

INFRA 코드의 피복관 성능해석모델 검증 Verification of Cladding Performance Analysis Models in INFRA

방제건, 김대호, 김영민, 양용식, 이찬복, 정연호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

최근의 핵연료 개발 추세는 안전성뿐만 아니라 경제성 향상을 위해 연소도를 증가시키고 있다. 고연소도 핵연료의 개발은 이전에는 고려하지 않았던 핵연료거동의 새로운 현상들을 일으킨다. 이러한 고연소도의 핵연료 거동을 예측하기 위해 핵연료 성능해석코드 INFRA를 개발하였다. 고연소도에서 지르칼로이-4 핵연료 피복관의 성능을 분석하기 위해 크립모델, 부식모델, 크립아웃 모델 및 축방향 성장모델들을 개발하였다. INFRA 코드의 피복관 성능해석을 검증하기 위해, 상용로 및 Halden 원자로의 성능자료를 대상으로 검증계산을 수행하였다. 검증계산결과가 측정치와 잘 일치하였다.

Abstract

Recent trend of PWR fuel development is continuously increasing the burnup to improve the economy as well as the safety. Development of high burnup fuel raised the new issues for the fuel behaviour that was not considered beyond the high burnup. High burnup fuel performance code, INFRA (INtegraed Fuel Rod Analysis), was developed for the prediction of high burnup fuel behavior. Cladding performance models such as creep model, creep-out model, corrosion model and axial irradiation growth model were developed to analyze the performance of high burnup Zircaloy-4 cladding. Cladding performance analysis were performed to verify the cladding performance model in INFRA by using the performance data of commercial PWR and Halden reactor, etc. INFRA predicted the measured data reasonably well.

1. 개 요

세계의 핵연료 개발 추세는 경제성과 안전성을 더욱 향상시킨 고연소도 및 장주기 핵연료를 추구하고 있으며 기존의 핵연료 성능해석코드로는 이들 핵연료의 성능을 예측하

는 데 한계가 있다. 이에 따라 이들 핵연료의 성능을 예측할 수 있는 고연소도 핵연료 성능해석코드가 개발되고 있다. 고연소도에서는 핵분열기체의 방출이 증가하게 되고, 핵분열기체방출의 증가로 인한 팽윤량의 증가하므로 이에 대한 정확한 예측이 필요하고, 소결체 외곽에서 rim이 형성되므로 이의 영향에 대한 분석과 예측이 필요하다. 또한 핵분열기체방출량의 증가로 연료봉 내부 압력의 냉각수 압력을 초과하게 됨에 따라 creep-out 현상이 일어날 수 있고, 고연소도시 냉각수의 방사능 준위를 저하시키기 위한 냉각수내 수화학적 운전조건의 변화로 인해 피복관의 부식이 증가하게 되므로 이들 현상을 정확히 예측할 수 있어야 한다.[1,2]

고연소도에서의 핵연료의 성능을 예측할 수 있는 성능해석코드를 개발하기 위해, 고연소도에서 영향을 받는 핵연료 성능 인자들에 대한 분석을 수행하였고, 이들을 해석하기 위한 모델 및 프로그램을 개발하였다. INFRA 코드에서는 개발된 이러한 모델 및 프로그램이 사용되었으며, 소결체-피복관의 기계적 상호작용의 정확한 분석을 위해 유한요소해석 방법을 사용하였다.[3-10] INFRA 코드는 U-235 농축도 10 %이상, 연소도 100 MWD/ kgU-rod avg. 까지 핵연료의 성능을 분석할 수 있도록 개발되고 있어, 향후 개발될 미래 핵연료의 성능해석에도 적용할 수 있을 것이다.

핵연료 성능해석코드에서 피복관의 성능해석은 각 코드에 따라 예측결과가 다르게 나타난다. 피복관의 성능이 제조회사의 제조특성에 따라 다르므로 코드개발시 피복관의 성능해석모델은 특정 피복관의 성능자료의 의존하여 개발되고 검증이 수행된다. 미국 NRC의 성능해석코드인 Frapcon-3의 경우 극히 일부의 성능자료를 사용하여 검증을 수행하였으며, 피복관의 성능을 제조회사의 성능해석결과에 의존하고 있다. INFRA 코드에서는 지르칼로이-4 피복관의 성능자료를 활용하여 개발된 성능모델 및 프로그램을 사용하고 있다.

2. INFRA 코드의 피복관 성능모델 검증

2.1 피복관 크립 및 creep-out 모델 검증

핵연료-피복관 갭에서의 열전달계수는 핵연료-피복관 갭 크기 및 핵연료-피복관 내부 압력의 함수이므로 핵연료봉 거동 해석에 핵연료 및 피복관 변형의 정확한 계산이 필요하다. 피복관에서의 정확한 응력계산은 피복관 손상의 시작을 정확히 예측하는데 필요하다. Frapcon-3 코드내의 변형 해석은 작은 변형해석으로 구성되어 있다. 핵연료 및 피복관내의 응력, 변형 및 천이의 변형 해석은 핵연료봉 전체에 대해 수행된다. 이 해석은 피복관이 변형동안 실린더형 모양을 유지하고 핵연료 열팽창, 팽윤, 고밀화 및 재배치, 피복관 열팽창, 크립, 소성 등의 영향들을 포함하고 있다는 가정에 기본을 두고 있다.[11]

FEMAXI 코드에서는 옵션에 따라 MATPRO-09의 크립모델 및 Nenansen이 개발한 크립모델을 사용하고 있으며, 피복관 온도가 450°C를 초과할 경우 별도의 크립 관계식을 사용하고 있다.[12]

CARO 코드는 지르칼로이 피복관의 크립변형이 열적크립과 방사선조사에 의한 조사 크립에 의해 발생하고, 각 크립은 1차크립과 2차크립으로 구분하여 계산한다.[13] 크립에 의한 피복관 변형은 다음식 (1)과 같다.

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{1,th} + \varepsilon_{2,th} + \varepsilon_{1,irr} + \varepsilon_{2,irr} \quad (1)$$

1차크립 및 2차크립은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_1 = C \cdot \dot{\varepsilon} \cdot (1 - e^{-k\sqrt{t}}) \quad (2)$$

$$\varepsilon_2 = \dot{\varepsilon} \cdot t \quad (3)$$

그리고 식 (2) 및 (3)의 $\dot{\varepsilon}$ 은 열적크립율 및 조사크립율로 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\varepsilon}_{th} = \frac{1}{2} \cdot A_{th} \cdot \exp(-26116 \text{ K/Tc}) \cdot \sigma_{eff}^{1.87} \cdot \text{sign}(\sigma_{eq}) \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_{irr} = \frac{1}{2} \cdot A_{irr} \cdot \Phi^{0.85} \cdot \sigma_{eff} \cdot \text{sign}(\sigma_{eq}) \quad (5)$$

여기서, C는 피복관 재질의 strain-hardening 상수, t: 조사기간, k: $5.5 \cdot \exp(-1460.2/\text{Tc})$, A_{th} : 열적크립인자, Tc: 피복관 평균온도 (K), A_{irr} : 조사크립인자이고 Φ 는 중성자속 ($E > 0.821 \text{ MeV}$) 이며, 열적크립인자 A_{th} 과 조사크립인자 A_{irr} 은 항복강도에 따라 변한다.

CARO 코드가 피복관 거동을 예측하기 위해 더 많은 검증계산을 수행하였고, Frapcon-3 코드의 경우 피복관 거동에 대한 신뢰성이 적은 것으로 알려지고 있으므로, Infra 코드에서는 CARO 코드의 크립모델을 사용하였다. INFRA 코드에 CARO 코드의 크립모델을 이식한 후 CARO 코드 및 Frapcon 코드와 크립 예측치를 비교하기 위한 계산을 수행하였다. 그림 1은 코드별 크립예측치를 보여주고 있다. Frapcon-3 코드에 의한 크립예측치가 가장 크고, Infra 코드의 크립예측치가 가장 작은 것으로 나타났다. 이 계산 결과에서 Frapcon-3 코드 및 Infra 코드의 경우 크립값이 어느 연소도 까지는 증가하다가 그 후 감소하는 현상을 보여주고 있는 데, 이것은 피복관/핵연료 접촉이 일어났기 때문이며, Frapcon-3 코드 및 Infra 코드에서 CARO 코드보다 접촉이 일찍 일어나는 것으로 계산하고 있음을 보여준다.

그림 2는 Infra 코드의 크립계산결과가 CARO 코드의 예측치에 접근하도록 크립상수 값을 결정하여 계산한 결과를 보여준다. 이를 위해 크립에 영향을 주는 1,2차 크립상수 및 열적크립지수, 조사크립지수 값을 변경하면서 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 계산 결과, 1차 크립상수의상수 값이 증가함에 따라 크립량이 증가하고 크립기울기의 변화가 아주 작음을 알 수 있었고, 2차 크립상수 값의 증가함에 따라 크립량이 다소 증가하고 있고 기울기도 다소 증가하였다. 그리고 열적크립과 관련한 응력지수 값의 변화는 크립량의 변화에 거의 영향을 주지 않았고 조사크립 관련 속중성자 지수의 값을 변화시켜 계산한 결과는 지수 값이 증가함에 따라 크립량 및 크립기울기가 크게 증가하고 있음을 보여주었다. 또한 1,2차 크립상수 및 열적, 조사크립 지수 값의 변경에 따른 크립량 차이를 계산

하였다.[14] 이를 통해 결정된 크립상수 및 지수 값들은 다음과 같다.

- 1차 크립상수 : 3500 → 5000
- 2차 크립상수 : 1.15 → 1.20
- 열적크립 응력지수 : 1.87 → 1.97
- 조사크립 중성자속 지수 : 변화없음(0.85)

크립상수 값이 결정된 Infra 코드로 Frapcon-3 코드 개발시 사용된 입력자료를 갖고 검증계산을 수행하였다. 그림 3 및 4는 각각 ANO-2 원자로 및 Oconee-1 원자로의 핵연료를 대상으로 계산한 크립예측치로 각 코드별 계산결과를 보여주고 있다. Infra 코드의 크립예측치가 측정치와 거의 유사함을 보여주고 있다. 따라서 Infra 코드의 크립모델이 성공적으로 이식되었음을 알 수 있다.

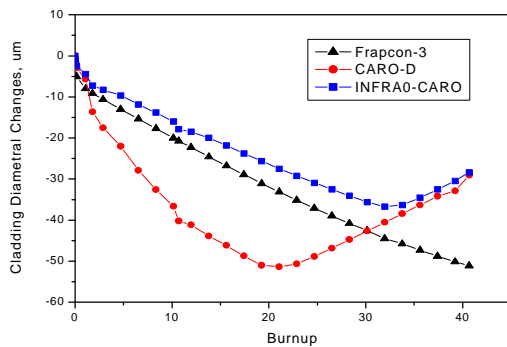


그림 3. 코드별 크립량 비교 (1)

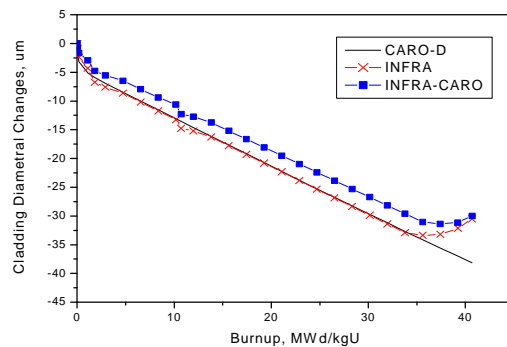


그림 4. 코드별 크립량 비교 (2)

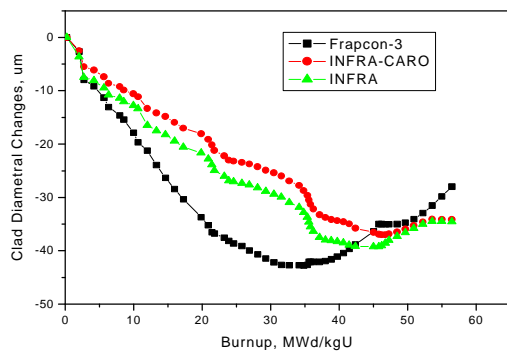


그림 4. ANO-2 발전소 핵연료봉에 대한 코드별 크립량 비교

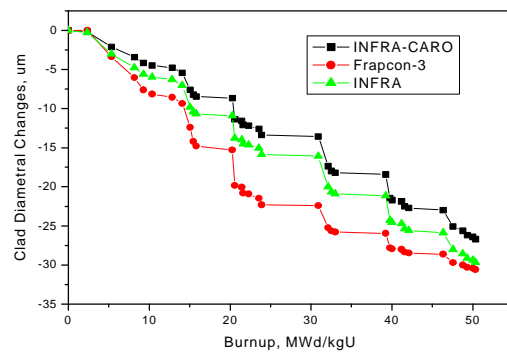


그림 4. Oconee 발전소 핵연료봉에 대한 모델별 크립량 비교

2.2 Creep-out 모델 검증

INFRA 코드의 creep-out 모델은 CARO 코드의 크립모델식으로부터 개발하였다.

Halden의 노내에서의 피복관 creep-out 실험결과와 기존 핵연료 성능분석코드의 예측치를 비교한 결과(그림 5 및 6), 피복관의 creepdown 시험자료에 근거하여 개발된 기존 코드가 약 20-30% 작게 예측하는 것으로 나타났다. 1차 크립 상태에서는 예측치가 측정치보다 높고, 2차 크립 상태에서는 예측치의 기울기가 측정치의 크립 기울기보다 작게 나타났다. 크립모델에서와 마찬가지로 1차 크립 상수, 2차 크립상수 값 및 지수 값들에 대한 민감도분석 및 변수연구를 통해 상수 및 지수값들을 결정하였다. stress 관련 지수는 1.87에서 1.57로, 중성자속 관련 지수는 0.86으로 보정하였고, 또한 1차크립상수는 2800 h^{-1} , 2차크립상수는 $1.7 \times 10^{-20} (\text{n/cm}^2\text{-s})^{0.85} \cdot (\text{N/mm}^2)^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 이었다.[9]

그림 7,8은 creep-out 모델이 삽입된 INFRA 코드로 계산한 결과를 보여주고 있으며, 측정치를 잘 예측하고 있음을 보여준다. Creep-out과 관련한 실험을 현재 Halden에서 수행중에 있어 앞으로 이와 관련한 더 많은 자료가 생산될 것이므로 이들 성능자료의 확보를 통해 creep-out 모델에 대한 검증은 추가로 수행할 계획이다.

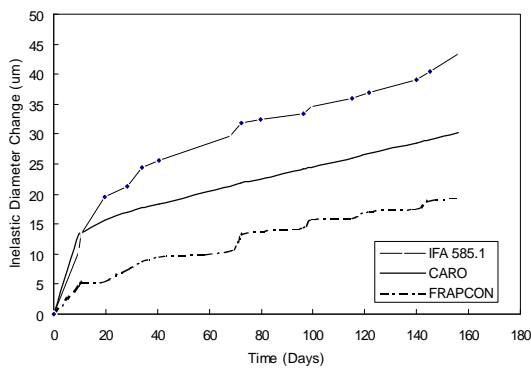


그림 5. Rod-1 실험 측정치 및 기존 코드 예측치

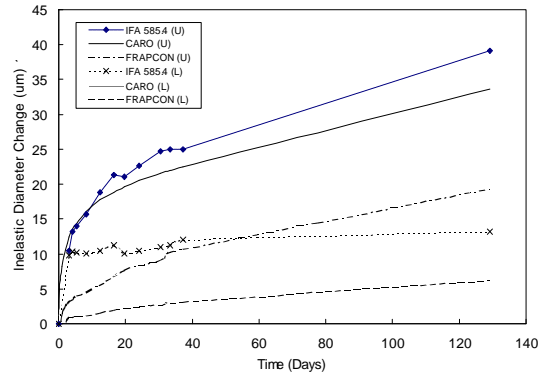


그림 6. Rod-2 실험 측정치 및 기존 코드 예측치

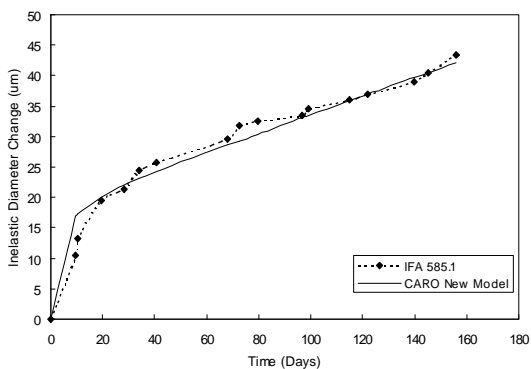


그림 7. INFRA 코드 Creep-out 예측치와 측정치(Rod-1) 비교

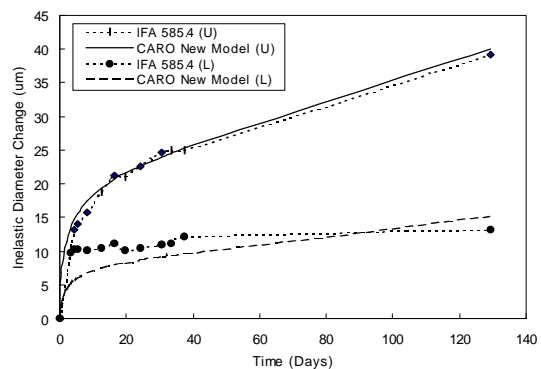


그림 8. INFRA 코드 Creep-out 예측치와 측정치(Rod-2) 비교

2.3 수소농도모델 검증

INFRA 코드에는 최근에 개발된 EPRI의 수소농도 모델(식 6)을 이식하였다. 또한 본 과제 1단계에서 개발한 피복관 부식 모델인 ZIRCO 프로그램도 EPRI의 수소농도 모델을 사용하고 있다. 수소농도 모델식은 다음과 같다.

$$C_{H_2} = C_{oH_2} + 27100 \times F_{H_2} \times s / (W_o - s/\lambda) \quad (6)$$

여기서, C_{H_2} 는 수소농도 (ppm), C_{oH_2} 는 초기 수소농도 (ppm), F_{H_2} 는 수소포획율, s 는 산화막 두께 (μm), W_o 는 초기 피복관 두께 (m), 그리고 λ 는 Pilling-Bedworth ratio (1.56 for ZrO_2) 이다.

EPRI의 모델로 수소농도 계산시 수소포획율이 입력으로 주어지지만 INFRA 코드에서는 고정값으로 주어진다. Frapcon-3 코드에서의 수소포획율은 0.15이었고, INFRA 코드에서는 수소포획율의 값이 0.16으로 결정되었다.[14] 그림 9는 BR-3 원자로 24i6 연료봉의 축방향 7번째 위치에서의 Frapcon 및 Infra 코드의 수소농도 계산 결과를 비교한 것이다. 그림에서 Infra 코드의 수소포획율이 0.16일 경우 수소포획율이 0.15인 Frapcon-3의 수소농도 계산결과와 거의 일치하여 Infra 코드에서의 수소포획율은 0.16으로 결정하였다. 그림 10은 ANO-2 원자로 24i6 연료봉에 대하여 주기말에서 축방향 위치에서의 수소농도를 계산한 결과이다. 이 그림에서 INFRA 코드의 수소농도 예측결과가 측정치와 거의 일치함을 보여주고 있어 검증결과 INFRA 코드에의 수소농도 모델이 수소농도를 잘 예측함을 알 수 있다.

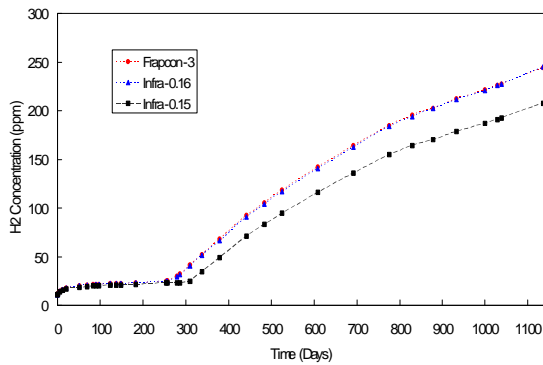


그림 9. 수소포획율에 따른 코드별 수소농도 계산결과 비교 (BR-3 원자로 24i6 연료봉)

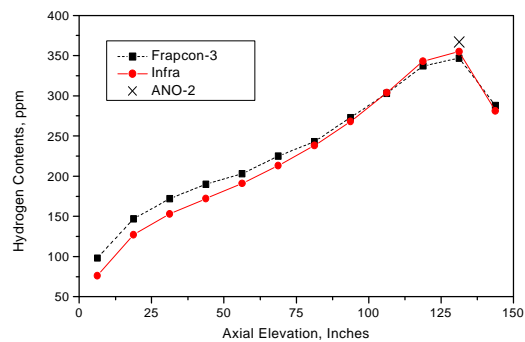


그림10. ANO-2 원자로 주기말에서 축방향 위치에서의 수소농도

2.4 부식모델검증

Frapcon-3 코드에서의 부식모델은 초기 EPRI 모델에 기초를 두고 있는 초기 ESCORE 부식모델을 사용하고 있다. INFRA 코드에서는 Zircaloy-4 핵연료 피복관의 고연소도에서의 부식을 예측하기 위해 개발된 부식프로그램 ZIRCO[10]의 부식모델을 사용하였다. Zirco 부식모델에서는 Zircaloy 피복관의 부식 기구 및 부식기구에 영향을 주는 인자들을 고려하였으며 다음 식으로 나타내었다.

$$\frac{ds^3}{dt} = C_1 \cdot \exp(-Q_1/RT) \quad (7)$$

$$\frac{ds}{dt} = C_2 \cdot F_{Mat} \cdot F_{Flux} \cdot F_H \cdot \exp(-Q^*(C_{Li})/RT) \quad (8)$$

Pre-transition 기간의 부식은 산화층의 두께가 약 2 μm 로 작아 피복관의 건전성에 주는 영향이 작기 때문에 기존의 Garzarolli 모델을 사용하였으며, Post-transition 기간의 부식은 부식에 영향을 주는 인자들을 고려하여 위의 식 8과 같이 나타내었다. 피복관의 재질 특성은 피복관의 제조사의 제조 특성 별로 다를 수 있고, 여러 변수들이 복합적으로 피복관의 부식에 영향을 주기 때문에 하나의 인자, F_{Mat} 로 정의하였다. 노내의 중성자 조사 효과는 F_{Flux} 인자로 나타내었다. 피복관의 Hydride의 영향은 F_H 인자로 나타내었으며, EPRI의 PFCC 모델과 같이 피복관의 수소농도가 400 ppm 이상에서 F_H 가 아래와 같이 증가하는 것으로 가정하였다.

$$F_H = 1 \quad \text{for } C_{H_2} \leq 400 \text{ ppm} \quad (9)$$

$$F_H = 1 + 0.699 \log\left(\frac{C_{H_2}}{400}\right) \quad \text{for } C_{H_2} > 400 \text{ ppm} \quad (10)$$

냉각수 내의 Li이 부식에 주는 영향으로는 Li이 피복관의 산화층에 유입되어 산소의 확산계수를 증가시키는 부식기구에 기반하여, Li이 부식의 활성화에너지에 영향을 주는 것으로 아래 식과 같이 나타내었다. Li의 농도가 증가함에 따라 활성화에너지가 감소하여 피복관의 부식을 증가시킨다.

$$Q^*(C_{Li}) = 28200 - A \cdot (C_{Li} - 0.5) \quad (11)$$

여기서 C_{Li} 는 냉각수내 Li의 농도(ppm)이며, A 값은 43.4 (cal/mol-ppm) 으로 설정하였다. 금속-산화층 경계면에서의 온도는 산화층의 열전도도에 매우 의존한다. 본 모델에서 사용된 산화층 열전도도의 값은 1.2(W/m-K) 이다.

Infra 코드에 이식된 부식모델의 검증을 위해 ANO-2 및 BR-3 원자로를 대상으로 부식계산을 수행하였다. 그림 12는 ANO-2 원자로 주기말에서 축방향 위치별 산화층 두께를 계산한 결과를 Frapcon-3 코드의 계산결과와 비교한 것으로 측정치와 잘 일치함을 알 수 있으며, 그림 13은 BR-3 원자로 24i6 연료봉에 대하여 연소도에 따른 부식 예측치를 Frapcon-3 코드와 비교한 것이다. 이들 결과로부터 Infra 코드에 부식모델이 성공적으로 이식되었음이 검증되었다.

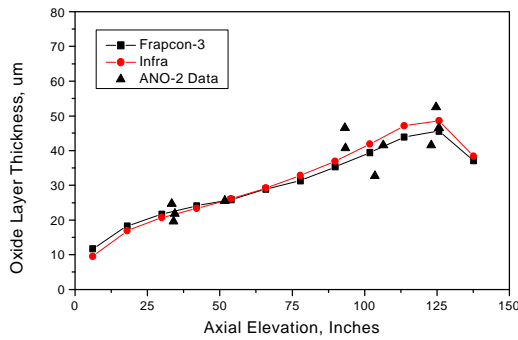


그림 12. ANO-2 원자로 주기말에서의 축방향 위치별 산화층 두께

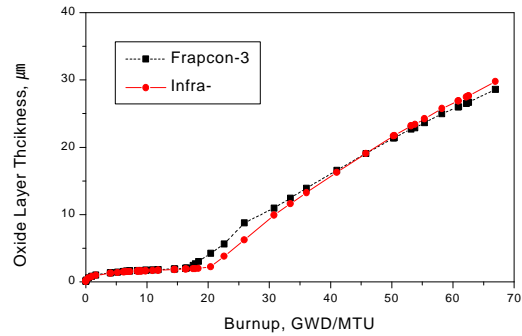


그림 13. BR-3 원자로 24i6 연료봉의 연소도에 따른 산화층 두께

2.5 축방향 조사성장 모델

각 코드의 조사성장 모델을 검토한 결과 조사성장 예측에 있어 큰 차이는 보이지 않으나, CARO 코드의 모델이 가장 많은 조사자료를 사용하여 검증을 수행하였으므로 다른 코드의 모델들보다 신뢰성이 있는 것으로 판단되어 CARO 코드의 축방향 조사성장모델을 선정하여 INFRA 코드에 이식하였다.

일본에서 개발된 FEMAXI 코드는 지르칼로이 피복관의 조사성장을 예측하기 위해 4개의 모델(Manzel, Hanerz, Hesketh 및 MATPRO 조사성장 예측 모델)을 포함하고 있으며 옵션에 따라 하나를 선택하여 계산한다. Frapcon-3 코드의 축방향 조사성장 모델은 MATPRO의 축방향 성장 예측모델을 사용하고 있으며, 이 모델은 속중성자 플루언스, 피복관 texture, 피복관온도 및 냉간가공의 영향이 포함되어 있으며, 40-360°C의 온도범위에서 지르칼로이 피복관의 조사성장을 모델링하기 위해 개발되었다.

다음 식은 INFRA 코드에 삽입된 축방향 조사성장모델이다.

$$\epsilon_{ag} = \frac{\Delta L_{ag}}{H_{ax}} = A_{ag} \cdot \left(\frac{\Phi}{10_{21}/\text{cm}^2} \right)^n \quad (12)$$

여기서, ϵ_{ag} 는 축방향 변형, ΔL_{ag} 는 늘어난 길이, H_{ag} 는 초기 길이, A_{ag} 는 성장인자, Φ 는 플루언스 ($E > 0.821\text{MeV}$), 그리고 n 을 지수를 나타낸다.

INFRA 코드의 조사성장모델을 검증하기 위한 계산을 수행하였다. 검증계산에는 BR-3 원자로의 24i6 연료봉, ANO-2 원자로의 tsq002 연료봉, Oconee-1 원자로 15309 연료봉의 성능자료들이 사용되었다. 그림 14는 Frapcon-3 코드와 INFRA 코드의 BR-3 핵연료봉의 플루언스에 따른 조사성장을 비교한 것이다. 표 1은 ANO-2 및 Oconee 원자로의 주기말에서 측정된 조사성장을 나타내고 있으며, 그림 15는 ANO-2 핵연료봉에 대한 주기말에서의 축방향 조사성장을 나타낸 것이다. 계산결과 측정치와 잘 일치하였으며, Infra 코드의 조사성장모델이 성공적으로 이식되었음이 검증되었다.

표 1. 피복관 축방향 조사성장율

Reactor	Rod/Assembly Identity	Rod-Average Burnup, GWD/MTU	Measured Rod Growth, %
ANO-2 PWR	TSQ002/D040	53.0	0.83 to 1.11
Oconee PWR	15309/iD45	50.0	0.792 to 0.907

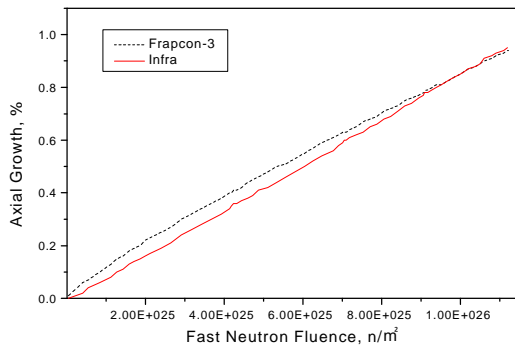


그림 14. BR-3 원자로 연료봉에 대한 조사성장 예측치 비교

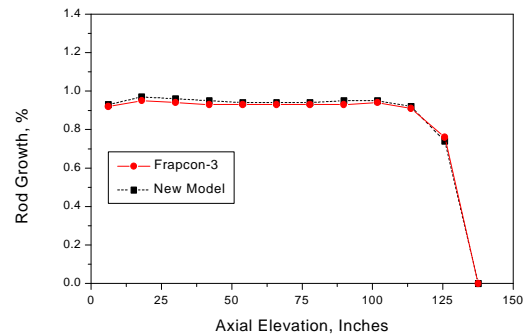


그림 15. ANO-2 원자로 주기말에서 축방향 위치별 조사성장 예측치 비교

3. 결론

기존의 핵연료 성능해석코드로는 최근 개발되고 있는 고성능 고연소도 핵연료의 성능 해석에 제한이 따르므로, 이의 해석을 위해 고연소도 핵연료 성능해석코드 INFRA를 개발하였다. 피복관 크립 및 축방향 조사성장을 예측하기 위해 기존 코드의 모델을 참고하

여 개발된 모델을 이식하였고, 피복관 수소농도를 예측하기 위해 ERPI에서 개발된 모델을 이식하였으며, creep-out 모델 및 부식모델은 자체 개발한 모델을 이식하였다. INFRA 코드의 피복관 성능모델들의 검증에 위해 핵연료 성능시험자료 및 기존의 상용코드와의 비교하였다.

검증계산결과 INFRA 코드의 계산치가 측정치와 잘 일치하였고 기존 상용코드의 계산결과와도 잘 일치하고 있음을 보여 주었다. 따라서 Infra 코드에의 피복관 모델이 성공적으로 이식되었으며, 고연소도에서의 핵연료 피복관 거동을 잘 예측함이 검증되었다.

INFRA 코드는 IAEA/CRP FUMEX-II와의 Benchmach에 참여하여 지속적인 검증을 수행하여 국제적인 인증을 받을 계획이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] A.T. Donaldson' "In-Reactor Creep Behaviour of Zircaloy Under Variable Loading Conditionss In IFA-585", HWR-413, October, 1994.
- [2] M.A. McGrath, "In-Reactor Creep Behaviour of Pre-Irradiated Zircaloy-4 Under Tensile Hoop Stresses (IFA-585.4)", HWR-532, Jan. 1998.
- [3] 이찬복 외, "UO₂ 핵연료봉 성능 분석코드 INFRA 개발", 2001 한국원자력학회 추계 학술발표회 논문집, 227, 2001.
- [4] C.B. Lee, et al, "RAPID model to predict radial burnup distribution in LWR UO₂ fuel", J. of Nuclear Mater., vol.282, p.196, 2000.
- [5] 이찬복 외, "가돌리니아 가연성독봉의 반경방향출력분포 예측모델 개발 ", 1999 추계 한국원자력학회 학술대회, 1999.
- [6] 김대호 외, "고연소도 핵연료의 핵분열 기체 팽윤 모델 ", 1998 추계 한국원자력학회 학술대회, 1998.
- [7] 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.
- [8] C.B. Lee and Y.H. Jung, "An Attempt to Explain High Burnup Structure Formation Mechanism in UO₂ Fuel", J. of Nuclear Mater., vol.279, p.207, 2000.
- [9] 방제건 외, "핵연료 피복관 Creep-out 모델 개발", 1998 추계 한국원자력학회 학술대회, 1998.
- [10] 방제건 외, "Development of LWR Fuel Zircaloy-4 피복관 부식모델 개발",

1999 춘계 한국원자력학회 학술대회, 1999.

- [11] D.D. Lanning, et al, "FRAPCON-3 : Modifications to fuel rod material properties and performance models for high burnup application", NUREG/CR-6534, PNNL, 1997.
- [12] M. Suzuki, "Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V(ver.1), JAERI-Data/Code 2000-030, JAERI, 2000.
- [13] W. Hering, Code Manual CARO ver. D5.5, KWU, 1995.
- [14] 방제건 외, "INFRA 코드 피복관 성능모델 검증보고서", 발간예정, 2002.