

## 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>

### **Nonlinear Response Structural Optimization of a Nuclear Fuel Rod Spacer Grid Spring Using the Equivalent Load.**

Do-Won Kim, Hyun-Ah Lee, Ki-Nam Song, Yong-Il Kim, 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. 서 론**

경수로형 원자로(Pressurized light Water Reactor: PWR)내의 핵연료 집합체는 골격체와 핵연료봉으로 구성되어 있다. 골격체는 상·하단 고정체, 안내관, 지지격자체로 구성되어 있으며 핵연료봉을 고정시켜주는 기능을 하고 있다. 세장비(slender-

ness ratio)가 큰 핵연료봉을 지지하는 것은 양끝단의 상·하단 고정체를 제외하면 중앙에 위치한 지지격자체 몇 개가 전부이다. 핵연료봉은 지지격자체 지지부에 의해 지지된다. 원자로 내에서는 증성자조사로 인한 응력이 완과 핵연료봉의 직경 변화가 일어난다. 이로 인하여 원전연료가 원자로에 장전 된지 1년 이내에 지지격자 스프링은 초기 스프링력의 90% 이상을 잃게 된다. 지지격자 스프링은 비선형성을 가지고 있다. 또한 핵연료봉의 장입시 스프링은 소성변형을 일으키게 된다. 이러한 이유로 인하여 시간이 지남에 따라 많은 스프링력을 잃게 된다.<sup>(1)</sup> 하지만 지금까지 비선형성을 고려하지 않은 선형최적설계만을 연구하여 왔다. 따

<sup>†</sup> 책임저자, 한양대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 한국원자력연구소

<sup>\*\*\*</sup>교신저자, 한양대학교 기계정보경영학부

E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr

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

라서 이러한 문제를 해결할 수 있는 지지격자체 설계의 필요성이 크게 부각되었다.

지지격자의 스프링이 임의의 외력에 의해 변형된 후에도 일정한 힘을 유지할 수 있어야 한다. 또한 지금까지 고려되지 않은 재료의 비선형성을 고려한 구조최적설계를 실시하여야 한다. 따라서 지지격자 스프링의 재료비선형성을 고려하기 위하여 비선형 구조물에 대한 최적화를 선형응답구조 최적설계 방법을 이용해 달성할 수 있는 등가하중(Nonlinear Response Optimization Equivalent Load, NROEL)법을 적용하여 최적설계를 수행한다.<sup>(2~3)</sup> 응력이 이완되고 스프링력이 저하된 상태에서도 핵연료봉을 지지할 수 있는 충분한 힘을 유지하기 위해 최대응력값을 줄이도록 최적설계를 수행한다. 지지격자 스프링의 형상최적설계에는 GENESIS 7.5<sup>(4)</sup>를 이용한다. NROEL의 계산에는 Visual C++을 사용한다. 최대응력값을 비교하기 위한 비선형정적해석(nonlinear static analysis)에는 ABAQUS 6.4-1<sup>(5)</sup>을 이용한다.

## 2. 지지격자의 기능 및 특징

지지격자체는 핵연료집합체에서 골격체를 구성하고 있다. Fig. 1(a)의 지지격자체는 Fig. 1(b)에 보이는 지지격자 단일체로 이루어져 있다. 지지격자 단일체는 4개의 지지격자로 이루어져 있으며 1개의 핵연료봉을 원자로내에 고정시키는 역할을 한다. 지지격자는 연료봉을 지지하는 스프링(spring)과 디플(dimple)로 구성되어 있다. 디플은 스프링에 비해 강성이 상당히 크므로 핵연료봉을 지지격자에 체에 삽입할 때 변형은 거의 무시할 수 있다.<sup>(1)</sup>

지지격자체는 핵연료봉을 수직·수평 방향으로 지지하는 기능을 한다. 냉각수의 흐름으로 생기는 진동 손상을 막기 위해 충분한 접촉력을 유지한다. 또한 핵연료봉 사이에 냉각수로를 형성하여 열전달을 촉진시켜야 한다. 그리고 비정상적 운전환경에서 핵연료집합체 사이의 횡 방향 하중경로를 제

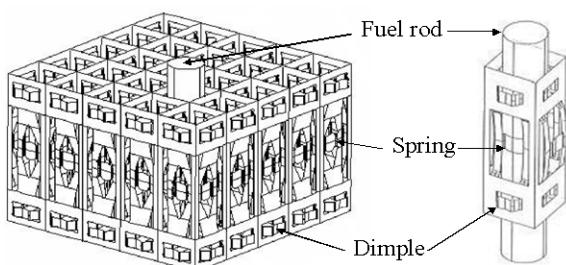


Fig. 1 Schematic view of a spacer grid set

공하고 충분한 강도를 갖게 함으로써 제어봉의 삽입경로를 제공하는 기능을 가져야 한다.<sup>(1)</sup> 기계구조적 건전성 측면에서 핵연료봉 고정기능을 충분히 만족하면서 스프링의 응력을 줄여 핵연료봉을 충분히 지지할 수 있는 형상을 도출하기 위한 형상최적설계를 진행한다.

## 3. 등가하중 소개 및 적용

### 3.1 비선형 해석의 필요성

많은 구조물의 경우 선형해석으로는 구조물의 거동을 제대로 표현할 수 없으며, 특히 재료의 비선형이나 대변위, 대변형의 문제는 비선형해석을 통한 구조물의 반응을 구하는 것이 보편화 되어 있다. 하지만 비선형해석을 통한 구조물의 최적설계를 수행하는 것은 선형문제에 비해 고가이며, 계산이 어렵다. 한편, 선형응답최적화기법은 많은 연구에 의해 잘 정리되어 있다. 따라서, 재료비선형을 가진 구조물에 대한 최적화를 선형응답구조최적설계 방법을 이용해 달성한다. 이를 위해 2005년 박기종과 박경진에 의해 새롭게 제안 되어진 NROEL을 이용하여 최적설계를 진행한다.<sup>(3)</sup>

### 3.2 변위장을 일치시키는 등가하중의 계산

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

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

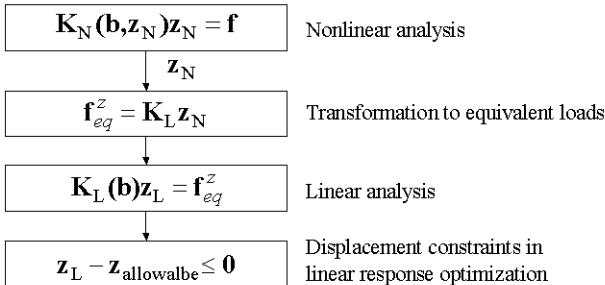
여기서  $\mathbf{K}_N$ 은 비선형시스템의 강성행렬을 나타내고, 설계변수  $\mathbf{b}$ 와 비선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_N$ 으로 이루어진 함수이다. 하첨자 N은 비선형해석으로부터 얻어진 값임을 의미한다. 식 (1)의 비선형해석을 수행하면 절점변위벡터  $\mathbf{z}_N$ 을 산출할 수 있다. 따라서, 등가하중은 식 (2)와 같이 산출할 수 있다.

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

$\mathbf{f}_{eq}^Z$ 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 선형해석을 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)로부터



**Fig. 2** Generation of equivalent loads for displacement constraints

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

### 3.3 응력장을 일치시키는 등가하중의 계산

비선형해석은 내연적 방법을 사용하여 수행된다. 내연적 방법이란 단위하중을 증가시키며 변위를 계산하는 방법으로 최종적인 변위장을 계산한다. 비선형해석에서는 응력과 변형률 역시 선형적이지 않으며, 변위장을 일치시키는 등가하중은 응력장을 일치시키지 못한다.

식 (1)의 비선형해석을 수행하면 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 을 얻는다. 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 과 동일한 절점변위벡터를 유발시키는 선형해석을 위한 절점변위벡터를 생성하기 위해 식 (4)와 같이 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 을 초기응력조건으로 사용하여 선형해석을 수행한다.

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

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

식 (4)의 선형해석으로부터 선형절점변위벡터  $\mathbf{z}_L^\sigma$ 을 얻는다. 이 절점변위벡터는 선형해석을 수행할 때 식 (1)로부터 얻은 비선형응력벡터  $\sigma_N$ 과 동일한 응력을 유발시키는 변위장이다. 그러므로 식 (5)와 같이 절점변위벡터  $\mathbf{z}_L^\sigma$ 을 강성행렬과 곱하면 응력장을 일치시키는 등가하중  $\mathbf{f}_{eq}^\sigma$ 를 계산할 수 있다.  $\mathbf{f}_{eq}^\sigma$ 를 이용하여 식 (6)과 같이 선형해석을 수행하면 선형응력벡터  $\hat{\sigma}_L$ 이 산출 된다.

$$\mathbf{K}_L(\mathbf{b})\mathbf{z}_L = \mathbf{f}_{eq}^\sigma \quad (6)$$

### 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.

$$\sigma_L^i = \sigma_L^i \times \alpha^i \quad (7)$$

$$\alpha^i = \frac{\sigma_L^i}{\sigma_L^j} \quad (8)$$

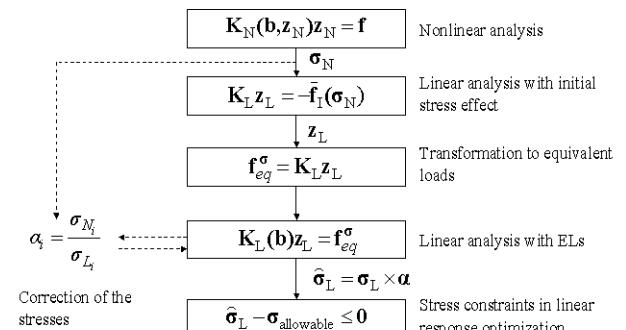
여기서  $i$ 는 전체 요소의 수이다.  $\alpha$ 는 식 (8)과 같이 계산되는 보정벡터이며 식 (6)에서 얻어진  $\sigma_L$ 에 곱해져 보정된 응력벡터  $\hat{\sigma}_L$ 을 계산한다. 이렇게 계산된  $\hat{\sigma}_L$ 은 언제나 비선형 응력벡터  $\sigma_N$ 과 정확히 일치하게 된다. 등가하중  $\mathbf{f}_{eq}^\sigma$ 를 이용하여 선형 구조최적설계를 수행하면 비선형 응력장과 동일한 응력장을 고려할 수 있다. 응력장을 일치시키는 등가하중을 구하기 위한 순서도를 Fig. 3에서 나타내었다.

### 3.5 등가하중의 적용

등가하중법을 이용한 비선형 응답 최적설계의 과정은 다음과 같다.

단계 1. 초기값과 종료조건의 판정을 위한 허용계수  $\varepsilon$ 을 설정한다. ( $k = 0$ )

단계 2. 현재 설계값  $\mathbf{b}^{(k)}$ 로 비선형해석을 수행한다. 여기서 선형강성행렬  $\mathbf{K}_L$ 과 비선형반응값들을 얻는다.



**Fig. 3** Generation of equivalent loads for stress constraints

단계 3. 등가하중을 계산한다.

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

$$\|\mathbf{f}_{eq}^{z,(k)} - \mathbf{f}_{eq}^{z,(k-1)}\| \leq \varepsilon \quad (9a)$$

$$\|\mathbf{f}_{eq}^{\sigma,(k)} - \mathbf{f}_{eq}^{\sigma,(k-1)}\| \leq \varepsilon \quad (9b)$$

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

단계 5. 선형 응답 구조최적설계를 수행한다.

등가하중  $\mathbf{f}_{eq}^{z,(k)}$ ,  $\mathbf{f}_{eq}^{\sigma,(k)}$ 는 다중하중조건으로 최적화에 적용된다.

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

#### 4. 지지격자 스프링의 최적설계

##### 4.1 초기모델 설정 및 목적

최적설계의 초기모델로는 이전 연구자의 모델을 선정하였다.<sup>(6)</sup> 지금까지 연구된 지지격자의 형상 가운데 스프링의 곡률이 핵연료봉의 곡률과 거의 유사하도록 최적설계된 모델이다. 따라서 스프링의 곡률부분을 고정하여 설계를 수행할 수 있다. 충격하중에 대한 부분 또한 지금까지의 연구 가운데 좋은 결과를 얻었다. 따라서 충격하중에 대한 부분을 고려하지 않고 스프링 부분만을 고려해 최적설계를 실시할 수 있는 모델이다. 하지만 재료 비선형이 고려되지 않고 선형성만을 고려한 모델이므로 비선형성을 고려한 최적설계에 적합한 모델로 선정하였다.<sup>(6)</sup>

##### 4.2 지지격자 스프링의 해석

지지격자의 재료는 Zircaloy-4이다. 이 재료의 물성치는 원자력연구소에서 제공받았으며 탄성영역 뿐만 아니라 소성영역 또한 가지고 있다. 응력-변형률 곡선은 Fig. 4에 보였다. 이 물성치를 적용하여 비선형정적해석은 새로운 모델의 확인작업과 강성행렬, 변위장, 응력장을 산출하기 위해 사용된다. 비선형정적해석을 수행하기 위해 초기모델의 유한요소를 생성한다. 핵연료봉이 지지격자에 장입 되면 스프링에 0.3 mm의 처짐이 일어난다. 이 처짐과 동일한 조건을 주기 위해 강제변위를 유발시킨다. 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 설정

한다. 이때 지지격자는 용접으로 연결되므로 이 용접부분을 경계조건으로 설정한다. 경계조건은 6 자유도를 모두 구속한다.

##### 4.3 설계영역 결정

지지격자에서 Fig. 5에는 지지격자의 설계영역을 나타낸다. A영역을 스프링이라 하고 B영역을 딥풀이라 한다. 충격하중에 영향을 주는 딥풀 영역은 이전 연구에서 선형최적설계를 통해 충분한 강도를 가진 설계를 얻었다. 따라서 충격하중에 영향을 주는 딥풀 영역은 제외시키고 핵연료봉을 지지하게 되는 스프링 영역만을 설계영역으로 선정하여 최적설계를 실시하였다.

##### 4.4 설계정식화

앞 절에서 선택된 설계영역인 지지격자 스프링에서 형상을 결정할 수 있는 섭동벡터들을 설계변수로 한다. 설계변수의 개수는 30개로 하였다. 설계변수인 스프링의 형상을 부드러운 스플라인(spline) 곡선으로 나타내기 위하여 설계도메인을 잡고 도메인의 꼭지점과 각 변의 중심점을 이동시키는 방법을 이용한다. 이를 Fig. 6에 간략하게 나타내었다. 섭동벡터는 Fig. 7에 대략적으로 나타냈다. 형상최적설계의 목적은 최대응력을 줄여 중성자조사에 의해 응력이 이완되고 스프링력이 저하된 상태에서도 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 운송중에 스프링에 힘이 가해지기 때문에 초기 스프링력( $F_{spring}$ )이 최소 40 N이상이 되어야 한다.<sup>(1~2)</sup> 지금 까지 정의한 것으로 설계정식화를 하면 식 (10)과 같다.

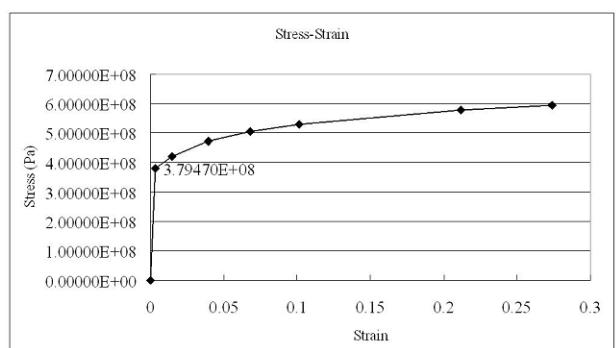


Fig. 4 Stress-Strain curve

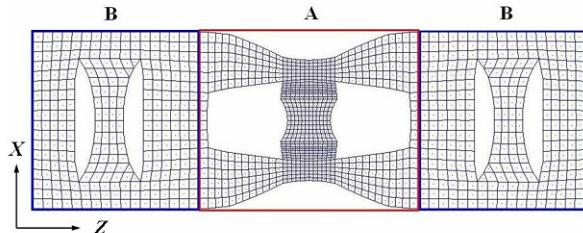


Fig. 5 Design Area

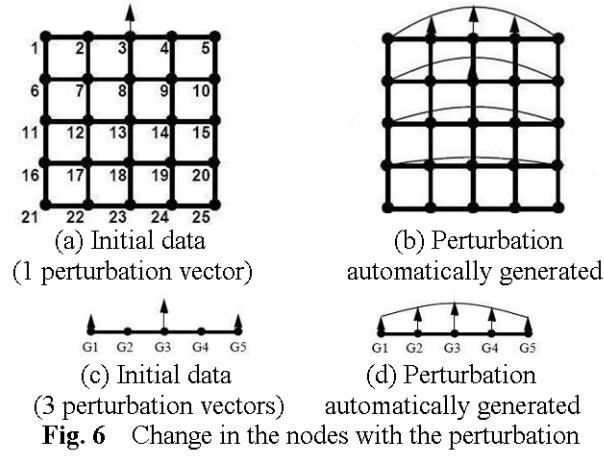


Fig. 6 Change in the nodes with the perturbation vector

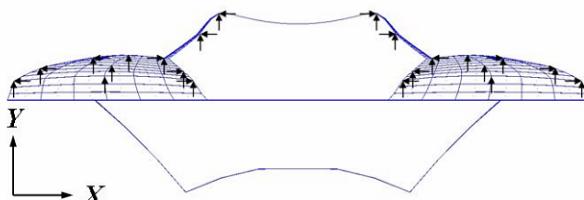


Fig. 7 Perturbation vectors

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

이 문제는 최대응력을 최소화하는 최대값 최소화 문제로 각 유한요소마다 발생하는 응력이 다르고 최대응력 또한 매번 같은 유한요소에서 발생하지 않기 때문에 식 (11)와 같이 테일러-벤조 정식화(Taylor-Bensoe ‘beta’ formulation)로 설계정식화를 수정한다.<sup>(7)</sup>

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

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. 8에 최적설계에 대한 순서도를 나타내었다. 초기모델을 ABAQUS 6.4-1<sup>(5)</sup>을 사용하여 비선형정적해석을 실시한다. 비선형정적해석 결과에서 산출된 강성행렬과 변위, 응력을 Visual C++을 사용하여 변위장과 응력장을 일치시키는 등가하중을 산출한다. 산출된 등가하중을 이전 설계단계의 모델과 비교하여 설계변수나 등가하중의 차가 설정한 허용계수보다 작다면 사이클을 종료한다. 설정한 허용계수를 만족하지 못한다면 GENESIS 7.5<sup>(4)</sup>를 사용하여 형상최적설계를 수행한다. 변경된 설계변수 정보를 적용하고 비선형정적해석을 재 수행한다. 종료조건을 만족할 때까지 Fig. 8의 과정을 반복한다.

## 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 비선형정적해석을 실시하여 최대응력을 비교하였다. 19번의 설계단계를 수행하였고 각 설계단계마다 형상이 바뀌면서 응력이 483.14 MPa에서 468.91 MPa로 줄어들었다. 마지막 설계단계의 모델과 초기모델의 최대응력의 차이는 약 15 MPa정도이다. 소성영역 또한 줄어든 것을 확인 하였다. 제한조건으로 설정한 반발력을 확인해본 결과 40 N이상을 만족시키는 결과를 얻었다. 각 설계에 대한 최대응력값은 Table 1에 나타내었다.

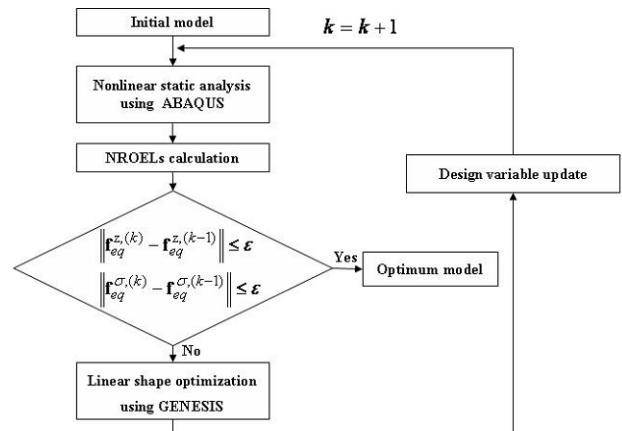


Fig. 8 Flow chart of optimization for a spacer grid

**Table 1** Optimization history (stress)

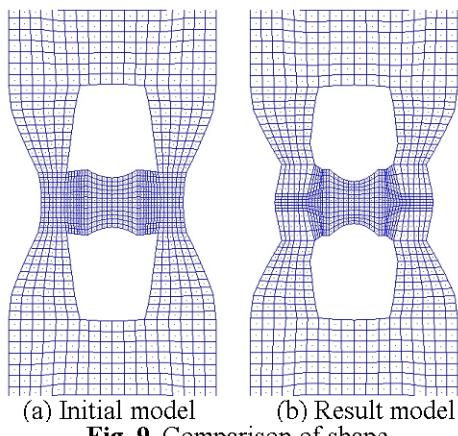
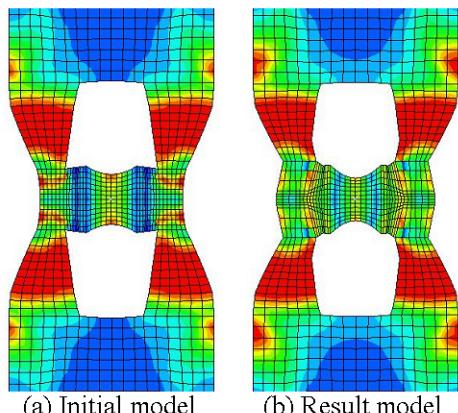
cycle	0	1	2	3	4	5	6
stress	483.14	479.74	478.93	477.40	478.72	476.80	474.22
cycle	7	8	9	10	11	12	13
stress	472.99	472.78	473.15	471.39	471.27	470.74	470.41
cycle	14	15	16	17	18		
stress	471.05	471.40	468.85	468.96	468.91		

### 5.2 형상

최적설계를 수행한 결과형상과 초기형상을 비교하면 Fig. 9와 같다. 지지격자 외곽의 오목하던 부분이 볼록하게 변형되었고 핵연료봉과 접촉하는 면을 지지하는 부분이 사다리꼴로 넓어진 것을 확인할 수 있다. 또한 핵연료봉과 접하는 부분의 오목한 형상이 더 깊어진 것을 볼 수 있다. 응력분포의 모습은 Fig. 10과 같다. 최대응력은 같은 위치의 같은 요소에서 발생하였다. 또한 핵연료봉이 직접 접하는 부분과 스프링의 다리부분에서 응력이 줄어든 것을 확인하였다.

### 6. 결 론

등가하중법을 이용하여 재료 비선형을 고려한

**Fig. 9** Comparison of shape**Fig. 10** Comparison of stress

원자로 핵연료봉 지지격자 스프링의 최적설계를 수행하였다. 비선형해석과 선형 최적설계를 반복 실시하였다. 최대값의 최소화 문제를 이용하여 구조물에 발생하는 최대응력을 줄임과 동시에 소성 영역을 줄였다. 스프링 설계 시 등가하중을 사용하여 비선형성이 고려된 최적설계를 수행하였다. 비선형성이 고려 됨으로써 선형성만을 고려했던 최적설계보다 최대응력이 적게 발생하는 설계를 얻을 수 있었다. 따라서 중성자 조사로 인해 감소하는 스프링력이 현재보다 향상될 것으로 예상된다. 지금까지 딥풀부분은 강성이 강하여 변형을 고려하지 않았으나 향후 제안된 설계기법을 이용하여 변형과 비선형성을 고려한 지지격자 딥풀의 최적설계에도 적용할 필요가 있다.

### 후 기

이 논문은 2단계 두뇌한국21사업, 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터 그리고 한국원자력 연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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
- (4) GENESIS Version 7.5, *User's Manual*, 2001, Vanderplaats Research and Development, Inc., Colorado Springs, CO.
- (5) ABAQUS/Standard Version 6.4-1, *User's Manual*, 2004, Hibbit, Karlson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, U.S.A.
- (6) 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.
- (7) 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.