

《기술보고》

핵연료집합체 Holddown Spring 특성해석

임정식 · 손동성  
한국원자력연구소  
(1995. 6. 14 접수)

요 약

핵연료 부품 설계개선 및 부품설계 최적화와 관련하여 Holddown Spring 설계해석 방법을 조사하고 기존 해석방법을 보완한 개선된 해석방법을 제시하였다. 이 개선된 스프링 해석방법을 이용하여 기존 17×17 국산핵연료의 Holddown Spring 및 직선형 Holddown Spring 특성해석을 시도하여 시험결과와 비교하였다. 이들 해석결과 개선된 해석방법에 의한 스프링 특성의 예측은 시험값에 잘 일치함을 보인다.

또한 최대응력에 기초한 스프링 판 두께 최적화로써 직선형 스프링의 두께에 대한 최적화를 실시하여 그 특성을 검토하였다.

1. 개 요

Holddown Spring은 그림 1에서와 같이 상단고정체 (Top End Piece)의 상부에 위치하는 핵연료집합체의 최상단 부품으로써 핵연료 수명기간 동안 핵연료집합체가 받는 부력과 냉각수의 상승력에 의한 위쪽 방향의 힘을 이겨 핵연료집합체가 하부노심지지판(Lower core plate)에서 부상(Lift-off)되지 않도록 눌러 주는 역할과 열팽창에 의한 구조적 변형으로 원자로 구조재와 핵연료 집합체간의 기계적 압력 및 충격으로 인한 핵연료 집합체의 손상을 방지하는 역할을 한다.

Holddown Spring의 힘이 충분하지 않을 경우, 냉각수의 상승력에 의해 핵연료집합체가 하부노심지지판에서 부상되었다 낙하하는 과정을 통해 하단고정체와 안내관에 큰 충격을 가하며, 이 충격에 의해 연료봉의 축방향 위치이탈을 초래할 수 있고, Holddown Spring에 피로파괴를 유발할 수 있으며, 상부노심지지판(Upper core plate)의 정렬핀과 상단고정체의 정렬핀 수용구멍 마모를 수반하는 등의 문제점을 야기하게 되므로 스프링의 설계 시는 핵연료 수명기간 동안 요구되는 스프링력을 유지할 수 있도록 설계변수를 설정하여야 한다.

현재 경수로 핵연료에 사용되고 있는 Holddown

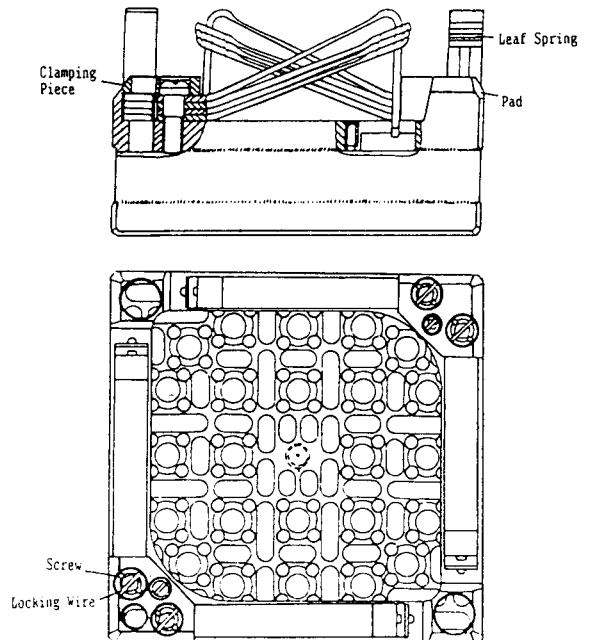


그림 1. 17×17 국산핵연료용 상단고정체 및 Holddown Spring

Spring의 형태는 크게 나누어 판 스프링 형태와 코일 스프링 형태의 두 종류가 주류를 이루고 있다. 판 스프링의 경우 스프링의 설치공간이 적게 필요하고 작은 변위에서 큰 스프링력을 발생하는 등의 장점이 있는 반면 설계변수 결정이 코일 스프링에 비하여 비교적 어렵다. 한편 코일 스프링의 경우 설치공간이 많이 소요되나 설계 및 제조가 용이하고 판 스프링에 비해 선형거동이 우수한 것으로 알려져 있다. 표 1에서와 같이 ABB/CE, SIEMENS /KWU 형의 원자로 및 한국표준형 원자로에 장전되는 경수로 핵연료는 코일 스프링을 사용하고, Westinghouse 형의 원자로에 장전되는 경수로 핵연료는 판 스프링 형태를 취하고 있다.

이 판 스프링은 냉각수의 수력적 상승력의 크기에 따라 2개의 판부터 4개의 판을 겹쳐 하나의 스프링 조합을 한 조로 하여 그림 1에서와 같이 상단고정체 상부 4면에 장착하여 사용한다.

판 스프링 형태의 Holddown Spring 설계시 스프링의 형상이 단순 외팔보가 아니고 길이에 따라 두께가 변화하며 굴곡부가 있는 형태로서 스프링 판의 대변형에 따른 각 판 사이에 발생하는 마찰력의 영향 및 소성영역까지 변형되는 스프링의 대변형 거동에 따라 스프링 특성을 해석적으로 얻기가 쉽지 않으므로 제한된 설치공간 내에서 핵연료의 전 수명기간동안 요구 스프링력을 내도록 설계변수를 결정하는 데는 어려움이 따르고 있다.

지금의 핵연료 개발 추이는 세계적으로 고연소도를 목표로 개발 및 상용화가 진행되고 있고 이와 같이 핵연

료가 고연소도로 연소될 경우 중성자 조사에 의한 스프링 이완량의 증가 및 연료봉 축방향 조사 성장의 증가로 인한 상·하단고정체 사이의 간격 여유 감소 등을 고려하여야 하므로 Holddown Spring을 개발하기 위해서는 보다 실제적인 판 스프링 사이의 마찰력의 영향을 고려한 해석방법과 스프링 특성곡선이 주어졌을 경우 요구되는 스프링력을 제공할 수 있는 주요 설계인자들을 최적으로 구할 수 있는 설계방법이 개발되어야 하고, 최종설계된 Holddown Spring은 시험을 통하여 검증되어야 한다. 특히 기존의 원자로에 재 장전되는 핵연료 부품의 개발에 있어서는 노심이나 핵연료집합체의 기하학적 제원이 제한된 경계조건을 가지므로 연소도 변화에 따른 집합체 부품의 건전성에 주는 영향인자의 면밀한 분석 및 이의 결과에 대한 신뢰할 만한 보증이 필요하며 이에 따라 각 부품의 설계최적화는 불가결한 요소이다.

여기서는 위에서 언급한 이유로 집합체 부품의 설계 변경 또는 최적화에 대응하기 위하여 집합체 노내 건전성에 지대한 영향을 주는 Holddown Spring의 특성해석 방법을 조사 검토하고, Holddown Spring의 특성해석 및 최적화에 대한 것을 기술하고 있다. 그 내용으로는 기존의 Holddown Spring 특성해석 방법에 대한 검토를 통하여 기존 방법상의 문제점을 파악하고, 스프링 특성해석 방법의 개선에 대한 것과 또한 개선된 해석방법을 이용하여 기존의 17×17 국산핵연료용 Holddown Spring의 특성을 해석한 후 시험결과와 비교한 결과 및 직선형 Holddown Spring의 특성 해석을 다룬다.

표 1. 핵연료 설계/ 제조회사별 경수로 핵연료 Holddown Spring 특성해석 방법

	Westinghouse	Siemens /KWU	Fragema	KAERI
스프링 형상	-Leaf Spring	-Leaf Spring <sup>(1)</sup> -Coil Spring <sup>(2)</sup>	-Leaf Spring	-Leaf Spring <sup>(1)</sup> -Coil Spring <sup>(3)</sup>
스프링 특성	경험식 및 시험으로 얻음	시험결과 평균을 10% 하향조정	시험으로 얻음	시험결과 평균을 10% 하향조정
스프링 set 당 판스프링 개수 (17×17 핵연료)	3	3	3	4
스프링 재질	Inconel 718	Inconel X-700	Inconel 718	Inconel 718

Note (1) : 웨스팅하우스 형 원자로 재장전 핵연료

(2) : Siemens 형 원자로용 핵연료

(3) : 한국표준형 원자로용 핵연료

끝으로 응력에 기초한 직선형 스프링의 두께 최적화를 시도하고 최적화 스프링의 특성에 대한 검토를 기술하였다.

## 2. Holddown Spring의 특성해석

### 2.1. 기존의 Holddown Spring 특성해석 방법

Westinghouse의 Holddown Spring 하중-변위 곡선(force-deflection curve), 즉, 특성곡선을 구하기 위한 그 동안 사용되던 해석적 방법은 굽힘 판 스프링에서 각각의 판에 대한 실험적 방법을 사용하여 얻은 다음 식을 이용하였다[1].

최상단 판 스프링에 대하여

$$K = \frac{Eb^3}{6.5424[L + (7.684h - 0.491)h]^3}$$

여기서 L : 스프링 길이

h : 스프링 기초두께

E : Young's Modulus

K : 스프링 강성도(Stiffness)

이며, 하부 판 스프링에 대하여

$$K = \frac{Eb^3}{6.5424[L + (0.105R - 0.910)]^3}$$

으로서 R은 기초에서 측정된 굽힘 각이다. 물론 이 식들에는 판과 판 사이에 존재하는 마찰력이 고려되어 있지 않으므로 이들 마찰력이 고려된 실제의 시험결과보다 이들 식의 중첩에 의해 구한 스프링 상수는 더 작게 나타난다. 이들 식을 참고로 하여 설계된 Holddown Spring의 최종 특성은 시험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 설계에 적용한다.

Siemens/KWU의 Westinghouse 형 원자력에 재장전되는 핵연료의 스프링 해석은 2개 내지 3개의 스프링으로 이루어진 스프링 팩(pack)에 대하여 5회 내지 10회의 특성시험을 하고, 여기서 얻은 스프링 특성을 평균하여 얻은 시험 값에 설계 마진을 고려하여 10% 하향 조정된 특성을 설계곡선으로 하여 핵연료의 노내 거동을 해석한다[2].

Fragema의 특성해석은 기본적으로 Westinghouse와 같으며 시험을 통하여 얻은 스프링 특성을 이용하여

스프링의 노내 거동 해석에 사용한다[3].

각 핵연료 설계/제조회사의 스프링 특성을 구하는 방법은 표 1에 나타내었다.

이외에 스프링 판의 특성해석 방법으로써 스프링 판은 두께에 비하여 길이가 길기 때문에 각 판 및 조립된 판 스프링 set의 강성도 예측방법을 beam 이론을 적용하고 Castigliano의 제 2정리를 이용하여 각 판들의 강성도 및 조립된 판 스프링 set의 강성도를 계산할 수 있도록 한 연구도 발표되었다[4].

송기남 등[4]은 17×17 국산 핵연료용으로 사용하는 판 스프링 4개를 한 조로 한 스프링 set에 대해 스프링 강성도(stiffness)를 계산하고 시험치와 비교하였으며, 이 해석결과 국내에서 제조된 스프링 set에 대하여 스프링 상수 142 N/mm를 얻었고 이것은 송기남 등[5]이 시험한 강성도 값보다 10% 정도 높게 예측되는 것으로 평가되었다.

유한요소 코드에 의한 스프링 특성 해석의 예는 ADINA 코드를 사용한 유한 요소 해석을 이용한 연구[6]가 발표되었으나 지금까지의 이들 방법들 모두 선형적 해석방법으로써 실제적으로 소성변형을 수반하는 스프링의 노내거동을 예측하기 위한 비선형의 영역까지는 스프링 특성을 제공하지 못하고 있으며, 실제적인 설계 적용을 위한 해석방법의 제공에는 Holddown Spring의 비선형 대변형(Non-linear large deflection)까지를 고려한 해석이 포함되어야 한다.

이상에서 지적한 문제점을 해결하기 위하여 지금까지는 판과 판 사이에서 무시된 마찰력의 영향을 고려하고 스프링의 대변형 해석을 포함하는 비선형 해석의 방법을 제시하였다. 이것은 3개 내지 4개의 판이 하나로 조립된 스프링 팩에 대하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS 코드[7]의 마찰요소(Contact 12)를 채택하여 스프링을 유한요소 모델링하고 대변형 해석을 이용하여 특성해석을 수행하므로써 가능하게 되며, 해석에 의한 결과를 시험결과와 비교하여 유한요소 해석 방법의 적합성을 보임으로써 설계에 적용할 수 있게 된다. 이렇게 하나의 스프링 set를 한번에 해석하므로써 개개의 스프링을 해석한 후 중첩하는 번거로움을 해소할 수 있게 됨은 물론 해석에 의해 어느 정도 설계변수를 결정한 후 최종 시험을 통하여 설계검증을 수행하게 되어 시험에 의한 특성결정의 시간 및 비용의 절감을 얻을 수 있도록 할 수 있다.

2.2. 개선된 Holddown Spring 특성 해석

2.2.1. Bent Type Holddown Spring 해석

기존의 하나 하나의 판 스프링을 해석한 후 그 결과를 중첩하는 방법 대신 4개 스프링 판이 1조가 된 하나의 모델에서 스프링 판과 판 사이의 마찰을 고려하기 위하여 ANSYS 코드의 Contact 12 element(또는 Contact 52 element)를 사용하고, 재료 및 기하학적 비선형 해석을 포함시킨 대변형 해석을 이용, 기존의 17×17 국산핵연료 집합체에 사용되는 Holddown Spring을 유한요소 모델링 한 후 하중을 가함으로써 스프링 특성곡선인 하중-변위곡선을 얻는다.

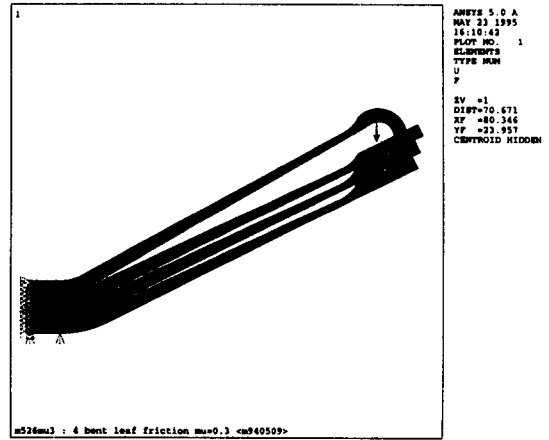


그림 2. Bent Type Holddown Spring 유한요소모델 및 경계조건

가) 유한요소 모델

해석에 사용된 17×17 국산핵연료용 스프링은 표 2의 제원을 갖으며 4개의 판 스프링이 한 조의 스프링 팩을 이루며 이들의 조립된 상태에서부터 특성곡선을 얻기 위한 유한요소모델을 그림 2에 의력 및 변위 경계조건과 함께 나타내었다.

표 2. 17×17 국산핵연료용 Holddown Spring의 제원

	상부판스프링	하부판스프링
길이 (mm)	139.3	142.8
두께 (mm)	기저부	4.3
	목부위	2.15
폭 (mm)	20	20
굽힘반경 (mm)	19.5	25
재질	Inconel 718	Inconel 718

며 이때 사용된 스프링의 물성은 표 3과 같다[6].

다) 해석 결과 및 검토

개선된 방법의 Holddown Spring 특성해석의 적합성을 확인하기 위하여 먼저 17×17 국산핵연료용 Holddown Spring 특성 시험결과[8]와 동일제원의 해석결과를 상호 비교하였다. 그림 3은 17×17 국산핵연료용 Holddown Spring의 특성 시험 곡선이며 그림 4는 17×17 국산핵연료 Holddown Spring의 특성해석 결과인 변형의 모습을 나타내고 있다.

그림 5는 특성해석 결과와 함께 Holddown Spring 특성 시험값 및 설계곡선을 같이 나타내었다. 그림 5로부터 유한요소 해석결과와 시험값은 잘 일치함을 알 수

표 3. Inconel 718의 물성

Properties		Values			
Young's Modulus(N/mm <sup>2</sup> )		200,000			
Poisson's Ratio		0.3			
Plastic Path	Stress(N/mm <sup>2</sup> )	1127	1210	1258	1280
	Strain	0.0061	0.0074	0.0096	0.016
Yield Stress(N/mm <sup>2</sup> )		1033.5			

나) 재료의 물성

탄성영역을 초과하는 비선형 대변형 해석에는 탄성영역 및 소성영역의 재료적 거동의 입력자료를 필요로 하

있으며 예측된 오차는 3% 이내이다. 또한 참고문헌 5에는 에너지 법을 적용하여 계산된 17×17용 국산제조 Holddown Spring의 스프링 상수 K가 142.0 N/mm

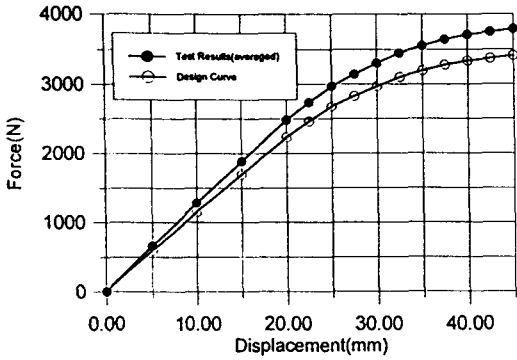


그림 3. 17×17 국산핵연료용 Holddown Spring 특성

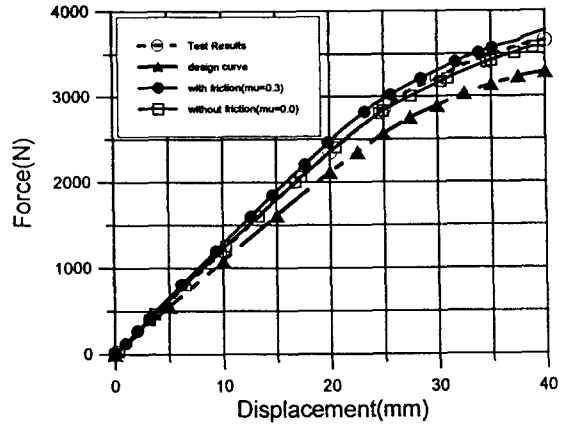


그림 5. Bent Type Holddown Spring 특성 해석결과

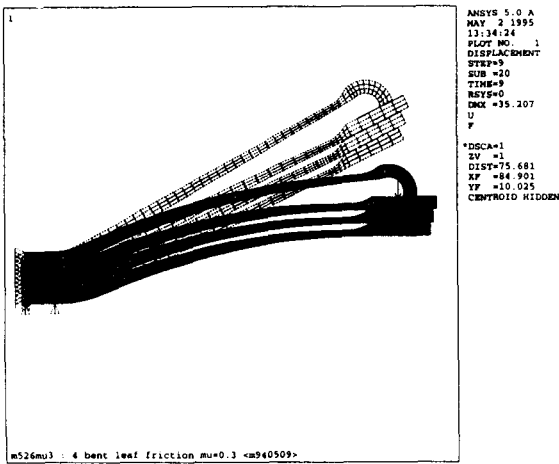


그림 4. Bent Type Holddown Spring 특성해석 변위결과

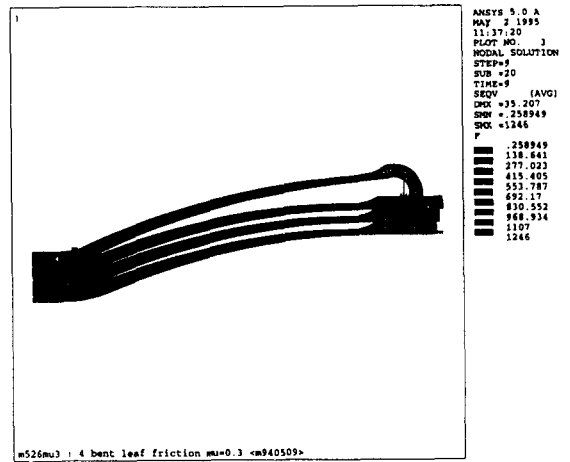


그림 6. Bent Type Holddown Spring 특성해석 등가응력 결과

으로써 시험결과보다 10% 정도 높은 것으로 예측하였고 이를 근거로 하면 시험결과의 스프링 상수는 129 N/mm임을 알 수 있으며, 이때의 스프링 상수는 선형구간의 값을 나타내고 있다. 본 유한요소 해석에 의한 선형구간의 스프링 상수는 125 N/mm로서 역시 시험결과에 비해 3%의 오차를 보인다. 따라서 이들 두 결과를 기초로 하여 볼 때 유한요소 해석의 적용 타당성을 알 수 있다.

그림 5는 또한 해석의 결과 판 스프링 사이의 마찰력의 영향을 보여주고 있으며 판 스프링 사이의 마찰력을 고려한 결과는 변위가 많이 발생하여 스프링 판과 판 사이에 미끄러짐이 발생하는 비선형 구간에서 마찰력을 고려하지 않은 결과에 비해 약 4%의 차이로 높게 해석됨을 보인다.

그림 6은 절점해석의 결과인 등가응력 분포를 보이며 최대 인장응력 1246 N/mm<sup>2</sup>을 나타내고, 높은 응력의 분포영역은 moment arm이 큰 bending 부분으로써 이 지역의 각 판의 상·하 요소 층에서는 소성변형을 수반하는 항복응력 이상의 응력이 분포됨을 보인다.

### 2.2.2. 직선형 Holddown Spring 특성해석

고연소도 핵연료 설계에선 집합체 부품의 설계개선 및 최적화, 특히 연료봉의 조사성장 증가로 인해 상·하단고정체 사이의 간격이 기존의 연소도를 갖는 핵연료보다 더 필요하게 됨으로 상·하단고정체의 높이를 감

소시키는 문제는 가장 유력시되고 있는 설계개선 사항이며 이렇게 될 때의 Holddown Spring은 기하학적 경계조건에 의해 더욱 compact화 되고 특성이 개선된 스프링의 설계가 필요하게 된다. 이러한 스프링의 설계변경 예는 Siemens /KWU의 FOCUS 핵연료[9]에서 발견되고 있다. 따라서 상단고정체의 설계변경 가능성과 이에 따라 발생하는 Holddown Spring의 설계변경 및 특성해석의 차원에서 직선형 Holddown Spring 특성을 유한요소로 모델링하고 해석결과와 시험결과를 비교 검토하였다.

가) 유한요소 모델

직선형 Holddown Spring의 특성해석을 위한 유한요소 모델을 경계조건과 함께 나타내면 그림 7과 같다. 각각의 스프링과 스프링 사이의 마찰 및 미끄러짐은 Contact 12 element의 특성 값을 줌으로써 해석에 포함시킨다.

나) 해석 결과

직선형 Holddown Spring의 특성해석 결과인 변위의 형상은 그림 8에 보이고 하중변위 곡선은 마찰계수의 영향을 비교하기 위하여  $\mu=0.0$  및  $\mu=0.3$ 에 대하여 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9에서 보면 3개의 판이 하나로 조립된 1 set의 해석모델에 의한 계산은 스프링 특성 시험결과와 설계곡선 사이에 위치하며 특히 스프링

의 선형거동구간에서는 시험결과와 아주 잘 일치함을 알 수 있다. 마찰계수 0.3을 고려한 특성 값은 선형구간에서는 약 5%의 오차로, 비선형 구간에서는 약 8%의 오차를 보이고 있다.

3. 직선형 Holddown Spring의 최적설계

Holddown Spring은 그 동작범위에서 소성변형을 할 수가 있고 이로 인해 하중-하중제거 (loading-unloading)의 반복주기를 거칠 경우 잔류 소성변형에 의해 동일 변위에 대해서도 스프링력이 감소

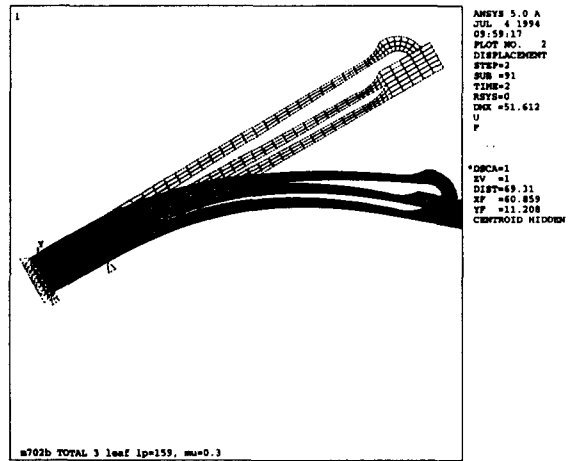


그림 8. 직선형 Holddown Spring 특성해석 변위결과

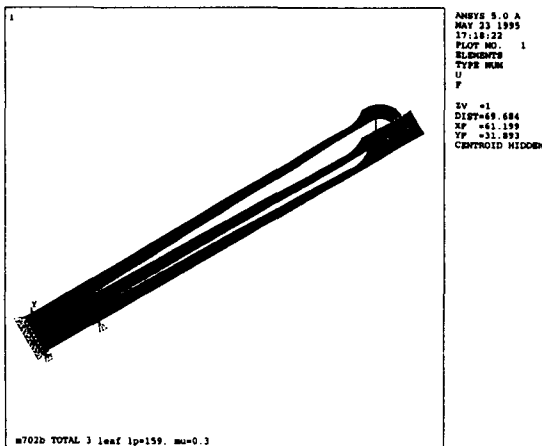


그림 7. 직선형 Holddown Spring 유한요소모델 및 경계 조건

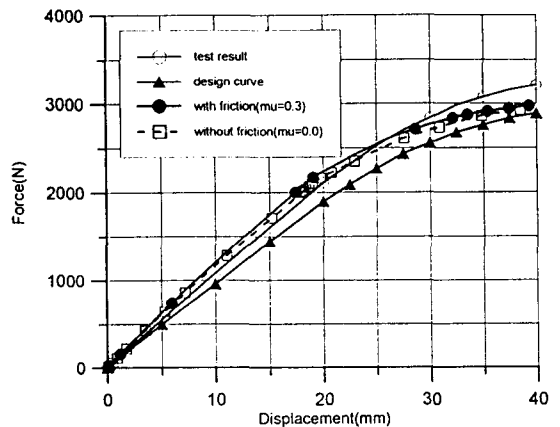


그림 9. 직선형 Holddown Spring 특성해석 결과

표 4. List Optimization Sets from Set 1 to Set 9

	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9
H	4.000	5.8123	3.7460	4.4190	4.1109	6.3334	5.5774	5.5390	5.5339
H1	2.000	3.6001	4.4233	4.1627	2.9640	2.4519	2.1270	2.0352	2.0142
Dels	98.498	97.203	358.34	207.75	195.30	76.025	42.242	35.452	33.679

Note : H =Base Thickness(mm)  
 H1 =Neck Thickness(mm)  
 Dels =Status of the Objective Variable

되는 바람직하지 못한 결과를 초래할 수 있다. 따라서 스프링의 거동은 가급적 선형구간이 넓은 범위구간에서 일어나도록 설계하는 것이 바람직하다. 이러한 점을 염두에 두고 스프링 판의 설계최적화를 시도하였다.

이 계산을 위하여 먼저 하나의 직선형 스프링 판에서 하중을 가하고 항복응력, 전단응력을 상태변수(state variable)로 두고 최적화를 위한 목적함수로서 절점 등가응력의 최소와 최대차이를 선정하여 이 차이가 최소가 되도록 하는 구속조건하에서 상태변수를 만족하는 스프링의 최적 두께를 계산하도록 하였다.

설계변수(Design variable)인 스프링 판 기저두께를 최소 2mm에서 최대 5mm로 구속하고, 최소 목 두께(Neck Thickness)를 2mm에서 4.5mm로 하여 상태변수인 절점 등가응력을 항복응력 1034 N/mm<sup>2</sup> [10] 이하가 되도록 하고 절점 전단응력을 항복응력의 70%인 724 N/mm<sup>2</sup> 이하로 제한하여 구한 최적 스프링 두께들은 표 4에 나타내었다. 이들 값 중에서 스프링 판 기저두께 5.6mm, 최소 목 두께 2.1mm를 선택하여 2개의 스프링을 1조로 한 경우를 해석한 결과는 그 범위가 그림 10과 같이 나타나며 특성곡선은 그림 11과 같다. 그림 11에서 보면 스프링 판 내의 최대 및 최소 등가응력의 차이가 최소가 되도록 한 두개로 이루어진 두께 최적화 스프링 set은 두께 4.3mm, 최소 목 두께 2.3mm를 갖는 3개 스프링판이 1조로 된 기존의 특성곡선과 비교하였을 때 거의 동일한 특성을 보임을 알 수 있고 이로부터 3개의 판 스프링 대신 2개의 판 스프링을 사용하므로 스프링 특성에는 큰 변화가 없으나 가공 및 조립 비용의 감소를 가져올 수가 있다.

4. 결 론

핵연료집합체의 노내 운전 중 안전성에 중요한 역할

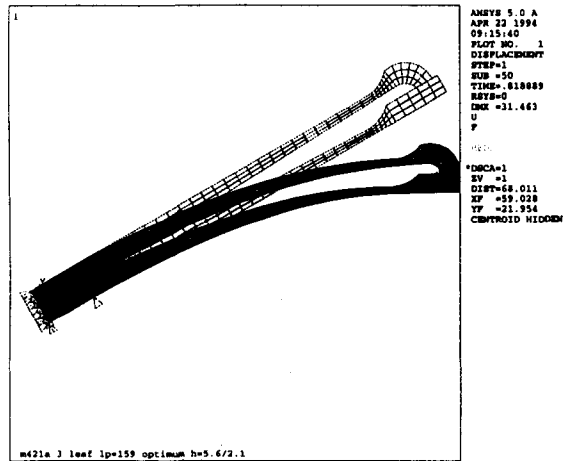


그림 10. 두께 최적화 Holddown Spring의 변위결과

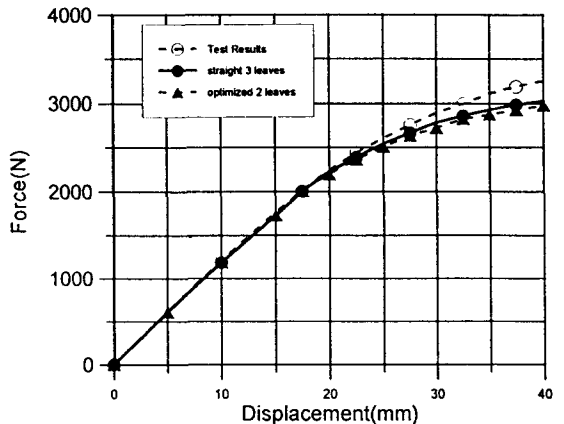


그림 11. 두께 최적화 Holddown Spring의 특성

을 하는 Holddown Spring의 특성 해석방법을 조사 검토하여 ANSYS 코드 해석에 의한 변위-하중의 특성 곡선을 얻을 수 있는 개선된 방법을 제시하였다. 이 개

선된 해석방법은 3개 내지 4개로 이루어진 스프링 set에 대하여 한번에 유한요소 모델링하고 스프링 판과 판 사이에 존재하는 마찰력을 고려하므로써 하나 하나의 스프링 판에 대하여 해석한 후 중첩하여 얻었던 기존의 해석방법보다 시험결과에 더 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있게 한다. 이 개선된 방법을 이용하여 17×17 국산 핵연료의 Holddown Spring 특성해석을 수행하였고 고연소도를 향한 집합체 부품 설계변경의 결과로 발생할 Holddown Spring 설계개선에 대처하기 위하여 직선형 Holddown Spring에 대한 특성 해석을 병행하였다. 이들 해석 결과들은 모두 스프링 특성시험 결과와 잘 일치함을 보이며 앞으로의 설계변경에 적용 가능함을 보인다.

또한 이들의 해석결과 스프링 특성에서 비선형 거동을 결정해 주는 소성영역이 스프링의 극부적인 영역에서 발생하므로 스프링의 선형거동을 개선시켜 주기 위한 최적설계를 수행하였고 이 결과 스프링의 최소 목 두께 2.1mm, 스프링 기저두께 5.6mm의 판 두개를 사용하면 기존의 판 스프링 3개를 사용하는 결과와 거의 동일한 결과를 얻을 수 있게 하지만 스프링 선형거동 구간의 확장을 기대하였던 처음의 예측은 뚜렷한 개선점을 보여주고 있지는 않다.

### 후 기

이 기술보고는 과학기술처 원자력연구개발 사업과 관련한 '93과제년도 미래형핵연료설계기술개발의 결과이며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. P.J. Sipush, "PWR Fuel Rod Design and Fuel

Assembly Design", Lecture Note, KAERI (1984)

2. B.K. Na, Kunz, "Design of the Fuel Assembly Structure with Zircaloy Spacer Grid", B112/87/e268a (1987)
3. Fragema, "Mechanical Design Report 900 MWe STD Fuel Assembly", ITB/84/4093
4. 송기남, 임현태, 서정민, "Leaf 형 Holddown Spring 집합체 강도해석", KAERI/TR-209/91 (1991)
5. 송기남, 임현태, "17×17형 핵연료 Leaf Spring 시험보고서", KAERI/TR-Fe-GEN-91001K (1991)
6. 김형구, 임정식, 김일곤, 손동성, "기하학적 재료적 비선형을 갖는 중첩된 판 스프링의 특성해석에 관한 연구", 대한기계학회 제14권 제1호, pp 13-22 (1990)
7. Swanson Analysis Systems Inc., "ANSYS User's Manual for Revision 5.0"
8. Gartner, "Determination of Spring Characteristic and Fatigue Test on FA Holddown Leaf Spring", U9 213/87/103 (1987)
9. Aisch, Fuchs, Lettau, "Focus Type Fuel Assembly for PWR", Nucl. Eng. & Design, 147, pp 105-110 (1993)
10. J.S. Yim, Kunz, "Design of the Fuel Assembly Structure with Inconel Spacer Grids", U6 312/87/e280 (1897)