

돌관공사 시나리오 기반 공기-비용 최적화 모델 개발

이시현¹ · 이승현¹ · 손재호*

¹홍익대학교 건축공학과

Development of Time-Cost Trade-Off model Based on Emergency Construction Work Scenario

Lee, Sihyun¹, Lee, Seounghyun¹, Son, Jaeho*

¹School of Architectural Engineering, Hongik University

Abstract : Recently, the cost of construction projects has escalated due to a significant increase in size and complexity. Many construction projects have failed to meet their originally intended project deadline due to various factors such as weather, labor supply, equipment, procurement, accidents, etc. Consequently, emergency construction work scenario has to be implemented in order to shorten the duration and satisfy the original estimated schedule. However, many critical decisions in emergency scenario rely solely on the experience of a construction manager. Thus, this paper proposes TCTO optimization model to decide the most effective alternative out of various working scenarios which are generated by the combination of work group and work time. The developed TCTO model provides the optimum schedule that satisfies the practical constraints. Future research could involve the integration of resource leveling with the proposed model. This would make the model more versatile.

Keywords : TCTO, Optimization, Emergency Construction Work, Genetic Algorithm

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.1.1 연구의 배경

최근 건설공사가 초고층화, 복합화가 진행됨에 따라 공사 규모 및 투입비용이 증가하며, 이를 위한 공사기간 단축의 필요성이 더욱 강조되고 있다(Choi et al, 2011). 그러나 공사를 진행하면서 여러 요인(기후, 노무, 장비 및 자재조달, 안전사고 등)에 의해 예정된 공기 내에 공사를 완료할 수 없는 경우가 빈번히 발생하고 있는 실정이다(Choi 2003).

공사마감일 내에 공사를 완료하기 위한 방법으로 돌관공사가 주로 시행되고 있다. 그러나 실제 돌관공사 진행 시 공정 간 선후행 관계에 따른 작업조의 할당은 정확한 과거 데이터를 바탕으로 하는 것이 아닌 현장소장의 경험에 의존하고 있는 실정이다.

효율적인 공사를 위하여 액티비티별 공사비와 공사기간 사이의 관계를 고려하여 적절한 공정계획을 세우기 위해 많은 모델들이 개발되어 왔다. 하지만 기존 모델들은 실제 돌관공사에서 작업조 투입에 따른 노무비의 변화를 고려하지 않아 실제 돌관공사 시나리오를 공정계획에 반영하는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구는 현장적용 가능한 돌관공사 시나리오 기반 공기-비용 최적화 모델을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

건설 프로젝트의 각 작업과 활용 가능한 옵션들의 관계는 선형, 계단형, 곡선형, 이산형 등 다양한 형태로 나타날 수 있다(Hinze 2004).

본 연구는 프로젝트를 구성하는 액티비티의 여러 대안들 중 하나의 대안을 선택하면 직접비와 공사기간이 결정되는 이산형(Discrete) 공기-비용 절충 방안을 기반으로 하며, 액티비티마다 14개의 작업조 투입옵션 중 하나를 선택하여 최소공사비를 산정하는 돌관공사 시나리오를 설정하였다. 다음 Fig. 1은 이산형 공기-비용 절충방안에서의 대안별 공기 및 비용의 관계를 보여준다.

* Corresponding author: Son, Jaeho, School of Architectural Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Korea
E-mail: jhson@hongik.ac.kr
Received February 1, 2016; revised March 24, 2016
accepted March 31, 2016

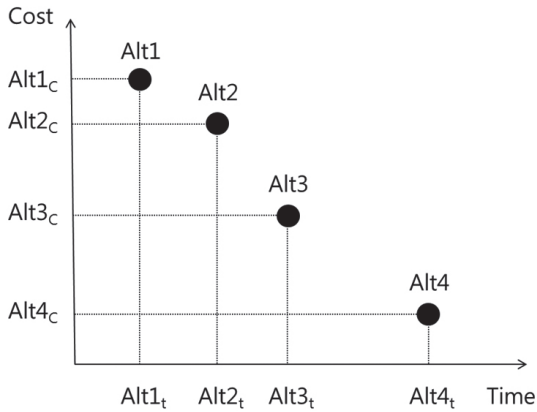


Fig. 1. Discrete time-cost trade off

연구방법으로 기존 공기-비용 절충 모델을 분석하고, 작업조 투입에 따라 달라지는 노무비 옵션을 정의한 뒤, 돌관공사 시나리오에 적용할 수 있도록 공기-비용 절충모델을 개선하였다. 국내공사와 해외공사에 적용할 수 있는 모델을 이용하여 돌관공사 시나리오 예시의 최적해를 구했다. 전체적인 연구의 흐름은 다음 Fig. 2와 같다.

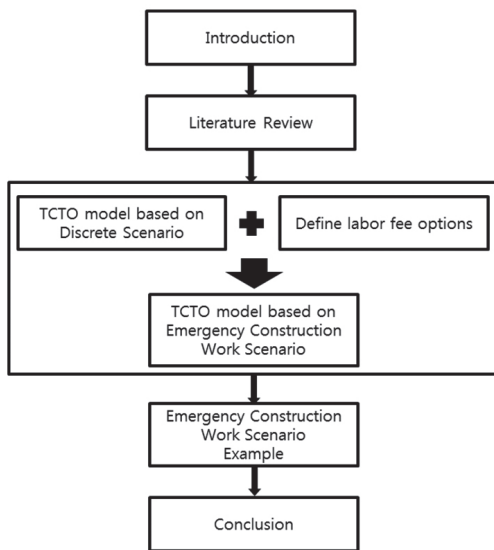


Fig. 2. Flow chart of study

2. 이론적 고찰

2.1 최적화 기법

최적화 기법은 주어진 제약조건하에서 달성하고자 하는 목표를 이루기 위한 의사결정 문제를 모형으로 정형화하고 이에 대한 해를 구하기 위한 방법으로, 선형계획법, 비선형계획법, 유전알고리즘, 동적계획법 등이 있다(Lee 2008).

이 중 선형계획법은 선택 가능한 대안 및 선호도를 선형의 등식 또는 부등식으로 나타내어 선형모형으로 공식화하면 빠르고 정확하게 최적해를 구할 수 있고(Lee 2000), 유전자 알

고리즘은 대규모 프로젝트에 적용이 가능하며 최적해에 대한 탐색능력이 뛰어나다는 장점이 있어(Shin et al, 2004) 공기-비용 최적화 연구에 많이 이용되었다. 이에 본 연구에서는 선형계획법과 유전자 알고리즘을 활용하여 돌관공사 시나리오 기반 공기-비용 최적화 모델을 개발하였다.

2.1.1 선형계획법

선형 계획법(Linear Programming)은 여러 제약조건을 만족시키면서 하나의 목적을 달성하기 위해 한정된 자원을 배분하는 수학적 계획법이다(Lee et al, 2010).

선형계획법을 작성하기 위해서는 의사결정의 크기를 결정하는 결정변수, 궁극적으로 구하고자 하는 최적해인 목적함수, 목적함수의 값의 범위를 제한해주는 제한조건을 설정해야 한다. 의사결정에 있어 그 크기를 결정하는 결정변수를 이용하여 1차 부등식 또는 등식 형태로 제시된 제약조건하에 의사결정의 해결을 위해 하나의 1차 함수 형태로 나타내는 목적함수의 최소/최대값을 구할 수 있다(Park 2013).

2.1.2 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm: GA)은 진화의 원리를 적용하여 최적화 문제를 해결하기 위한 탐색 알고리즘이다(Kim et al, 2015).

자연 진화의 법칙에 의해 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며 교배(crossover)와 돌연변이(mutation)의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고, 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되는 진화의 과정을 되풀이하여 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들로 형성된다(Park et al, 2003).

유전자 알고리즘은 이러한 생명체의 자연 진화 법칙을 일반 최적화문제에 적용한 방법이며(Kim 1996), 매개변수(집단 크기, 교배확률, 돌연변이확률, 정지조건)를 적절하게 조정하여 해의 탐색이 원하는 방향으로 이루어져 최적 해를 얻을 수 있다.

2.2 선행연구 분석

공기-비용 절충관계 문제에 대한 국내 연구들로 Suh et al. (1992)은 '정상가용자원수준'과 '추가자원동원수준'을 고려한 시간-비용 상관관계를 통해 더 실제적인 최적공기 산정방법을 제시하였다. Roh et al.(2006)은 초고층 마감 공정을 대상으로 노무비옵션이 적용된 탭트 공정관리기법을 활용한 공기-비용 절충모델을 제시하였다. Kang et al.(2007)은 공정별 비용, 공기의 확률분포를 적용하여 건설현장 실정을 고려한 확률적 비용-공기 최적화 모델을 제시하였다. Maeng(2011)은 건설 프로젝트에 투입되는 장비의 최적화 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하여 장비의 운영효율성을

극대화 시킬 수 있는 데이터를 바탕으로 시간-비용 상관관계를 고려한 공정관리 최적화 의사결정 모델을 제시하였다. Kang(2014)은 단위작업별 대안 간 상호관계를 고려하여 최적해를 구할 수 있는 모델을 제시하였다.

국의 연구는 Feng et al.(1997)은 CPM 기법과 유전자 알고리즘을 통합하여 시간-비용 상관관계를 고려한 최적해를 찾는 시스템을 개발하였고, Leu and Yang(1999)은 프로젝트 자원의 한정과 평준화를 고려하여 현실적용이 가능한 시간-비용 최적화 모델을 제안하였다. Hegazy(1999)는 공기단축에 따른 인센티브와 공기연장에 따른 손해를 고려하여 정해진 마감기한 내에 최소의 비용으로 프로젝트를 조달할 수 있는 공법조합을 탐색하는 시스템을 구현하였다. Chen and Weng(2008)은 건설 프로젝트의 자원투입, 일정조정 등의 조건들을 고려할 수 있는 공기-비용 최적화 모델을 제시하였다. Faregh et al.(2014)는 퍼지이론을 기반으로 하여 공기기간, 공사비 및 자원제약을 고려한 최적화 모델을 제시하였다. Son et al.(2013)은 액티비티의 4가지 선 후행 관계를 공식화한 이산형 공기-비용 최적화 모델에 대해 연구하였다.

이와 같이 기존 연구들을 살펴본 결과 공기-비용 최적화 모델의 개발은 지속적으로 이루어져 왔으며 현실적인 요소들을 반영하기 위한 연구들이 진행되었으나 작업조 투입에 따른 노무비의 변화를 고려한 연구는 미비하였다. 따라서 본 연구에서는 돌관공사 시 투입되는 인원에 대한 노무비용을 고려한 모델을 개발하여 효율적인 노무비 관리의 가이드라인이 될 수 있는 최적화 공정계획 모델을 제시하고자 한다.

3. 돌관공사 시나리오 기반 최적화 모델 개발

3.1 돌관공사 시나리오

전형적인 프로젝트 비용 구성 요소는 재료비, 장비비, 노무비이다. 재료비와 장비비는 시장 가격에 의해 결정되므로 프로젝트 관리의 영향이 적으나, 노무비는 불확실성에 따른 위험이 큰 구성 요소이기 때문에 노무비의 관리는 프로젝트의 성공을 결정하는데 매우 중요하다(Hanna et al, 2005).

따라서 본 연구에서는 돌관공사 시 불확실성이 큰 노무비를 고려한 모델을 제시하고자 한다. 모델의 돌관공사 시나리오 오는 다음의 세 가지로 분류할 수 있다(Roh et al, 2006).

1. 평면적 작업조 증가
2. 시간적 작업조 증가
3. 작업원의 연장근무

평면적 작업조의 증가는 동시 투입되는 작업조 인원의 수를 N명, 2N명으로 증가시키는 것이며, 시간적 작업조의 증가는 1일 교대 작업조의 수를 1개조에서 3개조까지 증가, 작업원의 연장근무는 1일 근무시간을 8시간에서 10시간, 12시간으로 증가시키는 것을 의미한다.

돌관공사를 위한 야간작업은 노무비의 할증이 붙게 되며, 작업의 능률저하도 동반한다. 따라서 1일 8시간외의 초과근무 및 야간근무는 노무비의 1.5배를 적용하고¹⁾, 초과근무 및 야간작업 시 25%의 능률저하를 적용한다.²⁾

공기관련계수와 비용관련계수는 다음 수식 (1), (2)를 이용하여 구할 수 있으며, 공기관련계수를 각 액티비티의 공기기간에 나누고 비용관련계수를 공사비에 곱하면 돌관공사 수행 시 해당 액티비티의 공기와 공사비를 산출할 수 있다.

$$C_d = A(1 + X \div 8 \times 0.75) \quad (1)$$

$$C_c = A(1 + X \div 8 \times 1.5) \quad (2)$$

C_d = 공기관련계수
 C_c = 비용관련계수
 A = 4인기준 작업조의 수
 X = 초과 및 야간 작업시간

돌관공사 옵션별 노무비의 할증 및 능률저하를 반영한 공기 및 비용관련계수는 Table 1과 같으며, 액티비티별 14개의 노무비 옵션이 적용되었다.

Table 1. Duration and Cost Factors For Each Option of Emergency Construction Work

Option	Number of labors	Work time	Number of labor teams	Factor of duration	Factor of cost
1	N	8	1	1	1
2	N	8	2	1.75	2.5
3	N	8	3	2.5	4
4	N	10	1	1.188	1.375
5	N	10	2	2.125	3.25
6	N	12	1	1.375	1.75
7	N	12	2	2.5	4
8	2N	8	1	2	2
9	2N	8	2	3.5	5
10	2N	8	3	5	8
11	2N	10	1	2.375	2.75
12	2N	10	2	4.25	6.5
13	2N	12	1	2.75	3.5
14	2N	12	2	5	8

3.2 네트워크 Example

돌관공사 시나리오 기반 최적화 모델의 설명을 위하여 Fig. 3과 같은 네트워크 공정표를 이용하고자 한다. 총 9개의 액티비티로 이루어져 있으며, 액티비티별 공사기간과 직접비는 Table 2와 같다. 간접비는 1,000,000원/일, 계약된 공사완료

1) 근로기준법 제 56조. 연장, 야간 및 휴일 근로 사용자는 연장근로와 야간근로 또는 휴일근로에 대하여는 통상임금의 100분의 50이상을 가산하여 지급하여야 한다.
 2) 표준품셈 1-16 품의할증. 공정계획에 의한 공기 산출결과 정상작업(정상공기)으로는 불가능하여 야간작업을 할 경우나 공사성질상 부득이 야간작업을 하여야 할 경우에는 품을 25%까지 가산한다.

시점은 30일, 그 이후는 2,000,000원/일 의 지체보상금이 발생한다고 가정하였다. 최적화 수행 전 총 공사기간은 61일이며, 공사비용은 직접비와 간접비, 초과된 31일의 지체보상금을 합한 224,120,000원 이다.

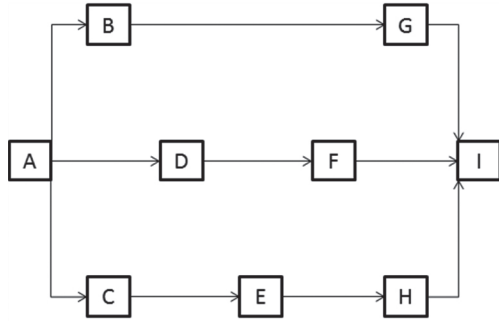


Fig. 3. Network Diagram

Table 2. Model Information

Activity	Duration(day)	Cost(10,000won)
A	8	748
B	13	1,648
C	10	1,248
D	7	948
E	8	708
F	12	1,248
G	14	868
H	10	1,248
I	7	1,448

3.3 Spread Sheet를 활용한 최적화모델

3.3.1 국내공사 적용모델

국내공사 적용모델의 목적함수인 총공사비는 직접비와 간접비의 합으로 이루어져 있으며, 노무자 1명을 1일 8시간 동안 고용하는 노무비를 80,000원/일 로 설정하였으며, 각 옵션에 따른 노무비는 비용관계수를 통해 계산하여 직접비에 포함시켰다. 간접비는 1,000,000원/일 로 가정하였으며 총 공사비는 다음 수식 (3)과 같다. 최적화모델의 액티비티 간 선후행 관계를 위한 수식은 다음 수식 (5)와 같다. 수식 (4)와 수식 (6)은 14가지의 대안 중 하나의 대안을 선택하기 위한 수식이다.

$$Min[\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m DC_{ik} \times X_{ik} + IDC \times TD] \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ik} = 1 \quad , \quad X_{ik} = \{0, 1\} \quad (4)$$

DC = 직접비
 IDC = 간접비
 TD = 총 공사기간
 n = 프로젝트 액티비티의 개수
 m = 액티비티 i의 대안의 수
 X_{ik} = 액티비티 i의 대안중 하나를 선택하는 이진수

$$ES_j \geq ES_i + \sum_{k=1}^{m_i} (D_{ik} \times X_{ik}) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{m_i} X_{ik} = 1 \quad , \quad X_{ik} = \{0, 1\} \quad (6)$$

ES_j = 후행 액티비티 j의 가장빠른 작업시작시간
 ES_i = 선행 액티비티 i의 가장빠른 작업시작시간
 D_{ik} = 선행 액티비티 i 선택대안의 공기
 X_{ik} = 액티비티 i의 대안중 하나를 선택하는 이진수

국내공사 적용모델의 구성은 Fig. 4와 같다. 액티비티의 평상시 비용과 기간을 입력하면 14개 대안들의 비용과 기간이 각 대안별 공기-비용 계수를 이용하여 자동으로 계산되어 입력되며, 이를 바탕으로 목적함수인 최소공사비를 위한 대안들이 선택되도록 모델을 구성하였다. 열 A (Activity), B (Option), C (Duration), D (Labor Cost), E (Cost)에는 Fig. 3과 Table 2를 바탕으로 각 액티비티의 정보를 입력하였고, 열 H (Selected Duration), I (Selected Cost), J (Selected Option)에는 선택된 대안의 정보가 나타난다. P3:P13 (From i)은 선행작업, Q3:Q13 (To j)은 후행작업을 나타내며, R3:R13 ($X_j - X_i$)은 후행작업 j와 선행작업 i의 ES의 차이, S3:S13 (Ti)은 선행작업 i의 공사기간을 입력하였다. M4:M12(소요시간)는 액티비티별 선택된 대안의 공사기간을 나타낸다. O17 (Total Duration)은 총 공사기간이며, O18 (Indirect Cost)는 일일간접비이다. O16 (Total Cost)는 프로젝트의 총공사비이며 수식 (3)을 입력하였다. 줄어든 것을 알 수 있었다.

다음 Fig. 5는 선형최적화 프로그램의 설정화면이다. 모델의 목적함수는 O16가 최소가 되는 값을 찾도록 입력하였다. 변수는 선택된 액티비티를 나타내는 열F (Selected Activity)와 각 액티비티의 ES를 나타내는 N4:N12를 입력하였다. 제한조건으로는 변수인 각 액티비티의 선택여부의 합인 열G (Sum)가 1이 되도록 설정하였고, 열F는 이진수, N4:N12는 정수로 설정하였다. 그리고 선후행 관계에 따라 M4:M12(선행 액티비티의 소요시간)와 N4:N12(액티비티의 ES)의 합이 N4:N12(후행 액티비티의 ES) 이상으로 설정하고, R4:R13은 S4:S13 이상으로 설정하여 액티비티 간 선후행 관계를 고려할 수 있도록 하였다. 돌관공사수행 후 총 공사기간인 N18은 마지막 액티비티 I의 소요시간인 M12과 ES인 N12의 합으로 나타내었으며, 지체보상금이 발생하지 않도록 30일 이하로 설정하였다.

국내공사 적용모델의 최적해 산출 결과는 다음 Table 3와 같으며 선택대안의 정보는 다음 Table 4와 같다. 공사기간은 61일에서 22일로 39일 줄일 수 있었으며, 공사비용은 224,120,000원에서 132,720,000원으로 91,400,000원이 줄어든 것을 알 수 있었다.

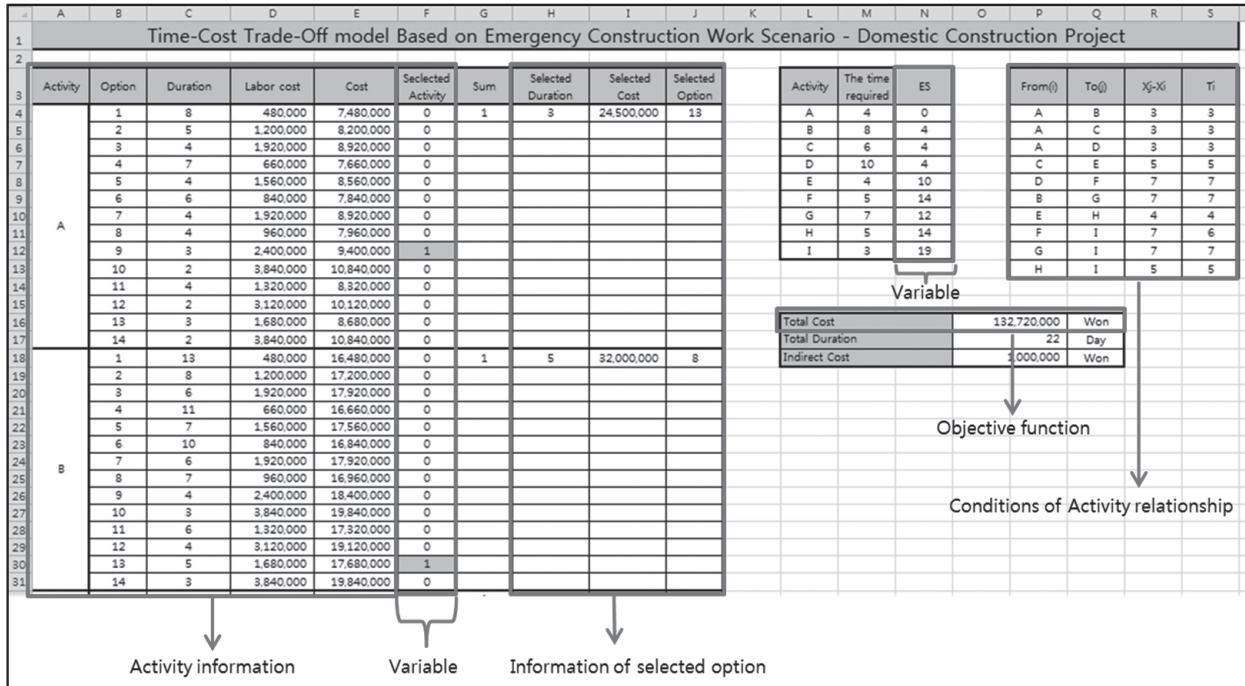


Fig. 4. Optimization Model for Domestic Emergency Construction Work

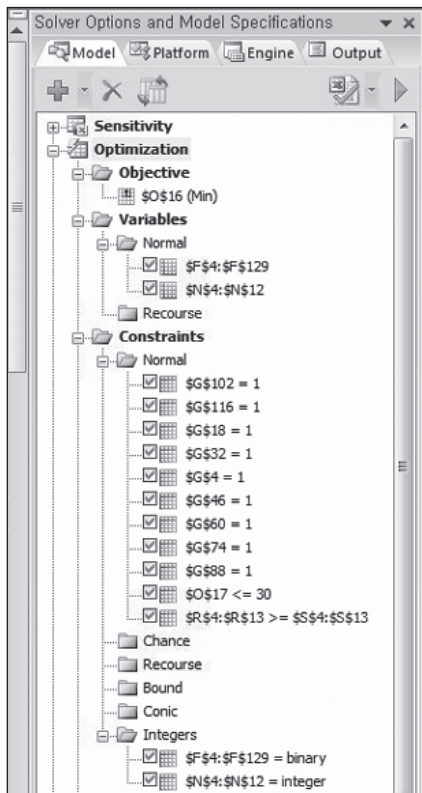


Fig. 5. Set-up Screen of Linear Optimization Program

3.3.2 해외공사 적용모델

국내공사의 경우 일용직근로자를 수급할 수 있는 인력시장이 잘 형성되어 있으므로 일일가용인원의 수에 대해 탄력

적으로 고려할 수 있다. 하지만 해외공사의 경우 현지에 인력시장이 활성화 되어 있지 않아 인력고용을 탄력적으로 운용하기 수월하지 않다. 따라서 국내에서 조달하는 인원에 대한 Setup비용(비자, 기타 경제비용 등)과 돌관공사 시 추가적으로 현지에서 필요한 일일가용인원에 대한 고려가 필요하다. 따라서 최소공사비가 산출되는 돌관공사 완료시점의 국내조달인원에 대한 Setup비용과 현지에서의 인력조달비용을 고려한 최소공사비를 찾는 것이 해외공사 적용모델의 목표이며 이는 수식 (7)과 같다. 수식 (8)은 14가지의 대안 중 하나의 대안을 선택하기 위한 수식이다.

Table 3. Comparative Analysis between Results of Existing and Optimization Model

Emergency construction work	Total duration(day)	Selected option	Total cost (10,000won)
Before	61		22,412
After	22	A9, B13, C13, D1, E9, F8, G13, H8, I13	13,272

Table 4. Information of Alternatives for each Activity

Activity	Selected option	Number of labors	Work time	Number of labor teams
A	9	2N	8	2
B	13	2N	12	1
C	13	2N	12	1
D	1	N	8	1
E	9	2N	8	2
F	8	2N	8	1
G	13	2N	12	1
H	8	2N	8	1
I	13	2N	12	1

$$\text{Min}[\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m DC_{ik} \times X_{ik} + IDC \times TD] \quad (7)$$

$$+ DHR \times SC + \sum_{d=1}^{TD} FHR_d \times FLC] \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ik} = 1, \quad X_{ik} = \{0, 1\}$$

- DC = 직접비
- IDC = 간접비
- TD = 총 공사기간
- n = 프로젝트 액티비티의 개수
- m = 액티비티 i의 대안 수
- X_{ik} = 액티비티 i의 대안 중 하나를 선택하는 이진수
- DHR = 국내조달인원 (Domestic Human Resource)
- SC = 셋업비용 (Setup Cost)
- FHR = 현지조달인원 (Foreign Human Resource)
- d = 공사일정
- FLC = 현지조달비용 (Foreign Labor Cost)

해외공사 적용모델의 구성은 다음 Fig. 6와 같으며 Fig. 7은 선택대안을 바탕으로 작성되는 스케줄표이다. 기본구성은 국내공사 적용모델과 같으며 해외공사 상황을 반영하기 위해 국내조달인원, Setup Cost, 현지조달인원합계, 현지조달비

용, 일별현지조달인건비합계가 추가 되었다. O21은 돌관공사 수행기간동안 필요한 현지조달인원의 합계를 의미하며, O22는 현지에서 조달하는 인력의 1일 인건비이다. 해외공사는 인력시장의 비활성화에 따른 인력확보의 어려움 때문에 국내 1일 인건비의 2.5배인 200,000원/일로 가정하였다. 변수로 해외공사 수행 시 국내에서 조달하는 총인원의 숫자인 O19(국내조달인원)을 추가하였고, O20(Setup Cost)에는 국내조달인원에 대한 Setup 비용을 1,500,000원/인 으로 가정하여 입력하였다. Fig. 7의 B2:AE10에는 선택옵션별 필요인원이, B11:AE11은 일별필요인원이 입력된다. 이를 바탕으로 변수인 국내조달인원이 계산되며, 일별필요인원과 국내조달인원의 차인 현지조달인원은 B12:AE12에 입력된다.

해외공사 적용모델의 경우 일별로 현지조달인원을 구하고 그에 따라 산출되는 현지조달인건비 합계를 이용하여 최소공사비를 구해야 하므로 선형최적화가 불가능하다. 따라서 유전자알고리즘 소프트웨어를 활용하여 최적화를 수행하였다. 다음 Fig. 8는 유전자알고리즘 소프트웨어의 설정화면이다. 목적함수와 제한조건은 국내공사 적용모델과 같으며, O19(국내조달인원)의 수를 변수로 넣었다.

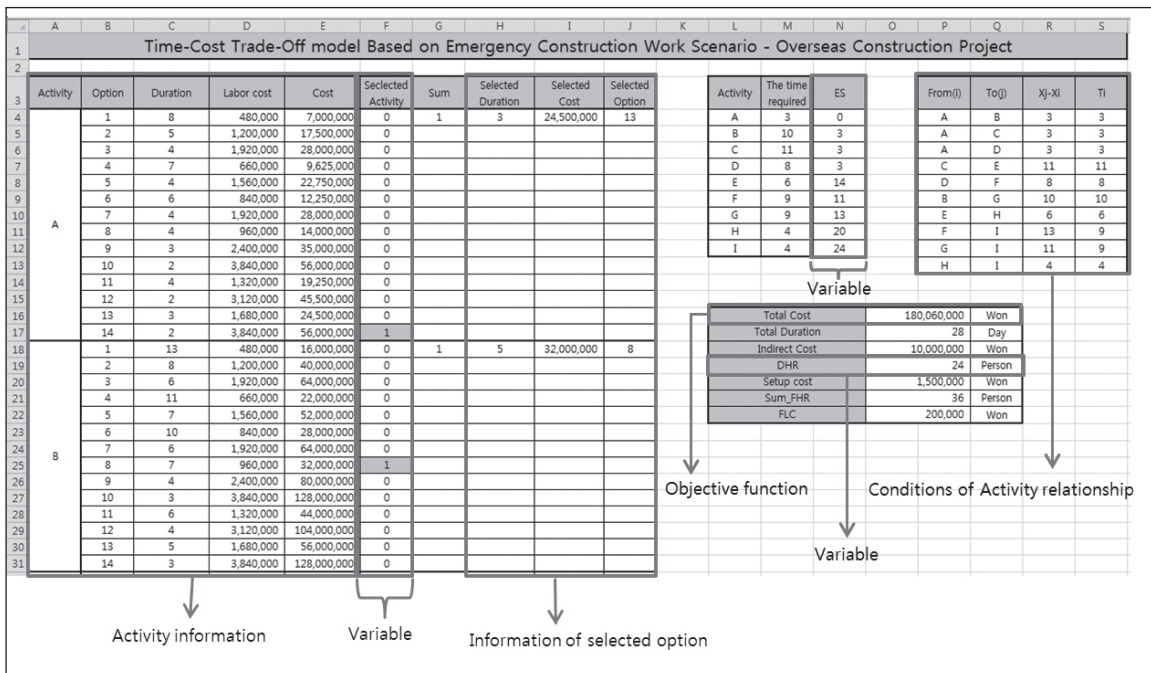


Fig. 6. Optimization Model for Overseas Emergency Construction Work

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2	A	24	24	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	B	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	C	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	D	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
8	G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Necessary resource	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	30	30	30	30	30	24	24	12	12	12	12	12	12	0	0
12	Domestic human resource	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Fig. 7. Schedule of Optimization Model for Overseas Emergency Construction Work

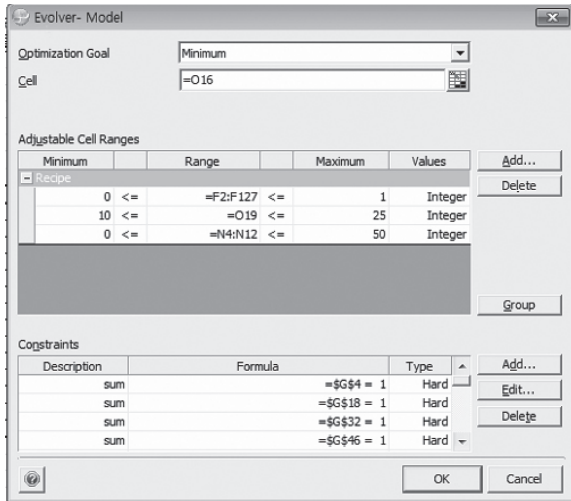


Fig. 8. Set-up Screen of Genetic Algorithm Program

유전자 알고리즘의 특성상 초기선택 값에 따라 최소값의 근사치가 다르게 나오게 된다. 본 모델에서 초기선택 값은 각 액티비티의 선택대안이다. 따라서 F열의 선택대안을 1부터 14까지 순차적으로 선택하여 최적화를 수행한 결과는 다음 Table 5와 같다. 초기 선택대안을 8로 설정하였을 때 가장 작은 최적해인 180,060,000원이 산출 되었다. 해외공사 적용모델의 최적해 산출 결과 공사기간은 61일에서 28일로 33일 줄일 수 있었으며, 선택대안의 정보는 다음 Table 6과 같다. 공사비용은 224,120,000원에서 180,060,000원으로 44,060,000원이 줄어든 것을 알 수 있었다.

Table 5. Result of each Duration on Overseas Emergency Construction Work Model and Comparative Results between Existing and Optimization Model

Initial selected option	Total cost (10,000won)	Total duration(day)	Domestic human resource
1	19,208	30	24
2	22,588	28	22
3	20,208	29	25
4	19,270	29	21
5	19,902	30	25
6	18,868	29	24
7	18,088	29	25
8	18,006	28	24
9	18,592	28	25
10	19,252	30	25
11	18,586	29	24
12	18,254	30	24
13	18,434	30	24
14	18,084	28	24

Emergency construction work	Total duration(day)	Selected option	Total cost (10,000won)
Before	61		22,412
After	28	A14, B8, C6, D6, E11, F4, G8, H13, I8	18,006

Table 6. Information of Alternatives for each Activity

Activity	Selected option	Number of labors	Work time	Number of labor teams
A	14	2N	12	2
B	8	2N	8	1
C	6	N	12	1
D	6	N	12	1
E	11	2N	10	1
F	4	N	10	1
G	8	2N	8	1
H	13	2N	12	1
I	8	2N	8	1

3.4 비교 및 결과분석

국내공사 적용모델과 해외공사 적용모델의 수행 결과 국내공사 적용모델의 최적해는 132,720,000원, 해외공사 적용모델의 최적해는 180,060,000원 이다. 두 모델의 최적해를 비교하면 해외공사 적용모델의 총공사비가 47,340,000원 더 많은 것을 알 수 있다. 그 이유로 해외공사의 경우 국내조달 인원의 Setup비용과 현지조달인원에 대한 인건비가 총공사비에 추가되기 때문이다. 따라서 해외공사 적용모델을 활용하면 최적화를 통해 돌관공사 시 불확실한 요소들을 포함한 최소공사비를 구할 수 있으며, 이는 돌관공사 수행 시 의사결정에 도움이 될 것으로 사료된다.

4. 민감도 분석을 이용한 모델 검증

4.1 국내공사 모델

다음 Table 7은 국내공사 적용모델의 돌관공사 공사기간별로 최적해를 구하여 비교한 것이다. 이를 위해 국내공사 모델의 공사기간을 21일부터 30일까지 1일단위로 설정하여 총공사비를 산출하였다. 그 결과 국내공사 모델의 최적해는 공사기간이 22일 일 때 총공사비가 132,720,000원임을 확인할 수 있다.

Table 7. Comparative Results of Cost by Emergency Construction Work Duration on Domestic Model

Total duration	Total cost (10,000won)	Selected option
21	13,298	A9, B9, C13, D8, E9, F4, G11, H13, I13
22	13,272	A9, B13, C13, D1, E9, F8, G13, H8, I13
23	13,300	A9, B9, C13, D8, E9, F1, G8, H8, I8
24	13,364	A9, B9, C13, D8, E11, F1, G8, H8, I13
25	13,308	A9, B11, C13, D1, E8, F6, G8, H8, I13
26	13,318	A9, B8, C11, D4, E8, F1, G8, H8, I13
27	13,346	A9, B8, C8, D4, E11, F1, G8, H8, I8
28	13,392	A9, B8, C8, D1, E8, F1, G8, H8, I8
29	13,438	A11, B8, C8, D4, E11, F1, G8, H8, I8
30	13,484	A11, B8, C8, D1, E8, F1, G8, H8, I8

4.2 해외공사 모델

해외공사 모델은 변수인 공사기간을 30일 이하로 설정하여 최적화를 수행하였으며 최적해가 산출될 때의 공사기간은 28일 이었다. 산출된 최적해의 검증을 위하여 변수였던 공사기간을 21일부터 30일까지 1일단위로 확정된 공사기간으로 설정하였고, 총 10번의 최적화를 수행하여 최적해인 총공사비를 산출하였다. 다음 Table 8은 1일단위로 설정된 공사기간별로 산출된 해외공사 적용모델의 총공사비를 비교한 표이다. 비교결과, 해외공사 모델의 최적해는 공사기간이 28일 일 때 총공사비가 180,060,000원 임을 검증하였다.

Table 8. Comparative Results of Cost by Emergency Construction Work Duration on Overseas Model

Total duration	Total cost (10,000won)	Selected option
21	20,768	A14, B13, C8, D13, E9, F13, G7, H13, I14
22	20,604	A14, B13, C8, D13, E14, F13, G8, H8, I14
23	20,002	A9, B13, C8, D7, E9, F13, G7, H13, I13
24	20,270	A7, B13, C8, D7, E9, F13, G7, H13, I14
25	20,104	A14, B13, C8, D13, E8, F8, G8, H8, I14
26	19,854	A8, B13, C12, D6, E7, F6, G7, H13, I13
27	19,218	A14, B13, C2, D6, E2, F6, G7, H13, I13
28	18,006	A14, B8, C6, D6, E11, F4, G8, H13, I8
29	18,586	A9, B2, C13, D13, E6, F4, G8, H13, I8
30	19,208	A9, B1, C8, D1, E5, F4, G10, H4, I14

4. 결론

본 연구의 목표는 건설프로젝트의 수행 중 발생하는 돌관공사 상황에서 효율적인 인력투입을 결정할 수 있는 공기-비용 최적화 모델을 개발하는 것이다. 이를 위해 돌관공사 시 인력투입에 따른 노무비의 변화, 국내 및 해외공사 시 인력수급에 관한 사항을 조사 및 반영하고 기존에 연구되었던 TCIO모델을 기반으로 선형계획법, 유전자 알고리즘을 활용하여 돌관공사 시나리오 기반 공기-비용 최적화 모델을 개발하였으며, 본 연구를 통해 개발된 모델은 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

첫째, 작업조의 투입에 따른 노무비 옵션을 고려하였다. 둘째, 국내공사와 달리 인력수급에 어려움이 있는 해외공사 시에 적용할 수 있는 사항들을 조사하고 고려사항으로 추가하였다. 셋째, 손쉽게 데이터를 입력하고 최적해를 얻을 수 있도록 설계하고, 스프레드시트로 구현하여 활용성을 높였다.

본 연구의 돌관공사 시나리오 기반 공기-비용 최적화 모델은 손쉽게 데이터를 입력하고 최적해를 얻음으로써, 현장소장의 경험에 의존했던 작업조의 투입을 좀 더 효율적으로 수행할 수 있는 가이드라인이 될 수 있다고 판단된다. 또한 불확실한 요소인 공사인건비와 Setup비용, 해외 현지조달 상황

에 대한 정확한 정보를 제공받는다면 돌관공사 시나리오 기반 공기-비용 최적화모델을 통해 건설기업의 이익창출에 도움이 될 것으로 사료된다.

추후 돌관공사 시 투입되는 장비에 대한 비용을 추가적으로 고려하는 연구가 추천된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (NRF-2014R1A1A4A01008951)

References

Chen, P., and Weng, H. (2008). "A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling." *Automation in construction*, 18(4), pp. 485-498.

Choi, M., Park, M., Lee, H., and Lee, K. (2011). "Resource Optimization for Preventing Time-overrun in a High-rise Building Project Using Layer Construction Method." *Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 31(2), pp. 383-384.

Choi, M. K. (2003). "A Study on the methods to reduce construction time by analysing cost components of the concrete works in the apartments." MS thesis, Honam Univ., Gwang ju, Korea.

Feng, C., Liu, L., and Burns C. (1997). "Using Genetic Algorithms To Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems.", *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 11(3), pp. 184-189.

Faregh, N., Ketabi, S., and Ghandehari, M.. (2014). "Project scheduling by FGP to Time-Cost-Quality trade off: construction case study", *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 4(3), pp. 53-59.

Hanna, C., Awad, S., and Kenneth, T. (2005). "Impact of Extended Overtime on Construction Labor Productivity" *Journal of Civil Engineering and Management*, ASCE, 131(6), pp. 734-739.

Hegazy, T. (1999). "Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms.", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26, pp. 685-697.

Hinze, J. (2004). *Construction planning and scheduling*.

- 2nd ed, Prentice Hall, Pearson, pp. 169–191
- Kang, B., Park, S., Han, S., and Kim, H. (2007). “Probabilistic Time–Cost Optimization for Controlling Construction Projects.” *Proceeding of Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 3179–3183.
- Kang, N. U. (2014). “Development of optimal construction planning method considering the sequence between alternatives of activities.”, MS thesis, Hongik Univ., Sejong, Korea.
- Kim, K. H. (1996). “Gentic Algorithm.”, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 32(2), pp. 28–35.
- Kim, M., Park, Y., Lee, H., Lee, J., and Lee, K. (2015). “Development of Manufacturing Planning for Multi Modular Construction Project based on Genetic–Algorithm”, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 16(5), pp. 54–64.
- Lee, H., Chung, K., and Choi, K. (2010). “Test Input Sequence Generation Strategy for Timing Diagram using Linear Programming”, *Journal of Korea Information Processing Society*, 17–D(5), pp. 337–346.
- Lee, H. B. (2008). “Excel Management science”, Muyokpublisher, Seoul, Korea.
- Lee, J. H. (2000). “A Study on Optimal photolithography processes in the fabrication scheduling using Linear Programming.” MS thesis, Yonsei Univ., Seoul, Korea.
- Leu, S., and Yang, C. (1999). “GA–based fuzzy optimal model for construction scheduling.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(5), pp. 420–427.
- Maeng, J. C. (2011). “Development of progress management decision making model considering time–cost trade off.”, MS thesis, Korea Univ., Seoul, Korea.
- Park, S. H. (2013). “A Study on Optimal Design of Multi–Objective Rainwater Detention System Linear Programming.” MS thesis, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Park, U., Cho, S., and Kang, K. (2003). “A Study on Rebar Detailing Optimization Using Genetic Algorithm.” *Journal of Architectural Institute of Korea*, 19(10), pp. 125–132.
- Roh, S., Lee, H., Park, M., and Ryu, H. (2006). “Scheduling Method by Using Genetic Algorithms to Solve Time–Cost Trade–Off Problems (Focused on High–rise Building Finishing Work).”, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 22(6), pp. 157–164.
- Shin, Y., Kim, J., Seo, D., and Kang, Kyung. (2004). “A Study on the Model for Time–Cost Trade–off by Using Genetic Algorithms.” *Journal of Architectural Institute of Korea*, 20(8), pp. 91–98.
- Son, J., Hong T., and Lee, S. (2013). “A mixed (continuous+discrete) time–cost trade–off model considering four different relationships with lag time.” *Journal of Civil Engineering*, KSCE, 17(2), pp. 281–291.
- Suh, S., Park, T., Lee, C., and Kim, M. (1992). “A Study on the Estimation of Optimum duration in view of Cost in Building Construction”, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 8(1), pp. 209–214.

요약 : 최근 건설공사의 규모와 복잡성이 현저하게 증가함에 따라 건설비용이 상승하게 되었다. 많은 건설공사가 날씨, 노동력 공급, 장비 구매, 사고 등과 같은 다양한 요소들로 인하여 당초 계획했던 공사기일 내에 완공되지 못하고 있다. 계획된 시간 내에 공사를 완공하기 위하여 돌관공사를 시행하여야 한다. 하지만 돌관공사를 위한 결정들이 현장 소장들의 경험에만 의지하고 있는 실정이다. 그러므로 이 논문은 작업조의 투입과 작업시간의 조합으로 생길 수 있는 다양한 돌관공사 시나리오 중 최적의 대안을 선정할 수 있는 TCOT 모델에 제안하고자 한다. 개발된 모델은 실무적인 제약조건을 만족시키는 최적의 공정계획을 제공할 수 있다. 더 나아가서 제안된 모델에 자원평준기능을 포함하게 되면 보다 실용적인 모델이 될 수 있을 것으로 예상된다.

키워드 : 공기-비용 상관관계, 최적화, 돌관공사, 유전자 알고리즘
