

소결체 재정렬 모델에 의한 핵연료봉 피복관의 완화 해석  
Analysis of Cladding Relaxation of Fuel Rod by Pellet Rearrangement  
Model

김영민, 양용식, 이찬복, 김대호, 방제건, 정연호

한국원자력연구소  
305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

유한요소분석 프로그램의 실증을 위하여 Halden의 재조사 시험 핵연료봉의 피복관 신장 실험치와 유한요소해석 프로그램에 의한 계산치를 비교·분석하였다. 실험에서 나타나는 피복관 완화 현상을 기술하기 위하여 소결체에 대한 재정렬 모델을 도입하였다. 시험시점 4.5일을 기준으로 그 이전에는 마찰계수가 0.5일 때, 그 이후에는 0.55일 때 피복관 신장의 실험치와 계산치가 잘 일치하였다. 핵연료봉 온도의 실험치 및 계산치의 차는 피복관 신장 계산 결과에 큰 영향을 미쳤다. 재정렬 모델로 선정된 고온 조사 크립변형률 속도식의 상수값의 변화에 따라 계산치의 변화가 심하였다. MATPRO 크립 모델에 의한 소결체의 크립 변형률은 재정렬 변형률에 비해 무시할 수 있을 정도로 작았다. 피복관 신장을 보다 정확히 계산하기 위하여 실험치 및 계산치의 온도 차 해소, 적합한 재정렬 모델 설정, 마찰계수의 변화특성 분석이 필요하다.

Abstract

The clad elongation calculated by the finite element program in INFRA code was compared with experimental results from re-irradiation tests for UO<sub>2</sub> PWR rods in Halden. Rearrangement within pellet was introduced in order to describe the experimental relaxation of clad. Irradiation creep strain rate was selected as a mathematical expression for rearrangement, but the related constant was newly determined. Calculational and experimental results were well in agreement at frictional coefficients between 0.5 and 0.55. But results were very sensitive to the difference between calculated and measured fuel rod temperature, and to the change in the value of rearrangement model constant. This requires the accurate calculation of fuel rod temperature and the more appropriate rearrangement model.

1. 서 론

연소도 100 MWd/kgU-rod avg.까지의 핵연료봉의 노내 거동을 평가하는 핵연료봉 성능

분석 코드 INFRA가 한국원자력연구소에서 개발되었다[1]. INFRA 코드에는 고연소도 핵연료의 주요 손상 거동의 하나인 PCMI 분석 기능을 추가하기 위하여 소결체 및 피복관의 기계적 거동을 계산하는 유한요소분석모듈이 삽입되어 있다. 유한요소분석모듈을 통해 소결체 및 피복관의 변형량, 변형률, 응력 및 PCMI시 소결체와 피복관 사이에 작용하는 접촉응력(contact pressure)을 계산할 수 있다.

여러 핵연료봉 제조사 시험 결과에 의하면 PCMI시 나타나는 피복관 신장(elongation)은 출력의 크기에 따라 증가하다가 어느 정도 이상의 고출력에서는 오히려 감소하였다[2]. 이러한 현상을 피복관 완화(relaxation)라고 하며, INFRA 코드의 유한요소분석 모듈에 피복관 완화를 설명할 수 있는 모델이 추가로 필요하였다. 조사 크립 변형률 속도식이 완화모델로 제시되었지만[2], 이는  $UO_2$ 에 대한 MATPRO 크립모델[3]과 그 형태가 유사하고 단지 상수값이 실험치에 맞추어 새로이 결정되었다. MATPRO 크립모델에는 그 고유한 상수값이 제시되어 있다. 따라서 MATPRO 크립모델을 통한 피복관 완화의 설명가능 여부를 판단하여야 하고, 만약 설명이 불가능할 경우에는 다른 모델을 도입하여야 한다.

본 연구에서는 유한요소분석 프로그램의 실증을 위하여, 피복관 완화모델을 설정하였고, 피복관 신장(elongation)에 대한 유한요소분석 프로그램에 의한 계산치와 핵연료봉 제조사 시험에 의한 실험치를 비교하여 핵연료봉 피복관 완화 특성을 분석하였다.

## 2. 피복관 완화

시험결과에 의하면 핵연료봉에 고출력이 유지될 때 피복관의 신장 특성에 있어 완화라는 현상이 발생한다. 완화는 고출력으로 피복관의 온도가 더 높아질 때 열팽창에 의해 피복관이 더 늘어난다고 예상되지만, 오히려 그 반대로 길이가 줄어드는 현상이다. 그림 1에 출력 변화 및 그에 따른 피복관 신장 특성을 나타내었다. 그림 1의 A-B 구간의 선출력에서는 소결체와 피복관이 접촉하지 않은 상태이고 각자 독립적으로 열팽창한다. B-C의 선출력에서 강도가 약한 PCMI가 발생한다. C-D의 선출력에서는 PCMI 강도가 더욱 커지기 때문에 접촉력에 의한 피복관 신장이 증가한다. 그러나 어느 정도 시간이 경과하면 오히려 신장되었던 피복관의 길이가 감소하는 완화가 일어난다. D-E 구간에서는 추가적인 완화가 발생하고, E-F 구간에서는 열수축이 일어난다.

소결체는 열팽창에 의해 모래시계 모양으로 변형되고, PCMI가 일어날 때 그 상·하부의 뿔족부(cusp)가 피복관을 밖으로 밀어내어 융기(ridging) 및 신장이 생긴다. 완화의 원인은 고출력이 유지될 때 발생하는 소결체의 부피감소를 들 수 있다. 소결체의 부피가 감소하면 뿔족부의 크기가 줄어들고, 당연히 피복관을 미는 접촉력이 작아져 완화가 발생한다. 고출력에서 소결체의 부피가 감소하는 원인은 핵연료의 고밀화와 크립이 알려져 있다. 또 다른 원인으로 고출력에서 균열에 의해 발생한 소결체의 빈공간에 소결체 조각이 이동하는 재정렬(rearrangement)을 고려할 수 있다.

## 3. 계산절차

Halden에서 시험에 사용된 핵연료봉은 원자로에서 50 MWd/kgUO<sub>2</sub>까지 연소된 표준 PWR 핵연료봉이다. 표 1에 시험에 쓰인 핵연료봉의 특성자료를 나타내었다. 이 핵연료봉은 소결체와 피복관이 이미 접촉한 상태(soft contact)에서 시험이 수행되었다. 그림 2에는 시간에 따른 핵연료봉 중심 온도의 측정치와 INFRA 코드에 의한 계산치를 나타내었다. INFRA 코드에 의해 계산한 온도가 측정치보다 구간에 따라 최고 50℃ 정도 과소평가되고 있다. 핵연료성능분석코드에 의한 성능분석시 50℃ 이내의 온도차는 보통 허용되고 있다. 그림 3에는 시간에 따른 선출력을 나타내었다. INFRA 코드 계산치와 실험치가 잘 일치하고 있다.

약 80일간의 시험기간을 총 67개의 time step으로 나누어 계산을 수행하였다. 각 time step에서 INFRA 코드에서 계산된 핵연료봉 제원, 물성, 온도를 입력으로 하여 유효요소분석 모듈에서 소결체 및 피복관의 기계적 거동을 계산하였다. 재정렬 모델은 다음과 같이 조사 크립 변형률속도 모델의 형태를 유지하였고, 상수는 시험결과와 curve fitting하여 구하였다.

$$\dot{\epsilon}_e^{ra} = 1.5 \times 10^{-27} F \sigma_e,$$

여기서  $\dot{\epsilon}_e^{ra}$ 는 재정렬 변형률속도,  $F$ 는 핵분열속도(fissions/(m<sup>3</sup>·s)),  $\sigma_e$ 는 소결체에서 재정렬되는 영역의 유효응력(MPa)이다. UO<sub>2</sub> 소결체에 대한 크립 모델로는 MATPRO 모델을 사용하였다. UO<sub>2</sub> 소결체와 Zircaloy-2 피복관 사이의 마찰계수는 Nakatsuka가 구한 0.4~0.6의 값을 적용하였다[4].

#### 4. 계산 결과

그림 4에 재조사 시험 핵연료봉의 피복관 신장 변화를 ① 마찰계수가 0.5이고 재정렬을 고려한 경우, ② 마찰계수가 0.55이고 재정렬을 고려한 경우, ③ 마찰계수가 0.55이고 재정렬을 고려하지 않은 경우에 대하여 각각 나타내었다. 그림 4에서 마찰계수가 0.55일 때 약 4.5일 이후(그림 3에서 선출력이 약 14 kW/m 이상일 때) 재정렬을 고려한 경우가 고려 안한 경우 보다 피복관 신장이 작게 나타나고 있고 실험치와 보다 더 일치하고 있다. 이는 PCMI를 해석할 때 재정렬 모델을 적용하는 것이 타당함을 의미한다. 또, 4.5일 이전에서는 마찰계수가 0.5이고 재정렬을 고려한 경우가, 그 이후에는 마찰계수가 0.55이고 재정렬을 고려한 경우가 실험치와 잘 일치하고 있다. 이로부터 마찰계수가 시간에 따라 다른 값으로 주어지는 것이 바람직하다고 판단된다. 피복관 신장의 실험치와 계산치가 차이가 생기는 구간은 그림 2에서 온도의 실험치와 계산치가 차이가 나는 구간과 일치하고 있다. 온도에 대한 실험치와 계산치의 차이가 피복관 신장의 실험치와 계산치의 불일치하는 일차적 요인이라고 판단된다.

그림 5에는 재조사 시험 핵연료봉의 피복관 신장 변화를 재정렬을 고려한 경우에 대하여 마찰계수에 따라 나타내었다. 마찰계수가 증가할수록 피복관 신장이 크다. 그 이유는 PCMI시 피복관에 접촉력이 작용하는데, 그 양의 축방향 성분의 크기가 Coulomb의 마찰법칙에 따르면 마찰계수에 비례하기 때문이다[5]. 그림 5에서 4.5일 기준으로 그 이전에는 마찰계수

가 0.5일 때, 그 이후는 0.55일 때가 실험치와 잘 일치한다.

그림 6에는 재조사 시험 핵연료봉의 4~5일 사이의 선출력 대 피복관 신장을 마찰계수와 재정렬 모델 적용 여부에 따라 나타내었다. 그림 6에서 피복관 신장이 마찰계수에 비례하고 있다. 재정렬을 고려하여 계산한 경우 실험치에서와 같이 선출력 14 kW/m에서 완화가 분명하게 나타나고 있다. 선출력 14 kW/m 이하에서 실험치와 계산치가 불일치하는 이유는 온도의 실험치와 계산치가 불일치하기 때문이라고 판단된다.

표 2에는 선출력이 약 14 kW/m로 최대인 시험시점 5.3일에서 소결체 뾰족부의 크립 및 재정렬 변형률을 비교하여 나타내었다. 소결체 크립에 의한 변형률은 재정렬 모델에 의한 변형률에 비해 무시할 수 있다. 소결체의 부피 변화를 일으키는 요인 중에서 고밀화는 INFRA에서 기본적인 형상자료로 유한요소분석모듈에 제공된다. 따라서 고출력에서 소결체의 부피 변화를 일으키는 주된 원인이 재정렬에 의한 물질이동임을 알 수 있다.

## 5. 결론

이상 접촉해석으로 유한요소해석 프로그램의 실증을 위하여 Halden의 재조사 시험 핵연료봉의 피복관 신장 실험치와 유한요소해석 프로그램에 의한 계산치를 비교하여 핵연료봉 피복관 완화 특성을 분석하였다.

일반적으로 핵연료봉 성능분석시 허용되었던 50℃ 이내의 실험치 및 계산치의 온도차는 피복관 신장 계산결과에 큰 영향을 미쳤다. 보다 정확한 핵연료봉 온도 계산이 필요하다. 시험시점 4.5일을 기준으로 그 이전에는 마찰계수가 0.5일 때, 그 이후에는 0.55일 때 두 결과가 잘 일치하였다. 또한 재정렬 모델을 적용한 경우가 적용하지 않은 경우 보다 피복관 완화를 보다 더 정확하게 기술하였다. 피복관 신장은 Coulomb의 마찰법칙에서 예측할 수 있는 바와 같이 마찰계수에 비례하였다. 마찰계수의 크기는 0.5~0.55 사이로 UO<sub>2</sub> 소결체와 Zircaloy 2 피복관 사이의 마찰계수의 실험결과인 0.4~0.6의 범위에서 피복관 신장의 실험치와 계산치가 일치하였다.

피복관 완화 특성을 분석하기 위하여 도입한 재정렬 모델의 수학적 표현으로서 기존에 제시되어 있는 조사 크립 변형률 속도 모델의 형태를 사용하였고, 그 상수값은 실험치와의 curve fitting으로 결정하였다. 상수값의 변화에 따라 계산치가 jump하는 특성을 보여 재정렬 모델에 대해 보다 유연한 수학적 표현이 필요하다고 판단되었다. 소결체의 재정렬 및 크립 변형률을 비교한 결과 크립변형률이 재정렬 변형률에 비해 무시할 수 있을 정도로 작았다. 피복관 완화 특성은 소결체의 재정렬 특성으로 설명이 가능하다고 판단되었다.

보다 정확한 피복관 신장을 계산하기 위하여 정확한 온도계산, 적합한 재정렬 모델 설정, 마찰계수의 변화특성분석이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 이찬복, 방제건, 김대호, 김영민, 양용식, 정연호, “UO<sub>2</sub> 핵연료봉 성능분석코드 INFRA 개발,” 2001 추계원자력학술발표회 논문집, 한국원자력학회 (2001).
- [2] 김영민, 양용식, 이찬복, 김대호, 방제건, 정연호, “유한요소법에 의한 소결체 및 피복관의 기계적 상호작용 해석,” KAERI/TR-2464/2003 (2003).
- [3] Hagrman, D.T., editor, SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO -- A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis, NUREG/CR-6150 (1993).
- [4] Nakatsuka, M., “Measurements of the Coefficient of Friction between UO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pellets and Unirradiated Zircaloy Cladding,” *J. Nucl. Mater.*, **96**, pp. 205-207 (1981).
- [5] 김영석, 소성역학, Σ시그마프레스, 서울 (2001).

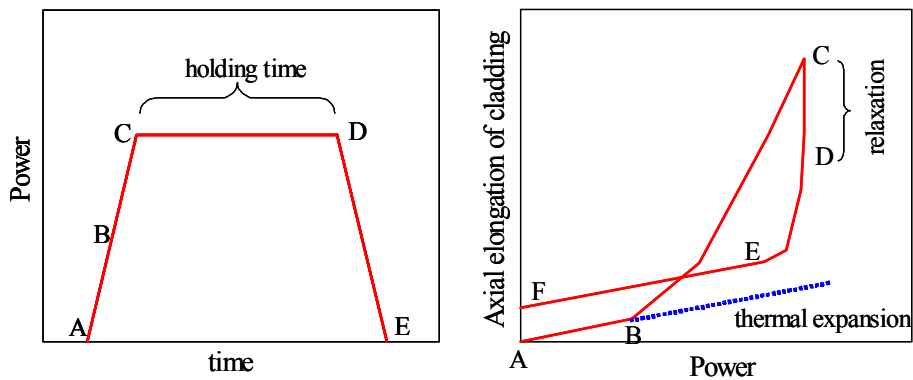


그림 1 핵연료봉 출력 ramp 및 그에 따른 피복관 신장 특성

1

Parameter	Rod 3	Rod 4
Fuel enriched length (mm)	359.6	359.3
Fuel weight (g)	200	200
Initial density (%TD)	95.8	95.8
Initial enrichment (%)	3.6	3.6
Grain size (mm)	10 15	10 15
Initial fuel O.D. (mm)	8.19	8.19
Clad material	Low Sn Zr2	Low Sn Zr2
Initial clad O.D. (mm)	9.5	9.5
Initial clad I.D. (mm)	8.36	8.36
Initial diametral gap (mm)	170	170
Burnup (MWd/kgUO <sub>2</sub> )	50	50

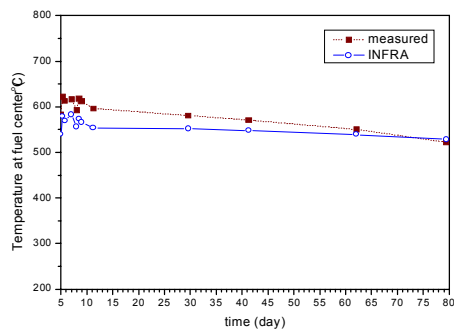
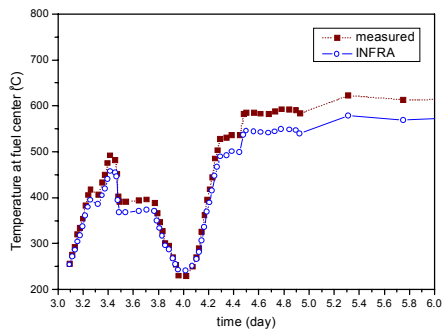


그림 2 재조사 시험 핵연료봉의 시간에 따른 중심 온도

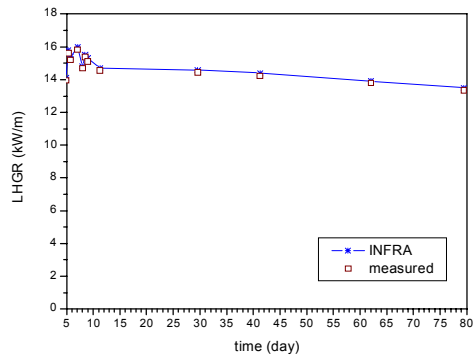
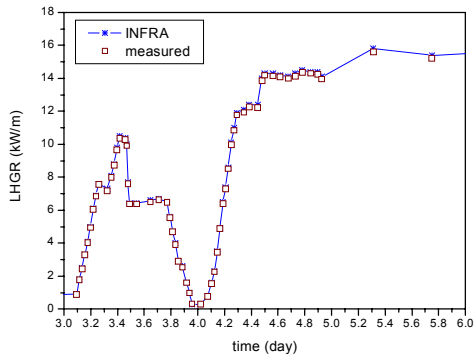


그림 3 재조사 시험 핵연료봉의 시간에 따른 선출력

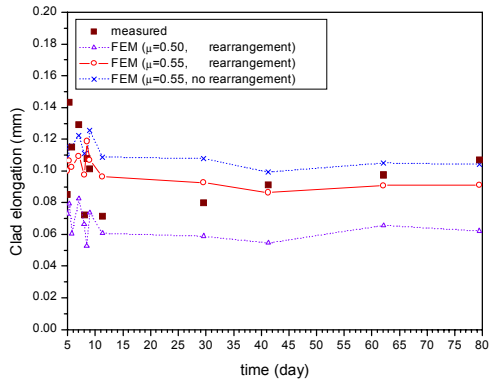
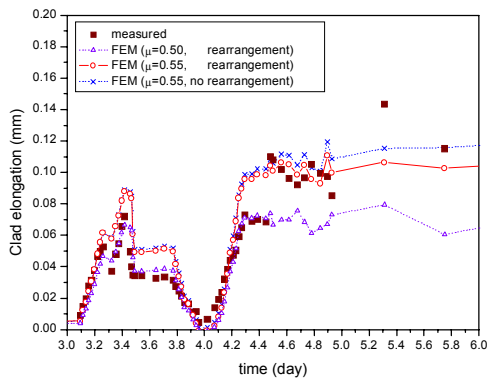


그림 4 재조사 시험 핵연료봉의 완화에 따른 피복관 신장 변화

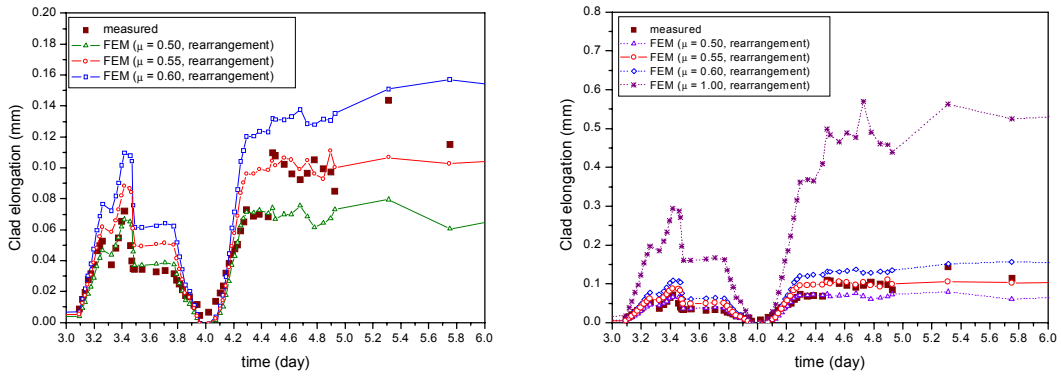


그림 5 재조사 시험 핵연료봉의 마찰계수에 따른 피복관 신장 변화

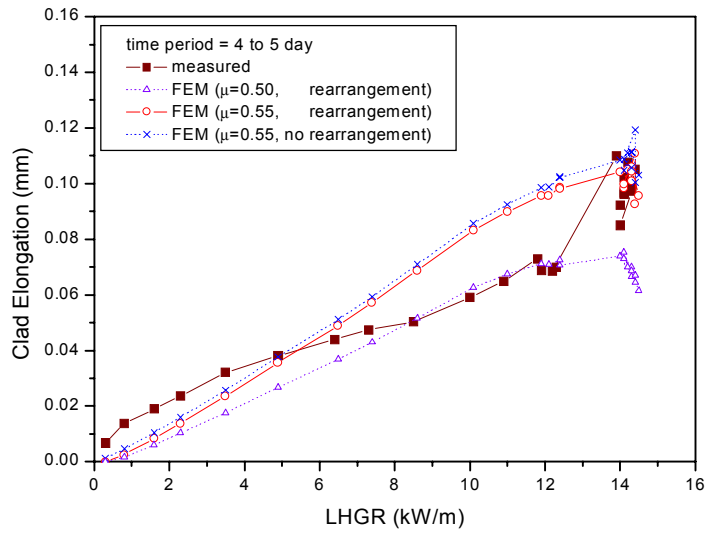


그림 6 재조사 시험 핵연료봉의 마찰계수 및 완화에 따른 선출력 대 피복관 신장

2

5.3

	Creep	Rearrangement
Radial strain (%)	$0.2537 \times 10^{-6}$	$-0.1855 \times 10^{-2}$
Axial strain (%)	$-0.2815 \times 10^{-6}$	$-0.1446 \times 10^{-2}$
Hoop strain (%)	$0.4581 \times 10^{-7}$	$0.3301 \times 10^{-2}$