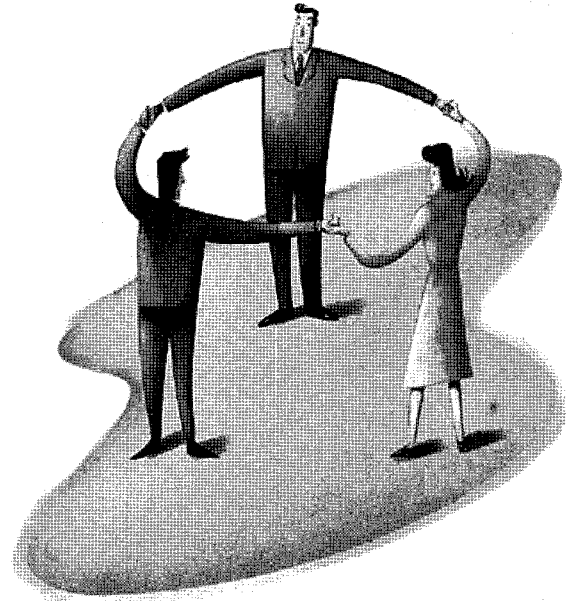


개선형 한국표준 원전 설계

양준석 | 한국전력기술(주) 원자력 설계 개발단 상무
백종만 | 한국전력기술(주) 원자력 설계 개발단 부장
윤호택 | 한국수력원자력(주) 신고리 1,2 사업관리 실장

1. 서론

우리나라는 1978년 고리1호기 상업운전 이후 지속적으로 원자력발전소의 건설을 추진하였으며 현재 20기의 원전이 운영중이고 4기의 원전이 건설 중이다. 국내 원자력산업 초기에는 기반기술의 부족으로 대부분의 기술을 외국 업체에 의존하였으나 그 후의 기술자립 정책의 지속적인 추진으로 한국표준형원전(Korean Standard Nuclear Power Plant: KSNP) 효시인 영광3,4호기(YGN3&4)를 국내업체 주도로 성공리에 완수하였고, 이어 건설된 울진 3,4호기는 국내 기술진에 의해 개발된 표준화사업 결과를 전면적으로 반영함으로써 명실 공히 1,000 MWe급 한국표준형원전으로 자리 잡게 되었다. 또한, 울진3,4호기의 후속 호기인 영광5,6호기 및 울진5,6호기에 한국표준형원전 설계를 반복 적용함으로써 가압경수로 1,000MWe급 원전에 대한 경제성, 기술성 및 국산화율을 향상시키는 효과를 얻게 되었다. 그러나, 울진3,4호기, 영광5,6호기 및 울진 5,6호기가 연속적으로 건설되면서 사업공정의 탄력



성 부족과 설계개선 및 건설물량 감소의 한계성으로 인해 한국표준형원전의 반복 건설에 따른 사업비절감 효과는 거의 임계점에 도달하게 되었으며 후속원전에 대한 더 이상의 사업비 절감은 기대하기 힘들어지게 되었다.

한편, 최근의 국제적 경제 환경은 WTO 체제의 출범과 시장의 완전 개방 등으로 무한 경쟁시대에 돌입하게 되었으며 원전 건설 또한 국내외적으로 치열한 경쟁을 피할 수가 없게 되었다. 이러한 여건 변화에 적극적으로 대처하기 위해서 지금까지 이룩한 기술자립 능력과 건설 및 운전 경험을 바탕으로 기존 한국표준형원전의 설계개념을 재정립하여 선진화되고 고도화된 새로운 원전모델의 개발이 불가피하게 되었다. 이러한 필요에 따라 지금까지 추진되어 온 부분적 설계개선을 탈피하여 종합적인 설계개선으로 한국표준형원전의 기술성과 경제성을 제고하여 국제 경쟁력이 향상된 원전 설계모델을 개발하기 위한 목적으로 한국표준형원전 설계개선사업을 통해 개선형 한국표준원전(KSNP+)을 개발하게



되었다.

본 논문에서는 개선형 한국표준형원전의 개발 및 주요설계 특성을 검토하고 현재 건설 추진 중인 신고리1,2/신월성12호기에 반영된 내용을 제시하기로 한다.

2. 개선형 한국표준형원전(KSNP+) 개발

한국표준형원전의 참조설계모델인 영광3,4호기와 영광3,4호기 참조설계모델인 System 80 설계간의 주요 설계변수는 표 1과 같다.

영광3,4호기는 System 80 설계를 참조로 한 1000 MWe급 가압경수로이며 원전 설계 참여 및 기술전수 계약을 통하여 원전설계의 기술자립 기반을 구축하는 계기가 된 한국표준형원전의 태동호기이며 한국표준형원전은 영광3,4호기를 참조 모델로 원전설계 표준화사업을 통해 도출된 설계사항 반영 및 울진3,4호기 사업을 통해 완성된 1000 MWe급 가압경수로 발전소이다. 현재 한국표준형원전은 영

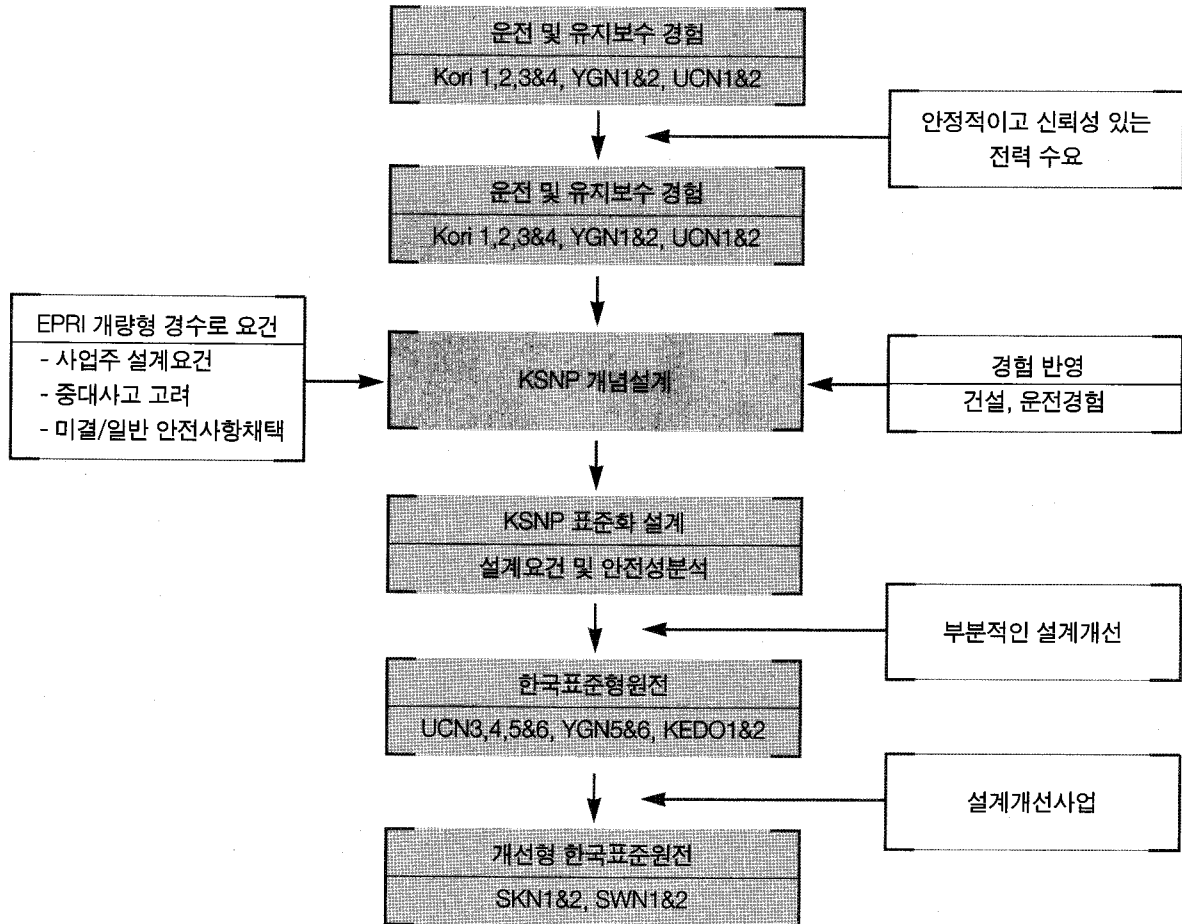
광5,6호기 및 울진5,6호기를 포함하여 총 6기가 운영 중에 있다. 개선형 한국표준형원전(KSNP+)은 한국표준형원전의 설계, 건설 및 운영 중에 발생된 경험을 토대로 안전성을 유지하고 경제성을 확보할 수 있도록 추진하였다(그림 1 참조). 이를 위해 설계개선사업을 추진하게 되었으며 설계개선은 한국표준형원전 설계 대비 전반적인 설계개선을 수행하였기 때문에 그 사업의 복잡성과 규모를 고려하여 3단계로 구분하여 추진하였다.

1단계는 한국표준형원전의 설계, 건설, 운전 및 유지보수 경험에 근거하여 안전성을 포함한 기술성, 건설성, 운전성 및 경제성을 향상시킬 수 있는 개선항목을 도출하고 검토하여 모든 설계분야의 설계개념을 정립하는 단계로서 1998년 1월부터 1년 동안 수행되었다. KSNP+에 적용할 설계개선사항을 도출하기 위해 기존 국내외 가동원전과 한국표준형원전 선행호기의 설계, 구매, 건설, 운전 및 유지보수 경험을 통해 설계개선이 필요하다고 판단되는 항목을 한수원, 한기, 시공업체 및 제작업체 등 관련기관에서 요구한 설계개선사항들을 개략 검토 대상으로

표 1 _ 주요 설계변수 비교

설계변수	YGN3&4	System 80
열출력, MWt (원자로냉각재펌프 열출력 포함)	2825	3817
전기출력, MWe	1000	1300
원자로냉각재펌프 열출력, MWt	10	17
고온관 온도, oF	621.2	621.2
저온관 온도, oF	564.5	564.5
냉각재 평균온도, oF	592.9	592.9
원자로냉각재계통 냉각재 유량, lb/hr	121.5x10 ⁶	164.0x10 ⁶
증기발생기 이차측 압력, psia	1070	1070
증기발생기 관폐쇄율,	%	82

■ 그림 1_ 개선형 표준원전 개발 과정



하였으며 상세 검토 대상은 설계 적용 시 개선효과가 확실할 것으로 기대되는 항목, 적용에 따른 설계, 구매 또는 시공 영향이 매우 커서 신고리1,2호기/신월성1,2호기 건설사업 착수 이전에 적용성이 결정되어야 할 항목들로 제한되었다. 선정된 설계개선 과제별로 사업 적용 시 예상되는 기술성, 인허가성, 건설성 및 경제성 효과와 문제점들을 검토하여 KSNP+에 적용여부를 평가하였다.

2단계에서는 1단계에서 정립된 설계개념을

KSNP+에 적용할 수 있도록 상세설계기준을 수립하고 1단계에서 도출된 개선항목들의 설계 시현성 및 시공성을 검증하며 관련 기본설계 및 일부 상세설계를 개발하는 단계로서 '99. 10월에 착수하여 약 2년 동안 수행되었다.

3단계는 KSNP+의 상세설계 및 건설이 진행되는 신고리1,2호기/신월성1,2호기 건설단계로서 1, 2단계 개발 결과를 모두 반영하여 실질적으로 KSNP+를 실제 사업을 통해 구현하는 단계이며 신



고리1,2호기/신월성1,2호기는 2002년 8월 계약이 체결되어 건설 중이다.

3. 개선형 한국표준형원전의 설계특성

개선형 한국표준형원전은 설계, 구매, 건설 및 운전 경험을 설계에 반영하여 수행중에 있으며 설계개선 과제를 통해 채택된 설계개선의 주요 내용은 크게 건물배치 최적화, 계통설계 최적화 및 국산화, 구조물설계 최적화, 건설공기 단축 등으로 구분하여 특성을 고찰하였다.

3.1 건물배치 최적화

한국표준형원전의 건물 배치는 그림 2에서와 같이 2호기의 보조건물, 출입통제건물 및 방사성폐기물건물을 1개의 복합건물로 통합 배치하였으나, KSNP+의 건물배치는 그림 3에서와 같이 본관건물 배치형태 최적화를 위해 방사성폐기물 터널 삭제를 포함하여 지하공동구를 최단거리에 배치하였고, 배관, 케이블 및 공조덕트 등을 최단거리에 배치하여 건물체적 및 시공물량을 현저히 감소시켰다. 그

리고, 양호기 동시접근 및 주제어실 인접배치, 보조 건물, 원자로건물, 핵연료건물 및 복합건물 운전 층의 층고 일치, 양호기의 출입통제 기능과 방사성폐기물처리 기능의 통합, 승강기 운전구간 확장 및 추가 설치, 1차 시료채취실과 방사화학실험실의 근접 배치, 터빈건물 운전층의 하역 공간 및 천정크레인 운전구간 확장 등의 운전 보수성을 고려한 건물 및 기기 배치설계를 개선하였다. 또한, 방사선피폭 저감을 고려한 건물 및 기기 배치를 위해 방사성유체 계통 필터실과 고준위폐기물 저장지역을 상하층에 인접배치, 방사성기기공작실을 복합건물 내부에 배치, 합리적피폭최소화(ALARA) 개념을 적극적으로 반영한 건물 및 기기 배치 등의 설계개선을 하였으며, 발전소 종사자 및 방문자 동선을 고려한 건물 및 기기 배치를 위해 주제어실과 원자로건물 및 핵연료 건물 작업자 동선 개선, 작업자 동선과 방문자 동선의 물리적 분리 등의 설계개선 사항을 반영하였다.

3.2 계통설계 최적화 및 국산화

3.2.1 원자로 계통설계 최적화 및 국산화

화학체적제어계통은 원자로냉각재계통의 화학 및 냉각재 재고량을 조절하는 기능을 수행하며, 영광

그림 2 _ 표준원전 건물배치

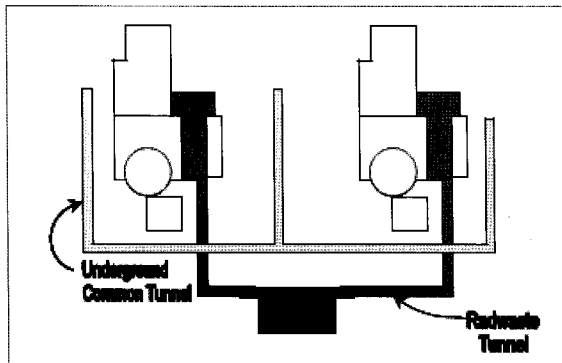


그림 3 _ 개선형 표준원전의 건물배치

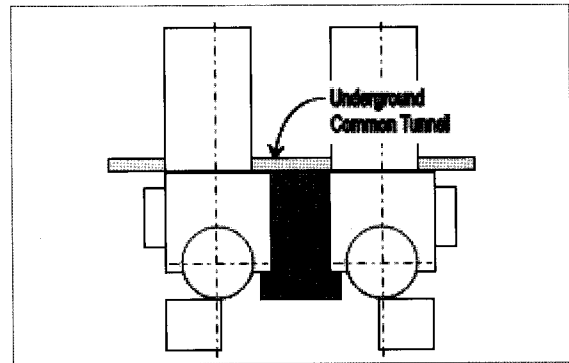
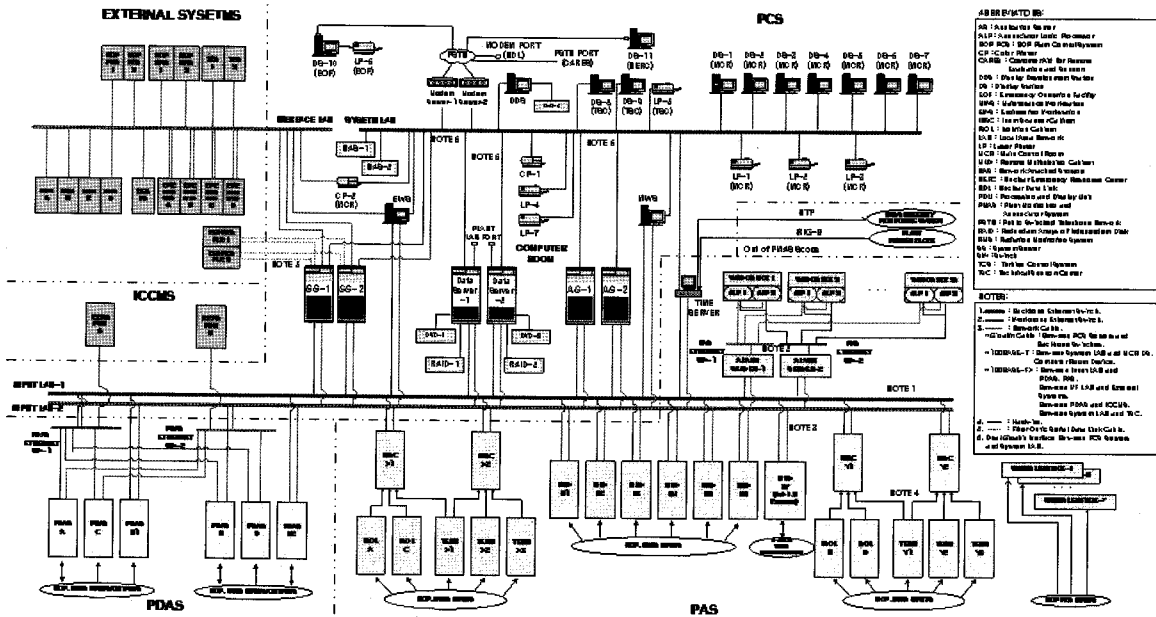


그림 4 _ 발전소감시경보계통 구성



3,4호기에서 참조 설계로 적용하였던 1,300 MWe 급 미국 팔로버디 원전과 동일 용량의 대형 탱크를 1,000 MWe급의 표준원전에 적합한 용량으로 변경하고, 동 계통의 기기에 대하여 그 기능과 안전상의 중요도를 고려하여 안전 및 품질등급을 조정하는 등 계통설계 최적화를 수행하였다.

또한 발전소의 운전상태를 실시간으로 감시하는 발전소감시계통과 발전소 이상상태 발생시 운전원에게 경보를 제공함으로써 발전소를 안전하게 운전할 수 있도록 하는 발전소경보계통을 발전소감시경보계통(PMAS)으로 통합하여 국산화하는 대형의 설계 개선이 채택되었다(그림 4 참조). 통합계통의 시험성 검증을 위하여 다채널설비(Multi Channel Facility)가 제작되어 중요 기능에 대한 시험이 이루어졌고 시험 과정에서 도출된 문제점들에 대한 대안을 도출함으로써 원전 건설 공기 준수와 향후 발전소

의 실제 운전을 안정적으로 수행할 수 있는 기반을 구축하였다. 이 설계개선은, 외국사에 의하여 공급되던 발전소감시계통의 국산화 기반을 마련하였다.

노심보호연산기 계통은 발전소의 핵심인 원자로 심의 상태를 감시하고 이상 발생시 원자로를 정지시키는 기능을 수행한다. 이 계통에 대한 설계개선은 구형의 컴퓨터를 신형으로 교체하면서 표준원전은 채널 B 및 C에만 위치하던 제어붕위치연산기(그림 5 참조)를 채널 A, B, C 및 D에 별도로 설치하고 이를 이중화하여(그림 6 참조) 계통의 신뢰성을 향상시켜 이미 차세대 원전의 안전성 및 신뢰성 목표치에 근접한 표준원전의 안전성을 한 차원 더 향상시킬 수 있게 되었다.

한국표준형원전의 원자로상부구조물은 여러 개의 부품들로 구성되어 있어, 핵연료 재장전 시 원자로 헤드의 해체 및 인양 시 여러 단계의 복잡한 작업들이 선행되어야 하므로 핵연료 재장전 작업을 장기간



그림 5 _ 표준원전 노심보호연산기계통

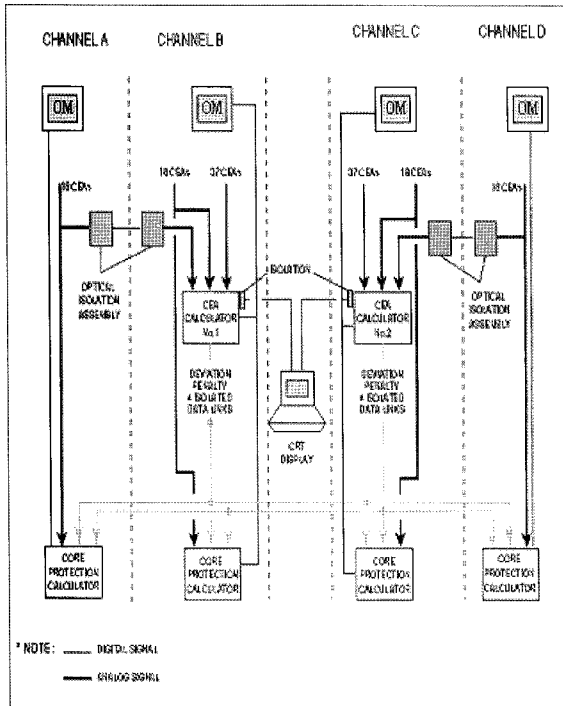
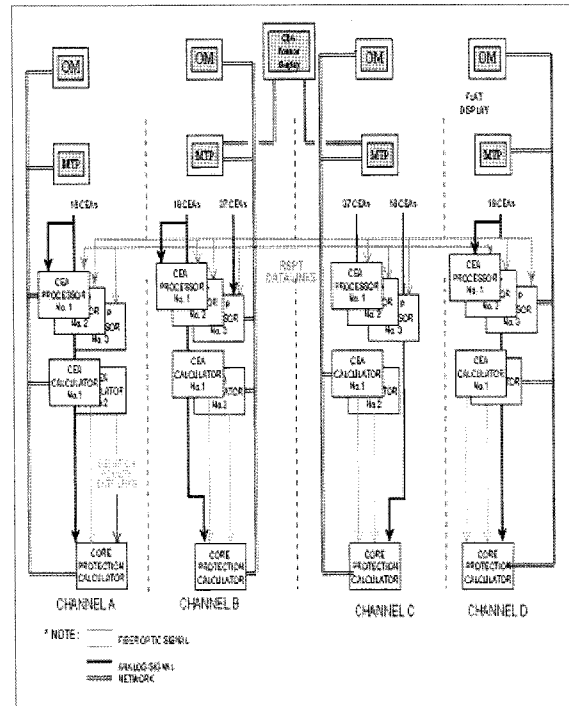


그림 6 _ 개선형 원전 노심보호연산기계통



지연시키고 있다. 또한 작업자에 대한 방사선 피폭량도 증가시키게 되고, 격납건물 내에 제거 및 분리된 원자로 상부 구조물 부품들의 보관 장소도 준비되어야 한다. 이러한 불편이나 문제점을 최소화하기 위하여, 복잡한 원자로 상부 구조물을 일체화한 일체형상부구조물(Integrated Head Assembly, IHA) (그림 7참조)를 도입하였다. 일체형상부구조물은 원자로 헤드인양, 비산물 방호, 제어봉구동장치(Control Element Driving Mechanism, CEDM) 냉각, CEDM 내진지지, 상부케이블 지지 등의 기능을 수행하도록 설계된 각각의 부속품들이 조합되어 있고, 각각의 일체형상부구조물 부속품들은 원자로 헤드와 일체형으로 결합되어 핵연료 재장전시 한번의 인양으로 원자로 헤드를 원자로 헤드 저장대로 이동시켜 보관한다. 또한 일체형상부구조

물은 CEDM 전원 케이블, Reed Switch Position Transmitter(RSPT) 케이블 등의 원자로 상부 케이블 및 원자로냉각재가스배기계통(Reactor Coolant Gas Vent System, RCGVS) 배관의 분리 및 연결 기능을 수행하도록 설계되며, 격납건물 천정크레인파 원자로 헤드 사이를 연결한다. 단순화된 일체형상부구조물의 원자로 상부덮개 해체 작업 과정은 일체형상부구조물 상부에서 각종 케이블 분리, 원자로 상부덮개 배기계통 분리, 내진 지지대 제거, 그리고 polar crane의 일체형상부구조물 인양프레임 연결순이며, 조립 작업은 이 과정의 역순이다.

일체형상부구조물 채택에 따라 원자로 상부 구조물의 제거/설치 작업을 단순화하여 핵연료 재장전 기간 단축, 현장 작업자의 방사선 피폭량 감소, 부품 보관 장소 감소, 강철 구조물인 Head Area Cable

그림 7 _ 일체형상부구조물 설계

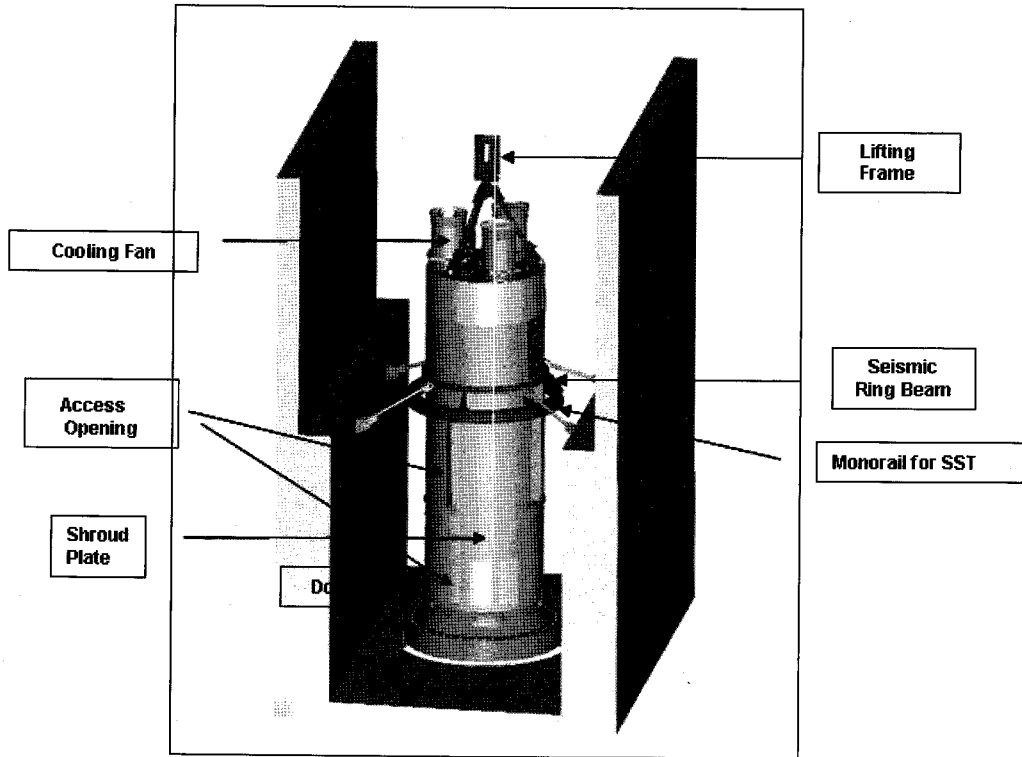


그림 7-1 _ 개선형 한국표준원전 주요기기 배치도

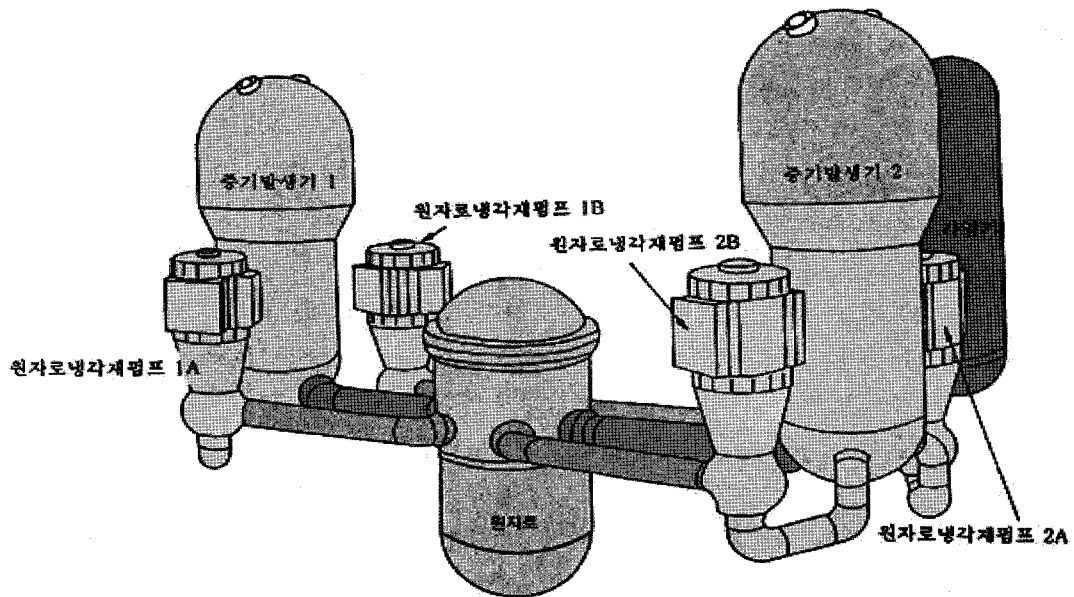
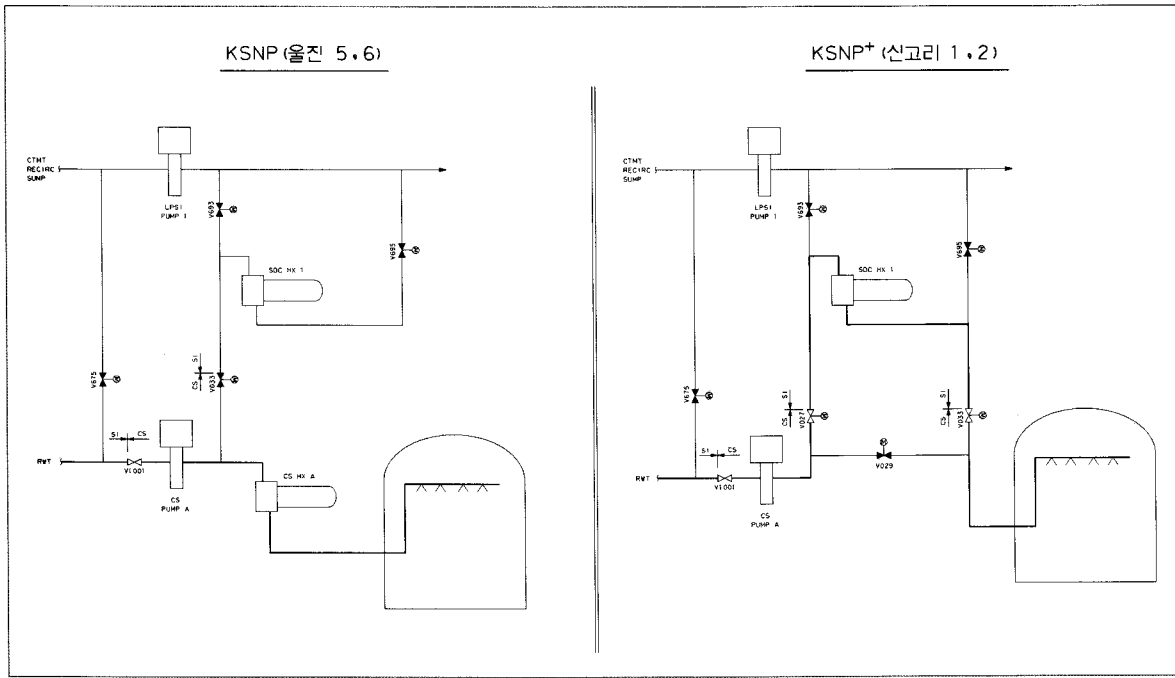




그림 8 _ 원자로건물살수계통 설계



Tray System(HACTS)의 제거로 인한 시공성 향상, 작업 위험도 감소, 그리고 설계기술 및 부품 국산화 등이다.

이외에도 노외중성자속감시계통 개선과 영구수조 밀봉체 설계의 적용을 통하여 재장전 운전기간 단축과 작업자 피폭선량 저감을 이룰 수 있게 되었고 계측제어계통에 대한 전원 이중화와 발전소시각동기화 설계 등 다양한 개선사항이 채택되어 안전성 뿐만 아니라 원전에 종사하는 운전원 및 작업자의 작업환경의 향상을 이룰 수 있게 되었다.

3.2.2 보조설비 계통설계 최적화

보조설비계통(Balance of Plant, BOP) 계통설계와 관련하여 순환수계통의 수로방식을 6열 단독수로에서 4열 공동수로로 변경(펌프 및 Travelling Screen : 6대에서 4대로 감소), 1차측기냉각수계

통에 Common Loop 개념을 적용하여 계통 최적화, 원자로건물살수계통에서 살수열교환기 삭제 및 정지냉각열교환기와 공유 등의 설계개선을 적용하였고(그림 8 참조), 설비용량 최적화 및 신기술 적용을 위해 비상디젤발전기, 1차측기냉각해수펌프, 보조보일러, 복수펌프 및 대기변압기 등의 용량 최적화, 원자로건물 수소제어 설비로 능동형 수소재결합기에서 피동형 수소재결합기로 변경, 액체방사성 폐기물계통의 원심분리기를 역삼투압 처리설비로 변경, 발전소 제어계통 제어방식으로 단일루프 대신 다중루프 채택 및 현장 다중화기기에 제어기능 부여 등의 설계개선을 통해 계통구성을 최적화하였다.

3.3 구조물 설계최적화

개선형 한국표준형원전의 구조물 설계와 관련하여

그림 8 _ 원자로건물살수계통 설계

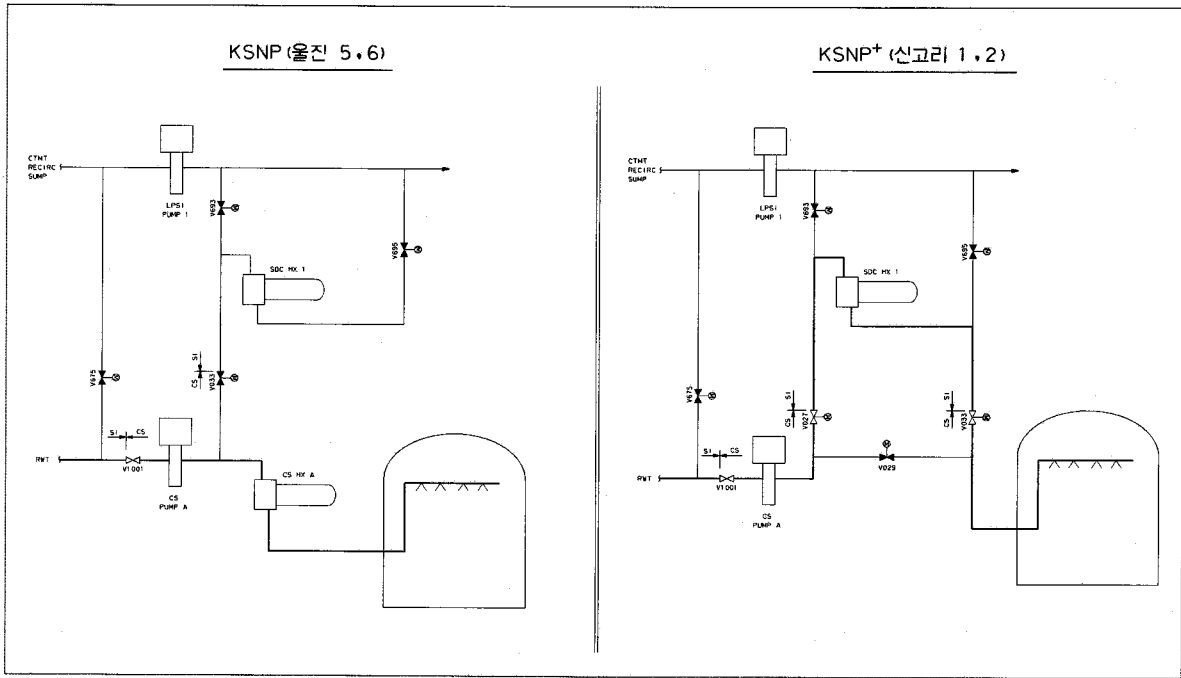
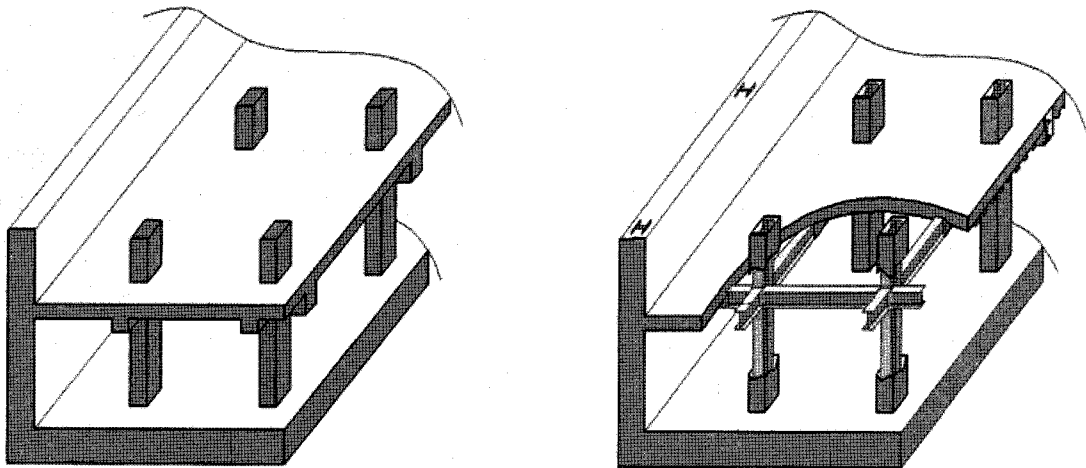


그림 9 _ 표준원전과 개선형 표준원전의 합성구조

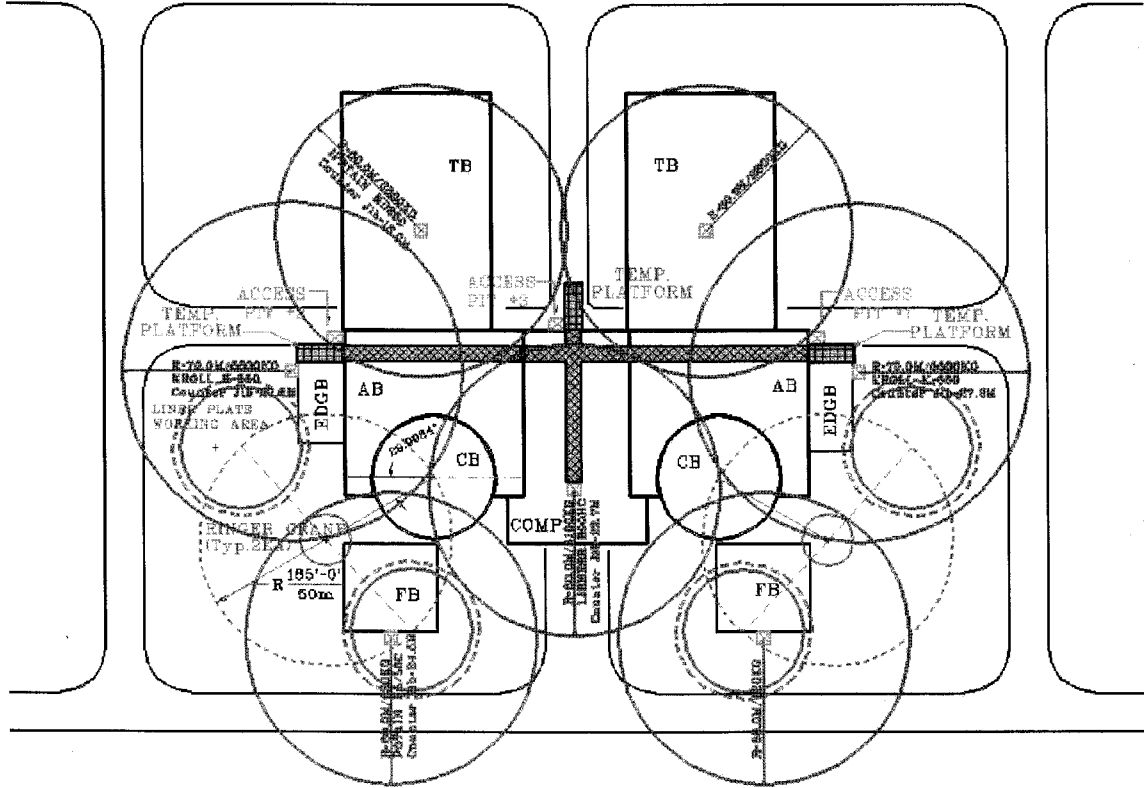


여 보조건물은 1차 보조건물과 2차 보조건물로 구성되어있고 터빈건물 및 출입통제건물과 지하 벽체를 공유하도록 설계하였으나 기기 배치 최적화를 통

해 건물의 규모를 1차 보조건물 크기로 축소하고 인접건물과도 완전히 분리된 형태로 배치하였다. 보조건물과 복합건물은 내진범주 1등급으로 수직방향



그림 10 _ Tower Crane 위치도



하중을 전달하는 기둥 및 거더는 철골부재와 철근콘크리트 합성구조(철골-철근 콘크리트 구조; 그림 9 참조)를 적용함으로써 내진 및 하중강도 증가, 부재 단면감소로 공간 활용성 증가, 건설물량 감소, Embedded Plate 삭제 가능, 지보공 및 가설지지대 물량절감 등의 효과를 기대할 수 있으며, 케이블트레이 지지대 간격 세분화, 관통부 밀봉재로 고밀도 실리콘 및 무수축 그라우트 병용 등의 설계개선을 채택하였다. 철골부재와 철근콘크리트 합성구조는 Deck Plate 공법을 효율적으로 적용하기 위한 방안이기도하다.

3.4 건설공기 단축

개선형 한국표준형원전의 건설공기 단축을 위하여 구역별 시공완료 개념을 적용하였고 이를 위해 설계/구매/시공/시운전 등의 각 업무단계를 상호 유기적으로 연계하는 업무분류체계를 개발하여 구역별 시공완료 개념이 가능토록 개선하였고 이는 건물의 한 개 층을 2-4개 구역으로 분리하여 세분화된 구역단위로 시공 Activity를 구성하여 관리하고 시공을 마감하는 방식이다. Deck Plate 공법 등 신 건설공법 및 분관 건물 시공접근성 향상을 위해 시공용 임시 통로 (Jetty) 및 가설시공용 플랫폼(Access

Pit) 설치하여 차량의 통행로를 확보하고 중량물의 이동시 소형 기기 및 자재는 Tower Crane으로 인양토록 하였으며(그림 10참조) Module화 등 시공성 향상방안을 적용하였다. 또한 원자로 냉각재 배관의 용접은 자동용접을 적용하여 용접의 품질 및 기간단축에 기여토록 하였다.

4. 결 론

개선형 한국표준형원전은 표준원전의 설계, 제작, 건설 및 운전 경험을 반영하여 안전성을 유지하고 경제성을 확보할 수 있도록 최적화된 설계 개념을 적용하고 있다. 현재 건설 중인 신고리1,2호기 및 신월성 1,2호기는 개선형 표준원전의 설계를 적용하여 추진하고 있다. 본 논문에서는 개선형 표준원전의 개발 및 설계 특성을 제시하였고 이들 설계의 주요 특성은 발전소 배치 최적화, 계통설계최적화, 구조설계최적화 및 건설공기 단축 측면에서 소개하였다.

발전소 배치 최적화는 2개 호기의 보조건물, 출입

통제건물 및 방사성폐기물건물을 1개의 복합건물로 통합 배치하였으며, 방사성폐기물 터널 삭제를 포함하여 지하공동구를 최단거리에 배치하였다. 계통설계최적화는 구조물 설계 최적화는 합성구조(철골-철근 콘크리트 구조)를 적용함으로써 내진 및 하중강도 증가, 부재 단면감소로 공간 활용성 증가, 건설물량 감소, Embedded Plate 삭제 가능, 지보공 및 가설지대 물량절감 등의 효과를 기대할 수 있다. KSNP의 건설공기 단축을 위하여 구역별 시공완료 개념을 적용하였고 Deck Plate 공법 등 신 건설공법 및 Access Pit, Jetty 및 Module화 등 시공성 향상방안을 적용하였다.

이상과 같이 개선형 표준원전의 주요 설계특성을 고찰해 본 결과, 전반적으로 성능 향상 및 안전성을 유지하고 경제성을 획기적으로 개선할 것으로 판단되며 현재 건설 중인 신고리1,2호기 및 신월성1,2호기에 이러한 특성요건들을 적절히 반영되어 설계가 진행되고 있는 바, 경제성, 안전성 및 성능 면에서 우수한 명실상부한 한국의 개선형 한국표준형원전이 될 것으로 기대된다.