

경수로 원전연료용 연료봉 압축스프링의 설계 최적화

전경락, 최준형, 김용환, 김재원

한국원전연료주식회사

요 약

경수로용 원전연료의 고연소에 따른 핵분열 가스 증가에 대비하여 플레넘 부피를 최대한으로 확보하기 위하여 연료봉 압축스프링의 부피를 최소화하는 설계 최적화에 대한 연구를 수행하였다. 연료봉 설계변경이나 제조공정에 따른 요구사항을 용이하게 반영할 수 있도록, 최적설계 Software Package인 IDESIGN을 이용하여 최적설계 프로그램을 작성하였으며, 구해진 설계변수 값 부근에서 다시 반복 계산을 수행하여 설계변수들의 자릿수를 조정할 수 있게 하였다. 한편, 스프링의 좌굴특성을 향상시키기 위하여 연료봉으로부터 돌출된 스프링의 피치는 작게 하고 연료봉 플레넘 길이내의 피치는 더욱 크게 하는 부등피치 압축스프링은 균일피치의 경우와 거의 동일한 방법으로 설계되며, 각 구역의 설계값은, 스프링 제조설비를 고려하여 실험적으로 결정될 상수를 포함한, 9개의 미지수에 대한 9개의 연립방정식의 해를 구하여 결정된다.

1. 서론

원전연료를 공급하는 많은 외국회사들은 연료의 연소도 증가에 따른 핵분열 가스의 증가에 대비하여 연료봉 압축스프링의 피치를 크게 함으로써 스프링 부피를 감소시키고 플레넘 공간을 최대한 확보하려는 추세이며, 특히 WH사는 V5H에 일반 압축스프링보다 피치가 2배 이상 늘어난 스프링을 사용하고 있고, Performance+에서는 스프링 중간부의 피치를 외경의 2배 정도까지 늘리고 양끝에 좌권부를 연결하는 최소한의 천이구역을 두어 스프링 부피를 더욱 감소시켰다. 한편, 국내에서 공급하고 있는 경수로용 원전연료 중 JDFA형과 CE형 연료봉에는 보통의 Standard형 압축스프링을 사용하였으며, WH형 연료봉에는 Pitch-Extended형 압축스프링을 사용하고 있다.

연료봉 압축스프링은 집합체의 운반 및 취급시 소결체를 지지하며 노내에서 소결체의 성장을 허용하고 플레넘 공간을 제공할 수 있어야 한다. 이에 대한 설계기준은 다음과 같다 [1].

- 최소 스프링력 : 운반 및 취급시, 소결체 총 무게의 4배의 하중을 지지할 수 있어야 한다.
- 허용 응력 : 사용중 발생하는 응력으로 인해 재료의 파단이 없어야 한다.
- 최대 직경 : 스프링이 최대로 압축되었다고 가정할 때, 스프링이 피복관과 접촉할 정도로 직경 방향으로 팽창이 일어나서는 안된다.
- 좌굴 방지 : 봉단마개를 장착할 때, 스프링의 좌굴이 일어나지 않아야 한다.
- 완전 압축길이 : 스프링의 완전 압축길이는 최악의 치수공차를 고려하고, 노내에서 스프링의 열팽창과 소결체의 조사성장을 고려한 최소 플레넘길이보다 작아야 한다.

● 용접열에 의한 손상 방지 : 봉단마개와 접촉하고 있는 스프링의 끝 부분은 용접에 의해 파손될 수 있으므로 스프링 끝부분에 스프링 역할을 하지 못하는 좌권부를 둔다.

압축스프링은 위의 설계기준들을 만족하면서 플래넵 공간을 최대한 확보할 수 있도록 스프링의 부피를 최소화하는 것이 좋다. 또한 스프링 제조설비, 봉단마개의 형상 및 용접방법 등 연료봉 제조공정에 따른 요구사항 등을 반영하여 제조가 용이하도록 하여야 한다. 이러한 설계조건들을 최적 설계 개념을 사용하여 표현하면, 스프링의 부피를 최소화하는 것이 목적함수이고 스프링의 선경, 직경, 자유장, 감긴 횟수 등이 설계변수가 되며 허용 응력내에서 소결체에 의해 가해지는 하중, 연료봉 피복관의 내경과 스프링의 팽창, 장입시의 좌굴조건 등은 제한조건이 된다 [2].

2. 등피치 압축스프링의 설계

압축스프링의 부피는, 스프링의 피치가 상당히 큰 경우, 아래와 같이 계산될 수 있으며, 최적설계는 이를 최소화하는 문제가 된다.

$$\phi_0 = \frac{\pi^2}{4} d^2 D \left[N \left(\frac{L-Qd}{2ND} \right)^2 + Q \right] \quad (1)$$

제한조건은 위에서 기술한 설계기준으로부터, 기계공학에서 일반적으로 사용하는 식을 이용하여 구할 수 있다 [2, 3]. 우선, 스프링이 연료봉에 장입되었을 때의 최소 스프링력이 소결체 무게의 4배 이상이어야 한다. 이를 수식으로 나타내면,

$$\phi_1 = 4W - \frac{d_{\min}^4 G}{8 D_{\max}^3 N} (L_{\min} - U_{\max}) \leq 0 \quad (2)$$

또한, 스프링이 피복관에 응력을 가하지 않도록 하기 위해 스프링 외경과 탄성적, 열적 직경방향 팽창량의 합이 피복관의 내경보다 작아야 한다.

$$\phi_2 = [OD + (D_e + D_t)] - ID_{clad} \leq 0 \quad (3)$$

스프링이 압축에 의해 탄성범위내에서 직경방향으로 팽창되는 양은 다음과 같다.

$$D_e = 0.1 [P_{\max}^2 - 0.8P_{\max}P_{\min} - 0.2P_{\min}^2] / D$$

피복관에 대한 스프링의 상대적인 열팽창은 아래와 같이 계산된다.

$$D_t = \alpha \cdot OD_{\max} \cdot \Delta T$$

또한, 발생하는 전단응력이 허용 전단응력을 넘지 않는 조건으로,

$$\phi_3 = \frac{Gd(L-U)}{\pi D^2 N} \left(\frac{4D-d}{4D-4d} + \frac{0.615d}{D} \right) - \tau_{\max} \leq 0 \quad (4)$$

뿐만 아니라, 연료봉에 스프링을 장입할 때 스프링의 좌굴이 일어나지 않아야 한다. 그림 (1)은 압축스프링의 좌굴곡선을 스프링의 자유장에 대한 돌출 길이와 직경과의 관계로 나타낸 것이다 [1, 4]. Curve A는 스프링의 양단이 편편하며 한쪽은 평면에 의해 압축되고 다른 한쪽은 구형에 의해 압축되는 경우, Curve B는 양단 모두 서로 평행한 평판에 의해 압축되는 경우에 적용하며, 이를 최소 오차자승법에 의해 근사식으로 표현하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_4 = \frac{L-U}{L} - \frac{C_1}{(L-U)/D - C_2} \leq 0 \quad (5)$$

마지막으로, 이들 외에도 실제적인 스프링을 얻기 위하여 스프링의 선경, 직경, 자유장, 감긴수 등이 양수가 되어야 할 것이다.

이상과 같이, 스프링의 최적설계는 설계변수 d, D, N, L 을 잘 선정하여 위의 조건식들을 만족시키면서 부피 Φ_0 를 최소화하는 것이다. 한편, 최적 설계에 사용되는 수식은 편의상 주로 간편식을 사용하게 될 것이므로 좀더 정확한 계산을 위하여서는 검증된 Computer Code를 사용하여 상세해석을 수행하여야 할 것이다.

3. 부등피치 압축스프링의 설계

같은 설계조건인 경우 이론적으로는 압축스프링의 피치가 클수록 자유장이 작아져서 좌굴조건에 더욱 유리하게 보이지만 실제로는 피치가 너무 크면 스프링이 압축되는 동안 스프링의 Turn과 Turn 사이가 피복판 끝에 걸려 좌굴을 일으키는 경우가 많다. 따라서, 연료봉으로부터 돌출된 스프링의 피치는 작게 하고 연료봉 플레넘 길이내의 피치는 더욱 크게 함으로써 스프링의 부피를 최소화하면서 좌굴특성을 향상시킬 수 있는 부등피치 압축스프링을 설계하였다 (그림 2).

Normal Pitch, Transition Pitch 그리고 Extended Pitch 각 구역에서의 스프링 상수는 등피치의 경우와 같으며, 이를 전체에 대한 등가 스프링상수로 표현하면 다음과 같다.

$$K_{eq} = \frac{Gd^4}{8D^3(N_1 + N_2 + N_3)} = \frac{Gd^4}{8D^3N_t} \quad (6)$$

앞에서 설명한 제한조건들을 부등피치의 경우에 대해 구해 보면, 압축에 의한 직경방향 팽창값을 구하는 식만 차이가 있으며 각 구역에서 아래와 같이 표현된다.

$$D_e = \frac{0.1}{D} \cdot \left[1.2 \cdot \left(\frac{L_i}{N_i} \right) \cdot \left(\frac{\delta_i}{N_i} \right) - 0.2 \cdot \left(\frac{\delta_i}{N_i} \right)^2 \right] \quad (7)$$

윗 식에서 피치가 가장 큰 L_3 구역에 대해 직경방향 팽창값이 최대이며, 최대 피치 $P_3 = L_3/N_3$ 는 무한정 크게 할 수 없고 제조설비의 제작성을 고려해야 하므로 $P_3 = C_1 D$ 로 놓고, C_1 은 제조의 시행착오를 거쳐 결정할 수 있다. 따라서 부등피치 스프링도 전체길이, 전체 감긴수, 직경, 선경 등을 등피치의 경우와 마찬가지로 결정할 수 있다. 이 설계변수들이 정해지면 각 구역에 대한 길이와 감긴수를 결정해야 한다. 즉, 주어진 L_i, N_i 에 대하여 다음 9개의 변수를 결정하는 문제가 된다.

$$L_1, L_2, L_3; N_1, N_2, N_3; P_1, P_2, P_3$$

전체 길이 및 전체 감긴수는 각 구역의 길이 및 감긴수의 합이므로,

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3 + Q_1 d + Q_2 d \quad (8)$$

$$N_t = N_1 + N_2 + N_3 + Q_1 + Q_2 \quad (9)$$

또한, 피치의 정의로부터,

$$P_1 = \frac{L_1}{N_1}, P_2 = \frac{L_2}{N_2}, P_3 = \frac{L_3}{N_3} \quad (10)$$

설계 목적이 스프링의 부피는 줄이고 좌굴특성은 향상시키고자 하는 것이므로, 피치가 작은 L_1 구역만 플레넘 밖으로 돌출되도록 하기 위하여 피치가 큰 L_3 구역과 천이구역 L_2 의 길이의 합을 연료봉 플레넘 길이와 같도록 한다.

$$U = L_2 + L_3 + Q_2 d \quad (11)$$

스프링의 최대 피치 P_3 는 앞에서 이미 기술한 바와 같이 직경의 함수로 표현될 수 있다.

$$P_3 = C_1 D \quad (12)$$

천이구역의 피치 P_2 는 최소 피치 P_1 으로부터 최대 피치 P_3 로 등간격으로 증가하는 것이 바람직

할 것이므로,

$$P_3 = P_1 \cdot [1 + C_2(N_2 + 1)] \quad (13)$$

그리고 등차 수열의 합으로부터 천이구역의 길이 L_2 는,

$$L_2 = \frac{N_2}{2} (2 + C_2 + C_2 N_2) P_1 \quad (14)$$

이상에서 C_1, C_2 는 제작성을 감안하여 결정될 상수이며, 미지수 9개에 대한 9개의 연립방정식의 해를 구하면 된다. $P_1, P_2, P_3, L_1, L_2, L_3$ 를 차례로 소거하면, N_2 에 대한 2차 방정식이 되어 2개의 근을 갖게 되지만 각각에 대해 나머지 해를 구하면 적절한 양의 해를 선택할 수 있다.

4. 최적설계 프로그램

최적설계에는 축차적으로 최적점을 찾아 나아가는 Software Package인 IDESIGN을 사용하였으며[5], 앞에서 설명한 식 (1)~(5)의 목적함수 및 제한조건식을 담은 부프로그램 USERC를 작성하였다. 특히, 좌굴방지를 위하여 스프링의 직경을 가능한 한 최대가 되도록 하고, 그림 (1)에서 스프링 각 치수의 공칭값에 대해서는 Curve A를 만족하도록 하고, 공차를 고려한 최악조건에 대해서는 Curve B를 만족하도록 하였다.

최적설계에서 사용하는 대부분의 축차적인 방법은 극소점을 찾는 과정에 불과하므로, 주어진 해가 모든 영역내에서의 최소점인지 확인하기 위해 여러 다른 초기값에서 얻은 값과 비교 검토할 필요가 있다. 뿐만 아니라 실제 설계에서는 각 설계변수의 자릿수를 제작이 용이하도록 조절해야 하며, 예를 들어 스프링의 선경과 같이 선택 범위가 한정되어 있거나 원자재 공급에서 이미 정해 지는 경우도 있을 수 있다. 따라서, 최적설계 프로그램으로부터 구한 해의 부근에서 각 설계변수, 즉 선경, 외경, 자유장, 감긴수 등을 변화시키면서 사용 가능한 값들을 찾고 이들을 스프링 부피 순으로 나열함으로써 제작성을 고려한 설계(안)을 여러가지 제시할 수 있도록 단순 반복 계산에 의한 설계확인용 프로그램을 작성하였다.

5. 결과 및 고찰

표 1에 17 Type 원전연료의 연료봉 압축스프링을 기준으로 JDFA형, KNFC형, 부등피치 스프링의 주요 설계제원을 비교하였으며, 그림 1에는 좌굴선도에서의 설계점을 표시하였다. 같은 설계 조건인 경우 압축스프링의 피치가 클수록 자유장이 작아져서 설계점이 좌굴선도의 안쪽에 위치하므로 좌굴조건에 더욱 유리하게 보이지만, 피치가 너무 크면 스프링이 압축되는 동안 스프링의 Turn과 Turn 사이가 피복관 끝에 걸려 좌굴을 일으키게 되므로 실제 스프링 장입시험을 통하여 연료봉 제조공정에 적절한 피치를 선정하여야 한다.

연료봉으로부터 돌출된 스프링의 피치는 작게 하고 연료봉 플레넘 길이내의 피치는 더욱 크게 하는 부등피치 압축스프링은 등피치의 경우와 거의 동일한 방법으로 설계되며, 좌굴특성을 향상 시키기면서 스프링의 부피는 더욱 줄일 수 있다. 국내 제조업체에서 부등피치 압축스프링의 시제품을 제조해 본 결과, 최대 피치에 대해서는 생산성을 고려하면 $C_1=1.5$ 정도가 최대이며, 천이구역의 피치는 최소피치 구역으로부터 최대피치 구역으로 20% 씩 증가시킨 $C_2 = 0.2$ 정도가 적절한 것으로 나타났다.

표 1. 경수로용 원전연료 연료봉 압축스프링 (17x17 Type) 설계 제원 비교

	JDFA형 (등피치)	KNFC형 (등피치)	Sample 1 (부등피치)	Sample 2 (부등피치)	Sample 3 (부등피치)
Wire Dia., mm	1.55	1.45	1.32	1.45	1.45
Spring O.D., mm	8.05	8.00	7.85	7.95	8.00
Free Length, mm	198.5	222	221.74	216.15	215.65
Plenum Length, mm	166	185	185	185	185
Active Turn	57	40	27	31	30
Pitch, mm(max/min)	3.10	5.29	10.00/4.56	7.88/4.19	9.59/3.56
Spring Vol., mm ³	2364	1639	1082	1410	1388

6. 결 론

연료봉 압축스프링의 여러 설계 요구사항을 만족시키면서 스프링의 부피를 최소화하기 위하여 IDESIGN을 이용한 최적설계 프로그램을 작성하였으며, 구해진 설계변수값 부근에서 반복 계산에 의해 설계변수들의 자릿수를 조정하고 스프링 부피순으로 나열함으로써 제작성을 고려한 설계(안)을 여러가지 제시할 수 있도록 하였다. 연료봉으로부터 돌출된 스프링의 피치는 작게 하고 연료봉 플레넘 길이내의 피치는 더욱 크게 하는 부등피치 압축스프링은 등피치의 경우와 거의 동일한 방법으로 설계되며, 각 구역의 설계값은, 스프링 제조설비를 고려하여 실험적으로 결정될 상수를 포함한, 9개의 미지수에 대한 9개의 연립방정식의 해를 구하여 결정된다. 부등피치 압축스프링의 시제품을 제조해 본 결과, 최대 피치는 직경의 1.5배 정도이며, 천이구역의 피치는 최소피치 구역으로부터 최대피치 구역으로 약 20%씩 증가시키는 것이 적절한 것으로 판단된다.

기호 및 약어

d= 스프링의 선경, OD=스프링의 외경, D=스프링의 평균직경 (OD-d), L=스프링의 자유장
 U=초기 플레넘 길이, W=연료봉내 소결체 무게, N=스프링 역할을 하는 코일의 감긴수
 Q=스프링 역할을 못하는 부분의 감긴수, F=스프링력, K=스프링 상수, G=전단 탄성계수
 τ_{max} =허용 전단응력, P_{max} , P_{min} =스프링이 장입되기 전,후 최대 피치, 최소 피치
 α =피복관과 스프링의 열팽창 계수 차이, ΔT = 상온과 노내의 피복관 및 스프링 평균 온도 차이

감사의 글

본 연구는 한국전력연구원이 지원한 과제의 일부로 수행되었으며, 한국 원자력 연구소 이재한 박사의 IDESIGN을 이용한 최적설계에 관한 조언에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Westinghouse, Fuel Assembly Mechanical Design Manual, Vol. 1 (1988)
- [2] 박병만, 최적설계, 대한기계학회지, Vol.23, No.1 p.37-43 & No.2 p.126-132 (1983)
- [3] Wahl. A.M., Mechanical Springs, Penton Pub. Co., 2e, reprinted by SMI, (1982)
- [4] SAE HS 795, Spring Design Manual Part 2, Helical and Spiral Springs
- [5] 한국과학기술원, 최적설계 및 응용, 산학협동공개강좌 (1986)

Spring Buckling Curves

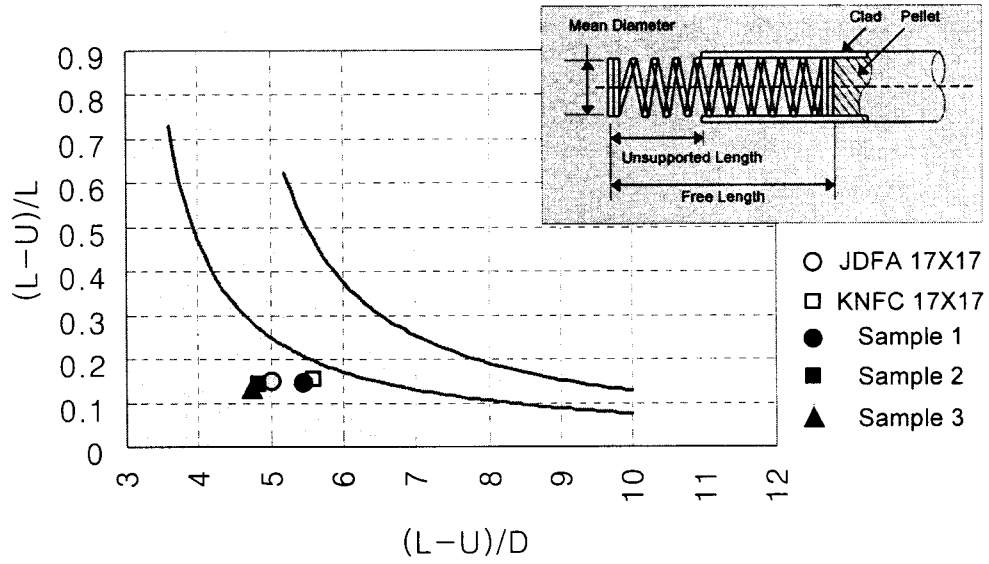


그림 1. 스프링의 좌굴선도와 설계점

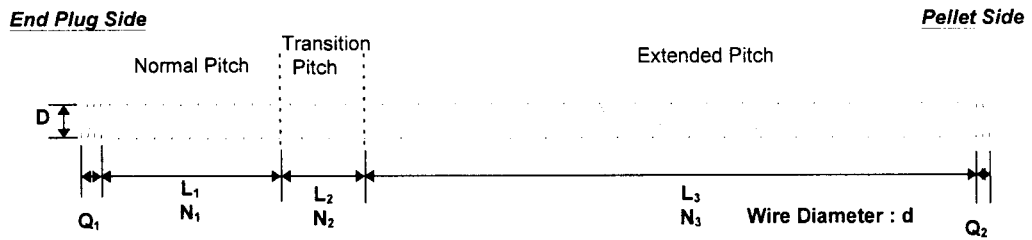


그림 2. 부등피치(Pitch-Variable) 압축스프링의 개략도