

## APR+ 표준설계 발전원가 분석

하각현 · 김성환 · 이재호  
한수원 중앙연구원

(2014년 11월 6일 접수, 2014년 12월 12일 수정, 2014년 12월 15일 채택)

### A Generating Cost Evaluation of APR+ Standard Design

Gag-Hyeon Ha, Sung-Hwan Kim, Jae-Ho Lee  
KHNP Central Research Institute

(Received 6 November 2014, Revised 12 December 2014, Accepted 15 December 2014)

요약

한수원 중앙연구원은 2007년부터 정부과제의 하나로 전기출력이 1500MWe급인 GEN.III+ 원전 APR+를 개발하고 있다. APR1400에 비해 보다 개선된 안전성과 경제성을 갖는 원전을 개발하기 위해 국내 건설 중인 원전과 해외에서 개발 또는 건설 중인 ALWR(Advanced Light Water Reactor)의 설계내용 및 후쿠시마 원전사고로부터 도출된 개선사항을 반영하여 한국 실정에도 맞고, 해외 수출형 원전에도 부합되는 원전을 설계하고 있다. APR+의 경쟁력을 확인하기 위해 APR+ 표준설계개발 단계에서 3회의 경제성 평가를 수행하였다. 표준설계개발 단계에의 3차(최종) 경제성 평가 결과 APR+ N-th호기는 국내석탄화력 1000MWe급 대비 약 23% 경쟁력 우위인 것으로 평가되었다.

주요어 : APR+, 건설비, 운전유지비, 연료비, 발전원가

Abstract - KHNP CRI has been developing APR+ nuclear power plant since 2007, which is GEN III+ model with 1500 MWe capacity. To develop safer and more economical nuclear power plant than APR1400, we investigated advanced design features of ALWR(advanced light water reactor) being constructed in Korea and being developed/constructed in foreign countries. We applied the advanced design features and lessons learned from Fukushima accident to develop APR+ standard design suitable for both domestic construction and overseas construction business. Three economic assessments have performed during standard design phase of APR+. The result of the 3th(final) economic analysis for APR+ standard design showed that APR+ N-th plant was about 23% more economical than coal-fired 1,000MW power plant.

**Key words** : APR+, Total Capital Cost, O&M cost, Fuel Cost, Generating Cost

### 1. 서 론

#### 1-1. APR+ 원전 개발 현황

APR+원전은 개량형 원전인 1000MWe 급 OPR1000과 APR1400의 설계 및 시공에서 축적된

기술 및 경험과 해외에서 설계 또는 건설 중인 원전을 참조하여 전기출력 용량을 1500MWe급으로 하는 GEN III+급 경수로로써 기본설계(2007.9~2010.7), 표준설계(2010.7~2012.12)를 완료하고, 현재 3단계인 APR+ 설계안전성 향상 기술개발 단계(2013.1~2015.12)를 진행하고 있다. APR+ 설계기본요건 중 경제성 목표는 국내석탄화력 1000MWe 대비 20% 이상의 경쟁력 우위를 갖는 것으로 설정되었다.

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
KHNP Central Research Institute 1312 Gil 70 Yuseongdaero,  
Yuseong, Daejeon, KOREA 305-343  
Tel : 042-870-5773 E-mail : hyeon0902@khnp.co.kr

## 2. APR+ 설계특성

2011년 3월 11일 발생한 지진과 해일로 인해 일본 후쿠시마 원전에 전원공급이 끊기고 원자로 냉각 기능이 상실되어 노심용융 및 수소폭발 사고가 발생하였다. APR+는 기존의 능동형 보조급수계통을 대신하여 피동보조급수계통을 채택하였는데 피동보조급수계통은 자연대류 냉각방식에 의해 1차 측의 냉각 및 붕괴열을 제거하는 역할을 한다. 피동보조급수계통은 피동응축냉각탱크, 피동응축열교환기, 역지밸브, Class 1E급 배터리에 의해 동작되는 차단밸브, 배관, 계측제어 설비로 구성되며, 각 계열에 100%의 용량에 독립 2계열로 설계되었다.

노심출력 증가(3983→4361MWt)에 따른 주기기 설계 개선 사항으로 원자로 직경 30cm 증가, 원자로 냉각재 펌프유량 3%증가, 증기발생기 열전달면적 3.1%증가, 증기발생기 전열관 높이 1 ft 증가 등이 있다. 또한 항공기 충돌을 고려하여 안전관련건물(원자로건물, 보조건물)외벽두께를 증가시켰다. 기타 설계개선항목으로는 주증기배관에 LBB적용, 사이버보안 설계적용, 중대사고대처설계 강화 등이 있다.

또한 후쿠시마 원전사고 이후 국내 원전에 대한 점검과 설계취약점에 대한 검토가 이루어 졌으며, 안

전점검의 결과로 도출된 설계 개선사항들이 APR+ 설계에 반영되었다. 대표적인 개선사항은 자동지진정지계통(ASTS)설계, 보조건물 100' 전체출입구 및 EDG건물 출입구 방수문설계, 최종열제거설비(ESW 펌프실 등) 침수방지설계 등의 설계개선 항목이 APR+ 설계에 반영되었다.

## 3. APR+ 발전원가 산정

### 3-1. 개요

APR+ 발전원가 산정은 가격기준일 및 설계기준일을 정하고, 주요 통계자료, 설계자료를 이용하여 적용변수를 결정한다. APR+ 원전의 건설비는 신고리원전 3,4호기(APR1400) 계약자료를 근거로 물가상승률, APR1400 대비 설계변경 사항 및 후쿠시마 사고 후속대책에 따른 변경/추가 사항을 반영하여 가격기준일의 불변가로 산정하였다. 운전유지비는 10년 이상 운전 실적이 있는 국내 1,000MWe급 원전의 운전유지비 실적자료와 원전사후처리비 산정에 대한 관련 법령을 근거로 산출하였다. 원전연료비는 APR+ 노심설계를 기준으로 18개월 주기기준 연료교체 방식에 따른 재장전 모델을 수립하여 산정하였다.

### 3-2. 건설비 산정 방법

건설비는 발전소를 건설하여 상업운전하는 시점까지 소요되는 모든 자본적 지출을 말한다. 건설비는 순건설비(Overnight Cost)와 건설기간동안 투입된 자금에 대한 건설중이자(Interest During Construction : IDC)로 구성되며, 순건설비는 직접건설비, 간접건설비, 예비비로 구분할 수 있다. 직접건설비와 간접건설비는 발전소 설비에 직접 부과할 수 있는가 없는가에 따라 구분되는데 직접건설비는 대상 발전소의 형태, 설비용량 등 기술적 특성에 따라 크게 달라지며 동일 형태, 동일용량의 발전소일지라도 해당 발전소 건설사업의 부지조건 및 사업여건에 따라 가변성이 많고, 간접건설비는 일반적으로 직접건설비에 비례하지만 사업특성, 건설계약 방식등에 따라 크게 변화한다. 직접건설비는 구매비(재료비)와 시공비(노무비)로 구분되며, 간접건설비는 기술용역비, 사업주비, 부지매입비 등으로 구성된다. 순건설비는 보통 Overnight Cost라고 하며 여기에는 직접건설비, 간접건설비 및 예비비가 포함되며, 여기에 물가상승비 건설기간 중

Table 1. APR+ Design Features

구분	APR+	APR1400
설비용량	1,560 MWe	1,455 MWe
핵연료집합체수	257개(+16 FA)	241개
원자로용기(내경)	5.0 m	4.7 m
증기발생기	76.2 ft(+0.5 ft) (튜브길이방향 1ft 증가)	75.7 ft
고온관/ 저온관 온도	619 °F/557 °F	615 °F/ 555 °F
안전관련계통 구성	4 Train	Semi-4 Train
보조급수계통	피동형응축계통 2계열	능동형 4대
비상디젤발전기	4 대/호기	2 대/호기
대체교류전원 발전기	가스터빈발전기 2대	디젤발전기 1대
중대사고대처설비	IVR(In vessel Retention) +CFS(Cavity Flooding Sys)	좌동
주증기관 LBB	적용	미적용
건설공기(FC-FL, N-th호기)	36 개월	41.5 개월



Fig. 1. Composition of Expenses

지급하는 이자를 합한 것을 총건설비라 한다.

APR+ 건설비는 신고리 3,4호기(APR1400) 계약자료, APR1400 대비 주요설계변경내역, GA 변경 및 후쿠시마 사고 후속대책 설비 등을 고려하여 산정하였다. APR+ 직접건설비는 설계변경으로 인한 기자재의 가격 증감과 시공물량의 변화를 반영하기 위하여 신고리 3,4호기의 직접건설비에 용량보정계수(CSF, Cost Scaling Factor)를 적용하여 산정하였다.

$$C_2 = C_1 \times CSF = C_1 \times \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^P$$

$C_1$  : 참조발전소 기자재비 또는 시공비

$C_2$  : APR+ 기자재비 또는 시공비

$Q_1$  : 참조발전소 기기의 기술적 계수

$Q_2$  : 대상발전소 기기의 기술적 계수

p : 비용보정지수(P.F. : Power Factor)

### 3-3. 운영비 산정 방법

APR+의 운영비는 아래 그림 1에서 보는 바와 같이 크게 운전유지비, 원전연료비로 구성된다.

운전유지비는 인건비, 수선유지비, 경비, 일반관리비, 원전사후처리비, 원자력연구개발 기금(1.2원/kWh)으로 구성되며, 그중 인건비는 발전소 현장에 상주 근무하여 발전소 운전, 보수 및 행정업무 등에 종사하고 있는 발전소 종사자들의 급여, 제수당 등의

인건비를 말한다. 수선유지비는 정기적인 보수작업에 소요되는 비자산성 자재 비용인 보수자재비와 발전소 운전 보수에 소요되는 물품비용 및 장비비용 등으로 구분되고, 경비는 보험료, 인허가 비용, 관리 및 지원 등에 소요되는 기타 경비적 비용을 말한다. 원전사후처리비는 중·저준위방사성 폐기물처분비, 원전철거비, 사용후핵연료처리비 구성된다.

원자력의 연료주기는 기술적인 여건이나 정책상황에 따라 여러 가지 형태가 있을 수 있다. 국내에서는 재처리과정이 없으므로 우라늄 정광, 변환, 농축, 성형가공으로 구성되는 선행원전연료주기비만을 원전연료비로 구분하고, 후행핵연료주기비(사용후 핵연료처분비)는 운전유지비로 분류하여 처리하였다.

### 3-4. 발전원가 산정

발전설비에 대한 경제성분석에서 발전원가는 여러 가지의 대안을 비교하는 수단으로 쓰이고 있다. 발전원가란 전력이 송전계통에 연결되는 지점(Bus-bar)까지 소요되는 비용을 뜻하며, 전력이 수용가에 공급될 때까지의 비용인 전력원가와 구별된다. 넓은 의미에서 발전원가는 발전소를 건설하고 이를 운영하여 전력을 생산하는데 소요되는 총비용, 즉 발전비용을 말하며, 좁은 의미로는 단위전력량(1kWh)을 생산할 때 필요한 비용 즉 발전단가를 뜻한다.

APR+ 표준상세설계 3차 경제성 평가시의 발전원가 산정기준을 요약하면 표 2와 같다.

Table 2. Cost Estimate Bases of APR+ Generating Cost

경제 변수	적 용 기 준
가격기준일	2012.06.30
경제수명 기간	60년(원자력), 30년(화력)
감가상각법	정액법, 잔존가치 0%
할인율/이자율	6% / 5%
적용환율	1100 Won/USD
소내소비율	5%(원자력), 4%(석탄화력)
건설방식	2호기 동일부지 동시건설
N-th호기	3번째 건설되는 발전소 (APR+ 5,6호기에 해당)
연료비	우라늄구입가 : 정광 : 61.5, 변환 : 17, 농축 : 143, 가공 : 356 ○APR+ 1,2호기 : 141 개월 ○APR+ N-th호기 : 136 개월 ○석탄화력 1070MWe × 2기 : 108 개월
설비용량(gross)	APR+ : 1,560 MWe × 2기, 석탄화력 : 1,070MWe × 2기

**Table 3.** A Comparison of APR+ Generating Cost

구 분	단 위	APR+ 1st (1,560MWe×2)	APR+ N-th (1,560MWe×2)	석탄화력 1000MW (1,070MWe×2)
- 고정비	원/kWh	25.62	20.55	13.73
- 운전유지비	원/kWh	14.99	14.99	5.02
- 연료비	원/kWh	9.14	9.14	39.20
발전원가	원/kWh	49.75	44.68	57.95
비교 우위	%	14.2%	22.9%	기준

APR+ 비교 발전원인 석탄화력1000MW와 발전원가를 비교해보면, 표 3과 같이 APR+ 1st 호기는 14.2%, APR+ N-th호기는 22.9%의 석탄화력 대비 경쟁력 비교우위에 있는 것으로 평가되었다.

#### 4. 결론

APR+는 전기출력 1500MWe(열출력 4,361 MWt)급의 개량형 PWR 원전으로서 단순화, 충분한 설계여유도, 인간공학 고려, 입증기술 사용, 친환경설계, 신규요건과 신기술에 대한 관련계통 최적화를 원칙으로 설계되고 있으며, 해외의 3세대 원전과 경쟁하는 한국의 해외수출 주력노형으로서 APR+ N-th호기 기준으로 국내 석탄화력 1,000MWe급 대비 20% 이상의 경쟁력 우위를 확보하는 목표를 충족시키는 것으로 평가되었다.

본 경제성 평가는 2012년 6월 30일 불변가격과 할인율 6%, 이용률 90%, 소내소비율 5%에서 APR+ 1st 발전원가는 49.75원/kWh, N-th호기 발전원가는 44.68원/kWh로 분석되어 석탄화력 1,000MWe급의 발전원가인 57.95원/kWh 대비 14.2%~22.9% 우위에 있는 것으로 분석되었다.

APR+의 표준상세설계를 기준으로 한 발전원가 산정 결과, 기저부하에서 APR+ 원전이 충분한 경쟁력을 보유하고 있는 것으로 분석된다. 표준설계효과가 극대화되는 APR+ N-th호기는 APR+1,2호기 대비 8%~9%정도 경쟁력이 좀더 개선되는 것으로 분석되었고, 대용량 석탄화력 대비 충분한 경쟁력 우위를 확보할 수 있을 것으로 분석된다.

결론적으로 APR+는 용량증대에 따른 규모의 경제성, 60년 설계수명, 설계최적화 등의 원인에 의해 국내 대용량 석탄화력 발전원 대비 충분한 경쟁력 우위를 확보하고 있다고 평가된다.

#### References

1. EPRI, Technical Assessment Guide, Volume 1, Rev.7, 1993
2. EPRI, Technical Assessment Guide, Volume 3, Rev.7, 1997
3. EPRI, ALWR Cost Estimating Groudrules, 1995
4. 한수원 중앙연구원, APR+ 2단계 표준상세설계 개발 세부3과제 경제성평가보고서(3차), Nov. 2012
5. 지식경제부, 제 5차 전력수급기본계획(2010~2024), 2010
6. 지식경제부, 피동안전설비 적용 기술개발, APR+ 1단계 세부 2과제, 2010
7. 한국전력공사, 차세대원자로기술개발(II) 경제성 평가 최종보고서, Feb. 1999
8. 지식경제부고시 제2011-197호, Oct. 2011