서비스경영학회지 제22권 제3호 2021년 09월 DOI: 10.15706/jksms.2021.22.3.012

자원 제약을 고려한 일정 문제
– 활동 진행중 재작업이 가능한 경우 –

이 두 희(제1저자)
숭실대학교 일반대학원 프로젝트경영학과 (박사과정)

백 인 섭(공동저자)
숭실대학교 경영학부 (박사)

김 승 겸(공동저자)
숭실대학교 일반대학원 프로젝트경영학과 (박사과정)

안 태 호(교신저자)
숭실대학교 경영학부 (교수)

Resource Constrained Project Scheduling Problem
– Case with Possible Rework while Activity –

Lee, Doo Hee(First Author)
Graduate School of Project Management, Soongsil University (Doctoral Student)

Paek, In Soub(Co Author)
Soongsil University (Ph.D.)

Kim, Sung Kyum(Co Author)
Graduate School of Project Management, Soongsil University (Doctoral Student)

Ahn, Tae ho(Corresponding Author)
College of Business Administration, Soongsil University (Professor)

Abstract

Activity requires to be performed again given the performance of project. This repetition of work is called rework. It is previously considered to occur upon completion of activity; however, due to the fact that changes in requirements in the project cause the occurrence time of rework vary from the beginning to the end. Thus, model and algorism to apply for the activity need to be developed.

In this research, among SRCPSP (Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem), statistical model of RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem) typical project scheduling problem, the method which when the period of activity acts as probability variable, expected value and multiplier of the unexpected value is used for estimation. Along with the method, a mathematical model, which shows rework can occur at arbitrary point, is developed and has proven its validity through simulated tests with applicable algorism. This research is significant because of extended experimental period of activity from the beginning to the end along with the distinguished means of the mathematical model which the period of rework is estimated via the expected value and multiplier of the value.

Keywords : Project Scheduling, Project Uncertainty, Project Duration

접수일(2021년 08월 08일), 수정일(2021년 09월 07일), 게재확정일(2021년 09월 10일)

I. 서 론

일반적으로 프로젝트에서 일정은 규모와 복잡도가 증가할수록 계획된 일정과 실행된 일정의 차이를 줄이기 어렵다. 이는 프로젝트가 가진 불확정적 요소를 일정에 적용하지 않거나, 정확히 적용하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 프로젝트 일정 문제에서도 확정적인 요소만으로 최적의 일정을 탐색하는 확정적 모델의 경우, 요소들에 대한 값이 확정적이기 때문에 실제 프로젝트의 `불확정성을 적용하기 어려우므로 이를 해결

하기 위해서는 확률적 모델을 사용하여야 한다. 일반적인 프로젝트에서의 일정은 정확하고 공식적인 계획을 필요로 한다. 프로젝트 일정문제의 대표적 확정형 모델인 RCPSP(Resource Constrained Project Scheduling Problem)의 경우 자원의 제약 하에서 활동의 수행방법과 시작 시점의 조합 중 최적의 조합을 찾는 것이다. 이는 요소들이 확정적일 경우 예측되는 환경에서 수행되는 활동들의 수행방법과 시작 시점에 대한 확정으로 볼 수 있다. 그러나 RCPSP에 불확실성을 적용한 확률적 모델인 SRCPSP(Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem)의 경우 확률적 요소를 확률변수로 적용하여야 하며, 이는 계획 시점에서 추정되는 대부분의 확률변수 추정치가 실제 일정과 다름을 의미한다. 예를 들어 활동 수행 기간이 10이고 수행 기간 10으로 수행될 확률이 80%, 수행 기간 20으로 수행될 확률이 20%라 하면, 계획 시점에서의 활동 기간에 대한 확률변수의 추정치를 기댓값으로 계산할 경우 $10 \times 0.8 + 20 \times 0.2 = 12$가 된다. 그러나 실제 프로젝트에서 그 활동이 가지는 값은 10 또는 20의 값을 가지게 되며, 수행 기간이 확률적인 값을 가지는 활동은 프로젝트를 수행해야만 그 기간을 정확히 알 수 있다. 따라서, 활동의 수행기간이 확률적일 때 기댓값으로 추정하는 방법을 사용하여 그 추정치로 수행방법과 시작시점의 조합을 구하는 것은 실제 진행되는 활동의 기간과 다른 기간으로 일정을 계획하게 된다. 문제는 활동의 기간이 결정되는 시점이 일정의 계획시점이 아닌 프로젝트 진행중에 결정된다는 부분이며, 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 사용하여 가상으로 프로젝트의 일정을 작성하고 활동의 수행기간이 프로젝트 진행 중에 결정되는 방법을 사용한다.

Johansen et al.(2014)는 불확실성이 있는 프로젝트 비용 추정에 있어 불확실성의 해결에 따라 그 추정치가 더욱 정확해지며, 비용 추정치와 수익 추정치 및 프로젝트의 수행여부 판단에 중요한 도구라 하였다. 본 연구에서 불확실성의 요소의 하나로 재작업이 가능한 프로젝트 모델을 다루며, 실제 프로젝트에서 제품개발, 건축, 공정설계 등 다양한 분야에서 재작업이 프로젝트에 미치는 영향과 그 중요성이 거론되고 있다.

SRCPSP에서 활동의 기간을 확률적으로 다루는 경우 중 하나는 활동이 재작업 되는 확률을 가지는 경우이다. 백인섭(2020)의 경우 활동의 종료 시점에서 재작업의 여부를 확률적으로 판단하였으며 그 활동의 추정을 기댓값과 그 승수를 이용하였다. 그러나 실제의 프로젝트에서 재작업의 판단 시점은 활동의 종료 시점만이 아니다. 예를 들어 활동의 진행 중 요구사항이 변경될 경우 언제든지 재작업에 대한 판단은 이루어질 수 있다. 그러므로 활동의 종료시점만이 아닌 시작 후 종료 시점까지 모든 시점에서 재작업이 이루어질 수 있는 모델이 필요하다.

본 연구에서는 프로젝트에서 일부 활동이 해당 활동의 시작 후 종료 시점까지 재작

업 가능성이 있어 그 기간이 확률적인 경우를 다룬다. 계획 시점에서는 이 활동들의 확률변수를 기댓값과 그 승수를 이용하여 추정하였으며, 이두희(2020)의 연구와 같이 프로젝트 초기부터 말기까지 (기댓값으로 인한 추가기간) × (승수)의 변화에 따른 결과 또한 제시한다. 이를 위하여 연구의 수학적 모형을 제시하며, 모의실험을 위한 알고리즘을 제시하고, 모의 데이터의 생성과 실험을 수행한다. 그 결과를 통해 제시된 기법이 실제로 작동하며 유효함을 입증하고자 한다.

II. 이론적 배경

2.1 불확정적 요소가 있는 일정 문제

실제 프로젝트에 있어, 프로젝트는 여러 형태의 불확정적 요소를 지니고 있다. 그러므로 실제 진행되는 프로젝트 기간은 기존의 계획보다 적은 시간이 소요되거나, 더 지체 될 수도 있다. 불확정적 요소로 프로젝트 진행에 있어 자원이 일정보다 늦거나 사용 할 수 없게 되거나 새로운 활동의 추가, 수정으로 인해 시간과 기한이 변경되는 경우도 있다. 또한 프로젝트 범위가 변경되거나, 기상 조건 또는 업무 환경으로 인한 지연 등 여러 형태로 존재한다(Goldratt, 1997). 이러한 불확정적 요소가 있는 프로젝트에서 과학적 의사결정에 대한 연구는 산업이 발전함에 따라 같이 진행되었다. Chakrabortty et al.(2017)은 활동기간이 불확정적임에 따른 연구에서 활동의 기간을 처리하는데 최적화된 개념을 제시하고 불확정적 요소를 확정적 요소로 통합하기 위하여 6가지의 휴리스틱 기법을 제안하였다. 유전자 알고리즘, 시뮬레이션 어닐링, 입자 최적화, 지역 분기 한정법 등의 메타 휴리스틱 기법을 사용하였으며, 그 결과 최적화 모델은 CBC(Coin-Branch & Cut)를 사용하여 해결되었다.

2.2 재작업에 관한 선행연구

프로젝트 일정을 계획할 때 불확정적 요소(공정변화, 재작업 등)는 생산 장애와 공정의 혼란을 일으키는 요인으로 일정을 수립할 때 중요한 문제로 여겨진다(Li, Z. & Ierapetritou, 2008). Hegazy et al.(2011)은 재작업이 프로젝트 지연에 어떠한 영향을 주는지 조사하고, 프로젝트 비용에 효율적인 조치전략에 관한 최적화 방안을 제시하였다. Raghavan & Srihari(2018)는 확률적으로 발생하는 재작업 또는 재가공 등으로 일정이 지연되는 경우에서 가중 지연시간(Weighted Tardiness)을 최소화하는 변형 유전자 알고리즘(Modified Genetic Algorithm)을 제안하였다. 백인섭(2020)은 재작업이 발생할 수 있는 프로젝트 일정 문제에서, 재작업이 가능한 활동의 기간 추정

은 일정 수립에 있어 중요한 문제이며, 확률적인 활동의 기간을 추정하는 방법을 제시하였다. Lipke(2020)는 프로젝트의 관리자는 재작업 발생 경우 재작업 비용의 영향을 평가하고 재작업으로 증가되는 기간을 결정하는 접근법을 제안하였다. Maghsoudlou & Niaki(2017)는 재작업이 프로젝트에 미치는 부정적인 영향을 조사하고, 재작업의 효과를 분석하여 이를 줄이기 위한 방법을 제시하였다. 위와 같은 선행 연구들의 결과에 따르면, 재작업은 어느 프로젝트와 공정에서 배제할 수 없는 행동의 하나로 그의 따른 피해와 공정의 지연 등의 이유로 발생하는 문제의 최소화가 프로젝트 결과 성능에 영향을 끼침을 알 수 있다.

2.3 시뮬레이션 기법

프로젝트 일정을 계획할 때 시뮬레이션 기법은 불확정적 요소가 존재하는 프로젝트에서 가능한 일정을 계산하여 볼 수 있는 점에서 확률적인 요소를 다루는 SRCPSP(Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem)의 적합한 일정 계획 기법이다. 또한 프로젝트의 목표 달성, 프로젝트의 결과에 미칠 영향을 평가하기 위하여 불확정적 요소 유발 근본의 종합적 영향을 모델링한다(PMI, 2017). 시뮬레이션 기법 중 가장 보편적으로 몬테카를로 분석을 들 수 있다. 시뮬레이션은 모든 산업과 일상에서 제한 없이 적용될 수 있으며, 시스템에서 시간의 흐름과 환경 등을 만들어 모방한 것이다. 따라서 얼마나 현실과 유사한 시스템을 구현했는지가 매우 중요하다(Jerry,1984). Zhang et al.,(2007)은 이러한 시뮬레이션의 성질을 이용하면 생산 프로젝트에서 생산 시 발생 할 확률적 요소들에 대한 확률모델을 구성하여 반복 실험을 진행할 수 있다고 했다. 백인섭, 안태호, & 조윤재(2020)의 활동의 기간이 확률적인 RCPSP문제에서 시뮬레이션 기법을 사용한 활동 기간 추정, Zaman et al.,(2021)의 시뮬레이션 기법을 통한 활동 기간의 불확정적 구성요소를 처리하기 위한 접근방식을 제안하는 등 시뮬레이션 기법을 활용한 불확정적 요소 해결을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.4 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정 문제(RCPSP, Resource Constrained Project Scheduling Problem)

자원이 제약된 프로젝트 일정 문제의 관한 대표적인 초기 연구는 Herroelen(1972)과 Davis(1973)의 연구이다(남재덕, 2009). RCPSP는 활동 간의 선·후행관계, 자원, 기간, 페널티 비용 등 여러 제약조건이 있는 환경에서 활동의 시작시점과 수행방법 선택의 문제이다. 이 문제의 해결을 위해 한계열거법, 분기한정법, 정수계획법, 0-1 계획법, 2차 방정식 등의 선행연구들이 진행되었다. 한계열거법은

Davis & Heidorn(1971)이 최적해법을 제안함으로 시작되었다. 분기한정법(Branch and Bound)은 Johnson(1967)과 Schrage(1970)에 의해 연구되었으며, 정수계획법은 Wagner(1959)가 기계 일정 계획 문제를 다룬 연구에서 사용되었다. 0-1계획법은 주어진 제약조건에 대해 0 또는 1로 이루어진 변수를 곱하는 것으로 Patterson & Roth(1976)는 해당 제약을 조건부로 적용하였다.

Ⅲ. 문제의 정의와 수식화

3.1 문제의 정의

본 연구는 RCPSP(자원 제약을 고려한 프로젝트 일정 문제)에서 프로젝트의 일부 활동이 수행 중 재작업 될 수 있는 확률을 가진 경우를 다루고 있다. 따라서 본 연구 문제에서 활동의 수행 기간은 재작업 발생에 따른 확률변수로 연구의 모형이 확률 모형에 속한다.

본 연구에서 문제의 가정은 아래와 같다.

(1) 활동 : 프로젝트는 N개의 활동과 2개의 가상활동(Dummy Activity)으로 구성되어 있다. 2개의 가상활동은 네트워크의 시작과 종료 활동을 의미하며 수행기간, 수행비용 및 필요자원은 0이다. 네트워크에 포함된 모든 활동이 종료되어야 프로젝트는 종료된다.

(2) 활동간 선·후행 관계 : 네트워크 내 활동들은 서로 선·후행 관계가 확정적으로 존재하며 모든 활동은 선행 활동 종료 후 후행 활동이 시작된다. 활동간 선·후행 관계의 집합이 H이면, $(i,j)\in H$의 의미는 활동 i가 종료되기 전 활동 j는 시작 될 수 없음을 뜻한다.

(3) 활동의 비선매성 : 프로젝트의 모든 활동은 시작 시점부터 종료 시점까지 중단될 수 없다. 즉, 시작한 활동은 중단 없이 진행되어야 함을 뜻한다.

(4) 모드(Mode) : 모드는 활동의 수행방법을 뜻하며, 각각의 활동은 한 가지 이상의 수행방법을 가지고 있다. 선택되는 모드에 따라 활동의 기간과 소모되는 자원 및 비용은 변경될 수 있으며 그 값은 사전에 알려져 있다.

(5) 자원 : 활동은 그 수행방법에 따라 장비, 인력 등의 점유되는 자원의 종류와 수량이 다를 수 있으며, 해당 활동의 종료 시점에 그 자원의 점유가 종료된다. 프로젝트 기간 동안 가용한 자원은 사전에 알려져 있으며, 모든 시점에서 활동들이 점유하는 자원의 양은 알려진 가용량을 초과할 수 없다.

(6) 재작업 발생 확률이 있는 활동 : 재작업이 발생할 수 있는 활동들의 집합을

RA라고 하고, 재작업 발생 확률이 0%의 활동들의 집합을 $\overline{RA}$라 할 때, 집합 RA의 속한 각각의 활동에 대한 재작업 여부는 해당 활동의 수행 중 임의의 시점에 결정된다. 재작업 여부가 결정되면 작업은 즉시 재 작업되며, 재작업 시점 이전에 수행된 기간과 비용도 프로젝트 에 합산된다. 재작업 활동의 재작업 비용과 기간은 초기 활동의 값과 같다.

(7) 재작업의 연속성 : 재작업이 발생할 수 있는 활동의 재작업 여부가 결정되면 즉시 재작업이 수행되어야 한다.

(8) 재작업 확률 : 집합 RA에 속한 활동들의 재작업 발생 확률은 사전에 알려져 있다.

(9) 재작업 발생으로 인해 추가되는 기간과 비용 : 집합 RA에 속한 각각의 활동들이 재작업의 발생으로 수행 기간과 비용이 추가되는 경우, 재작업 이전에 수행된 기간과 비용은 해당 활동의 단위 기간(1일)별 비용으로 계산하여 해당 활동의 총 기간에 합산한다.

(10) 마감기한(Due Date)과 지체보상금(Penalty Cost) : 프로젝트에는 주어진 마감기한이 존재하며, 주어진 마감기한을 초과하는 경우 그 시점마다 지체보상금이 발생한다. 마감기한과 지체보상금은 사전에 알려져 있다.

3.2 문제의 수식화

본 문제의 수식은 아래와 같다.

$$Minimize \quad \sum_{i \in \overline{RA}} \sum_{m \in M(i)} Acti\_Cost_{i,m} \times x_{i,m}$$
$$+ \sum_{i \in RA} \left(\sum_{m \in M(i)} Acti\_Cost_{i,m} \times x_{i,m} \right) \times R_i$$
$$+ \ Pen\_Cost \times \max\left\{ s_{N+1} - Due\_Date, 0 \right\} \qquad [1]$$

$Subject\ to$

$$x_{i,m} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i,m \ [2]$$

$$\sum_{m \in M(i)} x_{i,m} = 1 \qquad \forall i \ [3]$$

$$d_i = \begin{cases} \sum_{m \in M(i)} dur_{i,m} \times x_{i,m} \times R_i & \text{if } i \in RA \\ \sum_{m \in M(i)} dur_{i,m} \times x_{i,m} & otherwise \end{cases} \qquad \forall\, i \ [4]$$

$$s_i + d_i \le s_j \qquad \forall\ (i,j) \in H \ [5]$$

$$s_0 = 0 \quad [6]$$

$$\sum_{i \in S_t} \sum_{m \in M(i)} R_{i,m,k} \times x_{i,m} \le b_k \qquad \forall\, t,k \quad [7]$$

Where,

i 프로젝트에서 활동을 나타내는 인덱스이다. 활동 0, 활동 N+1은 가상의 활동으로 시작과 끝을 뜻한다.

RA 재작업 발생 확률이 0%보다 큰 활동들의 집합을 뜻한다.

$\overline{RA}$ 재작업 발생 확률이 0% 이하인 활동들의 집합을 뜻한다.

m 활동의 수행방법(모드)를 나타내는 인덱스이다.

$M(i)$ 활동 i의 수행방법(모드)의 집합이다.

$x_{i,m}$ 활동 i가 모드 m으로 수행될지 판단하는 결정변수이다. 수행되면 1, 그렇지 않으면 0으로 표시되는 0−1 변수이다

$dur_{i,m}$ 활동 i가 m의 방법으로 수행될 때의 초기 수행기간이다.

R_i 활동 i가 프로젝트에서 초기 수행기간대비 수행된 총 기간을 비율로 나타낸 확률변수이다.

d_i 활동 i가 수행된 총 기간이다.

s_i 활동 i의 시작시점을 나타낸 의사결정변수이다.

H 네트워크 내 활동들 간의 선·후행 관계를 나타내는 집합이다.

S_t 시점 t에서 수행 중인 활동들의 집합이다. 시점 t에 시작되는 활동은 포함하지만, 시점 t에 종료되는 활동은 포함하지 않는다.

$R_{i,m,k}$ 활동 i의 수행방법이 m일 때, 자원 k의 점유량을 뜻한다.

k 프로젝트에서 사용되는 자원의 종류를 나타내는 인덱스이다.

b_k 자원 k의 시점별 가용자원량을 뜻한다. 가용자원의 수량은 프로젝트 전 기간에 동일하다.

Due_Date 프로젝트 마감기한을 뜻한다.

Pen_Cost 프로젝트의 종료 시점이 마감기한을 초과하였을 때 발생하는 총 지체보상금을 뜻한다.

식[1]은 본 문제의 목적함수에 해당하며, 프로젝트 총비용의 최소화가 목표임을 보

여준다. 본 연구에서 프로젝트의 총비용은 크게 세 부분으로 볼 수 있다. 첫 번째는 재작업 발생 확률이 0% 이하인 활동들의 수행비용에 대한 합이며, 이 비용은 각 활동이 어떤 모드로 수행되는지에 따라 결정된다. 두 번째 비용은 재작업 발생확률이 있는 활동들의 수행비용에 대한 합이며, 이 비용은 각 활동들이 어떤 방법으로 수행되었고 재작업으로 인해 추가된 기간에 의해 비용이 결정된다. 마지막은 프로젝트의 종료 시점이 마감기한을 초과하여 발생하는 지체보상금이다. 이 비용은 마감기한을 초과한 기간에 의해 결정된다. 식[2]에서 $x_{i,m}$은 0-1 변수임을 나타내고 활동 i가 모드 m로 수행되면 1 아니면 0의 값을 가진다. 식[3]은 각 활동이 한 가지 모드만을 사용하여 수행됨을 나타낸다. 식[4]는 활동 i가 프로젝트에 수행되는 총 기간이 d_i임을 보여주며, 활동 i가 재작업 발생 확률이 0% 이하인 활동이면 활동의 d_i는 수행되는 m에 의해 결정되고, 재작업 발생 확률이 0%보다 큰 활동이면 활동의 d_i는 수행되는 m에 따른 초기 수행기간에 실제 수행기간과의 비율(R_i)을 곱하여 나타낸다. 식[5]는 활동의 선·후행에 따라 후행활동의 시작시점이 선행활동의 종료시점보다 이전에 수행될 수 없음을 보여주며, 집합 H는 활동간 선·후행 관계를 나타낸 집합으로 $(i,j) \in H$는 활동 i는 활동 j의 선행을 의미한다. 식[6]은 프로젝트의 시작을 의미하는 활동 0($i=0$)의 시작시점(s_0)이 0이라는 뜻으로, 프로젝트 전체의 시작시점이 0임을 의미한다. 식[7]은 자원에 대한 제약식이며, S_t는 개념적인 서술로 시점 t에서 수행 중인 모든 활동의 집합을 뜻한다. 따라서 $\sum_{i \in S_t} \sum_{m \in M(i)} R_{i,m,k} \times x_{i,m}$는 시점 t에서 수행 중인 모든 활동이 필요로 하는 자원 k에 대한 총합을 의미하며, 모든 시점에서 자원 k에 대한 사용량의 합이 자원 k의 가용량 b_k 이하임을 의미한다.

IV. 알고리즘

본 연구는 RCPSP(자원제약을 고려한 일정문제)의 확률적 확장 모델 중 복수 모드를 지닌 RCPSPMM(RCPSPMM, RCPSP With Multiple Mode)를 다룬다. 일반적인 RCPSPMM의 경우 확정적 모델로 확률적 요소를 다루지 않으나, 본 연구에서는 프로젝트의 일부 활동이 재작업 가능확률로 인하여 그 수행기간이 확률적인 경우를 다룬다. 이 활동들의 수행기간은 일정의 초기 계획 시점과 같이 특정 시점에서 판단되지 않는다. 이런 활동들은 재작업으로 판단되는 시점마다 해당 활동의 수행기간이 늘어나게 되며, 최종적으로 재작업으로 판단되지 않는 시점에 그 수행기간이 확정된다. 그

러므로 본 연구는 어느 특정 시점에서 해를 결정할 수 없으며, 재작업 확률이 있는 활동들의 재작업 여부에 대한 판단 시점마다 해의 결정을 위하여 일정의 계획을 재작성하는 전형적 다단계 의사결정 문제이다. 따라서 일정의 계획을 재작성하는 방법은 다음과 같다.

Step 1. [초기 일정계획]

프로젝트 초기 일정계획의 작성은 시점 t의 값을 0으로 하여 모든 활동을 대상으로 작성한다.

Step 2. [일정의 재작성 시점 t의 탐색]

Step 2-1. 현재 시점 t까지 재작업 발생확률이 있는 모든 활동이 더 이상 재작업 판정을 할 필요가 없는 경우(판정이 재작업 안함으로 결정된 경우), 모든 해가 구해졌으므로 종료한다. 앞의 경우에 해당하지 않으면 Step 2-2로 이동한다.

Step 2-2. 현재 시점 t까지 재작업 발생확률이 있는 활동 중 재작업을 판정해야 하는 활동이 있는 경우, 가장 빠른 재작업 판정 시점을 탐색하여 t의 값을 갱신하고, 재작업 여부를 판정한다. 재작업하지 않음으로 판정되면 해당 활동의 총 수행기간이 확정된다.

Step 3. [현재 시점 t에서의 일정계획]

시점 t까지 완료되지 않은 활동들에 대한 일정을 재작성하고, Step 2로 이동한다.

본 연구의 경우 확률적 요소로 인해 특정 시점에서 모든 의사결정이 되지 않고, 재작업 확률이 있는 활동들의 재작업 판정 시점마다 다단계로 의사 결정되는 문제라 제시하였으므로, 남은 것은 현재 시점 t에서의 일정계획에 대한 작성이다. 앞에 제시된 수학적 모형은 확률모형이므로 확정적으로 작성해야하는 일정의 계획에는 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 확률변수인 재작업 발생 확률이 있는 활동의 수행기간을 확정적인 상수로 추정한다. 그리고 이 추정치를 이용하여 확률모형을 확정모형으로 변환한다. 이때, 확률변수를 상수로 추정하는 방식에 따라 모형을 최적화하는 해는 바뀌게 된다. 본 연구에서는 재작업 확률이 있는 활동의 수행기간을 기댓값과 그 승수를 이용하여 추정하는 방식을 사용하며, 해당 프로젝트에 적합한 승수 값을 탐색하는 그 값을 결정하는 방식을 제안한다.

4.1 시점 t에서의 일정계획 모형

본 장에서는 확률변수 R_i를 포함한 시점 t에서의 확률적 모형과 확률변수 R_i을 상

수로 추정하여 변환한 시점 t에서의 확정적 모형을 소개한다. 두 수학적 모형의 구분을 위해 확률적 모형을 '시점 t에서의 확률적 모형($Problem^t$)'이라 하고, 확정적 모형을 '시점 t에서의 확정적 추정모형($Problem\_Est^t$)'이라 한다.

4.1.1 시점 t에서의 확률적 모형, $Problem^t$

시점 t에서의 확률적 모형($Problem^t$)을 수식화하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Minimize \quad & \sum_{i \in \overline{RA} \cap (A \cup C)} \sum_{m \in M(i)} Acti\_Cost_{i,m} \times x_{i,m} \\ + & \sum_{i \in RA \cap (A \cup B \cup C)} \left(\sum_{m \in M(i)} Acti\_Cost_{i,m} \times x_{i,m} \right) \times R_i^t \\ + & \ Pen\_Cost \times \max \left\{ s_{N+1} - Due\_Date, 0 \right\} \end{aligned} \qquad [1]$$

Subject to

$$x_{i,m} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in (A \cup B \cup C),\ m \quad [2]$$

$$x_{i,m} = x_{i,m}^{PREV} \qquad \forall i \in (A \cup B),\ m \quad [3]$$

$$\sum_{m \in M(i)} x_{i,m} = 1 \qquad \forall i \in (A \cup B \cup C) \quad [4]$$

$$d_i = \begin{cases} \sum_{m \in M(i)} dur_{i,m} \times x_{i,m} \times R_i^t & \text{if } i \in RA \cap (A \cup B \cup C) \\ \sum_{m \in M(i)} dur_{i,m} \times x_{i,m} & \text{if } i \in \overline{RA} \cap (A \cup C) \end{cases} \qquad \forall i \quad [5]$$

$$s_i + d_i \le s_j \qquad \forall\ (i,j) \in H,\ \forall i, j \in (A \cup B \cup C) \quad [6]$$

$$s_i = s_i^{PREV} \qquad \forall i \in A \quad [7]$$

$$s_i = t \qquad \forall i \in B \quad [8]$$

$$s_i \ge t \qquad \forall i \in C \quad [9]$$

$$\sum_{i \in S_\tau} \sum_{m \in M(i)} R_{i,m,k} \times x_{i,m} \le b_k \qquad \forall \tau \ge t,\ k \quad [10]$$

Where,

t	일정의 계획이 작성되는 시점으로, 최초의 시점은 0이다. 재작업의 발생확률이 있는 활동의 재작업의 판단 시점마다 t의 값이 갱신.
$PREV$	$t > 0$인 경우, 갱신되기 직전 시점 t에서의 상태라는 것을 표시하는

기호.

$x_{i,m}^{PREV}$ $t>0$인 경우, t의 값이 갱신되기 직전 시점 t의 일정계획 $Problem^{PREV}$에서의 s_i의 값.

s_i^{PREV} $t>0$인 경우, t의 값이 갱신되기 직전 시점 t의 일정계획

A 시점 t까지 완료되지 않은 활동들의 집합이다. 여기에 속한 활동들의 시작시점과 모드는 $Problem^{PREV}$ 에서 승계되며, $t=0$인 최초일정 $Problem^0$에서는 공집합이다.

$A=\left\{ i \mid s_i^{PREV} < t,\ s_i^{PREV} + d_i^{PREV} > t \right\}$

B 시점 t에 재작업 여부가 판정되는 활동들의 집합이다. 여기에 속한 활동들의 시작시점과 모드는 $Problem^{PREV}$ 에서 승계되며, $t=0$인 최초일정 $Problem^0$에서는 공집합이다. B =

$\left\{ i \in RA \mid s_i^{PREV} < t,\ s_i^{PREV}\ \ d_i^{PREV} + d_i^{PREV} \ge t, t\text{에서 재작업판정} \right\}$

C 시점 t 이후에 시작하는 활동의 집합이다. $t=0$인 최초일정 $Problem^0$에서는 모든 활동이 이 집합에 속한다. C = $\left\{ i \mid s_i^{PREV} \ge t \right\}$

R_i^t 활동 i가 시점 t에서 재작업 함으로 판정된 경우, 활동 i가 0회 재작업될 경우의 수행기간 대비, 초기 시점 t까지 수행한 기간과 재작업 기간을 합의 비율을 나타내는 확률변수이다. 활동 i가 시점 t에서 재작업하지 않음으로 판정된 경우, $Problem^{PREV}$ 에서 계획된 활동 i의 총 수행기간이다.

식 [1]은 $Problem^t$가 프로젝트 총비용의 최소화 문제임을 나타낸다. 이 식에서 총비용은 세 부분으로 나눌 수 있으며, 첫 부분은 시점 t까지 완료되지 않은 활동들($A\ \cup C$) 중에 재작업 발생확률이 0%인 활동들($i \in \overline{RA}$)에 대한 비용의 합이며, 두 번째 부분은 재작업 발생확률이 0보다 큰 활동들($i \in RA$) 중에서 시점 t에서 재작업 판정을 받았거나 시점 t까지 완료되지 않은 활동들($A \cup B \cup C$)에 대한 비용의 합이며, 세 번째 부분은 일정지연에 따른 지체보상금이다. 식 [3]은 시점 t에서 집합 A와 집합 B에 속한 모든 활동의 모드가 $Problem^{PREV}$ 에서 승계됨을 나타낸다. 식 [7]은 집합 A에 속한 활동들이 t보다 이전 시점에 시작되었음을 나타낸다. 식 [8]은 집합 B에 속한 활동들 중 시점 t에서 재작업 판정된 활동의 추가기간의 시작시점 t임을

나타낸다. 식 [9]는 집합 C에 속한 활동들이 t이후의 시점에 시작됨을 나타낸다. 기호 S_τ는 개념적인 서술로 시점 $\tau(\tau \geq t)$에 진행 중인 모든 활동을 나타낸다.

4.1.2 시점 t에서의 확정적 추정모형, $Problem\_Est^t$

시점 t에서의 확정적 추정모형($Problem\_Est^t$)을 수식화하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
& Problem_Est^t \\
& Minimize \quad \sum_{i \in \overline{RA} \cap (A \cup C)} \sum_{m \in M(i)} Acti_Cost_{i,m} \times x_{i,m} \\
& + \sum_{i \in RA \cap (A \cup B \cup C)} \left(\sum_{m \in M(i)} Acti_Cost_{i,m} \times x_{i,m} \right) \times Est_R_i^t \\
& + \; Pen_Cost \times \max \left\{ s_{N+1} - Due_Date,\, 0 \right\}
\end{aligned} \qquad [1]$$

식 [1]은 확률적 모형($Problem^t$)의 확률변수 R_i^t을 상수 $Est_R_i^t$로 추정한 모형으로 확률적 모형을 확정적 모형으로 변환하였다.

4.1.3 확률변수 R_i를 상수로 추정하는 방법

본 연구에서는 확률변수를 추정하여 상수로 변환하는 방법 중 기댓값(Expected Value)으로 변환하는 방법을 사용한다. 따라서 확률변수 R_i을 기댓값을 이용하여 상수로 추정한다. 수학적 모형에서 R_i는 활동 i의 기본 기간(재작업횟수가 0인 경우 수행기간)대비 활동 i가 프로젝트에서 실제 수행된 기간에 대한 비율을 나타내는 확률변수이다. 예를 들어 활동 i의 기본 기간이 10이고 실제 프로젝트에서 수행된 기간이 12일 경우 1.2의 값을 가지게 된다. 이때 활동 i의 기본 수행기간을 D_i, 실제 수행기간을 d_i라 하면 $d_i = D_i \times R_i$의 형태로 수식화 할 수 있으며, 재작업으로 인해 추가된 기간 $D_i \times R_i - d_i$를 기댓값을 이용하여 상수로 추정할 수 있다면 R_i 역시 상수(Est_R_i)로 추정할 수 있다. 예를 들어 활동 i의 재작업 횟수에 따른 재작업 판정확률이 첫 번째 판정 시 30%이며, 두 번째 판정 시 20%, 세 번째 판정 시 0%로 가정하자. 첫 번째 재작업의 경우 모형의 가정에서 수행기간 중 언제든지 재작업 판정이 가능하다고 하였으므로, 1~10사이의 임의의 시점에 판정이 일어날 수 있으며, 그 첫 번째 판정과 두 번째 판정에서의 기댓값의 계산은 아래와 같다.

첫 번째 판정에서 재작업 안함 판정을 받을 확률(0.7)에 대한 기댓값 = $0.7 \times D_i$

첫 번째 판정에서 재작업 함, 두 번째 판정에서 안함 판정일 경우

$$=0.3\times\{(1+D_i)\}\times\frac{1}{D_i}+0.3\times\{(2+D_i)\}\times\frac{1}{D_i}+\ldots+0.3\times\{(D_i+D_i)\}\times\frac{1}{D_i}$$

$$=0.3\times\left\{\frac{1}{2}(D_i+1)+1\right\}$$

따라서 기댓값 $E(d_i)=0.7\times D_i+0.3\times\left\{\frac{1}{2}(D_i+1)+1\right\}$로 구할 수 있다.

그러나 프로젝트는 활동의 선·후행, 자원의 제약 등의 제약조건으로 인해 활동의 수행기간에 대한 확률변수를 기댓값만으로 추정치를 구하는 것이 가장 좋은지 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 프로젝트 별로 적합한 추정치($E(d_i^+)$)를 구하기 위해 기댓값에 승수를 다양하게 적용하는 방법을 제시한다.

4.1.4 $E(d_i^+)$에 승수(Multiplier)를 적용하는 방법

기댓값($E(d_i^+)$)에 곱해지는 승수를 M이라 하면, 적용공식은 아래와 같다.

$$E(d_i)=D_i\times Est\_R_i=D_i+(E(d_i^+)\times M)\qquad \forall i\in RA$$

위의 식은 $Problem\_Est^t$ 모형에서 집합 RA에 속하는 활동 i에만 적용되며, 일정계획에서만 사용한다. 이는 본 연구모형의 목적함수 값이 시뮬레이션을 통해 얻어지는 것을 의미하며, 위의 식은 시뮬레이션의 진행을 위한 일정계획에만 사용된다는 뜻이다.

본 연구에서 M을 적용하는 방법은 백인섭, 안태호 & 조윤재(2020)의 연구를 통해 유용성이 입증된 동일 프로젝트내의 동일한 M을 적용하는 방식을 통해 적정한 M을 찾고, 이두희(2020)를 통해 제시된 일정계획 시점에 따라 M에 함수(Function)를 적용하여 차등적으로 적용하여 가장 좋은 $E(d_i^+)$를 찾는 방식을 적용하여 실험한다. 이에 대한 공식은 아래와 같다.

$$E(d_i)=D_i\times Est\_R_i=D_i+E(d_i^+)\times(M\times F(t))\qquad \forall i\in RA$$

위 식에서 함수 $F(t)$는 시점 t에서 M에 적용하는 배율이다.

4.2 해법

본 연구의 해법은 다음과 같다.

4.2.1 $Problem_Est^t$의 휴리스틱 기법 약술

시점 t에서의 확정적 추정모형 $Problem_Est^t$는 RCPSPMM의 전형적인 모습으로 이의 해법으로 본 연구에서는 이웃탐색기법(Neighborhood Search)을 기반으로 한 다수 경로(Multi-Pass) 알고리즘을 제시한다.

Step 1 [가능해의 생성]
실행이 가능한 해(Feasible Solution)를 생성한 후, Step 2로 이동한다.

Step 2. [이웃탐색기법을 통한 해의 개선]
다양한 이웃탐색기법을 반복적으로 사용하여 가능해를 개선한다. 해가 개선되지 않으면 Step 3으로 이동한다.

Step 3. [추가 진행의 판단]
제한된 연산 시간이 초과되거나, 새로운 가능한 해의 제한된 생성횟수를 초과하는 경우 종료된다. 앞의 조건에 해당하지 않으면 Step 1로 이동한다.

위에서 제안된 휴리스틱 기법의 알고리즘은 Step 1. [가능해의 생성]으로 시작되며, 실행이 가능한 해의 생성은 프로젝트의 모든 활동에 대해 수행방법(모드)과 시작시점을 결정한다는 것을 의미한다. 실행이 가능한 해의 뜻은 문제의 제약 조건이 모두 충족되었다 것을 의미하며, 이렇게 생성된 가능해를 Step 2. [이웃탐색기법을 통한 해의 개선]에서 다양한 이웃탐색기법을 반복적으로 사용하여 개선을 시도한다. Step 1에서 모든 활동에 대해 결정된 수행방법과 시작시점을 Step 2에서 가능해의 부분적 변경을 통하여 개선한다. 이때 변경을 통해 목적함수의 값이 좋아지는 경우 변경이 지속되고, 그렇지 않은 경우 변경을 취소한다. 이를 반복하여 개선을 시도하며, 해가 개선되지 않으면 Step 1로 이동하거나 종료한다. 이와 같은 알고리즘의 경우 연산시간 또는 특정 단계의 반복에 대한 제한값을 설정할 수 있으며, 본 연구에서는 Step 3의 횟수를 제한하였다. 따라서 Step 3의 누적 횟수가 미리 설정된 값을 초과하면, 현재 발견된 가장 좋은 가능해를 최선해(Best Solution)로 확정한 후 알고리즘을 종료한다.

4.2.1.1 Step 1. 실행 가능한 해의 생성

$Problem_Est^t$의 가능해(Solution)는 활동 i의 수행방법(모드) m과 시작시점 s_i의 조합으로 구성된다. 활동 i가 집합 A, 집합 B의 원소이면, 활동 i의 m과 s_i는 이미 결정되어 있다. 그러므로 m과 s_i가 아직 결정되지 않은 활동들은 집합 C에 속하며, Step 1에서 집합 C에 속한 활동들의 m과 s_i를 순차적으로 결정하여 일정계획을 완

성한다. 이때 m과 s_i는 프로젝트의 제약조건들을 준수하며 결정되기 때문에 Step 1에서 완성된 해는 실행이 가능한 해(Feasible Solution)이다. 그러므로 Step 1은 아래와 같이 정리할 수 있다.

(1) 집합 C에 속한 활동들의 수행방법(모드)의 결정
집합 C에 속한 활동들의 모드를 임의로 결정한다(난수 사용). 모드가 결정되면 수행기간은 미리 알려져 있으므로 자동으로 결정된다.

(2) 집합 C에 속한 활동들의 시작시점의 결정
집합 C에 속한 활동들의 시작시점을 결정한다.(집합 A와 집합 B에 속한 활동들의 시작시점은 이전에 결정되어 있음)
(2-1) 집합 C에 소한 활동들의 시작시점을 초기화한다.
(2-2) 시작시점이 결정되지 않은 활동들을 선택한다.
s_i가 결정되지 않은 활동 중에서 선행활동의 시작시점이 모두 확정되었거나 선행활동이 없는 활동을 선택한다. 선택할 활동이 없으면 종료한다.
(2-3) s_i를 결정한다.
아래의 조건을 모두 충족하는 τ 중 가장 작은 값을 활동 i의 s_i로 결정한다.
(조건 1) 활동 i의 모든 선행활동의 종료시점보다 시점 τ가 빠를 수 없다.
(조건 2) 활동 i가 m으로 시점 τ에 시작해도 자원제약을 위반하지 않는다. ($Problem^t$의 제약식 [10])

(3) 목적함수의 값의 산정
(1)과 (2)에서 m(선택된 수행방법 $x_{i,m}$ = 1, 선택되지 않은 수행방법 $x_{i,m}$ = 0)과 s_i가 모두 결정되었으므로, 목적함수 식에 s_i와 $x_{i,m}$을 대입하고 그 값을 계산한다.

4.2.1.2 Step 2. 이웃탐색기법을 통한 해의 개선

휴리스틱 기법 중 하나인 이웃탐색기법을 사용하여 가능해의 일정한 부분을 변경한다. 목적함수의 값이 개선되면 변경하고 개선되지 않으면 변경을 취소한다. Step 2에서는 Step 1에서 생성한 해의 일정 부분만을 변경한다. Step 2에서 다루는 이웃탐색기법들 (1)수행방법의 변경을 통한 개선과 (2) 활동들의 배정 변경을 통한 개선으로 분류한다.

(1) 수행방법의 변경을 통한 개선
집합 C에 속한 활동들 중에서 임의로 하나를 선택하고, 선택된 활동의 수행

방법(모드)을 변경해 본다. 이로 인해 해당 활동의 기간과 시작시점이 달라질 수 있으며, 이후 배정된 활동들의 수행방법(모드)과 시작시점도 달라질 수 있다.

(1-1) 집합 C에 속한 활동들 중 임의의 하나를 선택하여 그 활동을 i라 하고,. 활동 i의 수행방법(모드)을 변경한다. 이때 활동 i의 현재 시작시점을 $\overline{s_i}$, 변경된 수행방법을 $\overline{m}$이라 하자.

(1-2) 집합 C에 속한 활동들 중 시작시점이 $\overline{s_i}$이상인 활동들의 시작시점을 초기화한다.

(1-3) 활동 i의 시작시점 $\overline{s_i}$를 결정한다.

(1-4) 시작시점이 결정되지 않은 모든 활동들에 대해 Step 1의 [활동들의 시작시점을 결정]에 준하여 의 시작시점을 결정한다.

이 수행방법의 변경을 통해 목적함수의 값이 개선되었다면 변경을 유지하고, 개선되지 않았다면 변경된 부분을 이전 상태로 복구한다.

(2) 활동들의 배정 변경을 통한 개선

Step 1 [활동들의 시작시점을 결정]의 경우 시작시점을 결정할 수 있는 활동이 둘 이상인 경우 프로젝트의 선·후행 관계에만 부합되면 그 활동들은 동일 시점에서 시작될 수 있다. 만일 이때 자원제약과 같은 제약조건으로 인해 동일 시점에 시작할 수 없는 경우, 어떤 활동이 먼저 선택되어 시작시점이 배정되는가에 따라 일정의 계획은 달라질 수 있다. 이 개선 기법은 활동들의 수행방법을 유지한 상태에서 시작시점을 변경하는 방법으로, Step 1 [활동들의 시작시점을 결정] 부분과 동일하다.

이 방법으로 목적함수의 값이 개선되었다면 변경을 유지하고, 해를 변경하고, 개선되지 않았다면 변경된 부분을 이전 상태로 복구한다.

4.2.1.3 Step 3. 추가 진행의 판단

Step 3은 개선 방법의 추가진행에 대한 여부를 판단한다. 본 연구에서 사용하는 휴리스틱 기법은 다수경로(Multi-Pass) 알고리즘으로, 경로의 방문횟수를 제한하거나 CPU Run-time을 이용하여 시간을 제한할 수도 있다.

4.2.2 *Problem*의 시뮬레이션

본 연구의 *Problem* 모형은 확률적 의사결정 모형이다. 따라서 목적함수의 값은 의

사결정변수인 m과 s_i가 어떠한 값들을 가지냐에 따라 달라진다. 그런데 확률변수 R_i로 인해 재작업 발생확률이 있는 모든 활동의 재작업이 판정이 종료되어야 최종적으로 목적함수의 값을 구할 수 있다. 그러므로 $Problem$ 모형은 프로젝트가 진행됨에 따라 단계별로 목적함수의 값이 결정된다는 특징을 가지고 있다. 따라서 목적함수의 값을 구하기 위해서 다음의 절차를 제안한다.

(1) 확정되지 않은 R_i는 모두 추정치를 구하여($Problem\_Est^t$)하여 일정을 계획한다.(모든 활동의 수행방법과 시작시점을 결정)

(2) 프로젝트의 시점 t를 가상으로 증가시키며 가장 빠른 재작업 판정 시점을 탐색한다. 난수를 사용하여 재작업 여부를 판정하고 잔여 일정을 위한 일정을 재 계획한다.

(3) 재작업 발생확률이 있는 모든 활동의 판정이 종료되지 않은 경우 (2)를 반복하며, 종료된 경우 모든 R_i의 값이 확정되어, 이 시점의 일정이 프로젝트의 최종 일정으로 확정된다. 그로인해 $Problem$의 목적함수 값이 결정된다.

(3)에서 결정되는 목적함수 값은 (2)의 재작업 판정 시점에 발생된 난수의 값에 따라 달라진다. 그러므로 본 연구는 $Problem$의 목적함수 값을 충분히 반복하여 구한 후 그 평균을 최소화하는 추정방법을 찾고자 한다.

V. 모의실험

본 연구의 모의실험(시뮬레이션)은 충분한 반복을 통하여 $Problem^t$ 모형에서 우월한 목적함수 값을 가지는 추정방식을 탐색하는데 그 의미가 있다. 즉, 확률적 모형인 $Problem^t$의 목적함수의 값을 평균적으로 우월하게 만들기 위한 최적의 $Problem_Est^t$을 찾기 위함이며, 이는 $Problem^t$ 모형의 확률변수 R_i를 상수로 추정하는 우월한 탐색방법을 찾는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 기댓값을 이용한 방식을 적용하였으며, 다음과 같은 방법으로 모의실험을 진행하였다.

(1) 모의실험의 조건 설정한다.

(2) 재작업 확률이 있는 활동의 수행기간의 추정치를 기댓값과 승수M을 이용하여 추정하고, 프로젝트 전 기간에 일정하게 적용한 후 실험을 반복하여 목적함수의 값의 평균을 최소로 만드는 M의 값을 탐색한다.

(3) 프로젝트 전 기간에 차등적으로 M을 적용할 수 있도록 함수 $F(t)$를 다양하게 적용하여, 더 우월한 추정치 탐색방법이 있는지 탐색한다. 예를 들면 프로젝트 초기의 추정치에는 (2)의 M값보다 작게 적용하고, 프로젝트 기간이 증가할수록 M값을 크게 차등 적용한다.

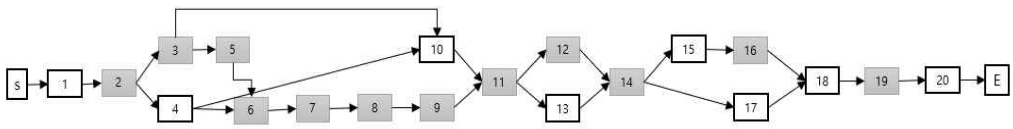
(4) (2)와 (3)의 목적함수 값의 평균을 비교하여 가장 좋은 추정방법을 찾는다.

5.1 모의실험 조건 설정

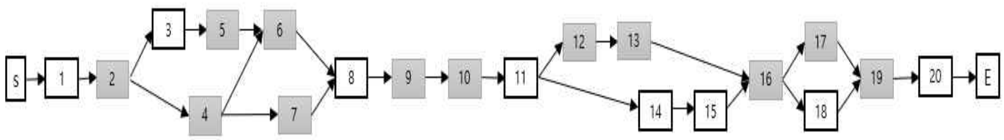
본 모의실험은 Microsoft Office Professional 2018 Excel VBA(Visual Basic for Applications)를 사용하여 알고리즘을 코드로 변환하여 진행하였으며, 총 3개의 프로젝트에 대하여 동일한 환경과 조건으로 모의데이터를 생성하여 실험을 진행하였다. 각 프로젝트들은 20개의 활동과 각 활동별 5개의 수행방법(모드)을 가지며, 각 수행방법별 자원의 종류는 2가지로 설정하였다. 활동간 선·후행 관계와 수행방법별 기간, 비용, 자원의 종류와 크기 등은 난수를 통하여 임의 생성하였다. 프로젝트별 마감기한일은 각각 350, 마감기한 초과로 인한 지체보상금은 1일마다 50으로 동일하다.

(1) 프로젝트 별 네트워크는 아래와 같다.

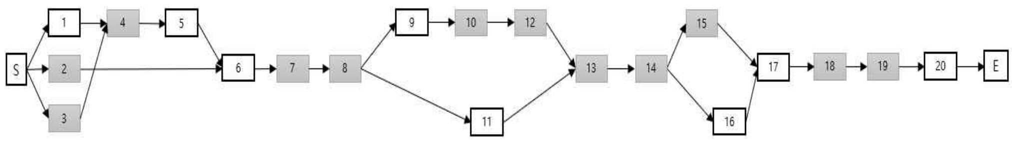
<그림 1> 프로젝트 1의 네트워크



<그림 2> 프로젝트 2의 네트워크



<그림 3> 프로젝트 3의 네트워크



(2) 재작업 확률이 있는 활동과 확률

각 프로젝트에서 재작업 발생확률이 0%보다 높은 활동은 재작업 확률을 30%에서

50%이며, 난수를 이용하여 임의로 발생하였다. 해당 활동을 표로 정리하면 다음과 같다.

<표 1> 각 프로젝트에서 재작업 발생 확률이 있는 활동

	재작업 발생 확률이 있는 활동
프로젝트 1	2,3,5,6,7,8,9,11,12,14,16,19
프로젝트 2	2,4,5,6,7,9,10,12,13,16,17,19
프로젝트 3	2,3,4,7,8,10,12,13,14,15,18,19

5.2 프로젝트 전 기간에 M을 일정하게 적용한 실험결과

본 모의실험에서는 세 개의 프로젝트에 대하여 M의 값을 0부터 4까지 0.4씩 점차 증가시켜 총 11개의 M값을 적용하여 실험하였다. 각 M값에 대하여 1,000회의 모의실험을 진행하였으며, 목적함수 값(프로젝트 총 비용)의 평균을 구하였다. 그 결과 프로젝트 별 M값별 목적함수 값의 평균과 가장 좋은 목적함수 값을 가지는 M값($Best\,M$)을 알 수 있었으며, 비교분석한 결과는 다음과 같이 표로 나타내었다.

프로젝트 총 비용의 평균 : T_C

활동비용의 합 : A_C

프로젝트 지체보상금(Penalty Cost) : P_C

<표 2> 일정한 M을 적용한 프로젝트 1의 결과

M	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4
T_C	4,402	3,677	<u>2,891</u>	3,283	3,136	3,371	3,295	3,360	3,512	3,569	3,566
A_C	3,260	3,053	2,699	3,061	2,992	3,302	3,249	3,347	3,466	3,534	3,529
P_C	1,142	624	192	221	143	69	46	13	46	35	37

<표 3> 일정한 M을 적용한 프로젝트 2의 결과

M	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4
T_C	4,921	4,056	3,758	3,647	<u>3,414</u>	3,702	3,819	4,083	4,410	4,248	4,457
A_C	3,445	3,296	3,297	3,394	3,335	3,664	3,787	3,997	4,230	4,152	4,308
P_C	1,476	760	461	253	80	38	32	87	180	96	148

<표 4> 일정한 M을 적용한 프로젝트 3의 결과

M	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4
T_C	4,557	3,682	3,672	3,286	<u>3,255</u>	3,263	3,499	3,699	3,821	3,943	4,076
A_C	3,477	3,232	3,406	3,175	3,215	3,242	3,486	3,690	3,818	3,943	4,072
P_C	1,080	450	266	111	40	21	13	9	3	1	4

5.3 프로젝트 기간별로 M을 차등하게 적용한 실험결과

앞서 진행한 모의실험에서 찾은 가장 좋은 M을 프로젝트 기간별로 차등하게 적용하기 위하여, M값 × 일정계획 시점($\frac{t}{Due\,Date}$) 즉 $M \times F(t)$의 형태로 추정하여 실험하였다. 여기서 $F(t)$는 일정계획 시점에 따라 M값을 차등하여 적용하기 위한 함수를 나타낸다. 다양한 $F(t)$를 적용하였으며, 유의미한 경우 밑줄로 표기하였다. 각 프로젝트별 각 $F(t)$는 1,000회의 모의실험을 진행하였다.

<표 5> 차등한 M을 적용하기 위한 $F(t)$별 결과

	프로젝트 1	프로젝트 2	프로젝트 3
$M=0$	4,402	4,921	4,557
$Best\ M$	2,891	3,414	3,255
(1) $M \times (\frac{t}{Due\,Date}+0.5)$	3,119	3,712	3,214
(2) $M \times (\frac{t}{Due\,Date}+1.5)$	2,877	3,391	3,729
(3) $M \times (\frac{t}{Due\,Date}+2)$	2,869	3,328	3,806
(4) $M \times 1.5(\frac{t}{Due\,Date}+0.5)$	2,976	3,345	3,692
(5) $M \times 1.5(\frac{t}{Due\,Date}+2)$	2,965	3,617	3,383
(6) $M \times 2(\frac{t}{Due\,Date})$	3,259	3,674	3,479

결과에 따르면 표 5에 따르면 프로젝트 1의 경우 (2)와 (3), 프로젝트 2의 경우 (2), (3)과 (4), 프로젝트 3의 경우 (2)에서 $F(t)$를 적용한 경우가 적용하지 않은 경

우보다 더 좋은 결과를 보였다.

5.4 모의실험 결과

실험을 통하여 본 연구에서 제시한 $Problem^t$모형의 문제해결을 위한 알고리즘이 유효함을 알 수 있으며, 그 결과로 실험에서 사용한 모든 프로젝트에서 기댓값에 M값을 적용하지 않은 결과보다 M값을 적용한 경우 더 우월한 목적함수 값의 평균을 찾았다. 또한 M값을 차등하게 적용한 경우에서도 더 우월한 목적함수 값의 평균을 가지는 추정방법을 찾을 수 있었다. 그러나 프로젝트별로 어떤 추정방법을 사용하였는가와 프로젝트 조건에 따라 적합한 추정방법이 다름을 알 수 있다.

Ⅵ. 결 론

본 연구에서는 확정적 모델인 RCPSP의 확률적 확장 모델인 SRCPSP 중 재작업으로 인해 활동의 기간이 불확실성이 있는 경우를 다루었다. 재작업이 판정되는 경우 재작업의 시작시점이 작업의 종료시점이었던 기존의 연구와는 다르게, 해당 활동이 시작된 후 종료시점 사이의 임의의 시점에서 재작업의 판정이 이루어지며, 재작업으로 판정될 경우 즉시 시작되어 활동의 수행기간 중에 재작업이 일어나는 경우를 다루고 있다. 이를 위하여 확정적인 $Problem^t$ 모형을 수식화하였으며, $Problem^t$의 활동기간에 대한 확률변수 R_i를 기댓값과 그 승수를 이용하여 추정치 R_i^t를 구하여 확정적 모델인 $Problem^t$과 알고리즘을 제시하였으며, 제시된 알고리즘의 유효함을 입증하기 위하여 모의실험을 실행하였다. 실험의 결과에 따르면 제시된 알고리즘이 문제해결에 유효하며, 기존의 연구에서 제시된 기댓값과 그 승수(M)를 이용한 추정방법도 정상적으로 적용됨을 알 수 있었다.

실제의 프로젝트에서는 요구사항의 변경, 작업물의 품질 불만족 등과 같은 다양한 이유로 재작업이 일어날 수 있으며, 재작업의 시점도 작업의 시작 이후 종료 시까지 언제든지 일어날 수 있다. 본 연구는 이를 반영하였다는 점에 의의가 있다. 그러나 모의실험에 사용된 데이터가 현실의 데이터가 아닌 임의의 가상 데이터라는 점에 그 한계를 가지고 있다. 또한, 활동 기간의 불확실성 중 재작업만이 적용되어 있다는 점에 향후 본 연구에서 다루지 못한 다양한 불확실성의 적용에 관한 추가적 연구가 필요하다. 또한 본 연구에 적용된 추정방법이 아닌 프로젝트에 따라 효과적인 추정방법들도 다양하게 존재할 수 있다. 본 연구의 적용된 함수보다 더 다양한 기울기와 그의 크기

를 적용하는 방법, 불확실성의 구체적인 시점을 파악하는 등 연구방향을 확대할 수 있다. 또한, 현대 사회의 여러 분야에 다양한 형태의 PM(Project Management)이 존재하며, 본 연구는 효과적인 의사결정에 기여할 수 있다는 점에서 그 의의가 있다.

참고문헌

백인섭 (2019), *자원 제약을 고려한 프로젝트 일정 문제 : 재작업 가능한 활동이 있는 경우,* 숭실대학교 박사학위논문.

백인섭, 안태호, 조윤재 (2020), 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정 문제 : 활동의 재작업이 가능한 경우, *글로벌경영학회지*, 22(1), 207-232.

Chakrabortty, R. K., Sarker, R. A. and Essam, D. L. (2017). Resource constrained project scheduling with uncertain activity durations. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 537-550.

Davis, E. W. (1973). Project scheduling under resource constraints—historical review and categorization of procedures. AIIE Transactions, 5(4), 297-313.

Davis, E. W. and Heidorn, G. E. (1971). An Algorithm For Optimal Project Scheduling Under Multiple Resource Constraints. *Management Science,* 17(12), B-803.

Goldratt, E. M. (1997). *Critical chain*. Schedule Network Analysis Using Event Chain.

Hegazy, T., Said, M. and Kassab, M. (2011). Incorporating rework into construction schedule analysis. *Autom. Constr,* 20(8), 1051-1059.

Herroelen, W. S. (1972). Resource-constrained project scheduling—the state of the art. J*ournal of the Operational Research Society*, 23(3), 261-275.

Jerry, B. (1984). *Discrete-event system simulation*. Pearson Education India.

Johnson, T. J. R. (1967). An algorithm for the resource constrained project scheduling problem *(Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). Cambridge.*

Johansen, A., Sandvin, B., Torp, O. and Økland, A. (2014). Uncertainty analysis-5 challenges with today's practice. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 119, 591-600.

Li, Z., Ierapetritou, M. (2008). Process scheduling under uncertainty: Review and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 32(4), 715-727.

Lipke, W. (2020). Project duration increase from rework. PM World , *PMI Oklahoma City Chapter*, 9(4), 1-17.

Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B. and Niaki, S. T. A. (2017). Multi-skilled project scheduling with level-dependent rework risk; three multi-objective mechanisms based on cuckoo search. *Applied Soft Computing*, 54, 46-61.

Project Management Institute (PMI). (2017). http://www.pmi.org/

Patterson, J. H. and Roth, G. W. (1976). Scheduling a project under multiple resource constraints: a zero-one programming approach. *AIIE transactions*, 8(4), 449-455.

Raghavan, V. A., Yoon, S. W. and Srihari, K. (2018). A modified Genetic Algorithm approach to minimize total weighted tardiness with stochastic rework and reprocessing times. *Computers & Industrial Engineering*, 123, 42-53.

Schrage, L. (1970). Solving resource-constrained network problems by implicit enumeration—nonpreemptive case. *Operations Research,* 18(2), 263-278.

Zaman, F., Elsayed, S., Sarker, R., Essam, D. and Coello, C. A. C. (2021). An evolutionary approach for resource constrained project scheduling with uncertain changes. *Computers & Operations Research*, 125, 105104.

Zhang, H., Jiang, Z. and Guo, C. (2007). Simulation based real-time scheduling method for dispatching and rework control of semiconductor manufacturing system. *In 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2901-2905.

* 저자소개 *

· **이 두 희**(roqurdhkdwk@naver.com)

숭실대학교 일반대학원 프로젝트경영학과에서 박사과정에 재학중이다. 주요 관심분야는 경영과학, 서비스경영 등이다.

· **백 인 섭**(insoub@gmail.com)

숭실대학교에서 경영학 박사학위를 취득하였다. 주요 관심분야는 경영과학, 인공지능, 품질경영 등이다.

· **김 승 겸**(unitech92@naver.com)

숭실대학교 일반대학원 프로젝트경영학과에서 박사과정에 재학중이다. 주요 관심분야는 경영과학, 품질관리, 서비스 경영 등이다.

· **안 태 호**(ahnt@ssu.ac.kr)

숭실대학교 경영학부 교수로 재직 중이며 주요 연구는 경영과학, 의사결정 등이다.