

# 접촉응력해석을 통한 핵연료 지지격자 구조물의 최적설계

장인권\* · 광병만\*\* · 송기남\*\*\*

## Optimal Design of a Nuclear Fuel Rod Support Structure Based on Contact Stress Analysis

In Gwun Jang, Byung Man Kwak and Kee Nam Song

**Key Words :** Spacer grid, optimal design, contact

### Abstract

An optimal design method is adopted for a spacer grid in nuclear power plant. It is made of punched sheet metal process, functioning as springs and dimples supporting fuel rods. For stress analysis of the assembled fuel rod support, a typical cell out of the repeated pattern in the assembly is modeled using 4-node shell elements. A commercial code, ABAQUS, is used for detailed analysis of contacting phenomena with friction. For the optimization, design variables are taken from geometric parameters representing the shape of the bent leaf spring part and mating contact region with fuel rod. Objective function is considered in relation to mechanical functions and durability. Maximum von Mises stress is considered in relation to constrained contact stress.

### 기호설명

- $h_i(\mathbf{b})$  i-th equality constraint equation
- $g_j(\mathbf{b})$  j-th inequality constraint equation
- $\mathbf{b}$  n-dimensional vector of unknowns
- $n_{hc}$  Number of equality constraints
- $n_{gc}$  Number of inequality constraints
- $NID$  Number of interested nodes
- $\sigma_y^i$  von-Mises stress at i-th node

### 1. 서론

우리나라는 현재 상당한 양의 전력을 원자력 발전에 의존하고 있고, 또한 앞으로도 이런 경향이 오랫동안 지속될 것으로 예상되고 있다. 그렇기 때문에 원자력 발전의 제반 기술에 대한 국산

화가 중요하다고 할 수 있다. 특히 기술전쟁시대라 불리는 요즘은 어느때보다 더욱 기술 자립이 요구되는 실정이다. 현재 원자력 발전과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있으며 이런 연구를 바탕으로 점차적으로 국산화가 이루어지고 있지만, 핵연료봉 지지격자의 경우 핵연료봉의 안정적 지지를 위해 상당히 중요한 역할을 맡고 있음에도 아직 국산화가 되지 않고 있다. 그동안 국내 원전에서 사용되고 있는 지지격자체는 전량 수입된 지지격자판을 조립하여 국내에서 용접하거나 아예 지지격자체 완제품을 수입하여 핵연료 부품으로 사용하여 왔다.

그러므로, 본 연구에서는 이러한 요구에 맞춰 최적설계기법과 접촉해석을 도입하여 지지격자에 대한 최적설계를 수행하고자 한다. 지지격자의 연료봉 지지형상은 연료봉의 지지거동 향상 및 건전성 확보에 상당한 영향을 끼치므로, 지지격자의 형상최적설계는 반드시 접촉현상을 규명하면서 이루어져야 한다.

본 연구의 목적은 핵연료의 핵심구조부품 중 하나인 지지격자에 대해 연료봉과의 접촉을 고려하여 형상최적설계를 수행하는 것이다. 그러므로,

\* KAIST 기계공학과 박사과정

\*\* KAIST 기계공학과 교수

\*\*\* 원자력 연구소 소속

두가지로 나누어 본 연구를 수행하고자 한다. 첫 번째는 지지격자에 대한 유한요소해석을 통해 지지격자의 응력분포와 연료봉과의 접촉현상을 파악하는 것이며, 두번째로는 위의 해석결과에 근거하여 지지격자의 최적설계를 수행하는 것이다. 본 논문의 2 장에서는 이를 위하여 지지격자의 역할과 해외에서의 개발방향에 대해 알아보았으며 3 장에서는 지지격자의 모델링에 적합한 요소를 선택한 다음 단순화 모델링을 하여 실험을 통해 얻어진 스프링력 곡선과 비교해보았다. 그런 다음 지지격자 사이의 대칭 및 반복구조를 이용하여 거기에 맞는 경계조건을 주어 지지격자의 상세 모델링을 하였다. 그런 후 상세 모델링을 통해 지지격자에서의 응력분포와 접촉응력을 알아보았다. 4 장에서는 상용프로그램과의 연계를 통한 최적설계 방법론에 대해 알아본 후 목적함수를 선정하여 지지격자에 대한 최적설계를 수행하였다. 끝으로 5 장에서는 앞의 결과를 검토하고 본 연구의 결론을 기술하였다.

## 2. 지지격자에 대한 조사 및 연구방향

### 2.1 지지격자의 기능

지지격자체는 원자로 내에서 핵연료봉을 수직/수평 방향으로 제 위치에 있도록 고정시켜주는 역할과 연료봉 사이에 수로를 형성하도록 하는 역할, 그리고 지진 등의 비정상 운전시 집합체 사이의 횡방향 하중경로를 제공하는 역할을 맡고 있다.

그림 1 은 지지격자의 형상을 보여주고 있다. 실제의 경우는 이런 지지격자가 17\*17 개가 모여 하나의 지지격자체를 형성한다. 여기서 덤플과 스프링은 핵연료봉을 고정시키는 역할을 수행한다. 단, 덤플은 스프링에 비해 상당히 큰 강성을 지니고 있으므로 핵연료봉 장전시 변형이 거의 일어나지 않는다.

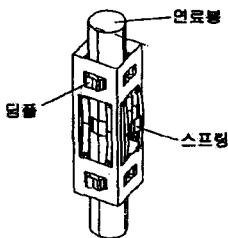


그림 1 Shape of unit supporting grid

### 2.2 지지격자에 대한 연구방향

지금까지 지지격자체는 크게 3 가지 관점에서 개발이 진행되어 왔다. 즉, 지지격자 재질의 관점, 성능향상을 위한 지지격자의 형상개선의 관점, 그리고 제조성 및 품질향상을 위한 제조방법 개선의 관점에서 개발되어 왔는데 본 연구에서는 이 중 형상개선의 관점에서 접근하고자 한다.

성능 향상을 위한 지지격자의 형상개선 관점에서 보면 연료봉 수로에서 열전달을 촉진시키려는 냉각성능 개선과 연료봉의 기계적 손상 감소가 있다. 이중 냉각성능 개선과 관련된 사항으로 냉각수의 혼합을 촉진시키기 위한 혼합날개를 들 수 있다. 그리고, 연료봉의 기계적 손상을 감소시키려는 시도로는 연료봉을 지지하는 지지격자 스프링과 덤플의 형상을 변경하여 연료봉과의 접촉면적을 증가하도록 하므로써 접촉면에서의 국부접촉 응력치가 감소할 수 있도록 하거나(Westinghouse사의 Performance+연료 및 Simense/KWU 사의 FOCUS 연료, ABB-CE 사의 TURBO 연료, Mitsubishi 사 연료 등), 지지격자 스프링과 지지격자판 기저부의 가공방법을 다르게하여 중성자 조사에 따른 조사 성장량의 차이로 지지격자 스프링이 연료봉을 지속적으로 지지할 수 있도록 하여 마멸을 줄이려 하는 등(ABB-CE 사의 TURBO 연료)의 개선이 시도되고 있다. 그러나, 아직 지지격자에서 일어나는 프레팅 마멸 기구가 정확히 알려지지 않고 있고, 또한 프레팅 마멸 손상을 극복하기 위해 특별히 개발된 지지격자체도 없는 상태이다. 한편 Mitsubishi 사의 스프링은 현존 스프링과 비슷한 스프링력을 갖고 있으면서도 스프링에서의 응력은 70%이하로 발생하여서 응력부식균열(stress corrosion cracking)로 스프링이 손상될 가능성을 크게 줄였다.(1)

## 3. 지지격자 모델링

### 3.1 요소선택 및 단순 모델 해석

ABAQUS 에서 제공되는 요소중 쉘요소인 S4R 을 이용하여 지지격자의 모델링을 하였다. 이 요소는 두꺼운 쉘이나 얇은 쉘에 모두 적용할 수 있는 범용성을 가지고 있다.

모델의 타당성을 비교하기 위해 요소의 수가 203 개인 모델을 바탕으로 스프링력 곡선을 구한 다음 이것을 지지격자 스프링력 실험값과 비교하여 보았다. 이 곡선과 실험값을 비교해보면 그래프의 기울기가 거의 같은 등 유사성을 찾을 수 있다.(그림 2) 그런데, 그래프를 살펴보면 실험값과

어느 정도의 오차가 있다는 것을 알 수 있는데 이것은 실험시의 정확한 경계조건을 알 수 없어서 유사한 경우를 추정하여 모델링을 하였기 때문이다. 그리고, 스프링의 변위값이 큰 부분에서는 실험값의 기울기가 점차적으로 줄어드는데 반해 유한요소모델의 경우는 기울기에 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 유한요소해석시 선형해석을 하였기 때문이며 실제적으로 이 정도의 변형에서는 비선형해석을 필요로 하기 때문이다.

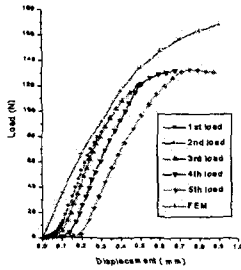


그림 2 Spring displacement-force diagram

### 3.2 경계조건파악 및 상세 모델링

지지격자체의 전체적인 형상은 그림 3 과 같다.

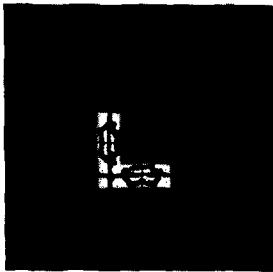


그림 3 Shape of supporting grid

먼저 경계조건들을 찾기 전에 몇가지 가정을 하기로 한다. 첫째, 핵연료봉을 장전한 후 핵연료봉 간에는 상대적인 운동이 없다고 가정한다. 즉, 핵연료봉들의 위치가 고정되어있다고 본다. 실제적으로도 원전 정상운행시 핵연료봉의 최대진폭은 0.2mm 정도로 큰 거동양상을 보이지 않으므로 핵연료봉 사이에 상대적인 운동이 없다고 가정하여도 문제가 없을 것이다. 둘째, 핵연료봉은 지지격자에 비해 상당히 큰 강성을 가지고 있다고 가정한다. 이것은 핵연료봉을 강체로 가정하여 핵연료봉의 변형을 제한함으로써 최소기본구조에서의 반복성과 대칭성을 부여하였다. 세째, 전체적인 지지격자체는 무수히 많은 지지격자들로 이루어져 있어서 끝단효과(end effect)를 무시할 수 있다고

가정한다. 실제로 지지격자체는 17\*17 개의 지지격자로 이루어져 있으므로 가운데 부분에서는 이런 가정이 잘 맞아 들어갈 것이다. 위의 가정들을 이용하면 지지격자는 그림 3 에서의 밝은 부분이 반복적으로 배열되어 구성되어 있음을 알 수 있다. 이런 반복패턴을 이용하여 지지격자의 경계조건을 구한 다음 모델링을 하였다.(그림 4)

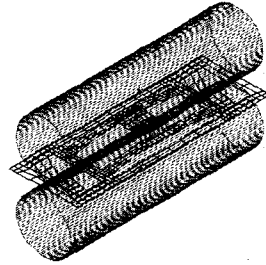


그림 4 Modeling of supporting grid

이 모델에 대한 응력 및 접촉해석결과는 그림 5 에 나타나 있다.

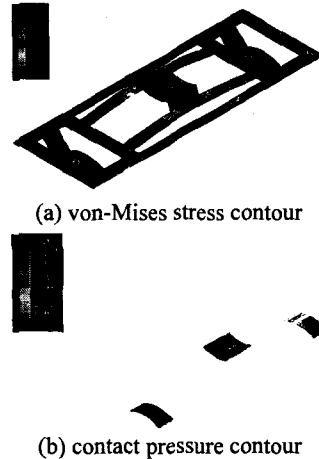


그림 5 Analysis of supporting grid

## 4. 지지격자에 대한 최적설계

### 4.1 상용 유한 요소 프로그램을 이용한 형상최적설계 과정

본 연구에서는 지지격자의 형상최적설계를 위해 상용 유한 요소 프로그램으로 ABAQUS Version 5.7 을, 최적설계 프로그램으로는 Vanderplaats 연구실에서 개발한 DOT(design optimization tools) Version 4.0 을 연계하여 최적화 과정을 수행하였다.(2) 이 경우 상용 유한 요소 프로그램에서 얻

은 자료는 직접 사용할 수 없으므로 상호 프로그램간의 데이터 교환은 파일에 읽고 쓰는 방법으로 수렴조건을 만족할 때까지 아래의 과정을 반복적으로 수행하였다.

- (1) 구조물의 초기 형상과 형상 설계 변수의 초기값을 설정한다.
- (2) 주어진 형상 설계 변수들로부터 구조물의 형상을 결정하여 유한 요소 모델을 구성한다.
- (3) 상용 유한 요소 프로그램을 이용하여 현 상태의 구조물을 해석한다.
- (4) 설계 변수들을 독립적으로 섭동시켜 각각의 섭동된 설계변수에 대하여 구조해석을 수행한다.
- (5) (3)번과 (4)번에서 구한 정보를 이용하여 각 설계 변수에 대한 목적 함수 및 제한 조건들의 민감도를 구한다.
- (6) 위에서 구한 민감도 값과 최적설계 프로그램을 이용하여 새로운 형상 설계 변수들의 값을 구한다.
- (7) 수렴조건을 만족하면 모든 과정을 마치고, 그렇지 않으면 (2)-(6)의 과정을 다시 반복한다.

#### 4.2 스프링에 걸리는 등가응력과 접촉부에서의 접촉응력값을 고려한 최적설계

지지격자에 대한 목적함수의 선정에 있어서 유의해야 할 점은 지지격자란 연료봉을 안정적으로 지지하기 위해 존재한다는 것이다. 우선 연료봉의 안정적 지지를 위해서 고려할 사항으로 지지격자 스프링에 걸리는 응력을 들 수 있다. 국내 고리 2 호기 및 브라질 Angra-1 에서 발생하였던 핵연료봉 프레팅 마모는 지지격자 스프링 형상에 급격한 곡률 반경을 갖는 부위가 있어서 이 부분에서 소성변형이 쉽게 발생하여 핵연료봉 지지력이 소실되었기 때문이다. 즉, 이 사례는 스프링 형상에 걸리는 응력이 목적함수가 될 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 예는 Siemens/KWU 사가 개발한 FOCUS 핵연료에서도 알 수 있다. 이 제품은 응력집중 부위가 가능한 존재하지 않도록 지지격자 스프링의 형상을 설계함으로써 노내 거동 중 소성변형이 일어날 수 있는 가능성을 억제하였다.(1) 또한, 2 장에서도 언급한 바 있듯이 지지격자에 걸리는 응력값이 커질수록 응력부식균열로 스프링이 손상될 가능성이 커지게 된다. 그러므로, 스프링 형상에 걸리는 등가응력은 설계시 중요한 고려 요소가 될 수 있다.

또한 고려해야 할 사항으로 접촉부에서의 접촉 응력이 있다. 접촉부에서의 응력값이 너무 크면 마멸이나 응력부식균열이 심하게 일어나므로 접촉

응력값을 최소화할 수 있도록 지지격자의 접촉부와 핵연료봉 사이의 초기 간극을 조정해 주어야 한다.

본 연구에서는 스프링에 걸리는 응력과 접촉부에서의 접촉응력값을 모두 고려한 최적설계를 수행하고자 한다. 최적설계 방법은 스프링에 걸리는 응력값을 목적함수로 두고 접촉응력값을 제한 조건으로 두기로 한다. 설계변수로는 그림 6 에서와 같이 설정된 스프링 형상에 관련된 설계변수 2 개(하나의 곡률반경과 하나의 내각)와 각각의 스프링과 덤플 접촉부의 곡률반경 3 개(그림 7), 그리고 가상설계변수를 잡을 수 있다. 이 문제의 경우는 최대등가응력값을 최소화하는 것이므로 전형적인 최대응력최소화 문제가 된다. 그러므로, 가상설계변수  $b_{n+1}$  를 두어 아래와 같은 등가의 표준 형태로 만들어 준다.

$$\text{Minimize } b_{n+1}$$

$$\text{subject to } \sigma'_y \leq b_{n+1}, \text{ for } i=1, \dots, NID$$

$$h_j(\mathbf{b}) = 0, \text{ for } j=1, \dots, nhc$$

$$g_k(\mathbf{b}) \leq 0, \text{ for } k=1, \dots, ngc$$

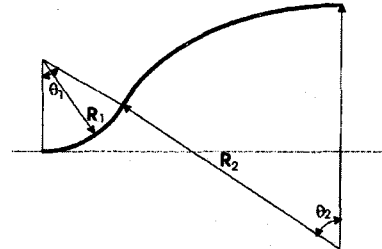


그림 6 Shape of spring

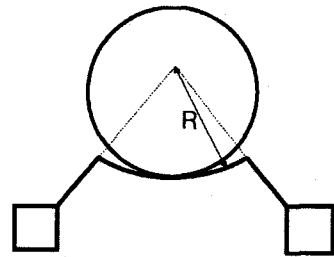


그림 7 Shape of contact part

표준형태로 바뀌어진 설계식을 보면 설계변수가 6 개, 제한조건이 463 개이다. 제한조건 중 108 개는 가상설계변수로 인한 관심절점에서의 등가응력에 대한 제한조건이고, 351 개는 접촉응력값에 대한 제한조건이며, 나머지 4 개는 스프링 형상에

대한 기하학적 제한조건이다. 여기서 접촉응력에 대한 제한조건값으로 140MPa 을 설정하였다.

최적설계를 수행하기 전과 수행한 후의 결과를 비교해보면 그림 8 와 같다. 여기서 사용된 요소는 4 절점 감쇠셀요소(S4R) 1175 개이고, 절점의 개수는 1891 개이다. 최적화된 결과를 살펴보면 최적화 되기 전에는 스프링의 접촉부 근처에서 상당히 큰 값의 응력이 발생하였으나, 최적화 후에는 응력 분포가 상당히 고르게 되어졌다는 것을 알 수 있다. 각각의 경우 최대등가응력을 비교해 보아도 설계 전에는 756.5MPa 이었는데, 설계 후에는 564.2MPa 로 25.4%가 감소하였다. 또한, 접촉응력의 경우에도 설계 전에 202.6MPa 이던 것이 설계 후에는 140.0MPa 로 30.9%가 감소하였다. 자세한 최적설계 결과는 그림 9 에 나타나 있다.

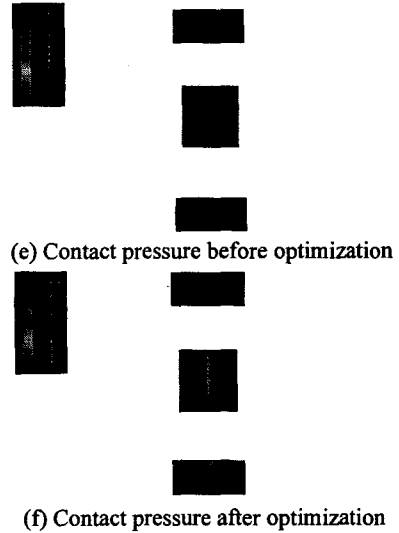
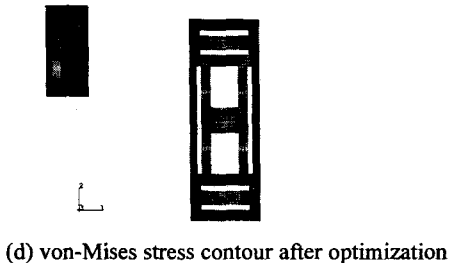
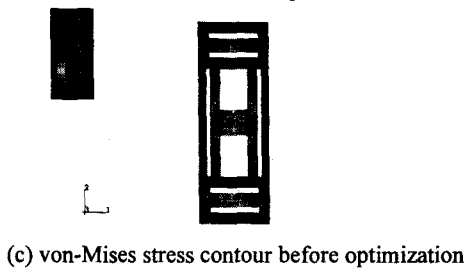
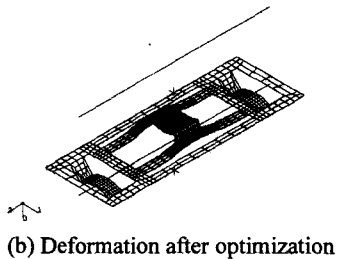
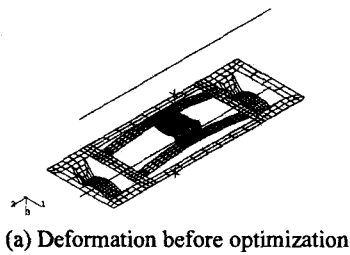


그림 8 Optimum results for maximum von-Mises and contact stress minimization problem

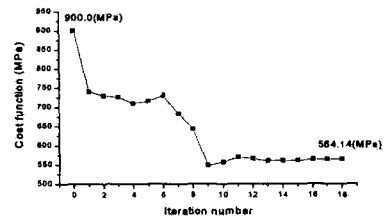


그림 9 History of cost function of maximum von-Mises stress and contact stress minimization problem

## 5. 결론

본 연구에서는 아직 국내에서 이루어지지 않고 있던 핵연료봉 지지격자의 최적설계를 접촉기법을 도입하여 수행해 보았다. 먼저 최적설계를 수행하기 전단계로 경계조건의 반복성과 대칭성을 이용하여 지지격자체의 모델을 구성해보았다. 이 모델을 이용하면 지지격자판 하나로 지지격자에 대한 해석을 할 수 있기 때문에 보다 효율적이고 빠른 최적설계를 수행할 수 있었다. 지지격자의 최적설계를 위해 스프링에 걸리는 등가응력과 접촉부에 걸리는 접촉응력을 동시에 고려하여 보았다. 위의 경우 최대값을 최소화하는 것이므로 가상설계변수를 도입하였다. 최적설계 수행 후 목적함수에서 상당량의 개선이 이루어졌다. 실제문제에 적용을 하기 위해서는 이 설계안에 대한 실

힘이나 검증이 필요할 것이다.

## 후 기

본 연구는 원자력 연구소의 위탁으로 과학기술부의 원자력 연구 개발 사업인 “경수로용 신형 핵연료 개발 과제”의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- (1) 핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향, 한국원자력연구소, 1997
- (2) 박수한, “경계형상표현기법에 따른 구조물의 형상최적설계 비교연구,” 한국과학기술원 석사학위 논문, 1998