

<학술논문>

## 등가하중을 이용한 원자로 핵연료봉 지지격자 스프링의 비선형 응답 구조 최적설계

김도원<sup>†</sup> · 이현아<sup>\*</sup> · 송기남<sup>\*\*</sup> · 김용일<sup>\*</sup> · 박경진<sup>\*\*\*</sup>  
(2007년 7월 10일 접수, 2007년 10월 17일 심사완료)

### Nonlinear Response Structural Optimization of a Spacer Grid Spring for a Nuclear Fuel Rod Using the Equivalent Loads

Do-Won Kim, Hyun-Ah Lee, Ki-Nam Song, Yong-Il Kim and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Spacer Grid(지지격자), Shape Optimization(형상최적설계), Nonlinear Response Optimization(비선형 응답 최적설계), Equivalent Load(EL, 등가하중)

#### Abstract

The spacer grid set is a part of a nuclear fuel assembly. The set has a spring and the spring supports the fuel rods safely. Although material nonlinearity is involved in the deformation of the spring, nonlinearity has not been considered in design of the spring. Recently a nonlinear response structural optimization method has been developed using equivalent loads. It is called nonlinear response optimization equivalent loads (NROEL). In NROEL, the external loads are transformed to the equivalent loads (EL) for linear static analysis and linear response optimization is carried out based on the EL in a cyclic manner until the convergence criteria are satisfied. EL is the load set which generates the same response field of linear analysis as that of nonlinear analysis. Shape optimization of the spring is carried out based on EL. The objective function is defined by minimizing the maximum stress in the spring while mass is limited and the support force of the spring is larger than a certain value. The results are verified by nonlinear response analysis. ABAQUS is used for nonlinear response analysis and GENESIS is employed for linear response optimization.

#### 1. 서론

경수로형 원자로(Pressurized light Water Reactor: PWR)내의 핵연료 집합체는 골격체와 핵연료봉으로 구성되어 있다. 골격체는 상·하단 고정체, 안

내관, 지지격자체로 구성되어 있으며 핵연료봉을 고정시켜주는 기능을 하고 있다. 세장비(slenderness ratio)가 큰 핵연료봉을 지지하는 것은 양끝단의 상·하단 고정체를 제외하면 중앙에 위치한 지지격자체 몇 개가 전부이다. 핵연료봉은 지지격자체 지지부에 의해 지지된다. 원자로 내에서는 중성자조사로 인하여 응력이완과 핵연료봉의 직경변화가 일어난다. 이로 인하여 원전연료가 원자로에 장전된지 1년 이내에 지지격자 스프링은 초기 스프링력의 90% 이상을 잃게 된다. 지지격자 스프링은 비선형성을 가지고 있다. 또한 핵연료봉의 장입 시 스프링은 소성변형을 일으키게 된다. 이

<sup>†</sup> 책임저자, 한양대학교 대학원 기계공학과 조

<sup>\*</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 한국원자력연구소

<sup>\*\*\*</sup> 한양대학교 기계정보경영학부

E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5246 FAX : (031)407-0755

러한 이유로 인하여 시간이 지남에 따라 많은 스프링력을 잃게 되어 스프링의 해석에는 비선형이 관련되어 있다.<sup>(1-3)</sup> 하지만 지금까지 비선형성을 고려하지 않은 선형 최적설계만을 연구하여 왔다. 따라서 이러한 문제를 해결할 수 있는 지지격자체 설계의 필요성이 크게 부각되었다.

스프링이 시간에 따라 성능이 저하되는 가장 큰 요인은 스프링의 소성변형이다. 따라서 소성변형이 일어나는 부분의 응력을 줄여 스프링의 성능을 향상시킬 수 있도록 설계하였다. 소성변형이 일어나는 요인은 재료가 비선형성을 가지고 있고 스프링에 강제변위가 일어날 때 발생하는 응력이 허용응력보다 크기 때문이다. 따라서 스프링에 가해지는 힘은 일정하므로 스프링의 비선형성을 고려해 설계를 진행한다.<sup>(4-7)</sup>

비선형성을 고려하기 위해 비선형 구조물에 대한 최적화를 실시한다. 비선형 응답을 직접 고려한 최적설계의 방법으로 유한차분법(finite differential method: FDM)을 이용하는 것이 보편적이다. 그러나 이 방법은 설계변수의 개수만큼 비선형 해석을 수행해야 하는 만큼 비용이 매우 고가여서 비효율적이다. 따라서 최적화에는 선형 응답 구조 최적설계 방법을 이용해 달성할 수 있는 등가하중을 이용한 비선형 응답 최적설계(nonlinear response optimization using equivalent load, NROEL)법을 이용한다. 이렇게 해석한 결과로 나온 설계변수들의 변화를 가지고 최대응력의 값을 비교하고 이를 갱신하여 새로운 모델을 생성한다. 새로운 모델은 응력이 이완되고 스프링력이 저하된 상태에서도 핵연료봉을 지지할 수 있는 충분한 힘을 유지할 수 있어야 한다. 따라서 위에 언급한 내용들을 가지고 기능요구에 맞는 최적의 설계형상을 얻고자 한다. 설계 및 해석을 위해 유한요소 모델을 생성하였고 설계 내의 해석에는 유한요소해석방법을 사용한다. 지지격자의 형상을 결정하기 위해 최적설계 소프트웨어인 GENESIS 7.5<sup>(8)</sup>를 이용하여 형상최적설계를 실시하고 비선형 정적 해석과 최대응력값을 구해내기 위해 상용 소프트웨어인 ABAQUS 6.4-1<sup>(9)</sup>을 사용한다. 강성행렬과 변위를 이용하는 등가하중의 계산은 Visual C++<sup>(14)</sup>을 사용한다.

## 2. 지지격자의 기능 및 특징

지지격자체는 핵연료집합체에서 골격체를 구성하고 있다. Fig. 1(a)에 보인 지지격자체는 Fig. 1(b)의 지지격자 단일체로 이루어져 있다. 지지격자 단일체는 4개의 지지격자로 이루어져 있으며 1개의 핵연료봉을 원자로내에 고정시키는 역할을 한다. 지지격자는 연료봉을 지지하는 스프링(spring)

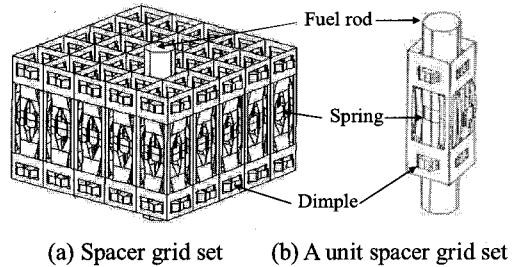


Fig. 1 Schematic view of a spacer grid set

과 딴플(dimple)로 구성되어 있다. 딴플은 스프링에 비해 강성이 상당히 크므로 핵연료봉을 지지격자체에 삽입할 때 변형은 거의 무시할 수 있다.<sup>(1-3)</sup>

지지격자체가 가지는 일반적인 기능들로는 첫째, 노심 내에서 핵연료봉들을 제 위치에 있도록 수평·수직으로 지지한다. 둘째, 냉각수의 흐름으로 생기는 진동손상을 막기 위해 핵연료봉과 충분한 접촉력을 유지한다. 셋째, 핵연료봉 사이에 냉각수로 형성하여 핵연료봉으로부터 냉각재로의 열전달을 촉진 시켜준다. 넷째, 지진이나 냉각재 상실과 같은 비정상 운전환경에서 핵연료집합체 사이의 횡방향 하중경로를 제공하고 충분한 강도를 가지게 함으로써 제어봉의 삽입경로를 제공한다. 따라서 지지격자체를 설계할 경우 이러한 기능들이 고려되어야 한다.<sup>(1-3)</sup> 이번 연구의 주된 목표는 기계·구조적 건전성 측면에서 첫 번째와 두 번째의 핵연료봉 고정기능을 충분히 만족하면서 스프링의 최대응력을 줄여 핵연료봉을 충분히 지지할 수 있는 스프링의 형상도출에 중점을 두었다.

## 3. 등가하중 소개 및 적용

이 장에서는 등가하중에 대한 소개와 등가하중을 지지격자에 적용하는 과정을 기술한다. 여기서 등가하중을 계산하기 위한 선형 해석 및 비선형 해석은 유한요소해석방법으로 수행한다.

### 3.1 비선형 해석의 필요성

많은 구조물의 경우 선형 해석으로는 구조물의 거동을 제대로 표현할 수 없으며, 특히 재료의 비선형이나 대변위, 대변형의 문제는 비선형 해석을 통한 구조물의 반응을 구하는 것이 보편화 되어있다. 하지만 비선형 해석을 통한 구조물의 최적설계를 수행하는 것은 선형문제에 비해 고가이며 계산이 어렵다. 비선형 해석을 통한 최적설계의 대표적인 방법이 유한차분법(finite differential method:

FDM)이다. 이 방법은 한 번의 비선형 최적설계를 위하여 설계 변수 개수만큼의 비선형 해석을 수행한다. 즉, 최적설계의 반복과정이 진행될 때마다 설계변수 개수만큼 비선형 해석을 수행해야 하는 것이다. 비선형 해석이 매우 고가임을 고려하면 이 방법은 효율적이지 못하다. 한편, 선형 응답 최적화기법은 많은 연구에 의해 잘 정리되어 있다.

구조물의 비선형성은 재료물성의 비선형으로 인한 재료비선형(material nonlinearity)과 기하학적 구조물의 특성으로 인한 기하비선형(geometric nonlinearity)으로 구분된다. 이러한 비선형 특성을 갖는 응답과 같은 크기의 응답을 나타낼 수 있는 방법으로 등가하중을 이용한 비선형 응답 최적설계(nonlinear response optimization using equivalent load, NROEL)법이 있다. 등가하중이란 구조물의 비선형 해석에 의한 응답과 동일한 응답을 선형 해석에서 발생시키고, 선형 해석을 이용하는 최적화를 할 목적으로 만들어지는 하중을 의미한다.<sup>(4-7)</sup> 따라서, 재료비선형을 가진 구조물에 대한 최적화를 선형 응답 구조최적설계 방법을 이용해 달성하기 위해 2007년 Shin에 의해 새롭게 제안된 NROEL을 이용하여 최적설계를 진행한다.<sup>(5)</sup>

### 3.2 변위장을 일치시키는 등가하중의 계산

유한요소 이론에 의한 비선형시스템의 평형 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{K}_N(\mathbf{b}, \mathbf{z}_N)\mathbf{z}_N = \mathbf{f} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{K}_N$ 은 비선형시스템의 강성행렬을 나타내고, 설계변수  $\mathbf{b}$ 와 비선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_N$ 으로 이루어진 함수이다. 하점자  $N$ 은 비선형 해석으로부터 얻어진 값 임을 의미한다. 식 (1)의 비선형 해석을 수행하면 절점변위벡터  $\mathbf{z}_N$ 을 산출할 수 있다. 따라서, 등가하중은 식 (2)와 같이 산출할 수 있다.

$$\mathbf{f}_{eq}^z = \mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_N \quad (2)$$

$\mathbf{f}_{eq}^z$ 는 변위장을 일치시키는 등가하중을 의미한다.  $\mathbf{f}_{eq}^z$ 는 선형강성행렬인  $\mathbf{K}_L$ 과 절점변위벡터  $\mathbf{z}_N$ 의 곱으로부터 산출할 수 있다. 식 (2)에서 산출된 등가하중  $\mathbf{f}_{eq}^z$ 를 이용하여 식 (3)과 같은 선형 해석을 수행하면, 선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_L$ 을 얻는다.

$$\mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_L = \mathbf{f}_{eq}^z \quad (3)$$

여기서 얻어진 선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_L$ 은 식 (1)로

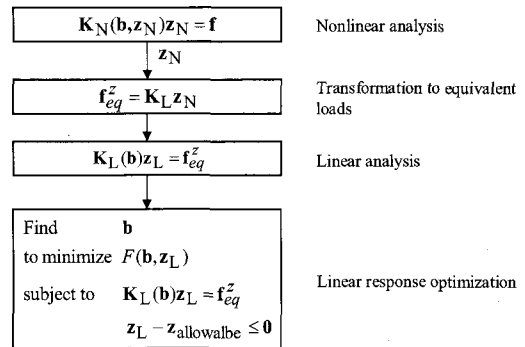


Fig. 2 Generation of equivalent loads for displacement constraints

부터 얻어진 비선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_N$ 과 동일한 값을 갖게 된다. 따라서 등가하중  $\mathbf{f}_{eq}^z$ 를 이용하여 선형 구조최적설계를 수행하면 비선형변위장과 동일한 변위장을 고려할 수 있는 구조최적설계를 수행할 수 있다. 이 과정은 Fig. 2의 순서도에서 나타내었다.

### 3.3 응력장을 일치시키는 등가하중의 계산

비선형 해석은 단위 하중을 증가시키며 변위를 계산하는 방법으로 최종적인 변위장을 계산한다. 하지만 등가하중법을 이용한 변위장의 일치식 (2)와 식 (3)과 같이 명확한 관계를 갖는다. 즉, 비선형 해석에서 변위가 계산되는 과정과 상관없이 최종적인 변위값만을 필요로 한다. 응력은 변위의 변화율인 변형률로 계산되는 2차적인 값이다. 비선형 해석에서는 응력과 변형률의 관계 역시 선형적이지 않으며, 변위장을 일치시키는 등가하중은 응력장을 일치시키지 않는다. 따라서 응력장을 일치시키기 위한 등가하중을 새롭게 계산해야 한다.

식 (1)의 비선형 해석을 수행하면 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 을 얻는다. 비선형 해석을 통해 얻어진 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 은 동일한 절점변위벡터를 유발시키는 선형 해석을 하기 위해 사용된다. 동일한 절점변위벡터를 얻기 위해 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 을 초기응력조건으로 사용한다. 식 (4)와 같이 선형 해석을 수행한다.

$$\mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_L^\sigma = -\bar{\mathbf{f}}_1(\sigma_N) \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_{eq}^\sigma = \mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_L^\sigma \quad (5)$$

식 (4)의 선형 해석으로부터 선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_L^\sigma$ 을 얻는다. 이 절점변위벡터는 선형 해석을 수행할 때 식 (1)로부터 얻은 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 과 동일한 응력을 유발시키는 변위장이다. 그러므로

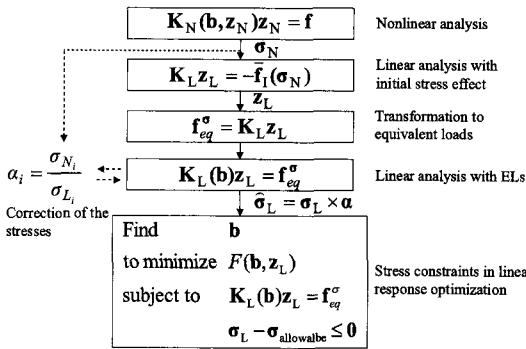


Fig. 3 Generation of equivalent loads for stress constraints

식 (5)와 같이 절점변위벡터  $z_L^\sigma$  을 강성행렬과 곱하면 응력장을 일치시키는 등가하중  $f_{eq}^\sigma$  를 계산할 수 있다.  $f_{eq}^\sigma$  를 이용하여 식 (6)과 같이 선형 해석을 수행하면 선형응력벡터  $\sigma_L$  이 산출 된다.

$$K_L(b)z_L = f_{eq}^\sigma \quad (6)$$

3.4 응력 등가하중의 오차와 보정계수

비선형성이 매우 크거나 비선형 해석기와 최적화에 사용되는 선형 해석기가 다른 경우 내부적인 유한요소식의 차이로 인해  $\sigma_L$  과  $\sigma_N$  이 정확히 일치하지 않을 수 있다. 식 (4)에 적용되는 초기 응력값들은 식 (1)에서 응력계산에 사용된 적분점과 동일한 위치에 가해져야만 한다. 경우에 따라 그것이 불가능 한 경우에도 오차가 발생할 수 있다. 이와 같은 원인들로 인해 등가하중이 유발한 응력장이 실제 비선형 해석에서의 응력장과 오차를 갖게 되면 등가하중을 이용한 선형 최적설계과정은 좋은 해를 얻을 수 없게 된다. 따라서 식 (7)과 같은 보정작업을 수행한다.

$$\hat{\sigma}_{L_i} = \sigma_{L_i} \times \alpha_i \quad (7)$$

$$\alpha_i = \frac{\sigma_{N_i}}{\sigma_{L_i}} \quad (8)$$

여기서  $i$  는 전체 요소의 수이다.  $\alpha$  는 식 (8)과 같이 계산되는 보정벡터이며 식 (6)에서 얻어진  $\sigma_L$  에 곱해져 보정된 응력벡터  $\hat{\sigma}_L$  을 계산한다. 이렇게 계산된  $\hat{\sigma}_L$  은 언제나 비선형 응력벡터  $\sigma_N$  과 정확히 일치하게 된다. 등가하중  $f_{eq}^\sigma$  를 이용하여 선형 구조최적설계를 수행하면 비선형 응력장과 동일한 응력장을 고려할 수 있다. 응력장을 일치시키는 등가하중을 구하기 위한 순서도를

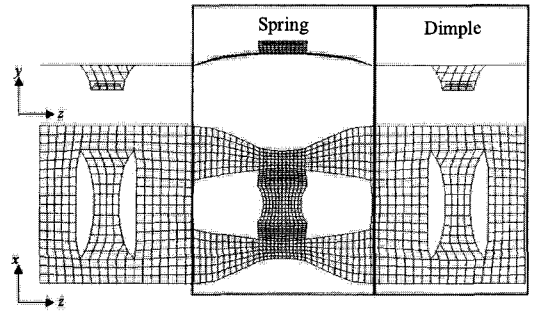


Fig. 4 Initial model

Fig. 3에서 나타내었다. 이렇게 구해진 등가하중  $f_{eq}^z$  와  $f_{eq}^\sigma$  는 다중하중조건을 사용하여 선형 최적설계에 적용하게 된다.

4. 지지격자 스프링의 최적설계

4.1 초기모델 선정 및 목적

최적설계의 초기모델로는 이전 연구자의 모델을 선정하였다.<sup>(10)</sup> 이 모델은 지금까지 연구된 지지격자들의 선형최적설계 가운데 좋은 결과를 얻은 모델이다. 유한요소모델의 형상은 Fig. 4에 나타내었다. 또한 지지격자의 스프링과 딴플 부분을 대략적으로 나타내었다. 초기모델의 특징을 살펴보면 첫 째, 연료봉과 접하게 되는 스프링의 곡률이 핵연료봉의 곡률과 거의 유사하도록 호몰로지 이론을 사용하여 최적설계 된 모델이다. 둘째, 기존 지지격자에서 불필요한 부분을 위상최적설계를 통해 제거하고 필요한 부분만을 남긴 새로운 모델이다. 셋 째, 충격하중에 대한 부분 또한 지금까지의 연구 가운데 좋은 결과를 얻었다. 충격하중은 딴플에 의해서 그 강도가 결정이 된다. 따라서 지지격자와 연료봉이 접하는 스프링 부분의 곡률을 고정하여 설계를 수행할 수 있다. 또한 충격하중에 대한 딴플 부분은 설계영역에 포함하지 않고 핵연료봉의 지지에 영향을 주는 스프링 부분만을 설계영역으로 설정해 최적설계를 수행할 수 있는 모델이다. 하지만 재료비선형을 고려하지 않고 선형성만을 고려하여 최적설계를 수행한 모델이므로 비선형을 고려한 최적설계에 적합한 모델로 선정하여 이 모델을 초기모델로 선정하였다.<sup>(10)</sup>

4.2 지지격자 스프링의 해석

지지격자의 재료는 Zircaloy-4이다.<sup>(1-3)</sup> 이 재료의 물성치는 탄성영역뿐만 아니라 소성영역 또한 가

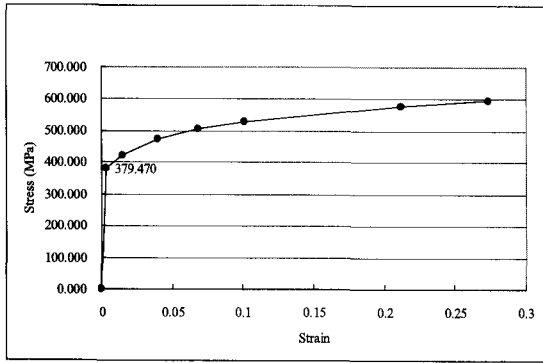


Fig. 5 Stress-Strain curve

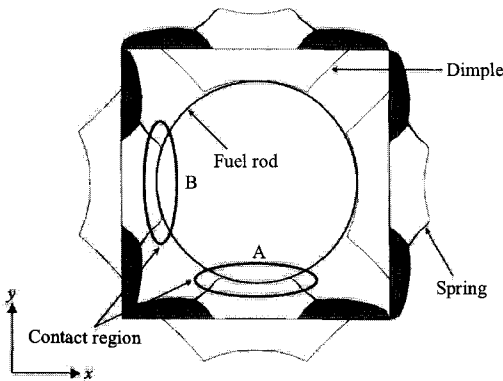


Fig. 6 Contact between the nuclear fuel rod and the spring

지고 있다. 응력-변형을 곡선이 Fig. 5에 있다. 이 물성치를 적용한 비선형정적해석은 새로운 모델의 확인작업과 강성행렬, 변위장, 응력장을 산출하기 위해 사용된다. 비선형정적해석을 수행하기 위해 초기모델에 대한 유한요소모델을 생성한다. ABAQUS 6.4-1<sup>(9)</sup>에서 강성행렬을 산출할 때 절점 개수의 제한이 있어 유한요소모델의 절점 개수를 1513개로 생성하였고 유한요소의 개수는 1332개이다. 유한요소는 4절점의 요소로 생성하였다. 핵연료봉이 장입된 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 이때 스프링 중심부인 A의 y축 방향과 B의 x축 방향의 수직변위는 0.3 mm이다. 이 변위와 동일한 조건을 주기 위해 비선형 해석기인 ABAQUS 6.4 상에서 지지격자 스프링에 강제변위를 유발한다. 강제변위를 유발시키기 위하여 연료봉과 직경이 같은 실린더를 설계한다. 실린더는 변형이 없는 강체로 설정하고 접촉요소를 사용하여 강제변위를 유발한다. 강제변위는 핵연료봉이 스프링에 수직으로 힘을 가하게 되는 단일방향으로 설정한다. 이때 지지격자와 지지격자 사이가 용접으로 연결되므로 이 용접부분을 경계조건으로 설정한다. 이

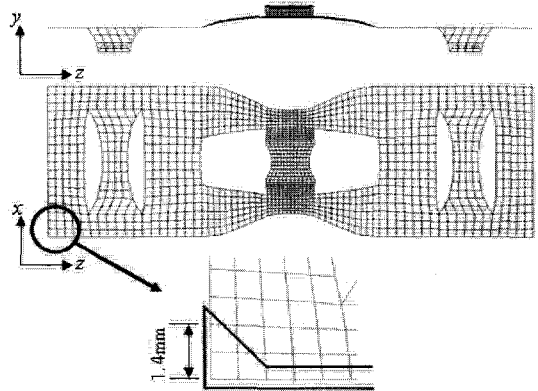


Fig. 7 Boundary condition

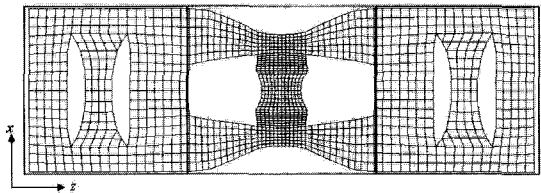


Fig. 8 Design area

를 Fig. 7에 나타내었다. 경계조건은 6자유도를 모두 구속한다.

### 4.3 설계영역 결정

지지격자에서 Fig. 8에는 지지격자의 설계영역을 나타낸다. C영역을 스프링이라 하고 D영역을 딤플이라 한다. 핵연료봉과 스프링이 접촉할 때 두 물체의 접촉면에서 접촉압력이 생기면서 상호간에 미세한 진동으로 인해 수직 혹은 수평방향의 상대적인 변위가 반복적으로 발생한다. 이 미세한 변위를 가지는 진동으로 인하여 지지격자 스프링의 응력이 이완되고 스프링력이 저하되게 된다. 따라서, 충격하중에 영향을 주는 딤플 영역은 이전 연구에서 선형최적설계를 통해 충분한 강도를 가진 설계를 얻었으므로 딤플 영역은 제외시키고 핵연료봉을 지지하게 되는 스프링 영역만을 설계영역으로 선정하여 최적설계를 실시한다.

### 4.4 설계정식화

앞 절에서 선택된 설계영역인 지지격자 스프링에서 섭동벡터(perturbation vector)에 의해 움직일 수 있는 스프링 각 부분의 형상을 설계변수로 한다. 섭동벡터란 형상을 움직여주는 절점에 가해지는 벡터를 말한다. 설계변수의 개수는 30이다. 설계변수인 스프링의 형상을 부드러운 스플라인(spline) 곡선으로 나타내기 위하여 설계도메인(design domain)을 잡고 도메인의 꼭지점과 각 변의 중심점을 이동시키는 방법을 이용한다. 그리하여

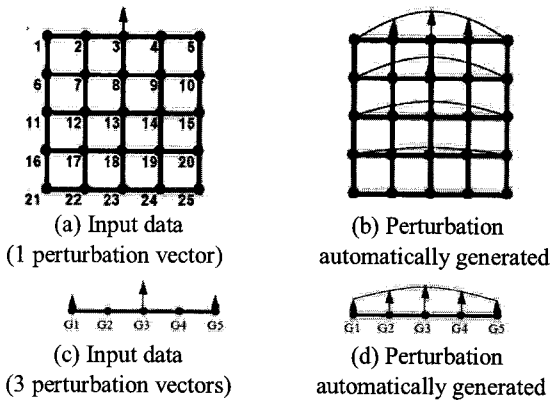


Fig. 9 Change in the nodes with the perturbation vector

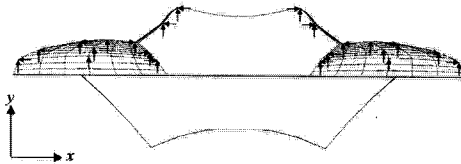


Fig. 10 Perturbation vectors (on the x-y plane)

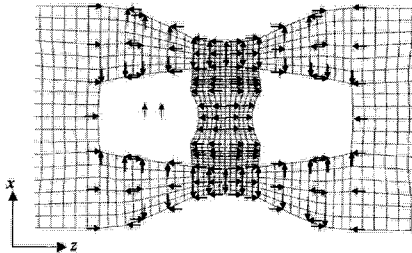


Fig. 11 Perturbation vectors (on the x-z plane)

도메인 내부에도 부드러운 스플라인 곡선을 자연스럽게 생성시켜 형상최적설계 시 격자의 질이 떨어지는 것을 방지하였고, 그 결과 격자의 질이 좋은 최적모델을 얻게 되었다. 이를 Fig. 9에 간략하게 나타내었다. 섭동벡터는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타냈다. 형상최적설계의 목적은 최대응력을 줄여 중성자조사에 의해 응력이 이완되고 스프링력이 저하된 상태에서 핵연료봉을 지지할 수 있는 충분한 힘을 유지하는 것이므로 최대응력을 목적함수로 설정한다.

지지격자가 지켜야 할 제한조건은 다음과 같다. 지지격자의 질량(mass)은 기존의 질량(mass<sub>initial</sub>)보다 작거나 같아야 한다. 또한 원자로 내에서 중성자 조사로 인해 초기 스프링력의 90% 이상이 감소하고 유체유발진동, 핵연료집합체의 운송 중에 스프링에 힘이 가해지기 때문에 초기 스프링력(F<sub>spring</sub>)이 최소 40 N 이상이 되어야 한다.<sup>(1-3)</sup> 앞에 정의한 것으로 설계정식화를 하면 식 (10)과 같다.

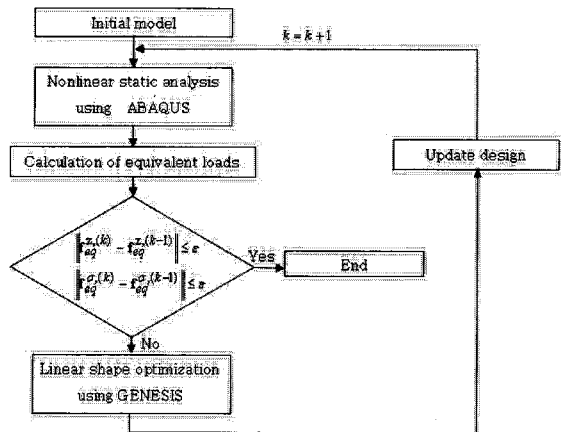


Fig. 12 Flow chart of optimization for a spacer grid

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && b_i \quad i = 1, \dots, 30 \\
 &\text{to minimize} && \text{maximum } \sigma \\
 &\text{subject to} && \text{mass} \leq \text{mass}_{\text{initial}} \\
 &&& F_{\text{spring}} \geq 40 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{10}$$

이 문제는 최대응력을 최소화하는 최대값의 최소화 문제로 각 유한요소마다 발생하는 응력이 다르고 최대응력 또한 매번 같은 유한요소에서 발생하지 않기 때문에 식 (11)와 같이 테일러-벤조 정식화(Taylor-Bendsoe 'beta' formulation)로 설계정식화를 수정한다.<sup>(11-13)</sup>

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && b_i \quad i = 1, \dots, 30 \\
 &\text{to minimize} && \beta \\
 &\text{subject to} && \text{mass} \leq \text{mass}_{\text{initial}} \\
 &&& F_{\text{spring}} \geq 40 \text{ N} \\
 &&& \sigma \leq \beta
 \end{aligned} \tag{11}$$

이는 가상변수 베타(beta:  $\beta$ )를 목적함수로 하여 이를 최소화하면서 설계자가 원하는 최대값을 베타보다 작거나 같도록 제한조건을 잡아주는 최대값의 최소화 문제 풀이 방법 중 하나이다. 따라서 구조물에 발생하는 응력을 베타보다 작거나 같도록 한다.

#### 4.5 최적설계 순서도

Fig. 12에 최적설계에 대한 순서도를 나타내었다. 순서도에 따른 단계들을 다음과 같이 설명하였다.

단계 1. 초기값과 종료조건을 판정을 위한 허용 계수  $\epsilon$ 를 설정한다. ( $k = 0$ )

단계 2. 현재 설계값  $b^{(k)}$ 로 비선형 해석을 수행한다. 여기서 선형강성행렬  $K_L$ 과 비선형 반응값들을 얻는다.

단계 3. 변위장과 응력장을 일치시키는 등가하중을 계산한다.

**Table 1** Optimization history (stress)

cycle	0	1	2	3	4	5	6
stress	483.14	479.74	478.93	477.40	478.72	476.80	474.22
cycle	7	8	9	10	11	12	13
stress	472.99	472.78	473.15	471.39	471.27	470.74	470.41
cycle	14	15	16	17	18		
stress	471.05	471.40	468.85	468.96	468.91		

단계 4.  $k=0$  이면 단계 5로 넘어가고,  $k > 0$  이면 아래와 같이 종료조건을 검사한다.

$$\|f_{eq}^{z,(k)} - f_{eq}^{z,(k-1)}\| \leq \epsilon \quad (12a)$$

$$\|f_{eq}^{\sigma,(k)} - f_{eq}^{\sigma,(k-1)}\| \leq \epsilon \quad (12b)$$

종료조건을 만족하면 과정을 종료하고, 그렇지 않으면 단계 5로 넘어간다.

단계 5. 선형 응답 구조최적설계를 수행한다. 등가하중  $f_{eq}^{z,(k)}$ ,  $f_{eq}^{\sigma,(k)}$  는 다중하중조건으로 최적화에 적용된다.

단계 6. 설계를 변경하고 사이클 번호는  $k=k+1$  로 증가한다. 단계 2로 돌아간다.

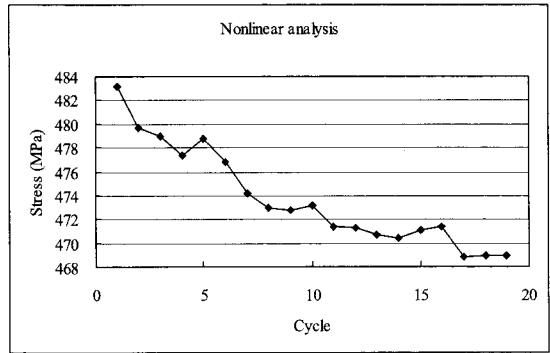
## 5. 결과

### 5.1 결과 비교

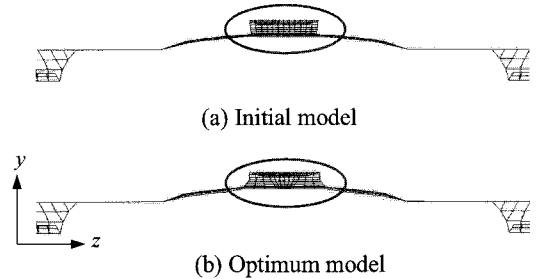
최적설계의 궁극적인 목적은 앞에서 살펴본 것과 같이 ‘최대응력값을 얼마나 줄일 수 있는가’이다. 이를 위하여 등가하중을 사용하여 형상최적설계를 수행하였다. 각 설계단계마다 비선형 정적 해석을 실시하여 최대응력을 비교하였고 반발력을 계산하여 40 N이상의 스프링력을 가지는지 확인하였다. 19번의 설계단계를 수행하였으며 각 설계단계마다 형상이 바뀌면서 응력이 483.14 MPa에서 468.91 MPa로 줄어들었다. 마지막 설계단계의 모델과 초기모델의 최대응력의 차이는 약 15 MPa 정도이다. 16번째의 설계단계에서 마지막 설계단계보다 낮은 응력값이 나왔으나 종료조건을 만족하지 못하여 종료조건을 만족시키는 19번째 설계단계에서 종료를 하였다. 각 설계에 대한 최대응력값은 Table 1에 나타내었다. Table 1의 응력값들을 Fig. 13에 그래프로 나타내었다.

### 5.2 형상

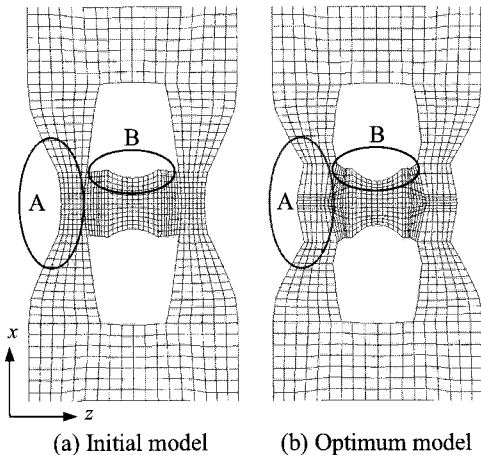
초기형상과 최적설계를 수행한 결과형상을 Fig. 14과 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 14에서 보면 핵연료봉과 접촉하는 면을 지지하는 부분이 사다리꼴로 넓어진 것을 확인할 수 있다. Fig. 15에서는 A의 오목하던 부분이 볼록하게 변형되었고 또한 핵



**Fig. 13** Optimization history



**Fig. 14** Comparison of shape (on the  $y-z$  plane)



**Fig. 15** Comparison of shape (on the  $x-z$  plane)

연료봉과 접하는 부분인 B의 오목한 형상이 더 깊어진 것을 볼 수 있다. 응력분포의 모습은 Fig. 16과 같다. 최대응력은 A위치의 같은 요소에서 발생하였다. 또한 큰 타원으로 표시한 B영역은 핵연료봉이 직접 접하는 부분과 스프링의 다리부분에서 응력이 줄어든 것을 확인하였다.

## 6. 결론

등가하중법을 이용하여 재료비선형을 고려한 원자로 핵연료봉 지지격자 스프링의 최적설계를 수

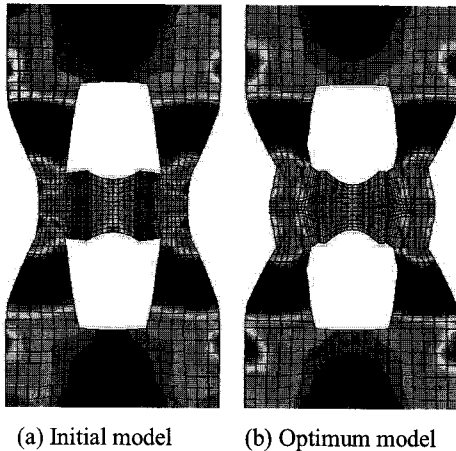


Fig. 16 Comparison of the stress

행하였다. 연료봉을 지지하는 지지격자 스프링 만을 설계영역으로 설정하고 설계순서를 정하였다. 스프링 설계 시 등가하중을 사용하여 비선형성이 고려된 최적설계를 수행하였다. 지지격자 스프링에 발생하는 최대응력을 비교해 가며 비선형 해석과 선형 최적설계를 반복 실시하였다. 최대값의 최소화 문제를 이용하여 구조물에 발생하는 최대응력을 줄임과 동시에 소성영역을 줄였다. 비선형성이 고려 됨으로써 선형성만을 고려했던 최적설계보다 최대응력이 적게 발생하는 설계를 얻을 수 있었다. 따라서 중성자 조사로 인해 감소하는 스프링력이 현재보다 향상될 것으로 예상된다.

지금까지 덤플부분은 강성이 강하여 변형을 고려하지 않았으나 향후 제안된 설계기법을 이용하여 변형과 비선형성을 고려한 지지격자 덤플의 최적설계에도 적용할 필요가 있다. 또한 아직까지 스프링의 소성변형영역을 완전히 제거하지 못하였다. 소성변형이 일어나지 않는 설계가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 2단계 두뇌한국21사업과 한국원자력연구소에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) Park, G. J., Park, K. J. and Lee, J. N., 2001, "Impact Analysis of the Spacer Grid Assembly and Shape Optimization of the Attached Spring," KAERI/CM-509/2001, pp. 1~73.
- (2) Park, G. J., Park, K. J., Kwon, Y. D. and Lee, J. J., 2006, "Impact Analysis of the Spacer Grid Assembly and Axiomatic Design based Shape Optimization of the Attached Spring," KAERI/CM-911/2005, pp. 7~43.
- (3) Park, G. J., Lee, H. A., Kim, C. K. and Song, K. N., 2007, "Development of the High Performance Spacer Grid," KAERI/CM-949/2006, pp. 7~43.
- (4) Kim, Y. I., Lee, H. A. and Park, G. J., 2006, "Case Studies of Nonlinear Response Structural Optimization using Equivalent Loads," *The Fourth China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization Of Structural and Mechanical Systems*, CJK-OSM4, Kunming, China, pp. 83~88.
- (5) Shin, M. K., Park, K. J. and Park, G. J., 2007, "Optimization of structures with nonlinear behavior using equivalent loads," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 196, Issues 4-6, 1, pp. 1154~1167.
- (6) Park, K. J. and Park, G. J., 2005, "Structural optimization for nonlinear behavior using equivalent static loads(I)," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 8, pp. 1051~1060.
- (7) Park, K. J. and Park, G. J., 2005, "Structural optimization for nonlinear behavior using equivalent static loads(II)," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 8, pp. 1061~1069.
- (8) GENESIS Version 7.5, *User's Manual*, 2001, Vanderplaats Research and Development, Inc., Colorado Springs, CO.
- (9) ABAQUS/Standard Version 6.4-1, *User's Manual*, 2004, Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (10) Lee, H. A., Kim, C. K., Song, K. N. and Park, G. J., 2007, "Optimization of a Nuclear Fuel Spacer Grid Using Considering Impact and Wear with Homology Constraints," *Computational Structural Engineering Institute of Korea Annual Conference*, Seoul, Korea.
- (11) Vanderplaats, G.N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- (12) Taylor, J. E. and Bendsoe, M. P., 1984, "An Interpretation for Min-Max Structural Design Problems Including a Method for Relaxing Constraints," *International Journal of Solids Structures*, Vol. 20, No. 4, pp. 301~314.
- (13) Arora, J.S., 2004, *Introduction to Optimum Design*, Elsevier Academic Press, CA.
- (14) Stephen Prata and Lee. D. H., 1999, "C++ Basic Plus," Sungandang, Korea.