



차세대 원전의 경제성 향상을 위한 설계 방안

오 승 중

한전 전력연구원 신형원전개발센터 종합분석그룹장

한 국전력공사에서는 92년부터 G-7 과제의 일환으로 열 출력 4,000MWt의 개량형 표준 신형 원자로인 차세대 원전 (Korean Next Generation Reactor, KNGR)을 개발하고 있다.

차세대 원전의 안전성과 경제성을 고려한 균형있는 설계를 위해, 설계 초기 단계부터 안전성·경제성 및 성능에 대해 주기적인 종합 평가를 수행하고 있다.

본 논문에는 차세대 원전의 경제성 향상을 위해 수행한 주요 기술적 검토 내용 및 설계 개선 사항을 기술하고자 한다.

개 요

원전의 안전성 이슈는 원자력 사업의 핵심적 관심사가 되어 향후 지속적인 에너지원으로의 존속 여부에 대한 중요한 요소가 되었다.

한편 전력 시장이 개방되어 시장 경제 논리에 의해 발전원의 선택이 좌우될 것으로 예상되는 현재 상황을 고려한다면, 각 전원별 가격 요소가 전력 공급원의 유형을 결정하는데 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다.

이러한 두 가지 필요 요건을 고려할 때, 신형 원전의 성패를 좌우하는 열쇠는 안전성과 경제성을 설계에 균형있게 반영하는 것이라고 판단된다.

이러한 설계 목표를 세우고, 한국전력공사에서는 향후 10년 내 건설 예정인 차세대 원전을 개발하고 있다.

차세대 원전은 열출력 4,000 MWt(1,450MWe)의 가압 경수로로, 1,000MWe급인 한국 표준형 원전(Korean Standard Nuclear Plant; KSNP) 설계를 근간으로 하여 System80+ 표준 원전의 원자로 설계 특성을 반영하여 개발되고 있다.

현재 운전중인 한국 표준형 원전으로는 영광 3·4호기와 울진 3호기가 있으며, 울진 4호기와 영광 5·6호기가 건설중에 있다.

차세대 원전은 안전성 향상을 위해 능동 및 피동 개념을 설계에 반영하고 있으며, 주요 설계 특성으로는 4 트레인의 안전 주입 유로, 격납 용기 내 재장전 수조(In-containment Refueling Water Tank), 안전 및 보호 기능을 일체화한 POSRV, 그리고 대형 화전 및 워크스테이션 기반의 주제어실 등이 있다.

차세대 원전 설계는 설계 개발과 병행하여 안전성·경제성·건설성 및 가동성 등을 종합적으로 분석, 평가하고 있다.

종합 분석의 목적은 안전성과 경제성의 균형을 맞추고, 분석 결과를 토대로 설계 개선을 도모하는 데 있다.

본 논문에서는 경제성·가동성 그리고 운전성 향상을 위해 이루어진

몇몇 설계 개선 사항에 대해 발표하고자 한다.

경제성 향상을 위한 설계 개선 방안

기존 원전의 설계 관행과 달리 차세대 원자로 개발시 설계 개발 단계에서부터 안전성과 경제성을 검토하여 분석 결과를 설계에 반영하고 있으며, 이를 주기적으로 수행하고 있다.

차세대 원전 설계의 안전성은 확률론적 기법으로 평가하고 있으며, 경제적인 측면은 설계 단순화 건설성 평가, 가동성 및 보수성 검토를 통해 수행하고 있다.

이와 같은 평가 및 차세대 원전의 설계 반영이 현재까지 순조롭게 진행되고 있으며, 경제성 향상과 관련된 설계 개선 방안에 대해 몇 가지 사례를 제시하고자 한다.

97년도에 실시한 제1차 경제성 평가에 대한 민감도 분석 결과를 발전소 설계와 관련하여 경제성 향상 효과를 가져오는 변수로는 이용률, 건설 사업비, 운전 유지비, 건설 기간 순으로 나타났다.

따라서 본 논문에서는 이용률을 높이기 위한 계획 정지 기간 단축 방안, 건설비를 줄이기 위한 설계 단순화 사례, ICRP-60에 기반을 두되 경제성을 유지시킬 수 있는 방사선 방호 설계, 그리고 마지막으로 건설 기간 단축을 위한 건설 공법 등에 대한

소개를 하고자 한다.

1. 계획 정지 기간 단축 방안

계획 정지 기간을 단축시키기 위한 차세대 원전의 운전중인 국내 표준 원전의 정기 보수 공정을 검토하였으며, 이를 토대로 현재 차세대 원전의 표준 공정을 개발하고 있다.

현재까지 개발된 표준 공정을 검토한 결과, 핵연료 재장전과 증기발생기 와류 탐상 시험(Eddy Current Test; ECT)이 계획 예방 정비의 주요 공정(Critical Path)으로 평가됨에 따라 두 가지 설계 개선, 즉 재장전수조의 영구 밀봉체와 일체형 상부 구조물(Integrated Head Assembly; IHA)을 차세대 원전 설계에 반영하였다.

기존 원전의 경우, 핵연료 재장전을 위한 충수시 원자로 용기와 주위의 수조 바닥 사이에 밀봉체가 설치되며, 재장전 후 정상 운전시에는 이를 제거하였다.

이러한 작업을 위해서는 원자로 용기 분해, 조립시 복잡한 과정 및 격납 건물 천정 크레인의 사용이 불가피하였으나, 차세대원전에서는 재장전수조의 영구 밀봉체를 설치함으로써, 이의 설치 및 제거 과정이 필요없게 되었다.

영구 밀봉체로 인한 원자로 공동에서의 국부적 가압의 가능성은 원자로 냉각재 배관에 파단전 누설(Leak-before break) 개념을 적용하여 제거하였다.

모든 원자로 용기 헤드 부품을 하나의 모듈로 통합시켜 일체형 상부 구조물(IHA)을 개발하였다.

IHA의 유무에 따른 원자로 용기 모형을 <그림 1>과 <그림 2>에 제시하였다.

IHA 외형은 핵연료 재장전 기간중 다중 스티드 인장기를 사용할 수 있도록 설계하였다.

이러한 설계 개선은 기존 원전에서 원자로 용기 헤드 분해에 소요되던 7일 공정을 4일로 하여 3일을 단축시키는 효과를 얻을 수 있을 것으로 검토되었다.

증기발생기 와류 탐상 시험에 대한 개선 방안은 현재 검토중에 있다.

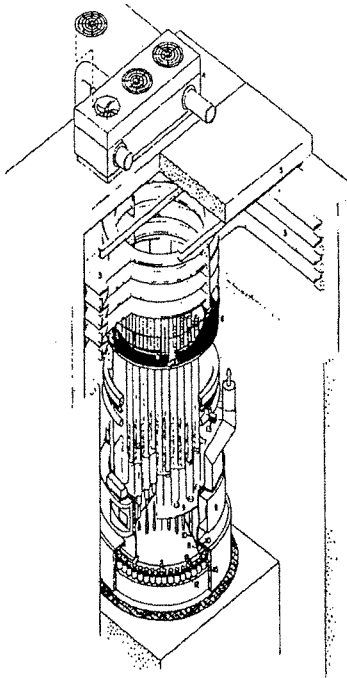
2. 설계 단순화

발전소 계통 및 건물의 최적화는 이것으로 인해 건설비에 직접적인 감소 효과를 주므로 최근의 자금난 등을 고려할 때 그 효과가 엄청나다고 할 수 있다.

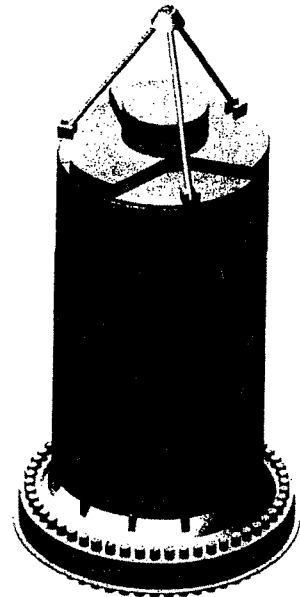
차세대 원자력발전소는 기존 호기 설계 경험과 해외 유사 발전소 설계 사례 등을 참조하여 부단한 개선 노력을 해오고 있다.

그 중 설비 개선 사례를 살펴보면 다음과 같다.

- HVAC 냉각 방식 변경 및 덕트 물량 감소
- Non 1E 디젤 발전기 제거
- 복수 저장 탱크로부터 보조 급수 탱크의 분리



〈그림 1〉 기존 원전의 원자로 용기 헤드 부품



〈그림 2〉 차세대 원전 일체형 상부 구조물

- 전 제어 계통 케이블의 MUX화로 인한 케이블 물량 감소
- 관류형 열교환기를 판형 열교환기로 교체
- 증기발생기 취출 계통의 단순화 또한 각 건물의 층고 조정, 기기 배치 최적화, 불필요한 벽체의 제거 등을 통한 건물의 체적을 대폭 감축하여, 현재 격납 건물을 제외하면 1000MWe급 표준 원전의 체적과 대등한 수준까지 축소하였다.

3. 방사선 방호

국내 규제 기관은 ALWR의 작업

자 선량 및 ALARA 분야에 ICRP-26 개정판인 ICRP-60을 적용할 계획으로 있다.

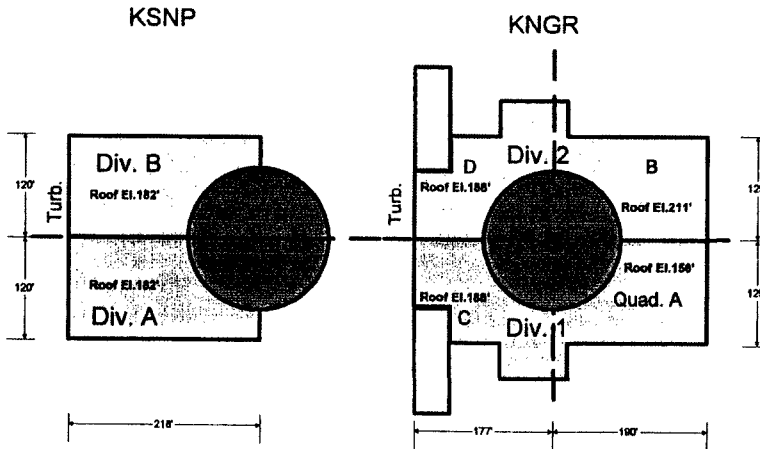
ICRP-60에서는 연간 50mSv로 제한하고 있는 ICRP-26에 비해 연간 50mSv를 넘어서는 안된다는 조건과 함께 5년 평균 20mSv/yr로 연간 작업자 개인 선량 한도를 하향 조정하였다.

ICRP-60 발간 이후, 국내 규제 기관에서는 ICRP-60 권고안을 반영한 방사선 방호 규제 요건 개발을 수행하여 왔으며, 98년 여름 신요건을 발표하였다.

신요건의 주요 특징은 ① 연간 작업자 선량 한도를 5년 평균 20mSv/yr로 설정하였고 ② 연간 선량 한도 준수보다 ALARA 요건을 더욱 강조한 것으로 요약할 수 있다.

피폭 제한 요건이 강화되면 원전 비용 상승을 야기시키며, 이러한 경제적 충격을 최소화하기 위해 방사성 구역(hot zone)과 비방사성 구역(clean zone) 구분에 관심을 기울였다.

작업자들은 출입 통제 건물(access control building)을 통하지 않고는 방사성 구역(hot zone)에서 비방사성 구역으로 들어갈 수 없도록 설계



〈그림 3〉 KSNP와 KNGR의 보조 건물 및 격납 건물 배치도

하고 있으며, 방사선 작업과 작업자 동선(movement)을 심도있게 두어 방사선 방호 설계시 핵연료 손상률을 1%에서 0.25%로 완화하여 설계 보수성을 최소화하였다.

작업자 피폭 저감은 ALARA를 위해서 뿐만 아니라, 운전 비용을 저감하기 위해서도 중요하다.

방사선 준위와 NOREM 재질 적용에 따른 효과를 정확히 평가하기 위해서, 크러드(crud) 및 방사능 누적을 평가할 수 있는 전산 코드를 개발하였으며, 이를 차세대 원전에 적용할 예정으로 있다.

상기 전산 코드를 사용하여 저코발트 재질들에 대한 적용 효과를 평가한 결과에 의하면, 증기발생기 튜브에 Inconel 690을 적용하는 것이 매우 유익한 것으로 밝혀졌다.

작업자 피폭을 저감하기 위해, 기존 원전에서 보수 작업시의 방사선 피폭 자료를 수집·분석하여, 고피폭 보수 작업을 검토하였다.

검토 결과 증기발생기 보수 작업이 가장 중요한 것으로 나타났으며, 현재 증기발생기 작업에 대해 심층 분석 및 보수 작업 시간을 단축시키기 위한 설계 개선 방안을 모색하고 있다.

현재의 설계와 적절한 운전중 ALARA 기법 적용을 가정하였을 때, KNGR 작업자 집단 선량은 약 0.88 Person-Sv/년으로 잠정 평가되었다.

이는 KNGR URD 요건인 1Person-Sv/년 이하이다.

차세대 원전에서 설계 목표를 만족하기 위해 채택한 방안을 요약하면 다음과 같다.

① 저코발트 재질 채택, 원자로 냉각재 펌프 베어링에 안티모니(Sb) 최소화, 그리고 원자로 냉각재의 pH를 6.9에서 7.4로 유지시킴으로써 크러드 발생을 억제한다.

② 보온 재순환을 위해 증발기(evaporator)를 사용하는 화학 및 체적 제어 계통을 제외하고, 방사성 폐기물 계통에 증발기 대신 이온 교환기를 사용하는 것과 같이 더욱 신뢰성 높고 단순한 기기를 사용한다.

③ 검사 및 보수 작업을 용이하게 수행할 수 있도록 증기발생기의 설계를 개선하고, 증기발생기 튜브 재질로 Inconel 690을 사용하며 잔류 응력을 최소화시키는 최신 공법으로 제작한다.

④ Drip containment, glove bags 등과 같은 도구의 적절한 사용

과 공기 중 오염 확산 방지 및 내부 피폭 최소화를 위한 적절한 환기 계통을 사용하여 공기 중 오염 관리를 효율적으로 수행한다.

⑤ 영구 및 일시 차폐를 설계에 반영하되, 가능한 한 영구 차폐로 하고, 모든 고방사선 격실 입구에 미로(Labyrinth) 설계를 고려하며, 차폐 설치 및 제거시 받는 피폭을 포함한 총피폭을 저감할 수 있는 휴대용 차폐체 사용 등을 검토하고 있다.

4. 건설성 평가

건설 공기 단축은 투자의 불확실성을 해소하고 건설 이자 절감을 통한 건설비를 저감하는 측면에서 큰 의미가 있다.

이러한 관점에서 일본 동경전력의 K-6, K-7에서 달성한 공기 단축이 좋은 본보기가 될 것으로 판단된다.

가시와자키 가리와 발전소와 웨스트링하우스사의 AP-600의 건설 공법을 참고하여, 한전에서는 차세대 원전 개발시 최신 건설 공법을 적용하기 위한 검토를 수행하고 있다.

차세대 원전의 구조물 배치를 볼 때, 보조 건물이 격납 건물을 둘러싸고 있다(그림 3).

〈그림 3〉에서 보듯이, 한국 표준형 원전에서는 보조 건물이 부분적으로 격납 건물을 둘러싸고 있다.

표준 원전 격납 건물은 여타 구조물의 큰 간섭없이 건설이 가능하였으나, 보조 건물이 격납 건물을 둘

러싸고 있는 차세대 원전 구조물 배치 설계는 격납 건물 내로 기기 이송과 설치에 면밀한 검토가 요구되어 있다.

더욱이 보조 건물 건설 공기는 격납 건물 공기와 직접 연관되어 있으므로, 보조 건물 건설 공기를 단축시키는 것이 유리한 것으로 검토되어, 이러한 관점에서 Over-the-Top 공법으로 NSSS 주기를 대형 기중기를 이용하여 설치하는 방안의 적용성을 검토하였다.

보조 건물 건설 공기를 단축시키기 위해, 지하층에 대해서는 무지보(Deck Plate) 공법을 검토하여 적용하기로 결정하였다.

기존 원전 시공 사례를 보면, 지지보(Shoring) 설치 및 콘크리트 타설에 의한 구조물 공사 완료 후 기전 분야(Mechanical and Electrical Components) 공사가 시작되었다.

기존 원전의 경우 부분적으로 무지보 공법이 적용되었으나, 차세대 원전에서는 무지보 공법을 보조 건물 지하층에 적용하고, 건설 공기 단축과 병행하여 검토하고 있다.

보조 건물 지하층은 기전 분야 설비가 밀집되어 보조 건물 지하층 공사가 주요 공기(Critical Path) 중의 하나로 무지보 공법 적용을 위해 보조 건물 바닥 높이를 조정하였다.

분석 결과, 무지보 공법을 적용할 경우 노임(Labor Cost)은 50%

가량 증가하나, 건설 공기는 2개월 가량 줄어드는 것으로 밝혀졌다.

현재 보조 건물 상층부에 무지보 공법을 적용하는 것을 검토중에 있으며, 상세한 비용-이득 분석 결과를 토대로 이에 대해 결정을 내릴 것이다.

무지보 공법의 이득을 극대화시키기 위해서는 Over-the-Top 공법에 의한 기기 모듈 설치를 병행할 필요가 있어 현재 기기 모듈화를 적극 검토하고 있으며, 현재 약 170개 가량의 모듈화 대상을 선정하여 그 효과를 평가중에 있다.

결론

지금까지 차세대 원전을 개발하면서 수행된 설계 개선 사례를 재장전수조 영구 밀봉체, 일체형 상부 구조물, 건물 및 계통의 최적화, 그리고 피폭 저감 및 건설성 제고 방안 등과 같은 경제성 향상 방안에 맞추어 발표하였다.

경제 상황, 환경 문제, 그리고 지구 온난화 등을 고려시, 균형있는 자연 자원 활용이 어느 때보다 중요한 이 시점에서, 이러한 설계 개선 사례가 한·일 원자력 산업계가 원자력이 안전하고 경제적인 에너지 원으로 계속해서 자리매김할 수 있도록 힘쓰는 데 잘 활용되길 희망한다. ☉