'02 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

웨스팅하우스형 17x17 개량핵연료 상단고정체 누름스프링 개발

Development of Top Nozzle Holddown Spring for 17x17 Next Generation Fuel Assembly

이진석,이신호,김형구,이준노,전경락

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

웨스팅하우스형 17x17 개량핵연료의 상단고정체 누름스프링 개발을 위하여 재료역학적 보이론 및 시험결과로부터 유도된 탄소성 해석모델과 유한요소법을 이용하여 누름스프링의 특성곡선을 얻었으며 응력해석을 수행하였다. 본 연구에서는 17x17 개량핵연료 집합체의 누름스프링 후보모형으로 3-leaf 와 4-leaf 누름스프링을 사용하였다. 탄소성 해석모델과 유한요소해석으로부터 얻은 스프링 특성곡선은 서로 4~7%의 차이를 보이며 비교적 잘 일치하는 것으로 평가되었다. 두 후보모형은 스프링 특성 및 스프링력, 주요부분에서 응력이 서로 비슷하며 17x17 개량핵연료 집합체의 누름스프링으로서 적합한 것으로 판단된다. 본 연구의 탄소성 해석모델과 유한요소해석 결과는 추후 시제품을 제조하여 특성시험 및 변형률 측정 시험을 통해 검증할 계획이다.

Abstract

Two conceptual holddown spring designs were developed for 17x17 Next Generation Fuel(NGF) top nozzle. One spring pack concept uses three 0.175 inch thick leaves. The other uses four 0.155 inch thick leaves. The room temperature elastic-plastic properties of each spring pack are calculated using the elastic-plastic model derived from classic beam theory and the exiting spring characteristics test. The stress analysis and spring characteristics of each spring pack are also analyzed using FEM(ANSYS 5.7) to verify the elastic-plastic model. The results of the elastic-plastic model have a good agreement to the results of finite element analysis. It is concluded that the 3-leaf 0.175 inch spring pack concept and 4-leaf 0.155 inch spring pack concept are both viable candidates for 17x17 NGF. A series of load-deflection tests will be used to verify the elastic-plastic model and finite element model.

1. 서론

경수로용 핵연료집합체 상단고정체의 누름스프링(Holddown Spring)은 상부노심판에 접촉하여 운전중 냉각수의 부양력 및 유동력에 의한 집합체의 들림(Lift-off)을 방지하는 역할을 하고 있다. 또한 수명기간 동안에 발생하는 안내관의 열적변형 및 중성자 조사에 의한 길이변화를 흡수하면서 집합체의 구조적 건전성을 유지하는 기능을 수행한다. 따라서 수명기간 동안 누름스프링이 제기능을 유지하기 위해서는 다양한 조건에서 적절한 스프링력을 확보해야한다[1].
웨스팅하우스형 17x17 개량핵연료개발 과제에서는 열적성능향상을 위해 기존 3개의 중간혼합형 지지격자를 5개로 늘렸으며 I형 스프링, 베인 형상변경, 중간지지격자판의 높이 증가등에 따른 수력저항 증가로 인하여 17x17 RFA(Robust Fuel Assembly)대비 수력저항이 110%로 상승할 것으로 예상한다. 따라서 증가된 수력저항을 흡수할 수 있는 새로운 누름스프링을 개발하여 노내에서 집합체의 건전성을 확보하고자 한다.

본 연구에서는 누름스프링의 재료역학적 보이론 및 시험결과로부터 유도된 탄소성 해석모델을 제시하고 이를 이용하여 17x17 V5H 및 17x17 RFA에 적용된 스프링의 0.155 inch 두께를 0.175 inch로 증가시킨 Thick 3-leaf 누름 스프링과 기존 스프링의 두께를 유지하면서 스프링을 한 장 추가하여 스프링력을 증가시킨 4-leaf 누름스프링 후보모형을 개발하였으며 최종후보를 선정하기 위하여 스프링 특성곡선, 응력값을 고려한 타당성 검토를 수행하였다. 또한 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 응력해석을 수행하여 각 후보모형의 스프링 특성곡선을 비교하였고 스프링의 주요부분인 스프링 굽힘부분(Root Bend Line)에서 응력을 분석하였다.

2. 누름 스프링 후보모형 개발

17x17 개량핵연료 집합체가 노내 운전조건에서 수력저항으로 인해 들리지 않기 위해서는 최소 400 lbs(상온조건)의 누름스프링력이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 먼저 기존 스프링의 특성곡선과 재료역학적 보이론으로부터 구한 탄소성 모델을 이용하여 스프링의 두께를 증가시키는 방법과 스프링의 개수를 증가시키는 방법으로 누름스프링을 개발하였다.

표 1은 탄소성 모델에 적용된 두 후보모형의 주요치수를 보여주고 있다. 식 (1)은 누름스프링의 주요치수를 이용하여 스프링 상수(K)를 예측하는 관계식이며 식 (2)와 (3)은 재료의 항복강도를 이용하여 항복점에서 하중과 변위를 구하는 식이다. 식 (4)는 하중과 변위의 관계를 나타내는 일반식으로서 식 (1), (2), (3)을 식(4)에 대입하여 항복점까지의 특성곡선을 나타낸다. 식 (5)와 (6)은 기존 스프링 특성시험을 통하여 얻은 경험식으로서 소성구간에서 변위와 하중의 관계를 보여주고 있다.

$$K = \frac{nEwt^3F}{4L^3R} \qquad (1)$$

$$P_y = \frac{nwt^2 s_y}{6L} \tag{2}$$

$$d_y = \frac{2L^2 R s_y}{3EtF} \tag{3}$$

$$P = Kd \qquad (d \le d_y) \tag{4}$$

$$P = P_y + K(d - d_y) - 1.8\left[\frac{(d - d_y)}{2.5 d_y}\right]^{3/2} \qquad (d_y \le d \le 3.5 d_y) \tag{5}$$

$$P = 1.7 P_y \qquad (3.5 \ddot{a}_y \le \ddot{a}) \tag{6}$$

여기서,

d	=	Deflection, inch	P	=	Load, lbs
d_y	=	Yield Deflection, inch	P_y	=	Yield Load, lbs
E	=	Modulus of Elasticity	R	=	Thickness Taper Ratio
F	=	Tail Fixity Factor(= .92)	s_y	=	Yield Stress, psi
K	=	Elastic Stiffness, lbs/inch	t	=	Leaf Thickness, inch
L	=	Moment Arm, inch	w	=	Leaf Width, inch
n	=	Number of Leaves			

위의 탄소성 모델을 통하여 예측된 스프링 특성곡선은 그림 1과 같으며 최대 변위 2.0 inch에서 3-leaf 스프링은 740 lbs, 4-leaf 스프링은 750 lbs를 보여 요구되는 누름스프링력을 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 3-leaf 스프링 상수(K)는 611 lbs/inch 이며 4-leaf 스프링 상수는 554 lbs/inch 로서 3-leaf 스프링의 K값이 4-leaf 스프링보다 큰 반면 소성구간에서 최대하중은 4-leaf 스프링이 오히려 약간 크게 나타났다.

3. 유한요소해석

17x17 개량핵연료 집합체의 상단고정체는 기존 17 V5H와 17 RFA와는 달리 그림 2와 같이 스프링 클램프가 상부판에 일체형으로 주조되어 스프링 나사 손상에 따른 누름력 상실을 방지하도록 설계되었다. 또한 Thick 3-leaf와 4-leaf 스프링 팩의 두께증가를 수용하도록 스프링 포켓의 바닥면을 각각

0.155 inch와 0.060 inch 홈을 갖도록하였다. 본 해석에서는 상단고정체의 구조적 대칭성과 주 관심인 누름스프링의 거동에 미치는 영향을 고려하여 스프링 클램프를 포함한 일부분 만을 모델링 하였다. 누름 스프링 모델은 누름스프링의 스프링 특성과 응력결과에는 영향을 주지 않지만 변형후에 상단고정체의 다른부분과 간섭을 평가할 수 있도록 스프링의 탱아암(Tang Arm)을 포함하였다.

유한요소해석을 위해 SolidWorks[2]를 사용하여 누름스프링과 상단고정체를 3차원 모델링하였으며 유한요소해석에는 범용 프로그램인 ANSYS Ver. 5.7[3]을 사용하였다. 누름스프링의 탄소성 거동을 모사하기 위한 유한요소모델은 그림 3와 같이 상단고정체의 스프링 클램프부분과 홀다운 스프링 그리고 원자로 내부 상부노심판을 모사한 판으로 구성되어있다.

3.1 유한요소 모델링

유한요소 해석에 사용된 모델은 누름스프링, 상단고정체의 스프링클램프 부분, 하중 가중판으로 구성되어 있으며 실제 운전조건에서 발생하는 최대 하중 및 경계조건을 사용하였다. 예비해석을 통하여 스프링의 이탈을 방지하는 스프링핀은 누름 스프링의 거동에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 유한요소모델에 포함하지 않았으며 그림 2의 상단고정체 유로판도 유한유소모델에서는 제외하였다. 누름스프링, 상단고정체, 하중 가중판의 유한요소모델에는 10개 절점의 사면체요소(Solid92)가 사용되었으며, 가중판은 강제변위를 주어 강체(Rigid Body)거동을 하도록 정의하였다. 누름스프링은 3-leaf의 경우 5471개의 요소로, 4-leaf는 5968개의 요소로 모델링 하였으며 상단고정체는 약 2630개의 요소로 모델링 되었다. 원자로 상부노심판을 모사한 가중판과 상부 스프링, 스프링과 스프링, 하부 스프링과 상단고정체 상부판의 윗면은 접촉에 의해 하중을 전달하는 불연속 구속 상태에 있다. 이러한 접촉을 고려하기 위하여 접촉요소(Conta174 와 Targe170)를 사용하였으며, 탄소성해석모델과 비교하기 위하여 모든 부분에서 마찰에 의한 손실은 고려하지 않았다. 또한 하중조건으로 인하여 스프링은 대변형을 받게 되므로 이를 고려하여 기하학적 비선형 해석을 수행하였다.

3.2 재료물성치

누름스프링의 재질은 응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking)에 대한 저항성이 크고 항복강도가 높은 인코넬 718 합금이며 상단고정체의 재질은 주조용 스테인레스강(CF3)이다. 유한요소 해석에 사용된 상온에서의 각 재료의 물성치는 표 2와 같다[4]. 누름스프링의 탄소성 거동 해석을 위해 각 재료의 응력-변형률 선도를 입력값으로 사용하였다.

3.3 하중 및 경계조건

누름스프링은 노내에서 원자로 내부 상부노심판에 의해 변위하중을 받게되며 상부판이 스프링 클램프 윗면에 닿을 때가 최대 변위가 된다. 따라서 하중조건으로는 스프링의 자유높이로부터 스프링 클램프의 윗면까지인 변위를 고려하여 상부노심판을 모사한 가중판에 강제변위를 주어 실제 운전조건을 모사하도록 하였다.

17x17 개량핵연료 누름스프링은 기존 17x17 V5H와 RFA 연료에서 누름스프링을 고정시키기 위해 사용된 스프링 나사대신 상단고정체의 상부판과 일체형으로 주조된 스프링 포켓에 스프링의 끝부분을 삽입하는 방법으로 고정되며 스프링 핀은 스프링을 고정시키는 역할보다 스프링의 이탈을 방지하는 역할을 한다. 따라서 해석에서는 스프링 핀을 고려하지 않는 대신 스프링의 강체운동을 방지하기 위해 각 스프링 바닥의 곡면부위를 x, z 방향에 대해 고정시켰다. 또한 상단고정체의 유한요소모델은 대칭경계조건과 바닥면을 y 방향에 대해 변위를 고정시켰다.

3.4 해석결과

유한요소 탄소성 해석으로부터 가중판의 변위에 따른 스프링의 반력을 구하여 그림 4와 같은 스프링 특성곡선을 얻었다. 3-leaf 의 경우 탄성부분에서 스프링 상수는 605 lbs/inch 이었으며 최대변위에서 스프링력은 775 lbs 이었다. 4-leaf의 경우 스프링 상수는 549 lbs/inch이었으며 최대변위에서 스프링력은 804 lbs 이었다. 응력해석 결과, 3-leaf 및 4-leaf 스프링의 최대응력은 상부 스프링의 굽힘부분에서 발생하는 것으로 나타났으며 굽힘부분에서 폭방향으로 평균한 최대주응력은 각각 205 ksi와 200 ksi로서 응력측면에서도 서로 큰 차이를 보이지 않고 있으나 4-leaf 스프링이 다소 유리한것으로 나타났다.

4. 결론

17x17 개량핵연료 누름스프링 후부모형인 3-leaf와 4-leaf에 대해 탄소성모델 및 접촉요소를 이용한 유한요소해석과 다음과 같은 결론을 얻었다.

재료역학적 보이론 및 기존 누름스프링의 시험결과로부터 유도된 탄소성모델은 접촉요소를 이용한 유한요소 해석과 매우 잘 일 치하는 것으로 평가된다. 3-leaf와 4-leaf 스프링에 대한 스프링 상수와 최대 스프링력을 비교해본 결과 스프링 상수는 약 1%의 차이를 보였으며 스프링력은 약 4~7%차이를 보여 서로 잘 일치한다고 할 수 있다. 또한 탄소성모델이 기존 스프링의 특성시험결과를 반영한 점을 감안한다면 유한유소모델 또한 스프링 특성을 잘 예측하고 있다고 판단된다. 탄소성모델과 유한요소모델은 추후 수행될 스프링 특성시험의 결과로 검증할 계획이다.

개량핵연료 과제에서 제안된 3-leaf 및 4-leaf스프링은 탄소성모델과 유한요소해석을 통하여 스프링 특성 및 스프링력, 탄소성거동, 응력상태를 비교해본 결과 큰 차이를 보이지 않으며 두 후보모델이 설계관점에서 모두 만족되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원으로 작성되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] “Mechanical Design Manual”, Westinghouse Proprietary, 1999

[2] Solidworks 2000, User’s Manual, SolidWorks Co., 2000

[3] ANSYS, User’s Manual, Version 5.7, Swanson Analysis Systems, Inc.

[4] “Material Property Manual”, Westinghouse Proprietary, 1990

표 1. **누름스프링의 주요치수**

Items	Thick 3-Leaf	4-Leaf
Number of Leaves per Spring Pack, N	3	4
Leaf Thickness, Inches	0.175	0.155
Leaf Width, inches	0.750	0.750
Top Leaf Free Height, inches	2.555	2.655
Top Leaf Length, inches	5.317	5.317
Top Leaf Tip Inside Radius, inch	0.215	0.212
Bottom Leaf Tail Length, inch	0.865	0.895
Taper Ratio	2:1	2:1

표 2. **상단고정체 및 누름스프링의 재료물성치**

Parameter	CF3	Inconel 718
Young' s Modulus, psi	2.89×10^7	2.9×10^7
Poisson Ratio	0.263	0.294
Yield Strength, psi	25×10^3	150×10^3
Ultimate Strength, psi	65×10^3	195×10^3

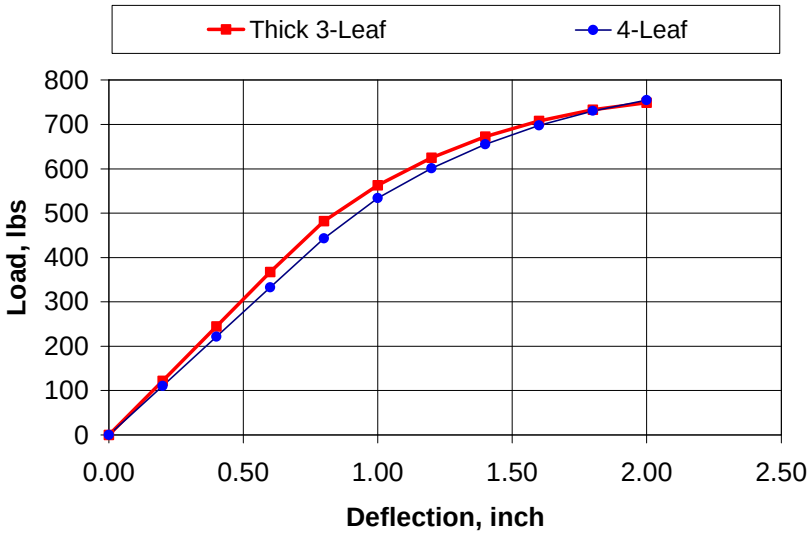

그림 1. 탄소성 모델로 예측한 누름스프링 특성곡선

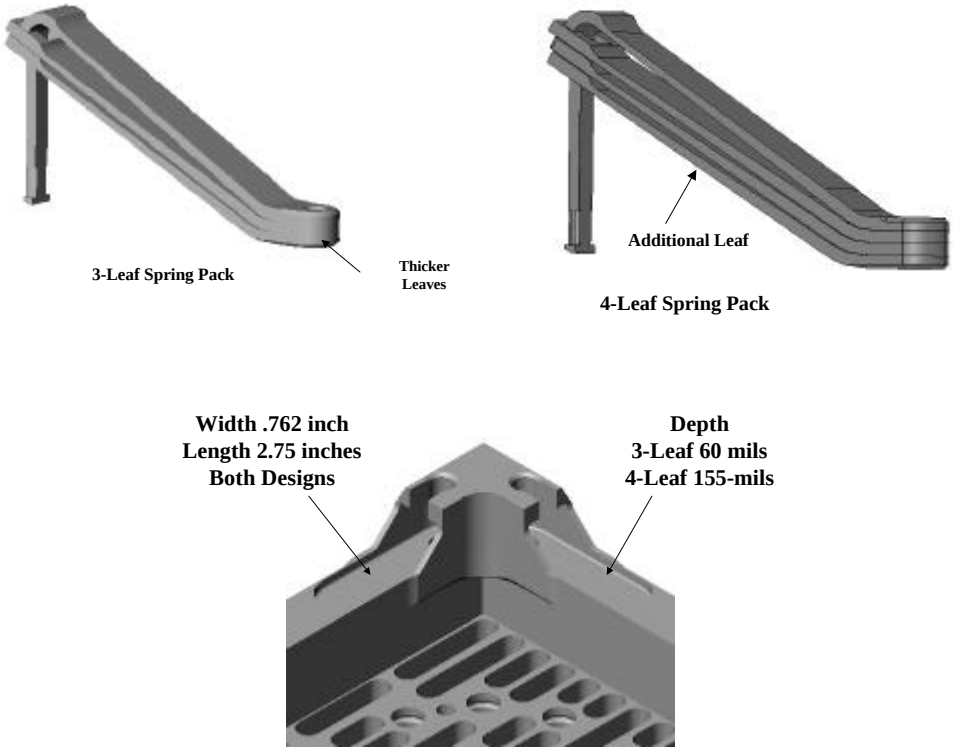

그림 2. 상단고정체 및 누름스프링의 3차원 솔리드 모델

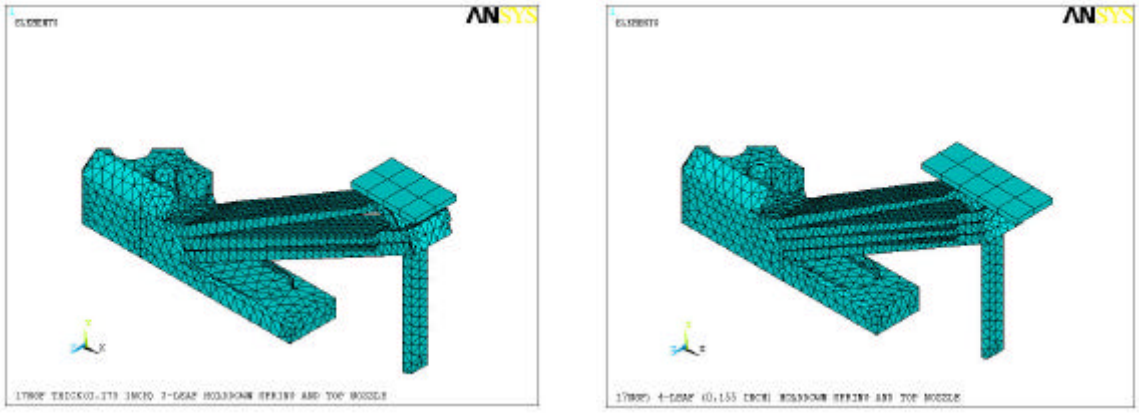

그림 3. 상단고정체 및 누름스프링의 유한요소모델

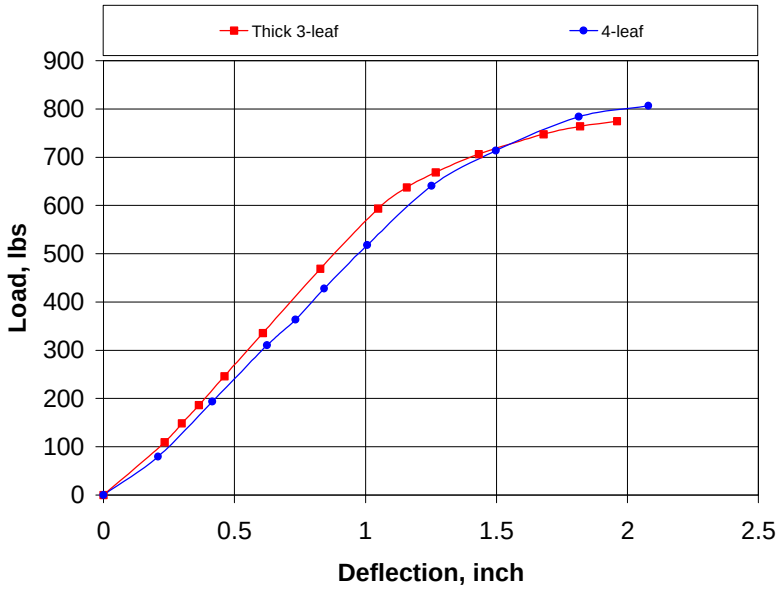

그림 4. 유한요소해석으로 예측한 누름스프링 특성곡선