



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박사학위 논문

재작업 가능한 활동이 포함된 자원 제약
하의 프로젝트 일정 문제
- 시나리오 기반 휴리스틱 기법 -

Resource Constrained Project
Scheduling Problem with Reworkable
Activities

- A Scenario-based Heuristic Approach -

2022년 6월

숭실대학교 대학원

프로젝트경영학과

정 승 현

박사학위 논문

재작업 가능한 활동이 포함된 자원 제약
하의 프로젝트 일정 문제
- 시나리오 기반 휴리스틱 기법 -

Resource Constrained Project
Scheduling Problem with Reworkable
Activities

- A Scenario-based Heuristic Approach -

2022년 6월

승실대학교 대학원

프로젝트경영학과

정 승 현

박사학위 논문

재작업 가능한 활동이 포함된 자원 제약
하의 프로젝트 일정 문제
- 시나리오 기반 휴리스틱 기법 -

지도교수 안 태 호

이 논문을 박사학위 논문으로 제출함


2022년 6월


숭실대학교 대학원

프로젝트경영학과


정 승 현

정승현의 박사학위 논문을 인준함

심사위원장 김병용 

심사위원 박종우 

심사위원 신로철 

심사위원 임성욱 

심사위원 안태호 

2022년 6월

숭실대학교 대학원

목 차

| | |
|--|-----|
| 국문초록 | vii |
| 영문초록 | ix |
| | |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 및 목적 | 1 |
| 1.2 연구 방법 및 구성 | 3 |
| | |
| 제 2 장 이론적 배경 | 5 |
| 2.1 프로젝트 일정 문제 | 5 |
| 2.1.1 PERT/CPM | 6 |
| 2.1.2 자원 최적화(Resource Optimizing) | 7 |
| 2.1.3 일정 단축(Schedule Compression) | 7 |
| 2.2 RCPSP | 8 |
| 2.2.1 자원의 제약이 있는 프로젝트 일정 문제(RCPSP) | 8 |
| 2.2.2 NP-hard Class | 9 |
| 2.2.3 정수 선형계획법 | 9 |
| 2.2.4 RCPSP의 휴리스틱 기법 | 10 |
| 2.3 불확실성이 있는 일정 문제 | 12 |
| 2.3.1 불확실성이 있는 일정 관련 선행연구 | 12 |
| 2.3.2 재작업 관련 선행연구 | 13 |
| 2.3.3 시뮬레이션 기법(Simulation) | 15 |

| | |
|--|----|
| 제 3 장 수학적 모형 | 16 |
| 3.1 문제의 개요 | 16 |
| 3.2 문제의 가정 | 16 |
| 3.3 문제의 수식화 | 20 |
| 제 4 장 알고리즘 | 24 |
| 4.1 시점 t 에서의 프로젝트 잔여 일정 문제와 해법 | 28 |
| 4.1.1 시점 t 에서의 프로젝트 잔여 일정 문제 | 28 |
| 4.1.2 시점 t 에서의 (다단계 의사결정) 해법 | 28 |
| 4.2 시점 t 의 업데이트와 추가 재작업 발생 여부 결정 | 39 |
| 4.2.1 시점 t 의 업데이트 | 40 |
| 4.2.2 추가 재작업에서 재작업 발생 여부 | 40 |
| 4.3 확정 모형의 휴리스틱 기법 약속 | 40 |
| 4.3.1 전체 일정을 작성하는 휴리스틱 기법 | 41 |
| 4.3.2 잔여 일정을 작성하는 휴리스틱 기법 | 43 |
| 제 5 장 모의실험 결과 | 44 |
| 5.1 모의실험 조건 설정 | 45 |
| 5.1.1 데이터 생성 기본구성 | 45 |
| 5.2 모의실험 데이터와 모의실험 과정 요약 | 47 |
| 5.2.1 프로젝트 데이터 소개 | 47 |
| 5.2.2 재작업 발생 경우의 수와 확률 | 49 |
| 5.2.3 모의실험 과정과 결과 | 52 |
| 5.3 프로젝트 총비용의 분포, 기댓값과 분산 도출 | 66 |
| 5.3.1 시나리오별 발생 확률과 프로젝트 총비용 | 66 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 5.3.2 프로젝트 총비용의 확률분포, 기댓값과 분산 | 68 |
| 5.4 알고리즘의 안정성과 유효성 검증 | 69 |
| 5.4.1 알고리즘의 안정성 | 70 |
| 5.4.1 알고리즘의 유효성 | 71 |
| 5.5 파라미터에 따른 프로젝트 총비용 분석 | 72 |
| 제 6 장 결론 | 76 |
| 6.1 연구의 결과 | 78 |
| 6.2 연구의 시사점, 한계 및 향후 연구과제 | 79 |
| 참고문헌 | 81 |

표 목 차

| | |
|---|----|
| [표 2-1] RCPSP의 휴리스틱 기법 관련 선행연구 | 10 |
| [표 2-2] 불확실성이 있는 일정 관련 선행연구 | 13 |
| [표 2-3] 재작업 관련 선행연구 | 14 |
| [표 4-1] 활동 3*과 4*의 재작업 횟수 조합 | 34 |
| [표 4-2] 시나리오별 활동 1, 2의 시작 시기 | 37 |
| [표 5-1] 데이터 셋의 기본구성 | 45 |
| [표 5-2] 활동 기간과 비용의 생성 파라미터 | 46 |
| [표 5-3] 자원 생성 파라미터 | 46 |
| [표 5-4] 시점별 자원 가용량 | 47 |
| [표 5-5] 재작업 가능한 활동과 발생 확률 | 47 |
| [표 5-6] Prob-1 데이터 기본구성 | 48 |
| [표 5-7] 재작업 발생 시나리오 및 발생 확률 (1/2) | 50 |
| [표 5-8] 재작업 발생 시나리오 및 발생 확률 (2/2) | 51 |
| [표 5-9] 단계 1에서 생성된 시나리오 | 53 |
| [표 5-10] 단계 1의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균 | 54 |
| [표 5-11] 단계 1에서 활동 1 배정 시 모드별 총비용의 가중평균 | 55 |
| [표 5-12] 단계 2의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균 | 55 |
| [표 5-13] 단계 2에서 활동 3 배정 시 모드별 총비용의 가중평균 | 56 |
| [표 5-14] 단계 3의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균 | 56 |
| [표 5-15] 단계 3에서 활동 2 배정 시 모드별 총비용의 가중평균 | 57 |
| [표 5-16] 단계 8의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균 | 59 |
| [표 5-17] 단계 12의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균 | 61 |
| [표 5-18] Prob-1에서 시나리오 (1, 0, 2)의 최종 일정 | 65 |

| | |
|---|----|
| [표 5-19] 시나리오별 프로젝트 비용과 발생 확률 1/2 (Prob-1, 실험 1) · 66 | 66 |
| [표 5-20] 시나리오별 프로젝트 비용과 발생 확률 2/2 (Prob-1, 실험 1) · 67 | 67 |
| [표 5-21] 프로젝트 총비용의 확률분포 (Prob-1, 실험 1) ······ 68 | 68 |
| [표 5-22] Prob-1, -2 및 -3의 안정성 실험 ······ 70 | 70 |
| [표 5-23] 알고리즘 유효성 검증 ······ 71 | 71 |
| [표 5-24] 활동의 수에 따른 기댓값과 연산시간 비교 ······ 73 | 73 |
| [표 5-25] 모드/재작업 가능한 활동의 수에 따른 기댓값과 연산시간 ·· 74 | 74 |
| [표 5-26] 재작업 확률 증감에 따른 기댓값과 연산 시간 비교 ······ 75 | 75 |

그 립 목 차

| | |
|----------------------------------|----|
| [그림 4-1] 가상의 일정 | 25 |
| [그림 4-2] 시점 t 에서 작성되는 일정 | 29 |
| [그림 4-3] 네트워크 예시 1 | 31 |
| [그림 4-4] 네트워크 예시 2 | 32 |
| [그림 4-5] 네트워크 예시 3 | 34 |
| [그림 4-6] 네트워크 예시 4 | 35 |
| [그림 4-7] 네트워크 예시 5 | 36 |
| [그림 5-1] Prob-1 네트워크 | 48 |

국문초록

재작업 가능한 활동이 포함된 자원제약 하의

프로젝트 일정 문제:

시나리오 기반 휴리스틱 기법

정승현

프로젝트경영학과

승실대학교 대학원

일반적으로 프로젝트의 일정을 계획하고 수행하는 데에는 다양한 불확실성이 존재하며, 이 경우 불확실성하의 의사결정이 이루어져야 한다. 프로젝트 일정 문제의 최근 연구에서도 SRCPSP(Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem)라는 모형이 다루어지고 있다. 전형적인 RCPSP 모형은 확정적 모형이지만, SRCPSP 모형은 활동의 기간이나 비용 등에 불확실성이 존재하는 모형이다.

백인섭(2020)은 SRCPSP 모형을 다루었다. 이 모형에서 일부 활동은 검수에 따라 재작업이 요구될 수 있으며, 재작업 확률은 사전에 알려져 있다. 이 연구의 핵심은 일정을 작성할 때 재작업 횟수를 어떻게 추정하는가에 있다. 재작업 횟수를 기댓값으로 추정한 값을 중립적이라 할 때, 기댓값보다 크게 추정한 값은 비관적, 낮게 추정한 값은 낙관적이라 할 수 있다. 백인섭(2020)은 시뮬레이션을 통해 프로젝트별 낙관-비관

계수를 찾는 방법을 제시하였고, 기댓값을 사용한 일정작성보다 낙관-비관 계수를 적용한 일정작성이 더 우수한 결과를 보였다.

본 연구는 백인섭(2020)의 연구에서 제시한 모형과 동일한 모형을 다루지만, 일정을 작성하는 방법론은 차이가 있다. 백인섭(2020) 연구는 일정작성에 기댓값을 사용하였지만, 본 연구는 의사결정나무 기법을 사용했다는 점에서 근본적인 차이점이 있다. 본 모형에서 프로젝트 일정의 의사결정나무는 결정 노드와 상황 노드로 구성된다. 결정 노드는 그 시점에서 시작할 수 있는 활동과 모드이며, 상황 노드는 재작업 가능한 활동의 검수를 의미한다. 검수가 합격이면 그 활동은 완료되며, 불합격이면 재작업 되어야 한다. 결정 노드에서 활동의 선택은 향후 존재하는 상황 노드를 고려하여 이루어져야 한다. 향후 존재하는 상황 노드의 합격, 불합격 조합을 시나리오라 하자. RCPSP의 속성상 시나리오별 최적의 일정을 작성하는데 소요되는 시간은 매우 클 수 있다. 본 연구는 제한된 시간 내에 우수한 일정을 작성하기 위해 휴리스틱 기법을 사용하였다. 그러므로 본 연구에서 제안한 알고리즘은 시나리오 기반 휴리스틱 기법에 해당한다. 모의실험을 통해 제안한 알고리즘의 안정성과 유용성을 입증하였다.

본 연구의 특징은 SRCPSP 모형에 의사결정나무 기법을 도입한 새로운 해법을 제시하였고, 재작업 가능한 활동의 수가 비교적 작은 경우 프로젝트 비용의 확률분포를 체계적으로 구할 수 있다는 점이다.

ABSTRACT

Resource Constrained Project Scheduling Problem with Reworkable Activities

– A Scenario-based Heuristic Approach –

JEONG, SUNG-HYUN

Department of Project Management

Graduate School of Soongsil University

In general, there are various uncertainties in planning and carrying out the project schedule, and in this case, decisions must be made under uncertainty. A model called SRCPSP(Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem) is being dealt with in recent research on the project scheduling problem. The typical RCPSP model is a deterministic model, but the SRCPSP model is a model in which uncertainty exists in the duration or cost of an activity.

Paek(2020) dealt with the SRCPSP model. In this model, some activities may require rework according to inspection, and the probability of rework is known in advance. The key to this study is how to estimate the number of reworks when creating a schedule. Assuming that the estimated number of reworks as an

expected value is neutral, a value estimated larger than the expected value is pessimistic, and a value estimated lower than the expected value is optimistic. Paek(2020) suggested a method to find the optimism–pessimism coefficients for each project through simulation, and schedule creation with optimism–pessimism coefficients showed better results than schedule creation using expected values.

This study deals with the same model as the model presented in the study of Paek(2020), but the methodology for creating the schedule is different. The study of Paek(2020) used expected values for scheduling, but this study has a fundamental difference in that it used the decision tree technique. In this model, the decision tree of the project schedule consists of decision nodes and situation nodes. The decision node is the activity and mode that can be started at that point, and the situation node refers to the result of the review of the reworkable activity. If the inspection passes, the activity is completed, and if it fails, the activity must be reworked. The selection of an activity in the decision node should be made in consideration of the situation node that exists in the future. Let the pass/fail combination of the situation nodes that exist in the future be a scenario. Due to the nature of RCPSP, the time required to create an optimal schedule for each scenario can be very large. This study used a heuristic method to create an excellent schedule within a limited time. Therefore, the algorithm proposed in this study corresponds to a scenario-based

heuristic method. The stability and usefulness of the proposed algorithm were verified through simulation.

The characteristic of this study is that it presents a new solution procedure that introduces the decision tree technique to the SRCPSP model, and the probability distribution of the project cost can be systematically obtained when the number of reworkable activities is relatively small.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

현대사회는 18세기 후반 1차 산업혁명 이후 2차, 3차를 거쳐 4차 산업혁명의 시대에 도달하였다. 4차 산업혁명은 21세기 정보통신(Information Technology)의 급속한 발전을 토대로 기계의 지능화를 통해 생산성이 향상되어 산업구조의 근본이 변하는 것으로 인공지능(Artificial Intelligence), IoT(Internet of Things), Big Data, Cloud Computing, Mobile 등 컴퓨터 기술을 기반으로 이루어지고 있다. 이러한 정보통신의 발전은 기업의 업무에도 많은 영향을 주고 있으며, 또한 프로젝트에서 효율적인 일정의 작성과 관리를 용이하게 한다.

현대 기업에서 프로젝트의 계획과 실행 및 관리는 선택의 영역이 아닌 필수적인 요소이다. 프로젝트 일정에 따라 필요한 자원의 종류와 수량이 달라질 수 있다. 그러므로 자원의 효율적인 제어 측면에서 프로젝트 일정 작성은 매우 중요하다. 프로젝트는 일반적으로 자세하고 공식적인 계획이 필요하며, 프로젝트에서 계획이란 예측되는 환경에서 해야 할 일들에 대한 확정을 뜻한다. 계획의 구성요소 중 하나인 일정이란 해야 할 일들의 시작과 완료를 보여주며, 이를 작성하는 기술은 복잡하고 규모가 큰 프로젝트의 마감일을 엄격히 지키는 데 도움을 준다(Kerzner, 2017).

프로젝트의 일정에 관련된 대표적인 연구들로는 1959년 발표된 PERT/CPM(Program Evaluation & Review Technique/Critical Path Method)부터, TCTP(Time-cost trade - off problem), GERT(Graphical Evaluation & Review Technique), RCPSP(Resource Constrained Project Scheduling Problem) 등이 있다(백인섭, 2020).

이들 기법 중 프로젝트에서 요구되는 자원을 구체적으로 다루는 모형

은 RCPSP뿐이다. 그러므로 자원이 한정된 상황에서 실행 가능하며 효율적인 계획을 수립하고자 할 때 RCPSP 모형은 매우 유용하다. 이 문제에서 많이 연구된 주제에는 프로젝트 총비용의 최소화 또는 완료 시간의 최소화 등이 포함되며, 제조 및 건설 등의 다양한 분야에서 현실적인 상황에 적용할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다(Elsayed et al., 2017).

자원을 구체적으로 다룬다는 점에서 RCPSP 모형은 매우 현실적인 모형이지만, 프로젝트의 모든 요소가 확정적이어야 한다는 가정을 갖고 있다. 그러나 대부분의 프로젝트는 태생적으로 불확실한 요소들을 지니고 있으며, 기업의 실제 프로젝트의 일정을 작성할 때 이러한 불확실성을 무시하기는 어렵다. 따라서, 프로젝트의 일정 문제에 불확실성을 확률적(Stochastic) 요소로 직접 적용하는 SRCPSP(Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem)에 관한 연구가 최근에 진행되고 있다(Bruni et al., 2017).

SRCPSP의 연구 중 하나인 백인섭(2020)의 연구는 RCPSP에 확률적인 요소인 재작업을 추가한 모형이다. 이 연구에서 목적함수는 프로젝트 총비용의 최소화이다. 프로젝트 총비용에 큰 영향을 미치는 요소로 활동의 재작업 여부를 꼽을 수 있다. 재작업 횟수가 증가할수록 프로젝트 총비용은 증가하게 된다. 이 모형에서 프로젝트의 일부 활동은 검수에서 합격될 때까지 재작업이 요구되며, 재작업 확률은 사전에 알려져 있다. 이 연구의 핵심은 프로젝트의 일정을 작성할 때 재작업 횟수를 어떻게 추정하는가에 있다. 이 연구에서 일부의 활동은 검수 시 재작업 확률로 인해 해당 활동의 최초 시작으로부터 최종 완료까지의 기간이 불확정적이며, 이 기간은 재작업 횟수에 비례한다. 따라서 이 불확정성을 RCPSP에 적용하기 위해서는 확률적인 재작업 횟수를 추정하여야 한다. 백인섭

(2020)은 재작업 횟수의 추정에 있어서 기댓값 원칙을 사용하였다. 재작업 횟수를 기댓값으로 추정한 값을 중립적이라 할 때, 기댓값보다 크게 추정한 값은 비관적, 낮게 추정한 값은 낙관적이라 할 수 있다. 해당 연구에서는 시뮬레이션을 통해 프로젝트별 낙관-비관 계수를 찾는 방법을 연구하였고, 중립적 기댓값 계수를 적용한 일정보다 낙관-비관 계수를 적용한 일정이 더 우수하다는 결과를 보였다.

본 연구에서는 백인섭(2020)의 연구에서 SRCPSP의 해결을 위해 기댓값을 사용한 것과 다르게 의사결정나무 기법을 사용하여 연구하고자 한다.

1.2 연구 방법 및 구성

본 연구는 백인섭(2020)의 연구와 동일하게 프로젝트의 일부 활동에 재작업 확률이 있어 검수에 따라 재작업이 요구되는 RCPSP의 확률적 모형을 다룬다. RCPSP의 확률적 모델인 SRCPSP에서 불확정적인 요소를 다루는 방법의 하나는 확률적 요소를 확정적 요소로 추정하여 RCPSP에 적용하는 방법인데, 이와는 달리 본 연구에서는 의사결정나무 기법을 사용한다. 본 연구의 모형에서 프로젝트 일정작성에 사용한 의사결정나무는 결정 노드와 상황 노드로 구성되며, 결정 노드는 그 시점에서 시작할 수 있는 활동과 모드이고, 상황 노드는 재작업 가능한 활동의 검수를 의미한다. 검수가 합격이면 그 활동은 완료되며, 불합격이면 재작업 되어야 한다. 결정 노드에서 활동의 선택은 향후 존재하는 상황 노드를 고려하여 이루어져야 한다. 향후 존재하는 상황 노드의 합격, 불합격 조합을 시나리오라 할 때, RCPSP의 속성상 시나리오별 최적의 일정을 작성하는 데 소요되는 시간은 매우 클 수 있다. 따라서 본 연구는 제한된 시간 내에 우수한 일정을 작성하기 위한 휴리스틱 기법을 제안한다.

즉, 본 연구에서 제안하는 알고리즘은 시나리오 기반 휴리스틱 기법이다. 이를 위해 (1) 프로젝트 총비용 최소화를 위한 RCPSP에 일부 활동이 검수 시 재작업이 요청될 수 있는 확률적 요소가 추가된 수학적 모형을 작성하고, (2) 수학적 모형의 해결을 위한 알고리즘을 제안하며, (3) 제안한 알고리즘을 실험하기 위해 코드로 전환하고, (4) 데이터 생성 및 모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 안정성과 유효성을 입증한다.

본 연구는 총 6장으로 구성하며, 제1장은 서론으로 연구의 배경 및 목적과 연구 방법 및 구성을 서술하였다. 제2장은 문헌연구를 통한 이론적 배경으로 불확정성이 있는 일정 문제, RCPSP와 시뮬레이션 기법 등에 관한 선행연구를 살펴보았다. 제3장에서는 일부 활동에 재작업 확률이 있어 그 수행 기간에 불확정성이 있는 RCPSP의 모형을 제시하였다. 제4장에서는 제시한 모형에 대한 해법으로 알고리즘을 제시하였다. 제5장에서는 알고리즘을 토대로 코딩하여 모의실험을 진행한 결과를 요약하였다. 마지막으로 제6장에서는 모의실험의 결과를 중심으로 연구결과를 정리하고, 연구의 한계와 향후 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장 이론적 배경

본 연구는 프로젝트 일정 문제 중 하나인 RCPSP(Resource Contained Project Scheduling Problem)에 프로젝트 활동의 재작업을 적용한 모형을 만들고 알고리즘을 개발하여 그 유효성을 입증하는 것이다. 따라서 프로젝트 일정 문제, RCPSP, 불확실성, 재작업 관련 문헌에 대해 연구하였다.

2.1 프로젝트 일정 문제

프로젝트에 대한 대표적인 정의 중 하나는 ‘고유한 제품, 서비스 또는 결과물을 산출하기 위해 한시적으로 투입하는 노력’이다. 이처럼 프로젝트는 유일한 제품과 서비스 또는 결과물 산출이라는 특성을 가지기 때문에 태생적으로 불확실성이 산출될 수밖에 없으며, 효과적이고 효율적인 프로젝트의 실행과 관리를 위해서는 ‘한시적인 기간’이라는 명제에 대한 프로젝트의 일정 계획과 일정 관리가 매우 중요하다. 즉, 성공적인 프로젝트의 완료를 위해서 범위의 명확한 설정과 제한된 자원의 활용, 기간 내에 완수하기 위한 일정에 대한 계획의 수립, 프로젝트가 태생적으로 가지고 있는 불확실성의 축소를 위한 신속한 의사결정이 핵심적인 요인이다(PMI, 2017).

프로젝트에서 일정의 계획이란 활동들의 시작 시점과 완료 시점을 정하는 것이 기본일 것이다. 이런 요소들을 정하는 것을 계획이라 할 때, 일정의 계획하는 방법으로 PMI(2017)는 일정 네트워크 분석과 주공정법(CPM, Critical Path Method), 자원최적화, 일정단축 및 분석기법 등을 제시하고 있다.

2.1.1 PERT/CPM

1958년 미국 해군에 의해 진행된 폴라리스 미사일(Polaris Missile) 개발 프로젝트에서 일정의 계획 및 통제를 위해 개발된 PERT(Program Evaluation & Review Technique)와, 1959년 Kelley & Walker(1959)에 의해 개발된 CPM은 그 수행 기간이 각각 확정적인지 확률적인지로 구분할 수 있다(Taha, 2011).

CPM은 프로젝트의 최소 완료 시간과 주경로(Critical Path)의 활동(Critical Activity)을 구하는 것을 중점으로 제시된 네트워크 기반 일정 기법으로, 주경로의 활동이란 이에 해당하는 활동에 대한 지연이 전체 프로젝트 완료 시간에 직접 영향을 주는 활동들을 말하며, 반대로 주경로의 활동이 아닌 활동(Noncritical Activity)이란 여유시간(Slack) 내의 지연이 전체 프로젝트 완료 시간에 영향을 주지 않는 활동들을 말한다(Kelley & Walker, 1959). 이런 CPM은 상호활동을 진행하는 모든 프로젝트에 사용할 수 있으며, 건축과 소프트웨어 개발, 연구 프로젝트, 제품 개발 등 모든 형태의 프로젝트에 사용되고 있다(Debels & Vanhoucke, 2007).

PERT는 일정을 계획할 때, 활동들의 수행 기간에 대해 확률적 추정을 통하여 사용한다. 그 방법은 먼저 낙관치(Optimistic Time)와 최빈치(Most likely Time) 및 비관치(Pessimistic Time)를 추정하고, 이를 1:4:1의 비율로 적용하여 활동의 수행 기간을 평균으로 산정하는 확률적 모형으로, 활동들의 기간에 대한 기댓값과 분산을 구하고 중심극한정리를 적용하여 사용한다.

이와 관련된 연구로는 이산 사건 모델링 접근법과 단순화된 중요 활동 식별 방법을 통합한 PERT 시뮬레이션 모델에 대해 연구 활동 분할을 통한 다중 자원 평준화 문제의 비용의 최소화에 대한 해법을 하이브리드

메타 휴리스틱 방식의 제시(Lu & AbouRizk, 2000)와 전력 시스템의 정전 사고 이후 복원 계획 수립에 PERT/CPM 그래프 이론을 기반으로 한 방법론을 제안(Mota et al., 2007), 주공정일정(CC, Critical Chain-scheduling) 및 여유 시간관리(BM, Buffer Management)로 알려진 프로젝트 관리에 제약이론을 적용 연구(Herroelen & Leus, 2001), 활동 간 의존도가 프로젝트 기간 성과에 미치는 영향을 분석함으로써, 활동 간 종속성을 가정하여 버퍼 크기를 결정하는 방법에 대한 연구(Bie et al., 2012) 등이 있다.

2.1.2 자원 최적화(Resource Optimizing)

자원최적화는 활동의 수행에 필요한 자원의 점유량 또는 사용량을 가용자원량 이하로 조정하기 위해 사용된다. 자원의 수요와 공급에 따라 일정 모델을 조정하는데 사용할 수 있는 자원최적화기법의 예로 자원 평준화(Resource Leveling)와 자원 평활화가 있다(PMI, 2017). 자원 평준화는 가용자원량과 필요자원량의 균형을 유지하며, 자원의 제약조건에 근거하여 활동의 시작과 종료를 조정하는 기법으로, 같은 기간에 한 종류의 자원을 둘 이상의 활동에서 사용하는 경우 또는 자원의 사용량을 일정 수준으로 유지해야 할 때 사용한다. 자원평활화는 프로젝트에서 활동들의 자원 요구량이 미리 정해진 한도를 초과하지 않도록 활동을 조정하는 기법이다.

2.1.3 일정 단축(Schedule Compression)

일정 단축은 일정 관련 목표의 충족을 위하여 활동의 수행 기간을 단축하거나 활동의 시작 시점을 앞당기기 위해 사용한다. 일정단축의 예로 공정압축법(Crashing), 공정중첩 단축법(Fast Tracking) 등이 있다(PMI,

2017). 공정압축법은 자원의 추가를 통해 일정을 단축하는 기법이며, 리스크의 증가, 원가의 상승 등을 초래할 수 있다. 공정중첩 단축법은 일반적인 선행관계에서 순차에 따라 실행되는 활동 또는 단계를 일부 특정 부분에 대해 선행 활동의 종료보다 후행 활동의 시작을 빠르게 진행하여 일부 수행구간을 동시에 진행하는 방식으로 리스크 증가와 재작업 등을 초래할 수 있다. 이는 주공정에 속한 활동을 중첩하는 경우에만 효과적이다.

2.2 RCPSP

2.2.1 자원의 제약이 있는 프로젝트 일정 문제(RCPSP)

RCPSP는 활동의 선/후행 관계, 자원의 제약, 마감일, 패널티 비용 등의 제약조건 내에서 활동의 우선순위와 모드의 선택에 대한 문제이다. 이 문제는 실제 프로젝트의 일정작성에 적용할 수 있는 프로젝트 일정 문제 중 가장 현실적 제약조건들로 이루어져 있다. 이 문제의 해결을 위해 이전 연구에서는 한계열거법, 분지한계법, 선형계획법, 정수계획법, 2차 방정식, 0-1 계획법, 암묵적열거법 등을 사용하였다(백인섭, 2020).

한계열거법은 Davis & Heidorn(1971)가 최적해법을 제안함으로 시작되었다(민택기, 2005). 장점으로는 작업의 소요기간에 따라 자원 요구가 변화되고 작업의 연속성에 관한 다양한 가정들이 허용되며, 단점으로는 문제의 크기가 증가함에 따라 급격히 해의 영역이 증가한다는 점이다(남재덕, 2008). 분지한계법(Branch and Bound)은 Johnson(1967)과 Schrage(1970)에 의하여 연구되었으며, 선형계획법은 Stinson et al.(1978)의 연구에서 노드 선택 휴리스틱 기법을 이용하여 수식화하였다. 이들은 분지 한계 나무(Branch and Bound Tree)를 이용하여 열등

해의 효율적 제거를 위한 우월 규칙(Dominance Rule)을 수립하여 효율성을 높였다. 정수계획법은 Wagner(1959)가 완료 시간 최소화 기계 일정 문제에 관한 연구에서 이를 이용한 알고리즘을 제시하였다.

0-1 계획법은 주어진 제약조건에 대해 0 또는 1을 곱하는 것으로 해당 제약을 조건부로 적용하여 주어진 문제에 대한 수식화를 표현할 수 있으며, 효율적인 수식화는 문제를 표현하기 위해 최소화된 제약 또는 적은 수의 0-1 변수를 가진다(Patterson & Roth, 1976).

2.2.2 NP-hard Class

RCPSP는 일반적으로 해 영역의 크기가 커지면 최적해 산출에 걸리는 시간이 기하급수적으로 증가하는 대표적인 NP-Hard Class 문제이다(Blazewicz, 1978). NP-Hard Class란 모든 경우의 수를 일일이 확인하는 방법 외에 다항식처럼 풀이할 수 없는 문제를 말하며, RCPSP에서는 의사결정변수의 조합인 해의 영역의 크기가 매우 커서 모든 경우의 수를 확인하기에 현실적이지 않음을 말한다(Davis, 1973). 따라서 NP-Hard 문제의 경우 휴리스틱 기법을 활용하는 것이 현실적이다(안태호, 1998).

2.2.3. 정수 선형계획법

정수 선형계획법(Integer linear Programming)은 변수의 값을 정수로 제한하여 최적화 문제를 다루는 것을 말한다. 이와 관련된 연구로는 활동이 시작하면 중지되지 않는 경우(Preemption of Activity) 자원의 재생여부에 따른 문제, 시간과 자원의 트레이드오프 문제, 이를 통해 일정 문제에 대한 요소들을 통합적으로 고려한 기법 등을 연구 하였으며(Nudtasomboon & Randhawa, 1997), 다중 자원의 제약이 있는 프로젝트 일정문제(MRCPSP, Multiple Resource Constraint Project

Scheduling Problem)를 해결하기 위해 암묵적인 열거(Implicit Enumeration)의 (0-1프로그래밍) 알고리즘의 연구에서 0-1 공식의 구조를 특별히 활용하여 주어진 다중 자원 문제를 해결하는 데 필요한 계산 시간을 크게 줄였으며, 다중 자원 제약이 있는 프로젝트 일정계획 문제가 기타 관련 시퀀싱 문제를 포함하고 있음을 고려하여 제한된 계산 결과와 함께 시퀀싱 문제에 대한 접근방식의 확장절차 연구하였다(Patterson & Roth, 1976).

2.2.4 RCPSP의 휴리스틱 기법

본 연구에서 다루는 RCPSPMM(RCPSP with Multi Modes)은 대표적인 NP-Hard Class 문제로 이런 문제의 해결방법에는 주로 휴리스틱 기법이 사용된다(Pellerin et al., 2019). NP-Hard Class의 프로젝트 일정 문제에 대해 모든 해의 영역을 탐색하여 최적해(Optimal Solution)를 찾아내는 것은 현실적이지 않다. 따라서, 적은 시간 내에 현실적으로 만족할 만한 수준의 해를 구하는 휴리스틱 기법을 통해 최선의 의사결정변수 조합을 탐색하는 것이 현실적이다. 이와 관련된 연구는 [표 2-1]과 같다.

[표 2-1] RCPSP의 휴리스틱 기법 관련 연구

| 저자 | 연도 | 내용 |
|------------------|------|--|
| Patterson | 1973 | 휴리스틱 기법을 7가지 방식으로 실험하였으며, 프로젝트의 지연과 자원의 유휴 기간 및 휴리스틱의 처리 시간 등을 근거로 하여 휴리스틱의 성능을 각각 측정. 실험의 결과로 시간과 관련된 방식은 자원을 비효율적으로 사용하는 대신 일정 지연이 최소화되는 일정을 도출. 자원과 관련된 방식은 프로젝트 기간이 지연되나 반대로 자원이 효율적으로 계획된다는 것을 제시함. |
| Davis | 1973 | RCPSP 중 대표적인 것으로 조합 문제(Combinational Problem)을 보고, RCPSP와 조립라인 균등화(ALB, Assembly Line Balancing)간의 트레이드오프 문제를 연구 |
| Patterson et al. | 1990 | RCPSP를 위한 역추적(backtracking) 알고리즘을 제시 |

| | | |
|--------------------------|------|---|
| 안태호 | 1998 | 자원 제약을 고려하여 기간의 단축이 가능하고 복수의 양식을 지니고 있는 단일 프로젝트 일정 문제의 자원 가용량이 시간에 따라 변하는 경우에 대하여 연구 |
| Lova et al. | 2006 | 다중 경로 휴리스틱 기법에 대하여 제시 |
| Debels & Vanhoucke | 2007 | 활동들의 수행 기간에 불확실하고, 자원의 제약이 있는 경우 유전자 알고리즘을 활용하는 방안을 제시. 이 경우 비용 최소화를 위한 네 가지 개선 절차를 포함하여 시뮬레이션 방법을 제시 |
| Van Peteghem & Vanhoucke | 2010 | 다중 모드 자원 제약이 있는 프로젝트의 일정 문제에 대한 유전자 알고리즘을 제시 |
| Kapur et al | 2012 | 소프트웨어 출시의 일정 계획 작성을 위한 2차원 다중 릴리스 소프트웨어 안정성의 모델링과 최적화 문제의 해결을 위한 휴리스틱 알고리즘을 제시 |
| Alsayegh & Hariga | 2012 | 활동 분할을 통한 다중 자원 평준화 문제에 비용 최소화를 위한 해법을 하이브리드 메타 휴리스틱 방식으로 제시 |
| Ponz-Tienda et al. | 2013 | 유전자 알고리즘을 활용하여 ‘프로젝트 일정 문제 라이브러리(PSPLIB, Project Scheduling Problem LIBrary)’의 테스트를 통한 다양한 알고리즘 간의 탐색 시간을 비교 |
| Naber & Kolisch | 2014 | 활동에 대한 자원의 사용이 변동적인 RCPSP 문제에 대해 메타 휴리스틱 기반의 알고리즘으로 연구 |
| Kellenbrink & Helber | 2015 | 항공기 이·착륙 스케줄링 사례를 통해 기존의 RCPSP 문제에 대해 변경이 가능한 프로젝트의 구조를 추가하는 유전자 알고리즘을 제시 |
| Li & Demeulemeester | 2016 | 자원 평준화 문제(RLP)의 확률적으로 분석을 통하여 자원의 가용량과 활동의 소요량에 대한 편차를 최소화하기 위한 유전자 알고리즘을 제시 |
| Etgar et al. | 2017 | 버전의 계획과 릴리스 문제에 대한 순 현재가치(NPV)를 최대화할 수 있는 제품의 출시 일정을 작성하기 위해 다양한 최적화 기법과 휴리스틱 기법을 제안 |
| 이현기 | 2017 | 자원의 대여를 이용하여 자원을 추가투입하고, 이로 인한 자원 가용량의 변동을 이용하여 비용을 최소화하는 휴리스틱 알고리즘을 제안 |
| Geiger | 2017 | RCPSPMM의 해결을 위한 지역 탐색 기법 제시, 반복 지역과 가변 이웃 탐색 기법을 기반으로한 지역 탐색을 위한 병렬 방식을 구현 |
| Li & Lim | 2018 | 소매업체들을 위한 효율적인 재고/물류 시스템에서 매일 각 상점의 재고 보유 단위(SKU)의 수요 예측을 위한 Greedy Aggregation-Decomposition 휴리스틱 기법을 제안 |
| Chand et al. | 2019 | RCPSP의 각 의사결정 단계에서 우선순위 규칙과 후속 활동에 대한 정당성을 이용하는 롤아웃-정의(RJ, Rollout-Justification)에 진화된 유전자 알고리즘을 사용 |
| Chu et al. | 2019 | 다수의 중복 모드가 있는 자원의 제약이 있는 프로젝트 일정 문제에서 롤-아웃 정책을 기반으로 한 근사 동적 프로그래밍 알고리즘(ADP, Approximate Dynamic Programming)의 개발에 |

| | | |
|-----------|------|--|
| | | 관하여 연구 |
| Roy & Sen | 2020 | RCPSP의 효율적인 해결을 위해 반딧불(Firefly) 알고리즘에 기반한 군집 지능(Swarm Intelligence) 알고리즘을 개발 |

2.3 불확실성이 있는 일정 문제

2.3.1 불확실성이 있는 일정 관련 선행연구

일반적인 RCPSP는 확정적 모델로 재작업과 같은 확률적 요소가 거의 없는 결정론적 환경을 고려하고 있다. 그러나 실제의 프로젝트는 태생적으로 불확정성을 가지고 있으며, 실제 활동의 진행에서 다양한 원인으로 인해 계획과 다른 불확정성이 발생하고 있고 이는 계획된 일정의 진행을 저해하는 요소이다(Li & Ierapetritou, 2008; 안정일, 2018; 이현주, 2019).

실제의 프로젝트에서 활동은 계획된 일정보다 더 많은 시간이 소요되거나, 더 적은 시간이 소요될 수 있으며, 이로 인해 자원의 사용이 어려워지기도 한다. 또한, 활동의 수행 기간과 마감일을 변경하거나 새로운 활동이 필요하게 될 수도 있다. 이외에도 프로젝트 범위의 변경 및 기상 조건의 변화로 인한 지연 등으로 활동이 통합되거나 중단되기도 한다(Goldratt, 2017).

이러한 불확실성을 가진 환경에서의 의사결정에 관한 연구는 산업의 발전에 맞춰 지속해서 진행됐으며, 최근 컴퓨터 기술의 발전과 실험 시스템의 기능 향상 등으로 다양한 관점에서 연구가 진행되고 있으며 급속히 발전하고 있다(Kochenderfer, 2015).

RCPSP의 영역에서도 확률적 확장모델인 SRCPSPP(Stochastic Resource Constrained Project Scheduling Problem)가 연구되고 있으며, SRCPSPP에서 활동 기간은 알려진 확률분포 또는 활동의 수행 기간에 따

큰 임의의 변수로 모형화 되는데, 일반적으로 기준일정은 생성되지 않으며, 총 기간(Makespan)의 최소화를 목적으로 한다(Rostami et al., 2018). 이와 관련된 연구는 [표 2-2]와 같다.

[표 2-2] 불확실성이 있는 일정 관련 연구

| 저자 | 연도 | 내용 |
|----------------------------|------|--|
| Stork | 2001 | 엄밀한 분기 한정 알고리즘을 제안 |
| Ballestin & Leus | 2009 | GRASP(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)의 적용 버전을 제안 |
| Creemers, Leus & Lambrecht | 2010 | 최적의 일정 정책의 결정을 위해 연속시간 마르코프 체인 기반의 SDP(Stochastic Dynamic Programming)를 사용 |
| Creemers | 2015 | 엄밀한 마르코프 체인 알고리즘을 제안 |
| Fang et al. | 2015 | 진화적 메타휴리스틱 기법인 EDA(Estimation of Distribution Algorithm) 추정을 제안 |
| Wang & Ning | 2018 | 프로젝트 일정을 위하여 세 가지의 불확실한 선택제약 프로그래밍 모델을 제시 |
| Chen et al. | 2018 | 17가지의 자원기반 우선순위 규칙 휴리스틱 기법의 성능을 조사 |
| Raghavan, et al. | 2018 | 전자제품 제조 서비스(EMS) 분야의 확률적인 재작업과 재처리 시간이 있는 일정 문제의 해결을 위해 변형된 유전자 알고리즘을 개발 |
| Davari & Demeulemeester | 2019 | 선택의 제한이 있는 효율적인 분기 한정법 알고리즘을 개발 |

2.3.2 재작업 관련 선행연구

재작업과 공정변화 등의 불확정성은 프로젝트 일정 문제에 있어 실행 불가능과 생산 장애를 일으키는 요인으로 생산 일정 계획에서 매우 중요한 문제이다(Li & Ierapetritou, 2008).

재작업에 대한 몇 가지 정의를 살펴보면, 초기 단계에서 불완전한 가정으로 시도되었기 때문에 반드시 발생하는 반복(Smith & Eppinger, 1997), 초기에 부정확하게 시행된 활동 또는 불필요한 활동을 반복 하는 것(Love, 2002), 동일한 범위, 추상적인 수준에서의 활동의 반복(Costa &

Sobek, 2003), 프로젝트에서 어떠한 모든 형태의 변화로 인해 다시 해야만 하는 작업(Taylor & Ford, 2006), 업스트림과 다운스트림에서 이전에 수행된 작업에 의하여 설계가 변경된 것(Mitchell & Nault, 2007), 불필요한 설계를 반복하는 활동(Arundachawat et al., 2009), 결함으로 인한 프로젝트의 마감일이 변경되는 경우 발생하는 작업(Kennedy et al., 2014), 가정이 변경되어 비슷한 방법으로 작업을 재수행하는 것(Wynn & Eckert, 2017)이라 정의하고 있으며, 과거 선행연구에서는 품질의 부적합과 편차 및 결함 또한 재작업과 같은 의미로 보았다(Abdul-Rahman, 1995; Barber et al., 2000; Burati et al., 1992; Hegazy et al., 2011; Josephson et al., 2002). 이와 관련된 연구는 [표 2-3]과 같다.

[표 2-3] 불확실성이 있는 일정 관련 연구

| 저자 | 연도 | 내용 |
|--------------------|------|--|
| Hegazy et al. | 2011 | 재작업이 일정 지연에 미치는 영향을 조사하고 비용에 대한 효율적인 조치전략 최적화 방안을 제안 |
| Hossain & Chua | 2014 | 건설 분야의 프로젝트에서 프로젝트의 총 기간에 영향을 주는 다양한 재작업 요인들을 설명하며, 최소한의 재작업으로 일정을 최적화하는 통합 프레임워크를 제안 |
| Maghsoudlou et al. | 2017 | 재작업이 프로젝트의 성능과 생산성에 불리한 영향을 미치며, 그로 인한 재작업의 효과를 분석하고, 이를 줄이기 위한 몇 가지 접근법을 제시 |
| Raghavan et al. | 2018 | 확률적인 재작업 및 재처리시간을 포함한 일정 문제의 해결을 위해 변형된 유전자 알고리즘을 제안 |
| 백인섭 | 2020 | 프로젝트 일정 문제에서 활동의 재작업확률이 알려져 있는 경우 일정계획의 활동 기간에 대한 기댓값과 그 승수(Multiplier)를 이용하여 활동 기간에 대한 추정치를 적용했다. 그리고 승수의 변화에 따른 모의실험을 통하여 해당 프로젝트에 적합한 승수를 찾는 방법을 제시 |
| Lipke, W. | 2020 | 프로젝트 관리자가 재작업에 대한 비용의 영향을 평가하고, 재작업으로 인해 증가하는 기간을 결정하는 방법을 제시 |

2.3.3 시뮬레이션 기법(Simulation)

확률적인 요인으로 인해 불확정적인 사건의 가능한 결과에 사용되는 일반적인 기법으로 몬테카를로 시뮬레이션이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션은 무작위 추출의 반복을 이용하여 확률적인 값을 확정적으로 추정할 수 있으며, 프로젝트의 일정 작성에서 확률적 요인을 사용하여 전체 프로젝트에 대한 가능한 일정 결과를 계산할 수 있다(PMI, 2017). 또한, 시뮬레이션은 모든 산업과 생활에 제한 없이 적용 가능하며, 실제 상황이나 시스템에서 시간의 흐름과 유사한 환경을 만들어 이를 모방한 것이며, 따라서 시뮬레이션은 실제와 얼마나 유사하게 모델링되었는가가 실험 성공의 관건이라 하였다(Banks, 2005).

시뮬레이션 기법을 이용하면 프로젝트에서 생산 진행 시 발생할 수 있는 재작업, 고장 등에 대한 확률모델을 적용하여 반복 실험을 진행할 수 있다(Zhang et al., 2007). 이러한 시뮬레이션 기반의 최적화 방법은 피드백 루프를 사용하기도 하는데, 이 경우 시뮬레이션을 통해 매개변수를 받아서 사용하는 방법으로 적용할 수도 있다(Carson & Maria, 1997; Werner et al., 2006).

제 3 장 수학적 모형

3.1 문제의 개요

본 연구는 자원제약하에 불확실성이 있는 프로젝트 일정 문제(RCPSP with Uncertainty, Resource Contained Project Scheduling Problem with Uncertainty)를 다룬다. 일반적인 RCPSP 모형에는 불확실성이 존재하지 않는다. 그러므로 프로젝트를 구성하고 있는 활동들은 오직 한 번만 수행된다. 이와는 달리 본 연구는 전체 또는 일부의 활동들이 재작업될 수 있는 경우를 다룬다.

재작업의 형태는 범위와 횟수의 측면에서 다양할 수 있다. 예를 들어 활동 A에 재작업이 발생한다고 가정하자. 활동 A는 시작부터 종료까지 전체 작업이 다시 수행되어야 하는 때도 있고, 전체가 아닌 특정 부분만 작업이 다시 수행되어야 하는 때도 있다. 또한, 재작업이 지체없이 즉각 이루어져야 하는 때도 있으며, 재작업이 일정 시간 경과 후에 이루어져도 무방한 때도 있다. 본 연구의 모형은 부분 재작업이 아니라 활동 전체에 대한 재작업이 이루어져야 하는 경우를 다루며, 재작업 횟수의 제한이 없고, 재작업이 즉각 수행되지 않아도 되며, 재작업 발생확률이 일정하며 확률값이 사전에 알려진 경우를 다룬다.

3.2 문제의 가정

본 문제에서 가정은 다음과 같다.

- (1) 프로젝트 활동: 프로젝트에서 실제 활동의 수는 N 개이며, 편의상 프로젝트의 시작과 종료에 해당하는 두 개의 가상활동(Dummy Activity)을 네트워크에 포함한다. 가상활동의 수행에 필요한 기간,

비용 및 자원은 모두 0이다. 모든 활동이 종료되면 프로젝트도 종료된다.

- (2) 재작업이 가능한 활동들 - 검수: 일부 활동들은 활동이 종료될 때 검수를 받아야 한다. 합격 판정을 받으면, 그 활동은 완전히 종료된다. 불합격 판정을 받으면, 그 활동은 재작업에 들어간다.
- (3) 재작업 횟수: 재작업이 가능한 활동의 경우, 재작업 횟수에는 제한이 없다. 합격 판정을 받을 때까지 재작업이 이루어진다.
- (4) 재작업 범위: 불합격 판정받은 활동은 전면 재작업에 들어간다. 예를 들어, 활동의 작업 범위를 100이라 하자. 최초의 작업에서도 100을 해야 하며, 이후의 재작업에서도 동일하게 100을 수행해야 한다. 다시 말해, 재작업 회차가 증가해도 작업 범위는 감소하지 않는다.
- (5) 재작업의 시작 시기: 불합격 판정 즉시 재작업이 시작될 필요는 없다. 예를 들어, 활동 A가 시점 10에 완료되고 불합격 판정을 받았다고 하자. 활동 A의 재작업은 반드시 시점 10에 시작되어야 하는 것은 아니다. 시점 10 이후의 어떤 시점에 재작업이 시작되어도 무방하다.
- (6) 활동의 선·후행 관계: 활동 간에 선·후행 관계가 존재할 수 있다. 이들 선·후행 관계는 확정적으로 존재한다. 후행 활동은 자신의 모든 선행 활동이 종료된 이후에나 시작할 수 있다. 활동 간의 선·후행 관계에 대한 집합을 H 라 하자. $(i,j) \in H$ 이면 활동 i 는 활동 j 가 종료되기 전에는 시작할 수 없음을 뜻한다.
- (7) 활동의 비선점성(Non-preemptive): 재작업이 없는 활동의 경우, 활동은 시작되면 종료 시점까지 연속적으로 수행되어야 하며 종료 시점 이전에 중단될 수 없다. 재작업이 가능한 활동의 경우, 비선

점성은 작업에만 적용되고 작업 간에는 적용되지 않는다. 예를 들어, 활동 B가 재작업이 가능한 활동이고, 2번의 재작업을 수행한 후에 합격 처리되었다고 하자. 활동 B의 첫 번째 작업은 일단 시작하면 종료할 때까지 중단될 수 없고, 첫 번째 재작업과 두 번째 재작업도 일단 시작하면 중도에 중단될 수 없다. 단, 첫 번째 작업과 첫 번째 재작업, 첫 번째 재작업과 두 번째 재작업은 연속적으로 수행될 필요는 없다.

- (8) 모드(Mode): 활동의 수행방법을 모드라 한다. 모드는 활동마다 하나 이상 존재하며, 어떤 모드로 수행되는가에 따라 해당 활동의 수행에 필요한 기간, 비용과 자원은 달라질 수 있다. 각 활동에 대한 모드별로 수행에 필요한 기간, 비용과 자원은 사전에 알려져 있다.
- (9) 재작업의 모드: 모드는 활동 단위로 배정된다. 어떤 활동이 재작업에 들어간다고 해도 모드의 변경은 허용되지 않는다. 예를 들어, 활동 C가 모드 1로 수행되었고, 불합격 처리되었다고 하자. 이 경우 활동 C의 재작업은 항상 모드 1로 이루어져야 한다.
- (10) 활동의 수행 기간과 비용: 활동의 수행비용은 배정된 모드와 재작업 횟수에 따라 결정된다. 활동 C가 수행할 수 있는 모드가 두 가지 존재한다고 가정하자. 첫 번째 모드의 경우 수행에 필요한 기간은 20, 비용은 50이고, 두 번째 모드의 경우 필요한 기간은 10, 비용은 80이라 하자. 활동 C를 첫 번째 모드로 수행하고 재작업이 없다면, 활동 C의 수행비용은 50이고 기간은 20이 된다. 만약 재작업 횟수가 3이라면 총 4번 수행하였으므로 비용은 $50 \times 4 = 200$ 이다. 활동 C의 수행 기간은 3번째 재작업의 완료 시점에서 최초의 작업 시작 시점을 뺀 값으로, 작업 간의 간격에 따라 그 값이 결정된다.

- (11) 자원 : 프로젝트에서 활동의 수행에는 시설과 장비 또는 인력 등과 같은 자원이 필요하다. 각 활동을 수행하는데 필요한 자원의 수량과 종류는 모드에 따라 다르며, 사전에 알려져 있다. 활동 D가 모드 1로 수행하는 경우 자원 1은 3, 자원 2는 5만큼 필요하다는 것은 활동 D의 시작 시점부터 종료 시점까지 매 시점에서 자원 1은 3, 자원 2는 5가 활동 D에 의해 점유됨을 뜻한다. 활동 D가 종료되면, 해당 자원의 점유도 종료된다. 재작업의 경우에도 재작업이 수행되는 매 시점별로 같은 종류와 수량의 자원이 점유되고, 재작업이 완료되면 자원의 점유도 종료된다.
- (12) 가용자원의 수량: 프로젝트의 모든 기간에 걸쳐 사용 가능한 자원의 수량은 사전에 알려져 있다. 어떤 시점에서도 수행되는 활동들에 의해 점유되는 자원량의 합은 가용자원의 수량을 초과할 수 없다.
- (13) 재작업 확률: RA 에 속한 각 활동에 대한 재작업 확률은 사전에 알려져 있다.
- (14) 마감일(Due Date): 프로젝트에는 마감일이 있으며, 프로젝트가 마감일보다 늦게 종료된 경우, 마감일로부터 프로젝트의 종료 시점까지 매 시점 지체보상금(Penalty Cost)이 발생한다. 마감일과 매 시점 적용되는 지체보상금은 사전에 알려져 있다.

3.3 문제의 수식화

본 문제에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} \quad \sum_{i \in RA} \sum_{m \in M(i)} Acti_Cost_{im} \times x_{im} \\
 & \quad + \sum_{i \in RA} \left(\sum_{m \in M(i)} Acti_Cost_{im} \times x_{im} \right) \times (R_i + 1) \\
 & \quad + Pen_Cost \times \max \{s_{N+1} - Due_Date, 0\} \quad [1]
 \end{aligned}$$

Subject to

$$x_{im} \in \{0, 1\} \quad \forall im \quad [2]$$

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

$$d_i = \begin{cases} s_i^{R_i} + \sum_{m \in M(i)} dur_{im} \times x_{im} - s_i^0 & \text{if } i \in RA \\ \sum_{m \in M(i)} dur_{im} \times x_{im} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \quad [4]$$

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

$$s_i^{l-1} + \sum_{m \in M(i)} dur_{im} \times x_{im} \leq s_i^l \quad \forall i \in RA, l = 1, 2, \dots, R_i \quad [6]$$

$$s_0 = 0 \quad [7]$$

$$\sum_{i \in S_t} \sum_{m \in M(i)} R_{imk} \times x_{im} \leq b_{kt} \quad \forall kt \quad [8]$$

Where,

i 프로젝트에서 활동을 나타내는 인덱스로 $i = 0, 1, 2, \dots, N, N+1$ 로 표기된다. 활동 0과 $N+1$ 은 가상의 활동으로 각각 프로젝트의 시작과 종료를 의미한다.

RA 재작업 확률이 있는 활동들의 집합이다.

| | |
|-------------------|---|
| \overline{RA} | 재작업이 발생하지 않는 활동들의 집합이다. |
| m | 각 활동의 모드를 나타내는 인덱스이다. |
| $M(i)$ | 활동 i 가 선택할 수 있는 모드의 집합이다. |
| x_{im} | 활동 i 가 모드 m 으로 수행되면 1, 아니면 0의 값을 가지는 0-1 의사결정변수이다. |
| $Acti_cost_{im}$ | 활동 i 가 모드 m 으로 1회 수행할 때 필요한 수행비용이다. |
| dur_{im} | 활동 i 가 모드 m 으로 1회 수행할 때 필요한 수행 기간이다. |
| R_i | 활동 i 의 재작업 횟수를 나타내는 확률변수이며, R_i 는 범자연수(비음 정수)에 속한다. |
| d_i | 프로젝트에서 활동 i 가 시작에서 종료까지 소요된 기간이다. 활동 i 가 재작업이 가능한 활동의 경우 활동의 최초 작업의 시작 시점부터 마지막 작업의 완료 시점까지의 기간을 의미한다. |
| s_i | 활동 i 의 시작 시점을 나타내는 의사결정변수이다. |
| s_i^l | 재작업이 가능한 활동 i 의 l 번째 재작업의 시작 시점이다. $l = 0$ 이면, 최초의 작업을 의미하고, $l = 1, 2, \dots, R_i$ 는 l 번째 재작업을 의미한다. |
| H | 활동들의 선·후행 관계를 나타내는 집합이다. (i, j) $\in H$ 이면, 활동 i 가 종료되기 전에는 활동 j 가 시작될 수 없음을 의미한다. |
| S_t | 시점 t 에 진행 중인 활동의 집합으로, 개념적인 |

| | |
|-------------|--|
| | 서술(conceptual statement)이다. 시점 t 에 시작된 활동은 포함되나, 종료된 활동은 제외된다. |
| k | 자원의 종류를 나타내는 인덱스이다. |
| R_{imk} | 활동 i 가 모드 m 으로 진행될 때, 시점별 자원 k 의 소요량이다. |
| b_{kt} | 시점 t 에 가용한 자원 k 의 수량이다. 자원 별 가용량은 프로젝트 시점별로 다를 수 있다. |
| Due_Date | 프로젝트의 마감일이다. |
| Pen_Cost | 프로젝트의 종료 시점이 마감일을 초과하는 경우 지연 시점별 발생하는 지체보상금이다. |

식[1]은 본 연구의 목적함수로 이 문제가 프로젝트의 비용 최소화 문제임을 보여준다. 이 모형에서 프로젝트 비용은 세 부분으로 나누어진다. 첫 번째 부분은 재작업 확률이 없는 활동들에 대한 비용의 합계로, 각 활동이 어떤 모드로 진행되는가에 따라 결정되며, 두 번째 부분은 재작업 확률이 있는 활동들에 대한 비용의 합계로, 각 활동이 어떤 모드로 수행되는가와 재작업으로 작업횟수가 몇 번 추가되는가에 따라 결정된다. 마지막 부분은 지체보상금에 대한 비용으로, 프로젝트가 마감일(Due_Date)을 초과한 경우 지연되는 기간에 따라 결정된다. 제약식 [2]의 $x_{i,m}$ 은 활동 i 의 수행 모드 m 에 대한 것을 나타내는 0-1변수이다. 제약식 [3]은 모든 활동이 활동별로 단 하나의 모드만 선택할 수 있음을 나타낸다. 제약식 [4]는 활동 i 가 시작해서 완료될 때까지 소요된 기간 d_i 를 나타낸다. 만일, 활동 i 가 재작업 확률이 없는 활동($i \in \overline{RA}$)인 경우 수행하는 기간 d_i 는 활동 i 가 어떤 모드를 사용하는가에 따라 결정된다.

즉, 의사결정변수 x_{im} 에 의해 결정된다. 그러나, 활동 i 가 재작업 확률이 있는 활동($i \in RA$)인 경우 시작에서 종료까지의 기간은 d_i 는 선정 모드, 재작업 횟수와 각 작업의 시작 시기에 따라 결정된다. 즉, 확률변수 R_i 와 의사결정변수 x_{im} , s_i^l 에 의해 결정된다.

제약식 [5]는 활동들의 선·후행 관계에 대해 나타내고 있다. 만일 활동 i 가 활동 j 의 선행 활동이면, 활동 i 가 종료되는 시점($s_i + d_i$) 이후 후행 활동 j 의 시작이 가능함을 의미한다. 여기서 집합 H 는 활동들 사이의 선·후행 관계를 나타내는 집합으로, $(i, j) \in H$ 는 활동 i 가 활동 j 의 선행 활동이고, 활동 j 는 활동 i 의 후행 활동임을 나타낸다. 제약식 [6]은 재작업이 가능한 활동만을 대상으로 한다. 활동 i 에 총 R_i 번의 재작업이 발생했다고 하자. 첫 번째 재작업의 시작 시기(s_i^1)는 최초의 종료 시기(시작 시기 + 작업 기간 = $s_i^0 + \sum_{m \in M(i)} dur_{im} \times x_{im}$)보다 앞설 수 없다. 같은 방식으로 $l > 0$ 번째 재작업의 시작 시기는 $(l-1)$ 번째 작업의 종료 시기보다 앞설 수 없음을 나타낸다. 제약식 [7]은 활동 i 의 인덱스가 0인 가상활동이 시점 0에 시작($s_0 = 0$)됨을 의미하며, 이는 프로젝트의 시작 시점이 0으로 설정되었다는 의미이다. 식 [8]은 자원과 관련된 제약식으로 S_t 는 시점 t 에서 진행 중인 활동들의 집합을 나타내는 개념적인 서술이다. 따라서, $\sum_{i \in S_t} \sum_{m \in M(i)} R_{imk} \times x_{im}$ 은 시점 t 에서 진행 중인 각 활동들($i \in S_t$)이 요구하는 자원 k 의 수량을 합한 값이다. 즉, 매 시점에 진행 중인 모든 활동의 수행에 필요한 자원의 종류별 요구량의 합이 그 시점에 가용한 수량(b_{kt})을 초과할 수 없음을 나타낸다.

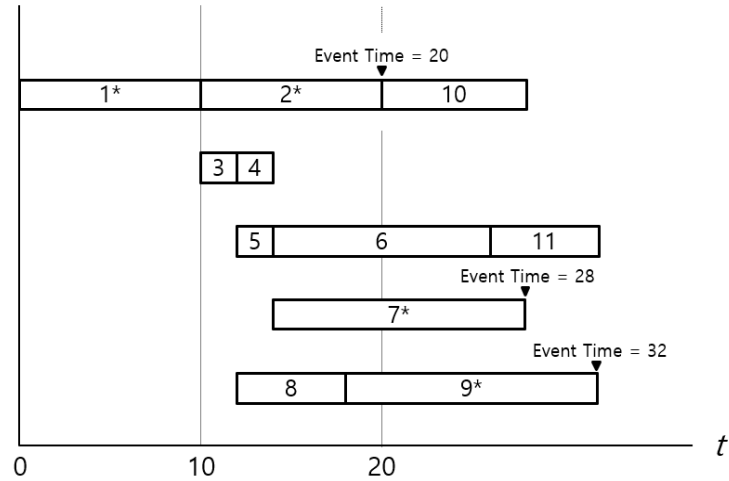
제 4 장 알고리즘

본 연구는 RCPSP(Resource Contained Project Scheduling Problem)에서 활동별로 선택할 수 있는 모드가 복수인 경우(RCPSPMM, RCPSP with Multiple Modes)를 다룬다. 전형적인 RCPSPMM은 확정적 모형으로서 어떤 활동이든 한 번만 수행하면 되지만, 본 문제는 RCPSPMM은 확률적 모형으로서 몇몇 활동의 경우 검수 결과에 따라 재작업이 이루어질 수 있다.

RCPSPMM은 NP-Hard Class에 속한다. RCPSPMM의 경우 활동의 수와 활동별 모드의 수가 커지면, 해 영역이 기하급수적으로 확장되어 최적해를 탐색하는 데 소요되는 시간이 급증하게 된다(Ahn & Erenguc, 1998). 따라서 활동과 모드의 수가 작다면 해 영역 또한 그다지 크지 않아 최적해법을 사용할 수 있으나, 활동과 모드의 수가 커지면 해 영역이 기하급수적으로 커지게 되어 현실적인 시간 내에 최적해를 구하는 것이 불가능하게 된다. 그러므로 활동과 모드의 수가 큰 경우에는 비교적 제한된 시간 내에 양질의 결과를 찾아내는 휴리스틱 기법을 사용한다.

확정적 RCPSPMM의 경우 모든 요소가 확정적이기 때문에 불확실성이 없으며, 따라서 프로젝트의 전체 일정을 한 번에 모두 확정할 수 있다. 만일 프로젝트 진행 중 잔여 일정을 재작성한다 해도 최초의 작성 시점에서의 정보가 전혀 변경되지 않았으므로 같은 일정이 도출될 수밖에 없다. 이와는 달리 본 연구에서 다루는 확률적 RCPSPMM은 재작업이 가능한 활동이 완료될 때마다 합격 또는 불합격 두 개의 상황 중 하나의 상황이 발생한다. 합격 판정을 받으면 해당 활동은 완료되어 재작업할 필요가 없어지지만, 불합격 판정을 받으면 해당 활동을 최소한 한 번 더 수행해야 하며, 수행 완료 시 판정 여부에 따라 추가 재작업이 요

구될 수도 있다. 그러므로 본 모형에서 프로젝트 일정은 재작업이 완료되는 시점까지의 일정과 그 이후의 일정으로 나누어진다.



[그림 4-1] 가상의 일정

[그림 4-1]과 같은 가상의 일정을 고려하자. 위의 그림에서 1*, 2*, 7*과 9*는 재작업이 가능한 활동을 의미한다. 만일 현재 시점이 10($t=10$)이고, 시점 0에 시작한 활동 1*은 시점 10에 완료되었으며 합격 판정을 받았다고 하자. 그러면 현재 시점 이후의 일정에서 가장 빠른 이벤트 시점(재작업 활동이 완료되어 합격 또는 불합격 판정받는 시점)은 재작업 가능한 활동 2*, 7*, 9*의 완료 시점인 20, 28, 32 중 가장 빠른 시점이 된다. 따라서 현재 시점을 기준으로 미래의 가장 빠른 이벤트 시점을 t_{rework} 라 정의하면, $t_{rework} = \min(20, 28, 32)$ 가 된다. $t < 10$ 까지의 일정은 이미 과거의 일정이므로 확정된 일정이고, $t = 10$ 부터 20까지의 일정은 이벤트가 발생하지 않아 확정된 일정이다. 그러나 $t \geq t_{rework}$ 이후의 일정은 그 시점에 완료되는 활동 2*, 7*, 9*의 합격 여부에 따라 추가 재작업이

요구될 수도 있다. [그림 4-1]의 일정에서 활동 10은 $t = 20$ 에, 활동 11은 $t=26$ 에 시작하도록 배정되어 있다. 그러나 활동 2*가 불합격 판정을 받아 재작업이 요구되고 활동 2*와 10 사이에 선행관계가 존재한다면, 활동 10은 $t = 20$ 에 시작될 수 없다. 따라서 $t \geq t_{rework}$ 이후의 일정은 시점 t 에 확정될 수 없으며, 시점 t_{rework} 에서 활동의 재작업 판정 여부에 따라 일정이 새로 작성되어야 한다. [그림 4-1]의 가상 일정의 경우, $t < 10$ 까지의 일정은 이미 경과되어 과거의 일정이고, $10 \leq t < 20$ 까지의 일정은 현재 시점 $t = 10$ 에서 확정되는 일정이고, $t \geq 20$ 의 일정은 $t = 20$ 에서의 이벤트 결과에 따라 변경될 수 있는 일정이다.

재작업이 가능한 활동이 존재하는 RCPSPMM 문제를 현실에서 다룬다면, 아래의 모형과 같은 순서로 일정을 작성하고 정보가 업데이트될 때마다 잔여 일정을 재작성할 수 있다.

모형 1. 잔여 일정 전체를 작성하는 모형

(1) (최초의 일정)

시점 $t = 0$ 으로 한다. 모든 활동을 대상으로 최초의 일정계획을 작성한다.

(2) (재작업 가능한 활동이 완료되는 시점까지 진행)

시점 t 를 증가시키며, 가장 빠른 재작업 가능한 활동의 완료 시점을 찾는다. 재작업 가능한 활동이 완료되는 시점에 이르면, 검수 결과에 따라 두 가지의 상황이 발생한다. 만약 해당 활동이 합격 판정이면, 그 활동은 재작업 가능한 활동에서 삭제한다. 불합격 판정이면, 시점 t 이후에 다시 작업하도록 한다.

(3) (시점 t 에서의 잔여 일정 재작성)

시점 t 까지 시작하지 않은 활동들을 대상으로 일정을 재작성한다. 잔여 일정에 재작업 가능한 활동이 없으면, 더이상 일정의 재작성은 필요없다. 그러나 잔여 일정에 재작업 가능한 활동이 남아 있으면 (2)를 반복한다.

모형 1은 잔여 일정 전체를 재작성한다. 예를 들어, $t = 0$ 일 때 모든 활동을 대상으로 일정을 작성하며, 재작업이 가능한 활동들이 완료될 때마다 잔여 일정 전체를 재작성한다. 그러나 재작업이 가능한 활동들이 완료되는 시점마다 그 시점 이후의 일정이 변경되므로, 모형 1은 다음과 같이 수정될 수 있다.

모형 2. 다음번 재작업 가능한 활동이 완료되는 시점까지만 일정 작성하는 모형

(1) (최초의 일정)

시점 $t = 0$ 으로 한다. 재작업 가능한 활동들이 완료되는 시점 중 가장 빠른 시점까지의 일정만 작성한다.

(2) (재작업 가능한 활동이 완료되는 시점까지 진행)

재작업 가능한 활동이 완료되는 시점으로 t 를 업데이트한다. 재작업이 가능한 활동이 다수이면, 이들 완료 시점 중 가장 빠른 시점을 t 로 한다. 이 시점에 완료되는 (재작업이 가능한) 활동들의 검수 결과에 따라 합격이면 그 활동을 재작업 가능한 활동에서 삭제한다. 불합격 판정이면, 시점 t 이후에 다시 작업하도록 한다.

(3) (시점 t 에서의 잔여 일정 재작성)

시점 t 까지 시작하지 않은 활동들을 대상으로 일정을 재작성하

되, 시점 t 이후 재작업이 가능한 활동이 완료되는 시점 중 가장 빠른 시점까지의 일정만 작성한다. 잔여 일정에 재작업 가능한 활동이 없으면, 더이상 일정 재작성은 필요없다. 그러나 잔여 일정에 재작업 가능한 활동이 남아 있으면 (2)를 반복한다.

모형 1은 확률적 부분까지를 포함하고 있지만, 모형 2는 확정적 부분까지만 일정을 (재)작성한다.

4.1 시점 t 에서의 프로젝트 잔여 일정 문제와 해법

본 연구는 모형 2에 기반하여 하위 문제들과 하위 문제들의 해법을 제시한다.

4.1.1 시점 t 에서의 프로젝트 잔여 일정 문제

시점 t 까지 시작하지 않은 활동들을 대상으로 일정을 작성한다. 이 일정에서 재작업이 가능한 활동이 완료되는 최초의 시점을 t_{rework} ($t_{rework} > t$)라 하자. 이 경우 기간 $[t, t_{rework})$ 에는 (재작업 가능한 활동이 실패 판정받아) 재작업이 추가되는 경우는 존재하지 않는다. 다시 말해 기간 $[t, t_{rework})$ 의 일정은 확정적 일정이다.

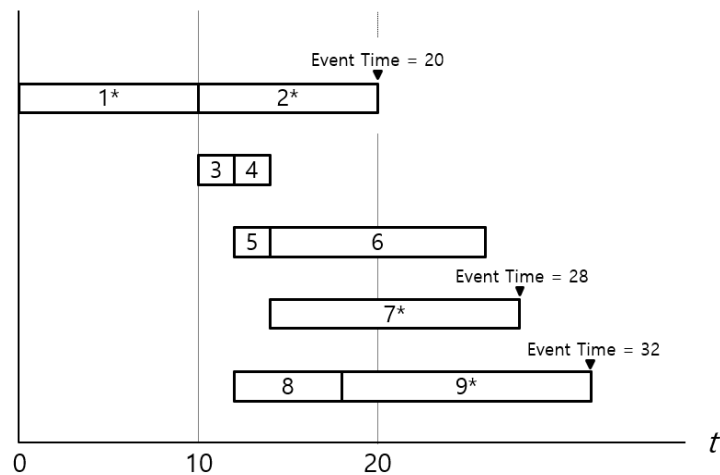
미래의 재작업 횟수의 확률적 분포를 고려한 일정작성 기법으로 아래의 다단계 의사결정 해법을 제안한다.

4.1.2 시점 t 에서의 (다단계 의사결정) 해법

시점 t 까지 시작하지 않은 활동들을 미배정 활동들이라 하자. 미배정 활동 중 자신의 선행 활동들이 모두 배정된 활동을 배정 가능 활동이라

하자. 이 해법에서는 배정 가능한 활동들의 시작 시기와 모드를 동시에 결정하는 것이 아니라, 배정할 활동을 하나 선택하고 그 활동의 모드를 결정한다. 이와 같은 배정은 t_{rework} 이전에 시작할 활동이 더이상 없을 때까지 반복된다. 그런데 t_{rework} 는 시점 t 에서 일정을 작성하기 이전부터 알려지는 값이 아니라 시점 t 에서 일정이 어떻게 작성되느냐에 따라 결정되는 값이다. 그러므로 최초의 t_{rework} 은 충분히 큰 값으로 초기화되며, 재작업 가능한 활동이 배정될 때마다 t_{rework} 은 재작업 가능한 활동의 완료 시점 중 가장 빠른 시점으로 업데이트된다.

시점 t 에서 작성되는 일정이 [그림 4-2]와 같다고 하자. $t \geq 10$ 에서 활동들의 배정 순서는 2*, 3, 4, 5, 6, 7*, 8, 9*라 하자.



[그림 4-2] 시점 t 에서 작성되는 일정

재작업이 가능한 활동 2*가 배정되었다면, 최초의 재작업 가능한 활동의 완료 시점이 20이므로 $t_{rework} = 20$ 이 된다. 이후 재작업이 발생하지 않는 활동 3, 4, 5와 6이 배정되어도 t_{rework} 은 여전히 20이다. 재작업이

가능한 활동 7*이 배정되면, t_{rework} 은 기존의 값 20과 활동 7*의 완료 시점 28 중 빠른 시점인 20이 된다(활동 7*의 완료 시점이 기존의 t_{rework} 보다 이르지 않으므로, t_{rework} 은 변하지 않는다). 활동 8은 재작업이 가능한 활동이 아니므로 t_{rework} 은 변하지 않고, 활동 9*는 재작업이 가능하지만 완료 시점이 t_{rework} 보다 빠르지 않으므로 t_{rework} 의 값은 변하지 않는다. 만약 아직 미배정된 활동 중 $t_{rework} = 20$ 보다 더 이른 시점에 배정될 수 있는 활동이 없다면, t_{rework} 은 20으로 확정되고 시점 10부터 t_{rework} 까지의 일정 또한 확정된다.

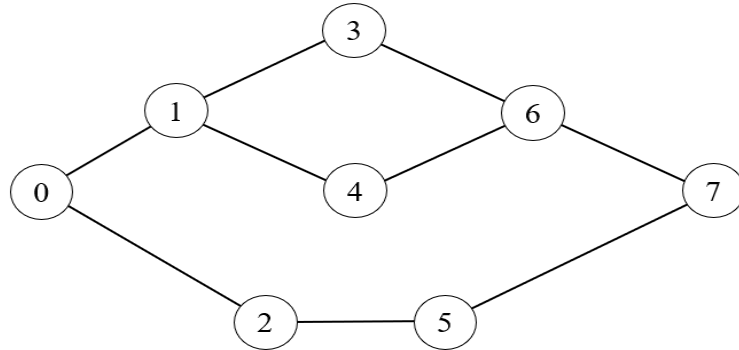
Step 0. t 와 t_{rework} 초기화

$t = 0$, t_{rework} = 충분히 큰 값으로 설정한다. (여기서 t 는 일정이 작성되는 시점을, t_{rework} 는 시점 t 이후에 배정된 재작업이 가능한 활동들의 완료 시점 중 가장 빠른 완료 시점이다. 아직 어떤 활동도 배정되지 않았으므로, t_{rework} 은 충분히 큰 값으로 초기화한다.)

Step 1. 배정 가능한 활동 중 하나를 선택한다.

1.1 [배정 가능한 활동 리스트 업데이트]

시작 시기와 모드가 미배정된 활동 중 배정 가능한 활동들의 리스트를 업데이트한다(여기서 배정 가능한 활동들이란 자신의 선행 활동이 모두 배정된 활동들을 말한다.).

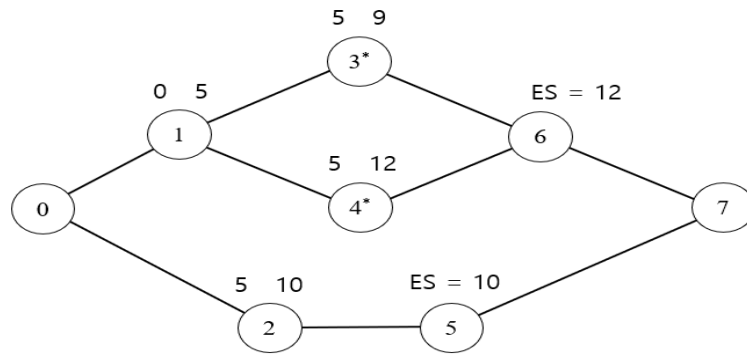


[그림 4-3] 네트워크 예시 1

[그림 4-4]의 네트워크에서 활동 0과 7은 프로젝트의 시작과 종료를 나타내는 가상의 활동들이다. $t = 0$ 이라면, 시작을 나타내는 활동 0 이외의 어떤 활동들도 미배정 상태이므로, 배정 가능한 활동은 1과 2이다(이 두 활동의 선행 활동은 0뿐이다.). 활동 1, 2와 3이 배정되었다면, 배정 가능한 활동은 4와 5이다(활동 4의 선행은 활동 1뿐이고, 활동 5의 선행은 활동 2뿐이며, 활동 1과 2는 이미 배정된 상태이다.).

1.2 [t_{rework} 이후에나 시작할 수 있는 활동들은 배정 가능한 활동 리스트에서 제거]

배정 가능한 활동 중 t_{rework} 이후에나 시작할 수 있는 활동들은 기간 $[t, t_{rework})$ 의 일정에 속하지 않으므로, 배정 가능한 활동 리스트에서 제거한다.



[그림 4-4] 네트워크 예시 2

[그림 4-5]의 경우 활동 1, 2, 3*과 4*가 배정된 상태이다. 활동 3*과 4*는 재작업이 가능한 활동이다. 활동 1부터 4*까지의 시작 시점과 종료 시점은 (0, 5), (5, 10), (5, 9)와 (5, 12)이다. 현 배정상태(활동 1부터 4*까지 배정)에서 배정 가능한 활동은 5와 6이다. 활동 5의 경우 선행관계만 고려한 ES(Earliest Start Time)는 10이다.(활동 5의 선행은 활동 2이고, 활동 5의 시작 시점은 활동 2의 종료 시점보다 빠를 수 없다). 활동 6의 경우 선행관계만 고려한 ES는 12이다(활동 3*과 4*의 종료 시점보다 빠를 수 없다). 배정 가능한 활동 중 t_{rework} 보다 ES가 큰 활동들은 현재 시점 t 에서 배정이 이루어질 수 없고 시점 t_{rework} 이후에 배정할 수 있다. 그러므로 활동 5와 6은 배정 가능한 활동 리스트에서 삭제되어야 한다.

(t_{rework} 이전에) 배정 가능한 활동 리스트가 비어 있으면, 기간 $[t, t_{rework})$ 의 일정이 확정되었으므로 종료한다. 비

어 있지 않으면, Goto Step 1.3

1.3 [시점 t 이후의 재작업 횟수의 시나리오 M (예로서 $M = 1,000$) 개 생성]

시점 t 이후에 추가될 수 있는 재작업의 회수 시나리오를 M (예로서 $M = 1,000$) 개 생성한다. 예를 들어 시점 $t = 0$ 이고, 아직 합격 판정받지 못한 재작업 가능 활동들로 3*과 4*가 있고, 각각의 재작업 확률은 0.2와 0.3이라 하자. 각 활동의 재작업 횟수 시나리오는 다음과 같은 방법으로 생성될 수 있다.

활동 3*의 재작업 횟수는 0~1 사이의 난수가 0.2 이상의 값이 될 때까지의 횟수(아래 구문에서 cnt의 값)

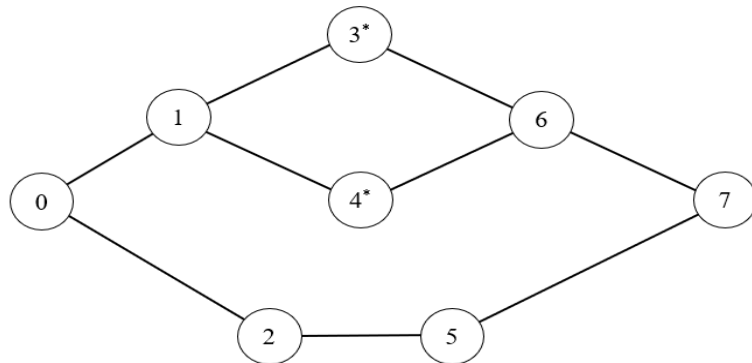
```
for cnt = 0 to 10000
  if rnd > 0.2 then exit for
next cnt
```

위와 같은 방법을 활동 4*에도 적용하여 M 개의 추가 재작업 횟수의 시나리오를 생성한다.

[표 4-1] 활동 3*과 4*의 재작업 횟수 조합

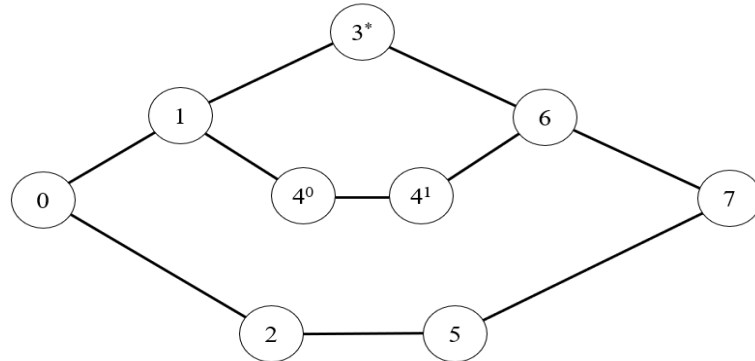
| 시나리오 | (추가) 재작업의 수 | |
|-------|-------------|-------|
| | 활동 3* | 활동 4* |
| 1 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 2 |
| 3 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 |
| 5 | 1 | 0 |
| 6 | 1 | 0 |
| 7 | 2 | 1 |
| 8 | 1 | 0 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 1,000 | 0 | 0 |

프로젝트 네트워크가 [그림 4-5]와 같고, 현재 시점 $t = 0$ 이라 하자. 활동 3*과 4*는 미배정 상태이다.



[그림 4-5] 네트워크 예시 3

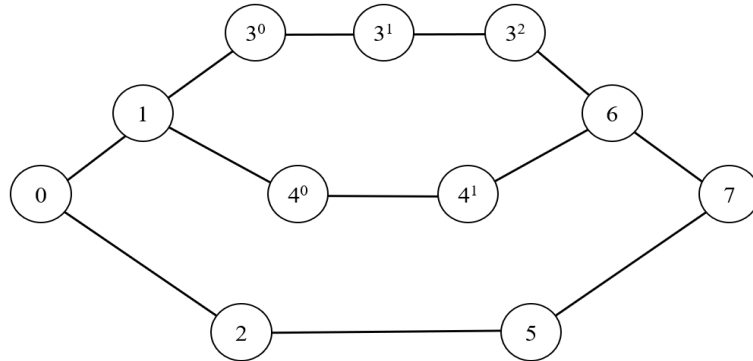
시나리오 1은 현재 시점 이후에 추가되는 재작업의 수가 활동 3*은 0, 활동 4*는 1인 경우이다. 이를 네트워크에 반영하면 [그림 4-6]과 같다.



[그림 4-6] 네트워크 예시 4

활동 3은 변함이 없지만, 활동 4는 4^0 에 4^1 이 추가되었다 (여기서 위첨자는 재작업의 순번이다. 4^0 이란 활동 4의 원 작업을, 4^1 이란 활동 4^* 의 첫 번째 재작업을 의미한다.). 선행관계 측면에서 보면, 활동 4^* 의 첫 번째 재작업은 원 작업이 종료된 이후에 시작될 수 있고 활동 6은 활동 4^1 이 종료된 이후에 시작될 수 있다. 합격/불합격 판정 측면에서 보면, 활동 3^* 은 한 번 수행으로 합격 판정받는다는 것을 의미하고, 활동 4^* 는 두 번 만에 합격 판정받는다는 것을 의미한다.

시나리오 7은 활동 3^* 에 재작업이 두 번, 활동 4^* 에 재작업이 한 번 추가되는 경우이다. 이를 네트워크로 표현하면 아래와 같다.



[그림 4-7] 네트워크 예시 5

원 모형에서 활동 3*과 4*의 재작업 횟수는 확률변수지만, 시나리오 1에서 재작업의 수가 0과 1인 계수이고, 시나리오 7은 재작업의 수가 2와 1인 계수이다.

t 가 0보다 큰 시점이라 하자. 이 시점까지 재작업 가능한 활동이 합격 판정받았다면, 이 시점 이후의 시나리오에서 그 활동의 추가 재작업의 수는 0으로 설정한다. 재작업이 가능한 어떤 활동이 3번 연속적으로 실패 판정을 받았다고 하자(최초 작업 실패, 두 번의 재작업도 모두 실패했음을 의미한다.). 이 경우 3번째 재작업이 실행되어야 한다. 이때 시나리오에서 그 활동의 추가 재작업의 수가 0이란 3번째 재작업은 합격 판정을 받는다는 것을 의미한다. 추가 재작업의 수가 2이면 3번째 재작업 실패, 4번째 재작업 실패, 그리고 5번째 재작업은 합격임을 의미한다.

1.4 [M개의 시나리오별로 일정작성]

시점 t 이후에 M 개의 시나리오가 현실로 발생한다고 가정한다. 미래의 재작업 횟수가 알려진 값이므로 이제 일정 문제는 확정적 모형이다. 확정적 모형의 휴리스틱 해를 구한다. 확정 모형의 휴리스틱 기법은 4.3에 약술되어 있다.

1.5 [M개의 시나리오 분석을 통해 배정할 활동 확정]

시나리오별로 배정 가능한 활동들의 시작 시점을 분석한다. 이 활동 중 시작 시점의 평균이 가장 빠른 활동을 이 단계에서 배정할 활동으로 선정한다. 시작 시점 평균이 가장 빠른 활동이 복수이면, 이들 중 하나를 임의로 선택한다.

예를 들어 활동 1과 2가 배정 가능한 활동이고, 아래와 같이 시나리오가 생성되었으며, 시나리오별로 휴리스틱 해가 구해졌고, 그 해에서 활동 1과 2의 시작 시기는 아래 표와 같다고 하자.

[표 4-2] 시나리오별 활동 1, 2의 시작 시기

| 시나리오 | (추가) 재작업의 수 | | 시작 시기 | |
|----------|-------------|----------|----------|----------|
| | 활동 3 | 활동 4 | 활동 1 | 활동 2 |
| 1 | 0 | 1 | 3 | 0 |
| 2 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 5 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 7 | 2 | 1 | 0 | 3 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| 1,000 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 평균 | | | 0.21 | 3.30 |

1,000개의 시나리오의 휴리스틱 해를 구하고 각 해에서의 활동 1과 2의 시작 시기를 조사한 결과, 활동 1의 시작 시기는 평균 0.21, 활동 2의 시작 시기는 평균 3.30에 달했다고 하자. 많은 시나리오에서 활동 1의 시작 시기가 2의 시작 시기보다 앞섰으므로, 이번에 배정할 활동으로 활동 1을 선택한다.

위의 표에서 1,000개의 시나리오에서 중복의 빈도가 상당히 높다. 이미 해를 구한 시나리오와 동일한 시나리오가 존재하면, 같은 시나리오의 해는 새로이 구하지 않고 기존의 해를 사용한다.

Step 2. 배정 활동의 모드를 선택한다.

Step 1에서 확정된 활동을 대상으로 한다. 이 활동의 선택 가능한 모드 별로 M개의 시나리오의 일정을 작성한다. 프로젝트 총 비용이 가장 낮은 모드를 이 활동의 모드로 선택한다.

예를 들어, 배정할 활동이 2이고 선택 가능한 모드로 1, 2, 3이 있다고 하자. Step 2에서의 일정 문제는 Step 1의 일정 문제를 다음과 같이 수정한 문제이다.

(1) 활동 2를 모드 1로 배정하고 활동 2의 시작 시기를 배정한다. 이 제약조건을 추가하여 M개의 시나리오 일정을 작성한다.

⋮

(3) 활동 2를 모드 3으로 배정하고 활동 2의 시작 시기를 배정한다. 이 제약조건을 추가하여 M개의 시나리오 일정을 작성한다.

예를 들어, 활동 2의 모드를 1로 할 때의 프로젝트 총비용 평균이 498, 2로 할 때 평균이 535, 3으로 할 때 257이면, 활동 2의 모드는 3으로 정한다.

Step 3. t_{rework} 와 미배정 활동 업데이트

Step 2에서 배정한 활동을 i 라 하자.

3.1 [t_{rework} 업데이트]

활동 i 가 재작업 가능한 활동이고 활동 i 의 종료 시점이 t_{rework} 보다 빠르면, t_{rework} 를 활동 i 의 종료 시점으로 업데이트한다.

3.2 [미배정 활동 리스트 업데이트]

Step 2에서 배정한 활동을 미배정 활동 리스트에서 제거한다. Goto Step 1

4.2 시점 t 의 업데이트와 추가 재작업 발생 여부 결정

가상으로 프로젝트를 진행해 본다고 하자. 프로젝트 시작 시점을 $t=0$ 이라 하면, 최초의 일정작성은 시점 $t=0$ 에서 이루어지며, 일정의 재작성은 $t>0$ 이후의 시점 중 재작업 가능한 활동이 완료되는 시점에서 이루어진다. 이 시점을 t_{rework} 이라 하자. 이 시점에서 재작업 가능한 활동의 검수 결과에 따라 그 활동이 완전히 종료될 수도 있고, 아니면 최소한 한 번 더 작업이 이루어져야 할 수도 있다.

4.2.1 시점 t 의 업데이트

현재 시점을 t 라 하자.

t 이후에 완료되는 재작업 가능한 활동이 하나도 없으면, t 시점 이후의 일정은 재작업 가능한 활동이 없으므로 확정적이다. t 시점부터 프로젝트 완료 시점까지 가상의 프로젝트는 일정대로 진행된다. 가상 프로젝트 진행을 완료한다.

t 이후에 완료되는 재작업 가능한 활동이 최소한 한 개 있으면, 다음번 분석 시점 t_{rework} 은 그러한 활동들의 완료 시점 중 가장 빠른 시점이 된다.

4.2.2 추가 재작업에서 재작업 발생 여부

활동 i 는 재작업 가능한 활동이고, t_{rework} 에 완료 예정이라 하자. 가상 프로젝트에서 활동 i 의 추가 재작업 여부는 사전에 알려진 활동 i 의 재작업 확률에 따라 결정된다. 예를 들어 활동 i 의 재작업 확률을 $ReWork_P(i)$ 라 하자. 난수값이 $ReWork_P(i)$ 이하면, 추가 재작업이 발생한 것으로, 아니면 활동 i 는 합격 판정받아 더 이상 추가 재작업이 없는 것으로 처리한다.

만약 추가 재작업이 발생하면, 활동 i 는 t_{rework} 이후에 다시 작업되어야 한다. 즉, 활동 i 는 시점 t_{rework} 에 미배정된 상태가 된다.

t 는 t_{rework} 로 업데이트되며, 시점 t 에서의 잔여 일정이 작성된다.

4.3 확정 모형의 휴리스틱 기법 약속

불확실성이 없는 RCPSPMM의 휴리스틱 기법은 이미 많이 연구된 분야다. 본 연구에서 사용된 휴리스틱 기법은 Ahn & Ereguc(1998)에 사용

된 휴리스틱 기법을 본 문제에 맞게 조정한 것이다. Ahn & Erenguc(1998)의 문제는 모드 내에서 기간 단축이 가능하여 모드별로 여러 기간이 존재하고 자원 가용량이 일정한 경우이고, 본 휴리스틱의 문제는 모드별로 오직 하나의 기간만이 존재하고 자원의 가용량이 일정하지 않은 경우이다.

4.3.1 전체 일정을 작성하는 휴리스틱 기법

전체 일정을 작성하는 휴리스틱 기법은 아래와 같이 약술될 수 있다.

Step 0. 초기화

모든 활동은 미배정 상태이다. (시작 시기, 모드는 모두 미확정)

Step 1. 배정할 활동 선택

1.1 미배정 활동 중 (1) 선행 활동들이 존재하지 않거나 (2) 모든 선행 활동들이 배정된 활동들은 배정 가능한 활동이다.

1.2 배정 가능한 활동이 없다면, 모든 활동이 배정되었고 일정이 완성되었다.

해의 값을 구하고, 지금까지 알려진 가장 좋은 해의 값보다 현재 해의 값이 좋으면, 현재 해의 값을 가장 좋은 해의 값으로 업데이트한다.

Goto Step 2.

1.3 활동의 배정

배정 가능한 활동 중 하나를 임의로 선정한다. 선정된 활동을 i 라 하자. 활동 i 가 선택할 수 있는 모드 중 하나

를 임의로 선정한다. 그 모드를 m 이라 하자. 활동 i 가 모드 m 으로 시작할 수 있는 가장 빠른 시점에 활동을 배정한다. 그 시점을 t 라 하자. 시점 t 는 아래의 두 조건을 모두 충족하는 t 중 가장 빠른 시점이다.

- (1) 활동 i 의 선행 활동이 존재한다면, 그 선행 활동의 종료 시점은 t 보다 늦을 수 없다.
- (2) 자원의 종류 k 별로 기간 $[t, t + dur_{im})$ 에 잔여 자원의 가용량이 이 활동 i 의 요구량 R_{imk} 보다 부족하지 않는다. 여기서 $t + dur_{im}$ 은 활동 i 의 종료 시점이며, 종료 시점에는 자원의 요구량이 존재하지 않는다.

Goto Step 1.

Step 2. 모드 변경을 통한 해의 개선

각 활동별로 미선택 모드에 대해 아래를 수행한다.

편의상 현 활동을 i , 배정된 모드를 m , 미배정 모드를 m' 이라 하자.

- (1) 모드의 비용이 이미 선택한 모드 비용보다 저렴하다.
 $(Acti_Cost_{im'} < Acti_Cost_{im})$
- (2) 다른 활동들의 배정(시작 시기와 모드)을 변경하지 않고 활동 i 의 모드를 m 에서 m' 으로 변경이 가능하다.
- (3) 활동 i 의 재배정이 프로젝트 종료 시점에 영향을 끼치지 않는다.

위의 세 가지 조건을 모두 충족된다면, 활동 i 를 모드 m' 으로 재배정하면 프로젝트 총비용은 $(Acti_Cost_{im} - Acti_Cost_{im'})$ 만큼 개선된다.

더이상 해가 개선되지 않을 때까지 Step 2를 반복한다. 더이상 개선되지 않으면, Goto Step 1.

소개한 휴리스틱 기법은 미리 설정한 연산시간이 초과할 때까지 반복한다. 초과할 때까지 발견된 휴리스틱 해 중 해의 값이 가장 좋은 해를 휴리스틱의 해로, 해의 값을 휴리스틱의 해 값으로 한다.

4.3.2 잔여 일정을 작성하는 휴리스틱 기법

전체 일정이 아니라 시점 t 이후의 일정을 작성이라면 시점 t 이전에 시작한 활동들의 배정은 변경될 수 없으며, 이들 활동을 제외한 모든 나머지 활동들의 시작 시기는 시점 t 보다 앞설 수 없다. 다른 부분들은 전체 일정을 작성하는 기법과 동일하다.

제 5 장 모의실험 결과

본 연구에 제시된 알고리즘 모형의 성능을 검증하기 위해 모의실험을 하였다.

본 연구에서 다루는 문제는 재작업이 가능한 활동이 포함된 프로젝트의 일정 문제이다. 프로젝트의 불확실성은 활동들의 재작업 횟수에 있다. 다시 말해 특정 작업이 수행될 때마다 합격/불합격의 검수가 이루어지고 합격 판정을 받을 때까지 재작업이 수행되므로 불합격 판정 횟수만큼 재작업이 수행된다. 그러므로 재작업 횟수는 확률변수가 된다.

본 연구에서 제시하는 알고리즘은 시나리오 기반 알고리즘이다. 여기서 시나리오란 재작업 가능한 활동들의 재작업 횟수를 말한다. 예를 들어 활동 2, 5와 7이 재작업 가능한 활동들이라 하자. 활동 2, 5와 7의 재작업 횟수의 조합을 시나리오라 하자. (0, 0, 0)이란 활동 2, 5와 7이 모두 재작업 없이 완료된 경우이고, (1, 2, 3)이란 활동 2는 1번의 재작업, 활동 5는 2번의 재작업, 활동 7은 3번의 재작업을 마친 후에 합격 판정을 받는 경우를 의미한다. 원래 재작업 횟수는 확률변수이지만, 시나리오란 재작업 확률변수들이 특정한 값을 취하는 경우이므로, 시나리오가 주어진다면 재작업 횟수는 더이상 확률변수가 아니라 상수가 된다. 이 경우 재작업이 가능한 활동이 포함된 프로젝트 일정 문제는 더이상 확률적인 모형이 아니라 확정적 모형이 된다.

본 연구에서 제시하는 알고리즘은 다단계 알고리즘으로서, 단계마다 배정할 활동을 하나 선택하고, 선택한 활동의 모드를 결정한 후, 선택된 활동이 선정된 모드로 시작할 수 있는 가장 빠른 시점을 그 활동의 시작 시점으로 배정한다. 그러므로 단계마다 활동과 모드의 선택이 주요 이슈가 된다.

본 모의실험에서는 많은 수의 시나리오 분석을 통하여 기대 시작 시점이 가장 빠른 활동을 선택한다. 각 모드별로 시나리오 분석을 통해 기대 프로젝트 비용을 구하고, 가장 낮은 기대 프로젝트 비용을 발생시키는 모드를 선택한다.

본 모의실험에서 알고리즘은 Microsoft Office Professional Plus 2016 Excel VBA(Visual Basic for Applications) 언어로 코드를 작성하였으며, 연산의 수행은 Intel Core i5-3570K CPU, 3.4 GHz 환경에서 진행하였다.

5.1 모의실험 조건 설정

5.1.1 데이터 생성 기본구성

모의실험의 조건은 같은 환경과 같은 조건에서 생성된 데이터를 통해 실험하였으며 시뮬레이션 테스트를 위한 데이터 셋의 기본적인 구성은 [표 5-1]과 같다.

[표 5-1] 데이터 셋의 기본구성

| 기호 | 구분 | Prob 1 | Prob 2 | Prob 3 |
|---------------|-----------------|--------|--------|--------|
| N | 활동의 수 | 16 | 16 | 16 |
| M | 모드의 수 | 2 | 2 | 2 |
| K | 자원 종류의 수 | 2 | 2 | 2 |
| Due Date | 수행완료일 | 30 | 30 | 30 |
| Penalty | 프로젝트 지연 기간당 패널티 | 10 | 10 | 10 |
| N_of_Scenario | 시나리오 횟수 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

본 모의실험은 [표 5-1]과 같이 세 개의 프로젝트를 중심으로 진행한다. 각 프로젝트의 활동 수(N)는 각각 16이며, 활동들에 대한 선택 가능

한 모드의 수(M)는 2로 설정하였다. 각 모드에서 선택 가능한 자원 종류(K)는 2종류로 설정하였다.

그 외의 모드별 수행을 위한 기간과 비용 및 필요자원 등에 대한 계수는 프로젝트들의 데이터 생성 시 난수 발생을 통해 임의로 생성하였다. 모드별 기간과 비용은 아래의 표와 같이 생성하였다. 모드 1은 모드 2에 비해 기간은 길지만, 비용은 저렴하도록 설정하였다. 모드 1의 기간은 최소값이 3, 최대값이 6인 이산 균일분포로부터 생성하였으며, 모드 2의 기간은 최소값이 2, 최대값이 4인 이산 균일분포로부터 생성하였다. 모드 1의 데이터를 먼저 생성한 후에 모드 2의 데이터를 생성하였다. 만약 모드 2의 기간이 모드 1의 기간보다 길거나 같은 경우, 모드 2의 기간이 모드 1의 기간보다 짧을 때까지 모드 2의 기간을 다시 생성하였다. 비용도 아래의 표와 같이 이산 균일분포로부터 생성하였으며, 모드 2의 비용이 모드 1의 비용보다 크도록 [표 5-2]와 같이 설정하였다.

[표 5-2] 활동 기간과 비용의 생성 파라미터

| | 모드 1 | 모드 2 |
|----|-----------|-----------|
| 기간 | U(3, 6) | U(2, 4) |
| 비용 | U(10, 20) | U(15, 25) |

자원의 경우, 모든 모드에 공통으로 [표 5-3]과 같이 생성하였다.

[표 5-3] 자원 생성 파라미터

| | 자원 1 | 자원 2 |
|--------|---------|---------|
| 자원 요구량 | U(3, 6) | U(2, 4) |

프로젝트 시점별로 가용한 자원의 수량은 아래의 표와 같이 설정하였다. 시점 0부터 19까지는 자원 1의 경우 6, 자원 2의 경우 7로 설정하였

으며, 그 이후의 시점에서는 각 자원의 가용량이 초기에 비해 1만큼 크도록 [표 5-4]와 같이 설정하였다.

[표 5-4] 시점별 자원 가용량

| | 시점 0~19 | 시점 20~ |
|------|---------|--------|
| 자원 1 | 6 | 7 |
| 자원 2 | 7 | 8 |

재작업이 가능한 활동은 활동 6, 10과 12이며, 재작업이 발생할 확률은 0.2, 0.1과 0.1로 [표 5-5]와 같이 설정하였다.

[표 5-5] 재작업 가능한 활동과 발생 확률

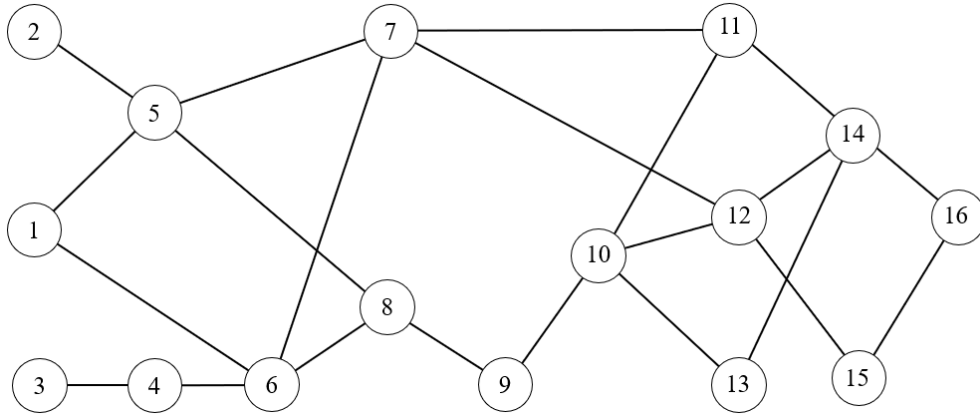
| | 재작업 가능한 활동과 확률 | | |
|----|----------------|-----|-----|
| 활동 | 6 | 10 | 12 |
| 확률 | 0.2 | 0.1 | 0.1 |

5.2 모의실험 데이터와 모의실험 과정 요약

본 연구에서 사용한 Prob-1 문제의 데이터를 상세 소개하고 모의실험 과정을 요약하고자 한다.

5.2.1 프로젝트 데이터 소개

Prob-1의 네트워크는 [그림 5-1]과 같다. 활동의 수는 16이며, 활동 6, 10과 12는 재작업이 가능한 활동들로서 재작업 확률은 0.2, 0.1과 0.1이다.



[그림 5-1] Prob-1 네트워크

모드의 수는 활동 별로 2개씩이다. 프로젝트 수행에 필요한 자원은 2종류이며, 활동, 모드와 자원에 관한 데이터는 [표 5-6]과 같다.

[표 5-6] Prob-1 데이터 기본구성

| 활동 | 모드 | 기간 | 비용 | 자원 1 | 자원 2 |
|----|----|----|----|------|------|
| 1 | 1 | 3 | 17 | 4 | 3 |
| | 2 | 2 | 20 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 4 | 12 | 3 | 2 |
| | 2 | 3 | 20 | 2 | 3 |
| 3 | 1 | 5 | 18 | 1 | 4 |
| | 2 | 4 | 19 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 4 | 14 | 3 | 2 |
| | 2 | 3 | 18 | 5 | 3 |
| 5 | 1 | 4 | 18 | 5 | 3 |
| | 2 | 2 | 22 | 5 | 3 |
| 6 | 1 | 6 | 17 | 2 | 2 |
| | 2 | 4 | 18 | 1 | 3 |
| 7 | 1 | 6 | 12 | 5 | 2 |
| | 2 | 3 | 15 | 4 | 3 |
| 8 | 1 | 6 | 14 | 3 | 2 |
| | 2 | 2 | 18 | 3 | 3 |
| 9 | 1 | 6 | 11 | 4 | 2 |
| | 2 | 4 | 20 | 3 | 4 |
| 10 | 1 | 6 | 16 | 1 | 4 |
| | 2 | 3 | 25 | 4 | 3 |

| | | | | | |
|----|---|---|----|---|---|
| 11 | 1 | 5 | 18 | 2 | 4 |
| | 2 | 3 | 22 | 1 | 3 |
| 12 | 1 | 5 | 11 | 2 | 3 |
| | 2 | 4 | 17 | 3 | 2 |
| 13 | 1 | 4 | 18 | 1 | 4 |
| | 2 | 2 | 23 | 1 | 3 |
| 14 | 1 | 5 | 20 | 5 | 4 |
| | 2 | 4 | 23 | 3 | 3 |
| 15 | 1 | 4 | 19 | 2 | 2 |
| | 2 | 3 | 24 | 2 | 3 |
| 16 | 1 | 3 | 11 | 1 | 2 |
| | 2 | 2 | 25 | 4 | 3 |

프로젝트 비용은 (1) 활동 수행비용의 합과 (2) 프로젝트 지연 시 발생하는 지체보상금으로 구성된다.

활동 수행비용은 활동이 어느 모드로 수행되는가에 따라 결정된다. 예를 들어, 활동 2가 모드 1로 수행된다면 활동 2의 비용은 12이다. 재작업이 가능한 활동의 경우의 활동비용은 수행횟수에 따라 달라진다. 예를 들어, 활동 6이 2번 실패 후 3번째 합격했다면, 총 수행횟수는 3회가 된다. 활동 6이 모드 2로 수행했다면, 활동 6의 비용은 $18 \times 3 = 54$ 가 된다.

이 프로젝트의 경우, 마감일은 30이고 프로젝트 지연시 발생하는 기간당 지체보상금은 10으로 설정했다. 예를 들어, 프로젝트가 시점 29에 종료한다면 프로젝트는 지연되지 않았으므로 지체보상금은 0이 되지만, 시점 35에 종료한다면 기간 5만큼 지연되었으므로 지체보상금은 $5 \times 10 = 50$ 이 된다.

5.2.2 재작업 발생 경우의 수와 확률

활동 6, 10과 12는 재작업이 발생할 수 있으며, 재작업 확률은 0.2, 0.1과 0.1이다. 합격 판정을 받을 때까지 재작업이 발생하므로 재작업 발생 경우의 수는 무한하다. 다시 말해 재작업 발생 횟수의 조합이 바로 시나

리오이므로, 시나리오 경우의 수는 무한하다. 시나리오를 모두 나열하는 것은 불가능하므로, 발생확률이 100,000분의 1 이상인 시나리오들만 나열하면 [표 5-7], [표 5-8]과 같다. 시나리오는 오름차순으로 정렬하였다.

[표 5-7] 재작업 발생 시나리오 및 발생확률 (1/2)

| 재작업 횟수 | | | 발생확률 | | | |
|--------|-------|-------|---------|---------|---------|----------|
| 활동 6 | 활동 10 | 활동 12 | 활동 6 | 활동 10 | 활동 12 | 결합확률 |
| 0 | 0 | 0 | 0.80000 | 0.90000 | 0.90000 | 0.648000 |
| | | 1 | 0.80000 | 0.90000 | 0.09000 | 0.064800 |
| | | 2 | 0.80000 | 0.90000 | 0.00900 | 0.006480 |
| | | 3 | 0.80000 | 0.90000 | 0.00090 | 0.000648 |
| | | 4 | 0.80000 | 0.90000 | 0.00009 | 0.000065 |
| | 1 | 0 | 0.80000 | 0.09000 | 0.90000 | 0.064800 |
| | | 1 | 0.80000 | 0.09000 | 0.09000 | 0.006480 |
| | | 2 | 0.80000 | 0.09000 | 0.00900 | 0.000648 |
| | | 3 | 0.80000 | 0.09000 | 0.00090 | 0.000065 |
| | 2 | 0 | 0.80000 | 0.00900 | 0.90000 | 0.006480 |
| | | 1 | 0.80000 | 0.00900 | 0.09000 | 0.000648 |
| | | 2 | 0.80000 | 0.00900 | 0.00900 | 0.000065 |
| | 3 | 0 | 0.80000 | 0.00090 | 0.90000 | 0.000648 |
| | | 1 | 0.80000 | 0.00090 | 0.09000 | 0.000065 |
| | 4 | 0 | 0.80000 | 0.00009 | 0.90000 | 0.000065 |
| 1 | 0 | 0 | 0.16000 | 0.90000 | 0.90000 | 0.129600 |
| | | 1 | 0.16000 | 0.90000 | 0.09000 | 0.012960 |
| | | 2 | 0.16000 | 0.90000 | 0.00900 | 0.001296 |
| | | 3 | 0.16000 | 0.90000 | 0.00090 | 0.000130 |
| | | 4 | 0.16000 | 0.90000 | 0.00009 | 0.000013 |
| | 1 | 0 | 0.16000 | 0.09000 | 0.90000 | 0.012960 |
| | | 1 | 0.16000 | 0.09000 | 0.09000 | 0.001296 |
| | | 2 | 0.16000 | 0.09000 | 0.00900 | 0.000130 |
| | | 3 | 0.16000 | 0.09000 | 0.00090 | 0.000013 |
| | 2 | 0 | 0.16000 | 0.00900 | 0.90000 | 0.001296 |
| | | 1 | 0.16000 | 0.00900 | 0.09000 | 0.000130 |
| | | 2 | 0.16000 | 0.00900 | 0.00900 | 0.000013 |
| | 3 | 0 | 0.16000 | 0.00090 | 0.90000 | 0.000130 |
| | | 1 | 0.16000 | 0.00090 | 0.09000 | 0.000013 |
| | 4 | 0 | 0.16000 | 0.00009 | 0.90000 | 0.000013 |

[표 5-8] 재작업 발생 시나리오 및 발생확률 (2/2)

| 재작업 횟수 | | | 발생확률 | | | |
|--------|-------|-------|---------|---------|---------|----------|
| 활동 6 | 활동 10 | 활동 12 | 활동 6 | 활동 10 | 활동 12 | 결합확률 |
| 2 | 0 | 0 | 0.03200 | 0.90000 | 0.90000 | 0.025920 |
| | | 1 | 0.03200 | 0.90000 | 0.09000 | 0.002592 |
| | | 2 | 0.03200 | 0.90000 | 0.00900 | 0.000259 |
| | | 3 | 0.03200 | 0.90000 | 0.00090 | 0.000026 |
| | 1 | 0 | 0.03200 | 0.09000 | 0.90000 | 0.002592 |
| | | 1 | 0.03200 | 0.09000 | 0.09000 | 0.000259 |
| | | 2 | 0.03200 | 0.09000 | 0.00900 | 0.000026 |
| | 2 | 0 | 0.03200 | 0.00900 | 0.90000 | 0.000259 |
| | | 1 | 0.03200 | 0.00900 | 0.09000 | 0.000026 |
| | 3 | 0 | 0.03200 | 0.00090 | 0.90000 | 0.000026 |
| 3 | 0 | 0 | 0.00640 | 0.90000 | 0.90000 | 0.005184 |
| | | 1 | 0.00640 | 0.90000 | 0.09000 | 0.000518 |
| | | 2 | 0.00640 | 0.90000 | 0.00900 | 0.000052 |
| | 1 | 0 | 0.00640 | 0.09000 | 0.90000 | 0.000518 |
| | | 1 | 0.00640 | 0.09000 | 0.09000 | 0.000052 |
| | 2 | 0 | 0.00640 | 0.00900 | 0.90000 | 0.000052 |
| 4 | 0 | 0 | 0.00128 | 0.90000 | 0.90000 | 0.001037 |
| | | 1 | 0.00128 | 0.90000 | 0.09000 | 0.000104 |
| | | 2 | 0.00128 | 0.90000 | 0.00900 | 0.000010 |
| | 1 | 0 | 0.00128 | 0.09000 | 0.90000 | 0.000104 |
| | | 1 | 0.00128 | 0.09000 | 0.09000 | 0.000010 |
| | 2 | 0 | 0.00128 | 0.00900 | 0.90000 | 0.000010 |
| 5 | 0 | 0 | 0.00026 | 0.90000 | 0.90000 | 0.000207 |
| | | 1 | 0.00026 | 0.90000 | 0.09000 | 0.000021 |
| | 1 | 0 | 0.00026 | 0.09000 | 0.90000 | 0.000021 |
| 6 | 0 | 0 | 0.00005 | 0.90000 | 0.90000 | 0.000041 |

활동 6과 10의 재작업 횟수가 모두 0인 경우, 활동 12의 재작업 횟수는 0부터 4까지만 나열하였다. (0, 0, 5)의 발생확률은 (0, 0, 5)의 발생확률에 활동 12의 재작업 확률 0.1를 곱한 값으로서, 0.00000648이며 이 값은 1/100,000보다 작은 값이다. 활동 6의 재작업 횟수가 6인 경우, 활동 10과 12의 재작업 횟수는 모두 0인 경우만 나열하였다. (6, 0, 0)의 발생확률이 0.000041이므로 (6, 0, 1) 또는 (6, 1, 0) 모두 발생확률은 0.000041 * 0.1로서 1/100,000보다 작은 값이다.

발생확률이 1/100,000을 초과하는 시나리오의 수는 56개에 이른다. 이들

시나리오의 발생확률 합계는 0.999874에 이른다.

5.2.3 모의실험 과정과 결과

모의실험의 과정을 단계별로 소개하고, 본 연구에서 제안한 기법을 사용하여 프로젝트 총비용의 분포를 구하고자 한다. 사용한 프로젝트는 Prob-1이며, 활동 6, 10과 12의 재작업 횟수가 (1, 0, 2)인 경우이다.

모의실험 과정을 단계별로 소개한다. 각 단계마다 (1) 활동의 배정 또는 (2) 재작업 발생 여부 확정 중 하나의 행위가 실행된다. 여기서 활동의 배정이란 (1-1) 배정 가능한 활동 중 배정할 활동의 선택하고 (1-2) 배정할 활동의 선택 가능한 모드 중 하나를 선정하며 (1-3) 그 활동의 시작 시기를 결정하는 것을 말한다. 재작업 발생 여부 확인이란 재작업이 가능한 활동이 완료되는 시점마다 그 활동의 합격 또는 불합격 여부를 판정하는 것을 말한다. 합격되면 그 활동은 완전히 종료되며 더 이상 재작업이 발생하지 않는다. 불합격 처리되면 그 활동은 재작업을 수행해야 한다.

단계 1 활동의 배정

(0) $t = 0$ (현 배정이 이루어지는 시간),

t_{rework} = 충분히 큰 값 (재작업 가능 활동의 판정이 이루어지는 시점
중 가장 빠른 시점)

(1) 현 단계의 배정 가능 활동 리스트

Prob-1에서 시점 $t = 0$ 에 시작할 수 있는 활동은 1, 2과 3이다.

(2) 활동의 선정

배정 가능한 활동 중 하나를 선택한다. 선정 기준은 생성한 시나리오

에서 휴리스틱 기법으로 일정을 작성할 때 배정된 시작 시기 순이다.

시나리오를 1,000개 생성한다. 중복된 시나리오가 존재할 수 있다.
단계 1에서 생성된 시나리오를 정리하면 [표 5-9]와 같다.

[표 5-9] 단계 1에서 생성된 시나리오

| 활동별 재작업 횟수 | | | Count |
|------------|----|----|-------|
| 6 | 10 | 12 | |
| 0 | 0 | 0 | 653 |
| 1 | 0 | 0 | 136 |
| 0 | 0 | 1 | 42 |
| 1 | 0 | 2 | 3 |
| 2 | 0 | 0 | 29 |
| 3 | 0 | 0 | 7 |
| 1 | 0 | 1 | 19 |
| 4 | 0 | 0 | 3 |
| 1 | 1 | 0 | 18 |
| 0 | 1 | 0 | 58 |
| 1 | 2 | 1 | 2 |
| 3 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 3 | 0 | 1 |
| 0 | 2 | 0 | 4 |
| 2 | 0 | 1 | 4 |
| 0 | 1 | 1 | 6 |
| 0 | 0 | 2 | 5 |
| 0 | 0 | 3 | 2 |
| 2 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 2 | 0 | 2 |
| 2 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 3 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 합계 | | | 1,000 |

생성된 시나리오의 수는 1,000개지만, 중복을 제외하면 시나리오의 종류는 총 24개이다. 시나리오별로 휴리스틱 해를 도출할 때 활동들의 시작 시기는 [표 5-10]과 같다.

[표 5-10] 단계 1의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균

| 활동별 재작업 횟수 | | | Count | 활동별 시작 시기 | | |
|------------|----|----|-------|-----------|-------|-------|
| 6 | 10 | 12 | | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 0 | 0 | 653 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 136 | 0 | 3 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 42 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 2 | 3 | 0 | 3 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 19 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 58 | 0 | 3 | 0 |
| 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 3 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 2 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 7 | 0 |
| 1 | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 3 | 1 | 0 | 3 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 5 | 0 |
| 가중 평균 | | | | 0.000 | 0.616 | 0.000 |

배정 가능한 활동 중 시작 시기의 가중평균이 가장 낮은 활동은 1과 3이다. 이 두 활동 중 활동 1이 단계 1에서 배정될 활동으로 선택되었다.

(3) 모드 선정과 시작 시기 배정

활동 1에서 선정 가능한 모드는 1과 2이다. 어떤 모드로 배정하는 것이 유리한가를 판단하기 위해 각 모드마다 천 개의 시나리오를 발생시켜, 해당 모드로 진행할 때의 프로젝트 총비용의 가중평균을 구한다. 현 단계에서 모드별 프로젝트 총비용의 가중평균은 [표 5-11]

과 같다.

[표 5-11] 단계 1에서 활동 1 배정 시 모드별 총비용의 가중평균

| 모드 | 1 | 2 |
|-----------|---------|--------|
| 총비용의 가중평균 | 363.945 | 362.55 |

활동 1을 모드 2로 배정할 때 프로젝트 총비용의 기댓값이 최소화되므로, 모드 2를 배정 모드로 한다.

활동 1이 모드 2로 배정될 때 (1) 선행관계와 (2) 자원제약을 모두 충족시키는 시작 시점 중 가장 빠른 시점은 0이다.

단계 2 활동의 배정

- (1) 현 단계의 배정 가능 활동 리스트: 활동 2, 3
- (2) 활동의 선정: 활동 3 선택

[표 5-12] 단계 2의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균

| 활동별 재작업 횟수 | | | Count | 활동별 시작 시기 | |
|------------|----|----|-------|-----------|---|
| 6 | 10 | 12 | | 2 | 3 |
| 0 | 0 | 1 | 53 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 659 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 124 | 2 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 60 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 12 | 2 | 0 |
| 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 8 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 2 | 8 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|-------|---|---|---|-------|-------|
| 0 | 2 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0 |
| 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 가중 평균 | | | | 0.278 | 0.000 |

(3) 모드 선정과 시작 시기 배정: 활동 3의 모드 = 2, 시작 시기 = 0

[표 5-13] 단계 2에서 활동 3 배정 시 모드별 총비용의 가중평균

| 모드 | 1 | 2 |
|-----------|---------|---------|
| 총비용의 가중평균 | 367.121 | 354.674 |

단계 3 활동의 배정

(1) 현 단계의 배정 가능 활동 리스트: 활동 2, 4

(2) 활동의 선정: 활동 2 선택

[표 5-14] 단계 3의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균

| 활동별 재작업 횟수 | | | Count | 활동별 시작 시기 | |
|------------|----|----|-------|-----------|---|
| 6 | 10 | 12 | | 2 | 4 |
| 0 | 1 | 1 | 5 | 0 | 4 |
| 0 | 0 | 0 | 670 | 0 | 4 |
| 3 | 0 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| 1 | 1 | 0 | 20 | 0 | 4 |
| 0 | 1 | 0 | 61 | 0 | 4 |
| 2 | 0 | 0 | 32 | 0 | 4 |
| 0 | 0 | 1 | 54 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 0 | 113 | 0 | 4 |
| 1 | 2 | 0 | 3 | 0 | 4 |
| 2 | 1 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| 0 | 2 | 0 | 5 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 1 | 11 | 0 | 4 |

| | | | | | |
|-------|---|---|---|-------|-------|
| 2 | 0 | 1 | 4 | 0 | 4 |
| 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 4 |
| 0 | 0 | 2 | 4 | 0 | 4 |
| 1 | 1 | 1 | 4 | 0 | 4 |
| 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 |
| 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 4 |
| 가중 평균 | | | | 0.000 | 4.000 |

(3) 모드 선정과 시작 시기 배정: 활동 2의 모드 = 1, 시작 시기 = 0

[표 5-15] 단계 3에서 활동 2 배정 시 모드별 총비용의 가중평균

| 모드 | 1 | 2 |
|-----------|--------|---------|
| 총비용의 가중평균 | 357.11 | 358.631 |

단계 4 활동의 배정

- (1) 현 단계의 배정 가능 활동 리스트: 활동 4, 5
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 4, 모드 1 선정, 시작 시기 4
활동 4와 5의 기대 시작 시기: 4.000, 7.171 (활동 4 선택)
활동 4의 모드 기대비용: 358.821, 359.102 (모드 1 선택)
활동 4가 모드 1로 시작 가능한 가장 빠른 시점: 4

단계 5 활동의 배정

- (1) 배정 가능 활동: 5, 6
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 5, 모드 1 선정, 시작 시기 8
기대 시작 시기: 8, 8, 모드 기대비용: 355.657, 366.299

단계 6 활동의 배정

- (1) 배정 가능 활동: 6

배정 가능 활동이 하나이므로, 시나리오 분석 불필요

(2) 활동/모드의 선정: 활동 6, 모드 2 선정, 시작 시기 8

모드 기대비용: 405.767, 357.344

(3) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 $\rightarrow 12$

활동 6은 재작업이 가능한 활동, $dur_{6,2} = 4$, 활동 6의 완료 시점 = 12

단계 7 t 의 업데이트, Event 발생, t_{rework} 업데이트

(1) $t = 0$ 에서 배정 가능한 활동은 없음 (활동 6의 합격/불합격 판정이 알려지기 전에 배정할 수 있는 활동 없음)

(2) $t = 0 \rightarrow t_{rework} = 12$

(3) t_{rework} 시점에 완료되는 활동 중 재작업이 가능한 활동은 6뿐임

임의로 생성한 난수 = 0.1047 < 활동 6의 재작업 확률 = 0.2이므로, 활동 6은 불합격 판정 \rightarrow 활동 6은 재작업을 해야 함

(4) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 ($t = 12$ 이후에 배정되었고, 재작업이 가능한 활동은 하나도 없음)

단계 7 활동의 배정 (재방문)

(1) 배정 가능 활동: 6¹ (활동 6의 첫 번째 재작업 활동)

배정 가능 활동이 하나이므로, 시나리오 분석 불필요

(2) 활동/모드의 선정: 활동 6¹, 모드 2 선정, 시작 시기 12

재작업 활동은 원 활동의 모드와 동일하므로 모드 기대비용 분석 불필요

(3) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 $\rightarrow 16$

활동 6¹은 재작업이 가능한 활동, $dur_{6,2} = 4$, 활동 6¹의 완료 시점 = 16

단계 8 t 의 업데이트, Event 발생, t_{rework} 업데이트

- (1) $t = 12$ 에서 배정 가능한 활동은 없음 (활동 6¹의 합격/불합격 판정이 알려지기 전에 배정할 수 있는 활동 없음)
- (2) $t = 12 \rightarrow t_{rework} = 16$
- (3) t_{rework} 시점에 완료되는 활동 중 재작업이 가능한 활동은 6¹뿐임
임의로 생성한 난수 = 0.3581 > 활동 6의 재작업 확률 = 0.2이므로,
활동 6¹은 합격 판정 \rightarrow 활동 6은 더이상 재작업 없음
- (4) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 ($t = 16$ 이후에 배정되었고, 재작업이 가능한 활동은 하나도 없음)

단계 8 활동의 배정 (재방문)

- (1) 배정 가능 활동: 7, 8
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 8, 모드 2 선정, 시작 시기 16
활동 6은 한 번의 재작업을 거친 후 합격 처리되었으므로, 재작업 횟수는 1로 고정되었다.
활동 8의 모드 기대비용: 420.517, 393.466

[표 5-16] 단계 8의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균

| 활동별 재작업 횟수 | | | Count | 활동별 시작 시기 | |
|------------|----|----|-------|-----------|----|
| 6 | 10 | 12 | | 7 | 8 |
| 1 | 0 | 0 | 792 | 22 | 16 |
| 1 | 0 | 1 | 85 | 20 | 16 |
| 1 | 1 | 0 | 86 | 20 | 16 |
| 1 | 0 | 2 | 13 | 20 | 16 |

| | | | | | |
|-------|---|---|----|--------|----|
| 1 | 3 | 0 | 1 | 20 | 16 |
| 1 | 3 | 1 | 1 | 20 | 16 |
| 1 | 1 | 1 | 11 | 20 | 16 |
| 1 | 2 | 0 | 9 | 20 | 16 |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 20 | 16 |
| 1 | 0 | 3 | 1 | 20 | 16 |
| 가중 평균 | | | | 21.584 | 16 |

단계 9 활동의 배정

- (1) 배정 가능 활동: 7, 9
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 9, 모드 2 선정, 시작 시기 18
활동 7과 9의 기대 시작 시기: 20, 18 (활동 9 선택)
활동 9의 모드 기대비용: 413.886, 394.566 (모드 2 선택)

단계 10 활동의 배정

- (1) 배정 가능 활동: 7, 10
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 7, 모드 2 선정, 시작 시기 20
활동 7과 10의 기대 시작 시기: 20, 23 (활동 7 선택)
활동 7의 모드 기대비용: 402.914, 393.247 (모드 2 선택)

단계 11 활동의 배정

- (1) 배정 가능 활동: 10
배정 가능 활동이 하나이므로, 시나리오 분석 불필요
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 10, 모드 2 선정, 시작 시기 23
모드 기대비용: 403.775, 395.088
- (3) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 $\rightarrow 26$
활동 10은 재작업이 가능한 활동, $dur_{10,2} = 3$, 활동 10의 완료 시점

= 26

단계 12 t 의 업데이트, Event 발생, t_{rework} 업데이트

- (1) $t = 16$ 에서 배정 가능한 활동은 없음 (활동 10의 합격/불합격 판정이 알려지기 전에 배정할 수 있는 활동 없음)
- (2) $t = 16 \rightarrow t_{rework} = 26$
- (3) t_{rework} 시점에 완료되는 활동 중 재작업이 가능한 활동은 10뿐임
임의로 생성한 난수 = 0.054 > 활동 10의 재작업 확률 = 0.1이므로,
활동 10은 합격 판정 \rightarrow 활동 10은 더이상 재작업 없음
- (4) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 ($t = 26$ 이후에 배정되었고, 재작업이 가능한 활동은 하나도 없음)

단계 12 활동의 배정 (재방문)

- (1) 배정 가능 활동: 11, 12, 13
- (2) 활동/모드의 선정: 활동 12, 모드 2 선정, 시작 시기 26
활동 11, 12와 13의 기대 시작 시기: 26.002, 26, 26.293 (활동 12 선택)
활동 12의 모드 기대비용: 392.687, 387.362 (모드 2 선택)

[표 5-17] 단계 12의 시나리오별 활동 시작 시기와 가중평균

| 활동별 재작업 횟수 | | | Count | 활동별 시작 시기 | | |
|------------|----|----|-------|-----------|--------|--------|
| 6 | 10 | 12 | | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 0 | 0 | 909 | 26 | 26 | 26 |
| 1 | 0 | 1 | 82 | 26 | 26 | 29 |
| 1 | 0 | 2 | 8 | 26 | 26 | 31 |
| 1 | 0 | 3 | 1 | 28 | 26 | 33 |
| 가중 평균 | | | | 26.002 | 26.000 | 26.293 |

활동 6은 한 번의 재작업 후 합격 판정을 받았고 활동 10은 최초의
작업에서 합격 판정을 받았으므로, 시나리오에서 활동 6의 재작업
횟수는 1, 활동 10의 재작업 횟수는 0으로 제한된다.

(3) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 $\rightarrow 30$

활동 12는 재작업이 가능한 활동, $dur_{12,2} = 4$, 활동 12의 완료 시점
 $= 30$

단계 13 활동의 배정

(1) 배정 가능 활동: 11, 13

(2) 활동/모드의 선정: 활동 11, 모드 2 선정, 시작 시기 26

활동 11과 13의 기대 시작 시기: 26.032, 26.366 (활동 11 선택)

활동 11의 모드 기대비용: 402.213, 388.06 (모드 2 선택)

단계 14 활동의 배정

(1) 배정 가능 활동: 13

배정 가능 활동이 하나이므로, 시나리오 분석 불필요

(2) 활동/모드의 선정: 활동 13, 모드 2 선정, 시작 시기 26

모드 기대비용: 410.72, 387.079 (모드 2 선정)

단계 15 t 의 업데이트, Event 발생, t_{rework} 업데이트

(1) $t = 26$ 에서 배정 가능한 활동은 없음 (활동 12의 합격/불합격 판정
이 알려지기 전에 배정할 수 있는 활동 없음)

(2) $t = 26 \rightarrow t_{rework} = 30$

(3) t_{rework} 시점에 완료되는 활동 중 재작업이 가능한 활동은 12뿐임

임의로 생성한 난수 $= 0.094 <$ 활동 12의 재작업 확률 $= 0.1$ 이므로,

활동 12는 불합격 판정 → 활동 12의 첫 번째 재작업을 수행해야 한다.

- (4) t_{rework} = 충분히 큰 값 ($t = 30$ 이후에 배정되었고, 재작업이 가능한 활동은 하나도 없음)

단계 15 활동의 배정 (재방문)

- (1) 배정 가능 활동: 12^1 (활동 12의 첫 번째 재작업 활동)

배정 가능 활동이 하나이므로, 시나리오 분석 불필요

- (2) 활동/모드의 선정: 활동 12^1 , 모드 2 선정, 시작 시기 30

재작업 활동의 모드는 원 활동의 모드와 동일하므로, 시나리오 분석 불필요

- (3) t_{rework} = 충분히 큰 값 → 34

활동 12^1 은 재작업이 가능한 활동, $dur_{12,2} = 4$, 활동 12^1 의 완료 시점 = 34

단계 16 t 의 업데이트, Event 발생, t_{rework} 업데이트

- (1) $t = 30$ 에서 배정 가능한 활동은 없음 (활동 12^1 의 합격/불합격 판정이 알려지기 전에 배정할 수 있는 활동 없음)

- (2) $t = 30 \rightarrow t_{rework} = 34$

- (3) t_{rework} 시점에 완료되는 활동 중 재작업이 가능한 활동은 12^1 뿐임

임의로 생성한 난수 = 0.016 < 활동 12의 재작업 확률 = 0.1이므로, 활동 12^1 은 불합격 판정 → 활동 12의 두 번째 재작업을 수행해야 한다.

- (4) t_{rework} = 충분히 큰 값 ($t = 34$ 이후에 배정되었고, 재작업이 가능한

활동은 하나도 없음)

단계 16 활동의 배정 (재방문)

- (1) 배정 가능 활동: 12^2 (활동 12의 두 번째 재작업 활동)

배정 가능 활동이 하나이므로, 시나리오 분석 불필요

- (2) 활동/모드의 선정: 활동 12^2 , 모드 2 선정, 시작 시기 34

재작업 활동의 모드는 원 활동의 모드와 동일하므로, 시나리오 분석 불필요

- (3) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 $\rightarrow 38$

활동 12^2 는 재작업이 가능한 활동, $dur_{12,2} = 4$, 활동 12^2 의 완료 시점 = 38

단계 17 t 의 업데이트, Event 발생, t_{rework} 업데이트

- (1) $t = 38$ 에서 배정 가능한 활동은 없음 (활동 12^2 의 합격/불합격 판정이 알려지기 전에 배정할 수 있는 활동 없음)

- (2) $t = 34 \rightarrow t_{rework} = 38$

- (3) t_{rework} 시점에 완료되는 활동 중 재작업이 가능한 활동은 12^2 뿐임
임의로 생성한 난수 = 0.687 > 활동 12의 재작업 확률 = 0.1이므로,
활동 12^2 는 합격 판정 \rightarrow 활동 12에 더 이상의 재작업은 없다.

- (4) $t_{rework} =$ 충분히 큰 값 ($t = 38$ 이후에 배정되었고, 재작업이 가능한 활동은 하나도 없음)

단계 17 활동의 배정 (재방문)

- (1) 배정 가능 활동: 14, 15, 16

더이상 미완료 재작업 활동이 없으므로, 오직 하나 만의 시나리오만 존재한다. 다시 말해, 잔여 일정작성 문제는 확률적이지 않고 확정적이다.

(2) 휴리스틱 해로부터

활동 14의 모드 = 2, 시작 시기는 38

활동 15의 모드 = 1, 시작 시기는 38

활동 16의 모드 = 1, 시작 시기는 42

Prob-1에서 시나리오 (1, 0, 2)의 최종 일정은 [표 5-18]과 같다.

[표 5-18] Prob-1에서 시나리오 (1, 0, 2)의 최종 일정

| 활동 | 모드 | 기간 | 시작시점 | 종료시점 |
|-----------------|----|----|------|------|
| 1 | 2 | 2 | - | 2 |
| 2 | 1 | 4 | - | 4 |
| 3 | 2 | 4 | - | 4 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 8 |
| 5 | 1 | 4 | 8 | 12 |
| 6 | 2 | 4 | 8 | 12 |
| 6 ¹ | 2 | 4 | 12 | 16 |
| 7(0) | 2 | 3 | 20 | 23 |
| 8(0) | 2 | 2 | 16 | 18 |
| 9(0) | 2 | 4 | 18 | 22 |
| 10 ⁰ | 2 | 3 | 23 | 26 |
| 11 | 2 | 3 | 26 | 29 |
| 12 | 2 | 4 | 26 | 30 |
| 12 ¹ | 2 | 4 | 30 | 34 |
| 12 ² | 2 | 4 | 34 | 38 |
| 13 | 2 | 2 | 26 | 28 |
| 14 | 2 | 4 | 38 | 42 |
| 15 | 1 | 4 | 38 | 42 |
| 16 | 1 | 3 | 42 | 45 |

프로젝트 수행 기간은 45이다. 지연 기간당 페널티가 10이고 마감일이

30이므로, 페널티 비용은 150이다. 활동들 비용의 합은 346이므로 프로젝트 비용은 496이 된다.

5.3 프로젝트 총비용의 분포, 기댓값과 분산 도출

시나리오마다 본 연구에서 제안한 일정작성 방법을 적용한다면, 시나리오별 프로젝트의 총비용을 구할 수 있다. 충분히 많은 수의 시나리오를 생성한 후 시나리오별 프로젝트 총비용을 구한다면, 프로젝트 총비용을 분포가 생성된다.

5.3.1 시나리오별 발생확률과 프로젝트 총비용

재작업 가능한 활동이 6, 10과 12이고 재작업 확률이 0.2, 0.1과 0.1일 때, 발생확률이 1/100,000 이상인 시나리오는 총 56개가 된다. Prob-1을 대상으로 시나리오별 프로젝트 총비용을 구해 보았다.

[표 5-19] 시나리오별 프로젝트 비용과 발생확률 1/2 (Prob-1, 실험 1)

| 활동별 재작업 횟수 | | | 프로젝트 비용 | | | 완료일 | 발생 확률 |
|------------|----|----|---------|------|-------|-----|----------|
| 6 | 10 | 12 | 총비용 | 활동비용 | 지체보상금 | | |
| 0 | 0 | 0 | 326 | 286 | 40 | 34 | 0.648000 |
| 0 | 0 | 1 | 408 | 298 | 110 | 41 | 0.064800 |
| 0 | 0 | 2 | 465 | 315 | 150 | 45 | 0.006480 |
| 0 | 0 | 3 | 522 | 332 | 190 | 49 | 0.000648 |
| 0 | 0 | 4 | 579 | 349 | 230 | 53 | 0.000065 |
| 0 | 1 | 0 | 402 | 302 | 100 | 40 | 0.064800 |
| 0 | 1 | 1 | 484 | 314 | 170 | 47 | 0.006480 |
| 0 | 1 | 2 | 541 | 331 | 210 | 51 | 0.000648 |
| 0 | 1 | 3 | 598 | 348 | 250 | 55 | 0.000065 |
| 0 | 2 | 0 | 478 | 318 | 160 | 46 | 0.006480 |
| 0 | 2 | 1 | 560 | 330 | 230 | 53 | 0.000648 |
| 0 | 2 | 2 | 617 | 347 | 270 | 57 | 0.000065 |
| 0 | 3 | 0 | 554 | 334 | 220 | 52 | 0.000648 |
| 0 | 3 | 1 | 636 | 346 | 290 | 59 | 0.000065 |
| 0 | 4 | 0 | 630 | 350 | 280 | 58 | 0.000065 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|-----|-----|-----|----|----------|
| 1 | 0 | 0 | 386 | 316 | 70 | 37 | 0.129600 |
| 1 | 0 | 1 | 474 | 324 | 150 | 45 | 0.012960 |
| 1 | 0 | 2 | 531 | 341 | 190 | 49 | 0.001296 |
| 1 | 0 | 3 | 588 | 358 | 230 | 53 | 0.000130 |
| 1 | 0 | 4 | 645 | 375 | 270 | 57 | 0.000013 |
| 1 | 1 | 0 | 441 | 341 | 100 | 40 | 0.012960 |
| 1 | 1 | 1 | 523 | 353 | 170 | 47 | 0.001296 |
| 1 | 1 | 2 | 580 | 370 | 210 | 51 | 0.000130 |
| 1 | 1 | 3 | 637 | 387 | 250 | 55 | 0.000013 |
| 1 | 2 | 0 | 496 | 366 | 130 | 43 | 0.001296 |
| 1 | 2 | 1 | 578 | 378 | 200 | 50 | 0.000130 |
| 1 | 2 | 2 | 635 | 395 | 240 | 54 | 0.000013 |
| 1 | 3 | 0 | 551 | 391 | 160 | 46 | 0.000130 |
| 1 | 3 | 1 | 633 | 403 | 230 | 53 | 0.000013 |
| 1 | 4 | 0 | 606 | 416 | 190 | 49 | 0.000013 |

[표 5-20] 시나리오별 프로젝트 비용과 발생확률 2/2 (Prob-1, 실험 1)

| 활동별 재작업 횟수 | | | 프로젝트 비용 | | | 완료일 | 발생확률 |
|------------|----|----|---------|------|-------|-----|----------|
| 6 | 10 | 12 | 총비용 | 활동비용 | 지체보상금 | | |
| 2 | 0 | 0 | 424 | 334 | 90 | 39 | 0.025920 |
| 2 | 0 | 1 | 506 | 346 | 160 | 46 | 0.002592 |
| 2 | 0 | 2 | 563 | 363 | 200 | 50 | 0.000259 |
| 2 | 0 | 3 | 620 | 380 | 240 | 54 | 0.000026 |
| 2 | 1 | 0 | 479 | 359 | 120 | 42 | 0.002592 |
| 2 | 1 | 1 | 567 | 367 | 200 | 50 | 0.000259 |
| 2 | 1 | 2 | 624 | 384 | 240 | 54 | 0.000026 |
| 2 | 2 | 0 | 534 | 384 | 150 | 45 | 0.000259 |
| 2 | 2 | 1 | 616 | 396 | 220 | 52 | 0.000026 |
| 2 | 3 | 0 | 589 | 409 | 180 | 48 | 0.000026 |
| 3 | 0 | 0 | 482 | 352 | 130 | 43 | 0.005184 |
| 3 | 0 | 1 | 564 | 364 | 200 | 50 | 0.000518 |
| 3 | 0 | 2 | 621 | 381 | 240 | 54 | 0.000052 |
| 3 | 1 | 0 | 537 | 377 | 160 | 46 | 0.000518 |
| 3 | 1 | 1 | 619 | 389 | 230 | 53 | 0.000052 |
| 3 | 2 | 0 | 592 | 402 | 190 | 49 | 0.000052 |
| 4 | 0 | 0 | 540 | 370 | 170 | 47 | 0.001037 |
| 4 | 0 | 1 | 622 | 382 | 240 | 54 | 0.000104 |
| 4 | 0 | 2 | 679 | 399 | 280 | 58 | 0.000010 |
| 4 | 1 | 0 | 595 | 395 | 200 | 50 | 0.000104 |
| 4 | 1 | 1 | 677 | 407 | 270 | 57 | 0.000010 |
| 4 | 2 | 0 | 650 | 420 | 230 | 53 | 0.000010 |
| 5 | 0 | 0 | 598 | 388 | 210 | 51 | 0.000207 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|-----|-----|-----|----|----------|
| 5 | 0 | 1 | 686 | 396 | 290 | 59 | 0.000021 |
| 5 | 1 | 0 | 653 | 413 | 240 | 54 | 0.000021 |
| 6 | 0 | 0 | 656 | 406 | 250 | 55 | 0.000041 |

5.3.2 프로젝트 총비용의 확률분포, 기댓값과 분산

시나리오별 발생확률과 프로젝트 총비용으로부터 프로젝트 총비용의 확률분포와 누적 확률분포를 구할 수 있다.

[표 5-21] 프로젝트 총비용의 확률분포 (Prob-1, 실험 1)

| 총비용 | 발생확률 | 누적확률 | 총비용 | 발생확률 | 누적확률 |
|-----|----------|----------|-----|----------|----------|
| 326 | 0.648000 | 0.648000 | 579 | 0.000065 | 0.998503 |
| 386 | 0.129600 | 0.777600 | 580 | 0.000130 | 0.998633 |
| 402 | 0.064800 | 0.842400 | 588 | 0.000130 | 0.998762 |
| 408 | 0.064800 | 0.907200 | 589 | 0.000026 | 0.998788 |
| 424 | 0.025920 | 0.933120 | 592 | 0.000052 | 0.998840 |
| 441 | 0.012960 | 0.946080 | 595 | 0.000104 | 0.998944 |
| 465 | 0.006480 | 0.952560 | 598 | 0.000272 | 0.999216 |
| 474 | 0.012960 | 0.965520 | 606 | 0.000013 | 0.999229 |
| 478 | 0.006480 | 0.972000 | 616 | 0.000026 | 0.999255 |
| 479 | 0.002592 | 0.974592 | 617 | 0.000065 | 0.999320 |
| 482 | 0.005184 | 0.979776 | 619 | 0.000052 | 0.999372 |
| 484 | 0.006480 | 0.986256 | 620 | 0.000026 | 0.999397 |
| 496 | 0.001296 | 0.987552 | 621 | 0.000052 | 0.999449 |
| 506 | 0.002592 | 0.990144 | 622 | 0.000104 | 0.999553 |
| 522 | 0.000648 | 0.990792 | 624 | 0.000026 | 0.999579 |
| 523 | 0.001296 | 0.992088 | 630 | 0.000065 | 0.999644 |
| 531 | 0.001296 | 0.993384 | 633 | 0.000013 | 0.999657 |
| 534 | 0.000259 | 0.993643 | 635 | 0.000013 | 0.999670 |
| 537 | 0.000518 | 0.994162 | 636 | 0.000065 | 0.999734 |
| 540 | 0.001037 | 0.995198 | 637 | 0.000013 | 0.999747 |
| 541 | 0.000648 | 0.995846 | 645 | 0.000013 | 0.999760 |
| 551 | 0.000130 | 0.995976 | 650 | 0.000010 | 0.999771 |
| 554 | 0.000648 | 0.996624 | 653 | 0.000021 | 0.999791 |
| 560 | 0.000648 | 0.997272 | 656 | 0.000041 | 0.999833 |
| 563 | 0.000259 | 0.997531 | 677 | 0.000010 | 0.999843 |
| 564 | 0.000518 | 0.998050 | 679 | 0.000010 | 0.999854 |
| 567 | 0.000259 | 0.998309 | 686 | 0.000021 | 0.999874 |
| 578 | 0.000130 | 0.998438 | | | |

위에서 구한 총비용의 확률분포는 시나리오 발생확률의 합이 0.999874로서 1.0이 아니므로 불완전한 확률분포이다. 그렇지만 위 분포에서 누락된 시나리오의 발생확률이 1/100,000 미만이고, 재작업의 횟수가 상당히 크다 하더라도 프로젝트 총비용이 기하급수적으로 증가하는 것은 아니다. 다시 말해, 누락된 시나리오의 발생확률은 극히 낮고 해당 시나리오의 총비용 또한 매우 큰 값이 아니므로, 프로젝트 총비용의 기댓값과 분산을 위의 확률분포로부터 구해 보았다. 총비용의 기댓값은 356.912이고 분산은 2,626,331이다.

5.4 알고리즘의 안정성과 유효성 검증

본 연구에서 제안한 알고리즘은 최적해법이 아니라 다단계 의사결정 휴리스틱 기법인데, 주요 특징 중 하나로 많은 수의 난수를 사용하는 것을 꼽을 수 있다. 단계별로 충분한 수의 시나리오를 생성하는데, 시나리오를 생성할 때 난수가 사용된다. 또한, 시나리오 문제의 해를 구할 때도 활동의 배정이나 모드 선정에서 난수가 사용된다. 그러므로 본 알고리즘으로 동일한 프로젝트를 분석한다고 하더라도 분석할 때마다 상이한 결과도 도출될 수 있다. 분석할 때마다 도출되는 확률분포가 크게 다르지 않다면 안정적이라 평가할 수 있고, 크게 다르다면 안정적이지 않다고 평가할 수 있다.

본 알고리즘은 단계별로 충분한 수의 시나리오 분석을 통해 활동과 모드를 결정해 나간다. 이와는 정반대 접근 방법은 무작위로 활동 또는 모드를 배정하는 것이다. 본 알고리즘으로 확률분포를 구한 것이 무작위 배정으로 구한 확률분포보다 우월하지 않다면, 본 알고리즘의 유효성은 없다고 할 수 있다.

Prob-1, Prob-2와 Prob-3를 대상으로 본 알고리즘의 안정성과 유효성

을 검증한다.

5.4.1 알고리즘의 안정성

Prob-1, Prob-2와 Prob-3를 대상으로 10번씩 모의실험을 수행한 결과이다.

[표 5-22] Prob-1, -2 및 -3의 안정성 실험

| 실험번호 | Prob-1 | | Prob-2 | | Prob-3 | |
|------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| | 기댓값 | 분산 | 기댓값 | 분산 | 기댓값 | 분산 |
| 1 | 356.91 | 2,267.96 | 342.41 | 1,284.51 | 349.72 | 1,895.14 |
| 2 | 365.63 | 2,019.63 | 349.84 | 1,260.40 | 344.72 | 2,104.33 |
| 3 | 357.97 | 2,056.11 | 371.93 | 1,599.02 | 347.73 | 1,895.14 |
| 4 | 356.83 | 2,250.39 | 346.93 | 1,546.90 | 344.72 | 2,104.33 |
| 5 | 356.65 | 2,206.07 | 345.77 | 1,250.93 | 344.72 | 2,104.33 |
| 6 | 357.27 | 2,302.13 | 350.22 | 1,260.06 | 347.73 | 1,895.14 |
| 7 | 358.23 | 2,120.29 | 349.15 | 1,487.79 | 344.72 | 2,104.38 |
| 8 | 355.56 | 2,185.91 | 359.40 | 1,607.09 | 344.72 | 2,104.33 |
| 9 | 362.01 | 2,067.52 | 366.92 | 1,597.27 | 352.79 | 1,728.75 |
| 10 | 357.45 | 2,371.92 | 350.26 | 1,261.42 | 347.73 | 1,895.14 |
| 평균 | 358.45 | 2,184.79 | 353.28 | 1,415.54 | 346.93 | 1,983.10 |
| 분산 | 9.27 | | 92.62 | | 7.60 | |
| 최소 | 355.56 | | 342.41 | | 344.72 | |
| 최대 | 365.63 | | 371.93 | | 352.79 | |
| 범위 | 10.07 | | 29.52 | | 8.07 | |

Prob-1의 경우 프로젝트 총비용의 기댓값은 358.45이며 분산은 9.27이고, Prob-2의 경우 기댓값은 353.28이며 분산은 92.62이고, Prob-3의 경우 기댓값은 346.92이며 분산은 7.60이다.

난수를 사용하는 알고리즘의 특성상 분산이 0이거나 0에 가깝기는 어려

을 수 있다. 본 알고리즘에서 분산을 줄이는 방법은 각 단계 별로 활동과 모드를 선정할 때 (1) 생성하는 시나리오의 수를 증가시키고 (2) 확정적 모형의 해를 구할 때 사용하는 휴리스틱 기법 대신에 최적화 기법을 사용하거나 휴리스틱 기법을 그대로 사용하는 경우 허용하는 연산시간을 증가시켜야 한다. 이 두 가지 프로젝트 총비용의 확률분포를 구하는 데 소요되는 연산시간을 증가시킨다.

5.4.2 알고리즘의 유효성

Prob-1, Prob-2와 Prob-3를 대상으로 알고리즘의 유효성을 검증하였다. 유효성 검증을 위해 3종류의 실험을 수행하였다.

- (1) 각 단계에서 활동은 무작위로, 모드는 기존의 방식대로 배정
(R-A로 표기)
- (2) 각 단계에서 활동은 기존 방식으로, 모드는 무작위로 배정
(R-M으로 표기)
- (3) 각 단계에서 활동과 모드 모두 무작위로 배정
(R-A&M으로 표기)

[표 5-23] 알고리즘 유효성 검증

| | | Basic | R-A | R-M | R-A&M |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Prob-1 | 1 | 356.91 | 406.95 | 429.53 | 431.66 |
| | 2 | 365.63 | 385.57 | 373.50 | 486.24 |
| | 3 | 357.97 | 388.79 | 488.55 | 487.10 |
| | 4 | 356.83 | 363.99 | 497.83 | 493.38 |
| | 5 | 356.65 | 404.09 | 447.55 | 496.39 |
| | 6 | 357.27 | 371.44 | 410.86 | 500.77 |
| | 7 | 358.23 | 364.74 | 513.12 | 497.51 |
| | 8 | 355.56 | 399.25 | 417.93 | 459.80 |
| | 9 | 362.01 | 402.72 | 460.27 | 525.04 |
| | 10 | 357.45 | 408.93 | 402.83 | 468.44 |
| | 기대값 | 358.45 | 389.65 | 444.20 | 484.63 |
| | Basic대비 | - | 31.20 | 85.75 | 126.18 |

| | | | | | |
|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Prob-2 | 1 | 342.41 | 412.03 | 459.55 | 529.32 |
| | 2 | 349.84 | 364.64 | 432.16 | 478.42 |
| | 3 | 371.93 | 411.24 | 564.69 | 435.07 |
| | 4 | 346.93 | 406.21 | 452.20 | 425.69 |
| | 5 | 345.77 | 415.99 | 440.49 | 538.09 |
| | 6 | 350.22 | 381.57 | 413.10 | 457.73 |
| | 7 | 349.15 | 375.20 | 440.41 | 536.31 |
| | 8 | 359.40 | 375.58 | 450.78 | 539.53 |
| | 9 | 366.92 | 425.59 | 482.28 | 515.74 |
| | 10 | 350.26 | 378.29 | 434.16 | 512.15 |
| | 기대값 | 353.28 | 422.73 | 456.98 | 496.80 |
| | Basic대비 | - | 69.44 | 103.70 | 143.52 |
| Prob-3 | 1 | 349.72 | 386.85 | 398.53 | 516.14 |
| | 2 | 344.72 | 385.52 | 394.60 | 437.73 |
| | 3 | 347.73 | 409.50 | 450.95 | 434.61 |
| | 4 | 344.72 | 397.09 | 416.51 | 426.01 |
| | 5 | 344.72 | 381.49 | 378.61 | 457.54 |
| | 6 | 347.73 | 373.11 | 399.24 | 472.51 |
| | 7 | 344.72 | 376.21 | 446.45 | 456.11 |
| | 8 | 344.72 | 376.13 | 433.39 | 419.01 |
| | 9 | 352.79 | 381.11 | 444.54 | 411.90 |
| | 10 | 347.73 | 423.37 | 413.17 | 410.44 |
| | 기대값 | 346.93 | 389.04 | 417.60 | 444.20 |
| | Basic대비 | - | 42.11 | 70.67 | 97.27 |

Prob-1의 경우, R-A(활동 임의배정)는 기본모형 대비 31.20만큼 총비용 기댓값이 악화되었으며 R-M(모드 임의배정)은 85.75만큼 기댓값이 나빠졌으며 R-A&M(활동과 모드 임의배정)은 126.18만큼 기댓값이 높게 나타났다. Prob-2와 Prob-3에서도 같은 현상이 관찰되었다. R-A, R-M 그리고 R-A&M 순으로 기댓값이 더욱 악화되었다.

5.5 파라미터에 따른 프로젝트 총비용 분석

본 모형에는 활동의 수, 모드의 수 등 많은 수의 프로젝트 파라미터가 존재한다. 파라미터 값에 따른 프로젝트 총비용의 변화를 관찰하였다.

기본 데이터 셋에서 프로젝트 활동의 수는 16이다. 활동의 수가 14 또는 20으로 변경되는 경우, 기댓값과 확률분포를 구하는 데 소요되는 시

간은 [표 5-24]와 같다.

[표 5-24] 활동의 수에 따른 기댓값과 연산시간 비교

| | | 기본모형 10개 평균 | 활동의 수 = 14 | 활동의 수 = 20 |
|------|--------|----------------|------------|------------|
| 기댓값 | Prob-1 | 358.45 | 300.07 | 539.98 |
| | Prob-2 | 353.28 | 296.94 | 561.73 |
| | Prob-3 | 346.93 | 296.64 | 477.64 |
| | 평균 | 352.89 | 297.88 | 526.45 |
| 연산시간 | Prob-1 | 2,047 | 2,811 | 4,088 |
| | Prob-2 | 3,103 | 2,150 | 2,248 |
| | Prob-3 | 2,309 | 1,466 | 2,727 |
| | 평균 | 2,486.30 | 2,142.33 | 3,021.00 |

기본모형의 경우 각 Prob-1, -2와 -3 문제에 대해 총 10번씩의 모의 실험을 수행하였다. 표에서 기본모형 10개 평균이란 10번의 모의실험에서 구한 값들의 평균을 의미한다. 활동의 수가 14와 20인 경우는 오직 한 번의 실험만을 수행하였고 그 실험의 결과를 사용하였다.

활동의 수가 증가할수록 기댓값도 증가하는 것으로 관찰되었다. 연산시간의 경우는 활동의 수와 별 관련이 없는 것으로 나타났다. 활동의 수가 아무리 많다 하더라도 재작업이 가능한 활동이 없다면, 휴리스틱 해를 한 번만 구하면 된다. 본 실험에서는 확정적 모형의 휴리스틱 해를 구할 때 연산시간을 0.3초로 제한하였다. 활동의 수가 16인 기본모형의 경우 연산시간의 평균은 2,486.30초였으며, 활동의 수가 14일 때 2,142.33초이고 활동의 수가 20인 경우는 3,021.00초였다.

[표 5-25] 모드와 재작업 가능한 활동의 수에 따른 기댓값과 연산시간

| | | 기본모형 10개 평균 | 모드의 수 = 1 | 모드의 수 = 3 | 재작업 활동 = 2 | 재작업 활동 = 4 |
|------|--------|----------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| 기댓값 | Prob-1 | 358.45 | 562.43 | 319.30 | 356.45 | 365.08 |
| | Prob-2 | 353.28 | 517.48 | 326.62 | 340.83 | 364.69 |
| | Prob-3 | 346.93 | 421.98 | 323.42 | 341.05 | 352.59 |
| | 평균 | 352.89 | 500.63 | 323.11 | 346.11 | 360.79 |
| 연산시간 | Prob-1 | 2,047 | 513 | 2,763 | 470 | 5,458 |
| | Prob-2 | 3,103 | 759 | 4,015 | 1,233 | 6,698 |
| | Prob-3 | 2,309 | 605 | 3,371 | 619 | 4,668 |
| | 평균 | 2,486.30 | 625.67 | 3,383.00 | 774.00 | 5,608.00 |

기본모형에서 모드의 수는 2이다. 모드의 수=1은 기본모형의 문제에서 두 번째 모드를 삭제한 문제이고, 모드의 수=3은 기본모형에 새로운 모드 하나를 추가한 문제이다.

모드의 수가 증가하면 활동의 선택 사항이 증가하므로 프로젝트 총비용의 기댓값은 감소한다. 또한, 모드의 수가 커질수록 연산시간도 증가한다.

기본모형에서 재작업 활동의 수는 3이다. 기본모형에서 3번째 재작업 활동(활동 12)을 제거하여 재작업 활동의 수=2인 문제를 만들었고, 기본모형에서 활동 14를 재작업 활동으로 지정하여 재작업 활동의 수=4인 문제를 만들었다.

재작업 활동의 수가 증가하면 재작업으로 인한 활동비용이 증가하고 프로젝트 완료 시점이 지연되어 총비용이 증가하게 된다. 재작업 활동의 수가 증가하면 연산시간은 급증한다.

[표 5-26] 재작업 확률 증감에 따른 기댓값과 연산 시간 비교

| | | 기본모형 10개 평균 | 확률 0.05 감소 | 확률 0.05 증가 |
|------|--------|----------------|------------|------------|
| 기댓값 | Prob-1 | 358.45 | 343.82 | 370.75 |
| | Prob-2 | 353.28 | 344.08 | 363.83 |
| | Prob-3 | 346.93 | 332.61 | 360.41 |
| | 평균 | 352.89 | 340.17 | 365.00 |
| 연산시간 | Prob-1 | 2,047 | 1,200 | 3,112 |
| | Prob-2 | 3,103 | 1,558 | 4,649 |
| | Prob-3 | 2,309 | 1,376 | 6,581 |
| | 평균 | 2,486.30 | 1,378.00 | 4,780.67 |

기본모형에서 재작업이 가능한 활동은 6, 10과 12이고 재작업 확률은 0.2, 0.1과 0.1이다. 각 확률을 0.05씩 감소 또는 증가시켜 두 문제를 만들었다. 재작업 활동의 수가 증가할 때와 마찬가지로 재작업 확률이 증가하면 프로젝트 총비용은 증가하고, 연산시간은 급증한다.

제 6 장 결 론

프로젝트 일정 문제(Project Scheduling Problem) 중 프로젝트에서 요구되는 자원을 구체적으로 다루는 모형은 RCPSP(Resource Contained Project Scheduling Problem)뿐이다. 그러므로 자원이 한정된 상황에서 실행 가능하며 효율적인 계획을 수립하고자 할 때 RCPSP 모형은 매우 유용하다. 이 모형은 자원을 구체적으로 다룬다는 점에서 매우 현실적인 모형이지만 프로젝트의 모든 요소가 확정적이어야 한다는 가정을 지니고 있다. 즉, 모형을 구성하고 있는 모든 수치가 확정된 계수라는 의미이다. 그러나 대부분의 프로젝트는 태생적으로 불확실한 요소들을 지니고 있으며, 실제 프로젝트의 일정을 작성할 때 이러한 불확실성을 무시하기는 어렵다. 예를 들어 활동을 집행하는 데 소요되는 경비가 계획된 추정값보다 많이 소요될 수도 있고, 작업이 완료되었으나 검수에 불합격하여 부분 또는 전면 재작업이 필요할 수도 있다. 특히 연구개발(R&D) 프로젝트와 같이 최초로 시도하는 활동들이 상당수 존재하는 경우 재작업과 같은 불확실성은 더 높아진다.

본 연구는 특정 활동들이 끝나는 시점에 검수 또는 평가 절차를 거쳐 합격/불합격 판정을 받고, 합격이면 완료, 불합격이면 재작업을 해야 하는 경우를 다루며, 재작업 확률이 사전에 알려졌다고 가정한다. 재작업 확률이 알려져 있으므로, 재작업 확률을 통해 수많은 재작업 횟수의 조합을 생성할 수 있다. 본 연구에서는 재작업 횟수의 조합을 시나리오라 부른다.

시나리오 측면에서 전형적인 RCPSP와 본 연구의 차이를 설명하면, 전형적인 RCPSP에서는 재작업 확률이 모두 0이므로 오직 하나의 시나리오만 존재하는 반면 본 연구에서는 다수의 시나리오가 존재한다. 하나의

시나리오만 존재하면 확정적인 모형과 되고, 두 개 이상의 시나리오가 존재하면 확률적 모형이 된다. 확정적 모형이라면 일정을 작성하는 시점에서 추정된 미래의 상황과 프로젝트가 완료된 시점에서의 실제 상황이 동일하다. 확률적 모형의 경우 일정을 작성하는 시점에서 보면 발생 가능한 시나리오가 다수이지만, 프로젝트가 완료된 시점에서 보면 오직 하나의 시나리오만 실현된다.

다수의 시나리오가 존재할 때 의사결정을 하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 방법은 다수의 시나리오를 하나의 시나리오로 합성하는 것이다. 다수의 시나리오를 하나의 시나리오로 합성 또는 축소하는 대표적인 방법으로 기댓값을 들 수 있다. 예를 들어 활동 3과 5가 재작업 가능한 활동이고 (0, 0), (0, 1), (1, 0)이라는 3개 시나리오만 존재한다고 하자. 각 시나리오의 발생확률이 0.3, 0.3과 0.4라면 기댓값을 적용한 시나리오는 $(0 \times 0.3 + 0 \times 0.3 + 1 \times 0.4, 0 \times 0.3 + 1 \times 0.3 + 0 \times 0.4) = (0.4, 0.3)$ 이 된다. 다수의 시나리오를 기댓값을 이용하여 하나의 시나리오로 축소했으므로, 확률적 모형을 확정적 모형화시키는 것이다. 두 번째 방법은 대안 별로 각 시나리오에서의 평가액을 산출한 후 각 시나리오의 발생확률을 곱하여 기대 평가액을 구하고, 기대 평가액이 좋은 대안을 선택하는 방법으로 의사결정나무 원리를 반영한 것이다. 예를 들어 활동 1의 모드 1과 2 중 하나를 선택하는 상황을 고려하자. 모드 1로 진행한다면 (0, 0) 시나리오에서 프로젝트 비용이 300, (0, 1)에서 200 그리고 (1, 0)에서 400이고 모드 2로 진행한다면 (0, 0)에서 350, (0, 1)에서 150 그리고 (1, 0)에서 300이라고 하자. 모드 1로 진행할 때의 기대비용은 $300 \times 0.3 + 200 \times 0.3 + 400 \times 0.4 = 310$ 이고 모드 2로 진행할 때의 기대비용은 $350 \times 0.3 + 150 \times 0.3 + 300 \times 0.4 = 270$ 이 되어 모드 2를 선택한다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 다단계 의사결정 기법으로 단계마다

배정할 활동과 그 활동의 수행 모드를 결정한다. 활동과 모드를 선택할 때 많은 수의 시나리오를 생성하고 분석하여 대안(활동과 모드) 별 기대 평가액을 산출하고 기대 평가액이 가장 유리한 대안을 선택하였다.

본 연구에서는 시나리오 기반 일정작성 기법을 소개하였다. 소개된 일정작성기법을 많은 수의 시나리오에 적용한다면 프로젝트 총비용의 확률 분포를 구할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안한 알고리즘은 프로젝트 일정작성 기법으로 유용할 뿐만 아니라 프로젝트 총비용의 확률분포를 구하는 데도 사용될 수 있다. 제안된 알고리즘은 모의실험을 통해 안정성과 유효성을 검증하였고, 프로젝트 파라미터의 변화에 따라 알고리즘을 적용한 결과가 어떻게 영향받는지 살펴보았다.

6.1 연구의 결과

일반적인 RCPSP는 전형적인 NP-Hard 문제로 활동의 수와 활동별 모드의 수가 커지면 해 영역이 기하급수적으로 확장되어 제한된 시간 내에 양질의 결과를 찾을 수 있는 휴리스틱 기법을 사용한다. 본 연구에서는 확정적 모형인 RCPSP에 확률적 요소인 재작업을 추가한 모형을 다루며, 이 모형에 적용될 수 있는 새로운 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서는 (1) 프로젝트에서 단계별로 배정 가능한 활동이 배정될 때마다 재작업이 가능한 활동의 재작업 횟수에 대한 시나리오를 생성하여 프로젝트의 일정을 구하고, (2) 시나리오를 적용하여 구한 프로젝트 일정의 모드별 총비용과 그 분포를 구하였다. (3) 재작업의 수행이 연속적이지 않은 프로젝트의 일정과 비용에 대한 해법도 제시하였다.

본 연구에서 제안된 알고리즘에 대해 총 3개(Prob-1, Prob-2와 Prob-3)의 문제를 대상으로 10번씩 모의실험을 수행하였으며, 안정성 검증에서 Prob-1의 경우 프로젝트 총비용의 기댓값 358.45, 분산 9.27이고,

Prob-2의 경우 기댓값 353.28 분산 92.62, Prob-3의 경우 기댓값 346.92 분산 7.60의 값을 보였다. 각 문제 별로 분산이 그다지 크지 않았고, 이는 알고리즘이 안정적임을 보여준다.

본 연구에서 제안한 알고리즘은 각 단계별로 시나리오 분석을 통해 배정할 활동을 선택하고, 선택된 활동의 모드 또한 시나리오 분석을 통해 결정한다. 이러한 배정 방식이 유효함을 입증하기 위해 각 단계 별로 (1) 활동은 임의 배정, 모드는 시나리오 분석을 통해 배정, (2) 시나리오 분석을 통해 활동 배정, 모드는 임의 배정, (3) 활동과 모드를 임의로 배정해 보았다. 모의실험 결과 Prob-1의 경우, R-A(활동 임의배정)는 기본모형 대비 31.20만 원 총비용 기댓값이 악화되었고 R-M(모드 임의배정)은 85.75만 원 기댓값이 나빠졌으며 R-A&M(활동과 모드 임의배정)은 126.18만 원 기댓값이 나쁘게 나타났다. Prob-2와 Prob-3에서도 같은 현상이 관찰되었다. R-A, R-M 그리고 R-A&M 순으로 기댓값이 더욱 악화되는 결과를 보였다.

마지막으로 파라미터에 따른 프로젝트 총비용 분석에 따르면, 활동의 수가 증가할수록 프로젝트 총비용의 기댓값도 증가하는 것으로 관찰되었으며, 모드의 수가 커질수록 연산시간도 증가함을 확인하였다. 또한, 재작업 활동의 수와 재작업 확률을 증가시키며 각각을 관찰한 결과 재작업 활동의 수와 재작업 확률이 증가하면 연산시간이 급증함을 확인하였다.

6.2 연구의 시사점, 한계 및 향후 연구과제

본 연구는 SRCPSP에 적용할 수 있는 새로운 해법을 제시하였다는 점에서 학술적 가치가 있다. 백인섭(2020)도 이 문제의 해법을 제시하였는데, 백인섭(2020)의 해법은 기댓값에 기반한 해법이고 본 연구는 의사결정나무기법에 기반한 해법이라는 점에서 차이가 있다. 백인섭(2020)

의 해법과는 달리 본 연구에서 제안한 해법은 프로젝트 총비용의 확률분포를 보다 용이하게 생성할 수 있다는 장점이 있다.

재작업이 가능한 활동의 수가 증가하거나 재작업 발생 확률이 증가하면 프로젝트 총비용의 확률분포를 구하는 데 소요되는 시간 또한 급증하게 되며, 이는 본 연구의 한계라 할 수 있다. 또한 활동의 비용이나 품질 변동 등 프로젝트에 존재하는 확률적 요소는 다양한데 본 연구는 확률적 요소로 재작업만 고려했으며, 이 또한 본 연구의 한계라 할 수 있다.

프로젝트 총비용의 확률분포는 프로젝트의 가치나 리스크를 체계적으로 평가하는데 있어 핵심 요소다. 프로젝트의 불확실성이 높을수록 체계적인 평가가 더욱 필요하지만, 총비용의 확률분포를 정교하게 구하는 것은 더욱 어려워진다. 그러므로 불확실성이 매우 높은 프로젝트의 경우에도 만족할만한 수준의 총비용 확률분포를 구할 수 있는 기법이 개발되어야 하고, 재작업 이외의 프로젝트 불확실성도 포함하는 모형에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

[국내 문헌]

- 남재덕. (2008). 프로젝트 포트폴리오 평가 문제: 불확실성 하의 최초 구성 및 주기적 개장을 중심으로. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 민택기. (2005). 프로젝트 포트폴리오 평가문제: 시뮬레이션을 이용한 다속성 평가를 중심으로. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 백인섭. (2020). 자원 제약을 고려한 일정문제: 활동의 재작업이 가능한 경우. *글로벌경영학회지*, 17(1), 207-232
- 안정일. (2018). 반도체 측정공정을 위한 재측정 디스패칭 룰: 페널티기법을 이용한 불확실성하의 스케줄링을 중심으로. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 안태호. (1998). 자원 제약을 고려하여 기간 단축이 가능한 복수의 양식을 지닌 단일 프로젝트 일정 문제: 자원 가용량이 시간에 따라 변하는 경우의 휴리스틱 해법. *한국OA학회지*, 3(4), 154-163.
- 이현기. (2017). 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정문제: 기간 단축이 가능한 복수의 모드를 갖고 자원의 가용량을 변경할 수 있는 경우. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 이현주. (2019). 패션의류 유통산업의 매장 간 수평이동 배분 알고리즘에 관한 연구. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.

[국외 문헌]

- Abdul-Rahman, H. (1995). The cost of non-conformance during a

- highway project: a case study. *Constr. Manag. Econ*, 13(1), 23–32.
- Ahn, T., & Erenguc, S. S. (1998). The resource constrained project scheduling problem with multiple crashable modes: a heuristic procedure. *European Journal of Operational Research*, 107(2), 250–259.
- Alsayegh, H., & Hariga, M. (2012). Hybrid meta-heuristic methods for the multi-resource leveling problem with activity splitting. *Automation in Construction*, 27, 89–98.
- Arundachawat, P., Roy, R., Al-Ashaab, A., & Shehab, E. (2009). Design rework prediction in concurrent design environment: current trends and future research directions. in *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference - Competitive Design*. Cranfield University Press
- Ballestin, F., & Leus, R., (2009). Resource-constrained project scheduling for timely project completion with stochastic activity durations. *Production and Operations Management*, 18(4), 459–474.
- Banks, J. (2005). *Discrete event system simulation*. Pearson Education India.
- Barber, P., Graves, A., Hall, M., Sheath, D., & Tomkins, C. (2000). Quality failure costs in civil engineering projects. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(4/5), 479 - 492.
- Bie, L., Cui, N., & Zhang, X. (2012). Buffer Sizing Approach With Dependence Assumption Between Activities In Critical Chain Scheduling. *International Journal of Production Research*, 50(24),

7343-7356.

- Blazewicz, J. (1978). Complexity of computer scheduling algorithms under resource constraints. In *Proc. First Meeting AFCET-SMF on Applied Mathematics*, 16(6), 169-178.
- Bruni, M. E., Pugliese, L. D. P., Beraldi, P., & Guerriero, F. (2017). An adjustable robust optimization model for the resource-constrained project scheduling problem with uncertain activity durations. *Omega*, 71, 66-84.
- Burati, J.L., Farrington, J.J., & Ledbetter, W.B. (1992). Causes of quality deviations in design and construction. *J. Constr. Eng. Manag*, 118(1), 34 - 49.
- Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: methods and applications. In *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation*, 118-126. IEEE Computer Society.
- Chand, S., Singh H., & Ray T. (2019). Evolving heuristics for the resource constrained project scheduling problem with dynamic resource disruptions. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 897 - 912.
- Chen, Z., Demeulemeester, E., Sijun, B., & Yuntao, G., (2018). Efficient priority rules for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 270(3), 957-967.

- Chu, Z., Xu, Z., & Li, H. (2019). New heuristics for the RCPSP with multiple overlapping modes. *Computers & Industrial Engineering*, 131, 146–156.
- Costa, R., & Sobek, D. (2003). Iteration in engineering design: inherent and unavoidable or product of choices made?. in *ASME 2003 International design engineering technical conferences and Computers and information in engineering conference*, 669–674. American Society of Mechanical Engineers.
- Creemers, S. (2015). Minimizing the expected makespan of a project with stochastic activity durations under resource constraints. *Journal of Scheduling*, 18(3), 263 – 273.
- Creemers, S., Leus, R., & Lambrecht, M. (2010). Scheduling Markovian PERT networks to maximize the net present value. *Operations Research Letters*, 38(1), 51–56.
- Davari, M., & Demeulemeester, E. (2019). A novel branch-and-bound algorithm for the chance-constrained resource-constrained project scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 57(4), 1265–1282
- Davis, E. W. (1973). Project scheduling under resource constraints historical review and categorization of procedures. *AIIE Transactions*, 5(4), 297–313.
- Davis, E. W., & Heidorn, G. E. (1971). An Algorithm For Optimal Project Scheduling Under Multiple Resource Constraints. *Management Science*, 17(12), B-803.

- Debels, D., & Vanhoucke, M. (2007). A decomposition-based genetic algorithm for the resource-constrained project-scheduling problem. *Operations Research*, 55(3), 457-469.
- Elsayed, S., Sarker, R., Ray, T., & Coello, C. C. (2017). Consolidated optimization algorithm for resource-constrained project scheduling problems. *Information Sciences*, 418, 346-362.
- Etgar, R., Gelbard, R., & Cohen, Y. (2017). Optimizing Version Release Dates Of Research And Development Long-Term Processes. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 642-653.
- Fang, C., Kolisch, R., Wang, L., & Chundi, M. (2015). An estimation of distribution algorithm and new computational results for the stochastic resource-constrained project scheduling problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(4), 585 - 605.
- Geiger, M. J. (2017). A multi-threaded local search algorithm and computer implementation for the multi-mode, resource-constrained multi-project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 256(3), 729-741.
- Goldratt, E. M. (2017). *Critical chain*. Routledge.
- Hegazy, T., Said, M., & Kassab, M. (2011). Incorporating rework into construction schedule analysis. *Automation in construction*, 20(8), 1051-1059.
- Herroelen, W., & Leus, R. (2001). On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. *Journal of Operations Management*, 19(5),

559-577.

Hossain, M. A., & Chua, D. K. H. (2014). Overlapping design and construction activities and an optimization approach to minimize rework. *International journal of project management*, 32(6), 983-994.

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

Josephson, P. E., Larsson, B., & Li, H. (2002). Illustrative benchmarking rework and rework costs in Swedish construction industry. *Journal of Management in Engineering*, 18(2), 76 - 83.

Kapur, P. K., Pham, H., Aggarwal, A. G., & Kaur, G. (2012). Two Dimensional Multi-Release Software Reliability Modeling And Optimal Release Planning. *IEEE Transactions on Reliability*, 61(3), 758-768.

Kellenbrink, C., & Helber, S. (2015). Scheduling Resource-Constrained Projects with a Flexible Project Structure, *European Journal of Operational Research*, 246(2), 379-391.

Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path Planning And Acheduling. In *Papers presented at the December 1-3, 1959, eastern joint IRE-AIEE-ACM computer conference*, 160-173.

Kennedy, B. M., Sobek, D. K., & Kennedy, M. N. (2014). Reducing Rework by Applying Set Based Practices Early in the Systems Engineering Process. *Systems Engineering*, 17(3), 278-296.

- Kerzner, H. (2017). *PROJECT MANAGEMENT: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* -12th ed. New Jersey: John Wiley and Sons Inc.
- Kochenderfer, M. J. (2015). *Decision making under uncertainty: theory and application*. MIT press.
- Li, C., & Lim, A. (2018). A greedy aggregation - decomposition method for intermittent demand forecasting in fashion retailing, *European Journal of Operational Research*, 269(3), 860-869.
- Li, H., & Demeulemeester, E. (2016). A genetic algorithm for the robust resource leveling problem. *Journal of Scheduling*, 19(1), 43-60.
- 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 J.*, *PMI Oklahoma City Chapter*, 9(4), 1-17.
- Lova, A. L., Tormos, M. P., & Barber, F. (2006). Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling: Scheduling Schemes, Priority Rules And Mode Selection Rules. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 10(30), 69-86.
- Love, P. E. D., (2002). Influence of project type and procurement method on rework costs in building construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(1), 18 - 29.
- Lu, M., & AbouRizk, S. M. (2000). Simplified CPM/PERT Simulation

- Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(3), 219-226.
- Maghsoudlou, H., Afshar-Nadjafi, B., & 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.
- Mitchell, V. L., & Nault, B. R. (2007). Cooperative planning, uncertainty, and managerial control in concurrent design. *Management Science*, 53(3), 375-389.
- Mota, A. A., Mota, L. T. M., & Morelato, A. (2007). Visualization Of Power System Restoration Plans Using CPM/PERT Graphs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(3), 1322-1329.
- Naber, A., & Kolisch, R. (2014). MIP Models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles, *European Journal of Operational Research*, 239(2), 335-348.
- Nudtasomboon, N., & Randhawa, S. U. (1997). Resource-Constrained Project Scheduling With Renewable And Non-Renewable Resources And Time-Resource Tradeoffs. *Computers and Industrial Engineering*, 32(1), 227-242.
- Patterson, J. H. (1973). Alternate methods of project scheduling with limited resources. *Naval Research Logistics Quarterly*, 20(4), 764-784.
- Patterson, J. H., & Roth, G. (1976). Scheduling a project under multiple resource constraints: a zero-one approach. *AIIE*

Transactions, 8(4), 449–456.

- Patterson, J. H., Slowinski, R., Talbot, F. B., & Weglarz, J. (1990). Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource constrained scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 49(1), 68–79.
- Pellerin R., Perrier N., & Berthaut F. (2019). A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 280, 395 - 416
- Ponz-Tienda, J. L., Yepes, V., Pellicer, E., & Moreno-Flores, J. (2013). The resource leveling problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm. *Automation in Construction*, 29(1), 161–172.
- Project Management Institute(PMI). (2017). *A Guide To The Project Management Body Of Knowledge - sixth ed.* Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.
- Raghavan, V. A., Yoon, S. W., & 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
- Rostami, S., Creemers, S., & Leus, R. (2018). New strategies for stochastic resource-constrained project scheduling. *Journal of Scheduling*, 21(3), 349–365
- Roy, B., & Sen, A. K. (2020). A novel metaheuristic approach for resource constrained project scheduling problem. In *Soft*

- Computing: Theories and Applications* (pp. 535-544). Springer, Singapore.
- Scharge, L. (1970). Solving resource-constrained network problems by implicit enumeration - non-preemptive case. *Operation Research*, 18(2), 263-278.
- Smith, R. P., & Eppinger, S. D. (1997). Identifying controlling features of engineering design iteration. *Management science*, 43(3), 276-293.
- Stinson, J. P., Davis, E. W., & Khumawala, B. M. (1978). Multiple resource - constrained scheduling using branch and bound. *AIIE Transactions*, 10(3), 252-259.
- Stork, F. (2001). *Stochastic Resource-Constrained Project Scheduling*. Ph.D. Thesis. Technische Universität Berlin.
- Taha, H. A. (2011). *Operation Research: An Introduction - 9th ed.* Chicago: Prentice Hall.
- Taylor, T., & Ford, D. N. (2006). Tipping point failure and robustness in single development projects. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 22(1), 51-71.
- Van Peteghem, V., & Vanhoucke, M. (2010). A Genetic Algorithm For The Preemptive And Non-Preemptive Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 201(2), 409-418.
- Wagner, H. (1959). An integer programming model for machine scheduling. *Naval Research Logistics Quarterly*, 6(1), 131-140.

- Wang, X., & Ning, Y. (2018). Uncertain chance-constrained programming model for project scheduling problem. *Journal of the operational research society*, 69(3), 384-391.
- Werner, S., Horn, S., Weigert, G., & Jähnig, T. (2006). Simulation based scheduling system in a semiconductor backend facility. In *Proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, 1741-1748.
- Wynn, D. C., & Eckert, C. M. (2017). Perspectives on iteration in design and development. *Research in Engineering Design*, 28(2), 153-184.
- Zhang, H., Jiang, Z., & 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.