

# 확률적 모의실험법을 이용한 석탄화력발전소의 건설사업비 추정

한형기, 문승재\*<sup>†</sup>

한국전력기술(주), \*한양대학교 기계공학과

## Estimation of the Project Cost for a Coal-fired Power Plant using Stochastic Simulation

Hyoung-Gi Han, Seung-Jae Moon\*<sup>†</sup>

KEPCO Engineering & Construction Company, Inc.

\*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea 133-791

(Received November 23, 2012; revision received December 14, 2012)

**초 록 :** 석탄화력발전소의 건설사업비를 국내 500 MW급 석탄화력발전소를 대상으로 확률적 모의실험 방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 추정하였다. 물가상승률을 적용한 실적 건설사업비에 확률적 모의실험 이론을 적용하였고, 전산 모사 소프트웨어를 통하여 건설사업비를 추정하였다. 확률적 모의실험을 통한 국내 500 MW급 석탄화력발전소의 총 건설사업비는 2011년 12월 불변가 기준, 신뢰수준 95%에서 인접발전소가 없는 경우 약 1조 8,700억 원에서 2조 3,300억 원이며 토목공사의 비중과 민감도가 높은 것으로 나타났고, 인접발전소가 있는 경우 약 1조 2,400억 원에서 1조 5,900억 원이며 기자재비의 비중과 민감도가 높으며, 건설사업비 추정시 물가상승률을 적용해야 적합한 결과가 도출되는 것으로 나타났다.

**ABSTRACT :** Estimated project cost and executed sensitivity analysis for domestic 500 MW coal-fired power plants with monte carlo simulation. As a result of research, the basis of constant price in December, 2011 and 95% level of confidence, the project cost in case of not having adjacent power plant was 1,870 billion won to 2,330 billion won and the project cost in case of having adjacent power plant was 1,240 billion won to 1,590 billion won. In case of not having adjacent power plant is sensitive to civil construction cost but the other case is sensitive to material cost.

**Key words :** coal-fired power plant (석탄화력발전소), project cost (건설사업비), stochastic estimation (확률적 추정), monte carlo simulation (몬테카를로 시뮬레이션), sensitivity analysis (민감도 분석)

### 1. 서 론

5차 전력수급기본계획에 따르면 석탄화력발전소는 2024년까지 약 12,000 MW를 신설할 계획이고, 민자발전사업(IPP: Independent Power Plant)의 활성화로 민간

업체의 석탄화력발전소에 대한 자본투자와 건설의지가 높아지는 추세이다<sup>1)</sup>.

전 세계적인 전력산업의 민영화, 시장개방 흐름에 따라 발주자인 정부 또는 민간사업자는 제한된 자원으로 최대의 효과를 얻으려 하고 계약자인 설계사, 기자재사, 건설사는 조금이라도 예산을 더 확보하려는 노력이 치열해지고 있다. 이러한 노력을 뒷받침해 줄 수 있는 자료가 기본계획단계의 건설사업비이며, 이에 대한 정확한 산정은 사업추진의 타당성과 추진과정에서의 예산 및 예비비 확보

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel. +82-2-2220-0450; Fax +82-2-2220-2299  
E-mail address: smoon@hanyang.ac.kr

등을 좌우하는 중요한 역할을 한다.

기본계획단계 건설사업비 산정의 중요성에도 불구하고 기존의 확정적(Deterministic) 산정 방법은 산정자의 주관적인 성향에 의존하고 있고, 건설사업비에 영향을 미치는 여러 가지 변동성을 고려하지 못한 확정적인 금액을 제시하고 있어 의사결정을 위한 객관적 자료로서 충분하지 않다. 따라서, 의사결정에 도움을 줄 수 있는 보다 객관적이고 합리적인 건설사업비 산정 방식이 필요하며 기존의 확정적 산정 방식을 벗어난 새로운 산정 방법에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 국내 석탄화력발전소의 건설사업비 체계를 알아보고 기존의 확정적 건설사업비 산정 방법의 문제점을 분석하여 이를 보완하기 위한 확률적(Stochastic) 건설사업비 추정 방법을 적용하였다. 실적자료가 비교적 풍부한 국내 표준 500 MW급 석탄화력발전소 건설사업비를 대상으로 확률이론을 도출하고 확률적 모의실험 방법인 몬테카를로 시뮬레이션(Monte carlo simulation)을 수행하였다. 이를 통한 건설사업비 추정 및 민감도 분석(Sensitivity analysis) 결과를 가지고 현재 추진 중인 사업과의 비교를 통해 결과의 적합성을 입증하고 현실성 있는 확률적 건설사업비와 민감도, 유형별 특징을 도출하였다.

연구범위는 사업주 입장에서의 건설사업비로 미분탄보일러 형식의 국내 500 MW급 석탄화력발전소로 한정했으며, 인접발전소가 없는 경우와 있는 경우의 2가지 유형으로 구분해서 연구를 진행하였다. 건설사업비 항목별 내역은 기업 입장에서 민감하게 여겨질 수 있는 부분으로 본 연구에서는 현재 언론을 통해 공개되는 총 건설사업비 수준에서 나타내었다.

## 2. 건설사업비 산정 방법

### 2.1 선행 연구 조사 및 분석

기존의 확정적 건설사업비 산정 방법은 단일 값이 입력되어 단일 결과를 산출하는 점 산정(Point cost estimation) 방식으로써 산출된 건설사업비의 불확실성 정도를 표현할 수 없었다. 반면, 확률적 건설사업비 추정방식은 불확실성 정도를 표현할 수 있고 의사결정자의 불확실성 수용 정도에 따라 공격적 혹은 방어적 건설사업비를 결정

하고, 이를 통해 실제 사업수행을 위한 예비비를 마련하는 중요한 근거가 될 수 있다.

이러한 장점으로 인하여 확률적 건설사업비 추정에 관한 활발한 연구가 이루어졌다. 선행 연구들도 기존의 확정적 방법에서 벗어난 확률적 비용 산정을 주목적으로 하는 것은 동일하나 그 대상이 소규모 건축공사에 한정되어 있거나 중요한 변수가 될 수 있는 물가상승의 미적용, 분석 대상이 가상사례이거나 불충분한 실적자료를 적용하는 등의 한계를 보이고 있다. 조재호 등<sup>[2]</sup>은 확률이론 및 실적자료를 활용해서 소규모 건축물의 바닥공사에 확률적 공사비 견적을 주제로 연구하여 예상견적 비용의 위험도를 산출하였다. 반면, 물가상승률을 고려하지 않아 산출 시점별로 달라질 수 있는 화폐 가치에 대한 반영이 안되었고 바닥공사에 한정된 결과를 도출하였다. 이만희 등<sup>[3]</sup>은 확률이론을 이용한 프로젝트 예비비 산정 이론을 제시하고 가상의 사례를 적용해 적합성을 검증하였다. 가상의 사례를 적용한 이론정립이 주목적으로 실제 사례를 적용하지 못한 한계를 지닌다. 이동준 등<sup>[4]</sup>은 확률개념의 시뮬레이션을 이용해서 최종 공사비를 추정하였고 아파트 건축공사에 적용하여 확률적으로 최종 공사비를 월별로 추정하는 방안을 제시하였다. 반면, 아파트 건축공사를 대상으로 물가상승률이 고려되지 않은 4개의 적은 실적자료를 가지고 분석한 한계가 있다. 윤은상 등<sup>[5]</sup>은 원자력 발전소의 시공금액을 확률적으로 추정하여 물가상승률을 적용하고 단위공사간의 시공비와 단위공사별 민감도를 분석하였다. 총 건설사업비가 아닌 시공비의 분석만이 이루어졌고 5개의 적은 실적자료를 가지고 원자력발전소 시공에 한정된 결과를 도출하였다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 연구에서 나타난 한계점들을 해결하기 위해 기존에 시도된 적이 없는 석탄화력발전소의 건설사업비를 대상으로 기존 연구보다 많은 실적자료를 활용하고, 주요 변수인 화폐의 시간적 가치를 반영하여 산정시점별로 달라질 수 있는 건설사업비의 변동성을 반영하였다. 이를 위해 전체 실적자료를 대상으로 항목별 특성에 맞는 물가상승률을 반영하였다. 또한, 확률적 모의실험을 통해 추정된 총 건설사업비에 영향을 미치는 건설사업비 항목들에 대한 민감도 분석을 수행하고 유형별 특징을 파악하여 국내 500 MW급 석탄화력발전소의 보다 현실적이고 구체적인 확률적 건설사업비, 민감도 분석 결과를 제시하고자 한다.

## 확률적 모의실험법을 이용한 석탄화력발전소의 건설사업비 추정

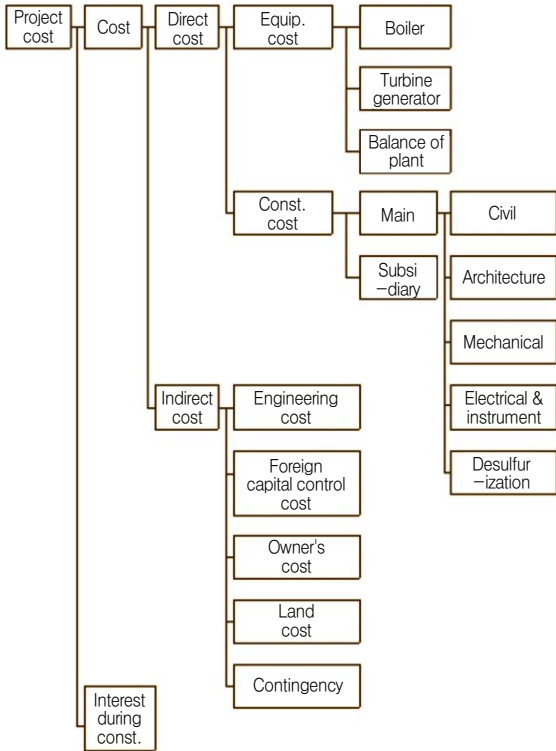


Fig. 1 Structure of cost for a coal-fired power plant

### 2.2 현행 건설사업비 산정방법 및 문제점

#### 2.2.1 국내 석탄화력발전소 건설사업비 산정방법

국내 석탄화력발전소 건설에 소요되는 전체 제반 비용을 의미하는 건설사업비는 계층적인 구조를 가진다. 하부 사업비 항목의 합이 상위 사업비를 구성하며, 이들의 합을 통해 최종적으로 총 건설사업비가 결정되는 구조이다. Fig. 1은 석탄화력발전소 건설사업비의 체계를 나타낸 것이다. 총 건설사업비는 순 사업비, 건설 중 이자로 크게 나뉘고 순 사업비는 비용의 성격에 따라 영구적, 물리적 건설에 직접적으로 관련된 비용인 직접비와 건설을 위해 부수적으로 발생하는 비용인 간접비로 나눌 수 있다. 건설사업비 산정을 위해서는 사업비 항목별로 비용을 구분한 뒤 화폐의 시간적 가치를 반영하기 위해 물가상승률을 적용해야 한다. 참조사업의 건설사업비로부터 기준년도까지 물가지수 변동에 따른 물가상승률을 반영하는 불변가격

Table 1 Cost estimation of various stages for the construction of coal-fired power plant

Stages	Accuracy	Eng. progress	Basis of estimate	Contingency
Order of magnitude	+50% ~ -30%	0%	- Cost model - General site condition - Arrangement drawing - Tech. characteristic of final product	25% and over
Preliminary baseline	+30% ~ -15%	5% ~ 15%	- Cost model - Design requirement - Major equipment tech. spec. - Contract price - Pre. P&ID	15% and over
Definitive	+15% ~ -10%	35% ~ 45%	- System design - Quantity take-off - BOP contract price - Labor cost quotation	5% ~ 15%
Engineer's estimate	+10% ~ -5%	100%	- End of engineering - Detail quotation - Condition of contract	1% ~ 10%

(Constant price)과 건설사업비가 집행될 연도의 실질가격을 의미하는 경상가격(Current price)으로 구분하여 산정한다. 불변가격은 기준년도의 금액 수준을 비교하는데 활용되며, 경상가격은 해당 시점에 집행될 금액을 예측하고 기간별 자금계획을 세우는데 활용될 수 있다. 경상가격은 실제 집행시점의 금액을 의미하지만 기본계획단계의 건설사업비 산정을 위해서는 현금흐름표(Cash flow)를 작성하고 해당 시점의 예측 물가상승률을 반영해서 산정한다.<sup>6)</sup>

#### 2.2.2 현행 건설사업비 산정의 문제점

현행 기본계획단계의 건설사업비 산정은 일반적으로 앞서 설명한 건설사업비 산정 체계와 불변가격, 경상가격 산정 방법을 바탕으로 다음과 같은 절차로 진행된다. 먼저, 보통 1 ~ 2개 정도의 유사한 참조사업을 선정하고 실적 건설사업비 자료를 확보하며, 확보한 건설사업비를 기준으로 정하고 사업비 항목별로 물가상승률을 적용할 물가지표를 선정한다. 선정된 지표를 가지고 기준년도까지 지표의 증감률을 기준가에 반영해서 산정하는 과정을 거친다.<sup>6)</sup> 이러한 방식은 기본계획단계에서 산정한 건설사업비의 변동 폭이 어느 정도인지, 어느 만큼의 신뢰도와 위험도를 가지는지에 대한 것이 정량적으로 제시되지 못해 기본계획단계 건설사업비 산정의 주요 목적인 예산 산정, 자금마

련 등을 위한 의사결정에 어려움을 가져오고 있다. 이것에 대한 대안으로 확정적 건설사업비 산정체계에서는 사업진행 과정에 따른 구분을 통해 단계별 정확도 수준을 제시하고 있다. 국내 발전소 건설의 확정적 건설사업비 산정에서는 사업진행 정도에 따라 기본계획사업(Order of magnitude), 사업기준사업비(Preliminary or baseline), 확정사업비(Definitive), 공사설계서(Engineer's estimate) 단계로 구분하여 Table 1과 같이 진행 단계별 정확도와 예비비 수준을 제시한다. 이는 다년간의 국내 석탄화력발전소 건설 프로젝트를 통해 산출된 산정단계별 정확도와 설계진도율, 예비비의 관계를 나타낸 것이다<sup>6)</sup>. 설계가 진행되지 않은 기본계획 단계에서는 산정된 건설사업비가 +50% ~ -30% 까지 변동성이 매우 크고 예비비는 25% 이상 마련되어야 한다. 이러한 예측은 의사결정을 위한 합리적인 정보를 제공해 주지 못한다. 따라서, 가능한 기본계획 건설사업비 산정의 변동 폭을 줄일 필요가 있고 추정된 건설사업비의 예상범위와 발생할 확률(Probability)을 알아보는 확률적 건설사업비 추정을 적용할 필요가 있다. 적어도 변동 폭이 기본계획사업비 범위인 +50% ~ -30% 내에 들어간다면 확률적 건설사업비 추정은 기존의 확정적 건설사업비 산정 방식보다 의미를 가질 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 확률적 건설사업비 추정 방법

#### 3.1 확률적 추정의 개념

확률적 추정 방법은 통계적인 접근방법을 통해 입력변수의 확률분포(Probability distribution) 값을 산출하고 무작위 샘플링 모의실험(Random sampling simulation)을 적용한 불확실성 정도를 출력 값으로 나타내어 각 변수들의 발생 가능한 범위를 추정한다. 일반적으로 모의실험은 시스템에 대한 이해와 의사결정에 도움을 주기 위하여 현재 또는 미래에 발생할 수 있는 상황을 수학적이고 논리적인 모형으로 컴퓨터를 사용하여 재현하는 것을 의미한다. 즉, 실제로 시스템이 구축되기 전에 전산모사 환경하에서 표현된 물리적, 수학적 모델 또는 시스템을 묘사하는 모델을 구축하고 이를 통하여 다양한 환경하에서 시스템을 전산적으로 실험함으로써 예비결과를 도출하거나 시스템에서 소모되는 시간, 비용 등의 여러 목적 함수들을 예측하

는 도구이다.

모의실험의 결과는 모델을 통해 추정된 근사 값이지만, 기타 분석적인 방법보다 많은 장점을 가지고 있다. 많은 입력변수들이 취할 수 있는 분포에 대한 결정을 통하여 보다 명확한 의사결정자의 주관 부여가 가능하고, 입력변수들의 상관관계를 고려할 수 있으며, 모형개발 시간이 단축되고 반복 시행 횟수 증가에 따른 정확성이 향상되어 결과에 대한 분석이 용이해 진다<sup>5)</sup>.

#### 3.2 확률적 모의실험의 효용성

대수의 법칙(Law of large numbers)에 따르면 관찰 대상의 수를 늘려갈수록 개개의 단위가 가지고 있는 고유 특성은 중화되고 그 집단에 내재된 본질적인 경향성이 나타나게 된다. 따라서, 관찰 대상의 수가 많아질수록 통계학적으로 그 정확도가 높아지며 신빙성 높은 결과를 도출하게 되는 것이다<sup>7)</sup>. 반면, 국내 500 MW급 석탄화력발전소의 경우 약 40여 개의 발전소가 건설되었고 2개의 발전소가 1개의 프로젝트로 건설되는 것을 감안하면, 실적자료가 되는 프로젝트는 약 20여 개로 줄어들고 자료의 확보나 그 적합성을 고려할 때 활용 가능한 실적자료는 더 줄어들게 된다. 적은 실적자료는 대수의 법칙에 어긋나며 결과적으로 본질적 경향성에 벗어난 편향된 결과 값을 가져오기 쉽다. 따라서, 실적 건설사업비 자료를 충분히 획득할 수 없는 플랜트 건설사업비 산정의 경우 대안적으로 자료를 생성하여 모집단에 근접하는 충분한 실적자료를 만들어내는 방안을 적용해 볼 수 있다. 실적자료의 확률분포에 근거하여 가상의 자료를 만들어 내는 방법인 몬테카를로 시뮬레이션은 확률분포(Probability distribution)로부터 난수를 발생시켜 자료를 생성할 수 있다. 횟수를 늘려가며 각각의 다른 난수를 발생시켜 자료의 수를 늘려가면 실제와 유사한 형태의 분포를 가지는 가상의 실적자료를 얻을 수 있다.

#### 3.3 건설사업비 추정 절차

확률적 건설사업비 추정을 위해서는 본 연구에서 적용한 확률적 모의실험 방법인 몬테카를로 시뮬레이션의 절차에 대한 이해와 석탄화력발전소 건설사업비에 적용하기 위한 방안을 수립하는 것이 필요하다.

몬테카를로 시뮬레이션은 확률분포정의, 누적확률분포

## 확률적 모의실험법을 이용한 석탄화력발전소의 건설사업비 추정

의 구성, 난수부여, 시뮬레이션, 결과, 민감도 분석, 의사결정 순으로 진행된다. 몬테카를로 시뮬레이션의 진행 절차에 따라 먼저 확률분포를 정의해야 한다. 확률분포는 어떤 결과나 확률변수(Random variable)의 발생 가능성에 관한 분포로 확률변수는 표본공간에서 정의된 실수 값 함수를 의미하며, 어떤 형태의 부분집합  $A$ 에 대해 확률변수  $X$ 가  $A$ 에 포함될 확률을 대응시켜 주는 관계를 확률변수  $X$ 의 확률분포라 한다.

Back 등<sup>9)</sup>의 연구에 따르면 건설사업비에서 모델링을 위해 가져야 할 확률 분포의 특성을 4가지로 정의하고 있다. 첫째, 상한과 하한의 경계가 있어야 하고 분포는 연속적이어야 하며, 둘째, 상한과 하한의 경계에 근접할수록 사건이 일어날 확률은 줄어들어야 하고, 셋째, 건설비용의 분포는 하나의 형태를 가져야 한다. 마지막으로, 건설사업비 산정에 있어서 실제 비용들은 예상보다 더 높게 형성될 가능성이 크므로 왜곡도, 즉, 비대칭적인 확률분포가 기대된다는 것으로 이러한 정의에 의한 조건을 만족시키는 가장 적합한 분포로 삼각분포를 선정하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 삼각분포를 실적자료가 충분하지 않은 건설공사의 건설사업비 추정에 적합하다고 판단하고 확률분포 함수로 사용하였다. 각 분포의 특성은 최소값, 최대값, 최빈값(mode)으로 표현되며, 이러한 이론을 바탕으로 확률분포를 통해 난수를 발생시켜, 신뢰구간에 해당하는 값을 추정해 주는 소프트웨어인 Crystal Ball<sup>®</sup>을 가지고 연구를 수행하였다<sup>8)</sup>.

### 4. 석탄화력발전소 건설사업비 추정

#### 4.1 건설사업비 추정 조건

확률적 건설사업비 추정을 위해 국내 표준 500 MW급 석탄화력발전소의 건설사업비 실적자료를 활용하였고, 이 중에서 외자의 비중이 높고 표준화되지 않았던 1995년 이전에 준공된 발전소는 제외하였다. 국내 석탄화력발전소는 건설과 운영의 효율성을 위해 한 프로젝트에서 2개 호기씩 건설하고 있으므로 자료획득이 가능한 30개 발전소를 프로젝트 단위로 나눠 15개 프로젝트를 모의실험을 위한 자료로 선정하였다.

Fig. 2는 실험 대상이 되는 총 건설사업비 실적의 분포를 나타내는 것으로 각 사업별로 발전소 준공 후 발행하는 건

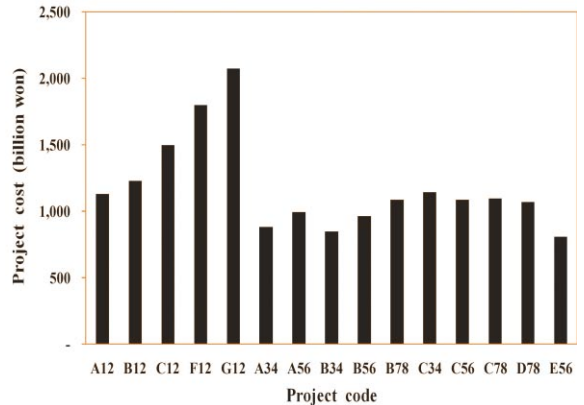


Fig. 2 Project cost of domestic 500 MW coal-fired power plants at completion

실지에 수록된 준공년도 정상가로 나타난 것이다. 이는 각 발전소별 준공 당시의 건설사업비를 그대로 표현한 것으로서 발전소 준공시점이 서로 다르고 준공 이후의 물가상승률이 전혀 반영되어 있지 않으므로 본 연구에 활용하기 위한 자료로 적합하지 않다고 판단하였다. 따라서, 물가상승을 반영하고 기준시점을 통일시키는 선행 작업이 이루어졌다.

Table 2는 본 연구의 15개 프로젝트 실적자료에 건설사업비 항목별 물가상승률의 반영을 위해 사업비 항목 및 비율, 적용지수를 구성한 내용이다. 사업비 항목은 15개 사업 모두 동일하고 비율은 실제 사업에 적용한 것을 반영하였으며, 적용지수는 국내 석탄화력발전소 건설사업비 산정시 활용되는 물가지수의 항목을 적용하여 사업별로 준공년도 지수 대비 2011년 12월까지의 물가 증감 비율을 반영하였다.

Fig. 3은 Table 2의 물가상승률 적용 자료를 반영한 2011년 12월 기준 불변가로 15개 사업의 건설사업비 항목별로 물가상승시킨 값을 합산한 총 건설사업비를 산출한 결과이다.

앞서 물가상승률을 적용하지 않았던 Fig. 2와 비교해 볼 때, 건설사업비의 분포가 많이 달라진 것을 볼 수 있다. 한 예로 프로젝트 코드 A12의 경우 물가상승률 미적용시 Fig. 2에 의하면 총 건설사업비가 1조 1,000억 원 정도이지만, 물가상승률을 적용한 Fig. 3에 의하면 약 2조 원의 총 건설사업비로 나타난다. 실제 A12 프로젝트는 1997년 10월에 준공된 발전소로 당시 1조 1,000억 원 정도가 소

Table 2 Index of inflation in domestic 500 MW coal-fired power plants

Items of cost		Proportion		Index (producer price index)	
Direct cost	Boiler	Labor	22%	Labor : Mean of salary for manufacturing Material : Mean of 1st metal and metal working process Etc : Producer price total index	
		Material	53%		
		Etc	25%		
	Turbine generator	Labor	19%		
		Material	53%		
		Etc	28%		
	Balance of plant	Labor	14%		
		Material	58%		
		Etc	28%		
	Civil	Labor	37%		
		Material	63%		
	Architecture	Labor	47%		
		Material	53%		
	Mechanical	Labor	67%		
		Material	33%		
	Electrical & instrument	Labor	45%		
		Material	55%		
	Subsidiary	Labor	37%		
		Material	63%		
Desulfurization	Labor	67%			
	Material	33%			
In-direct cost	Engineering		Mean of salary for engineering (7grades)		
	Foreign capital control		Foreign capital in material × 15%		
	Owner's		Direct cost × 4.5%		
	Contingency		Producer price total index		
Interest during construction		Producer price total index			

요되었지만 현재 기준으로 봤을 때, 당시의 1조 1,000억 원은 물가상승률을 적용한 2011년 12월의 2조 원과 비슷한 가치를 지닌다고 볼 수 있다. 2장 1절의 선행 연구 조사 및 분석에서의 물가상승률을 적용하지 않는 연구방법을 사용한다면, A12 프로젝트는 1조 1,000억 원 정도가 소요 되었다고 판단될 수 있고, 현재 똑같은 발전소를 짓는다면 그와 유사한 수준의 비용이 들 것이라는 오류를 범할 수 있는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선

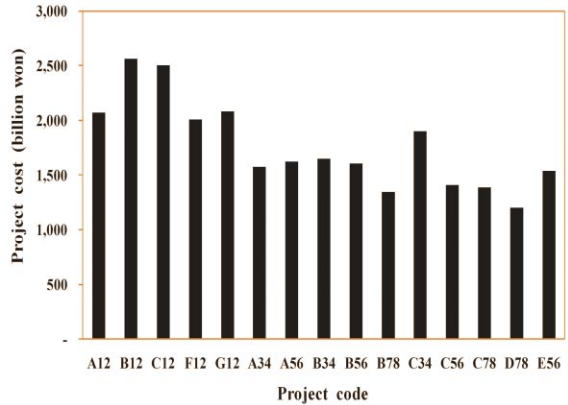


Fig. 3 Project cost in Dec. 2011 of domestic 500 MW coal-fired power plants

하고자 물가상승률을 적용한 건설사업비 자료를 기준으로 활용하였고, 유형별로 물가상승률을 적용하지 않은 실적 자료와의 비교를 통해서 그 차이 및 물가상승률 적용의 적합성을 검토하였다.

Fig. 3의 또 다른 특징으로는 인접발전소가 없는 1,2호기 사업들의 건설사업비가 다른 사업들에 비해 높은 것이다. 이는 인접발전소가 없는 사업들의 특성이라 가정하고 그 특성을 알아내기 위해 대상을 인접발전소가 없는 경우 A12, B12, C12, F12, G12의 5개와 인접발전소가 있는 경우 A34, A56, B34, B56, B78, C34, C56, C78, D78, E56의 10개의 2가지 유형으로 나눠서 연구를 수행하였다.

#### 4.2 건설사업비 추정 및 분석

확률적 건설사업비 추정을 위해서는 확률분포를 정의하고 이를 토대로 확률적 모의실험을 적용해 보아야 한다. 이를 적용하기 위해서는 3장에서 선택한 확률분포인 삼각 분포의 변수 즉, 최대값, 최소값, 최빈값을 우선 구해야 한다. 최소값, 최대값은 실적자료를 통해 얻을 수 있고, 최빈값을 구하기 위해서는 수집된 자료를 가지고 도수분포표와 히스토그램을 작성해야 하지만 최빈값을 구하기 위한 도수가 적어 그 적합성이 입증되지 못한다. 따라서, 해당 분야 건설사업비 산정의 15년 ~ 25년 경력을 가진 전문가 4명에게 각 건설사업비 항목별 예상되는 최빈값을 주고, 그 적정성에 대한 판단을 통해 적용값을 산출하였다. 이는 건설사업비 산정의 경험을 많이 확보한 전문가 판단



## 확률적 모의실험법을 이용한 석탄화력발전소의 건설사업비 추정

(Expert judgement)이 본 연구에 적합한 것으로 판단되었기 때문이다. 이러한 가정 하에 인접발전소가 없는 경우와 인접발전소가 있는 경우 2가지 경우로 구분하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였고 그 결과를 분석하였다.

### 4.2.1 인접발전소가 없는 경우

인접발전소가 없는 경우는 신규 부지에 발전소를 짓는 것을 의미하는 것으로 일반적으로 부지조성이 되어 있지 않은 곳에 짓는 발전소를 의미한다. 4장 1절에서 구분한 인접발전소가 없는 경우 5개 프로젝트의 건설사업비 항목의 최소값, 최빈값, 최대값으로 삼각분포가 구성되고 삼각분포를 바탕으로 시뮬레이션 소프트웨어인 Crystal Ball®을 사용해서 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 난수는 모사를 위해 충분히 큰 수인 5,000번으로 설정했고,

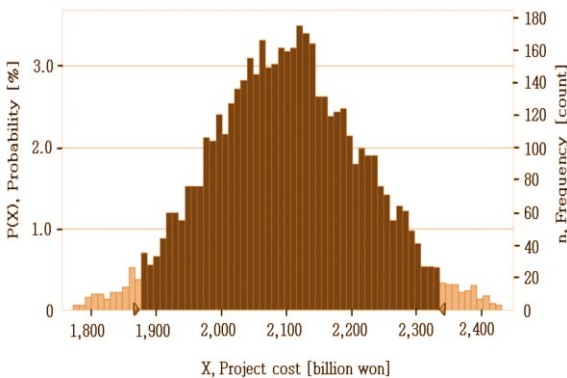


Fig. 4 Project cost in case of not having adjacent power plant

Table 3 Result of simulation in case of not having adjacent power plant

Statistic	Forecast value
Trials	5,000 times
Certainty	95%
Mean of project cost	2,101 billion won
Standard deviation	117 billion won
Minimum of project cost	1,875 billion won
Maximum of project cost	2,332 billion won
Skewness	0.0678
Kurtosis	2.93

각 건설사업비 항목별 확률분포에 따라 약 5,000개의 실적 값들이 생성되었다.

시뮬레이션을 통해 생성된 항목별 건설사업비의 합을 나타낸 Fig. 4의 가로축은 총 건설사업비의 범위, 세로축은 발생확률과 발생빈도를 나타낸 것으로 이는 기존의 5개 실적자료의 확률분포를 바탕으로 대수의 법칙을 만족시킬 수 있는 수준의 가상 자료를 생성함으로써 실적자료가 가지는 의미를 증대시킨 것이다.

Table 3은 Fig. 4의 시뮬레이션 내용을 분석한 결과로 5,000번의 난수를 부여해서 실적을 발생시켰을 때, 95% 신뢰수준에서 평균은 약 2조 1,000억 원, 표준편차는 약 1,200억 원, 범위는 약 1조 8,700억 원 ~ 2조 3,300억 원 정도로 나타났다. 정규분포와의 유사성을 알 수 있는 왜도는 0.06, 첨도는 2.93으로 정규분포의 왜도와 첨도가 각각 0, 3인 것을 감안하면, 중심극한정리 즉, 통계적으로 표본의 크기 이 충분히 클 때에는 임의의 모집단으로부터의 표본평균이더라도 그 분포가 정규분포에 근사한다는 것을 만족시키고 있다.

### 4.2.2 인접발전소가 있는 경우

인접발전소가 있는 경우는 기존에 운영 중인 발전소가 있는 부지에 추가로 발전소를 짓는 것으로 일반적으로 부지조성이 어느 정도 되어 있는 곳에 짓는 발전소를 의미한다. 4장 1절에서 구분한 10개 프로젝트의 건설사업비를 정리하였다. Fig. 5는 사업비 항목별로 구성한 확률분포를 바탕으로 인접발전소가 없는 경우 수행한 것과 동일한 기준으로 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 것이다. 건설사업비 항목별 확률분포에 따라 임의의 5,000개 실적 값들이 생성되었으며 그 합인 총 건설사업비의 분포를 나타낸 것이다.

Table 4는 시뮬레이션 결과로 인접발전소가 없는 경우와 같은 방법으로 분석한 결과는 95% 신뢰수준에서 평균은 약 1조 4,100억 원, 표준편차는 약 900억 원 범위는 약 1조 2,400억 원 ~ 1조 5,900억 원 정도로 나타났다. 왜도는 약 -0.01, 첨도는 2.82로 정규분포에 근사하는 중심극한정리를 만족시키고 있다. 이 결과는 인접발전소가 없는 경우와 약 7,000억 원 가까이 차이가 나는 추정액으로 건설사업비에 있어서 인접발전소가 없는 경우와 있는 경우 2가지 유형 간의 뚜렷한 차이가 있는 것을 의미하고 민감도 분석을 통해서 그 차이를 알아보았다.

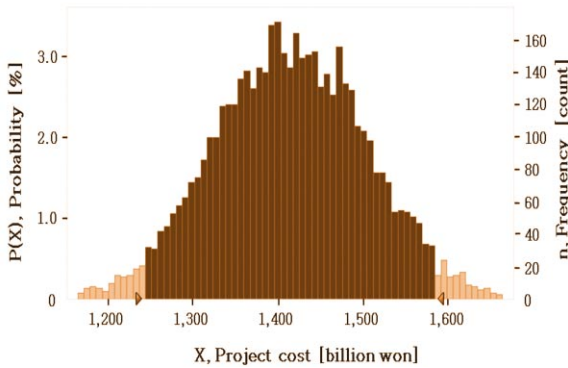


Fig. 5 Project cost in case of having adjacent power plant

Table 4 Result of simulation in case of having adjacent power plant

Statistic	Forecast value
Trials	5,000 times
Certainty	95 %
Mean of project cost	1,414 billion won
Standard deviation	89 billion won
Minimum of project cost	1,241 billion won
Maximum of project cost	1,585 billion won
Skewness	-0.0083
Kurtosis	2.82

### 4.3 민감도 분석

민감도 분석(Sensitivity analysis)은 한 모형에서 변수(Parameter)가 불확실할 때, 이 변수가 취할 수 있는 가능한 값들을 모두 대입해 변수의 변화에 따라 결과가 어떻게 되는지 분석하는 것을 말한다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 총 건설사업비를 종속변수로 놓고 건설사업비 항목을 독립변수로 두어 건설사업비 항목의 변경에 따른 총 건설사업비에 미치는 영향을 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 소프트웨어인 Crystall Ball<sup>®</sup>을 활용하여 분석하였다.

#### 4.3.1 인접발전소가 없는 경우

인접발전소가 없는 경우의 민감도 분석 결과 상위 5개 항목은 Fig. 6과 같으며, 토목공사비가 27.0%로 총 건설사

업비 변동에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 실제로 석탄화력발전소에서 인접발전소가 없는 경우는 부지 정지, 연료하역부두, 물량장, 취·배수로, 저탄장, 회사장 등의 토목공사가 추가로 필요하고 토질이나 암반, 해양공사의 특성에 따라 토목공사가 대폭 증가하는 경우가 발생될 수 있다. 따라서, 토목공사의 비중이 높을 뿐만 아니라 변동에 따른 총 건설사업비에 미치는 영향이 다른 항목 보다 크다. 이러한 경우는 토목공사에 대한 민감도가 높으므로 토목공사 관리에 대한 비중을 높일 필요가 있고 좀 더 정확한 건설사업비 산정을 위해서 현지 조사를 통한 빠른 토목 물량 산출이 필요하겠다.

#### 4.3.2 인접발전소가 있는 경우

인접발전소가 있는 경우의 분석결과는 Fig. 7과 같으며 보일러 기자재비가 23.6%로 건설사업비 변동에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 그 뒤로 보조기기 20.9%, 탈황설비 19.3%로 기자재비의 민감도가 높은 것으로 봤을 때, 인접발전소가 있는 경우는 보일러를 포함한 기자재비의 변동이 총 건설사업비에 가장 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 석탄화력발전소에서 인접발전소가 있는 경우는 조성되어 있는 부지와 기존 설비, 기존 건물의 공용으로 시공비가 다소 축소된다. 따라서, 토목공사를 포함한 시공비 변동은 총 건설사업비에 미치는 영향이 적으며, 기자재 관리에 대한 비중을 높일 필요가 있다.

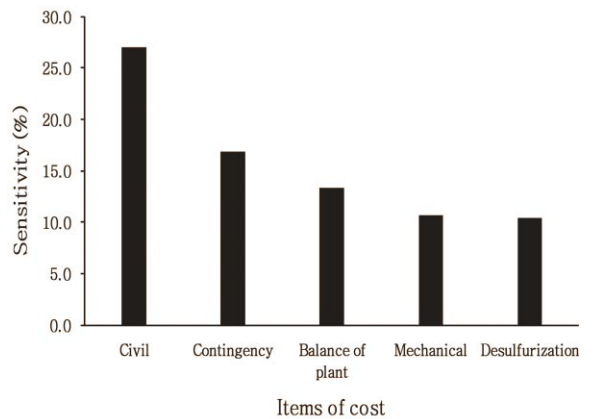


Fig. 6 Sensitivity analysis in case of not having adjacent power plant



## 확률적 모의실험법을 이용한 석탄화력발전소의 건설사업비 추정

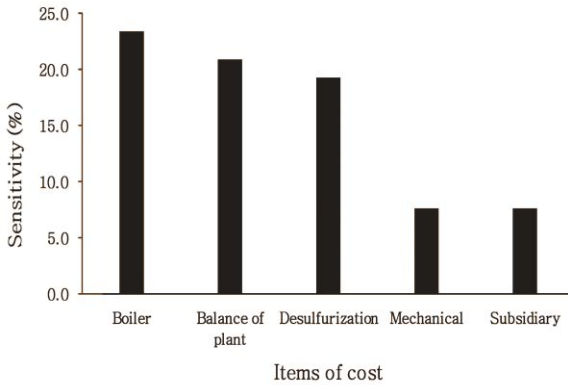


Fig. 7 Sensitivity analysis in case of having adjacent power plant

### 4.4 건설사업비 추정의 적합성

본 연구에서는 적합성을 판단하기 위해 현재 진행 중인 사업 혹은 가장 최근에 종료된 사업과 인접발전소가 없는 경우, 인접발전소가 있는 경우 2가지 유형별로 추정된 건설사업비를 비교해 보는 방법을 사용하였다. 기존의 확정적 건설사업비 산정과의 비교를 위해 2장 Table 1의 현행 건설사업비 산정 단계별 정확도 수준을 가지고 추정한 건설사업비가 어느 정도 정확인지에 대한 검토를 수행하였다. 또한, 물가상승률을 적용하지 않은 자료를 가지고 시뮬레이션한 결과와의 비교를 통해 본 연구에서 수행한 확률적 건설사업비추정의 적합성에 대해 알아보았다.

#### 4.4.1 인접발전소가 없는 경우

인접발전소가 없는 경우, 실제 진행 중인 사업의 총 건설사업비는 2011년 12월 기준 약 2조 원이며, 이는 4장 2.1 절의 시뮬레이션 결과 나타난 95% 신뢰수준의 범위인 약 1조 8,700억 원 ~ 2조 3,300억 원 사이에 포함되어있는 것으로 나타났다.

진행 중인 사업의 건설사업비가 약 2조 원임을 고려할 때, 이것을 실제 건설사업비라 가정하면 확정적 건설사업비 산정을 했을 경우, 2장 Table 1의 기본계획단계에 산정된 확정적 건설사업비의 오차 범위는 2조 원에 정확도 +50% ~ -30%가 적용되므로 1조 4,000억 원 ~ 3조 원까지의 변동폭을 나타낼 수 있고, 예비비는 25% 이상 마련해

둬야 하는 것을 의미한다. 이는 설계가 0% 즉, 진행되지 않은 단계에 산정된 확정적 건설사업비의 오차 범위와 예비비를 나타낸 것으로 정확도가 낮고 변동폭이 매우 크다. 시뮬레이션을 통한 확률적 건설사업비 추정 결과는 1조 8,700억 원 ~ 2조 3,300억 원으로 확정적 건설사업비의 오차 범위와 비교해 본 결과, 설계가 35% ~ 45% 가량 진행되었을 때의 확정사업비(Definitive) 단계 수준과 비슷한 오차 범위를 보이는 것으로 나타났다. 이는 앞서 확정적 건설사업비 체계와 비교해 봤을 때, 정확도가 높은 것을 나타내며 이를 통해 기본계획단계의 확률적 건설사업비 추정이 상당 수준 적합성을 가진다고 판단할 수 있다.

#### 4.4.2 인접발전소가 있는 경우

인접발전소가 있는 경우는 현재 건설 중인 사업이 없어 가장 최근에 종료된 사업과 비교해 보는 방법을 사용하였다. 가장 최근에 종료된 사업의 총 건설사업비는 2011년 12월 기준 약 1조 3,500억 원이며, 4장 2.2 절의 시뮬레이션 결과 나타난 95% 신뢰수준의 범위인 약 1조 2,400억 원 ~ 1조 5,900억 원 사이에 포함되어 있는 것으로 나타났다. 2장 Table 1의 확정적 건설사업비 산정을 했을 경우와 비교해 본 결과 확률적 건설사업비 추정을 통한 결과 값이 인접발전소가 없는 경우와 마찬가지로 확정사업비가 나왔을 때의 수준과 비슷한 오차 범위를 나타내었다. 이는 인접발전소가 있는 경우 역시 확률적 건설사업비 산정이 적합성을 가진다고 볼 수 있다.

#### 4.4.3 물가상승률 반영의 적합성

앞서 수행한 시뮬레이션에서 다른 조건은 동일하게 두고, 물가상승률 반영을 위해 조사했던 4장 Table 2의 물가상승지표만 반영하지 않은 자료를 가지고 인접발전소가 없는 경우와 있는 경우 2가지 유형에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

물가상승률을 적용하지 않았을 때, 인접발전소가 없는 경우, 분석결과 95% 신뢰수준에서 평균은 약 1조 6,300억 원, 범위는 약 1조 4,000억 원 ~ 1조 8,600억 원으로 나타났다. 이는 실제 프로젝트 건설사업비 약 2조 원의 범위를 벗어나는 결과로 앞서 물가상승률을 적용해 추정했던 평균 약 2조 1,000억 원, 범위 약 1조 8,700억 원 ~ 2조 3,300억 원과 평균 기준 약 4,700억 원 정도가 적게 나타났다. 같은 방식으로 인접발전소가 있는 경우, 시뮬레이션

한 결과는 신뢰수준 95%에서 평균은 약 9,800억 원, 범위는 약 8,600억 원 ~ 1조 1,000억 원이다. 이 역시 가장 최근에 종료된 프로젝트의 건설사업비인 약 1조 3,500억 원을 벗어난 추정 결과로 앞서 물가상승률을 적용해 추정했던 평균 약 1조 4,100억 원, 범위 1조 2,400억 원 ~ 1조 5,900억 원과도 평균 기준 약 4,300억 원 정도의 낮은 결과를 보이고 있다.

앞서 살펴 본 2가지 경우 모두 물가상승률을 적용하지 않았을 때의 추정된 건설사업비는 실제 건설사업비 범위를 벗어난 추정결과를 나타내었고, 공통적으로 추정된 결과가 실제 소요되는 건설사업비보다 더 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 원인은 준공 당시의 건설사업비를 그대로 사용하여 과거로부터 현재까지의 물가상승분이 반영되지 않았기 때문에 그 만큼 추정 값이 더 낮게 나왔다고 판단할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 국내 500 MW급 석탄화력발전소의 건설사업비를 대상으로 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 확률적으로 총 건설사업비를 추정하고, 건설사업비 항목별 민감도를 분석해서 사업 유형별 특징을 알아보았다. 또한, 실제 수행 중이거나 최근에 종료된 건설사업비 산정자료와의 비교를 통해 추정된 건설사업비와 물가상승률 적용의 적합성을 확인하고, 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 확률적 모의실험을 통한 국내 500 MW급 석탄화력발전소 총 건설사업비는 2011년 12월 불변가 기준, 신뢰수준 95%에서 인접발전소가 없는 경우 약 1조 8,700억 원에서 2조 3,300억 원, 인접발전소가 있는 경우 약 1조 2,400억 원에서 1조 5,900억 원으로 추정되었다.
- 2) 민감도 분석 결과 건설사업비에서 인접발전소가 없는 경우는 토목공사의 비중과 민감도가 상대적으로 높고, 인접발전소가 있는 경우는 기자재비의 비중과 민감도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.
- 3) 물가상승률을 반영하지 않을 경우, 신뢰수준 95%에서 인접발전소가 없는 경우 약 1조 4,000억 원 ~ 1조 8,600억 원, 인접발전소가 있는 경우 약 8,600억 원 ~ 1조 1,000억 원으로 추정되었다. 이는 실제 수행중

이거나 최근에 준공된 건설사업비를 벗어난 결과로 준공시점이 서로 다른 석탄화력발전소 건설 프로젝트의 확률적 건설사업비 추정시 물가상승률을 적용해야 결과의 적합성이 입증될 수 있다.

## 참고문헌

1. Ministry of Knowledge Economy, 2010, "5th Basic Plan of Electric Power Supply and Demand, p. 33.
2. Cho, Jea Ho, 2000, "A Study on the Application of Cost Risk Exposure Methods by the Probabilistic Evaluation on the Construction Projects", Journal of Korea Institute of Construction Engineering and Management, Vol. 1, No. 1, pp. 63-71.
3. Lee, Man Hee, 2004, "Probabilistic Applications for Estimating and Managing Project Contingency", 5th Conference's Journal of Korea Institute of Construction Engineering and Management, pp. 224-227.
4. Lee, Dong Joon, 2004, "A Method of EAC Using Probability Concept Simulation", Seoul National University, Thesis of Master's Degree, pp. 50-54, 87-89.
5. Yoon, Eun Sang, 2007, "Stochastic Trend Analysis for NPP Construction Cost", KEPCO, Journal of Electric Power Vol. 18, No. 1, pp. 106-114.
6. Cho, Soo Hwi, 2005, "Textbook of Basic Course - Cost Estimation and Management", KEPCO E&C, Textbook of Basic Course, Vol. 1, No. 1, p. 11.
7. Kojima Hiroyuki, 2011, "Introduction of Statistics", Ji-sang-sa, Korea, pp. 155-156.
8. Department of Software in Eretec, 2005, "Crystal Ball 7 Getting Started Guide", Korea, pp. 12-13.
9. Back, W. Edward, 2000, "Defining Triangular Probability Distribution from Historical Data", Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, pp. 29-37.