2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

반복하중하의 인코넬 지지격자 스프링 거동

Behaviour of Inconel Spacer Grid Spring subjected to Repeated Loading

김형규*, 윤경호, 강흥석, 송기남, 이종호†

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

인코넬 지지격자 스프링에 하중이 반복적으로 작용할 때, 가해진 하중의 크기에 따라 스프링 특성 곡선의 기울기가 감소하는 현상[1]에 대해 상세한 시험을 수행하였다. 스프링 특성 곡선을 생산하기 위해 사용한 변위의 범위에서 최초의 하중 사이클 완료 후 영구 변형이 발생하고 다음 사이클에서 기울기가 감소할 수는 있으나, 이후 반복적으로 동일한 변위를 가할 때 추가적인 영구 변형이나 기울기의 감소가 나타나지 않았다. 그러나 만일 연속되는 사이클에서의 변위가 최대하중을 초과하는 것일 경우에는 그 다음의 사이클에서 추가적인 영구 변형과 기울기의 감소가 나타났다. 한편 유한요소해석을 통하여 시편으로 사용한 스프링에 대해 응력과 국부적 소성역에 의한 스프링의 변형 상태를 분석하였다. 사용한 해석 방법은 시험 결과를 타당하게 설명해 줄 수 있으며 스프링 변형의 예측을 위한 도구로 사용할 수 있다.

Abstract

Detail tests are carried out to examine the stiffness decrease phenomenon shown during the application of the repeated loading to the Inconel spacer grid spring [1]. The permanent set and stiffness decrease of the following cycle may be found during a conventional spring characterization test, those do not occur during the successive load cycle with the same displacement. However, if the displacement during the successive cycle exceeds that at the peak load, the additional permanent set and stiffness decrease appear. The shape of the spring deformation is investigated by analyzing the stresses as well as the localized yield zones through finite element method. It is shown that presently used method can explain the test result of the present research and be used as a tool for predicting the deformation shape of the spacer grid spring.

† 연구생, 충남대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

핵연료집합체 지지격자의 기본적인 기능은 원자로 내부의 핵적, 열적 그리고 수력적 조건에서 핵연료의 수명 말까지 연료봉이 핵연료집합체 내부의 정위치에 지지될 수 있도록 하는 것이다. 이때 연료봉을 지지하는 힘은 단순히 연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이의 마찰력이다. 따라서 이 마찰력이 일정한 범위 내의 값으로 유지되지 못하면 지지격자체는 요구되는 성능을 만족하지 못하게 된다. 한편, 원자로 내부의 조건으로서, 핵적인 조건이란 방사능 조사에 의한 연료봉 및 지지격자체의 치수 변형, 그리고 재료 물성치의 변화를 의미하며 이는 열적 요인에 의해서도 영향을 받는 것들이다. 또한 수력적 조건으로서는 원자로 내부를 흐르는 냉각수에 의해 핵연료집합체와 연료봉이 위쪽으로의 수력적 힘을 받는다든가 또 부력이 작용하게 됨을 의미하며, 이와는 별도로 연료봉 및 핵연료집합체에 유체유발 진동이 발생하는 것도 포함한다. 이러한 조건들이 연료봉과 지지격자체 사이의 마찰력에 영향을 미치게 되는 기구로는 크립에 의한 연료봉 지름의 감소, 지지격자 스프링 또는 딤플의 탄성계수 감소, 유체유발 진동에 의한 연료봉과 지지격자 스프링/딤플의 접촉부위에서의 프레팅마멸 및 이에 의한 접촉력의 감소와 스프링 또는 딤플의 피로손상 등을 예로 들 수 있다.

연료봉의 지지에 관해 통상적으로 수행하는 핵연료집합체의 기계설계에서는 핵연료집합체 제조 시의 지지격자 스프링 또는 딤플의 특성과 원자로 내부의 핵적, 열수력적 조건에 따른 연료봉, 지지격자체의 재료 물성치 변화들을 고려한다. 이 중 재료 물성치의 변화에 대해서는 기존의 실험자료들을 활용하게 되므로 핵연료의 기계설계자가 실질적으로 고려하게 되는 것은 핵연료집합체 제조 시의 지지격자 스프링 또는 딤플의 특성이다. 이때의 지지격자 스프링 또는 딤플 특성이란 핵연료집합체의 제조 시에 연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이의 수직하중(일반적으로 “스프링 힘; spring force”이라 한다)과 연료봉이 지지격자체 내부로 장입될 때 스프링 또는 딤플에 가해지는 변위(일반적으로 “간섭; interference”라 한다), 그리고 이들과 직접적으로 관련이 있는 스프링 상수를 말한다. 즉, 설계자는 사용하고자 하는 스프링 또는 딤플의 제조 시 하중-변위 선도를 기본 자료로 이용하며 원하는 변위나 스프링 힘을 얻기 위하여 새로운 형상을 개발하기도 한다. 이때 스프링 또는 딤플의 제조 시 하중-변위 선도를 일반적으로 “특성 곡선(characterization curve)”이라 부르며 이때의 시험을 “특성 시험(characterization test)”라 한다.

지지격자 스프링 또는 딤플의 특성 곡선은 스프링/딤플의 두께와 형상 및 치수에 직접적으로 영향을 받는다. 스프링 힘은 스프링 상수와 변위와의 곱이다. 따라서 원하는 스프링 힘을 얻기 위해 기계설계자는 두 가지 변수(스프링 상수와 변위)를 조정할 수 있으며 따라서 다양한 형태와 치수의 스프링 또는 딤플을 설계할 수 있다. 설계된 스프링 및 딤플은 특성 시험에 의해 설계에서 요구하는 스프링 힘을 얻을 수 있는지를 확인하게 되며 최종적으로 결정된 스프링/딤플의 특성 곡선은 다시 핵연료의 노내 거동을 분석하기 위한 기초 설계자료로 이용된다. 지지격자 스프링 또는 딤플의 특성 시험은 일반적인 만능인장 시험기를 이용하여 스프링 또는 딤플에 수직력을 가하며 변위에 따른 하중의 변화를 관찰하는 비교적 간단한 시험이다. 특성 시험의 방법으로는 지지격자체가 완성된 상태에서 수행하는 ‘지지격자체 단위의 시험’과 스프링과 딤플이 있는 지지격자판 단

위로 시험하는 ‘지지격자판 단위의 시험’을 들 수 있으며 후자가 전자에 비해 다소 간편하다는 이점이 있다. 그러나 ‘지지격자판 단위의 시험’을 수행할 경우에는 지지격자판 상호간의 접합조건이나 스프링이 하중을 받을 때 반력이 작용하는 위치 등과 같은 경계조건이 지지격자체 상태를 제대로 모사해 줄 수 있는 시험조건을 찾아야 유용한 시험결과로서 활용할 수 있다. 이에 대해 앞선 연구[1]에서는 지지격자체의 조건을 잘 모사할 수 있는 경계 조건을 찾아 이를 활용한 지지격자판 단위의 시험 방법에 대해 발표하였으며, 이와 함께 반복되는 하중이 작용할 때 스프링 특성 곡선의 기울기가 감소하는 현상을 발견하였다.

특성 곡선의 기울기가 감소한다면 동일한 변위(간섭)에 의해 스프링 힘이 줄어들게 된다는 것을 의미한다. 이것은 원자로 내의 냉각수 유동에 의해 진동하는 연료봉을 고려할 때, 연료봉이 지지격자 스프링에 연속적으로 변위를 가하는 경우, 스프링 힘이 지속적으로 줄어들 가능성이 있다고 생각할 수 있고 따라서 스프링 힘(또는 간섭)의 설계에 있어 중요하게 고려하여야 할 점이라 할 수 있다. 그러나 유체유발 진동은 원자로 내의 핵연료집합체 또는 연료봉에서 피할 수 없이 발생하는 현상이므로 현재 사용 중인 모든 핵연료에서 위에서 말한 스프링 힘의 감소가 지속적으로 발생한다는 것이 타당한 것인지에 대한 의문이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 앞선 연구[1]에서 발견한 반복 하중이 작용할 때의 스프링 힘 감소를 실험적으로 좀 더 자세히 분석하였으며 그 결과를 분석하였다. 한편 기 수행한 또 다른 연구[2]에서 확립한 유한요소해석 방법을 이용하여 스프링의 응력해석 결과를 분석하고, 형상과 하중의 크기에 따라 스프링이 변형되는 상태를 해석함으로써 실험에서 관찰된 현상들을 해석적으로도 설명하였다.

2. 시험 방법

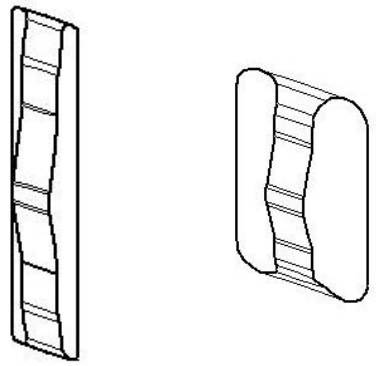
2.1 시편 및 시험장비

앞선 연구결과[1]로부터 시험 방법의 타당성이 입증된 지지격자판 단위의 시험을 수행하였다. 시편은 경수로 핵연료의 최하단 지지격자체로 이용되는 인코넬 지지격자체의 외부와 내부 지지격자판에서 연료봉 하나가 위치할 수 있는 크기로 절단하여 취하였으며 각각의 개략적인 형상을 그림 1 의 (a) 및 (b)에 보여 준다. 본 연구에서 최하단 인코넬 지지격자 스프링에 대해 국한한 것은 앞선 연구결과[1]로부터 스프링에 반복하중이 가해질 때, 스프링 특성 곡선 기울기의 감소량이 최하단 지지격자 스프링에서 현저히 나타났기 때문이다. 한편 본 논문에서는 그림 1 의 (a) 및 (b)의 스프링을 각각 “스프링 A” 및 “스프링 B”라 하였다.

한편 시편에 수직(압축) 하중을 가할 때 하중점이 이동하는 것을 방지하기 위하여 시편을 고정할 수 있는 치구를 그림 2 와 같이 제작하였다. 시험 장비로는 일반적인 만능인장시험기를 이용하였고 시험 중 하중-변위 데이터가 연속적으로 저장되도록 하였다.

2.2 시험 조건

상온, 공기 중에서 시험을 수행하였으며 만능인장시험기의 하중속도는 0.5 mm/분, 1 kN 용량의 로드 셀을 이용하였다. 크로스 헤드의 변위와 로드 셀에서 측정되는 하중 데이터를 초당 5



(a) (b)

그림 1. 시험에 사용한 스프링의 형상; (a) 스프링 A (b) 스프링 B.

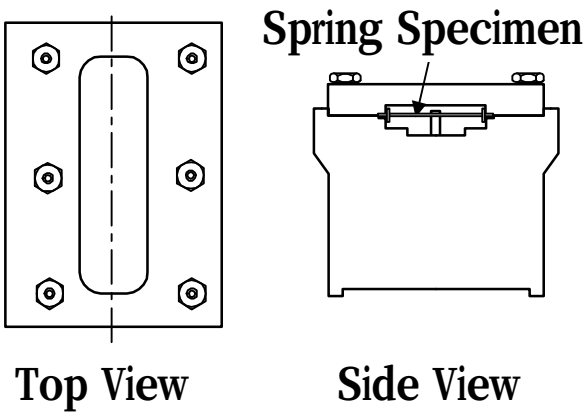


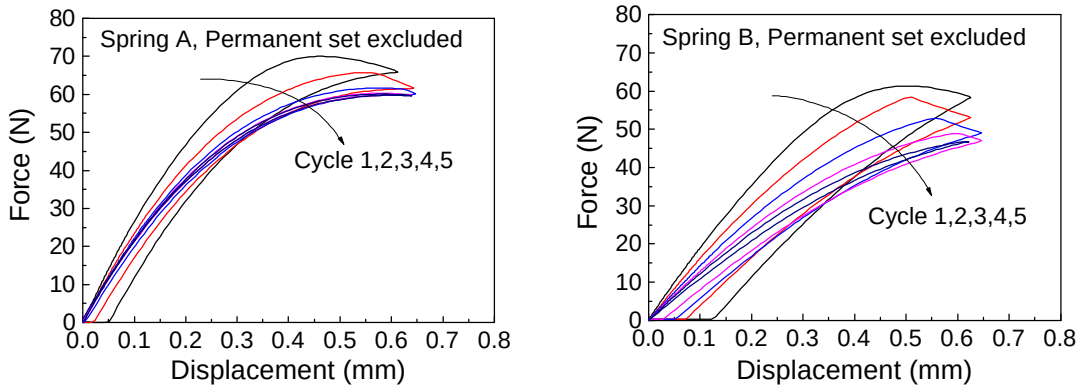
그림 2. 시험에 사용한 시편 고정 치구.

번 실시간으로 컴퓨터에 저장한 후 분석자료로 사용하였다. 앞선 연구[1]에서는 얻어진 시험 결과로부터 향후에 스프링의 설계곡선을 얻기 위하여 한 가지 스프링에 대하여 다섯 가지의 다른 변위를 설정하여 각각의 변위에 대해 5 회씩 반복하여 시험하였다. 그러나 본 연구에서는 하중의 반복에 따른 스프링의 거동을 분석하는 것이 주된 목적이므로 스프링 A 및 B 에 대해 단순 압축 때 얻어지는 최대 하중에서의 변위를 기준으로 그 전, 그리고 후의 두 가지 변위를 선택하여 시험하였다. 이때 최대하중에서의 변위보다 작은 변위로 시험할 때에는 그 변위가 가능한 최대하중이 발생하는 변위에 가깝도록 하였다. 이렇게 한 이유는 앞선 연구에서 얻은 결과로부터 스프링의 특성곡선에서 최대하중을 지나지 않는 범위의 변위로 하중이 반복되었을 때에는 기울기의 감소가 관찰되지 않았으나 최대하중을 넘는 변위로 하중이 반복될 때에는 기울기의 감소가 관찰되었기 때문이다. 물론 시험을 시작하기 전 장비에 입력하는 변위가 최대하중이 발생할 때의 변위에 가깝도록 한다는 것은 하중 발생이 시작되는 점을 정확히 예측할 수 없기 때문에 매우 어렵다. 그러나 몇 차례의 반복 시험을 통하여 최대하중이 발생할 때의 변위에 상당히 근사하도록 할 수 있는 시험 기술을 얻을 수 있었다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 영구변형을 제외한 반복하중 시의 스프링 거동

앞선 연구결과에서 하중을 반복함에 따라 특성 곡선의 기울기가 감소한 시험 방법은 한번의 하중 사이클이 완료된 후 다음 사이클을 시작하기 전 장비의 크로스헤드를 이동시켜 앞선 사이클에서 발생한 영구변형이 다음 사이클을 시작할 때 하중-변위 선도에 포함되지 않도록 한 것으로 영구변형이 제외된 시험 결과를 나타낸 것이었다. 본 연구에서는 앞선 연구결과의 재현성을 우선 시험해 보고자 하였다. 한가지 다른 것은 앞선 연구에서는 사이클이 증가함에 따라 만능인장시험기의 크로스헤드가 이동하는 거리(입력 변위)를 계속 증가시켰으나([1]의 표 1 참조) 본 연구에서는



(a) (b)

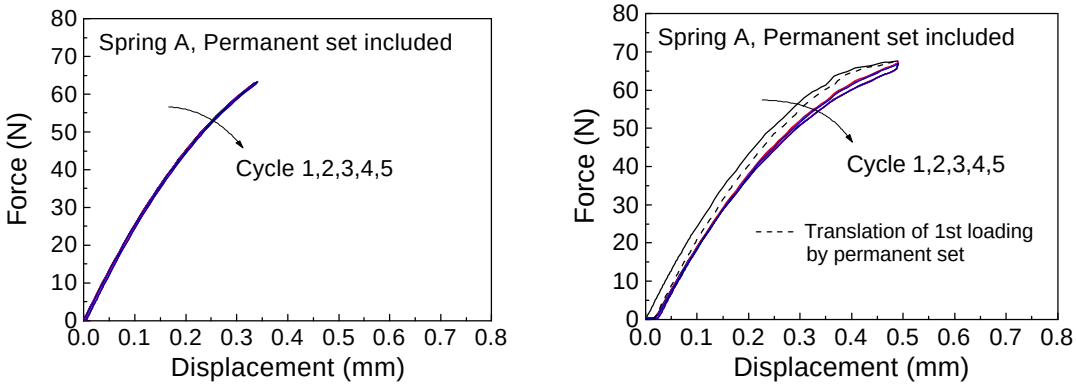
그림 3. 영구 변형량을 제외한 경우의 스프링 A 및 B 에 대한 반복 하중 시험 결과

매 사이클에서 동일한 변위를 입력하였다는 점이다. 그러나 입력 변위의 크기는 기울기의 감소를 관찰할 수 있었던 앞선 연구결과를 고려하여 스프링 A 및 B 에 대한 최대 하중 때의 변위(0.4 ~ 0.5 mm)보다 크게 하여 0.65 mm 로 하였다.

그림 3(a)와 (b)에는 스프링 A 및 스프링 B 에 대하여 각각 5 회의 하중 사이클을 반복한 결과를 보여 주고 있다. 그림 3(a)및 (b)에서 각 사이클의 최대 변위가 서로 다르고 또 입력 변위인 0.65 mm 보다 조금 작은 이유는, 시험 시작 전 크로스헤드를 이동시킬 때에, 지지격자 스프링과 장비에서 하중을 가하는 부위가 접촉을 시작하는 때의 크로스헤드 위치를 정확히 알 수 없기 때문이다. 즉, 실제 시험을 수행할 때에는 크로스헤드를 수동으로 이동시키다가 하중이 증가하기 시작하여 약 10 N 을 넘지 않을 때 정지시킨 후 크로스헤드를 가중 때와는 반대 방향으로 수동으로 조금 움직여 하중이 0 이 되게 하고(이때 실제로는 지지격자 스프링과 장비에서 하중을 가하는 부위 사이에는 간격이 존재한다) 이때로부터 시험을 수행하기 시작하기 때문에, 결과로 얻는 특성 곡선에서 하중이 작용하고 있는 부분의 변위는 입력 변위보다 항상 약간 작게 되는 것이다.

이 시험에서 앞선 연구[1]에서와 같이 하중이 반복됨에 따라 특성 곡선의 기울기가 감소하고 또 최대하중의 크기도 감소하는 것을 발견할 수 있었으므로 결과의 재현성을 확인하였다. 또한 영구 변형량은 하중이 반복될 때마다 줄어 들었으며 5 회의 반복 후에는 거의 발생하지 않게 되었다. 한편 그림 3(a)와 (b)에서 각각 5 회째의 하중 사이클로부터 얻은 특성곡선은 주어진 변위의 종점에서 최대하중이 나타난 것으로 보인다. 따라서 재현된 결과를 고려할 때, 그 이후의 사이클 반복에서는 더 이상의 기울기 감소가 없을 것이며 추가적인 영구 변형도 발생하지 않게 될 것이다. 따라서 앞선 하중 사이클에서의 영구 변형을 제외하고 지지격자 스프링에 반복 하중을 가하게 되면 최대하중과 기울기가 초기의 값보다 작은 어떤 값으로 점근하게 되며 추가적인 영구 변형량이 없어지게 된다는 것을 알 수 있다.

그러나 이러한 시험 방법은 연료봉이 지지격자체 내부에 장입되어 있는 상태에서 발생하는 실제 상황을 나타내고 있다고 보기는 어렵다. 그 이유는 연료봉이 지지격자체 내에 처음 장입되면 지지격자 스프링에는 영구 변형이 발생하게 되고, 이때 연료봉을 인출하여 재 장입하여도 초기 장



(a) (b)

그림 4. 영구 변형량을 포함한 경우의 스프링 A 에 대한 반복 하중 시험 결과; (a) 최대 하중 이전의 변위 범위 (b) 최대 하중 이후의 변위 범위.

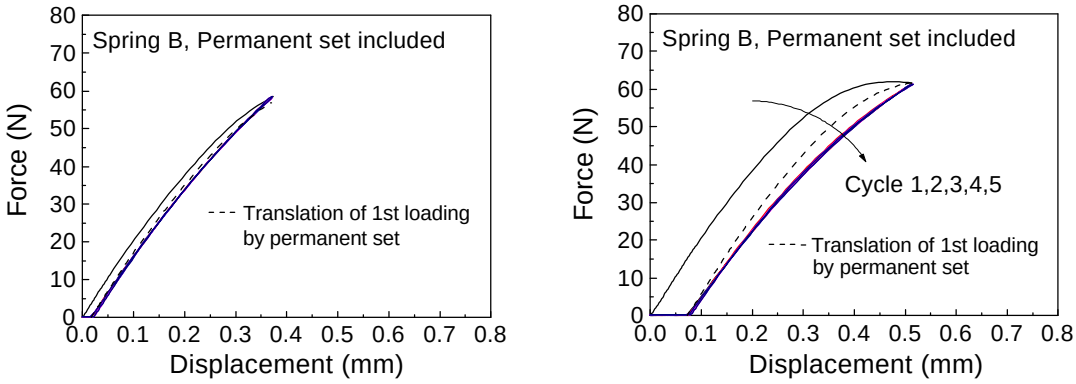
입 때의 영구 변형량 만큼 실제의 간섭이 줄어들게 될 것이므로 초기 장입 때 스프링에 가해진 변위가 이후의 재 장입 때의 간섭과 동일하게 된다는 것은 가능하지 않다. 그럼에도 불구하고 그림 3(a)와 (b)의 결과는 스프링에 발생하는 영구 변형과 기울기에 점근하는 한계가 존재한다는 것을 보여주고 있다는 점에서 매우 중요하다.

3.2 영구변형을 포함한 반복하중 시의 스프링 거동

3.1 에서의 시험 방법과 달리 일정한 변위를 입력하여 매 하중 사이클에서 만능인장시험기의 크로스헤드가 이동하는 거리 내에 앞선 하중 사이클에서 발생한 영구 변형량이 포함되도록 하는 시험을 수행하였다. 이 시험에 의해 연료봉이 지지격자체 내부로 장입, 인출, 그리고 재 장입 등이 반복되는 상황을 모사할 수 있다.

그림 4 는 스프링 A 의 특성 곡선에서 최대하중이 나타나는 변위를 전후한 변위를 입력하고 구한 시험 결과이다. 즉 그림 4(a)는 종점의 변위에서 최대하중이 나타나지 않은 경우이고 4(b)는 최대 하중이 나타난 이후의 변위를 입력 변위로 하여 시험한 결과이다. 최대 하중을 초과하지 않은 경우에는(그림 4(a)) 매 하중 사이클에서의 기울기가 유사함을 알 수 있고 특히 영구 변형도 거의 없는 탄성의 거동만 보이고 있다. 한편 최대 하중을 초과한 변위까지 시험한 결과에서는(그림 4(b)) 첫번째 하중 사이클 이후 영구 변형이 발생하였으나 두 번째부터 다섯번째의 사이클에서는 추가적인 영구 변형의 발생이 없고 기울기도 동일한 탄성적 거동을 보이고 있다. 그러나 이때(두 번째부터 다섯번째의 사이클)의 기울기는 첫번째 사이클에서 나타난 기울기보다 감소하였음을 알 수 있다. 또 그림 4(b)의 두 번째부터 다섯번째의 사이클에서 보여 주는 특성 곡선에서는 최대하중이 입력 변위의 종점에서 발생하고 있음을 알 수 있어 가중되는 동안에 최대하중이 나타난 첫 번째 사이클과는 다르다.

이러한 결과들로부터 최대하중이 나타나기 전까지의 변위만큼 하중이 반복될 때에는 기울기의 감소가 나타나지 않으나 최대하중을 초과한 하중 사이클 이후에는 기울기의 감소가 나타난다고 하는 앞선 연구결과[1]를 다시 확인할 수 있으며, 이러한 특성은 비록 어느 한번의 하중 사이클에



(a) (b)

그림 5. 영구 변형량을 포함한 경우의 스프링 B 에 대한 반복 하중 시험 결과; (a) 최대 하중 이전의 변위 범위 (b) 최대 하중 이후의 변위 범위.

서 최대하중을 초과하더라도 연속되는 사이클에서 최대하중이 초과되지 않으면 계속 보존된다는 것을 알 수 있다. 한편 그림 4 의 결과로부터, 변위의 크기가 최초의 특성 시험에서 얻어지는 특성 곡선 상에서의 최대하중을 초과하든 그렇지 않든 연속되는 하중 사이클에서의 하중-변위 선도에서 최대하중을 초과하지 않으면 스프링 힘이 동일하다는 것이다. 이러한 경우를 만족하는 변위의 크기가 연료봉과 지지격자 스프링 사이의 간섭으로 설정된다면 연료봉을 지지격자체 내에 장입하였다가 인출하고 재 장입하는 과정을 반복하더라도 연료봉과 지지격자 스프링 또는 딤플 사이의 접촉력은 변하지 않게 된다는 것을 의미한다. 그러나 간섭의 크기가 연속되는 사이클에서 최대하중을 초과하는 값이라면 추가적인 기울기의 감소와 영구 변형의 발생을 가져오게 될 것이므로 이때에는 연료봉 장입의 반복은 설계한 스프링 힘을 보장할 수 없게 하는 원인이 된다.

그림 5 에는 그림 4 에서의 시험 방법에 따라 스프링 B 를 시험한 결과를 보여 준다. 즉 그림 5(a)는 최초의 특성 곡선에서 최대하중이 발생하기 이전의 변위로 5 회의 반복 하중을 가한 것이며 그림 5(b)는 최대 하중이 발생한 이후의 변위로 반복 시험한 것이다. 그림 5(a)에서는 그림 4(a)에서와는 달리 첫번째 하중 사이클에서 영구 변형이 발생한 점으로 보아 주어진 변위의 범위에서 이미 스프링이 소성 변형되었음을 알 수 있다. 그러나 두 번째 이후의 하중 사이클에서는 기울기가 동일하고 또 추가적인 영구 변형도 발생하지 않았다. 이것은 그림 4(b)에서 설명한 대로 두 번째 이후 연속되는 사이클에서는 최대하중을 초과하는 변위로 스프링에 하중이 가해지지 않은 결과이다.

한편 첫번째 사이클에서 그림 4(a)에서와 거의 동일한 변위로 스프링에 하중을 가하였음에도 그림 4(a)에서와는 달리 소성 변형이 발생한 것은 스프링의 형상에 따른 것으로 판단된다. 즉 스프링 A 및 스프링 B 에 대한 치수를 상호 비교하면(시편으로 사용한 스프링이 상용품이므로 본 논문에서는 상세 치수를 표시하지 않았다) 스프링 B 가 스프링 A 에 비하여 두께는 얇고 높이는 높으며 길이는 짧다. 따라서 동일한 변위에 대해 스프링 내부의 응력은 더 크게 됨이 명백하므로(응력해석의 결과는 다음 절의 유한요소해석 결과에서 따로 설명한다) 소성 변형이 발생할 가능성이 높다. 스프링이 소성 변형되면 형상이 변하게 되므로 연속되는 반복 하중 사이클에서 기울기가 변

하게 된다. 그러나 그림 5(a)의 데이터를 상세히 분석한 결과 첫번째 특성 곡선에 비해 기울기의 감소는 최대 4..60%로서 매우 작았다.

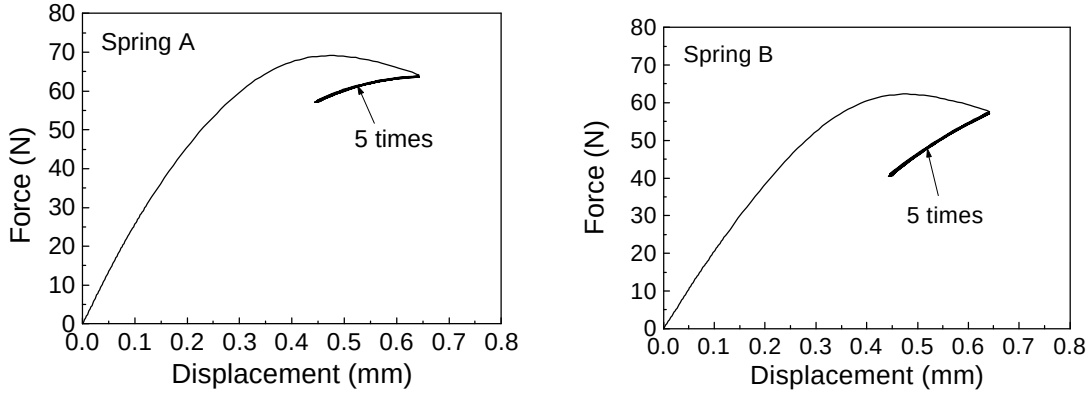
그림 5(b)에서는 스프링 B에 대해 최대하중을 초과한 범위로 변위를 주었을 때 보여준 거동을 나타낸다. 기대한 대로 첫번째 사이클에서 상당히 큰 소성 변형이 발생하였으며 두 번째 사이클에서 상당한 기울기의 감소가 발생하였음을 관찰할 수 있다. 그러나 두 번째로부터 다섯번째 사이클에서의 특성 곡선에서는 서로 동일한 기울기를 보이고 추가적인 영구 변형이 전혀 없는 전형적인 탄성 거동을 나타내었다. 두 번째 사이클 이후의 탄성적 거동은 앞서 그림 4(b) 및 5(a)에서 설명하였듯이 최대하중을 초과하는 변위의 하중이 스프링에 가해지지 않은 결과로 판단된다.

한편 그림 5(a) 및 5(b)에서도 주어진 입력 변위에 대해 스프링 힘은 항상 동일하였다. 따라서 스프링 A 및 스프링 B에 대하여 연료봉이 장입될 때의 간섭을 각각 그림 4(b) 및 5(b)에서 나타난 최대 변위 이내로 설계하면 연료봉의 반복적인 재 장입을 수행하더라도 추가적인 영구 변형의 발생이나 기울기의 감소는 나타나지 않아 설계한 스프링 힘에 영향을 주지 않게 된다. 핵연료집합체의 제조 시에는 여러 요인으로 인해(예를 들어 작업자의 실수나 장비의 오동작 등) 연료봉의 장입, 인출을 반복할 가능성은 충분히 존재한다. 따라서 스프링의 설계를 위하여 설계자가 특성 곡선을 분석할 때 간섭의 설계 값에 대한 스프링의 반복 시험결과를 필수적으로 고려하여야 안전한 설계에 도달할 수 있다.

3.3 프레팅 하중 시의 스프링 거동

원자로 냉각수 유동에 의해 연료봉과 지지격자 스프링 사이에는 진동에 의한 프레팅 현상이 발생하며 이는 지지격자 스프링에 피로 하중을 발생시킨다. 프레팅 현상에 의해 연료봉에 손상이 발생하기 위해서는 연료봉과 지지격자 스프링 또는 딤플의 접촉면에 미끄럼이 발생하여야 하고 이때 전단 하중이 발생한다. 접촉면에서 발생하는 전단 하중은 수직 하중(본 논문에서는 접촉력이라 정의하였다)과 마찰계수와의 곱으로 정의할 수 있으므로 프레팅 상태에서의 지지격자 스프링과 연료봉 사이의 접촉력을 분석하는 것은 연료봉의 프레팅 손상을 분석하는 기초가 된다. 이를 위해 본 연구에서는 연료봉이 지지격자체 내에 장입된 후 프레팅 현상이 있을 때 스프링 특성 곡선의 거동을 조사하고자 하였다. 연료봉이 지지격자체 내에 장입되면 연료봉과 지지격자 스프링의 간섭에 의해 스프링에는 변위가 발생하며 이에 따른 스프링 힘(접촉력)이 생기게 된다. 이후 냉각수 유동에 의해 연료봉은 유체유발진동을 하게 되며 따라서 스프링에 일정한 변위가 반복적으로 발생하게 될 것이다. 이러한 변위의 반복으로부터 접촉력의 증감이 반복되는 것을 생각할 수 있다.

그림 6(a)와 (b)는 스프링 A 및 B에 입력 변위 0.65 mm를 가한 후 변위의 폭을 0.2 mm로 하여 가중 및 제하를 5회 반복하여 얻은 시험 결과이다. 실제의 유체유발진동에 의해 프레팅 현상이 나타나는 연료봉의 진폭은 0.2 mm 보다 매우 작을 것으로 생각된다. 그러나 스프링의 거동을 조사하기 위한 시험에서 진폭을 매우 작게 취하면 분석에 어려움이 따르고 또 진폭이 작은 경우의 거동은 큰 경우에 비해 연료봉 손상이 덜 발생한다고 볼 수 있으므로 본 시험에서는 적절한 변위의 폭으로서 0.2 mm를 취하였다. 그림 6(a)와 (b)로부터 초기에 스프링이 입력 변위에 의해 변형한 후 0.2 mm의 변위로 5회 연속적인 가중 및 제하를 발생시키는 동안 각각의 스프링은 동일한 거동을



(a) (b)

그림 6. **프레팅 하중상태에서의 스프링 거동(반복 변위의 범위**: 0.2 mm).

보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 그림 4 및 5 에서의 결과로부터 연속되는 사이클에서 최대하중을 초과하지 않은 경우의 스프링 거동으로부터 쉽게 유추할 수 있는 결과이기도 하다. 다시 말하면 시험에서 사용한 초기의 입력 변위(0.65 mm)는 완전 제하될 때까지 제하 시의 곡선에서 중간에 최대하중이 발생하지 않는 변위이므로 0.2 mm 의 연속적인 가중 및 제하를 발생시키는 동안에 기울기의 감소가 발생하지 않은 것이다.

그러나 스프링의 형상이 접촉력의 변화에 미치는 영향을 관찰할 수 있다. 즉 그림 6(a)에서의 접촉력의 변화량(진폭)은 6(b)에 비하여 작다. 따라서, 마찰 계수가 일정하다고 할 때, 동일한 변위의 진폭이 작용하는 경우 스프링 A 와 연료봉 사이의 전단 하중 진폭은 작게 되어 스프링 B 보다 프레팅 손상 관점에서 유리하다고 말할 수 있다. 물론 동일한 조건의 냉각수 유동에 의해서도 연료봉 프레팅 상태에서의 변위 폭은 연료봉과 접촉하는 부위의 스프링 형상과 스프링 힘에 의해 달라지므로 본 절에서 설명하고 있듯이 특성 곡선에 의해서만 프레팅 손상에 대한 저항성을 논한다는 것은 충분하지 않다. 그러나 유체유발진동의 해석 결과로 프레팅 상태에서의 진폭을 알 수 있다면 본 절에서 분석한 방법을 이용하여 손상에 대한 저항성을 예측한다든가 저항성이 우수한 스프링을 설계할 수 있을 것이다. 그림 6(a)와 (b)로부터 프레팅 손상에 대한 저항성이 우수한 스프링의 조건은 만일 연료봉이 지지격자체 내로 장입될 때 발생하는 간섭의 크기가 해당 스프링 특성 곡선에서의 최대하중을 초과한다면, 특성 곡선에서 완전 제하 시의 영구 변형이 작은 스프링의 경우라 할 수 있다. 그 이유는 상대적으로 작은 영구 변형을 발생시키는 스프링이 갖는 제하 시의 특성 곡선은 가중 시의 곡선에 상대적으로 근접하게 될 것이므로 동일한 변위 폭에 대해 더 작은 접촉력의 진폭을 보이게 될 것이기 때문이다.

4. 유한요소해석

4.1 목적 및 해석 방법

2 장에서의 시험결과와 앞선 연구[1]로부터 특성 곡선은 스프링의 형상에 명백히 의존함을 알

수 있다. 따라서 그림 3 부터 그림 5 에서 관찰된 기울기의 감소는 스프링에 영구 변형이 발생함에 따라 형상이 바뀐 데에 따른 것이라 생각할 수 있다. 이에 대한 분석을 위해 본 연구에서는 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(version 5.8)[3]를 사용하였으며 스프링의 도면 상 치수와 인코넬 718 의 재료 상수로서 탄성계수는 199.5 GPa, 그리고 프와송비는 0.294 를 입력하였다. 한편 스프링의 특성 곡선은 비선형 탄소성 거동을 보이므로 항복 강도로서 976.8 MPa 과 경화 곡선(hardening curve)을 적용하였다.

유한요소해석에 사용한 요소로는 지지격자 스프링이 폭에 비하여 두께가 매우 작으므로 스프링을 4 node 를 갖는 셸 요소로 하여 ABAQUS 에서 제공하는 S4R 요소[3]를 사용하였다. 경계조건으로서는 스프링 하나를 포함하는 지지격자 판의 양변을 구속하였으며 연료봉이 스프링에 변위를 가하는 것을 모사하기 위해 강체 원통이 스프링에 접촉한 후 스프링에 압축을 가하는 방향으로 변위량만큼 원통을 강체 이동시켰다. 변위가 발생하였을 때의 스프링 힘은 구속된 두 변에서의 반력을 계산하여 구하였다. 이와 같은 유한요소해석을 통해 스프링의 특성 곡선을 모사할 수 있음은 이전의 연구[3]에서 발표하였다. 본 연구에서는 당시 사용한 프로그램을 이용하여 스프링의 형상 변화를 분석하였다.

4.2 해석 결과 및 고찰

지지격자 스프링에 하중을 가하여 발생한 영구 변형은 초기의 스프링 높이를 감소시키게 된다. 따라서 그림 4(b), 그림 5(a) 및 (b)에서 두 번째 사이클부터는 크로스 헤드가 이동을 시작하여 첫 번째 사이클에서 발생한 영구 변형량에 해당하는 거리만큼 진행하더라도 하중의 증가가 관찰되지 않는다. 이때 지지격자판이 이동할 수는 없으므로 스프링의 높이가 감소하기 위해서는 스프링과 연료봉 사이의 접촉점으로부터 스프링이 지지격자판으로부터 돌출되기 시작한 뿌리 부분까지의 형상이 변하여야 한다. 이것을 그림 7 과 같이 도식적으로 나타낼 수 있으며, 스프링의 높이가 감소하기 위해서는, 스프링을 측면에서 볼 때, 기울기 변화가 급격한 부분이나 이들을 연결하는 곡선부 또는 변곡점 부위에서 형상의 주된 변화가 있을 것으로 생각할 수 있다. 이러한 부위에서의 형상 변화는 스프링에 가하여진 하중에 의해 응력이 많이 집중됨으로써 국부적인 소성이 발생한 결과로 이해할 수 있다.

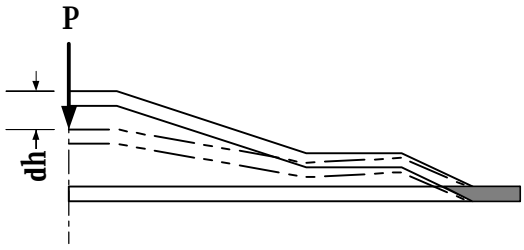
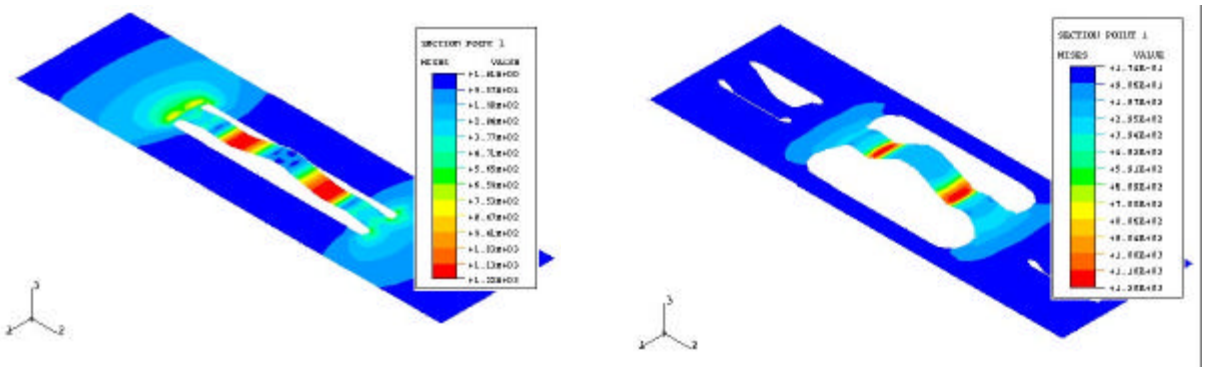


그림 7. 접촉력(P)에 의한 스프링의 변형.

그림 8(a) 및 (b)에는 각각 스프링 A 및 B 에 0.5 mm 의 수직 변위를 발생시켰을 때의 유한요소해석에 의한 Von Mises 응력분포 결과를 도시하고 있다. 예상하였던 대로 스프링의 길이방향으로



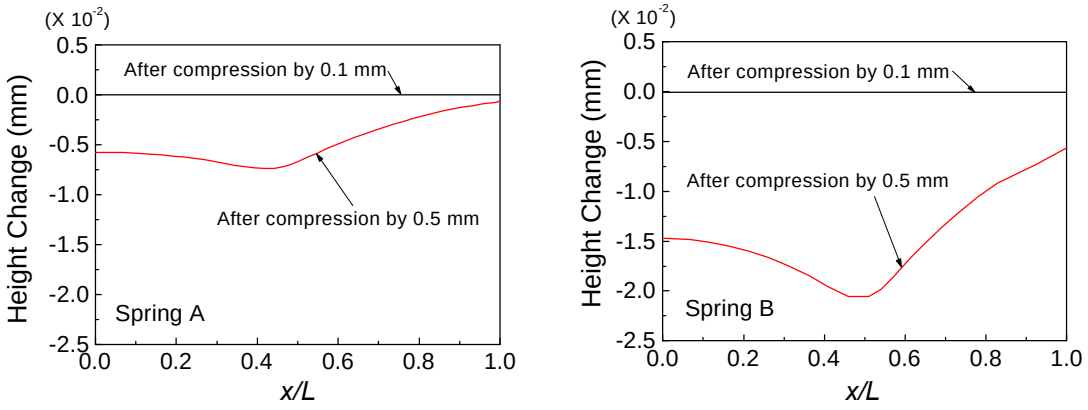
(a) (b)

그림 8. 유한요소해석에 의한 (a) 스프링 A 및 (b) 스프링 B의 응력 분포 결과(변위: 0.5 mm).

보아 중간 정도의 위치에 있는 곡선부(스프링 측면 형상이 크게 바뀌는 부분)와 그 주위에서 높은 응력을 나타내었다. 해석결과에서 그림 8(a) 및 (b)에 나타나 있는 최대 Von Mises 응력의 크기는 1220 MPa 와 1280 MPa 이었다. 따라서 스프링의 재질인 인코넬 718 의 항복 강도(976.8 MPa)와 비교할 때 그림 8(a) 및 (b)에서 국부적인 소성이 발생하였다는 것을 확인할 수 있다. 또한 스프링 B 의 경우가 스프링 A 에 비해 최대 응력뿐 아니라 스프링의 대부분 영역에서 응력이 높다는 것으로부터 그림 4 와 그림 5 의 비교에서 발견할 수 있었듯이 영구 변형량의 크기가 스프링 B 에서 더 컸다는 결과를 설명 할 수 있다.

지지격자 스프링에 하중을 가한 후 제하하였을 때 국부적인 소성이 발생하여 형상이 변화하는 것을 유한요소해석 결과로부터 나타내면 그림 9(a) 및 (b)와 같다. 그림 9(a) 및 (b)에는 각각 스프링 A 및 B 에 0.1 mm 와 0.5 mm 만큼의 변위를 가한 후 제하하였을 때 최초의 형상으로부터 변형된 양을 나타낸다. 이를 위해 횡축에는 스프링의 중심(연료봉과의 접촉점)으로부터 지지격자판에서 스프링이 시작되는 부분(뿌리 부분)까지의 거리를 정규화하여 나타내었고 종축은 스프링이 변형되기 전과 후의 높이 차이를 나타내었다. 변위량 0.1 mm 와 0.5 mm 는 두 종류의 스프링 특성곡선 모두에서 각각 최대하중을 초과하기 전, 그리고 초과한 후의 변위이다. 그림 9(a) 및 (b)의 결과로부터 변위 0.1 mm 에서는 스프링의 높이가 거의 변화하지 않았으나 0.5 mm 에서는 상당히 변화하였으며 특히, 스프링의 측면에서 볼 때, 기울기가 감소하다가 0 이 되는 부분($x/L \approx 0.4$)에서 가장 큰 높이의 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 이 부분은 그림 8(a) 및 (b)에서 최대 응력이 관찰된 곳이다. 또한 스프링과 연료봉의 접촉부(스프링의 중앙)로부터 위의 최대 응력이 발생한 곳까지의 구간에서 상대적으로 높은 응력이 나타나 이 부분에서 변형이 심하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

한편 두 가지 스프링 상호간의 비교에서는 스프링 B 가 스프링 A 에 비해 형상의 변화가 더 심하였다. 이 결과로부터 스프링 B 에서 더 큰 영구 변형량이 나타나며 최대하중이 초과한 이후의 기울기 감소가 더 크다는 그림 4 및 그림 5 의 결과를 설명할 수 있다. 그러나 영구 변형량을 정량적으로 분석하기에는 오차가 크다. 즉 그림 9(a) 및 (b)에서 $x/L = 0$ 에서의 높이 감소량을 서로 비교하면 약 3 배 정도의 차이가 보임을 알 수 있고 이것은 그림 4(b)와 5(b)에서의 영구 변형량 비와 비슷하다. 그러나 그림 9(a) 및 (b)에서의 높이 감소량과 그림 4(b)와 5(b)에서의 영구 변형량



(a) (b)

그림 9. 유한요소해석을 이용하여 스프링 A 및 B에 대해 0.1 mm와 0.5 mm의 변위를 가한 후 해중하였을 때의 형상 변화.

의 절대 크기를 비교하였을 때 잘 일치하지는 않았다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 사용한 유한요소해석 방법은 반복하중에 의한 스프링 특성 곡선의 기울기 감소, 높은 응력 발생 부위의 파악 등 스프링의 형상 변화에 대한 정성적 예측은 충분히 가능한 것으로 판단되며 따라서 이를 이용하여 스프링의 형상 개선 및 설계 시에 시험에 소요되는 노력을 상당히 경감시킬 수 있을 것이다.

4. 결 론

원자로 냉각재의 유동에 의해 발생하는 연료봉의 유체유발진동으로부터 지지격자 스프링에는 반복 하중이 작용하게 되고 이때 연료봉을 지지하는 지지격자체의 기본적인 기능에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 상용 인코넬 지지격자 스프링에 대해 특성 곡선의 생산을 위한 시험을 수행한데[1] 이어 본 연구에서는 하중이 반복적으로 작용할 때의 스프링 거동에 대해 보다 상세한 시험을 수행하였으며 아울러 유한요소해석을 별도로 수행하여 시험 결과를 해석적 방법으로도 설명하였다.

그 결과 시험에 사용된 상용 인코넬 지지격자 스프링은 스프링 특성 곡선을 생산하기 위해 사용한 변위의 범위 내에서는 영구 변형이나 기울기의 감소가 최초의 하중 사이클에서만 한번 발생하며, 반복적으로 동일한 변위를 가하는 하중 사이클에 의해서는 추가적인 영구 변형이나 특성 곡선 기울기의 감소가 나타나지 않았다. 따라서 반복 하중에 의해 스프링 힘이 소실되는 경우는 없다고 할 수 있다. 그러나 만일 연속되는 사이클에서의 변위가 최대하중을 초과하는 것일 경우에는 그 다음의 사이클에서 추가적인 영구 변형과 기울기의 감소가 나타나며, 이때의 추가적인 영구 변형과 기울기의 감소는 사이클을 반복함에 따라 줄어 들게 됨을 발견하였다. 이러한 특성은 향후 지지격자 스프링의 개발 시 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 한편 시험 결과로 보여준 지지격자 스프링의 거동은 응력과 변형을 분석한 유한요소해석을 통해 설명할 수 있었다. 이로부터 본 연구에서 사용한 해석 방법도 지지격자 스프링의 설계 또는 개발에 유용하게 사용할 수

있을 것으로 생각한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김형규외 4인 (1999) 인코넬 지지격자 스프링 시험방법에 대한 연구, 한국원자력학회 '99 추계 학술발표회.
2. H.-K. Kim and K.-H. Yoon (2000) Analysis of Fuel Grid Spring by Characterization test and Finite Element Method, 8th Int'l Conf. on Nucl. Eng., to appear in Apr. 2000.
3. Hibbitt, H.D., Karlsson, G.I. and Sorensen, E.P. (1998) ABAQUS User's Manual (version 5.8) Vol. I and II, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, R.I., USA.