2003 추계학술발표회 논문집 한국원자력학회

일체형 원자로상부구조물의 설계 개발

Development of Integrated Head Assembly Design

김일곤, 김현민, 조연호, 이명구, 권영주, 김인용, 강태교, 임인영, 양재영 한국전력기술(주) 305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요약

신고리 1,2호기 및 신월성 1,2호기에 일체형 원자로상부구조물의 도입으로 인해 기존의 한국표준형원전의 복잡한 원자로 상부구조물이 단순화되고, 핵연료 재장전 시 원자로 상 부구조물을 한번에 인양함으로써, 원자로 상부헤드의 분해 및 조립을 위한 절차를 줄여 재장전 기간 단축과 작업자의 피폭량 감소 등의 효과를 얻을 수 있다. 일체형 원자로상부 구조물은 한국표준형원전의 설계 특성에 맞게끔 설계를 수행하였고, 전산 유동해석을 통 해 제어봉구동장치의 냉각공기확보를 위한 냉각 송풍기 설계와 유체역학적 검증을 수행 하였으며, 3차원 구조해석을 통해 부품의 건전성을 확보하였다.

Abstract

The Integrated Head Assembly(IHA) has been introduced to SKN 1&2 and SWN 1&2 to simplify the reactor vessel head area structure of KSNP. It is expected that the IHA will contribute to the reduction of the number of refueling steps and the reduction in radiation exposure to operators in refueling outage duration. The IHA is designed to accommodate its function with the characteristics of KSNP. The verification of cooling air flow rate and the selection of cooling fan are performed through computational analyses for flow distribution and pressure drop. The structural integrity of IHA components is verified through 3 dimensional structural analyses.

1. 서론

신고리 1,2호기 및 신월성 1,2호기의 원자로상부에 도입된 일체형 원자로상부구조물

(Integrated Head Assembly ; IHA)는 국내 처음으로 기존 한국표준형원전(Korea Standard Nuclear Plant ; KSNP)의 복잡한 상부구조물을 단순화한 부품으로써 핵연료 재장전시 재장전 기간을 줄이고, 현장 작업자의 피폭량을 줄이기 위한 목적으로 새로이 도입되었다^{1,2)}.

국내에서 개발되는 일체형 원자로상부구조물은 한국표준형원전과 같은 ABB-CE형 원전 에 처음으로 도입되는 부분설계 변경형이 아닌 완전 일체형 원자로상부구조물이다. 웨스 팅하우스의 일체형 원자로상부구조물인 SHA³⁾와 개념은 비슷하나 발전소의 특성이나 형 태 및 요구사항이 달라 웨스팅하우스의 일체형 원자로상부구조물과는 실제로 많은 차이 점을 가지고 있다.

일체형 원자로상부구조물은 원자로 용기의 상부헤드 위에 설치되며, 기존의 원자로상부 구조물의 분해 및 설치보다 훨씬 더 적은 단계를 거침으로써 재장전 절차를 대폭 축소하 는데 그 목적이 있다. 현재 설계된 신고리 1,2호기 및 신월성 1,2호기의 일체형 원자로상 부구조물 모양은 그림-1과 같으며, 원자로 상부헤드를 제외한 주요 계통은 다음과 같다.

- 냉각 슈라우드 집합체
- 인양프레임 집합체
- 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism; CEDM) 냉각계통
- 비산물 차폐체
- 상부지역 케이블 계통
- 내진지지계통
- 원자로배기계통 배관 지지대
- 단일 스터드 인장기(Single Stud Tensioner) 운전을 위한 monorail 및 부속물

2. 일체형 원자로상부구조물의 구조설계

설계된 일체형 원자로상부구조물을 이루는 주요 부품에 대한 설명은 다음과 같다.

1) 냉각 슈라우드 집합체

이 집합체는 하부, 중부 및 상부 세 부분으로 나뉘어 졌으며, bottom ring plates, CEDM plenum plate, 배플, 냉각 슈라우드 판 및 supporting columns를 포함하고 있다. 냉각 슈라우드 집합체는 원자로 상부헤드 위에 영구적으로 붙어 있으면서 CEDM을 둘러 싸고 있는 형태이고, 배플은 IHA내부에서 plenum plate 상부에서 비산물 차폐체 판의 바 닥까지 설치되어 있어 IHA로 들어오는 공기와 나가는 공기를 분할하는 역할을 한다. Bottom ring plate는 원자로 상부헤드의 pad에 볼트로 연결되며, supporting column은 bottom ring plate와 연결된다. CEDM plenum plate는 CEDM coil 주위로 냉각공기를 안 내하고, CEDM 냉각 슈라우드를 지지하기 위해 CEDM 냉각 슈라우드의 바닥 높이에 위 치한다. 냉각 슈라우드에는 CEDM, HJTC 및 원자로배기계통 배관 플랜지의 배기, 검사, 유지 및 연결 등과 공기의 흡입을 위한 개구부(opening)가 존재한다.

2) 인양 프레임 집합체

이 집합체는 3개의 main columns, tripod legs, lifting blocks, clevis들과, 한 개의 lifting eye 및 shackle로 이루어져 있다. main column의 하부 끝은 원자로 상부헤드의 lift lug 와 연결되어 있으며, 다른 한쪽인 상부 끝은 송풍기 지지프레임의 lift block과 연결되어 있다. main column, pin 및 lift lug는 크레인으로 원자로 상부헤드를 포함한 일체형 원자 로상부구조물을 들어낼 때 인양 프레임과 원자로 상부헤드 사이의 하중 전달경로가 된다. Tripod assembly는 송풍기 지지 프레임 위의 lifting block과 핀으로 연결되어 있다.

3) CEDM 냉각 계통

이 계통은 3대의 냉각 송풍기와 송풍기 지지 프레임 및 상부 공기 plenum으로 이루어 졌으며, 냉각 송풍기는 정상운전 시 CEDM이 제 기능을 유지할 수 있도록 CEDM과 원 자로 상부헤드로부터 나오는 열을 제거하도록 설계된다. 냉각 송풍기는 송풍기 지지 프레 임에 의해 지지되고 송풍기 지지 프레임은 원자로상부헤드를 포함한 IHA 인양 시 tripod leg사이에 적당한 각도를 유지하도록 spread bar 역할을 한다. 상부 공기 plenum은 송풍 기 지지 프레임을 싸고 있으며, 냉각 송풍기로 들어가는 공기를 분배해 줄 수 있는 충분 한 공간을 갖는다.

정상운전 시 냉각 송풍기 3대 중의 2대가 작동되며, 각각의 냉각 송풍기는 CEDM 냉각 공기를 제거하기 위한 50% 용량을 갖고 있다. 냉각 송풍기는 송풍기 운전 및 냉각 성능 에 대한 정보를 감지하는 계측장치를 갖고 있으며, 송풍기의 진동을 흡수할 수 있는 isolator가 설치된다.

4) 비산물 차폐체

비산물 차폐체는 원자로 상부지역에서 예상되는 CEDM의 비산으로부터 보호되도록 IHA내부에 설치되며, NUREG-0800에 따라 설계된다. 비산물 차폐체는 main column과 level nut 및 lift nut에 의해 연결되며, 송풍기 지지 프레임과 연결된다. 5) 상부지역 케이블 계통

원자로 상부지역 케이블 계통은 다음과 같은 것들을 포함하고 있다.

- CEDM power/RSPT cables, ALMS/LPMS cables, HJTC cables
- Messenger wires
- Refueling disconnect panels(RDP)
- Messenger wire support beams

RDP는 IHA에 2개가 있으며, 케이블 connector가 여기에 부착된다. Messenger wire는 CEDM 압력 하우징의 위쪽에 설치되며, IHA 내 원자로 상부헤드 부분의 케이블들을 지지하고 배선(routing)하는 역할을 한다. 이 messenger wire는 support beam에 wire의 조정이 가능하도록 하기 위해 turn buckle을 사용하여 연결되어 있다. Messenger wire는 핵연료 재장전 기간 동안에 접근하여 CEDM의 배기를 수행할 수 있는 높이를 고려하여 설계되었다. 각 케이블들은 IEEE 384 요건에 맞도록 배선되었다.

6) IHA 내진지지 계통

IHA 내진지지 계통은 다음과 같은 것들을 포함하고 있다.

- CEDM seismic cap plate
- Seismic baffle stiffener ring
- Seismic stiffener plates and beams
- Seismic ring beams
- Seismic restraints

IHA 내진지지 계통은 CEDM을 수평방향으로 서로 연결하는 지지물로써 수평방향의 지 진하중이 가해졌을 때 CEDM → CEDM seismic cap plate → seismic baffle stiffener ring → seismic stiffer plate/beam → seismic ring beam → seismic restraint → refueling pool wall의 순서로 하중이 전달된다. CEDM의 수직방향 열팽창을 구속하지 않 기 위해 CEDM seismic cap plate 사이에 적절한 간격을 유지하도록 요구된다.

Seismic restraints는 seismic ring beam과 pool wall의 bracket을 연결한다.

7) 원자로 배기계통 배관 지지대

원자로 배기계통 배관 지지대는 IHA 내부에 있는 원자로 상부헤드 배기 배관에 대한 지지구조물이며, 이 배관 지지구조물은 main column에 설치된다. 이 배관은 IHA가 원자

로 상부헤드와 함께 원자로로부터 분리되기 전에 IHA 외부의 배관과 연계되는 플랜지에 서 분리된다.

8) 단일 스터드 인장기 운전을 위한 monorail 및 부속물

이 구조물은 발전소 가동중 및 핵연료 재장전시에 단일 스터드 인장기를 사용할 수 있 도록 IHA에 영구 부착되어 있다.

9) 원자로 상부헤드 단열재 연계설계

Davis Besse 원전의 원자로 상부헤드 손상에 따른 원자력 안전전문위원회 결정사항인 원자로 상부헤드에 대한 육안 검사 시행을 위한 검사장비 및 검사원의 접근을 위해 원자 로 헤드의 단열재를 6 inch 만큼 위로 올렸으며, 접근성 향상을 위해 IHA의 아래 부분에 door를 설치하였다.

3. 유동 해석

일체형 원자로상부구조물 내부에 있는 CEDM coil이 정상적으로 작동 될 수 있도록 충 분한 냉각공기를 공급해야 하고, 균등한 냉각공기의 흐름을 보장해야 하는데, 이를 위해 냉각 송풍기를 일체형 원자로상부구조물의 꼭대기에 설치하여 일체형 원자로상부구조물 의 중간위치에 있는 공기 흡입구를 통해 들어온 공기를 배플을 통해 송풍기로 흡입시켜 외부로 내보내는 형식을 취하였다(그림-2참조).

1) 유동분포해석

일체형 원자로상부구조물 내의 공기가 유동저항에 의해 국부적으로 차이가 나지 않고 골고루 분포되어 각 CEDM에 흡입되는 것을 확인하기 위해 유동분포해석을 수행하였다. 이 유동해석은 FLUENT⁴¹를 이용해 3차원으로 해석하였다. 이를 위해 일체형 원자로상부 구조물의 내부를 다공성 매질로 모사하여 높이에 따라 5개의 체적으로 구분하여 각 체적 별 유동저항을 계산하였다. 이 해석 시 구조가 복잡한 CEDM 냉각 슈라우드 영역의 축 방향 유동저항을 예측하기 위해 한 개의 CEDM 냉각 슈라우드에 대한 유동해석을 수행 하였고, 이때 횡방향 유동은 발생하지 않도록 하였다. 실제 각 CEDM은 슈라우드에 의해 분리되어 있어 횡방향 유동은 존재하지 않는다. 높이별로 나눈 5개 체적의 축방향 유동저 항은 각 영역의 레이놀드 수와 마찰계수 및 수력학적 직경(hydraulic diameter)을 사용 해 계산하였고, CEDM 냉각 슈라우드 영역을 제외한 나머지 영역의 횡방향 유동저항을 계산하기 위해 5개의 연속한 튜브군(tube bank)에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 유동해석을 위한 FLUENT의 입력모델은 그림-3과 같다. 이 모델을 이용해 유동분포해 석을 수행한 결과 CEDM 냉각 슈라우드의 유동저항이 매우 커서 압력강하의 대부분이 여기에서 발생하고, 나머지 영역에서 유동저항이 일부 차이가 나더라도 그 영향이 미미하 여 전체적인 냉각 공기의 분포는 상당히 균일함을 알았다. 그밖에 CEDM 냉각 슈라우드 하나 당 냉각 유량은 최소 요구유량에 비해 최소 10%이상의 여유 유량을 갖도록 설계되 었다.

2) 압력강하 해석

일체형 원자로상부구조물의 공기 유동에 의한 유동경로 별 압력강하 및 전체 압력강하 를 계산하였는데, 전체 압력강하는 냉각 송풍기 선정의 입력 자료로 사용되기 때문이다.

이를 위해서 일체형 원자로상부구조물을 8개의 구간으로 나누어 계산하였으며, 그림-2 에 이에 대한 위치가 대략적으로 나타나 있다. 각 구간별 압력손실은 유동해석을 통해 계 산된 CEDM 냉각 슈라우드의 축방향 유동저항, lower plenum에서의 유동 저항, 유동의 입구 및 출구 효과, 90° 굴절, 팽창 및 수축시의 유동저항 등을 고려하여 계산하였으며, 운전조건에 따라 기준조건, 최대 조건, 3대의 냉각 송풍기 동시 운전 조건 등의 3가지 경 우의 압력손실을 계산하였다.

압력강하 해석결과 압력손실의 대부분이 CEDM 냉각 슈라우드에서 발생한다는 것을 알 았으며, 이로 인해 각 냉각슈라우드 유량은 큰 차이가 없이 균일한 분포를 나타낸다는 것 을 알았다(그림-4 참조).

4. 구조해석

일체형 원자로상부구조물의 구조적 건전성을 확인하기 위해 그림-5와 같이 일체형 원자 로상부구조물의 유한요소모델(finite element model)을 작성하였으며 ANSYS⁵⁾를 사용하 였다.

1) 해석모델

IHA의 main column은 원자로 상부헤드 인양 시 하중 전달경로이며, 원자로 상부헤드 및 IHA 구성품들의 모든 하중을 지지하는 역할을 하고, support column은 bottom ring plate 위에서 IHA 주요 계통을 지지하고 있다. 전체적으로 main column이나 support column은 보요소로, plenum plate나 비산물 차폐체 같은 형태는 shell 요소로 모델링하였

다. CEDM은 실제의 73개 CEDM과 동등한 동특성을 갖는 축소 CEDM 모델을 개발하여 이를 IHA 해석모델에 도입시켰다. 그리고 CEDM seismic cap plate의 최적 설치위치를 찾아내기 위해 원자로용기와 CEDM 계통의 변수변화에 의한 분석을 통해 지지위치를 먼 저 선택한 후 제어봉 삽입요건 및 응력에 대한 만족 여부을 확인하여 지지위치를 결정하 였다⁶.

IHA 내의 케이블과 messenger wire 및 냉각 송풍기는 집중질량으로 모델링하였으며, plenum plate는 공기구멍이 일정한 형태로 배열됨에 따라 ligament 효율을 고려한 등가 탄성계수⁷¹를 계산하여 이를 입력으로 사용하였다.

IHA 경계요건으로서 main column과 head pad 연결부는 모멘트만을 허용하도록 구속하였고, seismic restraint는 재장전 수조 벽에 핀 연결로 구속하였다.

그리고 구조해석 이외에 개발된 유한 요소모델을 이용하여 IHA가 원자로 상부헤드와 함께 핵연료 재장전 기간 중 저장대에 저장되어 있을 때 지진 발생 시 기울어짐(tipping) 이 발생하는 가를 확인하기 위해 시간이력 해석을 수행하였고, 핵연료 재장전 시 원자로 상부헤드와 일체형 원자로상부구조물이 원자로용기로부터 해체 후 저장대로 이동시 낙하 사고에 대한 영향을 평가하기 위해 집중질량모델을 개발하여 이로 인한 원자로내부구조 물 및 핵연료집합체의 건전성을 평가하였다⁸⁾.

2) 해석 방법 및 해석 결과

그림-6은 일체형 원자로상부구조물의 모드해석 결과 중 주요 거동을 나타내는 1차 모드 를 보여주고 있다. 이 모드에서 볼 수 있는 것처럼 일체형 원자로상부구조물은 보와 같은 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 이 일체형 원자로상부구조물의 응답스펙트럼 해석을 위 해 원자로 냉각재계통의 해석을 통해 구한 운전기준지진(Operating Basis Earthquake)과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake) 및 분지관 파단(Branch Line Pipe Brake)에 의한 하중을 입력하중으로 사용하였다. 감쇠비는 Regulatory Guide 1.61⁹¹에 따라 사용하 였으며, 안전정지지진과 분지관 파단 하중은 제곱근의 제곱합(Square Root of Sum of Square)에 의해 합산되었다. 모드조합방법으로는 모드해석결과를 고려하여 cut-off frequency이하의 많은 모드들이 서로 근접하게 존재하고 있으므로 SRP 3.7.2¹⁰⁰에 따라 grouping method를 사용하였다. 응답스펙트럼을 통하여 각 부품에 가해지는 하중과 응력 을 구하여 이를 허용응력과 비교함으로써 부품의 건전성을 확인하였는데, 여러 주요 부품 중 해석결과 인양시 주하중 경로가 되는 main column의 응력여유가 최소 30%이상이 됨 을 알 수 있었다.. 일체형 원자로상부구조물이 원자로 상부헤드와 함께 저장대에 놓여 있을 때 안전정지지 진에 의해 기울어짐이 발생하지 않음을 시간이력해석을 통해 확인하였으며, 원자로 상부 헤드와 일체형 원자로상부구조물 낙하사고 시 원자로내부구조물 및 핵연료집합체의 건전 성이 유지됨을 확인하였다.

5. 결론

일체형 원자로상부구조물은 신고리 1,2호기와 신월성 1,2호기에 국내 최초로 설치될 부 품이다. 이 부품은 기존 한국표준형원전에 존재하는 복잡하고 거대한 원자로상부구조물을 없애고 일체화시킴으로써 핵연료 재장전 기간을 4~5일 줄일 수 있어 경제적인 이득이 있 을 뿐 아니라, 이들 기존 부품들을 위한 저장 공간이 없어짐으로써 공간 활용에 대한 여 유를 가질 수 있고, 여기에서 작업하는 종사자들에 대한 작업시간을 줄여 방사선 피폭량 을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있다.

일체형 원자로상부구조물의 구조해석과 유동해석을 통해 일체형원자로의 부품설계와 건 전성을 확인하였고, 일체형 원자로상부구조물과 원자로 상부헤드가 함께 저장대에 놓여 있을 때 지진에 의해 기울어짐이 발생하지 않으며, 이동 시 낙하사고에 의해 원자로내부 구조물 및 핵연료집합체가 건전성을 유지하고 있음을 모델개발을 통한 해석에 의해 건전 성을 확인하였다.

참고 문헌

- 1. 신고리1,2호기 예비 안전성 분석보고서, 제 9장, 한국수력원자력(주).
- 2. 신월성1,2호기 예비 안전성 분석보고서, 제 9장, 한국수력원자력(주).
- 3. Simplified Head Assembly Design & Implementation, ICONE-8477, 2004. 4
- 4. Fluent 5 User's Guide, Fluent Inc. 1998.7
- 5. ANSYS revision 5.5 User's manual, SASI, 1998
- Seismic Response Characteristics of the Combined System Composed of the Primary System and the Multiple Secondary Systems, Choon-Eon Jin, In-Yong Kim, Sung-Ho Park, PVP. Vol.387, ASME
- 7. ASME Sec. III, Div. 1, Appendix A-8000, Stresses in Perforated Flat Plate
- 8. KSNP+ 원자로덮개 5.5m 수직낙하 시 원자로내부구조물 건전성 평가, 남궁인 외 3인,
 추계 기계학회 학술발표 논문집, 2003.10
- 9. Regulatory Guide 1.61, 1973.10, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plant"
- 10. Standard Review Plan 3.7.2, "Seismic System Analysis"



그림-1 신고리 1,2 및 신월성 1,2호기의 일체형 원자로상부구조물



그림-2 일체형 원자로상부구조물 제어봉 구동장치 냉각공기 유동도



그림-3 일체형 원자로상부구조물 유동분포해석을 위한 Fluent code 입력모델



그림-4 일체형 원자로상부구조물 CEDM 냉각 슈라우드에서의 유속 분포



그림-5 일체형 원자로상부구조물 동적해석을 위한 입력 모델



그림-6 일체형 원자로상부구조물의 1차 모드 형태