



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 8월
석사학위 논문

국내추진 i-SMR 건설공사비
예측을 통한 대형원전 대비 경제성
확보 방안 비교분석 연구

조선대학교 대학원
원자력발전학과
오진호

국내추진 i-SMR 건설공사비
예측을 통한 대형원전 대비 경제성
확보 방안 비교분석 연구

A Study of the i-SMR Economic Feasibility
in Comparison to a Large Scale NPP through
Construction Cost Prediction

2023년 8월 25일

조선대학교 대학원
원자력발전학과
오진호

국내추진 i-SMR 건설공사비
예측을 통한 대형원전 대비 경제성
확보 방안 비교분석 연구

지도교수 김 종 현

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 4월

조선대학교 대학원

원자력발전학과

오진호

오진호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송종순 (인)

위원 조선대학교 교수 이경진 (인)

위원 조선대학교 교수 김종현 (인)

2023년 5월

조선대학교 대학원

목차

ABSTRACT	vi
제1장. 서론	1
제2장. SMR 개요	3
제1절. Overview	3
제2절. 세계 SMR 개발현황	4
제3절. i-SMR 특징	5
제3장. 경제성평가 방법론	6
제1절. 순현재가치(Net Present Value, NPV) 평가	6
제2절. 내부수익률(Internal Return Rate, IRR) 평가	6
제3절. 편익/비용 분석(B/C ratio) 평가	7
제4절. 회수기간(Payback Period) 평가	7
제5절. 균등화발전비용(Levelized Costs of Energy, LCOE) 평가	8
제4장. 원전의 경제성평가 사례	9
제1절. 대형원전의 경제성평가 사례	9
제2절. SMR의 경제성평가 사례	11
제5장. i-SMR의 경제성평가 방법론 검토	13
제1절. 균등화발전비용(LCOE) 평가	13
1. 자본비용	13
2. 연료비	14
3. 운전유지비용	14

4. 사후처리비	15
제2절. 재무성 평가	16
1. 전기판매가격	16
2. 불확실성 고려	16
3. 기타비용	17
제6장. i-SMR의 균등화발전비용 평가	18
제1절. IEA LCOE 자료 활용	18
1. 투자비	19
2. 연료비	21
3. 운전유지비용	22
4. 사후처리비	23
5. 종합	24
제2절. 7차 전력수급기본계획 자료 활용	25
제3절. 민감도 분석	29
1. 할인율 변화	29
2. 이용률 변동	30
제7장. 결론	32
참고문헌	33

표 목차

표 1. 대형원전 대비 혁신형 SMR 비교	5
표 2. 균등화발전비용 산정을 위한 발전비용 항목	9
표 3. 선행 원전 계속운전 경제성평가 사례	11
표 4. APR1400(설비용량 1,377MW, 이용률 85%) 균등화발전비용(LCOE)	19
표 5. 용량계수(Scale Factor) - Cost-size Scaling Exponents	20
표 6. 변동 운전유지비 고려항목 및 근거	22
표 7. 세부 항목별 균등화발전비용(LCOE) 추정값 [단위 : USD/MWh]	24
표 8. i-SMR 균등화발전비용(LCOE) 추정값 [단위 : 원/kWh]	25
표 9. 원자력 1,000(이용률 80%) 균등화발전비용(LCOE) 추정 입력 전제	26
표 10. 원자력 1,000(이용률 85%) LCOE 추정값 [단위 : 원/kWh]	27
표 11. 연도별 소비자물가지수	28
표 12. i-SMR(680MW) 균등화발전비용 추정값 [단위:원/kWh]	28

그림 목차

그림 1. 소형모듈원자로(SMR) 도식	3
그림 2. 세계 SMR 개발현황	4
그림 3. SMR 건설비의 Top-down 추정(Barenghi et al, 2012)	12
그림 4. 할인율 변화에 따른 i-SMR LCOE (IEA 자료 기반)	30
그림 5. 전체 원전 이용률('00 ~ '19)	31
그림 6. 이용률 변화에 따른 i-SMR LCOE (7차 전력수급기본계획 추정 기반)	31

초 록

국내추진 i-SMR 건설공사비 예측을 통한 대형원전 대비 경제성 확보 방안 비교분석 연구

오 진 호

지도 교수 : 김 중 현

원자력공학과

조선대학교 대학원

에너지 안보와 탄소중립 달성의 주요 수단으로 소형모듈원자로(SMR)이 주목받고 있다. SMR은 높은 안전성과 대형원전 대비 짧은 건설기간 및 공장 모듈화에 따른 예산 투입의 불확실성의 제거, 신재생 에너지 간헐성 보완이 가능한 탄력운전 등 분산전원의 유연성 등으로 미래 에너지 산업의 게임체인저로 인식되고 있으며, 전 세계적으로 71종 이상의 SMR이 개발되고 있다. 본 논문에서는 경제성평가에서 활용되는 여러 가지 방법론을 검토하고, 그 중 국내 추진 중인 i-SMR의 최적 경제성평가 방법론을 도출하였다. 대형원전과 SMR에서 적용된 경제성평가 사례 분석 결과, 타 발전원과의 경제성 비교를 위해서는 균등화발전비용(LCOE) 평가방법의 적용이 적합하였고, 재무성 평가를 위해서는 순현재가치(NPV)법을 적용하는 것이 적합함을 확인하였다. IEA LCOE 자료 및 7차 전력수급기본계획 기반으로 i-SMR의 균등화발전비용(LCOE)를 본 논문에서 제시한 방법을 적용하여 추정하였다. 추정된 LCOE 값은 대형원전 대비 발전원가가 다소 높았으나, 해당 값이 최초건설호기 기준임을 고려 시, 반복건설 시 대형원전 수준의 경제성을 기대할 수 있을 것으로 보인다. 다만, 건설비와 발전량이 LCOE에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 적정 할인율과 이용률의 확보가 중요할 것으로 분석되었다.

Abstract

A Study of the i-SMR Economic Feasibility in Comparison to a Large Scale NPP through Construction Cost Prediction

Jinho Oh

Advisor : Prof. Jonghyun Kim , Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

SMR are gaining attention as a major means of achieving energy security and carbon neutrality. SMRs are recognized as a game changer in the future energy industry due to their high safety, short construction period compared to large-scale reactor, elimination of budgetary uncertainty through plant modularization, and flexibility of distributed power sources such as resilient operation that can compensate for intermittency of renewable energy. In this paper, I reviewed various methodologies utilized in economic evaluation and derived the optimal economic evaluation methodology for i-SMR, which is being promoted in Korea. As a result of the analysis of economic evaluation cases applied to large-scale reactors and SMR, it was confirmed that the application of LCOE is suitable for economic comparison with other power generation sources, and NPV is suitable for financial evaluation. The LCOE of i-SMR was estimated based on the IEA data and the 7th BPLE. As a result of the estimation, It was higher than that of large scale NPPs, but considering that it is FOAK price, it is expected that the economic efficiency of large NPPs can be expected when repeatedly constructed. However, since the impact of construction cost and power generation on LCOE is very large, it is analyzed that it is important to secure an appropriate discount rate, etc.

제1장. 서론

IAEA는 기존 대형원전과 달리 출력이 300MW 이하로 낮고 증기발생기, 냉각재펌프 등 원전의 주요 구성요소들을 하나의 모듈로 일체화시킨 원자로를 소형모듈원자로(SMR)이라 정의하며 [1], 전세계적으로 한국, 미국, 러시아, 중국 등에서 71종 이상의 SMR을 개발하고 있는 등 SMR은 원자력 산업계의 화두로 주목받고 있다 [2].

2011년 후쿠시마 원전사고 이후 원전의 안전성에 대한 관심이 높아졌고, 미국의 보글 원전이나 프랑스의 플라망빌 원전 등에서 건설 지연으로 인하여 계획 대비 높은 예산이 투입되는 투자비의 불확실성, 송전선로 건설비용 증가 및 수용성 문제, 분산전원으로서의 가치 등이 SMR이 에너지 산업의 트렌드로 주목받고 있는 이유다.

SMR은 일체형 원자로 설계로 냉각재 상실사고를 배제하였고 피동형 설계를 통해 안전성을 높였으며, 공장 모듈화를 통해 대형원전의 건설공기인 56개월(APR1400 기준)의 절반도 되지 않은 짧은 기간에 건설이 가능함에 따라 건설 지연에 따른 비계획적인 예산 증가라는 불확실성이 발생하지 않는다. 뿐만 아니라, 출력제어가 가능한 계통 유연성 높은 소규모 발전이라는 특성을 보유하고 있어 신재생 에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 분산형 전원에 적합하다

과학기술정보통신부와 산업통상자원부에 따르면 한국의 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업은 2022. 5. 예비타당성조사를 통과했고, ‘28년까지 약 4,000억원의 사업비를 투입하여 ‘30년 세계 SMR 시장 진출을 위한 SMR 노형 개발을 추진할 예정이다 [3].

이처럼 SMR은 10여년 내 상용화를 목표로 개발중에 있으며, 국내/외에서 많은 분야의 연구가 수행되고 있으나 아직 대부분의 연구가 기술성, 안전성

등의 연구로 경제성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 결국 시장에서 살아남기 위해서는 SMR의 경제성이 확보되어야 할 것이므로 다양한 방법을 통해 SMR의 경제성 연구가 필요할 것이다.

본 논문에서는 경제성평가에서 활용되는 여러가지 방법론을 검토하고, 그 중 i-SMR에 적용하기 위한 최적의 경제성평가 방법론을 도출하고자 한다. 먼저, 2장에서는 SMR의 전반적인 개념과 세계 SMR 개발현황, i-SMR의 주요 특징에 대해서 알아보았다. 3장에서는 일반적인 사업의 경제성평가에서 활용되는 평가방법론을 검토하고, 4장에서 기존 대형원전 및 SMR에 대한 경제성평가 사례 검토를 통해 원전의 경제성평가에서 활용되고 있는 평가방법론에 대해서 살펴보았다. 5장에서는 3~4장의 분석 내용을 기반으로 국내의 i-SMR 원전에 적용 가능한 최적의 경제성평가 방법론을 제시하였다. 6장에서는 5장의 방법론을 기반으로 국내건설을 가정한 i-SMR의 건설공사비 개발 목표를 IEA 자료와 제7차 전력수급기본계획의 경제성평가 자료를 활용하여 i-SMR의 균등화발전비용을 분석하였다.

제2장. SMR 개요

이 장에서는 소형모듈원자로(SMR)의 개략적인 설명과 함께 세계 SMR 개발현황에 대해서 알아보고, 국내 i-SMR의 주요 특징을 소개하였다.

제1절. Overview

소형모듈원자로(SMR)란 증기발생기, 냉각재펌프, 가압기 등 주요기기를 하나의 용기에 일체화한 소형 원자로로 전기출력이 300MWe 이하인 원자로를 말한다 [1].

구분	OPR 1000	APR 1400	SMR
전기용량	1000MWe	1400MWe	300MWe 이하

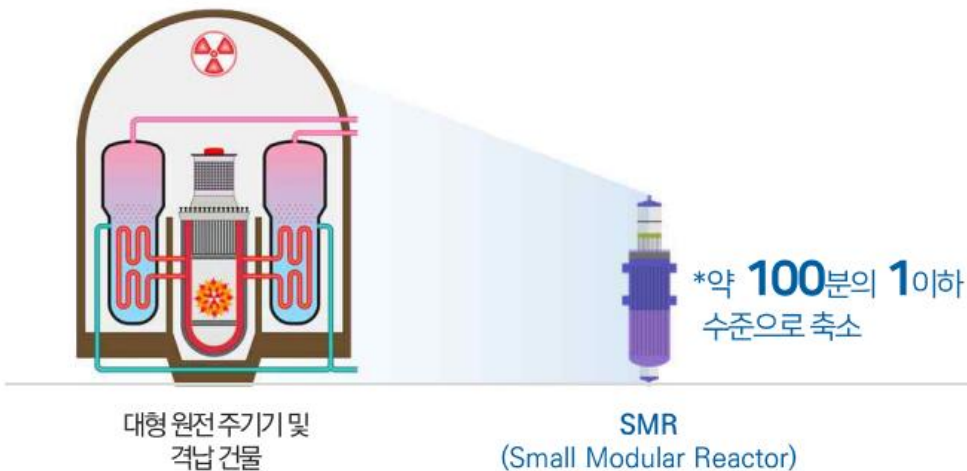


그림 1. 소형모듈원자로(SMR) 도식

SMR은 모듈형태로 제작, 이송 및 건설이 가능하므로 건설공기 단축이 가능하며, 소형발전의 특성으로 지역적 활용 가능성이 높고, 수소생산, 공정열,

담수 활용 및 지역난방 등 다양한 분야에서 활용이 가능하다는 장점이 있다.

제2절. 세계 SMR 개발현황

현재 전 세계적으로 미국, 러시아, 중국, 캐나다 등 다수의 나라들이 SMR을 개발하고 있다.

국가	명칭	출력(MWe)	노형	현황	비고
미국	NuScale	12×60	경수로	인허가중	지상용
	Xe-100	82.5	고온가스로	기초설계	비경수형
	Aurora	1.5	고속로	개념설계	초소형
	eVinci	2~3.5	열전도관	개발중	초소형
	MMR	5~10	고온가스로	초기설계	초소형
러시아	BWRX-300	270~290	경수로	인허가단계	지상용
	RITM-200M	2×50	경수로	가동중	해상용
	KLT-40S	2×35	경수로	가동중	해상용
	ABV-6E	6~9	경수로	최종설계	해상용
중국	VBFR-300	325	경수로	인허가단계	해상용
	HAPPY200	200(MWt)	경수로	상세설계	지상용
	ACP100	100	경수로	상세설계	지상용
캐나다	HTR-PM	210	고온가스로	건설중	비경수형
	HTR-10	2.5	고온가스로	가동중	비경수형
	ARC-100	100	소동고속로	개념설계	비경수형
일본	IntegralMSR	195	융용염로	개념설계	비경수형
	GT-HTR300	100~300	고온가스로	인허가단계	비경수형
아르헨티나	HTTR-30	30(MWt)	고온가스로	가동전	비경수형
스웨덴	CAREM	30	경수로	건설중	지상용
	SEALER	3	고속로	개념설계	비경수형



*이미지출처: Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, 2020

그림 2. 세계 SMR 개발현황

제3절. i-SMR 특징

i-SMR은 계통 설계 단순화로 고장요소를 제거하고, 고내압 철제 격납용기 활용으로 안정성을 높였음. 외부 전력 상실 및 운전원 미개입 시에도 안전한 냉각이 가능하며, 최악의 경우에도 주민 대피·소개 필요성은 기존 워전 대비 현저히 낮음. 공장 모듈화 및 내륙수송으로 건설기간을 단축시킬 수 있으며, 신재생에너지의 간헐성 대응을 위한 탄력운전이 가능함. 전력수요 저하 시 전력 일부를 수소·담수·공정열 생산 등 다목적으로 활용이 가능하며, 탄소중립 달성을 위해 폐지되는 노후 석탄 화력 발전설비를 대체할 수 있다. [4]

표 1. 대형원전 대비 혁신형 SMR 비교

구분		대형원전	혁신형 SMR(개념안)
모듈화 설계개념	기본모듈 배치	1개(Stand alone)	4개
	모듈화 설계	일부 건설공법 모듈화	격납용기 모듈화
	격납용기	대형 콘크리트 건물	소형 철제 용기
주요 설계 목표치	전기 출력	1,400MWe	170MWe(단위모듈)/680MWe(4개 모듈)
	노심손상빈도	1.0x10 ⁻⁶ /R·Y 이하	1.0x10 ⁻⁹ /R·Y 이하
	건설비용	\$3,000/kWe	\$3,500/kWe 이하
주요 시스템 설계특성	반응도 제어	수용성 봉산 사용	수용성 봉산 미사용
	핵연료 및 노심	16x16 봉형 UO ₂ 5% 이하 U-235 241개 집합체 유효핵연료 길이 : 3.8m 재장전주기 : 18개월	17x17 봉형 UO ₂ 5% 이하 U-235 69개 집합체 유효핵연료 길이 : 2.4m 재장전주기 : 24개월
	제어봉 구동장치	원자로용기 외부 설치	원자로용기 내부설치
	원자로 냉각재 펌프	원심펌프	캔드모터펌프*
	사고시 운전원 개입	필요	불필요
	안전등급 DC 전력	필요	불필요
	격납용기 냉각	원자로건물 내 재장전수 탱크 + 비상냉각탱크	외부 침수

* 펌프의 모터와 임펠러가 하나의 몸체에 들어 있어, 밀봉수 불필요로 단순화 가능

제3장. 경제성평가 방법론

사업의 경제성을 분석하는 방법에는 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR), 편익/비용(B/C), 회수기간(Payback Period), 균등화발전비용(LCOE) 등 다양한 방법이 존재한다. 각 평가 방법마다 각각의 장·단점이 있으며, 평가의 목적과 대상에 따라 어느 한 방법을 적용하기도 하고, 복수의 평가 방법을 적용하여 사업의 경제성을 평가하기도 한다.

각 기법의 평가방법은 아래와 같다.

제1절. 순현재가치(Net Present Value, NPV) 평가

순현재가치 평가는 기업의 잉여현금흐름을 현재가치로 할인하고 합산하여 순현재가치를 산정하는 방법으로, 순현재가치가 0보다 크면 경제성이 있다고 평가한다 [5].

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

NPV : 순현재가치

B_t : t 시점의 편익

C_t : t 시점의 비용

r : 할인율

n : 사업기간(또는 분석기간)

제2절. 내부수익률(Internal Return Rate, IRR) 평가

내부수익률 평가는 순현재가치가 0이 될 때의 할인율을 구하는 방법으로 이를 ‘내부수익률’이라 한다. 내부수익률이 사업 또는 프로젝트의 목표 수익률보다 크면 경제성이 있다고 평가한다 [5].

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+R)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+R)^t}$$

(2)

- R : 내부수익률
- B_t : t 시점의 편익
- C_t : t 시점의 비용
- n : 사업기간(또는 분석기간)

제3절. 편익/비용 분석(B/C ratio) 평가

편익-비용 분석 평가는 할인된 편익을 할인된 비용으로 나누고, 그 비율 값인 편익-비용 값을 구한다. 편익-비용 값이 1보다 크면 경제성이 있다고 평가 한다 [6].

$$B/C = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

(3)

- B_t : t 시점의 편익
- C_t : t 시점의 비용
- r : 할인율
- n : 사업기간(또는 분석기간)

제4절. 회수기간(Payback Period) 평가

회수기간 평가는 사업기간 중 발생하는 현금흐름에 기초하여 소요된 총 비

용을 모두 회수하는데 소요되는 기간을 나타내는 방법으로 산출식은 다음과 같다 [6].

$$Accumulated\ liquidity(n) = \sum_{t=0}^n cf(i)$$

(4)

$cf(i)$: 누적 현금흐름이 0이 되는 세후 순익

제5절. 균등화발전비용(Levelized Costs of Energy, LCOE) 평가

균등화발전비용(LCOE) 평가는 발전기 수명기간의 건설비, O/M, 연료비 등 전력 생산비용과 투자자의 기회비용(자본수익률, Return on equity)을 전부 회수할 수 있는 가상의 발전원가이다 [7].

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n (C_t + OM_t + Fuel_t) / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^n GN_t / (1+r)^t}$$

(5)

C_t : t 년도 자본비용(건설비, 이자, 발전소 해체 비용)

OM_t : t 년도 운전유지비(고정비+변동비)

$Fuel_t$: t 년도 연료비

GN_t : t 년도 발전량

r : 실질할인율 = WACC

$\sum_{t=0}^n$: 비용 발생 총기간 합계(건설, 운전, 해체 포함)

제4장. 원전의 경제성평가 사례

이 장에서는 대형원전과 SMR의 경제성평가 사례 분석을 통해 원자력에 대한 경제성평가 방법을 조사하였다.

제1절. 대형원전의 경제성평가 사례

조성진·김윤경(2018)은 원자력발전의 계속운전에 대한 균등화발전비용을 산정하여 7차 수급계획에서 제시한 신규원전, 신규석탄발전, 신규 LNG 복합발전의 균등화발전비용과 비교하였다 [7]. 경제성평가를 위한 발전비용 항목으로 설비투자비, 연료비, 순운전유지비와 사후처리비, R&D, 지역협력사업비, 지역자원시설세 등 기타비용으로 분류하고 각각의 단위당 비용을 산출·합산하여 계속운전의 균등화발전비용을 산정하였다. 또한, 할인율(3/5.5/10%), 이용률(60/70/80/90%) 및 계속운전 기간(10/20년)에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

표 2. 균등화발전비용 산정을 위한 발전비용 항목

구분	세부내용 및 관련 비용	단위당 비용 산정
설비투자비	설비교체비용, 안전성 향상비용 등	설비투자비/발전량
연료비	계속운전기간 중 연평균 연료비	연료비/발전량
순운전유지비	직접 재료비, 인건비, 수선유지비, 기타비용 등 연평균 비용	재무비용/발전량
사후처리비	중저준위폐기물관리비, 사용후핵연료비용, 해체총당금	연평균발생량기준비용 /발전량, 연간총당금/발전량
기타비	R&D 비용 지역협력사업비 지역자원시설세	관련법에 따른 발전량 당 비용

* Economic feasibility study of the life extension (2018)

이기현·김태령·정철욱(2015)은 균등화발전비용을 이용하여 원자력발전의 계속운전 경제성을 평가하였고, 추가적으로 원전의 10, 20, 30년 계속운전 가정 시 대체할 수 있는 신규원전 건설 기수 및 전기판매액을 산정하였다 [8]. 균등화발전비용 산정 시 투자비, 운전유지비, 연료비, 폐기비용을 고려하였으며, 신규원전 건설 대신 계속운전을 함에 따라 절감되는 비용을 산출하기 위해 전력거래소의 정산단가를 활용하였다. 민감도 분석은 할인율(3/6/10%), 이용률(60/70/80/90%) 및 계속운전 기간(10/20/30년)에 대해서 수행하였다.

한수원 자체의 계속운전 경제성평가는 한수원 외부의 연구와는 달리 대부분 순현재가치(NPV)법을 활용, 현금흐름 비교를 통해 영구정지 대비 계속운전의 경제성을 평가하였다 [9]. 이는 연도별 현금흐름을 추정하기 위한 세부 회계자료에 대한 접근이 가능하여 계속운전기간 중 예상수익과 지출에 대한 상세 평가를 할 수 있기 때문이며, 평가의 목적이 타 발전원과의 비교가 아닌 특정 발전소에서의 계속운전과 영구정지 간의 경제성 비교 검토이므로 대안 간 비교방법에 더 적합한 순현재가치법을 사용하는 것으로 보인다.

내부 의사결정을 위해서는 대안의 선택에 따른 정량적인 경제성이 제시되어야 하는데, 균등화 발전비용은 발전원가를 추정하는 방식이기 때문에 대안에 대한 경제성 규모를 산출하는 데에는 적합하지 않다. 이를 위해서는 추가적인 매출의 산정 과정이 필요하기 때문이다. 이러한 사유로 일반 사업의 타당성 평가에서도 발전원 간의 경제성 비교가 평가 목적인 경우에는 균등화 발전비용법이 사용되어지나, 사업 자체의 타당성 여부를 평가하기 위해서는 순현재가치법이 사용된다.

표 3. 선행 원전 계속운전 경제성평가 사례

No	구분	수행기관	수행시기	분석방법
1	월성 1 호기	한전 전력연구원	2009.09.	NPV
2		한수원 중앙연구원	2013.04.	NPV
3		한수원 중앙연구원	2013.11.	NPV
4		에너지경제연구원	2014.09.	LCOE
5	고리 1 호기	한전 전력연구원	2006.12.	NPV
6		한전 전력연구원	2007.06.	NPV
7		에너지경제연구원	2015.05.	NPV/LCOE

제2절. SMR의 경제성평가 사례

이슬·정우용(2002)은 LCOE 모형과 재무모형을 설계하고, 변수의 불확실성에 대비하여 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)을 적용하여 대형원전과 SMR의 경제적, 재무적 경제성을 평가하였다. LCOE 모델에서는 대형원전의 비용을 기반으로 SMR 러닝커브(Fig. 3)를 통해 SMR 입력변수를 추정하였고, 학습 요인, 모듈화 요인 등을 고려하여 산출한 SMR 저감계수를 적용하였다. 재무 모델은 건설기간 변경에 따른 금융비용 증가를 고려하였고, 건설비 대비 이자비용과 투자회수기간을 제시하는 등 SMR의 재무적 측면의 검토 결과를 제시하였다 [10].

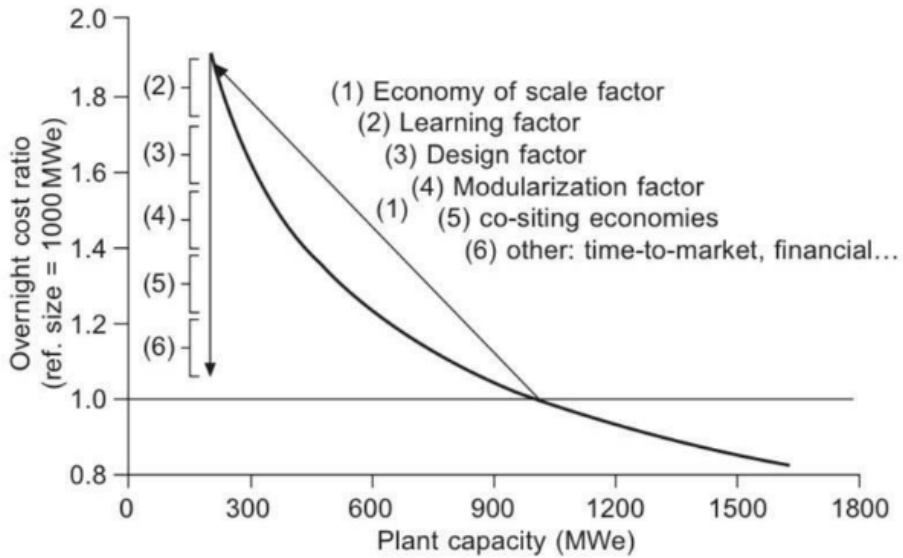


그림 3. SMR 건설비의 Top-down 추정(Barenghi et al, 2012)

B. Mignacca · G. Locatelli(2020)는 체계적 문헌 고찰(Systematic Literature Reviews)를 통해 SMR의 경제성 평가시 고려해야 할 사항에 대해 종합 정리하였다. SMR 경제성평가 시 발전비용으로 건설비용과 건설중 이자의 합인 자본비용(전체 비용 대비 50~75% 차지), 운전유지비용, 연료비, 해체 비용에 대한 검토가 필요함을 제시하였다. SMR의 Overnight Construction Cost 산정 시 대형원전과의 크기 비율과 모듈화 영향을 고려하여 자본비용을 산정하고, 건설기간 단축으로 인한 이자율(IDC) 감소, 용량계수 및 반복건설에 따른 자본비용 저감 등을 평가에 적용해야함을 언급하였으며, 다중 유닛 사용을 통한 운전유지비 절감과 해체 용이성에 따른 해체비용 감소 또한 언급하였다 [11].

제5장. i-SMR의 경제성평가 방법론 검토

이 장에서는 3~4장의 검토결과를 기반으로 i-SMR에 대한 최적의 경제성 평가 방법론을 검토하겠다.

i-SMR의 경제성 평가를 위해서는 평가 목적에 따라 두 가지 평가방법론의 적용이 필요하다. 타 발전원과의 경제성을 비교하기 위해서는 발전원가를 추정하는 균등화발전비용(LCOE)법을 적용하고, i-SMR 운영기간 중 수익성 등에 대한 재무성 평가를 위해서는 건설기간에 따른 이자비용 변화, 수익과 지출 시점에 따른 재무성의 변화 등을 고려하여 사업의 의사결정을 지원할 수 있도록 순현재가치(NPV)법을 활용하는 것이 더 적합하다.

제1절. 균등화발전비용(LCOE) 평가

i-SMR의 균등화발전비용을 산정하기 위해서는 자본비용, 연료비, 운전유지비, 사후처리의 총 4가지 항목에 대한 비용 산정이 필요하다.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n (\text{자본비용}_t + \text{운전유지비}_t + \text{연료비}_t + \text{사후처리비}_t) / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^n \text{발전량}_t / (1+r)^t}$$

(6)

1. 자본비용

국가마다 시장 및 운영환경의 차이로 비용 산정에 대해 큰 차이가 발생될 것으로 판단된다. 한국과 같은 규제시장에서는 정부주도로 원자력발전이 추진되기에 낮은 이자로 인하여 건설단가가 다른 나라 대비 낮게 산정될 것이고, 지속적인 원자로 건설 경험으로 인하여 반복건설을 통한 건설비용 절감 역시 존재할 것이다. 따라서 우리나라의 실정에 맞는 자본비용의 적용이 정

확한 평가를 위해 중요하다.

i-SMR은 현재 개발 중으로 건설비에 대한 실적은 존재하지 않기 때문에 다음 두가지 방법으로 건설비를 추정한다. 첫번째로 대형원전 건설비를 통해 추정하는 방법이다. 실적이 존재하는 대형원전 건설비를 세부 항목으로 구분하고 항목별로 적정 용량계수(Scale Factor)를 적용하여 산정한다. 두번째는 한수원이 제시하는 건설단가를 활용하는 것이다. 이는 공개되지 않은 세부 자료를 기반으로 산정된 단가이므로 첫번째 방법 대비 단가의 정확성이 높다 할 수 있다. i-SMR은 예비타당성조사 통과를 위해 건설단가를 공개하고 있으므로 이를 활용할 수 있다.

건설단가 내 금융비용(건설중이자)이 고려되지 않은 경우 총 건설비에 대한 금융비용을 산정해야 한다. 이는 건설기간과 준공시점을 고려한 건설비의 현가와 미래가의 차이로 계산할 수 있다. 정확한 계산을 위해서는 건설비에 대한 차입을 역시 반영할 필요성이 있다.

2. 연료비

한수원은 i-SMR의 연료로 기존 대형원전 대비 우라늄 농축도를 높여 장주기 운전(2년 이상)을 목표로 한다고 밝힌 바 있다. 따라서 기존 대형원전의 연료집합체와는 다른 형태의 연료 사용하므로 기존 원전의 연료비를 그대로 사용하는 것은 오차가 발생할 수 있다. 뿐만 아니라 연료집합체 제작업체에 따라 가격 변동이 발생할 수 있다. 따라서 불확실성에 대비하여 해외 수입, 국내 제작, 기존원전과의 용량계수에 따른 적용 등 3가지 시나리오에 대해서 분석을 하는 것이 필요하다.

3. 운전유지비용

운전유지비는 대형원전의 실적 운전유지비의 평균값을 사용하되, 각 항목별로 기존 원전과 i-SMR의 비용 차이 발생 여부를 분석 검토하고 이를 기반으

로 비율적인 값을 계산할 필요가 있다. 검토되어야 할 대표적인 세부항목은 인건비, 수선유지비, 개발비, 세금과공과, 기타 경비 등이 있다. 세부항목별로 각각의 특성에 따라 적용해야 할 비율을 다르게 적용해야 한다.

인건비의 경우, i-SMR은 다수의 운전원이 필요한 기존 대형원전과는 달리 혁신기술을 적용해 적은 운전원만으로도 발전소 운영이 가능하므로 운전원의 비율을 적용하여 인건비를 추정해야 한다.

수선유지비는 무방산 운전 및 일체화 설계 등에 따른 계통의 단순화의 영향으로 감소될 것이며, 감소 영향을 계통 개수의 비율로 산정될 수 있을 것이다.

개발비의 경우, 기존 원전이 원자력진흥법에 따라 R&D 기금을 지불하지만 i-SMR은 관련 법이 부재하므로 비관련 원가로 제외하거나 동일한 개발비가 지불된다는 가정을 통해 비용을 산정한다.

세금과공과 역시 현재 관련 법이 지정되지 않아 비용이 발생하지 않지만, 관련 법 부재를 사유로 비관련 원가로 제외하거나 동일 비용 지불을 가정하는 방법으로 비용을 도출할 수 있다.

운전유지비는 혁신기술과 규제환경에 따라 i-SMR이 상대적으로 적은 비용으로 산정될 것으로 보이며, 상기와 같은 Bottom-Up 방식의 산정이 합리적일 것으로 판단된다.

4. 사후처리비

사후처리비는 기존원전의 비용의 적용을 검토하되 규제 환경에 따라 비용 재산정이 필요할 것이다. 사후처리비는 중저준위 폐기물 처분비용, 사용후핵연료 관리부담금, 해체비용으로 구성된다. 중저준위 폐기물의 경우 봉소 미사용, 단순화된 계통에 따른 폐기물 감소가 예상됨에 따라 대형원전에 비해 발

생량이 감소할 것이다. 사용후핵연료 발생량 역시 장주기운전(2년 이상)을 통해 감소할 것으로 보인다. 따라서 해당 비용 또한 운영유지비와 같이 Bottom-Up 방식의 추정이 적합할 것이다.

해체비용 또한 공장식 해체의 가능성으로 인해 비용 절감이 예상되어지므로 관련 연구의 메타분석을 통해 비용 절감율을 산정하여 적용할 수 있을 것이다.

제2절. 재무성 평가

순현재가치법을 사용한 재무성 평가에서도 균등화발전비용에서 검토하였던 자본비용, 연료비, 운전유지비, 사후처리비는 모두 검토되어야 한다. 추가적인 부분이 있다고 한다면, 각각의 비용을 운영기간 연도별로 물가상승을 적용하여 반영하고 할인율을 고려한 현금흐름을 분석하고 순현재가치(NPV)를 추정하는 것이다.

1. 전기판매가격

i-SMR의 운영주체에 따라 발전된 전력의 판매단가는 달리 계산되어야 한다. 한수원이 운영사인 경우, 현 전력시장체계가 유지된다는 가정에서는 원자력 정산단가를 사용하는 것이 적합하다. 하지만 i-SMR의 전력판매가 별도의 차액거래계약(Vesting Contract)을 통해 이루어진다면 해당 가격의 적용이 필요할 것이다.

2. 불확실성 고려

평가를 위한 i-SMR 입력변수는 불확실성이 높다. 따라서 정확성을 위해서는 연료비, 이용률, 판매단가, 할인율 등에 대해 민감도 분석을 수행할 필요성이 있다. 또는 확률함수를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 결과의 분포 범위를 제시하는 것도 한 방법일 것이다.

3. 기타비용

i-SMR의 경제성평가에서는 앞서 언급하였던 항목들에 대한 분석이 이루어지겠지만, 이외에도 고려할 필요성이 있는 항목이 있다. 타 발전원과의 경제성 비교 또는 전력시장에서 얻을 수 있는 경제성을 산정할 때에는 이외에도 전력시스템에서 얻어질 수 있는 기타 수익을 고려할 수 있기 때문이다.

기타 수익에는 다음과 같은 항목들이 있다.

i-SMR은 분산형전원의 가능성으로 인하여 송전선로 구축이 불필요함에 따라 대형원전 건설과 비교 시 송전선로 비용이 절감될 수 있는데, 이는 추가적인 수익 항목으로 분류될 수 있다. 뿐만 아니라, i-SMR은 부하추종운전이 가능함에 따라 전력시장에서 재생에너지의 간헐성 운전에 대한 보상으로 얻을 수 있는 보조서비스 정산비용 및 DR 자원으로서의 Positive DR 등 추가적인 수익을 창출할 수 있다. 그리고 전통적인 편익항목인 온실가스 저감효과 등도 수익으로 고려되어질 수 있을 것이다. 다만, 사회적인 편익항목 들은 직접적인 재무적 수익으로 볼 수 없기 때문에 재무성 평가에서 적용하는 것은 적합하지 않을 수 있다.

제6장. i-SMR의 균등화발전비용 평가

이 장에서는 5장의 경제성평가 방법론을 활용하여 i-SMR의 경제성을 검토 하겠다. 신뢰성 있는 기관에서 발표한 대형원전의 LCOE 자료를 기반으로 i-SMR의 균등화발전비용(LCOE)을 산정하고, 이를 분석해 보았다.

제1절. IEA LCOE 자료 활용

i-SMR의 균등화발전비용 산정은 다음의 2가지 방법을 사용하였다. 첫째는 신뢰성 있는 기관인 IEA에서 발행한 발전원별 LCOE 자료를 활용하였고, 둘째로 7차 전력수급기본계획의 국내원자력 1,000MW의 자료를 기반으로 하였다. 두 자료를 통해 i-SMR의 LCOE를 도출하였고, 두가지 값의 비교를 통해 자료의 정합성을 재검증하였다.

IEA/NEA는 5년마다 국가별 균등화발전비용(LCOE) 자료(Projected Costs of Generating Electricity)를 정리하여 발행하고 있으며, 해당 자료에는 발전원별 LCOE 값이 수록되어 있어 국가별, 발전원별 발전원가 비교가 용이하다. 본 논문에서는 2020년 발행된 자료를 사용하였다 [13].

i-SMR은 현재 개발중인 원자로이므로 건설비, 연료비, O&M, 사후처리비에 대한 실적이 존재하지 않는다. 따라서 설계자료를 바탕으로 해당 자료를 추정하거나, 대형원전의 실적 자료를 활용하여 용량계수(Scale Factor)를 적용하여 i-SMR의 LCOE를 재산정하여야 한다. 본문에서는 IEA/NEA의 Projected Costs of Generating Electricity(2020)의 APR1400 LCOE를 참조하였다. 참조자료에 수록되어 있는 APR1400의 LCOE 자료는 표4와 같다.

표 4. APR1400(설비용량 1,377MW, 이용률 85%) 균등화발전비용(LCOE)

구분		LCOE (USD/MWh)	비고
투자비 (건설비)	할인율 3%	11.46	·금융비용 및 예비비 포함
	할인율 7%	25.51	
	할인율 10%	39.39	
해체비	할인율 3%	0.20	·decommissioning costs are calculated 15% of overnight costs
	할인율 7%	0.03	
	할인율 10%	0.01	
연료비		9.33	·used Front-end and Back-end of nuclear fuel cycle
O&M		18.44	·고정비 및 변동비성 비용 고려
합계	할인율 3%	39.42 (43.40)	·단위 : USD/MWh(원/kWh) ·환율 : 1,101(원/USD) - IEA/NEA LCOE(2020) 기준
	할인율 7%	53.30 (58.68)	
	할인율 10%	67.16 (73.94)	

* IEA/NEA Projected Costs of Generating Electricity(2020)

1. 투자비

i-SMR은 건설비에 대한 실적이 부재함에 따라 APR1400의 투자비 단가를 기반으로 건설비를 추정하였다. APR1400의 건설비에 용량계수(Scale Factor)를 적용하여 i-SMR의 건설비를 산정하였다. 재산정 식과 용량계수표는 다음과 같다 [14].

$$i-SMR \text{ 건설비} = APR1400 \text{ 건설비} \times \text{용량보정비율} \quad (7)$$

$$\text{용량보정비율} = \left(\frac{i-SMR \text{ 설비용량}}{APR1400 \text{ 설비용량}} \right)^{\text{용량보정계수}} \quad (8)$$

표 5. 용량계수(Scale Factor) - Cost-size Scaling Exponets

계정	Scaling exponents	
	원자력	석탄
직접비		
토지 및 토지권한	0.0	0.0
구조물 및 설비개선	0.50	0.45
원자로/보일러	0.60	0.60
터빈 설비	0.80	0.70
전기 설비	0.40	0.30
기타 설비	0.30	0.20
주복수기 열제거설비	0.80	0.80
간접비		
건설 서비스	0.45	0.50
사무 Engineering & Service	0.20	0.60
현장 Engineering & Service	0.40	0.50
사업자 비용	0.50	0.55
비용가중 평균	0.50	0.55

* DOE, Delene, J. G., et al. (1984)

식 (7), (8)과 표5를 기반으로 추정된 할인율 3% 기준의 i-SMR의 투자비 단가는 15.40 원/kWh이다. 세부 건설비 사항을 알 수 없는 관계로 각각의 항목에 대해 Scaling Exponets를 적용하지 못하였고, 전체 비용에 비용가중 평균인 0.5를 적용하였다. i-SMR LCOE 단가를 재산정하기 위해서 각각 이용률을 고려한 발전설비의 발전량 비중을 활용하였다.

$$i-SMR \text{ 투자비단가} = 11.46 \times \left(\frac{680}{1,377}\right)^{0.5} \times \frac{1,377 \times 85\%}{680 \times 90\%} = 15.40 \quad (9)$$

상기 투자비 단가는 최초건설호기(FOAK) 기준으로 볼 수 있으며, Nth 호기(NOAK) 투자비는 학습효과 및 복제절감의 원리에 따라 감소될 수 있다. 다만, i-SMR은 기존의 대형원전 대비 혁신적인 설계개념이 도입되었고, 아직 설계가 진행 중이므로 특정 수치를 산출하기에는 불확실성이 높다. 따라서 본 논문에서는 보수적인 관점에서 최초건설호기(FOAK) 투자비를 산출하기로 하였다. 투자비는 할인율의 영향을 크게 받는 인자이며, 할인율별 투자비의 변화는 IEA/NEA LCOE 자료의 각 할인율 값을 활용하여 용량계수를 적용하여 SMR의 LCOE값을 산출하였다.

2. 연료비

원자력 발전은 LNG와 석탄화력 발전과 달리 발전량에 비례하여 연료비가 산정되지 않는다. 노심 설계비용이 존재하고, 사용후연료 처분 등 후행주기 비용이 연료비에 포함되기 때문이다.

IEA/NEA의 Projected Costs of Generating Electricity(2020)에서는 APR1400의 연료비단가를 9.33 USD/MWh로 제시하였다. 채광, 농축 등 선행 핵주기 비용을 7 USD/MWh로 가정하였고, 사용후연료 처분 등 후행 핵주기 비용을 2.33 USD/MWh로 가정하였다.

정확한 계산을 위해서는 초기 노심 설계비용 등을 고려하고, 선행 / 후행 핵주기 연료비용의 변화를 검토해야 하지만, 정보의 부재로 인하여 i-SMR의 연료비 단가는 APR1400과 동일하다는 가정을 사용하였다. 연료비의 경우 발전량에 비례하여 변동되겠지만, 발전량 증가에 따른 증가된 연료비는 연료비단가 계산 시에는 마찬가지로 증가된 발전량에 나누어지므로 그 값이 동일하게 되기 때문이다. 따라서 연료비 단가의 용량계수 적용은 부적합하며, 이 가정에 따라 추정된 i-SMR의 연료비단가를 9.33 USD/MWh이다. 할인율의 변

화에도 연료비 단가는 동일함을 가정하였다.

3. 운전유지비용

IEA LCOE에서 APR1400의 운전유지비는 할인율과 관계없이 18.44 USD/MWh이다. 운전유지비는 인건비, 수선유지비, 개발비, 세금과공과, 기타 경비 등을 포함하고 있는데 고정비적 성격의 요소와 변동비적 성격의 요소를 포함하고 있다. 고정 운전유지비는 발전소의 발전량과 무관한 값으로 발전기 출력이 변동되더라도 Unit 단가가 변하지 않으며, 주요 항목으로는 인건비, 수선유지비 등이 있다. 변동 운전유지비는 발전량에 따라 값이 변하는 값으로 소모성 물품, 냉각재 및 감속재 보충분, 세금과공과 등이 이에 해당한다.

본 논문에서 LCOE는 연간소요비용에 연간발전량을 나누어 기준발전량(kWh) 당 발전원가(LCOE)를 산정하므로 고정운전유지비가 아닌 변동운전유지비는 분모의 비용에 변동을 주므로 고려되어야 할 필요가 있다. 그러나, 변동 운전유지비 중 소모성 물품, 냉각재 및 감속재 보충분 등은 그 비중이 크지 않기 때문에 고려하지 않고, 세금과공과는 변동 운전유지비로 고려하였다. 변동 운전유지비로 고려된 항목은 표6과 같다.

표 6. 변동 운전유지비 고려항목 및 근거

계정	Unit 단가 (원/kWh)	근거
R&D 기금	1.20	원자력 진흥법
지역협력사업비	0.25	발전소 주변지역 지원에 관한 법률 시행령
지역자원시설세	1.00	지방세법

변동유지비를 고려한 i-SMR의 운전유지비 단가는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & i-SMR \text{ 운전유지비단가} && (10) \\
 & = (18.44 - \text{변동비단가}) \times \left(\frac{680}{1,377}\right)^{0.5} \times \frac{1,377 \times 85\%}{680 \times 90\%} + \text{변동비단가} \\
 & = 21.79
 \end{aligned}$$

한편, i-SMR은 기존의 대형원전과 다른 운전유지비 형태를 가질 수 있는 관계로 보수적인 가정으로 APR1400의 운전유지비를 그대로 유지한다는 가정 아래의 운전유지비 단가는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & i-SMR \text{ 운전유지비단가} && (11) \\
 & = (18.44 - \text{변동비단가}) \times \frac{1,377 \times 85\%}{680 \times 90\%} + \text{변동비단가} = 31.01
 \end{aligned}$$

4. 사후처리비

IEA LCOE는 사후처리비 중 사용후연료 처분비용과 중저준위 폐기물 처분비용을 후행핵주기 비용으로 연료비에 포함시키기 때문에 비용의 중복계산을 피하기 위해서 사후처리비에서는 해체충당금만을 고려하였다.

i-SMR의 해체충당금은 결정된 바가 없기 때문에 보수적인 가정으로 APR1400 비용과 동일하다고 가정하였다. SMR은 그 크기와 모듈화 특성으로 인하여 해체비용의 비용 절감이 예상되어지나 현재까지 검토된 자료가 없고 보수적인 판단에 따른 비용 산정을 위해 대형원전과 동일한 해체비용을 사용하였다. 산정된 사후처리비 LCOE는 다음과 같다.

$$i-SMR \text{ 사후처리비 단가} = 0.2 \times \left(\frac{680}{1,377}\right)^{0.5} \times \frac{1,377 \times 85\%}{680 \times 90\%} = 0.38 \quad (12)$$

5. 종합

IEA LCOE를 기반으로 재산정한 i-SMR의 LCOE는 표 7, 표 8과 같다.

표 7. 세부 항목별 균등화발전비용(LCOE) 추정값 [단위 : USD/MWh]

할인율 발전단가	3%	7%	10%	비고
건설비	15.40	34.28	52.94	
연료비	9.33	9.33	9.33	
운전유지비	24.78	24.78	24.78	용량 보정계수 적용
	21.79	21.79	21.79	변동 운전유지비 고려
	35.27	35.27	35.27	APR1400 운전유지비 유지
	31.01	31.01	31.01	운전유지비 유지 + 변동비 제외
해체비	0.38	0.06	0.02	

표 8. i-SMR 균등화발전비용(LCOE) 추정값 [단위 : 원/kWh]

할인율 구분	3%	4.5%	5.5%	7%	10%
용량보정계수 적용 시	54.94	62.60	67.71	75.37	95.86
변동 운전유지비 고려 시	51.64	59.31	64.41	72.08	92.57
APR1400 운전유지비 유지 가정 시	66.48	74.14	79.25	86.91	107.41
운전유지비 유지 가정 변동 운전유지비 고려 시	61.79	69.46	74.56	82.23	102.72

* 기본가정 : IEA Projected Costs of Generating Electricity 기준

- 환율: 1,101원/USD

- 기준 할인율 : 4.5% (사회적 할인율 적용) / 이용률 : 85%

제2절. 7차 전력수급기본계획 자료 활용

7차 전력수급기본계획 기준으로 추정된 균등화발전비용 추정을 위한 입력 전제는 표9와 같다. 원전 R&D 기금 등 변동 운전유지비를 고려하여 운전 유지비를 재산정하였다 [7].

표 9. 원자력 1,000(이용률 80%) 균등화발전비용(LCOE) 추정 입력 전제

구 분	원자력 1000MW
건설비(천원/kW)	2,587
수명기간(년)	40
할인율(%)	5.5
재산정 운전유지비	13.31
연료비(원/백만kcal)	1,933
열소비율(kcal/kWh)	2,314
소내소비율(%)	4.8

* 조성진·박찬국(2015)

표9의 입력 전제에 기반하여 i-SMR LCOE 산정의 기초자료인 원자력 1,000의 LCOE를 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$\text{균등화발전원가}(LCOE) = \text{고정비 단가} + \text{변동비 단가} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{고정비 단가} &= \frac{\text{건설공사비(원)} \times \text{고정비율}^*}{\text{설비용량}(kW) \times 8,760(h) \times \text{이용률} \times (1 - \text{소내소비율})} \quad (13) \\ &= \frac{\text{건설비단가(원/kW)} \times \text{고정비율}^*}{8,760(h) \times \text{이용률} \times (1 - \text{소내소비율})} \end{aligned}$$

$$* \text{고정비율} = \text{자본회수계수}(CRF) + \text{운전유지비율} + \text{법인세비율} \quad (14)$$

자본회수계수(CRF, Cost Recovery Factor)는 투자액을 매년 연도별로 균등하게 회수할 수 있는 연간 금액을 산정하기 위한 비율로 투자액에 곱하여 그 금액을 산정한다.

$$C \times CRF = A, \quad CRF = \frac{A}{C} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (15)$$

* C: 최초투자액(총 건설비)

* A: 연도별 균등회수액(C와 증가가되는 연금)

운전유지비율은 건설비 대비 운전유지비의 비율을 나타내며, 법인세 비율은 건설비 대비 법인세 등의 비율을 의미한다.

위의 산정방식과 표 9의 입력 전제를 기반으로 추정된 원자력 1,000의 균등화발전비용은 표10과 같다.

표 10. 원자력 1,000(이용률 85%) LCOE 추정값 [단위 : 원/kWh]

이용률 발전단가	90%	80%	70%	비고
건설비	21.5	24.2	27.6	
연료비	4.5	4.5	4.5	
운전유지비	21.3	23.9	27.4	
해체비	2.1	2.4	2.8	
법인세	1.4	1.5	1.8	
합 계	48.6	54.1	61.2	

i-SMR 균등화발전비용(LCOE)은 표 10의 원자력 1,000 LCOE 추정값을 기반으로 용량계수 등을 적용하여 산정하였다. IEA LCOE 자료를 기반 추정과 동일하게 Scale Factor를 적용하였고, '15년 자료임을 고려하여 과거 연도별 소비자물가지수를 고려한 물가보정(표 11)을 반영하였다.

표 11. 연도별 소비자물가지수

년도 구분	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
소비자물가지수 증가율(%)	0.7	1.0	1.9	1.5	0.4	0.5	2.5	5.1	
누적 증가율(%)		1.00	1.01	1.03	1.05	1.05	1.06	1.08	1.14

용량보정, 물가보정, 원자력 1,000 운전유지비 유지 및 최신연료비를 반영한 i-SMR의 균등화발전비용(LCOE)는 다음과 같다.

표 12. i-SMR(680MW) 균등화발전비용 추정값 [단위:원/kWh]

발전단 가 이용률	건설비	운전 유지비	연료비	해체비	법인세	LCOE
90%	23.3	32.1	6.4	2.9	2.0	66.7
85%	24.7	34.0	6.4	3.0	2.2	70.2
80%	26.2	36.2	6.4	3.2	2.3	74.2
70%	30.0	41.3	6.4	3.7	2.6	83.9
60%	35.0	48.2	6.4	4.3	3.1	96.9

IEA 기반으로 추정된 i-SMR의 LCOE는 수급계획을 기반으로 추정된 LCOE 대비 약 10% 정도 높은 값을 보이는데, 이는 IEA 자료가 APR1400 건설비를 기초로 산정되었고, 수급계획 자료는 원자력 1000 건설비를 기초로 산정되었기 때문인 것으로 보인다. 상대적으로 APR1400의 건설비가 원자력

1000 건설비보다 높아 더 높은 건설비 단가를 형성한 것으로 판단된다.

i-SMR은 아직 설계중으로 건설단가를 정확하게 예측할 수 없다. 다만, 분석의 기초자료에 따라 건설단가 간 다소 차이를 보이고, 건설단가가 균등화 발전비용에서 차지하는 비중이 약 30 ~ 40% 임을 고려할 때, 적절한 건설비 규모의 달성이 SMR의 발전원가 경쟁력을 확보하는 중요 요건이 될 것으로 판단된다.

제3절. 민감도 분석

이번 장에서는 IEA와 수급계획을 기반으로 추정된 균등화발전비용을 활용하여 할인율, 이용률, 연료비 변동 등에 대해 민감도 분석을 실시하고, 결과가 나타내는 의미에 대해서 검토하였다.

1. 할인율 변화

일반적으로 할인율이 증가할 경우 LCOE값은 증가한다. 이는 할인율 증가로 건설이자가 증가하여 건설비 단가가 증가하기 때문이다. 연료비, 운전유지비 단가는 일반적으로 할인율에 영향을 받지 않는다. 해체비 단가는 해체충당금 항목에서 할인율의 영향을 받으나 그 비중이 크지 않기 때문에 할인율에 따른 LCOE 증가의 주요 항목은 건설비라 할 수 있다.

분석결과에 따르면 i-SMR은 3% 할인율에서는 61.8 원/kWh로 추정되었으나, 10% 할인율에서는 102.7 원/kWh로 비례적으로 증가함을 보였다. 3% 할인율은 국가나 정부의 적극적인 지원을 통해 낮은 이자율로 사업을 진행할 경우 적용할 수 있는 할인율로써 한수원 등의 공기업에서 적용 가능한 수치이다. 과거 다수의 연구에서 원자력과 타 발전원과 비교를 하는 경우, 사회적 할인율인 4.5%를 적용한 바 있다. 7%, 10% 할인율은 정부 차원이 아닌 민간에서 원자력 사업을 추진하는 경우에 해당되며, 한수원이 추진하는 i-SMR 사업의 경우 정부 지원 의사에 따라 3% 또는 4.5% 할인율을 적용하는 것이

적합할 것으로 판단된다.

할인율 변화에 따른 i-SMR의 균등화발전비용 LCOE는 그림 4와 같다.

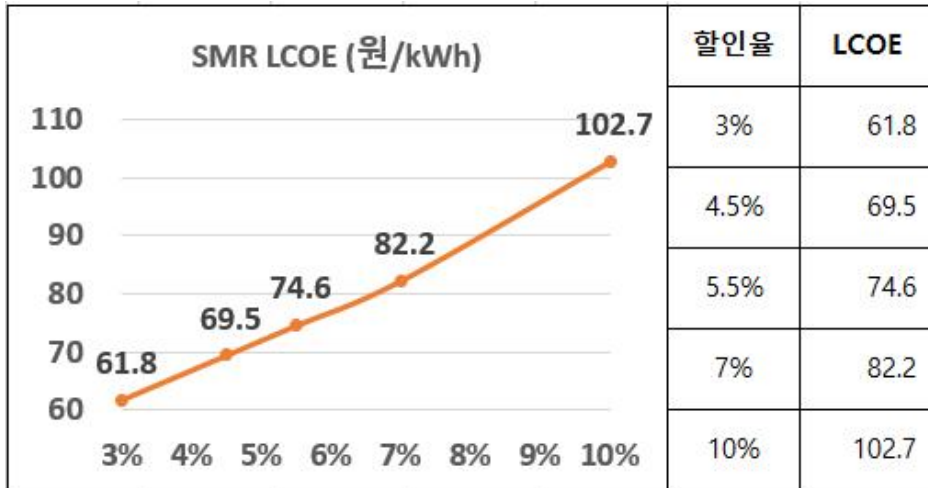


그림 4. 할인율 변화에 따른 i-SMR LCOE (IEA 자료 기반)

2. 이용률 변동

균등화발전비용(LCOE)은 발생하는 모든 비용을 발전량으로 나누어 발전원가를 산정하는 방식이므로 발전량을 결정하는 이용률 값이 중요하다. 높은 이용률은 낮은 LCOE값을 산출하게 된다.

'00 ~ '19년까지의 20년간 전체 원전의 평균 이용률은 86.1%였으며, '11년 이후 낮은 이용률을 제외한 '00 ~ '11년까지의 전체 원전 평균 이용률은 92.3% 이다 (그림 5). 과거 다수의 연구에서도 원전의 이용률을 80 ~ 90%로 산정한 바 있으며, 최근 20년간의 평균 이용률을 고려할 때 향후 대형 원전의 이용률 전망은 85%를 기준으로 상/하안 10% 정도의 민감도 분석을 고려해볼 수 있을 것이다.

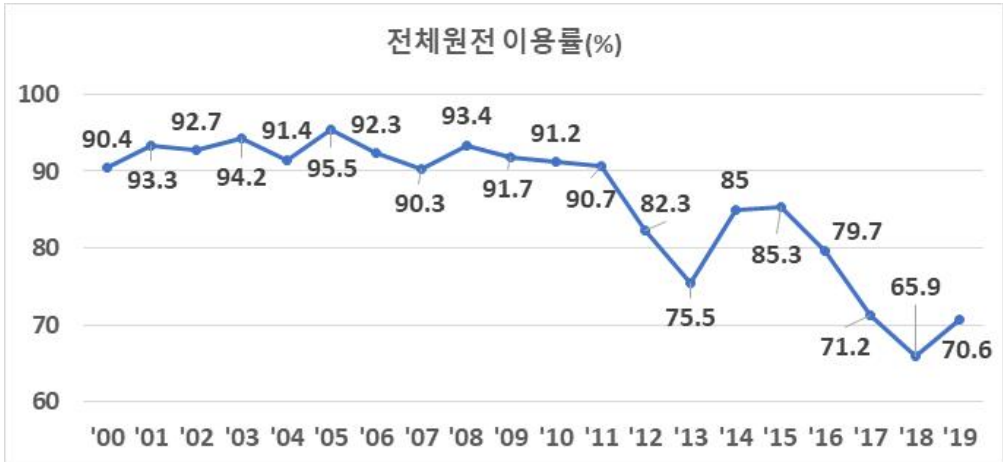


그림 5. 전체 원전 이용률('00 ~ '19)

한편, i-SMR의 이용률을 전망함에 있어 대형원전의 이용률을 전망하는 것은 적합하지 않다. i-SMR은 전력 수요와 신재생 에너지의 간헐성에 대비하여 부하추종운전을 수행하게 됨에 따라 해당 이용률을 더욱 낮아질 것으로 보인다. 따라서 이용률 변화에 따른 LCOE를 검토할 필요성이 있다.

이용률 변화에 따른 i-SMR의 LCOE는 그림 6과 같다. 분석에 따르면, 90% 이용률에서 66.7원/kWh의 LCOE 값은 60% 이용률에서 96.9원/kWh로 증가하였다.

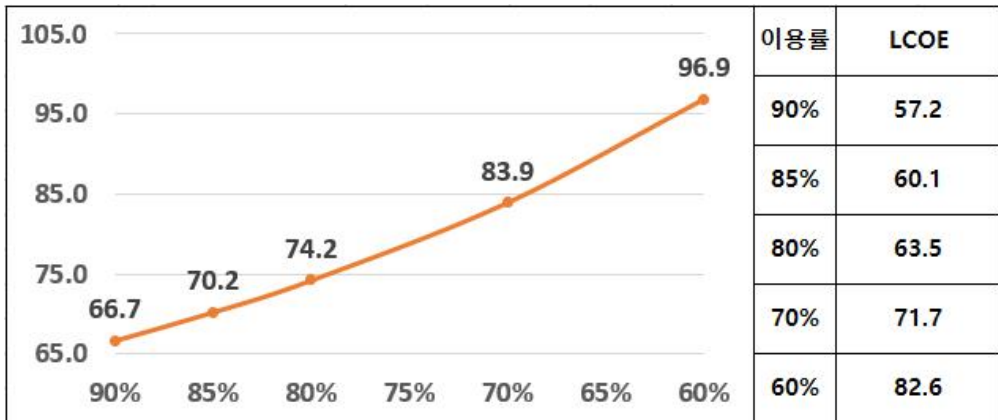


그림 6. 이용률 변화에 따른 i-SMR LCOE (7차 전력수급기본계획 추정 기반)

제7장. 결론

전 세계적으로 여러 국가에서 대형원전의 입지문제와 안전성 향상, 기술성 등의 장점으로 SMR 프로젝트를 추진하고 있다. 현재 개발이 진행 중인 관계로 기술성과 안전성에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 SMR을 도입하려는 국가들의 입장에서는 결국 경제성이 가장 중요한 선택 요소가 될 것으로 보인다. 최근 미국의 보글원전은 예정보다 2배 이상의 예산이 투입되고 있고, 프랑스의 플라망빌 원전 역시 계획보다 수 배의 예산이 투입되고 있는 등 건설 원전의 경제성 악화 소식이 심심치 않게 들려오고 있다. 이는 SMR에서도 다르지 않은 상황이다. 최근 NuScale SMR 프로젝트의 균등화발전비용 목표치를 58\$/MWh에서 89\$/MWh로 53% 조정한 바 있다.[12] 경제성이 모호한 프로젝트가 성공적으로 도입되기를 기대하기는 어려울 것이다. 즉, 시장에서는 결과적으로 경제성이 확보된 원전만이 살아남게 될 것이다. 따라서 앞으로 SMR의 경제성에 대해서도 더 많은 관심을 가져야 할 것이다.

본 연구에서 제시된 방법을 사용하여 IEA LCOE 자료와 7차 전력수급기본계획 추정자료를 기반으로 i-SMR의 균등화발전비용을 추정한 결과, 대형원전보다는 다소 높았지만, LCOE 등 경쟁전원 대비 저렴한 발전원가를 보였다. 본 논문의 추정자료가 최초건설호기(FOAK) 기준임을 고려 시 반복건설(NOAK) 단가는 더 경쟁력을 확보할 것으로 판단되었다. 다만, 민감도 분석 결과 할인율이 건설비에 미치는 영향이 크고, 이용률에 따라 발전원가가 크게 변화하기 때문에 적정 할인율을 만족하는 자원 조달과 적정 이용률을 확보하기 위한 방안을 다방면으로 검토하고, 관련된 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] B. Mignacca, G. Locatelli, Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 118, 2020
- [2] SUBKI, Hadid. Advances in small modular reactor technology developments. 2020
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, (Reference) Nuclear Power Plant Industry Policy Division, Full-scale promotion of large-scale R&D to build a nuclear powerhouse, 2022
- [4] H. O. Kang, "Highlights and Implications of the Innovative SMR Development Plan," July 8, 2022, Korea Energy Economics Institute, World Nuclear Market Insights, July 8, 2022
- [5] B. H. Um and C. H. Kang, An Economical Analysis on Fuel Switching Model of Coal Power Plant using Herbaceous Biomass, Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, vol. 61, no. 3, pp. 89–99, 2019
- [6] H.-J. Kim, K.-N. Ko, and J.-C. Huh, Reassessment of Economic Feasibility for a Wind Farm on Jeju Island Considering Variable Jeju SMP, Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 33, no. 5. The Korean Solar Energy Society, pp. 41–50, 2013
- [7] Cho, Sungjin, and Yoon Kyung Kim, Economic feasibility study of the life extension by reactor type of nuclear power plant in Korea, study resource and economic environment 27.2, pp.261-286, 2018
- [8] Lee, Kihyun, Taeryong Kim, and Cheolwook Jeong, Economic Evaluation of Long-term Operation of NPPs in Korea, 2015
- [9] Board of Audit and Inspection, 2020, full report on feasibility check of the decision to close Wolsong Unit 1 early. pp.143, 2020
- [10] Seul Lee, Wooyong Jung, Economic Feasibility Simulation of Large reactors and SMRs, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting

Changwon, Korea, October 20-21, 2022

- [11] B. Mignacca, G. Locatelli, Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda, Vol. 118, 2020
- [12] David Schlissel, Eye-popping new cost estimates released for NuScale small modular reactor, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 2023
- [13] LORENCZIK, Stefan, et al. Projected costs of generating electricity-2020 edition. Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2020.
- [14] Delene, J. G., et al. Nuclear energy cost data base. A reference data base for nuclear and coal-fired powerplant power generation cost analysis. No. DOE/NE-0044/2. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 1984.