

## 경수로용 핵연료집합체 중간지지격자 스프링의 기계적 특성 평가

### Mechanical Characteristic Evaluation of the Mid Grid Spring in PWR Fuel Assembly

엄경보, 이신호, 전상윤, 권용복, 전경락

한전원자력연료주식회사  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

경수로용 핵연료집합체에 사용하는 중간지지격자 스프링의 기계적 특성 평가를 위하여 스프링 특성 시험을 수행하였다. 시험에는 웨스팅하우스형 발전소에 사용되는 17x17 및 14x14 핵연료집합체의 국산 중간지지격자를 사용하였으며, 지지격자판 단위와 지지격자체 단위의 스프링 특성 시험을 수행하여 스프링의 하중-변위 특성 곡선을 구하였다. 시험 결과, 국산 중간지지격자 스프링은 핵연료집합체 수명 초기에 요구되는 기준을 만족하는 것으로 평가되었다. 또한, 지지격자판 원자재의 기계적 특성 및 지지격자 스프링의 형상에 따른 스프링의 특성 변화를 비교 분석하였고, 지지격자판 단위 시험 방법의 유용성에 대하여 논하였다.

#### Abstract

The spring load-deflection characteristic tests were performed for Westinghouse type 17x17 and 14x14 fuel assembly mid grids to evaluate the mechanical characteristics of the springs. Six kinds of prototype mid grids manufactured by KNFC were tested and two kinds of test methods were used: block test and in-grid test. The test results showed that all tested mid grid springs satisfied the criteria required at the beginning of fuel assembly life. In addition, the variation of spring characteristics resulting from the difference in the mechanical properties of spring material and spring shapes was investigated. And the validity of the test methods was discussed.

#### 1. 서 론

경수로용 핵연료집합체의 중간지지격자는 골격체의 일부분으로 안내관과 연결되며, 안내관 및 계측관을 지지하여 그 위치를 고정시켜 제어봉 및 계측기의 삽입 경로를 유지하고, 연료봉간 간격

이 유지되도록 하는 구조부품이다. 중간지지격자에 부착된 혼합날개는 연료봉 주위의 냉각수 혼합을 유발하여 연료봉에서 발생하는 열이 보다 효과적으로 냉각수에 전달되도록 한다.

본 논문에서 사용된 중간지지격자는 웨스팅하우스형 발전소에 사용되는 17x17 및 14x14 핵연료집합체의 중간지지격자로서, 두 개의 스프링과 네 개의 덤플이 짝을 이루어 하나의 연료봉을 지지하는 셀을 이루는 구조를 가지고 있다. 덤플은 스프링에 비해 강성이 매우 크기 때문에 연료봉의 횡방향 위치를 고정시키는 역할을 하며, 스프링력에 의해 연료봉이 지지된다. 중간지지격자의 스프링은 핵연료집합체 제조, 운송 및 취급시 연료봉을 통해 다양한 하중을 받게 되고, 핵연료집합체가 원자로 내에서 연소되는 기간 동안에도 연료봉을 적절히 지지해야 하므로 스프링의 초기 특성이 중간지지격자 성능에 중요한 역할을 하게 된다.

본 논문에서는 중간지지격자 스프링에 대한 스프링 특성 시험을 수행하여 국산 중간지지격자 스프링이 핵연료집합체 수명 초기에 요구되는 기준을 만족하는지 평가하였고, 지지격자판 원자재의 기계적 특성 및 지지격자 스프링의 형상에 따른 스프링의 특성 변화를 비교 분석하였으며, 사용된 시험 방법의 유용성에 대하여 논하였다.

## 2. 시편 종류 및 시험 방법

### 2.1 시편 종류

시험에 사용된 지지격자는 웨스팅하우스형 발전소에 사용되는 17x17 및 14x14 핵연료집합체의 중간지지격자로서 재질은 지르칼로이-4 이다. 원자재 공급사 및 지지격자판 제작사에 따라 17x17형 중간지지격자 내/외부 지지격자판 스프링 8종과 14x14형 중간지지격자 내/외부 지지격자판 스프링 4종으로 시편의 그룹을 나누었다. 단, 지지격자체 제작사는 동일하다. 시편의 종류 및 원자재 기계적 특성은 표 1과 같다.

### 2.2 시험 방법

표 1의 스프링 종류별로 지지격자에 연료봉이 장입되었을 경우 설계상 발생할 수 있는 스프링의 최대 변위 범위를 구하고 이 범위를 나누어 5단계의 시험 변위를 설정하였다. 표 1의 각 그룹별로 5단계의 시험 변위 각각에 대해 5개의 스프링 시편을 사용하였으며, 시험 변위에 이를 때까지 스프링에 하중을 가한 후 반대로 하중을 감소시켜 하중이 영이 될 때까지 시험을 수행하여 하중-변위 데이터를 수집하였다.

시험은 만능재료시험기를 사용하여 상온에서 수행하였으며, 시험 방법은 치구 및 시편의 형태에 따라 지지격자판 단위의 시험과 지지격자체 단위의 시험으로 구분된다.

#### 2.2.1 지지격자판 단위의 시험

그림 1(a)에서 보여지는 바와 같이, 지지격자판의 한 셀을 절단하여 치구 위에 올려 놓고 양단을 조여 지지격자판의 셀이 양단 고정된 경계조건을 갖게한 후, 지지격자판의 중앙에 위치한 스프링에 하중을 가한다.

지지격자판 단위의 시험 방법은 외부지지격자판 스프링의 특성 시험과 7-i-a와 4-i-a 그룹의

내부지지격자판 스프링의 특성 시험에 적용되었다.

### 2.2.2 지지격자체 단위의 시험

그림 1(b)에서 보여지는 바와 같이, 내부 및 외부의 모든 지지격자판을 조립하여 용접공정을 거쳐 완성된 지지격자체를 시편으로 사용하며, 각 셀에 연료봉 외경을 모사한 하중봉을 삽입하여 스프링에 하중을 가한다.

지지격자체 단위의 시험 방법은 모든 내부지지격자판 스프링의 특성 시험에 적용되었다.

## 3. 시험 결과 및 평가

핵연료집합체 수명 초기에 중간지지격자 스프링에 요구되는 스프링력의 범위를 구하였고, 시험 결과로 부터 구한 중간지지격자 스프링력이 요구되는 스프링력의 범위내에 있는지를 평가하였다. 시험 결과로부터 연료봉에 작용하는 스프링력을 구하기 위해 내부지지격자판 스프링은 지지격자체 단위의 시험을 통해 구한 스프링 특성곡선을 사용하였고 외부지지격자판 스프링은 지지격자판 단위의 시험을 통해 구한 스프링 특성곡선을 사용하였다.

### 3.1 요구되는 스프링력

지지격자의 스프링은 핵연료집합체 운송 및 취급시 발생할 수 있는 하중을 견뎌야 하고, 연료봉 열팽창시 연료봉에 좌굴을 유발하지 않아야 하며, 연료봉 장입시 연료봉에 과도한 흠집을 발생시키지 않아야 한다. 핵연료집합체 수명 초기에 요구되는 이러한 기준을 만족하는 스프링력의 범위를 다음과 같이 구하였다.

#### 3.1.1 최소 스프링력

지지격자의 스프링은 핵연료집합체 운송 및 취급시 기준이 되는 횡방향 6g와 축방향 4g의 하중에도 연료봉을 계속 지지하고 있어야 하므로<sup>[1],[2]</sup>, 이 때 발생될 수 있는 최대 하중이 지지격자 스프링에 요구되는 최소 스프링력이 된다. 힘의 평형식 구성을 위해 지지격자 한 셀 내에서 스프링과 연료봉사이의 하중 관계를 그림 2에 나타내었다.

횡방향 6g하중이 작용할 때의 힘의 평형식은 다음과 같다.

$$FS + 2FF = \frac{W \times g \times S}{AF} \quad (1)$$

여기서, FS = grid spring force, FF = friction force ( $\mu \times FS$ ),  $\mu$  = friction coefficient

W = fuel rod weight, g = shipping & handling acceleration, S = grid to grid span

AF = active fuel length

식 (1)로부터  $FS = (W \times g \times S) / [(1 + 2\mu)AF]$  이며, 17x17형 및 14x14형에 대한 계산 결과, 스프링력(FS)은 각각 1.03 kgf 및 1.50 kgf 이다.

축방향 4g하중이 작용할 때의 힘의 평형식은 다음과 같다.

$$4N \times \mu \times FS = W \times g \quad (2)$$

여기서, FS = grid spring force,  $\mu$  = friction coefficient, W = fuel rod weight  
 $g$  = shipping & handling acceleration, N = number of grids

식 (2)로부터  $FS = (W \times g) / (4N \times \mu)$  이며, 17x17형 및 14x14형에 대한 계산 결과, 스프링력 (FS)은 각각 0.80 kgf 및 1.10 kgf 이다.

횡방향 및 축방향 하중이 작용할 때의 스프링력중 큰 값이 지지격자 스프링에 요구되는 최소 스프링력이 되므로, 17x17형 지지격자 스프링의 최소 스프링력은 1.03 kgf 이며, 14x14형 지지격자 스프링의 최소 스프링력은 1.50 kgf 이다.

### 3.1.2 최대 스프링력

지지격자의 최대 스프링력은 연료봉 장입 과정에서 연료봉에 과도한 흠집을 유발하지 않기 위해 경험적으로 9.07 kgf (20 lbs) 를 넘지 않도록 제한되며, 연료봉의 노내 열팽창시 축방향 팽창을 허용하여 연료봉 좌굴이 발생하지 않도록 해야한다<sup>[3]</sup>.

지지격자 스프링과 연료봉사이 에 발생해는 마찰력( $F_{br}$ )과 연료봉 튜브의 임계좌굴하중( $P_{crit}$ )과의 관계는 식 (3)과 같다.

$$4F_{br} < P_{crit} \quad (3)$$

여기서,  $P_{crit} = 2\pi^2 EI / L^2$ ,  $F_{br} = 4 \mu FS$ ,

$P_{crit}$  = critical buckling load for tube,  $F_{br}$  = rod breakaway force

FS = spring force, L = grid to grid span length,  $\mu$  = friction coefficient

E = Young's Modulus,  $I = \pi \times (D_{O.D.}^4 - D_{I.D.}^4) / 64$

식 (3)로부터  $FS < (P_{crit} / 16\mu)$  이며, 17x17형 및 14x14형에 대한 계산 결과, 스프링력(FS)은 각각 10.49 kgf 및 9.03 kgf 가 된다.

식 (3)으로부터 구한 스프링력과 9.07 kgf 를 비교해서 그 중 작은 값이 지지격자 스프링에 요구되는 최대 스프링력이 되므로, 17x17형 지지격자 스프링의 최대 스프링력은 9.07 kgf 이며, 14x14형 지지격자 스프링의 최대 스프링력은 9.03 kgf 이다.

### 3.2 연료봉에 작용하는 스프링력

시험을 통해 구한 스프링 특성 곡선으로부터 연료봉에 작용하는 지지격자 스프링력을 구하기 위해서 연료봉의 형상과 지지격자에 연료봉을 장입하는 과정이 고려되어야 한다. 연료봉의 밀봉을 위해 연료봉 튜브의 양단은 봉단마개와 용접되며, 이 때 용접 비드가 발생한다. 용접 비드를 제거하는 과정을 거친 후에도 잔여 비드 및 동심도 차이에 의해서 봉단마개와 튜브 사이에 단차가 발생할 수 있으며, 이 때의 단차는 최대치가 규제되어 있다. 그림 3에서 A-B 구간은 단차가 없는 연료봉이 장입될 때 스프링에 발생하는 하중-변위 곡선이며, 이 구간의 변위는 연료봉 외경에서 지지격자 셀 내의 스프링과 덤플간 거리를 뺀 길이가 된다. 단차가 있는 연료봉의 장입시에는 스프링이 A-B 경로에 이어 단차에 의해 C지점까지 증가된 변위를 겪게 되고, C지점 통과 후 변위

가 감소하여 D지점에 이르게 된다. D지점은 스프링이 연료봉의 단차 부위를 완전히 벗어난 상태를 나타내며 D지점의 변위는 B지점과 마찬가지로 연료봉 외경에서 지지격자 셀 내의 스프링과 덤플간 거리를 뺀 길이가 된다. 따라서, 연료봉 완전 장입 후에 연료봉에 작용하는 스프링력은 D지점의 하중이 되며, D-E 구간은 이 때에 연료봉에 작용하는 스프링의 탄성거동을 나타내고, A-E 구간의 변위가 영구 변형량이 된다.

스프링 특성 시험을 통해, 표 1의 그룹 각각에 대하여 5가지 변위에 대한 하중-변위 곡선을 구하였으며, 이 곡선들로 전체 변위에 대한 스프링 특성 곡선을 구성하였다. 그림 4에 7-i-b와 7-o-b그룹의 전체 변위에 대한 스프링 특성 곡선을 나타내었으며, 각 곡선에서 그림 3의 D지점에 해당하는 5개의 점들을 연결하여 점선으로 표시된 곡선을 구성하였다. 이 곡선을 통해 임의의 스프링 변위에 대하여 연료봉에 작용하는 스프링력을 알 수 있게 된다. 이와 같은 방법으로 모든 그룹의 스프링에 대해 연료봉에 작용하는 스프링력 및 스프링 강성을 구하였다.

### 3.3 평가

3.1에서 구한 지지격자의 요구 스프링력과 3.2에서 구한 지지격자 스프링력의 시험값을 표 2에 나타내었다. 표 2에서와 같이 시험에서 구한 모든 지지격자 스프링력들은 요구되는 스프링력의 범위 내에 있으므로, 국산 중간지지격자의 스프링은 핵연료집합체 수명 초기에 요구되는 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

## 4. 시험 결과에 대한 고찰

### 4.1 지지격자판 원자재의 기계적 특성에 따른 스프링 특성 고찰

지지격자판 원자재의 기계적 특성이 스프링력과 강성에 미치는 영향을 알아보기 위해 표 1의 원자재의 기계적 특성과 표 2의 스프링력 및 강성들 간의 관계를 그래프화하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 (a) 및 (b)에서는 원자재 인장강도에 대한 내부 및 외부지지격자판의 스프링력을 나타내었고, (c) 및 (d)에서는 원자재 항복강도에 대한 내부 및 외부지지격자판의 스프링 강성을 나타내었다.

그림 5의 (a) 및 (b)에서 연료봉에 작용하는 지지격자의 스프링력은 지지격자판 원자재의 인장강도에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 그림 3에서 원자재의 인장강도 증가는 하중-변위 곡선중 소성 구간에 대한 하중 값의 증가를 유발하게 될 것이며, 결과적으로 지지격자의 스프링력을 나타내는 D지점의 하중값도 증가 시키게 되는 것으로 판단된다.

그림 5의 (c) 및 (d)에서 연료봉에 작용하는 지지격자의 스프링 강성은 원자재의 항복강도에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 그림 4의 스프링 하중-변위 특성 곡선에서, 다섯 구간의 변위에 대하여 구한 하중 제거시의 스프링 강성을 비교해 보면, 상대적으로 큰 변위까지 하중을 받은 경우 일수록 즉, 상대적으로 많은 소성 변위를 가진 경우일수록, 하중 제거시 스프링 강성이 줄어드는 현상을 볼 수 있으며, 이것은 지지격자 스프링이 재료의 소성 외에도 스프링 형상에 의한 기하학적 비선형성을 갖기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 항복강도가 다른 동일 형상의 두 스프링이

동일한 변위까지 하중을 받을 경우, 원자재의 탄성계수가 같다고 가정하면, 원자재의 항복강도가 큰 스프링이 항복강도가 작은 스프링에 비해 좁은 소성 변위 구간을 갖게 되어 하중 제거시 상대적으로 큰 스프링 강성을 갖게 될 것으로 예상되며, 이러한 이유로, 스프링의 원자재 항복강도가 증가할수록 하중 제거시의 스프링 강성도 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다.

#### 4.2 스프링 형상에 따른 스프링 특성 고찰

2.2.1항에서 언급된 바와 같이, 7-i-a그룹과 4-i-a그룹에 대해서는 지지격자판 단위와 지지격자체 단위의 시험을 모두 수행하였으며, 시험에서 얻은 스프링 강성값을 표 3에 나타내었다.

표 3에서 지지격자판 단위의 시험과 지지격자체 단위의 시험에서 얻은 스프링 강성을 비교해 보면, 17x17 내부지지격자판 스프링(7-i-a그룹)의 경우, 지지격자체 단위의 시험결과가 지지격자판 단위 시험결과의 25%이나, 14x14 내부지지격자판 스프링(4-i-a그룹)의 경우엔 83%로 17x17 내부지지격자판 스프링의 경우가 14x14 내부지지격자판 스프링의 경우보다 시험 방법 차이에 따른 강성의 차이가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 지지격자판 단위의 시험과 지지격자체 단위의 시험 각각에 대하여 17x17 및 14x14 내부지지격자판 셀의 경계에 주어지는 조건은 같으므로, 시험 방법 차이에 따른 강성 차이의 비율 측면에서 두 지지격자판 스프링이 상당히 다른 값을 보이는 것은 경계 조건을 제외한 두 지지격자판의 차이 즉, 지지격자판의 두께와 형태 및 스프링의 형상 차이등에 기인한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 요인들 중 스프링의 형상 차이에 따른 두 지지격자판의 스프링 특성 차이에 관하여 고찰해 보고자 하며, 17x17 내부지지격자판의 스프링 형상은 대각선 아치형이라 하고 14x14 내부지지격자판의 스프링 형상은 수직선 궁형이라 칭하기로 한다.

지지격자 스프링의 형상 차이에 의한 스프링 특성 변화를 분석하기 위해 17x17 및 14x14 내부지지격자판을 Solidworks<sup>[4]</sup>로 모델링하여 상용 유한요소 해석코드인 ANSYS<sup>[5]</sup>로 지지격자판 단위 시험과 지지격자체 단위 시험의 경계 조건을 모사하여 탄성 해석을 수행하였으며, 응력 해석 결과를 그림 6에 나타내었다.

하중에 의해 지지격자 스프링에 변위가 발생하는 현상을 편의상 처짐이라 하면, 스프링 중앙에 가해지는 하중에 의해 발생하는 총 처짐은 지지격자판의 처짐과 스프링 자체의 변형에 의한 처짐의 합으로 볼 수 있고, 여기서 지지격자판의 처짐은 스프링 양단이 지지격자판과 만나는 경계점의 처짐이 된다. 유한요소해석을 통해, 동일 하중을 가하였을 때, 내부지지격자판의 각 부위에서 얻어진 처짐량을 구하였으며, 지지격자판 처짐량과 스프링 자체 변형에 의한 처짐량을 총 처짐량으로 나눈 비율을 표 4에 나타내었다.

표 4에서 지지격자체 단위의 시험 방법을 모사한 해석 결과를 비교해 보면, 14x14 내부지지격자판 스프링의 경우 스프링 자체 변형에 의한 처짐량이 83%로 전체 처짐량의 대부분을 차지하며, 17x17 내부지지격자판 스프링의 경우 지지격자판의 처짐량, 즉 스프링 양단이 지지격자판과 만나는 경계지점의 처짐량이 54%로 스프링 자체 변형에 의한 처짐량보다 큰 것을 알 수 있다. 그림 6(a) 및 6(c)의 응력해석 결과에서도 17x17 내부지지격자판 스프링의 경우 지지격자판에서 최대 응력이 발생하며, 14x14 내부지지격자판 스프링의 경우 스프링 내의 곡면부에서 최대 응력이 발

생하였다. 이러한 해석 결과는 스프링 양단의 위치가 지지격자판 중앙에 위치한 수직선형의 14x14 내부지지격자판 스프링과 달리 17x17 내부지지격자판 스프링의 경우 대각선형의 스프링으로 스프링 양단의 위치가 지지격자판 셀의 경계 부위에 상대적으로 가까이 있기 때문에 판단된다. 따라서, 셀의 경계 부위가 슬롯과 용접부로 구성된 내부지지격자판 스프링의 경우, 지지격자판 스프링의 특성이 스프링 양단의 위치에 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

지지격자판 단위의 시험 방법을 모사한 해석 결과는 17x17 내부지지격자판 스프링의 지지격자판 처짐량이 13%로 14x14 내부지지격자판 스프링의 지지격자판 처짐량 6%에 비해 큰 것으로 나타났다. 그림 6(b) 및 6(d)의 응력해석 결과에서 17x17 내부지지격자판 스프링의 경우 지지격자판에서 최대 응력이 발생하며, 14x14 내부지지격자판 스프링의 경우 스프링 내의 곡면부에서 최대 응력이 발생하였다. 지지격자판 셀이 양단 고정 경계조건을 갖음에도 불구하고 대각선형인 17x17 내부지지격자판 스프링의 경우가 수직선형인 14x14형의 경우에 비해 지지격자판 처짐 비율이 크게 나타난 것은 17x17 내부지지격자판의 아치형 스프링이 14x14 내부지지격자판의 공형 스프링에 비해 스프링 자체의 지지격자판에 대한 상대적인 강성이 크다는 것을 의미하는 것으로 판단된다. 연료봉 지지건전성 측면에서 지지격자 스프링은 가능한 넓은 탄성 구간을 갖는 것이 바람직하며 따라서, 스프링 자체의 형상은 아치형에 비해 지지격자판에 대한 상대적인 강성이 작아 넓은 탄성 변위 구간을 갖는 공형이 연료봉 지지건전성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

#### 4.3 시험 방법 고찰

스프링 특성 곡선을 구하기 위한 시험 방법은 지지격자판 단위의 시험 방법과 지지격자판 자체 단위의 시험 방법이 있다. 지지격자판 자체 단위의 시험 방법은 양산용 지지격자판을 시편으로 사용하기 때문에 완성된 핵연료집합체 내에서 연료봉에 작용하는 지지격자 스프링의 실제적인 하중-변위 특성을 파악할 수 있다. 지지격자판 단위의 시험 방법은, 지지격자판의 한 셀을 시편으로 하며 치구로 셀의 양단을 고정하여 시편에 고정된 경계조건을 주게 되므로, 연료봉에 작용하는 지지격자 스프링의 실제적인 하중-변위 특성을 얻기 위해서는 완성된 지지격자판 자체 내에서 양단 고정 경계조건을 갖는 다고 볼 수 있는 지지격자판 셀에 한하여 이 시험 방법을 적용할 수 있다.

시험에 사용된 중간지지격자의 내부지지격자판들은 각 셀의 경계 부위에 슬롯과 용접부를 가지고 있으므로, 내부지지격자판 스프링의 시험에는 지지격자판 자체 단위의 시험 방법을 사용하였고, 이와 달리, 외부지지격자판들은 각 셀의 경계 부위가 서로 연결되어 있는 구조를 가지고 있어 양단 고정 경계조건을 갖는다고 볼 수 있으므로, 외부지지격자판 스프링의 시험에는 지지격자판 단위의 시험 방법을 사용하였다.

본 연구에서는, 지지격자판 단위의 시험으로는 실제 스프링의 특성 곡선을 구할 수 없는 내부 지지격자판에 대하여, 지지격자판 셀 경계조건에 영향을 배제한 스프링 부위만의 하중-변위 특성을 얻기 위한 목적으로 7-i-a와 4-i-a 그룹의 내부지지격자판 스프링에 대하여 지지격자판 단위의 시험 방법을 적용하여 보았다. 그 결과, 7-i-a와 4-i-a 그룹에 대한 지지격자판 단위의 시험을 통해 얻은 스프링의 하중-변위 특성을 지지격자판 자체 단위의 시험을 통해 얻은 결과와 비교함으로써, 4.2와 같이 스프링 형상에 따른 스프링 특성의 변화에 대한 고찰이 가능하였다.

따라서, 지지격자판 단위의 시험 방법은, 지지격자판의 셸이 양단 고정의 경계조건을 갖는다고 볼 수 있는 경우에 적용될 뿐만 아니라, 지지격자판 셸의 경계조건 영향을 배제한 스프링 자체의 특성을 파악하기 위한 경우에도 적용될 수 있으며, 지지격자판 단위의 시험 방법에 비하여 비용이 저렴하고 시험 절차가 간소하므로 지지격자 스프링의 다양한 형상 개발에도 유용한 시험 방법으로 판단된다.

## 5. 결론

웨스팅하우스형 발전소에 사용되는 17x17 및 14x14 핵연료집합체의 국산 중간지지격자 스프링에 대하여 지지격자판 단위의 시험 및 지지격자판 단위의 시험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

시험에서 얻은 스프링 특성 곡선의 평가를 통해 국산 중간지지격자의 스프링이 핵연료집합체 수명 초기에 요구되는 기준을 만족함을 확인하였다.

공급사가 서로 다른 원자재로 제작된 지지격자의 연료봉에 작용하는 스프링력 및 스프링 강성은 지지격자판 원자재의 인장강도 및 항복강도에 각각 비례하는 경향을 보였으며, 수직 궁형 스프링이 대각선 아치형 스프링에 비해 상대적으로 스프링 강성이 작아 넓은 탄성 변위 구간을 갖게 되므로 연료봉 지지건전성 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

지지격자판 단위의 시험 방법은, 지지격자판의 셸이 양단 고정의 경계조건을 갖는다고 볼 수 있는 경우에 적용될 뿐만 아니라, 지지격자판 셸의 경계조건 영향을 배제한 스프링 자체의 특성을 파악하기 위한 경우에도 적용될 수 있으며, 지지격자판 단위의 시험 방법에 비하여 비용이 저렴하고 시험 절차가 간소하므로 지지격자 스프링의 다양한 형상 개발에도 유용한 시험 방법으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] "Fuel Design Report for 17x17 Fuel Assembly", KNFC, 1994
- [2] "Fuel Design Report for 14x14 Fuel Assembly", KNFC, 1994
- [3] "Mechanical Design Manual", Westinghouse Proprietary, 1999
- [4] Solidworks 2000, User's Manual, SolidWorks Co., 2000
- [5] ANSYS, User's Manual, Version 5.7, Swanson Analysis Systems, Inc.

표 1. 시편 종류 및 지지격자판 원자재의 기계적 특성 평균값

시편 그룹	스프링 종류	지지격자판 제작사	원자재 공급사	U.T.S. (MPa)	Y.S.(0.2%) (MPa)	El. (%)
7-i-a	17x17 내부 지지격자판	A 사	C 사	434.8	326.8	34.6
7-i-b		B 사	C 사	458.0	348.0	32.9
7-i-c			D 사	468.0	355.0	30.0
7-i-d			E 사	485.0	366.5	33.05
7-o-a	17x17 외부 지지격자판	A 사	C 사	449.0	348.0	34.0
7-o-b		B 사	C 사	445.0	338.0	33.1
7-o-c			D 사	477.0	375.0	29.0
7-o-d			E 사	487.5	348.5	31.7
4-i-a	14x14 내부 지지격자판	A 사	C 사	441.9	331.3	33.6
4-i-b		B 사	C 사	449.0	344.5	32.8
4-o-a	14x14 외부 지지격자판	A 사	C 사	445.0	325.5	34.3
4-o-b		B 사	C 사	452.5	334.0	33.3

표 2. 요구 스프링력 및 시험 결과

지지격자판 종류	스프링 종류	요구 스프링력 (kgf)	스프링 변위 (mm)	스프링력 시험값 (kgf)				
				그룹	7-i-a	7-i-b	7-i-c	7-i-d
17x17	내부 지지격자판 스프링	1.03 ~ 9.07	Min.	0.089	1.30	1.20	1.30	1.47
			Nom.	0.254	3.55	3.67	3.77	4.12
			Max.	0.368	4.68	5.08	5.10	5.40
		강성	(kgf/mm)	16.1	17.0	17.3	18.7	
	외부 지지격자판 스프링	1.03 ~ 9.07	Min.	0.089	1.05	1.10	1.20	1.20
			Nom.	0.368	2.90	3.13	3.28	3.38
			Max.	0.470	3.08	3.32	3.48	3.62
		강성	(Kgf/mm)	8.4	8.8	11.0	9.6	
14x14	내부 지지격자판 스프링	1.50 ~ 9.03	Min.	0.234	1.98	2.02		
			Nom.	0.330	2.63	2.70		
			Max.	0.477	3.27	3.42		
		강성	(kgf/mm)	8.0	8.3			
	외부 지지격자판 스프링	1.50 ~ 9.03	Min.	0.234	1.79	1.90		
			Nom.	0.330	2.32	2.45		
			Max.	0.472	2.90	3.02		
		강성	(kgf/mm)	7.0	7.3			

표 3. 7-i-a그룹 및 4-i-a그룹의 스프링 강성

그룹	시험 방법	강성 (Kgf/mm)
7-i-a	지지격자체 단위 시험 (a)	16.1
	지지격자판 단위 시험 (b)	64.3
	(a) / (b)	0.25
4-i-a	지지격자체 단위 시험 (c)	8.0
	지지격자판 단위 시험 (d)	9.6
	(c) / (d)	0.83

표 4. 유한요소해석으로 구한 내부지지격자판의 부위별 처짐 비율

스프링 종류	모사된 시험 방법	총 처짐양에 대한 부위별 처짐 비율 (%)	
		지지격자판 처짐	스프링 자체 처짐
17x17 내부지지격자판	지지격자체 단위 시험	54	46
	지지격자판 단위 시험	13	87
14x14 내부지지격자판	지지격자체 단위 시험	17	83
	지지격자판 단위 시험	6	94



(a) 지지격자판 단위의 시험



(b) 지지격자체 단위의 시험

그림 1. 스프링 특성 시험 장면

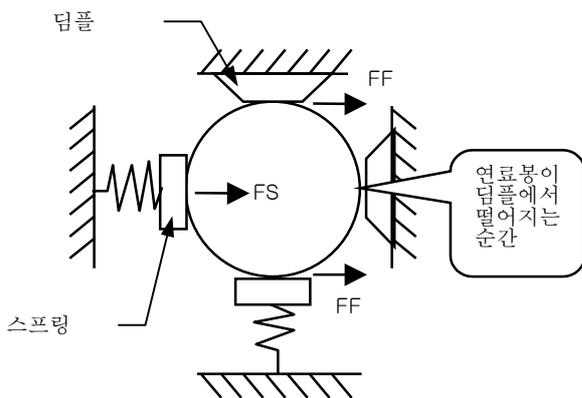


그림 2. 스프링과 연료봉사이의 하중 관계

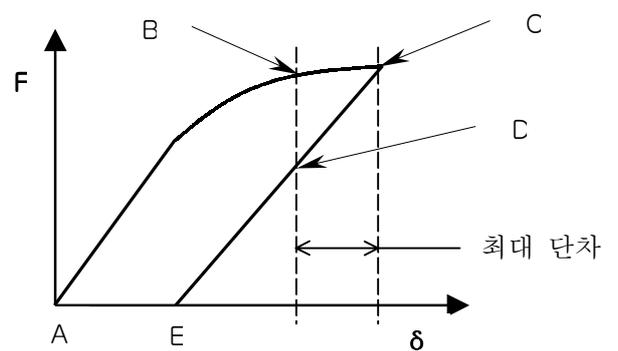
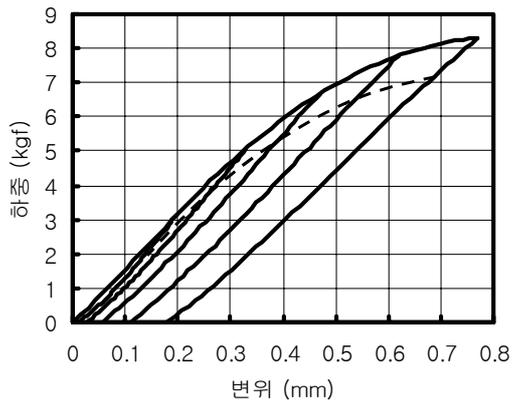
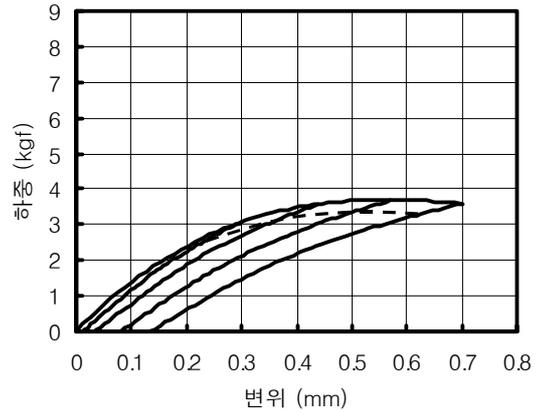


그림 3. 스프링 특성 곡선에서의 스프링력 위치

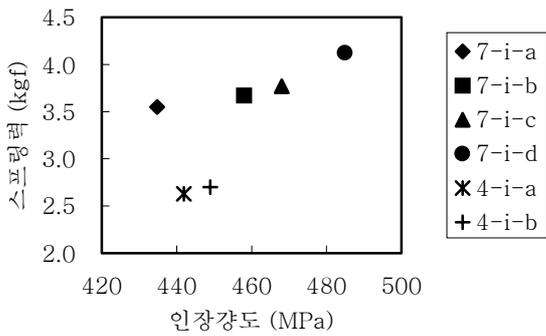


(a) 그룹 7-i-b 의 스프링 특성 곡선

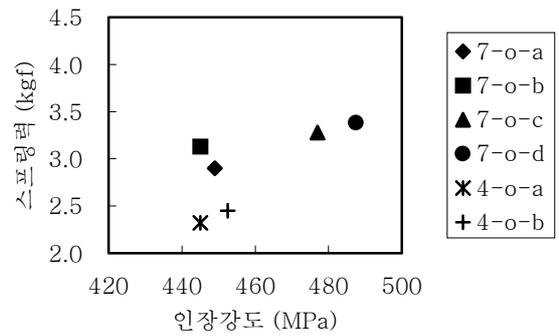


(b) 그룹 7-o-b 의 스프링 특성 곡선

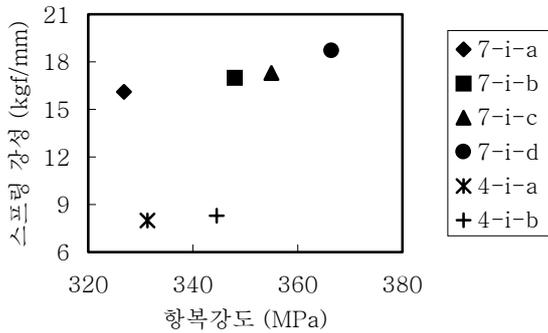
그림 4. 스프링 특성 곡선



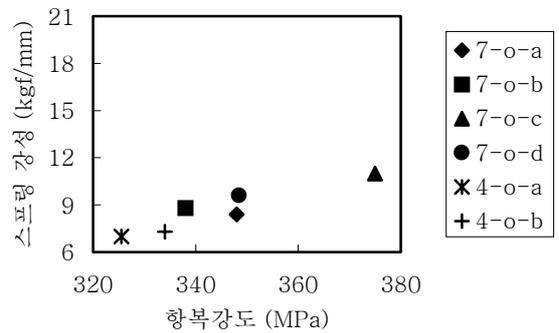
(a) 내부지지격자판 원자재 인장강도에 대한 내부지지격자판 스프링력



(b) 외부지지격자판 원자재 인장강도에 대한 외부지지격자판 스프링력

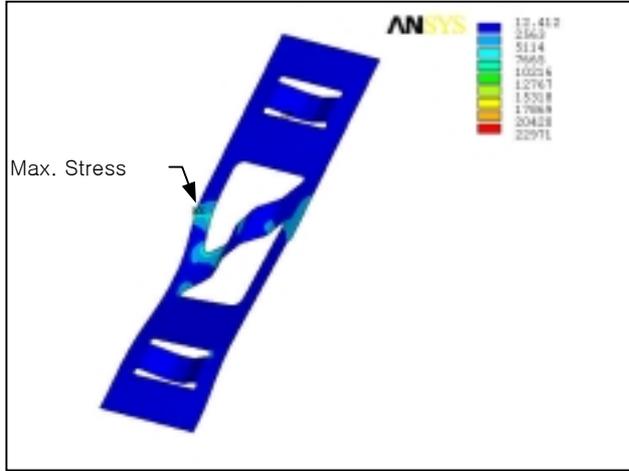


(c) 내부지지격자판 원자재 항복강도에 대한 내부지지격자판 스프링 강성

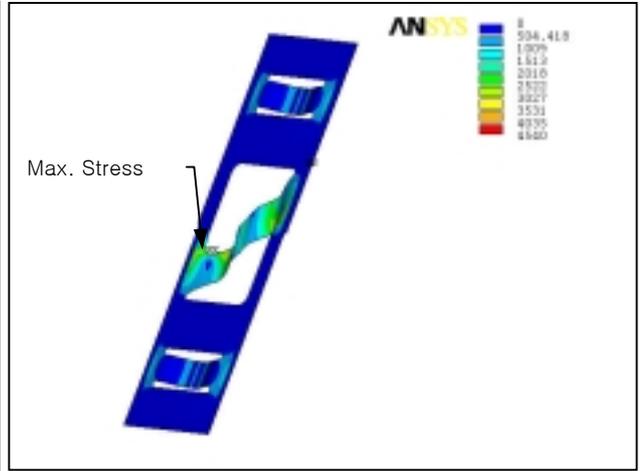


(d) 외부지지격자판 원자재 항복강도에 대한 외부지지격자판 스프링 강성

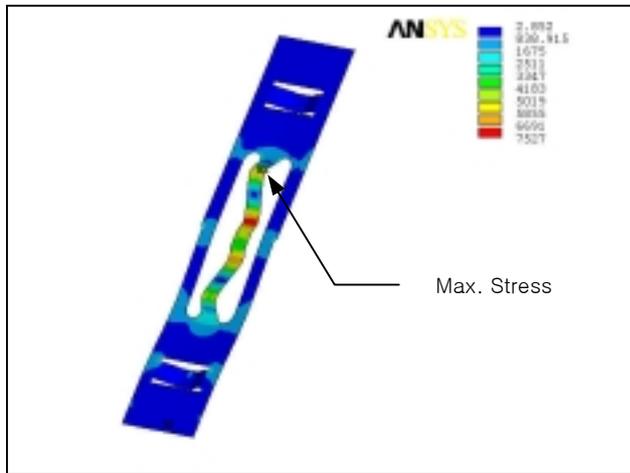
그림 5. 원자재 기계적 특성에 대한 스프링력 및 스프링 강성



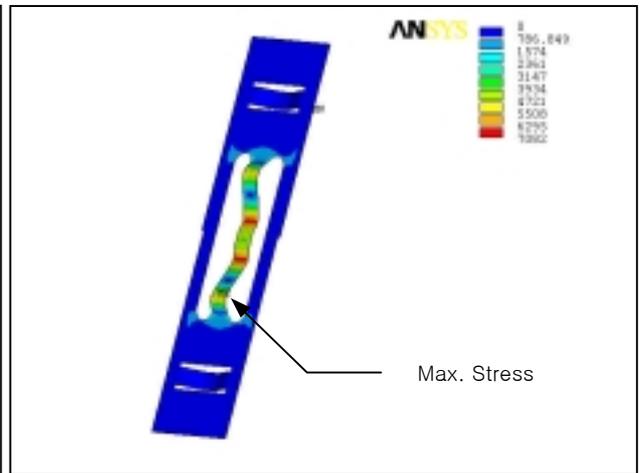
(a) 17x17 형 내부지지격자판 스프링  
- 지지격자체 단위 시험 모사



(b) 17x17 형 내부지지격자판 스프링  
- 지지격자판 단위 시험 모사



(c) 14x14 형 내부지지격자판 스프링  
- 지지격자체 단위 시험 모사



(d) 14x14 형 내부지지격자판 스프링  
- 지지격자판 단위 시험 모사

그림 6. 유한요소 응력해석 결과 (unit: psi)