

## 공리적 설계를 이용한 원자로 핵연료봉 지지격자체의 설계

송기남\* · 강병수\*\* · 최성규\*\*\* · 윤경호\*\*\*\* · 박경진†

(2001년 12월 18일 접수, 2002년 5월 27일 심사완료)

### Design of a Nuclear Fuel Rod Support Grid Using Axiomatic Design

Kee-Nam Song, Byung-Soo Kang, Sung-Kyoo Choi, Kyung-Ho Yoon and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Axiomatic Design(공리적 설계), Independence Axiom(독립 공리), Decoupled Design(비연성화 설계), Nuclear Fuel Rod Support Grid(지지격자체)

#### Abstract

Recently, much attention is imposed on the design of the fuel assemblies in the Pressurized Light Water Reactor (PWR). Spacer grid is one of the main structural components in a fuel assembly. It supports fuel rods, guides cooling water, and maintains a coolable geometry from the external impact loads. In this research, a new shape of the spacer grid is designed by the axiomatic approach. The Independence axiom is utilized for the design. For conceptual design, functional requirements (FRs) are defined and corresponding design parameters (DPs) are found to satisfy FRs in sequence. Overall configuration and shapes are determined in this process. Detail design is carried out based on the result of the axiomatic design. For the detail design, the system performances are evaluated by using linear and nonlinear finite element analysis. The dimensions are determined by optimization. Some commercial codes are utilized for the analysis and design.

#### 1. 서 론

경수로형 원자로(Pressurized Light Water Reactor; PWR)에 사용되는 Fig. 1의 핵연료집합체는 골격체와 핵연료봉으로 구성되어 있다. 골격체는 상단 고정체, 하단고정체, 안내관, 지지격자체가 하나의 구조물을 이루고 있다. 핵연료봉은 세장비(slenderness ratio)가 400 이상으로 크기 때문에 8-11개의 지지격자체에 의해서 지지되고 있다. 지지격자체의 지지부는 Fig. 2의 스프링과 덤플로 구성된다. 핵연료봉은 이 지지부의 지지력에 의해 지지된다. 따라서 핵연료봉의 기계적 건전성은 지지부의 기계적 성능과 밀접하게 연관되어 있다. 또한 지진이나 냉각재 상실사고와 같은 비정상적인 운전환경에서 발생하는 횡방향 충격하중은, 그 대

부분을 지지격자체가 감당하게 된다. 그러므로 비정상적인 운전환경에서 원자로를 긴급정지하기 위해 제어봉을 삽입하려면, 지지격자체는 횡방향 충격에 대해 충분한 구조적 강도를 갖도록 설계되어야 한다. 따라서 기계/구조적인 관점에서 지지격자체의 성능 개선이 진행되어 왔다.<sup>(1)</sup> 1968년부터 1993년까지 미국 특허청에 공고된 지지격자체와

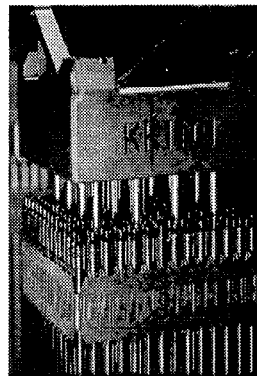


Fig. 1 Nuclear fuel assembly

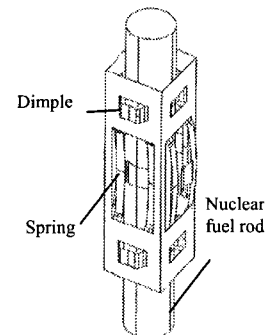


Fig. 2 Unit spacer grid

\* 회원, 한국원자력연구소  
 \*\* 회원, 한양대학교 기계설계학과 대학원  
 \*\*\* (주)한국철도차량  
 \*\*\*\* 한국원자력연구소  
 † 책임저자, 회원, 한양대학교 기계설계학과  
 E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr  
 TEL : (031)400-5246 FAX : (031)407-0755

관련된 특허는 약 137 종이다. 이들의 대부분은 기계/구조적인 측면이나 열수력적인 측면에서 재질, 제조성 향상, 형상 등에 관한 것들이다.<sup>(2)</sup> 재질 관점에 관한 대표적인 연구로는 1979년 Walton의 연구<sup>(3)</sup>가 있으며, 형상 관점에 관한 연구로는 1982년 Larson의 연구<sup>(4)</sup>와 1999년 장인권의 연구<sup>(5)</sup>가 있다. Larson은 지지격자체의 외판의 형상을 최적화하여 열수력 성능을 개선하였으며, 장인권은 여러 스프링에 대해 여러 목적함수를 적용하여 구조적인 성능 향상의 경향을 파악하려 하였다.

본 연구에서는 기계/구조적인 측면에서 지지격 자체의 내판 형상을 설계하고자 한다. 그러나 경험에 의존하는 지금까지의 설계 관행에 비해 보다 체계적이고 합리적인 설계 기법을 도입할 것이다. 이미 원자력에서 실제로 사용되고 있는 지지격 자체들은 그 설계 과정이 대부분 알려져 있지 않다. 또한 많은 경우, 그 설계 기준도 합리적으로 설명하지 못하고 있다. 합리적이고 체계적으로 설계 과정을 설명할 수 있는 설계기법을 도입하면 설계 비용 감소를 꾀할 수 있다. 뿐만 아니라, 설계자는 설계과정에서 나타날 수 있는 오류들을 쉽게 발견할 수 있다. 본 연구에서 사용한, 합리적이고 체계적으로 설계 과정을 설명할 수 있는 설계기법이란 공리적설계<sup>(6)</sup> 기법이다. 특히 공리적설계를 구성하는 두 개의 공리 중 하나인 독립공리 (Independence axiom)<sup>(6-12)</sup>를 사용하여 설계를 진행할 것이다. 독립공리에 의거하여 지지격자체의 기능적 요구들을 정의하고 각각의 기능적 요구들을 만족하는 설계 파라미터(Design Parameters; DPs)를 최적화 기법<sup>(11)</sup>을 이용하여 결정할 것이다. 수치 최적화 작업을 위해 GENESIS<sup>(15,16)</sup>를, 비선형해석을 위해 LS-Dyna3D<sup>(17)</sup>와 ABAQUS<sup>(18)</sup>를 사용한다.

## 2. 공리적 설계

설계는 무엇을 원하는가와 그것을 어떻게 얻을 것인가라는 질문의 연속적인 상호작용이라고 할 수 있다. 설계를 하는 동안 명시된 요구 조건들로부터 얻은 정보를 이용하여 설계목적을 정의함으로써 설계자가 얻고자 하는 것을 결정한다. 이를 기능적 요구(Functional Requirement; FR)라 한다. 기능적 요구를 어떻게 달성할 것인가에 대한 해답은 물리적 영역의 설계 파라미터(Design Parameter; DP)를 통해 얻을 수 있다. 결정된 FR을 DP로 사상하는 과정은 Fig. 3에 예시되어 있다. 설계 문제의 FR과 DP들은 지그재그 과정을 통해 계층적으로 분해된다. 한 계층은 그 계층만으로 비록 추상적이기는 하지만 완벽한 설계 해를 제공한다. FR

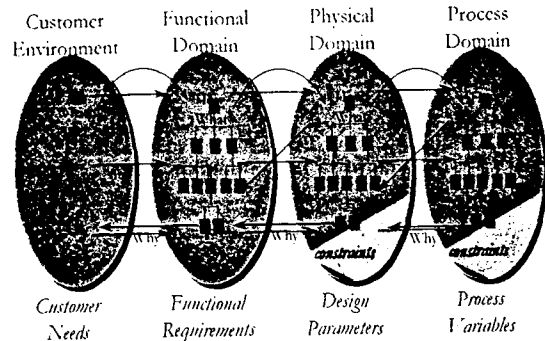


Fig. 3 Concept of domain, mapping and spaces

과 DP가 더 이상 계층적으로 분해되지 않을 시점에 도달하면 그 때가 설계가 완료되는 시점이다.

공리적 설계에서의 공리는 독립 공리 (Independence Axiom)와 정보 공리(Information Axiom)로 이루어진다. 독립 공리는 기능적 영역의 기능적 요구(FRs)로부터 물리적 영역의 설계 파라미터(DPs)로 진행되는 사상과정을 정의할 때에, DP와 FR이 일대일로 대응되기를 추천한다. 본 연구에서는 독립공리만을 적용하여 설계를 수행한다. 독립 공리를 설명하기 위해서 식 (1)의 설계방정식을 사용한다.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (1)$$

여기서 {FR}은 기능적 요구 벡터이고 {DP}는 설계 파라미터 벡터, [A]는 {FR}과 {DP}와의 관계를 설명하는 설계 행렬(design matrix)이다. 이제 다음과 같은 세 종류의 설계방정식을 고려해보자.

연성 설계(coupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

비연성화 설계(decoupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

비연성 설계(uncoupled design)

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 X는 FR과 DP가 관련이 있음을 의미하고 O는 관련이 없음을 의미한다.

식 (2)의 연성설계는 FR1을 만족시키기 위해 DP1, DP2, DP3를 동시에 결정해야 하는 경우이다.

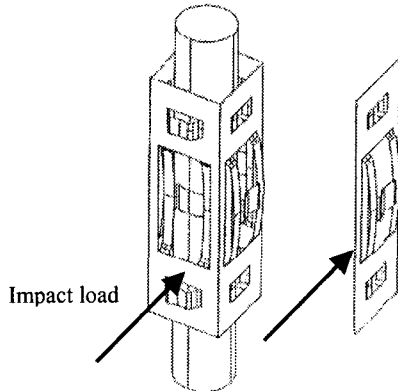


Fig. 4 Unit spacer grid under lateral impact load

이 경우, FR1 을 만족하기 위해 DP1, DP2, DP3 를 결정하더라도 이 결정이 FR2 와 FR3 도 만족한다는 보장은 없다. 따라서 주어진 FR 들들을 모두 만족하기 위해서는 시행착오를 반복하여 DP 들들을 결정해야 한다.

식 (3)의 비연성화 설계는 순차적 설계를 보여 준다. 이 경우, FR1 을 만족하기 위해서는 DP1 만을 결정하고, FR2 를 만족하기 위해서는 이미 결정된 DP1 에 추가적으로 DP2 만을 결정하면 된다. 마찬가지로 FR3 를 만족하기 위해서는 DP1, DP2 가 이미 결정되었으므로 DP3 만을 결정하면 된다.

식 (4)는 각각의 FR 과 DP 가 일대일의 대응관계를 이룬다. 공리적 설계의 제 1 공리인 독립공리는 FR 과 DP 가 일대일로 대응되는, 식 (4)와 같은 비연성 설계를 추천하고 있다. 이것이 어렵다면 차선책으로 식 (3)의 비연성화 설계를 추천하고 있다. 만약 설계결과가 식 (2)와 같은 연성 설계라면, 이것은 공리적 설계의 관점에서 잘못된 설계이다. 이 경우 설계자는 FR 이나 DP 를 다시 설정하여 비연성 설계나 비연성화 설계가 되도록 하여야 한다.

### 3. 독립공리를 이용한 지지격자체 설계

#### 3.1 문제 설정

지지격자체가 가져야 하는 일반적인 기능들은 다음과 같다. 첫째, 지지격자체는 연료봉을 안정적으로 지지해야 한다. 둘째, 지지격자체는 뜨거운 연료봉에서 냉각수로 향하는 열전달을 촉진시켜야 한다. 셋째, 지지격자체는 어떠한 비정상적인 운전 환경에서도 지지격자체 내부의 제어봉 통로를 안전하게 보호하여야 한다. 설계자는 지지격자체를

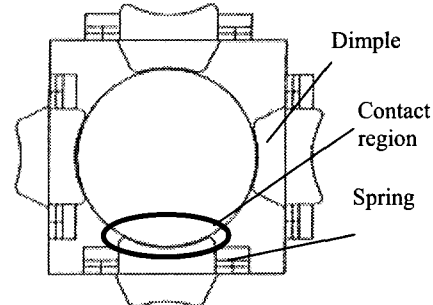


Fig. 5 Contact between nuclear fuel rod and spring

설계하는데 있어 이와 같은 기능들을 염두에 두어야 한다. 특히, 원자로의 안전한 운전을 위한 세번째 기능은 매우 중요하다. 본 논문에서는 지지격자체를 기계/구조적인 측면에서 바라보고 있으므로 다음의 현상들을 고려한다.

지진과 같은 비정상적인 운전환경에서는 Fig. 4와 같이 횡방향 충격 하중이 지지격자체에 가해진다. 지지격자체는 그 내부에 있는 제어봉 통로들이 충격하중으로부터 안전하게 보호하여야 한다. 따라서 지지격자체는 이 충격하중을 견디는 충분한 강도를 가지고 있어야 한다.

또 Fig. 5 에서처럼 지지격자체의 스프링은 연료봉을 지지해야 하기 때문에 반드시 연료봉과 접촉을 한다. 이 접촉면에는 접촉압력이 존재한다. 이 접촉압력과 함께 냉각수에 의한 유체유발 진동에 의해 프레팅(fretting)현상이 일어난다. 이 프레팅현상으로 인해 연료봉이 마모되어 결과적으로 방사능 유출의 위험이 생긴다. 따라서 연료봉의 마모를 방지하여야 한다.

지지격자체에서 실제로 연료봉을 지지하는 부분은 스프링과 딤플이다. 그런데 딤플의 강성에 비해 스프링의 강성은 매우 낮다. 따라서 연료봉이 지지격자체에 삽입될 때, 대부분의 변형은 딤플이 아닌 스프링에서 일어난다. 그런데 변형된 스프링은 충분한 지지력으로 연료봉을 지지해야 한다. 따라서 스프링의 소성변형이 최소화되어야 한다.

이제, 지지격자체에 대한 상기 관찰 결과를 바탕으로 지그재그 과정과 분해를 통해, 구조적인 측면에서 바라본 지지격자체의 FR 과 DP 들을 선정한다.

#### 3.2 설계 방정식의 구성

지지격자체는 외부 충격으로부터 제어봉 통로를 보호하여야 한다. 이를 위해서 지지격자체는 외부 충격에 대해 충분한 강도를 가져야 한다. 충분한 강도를 가지게 할 수 있는 부분은 크게 외관

과 내판으로 구분할 수 있다. 외판의 강도를 결정하는 것은 두께이다. 그러나 외판의 두께는 일정한 값으로 고정되어 설계대상에서 제외되었다. 따라서 내판의 강도를 조절하는 것으로 외부 충격을 견뎌야 한다. 횡방향 충격에 저항하는 내판의 강도를 결정하는 부분은 Fig. 6 에서의 치수  $l$  이다. 따라서 FR1 과 DP1 을 다음과 같이 결정한다.

- FR1: 횡방향 충격에 견디는 강도를 가져라.
- DP1: Fig. 6 의  $l$  의 치수

또한 지지격자체는 연료봉을 안정적으로 지지하여야 한다. 따라서 FR2 와 DP2 는 다음과 같다.

- FR2: 횡방향으로 연료봉을 안전하게 지지하라.
- DP2: 횡방향 지지부

이제 이들에 의한 설계행렬이 어떤 유형인지를 알아본다. 본 연구에서는 횡방향 지지부를 Fig. 6 의 중앙에 배치할 것이다. 그런데 Fig. 6 에서  $l$  의 치수가 결정되어야만, 다시 말하면 내판의 강도가 결정되어야만 횡방향 지지부가 차지하는 공간을 결정할 수 있다. 따라서 FR1 과 FR2 는 다음과 같은 비연성화 행렬을 이룬다.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

그런데 FR2-DP2 즉, 연료봉을 횡방향 지지부로 안전하게 지지하기 위해서는 연료봉 마모에 의한 연료의 누출을 방지하고 소성변형을 최소화하여 필요한 지지력을 확보하여야 한다. 따라서 FR2 는 다음과 같은 두개의 기능적 요구로 분해될 수 있다.

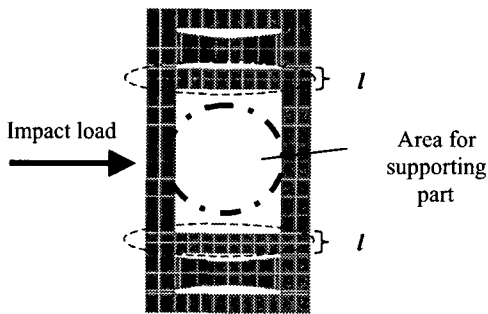


Fig. 6 Unit inner strip in a spacer grid

- FR21: 연료봉과 지지부 사이의 접촉압력을 최소화하라.
- FR22: 일정한 지지력을 확보하면서 최대응력을 최소화하라.

그런데 지지부의 지지력에 의한 접촉력이 존재하면 그 접촉압력은 접촉면적에 의해 결정된다. 따라서 접촉부의 형상으로 접촉압력을 조절할 수 있다. 지지부의 지지력은 스프링의 형상에 의해 결정된다. 그런데 접촉부의 형상이 고정되면 스프링의 형상 변화의 자유에 어느 정도 제한을 받게 된다. 이제 이들 FR21 과 FR22 에 대응하는 DP21 과 DP22 및 그 설계 행렬은 다음과 같다.

- DP21: 접촉부의 형상
- DP22: 스프링의 형상

$$\begin{Bmatrix} FR21 \\ FR22 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP21 \\ DP22 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

### 3.3 DP1 의 결정

FR1 즉, 내판의 강도를 조절하기에 앞서 다음과 같이 충격시험에서의 임계충격하중을 정의할 필요가 있다.

**임계충격하중** : 격자체에 가해지는 충격력이 점진적으로 증가할 때, 격자체의 소성 붕괴 시점 직전에 가해진 충격력.

이제 설계 기준이 되는 임계충격하중을 결정한다. 그 후 설계하려는 지지격자체의 임계충격하중이 그 기준값보다 크게 되도록 Fig. 6 의 충격지지부의 길이  $l$ (DP1)을 결정한다. 일반적으로 임계충격하중의 기준값으로는, 실제로 원자로에서 사용되고 있는 격자체를 대상으로 충격시험을 수차례 시행하여 얻은 임계충격하중의 평균값을 취한다. 실제 충격 시험은 Fig. 7 의 자유낙하식 충격시험장치를 사용하였으며, 여기서 나온 평균값은 4500N 이다. 실제 충격 시험을 모사하는 비선형 유한요소 모델을 Fig. 8 과 같이 개발하였다. 이것은 Fig. 4 의 단위지지격자체를 가로방향과 세로방향으로 확장시켜 조립한 형상이다. 해석 시의

Table 1 Material properties of zircaloy-4

Elastic				Plastic	
E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$
105.15	328.0	6550	0.294	328.0	0.0
				443.0	0.340

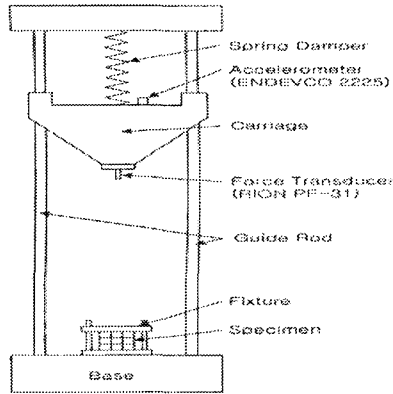


Fig. 7 Free fall shock machine

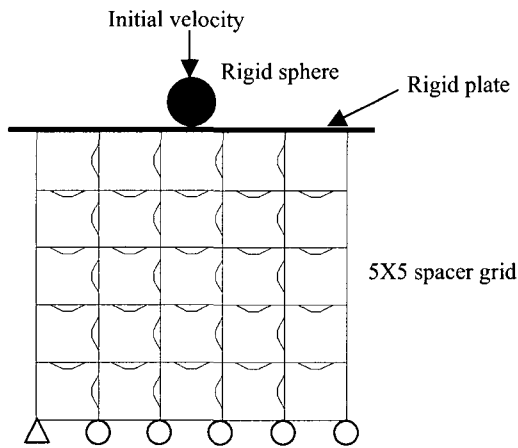


Fig. 8 Impact analysis model

충격력은 강체 구와 강체 판, 지지격자체가 접촉할 때의 접촉력으로 정의하고 Table 1의 물성치<sup>(19)</sup>를 사용한다. 충격지지부의 길이  $l$ 에 대한 여러 후보 값을 사용하여 임계충격하중을 구하는 비선형 해석을<sup>(17)</sup> 수행하였다. 그 결과, Fig. 9와 같이 값이 4.374mm 일 때의 임계충격하중이 4500N 이상인 것을 알 수 있었다. 따라서 FR1을 만족하는 DP1은 충격지지부의 길이  $l$ 을 4.374mm로 결정한다.

3.4 DP21과 DP22의 결정

FR2를 만족하기 위한 설계는 접촉 압력을 최소화하기 위한 핵연료봉과 스프링이 접촉하는 부분의 형상(DP21)을 결정하는 것이다. 지지력에 의해 생기는 접촉력은 일정하므로, 접촉 압력을 최소화하기 위해서 핵연료봉과 스프링이 접촉하는 부분의 곡률을 동일하게 하여 접촉면적이 최대가 되도록 한다.

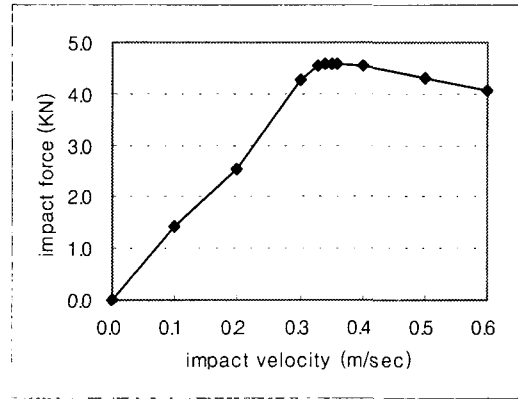
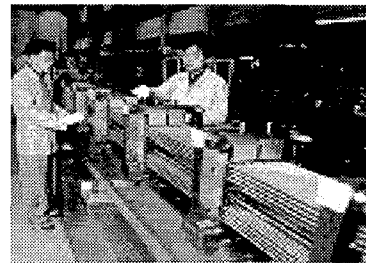
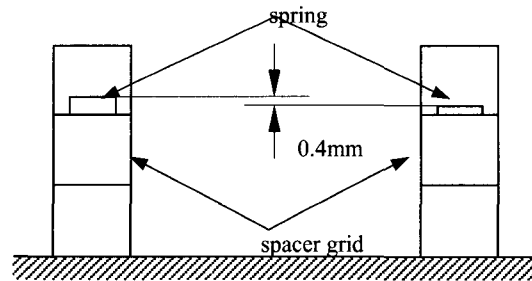


Fig. 9 Force - velocity curve at  $l=4.374$ mm



(a) Manufacturing process



(b) Schematic diagram of spacer grid

Fig. 10 Fuel assembly

또, 주어진 지지력을 가지면서 최대 응력이 최소화(FR22) 되는 스프링의 형상(DP22)을 결정하여야 한다. 스프링은 핵연료집합체의 제조 오차와 운송 과정에서의 하중 및 원자로 내부에서의 하중에 의해 변형을 하게 된다.

하중은 간단하게 식 (7)로 표현할 수 있다. 원자로 내에서는 중성자 조사에 의해 초기 스프링력의 92%가 감소하게 된다. 이것은 식 (7)의 좌변에 해당한다. 또한 유체유발진동(Fluid Induced Vibration)과 핵연료집합체의 운송 중에 스프링은 각각 2N, 1.2N의 힘을 받게 되는데, 이것들이 식 (7)의 우변이다. 이것을 정리한 식 (8)은 지지격자체의 초

기 스프링력은 최소 40N 이 되어야 함을 의미한다.

$$F_{spring} \times 0.08 > 2 + 1.2 \quad (7)$$

$$F_{spring} > 40N \quad (8)$$

변형은 Fig. 10 의 핵연료집합체 제조 과정과 관련이 있다. Fig. 10(a)와 같이 핵연료집합체는 여러 개의 지지격자체를 미리 정해진 간격으로 놓고, 연료봉을 수평방향으로 장입시켜 제조한다. 이 때, Fig. 10(b)에서처럼 하나의 연료봉을 공유하는 스프링에는 제조 과정의 공차에 의해 평균 0.4mm 의 높이차가 존재한다. 이것은 핵연료집합체가 제조 될 때 스프링이 연료봉에 의해 최대 0.4mm 눌러 지는 것을 의미한다. 위의 사항들을 종합하면 스프링은 40N 의 하중을 받고 제조 과정상의 이유로 0.4mm 의 변형을 일으킴을 알 수 있다.

식 (5)에서 이 설계는 비연성화 설계이기 때문에 DP1 으로 인해 스프링이 차지하는 공간은 고정 된다. 또 식 (6)에서 접촉부의 형상이 결정되면 스프링의 형상에 다소 제한이 생기게 된다. 이제 DP22 를 결정하기 위해 다음과 같은 최대값의 최소화 문제(Min-Max problem)를<sup>(13, 14)</sup> 설정하였다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && \beta \\ &\text{subject to} && \sigma < \beta \\ & && \delta = 0.4 \text{ mm} \\ & && F_{spring} = \text{given constant load} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $\beta$ 는 가상의 변수,  $\sigma$ 는 응력,  $\delta$ 는 스프링의 변위,  $F_{spring}$ 은 스프링에 가해지는 하중이다.

이 정식화를 통해 바라는 것은 주어진 지지력에 의해 0.4mm 의 탄성변형을 일으키면서 최대응력은 최소화되는 스프링의 형상이다. 그러나 일반적으로 위에서 언급한 하중조건에서는 스프링이 소성변형을 일으킨다. 따라서 이를 고려하기 위해 비선형해석<sup>(18,20)</sup>을 수행하여야 한다. 구조최적설계의 선형최적화가 가지는 효율성을 이용하면서 동시에 소성변형을 고려하기 위해서 Fig. 11 의 설계 과정을 사용하였다. 이 과정의 목적은 40N 의 지지력에 의해 0.4mm 의 탄소성변형을 하면서 소성 변형 자체는 최소화되는 스프링형상을 얻는 것이다. 이 과정에서 정식화 (9)의  $F_{spring}$  값을 적절히 반복적으로 변화시켰다. 이 값은 대체로 40N 보다 다소 큰 값들이었다. 형상최적화문제를 풀기 위해 Fig. 12 의 1/4 모델을 사용하였다. 스프링이 가질 수 있는 강성의 범위를 최대한 넓게 하기 위해, 즉 설계 공간을 넓게 고려하기 위해 초기 스프링형상의 다리를 x 방향 보다는 y 방향으로 연결하였

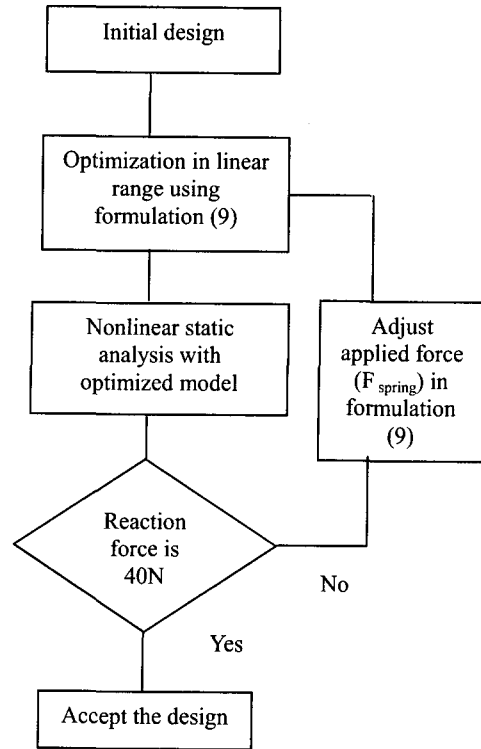


Fig. 11 Design process for DP22

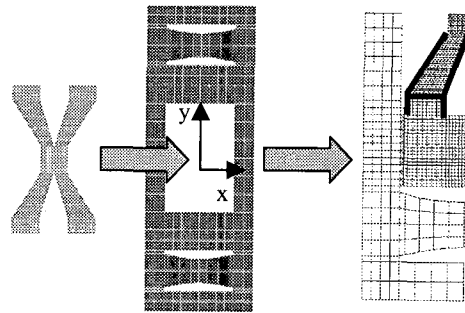


Fig. 12 Initial quarter design of spring and design variables

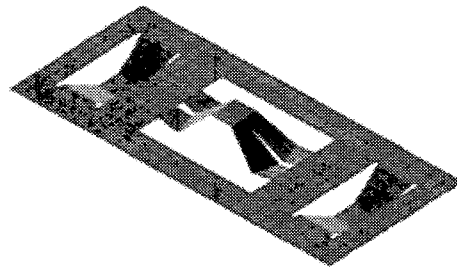


Fig. 13 Designed unit inner strip

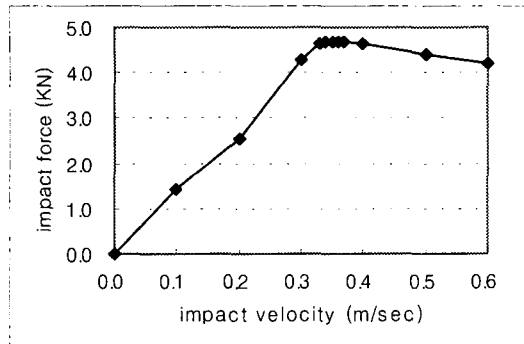


Fig. 14 Force – velocity curve of final design

다. 형상 설계변수는 Fig. 12 우측 그림에서 굵은 선으로 표시한 부분의 3 차원 좌표이다. 실제 문제 해결은 상용소프트웨어를 사용하였다.<sup>(15, 16)</sup> 이 과정의 결과로서, Fig. 13 과 같은 스프링형상(DP22)을 얻었다. 지금까지 식 (5)와 식 (6)에 의해 DP1, DP21, DP22 의 순서로 설계를 수행하였다.

#### 4. 고찰

설계된 지지격자체의 임계충격하중을 점검하기 위해 비선형충격해석을 수행한 후 Fig. 14 의 임계충격하중을 얻었다. 이 값은 스프링이 없는 지지격자체의 임계충격하중에 비해 약 100N 정도 더 높은 것이다. 따라서 엄밀하게 말하자면, 지지부(DP2)가 내판의 강성에 영향을 미치지 않는다는 것을 표현하는 식 (5)는 정확한 사실은 아니다. 그러나 100N 의 차이에서 알 수 있듯이, DP2 에 대한 FR1 의 민감도가 매우 작다. 따라서 공리적 설계의 정리 8 에 의해 스프링은 내판의 강성에 영향을 미치지 않는다고 근사화할 수 있다. 정리 8 은 설계행렬의 한 요소에서 DP 가 FR 에 미치는 영향이 설계자가 정한 정도보다 작다면 이 행렬 요소는 무시될 수 있다는 내용을 담고 있다.<sup>(6)</sup>

이 연구에서 지지격자체의 설계행렬은 비연성화 행렬이다. 따라서 내판의 강도를 변경하면 즉, 임계충격하중을 변경하게 되면 스프링의 형상을 다시 설계하여야 한다. 만약 스프링에 가해지는 하중조건이 변경된다면 설계자는 단지 스프링의 형상만을 다시 설계하면 된다. 소성변형의 주된 원인은 제작과정에서의 공차에 기인하는 것이므로 제작과정에서의 공차가 개선된다면 하중조건이 변경은 언제든지 가능하다. 만약 공차가 개선된다면 스프링 형상의 재설계만으로 탄성변형만을 하는 스프링을 얻을 수 있을 것이다.

#### 5. 결론

설계 공리 중 제 1 공리인 독립 공리를 이용하여 구조적 건전성의 관점에서 원자로 핵연료봉 지지격자체를 설계하는 기법을 제안하였다. 이를 위해 지지격자체가 가져야 하는 기능적 요구들을 정의하고 이들을 달성하기 위한 설계파라미터들을 정의하였다. 기능적 요구의 일부는 지그재그과정을 통해 분해되어 2 수준으로 계층화되었다. 공리적 설계의 정리 8 에 의해 설계행렬을 비연성화 행렬로 근사화하고 이에 따라 설계를 수행한 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 구조적인 관점에서 지지격자체에 접근하였다. 그러나 실제 지지격자체의 동작환경은 열역학, 유체역학, 구조동역학, 핵관련 여러 학문이 복합적으로 관련이 있다. 위의 분야들이 고려된다면 본 연구의 비연성화 설계는 유효하지 않을 수 있으며, 정의된 기능적 요구 또한 수정될 수 있을 것이다. 따라서 위의 다양한 학문들을 아우르는 설계가 앞으로 이루어져야 한다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 한국원자력연구소에서 수행하고 있는 고성능지지격자구조기술개발과제의 연구비 지원과 한국과학재단지정 최적설계신기술센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Jung, Y.H., Song, K.N., Kim, H.K., Kang, H.S., Yoon, K.H., 1999, *Final Report of Development of New Fuel Rod for Pressurized Light Water Reactor*, KAERI/RR-2015/99, KAERI.
- (2) Kim, H.K., Song, K.N., Yoon, K.H., Kang, H.S., Jeon, T.H., Oh, D.S., In, W.K., Bang, J.K., Oh, S.E., Seo, J.M., Lee, J.S., Park, S.K., 1997, *Analysis of the Patent Specifications on Nuclear Grid assembly Permitted in U.S.A.*, KAERI/TR-867/97, KAERI.
- (3) Walton, L.A., 1979, "Zircaloy Spacer Grid Design," *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol.32, pp. 601~602, USA.
- (4) Larson, J.G., 1982, "Optimization of The Zircaloy Spacer Grid Design," *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 43, pp. 160~161, USA.
- (5) Jang, I.G., 1999, "Optimal Design of a Nuclear Fuel Rod Support Structure Based on Contact Stress Analysis," M.S. Thesis, KAIST.
- (6) N.P. Suh, 2001, *Axiomatic Design*, Oxford University Press, New York.

- (7) Lee, K.W. and Park, G.J., 2000, "A Structural Optimization Methodology Using the Independence Axiom," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, Issue 10, pp. 2438~2450.
- (8) Lee, K.W., Lee, K.H., and Park, G.J., 2000, "A Structural Optimization Methodology Using the Independence Axiom," *Proceeding of the First International Conference on Axiomatic Design ICAD2000*, pp. 145~150.
- (9) Lee, K.H., Hwang, K.H., and Park, G.J., 2000, "Robust Design of a Micro Gyroscope Using Axiomatic Approach," *2000 U.S. - Korea Conference on Science and Technology, Entrepreneurship, and Leadership*.
- (10) Shin, C.S., Lee, K.H., and Park, G.J., 2000, "Robust Structural Optimization Using Design Axioms in a Discrete Design Space," *AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, AIAA-2000-4808.
- (11) Shin, M.K., Hong, S.W., and Park, G.J., 2001, "Axiomatic Design of the Motor Driven Tilt/Telescopic Steering System for Safety and Vibration," *Proc. Instn. Mech. Engrs. (Journal of Automobile)*, February, Vol. 215, pp. 179~187.
- (12) Do, S.H. and Park, G.J., 2001, "Application of Design Axioms for Glass-Bulb Design and Software Development for Design Automation," *Journal of Mechanical Design*, September, Vol. 123, Issue 3, pp. 322~329.
- (13) Arora, J.S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (14) Vanderplaats, G.N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (15) GENESIS *User Manual*: Ver 5.0, 1998, VMA Engineering.
- (16) FEMBGENESIS *User Manual*: Ver 26.3D, 1996, VMA Engineering.
- (17) LS-DYNA *User Manual*, 1999, Livermore Software Technology, CO.
- (18) ABAQUS/Standard Version 5.8 *User manual*, Hibbit, Karlsson, and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (19) Yoon, K.H., Kang, H.S., Kim, H.K., Song, K.N. et al., 2000, *Analysis of Buckling Behavior of Fuel Rod Support Grid Assembly Subjected to the Lateral Impact Load*, KAERI/TR-1569/00, KAERI.
- (20) Bathe, K.J., 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Inc. A Simon and Schuster Company Englewood Cliffs, New Jersey.