

## 지지격자 스프링의 특성 개선을 위한 형상설계

### Shape Design of Spacer Grid Spring for Improving its Characteristics

허성필, 윤경호, 송기남, 정연호  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

핵연료집합체에서 지지격자 스프링은 연료봉에 손상을 일으키지 않으면서 연료봉을 지지해야 하며, 그 특성과 성능은 특성시험을 통해 얻게 되는 특성곡선으로부터 결정된다. H형 지지격자 스프링의 2단계 형상은 프레팅 마모에 의한 연료봉의 손상을 최소화하고 연료봉의 삽입에 의해 발생하는 등가응력을 최소화하도록 설계되었으나, 스프링의 최대하중을 증가시키는 것이 요구되고 있다. 본 논문에서는 H형 스프링의 2단계 형상에 대해 최대하중을 증가시키기 위한 형상설계를 수행하였다. 유한요소해석을 통해 스프링의 특성곡선을 구하고 이를 시험결과와 비교하였으며, 다른 특성의 저하 없이 최대하중이 증가된 최종단계의 H형 스프링 형상을 제시하였다.

#### Abstract

Spacer grid spring in a nuclear fuel assembly must support the fuel rods without damaging them, and its characteristics and performance are determined from the characteristic curve obtained through the characteristic test. The H-shape spring in the second stage is designed to minimize the fretting damage and to minimize the equivalent stress caused by the insertion of the fuel rod, but it is required to increase the maximum load. In this paper, the shape design is made to increase the maximum load of the H-shape spring in the second stage. The characteristic curve is obtained from the finite element analysis, and the analysis result is compared with the test result. The H-shape spring in the final stage having the increased maximum load is proposed.

## 1. 서론

경수로 핵연료의 지지격자(spacer grid)는 원자로 내에서 연료봉(fuel rod)들이 횡방향 및 축방향의 정위치에 있도록 지지하며, 연료봉 사이에 냉각수의 흐름 통로를 제공하는 역할을 한다. 이러한 지지격자는 Fig. 1과 같이 얇은 스트랩(strap)들이 엮갈려 끼워진 격자형 구조물로, 내부 스트랩에 형성된 판스프링 형태의 스프링과 덤플이 격자체 내부로 삽입된 연료봉을 고정시키게 된다. 지지격자 스프링은 연료 수명동안 연료봉에 손상을 일으키지 않으면서 연료봉을 건전하게 지지해야 하며, 특성시험을 통해 얻게 되는 특성곡선으로부터 강성, 선형구간의 크기, 최대하중 등을 구하고 이로부터 그 특성과 성능이 결정된다.<sup>1,2)</sup>

H형 지지격자 스프링의 2단계 형상은 프레팅 마모에 의한 연료봉의 손상을 최소화하고 접촉압력이 균일하게 분포되도록 설계되었으며<sup>3)</sup>, 연료봉의 삽입에 의해 발생하는 등가응력을 최소화시키는 최적화된 모델이다.<sup>4)</sup> 그러나 H형 스프링의 2단계 형상은 최대 지지하중이 다소 작아서 과도한 하중의 작용에 대해서는 스프링의 역할을 상실할 가능성이 있으며, 이에 최대하중을 증가시키는 것이 요구되고 있다.

본 논문에서는 한국원자력연구소에서 고안하여 미국 및 대한민국 특허를 획득한 H형 스프링의 형상을 개량한 2단계 형상에 대해서 최대하중을 증가시키기 위한 형상설계를 수행하였다. 형상변경에 따른 특성곡선을 얻기 위하여 유한요소해석을 통해 H형 스프링의 2단계 형상에 대한 특성곡선을 구하였으며, 시험결과와 비교하여 해석방법의 타당성을 검토하였다. 스프링의 형상이 변경되면 최대하중 뿐만 아니라 스프링의 다른 특성도 함께 변하게 되므로, 다른 특성의 저하 없이 최대하중을 증가시킬 수 있는 형상을 제시하고자 한다.

## 2. 지지격자 스프링의 특성시험 및 유한요소해석

### 2.1 특성시험

지지격자와 분리된 단일 셀 시편을 준비하여 지지격자 스프링의 특성시험을 수행하였

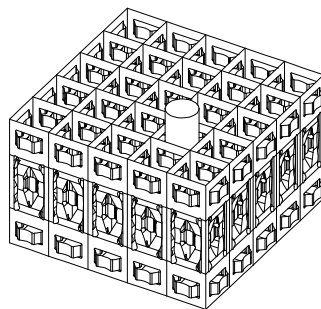


Fig. 1 Configuration of a partial spacer grid

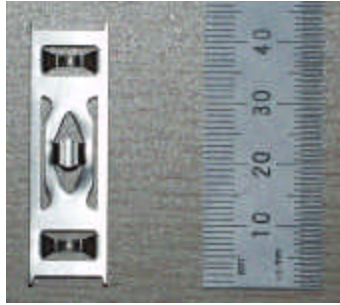


Fig. 2 Unit cell specimen of the H-shape spring in the second stage

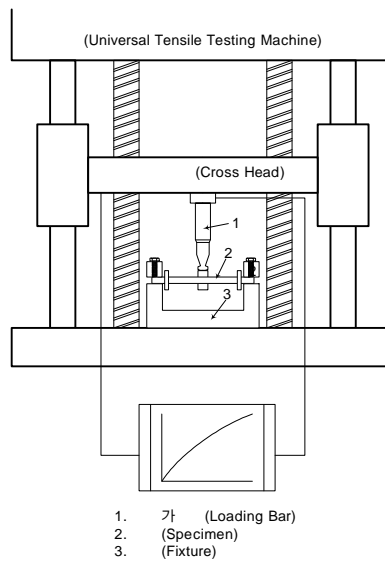


Fig. 3 Schematic drawing of tester

다. Fig. 2는 H형 스프링 2단계 형상의 특성시험을 위한 시편을 나타낸다. Fig. 3과 같이 시편의 양 끝단(edge)을 치구(fixture)로 고정하고 연료봉의 외경과 동일한 직경을 갖는 가중봉(loading bar)으로 스프링면에 수직방향의 변위를 가하였다. 수 회의 반복시험을 수행하여 특성곡선을 얻고, 이로부터 지지격자 스프링의 강성과 최대하중 등을 결정하였다.<sup>5)</sup>

## 2.2 특성곡선 해석

본 논문에서는 스프링의 특성시험을 모사하기 위한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4는 H형 스프링의 2단계 형상에 대한 유한요소 모델을 나타낸 것으로 976개의 4절점 쉘요소(shell element)를 사용하여 모델을 구성하였다. 3차원 CAD 프로그램인 I-DEAS Ver. 8을 사용하여 형상을 모델링하였고, 해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver. 6.1<sup>6)</sup>을 사용하였다.

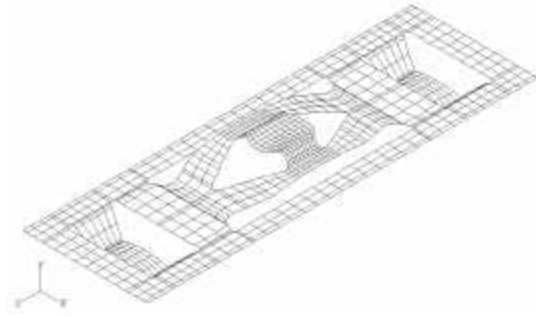


Fig. 4 Finite element model of the H-shape spring in the second stage

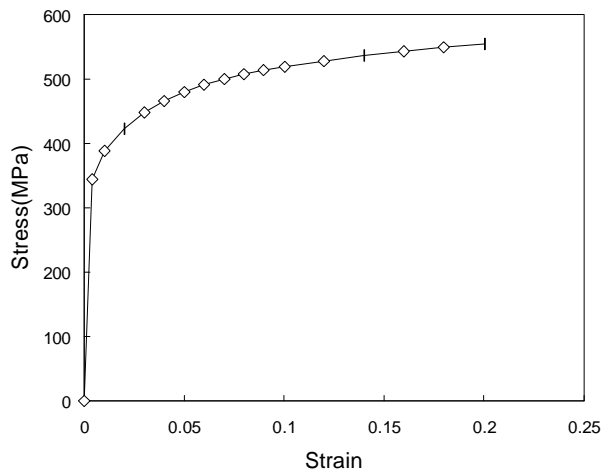


Fig. 5 Stress-strain curve of Zircaloy-4

지지격자 스프링의 특성곡선 해석은 소성 영역까지의 변형을 고려해야 하므로 탄소성 해석을 수행해야 한다. 이를 위하여 지지격자 스프링의 재질인 지르칼로이(Zircaloy)에 대한 인장시험을 수행하였고, Fig. 5와 같은 응력-변형률 선도를 얻었다. 경계조건은 특성 시험 조건을 잘 표현할 수 있도록 스프링의 양 끝단은 수직방향 변위와  $x$ 축,  $z$ 축에 대한 회전 자유도를 구속하였고, 끝단에서 0.4mm 떨어진 치구 물림부는 수직방향 변위와  $x$ 축에 대한 회전 자유도를 각각 구속하였다.<sup>7)</sup>

Fig. 4의 스프링 위에 연료봉에 해당하는 지름 9.5mm의 원통을 강체로 모델링하고 특성시험에서와 동일하게 이 강체 원통을 수직방향으로 이동시켜 스프링과의 접촉이 일어날 때부터 1mm의 변위를 발생시켰다. 강체봉과 스프링면에는 상대적 침투가 일어나지 않도록 접촉 조건을 설정하였다. 강체봉의 이동은 기준절점(reference node)을 정의하여 이 절점에 변위를 부여하였고, 시험조건과 일치하도록 수직 방향의 변위를 제외한 나머지 자유도를 모두 구속하였다.

Fig. 6은 유한요소해석에서 얻은 특성곡선을 3회의 시험결과와 함께 나타낸 것으로, 변

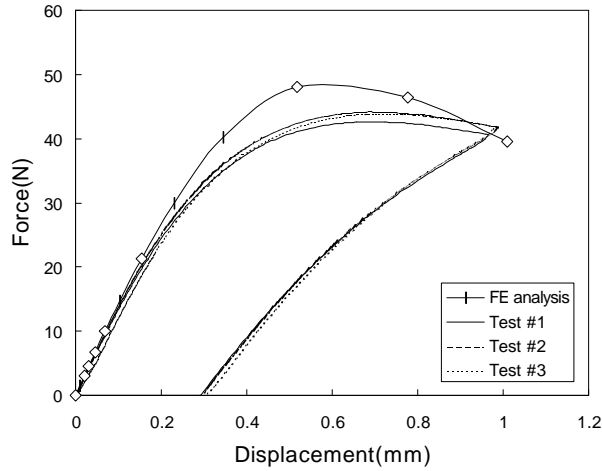


Fig. 6 Characteristic curves of the H-shape spring in the second stage

위가 대략 0.2mm 이내인 선형 구간에서는 두 결과가 잘 일치한다. 그러나 이후의 비선형 구간에서는 두 결과에 차이가 발생하며, 최대하중의 크기에서 약 10%의 상대 오차가 나타났다.

H형 스프링의 초기형상에 대해서도 Fig. 7과 같은 유한요소 모델을 구성하고 위의 H형 스프링 2단계 형상에 대한 해석에서와 동일한 조건 및 방법으로 특성해석을 수행하였다. Fig. 8에 해석결과를 3회의 시험결과와 함께 나타내었는데, 그림에서 H형 스프링 초기형상도 Fig. 6의 2단계 형상에서와 유사하게 선형 구간의 기울기, 즉 스프링의 강성은 두 결과가 잘 일치하나, 비선형 구간에서 약간의 차이가 발생함을 볼 수 있다. H형 스프링의 초기형상에서는 최대하중에 약 6%의 오차가 발생하였다.

Fig. 6과 Fig. 8에서 특성곡선에 대한 유한요소해석 결과와 시험결과에 차이가 나타나는 이유는 스프링의 제조를 위한 프레스가공에서 약간의 치수변화와 잔류응력이 발생하는데, 이를 해석에서 고려하지 못했기 때문으로 생각된다. 그러나 비선형 구간에서도 차이가 크지 않으며 특히 스프링의 강성을 산출하는 선형 구간에서는 잘 일치하므로 본 논

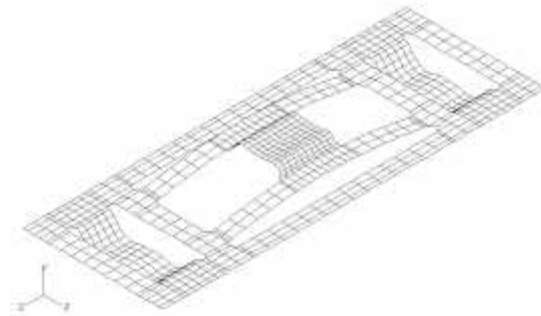


Fig. 7 Finite element model of the H-shape spring in the early stage

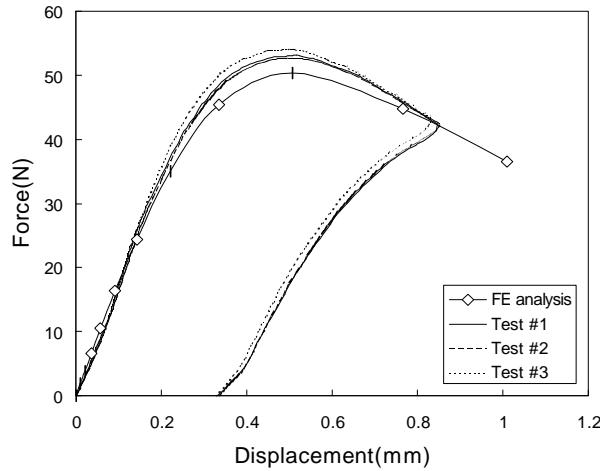


Fig. 8 Characteristic curves of the H-shape spring in the early stage

문의 유한요소해석 방법이 작은 오차범위 내에서 특성곡선을 예측하는데 타당하다고 할 수 있을 것이다.

### 3. 특성개선을 위한 H형 스프링의 형상설계

#### 3.1 H형 스프링 2단계 형상의 형상개선

##### 3.1.1 개요

H형 스프링의 2단계 형상은 연료봉과의 접촉형태가 등각접촉(conformal contact)이 되어 프레팅 마모에 의한 손상을 최소화하고, 연료봉의 삽입에 의해 발생하는 등가응력을 최소화하는 형상 최적화를 통해 얻어진 형상이다. 또한 연료봉과의 접촉부 형상이 원형 또는 아치 형상이 되게 하여 접촉압력이 균일하게 분포되도록 설계하였다.<sup>3,4)</sup>

그런데, H형 스프링의 2단계 형상은 Fig. 6의 특성곡선에서 최대하중이 50N 미만이 되어 마모 측면에서의 우수한 특성에도 불구하고 실제 원자로 운전시에 과도한 하중이 작용하게 되면 스프링의 역할을 상실할 수 있는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 H형 스프링 2단계 형상의 최대하중이 50N 이상이 되도록 하기 위한 형상변경을 시도하였다.

H형 스프링의 2단계 형상은 주로 스프링 하단부가 연료봉을 지지하게 된다. 또한 스프링 하단부가 양단 고정부와 같은 형태로 연료봉을 지지하므로, 이 스프링 하단부의 길이를 줄이면 스프링이 받는 최대하중을 증가시킬 수 있을 것으로 예측된다.

##### 3.1.2 특성곡선에 영향을 미치는 형상 인자

H형 스프링의 하단부 형상은 측면에서 볼 때 Fig. 9와 같이 두 개의 원호로 구성되어 있다. 따라서 하단부 길이  $l$ 을 변화시키는 데에는 두 개의 곡률 반경( $R, r$ )의 조절이 가능하다. 또한 스프링 하단부의 길이를 줄여 갈 경우 중앙 cutout부는 고정시킬 수도 있

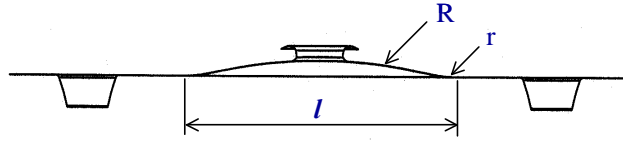


Fig. 9 H-shape spring in the second stage from the side view

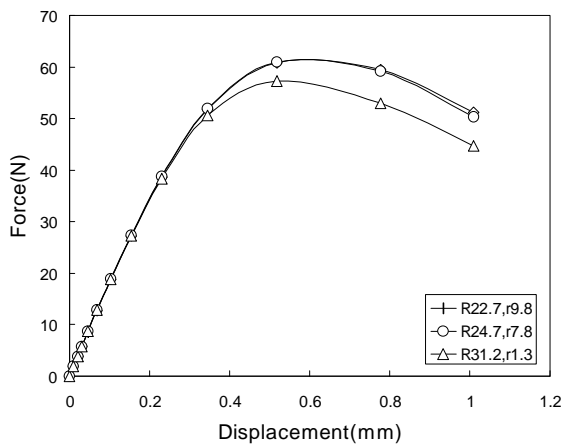
고, 함께 줄일 수도 있을 것이다.

Fig. 10(a), (b)는 스프링 하단부의 길이가 각각 16mm, 14mm일 경우에 서로 다른 R과 r의 조합에 대한 특성곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 두 그림에서 R(또는 r)의 증가나 감소에 따라 스프링의 지지하중이 증가하거나 감소하는 일관된 경향은 볼 수 없다. 그러나 스프링 하단부 길이에 상관없이 r이 매우 작은 경우를 제외하면 R과 r의 조합은 특성곡선에 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

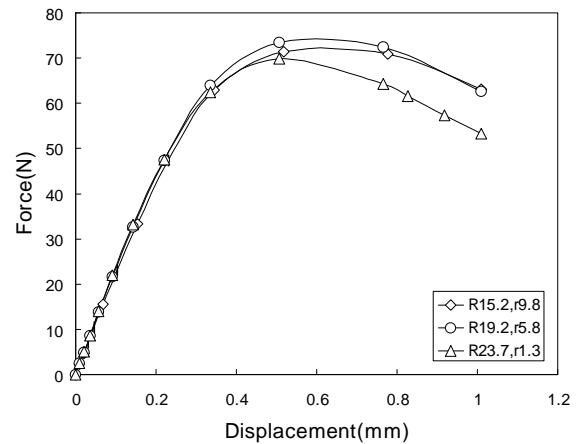
Fig. 11(a), (b)는 동일한 스프링 하단부 형상에 대하여 중앙 cutout부의 길이가 특성곡선에 미치는 영향을 평가한 그림이다. 두 그림에서 cutout부의 길이가 감소하면 스프링의 지지하중이 증가하지만, 그 차이는 미소함을 알 수 있다.

### 3.1.3 스프링 하단부 길이 변화에 따른 스프링 특성

H형 스프링 2단계 형상의 최대하중을 증가시키기 위해 스프링 하단부의 길이를 감소시키는 데에는 여러 형상 인자들이 동시에 변화될 수 있다. 그런데, 위의 고찰에서와 같이 R과 r의 조합 및 cutout부의 길이는 특성곡선에 큰 영향을 미치지 못하므로 일정한 기준을 정하여 스프링 하단부의 길이를 변화시켰다. Table 1과 같이 네 가지의 길이 모

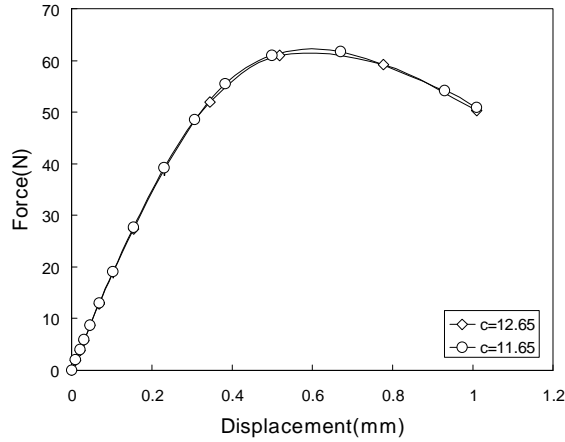


(a)  $l=16\text{mm}$

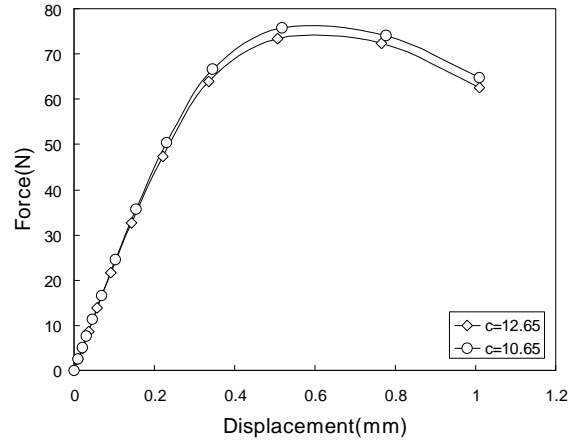


(b)  $l=14\text{mm}$

Fig. 10 Characteristic curves of the H-shape spring in the second stage for the different combination of R and r



(a)  $l=16\text{mm}$ ,  $R=24.7\text{mm}$ ,  $r=7.8\text{mm}$



(b)  $l=14\text{mm}$ ,  $R=19.2\text{mm}$ ,  $r=5.8\text{mm}$

Fig. 11 Characteristic curves of the H-shape spring in the second stage for the different length of central cutout

Table 1 Dimensions of various H-shape spring models

	$l(\text{mm})$	$R(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$c(\text{mm})$
Model I	18	31.2	9.8	12.65
Model II	16	24.7	7.8	11.65
Model III	14	19.2	5.8	10.65
Model IV	12	14.7	3.8	9.65

델을 설정하였는데,  $l$ 의 2mm 감소에 대하여  $r$ 을 2mm 감소시키며  $R$ 을 조절하였고, 중앙 cutout부의 길이는 1mm씩 감소시켜 각 모델을 구성하였다.

각 길이 모델에 대해 유한요소해석을 수행하여 Fig. 12와 같이 특성곡선을 얻었고, 이로부터 최대하중을 결정하였다. Fig. 13은 최대하중에 대한 해석결과와 예측결과를 함께 나타낸 것으로, 예측결과는 특성시험이 수행된  $l=18\text{mm}$  모델에서의 해석결과와 시험결과와의 상대적 차이가 다른 길이 모델에서도 동일하게 적용될 것을 가정하여 계산한 값이다. 즉, 각 길이모델에 대한 해석결과에 아래의 식 (1)로부터 계산한 가중치를 곱하여 계산하였다.

$$w = \frac{43.58\text{N}(\text{average test result})}{48.69\text{N}(\text{FE analysis result})} = 0.895 \quad (1)$$

그림에서 스프링 하단부의 길이가 감소함에 따라 최대하중이 증가함을 볼 수 있는데, 이는 예측했던 대로 굽힘변형에 대한 저항이 증대되기 때문이다. 또한  $l=18\text{mm}$ 인 현재의 H형 스프링 2단계 형상은 과도한 하중의 작용에 대한 연료봉의 지지에 문제가 있지만,  $l$ 이 16mm 이하가 되면 스프링의 최대하중이 50N 이상이 되어 이러한 결점을 보완할 수



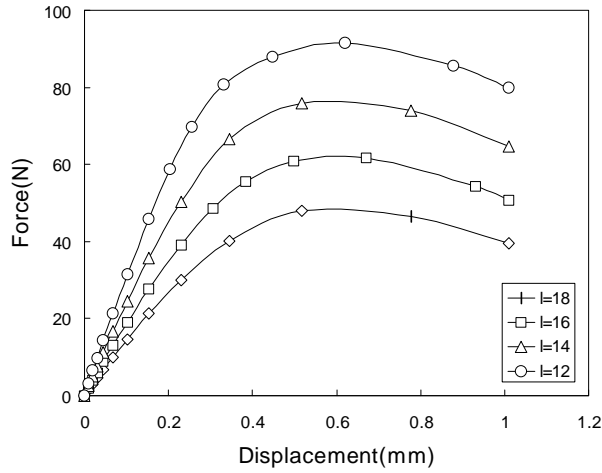


Fig. 12 Characteristic curves of various H-shape spring models

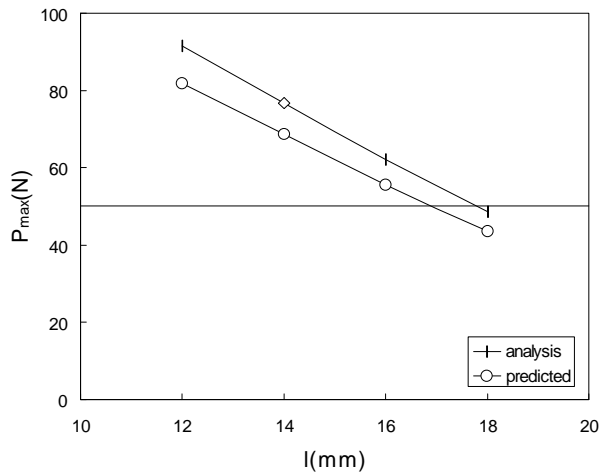


Fig. 13 Prediction of maximum load of various H-shape spring models

있을 것이다.

지지격자 스프링의 특성 중 중요한 것이 강성과 선형구간의 크기이다. 따라서 위와 같이 최대하중을 증가시키기 위한 형상변경에서 스프링의 다른 특성이 저하되어서는 안 될 것이다. Table 2는 Table 1의 네 가지 길이모델에 대해 강성과 선형구간의 크기를 구한 결과이다. 스프링의 강성은 특성곡선의 앞부분 데이터를 선형 적합(linear fitting)하여 이 직선의 기울기로부터 계산하였다. 또한 선형구간의 크기는 회귀분석(regression analysis)에서의 결정계수(coefficient of determination)  $r^2$ 가 0.995이상이 되는 최대 범위로 하였다. 표에서 스프링의 최대하중을 증가시키기 위하여 스프링 하단부의 길이를 감소시키면 강성은 증가하면서도 선형구간의 감소가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 지지격자 스

Table 2 Stiffness and linear range of various H-shape spring models

	$\ell(\text{mm})$	Stiffness(N/mm)	Linear range(mm)
Model I	18	123.4	0.29
Model II	16	161.4	0.29
Model III	14	209.6	0.28
Model IV	12	270.6	0.27

프링의 강성은 너무 작으면 연료봉의 건전한 지지가 곤란하고 너무 크면 연료봉이 휨(bowing)을 일으킬 수 있으므로,  $150 \pm 20 \text{N/mm}$  범위의 강성을 갖는 것이 바람직하다. 이 기준으로 볼 때 현재의 H형 스프링 2단계 형상은 강성이 다소 작은 편이며,  $\ell=16\text{mm}$ 의 모델은 최대하중이 50N 이상이 되면서 강성의 설계 기준치를 잘 충족하는 모델이라고 할 수 있다.

### 3.2 결합 H형 스프링의 형상개선

#### 3.2.1 H형 스프링 2단계 형상과 초기형상의 결합

3.1절에서는 H형 스프링의 2단계 형상에 대하여 스프링 하단부의 길이를 변화시켜 50N 이상의 최대하중을 갖는 스프링 모델을 구성하였다. Fig. 8에서 H형 스프링 초기형상의 최대하중은 2단계 형상보다 크지만, 연료봉의 마모 측면에서는 H형 스프링의 2단계 형상이 초기형상에 비해 우수하다. 이에 Fig. 14와 같이 H형 스프링의 초기형상에서 연료봉과의 접촉부 형상을 2단계 형상으로 대체한 모델을 구성하여 그 특성을 평가하였다.

Fig. 15는 H형 스프링의 초기형상과 2단계 형상의 연료봉 접촉부를 결합한 모델의 특성곡선 해석 결과를 초기형상의 특성곡선과 함께 나타낸 것으로, 결합 H형 스프링의 강성과 최대하중은 H형 스프링의 초기형상에 비해 작아짐을 볼 수 있다.

#### 3.2.2 스프링 하단부 길이 변화에 따른 스프링 특성

결합 H형 스프링에 대해 3.1절의 H형 스프링 2단계 형상에서와 마찬가지로 최대하중

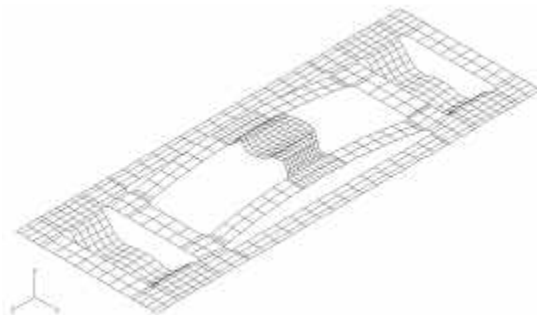


Fig. 14 Finite element model of the combined H-shape spring

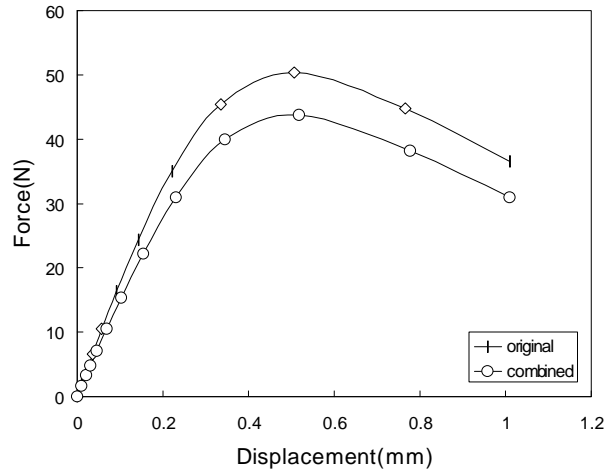


Fig. 15 Characteristic curves of the combined and the original H-shape spring

Table 3 Dimensions of various combined H-shape spring models

	$\ell$ (mm)	R(mm)	r(mm)
Model A	18	44.05	2.0
Model B	16	34.90	2.0
Model C	14	26.83	2.0
Model D	12	19.84	2.0

의 증가를 위하여 스프링 하단부의 길이를 감소시킨 모델을 구성하였으며 이에 따른 스프링 특성의 변화를 평가하였다. 결합 H형 스프링은 스프링 하단부를 구성하는 r이 매우 작은 값이어서, r을 고정한 상태에서 R을 조절하여 Table 3과 같은 네 가지 길이 모델을 구성하였다.

Fig. 16은 각 길이 모델에 대한 특성곡선 해석 결과이며, 이로부터 최대하중을 결정하여 Fig. 17에 나타내었다. 결합 H형 스프링에 대해서는 시험결과가 없는 상태이므로 해석결과만을 도시하였다. 두 그림에서 스프링 하단부의 길이 감소에 따른 강성 및 최대하중의 증가는 H형 스프링의 2단계 형상에서와 동일한 경향이나, 결합 H형 스프링에서 스프링 하단부 길이의 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 4는 결합 H형 스프링의 네 가지 길이 모델에 대한 강성과 선형구간의 크기를 구한 결과이며 계산방법은 위의 H형 스프링 2단계 형상에서와 동일하다. Table 4에서  $\ell=16\text{mm}$ 의 모델이 50N 이상의 최대 지지하중을 나타내면서 강성 기준치에 가장 가까운 모델이라고 할 수 있다.

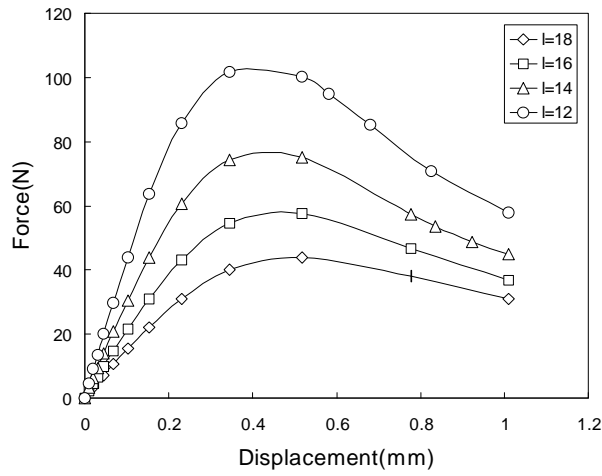


Fig. 16 Characteristic curves of various combined H-shape spring models

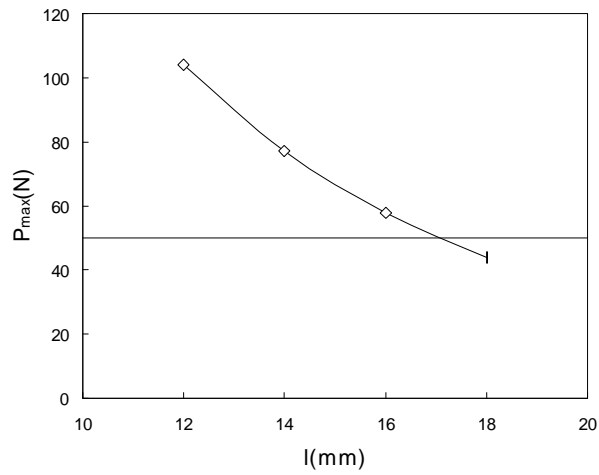


Fig. 17 Maximum load of various combined H-shape spring models

Table 4 Stiffness and linear range of various combined H-shape spring models

	$l$ (mm)	Stiffness(N/mm)	Linear range(mm)
Model A	18	130.4	0.26
Model B	16	183.9	0.25
Model C	14	262.0	0.24
Model D	12	385.0	0.22

## 4. 결 론

본 논문에서는 핵연료봉 지지격자 스프링의 특성개선을 위한 형상설계를 수행하였다. 형상변경에 따른 스프링의 특성곡선을 얻기 위하여 유한요소해석을 통해 특성곡선을 구하였고, 특성시험 결과와 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다. 한국원자력연구소에서 고안한 H형 스프링 2단계 형상의 미비점을 보완하는 최종단계의 H형 스프링 형상을 제안하였다. 또한 H형 스프링의 초기형상에 2단계 형상의 연료봉 접촉부를 결합한 모델에 대해서도 형상을 변경하여 그 특성을 개선하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업 중 “경수로형신형핵연료개발”(대과제) “고성능지지격자구조기술개발”(세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. 송기남 외, “핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향”, KAERI/TR-865/97, 한국원자력연구소, 1997.
2. 정연호 외, “경수로용 신형핵연료개발 - 핵연료 성능평가 및 열수력성능향상 기술개발”, KAERI/RR-2015/99, 한국원자력연구소, 2000.
3. H. K. Kim, H. S. Kang, K. H. Yoon and K. N. Song, “Experimental Investigation on the Parameters Affecting Fuel Fretting Wear”, SMiRT 16, Paper 1548, 2001.
4. K. H. Yoon, H. K. Kim, H. S. Kang, K. N. Song and K. J. Park, “Shape Optimization of the H-shape Spacer Grid Spring Structure”, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 33, No. 5, pp. 547~555, 2001.
5. 윤경호, 송기남, 강홍석, 정연호, “지지격자 스프링/딴플의 특성시험 및 유한요소해석”, 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2001.
6. “ABAQUS User’s Manual”, Version 6.1, Hibbit, Carlsson & Sorensen Inc., 2000.
7. 송기남, 허성필, 윤경호, 강홍석, 정연호, “핵연료봉 지지스프링의 탄소성 특성해석”, 대한기계학회 재료 및 파괴부문 1차 학술대회 논문집, pp. 61~67, 2002.
8. R. D. Cook, D. S. Malkus and M. E. Plesha, “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, John Wiley & Sons, New York, 1988.