一般論文

유조선의 최적 운항일정계획

주재훈* • 김기석**

An Optimization of Crude Oil Tanker Scheduling Problems

Jae-Hun Joo* • Ki-Seog Kim**

목 차

Abstract

This paper presents an efficient optimization algorithm for the crude oil tanker scheduling problem. The algorithm consists of two stages. In stage one, all the potentially optimal schedules (called 'candidate schedules') are generated from feasible schedules for each ship. In the second stage, a multiple ship scheduling problem is formulated as 0-1 integer programming problem considering only those candidate schedules.

The efficiency of the suggested algorithm was improved by exploiting the special structure of the formulation. The algorithm was illustrated by a numerical example and tested on practical ship scheduling problems.

1. 서 론

선박 운항일정계획문제(ship scheduling problem)란 선박, 화물, 항만 및 해상·기상조건 등을 고려하여 운항비용의 최소화(또는 운항이익의 최대화)를 목표로 항구간 화물의 수송순서를

*부산대학교 경영학과 강사

**부산대학교 경영학과 교수

결정하는 문제로서, 적화항과 양화항의 방문 순서와 각 항구에의 입·출항시간 및 하역시간을 결정하는 것이다. 선박운항으로 매일 소요되는 비용이 막대한 만큼 최적 운항일정계획을 수립하는 문제는 대단히 중요하다. 그러나 선박 운항일정계획은 여러 예기치못한 사태로 지연되기도 하는 등 많은 불확실성이 내재되어 매우 복잡하다.

선박의 운항형태는 일반적으로 정기선운항(liner operation), 부정기선운항(tramp operation), 화주직접운항(industrial operation)으로 구분되며, 이에 따라 그 복잡도가 상이하다. 대체적으로 방문할 항구가 고정되어 있고 수요가 안정적인 정기선 운항의 일정계획문제가 부정기선 운항의 경우보다 용이하다. 유조선운항과 같은 화주직접운항형태의 경우는 그 중간 정도의 복잡도를 갖는다고 할 수 있다.

유조선 운항일정문제를 중심으로 지금까지의 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Dantzig와 Fulkerson(1954)은 적화항과 양화항이 각각 하나인 경우, 고정된 일정을 만족시킬 수 있는 유조선의 척수를 최소로 하는 선대구성 문제를 고찰하였다. 그리고 Appelgren(1971)는 일정기간동안 주어진 선대의 각 선박에 화물의 최적 수송순서를 결정하는 문제를 고찰하였다. 즉, 그는 화물의 양, 화물의 종류, 적·양화항, 적·양화시간, 그리고 각 선박의 초기상태를 알고 있다고 가정하고, 단일의 적화항에서 다수의 양화항까지 화물수송에 의한 총공헌이익을 최대로 하는 일정계획모형을 제시하고 단치히-울프의 분해기법(Dantzig-Wolfe decomposition)과 분단탐색법(branch and bound algorithm)을 적용하여 최적해를 도출하고자 했다. Ronen(1985)은 단일의 적화항에서 다수의 양화항까지 산적화물을 수송하는 일항차의 선박일정문제를 운항비의 최소관점에서 분석했다. 여기서 그는 이 문제 해결을 위해 발견적 해법(heuristic single step cost minimization algorithm)과 최적해법(exact algorithm) 그리고 편의무작위해법(biased random algorithm)을 제시했다. Brown, Graves 그리고 Ronen(1987)은 중동지역에서 북미대서양에 이르는 원유수송 일정계획문제를 분석하고 이를 탄력적 집합분할문제(elastic set-partitioning problem)로 모형화했다. 이 연구에서는 선박이용으로 인한 기회비용, 항비와 운하통과비, 체선료 및 연료비를 고려하여 공선항해의 최적속력과 공선항해의 항로의 결정 그리고 항해용선의 결정문제를 고찰하였다. Fisher와 Rosenwein(1989)은 선적화물과 원유수송선의 일정문제를 공헌이익의 최대화기준에 의해 집합패킹문제(set-packing problem)로 모형화하고 이를 쌍대해법(dual algorithm)으로 최적 스케줄을 찾고자 했다.

본 연구에서는 우리나라 유조선 운항회사의 일정계획문제를 분석한 뒤, 최적 운항일정계획수립을 위한 접근법을 제시한다. 본 연구에서의 접근법은 두 단계, 즉 후보 스케줄(candidate schedules)의 산출단계와 최적 스케줄(optimal schedule)의 산출단계로 구성되어 있다.

첫째 단계인 후보 스케줄을 산출하는 기본적인 절차는 다음과 같다. 먼저 각 선박에 대한 모든 가능한 스케줄(possible schedules)을 고려 대상으로 하여 물리적 조건(또한 운항조건)을 만족하는 실행가능 스케줄(feasible schedules)을 산출한다. 둘째, 이들 실행가능 스케줄에 적절한 지배원리를 적용하여 최적의 가능성을 내포한 후보 스케줄(candidate scahdules)을 산출한다. 이 단계에서 선박과 항구 그리고 화물의 수가 증가함에 따라 실행가능 스케줄의 수가 증가할 것으로 보인다. 하지만 본 연구에서는 선박운항에 따른 여러 복잡한 제약조건들을 이용하므로써 일차적으로 실행가능 스케줄의 수를 취급가능한 범위내로 감소시키고 한자.

둘째 단계에서는 먼저 선박별 이들 후보 스케줄을 이용하여 일정문제를 운항비를 최소로 하는 0-1 정수계획문제로 정식화하여 최적해를 산출한다.

본 연구에서는 이 수리적 모형이 갖는 특수한 구조를 이용하는 최적해법을 제시하고 이 해법에 의하여 선박별 최적 스케줄을 산출하고자 한다.

또한 본 연구에서는 간단한 유조선 운항일정문제의 수치예를 제시하고, Y해운사의 선박운항일정문제에 2단계 접근법을 적용하고자 한다.

2. 유조선 운항일정계획의 성격

대부분의 유조선 운항선사는 선박을 직접 보유하거나 정기용선 혹은 연속항해용선(consecutive voyage charter)에 의하여 원유를 수송하는데, 대체로 적화항까지는 공선운항을, 적화항에서 양화항까지는 만선운항을 한다. 수송수요는 비교적 예측이 용이하고 안정적이며 공급지와 수요지는 원거리로 떨어져 있고 인접해 있는 다수의 공급지에서 인접해 있는 다수의 수요지에 원유를 수송하게 된다.

우리나라의 주요 유조선 운항선사로는 유공해운과 호남정유가 있으며, 이들 선사는 페르시아만(Persian Gulf)의 다수 공급지에서 울산과 인천 두 항구로 원유를 수송하고 있다.

유조선의 운항일정계획수립시 고려해야 할 요인과 본 연구에서 이들 요인을 고려하는 정도는 다음과 같다.

(1) 선박조건

1) 선대규모 : 선사가 보유하고 있는 선박과 정기용선(time charter)에 의한 선박은 일정계획수립시 통제하에 있는 선박으로 간주하고 통제하의 선박에 의해 운송이 불가능한 나머지 화물은 항해용선으로 운송한다.

2) 선박의 크기 : 최대적화톤수, 전장, 선폭, 흘수 등은 일정계획수립시 물리적 제약조건이 된다.

3) 하역설비 : 육상의 하역설비 이용이 불가능한 경우 본선의 하역설비를 이용하게 되며, 선박별 하역시간의 차이는 운항비에 영향을 준다.

4) 운하 통과 여부 : 선박의 크기 및 공선과 만선운항시에 따라 운하의 통과가능여부가 결정되고 항해거리에 영향을 주어 운항비에도 영향을 준다. 본 연구에서는 운하통과 여부는 고려대상에서 제외하였다.

5) 선박의 이용가능성(정기검사, 계선)

6) 선속 : 항해중 연료의 소모량은 대체로 선속의 3승에 비례하여 운항비에 커다란 영향을 준다. 또한 공선항해와 만선항해에 따라서도 연료의 소모량은 달라진다.

7) 선박의 초기위치 : 선박의 초기상태가 항해중이거나 항구에서 하역 작업중이거나 계선 혹은 정기검사 중이건 어떤 상황에서도 일정계획수립이 가능해야 한다.

(2) 항만조건

1) 항해가능 수심 : 항구의 제한된 수심은 선대를 구성하는 각 선박의 입·출항에 영향을 주고, 또한 적·양화톤수에도 영향을 준다.

2) 하역설비 : 항구에 따라 하역능력이 상이할 수 있다.

3) 항구간의 거리 : 같은 두 항구간에도 주항시와 복항시의 항해거리는 다를 수 있다.

4) 항내 조선시간, 접안시간 및 하역시간 : 각 항구별 도선사에 의한 조선시간과 접안시간 및 톤당 하역시간을 추정한다. 또한 공휴일의 작업여부와 작업시간도 일정계획수립에 영향을 준다. 본 연구에서는 공휴일도 언제나 작업이 가능하다고 전제하였다.

5) 간만의 차 : 어떤 항구에 어떤 선박의 입·

출항여부가 만조와 간조에 따라 다를 수 있다. 이로 인한 입·출항의 대기시간이 필요하다. 하지만 본 연구에서는 간만의 차를 고려하지 않았고 운항가능 최소수심을 전제조건으로 하였다.

6) 검역, 세관, 연료 및 윤활유의 공급, 급수, 선식, 선용품의 공급 : 본 연구에서는 이들 모든 조건이 동일한 것으로 간주한다.

(3) 화물조건

1) 화물의 종류 : 본 연구에서는 수송하는 원유는 단일 종류이므로 차항차(next voyage) 수송화물에 영향을 주지 않는다고 간주한다.

2) 화물량 및 적·양화항

3) 만선 혹은 부분적

4) 용선가능 여부 : 집화된 화물량이 통제하에 있는 선박의 수송능력을 초과하는 경우, 그 초과되는 화물은 항해용선에 의해 수송이 가능하다. 항해용선이 불가능한 화물이나 필수적으로 통제하의 선박에 의해 운송해야 할 화물을 명시할 수도 있다.

5) 인도시기 : 각 화물의 적·양화시간이 주어지고, 필요한 경우 각 화물의 가장빠른 적·양화시간과 가장 늦은 적·양화시간을 명시할 수도 있다.

(4) 해상·기상 조건

1) 악천후 및 태풍으로 인한 지연

2) 항해중 환자의 발생으로 인한 항로의 이탈

본 연구에서는 상기의 우발적 요인이 일정문제에 미치는 영향을 간접적 방법으로 고려하였다. 즉, 해상·기상조건으로 일정에 변화가 발생하는 경우 그 시점에서 다시 변화된 상태를 입력하여 재일정계획이 수립될 수 있도록 한다(일종의 연동식 일정계획 : Rolling Scheduling이 가능함).

(5) 의사결정기준과 의사결정사항

1) 의사결정기준 : 비용 최소화기준, 이익 최대화 기준, 선대 이용도 최대화 기준 등이 있다. 유조선 운항의 형태는 대체로 화주가 직접 선박을 보유하거나 용선하여 필요한 화물을 수송하는 화주직접운항형태를 취하고 있어 비용 최소화 기준이 가장 적절하다고 볼 수 있다. 비용기준의 경우에 있어서도 다음의 비용을 고려하는 정도가 상이 할 수 있다.

• 고정비(선비)

직접선비 : 선원비, 선용품비, 수리비, 윤활유비, 일반관리비 등.

간접선비 : 설비금리, 선박보험료, 선박세, 선박감가상각비 등.

• 가변비 : 연료비, 항비, 화물비, 도선료, 중개 혹은 집화수수료, 운항대리점비, 체선료 등.

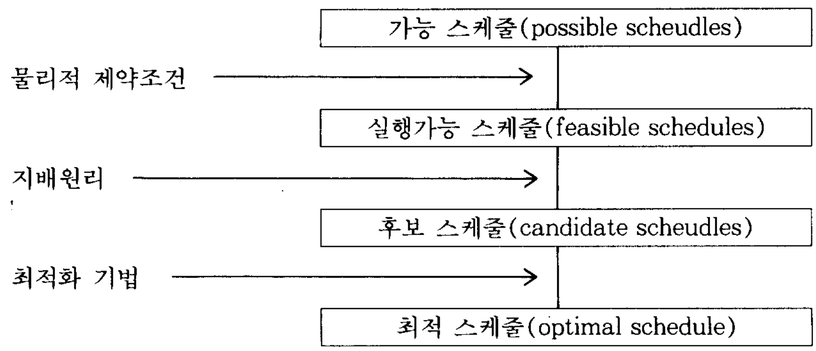
본 연구에서는 연료비, 항비, 화물비, 도선료 및 부분적 운항으로 인한 기회비용의 합으로 나타나는 운항비를 최소로 하는 선박별 일정계획을 수립하고자 한다.

2) 의사결정사항 : 각 선박의 운송해야 할 화물의 순서 즉, 방문해야 할 항구의 순서결정 및 각 항구에서의 입·출항 시간의 결정, 선속의 결정. 만선운항시의 선속은 화물의 인도시기에 의하여 결정된다고 볼 수 있으나 공선항해시의 선속은 연료소모량과의 관계에서 결정해야 한다. 본 연구에서는 연료소모량은 선속의 3승에 비례한다고 가정하고 공선항해의 선속을 결정한다 [최적 선속의 결정문제는 Papadakis와 Perakis (1989)의 논문을 참조하라]. 또한 항해용선에 의하여 수송해야 할 화물의 양을 결정해야 한다.

3. 후보 스케줄의 산출

본 연구에서는 유조선 일정계획문제의 성격을 고려하여 선박의 일 항차에 해당하는 약 2개월

정도를 계획대상기간으로 설정하여 (그림 1)과 같은 절차에 따라 최적의 스케줄을 발견하고자 한다.



(그림 1) 일정문제의 해결절차

3.1. 실행가능 스케줄의 산출

어떤 선박의 운송대상이 되는 화물의 수가 m 이라고 하면, 모든 가능한 화물의 운송순서. 즉 가능 스케줄(possible schedules)수는 $\sum_{i=1}^{m} {}_mP_i$ 개로 대단히 복잡하다. 그러나 선박과 화물 그리고 항구와 관련된 물리적 제약조건을 만족하는 실행가능 스케줄(feasible schedules)의 수는 그에 비하여 상당히 감소한다.

각 선박의 실행가능 스케줄을 산출하기 위해서는 다음의 정보가 필요하다. 첫째, 선대의 규모와 선박의 크기, 선속(공선항해시의 최대속력, 만선항해시의 최대속력, 서비스속력 등), 최대 흘수, 초기상태(항해중, 정박중, 정기검사 혹은 계선), 초기의 적화상태 등의 선박조건. 둘째, 화물의 수, 화물의 양, 적화항, 양화항, 화물의 인도시기 등의 화물조건. 셋째, 각 항구의 수심, 항구간의 거리, 각 항구에서의 접안시기 및 도선시간 등의 항구조건. 넷째, 선박별, 선박/항구별 운항관련 비용. 한편 이러한 정보는 실행가능 스케줄을 산출하는데 물리적 제약조건으로 이용된다.

본 연구에서 고려하는 물리적 제약조건은 다음과 같다.

조건 1) 선박의 적재톤수가 최대적화톤수를 초과해서는 안된다.

조건 2) 현 적재톤수에 의한 선박의 흘수가 적·양화항의 운항가능 최소수심을 초과해서는 안된다.

조건 3) 적·양화항에의 도착시간이 해당 화물의 가장 늦은 적·양화시간을 초과해서는 안된다.

조건 4) 화물의 양화완료시간이 선박의 이용가능시간과 계획대상기간내에 있어야 한다.

조건 5) 적·양화를 위한 대기시간이 허용시간을 초과해서는 안된다.

이와 같은 물리적 조건을 만족하는 실행가능 스케줄을 산출하는 스케줄 발생기의 개략적인 원리는 (부록)에 제시되어 있다. 역서 고려해야 할 중요한 한 요인은 모든 실행가능 스케줄을 빠짐없이 발생시켜야 하며, 또한 중복 발생되지 않도록 해야 한다는 점이다.

3.2. 후보 스케줄의 산출

스케줄 발생기에 의한 선박별 실행가능 스케줄은 모든 물리적 조건을 만족하는 스케줄이다. 한편 어떤 선박의 실행가능 스케줄로 운송하는 화물은 같으나 수송순서만 다른 2개 이상의 실행가능 스케줄이 산출될 수 있는데, 이들 스케줄 중에서 하나의 스케줄이 다른 스케줄을 지배(dominate)하게 된다. 따라서 선박별 실행가능 스케줄의 운항비를 산출하여 피지배 스케줄(dominated schedules)을 제거하고 최적의 가능성을 내재한 스케줄, 즉 후보 스케줄(candidate schedules)을 선별할 필요가 있다.

따라서 스케줄 발생기의 중요한 한 구성요인은 각 실행가능 스케줄의 운항비를 산출하는 부프로그램이다. 지배원리의 한 기준으로 운항거리를 고려하여 보았으나 이는 선속이 운항비에 미치는 영향을 고려하지 못하므로 채택하지 않았고, 연료소모량이 선속의 3승에 비례한다고 가정하고 운항비를 지배원리의 기준으로 채택하여 프로그램을 작성하였다.

또한 본 스케줄 발생기에서는 어떤 화물을 수송하기 위해 어떤 항구에서 대기해야 할 시간이 지정한 시간 이상인 경우, 그 화물은 해당 선박의 운송 가능 화물에서 제외시킬 수 있도록 하였다. 본 스케줄 발생기에서는 사용자가 임의로 그 기간을 명시할 수 있는 선택권을 부여하고 있다.

4. 최적 스케줄의 산출

4.1. 수리적 모형

각 선박의 후보 스케줄이 산출되면, 다음으로 각 선박의 최적 스케줄을 선택하여야 한다. 이 문제는 다음과 같은 0-1 정수 계획 문제로 정식화 할 수 있다.

(문제 1)

$$\min z = \sum_{i=1} \sum_{j \in S_i} c_{ij} x_{ij}$$

s.t.

$$\sum_{j \in S_i} x_{ij} = 1,\ i, \cdots, n \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in S_i} a_{ijk} x_{ij} \ \begin{matrix} \leqq \\ \text{or} \\ = \end{matrix} \ = 1, \quad k=1, \cdots, m \qquad (2)$$

$$x_{ij} = 0,\ 1,\ j \in S_i,\ i=1, \cdots, n \qquad (3)$$

위의 수리적 모형에서 사용한 기호는 다음과 같다.

n : 선박의 수.

m : 화물의 수.

x_{ij} : 선박 i가 후보 스케줄 j로 운항하는 경우에는 1의 값을 갖고, 아니면 0의 값을 갖는 이진변수.

S_i : 선박 i의 후보 스케줄 집합.

c_{ij} : 후보 스케줄 j로 선박 i를 운항하는 경우의 운항비.

a_{ijk} : 후보 스케줄 j로 선박 i를 운항할 때, 스케줄 j에 의해 화물 k를 수송하는 경우 1의 값을, 그렇지 않는 경우는 0의 값을 갖는 매개변수.

상기 수리적 모형에서 목적함수는 각 선박의 스케줄에 의한 총운항비를 최소화하고자 한다. 제약식 (1)은 계획대상기간동안 각 선박이 정확히 하나의 스케줄만을 선택하도록 하고 있다. 제약식 (2)는 각 화물이 정확히 하나의 선박, 하나의 스케줄에 의해 운송되어야함을 의미하는데, 제약식 (2)가 부등식(≤)인 경우는 해당 화물을 항해용선(spot charter)으로도 수송이 가능함을 의미한다. 그리고 제약식(2)가 등식(=)인 경우는 통제하의 선박으로 필히 수송되어야 함을 의미한다.

상기 수리적 모형은 0-1 정수계획문제인 만큼 기존의 해법을 이용하여 최적해를 구할 수 있다.

그러나 통제하의 선박이 n척이고 각 선박의 후보 스케줄이 s개라 가정하는 경우, 이 문제는 ns개의 이진변수를 갖는 정수계획문제이다. 따라서 s나 n이 증가함에 따라 문제의 규모가 방대하여 개인용 컴퓨터에서는 계산이 불가능하며 대형 컴퓨터에서도 상당한 계산시간을 요구할 것이다.

따라서 본 연구에서는 이 문제의 최적해를 효율적으로 산출하는 최적해법을 제시한다.

4.2. 해법

(문제 1)은 특수한 구조를 지닌 0-1 정수계획문제이다. 이 문제에서 선박 i와 관련된 각 변수집합을 하나의 구간으로 분할하면, 선박수에 상응하는 n개의 구간이 존재한다. (문제 1)의 제약식 (1)에 의해 각 구간에 있는 변수중 어느 하나의 변수가 1의 값을 갖고 나머지 변수는 0의 값을 가져야 한다.

변수 x_{ij}의 첨자 j를 구간별(선박별)로 구분하여 $j_i(i=i, \cdots, n)$라 하자(J_i는 선박 i의 후보 스케줄수에 해당한다). 그리고 식(2)의 화물제약식에서 변수 x_{ij}의 좌변계수가 1인 $k(k=1, \cdots, m)$의 집합(선박 i의 j번째 스케줄에 의해 운송되는 화물의 집합)을 S(i, j), 식(2)의 화물제약식이 등식인 k의 집합을 ESET이라 하자. 그러면 이 문제의 실행가능해가 되기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\text{i)}\ S(1, j)\cap S(2, j)\cap, \cdots, \cap S(n, j)=\phi \quad \forall j\in S_i,\ i=1, \cdots, n$$

$$\text{ii)}\ S(1, j)\cup S(2, j)\cup, \cdots, \cup S(n, j)>=ESET \quad \forall j\in S_i,\ i=1, \cdots, n$$

따라서 (문제 1)의 최적해를 도출하는 해절차는 다음과 같다.

기 호

List : 변수의 집합(후보 스케줄의 집합)

S(L) : 변수 x_{iL}의 계수가 1인 $k(k=1, \cdots, m)$의 집합(선박 i의 L번째 후보 스케줄에 의해 운송하는 화물집합)

S : List에 있는 변수로서 제약식 (2)의 좌편계수가 1인 제약식 k의 집합(List에 있는 후보 스케줄로 운송하는 화물의 집합)

T : List에 있는 변수의 목적함수계수의 합(List에 있는 후보 스케줄로 선박을 운항하는 경우의 총운항비)

해절차

단계 0) 초기화

$List=\phi,\ \bar{z}=\infty,\ i=0$

단계 1) 구간(선박)의 선택

$i=i+1$, $L=1$(구간 i의 첫번째 열)

단계 2) 구간 i의 각 변수에 대한 순차적 실행가능성조사(선박 i의 L번째 스케줄부터 순차적으로 각 스케줄의 실행가능성 조사)

구간 i의 L번째 열부터 순차적으로 다음 조건을 만족하는지 조사한다.

1) $S\cap S(L)=\phi$이고

2) $T+c_{iL}<\bar{z}$

1)과 2)를 만족하는 열 L가 존재하면, j=L로 두고 단계 3)으로 가고, 아니면 $i=i-1$로 두고 단계 4-1)로 간다.

단계 3) 해점검

$List=List+\{j\}$

i) $i<n$인 경우, 단계 1)로 간다.

ii) $i=n$이고 $S>=ESET$인 경우, $\bar{z}=T+c_{ij}$라 두고 단계 4-1)로 간다.

iii) 상기외의 경우, 단계 4-1)로 간다.

단계 4) 역행탐색(backtracking)

1) L=List에 있는 마지막 요소

$List=List-\{L\}$

L=L+1

2) $L \leq J_i$인 경우, 단계 2)로 가라.

$L <= J_i$인 경우 $i=i-1$로 두고, $i=0$ 이면 단계 5)로 가고 $i \neq 0$이면 단계 4-1)로 간다.

단계 5) 종료

$\bar{z}=\infty$인 경우에는 실행가능해가 존재하지 않는다.

$\bar{z}<\infty$인 경우에는 z를 산출한 List의 해가 최적해이다.

(문제 1)의 해가 존재하면, 최악의 경우(worst case)에도 이 해법에서는 $\prod^{n}_{i=1} J_i$번의 집합비교로 최적해를 구한다. 이 해법을 파스칼 언어로 구현하기 위하여 자료구조로는 스텍(stack)을 이용하였다. 이 해법을 구현한 부프로그램은 스케줄 발생기에 삽입되어 사용될 수 있도록 하였는데, 단지 4개의 필드(field)로 구성된 하나의 레코드로 정의된 스텍을 위한 저장량이 필요할 뿐이다. 따라서 컴퓨터 저장량의 관점에서도 이 해법은 대단히 효율적이다(연구목적으로 필요한 경우, 본 해법의 프로그램을 제공할 수 있다).

5. 수치예 및 적용

5.1. 수치예

수치예는 통제하의 선박이 2척(한척은 디젤기관의 선박이고, 다른 한척은 증기기관의 선박이라 가정한다), 적화항이 4개, 양화항이 2개, 그리고 화물의 수가 5개인 문제이다. 수치예의 선박, 화물, 항구관련 자료는 (표 1), (표 2), (표 3), (표 4)와 같다. 그리고 (표 2)에서 화물 4는 인도시기의 이유로 항해용선이 불가능하므로 통제하의 선박으로 필히 운송되어야 한다. 일반적으로 선박별 연료 소모량과 하역작업시간이 상이하고 각 항구의 항비도 상이하다. 한편 본 수치예에서 계산의 편리를 위해 각 선박의 모든 항구에서의 도선시간 및 접안시간 등은 1시간으로 동일하다고 가정하고 임의의 항구에서 허용가능한 대기시간은 80시간이라 가정한다. 또한 1991년 3월 1일 00시 현재, 각 선박은 P5항구에서 출항한다고 가정한다.

(표 1) 선박특성

선명	적화톤수(L/T)	최대흘수	최대속력(knots)	서비스속력
1	40,000	10.8m	14.5(15.5 : 공선시)	13.5
2	40,000	10.8m	14.5(15.5 : 공선시)	13.5

(표 2) 화물자료

번호	적화항	양화항	화물량(L/T)	가장 빠른 적화시간	가능 늦은 적화시간	가장 늦은 양화시간
1	P1	P5	20,000	3/16, 16:00	3/19, 14:00	4/5, 06:00
2	P2	P6	15,000	3/17, 02:00	3/19, 14:00	4/6, 12:00
3	P3	P5	20,000	3/17, 12:00	3/19, 14:00	4/5, 06:00
4	P3	P5	15,000	3/14, 14:00	3/18, 18:00	4/4, 05:00
5	P4	P6	25,000	3/15, 20:00	3/18, 18:00	4/5, 06:00

(표 3) 각 항구의 운항가능 수심

항구	흘수제한	항구	흘수제한
1	40,000	4	40,000
2	40,000	5	40,000
3	25,000	6	40,000

*흘수제한은 각 항구의 수심을 적화톤수로 변환한 것임. 단위 : L/T

(표 4) 항구간 거리행렬(대칭행렬, 단위 : 해상마일)

$$
\begin{array}{c|ccccc}
 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\
\hline
1 & 180 & 360 & 380 & 5800 & 5800 \\
2 & & 70 & 180 & 5980 & 5980 \\
3 & & & 50 & 6160 & 6160 \\
4 & & & & 6168 & 6168 \\
5 & & & & & 300
\end{array}
$$

(1) 후보 스케줄의 산출

부록의 스케줄 발생기 원리에 의한 선박 1의 실행가능 스케줄을 산출하면 (그림 2)과 같다. (그림 2)에서 마디 1의 자손마디는 마디 6뿐인데, 그 이유는 다음과 같다. 마디 1 다음에 올 수 있는 후보화물은 2, 3, 4, 5가 있으나 화물 3과 4는 P3항구의 흘수제한(조건 2), 화물 5는 적재톤수 조건(조건 1)에 의해 적재가 불가능하다.

(그림 2)의 마디 6-13에 상응하는 각 실행가능 스케줄의 운항비는 다음식에 의하여 산출된 것이다(필요한 경우 체선료 등의 기타 선박운항으로 인하여 추가적으로 발생하는 비용을 운항비에 포함시킬 수 있다).

스케줄 발생기의 운항비 산출 부프로그램에서도 아래의 식을 이용하여 운항비를 계산하고 있다. 또한 스케줄 발생기에서는 화물의 수송순서가 결정되면 양화항의 입·출항시간 및 총항해거리를 계산한다.

운항비 = 연료비 + 항비 + 화물비 + 도선료 + 기회비용

연료비 = 총연료소모량 * 톤당 연료비

(단, 연료소모량은 선속의 3승에 비례한다고 가정함.)

항비, 도선료, 화물비 : 선박, 항구, 화물에 의해 결정됨.

기회비용 : (최대적화톤수 − 적재톤수) * 톤당 용선료

운항비 기준에 의해 스케줄 2는 스케줄 1을, 스케줄 8은 스케줄 3을 지배하고 있다. 따라서 선박 1의 후보 스케줄은 총 6개로 감소한다. 같은 원리로 선박 2의 후보 스케줄이 산출된다.

(2) 최적 스케줄의 산출

수치예 1에서 선박 i의 j번째 후보 스케줄을 x_{ij}라 하면, 최적 스케줄을 산출하기 위한 수리적 모형은 다음과 같다.

(문제 2)

min $z = 563896x_{11} + 485986x_{12} + 553017x_{13} + 542253x_{14} + 609205x_{15} + 534536x_{16} + 1080969x_{21} + 1051267x_{22} + 1125638x_{23} + 1147628x_{24} + 1221786x_{25} + 1086352x_{26}$

s.t. $x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} = 1$

$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} = 1$

$x_{11} + x_{12} + x_{14} + x_{21} + x_{22} + x_{24}1 \leq 1$

$x_{11} + x_{13} + x_{15} + x_{16} + x_{21} + x_{23} + x_{25} + x_{26} \leq 1$

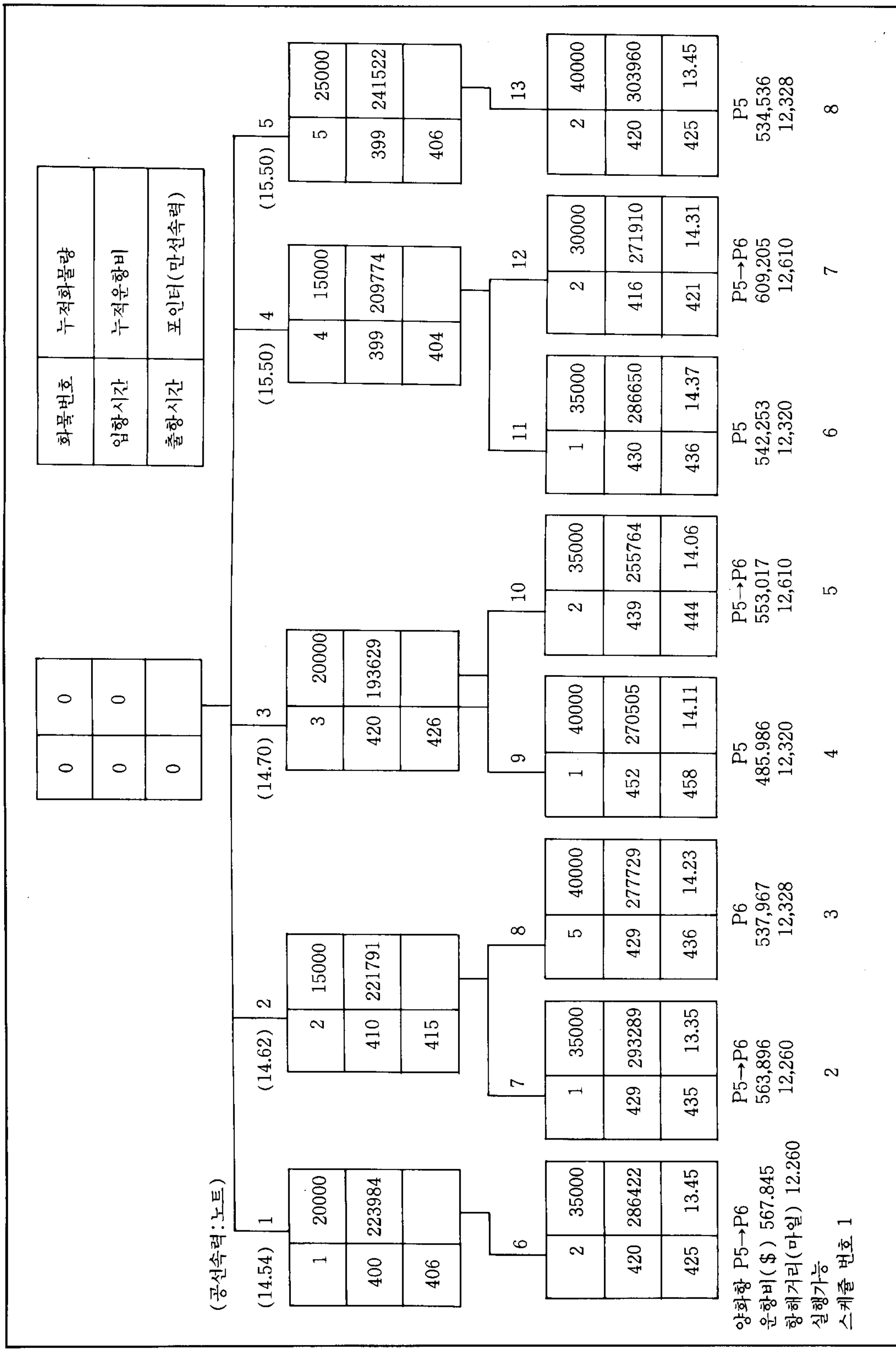
$x_{14} + x_{15} + x_{24} + x_{25} = 1$

$x_{16} + x_{26} \leq 1$

$x_{ij} \in \{0, 1\}$, for all i, j

단계 0) List=0, $\bar{z}=0$, i=0, ESET={4}, $J_1=6, J_2=6$

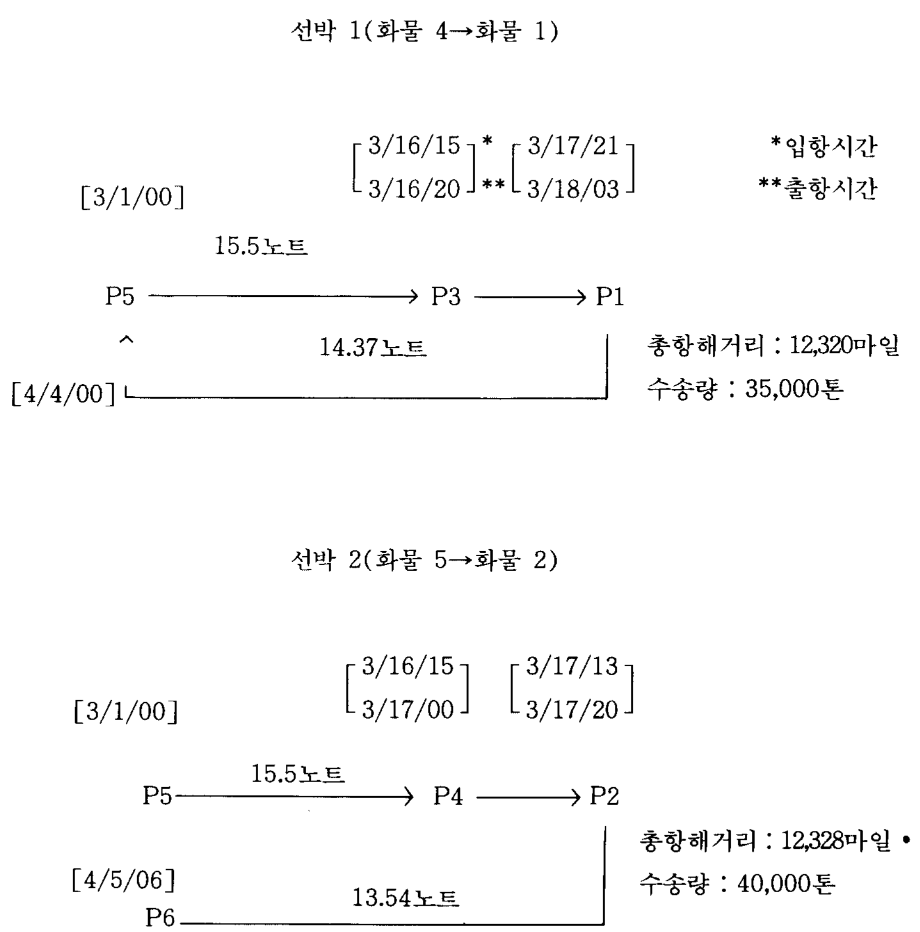
단계 1) i=1, L=1. 단계 2) j=1. 단계 3) List={1}. 단계 1) i=2, L=1. 단계 2) i=1. 단계 4-1) L=1, List=0, L=2. 단계 2) j=2.



[그림 2] 선박 1의 실행가능 스케쥴

단계 3) List$=\{2\}$. 단계 1) $i=2$, $L=1$. 단계 2) $j=5$. 단계 3) List$=\{2, 5\}$. $z=1{,}707{,}772$. 단계 4-1) $L=5$, List$=\{2\}$, $L=6$. 단계 4-2) $L=6=J_2=6$, 단계 2) $j=6$. 단계 3) List$=\{2, 6\}$. 단계 4-1) $L=6$, List$=\{2\}$ 단계 4-2) $i=1$. 단계 4-1) $L=2$, List$=0$, $L=3$, 단계 2) $j=3$. 단계 3) List$=\{3\}$, 단계 1) $i=2$, $L=1$. 단계 2) $j=4$. 단계 3) List$=\{3, 4\}$, $\bar{z}=1{,}700, 645$. 단계 4-1) $L=4$, List$=\{3\}$, $L=5$. 단계 4-2) $L=5<J_2=6$. 단계 2) $i=1$. 단계 4-1) $L=3$, List$=0$, $L=4$, …, 단계 3) List$=\{4, 6\}$, $\bar{z}=1{,}628{,}605$. 단계 4-1) $L=6$, List$=\{4\}$, $L=7$, …, 단계 4-2) $L=7>J_1=6$, $i=0$. 단계 5) 종료, 즉 $\bar{z}=1{,}628{,}605$, List$=\{4, 6\}$, $x_{14}=x_{26}=1$.

따라서 선박 1은 후보 스케줄 4($x_{14}=1$), 선박 2는 후보 스케줄 6($x_{26}=1$)으로 운항할 때, 총운항비는 $1,628,605로 최소가 된다. 그리고 항해용선으로 수송해야 하는 화물량은 20,000L/T이며 선박 1과 2의 최적 스케줄은 (그림 3)과 같다.



(그림 3) 선박별 최적 스케줄

수치예에서 알수 있듯이 목적함수의 계수가 적은 순으로 정렬하여 문제를 재구성하면, 보다 엄격한 상한값을 빨리 구할 수 있어 본 연구에서 제시한 해법은 보다 효율적이다. 그러나 정렬시간을 고려하여 본 연구에서는 이 방법을 이용하지는 않았다.

5.2. 응 용

Y해운사는 페르시아만(Persian Gulf)의 7-13개 항구에서 원유(crude oil)를 적재하여 울산항에서 양화하고 있다. 240,000L/T급 디젤기관(diesel engine)의 선박 2척과 220,000L/T급 증기기관(steam turbine)의 선박 1척으로 Y사에서 필요한 화물을 수송하고 있으며, 화물의 수요는 대체적으로 안정적이다. 2척의 디젤기관 선박은 그 특성이 같고 증기기관의 선박은 연료소모량이 전자에 비하여 약 2.5배 정도이며, 화역시간은 전자가 약 5,000LT/hour, 후자가 4,000LT/hour이다.

본 연구에서는 이 회사가 보유하고 있는 유조선 3척의 특성과 페르시아만의 9개항구, 우리나라의 2개항구를 각각 적·양화항로 설정하고 각 항구의 수심과 항구간의 거리 등을 조사하고 (거리표, 관련해도, World port index), 이전의 실제 화물수요와 유사한 형태로 화물수요를 추정하였다.

각 선박의 특성과, 1991년 3월 1일 00시 현재 집화한 화물과 각 항구에 대한 명세는 다음의 (표 5), (표 6), (표 7), (표 8)과 같다.

계획대상기간은 각 선박이 일항차에 소요되는 기간인 약 1.5개월로 한다. 두 척의 선박은 양화항에서 하역중이고 1척의 선박은 페르시아만을 향하여 향해중인 것으로 선박의 초기위치를 설정하였다.

(표 5) Y해운사의 선박특성

선 명	적화톤수	최대흘수	최대속력(MCR, knots)	서비스속력(knots)
YC	240,000	19.8m	15.5(16.5:공선시)	15.0
YF	240,000	19.8m	15.5(16.5:공선시)	15.0
YP	220,000	18.8m	14.5(15.5:공선시)	13.5

(표 6) Y해운사의 화물자료

번호	적화항	양화항	화물량 (L/T)	가장 빠른 적화시간	가장 늦은 적화시간	가장 늦은 양화시간
C_1	K.F.	UL.	80000	3/13/18	3/17/02	4/6/22
C_2	S.I.	UL.	75000	3/14/14	3/17/22	4/8/14
C_3	D.I.	UL.	75000	3/15/20	3/19/04	4/6/02
C_4	U.S.	UL.	90000	3/16/16	3/19/14	4/8/14
C_5	R.T.	UL.	70000	3/15/00	3/17/22	4/6/12
C_6	R.A.K.	UL.	70000	3/18/18	3/22/02	4/14/20
C_7	M.A.A.	UL.	70000	3/20/10	3/23/18	4/18/04
C_8	J.D.	UL.	80000	3/21/16	3/25/00	4/14/20
C_9	KFN	UL.	85000	3/20/10	3/27/22	4/18/04
C_{10}	K.F.	UL.	70000	3/29/14	4/1/22	4/19/20
C_{11}	S.I.	UL.	60000	3/29/14	4/1/22	4/19/20
C_{12}	U.S.	UL.	65000	3/28/08	3/30/00	4/20/06

C_{13}	R.T.	UL.	85000	3/23/08	3/26/16	4/16/12
C_{14}	R.A.K.	UL.	75000	3/24/14	3/27/22	4/17/18
C_{15}	M.A.A	UL.	80000	3/22/02	3/23/08	4/10/16
C_{16}	S.I.	IN.	75000	3/28/18	4/2/18	4/14/20
C_{17}	D.I.	IN.	95000	3/20/20	3/24/04	4/16/02
C_{18}	R.A.K.	IN.	90000	3/29/04	4/1/12	4/15/01
C_{19}	J.D.	IN.	75000	3/16/16	3/19/14	4/7/08
C_{20}	K.F.N.	IN.	80000	3/16/16	3/19/14	4/7/08
C_{21}	K.F.	IN.	40000	3/17/12	3/19/14	4/9/10
C_{22}	U.S.	IN.	45000	3/20/10	5/23/08	4/14/00
C_{23}	M.A.A.	IN.	50000	3/22/22	3/25/20	4/14/20
C_{24}	R.T.	IN.	70000	3/20/20	3/23/18	4/13/14

(표 7) 각 항구의 운항가능 수심

	항구명	흘수제한(m)		항구명	흘수제한(m)
1	K.F.	20.0	7	M.A.A.	20.0
2	S.I.	150,000L/T	8	J.D.	16.76
3	D.I.	20.0	9	KFN	20.0
4	U.S.	10.97	10	UL.	20.0
5	R.T.	20.0	11	IN.	18.9
6	R.A.K.	17.0			

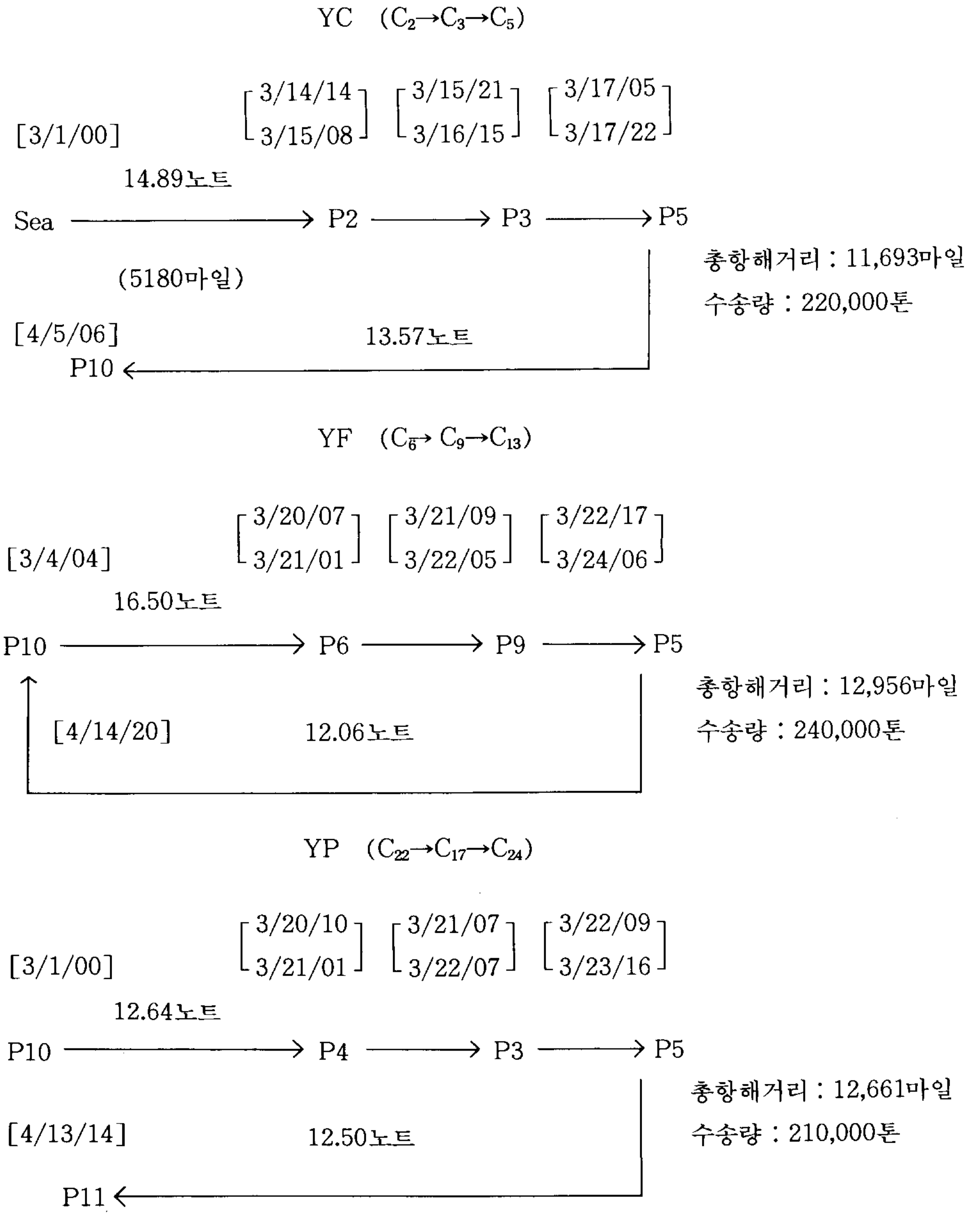
(표 8) 항구간 거리행렬(대칭행렬, 단위:해상마일)

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	180	360	380	430	580	650	380	700	5800	5800
2		70	180	300	430	540	180	600	5980	5908
3			50	180	330	360	65	410	6160	6160
4				140	250	350	90	360	6168	6168
5					150	180	230	230	6263	6263
6						65	380	115	6348	6348
7							410	50	6450	6450
8								455	6205	6205
9									6500	6500
10										300

스케줄 발생기에서 산출한 실행가능 스케줄은 총 442개(선박당 평균 148개), 선박별 후보 스케줄은 각각 43개, 121개, 97개(평균 87)였다. 따라서 최적 스케줄을 구하기 위한 수리적 모형

은 261개 이진변수와 27개의 제약식을 갖는 0-1 정수계획문제이다.

본 연구에서 제시한 해법으로 산출한 선박별 최적 스케줄은 (그림 4)와 같다. 따라서 24개의 화물, 총 1,750,000톤중 670,000톤의 화물은 통제하에 있는 3척의 선박으로 수송하고, 나머지 화물은 항해용선에 의해 운송할 때 총 운항비가 최소이다.



[그림 4] Y사의 선박별 최적 스케줄

이 적용문제에서 후보 스케줄의 산출에 필요한 각 선박과 항구 및 화물 그리고 운항비 등 관련 자료의 입력시간과 261개 후보 스케줄의 출력시간을 포함한 스케줄 발생기의 총 CPU시간은 17초였다. 다음으로 최적 스케줄을 구하는데 소요된 CPU시간은 94초였다(Coprocessor가 내장되어 있지 않는 IBM 16BIT AT기종의 개인용 컴퓨터에서의 CPU시간이다). 그런데 최적 스케줄을 산출하는 프로그램은 스케줄 발생기와 연결되어 있어 별도의 입·출력시간이 필요하지 않다.

Y해운사가 원유수송에 한 척의 선박을 더 투입하여 통제하의 선박이 4척이라 가정하고, (표 6)-(표 8)의 자료를 이용하여 선박별 최적 스케줄을 산출하였다. 이 경우 스케줄 발생기로 산출한 실행가능 스케줄과 후보 스케줄은 각각 494개와 300개였다. 스케줄 발생기와 최적해법에 소요된 CPU시간은 각각 18초와 1205초였다.

6. 결 론

수리적 기법으로 유조선의 운항일정계획과 같은 복잡한 문제의 최적해를 구하고자 하는 경우, 현실 여건을 고려하는 정도와 수리적 모형의 취급가능성이란 문제가 상반관계(trade-off)로 작용한다. 본 연구에서는 이러한 복잡한 현실을 여건을 보다 신축성있게 고려하기 위하여 선박운항과 관련된 물리적 제약조건을 고찰하고 이 조건을 충족하는 선박별 후보 스케줄을 산출하여, 이들 후보 스케줄에서 계획대상기간동안 총운항비를 최소로하는 최적 스케줄을 산출하는 2단계 접근법을 이용하였다.

현실의 구체적이고 복잡한 여건을 반영하는 정도는 스케줄 발생기가 얼마나 정교하게 작성되어 있는가에 의존한다. 본 연구에서 작성한 스케줄 발생기는 선박과 항구 그리고 화물과 관련된 대부분의 실제 상황을 반영하고 있으며, 만선과 공선시의 운항속력도 제시하고 있다. 그러나 각 항구에서의 하역시간의 제한이나 만조와 간조에 따른 선박의 대기시간을 고려하고 있지는 않지만 약간의 수정으로 이들 사실을 반영할 수 있다.

본 연구에서는 3척의 선박으로 페르시아 만에서 우리나라로 원유를 수송하는 Y해운사의 운항일정문제를 분석하고 적재항과 양화항을 각각 9개와 2개로 설정하고 현실의 화물수요와 유사한 24개의 화물수요를 추정하였다. 그리고 본 연구에서 제시한 2단계 접근법으로 선박별 최적 스케줄을 산출하였는데, 이 접근법은 컴퓨터 저장량의 관점에서나 계산시간의 관점에서 매우 효율적이였다.

이 적용문제에서 선박별 후보 스케줄을 산출하는데 소요된 CPU시간은 17초였다. 그리고 각 후보 스케줄에서 최적 스케줄을 선택하는 문제는 261개의 이진변수와 27개의 제약식을 갖는 0-1 정수계획문제인데, 본 연구에서 제시한 해법으로 CPU시간 94초내에 최적해를 구하였다. 따라서 본 연구에서는 우리 나라 유조선 운항선사의 일정계획문제를 개인용 컴퓨터에서도 해결이 가능하다는 결론을 얻었다.

그러나 본 연구에서 제시한 최적해법이 갖는 한계점은 유조선의 일정문제와 같은 특수한 유형의 0-1 정수계획문제에서만 해를 구할 수 있다는 점이다. 따라서 이러한 문제점을 극복하는 한 방안으로 일정문제의 수리적 모형을 정수 일반 네트워크로 표현하여 최적해를 도출하고자 시도하여 보았는데, 본 연구에서 제시한 해법이 정수 일반 네트워크 해법보다 계산시간의 관점에서 보다 효율적이였다. 그러나 네트워크 모형이 갖는 장점은 실무자 입장에서 이해가 용이하다는 점과 일정문제의 복잡성을 보다 신축성있게 반영한다는 점이다.

현실의 유조선 운항시스템에서 본 연구에서 제시한 스케줄 발생기와 해법을 대화형 의사결정지

원시스템으로 이용하기 위해서는 선박과 항구 및 화물 그리고 관련 비용에 관한 데이터베이스를 구축하고 이와 결합할 필요가 있다. 이러한 의사결정지원시스템이 구축되면 매일의 선박운항으로 발생하는 비용의 상당한 절감효과가 있을 것으로 기대된다.

—參考文獻—

1. 대한민국 수로국, 「거리표」, 서지 제905호, 1979.

2. 梁時權, "商船의 最適速力 및 積貨重量톤의 決定에 關한 硏究(海運經營上의 與件變化에 따른 經濟性을 中心으로)," 韓國海洋大學 大學院 論文集, 第5輯, pp.3–51.

3. 허일, "배선 및 선박운항일정계획에 관한 연구－유조선의 운항일정계획을 중심으로－," 「한국항해학회지」, 제14권 제1호(1990), pp.21–38.

4. Appelgren, L., "Integer Programming Methods for a Vessel Scheduling Problem," Transportation Science, Vo.5(1971), pp.64–78.

5. Branch, A.E., Economics of Shipping Practice and Management, 2nd ed., Chapman and Hall, London, 1988.

6. Brown, G.B., G.W. Graves., and D. Ronen, "Scheduling Ocean Transportation of Crude Oil," Management Sci., Vol.33, No.3 (1987), pp.335–346.

7. Dantizig, G.B. and D.R. Fulkerson, "Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule," Naval Research Logistics Quarterly, No.1(1954), pp.217–222.

8. Defence Mapping Agency, World Port Index, Publication No.150, Hydrographic/Topographic Center, 1980.

9. Fisher, M.L., and M.B. Rosenwein, "An Interactive System for Bulk_Cargo Ship Scheduling," Naval Research Logistics, Vol.36 (1989), pp.27–42.

10. Forrest, J.J., J.P.H. Hirst and J.A. Tomlin, "Parctical Solution of Large Mixed Integer Programming Problems with UMPIRE," Management Sci., Vol.20, No.5(1974), pp.736–773.

11. Glover, F. and J.M. Mulvey, "Equivalence of the 0–1 Integer Programming Problem to Discrete Generalized and Pure Networks," Operations Research, Vol.28, No.3(1980), pp.829–839.

12. Papdakis, N.A., and A.N. Perakis, "A Nonlinear Approach to the Multiorigin, Multidestination Fleet Deployment Problem," Naval Research Logistics, Vol.36(1989), pp. 515–528.

13. Ronen, D., "Cargo Ships Routing and Scheduling Survey of Methods and Problems," European Journal of Operations Research, 12 (1983), pp.119–126.

14. Ronen, D., "Scheduling of Vessels Shipment of Bulk and Semi–bulk Commodities Originating in a Single Area," Operations Research, Vol.34, No.1(1986), pp.164–173.

15. Stout, K.L. and B.W. Douglas, "A Model–Based Decision Support System for Planning and Scheduling Ocean–Borne Transportation," Interfaces, Vol.11, No.4(1981), pp.1–10.

부록 : 스케줄 발생기의 개략적 원리

```
Schedule Generator :
type
  N : number of ship;
  M : number of cargo;
  P : number of port;
  PRD, BRH : array for building tree;
  SCH : array of set type for schedule;
  TINFO : array of record type for storing informations of arrrival & departure status for each
  ship;
begin
  for I : =1 to N do
     begin
       K←1;
       L←0;
       foreach j∈M do if feasible
         begin
           PRD[k]←0;{rooted node}
           BRH[k]←k+1;{sibling node}
           TINFO[k]←tree information for cargo loading & discharging of ship{arrival time,
                     departure time, current ton, etc.}
           K←K+1;
         end;
       BRH[k-1]←left child node of rooted node;
       P←1;
       while P<>K do
         begin
           TK←K;
           for j : =P to K-1 do
             begin
               foreach cargo in brother nodes of j do if feasible
                 begin
                   PRD[TK]←J;
                   BRH[TK]←TK+1;
                   TINFO[TK]←tree information;
```

```
                TK←TK+1
              end;
              BRH[TK-1]←left child of node j;
              if all cargos in brother nodes of j is infeasible then
                  begin
                  L←L+1;
                  SCH[i, L]←{cargo of node j}+{all cargo of prd[j]}
                end;
          P←K;
          K←TK;
        end;
      write each schedule
    end;
end.
```

저자소개

저자(김기석)는 현재 부산대학교 경영학과 부교수로 재직중이며, 서울대학교 경영학과에서 학사, 한국과학원 산업공학과에서 석사, 그리고 Univ. of Washington 경영과학과에서 박사학위를 취득하였다. 주요 관심분야는 네트워크 최적화, 일정계획, 생산전략, PC활용 등이다.

저자(주재훈)는 한국해양대학 항해학과에서 공학사, 부산대학교 경영학과에서 경영학석사, 그리고 경영과학 전공으로 박사과정을 수료하였다. 주요 관심분야는 일정계획, 네트워크이론, 정수계획법 등이다.