KAERI/TR-2583/2003

대용량 액체금속로 노내 핵연료 교환기기의 구조검토

Structural Review of In-Vessel Fuel Transfer Equipment in large size LMR

2003. 11

한 국 원 자 력 연 구 소

제 출 문

한국원자력연구소소장 귀하

본 보고서를 2003년도 “액체금속로 기계설계 기술개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 대용량 액체금속로 노내 핵연료 교환기기의 구조검토

(Structural Review of In-Vessel Fuel Transfer Equipment in large size LMR)

2003년 11월 7일

과 제 명 : 액체금속로 기계설계기술개발

주 저 자 : 김 석 훈

요 약 문

KALIMER의 출력이 대용량으로 증가되는 경우에 노내 핵연료 교환기기의 구조개념을 제시하고 검토하였다. 150 MWe에서 600MWe로 전기출력이 증가함에 의해 노심의 크기가 증가된다. 증가된 노심 크기를 가정하여 회전플러그의 크기 및 핵연료 교환방식을 평가하였다. 또한 평가된 여러개념 중 가장 적합한 2개의 개념을 선정하였으며 판토그라프식 노내 핵연료 교환기 팔의 한계길이에 대하여 분석하였다

노내 핵연료 교환기의 모델 형상은 판토그라프식 팔에 의해 최대로 펼쳐져 있는 상태이다. 이러한 상태에서 고려한 하중은 노심 집합체의 무게, 자중 및 인출 시에 반력 등이다. ANSYS 코드를 사용하여 유한요소해석에 의해 노내 핵연료 교환기의 구조해석을 수행하였다. 재장전하중 및 지진하중에 대하여 노내 핵연료 교환기의 설계변수로 고려된 부품들의 단면변화에 대한 응력 및 변형을 계산하였다.

ABSTRACT

In case the power of KALIMER is increased by the large size, the structural concept of In-Vessel Fuel Transfer Equipment was suggested and reviewed. The core size is expanded due to increasing of the electric power 150 MWe to 600 MWe. The size of rotating plug and the method of the fuel transfer were evaluated by assuming the increased core size. Also, among the various evaluated concepts two concepts were selected and the marginal length of the arm for the pantograph type IVTM was analysed.

The model configuration of IVTM is fully extended condition of the pantograph arm. In this condition, the loads considered are the weight of the core assembly, self weight and reaction force for the withdrawal of the core assembly. The structural analysis of IVTM was carried out by the finite element analysis using ANSYS code. The stress and deformation were calculated to the the refueling and seismic loads for the section variation of the components considered as the design parameters of IVTM.

목 차

표 목 차

그림 목차

1. 서 론

핵연료 교환계통은 원자로 노심 집합체를 원자로 정지기간 동안 취급하고 운송하는 장치 및 설비를 말한다. 주요시설은 노내 핵연료 교환기, 회전플러그, 캐스크 및 운송계통으로 구분할 수 있다. 이러한 시설 중 노내 핵연료 교환기와 회전플러그는 노내 핵연료 교환기기(In-Vessel Fuel Transfer Equipment)로 분류된다. 원자로 용기 내의 노심 집합체의 직접적인 이동은 노내 핵연료 교환기(In-Vessel Transfer Machine)에 의하여 이루어진다. KALIMER-150 노내 핵연료 교환기는 원자로 회전플러그에 의해 고정되어 작동한다. 노내 핵연료 교환기와 간섭하는 주변기기인 회전플러그는 핵연료 재장전 시에 회전운동을 하고 노내 핵연료 교환기를 이동시키는 역할을 하며 원자로 헤드의 중앙에 위치하여 특별한 밀봉장치로 고정되어있다. 회전플러그의 내부로 제어봉 집합체 출입구 및 노내 핵연료 교환기가 관통하며 하부에 노내 상부구조물이 용접 결합되어 있다.

KALIMER의 출력이 대용량으로 증가되어지는 경우에 대하여 노내 핵연료 교환기기의 주요시설에 대한 구조개념에 대하여 제시하고 분석하였다. 150 MWe에서 600 MWe로 전기출력이 증가함에 의해 노심의 크기가 증가되고 이로 인해 회전플러그 및 노내 핵연료 교환기의 크기 및 교환방식이 변화가 생긴다. 대용량 KALIMER의 노심의 크기를 가정하고 회전플러그의 크기 및 핵연료 교환방식을 평가하였다. 평가된 여러개념 중 회전플러그의 크기를 가장 적게할 수 있으며 핵연료 교환방식도 경제적인 KLIMER-150에서 채택한 판토그라프식 노내 핵연료 교환기 팔의 한계길이에 대하여 분석하였다.

2. 대용량 노내 핵연료 교환기기의 구조개념 개발

2.1 기술개발현황

2.1.1 해외 기술개발 현황

핵연료 교환기기의 개념은 전 세계적으로 여러가지 설계방식이 사용되어왔고 현재 설계되고 있다. 대표적인 교환방식은 운전 중에는 노내 핵연료 교환기를 원자로 밖

으로 인출시켜 보관하는 착탈식 개념과 A-Frame type 및 노내 핵연료 교환기를 운전 중에도 노내에 고정하는 회전플러그 형태 등이 있다. 착탈식 설계개념은 핵연료 교환 시에 노심 상부 구조물을 노외로 인출하고 그 자리에 핵연료 교환기를 장착하여 사용한다. 일본의 MDP (Modular Double Pool)에서는 이러한 착탈식 설계개념을 채택하고 있다. 325MWe 규모의 소형 노심을 사용하면서 원자로를 모듈화 함으로써 모듈형 원자로의 공기단축, 공장 제작, 표준화 등과 같은 장점을 활용할 수 있다. A-Frame type 노내 핵연료 교환기는 노심 내에 노내 핵연료 교환기가 경사진 형태로 설계되었으며 경사진 핵연료 주입구를 통하여 노내에서 노외로 노심집합체를 이동시킨다. A-Frame type은 노내 핵연료 교환기의 구조가 복잡하고 크기가 커지며 containment dome안에 기기의 일부가 설치가 된다. 이러한 방식으로는 프랑스의 Phenix, Superphenix와 SAFR(Sodium Advanced Fast Reactor)등이 있다. 그러나 비용이 고가이고 구조가 복잡한 단점이 있다.

그동안 세계적으로 가장 많이 채택된 액체금속로 핵연료 교환기기의 설계방식은 회전플러그 방식으로 원자로 운전 중에 핵연료 교환기가 노내에 고정되는 방식을 사용하고 있다. 이러한 방식은 원자로 내에서 재장전 기간 동안 소듐 및 방사능에 노출된 노내 핵연료 교환기를 취급하기 위한 별도의 캐스크와 처리 및 보관장소가 필요하지 않아 경제적이다. 또한 노심집합체의 교체주기를 짧게 할 수 있으며 작업자의 방사능 누출 위험이 적은 장점이 있다. 회전플러그 방식은 원자로의 크기가 대용량으로 증가되면 회전플러그의 개수가 증가하며 더 넓어진 노심의 면적에서 노심집합체를 취급할 수 있게 된다. 노내 핵연료 교환기도 주변 구조물과의 간섭 사항을 고려하여 수직 단순 입,인출의 기능을 갖는 수직 인출 교환기, 팔 길이가 고정되어 작동하는 Offset arm 방식, 수평방향으로 팔이 신축할 수 있는 Pantograph arm 방식 등이 사용되고 있다. 현재 사용 및 설계되고 있는 액체금속로 핵연료 교환기기의 노심직경에 따른 회전플러그의 크기를 표 1에 정리하였다.

2.1.2 국내 기술개발 현황

노내 핵연료 교환기기의 여러 가지 설계개념 중 착탈식, A-Frame type, 판토그라프 방식에 대한 설계개념이 고려되었다. 착탈식 설계개념은 KALIMER-150의 초기 설계단계에 고려된 개념으로써 핵연료 교환 시에 노심 상부 구조물을 노외로 인출하고

그 자리에 핵연료 교환기를 장착하여 사용한다. 이러한 방식은 사용전에 장치의 기능시험 및 유지와 보수 작업을 수행할 수 있으며 회전식 차폐플러그에서와 같이 복잡한 작동작업을 감소시킬 수 있어 원자로 보수기간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 착탈식 노심 상부 구조물과 핵연료 교환기의 도입은 원자로로부터 동 장비들의 인출 및 장입이 이루어지므로 방사성 물질의 유출 방지 및 원자로 cover개스의 유출방지 등의 기능이 설계되어야 한다.

KALIMER의 노형에 대한 GE와의 공동연구를 통해 위의 세 가지의 개념에 대하여 장단점 비교, 제작 및 유지보수, 경제성 등에 대하여 검토한 결과 현재 판토그라프식 노내 핵연료 교환기의 설계개념이 가장 우수한 것으로 평가되었으며 이를 KALIMER-150의 설계개념으로 채택하였다[1]. 현재 KALIMER-150의 개념설계 기술을 확보하였고 메커니즘 모델링 및 구조해석을 통해 구조적 건전성을 입증 하였다. 대용량으로 원자로가 대형화 될 경우에 추가 개념설계가 필요하여 주어진 노심을 기준으로 대체 개념설계 안이 제시되었다.

2.2 대용량 노내 핵연료 교환기기의 개념검토

2.2.1 개요

원자로 헤드 집합체의 크기는 전체적인 액체금속로의 설계 동안 중요한 문제이다. 원자로 헤드를 관통하는 큰 기기 들은 다른 원자로 기기들의 위치에 제한을 주는 것은 물론 중요한 공간을 차지하게 된다. 또한 큰 크기의 회전플러그는 제작이 용이하지가 않다. 원자로 헤드에 구조적으로 지지되어있는 회전플러그의 여러 개념이 연구되었고 동일하게 가정된 노심의 크기에 대하여 각 개념에 대한 크기 및 장단점을 비교 분석하였다. 여기서 제안되어진 기본개념은 과거 및 현재 사용되고 있는 액체금속로의 개념에 근거한 것이다

공간의 제한성과 주변기기의 크기와 더불어 회전플러그의 크기에 영향을 줄 수 있는 중요한 설계 필요조건은 다음과 같은 것들이 있다.

1. 노심크기
2. 노심에서의 CRD(Control Rod Drive) 배치

3. 계장 포트
4. 노내 상부 구조물의 지지상태
5. CRD의 지진 지지상태
6. 회전플러그 플랜지 사이 공간

위의 필요조건을 만족하기 위한 회전플러그의 여러 개념이 검토되었다. 모든 개념에서 회전플러그의 크기를 보다 적게 만들기 위한 설계가 고려되었으며 각각의 경우에 노내 핵연료 교환기는 노심 내의 모든 위치 및 핵연료 교환소에 도달할 수 있어야 한다.

2.2.2 설계개념 및 장단점 비교

KALIMER 출력이 대용량으로 증가되어지는 경우에 대하여 노내 핵연료 교환방식에 대하여 분석하였다. 출력의 증가에 의해 노심크기가 증가되고 이로 인해 회전플러그 및 노내 핵연료 교환기의 크기 및 교환방식이 변화가 생긴다. 연구의 목적은 현재 대용량 KALIMER노심 직경을 5.5m로 가정하고 이를 기준으로 하여 회전플러그의 크기 및 핵연료 교환방식을 평가 하는 것이다.
전기출력이 증가되어지는 경우에 노내 핵연료 교환기기의 형태가 연구되었고 6개의 종류에 대한 작동방식 및 장단점이 비교되었다[2].

(1) 3개의 회전플러그, 1개의 수직인출 교환기

3개의 회전플러그의 개념은 그림 1과 같으며 어떤 노심위치와 핵연료 교환소 위에 위치될 수 있는 수직인출 장치가 요구된다. 수직인출에 대하여 설계된 노내 핵연료 교환기는 설계가 복잡하지 않고 작동 중에 신뢰도가 높다. 임의의 노심위치 상부에 노내 핵연료 교환기가 직접 위치함으로써 노심집합체를 수직 인출하게 된다. 이러한 방식은 회전플러그의 직경이 너무 크게 되는 단점을 갖게 된다. 3개의 회전플러그가 사용되기 때문에 노심 집합체를 다루기 위해서는 기계의 세밀한 정확도가 필요하다.

(2) 2개의 회전플러그, 2개의 수직 인출 교환기

이러한 개념에서는 노심내의 핵연료 교환 시에 2개의 수직 인출 노내 핵연료 교환기가 설치된다. 그림2에서 보면 내부 노심에 있는 노심 집합체는 노심에서 핵연료 교환소로 움직이기 위하여 2번 조작되어진다. 2개의 수직 인출 노내 핵연료 교환기는 소형 회전플러그의 내부에서 다른 회전 반경으로 분리되어 위치한다. 한 개의 노내 핵연료 교환기는 내부 노심 내에 노심 집합체 들에 도달 할 수 있고 다른 노내 핵연료 교환기는 외부 노심 및 핵연료 교환소로 도달될 수 있다. 중복되는 구역이 있으며 두개의 노내 핵연료 교환기는 이러한 구역의 어느 위치에도 도달할 수 있다. 재장전 절차는 첫째로 중복되는 구역에서 외부로 이동하여 핵연료 교환소로 노심 집합체를 이동시킨다. 이러한 작동은 중복되는 구역에 빈 공간을 만들며 내부 노심으로부터 집합체가 이 구역으로 이동된다. 그 후 소형 회전플러그 내부에 있는 다른 노내 핵연료 교환기가 작동하여 노내 핵연료 교환소로 노심집합체를 이동시킨다. 따라서 내부노심에서 외부노심으로 노심 집합체의 이동 시에는 2번 조작된다.

이러한 개념의 단점은 약 반 정도의 노심 집합체가 2번 조작된다. 내부 노심의 노심 집합체를 핵연료 교환소로 이동시키는데 노심 집합체를 떨어뜨리거나 다른 사고의 위험성이 2배로 증가된다. 또한 내부노심의 노심집합체는 대부분 핵연료 집합체로 채워져 있어 다른 노심 집합체보다 더 빈번히 재장전 되어져야 한다. 이러한 사실은 핵연료 재장전 교환방식의 신뢰도를 감소시키고 재장전 시간을 증가 시킬 것이다.

내부노심에서 간섭구역으로 사용 후 핵연료 집합체를 이동할 때 조작이 복잡하며 간섭구역으로 bowing 나 swelling에 의해 변형될 수 있는 노심집합체를 삽입하는 조작이 필요하다. 이러한 조작은 변형된 노심집합체를 제거하는 것보다 훨씬 더 어렵고 노내 핵연료 교환기의 추가적인 기능을 요구하게 된다. 각각의 핵연료 집합체는 노심에서 잘못된 리셉터클로 삽입되는 것을 방지하는 노즐이 설치된다. 그러나 간섭구역은 노심으로부터 모든 노심 집합체를 삽입할 수 있어야 한다. 노심에 있는 노내 핵연료 교환기는 노내 상부 구조물 내에 있으며 control rod, guide tube 및 계장의 주변 구조물과의 간섭을 피해야 한다.

(3) 2개의 회전플러그, 1개의 수직 인출 교환기 및 offset arm

이러한 개념에서는 모든 노심위치로 offset arm이 이동할 수 있기 위해서 작은 회전플러그 아래 매달린 노내 상부구조물이 회전하는 것이 필요하다. 그림 3을 보면 2안의 개념과 비슷하며 1개의 수직인출 교환기 대신 Fixed arm machine이 설치된다. 그림 4 및 그림 5를 참고하면 수직인출 교환기는 노심중앙 상부의 소형 회전플러그 내에 위치하며 내부노심의 노심집합체를 이동하는 역할을 한다. Fixed arm machine도 회전플러그 내에 위치하며 외부노심의 노심집합체를 이동시킨다. 내부노심의 노심집합체는 exchange position으로 이동한 뒤 Fixed arm machine에 의해 두 번째로 조작되어 discharge position을 통해 외부로 인출하게 된다. 대형 회전 플러그의 직경이 2안의 방식보다 작게 되며 약 7m로 평가된다. 이러한 회전플러그의 형태는 EFR에서 개념설계 중이며 2개의 회전플러그의 개념과 비슷하나 offset arm의 사용에 의해 재장전과정을 약간 더 단순화 시킬 수 있는 장점이 있다.

(4) 1개의 회전플러그, 1개의Offset Arm, 편심된 UIS

이러한 개념에서 회전플러그의 직경은 약 6.5m 정도로 산정된다. 회전플러그 직경의 감소는 1개의 회전플러그의 하단에 편심기둥의 형태로 노내 상부구조물이 설치됨에 의해서 가능해진다.

이러한 형태의 핵연료 교환방식은 회전플러그의 크기가 대폭 감소하게 된다. 회전플러그 크기의 감소는 1개의 회전플러그에 편심된 기둥의 형태로 매달려지는 노내 상부구조물에 의해서 이루어진다. 그림 6에서 보면 노내 상부 구조물은 재장전 시에 pivot join에 의해 편심되어지고 회전플러그에 매달려 설치된 Offset Arm이 노심의 전 구역 및 핵연료 교환소에 도달할 수 있게 된다. 이러한 개념의 단점은 다음과 같다. 재장전 기간 동안 노내 상부 구조물을 편심시키고 control rod drives를 연결을 방지하는 별도의 장치가 필요하다. 이러한 편심된 노내 상부 구조물의 개념은 현재 FFTF에서 사용되고 있다. 피봇(pivot) 기둥의 형태로 노내 상부구조물이 설계되고 구조적 복잡성이 증가 하게 된다. Offset Arm식 노내 핵연료 교환기는 수직형 노내 핵연료 교환기보다 구조가 더 복잡하게 된다.

(5) 1개의 회전플러그, 1개의 판토그라프식 팔

이러한 설계의 장점은 가장 작은 회전플러그의 크기를 갖는다. 회전플러그 크기의 감소는 노심과 노내 상부구조물의 중심이 거의 일치하는 1개의 회전플러그를 사용함으로써 이루어 질 수 있다. 그림7을 참고하면 회전플러그에 매달린 판토그라프식 노내 핵연료 교환기는 핵연료 교환소 및 노심의 모든 구역에 도달할 수 있게 팽창 및 축소가 가능하다. 이러한 반경방향의 위치로 판토그라프식 팔을 이동시키기 위하여 노내 상부구조물에 slot이 위치하게 된다. 이것은 노내 상부 구조물의 강도를 약하게 하기 때문에 실린더형 대신 기둥의 형태로써 노내 상부 구조물을 설계하는 것이 강도를 증가 시킬 수 있다.

이러한 개념은 핵연료 재장전 시에 노내 상부 구조물의 slot 아래 노심 집합체의 계장 및 취급이 문제가 된다. 판토그라프식 노내 핵연료 교환기는 수직인출식 노내 핵연료 교환기 보다 더 복잡하게 된다. 그러나 영국 PFR에서 판토그라프식 노내 핵연료 교환기가 수 십년 동안 성공적으로 사용되어져 왔다.

(6) 2개의 회전플러그, 분리형 UIS

이러한 개념에서 대형 회전플러그의 직경은 약 8.4m로 산정된다. 그림 8을 참고하면 크기의 감소는 전체 노심집합체와 노내 핵연료 교환소의 위치로 노내 핵연료 교환기가 도달할 수 있도록 최소반경의 2개의 회전플러그 방식을 고려함에 의해 얻어질 수 있다.

2.3 검토결과

모든 개념에서 회전플러그의 크기를 보다 적게 만들기 위한 구조가 고려되었으며 각각의 경우에 노내 핵연료 교환기는 노심 내의 모든 위치 및 핵연료 교환소에 도달할 수 있어야 한다. 표 2는 핵연료 교환기기의 장단점을 요약 정리하였고 표 3은 대용량 회전플러그의 설계개념 및 크기 비교에 대한 분석 내용이다. 회전플러그 비교에 따르면 3안의 두 개의 회전플러그와 4안 및 5안의 회전 플러그가 적은 회전 반경을 나타냄을 알 수 가 있다. 3안의 회전 플러그는 직경이 700cm로써 1개의 회전플러그의 경우에 비해 큰 편이나 노내 핵연료 교환기의 구조가 간단하여 구조적인 안전

성이 있다. 1개의 회전플러그 개념 중 5안의 판토그라프식 핵연료 교환기는 현재의 KALIMER 핵연료 교환기의 설계개념이며 구조가 간단하고 회전플러그의 직경을 제일 작게 할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그러나 판토그라프식 팔의 한계길이 및 메커니즘에 대한 구조검토가 필요하다.

3. 대용량 판토그라프식 노내 핵연료 교환기의 한계길이 검토

KALIMER의 출력이 대용량으로 증가되는 경우에 대하여 대용량 노내 핵연료 교환기기의 여러 개념 중 KLIMER-150에서 채택한 판토그라프식 노내 핵연료 교환기의 팔의 한계길이에 대하여 분석하였다. 전기출력의 증가에 따른 노심 크기의 증가로 회전플러그 및 노내 핵연료 교환기의 크기의 변화가 생긴다. 노내 핵연료 교환기의 모델링 형상은 판토그라프식 팔에 의해 최대로 펼쳐진 상태를 고려하였다. 그리고 대용량 KALIMER 노심의 외부직경을 가정하여 노내 핵연료 교환기의 판토그라프식 팔의 한계길이를 검토하였다. ANSYS 코드를 사용하여 유한요소해석에 의해 노내 핵연료 교환기의 구조해석을 수행하였다. 재장전하중 및 지진하중을 포함한 설계하중에 대하여 응력 및 변형을 계산하였다.

3.1 판토그라프식 노내 핵연료 교환기기의 설계개념

3.1.1 판토그라프식 노내 핵연료 교환기의 설계 고려사항

판토그라프식 노내 핵연료 교환기의 구조설계 기준을 살펴보면 SSE 지진하중을 포함한 primary stress가 재료의 항복응력의 90% 이내가 되어야 하며 부가적인 크립피로 응력은 ASME NH code에 따라야 한다. 이러한 구조 건전성 평가는 설계기술에 대한 기초자료로써 설계단계에서 주변구조물과 상호 유기적으로 검토되어야 한다. 또한 노내 핵연료 교환기기는 많은 주변구조물과 기하학적이며 기능적인 Interface를 갖는다. 대표적인 주요 설계 고려사항을 살펴보면 아래와 같다[3].

- 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, 교환할 수 있어야 한다.

- 노내 핵연료 교환기의 하부구조는 유체유발진동과 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 조절될 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 제거될 수 있어야 한다

3.1.2 판토그라프식 노내 핵연료 교환기기의 개념

대용량 노내 핵연료 교환기기의 해석모델은 KALIMER-150의 개념설계을 기본으로 하고 있으며 판토그라프식 팔의 길이가 증가될 때 구조적 건전성을 만족할 수 있는

한계길이를 검토하였다.

(1) 노내 핵연료 교환기 개념

KALIMER-150 노내 핵연료 교환기는 소듐으로 채워진 원자로 내에서 노심 집합체를 다루는데 사용된다. 노내 핵연료 교환기 형태는 판토그라프 식으로 운전 중에는 노심 내에 고정되며 그림 9와 같은 형태이다. 노내 핵연료 교환기는 크게 두 부분으로 나누어지며 상부는 하부를 운전하기 위한 전기 및 기계 구동장치로 구성된다. 이러한 구동 장치는 전기모터, 감속기, 기어, 회전 조절클러치, 긴급 수동운전장치와 계측 및 운전을 조절하기 위한 요소들로 구성된다. 하부는 회전플러그로부터 수직 아래로 11.5m로 뻗어있으며 main tube와 판토그라프식 팔 등으로 구성되어있다. 노내 핵연료 교환기는 회전플러그의 중심으로부터 91.45cm 거리에 있으며 180^{o} 회전할 수 있으며 장착 및 탈착이 필요한 노심 집합체위로 판토그라프식 팔을 수평 이동시킬 수 있다. KALIMER-150에서 판토그라프식 팔의 반경방향의 수평이동 거리는 최대 축소 시 30.48 cm이며 최대 팽창 시 91.44cm이다. 또한 노내 핵연료 교환기의 주요 설계요건을 간단히 요약하면 아래와 같다.

(2) 회전플러그의 개념

KALIMER-150의 회전플러그는 핵연료 재장전 시에 회전운동을 하고 노내 핵연료 교환기를 이동시키는 역할을 하며 원자로 헤드의 중앙에 위치하여 특별한 밀봉장치로 고정되어있다. 회전 플러그의 반경은 그림 10에서 나타난 것처럼 2.743m이며 회전플러그 중심은 원자로 노심과 편심되게 설계함으로써 핵연료 교환기의 팔의 길이를 적게 유지할 수 있으며 노심 집합체로의 접근이 쉽도록 설계하였다. 그림 11은 회전플러그의 3차원 개념도로써 회전 플러그의 중심은 6개의 제어봉 집합체 출입구, 노내 핵연료 교환기가 관통하고 하부에 노내 상부구조물이 용접 결합되어 있다. 그림 12는 회전플러그의 측면도를 나타낸다. 회전플러그의 베어링지지 구조물 및 밀봉장치가 그림 13에 나타나 있다. 그림 13에서 보듯이 원자로 운전 동안 회전플러그는 ledge seal에 의해 밀봉되어 진다. 재장전 준비 기간 동안에는 그림 14에서 보듯이 회전플러그 hold-down 보울트가 풀어지고 회전플러그가 3개의 잭 (jack)에 의해 상승된

다. 회전플러그의 회전은 기어 모터의 피니언 기어가 링 기어를 구동시켜서 일어난다. 회전 플러그의 각 회전은 링 기어에 의해 구동되는 encorder 와 tacometer에 의해 관측된다[4].

3.2 해석모델

그림 15의 노내 핵연료 교환기는 OBE나 SSE 지진하중 하에서 노심집합체를 인출하고있는 상태에서 안전성을 확보하여야 한다. 따라서 해석은 지진하중에 대한 구조적 건전성이 있어야 하고 노내 핵연료 교환기로부터 노심 및 노내 저장소로 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 가한 뒤 정적해석으로 수행하였다[5]. 상부내부구조물과 핵연료 교환기에 대한 단순한 보 모델을 ANSYS 프로그램으로 작성하고, 작성된 모델에 대한 구조적 건전성 해석을 수행하였다. 상부 내부 구조물과 노내 핵연료 교환기는 구조적으로 연동되어 있으므로 KALIMER-150의 노내 상부구조물의 변위량을 노내 핵연료 교환기의 변위량과 중첩하여 변형량 및 응력을 계산하였다. 면진된 원자로 건물에서 노내 상부 구조물의 수평 x방향과 y방향으로의 최대변위는 0.72 cm 와 0.53 cm 이고 수직방향 인 z방향은 0.054 cm가 해석에 적용되었다.

3.2.1 해석 모델링

완전히 인출된 노심 집합체는 판토그라프식 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. 해석모델은 노내 교환기의 구동위치 중에서 가장 취약한 구조인 판토그라프식 팔의 최대 팽창 시의 형상을 모델링 하였다. 노내 핵연료 교환기의 상단은 회전플러그에서 모든 방향에서 구속되며, 하단은 상부내부구조물 하단에 수평방향이 지지된다. 해석 모델은 노내 핵연료 교환기의 main tube를 하단에서 수평방향으로 지지하는 상부 내부구조물은 해석 모델링에서 제외하였다. 대용량 KALIMER의 경우 상부 내부 구조물의 설계가 이루어 지지 않았으므로 KALIMER-150의 상부 내부 구조물의 변위에 대한 해석 결과

를 노내 핵연료 교환기의 초기변위로 주었다. 즉 주어진 하중에 대하여 노내 상부구조물과 노내 핵연료 교환기의 중첩된 변형량 및 응력을 계산하였다. 대용량 노내 핵연료 교환기의 경우에 증가된 노심의 크기를 5.5m로 가정했을 때 계산된 판토그라프식 노내 핵연료의 최대 팽창 시의 팔 길이는 그림 16에서 보면 약 2.74 m로 계산되었다. 이러한 해석모델에 대하여 구조 건전성이 검토되었고 팔 길이를 중간 크기인 1.82 m로 하였을 때 변형량 및 응력이 계산하였다. 또한 변형량 및 응력이 집중되는 판토그라프식 팔 및 main tube 의 파이프의 단면 크기를 변화시켜 계산을 수행하였다. 해석모델은 ANSYS 코드를 사용하여 작성하였으며 주요 설계인자가 APDL의 변수로 지정되어 모델링에 사용되었다. 노내 핵연료 교환기의 부품내부는 중공구조물로 가정하였으며 각 부품의 두께는 4cm로 계산하였다. 그림 17은 모델링 형상이며 사용된 요소는 beam4이고 단순 보 모델로써 사용된 빔의 개수는 15개이다[6].

3.2.2 경계조건

작용하중은 노심 집합체 덕트를 잡는 그리퍼의 끝 부분에 재장전 하중을 고려하여 작용시켰으며 자중 및 지진하중을 고려하였다. 재장전하중은 2270Kgf로 가정하였으며 그 내용은 다음과 같다. 예상하중은 최대 노심 집합체 무게가 600Kgf, backup holddown(136Kgf), interassembly contact friction (227Kgf), 정상 인출하중(1043Kgf)이 더해졌다. 재장전 하중은 예상하중에 113%의 margin을 적용 하였다. 지진 하중은 노심 집합체를 잡고 있는 상태에서 OBE event 와 SSE event를 고려하였고 0.25g ZPA 와 0.5g ZPA를 고려하였다[7]. 지진해석에 대한 등가 정하중은 표 4에 나타냈다. 표에서 수평방향의 증폭가진이 없는 이유는 원자로 건물이 수평방향으로 면진 설계된 것을 고려한 것이며 수직방향으로는 수평에 비하여 2.5배 증폭되는 것으로 하였다. 노내 핵연료 교환기의 구조재질은 스테인리스 강이고 사용 물성치는 비중이 78.57×10^{-7} Kg/mm^3이며 포와송 비가 0.3 및 영계수가 $2.04 \times 10^4 Kgf/mm^2$ 이다.

3.3 해석결과

대용량 노내 핵연료 교환기의 판토그라프식 팔의 한계길이를 검토하기 위해 ANSYS코드의 단순 보모델을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 노내 핵연료 교환기

의 팔 길이를 변화시켜 팔 길이가 1.82m와 2.74m에 대하여 응력 및 변형량을 계산하였다. 그림18 ~ 그림21은 핵연료 인출하중 및 지진하중에 대하여 팔 길이가 1.82m인 경우에 수행한 응력분포이다. 그림18과 그림19는 OBE 지진하중을 고려한 경우에 최대응력 및 변위에 대한 계산 결과이다. 판토그라프식 팔의 상단 link 부분에 90MPa의 최대응력이 발생하였고 최대 17mm의 합성 최대변위가 발생하였다. 이러한 계산 값들은 노내 핵연료 교환기의 설계 한계 값인 133MPa 보다 작은 값을 나타내어 구조적으로 안전함을 알 수 있다. 또한 그림 20과 그림21의 계산결과에서 볼 수 있듯이 SSE 지진하중에 의한 최대응력은 119MPa이고 최대변위는 20mm로 계산 값이 더 보수적이므로 추후 지진하중은 SSE 하중에 대해서만 고려하였다.

팔 길이가 2.74m인 경우에 대하여 수행한 구조해석 결과는 그림 22 ~ 그림25에 나타나있다. 해석결과 최대 발생응력은 그림22와 그림23에서 보듯이 팔 길이가 1.82m인 경우와 마찬가지로 link 상단 부분에 발생하였다. 발생한 최대 합성변위는 40mm이고 최대응력은 186MPa로 설계 한계 값을 초과하였다. 따라서 팔 길이가 증가하여 2.74m인 경우에 현재 노내 핵연료 교환기의 각 부품의 설계치수에 대해서는 판토그라프식 팔이 한계길이를 초과하여 구조설계요건을 만족하지 못함을 알 수 있다. 이러한 경우에 대하여 구조 설계요건을 만족시키는 설계를 위해 노내 핵연료 교환기의 main tube, link, grapple의 단면크기를 변화시켜서 계산을 수행하였다. Grapple 의 사각 단면크기를 0.2m x 0.2m 와 0.3m x 0.3m로 변화시킬 때 main tube의 단면크기와 link의 단면크기를 변화시켜 가며 응력 및 변형량을 계산하였다. 계산결과는 표 5 및 표 6에 나타내었다. 표 5에서 보면 Grapple의 단면크기는 0.2m x 0.2m로 결정하고 link의 단면적을 현 설계 상태인 0.2m x 0.1m 에서 0.2m x 0.2m로 증가시켰을 때 응력 및 변형량은 103~106MPa 및 29~19mm의 분포를 보였으며 설계 한계 값은 만족함을 알 수 있었다.

그림24와 그림25는 link의 단면적을 0.2m x 0.2m로 증가시켰을 때 응력 및 변형량에 대한 것이다. 표 6은 그래플 단면의 크기가 0.3m x 0.3m인 경우로 link 단면의 크기를 0.3m x 0.2m로 증가시켜야 노내 핵연료 교환기의 설계 한계 값을 만족함을 알 수 있었다. 그림26 과 그림27은 link의 단면적을 0.3m x 0.3m로 증가시켰을 때 응력 및 변형량에 대한 것이다. 이러한 계산 결과로부터 노내 핵연료 교환기의 팔 길이가 증가됨에 따라 핵연료 인출하중 및 지진하중에 대하여 굽힘 모우멘트에 의한 처짐이 증가하므로 link의 단면을 보강하여 설계하여야 함을 알 수 있다. 따라서 노내 핵연

료 교환기의 설계 시에 판토그라프식 팔의 길이가 결정되었을 때 주변 구조물과의 간섭사항을 고려하여 각 부품의 치수를 적절히 선정하고 구조적 건전성을 만족하는 설계가 필요하다.

4. 결론

대용량 노내 핵연료 교환기기의 교환방식을 검토한 결과 EFR에서 채택하고 있는 2개의 회전플러그 및 offset arm을 사용한 노내 핵연료 교환방식과 현재 KALIMER-150에서 채택하고 있는 1개의 회전플러그 및 판토그라프식 팔을 사용한 노내 핵연료 교환기가 가장 적합한 형태인 것으로 검토되었다. 2개의 회전플러그의 개념은 노내 핵연료 교환기의 구조가 단순해지고 기존에 설계된 액체금속로에서 그 안전성이 증명이 된 장점이 있으나 내부노심에 위치한 노심집합체를 2번에 이동시켜야 하므로 재장전 시간이 길어진다. 반면 KALIMER-150에서 채택하고 있는 판토그라프식 노내 핵연료 교환방식은 회전플러그의 크기 및 회전반경을 가장 작게할 수 있는 장점이 있으며 재장전 과정을 단순화 시킬 수 있다. 또한 본 보고서에서는 판토그라프식 대용량 노내 핵연료 교환기의 구조적 건전성을 평가하기 위해 ANSYS 코드를 사용하여 응력 및 변형해석을 수행하였다. 변형량 및 응력이 집중되는 판토그라프식 팔 및 main tube 의 파이프의 단면 크기를 변화시켜 계산하였다. 그 밖의 다른 노내 핵연료 교환기의 주요 설계치수를 변화시켜 노내 핵연료 교환기의 구조적 건전성을 만족시키는 지를 검토하였고 각 부품의 치수가 계산되었다. 계산 결과에서 보면 판토그라프식 팔 길이가 1.82m인 경우에는 현재의 설계가 구조적으로 안전하였다. 그러나 팔 길이가 2.74m로 증가되면 현재의 설계는 구조적으로 안전하지 않으며 link의 단면적을 보강하여 단면 크기가 0.2m x 0.2m 이상이 되어야 구조적으로 건전함을 알 수 있었다. 향후 대용량 KALIMER의 핵연료 교환기기는 검토된 6가지 개념중 가장 타당한 위의 2가지 개념에 대하여 노내 핵연료 교환기와 회전플러그의 공간 점유량이 분석되어야 한다.

참고문헌

1. GE Nuclear Energy, "KALIMER Plug-in/Plug-out IVTM Design Study Final Report, G78A-

1, Class 2, Rev.1, June 1997.

2. EPRI, "Large Pool LMFBR Design Appendices L-CC", NP-1016, Vol 3, Part 2,1979

3. 김석훈, “Design Requirements for KALIMER Reactor Refueling System, KALIMER/MS 440-DR-01 rev. 0/2000, 한국원자력연구소,2000.

4. KALIMER preliminary conceptual design report, KAERI/TR-1636/2000.

5. 김석훈외 1인, “KALIMER 원자로 핵연료 교환기의 메커니즘 모델링 및 구조해석”, 추계학술발표회 논문집, 한국 전산구조공학회, 2002.

6. ANSYS Computer Program, Version 6.1, 2001.

7. PRISM Preliminary Safety Information Document, GE, 1987.

표 1. 원자로형에 따른 노심 및 회전플러그의 크기

	용량(MWe)	노심직경(m)	회전플러그(m)
KALIMER	150	3.44	2.74 w/ IVTM
EFR	1490	8.2	7.2
SuperPhenix	1440	8.0	11.2
PFBR	500	4.96	6.93
LMFBR	1000	5.4	8.69
ALMR	155	2.4	2.74 w/ IVTM

표 2. 대용량 회전플러그 방식 핵연료 교환기기의 종류 및 장단점 비교

종류	설계개념	장점	단점	원자로
1안	3개의 회전플러그, 1개의 수직인출 교환기	노내 핵연료 교환기의 단순화	매우 큰 회전플러그 직경	SNR-300(Russia) CRBRP (U.S.A.)
2안	2개의 회전플러그, 2개의 수직인출 교환기	단순 고장이 적음, straight pull machines	재장전시간 증가	JOYO (Japan) DFR(UK)
3안	2개의 회전플러그, 수직인출 및 Offset Arm교환기,	적은 회전반경, 단순고장이 적음	재장전시간 증가	EFR
4안	1개의 회전플러그, 편심된 UIS, Offset Arm 교환기,	적은 회전반경	UIS와 노심이 일치하지 않음, UIS구조가 복잡	MONJU (Japan)
5안	1개의 회전플러그, 판토그라프식 교환기	아주 적은 회전반경, 재장전 시간 단축	노내 핵연료 교환기 구조복잡	KALIMER PRISM PFR
6안	2개의 회전플러그, 편심된 UIS, 1개의 수직인출 교환기	straight pull machines	UIS와 노심이 일치하지 않음, UIS구조가 복잡	

표 3. 대용량 회전플러그의 설계개념 및 크기 비교

종류	설계개념	회전플러그 직경(m)	비 고
1안	3개의 회전플러그, 1개의 수직인출 교환기	11.3	*노심의직경은 5.5 m 기준
2안	2개의 회전플러그, 2개의수직인출 교환기	8.68	
3안	2개의 회전플러그, 수직인출 및 Offset Arm교환기,	7	
4안	1개의 회전플러그, Offset Arm 교환기, 편심된 UIS	6.5	
5안	1개의 회전플러그, 판토그라프식 교환기	6.4	
6안	2개의 회전플러그, 편심된 UIS, 1개의 수직인출 교환기	8.4	

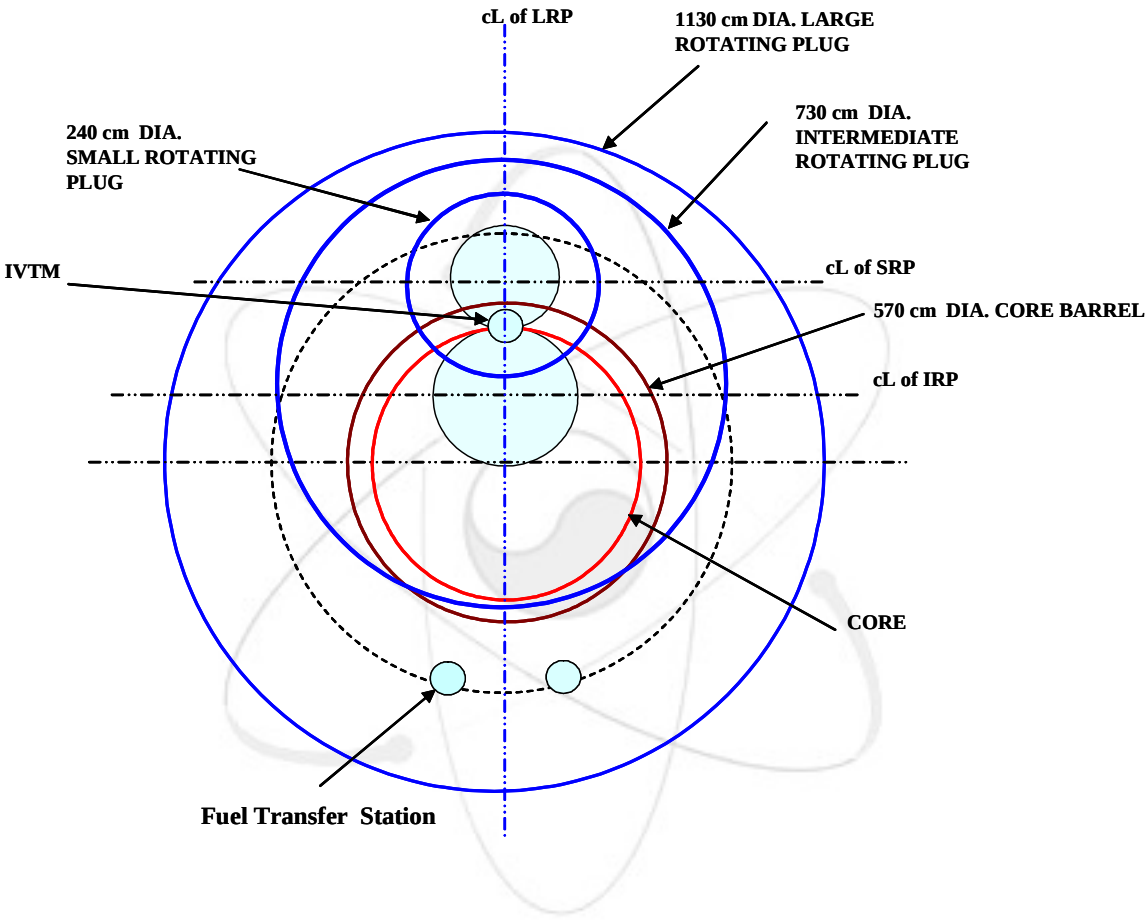

그림 1. 3개의 회전플러그, 1개의 수직인출 교환기의 평면도

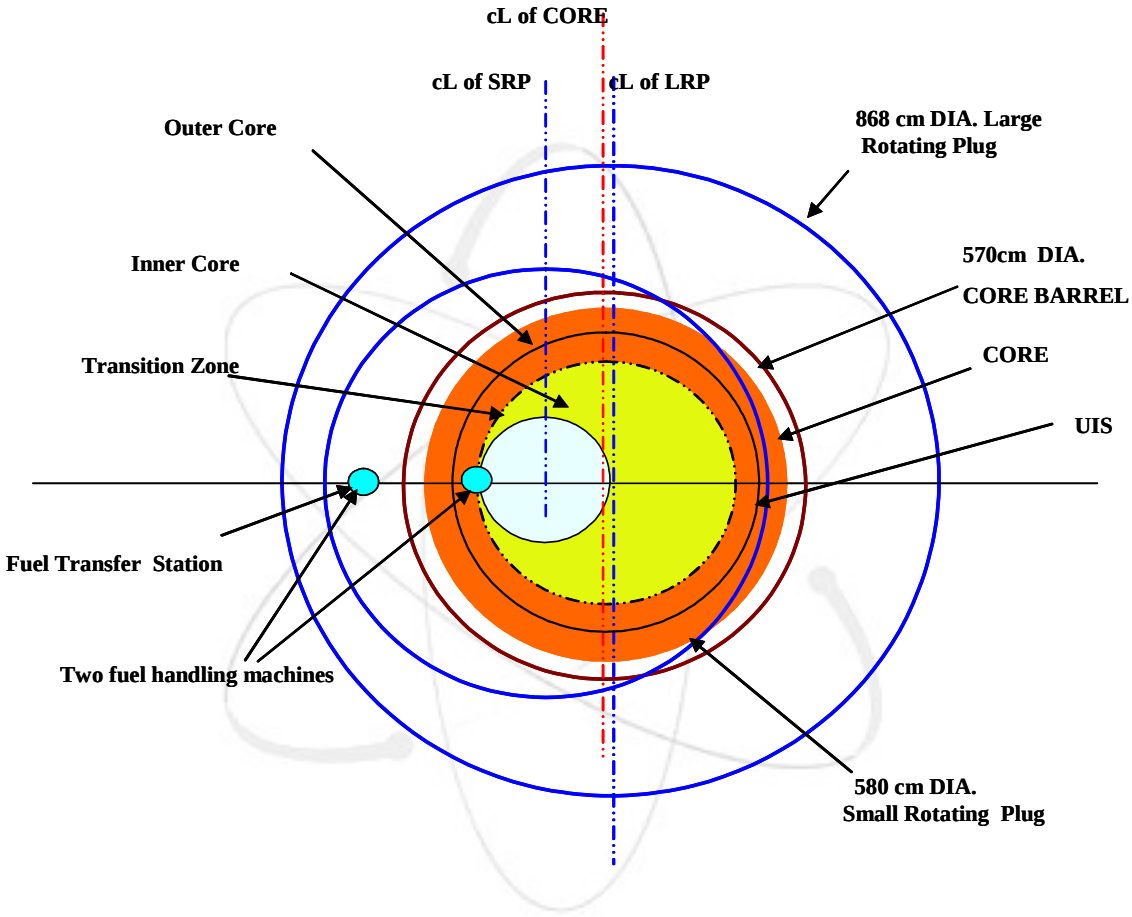

그림 2. 2개의 회전플러그, 2개의 수직인출 교환기의 평면도

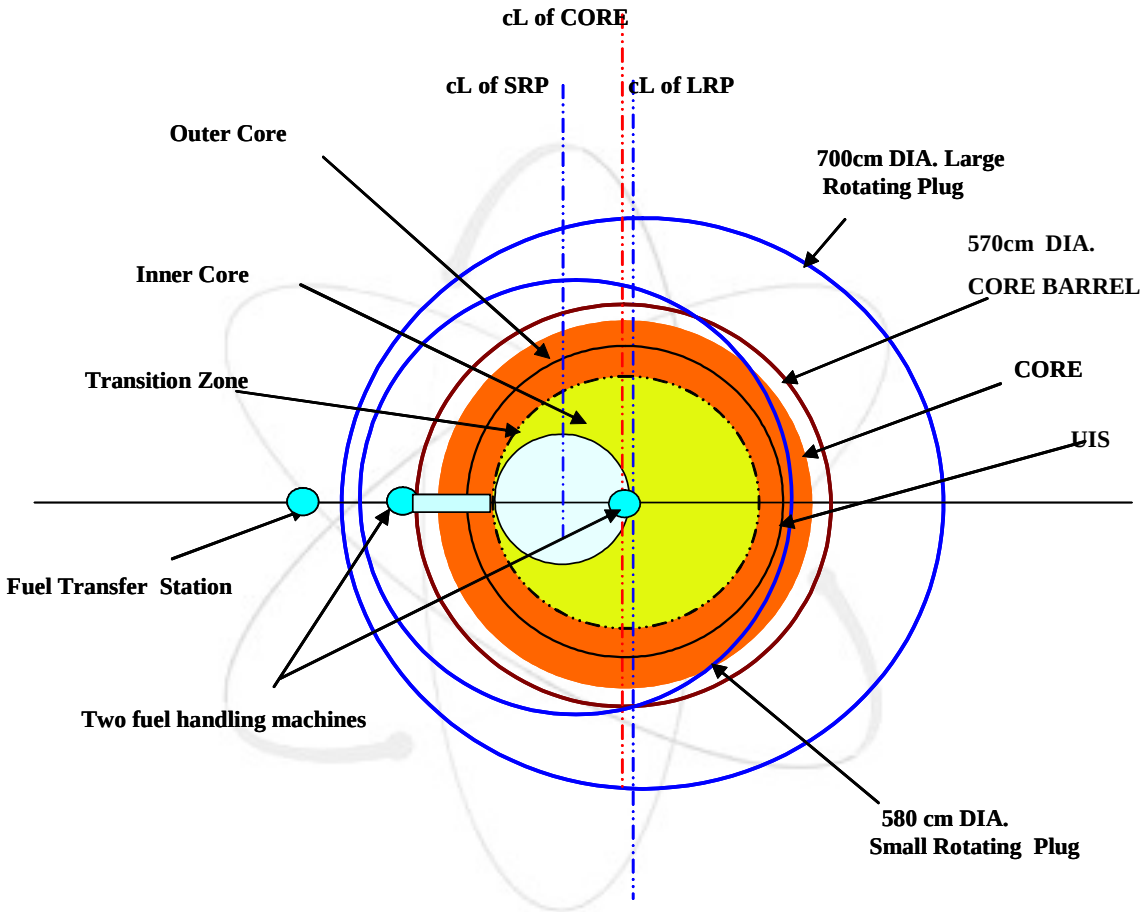

그림 3. 2개의 회전플러그, 수직 인출 및 Offset Arm교환기의 평면도

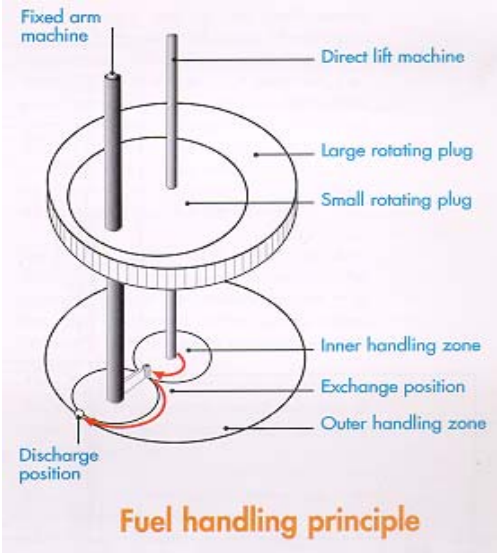

그림 4. 2개의 회전플러그, 수직 인출 및 Offset Arm교환기의 핵연료 교환 개념도

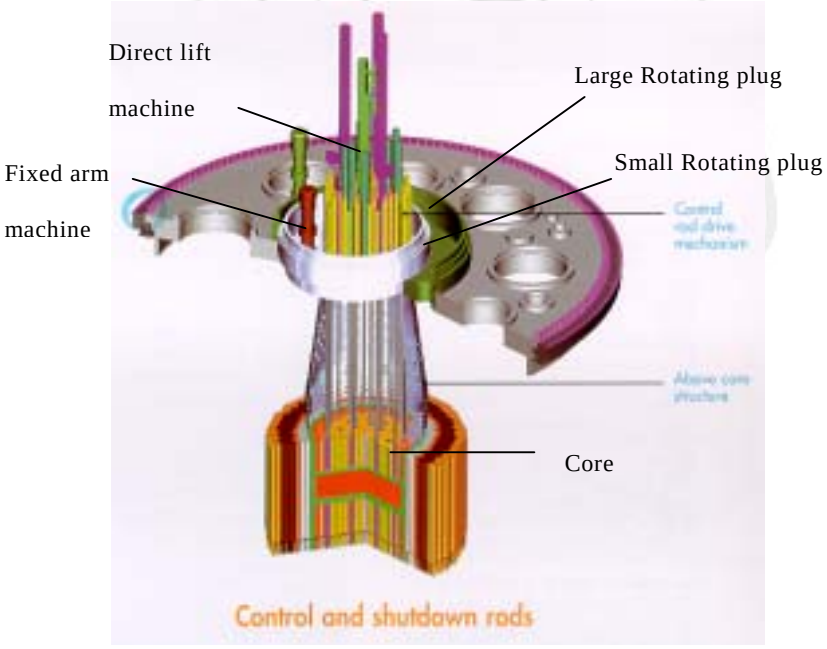

그림 5. 2개의 회전플러그, 수직 인출 및 Offset Arm교환기의 3차원 개념도

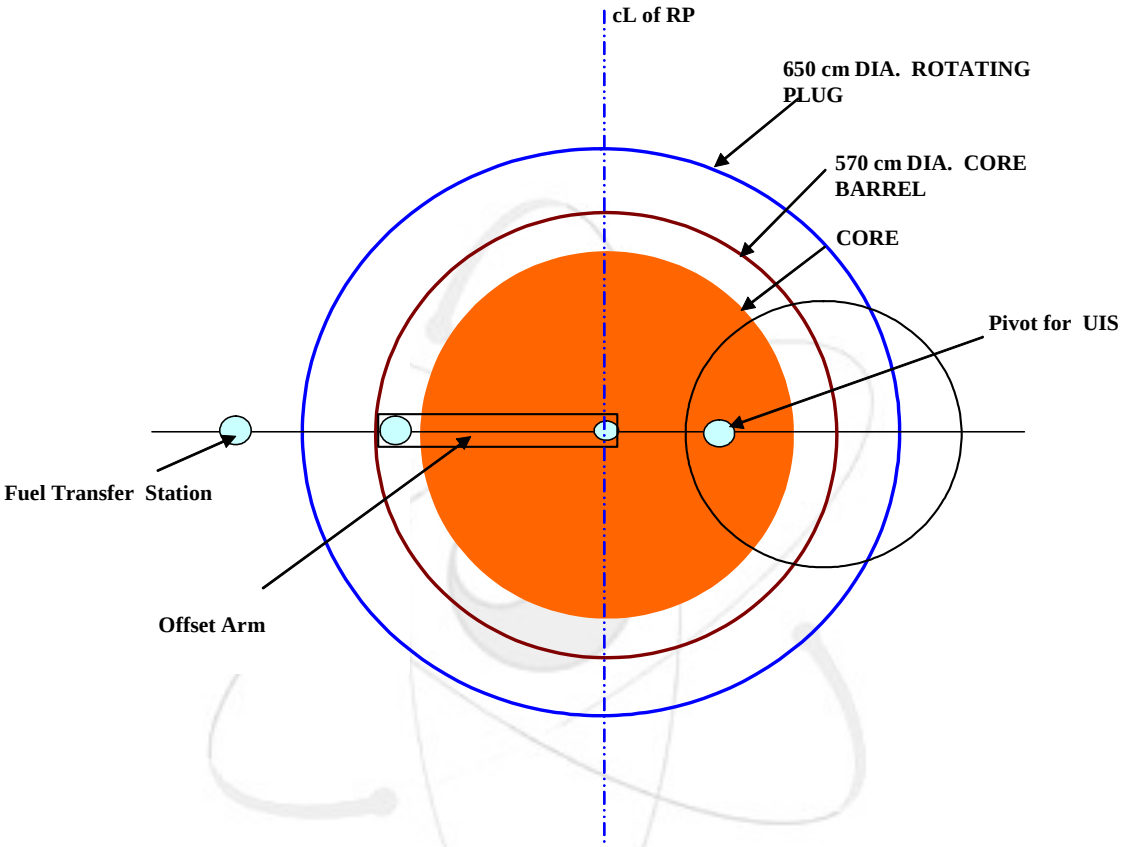

그림 6. 1개의 회전플러그, 편심된 UIS, Offset Arm 교환기의 평면도

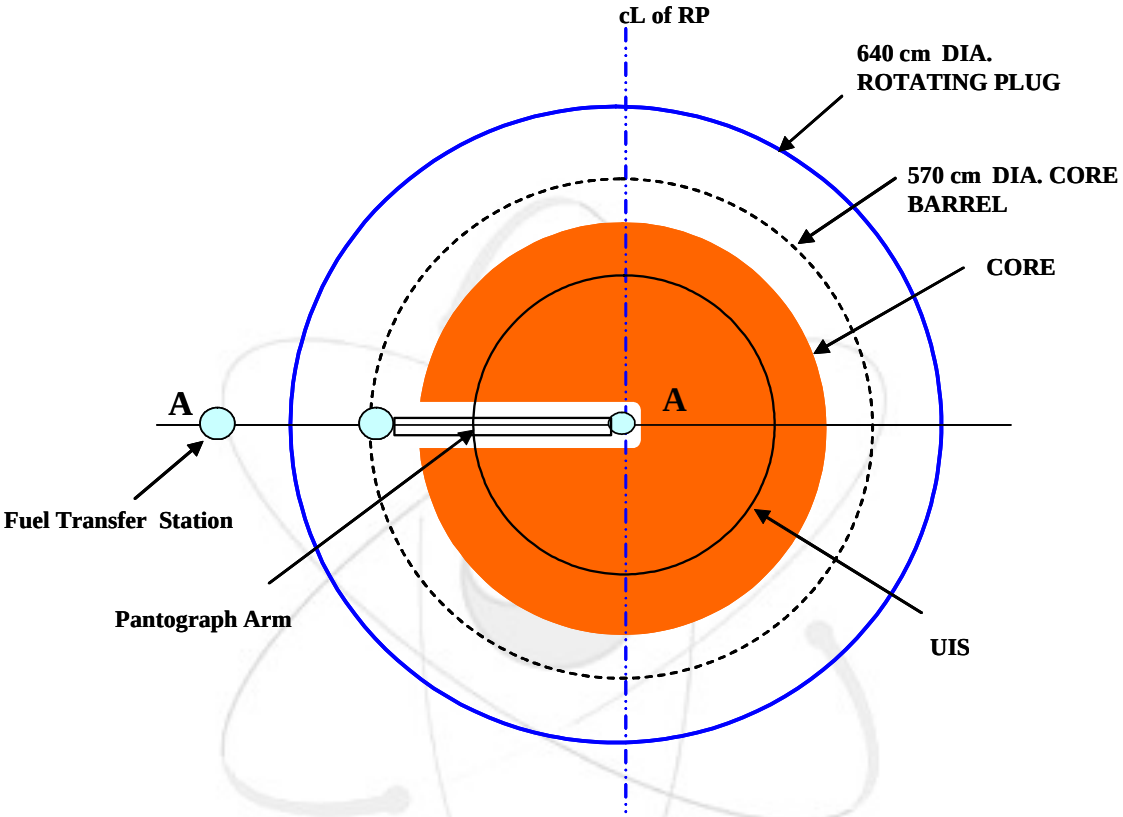

그림 7. 1개의 회전플러그, 판토그라프식 교환기의 평면도

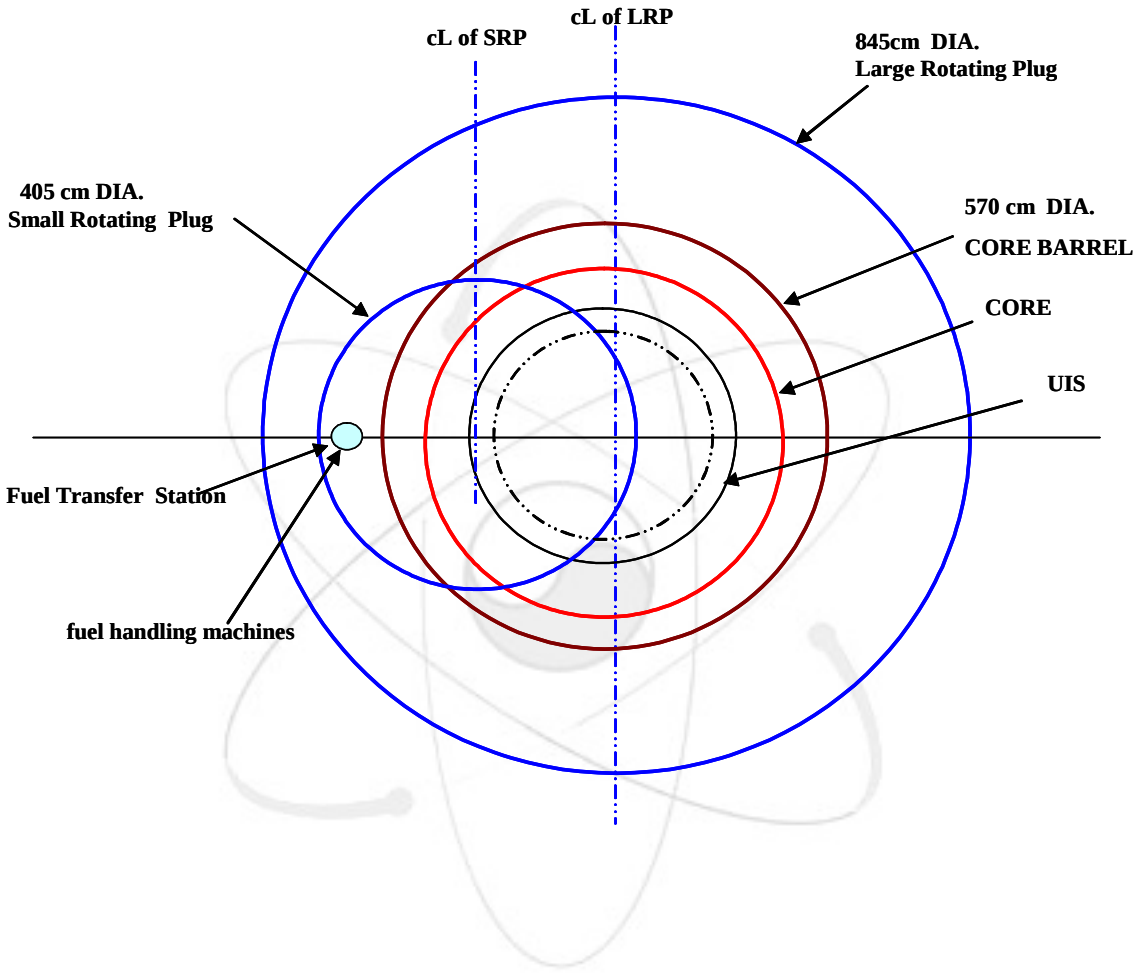

그림 8. 2개의 회전플러그, 편심된 UIS, 1개의 수직인출 교환기의 평면도

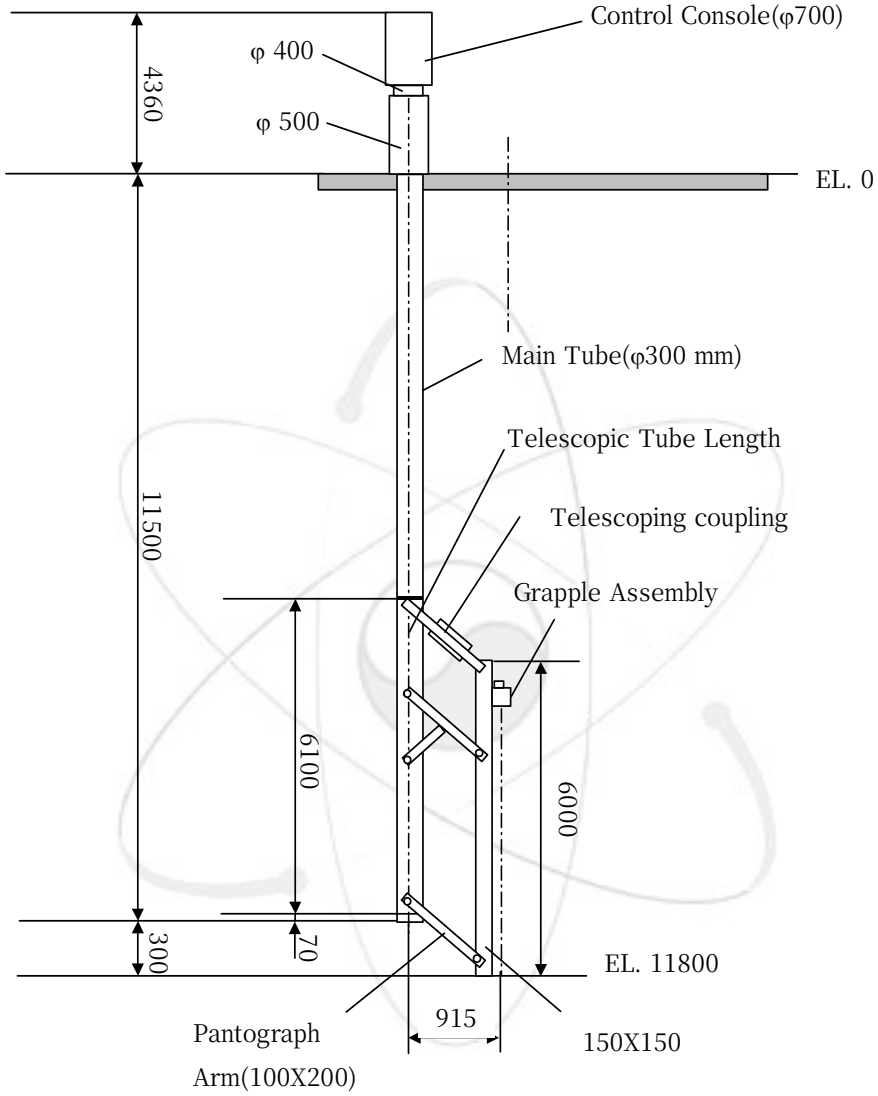

그림 9. 노내 핵연료 교환기의 2차원 개념도

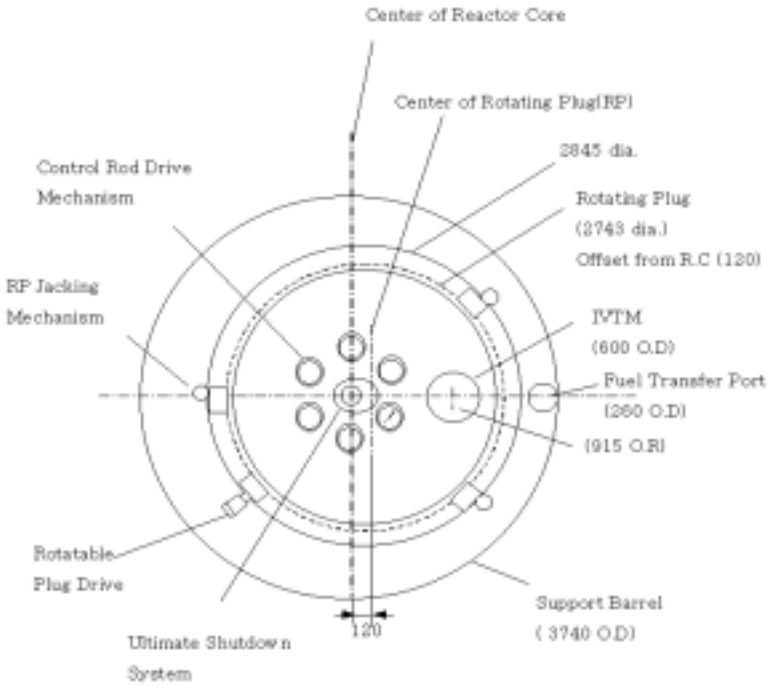

그림 10. 회전플러그의 평면도

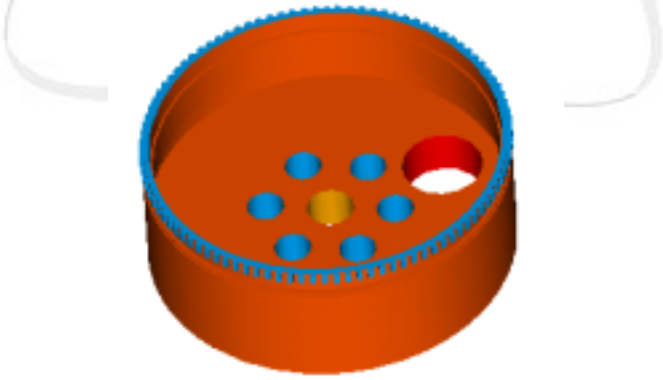

그림 11. 회전플러그의 3차원 개념도

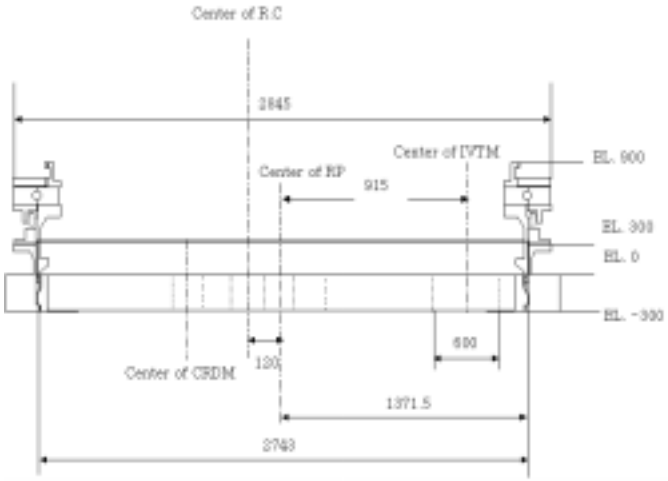

그림 12. 회전플러그의 측면도

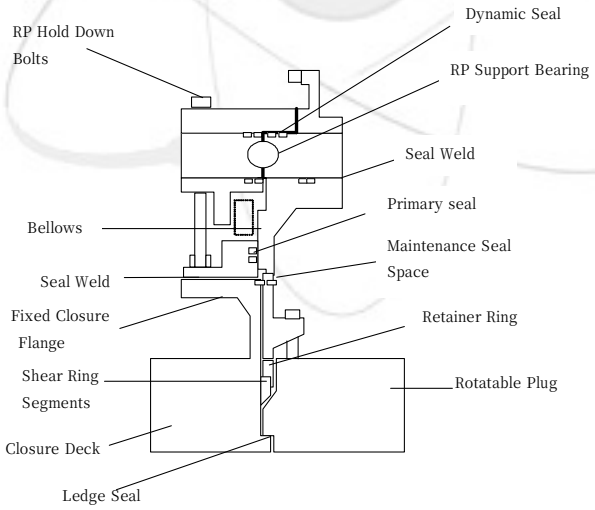

그림 13. 회전플러그의 seal 개념도(원자로 운전)

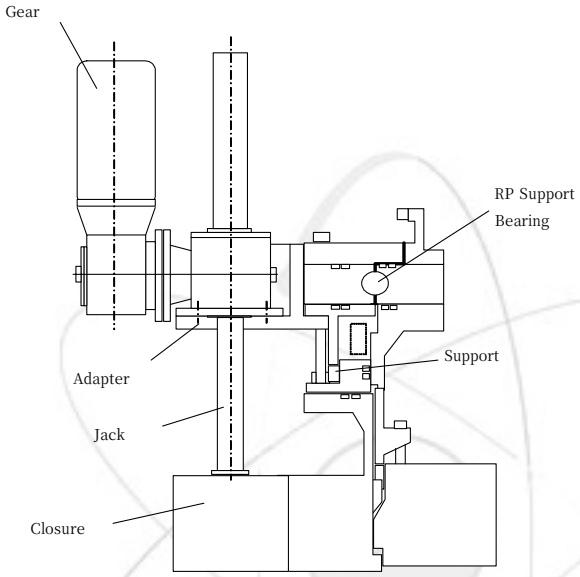

그림 14. 회전플러그의 seal 개념도(재장전)

표 4. 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

표 5. 구성부품의 단면변화에 따른 최대 변위 및 응력(Grapple 단면: 0.2 m x 0.2 m)

Main Tube / Link	항 목	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	비 고
0.2 m x 0.1 m	최대변위(mm)	40	33	31	31	* Grapple의 단면크기가 0.2 m x 0.2 m 일 경우
	최대응력 (MPa)	186	187	188	188	
0.2 m x 0.2 m	최대변위(mm)	29	22	20	19	
	최대응력 (MPa)	103	105	105	106	

표 6. 구성부품의 단면변화에 따른 최대 변위 및 응력(Grapple 단면: 0.3 m x 0.3 m)

Main Tube / Link	항 목	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	비 고
0.2 m x 0.1 m	최대변위(mm)	45	37	35	34	* Grapple의 단면크기가 0.3 m x 0.3 m 일 경우
	최대응력 (MPa)	222	225	226	226	
0.3 m x 0.2 m	최대변위(mm)	27	19	16	15	
	최대응력 (MPa)	118	70	70	71	

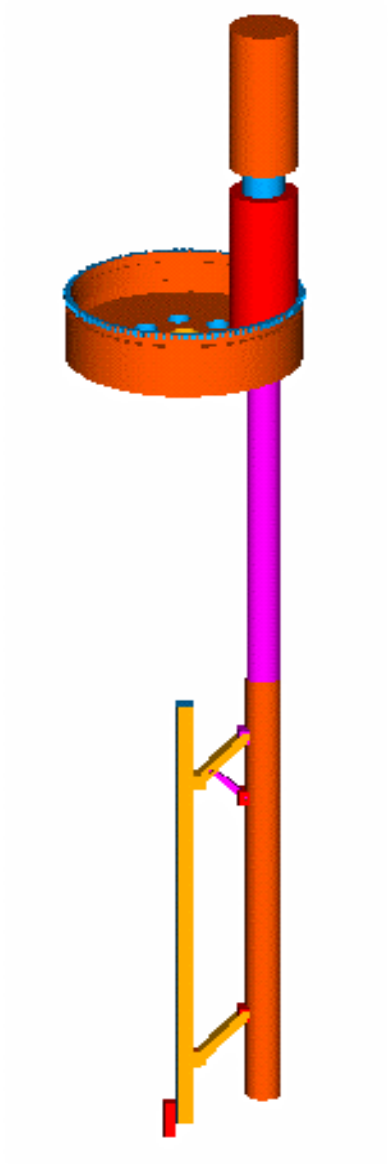

그림 15. 노내 핵연료 교환기의 3차원 개념도

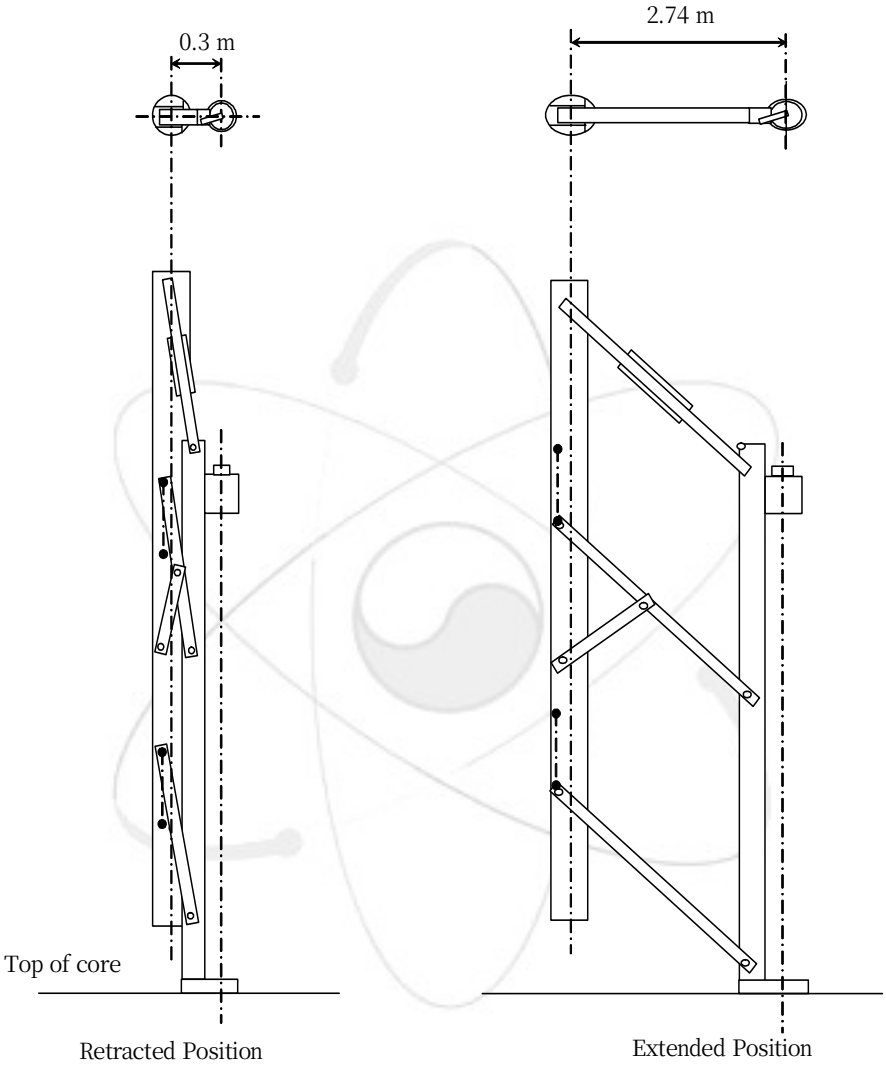

그림 16. 신축위치에 따른 노내 핵연료 교환기의 개념도

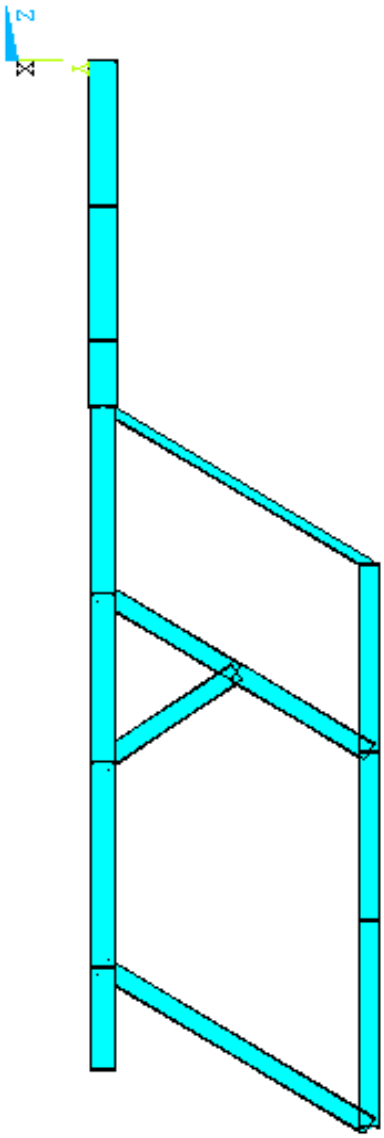

그림 17. IVTM의 모델링 형상

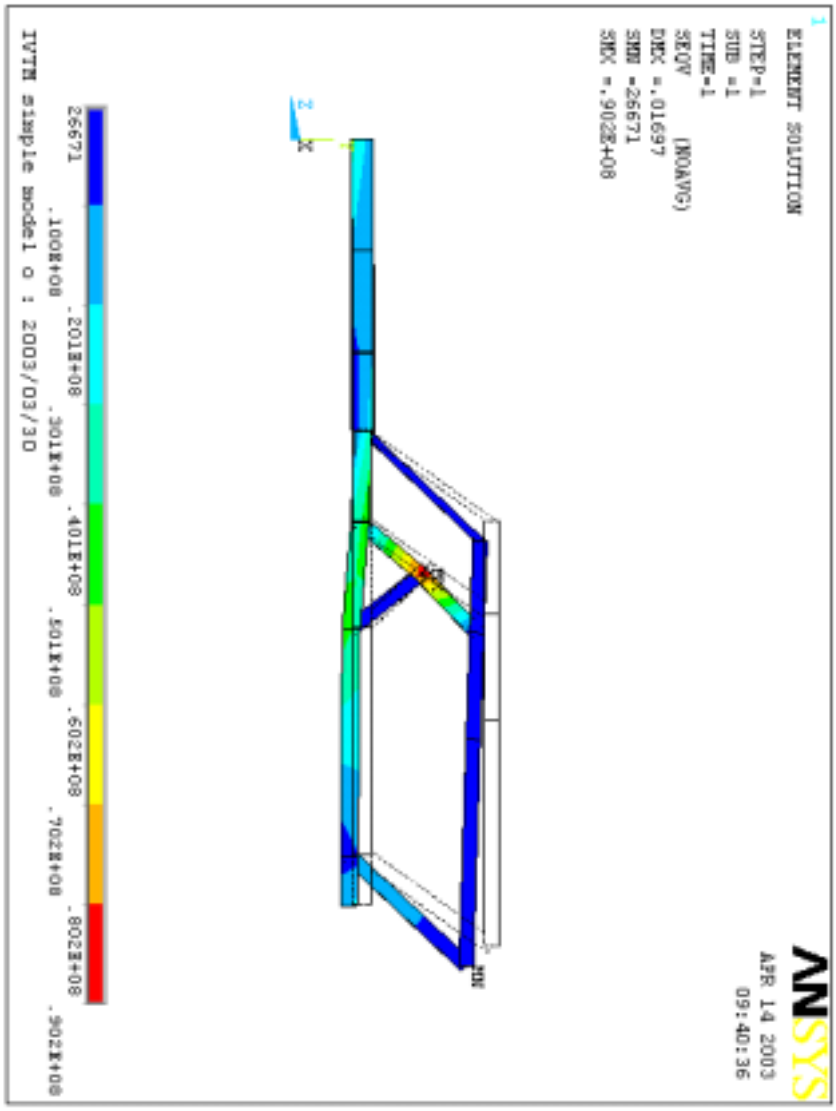

그림 18. OBE 지진하중 하의 최대응력(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.1)

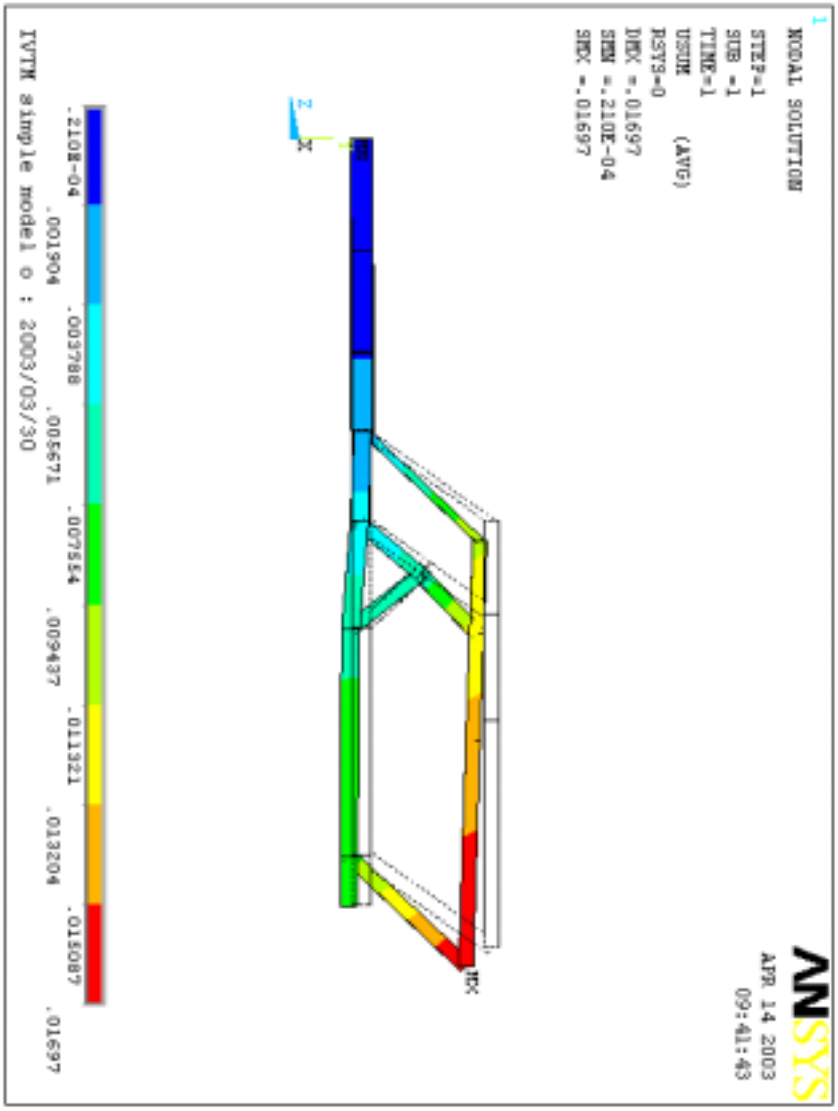

그림 19. OBE 지진하중 하의 최대변위(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.1)

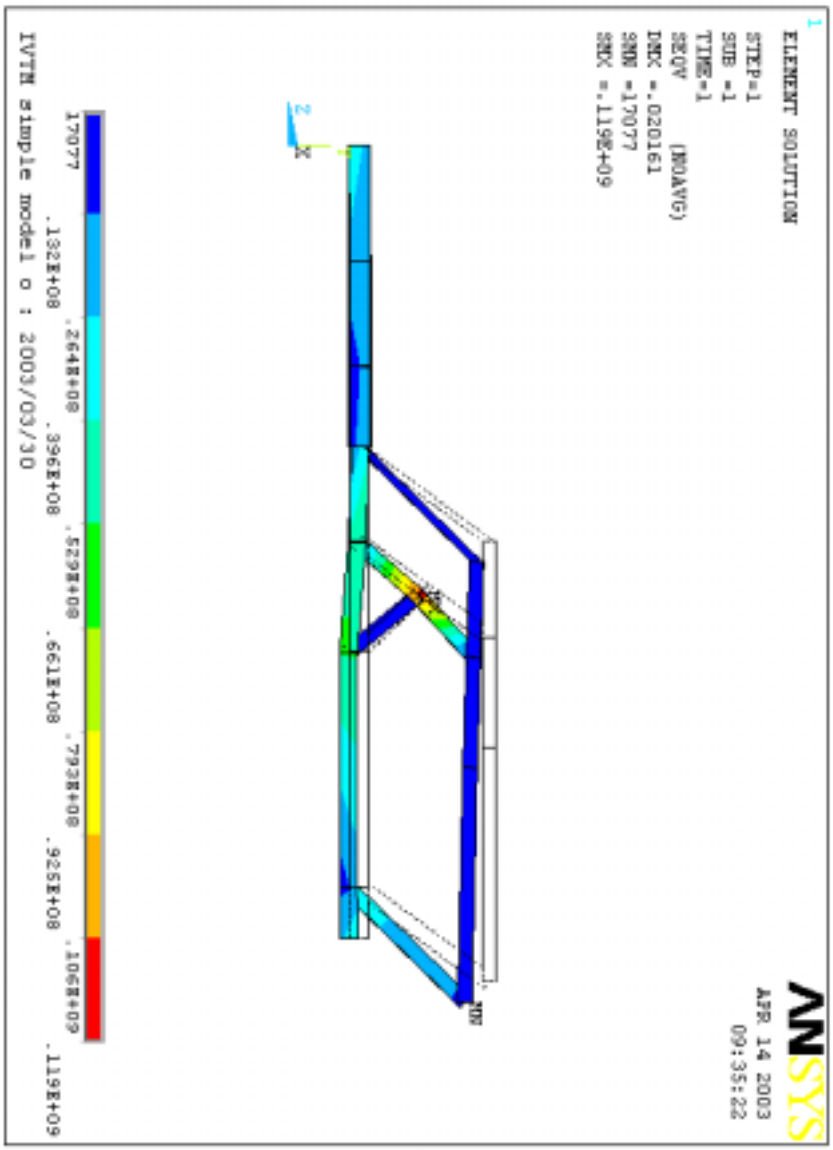

그림 20. SSE 지진하중 하의 최대응력(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.1, 1.82m)

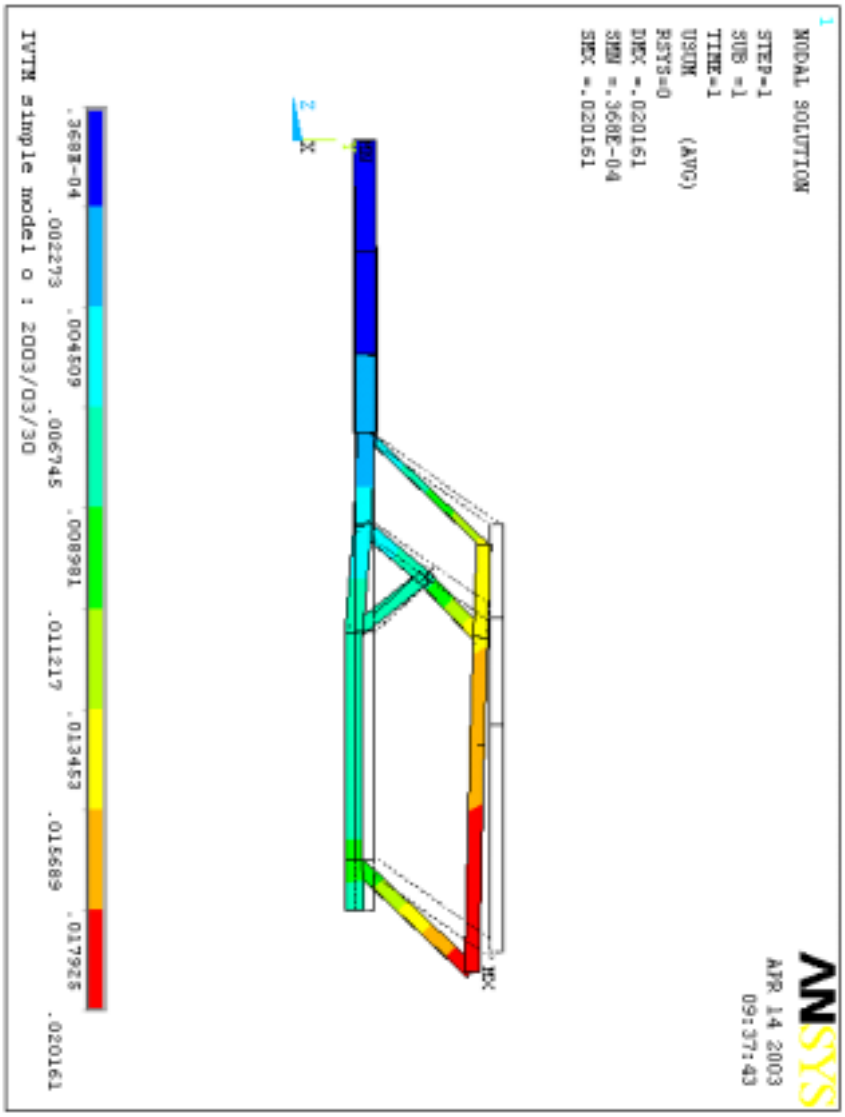

그림 21. SSE 지진하중 하의 최대변위(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.1, 1.82m)

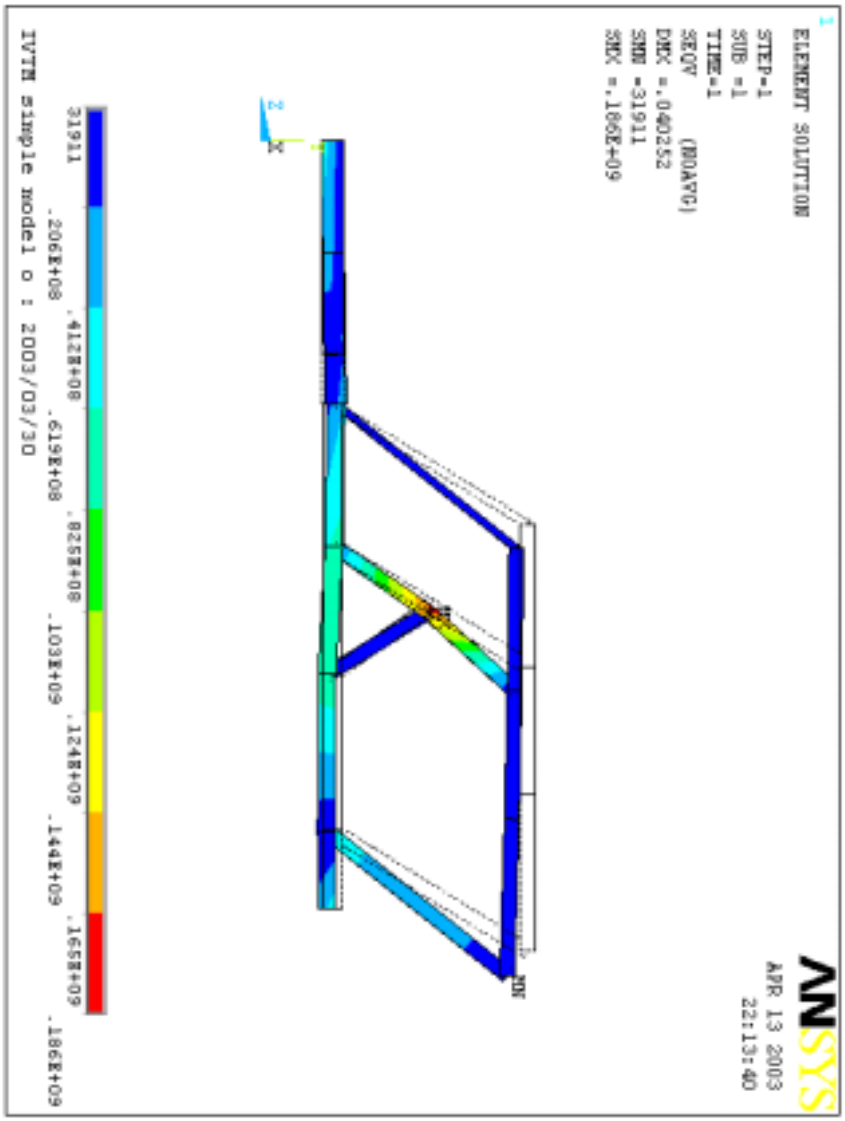

그림 22. SSE 지진하중 하의 최대응력(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.1, 2.74m)

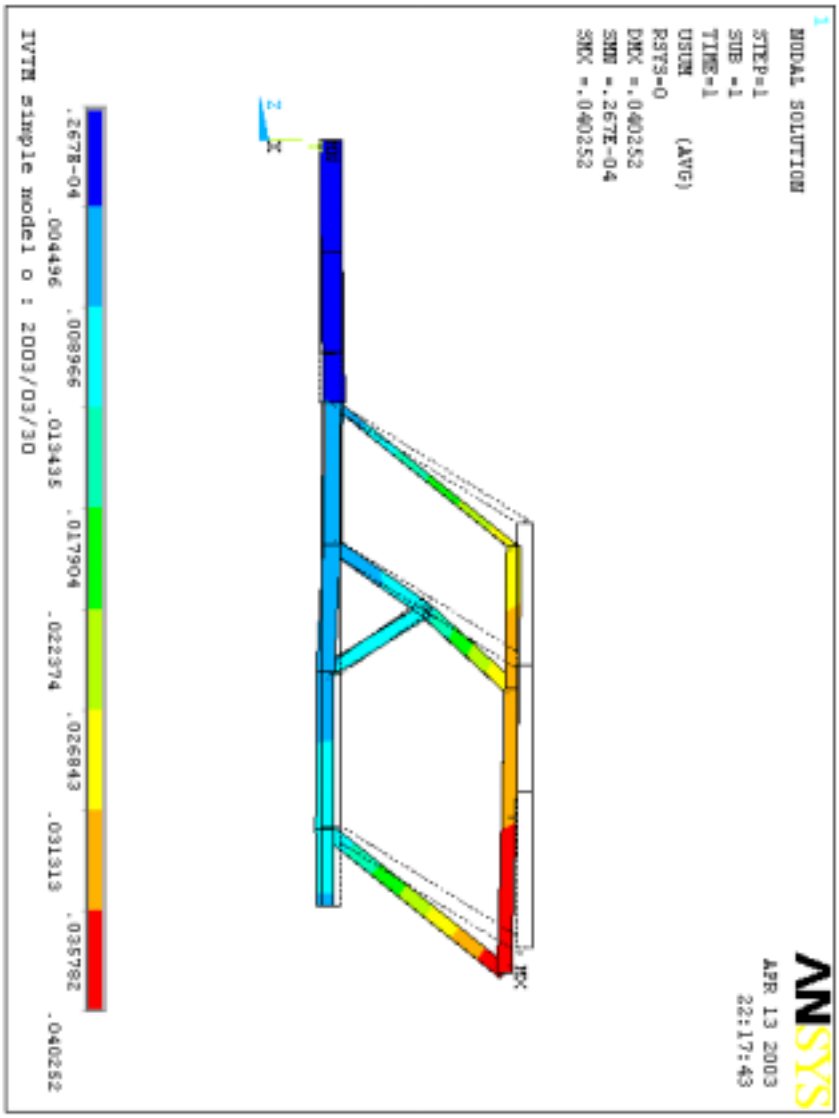

그림 23. SSE 지진하중 하의 최대변위(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.1, 2.74m)

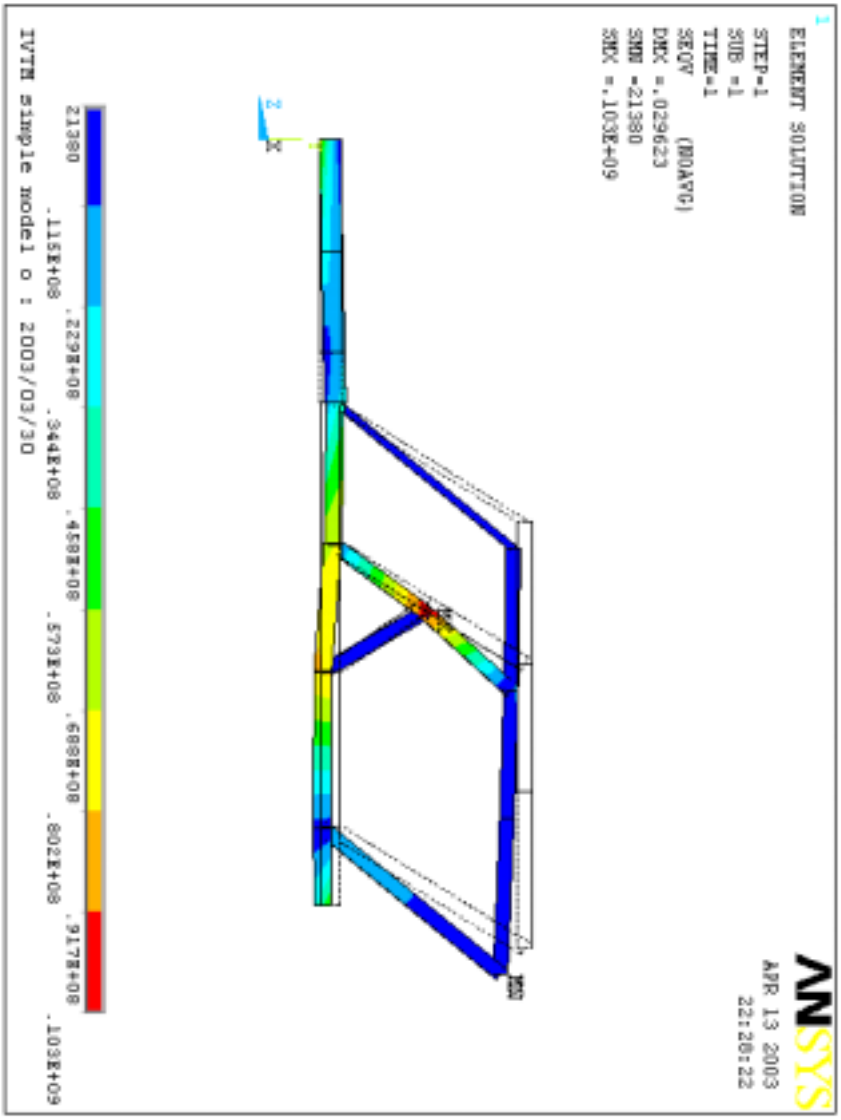

그림 24. SSE 지진하중 하의 최대응력(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.2)

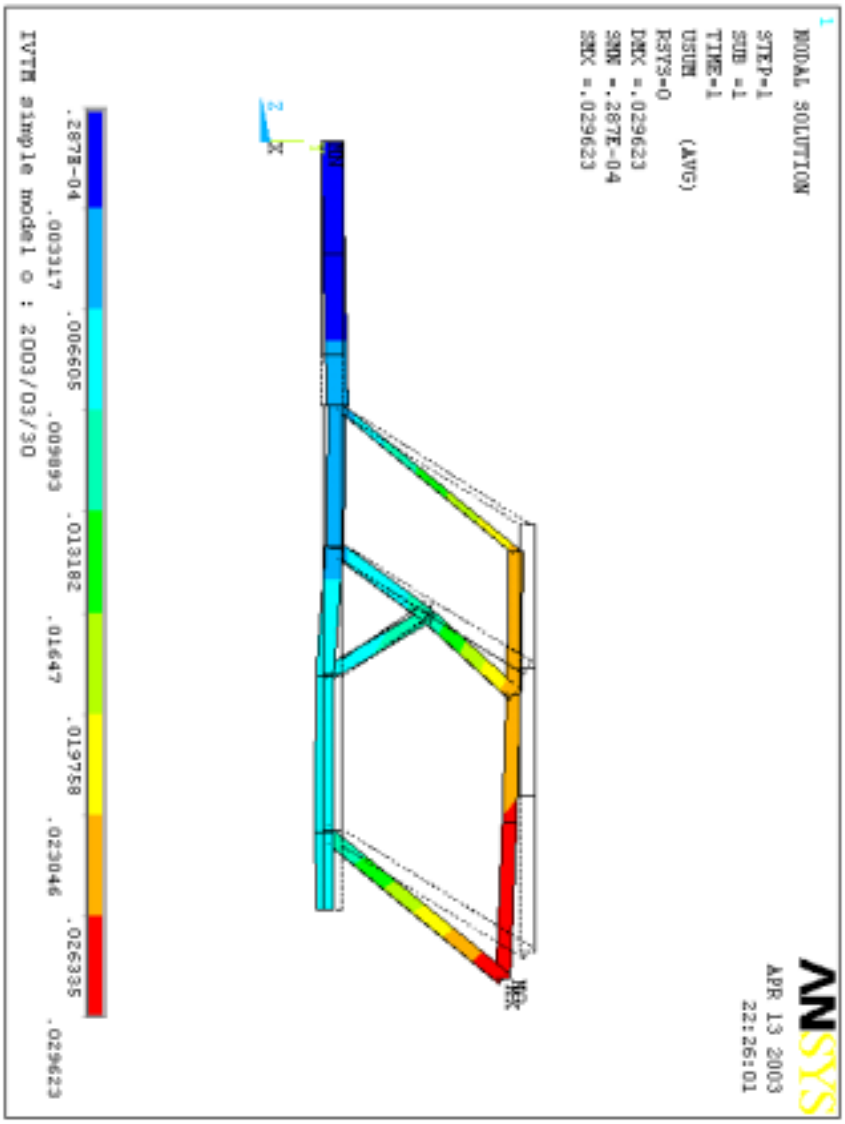

그림25. SSE 지진하중 하의 최대변위(grapple/0.2x0.2 , link/ 0.2x0.2)

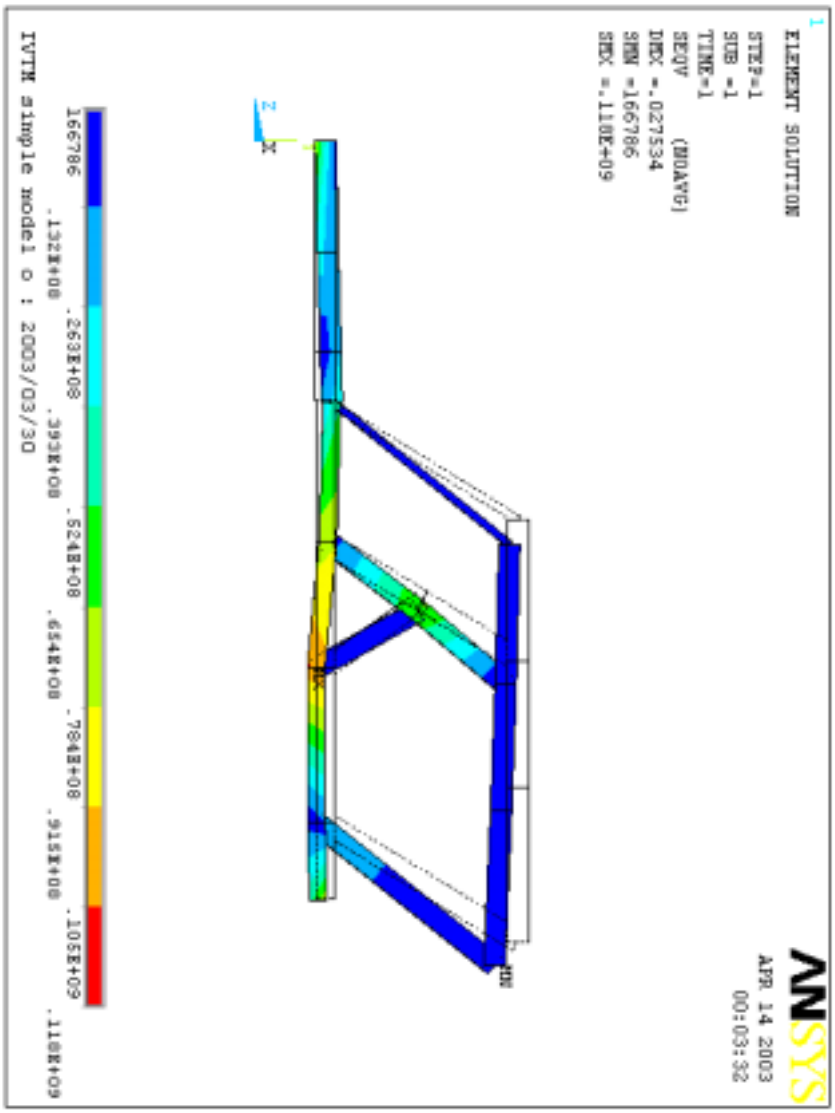

그림 26. SSE 지진하중 하의 최대응력(grapple/0.3x0.3 , link/ 0.3x0.2)

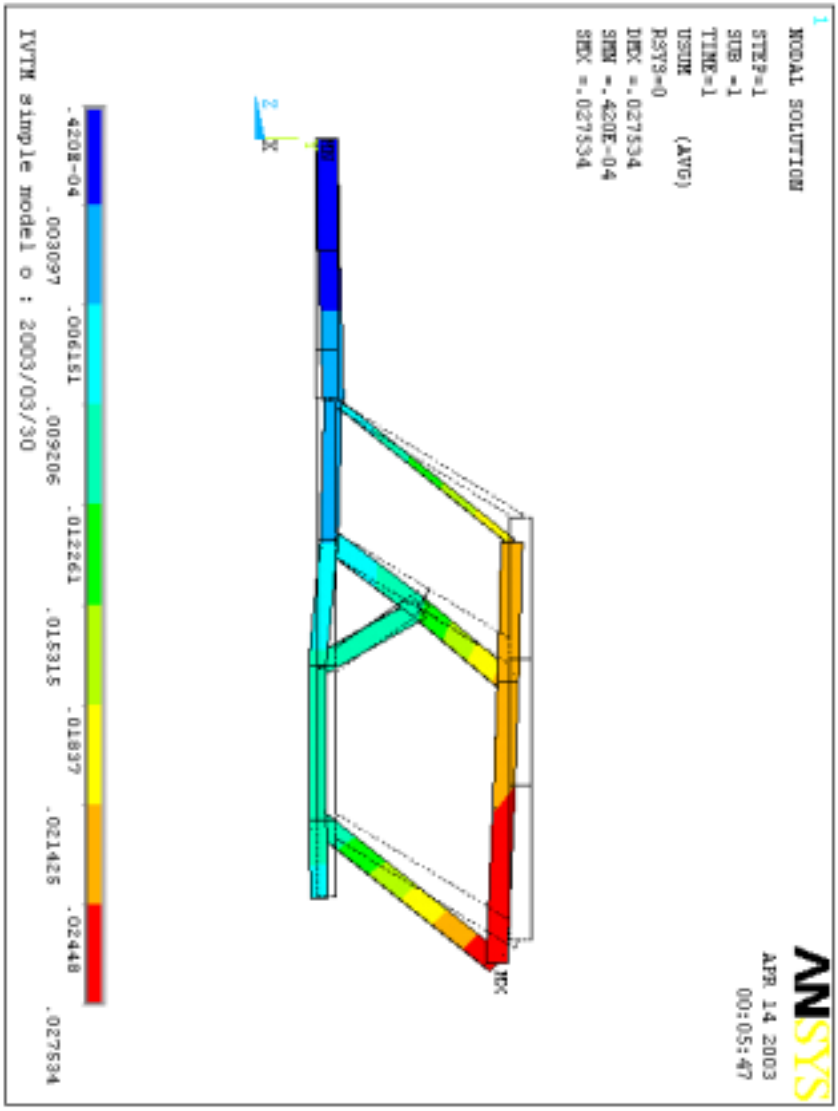

그림27. SSE 지진하중 하의 최대변위(grapple/0.3x0.3 , link/ 0.3x0.2)

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2583/2003			

제목/부제	대용량 액체금속로 노내 핵연료 교환기기의 구조검토
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	김석훈 /액체금속로 기계설계기술개발
연 구 자 및 부 서 명	

출 판 지	한국, 대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2003. 11
페 이 지	45 p.	도 표	있음(V), 없음( )	크 기	A4
참고사항					
비밀여부	공개(V), 대외비( ), __ 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약 번호		

초록 (15-20줄 내외)

KALIMER의 출력이 대용량으로 증가되는 경우에 노내 핵연료 교환기기의 구조개념을 제시하고 검토하였다. 150 MWe에서 600MWe로 전기출력이 증가함에 의해 노심의 크기가 증가된다. 증가된 노심 크기를 가정하여 회전플러그의 크기 및 핵연료 교환방식을 평가하였다. 또한 평가된 여러개념 중 가장 적합한 2개의 개념을 선정하였으며 판토그라프식 노내 핵연료 교환기 팔의 한계길이에 대하여 분석하였다

노내 핵연료 교환기의 모델 형상은 판토그라프식 팔에 의해 최대로 펼쳐져 있는 상태이다. 이러한 상태에서 고려한 하중은 노심 집합체의 무게, 자중 및 인출 시에 반력 등이다. ANSYS 코드를 사용하여 유한요소해석에 의해 노내 핵연료 교환기의 구조해석을 수행하였다. 재장전하중 및 지진하중에 대하여 노내 핵연료 교환기의 설계변수로 고려된 부품들의 단면변화에 대한 응력 및 변형을 계산하였다.

주제명키워드 (10단어내외)	노내 핵연료 교환기기, KALIMER, 노내 핵연료 교환기, 회전플러그, 핵연료 교환, 유한요소해석

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2583/2003			

Title/ Subtitle	Structural Review of In-Vessel Fuel Transfer Equipment in large size LMR
Project Manager and Department	Seok-Hoon Kim / LMR Mechanical Structure Design Development
Researcher and Department (or Main Author)	

Publication Place	Taejon, Korea	Publisher	KAERI	Publication Date	2003. 11
Page	45p.	Fig. & Tab.	Yes(V), No ( )	Size	A4
Note					
Classified	Open(V), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical report	
Sponsoring Org.			Contract No.		

Abstract (15-20 Lines)

In case the power of KALIMER is increased by the large size, the structural concept of In-Vessel Fuel Transfer Equipment was suggested and reviewed. The core size is expanded due to increasing of the electric power 150 MWe to 600 MWe. The size of rotating plug and the method of the fuel transfer were evaluated by assuming the increased core size. Also, among the various evaluated concepts two concepts were selected and the marginal length of the arm for the pantograph type IVTM was analysed.

The model configuration of IVTM is fully extended condition of the pantograph arm. In this condition, the loads considered are the weight of the core assembly, self weight and reaction force for the withdrawal of the core assembly. The structural analysis of IVTM was carried out by the finite element analysis using ANSYS code. The stress and deformation were calculated to the the refueling and seismic loads for the section variation of the components considered as the design parameters of IVTM.

Subject Keywords (About 10 words)	In-Vessel Fuel Transfer Euipment, KALIMER, IVTM, Rotating Plug, Fuel Transfer, finite element analysis