2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

한국표준형 핵연료 상단고정체 누름 스프링 최적설계

Top Nozzle Holddown Spring Optimization of KSNP Fuel Assembly

이성기, 박남규, 김형구, 이준노, 김재원
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

한국표준형 원자로용 핵연료 상단고정체 누름스프링의 무게를 최소화하는 최적설계를 수행하였다. 스프링 소선 밀도가 일정하다는 가정하에 스프링소선 직경, 평균 직경, 코일회수, 자유장길이 등의 설계변수를 이용하여 부피를 최소화 하였으며, 또한 제한조건으로는 전단응력이 스프링의 허용전단응력 이내로 하고, 스프링소선 직경 및 평균 직경이 핵연료의 다른 구성부품과 양립이 되도록 범위를 설정하였다. 이러한 조건을 바탕으로 운전중 부과되는 설계요구조건을 만족하면서 무게가 최소화된 누름스프링에 대한 최적설계를 수행하였다.

Abstract

Design optimization is performed to minimize the weight of top nozzle holddown spring for Korea Standard Nuclear Plant (KSNP) fuel assembly. Under the assumption that spring material density is constant, the volume minimization is executed by using the design variables, viz. wire diameter, mean coil diameter, number of coil turns, free length etc. And also constraint conditions are established to make sure that shear stress is not more than allowable one, and wire diameter and mean coil diameter are within the compatible range of the fuel assembly structural components. Based on these conditions, the least-weight-gained optimum design of the holddown spring is prosecuted by reflecting design conditions during the normal operation.

1. 서 론

상단고정체는 안내관에 의해 연결된 핵연료집합체 상단 구조 부품으로 핵연료집합체 상부에서 축방향 및 횡방향으로 집합체를 지지하는 기능을 한다. 이 상단고정체의 주기능을 수행하는 구성요소인 누름스프링은 원자로 정상상태 운전기간동안 원자로 노심과 핵연료 집합체 간의 중성자 조사 및 열팽창 차이에 의한 길이 변화를 수용하면서 핵연료 집합체가 냉각재 수력에 의해 들림 현상이 발생하지 않도록 하부방향으로 누르는 역할을 한다. 집합체 들림은 집합체 자중, 누름스프링의 누름력, 수력에 의한 양력 등을 이용하여 평가할 수 있으며, 집합체 자중과 누름스프링의 합력이 수력에 의한 양력보다 큰 누름력을 제공할 수 있도록 누름 스프링을 설계함으로써 집합체 들림을 방지할 수 있다. 그러나 핵연료의 부양력에 대한 보다 큰 여유도를 확보하기 위하여 누름력을 증대시키면 핵연료집합체에 과도한 압축하중이 작용하여 집합체의 굽힘현상을 야기시킴으로써 집합체 건전성에 악영향을 미치는 면도 있다.

현재 상용원자로에 사용되는 핵연료집합체의 누름스프링 형상은 크게 그림 1 과 같이 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 한국표준형 원자로용 핵연료에 사용되는 코일형의 누름스프링과 웨스팅하우스 및 프라마톰 등의 원자로용 핵연료에 사용되는 판형 누름스프링이다. 판 스프링은 형상 및 기구학적 복잡성에 의한 해석적 가치성 때문에 코일스프링보다 상대적으로 많은 연구와 해석이 수행되어왔다. 한편 코일스프링은 이에 비해 정립된 수식 및 보다 단순한 계를 이루고 있으므로 핵연료설계요구조건을 만족하는 정형화된 방법론에 의거 설계를 수행해왔다. 즉, 이에 대한 최적설계와 같은 정밀화 된 설계를 수행함에 있어서는 앞서 언급한 연유에 의해서 다소 소홀해 왔던 것이 사실이다.

본 연구에서는 핵연료 집합체 및 상단고정체에 부과되는 설계조건을 만족하면서 무게가 최소화된 한국표준형 원자로용 핵연료 누름스프링[1]에 대한 최적설계를 수행하였다. 즉 스프링소선 직경, 평균 직경, 코일회수, 자유장길이 등의 기하학적 형상 변수들을 사용하여 핵연료와 양립성을 유지하고, 운전중 부과되는 설계요구조건 등을 만족하면서 무게가 최소화된 누름스프링을 찾기 위한 최적설계 프로그램을 구성하여 해석을 수행하였다.

2. 최적 설계

2.1 기본설계공식

그림 2 에서와 같이 축방향으로 하중(W)이 작용하고 있는 압축코일스프링의 평균 반지름을 r, 평균 지름을 D 라 하고 d 를 스프링의 소선직경이라고 하면 스프링에는 식 1 과 같은 비틀림 모우멘트가 생긴다[2].

$$T = W\,r = \frac{tpd^3}{16} \tag{1}$$

따라서 스프링의 단면에 작용하는 평균전단응력은 식 2 와 같다.

$$t = \frac{16\,rW}{p\,d^3} = \frac{8D}{p\,d^3}W = \frac{8C}{p\,d^2}W = \frac{8C^3}{p\,D^2}W \tag{2}$$

단, D/d=2r/d=C 이고, C 를 스프링 지수라고 한다.

그러나, 스프링의 단면에는 식 (2)와 같은 응력 이외에도 직접적인 전단력, 코일 방향의 압축력 및 굽힘응력 등이 작용하여 그림 3 에 나타낸 바와 같이 복잡한 응력분포상태가 된다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 수정계수 K 를 곱하여 보정하게 되며, 식(2)를 수정계수 K 를 이용하여 수정하면 다음식과 같이 된다.

$$t = K\frac{16rW}{pd^3} = K\frac{8D}{pd^3}W = K\frac{8C}{pd^2}W = K\frac{8C^3}{pD^2}W \qquad (3)$$

여기서, K 를 Wahl 의 수정계수라 하고, Wahl 의 수정계수 K 는 다음식에서와 같이 스프링 지수 C 만의 함수로 나타난다.

$$K = (4C-1)/(4C-4) + 0.615/C \qquad (4)$$

표 1 과 그림 4 는 스프링 지수 C 에 대한 K 의 값을 수치와 그래프로 표시한 것이다. 코일스프링에서는 스프링의 평균지름 D 에 비하여 소재의 지름 d 가 크게 되면, 굵은 소재를 작은 지름에 감는 것이 되므로 제조시 파손이 생기기 쉽다. 따라서 스프링 지수 C 를 4 이하로 잡는 것은 좋지 못하다. 이 스프링 지수 C 의 값은 코일스프링의 실제 설계 계산에 있어서, 이론적인 계산공식을 수정해서 사용하는 경우에 고려하지 않으면 안 되는 중요한 변수이다. 그리고 수정계수 K 의 값은 그림 4 에서 보는 바와 같이 C 값의 감소에 따라 급격한 증가를 보이므로 굵은 소재를 작은 지름에 감는 것은 소재에 전단응력을 크게 하는 결과를 초래하게 되므로 앞에서 언급한 바와 같이 스프링 지수 C 를 너무 작게 하지 않는 것이 좋다.

한편, 스프링의 처짐 및 강성에 대한 식을 유도하기 위하여 일반적으로 비틀림에 의한 원봉의 비틀림각에 대한 식을 표현하면 다음과 같다.

$$q = \frac{T\ L}{G\ I_o} \qquad (5)$$

여기서,

T : 비틀림 모우멘트, L : 길이, G : 횡탄성계수, I_O : 축심에 대한 극단면 2 차 모우멘트

코일스프링에서는 $L = 2\pi rn$, $I = \pi d^4/32$ 이므로 (5)식에 대입하면,

$$q = \frac{64\ nr^2W}{GD^4}, \quad d = rq = \frac{64\ nr^3W}{GD^4} \qquad (6)$$

2r=D, D/d = C 이므로 (6)식은 다음과 같이 표현된다.

$$d = \frac{8nD^3W}{Gd^4} = \frac{8nC^3W}{Gd} = \frac{8nC^4W}{GD} \qquad (7)$$

또한, 스프링 상수 Ks 는 다음과 같이 표현된다.

$$K_s = \frac{W}{d} = \frac{Gd^4}{8nD^3} = \frac{Gd}{8nC^3} = \frac{GD}{8nC^3} = \frac{Gd^4}{64nr^3} \qquad (8)$$

2.2 **최적설계 및 건전성평가**

앞 절에서 언급한 스프링 관련식을 토대로 최적설계를 위한 식을 구성하였다. 즉 설계하중에 대한 스프링의 최대 전단응력이 허용 전단응력보다 작고, 핵연료 다른 구성부품 간의 양립성을 만족하기위한 스프링 소선지경, 평균직경 및 코일 수 등의 일정범위 내에서 스프링의 무게를 최소화 하는 문제를 고려하였다. 즉, 스프링의 무게를 최소화 한다는 것은 밀도가 일정하다는 가정 하에 부피를 최소화 하기위한 부피식만으로 구성하였다. 스프링의 체적은 스프링 소선 직경 및 평균직경과 코일 수 변수로 구성되므로 이들 변수를 설계변수로 하여 다음과 같이 목적함수를 구성할 수 있다.

$$F(D, d, n) = V$$
$$= \pi d^2 \frac{\pi D n}{4} = [\pi^2 d^2 nD]\frac{1}{4} \qquad (9)$$

즉, 위 목적함수에 대한 각 설계변수가 만족해야 할 조건으로 다음을 고려해야 한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(D, d, n)}{\partial D} - \frac{\pi^2 d^2 n}{4} &= 0 \\ \frac{\partial F(D, d, n)}{\partial d} - \frac{\pi^2 d\ nD}{2} &= 0 \\ \frac{\partial F(D, d, n)}{\partial n} - \frac{\pi^2 d^2 D}{4} &= 0 \end{aligned} \qquad (10)$$

또한 위의 목적함수를 구함에 있어 제한조건 등은 다음과 같다.

먼저 재료의 파단 등이 없어야 하므로, 전단응력 τ를 식(3)으로부터 식(11)과 같이 표현하여, 전단응력이 허용전단응력을 초과하지 않는 조건으로 식 (12)를 첫째 제한조건으로 하였다.

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{8\,kwd}{\pi d^3} = \frac{8\,kKs\ \delta}{\pi d^3} \\ &= \frac{8\,d^4 G\,\delta}{8\,D^3 n \pi d^3} \times \left[\frac{4D - d}{4D - 4d} + \frac{0.615\ d}{D}\right] \\ &= \frac{dG\ \delta}{D^3 n \pi} \times \left[\frac{4D - d}{4D - 4d} + \frac{0.615\ d}{D}\right] \end{aligned} \qquad (11)$$

$$f_1 = \frac{dG\ \delta}{D^3 n \pi} \times \left[\frac{4D - d}{4D - 4d} + \frac{0.615\ d}{D}\right] - \tau_{\max} \le 0 \qquad (12)$$

다음으로 그림 5 에서 볼 수 있듯이 스프링의 최대변위가 δ이므로 요구되는 강성 확보를 위해 하중 W 에 대하여 변위 δ보다 작아야 되는 제한조건을 부가하면 식 (13)과 같다.

$$f_2 = \frac{8WD^3}{d^4 G} - \delta \le 0 \qquad (13)$$

그리고 그림 5 와 같이 핵연료집합체의 다른 구성요소와의 양립성을 위해 스프링의 최대 외경이 상단 고정체 누름판 외곽링의 외경부를 넘지 않게하며, 최소 내경은 외곽링의 내경부보다 크게 설정한다. 또한 코일의 감긴 수가 음수가 되면 안된 다는 조건을 식 (14), (15), (16)으로 한다.

$$f_3 = (D + d) - D_{OP} \le 0 \quad (14)$$
$$f_4 = -(D - d) + D_{IP} \le 0 \quad (15)$$
$$f_5 = -n < 0 \quad (16)$$

이상과 같은 조건을 반영한 최적설계 프로그램을 구축하여 설계를 수행하였다. 해석 결과, 표 2 에서와 같은 3 종의 홀다운 스프링 설계사양을 도출하였다. 도출된 스프링은 기존의 설계사양과 매우 유사하지만, 기존보다 무게가 다소 감소하고 강성이 증가하였으며, 또한 강성의 증가로 인한 해당 변위에서의 스프링력이 증가되므로 핵연료가 운전중 냉각수 양력에 의한 부양억제력을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 참고로 핵연료 집합체의 부양 억제력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f_{margin} = W_{feul\ weight} + B_{buoyance} + P_{spring\ \ force} - (U_{lift\ \ force} + FM_{flow\ \ maldistribution} + JA_{jitter\ allowance} + CA_{crud\ allowance})$$

한편, 코일 스프링설계에 있어서 가장 주의 깊게 고려할 사항중 하나가 재료의 파단과 관련된 허용전단응력의 초과여부다. 따라서 추가적인 건전성 평가 차원에서 표 2 에서 도출된 스프링 사양은 앞서 기술한 전단 응력식을 만족하지만 국부적으로 전단응력 분포를 고찰할 필요가 있다. 따라서 표 2 에서 도출된 설계사양중 수식에 의거 전단력이 가장 클 것으로 예상되는 스프링 1 대하여 범용유한요소 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 기하학적 형상을 모델링하여 응력해석을 수행하였다. 모델링한 스프링의 요소분할에 사용된 종류는 Solid 45 요소를 사용하였으며, 경계조건은 스프링의 하단을 구속하고 상단을 완전 Solid 가 될 때의 변위만큼 강제변위를 주었다. 해석결과 응력분포는 그림 6 에서 보는 바와 같이 피크 전단응력이 상온에서 허용 전단응력인 110,000 psi 이하로 나타났다. 따라서 실제 핵연료가 원자로 내에서 운전중 완전 Solid 가 될 때까지 눌려지는 경우는 거의 발생하지 않는 상황임을 고려할 때 손상에 대한 여유는 상당히 있는 것으로 판단된다.

3. 결론 및 향후과제

핵연료 집합체 및 상단고정체에 부과되는 설계조건을 만족하면서 무게가 최소화된 한국표준형 원자로용 핵연료 누름스프링에 대한 최적설계 프로그램을 구성하여 체적이 다소 감소하고 강성이 증가한 3 종의 스프링 설계사양을 구할 수 있었다.

또한 추가적인 건전성 평가 차원에서 국부적인 전단응력 분포를 고찰하기 위하여 기존 스프링 및 최적설계된 스프링에 대하여 범용유한요소 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과 스프링이 완전히 눌린 상태에서 피크 전단응력이 상온에서 허용 전단응력 이하로 나타났다. 따라서 실제 핵연료가 원자로내에서 운전중 완전 Solid 가 될 때까지 눌려지는 경우는 거의 발생하지 않는 상황임을 고려할 때 손상에 대한 여유는 상당히 있는 것이다.

구조적으로 보다 완전한 스프링설계를 도출하기위해서는 고유진동수와 공진여부 등의 동적특성도 고려하여 최적설계를 수행해야 할 것으로 사료되어 향후에는 이를 반영한 보다 완벽한 최적설계해석을 수행할 예정이다.

4. 참고문헌

1. Fuel Design Report for YGN 3&4 Nuclear Fuel, KNFC, 1991
2. Shigley, J.E, Mechanical Engineering Design, Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1977.
3. ANSYS/5.7, Swanson co., 2001

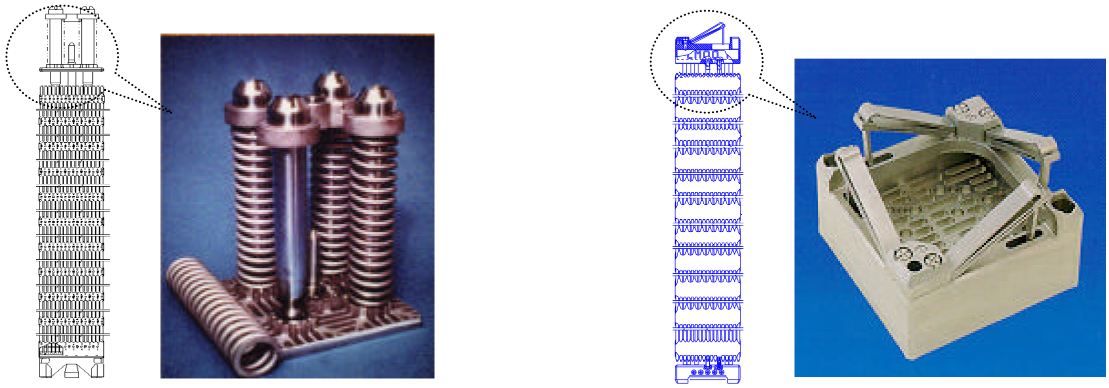
본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 신형핵연료 상하단고정체 개발과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

표 1. C에 대한 K의 값

D/d	4.0	4.25	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
K	1.39	1.36	1.34	1.32	1.30	1.28	1.27	1.24	1.22	1.20	1.18	1.17	1.16	1.15

표 2. 최적설계 결과

구 분	스프링선 직경	코일평균직경	코일 수	체 적	강성	비고
기존 스프링	d	D	N	V	Ks	Reference
스프링 1	1.020 d	1.10 D	0.850 N	0.9958 V	1.002 Ks	Reference/Spring
스프링 2	1.029 d	1.11 D	0.838 N	0.9902 V	1.013 Ks	
스프링 3	1.020 d	1.07 D	0.889 N	0.9944 V	1.023 Ks	



(A).한국표준형(코일형) (B) 웨스팅하우스형 (판형)

그림 1. 핵연료집합체 홀다운스프링 형상

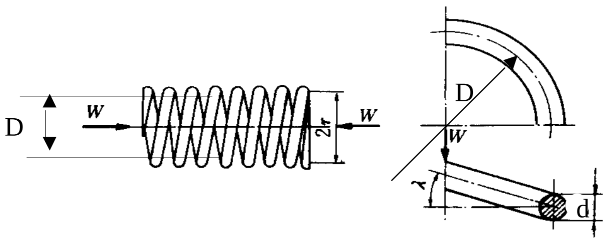


그림 2. 압축코일스프링 자유물체도

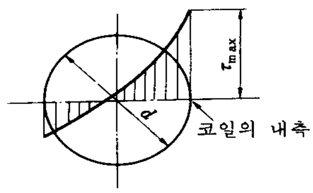


그림 3. 단면에서의 응력분포상태

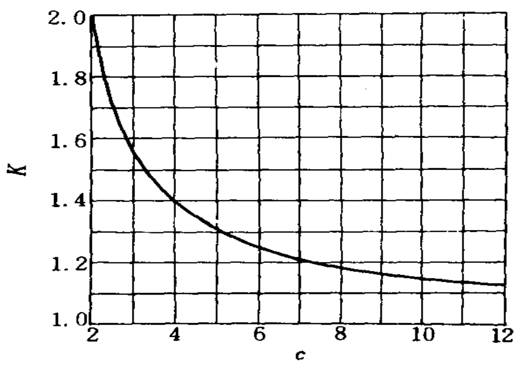


그림 4. Wahl 의 응력수정계수

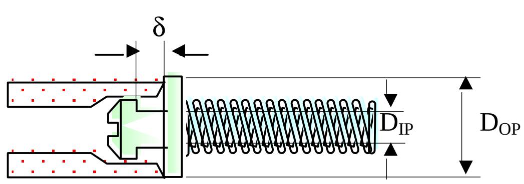
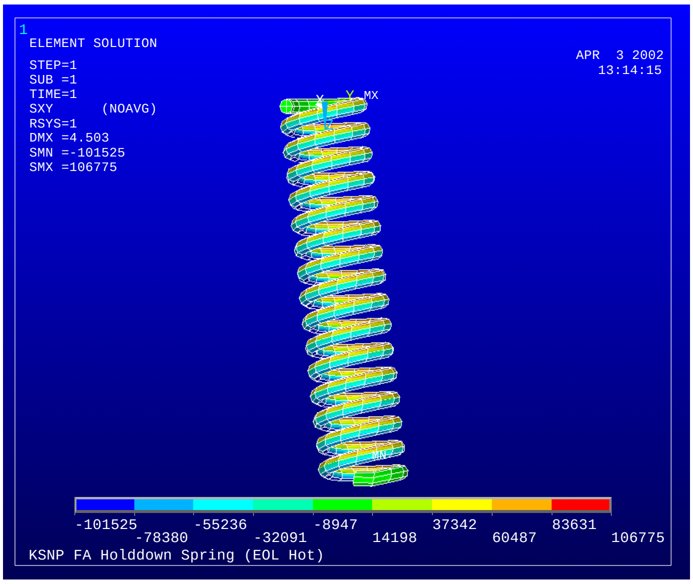
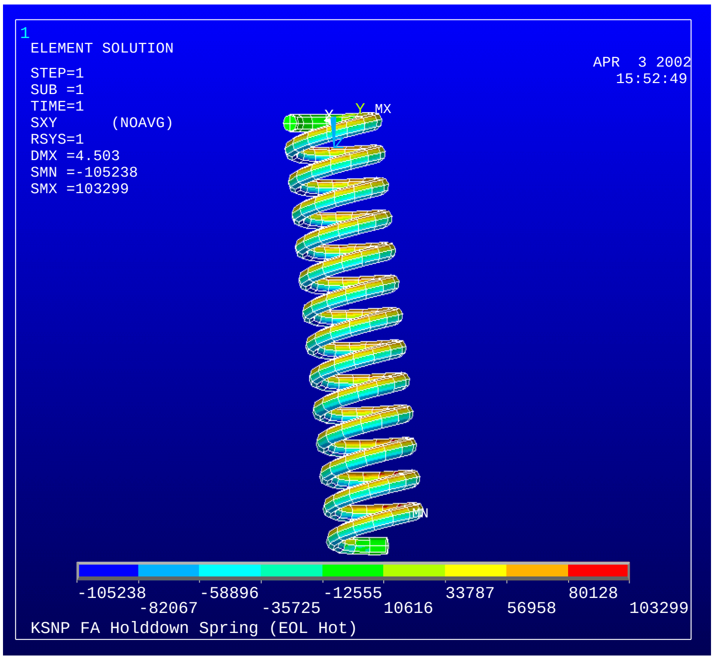


그림 5. 누름판 및 외곽기둥과의 조립도



(A) 기존스프링 완전눌림조건



(B) Optimized Spring 에 대한 완전눌림조건

그림 6. 전단응력 분포 선도