

# System Dynamics를 이용한 원자력발전의 기술가치 평가

## A System Dynamics Approach for Valuing Nuclear Power Technology

이용석\*

Lee, Yong-Suk\*

### Abstract

Nuclear technology made a great contribution to the national economy and society by localization of nuclear power plant design, and by stabilization of electricity price, etc. It is very important to conduct the retrospective analysis for the nuclear technology contribution to the national economy and society, but it is more important to conduct prospective analysis for the nuclear technology contribution.

The term "technology value" is often used in the prospective analysis to value the result of technology development. There are various definitions of technology value, but generally it means the increment of future revenue or the reduction of future cost by technology development. These technology valuation methods are widely used in various fields (information technology or energy technology, etc).

The main objective of this research is to develop valuation methodology that represents unique characteristics of nuclear power technology. The valuation methodology that incorporates market share changes of generation technologies was developed. The technology valuation model which consists of five modules (electricity demand forecast module, technology development module, market share module, electricity generation module, total cost module) to incorporate market share changes of generation technologies was developed. The nuclear power technology value assessed by this technology valuation model was 3 times more than the value assessed by the conventional method. So it was confirmed that it is very important to incorporate market share changes of generation technologies.

The valuation results of nuclear power technology in this study can be used as policy data for ensuring the benefits of nuclear power R&D (Research and Development) investment.

**Keywords** : 기술가치, 원자력, 발전원 구성비, 시스템다이내믹스  
technology value, nuclear, market share, system dynamics

\* (주) 미래와도전 선임연구원 (제1저자, ys028@fnctech.com)

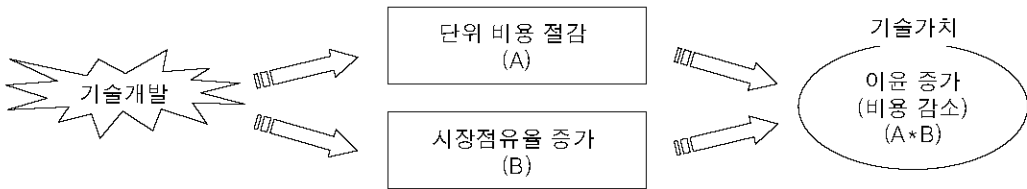
## 1. 서론

원자력 기술개발은 국가 연구개발 프로그램의 형태로 지금까지 원자력발전소 설계 기술 자립, 전력요금 안정화 등을 통해 국가에 많은 사회경제적 기여를 해왔으며, 이같은 사실은 과거 원자력 기술개발의 국가에 대한 기여도의 회고적 분석 (Retrospective Analysis) 연구들을 통해서도 입증되고 있다.

그러나, 과거 원자력 기술개발이 국가에 얼마나 많은 경제적, 또는 비(非)경제적 기여를 했는지를 분석하는 것도 중요하지만, 더욱 중요한 것은 앞으로 원자력 기술개발이 국가에 얼마나 많은 기여를 할 것인지에 대해 예측적 분석 (Prospective Analysis)을 수행하는 것이다.

이와 같은 미래의 기술개발 효과 측정을 위하여 기술가치(Technology Value)라는 개념이 사용되는데, 기술가치란 그 평가대상 및 방법에 따라 다양한 정의가 가능하지만 일반적으로 기술이 가져다주는 미래 수익 또는 비용감소분을 의미한다. 이러한 기술가치 평가는 기술개발의 타당성 분석 또는 기술을 보유한 벤처기업의 가치평가 등을 위해 정보통신, 에너지 등 다양한 기술분야에서 활용되고 있다.

일반적인 기술가치의 개념을 도시하면 그림 1과 같은데, 기술개발로 인하여 개별제품의 단위비용이 감소하고, 시장점유율이 증가함으로써 결국 총 이윤 증가 혹은 총 비용 감소를 가져오게 된다.

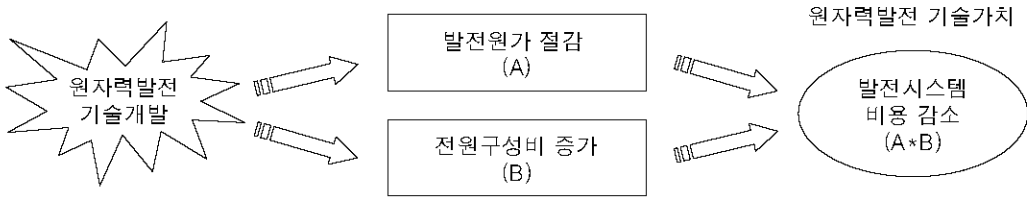


[그림 1] 일반적인 기술가치 개념도

원자력발전기술의 기술가치도 이와 마찬가지로 그림 2와 같이 발전원가(단위비용에 해당) 절감과 전원구성비(시장점유율에 해당) 증가로 인한 발전시스템 비용 감소로 나타낼 수 있다.

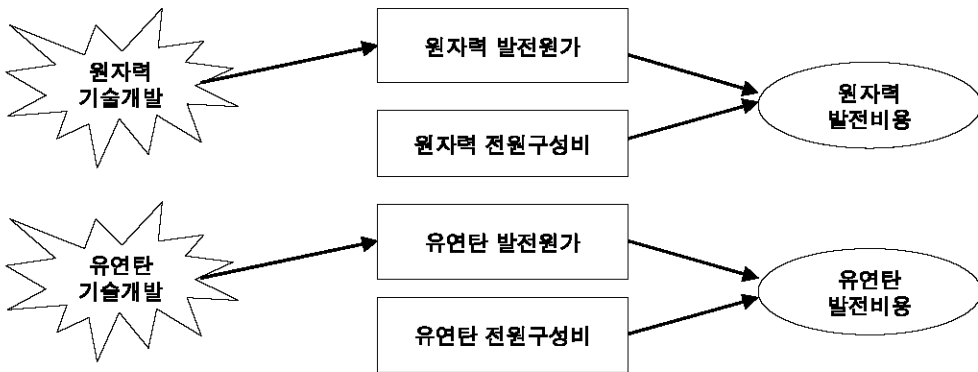
원자력발전 기술가치 = 원자력 기술 미개발시 총 발전시스템 비용

- 원자력 기술 개발시 총 발전시스템 비용

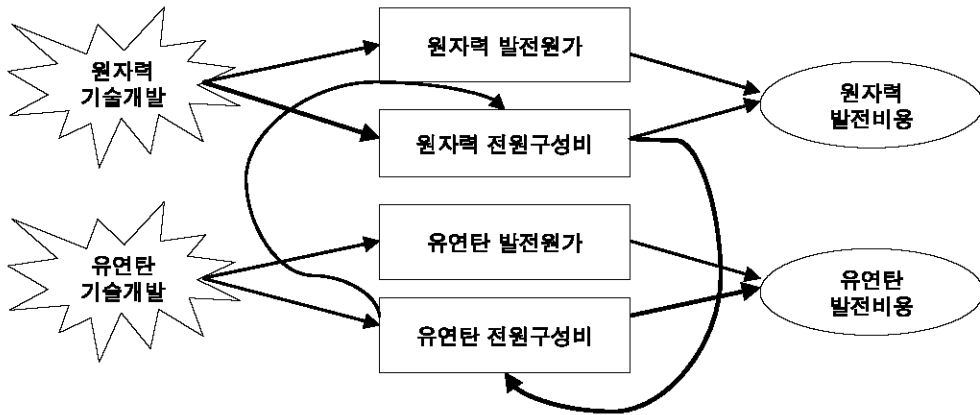


[그림 2] 원자력발전기술의 기술가치 개념도

이와같은 원자력발전기술에 대한 기술개발 효과를 측정하려면 단위비용 감소에 해당되는 발전원가 절감효과 뿐 아니라, 시장점유율 증가효과에 해당되는 전원구성비 증가효과도 동시에 고려되어야 한다. 그러나, 기존의 원자력발전 기술가치평가에서는 기술개발에 따른 전원구성비, 즉 시장점유율 증가효과는 고려되지 못하고, 그림 3과 같이 단선적인 기술가치 평가만이 수행되었다. 그러나, 실제로는 그림 4와 같이 원자력발전기술의 개발은 원자력발전원가 뿐 아니라 원자력 전원구성비에도 영향을 미치게 되며 이는 유연탄 등 타 발전원의 전원구성비에도 영향을 미치게 되고, 이것이 다시 원자력 전원구성비에 영향을 주게 되는 피드백 (feedback) 구조를 갖는다.



[그림 3] 피드백 구조를 고려하지 않은 기술가치 평가 개념도



[그림 4] 피드백 구조를 고려한 기술가치 평가 개념도

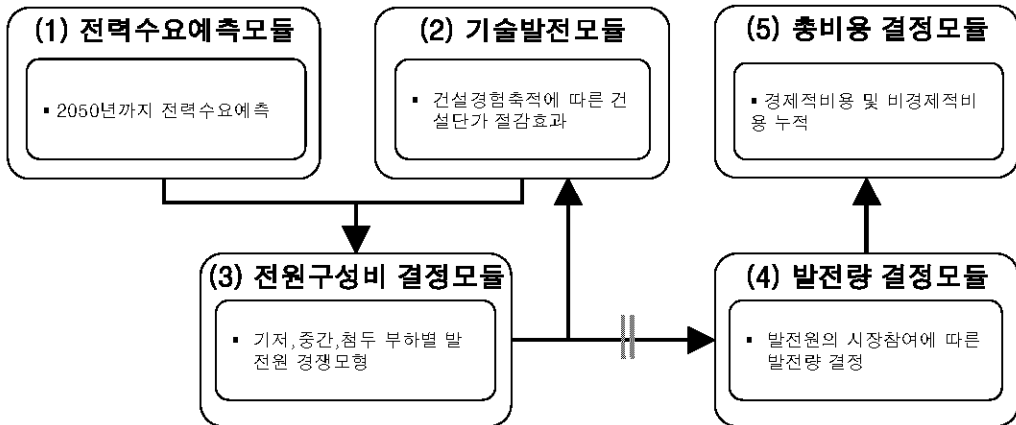
따라서 원자력발전기술에 대한 기술가치 평가 시, 이와같이 기술개발이 전원구성비 변화에 영향을 미치는 피드백 구조는 반드시 고려되어야 하며, 본 연구에서는 이러한 전원구성비 변화 영향을 고려할 수 있도록 시스템다이나믹스 (System Dynamics) 기법을 사용한 원자력발전 기술가치 평가 방법론을 개발하였다.

## II. 평가 방법론

전원구성비 변화를 고려한 원자력발전 기술가치 평가를 위하여 총 5단계의 모델을 구성하였다. 첫 번째는 전력수요예측 부분인데, 원자력발전 기술가치 평가를 위하여 우선 국내 전력수요규모를 예측하였으며 예측기간은 2050년까지로 하였다. 둘째로는 기술발전모델인데, 기술개발 또는 건설경험 축적으로 인한 원자력, 유연탄, LNG 등 발전원들의 비용절감 효과를 모형화하였다. 이는 기술경험 축적유무에 따른 단위비용 절감을 고려하기 위한 것이다. 셋째로는 전원구성비 결정 부분인데 여기서 원자력발전의 구성비 (시장점유율 또는 설비량 비율)가 결정된다. 이로인해 원자력 설비량, 즉 시장규모가 결정된다. 넷째로는 발전량 결정부분인데, 매시간별 전력부하에 따라 발전설비들의 시장참여가 이루어지고 발전원별 발전량이 결정되는 부분이다. 마지막 다섯째로는 발전비용 결정부분인데, 원자력, 유연탄, LNG 등 모든 발전원들의 총 발전비용이 구해진다. 이러한 총 발전비용에는 건설비, 연료비 등의 직접적인 경제적 비용 외에도 CO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 등 환경, 보건 영향 등의 간접적인 비경제적 비용도 포함된다. 원자력 발전의 기술가치는 기술개발에 따른 총 발전비용

절감분으로 정의되므로, 원자력 기술개발 유무에 따른 총 발전비용의 차이를 계산함으로써 구할 수 있다.

참고로 전원구성비 변화에 대한 연구는 최근에 시스데미스, 에너지경제연구원에서 각각 이루어진 바 있으나, 모두 경제성분석관련 비용(건설비, 운영비, 연료비 등)을 단순 상수로 취급하여 전원구성비를 구하였다는 제한점이 있다. 두 연구 모두 장기간 (2050년까지)의 전원구성비 예측을 목적으로 하고 있으므로, 실제로는 장기간 동안의 기술개발에 의한 건설비, 운영비, 연료비 등의 변화는 매우 중요한 요소라고 볼 수 있으며, 이를 고려하지 않은 장기간의 전원구성비 예측은 실제상황과는 많은 차이가 있다고 볼 수 있다는 점에서 선행연구는 실질적인 전원구성비 예측에는 한계점을 지니고 있다고 볼 수 있다. 반면 본 연구에서는 “(2) 기술발전모듈”에서 학습효과에 의한 건설단가의 절감효과를 고려함으로써, 기술가치 평가를 위한 좀 더 실질적인 전원구성비 예측을 수행하고자 하였다.



[그림 5] 모델 구성 논리

그림 5와 같은 모델의 경우 5가지 모형이 각각 독립적인 것이 아니라 상호연관관계를 갖고 있으며, 여기에 시간지연과 피드백이 고려되어야만 하는 특성이 있다. 예를 들면 “(3) 발전구성비 결정” 모형에서 발전원별 건설되어야 할 설비량이 결정되면 건설기간만큼의 시간지연 이후, 발전시장에 투입되어 발전량이 결정된다. 또한 “(2) 기술발전모듈”에서는 발전원별 건설단가가 내생적으로 결정됨으로써 “(3) 전원구성비 결정” 부분에 영향을 미치기도 하지만, 반대로 “(3) 전원구성비 결정” 부분에 의해 다시 영향을 받는 피드백 구조를 가진다.

본 연구에서는 이러한 상호적으로 복잡한 인과관계와 시간지연 및 피드백 특성을 고려

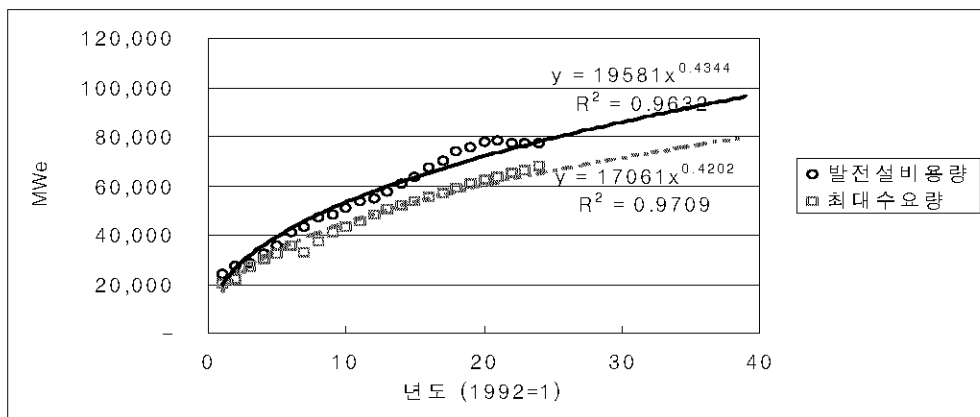
하기 위하여 시스템다이내믹스 기법을 적용하였다. 시스템다이내믹스 기법은 사회 또는 산업 시스템 (System)의 비선형적인 인과관계, 시간지연, 피드백을 고려하고 시간에 따라 변화하는 동적(Dynamic) 구조를 정량화하는데 있어서 유용한 기법으로, 1961년 Jay W. Forrester의 “산업동태론”을 시작으로 출발하여 정책설계도구로 개발되어 현재는 전력시장 또는 에너지시장 분석, 기술의 경제적 기여도 분석, 프로젝트 관리 분석 등 다양한 정책분야에서 활용되고 있다.

특히 전력시장 분석에서는 전력산업 구조개편 이후 일반 투자가의 신규 발전소 건설 Cycle 예측, 원자력을 포함한 다양한 발전기술에 대한 정책결정과정 분석, 전력산업 구조개편 이후 전원구성비 예측, 원자력발전산업의 기술경쟁력 분석 등의 분야에서도 시스템다이내믹스 기법을 적용하여 다양한 연구가 수행된 바가 있다.

### 1. 전력수요예측모델

일반적으로 발전소는 미래의 최대전력수요량을 예측하고 이에 대하여 일정수준의 설비 예비율을 유지할 수 있도록 건설된다. 원자력발전소 또한 최대전력수요량 예측에 근거한 국가 차원의 전력수급기본계획에 의하여 건설되므로, 향후의 원자력 발전소의 건설추세를 예상하기 위해서는 일차적으로 최대전력수요량의 예측이 필요하다.

본 모델에서 발전설비용량 및 최대전력수요량은 과거부터 현재까지 (1992~2004년)의 실적 및 2017년까지의 정부의 제 2차 전력수급기본계획에서 예측한 자료를 사용하였다. 2017년 이후는 자료가 없는 관계로 발전설비용량 및 최대전력수요량이 추세선에 따라 완만하게 증가한다고 가정하였다.



[그림 6] 최대수요량 및 발전설비용량 추세선

## 2. 기술발전모듈

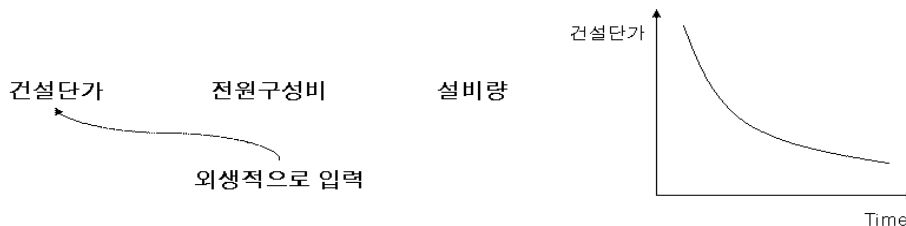
본 모델에서는 시간에 따른 발전기술 진보를 고려하였다. 앞서 언급하였듯이 최근 전원구성비 예측 연구가 각각 이루어진 바 있는데 (시스템믹스, 에너지경제연구원), 이 두 기관의 연구에서는 기술개발에 의한 경제성분석관련 비용(건설비, 운영비, 연료비 등)의 변화가 고려되지 않아 실질적인 전원구성비 예측에는 한계가 있었다.

본 모델에서는 건설비에 대한 학습효과 (건설비 감소효과)만을 고려하였다. 이는 학습효과가 대부분 건설비에서 발생하며, 상대적으로 운영비, 연료비 등의 학습효과는 영향이 작을 뿐더러, 현재 학습효과에 대한 비용변화에 대한 신뢰할만한 예측자료가 건설비에 대해서만 존재하는 관계로 본 연구에서는 건설비에 대한 학습효과만을 고려하였다.

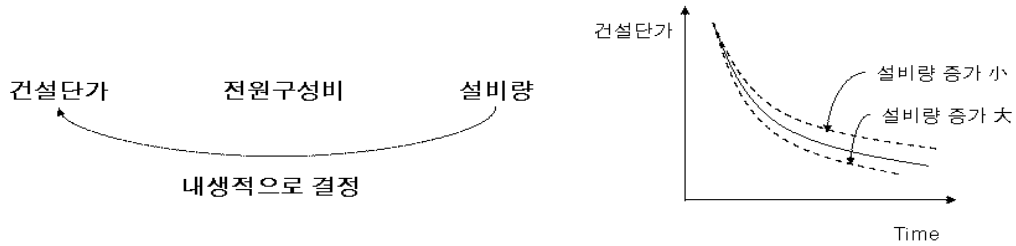
이러한 기술의 진보는 일반적으로 학습효과(Learning Effect)로 정의되는데, 학습효과를 외생적으로(Exogenous) 모델링하는 방법과 내생적으로 (Endogenous) 모델링하는 방법이 있다. 일반적으로 발전소를 많이 건설할수록 경험축적에 의해 건설단가는 절감된다. 그러나 학습효과를 외생적으로 모델링하는 경우에는 이러한 경험축적 유무에 관계없이 그림 7과 같이 무조건적으로 시간이 흐름에 따라 건설비가 절감된다고 가정한다. 즉, 그림 7은 건설단가 절감에 의해 전원구성비가 증가하고 이에 의해 설비량이 증가하는 단선적인 형태를 나타낸다.

그러나, 실제로는 건설비의 절감 정도는 축적된 건설경험에 의존하며 이는 누적 설비량으로 표현된다. 따라서 실제적으로는 그림 8과 같이 건설단가 절감에 의해 전원구성비가 증가하고 이에 의해 설비량이 증가하며, 이는 또다시 건설단가 절감에 영향을 미치게 되는 피드백 구조를 가진다.

본 연구에서는 그림 8과 같은 피드백 구조를 고려하여 기술진보가 내생적으로 결정되는 것을 고려하여 모델을 구성하였다.



[그림 7] 기술진보 외생적 모델 개념도



[그림 8] 기술진보 내생적 모델 개념도

### 3. 전원구성비 결정모형

본 모형에서는 기저, 중간, 침투부하별 원자력, 유연탄, LNG 등 발전원끼리의 경쟁에 의해 발전원별 구성비, 즉 시장점유율이 결정된다. 각 시점에서 전력소비량 증가 및 기존 발전소 폐기에 따른 발전용량 감소에 의한 전력부족분을 만족시킬 수 있도록 추가되어야 할 발전설비량이 정해지고, 발전설비들의 상대적인 경제성에 따라 추가되어야 할 (신규건설될) 발전설비의 구성비율이 결정된다.

#### 1) 원자력발전소 건설, 운전 모형

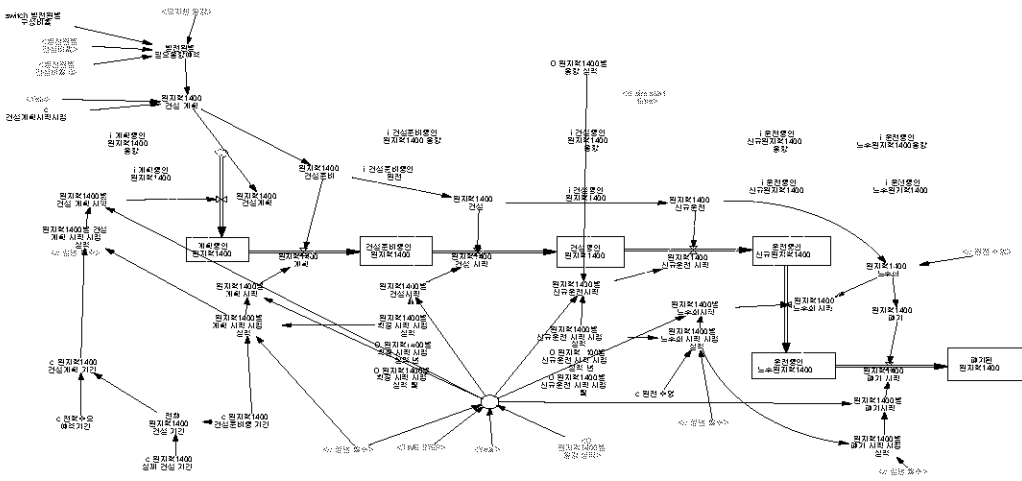
어떤 형식의 발전원이더라도 건설계획에서 시작하여 착공, 건설, 완공, 운영, 폐기의 수명과정을 가지게 된다. 다만 그 각각의 과정에 걸리는 시간이 각 형식별로 차이가 있다. 이 수명 과정은 전형적인 Stock and Flow 로 구성될 수 있다. 이 때 계획, 착공, 건설, 완공 등과 같은 이벤트들은 flow로 볼 수 있고, 각 과정 사이의 기간 동안 발생하는 누적분은 stock 변수로 볼 수 있다.

본 모형에서는 완공되어 발전가능한 용량을 세분하였는데, 완공이후 폐기 전까지 실제 발전을 하여 운영가능한 용량 중, 향후 10년안에 수명이 끝나는 경우에는 노후로, 그 이외의 것은 신규로 분류하였다. 이것은 발전사업자들이 새로운 발전소 건설을 계획할 경우, 계획이후 완공시 까지의 시간 지연을 고려할 때 지금 계획된 발전소가 완공될 무렵에는 노후화된 용량분은 실제 발전시장에서 폐기될 것이므로 건설계획시 미래에 실제 운영가능한 용량을 고려하기 위함이다.

모형에서 건설계획시에 고려하는 용량은 현재시점에서 운영가능한 용량이 아니라 노후화된 용량을 제외한 신규 용량과 건설준비중용량, 건설중인 용량을 고려하여 수요예측과 비교하여 결정하도록 한다. 그리고 제2차 전력수급기본계획에 따라 2017년까지 확정적 계획으로 분류된 발전건설계획은 그대로 실현된다고 가정하고 자료를 입력하였으며, 2017년



이후의 발전건설계획은 발전설비들의 상대적인 경제성에 따라 모형내에서 결정되도록 하였다.



[그림 9] 원자력발전소 건설, 운전 모형

## 2) 전원구성비 결정논리

본 모형에서는 전원구성비가 발전원별 상대적인 경제성에 따라 결정되도록 하였다. 전원구성비 계획을 위하여 현재 국내에서 주로 사용되고 있는 모형은 WASP (Wien Automatic System Planning Package)이라는 모형이다. 이 전산모형은 공급신뢰도, 계통운영상의 문제점 여부 등 기술적 요건을 만족하는 전원설비 조합안 중에서 비용이 최소가 되는 건설계획안을 제시해준다. 그러나, 이러한 WASP과 같은 최적화모형을 사용할 경우 특정발전원에 대한 과잉 의존의 오류를 범하게 될 우려가 있다. 실제로 WASP을 사용하여 전원구성비 변화를 시뮬레이션할 경우, 저비용의 발전원만 건설되고 고비용의 발전원은 전혀 건설되지 않는 것으로 나타나 실제 상황을 모의하는데는 많은 제한이 있다.

따라서 본 연구에서는 WASP과 같은 최적화모형 대신, 발전원 구성비율을 결정하는 과정을 로짓함수를 이용한 시장비중방정식 (market share equation) 개념을 사용하여 모형화하였다. 이러한 방법은 ENPEP 등 에너지시장 모형에서 최근 사용되고 있는 방법으로써 최소비용의 발전원이 최대 전원구성비를 점유하긴 하지만, 고비용의 발전원들도 최소한의 전원구성비는 유지하도록 함으로써 WASP 등 기존의 최적화모형과 같이 특정 발전원에 대한 과잉 의존의 오류를 범할 우려가 없다는 장점이 있다.

앞서 발전원가 설명부분에서 언급하였듯이 발전원가는 이용률별로 차이가 나므로, 이용

를  $A$ 의 범위에서 신규건설될 발전원  $i$ 의 구성비  $S_{iA}$ 를 구하기 위하여 다음과 같은 로짓 함수 시장비중방정식을 사용하였다.

$$S_{iA} = \frac{\left(\frac{1}{LGC_{iA}}\right)^r}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{LGC_{jA}}\right)^r}$$

$S_{iA}$  : 이용률 수준  $A$ 에서 발전원  $i$ 의 건설구성비 (시장비중)

$LGC_{iA}$  : 이용률 수준  $A$ 에서 발전원  $i$ 의 발전원가

$LGC_{jA}$  : 이용률 수준  $A$ 에서 발전원  $j$ 의 발전원가

$n$  : 발전원 개수

$A$  : 이용률 수준 (0%, 10%, ... , 90%, 100%)

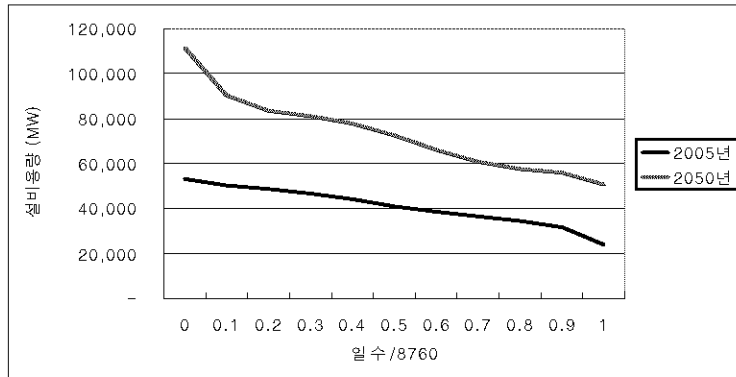
$r$  : 가격민감도를 나타내는 지수

#### 4. 발전량 결정모형

발전원별 전원구성비를 구함으로써 발전원별 설비량이 구해지면, 시간대별 전력부하에 따른 발전설비들의 시장참여에 의해 발전원별 발전량이 결정된다. 이러한 발전량을 구하기 위해서는 부하지속곡선이라는 것을 사용하게 되는데, 부하지속곡선은 1년 (8760시간)의 부하를 부하의 크기순서로 시간에 따라 재분배한 것이다. 이러한 부하지속곡선은 에너지경제연구원<sup>1)</sup>에서 AEC (Atomic Energy Commission)의 5차 다항식으로 표현되는 계수 추정식<sup>2)</sup>을 적용하여 향후 2050년까지의 부하지속곡선을 예측한 결과를 사용하였다. 그림 10의 y축은 용량이며 x축은 1년의 시간수 8,760시간을 1로 보아 정규화한 것이다. 2050년의 부하지속곡선은 부하율이 2004년에 비해 약 12% 낮으므로 전체적으로 2004년의 부하지속곡선에 비해 급하게 우하향하며, 이러한 현상은 특히 앞부분(x축의 0.0~0.1 구간)에서 현저하게 나타난다. 반대로 2004년의 부하지속곡선은 부하율이 높아(77%), 전체적으로 완만하게 우하향하는 형태이다. 부하율 하락의 이유는 가정, 상업용 수요비중의 증가(산업용 수요비중의 감소), 심야부하 개발의 축소(전기난방 감소), 냉방수요의 증가 등이다.

1) 에너지경제연구원, "전력산업 구조개편이 발전원료 선택에 미치는 영향 연구", 연구보고서 04-05.

2)  $a_1=6(2+ML-3LF)$ ,  $a_2=55+27ML-82LF$ ,  $a_3=-4(28+10ML-38LF)$ ,  $a_4=20(5+ML-6LF)$ ,  $a_5=-32(1-LF)$ , 여기에서  $ML$  = 최소수요/최대수요,  $LF$  = 부하율



[그림 10] 부하지속곡선 (2005년 vs 2050년)

## 5. 총 비용 결정모형

총 발전량과 발전설비량이 구해지면 이에 따라 총 비용을 구할 수 있다. 본 연구에서 기술가치를 기술개발로 인한 비용감소분으로 정의하였으므로, 최종 목적함수를 '총 비용 누적'으로 정의하였다. 이때 '총 비용 누적'은 2005년부터 2050년까지의 누적값이다.

본 연구에서 총 비용은 건설비, 운영비, 연료비 등의 직접적인 경제적 비용 뿐 아니라 (본 연구에서 '직접비용 (direct cost)'으로 정의), 환경오염, 건강영향 등 직접적으로 나타나지 않는 비용까지 (본 연구에서 '외부비용 (external cost)'으로 정의) 포함하도록 하였다. 이때 총 비용이란 원자력, 유연탄, LNG, 신재생 등 모든 발전원들이 포함된 전체 발전시스템의 비용을 합한 것을 의미한다.

직접비용이란 에너지 생산자나 소비자에 의해 직접적으로 고려되는 비용으로, 건설비, 운영비, 연료비 등 (원자력 사후처리비, 연구개발기금 등도 포함) 이미 시장 가격(market price)에 포함되는 비용을 나타낸다. 여기서는 직접비용을 발전원가 (단위 : kWh/원)에 발전량(단위 : kWh)을 곱한 개념으로 정의하였다. 반면, 외부비용은 에너지 생산자나 소비자에 의해 고려되지 않은 사회나 환경에 부과되는 비용으로 시장 가격에 포함되지 않은 비용으로 정의된다. 전통적인 발전원별 경제성 평가에서는 이러한 영향이 고려되지 않았으나, 최근에는 에너지 이용으로 인해 환경이나 인체 건강에 미치는 영향과 이로 인한 외부비용의 정량화를 포함한 접근 방법의 채택에 관한 관심이 증가하고 있다. 여기에는 대기오염으로 인해 인체 건강, 건물, 경작물, 삼림, 지구온난화 등에 미치는 영향, 작업상의 질병이나 사고, 발전소로 인한 시각상의 장애나 소음 발생으로 인한 쾌적함의 감소 등과 같은 자연 혹은 인공 환경에 미치는 피해를 포함한다.

이러한 외부비용 자료는 국내에서는 일부 발전원 또는 일부 외부비용에 대해서만 제한적으로 평가된 바가 있어 아직까지 입력자료로 사용할만한 외부비용 평가자료가 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 표 1과 같이 외부비용 관련 평가가 가장 심층적으로 이루어지고 있는 유럽연합 ExternE (Externalities of Energy) 프로젝트의 국가별 외부비용 평균값을 적용하였다. 이때 환율은 ExternE 외부비용 평가시점인 2003년 기준인 1375원/Euro를 적용하였다.

[표 1] 발전원별 외부비용 입력자료

발전원	원자력 1000MW	원자력 1400MW	GEN-IV	유연탄 500MW	유연탄 800MW
외부비용 (원/kWh) <sup>3)</sup>	5.36	5.36	5.36	78.24	73.99
발전원	IGCC	IGCC -Carbon	무연탄	LNG	석유
외부비용 (원/kWh)	66.98	8.41	82.13	24.61	75.63
발전원	양수	풍력	태양광	바이오매스	소수력
외부비용 (원/kWh)	5.91	2.06	8.25	18.78	5.91

3) ExternE 프로젝트의 국가별 외부비용 평균값. 2003년 환율 1375원/Euro 적용

### III. 시나리오 구성

입의 발전원  $i$ 에 대한 기술가치는 발전원  $i$ 의 기술개발 유무에 따른 총 비용차이로 정의되며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$Value_i = Cost(No\ Learning)_i - Cost(Learning)_i$$

$Value_i$  : 발전원  $i$ 의 기술가치

$Cost(No\ Learning)_i$  : 발전원  $i$ 의 기술 미개발시 총 비용 누적

$Cost(Learning)_i$  : 발전원  $i$ 의 기술 개발시 총 비용 누적

따라서 발전원  $i$ 의 기술가치를 구하기 위해서는 발전원  $i$ 의 기술 미개발시 총 비용 누적값을, 발전원  $i$ 의 기술 개발시 총 비용 누적값으로 차감하여 구하여야 한다. 본 연구에서는 원자력, 유연탄, LNG, 신재생의 기술가치를 구하기 위하여 표 2와 같은 시나리오를 구성하였다. [기준시나리오]는 원자력, 유연탄, LNG, 신재생, 그리고 그 외 기타 발전원들에 대한 기술개발이 모두 수행되는 상황으로서, 발전원별 경쟁력에 의해 전원 구성비가 결정되는 실제상황을 나타낸다.

반면, [원자력시나리오1], [유연탄시나리오1] 등 전원구성비 변화를 고려하지 않은 시나리오 (이하 [OOO시나리오1]로 표기)는 가상적인 시나리오로서, 표 2 같이 특정발전원에 대한 기술개발이 수행되지 않으며, 전원 구성비는 [기준시나리오]와 동일하다고 가정한다.

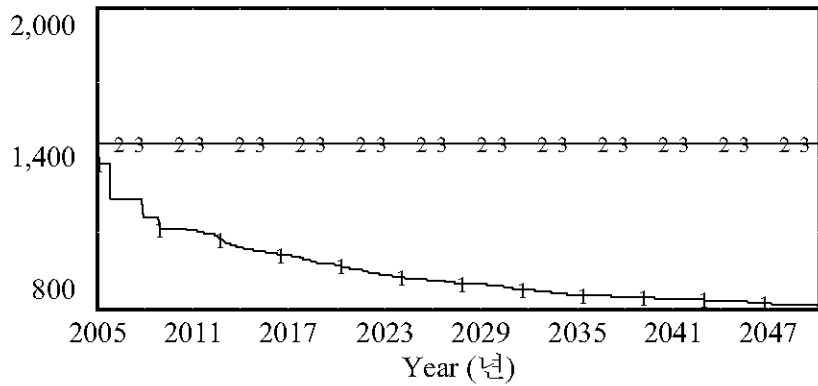
그러나 실제로는 특정 발전원의 기술개발 유무에 따라 발전원별 상대적인 경쟁력이 변화하므로 전원구성비도 변화할 것이다. 따라서, 이러한 실제상황을 고려하기 위하여 [원자력시나리오2], [유연탄시나리오2] 등 전원구성비 변화를 고려한 시나리오 (이하 [OOO시나리오2]로 표기)를 구성하였다.

예를 들어, [원자력시나리오2]는 원자력발전에 대한 기술개발이 수행되지 않고 유연탄, LNG, 신재생 등 타 발전원에 대한 기술개발은 수행된다는 점은 [원자력시나리오1]과 마찬가지로, 이에 의해 원자력발전의 전원구성비가 감소한다는 점을 고려하였다. 따라서 표 2에 나타낸바와 같이, [원자력시나리오1]의 전원구성비는 [기준시나리오]와 동일하나, [원자력시나리오2]의 전원구성비는 [기준시나리오]와 차이가 난다.

[표 2] 시나리오 구성 (시나리오별 기술개발여부)

시나리오명		전원구성비	기술개발여부 <sup>4)</sup>				
			원자력	유연탄	LNG	신재생	기타
기준시나리오			O	O	O	O	O
OOO시 나리오1	원자력시나리오1	기준시나리오와 동일	X	O	O	O	O
	유연탄시나리오1		O	X	O	O	O
	LNG시나리오1		O	O	X	O	O
	신재생시나리오1		O	O	O	X	O
OOO시 나리오2	원자력시나리오2	원자력 설비량 구성비율 감소	X	O	O	O	O
	유연탄시나리오2	유연탄 설비량 구성비율 감소	O	X	O	O	O
	LNG시나리오2	LNG 설비량 구성비율 감소	O	O	X	O	O
	신재생시나리오2	신재생 설비량 구성비율 감소	O	O	O	X	O

### 발전원별 건설단가

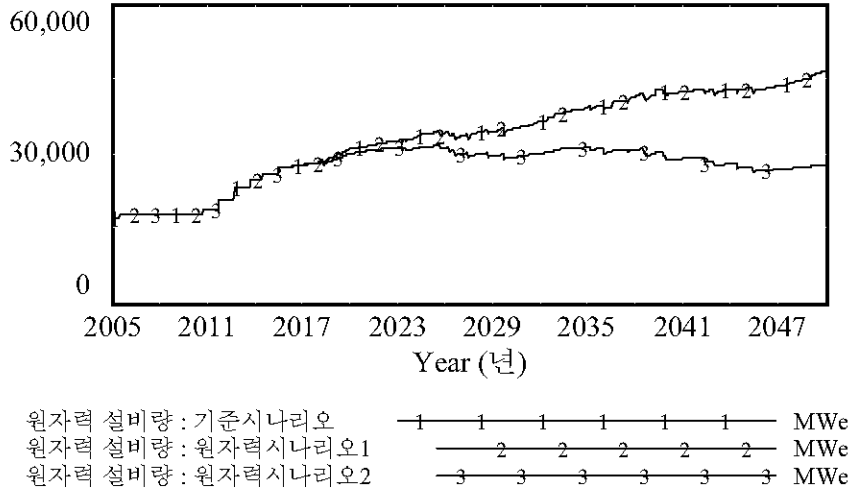


발전원별 건설단가[원자력1400]: 기준시나리오      + — + — +      천원/kW  
 발전원별 건설단가[원자력1400]: 원자력시나리오1      —      천원/kW  
 발전원별 건설단가[원자력1400]: 원자력시나리오2      3 — 3 —      천원/kW

[그림 11] 시나리오별 원자력 건설단가 추이

4) O : 기술개발 수행, X : 기술개발 미수행

### 원자력 설비량



[그림 12] 시나리오별 원자력 설비량 추이  
 (= 원자력의 전원구성비 × 총 설비량)

앞서 언급한 시나리오별 차이를 좀 더 이해하기 쉽도록 그림 11과 그림 12에 시나리오별 원자력 건설단가 및 원자력 설비량 (시장규모) 추이를 나타내었다. 그림 11은 원자력 발전에 대한 시나리오별 건설단가 추이를 나타내는데, [기준시나리오]의 경우 원자력 기술개발이 수행되므로 건설단가가 2050년까지 지속적으로 저감하나, [원자력시나리오1] 및 [원자력시나리오2]의 경우 원자력 기술개발이 수행되지 않음을 가정하므로 건설단가가 저감되지 않고 2050년까지도 2005년 수준을 유지하도록 하였다. 또한 그림 12는 원자력 발전에 대한 설비량(시장규모) 추이를 나타내는데, [원자력시나리오1]의 경우는 원자력 기술개발이 수행되지 않음에도 전원구성비를 [기준시나리오]와 동일하게 가정함으로써, 원자력설비량이 [기준시나리오]와 동일하게 가정되었다. 그러나, [원자력시나리오2]에서는 원자력 기술개발이 수행되지 않음으로써 전원구성비가 변화하는 상황을 고려하였으므로, 전원구성비가 [기준시나리오]보다 낮아지고 따라서 원자력 설비량이 '기준시나리오'에 비해 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서, 발전원 i의 기술개발 유무에 의한 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우 발전원 i의 총 기술가치는 다음과 같은 식에 의하여 구할 수 있다. 즉 [OOO시나리오1]에서의 총 비용 누적값과 [기준시나리오]에서의 총 비용 누적값을 차감하면 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우의 발전원 i의 총 기술가치를 구할 수 있다.

$$Value_{1i} = Cost(No\ Learning)_{1i} - Cost(Learning)_{1i}$$

$Value_{1i}$  : 전원구성비 변화를 고려안한 발전원  $i$ 의 총 기술가치

$Cost(No\ Learning)_{1i}$  : 총 비용 누적 (OOO시나리오1), 발전원  $i$

$Cost(Learning)_{1i}$  : 총 비용 누적 (기준시나리오)

마찬가지로, [OOO시나리오2]에서의 총 비용 누적값을 구하고 여기에 [기준시나리오]에서의 총 비용 누적값을 차감하면 전원구성비 변화를 고려할 경우의 발전원  $i$ 의 총 기술가치를 구할 수 있다.

$$Value_{2i} = Cost(No\ Learning)_{2i} - Cost(Learning)_{2i}$$

$Value_{2i}$  : 전원구성비 변화를 고려한 발전원  $i$ 의 기술가치

$Cost(No\ Learning)_{2i}$  : 총 비용 누적 (OOO시나리오2), 발전원  $i$

$Cost(Learning)_{2i}$  : 총 비용 누적 (기준시나리오)

한편, 본 연구에서는 총 기술가치를 경제적 기술가치와 비경제적 기술가치로 나누었는데, 경제적 기술가치란 기술개발 유무에 의한 직접비용 변화를 나타내며, 비경제적 기술가치란 기술개발 유무에 의한 외부비용 변화를 나타낸다.

전원구성비를 고려하지 않은 경우 경제적 기술가치는 [OOO시나리오1]에서의 직접비용 누적값을 구하고 여기에 [기준시나리오]에서의 직접비용 누적값을 차감하여 구할 수 있다. 또한 전원구성비를 고려하지 않은 경우 비경제적 기술가치는 [OOO시나리오1]에서의 외부비용 누적값을 구하고 여기에 [기준시나리오]에서의 외부비용 누적값을 차감하여 구할 수 있다.

반면 전원구성비를 고려한 경우 경제적 기술가치는 [OOO시나리오2]에서의 직접비용 누적값을 구하고 여기에 [기준시나리오]에서의 직접비용 누적값을 차감하여 구할 수 있다. 또한 전원구성비를 고려한 경우 비경제적 기술가치는 [OOO시나리오2]에서의 외부비용 누적값을 구하고 여기에 [기준시나리오]에서의 외부비용 누적값을 차감하여 구할 수 있다.



## IV. 평가 결과

### 1. 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우 발전원별 기술가치 평가결과

앞서 언급하였듯이 전원구성비 변화를 고려하지 않았을때의 총 기술가치는 [OOO시나리오1]의 총 비용 누적값에서 [기준시나리오]에서의 총 비용 누적값을 차감하여 얻어진다.

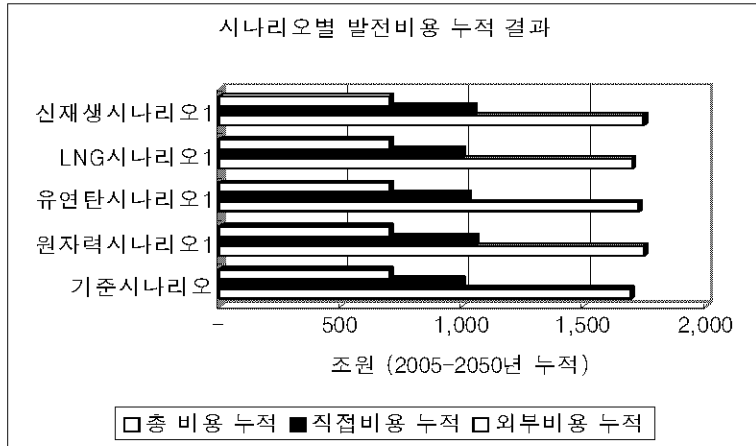
따라서 우선 [기준시나리오]와 [OOO시나리오1]의 '총 비용 누적'을 구하였으며 결과를 그림 13 및 표 3에 나타내었다. '총 비용 누적'은 '기준시나리오'의 경우 약 1,689조원으로 서 이중 '직접비용 누적'이 989조원, '외부비용 누적'이 699조원으로 나타났다.

'직접비용 누적' 값의 경우 [OOO시나리오1]가 '기준시나리오'보다 높게 나타났다. 이는 [기준시나리오]의 경우 모든 발전원의 기술개발을 가정한 반면, [OOO시나리오1]는 특정 발전원의 기술개발이 진행되지 않는 경우로 총 발전비용이 높아지기 때문이다.

반면 '외부비용 누적' 값의 경우 [OOO시나리오1]는 모두 '기준시나리오'와 같게 나타났다. 이는 [OOO시나리오1]의 경우 전원구성비가 [기준시나리오]와 동일하다고 가정했기 때문에, 전체 발전시스템에서 배출되는 이산화탄소, 황산화물 등 환경오염 물질량, 방사능 발생량 등이 [기준시나리오]와 동일하기 때문이다.

시뮬레이션 결과 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우 총 기술가치는 2050년 누적값 기준으로 원자력의 경우 55조원, 유연탄은 29조원, LNG는 5조원, 신재생은 51조원으로 나타나, "원자력>신재생>유연탄>LNG" 순으로 높은 기술가치를 갖는 것으로 나타났다.

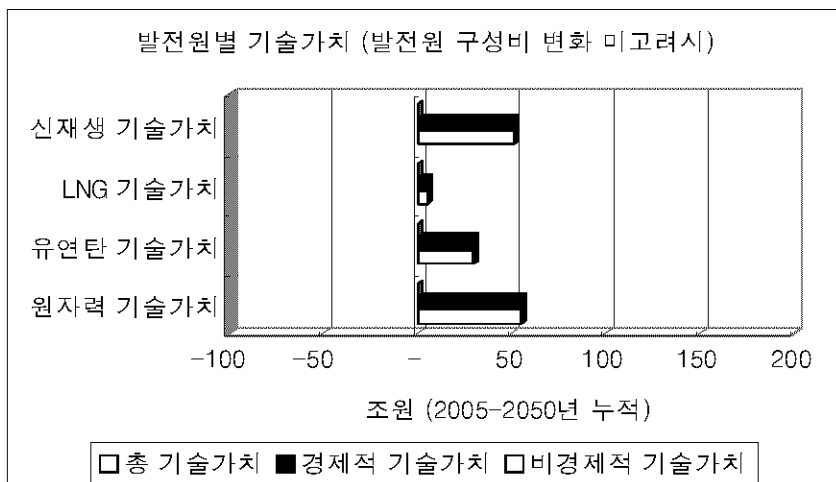
특이한 사항은 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우 표 4와 같이 비경제적 기술가치는 모든 발전원에 대해 0원으로 나타난다는 것이다. 이는 특정 발전원의 기술개발 유무에 따라 발전원별 설비량 및 발전량이 변화하지는 않는 것으로 가정했으므로, 표 14와 같이 시나리오별 외부비용 누적 결과에 차이가 없기 때문이다.



[그림 13] 전원구성비 변화 미고려 시 시나리오별 발전비용 누적 결과

[표 3] 전원구성비 변화 미고려 시 시나리오별 발전비용 누적 결과 (2005-2050 누적, 억원)

시나리오명	기준 시나리오	원자력 시나리오1	유연탄 시나리오1	LNG 시나리오1	신재생 시나리오1
총 비용 누적	16,893,170	17,443,620	17,190,120	16,945,800	17,405,320
직접비용 누적	9,899,450	10,449,900	10,196,400	9,952,080	10,411,600
외부비용 누적	6,993,720	6,993,720	6,993,720	6,993,720	6,993,720



[그림 14] 전원구성비 변화 미고려시 발전원별 기술가치 평가결과

[표 4] 전원구성비 변화 미고려시 발전원별 기술가치 평가결과 (2005-2050 누적, 억원)

	원자력 기술가치	유연탄 기술가치	LNG 기술가치	신재생 기술가치
총 기술가치	550,450	296,950	52,630	512,150
경제적 기술가치	550,450	296,950	52,630	512,150
비경제적 기술가치	0	0	0	0

## 2. 전원구성비 변화를 고려할 경우 발전원별 기술가치 평가결과

전원구성비 변화를 고려할 경우 총 기술가치는 [000시나리오2]의 총 비용 누적값에서 [기준시나리오]에서의 총 비용 누적값을 차감하여 얻어진다. 따라서 우선 [기준시나리오]와 [000시나리오2]의 ‘총 비용 누적’을 구하였으며 결과를 그림 15 및 표 5에 나타내었다.

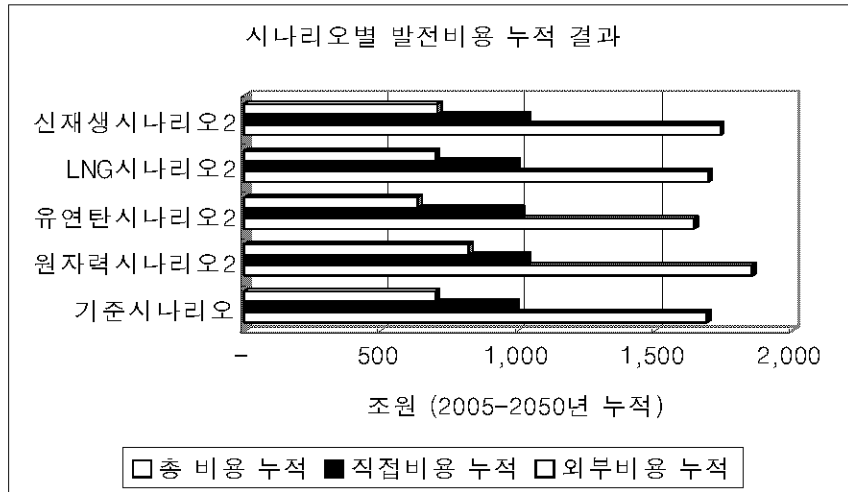
‘직접비용 누적’ 값의 경우 [000시나리오2]는 [기준시나리오]보다는 높지만 [000시나리오1] 보다는 낮게 나타났다. 이는 [000시나리오2]에서는 특정 발전원의 기술개발이 진행되지 않을 경우 해당 발전원이 저비용의 다른 발전원으로 대체되어 전원구성비가 변화되기 때문이다.

‘외부비용 누적’ 값의 경우 [000시나리오2]는 앞서 [000시나리오1]과 달리 시나리오 별로 각각 다른 값을 가진다. ‘외부비용 누적’은 [기준시나리오]의 경우 699조원이나, [원자력시나리오2]의 경우 821조원, [유연탄시나리오2]의 경우 633조원, [LNG시나리오2]의 경우 698조원, [신재생시나리오2]의 경우 706조원으로 [원자력시나리오2]의 경우 가장 높은 값을 갖는다.

이는 원자력의 외부비용이 타 발전원에 비해 매우 낮고 시장점유율이 높은 관계로, 향후 만약 원자력이 더 이상 건설되지 않고 이것이 유연탄 등 타 발전원으로 대체될 경우 전체 발전시스템의 외부비용 증가에 미치는 파급효과가 가장 크기 때문이다.

시뮬레이션 결과, 전원구성비 변화를 고려할 경우 총 기술가치는 2050년 누적값 기준으로 원자력의 경우 163조원, 유연탄은 -49조원, LNG는 3조원, 신재생은 48조원으로 나타나, "원자력>신재생>LNG>유연탄" 순으로 높은 기술가치를 갖는 것으로 나타났으며 원자력이 타 발전원에 비해 최소한 3배 이상의 높은 기술가치를 갖는 것으로 나타났다.

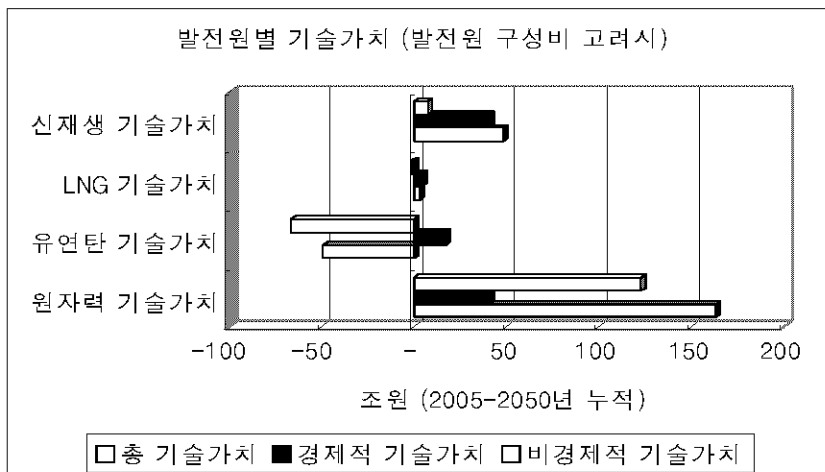
또한, 전원구성비 변화를 고려할 경우 앞서 전원구성비를 고려하지 않은 경우와는 달리 비경제적 기술가치가 포함된다는 점을 알 수 있는데, 경제적 기술가치의 경우 원자력은 40조원, 유연탄은 17조원, LNG는 4조원, 신재생은 40조원으로 나타나며, 비경제적 기술가치의 경우 원자력은 122조원, 유연탄은 -66조원, LNG는 -1조원, 신재생은 7조원으로 나타났다.



[그림 15] 전원구성비 변화 고려 시 시나리오별 발전비용 누적 결과

[표 5] 전원구성비 변화 고려 시 시나리오별 발전비용 누적 결과 (2005-2050 누적, 억원)

시나리오명	기준 시나리오	원자력 시나리오2	유연탄 시나리오2	LNG 시나리오2	신재생 시나리오2
총 비용 누적	16,893,170	18,523,630	16,401,010	16,924,420	17,375,520
직접비용 누적	9,899,450	10,304,400	10,070,100	9,942,660	10,307,100
외부비용 누적	6,993,720	8,219,230	6,330,910	6,981,760	7,068,420

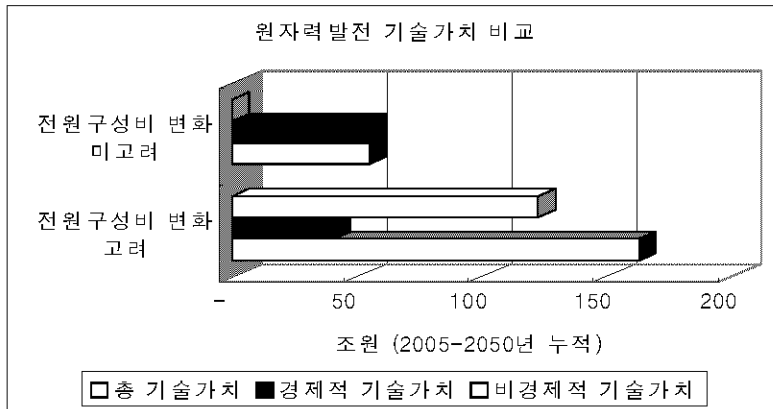


[그림 16] 전원구성비 변화 고려 시 발전원별 기술가치 평가결과

[표 6] 전원구성비 변화 고려 시 발전원별 기술가치 평가결과 (2005-2050 누적, 억원)

	원자력 기술가치	유연탄 기술가치	LNG 기술가치	신재생 기술가치
<b>총 기술가치</b>	<b>1,630,460</b>	<b>- 492,160</b>	<b>31,250</b>	<b>482,350</b>
경제적 기술가치	404,950	170,650	43,210	407,650
비경제적 기술가치	1,225,510	- 662,810	- 11,960	74,700

원자력발전 부문에 대한 기술가치 평가 결과만을 정리하면 그림 17, 표 7과 같다. 전원구성비 변화를 고려하지 않은 채 산정한 원자력발전의 기술가치는 2050년 누적 기준으로 약 55조원인 반면, 전원구성비의 변화를 고려하여 산정한 원자력발전의 기술가치는 약 163조원으로 나타났다. 이와같이 전원구성비 고려 유무에 따라 원자력발전 기술가치 평가값에 큰 차이가 나는 이유는 비경제적 기술가치 때문으로, 전원구성비 변화를 고려할 경우 비경제적 기술가치는 약 123조원으로 경제적 기술가치 40조원보다 약 3배 이상이나 높게 나타나 경제적이기보다 오히려 비경제적이기 때문에 훨씬 중요함을 알 수 있다.



[그림 17] 전원구성비 변화 고려 유무에 따른 원자력발전 기술가치 비교

[표 7] 전원구성비 변화 고려 유무에 따른 원자력발전 기술가치 비교 (2005-2050 누적, 억원)

	전원구성비 변화 미고려시	전원구성비 변화 고려시
<b>총 기술가치</b>	<b>550,450</b>	<b>1,630,460</b>
경제적 기술가치	550,450	404,960
비경제적 기술가치	0	1,225,510

## V. 결론

본 논문의 목적은 원자력발전산업의 특수성을 고려한 원자력발전 기술가치 평가 방법론을 개발하고자 하는 것이다. 이를 위하여 전원구성비의 변화를 고려한 기술가치 평가 모형을 개발하였다.

전원구성비 변화를 고려한 기술가치 평가를 위해 시스템다이내믹스 기법을 사용하여 총 5개의 모듈(전력수요예측모듈, 기술발전모듈, 전원구성비결정모듈, 발전량결정모듈, 총 비용모듈)으로 구성된 기술가치 평가모형을 구축하였다.

시뮬레이션 결과, 기존의 방식대로 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우 원자력발전의 총 기술가치는 2050년 누적값 기준으로 원자력의 경우 55조원인 반면, 본 연구에서 제시한 대로 전원구성비 변화를 고려할 경우 163조원으로서 기존방식 대비 약 3배가 높게 나타났다. 전원구성비 변화를 고려한 경우 원자력발전 기술가치가 더 높아지는 이유는 원자력발전 기술개발에 의한 발전원가 절감효과 뿐 아니라, 원자력발전 전원구성비 증가로 인한 이산화탄소와 같은 환경오염물질 배출 감소 등 비경제적 영향이 추가로 고려되기 때문이다. 전원구성비 변화를 고려하지 않을 경우 원자력기술개발에 의한 환경오염물질 배출 저감 등의 비경제적 가치가 제대로 평가될 수 없다.

전원구성비 변화를 고려할 경우 163조원 중 경제적 기술가치는 40조원, 비경제적 기술가치의 경우 123조원으로 나타나, 원자력발전의 경제적 기술가치보다 비경제적 기술가치가 훨씬 더 중요한 것으로 나타났다. 이를 통해 원자력발전의 기술가치 평가 시 기술개발이 원자력 전원구성비 변화에 미치는 영향이 반드시 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

또한 전원구성비 변화를 고려하였을 때 원자력발전의 기술가치는 유연탄, LNG, 신재생 등의 타 발전원 대비 적어도 3배 이상 높은 것으로 나타나 기술개발 효과 측면에서 원자력 발전이 가장 효과적인 것으로 평가되었다.

본 연구에서는 비경제적 가치를 고려하기 위해 환경, 안전, 소음과 같이 인체 및 주변환경에 미치는 영향을 평가한 ExternE의 외부비용 평가결과를 사용하였다. 따라서 본 연구에서 평가한 비경제적 기술가치의 범위는 인체 및 주변환경에 미치는 영향을 대상으로 하였으며 에너지안보 증대, 국가이미지 제고효과 등의 기타 효과는 고려하지 못하였다. 이는 아직까지 기술개발로 인한 에너지안보효과, 국가이미지 제고효과 등을 제대로 화폐가치로 평가할 수 있는 기법이 개발되지 않았기 때문인데, 향후 이들을 고려한 기술가치 평가가 추가로 이루어져야 할 것으로 보인다.

또한 본 연구에서 개발된 기술가치 평가모형에서는 우선 전력만 생산되는 발전설비까지만 대상으로 하였으나 향후 모형을 확장하여 열병합, 수소에너지 등 복합에너지분야까지

포함한 기술가치 평가모형의 개발이 필요하다.

본 연구는 국내 원자력 발전산업 연구개발 투자의 정당성 확보를 위한 정책기초자료로서 활용가능할 것이며, 특히 본 연구에서 개발된 전원구성비 변화 모형은 향후 중장기 전력시장 분석연구에도 응용가능할 것으로 보인다.

## [ 참고문헌 ]

- 신태영, 박병무, "거시계량경제모형을 이용한 연구개발 투자의 정책효과 분석", 과학기술정책관리연구소, 1998
- 윤충한 외 4인, "정보통신 연구사업의 국가경제에 대한 파급효과 및 기여도 분석", 정보통신정책연구원 연구보고서, 2000
- 윤충한, 장화탁, "정보통신 연구개발투자의 경제적 효과 연구", 정보통신연구원 정책연구, 2000
- 김정흠, "한국기계연구원의 국가경제에 대한 파급효과 분석", 한국기계연구원 보고서, 1998
- 한국원자력연구소, "한국원자력연구소 연구개발 투자의 국가경제 파급효과 분석연구", KAERI/RR-2464/2004
- 문기환 외, "한국원자력연구소 원자로계통설계 기술자립의 국가경제 파급효과 분석", 기술혁신학회지 제8권 특별호, 2005년 6월, pp.499~524
- 한국보건산업진흥원, "기술가치 평가(II)", KHIDIzine, 2001. 9
- 이철원 ((주) 기술과 가치), "한국전자통신연구원 연구성과의 경제사회적 파급효과 분석", 과학기술정책 정기간행물 Vol. 14, No. 2, p.50, 2004년
- 기초기술연구회, "소관연구기관 성과분석 및 경제사회적 기여전략 연구 보고서", 2004
- National Research Council, "Prospective Evaluation of Applied Energy Research and Development at DOE (Phase One)", ISBN 0-309-09604-9
- 한국원자력학회, "국가원자력기술지도 (NuTRM)"
- 산업자원부, 제2차전력수급기본계획, 산업자원부 공고 제2004-285호, 2004. 12.
- Wright, T.P. (1936), "Factors Affecting the Cost of Airplanes", Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 3, p. 122.
- Etan Gumerman & Chris Marnay, "Learning and Cost Reductions for Generating Technologies in the National Energy Modeling System (NEMS)", LBNL- 52559, 2004