



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](#)

박사 학위 논문

자원 제약을 고려한 제안 프로젝트
포트폴리오 최적화 문제

The Optimization Problem of
Proposal Project Portfolio with
Resource Constraints

2020년 12월

숭실대학교 대학원

프로젝트경영학과

조 윤 재

박사 학위 논문

자원 제약을 고려한 제안 프로젝트
포트폴리오 최적화 문제

The Optimization Problem of
Proposal Project Portfolio with
Resource Constraints

2020년 12월

숭실대학교 대학원

프로젝트경영학과

조 윤 재

박사학위 논문

자원 제약을 고려한 제안 프로젝트
포트폴리오 최적화 문제

지도교수 안 태 호

이 논문을 박사학위 논문으로 제출함

2020년 12월

승실대학교 대학원


프로젝트경영학과


조 윤 재


조 윤 재 의 박사 학 위 논 문 을 인 준 함

심 사 위 원 장 유 한 주 

심 사 위 원 박 종 우 

심 사 위 원 박 회 준 

심 사 위 원 김 병 용 

심 사 위 원 사 재 오 

2020년 12월

숭실대학교 대학원

감사의 글

16년 전 직장생활과 병행하여 석사를 마치고, 직장생활의 분주함속에서도 마음 한편엔 공부를 계속해야지 않나 하는 생각은 늘 있었습니다. 하지만 인연이 늦게 닿아 3년 전에야 다시 공부를 시작하였고, 본사에서 제안 프로젝트, 대전에서의 프로젝트 수행 등의 직장생활과 학업을 병행하므로 힘든 때도 많았지만, 다시 대학 신입생이 된 듯 의사결정과 학(OR)이라는 새로운 공부에 때론 즐거웠습니다. 그래서 가끔은 풀타임처럼 학업에 전념하면 좋겠다 라는 철없는(?) 생각을 하기도 했었지요.

제 인생을 돌이켜보면 많은 중대한 선택이 있었습시다만, 박사 진학을 결심하고, 실천에 옮겨 다시 공부를 시작한 것은 제 인생의 여러 선택 중에서 가장 잘한 선택 중의 하나가 아니었나 생각합니다. 최선을 다해 달려왔고 또 좋은 결실을 맺은 제 자신이 한편 스스로 대견스럽기도 하고 가슴 뿌듯한 성취감을 느낍니다. 이 모든 것이 존경하는 교수님들과 선배님, 동료, 후배님들의 많은 도움이 있었기에 가능했습니다.

제안 프로젝트의 선택과 포트폴리오 구성에 관한 제 논문은 알고리즘을 바탕으로 하므로 논문의 성격상 지도교수님의 인도가 없으면 그 알고리즘의 입증이 거의 불가능한 것이었습니다. 그러나 논문의 완성도를 높이기 위해 휴일을 막론하고 술한 밤을 안태호 지도교수님과 함께 하였습니다. 천학비재한 저를 이끌어 주신 안태호 교수님께 정말 마음을 다해 깊이 감사를 드립니다. 앞으로 건강을 돌보시기를 간곡히 바랍니다. 그리고 날카롭게 오류를 잡아 주시고 핵심을 짚어 주셨던 박종우 교수님, 유한주 교수님, 김광용 교수님, 박희준 교수님께 감사드립니다.

또한, 저를 다시 공부의 길로 이끌어주시고 많은 조언을 해주신 남재덕 교수님과 논문 과정 전체에 걸쳐 하나하나 세세한 가이드를 해주신 선배님이신 백인섭 박사님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

이 감사의 글을 쓰는 지금, 성탄절 연휴 늦은 밤, 이 시각에도 회사의 제안룸은 불을 환히 밝히고 있을 것입니다. 경쟁사의 제안팀 역시 그러하겠지요. 수주와 실주의 갈림길에서 환희와 비탄에 젖는 경쟁사를 포함한 모든 제안인력들에게도 동료의식과 함께 그들의 고생에 애잔함을 느낍니다. 제안 프로젝트 선택에 관한 제 줄고가 작은 보탬이 되기를 바랍니다.

안타깝게도 2년 전 과정 1학기 때에 어머니가, 올해 논문학기 때에는 아버님이 돌아가셨습니다. 하늘나라에서 막내아들의 논문통과를 무척 기뻐하실 것입니다. 두 분이 주신 큰 은혜에 엮드려 감사할 따름입니다. 또한 장성한 아들이 아빠의 분투를 보고 자극을 좀 받기를 바라는 소박한 바람도 가져봅니다. 앞으로 더불어 함께 하는 사회와 나누는 삶을 위해 더욱 노력할 것임을 다짐하면서 감사의 글을 대신합니다.

감사합니다. 2020년 12월

목 차

국문초록	v
영문초록	vii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 내용 및 방법	4
1.3 연구의 구성	7
제 2 장 이론적 배경	8
2.1 경쟁 제안관련 선행연구	8
2.2 프로젝트 일정문제 선행연구	12
2.3 RCPSP관련 선행연구	15
2.4 프로젝트 선택 및 일정문제 관련 선행연구	19
제 3 장 제안 프로젝트 포트폴리오 구성의 최적화 해법	21
3.1 제안 프로젝트의 특징 및 사례	21
3.2 문제의 가정	30
3.3 문제의 수식화	35
제 4 장 알고리즘	43
4.1 해의 영역	44
4.2 최적화 기법	48
4.3 개선 규칙(Bounding Rule)	57

제 5 장 모의실험 결과	67
5.1 모의실험 조건 설정	67
5.2 모의실험 결과	71
 제 6 장 결론	 76
6.1 연구의 결과	76
6.2 연구의 시사점	78
6.3 연구의 한계 및 향후 연구과제	79
 참고문헌	 80

표 목 차

[표 3-1] 후보 제안 프로젝트 리스트	26
[표 3-2] 활동기간 연장에 따른 수주확률 변화 사례	29
[표 3-3] 활동의 활동모드별 자원 예시	32
[표 3-4] 활동의 활동모드별 수주확률 증가분 계산 예시	34
[표 4-1] $P=14$, $Q_p=2$, $I=4$, $M_{pqi}=2$, $Max_Ext_{pqim}=2$ 일 때 경우의 수	47
[표 4-2] $P=20$, $Q_p=2$, $I=4$, $M_{pqi}=2$, $Max_Ext_{pqim}=2$ 일 때 경우의 수	47
[표 4-3] 목적함수의 Upper Bounding 적용 사례	59
[표 5-1] 데이터셋 기본구성	67
[표 5-2] Basic 데이터셋의 모의실험 결과	71
[표 5-3] P-12 데이터셋 및 P-16인 데이터셋 모의실험 결과	72
[표 5-4] PM-1 데이터셋 및 PM-3인 데이터셋 모의실험 결과	73
[표 5-5] AM-1 데이터셋 및 AM-3인 데이터셋 모의실험 결과	74
[표 5-6] CAP -1 데이터셋 및 CAP +1인 데이터셋 모의실험 결과	75

그 림 목 차

[그림 1-1] 알고리즘 연구 방식의 절차	7
[그림 2-1] 발주에서 계약체결에 이르는 제안절차	10
[그림 3-1] 여유시간(Slack)의 불허용 사례	24
[그림 3-2] 일반적인 제안 프로세스	25
[그림 3-3] 프로젝트 모드와 활동 모드의 관계	27
[그림 3-4] 프로젝트 모드의 필요 자원단위 예시	31
[그림 3-5] 시점 t 에서의 필요 자원 수량 예시	32
[그림 3-6] 시점 $t=23$ 에서 자원 배정의 가용량 초과 사례	34

국문초록

자원 제약을 고려한 제안 프로젝트

포트폴리오 최적화 문제

조 윤 재

프로젝트경영학과

승실대학교 대학원

국내의 소프트웨어시장에서는 시스템 개발, 시스템 유지관리 및 하드웨어 설치 등 다양한 정보시스템 구축사업이 발주되고 있다. 이에 이를 수주하려는 기업은 가용자원 내에서 사업내용, 예상 수익, 수주가능성 등의 요소를 종합적으로 고려하여 입찰 참여여부를 결정하게 된다. 이는 기업의 경영에 큰 영향을 주는 중요한 의사결정이며 고도의 정밀성과 과학성이 요구된다. 따라서 이러한 의사결정을 지원하기 위하여, 입찰할 사업에 대한 제안 프로젝트를 선택하여 포트폴리오를 구성하는 최적화 수학적모형과 알고리즘의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 제안 프로젝트의 특성을 반영한 프로젝트 모드라는 개념을 설정하고 활동별 활동 모드에 따라 활동 기간을 연장함으로써 선형적으로 증가되는 수주확률을 고려하였다. 이를 통해 제한된 자원 하에서 전체 기대가치의 합을 최대화하는 수학적 모형과 최적화 알고리즘을 제시

하였으며, 모의실험을 통해 본 알고리즘의 유효성을 입증하였다. 모의실험은 프로젝트의 수, 프로젝트 모드의 수, 활동모드의 수 등 다양한 계수 값을 조정하면서 수행하였다. 실행가능한 해가 존재하지 않는 해 영역 또는 현재의 해보다 개선된 해가 존재하지 않는 해 영역을 체계적으로 제거하는 기법인 개선 규칙들을 사용하였다. 이를 통해 수작업으로는 불가능하며 많은 연산시간이 소요되는 프로젝트 포트폴리오 최적화 해법을 비교적 적은 시간 내에 산출하였고, 작은 계수 값으로 수행한 일부 모의실험에서는 주어진 제한시간(3,600초)내에 계산결과를 도출하는 결과를 보였다.

본 연구는 활동의 기간이 연장됨에 따라 수주 확률이 선형적으로 증가한다는 가정 하에, 수주 기대가치의 총합을 최대화하는 문제로 최적해 도출 알고리즘을 새롭게 제시하였다는 점에 의의가 있다. 본 연구에서 제시된 알고리즘을 바탕으로 의사결정지원시스템(DSS, Decision Support System)이 개발된다면, 실제 기업의 제안 프로젝트 선정 및 포트폴리오 구성을 위한 의사결정 과정에 도움이 될 것이다.

ABSTRACT

The Optimization Problem of Proposal Project Portfolio with Resource Constraints

Cho, Yoon-Jae

Department of Project Management

Graduate School of Soongsil University

In the domestic software market, various information system construction projects such as system development, system maintenance and hardware installation are being ordered. It is a very important decision to establish a portfolio of bidding projects and to participate in the project by judging various factors such as business contents, expected profits, and possibility of winning orders within the available resources held by the company, and it requires a high degree of precision and scientificity. Therefore, to support such decision-making, it is necessary to develop an optimized mathematical model and algorithm that composes a portfolio by selecting a proposal project for a bidding project.

Setting the concept of project mode reflecting the characteristics of the proposal projects, this study considers the probability of winning orders linearly increased by extending the duration of activity according to the activity mode. Based on the considerations, this study presents mathematical models and optimization algorithms that maximize the sum of total expectations under resource constraints, and demonstrate the effectiveness of this algorithm through simulation experiments. The simulation was performed by adjusting various coefficient values, such as the number of projects, the number of project modes, and the number of activity modes. The bounding rules, a technique for systematically eliminate solution space where no viable solution exists or solution space that do not have an improved solution than the current one, were used. Through this, the project portfolio optimization solution, which is impossible by manual and takes a lot of computation time, was calculated in a relatively small amount of time. In some simulations performed with a small coefficient value, the calculation result was derived within the limited time (3,600 seconds).

This study is meaningful in that it presents a new algorithm for deriving optimally as a problem that maximizes the sum of order expectations, assuming that the probability of winning orders increases linearly as the duration of the activity extends. If a decision support system (DSS) is developed based on the algorithms presented in this study, it will help in the decision-making process for selecting and portfolio composition of proposal projects in a real business environment.

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.1.1 연구의 배경

현대의 기업 비즈니스 환경은 세계화와 과학기술의 급속한 발전으로 인해 국가 간의 경계가 허물어지고 다양성과 복잡성이 급격하게 증대되고 있다. 이러한 경영환경의 변화는 경영전략의 구체적인 실현방법의 하나인 효과적인 프로젝트 관리를 중요한 전략적 요소로 부각시키고 있다(오석현 외, 2018). 또한, 현대의 기업들에 있어 포트폴리오에 프로젝트를 포함시키거나 제거하는 포트폴리오 관리는 매우 중요하다. 특히, 복수의 프로젝트를 동시에 수행해야 하는 기업들은 체계적인 포트폴리오 관리를 통해 기업전략의 연계성을 확보하고 시장에서의 경쟁우위를 획득하기 위해 노력하고 있다.

포트폴리오(Portfolio)란 프로젝트(Project), 프로그램(Program), 그리고 다른 작업(Work)들의 집합체로서 조직의 전략적 목표 달성을 위해 그룹화한 것이며, 프로젝트 포트폴리오 관리(Project Portfolio Management)란 포트폴리오의 가치를 극대화하기 위한 활동으로서 후보 프로젝트나 프로그램 중에서 조직의 전략적 목적에 부합되면 포트폴리오에 포함시키고 부합되지 않으면 제거시켜는 것을 의미한다(PMI, 2017). 단일 프로젝트 관리가 해당 프로젝트의 범위, 예산, 그리고 일정에 대한 체계적인 관리를 통해 최종 결과물을 완성하는 것이라면, 복수 프로젝트에 대한 포트폴리오 관리는 전사적 차원에서 프로젝트들의 착수와 종료를 통합적으로 관리하여 조직의 전략적 목표달성을 달성하는 것이라고 할 수 있다(남재덕, 2008).

국내의 소프트웨어(Software) 시장에서도 복수의 사업에 입찰을 하는 기업의 경우 사업의 입찰에 대한 선택과 수주된 사업의 관리는 매우 중요하다. 예를 들어 공공부문에서 다수의 사업에 입찰을 하는 기업은 사업의 내용, 기대수익, 수주 가능성 등 다양한 요소를 종합적으로 판단하여 입찰(제안) 참여 여부를 결정하게 된다. 공공부문의 경우 입찰의 방식은 일반적으로 공개 경쟁방식이며, 정부기관, 지자체, 정부출연기관 등이 발주자(Buyer), 다수의 SI(System Integration) 기업들이 입찰자(Seller)로 참여한다. 이때 SI기업이 어떤 사업에 입찰을 하고, 어떤 사업을 수행하는가는 해당 기업의 생존을 좌우할 수 있는 중대한 문제일 수 있다. 즉, 국내 소프트웨어 시장은 시스템 개발, 시스템 유지관리, 인프라 구축 등 다양한 많은 SW관련 사업들이 발주되고 있으며, 이를 수주하려는 기업의 입장에서는 다수의 사업들 중 어떤 사업에 입찰하고, 어떤 사업에 입찰하지 말아야 할 것인가를 결정하는 것이 매우 중요하다는 것을 뜻한다.

다수의 사업 중에서 입찰할 사업을 선택하는 것은 그 기업이 투입 가능한 가용자원(인적·물적 자원)과 선택된 사업의 수주 가능성을 감안하여 기대수익의 최대화를 가져 올 수 있는 사업들의 조합(Combination)을 선정하는 것이며, 이는 고도의 정밀성과 과학성이 요구되는 매우 어려운 작업이다. 입찰자는 사업에 입찰하기 위해 제안활동을 해야 한다. 여기서 제안활동이란 제안서 작성 등을 비롯하여 제안에 필요한 제반 활동을 모두 포함하며, 이 또한 프로젝트로 볼 수 있다. 이때, 입찰자의 가용자원이 무한대라면 이론적으로 입찰자는 기대이익을 최대화하기 위해 가능한 많은 사업에 입찰하는 것이 유리할 것이다. 그러나 제안 프로젝트에 투입할 수 있는 자원은 기업마다 한정되어 있다. 따라서 하나의 입찰자가 공고된 모든 사업에 입찰하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로 입찰자는 입찰이 가능한 사업 중에서 수주가능성, 예상수익, 제안비용, 인적자원, 일정 등

다양한 평가기준과 제약조건을 고려하여 최대의 수익을 기대할 수 있는 제안 프로젝트 조합을 산출해야한다.

수많은 사업의 기회 속에서 기업의 제반 환경과 조건에 부합하는 유망한 프로젝트를 과학적으로 선택하는 것은 매우 중요한 의사결정이다. 기존 연구에서는 제안 프로젝트의 가장 큰 특성이라 할 수 있는 프로젝트 모드(최초로 기본 인력과 자원이 배정되면 제안 프로젝트가 종료될 때까지 기본 자원이 변동 없이 배정되는 방식)와 제안 종료일을 기준으로 일정을 역방향으로 수립하는 역방향 일정계획(Backward scheduling)이 반영된 포트폴리오 최적화에 관한 선행연구는 미흡한 상태이다. 또한 실무 현장에서 활용 가능한 제안 프로젝트의 선택을 위한 포트폴리오 최적화 모델의 개발이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 제안 프로젝트의 특성을 반영하고, 실무 현장의 다양한 평가기준과 제약조건을 최대한 고려하여 제안 프로젝트 포트폴리오 최적화를 위한 산출모형을 찾고 이를 최적화하는 방법을 연구하고자 한다.

1.1.2 연구의 목적

본 연구는 일정 기간 동안의 후보 제안 프로젝트들을 대상으로 선택 가능한 포트폴리오를 구성하고, 자원 제약, 일정 등 다양한 제약조건 속에서 예상 수주확률을 감안한 최대의 기대수익이 예상되는 포트폴리오 도출하는 수리적 모형과 알고리즘을 제시한다. 따라서 궁극적으로 본 연구의 목적은 제한된 자원으로 기대 수익을 최대화하는 제안 프로젝트의 포트폴리오 최적화를 통해 사업선택의 가능해(Feasible solution)을 도출하는 알고리즘을 구현하여 그 유효성을 입증하고 나아가, 실용적으로는 본 알고리즘을 바탕으로 실제 기업 환경에서 제안 프로젝트를 선정하고 포트폴리오를 수립하는 의사결정지원시스템의 핵심 로직 개발하는 데에 있다.

1.2 연구의 내용 및 방법

1.2.1 연구의 내용

본 연구는 복수 개의 후보 제안 프로젝트 중에서 입찰에 참여할 즉, 제안 작업을 수행할 제안 프로젝트를 선택하는 문제를 다룬다. 제안 프로젝트는 일반적인 프로젝트가 가지는 기본적 속성 외에 몇 가지 독특한 특성을 가진다. 첫째, 프로세스를 구성하는 활동(Activity)에 투입되는 자원은 프로젝트 시작시점에 확정되면 종료까지 그 자원이 기본적으로 유지된다는 점이다. 건축공사의 예를 들어, 기초공사, 철골, 전기설비, 인테리어 등 각 공정에 인력이 투입되어 작업이 진행되다가 해당 공정이 완료될 때, 해당 자원은 철수하지만, 제안 프로젝트는 제안 프로젝트팀이 구성되어 제안인력이 할당되면 활동과 공정에 상관없이 제안 종료 시까지 인력이 유지되는 것이다. 둘째, 여유일정(Slack)을 허용하지 않는다. 즉, 다수의 활동들이 병행할 때, 하나의 활동이 먼저 종료되면 해당 활동의 기간(Duration)을 다음 활동의 시작시점까지 연장하는 한이 있더라도 유휴 자원이 발생하지 않게 만드는 것을 뜻한다. 셋째, 모든 활동이 조기에 종료되더라도 마감일 전에 프로젝트를 종료시키지 않는다. 이는 제안 마감일(종료일)까지 가용한 자원과 노력을 총동원하여 제안품질을 조금이라도 향상시켜 수주가능성을 단 1%라도 높여야 한다는 지상과제를 가진 제안 프로젝트의 특성에서 비롯되는 것이다. 제안 프로젝트가 일정을 단축하여 프로젝트 비용을 최소화하려는 일반 프로젝트와의 가장 큰 차별점은 바로 이것이다. 그러므로 일정 수립에 있어 제안 프로젝트는 다른 프로젝트와 달리, 제안 종료일을 기준으로 역순으로 일정 수립하여 조기에 제안작업에 착수하는 것을 권장하는 것이다(류현주 & 박민영, 2009). 본 연구 역시 역순(backward)의 일정수립을 알고리즘에 반영하였다.

제안 프로젝트를 구성하는 가장 마지막 단계의 활동은 제안발표이다. 제안발표 후 발주자는 제안서 내용, 발표내용 및 입찰금액 등을 종합적으로 평가하여 사업자를 선정하며 선정결과를 공개한다. 즉, 제안자(입찰자)에 입장에서는 수주와 실주가 결정되는 것이며, 통상 수주 시에는 제안에 투입된 모든 비용은 향후 수행 프로젝트 비용에 산입되나 실주 시에는 모든 제안비용은 그대로 손실로 처리되고, 대체로 거의 모든 산출물들은 거의 무용지물이 되는 것 역시 다른 일반적인 프로젝트와 다른 점이라 할 수 있다.

본 연구는 이러한 제안 프로젝트의 특성을 감안하여 제안 프로젝트 선정을 위한 수학적 모델과 최적해 방식의 알고리즘을 개발하고, 모의실험을 통해 본 모델과 알고리즘의 유효함을 입증하고자 한다.

1.2.2 연구의 차별점

본 연구의 차별점은 제안 프로젝트 특유의 속성에서 비롯된다. 기본적으로 제안 프로젝트 수행팀이 구성되면 제안 프로젝트가 종료될 때까지 해당 인력이 유지된다는 것은 전술한 바와 같다. 본 연구의 수학적 모델에서는 이를 ‘프로젝트 모드’라는 의사결정 변수로 설정하였으며, 본 연구에서 개발한 알고리즘과 다른 RCPSP(Resource Contained Project Scheduling Problem)알고리즘과의 가장 큰 차별점은 프로젝트 모드라는 의사결정 변수를 채택했다는 점이다. RCPSP의 일반적 수리모형에서 의사결정 변수는 프로젝트 선택변수 및 활동모드 선택변수이며, 선택여부(0-1변수)를 결정하는 변수로 표현된다. 반면 본 논문의 프로젝트 포트폴리오 알고리즘의 수리모형에서는 프로젝트 선택변수와 활동모드 변수 사이에, 프로젝트 모드 선택여부를 결정하는 선택변수(0-1변수)를 삽입하고, 활동 모드 내의 기간연장을 의미하는 변수를 추가하였다.

또한 일반적으로 일정수립의 문제에서는 일정단축(Crashing)을 통한 전체 프로젝트의 기간단축 및 비용절감의 주제를 다루지만, 본 연구에서는 Crashing의 반대 개념인 활동의 기간 연장(Duration Extension)을 통한 수주확률(수주가능성) 향상의 선형적 비례관계를 전제로 연구를 전개하였다. 자원제약 하의 일정수립의 전개방향에 있어서도 통상의 다른 일정수립 방식과 달리, 역순(backward)의 방식으로 구현한 것도 차별점이라 할 수 있다.

1.2.3 연구의 방법

본 연구는 다수의 후보 제안 프로젝트에서 프로젝트 모드를 감안하여 자원제약 하에 입찰에 참여할 제안 프로젝트의 포트폴리오를 최적화하는 수리적 모형을 제시한다. 활동별 기간연장에 따른 제안품질의 향상과 수주가능성 즉, 수주확률의 상승을 전제로 알고리즘을 전개하였다. 알고리즘은 최적해 방식과 휴리스틱 방식이 있으나, 본 연구는 목적함수 정의, 문제의 가정 및 제약식 설정 등 전체 해 영역을 순차적으로 탐색하는 최적해 방식의 알고리즘을 제시하였고, 해당 알고리즘을 코드로 전환하였다.

해당 알고리즘이 유효성을 입증하기 위해 난수발생기를 활용하여 프로젝트의 예상가치, 프로젝트 수주 확률, 제안 마감일, 자원종류별 자원의 크기, 활동모드별 최대 연장 기간 등 주요 상수 값을 정해진 생성 규칙을 가지고 생성하였다. 프로젝트의 수, 프로젝트 모드의 수, 활동모드의 수 등 주요 계수값을 가감, 조정하며 수차에 걸친 모의실험을 수행하였고, 그 실험결과를 분석하였다. 또한 실행가능한 해가 존재하지 않는 해 영역 또는 현재의 해보다 개선된 해가 존재하지 않는 해 영역을 체계적으로 제거하여 연산시간을 감소시키는 기법인 개선 규칙을 사용하였다.

일반적인 알고리즘 연구방식의 절차를 도해하면 아래 그림과 같다.



[그림 1-1] 알고리즘 연구 방식의 절차

1.3 연구의 구성

본 논문은 모두 6개의 장으로 구성되어 있으며, 제1장에서는 연구의 배경 및 목적, 연구의 내용 및 방법, 연구의 구성을 서술하였고, 제2장은 본 연구에 관련된 이론적 배경으로 크게 4개의 부분으로 구분하여 선행연구를 수행하였다. 제3장에서는 이해를 돕기 위해 본 연구의 대상인 제안 프로젝트의 특징과 연구의 사례를 설명하였고, 수학적 모형과 제약식들을 정의하였다. 제4장에서는 탐색해야 할 해의 영역에 대한 탐색 시퀀스 및 수학적 모형을 구현하기 위해 사용된 최적해 방식 알고리즘과 연산 시간을 줄이기 위한 개선규칙(bounding rule)을 설명하였다. 이어 제5장에서는 모의실험 결과를 기본 데이터셋의 결과값과 비교 분석하였다. 마지막으로, 제6장에서는 알고리즘 내용 및 모의실험 결과를 중심으로 연구 결과를 요약하고, 본 연구의 의의, 시사점, 연구의 한계 및 향후 연구 과제를 제시하였다.

제 2 장 이론적 배경

본 연구의 주제는 주어진 제안 일정과 제한된 자원 하에서 기대수익을 최대화하는 제안 프로젝트 조합을 선정하고 일정을 수립하는 문제이다. 따라서 4가지 분야, 즉 경쟁 제안에 관한 분야, 프로젝트 일정문제, 자원제약 하의 프로젝트 일정문제인 RCPSP, 최적의 프로젝트 조합을 선정하는 프로젝트 선택 및 일정 문제에 관한 문헌연구를 수행하였다.

2.1 경쟁 제안관련 선행연구

제안이라는 단어는 매우 일상적으로 사용되는 용어으로써 사전적으로는 “안이나 의견으로 내놓음. 또는 그 안이나 의견”(표준국어대사전, 국립국어원)을 의미한다. 결혼이라는 전제에서는 흔히 청혼을 의미하며, 비즈니스 환경에서는 사업 제안, 투자 제안, 제안활동, 개선제안 등 다양한 분야에서 제안이라는 용어가 사용된다.

비즈니스 환경에서 제안이라는 용어는 개선제안과 경쟁제안이라는 2가지 범주에 포괄된다. 우선 개선제안은 기업내부의 다양한 개선활동 범주에 해당되는 제안이다. 한국제안활동협회의 자료에 의하면 “조직 구성원이나 협력업체, 고객들이 자신의 업무를 효율적, 효과적으로 수행하거나 기업 경영성과에 기여하기 위하여 업무, 사람, 고객, 주변환경 등에 대하여 수시로 자신의 아이디어를 제시하고 이를 개선하는 활동”으로 정의한다. 두 번째 범주는 경쟁제안이다. 즉, 공개 입찰경쟁에서 수주를 위한 영업행위의 일환으로 진행되는 제안요청서 분석, 제안전략 수립, 제안서 작성, 제안 발표 등의 활동들을 의미하는 것으로써, 본 논문의 연구대상이자 주제어이다. 따라서 본 논문에서 사용되는 제안은 경쟁 제안의 범주라고 할 수 있으며, 이후 사용되는 제안은 경쟁 제안을 의미한다.

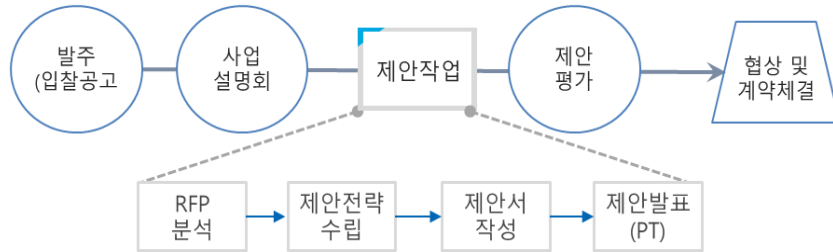
최용수(2012)는 제안요청서(RFP)에 대하여 각 공급사별로 자신들이 공급자로 선정되어 지기 위해 자신들만의 해결방법을 제시하는 행위라고 제안을 정의하였고 그러한 해결방법이 체계적으로 기술된 문서를 제안서(proposals)이라고 정의하였다.

수주형 비즈니스 환경에서 제안의 의미를 “발주자의 요구사항을 만족시키기 위해 입찰자가 제시하는 공식적인 조건”이라고 설명하였고 수주를 위한 여러 영업활동 중 발주자의 요구사항에 대해 구체적으로 입찰자의 입장을 밝히는 작업이며 수주를 위해 필수적으로 요구되는 활동이라 하였다(박상우, 2013).

김홍진(2014)은 자신의 의사를 타인에게 설득할 목적으로 제안하여 자신의 목적을 달성하려는 행위를 제안이라 하였다.

2.1.1 제안 절차

박상우(2012)가 제시하는 제안 절차에 따르면, 발주자가 공식적인 입찰공고를 통해 발주금액, 사업 수행기간, 사업 세부내용, 평가방식 등의 내용이 기술된 제안요청서(RFP)를 공개한다. 또한 발주자는 필요 시, 입찰자들을 대상으로 사업설명회를 개최하기도 한다. 입찰자는 발주자의 요구사항이 제시되어 있는 제안요청서(RFP)의 요청 사항을 바탕으로 제안서를 작성/제출하고, 제안발표를 하게 되며, 가격점수와 기술점수를 합산하여 최고 득점을 획득한 입찰자가 수주하게 된다. 즉, 발주자는 입찰에 참여한 입찰자를 대상으로 제안평가를 실시하고, 발주자에게 최상의 제안내용과 최적의 가격을 제시한 입찰자를 우선협상 대상자로 선정한다. 우선협상 대상자와 발주자 사이에 기술협상이 타결되면 계약체결에 이른다. 이를 도해하면 [그림 2-1]과 같이 설명된다.



[그림 2-1] 발주에서 계약체결에 이르는 제안절차

여기서 원형으로 표시된 활동은 발주자의 작업이고 사각형으로 표시된 활동은 입찰자(제안자), 사다리꼴로 표시된 활동은 발주자와 입찰자의 공동행위이다. 여기서 제안작업은 다시 RFP분석, 제안전략 수립, 제안서 작성 및 제안발표(PT)의 프로세스로 진행된다. 전체 제안 방향과 수주전략에 핵심적인 사항을 결정하는 제안전략은 “포괄적이고 경쟁력 있는 입찰을 제공하기 위해 물리적 및 재무적 모두에서 사용 가능한 모든 리소스를 사용하는 관리 기술”로 정의된다.(I Astana et al., 2015)

2.1.2 입찰과 관련된 포트폴리오 선행 연구

공개 경쟁 입찰 시장은 수주전쟁이라 부를 만큼 기업의 사활을 건 치열한 시장이다. 기업 내에서 본 사업 수행은 제안작업과 수주가 전제되어야 가능한 것이므로, 제안작업은 본 사업수행을 위한 관건적 요소이다. 따라서 입찰과 제안프로젝트 선택, 포트폴리오에 관한 주요 선행연구는 다음과 같다.

Lewis & Harold(2012)는 경쟁 입찰, 입찰 및 제안을 통한 계약 및 자금조달에 대한 기술적 품질과 비용 대비 가치가 뛰어난 제안서를 만드는 방법과 광범위한 조달, 공급, 작업 계약 입찰 및 자금조달에 관하여 설명하였

다. Yongyi Shou(2006)는 입찰 프로세스에 참여하는 R&D 사업 제안에 있어서, 리소스 제약 조건을 위반하지 않는 복수의 R&D 프로젝트 포트폴리오를 구성하기 위한 입찰 메커니즘을 제시하였다.

Markowitz의 전통 프로젝트 포트폴리오 이론을 기반으로 수익 품질, 이익 잠재력 및 수익성 지속 가능성 등의 평가요소로 구성된 수익성 평가 지수 집합을 수립하여 프로젝트 수익성에 대한 포괄적인 평가 지표 시스템을 구축하였다(Li hong-bing et al., 2008).

I Astana et al.(2015)은 입찰전략과 관련된 다양한 문헌의 관점을 바탕으로 초기 단계 프로젝트 포트폴리오에 관해 설명하였고, 입찰 전략 모델의 개념적 프레임워크를 개발하였다. WU Xiao-hui(2005)는 도로설계 분야의 입찰 프로젝트에서 입찰자의 포괄적 이익에 영향을 미치는 다양한 분석 요소를 AHP(Analytical Hierarchy Process) 방법의 원칙에 따라 분석하고, 입찰자의 주관적인 판단을 포괄적으로 정량화한 입찰 프로젝트 선정기법을 제공하였다.

Zhang xian(2010)은 입찰 프로젝트 선택에 영향을 미치는 다양한 평가 요소에 대한 포괄적 분석을 통해 후보 프로젝트에서 선택될 입찰 프로젝트를 선택하는 퍼지 AHP모델을 개발하였고, Semaan & Salem(2017)는 건설산업 분야의 빅데이터를 수집하여 입찰자 선택모델을 제시하였고, 사례연구 테스트를 통해 실제 응용 프로그램에서의 실행 가능성을 입증하였다.

입찰자의 예상 이익을 극대화하기 위한 다중 기간 자원 할당 방법을 개발한 Takano 등은 자원 할당 모델에서 예상 수익 함수의 부분적 선형 근사값을 생성하여 혼합 정수 선형 계획법 문제로 제시하였고, 최적의 자원 할당 Simulation을 통해 자원 할당 방법의 효율성을 입증하였다(Takano et al., 2017).

2.2 프로젝트 일정문제 선행연구

프로젝트 일정문제의 핵심은 프로젝트를 구성하는 각 활동의 시작시간과 완료시간을 결정하는 것이다. 프로젝트를 계층화하고 더 이상 나눌 수 없는 업무단위로 분할된 단위를 작업분할구조(WBS, Work Breakdown Structure)라하고 WBS를 기반으로 일정을 수립하는 것이 일정계획이다. 일정 계획을 개발하는 방법으로서 PMI(2017)에서는 일정 네트워크 분석, 주공정법(CPM), 자원최적화, 일정단축기법, 분석기법 등 많은 방법이 있으며, 본 주제와 밀접하게 연관된 일정단축 및 연장기법 및 자원최적화에 대해 연구하였다.

프로젝트 일정 문제의 대표적인 기법들로는 PERT(Program Evaluation & Review Technique), CPM(Critical Path Method), TCTP(Time-Cost Trade - off Problem), RCPSP 등을 꼽을 수 있으며, CPM, TCTP, RCPSP 모델은 일반적으로 불확실성이 없는 확정적(Deterministic)인 경우를 다루며 PERT, GERT 모델은 불확실성이 있는 확률적(Stochastic)인 경우를 다룬다.

PERT는 활동의 수행기간에 불확실성이 있는 경우 활동에 대한 정확한 지식을 바탕으로 각 활동의 수행기간을 세 가지(낙관적, 비관적, 가장가능성 높은)의 수행기간으로 추정한 후 하나의 기댓값으로 계산하는 방법이며(Malcolm et al., 1959), CPM은 모든 경로에서 여유기간이 없는 주경로(Critical Path)를 찾는 방법으로 주경로에 있는 활동의 수행기간은 각 활동의 기간이 이산적인 경우 프로젝트의 총 기간에 직접적으로 관여된다(Kelley & Walker, 1959). GERT는 확률적 네트워크를 분석하기 위한 기술로 네트워크의 논리를 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 분석하는 방법이다(Pritsker, 1966).

일반적인 기업에서 프로젝트 일정을 계획하는 경우 가장 현실적인 대안

은 RCPSP일 것이다. RCPSP 중 많이 연구되고 있는 복수의 모드를 지닌 문제(Resource Constrained Project Scheduling Problem with Multi-Modes, RCPSPMM)의 경우 작업(활동)의 시작시간과 그 실행방법(모드)의 선택을 의사결정 변수로 가지고 있으며, 자원이 한정된 경우를 다루고 있기 때문에 매우 현실적이다(백인섭, 2020). Sprecher(2002)는 선행 나무(Precedence Tree)개념을 사용하여 작업(활동)의 시작시간과 실행방법(모드)의 선택을 해로 선정하였으며, 모든 해를 탐색하는 전체열거법(Total Enumeration)을 통해 최적의 해를 구하는 RCPSPMM을 소개하였다.

2.2.1 Crashing기법

PMI(2017)에서는 프로젝트 수행비용을 최소화하거나 납기일정을 충족하기 위한 일정단축기법으로 Crashing(공정압축법)을 설명한다. Crashing기법은 활동에 자원을 추가 투입하여 최소한의 추가 비용으로 일정을 단축하는 기법이다. 따라서 자원이 추가로 투입되는 만큼 비용의 상승을 초래할 수도 있다. 단축되는 일정과 추가되는 비용의 Trade-off 관계를 면밀히 계산하여야 한다. 작업 기간 및 비용은 선정된 활동모드(Mode)와 그 모드 내에서의 기간 단축(Crashing) 정도에 따라 결정된다는 RCPSPMCM(RCPSP with Multiple Crashable Mode)가 Crashing 기법으로 제시되었고, 이는 활동에는 하나 이상의 모드(Mode)가 존재하며 모드 내에서는 기간 단축이 가능(Crashable)한 경우로써, 이 모델은 일정 문제의 두 부류인 RCPSP와 Time-Cost Trade-off 문제와의 통합이라는 의미를 지니고 있다(남재덕, 2008). 이러한 RCPSPMCM 모드의 Crashing을 통한 기간단축 문제에 대해서는 Ahn & Erenguc가 최적해 기법은 1995년에, 휴리스틱 기법은 1998년에 그 알고리즘을 제시하였다.

2.2.2 Fast Tracking기법

Fast Tracking(공정중첩 단축법)은 일반적으로 순차적으로 수행되는 활동 또는 단계를 특정구간에서 동시에 중첩 수행하는 방식으로 일정을 단축하는 것으로서, 비용의 증가를 초래하지는 않는다. 이는 주공정에서 전체 프로젝트 기간을 단축하기 위해 활동을 중첩할 수 경우에만 효과적인 기법이다(PMI, 2017). 그러나 Fast Tracking은 활동이 중첩되는 만큼 작업 품질의 하락, 작업자의 불만 및 피로도 상승 등의 부작용이 발생하여, 결국 해당 활동의 재작업(rework)과 작업의 재배치(rearrange)를 유발시켜 전체 프로젝트의 리스크의 증가를 불러일으킬 수 있으므로, 이 기법의 장단점을 잘 파악하여 신중히 접근해야 한다.

2.2.3 자원 최적화 기법(Resource Optimizing Technique)

프로젝트에서 주어진 자원의 최대 가용량을 초과하여 사용하지 않기 위해 자원최적화는 활동에 필요한 자원의 점유 또는 사용을 조절하는 기법이다. PMI(2017)에서는 자원의 수요와 공급에 따라 일정 모형을 조정하는데 사용할 수 있는 자원최적화 기법의 예로 자원평준화(Resource Levelling)와 자원평활화를 제시하고 있다. 자원 평준화는 자원의 가용량과 작업의 자원 요구량 사이에 균형을 유지하면서, 자원제약에 근거하여 시작시점과 종료시점을 조정하는 기법으로, 동일한 기간에 한 종류의 자원을 두개 이상의 활동에서 사용할 경우 또는 자원의 사용량을 일정한 수준으로 유지해야 하는 경우에 사용하며 이로 인해 주공정이 변경될 수 있다. 자원평활화는 프로젝트에 대한 자원 필요량이 사전에 주어진 자원 한도를 초과하지 않도록 일정 모형의 활동을 조정하는 기법이며, 자원평준화와는 반대로 일부 자원이 최적화되지 않을 수 있으나, 주공정을 변경시키지는 않는다.

이 분야의 관련 연구로는 분지(Branch) 프라이스 앤 컷(Price-and-Cut) 알고리즘을 활용한 Coughlan et al.(2010), 메타휴리스틱 방식을 활용한 Alsayegh & Hariga(2012)와, 유전자 알고리즘을 활용한 Li & Demeulemeester(2016)이 있다(이현기, 2017).

2.3 RCPSP 관련 선행연구

2.3.1 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정문제(RCPSP)

RCPSP는 활동의 선행관계, 작업방식, 마감기한, 최대 가용자원 등의 여러 제약조건하에서 활동의 우선순위와 활동모드의 선택에 관한 문제이다. 이 문제의 경우 실제의 프로젝트 일정계획에 적용할 수 있는 프로젝트 일정문제 중 가장 현실적인 제약조건들로 이루어져 있다. 이 문제의 해결을 위해 이전 연구에서는 한계열거법, 분지한계법, 선형계획법, 정수계획법, 2차 방정식, 0-1 계획법 등을 사용하였다.

한계열거법은 Davis & Heidorn(1971)가 최적해법을 제안함으로 시작되었다(민택기, 2005). 장점으로 작업의 소요기간에 따라 자원 요구가 변화되며 작업의 연속성에 관한 다양한 가정들이 허용되며, 단점으로 문제의 크기가 증가함에 따라 급격히 해 공간이 증가한다는 점이다(남재덕, 2008). 분지한계법(Branch and Bound)은 Johnson(1967)과 Schrage(1970)에 의해 연구되었으며, 선형계획법은 Stinson et al.(1978)이 노드 선택 휴리스틱을 이용하여 수식화하였다. 이들은 분지한계트리(Branch and Bound Tree)상에서 열등 해를 효율적으로 제거하는 우월 규칙(Dominance Rule)을 수립하여 효율성을 높였다. 정수계획법은 Wagner(1959)가 기계 일정 계획 문제를 연구에서 수식화하였다.

0-1계획법은 주어진 제약조건에 대해 0 또는 1로 만드는 변수를 곱하는 것으로 해당 제약을 조건부로 적용함으로 주어진 문제에 대한 수식화를

표현할 수 있으며, 최소화된 제약 또는 적은 수의 0-1변수를 가진다. 0-1 계획법은 Bowman(1959)이 활동의 수행에 이용하였고, Patterson & Huber(1974)는 정수 선형 프로그램(Linear Program)의 수식화에 이용하였으며, Patterson & Roth(1976)는 순서 문제(Sequencing Problem)의 수식화에 이용하였다.

다중 자원 제약하의 프로젝트 일정문제(MRCPSP, Multi-modes Resource Constrained Project Scheduling Problem)의 경우 각 활동이 자원 및 기간 제약조건과 함께 모드 집합 중 하나에서 수행될 수 있음을 의미한다(Slowinski et al., 1994).

백인섭(2020)은 RCPSP라는 확정적 모델에 공정상 어떤 활동이 재작업이 일어날 수 있다는 전제하에 재작업(Rework)이라는 확률적 요소를 적용하여 알고리즘을 개발하였고, 모의실험을 통해 재작업이 적용되지 않은 RCPSP 알고리즘으로 작성된 일정보다 재작업이 적용된 RCPSP 알고리즘으로 작성된 일정이 더 좋은 결과를 보여, 그 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

2.3.2 NP-hard Class

본 연구의 문제영역은 전형적인 복수의 모드를 가진 RCPSP이며, 일반적으로 RCPSPMM의 경우 해 영역의 크기가 커지면 최적해를 산출하는데 소요되는 연산 시간 역시 급증하게 되어 NP-Hard Class의 문제가 된다(Blazewicz, 1978). Davis(1973)는 정수 선형 계획법을 적용한 연구에서 이 런 분야의 문제를 직접적으로 다루는 것은 연산 시간의 증가로 현실적이지 않다고 했다. 이러한 이유로 NP-Hard Class의 경우 휴리스틱 기법을 사용하는 것이 현실적이다.

2.3.3. 자원 제약을 고려한 시간-비용 트레이드오프 문제 (RCTCTP, Resource Constrained Time-Cost Trade-off)

프로젝트 일정문제에서 시간과 비용간의 트레이드오프와 RCPSP의 통합으로 형성되었으며, Weglarz(1979)와 Talbot(1982)은 이를 수식화하였다. 이 문제의 특징은 활동이 자원을 소모하며, 재생 가능 자원, 재생 불가능한 자원, 이중 제약 자원을 모두 고려한 점이다. 김갑식(2016)은 프로젝트에서 활동의 품질이 기간과 비용에 큰 영향을 미치는 경우가 흔히 존재하며, 선행 활동이 품질이 후행활동의 재작업, 기간 추가, 비용 추가 등에 영향을 주는 연구를 수행하였다.

RCTCTP와 관련된 주요 연구로는 Talbot(1982), Patterson et al.(1989, 1990), Speranza & Vercellis(1993), Sprecher(1994), Nudtasomboon & Randhawa(1997), 그리고 Demeulemeester et al.(2000)의 연구가 있다. 그들의 연구에서 분지 한계(Branch-and-Bound) 절차가 개발되었고, De Reyck et al.(1998) 등은 지역 탐색(Local Search)과 타부 탐색(Tabu Search) 휴리스틱 절차를 개발하였다(김갑식, 2016).

2.3.4. 자원 제약을 고려한 일정문제의 휴리스틱 기법

RCPSP는 제조, 생산계획, 프로젝트 관리 및 기타 다양한 분야에서 광범위한 응용 프로그램을 갖는 일반적인 스케줄링 일반적인 문제이다. RCPSP는 1960년대부터 연구되어 왔으며 NP-Hard 문제이다. 또한 그 해결방법은 주로 휴리스틱이다(Pellerin et al., 2019).

Patterson(1973)은 휴리스틱을 7가지 방식으로 실험하여 프로젝트 지연, 자원의 유휴 기간, 휴리스틱 처리 시간 등에 근거한 휴리스틱 성능을 각각 측정하였다. 실험 결과, 시간과 관련된 휴리스틱 방식은 자원을 비효율적으로 사용하는 대신, 프로젝트의 일정 지연이 최소화되는 일정을 도출하였

다. 또한 자원과 관련된 휴리스틱 방식은 프로젝트 소요기간이 지연되는 반면, 자원을 효율적으로 계획한다는 것을 제시하였다. 이때 여유일정(slack)을 최소화하는 최소 여유기법(Minimum Slack Method)은 총 프로젝트 일정 지연을 측면에서, 가장 효율적인 것으로 결론지었다(이현기, 2017).

Patterson et al.(1990)은 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정문제를 위한 역추적(backtracking) 알고리즘을 제시하였고, Debels & Vanhoucke(2007)는 각 활동의 수행기간이 불확실할 때, 자원이 제한된 경우의 유전자 알고리즘을 활용한 방안을 제시 하였다. 이 경우 비용의 최소화 문제로 네 가지 개선 절차를 포함한 시뮬레이션 방법을 제시하였다(이현기, 2017).

Alsayegh & Hariga(2012)는 활동 분할을 통한 다중 자원 평준화 문제의 비용의 최소화에 대한 해법을 하이브리드 메타 휴리스틱 방식으로 제시하였고, Naber & Kolisch(2014)는 활동의 자원 사용이 변동적인 FRCPSPP 문제를 메타 휴리스틱 기반의 알고리즘으로 연구하였다.

Li & Lim(2018)은 소매업체를 위한 효율적인 재고 및 물류 시스템에서 매일 각 상점에서 각 재고 보유 단위(SKU)에 대한 수요를 예측하기 위해 Greedy Aggregation-Decomposition 휴리스틱 기법을 제안하였고, Chand, Singh & Ray(2019)의 연구에서는 RCPSP의 각 의사결정단계에서 우선순위 규칙 및 후속 활동에 대한 정당성을 사용하는 롤아웃-정의(RJ, Rollout-Justification) 절차에 진화된 유전자 알고리즘을 사용하였다.

Chua, Xua & Lib(2019)는 여러 개의 겹치는 모드의 자원이 제한된 프로젝트 스케줄링 문제에서 롤아웃 정책을 기반으로 근사 동적 프로그래밍(ADP, Approximate Dynamic Programming) 알고리즘 개발에 관하여 연구하였다.

2.4 프로젝트 선택 및 일정문제 관련 선행연구

Archer & Ghasemzadeh(1999)에 의하면 프로젝트 포트폴리오 관리란 특정한 조직의 sponsorship 혹은 관리 하에서 수행되는 프로젝트의 그룹들을 관리하는 것이라 정의하였고, Blichfeldt & Eskerod(2008)는 전체 후보 프로젝트를 우선순위를 통해 필터링하는 것, 필터링된 포트폴리오 내에 있는 프로젝트들을 동시에 다시 우선 순위화하는 것, 그리고 그 우선순위에 따라 프로젝트들에 할당된 자원을 배정하고 재조정하는 것 등 3가지 범주를 사용하여 프로젝트 포트폴리오를 정의하였다.

안태호(2003)는 복수 개의 프로젝트에 대하여 긍정적, 부정적 효과를 가져오는 전략적 의사결정 문제의 해결이 가능한 수리모형을 제시하였다. 또한, 안태호(2007)는 단일 모드(Single-Mode)를 가진 RCPSP에 대한 연구의 한계를 넘어 R&D 프로젝트 포트폴리오 수립모델에 복수 모드(Multi-Mode)를 적용한 휴리스틱 기법을 소개하였고, 기존 모형의 해법을 개선하는 것이 아닌, 프로젝트들의 대안(Alternatives), 포트폴리오의 기간별, 속성별 평가 등 새로운 속성들을 모형에 포함하는 최적화 기법을 소개하였다.

김동욱과 이원영(2018)은 유전자 알고리즘에 기반한 프로그램 개발 및 실행 결과 확인을 통해 프로젝트 포트폴리오 투입인력 최적화 모델을 개발하였고 유전자 알고리즘의 매개 변수를 다양하게 변경하고, 최적의 매개 변수를 선택하기 위해 독립적인 샘플 t 테스트 실시하였다. 반복적인 t 테스트를 통해 인력투입에서 31.2%의 개선효과를 입증하였다.

프로젝트의 선택에 대한 결정을 위해 예산 또는 인적자원과 같은 제약은 0-1결정변수를 사용한 수학적 선형 모델을 적용할 수 있으며(Santhanam et al., 1989), R&D 문제의 불확실성을 제한하기 위해 퍼지 R&D 포트폴리오 선택 모델을 개발하였으며(Wang & Hwang, 2007), 포

트폴리오 최적화에 직원의 배치와 일정을 포함하기 위한 비선형 혼합 정수 모델을 제시하였다.

선택된 프로젝트의 총 기대 이익 극대화라는 목적함수와 연속된 기간 사이에 할당된 자원 변동을 최소화하는 목적함수, 이와 같은 2개의 목적함수를 가진 알고리즘을 통해 복수개의 목적함수로서 프로젝트의 선택 및 일정수립을 최적화하려는 연구를 수행하였다(Liu & Wang, 2011).

Hassanzadeh et al.(2014)은 시간에 따른 자원제약이 있는 프로젝트의 선택 및 일정 문제를 위한 최적화 모델을 제시하였으며, Huang & Zhao(2014)은 R & D 프로젝트가 있는 포트폴리오를 변경하고 프로젝트 포트폴리오 일정을 다시 잡기 위해 새로운 수학 프로그램 모델을 개발하였다. Shariatmadari et al.(2017)은 자원관리와 수익을 고려하며 프로젝트를 선택하고 일정계획을 하는 혼합 정수 프로그래밍 모델을 제안하였으며, Habibi et al.(2019)은 프로젝트의 NPV와 프로젝트의 NPV 간의 균형을 맞추기 위해 프로젝트 활동의 시작 시간과 계획, 공급 업체 선택 및 주문 수량을 결정하는 프로젝트 일정 및 자재 주문 문제를 제안하였다.

제 3 장 제안 프로젝트 포트폴리오 구성의 최적화 해법

프로젝트(Project)란 유일한 제품, 서비스, 혹은 결과를 만들어내기 위해 수행되는 일시적인 노력이며, 명확한 목표 하에 수행 중에 그 내용이 점진적으로 구체화되는 활동이다(PMI, 2017). 이러한 기준으로 비춰보면 제안 프로젝트 역시 명실상부한 프로젝트이므로 프로젝트의 기본 속성을 가진다. 즉, 수주라는 명확한 목표, 제안서라는 산출물과 프로젝트 시작과 끝, 산출물이 점진적으로 구체화된다는 점에서 프로젝트의 정의(PMI, 2017)에 부합한다. 제안 프로젝트는 제안팀 구성, 제안전략 수립, 제안서 작성 및 제출, 제안 발표 등으로 이루어짐은 전술한 바 있다. 이러한 제안 과정에는 수행 인력 등 자원이 필수적이며, 특정한 제안서 제출 마감일이 존재하고, 제안서 작성 등 일련의 과정은 몇 개의 활동으로 세분화될 수 있고, 활동 간에 선행관계도 존재한다. 그러므로 이와 같은 일련의 제안 과정은 하나의 프로젝트이며, 본 연구에서 프로젝트라 함은 제안 프로젝트를 의미한다.

3.1 제안 프로젝트의 특징 및 사례

본 연구는 제안 프로젝트의 선정과 포트폴리오 구성에 관한 수학적 모형을 세워 최적화 해법을 제시하는 것으로써, 수학적 모형을 설명하기 위해서는 제안 프로젝트의 특징에 대한 이해가 필수적이다. 또한, 본 논문의 가독성 향상과 이해를 돕기 위해 제안 프로젝트 사례를 예시로 설명한다. 주로 많이 사용되는 용어 정리는 다음과 같다.

- 1) 입찰 : 상품의 매매나 도급 계약을 체결할 때 여러 희망자들에게 각자의 낙찰 희망 가격을 제출하게 하는 일(표준 국어대사전)
- 2) 제안요청서(RFP : Request for Proposal) : 발주자가 공급자에게 자신의 문제를 해결하기 위한 방안을 제안해 줄 것을 요청하는 공식 문서(최용수, 2012)
- 3) 제안서(Proposals) : 제안의 내용이 체계적으로 기술되어 있는 문서(최용수, 2012)
- 4) SI(System Integration) : 조직이 보유한 각종 정보 시스템과 산재한 정보 자원을 재구성하여 통합하고 관리하는 일(표준 국어대사전)
- 5) 제안 프로젝트 : 입찰경쟁에서 수주를 위해 RFP분석, 제안전략 수립, 제안서 작성, 입찰, 제안발표 등의 활동으로 이루어진 프로젝트로써 본 논문에서 프로젝트라 함은 제안 프로젝트를 의미한다.
- 6) 본 프로젝트 : 수주가 확정되어 계약 체결 후 계약의 내용에 따라 실제 사업을 수행할 때의 프로젝트를 의미한다. 계약 내용에 따라 개발, 유지관리, 인프라 구축, 컨설팅 프로젝트 등으로 분류된다.
- 7) 제안팀 : 제안 프로젝트를 수행하는 팀으로써 제안PM(제안 프로젝트의 수행 책임자)을 포함하여 각 분야별 전문가로 구성된다. 상설 조직이 아닌 임시 조직이다.
- 8) 수주 : 주문을 받음. 물건을 생산하는 자가 제품의 주문을 받는 것을 이룸(표준 국어대사전). 본 논문에서는 공개 경쟁 입찰에서 우선협상 대상으로 선정되는 것을 의미한다.
- 9) 실주 : 수주의 반대말로써 우선협상 사업자로 선정되지 못함을 의미
- 10) 제안 마감일 : 통상 제안서를 발주자에게 제출하는 날 또는 발주자에게 제안 발표(Presentation)를 진행하는 날로써, 제안 프로젝트 종료일(Due_Date)이다.

3.1.1 제안 프로젝트의 특징

일반적인 프로젝트와 대비하여 제안 프로젝트는 몇 가지 특징을 갖는다. 첫째, 일반적인 프로젝트에서는 활동 단위로 자원이 투입되지만, 제안 프로젝트에서는 대부분의 자원이 프로젝트 단위로 투입된다. 예로서 프로젝트 A는 활동 1, 2와 3로 구성되어 있으며, 1, 2, 3의 순으로 활동들이 수행된다고 하자. 일반 프로젝트의 경우, 활동 1에 투입된 자원들은 활동 1이 종료되면 프로젝트 A가 아닌 다른 프로젝트에 투입되는 경우도 빈번하다. 그러나 제안 프로젝트의 경우에는 활동 1에 투입된 자원 중 대부분은 프로젝트 A가 종료될 때까지 프로젝트 A에 전속된다. 그러므로 제안 프로젝트의 경우, 투입되는 자원을 (1) 프로젝트 전 기간에 투입되는 자원 그룹(본 논문에서는 이를 프로젝트 모드라 정의)과 (2) 특정 활동에만 투입(본 논문에서는 이를 활동 모드라 정의)될 수 있는 자원으로 구분하는 것이 필요하다.

둘째, 일반 프로젝트의 경우 프로젝트 일정 단축이 주된 이슈이다. 자원이 제한적인 경우, 활동 1에 투입된 자원은 활동 1이 종료된 즉시 같은 프로젝트 내의 다른 활동 또는 다른 프로젝트에 투입할 필요가 있기 때문이다. 또한 프로젝트가 조기 완료되면 그에 따른 보상이 주어지기도 한다. 그렇지만 제안 프로젝트의 경우, 제안서 작성이 완료되었다 하더라도 제안 마감일보다 먼저 제안서를 제출할 수 없다. 제안서 완료가 조기에 이루어진 경우, 프로젝트에 투입된 자원을 조기에 해산하는 것이 아니라 제안품질의 향상을 위해 계속적으로 제안서의 수정 보완 작업에 투입된다. 제안 프로젝트의 특성상 추가 기간, 추가 자원이 투입되면 제안서 품질은 향상되어 그 프로젝트를 수주할 확률이 높아지기 때문이다. 정리하면, 제안 프로젝트에 다소 일정상 여유가 있는 경우에는 프로젝트 수주 확률을 높이기 위해 어떤 활동의 기간을 얼마나 연장할 것인가가

중요한 이슈가 된다.

셋째, 제안 프로젝트에서 어떤 활동에 여유시간(slack)이 존재한다 하는 경우, 그 활동에 투입된 자원들을 여유시간만큼 유휴자원화 하는 경우는 없으며 다음 활동의 시작시점까지 그 활동을 수정보완하게 한다. 여유시간만큼 수정 보완하는 것을 체계화하기 위해, 활동들의 기간연장을 가능하게 하고 여유시간을 갖지 못하도록 프로젝트 일정을 작성할 필요가 있다. 자원들이 일단 활동에 투입되면, 활동기간 전체에 변동없이 활동 종료일까지 유지된다. 본 연구에서는 여유시간을 허용하지 않는 형태의 모델을 제시하였으며, 실제 제안 작업에서 여유시간은 존재하지 않는다. 만일 활동에 여유시간이 발생하는 경우, 해당 활동기간을 다음 활동 시작일까지 연장하여 자원의 유휴 자원화를 허용하지 않는다. 이를 도해하면 [그림 3-1]과 같다

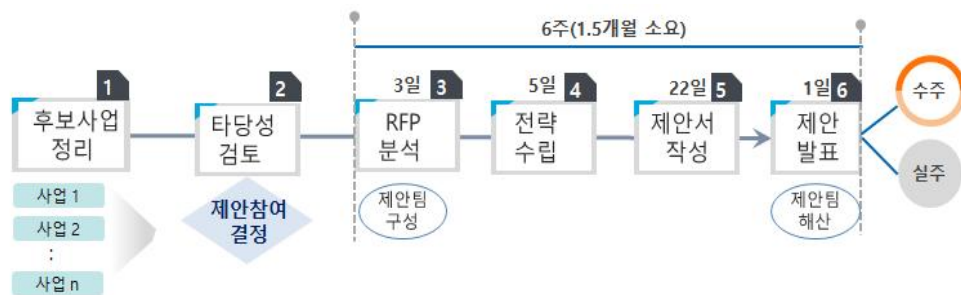


[그림 3-1] 여유시간(slack)의 불허용 사례

일반적으로 기업에서 제안 프로젝트에 투입할 수 있는 자원은 한정되어 있다. 그러므로 제안 프로젝트에서 필요로 하는 자원이 가용한 자원을 초과하지 않도록 프로젝트들이 선정되고 활동들에게 자원이 배정되어야 한다.

3.1.2 제안 프로젝트의 사례

주로 공개 경쟁 SW시장에서 수주활동, 제안 프로젝트 및 수행 프로젝트를 전개하는 SI기업은 일반적으로 다음과 같은 제안 절차로 제안 프로젝트를 수행한다. 입찰자의 관점에서 일반적인 제안 절차를 도해 하면 [그림 3-2]와 같다.



[그림 3-2] 일반적인 제안 프로세스

상기 [그림 3-2]에서 제안 프로젝트는 일반적으로 3번으로 표시된 활동 “RFP 분석” 부터 6번 활동 “제안발표”에 이르는 4개의 활동 (Activity)들을 의미하며, 통상 제안팀에 배정되는 인력자원의 종류는 특 급기술자, 고급기술자, 중급기술자, 초급기술자 등의 기술등급으로 구분 된다. 발주 내용 및 사업 규모에 따라 다르나, 1개의 제안 프로젝트는 사업 공고일에서 제안 발표일까지 6주(1.5개월) ~ 8주(2개월)정도의 기간이 소요된다.

상기 [그림 3-2]에서 1번 활동 “후보 사업 정리”는 각 영업부문에서 일정 기간단위(분기)별로 포착된 입찰 리스트를 작성하며 이는 해당 분기에 입찰 참여를 희망하는 후보 제안 프로젝트를 의미한다. 예시하면 아래 [표 3-1]와 같다.

[표 3-1] 후보 제안 프로젝트 리스트

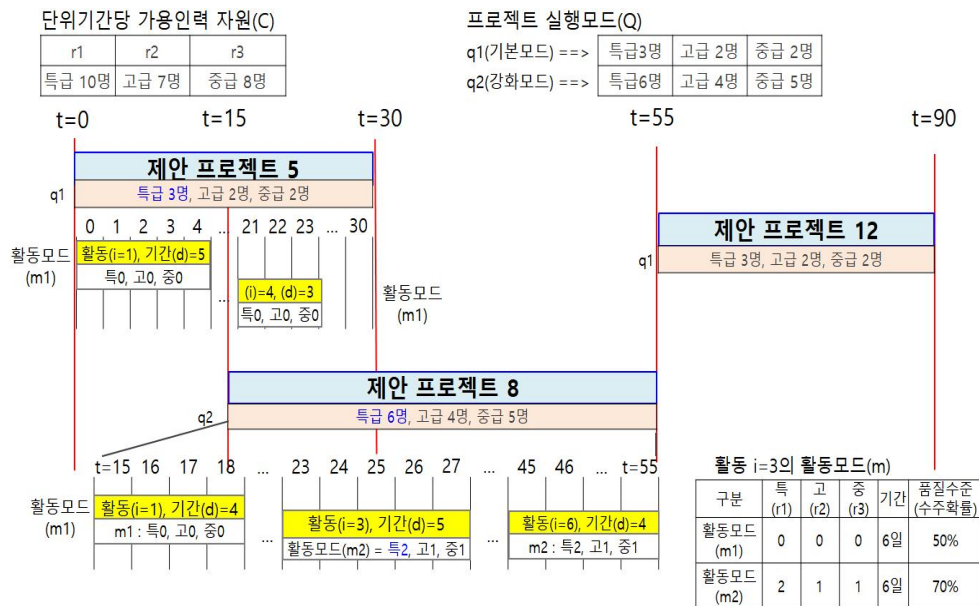
(단위 : 억원, VAT포함)

순번	사업명	사업 유형	공고 시기	제안 기간	수주 가능성	발주 금액	예상 이익	제안 비용	필요 인력
1	00기관 인프라 구축 사업	인프라	4월	4.06~5.16	50%	45	2.2	1	6
2	00기관 유지관리 사업	유지보수	4월	4.08~5.17	60%	107	5.3	2.5	12
3	00기관 정보시스템 구축	개발	4월	4.12~5.22	50%	120	10.5	2.8	13
4	00기관 서버통합 사업	인프라	4월	4.16~5.25	70%	80	3.8	1.8	7
:	:								:
19	00기관 유지보수 사업	유지보수	6월	6.24~8.03	0.7	81	4	1.9	9
20	00기관 디지털화 사업	개발	6월	6.29~8.07	0.5	42	2	1	6

상기 표에서 20개의 후보 사업(프로젝트)가 나열되어 있고 각 프로젝트별로 사업유형, 공고 시기, 제안 기간, 수주가능성, 발주금액, 예상이익, 제안비용, 필요 제안인력이 기술되어 있음을 알 수 있다. 경영진 등 기업의 의사결정자는 상기 [표 3-1] 후보 제안 프로젝트 리스트를 기반으로 제안 작성 가용인력, 일정, 수주가능성, 예상이익, 사업수행 시 습득되는 기술요소 등을 고려하여 해당 분기에 입찰 참여할 프로젝트를 선정한다.

특정 제안 프로젝트가 입찰 참여로 선정되면 먼저 공고되는 프로젝트를 순서로 제안팀을 구성하며, 이때 자원의 종류별로 특급기술자 N명, 고급기술자 M명 등으로 기본 제안인력이 구성되는데 이를 프로젝트 모드라 하며, 본 연구에서는 복수개의 프로젝트 모드가 존재할 수 있고, 선택된 프로젝트에서 프로젝트 모드는 단 1개만 선택됨을 전제로 하였다. 프로젝트 모드는 전술한 바와 같이 제안팀으로 제안인력이 할당되면 활동과 공정에 상관없이 제안 종료 시까지 인력이 유지되는 것을 의미한다. 프로젝트 모드를 기반으로 제안팀이 구성되고 본격적인 제안작업에 돌입하고 상기 [그림 3-2]에서 3번 활동(RFP 분석)을 시작으로 4번 활동(전략 수립), 5번 활동(제안서 작성), 그리고 6번 활동(제안 발표)을 마

지막으로 제안 프로젝트는 종료하게 된다. 각 활동(Activity)에 투입되는 자원의 종류와 수량에 따라 복수 개의 활동 모드가 존재하며, 복수 개 중 단 1개만의 활동 모드가 선택된다. 본 논문에서는 이를 0-1변수로 표기하였다. 프로젝트 모드와 활동 모드의 관계를 도해하면 [그림 3-3]과 같다



[그림 3-3] 프로젝트 모드와 활동 모드의 관계

[그림 3-3]의 예시에서 보는 바와 같이, 해당 분기(90일)에 선정된 프로젝트는 5번, 8번 및 12번임을 알 수 있다. 해당 분기에서 가용 자원인력은 그림 왼쪽 상단에서와 같이, 특급 10명, 고급 7명, 중급 8명으로 총 25명이 최대 가용 제안인력이다. 상기 그림의 사례로 각 프로젝트의 활동기간의 투입인력을 계산해보면 다음과 같다. t는 시간단위로써 통상 일단위로 표현된다. t=90은 주말을 포함하여 편의상 1개 분기에 해당되는 날수에 해당된다. 제안 프로젝트 5는 t=0에 시작되어 t=15에 종료되

는 기간 15일의 프로젝트이며, 선정된 프로젝트 8은 $t=15$ 에 시작하여 $t=55$ 에 종료되는 기간 40일의 프로젝트이다.


위 그림에서 프로젝트 모드는 기본모드($q1$), 강화모드($q2$) 2개가 있으며 제안 프로젝트 8은 $q2$ 의 프로젝트 모드를 배정받아 특급 6명, 고급 4명, 중급 5명으로 총 15명으로 40일간 제안 프로젝트를 수행하는 것으로 예시되어 있다. 제안 프로젝트 8은 6개의 활동, 활동 $i=1$ 에서 $i=6$ 으로 구성된다고 할 때, 세번째 활동 $i=3$ 은 $t=23$ 을 시작일로 하고 $t=27$ 을 종료일로 하는 기간(Duration) 5일의 활동임을 나타낸다. 그림 오른쪽 하단에 세번째 활동 $i=3$ 이 취할 수 있는 활동 모드와 제안 품질수준(수주확률)이 예시되어 있고, 그림에서 세번째 활동 $i=3$ 은 활동모드 $m2$ (특2, 고1, 중1)가 선택되었음을 표시하고 있다. 따라서 제안 프로젝트 8의 활동 $i=3$ 은 프로젝트 모드 $q2$ 의 기본 인력 특급 6명, 고급 4명, 중급 5명에서 활동 $i=3$ 이 취한 활동모드 $m2$ 의 추가인력 특급 2명, 고급 1명, 중급 1명이 합산되어 특급 8명, 고급 5명, 중급 6명의 자원을 배정받아 수행하는 것이 된다. 만일 $t=23$ 이라면, 프로젝트 5와 동시 진행되므로 프로젝트 5의 프로젝트 모드 $q1$ 의 자원과 합산하여야 한다. 프로젝트 5의 자원이 특급 3명, 고급 2명, 중급 2명이므로 $t=23$ 에서 요구되는 자원은 특급 11명($3+6+2$), 고급 7명($2+4+1$), 중급 8명($2+5+1$)이다. 이때, 해당 분기에서 가용 자원인력은 전술한 바와 같이, 특급 10명, 고급 7명, 중급 8명이므로 특급 인력은 가용자원 인력 10명을 초과하게 된다. 따라서 위와 같은 자원 배정은 불가능하다. 만일 시점이 $t=46$ 라면 이 시점엔 프로젝트가 중첩되지 않고 프로젝트 8만 진행되므로 모든 자원이 가용자원 내에 있어 정상적인 자원 배정이 가능할 것이다.

다음은 활동 기간연장에 따른 품질 수준 변화의 사례이다. 기간연장은 단위 활동에 있어서 일정의 연장이 프로젝트 품질, 즉 수주확률을 증가시

키는 것이 확실 시 될 때, 여유일정(slack)이 발생하여 자원이 유향화될 때, 해당 단위 활동기간을 연장하는 것을 의미하고, 이때 slack은 zero화 된다. 다만, 이는 가용자원과 납기 등 주어진 제반 조건을 모두 충족시키고 후행활동의 시작시점에 영향을 주지 않을 때 의미가 있다. 활동의 기간연장이 제안 품질(수주 확률)을 향상시킨다는 전제하에, 활동 기간연장에 의한 제안 품질수준(수주확률)의 변동을 예시로 설명하면 [표 3-2]와 같다.

[표 3-2] 활동기간 연장에 따른 수주확률 변화 사례

구분	특급 (r1)	고급 (r2)	중급 (r3)	기간	수주 확률
활동모드 (m1)	0	0	0	6일	50%
활동모드 (m2)	2	1	1	4일	70%



구분	특급 (r1)	고급 (r2)	중급 (r3)	기간	수주 확률
활동모드 (m1)	0	0	0	11일	60%
활동모드 (m2)	2	1	1	7일	79%

본 연구는 상기 표와 같이 자원을 고정시킨 상태에서 활동의 연장 기간과 프로젝트의 제안 품질수준(수주 확률)은 비례적으로 증가한다는 전제에서 기간연장에 따른 품질수준의 증분을 고찰하였다. 상기 표의 사례에서 활동 모드 m1의 기간을 6일에서 11일로 5일 연장할 때 품질수준은 10%향상되어 1일당 2%(10÷5)의 품질수준 증분을 나타내고, 활동모드 m2의 기간을 4일에서 7일로 3일 연장할 때 품질수준은 9%향상되어 1일당 3%(9÷3)의 품질수준 증분을 나타냄을 알 수 있다. 이는 후술할 수리모형에서 수주 확률 증가분으로 표현되었다.

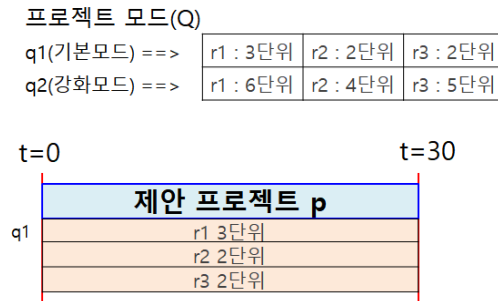
일반적으로 기업에서 제안 프로젝트에 투입할 수 있는 자원은 한정되어 있으므로 제안 프로젝트에서 필요로 하는 자원이 가용한 자원을 초과하지 않도록 프로젝트들이 선정되고 이를 감안하여 활동들에게 자원이 배정되어야 한다.

3.2 문제의 가정

본 제안프로젝트 포트폴리오 최적화 모형의 수립을 위해 요구되는 문제의 가정은 아래와 같이 정리될 수 있다.

- (1) 참여 가능한 후보 제안 프로젝트 리스트, 각 프로젝트의 발주금액과 제안서 제출 마감일, 제안 기간 그리고 수주 확률 등은 사전에 알려져 있다.
- (2) 각 프로젝트의 제안서 제출 마감일은 반드시 준수되어야 한다.
- (3) 각 프로젝트의 활동의 수와 선행관계는 사전에 알려져 있다. 각 프로젝트별로 활동 간 선행관계는 준수되어야 한다.
- (4) 모든 활동의 여유시간(slack)은 0으로서 여유시간을 허용하지 않는다.
- (5) 각 프로젝트 별로 복수의 프로젝트 모드를 가지며, 하나의 프로젝트 모드만을 배정받아야 한다. 프로젝트 모드에 따라 프로젝트 수행 기간 중 필요한 자원의 종류와 수량은 달라진다. 프로젝트 모드가 결정되면 그 프로젝트 모드에서 필요한 자원은 프로젝트 시작부터 종료까지 매 기간별로 배정되어야 한다. 예를 들어, 프로젝트 p 가 프로젝트 모드 q_1 으로 진행된다고 하자. 프로젝트 모드 q_1 으로 진행하면 자원 r_1 은 3단위, 자원 r_2 , r_3 는 각 2단위 필요하다고 하자. 이 경우, 프로젝트 p 의 시작부터 종료까지 매 기간별로 자원 r_1 은 3단위, 자원 r_2 는 2단위, 자원 r_3 는 2단위가 필요하게 된다. 즉, 프로젝트 p 는 $t=30$ 일인 프로젝트로써 r_1 은 3단위, 자원 r_2 는 2단위, 자원 r_3 는 2단위, 총 7단위의 자원이 처음부터 끝까지 투입된다. 만약 프로젝트 모드가 q_2 로 진해된다면 프로젝트 p 는 매 기간별로 자원 r_1 은 6단위, 자원 r_2 는 4단위, 자원 r_3 는 5단위, 총 15단위의 자원이 배정된다.

이를 도해하면 아래 [그림 3-4]과 같다.



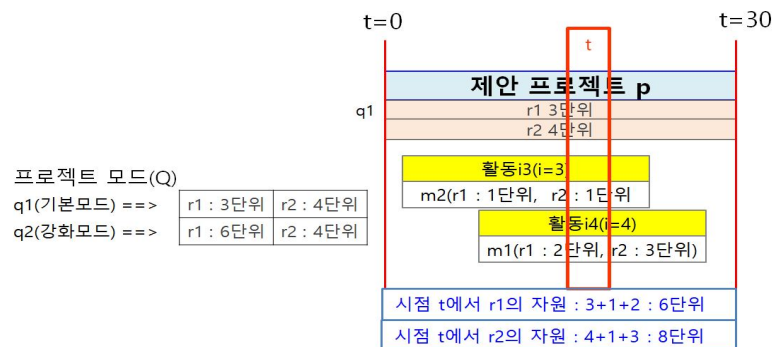
[그림 3-4] 프로젝트 모드의 필요 자원단위 예시

- (6) 프로젝트의 각 활동 별로 복수의 모드를 가지며, 각 활동 별로 오직 하나의 모드만을 배정받는다. 프로젝트의 프로젝트 모드에 따라 각각의 활동이 선택할 수 있는 모드가 달라진다. 예를 들어, 프로젝트 p가 프로젝트 모드 q1으로 진행될 때 활동 i1이 선택할 수 있는 활동 모드는 m1과 m2, 프로젝트 모드 q2로 진행될 때 활동 i1이 선택할 수 있는 활동 모드는 m3과 m4라 하자. 이 경우 프로젝트 모드 q1이 선택된다면, 활동 i1에 활동 모드 m3 또는 m4를 배정하는 것을 불가능하다.
- (7) 각 활동의 모드에 따라 활동의 수행 기간과 필요한 자원의 종류와 수량이 달라진다. 예를 들어, 활동 1(i=1)이 활동 모드 m1로 실행되면 필요한 수행 기간은 10일이며 자원 r1은 2단위, 자원 r2, r3는 각 3단위 필요하고, 활동 모드 m2로 실행되면 필요한 수행 기간은 6일이며 자원 r1은 4단위, 자원 r2, r3는 각 5단위 필요하다. 활동 1이 모드 m1로 수행된다면, 활동 1의 시작부터 종료까지 매 기간별로 자원 r1은 2단위, 자원 r2는 3단위, 자원 r3는 3단위가 필요하게 된다. 이를 도해하면 아래 [표 3-3]과 같다.

[표 3-3] 활동의 활동모드별 자원 예시

활동1(i=1)의 활동모드별 자원				
구분	특급 (r1)	고급 (r2)	중급 (r3)	기간
활동모드(m1)	2	3	3	10일
활동모드(m2)	4	5	5	6일

- (8) 프로젝트 p의 시작부터 종료까지 매 기간별 필요한 자원의 수는 프로젝트 모드와 해당 기간에 수행 중인 활동들의 활동 모드에 따라 결정된다. 예를 들어, 시점 t에 활동 i3과 i4가 실행 중이고, 프로젝트 p가 프로젝트 모드 q1로 진행되고, 프로젝트 p의 활동 i3이 활동 모드 m2로, 활동 i4는 활동 모드 m1로 진행된다고 하자. 프로젝트 모드 q1에서 자원 r1은 3단위, 자원 r2는 4단위가, 활동 i3의 모드 m2에서 자원 r1은 1단위, 자원 r2는 1단위가, 활동 i4의 모드 m1에서 자원 r1은 2단위, 자원 r2는 3단위 필요로 한다고 하자. 이 경우, 시점 t에 필요한 자원 r1의 수량은 $3 + 1 + 2 = 6$ 단위, 자원 r2의 수량은 $4 + 1 + 3 = 8$ 단위가 된다. 이를 도해하면 [그림 3-5]와 같다.



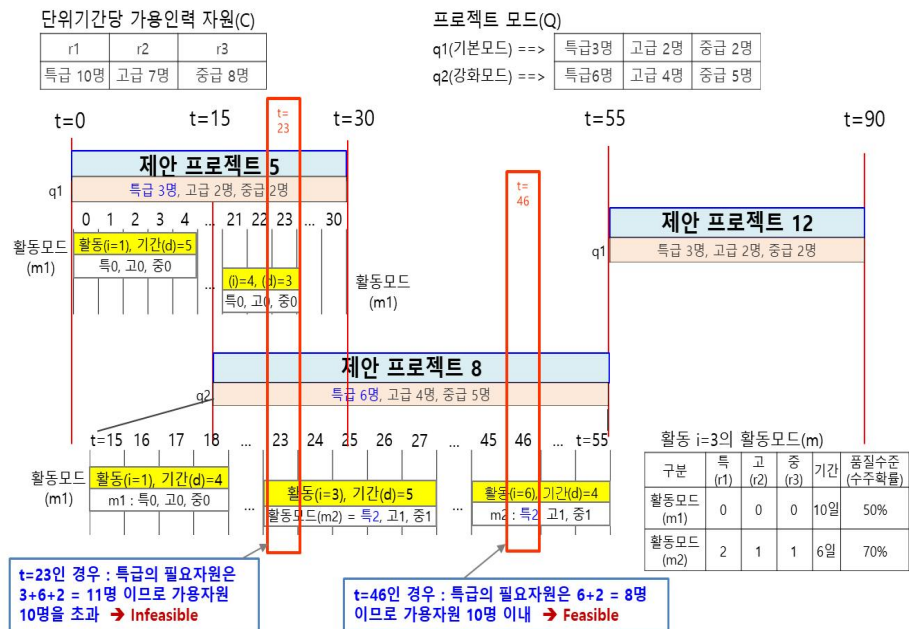
[그림 3-5] 시점 t에서의 필요 자원 수량 예시

- (9) 각 활동의 품질은 수행 기간을 연장하여 향상될 수 있으며, 각 활동의 품질이 향상되면 해당 프로젝트의 수주 확률도 향상된다. 또한 활동 품질 향상 수준은 수주 확률 증가분으로 산정 가능하다.
- (10) 각 활동의 모드에 따라 연장 가능한 기간과 수주 확률 증가분이 달라진다. 예를 들어 활동 i1의 경우 모드 m1이면 기간이 10일이고 모드 m2이면 기간이 6일이다. 모드 m1의 경우 최대 5일까지 기간을 연장하여 할 수 있으며, 모드 m2의 경우 최대 3일까지 기간을 연장할 수 있다 하자. 모드 m1의 경우 5일을 연장하여 15일 동안 수행하면 프로젝트 수주 확률이 2% 증가하고, 모드 m2의 경우 3일을 연장하여 9일 동안 수행하면 수주 확률이 3% 증가한다.
- (11) 각 활동의 기간은 선정된 모드의 기간과 연장된 기간으로 결정된다. 예를 들어 활동 i1이 모드 m1로 수행되면 필요한 기간은 10일이고 최대 5일까지 기간을 연장할 수 있다고 하자. 이 경우 연장 가능한 기간은 0일, 1일, 2일, 3일, 4일, 5일로 총 6가지 선택이 있을 수 있으며 결국, 선택 가능한 기간은 10일부터 15일 사이가 된다.
- (12) 활동의 연장 기간과 프로젝트 수주 확률 증가분은 선형으로 가정한다. m1의 경우 최대 기간 연장이 5일이고, 기간이 5일 연장될 때 수주 확률이 2% 증가한다고 하자. 이 경우 기간이 1일 연장될 때마다 수주 확률은 $0.4\%(2\% \div 5\text{일})$ 증가한다. m2의 경우 3일 동안 3%가 증가했으므로 1일당 증가분은 $1.0\%(3\% \div 3\text{일})$ 가 된다. 상기 가정 (10), (11), (12)의 설명은 아래 [표 3-4]로 설명될 수 있다.

[표 3-4] 활동의 활동모드별 수주확률 증가분 계산 예시

구분	기본 기간	연장 가능 기간	구분	최대 연장 기간	수주 확률 증가분	1일당 증가분
활동모드(m1)	10일	5일	활동모드(m1)	15일	2%	0.4%
활동모드(m2)	6일	3일	활동모드(m2)	9일	3%	1.0%

- (13) 프로젝트 수주 확률 증가분은 각 활동의 수주 확률 증가분의 단순합이다.
- (14) 포트폴리오가 실행되는 기간 중 매 기간별 가용한 자원의 종류와 수량은 알려져 있다.
- (15) 포트폴리오의 매 기간별 자원별 요구량은 선정된 프로젝트의 매 기간별 자원별 요구량의 합산이다. 포트폴리오의 매 기간별 자원별 요구량은 자원의 가용량을 초과할 수 없다.



[그림 3-6] 시점 t=23에서 자원 배정의 가용량 초과 사례

상기 [그림 3-6]의 사례에서 보는 바와 같이 시점 t=23에서는 특급 자원(r1)의 최대 가용량을 초과하였으므로(10 < 11(=3+6+2)) 문제의 가정 (15)를 위배하였다. 그러나 시점 t=46에서는 프로젝트가 중첩되어 있지 않으므로 최대 가용량을 초과하지 않았다. 이에 관한 자세한 설명은 본 논문 p.28에 상술되어 있다.

3.3 문제의 수식화

본 연구는 제안인력 등 자원 제약 하에서 기대 이익의 합을 최대화하는 제안 프로젝트의 포트폴리오를 구성하는 수학적 모델을 제시하며 목적함수와 제약식은 다음과 같다.

$$\text{Max} \sum_{p=1}^P V_p \times \left[\text{Prob}_p + \sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} \text{Prob}_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq} \right] \times x_p \quad [1]$$

subject to

$$\sum_{q=1}^{Q_p} y_{pq} = 1 \quad \forall p, x_p = 1 \quad \dots\dots\dots [2]$$

$$\sum_{m=1}^{M_{pqi}} z_{pqim} = 1 \quad \forall pi, x_p = 1, y_{pq} = 1 \quad \dots\dots\dots [3]$$

$$u_{pqim} \leq \text{Max_Ext}_{pqim} \quad \forall pqim, x_p = 1, y_{pq} = 1, \\ z_{pqim} = 1 \quad \dots\dots\dots [4]$$

$$d_{pi} = \sum_{q=1}^{Q_p} \left[\sum_{m=1}^{M_{pqi}} (D_{pqim} + u_{pqim}) \times z_{pqim} \right] \times y_{pq} \\ \forall pi, x_p = 1 \quad \dots\dots\dots [5]$$

$$f_{pi} - (f_{pj} - d_{pj}) = 0 \quad \forall (pi, pj) \in H_p, x_p = 1 \quad \dots\dots [6]$$

$$f_{p, I_p+1} = Due_Date_p \quad \forall p, x_p = 1 \quad \dots\dots\dots [7]$$

$$\sum_{p \in PS_t} \sum_{q=1}^{Q_p} PR_{pqr} \times y_{pq} + \sum_{p \in PS_t} \sum_{i \in AS_{\mu}} \sum_{q=1}^{Q_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} AR_{pqimr} \times y_{pq} \times z_{pqim} \leq C_r$$

$$\forall t, r \quad \dots\dots\dots [8]$$

$$d_{p,0}, d_{p, I_p+1} = 0 \quad \forall p, x_p = 1 \quad \dots\dots\dots [9]$$

$$f_{p,0} \geq 0 \quad \forall p, x_p = 1 \quad \dots\dots\dots [10]$$

$$x_p, y_{pq}, z_{pqim} \in \{0, 1\} \quad \forall pqim \quad \dots\dots\dots [11]$$

$$u_{pqim} \geq 0 \quad \forall pqim \quad \dots\dots\dots [12]$$

여기서,

- P 프로젝트의 수
- p 프로젝트 인덱스, $p = 1, 2, \dots, P$
- Q_p p 번째 프로젝트의 프로젝트 모드의 수
- q 프로젝트 모드 인덱스, $q = 1, 2, \dots, Q_p$
- I_p p 번째 프로젝트의 활동의 수
- i 활동 인덱스, $i = 0, 1, 2, \dots, I_p, I_p+1$; 0과 I_p+1 은 해당 프로젝트의 시작과 종료를 의미하는 가상활동이다.
- M_{pqi} p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행될 때 활동 i 가 선택할 수 있는 활동 모드의 수
- m 활동 모드 인덱스, $m = 1, 2, \dots, M_{pqi}$
- R 자원 종류의 수
- r 자원 종류 인덱스, $r = 1, 2, \dots, R$
- V_p p 번째 사업을 수행할 때의 예상 가치
- $Prob_p$ p 번째 제안 프로젝트를 기본 품질 수준으로 수행할 때의

p 번째 사업을 수주할 확률

$Prob_{pqim}^+$ p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 활동 i 가 m 번째 모드로 수행될 때 연장 기간 당 발생하는 수주 확률 증가분

d_{pi} p 번째 프로젝트의 활동 i 의 실행 기간

D_{pqim} p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 활동 i 가 m 번째 모드로 수행될 때 정상적인 실행 기간

u_{pqim} p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 활동 i 가 m 번째 활동 모드로 수행될 때 D_{pqim} 을 초과한 연장 기간; $u_{pqim} = d_{pi} - D_{pqim}$

x_p p 번째 입찰 프로젝트의 선정 여부를 나타내는 0-1 변수; p 번째 프로젝트가 선정되면 1, 아니면 0의 값을 갖는다.

y_{pq} p 번째 프로젝트의 q 번째 프로젝트 모드 선정 여부를 나타내는 0-1 변수; p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되면 1, 수행되지 않으면 0의 값을 갖는다.

z_{pqim} p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행될 때, 활동 i 가 m 번째 활동 모드로 선정되는 지를 나타내는 0-1 변수; 선정되면 1, 아니면 0의 값을 갖는다.

Max_Ext_{pqim} p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 프로젝트 p 의 활동 i 가 m 번째 활동 모드로 배정될 때, 활동 pi 의 연장 기간의 최대값

f_{pi} 프로젝트 p 의 활동 i 의 종료시기를 나타내는 변수

H_p 프로젝트 p 의 선행관계 집합; $(pi, pj) \in H_p$ 면, pi 가 종료되는 시점에 pj 가 시작되어야 한다.

Due_Date_p	프로젝트 p 의 마감일
C_r	r 번째 자원의 가용량
PS_t	시점 t 에 진행 중인 프로젝트들의 집합; $PS_t = \{ p \mid f_{p0} - d_{p0} \leq t < f_{pI+1} \} = \{ p \mid f_{p0} \leq t < f_{pI+1} \}$
AS_{pt}	시점 t 에 진행 중인 프로젝트 p 의 활동들의 집합; $S_{pt} = \{ pi \mid f_{pi} - d_{pi} \leq t < f_{pi} \}$
AR_{pqimr}	프로젝트 p 가 q 번째 프로젝트 모드로 실행되고 활동 i 의 배정 활동 모드가 m 일 때, 활동 i 의 전 기간에 걸쳐 매 기간별 필요한 r 번째 자원의 수량
PR_{pqr}	프로젝트 p 가 q 번째 프로젝트 모드로 실행될 때, 프로젝트 전 기간에 걸쳐 매 기간별 필요한 r 번째 자원의 수량

본 문제는 프로젝트를 선정하고, 선정된 프로젝트의 프로젝트 모드를 결정하며, 각 활동 별로 활동 모드, 연장 기간과 종료시기를 결정하는 문제이다.

선정 대상이 되는 P 개의 프로젝트 중 p 번째 프로젝트의 선정여부는 0-1 변수인 x_p 로 표현된다. x_p 가 1이면 p 번째 프로젝트가 수행하기로 선정됨을, 0이면 그렇지 않음을 나타낸다. 각 프로젝트 별로 선정 가능한 프로젝트 모드의 수는 다를 수 있다. p 번째 프로젝트에서 선정 가능한 프로젝트 모드의 수는 Q_p 로 표기한다. p 번째 프로젝트가 선정되었다면, Q_p 개의 프로젝트 모드 중 오직 하나의 모드가 선정되어야 한다. 0-1의 사결정변수 y_{pq} 는 p 번째 프로젝트에서 q 번째 프로젝트 모드를 선택하면 1, 아니면 0의 값을 갖는다. 식 [2]는 프로젝트 별로 선정 가능한 프로젝트 모드 중 오직 하나의 프로젝트 모드만 선택되어야 함을 나타낸다.

식 [2]는 선정된 프로젝트에 대해서만 적용된다. 즉 모든 p 에 대해 적용되는 것이 아니라, $x_p = 1$ 인 경우에만 적용된다. 그러므로 식 [2]는 개념적 서술(Conceptual Statement)이다. 모든 x_p 값에 대해 식 [2]가 적용되게 하려면, 식 [2]는 $\sum_{q=1}^{Q_p} y_{pq} \times x_p = 1 \times x_p$ 이며, 이를 정리하면 아래와 같다.

$$\sum_{q=1}^{Q_p} y_{pq} \times x_p - x_p = 0, \quad \forall p \quad \dots\dots\dots [2-1]$$

식 [2-1]은 x_p 값과 무관하게 모든 p 에 대해 성립하게 된다. 그런데 식 [2]부터 식 [13]까지 모든 제약식은 선정된 프로젝트에 적용되는 제약식이며, 선정되지 않은 프로젝트에는 적용할 필요가 없는 제약식이다. 식 [2-1]은 수학적 엄밀성이 높지만, 본 논문에서는 수식의 가독성을 중시하여 식 [2]와 같은 방식으로 표현한다.

각 활동 별로 오직 하나의 활동 모드만 선정되어야 한다. 그런데 프로젝트 p 에 속한 활동 i 가 선택할 수 있는 모드는 프로젝트 p 의 선정된 프로젝트 모드 q 에 따라 달라진다. 예를 들어, $q = 1$ 인 경우 활동 i 가 선택할 수 있는 첫 번째 모드와 $q = 2$ 인 경우 활동 i 가 선택할 수 있는 첫 번째 모드는 서로 관계없는 모드들이다. 프로젝트 p 에서 q 번째 프로젝트 모드가 선택되었을 때 활동 i 가 선택할 수 있는 활동 모드의 수는 M_{pqi} 로 표현되며, 인덱스 $pqim$ 은 프로젝트 p 가 q 번째 프로젝트 모드로 실행될 때 활동 i 가 선택할 수 있는 m 번째 모드를 지칭한다. 0-1 의사결정변수 z_{pqim} 은 활동 i 에 모드 $pqim$ 이 배정되면 1, 아니면 0의 값을 갖게 된다. 식 [3]은 프로젝트 p 가 선정되고 프로젝트 모드로 q 가 배정되었을 때, 각 활동 별로 오직 하나의 모드만 배정되어야 함을 나타낸다.

식 [4]와 [5]는 활동 pi 의 수행 기간 d_{pi} 는 배정된 활동 모드와 기간 연

장에 의해 결정됨을 보여준다. 활동 pi 를 모드 $pqim$ 으로 수행할 때 필요한 기간은 D_{pqim} 이다. 기간 D_{pqim} 만으로도 활동 pi 가 완료되지만, 활동 pi 의 품질을 향상시키기 위해 D_{pqim} 이외에 추가 기간을 투입할 수 있다. 활동 pi 가 모드 $pqim$ 으로 수행될 때, 추가할 수 있는 최대 작업일은 Max_Ext_{pqim} 로 표기하고, 몇 기간이 추가 투입되는 지를 나타내는 의사결정변수는 u_{pqim} 로 표기한다. 식 [4]는 p 번째 프로젝트의 i 번째 활동이 모드 $pqim$ 으로 배정될 때, 선택 가능한 추가 투입 기간은 그 모드의 최대 투입 기간을 초과할 수 없음을 나타낸다. 식 [5]는 프로젝트 p 의 활동 i 의 수행 기간 d_{pi} 는 선정된 모드 $pqim$ 에서의 정상 기간 D_{pqim} 에 연장한 기간 u_{pqim} 을 더한 값임을 나타낸다. 예를 들어, 프로젝트 \hat{p} 가 선정되었고, 프로젝트 모드가 \hat{q} 이고 활동 i 의 배정 모드가 \hat{m} 이라면, 활동 $\hat{p}\hat{i}$ 의 기간 $d_{\hat{p}\hat{i}}$ 는 $D_{\hat{p}\hat{q}\hat{i}\hat{m}} + u_{\hat{p}\hat{q}\hat{i}\hat{m}}$ 가 된다.

본 모형에서 의사결정변수인 활동 pi 의 종료시기는 f_{pi} 로 표기한다. 이 때 활동 pi 의 시작시기는 $f_{pi} - d_{pi}$ 가 된다. 프로젝트 p 의 선행관계를 나타내는 집합은 H_p 로 표기하며, 식 [6]은 $(pi, pj) \in H_p$ 이면 활동 pi 가 종료된 이후에나 활동 pj 가 시작할 수 있음을 의미한다. 활동의 여유시간 배제는 선행활동의 종료시기와 후행활동의 시작시기를 일치시키면 된다.

프로젝트 p 의 종료를 의미하는 활동은 $(I_p + 1)$ 이므로, 프로젝트 p 의 종료시기는 f_{p, I_p+1} 이 된다. 식 [7]은 프로젝트 p 가 자신의 마감일인 Due_Date_p 에 종료되어야 함을 나타낸다.

프로젝트 p 를 프로젝트 모드 q 로 진행할 때, 프로젝트 전 기간에 걸쳐서 매 기간 필요한 자원 r 의 수량은 PR_{pqr} 으로 표기하고, 활동 pi 를 활

동 모드 $pqim$ 으로 수행할 때 r 번째 필요한 자원의 수량은 AR_{pqimr} 로 표기한다. 만약 $PR_{pq} = 2$ 이면, 프로젝트 p 가 선정되고 q 번째 프로젝트 모드가 배정된다면 프로젝트의 전 기간에 걸쳐 매 기간별로 r 번째 자원이 2단위 필요함을 의미한다. $AR_{pqimr} = 3$ 이면, 활동 pi 이 수행되는 매 기간 동안 r 번째 자원은 3단위가 활동 pi 에 배정되어야 함을 의미한다. 시점 t 에 진행 중인 프로젝트 집합은 PS_t 로 표기한다. 만약 프로젝트 p 가 PS_t 에 속한다면, 이는 프로젝트 p 의 시작시기($f_{p0} - d_{p0} = f_{p0}$)가 t 보다 늦지 않고, 종료시기(f_{pI+1})가 t 보다 늦음을 의미한다. AS_{pt} 는 프로젝트 p 에 속한 활동들 중 특정 기간 t 에 수행 중인 활동들의 집합이다. 그러므로 시점 t 에 필요한 r 번째 자원의 수량은 PS_t 에 속한 프로젝트들에 의해

요청되는 수량 $\sum_{p \in PS_t} \sum_{q=1}^{Q_p} PR_{pq} \times y_{pq}$ 에 AS_{pt} 에 속한 활동들에 의해 요청되

는 수량 $\sum_{p \in PS_t} \sum_{i \in AS_{pt}} \sum_{q=1}^{Q_p} \sum_{m=1}^{M_{pi}} AR_{pqimr} \times y_{pq} \times z_{pqim}$ 의 합이다. 자원 r 의 가용량은 C_r 로 표기한다. 식 [8]은 매 기간별, 자원 종류 별로 포트폴리오에서

요구되는 수량이 가용량을 초과할 수 없음을 나타낸다.

식 [9]는 프로젝트의 시작과 종료를 나타내는 가상활동들의 수행기간은 0임을 나타낸다. 포트폴리오의 분석 시작 시점을 0이라 하자. 프로젝트 p 의 활동 0은 시작을 나타내는 가상활동으로서 수행 기간이 0이므로 활동 $p0$ 의 시작시기와 종료시기는 일치한다. 본 연구에서 포트폴리오의 분석 시작 시점을 0이라 가정한다. 그러므로 식 [10]은 모든 프로젝트의 시작시기는 포트폴리오 분석 시작 시점인 0보다 앞설 수 없음을 의미한다. 식 [11]은 x_p , y_{pq} , z_{pqim} 이 0-1 변수임을, 식 [12]는 u_{pqim} 이 비음조건을 지녔음을 나타낸다.

p 번째 제안 프로젝트가 낙찰되어 p 번째 본 사업을 수행하게 되었을 때 얻을 수 있는 예상 사업 가치는 V_p 로 표기한다. 모든 활동들을 정상적으로 수행할 때 (기간 D_{pqim} 으로 진행할 때) p 번째 사업의 수주 확률은 $Prob_p$ 이다. 활동의 수행 기간을 연장하면 활동의 품질이 향상되고 그로 인해 프로젝트의 수주 확률 또한 증가한다. $Prob_{pqim}^+$ 는 p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 활동 i 가 m 번째 활동 모드로 수행될 때 연장 기간 당 발생하는 수주 확률 증가분을 의미하고 u_{pqim} 은 p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 활동 i 가 m 번째 활동 모드로 수행될 때 D_{pqim} 을 초과한 연장 기간을 나타낸다. 그러므로 활동 i 가 활동 모드 m 으로 진행될 때 기간연장 u_{pqim} 에 의한 수주 확률 증가량은 $Prob_{pqim}^+ \times u_{pqim}$ 이 된다. 프로젝트 p 에서 기간 연장으로 인한 수주

확률 증가량의 총합은 $\sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} Prob_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq}$ 가 되며, 프

로젝트 p 의 수주 확률은 $Prob_p + \sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} Prob_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq}$

이 된다. 그러므로 식 [1]은 선정한 프로젝트들의 기대 가치(예상 가치 \times 수주 확률)의 합의 최대화를 의미한다. 여기서 선정된 프로젝트들은 프로젝트 포트폴리오라 표현할 수 있으므로, 식 [1]은 제안 프로젝트 포트폴리오의 기대 가치 최대화를 의미한다.

제 4 장 알고리즘

본 연구는 제안 프로젝트들로 구성된 포트폴리오의 기대 가치 최대화 문제를 다룬다. 포트폴리오는 제안 프로젝트 선정과 선정된 프로젝트의 일정 문제로 나누어진다. 여기서 프로젝트 일정이란 프로젝트 모드의 결정과 각 활동별 활동 모드 선정, 연장 기간 및 종료 시기의 결정으로 이루어진다.

본 모형에서 의사결정변수는 프로젝트 선정을 나타내는 x_p , 프로젝트별 프로젝트 모드 선정을 나타내는 y_{pq} , 활동별 활동 모드 선정을 의미하는 z_{pqim} 과 연장된 기간을 의미하는 u_{pqim} 이다. x_p , y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 의 값에 따라 각 활동들의 수행기간 d_{pi} 와 종료시기 f_{pi} 가 결정된다. 그러므로 활동들의 수행기간 d_{pi} 와 종료시기 f_{pi} 는 종속변수가 된다.

독립변수들 중 x_p , y_{pq} 와 z_{pqim} 은 0-1 변수들이어서 본 문제는 선형계획법으로 모형화될 수도 없으며, 본 모형은 제안 프로젝트가 가진 특유의 특징으로 인해 기존에 알려진 프로젝트 선택문제(PSP : Project Selection Problem)나 포트폴리오 모형과 차별점이 있어 기존의 해법을 사용하기 곤란하다.

본 연구에서는 본 모형에 적합한 최적해법을 제시하고자 한다. 0-1 변수를 다루는 최적해법의 특성상, 0-1 변수의 수에 따라 문제의 최적해를 탐색하는 데 소요되는 시간은 기하급수적으로 증가하게 된다. 0-1 변수의 수가 작은 경우 현실적인 시간 내에 최적해를 찾을 수 있지만, 0-1 변수의 수가 큰 경우 현실적인 시간 내에 최적해를 찾지 못할 수도 있다. 제한된 시간 내에 최적해를 찾지 못한 경우, 그 시간까지 찾은 해를 휴리스틱의 해로 사용할 수도 있다.

4.1 해의 영역

본 논문의 해는 프로젝트 선정 x_p , 프로젝트 모드 선정 y_{pq} , 활동 모드 선정 z_{pqim} 의 3 종류의 0-1 변수가 사용되고, 활동 모드 내의 연장 시간을 의미하는 u_{pqim} 변수가 사용된다.

해의 영역에서 프로젝트 선정 변수인 x_p 해 영역은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \\ \vdots \\ x_P \end{bmatrix}$$

프로젝트 모드 선정을 의미하는 y_{pq} 에 대한 해 영역은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{1q} & \cdots & y_{1Q_1} \\ y_{21} & y_{22} & y_{2q} & \cdots & y_{2Q_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & y_{pq} & \cdots & y_{pQ_p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{P1} & y_{P2} & y_{Pq} & \cdots & y_{PQ_P} \end{bmatrix}$$

z_{pqim} 은 활동 i 의 모드 선정을 의미한다. 그런데 z_{pqim} 의 해 차원은 너무 커서 하나의 행렬로 표현하는 것은 어렵다. p 번째 프로젝트가 선정되고($x_p = 1$) q 번째 프로젝트 모드가 선정되었을 때($y_{pq} = 1$) 활동 i 의 모드 선정에 국한하여 z_{pqim} 의 부분해를 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} z_{pqi1} \\ z_{pqi2} \\ \vdots \\ z_{pqim} \\ \vdots \\ z_{pqim_{pqim}} \end{bmatrix}$$

위와 같은 부분해는 가능한 pqi 조합만큼 생성된다. u_{pqim} 은 활동의 기간 연장에 관한 변수이다. 기간 연장 상한값은 활동의 모드에 따라 다르

고 기간 연장은 정수 단위로만 허용되므로, p 번째 프로젝트가 선정되고 ($x_p = 1$) q 번째 프로젝트 모드가 선정되며($y_{pq} = 1$) 활동 i 에 m 번째 모드가 선정되었을 때($z_{pqim} = 1$), u_{pqim} 의 부분해는 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ u_{pqim} \\ \vdots \\ Max_Ext_{pqim} \end{bmatrix}$$

위와 같은 부분해는 가능한 $pqim$ 조합만큼 생성된다.

x_p , y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 의 부분해를 모두 연결하면 본 문제의 해가 완성된다. 그렇지만 선정되지 않은 프로젝트는 목적함수값에 반영되지 않고 모든 제약조건에서도 제외되어 있다. 그러므로 프로젝트 \hat{p} 가 선정되지 않은 경우, $y_{\hat{p}q}$ 이하 부분해($y_{\hat{p}q}$, $z_{\hat{p}qim}$ 와 $u_{\hat{p}qim}$ 로 구성되는 부분해)는 어떤 값을 가져도 본 모형에 영향을 끼치지 못한다. 또한 프로젝트 \hat{p} 가 선정되었더라도 \hat{q} 번째 프로젝트 실행모드가 선정되지 않으면, $z_{\hat{p}\hat{q}im}$ 이하 부분해($z_{\hat{p}\hat{q}im}$ 와 $u_{\hat{p}\hat{q}im}$ 로 구성되는 부분해)는 어떤 값을 가져도 본 모형에 영향을 끼치지 못한다.

문제의 크기를 이해하기 위해 프로젝트의 수 $P = 3$, 프로젝트 모드의 수 $Q_p = 2$, 각 프로젝트별 활동의 수 $I = 4$, 활동별 모드의 수 $M_{pq} = 2$, 연장 가능한 기간의 수 $Max_Ext_{pqim} = 2$ 인 경우를 고려하자.

선정된 프로젝트의 경우, $Q_p = 2$ 이므로 $q = 1$ 인 경우와 2인 경우로 나누어진다. $q = 1$ 인 경우, 각 활동마다 모드가 2이고, 연장가능한 기간이 2이므로 선택가능한 기간은 3(연장하지 않은 경우부터 1기간 연장, 2기간 연장한 경우)이다. 그러므로 활동별 모드/기간 조합은 $M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim}+1) = 2 \times (2+1) = 6$ 이 된다. 총 4개의 활동이 있으므로, 4

개 활동이 생성하는 활동별 모드/기간 조합은 $[M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I$
 $= [2 \times (2+1)]^4 = 6^4 = 1,296$ 이 된다. 각 프로젝트 모드마다 활동별 모드
/기간 조합이 존재하므로, 각 프로젝트에서 가능한 경우의 수는 $Q_p \times$
 $[M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I = 2 \times [2 \times (2+1)]^4 = 2,592$ 가 된다. 선정된 프
로젝트의 수가 2인 경우는 $[Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I]^2$, 선정된 프
로젝트의 수가 3인 경우는 $[Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I]^3$ 이 된다.

정리하면, 프로젝트 3개가 선정되는 경우는 ${}_3C_3 = 1$ 로서 (1, 2, 3)이 선
정되는 경우이며, 이때 가능한 해의 수는 ${}_3C_3 \times$
 $(Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I)^3 = 1 \times (2 \times [2 \times (2+1)]^4)^3 =$
17,414,258,688이다. 프로젝트가 2개 선정되는 경우는 ${}_3C_2 = 3$ 으로서
(1,2), (1,3)과 (2,3)이 선정되는 경우이며, 이때 가능한 해의 수는 ${}_3C_2 \times$
 $[Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I]^2 = 3 \times (2 \times [2 \times (2+1)]^4)^2 = 20,155,392$ 이
고, 프로젝트 1개만 선정되는 경우는 ${}_3C_1 = 3$ 으로서 (1), (2), (3)이 선정
되는 경우이며, 이때 가능한 해의 수는 ${}_3C_1 \times$
 $[Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I]^1 = 3 \times (2 \times [2 \times (2+1)]^4)^1 = 7,776$ 이고,
어떤 프로젝트도 선정되지 않은 경우는 ${}_3C_0 = 1$ 이며, ${}_3C_0 \times$
 $[Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I]^0 = 1 \times (2 \times [2 \times (2+1)]^4)^0 = 1$ 이다. 모든
경우를 합하면 17,434,421,857이 된다.

선정된 프로젝트의 수를 $chosen_p$ 로 표기하면, 해의 수는 아래와 같다.

$$\sum_{chosen_p=0}^P {}_PC_{chosen_p} \times [Q_p \times [M_{pq} \times (Max_Ext_{pqim} + 1)]^I]^{chosen_p}$$

$P = 14, Q_p = 2, I = 4, M_{pq} = 2, Max_Ext_{pqim} = 2$ 인 경우, 총 가능

한 해의 수는 $6.21\text{E}+47$ 이며, P 가 20인 경우는 해의 수가 $1.88\text{E}+68$ 에 이른다. 계산에 사용된 표는 [표4-1]과 같다.

[표4-1] $P=14$, $Q_p=2$, $I=4$, $M_{pq_i}=2$, $Max_Ext_{pqim}=2$ 일 때 경우의 수

선택되는 P의 수(A)	조합의 수(B) ($_{14}C_n$)	경우의 수(C) $2,592^{(A)}$	선택된 프로젝트수를 감안한 경우의 수(B)*(C) (지수형태 표기)	비고
14	1	6.1786E+47	6.1786E+47	
13	14	2.38372E+44	3.33721E+45	
12	91	9.19644E+40	8.36876E+42	
11	364	3.54801E+37	1.29148E+40	
10	1,001	1.36883E+34	1.3702E+37	
9	2,002	5.28099E+30	1.05725E+34	
8	3,003	2.03742E+27	6.11836E+30	
7	3,432	7.86041E+23	2.69769E+27	
6	3,003	3.03256E+20	9.10679E+23	
5	2,002	1.16997E+17	2.34228E+20	
4	1,001	4.51378E+13	4.51829E+16	
3	364	17414258688	6.33879E+12	
2	91	6718464	611380224	
1	14	2592	36288	
0	1	1	1	
전체 경우의 수 총합			6.21205E+47	

[표4-2] $P=20$, $Q_p=2$, $I=4$, $M_{pq_i}=2$, $Max_Ext_{pqim}=2$ 일 때 경우의 수

선택되는 P의 수(A)	조합의 수(B) ($_{20}C_n$)	경우의 수(C) $2,592^{(A)}$	선택된 프로젝트수를 감안한 경우의 수(B)*(C) (지수형태 표기)	비고
20	1	1.8737E+68	1.8737E+68	
19	20	7.22878E+64	1.44576E+66	
18	190	2.78888E+61	5.29887E+63	
17	1,140	1.07596E+58	1.22659E+61	
16	4,845	4.15107E+54	2.01119E+58	
15	15,504	1.60149E+51	2.48295E+55	
14	38,760	6.1786E+47	2.39482E+52	
13	77,520	2.38372E+44	1.84786E+49	
12	125,970	9.19644E+40	1.15848E+46	
11	167,960	3.54801E+37	5.95924E+42	

10	184,756	1.36883E+34	2.529E+39
9	167,960	5.28099E+30	8.86994E+35
8	125,970	2.03742E+27	2.56653E+32
7	77,520	7.86041E+23	6.09339E+28
6	38,760	3.03256E+20	1.17542E+25
5	15,504	1.16997E+17	1.81392E+21
4	4,845	4.51378E+13	2.18692E+17
3	1,140	17414258688	1.98523E+13
2	190	6718464	1276508160
1	20	2592	51840
0	1	1	1
전체 경우의 수 총합			1.88821E+68

4.2 최적화 기법

본 연구에서 제안한 최적화 기법은 아래와 같다.

- (1) $x_p, y_{pq}, z_{pqim}, u_{pqim}$ 의 모든 조합을 체계적으로 생성한다. 생성되는 조합을 σ_{xyzu} 라 하자.
- (2) 위에서 구한 각각의 σ_{xyzu} 로부터
 - (2-1) 선정된 프로젝트의 각 활동의 종료시기와 수행기간을 산정한다.
 - (2-2) 자원제약의 준수여부를 검토한다.
 - (2-3) 모든 제약조건을 충족하면, 목적함수값을 구한다.

실행 가능한 σ_{xyzu} 중에 목적함수값을 최대화하는 σ_{xyzu} 가 최적 σ_{xyzu} 가 된다.

4.2.1 $x_p, y_{pq}, z_{pqim}, u_{pqim}$ 조합의 체계적 생성

본 연구에서는 다음과 같은 순서로 해를 생성해 나간다.

(1) x_p 부분해 내림차순 생성

최초의 x_p 값들은 모두 1로 하고, 모든 x_p 값들이 0이 될 때까지 다음 x_p 들의 수열을 생성한다.

생성되는 x_p 수열의 수는 2^P 이다. $P = 4$ 인 경우, 최초의 x_p 수열 (x_1, x_2, x_3, x_4) 는 다음과 같은 순서로 생성된다.

(1, 1, 1, 1)

(1, 1, 1, 0)

(1, 1, 0, 1)

.....

(0, 0, 0, 1)

(0, 0, 0, 0)

선정되는 프로젝트 인덱스로 표현하면 다음과 같다.

(1, 1, 1, 1) \rightarrow (1, 2, 3, 4)

(1, 1, 1, 0) (1, 2, 3)

(1, 1, 0, 1) (1, 2, 4)

.....

(0, 0, 0, 1) (4)

(0, 0, 0, 0) ()

(2) y_{pq} 부분해 체계적 생성

각각의 x_p 부분해에 대하여 y_{pq} 부분해를 내림차순으로 생성한다. 이때 선정되지 않은 프로젝트의 y_{pq} 는 생성에서 제외한다. 예를 들어, $P = 3$ 이고 x_p 부분해는 (1 0 1)으로 주어졌다고 하자. 이 경우 첫번째와 세번째 프로젝트는 선정되고, 두번째 프로젝트는 선정되지 않았으므로, y_{pq}

부분해는 첫 번째와 세번째 프로젝트만을 대상으로 생성한다. 예를 들어, $Q_{p=1} = 3$, $Q_{p=3} = 2$ 라면, 생성되는 y_{pq} 부분해는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{31} & y_{32} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

선정된 프로젝트 1과 3에 배정되는 프로젝트 모드 인덱스를 나열하면 다음과 같다.

$\begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{31} & y_{32} \end{pmatrix}$	배정 모드
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\rightarrow (1, 1)$
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$(1, 2)$
$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$(2, 1)$
$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$(2, 2)$
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$(3, 1)$
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$(3, 2)$

y_{pq} 를 내림차순으로 나열할 때, 선택된 배정 모드 인덱스는 오름차순으로 표현된다.

(3) z_{pqim} 부분해 체계적 생성

각각의 (x_p, y_{pq}) 부분해에 대해 z_{pqim} 부분해를 오름차순으로 생성한다. 이때 선정되지 않은 (x_p, y_{pq}) 부분해에 대해서는 z_{pqim} 부분해를 생성할 필요가 없다. 예를 들어, 프로젝트 p 가 선정되고 프로젝트 실행모드 q 가

선정되었다고 하자. 이때 생성되는 z_{pqim} 의 부분해는 아래와 같다.

$$\text{활동 1: } (z_{pq11} \ z_{pq12} \ \cdots \ z_{pq1M_{pq1}})$$

$$\text{활동 2: } (z_{pq21} \ z_{pq22} \ \cdots \ z_{pq2M_{pq2}})$$

...

$$\text{활동 I: } (z_{pqI1} \ z_{pqI2} \ \cdots \ z_{p,q,I,M_{pqI}})$$

예를 들어 활동의 수 $I = 3$ 이고 활동별 모드의 수 M_{pqI} 가 모두 2라면, z_{pqim} 은 다음과 같다.

$$(z_{pq11}, \ z_{pq12}, \ z_{pq21}, \ z_{pq22}, \ z_{pq31}, \ z_{pq32})$$

z_{pqim} 은 0-1 변수이고, 활동별 모드 선택은 1씩 이루어져야 하므로, z_{pqim} 을 오름차순으로 나열하면 다음과 같다.

$$(1, 0, \ 1, 0, \ 1, 0)$$

$$(1, 0, \ 1, 0, \ 0, 1)$$

$$(1, 0, \ 0, 1, \ 1, 0)$$

$$(1, 0, \ 0, 1, \ 0, 1)$$

...

$$(0, 1, \ 0, 1, \ 0, 1)$$

활동별 선택되는 모드 인덱스를 나열하면 아래와 같다.

$$(1, 0, \ 1, 0, \ 1, 0) \rightarrow (1, 1, 1)$$

$$(1, 0, \ 1, 0, \ 0, 1) \rightarrow (1, 1, 2)$$

$$(1, 0, \ 0, 1, \ 1, 0) \rightarrow (1, 2, 1)$$

$$(1, 0, \ 0, 1, \ 0, 1) \rightarrow (1, 2, 2)$$

...

$$(0, 1, \ 0, 1, \ 0, 1) \rightarrow (2, 2, 2)$$

z_{pqim} 을 내림차순으로 나열할 때, 선택된 활동 모드의 인덱스는 오름차순으로 표현된다.

(4) u_{pqim} 부분해 체계적 생성

x_p , y_{pq} 와 z_{pqim} 와 달리 u_{pqim} 은 0-1 변수가 아니다. 그러므로 활동 모드별 u_{pqim} 의 부분해는 하나의 변수로 표현된다. 프로젝트 p 가 선정되었고 프로젝트 실행모드 q 가 배정되었으며 활동 i 의 선정모드가 m 이고 이 모드에서 연장 가능한 최대 기간이 2일 때, u_{pqim} 이 취할 수 있는 값을 내림차순으로 나열하면 다음과 같다.

2
1
0

(5) y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 으로 구성된 부분해 생성의 예

프로젝트 1과 3이 선정되었다고 하고, 프로젝트별 프로젝트 모드의 수는 2, 활동의 수는 3, 활동별 활동 모드의 수는 2, 모드 내 연장 가능한 기간은 2라 하자. 프로젝트 1과 3이 선정되었을 때, 선정되는 프로젝트 모드, 활동별 활동 모드 및 연장 기간을 모두 나열하면 아래와 같다.

$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \ \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2)$
 $\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \ \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(1)$
 $\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \ \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(0)$

$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \ \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 2(2)$
 $\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \ \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 2(1)$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 2(0)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(1), 1(2)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(1), 1(1)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(1), 1(0)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(1), 2(2)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(1), 2(1)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(1), 2(0)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(0), 1(2)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(0), 1(1)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(0), 1(0)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(0), 2(2)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(0), 2(1)$$

$$\{p=1\} \ q = 1, 1(2), 1(2), 1(2), \quad \{p=3\} \ q = 1, 1(2), 1(0), 2(0)$$

⋮

$$\{p=1\} \ q = 2, 2(0), 2(0), 2(0), \quad \{p=3\} \ q = 2, 2(0), 2(0), 2(0)$$

$\{p=1\} \ q = 2, 1(2), 2(0), 1(1)$ 는 프로젝트 1에 해당하는 정보로서, 프로젝트 1의 프로젝트 모드는 2이며, 활동 1의 모드는 1(연장기간은 2), 활동 2의 모드는 2(연장기간은 0)이고 활동 3의 모드는 1(연장기간은 1)임을 의미한다.

위의 나열 방식은 선정된 프로젝트를 대상으로 인덱스가 작은 프로젝

트부터 큰 프로젝트 순으로 나열한 것이다. 프로젝트마다 기입되는 정보는 선정된 프로젝트 모드($q=1$ 또는 $q=2$)와 활동의 인덱스 순으로 활동의 모드(연장 기간)들이다.

4.2.2 종속변수값 결정

독립변수인 x_p , y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 이 결정되면, 독립변수의 값을 사용하여 종속변수인 d_{pi} 와 f_{pi} , 그리고 목적함수값을 구할 수 있다.

(1) 선정된 프로젝트의 활동 기간 d_{pi} 값 결정

주어진 x_p , y_{pq} , z_{pqim} , u_{pqim} 로부터 각 활동의 기간 값을 결정한다. 만약 p 번째 프로젝트가 선정되었다면, i 번째 활동의 기간은 다음과 같다.

$$d_{pi} = \sum_{q=1}^{Q_p} \left[\sum_{m=1}^{M_{pi}} (D_{pqim} + u_{pqim}) \times z_{pqim} \right] \times y_{pq}$$

프로젝트 p 의 선정된 프로젝트 실행 모드가 \hat{q} 이고 활동 i 에 배정된 모드가 \hat{m} 이라면, 활동 i 의 정상기간은 $D_{p\hat{q}\hat{m}}$ 이다. 만약 \hat{u} 만큼 기간 연장되었다면, 활동 d_{pi} 는 $D_{p\hat{q}\hat{m}} + \hat{u}$ 가 된다. 기간 연장되지 않는 경우 $\hat{u} = 0$ 이므로, 기간 연장 여부와 상관없이 활동 d_{pi} 는 $D_{p\hat{q}\hat{m}} + \hat{u}$ 로 표현된다. 즉, 활동 i 의 수행 기간을 선정된 프로젝트 수행 모드 \hat{q} , 활동 i 의 모드 \hat{m} 과 선택한 연장 기간 값 \hat{u} 로 표현하면 다음과 같다.

$$d_{pi} = D_{p\hat{q}\hat{m}} + \hat{u}$$

(2) 선정된 프로젝트의 활동별 종료시기 결정

활동 간의 선행관계와 프로젝트 마감일이 주어졌고(x_p , y_{pq} , z_{pqim} , u_{pqim})로부터 활동들의 수행 기간을 구할 수 있으므로, 각 활동의 종료시기를 결정할 수 있다.

제안 프로젝트의 특성상 마감일 이전에 프로젝트를 종료하는 것은 불가능하다. 일정에 다소 여유가 있는 경우, 마감일이 도달할 때까지 추가 수정 및 보완 과정을 통해 제안 프로젝트의 품질을 제고한다. 제안 프로젝트의 이러한 특성을 반영하여, 본 연구에서는 제안 프로젝트 마감일까지 프로젝트가 진행되어야 함을 제약조건으로 반영하였다. 프로젝트 시작 시점에 제약이 있는 것이 아니라 프로젝트 종료 시점에 제약이 존재하므로, 프로젝트 마감일로부터 역순으로 활동들의 종료시기를 결정한다. 역순으로 결정하므로, j 가 활동 i 의 후행활동이라면, 활동 i 의 종료시기는 후행 활동 j 의 시작시기 (종료시기에서 수행 기간을 제한 값)가 결정된 이후에나 확정된다.

프로젝트 p 가 선정된 경우, 활동 i 의 종료시기는 다음과 같고, 프로젝트 종료를 의미하는 가상활동 I_{p+1} 의 경우, 종료시기는 다음과 같다.

$$f_{p, I_{p+1}} = Due_Date_p$$

가상활동(dummy node를 의미)이 아닌 활동 i 의 종료시기는 i 의 후행 활동들의 시작시기 중 가장 작은 값과 같다. 활동 j 의 시작시기는 종료시기에서 수행기간을 뺀 값이다.

$$f_{p_i} = \min_{j | (i,j) \in H_p} (f_{pj} - d_{pj})$$

(3) 목적함수값 산정

독립변수 x_p , y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 이 결정되면, 목적함수값 $\sum_{p=1}^P V_p \times \left[Prob_p + \sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} Prob_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq} \right] \times x_p$ 은 쉽게 구할 수 있다.

프로젝트 \hat{p} 가 선정되면, 목적함수값은 일단 $V_{\hat{p}} \times Prob_{\hat{p}}$ 로 산출된다. 기

간 연장의 크기가 \hat{u} 라면, 목적함수값은 $V_p \times Prob_{pqim}^+ \times \hat{u}$ 만큼 증가한다.

4.2.3 제약조건 충족여부 검토

(1) 매 기간별 자원제약 조건 충족 여부

자원 제약에 관한 수식은 아래와 같다.

$$\sum_{p \in PS_t} \sum_{q=1}^{Q_p} PR_{pqr} \times y_{pq} + \sum_{p \in PS_t} \sum_{i \in AS_{pt}} \sum_{q=1}^{Q_p} \sum_{m=1}^{M_{pi}} AR_{pqimr} \times y_{pq} \times z_{pqim} \leq C_r$$

프로젝트 p 가 선정되었고, 배정된 프로젝트 모드는 \hat{q} , 활동 i 의 배정 모드는 \hat{m} 이라 하자. 이 경우, 프로젝트 p 가 수행되는 매 기간 중 프로젝트 p 에 의해 요청되는 자원 r 의 수량은 $PR_{pqr}^{\hat{q}}$ 이며, 활동 i 의 수행 기간 중 매 기간별 필요한 r 번째 자원은 $R_{pqimr}^{\hat{q}\hat{m}}$ 이다.

각 프로젝트 별로 활동들의 시작시기와 종료시기가 확정되었으므로, 특정 시점 t 에 진행 중인 프로젝트 집합 PS_t 를 구할 수 있다. 프로젝트 p 가 선정되었고, 프로젝트 p 의 시작시점 f_{p0} 이 t 보다 늦지 않고, 종료시점 f_{pI+1} 이 t 보다 늦다면, 프로젝트 p 는 PS_t 에 속한다.

$$PS_t = \{ p \mid f_{p0} - d_{p0} \leq t < f_{pI+1} \} = \{ p \mid f_{p0} \leq t < f_{pI+1} \}$$

프로젝트 p 가 선정되었다고 하자. 각 활동의 시작시기와 수행기간이 결정되었으므로, 특정 t 에 프로젝트 p 가 수행 중인지 알 수 있으며, 특정 시점 t 에 진행 중인 활동 집합, AS_{pt} 를 구할 수 있다. 활동 i 의 시작시기가 t 보다 작거나 같고 종료시점이 t 보다 크다면, 활동 i 는 시점 t 에 진행 중이며 집합 AS_{pt} 에 속한다.

$$AS_{pt} = \{ i \mid f_{pi} - d_{pi} \leq t < f_{pi} \}$$

선정된 프로젝트들의 PS_t 와 AS_{pt} 가 결정되었으므로, 여기에 속한 프로젝트들의 실행모드 그리고 활동의 모드에 따라 시점 t 에 필요한 각 자원

별 요구량이 결정된다. 만약 특정 시점 t 에서 이 제약 조건이 위배된다면, 현재의 해 σ_{xyzu} 는 실행 불가능한 해이다.

(2) 여유시간 제약 조건 위배 검토

제안 프로젝트의 특성상 자원 투입은 프로젝트 단위로 이루어진다. 프로젝트 중간에 투입되는 경우나 중간에 해지되는 경우보다 프로젝트 시작부터 종료까지 투입되는 경우가 더 빈번하다. 본 연구에서는 프로젝트 차원으로 투입된 자원이 프로젝트 중간에 유휴(idle) 상태에 이르지 못하도록, 주요 활동들의 여유시간을 0로 제한하였다. 이는 활동 i 의 종료 즉시 활동 j 가 시작되어야 함을 의미한다.

4.3 개선 규칙(Bounding Rule)

본 모형에서 해(solution)는 (선택한 프로젝트, 프로젝트 모드, 활동 모드와 기간연장)으로 구성된다. 해를 구성하는 값들은 정수이므로, 모든 가능한 해를 순차적으로 생성하는 것이 가능하며, 생성된 해의 실행 가능 여부와 목적함수값을 구하는 것도 가능하다. 프로젝트 모드의 수, 활동의 수, 활동 모드의 수 그리고 선택 가능한 기간 연장의 수가 늘어나면, 가능한 해(σ_{xyzu})의 수는 기하급수적으로 증가하게 하며 전체 가능한 해를 검토하는 데 필요한 연산 시간 또한 기하급수적으로 증가한다.

이후에 소개하는 개선 규칙들은 실행가능한 해가 존재하지 않는 해 영역 또는 현재의 해보다 개선된 해가 존재하지 않는 해 영역을 체계적으로 제거하여, 전체를 탐색하는 데 소요되는 연산 시간을 획기적으로 줄이는 기법들이다.

해를 검토하는 과정 중이라 가정하고, 현재까지 발견된 실행 가능한 해값 중 가장 좋은 해값을 Best_Sol_Value라 하자. 해를 검토하기 전 또

는 실행 가능한 해 값이 아직 발견되지 않았다면 Best_Sol_Value = $-\infty$ 로 설정한다.

4.3.1 x_p 를 생성하는 단계에 적용하는 규칙들

이 규칙들은 σ_{xyzu} 들만 생성되었고, 아직 y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 이 생성되기 이전 단계에 적용하는 규칙들이다.

(1) 규칙 1 : 포트폴리오 목적함수값의 상한값(Upper Bound)

이 규칙은 포트폴리오에서 생성할 수 있는 어떤 기댓값도 이미 알려진 Best_Sol_Value를 초과할 수 없을 때, 해당 포트폴리오 탐색을 중지하는 기법이다.

선정된 프로젝트별로 해당 프로젝트 기댓값의 상한값을 구한다. 예를 들어, \hat{p} 가 선정되었다고 하자. ($x_{\hat{p}} = 1$) 프로젝트 \hat{p} 의 프로젝트 모드가 2개 있다고 하자. 이 경우, $q = 1$ 일 때 각 활동별로 $Prob_{p1im}^+ \times Max_Ext_{p1im}$ 을 최대로 만드는 활동 모드를 구하여 $Prob_{p1im}^+ \times Max_Ext_{p1im}$ 을 합한다. $q = 2$ 일 때도 같은 방식으로 각 활동별로 $Prob_{p2im}^+ \times Max_Ext_{p2im}$ 을 최대로 만드는 활동 모드를 구하여 $Prob_{p2im}^+ \times Max_Ext_{p2im}$ 을 합한다. 활동별 $Prob_{pqim}^+ \times Max_Ext_{pqim}$ 를 최대로 만드는 프로젝트 모드 q 를 찾고, 그 프로젝트 모드일 때의 $Prob_{pqim}^+ \times Max_Ext_{pqim}$ 의 합계를 $Prob_{\hat{p}}$ 에 더 한다. 이 값이 프로젝트 \hat{p} 의 수주확률 최대값이 된다. 수주확률 최대값에 예상 가치 $V_{\hat{p}}$ 를 곱한 값이 프로젝트 \hat{p} 의 기대가치 최대값이 된다. 이해를 돕기 위해 예를 들어 계산하면 [표 4-3]과 같다.

[표 4-3] 목적함수의 Upper Bounding 적용 사례

프로젝트(P)	예상 가치 (Vp, 원)	기본 예상수주 율 (Probp, %)	실행 모드 (Q)	활동 (I)	활동 모드 (M)	모드 선택 여부 (z _{pqim})	(가) 수주율 증분 (Prob ^p _{pqim})	(나)최대 연장 가능 일수 (Max_Ext pqim)	(가)x (나)	합산된 증가율 최대값 (%)	수주율 최대값 (%)	기대가치 최대값 (원)	비고
p=5	1,000,000	50											
			q=1										
				i=1									
					m=1	0	0.3	3	0.9				
					m=2	1	0.2	5	1.0				최대 수주율을 가진 모드
					m=3	0	0.4	2	0.8				
				i=2									
					m=1	0	0.1	2	0.2				
					m=2	1	0.1	3	0.3				최대 수주율을 가진 모드
										1.3	51.3%	513,000	
p=8	3,000,000	70											
			q=2										
				i=1									
					m=1	1	0.4	4	1.6				최대 수주율을 가진 모드
					m=2	0	0.3	1	0.3				
				i=2									
					m=1	1	0.5	5	2.5				최대 수주율을 가진 모드
					m=2	0	0.3	3	0.9				
										4.1	74.1%	2,223,000	
										목적함수 총합(원)		2,736,000	

상기 [표 4-3]에서 프로젝트 p=5, p=8 2개의 프로젝트가 선택되었고 각 활동 모드에서 가장 높은 수주율 증가분만을 선택하여 합산하여 계산한 목적함수값이 2,736,000원이 나왔다면, 이는 가장 높은 수주율 증가분만을 취하여 계산한 것이므로 상한값이 되는 것이다. 만일 이렇게 구한 값이 Best_Sol_Value 이하라면 이때 선정된 프로젝트들로 구성된 포트폴리오에서는 이 이상 더 좋은 목적함수값을 나올 수 없음을 보여준다.

따라서, 이 경우 현재의 x_p 조합은 검토할 필요가 없으므로 (y_{pq} , z_{pqim} 과 u_{pqim} 을 생성하고 검토할 필요가 없다.) 다음 번 x_p 조합을 생성한다. 예를 들어, $P = 14$ 이고 현재 선택된 프로젝트들이 {1, 3, 5, 9}이며, 이

프로젝트들의 목적함수 상한값의 합계가 Best_Sol_Value이면, 검토해야 할 다음 번 선택 프로젝트들은 {1, 3, 5, 10, 11, 12, 13, 14}이다.

(2) 규칙 2 : 포트폴리오 자원 최소 요구량

자원제약으로 인해 선정된 프로젝트들을 동시 배정할 수 없다면, 해당 포트폴리오를 검토할 필요가 없다는 규칙이다. 이 규칙을 적용하기 위해서는 각 프로젝트 별로 (1) 프로젝트의 LS(Latest Start Time)과 마감일, (2) 프로젝트가 수행되는 매 기간별로 필요한 자원 r 의 최소 요구량을 계산해야 한다.

프로젝트 \hat{p} 가 선정되었다고 하자. 프로젝트 \hat{p} 의 마감일은 주어진 계수이지만, 프로젝트 \hat{p} 의 시작시점은 프로젝트 모드와 활동별 모드와 연장기간에 따라 달라진다. 프로젝트 \hat{p} 의 시작시점 중 가장 늦은 시작시점 (LS)은 프로젝트 모드별 LS를 구한 다음, 그 중 가장 큰 값으로 하된다. 프로젝트 모드별 LS는 그 프로젝트 모드 하에 각 활동의 모드/기간 중 최소값(활동별 최소 수행 기간 산정)을 택한 후, 마감일로부터 역산하여 프로젝트 시작시점을 구한다. 예를 들어, $q = 1$ 일 때 $LS = 40$ 이고, $q = 2$ 일 때 $LS = 45$ 라면, 프로젝트 \hat{p} 의 LS는 $\max \{40, 45\} = 45$ 가 된다. 마감일이 95라면, 프로젝트 \hat{p} 는 어떤 프로젝트 실행 모드에 어떤 활동별 모드/기간 조합이 주어진다 하더라도, 시점 45부터 95까지는 실행 상태란 의미이다.

LS부터 마감일까지의 기간 중 프로젝트 \hat{p} 가 요청하는 자원 r 의 최소 요구량은 프로젝트 모드별로 자원 r 의 최소 요구량을 계산한 후, 가장 작은 값을 택하여 구한다. $q = 1$ 인 경우, 프로젝트 모드에 의해 요청되는 자원 r 의 요구량은 $PR_{\hat{p}1r}$ 이다. LS부터 마감일까지 최소 활동 하나는 실행 상태이므로 활동들에 의해 요구되는 자원 r 의 최소 요구량은

AR_{p1mr} 중 최소값이다. 매 기간 자원 r 은 프로젝트 실행 모드와 활동들에 의해 요청되므로, $q = 1$ 일 때 LS부터 마감일까지의 자원 r 요구량의 최소값은 $PR_{p1r} + \min_{1 \leq i \leq I} AR_{p1imr}$ 이 된다. $q=2$ 일 때의 자원 요구량의 최소값은 $PR_{p2r} + \min_{1 \leq i \leq I} AR_{p2imr}$ 이다. 그러므로 프로젝트 \hat{p} 에 의해 매 기간별로 요구되는 자원 r 의 최소값은 프로젝트 모드별 최소값들 중 최소값이 된다.

예들 들어, 선정된 프로젝트, LS, 마감일, 자원 1과 2의 최소 요구량이 다음과 같고 자원 1의 가용량은 15, 자원 2의 가용량은 12이며, $P = 5$ 라고 하자.

$$p = 1, \text{ LS} = 45, \text{ Due Date} = 95, \text{ Min}_r=1 = 5, \text{ Min}_r=2 = 9$$

$$p = 3, \text{ LS} = 25, \text{ Due Date} = 65, \text{ Min}_r=1 = 3, \text{ Min}_r=2 = 4$$

$$p = 4, \text{ LS} = 15, \text{ Due Date} = 55, \text{ Min}_r=1 = 4, \text{ Min}_r=2 = 2$$

$$p = 5, \text{ LS} = 10, \text{ Due Date} = 45, \text{ Min}_r=1 = 3, \text{ Min}_r=2 = 4$$

프로젝트 1의 자원별 최소 요구량은 5, 9이고 가용량은 15, 12이므로, 프로젝트 1의 경우, 단독이라면 배정 가능할 수도 있다. 그런데 프로젝트 1이 배정된 상태에서 프로젝트 3이 배정된다면, 두 프로젝트가 반드시 동시에 실행되는 시점 45부터 65 사이에 요구되는 최소 자원은 $5+3=8$, $9+4=13$ 이 되며, 자원 2의 경우 가용량 12를 초과한 요구량이다. 이 경우, 프로젝트 1과 3은 자원 제약으로 인해 동시에 배정될 수 없음을 의미하며, 다음 번 검토해야 할 포트폴리오는 {1, 4, 5}가 된다.

이 규칙의 적용은 다음과 같다.

- (1) 프로젝트 인덱스 순으로 LS기간부터 마감일까지 최소 자원 요구량은 합산한 후, 가용량 초과여부를 검토한다. 만약 \hat{p} 번째 프로젝트에서 합산 요구량이 가용량을 초과했으면, Goto (2)

(2) 현 포트폴리오는 자원 제약으로 인해 실행 불가능한 포트폴리오다.

검토할 다음 번 포트폴리오는 아래와 같다.

- 현 포트폴리오에 속한 프로젝트 중 \hat{p} 보다 인덱스가 작은 프로젝트는 다음 번 포트폴리오에 속한다.
- \hat{p} 는 다음 번 포트폴리오에 속하지 못한다.
- 프로젝트 $\hat{p}+1, \hat{p}+2, \dots, P$ 는 모두 다음 번 포트폴리오에 속한다.

예를 들어, 현 포트폴리오는 {1, 3, 6, 7, 8, 9}이고, $P = 9$ 이며, 프로젝트 6의 최소 요구량 배정에서 가용량을 초과했으면, 검토할 다음 번 포트폴리오는 {1, 3, 7, 8, 9}가 된다.

4.3.2 x_p, y_{pq}, z_{pqim} 과 u_{pqim} 를 생성하는 단계에 적용하는 규칙들

이 규칙들은 σ_{xyzu} 를 실제 배정하는 단계에 적용하는 규칙들이다. 여기서 배정이란 각 활동 별로 수행기간 d_i 와 종료시기 f_i 를 계산한 후, 여유시간 제약 및 자원 제약 조건의 충족 여부를 확인하는 것을 의미한다.

배정 순서는 다음과 같다. 선정된 프로젝트 중 인덱스가 작은 프로젝트부터 배정한다. 동일 프로젝트에서 활동의 배정 순서는 활동 인덱스가 큰 것부터 한다. 활동 인덱스 역순으로 배정하는 이유는 프로젝트 마감일 이전에 프로젝트 종료가 불가능하기 때문이다.

아래 언급되는 개선 규칙들은 프로젝트 선정이 완료되었으며, \hat{p} 번째 프로젝트에서 \hat{q} 번째 프로젝트 모드가 배정되었으며, \hat{i} 번째 활동이 모드 \hat{m} 과 연장 기간 \hat{u} 로 배정되는 단계를 가정한다. 그러므로 선정된 프로젝트 중 프로젝트 인덱스가 \hat{p} 보다 작은 프로젝트의 배정은 완료된 상태이며, 프로젝트 \hat{p} 의 경우 활동 I_p 부터 $i+1$ 까지는 배정 완료되었고, $i-1$ 부터

1까지는 미배정이며, 프로젝트 인덱스가 \hat{p} 보다 큰 경우는 활동들이 미배정된 상태이다.

(1) 규칙 3 : σ_{xyzu} 목적함수값의 상한값(Upper Bound)

이 규칙은 현 σ_{xyzu} 배정에서 생성할 수 있는 어떤 기댓값도 이미 알려진 Best_Sol_Value를 초과할 수 없을 때, 현 σ_{xyzu} 배정을 중지하는 기법이다.

이 규칙과 앞서 설명한 규칙 1은 모두 목적함수값의 상한값에 관한 규칙이다. 규칙 1은 포트폴리오가 결정되는 단계에서 적용되고, 규칙 3은 σ_{xyzu} 의 배정이 이루어지는 단계에서 적용되는 차이점이 있다.

현재 프로젝트 \hat{p} 의 \hat{q} 번째 프로젝트 모드에서 활동 \hat{i} 에 모드 \hat{m} 과 기간 연장 \hat{u} 를 배정한 단계라 하자.

목적함수를 배정 측면에서 다시 정리하면, 선정된 프로젝트들의 기대가치의 합과 활동들의 기대가치 증가분의 합으로 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{p=1}^P V_p \times \left[\text{Prob}_p + \sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} \text{Prob}_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq} \right] \times x_p \\ & = \text{Max} \sum_{p=1}^P V_p \times \text{Prob}_p \times x_p \\ & \quad + \sum_{p=1}^P V_p \times \left[\sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} \text{Prob}_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq} \right] \times x_p \end{aligned}$$

위 식에서 $\sum_{p=1}^P V_p \times \text{Prob}_p \times x_p$ 은 선정된 프로젝트의 기대가치의 합을,

$\sum_{p=1}^P V_p \times \left[\sum_{q=1}^{Q_p} \left(\sum_{i=1}^{I_p} \sum_{m=1}^{M_{pqi}} \text{Prob}_{pqim}^+ \times z_{pqim} \times u_{pqim} \right) \times y_{pq} \right] \times x_p$ 은 선정된 프로젝트에서 활동들의 기대가치 증가분의 합을 나타낸다. 그런데 프로젝트 선정

이 완료된 상태이므로, $\sum_{p=1}^P V_p \times Prob_p \times x_p$ 는 상수이다. 선정된 프로젝트

인덱스의 집합을 S_Proj 라 정의하면, $\sum_{p=1}^P V_p \times Prob_p \times x_p =$

$\sum_{p \in S_Proj} V_p \times Prob_p$ 가 된다. 예를 들어, 프로젝트 1, 5와 7이 선정되었다면,

$S_Proj = \{1, 5, 7\}$ 이 되며, $\sum_{p \in S_Proj} V_p \times Prob_p = V_1 \times Proj_1 + V_5 \times Proj_5$

$+ V_7 \times Proj_7$ 이 되며, 이 값은 변수가 포함되지 않은 상수이다.

현재 배정 단계가 프로젝트 \hat{p} 에 활동 \hat{i} 라고 하자.

활동 배정은 프로젝트 인덱스 순으로 이루어지므로, 배정이 완료된 활동들은 (i) 프로젝트 인덱스가 \hat{p} 보다 작은 프로젝트에 속한 활동들과 (ii) 프로젝트 \hat{p} 에서 활동 인덱스가 \hat{i} 이거나 \hat{i} 보다 큰 활동들이다. 이 활동들의 경우, 프로젝트 모드, 활동 모드 및 기간 연장의 결정이 이루어진 상태이다. 예를 들어 프로젝트 \bar{p} 에서 프로젝트 모드는 \bar{q} 로, 활동 \bar{i} 의 모드는 \bar{m} , 연장 기간은 \bar{u} 로 결정되었다고 하자. 이 경우, 프로젝트 \bar{p} 의 활동 \bar{i} 가 산출하는 프로젝트 기대가치 증가분은 $V_{\bar{p}} \times Prob_{pqim}^+ \times \bar{u}$ 로서, 이 값 또한 상수이다.

아직 미배정 상태인 활동들은 (i) 프로젝트 \hat{p} 에서 활동 인덱스가 \hat{i} 보다 작은 활동들과 (ii) 프로젝트 인덱스가 \hat{p} 보다 큰 프로젝트에 속한 활동들이다. 규칙 (1)에서 전술한 바와 같이, 프로젝트 \bar{p} 의 활동 \bar{i} 가 미배정 상태라 하자. 이 활동이 산출할 수 있는 기대가치 증가분의 최대값은 $\underset{q,m}{MAX} (Prob_{pqim}^+ \times Max_Ext_{pqim})$ 이 된다.

종합하면 프로젝트 \hat{p} 에서 활동 \hat{i} 가 배정되는 단계에서 목적함수값의

상한값은 아래 3가지 기대가치의 합이다.

- (i) 선정된 프로젝트 기대가치의 합
- (ii) 배정 완료된 활동들의 기대가치 증가분의 합
- (iii) 미배정된 활동들의 기대가치 증가분의 최대값의 합

현재 배정 중인 해(부분해)의 목적함수값의 최대값이 이미 알려진 목적함수의 값 Best_Sol_Value 보다 작거나 같으면, 현재 배정된 부분해는 Best_Sol_Value 보다 향상된 해 값을 생성할 수 없으므로 배정을 중단한다.

(2) 규칙 4 : σ_{xyzu} 자원 제약 검토에서 프로젝트별 자원 최소 요구량을 반영하는 규칙

포트폴리오에서 요구하는 자원의 양이 가용량을 초과하게 되면 자원 제약 조건에 위배되어 현재 진행 중인 배정은 실행 불가능한 배정이 된다.

이 규칙을 보다 용이하게 적용하기 위해 매 시점별 그리고 종류별 사용가능한 자원량을 $Avail_{tr}$ (시점 t 에 사용 가능한 자원 종류 r 의 수량)이라 하자. 활동들이 배정되기 전 $Avail_{tr}$ 의 값은 모든 시점 t 별로 C_r 이 된다. 어떤 t 와 r 에 대해서도 $Avail_{tr}$ 은 0 이상의 값이 유지되어야 한다.

현재 배정 단계가 프로젝트 \hat{p} 에 활동 \hat{i} 라고 하자.

규칙 3에서 설명한 바와 같이 활동 배정은 프로젝트 인덱스 순으로 이루어지므로, 배정이 완료된 활동들은 (i) 프로젝트 인덱스가 \hat{p} 보다 작은 프로젝트에 속한 활동들과 (ii) 프로젝트 \hat{p} 에서 활동 인덱스가 \hat{i} 이거나 \hat{i} 보다 큰 활동들이다. 미배정된 활동들은 (i) 프로젝트 \hat{p} 에서 활동 인덱스가 \hat{i} 보다 작은 활동들과 (ii) 프로젝트 인덱스가 \hat{p} 보다 큰 프로젝트에 속한 활동들이다.

활동이 배정될 때마다 그 활동의 시작시점부터 종료시점-1까지 자원 종류별로 AR_{pqmr} 만큼 $Avail_{tr}$ 에서 차감된다. 그 활동의 시작시점부터 종료시점-1까지에 속한 특정 \hat{t} 를 고려하자. 그 활동이 해당 프로젝트에 속한 활동 중 시점 \hat{t} 에서 진행 중인 유일한 활동이라면, 프로젝트 모드에서 요구되는 자원 또한 종류별로 PR_{pqr} 씩 $Avail_{tr}$ 에서 차감된다.

규칙 2에서 전술한 바와 같이, 아직 배정을 시작하지 않은 프로젝트 p 의 경우에도 LS_p 부터 Due_Date_p-1 까지 매 시점별로 필요로 하는 자원 r 의 최소 요구량은 Min_pr 이다. 그러므로 미배정 프로젝트 p 마다 시점 LS_p 부터 Due_Date_p-1 까지 매 자원 별로 Min_pr 씩 $Avail_{tr}$ 에서 차감한다. 이때 $Avail_{tr} < 0$ 이라면, 현 부분 배정은 자원 제약을 충족시키는 배정을 생성할 수 없다.

제 5 장 모의실험 결과

본 논문의 알고리즘은 Microsoft Office Professional Plus 2016 Excel VBA(Visual Basic for Applications)로 코딩했으며, AMD Ryzen 7 2700 Eight-Core Processor CPU, 3.7 GHz을 사용하여 모의실험을 수행하였다. 본 모의실험의 목적은 제시된 모형의 적합성을 증명하고, 본 알고리즘에서 도입한 개선 규칙들의 우수성을 제시하기 위함이다.

5.1 모의실험 조건 설정

모의실험은 다음의 환경과 조건에서 생성된 데이터를 사용하여 수행하였다.

5.1.1 데이터 생성 기본구성

본 연구에서 사용한 데이터에서 프로젝트의 수, 프로젝트별 프로젝트 모드의 수, 프로젝트를 구성하는 활동의 수, 활동별 활동 모드의 수, 모드 내에서의 연장 가능한 기간은 다음과 같다.

[표 5-1] 데이터셋 기본구성

기호	구분	값
P	프로젝트의 수	14
Q	프로젝트별 프로젝트 모드의 수	2
I	프로젝트별 활동의 수	4
M	활동별 활동 모드의 수	2
E	모드별 최대 연장 기간	1(활동1~3),2(활동4)
R	자원 종류	6

5.1.2 난수값에 의한 데이터 생성 규칙

(1) 본 사업의 가치, 프로젝트 수주 확률, 마감일과 자원의 가용량 생성

본 사업의 가치, 프로젝트 수주 확률과 마감일은 아래와 같이 일양분포를 사용하여 구했다.

$$V = U(100, 500)$$

$$\text{Prob} = U(0.30, 0.70)$$

$$\text{Due_Date} = U(60, 100)$$

사업의 가치 V 는 최소값이 100, 최대값이 500인 일양분포로부터 추출하였고, 프로젝트 수주확률은 최소값이 0.30, 최대값이 0.70인 일양분포로부터, 마감일 최소값이 60, 최대값이 100인 일양분포로부터 구하였다.

편의상 사업의 가치와 마감일은 정수값을, 수주확률은 소숫점 2자리의 실수의 값을 갖도록 하였다. 이를 위해 사업 가치와 마감일은 소숫점 첫 자리에서 반올림하여 정수로 만들었으며, 수주확률은 소숫점 3자리에서 반올림하여 소숫점 2자리로 표현하였다. 포트폴리오 기간 중 가용한 자원의 양은 일양분포를 사용하여 구했다. 자원의 종류는 6이며, 종류별 하한값과 상한값은 아래와 같다.

$$\text{자원별 하한값} = (8, 5, 8, 5, 5, 5)$$

$$\text{자원별 상한값} = (11, 7, 11, 7, 7, 7)$$

예를 들어, 첫번째 자원의 가용량은 $U(8, 11)$ 로부터 생성하며, 반올림하여 정수로 만들었다.

(2) 자원 생성

첫 번째 실행모드에서 필요한 각 자원별 요구량은 일양분포를 사용하여 생성하였다. 자원의 종류는 6이므로, 6 종류의 자원별 하한값과 상한값은 아래와 같다.

첫 번째 프로젝트 모드에서 자원별 하한값 = (2, 0, 1, 1, 1, 1)

첫 번째 프로젝트 모드에서 자원별 상한값 = (3, 2, 3, 2, 2, 2)

그러므로 첫 번째 자원은 U(2, 3)으로부터, 두 번째 자원은 U(0, 2), ..., 여섯 번째 자원은 U(1, 2)로부터 생성된다. 필요한 자원의 수는 정수가 되도록 하였다. 두 번째 프로젝트 모드는 첫 번째 프로젝트 모드에 비해 자원별 요구량이 같거나 많다. 그러므로 두 번째 실행 모드에서의 자원량은 첫 번째 실행 모드에서의 자원 요구량에 추가되는 요구량으로 표현할 수 있다. 추가되는 자원의 요구량 또한 일양분포를 사용하여 구했으며, 자원별 하한값과 상한값은 다음과 같다.

두 번째 프로젝트 모드에서의 추가 요구량의 하한값 = (0, 0, 0, 0, 0, 0)

두 번째 프로젝트 모드에서의 추가 요구량의 상한값 = (2, 1, 2, 1, 2, 1)

예를 들어, 첫 번째 프로젝트 모드에서 첫 번째 자원 요구량은 3이고, 두 번째 프로젝트 모드에서 첫 번째 자원의 추가 요구량이 2이면, 두 번째 프로젝트 모드에서 첫 번째 자원의 요구량은 $3+2 = 5$ 가 된다.

활동의 활동 모드별 자원 요구량도 일양분포를 사용하여 구했다. 각 모드별 하한값과 상한값은 다음과 같다.

활동 모드 1에서의 각 자원별 하한값 = (0, 0, 0, 0, 0, 0)

활동 모드 1에서의 각 자원별 상한값 = (1, 1, 1, 1, 1, 1)

활동 모드 2에서의 각 자원별 하한값 = (0, 0, 0, 0, 0, 0)

활동 모드 2에서의 각 자원별 상한값 = (1, 1, 2, 2, 1, 1)

(3) 활동 기간 생성

편의상 $D(p_mode, i, a_mode)$ 는 프로젝트 실행모드가 p_mode 일 때 활동 i 가 모드 a_mode 로 실행될 때의 기간을 의미한다고 하자.

활동 1부터 3의 기간은 다음과 같은 방법으로 구했다.

$$D(1, i, 1) = U(6, 7)$$

$$D(1, i, 2) = D(1, i, 1) \times U(0.8, 0.9)$$

$$D(2, i, 1) = D(1, i, 1) \times U(0.8, 0.9)$$

$$D(2, i, 2) = D(2, i, 1) \times U(0.8, 0.9)$$

p_mode = 1일 때보다 2일 때 보다 많은 자원이 할당되고, 동일 p_mode에서는 a_mode가 증가할수록 자원이 추가된다. 그러므로 p_mode=1, a_mode= 1일 때, 활동의 수행기간이 가장 길고, p_mode 또는 a_mode가 증가할수록 활동의 수행기간은 단축된다. 본 논문에서 활동의 수행기간이 정수인 경우를 다루므로, 위의 식에서 기간이 정수가 아닌 경우 적절한 변환을 거쳐 정수로 만들어 사용하였다.

활동 4의 기간은 아래와 같은 방식으로 생성되었다.

$$D(1, i=4, 1) = U(16, 40)$$

$$D(1, 4, 2) = D(1, 4, 1) \times U(0.8, 0.9)$$

$$D(2, 4, 1) = D(1, 4, 1) \times U(0.8, 0.9)$$

$$D(2, 4, 2) = D(2, 4, 1) \times U(0.8, 0.9)$$

(4) 활동 모드별 최대 연장 기간

각 활동별 모드마다 수행 기간이 존재한다. 이 수행 기간은 연장될 수 있으며, 기간이 연장되면 프로젝트의 품질이 향상되어, 결과적으로 프로젝트 수주확률도 그만큼 높아진다. 활동 1, 2 그리고 3의 경우 1기간 연장이, 활동 4의 경우 2기간 연장이 가능하다. 1 기간 연장에 따른 수주 확률 증가는 다음과 같은 방식으로 생성되었다.

활동 1~3의 경우, $U(0.02, 0.04)$

활동 4의 경우, $U(0.025, 0.075)$

5.2 모의실험 결과

각각의 데이터 셋은 10개의 문제로 구성되어 있다. 연산 시간은 최대 3,600초까지만 허용하였다. 기준이 되는 데이터 셋, 즉 [표 5-1]에서 설명한 것처럼 기본 값으로 생성된 데이터 셋을 Basic 데이터셋이라 하자. Basic 데이터셋 문제들의 최적해를 구하는 데 소요된 시간(sec)과 최적해값은 아래 표 [표 5-2]와 같다.

[표 5-2] Basic 데이터셋의 모의실험 결과

문제 번호	연산시간(초)	최적해 값
1	311	799
2	269	899
3	108	753
4	528	1,081
5	983	756
6	13	720
7	19	553
8	22	600
9	171	956
10	53	703
평균	247.7	
최대	983	
최소	13	

Basic 데이터셋의 경우, 10문제 모두 제한시간 3,600초 이내에 최적해 값을 찾았으며, 연산 시간의 평균은 247.7 초였다.

제안 프로젝트 수가 연산 시간에 끼치는 영향을 분석하기 위해 프로젝트 수가 12인 데이터 셋(P-12)과 16인 데이터 셋(P-16)을 생성하였다. 이들 데이터셋과 Basic 데이터셋의 차이는 오직 프로젝트의 수뿐이다.

P-12 데이터셋과 P-16인 데이터셋으로의 모의실험 결과는 [표 5-3]과 같다.

[표 5-3] P-12 데이터셋 및 P-16인 데이터셋 모의실험 결과

문제 번호	P-12		Basic 데이터셋		P-16	
	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값
1	109	732	311	799	275	833
2	4	524	269	899	6	553
3	23	867	108	753	705	1,068
4	306	622	528	1,081	29	604
5	25	723	983	756	3,365	1,040
6	21	782	13	720	551	856
7	2	706	19	553	242	702
8	26	736	22	600	2,046	1,043
9	47	811	171	956	94	898
10	17	757	53	703	3,600+ *)	N/A
평균	58		248		N/A	
최대	306		983		3,600+	
최소	2		13		6	

*) 연산 제한 시간 3,600초를 초과함을 의미한다.

Basic 데이터셋에 비해 프로젝트 수가 2만큼 감소한 P-12의 경우, 연산 시간의 평균은 Basic 데이터셋에 비하여 23% 수준으로 감소하였다. 반면 Basic 데이터셋 대비 프로젝트 수가 2만큼 증가한 P-16의 경우, 연산 시간은 크게 증가하였으며, 제한 시간 이내에 풀지 못한 문제는 1개 발생하였다.

프로젝트 모드 수가 연산 시간에 끼치는 영향을 분석하기 위해 프로젝트 모드 수가 1인 데이터 셋(PM-1)과 3인 데이터 셋(PM-3)을 생성하였다. 이들 데이터셋과 Basic 데이터셋의 차이는 오직 프로젝트 모드의 수뿐이다. PM-1 데이터셋과 PM-3인 데이터셋으로의 모의실험 결과는 [표 5-4]과 같다.

[표 5-4] PM-1 데이터셋 및 PM-3인 데이터셋 모의실험 결과

문제 번호	PM-1		Basic 데이터셋		PM-3	
	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값
1	604	803	311	799	64	845
2	6	1,024	269	899	628	709
3	9	896	108	753	266	783
4	10	760	528	1,081	14	730
5	8	714	983	756	902	854
6	4	634	13	720	3,600+ *)	1,359
7	79	804	19	553	115	715
8	393	895	22	600	17	721
9	9	876	171	956	54	853
10	9	728	53	703	32	723
평균	113		248		N/A	
최대	604		983		3,600+ *)	
최소	4		13		14	

*) 연산 제한 시간 3,600초를 초과함을 의미한다.

Basic 데이터셋에 비해 프로젝트 모드가 수가 1만큼 감소한 PM-1의 경우, 연산 시간의 평균은 Basic 데이터셋에 대비하여 46% 수준으로 감소하였다. 반면 Basic 데이터셋 대비 프로젝트 모드 수가 1만큼 증가한 PM-3의 경우, 연산 시간은 크게 증가하였으며, 제한 시간 이내에 풀지 못한 문제는 1개 발생하였다.

활동 모드 수가 연산 시간에 끼치는 영향을 분석하기 위해 활동 모드 수가 1인 데이터 셋(AM-1)과 3인 데이터 셋(AM-3)을 생성하였다. 이들 데이터셋과 Basic 데이터셋의 차이는 활동 모드의 수뿐이다. AM-1 데이터셋과 AM-3인 데이터셋으로의 모의실험 결과는 [표 5-5]과 같다.

[표 5-5] AM-1 데이터셋 및 AM-3인 데이터셋 모의실험 결과

문제 번호	AM-1		Basic 데이터셋		AM-3	
	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값
1	1	647	311	799	3,600+ *)	N/A
2	16	731	269	899	104	852
3	2	612	108	753	3,600+ *)	N/A
4	34	758	528	1,081	3,600+ *)	N/A
5	-	667	983	756	3,600+ *)	N/A
6	2	1,150	13	720	2,439	914
7	4	505	19	553	171	863
8	1	500	22	600	202	808
9	12	1,003	171	956	69	778
10	1	710	53	703	1,475	945
평균	7		248		N/A	
최대	34		983		3,600+ *)	
최소	-		13		69	

*) 연산 제한 시간 3,600초를 초과함을 의미한다.

Basic 데이터셋에 비해 활동 모드가 수가 1만큼 감소한 AM-1의 경우, 연산 시간의 평균은 Basic 데이터셋에 대비하여 3.5% 수준으로 감소하였다. 반면 Basic 데이터셋 대비 활동 모드 수가 1만큼 증가한 AM-3의 경우, 연산 시간은 크게 증가하였으며, 제한 시간 이내에 풀지 못한 문제는 4개 발생하였다.

가용 자원 수준이 연산 시간에 끼치는 영향을 분석하기 위해 Basic 데이터셋 대비 가용량이 1씩 감소한 데이터 셋(CAP -1)과 가용량이 1씩 증가한 데이터 셋(CAP +1)을 생성하였다. 이들 데이터셋과 Basic 데이터셋의 차이는 오직 가용량의 차이 뿐이다. CAP -1 데이터셋과 CAP +1인 데이터셋으로의 모의실험 결과는 [표 5-6]과 같다.

[표 5-6] CAP -1 데이터셋 및 CAP +1인 데이터셋 모의실험 결과

문제 번호	CAP -1		Basic 데이터셋		CAP +1	
	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값	연산 시간	최적해값
1	6	777	311	799	2,691	999
2	15	634	269	899	1,219	967
3	44	740	108	753	176	1,011
4	168	847	528	1,081	3,600+ *)	N/A
5	301	590	983	756	3,600+ *)	N/A
6	7	562	13	720	543	844
7	2	415	19	553	93	623
8	1	557	22	600	249	832
9	28	892	171	956	1,314	1,255
10	14	631	53	703	716	798
평균	59		248		N/A	
최대	301		983		3,600+ *)	
최소	1		13		93	

*) 연산 제한 시간 3,600초를 초과함을 의미한다.

Basic 데이터셋에 비해 자원 가용량이 1씩 감소한 CAP -1의 경우, 연산 시간의 평균은 Basic 데이터셋에 대비하여 24% 수준으로 감소하였다. 반면 Basic 데이터셋 대비 자원 가용량이 1씩 증가한 CAP +1의 경우, 연산 시간은 크게 증가하였으며, 제한 시간 이내에 풀지 못한 문제는 2개 발생하였다.

제 6 장 결 론

본 논문은 주어진 제안서 제출 납기 내에서 제안 프로젝트를 구성하는 각 활동기간을 연장하거나, 자원 내에서 자원을 추가 투입하면 제안 품질이 향상되고 이어 해당 사업의 수주확률(수주가능성)이 높아진다는 전제로 출발하였다. 이를 입증하기 위해 프로젝트 선정의 조합 문제인 포트폴리오 기법과 자원제약하의 일정수립에 관한 문제인 RCPSP를 이용하여 기대수익을 최대화하는 프로젝트 조합을 구하는 최적해 알고리즘을 제시하였으며, 모의실험을 통하여 제시된 알고리즘이 유효하다는 것을 입증하였다.

6.1 연구의 결과

본 연구에서 해공간의 크기는 전형적인 NP-Hard로 정의될 정도로 막대하므로 다양한 개선규칙(Bounding rule)들을 사용하여 해공간의 탐색범위를 획기적으로 축소시켰다. 본 연구는 일양분포로 생성된 데이터를 기반으로 제안 프로젝트 포트폴리오를 구성하는 최적해 알고리즘을 구현하였다.

본 연구에서 제시한 최적해 기법은 아래와 같은 절차로 구현하였다. 첫째, 의사결정 변수 x_p , y_{pq} , z_{pqim} , u_{pqim} 의 모든 해 영역을 체계적으로 생성한다. 둘째, 해 영역으로부터 선정된 프로젝트의 각 활동의 종료시기와 수행기간을 계산하고, 자원제약을 준수여부를 검토한다. 그리고 모든 제약조건을 충족하면, 목적함수값을 구한다. 셋째, 실행 가능한 조합 중에 목적함수값을 최대화하는 조합이 최적해가 된다.

단, 모든 해 영역을 검토하는 데에 있어, 실행가능한 해가 존재하지 않은 해 영역 또는 현재의 해보다 개선된 해가 존재하지 않는 해 영역을 체계적

으로 제거하여, 전체를 탐색하는 데 소요되는 연산 시간을 줄이는 기법인 개선규칙들을 사용하여 연산의 효율을 높였다.

알고리즘을 구현한 순서는 1) 단위기간 당 p 번째 프로젝트가 q 번째 프로젝트 모드로 수행되고 활동 i 가 m 번째 모드로 수행될 때, 연장 기간 당 발생하는 수주 확률 증가분 $Prob_{pqim}^+$ 를 구하였다. 2) 산출된 $Prob_{pqim}^+$ 과 연장된 단위기간을 곱하여 누적하고 이를 최초 예상 수주확률 $Prob_p$ 와 합산한다. 3) 이렇게 하여 도출된 최종 수주확률과 $x_p=1$ 인 선정된 프로젝트의 기대수익을 곱하여 이 기대수익의 총합이 최대인 최적해를 구하였다.

구현된 알고리즘으로 모의실험을 수행하였고, Basic 데이터셋은 후보 제안프로젝트 수 14, 프로젝트 실행모드 2, 활동 4, 활동모드 2, 자원종류 6으로 설정하였다. 연산의 제한시간은 3,600초로 정하였고 Basic 데이터셋으로 10회 실험하였을 때, 10회 모두 제한시간 내에 최적해를 구하였고 평균 연산시간은 247.7초를 기록하였다.

Basic 데이터셋의 모의실험 결과를 기준으로 후보 제안 프로젝트 개수 (P), 프로젝트 모드의 수(Q_p), 활동모드의 수(M_{pqi}) 등의 계수값을 조정하면서 실험을 수행하였다. 이 때 계수값의 크기는 기본보다 ± 1 , 또는 ± 2 씩 가감 조정하여 실험하였다. 수행한 모의실험 중 하나인 프로젝트 크기를 예를 들면, 제안 프로젝트 크기를 기본값($P=14$)로 하였을 때와 2를 감소시킨 $P=12$ 의 경우, 평균 연산시간은 247.7초에서 58.0초로 크게 감소하였고, 반대로 2를 증가시킨 $P=16$ 의 경우 평균 연산시간은 산출할 수 없을 정도로 폭증하였다. 다른 모의실험의 경우 역시, 계수값을 줄이면 연산시간이 크게 줄었고, 계수값을 늘이면 연산시간이 크게 증가하여 연산 제한시간 3,600초 내에 최적해를 구하지 못하는 경우도 발생하였다.

본 연구에서 수행한 5가지의 모의실험 결과는 모두 계수값을 증가시켜 해 영역을 확장시키면 연산시간은 기하급수적으로 증가함을 보였다.

6.2 연구의 시사점

본 연구는 전술한 제안 프로젝트의 특징을 최적해 알고리즘에 반영하였다는 것에 의의가 있다. R&D 프로젝트의 경우, 선행 프로젝트의 산출물이 후행 프로젝트에 영향을 주는 등, 프로젝트간 상호의존성(interdependent)이 존재한다. 이를 감안하여 프로젝트 포트폴리오를 재구성하는 알고리즘에 관한 선행 연구(Huang & Zhao, 2014)가 존재한다. 반면, 제안 프로젝트는 프로젝트간의 상호의존성이 존재하지 않으며, 다만 가용자원에 대한 제약만이 존재한다. 이러한 제안 프로젝트의 특성, 즉, 프로젝트들이 독립적이며, 제안 프로젝트 수행팀원이 제안 마감일까지 제안 작업을 수행한다는 점, 일정수립이 제안마감일을 기준으로 역방향(backward)으로 수립되고, 여유시간(slack)을 허용하지 않는다는 점을 본 알고리즘에 반영하였다. 특히, 프로젝트 모드라는 새로운 독립변수를 설정하고 RCPSP 기법을 통해 프로젝트 선택(Project Selection)문제와 포트폴리오 문제를 병렬시키는 방안을 모색한 것은 기존 선행연구에는 없는 진일보한 방식이다.

본 연구는 막대한 수의 전체 해 영역에서 기대가치의 총합을 최대화하는 시퀀스(조합)를 찾는 프로젝트 포트폴리오 최적해 도출 알고리즘을 제시하되, 상기한 제안 프로젝트의 특징을 반영하여 새롭게 제시하였다는 점, 수작업 또는 Excel 수식으로는 불가능한 작업이 본 알고리즘을 통해 적절한 연산 시간 내에 최적해를 도출했다는 점에서 학술적 의의가 있다.

프로젝트의 일정수립에서 RCPSP가 매우 현실적이고 과학적인 대안임을 고려하면 실제 기업환경에서 자원제약을 고려한 프로젝트 포트폴리오를 수립하거나 일정을 분석할 때에도 도움이 될 수 있다.

본 알고리즘을 기반으로 실시간 제안 프로젝트 포트폴리오 Simulation이 수행된다면, 이를 통해 주어진 자원 내에서 다양한 조건들을 종합적으로 판단하여 실제 입찰에 참여할 제안 프로젝트를 합리적으로 선정할 수

있을 것이며, 수시로 변화하는 기업환경에서 과학적이고 신속한 입찰 참여 의사결정이 가능할 것이다. 또한 경영진, 영업조직, 기술조직 등 다양한 이해관계자이 이를 바탕으로 일정 및 자원 재조정 등 원활한 의사소통 역시 촉진될 것이다. 본 알고리즘을 바탕으로 적절한 사용자 Interface를 가진 의사결정지원시스템(DSS, Decision Support System)기반의 제안 프로젝트 포트폴리오 프로그램이 개발된다면 실용적으로 기업 비즈니스에 많은 도움이 될 것이다.

6.3 연구의 한계 및 향후 연구과제

본 연구가 갖는 학술적 의의도 불구하고 몇 가지 한계 및 향후 과제를 가지고 있다. 첫째, 제안 프로젝트에서 발생 가능한 여러 가지 불확실성을 감안한 알고리즘의 개발이 필요하다. 관련하여 예상되어지는 불확실성은 다음과 같다. 해당 분기 내에 발주될 것으로 예측된 사업 발주가 여러 가지 사정으로 지연되는 경우, 입찰 참여 결정으로 제안 프로젝트가 수행되는 도중에 영업 환경의 변화로 제안 프로젝트가 중단되는 경우, 본 프로젝트 투입 등 가용 인력자원이 크게 감소하는 경우 등의 불확실성이 상존하는 것이다.

둘째, 본 연구는 해 공간의 크기가 커지면 최적해를 산출하는 데 소요되는 연산 시간 역시 급증하는 NP-Hard Class의 문제를 다루므로, 향후 최적해 방식이 아닌 휴리스틱 방식의 알고리즘 구현이 필요하다. 본 연구의 최적해 방식을 통한 결과 값과 향후 휴리스틱 방식으로 나온 결과 값을 비교, 분석하는 것도 학술적으로 매우 유용한 작업이 될 것이다.

본 연구의 모의실험에서 사용된 데이터는 가상의 자료로 현실과 차이가 있을 수 있다. 위에서 언급한 다양한 불확실성을 반영한 연구 등 본 연구에서 다루지 못한 부분에 대해 추가적인 연구가 지속적으로 요청된다.

참 고 문 헌

[국내 문헌]

- 김갑식. (2016). 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정계획에서 활동의 품질과 기간과 및 비용 간 트레이드오프문제: 선택 가능한 모드가 복수인 경우. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 김동욱, 이원영. (2018). 유전자 알고리즘을 이용한 프로젝트 포트폴리오 투입인력 최적화 모델에 관한 연구. 한국IT서비스학회지 제17권 제4호, pp. 101~117
- 김홍진. (2014). 입찰전쟁에서 승리하는 제안의 기술. 프리렉. p.2
- 남재덕. (2008). 프로젝트 포트폴리오 평가 문제: 불확실성 하의 최초 구성 및 주기적 개장을 중심으로. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 류현주, 박민영. (2009). 고객을 사로잡는 매력적인 제안서와 창의적인 제안팀 이야기. 한빛미디어.
- 민택기. (2005). 프로젝트 포트폴리오 평가문제: 시뮬레이션을 이용한 다속성 평가를 중심으로. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 박상우. (2013). 수주의 기술. 비즈니스아츠. p.95
- 백인섭. (2020). 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정문제 : 재작업 가능한 활동이 있는 경우. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.
- 안태호. (2003). 프로젝트 일정관리기법을 활용한 전략적 의사결정모형. 경영정보연구, 대한경영정보학회, 제13호, pp. 127-140, 2003.
- 안태호. (2007). R&D 프로젝트 포트폴리오 구성 휴리스틱 기법. 숭실대학교 사회과학연구원 사회과학논총 제9집, pp. 183-195.

오석현, 오민정, 김승철. (2018). 프로젝트 포트폴리오관리가 기업 경쟁우위와 프로젝트의 기업전략 연계성에 미치는 영향 분석. 글로벌경영학회지 제15권 제3호, pp. 81~101

이현기. (2017). 자원 제약을 고려한 프로젝트 일정문제: 기간 단축이 가능한 복수의 모드를 갖고 자원의 가용량을 변경할 수 있는 경우. 숭실대학교 대학원 박사학위논문.

최용수. (2012). 이기는 제안서의 비밀. 라온북. p.24

[국외 문헌]

Project Management Institute (PMI). (2017). A Guide To The Project Management Body Of Knowledge - sixth ed. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.

Ahn, T., & Erenguc, S. S. (1995). The resource constrained project scheduling problem with multiple crashable modes: An exact solution method. Working Paper Series in Department of Decision and Information Sciences, University of Florida, pp. 95-101.

Ahn, T. and Erenguc, S.S. (1998). The Resource Constrained Project Scheduling Problem with Multiple Crashable Modes: A Heuristic Procedure. European Journal of Operation Research, Vol. 107, No. 2, pp. 250-259, 1998.

Alsayegh, H., & Hariga, M. (2012). Hybrid meta-heuristic methods for the multi-resource leveling problem with activity splitting. Automation in Construction, 27(1), pp. 89-98.

Archer, N.P. & Ghasemzadeh, F., (1999). An integrated framework for

- project portfolio selection. *International Journal of Project Management*, 17(4), pp. 207–216, 1999.
- Blazewicz, J. (1978). Complexity of computer scheduling algorithms under resource constraints. In *Proc. First Meeting AFCET-SMF on Applied Mathematics*, 16(6), pp. 169–178.
- Blichfeldt, B.S. and Eskerod, P., "Project portfolio management . There's more to it than what management enacts", *International Journal of Project Management* 26, pp. 357–365, 2008.
- Bowman, E. H. (1959). The schedule–sequencing problem. *Operations Research*, 7(5), pp. 621–624.
- 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, pp. 897 - 912.
- Chua Z., Xua Z., & Lib H. (2019). New heuristics for the RCPSP with multiple overlapping modes. *Computers & Industrial Engineering*, 131, pp. 146 - 156.
- Coughlan, E. T., Lübbecke, M. E., & Schulz, J. (2010). A branch-and-price algorithm for multi-mode resource leveling. In: Festa P. (eds) *Experimental Algorithms. SEA 2010. Lecture Notes in Computer Science*, 6049, pp. 226–238. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Davis, E. W. (1973). Project scheduling under resource constraints historical review and categorization of produres. *AIIE Transactions*,

5(4), pp. 297–313.

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

De Reyck, B., Demeulemeester, E., & Herroelen, W. (1998). Local search methods for the discrete time/resource trade-off problem in project networks. *Naval Research Logistics Quarterly*, 45(1), pp. 553–578.

Debels, D., & Vanhoucke, M. (2007). A decomposition-based genetic algorithm for the resource-constrained project-scheduling problem. *Operations Research*, 55(3), pp. 457–469.

Demeulemeester, E., De Reyck, B., & Herroelen, W. (2000). The discrete time/resource trade-off problem in project networks: a branch-and-bound approach. *IIE Transactions*, 32(11), pp. 1059–1069.

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), pp. 642–653.

Habibi, F., Barzinpour, F., Sadjadi, S.J., 2019. A mathematical model for project scheduling and material ordering problem with sustainability considerations: a case study in Iran. *Comput. Ind. Eng.* 128, 690–710.

Hassanzadeh, F., Modarres, M., Nemati, H.R., Amoako-Gyampah, K.,

2014. A robust R&D project portfolio optimization model for pharmaceutical contract research organizations. *Int. J. Prod. Econ.* 158, 18-27.
- Huang, X., Zhao, T., 2014. Project selection and scheduling with uncertain net income and investment cost. *Appl. Math. Comput.* 247, 61-71.
- I Astana, HA Rusdi, MA Wibowo. (2015). Conceptual Framework of Bidding Strategy in Order to Improve Construction Project Performance. *Applied Mechanics and Materials* (Volume 776). pp. 108-113
- Johnson, T. J. R. (1967). An algorithm for the resource constrained project scheduling problem (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology). Cambridge.
- Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path Planning And Scheduling. In *Papers presented at the December 1-3, 1959, eastern joint IRE-AIEE-ACM computer conference*, pp. 160-173.
- Lewis & Harold. (2012). *Bids, Tenders and Proposals : Winning Business Through Best Practice*. Kogan Page.
- Li, C., & Lim, A. (2018). A greedy aggregation - decomposition method for intermittent demand forecasting in fashion retailing, *European Journal of Operational Research*, 269(3), pp. 860-869.
- Li, H., & Demeulemeester, E. (2016). A genetic algorithm for the robust resource leveling problem. *Journal of Scheduling*, 19(1), pp. 43-60.

- Li, H.-B.1 Chen, Y.1 Li, H.2. (2008). Application of portfolio management to bidding decision-making. Journal of Wuhan University of Technology.
- Liu, S.S., Wang, C.J., 2011. Optimizing project selection and scheduling problems with time-dependent resource constraints. Autom. ConStruct. 20, 1110-1119.
- Malcolm, D. G., J. H. Roseboom, C. E. Clark & W. Frazar. (1959). Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. Operations Research, 7(5), pp. 646-669.
- Naber, A., & Kolisch, R. (2014). MIP Models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles, European Journal of Operational Research, 239(2), pp. 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), pp. 227-242.
- Patterson, J. H., & Huber, W. H. (1974). A horizon-varying, zero-one approach to project scheduling. Management Science, 20(6), pp. 990-998.
- Patterson, J. H., & Roth, G. (1976). Scheduling a project under multiple resource constraints: a zero-one approach. AIIE Transactions, 8(4), pp. 449-456.
- Patterson, J. H., Slowinski, R., Talbot, F. B., & Weglarz, J. (1989). An algorithm for a general class of precedence and resource

- constrained scheduling problems. *Advances in Project Scheduling*, 187(1), pp. 3-28.
- 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), pp. 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, pp. 395 - 416
- Pritsker, A. A. B. (1966). GERT Graphical evaluation and review technique. Memorandum RM-4973-NASA, Rand Corporation.
- Santhanam, R., Muralidhar, K., Schniederjans, M., 1989. A zero-one goal programming approach for information system project selection. *Omega* 17, 583-593.
- Scharge, L. (1970). Solving resource-constrained network problems by implicit enumeration - non-preemptive case. *Operation Research*, 18(2), pp. 263-278.
- Semaan, N. and Salem, M. (2017). A deterministic contractor selection decision support system for competitive bidding. *Engineering, Construction and Architectural Management*. Vol. 24 No. 1, pp. 61-77.
- Shariatmadari, M., Nahavandi, N., Zegordi, S.H., Sobhiyah, M.H., 2017.

- Integrated resource management for simultaneous project selection and scheduling. *Comput. Ind. Eng.* 109, 39-47.
- Slowinski, R., Soniewicki, B., & Węglarz, J. (1994). DSS for multi-objective project scheduling. *European Journal of Operational Research*, 79(2), pp. 220-229.
- Speranza, M. G., & Vercellis, C. (1993). Hierarchical models for multi-project planning and scheduling. *European Journal of Operational Research*, 64(1), pp. 312-325.
- Sprecher, A. (1994). Resource-constrained project scheduling: Exact methods for the multi-mode case. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Vol. 409, Berlin: Springer-Verlag.
- Sprecher, A. (1994). Resource-constrained project scheduling: Exact methods for the multi-mode case. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Vol. 409, Berlin: Springer-Verlag.
- Sprecher, A. (2002). Network Decomposition Techniques for Resource Constrained Project Scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 53(4), pp. 405-414.
- Stinson, J. P., Davis, E. W., & Khumawala, B. M. (1978). Multiple resource - constrained scheduling using branch and bound. *AIIE Transactions*, 10(3), pp. 252-259.
- Takano, Y., Ishii, N. & Muraki, M. Multi-period resource allocation for estimating project costs in competitive bidding. *Cent Eur J Oper Res* 25, 303 - 323 (2017).
- Talbot, F. B. (1982). Resource-constrained project scheduling problem

- with time-resource trade-offs: the non-preemptive case. *Management Science*, 28(1), pp. 1197-1210.
- Wagner, H. (1959). An integer programming model for machine scheduling. *Naval Research Logistics Quarterly*, 6(1), pp. 131-140.
- Wang, J., Hwang, W.L., 2007. A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real options valuation model. *Omega* 35, 247-257
- Weglarz, J. (1979). Project scheduling with discrete and continuous resources. *IEEE Transactions on Systems*, 9(10), pp. 644-650.
- WU Xiao-hui. (2005). AHP Estimation Method for Bidding Project Selection of Road Design. *Journal of Guangdong Commication Polytechnic*. 2005-04
- Yongyi Shou. (2006). A Bidding Mechanism for Resource Constrained R&D Project Selection. 2006 IEEE International Conference on. 2:685-688 Jun, 2006
- Zhang, Xian. (2010). The Study on the Strategy of Bidding Project Selection Based on Fuzzy AHP in Network-Based Manufacturing. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 29 - 32, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2010. pp. 2345 - 2349