

System Dynamics를 사용한 원자력발전산업 기술개발정책 지원모델 개발¹⁾

이용석, 정창현, 광상만, 김도형²⁾

초 록

현재 국내 원자력 발전산업은 상당한 기술자립을 이루었고, 외국으로의 기술 수출을 시도하고 있을 정도로 상당한 경쟁력을 갖고 있다는 의견이 지배적이다. 실제 한국전력, 원자력 연구소 등에서는 원자력 기술을 해외에 수출하고자 노력하고 있다. 원자력 발전기술의 해외 수출이나 연구개발 사업에서 가장 중요한 지표 중의 하나가 원자력 발전산업의 기술수준 또는 기술경쟁력이다. 또한 국외 뿐 아니라 국내에서도 발전원별 경쟁체제 도입으로 인해 원자력 발전의 경쟁력 평가는 원자력의 타 발전원 대비 경쟁력 확보 측면에서 중요한 사항이 되었다.

본 연구에서는 원자력 발전산업의 효율적인 기술개발 전략 수립을 지원하기 위한 모델을 System Dynamics 방법론을 사용하여 개발하였다. 이를 위하여 우선 원자력 발전산업의 기술경쟁력 평가를 위한 변수 및 평가범위를 선정하고, 선정된 변수들의 인과관계를 정성적으로 평가할 수 있도록 인과지도(Casual Loop Diagram)를 개발하였으며, 이를 정량화하여 평가할 수 있도록 흐름도(Stock Flow Diagram)를 개발하였다.

개발된 모델을 사용하여 총 연구비 등의 정책관련 변수들을 변화시키면서 시뮬레이션을 수행해보았다. 본 연구의 한 결과로서 기준 시나리오에 대한 분석 결과 2004년 이후의 원자력발전산업 순편익 누적 결과는 다음과 같다.

년도	2015	2025	2035	2045
순편익 누적(억원)	19,169	61,396	106,598	143,813
발전 비용 감소분 누적(억원)	9,370	39,182	73,409	103,212
국산화율 증가로 인한 수입액 감소분 누적(억원)	6,388	13,367	18,756	22,595
시장점유율 증가로 인한 수출액 증가분 누적(억원)	3,411	8,847	14,433	18,005

또한 시나리오별 비교평가를 실시하여 본 결과, 본 연구에서 정의한 순편익 누적(Cumulative Net Profit) 변수를 적용하면 현재 연구비 추세 대비 30% 까지 연구비를 증가시키는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

- 1) 본 논문은 산업자원부 전력정책연구사업 “원자력발전산업의 기술경쟁력 평가모델 개발”에 의해 연구되었음.
- 2) 이용석: 서울대학교 원자핵공학과 박사과정, ys028@plaza.snu.ac.kr
 정창현: 서울대학교 원자핵공학과 교수, cchyun@snu.ac.kr
 광상만: 아주대학교 에너지학과 교수, skwak@ajou.ac.kr
 김도형: (주) 시스템믹스 연구원, dohyoung@alum.mit.edu

I. 서론

현재 국내 원자력 발전산업은 외국으로의 기술 수출을 시도하고 있을 정도로 국가 경쟁력을 갖고 있다는 것이 지배적이다. 실제 한국전력, 원자력연구소 등에서는 원자력 기술을 해외에 수출하고자 노력하고 있다. 원자력 발전기술의 해외 수출이나 연구개발 사업에서 가장 중요한 지표 중의 하나가 원자력 발전산업의 기술경쟁력이다. 대외적으로는 동남아 국가를 중심으로 원자력의 국가간의 원자력발전 시장의 경쟁이 예상되고, 원자력 발전산업의 경쟁력 중 기술경쟁력이 이에 중요한 역할을 하게 된다. 국내로 보아도, 현재 한창 진행 중인 기술 개발 사업에서 기술경쟁력이 원자력발전의 효율적인 운영, 안전성 확보는 물론 다른 산업에의 파급효과 등에서 중요한 매개변수 역할을 한다.

이러한 원자력 발전산업의 기술경쟁력은 다양한 측면에서 생각할 수 있다. 경쟁상대를 국내의 타 발전원으로 보면 발전원가 측면에서의 타 발전원 대비 경제성 경쟁력으로 생각할 수도 있고, 환경영향 측면에서의 경쟁력으로 생각할 수도 있다. 또한 타 국가의 원자력 발전산업을 경쟁상대로 본다면 해외로의 수출실적을 경쟁력으로 볼 수도 있고, 발전 경제성이나 안전실적을 경쟁력으로 볼 수도 있다. 이렇게 평가 목적에 따라 원자력 발전산업의 경쟁력은 다양하게 정의되고 해석될 수 있으며, 어느 한 척도만을 가지고 경쟁력이라고 정의하기는 어렵다.

본 연구의 최종 목적은 기술경쟁력이라는 척도를 정하고 이를 단순히 측정하는 것이라기보다는 전력생산, 국산화 추진, 해외 수출 등 원자력 발전산업의 효율적인 추진을 위한 전략수립 지원 모델을 개발하는 것이다. 따라서 기술경쟁력이라는 단일 척도를 정의하고 이를 최종 목적함수로 사용하기보다는 원자력 발전산업에 대하여 경제적인 측면에서의 총 편익 (Total Benefit, 단위: 억원)을 정의하고 이것을 극대화하기 위한 전략을 수립할 수 있도록 모델을 개발하는 것이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 기술경쟁력 또는 기술수준이라는 변수를 따로 정의하기보다는 원자력 발전산업 모델 내의 각종 변수, 예를 들면 이용률, 국산화율, 수출액 등을 평가 및 예측하기 위한 중간 변수 개념으로 사용하였다. 물론 정의에 따라서는 이용률, 국산화율, 수출액 등을 모두 기술경쟁력이나 기술수준이라고 할 수도 있겠지만 이에 대해 통일된 개념이 없을뿐더러 이를 정의한다는 것이 총 편익 극대화를 위한 원자력 발전산업 전략수립 측면에서는 불필요한 작업이 될 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 원자력 발전산업 내의 각종 변수 (이용률, 국산화율, 수출액) 들의 상호 영향 관계를 묘사할 수 있는 시스템 다이내믹스 방법을 이용하여 국내 원자력 발전산업의 전략수립 모형을 개발하였다.

II. 본 연구에서의 평가방법론 개요

2.1 기술경쟁력 평가의 일반적 방법론

기술산업의 경쟁력을 평가하기 위하여 기술수준, 기술경쟁력이라는 어휘가 많이 사용되고 있다. 기술수준과 기술경쟁력에 대한 공통적인 기준은 없으며, 각 적용분야마다 사례별로 다르게 정의되어 사용되고 있다. 일반적으로 기술수준과 기술경쟁력을 평가하는 방식은 연구비, 연구인력 수 등의 투입지표와 논문, 특허 수 또는 매출액 등의 산출지표를 사용하거나, 예를 들어 이들을 아래와 같이 종합하여 단일 지표로서 사용하기도 한다.

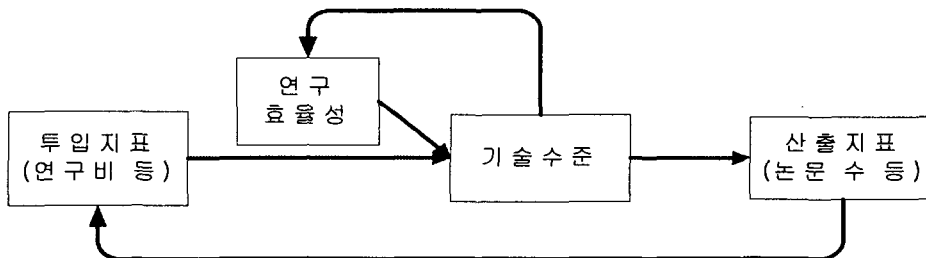
$$\text{기술수준} = a \cdot \text{투입지표} + b \cdot \text{산출지표} \quad (a, b \text{는 가중치})$$

그러나 이러한 일반적인 방식은 투입지표와 산출지표를 독립적으로 보게 된다. 실제로는 투입지표와 산출지표는 시간지연을 포함한 인과관계를 나타낸다. 예를 들어, 연구비가 증가하면 일정시간이 지난 후 이에 의해 논문, 특허 수가 증가하고 이에 의해 매출액이 증가하는 효과가 나타난다. 기존의 일반적인 기술수준 평가방식에서는 이러한 지표간의 인과관계가 잘 고려되지 않았다.

2.2 기술경쟁력 평가에서 System Dynamics 방법론의 적용

System Dynamics는 1960년대 초 미국 MIT 대학의 J. Forrester 교수가 개발한 학문으로서 복잡한 시스템 내 여러 변수들의 비선형적인 상호관계를 표현하고, 시간지연 및 피드백 구조를 고려하여 시나리오별로 시뮬레이션을 할 수 있는 방법론이다.

예를들어, 2.1에서 설명한 연구개발 투입지표와 산출지표간의 인과관계는 System Dynamics를 사용하여 다음 그림 1과 같이 모델링할 수 있다.



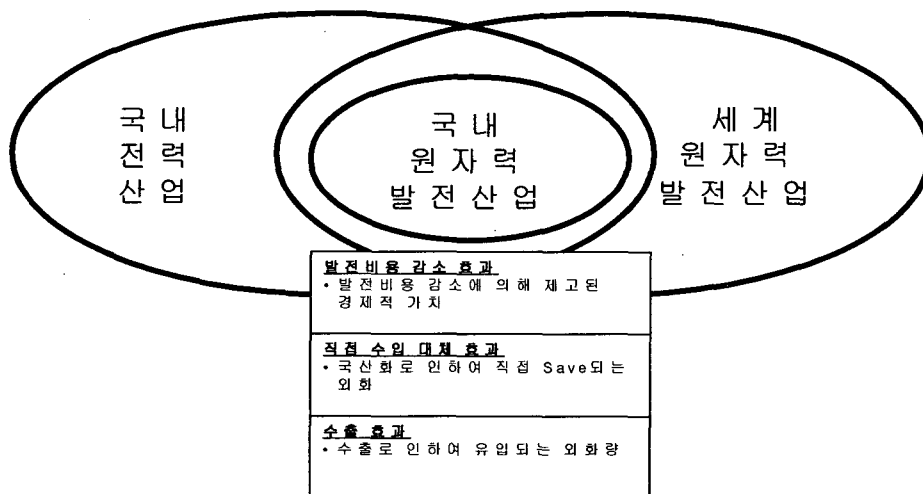
<그림 1. 기술수준에 대한 인과지도>

연구비 등의 투입지표는 기술수준을 향상시키는 역할을 한다. 그러나, 기술수준은 무조건 연구비를 많이 투자한다고 그에 비례하여 증가하는 것이 아니다. 기술수준 향상에는 현 시점에서의 기술수준이 영향을 미친다. 현 시점에서의 기술수준이 높아야 같은 연구비를 투자하더라도 연구효율성이 높아지므로 효율적으로 기술수준을 향상시킬 수 있는 것이다. 이런 과정을 거쳐 향상된 기술수준은 일정시간이 지난 후 논문 수나 매출액 등의 산출지표에 영향을 미친다. 또한 증가된 산출지표에 의해 연구비 등의 투자여력이 많아져 투입지표를 증가시키는 양(+)의 피드백 구조를 나타내게 된다. 그리고 그림 1에는 나타나지 않았지만 기술수명으로 인해 일정시간이 지나면 기술수준이 낮아지는 음(-)의 피드백도 존재한다.

이와 같은 인과관계와 시간지연을 고려한 기술경쟁력, 기술수준의 피드백 논리를 본 연구에서는 System Dynamics를 사용하여 모델링하였다.

2.3 시스템 정의

본 연구에서의 원자력 발전산업 경쟁력 평가 범위는 발전분야에 미치는 영향에 국한하기로 한다. 물론 원자력 발전산업의 기술은 발전분야 뿐 아니라 다양한 타 분야에 파급되어 영향을 미친다. 예를 들어 국내에서 품질관리 기술을 최초로 도입한 산업이 원자력발전소 건설이었고 이 품질관리 시스템이 건설회사를 경유하여 다른 산업에 전파된 경우가 있다. 그러나, 이러한 부분은 측정도 어렵고 본 연구의 목표와도 부합하지 않으므로 여기서는 발전분야와 관련된 직접적인 효과에만 국한하기로 한다. 그림 2와 같이 국내 원자력 발전산업은 국내의 전력산업에 포함됨과 동시에 세계 원자력산업에 포함된다. 이러한 범위에서 발전산업과 관련된 직접적인 효과만을 고려하면 평가 범위는 “발전비용 감소, 국산화율 향상, 수출액 증가”가 된다.

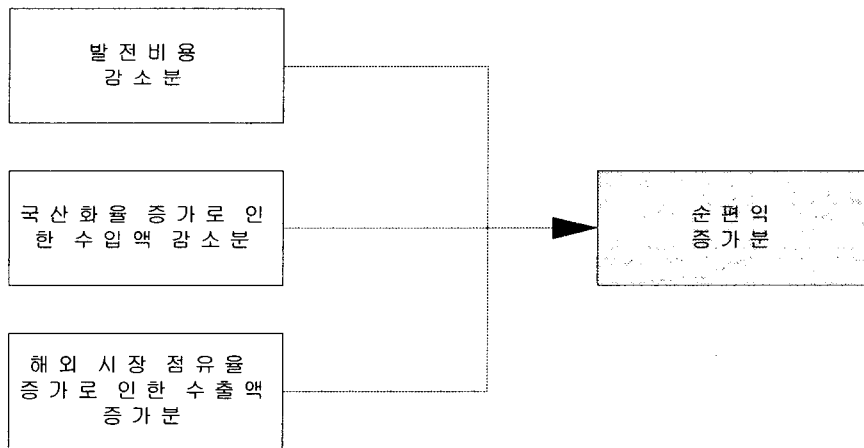


<그림 2 . 시스템 경계에 대한 개념도>

2.4 최종 목적함수

원자력 발전산업의 전략 수립 모델 개발에 있어서 어떤 것을 최종 목적함수로 할 것인지는 중요한 문제이다. 원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가할 수 있는 변수로 원자력 발전소의 발전원가, 국산화율, 수출액 등 다양한 변수가 존재하지만 이들은 모두 경쟁력의 한 요소일 뿐이며 이를 최종 목적함수로 사용할 수는 없다. 예를 들어 발전원가를 낮추려고 한다면 연구개발에 투자하여 원자력발전소의 기자재를 국산화하기보다는 가격경쟁력이 좋은 외국의 기자재를 수입하는 것이 나올 수 있다. 그러나 이로 인해 국산화율은 낮아질 수 있는데, 이때 어떤 것이 최적의 대안인지를 발전원가, 국산화율 등의 경쟁력 척도만 가지고는 알 수 없다. 따라서 최적의 대안을 평가하기 위해서는 최종 목적함수가 따로 정의되어야 하는데, 본 연구에서는 이러한 최종 목적함수로 순편익 (Net Profit)을 사용하기로 하였다.

순편익이란 기술개발 등으로 인해 향후 기대되는 총편익에 비용을 뺀 값이다. 본 연구에서의 순편익은 원자력발전산업 기술개발로 인해 향후 기대되는 총편익에 연구비 지출액을 뺀 값으로 정의하며, 순편익을 구성하는 요소는 우선 그림 3과 같이 발전비용 감소분, 국산화율 증가로 인한 수입액 감소분, 해외시장점유율 증가로 인한 수출액 증가분의 3가지로 정의하였다.

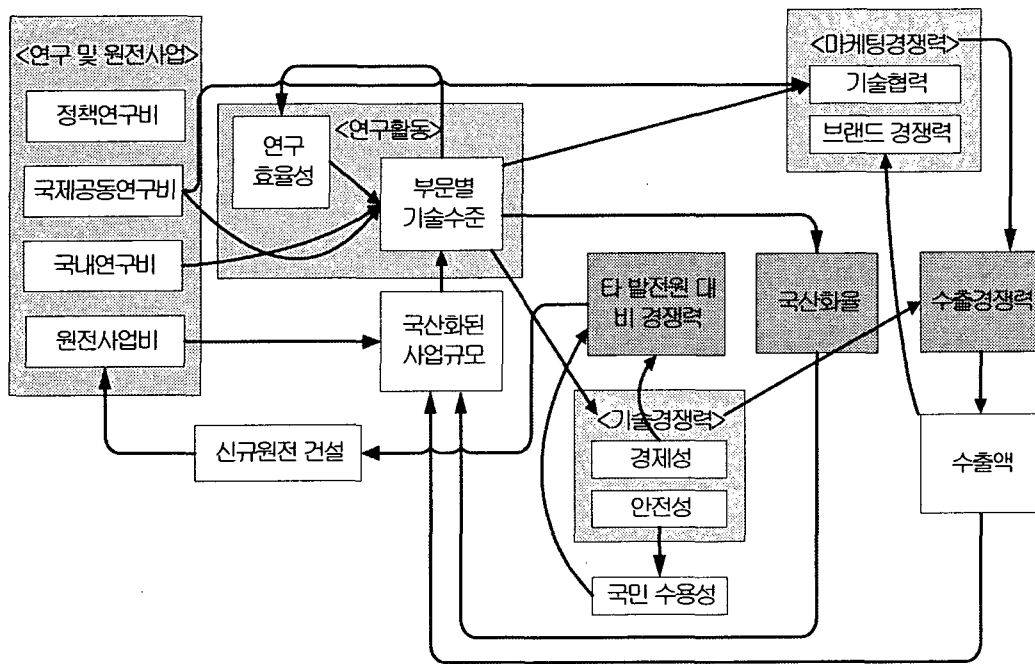


<그림 3. 본 연구의 순편익 (Net Benefit) 구성 요소>

물론 원자력 발전산업의 기술개발로 인한 편익은 타산업으로의 파급효과, 국가 기술수준 증대, 외교에의 기여, 비발전산업에 파급 등 여러 가지가 있지만 이러한 것들은 평가하기도 어렵고 불확실성이 매우 크기 때문에 본 연구에서는 이러한 간접적인 편익은 고려하지 않고 직접적인 편익만 고려하였다.

III. 주요 인과지도 (Casual Loop Diagram)

원자력 발전산업의 기술경쟁력을 평가하기 위한 전체적인 인과지도를 그림 4에 나타내었다. 연구 및 원전사업으로 인하여 각 부문별 기술수준이 증가하고 이 기술수준에 의하여 타발전원 대비 경쟁력, 국산화율, 수출경쟁력이 증가한다. 이러한 인과지도는 피드백 구조를 가지는데, 예를 들면 원전사업비의 증가로 국산화된 사업 규모가 증가하고 기술수준이 향상된다. 이로인해 경제성 경쟁력이 향상되어 타 발전원 대비 경쟁력이 향상되고 이는 신규원전 건설로 이어져 마지막으로 사업비가 다시 증가된다.



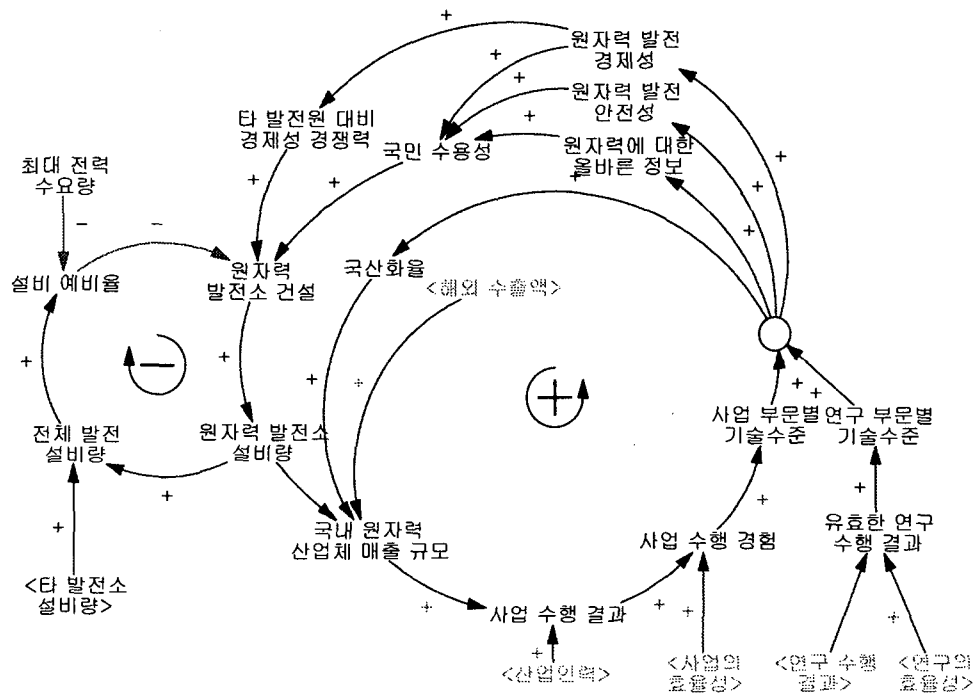
<그림 4 . 원자력 발전산업 기술경쟁력 주요 인과지도>

3.1 타 발전원 대비 경쟁력 및 국산화율 증가

그림 5는 국내 원자력 산업에 대한 주요 인과지도이다. 크게 2개의 피드백 구조로 이루어지는데, 왼쪽의 피드백 구조는 원자력 발전소 건설에 대한 구조로 음의 피드백 형태를 띤다. 음의 피드백이란 균형 루프라고도 하는데, 여기서 최대 전력 수요량이 증가에 의해 전력예비율이 감소되면 이로 인해 원자력 발전소가 건설됨으로서 전체 발전설비량이 증가되어 전력예비율이 증가하는 균형 상태를 이룬다. 오른쪽의 피드백 구조는 원자력 기술개발에 대한 구조로 양의 피드백 구조를 가진다. 이는 강화고리라고도 하는데 원자력 설비량 증가에 의하여 국내 원자력 산업체의 매출액이 증가하면 사업 수행의 경험이 늘어나게 되고 이는 곧 안전성, 경제성 향

상으로 이어져 타 발전원 대비 경쟁력이 확보되는 효과가 나타난다. 이는 원자력 발전소의 건설을 가져와 다시 원자력 발전소의 설비량을 증가시키는 효과가 나타난다. 타 발전원 대비 경쟁력은 사업 수행 경험 뿐 아니라 유효한 연구 결과에 의해서도 증가된다.

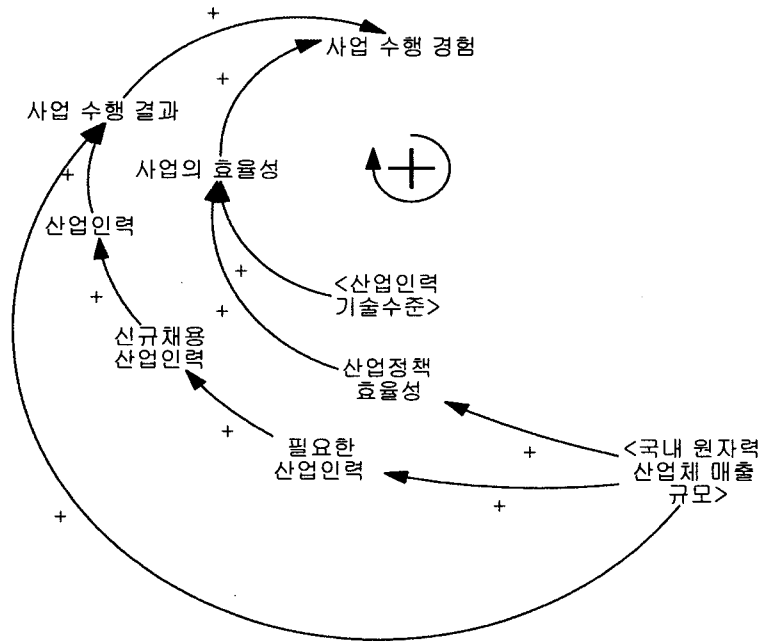
신규 원자력 발전소 건설을 위해서는 타 발전원 대비 경제성 경쟁력 뿐 아니라 국민 수용성도 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 국민 수용성은 연구 또는 사업수행에 의한 원자력 발전 경제성 및 안전성 향상에 의해서도 증가되지만 대국민 홍보 또는 정책연구 수행 등에 의한 원자력에 대한 올바른 정보 영향으로 증가될 수도 있다.



<그림 5 . 국내 원자력 산업 주요 인과지도>

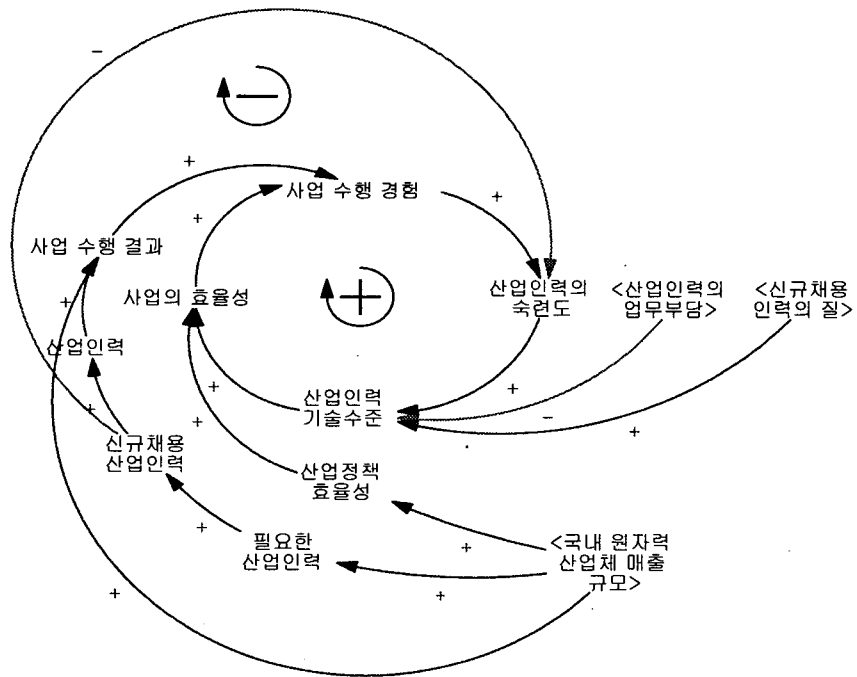
3.2. 사업 수행

앞에서 설명한 원자력 산업에 대한 인과지도에서 주요한 변수인 사업 수행 경험 증가 부분을 자세히 보면 그림 6과 같다. 사업 수행 경험의 증가는 두 가지에 의해서 나타나는데 하나는 사업 수행 결과의 증가와 사업의 효율성 증가이다. 사업 수행 결과는 사업비 투자액과 가용한 산업인력에 의해서 생기며, 사업의 효율성은 산업인력의 기술수준 및 산업정책의 효율성에 의해서도 증가한다.



<그림 6 . 국내 원자력 산업 사업수행 경험에 대한 인과지도 1>

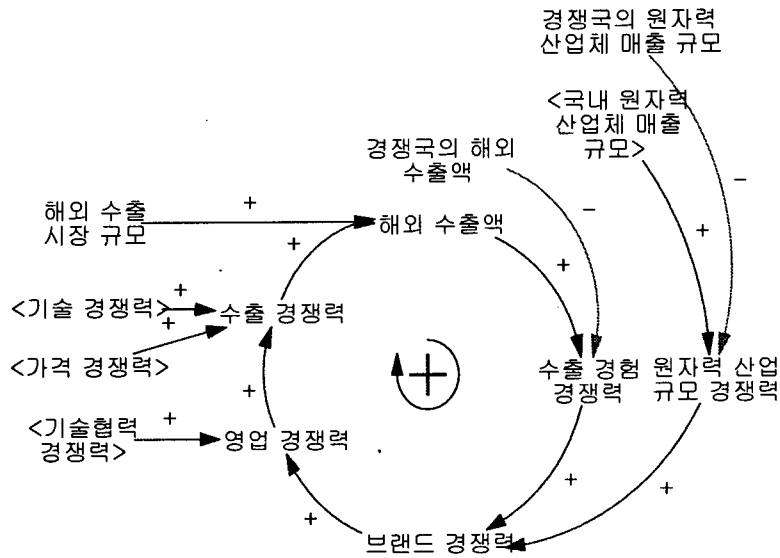
산업인력의 기술수준에 대해 더 자세히 살펴보면 그림 7과 같다. 산업인력의 기술수준은 숙련도, 업무부담, 신규채용인력의 질에 의해서 결정된다. 이 중 산업인력의 숙련도를 중심으로 살펴보면 산업인력 숙련도 자체는 산업인력 기술수준 및 사업 수행 경험에 양(+)¹⁾의 영향을 미치지만, 산업인력의 숙련도를 포함하는 피드백 구조는 양(+)²⁾의 피드백 구조와 음(-)³⁾의 피드백 구조 모두가 존재한다. 양(+)¹⁾의 피드백 구조를 먼저 보면 사업 수행 결과 및 사업의 효율성 증가로 인하여 사업 수행 경험이 증가하면, 이로 인해 산업인력의 숙련도가 증가하고 이는 산업인력 기술수준과 사업의 효율성의 증가를 가져와 다시 사업 수행 경험이 증가하는 양(+)²⁾의 피드백 구조를 갖고 있다. 음(-)³⁾의 피드백 구조를 보면 국내 원자력 산업체 매출 규모 증가로 필요한 인력이 증가하여 신규채용 인력이 증가하는데, 이는 곧 미숙련 인력의 증가를 의미하므로 평균적인 산업인력 숙련도에 음(-)³⁾의 영향을 미침으로서 사업 수행 경험에 음(-)³⁾의 영향을 미친다.



<그림 7 . 국내 원자력 산업 사업수행 경험에 대한 인과지도 2>

3.3 해외 수출

해외 수출액의 증가를 위해서는 수출경쟁력이 증가해야 하는데 수출 경쟁력은 그림 8과 같이 기술경쟁력, 가격경쟁력, 영업경쟁력으로 분류하였다. 수출이 원자력의 다른 사업 또는 연구활동과 특히 다른 점은 영업경쟁력이 중요하다는 것이다. 영업 경쟁력은 기술협력 경쟁력과 브랜드 경쟁력으로 구성되고 브랜드 경쟁력은 수출 경험 경쟁력과 원자력 산업 규모 경쟁력으로 구성된다. 수출에서 주요한 피드백 구조는 양(+)의 구조로서 수출 경쟁력이 증가하여 해외 수출액이 증가하면 수출 경험 증가로 브랜드 경쟁력이 향상되고 이는 다시 수출 경쟁력 증가를 가져오는 것이다. 우리나라의 경우 외국으로의 기술수출이 어려운 주요한 이유 중 하나가 해외수출실적이 많지 않다는 것을 이 피드백 구조를 통해 알 수 있다.



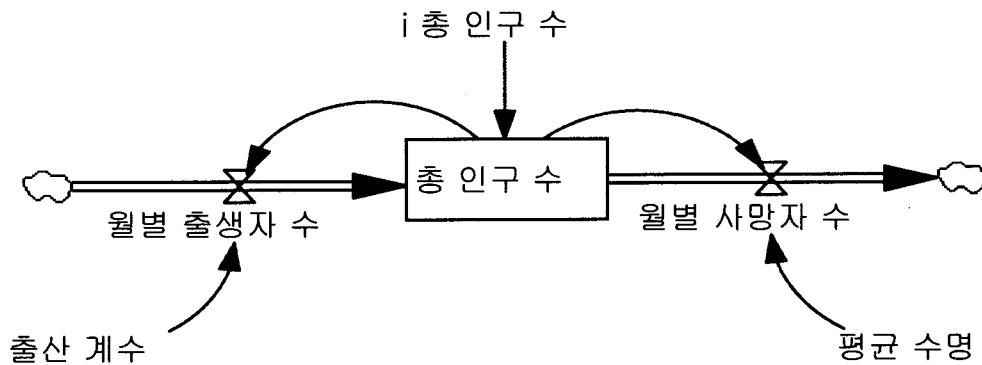
<그림 8 . 원자력 해외 수출에 대한 주요 인과지도>

IV. 흐름도 (Stock Flow Diagram)

흐름도(Stock Flow Diagram)란 앞에서 설명한 인과지도를 정량화한 모델이며, 여기서 사용되는 변수는 레벨 변수와 변동률 변수 및 보조변수로 나뉜다.

그림 9에 흐름도의 예를 나타내었는데 레벨 변수는 총 인구 수 (단위 : 명) 이고 변동률 변수는 월별 출생자 수, 월별 사망자 수 (단위 : 명/월)에 해당된다. 보조 변수로는 변동률 변수에 영향을 주는 출산 계수, 평균 수명이 해당된다. 즉 레벨 변수는 변동률 변수의 누적값으로 볼 수 있고, 보조변수는 변동률 변수에 영향을 미치는 변수로 볼 수 있다. 참고로, i 총 인구 수는 시뮬레이션 시작 시점의 총 인구 수 초기값을 나타낸다.

t 시점에서의 총 인구 수는 $t-1$ 시점에서의 총 인구 수 값에 t 시점에서의 월별 출생자 수를 더하고 t 시점에서의 월별 사망자 수를 뺀 값을 의미한다. 이 때 t 시점에서의 월별 출생자 수는 보조변수인 출산 계수가 높을 수록, $t-1$ 시점에서의 총 인구 수가 많을 수록 증가하며, t 시점에서의 월별 사망자 수는 보조변수인 평균 수명이 짧을수록, $t-1$ 시점에서의 총 인구 수가 많을 수록 증가한다.



<그림 9 . 레벨 변수와 변동률 변수의 예>

정량적인 평가를 위해서는 V장에서 설명한 정성적인 인과지도 (Casual Loop Diagram)들을 이와 같은 흐름도 (Stock Flow Diagram) 형태로 바꾸어 주어야 한다.

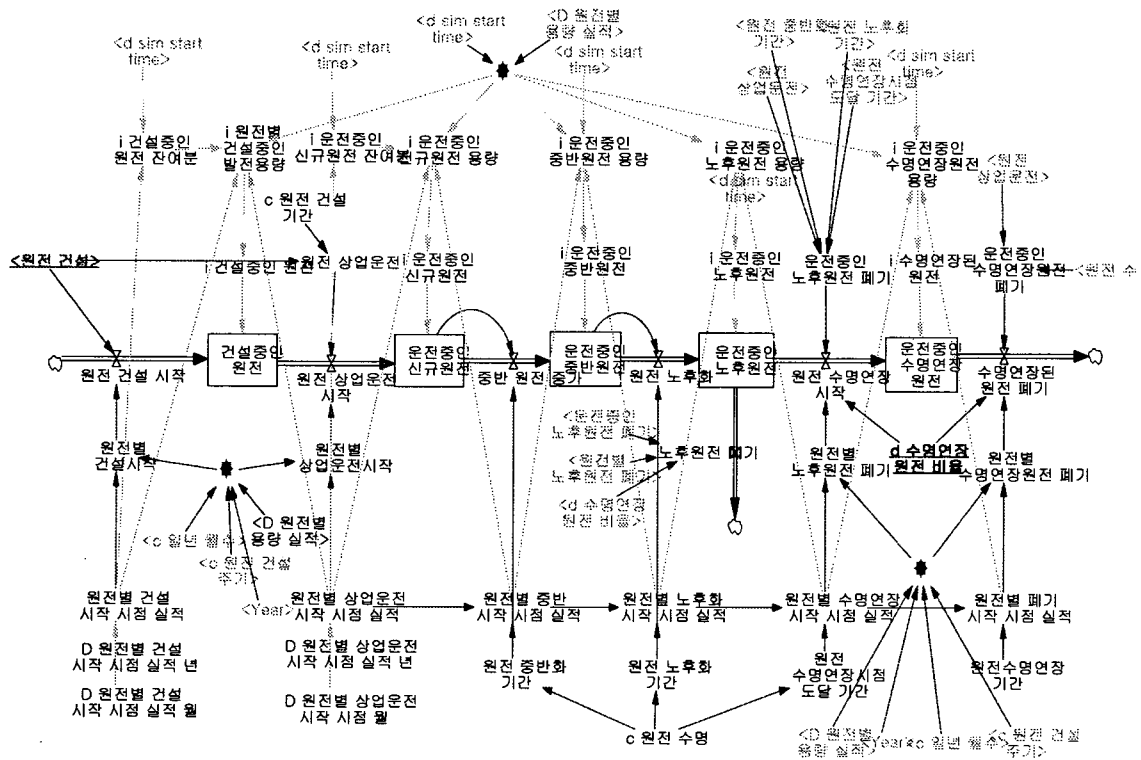
본 연구에서는 약 1,000여개 변수들의 인과관계가 흐름도를 사용하여 정량화되었으며, 따라서 개발된 흐름도도 약 50여개에 이른다. 모델에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [1]에 수록되어 있으며, 본 논문에서는 이들 흐름도 중 몇가지에 대해서만 예시로 설명하기로 한다.

4.1 원자력발전소 건설 및 운영 흐름도

원자력 발전소가 건설되어 폐기되기까지의 발전소 건설 및 상업운전 결정 흐름도를 각각 그림 10에 나타내었다. 여기서 주의할 점은 그림 10에서의 건설중인 원전, 운전중인 신규원전은 발전소의 수를 나타내는 것이 아니라 발전용량(MWe)을 나타내는 것이라는 점이다.

원자력 발전소의 건설 및 상업운전 흐름도는 여기서 두 가지 측면에서 사용된다. 첫째는 매 시점의 원자력 설비량 및 타 전력 설비량으로 최대전력수요량 대비 설비 예비율이 계산되어 발전소 건설 계획이 결정되는 것이고, 둘째는 건설중인 원전의 설비량(MWe) 및 운전중인 원전의 설비량(MWe)을 바탕으로 원자력 산업의 월별 매출액(억원/월)을 계산하는 것이다. 원자력 발전소와 관련한 흐름도에서 운전중인 원자력발전소는 향후 원전의 노후화에 따른 운영보수비 증가, 수명연장 유무 등을 고려할 수 있도록 운전중인 신규원전³⁾, 운전중인 중반원전, 운전중인 노후원전, 운전중인 수명연장원전 으로 세분화하여 놓았다.

3) 본 논문에서 이탤릭체로 표시된 부분은 개발된 모델 내의 변수명을 의미함.

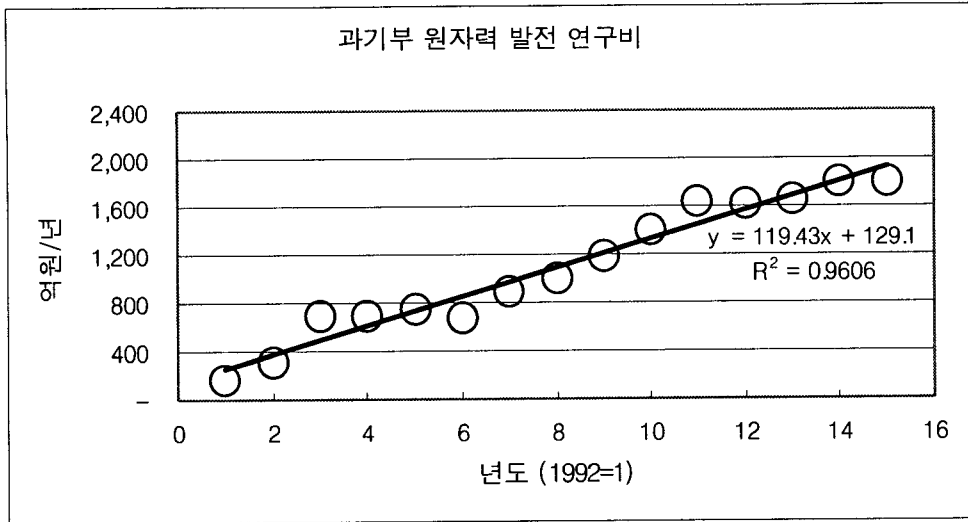


<그림 10 . 원자력 발전소 건설 및 상업운전 결정 흐름도>

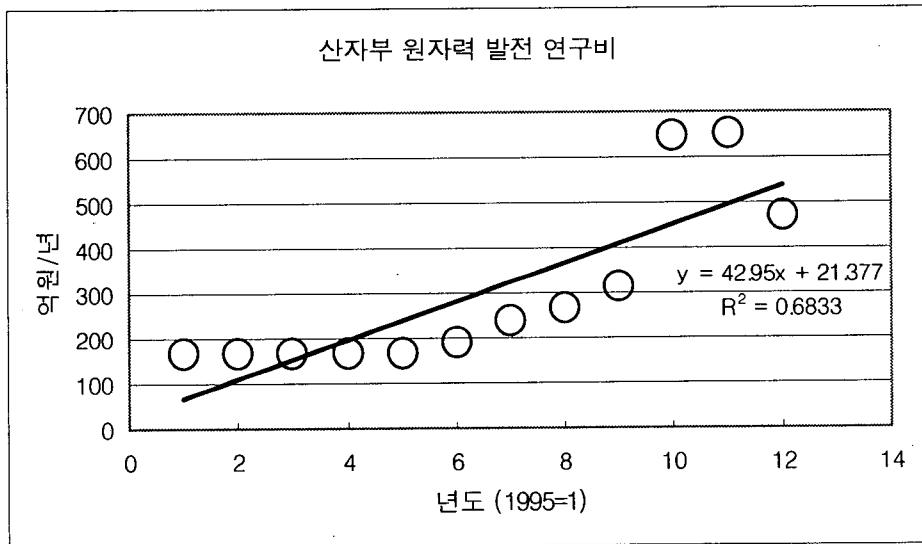
4.2 연구비 및 연구수행 흐름도

4.2.1 연구비 입력자료

원자력 발전 연구개발사업은 과기부에서 주관하는 원자력중장기연구개발사업과 산자부에서 주관하는 원전기술고도화사업이 있다. 본 연구에서 과기부 및 산자부 주도 연구비는 입력 변수로 처리하는 것을 원칙으로 하였다. 기준시나리오에서는 과기부 연구는 중장기 연구개발 시작시점인 1992년부터 2006년까지의 연구비 실적 및 계획자료로 도출된 추세선(그림 11)을 사용하였고, 산자부 연구는 시뮬레이션 시작 시점인 1995년부터 2006년까지의 연구비 실적 및 계획자료로 도출된 추세선(그림 12)을 사용하였다.



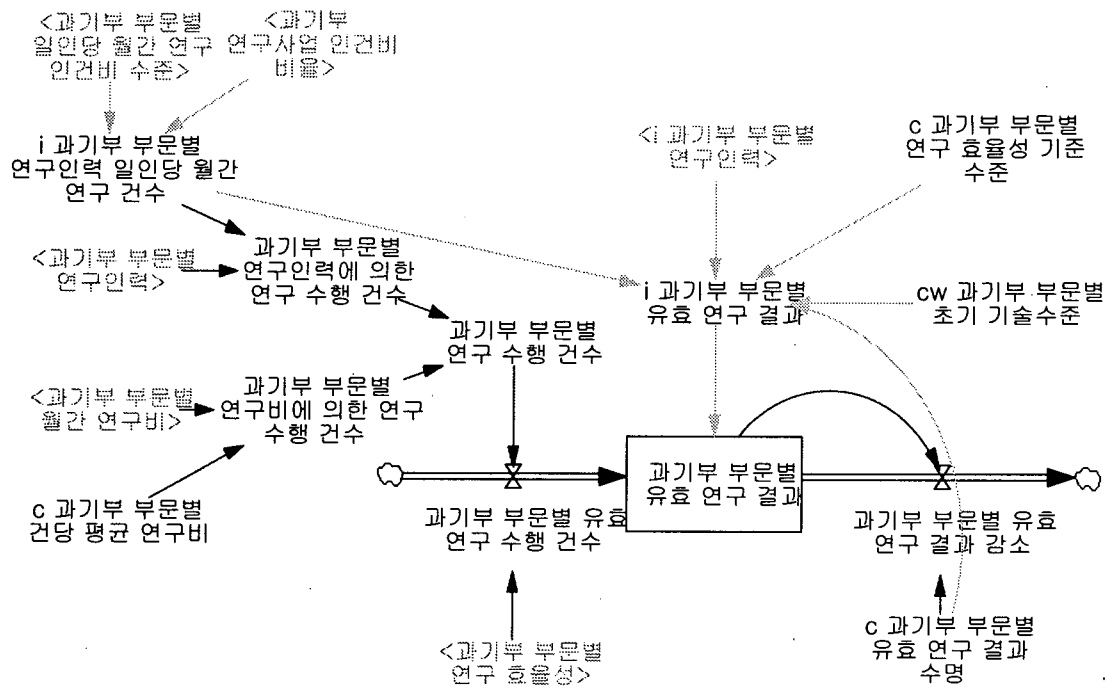
<그림 11 . 과기부 원자력 발전 연구비 추세선>



<그림 12 . 산자부 원자력 발전 연구비 추세선>

4.2.2 연구수행 흐름도

연구수행과정에 대한 흐름도를 그림 13에 나타내었다. 4.2.1에서 정의된 연구비와 연구인력, 연구 효율성 등에 의하여 유효 연구 결과가 결정된다. 여기서 유효 연구 결과란 수행한 연구 결과들 중 성공한 연구결과를 말한다.



<그림 13 . 과기부 부문별 연구 수행 결정을 위한 흐름도>

과기부 부문별 유효 연구 수행 건수는 과기부 부문별 연구 수행 건수와 과기부 부문별 연구 효율성에 의하여 정의된다. 즉 수행중인 연구 건수 뿐 아니라 연구의 효율성이 증가해야 유효한 연구 수행 결과가 많아지는 것이다.

과기부 부문별 연구 수행 건수는 과기부 부문별 연구인력에 의한 연구 수행건수와 과기부 부문별 연구비에 의한 연구 수행건수의 최소값으로 나타내었다. 이는 연구비가 많아져도 연구를 수행할 연구인력의 수가 부족하면 연구가 제대로 수행되지 않고, 반대로 연구인력의 수가 충분해도 연구비가 부족하면 연구가 제대로 수행되지 않는다는 점을 감안한 것이다.

유효 연구 결과에는 기술 수명이 있다고 가정하여 Exponential Decay를 적용하였다 (과기부 부문별 유효 연구 결과 감소).

V. 시뮬레이션 결과

5.1 시뮬레이션 기본 변수

개발된 컴퓨터 모델은 시뮬레이션을 실현하는 것이다. 이를 위해 가장 먼저 표 1과 같은 기본 변수를 결정하여야 한다.

<표 1. 시뮬레이션 기본변수>

변수 이름	의미	단위
<i>Time</i>	시뮬레이션의 기본 시간 단위	월, 개월
<i>INITIAL TIME</i>	시뮬레이션이 시작 되는 시점	$Time = 0$
<i>FINAL TIME</i>	시뮬레이션이 종료되는 시점	$Time = 600$
<i>TIME STEP</i>	시뮬레이션의 진행 단위	1 개월
<i>Year</i>	보조 변수 시간 변수	$1995 + Time / 365$

시간의 기본 단위인 *Time* 은 월 혹은 개월로 표시하기로 하였다. 어느 것을 기본 시간 단위로 할 것인가는 시뮬레이션의 결과에 크게 영향을 주지 않는다. 우리가 관심을 갖는 연구비가 일년 단위로 결정되므로, 그것보다 조금 적은 시간단위인 월을 사용하는 것이 모든 변수를 기술하기에 편리할 것으로 판단하였다.

시뮬레이션의 시작 시점을 결정하는 *INITIAL TIME* 은 일단 $Time = 0$ 을 사용하였으므로 시뮬레이션 시작 시점은 1995년으로 보면 1월 1일이 된다. 시뮬레이션 종료를 나타내는 *FINAL TIME* 은 $Time = 600$ 을 사용하였는데, 이는 50년에 해당한다. 시뮬레이션 기간으로 50년은 약간 긴 편인데, 추후 시뮬레이션의 목적에 따라 바꿀 수 있다.

일반적으로 *TIME STEP* 은 모델에 사용될 시간 관련 변수 중 가장 단위의 1/10 수준을 유지하거나, 현실에서 의미있는 시간 중에서 가장 작은 단위로 결정한다. 모델에 사용하고 있는 기본 시간 단위가 일년이고, 예상되는 지연변수들도 대부분 1년 이상으로 판단되어 *TIME STEP* 을 1 개월로 결정하였다.

보조 변수로 *Year* 를 사용하였는데, 이는 출력되는 변수의 추세를 월 단위로 보는 것 보다는 년 단위로 표현하는 것이 이해하기 쉽기 때문이다.

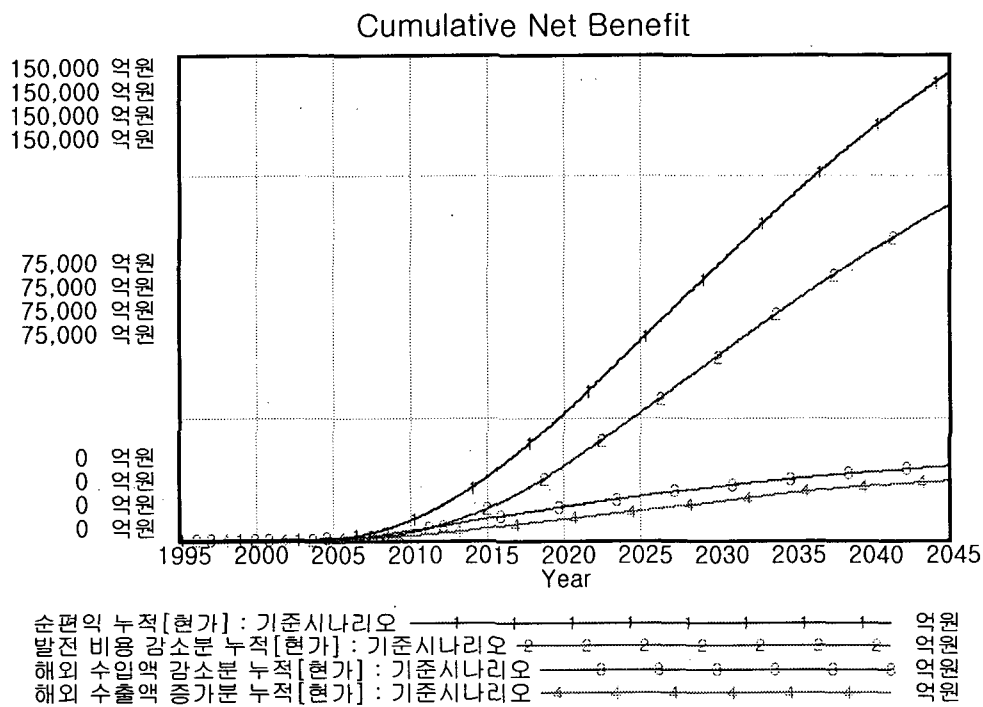
5.2 기준 시나리오 분석

기준시나리오는 지금과 같은 형태로 앞으로 계속 연구비가 책정되는 것으로 선정하였다. 따라서 총 연구비는 “4.2.1 연구비 입력자료”에서 정의한 바와 같이 과기부 연구비 및 산자부 연구비가 현재의 추세선대로 배분되는 것으로 하였다.

기준시나리오에서의 계산 결과를 표 2에 나타내었으며, 기준시나리오에 대하여 최종 목적함수인 순편익을 사용한 평가 결과를 그림 14에 도시하였다. 순편익 누적(억원)을 보면 전반적으로 큰 비중을 차지하는 것은 발전비용 감소 누적(억원)으로 나타났다. 이는 직접적인 경제적 효과 측면에서는 국산화 또는 수출보다는 발전비용 감소가 훨씬 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

<표 2 . 순편익 누적 분석 결과 (기준시나리오, 현가 (실질할인율 5% 기준))>

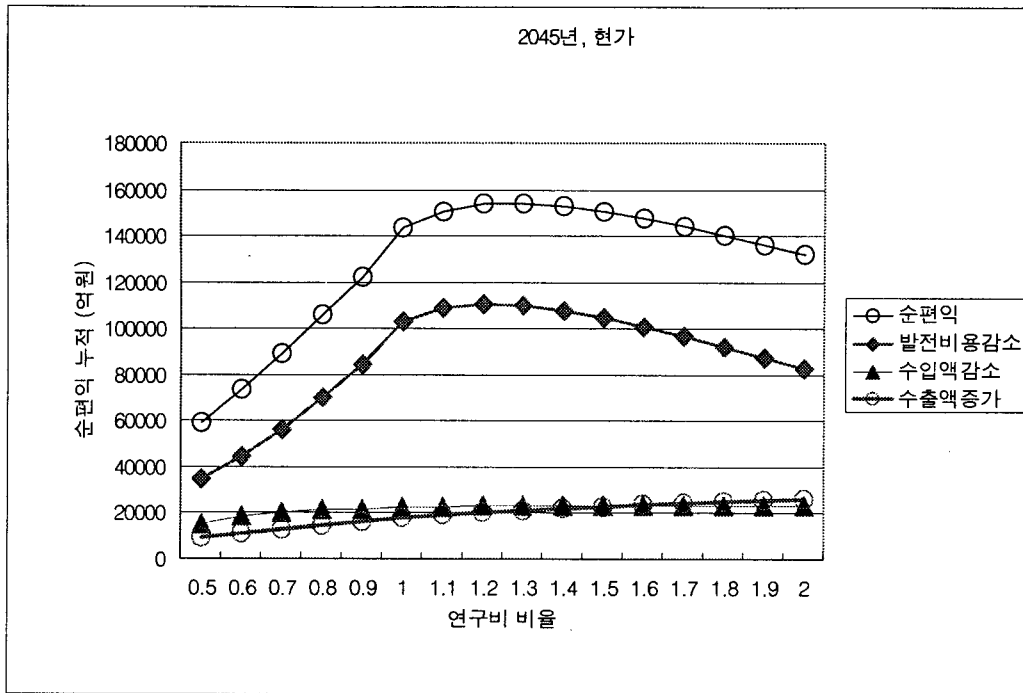
년도	2015	2025	2035	2045
순편익 누적(억원)	19,169	61,396	10,6598	143,813
발전 비용 감소분 누적(억원)	9,370	39,182	73,409	103,212
국산화율 증가로 인한 수입액 감소분 누적(억원)	6,388	13,367	18,756	22,595
시장점유율 증가로 인한 수출액 증가 분 누적(억원)	3,411	8,847	14,433	18,005



<그림 14 . 순편익 누적 분석 결과 (기준시나리오, 현가) >

5.3 연구비 규모에 대한 민감도 분석

여기서는 원자력 발전분야의 연구비를 조정할 경우 순편익 누적(억원)에 미치는 영향을 알아보기 위하여 시나리오 분석을 수행하였다. 연구비를 기준시나리오 대비 0.5배에서 2배까지 변경시키면서 시나리오 분석을 수행한 결과, 순편익 누적 [현가]은 그림 15와 같이 나타났다.



<그림 15 . 민감도 분석 결과 (2045년 순편익 누적, 현가)>

분석 결과 연구비를 기준시나리오보다 약 30% 정도 증가시키는 것이 현가 기준으로 순편익이 최대가 되는 것으로 나타났다. 이는 수입액 감소, 수출액 증가분을 고려한 것으로, 이를 고려하지 않은 발전비용 감소분 측면에서만 보면 기준시나리오 대비 20%가 최적인 것으로 나타났다. 전체 순편익 측면에서 연구비를 30%보다 더 증가시킬 경우 경제적 이득이 오히려 감소하는 것은 원자력 발전산업 기술개발로 인한 발전원가 절감, 국산화, 수출 증대에 일정한 한계가 있기 때문이다. 반면 기준시나리오 대비 연구비를 감소시킬 경우에는 경제적 이득이 기준시나리오에 비해 매우 큰 폭으로 감소하므로, 최소한 기준시나리오 정도의 연구비 수준은 반드시 유지할 필요가 있는 것으로 나타났다.

5.4 2004년 연구비 변화

일반적으로 어느 한 연구 결과가 국가 경제에 기여하는 정도는 그와 관련된 다른 연구의 결과에 따라 달라진다. 여기서는 단일 년도의 연구비 파급효과를 알아보기 위하여 표 4와 같은 시나리오 “연구비 0 2004”를 준비하였다.

<표 4 . 2004년도 연구비 변화 시나리오>

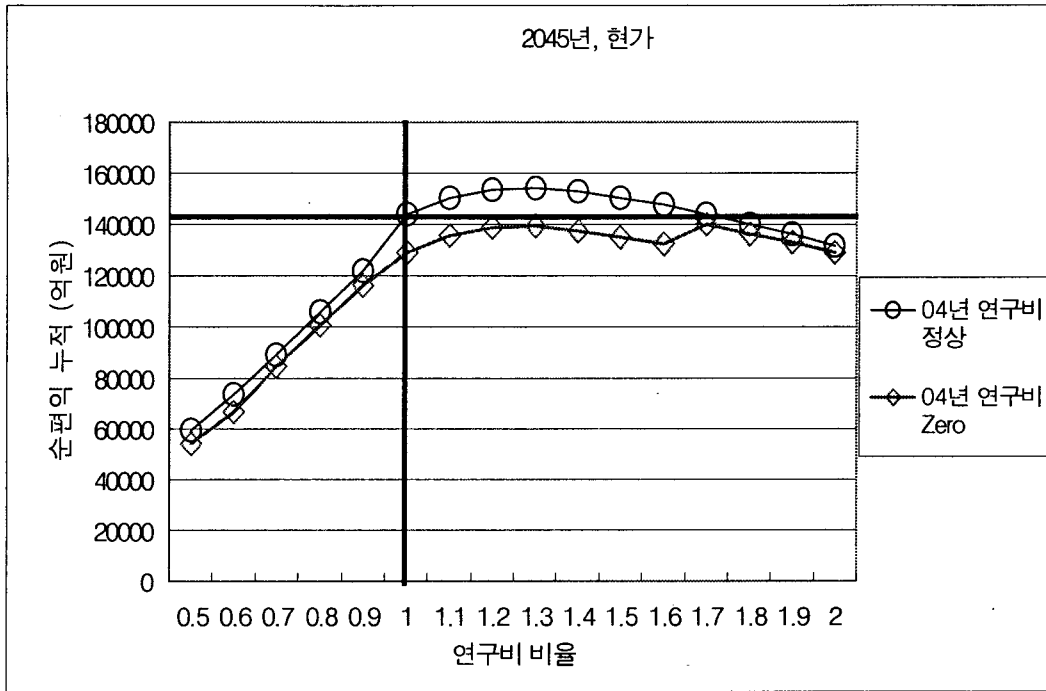
시나리오명	설명
기준시나리오	표 8 참조 2004년 연구 예산 (약 2000억원)
연구비 0 2004	2004년도 총 연구비 = 0

다음 표 5는 기준시나리오와 “연구비0 2004“를 비교한 것이다. 표에 나타난 바와 같이 2004년도에 투입된 원자력 연구개발비로 인한 순편익 증가분은 현가를 기준으로(5% 실질할인율) 약 1조 4천억원 정도이다.

< 표 5 . 2004년 연구비로 인한 순편익 증가분 >

시나리오	2045년도까지의 순편익 누적 (억원)	
	경상가	현가
기준시나리오	970,953	143,813
연구비0 2004	900,483	128,980
차이 (2004년 연구비로 인한 순편익 증가)	70,470	14,833

또한 2004년도의 연구비를 0으로 한 다음, 연구비를 증가시킨 경우, 기존 시나리오와의 차이를 알아보았다. 그림 16는 그림 15의 민감도 분석 결과 (04년 연구비 정상)와 2004년 연구비를 0으로 한 이후 2005년부터 연구비 비율을 변화시킨 결과 (04년 연구비 Zero)를 비교한 그림이다. 2004년 연구비를 0으로 한 경우도 그림 15의 경우와 마찬가지로 이후 연구비를 30% 증대시키는 것이 편익 측면에서 가장 좋은 것으로 나타났다. 기준시나리오의 경우 2045년도 현가 기준 순편익 누적이 143,813억원이었는데, 그림 16을 보면 2004년 연구비가 0이면 2005년 이후 연구비를 최적으로 투입해도 기준시나리오보다 순편익 누적이 높게 나오지 않는다. 그림 16에서 연구비가 70% 증가될때, 순편익이 급격히 증가한 것을 알 수 있는데, 이는 원인 분석 결과 발전소의 추가 건설에 의한 것으로 나타났다.



<그림 16. 2004년 연구비가 0일때 2005년 이후 연구비 변화에 따른 순편익 누적 결과>

VI. 결론

이번 연구 결과물인 시스템다이나믹스 모델은 다양한 사람들의 의견을 종합하여 작성한 것이므로 논리적 면에서 상당한 타당성을 가질 것으로 판단된다. 본 모델에 들어간 기본 자료의 경우도 가능한 경우 대부분 실적자료를 사용하도록 하였기 때문에, 기준시나리오 분석 결과도 합리적인 범위에서 도출되었다. 이러한 모델을 사용하여 각종 의사결정 변수를 변화시키면서 시뮬레이션을 해 볼 수 있다.

본 연구에서 개발된 모델에는 전력 수요공급, 원자력발전산업 규모, 연구활동, 연구인력, 국민 수용성, 수출 등 원자력 발전산업과 직접 관련된 변수들을 가능한 한 전부 포함시키고 이들의 연관관계를 모델링하려고 시도하였다.

모델을 구성하고 다양한 시뮬레이션을 수행해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 연구비 민감도 분석 결과 현재 연구비 추세 대비 30% 정도 연구비를 증가시켰을 때, 순편익이 가장 크게 나타났다. 이는 원자력연구개발로 인한 경제적 효과를 극대화하기 위해서는 적어도 현수준보다는 높은 수준의 연구개발비를 투자하는 것이 효과적임을 나타낸다. 반면 30% 이상 연구비를 증가시켰을 때는

오히려 순편익이 감소하였으며, 현 연구비 추세보다 연구비를 감소시켰을 경우에는 순편익이 매우 큰 폭으로 감소하였다.

- 당해연도 (2004년) 연구비를 지급하지 않았다고 가정할 경우, 2005년 이후 아무리 연구개발비를 증가시키더라도 모든 경우 기준시나리오에 비해 순편익이 낮게 나타났다. 이는 연구개발의 연속성이 중요함을 나타내는 것이라 볼 수 있다.

이외에도 본 연구에서 개발된 System Dynamics 모델을 사용하여 연구인력의 관리전략, 연구부문별 자원배분 최적화 전략 등의 시뮬레이션을 할 수 있다. 물론 이와 같은 다양한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 모델이 좀 더 개선될 필요성이 있다.

이번 연구는 하나의 시작에 불과하다. 앞으로 자료를 계속 보완하고 논리를 계속 보완하여 보다 질 좋은 모델을 개발해 나가려고 한다. 모델 보완에 필요한 추가 연구를 나열하면 다음과 같다.

- 수행된 연구의 성공 및 실패에 관한 연구
- 수출의 비경제적 파급효과에 관한 연구
- 국민 수용성 향상 방안에 대한 연구
- 기술 수준의 측정에 관한 연구
- 연구부문별 자원배분 최적화 연구 등

VII. 참고문헌

7.1 국내문헌

- [1] (주)시스템믹스, “원자력발전산업의 기술경쟁력 평가 모델 개발”, 전력정책연구사업 최종보고서, 2004
- [2] 이용석, 곽상만, 김도형, “원자력 발전산업의 기술경쟁력 평가 정성적 모델 개발”, 2003, 한국시스템다이내믹스학회 추계학술대회 논문
- [3] (주)시스템믹스, “한국원자력연구소의 국가 경제에 대한 기여도 분석”, 2002
- [4] (주)시스템믹스, “하나로의 국가경제에 대한 기여도 분석”, 2002
- [5] 한국원자력산업회의, “2002년도 제 8회 원자력산업실태조사”, 2003
- [6] 에너지경제연구원, “원자력발전 경쟁력 분석 연구”, 2001
- [7] 한국보건산업진흥원, “기술가치평가(II)”, KHIDIzine, 2001. 9
- [8] 산업자원부, “원자력발전백서”, 1998년 ~ 2002년분

7.2 해외문헌

- [1] 일본원자력산업회의, “2001년도 제 41회 원자력산업실태조사”, 2002