



신형경수로 1400 종합 평가 결과 및 건설성 향상 방안

나장환 · 이재성 · 강용철
한국수력원자력(주) 신형원전개발센터

G-7 과제의 일환으로 1,400 MWe급 개량형 신형경수로(APR1400)의 기본 설계를 완료하고, 국내 1000 MWe급 표준 원전 후속 호기로 채택되어 건설을 위한 준비를 수행하고 있다. 신형경수로는 설계 초기 단계에서부터 안전성과 경제성을 고려한 균형있는 설계를 위해, 안전성·경제성 및 성능에 대해 주기적인 종합 평가를 수행하였으며, 본 논문에서는 기본 설계시 수행한 주요 평가 결과와 건설 및 상세 설계 단계에서의 추진 방안 등을 기술하였다.

상황을 고려시, 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 것이다.

이러한 설계 목표를 세우고, 1992년 21세기 전반기를 담당할 국가 에너지원을 위한 신형경수로 원전 개발 연구를 착수하여, 기본 설계를 완료하고 건설을 위한 기본 계획 및 상세 설계를 추진하고 있다. 신형경수로는 1,400MWe급의 가압경수로로 1,000Mwe급인 한국형 표준 원전 설계를 근간으로 하여 System 80*의 일부 설계 특성을 반영하여 개발되었다.

신형경수로 설계는 설계 개발과 동시에 안전성·경제성·건설성 및 가동성 등을 종합적으로 분석, 평가

하였다. 종합 분석의 목적은 안전성과 경제성의 균형을 맞추고, 분석 결과를 토대로 설계 개선을 도모하는데 있다.

본 논문에서는 안전성·경제성, 그리고 건설성 향상을 위해 수행한 기본 설계시의 종합 분석 결과와 경제성, 공기 단축 및 건설성 향상을 위한 개선 방안을 기술하였다.

신형경수로 1단계 개념 설계 연구에서는 안전성과 경제성을 고려한 42개항의 설계 기본 요건이 선정되었으며, 설계 전반에 걸쳐 성능을 포괄적으로 나타내는 항목인 안전성·경제성·건설성·가동성 및 방사선 방호 측면의 주요 지표는 <표 1>과 같다.

개요

TMI-2 및 체르노빌 원전 사고 이후 원전의 안전성 이슈는 원자력 사업의 핵심적 관심사가 되었다. 한편 전력 시장이 개방되어 시장 경제 논리에 의해 좌우될 것으로 예상되는

종합 안전성 평가

1. 확률론적 안전성 평가

발전소 개별 안전성 평가(IPE :

〈표 1〉 신형경수로 설계 기본 요건

항목	기본 요건	항목	기본 요건
용량 및 노형	4,000MW급 PWR	노심 손상 빈도	< 1.0E-5/Ry
발전소 수명	60년	격납 건물 파손 빈도	< 1.0E-6/Ry
설계 기준 지진	SSE 0.3g	가동률	> 90%
건설 공기	48개월(Nth 호기)	집단 작업자 선량	< 1 man-Sv/Ry
		경제성 목표	석탄 화력 대비 20% 이상

Individual Plant Examination) 등을 통해 확률론적 안전성 평가의 실효성이 입증됨에 따라 신형경수로 개발시 설계 안전성을 평가하는 기구로 채택되어 개념 설계에서 최적화 검토에 이르기까지 주기적으로 설계 안전성을 평가하였다.

울진 3·4호기 및 System 80+의 확률론적 안전성 평가 결과를 토대로 신형 경수로 원전의 안전성 향상을 위해 개념 설계 단계에서 보조 급수 계통을 보완하는 피동 이차 응축 계통 및 이중 격납 건물 등을 설계에 반영하였으며, 주요 설계 특성으로는 4트레인 안전 주입, 격납 용기내 재장전 수조(In-containment Refueling Water Tank), 안전 및 보호 기능을 일체화한 POSRV(Pilot Operated Safety and Relief Valve) 등이 있다.

기본 설계 완료 후 경제성 향상을 위해 이들 피동 계통에 대한 설계 최적화를 검토하여 대안 설계에 대해 기술성·안전성·경제성 등을 검토하여 일부 설계를 제거하였다.

외부 격납 건물 제거와 관련하여

원자로 용기 외부 냉각(ERVC : External Reactor Vessel Cooling)을 채택하여 격납 건물 안전성이 확보되도록 하였다.

전출력 노심 손상 빈도는 2.25E-6/년으로 초기 사건별 기여도를 보면 대형 LOCA 등 LOCA군에 속하는 초기 사건이 43.3%이며, 주급수 상실 사고 등 과도 사건은 전체 노심 손상 빈도의 56.7%를 차지하고 있다.

전체 노심 손상 빈도에 가장 큰 영향을 미치는 초기 사건은 주급수 상실 사고로써 전체의 20.9%를 차지하였다.

전체 노심 손상 빈도에 대해 16.4%의 기여도를 갖는 소형 냉각재 상실 사고는 전체 결과에 두 번째로 큰 영향을 주는 초기 사건으로, 발전소 정전 사고의 전체 노심 손상 빈도에 대한 기여도는 14.9%를 차지하는 것으로 나타났다.

그리고 증기발생기 파단 사고(10.3%), 원자로 정지 불능 사고(7.7%), 중형 냉각재 상실 사고(7.3%) 등이 전체 결과에 큰 영향을

미치는 초기 사건으로 파악되었다.

2. 가동률 향상

경제성 평가에 대한 민감도 분석 결과, 경제성을 확보하는 데 가장 중요한 변수가 원전의 가동성임이 확인되었다. 가동률 확보를 위해 고장 정지 및 핵연료 재장전시의 계획 정지 기간 감소 방안이 검토되었다.

계획 정지 기간을 단축시키기 위해 운전중인 국내 표준 원전의 정기 보수 공정을 검토하였으며, 이를 토대로 표준 공정을 개발하였다.

핵연료 재장전 측면에서 재장전 수조의 영구 밀봉체와 일체형 상부 구조물(Integrated Head Assembly:IHA)을 설계에 반영하였다.

IHA 외형은 핵연료 재장전 기간 중 다중 스테드 인장기를 사용할 수 있도록 설계하여, 모든 원자로 용기 스테드를 동시에 조이고 풀 수 있도록 하였다.

이러한 설계 개선은 기존 원전에서 원자로 용기 헤드 분해에 소요되던 공정을 2일 정도 단축시키는 것으로 확인되었다.

고장 정지 감소와 관련하여 1978년부터 1996년까지 국내 원전의 고장 모드 및 원인, 복구 시간 및 조치 등을 검토하여 신형경수로의 고장 정지를 평가하였다.

예로 국내 기존 원전에서 냉각재 온도 측정을 위한 RTD 우회관을 신형경수로에서는 Thermowell형으

로 개선하였다. 이러한 영향에 의해 고장 정지 빈도는 0.8회, 기간은 2.1 일/년으로 평가되었다.

신형경수로의 정상 표준 공기는 18개월로 가동성 분석 결과 37일로서 연간 24.7일로 평가되었다. 원자로 용기, 터빈/발전기 및 격납 건물 종합 누설률 검사, 증기발생기 교체 등 연장 운전과 관련한 정기 보수는 60년 수명 기간 동안 2.7일/년으로 평가되었다. 따라서 계획 예방 정지와 고장 정지를 고려한 신형경수로의 연간 정지 기간은 29.5일로 가동율 92%로 평가되었다.

3. 방사선 방호 설계

국내 규제 기관은 ALWR의 작업자 선량 및 ALARA 분야에 ICRP-26 개정판인 ICRP-60을 적용하기로 결정하였다.

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

국내 규제 기관에서는 ICRP-60 권고안을 반영한 방사선 방호 규제 요건을 개발하였으며, 주요 특징은 ① 규제의 단순화를 위해 연간 선량 한도를 20mSv/yr로 설정하였고, ② 연간 선량 한도 준수보다 ALARA 요건을 더욱 강조한 것으로 요약할 수 있다.

신형경수로 설계는 설계 및

〈표 2〉 APR1400 주요 경제성 평가 기준

경제 변수	적용 기준	경제 변수	적용 기준
가격 기준일	2001. 1. 1	설계 기준일	APR1400 기본 설계(2001. 10. 31)
할인율(년)	8%	건설 방식	2호기 동일 부지 동시 건설
적용 환율	1,300 won/\$	경제 수명 기간	APR1400: 40년, 석탄 화력 : 30년

〈표 3〉 발전원별 발전 원가 종합

구분	APR1400 1,2 (1400MWx2)	APR1400 Nth (1400MW x2)	석탄 800 (800MWx2)	석탄 500 (500MWx2)
건설 단가(X 천원/kW)	1,658	1,333	1,133	1,177
발전 원가(원/kWh)	35.89	31.65	38.06	41.20
경제성 비교(%)	5.7	16.9	기준	
	12.9	23.2		기준

ALARA 요건 만족을 위해 구조물 설계, 기기 배치 및 선원향 감소 측면에서 설계 영향을 검토하였다.

그 동안 향상된 핵연료 성능을 반영하여 0.1% 핵연료 손상률로 제한하였으며, 냉각재와 접촉하는 계통 및 증기발생기 튜브 재질로 저코발트 함유 재질을 채택하였다.

작업자 선량을 줄이기 위한 일체형 상부 구조물(IHA : Integrated Head Assembly), 100% 다중 신장기(MST : Multi-stud tensioner)를 채택하였고, 증기발생기 튜브로 Inconel 690을 적용하였다.

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

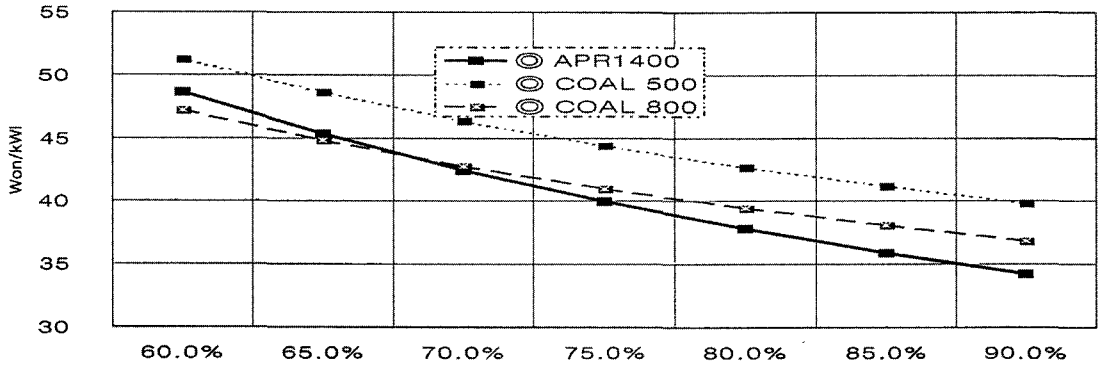
검토 결과 증기발생기 보수 작업이 가장 중요한 것으로 나타났으며,

현재의 설계와 적절한 운전중 ALARA 기법 등 적용으로 작업자 집단 선량은 약 0.48 man-Sv/년으로 설계 요건인 1 man-Sv/년 이하로 분석되었다.

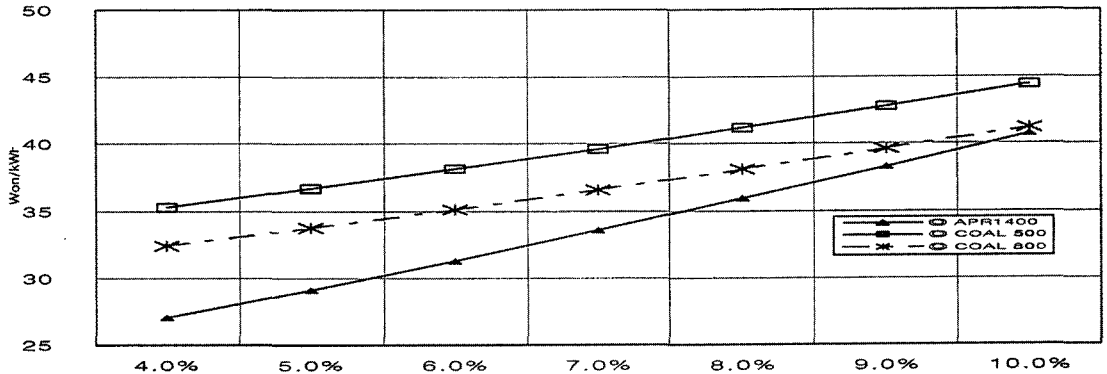
경제성 평가

신형경수로의 경제성 평가는 기술적 모델과 비용 모델을 기초로 하여 최저 필요 수입액(Minimum Revenue Requirements)에 의한 발전 원가 비교법을 적용하고, 비교 발전원은 석탄 화력 500MWe 및 800MWe급으로 하였다. 〈표 2〉는 APR1400에 대한 최종 평가 기준이다.

발전원별 건설비·고정 비율·운전 유지비 및 연료비와 최소 필요 수입법에 의해 각각의 발전 원가를 계



〈그림 1〉 발전소 이용률 변화에 따른 민감도 분석



〈그림 2〉 할인율 변화에 따른 민감도 분석

산한 결과는 <표 3>과 같다.

신형경수로 1·2호기에 대한 경제성 평가 결과, 할인율 8%, 이용률 85%에서 발전 원가는 35.89원/kWh로 비교 발전원인 석탄 800MWh 대비 5.7% 비교 우위에 있으며, 신형경수로 Nth 호기는 31.65원/kWh로 석탄 화력 500MWe급 대비 23.2%의 비교 우위에 있어 개념 설계시 석탄 화력 대비 20% 경제성 확보 목표는 충분히 달

성한 것으로 분석되었다.

신형경수로 경제성 평가는 발전 원가 비교법을 채택하고 있다. 이 방법은 미리 산정에 필요한 변수를 확정하여 발전 원가를 산정하는 것으로 선택 변수에 따라 경제성이 좌우된다.

따라서 중요한 투자 의사 결정이나 변수의 가변성에 민감한 이용률·할인율·석탄 가격 등에 대해서는 민감도 분석을 수행하였으며, 그

결과는 <그림 1, 2>와 같다.

이용률 변화에 따른 민감도 분석 결과 이용률 67.5%에서 석탄 화력 800MWe급과 경쟁력 우위가 교차되는 것으로 분석되었다.

또한 할인율 4%에서 10%까지 변할 때의 경제성 평가 결과는 <그림 2>와 같으며, 할인율 변화가 신형경수로의 경제성에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다.

석탄 수입 가격 변화에 따른 발전

원가 민감도 분석 결과 신형경수로 1·2호기는 석탄 가격 기준인 36.31\$/톤에서 15% 정도 가격 절하시 경쟁력이 교차되는 것으로 검토되었다.

건설성 평가 및 건설성 향상 방안

1. 건설성 검토

원자력발전소의 건설 공기 단축은 투자의 불확실성을 해소하고 투자 회수 기간을 단축한다는 측면에서 큰 의미가 있다. 이에 따라 원전 사업자는 건설 공기 단축을 위해 최선의 노력을 경주하고 있으며, 신형경수로의 Nth호기 건설 공기는 48개월을 목표로 추진되고 있다.

따라서 기본 설계시부터 건설 공기를 줄이기 위한 여러 설계 방안을 검토하였으며, 건설 공기 단축을 위한 주요 방안(주기기 설치를 위한 상부 반입 설치법, 보조 건물 및 복합 건물 무지보 공법)에 대하여 소개하고자 한다.

가. NSSS 주기기 설치

표준 원전에서는 보조 건물이 부분적으로 격납 건물을 둘러싸고 있으나, 신형 경수로로는 보조 건물이 격납 건물을 완전히 둘러싸고 있다.

표준 원전의 격납 건물은 여타 구조물의 큰 간섭 없이 건설이 가능하였으나, 보조 건물이 격납 건물을 둘러싸고 있는 구조물 배치로 격납 건물 내로 기기 이송과 설치에 면밀한

검토가 요구된다. 이에 따라 Over-the-Top 공법으로 NSSS 주기기를 대형 기중기를 이용하여 설치하는 방안의 적용성을 검토하였으며, 약 2개월의 공기를 단축할수 있는 것으로 검토되었다.

나. 격납 건물 및 보조 건물 구조물 설치

신형경수로의 보조 건물 및 복합 건물의 시공성 개선과 공기 단축을 위하여 무지보 공법(Deck Plate)을 적용하였고, 이러한 공법의 효과를 극대화하기 위하여 모듈화 방안을 채택하였다.

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

신형경수로에서는 무지보 공법을 보조 건물 및 복합 건물에 적용하고 기전 분야 기기를 병행하여 설치하는 방안을 검토하였으며, 무지보 공법의 이득을 극대화하기 위한 기기 모듈화와 관련 약 170개 가량의 모듈화 대상을 선정하여 검토하였다.

2. 건설 공정표 개발

신형경수로 건설 공정표는 건설 공기(F/C ~ 준공)가 48개월 및 54개월에 달성 가능한 공정표로서 궁극적으로 신형경수로 Nth호기에 48개월의 건설 공기를 만족하는 데 있다.

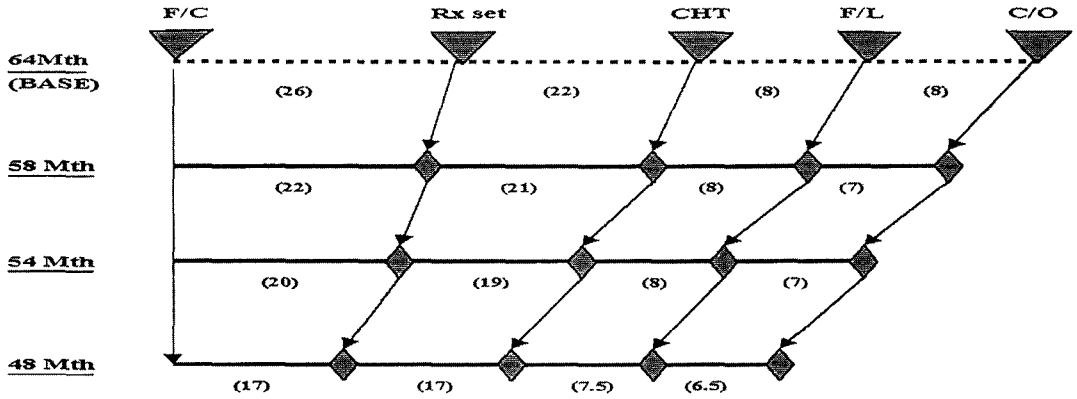
건설 공정표 개발 범위는 표준 설계 범위의 원자로 건물, 보조 건물, 터빈 건물 및 복합 건물의 시공으로 주공정(Critical path) 및 비임계 공정(Non-critical path)으로 나누어 검토하였다.

격납 건물 주공정 업무는 공동 매트 기초 공사, IRWST 설치 및 내부 구조물 공사, NSSS 주기기 및 원자로 냉각재 계통, 원자로 용기 내부 구조물 설치 및 기동 시험 등으로 구성된다.

또한 보조 건물 공사의 주공정은 건물 구조물 공사, 주제어실 기기 설치, 기전 공사 및 가압/기동 시험 등으로 구성되며, 보조 건물 전층에 대해 무지보 공법 및 모듈 공법을 적용하여 공기 단축을 도모하였다.

터빈 건물의 주요 공정은 EL. 100'까지의 구조물 공사와 터빈 Overhead 크레인 설치 공사, T/G pedestal 공사 및 고온 기능 시험 등으로 연계되는 공정이다.

그 동안 건설성 향상을 위해 적용 가능한 것으로 검토된 본관 건물 기초 공동 매트 기초 및 형상 단순화, 원자로 건물, NSSS 주기기 반입을 위한 Over-the-top 공법, 보조 건물 주공정 단축을 위한 보조 건물 전층 무지보 공법(Deck plate) 적용 및 구조물/기기 모듈화 등 신기술/신공법을 적용하고 기존 원전의 실적 공기 등을 비교 분석하여 건설 공정을 개발하였다.



〈그림 3〉 신형경수로 원전 건설 목표 공정

신형원전의 Nth 호기 건설 공정은 기본 설계 과정에서 전제되고 검토된 사항 등이 제대로 반영될 경우 목표 공기인 48개월에 건설이 가능한 것으로 검토되었다.

결론

기존 원전의 설계 개념과 달리 개량형 경수로 개발시 설계 개발 단계에서부터 안전성과 경제성을 주기적으로 검토하여 분석 결과를 설계에 반영하였다.

신형경수로 원전 설계의 안전성은 확률론적 기법으로 평가하였으며, 경제적인 측면은 건설 공정 및 비용 검토를 통해 수행하였다.

가동성 향상을 위한 계획 정지 및 고장 정지 감소 방안을 제시하였으며, 건설성 검토와 최신의 건설 공법을 적용할 수 있는 설계 개선 방안을

제시하였다.

신형경수로 원전의 안전성 및 경제성을 확보하기 위한 상세 검토가 기본 설계 단계에서 이루어졌으며, 기본 설계 이후 피동 이차 응축 계통 및 외부 격납 건물 제거 등 설계 최적화를 수행하였다.

일반적으로 신형경수로에는 중대 사고 대처 등 안전성 향상을 위해 투자비가 일부 증가되었으나, 규모의 경제성, 이용률 향상, 구조물 최적화 및 건설 공정의 단축 등으로 투자비를 상쇄하는 것으로 검토되었다.

안전성 평가 결과 노심 손상 빈도는 외부 사건을 포함한 전출력 운전 시 2.69E-6/년으로 설계 요건을 만족하며, 격납 건물 파손 빈도 경우에도 2.84E-7/년으로 1.0E-6/년의 설계 목표를 만족하는 것으로 검토되었다.

가동성 평가 결과 92%로 목표치

인 90%를 상회하며, 작업자 집단 선량은 약 0.48 man-Sv/년으로 설계 요건인 1 man-Sv/년 이하로 분석되었다.

경제성 평가 결과 신형경수로 1·2호기는 석탄 800MWh 대비 5.7% 비교 우위에 있으며, 신형경수로 Nth 호기는 석탄 화력 500MWe급 대비 23.2%로 석탄 화력 대비 20% 경제성 확보를 달성한 것으로 분석되었다.

신형경수로 원전의 건설성 검토는 48개월 시공 주공정표와 요약 공정표를 개발하였다.

모듈화 부분에 있어서는 대표 항목에 대한 상세 검토를 수행하였으나 상세 설계 및 건설 과정에서 지속적으로 추가 검토가 필요한 것으로 검토되었다.