2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형 경수로 연료용 상단 고정체 성능 평가

The Performance Evaluation of Top Nozzle for New LWR Fuel

이성기, 박남규, 서정민, 최기성, 김형구, 이준노, 김재원
한전원자력연료㈜
대전광역시 유성구 덕진동 493

요 약

5000 lb 하중의 기계적 강도 설계기준을 만족하고 해체 및 재조립 기능이 확보된 고유 모델의 신형핵연료 상단고정체 개발을 위해 상단고정체 각 구성부품에 대한 최적설계 및 평가를 수행하였다. 주 평가사항으로는 상단고정체 각 구성요소 및 조립체에 대한 구조적 건전성, 조립 및 해체의 용이성, 제조성 등의 사항을 평가하여 도출된 상단고정체 각 구성요소 중 최적의 요소들을 선정하여 주 후보모형을 결정하였다. 결정된 주후보모형에 대한 최종 설계사양 결정 및 향후 설계변경 등의 사안이 발생시 능동적인 대처를 위해 적합한 설계 시스템을 구축하는 것이 핵연료의 안전성 및 경제성 측면에서 필요하다. 따라서 본 연구에서는 개발된 신형핵연료 상단고정체 주 후보 모형 구성부품에 대한 해석, 평가 및 최적설계를 이용하여 보다 개선된 설계사양을 결정하였으며, 아울러 평가에 필요한 최적 설계시스템을 구축 하여 성능평가를 보다 효율적으로 수행할 수 있었다.

Abstract

Optimal design and performance evaluation were performed to develop the new Top Nozzle which satisfied a 5000-lb-load design requirement and had the easy dismantlement and assembly abilities. The main evaluation items are to decide the most adoptable candidate by selecting optimal components among the derived Top Nozzles that have been evaluated in the viewpoint of structural integrity, reconstitution, manufacturability etc. It is necessary to establish the proper design systems for positively meeting the design finalization and the future design change in the standpoint of nuclear fuel safety and economy. The better design feature, therefore, was set up through the aforementioned methodology for the adaptable model. In addition, an effective performance evaluation could be performed by establishing the optimal design scheme.

1. 서론

가압 경수로용 상단고정체는 핵연료의 상부 구조부품으로서 원자로 운전중 핵연료 냉각재의 수력적 양력에 의한 들림을 방지하고 열 및 조사에 의한 상부노심판과 핵연료의 상대변위를 수용

하며, 원자로 상부구조물과 기하학적 양립성을 유지시키는 역할을 한다. 핵연료 취급 및 운송중에는 취급공구와의 연결체 역할 및 노심과 연료 저장랙 등으로부터 장전/인출시 핵연료 집합체를 보호하고 안내하는 기능을 한다. 또한 상단고정체 유로판을 통해 냉각재 유량분포를 균일하게 하고 연료봉이 핵연료집합체 상부로 돌출되는 것을 방지한다.

일차적으로 그림1에서 보는 바와 같이 이러한 기능적요건을 만족하고 또한 전체적인 핵연료 집합체의 노내 건전성을 확보하며, 해체 및 재조립이 용이한 여러가지 상단고정체 후보모형을 표1과 같은 항목에 대하여 개략적 성능평가를 통하여 주후보 모형이 선정되었다[1].

본 연구에서는 이 주후보 모형에 대한 최종 설계사양을 결정하기위한 신형 핵연료 상단고정체 주 후보모형 구성부품에 대하여 기존 평가 방법론 또는 새로운 평가 방법론의 적용 및 필요한 평가 시스템을 구축하여 보다 효율적으로 성능평가를 수행하는 것이다.

2.1. 주 설계 사양 및 형상

신형핵연료 상단고정체의 기본적인 설계 사양은 기존 핵연료 상단고정체와 유사하나, 일부 부품의 재질, 체결방법, 유로판의 유로구멍 형상에 있어서 다소 차이가 있다. 주요 설계상 특징은 그림1에서 보는 바와 같이 안내관 플랜지에 4개의 원주방향 돌출부가 있고 이 돌출부가 유로판 하부에 있는 오목부에 삽입되어 안내됨으로써 조립 및 해체시 비틀림을 방지하는 효과가 있다. 또한 이 돌출부는 연료봉 장입시 연료봉과 간섭이 발생하지 않도록 위치가 설정되었다. 상단고정체 기둥은 내부 기둥이 외부기둥 안으로 위에서 삽입되어 안내관 플랜지와 나사로 체결되고 내부기둥 상부에서 풀림방지를 위해 외부기둥과 크림핑 하도록 되어 있다. 누름스프링은 재질이 기존 인코넬 X-750대신 강성이 우수한 인코넬 718로 설계되었다. 그리고 핵연료 집합체의 보다 많은 압력 강하를 수용하고 부양 여유도 확보 등과 같은 성능적인 요구조건을 만족하는 효율적인 설계 수행을 위하여 최적설계 방법론을 도입하여 스프링의 설계변수를 결정 하였다. 한편 유로판은 3종의 후보모형 중 압력강하 민감도 분석을 통하여 선정된 것으로 사다리꼴 형상의 서로 다른 길이를 갖는 긴 유로구멍이 엇갈림 구조로 분포되어 있는 형상을 하고 있다. 설정된 상단고정체 구성요소들에 대한 제조성 평가의 일환으로 조립체를 완성하였으며, 그림2는 이를 장착한 시험용 집합체를 보여주고 있다. 이 시험집합체를 이용하여 압력강하시험 및 이물질 여과시험을 수행할

예정이다.

3. 성능 해석 및 평가

신형핵연료 상단고정체에 대한 성능해석 및 평가는 각 구성요소, 연결 및 체결 매체 등이 핵연료 집합체와 상단고정체에 적용되는 설계기준의 만족여부, 제조성 등에 대하여 다각적으로 평가되었으며, 각 구성요소별 특성을 고려하여 수계산, 컴퓨터 코드 해석, 시험 등의 평가 방법이 사용되었다[1, 2].

3.1. 상단고정체 내.외부 기둥

상단고정체 외부기둥은 유로판에 나사로 체결되어 있으며, 누름 스프링은 외부기둥 외측에 위치하고 스프링 상부에는 누르판이 위치한다. 내부기둥은 외부기둥 안쪽에 삽입되어 하부는 안내관 플랜지와 나사체결되고, 상부는 외부기둥 머리부 홈에 크림핑되어 원자로내 유동에 의한 풀림을 방지하도록 설계되어있다. 상단고정체는 취급시에 축방향으로 5000 lbs의 설계하중을 견디어야 한다. 하중 전달 메커니즘은 상단고정체 누름판을 취급기로 들어 올렸을 때 하중은 외부기둥 상부를 통하여 내부기둥에 전달된다. 이 내부기둥 4개가 5000 lbs의 하중을 분산하여 수용한다. 이때 내부기둥의 under cut 부위는 축방향 인장력을 전달하는 핵연료 기하구조물상 최소 단면부가 되며, 또한 외부기둥과 부분적으로 접촉하는 부위가 있어 복잡한 기하 형상을 이루고 있어, 정확히 해석적으로 표현하기가 쉽지 않으며, 또한 시험상으로도 시간적 경제적 비용이 많이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 이 기둥부에 대한 해석을 ANSYS[3]를 이용하여 그림 3과 같이 기하 모델링을 한 후 접촉부 및 외력 등을 반영하고 경계조건을 구성하여 비선형 해석을 수행하였다. 해석결과, 그림 4와 같이 기둥의 under cut 부위에서 최대 응력이 발생하였으나 설계기준인 일차 막응력 강도가 허용응력($P_m = 2/3\ \sigma_y = 30{,}000 \times 2/3 = 20{,}000$ psi) 의 약 60 %정도로 구조 강도측면에서 건전한 것으로 평가 되었다.

3.2. 누름 스프링

누름스프링에 대한 설계는 핵연료 집합체 및 상단고정체에 부과되는 설계조건을 만족하면서 무게가 최소화된 최적설계 기법을 도입하여 수행하였다. 즉 스프링소선 직경, 평균 직경, 코일회

수, 자유장 길이 등의 기하학적 형상 변수들을 사용하여 관련 부품과 양립성을 유지하고, 운전중 부과되는 설계요구조건 등을 만족하면서 무게가 최소화된 누름스프링을 찾기 위해 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 설계 시스템 구축 및 최종 사양을 결정 하였다[2, 3].

최적 설계에 대한 목적함수 및 제한조건 등은 몇 개의 고전 역학공식을 이용하여 다음과 같이 구성하였다.

$$F(D,d,n) = V = pd^2 \frac{pDn}{4} = [p^2 d^2 nD]\frac{1}{4}$$

위 목적함수에 대한 각 설계변수가 만족해야 할 K-T 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial F(D,d,n)}{\partial D} - \frac{p^2 d^2 n}{4} = 0$$
$$\frac{\partial F(D,d,n)}{\partial d} - \frac{p^2 d\, nD}{2} = 0$$
$$\frac{\partial F(D,d,n)}{\partial n} - \frac{p^2 d^2 D}{4} = 0$$

여기서, D=스프링 평균직경, d= 스프링소선 직경, n= 코일 회수

한편, 제한조건은 재료의 손상 방지, 적절한 강성확보 및 그림5와 같이 상단고정체 다른 구성요소와 양립성 유지 등을 고려하여 다음과 같이 설정되었다.

$$f_1 = \frac{dGd}{D^3 np} \times \left[\frac{4D - d}{4D - 4d} + \frac{0.615\, d}{D}\right] - t_{\max} \le 0$$
$$f_2 = \frac{8WD^3}{d^4 G} - \Delta \le 0$$
$$f_3 = D + d - D_{OP} \le 0$$
$$f_4 = -D - d + D_{IP} \le 0$$
$$f_5 = -n \le 0$$

여기서, G=전단계수, W=하중, δ=변위, Δ=임의 변위, τ_{max} = 최대전단응력

위의 목적함수 및 제한조건을 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS에 적용하여 해석을 수행하였다. 먼저 최적설계 루프 실행에 앞서 그림 6과 같이 노내조건을 모사한 경계조건을 적용하여 정적 해석을 수행하였다. 최적설계에 사용된 알고리즘은 ANSYS 코드 최적설계의 한 모듈인 Sweep Tool을 이용하여 ns = n × Ns (여기서 n=설계변수 갯수, Ns=각 설계변수에 대한 평가실행 갯수) 만큼의 설계 세트를 생산한다. 프로그램의 수행결과 표 2와 같은 적합설계 세트를 구할 수 있었으며, 그림 7은 이 중 하나의 사양에 대한 전단응력 분포를 나타낸 것으로 허용응력 110,000

psi 이내에 있음을 보여주고 있다. 이 적합설계 세트들은 기존 설계 변수들에 비해 다소 개선된 값이나 해석의 초기치를 기존 상단고정체 설계값을 사용하였기에 개선의 폭은 그다지 크지않다. 즉, 기존 설계변수들도 나름대로 최적화 되어 도출된 값으로 현재 이 사양의 스프링이 장착된 핵연료집합체가 노내 운전중에 있는 실제로 검증된 값이다. 하지만 향후 원자로 운전조건의 변경 및 새로운 핵연료 사양의 적용 등과 같은 사안이 발생할 경우에 여기서 도출된 설계 알고리즘을 이용하여 누름 스프링의 각종 설계변수를 결정할 수 있으므로 효율적인 설계 시스템 구축차원에서 의미가 있을 것으로 사료된다.

2.3 플랜지

본 연구에서 개발된 플랜지는 그림 1에서 보는 바와 같이 하부는 안내관과 용접되며, 상부에는 4개의 원주방향 돌출부가 있고 이 돌출부가 유로판 밑면에 있는 오목부에 삽입되어 내부기둥과 체결됨으로써 조립 및 해체시 비틀림을 방지하는 효과가 있다. 또한 내부기둥이 외부기둥 안으로 위에서 삽입되어 플랜지 나사부와 체결되도록 되어 있어 구조적으로 견고하다. 이 나사 연결에 대한 평가는 참고문헌[1]에서 기 수행되어 그 건전성이 유지되는 것으로 평가 되었다.

한편 집합체 제조시 골격체에 연료봉을 장입하는 공정 중 발생할 수 있는 연료봉과 이 플랜지 날개와 간섭발생 여부의 평가를 수행하였다. 당초 설계에서는 4개의 돌출부가 전면 기준으로 각각 0, 90, 180, 270 도로 배치되어 돌출부에서 연료봉과 간섭이 발생할 수 있는 것으로 평가되어 돌출부 방향을 45 도씩 회전시켜 각각 45, 135, 225, 315 도로 배치시켜 간섭을 배제시켰다.

2.4 기타 구성부품

스테인레스강(SS-304)으로 제조된 누름판은 원자로 운전시 누름스프링에 의한 스프링력, 핵연료의 해체 및 재조립시 가해지는 하중, 운반 및 취급중 집합체 자중에 의해 생성된 하중 등을 받는 구조물로서 이들 하중이 가해질 때 각각의 설계기준을 만족하는지 그림 8 및 그림 9와 같은 응력해석을 수행하였고, 기존 누름판 대비 구조적 건전성 측면에서 우수한 것으로 평가되었다[1].

유로판은 원자로 냉각재의 유로를 노심 밖으로 안내하는 역할을 하며, 노심에서의 압력강하를 균일하게 하여 교차류의 발생을 최소화 시킨다. 이러한 기능적 요건을 만족하는 유로판을 개발하

기 위하여 그림 10 및 11에서 보는 바와 같이 여러가지 도출된 후보모형을 범용 전산유체해석 프로그램인 FLUENT 코드를 이용하여 압력강하특성을 비교 평가하는 민감도 분석을 수행하였으며, 그림 10 및 그림 11과 같은 유로형상을 갖는 유로판을 개발하였다. 유로판에는 앞서 언급한 플랜지 및 외부기둥과 기하학적 연결을 위하여 유로판 상부에는 나사가공이 되어 있으며, 하부에는 플랜지 돌출부를 수용할 수 있도록 90도 간격으로 네 군데 홈을 내어서 외부기둥, 유로판, 플랜지가 상호 기하학적으로 양립 되도록 하였다[1, 5].

3. 결론

이전 연구에서는 신형핵연료 상단고정체 개발을 위해 도출된 후보모형에 대한 각 구성요소 및 조립체에 대한 구조적 건전성, 해체 및 조립의 용이성, 제조성 등을 평가하여 각 구성요소중 최적의 요소들을 선정하여 신형 경수로용 최종 후보모형 상단고정체의 설계사양을 결정하였다.

본 연구에서는 최종 도출된 후보모형 사양에 대한 일부 부품에 대하여 다음과 같이 추가적인 성능해석의 일환으로 몇 개의 새로운 설계 평가 시스템을 구축할 수 있었다. 누름 스프링에 대해서는 상용 코드를 이용한 최적설계 알고리즘을 개발하여 향후, 노내 운전조건 및 여러가지 핵연료 사양에 대하여 양립성을 유지할 수 있는 스프링 설계변수를 도출할 수 있었다. 한편, 상단고정체 외부기둥에 대한 유한요소 해석을 통해 수계산에 의한 해석수행의 난해함 및 시험에 따른 경제적 시간적 부담을 줄이는 효과를 가져왔다. 기타 부품에 대해서는 제조성 및 부품간 양립성 측면에서 설계변경을 수행하여 보다 성능이 우수한 상단고정체가 되도록 설계사양을 개정 하였다.

종합적으로 볼 때 개발된 신형 상단고정체는 기존 핵연료와 비교하여 상단고정체를 일체로 해체 및 조립을 할 수 있어 연료 수리시간을 단축 시킬 수 있으며, 누름판 및 안내관 플랜지의 기하학적 형상 개선으로 구조적 건전성을 도모하였고, 아울러 집합체 부양 억제력을 제고 시킬 수 있는 설계사양을 갖추었다.

참고문헌

[1] “한국 표준형 경수로 연료용 상단고정체 개발”, 2001 추계 원자력학회 학술발표 논문집, 이성

기 등, 한전원자력연료주식회사, 2001. 10.

[2] “한국 표준형 핵연료 상단고정체 누름 스프링 최적설계”, 2002 춘계 원자력학회 학술발표 논문집, 이성기 등, 한전원자력연료주식회사, 2001. 10.

[3] “ANSYS User’s Manual”, Ver. 6.2., Swanson Co., 2002.

[4] “Top Nozzle Holddown Spring Optimization of KSNP Fuel Assembly”, Accepted, The Second China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical System, Seongki Lee et al., KEPCO Nuclear Fuel Co., Ltd., 2002. 11.

[5] “경수로용 핵연료 상단고정체 유로판에 대한 압력강하 민감도 분석”, 2001 춘계 원자력학회 논문집, 류계열 등, 한전원자력연료주식회사, 2001.

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 신형핵연료 상하단고정체 개발과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

표1. 상단고정체 후보모형 성능평가 항목

구분	가중치 (총계:100)	후보 모형		비 고
		기타 부품 (6종)	유로판 (3종)	
구조적 건전성	20	✓	✓	
조사성장 공간제공	10	✓		
기계적 양립성	5	✓		
집합체 들림방지	10	✓		
장전/인출 용이성	5	✓		
해체/재조립 용이성	20	✓		
해체시 부품수	10	✓		
제조성	20 (30)	✓	✓	기타부품 (유로판)
압력강하성능	50		✓	

표2. 스프링 적합설계 세트

Feasible Items	Wire Dire (d)*	Mean Dia. (D)*	Coil Turn (N)*	Volume (V)*	Stiffness (Ks)*	Shear Criteria Satisfaction (τ <110,000 psi)	
						Operating	Design
F1	1.020	1.100	0.850	0.9958	1.002	O	O
F2	1.029	1.110	0.838	0.9902	1.013	O	O
F3	1.020	1.070	0.889	0.9944	1.023	O	O
F4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	O	O
F5	1.000	1.000	0.500	0.518	2.001	O	×
F6	1.000	1.000	0.750	0.760	1.335	O	×

* Normalized values w.r.t current design

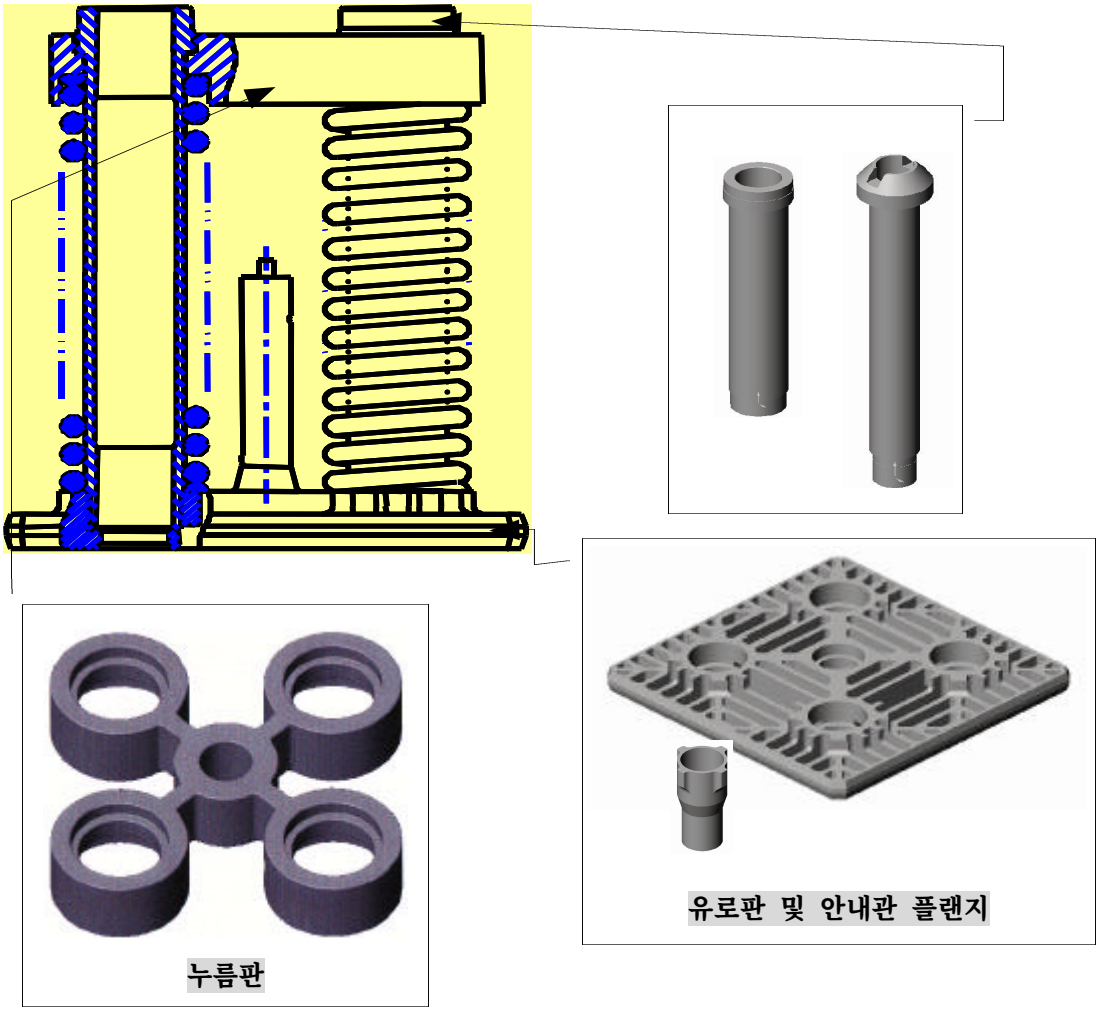

그림 1. 신형 핵연료 상하단고정체 주후보 모형 형상

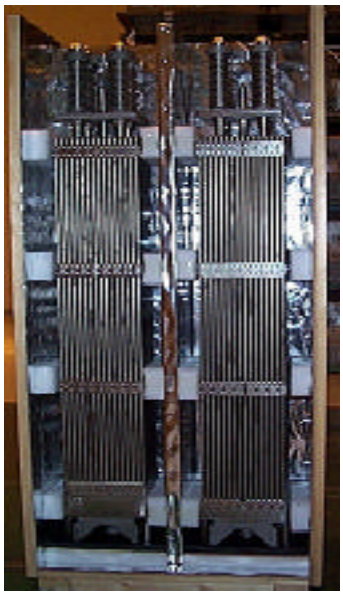

그림 2. 신형 상하단고정체가 장착된 시험 집합체(좌)

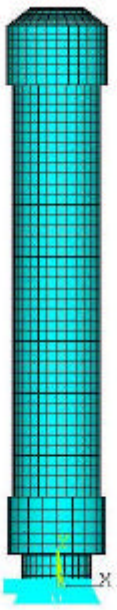

그림 3. 기둥 요소분할 형상 및 경계조건

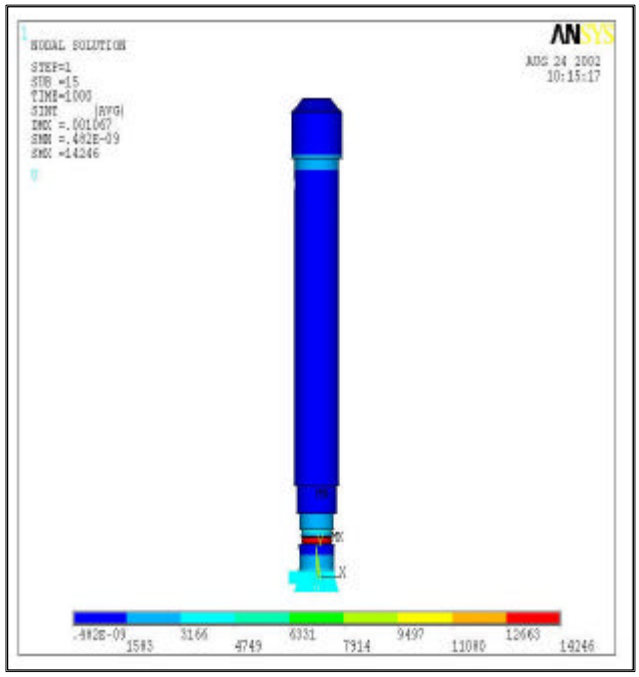

그림 4. 응력 강도

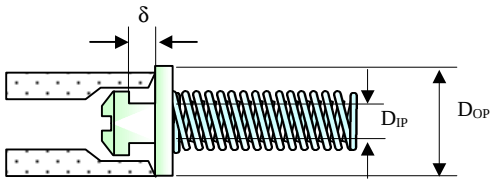

그림 5. 핵연료 집합체 스프링 계

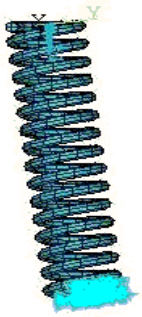

그림 6. 스프링 요소분할 형상 및 경계조건

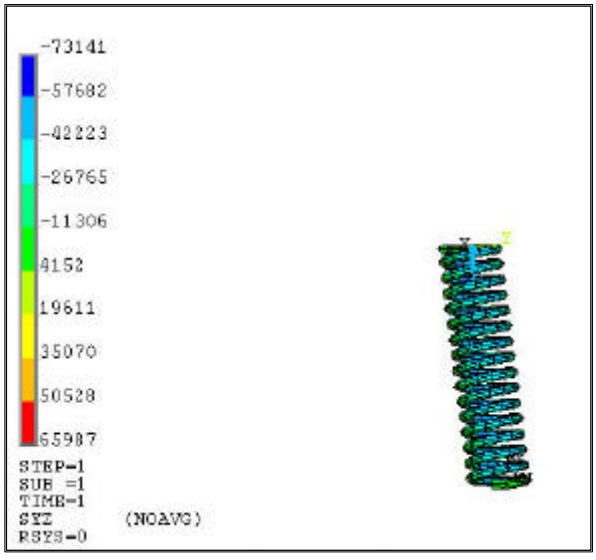

그림 7. 전단 응력분포

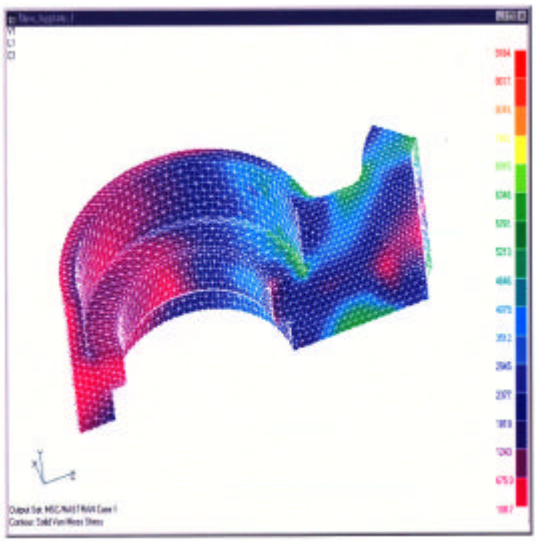

그림8. 해체/조립 하중에 대한 응력 분포

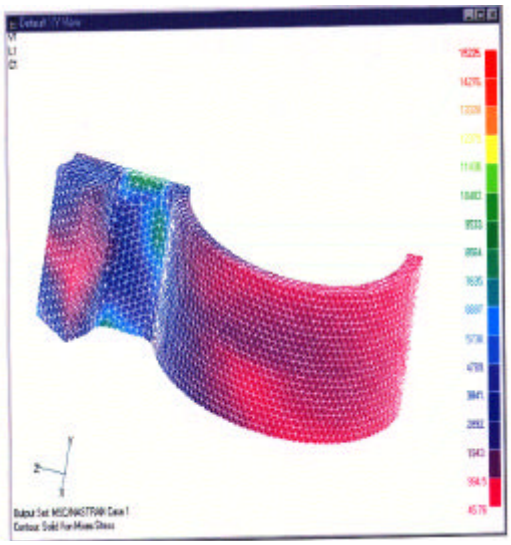

그림9. 취급하중에 대한 누름판 변위 및 응력 분포

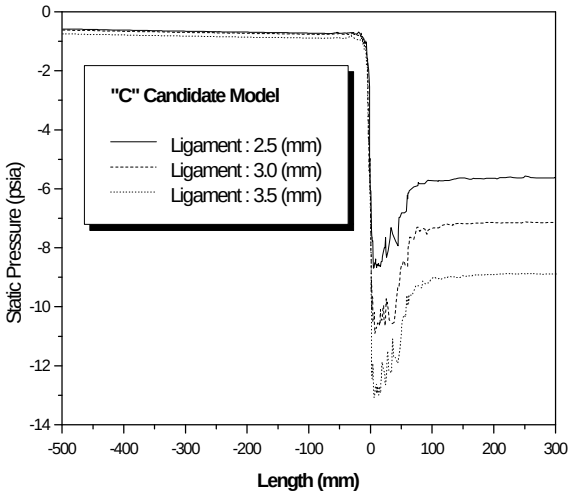

그림 10. Ligament 폭 변화에 따른 압력강하 비

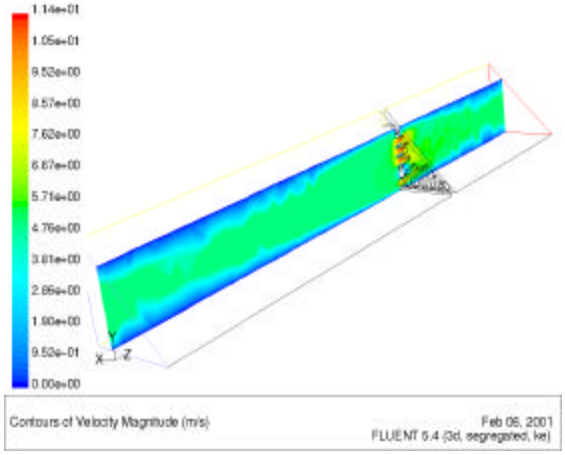

그림 11. 유동 해석 영역에서 속도 분포