

'98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

노내에서 지지격자 스프링의 잔류 변위 예측을 위한 방법론

윤경호, 송기남, 강홍석, 방제건, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

노내에서 지지격자 스프링의 잔류 탄성변위는 시간(연소도)에 따라 변하게 된다. 이는 격자판의 중성자 조사에 의한 길이방향의 성장으로 지지격자 셀 크기의 증가와 피복관의 크리프에 의한 직경의 감소 및 중성자 조사에 의한 지지격자 스프링력의 이완으로 인한 것이다. 만일 지지격자 스프링의 거동이 변하여 연료봉을 탄성적으로 지지하지 못할 경우 이것은 연료봉의 유체에 의한 진동을 가속시키게 되며, 연료봉과 지지격자 스프링이나 덤플간의 반복적인 고주기의 충격하중은 연료봉의 지지부와 봉간(grid-to-rod)의 프레팅 마모의 원인이 될 수 있다. 따라서 시간에 따라 변하는 변수들의 영향을 고려한 지지격자 스프링의 잔류 탄성변위를 예측할 수 있는 방법론을 정립하여 새로운 지지격자체의 개발시 건전한 연료봉의 지지거동을 평가할 수 있는 도구로 활용하고자 하였다.

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체에서 지지격자체는 연료봉들이 횡방향 및 종방향으로 정위치를 유지하도록 하여 연료봉간의 수로가 보장되도록 하며, 또한 핵연료집합체가 하나의 지지구조물을 형성하게 하는 핵심 구조부품이다. 지지격자체는 크게 세 가지 관점에서 이의 개발이 진행되어 오고 있다. 이것은 첫째 고연소도 및 장주기 운전에 부합되도록 하기 위해 부식에 대한 저항성이 좋고 중성자 조사에 의한 성장이나 크리프가 적게 일어나는 새로운 재료의 개발에 대한 관점, 둘째 지지부와 봉간의 프레팅 마모를 억제시킬 수 있는 기계구조적 성능의 개선이나 연료봉에서 발생된 열을 냉각수로 효과적으로 전달시킬 수 있는 냉각성능의 향상을 위한 지지격자판의 형상개선과, 그리고 셋째 격자판의 제조성과 이의 품질향상을 위한 제조방법의 개선에 관한 관점이다.

연료봉의 지지는 연료봉과 지지격자 스프링이나 덤플간의 마찰력으로 이루어지며 보통 스프링으로서의 성능이 비교적 나은 인코넬 재료의 스프링을 지르칼로이 격자판에 삽입하거나 인코넬 격자판 자체에 스프링을 형성시켜 연료봉의 지지를 감당하여 왔다. 그러나 이 인코넬 재료의 사용은 노심에서의 중성자 흡수 단면적이 커 중성자 경제성 면에서

바람직하지 않아 이의 사용을 가능한 억제하고 있다. 또한 최근 지지격자체의 개발방향은 지르칼로이 격자판 자체에 형성시킨 스프링만으로 고연소도나 장주기 운전에 적합한 성능을 가질 수 있도록 하고 있다. 그래서 봉간 지지부의 프레팅 마모를 발생시킬 수 있는 유체유발진동의 일차 원인이 될 수 있는 노내에서의 시간(연소도)에 따른 지지격자 스프링의 지지거동을 평가할 수 있는 방법론의 정립이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 노내에서의 시간에 따른 지지격자 스프링의 잔류 탄성변위를 예측할 수 있는 방법론의 정립을 인코넬 및 지르칼로이 지지격자 스프링에 대해 기술하였다.

2. 시간에 따른 변수들

(1) 크리프에 의한 연료봉 직경의 감소

연료봉은 노내 연소기간중 피복관의 재질, 펠렛과 피복관 사이의 틈새, 펠렛의 고밀화(densification)와 팽윤(swelling), 및 연료봉 길이방향에 따라 변화하는 국부적인 중성자 조사선량에 따라 그 직경이 변화하게 되고, 이 변화는 바로 지지격자 스프링의 유효 변위와 스프링력을 변화시키게 된다. 이러한 크리프에 의한 피복관의 직경감소를 계산하기 위한 크리프자료는 CARO-D 코드에 의한 결과를 사용하였다. Fig. 4 는 피복관의 종류에 따른 피복관 직경의 변화를 나타낸 것으로 KWU의 PCA(Prime Candidate Alloy)나 HCW(High Cold Worked)에 비해 KOFA 연료에 사용된 W의 피복관이 크리프에 의한 직경감소가 큰 것으로 나타났다.

(2) 중성자 조사에 의한 스프링력의 이완

인코넬 지지격자와 지르칼로이 지지격자 모두 스프링의 재질은 인코넬이며, 인코넬은 중성자 조사에 의해 스프링력이 지수적으로 이완을 일으킨다. 중성자 조사에 의한 스프링력의 이완은 Fig. 5 와 같이 지수함수로 감소하며 속 중성자속이 8×10^{21} n/cm² 이상에서 조사이완율은 스프링의 형상에 따라 73 %, 88 % 및 90 % 로 달라지게 되며, KOFA 핵연료는 KWU 표준인 90 % 를 사용하였다.

(3) 중성자 조사에 의한 격자판의 길이방향 성장

중성자 조사는 지르칼로이 지지격자판을 성장시켜 지지격자 셀의 크기를 늘리며, 이로 인해 결국 스프링의 유효 변위를 감소시킨다. Fig. 6 은 지르칼로이 격자판이 조사 성장하는 거동을 나타낸 것이다. 격자판의 조사 성장은 연소도에 따라 증가하게 되며 KOFA 핵연료는 KWU 시험결과인 50 MWd/kgU 의 연소도에서 최대 0.3 % 의 성장[2]을 갖는 설계곡선을 사용하였다.

3. 스프링의 잔류 탄성변위 평가 방법론

운전온도에서의 잔류 스프링력은 훅의 법칙(Hooke's Law) 으로 표현된다.

$$F_{res}(t) = C_{OT} \times \delta_{res}(t) \quad (1)$$

- 여기서 $F_{res}(t)$: 임의 시간 t 에서의 잔류 탄성 스프링력
 C_{OT} : 운전온도에서의 스프링 상수
 $\delta_{res}(t)$: 임의 시간 t 에서의 잔류 탄성 스프링 변위

운전온도에서는 상온의 스프링 상수가 유효하지 않으므로 운전온도에서의 스프링 상수는 상온에서의 스프링 상수와 스프링 탄성계수의 관계로부터 구한다.

$$C_{OT} = \left(\frac{E_{OT}}{E_{RT}} \right) \times C_{RT} \quad (2)$$

- 여기서 E_{OT} : 운전온도에서 스프링의 탄성계수
 E_{RT} : 상온에서 스프링의 탄성계수
 C_{RT} : 상온에서의 스프링 상수

초기 스프링 탄성변위는 변형되기 전의 스프링 및 덤플의 높이, 지지격자 셀의 피치, 격자판의 두께 및 초기 피복관 직경 등에 의해 결정될 수 있다. δ_P , δ_T , δ_{CR} 및 δ_{IG} 는 원자로의 운전조건에 의해 계산될 수 있다. 전체 스프링 변위는 피복관의 크리프감소와 격자판의 조사성장 등에 의해 감소되므로 연료봉과 접촉하는 지지격자 스프링의 중성자 조사에 의한 값은 전체(탄성 + 소성) 스프링 변위하에서 수행된 노내 스프링력 이완시험으로부터 구한 연소도에 따른 스프링력 이완곡선에서 직접 결정할 수는 없다. 따라서 중성자 조사에 의한 스프링력의 이완을 구하기 위해서 연소도의 함수로 구해진 전체 스프링 변위의 영향을 받는 시간-가중된 스프링력을 도입하였다.

$$\delta_{res}(t) = \delta_G(t) - [1 - R(t)] [\delta_0 - \delta_P - \delta_T - \delta_{CR}^W(t) - \delta_{IG}^W(t)] \quad (3)$$

- 여기서 $\delta_G(t)$: 스프링력 이완을 고려하지 않은 임의 시간 t 에서의 초기 스프링력
 $R(t)$: 임의 시간 t 에서의 이완된 잔류 스프링력비
 δ_0 : 상온에서 스프링의 초기 변위
 δ_P : 노내에서 계통압력에 의한 연료봉의 변위
 δ_T : 운전온도에서의 격자판과 연료봉간의 열팽창차에 의한 셀의 변위
 $\delta_{CR}^W(t)$: 임의 시간 t 에서의 시간-가중된 연료봉의 직경 감소
 $\delta_{IG}^W(t)$: 임의 시간 t 에서의 시간-가중된 격자판의 길이방향 성장

이에 대한 프로그램의 흐름도를 Fig. 1 에 나타내었다.

4. 적용결과 및 토의

위에서 정립한 방법론을 KOFA에 적용하였다. 핵연료집합체의 축방향으로는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 중성자속이 가장 큰 5번째와 6번째의 지지격자 위치에서 스프링의 잔류변위를 가장 먼저 잃게 되며 8번째의 지지격자 위치에서는 유효영역이 아니라 해석을 수행하지 않았다. 각 핵연료집합체별로 최대 크리프시 모든 지지격자 위치에서 가장 작은 스프링의 잔류변위를 Fig. 8에 나타내었다. 이것은 16×16형 인코넬 지지격자에서 가장 먼저 스프링의 잔류변위가 0 이하를 나타내며, 17×17형, 14×14형의 순으로 나타났다. 축방향으로는 연료봉의 크리프에 의한 직경감소가 가장 큰 5번째와 6번째의 지지격자 위치에서 가장 먼저 잔류변위가 0 이하인 것을 알 수 있었다.

5. 결론

노내에서 지지격자 스프링의 잔류변위가 0 이하로 갇이 발생시 연료봉은 유체에 의한 진동으로 연료봉과 이들 지지부간에 접촉과 분리를 반복하는 고주기의 충격하중이 발생하게 된다. 이는 연료봉의 프레팅에 의한 마모를 유발할 수 있으며 연료봉 손상의 직접적인 원인이 될 수 있다. 따라서 지지격자 스프링이 건전한 연료봉의 지지를 유지하기 위해서는 스프링의 잔류변위가 항상 0 이상인 양의 접촉을 유지하여야 한다. 개발된 방법론은 시간에 따라 지지격자 스프링의 잔류변위를 평가할 수 있으며 만일 새로운 지지격자체의 개발시에도 스프링의 특성곡선과 피복관의 사용에 따른 크리프에 의한 유용한 연료봉 직경의 감소자료와 사용된 지지격자 스프링의 재질에 따른 중성자 조사에 의한 스프링력의 이완곡선을 적용하면 노내에서의 연료봉 지지거동을 유효하게 평가할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Borsdorf, "Verification of Fuel Rod Support in Fuel Assemblies with Inconel Spacer Grids Type AH 42," KWU BT52/93/E346, 1993.
2. K.N.Song and Kunz, "Design of the Fuel Assembly Structure with Zircaloy Spacer Grids," KAERI/KWU Report, U6 312/87/e278, 1987.
3. 김형구, 김규태, "핵연료집합체 지지격자 스프링의 노내 거동분석용 프로그램 BOSCREX의 개발," KAERI/TR-337/93, 1993.
4. 윤경호, "노내 연료봉 지지거동의 예측을 위한 모델 개발," KAERI 선임, 1995.
5. K.T.Kim et al., "Development of A Methodology for In-Reactor Fuel Rod Supporting Condition Prediction," J. of the Korean Nuclear Society Vol. 28, No. 1, pp 17-26, 1996.

Table 1. Geometric data of KOFA

	14×14 type	16×16 type	17×17 type
연료봉의 외경/내경	10.75/9.3 mm	9.5/8.22 mm	9.5/8.22 mm
연료봉당 지지개소	37	48	42
지지격자 재질	Inc./Zry	Inc.	Inc./Zry
스프링 재질	Inc.	Inc.	Inc.
초기 규정 스프링력	24±9 N(Inc.) 40±10 N(Zry) 24±9 N(Zry)	18±6 N	18±6 N(Inc.) 35±10 N(Zry) 18±6 N(Zry)
초기 규정 스프링 변위	0.35 mm(Inc. inner) 0.30 mm(Inc. outer) 0.61 mm(Zry diagonal) 0.492 mm(Zry normal)	0.47 mm(inner) 0.33 mm(outer) - -	0.26 mm(Inc. inner) 0.35 mm(Inc. outer) 0.805 mm(Zry diagonal) 0.432 mm(Zry normal)

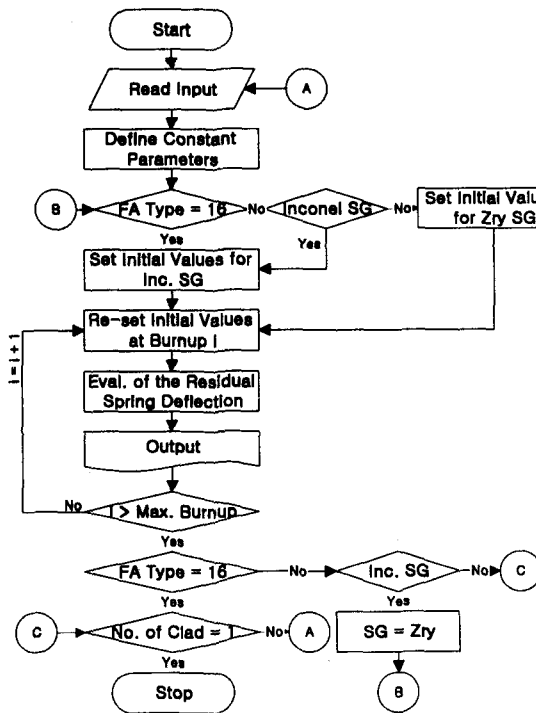


Fig. 1 Flowchart of SGFORCE program.

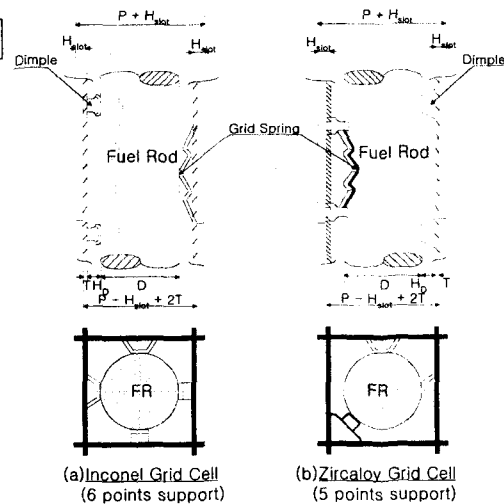


Fig. 2 Schematic diagram of representative spacer grid cell.

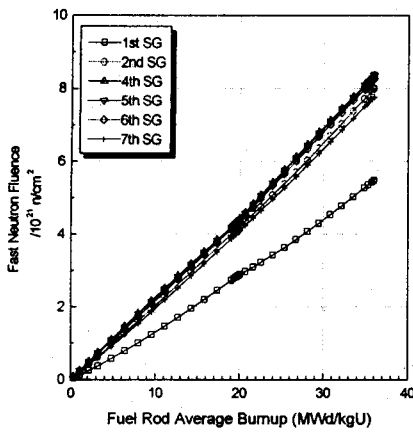


Fig. 3 Comparison of fast neutron fluence as spacer grid position.

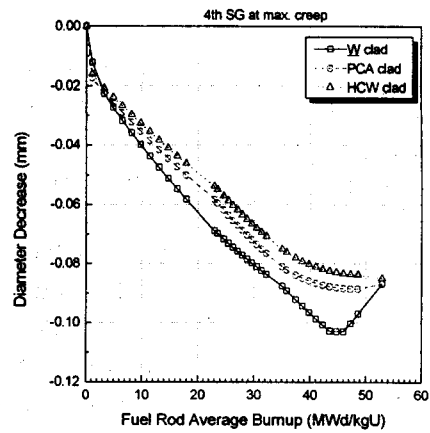


Fig. 4 Comparison of creep data as clad type at max. creep.

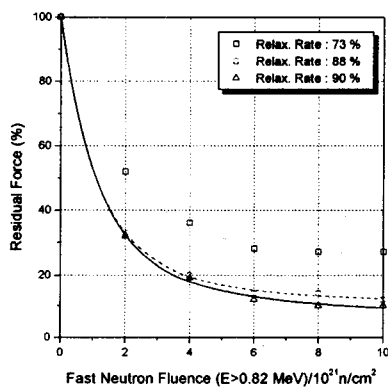


Fig. 5 Spacer grid spring force

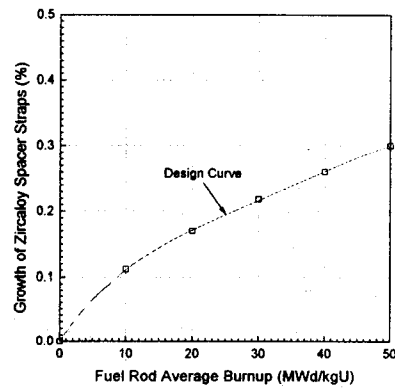


Fig. 6 Irradiation growth of Zircaloy spacer straps

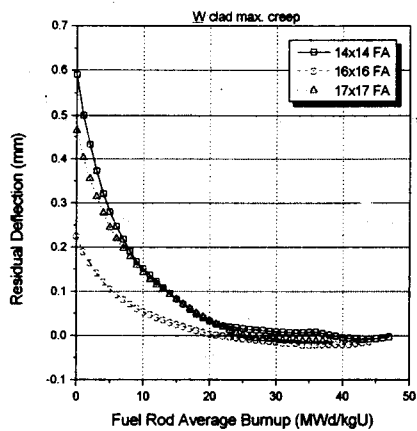


Fig. 7 Comparison of residual deflection as FA type at max. creep.

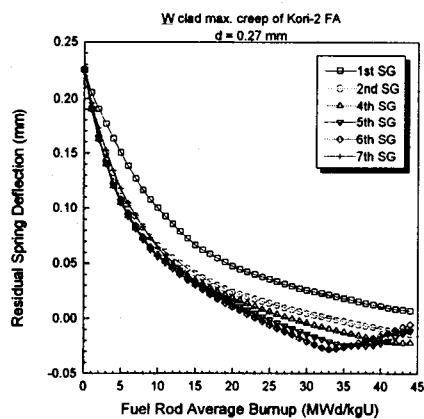


Fig. 8 Residual spring deflection as spacer grid position