

플랜트 건설사업의 모듈러 설계대안별 RVI 평가 모델

강현욱*

*광주대학교 건축학부 건축공학과 조교수

Risk based Value Index Evaluation Model for Modular Design Alternatives in Plant Construction Projects

Kang, Hyun Wook*

*Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Gwangju University

Abstract : The purpose of this study is to suggest a model for evaluation of a risk based value index for modular design alternatives in plant construction projects. Accordingly, 1) Setting the basic project cost and the scope to apply the module, 2) Evaluating the importance, easiness, and effectiveness index for Engineering, Procurement, Fabrication, transportation, and construction work, 3) Estimating the total project cost by analyzing the risk reserve Step, 4) Comparing the effectiveness index and total project cost for each modular design alternative, it was composed of the steps of deriving RVI. To verify such a model, Plan-A, which applied a module to one process, and Plan-B, which applied a module to three processes, were composed to evaluate RVI.

Keywords : Modular Plant Construction, Modular Design, Risk Events, Risk Reserve, Risk based Value Index

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

해외 플랜트 건설사업은 발주국의 노동 근로 규제와 안전관리 규제, 사업부지 환경조건 그리고 공사기간 단축을 위하여 Steel Structure, Process Equipments, Pipe Rack, Insulation, Fireproofing, Electrical and Instrumentation cable-trays, Buildings, 등을 공장(Module Shop)에서 제작하고 건설현장으로 운송하여 설치하는 모듈러 공법의 적용이 확대되고 있다(Exxon, 2013; Kang et al., 2018).

모듈러 공법을 적용하는 경우 모듈의 대상과 범위에 따라 설계대안이 구성되고 제작하기 위한 Module Shop을 선정한다. 그리고 시공단계에서 제작된 Module을 해상과 육상으로 운송하여 설치하기 때문에 관리업무의 체계가 기존의 설

계, 구매 및 조달, 시공단계에서 구매 및 조달에 포함된 제작, 운송을 세분화하여 설계, 구매, 제작, 운송, 시공으로 분류되며, 사업비의 비용항목도 동일하게 분류되어 산정된다. 이와 같이 제작 및 운송단계가 추가됨에 따라 Module Shop, 운송장비와 경로, 하역항만 등에 대한 계획과 모듈을 제작하고 운송하는 과정에서 예상하지 못한 위험의 영향에 따른 경제적 손실의 예방이 중요하다.

주요 선행연구는 모듈러 적용에 따른 공사관리 방안과 공사기간의 단축효과에 대한 사례연구(Park, 2012), 모듈러 공법의 적용 여부를 결정하기 위하여 지식 기반 시스템을 활용한 타당성 분석 방법 제시(Murtaza et al., 1993), 입찰단계에서 모듈러 플랜트에 대한 의사결정 모델 개발(Park et al., 2016), 모듈러 플랜트의 위험평가 및 예비비 예측(Kang et al., 2018; Kim, J.W., 2017), VE기법을 활용한 모듈러 플랜트 위험평가 모델 개발(LEE, 2021) 등이 수행되었다. 선행연구를 고찰한 결과, 모듈의 적용 대상과 범위에 따라 다르게 구성되는 설계대안별 관리업무의 효율성, 사업비의 차이 등을 종합적으로 고려하여 최적 설계안을 선정하기 위한 평가 모델의 연구가 부족한 것으로 검토되었다.

즉, 플랜트 건설사업에서 모듈러 공법을 적용하는 대상과

* **Corresponding author:** Kang, Hyun-Wook, Department of Architectural Engineering, Gwangju University, 277 Hyodeok-Ro, Nam-Gu, Gwangju, Korea
E-mail: khw@gwangju.ac.kr
Received August 1, 2022; **recised** September 5, 2022
accepted September 20, 2022

범위에 따라 투입되는 인원, 관계 협력사의 규모, 공사기간의 단축 가능 일수, 발생가능한 위험사건 등이 다르기 때문에 설계대안별로 관리업무(설계, 구매, 제작, 운송, 시공)의 효율성과 총 사업비를 비교하여 최적의 설계안을 선정하기 위한 모델(분석방법)이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 모듈 설계대안별로 관리업무의 효율성 지수를 평가하고 위험예비비를 포함한 총사업비를 추정하고 그 결과를 기반으로 최적 설계안을 선정하기 위한 위험기반의 평가지수(Risk based Value Index; RVI)를 도출하는 모델을 제안하는 것이다.

1.2 연구 대상 및 방법

본 연구의 대상은 모듈러 공법을 적용하는 플랜트 건설사업이며, 범위는 모듈러 공법을 적용함에 따른 관리업무의 효율성 지수를 평가하고 위험사건에 대한 예비비를 분석하여 모듈 설계대안별 위험기반의 평가지수(RVI)를 도출하는 것이다. 즉, 모듈을 적용하는 대상과 범위에 따라 구성된 다수의 설계대안별로 관리적 측면과 경제적 측면을 종합적으로 분석 및 평가하여 도출된 지수를 위험기반의 평가지수라고 정의하였다. 이와 같이 모듈 설계대안별로 위험기반의 평가지수를 도출하기 위하여 관리적 측면은 설계대안별 업무(설계, 조달, 제작, 구매, 시공)의 중요도, 편리성을 반영한 관리업무의 효율성을 평가하며, 경제적 측면은 설계대안별 기초사업비와 발생가능한 위험사건에 따라 추정된 예비비를 기반으로 모듈 설계대안별 위험기반의 평가지수를 도출한다.

위험기반의 평가지수를 도출하기 위해서 반영되는 관리업무의 효율성을 업무 중요도와 편리성으로 구성한 이유는 다음과 같다. 업무의 중요도는 일반적으로 플랜트 건설사업은 설계, 구매 및 조달, 시공으로 분류되며, 모듈러 공법을 적용하는 경우 구매 및 조달 업무에 모듈의 제작과 운송이 포함된다. 즉, 모듈을 적용하지 않는 경우와 적용하는 경우 그리고 모듈을 적용하는 범위에 따라 업무 항목별로 관리의 중요도가 다르게 계획되어야 하므로 이를 반영하였다. 또한, 업무의 편리성은 모듈을 적용하는 대상과 범위에 따라 설계의 복잡성, 제작업체의 시공능력에 대한 적절성, 운송경로의 적절성, 운송장비의 보유 여부, 현장에서 모듈을 운송하고 설치하는 경로 등과 같은 다양한 사항을 검토하여야 하기 때문에 모듈 설계대안별 업무 수행의 효율성에 중요도와 편리성을 포함한 것이다.

이와 같은 연구의 진행절차를 설명하면 다음과 같다. 2장에서는 주요 선행연구와 본 연구의 내용을 비교하여 차이점을 설명하고 3장에서는 본 연구에서 제시하고자 하는 모듈 설계대안별 RVI 평가 모델의 분석단계를 구체적으로 설명

한다. 4장에서는 제시된 모델의 사용성 검증을 위하여 플랜트 건설사업에 참여한 전문가 5명으로부터 조사된 설문과 의견 그리고 관련 선행연구에서 활용된 자료를 적용하여 분석단계별로 결과를 도출한다.

2. 선행연구 고찰 및 비교

2.1 주요 선행연구 고찰 내용

주요 선행연구(Lee, 2021)의 모델은 모듈러 공법을 미적용하는 경우와 모듈러 공법을 적용하는 경우를 평가하기 위한 목적이며, 이를 위하여 VE기법을 활용하였다. VE기법의 산정식에서 Function을 제작성, 운송성, 시공성, 공중성, 가용성 항목으로 설정하고 모듈시공 부분의 관리측면을 평가하였다. 그리고 Cost는 사업비에 순위험비용을 합산하는 방법으로 준공금액에서 계약금액을 차감하여 위험비용을 산정하고 그 위험비용에서 발주자의 책임으로 인하여 증액된 비위험비용을 차감하는 방법으로 순위험비용을 산정하였다.

본 연구에서 제시하는 모델은 모듈러 공법을 적용하는 대상과 범위에 따라 다르게 구성된 설계대안별로 설계, 구매, 제작, 운송, 시공업무에 대한 중요도와 편리성을 분석하고 효율성 지수를 도출한다. 또한, 모듈러 공법을 적용하는 범위에 따라 변동되는 기초사업비를 설계대안별로 각각 산정하고 분석된 위험예비비를 합산하여 총사업비를 추정한다. 위험예비비는 중요 위험사건을 정립하고 위험사건의 발생에 따른 경제적 손실을 예방하기 위하여 필요한 적정 예비비를 위험사건별로 분석하는 것이다. 이와 같이 모듈 설계대안별로 분석된 관리업무의 효율성 지수와 총사업비를 비교하여 최적 설계안을 선정하기 위한 정량적 RVI를 도출한다.

2.2 주요 선행연구 내용 비교

■ 연구모델 적용 대상

- 선행연구: 현장시공 및 모듈러 시공 비교 평가
- 본 연구: 모듈러 공법 적용 설계대안별 비교 평가

■ Function 부분 분석 방법 비교

- 선행연구: 평가항목별 가중치는 분석자 주관 평가
- 본 연구: AHP기법을 적용하여 가중치 분석 및 평가

평가항목별로 가중치를 분석하는 방법에서 선행연구는 분석자가 주관적으로 평가를 하나, 본 연구에서는 평가항목별로 상대적인 중요도 지수를 도출하여야 하므로 AHP기법을 적용하여 분석하고 모듈러 공법을 적용하는 경우에 설계, 구매, 제작, 운송, 시공에 대한 편리성 및 효율성을 Table 1에서 제시된 세부항목에 따라 구체적으로 평가함.

■ Cost 부분 기초사업비 산정 방법 비교

- 선행연구: 직접비에 간접비를 포함하여 산정
- 본 연구: 직접비와 간접비를 분류하여 산정

선행연구는 모듈러 공법을 적용하는 범위에 따라 간접비가 변동되는 경우를 반영하지 않았으나, 본 연구에서는 간접비의 변동 규모가 총사업비의 산정에 영향이 있으므로 모듈 설계대안별 적정 간접비를 별도 산정하여 반영함.

■ Cost 부분 위험예비비 분석방법 비교

- 선행연구: 준공금액과 계약금액의 차액을 위험비용으로 판단하여 순위험비용을 산정
- 본 연구: 위험사건별로 예비비 비율을 조사하고 설계, 구매, 제작, 운송, 시공업무 중에서 비용의 변동에 영향을 미치는 기초사업에 곱하여 위험예비비를 산정

선행연구는 위험비용을 산정하기 위해서 준공금액이 필요하다, 본 연구에서는 준공금액과 계약금액의 차이 그리고 참여자의 경험을 모두 반영하기 위해서 예비비 비율을 적용하는 방법으로 산정함.

따라서 선행연구와 본 연구의 내용을 비교해 보면, 제시된 모델을 적용하는 대상과 관리업무의 중요도, 편리성, 효율성을 분석 및 평가하는 방법 그리고 기초사업비와 위험사건에 따른 예비비를 산정하는 방법에 차이가 있다.

3. 모듈러 설계 RVI 평가 모델

3.1 모듈러 설계 RVI 평가 모델 개요

모듈러 설계 RVI (Risk based Value Index) 평가 모델은 먼저, 모듈 설계대안별로 관리업무에 대한 중요도 및 편리성에 따른 효율성 지수를 평가한다. 다음으로, 설계대안별로 산정된 기초사업비에 위험사건의 영향에 따라 분석된 위험예비비를 합산하여 총사업비를 추정한다. 이와 같은 결과를 기초로 설계대안별 RVI를 도출하는 것으로 평가 모델의 산정식을 설명하면 아래와 같다.

$$RVI = \frac{\text{Work Effectiveness Index}}{\text{Base Cost} + \text{Risk Reserve}}$$

RVI를 도출하기 위한 산정식은 건설사업의 경제성을 평가하기 위해서 활용되는 VE의 산정식(VE=Function/Cost)과 개념이 유사하다. 즉, 분모에는 분석대상과 비교대상의 비용(Cost)이 대입되고 분자는 각 대상별 성능(Function)을 평가한 지수가 대입되어 종합적인 가치지수를 도출한다. 이와 같이 RVI 또한 분모에 모듈 설계대안별로 다르게 산정된 기초사업비(Base Cost)와 위험사건별 예비비(Risk Reserve)를 합산한 총사업비가 대입되고 분자는 모듈 설계대안별로 관리업무의 중요도와 편리성을 평가한 결과에 따른 업무의 효율성(Work Effectiveness Index) 지수를 대입하여 모듈

설계대안별로 위험기반의 가치지수를 도출하는 것이다.

따라서 RVI는 모듈 설계대안별로 산정된 총사업비와 관리업무의 효율성 지수를 기반으로 도출된 지수를 비교하여 최적 설계안을 선정하기 위한 자료로 활용이 가능하다.

3.2 모듈러 설계 RVI 평가 모델 절차 및 방법

모듈 설계대안별로 RVI를 평가하기 위해서 먼저, 분석하고자 하는 플랜트 건설사업에 대한 기초사업비를 산정하고 설계대안별로 모듈을 적용하는 대상과 범위를 설정한다.

다음으로 설계대안별로 관리업무(설계, 조달, 제작, 운송, 시공)에 대한 중요도 비율과 편리성 점수를 산정하여 이를 종합한 효율성 지수를 도출한다. 또한, 정립된 위험사건별로 손실을 예방하기 위한 예비비를 산정한다.

마지막으로, 모듈 설계대안별로 산정된 기초사업비와 위험예비비를 합산한 총사업비 그리고 관리업무에 대한 효율성 지수를 기반으로 상대 비교하여 RVI를 도출한다.

상기에서 개략적으로 설명한 모듈러 설계 RVI 평가 모델의 절차와 방법을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

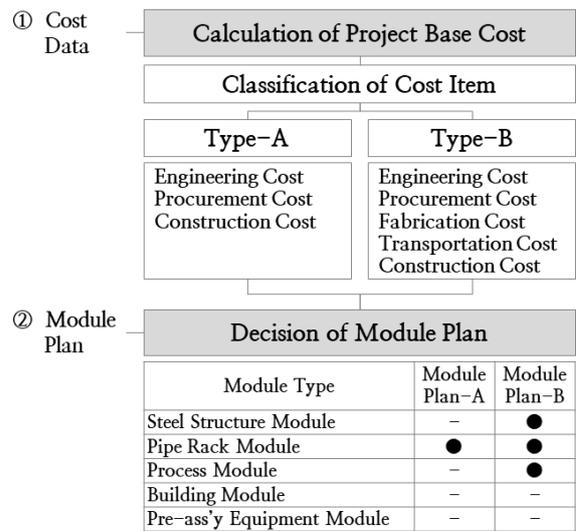


Fig. 1. Step-1 of RVI Evaluation Model

Step-1은 분석하고자 하는 플랜트 건설사업의 기초사업비를 산정하고 모듈러 공법을 적용하는 대상과 범위에 따른 설계대안을 구성한다(Fig. 1).

① Cost Data는 모듈러 공법을 적용함에 따라 내역서의 비용항목을 분류하고 기초사업비를 산정하는 단계이다. 대규모 플랜트 건설사업은 일반적으로 Lump-Sum Turnkey 방식으로 추진되기 때문에 Type-A와 같이 설계비, 조달비, 시공비를 모두 포함하여 사업비를 산정하게 된다. 이와 같이 분류하여 산정된 총사업비를 모듈러 공법을 적용함에 따라 Type-B처럼 제작과 운송항목을 추가하여 세분화한다. 그러

나, 플랜트 건설사업에 대한 내역서 분류체계는 발주자가 제공한 입찰안내서에 사업비는 설계비, 조달비, 시공비 항목으로 구성되어 있기 때문에 제작비와 운송비 항목을 별도로 분류하는 것은 본사 또는 현장에서 효율적인 사업비 관리를 위하여 별도로 작성되어야 하는 제한이 있다.

② Module Plan은 모듈러 공법을 적용하는 대상과 범위를 선정하는 단계이며, 상기의 Module Type 중에서 어떠한 Module Type을 적용할 것인지를 판단하는 것이다. 즉, 해당 플랜트 건설공사를 진행하는 현장 위치, 노동력 수준, 안전 기준 수준, 자재 수급 현황, 관리인력 규모, 공사기간 및 공기 단축 가능 여부 등을 고려하여 모듈러 공법의 적용 대상과 범위를 선정한다. 이와 같은 과정에 따라 모듈러 공법을 적용하는 대상별로 Module Plan-A와 Module Plan-B 등으로 설계대안이 구성될 수 있다.

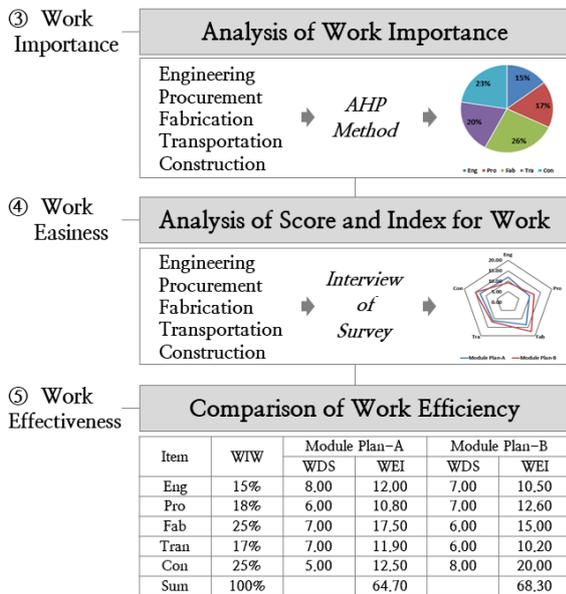


Fig. 2. Step-2 of RVI Evaluation Model

Step-2는 모듈러 공법을 적용함으로써 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 상대적인 중요도와 편리성을 분석하여 최종적으로 업무의 효율성을 평가한다(Fig. 2).

③ Work Importance는 현장시공 대비 모듈러 시공을 비교하여 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 상대적인 중요도(가중치)를 분석하는 것이다. 예를 들어, 현장시공은 조달 및 시공업무의 중요도가 높은 반면에, 모듈러 시공에서는 제작 및 운송 그리고 시공업무가 상대적으로 중요하므로 AHP(Analytic Hierarchy Process)기법을 활용하여 관리업무 항목별로 중요도(Work Importance Weight)를 평가한다. AHP기법을 적용한 이유는 현장시공 공법 또는 모듈러 공법을 적용함에 따라 관리업무의 중요도가 다르게 평가되어야

하고 이러한 과정에서 분석자의 주관적인 판단을 객관화하기 위하여 평가하고자 하는 항목별로 상대적인 중요도를 분석하는데 활용되고 있는 AHP기법을 적용하였다. 그러나 추진하고 있는 건설사업의 업무조건 등을 고려하여 AHP기법이 아닌 다수의 분석자가 100%를 기준으로 관리항목별로 가중치를 평가할 수 있다.

④ Work Easiness는 모듈러 공법을 적용하는 대상과 범위가 다르게 구성된 설계대안별(Module Plan-A, Plan-B)로 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 편리성 점수(Work Easiness Score)를 평가하는 것이다. 이와 같이 설계대안별 업무의 편리성은 1점~10점의 척도로 평가자의 경험, 투입되는 인력 규모, 업무의 협업 관계 등을 고려하여 점수로 평가하는 것이며, 항목은 <Table 1>과 같다. <Table 1>에서 제시된 평가항목은 본 연구에서 반영하고자 하는 항목이며, 플랜트 건설사업의 종류 등에 따라 다르게 구성할 수 있다.

Table 1. Evaluation Items for Work Easiness

Item	Explain
Engineering	<ul style="list-style-type: none"> Module type : Pipe Rack, Structure, Process Module, Building Module Module size : Column spacing, Girder spacing, Support beam
	<ul style="list-style-type: none"> Module durability : Column size, Girder size, Beam size, Brace size Module connection : Welding point and gap, Bolting point and gap
Procurement	<ul style="list-style-type: none"> Procurement materials : Material type, Spec, Size, Procurement region Procurement location : Construction site, Fabrication site
	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication location : Domestic, Overseas Fabrication experience : Pipe Rack, Pipe Structure, Process Module Fabrication equipment : Field size, Crane spec, Worker skill Jetty facility : length, depth, durability, Specification
Transportation	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication location : Domestic, Overseas Transportation route : Safety, Distance, Optimal route Transportation equipment : Barge spec, Tugboat specification, Bulk ship spec
	<ul style="list-style-type: none"> Transportation route : Safety, Distance, Optimal route Installation equipment : Self-Propelled Module Transporter(SPMT), Crane Installation quality : Welding gap of Pipe to Pipe, etc Construction Management : Labors, Safety, Schedule, Workability, etc

⑤ Work Effectiveness의 목적은 Work Importance 단계에서 분석된 현장시공 대비 모듈러 시공을 비교하여 관리업무에 대한 중요도와 Work Easiness 단계에서 설계대안별 관리업무의 난이도를 평가한 점수에 따른 업무의 효율성 지수 (Work Effectiveness Index)를 도출하는 것이다. 이와 같은 지수를 도출하기 위한 산정식은 아래와 같다.

$$WEI = (WIW \times WES) \times 10$$

- WEI : Work Effectiveness Index
- WIW : Work Importance Weight
- WES : Work Easiness Score

상기와 같은 산정식에 따라 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 효율성 지수를 도출하며, 이와 같이 도출된 지수는 3.1 모듈러 설계 RVI 평가 모델 개요에서 제시한 RVI 평가 방법의 Work Effectiveness Index에 대입된다.

Step-3은 발생가능한 위험사건을 식별하고 그 위험사건으로 인한 경제적 손실을 최소화하기 위하여 위험예비비를 산정한다. 이와 같이 산정된 위험예비비와 Step-1에서 산정된 기초사업비를 합산하여 총 사업비를 추정한다(Fig. 3).

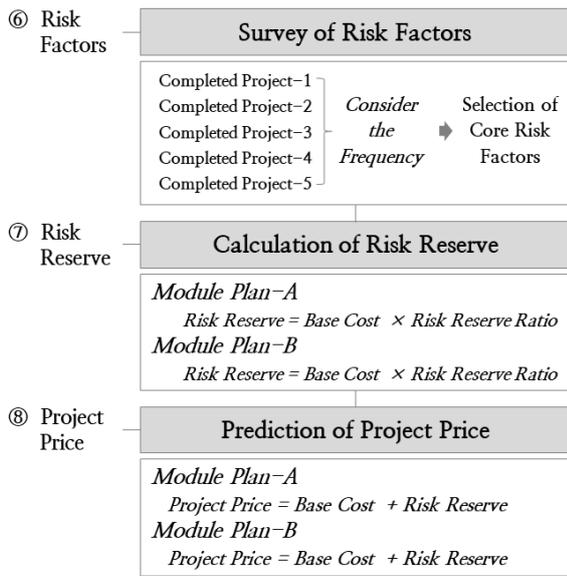


Fig. 3. Step-3 of RVI Evaluation Model

⑥ Risk Factors는 준공이 완료된 플랜트 건설사업에서 발생되었던 위험사건과 신규로 진행 중인 플랜트 건설사업에서 반영되어야 하는 위험사건을 추출한다. 준공된 플랜트 건설사업에서 위험사건을 추출하는 경우 발생빈도와 경제적 손실 규모 등이 기준이 되며, 신규 플랜트 건설사업에서는 계약조건, 현장위치, 공사환경 조건 등을 고려하여야 한다.

⑦ Risk Reserve는 추출된 위험사건별로 그 위험사건이 발생되어 공중, 원가 등의 변동을 유발함에 따른 경제적 손실을 최소화하기 위하여 필요한 예비비를 산정하는 것이다.

예비비는 기초사업비에 위험사건별로 적정 예비비 비율을 곱하여 산정하는 방법을 적용하였으며, 예시는 아래와 같다.

Table 2. Example of Risk Reserve Calculation Method

Item	Explain				
Base Cost of Engineering	28,144,216				
Risk Factors	Eng	Pro	Fab	Tran	Con
Error in detail design	0.20%	0.27%	0.29%	-	0.14%
Risk Factors	Eng*	Pro	Fab	Tran	Con
Error in detail design	56,288	304,947	310,006	-	329,061

* Eng : 56,288 = 28,144,216 × 0.20%

위험예비비는 예시와 같이 1가지의 위험사건이 설계, 조달, 제작, 운송, 시공에 미치는 영향에 따라 변동이 예상되는 비율을 해당 기초사업비에 곱하여 산정한다. 즉, 위험사건별로 적정 예비비 비율을 기초사업비에 곱하여 산정하는 것이다. 이와 같이 적정 예비비를 산정하기 위해서 반영되는 예비비 비율(Ratio)은 예정된 신규 플랜트 건설사업의 규모, 특성 등이 유사한 준공된 플랜트 건설사업의 계약내역 금액과 준공내역 금액을 비교하여 증액된 금액만큼의 비율을 산정하는 방법을 적용하며, 플랜트 건설사업의 규모, 계약조건, 설계내용, 현장조건 등을 고려하여 예비비 비율의 규모를 조정하여 산정하여야 한다.

⑧ Project Price는 모듈 설계대안별로 산정된 기초사업비에 위험예비비를 합산하여 총사업비를 추정하는 것이다.

Step-4는 본 연구의 모델에서 최종적으로 도출되는 Risk based Value Index를 평가하는 단계이며, Step-2에서 분석된 관리업무의 효율성 지수와 Step-3에서 추정된 총사업비를 비교하여 모듈 설계대안별로 RVI를 도출한다(Fig. 4).

⑤ Work Effectiveness

Item	WTW	Module Plan-A		Module Plan-B	
		WDS	WEI	WDS	WEI
Eng	15%	8.00	12.00	7.00	10.50
Pro	18%	6.00	10.80	7.00	12.60
Fab	25%	7.00	17.50	6.00	15.00
Tran	17%	7.00	11.90	6.00	10.20
Con	25%	5.00	12.50	8.00	20.00
Sum	100%		64.70		68.30

⑥ R.V.I

WEI	64.70	68.30
PPI	1.5	0.98
RVI	43.10	69.70

Fig. 4. Step-4 of RVI Evaluation Model

설계대안별로 RVI를 도출하기 위해서 반영된 관리업무의 효율성 지수(Work Effectiveness Index)는 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 중요도 비율과 편리성 점수를 곱하여 산정된 각각의 지수를 합산한 것이며, 총사업비에 대한 지

수는(Project Price Index)는 Module Plan-A의 총사업비와 Module Plan-B의 총사업비를 비교하여 산정된다.

4. 모듈러 설계 RVI 평가 모델 검증

4.1 모듈러 설계 RVI 평가 모델 검증 개요

모듈러 설계 RVI 평가 모델에 대한 사용성 검증은 3장에서 제시한 모델의 절차 및 방법에 따라 분석단계별로 요구하는 값들을 입력하여 결과가 도출되는 과정에 대한 적합성을 확인하는 것이다. 이에 따라 건설회사에서 대외비로 관리되는 사업비의 조사가 제한되는 점으로 인하여 모듈러 공법을 적용한 플랜트 건설사업의 선행연구(Kang et al., 2018)에서 활용된 사업비와 위험예비비 비율 등을 활용한다.

본 모델의 활용성과 결과 도출과정의 분석방법에 대한 적정성을 검증하기 위하여 단계별로 입력되어야 하는 자료(사업비, 편리성 점수, 예비비 비율 등)에 대해서는 플랜트 건설사업에 참여한 경력이 있는 5명의 전문가에게 설문과 의견을 조사하였다. 즉, 선행연구를 통하여 활용된 자료를 본 연구의 모델에 입력한 후 5명의 전문가에게 단계별 분석방법을 설명하고 입력된 자료를 기준으로 수정되어야 하는 부분에 대한 설문과 의견을 반영한 것이다.

4.2 모듈러 설계 RVI 평가 모델 검증 결과

4.2.1 기초사업비 조사 및 모듈러 설계대안 구성

기초사업비는 선행연구(Kang et al., 2018)에서 조사된 사업비를 활용하나, 모듈러 공법을 적용함에 따라 시공에 투입되는 실시공 인원과 관리직 인원이 감소되는 변동 사항을 반영하기 위하여 설계, 구매, 제작, 운송, 시공비에 포함되어 산정된 간접비(Indirect Cost)를 별도로 재산정하였다.

또한, 모듈러 설계대안은 2가지이며, 첫 번째는 선행연구에서 Pipe Rack을 모듈러 적용하였기 때문에 Module Plan-A로 설정하였다. 그리고 모듈의 적용 대상의 차이에 따른 RVI를 비교하기 위하여 Module Plan-B는 Steel Structure Module, Pipe Rack Module, Process Module로 구성하였으며, 내용은 아래 <Table 3>과 같다.

Module Plan-A의 기초사업비는 선행연구에서 조사된 사업비에서 간접비 비율을 직접비에 곱하여 재산정한 것이며, Module Plan-B는 3가지의 모듈을 적용함에 따라 변동되는 직접비와 간접비를 재산정하였다. 즉, 모듈러 공법을 적용하는 경우 외주업체(Module Shop)에서 모듈을 제작하고 현장에서 운송 후 설치함으로 현장에 투입되는 자재, 인력, 장비 등이 감소하게 되어 직접재료비, 직접노무비, 직접경비가 감소된다. 이에 따라 직접공사비를 기준으로 공사규모별로 정해진 간접비 제비율을 반영하여 산정되는 간접공사비(간접

Table 3. Composition of the Module Plan

Module Type	Module Plan-A	Module Plan-B
Steel Structure Module	-	●
Pipe Rack Module	●	●
Process Module	-	●
Building Module	-	-
Pre-assy Equipment Module	-	-

Unit : 1,000 KRW

Item	Module Plan-A		Module Plan-B		Variation
	Price	Ratio	Price	Ratio	
Direct Cost	518,928,056	85.00%	518,928,056	90.68%	-
Engineering	28,144,216	5.42%	33,730,324	6.50%	5,586,108
Procurement	112,943,165	21.76%	96,520,618	18.60%	-16,422,547
Fabrication	106,166,575	20.46%	177,162,038	34.14%	70,995,463
Transportation	36,630,216	7.06%	75,244,568	14.50%	38,614,352
Construction	235,043,884	45.29%	136,270,507	26.26%	-98,773,377
Indirect Cost	91,575,539	15.00%	53,345,755	9.32%	-38,229,784
Expenses	91,575,539		53,345,755		-38,229,784
Total	610,503,595	100%	572,273,811	100%	-38,229,784

노무비, 간접경비, 기타경비, 안전관리비, 환경관리비, 보험료, 수수료 등) 또한 감소되는 것이다. 예를 들어, 간접노무비는 직접노무비에 공사규모별로 정해진 제비율을 곱하여 산정하므로 직접노무비에 해당하는 직접노무인력(실시공 인력)이 감소하게 되면, 간접노무비가 연계되어 감소되는 것과 같다.

따라서 3가지의 모듈을 적용하는 Module Plan-B는 모듈을 제작하는 외주업체의 계약 범위가 Module Plan-A보다 확대되고 현장에 투입되는 자재, 인력, 장비 등이 감소하게 되므로 이와 같은 차이점에 따른 비용항목의 금액 변화를 반영하기 위하여 전문가 5명에게 3가지의 모듈을 적용하는 경우 설계, 조달, 제작, 운송, 시공 비용항목이 차지하는 직접비 비율과 간접비 비율을 조사하였다. 이에 따라 전문가 5명으로부터 조사된 직접비의 평균 비율을 Module Plan-A의 직접비에 곱하여 Module Plan-B의 직접비를 재산정하였으며, 간접비는 직접비 합계에 전문가 5명으로부터 조사된 평균 간접비 비율을 반영하였다.

4.2.2 관리업무 편리성 및 효율성 분석

모듈 설계대안별로 관리업무의 편리성과 효율성을 평가하기 위해서 1) 현장시공 대비 모듈러 적용의 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 상대적인 중요도를 평가한다. 즉, 현장시공은 자재를 구매하고 현장으로 조달하여 시공하는 업무가 중요한 반면에 모듈러 시공은 모듈을 제작하고 운송하는 업무가 중요하므로 이를 반영한 관리업무의 편리성과

Table 4. Results of Analysis for Work Importance Weight

Item	Eng	Pro	Fab	Tran	Con	Geo-Mean
Eng	1.00	0.50	1.00	1.00	0.50	0.76
Pro	2.00	1.00	0.50	1.00	0.50	0.87
Fab	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00	1.32
Tran	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Con	2.00	2.00	0.50	1.00	1.00	1.15
Sum	7.00	6.50	4.00	5.00	5.00	5.10
λ_{max}	5.29	C.R	6.56%	C.I	0.07	OK

Item	Weight	Rank	Graph
Eng	0.149	14.87%	
Pro	0.171	17.08%	
Fab	0.259	25.89%	
Tran	0.196	19.62%	
Con	0.225	22.54%	
Sum	1.000	100%	

Table 5. Results of Survey for Work Easiness Score

Item	Weight	Explain	Module Plan-A	Module Plan-B
Engineering	14.87%	<ul style="list-style-type: none"> Module type Module size Module durability Module connection 	7.80	6.00
			6.80	6.00
			7.80	7.00
			6.80	6.00
Average Score			7.30	6.25
Procurement	17.08%	<ul style="list-style-type: none"> Procurement materials Procurement location 	6.80	7.00
			6.80	7.00
			Average Score	
Fabrication	25.89%	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication location Fabrication experience Fabrication equipment Jetty facility 	6.80	7.00
			6.80	6.00
			7.80	7.00
			6.80	7.00
Average Score			7.05	6.75
Transportation	19.62%	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication location Transportation route Transportation equipment 	6.80	6.00
			6.80	6.00
			7.80	7.00
Average Score			7.13	6.33
Construction	22.54%	<ul style="list-style-type: none"> Transportation route Installation equipment Installation quality Construction Management 	6.80	7.00
			6.80	7.00
			7.00	7.00
			6.60	8.00
Average Score			6.80	7.25

효율성을 평가하기 위함이다. 이러한 설계, 조달, 제작, 운송, 시공업무에 대한 중요도는 AHP기법을 활용하며, 전문가 5명의 의견을 반영하여 분석하였다(Table 4).

모듈러 공법을 적용하는 경우 Module Shop에서 설계된 모듈을 제작하는 과정과 제작된 모듈을 운송하여 현장에서 설치하는 시공업무의 중요도가 상대적으로 높게 도출되었

다. 이는, Module Shop에서 플랜트 시설을 구성하는 철골 구조물과 각종 기계, 전기, 통신, 계장설비 등을 모듈단위별로 제작하는 완성도에 따라 시공의 품질이 결정되므로 중요도가 높게 평가된 것으로 해석된다.

2) 설계, 구매, 제작, 운송, 시공업무의 편리성을 평가하는 것으로 <Table 1> Evaluation Items for Work Easiness에서 제시된 항목별로 1점~10점 범위에서 점수를 부여한다. 항목별로 점수를 부여하는 기준은 업무에 투입되는 인력의 규모와 협력회사의 규모, 업무의 복잡 정도 등을 종합적으로 고려하여 관리의 편리성이 높을수록 1점에 가까운 점수를 부여하며, 편리성이 낮을수록 10점에 가까운 점수를 부여하는 것으로 전문가 5명으로부터 조사하였다(Table 5).

3) 설계, 구매, 제작, 운송, 시공업무의 중요도와 편리성을 분석한 결과에 따라 관리업무의 효율성(Work Effectiveness)을 평가한다. 본 연구에서 구성된 Module Plan-A와 Module Plan-B의 설계, 구매, 조달, 제작, 시공업무의 효율성을 종합적으로 평가한 결과, 모듈러 공법을 적용하는 공종이 많은 Module Plan-B의 업무 편리성이 높게 조사되었기 때문에 효율성 지수는 낮게 도출되었다(Table 6).

Table 6. Results of Evaluation for Work Effectiveness Index

Item	WIW	Module Plan-A		Module Plan-B	
		WES	WEI	WES	WEI
Engineering	14.87%	7.30	10.85	6.25	9.29
Procurement	17.08%	6.80	11.62	7.00	11.96
Fabrication	25.89%	7.05	18.25	6.75	17.48
Transportation	19.62%	7.13	14.00	6.33	12.43
Construction	22.54%	6.80	15.33	7.25	16.34
Sum	100%	7.02	70.04	6.72	67.49

- WIW : Work Importance Weight
- WES : Work Easiness Score
- WEI : Work Effectiveness Index

Module Plan-B의 업무 효율성 지수가 Module Plan-A보다 낮게 도출된 원인을 살펴보면, 모듈을 적용하는 공종의 대상과 범위가 넓을수록 모듈을 제작하기 위하여 다수의 외주업체에 대한 시공능력과 가격수준을 검토하고 모듈 종류별로 각기 다른 Module Shop에서 제작된 모듈을 현장으로 운송하기 위한 육상 및 해상 운송장비의 규격, 운송경로, 항만(Jetty)의 환경조건 등을 검토하여야 한다. 또한, 설계 시 제작을 위한 모듈단위의 규격과 개수에 따라 각종 배관의 용접개소가 달라지므로 시공품질을 고려하여야 하며, 이와 같이 모듈과 모듈 간에 각종 배관의 접합부에 대한 정밀도를 확보하여야 한다. 이와 같은 검토사항 등으로 모듈을 적용하는 개수가 많을수록 동일한 기간 동안에 업무를 수행하는 효율성 지수가 낮은 것으로 평가된 것이다.

4.2.3 위험예비비 및 사업비 추정

위험예비비는 건설사업을 진행하는 과정에서 위험사건의 발생으로 인한 경제적 손실을 사전에 예방하기 위해서 필요한 비용을 말하며, 본 연구에서는 1) 선행연구¹⁾에서 조사된 위험사건을 기준으로 Module Plan-A와 Module Plan-B에 대한 위험예비비를 산정한다<Table 7>, <Table 8>.

Table 7. Core Risk Events

Item	Risk Factors
RF-01	Error in detail design
RF-02	Error in working design
RF-03	Error in piping & instrument diagram
RF-04	Error in equipment design
RF-05	Error in connection(pipe to pipe)
RF-06	Delay in module fabrication schedule
RF-07	Lack of ocean transportation route
RF-08	Error in module fabrication
RF-09	Variation in material quantity
RF-10	Change in equipment specification
RF-11	Lack of skill fabrication
RF-12	Lack of jetty specification
RF-13	Lack of ocean transportation machine
RF-14	Error in module design
RF-15	Lack of site transportation route

위험사건은 모듈을 적용하는 대상과 범위에 따라 다르게 반영하는 경우를 고려하여야 하나, 본 연구에서는 1개의 공중에 모듈을 적용하는 Module Plan-A와 3개의 공중에 모듈을 적용하는 Module Plan-B에 대해서 식별된 위험사건이 발생하였을 경우 경제적 손실을 예방하기 위해서 필요한 예비비의 금액적 규모를 비교하기 위한 목적으로 선행연구에서 조사된 위험사건을 동일하게 반영하였다.

2) 중요 위험사건 15개 항목을 기준으로 Module Plan-A와 Module Plan-B의 적정 위험예비비를 산정한 결과, Module Plan-A는 약 11,938백만원, Module Plan-B는 약 20,063백만원(Plan-A 대비 +8,124백만원, +68.06% 높음)으로 세부적인 내용은 <Table 8> 및 <Table 9>와 같다.

3) 총사업비는 Module Plan-A와 Module Plan-B의 모듈러 공법을 적용하는 범위에 따라 각각 산정된 기초사업비에 위험예비비를 합산한 것으로 3개의 공중에 모듈러 공법을

1) Kang et al. (2018). "Risk Assessment and Contingency Prediction considering Work Characteristics for Modular Plant Construction Projects." Korean Journal of Construction Engineering and Management, KICEM, 19(5).

Table 8. Results of Analysis for Risk Reserve

■ Risk Reserve for Module Plan-A Unit : 1,000 KRW

Item	Eng	Pro	Fab	Tran	Con	Sum
RF-01	56,288	304,947	310,006		329,061	1,000,303
RF-02	67,546	271,064	297,266		940,176	1,576,052
RF-03	70,361	282,358	265,416	73,260	587,610	1,279,005
RF-04	39,402	282,358			517,097	838,856
RF-05			233,566		333,762	567,329
RF-06			396,001	51,282		447,284
RF-07				106,960		106,960
RF-08		273,322	222,950			496,272
RF-09	61,917	293,652	403,433	73,260	658,123	1,490,386
RF-10	36,587	327,535	339,733		1,316,246	2,020,101
RF-11			186,853			186,853
RF-12				123,810		123,810
RF-13				101,466	279,702	381,168
RF-14	48,971	316,241	329,116			694,328
RF-15				132,601	597,011	729,613
sum	381,073	2,351,477	2,984,342	662,641	5,558,788	11,938,320

■ Risk Reserve for Module Plan-B Unit : 1,000 KRW

Item	Eng	Pro	Fab	Tran	Con	Sum
RF-01	101,191	337,822	620,067		340,676	1,399,757
RF-02	134,921	386,082	797,229		817,623	2,135,856
RF-03	134,921	386,082	620,067	263,356	681,353	2,085,779
RF-04	118,056	482,603			408,812	1,009,471
RF-05			1,204,702		463,320	1,668,022
RF-06			1,027,540	150,489		1,178,029
RF-07				300,978		300,978
RF-08		337,822	708,648			1,046,470
RF-09	101,191	386,082	974,391	300,978	817,623	2,580,266
RF-10	70,834	386,082	797,229		1,171,926	2,426,072
RF-11			620,067			620,067
RF-12				361,174		361,174
RF-13				285,929	299,795	585,724
RF-14	101,191	289,562	1,240,134			1,630,887
RF-15				421,370	613,217	1,034,587
sum	762,305	2,992,139	8,610,075	2,084,275	5,614,345	20,063,139

적용하는 Module Plan-B의 기초사업비에 포함된 간접비가 절감되었기 때문에 Module Plan-A의 총사업비가 33,389백만원(+5.65%) 높게 산정되었다.

Table 9. Results of Prediction for Risk Reserve

■ Project Price for Module Plan-A Unit : 1,000 KRW

Item	Base Cost	Risk Reserve	Project Price
Direct Cost	518,928,056		530,866,376 85.0%
Engineering	28,144,216	381,073 3.2%	28,525,288 5.4%
Procurement	112,943,165	2,351,477 19.7%	115,294,642 21.7%
Fabrication	106,166,575	2,984,342 25.0%	109,150,918 20.6%
Transportation	36,630,216	662,641 5.6%	37,292,856 7.0%
Construction	235,043,884	5,558,788 46.6%	240,602,672 45.3%
Indirect Cost	93,407,050		93,407,050 15.0%
Expenses	93,407,050		93,407,050
Total	612,335,106	11,938,320 100%	624,273,426 100%

■ Project Price for Module Plan-B Unit : 1,000 KRW

Item	Base Cost	Risk Reserve	Project Price
Direct Cost	518,928,056		538,991,195 91.2%
Engineering	33,730,324	762,305 3.8%	34,492,629 6.4%
Procurement	96,520,618	2,992,139 14.9%	99,512,758 18.5%
Fabrication	177,162,038	8,610,075 42.9%	185,772,113 34.5%
Transportation	75,244,568	2,084,275 10.4%	77,328,843 14.3%
Construction	136,270,507	5,614,345 28.0%	141,884,852 26.3%
Indirect Cost	51,892,806		51,892,806 8.8%
Expenses	51,892,806		51,892,806
Total	570,820,861	20,063,139 100%	590,884,000 100%

4.2.4 모듈 설계대안별 RVI 평가

모듈 설계대안별로 관리업무의 중요도, 편리성, 효율성 그리고 위험예비비를 포함하여 추정된 총사업비에 따른 RVI를 평가한다. <Table 10>은 Module Plan-A와 Module Plan-B에 대한 RVI를 평가한 결과이며, Project Price Index는 설계대안별 사업비를 비교한 지수이다<Table 10>.

상기와 같이 도출된 Module Plan-A와 Module Plan-B의 RVI를 비교해 보면, 관리업무의 효율성 지수(WED)는 1개의 공중에 모듈을 적용한 Module Plan-A보다 3개의 공중에 모듈을 적용한 Module Plan-B가 낮은 것으로 산정되었으나, 3개의 공중에 모듈을 적용하는 Module Plan-B가 현장에 투입되는 직접비의 감액으로 인하여 연계된 간접비 또한 감액되기 때문에 종합적인 RVI는 높게 평가되었다.

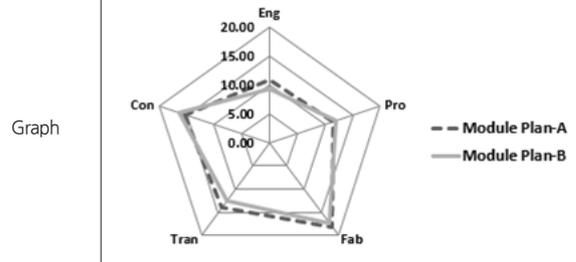
5. 결론

본 연구의 목적은 플랜트 건설사업에서 모듈러 공법을 적

Table 10. Results of Evaluation for Risk based Value Index

Unit : 1,000 KRW

Item	WW	Module Plan-A		Module Plan-B	
		WES	WEI	WES	WEI
Engineering	14.87%	7.30	10.85	6.25	9.29
Procurement	17.08%	6.80	11.62	7.00	11.96
Fabrication	25.89%	7.05	18.25	6.75	17.48
Transportation	19.62%	7.13	14.00	6.33	12.43
Construction	22.54%	6.80	15.33	7.25	16.34
Sum	100%	-	70.04	-	67.49
Project Price		624,273,426		590,884,000	
Work Effectiveness Index		70.04		67.49	
Project Price Index		1.06 ¹⁾ (Compared to Plan-A)		0.95 ²⁾ (Compared to Plan-B)	
Risk Value Index		66.30		71.31	



1) 1.06 = 624,273,426 ÷ 590,884,000
2) 0.95 = 590,884,000 ÷ 624,273,426

용하는 대상과 범위에 따른 최적의 설계안을 선정하기 위한 위험기반의 평가지수(Risk based Value Index; RVI)를 도출하는 모델을 제안하는 것이다. 즉, 모듈 설계대안별로 투입되는 인원과 관계 협력사의 규모, 공사기간의 단축 가능 일수, 발생가능한 위험사건 등이 다르기 때문에 관리업무의 중요도 및 편리성을 평가하여 효율성 지수를 도출하고 사업비와 위험예비비를 분석한 결과에 따른 RVI를 기준으로 최적 설계안을 선정하기 위한 기초자료로 활용하기 위함이다.

모듈 설계대안별로 RVI를 평가하기 위한 모델은 ① 기초 사업비와 모듈을 적용하는 대상과 범위를 설정하는 단계, ② 설계, 구매, 제작, 운송, 시공업무에 대한 중요도, 편리성, 효율성 지수를 평가하는 단계, ③ 중요 위험사건의 영향에 따른 경제적 손실을 예방하기 위해서 필요한 예비비를 분석하여 총사업비를 추정하는 단계, ④ 모듈 설계대안별로 평가된 관리업무의 효율성 지수와 총사업비를 비교하여 RVI를 도출하는 단계로 구성하였다.

또한, 모델의 사용성을 검증하기 위해서 Module Plan-A는 Pipe Rack을 모듈로 적용하는 경우, Module Plan-B는 Steel Structure, Pipe Rack, Process Module을 모듈로 적용하는 경우로 설정하여 모듈 설계대안별로 관리업무의 중요

도, 편리성, 효율성 지수를 평가하였다. 그리고 설계대안별로 각각 산정된 기초사업비에 위험예비비를 합산하여 총 사업비를 추정하였다.

상기와 같은 과정으로 모델을 검증한 결과, 1개의 공중에 모듈을 적용한 Module Plan-A보다 3개의 공중에 모듈을 적용한 Module Plan-B가 관리업무의 효율성은 낮은 것으로 나타났지만, 기초사업비에서 현장에 투입인원 감소 등에 따라 간접비가 절감되어 종합적인 RVI는 높게 평가되었다.

따라서 본 연구에서 제시한 모델은 플랜트 건설사업에서 모듈러 공법을 적용하는 경우에 다수의 설계대안별로 도출된 객관적인 RVI에 따라 발주자와 계약자가 최적의 설계안을 선정하기 위한 의사결정 과정에 활용될 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시된 모델의 절차와 방법에 대한 적합성을 검증하는 과정에서 사례 1곳과 선행연구의 결과를 활용함에 따라 도출된 결과값을 모든 플랜트 건설사업에 일반화하여 적용하기에는 제약이 있다. 또한, 모듈러 공법을 적용함에 따른 공사기간의 단축 일수 등에 대해서는 업무의 효율성 지수를 도출하기 위한 편리성 평가항목을 반영하였기 때문에 모듈러 공법을 적용하는 경우와 적용하지 않는 경우에 대한 공사비의 차이 그리고 공사기간의 단축 효과를 정량적으로 분석한 후속 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

Reference

- Exxon Mobil (2013). Project Tender Document.
Kang, H.W., Kim, J.W., and Kim, Y.S. (2018). "Risk Assessment and Contingency Prediction considering Work Characteristics for Modular Plant Construction Projects." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, 19(5), pp. 81-89.

- Kim, J.W. (2017). "Scenario-based Risk Factor and Risk Cost Analysis Model for Modular Plant Construction." Thesis of M.S. The University of Chung-Ang.
Lee, W.B. (2021). "Development of Risk Assessment Model for Modular Plant Construction Projects Using Value Engineering." Thesis of M.S. The University of Chung-Ang.
Murtaza, M.B., Fisher, D.J., and Skibniewski, M.J. (1993). "Knowledge-based approach to modular construction decision support." *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(1), pp. 115-130.
Park, K.J. (2012). "Introduction of Module Construction Method for Overseas Plant Projects." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(1), pp. 21-24.
Park, C.Y., Kim, H.J., Won, J.W., Jang, W.S., and Han, S.H. (2016). "A Study for Selecting Modular Construction Method." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 17(4), pp. 12-19.

요약 : 본 연구의 목적은 플랜트 건설사업에서 모듈러 설계대안에 대한 위험기반의 평가지수를 도출하는 모델을 제안하는 것이다. 이에 따라 ① 기초사업비와 모듈을 적용하는 대상과 범위를 설정하는 단계, ② 설계, 구매, 제작, 운송, 시공업무에 대한 중요도, 편리성, 효율성 지수를 평가하는 단계, ③ 중요 위험사건의 영향에 따른 경제적 손실을 예방하기 위해서 필요한 예비비를 분석하여 총사업비를 추정하는 단계, ④ 모듈 설계대안별로 평가된 관리업무의 효율성 지수와 총사업비를 비교하여 RVI를 도출하는 단계로 구성하였다. 그리고 모델의 사용성을 검증하기 위해서 Module Plan-A는 Pipe Rack을 모듈로 적용하는 경우, Module Plan-B는 Steel Structure, Pipe Rack, Process Module을 모듈로 적용하는 경우로 설정하여 관리업무의 중요도, 편리성, 효율성 지수를 평가하고 위험예비비를 포함하여 총사업비를 추정하였다. 이와 같은 과정으로 모델을 검증한 결과, 1개의 공중에 모듈을 적용한 Module Plan-A보다 3개의 공중에 모듈을 적용한 Module Plan-B가 관리업무의 효율성은 낮은 것으로 나타났지만, 기초사업비에서 간접비가 절감되어 종합적인 RVI는 높게 평가되었다.

키워드 : 모듈러 플랜트, 모듈러 설계대안, 위험사건, 위험예비비, 위험기반의 평가지수