

시뮬레이션을 통한 제철플랜트 배관장치 설계비용의 변동 범위 분석

배경석, 허기무*, 윤성훈*, 문윤재*, 유호선**, 이재현*[†]
(주)포세, *한양대학교 기계공학부, **승실대학교 기계공학과

Analysis of Cost Variation of Piping Equipment Design of a Steel Manufacturing Plant by Simulation

Kyung-Suk Bae, Ki-Moo Heo*, Sung-Hoon Yoon*, Yoon-Jae Moon*,
Ho-seon Yoo**, Jae-Heon Lee*[†]

POSE Engineering Co., Ltd., Seoul 152-650, Korea

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

**Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received November 5, 2014; revision received November 13, 2014)

초 록 : 본 연구에서는 배관설계항목을 조사하여 전문가 면담 및 설문을 통해 주요 설계항목을 도출하였고, 이를 국내외 사례 프로젝트에 적용하여 주요 배관설계 항목별 비중 및 비용변동 범위를 조사하였다. 조사결과를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 배관설계비 전체에 대한 비용변동 범위를 분석하여 유사 프로젝트 수행 시 입찰단계에서 합리적인 입찰금액 산정 및 입찰참여에 대한 타당성을 검토할 수 있는 방안을 제시하였다.

ABSTRACT : In this consideration, this research investigated the piping design items and drew out key design items through interview with experts and surveys to apply them to actual project examples and look into piping design item-specific significance and cost variation ranges. Based on this investigation, the Monte-Carlo simulation was employed herein to analyze the cost variation range for the entire piping design costs with a view to presenting a way to calculate a reasonable bidding price for any similar project and verify the appropriateness of joining a bid.

Key words : piping design(배관설계), Monte-Carlo simulation(몬테카를로 시뮬레이션), cost of piping design (배관설계 비용)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

플랜트 산업은 엔지니어링, 설계, 감리 등의 소프트적인 부분을 비롯하여 기기, 자재 등의 물리적인 부분과 건설 등의 부분으로 구성된 복합시스템이다. 국내에서 중화학공업이 1970년대 정부 정책에 따라 태동하여 1990

년대 절정기에 이른 반면 산업화가 늦은 아시아, 아프리카, 중동 등 신흥국들은 1990년대부터 자국의 국가발전 전략에 따라 정유, 석유화학, 발전, 담수, 가스처리 및 기타 산업설비 등에 대한 개발 사업이 활발하게 진행되고 있다. 우리나라 해외플랜트 수주기업들은 고도성장기에 국내에서 축적한 기술과 경험을 밑바탕으로 해외시장에 적극적으로 진출한 결과 1970년대 단순토목에서 시작하여 현재는 고도의 기술이 요구되는 원자력 발전플랜트까지 그 영역을 넓혀 2003년 64억 달러에서 2013년 10배 이상 성장하여 640억 달러에 이르게 되었다.^[1]

그러나 이와 같은 플랜트 산업의 양적 팽창의 이면에는 국내기업끼리의 과다 경쟁, 동시다발적인 수주로 야기되

[†] Corresponding author
Tel. +82-2-2220-0425; Fax +82-2-2220-4423
E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

는 사업관리상의 허점, 설계관리에 대한 체계적인 시스템 구축 미비 등으로 수익성 악화라는 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제점 중에 설계관리의 미비는 우리기업의 지속가능한 성장 및 발전에 걸림돌로 작용하고 있다. 이에 따라 설계의 효과적인 관리를 위하여 플랜트 설계에 있어 전체 투입시수 중 15~20% 정도를 차지하는 배관 설계 예산의 정확성을 확인하고 어느 설계항목이 예산의 범위에서 얼마만큼 벗어날 수 있는지에 대한 우선순위를 확인하여 집중 관리하는 것이 필요하나 현재까지 이에 대한 실증분석이 이루어진 것이 없어 이 분야를 연구하고자 한다.

1.2 연구 방법

선행 연구를 살펴보면 건설공사의 리스크 분석에 기초한 수익성 예측모델에 관한 연구^[2], 확률적 기법을 적용한 위험요인 분석에 관한 연구^[3], 해외 발전플랜트 EPC 사업의 리스크 분석 및 관리 방안에 관한 연구^[4] 등이 있는데, 이들은 주로 플랜트사업 전체에 대한 효율적 관리 방안에 대한 것으로 집약될 수 있는데 반해 본 연구에서는 토목, 건축, 기계, 전기, 계장 등 다양한 설계 작업 중에 제철플랜트 배관설계로 국한시켰다. 문헌조사는 관련 선행 논문과 배관과 관련된 도서 및 자료를 조사하는 한편 설문조사는 플랜트 배관설계 전문가들에게 설계항목의 중요도와 설계오류 발생빈도를 설문하여 점수화하였다. 이는 사례 프로젝트에서 조사된 전체 배관설계비 항목을 구분하여 세부항목의 설계비 변동 범위를 분석하기 위함이다.

2. 배관설계항목의 중요도 및 설계오류 발생빈도 분석

2.1 배관설계항목의 중요도 분석

주요 배관설계항목의 도출을 위하여 제철플랜트 건설사업 수행 시 배관설계항목의 중요도를 분석하였다. 배관설계항목은 국내외 건설사의 자료를 토대로 조사하였다. 4년 이상의 경력을 가진 관련 전문가들에게 2013. 08. 1일부터 2013. 09. 30까지 약 2개월의 기간 동안 30부를 배포하였으며, 평가방법은 1에서 7까지 통계학에서

Table 1 Significance analysis result

Piping design items	Score	Rank
Plot plan	6.43	1
Piping & instrument diagram piping	6.13	2
Piping routing study	5.61	3
Piping material specification	5.17	4
Piping plan drawing and isometric drawing	4.91	5
Stress analysis	4.61	6
Structure and pipe rack information	4.57	7
Utility flow diagram	4.48	8
Bill of material	4.39	9
Support design	4.22	10
Key plan	4.17	11
Underground composite plan drawing	4.09	12
Piping general arrangement drawing	2.26	13
Piping planning	2.61	14
Line index	2.13	15

많이 사용되는 7점 평가 척도 방식으로 진행되었다. Table 1은 배관설계항목의 중요도 분석결과로서 각 항목의 평균점수와 우선순위로 구분하여 분석하였다. 배관설계에 포함된 15개의 항목 중 Plot plan이 6.43으로 중요도 우선순위가 가장 높았다. 이는 전체 공장의 장치, 구조물, 도로 등의 위치를 결정하는 도면으로 전체 설계항목에 미치는 영향이 매우 높기 때문에 파악되었다. 배관설계항목의 중요도 분석결과를 종합적으로 평가하면 다음과 같다. 항목이 전체 설계시스템에 미치는 파급 정도가 크고 상호의존성이 클수록 중요도가 높은 것으로 분석된 반면, 타 설계 항목과의 연계성이 낮거나 빠른 수정, 보완 및 대응이 가능한 것들은 낮게 분석되었다. 중요도 순위 1~12까지는 전문가 설문지에 의해 평가된 중간 이상의 평점인 4점 이상을 받았으나, 순위 13~15까지는 중간 이하를 받아 중요도가 떨어져 1~12위까지의 설계항목만 1차적으로 선별하였다. 이렇게 압축한 12개 설계항목을 대상으로 2.2항의 설계오류 발생빈도를 분석하였다.

2.2 배관설계항목의 설계오류 발생빈도 분석

2.1항에서 행한 배관설계 중요도 분석을 통하여 도출된 12개 항목을 대상으로 설계오류 발생빈도 분석을 하였다. 2.1항의 중요도 설문조사와 같은 방식으로 진행하였다.

Table 2는 설계오류 발생빈도 분석결과로서 각 항목의 평균 점수와 우선순위로 구분하여 분석하였다. 2.1항의 중요도 분석과는 달리 Piping plan drawing and isometric drawing의 항목이 6.62로 설계오류 발생빈도가 높게 분석되었다. 전체 설계에서 가장 큰 도면 비중을 차지하고 있기 때문에 설계오류에 노출될 정도가 다른 항목보다 높으며 근본적으로 잦은 벤더 프린트의 수정에 따른 설계변경, 작성된 도면과 시공현장 간의 불일치 등의 문제로 설계오류 발생빈도가 높은 것으로 분석되었다. 평가점수 중에 1점대를 기록한 Key plan과 Underground composite plan drawing은 다른 항목보다 상대적으로 설계오류 발생빈도가 낮아 제외하고 나머지 10개 항목을 분석대상으로 정하였다. 이렇게 하여 설계항목에 대한 1차 중요도 분석으로 12개, 2차 설계오류 발생빈도 분석 과정을 통하여 10개로 선별하여 배관설계 비용변동 범위 분석을 위한 대상 항목을 선정하

Table 2 Result of design error frequency analysis

Piping design items	Score	Rank
Piping plan drawing and isometric drawing	6.62	1
Piping routing study	6.33	2
Structure and pipe rack information	5.81	3
Piping & instrument diagram	4.38	4
Utility flow diagram	4.33	5
Bill of material	3.38	6
Stress analysis	3.09	7
Plot plan	2.24	8
Piping material specification	2.19	9
Support design	2.05	10
Key plan	1.33	11
Underground composite plan drawing	1.19	12

였다.

3. 배관설계의 항목 및 변동성 분석

3.1 배관설계비 변동 범위 분석절차

제철플랜트 배관설계의 항목에 따른 배관설계비의 변동 범위 분석을 위한 절차를 세부적으로 설명하면 다음과 같다.

첫째, 국내 건설업체가 수행한 4개의 제철플랜트 배관설계항목에 대한 투입시수를 조사하여 총 설계시수에서 차지하는 설계비중을 구하고 이를 바탕으로 각 항목별 설계비를 분석하였다.

둘째, 전문가 설문을 통해 프로젝트 수행 시 배관설계 항목별 비용변동 범위를 조사하였다.

셋째, 분석된 배관설계항목별 설계비와 비용변동 범위를 통해 항목별 설계비의 최소, 평균, 최대비용을 분석하였다.

넷째, 셋째에서 산출한 값을 몬테카를로 시뮬레이션 기법의 입력 값으로 하여 제철플랜트 배관설계비 변동 범위를 분석하였다.

3.2 사례 프로젝트의 분석

배관설계의 각 항목들에 대한 비용변동 범위의 사례분석을 위해 규모 및 설계기간의 유사점이 있는 국내 2개, 해외 2개의 프로젝트를 사례 대상으로 선정하였다. 연간 300만 톤을 생산하는 제철소로서 고로, 재강, 코크스, 연주, 각종 부대시설 등을 연결하는 배관설계 구간이다. 국내 2개 프로젝트의 평균 설계비용은 351,537,595원, 해외 2개 프로젝트의 평균 설계비용은 1,020,804,445원으로 분석되었다. 국내외의 설계비용의 차이는 설계구간에 따른 차이이며 배관설계의 특성상 투입시수에 따른 차이로 구간이 길수록 설계비용은 많아지는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 프로젝트 역무범위가 유사한 국내 프로젝트 2개와 해외 프로젝트 2개를 분석하여 국내와 해외 프로젝트 간의 비용변동 범위를 비교하였다.

Table 3는 국내외 사례 프로젝트의 평균 설계 비중 분석에 관한 것으로 배관설계항목과 각각의 비중으로 분석하였다. 설계 비중 분석의 목적은 배관설계 항목별 비용

Table 3 Average design significance analysis of example projects

Piping design items	Korean		Overseas	
	case1	case2	case3	case4
Structure & pipe rack information	25%	18%	17%	22%
Piping routing study	7%	6%	22%	11%
Piping material specification	2%	2%	2%	2%
Stress analysis	8%	8%	8%	8%
Piping & instrument diagram	1%	1%	4%	4%
Piping plan drawing and isometric drawing	29%	27%	25%	29%
Support design	5%	22%	8%	11%
Others	5%	4%	3%	3%
Bill of material	2%	2%	2%	2%
Utility flow diagram	2%	2%	2%	2%
Plot plan	14%	8%	7%	6%
Total	100%	100%	100%	100%

변동 범위 분석과 함께 몬테카를로 시뮬레이션의 입력 값으로 활용하기 위함이다. Piping plan drawing and isometric drawing은 평균 비중 국내 28%, 해외 27%로 가장 높으며 이를 분석대상 프로젝트의 각각의 평균 설계비인 국내 351,538,500원, 국외 1,020,839,000원에 적용하면 국내 98,794,215원, 해외 277,378,950원으로 계산되었다. Others 항목은 상기 3.1항에서 정리된 배관설계 항목의 중요도 분석 하위 5개 항목인 Key plan, Underground composite plan drawing, Piping general arrangement drawing, Piping planning, Line index이다.

3.3 배관설계항목별 비용변동 범위 분석

각 항목의 비용변동 범위를 알기 위해 전문가 설문을 하였다. 설계항목별 비용변동 범위의 경우 관련 전문가들이 어떤 설계항목에서 어느 정도로 발생을 하는지 경험으로만 알고 있지, 정량적으로 수치화된 자료는 없어 전문가 개인의 정성적 분석으로 하였으며 분석목적은 분석을 통해 산출된 값을 토대로 배관설계비의 변동 범위 분석을 위해 몬테카를로 시뮬레이션의 입력 값으로 활용하기 위

Table 4 Investigation result on cost variation range of each piping design item

Piping design items	Korea		Overseas	
	(-)	(+)	(-)	(+)
Piping routing study	-2.84	3.94	-2.96	4.24
Piping material specification	-1.78	2.06	-1.71	2.71
Piping & instrument diagram	-2.56	2.67	-2.12	3.37
Structure and pipe rack information	-2.62	3.15	-1.94	3.33
Utility flow diagram	-1.55	2.63	-1.82	2.85
Stress analysis	-2.34	2.87	-1.99	3.17
Support design	-1.52	2.59	-1.79	3.16
piping plan drawing and isometric drawing	-3.53	4.51	-2.94	4.84
bill of material	-2.42	3.27	-2.28	3.85
plot plan	-1.94	2.72	-1.88	2.91
others	-1.44	1.42	-1.72	1.72

함이다.

Table 4는 설계항목별 비용변동 범위 조사결과에 관한 것으로 배관설계의 각 항목별로 감액, 증액으로 구분하여 분석하였다. 이를 정리하면, Piping plan drawing and isometric drawing 항목의 범위가 국내 -3.53%~4.51%, 해외 -2.94%~4.84%로 가장 넓은 구간을 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 배관설계의 높은 비중을 차지하고 있어 잦은 설계변경으로 비용에 대한 영향이 가장 큰 것으로 분석된다. Piping routing study 항목의 범위가 국내 -2.84%~3.94%, 국외 -2.96%~4.24%로 두 번째로 넓었으며, Bill of material 항목의 범위가 국내 -2.42%~3.27%, 국외 -2.28%~3.85%로 세 번째로 넓었다. Piping & instrument diagram 항목의 범위가 국내 -2.56%~2.67%, 국외 -2.12%~3.37%로 네 번째로 넓었다. 이를 토대로 사례대상 평균 설계비에 적용하여 각 항목별 최소비용 및 최대비용을 분석하였다. 즉 각 항목별 사례 평균비용에 최소비용 및 최대비용을 곱하여 각 항목별 최소비용 및 최대비용을 분석하였고 항목별 총합이 전체 배관설계 비용이 된다. 도출된 값을 배관설계비의 비용변동 범위 분석을 위해 몬테카를로 시뮬레이션의 입력 값으로 활용하였다.

시뮬레이션을 통한 제철플랜트 배관장치 설계비용의 변동 범위 분석

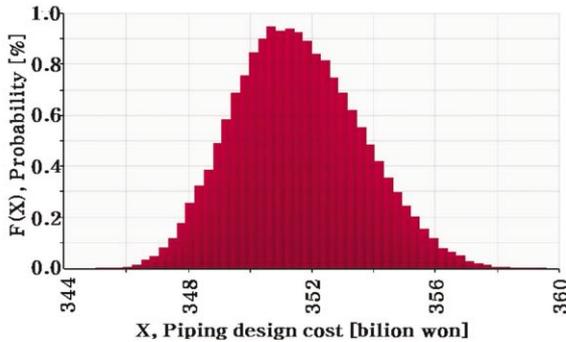


Fig. 1 Variation range distribution of piping design cost(Korea)

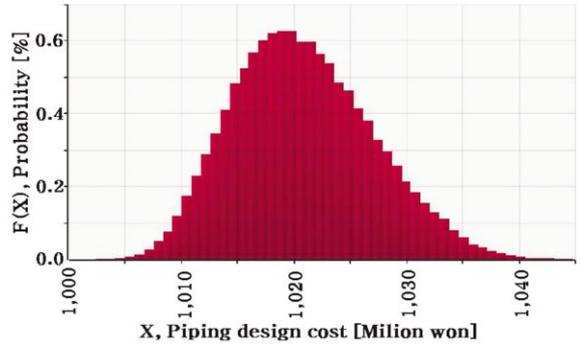


Fig. 2 Variation range distribution of piping design cost(overseas)

3.4 모의실험을 통한 배관설계비 변동 범위 분석

사례대상이 국내 2곳, 해외 2곳으로 한정됨에 따라 여러 변수를 측정할 수 있는 모의실험 방법인 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 배관설계비 변동 범위를 분석하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 확률분포정의, 누적확률분포의 구성, 난수부여, 시뮬레이션, 결과 순으로 진행된다. 확률 분포는 추정하기 위한 데이터가 거의 없는 경우 설문조사를 통해 전문가의 의견을 데이터화 하거나 분석자의 과거 경험 및 노하우에 근거하여 분포를 추정하게 되는 경험적 분포의 대표적인 삼각형 분포로 정의하였다. 여기서 난수는 불규칙성과 무작위성을 의미하며 확률분포의 합은 1이라는 정의에 착안하여 0~1 사이로 한다. 보다 정확한 값을 얻기 위해 시뮬레이션 반복횟수는 100,000번으로 설정하였다. 이를 통해 배관설계 각 항목별 100,000개의 값들이 생성되었으며 항목별 값들을 토대로 도출된 배관설계 비용의 변동 범위 분석결과는 다음과 같다.

Fig. 1은 국내 사례의 배관설계 비용변동 범위 분포도로서 가로축은 총배관설계비의 범위, 세로축은 추정된 배관설계비가 발생할 확률을 나타내며 시뮬레이션 반복횟수 100,000번의 설정으로 인해 발생확률에 10^{-7} 을 곱해야 한다. 최소비용 345,006,214원, 최대비용 359,582,690원으로 설계비의 평균비용 351,537,595원을 기준으로 약 -1.86%~약 2.28%의 비용변동 범위를 가지는 것으로 분석되었다.

Fig. 2는 해외 사례의 배관설계 비용변동 범위 분포도

로 최소비용 1,002,416,345원, 최대비용 1,044,815,950원으로 설계비의 평균비용 1,020,804,445원을 기준으로 약 -1.81%~약 2.35%의 비용변동 범위를 가지는 것으로 분석되었으며, 1,011,384,210원~1,031,664,949원은 90%의 확률로 신뢰할 수 있는 것으로 나타났다. 국내의 300만 톤급 제철플랜트 배관설계비 산정 시 배관구간에서의 비용변동 범위 조사결과 설계규모에 따른 금액차이는 있지만 비용변동 범위는 평균 -1.83%~2.31%로 차이점이 없는 것을 도출할 수 있었다.

이와 같이 도출된 배관설계비의 변동 범위 분석결과를 이후 유사 프로젝트 수행 시 입찰단계에서 합리적인 입찰 금액 산정 및 입찰참여에 대한 타당성을 검토할 수 있는 참고자료 및 예비비 산정을 위한 기준자료로써 활용이 가능하다.

4. 결론

본 연구는 플랜트 배관설계의 항목을 고려한 배관설계비 변동 범위 분석을 목적으로 수행되었으며 이를 위해 관련 설계자료 및 전문가를 통하여 배관설계의 항목을 조사한 후 설문 및 면담을 통하여 항목에 대한 중요도와 설계오류 발생빈도를 분석하였다. 이를 통해 배관설계의 주요 항목을 도출하여 각 주요 항목별로 사례 프로젝트의 배관설계비, 설계비중 및 설계항목별 비용변동 범위를 조사하였다. 조사결과를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 배관설계비의 변동 범위를 분석하였으며 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 배관설계의 15개 항목 중 Plot plan 항목이 가장 중요도가 높고 Piping plan drawing and isometric drawing 항목이 가장 설계오류 발생빈도가 높은 것으로 분석되었다.
- (2) 모의실험을 통한 국내외 300만 톤급 제철플랜트 배관설계 비용의 변동 범위 결과는 다음과 같다. 국내 평균 설계비용 351,537,595원을 기준으로 약 -1.86%~약 2.28%, 해외 평균 설계비용 1,020,804,445원을 기준으로 약 -1.81%~약 2.35%의 비용변동 범위이며, 설계규모에 따른 비용차이와 설계항목에 따른 비용변동을 차이는 있지만 비용의 변동율은 유사한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. Comprehensive information service of overseas construction, 2011, Annual Status of construction statistics, p. 33.
2. Kim, D. H., 2006, Risk-based profitability forecasting in international construction projects, Journal of the Korean Society of Civil Engineers vol. 26, no.4.
3. Kim, M. S., 2010, Quantitative and qualitative analysis on risk factors for a overseas plant construction project, MS thesis, Chungang University, Seoul, Korea.
4. Park, H. S., 2011, Risk management in the EPC business for overseas power plant projects, MS thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.