

한국 표준형 경수로 연료용 상단 고정체 개발

Development of Top Nozzle for Korean Standard LWR Fuel

이성기, 김일규, 최기성, 김용환, 이준노, 김형구

한전원자력연료(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압 경수로용 신형 상단고정체 개발을 위해 도출된 후보모형에 대한 각 구성요소 및 조립체에 대한 성능평가를 수행하였다. 또한 기존 핵연료의 상단고정체 대비 구조적 건전성, 해체 및 조립의 용이성, 제조성 등을 평가하여 도출된 상단 고정체 각 구성요소중 최적의 요소들을 선정하여 신형 경수로용 상단고정체를 구성하였다.

따라서 본 연구에서 개발된 신형 상단고정체는 관련 모든 설계기준을 만족하였으며, 기존 핵연료 대비 상단 고정체 일체로 해체 및 조립을 할 수 있어 연료 수리시간 단축, 누름 스프링의 설계개선을 통한 집합체 부양역제 여유도 증가, 누름판 및 안내관 플랜지의 기하학적 형상 변경으로 인한 구조적 안전성 향상을 기하였다.

Abstract

Performance evaluation was executed for each component and its assembly for the deduced Top Nozzles to develop the new Top Nozzle for LWR. This new Top Nozzle is composed of the optimum components among the derived Top Nozzles that have been evaluated in the viewpoint of structural integrity, simpleness of dismantle and assembly, manufacturability etc.

In this study, the developed Top Nozzle satisfied all the related design criteria. In special, it makes fuel repair time reduced by assembling and disassembling itself as one body, and improves Fuel Assembly holddown ability by revising the design parameters of its spring and the structural integrity through the betterment of its geometrical shape of Flange and Holddown Plate as compared with the existing LWR Top Nozzles.

1. 서론

가압 경수로용 상단고정체는 핵연료의 상부 구조부품으로써 원자로 운전중 핵연료 냉각재의

수력적 양력에 의한 들뜸을 방지하고 열 및 조사에 의한 상부노심관과 핵연료의 상대변위를 수용하기 위하여 누름 스프링을 통한 축 및 횡방향의 움직임을 제한하며, 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. 핵연료봉 수리 및 재조립시 연료봉을 골격체에서 분리 및 재조립이 용이하도록 하는 역할을 한다. 또한 상단고정체 유로판을 통해 냉각재 유량분포를 균일하게 하고 연료봉이 핵연료집합체 상부로 돌출되는 것을 방지한다.

본 연구에서는 이러한 기능적요건을 만족하고 또한 전체적인 핵연료 집합체의 노내 건전성을 확보하는 해체 및 재조립 후보모형 6종[그림 1], 유로판 후보모형 3종[그림 2]을 도출하여 각각의 후보모형에 대해 표1과 같이 상단고정체의 구조적 건전성, 해체/재조립 용이성, 제조성 등에 대한 성능평가를 통하여 최적의 상단 고정체를 선정하였다[1].

2. 신형 상단고정체 주요 설계 사항

2.1. 기존 상단고정체(한국표준형)

기존의 한국표준형 상단고정체는 4개의 외곽기둥이 안내관과 나사로 연결되어 있으며, 운전 중 풀림을 방지하기 위하여 크림핑(crimping) 되어 있다. 상단 고정체 외곽기둥은 스테인레스강(SS-304)으로 제조되며, 누름스프링과 누름판을 안내하고 지지하는 역할을 한다. 상단고정체 상부는 노내에서 상부 안내 구조물과 연결되어 있으며, 상단고정체 내부로 제어봉집합체와 중성자 선원봉 등의 삽입이 가능하도록 되어 있다. 중앙기둥은 유로판에 나사로 연결된 후 용접되어 있고 노내 계측기에 대한 공간을 제공하며, 재조립시 누름스프링에 압축하중을 가한 상태에서 외곽기둥을 해체할 때 필요한 치구를 장착할 수 있도록 되어있다. 누름판은 스테인레스강(SS-304)으로 제조되며, 원자로 운전시 누름스프링을 누르고 있으며, 핵연료 취급장비가 상단고정체에 장착되도록 하여 핵연료 집합체를 취급할 수 있도록 되어있다. 유로판 또한 스테인레스강(SS-304)으로 제조되며, 상단고정체의 모든 구성품들을 하나의 구조물로 묶어주는 주요 구조물

로서 가열된 냉각제를 집합체 밖으로 안내하는 유로 구멍이 있으며 연료봉과 독물질봉이 지지 격자 내에 있도록 제한하고 누름력을 안내관에 전달하는 역할을 한다. 누름 스프링은 인코넬 X-750으로 제조되며 4개의 스프링이 4개의 외곽기둥에 각각 끼워져 있으며 냉각제의 양력에 대한 집합체 들뜸을 방지하기 위한 누름력을 제공한다.

2.2. 신형 상단고정체

경수로 핵연료용 상단고정체 개발은 다른 핵연료 구성부품과 마찬가지로 노심 및 전체 집합체 설계의 보조 단계의 설계로 참조 집합체가 있어야 개발 및 설계가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 아직까지 신형 핵연료의 집합체 설계사양이 결정이 안된 상태임에 따라 기존 한국표준형 핵연료를 기본 참조 집합체로 하고, 일부 설계사양중 상단고정체 설계를 가장 보수적으로 할 수 있는 현재 개발 단계인 한국표준형 개량 핵연료 설계사양을 일부 참조하여 개발 및 세부 설계를 수행하였다. 기본적인 설계 사양은 기존 한국표준형 핵연료, 개량 핵연료 상단고정체와 대동소이하나, 일부 부품의 재질, 체결방법, 유로관의 유로구멍 형상에 있어서 차이가 있다. 주요 설계상 특징은 안내관 플랜지에 4개의 원주방향 돌출부가 있고 이 돌출부가 유로관 밑면에 있는 오목부에 삽입되어 체결됨으로써 조립 및 해체시 비틀림을 방지하는 효과가 있다. 또한 내부기둥이 외곽기둥 안으로 위에서 삽입되어 안내관 플랜지와 나사로 체결되고 내부기둥 상부에서 풀림방지를 위해 외곽기둥과 크립핑되어 있다. 누름스프링은 재질이 기존 인코넬 X-750대신 강성이 우수한 인코넬 718로 설계되었으며, 핵연료 집합체의 보다 많은 압력 강하를 수용하고 부양 여유도를 확보하기 위하여 설계변수를 변경하였다. 유로관은 3종의 후보모형중 압력강하 민감도 분석을 통하여 선정된 것으로 사다리꼴 형상의 서로다른 길이를 갖는 긴 유로구멍이 엇갈림 구조로 분포되어 있는 형상을 하고 있다[그림 2].

3. 성능 해석 및 평가

본 연구에서 도출된 신형 상단고정체에 대한 성능해석 및 평가는 각 구성요소, 연결 및 체

결 매체 등이 핵연료 집합체와 상단고정체에 적용되는 설계기준의 만족여부, 제조성 등에 대하여 다각적으로 평가를 수행하였으며[1], 각 구성요소별 특성을 고려하여 수계산, 컴퓨터 코드 해석, 시험 등의 평가 방법이 사용되었다[1, 2].

3.1 누름판

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 응력해석이 필요하다. 응력해석은 먼저 3차원 기하모델링 소프트웨어인 SolidWorks[3]로 누름판의 대칭형상[그림 4]을 이용하여 1/8기하모델을 수행한 후, 범용 유한요소 프로그램인 MSC/NASTRAN[4]을 사용하여 수행하였다. 해석을 위한 자유물체도는 하중조건별 그림 5,6과 같다. 응력해석결과에 의하면, 해체/재조립 하중에 의한 최대응력은 9,184 psi 이고, 이 때의 변위는 0.00299in로 나타났다[그림 7]. 또한 취급하중에 의한 최대응력은 15,225 psi로 나타났으며, 이 때의 변위는 0.000585 in 이다[그림 8]. 따라서 항복강도인 30,000 psi와 비교할 때 약 50 % 정도의 여유가 있어 구조적으로 안전한 것으로 나타났으며, 기존 누름판에 대한 동일한 해석을 수행한 결과 최대 응력이 항복강도의 74 % 정도[5]임을 고려할 때 구조적 안전성 측면에서 다소 우수한 것으로 판단된다.

3.2. 누름 스프링

누름 스프링은 핵연료 노내장전중 냉각재의 수력학적 양력에 대한 집합체의 들림을 방지하기 위하여 누름력을 제공한다. 따라서 설계시 고려사항은 핵연료 집합체의 조사성장량, 열팽창량, 스프링의 조사 이완, 노내 열수력조건 등을 고려하여 다음과 같은 식에 의거 적절한 스프링력이 산출되도록 스프링의 자유장 길이, 내경, 외경, 소선길이, 운전길이, 전단강성 등의 설계변수 등을 조절하여 그림 3과 같은 설계사양을 확정하였다.

$$S_f = [L_f + B_f - 0.985 \times W_f] / 4$$

여기서 S_f : Required Spring Force

L_f : Hydraulic Lift Force on Fuel Assembly

B_f : Buoyant Force

W_f : Fuel Assembly Weight

결정된 스프링 설계사양은 핵연료 주기말 비운전 조건에서 기존 핵연료 대비 약 3배 정도의 스프링력이 산출되어 기존 핵연료보다 압력강하가 많이 발생하여 집합체에 부양력이 많이 가해지는 핵연료에도 적용 가능하도록 설계되었다[그림 3].

3.3 플랜지

본 연구에서 개발된 플랜지는 그림1의 (B)에서 보는 바와 같이 안내관과 용접되며, 상부에는 4개의 원주방향 돌출부가 있고 이 돌출부가 유로판 밑면에 있는 오목부에 삽입되어 체결됨으로써 조립 및 해체시 비틀림을 방지하는 효과가 있다. 또한 내부 기둥이 외곽기둥 안으로 위에서 삽입되어 체결되도록 나사가공이 되어 있어 구조적으로 견고하다. 이 나사 연결에 대한 평가방법은 다음과 같은 고전적인 나사 해석식 등에 의한 수계산, 인장 및 굽힘시험, 및 ASME코드에서 제시된 응력 제한치를 이용하여 평가가 이루어졌다.

Bearing Stress; $\sigma_B = P / A_B < \sigma_y$

여기서 P : Preload = $T / (0.2 \times d)$

A_B : Bearing Area

T : Torque needed to create a desired preload

D : Nominal Bolt Size

Combined Stress Intensity; $S = 2 \times \tau_{\max} = 2 \times (\tau^2 + (\sigma_p)^2)^{0.5}$

여기서 τ : Torsional Stress = $(T/2 \times r) / J$

J : Polar Moment of Inertia

σ_p : Tensile Stress due to Preload

실제 평가는 기존 연료대비 나사 규격, 기하학적 형상, 치수 등을 비교하여 한계해석 방법 (Bounding Approach)을 이용하여 평가를 수행하였다. 평가 결과 모두 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다.[1,2]

3.4 유로관

상단고정체 유로관은 원자로 냉각재의 유로를 노심 밖으로 안내하는 역할을 하며, 노심에서의 압력강하를 균일하게 하여 교차류의 발생을 최소화 시킨다. 이러한 기능적 요건을 만족하는 유로관을 개발하기 위하여 도출된 3종의 상단고정체 유로관 후보모형에 대한 압력강하 성능을 평가하고 최적의 유로관 설계를 위해 상단고정체 유로관을 범용 전산유체해석 프로그램인 FLUENT 코드를 이용하여 1/8 크기의 대칭 형상으로 모델링하고, 기존 핵연료 상단고정체 유로관에 대한 제원을 참조하여 유로관 두께, Ligament 폭, 유로구멍의 입구각도 등에 대하여 결정하였고, 이에 따라 압력강하특성을 비교 평가하는 민감도 분석을 수행하여 그림2의 후보모형 3을 신형 상단고정체 유로관으로 선정하였다[6]. 선정된 유로관에 앞서 언급한 플랜지 및 외곽 기둥과 기하학적 연결을 위하여 유로관 상부는 나사가공을 하부에는 플랜지 돌출부를 수용할 수 있도록 90° 간격으로 네 군데 홈을 내어서 외곽기둥, 유로관, 플랜지가 상호 기하학적으로 양립 되도록 하였다.

4. 결론

새로운 가압 경수로용 신형 상단고정체 개발을 위해 도출된 후보모형에 대한 각 구성요소 및 조립체에 대한 성능평가를 수행하기 위하여 개발과정에서 도출된 상단고정체를 각 후보모형에 대한 구조적 건전성, 해체 및 조립의 용이성, 제조성 등을 평가하여 각 구성요소중 최적의 요소들을 선정하여 신형 경수로용 상단고정체를 개발하였다.

본 연구에서 개발된 신형 상단고정체는 기존 핵연료 대비 상단 고정체를 일체로 해체 및 조립을 할 수 있어 연료 수리시간을 단축 시킬 수 있으며, 누름스프링 강성도 등의 설계개선을 통

하여 집합체 부양역제 여유도를 증가시켰으며, 누름판 및 안내관 플랜지의 기하학적 형상 개선으로 구조적 안전성을 도모하였다.

참고문헌

- [1] “신형 상단고정체 후보모형 성능 평가 보고서”, KNF-TR-FA2-01001, 전상윤, 한전원자력연료주식회사 2001. 2.
- [2] “경수로형 신형 상■하단고정체 개발”, 최종보고서, 과학기술부, 2000.3
- [3] Solidworks 2000, User’s Manual, SolidWorks Co., 2000.
- [4] MSC/NASTRAN, User’s Manual Ver. 68, MSC.
- [5] “상■하단고정체 후보모형 모델링 및 응력해석”, 연차보고서, 과학기술부, 2001, 3.
- [6] “경수로용 핵연료 상단고정체 유로관에 대한 압력강하 민감도 분석”, 2001 춘계 원자력학회 논문집, 류계열 등, 한전원자력연료주식회사, 2001.

※ 본연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 신형핵연료 상하단고정체 개발과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

표1. 상단고정체 후보모형 성능평가 결과 [1]

[해체 및 재조립 후보모형]

구 분	후 보 모 형					
	1	2	3	4	5	6
구조적 건전성 (20)	C(13)	B(18)	C(13)	C(13)	A(20)	C(13)
조사성장공간 제공 (10)	A(10)	A(10)	A(10)	A(10)	A(10)	A(10)
기계적 양립성 (5)	A(5)	A(5)	A(5)	A(5)	A(5)	A(5)
집합체 들림방지 (10)	A(10)	A(10)	A(10)	A(10)	A(10)	A(10)
장전/인출 용이성 (5)	A(5)	A(5)	A(5)	A(5)	A(5)	A(5)
해체/재조립 용이성 (20)	C(15)	C(17)	B(17)	B(17)	C(15)	A(20)
해체시 부품의 수 (10)	B(7)	C(5)	A(10)	A(10)	B(7)	A(10)
제조성 (20)	B(18)	A(20)	C(13)	C(13)	A(20)	C(13)
계 (100)	83	90	83	83	92	86

[유로판 후보모형]

구 분	후보모형 1	후보모형 2	후보모형 3
구조적 건전성 (20)	A(20)	A(20)	A(20)
압력강하 성능 (50)	C(30)	B(40)	A(50)
유로판 후보모형 제조성 (30)	C(20)	B(25)	A(30)
계 (100)	70	85	100



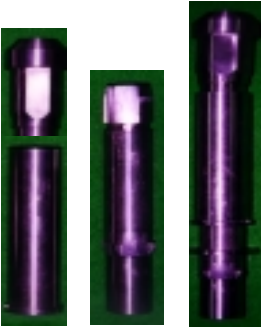
(A) 후보모형 1



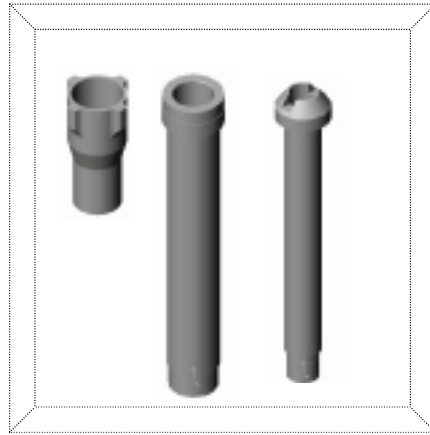
(B) 후보모형 2



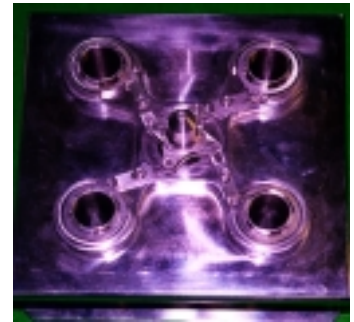
(C) 후보모형 3



(A) 후보모형 4

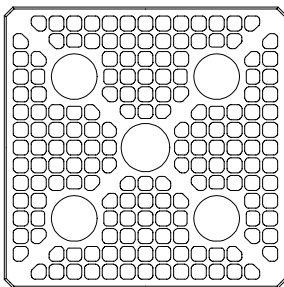


(B) 후보모형 5 (주)

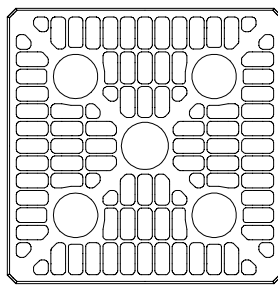


(C) 후보모형 6

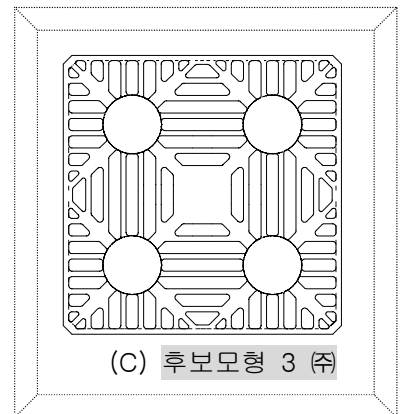
그림 1. 해체/조립 후보모형 상단고정체



(A) 후보모형 1



(B) 후보모형 2



(C) 후보모형 3 (주)

그림 2. 유로판 후보모형

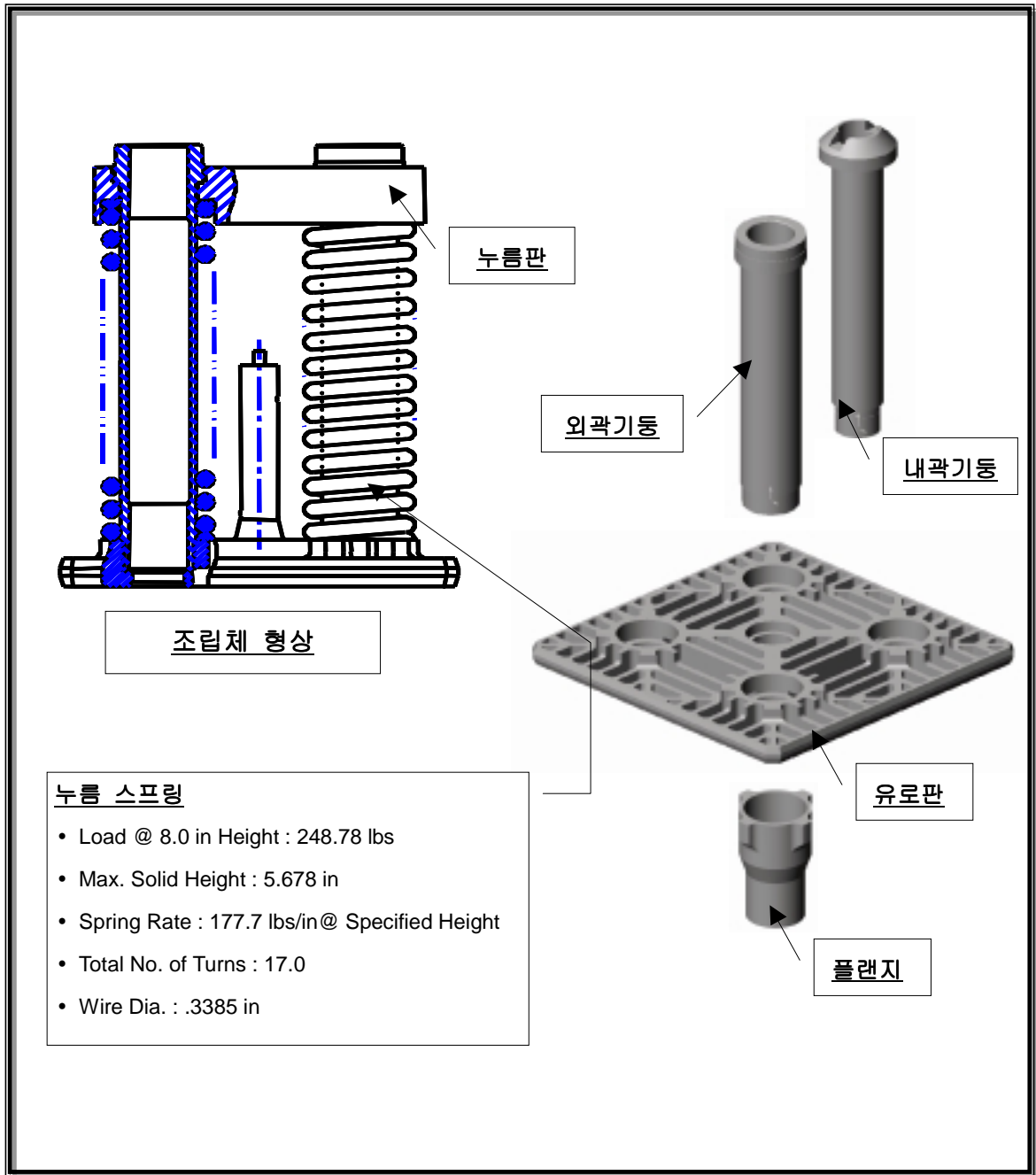


그림 3. 신형 상하단고정체 형상

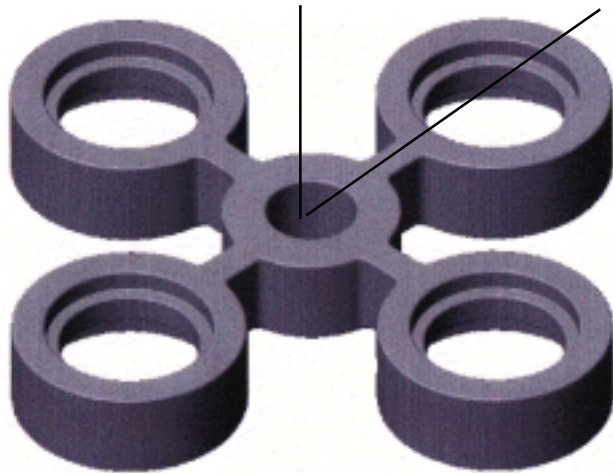
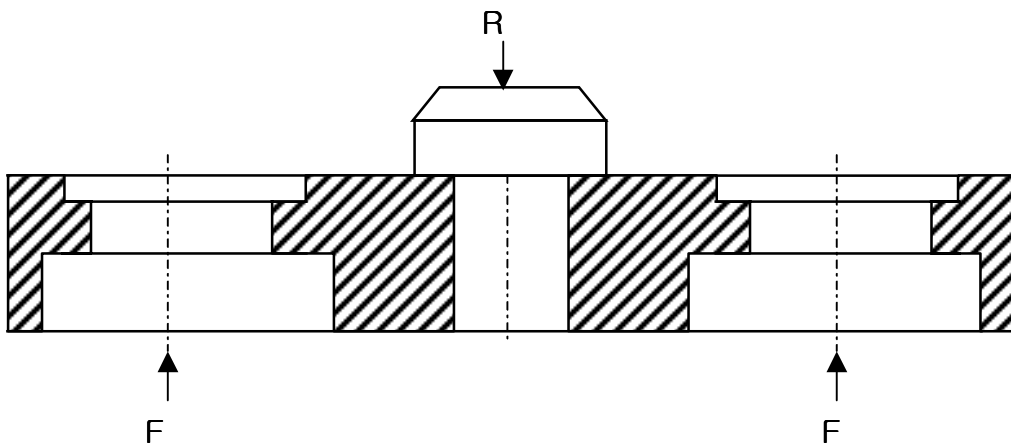
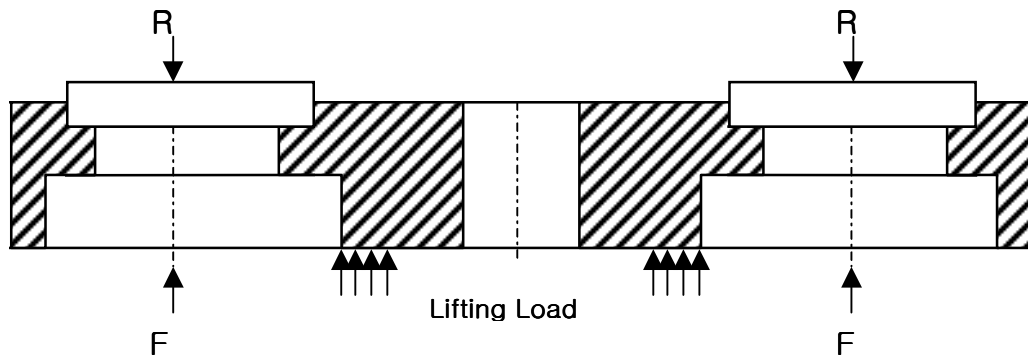


그림 4. 누름판 형상 (1/8 대칭)



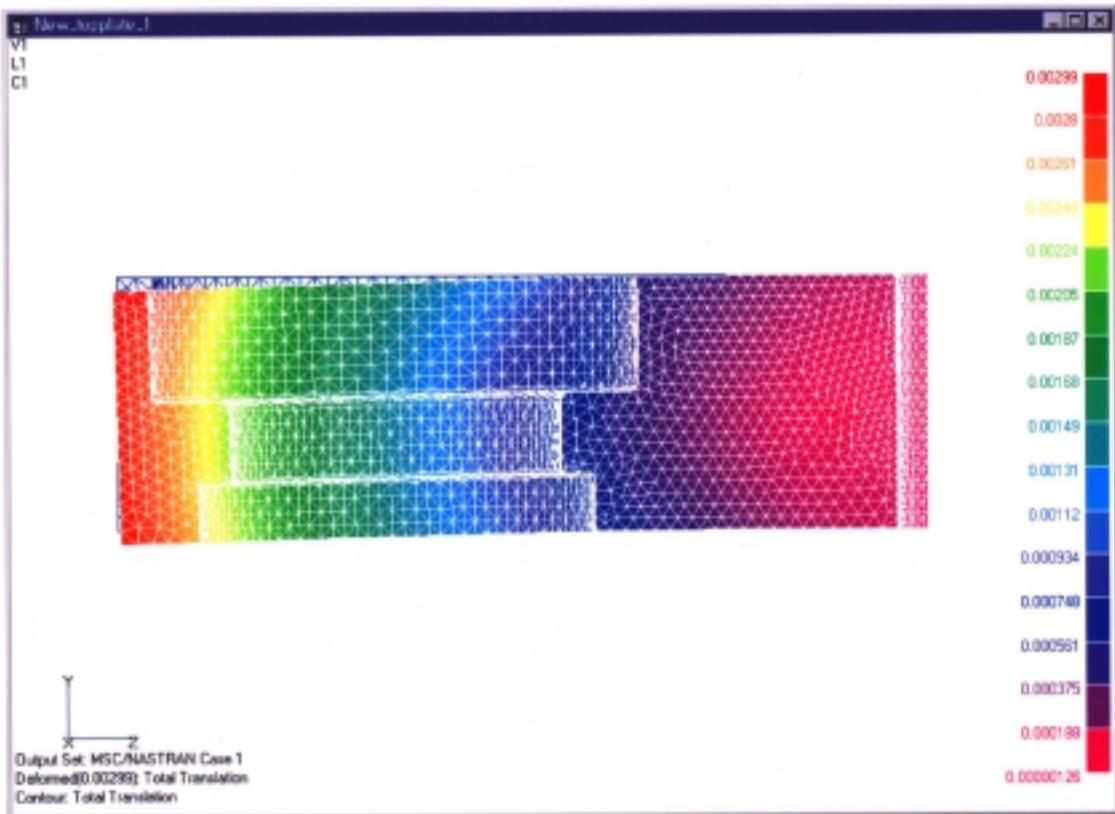
$F = 358.56 \text{ lbs}$ (Spring Force : 4 places), $R = 4 \times F$ (Reaction Force)

그림 5. 해체/조립 하중에 대한 자유 물체도

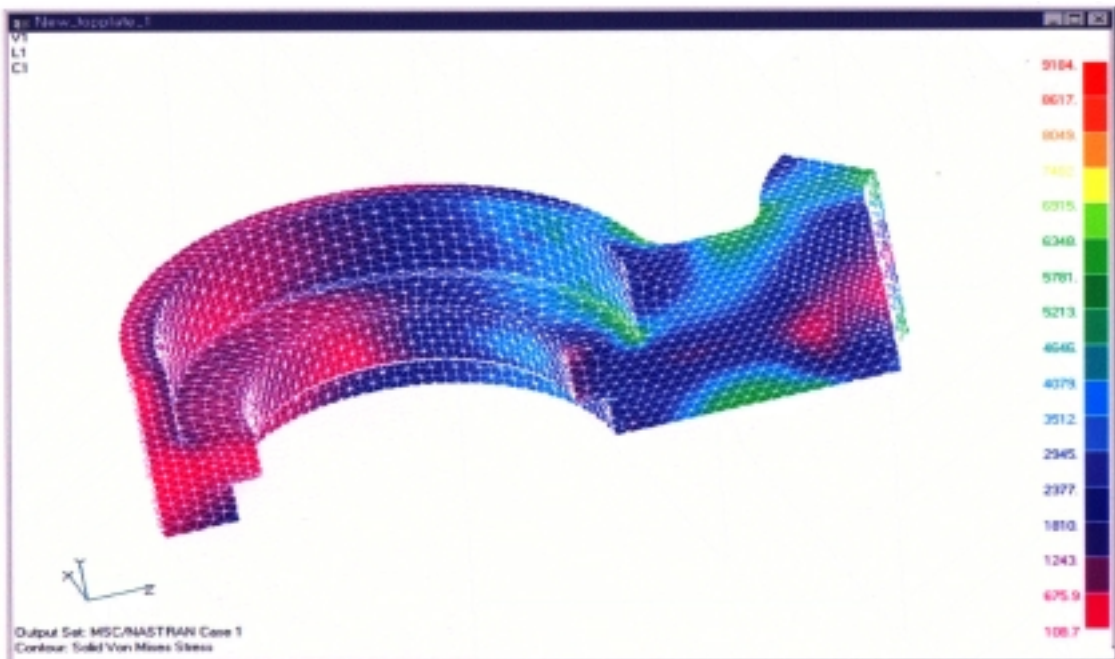


$R(\text{Total}) = 4 \times F + 5000 \text{ lbs}$ (Lifting Load)

그림 6. 취급하중에 대한 자유 물체도

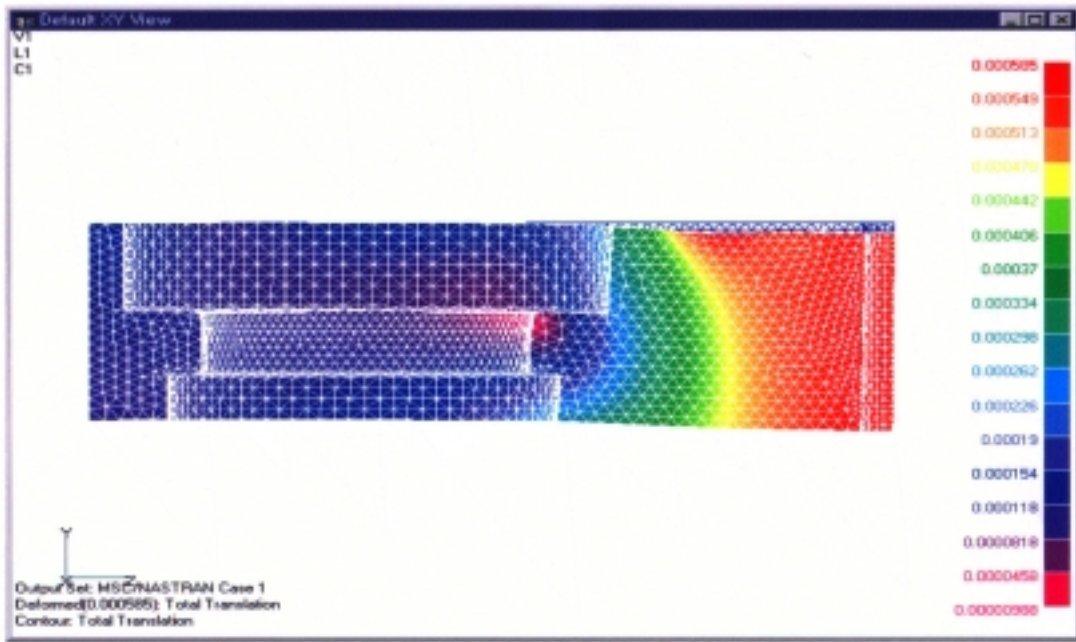


(A) 변위 형상

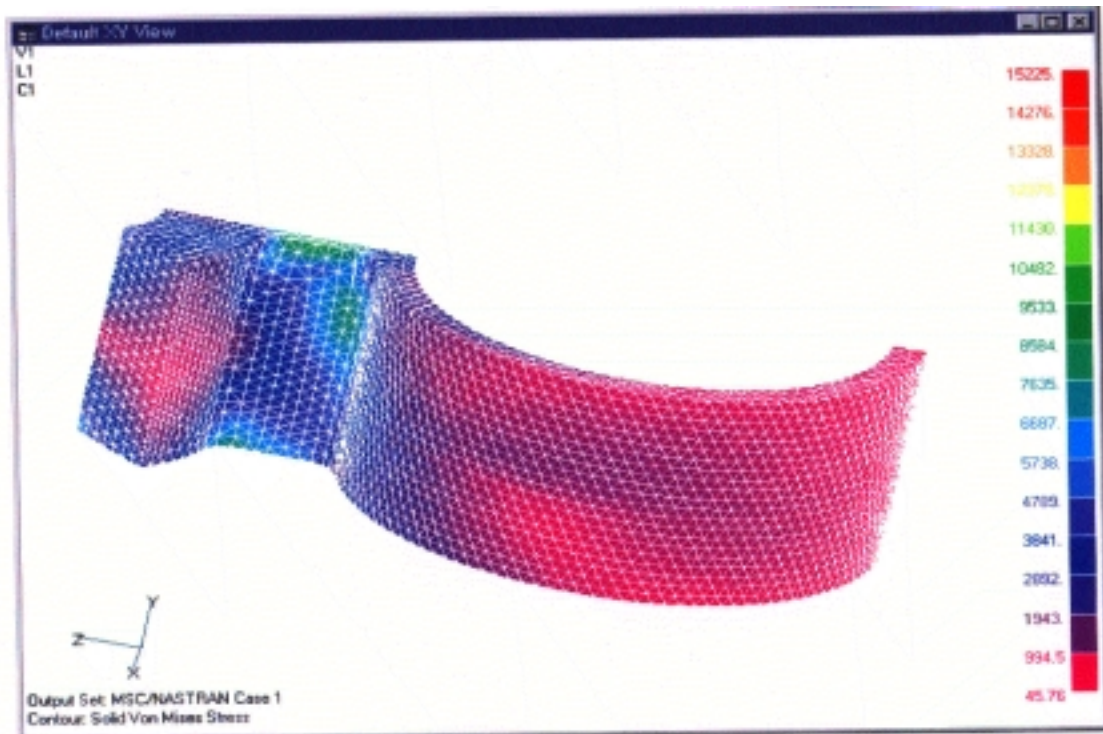


(B) 응력 분포

그림7 해체/조립 하중에 대한 누름판 변위 및 응력 분포



(A) 변위 형상



(B) 응력 분포

그림8 취급하중에 대한 누름판 변위 및 응력 분포