

특 집

원자력발전소 설계 및 기술 동향

개선형 한국표준형원전(KSNP) 사업

- Development of the Improved Korean Standard Nuclear Power Plant -



노대중*

1. 사업 추진 배경

우리나라는 부존 에너지 자원이 부족하여 전체 에너지 수요의 98%를 수입에 의존하고 있으며 1970년대 초반에 국제적인 석유 파동을 겪으면서 석유 에너지를 대체할 수 있는 원자력 에너지의 개발에 주력하게 되었다. 그 결과, 1978년에 고리 1호기가 상업 운전을 시작함으로써 원자력 발전 국가가 되었으며, 현재는 총 16기가 가동 중에 있고 4기가 건설 중에 있는 세계 주요 원자력 발전 국가로 성장하였다.

외국 기술에 종속되어 있던 우리나라의 원자력산업은 1984년에 시작된 원자력 기술 자립 계획에 따라 건설된 영광 3, 4호기가 1995년에 상업 운전에 들어가고 영광 3, 4호기를 기본 모델로 하여 건설된 한국 최초의 표준형 원전인 울진 3, 4호기가 각각 1998년과 1999년에 성공리에 상업 운전을 함으로써 기술 자립 단계에 돌입하게 되었다.

한국표준형원전(이하 '표준원전')은 한반도에너지개발

* 한국전력공사 원자력건설처 신규사업추진팀 부장

발기구(KEDO) 주관으로 북한에 건설될 원자력발전소로 선정됨으로써 안전성이 국제적으로 입증되었으며 현재 건설 중인 영광 5, 6호기 및 울진 5, 6호기를 통한 지속적인 개선 작업으로 표준원전의 설계, 제작 및 건설 기술은 기술 고도화 단계에 진입하고 있다. 단기간에 이룩된 이러한 눈부신 발전은 원자력산업계에 종사하는 구성원들의 노력과 의지 그리고 일관되게 기술 자립을 추진한 정부의 지원과 보호가 잘 조화된 결과에 따른 것이라고 말할 수 있다.

그러나, 최근의 국제적 경제 환경은 WTO 체제의 출범으로 국가간 장벽이 없어지고 모든 시장이 완전 개방되는 추세이며 원자력산업 분야도 국내외적인 치열한 경쟁을 피할 수 없게 변화하고 있다. 미국, 프랑스, 일본과 같은 선진 외국의 경우, 원전 건설이 활발하게 이루어지지 않고 있음에도 불구하고 지속적이고 적극적인 신 모델의 개발과 기존 모델의 개선 작업을 통하여 꾸준히 경쟁력을 강화하고 있으며 이미 강화된 경쟁력이 중국의 원전 시장에 나타난 바 있다. 우리나라의 원자력산업이 이러한 경쟁 환경에서 우위를 확보하기 위해서는 자립 단계에 도달한 기술 능력을 더욱

고도화하고 안전성, 기술성 및 경제성을 포함한 모든 측면에서 세계적인 경쟁력이 확보된 원전 모델을 개발해야 한다. 표준원전을 국제적인 경쟁력이 확보된 원전 모델로 변화시키기 위해서는 우선 know-why에 기초하여 독자적인 설계 개념을 재정립하여 기술을 고도화하고 20기에 달하는 원전 건설 경험 및 20여 년간의 원전 운전 경험 등을 종합적으로 설계에 반영하여야 한다. 즉, 표준원전의 개발 이후 지금까지 추진해 온 부분적인 개선 또는 개량 대신 혁신적이고 전면적인 개선을 통하여 기술성, 건설성, 경제성, 운전 및 유지 보수성이 대폭 강화된 경쟁력 있는 원전 모델로 다시 태어나야 한다. 개선형 한국표준원전(이하 '개선원전') 사업은 이러한 목적을 달성하기 위한 방안으로 한국전력공사 주도 아래 1998년부터 추진되어 왔다.

2. 개선형 한국표준원전 사업

2.1 사업 추진 단계

개선원전 사업(이하 '개선사업')은 3단계로 계획되어 추진되고 있다. 1단계 사업은 표준원전의 설계, 건설, 운전 및 유지 보수 경험에 근거하여 안전성에 부정적인 영향을 미치지 않고 안전성을 포함한 기술성, 건설성, 운전성 및 경제성을 향상시킬 수 있는 개선 항목을 도출하고 검토하여 모든 설계 분야의 설계 개념을 재정립하는 단계로써 1998년 1월부터 1999년 1월까지 1년 동안 수행되었다.

2단계 사업은 1단계에서 정립된 설계 개념을 개선원전에 적용할 수 있도록 상세 설계 기준을 수립하고 1단계 사업에서 도출된 개선 항목들의 설계 시현성 및 시공성을 검증하며 개선원전에 처음으로 적용될 구조물 및 설비들의 기본 설계와 일부 상세 설계를 수행하는 사업 단계로써 1999년 10월에 착수되었으며 2001년 10월까지 2년 동안 계속될 예정이다. 물론, 1단계 사업과 동일한 방법으로 개선 항목들을 추가로 도출하고 검토하는 업무는 2단계 사업에서도 지속적으로 추진된다. 3단계 사업은 개선원전의 상세 설계가 진행되는 신규 원전 종합 설계 용역으로써 1, 2단계 사업 결과를 모두 반영하여 실질적으로 개선형 한국표준원전을 탄생시키는 사업 단계이다. 현재까지 계획된 정부의 장기 전원 개발 계획에 따르면 신규 원전은 2008년도에 상업 운전을 개시할 예정이다.

2.2 1단계 사업 내용

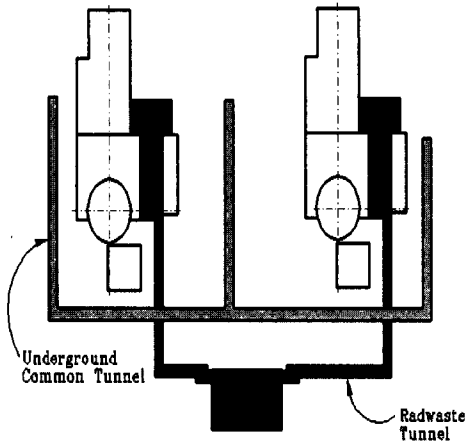
1998년 1월부터 1999년 1월까지 수행된 1단계 사업에서는 원전을 운영하고 유지 관리하는 한전, 건설회사, 기자재 제작회사 및 설계 기술자들로부터 개선이 요구되는 설계 개선 사항 323개를 도출하여 반영 효과를 검토하였으며 그 중 103개 항목을 보다 상세한 검토가 필요한 항목으로 선정하여 각 항목별로 안전성 및 기술적 측면에서의 개선 가능성, 건설 측면에서의 시공성 개선 정도, 운전 및 유지 보수성에 미치는 영향을 상세 검토하고 최종적으로 기자재비, 건설비 및 유지 관리비를 모두 고려한 경제성 효과를 분석하여 개선원전에 대한 적용 여부를 결정하였다. 각 항목별 검토 작업은 국내의 원전의 현황, 선진 외국의 최신 기술 현황 및 건설 공법, 건설 공정 등을 종합적으로 분석하여 수행되었다. 그 결과, 87개 항목이 개선원전에 적용 가능한 것으로 채택되었다. 원자력발전소는 모든 종류의 산업 기술이 적용되는 기술 집약적인 시설물이므로 개선 사항 역시 원자력, 기계, 배관, 전기, 계측, 토목, 건축 등 전 기술 분야에 걸쳐 검토되었다.

여기에서는 1단계 사업을 통하여 개선된 내용 중 발전소 배치, 구조물 분야 중 건설과 관련된 주요 개선 사항들을 종합하여 소개하고자 한다.

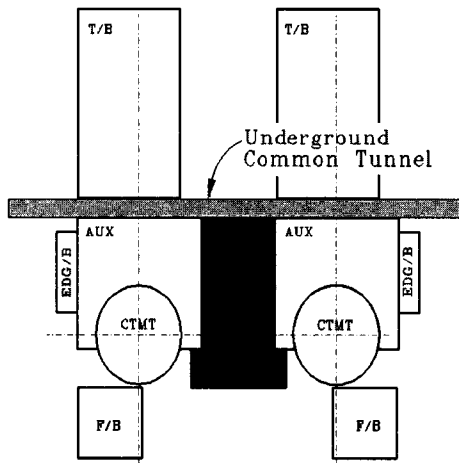
(1) 설비 배치 최적화를 통한 건물 규모 축소

원전의 건물 개수 및 크기는 건물 내부에 수용되는 각종 기기 및 설비의 크기와 배치 방법에 따라 결정된다. 선진 외국, 특히 일본의 경우, 출력을 20% 이상 격상시켰음에도 불구하고 건물의 규모는 오히려 감소된 신형 원전이 개발 완료되었음을 주목하여 건물 규모의 축소 방안을 검토하였다. 이를 위하여 표준원전의 주요 건물에 설치된 기기 및 설비의 배치를 원점에서 재검토하였으며 이를 토대로 주요 기기 및 설비의 배치를 최적화하고 유사한 기능을 갖는 건물을 통합하여 주요 건물의 개수를 15개에서 11개로 감소(2개 호기 기준)시켰으며 건물 규모(체적)도 최적화함으로써 전체 체적을 표준원전 대비 15%(약 94만 m³) 감소시켰다.

〈그림 1〉에 한국표준형 원전과 1단계 사업에서 최적화한 개선형 표준원전의 건물 배치도를 간략하게 비교 도시하였다.



울진 5, 6호기



개선형 표준원전

그림 1. 한국표준형원전과 개선형 한국표준원전의 배치도

(2) 부지 면적 최적화

원전에 대한 홍보 및 국민들의 이해 부족으로 인하여 충분한 원전 건설 부지를 확보하기 위해서는 많은 노력이 필요하고 지가 상승에 의하여 부지 매입 비용도 증가하고 있으므로 발전소의 점유 면적을 최소화하여 부지 매입 비용을 절감하고 이용 가능한 부지에 다수의 발전소를 건설할 수 있도록 부지 면적을 최소, 최적화 할 수 있는 방안을 검토하였다. 소요 부지 면적은 건물 규모의 저감 및 건물 통합 작업과 연계하여 각 건물 및 옥외 설비들의 배치 방안과 건설시의 시공 접근성 및 발전소 종사자의 동선을 종합적으로 고려하

여 산정하였으며 그 결과 부지 면적은 발전소 보호 구역 기준으로 약 18% 정도 저감 가능한 것으로 평가되었다.

(3) 구역별 시공 완료 개념 도입

원전의 각 건물에는 수많은 종류의 기기와 설비들이 설치되며 이들의 시공을 위한 시공규격서(시방서)도 20여 개에 달한다. 표준원전의 경우, 토건 공사가 완료된 이후에 시작되는 기계, 배관, 전기, 계측 기기 등의 시공은 대부분 시방서 및 계통별로 진행되었다. 이러한 시공 방식은 한 시방서 및 계통씩 순차적으로 시공이 완료된다는 장점이 있는 반면 동일 구역에서 각 시방서별로 시차를 두고 반복적으로 공사가 진행되므로 구역별 시공 공정의 확인이 어려워 효율적인 공정 관리가 곤란하며 각종 기자재의 구매 및 반입 시점의 관리도 곤란한 단점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위한 방안으로 구역별 시공 완료 개념을 도입한 공정 관리 방안을 검토하였다. 구역별 시공 완료 개념은 기본적으로 각 건물의 한 개 층을 규모에 따라 2~4개 구역으로 분할하고 각 구역별로 세분화된 시공 Activity를 수립하여 구역 단위로 시공을 완료하는 공정 관리 개념이다. 구역별 시공 완료 개념은 현재 진행 중인 2단계 사업을 통하여 구체화되고 있다.

(4) 철골 - 철근 콘크리트 합성 구조(Steel - Reinforced Concrete Structure) 적용성 확보

원자력발전소의 주요 구조물은 건물 내부의 각종 설비들을 지지하고 외부 환경으로부터 보호하는 역할 외에 건물 내부에 있는 방사능 물질이 외부로 누출되지 못하도록 건물 내부와 외부를 물리적으로 차단하여 방사선을 차폐하는 역할과 강력한 에너지를 가진 내외부 비산물이 건물 내부에 있는 중요 기기를 타격하지 못하도록 차폐하는 역할을 한다. 이러한 차폐요건이 적용되는 모든 구조물은 차폐 효과가 우수한 철근 콘크리트 구조로 설계되어 왔다. 그러나, 철근 콘크리트 구조는 특성상 하부로부터 상부로 시공을 진행하게 되고 방사선 차폐를 위하여 건물 외곽부가 벽체로 폐쇄되므로 슬래브 콘크리트 타설 후에 거푸집을 외부로 반출하기가 어렵다. 또한, 슬래브 거푸집 존치 기간 중에는 하부 공간을 이용할 수도 없고 거푸집 제거 후에도 기자재를 반입하기가 불편하다. 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 Metal Deck를 이용하여 거푸집이

나 지보공 없이 슬래브 콘크리트를 타설하는 시공 방법이 검토되었다.

그러나, 철근 콘크리트 구조에 Metal Deck를 적용할 경우, 시공 기간이 증가하고 Metal Deck를 지지하는 강재 거더와 철근 콘크리트 부재의 연결 상태가 불안정하여 적용 타당성이 없는 것으로 판단됨에 따라 뼈대를 구성하는 기둥과 거더에 합성 구조를 적용하는 방안을 검토하였다. 합성 구조는 구조적으로 철근 콘크리트와 강구조의 장점을 공유하는 구조 형식으로 지진에 대한 저항 능력이 특별히 요구되는 원전 구조물에 적합한 형식이다. 합성 구조의 적용에 따른 영향을 검토한 결과 건설 공기는 약 2개월 단축이 가능하고 직접 공사비 증가는 미미한 것으로 나타났다. 강구조 부재가 추가되었음에도 공사비 증가가 미미한 이유는 고가의 거푸집 및 지보공과 각종 설비를 지지하기 위하여 다량 사용되는 매설 철관 등의 공사비와 강구조의 공사비가 거의 상쇄되기 때문이다. 2단계 사업에서는 합성 구조의 해석 및 설계 기준을 수립하고 아울러 이를 확대 적용하는 방안을 강구하고 있다.

(5) 신 건설 공법 적용 방안 구축

원자력발전소는 대량의 냉각수원이 근처에 있고 가능하면 인구 밀도가 낮으며 지진 발생 가능성이 없는 부지에 건설해야 하므로 대부분 해안 오지에 건설된다. 이러한 지리적인 여건 때문에 고도의 품질이 요구되는 시공에 필요한 우수 건설 인력을 확보하기 어렵고 산업사회의 급격한 발전으로 인하여 일반 노무 인력의 확보조차도 점점 어려워지고 있으며 임금의 상승으로 임금이 공사비 상승 요인 중 하나가 되고 있다. 이러한 요인 외에, 첨단 건설 장비와 대형 대용량 건설 장비의 등장으로 인력을 최소화한 기계화 시공의 가능성 및 필요성이 증가하고 있다. 우리나라와 마찬가지로 바닷가 오지에 원전을 건설하고 있고 건설 노동력이 절대 부족한 일본의 경우에는 기계화 시공은 물론 철근 조립 공정과 같은 반복적인 공정에는 로봇을 이용한 시공이 일반화되어 있다. 이러한 현실을 고려하여 1단계 사업에서는 초기 설계 단계에서 기계화 시공이 가능하도록 우선 원자로 냉각재 배관과 같은 대규모 배관을 용접하는 자동용접기를 전면 적용할 수 있는 방안과 건물의 일부를 시공용 중장비의 작업통로로 활용하기 위한 시공용 플랫폼 공법의 적용성을 검토하였다. 자동용접기는 국내 원전 건설에 부분적으로

사용된 실적이 있으며 수동 용접에 비하여 공기가 짧으면서도 열 변형을 최소화할 수 있고 용접 품질이 우수하므로 고품질이 요구되는 대규모 배관의 용접에 전면적으로 적용하는 방안을 검토하였으며 2단계 사업에서는 기계 제작회사 및 유 경험 건설회사와 상세 업무를 협의할 예정이다. 시공용 플랫폼 공법은 원전 구조물의 특수성과 연관되어 있다. <그림 1>에 보인 바와 같이 원전 구조물들은 밀집 배치되고 건물의 기초 슬래브가 지하 15m 정도에 있으므로 굴착 후에는 장비의 접근이 매우 어렵다. 시공용 플랫폼 공법은 건설 장비 및 운반 장비의 접근성 제한을 해소하고 기자재의 건물 내 반입을 용이하게 하기 위하여 건물의 일정 구간을 먼저 지상 층까지 가설한 다음 가설 구조물 위로 건설 장비 및 기자재 운반 장비를 통행하도록 플랫폼을 설치하는 공법이다. 그 외에도, 원자로 및 증기 발생기와 같은 중량 기기를 양중 능력이 1,200톤 이상인 초대형 크레인을 이용하여 격납 건물 상부를 통해 설치하는 Over-the-Top 공법, 대형 크레인을 이용한 모듈화 시공 방식 등을 적용하기 위하여 대상 공종을 검토 중에 있으며 외국에서 적용된 신 건설 공법을 국내 원전에도 적용할 수 있도록 해외 원전의 건설 현황을 조사하고 있다. 특수 장비가 사용되는 건설 공법을 성공적으로 적용하기 위해서는 시공을 담당하는 건설회사의 협조가 필수적이므로 2단계 사업에서 원전 시공 경험이 있는 국내의 대형 건설회사와 협력하여 적용 가능한 건설 공법을 선정하고 체계적인 시공 절차를 수립할 예정이다.

2.3 향후 추진 방향

앞서 설명한 바와 같이 현재 진행되고 있는 설계 개선 2단계 사업이 완료되면 신규 원전 건설을 위한 상세 설계에 착수하게 된다. 모든 건설 사업이 그렇듯이 원전 건설 또한 상세 설계 착수 단계에서는 전면적인 설계 개선이나 변경은 거의 불가능하다. 따라서, 상세 설계 착수 이전까지 설계 개선과 관련된 상세 설계 기준 정립 및 기본 설계 개발 외에 배치 및 구조물 분야에 대해서는 다음과 같은 사항을 중점적으로 연구, 검토하여 그 결과를 상세 설계에 반영할 예정이다.

- (1) 시공 및 건설 관리 편리성 제고 방안

- 시공 및 건설 관리 중심의 시공용 도서 작성 및 시공 공정 개발
- (2) 품질 향상과 공기 단축을 위한 건설 공법 발굴
- (3) 온배수 영향 저감을 위한 심층 방류 기술
 - 냉각수 계통 최적 배수 방식 및 구조물 기본 설계
 - 최적 시공 공법 및 시공 방안 수립
- (4) 환경 친화적인 설계

3. 맺음말

우리나라의 원전 설계 및 건설 기술은 이전의 기술 습득 단계에서 원전 기술의 응용이 가능한 고도화 단계에 진입해 있으나 최근에 개발된 선진 외국 원전 기

술의 우수성을 고려할 때, 날이 갈수록 치열해지는 국내외적인 경쟁 환경 하에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 안전성이나 기술성 못지 않게 경제성 및 운전 유지 보수성도 획기적으로 향상된 원전 모델이 개발되어야 한다. 본 사업이 성공적으로 수행될 경우, 개선형 한 국표준원전은 국내 다른 전원 설비 대비 경쟁력의 우위를 유지함은 물론 해외 시장 진출을 위한 기반도 구축함으로써 선진 외국과 경쟁할 수 있는 토대가 확보될 수 있을 것으로 생각한다. 끝으로, 본 특집이 미력하나마 기술자 여러분들에게 원전 건설 분야에 대한 관심의 계기가 되기를 바라며 더 좋은 원전을 건설할 수 있도록 원전 설계 및 건설에 대한 전문 기술자 여러분의 아낌없는 조언과 비판을 기대한다. ☐

● 경제 숲서 해설 ●

▶ ECN(Electronic Communication Network, 전자증권거래 네트워크) :

ECN은 컴퓨터 네트워크를 활용해 주식을 매매하는 전자적인 증권거래 시스템이다. 증권회사나 언론사들이 온라인 상에서 설립하는 가상 증권거래소로서 기존 증권거래소와는 달리 실체가 없이 온라인 상에서만 존재한다. 즉, 투자자들이 인터넷을 통해 내는 매매 주문이 증권거래소를 통하지 않고 직접 ECN 시스템에서 거래가 이뤄지는 방식이다.

ECN은 신속한 거래, 낮은 수수료, 거래당사자의 익명성 보장 등의 장점이 있다. 그러나, 정부 당국으로부터 규제를 받지 않기 때문에 이를 이용한 불법, 탈법 거래가 성행할 수 있다. 또, 별도의 투자자 보호 장치가 없어 선의의 피해를 입는 투자자들이 발생할 수 있다.

▶ NTC(Non-Trade Concerns, 비교역적 고려 요소) :

농업은 경제적으로 평가할 수 없는 효과를 많이 갖고 있는 업종이다. 경제적 역할뿐만 아니라 식량 안보, 사회 안정, 환경 보전 등 비경제적인 역할을 수행하고 있다. 예컨대 쌀 농사의 경우 쌀 생산으로 인한 경제적 효과만이 중요한 것이 아니라 여름철에 비가 많이 올 때 논이 훌륭한 저수지 기능을 수행함으로써 파생하는 효과도 만만찮다.

이같은 농업 교유의 기능을 총칭해 NTC라 일컫는다.