

마찰력을 고려한 판형 Holddown Spring 특성 해석 (Analysis of Characteristics of Holddown Spring Considering Friction)

임정식, 주형국, 손동성
한 국 원 자 력 연 구 소

요 약

경수로 핵연료의 홀드다운 스프링은 집합체를 하부 노심판에서 들려지지 않도록 하며 안내관의 조사성장과 열팽창에 의한 축 방향 길이 변화를 수용하는 중요한 역할을 하는 집합체 부품이다. 집합체의 열수력 상승력에 따라 이 스프링은 2개 내지 4개의 판 스프링을 조합하여 한 조의 스프링이 형성되며 이는 상단고정체의 고정틀에 나사로 고정된다. 이 스프링은 운전 중 큰 변위를 받게되어 비선형 특성을 보이며 이러한 특성을 아는 것은 스프링 설계 및 성능해석에 있어 중요한 변수이다. 여기서는 ANSYS에 의해 각 각의 스프링과 4개까지의 굽힘 판 스프링으로 조합된 스프링에 대하여 비선형 특성을 해석으로부터 얻고 시험값과 비교하였다. 이 해석에는 대변형, Stiffening 효과와 함께 판과 판 사이의 마찰의 영향을 고려하였다. 하중 방법은 기존의 절점 하중 방법대신 보다 실험적 하중방법에 접근한 강체에 의한 변위 하중을 가하고, 경계조건 또한 절점 구속대신 바닥과의 접촉효과를 고려하여 강체에 의한 접촉 경계조건을 두었다. 해석 값을 시험결과와 비교한 결과 기존의 하중과 경계조건에서 얻었던 결과보다 시험 값에 보다 잘 일치함을 얻었다. 이러한 해석 방법을 이용하여 최종 스프링 제원이 결정되기 전에 스프링 특성을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

A b s t r a c t

The holddown Spring is one of the major components of a fuel assembly for PWR. It holds the fuel assembly firmly seated down on the lower core plate and allows the FA axial movement caused from the irradiation growth of guide thimbles. Depending on the up-lift force of a fuel assembly, from 2 to 4 leaves are assembled to be a set of a spring pack and it is fixed on the frame of the top end piece by screw. The spring can deflect so greatly during operation that consequently it would have non-linear characteristics. It is important to know the characteristics exactly in the design of the FA, especially for the estimation of the performance of the FA. Here, the non-linear force-displacement of each leaf spring as well as the spring characteristics of a pack consist of two to four leaves are obtained by ANSYS. Large deformation and stiffening effect as well as friction between each leaf are included. The displacement loading by rigid block was applied in order to give more realistic displacement condition and the boundary condition of bottom rigid support were applied.

The results from ANSYS were compared with those from the tests, which showed a fairly good agreement with each other. Using this method, the characteristics of a spring set can be predetermined prior to the final decision of a spring dimension.

1. 서 론

Holddown Spring은 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 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 피로 파괴를 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 Spring의 형태는 크게 나누어 판 스프링 형태와 코일 스프링 형태의 두 종류가 이용되고 있다. 판 스프링의 경우 스프링의 설치공간이 적게 필요하고 작은 변위에서 큰 스프링력을 발생하는 등의 장점이 있는 반면 비선형 대변형 및 stress-stiffening 등의 요인에 의해 응력설계변수 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[1].

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

판 스프링 형태의 Holddown Spring 설계 시 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 있었다.

지금의 핵연료 개발 추이는 세계적으로 고연소도를 목표로 개발 및 상용화가 진행되고 있고 이와 같이 핵연료가 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 최적적으로 구할 수 있는 설계방법이 개발되어야 하며, 최종설계된 Holddown Spring은 시험을 통하여 검증되어야 한다.

여기서는 위에서 언급한 이유로 집합체 부품의 설계변경 또는 최적화에 대응하기 위하여 집합체 노내 건전성에 지대한 영향을 주는 Holddown Spring의 특성해석을 이전의 방법 [2]보다 실제적이고 현실적인 하중 및 경계조건을 적용하는 개선된 방법을 적용하여 해석하므로써 실제의 설계에 반영하기 위한 개선된 해석방법을 제시하고자 한다.

2. Holddown Spring의 특성 해석

2.1 기존의 Holddown Spring 특성 해석 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 식을 이용하여 구하고 각각의 판 스프링의 특성을 중첩하여 구하는 방법이 소개되었다[3]. 이 식에서 얻은 특성은 판과 판 사이에 존재하는 마찰력이 고려되어 있지 않으므로 이들 마찰력이 고려된 실제의 시험결과보다 이들 식의 중첩에 의해 구한 스프링 상수는 더 작게 나타난다.

Siemens/KWU의 Westinghouse 형 원자로에 재 장전되는 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% 하향조정된 특성을 설계곡선으로 하여 핵연료의 노내 거동을 해석한다[4].

Fragema의 특성해석은 기본적으로 Westinghouse와 같으며 시험을 통하여 얻은 스프링 특성을 이용하여 스프링의 노내 거동 해석에 사용한다[5].

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[6,7].

참고문헌 6에선 17x17 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 참고문헌 [8]의 시험된 강성도 값보다 10% 정도 높게 예측되는 것으로 평가되었다.

유한요소 코드에 의한 스프링 특성 해석의 예는 ADINA 코드를 사용한 유한 요소 해석을 이용한 연구[9]가 발표되었으나 지금까지의 이들 방법들 모두 선형적 해석방법으로써 실제적으로 소성변형을 수반하는 스프링의 노내거동을 예측하기 위한 비선형의 영역까지는 스프링 특성을 제공하지 못하고 있으며, 실제적인 설계적용을 위한 해석방법의 제공에는 Holddown Spring의 비선형 대변형(Non-linear large deflection)을 고려한 해석이 포함되어야 한다.

최근 대변형, 회전을 고려하고 가상일의 원리(Virtual Work Principle)를 적용하여 마찰을 고려한 판스프링의 특성곡선을 얻을 수 있는 소프트웨어 개발에 대한 논문이 발표되어 탄-소성 응력 분포를 고려한 스프링 판의 넓이 최적화까지 확장하는 방법이 소개되기 되었다[10].

이상에서 지적한 문제점을 해결하기 위하여 지금까지는 판과 판 사이에서 무시된 마찰력의 영향을 고려하고 스프링의 대변형 해석을 포함하는 비선형 해석의 방법을 이용한 해석의 결과가 발표되었다[2]. 이것은 3개 내지 4개의 판이 하나로 조립된 스프링 팩에 대하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 ANSYS 코드[11]의 마찰요소(Contact 12 및 Contac48)를 채택하여 스프링을 유한요소 모델링하고 대변형 해석을 이용하여 특성해석을 수행하고, 해석에 의한 결과를 시험결과와 비교하여 유한요소 해석방법의 적합성을 보였다. 이렇게 하나의 스프링 set를 한번에 해석하므로써 개개의 스프링을 해석한 후 중첩하는 번거로움을 해

소할 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 있음을 밝혔다. 하지만 여기서는 하중 및 경계조건의 편의를 위해 단순한 고정절점 하중을 스프링 판 일 점에 가하여 변위를 얻게 되므로 스프링의 변형이 진행될수록 나타나는 하중작용점의 수평이동으로 인한 모멘트 팔의 증가로 인해 실제의 경우보다 스프링 특성이 감소하는 경향을 보이게 된다. 더구나 스프링의 바닥에 면한 하나의 절점에 수직 변위 경계조건을 주게 되어 변형이 진행됨에 따라 바닥 면에 접하게되는 힌지점의 수평이동에 따른 스프링의 강성이 증가하는 경향 등이 서로 보완적 관계를 나타나게 되어 정확한 스프링 특성을 얻을 수가 없으므로 여기서는 이러한 하중작용 방법의 실제모사 및 스프링을 지지하는 바닥 점의 실제와 접근한 경계조건을 이용하여 재 해석을 수행하고 이로부터 이들의 영향을 검토 고찰하고자 한다.

2.2 유한요소법을 이용한 Holddown Spring 특성 해석

2.2.1 Bent Type Holddown Spring 해석

기존의 하나 하나의 판 스프링을 해석한 후 그 결과를 중첩하는 방법대신 4개 스프링 판이 1조가 된 하나의 모델에서 스프링 판과 판 사이의 마찰을 고려하기 위하여 ANSYS 코드의 Contact 48 element를 사용하고, 재료 및 기하학적 비선형 해석을 포함시킨 대변형 해석을 이용, 기존의 17x17 국산핵연료 집합체에 사용되는 Holddown Spring을 유한요소 모델링 한 후 하중을 가함으로써 스프링 특성곡선인 하중-변위곡선을 얻을 수 있다. 스프링 판에 변위를 가하는 강체-스프링 판과의 접촉경계에서는 ANSYS Ver 5.6 이상에서 새로 적용되기 시작한 Target169 - Conta171 요소를 사용하여 해석 모델 작성의 간편성과 정확성을 얻을 수 있으므로 여기서는 이들 요소를 사용하였다.

가) 하나의 판 스프링 특성

각 각의 경계조건 및 하중경계조건에 따른 계산 결과를 검토하기 위하여 하나의 스프링 판에 대해 이들 하중 및 경계조건을 변수로 하고 먼저 계산을 수행한다. 그림 1에는 이들 경계 및 하중 조건의 구분을 보여주고 있다. 이 후 두 개의 판, 세 개의 판 및 4개의 판으로 이루어진 17x17 KOFA HDS 까지 판수를 증가시켜 가며 계산을 수행하고 마찰력 및 하중 작용 방법에 따른 스프링 특성을 검토하고자 한다.

그림 2는 스프링 판을 눌러주는 하중으로서 변위를 가하기 위한 강체로 가정한 블록(Block)과 바닥에 면한 일점의 수직 변위를 구속하기 위한 변위 경계를 보이고 있다. 여기서 변위를 가하기 위한 강체는 수직으로 움직일수 있으며 수평방향으로는 판 스프링의 상부접촉면과 미끄러짐을 허용하고 있다.

탄성영역을 초과하는 비선형 대변형 해석에는 탄성영역 및 소성영역의 재료적 거동의 입력자료를 필요로 하며 이때 사용된 스프링의 물성은 그림 3과 같다.

그림 4에는 그림 1의 하중 및 경계조건 조합하에서 얻은 하나의 스프링 판에서 얻은 특성곡선을 비교하고 있다. 이 그림 4에서 알 수 있는 것과 같이 스프링의 하부 지지점에 절점변위 구속을 한 그림 1의 A, D 모델과 절점하중을 가한 A, C, E 모델에서는 강체에 의한 변위하중과 스프링판 하부에서 바닥과 강체 접촉요를 준 경우에 비해 상대적으로 작은

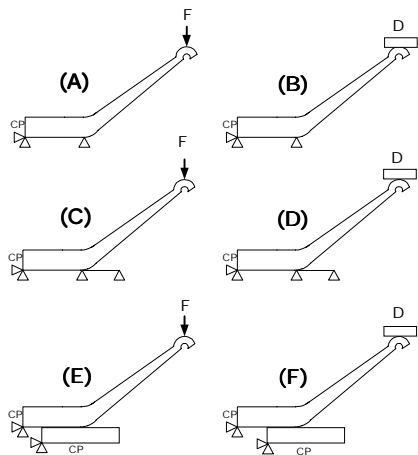


그림 1 상부판(Upper Leaf) 스프링의 하중 및 경계조건 구분

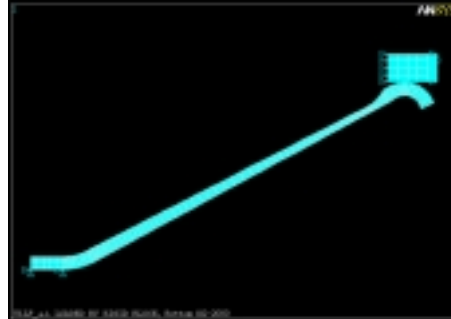


그림 2 변위하중 및 경계조건

스프링 특성을 나타내고 있음을 잘 보여주고 있는데 이는 판스프링의 바닥이 큰 변위에서 기초면과 접촉하여 일어나는 지지점의 이동으로부터 지지모멘트 팔의 길이가 짧아지는 영향과 지지반력의 영향으로 인해 스프링 특성이 감소되어 나타남을 보이는 것으로 해석할 수 있다. 반면 강체에 의한 변위 하중을 주었을 경우는 판스프링이 변위 됨에 따라 하중점의 이동에 의해 모멘트 팔의 길이가 줄어들게 되어 변위가 큰 영역에서 절점 하중을 가한 경우보다 큰 스프링 특성을 보이고 있음을 잘 나타내고 있다.

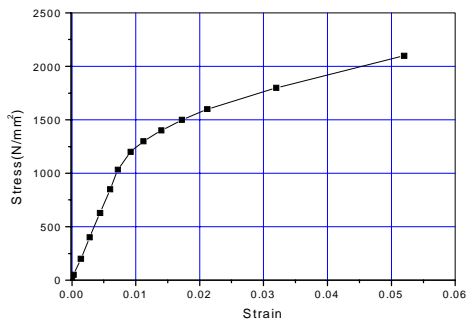


그림 3 Inconel 718 stress-strain 곡선

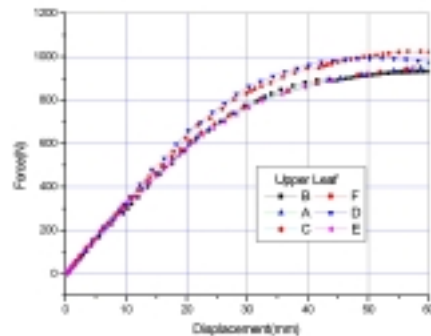


그림 4 Upper Leaf의 특성 비교

나) 두 개의 판으로 이루어진 스프링 특성

그림 5는 두 개의 판으로 이루어진 HDS 유한요소모델이며 이의 변위 된 모습과 응력분포를 그림 6에서 보이고 있다. 그림 8에는 이 모델을 이용하여 얻은 스프링 특성을

스프링 판과 판 사이의 마찰 계수 0과 0.3을 이용하여 얻은 결과를 보이고 있다.

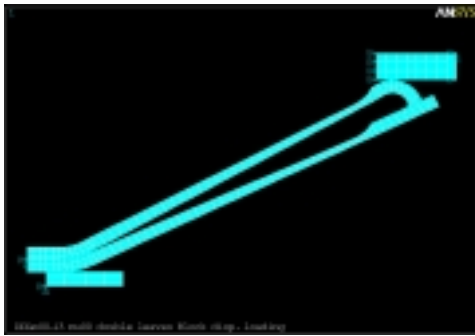


그림 5 두 개 판 스프링 모델의 변위 및 하중 경계조건

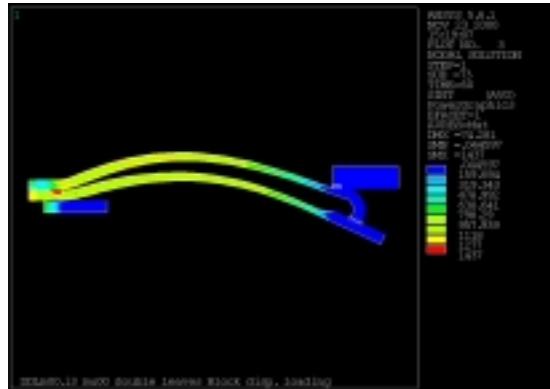


그림 6 두 개 판 스프링 모델의 변위 및 응력분포

이 그림 8에서는 스프링 특성에 미치는 마찰계수의 영향이 크지 않음을 보이는데, 이것은 두 개의 판 사이에는 하나의 미끄러짐 면이 존재하게 되어 하나의 판 사이에서 발생하는 마찰력이 전체의 스프링 특성에 주는 영향이 크지 않은 것에 기인한다고 볼 수 있다.

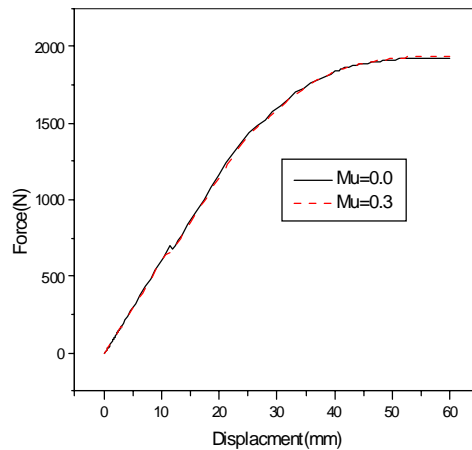


그림 7 2 Leaf 모델의 스프링 특성

다) 세 개의 판 스프링조의 스프링 특성

그림 8과 그림 9는 세 개의 판으로 이루어진 HDS 모델로 얻은 변형후의 모습과 응력 분포를 나타내고 있다.

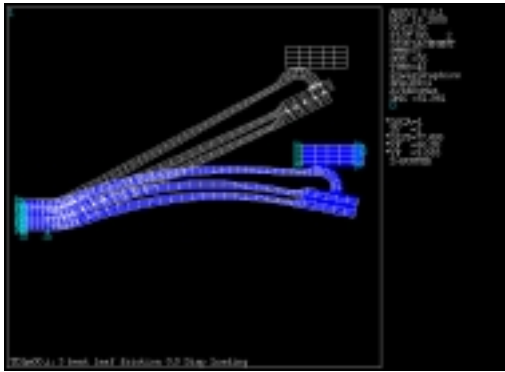


그림 8 세 개 판 스프링 모델의 변위

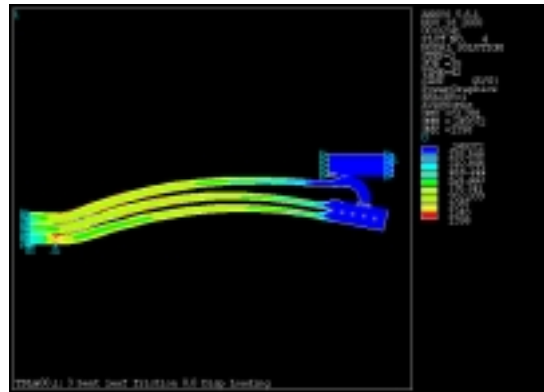


그림 9 세 개 판 스프링 모델의 응력분포

그림 10은 세 개의 판에서 판과 판 사이의 마찰계수가 0 및 0.3일 때 얻은 스프링 특성을 나타내고 있다. 여기서는 두 개의 마찰면에서 발생하는 마찰력의 영향으로 인해 마찰계수 0.3에서 마찰계수 0일 때보다 더 큰 스프링 특성을 그림 7보다는 보다 잘 나타내 보이고 있고 이러한 것은 스프링의 변위가 큰 부분에서 더 큰 차이를 보이고 있다.

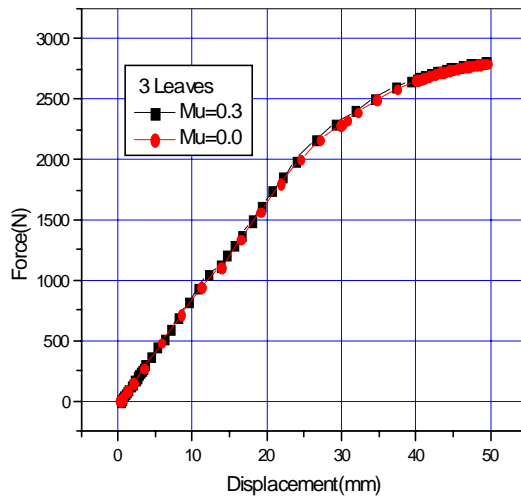


그림 10 세 개 판 스프링 모델의 스프링 특성

라) 네 개의 판스프링조의 스프링 특성

그림 11은 네 개의 스프링 판이 하나의 스프링 조를 이루고 있는 17x17 KOFA의 스프링을 나타내며 변위하중과 바닥의 강제지지에 의한 FEM을 이용하여 얻은 변위결과를 그림 12에 보이고 있다.

그림 13은 바닥에 면한 일점의 수직 변위를 구속한 일점 힌지 경계를 갖고, 상부판 스프링의 일점에 절점하중을 가하고 얻은 모델(A)의 스프링 특성으로서 판과 판 사이의 마찰계수를 0 및 0.3을 이용한 결과를 비교하기 위한 스프링 특성을 나타내고 있다. 그림 14는 바닥에 면한 일점의 수직변위를 힌지로 구속하고 하중으로는 강체변위를 스프링 판에 가한 모델(B)를 이용하여 얻은 스프링 특성으로서 여기서도 판과 판 사이의 마찰계수를 0 및 0.3을 이용한 결과를 비교하고 있다. 그림 15는 바닥에 면한 절점에 강체면에 접한 접촉절점을 이용하고 하중으로는 상부 스프링 판에 절점하중을 가하고 얻은 결과이며, 그림 16은 바닥을 강체에 접한 접촉요소를 사용하고 스프링 판의 상부에 강체를 이용한 변위 하중을 가하고 얻은 모델(D)로부터의 스프링 특성을 마찰계수 0과 0.3을 비교하여 나타낸 스프링 특성이다. 이들 4가지의 모델에서 얻은 스프링 특성은 마찰계수의 영향으로 인해 적은 수의 판으로 이루어진 다른 해석에서 보다 마찰력의 영향이 보다 크게 나타남을 보이고 마찰의 영향으로 인해 변위가 크게 되는 부분에서 보다 큰 스프링 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 17은 마찰계수 0일 경우 지금까지의 4개 모델에 대한 스프링 특성을 실험결과와 비교하고 있다. 실험에서는 실제로 판과 판 사이의 마찰이 있음에도 불구하고 절점하중을 가하여 구한 모델 C를 제외한 다른 모델들의 결과와 비교적 일치함을 보인다. 그림 18은 마찰계수 0.3을 이용하여 얻은 네가지 모델의 스프링 특성비교를 실험결과와 동시에 나타낸 비교 그림이다. 이 그림 18에서 보면 각 각의 경우 스프링 특성은 각 모델에서 큰 차이를 보이지 않고 실험에서 얻은 결과보다 다소 높은 결과를 보이며 강체 바닥과 접하고 상부 스프링 판 일점에 절점하중을 가한 모델 C를 제외하고는 대부분 실험의 결과보다 다소 높은 값을 나타내고 있다. 특히 이들 결과를 보면 절점 하중을 가하고 얻은 Model C의 경우 큰 변위영역에서 하중 작용점의 이동에 의한 영향으로 인해 다른 모델보다 작은 스프링 특성을 보이고 있다. 또 마찰계수 0.3일 경우 선형구간에서는 상부 스프링 일점에 절점하중을 가하는 Model C의 경우가 실험값에 보다 접근하고 있지만 위에서 언급한 이유로 인해 변위가 크게 되면 실험값보다 작은 값을 보이고 있다.

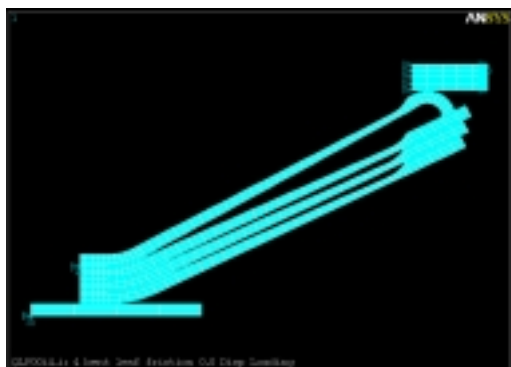


그림 11 네 개의 판 모델(D)의 유한요소 모델

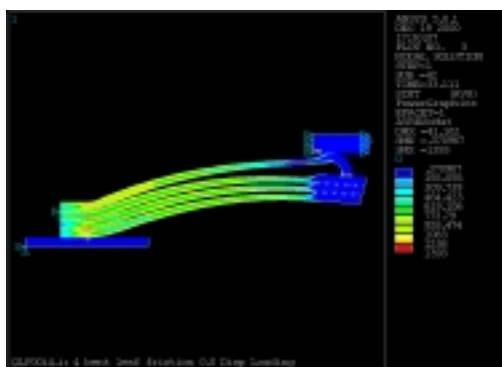


그림 12 네 개 판 스프링 모델(D)의 변위결과

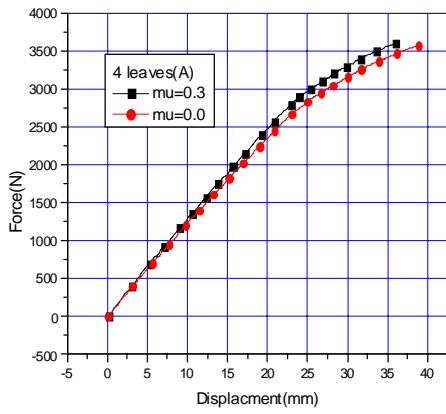


그림 13 모델 (A)의 스프링 특성

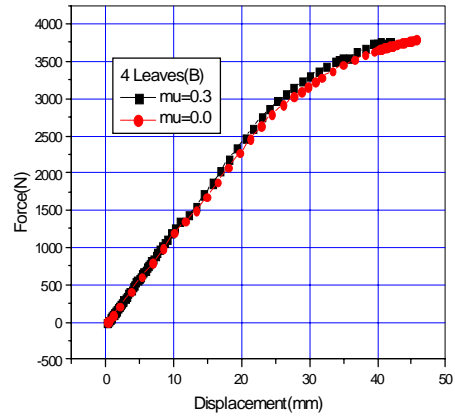


그림 14 모델 (B)의 스프링 특성

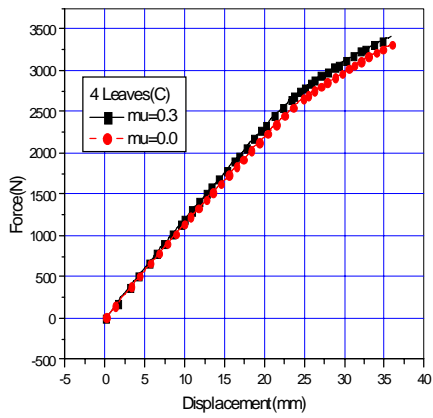


그림 15 모델 (C)의 스프링 특성

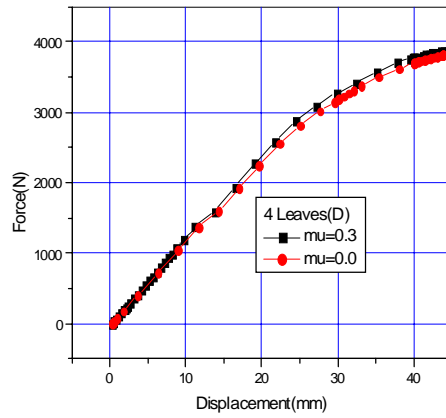


그림 16 모델 (D)의 스프링 특성

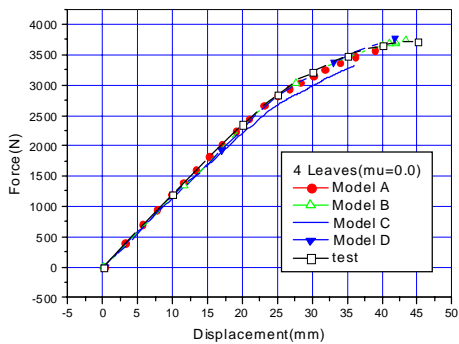


그림 17 4 Leaf HDS 특성

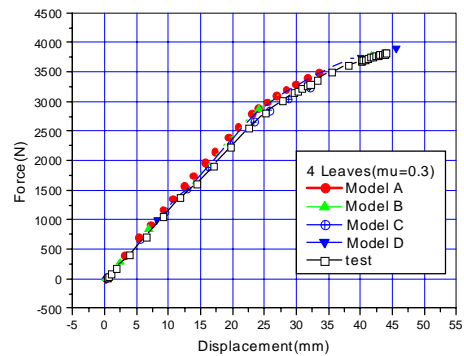


그림 18 4 Leaf HDS 특성

마찰계수가 0인 경우와 0.3인 경우의 스프링 특성의 차이는 마찰이 있는 경우 선형구간에서 약 3%의 차이를 보이고 비선형 구간에서는 약 5%의 큰 값을 보이고 있다.

그림 18과 그림 19로부터 유한요소 해석결과와 시험 값은 잘 일치함을 알 수 있으며 예측된 오차는 3 % 이내이다. 또한 참고문헌 5에는 에너지 법을 적용하여 계산된 17x17용 국산제조 Holddown Spring의 스프링 상수 K가 142.0 N/mm으로써 시험결과보다 10 % 정도 높은 것으로 예측하였고 이를 근거로 하면 시험결과와 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.

절점해석의 결과인 등가응력 분포를 보이는 그림에서 알 수 있는 것과 같이 판 스프링에서 최대 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 핵연료 보다 더 필요하게 됨으로써 상.하단고정체의 높이를 감소시키는 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

3개의 판스프링으로 이루어진 직선형 Holddown Spring의 특성해석을 위한 유한요소 모델을 경계조건과 함께 나타내면 그림 19(절점하중의 경우) 및 그림 20(변위하중의 경우)과 같다. 각각의 스프링과 스프링 사이의 마찰 및 미끄러짐은 Contact 48, Targe169-Conta171 요소의 특성 값을 줌으로써 해석에 포함시킨다.

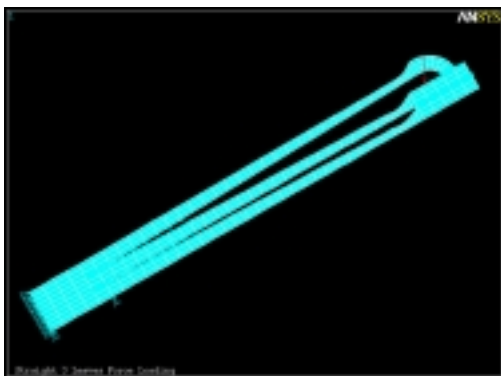


그림 19 직선형 HDS 절점 하중 모델

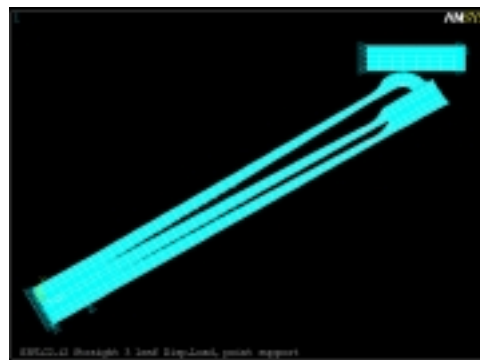


그림 20 직선형 HDS의 변위하중 모델

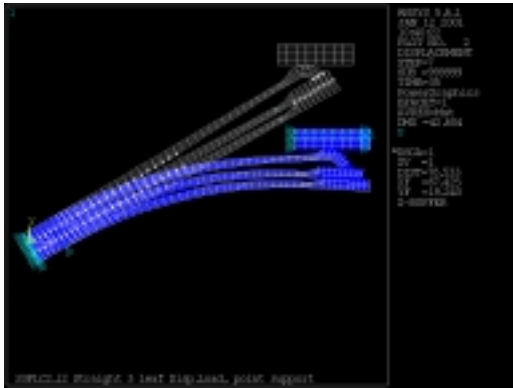


그림 21 직선형 HDS의 변위

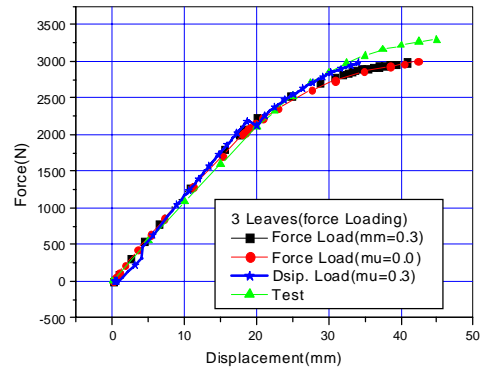


그림 22 직선형 HDS 특성

나) 해석 결과

직선형 Holddown Spring의 특성해석 결과인 변위의 형상은 그림 21에 보이고 하중변위 곡선은 마찰계수의 영향을 비교하기 위하여 $\mu=0.0$ 및 $\mu=0.3$ 에 대하여 나타내면 그림 22와 같다. 그림 22에서 보면 3개의 판이 하나로 조립된 1 set의 해석모델에 의한 계산은 스프링특성 시험결과와 설계곡선 사이에 위치하며 특히 스프링의 선형거동구간에서는 시험결과와 아주 잘 일치함을 알 수 있고 다만 절점하중 적용의 경우 큰 변위에서 실험결과와 비교적 크게 벗어나는 것은 이미 언급한 하중 작용점의 이동에 의한 결과로 생각할 수 있다. 마찰계수 0.3을 고려한 특성 값은 선형구간에서는 약 5%의 오차로, 비선형 구간에서는 약 8%의 오차를 보이고 있다.

4. 결 론

핵연료집합체의 노내 운전 중 안전성에 중요한 역할을 하는 Holddown Spring의 특성 해석방법을 상용의 ANSYS 코드 해석을 통해 변위-하중의 특성곡선을 얻을 수 있는 보다 개선된 방법을 제시하였다. 여기에는 보다 현실적인 경계조건 및 하중작용 방법의 개선이 포함되었으며 절점하중과 변위하중, 절점 힌지 경계와 강제 접촉요소 경계조건의 경우에 대한 영향을 평가하였다. 개선된 변위 하중작용과 강제 접촉요소 경계조건을 통해 2개 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 함을 보였다. 이러한 방법을 이용하여 17x17 국산핵연료의 Holddown Spring 특성해석을 수행하였고 다른 해석의 한 예로써 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.

Acknowledgement

The authors would like to express their appreciation to the Ministry of Science and Technology (MOST) of the Republic of Korea for the support of this work through the mid- and long-term nuclear R&D Project.

참 고 문 헌

1. 임정식, 손동성, 핵연료집합체 Holddown Spring 특성해석, 한국원자력학회지 Vol.27, No.5, pp803~810, Oct., 1995
2. 임정식, 손동성, 핵연료집합체 Holddown spring 특성 및 최적화, '94 ANSYS Users' Conference, Oct., 1994
3. P.J.Sipush, "PWR Fuel Rod Design and Fuel Assembly Design", Lecture Note, KAERI, 1984.
4. B.K.Na, Kunz, "Design of the Fuel Assembly Structure with Zircaloy Spacer Grid", B112/87/e268a, 1987,10
5. Fragma, "Mechanical Design Report 900 MWe STD Fuel Assembly", ITB/84/4093
6. 송기남, 김형규, 윤경호, 김대환, 송치훈, "SMART형 UO₂ 핵연료의 판형 홀다운스프링 집합체 탄성강성 해석", '99춘계학술발표대회, 한국원자력학회
7. 송기남, 정연호, 강홍석, 김대환, 이종호, "판형 홀다운스프링 집합체 탄성강성 해석", '99 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회
8. Gartner, "Determination of Spring Characteristic and Fatigue Test on FA Holddown Leaf Spring", U9 213/87/103, 1987.5
9. 김형구, 임정식, 김일곤, 손동성, "기하학적 재료적 비선형을 갖는 중첩된 판 스프링의 특성해석에 관한 연구", 대한기계학회 제 14권 제 1호, pp13-22, 1990
10. Berenger d'Uston, Optimized Design of Holddown Spring with Bending Leaves, Tansections, C02 paper #1396, SMiRT-16, Wasington D.C., Aug., 2001
11. Swanson Analysis Systems Inc., "ANSYS User's Manual for Revision 5.6, 2000.