'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 노내 핵연료 교환기의 메커니즘 모델링

Mechanism modelling of In-Vessel Transfer Machine in KALIMER

김석훈, 주영상, 유 봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구덕진동 150

요 약

노내 핵연료 교환기가 재장전 기간동안 노심내에서 노심집합체를 다룰 때 운동을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 KALIMER 노내 핵연료 교환기의 개념설계 특성이 연구되었고 기구동역학 해석이 수행되었다. 각 파트의 치수 및 조인트 위치와 같은 설계 인자에 대하여 IDEAS 코드에 의해 형상이 모델링되었다. 노내 핵연료 교환기의 운동 메커니즘을 묘사하기 위하여 스텝함수를 사용하여 조인트들의 움직임을 고려하였다. 노심 집합체의 장전에 의한 외력과 자중을 고려하여 강체에서의 변위,속도,가속도 와 각 조인트에서의 반력이 계산되었다. 해석결과는 구조건전성 평가와 재질 및 설계인자의 변화를 통한 무게경량화에 대한 자료로써 사용되어질것이다

Abstract

When In-Vessel Transfer Machine(IVTM) handle the core assembly during the refueling time in the reactor core, it is necessary to predict the motion of it precisely. In this paper, the characteristics of the conceptual design for KALIMER IVTM was studied and the kinematic analysis for the mechanical system has been carried out. The configuration by the design parameters such as the dimension of each part and the joint positions was modeled by IDEAS Code. To simulate the driving mechanism of IVTM, the movement of the joints was considered by using the step function. The displacement, velocity and acceleration for the rigid body and the reaction force of the joints were calculated by considering the weight of IVTM and the external force due to loading of the core assembly. The result will be used to the data for evaluating the structural integrity and the reduction of the weight through the change of the design parameters and the material.

1. 서 론

원자로내에서 노내핵연료 교환기가 핵연료 집합체 덕트를 제거할 때 핵연료 집합체 덕트의 무게 및 자중을 지탱하면서 작동하는 노내 핵연료 교환기의 동작을 정확히 예측하는 구조해석이 필요하다. 노심에 분포되어있는 노심 집합체와 제어봉등의 안전 관련 주요 구조물과의 충돌을 일으키지 않고 움직임을 제어하며 안정성을 유지 하여야한다. 이러한 안전성을 유지하기 위하여서는 노내 핵연료 교환기의 변형에의한 처짐의 양을 알아야한다. 처짐량은 각 조인트에서의 반력을 구함으로써 얻어질 수 있으며 반력은 노내 핵연료 교환기의 움직임에 대한 기구동역학 구조해석을 수행하여 구할 수 있다. 그림 1은 IDEAS 코드를 사용하여 노내 핵연료 교환기의 형상을 모델링 한것이다(1).

2. 노내핵연료 교환기의 개념설계

2.1. 설계개념

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 그림 2와 같이 설계된 노내 핵연료 교환기(In-Vessel Transfer Machine)에 의하여 이루어진다. 노내 핵연료 교환기는 판토 그라프식 형태로 원자로 회전플러그에의해 고정되어 작동한다. 회전플러그는 핵연료 재장전시에 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 용접 결합되어있다. 그림3은 회전플러그 상부의 개념도를 나타낸다.

새로운 노심 집합체는 핵연료 교환소(Fuel Transfer Station)를 통해 노심내로 이동되어지며 사용후 핵연료는 노심으로부터 제거된 뒤 핵연료 교환기에 의해 노내 저장소로 이동하여 일정기간 보관된다. 그림4는 노심 집합체의 이동경로에 대한 개념도이다. 운송계통은 노심에서 제거된 노심 집합체를 핵연료 운반 용기(Fuel Transfer Cask) 에 담아 저장시설로 이동시킨다(2).

2.2 설계요건

- 노내 핵연료 교환기는 노심, 노내 저장소, 핵연료 교환소 사이에 노심 집합체를 이동할 수 있어야한다.
- 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 구동시 원자로 내부의 노내 핵연료 교환기는 6개의 이동능력을 갖는다.
  . IVTM tube – 축방향에 대한 회전
  . Telescopic tube – 상승 및 하강
  . Pantograph arm – 팔의 신축
  . Grapple – 상승 및 하강
  . Grapple finger – 노심집합체를 장착 및 탈착
  . Grapple head – 축방향에 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 설계되어야한다.
- 노내 핵연료 교환기는 판토그라프 팔이 완전히 축소된 위치에서 아래의 동작을 할 수 있어야한다.
  . 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 수동작동에의해 조절 될 수 있어야 한다.
- 노내 핵연료 교환기는 노심, 노내 저장소, 노내 교환소에서의 정렬을 위해 노심 집합체를 회전 시킬 수 있어야 한다.
- 고장시에 노내 핵연료 교환기는 집어 올려진 노심 집합체를 제거하고 원자로 헤드의 관통부를 통하여 제거 될 수 있어야 한다.

2.3 구동방식 및 구조

노내 핵연료 교환기는 소듐으로 채워진 원자로 내에서 노심 집합체 덕트를 이동할때 사용된다. 노내 핵연료 교환기 형태는 판토그라프 식으로 운전중에 노심내에 고정된다. 그림2에 개념도에서 보듯이 노내 핵연료 교환기는 크게 두부분으로 나누어 지며 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 아래로11.2 m 로 뻗어 있으며 main tube 와 판토그라프식 팔등으로 구성되어있다. 노내 핵연료 교환기는 회전플러그의 중심으로부터 0.915m 떨어져 있고 180° 회전할 수 있으며 장착 및 탈착이 필요한 노심 집합체 덕트 위로 판토그라프식 팔을 수평 이동 시킬 수 있다. 그림5 에서 처럼 판토그라프식 팔의 반경방향의 수평이동 거리는 최대 신축시 0.3048 m 이며 최대 팽창시 0.9144 m 이다.

3. 기구 동역학 구조해석(Kinematic analysis)

3.1 동적구조해석 이론

동적구조 해석을 하기위해서는 기구동역학 구조해석과 진동구조해석을 수행해야만 한다. 기구동역학 구조해석에서는 다음과 같은 운동방정식을 풀어야 한다. 변위, 속도, 가속도를 구하기 위해서는 기구에 대한 기구학적 운동방정식인 Closed loop equation을 구성하여 이를 그래픽 방법(Grapical method) 또는 복소수 방법(Complex method) 으로 푼다. 그래픽 방법은 기하학적 조건을 이용해서 푸는것이고 복소수 방법은 아래의 변위,속도 및 가속도의 방정식을 풀어 구할 수 있다(3).

$$R = a + jb = r e^{jq} = r\cos q + j r \sin q \quad (1)$$

$$\frac{dR}{dt} = \dot{r} e^{jq} + jr\dot{q} e^{jq} \quad (2)$$

$$\frac{d^2R}{d^2t} = \dot{r} e^{jq} - r\dot{q}^2 e^{jq} + jr\ddot{q} e^{jq} + 2j\dot{r}\dot{q} e^{jq} \quad (3)$$

이와 같은 기구학적 해석을 통해 얻어진 변위, 속도, 가속도를 근거로 동역학적 운동방정식인 Newton’s law 또는 D’Alembert 원리로 구할 수 있다. Newton’s law는 ΣF = MA 와 ΣT=Iα(I: 무게중심에대한 inertia 모우멘트) 이고, D’Alembert 원리는 ΣF+(-MA)=0, ΣT+ (-Iα)=0 로 표시되는 방정식들이다. 진동 구조해석을 하기위해서는 Hamilton’s 원리의 방정식(4)에서 유도해낸 방정식(5) 로부터 구할 수 있다.

$$d \int_{t_0}^{t_f} (U - T)dt - \int_{t_0}^{t_f} d\, W\, dt = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}}\right) + \frac{\partial U}{\partial u} - \frac{\partial T}{\partial u} = p - f_d \quad (5)$$

3.2 해석 모델링

노내 핵연료 교환기의 작동순서는 그리퍼의 이동으로부터 시작된다. 인출하고자 하는 노심 집합체 상단에 판토그라프식 팔을 위치 시키고 그리퍼가 하부로 이동하여 노심 집합체 상단의 그래플 헤드와 결합하게된다. 해석의 모델링은 이단계에서부터 시작되며 그래플의 수직 병진 운동에 의해 노심 집합체를 들어 올린다. 완전히 인출된 노심 집합체는 판토 그라프식 팔에의해 최대로 축소되기위해 노내 핵연료 교환기의 main tube 내부에 설치되어 있는 슬라이더의 상

하작동이 이루어 진다. 이러한 운동으로 노심 집합체는 완전히 인출된뒤 노심위를 이동하게된다. 이러한 이동시에 노내 핵연료 교환기의 판토그라프식 팔은 자체하중 및 노심 집합체의 무게에의한 처짐이 발생하게되며 이러한 처짐은 노심상부와의 충돌을 야기 시킬 수 있다. 따라서 노내 핵연료 교환기의 노심 집합체의 취급시에는 이를 충분히 고려하여서 설계에 반영하여야 한다. 해석을 위해 노내 핵연료 교환기가 노심 집합체에 도달하는 모든 경로를 고려해야 하지만 운동이 회전플러그를 중심으로 축대칭 운동이고 노심위에서 원하는 위치까지의 회전이동은 회전플러그에의해 수행되므로 그림3에 표시된 고정된 위치에서 노내 핵연료 교환기의 운동을 고려하여 해석하였다. 노심 집합체를 제거하기위해 그리퍼가 하부로 이동한후 노심 상부에서 노심 집합체의 그레플 헤드와 결합하게된다. 이 시간 이후의 노내 핵연료 교환기의 거동을 해석에 적용하였다(4). 노심 집합체와 결합된 그리퍼는 20초 동안 수직 상승하여 정해진 위치에서 정지하게되며 슬라이더 어셈블리에 의해 판토그라프 팔을 신축하게된다. 이때 소요시간은 40초로 가정하였다. 완전히 신축된 노내 핵연료 교환기는 회전운동을 시작하여 40초 동안 180^{o} 회전후 반대 방향의 핵연료 저장소 및 핵연료 교환소에 핵연료 집합체 덕트를 이동시키기위해 멈추게되는 과정을 모델링에 적용하였다. 표 1은 노내 핵연료 교환기의 부품종류 및 운동 구속조건이다.

3.3 작용하중 및 경계조건

노내 핵연료 교환기의 사용재질은 스텐레스 강으로 가정 하였으며 사용 물성치는 비중량이 78.57×10^{7} Kgf/mm^3 , 포와송 비가 0.3, 영계수가 2.04×10^{4} Kg/mm^2 이다. 노심 집합체의 인출하중은 노내 핵연료 교환기의 그리퍼에 중력방향으로 500Kgf 의 하중을 주었으며 각 모델링에 사용된 부품은 solid로 가정하였다. Main tube의 내부는 공간으로 구동모터와 하부구조의 연결장치에의해 구성되게 되어있다. 또한 하부구조물의 각 부품은 구조물의 대형화와 무거운 자중을 야기시키므로 중공 구조물의 사용을 통해 경량화 설계를 수행 하여야한다(5). 해석형상의 복잡성으로 말미암아 본 모델에서는 main tube 및 각 부품의 밀도를 30% 와 50% 로 낮게 설정하여 자중에의한 무게를 감소시켜 해석에 적용하였다. 그림6 과 표2 에서 보듯이 노내 핵연료 교환기의 운동을 묘사하기위해 사용된 조인트는 총 10개로 구성하였다. 모터에의한 구동 조인트의 갯수는 3개이며 그리퍼의 병진운동, 슬라이더의 병진운동 및 tube ass'y의 회전운동에대한 함수를 정의하여 운동조건을 묘사하였다(6).

3.4 해석결과

그림 7은 시간에따르는 Fixed 조인트에서 반력의 변화를 나타낸다. 자중을 고려한 x, y, z축 방향의 반력의 크기는 x축반력의 힘의 성분은 팔의 신축과 더불어 감소하며 y축 방향의 반력은 거의 작용하지 않음을 알 수 있다. z축 방향의 힘의 성분은,자중 및 그리퍼에 작용하는 하중에 의해 시간 경과에 대하여 균일하게 분포되며 합성력은 약 1000 kgf의 반력을 조인트에 발생시

켰다. 그림 8~그림12도 노내 핵연료 교환기의 다른 조인트에 걸리는 반력의 크기를 x,y,z 방향 성분 및 합성힘으로 나타낸것이다. 각 조인트에 걸리는 y방향의 반력은 전부 0인 것을 알 수 있으며 시간이 경과하여 회전운동을 할 때에는 작은 반력들이 생겼다. 각 조인트에 걸리는 반력들은 그래플 집합체의 운동과 판토그래프 팔의 신축시에는 감소 또는 증가하는경향을 나타내며 팔이 회전을 시작 할때부터는 반력의 변화가 거의 없었다. 그림13~그림 16은 구동조건을 묘사하기 위해 가해진 step 함수에 의해 구현된 각 구동조인트에서 발생하는 변위,속도 및 가속도의 변화를 나타낸다. 구동 조인트는 Grapple, Slider ass’y 및 Tube ass’y 로 구성이 된다. 각각의 변위를 살펴보면 Grapple 의 이동거리는 20초 까지의 변위가 약 4000 mm 정도로 노심 집합체의 수직 이동거리와 거의 일치하게 되며 Slider ass’y 의 변위는 300 mm 정도로 팔의 신축시 작동하는 Slider ass’y 의 이동거리와 일치하게된다.

그림 17는 자중을 고려한 경우에 각 조인트에 걸리는 x,y,z 성분 반력의 합성력의 시간에 따른 변화를 계산한것으로 revolute 5 조인트에서 최대 반력 분포를 나타내며 revolute 1에서 다음 크기의 반력 분포를 나타내었다. 그림 18은 자중을 고려하지 않고 노심 집합체가 grapple에 의한 인출시 작용하는 집합체 무게만을 고려한 경우로써 자중을 고려한 경우와 차이가 많이 발생하는 적은 반력의 분포를 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 노내 핵연료 교환기의 움직임을 예측하기 위하여 범용 소프트웨어 Ideas의 mechanism 을 사용하여 노내 핵연료 교환기의 형상 및 구동방식을 모델링 하였다. 각 연결 조인트에서의 변위, 속도 및 가속도를 구하고 노내 핵연료 교환기의 자중 및 그리퍼에 의한 인출시에 작용하는 노심 집합체의 무게를 고려하여 반력을 계산하였다. 이러한 결과는 노내 핵연료 교환기의 세부 설계시에 안정성을 평가하기위한 자료로써 중요한 토대가 될것이며 각 부품별 재료 및 형상의 변화를 통해 무게의 경량화 및 변형의 최소화에 이용될 수 있을것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. IDEAS mechanism design course guide for revision 7.0.
2. 김석훈,”Design requirements for KALIMER reactor refueling system, KALIMER/MS 440-DR-01 rev. 0/2000, KAERI
3. 원자로내에 핵연료봉 제거 로봇 매니퓰레이터의 구조해석, 홍익대학교, 1998. 12.
4. Mehrdad Farid, Stanislaw A. Lukasiewicz,”Dynamic modeling of spatial manipulators with flexible

links and joints", Computers and structures 75,p 419-437, 2000.

5. Juan Manuel Ahuactzin, Kamal Gupta, "A motion planning based approach for inverse kinematics of redundant robots: the kinematic roadmap", Expert Systems with application 14, p 159-167, 1998.

6. Seong sik Jo, David Beale"Parameters estimation to improve accuracy of mechanical system simulations using rigid body codes", Computers and structures 65,p 679-686, 1997.

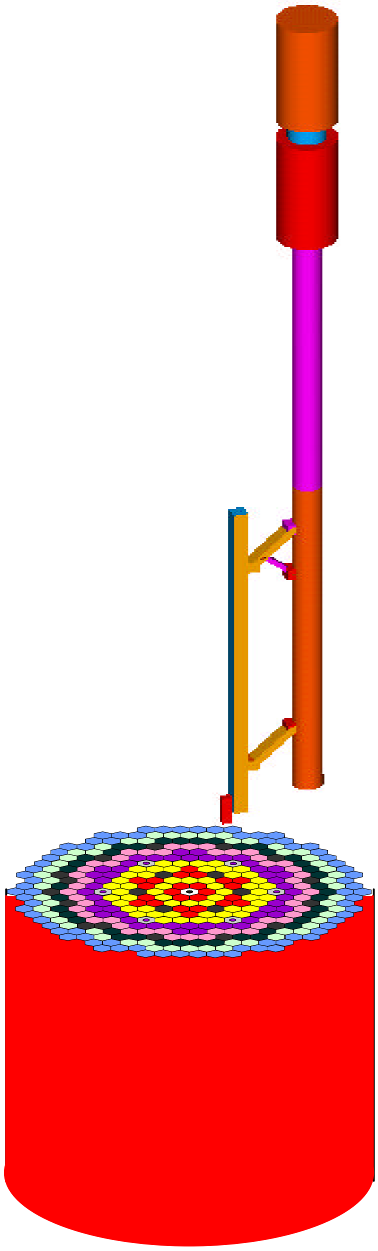

그림 1. 노내핵연료 교환기의 Ideas 모델링

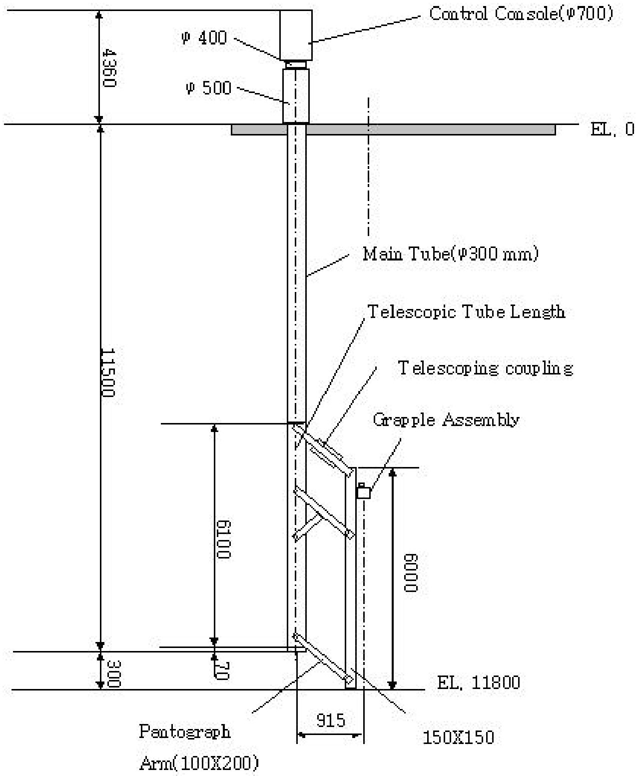

그림2. 노내 핵연료 교환기의 개념도

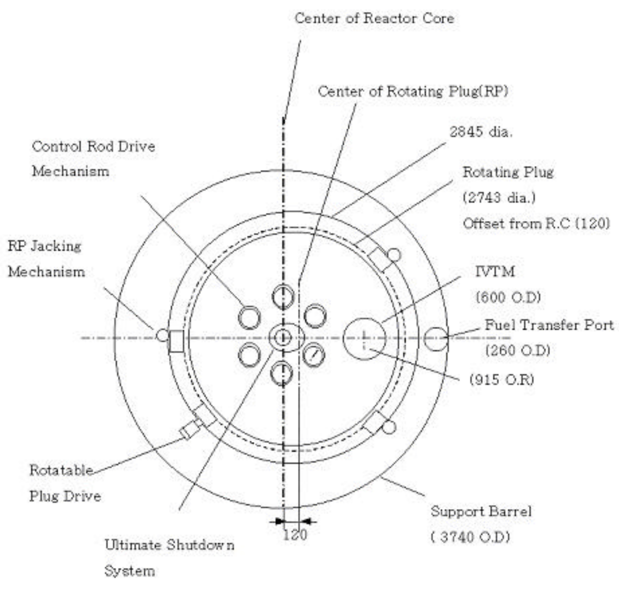

그림 3. 회전플러그의 상부 개념도

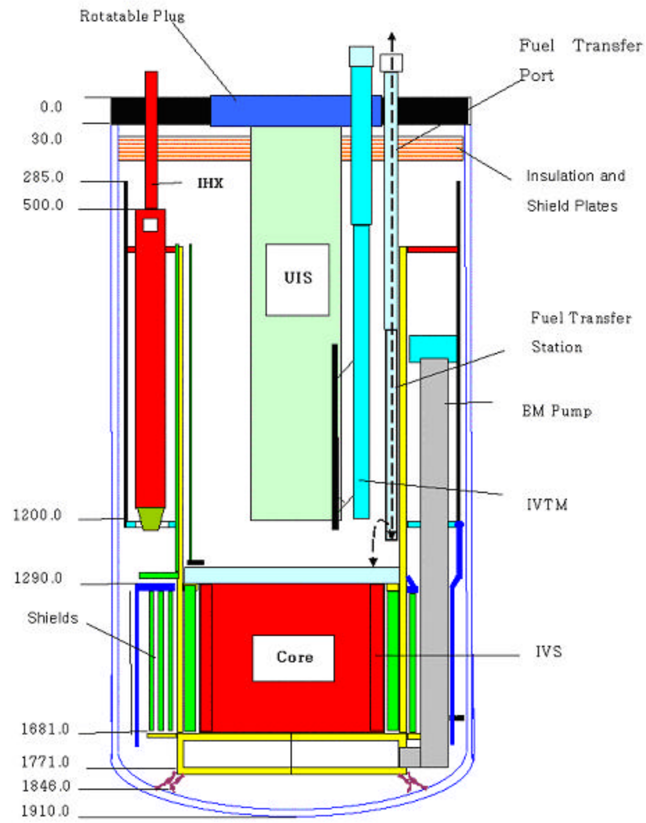

그림 4. 노심 집합체의 이동경로에 대한 개념도

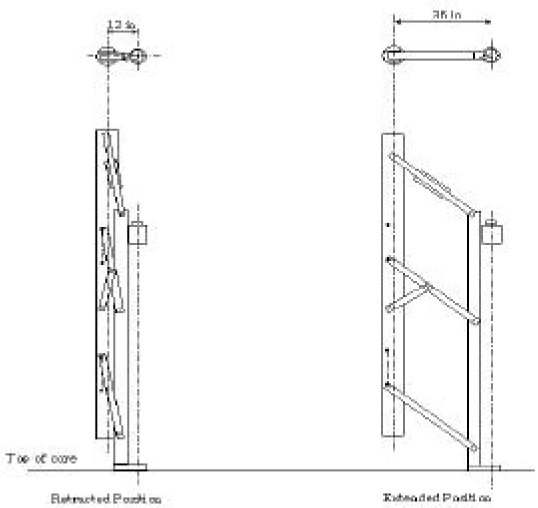

그림 5. 신축위치에 따른 노내 핵연료 교환기의 개념도

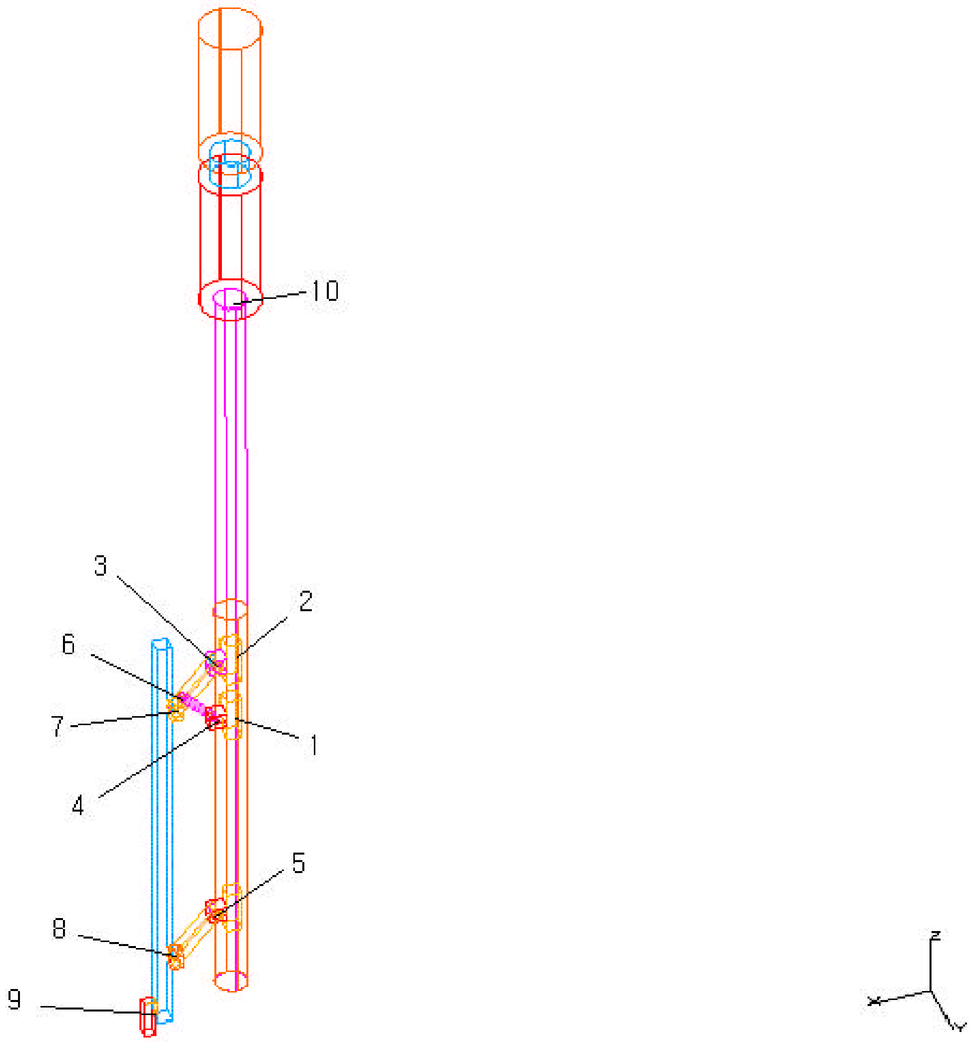

그림 6. 노내 핵연료 교환기의 조인트의 위치 및 좌표축 방향

표 1. 노내핵연료 교환기의 부품 종류 및 운동구속조건

번호	부품의 종류	운동 구속조건
1	Revolver	60~ 100초 사이 180°회전
2	Tube ass'y	
	Main tube	
	Tube 2	
3	Sliderblock ass'y	20~40초 사이 315 mm 병진
	Sliderblock 1	
	Sliderblock 2	
4	Sliderblock 3	
5	Pantograph arm	
6	Link 1	
7	Link 2	
8	Link 3	
9	Grapple	0~20초 사이 3700 mm 병진

표 2. 노내핵연료 교환기의 조인트 종류

번호	조인트 종류	비 고
1	Fixed	
2	Translational 1	Slider ass'y 의 병진
3	Revolute 1	
4	Revolute 2	
5	Revolute 3	
6	Revolute 4	
7	Revolute 5	
8	Revolute 6	
9	Translational 2	Grapple ass'y 의 병진
10	Revolute 7	Main tube의 회전

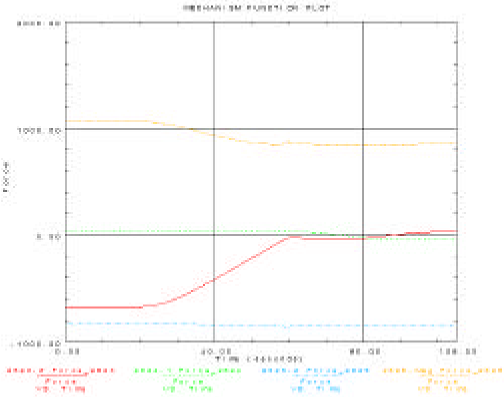

그림7. fixed joint 의 시간에 따른 좌표 성분별 반력 분포

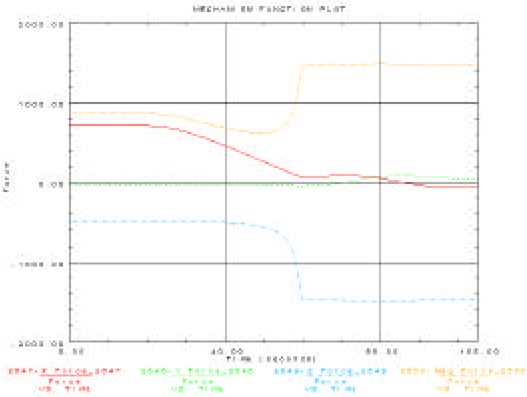

그림8. revolute 1 joint 의 시간에 따른 좌표 성분별 반력 분포

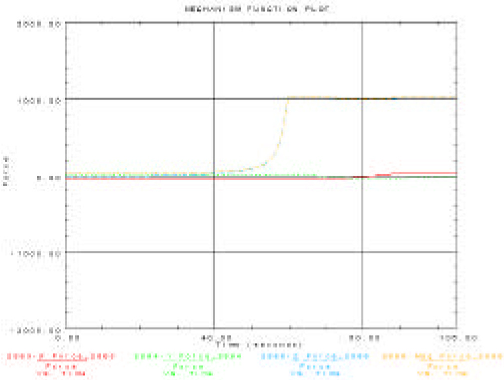

그림9. revolute 3 joint 의 시간에 따른 좌표 성분별 반력 분포

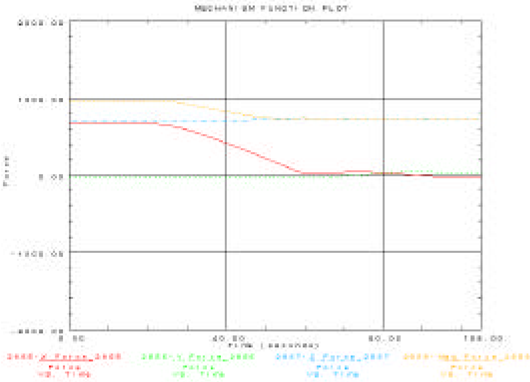

그림10. revolute 4 joint 의 시간에 따른 좌표 성분별 반력 분포

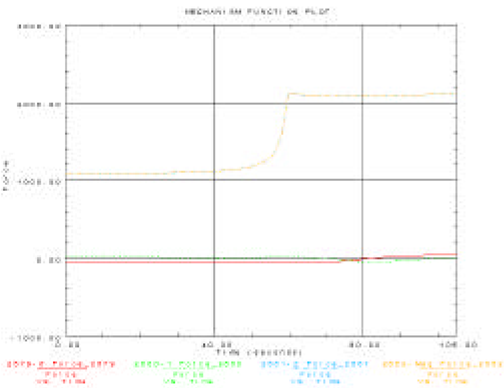

그림11. revolute 5 joint 의 시간에 따른 좌표 성분별 반력 분포

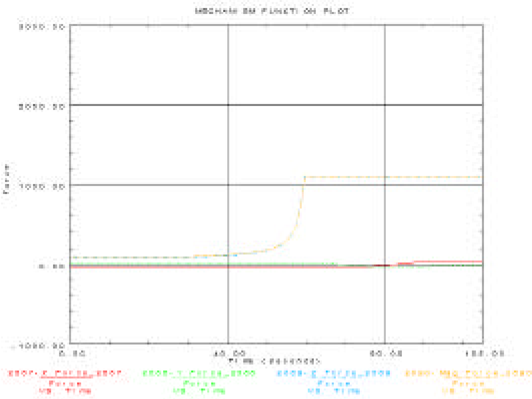

그림12. revolute 6 joint 의 시간에 따른 좌표 성분별 반력 분포

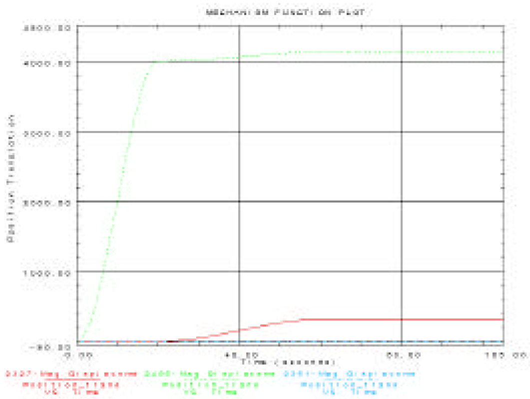

그림13. 구동joint 의 시간에 따른 변위 (Grapple,Slider ass'y,Tube ass'y)

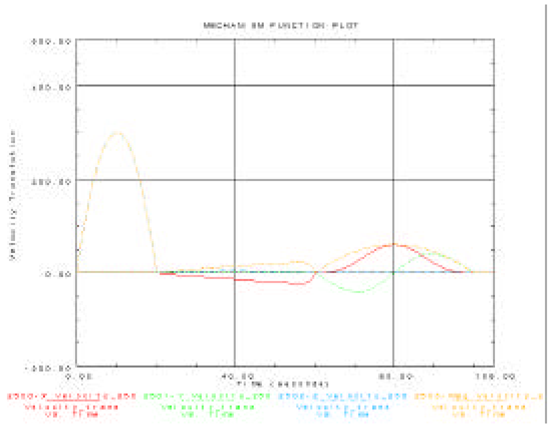

그림14. Grapple 의 시간에 따른 좌표 성분별 속도 변화

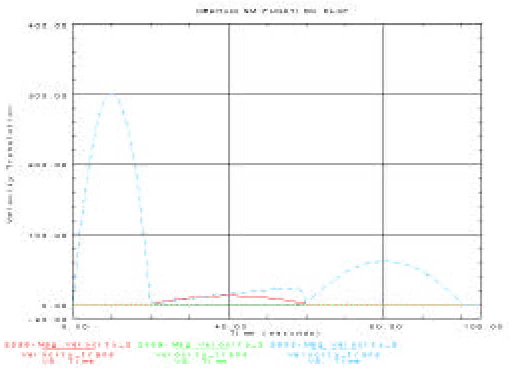

그림15. 구동joint 의 시간에 따른 속도변화 (Grapple,Slider ass'y,Tube ass'y)

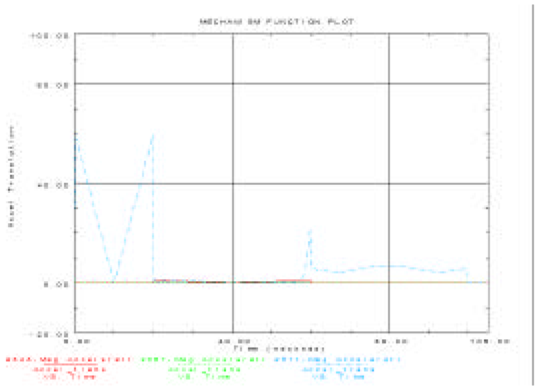

그림16. 구동joint 의 시간에 따른 가속도변화 (Grapple,Slider ass'y,Tube ass'y)

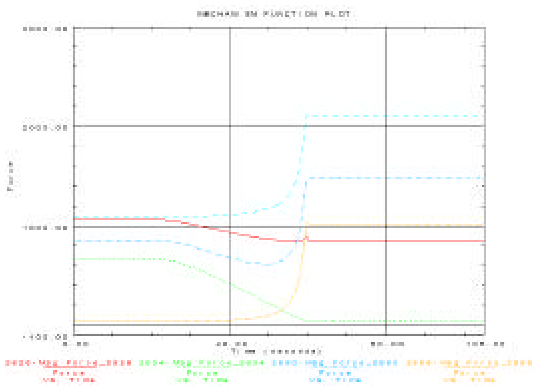

그림17. joint별 시간에 따른 합성 반력 의변화(자중고려)

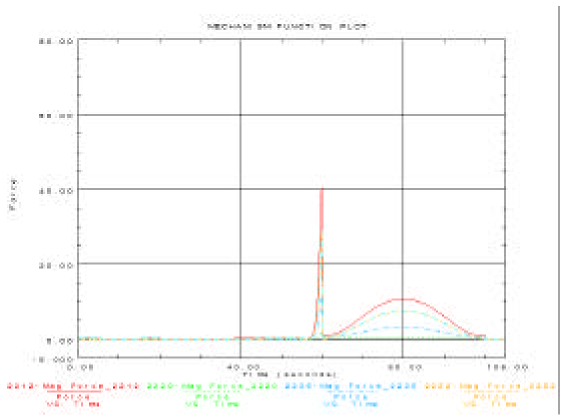

그림18. joint별 시간에 따른 합성 반력 의변화(자중무시)