

전력산업 구조개편 이후 전원구성비율 예측에 관한 연구

홍정석^{1*} · 곽상만² · 박문희³ · 최기련¹

¹아주대학교 에너지학과 / ²시스템믹스(주) / ³호서대학교 산업안전공학부

A Study on Forecast of Electric Power Generation Mix in the Competitive Electricity Market

Jung Suk Hong¹ · Sang Man Kwak² · Moon Hee Park³ · Ki Ryun Choi¹

¹Dep. of Energy Studies, Ajou Univ., Suwon, 443-749

²Systemix Co., Ltd., Seoul, 151-830

³Dep. of Safety Engineering, Hoseo Univ., Cheonan, 330-180

How to maintain the optimal electric power generation mix is one of the important problems in electric power industry. The objective of this study is to develop a computer model which can be used to forecast the investment in power generation unit by the plant owners after restructuring of electric power industry. Restructuring of electric power industry will make difference in decision making process of investment in power generation unit. After Privatization of Power Industry, Gencos will think that profit is the most important factor among all others attracting the investment in the industry. Coal power generation is better than LNG CCGT in terms of profit. However, many studies show that LNG CCGT will be main electric power generation source because the rest of factors other than profit in LNG CCGT are superior than Coal power generation.

The impacts of the various government policies can be analyzed using the computer model, thus the government can formulate effective policies for achieving the desired electric power generation mix.

Keyword: system dynamics, electric power generation mix, restructuring of electric power industry

1. 서론

전력산업은 지난 수십 년 간의 규제적 독점체제로부터 벗어나 단계적으로 보다 경쟁적인 구조로 전환되어 가고 있다. 2000년 12월 전력산업 구조개편 촉진법과 개정된 전기사업법이 국회에서 통과되어 2001년 4월부터 발전부문이 이전의 한전으로부터 분리되고 전력거래소에 의해 운영되는 시장에서 전력거래가 이루어짐에 따라 경쟁시장체제로의 첫발을 내딛었다. 또한

기후변화협약과 환경보호 강화, 기술의 발전과 혁신 등 여러 가지 국내외 여건 변화는 각 발전설비의 경쟁력에 큰 변화를 가져올 것이다.

그러나 무엇보다 중요한 것은 전력산업 구조개편이 발전원의 선택에 대한 의사결정과정에서 근본적 변화를 유도한다는 점이다. 즉, 그동안 정부계획에 의해 건설, 운영되던 발전설비들은 전력산업 구조개편에 따라 앞으로 시장에 의해 그 선택이 이루어지게 된다. 전력수요 증가에 따른 신규전원의 선택

본 논문은 산업자원부 전력산업기반기금 지원에 의한 것임.

*연락처 : 홍정석, 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5 아주대학교 에너지기후변화연구소, Fax : 031-219-2969,

E-mail : jshong@ajou.ac.kr

2003년 11월 24일 접수, 1회 수정 후 2004년 5월 27일 게재 확정.

이 일차적으로 시장기능에 맡겨지게 되는 것이다. 앞으로의 경쟁시장에서 각 발전원의 경제성을 스스로 입증하지 못한다면 전력시장에서 퇴출되는 경우도 가능한 것이다. 그러나 국가 전체적인 관점에서 적정한 전원구성비율을 유지하는 것은 전력산업 구조개편이 이루어지고 경쟁시장이 도입된다면 중요한 문제가 아닐 수 없다.

본 연구의 구체적인 목표는 구조개편에 따른 발전원별 시장 경쟁력을 분석하고 이에 기반하여 사업자의 의향을 반영한 전원구성의 변화를 예측하고 경쟁시장에서 발전원별 경쟁구조와 정책방향의 영향을 모사할 수 있는 전산모형을 개발하는 것이다. 이렇게 개발된 모형을 활용하여 전력산업 구조개편 이후 경쟁체제하에서의 발전설비 투자를 예측하고 이에 따른 영향을 분석하는 정책모형으로 활용 가능할 것이다.

2. 전력산업 구조개편

2.1 전력산업 구조개편 현황

우리나라 전력산업 구조개편은 다음과 같은 3단계로 추진되

고 있다. 그 첫 단계인 발전경쟁단계(2001~2004년)에서는 한국전력공사의 발전부문을 6개의 자회사로 분할하여 발전부문의 경쟁체제를 구축하였다. 분할된 발전회사를 단계적으로 민영화하여 효율성 증진을 통한 발전원가의 절감을 도모한다. 도매경쟁단계(2005~2008년)에서는 송전망을 개방하고 배전부문을 분할하여 경쟁적 전력 도매시장체제로 전환한다. 송전망의 개방은 민간업체도 전국적인 송전망의 자유로운 이용을 보장하는 것이며 이렇게 함으로써 공정한 경쟁여건이 조성된다. 소매경쟁단계(2008년 이후)에서는 배전망 개방 및 배전부문에서 판매부문을 분리하여 전력 소매시장을 자유화한다.

전력산업은 3단계의 구조개편 과정을 거쳐서 <Figure 1>과 같은 산업구조를 가지게 된다. <Figure 1>에서 보는 바와 같이 전력산업은 다수의 발전사업자, 단일 송전회사, 판매사업자인 다수의 배전회사 및 도매시장인 전력 풀시장으로 구성된다.

현재, 이러한 계획에 따라 우리나라의 전력산업구조는 대폭적인 개편을 추진중에 있다. 우선 전력회사인 한국전력이 분할되어 2001년 4월 2일 발전자회사가 탄생되었다. 이 과정에서 원자력발전은 수력발전과 함께 한국수력·원자력발전주식회사가 담당하게 되었다. 한국수력원자력 이외의 다섯 개의 화력 발전회사들은 조건이 충족되면 민영화될 예정이다.

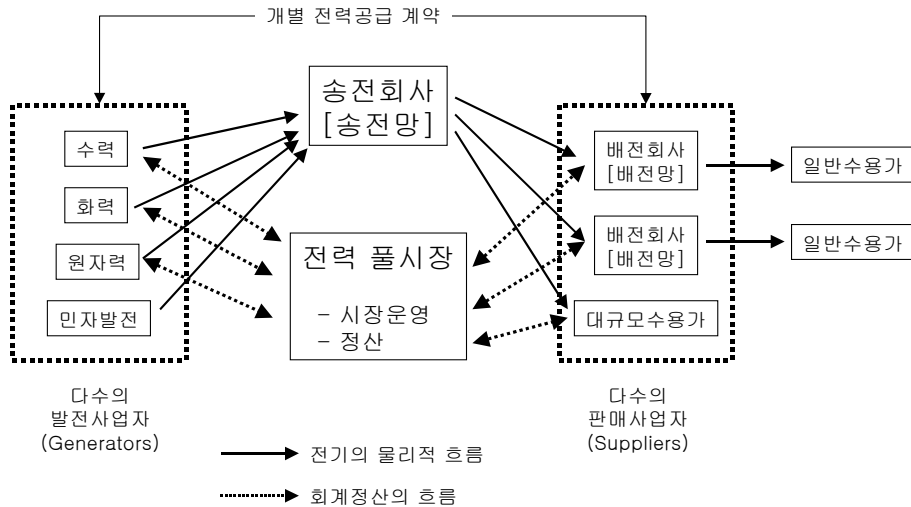


Figure 1. Restructuring of power industry.

Table 1. New paradigm of power market

구조개편 전	구조개편 후
<ul style="list-style-type: none"> ○ 규모의 경제성이 존재하는 독점형태 사업 ○ 공익성 우선으로 공급책임, 공평부담 원칙 준수 ○ 수요에 부응하는 설비확장 위주의 경영 ○ 비용보상 방식의 요금결정 (정부규제·승인요금) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 계통운영을 제외한 분야에 경쟁체제가 도입되는 경쟁사업 ○ 기업성을 중시하는 고객 세분화, 시장 차별화 추진 ○ 이익실현을 위한 판매확대, 시장확대 위주의 경영 ○ 고객이 참여하는 전력가격 결정 (시장결정·자율가격)

2.2 전력산업 구조개편과 전력수급계획

전력산업 구조개편에 의해 전력산업에는 경쟁시장개념이 도입되고 <Table 1>과 같은 새로운 패러다임이 형성되었다.

이와 같은 전력시장의 변화에 따라 전력수급계획의 수립 주체와 성격도 변화되었다. 구조개편 이전의 전원개발은 한전이 중심이 되어 정부정책 차원의 의사결정이라고 볼 수 있었으나, 구조개편에 따라 전력수급 기능과 역할을 다양한 주체에게 분담하게 되었다.

따라서 경쟁적 전력시장에서 전력수급계획의 역할도 재정립하여야 한다. 수급불균형 가능성 해소를 위한 별도의 대처방안을 수립하고 시장기능 활성화까지 한시적 정부조정기능(수급안정대책 등)을 도입하며, 기존 전력수급계획과 신규계획의 연계성 확보, 시장에서 적정 설비투자를 유인할 수 있는 메커니즘 강구 등을 필요로 한다.

3. 분석 모형의 개요

전력연구원(2002)은 발전원별 경쟁체제 도입 후 도매 전력시장의 가격과 일반 투자자의 신규 발전소 건설 Cycle을 예측할 수 있는 System Dynamics 모형을 개발하고 이를 이용하여 전력시장 안정화를 위한 방안을 모색하였다. 이 연구는 Andrew Ford(2001)의 모형을 참고로 하여 System Dynamics 모형을 이용하여 분석한 결과, 일반 투자가에 의한 신규 발전소 건설이 장기적인 건설 Lead-time에 의한 Boom and bust cycle을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 전력연구원(2002)은 신규 발전원으로서 LNG 복합발전만을 고려하고 있고, 다른 형식의 발전원의 추가는 없는 것으로 가정하고 있다. 그러나 현재 우리나라의 주요 발전원은 원자력, 유연탄, LNG이다. 이들 세 가지 발전원이 전체 발전용량에서 차지하는 비중은 약 80%이며, 발전량으로는 약 90%를 차지한다. 이 세 가지 발전원은 앞으로도 주요 발전형식의 위치를 유지할 것이다.

S. Oggianu(2002)는 원자력을 포함한 다양한 발전기술에 대한 모형을 구성했지만, 연구의 목적이 전력시장과 발전기술의 투자, 에너지정책 결정과정 간의 관계를 분석하기 위한 것으로 에너지 정책 결정과정을 모형 안의 내생변수로 고려하고 이에 대한 구조를 구축하는 것을 중요시하여 상대적으로 전력시장 자체에 대한 분석과 모형화에는 소홀한 경향이 있다. 제1차 전력수급 기본계획의 발전사업자 의향조사 결과에서도 발전자 회사의 경우 유연탄을 선호하고 있으며, 향후에도 수익성 측면에서 월등한 유연탄이 시장에서 퇴출된다고 보기는 어려울 것

이다. 그리고, 현재 원자력의 경우 한국수력원자력이 모두 소유하고 있으며, 그 기술과 투자의 특성상 앞으로도 계속 공사의 형태로 유지될 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 전력연구원(2002) 모형의 기본적인 구조에 더하여 민간이 선택하는 신규발전원으로서 LNG만이 아니라 유연탄과 LNG를 고려하였다. 또한 이 연구들의 시장에서의 발전설비 투자구조에 대한 모형화를 참고하되 우리나라 발전경쟁시장의 가격결정구조, 운영규칙 등을 분석하여 전원믹스에 의해 발전사업자의 수익성이 변화하는 구조를 분석하고 이에 의한 전원믹스의 영향을 살펴볼 수 있는 모형을 구성할 것이다.

A. Ford(2001), 전력연구원(2002), S. Oggianu(2002) 등의 연구는 모두 시스템 다이내믹스를 이용하여 모델링하였다. 시스템 다이내믹스는 시스템의 동태적인 변화를 피드백 구조의 관점에서 이해하고 모델링하여 컴퓨터 상에서 시뮬레이션함으로써 시스템을 분석하고 시스템을 변화시킬 수 있는 방법을 탐색하는 방법을 의미한다. 본 연구에서도 시스템 다이내믹스를 사용하여 모델링을 수행하였다. Jay W. Forrester의 1961년 “산업동태론”을 시작으로 출발한 시스템 다이내믹스는 정책설계도구로 개발되어 1970년대의 세계 환경 모델링과 국가 경제 모델링의 거시적 연구를 거쳐 1980년대에는 기업조직의 동태적 적응과정에서 의사결정자의 역할이라는 다소 미시적인 연구에 초점을 두면서 발전하여 왔다. 현재에는 다양한 산업부문에서 다이내믹한 패턴을 분석하는 데 사용되어 왔다. 수학적으로, 시스템 다이내믹스는 수치해석적으로 푸는 비선형 미분방정식의 집합이다.

$L = f(L, a, b, R(IR, OR))$ 라는 함수가 있다고 하자. 이들 함수 간의 관계에서 먼저 수준변수와 변화율변수의 관계식은 다음과 같이 정의되고,

$$L(t) = L(0) + \int IR(t)dt - \int OR(t)dt$$

L = 수준변수,
 R = 변화율 변수(IR = Inflow, OR = Outflow)
 t = 시간, 0 = 초기시간

위 식을 시간 t 에 대해 미분하면,

$$\frac{dL(t)}{dt} = dt \times (IR(t) - OR(t))$$

$$IR(t) = a \times L(t), \quad OR(t) = b \times L(t)$$

위의 두 식을 결합하여 새로운 식이 도출되는데, 이것이 시

Table 2. Changing of power supplier

구조개편(경쟁체제) 전	⇒	구조개편(경쟁체제) 후
한전 중심의 계획 [공익성, 독점성, 강제성]		다양화된 전기사업자 중심의 계획 [수익성, 경쟁성, 자율성]

시스템 다이내믹스 기법에서 Stock and Flow Diagram 모델 방정식의 수학적 알고리즘이 된다.

$$L(t) = I(t-dt) + dt \times (iR - oR)$$

Stock Flow Diagram이란 시스템 다이내믹스에서 시뮬레이션이 가능한 정량화 모델로 구성된 단계를 말한다. Stock Flow Diagram은 Stock 혹은 level, 저장변수, 수준변수로 불리는 박스 모양으로 표현되는 변수와 Flow 혹은 rate, 유량변수, 변화율변수로 불리는 파이프와 밸브 모양으로 표현되는 변수 및 보조변수, 상수 등으로 구성된다. Stock과 Flow의 관계는 위에서 설명한 수준변수와 변화율변수의 관계와 같다.

시스템 다이내믹스의 고유한 방법론적 특성은 첫째, 시스템의 동태적인 행태변화(dynamic behavior)에 관심을 두며, 둘째, 동태적인 변화의 근본적인 원인을 피드백 구조(feedback structure)에서 찾는다라는 것이다. Vensim, Stella, Powersim, Ithink등과 같은 그래픽한 시뮬레이션 환경이 개발됨에 따라 시스템 다이내믹스는 보편적인 분석방법으로 발전되고 있으며 최근에는 Peter Senge 등을 중심으로 하여 시스템 다이내믹스에서 축적된 지혜를 일반인들도 알기 쉽게 표현하고자 하는 시스템적 사고(Systems thinking) 분야로 확장되고 있다.

3.1 발전소의 수명주기

어떤 형식의 발전원이더라도 건설계획에서 시작하여 착공, 건설, 완공, 운영, 폐기의 수명과정을 가지게 된다. 다만 각각의 과정에 걸리는 시간이 각 형식별로 차이가 있다. 이 수명과정은 <Figure 2>와 같은 전형적인 Stock and Flow Diagram으로 구성될 수 있다. 이하 모형 설명부분에서 ‘ ’ 안에 표기한 것은 실제 모형에서 쓰인 변수이름이다. 이 때 ‘계획’, ‘착공’, ‘건

설’, ‘완공’ 등과 같은 이벤트들은 flow로 볼 수 있고, 각 과정 사이의 기간 동안 발생하는 누적분은 stock 변수로 볼 수 있다. <Figure 2>에서 stock은 박스 모양으로 나타나고 flow는 파이프와 밸브 모양으로 표현된다. 본 모형에서는 완공되어 발전 가능한 용량을 세분하였는데, 완공 이후 폐기 전까지 실제 발전을 하여 운영 가능한 용량증, 향후 10년 안에 수명이 끝나는 경우에는 ‘노후 발전원의 용량’으로, 그 이외의 것은 ‘신규 발전원의 용량’으로 분류하였다. 이것은 발전사업자들이 새로운 발전소 건설을 계획할 경우, 계획 이후 완공 시까지의 시간 지연을 고려할 때 지금 계획된 발전소가 완공될 무렵에는 노후화된 용량분은 실제 발전시장에서 폐기될 것이므로 건설계획 시 미래에 실제 운영 가능한 용량을 고려하기 위함이다.

모형에서 건설계획 시에 고려하는 용량은 현재 시점에서 운영 가능한 ‘발전원의 용량’이 아니라 ‘노후 발전원의 용량’을 제외한 ‘신규 발전원의 용량’과 ‘건설준비중 발전’용량, ‘건설중인 발전’용량을 고려하여 수요예측과 비교하여 결정하도록 한다. 그리고 제1차 전력수급 기본계획에 따라 2015년까지 확정적 계획으로 분류된 발전건설계획은 그대로 실현된다고 가정하고 자료를 입력하였다. <Figure 2>에서 변수이름이 ‘D..’로 시작하는 것은 모두 전력수급 기본계획과 발전설비현황 등의 자료를 입력한 변수이다.

<Figure 2>에서 전력수급 기본계획에 의해 2015년까지 확정된 건설계획 자료는 ‘D계획중인 발전소의 확정일정’이라고 모형에 의해 simulation된 발전소 건설계획은 ‘건설추진’이라고 하였다. 이 두 가지는 Stock Flow Diagram의 첫 번째 inflow인 ‘계획’에 연결된다. 발전소 건설의 계획에서 완공까지의 시간지연을 감안하여야 하기 때문에, 현재 계획, 건설, 운영중인 발전소를 모두 고려하여 이를 10년 후 운영 가능한 용량으로 추정하고, 이 미래의 운영 가능한 용량과 10년 후의 미래 수요예측

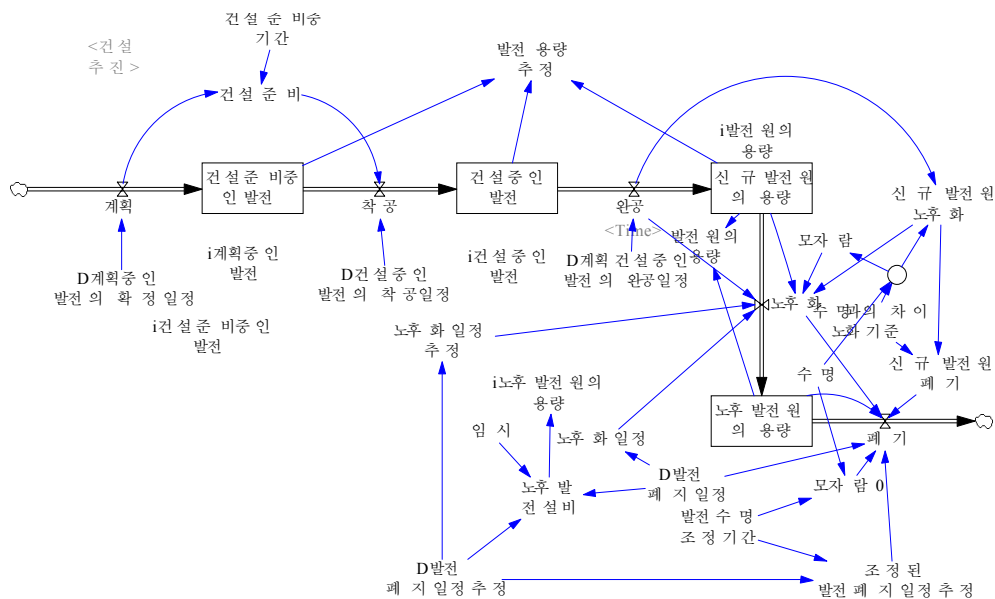


Figure 2. Power unit life cycle stock flow diagram.

과 비교하여 추정된 용량과 수요예측치의 차이를 현재에 '건설 추진'할 용량으로 감안한다. 이 때 적정예비율을 유지하도록 하는 정부정책이 적절히 효과를 보고 있다고 가정한다. 필요한 전체 용량에서 LNG와 유연탄의 비중을 얼마나 할 것인가는 다양한 변수를 감안하여 결정하게 되며 이에 대해서는 다음 절에서 Causal Loop Diagram을 이용하여 설명할 것이다.

3.2 전원구성비율과 수익성의 관계

<Figure 3>의 Causal Loop Diagram은 LNG 발전의 전원구성비

율과 수익성, 그에 의한 LNG 발전 건설에 의한 LNG 구성비율의 변화로 이어지는 closed loop를 보여준다. 'LNG의 비율'이 높아지면 'LNG의 SMP 결정비용' 또한 증가할 것이다. SMP(계통 한계 가격 : System Marginal Price)란 거래시간별로 일반발전기(원자력, 석탄 외의 발전기)의 전력량에 대해 적용하는 전력시장가격(원/kWh)으로서, 시간대별로 비제약 상태에서 운전이 할당된 발전기의 유효 발전가격(변동비) 가운데 가장 높은 값으로 결정한다. 'LNG의 SMP 결정비용'의 증가는 'LNG의 발전량'과 'LNG의 이용률'을 높이지게 할 것이고, LNG가 가격을 결정하는 비율이 높을수록 높은 한계비용의 LNG 발전소가 선

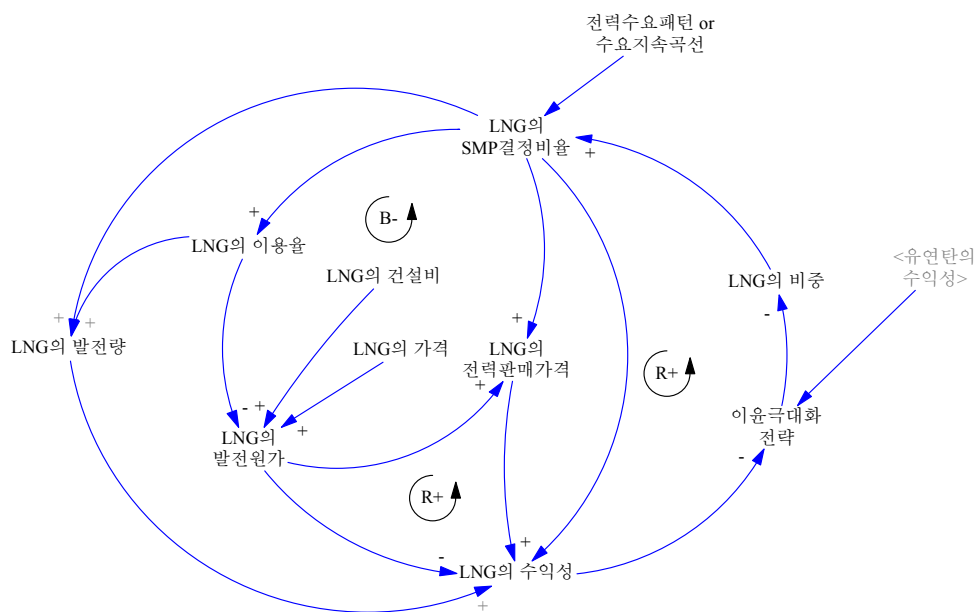


Figure 3. Relationship LNG CCGT mix and profit.

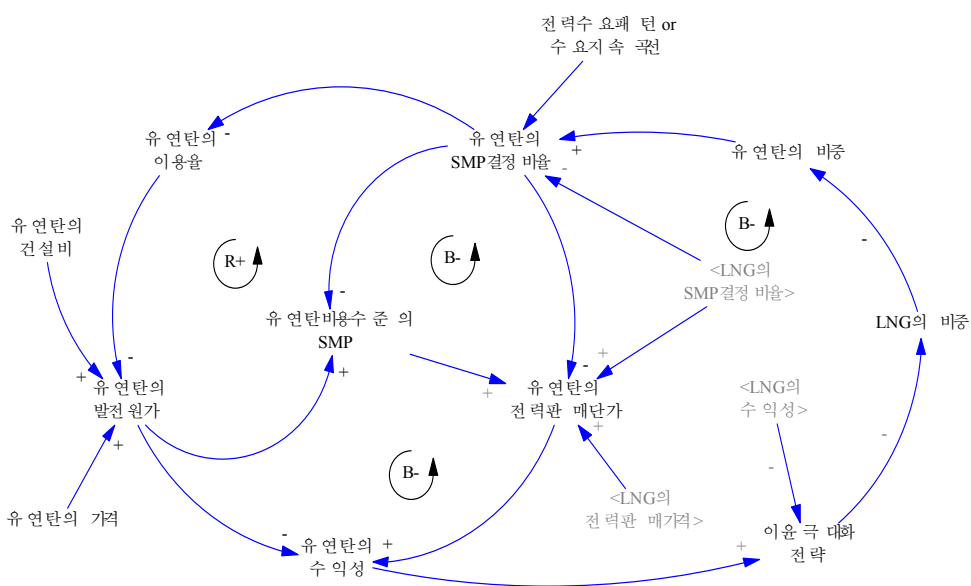


Figure 4. Relationship coal power mix and profit.

택되는 경우가 증가할 것이므로 LNG의 전력판매가격 또한 증가할 것이다. 반면 이용률이 증가할수록 LNG의 발전비용을 낮출 수 있을 것이므로 LNG의 전력판매가격 또한 낮아질 수 있을 것이다. 종합적으로 ‘LNG의 수익성’은 ‘LNG의 전력판매가격’과 ‘LNG의 발전량’과는 양의 방향으로, ‘LNG의 발전원가’와는 음의 방향으로 연결되어 있다.

이윤극대화 전략이란 수익성이 높은 유연탄을 선택하는 전략이라고 가정할 경우 LNG의 수익성과는 반대 방향으로 연결되어 있을 것이다. 이 Causal Loop Diagram은 2개의 강화고리(Reinforcing Loop)와 1개의 균형고리(Balancing Loop)로 이루어져 있으며, 발전비용 면에서 LNG는 지속적으로 유연탄보다 높은 값을 유지한다는, 즉 경제성이 상대적으로 낮다라는 전제를 갖는다.

<Figure 4>의 Causal Loop Diagram은 유연탄 발전의 전원구성 비율과 수익성, 그에 의한 유연탄 발전건설에 의한 유연탄 구성비율의 변화로 이어지는 closed loop를 보여준다. LNG 발전의 그림과 비슷한 변수들로 구성된 유사한 구조로 보이지만, 많은 경우 변수들 간의 관계가 LNG와는 다른 방향으로 연결되어 있다. 또한 LNG 발전과 달리 유연탄 발전은 기저부하 담당 발전원이기 때문에 많은 경우 유연탄 발전의 전력판매가격은 한계 발전원인 ‘LNG의 전력판매가격’으로 결정되게 된다. 따라서 유연탄의 평균 전력판매가격은 LNG의 전력판매가격과 유연탄의 한계비용으로 받은 가격을 각 해당 발전량을 고려하여 결정되어야 한다. 그래서 유연탄에는 LNG와 달리 유연탄의 한계비용으로 결정된 전력판매가격과 SMP 결정비용뿐만 아니라 LNG의 전력판매가격 및 LNG의 SMP 결정비용 등이 필요하다. 유연탄의 입장에서는 전체 발전량에서 LNG의 판매가격으로 받는 부분이 많을수록 수익성은 증가하며 기저부하로 운영되기 때문에 유연탄의 SMP 결정비용의 증가는 유연탄의 평균적인 이용률이 낮아진다는 것을 의미한다. 또한, 유연탄이 가격을 결정하는 비율이 높을수록 낮은 비용의 유연탄 발전소가 선

택되는 경우가 증가한다는 것이므로 유연탄의 전력판매가격은 낮아질 것이다. 또, 이윤극대화 전략이란 수익성이 높은 유연탄을 선택하는 전략이라고 설정했기 때문에, LNG와 반대로 유연탄의 수익성과 같은 방향으로 연결되어 있을 것이다.

이러한 각각의 관계가 LNG와는 반대 방향으로 연결되기 때문에 LNG와 비슷한 구조를 갖는 것 같지만, 유연탄의 Causal Loop Diagram은 1개의 강화고리(Reinforcing Loop)와 3개의 균형고리(Balancing Loop)로 이루어져 있다. 이러한 구조는 역시 유연탄이 발전비용 면에서 LNG보다 지속적으로 낮은 값을 유지하여 기저부하로 운영된다는 전제를 갖는다.

모형에서 전원구성에 따른 수익성의 변화를 계산하기 위해 부하지속곡선을 이용해 각 발전형식별 최소발전시간을 구하였다. 부하지속곡선은 1년 8760시간의 부하를 부하의 크기순서로 시간에 따라 재분배한 것이다. 이 부하지속곡선에 각 발전형식별 발전용량을 기저부하부터 누적시켜 표시하면 해당 발전형식의 최소발전시간을 알 수 있다. (최대용량 발전가능시간)최소발전시간은 해당 발전형식의 발전용량을 모두 가동할 수 있는 시간으로 정의한다. 인접해 있는 두 발전형식이 있을 경우보다 기저에 가까운 발전형식의 최소발전시간은 보다 침두에 가까운 발전형식에겐 최대발전시간에 해당될 것이다. 최대발전시간은 해당 형식의 발전원이 1년에 최대로 발전가능한 시간이다.

<Figure 5>는 이러한 관계를 간단히 예시한 것이다. 유연탄과 원자력을 예로 들어 보면 두 가지 모두 기저부하용에 해당하지만, 원자력이 유연탄보다 기저에 해당한다. 사실상 두 가지 발전형식은 거의 항상 함께 가동되지만 굳이 따지면 먼저 원자력이 발전되고 그 이상의 부하에 유연탄이 발전되는 것으로 볼 수 있다. 이 경우 원자력의 최소발전시간은 유연탄의 최대발전시간이다. 원자력은 <Figure 5>와 같은 경우라면 최대발전시간은 8760시간이다. 그리고 부하지속곡선에서 각 발전형식이 차지하는 면적은 각 발전형식의 발전량이 된다. 부하

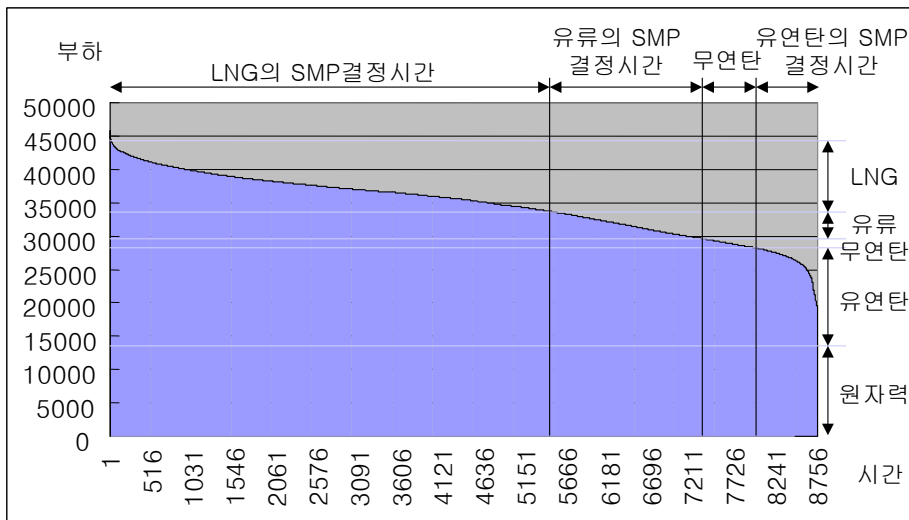


Figure 5. Load duration curve.

패턴이 매년 일정하다고 가정하고 최근 2년 간의 부하지속곡선의 패턴과 각 발전형식의 구성비율을 이용하여 각 발전형식별 최소발전시간을 구하도록 하였다. 이렇게 수요지속곡선 상에서 SMP 결정 발전기를 찾는 것은 위와 같이 간단히 개념적으로만 생각하면 간단한 것 같지만, 실제로는 상당히 복잡하고 어려운 문제이다. 이는 실제 발전계획 수립 시에 발전기별 비용 이외에도 발전기의 기동-정지시간, 출력증감발률, 최소운전시간, 최소정지시간 등을 고려하기 때문이다.

발전기의 기동정지 특성에 따라 상당부분의 중유발전소나 무연탄발전소는 부하가 낮은 심야에도 정지하지 않고 최소출력으로 운전을 한다. 이는 부하를 감소시키는 역할을 하여 변동비가 낮은 석탄(유연탄)발전소의 출력을 감소시키는 작용을 하며 따라서 유연탄발전소가 한계가격을 결정하도록 한다. 참고사항이지만, 최소출력으로 운전하는 발전기는 한계가격을 결정할 수 없도록 규정되어 있다.

또, 발전계획을 수립하다 보면 항상 예비력이 발생하여 이것도 수요를 낮추는 것과 동일한 효과를 나타낸다. 발전기 보수 문제도 한계가격 결정에 영향을 주는데, 이는 수요를 높이는 것과 유사한 효과가 있으리라고 생각된다. 모형에서는 가능한 이러한 실제상황을 고려하도록 하였으나, 완벽한 것은 아니다. 그러나 여기서 필요한 것은 전원구성비율과의 어느 정도의 연관성만을 추정하면 되므로 모형의 목표에 비추어 적절한 수준이라고 본다.

모형에서는 위와 같이 부하지속곡선을 이용하여 전원구성 변화에 따른 발전형식별 발전시간과 발전량을 구하고 각 발전형식이 한계발전원이 되어 가격을 결정하는 시간을 추정한다. 만약 예방정비기간 등 실제 발전가능한 용량을 제대로 감안하고 발전기의 기동정지 특성에 따라 부하가 낮은 심야에도 정지

하지 않고 최소출력으로 운전하는 경우 등을 정확히 구성하여 부하지속곡선에 적용했다면 여기서 도출된 각 발전형식별 최대발전시간과 최소발전시간의 사이에 해당하는 시간 동안 해당 발전원이 한계발전원이었다는 것이므로 그 차이는 1년 동안 각 발전형식이 가격을 결정할 시간이 될 것이다. 전원구성비율이 시간에 따라 변화하면 그에 따라 변화된 최소발전시간, 최대발전시간, 가격결정시간을 추정할 수 있다. 그에 따라 각 발전형식이 발전하는 시간 동안 가격을 결정하는 한계발전원의 시간비율을 추정할 수 있다.

각 발전형식의 발전하는 시간 동안 가격을 결정하는 한계발전원의 시간구성을 추정하고 그에 대응하는 발전량을 추정할 수 있으므로 평균판매수입을 추정할 수 있다. 이때 각 한계발전원에 의해 결정되는 가격은 발전형식별 발전원가를 사용하였는데, 실제로는 <Figure 6>과 같이 같은 발전형식이라도 각 발전소 설비별로 비용이 모두 다르며 낮은 순서대로 발전에 참여하여 발전설비 하나하나에 대응하는 계단형 한계비용곡선에 의해 가격이 결정되지만, 본 모형에서는 미래에 건설될 설비에 대해 예측하고 있어 그러한 세부비용자료를 생성할 수 없고 또 본 모형의 목적에 따라 정밀한 가격을 계산하는 것에 중점을 둘 필요는 없으므로 문제를 단순화하여 모형화하기 위해 각 발전형식별로 하나의 비용을 대표화하여 사용하였다.

3.3 전원구성비율과 수익성 이외의 조건과의 관계

어떤 형식의 발전설비를 선택하느냐의 문제는 수익성만으로 결정되는 것은 아니다. 경제성 이외에 입지, 환경문제 실제 발전설비 공급을 위해서 해결해야만 하는 문제이다. 김형준(1996)은 이러한 요인들을 고려한 평가기준을 정리하였고, 본

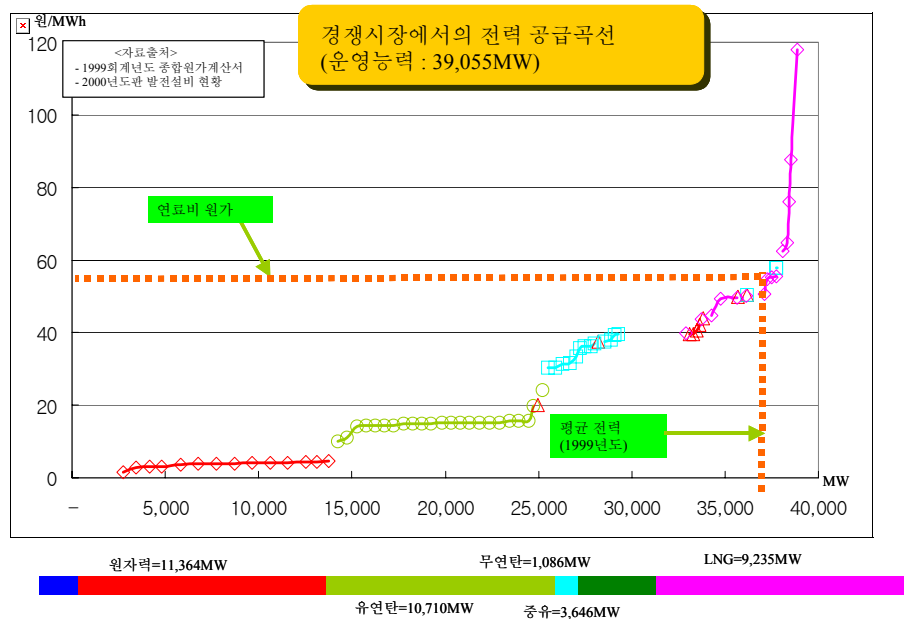


Figure 6. Power supply curve of competitive market.

연구에서는 이 기준의 세부항목은 유지하되 기준 간 우선순위, 가중치가 변화될 것으로 보였다. 이들 기준 중, 수익성 이외의 항목 중에는 전원구성비나 운영상황의 변화에 따라 영향을 받는 것도 있지만 받지 않는 것도 있다(<Figure 7> 참조). ‘건설유연성’으로 표현된 투자회수기간과 관련된 건설기간의 발전형식별 차이의 영향은 순전히 그 기술의 특성으로 결정되며 전원구성비나 운영상황이 어떻게 변화하더라도 건설기간에 영향을 주게 되지는 않는다. 단지 기술개발에 의해 건설공기가 단축될 수도 있다고 볼 수 있으며, 어느 한 발전형식이 대세가 되면서 그 기술에 대한 경험이 축적되고 기술개발이 상대적으로 많아지는 경우도 있겠지만 본 연구에서 그러한 기술개발 추세를 예측하는 것은 범위를 벗어난 것이다.

‘총 자본비용 단가’로 표현된 투자자금의 경우도 기술적 차이에 의해 발생하는 차이가 결정적이므로 마찬가지로 생각할 수 있을 것이다. 그러나 S. Oggianu(2002)의 연구에서는 이를 자본비용(capital cost) 측면에서 고려하여 운영기간 동안의 총 자본비용규모를 변수로 사용하고 발전소의 완공과 폐기에 따른 흐름과 대응시켰다. 그리고 정책에 따라 이것이 변화하도록 설계하였다. 본 연구 모형에서도 같은 개념을 활용할 수 있도록 모델을 구성하였지만, 정책과정을 내재화시킨 S. Oggianu(2002)의 모형과는 목적이 다르므로 외생변수화하여 사용하였다. 입지문제 또한 기술적 특성과 밀접한 관련이 있다. 유연탄의 경우 연료와 회처리를 위해 대규모의 면적이 필요하며, 하나의 unit에 해당하는 발전시설용량도 발전형식별로 차이가 있다. 이와 같은 문제들은 앞서와 같이 각 발전형식의 기술적 특성이며, 전력산업의 운영상황에 의해 영향받지 않는다고 볼 수 있

다. 반면, 입지가능한 면적의 측면에서는 LNG에 비해 유연탄이 훨씬 적은데다가, 우리나라의 면적은 고정되어 있으므로 새로운 발전시설을 건설할 수 있는 면적은 발전시설이 건설될수록 줄어들 것이므로 시간에 따른 발전소 건설과 전원구성비율의 변화에 따라 변화될 것이며, 이것은 LNG보다 유연탄에 있어서 더 큰 영향을 주는 문제일 것이다. 이것은 ‘입지문제 해결 가능성’으로 표현되었다. ‘탄소세’와 ‘총 전체 연료비용의 변동성’으로 표현된 환경과 연료수급에 관한 문제는 건설, 투자, 입지 등과는 그 성격이 조금 다르다. 이들 모두 각 발전형식의 기술적 특성에 의해 결정적으로 좌우된다는 공통점이 있지만, 환경과 연료수급 문제는 다른 것들과는 달리 운영과정과 전원구성에서 발생하는 변화에 의해 크게 달라진다. 건설, 투자, 입지 등의 문제는 건설에 대한 의사결정 시에 문제가 되고 완공 이후의 운영상황에 의해 변동될 여지가 거의 없지만, 환경과 연료수급 문제는 완공 이후의 운영과정에 따라 그 결과가 달라질 수 있다. 전원구성비율과 운영상황에 따라 같은 발전량이라도 운영과정의 환경오염물질 배출량과 연료사용량은 상당히 다를 것이다.

3.4 연구 결과

본 연구에서 개발된 모형을 이용하여 다양한 환경변화에 대한 전원구성비의 변화를 동태적으로 관찰할 수 있다. 각 변수의 조합에 따라 다양한 결과를 도출할 수 있는데, 여기서는 <Table 3>과 같이 목표 예비율의 변화와 원자력의 지속적 공급과 민영화 여부의 조합에 대한 결과를 보도록 하였다.

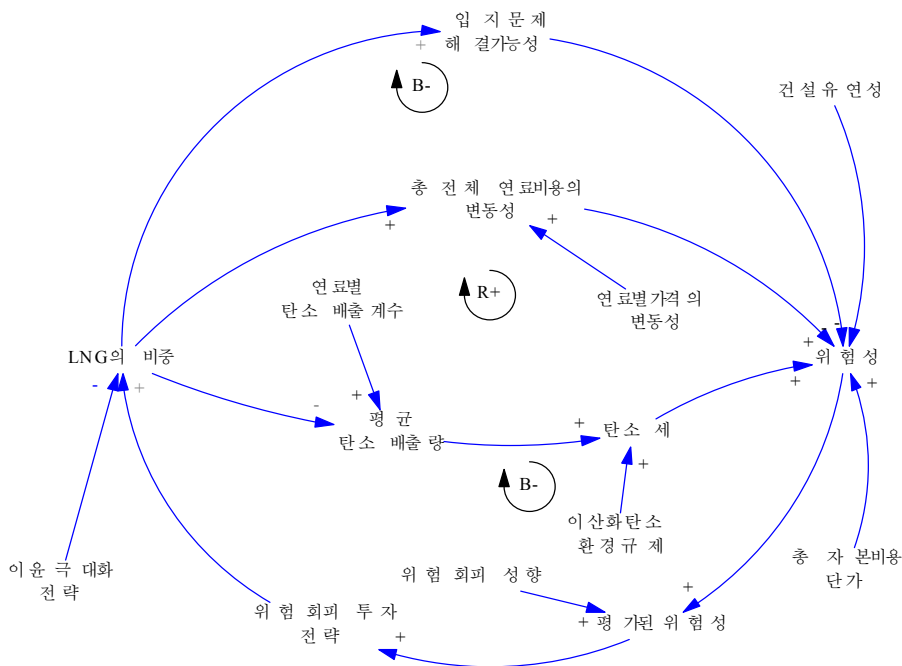


Figure 7. Relationship power generation mix and other decision variable.

Table 3. 시나리오 변수

변수	범위	비고
목표 예비율	10%, 15%	유지하려는 전력 설비예비율
민영화	○, ×	2010년까지 민영화 완료 여부
장기적인 원자력 공급	○, ×	2015년 이후 추가적인 원자력공급 여부

수요공급의 조건은 모두 제1차 전력수급 기본계획의 기준 전력수요 예측과 확정적 발전설비계획을 기준으로 시물레이션하였다. 확정적 발전설비계획(Most Probable Plan)은 건설의향 조사를 종합한 후 사업자계획을 실현가능성에 따라 건설중(A), 건설준비중(B1, B2), 계획중(C1, C2, C3)의 3단계로 등급을 분류했을 때, A~C1까지의 사업을 말한다.

‘장기적인 원자력 공급’은 제1차 전력수급 기본계획의 고려 기간인 2015년 이후에도 일정한 원자력발전의 공급이 있다는 가정을 고려할 수 있도록 한 것이다. 현실적으로 장기적인 원자력발전 공급의 추진력이 과연 현재와 같을 수 있을 것인가에 대한 불확실성이 존재한다. 때문에 제1차 전력수급 기본계획 기간 이후인 2015년 이후의 상황에 대해 더 이상의 원자력 공급이 없는 경우와 있는 경우를 고려하도록 하였다. 장기적인 원자력발전의 공급이 있다고 가정할 경우는 현재의 원자력발전의 구성비율을 어느 정도 유지할 수 있도록 한 것이다. 이 경우 원자력발전의 구성비율 결과는 당연히 크게 낮아지는 것과 현재 수준을 어느 정도 유지하는 2가지 결과를 가지게 될 것으로 쉽게 예상된다. 이 변수는 원자력의 구성비율보다 원자력의 공급 정도에 따른 유연탄과 LNG 구성비율의 변화를 보기 위해 고려한 것이다.

‘민영화’는 약 10년 후에 발전회사가 모두 민영화 되어 그들의 전원계획의 의사결정구조가 지금과 달라진다는 가정을 고려할 수 있도록 한 것이다. 현재 전력산업 구조개편 이후 발전 부문은 여러 개의 회사들로 분할되었지만, 아직까지 공사형

태로 유지되고 있다. 발전부문이 경쟁구조로 바뀌었다고는 하나 공사형태로 있는 한 전원계획 측면에서 그 의사결정구조가 크게 바뀔 것이라고 보기는 힘들 것이다. 여기서는 약 10년 후에는 발전회사들이 모두 민영화된다고 가정하고 이전과 의사결정구조가 바뀔 경우 전원구성비의 변화를 살펴본다. 민영화의 영향은 전체 발전용량에는 영향을 주지 않으면서 민간 발전회사의 발전원 선택기준에만 영향을 준다.

‘목표 예비율’은 우리나라의 전력예비율을 일정하게 유지하려는 정책이 시행될 경우 목표하는 예비율에 따라 전원구성비의 거동이 어떻게 변화하는지를 관찰하기 위한 변수이다. 이제 가지 변수를 조합하여 <Table 4>와 같이 8개의 시나리오를 구성하였다.

각 시나리오별로 2003년부터 2050년까지 시물레이션을 수행하였으며 시물레이션 기간 중 LNG, 유연탄, 원자력을 제외한 기타 국내탄, 석유, 수력 등은 모형에 포함되어 있으나 2015년 이후 추가적인 공급을 고려하지 않았기 때문에 장기로 갈수록 구성비율이 무시할 만큼 낮아지게 된다.

Table 4. 민영화와 장기적인 원자력 공급 시나리오 설정

시나리오 번호	민영화 여부	목표 예비율	장기적인 원자력 공급 여부
시나리오 1	×	10%	×
시나리오 2	×	10%	○
시나리오 3	×	15%	×
시나리오 4	×	15%	○
시나리오 5	○	10%	×
시나리오 6	○	10%	○
시나리오 7	○	15%	×
시나리오 8	○	15%	○

연도별 시나리오별 LNG 비중 결과는 <Table 5>, <Figure 8>

Table 5. 민영화와 원자력공급 시나리오별 LNG 발전의 구성비율

Year	시나리오1	시나리오2	시나리오3	시나리오4	시나리오5	시나리오6	시나리오7	시나리오8
2003	0.2531	0.2531	0.2531	0.2531	0.2531	0.2531	0.2531	0.2531
2005	0.2726	0.2726	0.2732	0.2732	0.2726	0.2726	0.2732	0.2732
2010	0.2700	0.2700	0.2749	0.2749	0.2699	0.2699	0.2748	0.2748
2015	0.2695	0.2695	0.2757	0.2757	0.2701	0.2701	0.2763	0.2763
2020	0.2918	0.2914	0.2969	0.2965	0.2995	0.2990	0.3049	0.3045
2025	0.2930	0.2844	0.2985	0.2901	0.3106	0.3007	0.3175	0.3076
2030	0.3077	0.2824	0.3152	0.2905	0.3379	0.3088	0.3488	0.3202
2035	0.3143	0.2744	0.3221	0.2836	0.3520	0.3063	0.3635	0.3193
2040	0.3248	0.2637	0.3327	0.2747	0.3721	0.3022	0.3837	0.3170
2045	0.3430	0.2684	0.3495	0.2789	0.3937	0.3080	0.4031	0.3216
2050	0.3611	0.2743	0.3661	0.2843	0.4145	0.3151	0.4218	0.3273

과 같다. 목표예비율 5% 포인트의 차이는 LNG의 구성비에 같은 방향으로 약 0.5~0.8% 포인트의 차이를 가져온다. 그리고, 장기적인 원자력발전의 공급이 있을 경우, 목표예비율을 5% 포인트 올리면 LNG 구성비는 약 1% 포인트 정도 증가한다. 장기적인 원자력발전의 공급이 있을 경우, LNG 구성비는 약 8에서 10% 포인트 정도 낮아지는 것으로 나타났다. 민영화되었을 경우, 목표예비율과 장기적인 원자력발전 공급이 LNG 구성비에 미치는 변화는 더 크게 나타난다. 민영화의 영향은 장기적으로 약 5% 포인트 정도 LNG 구성비를 증가시키는 것으로 나타났으며 시간에 따라 그 차이가 점점 커지는 것으로 보인다. 장기적으로 LNG의 구성비를 가장 작게 하는 시나리오는 2번으로 2050년에 27.43%, 가장 크게 하는 시나리오는 7번으로

2050년 42.18%로 나타났다.

목표예비율이 유연탄의 구성비율에 미치는 영향은 LNG의 경우보다는 작은 것으로 보인다. 그래프에서도 그 차이를 볼 수 있다. 다만, 장기적인 원자력발전 공급의 유무에 따라 목표예비율이 유연탄발전의 구성비율에 미치는 효과의 방향이 다르게 나타난다. 장기적인 원자력공급이 있는 경우에는 유연탄의 구성비율이 목표예비율의 증가에 따라 증가하지만, 장기적인 원자력공급이 없는 경우에는 목표예비율과 유연탄발전의 구성비율은 반대 방향으로 움직인다.

LNG의 그래프보다 유연탄의 그래프는 예비율이 다른 시나리오의 곡선이 거의 겹치고 있다. 장기적인 원자력발전의 공급이 있을 경우, 구성비는 약 10에서 12% 포인트 정도 낮아지는

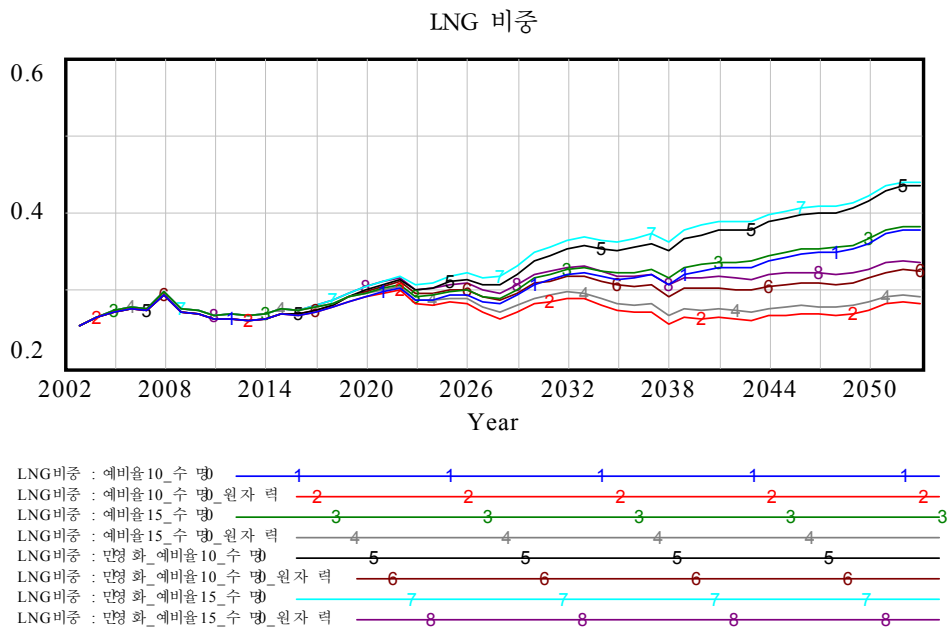


Figure 8. 민영화와 원자력공급 시나리오별 LNG 발전의 구성비율.

Table 6. 민영화와 원자력공급 시나리오별 유연탄발전의 구성비율

Year	시나리오1	시나리오2	시나리오3	시나리오4	시나리오5	시나리오6	시나리오7	시나리오8
2003	0.2740	0.2740	0.2740	0.2740	0.2740	0.2740	0.2740	0.2740
2005	0.2695	0.2695	0.2700	0.2700	0.2695	0.2695	0.2700	0.2700
2010	0.3125	0.3125	0.3181	0.3181	0.3124	0.3124	0.3180	0.3180
2015	0.3078	0.3078	0.3175	0.3175	0.3072	0.3072	0.3169	0.3169
2020	0.3317	0.3313	0.3412	0.3408	0.3249	0.3246	0.3340	0.3337
2025	0.3695	0.3607	0.3771	0.3689	0.3531	0.3455	0.3594	0.3526
2030	0.4250	0.3954	0.4293	0.4017	0.3960	0.3702	0.3971	0.3734
2035	0.4446	0.3938	0.4470	0.3989	0.4081	0.3632	0.4068	0.3645
2040	0.4652	0.3831	0.4669	0.3887	0.4189	0.3458	0.4170	0.3477
2045	0.4982	0.3946	0.4988	0.3994	0.4483	0.3560	0.4460	0.3578
2050	0.5281	0.4059	0.5279	0.4102	0.4752	0.3661	0.4727	0.3682

것으로 나타나 LNG의 경우보다 좀더 영향이 큰 것으로 보인다. 민영화되었을 경우, 장기적인 원자력발전 공급이 유연탄발전의 구성비율에 미치는 변화는 더 크게 나타났다. 민영화의 영향은 장기적으로 약 5% 포인트 정도 유연탄의 구성비를 감소시키는 것으로 나타났으며 시간에 따라 그 차이가 점점 커지는 것으로 보인다. 장기적으로 유연탄의 구성비율을 가장 작게 하는 시나리오는 6번으로 2050년에 36.61%, 가장 크게 하는 시나리오는 1번으로 2050년 52.81%로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 구조개편에 따른 발전원별 시장경쟁력을 분석하고 이에 기반하여 사업자의 의향을 반영한 전원구성비를 예측하고 경쟁시장에서 발전원별 경쟁구조와 정책방향의 영향을 모사할 수 있는 전산모형 개발을 목표로 하였다. 본 연구에서 개발된 모형은 전력산업 구조개편 이후 경쟁체제하에서의 발전설비 투자예측과 이에 따른 영향을 분석하는 정책적 근거모형으로 활용 가능할 것이다.

본 연구에서 개발을 시도한 모형은 지금까지 전원개발계획에 사용되어 온 최적화 모형과는 성격이 다르다. 기존 모형의 목적은 의사결정자에게 적정 전원구성비와 최적의 설비투자계획을 제시하는 것이며, 도출되는 결과는 이행되어야 할 목표가 된다. 이와 달리 본 연구의 모형은 최적의 전원구성비만을 최종 목표로 하지 않고 있다. 전력산업 전반을 관리하는 공공기관의 입장에서 예상되는 조건과 정책에 대해 미래의 전원

구성비가 어떠한 영향을 받는지를 합리적으로 추정해 볼 수 있도록 하여 전원구성비와 관련된 정책을 사전에 모의실험해 보는 것으로 실행가능한 정책개발에 도움을 주도록 하는 것이 목적이다.

모형에서 민간이 투자할 대상 설비형식으로서 LNG와 유연탄을 우선 고려하였다. 앞서도 언급했듯이 전력산업 구조개편 이후의 발전소 건설은 발전회사들이 각자의 경영전략에 따라 수행하게 된다. 현재 우리나라의 주요 발전원은 원자력, 유연탄, LNG이다. 이들 세 가지 발전원이 전체 발전용량에서 차지하는 비중은 약 80%이며, 발전량으로는 약 90%를 차지한다. 이 세 가지 발전원은 앞으로도 주요 발전형식의 위치를 유지할 것이다.

그러나, 현재 원자력의 경우 한국수력원자력이 모두 소유하고 있으며, 그 기술과 투자의 특성상 앞으로도 계속 공사의 형태로 유지될 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 민간이 주로 선택하는 발전원으로 유연탄과 LNG를 고려하도록 하였다.

전력산업 구조개편 이후 발전설비를 투자하는 대상이 공공에서 민간으로 변화함에 따라 의사결정구조, 선호기준의 변화가 발생할 것이다. 본 연구에서는 발전설비투자의 의사결정에 고려되는 변수에 있어서 전력산업 구조개편 이전과 이후에 큰 차이가 있다기보다는 각 변수들의 우선순위에 관점, 시각이 변화될 것으로 파악하였다.

그리고 이러한 변수를 크게 두 가지 부류로 구분하였다. 투자 의사결정이 민간으로 바뀌면서 가장 중요하게 고려할 것으로 예상되는 변수로서 수익성과 같은 직접적인 경제적인 변수와 기타 환경, 입지 등과 같은 변수들로 구분하였다. 그리고, 여건변화와 정책적인 개입에 의해 이들 변수들이 투자결정에 미치는 가중치가 변화한다는 가정에서 다양한 시나리오에 따라

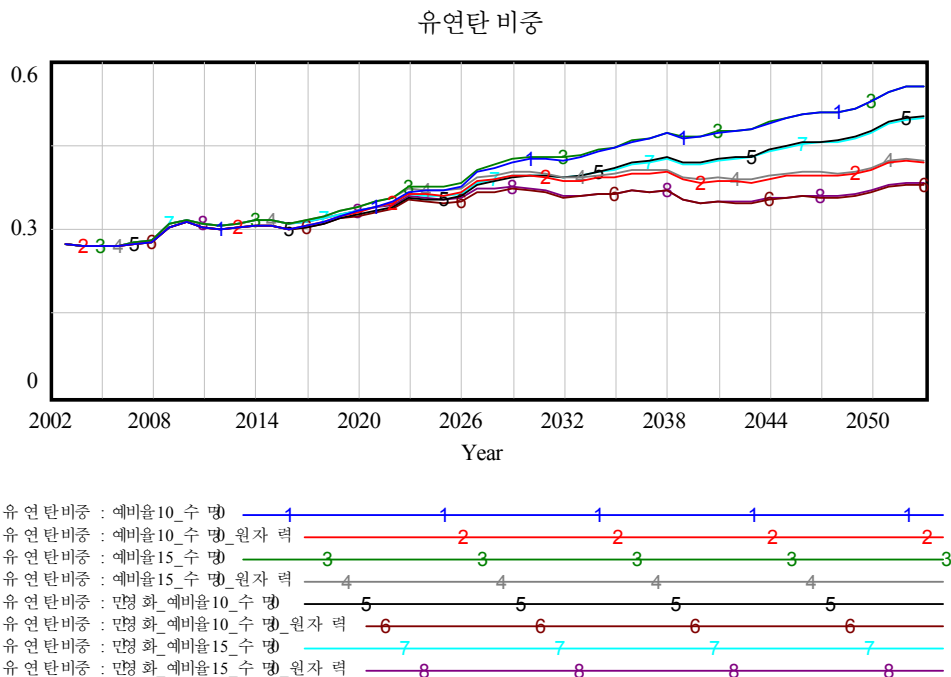


Figure 9. 민영화와 원자력공급 시나리오별 유연탄발전의 구성비율.

전원구성비의 동태적인 거동의 변화를 모사할 수 있는 모형을 구성하였다.

개발된 모형으로 다양한 시나리오에서 2050년까지 장기간에 걸친 전원구성비의 변화를 시뮬레이션하였는데, 미래에도 현재의 전원구성비와 비슷한 비율을 유지하기 위해서는, 당연한 결과이지만 민간이 공급하지 못한다고 가정한 원자력의 공급을 장기적으로 공급가능항가가 관건이 된다. 제1차 전력수급기본계획 기간인 2015년 이후에도 원자력의 지속적인 공급이 가능하여 현재와 비슷한 구성비율을 유지해 준다면 다른 발전원의 구성비를 또한 현재의 범위에서 상대적으로 크게 벗어나지는 않는다. 민영화의 영향으로 공공정책적인 측면을 가진 의사결정 변수에 대한 고려를 발전사업자들이 전혀 하지 않는다고 한다면 LNG의 구성비율을 증가시키는 결과를 보였다.

본 연구의 한계점 및 향후 연구방향은 다음과 같다. 다수의 발전사업자가 존재하는 경쟁시장이지만 이들 발전사업자가 비슷한 여건을 갖고 같은 조직에서 분리된 자회사들이기 때문에 비슷한 의사결정구조를 가질 것으로 가정하였다. 그러나, 향후 먼 미래에 민영화가 완료된 후 각자의 기업문화가 정착된 이후에는 각 사의 의사결정구조나 고려되는 변수들, 가중치들은 모두 다르게 될 것이다. 그럼에도 발전설비 투자사업에 고려되는 변수들은 모두 예상할 수 있는 것들이고 특별히 어느 발전사업자만이 고려하는 변수가 존재한다고 하더라도 그 가중치는 크지 않을 것이다. 개별회사 간에 각 변수들의 가중치에 차이가 약간은 존재하겠지만, 향후에도 이들에 대해 합리적인 방법으로 꾸준히 조사하고 하나의 기준으로 구성할 수 있다면 큰 문제는 없을 것이다. 그리고, 발전자회사 이외의 시장참여자들은 기존 한전의 조직에서 분리된 것이 아니므로 상당히 다른 의사결정을 할 수 있을 것이지만, 이들은 구성비율이 매우 작고 발전사업에 있어서 고려해야 할 변수는 발전자회사와 유사할 수밖에 없을 것이다. 다만, 기업의 규모가 작기 때문에 다른 사업자와 다른 결정을 내릴 수 있다면 그러한 영향이 전체적으로 얼마나 될 것인지는 차후 고려해야 할 것이다. 이번 모형에서는 이들의 영향은 작을 것으로 보고 그러한 차이에 대한 고려는 하지 않았다. 전원구성비와 관련된 변수들은 매우 광범위하고, 특히 각각에 대해 자세한 조사와 분석이 이루어져야 하는 세부 문제들과 연관되어 있기 때문에 향후 실제 사용하면서 이러한 변수들에 대해 많은 개선이 이루어져야 한다.



홍정석

아주대학교 재료공학과 학사
아주대학교 에너지학과 석사
아주대학교 에너지학과 박사
관심분야: System Dynamics, 전력산업

참고문헌

- Bunn, Derek W. and Erick R. Larsen (1997), *Systems Modelling for Energy Policy*. New York-London: John Wiley & Sons, Ltd.
- Cho, C-H. (2002), *Power Industry Restructuring and Privatization*, KDI.
- Fiddaman, Thomas S. (1997), *Feedback complexity in integrated climate-economy models*. Ph.D. Thesis Management 1997 Ph.D. Massachusetts Institute of Technology, Sloan School of Management. Cambridge, MA, USA.
- Ford, Andrew (2001), Waiting for the boom: - a simulation study of power plant construction in California, *Energy Policy*, 29(11), 847-869.
- Ford, Andrew (1997), System Dynamics and the Electric Power Industry. *System Dynamics Review* 13 (no. 1 Spring 1997): 57-85. by John Wiley & Sons, Ltd.
- Forrester, Jay W., (1994), *Learning Through System Dynamics as Preparation for the 21st Century*. Keynote Address for System Thinking and Dynamic Modeling Conference for K-12 Education. June 27-29, 1994 at Concord Academy, Concord, MA, USA. Online access: <http://sysdyn.mit.edu/sdep/papers/D-4434-3.pdf>. Last access date: 28 May, 2002.
- Forrester, Jay W. (1971), *World Dynamics*. Cambridge, MA: Wright-Allen Press.
- Forrester, Jay W. (1969), *Urban Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Forrester, Jay W. (1968), *Principles of Systems: text and workbook*. Cambridge, MA: Wright-Allen Press, Inc.
- Forrester, Jay W. (1961), *Industrial Dynamics*. The MIT Press Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc. New York, London.
- Kim, N-I. (2001), *A Study on Stabilization of Power Supply & Demand as Power Industry Restructuring*, KEEL.
- Kim, C-S., etc (2001), *A Study on Plans to Counteract for Climate Change as Power Industry Restructuring*, KOSPO.
- Kim, H-J. (1996), *An Application of the Analytic Hierarchy Process to the Electric Power Generation Mix*, Ph.D. Thesis, Inha Univ., Korea.
- MOCIE (2002), *A Study on Forecast of Wholesale Electricity Price in Competitive Power Market*.
- MOCIE (2002), *The 1st Basic Plan of Long Term Electricity Supply & Demand*.
- MOCIE (2002), *The 2nd Basic Plan of Energy in Korea*.
- Oggianu, Stella Maris (2002), *A System Dynamics Model of the Energy Policymaking Process*. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering. Cambridge, MA, USA.
- Senge, Peter M. (1990), *The Fifth Discipline: the Art and Practice of the Learning Organization*. New York, Doubleday/Currency.
- Sterman, John (2002), *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Irwin/McGraw-Hill.
- VENSIM. Ventana Systems. (Copyright 1996-2001 Ventana Systems, Inc.). *Ventana Systems* [Homepage of Ventana Systems], Online. Available: <http://www.vensim.com>. Last access date: February, 2000.



광상만

서울대학교 원자핵공학과 학사
KAIST 원자핵공학과 석사
MIT 원자핵공학과 박사
현재: 시스텍믹스(주) 이사, 아주대학교 대학원
에너지학과 교수
관심분야: System Dynamics, 경영전략,



박 문 회

아주대학교 산업공학과학사
아주대학교 에너지학과석사
아주대학교 에너지학과 박사
현재: 호서대학교 환경안전공학부 전임강사,
대성청정에너지연구소 부소장
관심분야: 안전공학, 기술경영, 데이터마이닝



최 기 련

서울대학교 자원공학과 학사
Grenoble 대학원 에너지경제학과 박사
현재: 아주대학교 에너지학과 교수 겸 아주대
학교 부설 에너지기후변화연구소 소장
관심분야: 에너지 경제 및 정책