

# 공리적 설계를 이용한 원자로 핵연료봉 지지격자체의 설계

송기남<sup>\*\*\*</sup> · 강병수<sup>\*\*</sup> · 최성규<sup>\*</sup> · 윤경호<sup>\*\*\*</sup> · 박경진<sup>\*\*</sup>

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

K.N. Song<sup>\*\*\*</sup>, B.S. Kang<sup>\*\*</sup>, S.K. Choi<sup>\*</sup>, K.H. Yoon<sup>\*\*\*</sup>, and G.J. Park<sup>\*\*</sup>

**Key Words :** Axiomatic design, Independence axiom, Decoupled design, Nuclear fuel rod support grid.

### 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 protects the system from the external impact loads. Various space grids have been proposed and new designs are also being created. In this research, a new 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)내의 핵연료집합체는 골격체와 핵연료봉으로 구성되어 있다. 골격체는 상단고정체, 하단고정체, 안내관, 지지격자체가 하나의 구조물을 이루고 있다. 핵연료봉은 세장비(slenderness ratio)가 400 이상으로 크기 때문에 8-11 개의 지지격자체에 의해서 지지되고 있다. 지지격자체의 지지부는 스프링과 댐플로 구성된다. 핵연료봉은 이 지지부의 지지력에서 발생하는 마찰력에 의해 지지된다. 따라서 핵연료봉의 기계적 건진성은 지지부의 기계적 성능과 밀접하게 연관되어 있다. 또한 지진이나 냉각재 상실사고와 같은 비정상적인 운전환경에서 발생하는 횡방향 충격하중은, 그 대부분을 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 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.

본 연구에서는 기계/구조적인 측면에서 지지격자체의 형상을 설계하고자 한다. 그러나 경험에 의존하는 지금까지의 설계 관행에 비해 보다 체계적이고 합리적인 설계 기법을 도입할 것이다. 이미 원자로에서 실제로 사용되고 있는 지지격자체들은 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 피할 수 있다. 뿐만 아니라, 설계

\* (주)한국철도차량

\*\* 한양대학교 기계설계학과

\*\*\* 한국원자력연구소

자는 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 공리 중의 하나인 독립공리 (Independence axiom)<sup>(6)</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>(12, 13)</sup>를, 비선형해석을 위해 LS-Dyna3D<sup>(14)</sup>를 사용한다.

## 2. 지지격자체의 기능 및 특징

지지격자체(spacer grid)는 상단 고정체, 하단 고정체, 안내관 등과 함께 Fig. 1의 핵연료집합체를 구성하는 부품 중의 하나이다. 특히, 지지격자체는 핵연료의 성능을 향상시키기 위해 하드웨어적인 개선이 필요한 경우에 우선적으로 고려되는 구조 부품이기도 하다.

Fig. 2에서는 지지격자체만을 나타내었다. 지지격자체는 스프링(spring)과 덤플(dimple)로 이루어져 있으며, 이들이 연료봉을 지지하는 역할을 한다. 덤플은 스프링에 비해 강성이 상당히 크므로 핵연료봉이 지지격자체에 장전될 때 덤플의 변형은 거의 일어나지 않는다.

지지격자체가 갖추어야 하는 일반적인 기능들은 다음과 같다. 그것들은 첫째, 노심 내에서 핵연료봉들이 제 위치에 있도록 고정시켜주는 기능과, 둘째, 핵연료봉 사이에 냉각 수로를 형성하여 핵연료봉으로부터 냉각재까지의 열전달을 촉진시켜주는 기능, 셋째, 비정상적인 운전 환경에서 핵연료집합체 사이의 횡 방향 하중 경로와 제어봉의 삽입 경로를 제공하는 기능 등이다. 그러므로 지지격자체를 설계할 경우에는 이런 기능들이 고려되어야 한다. 특히 지진에 의해 지지격자체는 횡 방향의 충격을 받게 되므로 일정한 충격력을 견딜

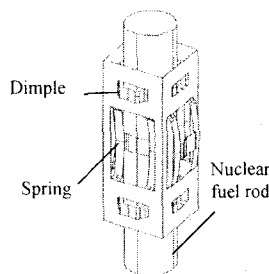


Fig. 1 Nuclear fuel assembly Fig. 2 Unit spacer grid

수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 주로 구조적 건전성 측면에서 지지격자체에 접근하고 있으므로 고정 기능과 내충격 기능을 중점적으로 고려한다.

## 3. 공리적 설계

독립 공리(Independence Axiom)를 설명하기 위해 다음과 같은 세 종류의 설계방정식<sup>(6)</sup>을 고려해보자.

연성 설계(coupled design)

$$\begin{cases} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{cases} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{cases} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{cases} \quad (1)$$

비연성화 설계(decoupled design)

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

비연성 설계(uncoupled design)

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

위의 식들은 기능적 요구(FRs)와 설계 파라미터(DPs) 사이의 관계의 유형에 따라 설계 상태를 세 가지 범주로 나눈 것이다. 여기서 X는 해당 FR과 DP가 관련이 있음을 의미하고 O는 관련이 없음을 의미한다.

식 (1)의 연성설계는 FR1을 만족시키기 위해 DP1, DP2, DP3를 모두 결정해야 하는 경우를 보여준다. 그러나 FR1을 만족하기 위해 DP1, DP2, DP3를 결정하더라도, 이 결정 사항들이 FR2 및 FR3도 동시에 만족한다는 보장은 없다. 따라서 주어진 FRs들을 모두 만족하기 위해서는 시행착오를 반복하여 DPs들을 결정해야 한다.

식 (2)의 비연성화 설계는 만족시켜야 할 FRs의 순서를 잘 결정하면, 식 (1)의 연성 설계에서와 같은 반복적인 시행착오는 피할 수 있음을 보여준다. 이 경우, FR1을 만족하기 위해서는 DP1만을 결정하고, FR2를 만족하기 위해서는 이미 결정된 DP1에 추가적으로 DP2만을 결정하면 된다. 마찬가지로 FR3를 만족하기 위해서는 DP1, DP2가 이미 결정되었으므로 DP3만을 결정하면 전체 FR들을 일괄되게 만족시킬 수 있다.

식 (3)은 각각의 FR을 만족하기 위해 해당하는 하나의 DP만을 결정하여 설계를 완성하는 비연성

설계(uncoupled design)를 보여준다. 이 때에는 각각의 FR 을 독립적으로 다루어질 수 있다. 따라서 차후 어떤 FR 에 변화가 생기더라도 관계되는 DP 만을 다시 결정하면 되므로, 설계결과의 유지 보수가 매우 용이하다.

공리적 설계에서의 독립공리는 FR - DP 가 일대일로 대응되는, 식 (3)과 같은 비연성 설계를 추천하고 있다. 이것이 어렵다면 차선책으로 식 (2)의 비연성화 설계를 추천하고 있다. 만약 설계결과가 식 (1)과 같은 연성 설계라면, 이것은 공리적 설계의 관점에서 옳지 않은 설계이다. 이 경우 설계자는 FR 이나 DP 를 다시 결정하여 비연성 설계나 비연성화 설계가 되도록 해야 한다.

#### 4. 독립공리를 이용한 지지격자체의 설계

##### 4.1 설계방정식의 구성

###### 4.1.1 기능적 요구(FRs)의 결정

지지격자체는 지진과 같은 비정상적인 운전환경에서는 횡방향의 충격을 받게 되므로 일정한 충격력에 견딜 수 있어야 한다. 또, 스프링과 핵연료봉사이의 접촉면에서 일어나는 프레팅(fretting) 현상에 의한 마모도 방지해야 한다. 한편, 스프링은 덤플에 비해 상대적으로 강성이 작다. 따라서 핵연료봉이 장전될 때에는 대부분의 변형이 스프링에서 일어난다. 그런데 스프링은 연료봉을 일정한 지지력으로 지지해야 하기 때문에 가능하면 스프링의 소성변형을 막아야 한다. 이상을 고려하면 지지격자체의 기능적 요구 벡터{FR}은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{충격력을 견디는 가벼운 것} \\ \text{접촉 압력의 최소화} \\ \text{최대 응력의 최소화} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

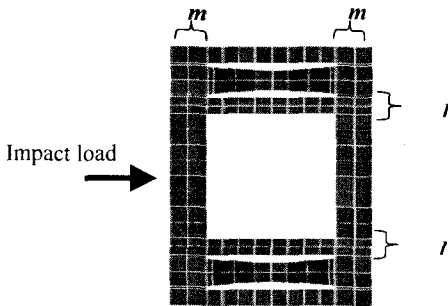


Fig. 3 Unit inner strip in a spacer grid

##### 4.1.2 설계파라미터(DPs)의 선정

지지격자체에서 스프링을 제거한 형상은 Fig. 3과 같다. 실제의 비정상적인 운전환경에서는 충격력은 Fig. 3 과 같은 방향으로 가해지게 된다. 이 충격을 견딜 수 있는 부분은 세로 폭  $l$  이므로, DP1 은 충격지지부의 세로 폭  $l$  으로 선정한다.

그리고 접촉력이 일정하다면 접촉면적을 증가시켜 접촉압력을 줄일 수 있다. 따라서 핵연료봉과 스프링 사이의 접촉부 형상을 DP2 로 하여 접촉면적을 조절한다.

마지막으로, 스프링에 발생하는 응력의 기계적인 원인은 연료봉을 지지하는 스프링의 지지력이다. 그런데 지지력은 일정해야 하며 재료의 두께 역시 변경할 수 없는 제약조건이 있어, 오직 스프링의 형상만으로 최대 응력을 최소화하여야 한다. 따라서 DP3 은 전체 스프링의 형상으로 선정한다. 이제 설계 파라미터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{충격 지지부의 길이}(l) \\ \text{핵연료봉과 스프링의 접촉부 형상} \\ \text{전체 스프링의 형상} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

##### 4.1.3 설계행렬의 결정

지지격자체의 실제 물리적 거동의 관찰과 현장 엔지니어와의 토의를 바탕으로 설계 방정식은 식 (6)과 같이 표현되었다.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & \chi \\ O & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

그러나 식(6)에서  $x$  로 표시되는 비대각 요소는 설계 파라미터에 대한 기능적 요구의 민감도가 매우 작기 때문에 설계 공리의 정리 8 에 의해서 무시할 수 있다<sup>(6-10)</sup>. 그러므로 식 (6)의 준비연성화 설계(nearly decoupled design)를 식 (7)의 비연성화 설계(decoupled design)로 간주할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

정리 8 은 주어진 설계 범위 내에서 비대각 요소들의 설계 파라미터들에 대한 민감도가 설계자가 정한 허용치 이하라면 이 비대각 요소들은 무시될 수 있다는 내용을 담고 있다.

이제 식 (7)로 표현되는 비연성화 설계 방정식에 따라 DP1, DP2, DP3 의 순서로 설계를 수행한다.

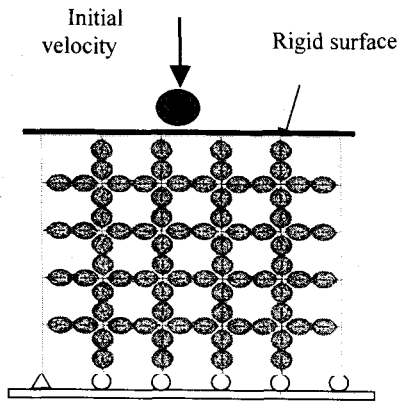
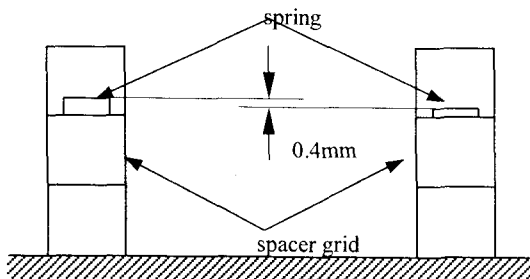


Fig. 4 Impact analysis model



(a) Manufacturing process



(b) Schematic diagram of spacer grid

Fig. 5 Fuel assembly

#### 4.2 DP1의 결정

FR1 즉, 충격력을 견디는 가벼운 지지격자체를 설계하려면 다음과 같이 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 임계충격하중

이 기준값보다 크게 되도록 DP1 인 Fig. 3 에서의 충격지지부의 길이  $l$  을 결정한다. 일반적으로 임계충격하중의 기준값은, 실제로 원자로에서 사용되고 있는 격자체를 대상으로 충격시험을 수차례 시행하여 얻은 임계충격하중의 평균값을 취한다. 이 경우 그 기준값은 4500N 이다. Fig. 4 에서처럼 해석 시의 충격력은 강체구와 강체 판, 지지격자체가 접촉할 때의 접촉력으로 정의하고, 실제 지지격자체의 물성치를 사용한다<sup>(15)</sup>.

충격지지부의 길이  $l$  에 대한 여러 후보값을 사용하여 임계충격하중을 구하는 비선형 해석을 수행하였다. 그 결과, 값이 4.374mm 일 때의 임계충격하중이 4500N 이상 인 것을 알 수 있었다. 따라서 FR1 을 만족하는 DP1 은 충격지지부의 길이  $l$  을 4.374mm 로 결정한다.

#### 4.3 DP2의 결정

FR2 를 만족하기 위한 설계는 접촉 압력을 최소화하기 위한 핵연료봉과 스프링이 접촉하는 부분의 형상(DP2)을 결정하는 것이다. 접촉 압력을 최소화하기 위해서는 핵연료봉과 스프링이 접촉하는 부분의 곡률이 동일해야 한다는 개념으로 초기의 모델을 결정할 수 있다.

#### 4.4 DP3의 결정

최대 응력을 최소화(FR3) 하는 스프링의 형상(DP3)을 결정해야 한다. 스프링은 핵연료집합체의 제조 오차와 운송 과정에서의 하중 및 원자로 내부에서의 하중에 의해 변형을 하게 된다.

하중은 간단하게 식 (8) 및 (9)로 표현할 수 있다. 원자로 내에서는 중성자 조사에 의해 초기 스프링력의 92%가 감소하게 된다. 이것은 식 (8)의 좌변에 해당한다. 또한 유체유발진동(Fluid Induced Vibration ; FIV)과 핵연료집합체의 운송 중에 스프링은 각각 2N 과 1.2N 의 힘을 받게 되는데 이것들이 식 (8)의 우변이다. 이것을 정리한 식 (9)는 지지격자체는 초기 스프링력이 최소 40N 이 되어야 함을 의미한다.

한편, Fig. 5(a)와 같이 핵연료집합체는 여러 개의 지지격자체를 등간격으로 놓고 연료봉을 수평방향으로 장입시켜 제조한다. Fig. 5(b)에서 하나의 연료봉을 공유하는 스프링이 제조 과정의 공차에 의해 0.4mm 의 차이가 있다. 이것은 핵연료집합체를 제조할 때 스프링이 연료봉에 의해 최대 0.4mm 만큼 눌러지는 것을 의미한다.

위의 사항들을 종합하면 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 스프링은 40N 의 하중에 의해 0.4mm 의 변형을 일으킴을 알 수 있다. 또, Fig. 6 은 적어도 점선으로 표시된 영역 내에서는 스프링이 탄성 변형을

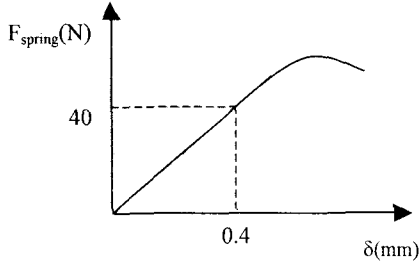


Fig. 6 Force – displacement curve

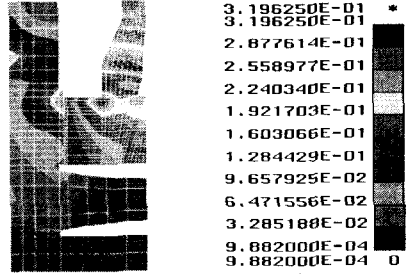


Fig. 8 After optimization

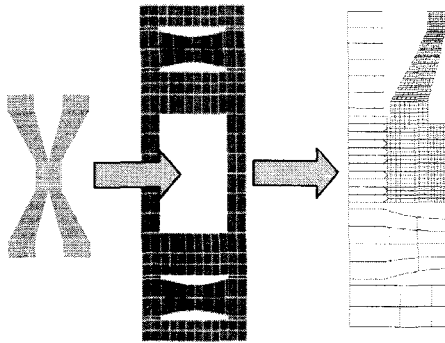


Fig. 7 Initial quarter design of spring

일으키는 것이 이상적임을 의미한다.

$$F_{spring} \times 0.08 > 2 + 1.2 \quad (8)$$

$$F_{spring} > 40 \text{ N} \quad (9)$$

Fig.7 의 지지격자판은 열전달과 유체유동 등을 고려하여 전체적인 치수가 어느 정도 정해져 있다. 여기서 DP1 이 결정되면 스프링이 차지하는 공간 또한 동시에 결정된다. 또, DP2 가 결정되면 스프링 형상에 대한 설계상의 자유도가 다소 감소하는 경향이 있다. 따라서 식(7)에서 보는 바와 같이, FR3 은 DP1, DP2, DP3 의 세 설계파라미터에 의해서 달성이 가능하다. 그런데 DP1, DP2 가 이미 결정되었으므로 스프링이 차지하는 공간이 고정되었다. 이제 Fig. 6 의 설계범위를 전제로 하여 FR3 을 만족하는 DP3 을 결정하기 위해 식 (10)과 같은

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \beta \\ & \text{subject to} && \sigma < \beta \\ & && \delta = 0.4 \text{ mm} \\ & && F_{spring} = 40 \text{ N} \end{aligned} \quad (10)$$

최적화기법을 도입한다. 식 (10)은 최대값의 최소화 문제(Min-Max problem)의 변형이다.

여기서 스프링이 일정한 지지력을 가져야 한다는 제한 조건을 고려하기 위해 등식 제한조건을 사용하였다. 일정한 지지력이라는 것은 외력이 일

정한 경우에 전체구조물을 대표하는 등가 강성이 일정하다는 것을 의미한다. 따라서 일정한 하중 40N 에 의해 접촉부의 수직변위가 0.4mm 변형하게 되면, 이에 해당하는 일정한 강성 또는 일정한 지지력을 가지게 되는 결과가 된다. 그러나 식(10)에 의한 형상최적화 결과, 어떠한 초기치와 설계 변수의 변경에도 허용 응력인 0.328 GPa 을 항상 초과하는 설계 결과를 얻었다. 즉, 고정된 공간 안에서 식 (10)의 정식화는 유용영역(feasible region)이 없는 문제임을 알 수 있다. 따라서 유용영역을 확보하기 위해 식 (10)의 등식 제약조건에서 스프링의 변형량을 0.4mm 에서 0.2mm 로 변경하여 설계 조건을 만족시키는 스프링의 형상을 얻기로 한다. 이것은 핵연료봉의 직경을 0.4mm 줄인 효과와 같다. 이를 반영한 식 (11)의 정식화에 의한 형상최적설계를 수행하였다. 그 결과를 Fig. 8 에 보였다. 응력 분포가 허용 응력보다 작음을 볼 수 있다. 이로써 FR3 을 만족하는 DP3 을 결정한다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \beta \\ & \text{subject to} && \sigma < \beta \\ & && \delta = 0.2 \text{ mm} \\ & && F_{spring} = 40 \text{ N} \end{aligned} \quad (11)$$

## 5. 고찰

지금까지의 설계과정을 거쳐 완성된 지지격자체가 Fig. 9 에 있다. 이 모델을 이용하여 충격 해석한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 격자판의 중앙에 스프링이 없을 때보다 약간 큰 값의 임계충격 하중을 얻을 수 있다. 이 결과를 통해 설계의 타당성 뿐만 아니라, 스프링의 형상(DP3)이 충격에 미치는 영향이 미약하다는 것도 확인할 수 있다.

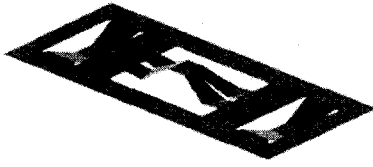


Fig. 9 Designed unit inner strip

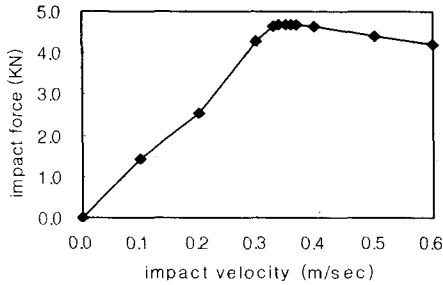


Fig. 10 Force – velocity curve of final design

이는 독립공리의 정리 8 을 적용하여 비연성화 설계 행렬을 사용한 것이 타당하였음을 확인시켜 주는 것이다.

비연성화 행렬의 사용이 가능하기 때문에, 지금까지의 과정을 거쳐 도출된 설계 파라미터들 중 스프링의 형상을 변경하기 위해서는, 지지격자체가 가지는 설계 행렬의 특성상 반드시 충격지지부의 길이와 접촉형상을 먼저 결정한 후 스프링의 형상을 결정하여야 한다.

## 6. 결 론

설계 공리 중 제 1 공리인 독립 공리를 이용하여 구조적 건전성의 관점에서 원자로 핵연료봉 지지격자체를 설계하는 기법을 제안하였다. 이를 위해 지지격자체가 가져야하는 기능적 요구조건들을 정의하고 이들을 달성하기 위한 설계파라미터들을 정의하였다. 구성된 설계행렬의 대각항 중 일부를 독립 공리의 정리 8 에 의해 무시함으로써 설계행렬을 비연성화 행렬(decoupled design matrix)로 처리할 수 있었다. 정리 8 의 적용에 대한 타당성은 설계결과를 고찰함으로써 충분히 입증하였다. 설계 과정에서 주어진 설계조건으로는 설계목적 달성할 수 없었기에 설계조건을 변경시켜 설계목적 달성하였다.

본 연구에서는 강성이 큰 덩플을 설계 대상에서 제외하였으나, 향후에는 덩플도 설계 대상에 포함시켜 완전한 지지격자체의 설계를 진행할 필요가 있다.

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

## 참고문헌

- (1) 정연호, 1999, 경수로용 신형핵연료 개발, KAERI/RR-2015/99, 한국원자력연구소.
- (2) 김형규, 1997, 지지격자체 관련 미국 특허 분석, KAERI/TR-867/97, 한국원자력연구소.
- (3) L.A. Walton, 1979, "Zircaloy Spacer Grid Design," *Transactions of the American Nuclear Society*, vol.32, pp. 601-602. USA.
- (4) J.G. Larson, 1982, "Optimization of The Zircaloy Spacer Grid Design," *Transactions of the American Nuclear Society*, vol 43, pp. 160-161. USA.
- (5) 장인권, 1999, "접촉응력해석을 통한 핵연료 지지격자 구조물의 최적설계," 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문.
- (6) N.P. Suh, 2000, *Axiomatic Design*, Oxford University Press, New York.
- (7) 이광원, 박경진, 1999, "구조 최적 설계를 위한 공리적 설계 방법론의 개발," 대한기계학회추계 학술대회 논문집 A, pp. 991-997.
- (8) 이광원, 박경진, 2000, "독립 공리를 이용한 구조 최적화 방법론 개발," 대한기계학회논문집(A), 제 24 권 제 10 호, pp. 2438-2450.
- (9) G.J. Park, K.W. Lee, K.H. Lee and G.J. Park, 2000, "A Structural Optimization Methodology Using the Independence Axiom," *Proceeding of the First International Conference on Axiomatic Design ICAD2000*, pp. 145-150.
- (10) K.H. Lee, K.H. Hwang and G.J. Park, 2000, "Robust Design of a Micro Gyroscope Using Axiomatic Approach," 2000 U.S. - Korea Conference on Science and Technology, Entrepreneurship, and Leadership.
- (11) J.S. Arora, 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (12) GENESIS *User Manual*: ver 5.0, 1998, VMA Engineering.
- (13) FEMBGENESIS *User Manual*: ver 26.3D, 1996, VMA Engineering.
- (14) LS-DYNA *User Manual*, 1999, Livermore Software Technology, CO.
- (15) 윤경호, 2000, 측면 충격하중에 의한 지지격자체의 좌굴거동 해석, KAERI/TR-1569/00, 한국원자력연구소.