'2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 노내 핵연료 교환기의 설계특성 및 구조해석

Design characteristics and structural analysis of In-Vessel Transfer Machine in KALIMER

김석훈, 주영상, 이재한

한국원자력연구소
대전광역시 유성구덕진동 150

요 약

노심 집합체 덕트를 제거하는 경우에 노심 집합체 덕트의 무게를 지탱하면서 작동하는 노내 핵연료 교환기의 동작을 정확히 예측하는 구조해석이 필요하다. 노내 핵연료 교환기의 모델링 형상은 판토그라프식 팔에 의해 최대로 펼쳐져 있는 상태로 노심 집합체의 무게, 자중 및 인출 시에 반력에 의한 처짐 및 변형이 발생하게 된다. 유한 요소 해석에 의해 노내 핵연료 교환기의 구조해석을 수행하였다. 자중 및 지진하중을 포함한 설계하중에 대하여 IDEAS 8.0 코드를 사용하여 응력 및 변형을 계산하였다. 해석 결과 노내 핵연료 교환기는 핵연료 재장전 시에 응력 및 변형에 대한 허용치를 만족하는 것으로 평가되었다.

Abstract

In case of the removal for the core assembly duct , the structural analysis to precisely predict the motion of In-Vessel Transfer Machine(IVTM) which move and support the weight of the core assembly duct is necessary. The modelling configuration of IVTM is the condition of fully extended with the pantograph arm and the deflection and deformation are occurred by the weight of the core assembly duct, self weight and reaction force for the withdrawal of the core assembly duct. The structural analysis of IVTM was carried out using the finite element analysis. The stress and deformation were calculated to the design load including the self-weight, seismic load by IDEAS 8.0 code. It was evaluated from the analysis that IVTM satisfied the allowable limit of the stress and deformation during the refuelling time.

1. 서 론

노내 핵연료 교환기는 소듐으로 채워진 원자로 내에서 노심 집합체 덕트를 다루는데 사용되어진다. 노내 핵연료 교환기 형태는 판토그라프 식으로 운전 중에는 노심 내에 고정되어지며 그림 1에 개념도가 나타나있다. 노내 핵연료 교환기는 크게 두 부분으로 나누어지며 상부는 하부를 운전하기 위한 전기 및 기계 구동장치로 구성된다. 이러한 구동장치는 전기모터, 감속기, 기어, 회전 조절클러치, 긴급 수동운전장치와 계측 및 운전을 조절하기 위한 요소들로 구성된다. 하부는 회전플러그로부터 수직 아래로 11.5 m 로 뻗어 있으며 main tube와 판토그라프식 팔 등으로 구성되어있다. 노내 핵연료 교환기는 회전플러그의 중심으로부터 0.91.5 cm 거리에 있으며 180^{o} 회전할 수 있으며 장착 및 탈착이 필요한 노심 집합체위로 판토그라프식 팔을 수평이동 시킬 수 있다. 그림 2에서 보듯이 판토그라프식 팔의 반경방향의 수평이동 거리는 최대 신축시 30.48c m이며 최대 팽창 시 91.44 cm이다.

원자로 내에서 노내 핵연료 교환기가 노심 집합체 덕트를 제거할 때 노심 집합체 덕트의 무게 및 자중을 지탱하면서 작동하는 노내 핵연료 교환기의 동작을 정확히 예측하는 구조해석이 필요하다. 노심에 분포되어있는 노심 집합체와 제어봉 등의 안전 관련 주요 구조물과의 충돌을 일으키지 않고 움직임을 제어하며 안정성을 유지하여야 한다. 이러한 안전성을 평가하기 위하여 노내 핵연료 교환기의 응력 및 변형해석을 수행하였다.

2. 노내 핵연료 교환기의 설계특성 및 요건

2.1. 설계특성

핵연료 재장전 계통은 원자로 노심 집합체를 원자로 정지기간동안 취급하고 운송하며 저장하는 장치 및 설비를 말한다. 핵연료 재장전 주기는 18개월이며 주요시설은 노내 핵연료 교환기 및 운송계통 과 저장계통으로 구분되어진다. 원자로 용기내의 노심 집합체의 이동은 노내 핵연료 교환기(In-Vessel Transfer Machine)에 의하여 이루어진다. 노내 핵연료 교환기는 판토그라프식 형태로 원자로 회전플러그에 의해 고정되어 작동한다. 회전플러그는 핵연료 재장전 시에 회전운동을 하며 노내 핵연료 교환기를 이동시키는 역할을 하며 원자로 헤드의 중앙에 위치하여 특별한 밀봉장치로 고정되어있다. 회전 플러그의 중심은 6개의 제어봉 집합체 출입구, 노내 핵연료 교환기가 관통하여 하부에 노내 상부구조물이 용접결합되어있다. 그림 3은 노내 핵연료 교환기 및 회전플러그의 IDEAS 모델을 나타낸다[1].

새로운 노심 집합체는 핵연료 교환소(Fuel Transfer Station)를 통해 노심 내로 이동되어지며 사용 후 핵연료는 노심으로부터 제거된 뒤 핵연료 교환기에 의해 노내 저장소로 이동하여 일정기간 보관된다. 운송계통은 노심에서 제거된 노심 집합체를 핵연료 운반 용기(Fuel Transfer Cask) 에 담아 저장시설로 이동시킨다.

2.2 설계요건

- 노내 핵연료 교환기는 노심, 노내 저장소, 핵연료 교환소 사이에 노심 집합체를 이동할 수 있어야 한다.
- 운전수명은 아래의 설계요건을 만족시켜야 한다
  . 상부 구조(구동부): 주기적인 보수 유지에 의한 20년
  . 하부 구조(원자로 내부) : 주기적인 보수 유지에 의한 30년
- 상부 구동부에 의한 구동 시 원자로 내부의 노내 핵연료 교환기는 6개의 이동능력을 갖는다.
  . IVTM tube 축 방향에 대한 회전
  . Telescopic tube 상승 및 하강
  . Pantograph arm 팔의 신축
  . Grapple 상승 및 하강
  . Grapple finger 노심집합체를 장착 및 탈착
  . Grapple head 축 방향에 대한 회전
- 보조장비와 함께 사용하여서 노내 핵연료 교환기는 손상된 receptacle을 제거, 교환 할 수 있어야 한다.
- 노내 핵연료 교환기의 하부구조는 유체유발 진동과 thermal striping을 최소화 하도록 설계되어야 한다.
- 노내 핵연료 교환기는 판토그라프 팔이 완전히 축소된 위치에서 아래의 동작을 할 수 있어야 한다.
  . 회전플러그의 회전 및 telescopic tube의 상승 및 하강
  . 핵연료 교환기의 회전 및 telescopic tube의 상승 및 하강
  . 회전플러그의 회전, 노내 핵연료 교환기의 회전, 그래플의 회전
- 노내 핵연료 교환기의 기능은 수동작동에 의해 조절 될 수 있어야 한다.
- 노내 핵연료 교환기는 노심, 노내 저장소, 노내 교환소에서의 정렬을 위해 노심 집합체를 회전 시킬 수 있어야 한다.
- 고장 시에 노내 핵연료 교환기는 집어 올려진 노심 집합체를 제거하고 원자로 헤드의 관통부를 통하여 제거 될 수 있어야 한다[2].

3. 노내 핵연료 교환기 구조해석

3.1 변형구조해석 이론

변형구조해석을 하기 위해서는 지배 방정식 (1)로부터 힘이 주어졌을 때 응력을 구할 수 있고 미소 변형인 경우 응력 변형율의 관계를 갖는 구성방정식 (2)와 변형율과 변위의

관계를 갖는 구성방정식 (3)로부터 응력, 변형율, 변위등을 구할 수 있다[3].

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + \rho \bullet f_i = 0 \tag{1}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}'}{2G} + \frac{1-2\mu}{E}\,\delta_{ij}\,\sigma_m + \alpha\,\sigma_{ij}\,\Delta T \tag{2}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{3}$$

3.2 해석 모델링

노심 집합체 덕트를 제거 할 때 노심 집합체 덕트의 무게를 지탱하면서 작동하는 노내 핵연료 교환기의 동작을 정확히 예측하는 구조해석이 필요하다. 이러한 움직임을 고려하여 노내 핵연료 교환기를 제어하여야 한다. 노내 핵연료 교환기의 작동순서는 그리퍼의 이동으로부터 시작된다. 인출하고자 하는 노심 집합체 상단에 판토그라프식 팔을 위치시키고 그리퍼가 하부로 이동하여 노심 집합체 상단의 그래플 헤드와 결합하게 된다. 완전히 인출된 노심 집합체는 판토 그라프식 팔에 의해 최대로 펼쳐져 있는 상태로 자체하중, 노심 집합체의 무게 및 인출 시에 반력에 의한 처짐 및 변형이 발생하게 되며 이러한 변형은 노심상부와의 충돌을 야기 시킬 수 있다. 따라서 노내 핵연료 교환기의 노심 집합체의 취급 시에는 이를 충분히 고려하여서 설계에 반영하여야 한다[4]. 그림 2 에서 처럼 판토그라프식 팔의 반경방향의 수평이동 거리는 최대 신축시 30.48 cm 이며 최대 팽창 시 91.44 cm 이다. 해석 모델링은 판토그라프식 팔의 최대 팽창 시의 형상이며 main tube의 하부는 노내 상부구조물에 의해 지지 되므로 해석에서 제외하였다. 해석은 IDEAS 코드을 사용하였으며 element type 은 10개의 노드를 갖는 3차원 4면체 solid92를 사용하였다. Mesh는 보다 정확한 해을 얻기 위해서 세밀히 나누었으며 모델을 구성하고 있는 volume를 자동으로 나누어 주는 auto mesh 기법을 사용하였다. 사용된 유한요소 모델의 크기는 요소수 16810개 이며 절점수 30221개이다. 그림4는 해석에 사용된 모델링 형상이며 그림 5는 유한 요소 해석 모델이다.

3.3 경계 및 하중조건

경계조건은 main tube 내에서 움직이는 3개의 술라이더가 최대 팽창 시에 형상에서 main tube와 접촉하는 모든 방향의 자유도가 0이 되도록 구속하였다. 노심 집합체 덕트를

잡는 그리퍼의 끝 부분에 재장전 하중을 고려하여 작용시켰으며 자중 및 지진하중을 고려하였다. 재장전하중은 2270 Kgf 로 가정하였으며 그 내용은 다음과 같다. 예상하중은 최대 노심 집합체 무게가 600 Kgf, backup holddown(136 Kgf), interassembly contact friction (227 Kgf), 정상 인출하중(1043 Kgf)이 더해졌다. 재장전 하중은 예상하중에 113%의 margin을 적용 하였다. 지진 하중은 노심 집합체를 잡고있는 상태에서 SSE event 와 OBE event를 고려하였다. 해석은 OBE 나 SSE에 따른 노내 핵연료 교환기로부터 노심의 임시 저장소나 노심의 정해진 위치에 노심 집합체를 장전 및 인출하는 능력을 평가하기 위한 것이다. 지진해석에 대한 하중은 표 1에 표시되어 있다[5].

노내 핵연료 교환기의 사용재질은 스텐레스 강으로 가정하였으며 사용 물성치는 비중량이 78.57 x 10^7 Kgf/mm^3, 포와송 비가 0.3, 영 계수가 2.04 x 10^4 Kgf/mm^2 이다. 각 모델링에 사용된 부품은 solid로 가정하였으며 main tube의 내부는 공간으로 구동모터와 하부구조의 연결장치에 의해 구성되게 되어있다. 따라서 하부구조물의 각 부품은 구조물의 대형화와 무거운 자중을 야기시키므로 중공 구조물의 사용을 통해 경량화 설계를 수행하여야 한다. 해석형상의 복잡성으로 말미암아 본 모델에서는 main tube 및 각 부품의 밀도를 50% 로 낮게 설정하여 자중에 의한 무게를 감소시켜 해석에 적용하였다[6].

3.4 해석결과

노내 핵연료 교환기는 OBE나 SSE 지진하중 하에서 노심집합체를 인출하고있는 상태에서 안전성을 확보하여야 한다. 따라서 해석은 지진하중에대한 구조적 건전성이 있어야 하고 노내 핵연료 교환기로부터 노심 및 노내저장소로 노심 집합체를 이동할 수 있어야 한다. 지진으로부터 격리된 구조의 원자로 건물에 기초해서 지진하중에 대한 내부 구조물은 수직과 수평방향으로 ground ZPA의 1.0과 1.5의 확대 계수를 갖는 상당 inertial load를 가한뒤 정적해석으로 수행하였다. 그림 6은 OBE 지진하중을 포함한 설계하중이 작용했을 때 구조물의 변위와 응력분포를 나타낸다. 최대 변위와 응력은 0.271 mm 과 0.736 Kgf/mm^2 로 SSE 지진하중을 포함한 설계하중의 경우보다 적게 발생했다. 그림 7~그림 9는 SSE를 포함한 설계하중이 가해졌을 때 판토그라프 팔의 변위를 나타낸다. x방향의 변위는 매우 적으며 y, z 방향의 변위가 비교적 크게 발생했다. 그림 8에서와 같이 판토그라프 팔의 수평 y 방향의 처짐이 가장 크게 발생하고 상부와 하부에 걸쳐서 s자 형태로 변화되며 이는 판토그라프 팔의 3개의 link부분의 변형의 차이에 의해 발생하는 것으로 예측된다. 최대 변형량은 0.327 mm 로 노내 핵연료 교환기의 위치 정확도의 한계 값인 2.5 mm보다 훨씬 적음을 알 수가 있었다. 그림 10은 SSE 하중을 포함한 경우의 변위의 합성값를 나타낸다. 노내 핵연료 교환기에서 응력에 대한 설계기준은 SSE 지진하중을 포함한 설계하중에 대하여 Primary stress가 항복응력의 90%을 만족하면 된다. 그림 11에서 보는 바와 같이 계산된 최대응력은 1.02 Kgf/mm^2 로 응력의 한계값인 13.54 Kgf/mm^2 의 허용응력을 만족함을 확인하였다. 높은 응력의 분포는 판토그라프팔의 상단 link 부분에서 주로 분포하였으며 고정

된 두번째 link 부분에서 가장 높은 응력분포를 발생시킴을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 노내 핵연료 교환기의 구조적 건전성을 평가하기위해 Ideas 8.0 코드를 사용하여 응력 및 변형해석을 수행하였다. 여러 설계하중을 가정하여 해석을 수행하였고 해석결과 설계 한계 값을 만족함을 확인하였다. 그러나 이러한 해석은 열수력 하중에 대한 고려는 제외시킨 것으로 향후 노심에서의 소듐의 유동에 의한 열수력 하중을 포함시켜야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. IDEAS design manual for revision 8.0.
2. KALIMER preliminary conceptual design report, KAERI/TR-1636/2000.
3. 원자로내에 핵연료봉 제거 로봇 매니퓰레이터의 구조해석, 홍익대학교, 1998. 12.
4. 김석훈 외 2인, "KALIMER 노내 핵연료 교환기의 메커니즘 모델링", 2001 춘계학술발표회 논문집, 한국 원자력학회, 2001.
5. PRISM Preliminary Safety Information Document, GE, 1987.
6. M.Barone, G.Vekins, G. Tzorbatzoglou, "A finite element stress analysis of the aluminum fram for the NESTOR detector", Nuclear Physics B(Proc. Suppl.) 61B, p 151-158, 1998.

표1. 노내 핵연료 교환기 지진하중

Load / Event	Ground ZPA(g)	Equivalent Static Inertial Load(g)	
		Horizontal	Vertical
OBE	0.25	0.25	0.625
SSE	0.50	0.5	1.25

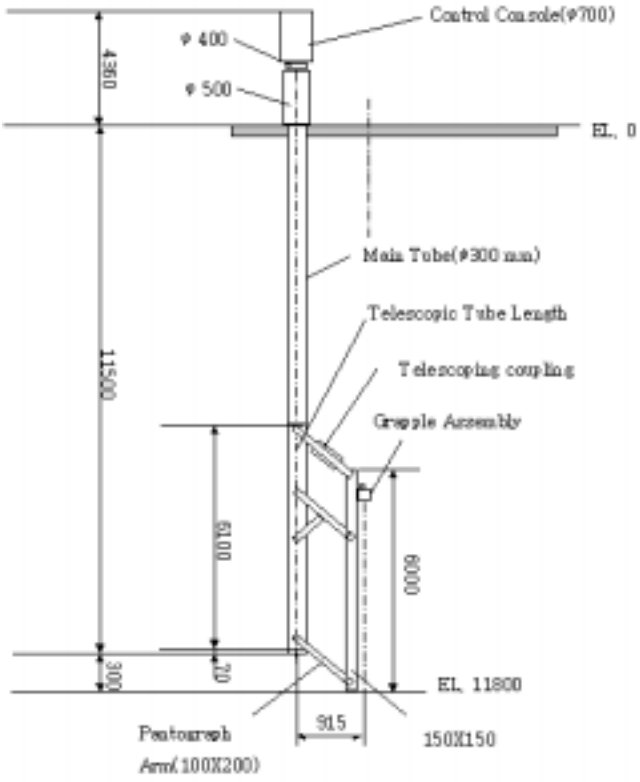

그림1 노내 핵연료 교환기의 개념도

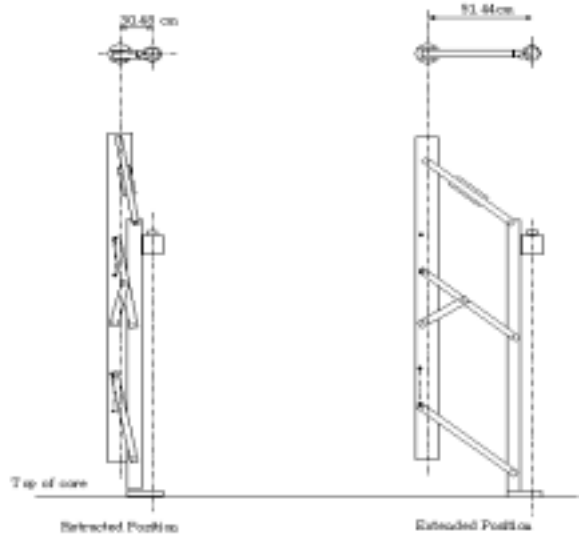

그림2 신축위치에 따른 노내 핵연료 교환기의 개념도

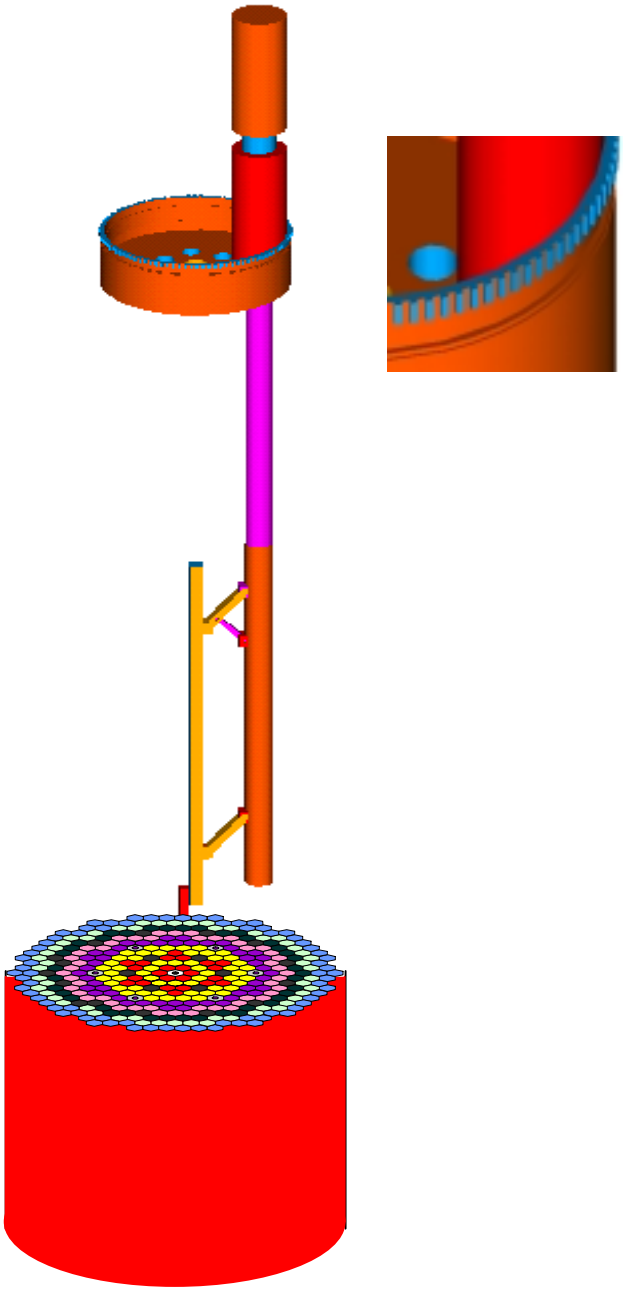

그림3 노내 핵연료 교환기의 Ideas 모델링

그림4 해석 구조물의 형상

그림5 해석 구조물의 유한요소모델

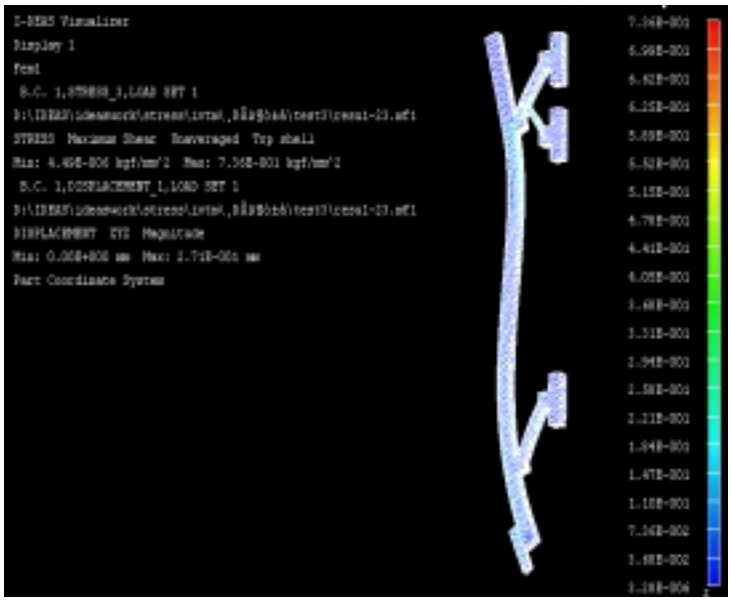

그림6 설계 하중(재장전하중+OBE) 하의 최대응력 분포

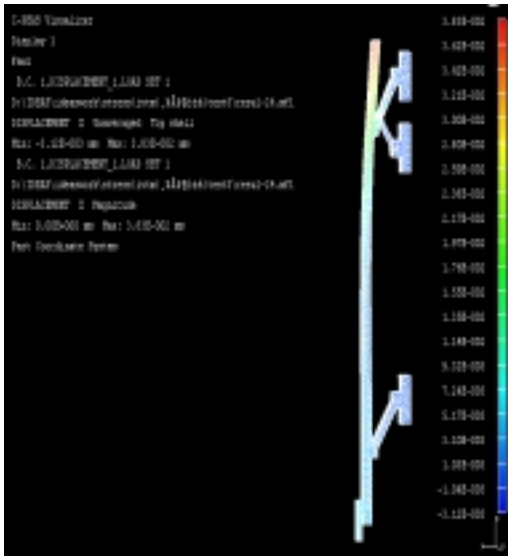

그림7 설계 하중하의 x축방향 변위

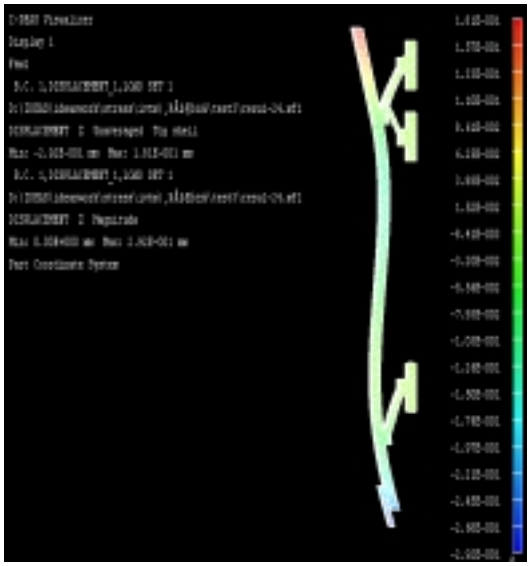

그림8 설계 하중하의 y축방향 변위

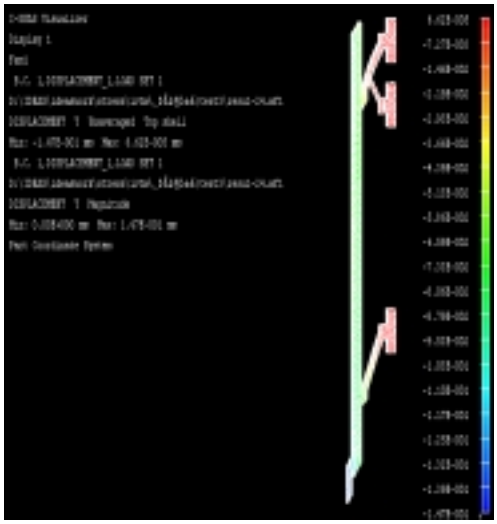

그림 9 설계 하중(재장전하중+SSE) 하의 z 축 방향 변위

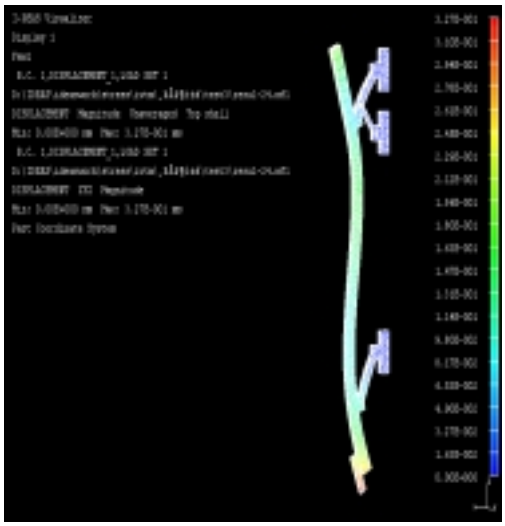

그림10 설계 하중(재장전하중+SSE) 하의 최대 변위

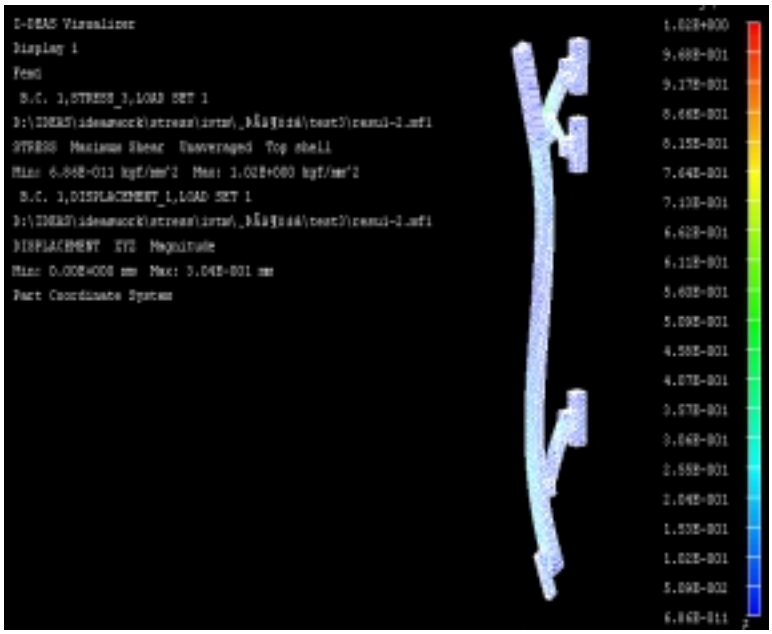

그림 11 설계 하중(재장전하중+SSE) 하의 최대응력 분포