

APR1400 개발 및 신고리 3·4호기 건설 프로젝트

오 승 중

한수원(주) 원자력환경기술원 엔지니어링지원센터 전문기술그룹장

박 기 철

한수원(주) 사업처 신고리 3·4호기 사업실장

APR1400 개발 과제는 1992년 12월부터 2001년 12월까지 9년간 국가 G-7 과제로 수행되었다. 이 과제는 정부(산업자원부) 및 국내 전 원자력 산업계가 참여하였다. 한전/한수원이 과제 주관 기관으로 기술 개발 및 총괄 업무를 수행하였다.

이 과제의 목표는 개량형 원전의 표준 설계를 개발하여 표준 설계 인가를 획득하는 것이다.

이 목표를 달성하기 위하여 개량형 원전에 대한 규제 요건, 그리고 표준 설계 인가에 대한 제도화 등이 병행되어 수행되었다.

아울러 이러한 국가 차원의 개발 과제를 통하여 국내 원자력산업의 기술 능력을 한 단계 더 향상시키는 것이 목적이다.

과제의 최종 목적인 APR1400 표준 설계 인가를 2002년 5월에 획득함으로써 이 과제를 성공적으로 완료하였다. 현재 APR1400은 신고리 3·4호기 노형으로 확정되

었으며, 현재 건설 프로젝트가 진행되고 있다.

이 논문에서는 APR1400 개발 연구에 대한 개요, 그리고, 설계 특성을 살펴보고, 현재 진행중인 신고리 3·4호기 건설 프로젝트에 대해 소개하도록 한다.

APR1400 개발 개요

APR1400 개발 과제는 9년에 걸쳐 3단계로 수행되었다. 1단계는 1992년부터 1994년까지로서, 노형 평가 및 비교 분석, 4000MWt급 개량형 원전으로 노형 확정, 설계 기본 요건 정립과 개념 설계를 수행하였다.

2단계는 1995년 3월부터 1999년 2월까지로서 설계 세부 요건 정립, 기본 설계 개발, 그리고 표준 안전성 분석 보고서(SSAR) 발행, 주기에 대한 설계 사양서 개발 및 제작성 검토를 수행하였다.

3단계는 1999년 3월부터 2001

년 12월까지 진행되었는데, 이 단계에서는 우선 안전성과 경제성이 조화된 발전소를 위한 설계 최적화를 수행하였다.

설계 최적화에 따른 표준 안전성 분석 보고서의 개정, 표준 설계 인가를 위한 인허가, 그리고 설계에 장기기간이 소요되는 설비들에 대한 상세 설계를 수행하였다.

APR1400 개발과 병행하여, 규제 측면에서 안전 규제 요건에 대한 체계 정립이 고려되었다.

안전기술원은 안전 요건 및 규제 지침을 개발하였고, 표준 설계 인가를 위한 법제화를 수행하였다. 그리고 표준 설계에 대한 안전성 심사를 수행하였다.

APR1400 설계 특성

APR1400은 4000MWt 개량형 가압경수로이다. 원자로 냉각 계통은 한국표준형 원전과 동일하게 2개의 증기발생기, 그리고 4개의 원

자로 냉각 펌프로 구성되어 있다(그림 1).

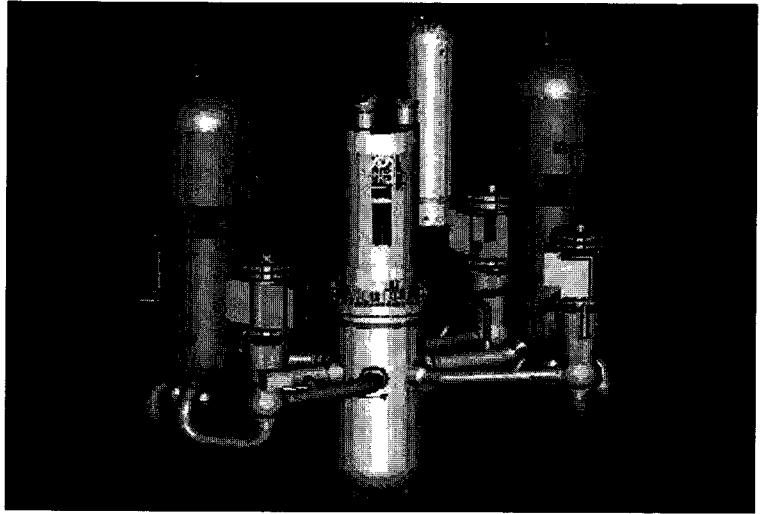
노심은 원자로 출력 증강에 따라 표준형 원전의 177개 핵연료 집합체에서 241개로 증가하였다. 정상 운전시 고온관 온도를 기존 원전의 621°F에서 615°F로 낮추어, 증기발생기 등 원자로 냉각 계통의 건전성 유지 및 수명 관리에 도움이 되도록 하였다. 가압기의 부피를 증가시켜 과도 상태에 대한 대처 능력을 향상시켰다.

개량형 원전은 경수로형 원전의 운전 및 수명 연장 경험을 반영하여 주요 설비에 대해서는 60년 수명을 요건으로 채택하여 경제적인 수명 관리를 추구하고 있으며, APR1400도 이를 채택하였다.

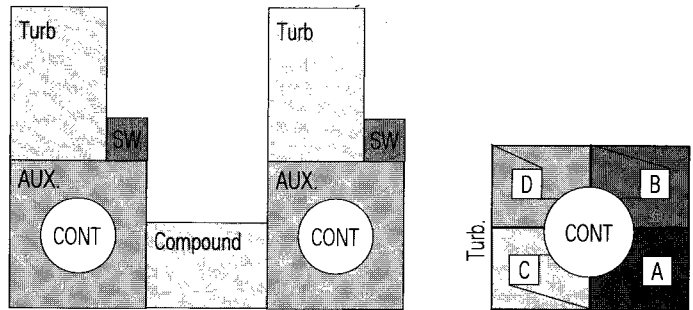
표준 설계 개념은 개개의 부지에 대해서는 최적화되지는 않더라도, 하나의 표준 설계를 반복적으로 사용하여 건설 공기 및 정비 부품 등에서 경제적 이득을 얻는 것이다.

프랑스의 경험이 보여주듯이 이러한 개념은 초기 호기는 부지 특성을 반영한 맞춤 설계보다 건설 단가가 상승하지만, 반복 건설 및 운영에 따라 그 경제성이 급격히 향상된다[1].

APR1400 표준 설계는 포괄 부지 개념에 따라 암반 및 토양 조건에서 0.3g 내진 요건을 모두 만족하도록 지진에 대한 대처 설계를 수행하였다.



〈그림 1〉 APR1400 원자로 냉각재 계통 구성



〈그림 2〉 APR1400 발전소 배치도 및 보조 건물 4분면 배치도

〈그림 2〉는 발전소 배치를 보여 주고 있다. 두 개의 발전소가 종방향 평행 이동형으로 배치되어 있으며, 양 호기 중간에 복합 건물을 배치하였다.

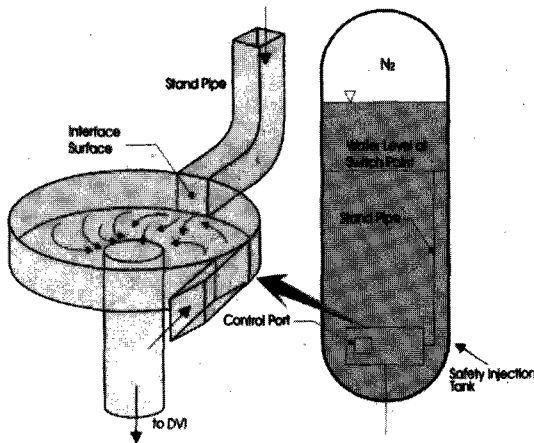
주요 기기 배치에 대해서는 3차원 CAD를 이용하여 정비 작업 및 인출 공간, 작업 동선 등의 최적화를 수행하였다.

한국표준형 원전 대비 제일 큰 차이점은 보조 건물의 4분면 배치가

다. 이는 4개 division의 안전 계통을 각각 4분면에 격리 배치함으로써 화재·홍수·지진 등 외부 사건에 대한 대처 능력을 한 차원 더 높게 향상시켰다.

적합 건물은 표준원전과 동일한 원통형 PS 콘크리트 격납 건물을 채택하였다.

안전 주입 계통은 개량형 원전 요건에 따라 4개의 기계적으로 독립된 안전 주입 계통이 원자로 강수관



〈그림 3〉 Fluidic Device 개략도

Fluidic device는 안전 주입 탱크 내의 수위가 설정치 이하로 떨어지면, 주입 유량을 감소시켜 격납 건물로 방출되는 유량을 최소화하고, 노심에 안전 주입수를 효율적으로 공급하는 장치이다. 〈그림 3〉은 Fluidic device의 개략도를 보여주고 있다.

격납 건물 내에 재장전 수조를 설치함으로써, 가상 파단 사고시 재순환 모드로의 전환 작업을 제거하여 이에 대한 대처 능력을 향상시켰다.

급속 감압 기능은 기존 PSRV형 밸브를 POSRV형 압력 방출 밸브로 변경하고, 이를 격납 건물 내 재장전 수조로 방출하여 신뢰도 및 운전성을 개선하였다.

이러한 공학적 안전 설비의 개선으로 전출력 내부 사고에 대한 노심 손상 빈도를 2.25E-6으로 낮추었다.

개량된 공학적 안전 설비의 성능에 대한 검증을 위하여 원자력연구소를 중심으로 실험을 수행하였는데 그 대표적인 실험으로 MIDAS와 VAPOR 실험을 들 수 있다.

MIDAS는 대형 저온관 파단 사고시 안전 주입수의 주입 현상에 대한 고찰을 위한 실험으로, 1/24 체적비로 축소된 실험 장치를 사용, 동등한 열수력 조건에서 우회율 등 중요 요소들을 측정하였다.

VAPOR는 실제 크기 및 열수력 조건에서 Fluidic device의 성능을



〈그림 4〉 MIDAS 실험 설비

에 직접 주입되도록 설계되었으며, 안전 주입 계통은 안전 주입 탱크와 펌프로 구성되어 있다.

확률론적 안전성 평가에 의하면 APR1400이 고압 사고 발생 확률이 높은 것으로 평가되어, 이에 대한 대처 능력을 증진시키기 위해 기

존 원전 대비 고압 안전 주입 계통의 용량을 2배로 증대하여 위험도 측면에서 최적화를 이루었다.

새로운 설비인 Fluidic device를 이용하여, 가상 파단 사고시 안전 주입수를 효율적으로 사용할 수 있도록 하였다.

검증하는 설비이다.

〈그림 4, 5〉는 이 두 실험 설비를 보여주고 있다.

개량형 원전은 설계 단계에서 중대 사고 대처 능력을 고려하도록 요구하고 있다.

APR1400은 심층 방어, 그리고 효율적인 중대 사고 관리 전략 수행을 목표로 중대 사고 대처 설비를 채택하였다.

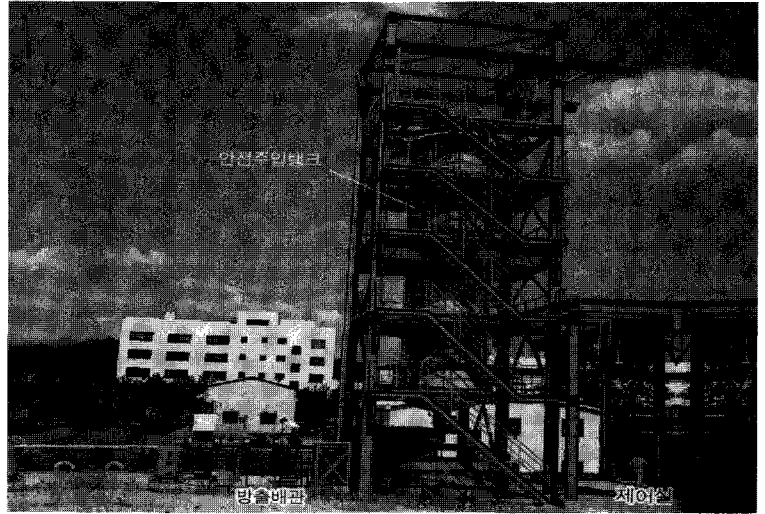
가상적인 중대 사고시 발생하는 수소의 효율적인 제어를 위해 피동형 촉매 수소 재결합기를 채택하였다.

중대 사고 관리의 효율적인 전략 중 하나로 원자로 외벽 냉각을 통한 원자로 용기의 건전성을 유지하는 In-Vessel Retention 개념을 들 수 있는데, APR1400은 이 전략이 효과적으로 수행되고 그 성공 확률을 극대화하기 위하여 외벽 냉각을 위한 충수 계통, 열차폐체 설계 개선 등을 수행하였다.

그 동안의 운전 경험, 그리고 컴퓨터 기술의 개발로 주제어실이 운전원 중심으로 운전원에게 편리하게 설계되어 가는 추세이다.

이러한 컴퓨터, 그리고 인간공학 적 요소를 반영하여, 프랑스는 N-4 발전소부터 첨단 주제어실을 개발 사용하고 있다.

APR1400에서도 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 Work station을 이용한 첨단 주제어실을 채택 개발



〈그림 5〉 VAPOR 실험 설비



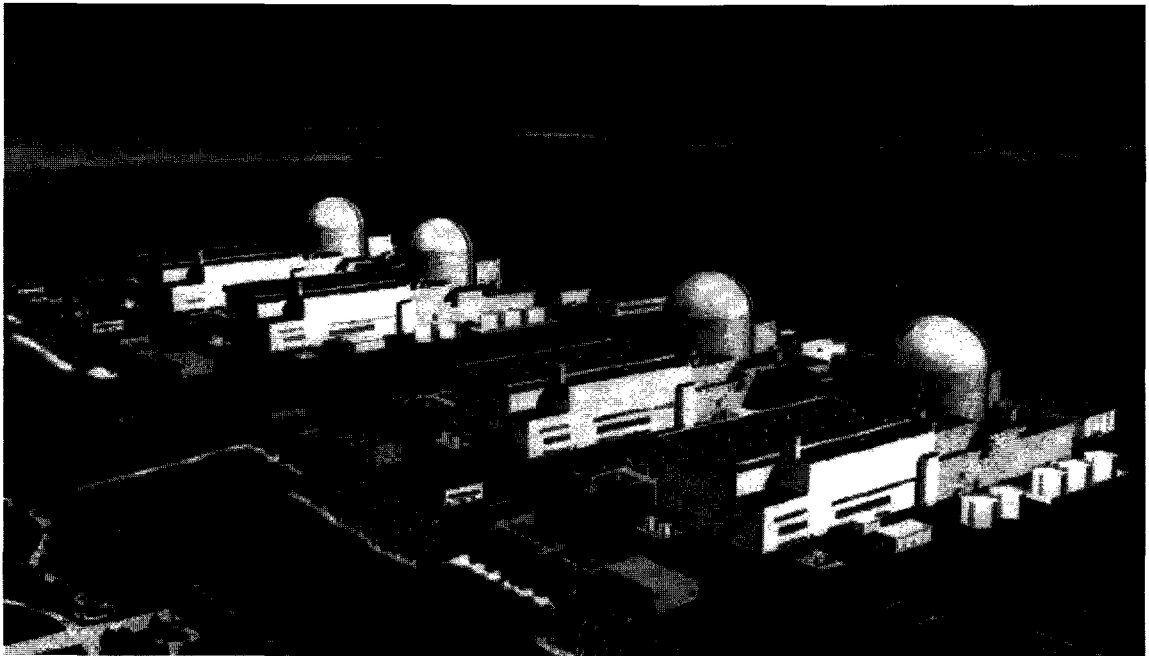
〈그림 6〉 APR1400 주제어실 조감도

하였다.

주요 구성 요소는 Work station에 의한 소프트웨어 기반 제어기, 정보를 효율적으로 제공하는 대형 정보 표시판 등이다.

그리고 심층 방어 측면에서 기존

기술에 바탕한 안전 제어반을 설치하여 운전 제어반 기능이 완전히 상실되었을 때에도 발전소의 안전 정지 능력을 확보하였다.



〈그림 7〉 APR1400 조감도

APR1400 표준 설계 인가

이미 설명한 바와 같이, APR1400 설계 개발과 연계하여, 안전기술원은 APR1400에 적용되어야 할 규제 요건 및 지침을 개발하였다.

기존 원전에 적용되는 규제 요건 및 지침, 그 동안의 운전 경험, 새로운 안전 계통에 대한 평가, 인간 공학적 고려와 주요 시스템, 기기에 대한 신뢰도 등을 검토하였다.

미국의 표준 설계 인증 제도를 검토하여 국내 실정을 반영한 표준 설계 인가 절차를 확립하였다.

표준 설계 인가는 표준 설계 부분에 대해 단일 설계 심사를 통하여 반복 건설시 간소화된 인허가 절차를 적용하여 규제의 효율화를 기하

기 위한 것이다.

APR1400 개발과 연계하여, 안전기술원은 사전 인허가 검토를 수행하여 설계자와 인허가 이슈에 대한 토의를 진행하였으며, 주요 안전 현안에 대한 검토를 하였다.

한수원은 2001년 7월에 표준 설계 인가를 신청하였다. 표준 설계 인가를 위하여 표준 설계 안전성 분석 보고서, 표준 설계 기술서, 설계·시공·성능 검증계획서, 비상 운전 절차서 등이 검토되었다.

설계 인가 과정중에 5차에 걸쳐 2251건의 질의·답변이 수행되었다. 주요 이슈로는 주제어실 설계와 관련된 인간-기계 연계 이슈, 새로운 안전 주입 계통 설계에 대한 성능, 그리고 중대 사고 대처 등이다.

APR1400은 2002년 5월에 설계 인가를 취득하였다.

신고리 3·4호기 건설 프로젝트

신고리 3·4호기는 가동중인 고리 1·2·3·4호기와 건설중인 신고리 1·2호기의 인접 부지인 울산광역시 울주군 서생면 신암리 일원에 건설되는 설비 용량 140만kW급 가압경수로형(PWR)으로 신형경수로1400(APR1400)을 최초로 적용하는 발전소이다.

2000년 1월 정부가 확정 공고한 「제5차 장기 전력 수급 계획」에 의거 발전소 건설 계획에 반영되어 있는 신고리 3·4호기는 오는 2010년 9월 및 2011년 9월 각각 준공을

목표로 건설하여 2010년대 이후의 전력 공급에 만전을 기하게 된다.

이에 따라 2001년 2월 건설 기본 계획을 확정하고, 2001년 10월에 두산중공업(주)에 원자로 설비 및 터빈 발전기를, 한국전력기술(주)에 종합 설계 용역에 대한 공급 제의 요청서를 발급하였고, 2002년 3월에 공급 제의서를 접수하여 계약을 위한 협상을 진행중이다. 이와 병행하여 주설비 공사의 시공 계약 추진을 위한 사전 준비 작업 또한 진행중에 있다.

신고리 3·4호기 공기는 건설 공기 58개월에서 신형경수로1400 노형의 최초 사업임을 고려하여 신뢰도 운전 기간을 6개월 추가 확보하여 64개월 사업 공기로 추진중이며 세부 건설 공정은 <표 1>과 같다.

신고리 3·4호기는 건설 비용을 최소화하기 위해 지금까지의 운전 및 건설 경험을 토대로 공용으로 사용할 수 있는 건물을 양호기 사이에 통합 배치하였으며, 운전 경험을 토대로 일부 펌프·탱크·열교환기 등을 제거 또는 통합하여 건물 및 설비를 최적화시켜 건설 물량의 감소를 꾀하였다.

또한 건설성 향상을 위하여 모듈 공법 등을 확대 적용하고 수직 반입 공법 등 시공 신기술도 적용토록 함으로써 후속기 반복 건설시 건설 기간 추가 단축이 가능하여 경제성이 지금보다 훨씬 향상될 것으로 기대

<표 1> 신고리 3·4호기 건설 일정

| 구분 | 기본계획 확정 | 본관 기초굴착 | 최초 콘크리트 | 원자로 설치 | 상온수압 시협 | 핵연료 장전 | 준공 |
|-----|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|----------|
| 3호기 | ● 01.2 | ○ (04.12) | ○ (05.6) | ○ (07.4) | ○ (09.1) | ○ (09.9) | ○ (10.9) |
| 4호기 | ● 01.2 | ○ (04.12) | ○ (06.6) | ○ (08.4) | ○ (10.1) | ○ (10.9) | ○ (11.9) |

된다.

아울러 발전을 위한 냉각수 및 기기 냉각용 해수 사용시 심층 취배수 방식을 도입함으로써 온배수에 의한 환경 영향을 최소화시켰으며, 취배수 구조물 구축과 관련된 일체의 해안선을 자연 그대로 유지함으로써 명실상부하게 환경 친화적인 발전소 건설을 목표로 추진중에 있다.

요약 및 결론

원자력은 한국에서의 전력 공급에 중요한 일익을 담당하고 있으며 개량형 원전인 APR1400은 우리나라의 Mid-term (2010년~2020년대) 전력 공급을 위한 선택이다.

APR1400의 개발에서의 주안점으로는 안전과 경제성의 균형된 증진, Proven technology에 의한 점진적인 개선, 그리고 국내 설계·제작 경험의 최대한 반영을 주요 요소로 추진하였다.

현재 핀란드를 선두로 원자력발전소의 신규 건설이 시작되고 있다. 또한 중국은 증가하는 전력 수요를

고려하여 4기의 개량형 원전 건설을 계획하고 있다.

미국의 에너지성(Dept. of energy)은 Nuclear Power 2010 프로젝트의 일환으로 개량형 원전의 건설을 촉진하기 위한 COL(통합 인허가) 신청에 대한 Incentive Program을 추진중에 있다.

이러한 움직임들은 향후 4~5년 사이에 세계 원자력 산업의 지각 변화를 가져올 것으로 예상된다.

따라서 APR1400의 적기 건설 및 운영은 초기 호기 건설에 수반되는 불확실성과 이에 따르는 위험을 제거하고, 국내 원자력산업이 국제 시장에서 경쟁력을 확보하는 데 일익을 담당할 수 있을 것으로 사료된다. ☞

<참고 문헌>

[1] Comparative Discussion of U.S. and French Nuclear Power Plant Construction Projects, EPRI, September 1986

[2] APR1400 설계특성 자료집, 한국수력원자력(주), 2002