

'98 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

너비감소 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도 특성해석 및 평가방법 보정

송기남, 강홍석, 윤경호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

서정민, 이진석

한국원전연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

두께는 일정하나 너비가 균일하게 변하는 판스프링들로 구성된 너비감소 판형 홀다운스프링 집합체에 대한 탄성강성도 특성해석을 수행하였다. 국산 경수로 핵연료의 홀다운스프링 집합체와 동일한 설계공간내에 있도록 고안한 여러 종류의 너비감소 판형 홀다운스프링 집합체 시편에 대한 탄성강성도를 해석적으로 평가하였고 특성시험을 수행하였다. 또한 실제 시험 결과들을 잘 예측할 수 있도록 Euler 보 이론과 변형률 에너지법에 근거한 탄성강성도 평가방법을 보정하였다.

1. 서 론

경수로에 장전되는 핵연료집합체의 최상단에는 홀다운스프링이라 불리는 부품이 부착되어 있는데 이 부품은 중성자 조사에 의해서 핵연료집합체가 성장하는 것과 노심 구조물 및 핵연료집합체 구조물간의 열팽창 차이 등을 수용하면서 노심 운전중에 냉각수 유동력에 의해 핵연료가 원자로 하부 노심판으로부터 부양되는 것을 방지할 수 있도록 충분한 힘으로 핵연료집합체 상단을 누르는 기능을 갖고 있다.⁽¹⁾ 웨스팅하우스(W)형 경수로에 장전되는 핵연료집합체에는 코일(coil)형 홀다운스프링을 사용하는 ABB-CE형 핵연료집합체와는 다르게 판형 홀다운스프링이 부착되어 있는데 판형 홀다운스프링은 코일형 홀다운스프링보다 스프링이 차지하는 수직 공간이 상당히 작은 장점이 있으나 판 스프링의 형상이 기하학적으로 다소 복잡함으로 인하여 판 스프링의 거동을 해석적으로 예측하는 것이 용이하지 않았다. 그런데 근래에 변형률 에너지법에 근거하여 유도된 탄성강성도식으로부터 판형 홀다운스프링의 탄성강성도를 예측할 수 있는 방법이 제안되었다.^(2,3)

현재까지 W형 경수로에 널리 사용되고 있는 판형 홀다운스프링은 크게 두 종류가 사

용되고 있다. 즉, 판의 너비는 일정하되 두께가 균일하게 감소하는 두께감소형 판형 홀다운스프링과 판의 두께는 일정하되 너비가 균일하게 감소하는 너비감소형 판형 홀다운스프링 등이다. 여기서 전자는 W사의 핵연료를 비롯하여 KOFA 연료 등에 사용되고 있으며 후자는 미국의 SPC(Siemens Power Corporation)사가 공급한 핵연료에 사용되고 있는데 후자가 전자에 비해 탄성특성이 양호한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 국산 경수로 핵연료 홀다운스프링 집합체(두께감소 판형 홀다운스프링 집합체)와 동일한 설계공간이 되도록 고안된 2형의 너비감소 판형 홀다운스프링 집합체에 대한 특성시험편 6종을 SUS 304 강으로 제조하여 탄성강성도 해석 및 특성시험을 수행하였다. 또한 Euler 보 이론과 변형률 에너지법에 근거하여 유도된 식과 시험편의 기하학적 치수를 입력자료로 사용하여 예측한 탄성강성도들을 특성시험결과들과 비교·분석하고 실제 시험 결과들을 잘 예측할 수 있도록 보정된 탄성강성도 평가방법을 제안하였다.

2. 너비감소 판형 홀다운스프링 집합체 설계

2.1 너비감소 판스프링 설계

너비감소 판형 홀다운스프링 집합체는 그림 1과 같이 너비가 길이방향으로 균일하게 변하는(감소하는) 형상을 가진 판스프링들로 구성되어 있어서 기존의 국산 핵연료에 사용되고 있는 두께감소 판스프링보다 판스프링의 제조성이 용이하고 탄성특성이 양호한 것으로 알려져 있다. 국산 핵연료에 사용되는 두께감소 홀다운스프링 집합체(판의 기저부위 두께 3.92mm)의 설계공간과 동일한 설계공간을 갖는 너비감소 판형 홀다운스프링 집합체 2형(16x16형 및 17x17형)을 고안하고 설계하였다.

2.2 특성시험용 너비감소 판스프링 시험편 설계 및 제작

핵연료에 사용되는 판스프링의 재질은 Inconel 718이 사용되고 있으나 본 연구에서는 Inconel 718과 탄성계수가 유사한 SUS 304 강으로 너비감소 판스프링의 특성시험용 시험편을 제조하였다. 제조된 판스프링 시험편은 스프링 높이, 스프링 길이, 각도 그리고 설계공차 등이 국산 핵연료 두께감소 판스프링과 동일하도록 설계되었다.

특성시험용 판스프링 시험편은 홀다운스프링 집합체를 구성하는 판스프링의 개수가 1개, 2개 및 3개 등으로 구성되도록 하였다. 한편 SUS 304 강의 물성치를 구하기 위해 별도로 ASTM E8M⁽⁴⁾에 따른 인장시험편을 제조하였다.

3. 탄성강성도 해석 및 특성시험

3.1 탄성강성도 해석

Euler 보 이론과 변형률 에너지법에 근거하여 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도를 예측할 수 있는 탄성강성도 평가식은 판 스프링의 기하학적 형상과 스프링 재질의 물성치들의 함수로서 다음과 같은 형태로 표현된다.⁽³⁾

$$K_{ass} = \frac{1}{\delta_{1F}} = \frac{1}{AA_1 - \frac{AB_1^2}{BB_1 + \sum_{i=2}^n \frac{1}{BB_i}}} \quad \text{----- Eq. (1)}$$

여기서 δ_{1F} 는 최상단 판스프링의 하중 작용점에서 스프링 변위를 나타내며 계수 AA_1 , AB_1 , BB_1 및 BB_i 들은 판 스프링의 기하학적 형상과 스프링 재질의 물성치들의 함수로 표현된다.

3.2 스프링 특성 시험

그림 2는 판스프링 집합체의 특성시험 장치를 개략적으로 나타낸 것으로 판스프링 집합체 상단에서 하중을 가하여 판스프링에 소성변형이 발생할 때까지 하중을 가한다. 특성시험에서 얻은 하중-변위 관계의 자료는 실시간으로 연결된 PC에 저장되며 ORIGIN 프로그램⁽⁵⁾을 이용하여 탄성영역에서 판스프링 집합체의 탄성강성도를 얻는다.

4. 계산결과 및 토의

표 1 및 2와 그림 3은 Eq. (1) 및 특성시험에서 얻은 결과를 비교한 것이다. 표 1 및 2와 그림 3에서 보면 판스프링 개수가 1개인 경우 특성시험 결과는 Eq. (1)로 부터의 결과와 약 10%범위 내외로 일치하고 있다. 여기서 10%정도 차이가 발생하는 것은 특성시험에서는 판스프링 시편의 치수 등에 의한 불균일성과 판스프링 기저부를 screw로 고정 한 것으로 인하여 어느 정도의 회전(rotation)변위가 발생하기 때문으로 추정된다. 판스프링의 개수가 2개 및 3개인 경우 특성시험 결과는 Eq. (1)로 부터의 결과와 20%범위 내외로 일치하고 있다. 여기서 판스프링의 개수가 증가함에 따라 특성시험 결과가 Eq. (1)로 부터의 결과와 차이가 나는 것은 판스프링들 사이의 접촉부위에서 마찰현상에 기인한 것으로 추정된다.

또한 표 1 및 2와 그림 4는 각각의 판스프링에서의 탄성강성도를 구하고 이를 합산하여 구한 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도와 특성시험 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 4에서 보면 조립된 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도를 각각의 판스프링에서의 탄성강성도를 구하고 이를 합산할 경우 특성시험 결과와 약 10%범위 내외로 과대 평가하고 있어서 신뢰성이 있을 수 있을 뿐만 아니라 보수적으로 탄성강성도를 평가할 수 있을 것으로 추정된다.

5. 결 론

너비감소 판형 홀다운스프링 집합체에 대한 탄성강성도 특성해석 및 특성시험을 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 판스프링 기저부의 screw고정 및 시편의 치수 불균일성으로 인한 탄성강성도 감소는 약 10%정도이다.
- 2) 판스프링들 사이의 상호 마찰로 인하여 탄성강성도 식은 탄성강성도를 약 10% 정도 과대 평가하고 있다.
- 3) 보정된 탄성강성도 평가방법은 판스프링 집합체의 탄성강성도를 보수적으로 잘 평가할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Song and Kunz, 1987, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual," Erlangen, KWU Work Report, U6 312/87/e326 (1987).
2. 송기남의 4인, "두께감소 판형 홀다운스프링집합체의 탄성강성도 해석," '96 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, pp. 487~493. (1996).
3. Song K.N., " Evaluation of an Elastic stiffness Sensitivity of Leaf Type HDS," *Transations of KSME(A)*, Vol. 21, No. 8, pp. 1276~1290 (1997).
4. ASTM Designation E 8M-97, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials[Metric].
5. *ORIGIN™ User's Manual Version 4.0* Microcal™ Software, Inc., Northampton, MA, USA (1995).

Table 1. Comparison of Elastic Stiffness from Eq. (1) and Characteristic Test for 16x16 Type

Specimen		Elastic Stiffness (N/mm)			A/C	B/C
		From Eq. (1)	Modified Method	Test Results		
		A	B	C		
1 Leaf	#01	47.354	47.354	42.12	1.124	1.124
	#02	47.806	47.806	42.29	1.130	1.130
	#03	47.746	47.746	41.34	1.155	1.155
2 Leaves	#01	96.985	86.809	83.99	1.155	1.034
	#02	97.358	87.370	83.57	1.165	1.045
	#03	97.426	87.471	82.48	1.181	1.061
3 Leaves	#01	147.088	127.004	115.46	1.274	1.010
	#02	145.898	126.329	116.54	1.252	1.084
	#03	145.891	126.020	117.80	1.238	1.070

Table 2. Comparison of Elastic Stiffness from Eq. (1) and Characteristic Test for 17x17 Type

Specimen		Elastic Stiffness (N/mm)			A/C	B/C
		From Eq. (1)	Modified Method	Test Results		
		A	B	C		
1 Leaf	#01	31.290	31.290	30.29	1.033	1.033
	#02	31.409	31.409	29.84	1.053	1.053
	#03	31.066	31.066	28.95	1.073	1.073
2 Leaves	#01	63.022	57.039	52.24	1.206	1.092
	#02	64.123	56.847	49.68	1.291	1.144
	#03	64.222	58.217	54.33	1.182	1.072
3 Leaves	#01	96.300	84.470	82.04	1.174	1.030
	#02	97.330	85.919	78.25	1.244	1.098
	#03	96.975	85.448	80.89	1.199	1.056

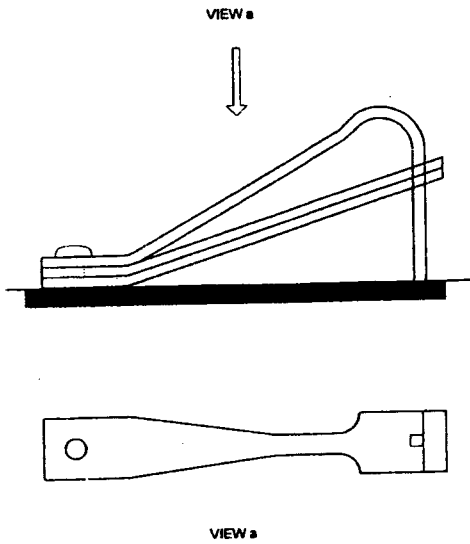


Fig. 1 Leaf Type TW-HDS

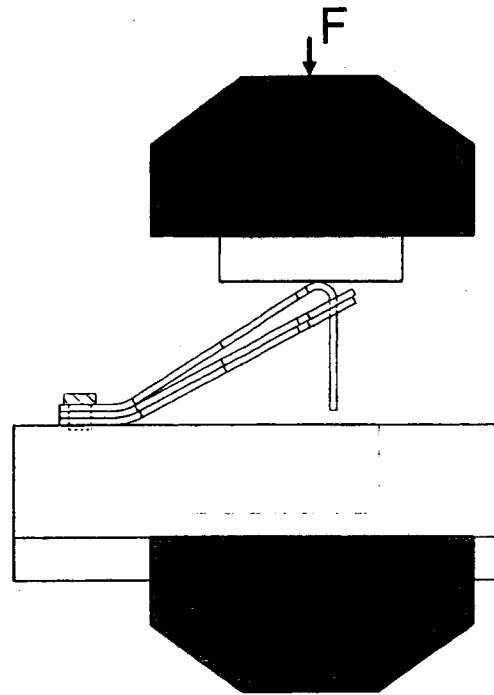


Fig. 2 Schematic View of Experimental Equipment

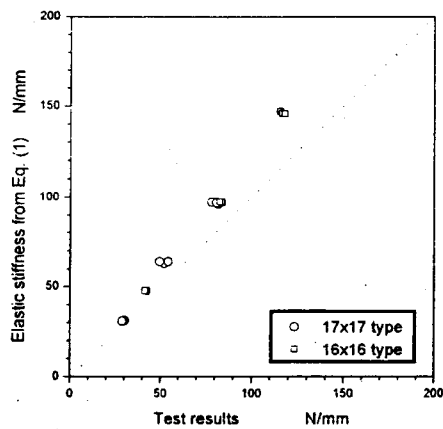


Fig.3 Comparison of test results and elastic stiffnesses from Eq. (1)

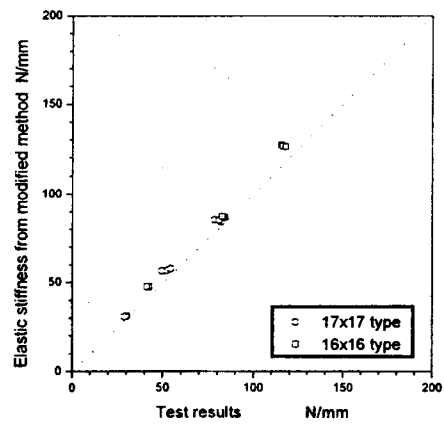


Fig.4 Comparison of test results and elastic stiffnesses from modified method