

## APR+ 표준설계에 대한 경제성 분석

하각현<sup>†</sup> · 이재호

한수원 중앙연구원

(2015년 10월 28일 접수, 2015년 12월 8일 수정, 2015년 12월 10일 채택)

### A Economic Evaluation for APR+ Standard Design

Gag-Hyeon Ha<sup>†</sup>, Jae-Ho Lee

KHNP Central Research Institute

(Received 28 October 2015, Revised 8 December 2015, Accepted 10 December 2015)

#### 요 약

한수원 중앙연구원은 2007년부터 정부과제의 하나로 전기출력이 1500MWe급인 GEN III+ 원전 APR+를 개발해 왔다. APR1400 보다 안전성이 진전된 노형을 개발하기 위해 국내외에서 건설되거나 설계중인 ALWR의 개선된 설계특성을 조사하였다. 국내외의 원전건설 사업에 적합한 APR+ 표준설계를 개발하기 위해 신개념설계특성과 후쿠시마 원전사고 경험을 설계에 반영하였다. APR+의 안전성향상 표준설계 단계(2013.1 ~ 2015.12)에서 한번의 경제성평가를 수행하였다. 설계 안전성향상 기술개발 단계에의 경제성 평가 결과 APR+ N-th호기는 국내석탄화력 1000MWe급 대비 39.2% 경쟁력 우위인 것으로 평가되었다. 또한 APR+원전은 해외 원전 선진국 ALWR에 비해 동등 이상 수준의 경쟁력을 확보하는 것으로 평가되었다.

**주요어** : APR+, 건설비, 운전유지비, 연료비, 발전원가

**Abstract** - KHNP CRI has developed APR+ nuclear power plant since 2007, which is GEN III+ model with 1500 MWe capacity. To develop safer nuclear power plant than APR1400, we investigated advanced design features of ALWR 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. One economic assessments have performed during safety design improvement phase(2013.1 ~ 2015.12) of APR+. The result of the economic analysis for APR+ safety inhcancement design showed that APR+ N-th plant is about 39.2% more economical than coal-fired 1,000MW power plant. Also APR+ plant is more cost advantage over foreign advanced nation ALWRs.

**Key words** : APR+, Capital Cost, O&M cost, Fuel Cost, Economic Evaluation

## 1. 서 론

### 1-1. APR+ 원전 개발 현황

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

과 해외에서 설계 또는 건설 중인 원전을 참조하여 전기출력 용량을 1500MWe급으로 하는 GEN III+급 경수로로서 기본설계(2007.9~2010.7), 표준설계(2010.7~2012.12)를 완료하고, 현재 3단계인 APR+ 표준설계 안전성 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 34101  
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 1E 급 배터리에 의해 동작되는 차단밸브, 배관, 계측제어설비로 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 LBB 적용, 사이버보안 설계적용, 중대사고대처설계 강화 등이 있다.

또한 후쿠시마 원전사고 이후 국내 원전에 대한 점검과 설계취약점에 대한 검토가 이루어 졌으며, 안전점검의 결과로 도출된 설계 개선사항들이 APR+ 설계

에 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, APR 1400 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 관련법령을 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

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 oF/557 oF	615 oF/555 oF
안전관련계통 구성	4 Train	Semi-4 Train
보조급수계통	피동형응축계통 2계열	능동형 4대
비상디젤발전기	4 대/호기	2 대/호기
대체교류전원발전기	가스터빈발전기 2대	디젤발전기 1대
중대사고대처설비	IVR(Invessel Retention) +CFS(Cavity Flooding Sys)	좌동
주증기관 LBB	적용	미적용
건설공기(FC-FL, N-th호기)	36 개월	41 개월

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 동일형태, 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 불가상승비 건설기간 중 지급하는 이자를 합한 것을 총건설비라 한다.

APR+ 건설비는 APR1400 건설실적 및 계약자료, APR1400 대비 주요설계변경내역, GA 변경 및 후쿠시마 사고 후속대책 설비 등을 고려하여 산정하였다. APR+ 직접건설비는 설계변경으로 인한 기자재의 가격증감과 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

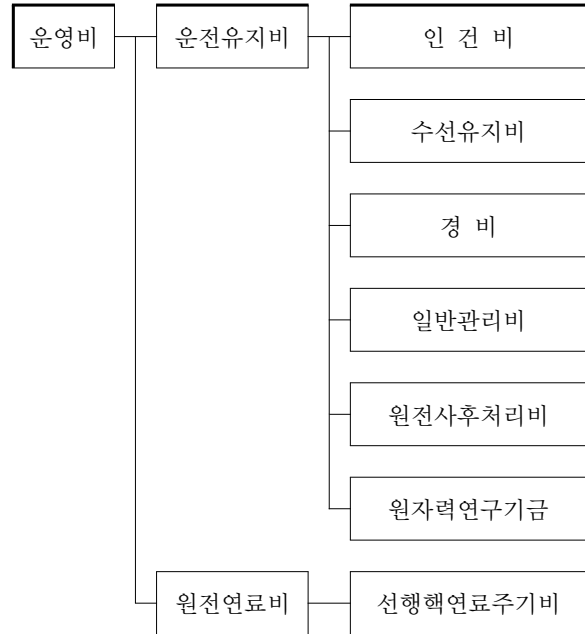


Figure 1. Composition of Expenses

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·준위방사성 폐기물처분비, 원전철거비, 사용후핵연료처리비 구성된다.

원자력의 연료주기는 기술적인 여건이나 정책상황에 따라 여러 가지 형태가 있을 수 있다. 국내에서는 재처리과정이 없으므로 우라늄 정광, 변환, 농축, 성형 가공으로 구성되는 선형원전연료주기비만을 원전연료비로 구분하고, 후행핵연료주기비(사용후 핵연료처리비)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+ 안전성향상 표준설계에 대한 최종 경제성 평가시의 발전원가 산정기준을 요약하면 표 2와 같다.

**Table 2.** Cost Estimate Bases of APR+

경제 변수	적 용 기 준
가격기준일	2015.06.30
경제수명 기간	60년(원자력), 30년(화력)
감가상각법	정액법, 잔존가치 0%
할인율/이자율	3.76% / 3.76%
적용환율	1,100 원/USD
소내소비율	4.1%(원자력), 4.0%(석탄화력)
건설방식	2호기 동일부지 동시건설
N-th호기	3번째 건설되는 발전소 (APR+ 5,6호기에 해당)
연료비	정광 : 47.17 USD/bU3O8 변환 : 12.21 USD/kgU, 농축 : 114.01 USD/SWU, 가공 : 416.73 USD/kgU
건설이자 계산기간 (기본계획 수립 ~ 상업운전)	○ 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+ COE

구 분	단 위	APR+ 1st (1,560MWe×2)	APR+ N-th (1,560MWe×2)	석탄화력 1000MW (1,070MWe×2)
- 고정비	원/kWh	20.23	16.56	10.52
- 운전유지비	원/kWh	16.33	16.33	25.45
- 연료비	원/kWh	7.70	7.70	30.83
발전원가	원/kWh	44.26	40.59	66.80
비교 우위	%	+33.7%	+39.2%	기준

※ 2015.6.30 불변가격, 환율: 1100/USD, 할인율/이자율 : 3.76%/3.76% 이용률: 85%

APR+ 비교 발전원인 석탄화력1000MW와 발전원가를 비교해보면, 표 3과 같이 APR+ 1st 호기는 33.7%, APR+ N-th호기는 39.29%의 석탄화력 대비 경쟁력 비교우위에 있는 것으로 평가되었다.

#### 4. 해외발전과의 경쟁력비교

OECD NEA/IEA 2015 보고서에 제시된 LCOE(Levelized Cost of Electricity)는 본 경제성평가 보고서의 발전원가와 같은 개념의 단위전력당 비용으로서 그 산출 방법은 다소 차이가 있으나 상대적 비교는 가능하다. 또한, 세부적으로 평가에 적용된 이용률, 환율, 가격기

준일 등의 세부 평가기준은 APR+ 경제성 평가 기준과 상이하다. 따라서 본 경제성 평가의 주요결과인 APR+의 발전원가를 OECD NEA/IEA 2015 보고서의 해외 경쟁노형 자료와 비교하기 위하여 OECD NEA/IEA 2015 보고서의 사용한 경제변수와 동일하게 APR+의 발전원가를 재산정하였다.

표 4. 는 OECD NEA/IEA 2015 보고서에 제시된 원전 중 Generation III(또는 III+)에 해당하는 주요 해외 노형과 재산정한 APR+의 발전원가를 비교한 것이다.

발전원가 비교결과 APR+ N-th호기는 유럽, 일본, 미국 등의 경쟁 노형과 동등 이상의 경쟁력을 확보하고 있다.

표 4. 주요 해외경쟁노형 및 APR+의 발전원가 비교

건설국가	프랑스	일본	영국	미국	중국	한국	
노형	ALWR	ALWR	ALWR	ALWR	ALWR	APR+ FOAK	APR+ NOAK
Net Capacity (MWe)	1,630	1,152	3,300	1,400	1,250	1,496	1,496
발전원가 (USD/MWh)	49.98	62.63	64.38	54.34	30.77	33.80	31.50
APR+ N-th의 비교우위	+37.0%	+49.7%	+51.1%	+42.0%	-2.4%	+6.8%	기준

- 가격기준일: 2013.06.30, 할인율: 3%,이용률: 85%, 환율: 1095.37원/\$

## 5. 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 2015년 6월 30일 불변가격과 할인율 3.76%, 이용률 85%, 소내소비율 4.1%에서 APR+ 1st 발전원가는 44.26원/kWh, N-th호기 발전원가는 40.59원/kWh로 분석되어 석탄화력 1,000MWe급의 발전원가인 66.80원/kWh 대비 33.7%~39.2% 우위에 있는 것으로 분석되었다.

APR+의 안전성강화 설계를 기준으로 한 발전원가 산정 결과, 기저부하에서 APR+ 원전이 충분한 경쟁력을 보유하고 있는 것으로 분석된다. 반복건설에 따른 표준설계효과가 극대화되는 APR+ N-th호기는 APR+1,2호기 대비 5%~6% 정도 경쟁력이 좀더 개선되는 것으로 분석되었고, 대용량 석탄화력 대비 충분한 경쟁력 우위를 확보할 수 있을 것으로 분석된다. 또한 유럽, 일본, 미국등의 경쟁노형대비 동등 이상의 경쟁력을 갖는 것으로 분석되어 APR+가 해외 수출용 노형으로도 손색이 없는 것으로 평가되었다.

결론적으로 APR+는 용량증대에 따른 규모의 경제성, 60년 설계수명, 설계최적화 및 금리의 인하 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. KHNP CRI, Cost Estimate Report for APR+ Standard Design Development Phase III, Oct. 2015
5. Ministry of Knowledge Economy, 5th Electricity Supply Plan, Dec. 2010
6. Ministry of Industry Trade, 5th Electricity Supply Plan, Feb. 2013
7. KEPCO, Final Cost Estimate Report for KNGR Development Phase II, Feb. 1999
8. Notice 2013-63 of Ministry of Industry Trade, June 2013