

지지격자 스프링의 형상 최적화

Shape Optimization of a Spacer Grid Spring Structure

윤경호, 송기남, 강홍석, 김형규

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

지지격자 스프링은 연료봉을 축방향 및 횡방향의 정해진 위치로 지지하는 기능을 가지며, 노내에서 연료봉의 열팽창차 및 조사에 의한 성장을 수용하여야 하며, 냉각수의 유동에 의한 연료봉의 손상을 방지하기 위해 연료봉의 탄성 에너지를 흡수하여야 한다. 고유모형 지지격자의 기계적 성능시험을 수행하고 이를 통해 제기된 개선사항에 대해 형상 최적화 방법론을 이용하여 연료봉의 변위에 의하여 발생하는 최대응력을 최소화할 수 있으며, 스프링의 힘 대 변위 선도에서 선형적 탄성영역을 확장할 수 있는 최적의 지지격자 형상을 도출하고자 하였다. 최적화는 유한요소 해석의 선형 구간에서 수행되었기 때문에 최적해는 비선형 해석을 통해 검증하였다. 이러한 최적화과정을 통해 초기 지지격자 스프링보다 성능이 우수한 것으로 나타난 최적의 지지격자 스프링 형상을 도출하였다. 이 구조해석 및 최적화 과정을 위해 상용 코드들을 사용하였다.

Abstract

In pressurized light water reactor fuel assembly, spacer grids support nuclear fuel rods both laterally and vertically. The fuel rods are supported by spacer grid springs and grid dimples that are located in the grid cell. The support system allows for some thermal expansion and imbalance of the fuel rods. The imbalance is absorbed by elastic energy to prevent coolant flow-induced vibration damage. Design requirements are defined and a design process is established. The design process includes mathematical optimization as well as practical design method. The shape of the grid spring is designed to maintain its function during the lifetime of the fuel assembly. A structural optimization method is employed for the shape design. Since the optimization is carried out in the linear range of finite element analysis, the optimum solution is verified by nonlinear analysis. A good design is found and the final design is compared with currently existing designs. Commercial codes are utilized for structural analysis and optimization.

## 1. 서론

오늘날 핵연료의 개발은 고연소도 및 무결함을 달성할 수 있는 방향으로 추진되고 있다. 고연소도 핵연료를 개발하기 위해서는 핵연료봉으로부터 냉각수로의 열전달을 촉진시키는, 즉 핵연료의 열적 성능을 제고하여야 하며 열적 성능의 제고를 위해 일차적으로 고려하는 것이 핵연료봉 주변을 흐르는 원자로 냉각수의 흐름을 개선하는 방법이다. 이를 위하여 지지격자체의 형상변경이 주로 이루어지고 있는데, 예로써 혼합날개의 부착 및 이의 설계 변경 또는 유로채널의 효율적인 구성 등을 들 수 있다. 그러나 이러한 열적 성능의 제고를 위한 방법은 핵연료봉 주변 냉각수의 흐름을 더욱 큰 난류 흐름이 되도록 하는 것을 토대로 하는 것이 대부분이며, 이는 핵연료봉 주변의 냉각수 흐름의 난류화로 인하여 연료봉 유체유발 진동의 원인이 된다. 핵연료봉의 유체유발 진동은 핵연료봉이 지지격자 스프링 또는 덤플과의 접촉면에서 서로 상대 미끄럼 운동하게 하는 요인이 되고 이로부터 연료봉의 접촉면에 국부적인 마멸이 발생하여 핵연료봉이 점진적으로 손상되는 “핵연료봉 프레팅 손상”을 일으키게 한다. 이러한 핵연료봉의 프레팅 손상을 최소화하고자 면접촉이 가능한 지지격자 형상을 도출하였고, 이에 대한 기계적 성능 시험을 통해 나타난 단점을 개선하고자 형상 최적화 방법론을 적용하여 도출된 고유모형의 지지격자 형상을 최적화하였다.

## 2. 지지격자 스프링

### 2.1 개요

서론에서 언급한 바와 같은 핵연료봉의 프레팅 손상을 방지하기 위해 연료봉과 지지격자 스프링이나 덤플 간의 접촉을 등각의 면접촉이 되도록 함으로써 접촉력을 분산시키고, 연료봉의 진동현상을 완화함으로써 연료봉의 프레팅 마멸 발생 가능성을 감소시키고자 하였다. 또한 스프링의 탄성거동 허용범위를 넓게 함으로써 연료의 수명 말까지 연료봉을 건전하게 지지하게 하기 위해 점접촉 또는 선접촉에 의해 연료봉을 지지하는 것보다 더욱 안정되게 연료봉을 지지할 수 있도록 연료봉과 지지격자 스프링이 면접촉이 되도록 하였을 뿐 아니라 이들 지지격자로부터의 돌출부들이 연료봉의 길이방향으로 유동 단면적을 차단하지 않도록 하여 연료봉 주변으로의 균일한 냉각수의 유동을 가능하게 하였다. 이러한 고유모형의 지지격자 스프링은 연료봉과의 접촉면적이 더욱 커져 연료봉과 지지격자 스프링 그리고 덤플간에 작용하는 힘을 분산시킬 수 있어 접촉면에서 첨두응력(peak stress)을 감소시키며, 연료봉에 작용하는 임의의 방향으로부터의 힘 또는 압력장의 변화에도 연료봉을 안정적으로 지지할 수 있도록 하기 위한 것이다.

## 2.2 초기 지지격자 형상

그림 1에 도시한 초기 지지격자 스프링 및 덤플의 형상은 프레팅 마멸에 의한 연료봉의 손상을 방지하기 위해 연료봉의 원주를 둘러싸는 형태로 연료봉을 지지하도록 되어 있다. 이 지지격자 스프링은 이중 아치 구조와 이들의 중앙부를 연결하는 연료봉의 곡률 반경과 동일하게 한 등각의 굴곡부로 이루어진 H형 스프링과, 연료봉과 등각 면접촉을 가능하도록 한 덤플이 연료봉의 원주방향으로 둘러싸고 있는 형태의 면접촉을 하고 있다[1]. 여기에서 이중 아치는 연료봉의 탄성 지지거동을 주로 감당하도록 설계하였으며, 중앙의 등각 굴곡부는 연료봉과의 면접촉이 가능하도록 연료봉과 곡률 반경이 같은 형상을 이루고 있다. 이러한 형상의 스프링과 덤플은 연료봉의 곡률 반경과 거의 같은 형상을 갖도록 함으로써 원자로의 운전 중 연료봉에 임의의 방향으로 힘이 작용하더라도 그 안정된 지지를 가능하게 할 수 있도록 되어 있다. 그러나 초기 지지격자 스프링 형상의 기계적 성능평가 시험결과, 연료봉의 마멸 측면에서는 요구되는 성능을 만족시키고 있으나 스프링의 강성이 연료봉 장입에 의한 스프링의 변형 및 수명 말 최소 요구 스프링력을 고려할 때 개선할 필요가 있음이 발견되었다. 또한 연료봉과 직접 접촉하는 중앙 굴곡부가 연료봉의 변위에 의해 변형되게 될 때 종방향 지지부의 강성이 중앙 굴곡부와 유사하여 연료봉에 의한 변형이 발생되게 되면 연료봉과 접촉하는 중앙 굴곡부가 수직방향의 변형 뿐 아니라 뒤틀리게 되는 변형이 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 횡방향의 뒤틀리는 변형은 연료봉과 미소한 미끄럼을 발생시키게 되고 이로 인해 핵연료봉 프레팅 손상의 원인이 될 수 있다고 판단되었다.

## 2.3 최적화된 지지격자 형상

초기 지지격자 형상에서 나타난 단점을 개선하기 위해 그림 2와 같이 연료봉과 직접 접촉하지 않는 세로방향의 지지부에 적절한 굽힘가공을 하여 이 종방향 지지부가 중앙 굴곡부에 비해 강성을 상대적으로 작게 하는 최적의 형상을 갖게 하여 핵연료봉과 접촉하는 스프링 접촉부에서의 변위를 세로방향의 지지부가 감당하고 연료봉과 직접 접촉하는 중앙 굴곡부는 단일방향의 굽힘만이 존재하도록 하였다. 핵연료봉과 지지격자 스프링이나 덤플간의 접촉을 연료봉에 의한 임의 방향의 운동에도 초기의 등각 면 접촉형상을 일정하게 유지하게 함으로써 핵연료봉과 스프링과의 접촉에 의한 프레팅 마멸 발생 가능성을 감소시키게 하였다. 그리고 연료봉과 접촉하는 중앙 굴곡부 형상을 최적화하여 연료봉과 스프링이 초기 접촉형상을 유지할 뿐만 아니라 접촉압력(contact pressure)의 크기 및 분포상태를 개선하여 연료봉과 스프링간의 접촉에 의한 프레팅 마멸 저항성이

제고되도록 하였다. 이러한 지지격자 스프링 형상의 최적화는 상용 최적화 코드인 GENESIS[2]를 사용하여 스프링 형상을 결정하는 주요 부위의 치수를 설계변수들로 설정하고 일정한 범위에서 요구되는 최소 스프링력을 만족하면서, 최대 등가응력을 최소화 하는 최적화를 수행하였다. 이를 통해서 안정적인 핵연료봉의 지지를 기하고 이로 인해 핵연료봉과 스프링간의 미끄러짐 혹은 문지름에 의한 프레팅 마멸 발생 가능성을 더욱 저감시키는 것을 목표로 한 것이다. 또한 핵연료봉과 직접 접촉하지 않는 세로방향의 지지부들을 최적화하여 스프링의 특성곡선인 힘 대 변위선도에서 스프링의 탄성거동 영역을 확장함으로써 핵연료의 제조 시 발생시킬 수 있는 스프링의 과다한 소성변형 발생 가능성을 감소시킴과 동시에 노내에서 핵연료봉 지지조건이 변화에도 핵연료의 수명 말까지 건전한 핵연료봉 지지를 가능하게 하기 위한 것이다. 그림 2는 단순 굽힘 형상의 지지부 구조와 이들의 중앙부를 연결하는 연료봉의 곡률 반경보다 약간 큰 곡률을 갖게 한 등각의 굴곡부로 이루어진 최적화된 스프링과 이 굴곡부와는 달리 연료봉의 곡률과 거의 동일한 곡률을 갖게 하여 등각 면접촉을 가능토록 한 덩플이 연료봉의 원주방향으로 둘러싸고 있는 형태의 면접촉을 개략적으로 나타내고 있다. 또한 연료봉과 직접 접촉하는 중앙 굴곡부의 형상을 원형 또는 아치 형상을 갖게 함으로써 중앙 굴곡부와 연료봉과의 접촉압력을 사각형상을 가진 굴곡부에 비해 균일하게 분포하도록 하였다.

### 3. 지지격자 스프링에 대한 유한요소해석

#### 3.1 개요

지지격자 스프링에 대한 특성곡선 및 접촉해석을 위해 상용 전처리 프로그램인 I-DEAS Ver. 7m1[3]을 사용하여 유한요소 해석모델을 작성하고 지지격자 스프링의 변위가 탄·소성 영역에서 거동하므로 인장시편을 제조하고 이의 인장시험[4]을 통한 시편 재료의 탄·소성 물성을 적용하였다. 또한 스프링 특성시험에서 시편이 처한 실제 경계조건을 모사하도록 경계조건을 적용하였고, 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS/Standard Ver. 5.8[5]을 사용하여 비선형 탄·소성 응력해석을 수행하였다.

#### 3.2 유한요소 해석모델 및 경계조건

해석모델에 사용된 요소는 시편의 두께가 0.457 mm이며, 지지격자의 전체 높이가 35 mm 이상으로 모델의 전체 크기와 비교하면 박판이라 가정할 수 있다. 또한 기하학적 형상에 비해 가해지는 변위가 비교적 클 것으로 예상되어 대변형 해석의 정확성이 높은 것으로 알려진 4-절점 쉘요소(S4R)를 사용하였고, 연료봉은 강체요소(R3D4)를 사용하여

연료봉의 직경과 동일한 곡률을 갖도록 모델링하였다. 이 강제요소는 실제 연료봉과 접촉하는 스프링부와의 접촉을 정의하고 이 강제요소의 참조절점(reference node)에 적용되는 하중(변위)과 변위방향의 자유도를 구속한 양 에지에서의 반력 데이터를 특성시험에서와 마찬가지로 ASCII형태로 저장하였다[6]. 지지격자 지지부의 양 에지는 실제 특성시험시 한 에지에서 약 0.6 mm정도를 상하 고정치구에 물리게 한 후 고정치구의 뚜껑을 6개의 나사로 체결하기 때문에 변위뿐 아니라 기울기도 구속되게 된다. 따라서 이 경계조건을 단순한 의미의 고정 경계조건으로 간주할 수 있다. 연료봉으로 모델링한 강제요소는 이 시편에 변위를 가하게 되는 z-축 변위 자유도 외에는 모두 구속하였다. 해석모델의 절점 수는 1048개이며, 요소 수는 696개로 모델을 작성하였다. 작성된 해석모델은 그림 1과 같으며, 요소의 크기를 1 mm로 하여 자유메시(free mesh)를 하였다. 한편, 최적화된 H형 지지격자 스프링의 해석을 위해 초기 지지격자를 위한 해석모델 작성에 사용한 것과 동일한 요소를 사용하였다. 해석모델의 절점 수는 1821개이며, 요소 수는 1432개로 모델을 작성하였다. 해석방법 및 절차는 동일하다. 작성된 해석모델을 그림 2에 나타내었으며, 요소의 크기를 연료봉과 접촉하는 면적은 접촉응력의 해석을 위해 0.05 mm로 하였고, 그 이외의 면은 1 mm로 하여 강제 메시(mapped mesh)를 하였다.

### 3.3 해석결과

초기 스프링의 경우 연료봉의 변위가 0.3 mm에 도달했을 때의 스프링의 변형 전, 후의 형상을 그림 3에 나타내었다. 이 그림에서 종방향 지지부는 연료봉의 변위에 의해 수직방향의 변형 뿐 아니라 지지부가 뒤틀리는 방향의 변형도 동시에 발생함을 알 수 있다. 한편, 최적화 스프링의 경우 연료봉의 변위가 0.3 mm에 도달했을 때의 스프링의 변형 전, 후의 형상을 그림 4에 나타내었으며, 최적화 스프링의 변형은 연료봉에 변위가 발생하면 종방향의 지지부 뿐만 아니라 연료봉과 접촉하는 굴곡부 역시 수직방향의 변형만이 발생하게 된다. 해석모델의 타당성을 검증하기 위해 특성시험을 통해 얻은 하중 대 변위선도와 해석에서 얻은 결과를 그림 5에 나타내었으며 이 그림에서 시험결과와 비교하여 보면 스프링 특성의 선형구간만을 선택하여 선형 보간(linear fitting)을 통해 얻은 강성은 178 N/mm로 특성시험에서 얻은 167 N/mm와 아주 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 시험결과와의 차이는 약 6.6 % 정도인 것으로 나타났다. 따라서 스프링의 특성 해석을 위한 모델 및 해석방법은 그 타당성이 있음을 알 수 있다.

최적화된 지지격자 스프링의 유한요소 해석결과를 그림 6에 나타내었으며 이 그림에서 스프링 특성의 선형구간만을 선택하여 선형 보간을 통해 얻은 강성은 216 N/mm로

나타났다. 이것은 초기 스프링 형상의 178 N/mm에 비해 스프링의 강성이 약 21 % 증가한 것이며, 스프링의 선형 구간도 변위 0.35 mm 이상에서 비선형 특성을 나타내므로 초기 스프링에 비해 선형구간이 확장되었음을 알 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 지지격자 스프링의 특성 해석결과 비교

최적화된 지지격자 스프링의 강성이 초기 형상에 비해 커진 것은 핵연료의 제조공정 중 연료봉의 삽입에 의한 스프링의 변형 및 연료의 수명 말까지 건전한 연료봉의 지지를 고려하여 설정된 0.4 mm의 변위에서 40 N 이상의 특성을 갖도록 설계하였다. 그림 7 및 8에는 이 변위에서의 지지격자 스프링에 분포하는 von Mises 등가응력의 분포 및 등가 소성변형률의 분포를 나타내었다. 이들 등가응력 및 소성변형률의 최대값은 변위가 증가함에 따라 변하게 되나, 등가응력의 경우는 초기 스프링이나 최적화된 스프링이나 큰 차이를 나타내지는 않았다. 이것은 스프링의 변위가 탄성영역에 국한되지 않고 소성영역으로까지 변형이 발생하게 되고 이로 인해 국부적인 영역에서 재료의 항복응력 이상의 등가응력을 나타내고 있다. 그러나 등가 소성변형률은 초기 스프링에 비해 최적화된 스프링 형상의 경우 최대 소성변형률이 작게 나타났다. 이것은 연료봉 지지측면에서는 보다 우수한 지지성능을 나타낼 것으로 판단된다. 그림 9에는 스프링의 변위에 따른 최대 등가응력 및 최대 등가 소성변형률의 변화를 나타낸 것이다.

### 4.2 지지격자 스프링의 접촉응력 해석결과 비교

지지격자 스프링의 접촉응력은 이 스프링과 연료봉과의 접촉에 의해 발생하게 되며, 이는 연료봉의 프레팅 마멸과 밀접한 관계가 있다. 따라서 접촉응력을 감소시키고 또한 연료봉과의 접촉응력의 분포가 원형 또는 타원형이 되도록 함으로써 프레팅 마멸에 대한 저항성을 제고시킬 수 있게 된다. 초기 지지격자 스프링의 접촉응력의 분포는 그림 10과 같으며, 이 그림을 살펴보면 초기 스프링 형상의 경우 접촉응력이 국부적으로 분산되게 되고 이것은 연료봉과의 접촉에 의한 마멸량을 크게 할 수 있다. 그림 11은 초기 지지격자 스프링 형상의 시편에 대한 마멸시험 결과를 나타낸 것으로 축방향 진폭을 갖고 일정한 주기로 정해진 시간 경과후의 마멸 윤곽을 나타낸 것이다[7]. 이 그림을 보면 연료봉에 발생하는 마멸형상은 접촉면의 전체를 보면 국부적으로 마멸이 집중되게 되고 이는 과도한 마멸의 발생으로 연료봉 손상을 일으킬 가능성이 높아지게 한다. 프레팅 마

멸시험을 통해 얻은 연료봉 마멸의 최대 깊이는 약 3  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 그러나 최적화 후의 지지격자 스프링 형상은 이 접촉응력이 그림 10의 (b)와 같이 원형에 가까운 형상을 갖는 것으로 나타났으며, 이는 접촉응력의 최대치를 감소시키게 된다. 이러한 최적화과정을 통해 개선된 지지격자 형상을 갖는 시편을 제조하여 이에 대한 프레팅 마멸시험을 수행할 예정으로 있다.

## 5. 결론

지지격자 스프링의 기계적 성능을 향상시킬 수 있도록 지지격자 스프링의 형상 최적화를 수행하였다. 최적화는 구조적 최적화를 수행하였으며, 이를 위한 기하학적 설계변수들을 정의하고, 목적함수로는 연료봉에 접촉하는 부분의 최대 등가응력을 감소하도록 하였다. 요구되는 최소 스프링력과 스프링 강성을 구속조건으로 하고 이를 만족하는 최적의 스프링 형상을 도출하였다. 형상 최적화를 통해 얻은 지지격자 스프링은 요구되는 기계적 성능을 만족하는 것으로 나타났으며, 접촉부에서의 상대적인 횡방향 변위를 최소화하여 연료봉과의 접촉에 의한 프레팅 마멸 저항성이 초기 지지격자 스프링보다 우수할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. K. H. Yoon et al., "Spacer Grid with H-Spring for Fuel Rods for Use in Nuclear Reactor Fuel Assemblies", US Patent No. 6167105, 2000.
2. GENESIS Ver. 6.0 User's Manual, VR&D, Colorado Springs, CO, USA, 2000.
3. "I-DEAS User's Manual", Ver. 7m1, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA, 1999.
4. ASTM E8M-99, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 1999.
5. "ABAQUS User's Manual", Ver. 5.8, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., RI, USA, 2000.
6. H. K. Kim and K. H. Yoon, "Analysis of Fuel Grid Spring by Characterization Test and Finite Element Method", ICONE-8, 1999.

7. 김형규 외 3인, “핵연료봉 프레팅마멸의 시험 분석”, KAERI/TR-1702/2000, 한국원자력연구소, 2000.

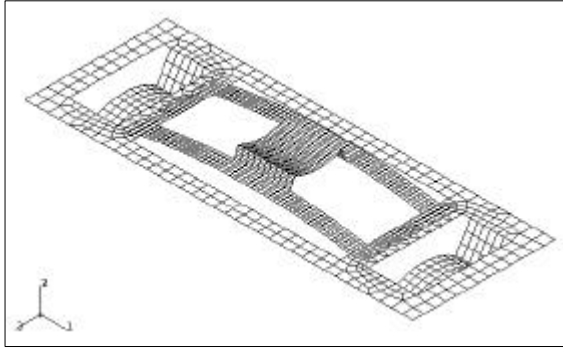


그림 1. 초기 지지격자 스프링의 형상

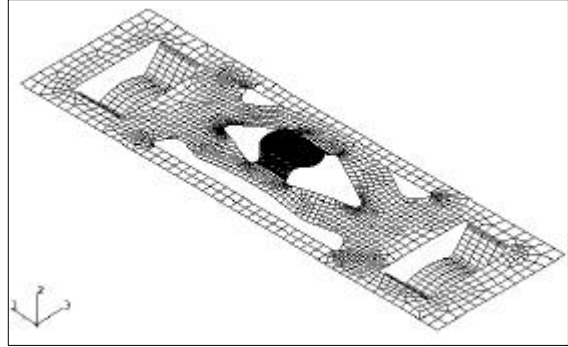


그림 2. 최적화된 지지격자 스프링의 형상

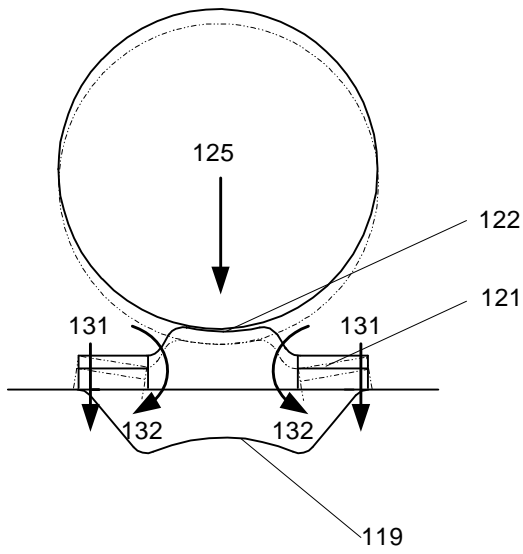


그림 3. 초기 지지격자 스프링의 변형형상

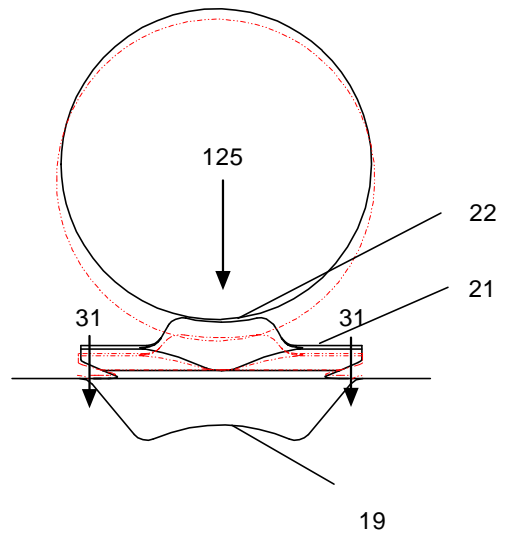


그림 4. 최적화된 지지격자 스프링의 변형형상



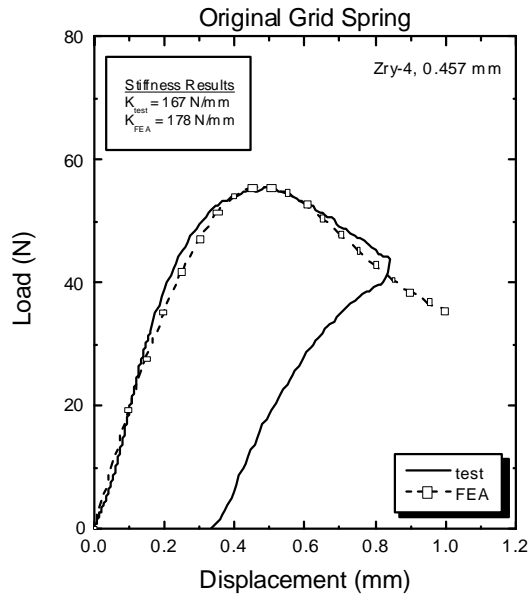


그림 5. 초기 지지격자 스프링의 특성시험 및 해석결과 비교

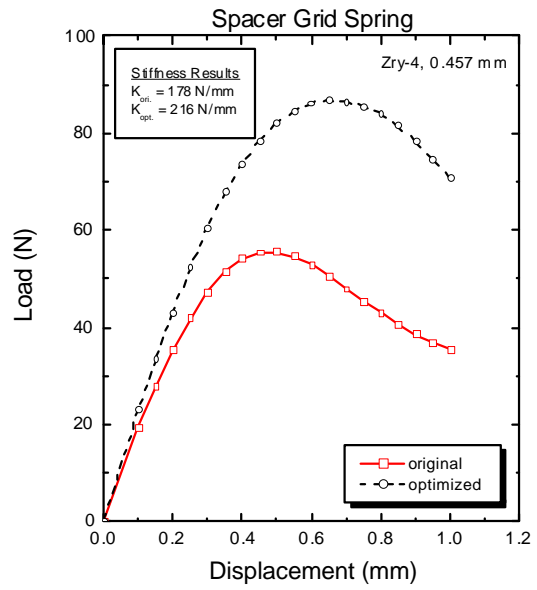
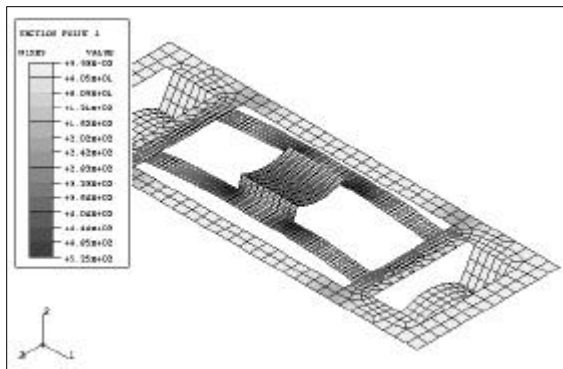
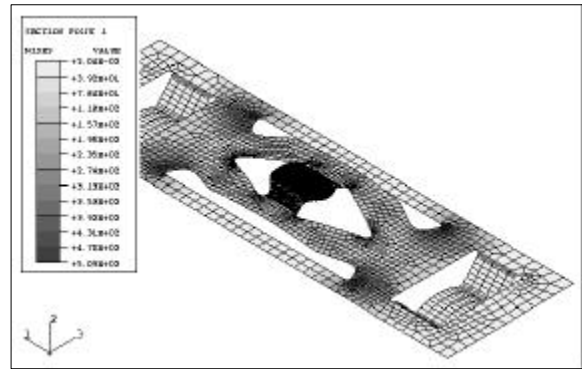


그림 6. 초기 및 최적화된 지지격자 스프링의 특성곡선 비교

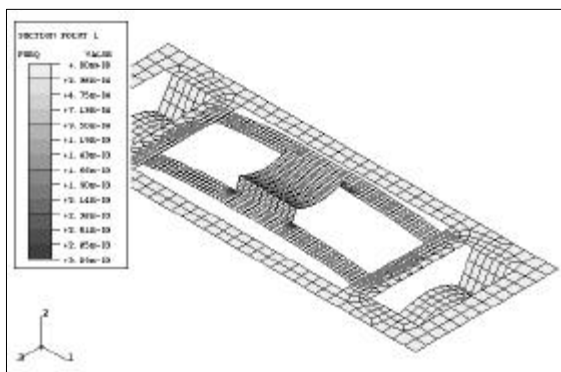


(a) 초기 스프링

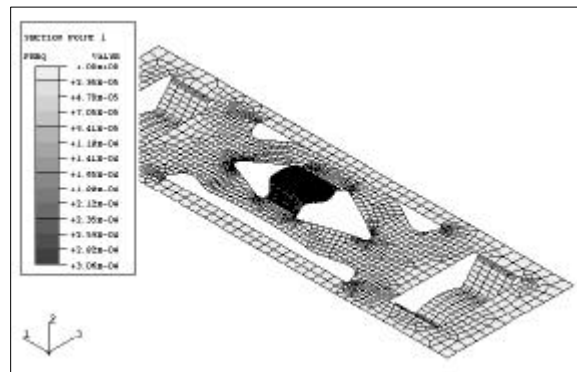


(b) 최적화 스프링

그림 7. 지지격자 스프링의 von Mises 등가응력 비교



(a) 초기 스프링



(b) 최적화 스프링

그림 8. 지지격자 스프링의 등가 소성변형률 비교

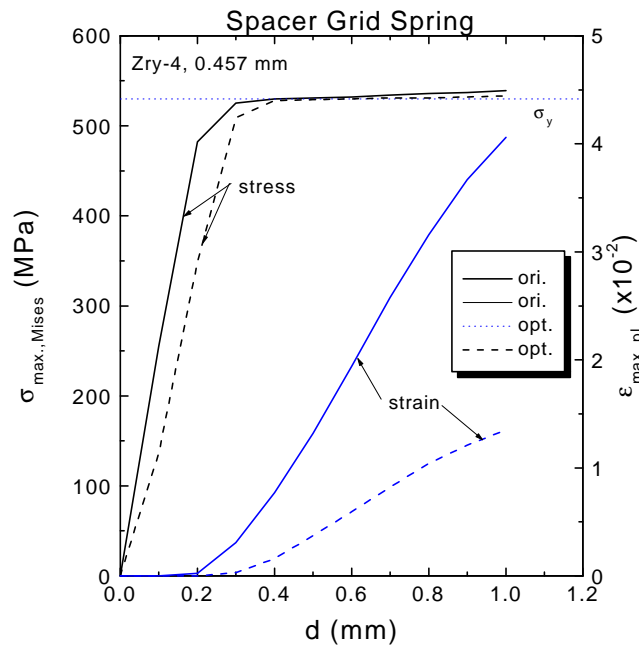
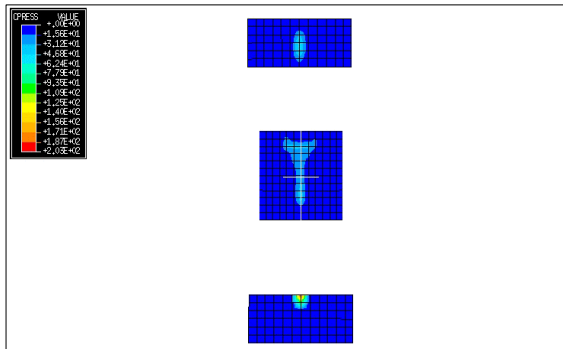
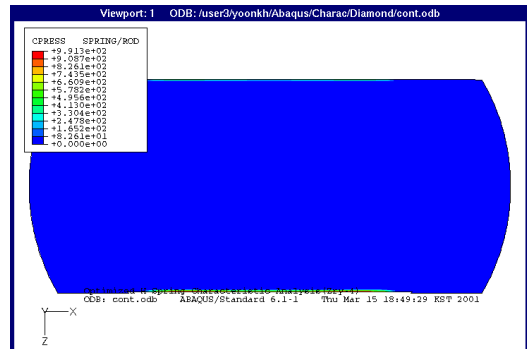


그림 9. 초기 및 최적화된 지지격자 스프링의 최대 von Mises 등가응력 및 최대 소성변형률 비교



(a) 초기 지지격자



(b) 최적화된 지지격자

그림 10. 지지격자 스프링의 접촉압력(contact pressure) 분포

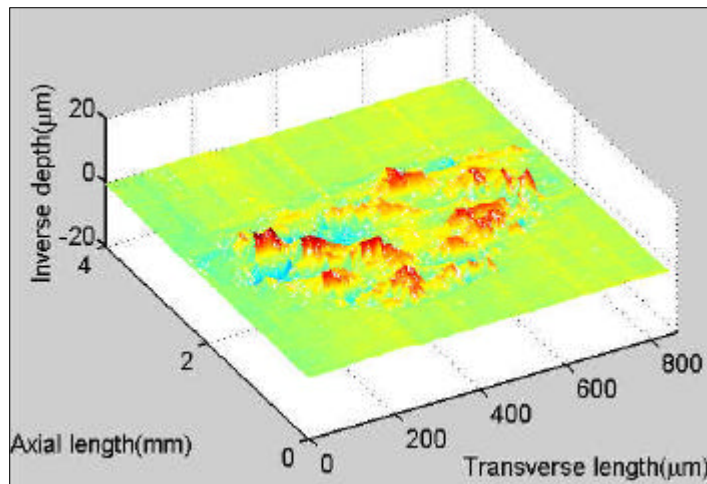


그림 11. 초기 지지격자 스프링의 축방향 프레팅 마멸시험에 의한 마멸 윤곽