

2001 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

이중판 노즐형 지지격자 스프링의 지지강성 저하를 위한 형상 개선

Shape Modification for Decreasing the Spring Stiffness of Double-plate Nozzle type Spacer Grid Spring

이강희

충남대학교 기계공학과
대전광역시 유성구 궁동 220

강홍석, 송기남, 윤경호, 김형규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

냉각수 통로와 핵연료봉을 지지하는 스프링의 역할을 동시에 수행하는 이중판 지지격자 노즐은 스프링으로서 사용하기에는 과도한 강성을 갖는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 바람직한 스프링 성능을 갖는 노즐형상을 제안하고자 새로 고안된 이중판 노즐과 핵연료봉에 대한 접촉해석을 수행하였다. 해석도구로 범용코드인 ABAQUS를 이용하였다. 노즐 상,하부를 잘라 낸 경우는 스프링 강성도를 떨어트리는 효과가 거의 없었고, 노즐 중앙에 긴 홈을 낸 경우, 원하는 범위로 스프링 강성을 낮출 수 있을 뿐 아니라, 스프링의 탄성변위를 증가시키는 효과도 있는 것으로 나타났다.

Abstracts

Nozzle of the double-plated grid plays the role of the spring to support a fuel rod as well as the coolant path in grid. The nozzle was known to be necessary to reduce the spring stiffness for supporting performance. In this study, the contact analysis between the fuel rod and the newly designed nozzle was performed by ABAQUS computer code to propose the preferable shape in term of spring performance. Two small cut at the upper and lower part of the nozzle appeared to have a minor effect in decreasing the nozzle stiffness. A long slot at the center of the nozzle was turned out not only to decrease the spring constant as desired but also to increase the elastic displacement.

1. 서론

핵연료 봉 지지격자 구조물은 원자로 내에서 실린더 형태의 가늘고 긴 핵연료 봉을 수직 및 수평방향으로 정해진 위치에 있도록 지지하는 역할과 이들 봉 사이에 형성되는 냉각수의 이동 경로를 제공하는 중요 핵연료 구조요소이다. 최근 국내에서도 핵연료 지지구조물에 대한 개발 작업이 활발하게 진행 중에 있으며, 이에 따라 새로 개발된 지지구조물에 대한 해석 및 검증 기술의 습득이 요구되고 있다.

연료봉은 실린더 형의 봉내에 우라늄 소결체를 포함하고 있으며, 원자로내의 가압된 냉각수의 유동으로 인한 난류와 횡류운동은 연료봉의 유체유발 진동(flow induced vibration)을 야기하고, 이러한 연료봉과 지지격자 스프링의 상대운동에 의해 프레팅 마모가 발생하며 심한 경우 핵연료 봉을 손상시키기도 한다^[1].

따라서 핵연료의 한계 수명까지 원자로의 안전운전을 위해, 지지격자 구조물은 연료봉과의 마찰에 의한 상호작용으로 인해 발생할 수 있는 기계/구조적 손상가능성을 줄일 수 있도록 설계가 이루어져야 하며, 동시에 냉각수 유동 통로를 충분히 확보할 수 있도록 설계해야 한다. 이러한 설계 기능요건에 준해서 현재 여러 형태의 지지격자 스프링이 고안되어져 있고 차체에 이를 국산화하여 핵연료 제조 및 생산분야에서 우위를 점하기 위한 기술개발이 진행 중이다.

특별히 지지격자의 연료봉에 대한 지지강성은 연료봉의 진동을 충분히 수용할 수 있는 정도의 스프링 강성으로, 동시에 연료봉과 공간(연료봉과 지지격자의 분리현상)이 생기지 않도록 이상적으로 지지되는 것이 바람직하며, 이에 따라 대략적인 목표 지지강성을 설정하고 있다.

본 연구에서는 이중관 노즐형 스프링의 지지강성을 목표치까지 감소시키기 위한 설계변경을 시도하였고 그로부터 구조적 측면에서 개선된 형태의 스프링 형상을 제한하고자 한다. 제안된 지지격자 스프링은 판 스프링 상단 부에 길이방향의 키 홈을 가지고 있으며, 이로부터 연료봉과의 접촉점에서 냉각수의 유동정체로 인한 핵비등이탈(nuclear boiling)이 발생할 가능성을 배제시키는 장점도 갖는다.

2. 해석모델 및 해석 조건

지지격자 단일 셀의 지지강성 감소를 목적으로 하는 구조적 특성 변경을 위해 해석의 대상을 지지격자 한 셀 만으로 한정하고, 설계변경 전·후의 유한요소 해석 모델을 그림 1에 도시하였다. 이중관 노즐형 스프링 한 셀의 지지강성은 연료봉과의 접촉해석을 통해서 얻어낼 수 있으며 이에 대한 접촉 유한요소 해석은 상용코드인 ABAQUS^[2]를 이용하였다. 봉과 지지격자 사이의 접촉으로 인한 정적 변형의 측면에서 볼 때, 연료봉의 변형은 스프링 지지격자에 비해 충분히 작다고 판단되어 우선 연료봉은 강체로 모델링하였고, 추가적으로 연료봉을 변형체로 모델링하여 지지격자와 접촉으로 인한 접촉응력과 접촉영역의 차이를 비교해 보았지만 큰 차이를 보이지 않았다. 지지격자 스프링의 경우는 두께의 치수가 면적에 비해 상대적으로 작고, 연료봉과 안정적인 접촉해석을 위해 1차원 탄소성 셀 요소를 이용하였다.

봉과 지지격자 사이의 접촉면에서의 미끄러짐에 대한 가정으로 ABAQUS가 제공하는 small sliding 옵션을 이용하였는데, 실제로 이들 사이의 상대운동은 수 백 μm 이하로 작기 때문에

충분히 타당한 가정이라 판단된다.

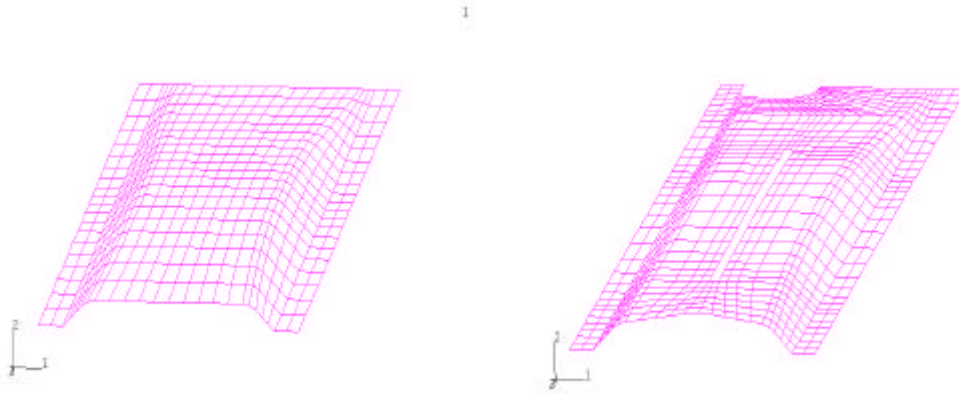


그림 1 유한 요소 해석 모델

또한 연료봉과 지지격자 사이에는 마찰이 존재하므로 정확한 접촉해석이기 위해서는 마찰이 고려된 마찰접촉해석이여야 하는데, 이에 대한 정확한 이론적 모사가 불가능하므로 시행착오의 방법을 이용하여 ABAQUS에서 제공하는 벌칙방법을 사용하였다.

접촉해석을 위한 안정적인 단위 스프링 셀의 요소 밀도 결정을 위해 몇 가지 경우에 대해 요소망을 구성하여 접촉해석을 수행하였다. 접촉되는 영역 부근의 요소 밀도에 따라 최대 혼합응력과 계산된 스프링력의 크기는 수렴하는 경향을 보였다. 또한 형상 변경의 이유로 불연속면이 생길 경우, 국부적인 응력집중이 생기지 않도록 요소화 과정에서 적절히 요소의 밀도를 조정하였다.

해석에서 스프링 측면 부분에 적용해야할 경계조건을 실제 모델의 물리적 특성과 가깝도록 정확히 적용하는 것이 중요하다. 이중 판 노즐형 스프링은 날개의 셀들을 서로 엇갈리도록 조립하고 겹치는 부분을 점용접하여 구성하는데, 점용접에 의해 스프링의 단위 셀들이 완전하게 결합되어 있다는 가정하에서 이동 자유도는 충분히 작은 것으로 판단하였고, 다만 스프링 셀의 폭방향 길이가 길이방향의 차원에 비해 충분히 큰 것으로 생각되어 폭방향의 굽힘변형으로 인한 단위 셀 연결 부위의 회전 변형이 가능할 것으로 생각된다. 결국 접촉해석을 위한 경계조건으로 스프링 단위 셀의 양쪽 측면을 z방향 회전 자유도를 제외한 나머지 자유도를 모두 구속시켰다. 지지격자 단위 셀의 측면절점의 변위를 모두 구속시킨 경우와 z방향 회전 자유도만을 자유로운 변형상태로 풀어주었을 경우의 해석결과를 아래 그림 2에 제시한다. z 방향의 회전을 자유롭게 했을 경우, 탄성영역에서에서의 스프링 강성에서는 큰 차이가 없으나, 소성영역에서 변형경화가 감소한다. 이것은 이중판 노즐형 스프링만의 형상에 따른 특수성이라 생각되며, 스프링과 덤플을 갖는 기존의 지지격자 스프링에 관한 해석결과로 볼 때, 일반적으로 z방향 회전자유도에 따라 탄성구간에서 변형기울기는 그렇지 않은 경우에 비해 상당한 차이를 보인다.

해석에 대한 가정으로 초기 접촉상태에서 연료봉이 1mm 만큼 수직 변위하고, 이에 따라 스프링과 연료봉 사이의 접촉으로 인한 접촉력이 순수하게 스프링 지지점의 반력으로 변환된다고 가정하기로 한다.

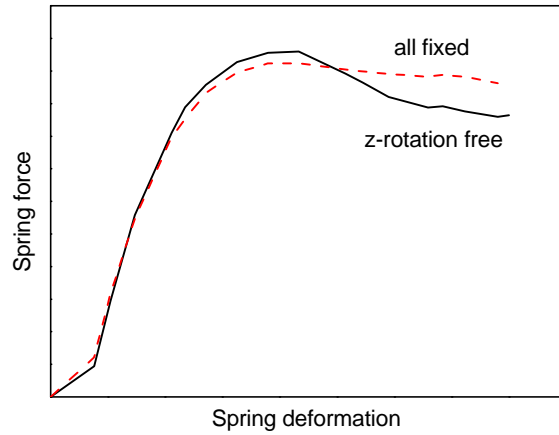


그림 2 z방향 회전 자유도 구속 여부에 따른 스프링력 곡선

3. 지지강성 저하를 위한 지지격자 스프링 형상 개선

이중판 노즐형 스프링의 개선 전 형상 및 치수에 대한 유한요소 모델을 이용하여 수행한 초기 접촉해석 결과, 그림 3에서와 같이 스프링의 탄성 지지강성비가 대략 목표치의 2배에서 3 배로 계산되었다. 이에 따라 스프링이 연료봉의 진동 변위를 유연하게 수용할 수 있도록 전체 적인 스프링 형상과 두께를 유지하면서 스프링 강성을 감소시킬 수 있도록 형상 개선을 위한 몇 가지 방안을 생각해 보았다.

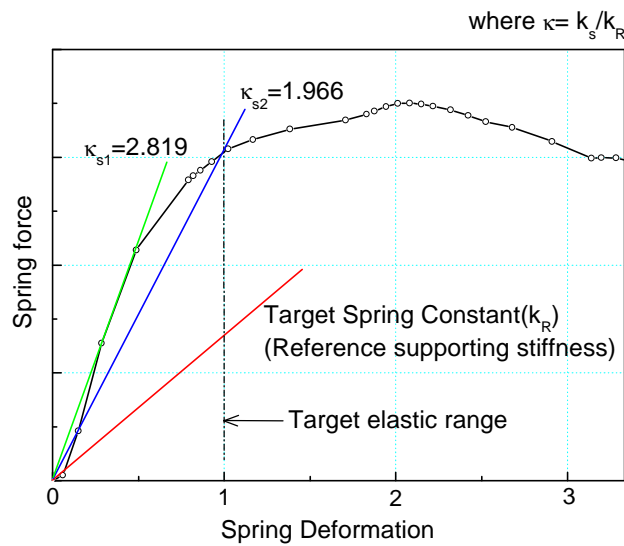


그림 3 형상 개선 전의 스프링 력 곡선

접촉해석의 결과로부터 스프링이 0.3(목표치로 무차원화된 변형양)만큼 변형하였을 때, 혼합 응력의 분포는 그림 4에 제시하였다. 최대 혼합응력은 아래 그림과 같이 스프링 상단 곡면부의 양 측면과 중심부에서 대략 300에서 320 MPa 정도로 계산되었다. 최대 혼합응력이 접촉영역에서가 아닌 그 이외의 영역에서 발생했다는 부분은 흥미로운 사실이다.

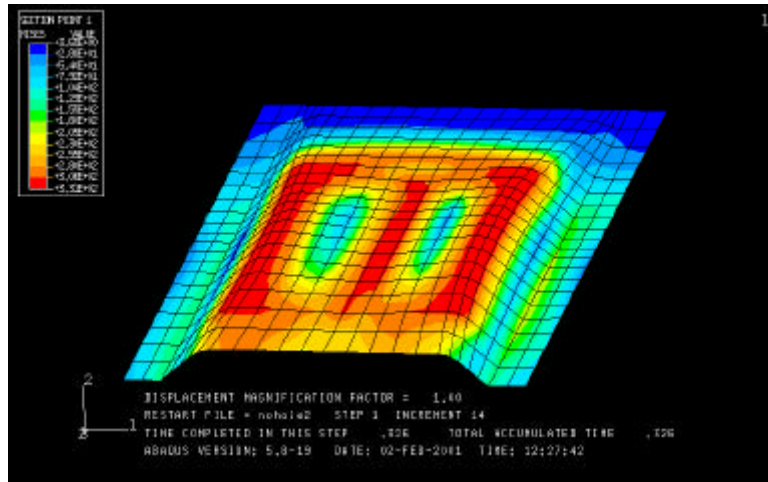


그림 4 개선 전 모델의 혼합응력 분포

1) 지지격자 스프링 단위 셀의 앞과 뒤에 각각 삼각형 홈과 원형 홈을 포함시킨 경우

스프링의 탄성 지지강성은 스프링 전체 면적의 크기와 밀접한 관련이 있을 것이며, 면적을 감소시킬 경우, 지지강성의 감소가 충분히 예상된다. 또한 스프링 구성 면적의 감소는 곧바로 냉각수의 유동 면적을 증가시킨다는 측면에서 유효한 개선방향이라 판단된다. 잘라내는 면적의 크기는 이들 홈 단면적의 합이 스프링 정면부 곡선의 바닥면과 이루는 폐곡선의 내부 단면적 (closed cross section, 그림 5의 ABCD)과 같도록 다음과 같이 설정하였고, 해당 모델의 치수는 그림 5에 도시하였다.

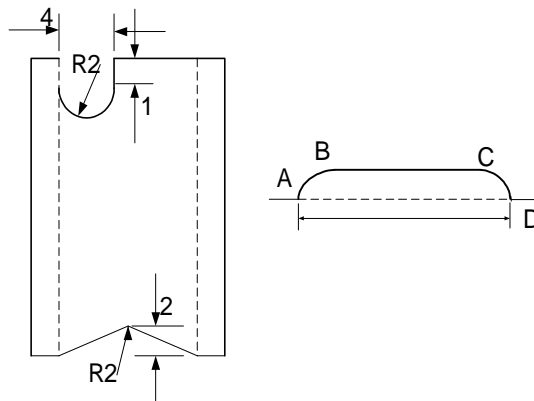


그림 5 삼각형 홈과 원형 홈을 따낸 경우의 스프링 모델

초기 해석과 같은 동일한 해석조건으로 접촉해석을 수행한 결과 탄소성 변형과정 동안 약간의 강성저하 현상이 포착된다. 예상했던 것만큼의 강성 저하는 아니지만 앞서 기술했던 강성 저하와 냉각수 유로의 확보의 측면에서 충분히 바람직한 개선방향이라 판단된다.

스프링 변형이 목표위치에 도달했을 때의 응력 분포는 (그림 6에서와 같이) 이전의 해석과 큰 차이가 없지만, 잘라낸 부분의 불연속면에서 약간의 응력집중 현상이 포착된다. 추후에 이 부분에 대한 요소밀도를 적절히 조절하여 연속적인 응력 분포를 얻을 수 있도록 하였으나, 접촉 영역 부근의 응력 분포가 해석의 주요 관심사이기 때문에 큰 의미를 두지 않았다.

2) 스프링의 양쪽 측면 부분의 flat한 면에 기울임을 준 경우(그림 6)

연료봉이 스프링과 만나 변형이 이루어 질 때, 단위 셀 측면의 기울임 효과가 탄성 굽힘 변형을 동반하여 스프링의 전체적인 탄성 지지강성이 감소될 것이다. 또한 기울임의 크기에 따른 지지강성의 영향을 알아보기 위해 몇 가지 경우에 대한 스프링력 그래프를 그림 7에 도시하였다.

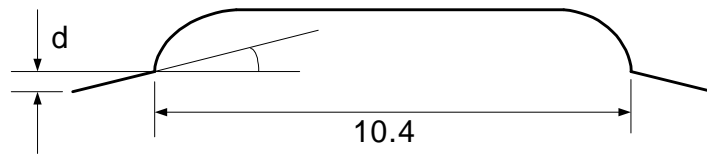


그림 6 스프링 edge에 기울음을 준 경우

해석결과, 탄성변형 구간내의 스프링 강성에는 큰 변화가 없었다. 이는 기울임을 준 부분의 모델링 과정에서 스프링의 주 몸체와 기울어진 평면의 경계가 해석에서 상당한 강성을 갖는 것으로 모델링 되었기 때문이라고 판단한다. 참고로 기울임의 크기가 커질수록 스프링 지지강성비가 약간씩 감소되나 주목할 만한 정도는 아니다.

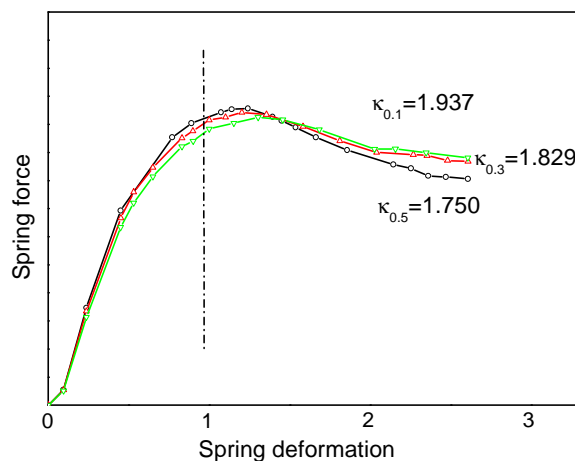


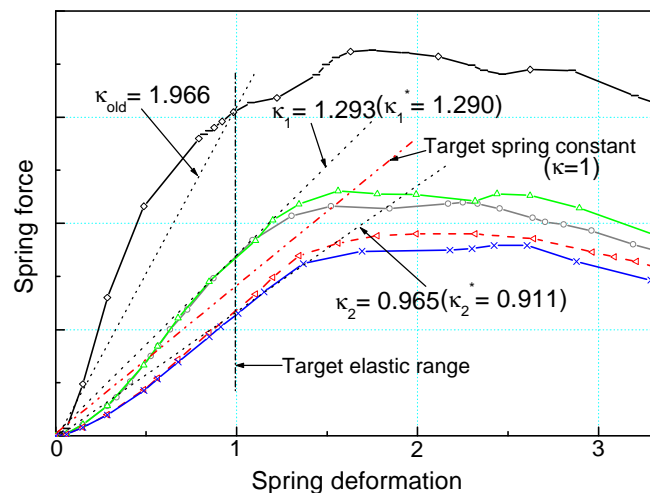
그림 7 기울임을 준 경우의 스프링력 그래프

3) 스프링의 중심부에 긴홈(Slot)을 넣은 경우

이중판 노즐형 스프링의 중심부에 길이방향의 긴홈을 부여한 경우, 직접적인 접촉 면적의 감소와 함께 스프링의 연속적인 곡면 특성의 상실로 인하여 지지강성이 상당히 감소될 것이다. 긴홈의 치수로 폭은 가공상의 한계치수인 0.5mm로 하였고, 키 홈 길이는 스프링이 연료봉과 접촉하여 수직방향으로 0.2mm에서 0.3mm 변형되었을 때, 연료봉과 스프링의 대략적인 접촉 길이인 16mm로 설정하였다. 그림 8는 길이방향으로 긴홈을 부여한 경우(16mm, 20mm)의 해석 결과와 개선 전의 모델에 대한 스프링력 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 이중판 노즐형 스프링의 초기 모델에 길이방향으로 긴홈을 부여한 경우, 스프링 탄성변형영역의 확대 효과와 함께 탄성구간내의 스프링 강성비가 상당히 저하되었다.

긴홈의 길이를 더 증가시킬 경우(20mm 까지), 스프링 지지강성이 상당부분 감소되어 지지강성비 1.97에 해당하는 지지격자 스프링 모델로부터 지지강성비가 1.0이하인 이중판 노즐형 지지격자 스프링을 구현할 수 있었다. 또한 지지강성을 감소시킬 목적으로 적용한 길이방향 홈은 연료봉과 스프링의 접촉점에서 정체 냉각수의 정체로 인한 핵비등 이탈을 억제한다는 측면에서도 유효하다.

접촉에 해석에 대한 혼합 응력 분포 형상은 그림 9에 도시하였다. 예상했던 바와 같이 긴홈의 끝부분 측면 불연속 영역에서 국부적인 응력집중이 관찰되고, 이 부근에서 최대 혼합응력 350 MPa 이상의 값을 갖는다. 홈 가공 시에, 이 부분에 심한 불연속 에지가 생기지 않도록 가공 및 해석상의 주의를 요한다. 접촉이 이루어지고 있는 영역에서의 혼합응력은 대략 200MPa 정도이며, 앞선 해석들과 유사하게 스프링의 측면 곡면부에 상당히 큰 혼합응력을 나타내지만 주목할 만한 점은 개선전의 모델에 비해 응력 분포가 균일화되었다는 점이다.



(κ_1 : 16mm홈, κ_2 : 20mm홈, *:노즐 상하단의 홈적용)

그림 8 스프링 중심부에 키홈을 넣은 경우

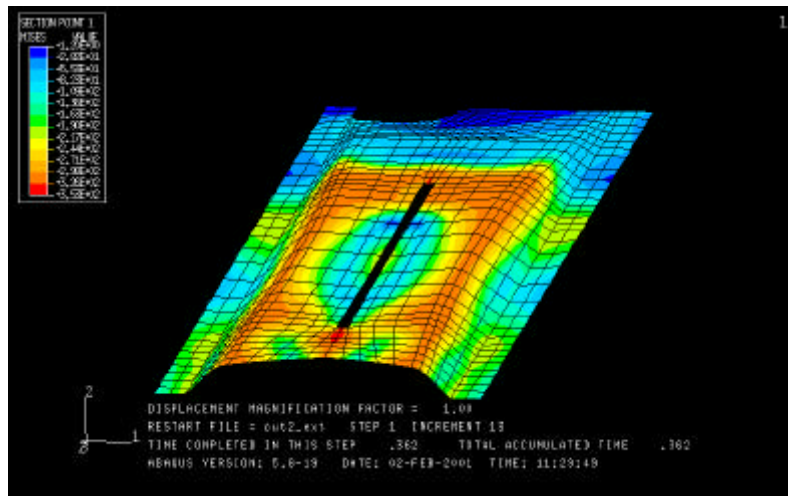


그림 9 긴흠을 갖는 모델의 혼합응력 분포

끝으로, 긴흠을 갖는(16mm) 이중판 지지격자 스프링의 두께에 따른 스프링 지지강성 영향을 파악해 보기 위해, 두께를 달리하여 수행 한 해석결과를 그림 10에 도시하였다. 두께 감소에 따라 스프링 지지강성비가 상당부분 차이를 두고 감소하게 된다. 일반적으로 판 스프링의 굽힘강성은 쉘 두께의 세제곱이 비례하여 변화하게 되는데, 이것은 쉘 두께가 membrane강성보다는 굽힘강성에 상당히 영향력이 크다는 것을 의미한다.

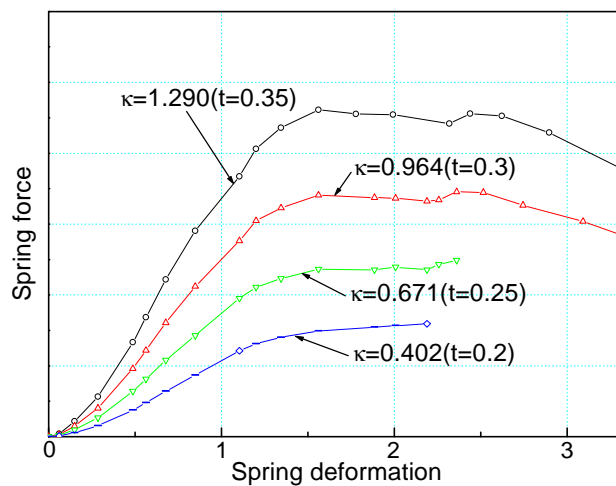


그림 10 두께에 따른 스프링 강성 변화

4. 결 론

핵연료 핵심 구조 요소인 지지격자 스프링의 여러 형태 중에서 새로이 개발된 이중판 노즐 형에 대한 지지강성을 저하시키기 위해 스프링의 앞과 뒤에 각각 삼각형 홈과 원형 홈을 따냈고, 중심부에는 길이방향의 키 홈을 만들었다. 형상 변경 전의 초기 모델에 대한 접촉 해석결과, 대략 두배에서 세배가량의 지지강성비를 갖는 이중판 노즐형 스프링을, 형상 변경 후, 긴 홈의 길이에 따라 지지강성을 목표치에 근접시키거나 그이하의 수준까지 낮출 수 있었다. 이러한 모재 절단의 효과는 기계적 성능을 증가시키는 것 외에 냉각수의 유로 확보와 냉각수 정체에 의한 핵비등 이탈을 억제한다는 측면에서도 유효한 설계 개선 방향이다.

변경된 모델의 접촉해석 결과, 판 스프링 중심부에 있는 긴 홈의 양 끝단에 상당한 응력집중현상이 관찰되었는데, 이는 유한요소해석의 편의를 위하여 실제 모서리부위에 존재할 호(Round)를 생략한 것에 기인한 것으로 판단되나, 추후에 이 부분에 대한 상세한 해석과 연구가 필요하다고 판단된다.

개선된 모델의 경우 스프링의 판 두께에 따라 스프링 강성 값의 변화가 현저하였다. 이러한 판 두께의 결정은 스프링 특성 뿐 아니라 지지격자체의 횡방향 충격강성을 고려하여 결정되어야 하나, 본 해석을 바탕으로 할 때, 이중판 지지격자의 판 두께는 0.3 ~ 0.35 mm 범위가 적합하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력개발사업의 일환으로 수행되었음.

5. 참고자료

[1] 강홍석 외 4인, 1998, “핵연료봉의 진동모드해석 기법 개발 및 연료봉의 프레팅 마모 손상 해석 방법론 연구”, 한국 원자력 연구소, RR-1850/98

[2] ABAQUS Manual Ver. 5.8