

호몰로지 조건을 이용하여 충격과 마모를 고려한 원자로 핵연료봉 지지격자의 최적설계

Optimization of a Nuclear Fuel Spacer Grid Using Considering Impact and Wear with Homology Constraints

이 현 아* · 김 종 기** · 송 기 남*** · 박 경 진****

Lee, Hyun-Ah · Kim, Chong-Ki · Song, Kee-Nam · Park, Gyung-Jin

ABSTRACT

The spacer grid set is a component in the nuclear fuel assembly. The set supports the fuel rods safely. Therefore, the spacer grid set should have sufficient strength for the external impact forces. The fretting wear occurs between the spring of the fuel rod and the spacer grid due to the flow-induced vibration. The conceptual design of the spacer grid set is performed based on the Independence Axiom of axiomatic design. Two functional requirements are defined and corresponding design parameters are selected. The overall flow of the design is defined according to the application of axiomatic design. The design for the impact load is carried out by using nonlinear dynamic analysis to determine the length of the dimple. Topology optimization is carried out to determine a new configuration of the spring. The fretting wear is reduced by shape optimization using the homology theory. In the design to reduce the fretting wear, the deformed shape of the spring should be the same as that of the fuel rod. This condition is transformed to a function and considered as a constraint in the shape optimization process. The fretting wear is expected to be reduced due to the homology constraint. The objective function is minimizing the maximum stress to allow a slight plastic deformation. Shape optimization results are confirmed through nonlinear static analysis because the contact area becomes wider.

Keywords: spacer grid, impact, fretting wear, axiomatic design, homology constraint

1. 서론

경수로형 원자로(Pressurized light Water Reactor: PWR)내의 핵연료 집합체는 상·하단 고정체, 안내관, 지지격자체로 구성되어 있으며 핵연료봉을 고정시켜주는 기능을 하고 있다. 세장비가 큰 핵연료봉을 지지하는 것은 양끝단의 상·하단 고정체를 제외하곤 중앙에 위치하는 지지격자체 몇 개가 전부이다. 따라서 비정상 운전 시 발생하는 충격은 대부분 지지격자체가 감당한다. 또한 원자로 내에서 중성자 조사와 냉각수의 흐

* 학생회원 한양대학교 기계공학과 박사과정 Email: fannail@hanyang.ac.kr

** 펠파이코리아 사원

*** 한국원자력연구소 실장 Email: knsong@kaeri.re.kr

**** 정회원 한양대학교 기계정보경영공학부 교수 Email: gjpark@hanyang.ac.kr

름에 의해 연료봉이 진동한다. 이 때문에 연료봉 지지능력이 저하되고 연료봉과 격자 지지부의 접촉부위에서 연료봉의 국부적인 손상이 발생하게 된다. 이때 발생하는 손상은 프레팅마모로 방사능 물질이 이 부분을 통해 냉각수로 유출될 수 있다.(정연호, 1999) 따라서 지지격자체는 외부인자에 의한 충격과 진동에 의한 프레팅마모를 동시에 고려한 설계가 필요하다. 공리적설계를 이용하여 지지격자체의 기능요구와 그에 따른 설계파라미터를 정한다.(Suh, 2001) 이를 바탕으로 설계영역과 설계순서를 결정하고 각각의 설계영역에 대해 설계를 수행한다. 충격하중에 대한 설계는 비선형동적해석을 통하여 수행하고 프레팅마모에 대한 설계는 호몰로지 조건을 이용한다. 최적설계는 GENESIS 7.5(GENESIS, 2004)를 사용하고 비선형해석은 ABAQUS 6.4-1(ABAQUS, 2003)을 이용한다.

2. 지지격자의 개념설계

2.1 지지격자 소개

원자로 내에는 핵연료집합체가 조밀하게 위치한다. 지지격자체는 핵연료집합체의 골격체를 구성하며 핵연료의 성능을 향상시키기 위한 개선 시 고려되는 구조부품이다. 지지격자체는 지지격자 단일체로 이루어져 있으며 지지격자 단일체는 4개의 지지격자로 이루어져 있다. 그래서 1개의 연료봉을 원자로 내에 고정시키는 역할을 한다. 지지격자는 스프링과 덤플로 이루어져 있다.

2.2 공리적설계 소개

공리적설계의 목적은 설계행위를 객관적이고 합리적인 틀을 세워 설계의 기준을 마련하여 이를 실제문제에 적용하는 것이다. 설계란 ‘무엇을 이룰 것인가’에 대한 기능요구(Functional Requirements: FRs)와 ‘그것을 어떻게 얻을 것인가’에 대한 설계파라미터(Design Parameters: DPs) 사이의 연속적 상호작용이다. 공리적설계는 FRs의 독립성을 유지하라는 독립공리와 설계의 정보량을 최소화하라는 정보공리로 이루어진다. 독립공리를 위한 설계방정식은 식 (1)과 같다.

$$FR=ADP \tag{1}$$

FR은 기능요구벡터, DP는 설계파라미터, A는 FR과 DP의 관계를 정의하는 설계행렬이다. 독립공리는 FRs로부터 DP로 진행하는 사상과정을 정의할 때 FRs와 DP가 일대일대응이 되기를 추천한다. 즉, 표 1에서 보인 공리적설계의 설계 방정식 3가지 중 비연성설계를 추구하는 것이다. 비연성설계의 발견이 불가능하면 차선책으로 비연성화설계를 선택하는데 이때는 DP의 순서에 따라 독립공리를 만족한다. 이때 X는 FRs와 DP가 서로 관련이 있음을, O는 관련이 없음을 의미한다.

2.3 공리적설계를 이용한 설계영역 결정

독립공리를 이용하여 지지격자체를 설계하기 위하여 식 (1)에서 먼저 FR과 DP를 결정하고 그 관계를 설계행렬 A로 표현해야 한다. 비정상적 운전환경에서 지지격자체는 횡방향의 충격을 받으므로 일정한 충격력을 견뎌야 한다. 또한 진동으로 인해 발생하는 프레팅마모를 줄여야 한다. 따라서 지지격자의 두 가지 기능요구를 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{충격하중에 견딜 수 있는 측면 구조 강도를 갖추어라} \\ \text{프레팅마모를 줄여라} \end{Bmatrix} \tag{2}$$

표 1 공리적설계의 설계방정식

	비연성설계	비연성화설계	연성설계
설계방정식	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ O & X & O \\ O & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$	$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$

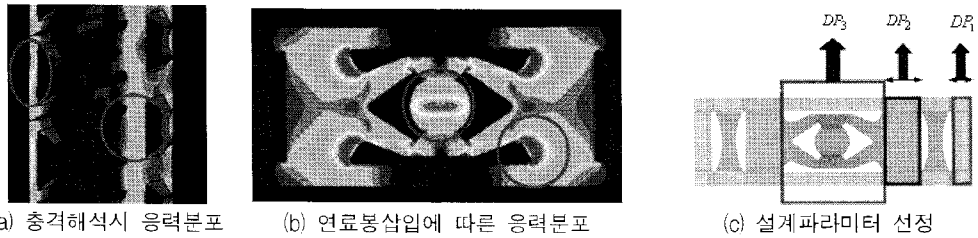


그림 1 설계파라미터 결정

기능요구에 따른 설계파라미터를 결정하기 위하여 지지격자에 대한 해석을 수행한다. 첫째로 실제 운전환경을 고려하여 지지격자체는 가로·세로 각각 16개의 지지격자로 구성된 16x16 모델을 이용하여 충격해석을 수행한다. 충격해석 결과의 응력분포를 그림 1(a)에 보였다. 실선으로 표시한 부분이 다른 부분보다 상당히 큰 응력분포를 보인다. 두 번째는 지지격자체에 연료봉이 삽입되었을 때를 고려하여 비선형 정적해석을 수행한다. 실제 연료봉이 삽입되면 지지격자 스프링의 중앙부분은 0.3 mm 늘리게 된다. 따라서 스프링 중앙부분이 0.3 mm 늘리도록 하여 해석을 수행한다. 그림 1(b)에서 보듯이 실선부분에서 큰 응력분포를 보인다. 해석 결과를 바탕으로 FRs에 상응하는 DPs를 선택하면 식 (3)과 같다. 이를 그림 1(c)에 보였다. 위의 FRs와 DPs를 바탕으로 설계행렬을 구성하면 식 (4)와 같다. 지지격자의 설계행렬은 FRs에 비해 DPs의 개수가 많은 과잉설계이기 때문에 연성설계이다. 그러나 DP_1 과 DP_3 는 서로 독립적이다. 설계를 수행할 때 우선 DP_1 과 DP_3 에 대한 설계를 수행하고 이때 DP_2 의 결과를 DP_2 와 DP_3 에 대한 설계에 제한조건으로 포함한다.

$$\begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{덤플 윗부분의 폭} \\ \text{덤플과 스프링 사이의 폭} \\ \text{스프링 부분} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & O \\ O & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

3. 충격하중을 고려한 설계

충격하중을 고려한 지지격자 설계를 수행한다. 충격력을 받는 구조물에 대한 최적설계는 현재 어렵다. 따라서 그림 1(c)의 DP_1 과 DP_2 의 치수를 직접 조정하여 개선된 설계를 얻는다. 지지격자의 충격해석 모델은 3x3을 이용한다. 현재 상용 지지격자체는 16x16이나 설계시간단축을 위하여 3x3모델을 이용한다. 실제 충격실험은 진자 실험으로 지지격자체에 일정속도를 가지는 진자를 떨어뜨려 충격실험을 한다. 같은 방법을 이용하여 충격해석을 실시한다. 덤플 윗부분의 폭인 DP_1 을 L_1 , 덤플과 스프링 사이의 폭인 DP_2 를 L_2 라고 지칭한다. 이때 L_1 과 L_2 의 합은 항상 일정하게 두고 L_1 과 L_2 의 길이를 0.25 mm 간격으로 상호 조정하면서 충격해석을 실시한다.

결과를 표 2에 보였다. 표에서 보듯이 L_1 의 길이가 길어질수록 충격력이 좋아진다. 그러나 3.0 mm 이후부터는 오히려 충격력이 떨어진다. 따라서 충격력이 최대가 되도록 L_1 의 길이는 3.0 mm로 결정한다. 또한 2장에서 설명하였듯이 이때의 L_2 의 값은 DP_3 인 스프링부분의 설계 시 제한조건으로 적용한다.

4. 지지격자 스프링의 최적설계

4.1 위상최적설계를 이용한 초기 모델 생성

그림 2(a)의 충격해석과 2(b)의 지지격자에 연료봉이 삽입되었을 때에 대한 해석결과에서 보듯이 실선으로 표시된 부분에 공통적으로 응력이 분포하지 않음을 알 수 있다. 따라서 지지격자에 대한 위상최적설계를 통하여 응

표 2 L1의 길이에 따른 충격력의 비교

L_1 (mm)	L_2 (mm)	Maximum impact load (kN)	Maximum stress (kN)
2.50	5.216	18.88	401.4
2.75	4.966	19.15	401.0
3.00	4.716	19.17	400.6
3.25	4.466	19.14	400.1
3.50	4.216	19.15	399.6

력이 분포하지 않는 부분에 대하여 검증한다. 식 (5)의 정식화를 이용하여 위상최적설계를 수행한다.

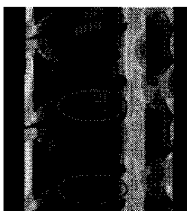
$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \text{strain energy} \\ & \text{subject to} && \text{mass} \leq 0.7 \times \text{mass}_{\text{reference}} \end{aligned} \quad (5)$$

결과는 그림 3(c)와 같다. 이를 통해 지지격자의 양측면은 필요하지 않다는 것이 확인 되었다.

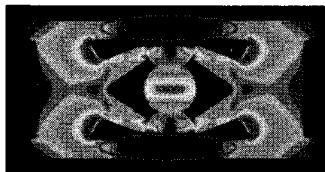
4.2 호몰로지 소개 및 정식화

호몰로지 설계는 설계자가 구조물의 일부나 구조물 전체의 변형 또는 고유진동수 등을 미리 예측하여 이러한 반응치가 얻어지도록 설계변수를 결정하는 기법이다. 즉, 구조물을 구성하는 점들이 변형 전, 변형 중, 변형 후에 걸쳐 요구되는 기하학적 형상을 유지하는 것이다.(Hoerner, 1967) 지지격자의 프레팅마모에 영향을 미치는 요소들 중 실험을 통하여 살펴본 결과 스프링형상이 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. (이영호 등, 2002)

이를 최소화하기 위해 지지격자 스프링과 연료봉 사이에 넓은 부분에서 접촉이 일어나도록 지지격자를 설계하여야 한다. 호몰로지 관점에서 살펴보면 지지격자 스프링의 접촉 후 형상이 연료봉의 형상과 동일할수록 넓은 부분에서 접촉이 일어난다고 볼 수 있다. 이를 그림 4에 보였다. x-y단면의 목적은 스프링 접촉부의 변형 후 곡률과 연료봉의 곡률의 차를 최소화 하는 것이다. y-z단면의 목적은 변형 후 스프링의 중심이 z방향으로 직선이 되도록 하는 것이다. R은 연료봉 반경이고 L'은 x-y단면상의 연료봉 중심으로부터 변형 후 스프링의 선택된 절점까지의 거리, M'는 y-z단면상의 거리이다. 이는 정식화에서 제한조건으로 사용된다. 다음 제한조건으로 질량은 초기 질량보다 가벼워야 한다. 지지격자 스프링력은 40 N이상이 되어야 한다. 원자로 내에서는 중성자 조사에 의해 초기 스프링력의 92%가 감소하게 된다. 또 유체유발진동에 의해 2N의 힘과 핵연료집합체의 운송 중에 1.2 N의 힘이 스프링에 가해지게 된다. 이를 정리하면 초기 스프링력이 40N이상이어야 함을 의미 한다. 변형 전 스프링 중심부의 높이는 1.65 mm이상이어야 한다. 이는 스프링 중심부의 높이가 주어진 길이보다 작은 경우 스프링력 40 N을 만족하지 못하는 경우가 발생하기 때문이다. 마지막으로 개념설계에서 정한 설계순서에 따라 L_2 를 제한 조건으로 사용한다. 목적함수는 최대 응력이다. 그러나 최대값의 최소화 문제는 수학적으로 어렵다. 따라서 테일러-벤조 정식화(Taylor-Bendsoe 'beta' formulation)로 설계정식화를 수정한다. 이는 가상변수 베타를 목적함수로 하고 설계자가 원하는 최대값을 베타보다 크지 않도록 제한조건으로 잡아주는 방법이다. 이를 정리하여 정식화하면 식 (6)과 같다.



(a) 충격해석시 응력분포

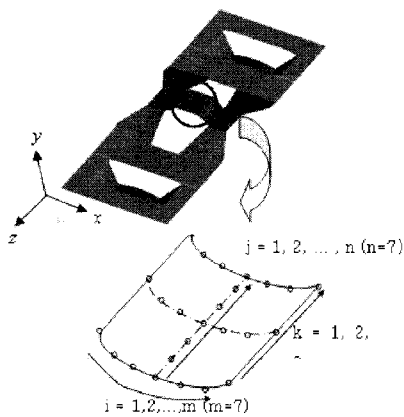


(b) 연료봉삽입에 따른 응력분포

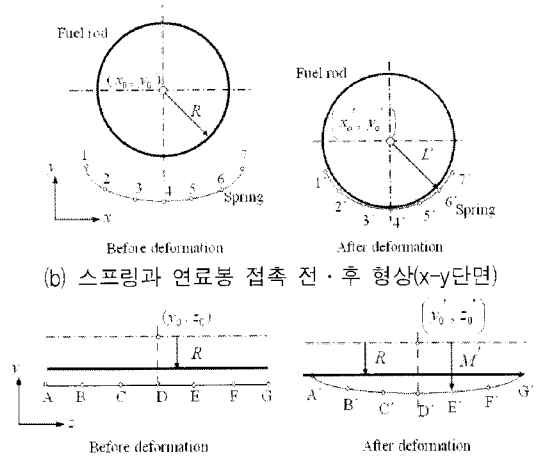


(c) 위상최적설계 결과

그림 2 위상최적설계



(a) 호몰로지 조건에 사용된 절점 선택



(b) 스프링과 연료봉 접촉 전·후 형상(x-y단면)

(c) 스프링과 연료봉 접촉 전·후 형상(y-z단면)

그림 3 호몰로지 조건에 사용된 절점의 선택

Find optimum shape
 to minimize β
 subject to $mass \leq mass_{initial}$
 $F_{spring} \geq 40 \text{ N}$
 $h_c \geq 1.65 \text{ mm}$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^7 (R - L'_{ik})^2 \leq C_h$$

$$\sum_{j=1}^7 (R - M'_j)^2 \leq C_h$$

$$L_2 \geq 4.716 \text{ mm}$$

(6)

4.3 형상최적설계

식 (6)의 정식화를 이용하여 지지격자 스프링의 형상최적설계를 수행한다. 하중조건은 압력으로부터 계산한다. 지지격자에 연료봉이 삽입될 때 0.3 mm 처지는 것에 대한 비선형 해석으로부터 지지격자의 각 요소들의 압력을 구하고 요소면적을 곱하여 요소에 작용하는 하중을 구한다. 이를 최적설계 시 하중조건으로 적용한다. 하중조건은 최적설계의 각 사이클마다 새로 계산한다. 설계의 종료조건은 다음과 같다. 이전 사이클의 설계 결과와 현재 사이클의 설계 결과의 전체거리를 구한다. 전체거리란 연료봉의 절점들과 지지격자 스프링의 절점들 사이의 거리들을 모두 더한 것이다. 이 값이 작을수록 연료봉과 지지격자 스프링의 곡률이 차이가 없다는 의미이므로 전체거리의 값이 커지면 설계를 종료하고 바로 앞 사이클의 결과를 최종모델로 선정한다.

5. 결과

그림 4에 형상최적설계의 결과를 보였다. 그림에서 보듯이 접촉면적은 기존모델에 비하여 약 4.5배 증가하였다. 소성영역은 기존모델에 비하여 줄어들었다. 지지격자 스프링의 중앙부분에 발생했던 응력이 결과모델에서는 전혀 발생하지 않는 것도 확인할 수 있다. 마지막으로 결과모델을 이용하여 충격해석을 하였다. 이때 충격력은 기존모델에 비하여 5.1% 향상된 값을 보여준다.

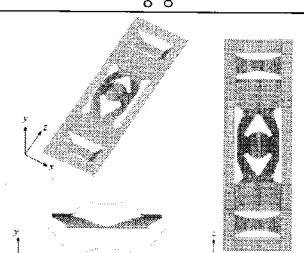
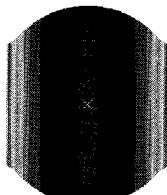
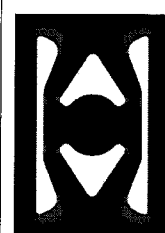
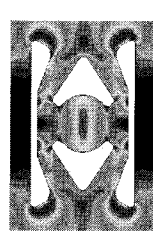
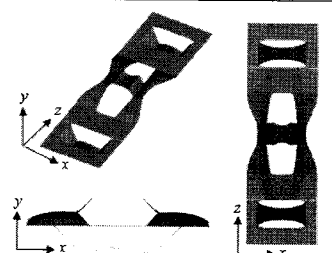
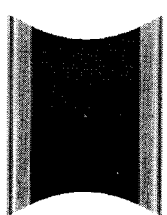
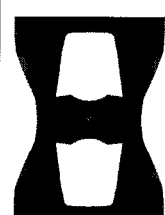
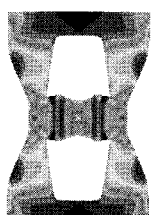
	형상	접촉부분	소성영역	응력분포
기존 모델				
결과 모델				

그림 4 지지격자 스프링의 형상최적설계 결과

6. 결론

지지격자에 대한 연구는 꾸준히 이루어져 왔다. 현재보다 좋은 충격력을 가지면서 연료봉과 지지격자가 좀 더 넓은 부분에서 접촉이 일어나도록 하는 설계가 필요하다. 이를 위하여 공리적설계를 이용하여 설계영역과 설계순서를 결정하였다. 기존모델에 비하여 지지격자 양측면이 사라졌다. 기존의 지지격자는 비선형정적해석 결과 탄성을 유지해야 하는 스프링 중심부에서도 소성변형이 일어났다. 그러나 결과모델은 중심부의 탄성을 유지시키면서 다른 부분의 소성영역도 줄였다. 또한 기존모델보다 접촉면적도 늘어났다. 충격력 또한 기존모델보다 향상되었다. 이를 통해 설계의 결과가 기존 지지격자보다 현저히 좋은 결과를 주었음을 알 수 있다. 지지격자의 경우 비선형성을 보인다. 향후에는 비선형성을 고려한 지지격자의 최적설계를 수행해야 한다.

감사의 글

이 연구는 한국원자력연구소와 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 협력을 통하여 수행되었습니다.

참고문헌

- 이영호, 김형규, 박순중, 윤경호, 강홍석(2002) 핵연료봉 프레팅 마멸에서의 접촉형상과 분위기의 영향, 추계 학술대회, 한국원자력학회.
- 정연호(1999) 경수로용 신형핵연료 개발, KAERI/RR-2015/99, 한국원자력연구소, 대전.
- ABAQUS/Standard Version 6.4 *User Manual*, 2003, ABAQUS, Inc.
- GENESIS *User's Manual*: Version 7.5, 2004, Vanderplaats Research and Development, Inc.
- Hoerner, S.V.(1967) Homologous Deformations of Tiltable Telescopes, *Journal of Structural Division, Proceedings of the ASCE*, Vol. 93, pp.461-485.
- Suh, N.P.(2001) *Axiomatic Design*, Oxford University Press, New York, USA.