

도 서로 비교 하였다

2. Halden 데이터베이스

핵연료 노내 조사 시험을 수행하기 위해 시작된 Halden 프로젝트에 의해 많은 양의 연소 중 핵연료 온도 변화 측정 데이터베이스가 생산되었다. 이 중에서 온도 측정에 대한 정확도가 높고 많은 연구자들에 의해 핵연료 온도 변화 검증용으로 사용되고 있는 세 개의 핵연료봉을 선택하여 본 연구에 사용하였다.

가. IFA-432-3 핵연료봉

IFA-432 핵연료봉들은 모두 3개의 핵연료봉으로 구성되어 있으며 특히 갭 넓이의 차이에 의한 운전중 핵연료의 온도 거동을 실험하기 위하여 다양한 갭 넓이를 가진 동일한 핵연료봉을 사용하여 실험을 수행하였다. 특히 IFA-432-3 핵연료봉은 상업용 핵연료에 비해 매우 작은 g/D ratio(갭넓이와 소결체 지름의 비)를 가지도록 설계되었으며, 연소도 34 MWd/kgU까지 연소되었다. 연소후 인출된 연료봉에 대한 분석결과 15 MWd/kgU에서 갭이 접촉되었으며 비교적 고온으로 운전되었음에도 불구하고 낮은 연소도와 좁은 갭의 영향으로 매우 적은 양의 핵분열 기체 방출이 이루어졌음이 밝혀졌다. 따라서 IFA-432-3 핵연료봉은 열궤환 효과가 거의 나타나지 않았기 때문에 갭의 넓이 변화에 따른 갭 열전도도의 변화에 의해 나타난 핵연료 표면온도의 변화와 연소도 증가에 따른 소결체 열전도도 변화에 의해 핵연료의 온도가 변화한 것으로 밝혀졌다 [3]. IFA-432 연료봉중 실험 데이터의 정확성과 안정성이 가장 뛰어난 3번 연료봉을 사용하여 INFRA의 온도 예측 성능을 분석하였다. IFA-432-3 핵연료봉의 재원은 표 1에 정리되어 있다.

나. IFA-515-A1

1994년에 장전된 IFA-515 집합체는 총4개의 핵연료봉으로 구성되어 있다. IFA-515 집합체는 실험의 목적이 가돌리니아(Gd)의 함량에 따른 열전도도 변화를 측정하기 위한 실험으로서 2개의 연료봉씩 각각 순수 UO_2 핵연료와 Gd가 함유된 핵연료봉을 동일한 조건에서 연소시켰다[4]. 따라서 생산된 4개의 온도 측정 데이터베이스 중에서 순수 UO_2 로 제작된 A1 핵연료봉을 INFRA 온도 검증에 사용하였다. A1 핵연료봉 역시 IFA-432-3 핵연료봉과 유사한 실험 목적으로서 고연소도까지의 효과를 관측하기 위하여 작은 갭 넓이 이외에도 핵분열 기체 방출로 인한 열궤환 효과를 차단하기 위하여 낮은 운전온도 ($\sim 750^\circ C$)를 유지하였다. 또한 초기 연료봉 충전압력이 외부 압력에 비해 높게 설계되어 크립다운 현상이 발생하지 않은 것으로 밝혀졌으며 핵분열 기체 방출량은 5% 이하인 것으로 밝혀졌다 [5]. IFA-515-A1 핵연료봉에 대한 재원은 표 1에 나타나 있다.

다. IFA-562-18

HUHB (Halden Ultra-High Burnup) 프로그램에 의해 장전된 IFA-562 핵연료봉들은 연소도에 따른 열전도도 변화와 이에 따른 핵연료 온도의 변화를 관찰하기 위해 설계되었다. 그러나 위에서 선택된 두 핵연료봉과는 다르게 초기 갭이 상용 핵연료에 가깝도록 넓게 설

계되었으며 핵연료/피복관 표면의 roughness도 작게 제작되어 연소 후반까지 소결체/갭 접촉이 발생하지 않았고 실험 후 실시된 핵분열 기체 방출량 조사에서는 매우 적은 양의 기체 방출로 열교환 효과에 의한 영향은 미미한 것으로 밝혀졌다 [2].

3. 결과 및 논의

INFRA 코드의 온도 예측 성능을 평가하기 위해 세 연료봉에 대한 설계자료와 운전자료를 사용하여 INFRA와 FRAPCON-3에서 계산을 수행하였다. 각 성능 모델별 분석을 위해서는 FRAPCON-3에 INFRA의 성능 모델을 이식하여 모델 변경으로 인한 계산결과의 차이를 분석하였다. 소결체의 열전도도는 Halden 모델[6], FRAPCON-3에 사용된 Lucuta 모델 [7] 그리고 KAERI 모델[8]을 적용하였다. KAERI 모델은 조사된 핵연료의 열확산계수를 측정하여 도출한 열전도도 모델이며, Halden 모델은 Halden의 시험자료를 기반으로 하여 유도된 모델로서 Halden 실험 자료의 예측에 가장 적합할 것으로 판단되어 본 연구에서는 INFRA의 기본모델로서 사용하였다. Lucuta 모델은 열전도도를 실제보다 크게 예측하는 것으로 알려져 있다. 그림 8의 결과와 같이 낮은 연소도에서는 Lucuta 모델, 높은 연소도에서는 KAERI 모델이 열전도도를 낮게 예측하며 온도에 따라 약간의 차이를 나타내고 있다.

가. IFA-432-3 핵연료봉

그림 1에는 IFA-432-3 핵연료봉에 대한 온도 분석 결과가 나타나 있다. INFRA-Halden의 경우 실측치를 가장 잘 예측하고 있다. 온도 예측치와 실측치의 차이를 나타낸 그림 2의 결과에서는 FRAPCON-3와 INFRA의 온도 예측 차이가 연소 후반에 비해 초반에서 상대적으로 큰 것을 알 수 있으며 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다.

그림 3과 그림 4에는 두 코드가 예측한 IFA-432-3 연료봉의 핵연료 표면온도, 갭 넓이가 나타나 있다. 연소 초기에는 FRAPCON-3, 연소 후반에는 INFRA가 표면 온도를 높게 평가하고 있는데 이는 갭 넓이 예측치 변화에 의한 것임을 알 수 있다. 갭 넓이를 결정하는 주요 인자들은 소결체/피복관 열팽창, 피복관 크립, 소결체 relocation, 고밀화 및 팽윤 모델 등이 있는데 FRAPCON-3와 INFRA에서는 동일한 열팽창 모델을 사용하고 있기 때문에 나머지 네가지 모델에 의해 갭 넓이의 변화가 발생하게 된다

그림 5와 그림 6은 FRAPCON-3에 INFRA의 relocation 모델과 크립 모델을 이식하여 계산한 결과로서 각각의 모델이 바뀌어도 FRAPCON-3의 핵연료 중심 온도 예측치는 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이 결과는 두 모델 모두 적은 양의 relocation을 예측하였기 때문에 모델 변경에 의한 relocation 양의 차이도 크지 않았기 때문이며 낮은 연소도에서 갭접촉이 발생하였기 때문에 크립의 영향도 크지 않기 때문이다.

동일한 방법으로 고밀화 및 팽윤모델의 변화에 의한 온도의 변화를 알아본 결과 그림 7과 같이 핵연료 표면 온도가 크게 변화함을 알 수 있었으며 그림 3과 동일한 경향을 나타내는 것으로 판단할 때 주로 고밀화 및 팽윤모델의 차이에 의해 두 코드의 핵연료 표면온도 예측 차이가 발생한 것을 알 수 있다.

따라서 IFA-432-3 핵연료봉의 자료에 대해서는 INFRA 코드에 Halden 열전도도 모델을 적용하였을 경우 핵연료 온도를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 고밀화 및 팽윤 모델

과 열전도도 모델의 차이가 큰 영향을 끼친 것으로 나타났다.

나. IFA-515-A1 핵연료봉

그림 9와 10에는 IFA-515-A1 핵연료봉의 온도 예측 결과와 두 코드간의 온도 예측 차이가 각각 나타나 있다. 앞의 IFA-432-3 결과와 유사하게 연소 초반에는 FRAPCON-3에 의한 온도 예측값이 INFRA-halden에 비해 높게 나타났지만 연소도가 증가함에 따라 INFRA-halden의 온도 예측치가 높게 나타나고 있으며 전 연소도 구간에 걸쳐 INFRA-halden의 온도 예측치가 측정치에 근접하는 것을 볼 수 있다. 60 MWd/kgU 이상의 연소도에서 두 코드가 동일한 표면 온도를 가지지만 열전도도 모델의 차이에 의해 INFRA의 중심 온도 예측치가 높게 평가되고 있으며, INFRA-KAERI 모델은 전구간에 걸쳐 높은 온도를 예측하고 있는데 이는 사용된 열전도도 모델의 차이에 의한 것이다.

FRAPCON-3와 INFRA의 중심온도 분포 경향은 그림 11에 나타난 핵연료 표면 온도의 변화와도 잘 일치하고 있는데 그림 12에 나타난 바와 같이 핵연료 표면온도 변화가 갭 넓이의 변화에 따라 변하는 것을 알 수 있다.

따라서 IFA-515-A1 핵연료봉에 대한 FRAPCON-3와 INFRA-halden 핵연료 중심 온도 예측치 차이는 IFA-432-3 핵연료봉과 동일하게 핵연료 갭 넓이 예측치 차이에 의한 핵연료 표면 온도의 차이에 의한 것으로 판단할 수 있으며 60 MWd/kgU 이상의 연소도에서는 소결체 열전도도 모델의 차이에 의해 주로 차이가 발생하였다.

그림 13의 결과와 같이 IFA-515-A1 핵연료봉의 경우에도 relocation 모델의 변경에 의한 온도의 변화는 크게 나타나지 않았는데 본 연료봉 역시 갭이 적은 핵연료봉의 특성에 의한 것으로 판단된다. 그러나 그림 14에 나타난 결과와 같이 초반의 고밀화 예측치 차이가 크지 않았으며 팽윤 예측치 차이도 크지 않은 것으로 나타났는데 이는 IFA-515-A1 핵연료봉의 소결체가 고밀도로 제작되었으며 지름 또한 매우 작게 제작되었기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 두 코드가 예측한 갭넓이의 차이는 그림 14와 같이 주로 크립에 의한 영향을 판단되며 연소도 증가에 따라 크립 예측 차이가 지속적으로 증가하는 것에 따라 그림 12와 같이 갭접촉이 발생하기 전까지 두 코드의 예측치 차이가 커지는 것으로서 확인할 수 있다.

이런 영향들을 종합적으로 평가할 때 IFA-515-A1 핵연료봉 자료에서도 INFRA-Halden의 온도 예측치가 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며 갭 접촉전까지는 주로 크립 모델, 갭 접촉이후에는 열전도도 모델의 차이에 의해 FRAPCON-3와 온도 예측에 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

다. IFA-562-18 핵연료봉

그림 16과 17에는 IFA-562-18 핵연료봉에 대한 온도 예측 결과가 나타나 있다. FRAPCON-3와 INFRA-Halden의 예측치는 연소 초반에는 실측치보다 높으나 점점 낮게 예측하고 있으며 KAERI 모델을 사용하였을 경우에는 연소 초반에는 높다가 연소후반에서는 실측치와 잘 일치하고 있다.

그림 17에 나타난 FRAPCON-3와 INFRA-Halden의 예측치 차이는 그림 18에 나타난 표면온도 예측치 차이와 같은 경향을 나타내고 있는데 이는 그림 19와 같이 갭넓이 예측의 차

이에서 발생하는 것이다. INFRA가 갭 넓이를 크게 평가하는 이유는 그림 20과 21을 통하여 연소 초반에는 고밀화 및 팽윤 모델, 연소 후반에는 relocation 모델에 의한 차이로 나타났으며 크립에 의한 차이는 크지 않은 것으로 밝혀졌다. 특히 IFA-432-3이나 IFA-515-A1 핵연료봉에서는 영향이 크지 않았던 relocation이 그림 22와 23과 같이 차이가 크게 발생하였는데 이는 IFA-562-18 핵연료봉의 초기 갭이 크기 때문에 relocation이 크게 계산되었고 차이도 많이 발생한 것으로 판단된다.

따라서 IFA-562-18 자료에 의한 검증결과 고밀화 및 팽윤, relocation 모델의 차이에 의해 두 코드의 중심 온도 예측치가 차이를 나타내고 있으며 고연소도 구간에서는 INFRA-KAERI의 온도 예측치가 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결론 및 토의

Halden 연구로에서 측정된 핵연료 온도 자료를 이용하여 INFRA 코드의 온도 예측 성능을 평가하였다. 평가한 결과 INFRA의 핵연료 중심 온도 예측치가 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

특히 소결체 고밀화, 팽윤 및 relocation과 피복관 크립등의 성능 모델들이 핵연료 갭이 소멸되는 연소도까지는 핵연료 온도 예측에 크게 영향을 끼치는 것을 알 수 있었으며, INFRA 코드의 모델들이 FRAPCON-3보다 안정적으로 온도를 예측하는 것으로 나타났다.

또한 연소도 증가에 따라 핵연료 온도에 직접 영향을 주는 소결체 열전도도 모델은 Halden 모델이 가장 정확한 것으로 나타났는데, 추후 다른 시험자료와의 비교를 통해 최적의 모델을 도출할 예정이다.

5. 참고 문헌

- [1] 이찬복외, "UO₂ 핵연료봉 성능분석코드 INFRA 개발", 2001 추계한국원자력학술대회, 2001
- [2] D.D. Lanning, C.E. Beyer, C.L. Painter, "FRAPCON-3: Modifications to Fuel Rod Material Properties and Performance Models for High-Burnup Application", NUREG/CR-6534 Vol. 1, PNNL-11513.
- [3] D.D. Lanning, E.R. Bradley, "Final Irradiation and Postirradiation Data from The NRC/PNNL Instrumented Assembly IFA-432", Proceeding of Enlarged Halden Program Group Meeting, Norway, 1986
- [4] T. Tverberg, M. Amaya, W. Wiesenack, "Analysis of the Thermal Behaviour of UO₂ and (U, Gd)O₂ Fuel in IFA-515", Proceeding of Enlarged Halden Program Group Meeting, Norway, 1998
- [5] T. Tverberg, M. Amaya, "Study of Thermal Behaviour of UO₂ and (U, Gd)O₂ to

High Burnup (IFA-515)", Proceeding of Enlarged Halden Program Group Meeting, Norway, 2000

[6] W. Wiesenack, "Assessment of UO₂ conductivity degradation based upon in-pile temperature data", Proc. of Int. Top. Mtg. on LWR Fuel Performance, Portland, Oregon, 1997.

[7] P.G. Lucta, et al., "A pragmatic approach to modeling thermal conductivity of irradiated UO₂ fuel: review and recommendations", J. Nucl. Mater. 232(1996)166

[8] C.B. Lee, et al., "Development of irradiated UO₂ thermal conductivity model", IAEA Technical Committee Meeting on Nuclear Fuel Behavior Modelling at High Burnup and its Experimental Support, Windmere, UK, 2000.

표 1. 검증에 사용된 각 핵연료봉 설계제원

	IFA-432-3	IFA-515-A1	IFA-562-18
Pellet diameter (mm)	10.83	5.561	5.913
Initial gap width (mm)	0.0381	0.025	0.05
Gap-to-Diameter ratio (%)	0.7	0.89	1.7
Clad outdiameter (mm)	12.8	6.5	7.02
Fuel density (%TD)	95.5	96.8	95.4
Enrichment (wt%)	10	11.5	13
Clad material	Zr-2	Zr-2	Zr-2
EOL burnup (MWd/kgU)	34	87	77

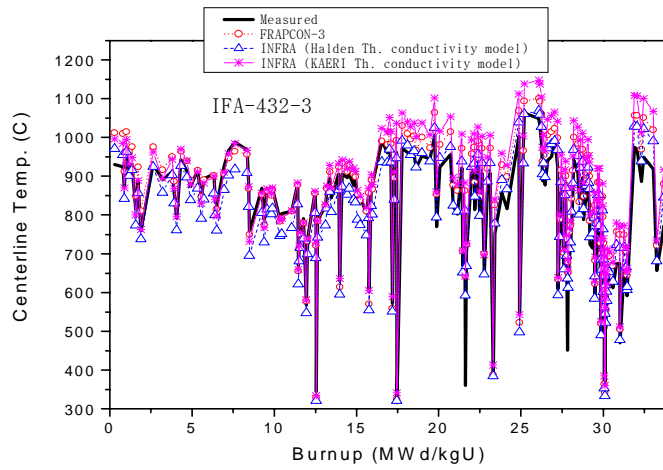


그림 1. IFA-432-3 핵연료봉 온도 검증 결과

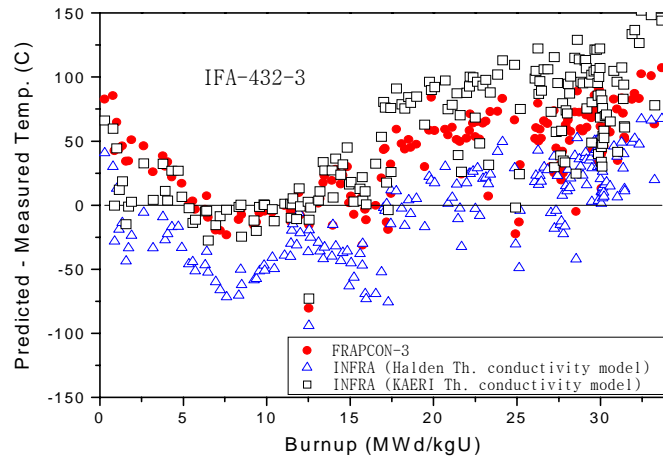


그림 2. 측정치 vs INFRA와 FRAPCON-3의 온도 예측 차이

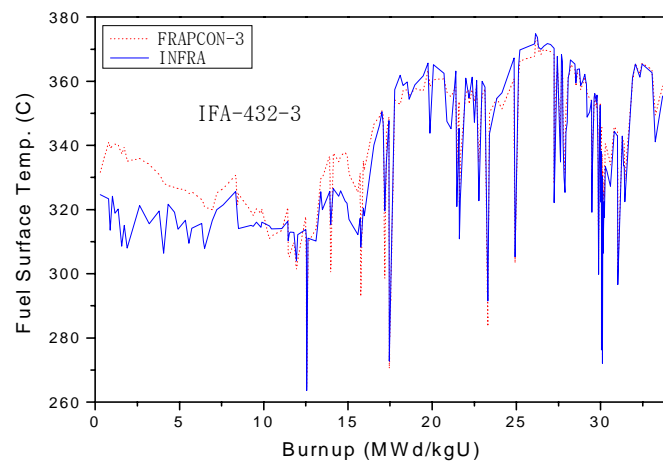


그림 3. INFRA와 FRAPCON-3의 핵연료 표면 온도 예측 결과

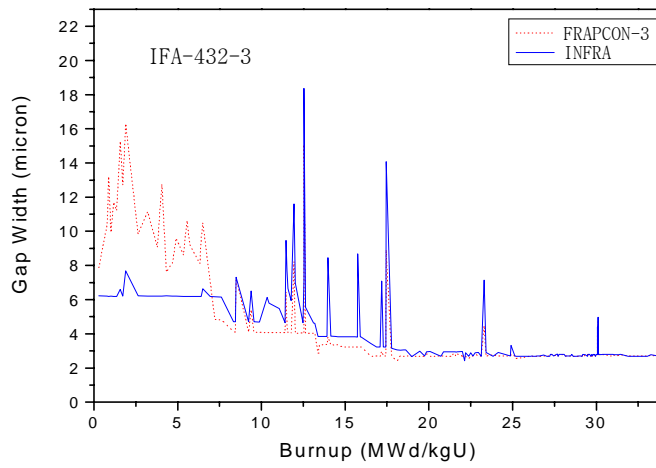


그림 4. INFRA와 FRAPCON-3의 갭 넓이 예측 결과

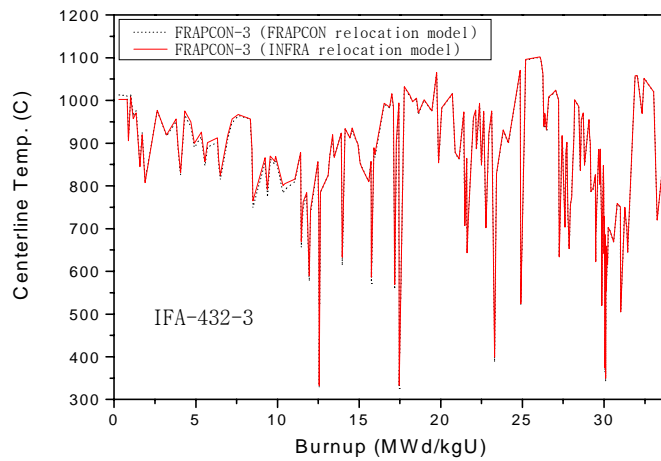


그림 5. Relocation 모델의 변화에 따른 FRAPCON-3 온도 예측치 변화

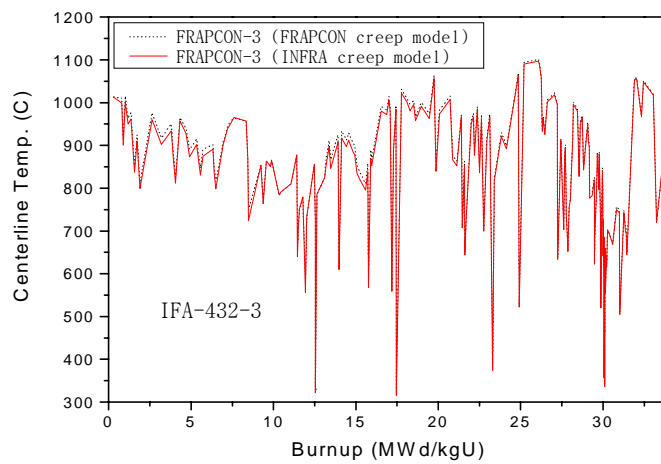


그림 6. Creep 모델의 변화에 따른 FRAPCON-3 온도 예측치 변화

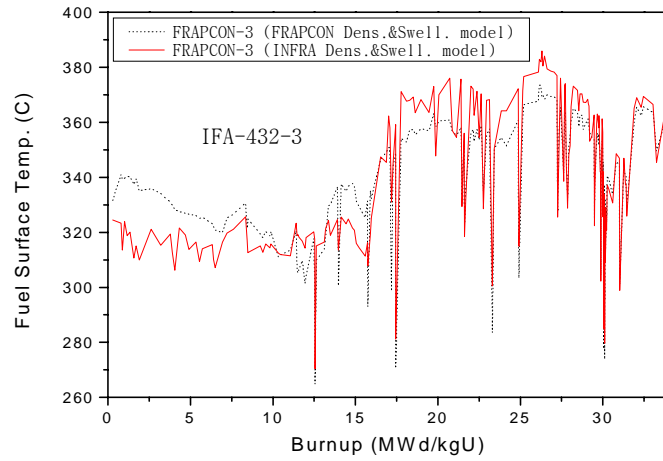


그림 7. Densification & Swelling 모델 변경에 따른 FRAPCON-3 핵연료 표면 온도 변화

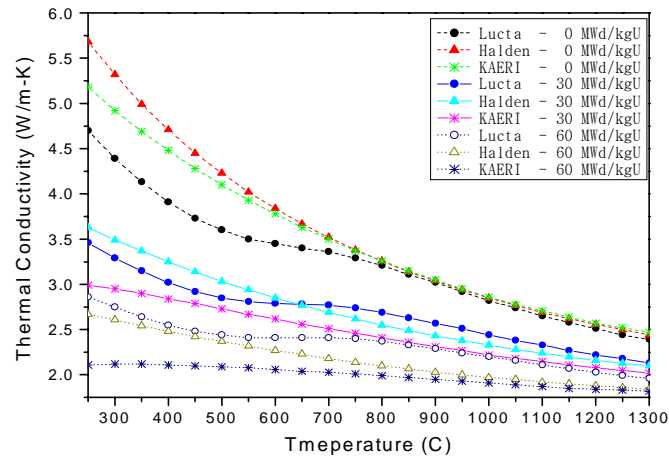


그림 8. 연소도 증가에 따른 열전도도의 변화

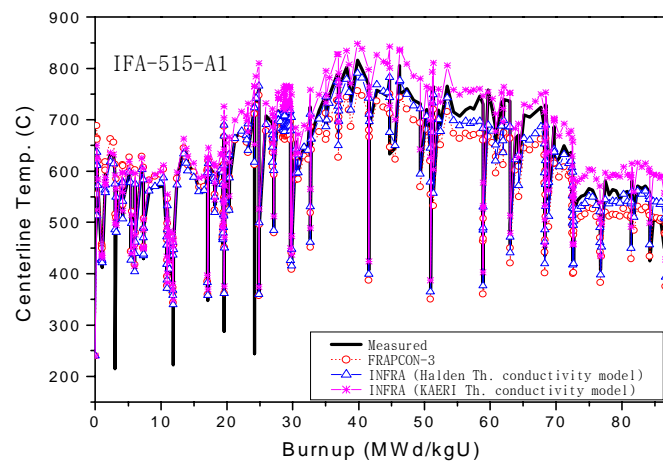


그림 9. IFA-515-A1 핵연료봉 온도 검증 결과

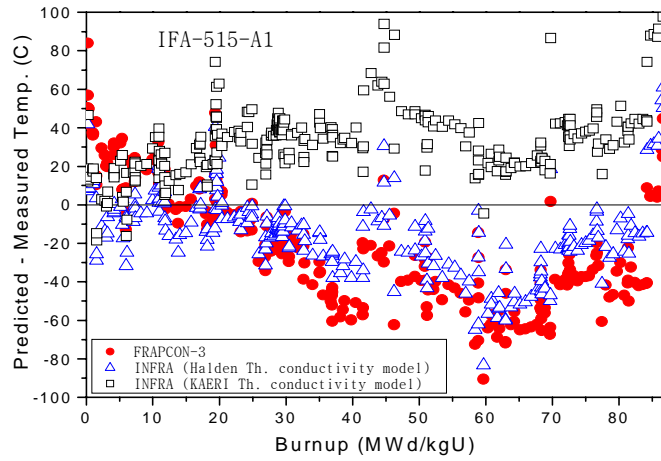


그림 10. 측정치 vs INFRA와 FRAPCON-3의 온도 예측 차이

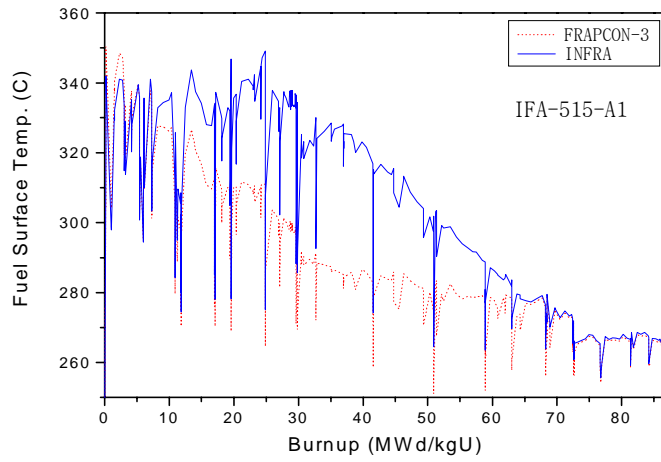


그림 11. INFRA와 FRAPCON-3의 핵연료 표면 온도 예측 결과

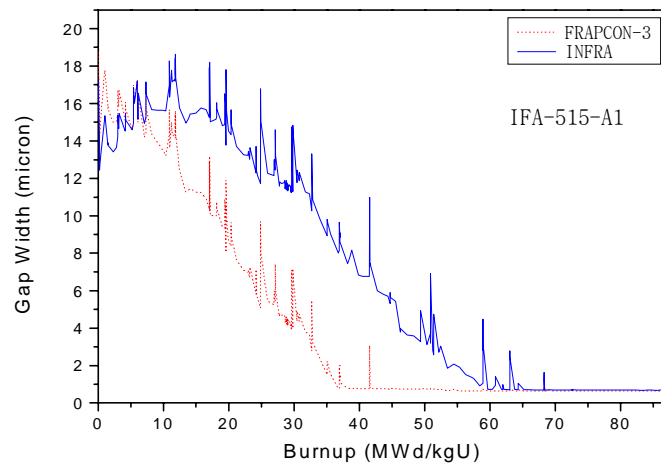


그림 12. INFRA와 FRAPCON-3의 갭 넓이 예측 결과

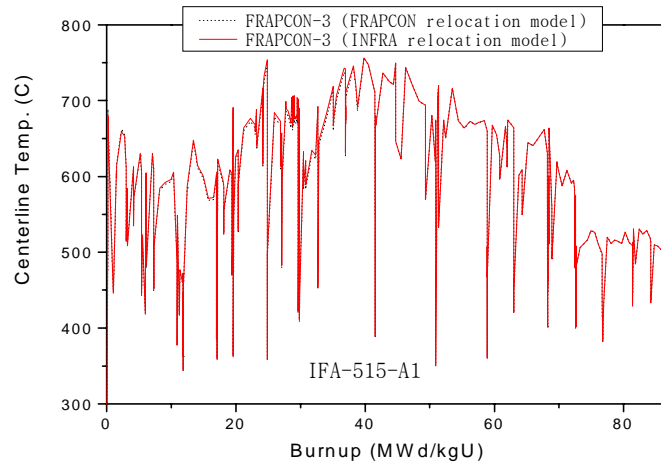


그림 13. Relocation 모델 변화에 따른 FRAPCON-3 온도 예측치 변화

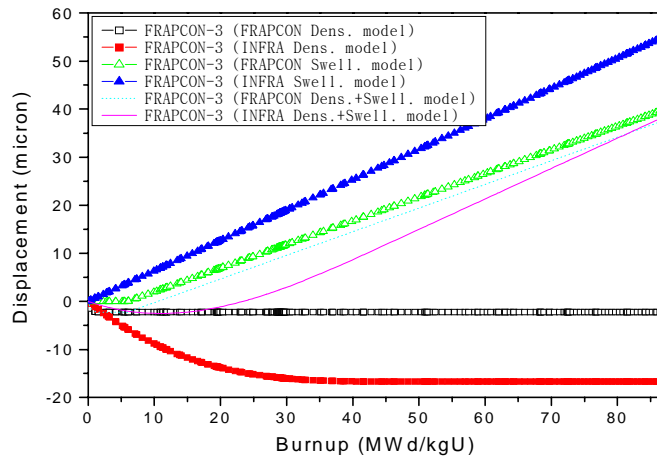


그림 14. 고밀화 및 팽윤 모델 변경에 따른 FRAPCON-3의 핵연료 변위량 변화

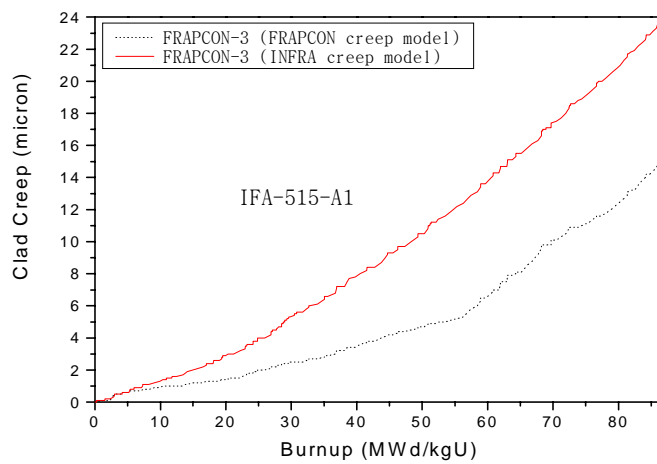


그림 15. Creep 모델 변경에 따른 FRAPCON-3 크립량 예측치 변화

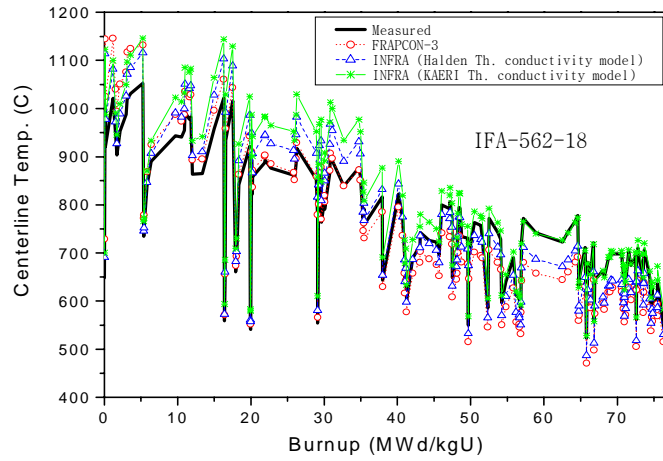


그림 16. IFA-562-18 핵연료봉 온도 검증 결과

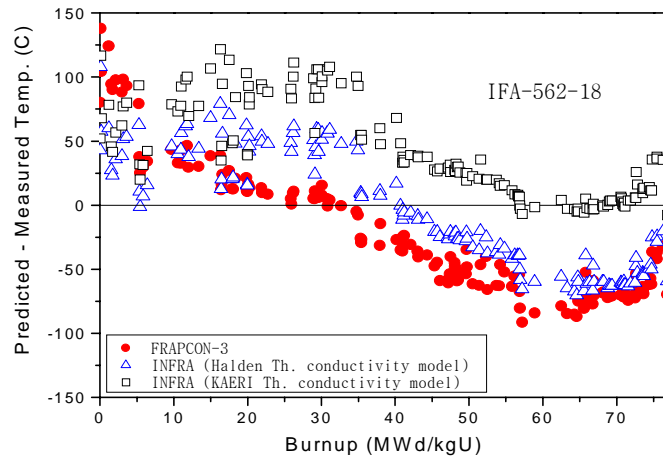


그림 17. 측정치 vs INFRA와 FRAPCON-3의 온도 예측 차이

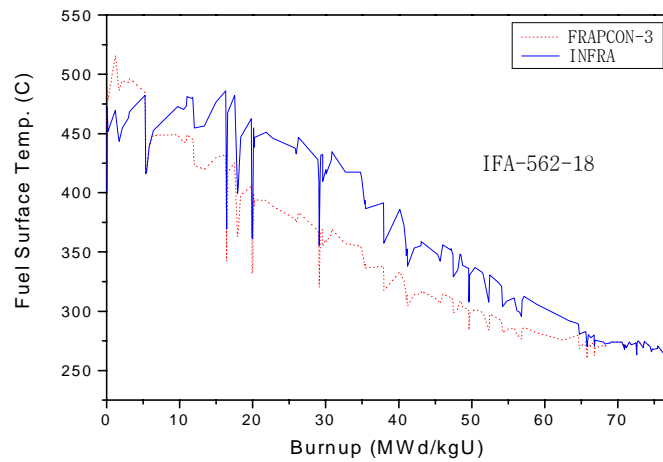


그림 18. INFRA와 FRAPCON-3의 핵연료 표면 온도 예측 결과

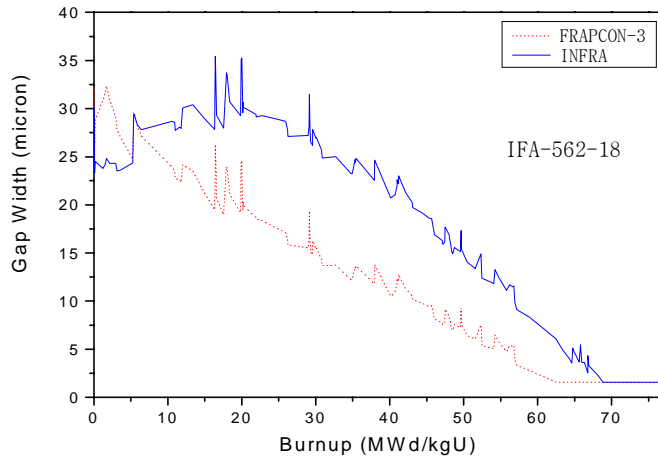


그림 19. INFRA와 FRAPCON-3의 갭 넓이 예측 결과

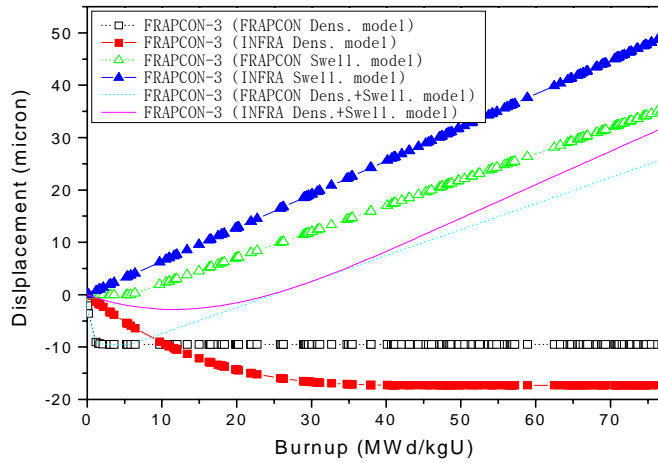


그림 20. 고밀화 및 팽윤 모델 변경에 따른 FRAPCON-3의 핵연료 변위량 변화

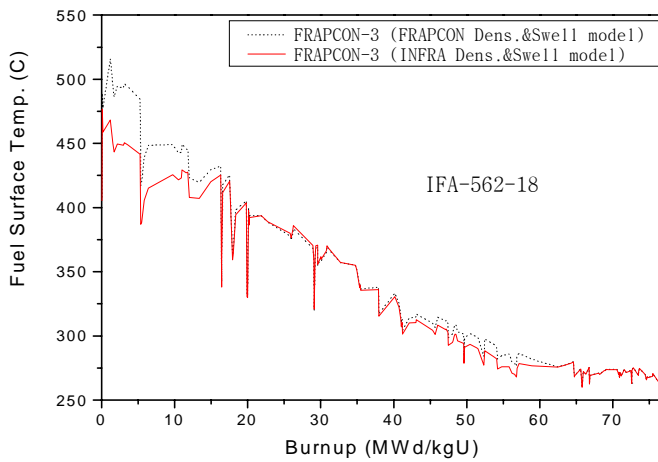


그림 21. 고밀화 및 팽윤 모델 변경에 따른 FRAPCON-3 핵연료 표면 온도 예측치 변화

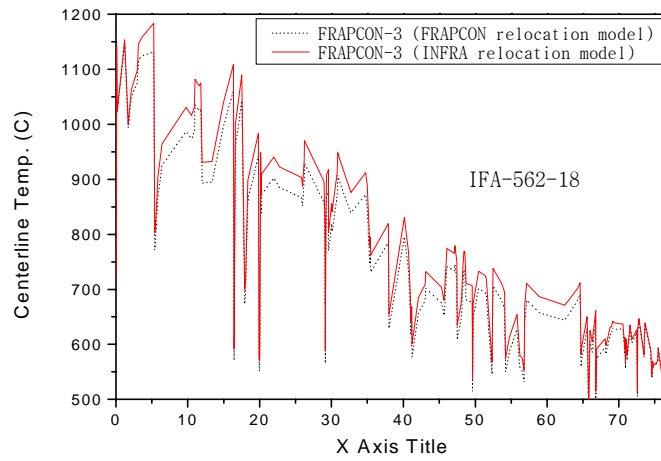


그림 22. Relocation 모델 변경에 따른 FRAPCON-3 온도 예측치 변화

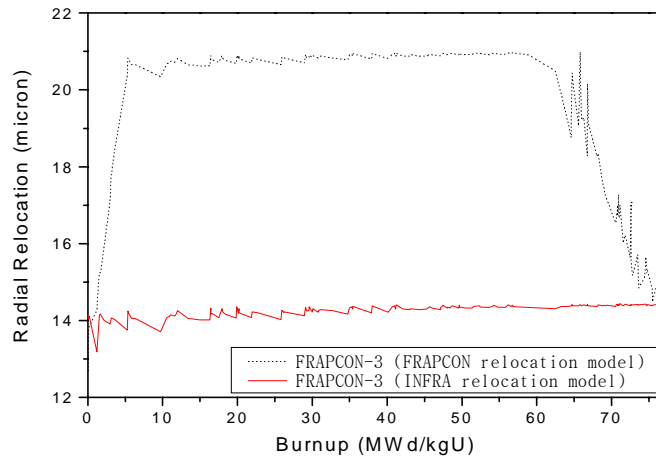


그림 23. Relocation 모델 변경에 따른 FRAPCON-3 relocation양 변화