

KALIMER 원자로 핵연료 교환기의 메커니즘 모델링 및 구조해석

Mechanism Modeling and Structural Analysis of the Fuel Handling Machine in KALIMER Reactor

김석훈* 이재한**
Kim, Seok Hoon Lee, Jae Han

ABSTRACT

The fuel handling machine handles the core assembly in refueling period of the reactor, it is necessary to predict the motion and structural integrity of it. The kinetic analysis of the fuel handling machine was carried out for the refueling motion. The reaction forces at the joints of machine were calculated with IDEAS code considering the weight of the machine and the loading force of the core assembly. Also, the structural analysis for the machine modeled by lumped-mass and beam elements was performed by using ANSYS code. The stresses and deformations were calculated for the equivalent static force based on the kinetic analysis and the seismic loads. The calculated displacements and stresses are quite low compared with allowable limits.

1. 서 론

KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 원자로에 사용되는 핵연료 교환기는 소듐으로 채워진 원자로 내에서 노심 집합체 덱트를 다루는데 사용된다[1]. 핵연료 교환기는 그림 1과 같이 상부와 하부로 나뉘며, 원자로 밖으로 노출된 상부는 하부기구를 운전하기 위한 전기 모터, 감속기, 기어, 회전 조절클러치, 긴급 수동운전장치와 계측기 요소로 구성된다. 하부는 회전플러그로부터 수직 아래로 11.2m 뻗어 있는 직경이 30cm이고 두께가 2.5cm인 주지지원통(main tube)와 판토그래프 팔 등으로 구성된다. 노내 핵연료 교환기의 상단은 회전플러그에서 3축으로 지지되며, 하단은 상부내부구조물 하부에 수평방향으로 지지된다. 핵연료 교환기는 회전플러그의 중심으로부터 91.5 cm 거리에 있으며, 판토그래프 팔의 수축, 팽창과 회전플러그에 의한 180° 회전을 조합하여 핵연료 집합체를 취급한다. 판토그래프 팔의 수평방향 이동거리는 수축 시 30.5cm, 팽창 시 91.5 cm이다[2].

핵연료 교환기가 노심 집합체를 취급할 때 교환기의 동작을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 취급장치가 노심 핵연료 집합체를 취급할 때 발생하는 핵연료 교환기 각 조인트 부분에서 발생하는 동적 반작용하중을 IDEAS 프로그램[3]으로 계산하고 평가하였다. 그리고 상부내부구조물과 핵연료 교환기에 대한 집중질량-보 모델을 ANSYS 프로그램[4]으로 작성하고, 작성된 모델에 대하여 계산된 동적 반작용 하중의 크기를 고려한 취급하중과 설계지진하중에 대한 구조적 건전성 해석을 수행하였다.

* 원자력연구소 선임연구원

** 정회원. 원자력연구소 책임연구원

2. 기구동역학 해석

2.1 핵연료 교환기 운동

노내 핵연료 교환기의 작동은 그리퍼의 이동으로부터 시작된다. 첫째로 인출하고자 하는 노심 집합체 상단에 판토그래프 팔을 위치시키고 그리퍼가 하부로 이동하여 노심 집합체 상단의 그레플 헤드와 결합한다. 둘째로, 그레플의 수직 병진운동에 의해 노심 집합체를 들어 올린다. 셋째로 완전히 인출된 노심 집합체는 노내 핵연료 교환기의 main tube 내부에 설치되어 있는 슬라이더의 상하작동으로 판토그래프 팔에 의해 수축 또는 팽창 이동한다. 넷째로 노심 집합체는 노심 위를 회전플러그에 의해 회전 이동하게 된다.

노내 핵연료 교환기 작동 시 판토그래프 팔 등의 연결부에는 자체하중 및 노심 집합체 무게에 의한 반력이 발생하게 된다. 과도한 반력이 발생할 경우 교환기 구조부분에 큰 응력과 끝단 위치의 부정확성을 가져올 수 있다.

기구동역학 해석은 노내 핵연료 교환기가 노심 집합체에 도달하여 이동하는 모든 경로를 고려해야 하지만 인출을 위해 노심집합체로 접근하는 운동은 제외하고 고정된 위치에서 노내 핵연료 교환기의 운동만을 고려하였다. 즉 노심 집합체를 제거하기 위해 그리퍼가 하부로 이동한 후 노심 상부에서 노심 집합체의 그레플 헤드와 결합한 이후의 노내 핵연료 교환기의 동적거동에 대해 IDEAS Mechanism 해석을 수행하였다.

노심 집합체와 결합된 그리퍼는 20초 동안 수직 상승하여 정해진 위치에서 정지하게 되며, 슬라이더 어셈블리에 의해 판토그래프 팔을 40초 동안 반경방향으로 31.5cm 팽창하게 된다. 팽창된 노내 핵연료 교환기는 회전운동을 시작하여 40초 동안 180° 반대 방향의 핵연료 저장소 및 핵연료 교환소에 핵연료 집합체 덩트를 이동시키기 위해 멈추게 된다. 핵연료교환기 운동은 100초 동안 3개의 과정으로 이루어 졌으며 이를 모델링하였다. 표 1은 노내 핵연료 교환기의 부품 종류 및 운동조건이다[5].

2.2 적용하중 및 조인트조건

노내 핵연료 교환기의 구조재질은 스테인레스 강이며, 사용 물성치는 비중이 $78.57 \times 10^{-7} \text{ Kg/mm}^3$, 포와송 비가 0.3, 영계수가 $2.04 \times 10^4 \text{ Kgf/mm}^2$ 이다. 노심 집합체의 인출하중은 노내 핵연료 교환기의 그리퍼에 중력방향으로 600 Kgf의 하중을 주었다. Main tube의 내부 공간에는 구동모터와 하부구조 사이의 연결장치들이 들어있다. 또한 하부구조물의 각 부품은 중공 구조물이지만 IDEAS 해석형상의 복잡성을 단순화하기 위하여 본 해석에서는 각 모델링에 사용된 부품을 solid로 가정하고, main tube 및 각 부품의 밀도를 각각 30%와 50%로 설정하여 자중에 의한 무게를 설계구조물과 같게 하였다. 표 2 에서 보듯이 노내 핵연료 교환기의 운동을 묘사하기 위해 사용된 조인트는 총 10개로 구성하였다. 모터에 의한 구동 조인트의 개수는 3개이며 그리퍼의 병진운동, 슬라이더의 병진운동 및 tube assembly의 회전운동에 대한 함수를 정의하여 운동조건을 묘사하였다[5].

2.3 해석결과

그림 3은 100초 동안 시간에 따른 Fixed 조인트에서 반력의 변화를 나타낸다. 자중을 고려한 x, y, z축 방향의 반력의 크기는 판토그래프 팔 방향 반력은 팔의 팽창과 더불어 감소하며, 이

평면에 수직축 반력은 거의 작용하지 않음을 알 수 있다. 수직 방향의 성분은 자중 및 그리퍼에 작용하는 하중에 의해 시간 경과에 대하여 균일하게 분포되며 최대 합성력은 약 1050 Kgf 이다. 그림 4 ~그림 6은 노내 핵연료 교환기의 1, 5, 6 조인트에 걸리는 각각의 반력을 x, y, z 방향 성분 및 합성력으로 나타낸 것이다. 그래프가 선명하지는 않지만 그림에서 가장 위쪽 선이 합성력을 나타낸다. 합성력은 Revolute 5 조인트에서 최대 반력을 나타내며 최대값은 약 2100 Kgf 이고, Revolute 1에서 1500Kgf 크기의 반력분포를 나타내었다. 각 조인트에 걸리는 반력은 그래플 집합체의 운동과 판토티그래프 팔의 팽창 시에는 감소 또는 증가하는 경향을 나타내며 팔이 회전을 시작 할 때부터는 변화가 거의 없었다. 그림 7은 자중을 고려한 경우에 각 조인트에 걸리는 합성력의 시간에 따른 변화를 계산한 것이다.

해석결과에서 핵연료 인출모델 1단계의 인출속도는 평균 200mm/sec, 2단계에서 판토티그래프 팔의 팽창 및 정지속도가 평균 15.75 mm/sec이고, 3단계에서 회전플러그 회전속도가 평균 4.5°/sec로 작은 편이어서 각 조인트에 발생하는 동적거동에 따른 반력의 변화가 크지 않았다. 또한 3단계 회전운동에서의 반력 크기가 팽창 정지시의 최대 합성력을 유지하고 일정한 것을 볼 때 핵연료 교환기의 구조해석에서 반영해야할 메커니즘 해석의 동적하중이 크지 않은 것을 알 수 있다.

3. 구조해석

노내 핵연료 교환기는 핵연료 취급 하중과 노심집합체를 인출하고있는 상태에서 OBE나 SSE 지진하중에 대하여 안전성을 확보하여야 한다. 구조해석은 핵연료 취급시에 발생하는 최대 하중과 지진하중에 대한 구조적 건전성이 있어야 하고, 노내 핵연료 교환기로부터 노심 및 노내 저장소로 노심 집합체를 이동할 수 있어야 한다. 즉 자체하중 및 노심 집합체의 무게에 의해 발생하는 노내 핵연료교환기 판토티그래프 팔의 처짐량은 위치의 부정확성과 다른 구조물과의 충돌을 방지하기 위해 제한되어야 한다.

이를 위하여 상부내부구조물과 핵연료 교환기에 대한 집중질량-보 모델을 ANSYS 프로그램으로 작성하고, 작성된 모델에 대하여 동적 반작용 하중의 영향을 고려한 취급하중과 설계지진하중에 대한 구조적 건전성 해석을 수행하였다.

3.1 해석 모델링

핵연료 교환기에 대한 구조해석에는 핵연료 교환기가 노심 집합체를 제거 할 때 작동하는 동작의 각 위치 중에서 가장 취약한 형상과 최대하중이 작용하는 경우에 대한 고려가 필요하다. 이러한 움직임을 고려하여 노내 핵연료 교환기의 해석 모델링은 판토티그래프식 팔의 최대 팽창시의 구조형상이며, 최대 하중은 노내 핵연료 집합체의 인출하중과 지진하중이 된다.

구조모델에서 원자로 밖에 위치하는 핵연료 교환기 상부에 있는 전기모터, 감속기, 기어, 회전 조절클러치, 긴급 수동운전장치와 계측기 요소는 제외된다. 구조모델의 대상은 하부구조물로 회전플러그로부터 수직 아래로 11.2m 떨어진 직경이 30cm이고, 두께가 2.5cm인 주지지원통(main tube)와 판토티그래프 팔, 조인트 등으로 구성된다.

노내 핵연료 교환기의 상단은 회전플러그에서 모든 방향에서 구속되며, 하단은 상부내부구조물 하단에 수평방향이 지지된다. 해석 모델은 핵연료 교환기 뿐만아니라 핵연료 교환기의 main tube를 하단에서 수평방향으로 지지하는 상부 내부구조물을 포함하였다[6]. 상부 내부구조물은 원통 실린더 구조로 직렬로 연결된 두 개의 원통직경이 각각 1.4m와 0.7m이고, 두께가 2.5cm와

5cm이다. en 구조물에 대하여 ANSYS 입력자료로 작성된 해석모델은 그림 8과 같이 빔과 집중 질량으로 구성된다. 사용된 빔의 개수는 22개이고, 집중질량은 7개이다. 경계조건은 main tube 내에서 움직이는 3개의 슬라이더가 최대 팽창 시의 형상에서 main tube와 접촉하는 모든 방향의 자유도를 구속하였다. 각 조인트에 대한 모델링을 위해 각 조인트에 이중 절점을 주고, 판도 그래프 팔이 위치하는 평면에 수직인 회전자유도를 각각 독립되게 갖도록 하였다.

노심 집합체 덕트를 잡는 그리퍼의 끝 부분에 재장전 하중을 작용시켰으며 자중 및 지진하중을 고려하였다. 앞서의 메커니즘 해석의 결과 특별히 동적하중의 영향이 크지 않았기 때문에 재장전 하중은 다음과 같이 정적인 하중만을 고려하였다.

최대 노심 집합체 무게가 600 Kgf, Backup hold-down (136 Kgf), Inter-assembly 접촉력 (227 Kgf)과 정상 인출하중(1043 Kgf)이 더해진다. 구조해석에서는 예상하중 2006 Kgf에 20% 정도의 추가적인 여유를 적용하여 2500 Kgf로 하였다.

지진 하중은 노심 집합체를 잡고있는 상태에서 0.25g ZPA (OBE)와 0.5g ZPA (SSE)를 고려하였다. 지진해석에 대한 등가 정하중은 표 3에 나타났다. 표 3에서 수평방향의 증폭가진이 없는 이유는 원자로 건물이 수평방향으로 면진설계된 것을 고려한 것이며, 수직방향으로는 수평에 비하여 2.5배 증폭되는 것으로 하였다. 노내 핵연료 교환기의 사용재질은 앞서 기술한 스테인리스 강이며, 물성치는 메커니즘 해석에 사용한 자료를 사용하였다.

3.2 해석결과

노내 핵연료 교환기의 구조적 건전성을 평가하기 위해 빔과 집중질량으로 이루어진 구조해석 모델을 작성하고 구조설계의 타당성 검토를 위해 고유진동수 해석을 수행하여 표 4에 나타났다. 표 4에서 보는 바와같이 1차와 2차 모드는 3.1Hz와 3.6Hz로 상부내부구조물의 고유 진동모드를 나타내고, 3차와 4차 모드는 6.5Hz 전후로 핵연료 교환기 자체만의 굽힘 모드를 나타내고 있다. 5차와 6차에서 핵연료 교환기의 2차 모드가 나타나고 있다. 이러한 고유진동수 범위는 핵연료 교환기의 1차 굽힘 모드가 상부내부구조물에 의해 억제된 결과이며, 구조강성 면에서 구조설계의 합리적 타당성을 주고있다.

핵연료 인출 하중 및 지진하중에 대한 변형 및 응력을 계산한 구조해석 결과를 그림 9와 표 5에 나타났다. 표 5에서 보는 바와 같이 핵연료 교환기의 자중만에 의한 변형은 0.65mm로 매우 작은 변위를 나타냈고, 자중 및 인출하중에 의한 핵연료 교환기의 최대 합성변위는 2.6mm로 작게 나왔다. 발생된 응력값도 각각 7 MPa과 26.7MPa로 나타나 재료의 항복응력인 147MPa에 비하여 매우 작은 값이다. 한편 자중 및 인출하중을 포함한 OBE 지진에 대한 해석에서는 14.4mm의 최대 변위가 발생되고, 최대 발생응력은 43 MPa로 나타났고, SSE 지진에 대한 해석에서는 27.0mm의 최대 변위가 발생되고, 최대 발생응력은 59.2 MPa로 나타났다. 이러한 결과로부터 최대 변위는 다른 구조물과 충돌을 일으킬 정도로 크지 않았으며, 계산된 최대 응력의 크기도 허용값과 비교하여 작게 나타나 충분한 구조적 건전성이 확보됨을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 노내 핵연료 교환기의 움직임을 예측하기 위하여 범용 소프트웨어 IDEAS의 mechanism 기능을 사용하여 노내 핵연료 교환기의 형상 및 구동방식을 모델링하였다. 노내 핵연료 교환기의 자중 및 그리퍼에 의한 노심 집합체 인출 시에 작용하는 무게를 고려하여 각 연

결 조인트에서의 반력을 계산하였다. 계산결과 최대 반력은 조인트 5에서 인출후 팽창 시에 2100kgf로 발생되었으며, 핵연료 교환기의 작동 속도가 충분히 느려 동적하중의 영향이 크지 않은 것을 알 수 있었다.

또한 노내 핵연료 교환기의 구조적 건전성을 평가하기 위해 빔과 집중질량으로 이루어진 구조해석 모델을 작성하고 구조설계의 타당성 검토를 위해 고유진동수 및 변형해석을 수행하였다. 핵연료 인출하중에 대하여 변형해석을 수행한 결과 최대 변위가 2.6mm로 매우 작게 나왔으며, SSE 지진을 고려한 해석에서는 27mm의 최대 합성변위가 발생되었지만 다른 구조물과 충동을 일으킬 정도로 크지 않았으며, 최대 발생응력의 크기도 59.2MPa로 충분한 구조적 건전성이 확보됨을 확인하였다. 이러한 해석은 열수력 하중에 대한 고려는 제외시킨 것으로 향후 소듐의 유동에 의한 열수력 하중을 포함시켜야 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- [1] 한도희 등, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-1636/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [2] 김석훈, Design Requirements for KALIMER Reactor Refueling System, KALIMER/MS 440-DR-01 rev. 0/2000, 한국원자력연구소, 2000.
- [3] IDEAS Mechanism Design Computer Program, Version 7.0, 2001.
- [4] ANSYS Computer Program, Version 5.6, 2000.
- [5] 김석훈 등, KALIMER 노내 핵연료교환기의 메커니즘 모델링, 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회, 논문집, 2001.
- [6] 이재한 등, KALIMER 상부내부구조물 지진해석용 보모델 개발 및 지진시간이력해석, 2001 한국원자력학회 춘계학술발표회, 논문집, 2001.

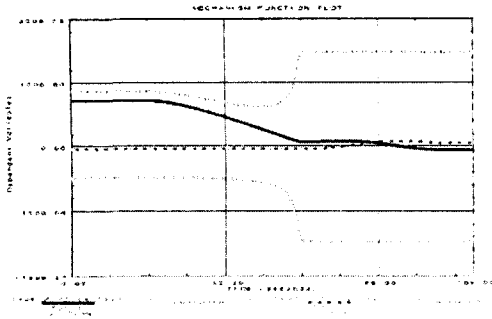


그림 4. Revolute 1 Joint의 시간별 반력 성분 (최대 합성력 1500Kgf)

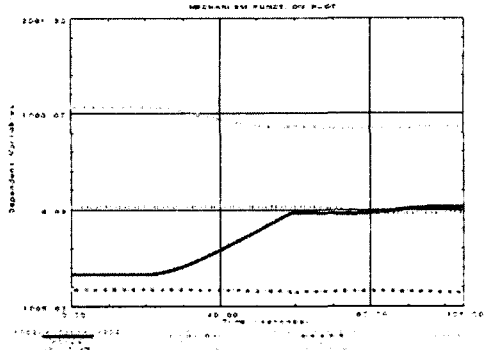


그림 3. Fixed Joint의 시간별 반력 성분 (최대 합성력 1050Kgf)

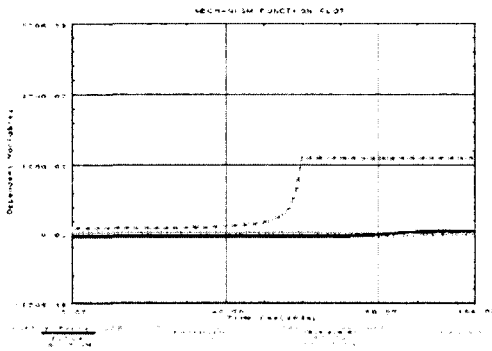


그림 6. Revolute 6 Joint 시간별 반력 성분 (최대 합성력 1100Kgf)

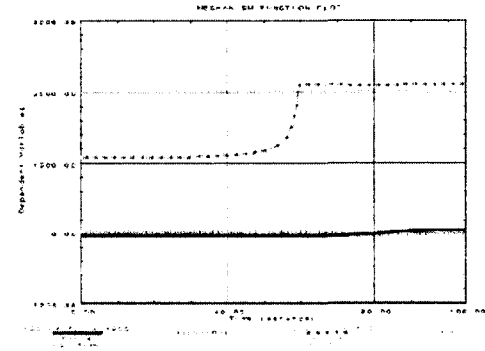


그림 5. Revolute 5 Joint 시간별 반력 성분 (최대 합성력 2100 Kgf)

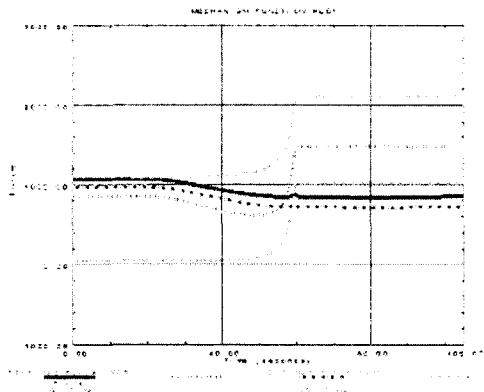


그림 7. 전체 조인트의 시간별 합성 반력 (최대 2100 Kgf)

표 3. 노내 핵연료 교환기 지진하중

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

표 4. 노내 핵연료 교환기 고유진동수 특성

노내 상부구조물 모드			노내 핵연료 교환기 모드		
고유진동수(Hz)	참여계수	주성분	고유진동수(Hz)	참여계수	주성분
3.11	130.3	X	6.53	2.1	Y
3.61	133.2	Y	6.54	3.7	X
16.4	85.7	X	7.53	28.6	X
18.7	80.6	Y	14.2	38.0	Y
19.7	14.3	X	22.2	13.4	X
			27.8	27.0	Y

표 5. 노내 핵연료 교환기 최대 변형량 및 최대응력

Event \ 성분	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	합성변위 (mm)	최대응력, MPa (절점)
자체무게(W)	0.0	0.54	0.37	0.65	7.0 (64)
인출하중(F)+W	0.0	2.19	1.40	2.60	26.7 (65)
OBE + F + W	10.3	9.71	2.54	14.4	43.0 (65)
SSE + F + W	20.5	17.3	3.68	27.0	59.2 (66)

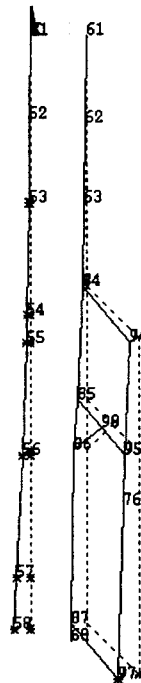
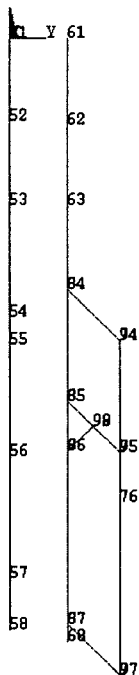


그림 8. 노내 핵연료교환기 보요소 모델 그림 9. 노내 핵연료교환기 변형형상(SSE+W+F)