



# 정한섭의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 26일

주 심 공학박사 옥 영 석



위 원 공학박사 이 강 배



위 원 공학박사 이 운 식



# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경 .....	1
1.2 기존 연구 현황 .....	2
1.3 연구내용 .....	6
제 2 장 수리모형 .....	8
제 3 장 최적해의 성질 규명 .....	10
3.1 흐름(flow)정의 .....	11
3.2 루프(loop)정의 .....	12
3.3 극단흐름(extremal flow)의 성질 .....	15
제 4 장 Shortest Path Refomulation 모형 .....	20
제 5 장 휴리스틱 알고리즘 .....	24
4.1 한계비용계수 .....	25
4.2 할당 메커니즘 .....	27
4.3 조정 메커니즘 .....	29
제 6 장 수치예제 .....	37

제 7 장 알고리즘 성능 분석 .....	46
제 8 장 결론 및 향후 연구과제 .....	72
참고문헌 .....	74
[부록-1] 문제P의 AMPL을 이용한 모델링 .....	79
[부록-2] 문제P의 Sample Data .....	82
[부록-3] 문제P의 배치처리를 위한 파일 .....	83
[부록-4] 문제SPR의 AMPL을 이용한 모델링 .....	84
[부록-5] 문제SPR의 Sample Data .....	87
[부록-6] 문제SPR의 배치처리를 위한 파일 .....	88
[부록-7] 휴리스틱 알고리즘 코드 .....	89

## 그림 목 차

[그림 3-1] 문제 $P$ 의 네트워크 표현 .....	10
[그림 3-2] 총괄흐름 .....	11
[그림 3-3] 개별흐름 .....	12
[그림 3-4] 총괄수준들 사이에 형성되는 루프의 형태 .....	13
[그림 3-5] 총괄수준과 개별수준 사이에 형성되는 루프의 형태 .....	14
[그림 3-6] 개별수준들 사이에 형성되는 루프의 형태 .....	15
[그림 3-7] [정리 2]의 증명 .....	17
[그림 3-8] [정리 3]의 증명 .....	18
[그림 3-9] [정리 4]의 증명 .....	19
[그림 4-1] 용량제약이 없는 기간 4인 그래프 $G$ .....	21
[그림 5-1] 휴리스틱 알고리즘의 개략적인 구성도 .....	24

## 표 목차

[표 1-1] 기존연구현황 .....	4
[표 6-1] 수요행렬 및 비용계수 .....	37
[표 6-2] $t=1$ 일때, 한계비용계수법의 적용후 수정된 해 .....	38
[표 6-3] $t=1$ 일때, 할당 매커니즘의 적용후 변화된 해 .....	40
[표 6-4] $t=3$ 일때, 한계비용계수법의 적용후 수정된 해 .....	41
[표 6-5] $t=3$ 일때, 할당 매커니즘의 적용후 변화된 해 .....	41
[표 6-6] $t=5$ 일때, 한계비용계수법의 적용후 수정된 해 .....	42
[표 6-7] $t=5$ 일때, 할당 매커니즘의 적용후 변화된 해 .....	42
[표 6-8] $t_1=5$ 일때, 조정 매커니즘의 적용후 변화된 해 .....	44
[표 6-9] $t_1=3$ 일때, 조정 매커니즘의 적용후 변화된 해 .....	44
[표 6-10] 휴리스틱 해 .....	45
[표 6-11] 최적 해 .....	45
[표 7-1] 최적해와 <i>SPR</i> 해의 목적함수값 비교 .....	53
[표 7-2] $T=4$ 인 경우의 <i>SPR</i> 해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교 .....	54

[표 7-3] $T=4$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교	55
[표 7-4] $T=4$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교	56
[표 7-5] $T=6$ 인 경우의 <i>SPR</i> 해와 휴리스틱해의 목적함수값 비	57
[표 7-6] $T=6$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교	58
[표 7-7] $T=6$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비	59
[표 7-8] $T=8$ 인 경우의 <i>SPR</i> 해와 휴리스틱해의 목적함수값 비	60
[표 7-9] $T=8$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 목적함수값 비	61
[표 7-10] $T=8$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교	62
[표 7-11] $T=12$ 인 경우의 <i>SPR</i> 해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교	63
[표 7-12] $T=12$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교	64
[표 7-13] $T=12$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교	65
[표 7-14] $T=18$ 인 경우의 <i>SPR</i> 해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교	66
[표 7-15] $T=18$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교	67
[표 7-16] $T=18$ 인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교	68
[표 7-17] <i>SPR</i> 해와 휴리스틱해의 목적함수 값 차이평균	69
[표 7-18] 최선해와 휴리스틱해의 목적함수 값 차이평균	70

[표 7-19] 최선해와 휴리스틱해의 평균계산시간의 비교 ..... 71

**A Heuristic Algorithm  
for a Multi-Product Dynamic Lot-Sizing and Shipping Problem  
with multiple freight container types allowed**

**Han-Sub Jung**

*Department of Industrial Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University*

**Abstract**

This paper analyzes a dynamic lot-sizing problem, in which the order size of multiple products and multiple container types are simultaneously considered. In the problem, each order (product) placed in a period is immediately shipped by multiple freight containers in the period. Moreover, each container has type-dependent carrying capacity restriction. The unit freight cost for each container type depends on the size of its carrying capacity and the total freight cost is proportional to the number of each container type employed. Also, it is assumed that the load size of each product is equal and backlogging is not allowed. The objective of this study is to simultaneously determine the lot-sizes and the transportation policy that minimizes the total costs, which consist of production cost, inventory holding cost, and freight cost. Because this problem is NP-hard, a heuristic algorithm with an adjustment mechanism is proposed based on the properties of the optimal solution. Also, we present a shortest path reformulation model to obtain the good lower bound to our problem. The computational results from a set of simulation experiment are presented.

Keywords : dynamic lot-sizing, transportation, heuristic algorithm, shortest path reformulation

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

생산계획이란 일반적으로 생산의 안정을 꾀하면서 재고량 혹은 추후조달량의 조절을 통해 경영목표를 성취하도록 생산량을 결정하는 것이다. 이는 “어느 시점에 얼마만큼 생산할 것인가?”를 결정하는 생산-재고 형태의 문제가 된다. 따라서 제조현장에서 총비용(생산 및 재고비용)을 최소로 하는 최적 생산 정책을 수립하는 것은 중요한 과제라고 하겠다. 이와 같은 생산-재고 문제들을 분석하는 생산계획모형들은 수요의 성질에 의해 확정적 모형(deterministic model)과 확률적 모형(stochastic model)으로 크게 분류된다.

전통적인 생산-재고 문제의 확정적 모형을 다룬 Wagner와 Whitin(1958)의 논문에서는 유한한 생산계획기간 동안 동적으로 발생하는 단일제품의 수요를 만족시키면서 총비용(생산비용 + 재고비용 + 준비비용)을 최소로 하는 최적의 생산정책 및 재고정책을 수립하였다. 이를 시발로 하여 다양한 동적 생산계획 모형들이 연구되어 왔다. 이러한 결과들은 오늘날의 산업사회에서 널리 사용되고 있는 컴퓨터를 이용한 생산계획 및 통제 시스템의 하나인 MRP시스템 등에 많이 이용되고 있다. 더욱이, 이러한 모형들은 제품분류(product assortment), 용량확장(capacity expansion), 투자 및 소비, 그리고 저수지 통제 문제 등의 다양한 분야에 응용되어 오고 있다.

오늘날, 적시에 적절한 수송수단을 사용하여 제품들을 운송하기 위한 수송

일정계획은 생산 및 분배 관리 혹은 수출·입 정책에 있어 매우 중요한 문제가 되어 왔다. 각 기업들은 다종제품을 생산하고 수송수단으로 화물컨테이너를 이용하여 생산된 제품을 고객에게 인도한다. 이는 각 제품에 대한 생산률, 사용되는 컨테이너의 종류, 컨테이너내의 적재정책, 그리고 사용되는 컨테이너의 개수 등과 같은 의사결정문제로 이끈다. 더욱이, 수송비용의 증가와 재고절감의 화두는 원자재 공급 및 생산 행위로부터 마케팅 및 최종분배정책에 이르기까지의 로지스틱시스템에 대한 의사결정과정을 동기화하는 것이 중요함을 부각시킨다. 로지스틱시스템에 대한 의사결정의 통합적 사고는 서비스 수준의 개선과 재고, 재공품, 생산준비, 그리고 수송에 의해 발생하는 총비용의 실질적인 절감을 유도할 수 있다 (Chandra와 Fisher(1994)). 이것은 본 저자들에게 생산-재고 및 수송 기능들이 함께 연계된 통합된 생산-수송 시스템에 대한 최적 생산 및 수송 정책을 연구하도록 하는 동기를 부여한다.

## 1.2 기존 연구 현황

본 논문에서 다루고 있는 형태의 문제를 일반적으로 DLSP(Dynamic Lot Sizing Problem)라고 한다. DLSP형태의 문제는 Wagner와 Whitin(1958)에 의해 처음으로 연구되었다. 이들은 생산용량은 제한되지 않고 추후조달(backlogging)이 허용되지 않는 기본모형을 다루었다. 그 이후 Wagner-Whitin모형을 확장시킨 많은 연구들이 이루어졌으며 이를 간단히 소개하면 다음과 같다. Zangwill(1966, 1969)은 추후조달(Backlogging)이 허용되는 동적생산계획문제를

분석하였으며 Sobel(1970)은 설비시동비용(Start-Up Cost)을 고려한 문제를 다루었다. Baker et al.(1978), Florian과 Klein(1971), Lambert와 Luss(1978), Love(1973), Swoveland(1975) 등은 Wagner-Whitin모형을 생산용량이 제한된 여러 가지 동적생산계획 문제들로 확장 시켜 분석하였다. Bitran et al(1982), Florian et al(1980) 등은 동적생산계획문제의 여러 형태별 알고리즘의 complexity를 분석하였다. Lee와 Denardo(1986)는 추가적인 수요정보하에서도 변하지 않는 초기의 최적 생산량을 결정할 수 있는 연동적 계획기간(Rolling Planning Horizon)에 관한 연구를 하였다. 이운식과 성창섭(1994, 1995)은 설비시동비용(Start-up)을 갖는 동적생산계획문제에서 연동적 계획기간에 관한 연구와 유한 생산률을 갖는 동적생산계획문제에서 생산준비비용의 절감 효과에 관한 연구를 수행하였다.

생산용량의 제약하에서 다종제품에 대한 동적생산계획문제들은 현장에서의 MRP시스템의 필요성에 의해 많은 주목을 받아왔다. 이 문제들을 해결하기 위한 알고리즘들은 전통적으로 다음과 같은 두 가지 범주로 분류될 수 있다.

- 1) 상대적으로 짧은 시간내에 근사적인 실행가능해(Approximate Feasible Solution)를 제공하는 휴리스틱 알고리즘 :  
Lambrecht와 Vanderveken(1979), Dixon과 Silver(1981), Dogramaci et. al.(1981), Maes와 Wassenhove(1988) 등이 이에 속한다.
- 2) 최적해에 대한 하한(Lower Bound)들을 제공하는 Relaxation Method :  
Bahl(1983), Chen과 Thizy(1990), Eppen과 Martin(1987), Kleindorfer와 Newson(1975), Millar와 Yang(1993), Thizy와 Wassenhove(1985),

Thizy(1991), Trigeiro(1985) 등이 이에 속한다.

실제로, 두 가지 범주의 연구논문들의 접근방식들은 이론과 응용관점에서 볼 때, 많은 부분들이 서로 유사성을 가지고 있다. Chen과 Thizy(1990)는 이와 같은 문제들이 이론적으로 NP-hard문제임을 증명하였다. Relaxation Method들의 대부분은 Lagrangean Relaxation(Geoffrion(1974))에 기초하고 있다. Kuik et al.(1993)은 다단계의 조립공정을 거치는 다종제품에 대한 동적생산계획문제를 LP-based Heuristic, Simulated Annealing, Tabu Search 등의 휴리스틱 알고리즘들을 개발하여 효율성을 비교하였다.

[표 1-1] 기존연구현황

	수송정책 고려하지 않음	수송정책 고려	
		단종의 컨테이너 고려	다종의 컨테이너 고려
단일 제품	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wagner &amp; Whitin(1958)</li> <li>• Zangwill(1966)</li> <li>• Sobel(1970)</li> <li>• Baker et al(1978)</li> <li>• Lee &amp; Denardo(1986)</li> <li>• General DLSP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hwang &amp; Sohn (1985)</li> <li>• Lee(1989)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이운식(1998)</li> <li>• 이운식과 옥영석 (1998)</li> <li>• Lee et al(2002)</li> </ul>
다종 제품	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lambrecht &amp; Vanderveken(1975)</li> <li>• Dixon &amp; Silver(1981)</li> <li>• Dogramaci et al(1981)</li> <li>• Maes &amp; Wassenhove (1988)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이운식과 한종한 (1999)</li> <li>• Lee et al(2002)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이운식 등(2001)</li> <li>• 본 연구</li> </ul>

그러나, 대부분의 기존 동적 생산계획모형들은 수송정책을 고려하지 않고

생산-재고 정책을 결정하는 단점을 가지고 있어, 생산시스템과 수송시스템이 연계된 통합시스템의 최적해를 제공할 수는 없다.

생산준비비용(Set-Up Cost)을 갖는 전통적인 동적생산계획문제에, 사용된 화물 컨테이너의 수에 비례하는 화물수송비용(Freight Cost)을 포함할 경우에 이 문제는 다수의 생산준비비용을 갖는 문제로 확장된다. Lippman(1969)과 Iwaniec(1979)은 periodic review방식의 다수의 생산준비비용 문제를 다루었다.

또한, Lippman(1971)은 유한 생산계획기간하에서 일정한 수요율을 갖는 문제를 연구하였다. Aucamp(1983, 1984)는 무한 생산계획기간하에서 일정한 수요율을 갖는 경제적 발주량(EOQ) 문제를 다루었다. Lee(1986)는 더 일반적인 화물수송비용을 갖는 EOQ문제를 연구하였다. Hwang과 Sohn(1985)은 퇴화성 제품에 대한 주문량과 수송모드를 동시에 고려한 생산계획모형을 다루었다. 그러나, 수송모드의 용량제한은 고려하지 않았다. Lee(1989)는 생산준비비용형태의 화물운송비용을 고려한 동적생산계획모형을 분석하였으며 제한된 적재용량을 갖는 한 종류의 컨테이너 형태를 고려하였다. 이때, 화물운송비용은 사용된 컨테이너의 대수에 비례한다고 가정하였다. Benjamin(1990)은 다수의 공급지와 수요지를 갖는 단일제품에 대한 생산-수송 네트워크에서의 수송모드의 선택문제를 다루었다. Chandra와 Fisher(1994)는 로트크기결정과 차량경로문제를 함께 고려한 유한계획기간하에서의 다종제품에 대한 로지스틱 환경을 분석하였다. 그들은 multi-stop routing 문제에 기초한 통합된 최적화모형을 제안하였다. 이운식(1998) 그리고 이운식(1998)과 옥영석(1998)은 Lee (1989)의 논문을 확장한 다종의 화물컨테이너를 고려한 동적 생산-수송 모형을 다루었다. 그러나, 각 수송

기간에 사용할 수 있는 화물 컨테이너의 종류는 기껏해야 한 종류를 사용할 수 있는 제한된 모형을 다루었다. Fumero와 vercellis(1999)는 용량관리, 재고할당, 그리고 차량경로를 고려한 생산 및 분배 계획을 위한 통합된 최적화모형을 제안하였고 통합모형을 풀기 위한 Lagrangean relaxation 기법을 개발하였다. 이운식과 한종한 (1999)은 한 종류의 화물 컨테이너를 이용하여 다종제품을 운송하는 동적 생산-수송 문제를 효율적으로 풀기 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 이운식 등(2001)은 이운식과 한종한(1999)의 연구를 다종의 화물컨테이너를 사용하는 생산-수송문제로 확장하였고 이를 효율적으로 풀기위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 이운식 등(2002)은 이운식과 한종한(1999) 그리고 이운식 등(2001)의 연구를 확장하여 최적해에 근사한 하한값(lower bound)을 효율적으로 찾을 수 있는 shortest-path-reformulation 모형을 제안하고 휴리스틱 알고리즘의 효율성을 분석하였다. 또한, 이운식 등(2002)은 생산된 제품을 적재용량이 다른 다종의 차량을 이용하여 수송하는 단일제품에 대한 생산-수송 문제를 분석하였다. 이것은 Lee(1989)와 이운식(1998)의 연구를 확장한 것이다.

### 1.3 연구내용

본 연구는 유한계획기간하에서 수요가 동적으로 발생하는 다종제품에 대한 동적 생산 및 수송 문제를 다룬다. 이 문제에서 수송방법은 다종의 화물 컨테이너를 이용하여 생산된 다종제품들을 수송하며 다종의 화물 컨테이너의 적재용량은 서로 다르다. 다종제품의 적재크기는 동일하고 화물 수송비용은 컨테이너 종

류별 사용대수에 비례한다고 가정한다. 또한, 추후조달(backlogging)은 허용되지 않는다. 이 문제에서 발생하는 총물류비용은 각 제품에 대한 생산비용(생산 준비비용+생산간접비용), 각 제품에 대한 재고유지를 위한 재고비용, 그리고 화물 컨테이너의 종류별 사용대수에 따른 수송비용을 포함한다. 본 논문의 목적은 다종제품의 동적수요를 만족하면서 총물류비용을 최소로 하는 최적 생산계획 및 수송계획을 동시에 결정하는 것이다.

본 논문의 2장에서는 다종의 화물 컨테이너를 고려한 다종제품의 최적 생산계획 및 수송계획을 동시에 결정할 수 있는 수리모형을 제시하고 3장에서는 제시된 수리모형에 대한 최적해의 구조적 특성을 규명한다. 이러한 수리모형은 혼합정수계획문제(MIP: Mixed Integer Programming)로서 NP-hard문제이다. 4장에서는 최적해에 근사한 하한값(lower bound)을 효율적으로 찾을 수 있는 shortest-path-reformulation 모형을 제시한다. 5장에서는 최적해의 성질을 근간으로 생산계획 및 수송계획을 효율적으로 찾을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 이 휴리스틱 알고리즘은 한계비용계수에 기초하여 개발되고 휴리스틱 알고리즘의 효율성을 향상시키기 위한 케환기능도 함께 개발된다. 6장에서는 수치예제를 통해 휴리스틱 알고리즘의 적용절차를 설명한다. 또한 7장에서는 다양한 문제들을 대상으로 한 시뮬레이션 실험을 통해 제안된 휴리스틱 알고리즘의 효율성을 검증한다. 마지막으로 8장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구과제에 대해 제시한다.

## 제 2 장 수리모형

Lee(1989), 이운식(1998), 이운식과 옥영석(1998) 그리고 이운식과 한종한(1999)의 논문을 근간으로 다중제품에 대한 동적 생산계획 및 수송계획 문제로 확장할 경우, 본 연구에 적합한 다음과 같은 수리적 모형을 제시할 수 있다.

$$(P) \quad \underset{x_{ij}, y_j}{\text{Minimize}} \quad \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^M S_i \cdot z_{it} + \sum_{i=1}^M h_i \cdot I_{it} + \sum_{j=1}^N F_j \cdot y_{jt} \right\} \quad (1)$$

$$s.t. \quad I_{it} = I_{t-1,i} + \sum_{j=1}^N x_{t-1,j} - d_{it}, \quad \forall t, i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{t,j} \leq W_j \cdot y_{t,j}, \quad \forall t, j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{t,i} \leq M_{it} \cdot z_{it}, \quad \forall t, i \quad (4)$$

$$I_{0,i} = I_{T,i} = 0, \quad \forall i \quad (5)$$

$$x_{t,j} \geq 0, \quad I_{it} \geq 0, \quad \forall t, i, j \quad (6)$$

$$z_{it} \in \{0,1\}, \quad \forall t, i \quad (7)$$

$$y_{t,j} : \text{nonnegative integer}, \quad \forall t, j. \quad (8)$$

위의 수리모형에서 사용되는 기호의 정의는 다음과 같다.

$T$  = 계획기간의 길이,

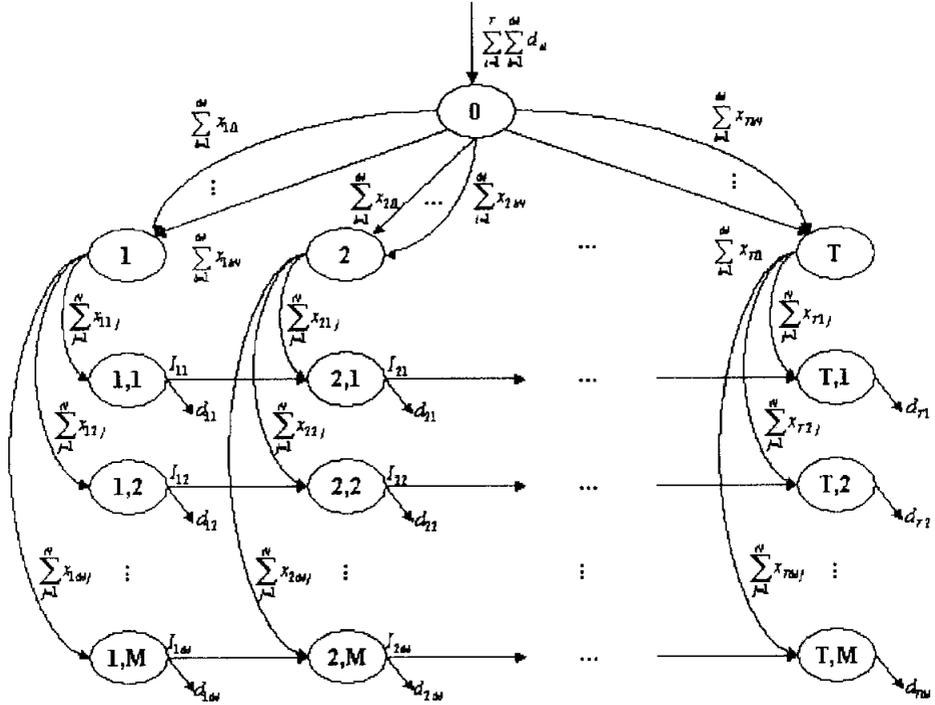
$t$  = 기간을 나타내는 첨자( $t = 1, 2, \dots, T$ ),

- $M$  = 생산되는 제품의 수,  
 $i$  = 제품의 종류를 나타내는 첨자 ( $i=1,2,\dots,M$ ),  
 $N$  = 사용되는 다중 컨테이너의 수,  
 $j$  = 컨테이너의 종류를 나타내는 첨자 ( $j=1,2,\dots,N$ ),  
 $d_{it}$  = 기간  $t$ 에서의 제품  $i$ 에 대한 수요량,  
 $M_{it}$  =  $\sum_{k=t}^T d_{ki}$   
 $W_j$  = 컨테이너  $j$ 의 화물 적재량,  
 $x_{tij}$  = 기간  $t$ 에 생산되어 컨테이너  $j$ 를 사용하여 수송되는 제품  $i$ 의 양,  
 $y_{tj}$  = 기간  $t$ 에 사용되는 컨테이너  $j$ 의 수(비음정수),  
 $I_{it}$  = 기간  $t$ 말에서의 제품  $i$ 에 대한 재고량,  
 $S_i$  = 제품  $i$ 에 대한 생산준비비용,  
 $F_j$  = 컨테이너  $j$ 의 단위당 수송비,  
 $h_i$  = 제품  $i$ 에 대한 단위당 재고비용,  
 $z_{it}$  = 기간  $t$ 에 제품  $i$ 에 대한 셋업이 있으면 1, 아니면 0.

제약식 (2)-(8)은 폐구간 볼록 집합을 정의하고 목적함수는 오목함수이므로  
 최적해는 볼록집합의 정점에서 발생한다. 다음장에서 최적해와 관련하여 정점의  
 성질을 규명한다.

### 제 3 장 최적해의 성질규명

문제  $P$ 의 제약식들은 [그림 3-1]과 같은 네트워크로 표현될 수 있다.

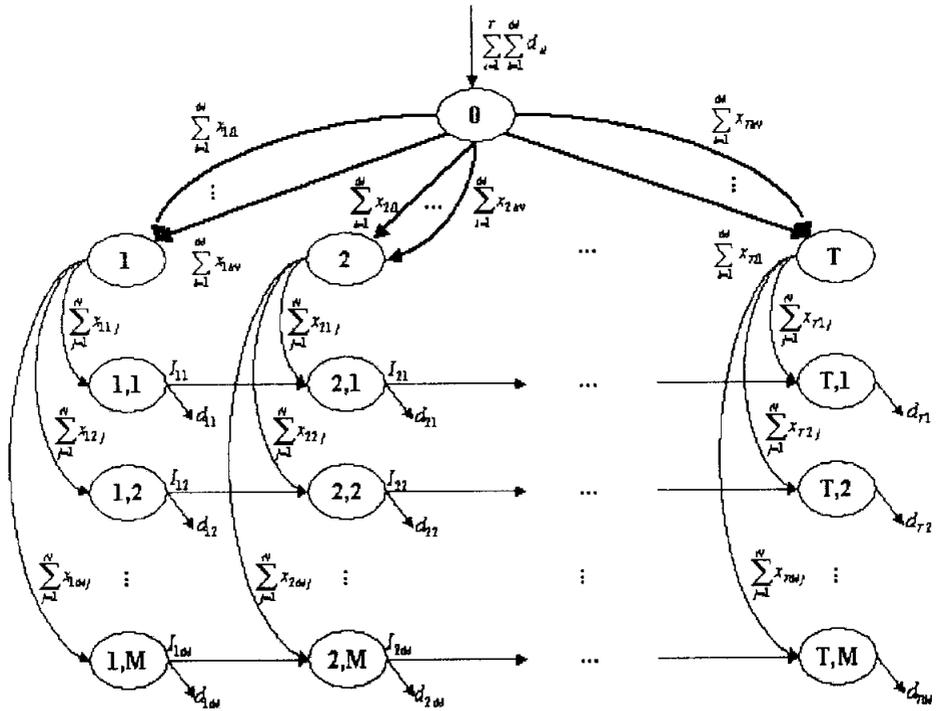


[그림 3-1] 문제  $P$ 의 네트워크 표현

### 3.1 흐름(flow)정의

[그림 3-1]의 네트워크에서 두 가지 형태의 흐름(flow)을 다음과 같이 정의한다.

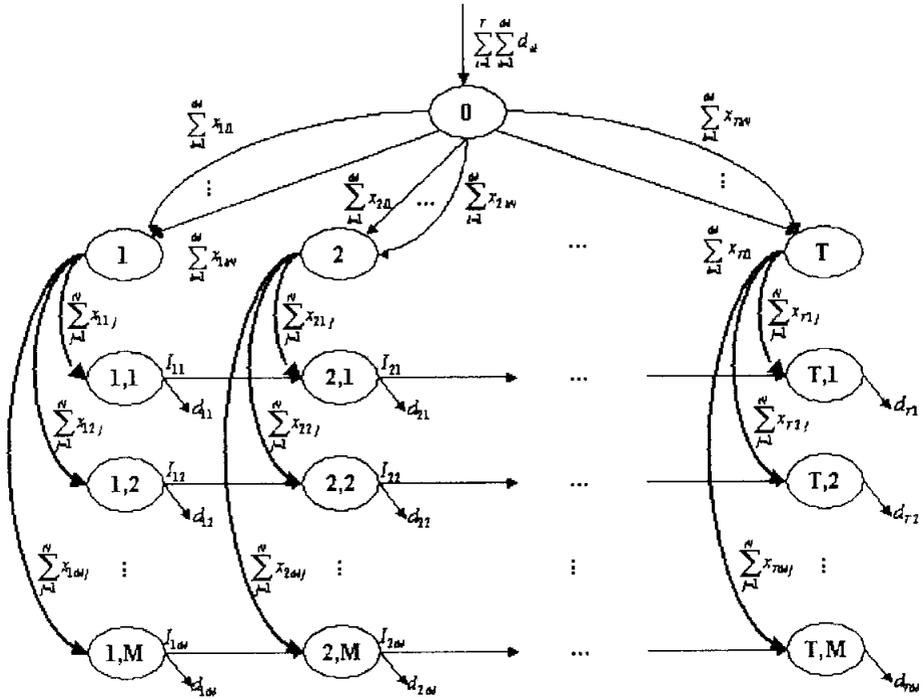
- (1) 총괄흐름 : 마디 (0)와 (1,2,...,T) 사이의 흐름
- (2) 개별흐름 : 마디 (1,2,...,T)와 ((1,1), (1,2), ..., (T,M)) 사이의 흐름



[그림 3-2] 총괄흐름

총괄흐름과 개별흐름은 네트워크상에서는 [그림 2], [그림 3]과 같이 표현할 수 있다. 총괄흐름의 특징은 컨테이너의 종류별 사용대수에 따라 호의 용량에 제한이 있는 특징이 있다. 그리고 개별흐름은 호의 용량에 제한이 없는 특징

을 가지고 있다.



[그림 3-3] 개별흐름

### 3.2 루프(loop)정의

[그림 3-1]의 네트워크에서 루프들은 다음과 같은 3 가지 방법에 의해 형성될 수 있다.

(1) 총괄수준들 사이에 형성되는 경우

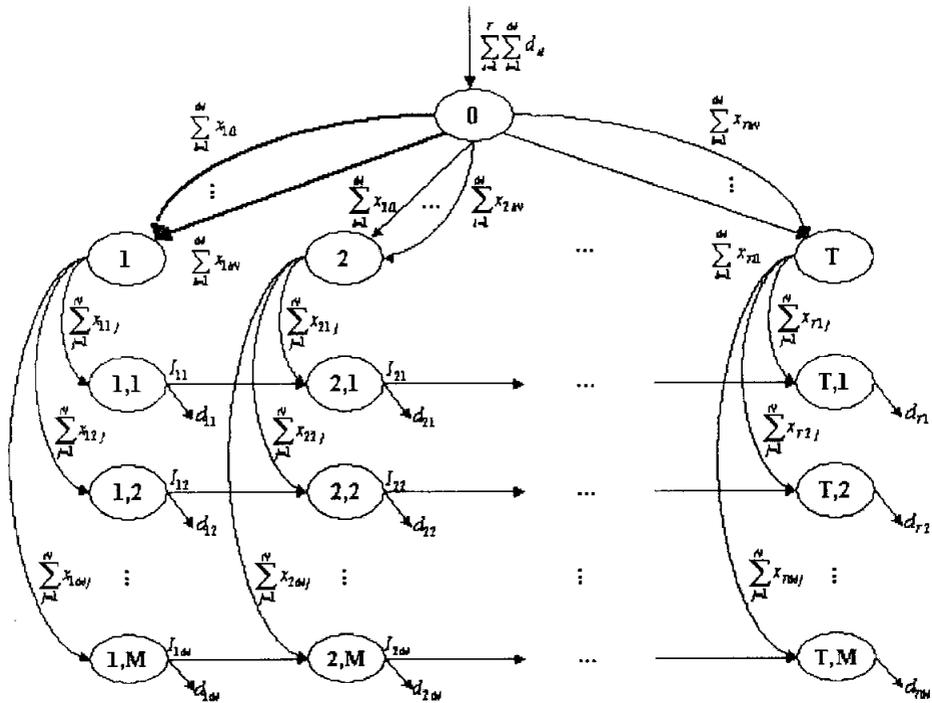
예를 들면 마디 (0), (1), (0)의 순서와 같이 생성되며 그 형태는 [그림 3-4]와 같다.

(2) 총괄수준과 개별수준 사이에 형성되는 경우

예를 들면 마디 (0), (1), (1,1), (2,1), (2), (0) 의 순서와 같이 생성되며 그 형태는 [그림 3-5]와 같다.

(3) 개별수준들 사이에 형성되는 경우

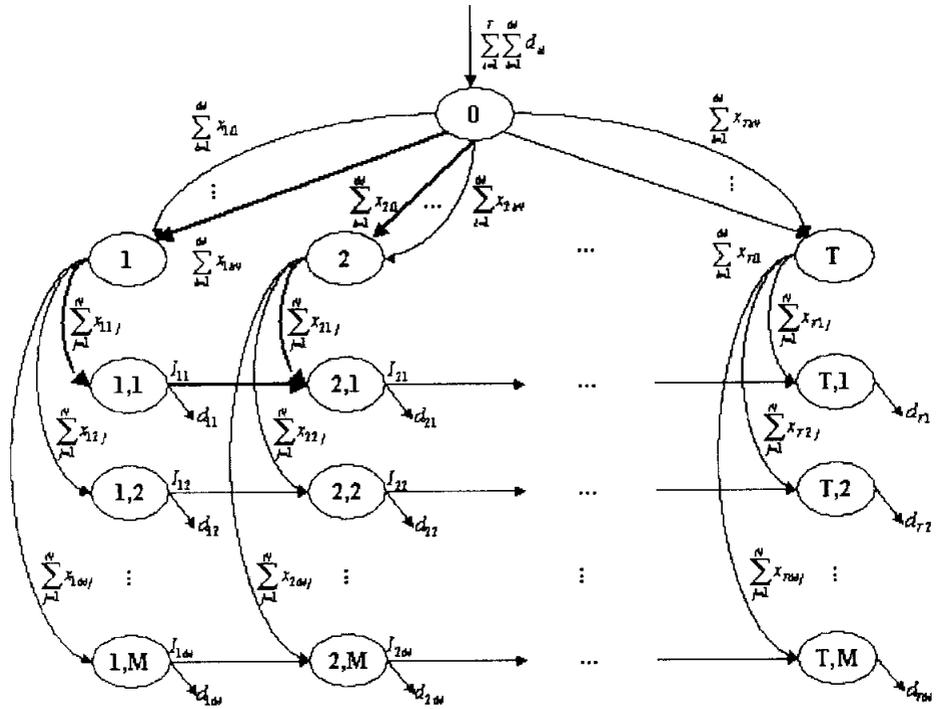
예를 들면 마디 (1,1), (1), (1,M), (2,M), (2), (2,1), (1,1)의 순서에 따라 형성되고 그 형태는 [그림 3-6]과 같다.



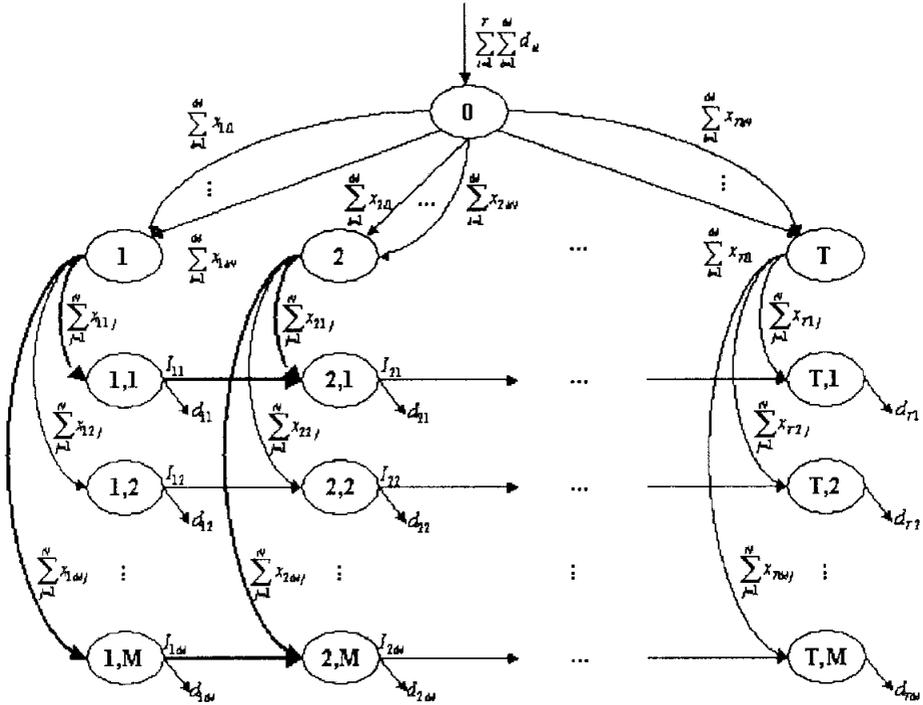
[그림 3-4] 총괄수준들 사이에 형성되는 루프의 형태

문제P의 제약식에 의해 형성되는 집합은 볼록집합(convex set)이고 목적함수는 오목함수이므로 문제P의 최적해는 정점(extreme point)에서 발생한다. 네트워케이론에서 볼 때, 그러한 정점은 극단흐름(extreme flow)으로 해석할 수

있다 (Florian et al. (1971)과 Zangwill(1968) 참조).



[그림 3-5] 총괄수준과 개별수준 사이에 형성되는 루프의 형태



[그림 3-6] 개별수준들 사이에 형성되는 루프의 형태

### 3.3 극단흐름(extreme flow)의 성질

네트워크상에서의 극단흐름은 호의 용량에 제한이 있을 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 구분되어 진다. 호의 용량에 제한이 없는 네트워크에서의 어떤 실행가능한 흐름(feasible flow)이 루프(loop)를 형성하지 않는다면 그 흐름은 극단흐름이다. 또한, 호의 용량에 제한이 있는 네트워크에서의 어떤 실행가능한 흐름(feasible flow)이 극단흐름이 되기 위해서는 각 루프(loop)들이 최소한 하나 이상의 포화호(saturated arc: 호의 용량만큼의 흐름을 가지는 호)를 포함하

여야 하고 그 역도 역시 성립한다. 이러한 극단흐름의 일반적인 성질을 이용하여 문제  $P$ 에 대한 극단흐름의 성질을 규명한다.

[정리 1] 문제  $P$ 에 대한 실행가능해가 다음의 성질을 만족하면 극단흐름이다.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot I_{t-1,i} = 0, \quad \forall t, i.$$

[증명] 제품  $i$ 에 대해 상기의 성질이 만족되면 네트워크에서 루프의 형성을 방해하게 되며 이것은 극단흐름이다. 따라서, 증명은 완료된다.

그러나,  $\sum_{j=1}^N x_{ij} \cdot I_{t-1,i} \neq 0$ 의 성질을 갖는 실행가능해라면 [정리2], [정리3] 그리고 [정리 4]의 성질을 만족해야만 그 흐름은 극단흐름이 된다. 이를 설명하기 위하여 다음과 같이 부분운송컨테이너, 재생점, 생산점 그리고 부분총괄운송점을 정의한다.

(1) 부분운송컨테이너

$nW_j < \sum_{i=1}^M x_{ij} < (n+1)W_j$  ( $n$ 은 비음정수)이면, 컨테이너  $j$ 는 기간  $t$ 에서 부분운송컨테이너이다.

(2) 재생점

제품  $i$ 에 대해  $I_{it} = 0$ 이면, 기간  $t$ 는 제품  $i$ 에 대해 재생점이다.

(4) 생산점

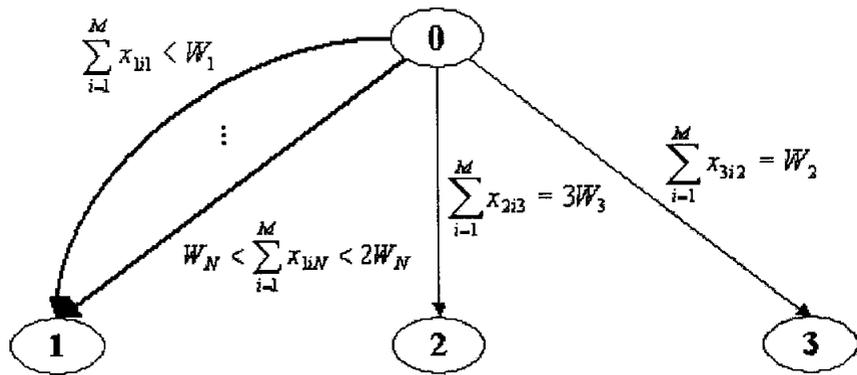
$\sum_{j=1}^N x_{ij} > 0$ 이면, 기간  $t$ 는 제품  $i$ 에 대해 생산점이다.

(4) 부분총괄운송점

제품  $i$ 에 대해 기간  $t$ 가 생산점이고 부분운송컨테이너를 포함한다면, 기간  $t$ 는 제품  $i$ 에 대해 부분총괄운송점이다.

[정리 2] 문제  $P$ 에 대한 최적해는 임의의 기간  $t$ 에서 최대한 하나의 부분운송컨테이너를 갖는다.

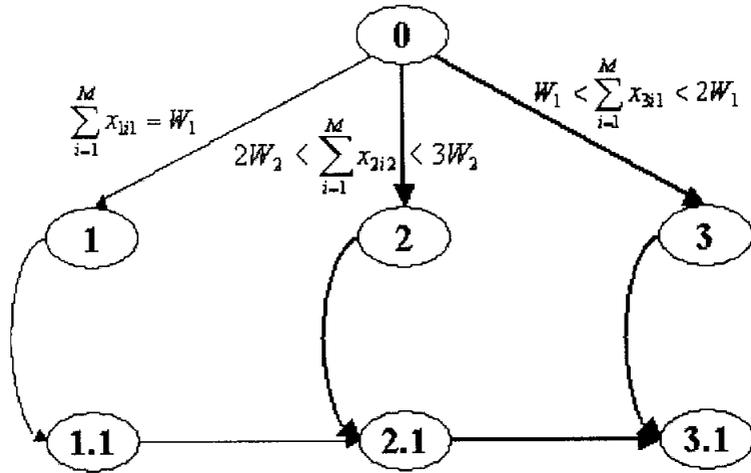
[증명] 기간  $t$ 에서 두개의 부분운송컨테이너를 갖는 최적해가 존재한다고 하자. 네트워크에서 볼 때, 이 경우는 [그림 3-7]과 같은 루프를 형성하게 만든다. 이 흐름이 극단흐름이기 위해서는 루프를 형성하는 호들중 최대한 하나만이 부분운송컨테이너를 가져야만 한다. 따라서 상기의 해는 최적해가 아니다. 따라서, 증명은 완료된다.



[그림 3-7] [정리 2]의 증명

[정리 3] 문제  $P$ 에 대한 최적해는 각 제품  $i$ 에 대한 2개의 연속적인 재생점들 사이에 제품  $i$ 에 대해 최대한 하나의 부분총괄운송점을 갖는다.

[증명] 제품  $i$ 에 대해 두개의 부분총괄운송점을 갖는 최적해가 존재한다고 하자. 네트워크에서 볼 때, 이 경우는 [그림 3-8]와 같은 루프를 형성하게 만든다. 이 흐름이 극단흐름이기 위해서는 (0,2)과 (0,3)의 흐름 중 최소한 하나는 포화흐름이어야 한다. 따라서 상기의 해는 최적해가 아니다. 따라서, 증명은 완료된다.



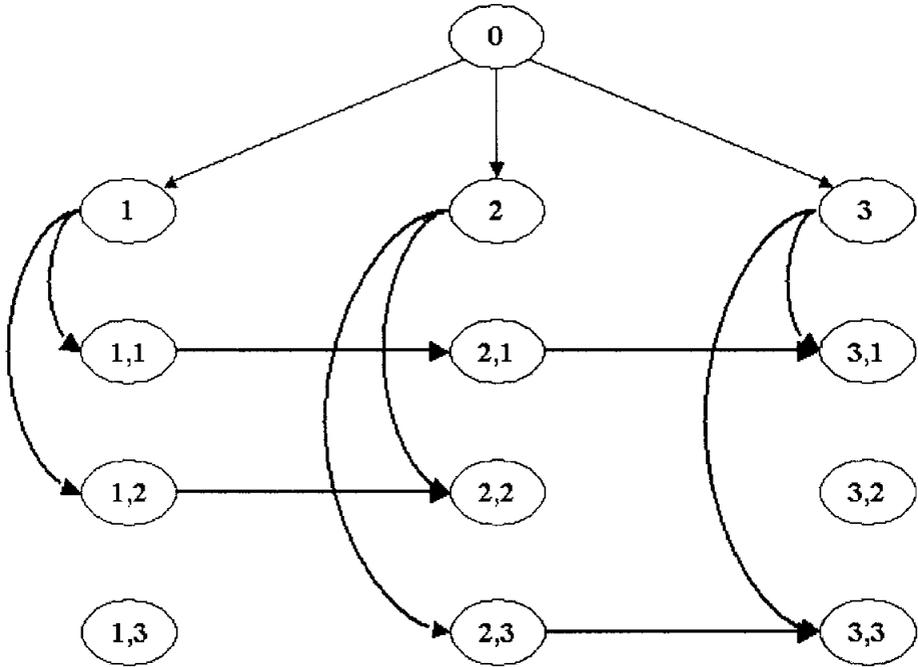
[그림 3-8] [정리 3]의 증명

[정리 2]와 [정리 3]이 만족되더라도 [정리 4]를 만족하지 않으면 그 흐름은 극단흐름이 아니다.

[정리 4] 문제  $P$ 에 대한 최적해는 개별흐름이 루프를 형성하지 않아야 한다.

[증명] 실행가능해에 대응되는 실행가능흐름이 [정리 2]와 [정리 3]의 성질을 만족하고 [그림 3-9]과 같은 형태의 루프를 형성한다고 하자. 이 경우에

개별흐름에서는 용량이 제한된 호를 갖지 않으므로 비포화들로 구성된 루프를 형성하게 된다. 따라서, 이 흐름은 극단흐름이 아니다. 그러므로, 증명은 완료된다.



[그림 3-9] [정리 4]의 증명

그러나 수리모형  $P$ 는 NP-hard문제가 되어 규모가 큰 문제에 대한 최적해를 찾기가 쉽지 않다. 특히, 이것은 단위 컨테이너의 운송량( $W$ )에 의해 분할되는 전체 수요에 의해 제한된다고 하더라도 값이 제한되지 않는 정수 변수  $\{y_i\}$ 가 존재하기 때문이다. 따라서, 다음장에서는 좋은 하한값(lower bound)을 얻기 위한 shortest path reformulation 모형을 제안한다.

## 제 4 장 Shortest Path Reformulation 모형

문제  $P$ 는 잠재적으로 매우 큰 혼합 정수계획법 문제이다. 문제  $P$ 는  $2MN+MT$ 개의 선형 변수,  $MT$ 개의 0-1 변수,  $NT$ 개의 비음 정수 변수와  $MT+NT+M$ 개의 제약식을 가진다. 따라서, 규모가 큰 문제에 대한 최적해를 효율적으로 찾을 수 있는 모형이 요구된다. 이러한 관점에서 Eppen과 Martin(1987)은 용량제약하의 동적생산계획문제에 대한 하한값(lower bound)을 빠르게 찾을 수 있는 방안을 제안하였다. 본 논문에서는 Eppen과 Martin(1987)에 의해 제안된 네트워크 모형화 방법을 본문제  $P$ 에 맞게 수정하여 적용하고자 한다. 용량제약하의 동적생산계획문제와 마찬가지로 문제  $P$ 에서 용량제약이 없는 경우에  $\sum_{j=1}^N x_{ij}^* \cdot I_{t-1,i}^* = 0$ , for  $t=2, \dots, T$ 를 만족하는 최적해  $(x^*, z^*, I^*)$ 가 존재한다는 것이 보여질 수 있다.

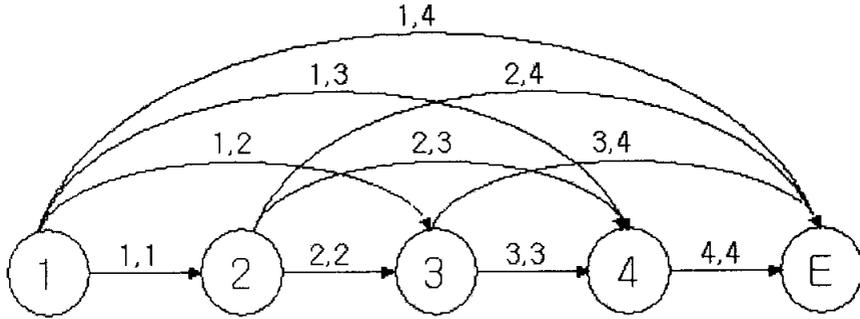
우리의 모형은 단일 제품의 동적생산계획문제에 대한 네트워크 표현을 사용한다. 각각의 제품을 위한 동적생산계획문제는 그래프  $G=(N, A)$ 에 의해 표현되어진다. 노드 집합은  $N=\{t\}$ 이고 여기서  $t$ 는 계획기간을 나타내는 첨자이다. 호 집합은  $A=\{(s, t): s \leq t\}$ 이고 여기서  $(s, t)$ 는 기간  $s$ 에서 제품  $i$ 의 생산량이  $\sum_{k=s}^t d_{ki}$ 이라는 것을 의미한다. [그림 4-1]은 단일 제품에 대한 그래프  $G$ 의 표현이다. Shortest path reformulation 모형을 개발하기 위해 다음과 같은 기호를 정의한다.

$$d_{ist} = \sum_{k=s}^t d_{ki} \quad (t \geq s),$$

$w_{itk}$  = 호  $(t, k)$ 가 선택되면 1, 아니면 0,

$c_{itk}$  = 호  $(t, k)$ 의 선택 비용,

$$= \sum_{s=t}^{k-1} h_s \cdot d_{i,s+1,k}.$$



[그림 4-1] 용량제약이 없는 문제에 대한 기간 4인 그래프  $G$

또한,  $b_i = \min\{t : d_{it} > 0\}$  라고 정의한다. 문제  $P$ 의 그래프  $G$ 에 대한 shortest path (SP) 모형을 다음과 같은 혼합정수계획 모형으로 제시할 수 있다.

$$(SP) \quad \text{Minimize} \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{k=t}^T c_{itk} \cdot w_{itk} + S_i \cdot z_{it} \right\} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N F_j \cdot y_{tj} \quad (9)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^M \sum_{k=t}^T d_{itk} \cdot w_{itk} \leq \sum_{j=1}^N W_j \cdot y_{tj}, \quad \forall t, \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^{b_i} \sum_{k=1}^T w_{itk} = 1, \quad \forall i, \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{t-1} w_{i,k,t-1} - \sum_{k=t}^T w_{itk} = 0, \quad \forall i, t > b_i, \quad (12)$$

$$\sum_{k=t}^T w_{itk} \leq z_{it}, \quad \forall i, t, \quad (13)$$

$$w_{ik} \geq 0, \quad \forall i, t, k \geq t, \quad (14)$$

$$z_{it} \in \{0,1\}, \quad \forall i, t, \text{ and} \quad (15)$$

$$y_j: \text{nonnegative integer}, \quad \forall t, j. \quad (16)$$

제약식 (10)은 전체 생산량은 그 기간에 사용된 컨테이너의 수와 관련된 전체 운반 용량에 의해 제한된다는 것을 의미한다. 제약식 (11), (12) 그리고 (13)은 flow balance 방정식들이다. 제약식 (11)과 (12)는 flow balance를 유지하도록 하는 반면 제약식 (13)은 경계 조건을 유도한다. 제약식(13)은 흐름 양이 실수값을 갖더라도 생산준비의 정수성질(integrality)을 만족시킨다. 그러나, 문제  $SP$ 에는 값이 제한되지 않는 정수 변수  $\{y_j\}$ 가 여전히 존재한다. 그 변수들은 문제  $SP$ 의 해 탐색 속도를 현저하게 증가시킨다. 그러므로, 본 논문에서는 문제  $P$ 와 문제  $SP$ 에 대해 좋은 하한값을 효율적으로 얻을 수 있는 LP relaxation 모형을 제안한다.

Eppen과 Martin(1987)에서 처럼, 여유 변수  $u_{it}$ 를 추가하고 목적함수 계수들을 조정한다.  $u_{it}$ 와 관련된 목적함수 계수로 고정비  $S_i$ 를 사용한다. 또한  $w_{ik}$ 를 위한 목적함수 계수로서 다음의 계수를 이용한다.

$$c_{ik}^1 = S_i + \sum_{s=t}^{k-1} h_i \cdot d_{i,s+1,k}. \quad (17)$$

비용 계수 (17)은 기간  $t$ 에서 기간  $k$ 까지의 누적 수요를 생산하는 데 발생하는 생산준비비용과 재고유지비용을 포함하고 있다. 그때, 다음과 같이 문제  $SP$ 에 대한 LP relaxation 모형을 제시할 수 있다.

$$(SPR) \quad \text{Minimize} \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{k=t}^T c_{ik}^1 \cdot w_{ik} + S_i \cdot u_{it} \right\} + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N F_j \cdot y_j \quad (18)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^M \sum_{k=t}^T d_{ik} \cdot w_{ik} \leq \sum_{j=1}^N W_j \cdot y_{ij}, \quad \forall t, \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^{b_i} \sum_{k=1}^T w_{ik} = 1, \quad \forall i, \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^{t-1} w_{i,k,t-1} - \sum_{k=t}^T w_{ik} = 0, \quad \forall i, t > b_i, \quad (21)$$

$$\sum_{k=t}^T w_{ik} + u_{it} = z_{it}, \quad \forall i, t, \quad (22)$$

$$\sum_{s=1}^t \sum_{j=1}^N y_{sj} \geq L_t, \quad \forall t, \quad (23)$$

$$\sum_{s=t}^T \sum_{j=1}^N y_{sj} \leq U_t, \quad \forall t, \quad (24)$$

$$u_{it} \geq 0, \quad \forall i, t, \quad (25)$$

$$w_{ik} \geq 0, \quad \forall i, t, k \geq t, \quad (26)$$

$$0 \leq z_{it} \leq 1, \quad \forall i, t, \text{ and} \quad (27)$$

$$y_{ij} \geq 0, \quad \forall t, j. \quad (28)$$

단,  $\langle x \rangle = x$ 보다 크거나 같은 최소 정수,

$$L_t = \min_j \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^t d_{si} / W_j \right\} \text{ 그리고}$$

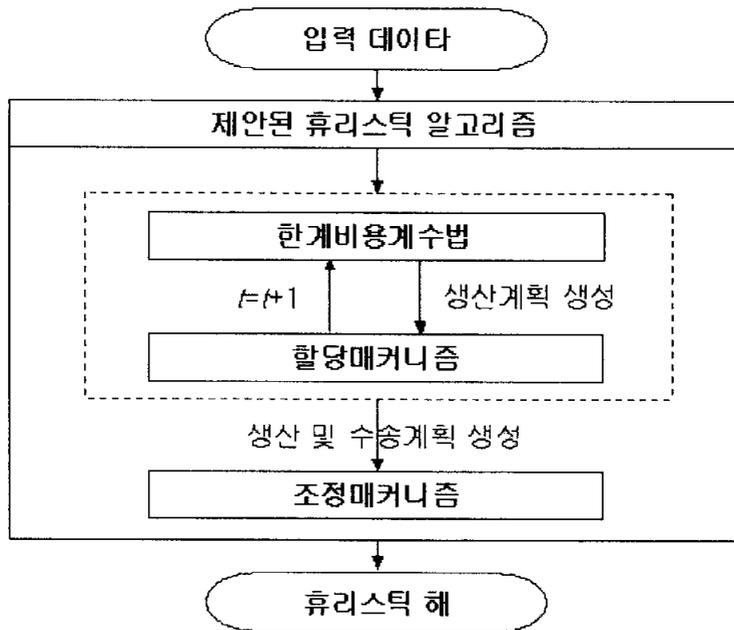
$$U_t = \max_j \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{s=t}^T d_{si} / W_j \right\} + (T - t + 1) \text{ 이다.}$$

제약식 (23)과 (24)는 경계 조건을 강화시킨다. 이 제약식들이 문제 *SPR*의 해 탐색 속도를 매우 증가시킨다.

그러나, 문제 *SP*는 문제 *P*와 마찬가지로 NP-hard문제가 된다. 따라서, 다음 장에서 정리 1, 2, 3 그리고 4의 특성들을 근간으로 하여 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

## 제 5 장 휴리스틱 알고리즘

본 논문에서 개발된 휴리스틱 알고리즘은 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 먼저 한계비용계수를 이용하여 주어진 수요에 대한 총괄생산계획을 산출하고, 다음으로 할당메커니즘을 이용하여 총괄생산계획을 최소의 운송비용으로 각 컨테이너에 할당하는 운송계획을 산출하며, 마지막으로 보다 더 최적해에 가까운 해로 조정하기 위한 조정메커니즘으로 구성된다. 그림[5-1]은 휴리스틱 알고리즘의 개략적인 구성도를 나타낸다.



[그림 5-1] 휴리스틱 알고리즘의 개략적인 구성도

## 5.1 한계비용계수

본 장에서는 현재의 생산 및 운송 계획에 수요  $d_{it}$ 를 포함함으로써 비용절감이 가능한 지를 판별할 수 있는 한계비용계수를 개발한다. 이를 위하여 다음과 같이 기호를 정의한다.

$$F_i(t) = \text{기간1부터 기간 } t \text{까지의 수요를 포함하는 생산 및 운송 계획에 대한}$$

$$\text{제품 } i \text{의 단위당 생산 및 재고 비용 } (t \leq T),$$

$$= \frac{S_i + H_i(t)}{t}$$

$$H_i(t) = \text{기간1부터 기간 } t \text{까지의 수요를 포함하는 생산 및 운송계획에 대응되}$$

$$\text{는 제품 } i \text{의 누적재고비용}$$

$$= h_i \sum_{k=1}^t (k-1)d_{ki}$$

$F_i(t)$ 를 이용하는 방법은 Silver-Meal(1973)의 논문에서 사용되었다. 이 방법은  $F_i(t)$ 를 최소로 하는 것이다. 만약 다음의 조건을 만족한다면 기간1부터 기간  $t$ 까지의 수요들을 포함하게 된다.

$$F_i(t) < F_i(t-1) \text{ 이고 } F_i(t) < F_i(t+1)$$

본 연구에서는 다음과 같은 한계비용계수를 사용한다:

$$M_i(t) = \frac{S_i + H_i(t-1) - h_i \cdot (t-1)^2 \cdot d_{ii}}{t(t-1)}$$

이 한계비용계수의 형태는 Lambrecht와 Vanderveken(1979), Dixon과 Silver(1981), 이운식과 한종한(1999)에서도 사용되어 그 효율성이 입증되었다.

$M_i(t)$ 가 양수라면, 현재의 로트에  $d_{ii}$ 를 포함시킴으로써 비용절감을 기대할

수 있다. 그러나,  $M_i(t)$ 가 음수라면, 비용증가가 일어난다. 따라서 문제P의 총괄생산 계획은 다음과 같은 절차를 통하여 얻을 수 있다.

[단계 1] 제품의 종류를 나타내는  $M$  개의 행들과 기간을 나타내는  $T$  개의 열들로 구성되는  $M \times T$  수요행렬을 만든다. 이 행렬의 요소  $(i,t)$ 는  $d_{it}$ 를 나타낸다.

$t=1$ 로 놓는다.

[단계 2]  $t=T$  라면, 각 제품에 대해, 현재의 로트에 기간  $t$ 에서의 양의 수요를 가지는 모든 제품들의 수요를 포함시킨다.

$$\sum_{j=1}^N x_{tj} = d_{ti}, \quad \forall i.$$

그리고 절차를 마친다.

아니면, 각 제품에 대해, 현재의 로트에 기간  $t$ 에서 양의 수요를 가지는 모든 제품들의 수요를 포함시킨다.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = d_{it}, \quad \forall i.$$

현기간에서 0의 수요를 갖는 제품은 고려대상에서 제외한다. 또한, 현기간에서 모든 제품의 수요가 0이라면 [단계 4]로 간다.

[단계 3] 고려대상의 모든  $i$ 와  $t(2 \leq t \leq T)$ 에 대해,  $M_i(t) > 0$ 을 만족하는  $M_i(t)$ 를 계산한다.

[단계 3.1] 각 제품에 대해, 현재의 로트에 가장 큰 양의  $M_i(t)$ 에 대응하는 수요를 포함시킨다.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = \sum_{j=1}^N x_{ij} + d_{it}.$$

각 제품에 대한 로트가 확정되면 [단계 4]로 간다.

아니면, 나머지 양의 한계비용계수들에 대해 [단계 3.1]을 반복한다.

[단계 4] 각 제품에 대해, 현재의 로트에 포함된 수요량 만큼을 수요행렬에서 차감하여 수요행렬을 수정한다.

또한, 할당 메커니즘에서 사용하기 위한 기간별 제품의 할당순서에 대한 집합  $A(t) = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$  를 다음과 같은 순서로 정렬시킨다:

- (1) 현재의 로트에 가장 많은 기간의 수요를 포함시킨 제품의 순서로  $a_1, a_2, \dots$ 에 우선 할당하고,
- (2) 2기간이상의 수요를 포함시킨 제품들중, 마지막 수요에 대한  $M_i(t)$ 가 가장 큰 제품의 순서로 차례로 할당하며,
- (3) 1기간의 수요만을 포함시킨 제품들에 대해서는 수요량이 큰 순서로 차례로 나열한다.

$t = t + 1$ 로 놓고 [단계 2]로 간다.

## 5.2 할당 메커니즘

한계비용계수  $M_i(t)$ 에 의해 형성된 총괄생산계획은 컨테이너의 크기와 비용을 고려하여 할당되어야 한다. 이 할당 메커니즘은 한계비용계수법에서 [단계 4]가 끝날 때, 적용시킬 수 있다. 다음과 같이 기호를 정의한다.

$\langle x \rangle = x$ 보다 크거나 같은 가장 작은 정수,

$$x_{ti\bullet} = \sum_{j=1}^N x_{tij} ,$$

$$x_{t\bullet\bullet} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{tij} .$$

특정기간  $t$ 에서의 총괄생산계획  $x_{t\bullet\bullet}$ 에 대해 다음과 같은 배낭문제(knapsack problem)를 풀면 특정기간  $t$ 에서의 컨테이너의 종류별 사용갯수  $y_{ij}^*$ 를 결정할 수 있다:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{j=1}^N F_j \cdot y_{ij} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^N W_j \cdot y_{ij} \geq x_{t\bullet\bullet} , \end{aligned}$$

$y_{ij}$  : nonnegative integer .

그러나, 제품별 생산량  $x_{ti\bullet}$ 를 어떤 컨테이너를 사용하여 운송할 것인가 하는 할당문제는 여전히 남게 된다. 우리는 이러한 할당방법을 효율적으로 할 수 있는 할당 메커니즘은 다음과 같이 제안한다.

[단계 1] 컨테이너 적재크기 단위당 운송비용  $U_j = F_j / W_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ )를 계산한다.

$$j^1 = \arg \min \{ U_j, j=1,2,\dots,N \} .$$

[단계 2]  $k_j = \langle x_{t\bullet\bullet} / W_j \rangle$  ( $j=1,2,\dots,N$ )를 계산한다.

$\hat{W} = W_{j^1}$ 으로 놓는다.

[단계 2.1] (컨테이너  $j^1$ 에 우선 할당한다.)

$k_{j^1} \leq 1$ 이면, [단계 2.4]로 간다.

[단계 2.2]  $x_{t,a_1,\bullet} \geq \hat{W}$ 이면, 다음과 같이 할당하고 [단계 2.1]로 간다:

$$y_{t,j^1} = y_{t,j^1} + 1, \quad k_{j^1} = k_{j^1} - 1,$$

$$x_{t,a_1,\bullet} = x_{t,a_1,\bullet} - \hat{W}, \quad x_{t,\bullet\bullet} = x_{t,\bullet\bullet} - \hat{W}, \quad x_{t,a_1,j^1} = x_{t,a_1,j^1} + \hat{W},$$

여기서,  $a_k$ 는 집합  $A(t)$ 의  $k$ 번째 원소의 값을 나타낸다.

[단계 2.3] 아니면, 다음을 할당한다:

$$x_{t,\bullet\bullet} = x_{t,\bullet\bullet} - x_{t,a_1,\bullet}, \quad x_{t,a_1,j^1} = x_{t,a_1,j^1} + x_{t,a_1,\bullet},$$

$$A(t) = A(t) - \{a_1\}, \quad \hat{W} = \hat{W} - x_{t,a_1,\bullet}.$$

만일  $A(t) \neq \{\emptyset\}$ 이면 [단계 2.1]로 간다.

[단계 2.4] 만일  $x_{t,\bullet\bullet} = 0$ 이면, 이 메커니즘을 종료한다.

[단계 2.5] 다음을 계산하고 이 메커니즘을 종료한다:

$$k_j = \langle x_{t,\bullet\bullet} / W_j \rangle \quad (j=1,2,\dots,N),$$

$$\hat{U}_j = k_j \cdot F_j / x_{t,\bullet\bullet},$$

$$j^2 = \operatorname{argmin}\{\hat{U}_j, j=1,2,\dots,N\},$$

$$x_{t,i,j^2} = x_{t,i,j^2} + x_{t,i,\bullet}, \quad \text{for } i \in A(t).$$

### 5.3 조정 메커니즘

앞서 소개한 한계비용계수 및 할당 메커니즘을 기초로 한 휴리스틱은 제한 기능없이 단순히 단방향으로만 작동하여 해의 산출은 용이하나, 최적해와 비교하여 볼 때 상당히 열악한 해를 제공할 수 있다. 따라서 우수한 해로 효율적으로 변환시킬수 있는 조정 메커니즘을 제안한다. 조정 메커니즘의 설명을 위해 요구되는 기호를 다음과 같이 정의한다.

$(x)^+ = x \geq 0$ 이면  $x$ , 아니면  $0$ ,

$$x_{i \bullet j} = \sum_{i=1}^M x_{ij} .$$

이러한 기호를 바탕으로 조정 메커니즘은 다음의 절차를 따른다.

[단계 1] 특정 부분총괄운송점에서의 운송량의 일부를 직전 부분총괄운송점으로 옮김으로써, 컨테이너의 전체 사용대수를 줄여 발생될 수 있는 비용의 절감효과를 평가한다.

$$t_1 = T .$$

[단계 1.1] 다음을 계산한다:

$$\varepsilon_{ij} = \text{MOD}(x_{i \bullet j}, W_j) \text{ for } 1 \leq t \leq t_1 \text{ and } \forall j ,$$

$$PS(t) = \{j \mid \varepsilon_{ij} > 0\}, \quad 1 \leq t \leq t_1 ,$$

$$t_1 = \arg \max \{t \mid PS(t) \neq \{\emptyset\}\} .$$

만일  $t_1 = 1$  이거나  $PS(t) - \{t_1\} = \{\emptyset\}$  라면, [단계 2]로 간다.

$$t_2 = \arg \max \{t \mid PS(t) - \{t_1\} \neq \{\emptyset\}\} ,$$

$$j_1 = PS(t_1) \text{ 그리고 } j_2 = PS(t_2) .$$

$\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2} \leq W_{j_2}$  이면, [단계 1.2]로 간다.

$\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2} > W_{j_2}$  이고  $\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2} > W_M$  이면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 [단계 1.1]로 간다.

$\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2} > W_{j_2}$  이고  $\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2} \leq W_M$  이면, [단계 1.3]으로 간다.

[단계 1.2] 다음을 계산한다:

$$H_{CUM} = 0,$$

$$\hat{x}_{ij} = x_{ij} \quad \text{for } t = t_1, t_2 \text{ and } \forall i, j,$$

$$M_1 = \{i \mid \hat{x}_{t_1, i, j_1} > 0, \quad \forall i\},$$

$$M_2 = \{i \mid \hat{x}_{t_1, i, j_1} \leq \varepsilon_{t_1, j_1}, \quad i \in M_1\}.$$

$M_2 = \{\emptyset\}$  이면, [단계 1.2.3]으로 간다.

[단계 1.2.1] 아니면, 다음을 계산한다:

$$\begin{aligned} H_{CUM} = H_{CUM} &+ \sum_{i \in M_2} S_i \cdot (\delta(\hat{x}_{t_1, i, j_1}) - \delta(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1}}^N \hat{x}_{t_1, i, j}))^+ - \sum_{i \in M_2} h_i \cdot (t_1 - t_2) \cdot \hat{x}_{t_1, i, j_1} \\ &- \sum_{i \in M_2} S_i \cdot (\delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_1, i, j}) - \delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_2, i, j}))^+. \end{aligned}$$

또한,  $i \in M_2$  에 대해 다음을 반복 계산한다:

$$\hat{x}_{t_2, i, j_2} = \hat{x}_{t_2, i, j_2} + \hat{x}_{t_1, i, j_1},$$

$$\varepsilon_{t_1, j_1} = \varepsilon_{t_1, j_1} - \hat{x}_{t_1, i, j_1},$$

$$\hat{x}_{t_1, i, j_1} = 0.$$

$\varepsilon_{t_1, j_1} > 0$  이면, [단계 1.2.3]으로 간다.

[단계 1.2.2]  $FR = F_{j_1} + H_{CUM}$  을 계산한다.

$FR \leq 0$  이면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 [단계 1.1]로 간다.

아니면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 다음을 계산한 후 [단계 1.1]로 간다:

$$x_{ij} = \hat{x}_{ij} \quad \text{for } t = t_1, t_2 \text{ and } \forall i, j.$$

[단계 1.2.3]  $i \in M_1 - M_2$  에 대해 다음을 계산한다:

$$FR(i) = F_{j_1} + H_{CUM} - h_i \cdot (t_1 - t_2) \cdot \varepsilon_{t_1, j_1} - S_i \cdot (\delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_1, j, j}) - \delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_2, i, j}))^+,$$

$$FR = \max\{FR(i), i \in M_1 - M_2\},$$

$$i_1 = \arg \max\{FR(i)\}.$$

$FR > 0$  이면, 다음을 계산하고 [단계 1.7]로 간다:

$$\hat{x}_{t_2, i_2, j_2} = \hat{x}_{t_2, i_2, j_2} + \varepsilon_{t_1, j_1},$$

$$\hat{x}_{t_1, i_2, j_1} = \hat{x}_{t_1, i_2, j_1} - \varepsilon_{t_1, j_1},$$

$$t_1 = t_2.$$

아니면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 [단계 1.1]로 간다.

[단계 1.3] 다음을 계산한다:

$$H_{CUM} = 0,$$

$$\hat{x}_{ij} = x_{ij} \quad \text{for } t = t_1, t_2 \text{ and } \forall i, j,$$

$$k_j = \langle (\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2}) / W_j \rangle, \quad j = j_2, \dots, N,$$

$$\hat{U}_j = k_j \cdot F_j / (\varepsilon_{t_1, j_1} + \varepsilon_{t_2, j_2}), \quad j = j_2, \dots, N,$$

$$j_3 = \arg \min \{ \hat{U}_j, j = j_2, \dots, N \},$$

$$M_3 = \{ i \mid \hat{x}_{t_1, i, j_1} > 0, \quad \forall i \},$$

$$M_4 = \{ i \mid \hat{x}_{t_1, i, j_1} \leq \varepsilon_{t_1, j_1}, \quad i \in M_3 \}.$$

$M_4 = \{\emptyset\}$ 이면, [단계 1.3.3]으로 간다.

[단계 1.3.1] 아니면, 다음을 계산한다:

$$\begin{aligned} H_{CUM} = & \sum_{i \in M_4} S_i \cdot (\delta(\hat{x}_{t_1, i, j_1}) - \delta(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_1}}^N \hat{x}_{t_1, i, j}))^+ - \sum_{i \in M_4} h_i \cdot (t_1 - t_2) \cdot \hat{x}_{t_1, i, j_1} \\ & - \sum_{i \in M_4} S_i \cdot (\delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_1, i, j}) - \delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_2, i, j}))^+. \end{aligned}$$

또한,  $i \in M_4$ 에 대해 다음을 반복 계산한다:

$$\hat{x}_{t_2, i, j_3} = \hat{x}_{t_2, i, j_2} + \hat{x}_{t_1, i, j_1},$$

$$\varepsilon_{t_1, j_1} = \varepsilon_{t_1, j_1} - \hat{x}_{t_1, i, j_1},$$

$$\hat{x}_{t_1, i, j_1} = 0.$$

$\varepsilon_{t_1, j_1} > 0$ 이면, [단계 1.3.3]으로 간다.

[단계 1.3.2] 아니면,  $FR = F_{j_1} + F_{j_2} - F_{j_3} + H_{CUM}$ 을 계산한다.

$FR > 0$ 이면, [단계 1.4]로 간다.

아니면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 [단계 1.1]로 간다.

[단계 1.3.3]  $i \in M_3 - M_4$  에 대해 다음을 계산한다:

$$FR(i) = F_{j_1} + F_{j_2} - F_{j_3} + H_{CUM} - h_i \cdot (t_1 - t_2) \cdot \varepsilon_{t_1, j_1} \\ - S_i \cdot (\delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_1, i, j}) - \delta(\sum_{j=1}^N \hat{x}_{t_2, i, j}))^+,$$

$$FR = \max\{FR(i), i \in M_3 - M_4\},$$

$$i_2 = \arg \max\{FR(i), i \in M_3 - M_4\}$$

$FR > 0$  이면, 다음을 계산하고 [단계 1.4]로 간다:

$$\hat{x}_{t_2, i_2, j_3} = \hat{x}_{t_2, i_2, j_3} + \varepsilon_{t_1, j_1},$$

$$\hat{x}_{t_1, i_2, j_1} = \hat{x}_{t_1, i_2, j_1} - \varepsilon_{t_1, j_1}.$$

아니면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 [단계 1.1]로 간다.

[단계 1.4] 다음을 계산한다:

$$M_5 = \{i \mid \hat{x}_{t_2, i, j_2} > 0, \quad \forall i\},$$

$$M_6 = \{i \mid \hat{x}_{t_2, i, j_2} \leq \varepsilon_{t_2, j_2}, \quad i \in M_5\}.$$

$M_6 = \{\emptyset\}$  이면, [단계 1.4.2]로 간다.

[단계 1.4.1]  $i \in M_6$  에 대해 다음을 반복 계산한다:

$$\hat{x}_{t_2, i, j_3} = \hat{x}_{t_2, i, j_3} + \hat{x}_{t_1, i, j_2},$$

$$\varepsilon_{t_2, j_2} = \varepsilon_{t_2, j_2} - \hat{x}_{t_2, i, j_2},$$

$$\hat{x}_{t_2, i, j_2} = 0.$$

$\varepsilon_{t_2, j_2} > 0$  이면, [단계 1.4.2]로 간다.

아니면,  $t_1 = t_2$  로 놓고 다음을 계산한 후 [단계 1.1]로 간다:

$$x_{ij} = \hat{x}_{ij} \quad \text{for } t = t_1, t_2 \text{ and } \forall i, j .$$

[단계 1.4.2] 다음을 계산하고 [단계 1.1]로 간다:

$$i_3 = \arg \min \{ \hat{x}_{t_2, i, j_2}, i \in M_5 - M_6 \} ,$$

$$\hat{x}_{t_2, i_3, j_3} = \hat{x}_{t_2, i_3, j_2} + \varepsilon_{t_2, j_2} ,$$

$$\hat{x}_{t_2, i_3, j_2} = \hat{x}_{t_2, i_3, j_2} - \varepsilon_{t_2, j_2} ,$$

$$x_{ij} = \hat{x}_{ij} \quad \text{for } t = t_1, t_2 \text{ and } \forall i, j ,$$

$$t_1 = t_2 .$$

[단계 2] 기간1에서의 과잉재고의 일부를 새로운 컨테이너의 사용, 새로운 생산점과 재고부족의 발생이 허용되지 않는 범위에서 바로 다음 부분총괄운송점으로 옮긴다.

[단계 2.1] 다음을 계산한다:

$$e_{ij} = \text{MOD}(x_{t, j}, W_j) \text{ for } 1 < t \leq T ,$$

$$t_3 = \arg \min \{ t \mid x_{t, \bullet} > 0, 1 < t \leq T \} ,$$

$$t_4 = \arg \min \{ t \mid e_{ij} > 0, 1 < t \leq T, \forall j \} ,$$

$$M_7 = \{ i \mid x_{1, i} > 0 \} \cap \{ i \mid x_{t_3, i} > 0 \} .$$

만약  $t_3 \neq t_4$  이거나  $M_7 = \{\emptyset\}$  이면 이 절차를 종료한다.

아니면, 다음을 계산하고 종료한다:

$$j_4 = \arg \min \{j \mid \varepsilon_{t_4, j} > 0, \forall j\} .$$

$$I_{\min}(i) = \min \left\{ \sum_{t=1}^s \left( \sum_{j=1}^N x_{tj} - d_{t,i} \right), 1 \leq s \leq t_4 - 1, W_{j_s} - e_{t_4, j_4} \right\}, \quad i \in M_7,$$

$$H_{\max} = \max \{h_i \cdot I_{\min}(i), i \in M_7\},$$

$$i^* = \arg \max \{h_i \cdot I_{\min}(i), i \in M_7\},$$

$$j_5 = \arg \min \{j \mid x_{1, i^*, j} > 0, \forall j\}$$

$$x_{1, i^*, j_5} = x_{1, i^*, j_5} - I_{\min}(i^*), \quad x_{t_3, i^*, j_4} = x_{t_3, i^*, j_4} + I_{\min}(i^*) .$$

## 제 6 장 수치예제

[표 6-1]에서와 같은 예제를 통하여 5장에서 제시한 휴리스틱 알고리즘의 적용절차를 알아본다.

[표 6-1] 수요행렬 및 비용계수

$d_{ij}$	$t$	1	2	3	4	5	$S_i$	$h_i$
1	1	80	75	84	70	90	100	1
2	2	25	40	17	23	20	120	0.9
3	3	102	110	129	120	117	150	1.1

$$T=5, M=3, N=3,$$

$$W_1 = 100, F_1 = 150; W_2 = 150, F_2 = 200; W_3 = 200, F_3 = 250.$$

▶ 한계비용계수법의 적용 ◀

[단계 1]  $t = 1$ .

[단계 2]  $x_{11\bullet} = 80, x_{12\bullet} = 25, x_{13\bullet} = 102$ .

$$[\text{단계 3}] M_1(2) = \frac{100 + 0 - 1 \times (2-1)^2 \times 75}{2(2-1)} = 12.5 > 0,$$

$$M_2(2) = \frac{120 + 0 - 0.9 \times (2-1)^2 \times 40}{2(2-1)} = 42.0 > 0,$$

$$M_2(3) = \frac{120 + 40 - 0.9 \times (3-1)^2 \times 17}{3(3-1)} = 16.5 > 0,$$

$$M_2(4) = \frac{120 + 74 - 0.9 \times (4-1)^2 \times 23}{4(4-1)} = 0.6 > 0,$$

$$M_3(2) = \frac{150 + 0 - 1.1 \times (2-1)^2 \times 110}{2(2-1)} = 20.0 > 0.$$

[단계 3.1]  $x_{11\bullet} = 80 + 75 = 155,$

$$x_{12\bullet} = 25 + 40 + 17 + 23 = 105,$$

$$x_{13\bullet} = 102 + 110 = 212.$$

[단계 4]  $A(1) = \{2, 3, 1\}$  을 정하고 할당 메커니즘으로 간다.

[표 6-2]  $t=1$ 일때, 한계비용계수법의 적용후 수정된 해

$t \backslash j$	1	2	3	4	5
1	155	0	84	70	90
2	105	0	0	0	20
3	212	0	129	120	117

▶ 할당 메커니즘의 적용 ◀

[단계 1]  $U_1 = 150/100 = 1.50$ ;  $U_2 = 200/150 = 1.33$ ;  $U_3 = 250/200 = 1.25$ .

$$j^1 = 3.$$

[단계 2]  $k_1 = \langle 472/100 \rangle = 5$ ,  $k_2 = \langle 472/150 \rangle = 4$ ,  $k_3 = \langle 472/200 \rangle = 3$ .

$$\hat{W} = W_3 = 200.$$

[단계 2.1]  $k_3 = 3 > 1$ 이므로 컨테이너 3에 우선 할당한다.

[단계 2.2]  $x_{12\bullet} = 105 < \hat{W} = 200$ 이므로 다음과 같이 할당한다:

$$x_{t23} = 0 + 105 = 105, \quad x_{t..} = 472 - 105 = 367,$$

$$A(t) = A(t) - \{2\} = \{3,1\}, \quad \hat{W} = 200 - 105 = 95.$$

$A(t) \neq \{\emptyset\}$  이므로 [단계 2.1]로 간다.

[단계 2.1]  $k_3 = 3 > 1$  이므로 컨테이너 3에 우선 할당한다.

$x_{t3.} = 212 > \hat{W} = 95$  이므로 다음과 같이 할당하고 [단계 2.1]로 간다:

$$k_3 = 3 - 1 = 2, \quad x_{t3.} = 212 - 95 = 117, \quad x_{t..} = 367 - 95 = 272,$$

$$x_{t33} = 0 + 95 = 95, \quad \hat{W} = 200.$$

[단계 2.1]  $k_3 = 2 > 1$  이므로 컨테이너 3에 우선 할당한다.

[단계 2.2]  $x_{t3.} = 117 < \hat{W} = 200$  이므로 다음과 같이 할당한다:

$$x_{t33} = 95 + 117 = 212, \quad x_{t..} = 272 - 117 = 155,$$

$$A(t) = A(t) - \{3\} = \{1\}, \quad \hat{W} = 200 - 117 = 83.$$

$A(t) \neq \{\emptyset\}$  이므로 [단계 2.1]로 간다.

[단계 2.1]  $k_3 = 2 > 1$  이므로 컨테이너 3에 우선 할당한다.

$x_{t1.} = 155 > \hat{W} = 83$  이므로 다음과 같이 할당하고 [단계 2.1]로 간다:

$$k_3 = 2 - 1 = 1, \quad x_{t1.} = 155 - 83 = 72, \quad x_{t..} = 155 - 83 = 72,$$

$$x_{t33} = 0 + 83 = 83, \quad \hat{W} = 200.$$

[단계 2.1]  $k_3 \leq 1$  이므로 [단계 2.3]으로 간다.

[단계 2.3]  $x_{i..} > 0$ 이므로 [단계 2.4]로 간다.

[단계 2.4] 다음을 계산한다:

$$U_1 = 1 \cdot 150 / 83 = 1.81 ,$$

$$U_2 = 1 \cdot 200 / 83 = 2.41 ,$$

$$U_3 = 1 \cdot 250 / 83 = 3.01 .$$

$i \in \{1\}$ 에 대해 다음을 할당한다:

$$x_{i11} = 0 + 83 = 83 .$$

[표 6-3]  $t=1$ 일때, 할당 메커니즘의 적용후 변화된 해.

$t \backslash i$	1			2			3			4			5		
1	72	0	83		0			84			70				90
2	0	0	105		0			0			0				20
3	0	0	212		0			129			120				117
$y_{ij}$	1	0	2												

이를 요약하면 다음과 같다.

▶ 한계비용계수법의 적용 ◀

[표 6-4]  $t=3$ 일때, 한계비용계수법의 적용후 수정된 해

$t \backslash i$	1	2	3	4	5
1	155	0	154	0	90
2	105	0	0	0	20
3	212	0	249	0	117

▶ 할당 메커니즘의 적용 ◀

[표 6-5]  $t=3$ 일때, 할당 메커니즘의 적용후 변화된 해.

$t \backslash i$	1			2			3			4			5		
1	72	0	83	0	0	0	3	0	151		0			90	
2	0	0	105	0	0	0	0	0	0		0			20	
3	0	0	212	0	0	0	0	0	249		0			117	
$y_{ij}$	1	0	2	0	0	0	1	0	2						

▶ 한계비용계수법의 적용 ◀

[표 6-6]  $t=5$ 일때, 한계비용계수법의 적용후 수정된 해

$t \backslash j$	1	2	3	4	5
1	155	0	154	0	90
2	105	0	0	0	20
3	212	0	249	0	117

▶ 할당 메커니즘의 적용 ◀

[표 6-7]  $t=5$ 일때, 할당 메커니즘의 적용후 변화된 해.

$t \backslash j$	1			2			3			4			5		
1	72	0	83	0	0	0	3	0	151	0	0	0	7	0	83
2	0	0	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0
3	0	0	212	0	0	0	0	0	249	0	0	0	0	0	117
$y_{ij}$	1	0	2	0	0	0	1	0	2	0	0	0	1	0	1

▶ 조정 메커니즘의 적용 ◀

[단계 1]  $t_1 = 5$

[단계 1.1] 다음을 계산한다:

$$\varepsilon_{s1} = \text{MOD}(27, 100) = 27,$$

$$\varepsilon_{31} = \text{MOD}(3,100) = 3 ,$$

$$\varepsilon_{11} = \text{MOD}(72,100) = 72 ,$$

$$\{PS(t)\} = \{1,-1,-1\} ,$$

$$t_1 = 5 , \quad t_2 = 3 , \quad j_1 = 1 , \quad j_2 = 1 .$$

[단계 1.2]  $\varepsilon_{51} + \varepsilon_{31} = 30 < W_1 = 100$  이므로 다음을 계산한다:

$$H_{CUM} = 0 ,$$

$$\hat{x}_{ij} = x_{ij} \quad \text{for } t=3,5 \text{ and } \forall i, j ,$$

$$M_1 = \{1,2\} , \quad M_2 = \{1,2\} .$$

[단계 1.3]  $H_{CUM} = 100 \cdot (1-1)^+ - 1 \cdot (5-3) \cdot 7 - 100 \cdot (1-1)^+$

$$+ 120 \cdot (1-0)^+ - 0.9 \cdot (5-3) \cdot 20 - 120 \cdot (1-0)^+ = -17.6$$

$$\hat{x}_{321} = 0 + 20 = 20 , \quad \hat{x}_{311} = 3 + 7 = 10 ,$$

$$\varepsilon_{51} = 27 - 20 = 7 , \quad \varepsilon_{31} = 7 - 7 = 0 ,$$

$$\hat{x}_{521} = \hat{x}_{511} = 0 .$$

$\varepsilon_{51} = 0$  이므로  $FR = F_{j_i} + H_{CUM}$  을 계산한다.

$FR = 100 - 17.6 = 82.4 > 0$  이므로, 다음을 계산하고 [단계 1.1]로

간다:

$$x_{ij} = \hat{x}_{ij} \quad \text{for } t=3,5 \text{ and } \forall i, j ,$$

$$t_1 = 3 .$$

[표 6-8]  $t_1 = 5$ 일 때, 조정 메커니즘의 적용후 변화된 해

$t \backslash i$	1			2			3			4			5		
1	72	0	83	0	0	0	10	0	151	0	0	0	0	0	83
2	0	0	105	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	212	0	0	0	0	0	249	0	0	0	0	0	117
$y_{ij}$	1	0	2	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1

이후의 조정 메커니즘 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

[표 6-9]  $t_1 = 3$ 일 때, 조정 메커니즘의 적용후 변화된 해

$t \backslash i$	1			2			3			4			5		
1	0	82	83	0	0	0	0	0	151	0	0	0	0	0	83
2	0	20	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	212	0	0	0	0	0	249	0	0	0	0	0	117
$y_{ij}$	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1

[표 6-10]은 휴리스틱 알고리즘을 적용하여 최종적으로 얻은 휴리스틱 해의 결과를 보여준다. 이 때, 휴리스틱해의 총비용함수는 2952.7로 CPLEX 패키지를 이용하여 구한 최적해의 총비용함수와 동일한 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다. [표 6-11]는 최적해를 보여준다.

[표 6-10] 휴리스틱 해

$t \backslash j$	1			2			3			4			5		
1	0	82	83	0	0	0	0	0	151	0	0	0	0	0	83
2	0	20	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	212	0	0	0	0	0	249	0	0	0	0	0	117
$y_{ij}$	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
총비용 : 2952.7															

[표 6-11] 최적해

$t \backslash j$	1			2			3			4			5		
1	0	0	165	0	0	0	0	0	151	0	0	0	0	0	83
2	0	102	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	212	0	0	0	0	0	249	0	0	0	0	0	117
$y_{ij}$	0	1	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
총비용 : 2952.7															

## 제 7 장 알고리즘 성능 분석

제안된 휴리스틱 알고리즘에 대한 성능분석을 위해, 다음과 같은 실험조건을 설계하여 시뮬레이션 분석을 한다.

(1) 계획기간( $T$ )은 4, 6, 8, 12, 18등의 5가지로 한다.

(2) 제품수( $M$ )는 3,6,8,10등의 4가지 경우로 하고, 각 제품에 대한 수요는

$N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 를 따른다.

- 평균  $\mu_i$ 는 균등분포  $U(25,100)$ 을 따른다.
- 표준편차  $\sigma_i$ 는 50%의 확률로  $\mu_i$ 와  $\mu_i/5$ 를 택한다.

(3) 각 제품에 대한 준비비용은 다음과 같이 정한다:

$$S_i = TS_i^2 \cdot \mu_i / 2, \quad TS_i = 1, 3, 6.$$

여기서,  $TS_i$ 는 EOQ의 Cycle Time을 의미한다.

(4) 각 제품에 대한 재고유지비용( $h_i$ )은 1.0으로 동일하게 둔다.

(5) 다중 컨테이너의 수( $M$ )는 2, 3, 4등의 3가지 경우로 한다.

(6) 컨테이너 적재용량 ( $W$ )는 다중 컨테이너의 수( $M$ )에 따라 다음과 같이 정한다:

- N=2 : 100, 200
- N=3 : 100, 200, 300
- N=4 : 100, 200, 300, 400

(7) 운송비( $F$ )는 적재용량( $W$ )에 따라 다음과 같이 3가지 경우로 한다.

- 적재용량에 비례 ( $W_j \times 1$ )

100, 200, 300, 400

- 적재용량에 비례하여 증가 ( $W_j \times 3 \times (j + (j-1) \times 0.25)$ )

300, 650, 1051, 1500

- 적재용량에 비례하여 감소 ( $W_j \times 3 \times (j - (j-1) \times 0.25)$ )

600, 1150, 1650, 2100

(8) 상기에 주어진 실험조건에 대해 3개의 수요표본을 발생시킨다.

(9) 본 시뮬레이션을 위하여 사용된 컴퓨터의 사양은 다음과 같다.

CPU : Pentium II-233

RAM : 320MB

Virtual Memory : 450MB

상기와 같은 실험조건을 바탕으로, 제안된 휴리스틱 알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 문제  $P$ 의 수리모형과 문제  $SPR$ 의 수리모형은 AMPL(Advanced Mathematical Programming Language)를 이용하여 모델링하였으며, Solver Engine은 ILOG사의 CPLEX 6.0.2를 이용하였다. 다양한 문제들을 대상으로 한 실험에서, 실험에 사용된 컴퓨터의 사양으로는  $T=12$ 이상이고  $M=8$ 이상인 문제에 대한 문제  $P$ 의 최적해의 산출은 과도한 컴퓨터 계산시간의 소모와 과도한 RAM용량의 요구로 불가능하였다. 따라서, 본 논문에서 문제  $SPR$ 의 수리모형이 제공하는 하한값(lower bound)의 성능을 분석 및 평가하기 위하여 문제  $P$ 에서 비교적 규모가 작은 문제( $T=4$  또는 6이고  $M=3$ 일때)에 대해서 최적해를 산출하였다. 또한, CPLEX패키지에서는 본 논문에서 다루고자 하는 형태의 혼합정수계획문제(Mixed Integer Problem)를 Branch & Bound 방법을 이용하여 최적해를 구하고 있어, 이

성질을 이용하여 탐색 노드수를 500,000으로 제한시키고 그 때까지의 최선해 (Best Solution)를 찾았다. 그래서 본 논문에서는 문제 *SPR*의 최적해(Optimal Solution)가 제공하는 하한값(lower bound)의 성능을 평가하기 위해 문제 *P*의 최적해(Optimal Solution)와 문제 *SPR*의 최적해(Optimal Solution)의 목적함수값을 비교하였고, 휴리스틱 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 휴리스틱해와 문제 *SPR*의 최적해(Optimal Solution)의 목적함수값의 비교, 휴리스틱해와 문제 *P*의 최선해(Best Solution)의 목적함수값의 비교 그리고 휴리스틱해와 문제 *P*의 최선해(Best Solution)의 계산시간을 비교하였다. 목적함수값의 비교는 아래의 기준을 이용하여 비교하였다.

$$\text{휴리스틱해와 최선해} \quad : \text{차이1} = \frac{(Z_{HEU} - Z_{BEST})}{Z_{BEST}} \times 100,$$

$$\text{최적해와 SPR해} \quad : \text{차이2} = \frac{(Z_{OPT} - Z_{SPR})}{Z_{OPT}} \times 100,$$

$$\text{휴리스틱해와 SPR해} \quad : \text{차이3} = \frac{(Z_{HEU} - Z_{SPR})}{Z_{SPR}} \times 100,$$

여기서  $Z_{HEU}$  = 제안된 휴리스틱으로 산출된 해의 목적함수 값

$Z_{BEST}$  = Branch & Bound 노드수를 500,000으로 제한후 산출된  
최선해(Best Solution)의 목적함수 값

$Z_{OPT}$  = 수리모형 *P*로 산출된 최적해(Optimal Solution)의  
목적함수 값

$Z_{SPR}$  = 수리모형 *SPR*로 산출된 최적해(Optimal Solution)의  
목적함수 값

[표 7-1]은 수리모형 *SPR*이 제공하는 하한값(lower bound)의 성능을 평가하기 위해 수리모형 *P*와 수리모형 *SPR*에 의해 산출된 최적해의 목적함수값 비교표이다. 과도한 계산시간의 요구로 인해 비교적 작은 문제( $T=4$  또는  $6$ 이고  $M=3$ 일 때)에 대한 탐색 노드수를 제한하지 않은 시뮬레이션 결과이다. 이때의 목적함수값의 차이의 평균은 6.52%이다. 비록 규모가 작은 문제에 대한 시뮬레이션 결과라 하더라도 수리모형 *SPR*의 최적해의 목적함수값은 문제 *P*에 대한 좋은 하한값(lower bound)을 제공한다. 그러므로, 수리모형 *SPR*의 최적해의 목적함수값은 규모가 큰 문제 *P*에 대해서도 좋은 하한값(lower bound)를 제공할 것으로 예상된다.

[표 7-2], [표 7-3] 그리고 [표 7-4]은  $T=4$ 인 경우의 시뮬레이션 결과이다. [표 7-3]에서 차이가 음수인 경우는 제안된 휴리스틱으로 산출된 해가 노드수를 500,000으로 제한후 산출된 최선해(Best Solution)보다 좋은 경우이다.  $T=4$ 인 경우에 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 평균은 10.11%이고 최선해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 6.26%이다.  $T=4$ 이고  $M=3$ 인 경우에는 최적해를 얻을 수 있었다. 또한,  $F$ (수송비용)가 일정 비율로 증가(Increasing)할 경우의 최선해와 휴리스틱해의 차이가 다른 경우(Uniform, Decreasing)에 비해 확연히 큰 경향이 확인된다. [표 7-4]에서 CPLEX 패키지를 이용한 계산시간을 볼 때,  $M=3$ 인 경우를 제외하고는 대부분 많은 계산 시간이 요구됨을 알 수 있다.

[표 7-5], [표 7-6] 그리고 [표 7-7]은  $T=6$ 인 경우의 시뮬레이션 결과이다.  $T=6$ 인 경우에 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 9.76%이고 최선해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 3.01%이다. *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 평균

이 10%이하로 떨어졌다.  $T=6$ 인 경우에 최선해와 휴리스틱해의 차이가 0인 경우는 제안된 휴리스틱 알고리즘과 최선해가 최적해를 제공하는 경우이다. [표 7-6]은 휴리스틱해의 계산시간과 CPLEX 패키지를 이용한 계산시간과의 비교 결과이다. CPLEX패키지를 이용하였을 경우에 거의 비슷한 계산시간을 요구하였으나  $M=8$ ,  $N=3$ , Decreasing의 경우 3245.130과 같이 과도한 계산시간을 요하는 경우도 관측되었다.

[표 7-8], [표 7-9] 그리고 [표7-10]는  $T=8$ 인 경우의 시뮬레이션 결과이다.  $T=8$ 인 경우에 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 12.18%이고 최선해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 -0.16%이다. *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 다시 10%이상으로 관측되었고, 최선해(Best Solution)의 대부분은 최적해에 근접하지 못함을 알 수 있다.  $T=8$ 인 경우  $T=6$ 인 경우와 마찬가지로 차이가 0인 경우는 제안된 휴리스틱 알고리즘이 최적해를 제공하는 경우이다. [표 7-9]는 휴리스틱 알고리즘의 계산시간과 CPLEX 패키지를 이용한 계산시간과의 비교 결과이다.  $M=3$ 인 경우를 제외한 대부분의 경우에 CPLEX 패키지가 많은 계산시간을 요구함이 관측되었다.

[표 7-11], [표 7-12] 그리고 [표7-13]는  $T=12$ 인 경우의 시뮬레이션 결과이다.  $T=12$ 인 경우에 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 9.34%이고 최선해와 휴리스틱해의 차이의 전체평균은 -15.49%였다.  $T=12$ 인 경우에 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 평균은 다시 10% 미만으로 떨어졌고 최선해와 휴리스틱해의 차이의 평균은 모든 경우에 있어서 휴리스틱해가 최선해보다 우수하게 나타남을 알 수 있다. 이는 파라미터의 수가 늘어남으로 인해 많은 Branch & Bound의 탐색

노드수를 요하게 되는데 반해 노드수를 500,000으로 제한하였기 때문에 최적해에 근접하지 못 함을 알 수 있다. [표 7-13]는 휴리스틱 알고리즘의 계산시간과 CPLEX 패키지를 이용한 계산시간과의 비교 결과이다. 모든 경우에 CPLEX 패키지를 이용한 계산 시간이 높게 관측되었다.

[표7-14], [표7-15] 그리고 [표7-16]은  $T=18$ 인 경우의 시뮬레이션 결과이다.  $T=18$ 인 경우에 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 9.04%이고 최선해와 휴리스틱해의 차이의 전체 평균은 -26.04%이다.  $T=18$ 인 경우의 모든 결과는  $T=12$ 인 경우와 매우 비슷하게 관측되었다.

또한, [표7-17]은  $T$ ,  $M$ ,  $\#$  및  $F$ 의 변화에 따른 휴리스틱해와 *SPR*해의 차이의 평균을 보여준다. [표7-18]은  $T$ ,  $M$ ,  $\#$  및  $F$ 의 변화에 따른 휴리스틱해와 최선해(Best Solution)의 차이의 평균을 보여준다. [표 7-18]는 휴리스틱 알고리즘과 CPLEX 패키지 적용시의 평균 계산시간을 나타낸다.

이와 같은 시뮬레이션 결과를 종합하여 볼 때, 다음과 같은 관찰 및 분석이 가능하다.

- $T = 4$ 인 경우 운송비가 Increasing인 경우에 휴리스틱 알고리즘의 효율성이 비교적 낮고 운송비가 Uniform이나 Decreasing인 경우에 휴리스틱 알고리즘의 효율성이 비교적 우수함을 알 수 있다.
- $T = 6$ 인 경우는 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이는 10.11%이고 휴리스틱해와 최선해(Best Solution)와의 차이는 3.01%로서 휴리스틱 알고리즘의 효율성이 우수함을 알 수 있다.
- $T = 8$ 인 경우 *SPR*해와 휴리스틱해의 차이는 9.76%인데 반해 휴리스

틱해와 최선해의 차이는  $-0.16\%$ 로써 Branch & Bound의 탐색 노드수를 500,000으로 제한한 최선해가 휴리스틱해보다 나뉘을 알 수 있고 최적해에 도달하기 위해서는 훨씬 더 많은 시간이 요구됨을 예상할 수 있다.

- $T = 12$ 인 경우와  $T = 18$ 인 경우는 모든 최선해가 Branch & Bound의 탐색 노드수 500,000에서 산출됨으로써 최선해(Best Solution)를 찾기 위한 시간은  $T$ (계획기간의 길이)와  $M$ (제품의 수)의 크기가 증가함에 따라 기하급수적으로 증가함을 알 수 있다.
- $SPR$ 해와 제안한 휴리스틱해의 차이는 전체적으로 10%에 근접해 있어 제안한 휴리스틱 알고리즘의 효율성이 우수함을 알 수 있다.
- 본 연구에서 제안한 휴리스틱 알고리즘은 빠른 계산시간으로 아주 우수한 해를 효율적으로 제공한다고 할 수 있으며 문제의 규모 (즉,  $T$ (계획기간의 길이),  $M$ (제품의 수) 및  $M$ (다중 컨테이너의 수))가 증가할수록 휴리스틱 알고리즘은 더욱 효율적으로 작용할 수 있을 것으로 기대된다.

[표 7-1] 최적해와 SPR해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	OPT1	BPR1	GAPl	OPT2	BPR2	GAPl	OPT3	BPR3	GAPl	AVG
4	2	Uniform	2205.0	2117.0	4.18	1972.5	1884.0	4.70	2292.0	2151.0	3.77	4.21	
		Increasing	3205.0	3059.0	4.77	2772.5	2592.0	9.50	3292.0	3037.0	6.42	6.90	
		Decreasing	4505.0	4386.5	4.98	3922.5	3455.8	13.51	4592.0	4294.5	7.86	8.78	
	3	Uniform	2205.0	2117.0	4.18	1972.5	1884.0	4.70	2232.0	2151.0	3.77	4.21	
		Increasing	3205.0	3059.0	4.77	2772.5	2592.0	9.50	3292.0	3037.0	6.42	6.90	
		Decreasing	4505.0	4276.3	5.85	3839.0	3411.0	12.55	4582.0	4190.5	9.34	9.08	
4	Uniform	2205.0	2117.0	4.18	1972.5	1884.0	4.70	2292.0	2151.0	3.77	4.21		
	Increasing	3205.0	3059.0	4.77	2772.5	2592.0	9.50	3292.0	3037.0	6.42	6.90		
	Decreasing	4470.0	4201.0	6.40	3764.5	3306.5	13.85	4492.0	4129.0	7.43	8.25		
5	2	Uniform	3112.5	2991.5	4.04	2284.5	2198.0	6.85	3109.0	2951.5	5.13	5.94	
		Increasing	4712.5	4409.5	6.87	3284.5	3066.0	7.19	4913.0	4149.5	6.94	6.98	
		Decreasing	6912.5	6382.0	8.31	4884.5	4389.0	8.88	5969.0	5300.9	10.81	10.00	
	3	Uniform	3112.5	2991.5	4.04	2284.5	2198.0	6.85	3109.0	2951.5	5.13	5.94	
		Increasing	4712.5	4409.5	6.87	3284.5	3066.0	7.19	4913.0	4149.5	6.94	6.98	
		Decreasing	8862.5	8229.8	10.18	4845.0	4272.8	8.71	5820.5	5357.3	10.89	7.25	
4	Uniform	3112.5	2991.5	4.04	2284.5	2198.0	6.85	3218.5	2951.5	9.05	6.65		
	Increasing	4712.5	4409.5	6.87	3284.5	3066.0	7.19	4813.0	4149.5	6.94	6.98		
	Decreasing	6712.5	6068.0	10.62	4845.0	4201.0	10.57	5788.0	5550.8	9.82	8.94		
Total												117.29	
Average												6.52	

[표 7-2] T=4인 경우의 SPR해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	HEU1	BPR1	GAP1	HEU2	BPR2	GAP2	HEU3	BPR3	GAP3	AVG
4	2	Uniform	2440.0	2117.0	15.54	2057.0	1984.0	8.18	2322.5	2151.0	8.02	10.91	
		Increasing	6698.0	6059.0	20.92	2857.0	2592.0	12.94	9379.5	9087.0	11.08	14.91	
		Decreasing	5265.5	4986.5	20.04	9922.5	9455.9	19.31	4862.0	4294.5	6.56	14.08	
		Uniform	2970.0	2117.0	11.95	2057.0	1984.0	9.18	2929.5	2151.0	8.02	9.72	
	3	Increasing	6970.0	6059.0	10.17	2937.0	2592.0	12.84	9479.5	9087.0	14.87	12.48	
		Decreasing	5185.5	4276.9	20.80	9861.0	9411.0	19.19	4812.0	4190.5	10.06	14.88	
		Uniform	2970.0	2117.0	11.95	2057.0	1984.0	9.18	2929.5	2151.0	8.02	9.72	
		Increasing	9970.0	9059.0	10.17	2857.0	2592.0	12.94	9929.5	9087.0	9.49	10.81	
	4	Decreasing	5096.0	4201.0	21.90	9981.0	9306.5	16.77	4482.0	4129.0	8.22	15.49	
		Uniform	7560.0	7406.0	2.08	7797.0	7286.0	7.01	10471.5	7941.0	42.04	17.25	
		Increasing	12110.0	11494.0	5.91	12997.0	11164.0	11.04	12056.0	10871.0	18.41	11.79	
		Decreasing	18106.0	17019.0	6.98	17541.5	16511.5	6.24	17205.0	15289.5	12.57	8.40	
5	Uniform	7560.0	7406.0	2.08	7622.0	7286.0	4.81	8819.5	7941.0	17.42	8.04		
	Increasing	12510.0	11494.0	9.41	12422.0	11104.0	11.27	12799.5	10871.0	19.67	19.45		
	Decreasing	17547.0	16490.5	6.41	17002.5	16051.8	5.92	16507.0	14867.2	11.09	7.79		
	Uniform	7792.5	7406.0	4.81	7622.0	7286.0	4.81	8079.0	7941.0	18.14	9.19		
6	Increasing	12782.5	11494.0	11.82	12722.0	11164.0	19.96	19179.0	10871.0	29.45	16.94		
	Decreasing	17106.0	16062.0	6.49	16702.5	15542.0	7.47	16406.0	14501.0	19.19	9.09		
	Uniform	9279.5	8987.0	3.42	9880.5	9456.0	4.94	10696.5	9288.0	14.79	7.50		
	Increasing	15829.0	14487.0	7.88	15880.5	14786.0	7.40	16187.5	14014.0	15.51	10.26		
7	Decreasing	22647.5	22087.0	2.54	22649.5	22115.5	2.41	22205.0	20521.5	8.20	4.99		
	Uniform	9180.5	8987.0	2.99	1001.0	9450.0	5.99	10682.5	9288.0	15.01	7.78		
	Increasing	15980.5	14487.0	10.81	16710.5	14786.0	18.15	16698.0	14014.0	18.72	14.06		
	Decreasing	22040.0	21447.0	2.76	23091.5	21425.9	7.77	22072.5	19990.8	10.75	7.09		
8	Uniform	9184.0	8987.0	2.42	9926.5	9456.0	5.04	10656.5	9288.0	14.79	7.40		
	Increasing	16697.5	14487.0	15.26	17026.5	14786.0	15.29	17187.5	14014.0	22.29	17.61		
	Decreasing	21947.5	20707.0	8.09	21455.5	20786.0	4.98	19194.5	19940.0	8.78	5.09		
	Uniform	14464.0	14299.0	1.15	14227.5	13950.0	4.99	15194.5	13740.0	10.15	5.29		
9	Increasing	24864.0	23591.0	5.66	22677.5	21092.0	7.52	22994.5	20574.0	11.47	8.22		
	Decreasing	97946.0	96271.0	2.96	92679.0	91969.5	4.17	92965.5	90016.5	7.89	4.99		
	Uniform	14514.5	14299.0	1.81	14140.0	13690.0	8.74	15194.5	13740.0	10.15	5.19		
	Increasing	26014.5	23591.0	10.55	23999.5	21092.0	19.02	23694.5	20574.0	14.88	12.92		
10	Decreasing	95714.0	95117.0	1.70	91799.5	90461.8	4.99	91515.5	29162.2	8.07	4.72		
	Uniform	14484.0	14299.0	1.15	14424.5	13950.0	5.89	15219.5	13740.0	10.74	5.91		
	Increasing	26864.0	23591.0	14.16	24824.5	21092.0	16.76	24615.5	20574.0	19.16	16.69		
	Decreasing	94704.5	93969.0	2.96	90720.0	29954.0	9.95	90906.5	28908.0	9.18	5.16		
Total											999.99		
Average											10.11		

[표 7-3] T=4인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 부적합수값 비교

T	M	N	F	HEU1	BEET1	GAP1	HEU2	BEET2	GAP2	HEU3	BEET3	GAP3	AVG3
10	2	Uniform	2446.0	2205.0	10.99	2057.0	1972.5	4.28	2929.5	2292.0	4.10	6.44	
		Increasing	3936.0	3205.0	15.92	2957.0	2772.5	6.05	3979.5	3292.0	4.98	7.58	
		Decreasing	5205.5	4605.0	14.94	3922.5	3922.5	0.00	4662.0	4692.0	0.65	5.00	
		Uniform	2970.0	2205.0	7.48	2057.0	1972.5	4.28	2929.5	2292.0	4.10	5.29	
	3	Increasing	3970.0	3205.0	5.15	2957.0	2772.5	3.09	3479.5	3292.0	7.47	5.22	
		Decreasing	5165.5	4605.0	14.66	3961.0	3939.0	0.57	4812.0	4892.0	0.65	5.90	
		Uniform	2970.0	2205.0	7.48	2057.0	1972.5	4.28	2929.5	2292.0	4.10	5.29	
		Increasing	3970.0	3205.0	5.15	2957.0	2772.5	3.05	3479.5	3292.0	7.47	5.22	
	4	Decreasing	5970.0	5205.0	5.15	2957.0	2772.5	3.05	3929.5	3292.0	2.89	3.69	
		Uniform	5096.0	4470.0	14.00	3961.0	3784.5	2.56	4462.0	4492.0	0.88	5.75	
		Increasing	7550.0	7497.0	0.84	7997.0	7992.5	5.90	10471.5	7977.0	41.95	16.28	
		Decreasing	12110.0	11997.0	3.53	12997.0	11962.5	9.10	12935.0	10777.0	17.24	9.96	
5	Uniform	7860.0	7649.0	-1.16	7822.0	7998.5	3.02	8619.5	7846.5	12.72	4.86		
	Increasing	12510.0	11997.0	6.95	12422.0	11962.5	9.92	12769.5	10827.0	17.94	11.41		
	Decreasing	17847.0	17091.5	2.67	17002.5	16459.0	9.84	16507.0	15199.5	8.60	4.87		
	Uniform	7762.5	7801.0	-0.49	7822.0	7599.5	0.90	8679.0	8224.0	5.46	1.75		
6	Increasing	12762.5	11805.0	6.13	12722.0	11400.5	11.58	13173.0	11097.5	18.70	12.81		
	Decreasing	17105.0	16760.0	2.06	16702.5	16107.0	9.70	16405.0	15052.0	8.99	4.91		
	Uniform	9273.5	9059.5	2.36	9860.5	9817.5	3.60	10656.5	9998.0	14.12	6.70		
	Increasing	15629.0	14639.5	6.61	15800.5	14917.5	6.32	16187.5	14198.0	14.50	9.14		
7	Decreasing	22847.5	22998.5	-1.11	22849.5	22867.5	1.26	22205.0	20788.0	6.82	9.06		
	Uniform	9180.5	9266.0	-0.92	10010.5	9706.0	3.14	10082.5	9797.9	3.03	3.75		
	Increasing	15980.5	14659.5	9.01	16710.5	14944.5	11.92	16698.0	14941.0	16.02	12.28		
	Decreasing	22040.0	21766.5	1.26	23091.5	21477.0	6.18	22072.5	20276.5	8.86	5.49		
8	Uniform	9184.0	9391.5	-2.21	9926.5	9999.5	0.99	10656.5	10419.0	2.94	0.15		
	Increasing	16997.5	14838.0	12.59	17026.5	15097.0	13.29	17197.5	14726.0	10.98	14.05		
	Decreasing	21347.5	21229.0	0.56	21455.5	21219.0	1.14	21097.5	19725.0	6.95	2.79		
	Uniform	14464.0	14489.0	-0.17	14227.5	13708.0	3.79	15194.5	13809.5	9.17	4.26		
9	Increasing	24864.0	23789.5	4.55	22877.5	21808.0	6.49	22994.5	20898.5	9.74	6.90		
	Decreasing	37846.0	36825.5	1.41	32879.0	31814.5	2.72	32385.5	30548.5	5.95	3.96		
	Uniform	14914.5	14998.0	-0.57	14140.0	13785.5	2.72	15194.5	14186.0	6.84	9.00		
	Increasing	26014.5	23615.5	9.23	23998.5	21999.5	11.74	23634.5	21482.0	10.02	10.99		
10	Decreasing	35714.0	35771.5	-0.16	31799.5	30046.5	2.76	31915.5	29914.5	5.95	2.65		
	Uniform	14464.0	14919.5	-3.01	14424.5	14014.0	2.99	15215.5	15580.0	-2.94	-0.81		
	Increasing	26864.0	24177.0	11.11	24224.5	21922.5	14.04	24915.5	21924.5	13.90	19.02		
	Decreasing	34784.5	34725.5	0.11	30720.0	30111.0	2.02	30906.5	29091.0	6.24	2.79		
Total											225.21		
Average											6.26		

[표 7-4] T=4 인경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교

T	M	N	F	HEU1	BEST1	HEU2	BEST2	HEU3	BEST3	HEU_AVG	BEST_AVG	
4	8	2	Uniform	0.039	0.140	0.039	0.120	0.086	0.090	0.055	0.117	
			Increasing	0.029	0.190	0.029	0.110	0.091	0.090	0.026	0.110	
			Decreasing	0.016	0.160	0.029	0.190	0.029	0.110	0.021	0.199	
		3	Uniform	0.031	0.740	0.029	0.110	0.015	0.350	0.028	0.400	
			Increasing	0.051	0.250	0.031	0.160	0.016	0.400	0.026	0.270	
			Decreasing	0.029	0.240	0.031	0.160	0.031	0.260	0.029	0.220	
		4	Uniform	0.039	0.970	0.039	0.420	0.039	1.540	0.039	0.910	
			Increasing	0.039	0.280	0.039	0.280	0.039	0.580	0.039	0.378	
			Decreasing	0.039	0.290	0.047	0.270	0.039	0.310	0.042	0.270	
		6	2	Uniform	0.031	215.620	0.031	4.790	0.031	89.500	0.031	109.910
				Increasing	0.031	121.950	0.039	5.630	0.029	10.000	0.031	49.860
				Decreasing	0.039	167.360	0.047	40.630	0.047	21.640	0.044	76.348
	3		Uniform	0.055	470.900	0.047	399.070	0.047	364.270	0.049	391.419	
			Increasing	0.047	549.180	0.039	399.850	0.047	401.340	0.044	446.790	
			Decreasing	0.039	552.590	0.047	394.320	0.055	566.990	0.047	436.639	
	4		Uniform	0.069	599.870	0.069	376.070	0.055	498.690	0.060	451.540	
			Increasing	0.069	681.620	0.070	434.990	0.055	459.500	0.066	509.710	
			Decreasing	0.069	589.890	0.070	429.450	0.066	429.110	0.065	476.617	
	8		2	Uniform	0.047	445.600	0.055	32.190	0.047	351.210	0.049	276.399
				Increasing	0.039	520.540	0.047	25.170	0.055	94.720	0.047	219.477
				Decreasing	0.055	525.440	0.055	95.070	0.039	177.080	0.049	265.868
		3	Uniform	0.069	544.430	0.047	400.500	0.069	410.500	0.057	451.610	
			Increasing	0.055	605.440	0.055	454.370	0.055	441.370	0.055	500.598	
			Decreasing	0.055	597.520	0.047	444.380	0.055	431.160	0.052	491.028	
		4	Uniform	0.070	647.460	0.066	441.510	0.070	482.400	0.076	523.790	
			Increasing	0.078	708.000	0.070	459.350	0.078	471.480	0.076	546.277	
			Decreasing	0.078	675.080	0.078	474.220	0.070	450.290	0.076	539.197	
		10	2	Uniform	0.055	490.520	0.055	208.290	0.047	384.170	0.052	360.998
				Increasing	0.055	599.510	0.068	302.450	0.069	417.950	0.060	439.970
				Decreasing	0.047	559.690	0.047	459.770	0.047	444.140	0.047	489.867
	3		Uniform	0.069	592.980	0.070	410.570	0.070	419.860	0.068	470.868	
			Increasing	0.070	650.500	0.070	466.370	0.069	455.810	0.068	524.227	
			Decreasing	0.070	627.690	0.068	480.640	0.069	452.760	0.065	520.349	
	4		Uniform	0.079	706.050	0.066	426.690	0.066	5,206.100	0.089	2,112.999	
			Increasing	0.066	685.590	0.094	459.090	0.094	516.870	0.091	559.519	
			Decreasing	0.079	692.690	0.108	499.020	0.066	496.560	0.091	560.727	

[표 7-5] T=6인 경우의 SPR해와 후리스틱해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	HEH1	BRP1	QAP1	HEH2	BRP2	QAP2	HEH3	BRP3	QAP3	AVG										
10	2	Uniform	5112.5	2991.5	4.04	2945.0	2198.0	9.68	9219.0	2991.5	8.88	7.58											
		Increasing	4762.5	4493.5	8.01	3345.0	3086.0	9.10	4513.0	4149.5	8.76	8.62											
		Decreasing	6312.5	6382.0	8.31	5348.0	4989.0	22.02	6579.0	5800.5	18.92	14.55											
		Uniform	4108.0	2991.5	39.99	2345.0	2198.0	9.68	9219.0	2991.5	8.88	19.29											
	3	Increasing	5318.0	4409.5	34.21	3945.0	3006.0	9.10	4568.0	4149.5	9.97	17.76											
		Decreasing	7818.0	6228.8	25.48	4972.0	4272.8	16.97	6428.0	5657.5	19.54	18.47											
		Uniform	5112.5	2991.5	4.04	2945.0	2198.0	9.68	9219.0	2991.5	8.88	7.58											
		Increasing	4712.5	4409.5	6.87	3345.0	3006.0	9.10	4719.0	4149.5	13.58	9.85											
	4	Decreasing	6712.5	6086.0	10.62	4972.0	4201.0	16.95	6378.0	5580.8	14.81	14.60											
		Uniform	8979.5	8789.5	2.16	9177.0	8915.5	2.99	12992.5	10190.0	27.09	10.71											
		Increasing	15096.5	13927.5	7.98	14877.0	13978.5	6.47	18968.0	14988.5	14.98.5	19.57											
		Decreasing	21860.0	21000.0	4.10	22052.0	20946.0	5.93	22930.0	21486.0	8.72	5.99											
5	Uniform	9289.5	8789.5	5.80	9166.0	8915.5	2.81	11184.0	10180.5	9.66	8.09												
	Increasing	15248.5	13927.5	9.49	15118.0	13979.5	8.18	17114.0	14988.5	14.58	10.74												
	Decreasing	22668.5	20982.8	11.21	21482.5	20898.8	5.98	22818.0	20891.2	9.22	8.60												
	Uniform	8861.0	8789.5	0.81	9166.0	8915.5	2.81	11184.0	10180.5	9.66	4.49												
6	Increasing	14981.0	13927.5	7.42	15566.0	13979.5	11.40	19420.5	14988.5	90.00	16.27												
	Decreasing	20580.0	19785.5	4.02	20946.5	19791.5	6.16	21990.0	20280.5	8.05	6.08												
	Uniform	12228.0	11778.5	8.82	12561.0	12358.5	1.64	14799.0	13858.5	7.91	4.46												
	Increasing	21228.0	19718.5	7.67	20981.0	19884.5	5.41	23939.0	21184.5	10.12	7.78												
7	Decreasing	82177.5	30638.0	5.02	91188.0	30242.0	8.12	84551.0	31564.5	9.48	5.87												
	Uniform	19158.0	11778.5	15.99	12771.0	12588.5	9.34	14797.0	13858.5	8.34	7.80												
	Increasing	28868.0	19718.5	15.99	22121.0	19884.5	11.25	24297.0	21184.5	14.64	19.94												
	Decreasing	30726.5	28698.8	8.47	31969.5	28826.8	6.95	32910.0	30047.5	7.88	5.93												
8	Uniform	12195.5	11778.5	3.54	12882.5	12358.5	2.02	14812.0	13858.5	8.46	4.87												
	Increasing	22695.5	19718.5	15.11	22282.5	19884.5	12.06	24725.5	21184.5	16.66	14.61												
	Decreasing	30877.5	28854.5	6.01	30826.5	28410.5	7.45	31009.5	29750.5	6.30	6.59												
	Uniform	19905.5	18871.5	2.90	20992.5	18700.5	11.94	21419.5	20928.5	5.97	6.53												
9	Increasing	39805.5	31839.5	6.87	39982.5	28572.5	12.88	34283.5	31512.5	8.75	9.50												
	Decreasing	50229.0	48186.0	2.12	48181.5	44582.5	8.12	48991.5	46882.5	4.48	4.91												
	Uniform	18841.0	18871.5	2.49	20898.0	19700.5	11.75	21504.0	20928.5	5.78	6.67												
	Increasing	95191.0	81839.5	11.25	94907.0	28572.5	18.04	95504.0	31512.5	12.67	13.98												
10	Decreasing	48904.5	47840.8	2.05	47937.0	48228.5	9.80	48196.5	49519.5	5.88	5.78												
	Uniform	19897.5	18871.5	2.47	20978.0	18700.5	12.18	21446.5	20928.5	5.50	6.72												
	Increasing	38437.5	31839.5	15.19	38678.0	28572.5	20.05	39089.5	31512.5	24.08	19.95												
	Decreasing	48772.5	45995.5	8.21	48047.5	41844.5	10.04	48906.0	44098.5	10.91	9.72												
Total											44098.5	44098.5	10.91	44098.5	44098.5	10.91	44098.5	44098.5	10.91	44098.5	44098.5	10.91	44098.5
Average											44098.5	44098.5	10.91	44098.5	44098.5	10.91	44098.5	44098.5	10.91	44098.5	44098.5	10.91	44098.5

[표 7-6] T=6인 경우의 전산해와 후리스틱해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	HEU1	BEET1	QAP1	HEU2	BEET2	QAP2	HEU3	BEET3	QAP3	AVGS
10	2	Uniform	3112.5	3112.5	0.00	2945.0	2284.5	2.05	3219.0	3105.0	9.54	2.08	
			4702.5	4712.5	1.06	3945.0	3284.5	1.84	4819.0	4819.0	4.84	2.51	
		Decreasing	6912.5	6912.5	0.00	5948.0	4684.5	14.16	6579.0	5939.0	10.23	6.13	
		Uniform	4108.0	3112.5	93.91	2945.0	2284.5	2.05	3219.0	3105.0	9.54	19.97	
	3	Increasing	5918.0	4712.5	25.58	3945.0	3284.5	1.84	4819.0	4819.0	5.80	11.07	
			Decreasing	7818.0	6862.5	18.92	4872.0	4845.0	7.04	6429.0	5820.5	10.95	10.44
		Uniform	9112.5	9112.5	0.00	3945.0	2284.5	2.05	3219.0	3105.0	9.54	0.89	
		Increasing	4712.5	4712.5	0.00	3945.0	3284.5	1.84	4819.0	4819.0	5.27	5.71	
	4	Decreasing	6712.5	6712.5	0.00	4872.0	4845.0	7.04	6429.0	5769.0	10.58	5.87	
			Uniform	8979.5	9062.5	-0.92	9177.0	9041.0	1.50	12992.5	11065.0	16.98	5.82
		Increasing	15098.5	14061.0	6.94	14877.0	14829.0	4.82	16866.0	16876.0	0.23	6.59	
		Decreasing	21860.0	21911.0	2.58	22062.0	21472.0	2.74	22990.0	22892.5	0.16	1.89	
9	2	Uniform	9299.5	9411.0	-1.18	9166.0	9561.0	-4.19	11164.0	11979.0	-6.76	-4.02	
			Increasing	15249.5	14491.0	5.67	15116.0	14984.0	5.09	17114.0	16569.0	9.29	4.88
		Decreasing	22668.5	20948.5	8.21	21492.5	21049.0	1.82	22816.0	22149.0	9.05	4.96	
		Uniform	8861.0	9812.5	-9.70	9166.0	9848.5	-5.00	11164.0	12189.5	-8.98	-7.89	
	3	Increasing	14961.0	14492.5	3.29	15566.0	14868.0	4.78	19420.5	16908.5	14.86	7.61	
			Decreasing	20580.0	20440.0	0.59	20946.5	20609.0	1.04	21990.0	21901.0	2.99	1.79
		Uniform	12229.0	12104.5	0.59	12501.0	13155.5	-4.52	14799.0	15972.5	-4.12	-2.70	
		Increasing	21229.0	20082.5	5.71	20961.0	20204.5	5.74	23999.0	22617.5	9.19	4.21	
	4	Decreasing	32177.5	31276.0	2.88	31166.0	30950.0	1.09	34551.0	32919.0	4.96	2.88	
			Uniform	19159.0	12998.0	6.05	12771.0	14157.5	-9.79	14797.0	13997.5	1.76	6.52
		Increasing	22858.0	20294.5	12.97	22121.0	21108.0	4.82	24997.0	23677.5	1.76	6.52	
		Decreasing	90726.5	90488.0	0.78	91869.5	90946.0	1.95	92910.0	92479.0	1.88	1.15	
8	2	Uniform	12195.5	13726.0	-11.15	12882.5	15927.0	-17.25	14812.0	16086.5	-7.92	-12.11	
			Increasing	22695.5	20592.0	10.54	22882.5	21859.5	2.90	24725.5	23479.0	5.34	6.26
		Decreasing	90977.5	29699.5	2.49	80526.5	90921.0	0.68	91609.5	91979.0	0.72	1.90	
		Uniform	19905.5	19419.0	-0.55	20992.5	19189.5	8.12	21419.5	21774.0	-1.69	2.81	
	3	Increasing	99805.5	92991.5	4.56	99982.5	90296.5	10.19	94889.5	99066.5	9.04	6.19	
			Decreasing	50229.0	49588.0	1.90	48181.5	46244.0	6.49	48991.5	47795.5	2.59	5.46
		Uniform	19941.0	19822.5	-2.92	20999.0	20981.0	2.54	21504.0	20951.5	-8.69	-9.09	
		Increasing	95191.0	99009.5	6.89	94907.0	91550.0	10.62	95504.0	94291.0	3.72	6.99	
	4	Decreasing	48804.5	49098.0	-0.97	47061.5	48670.0	1.65	48196.5	47998.0	1.88	0.89	
			Uniform	19997.5	21179.5	-8.67	20978.0	20969.5	0.04	21446.5	24198.5	-11.15	-6.59
		Increasing	96497.5	94946.0	6.10	95678.0	92189.5	10.84	99089.5	95417.5	10.95	9.10	
		Decreasing	49772.5	46668.0	6.20	46647.5	49226.0	5.91	48906.0	46848.0	4.99	5.90	
Total											108.95		
Average											9.91		

[표7-7] T=6인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교

T	M	N	F	HEU1	BEST1	HEU2	BEST2	HEU3	BEST3	HEU_AVO	BEST_AVO	
5	0	2	Uniform	0.099	1.750	0.093	0.160	0.099	19.600	0.094	0.909	
			Increasing	0.099	2.040	0.091	0.200	0.099	1.240	0.096	1.160	
			Decreasing	0.099	2.890	0.091	0.210	0.099	0.590	0.096	1.210	
		3	Uniform	0.070	0.050	0.070	1.690	0.070	145.240	0.070	49.999	
			Increasing	0.070	19.170	0.070	0.420	0.066	6.210	0.076	9.267	
			Decreasing	0.070	14.090	0.078	0.550	0.070	1.000	0.079	5.190	
		4	Uniform	0.078	921.910	0.102	7.990	0.086	969.460	0.089	292.550	
			Increasing	0.069	92.990	0.102	1.720	0.078	40.770	0.081	25.140	
			Decreasing	0.078	15.160	0.125	0.790	0.086	9.060	0.098	6.997	
		0	2	Uniform	0.047	591.090	0.047	959.640	0.055	992.210	0.049	492.990
				Increasing	0.047	560.290	0.055	409.090	0.047	409.690	0.049	499.009
				Decreasing	0.069	572.640	0.047	407.990	0.069	410.090	0.057	469.487
	3		Uniform	0.096	617.960	0.094	494.960	0.096	447.720	0.099	499.990	
			Increasing	0.096	564.270	0.096	469.990	0.096	467.960	0.096	594.079	
			Decreasing	0.078	659.020	0.094	464.290	0.102	454.270	0.091	525.927	
	4		Uniform	0.102	695.020	0.109	465.070	0.109	466.680	0.107	545.990	
			Increasing	0.109	774.120	0.102	499.920	0.209	599.670	0.199	599.097	
			Decreasing	0.102	779.070	0.102	479.990	0.078	495.400	0.094	599.100	
	0		2	Uniform	0.070	611.210	0.069	999.600	0.055	429.540	0.069	479.799
				Increasing	0.069	661.110	0.070	425.970	0.070	456.290	0.069	514.909
				Decreasing	0.069	709.210	0.055	459.190	0.069	461.990	0.060	541.077
		3	Uniform	0.102	827.850	0.102	496.010	0.096	490.550	0.096	591.470	
			Increasing	0.102	799.900	0.102	500.450	0.078	500.190	0.094	579.649	
			Decreasing	0.102	769.990	0.102	517.220	0.096	9.245.190	0.096	1,510.449	
		4	Uniform	0.117	719.780	0.117	499.780	0.102	526.990	0.112	579.999	
			Increasing	0.125	889.540	0.125	551.990	0.109	575.010	0.120	671.797	
			Decreasing	0.117	915.190	0.149	521.770	0.102	574.590	0.122	697.149	
		10	2	Uniform	0.070	769.250	0.070	499.750	0.079	517.990	0.079	572.990
				Increasing	0.070	792.640	0.069	529.670	0.070	522.120	0.069	614.610
				Decreasing	0.070	746.090	0.070	594.460	0.070	514.540	0.070	619.969
	3		Uniform	0.117	910.220	0.109	579.490	0.102	546.700	0.109	677.470	
			Increasing	0.125	1,094.790	0.109	525.990	0.102	574.170	0.112	711.510	
			Decreasing	0.125	950.100	0.125	529.190	0.102	546.420	0.117	641.550	
	4		Uniform	0.149	955.670	0.141	541.150	0.117	709.220	0.199	701.747	
			Increasing	0.141	1,155.670	0.199	566.490	0.125	669.910	0.199	799.797	
			Decreasing	0.141	979.920	0.149	579.260	0.125	669.110	0.199	792.290	

[표 7-8] T=8인 경우의 SPR해와 후리스틱해의 무적합수값 비교

T	M	N	F	HEU1	SPR1	GAP1	HEU2	SPR2	GAP2	HEU3	SPR3	GAP3	AVG	
8	2	Uniform	3922.0	3958.9	4.97	4105.0	3967.0	21.92	3957.0	4104.5	30.09	16.94	438.65 12.18	
		Increasing	5972.0	5016.9	7.05	5755.0	4779.0	20.42	7437.0	5884.5	26.81	18.09		
		Decreasing	8054.0	7949.3	17.05	5792.5	6744.0	17.09	9982.0	8914.5	99.82	18.91		
		Uniform	4982.5	3958.9	30.45	4105.0	3967.0	21.92	5987.0	4104.5	30.09	29.47		
	3	Increasing	6592.5	5016.9	30.17	5705.0	4779.0	19.98	7487.0	5884.5	27.87	25.74		25.74
		Decreasing	8740.0	7150.4	22.23	8093.5	6592.5	22.77	9892.0	8084.9	21.82	22.21		
		Uniform	3522.0	3958.9	4.87	4105.0	3967.0	21.92	5987.0	4104.5	30.09	18.94		
		Increasing	5922.0	5016.9	6.05	5705.0	4779.0	19.98	7657.0	5884.5	30.22	18.59		
	4	Decreasing	7829.5	6789.9	8.99	8099.5	6490.9	25.87	9749.5	7824.5	22.99	19.89		19.89
		Uniform	12777.0	12497.5	2.24	19575.0	12987.0	9.77	16615.0	19406.5	21.69	11.29		
		Increasing	20877.0	19917.5	5.94	20885.5	18775.0	11.29	29709.0	19814.5	19.62	12.27		
		Decreasing	90418.0	29192.5	4.20	29819.0	27665.0	7.90	90842.5	28674.5	7.56	6.55		
5	Uniform	19209.5	12497.5	5.05	19584.0	12867.0	9.68	16509.0	19406.5	29.10	12.81	12.81		
	Increasing	21859.5	19917.5	10.94	21879.5	18775.0	19.91	24159.0	19814.5	21.90	15.99			
	Decreasing	91001.5	28915.0	9.49	29039.5	26809.0	6.92	90082.5	27846.5	8.29	6.59			
	Uniform	12725.0	12497.5	1.92	19564.0	12967.0	9.08	14910.5	19406.5	8.29	6.59			
6	Increasing	21425.0	19917.5	9.77	21664.0	18775.0	15.99	22798.5	19814.5	15.06	19.41	19.41		
	Decreasing	28950.0	27461.9	4.98	28950.0	26095.0	10.61	28981.0	27122.5	6.89	7.48			
	Uniform	17450.0	17040.5	2.40	18092.0	17491.0	9.18	19989.0	18102.5	7.11	6.29			
	Increasing	29950.0	28190.5	6.47	90592.0	27671.0	10.94	91089.0	28289.5	9.90	8.90			
7	Decreasing	44937.5	49999.0	8.56	45844.0	41771.0	9.75	44880.5	42921.0	5.58	6.90	6.90		
	Uniform	18421.0	17040.5	6.10	18932.5	17491.0	8.04	19412.5	18102.5	7.24	7.79			
	Increasing	91921.0	28190.5	18.47	91445.5	27671.0	19.64	92140.5	28289.5	19.62	19.58			
	Decreasing	49196.5	42091.9	2.69	44290.0	40541.0	9.25	44208.5	41022.8	7.77	6.55			
8	Uniform	17416.5	17040.5	2.21	18992.5	17491.0	8.04	19845.5	18102.5	6.87	5.70	5.70		
	Increasing	92016.5	28190.5	19.81	92092.5	27671.0	15.76	92945.5	28289.5	16.46	15.95			
	Decreasing	42499.5	40620.5	4.62	49190.0	99211.0	10.15	42157.5	99774.5	6.02	6.99			
	Uniform	27898.5	26170.5	8.97	27999.0	26286.0	6.51	29906.0	28891.5	9.78	5.54			
9	Increasing	46988.5	49094.5	9.04	44782.5	41020.0	4.89	66432.0	60174.5	5.41	9.90	9.90		
	Decreasing	68701.0	66999.9	3.47	64247.5	61897.5	4.89	66432.0	60174.5	4.27	5.99			
	Uniform	27905.0	26170.5	6.25	28241.5	26286.0	7.94	90099.0	28891.5	4.27	5.99			
	Increasing	48005.0	49094.5	12.79	48984.5	41820.0	19.09	49591.5	44599.5	11.21	12.94			
10	Decreasing	67147.0	64909.0	4.41	64916.0	59470.8	8.15	66704.0	64296.0	9.84	5.47	5.47		
	Uniform	27752.0	26170.5	6.04	28226.5	26286.0	7.98	29977.0	28891.5	9.97	5.80			
	Increasing	50092.0	49094.5	16.14	50819.0	41820.0	29.87	99949.5	44599.5	19.78	19.99			
	Decreasing	67244.5	62218.5	8.08	61228.0	57854.0	6.20	67891.5	62247.5	8.97	7.75			
Total											438.65			
Average											12.18			

[표 7-9] 7=8인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	HEU1	BEET1	GA1	HEU2	BEET2	GA2	HEU3	BEET3	GA3	AVG3
10	4	Uniform	0.00	41.05	0	95.9	15.21	59.97	45.47	17.36	10.86		
		Increasing	0.94	57.55	0	51.83	11.47	74.97	61.91	21.29	11.23		
9	3	Uniform	23.03	78.92	10.54	78.92	6.47	99.92	86.91	15.05	10.92		
		Increasing	22.75	59.92	0	41.05	11.17	59.97	45.19	18.26	19.49		
8	2	Uniform	12.94	59.92	0	57.05	10.50	74.97	63.47	17.95	17.06		
		Increasing	12.94	77.98	0	60.93	10.41	99.92	84.91	15.92	15.09		
7	1	Uniform	0.00	59.92	0	41.05	15.26	59.97	46.25	15.95	6.89		
		Increasing	0.54	57.98	0	51.83	10.50	76.97	62.95	21.62	10.71		
6	2	Uniform	-10.94	13.97	0	71.22	12.89	97.49	89.98	18.84	10.08		
		Increasing	2.49	20.99	0	19.90	4.99	29.03	22.92	5.25	4.22		
5	1	Uniform	0.86	29.91	0	29.92	-0.04	90.94	91.96	-1.67	-0.29		
		Increasing	-18.19	19.94	0	19.94	0.81	10.93	17.91	-6.99	-7.08		
4	2	Uniform	-9.21	21.27	0	20.42	6.14	24.59	29.99	1.59	1.49		
		Increasing	1.99	29.93	0	28.25	2.70	30.02	30.50	-1.44	0.96		
3	1	Uniform	-29.07	19.94	0	14.87	-8.82	14.51	19.02	-26.72	-20.54		
		Increasing	-7.95	21.84	0	20.95	8.48	22.99	24.71	-7.77	-4.08		
2	1	Uniform	-5.67	28.99	0	28.72	0.45	28.91	31.09	-6.78	-4.00		
		Increasing	-11.86	19.92	0	19.44	-2.11	19.99	21.92	-9.07	-7.81		
1	2	Uniform	-1.95	30.92	0	29.71	2.99	31.09	31.99	-0.61	0.04		
		Increasing	1.08	45.84	0	44.99	2.99	44.99	45.99	-0.78	1.08		
0	1	Uniform	-15.88	18.92	0	22.99	-15.92	19.42	22.21	-12.64	-14.61		
		Increasing	-0.42	31.44	0	31.44	0.98	32.40	32.27	-1.49	-0.92		
0	2	Uniform	-22.05	18.92	0	21.92	-12.78	19.44	25.92	-25.49	-20.10		
		Increasing	-5.48	44.29	0	44.92	0.86	44.08	45.05	-1.88	-2.88		
0	3	Uniform	0.88	47.98	0	41.84	0.58	92.49	93.48	-1.49	-2.01		
		Increasing	-4.94	49.19	0	41.74	5.49	42.87	44.88	-4.59	-2.01		
0	4	Uniform	-9.56	27.99	0	28.99	-2.40	29.06	39.41	-10.51	-5.49		
		Increasing	0.05	68.69	0	64.96	0.25	68.42	68.44	2.86	2.84		
0	5	Uniform	-14.77	28.21	0	30.99	-8.55	30.09	35.99	-15.51	-12.94		
		Increasing	1.19	48.94	0	47.87	-2.87	49.91	50.92	-1.59	-1.09		
0	6	Uniform	-9.79	64.91	0	65.91	-1.51	66.04	67.98	-4.85	-9.20		
		Increasing	-17.40	28.26	0	32.80	-19.50	29.97	37.12	-19.24	-16.73		
0	7	Uniform	0.46	50.91	0	49.42	2.57	59.48	50.55	-5.00	-0.66		
		Increasing	0.09	67.82	0	64.91	-4.41	67.81	68.29	-0.67	-1.66		
Total											-5.95		
Average											-0.16		

[표 7-10] 7=8인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교

T	M	N	F	HEU1	BEST1	HEU2	BEST2	HEU3	BEST3	HEU_AVG	BEST_AVG	
8	2	Uniform		0.070	38.490	0.055	320.550	0.055	527.940	0.060	229.527	
			Increasing	0.055	9.850	0.055	89.550	0.047	195.290	0.055	95.290	
			Decreasing	0.065	10.240	0.065	44.060	0.055	48.110	0.060	54.157	
		3	Uniform		0.094	598.144	0.094	979.280	0.070	974.850	0.088	684.091
				Increasing	0.085	215.290	0.086	259.250	0.070	448.170	0.081	508.897
				Decreasing	0.086	58.590	0.094	55.870	0.070	0.990	0.089	42.417
		4	Uniform		0.109	457.740	0.117	468.000	0.109	458.790	0.112	454.825
				Increasing	0.109	348.280	0.155	375.970	0.086	552.090	0.109	417.915
				Decreasing	0.109	70.420	0.102	74.150	0.078	542.280	0.095	228.950
	3	Uniform		0.094	485.770	0.086	474.820	0.070	495.160	0.085	478.917	
			Increasing	0.086	492.560	0.078	499.940	0.070	480.280	0.078	494.195	
			Decreasing	0.078	502.785	0.070	552.950	0.070	460.060	0.078	505.048	
		3	Uniform		0.117	470.226	0.117	525.540	0.102	526.250	0.112	507.972
				Increasing	0.117	534.426	0.109	570.820	0.094	590.590	0.107	565.279
				Decreasing	0.109	515.620	0.109	557.300	0.102	559.200	0.107	544.040
		4	Uniform		0.141	550.760	0.141	580.960	0.109	486.310	0.130	599.149
				Increasing	0.141	576.310	0.141	699.160	0.164	595.420	0.148	609.637
				Decreasing	0.156	565.150	0.141	615.430	0.109	584.140	0.155	588.299
	2	Uniform		0.094	534.120	0.086	508.100	0.086	485.240	0.089	509.159	
			Increasing	0.086	535.560	0.102	542.650	0.078	524.000	0.089	594.070	
			Decreasing	0.094	537.990	0.102	589.900	0.078	6,024.250	0.091	1,581.640	
		3	Uniform		0.133	751.120	0.125	581.890	0.109	587.570	0.122	640.199
				Increasing	0.133	597.760	0.141	600.140	0.109	639.790	0.128	812.569
				Decreasing	0.133	610.560	0.133	628.630	0.109	626.540	0.125	622.510
		4	Uniform		0.172	830.970	0.164	687.990	0.125	564.090	0.154	687.489
				Increasing	0.164	952.850	0.156	681.930	0.155	611.660	0.151	748.819
				Decreasing	0.172	970.820	0.156	688.040	0.133	661.520	0.154	779.460
	2	Uniform		0.125	859.560	0.133	514.620	0.094	554.300	0.117	642.827	
			Increasing	0.109	841.890	0.117	571.150	0.102	582.020	0.109	665.000	
			Decreasing	0.109	874.470	0.164	612.120	0.102	606.630	0.125	697.407	
		3	Uniform		0.164	920.520	0.141	591.920	0.125	739.300	0.149	750.419
				Increasing	0.156	927.890	0.141	622.390	0.125	712.960	0.141	754.980
				Decreasing	0.164	957.160	0.148	672.080	0.133	682.270	0.148	770.505
		4	Uniform		0.188	1,026.170	0.148	708.450	0.156	667.590	0.164	800.737
				Increasing	0.180	1,108.460	0.156	754.590	0.156	720.010	0.164	861.020
				Decreasing	0.180	8,774.300	0.164	784.200	0.156	744.220	0.167	8,417.579

[표 7-11] T=12인 경우의 SPA해와 후린스틱해의 부적합수값 비교

T	M	N	F	HEU1	BR1	CA1	HEU2	BR2	CA2	HEU3	BR3	CA3	AVG
12	9	2	Uniform	5742	5370.5	6.92	5992.5	5998.0	10.99	6768	6999.5	6.86	9.06
			Increasing	8900.5	8022.5	10.94	8652.5	7720.0	12.08	9969	9909.5	7.07	10.09
		3	Decreasing	1991.5	11705.5	19.79	12899	11094.8	16.88	15141	19499.5	12.74	14.46
			Uniform	6802.5	5970.5	26.66	5867	5998.0	9.91	6844.5	6999.5	8.07	14.88
	8	3	Increasing	10111	8022.5	26.09	8417	7720.0	9.09	10944.5	9909.5	11.12	16.89
			Decreasing	19968.5	11994.0	19.19	19249	10785.8	25.35	14486	19040.5	10.65	17.78
		4	Uniform	5742	5970.5	6.92	5992.5	5998.0	10.99	6768	6999.5	6.86	9.06
			Increasing	9096.5	8022.5	12.81	8852.5	7720.0	14.87	10968	9909.5	11.87	12.95
	7	4	Decreasing	12090.5	11092.0	9.00	12029.5	10482.9	14.79	14088.5	12715.0	10.81	11.51
			Uniform	18894.5	18047.5	4.69	19547	18520.5	5.54	20089.5	19599.0	39.15	14.46
		2	Increasing	90294.5	28097.5	7.97	80847	28994.5	8.75	97944.5	29999.0	27.29	14.85
			Decreasing	49958.5	41870.0	4.27	44794.5	41919.5	6.86	44964.5	42808.0	5.04	5.89
6	3	Uniform	19287	18047.5	6.87	19481.5	18520.5	5.19	20795.5	19599.0	5.98	6.01	
		Increasing	31487	28097.5	12.22	31454	28994.5	10.89	32654.5	29999.0	11.25	11.48	
	4	Decreasing	49497	40998.5	7.00	49687	40714.0	7.90	44900	41812.5	8.04	7.45	
		Uniform	18848.5	18047.5	4.44	19590	18920.5	5.48	22545.5	19599.0	15.09	8.94	
5	4	Increasing	91648.5	28097.5	12.80	82996	28994.5	14.00	95945.5	29999.0	20.42	19.74	
		Decreasing	41482.5	39970.9	5.98	49265	39908.5	9.51	49991.5	40417.0	7.21	7.96	
	2	Uniform	24761	29700.0	4.48	27997	26174.0	4.87	28768	27192.5	5.99	5.09	
		Increasing	42529	39194.0	8.51	48405	42916.0	6.80	47068	48254.5	8.82	8.04	
4	2	Decreasing	89109.5	80511.5	4.29	88729.5	84999.5	5.74	89440.5	85492.0	6.19	5.99	
		Uniform	25603	29700.0	8.08	27917	26174.0	6.66	28598.5	27192.5	5.98	6.67	
	3	Increasing	44482.5	39194.0	19.49	47299.5	42916.0	11.25	48991	49294.5	12.18	12.81	
		Decreasing	61186.5	58589.9	4.44	67197	69000.8	6.57	67668.5	69994.2	6.79	5.91	
3	4	Uniform	24899.5	29700.0	9.99	27129.5	26174.0	9.84	28749	27192.5	5.86	4.48	
		Increasing	45879	39194.0	16.59	48902	42916.0	14.08	50287	48254.5	16.26	15.82	
	4	Decreasing	59828.5	58688.0	5.54	64778.5	60998.0	6.27	65106.5	61458.5	5.94	5.92	
		Uniform	98912	97184.0	9.09	10417.5	98212.0	5.77	10499	10124.5	9.59	4.19	
2	2	Increasing	65990	61982.0	7.91	68999	66862.0	10.22	69965	64528.5	7.90	8.41	
		Decreasing	97047	94679.5	2.50	99009	91574.5	4.84	99940.5	96688.5	9.18	9.91	
	3	Uniform	98183.5	97184.0	2.69	10461	98212.0	5.86	10467.5	10124.5	9.86	4.12	
		Increasing	68289.5	61982.0	11.22	69609	66862.0	14.74	71607.5	64528.5	10.97	12.91	
10	3	Decreasing	94154.5	91679.8	2.70	94929	88789.3	6.49	97080	93970.5	9.91	4.17	
		Uniform	98077	97184.0	2.40	10505	98212.0	6.00	10989	10124.5	5.09	4.48	
	4	Increasing	70281	67982.0	14.50	70908	66862.0	16.29	74905	64528.5	15.15	15.29	
		Decreasing	99918.5	88680.0	5.91	92940	86012.0	7.96	96919.5	91092.5	6.47	6.58	
Total													998.28
Average													9.34

[표 7-12] T=12인 경우의 최선해와 후리스틱해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	HEU1	BEET1	GAP1	HEU2	BEET2	GAP2	HEU3	BEET3	GAP3	AVG3
10	2	Uniform	Increasing	5742	8774.0	-15.23	5892.5	5919.5	-0.46	6768	7720.0	-12.53	-9.34
			Decreasing	8900.5	9678.0	2.56	8882.5	8501.5	1.78	9888	10369.5	-8.87	0.16
			Uniform	13515	12479.0	6.70	12898	12106.5	0.54	15141	14507.5	4.97	5.97
	3	Uniform	Increasing	10111	9304.5	0.38	8417	8787.0	-0.68	10944.5	12471.5	-17.05	-4.78
			Decreasing	13568.5	12887.0	5.29	13442	11442.5	15.74	14436	14909.0	-8.19	5.98
			Uniform	5742	8404.5	-81.68	5892.5	7125.5	-17.30	6768	10800.0	-36.15	-28.98
	4	Uniform	Increasing	9050.5	9527.0	-5.00	8882.5	9981.5	-11.40	10988	12155.5	-14.71	-10.97
			Decreasing	12090.5	12173.5	-0.88	12022.5	11307.5	4.51	14088.5	14065.0	0.17	1.83
			Uniform	18894.5	22713.5	-16.81	19547	24918.0	-21.95	26088.5	26508.5	-1.50	-13.92
	2	Uniform	Increasing	60294.5	92899.5	-7.84	90847	94072.5	-9.47	97944.5	97277.5	0.18	-5.54
			Decreasing	49058.5	45955.5	-5.00	44794.5	48510.5	-7.66	44958.5	48989.0	-8.11	-6.92
			Uniform	19287	23688.5	-95.47	19481.5	28505.5	-81.66	20756.5	35924.5	-48.01	-38.98
3	Uniform	Increasing	91487	93002.0	-19.27	91454	98210.5	-17.68	92658.5	91747.0	-98.89	-24.81	
		Decreasing	49487	46999.0	-7.57	48687	48584.0	-9.99	44800	52085.0	-19.68	-10.41	
		Uniform	18848.5	30018.0	-37.21	19536	29887.5	-53.52	22545.5	42992.5	-48.74	-39.18	
4	Uniform	Increasing	91648.5	98708.0	-18.24	82986	93888.0	-19.10	35545.5	50957.0	-90.84	-22.66	
		Decreasing	41482.5	47652.0	-12.95	49265	48487.0	-10.77	49381.5	51480.0	-15.80	-13.77	
		Uniform	24761	90504.5	-16.89	27997	94482.5	-20.50	28768	98898.5	-21.79	-17.92	
2	Uniform	Increasing	42528	46494.5	-8.53	45405	51914.5	-11.52	47088	52294.5	-9.99	-10.07	
		Decreasing	89109.5	67597.5	-6.56	88729.5	78607.0	-6.69	69440.5	74715.0	-7.06	-6.75	
		Uniform	25008	34834.0	-26.50	27917	39054.0	-28.52	28598.5	44855.5	-35.52	-30.18	
3	Uniform	Increasing	44482.5	50119.0	-11.25	47298.5	57147.5	-17.29	48921	64870.0	-28.04	-17.89	
		Decreasing	61186.5	67832.5	-8.59	67187	74898.0	-10.48	67658.5	72144.0	-6.22	-8.74	
		Uniform	24655.5	37868.5	-34.07	27125.5	40146.5	-32.49	28748	47181.5	-98.08	-36.20	
4	Uniform	Increasing	45673	54007.5	-15.49	48502	58785.5	-18.89	50287	65209.0	-22.88	-19.07	
		Decreasing	59828	67891.0	-11.60	64778.5	71954.0	-9.22	65108.5	75678.0	-18.97	-11.95	
		Uniform	88812	44901.5	-14.68	40471.5	50029.0	-19.21	42498	48989.0	-14.90	-16.08	
2	Uniform	Increasing	65990	78820.5	-10.00	66859	75109.5	-10.98	69585	77094.5	-9.96	-10.81	
		Decreasing	97047	105900.0	-7.84	98009	109889.0	-7.19	98940.5	108191.0	-7.57	-7.51	
		Uniform	38189.5	53546.5	-35.91	40451	57448.5	-29.59	42607.5	62006.0	-51.28	-32.25	
3	Uniform	Increasing	88289.5	81699.5	-16.97	89803	82874.5	-16.01	71807.5	84121.5	-14.88	-15.78	
		Decreasing	94154.5	102678.0	-8.48	94529	109820.0	-13.92	97080	119450.0	-14.49	-12.28	
		Uniform	98077	81872.5	-38.46	40505	58887.0	-31.91	49088	65209.0	-69.92	-34.56	
4	Uniform	Increasing	70281	84344.5	-16.67	70505	84992.5	-16.55	74305	89076.5	-16.58	-16.60	
		Decreasing	99919.5	104948.0	-10.51	92940	101980.0	-9.45	98919.5	129259.0	-21.97	-19.78	
		Total											-55.83
												-15.48	
													Average

[표 7-13] T=12인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교

T	M	N	F	HEU1	BEST1	HEU2	BEST2	HEU3	BEST3	HEU_AVG	BEST_AVG	
12	6	2	Uniform	0.109	564.785	0.094	402.569	0.086	419.608	0.096	595.652	
			Increasing	0.094	442.156	0.094	452.050	0.070	447.984	0.086	447.587	
			Decreasing	0.102	460.442	0.094	487.651	0.086	442.887	0.094	465.660	
		3	Uniform	0.125	478.150	0.109	470.787	0.102	464.639	0.112	469.528	
			Increasing	0.125	539.105	0.102	500.539	0.094	529.071	0.107	532.908	
			Decreasing	0.125	542.821	0.102	582.958	0.102	555.886	0.109	559.882	
		4	Uniform	0.164	508.842	0.125	508.852	0.098	497.776	0.223	505.157	
			Increasing	0.164	626.293	0.108	625.867	0.133	595.386	0.185	615.912	
			Decreasing	0.156	697.256	0.125	694.929	0.109	652.829	0.150	661.675	
		6	2	Uniform	0.125	525.325	0.109	561.868	0.109	554.837	0.115	547.177
				Increasing	0.169	1,757.190	0.117	599.051	0.102	595.296	0.117	983.842
				Decreasing	0.188	576.759	0.102	627.979	0.109	599.079	0.115	599.268
	3		Uniform	0.172	646.289	0.141	668.411	0.141	625.429	0.151	648.710	
			Increasing	0.164	657.656	0.141	704.002	0.141	651.647	0.148	671.102	
			Decreasing	0.172	695.981	0.141	714.578	0.133	699.325	0.148	703.262	
	4		Uniform	0.211	663.474	0.172	729.549	0.164	655.989	0.182	683.002	
			Increasing	0.209	695.920	0.164	754.945	0.164	691.384	0.177	713.689	
			Decreasing	0.195	736.449	0.205	750.179	0.156	747.024	0.219	744.551	
	6		2	Uniform	0.148	647.401	0.141	663.654	0.133	673.309	0.141	661.448
				Increasing	0.156	626.841	0.169	735.848	0.153	687.679	0.141	683.456
				Decreasing	0.156	672.928	0.133	725.148	0.125	679.177	0.138	692.416
		3	Uniform	0.189	706.636	0.156	832.227	0.156	799.820	0.167	779.594	
			Increasing	0.195	774.373	0.156	801.492	0.156	4,175.540	0.159	1,917.135	
			Decreasing	0.203	802.594	0.156	792.860	0.156	784.067	0.172	793.174	
		4	Uniform	0.234	814.661	0.180	787.002	0.188	750.950	0.201	784.104	
			Increasing	0.227	889.320	0.195	904.571	0.188	4,186.410	0.203	1,991.494	
			Decreasing	0.227	918.971	0.180	927.944	0.195	876.980	0.201	907.765	
		10	2	Uniform	0.188	690.152	0.148	727.987	0.148	682.071	0.161	700.070
				Increasing	0.172	732.654	0.148	794.142	0.156	756.788	0.159	761.195
				Decreasing	0.172	787.332	0.156	869.020	0.156	776.008	0.161	810.786
	3		Uniform	0.211	867.758	0.180	913.704	0.195	898.345	0.195	891.602	
			Increasing	0.219	899.950	0.188	965.649	0.188	906.333	0.198	920.644	
			Decreasing	0.211	945.189	0.180	908.903	0.180	913.524	0.190	942.542	
	4		Uniform	0.266	1,031.220	0.219	1,051.010	0.219	1,029.130	0.234	1,037.120	
			Increasing	0.279	1,120.660	0.219	999.027	0.219	1,065.120	0.237	1,060.926	
			Decreasing	0.266	1,045.140	0.219	1,030.070	0.242	1,057.260	0.242	1,044.157	

[표 7-14] T=18인 경우의 SPR해와 후리스트해의 부적합수값 비교

T	M	N	F	HEU1	SPR1	GAP1	HEU2	SPR2	GAP2	HEU3	SPR3	GAP3	AVG	
18	5	2	Uniform	10084.5	8405.5	20.00	9727.0	8934.5	9.85	10010.5	9181.0	9.89	19.18	
			Increasing	14686.0	12597.5	16.58	14487.0	13046.5	10.89	14880.5	13237.0	11.76	19.07	
		3	Decreasing	20259.0	18400.2	10.07	20781.5	18850.0	10.75	21294.5	19084.5	11.94	10.75	
			Uniform	8938.5	8493.5	7.08	9281.0	8854.5	10.46	10090.0	9191.0	9.86	9.19	
	6	3	Increasing	15959.5	12587.5	26.99	14481.0	13046.5	11.00	14590.0	13237.0	12.28	16.73	
			Decreasing	20889.5	17888.5	16.79	21248.8	18524.8	14.86	21090.0	18598.2	15.77	15.14	
		4	Uniform	8938.5	8493.5	7.08	9287.0	8854.5	9.85	10090.0	9191.0	9.85	9.85	
			Increasing	19700.0	12597.5	8.79	14817.0	13046.5	19.57	15290.0	13237.0	14.54	12.29	
	10	4	Decreasing	19702.5	17401.8	19.22	20284.0	17845.0	19.67	19795.5	18083.0	9.26	12.05	
			Uniform	27109.0	26039.5	4.11	28712.5	26758.0	7.19	32275.5	27009.5	19.52	10.27	
			2	Increasing	49485.0	39871.5	9.01	45112.5	41488.0	8.74	48025.5	40681.5	18.11	11.99
				Decreasing	62108.5	58911.5	5.42	65522.5	61711.0	6.18	69082.0	59484.0	6.05	5.88
8		2	Uniform	26954.5	26039.5	9.55	28951.0	26758.0	6.95	29190.5	27009.5	7.00	6.08	
			Increasing	49299.0	39871.5	8.00	46478.5	41488.0	12.02	46291.5	40681.5	13.85	11.49	
		3	Decreasing	61182.0	57282.5	6.90	64771.0	59898.5	8.19	62976.0	57781.7	8.01	7.88	
			Uniform	26787.5	26039.5	2.87	28987.5	26758.0	8.14	32598.0	27009.5	20.50	10.50	
18		4	Increasing	44658.0	39871.5	11.95	47687.5	41488.0	14.90	50888.5	40681.5	24.86	17.17	
			Decreasing	61014.0	55508.5	9.99	61893.5	58088.0	6.49	60292.0	56119.5	7.44	7.95	
		2	Uniform	36582.5	35009.0	2.79	40548.0	38478.0	5.87	38481.0	36749.0	4.71	4.27	
			Increasing	62844.5	58159.0	7.71	68805.0	63934.0	8.22	69095.0	58199.0	8.42	8.12	
8	2	Decreasing	99570.5	89136.5	4.90	109057.0	97889.0	5.49	91911.5	87898.0	4.80	5.07		
		Uniform	37508.5	35809.0	5.89	41080.5	38478.0	6.76	38478.0	36749.0	4.59	5.56		
	3	Increasing	62844.5	58159.0	16.18	71094.5	63934.0	12.15	64487.5	58199.0	10.82	19.06		
		Decreasing	90412.0	88379.9	4.87	100509.0	94574.5	6.27	99871.0	89017.5	5.47	5.47		
4	2	Uniform	36575.5	35009.0	2.71	40922.0	38478.0	4.79	38997.0	36749.0	4.92	3.94		
		Increasing	66157.0	58159.0	19.79	72998.5	63934.0	16.19	66985.5	58199.0	14.08	14.93		
	3	Decreasing	88958.0	83009.0	5.88	97679.5	91510.0	6.74	88880.0	82997.0	5.49	5.97		
		Uniform	58977.0	56882.0	4.06	61280.0	58755.0	4.96	59799.0	58004.0	3.08	3.89		
10	2	Increasing	99849.5	92158.0	7.80	102810.0	94598.0	8.20	97509.0	91192.0	6.99	7.84		
		Decreasing	145222.5	140948.0	9.09	150939.5	149898.0	4.48	141877.0	136827.0	3.99	3.61		
	3	Uniform	58798.5	56882.0	9.79	61299.5	58755.0	4.82	59694.5	58004.0	2.91	3.65		
		Increasing	102902.5	92158.0	11.66	105865.0	94598.0	11.98	100682.0	91192.0	10.41	11.94		
4	2	Decreasing	142514.5	136564.0	4.98	146884.5	139932.0	5.99	137579.0	132278.0	4.47	4.47		
		Uniform	58752.0	56882.0	9.89	60929.0	58755.0	9.78	59596.5	58004.0	2.84	3.86		
	3	Increasing	105874.0	92158.0	14.89	112098.5	94598.0	18.58	109252.0	91192.0	19.29	15.56		
		Decreasing	139509.0	132130.0	5.58	149081.0	134901.0	6.06	136097.5	128580.0	5.80	5.81		
Total											325.29			
Average											8.04			

[표 7-15] T=18인 경우의 최선해와 후리스틱해의 목적함수값 비교

T	M	N	F	HEU1		BEET1		GAP1	HEU2		BEET2		GAP2	HEU3		BEET3		GAP3	AVG3
				HEU1	BEET1	HEU2	BEET2		HEU3	BEET3	GAP3								
1	0	2	Uniform	10084.5	12195.0	-17.91	9727.0	12648.0	-29.10	10010.5	14074.0	-28.87	18509.5	-19.71	-15.94				
			Increasing	14686.0	16979.5	-10.94	14467.0	17594.5	-17.79	14860.5	18509.5	-19.71	-15.94						
			Decreasing	20255.0	25039.5	-12.09	20876.5	25174.5	-9.92	21234.5	22959.5	-5.19	-9.07						
			Uniform	8999.5	14109.0	-96.19	9781.0	13954.0	-27.89	10090.0	15494.0	-95.00	-93.09						
1	0	3	Increasing	15989.5	17200.5	-7.04	14481.0	18727.0	-22.07	14930.0	19894.0	-24.95	-18.22						
			Decreasing	20899.5	22182.5	-5.89	21048.0	22881.0	-8.01	21090.5	22746.0	-7.28	-7.04						
			Uniform	8999.5	14039.0	-49.88	9727.0	13954.0	-28.19	10090.0	17982.5	-42.30	-38.10						
			Increasing	19700.0	17187.0	-20.20	14817.0	17586.5	-15.06	15290.0	20599.0	-25.89	-20.56						
1	0	4	Decreasing	19702.5	20599.0	-4.04	20282.0	21002.5	-3.42	19795.5	20659.0	-4.50	-3.99						
			Uniform	27109.0	48911.0	-44.57	28712.5	49042.5	-96.25	32275.5	59907.0	-40.19	-40.92						
			Increasing	49486.0	57689.0	-24.06	45112.5	60066.5	-24.89	48025.5	65091.0	-27.99	-25.62						
			Decreasing	62109.5	76077.5	-18.90	65922.5	81297.5	-19.94	69082.0	79646.5	-20.80	-19.48						
1	0	5	Uniform	20964.5	48118.0	-41.59	28951.0	48149.0	-96.75	29190.5	57699.5	-48.96	-42.55						
			Increasing	49299.0	61804.5	-90.01	46479.5	59026.0	-21.27	48291.5	68974.5	-92.24	-27.84						
			Decreasing	61182.0	77750.0	-21.91	64771.0	79129.5	-18.15	62976.0	76621.5	-19.59	-19.95						
			Uniform	26787.5	47926.5	-49.40	28967.5	48948.0	-40.08	32599.0	57926.5	-49.89	-42.44						
1	0	6	Increasing	44096.0	64079.0	-90.94	47667.5	64147.5	-25.09	50688.5	69815.0	-27.40	-27.81						
			Decreasing	61074.0	73421.5	-16.90	61898.5	78079.0	-20.77	60292.0	71589.0	-15.72	-17.80						
			Uniform	96592.5	96954.5	-95.09	40546.0	60994.5	-93.59	38481.0	64897.0	-40.05	-95.42						
			Increasing	62644.5	82274.0	-29.86	68006.0	84020.5	-18.95	69096.0	86822.5	-27.99	-29.18						
1	0	7	Decreasing	99570.5	107924.0	-12.81	109057.0	120652.0	-14.58	97911.5	110274.0	-20.95	-16.12						
			Uniform	97506.5	60290.5	-97.79	41080.5	59196.5	-90.99	38487.5	68198.0	-40.99	-37.28						
			Increasing	67572.0	84889.5	-20.21	71094.5	86190.0	-17.46	64487.5	90995.5	-29.19	-22.27						
			Decreasing	90412.0	106599.0	-15.18	100909.0	121522.0	-17.90	88871.0	110700.0	-19.00	-17.16						
1	0	8	Uniform	90579.5	62401.0	-41.99	40922.0	68076.5	-40.72	38997.0	70959.0	-45.98	-42.69						
			Increasing	60157.0	84629.5	-21.89	72999.5	89996.0	-18.86	66989.5	90299.5	-26.48	-22.97						
			Decreasing	88958.0	107224.0	-17.99	97879.5	118942.0	-17.07	88880.0	10790.0	-19.97	-18.21						
			Uniform	58977.0	88875.0	-98.64	61280.0	106082.0	-41.70	59799.0	89882.5	-86.92	-87.22						
1	0	9	Increasing	99949.5	197008.0	-27.48	102910.0	140072.0	-26.96	97999.0	129840.0	-24.90	-26.45						
			Decreasing	145222.5	172999.0	-16.01	150909.5	186582.0	-19.44	141877.0	178627.0	-20.81	-19.75						
			Uniform	98796.9	102881.0	-42.85	61299.9	109146.0	-40.69	59694.9	119579.0	-47.44	-49.04						
			Increasing	102902.0	146471.0	-29.75	105885.0	145110.0	-27.05	100982.0	144569.0	-30.40	-29.06						
1	0	10	Decreasing	142514.5	182439.0	-21.89	148894.5	178998.0	-17.91	197679.0	181091.0	-24.09	-21.28						
			Uniform	68752.0	112108.0	-47.59	60929.0	107922.0	-49.45	59596.5	117940.0	-49.26	-46.77						
			Increasing	105874.0	144028.0	-26.49	112098.5	145034.0	-22.71	109252.9	141818.0	-27.09	-20.49						
			Decreasing	199509.0	171091.0	-18.48	149061.0	178640.0	-19.92	198097.5	180460.0	-24.62	-20.99						
				Total															
				Average															

[표 7-16] T=18인 경우의 최선해와 휴리스틱해의 계산시간 비교

T	M	N	F	HEU1	BEET1	HEU2	BEET2	HEU3	BEET3	HEU_AVG	BEET_AVG	
18	5	2	Uniform	0.16	499.92	0.11	494.24	0.20	470.24	0.15	496.00	
			Increasing	0.14	559.91	0.11	525.02	0.12	520.99	0.12	529.27	
			Decreasing	0.14	559.94	0.11	562.99	0.11	554.71	0.12	550.94	
		3	Uniform	0.20	585.04	0.15	617.22	0.15	589.66	0.15	597.91	
			Increasing	0.20	621.24	0.14	629.52	0.15	635.69	0.16	625.90	
			Decreasing	0.18	655.92	0.14	660.99	0.15	666.97	0.16	657.96	
		4	Uniform	0.23	659.85	0.17	629.10	0.17	645.91	0.19	637.96	
			Increasing	0.23	721.82	0.18	696.16	0.19	711.19	0.20	709.72	
			Decreasing	0.23	787.94	0.16	803.15	0.17	807.49	0.19	799.59	
		6	2	Uniform	0.19	709.49	0.16	690.27	0.16	709.31	0.17	699.96
				Increasing	0.20	730.86	0.15	760.94	1.15	766.59	0.50	753.26
				Decreasing	0.19	776.31	0.16	792.81	0.16	788.14	0.17	786.75
	3		Uniform	0.23	755.11	0.20	754.82	0.20	795.90	0.21	767.94	
			Increasing	0.25	2,867.45	0.19	840.99	0.20	900.26	0.21	1,536.23	
			Decreasing	0.24	997.19	0.20	876.17	0.20	939.85	0.22	905.06	
	4		Uniform	0.30	909.56	0.24	846.95	0.24	902.79	0.26	840.44	
			Increasing	0.30	976.19	0.24	971.52	0.24	981.59	0.26	976.49	
			Decreasing	0.30	1,010.66	0.24	994.29	0.24	1,074.80	0.26	1,026.58	
	8		2	Uniform	0.22	929.59	0.20	845.76	0.19	989.86	0.20	898.40
				Increasing	0.22	964.90	0.19	886.01	0.19	879.60	0.20	874.84
				Decreasing	0.23	917.91	0.18	909.40	0.20	912.15	0.20	919.15
		3	Uniform	0.28	972.41	0.24	849.99	0.23	1,027.95	0.25	995.44	
			Increasing	0.29	1,020.34	0.24	1,005.19	0.23	1,089.07	0.26	1,039.53	
			Decreasing	0.27	1,062.12	0.23	1,046.24	0.23	1,103.64	0.24	1,077.53	
		4	Uniform	0.35	1,050.10	0.29	1,069.97	0.28	1,055.72	0.31	1,056.40	
			Increasing	0.35	1,181.89	0.30	1,132.79	0.28	1,126.78	0.31	1,130.47	
			Decreasing	0.34	1,278.16	0.28	1,232.54	0.27	1,208.54	0.30	1,239.74	
		10	2	Uniform	0.25	1,008.81	0.22	1,001.01	0.20	951.89	0.25	986.28
				Increasing	0.26	1,015.25	0.22	1,046.50	0.22	1,087.11	0.25	1,042.95
				Decreasing	0.24	1,054.79	0.22	1,105.85	0.21	1,058.30	0.22	1,072.98
	3		Uniform	0.34	1,142.16	0.28	1,169.81	0.28	1,136.10	0.30	1,149.29	
			Increasing	0.33	1,250.89	0.27	1,290.01	0.28	1,266.97	0.29	1,266.29	
			Decreasing	0.32	1,295.17	0.28	1,295.82	0.34	1,277.32	0.31	1,269.77	
	4		Uniform	0.40	1,259.45	0.33	1,262.19	0.34	1,306.73	0.35	1,275.79	
			Increasing	0.40	1,362.11	0.34	1,366.88	0.34	1,341.23	0.36	1,364.01	
			Decreasing	0.39	7,006.96	0.34	1,469.57	0.33	1,441.69	0.35	3,305.87	

[표 7-17] SPR해와 휴리스틱해의 목적함수 값 차이평균

M	N	F	차이(%)					
			T=4	T=6	T=8	T=12	T=18	
8	2	Uniform	10.91	7.59	18.94	8.06	19.16	
		Increasing	14.91	8.62	18.09	10.09	19.07	
		Decreasing	14.09	14.55	18.91	14.48	10.75	
	3	Uniform	9.72	19.29	29.47	14.88	9.19	
		Increasing	12.48	17.76	25.74	15.99	16.79	
		Decreasing	14.68	18.47	22.21	17.79	15.14	
	4	Uniform	9.72	7.59	18.94	8.06	8.99	
		Increasing	10.81	9.85	18.55	12.95	12.29	
		Decreasing	15.49	14.60	19.98	11.51	12.05	
	6	2	Uniform	17.25	10.71	11.29	14.48	10.27
			Increasing	11.79	9.99	12.27	14.65	11.95
			Decreasing	8.40	5.98	6.55	5.99	5.88
3		Uniform	8.04	6.09	12.81	6.01	6.08	
		Increasing	19.45	10.74	15.98	11.45	11.49	
		Decreasing	7.79	8.60	8.59	7.45	7.68	
4		Uniform	9.19	4.48	6.58	8.94	10.50	
		Increasing	16.94	16.27	18.41	15.74	17.17	
		Decreasing	9.08	6.08	7.48	7.56	7.95	
9		2	Uniform	7.50	4.46	6.29	5.09	4.27
			Increasing	10.26	7.79	8.90	8.04	6.12
			Decreasing	4.99	5.87	6.80	5.99	5.07
	3	Uniform	7.78	7.80	7.79	6.67	5.56	
		Increasing	14.06	19.94	19.58	12.91	19.05	
		Decreasing	7.09	5.99	6.55	5.91	5.47	
	4	Uniform	7.40	4.87	5.70	4.48	3.94	
		Increasing	17.61	14.61	15.55	15.62	14.88	
		Decreasing	5.09	6.59	6.99	5.92	5.97	
	10	2	Uniform	5.29	6.59	5.54	4.19	3.89
			Increasing	8.22	9.50	10.71	8.41	7.64
			Decreasing	4.99	4.91	5.90	5.51	5.61
3		Uniform	5.19	6.67	5.95	4.12	3.65	
		Increasing	12.82	19.98	12.34	12.91	11.94	
		Decreasing	4.72	5.78	5.47	4.17	4.47	
4		Uniform	5.91	6.72	5.80	4.48	3.96	
		Increasing	16.89	19.95	19.95	15.29	15.56	
		Decreasing	5.16	9.72	7.75	6.58	5.81	
기강변평균			10.11	9.76	12.18	8.34	9.04	
전체 평균			10.09					

[표 7-18] 최선해와 휴리스틱해의 목적함수 값 차이평균

M	N	F	차이 (%)					
			T=4	T=6	T=8	T=12	T=18	
5	2	Uniform	6.44	2.06	10.86	-22.79	-29.09	
		Increasing	7.58	2.51	11.29	-19.45	-15.94	
		Decreasing	5.00	8.19	10.92	-12.28	-9.07	
	6	Uniform	5.29	19.97	19.49	-91.77	-99.09	
		Increasing	5.22	11.07	17.06	-19.94	-18.22	
		Decreasing	5.90	10.44	19.09	-15.68	-7.04	
	4	Uniform	5.29	0.89	6.89	-99.15	-98.10	
		Increasing	5.69	5.71	10.71	-27.15	-20.56	
		Decreasing	5.75	5.87	10.08	-14.08	-9.99	
	6	2	Uniform	16.29	5.82	-0.91	-29.94	-40.92
			Increasing	9.96	6.59	4.22	-21.51	-25.62
			Decreasing	6.02	1.89	-0.28	-19.51	-19.48
3		Uniform	4.86	-4.02	-7.98	-47.92	-42.55	
		Increasing	11.41	4.88	1.49	-85.42	-27.84	
		Decreasing	4.87	4.96	0.96	-29.40	-19.65	
4		Uniform	1.75	-7.89	-20.54	-47.65	-42.44	
		Increasing	12.81	7.61	-4.08	-94.24	-27.81	
		Decreasing	4.91	1.79	-4.00	-26.15	-17.80	
8		2	Uniform	6.70	-2.70	-7.61	-92.68	-96.42
			Increasing	9.14	4.21	0.04	-22.41	-29.18
			Decreasing	9.08	2.98	1.08	-19.64	-16.12
	3	Uniform	9.75	-2.68	-14.61	-40.09	-97.28	
		Increasing	12.28	6.52	-0.92	-28.68	-22.27	
		Decreasing	5.49	1.15	-2.68	-21.14	-17.16	
	4	Uniform	0.15	-12.11	-20.10	-49.98	-42.69	
		Increasing	14.05	5.26	-0.01	-50.94	-22.97	
		Decreasing	2.79	1.90	-2.01	-29.09	-18.21	
	10	2	Uniform	4.26	2.91	-5.49	-28.79	-97.22
			Increasing	6.90	6.19	2.84	-24.26	-26.45
			Decreasing	5.96	9.46	0.00	-21.69	-18.75
3		Uniform	9.00	-9.09	-12.94	-42.54	-49.64	
		Increasing	10.99	6.99	-1.09	-28.92	-29.06	
		Decreasing	2.65	0.85	-9.20	-25.97	-21.28	
4		Uniform	-0.81	-6.59	-16.79	-44.80	-46.77	
		Increasing	13.02	9.10	-0.66	-29.97	-25.49	
		Decreasing	2.79	5.90	-1.66	-27.17	-20.99	
각각별평균			6.26	5.01	-0.16	-28.29	-26.04	
전체평균					-9.08			

[표 7-19] 최선해와 휴리스틱해의 평균계산시간의 비교

M	F	T=4		T=5		T=8		T=12		T=18	
		HEU	BEET								
1	Uniform	0.035	0.117	0.034	5.903	0.030	229.327	0.036	395.652	0.154	485.032
	Increasing	0.026	0.110	0.035	1.100	0.035	96.230	0.086	447.907	0.122	558.272
	Decreasing	0.021	0.193	0.036	1.210	0.030	34.137	0.034	48.9.660	0.120	520.940
	Uniform	0.029	0.400	0.070	48.999	0.080	384.091	0.112	46.9.528	0.164	597.905
2	Increasing	0.026	0.270	0.076	8.267	0.081	306.837	0.107	582.903	0.161	626.798
	Decreasing	0.029	0.250	0.079	5.190	0.088	42.417	0.109	55.9.882	0.156	667.957
	Uniform	0.039	0.910	0.089	282.550	0.112	454.825	0.229	505.157	0.193	637.937
	Increasing	0.039	0.379	0.061	25.140	0.109	417.919	0.135	61.5.912	0.198	709.724
3	Decreasing	0.042	0.270	0.035	6.337	0.036	228.930	0.130	661.675	0.130	799.526
	Uniform	0.031	109.910	0.049	482.980	0.089	478.917	0.115	547.177	0.167	699.955
	Increasing	0.031	45.850	0.049	459.009	0.078	494.199	0.117	983.842	0.437	753.263
	Decreasing	0.044	76.949	0.057	485.497	0.079	505.048	0.115	569.258	0.167	785.759
4	Uniform	0.049	391.419	0.069	499.980	0.112	507.972	0.151	646.710	0.208	767.941
	Increasing	0.044	446.730	0.085	594.079	0.107	565.279	0.148	671.102	0.211	1.596.291
	Decreasing	0.047	499.659	0.091	525.927	0.107	544.040	0.148	709.202	0.216	905.065
	Uniform	0.060	451.540	0.107	545.590	0.130	599.149	0.182	689.002	0.230	840.495
5	Increasing	0.069	508.710	0.139	598.097	0.148	609.697	0.177	715.689	0.250	976.494
	Decreasing	0.065	478.817	0.094	569.100	0.135	588.299	0.219	744.551	0.260	1.026.583
	Uniform	0.049	276.999	0.069	476.789	0.089	509.159	0.141	661.448	0.198	898.402
	Increasing	0.047	219.477	0.068	514.909	0.089	534.070	0.141	669.456	0.135	874.698
6	Decreasing	0.049	265.869	0.060	541.077	0.091	1.581.640	0.158	682.415	0.201	913.147
	Uniform	0.057	451.810	0.036	581.470	0.122	640.199	0.187	779.594	0.259	989.441
	Increasing	0.055	500.999	0.094	579.649	0.125	612.569	0.169	1.917.195	0.245	1.079.990
	Decreasing	0.052	491.020	0.036	1.510.449	0.128	622.510	0.172	799.174	0.245	1.077.988
7	Uniform	0.076	529.790	0.112	575.989	0.154	687.489	0.201	794.104	0.307	1.058.997
	Increasing	0.076	546.277	0.120	671.737	0.151	749.813	0.209	1.991.494	0.310	1.130.467
	Decreasing	0.076	593.197	0.122	687.149	0.154	779.460	0.201	907.765	0.299	1.299.797
	Uniform	0.092	360.999	0.079	642.930	0.117	642.827	0.161	700.070	0.299	986.959
8	Increasing	0.080	499.970	0.069	614.610	0.109	665.000	0.159	761.195	0.232	1.042.993
	Decreasing	0.047	489.867	0.070	618.369	0.125	697.407	0.161	810.786	0.224	1.072.980
	Uniform	0.068	470.868	0.109	677.470	0.149	750.419	0.195	891.602	0.299	1.149.290
	Increasing	0.065	524.227	0.112	711.510	0.141	754.880	0.198	920.644	0.282	1.208.290
9	Decreasing	0.089	2.112.999	0.139	641.550	0.148	770.509	0.190	942.542	0.319	1.269.770
	Uniform	0.089	2.112.999	0.139	701.747	0.164	800.797	0.294	1.097.120	0.364	1.275.790
	Increasing	0.091	559.519	0.139	799.797	0.164	861.020	0.267	1.060.926	0.359	1.364.007
	Decreasing	0.091	560.727	0.138	792.290	0.167	9.417.978	0.242	1.044.197	0.364	3.305.879

## 제 8 장 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 유한계획기간하에서 수요가 동적으로 발생하는 다종제품에 대한 동적 생산 및 수송 문제를 다룬다. 이 문제에서 수송방법은 다종의 화물 컨테이너를 이용하여 생산된 다종제품들을 수송하며 다종의 화물 컨테이너의 적재용량은 서로 다르다. 다종제품의 적재크기는 동일하고 화물 수송비용은 컨테이너 종류별 사용대수에 비례한다고 가정한다. 또한, 추후조달(backlogging)은 허용되지 않는다. 이 문제에서 발생하는 총물류비용은 각 제품에 대한 생산비용, 각 제품에 대한 재고유지를 위한 재고비용, 그리고 화물 컨테이너의 종류별 사용대수에 따른 수송비용을 포함한다. 본 논문의 목적은 다종제품의 동적수요를 만족하면서 총물류비용을 최소로 하는 최적 생산계획 및 수송계획을 동시에 결정하는 것이다.

본 연구에서는 최적 생산계획 및 수송계획을 수립할 수 있는 수리모형을 제시하고 이 수리모형의 최적해에 대한 구조적 특성을 규명하였다. 수리모형에 대한 좋은 하한값을 효율적으로 찾을 수 있는 네트워크 기반의 shortest path reformulation 모형을 제안하였다. 또한, 최적해의 성질을 근간으로 생산계획 및 수송계획을 효율적으로 찾을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안하고 예제를 통해 그 알고리즘의 적용절차를 설명하였다. 또한 다양한 조건의 시뮬레이션 실험을 통해 제안된 휴리스틱 알고리즘의 효율성을 검증하였다.

이때,  $T=4, 6$  그리고  $M=3$ 인 작은 규모의 경우에 최적해와 *SPR*해의 차이는

평균 6.52%였고, 전체 실험문제에 대해 *SPP*해와 휴리스틱해의 차이는 10.09%였으며 최선해와 휴리스틱해의 차이는 -9.09%였다. 문제가 커질수록 최적해를 구하기 위해 많은 계산 시간이 요구됨을 알 수 있었다. 실험을 통해 본 연구에서 제안한 휴리스틱 알고리즘이 시간이나 비용기준의 측면에서 성능이 매우 뛰어나함을 확인할 수 있었다.

향후 연구과제로는 각 제품의 적체크기가 다른 경우, 다단계 구조를 갖는 Supply chain network문제, 그리고 확률적 수요를 갖는 문제 등으로 연구의 확장이 요구되며 메타 휴리스틱기법들을 응용한 휴리스틱 알고리즘의 개발 또한 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Aucamp, D., "Nonlinear Freight Costs in the EOQ Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 9, pp. 61-63, 1983.
2. Aucamp, D., "A Solution To The Multiple Set-Up Problem", *International Journal of Production Research*, Vol. 22, No. 4, pp. 549-554, 1984.
3. Bahl, H. C., "Column Generation Based Heuristic Algorithm for Multi-Item Scheduling", *AIIE Transactions*, Vol. 15, No. 2, pp. 136-144, 1983.
4. Benjamin, J., "An Analysis of Mode Choice for Shippers in a Constrained Network with Applications to Just-in-Time Inventory", *Transportation Research B* 24B/3, pp. 229-245, 1990.
5. Bitran, G. R. and Yansasse, H. H., "Computational Complexity of the Capacitated Lot Size Problem", *Management Science*, Vol. 28, No. 10, pp. 1174-1186, 1982.
6. Chen, W. H. and J. M., Thizy, "Analysis of Relaxations for the Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problem", *Annals of Operations Research*, Vol. 26, pp. 29-72, 1990.
7. Chandra, P. and M.L. Fisher, "Coordination of Production and Distribution Planning", *European j. of Operational Research*, Vol. 72, pp. 503-517, 1994.
8. Dixon, P. and E. A., Silver, "A Heuristic Solution Procedure for the Multi-Item Single-Level, Limited Capacity, Lot-Sizing Problem", *Journal of Operations Management*, Vol. 2, No. 1, pp. 23-29, 1981.
9. Dogramaci A., J. C., Panayiotopoulos, and N. R., Adam, "The Dynamic Lot-Sizing Problem for Multiple Items under Limited Capacity", *AIIE Transactions*, Vol. 13, No. 4, pp. 23-39, 1981.
10. Eppen, G. D. and R. K., Martin, "Solving Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problems Using Variable Redefinition", *Operations Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 832-848, 1987.

11. Baker, K. R., Dixon, P., Magazine, M. J., and E. A. Silver, "An Algorithm for the Dynamic Lot-Size Problem With Time-Varying Production Capacity Constraints", *Management Science*, Vol. 26, No. 16, pp. 1710-1720, 1978.
12. Florian, M. and M. Klein, "Deterministic Production Planning With Concave Constant Capacity Constraints", *Management Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 12-20, 1971.
13. Florian, M., Lensta, J. K., and A. Rinnooy-Kan, "Deterministic Production Planning : Algorithms and Complexity", *Management Science*, Vol. 26, No. 7, pp. 374-384, 1980.
14. Florian, M., Rossin-Arthiat, M., and D., DeWerra, "A Property of Minimum Concave Cost Flows in Capacitated Networks", *INFOR*, Vol. 9, pp. 293-304, 1971.
15. Fumero, F. and C. Vercellis, "Synchronized Development of Production, Inventory, and Distribution Schedules, " *Transportation Science*, Vol. 33, No. 3, pp. 330-340, 1999.
16. Geoffrion, A. M., "Lagrangian Relaxation for Integer Programming", *Mathematical Programming Study*, Vol. 2, pp. 82-114, 1974.
17. Hwang, H. and Sohn, K. I., "An Optimal Policy for Dynamic Transportation-Inventory Model with Deteriorating Items", *IIE Transactions*, Vol. 17, No.3, 1985
18. Iwaniec, K., "An Inventory Model with Full Load Operations", *Management Science*, Vol. 25, No. 4, pp. 275-280, 1979.
19. Kleindorfer, P. R. and E. F. P., Newson, "A Lower Bounding Structure for Lot-Size Scheduling Problems", *Operations Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 299-311, 1975.
20. Kuik, R., M., Salomon, L. N. Van Wassenhove, and J. Maes, "Linear Programming, Simulated Annealing and Tabu Search Heuristics for Lotsizing in Bottleneck Assembly Systems", *IIE Transactions*, Vol. 25, No. 1, pp. 62-72, 1993.
21. Lambert, A. M., and H. Luss, "Production Planning with Time-

- Dependent Capacity Bounds", *European Journal of Operations Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 275-280, 1982.
22. Lambrecht, M. R. and H. Vanderveken, "Heuristic Procedures for the Single Operation, Multi-Item Loading Problem", *AIIE Transactions*, Vol. 11, No. 4, pp 319-326, 1979.
  23. Lee, C. Y., "The Economic Order Quantity For Freight Discount Costs." *IIE Transactions*, Vol. 18, No. 3, pp. 318-320, 1986.
  24. Lee, C. Y., "A Solution to The Multiple Set-Up Problem with Dynamic Demand", *IIE Transactions*, Vol. 21, No. 3, pp. 266-270, 1989.
  25. Lee, C. Y., and E. V., Denardo, "Rolling Planning Horizon: Error Bounds For The Dynamic Lot Size Model", *Mathematics of Operations Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 423-432, 1986.
  26. Lee, W. S., "A Dynamic Production and Transportation Model with Multiple Freight Container Types", *J. of the Korean Institute of Industrial Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 157-165, 1998.
  27. Lee, W. S. and J. H., Han, "A Multi-Product Dynamic Lot-Sizing and Shipping Model", *J. of the Korean Society of Maintenance Engineers*, Vol. 4, No. 2, pp. 105-119, 1999.
  28. Lee, W. S., H. S. Jung, and K. B. Lee, "A Multi-Product Dynamic Lot-Sizing and Shipping Model with Multiple Freight Container Types Allowed", *J. of the Korean Society of Maintenance Engineers*, Vol. 6, No 2, pp. 83-102, 2001
  29. Lee, W. S. and Y. S., Ock, "A Dynamic Lot-Sizing and Shipping Model with at Most One of Multiple Freight Container Types Allowed in Each Shipping Period", *J. of the Korean Society of Maintenance Engineers*, Vol. 3, No. 2, pp. 65-82, 1998.
  30. Lee, W. S., C. R. Sox, and S. J. Cho, "A Heuristic Algorithm for a Multi-Product Dynamic Lot-Sizing and Shipping Model", *IIE Annual Conference 2002*, Orlando, U.S.A., 2002.
  31. Lee, W. S., C. R. Sox, and C. H. Kim, "A Dynamic Production and Transportation Model with Heterogeneous Vehicle Types", *The 7th*

*Annual International Conference on Industrial Engineering*, Pusan, KOREA., 2002.

32. Lippman, S. A., "Economic Order Quantities and Multiple Set-Up Costs", *Management Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-47, 1971.
33. Love, S. F., "Bounded Production and Inventory Models With Piecewise Concave Costs", *Management Science*, Vol. 20, No. 3, pp. 313-318, 1973.
34. Maes, J. and L. N., Van Wassenhove, "Multi-Item Single-Level Capacitated Dynamic Lot-sizing Heuristics: a General Review", *J. of Operational Research Society*, Vol. 39, pp. 991-1004, 1988.
35. Millar, H. H. and M. Yang, "An Application of Lagrangean Decomposition to the Capacitated Multi-Item Lot Sizing Problem", *Computers Operations Research*, Vol. 20, No. 4, pp. 409-420, 1993.
36. Silver, E. A., and H. Meal, "A Heuristic for Selecting Lot-Size Quantities for the Case of a Deterministic Time-Varying Demand Rate and Discrete Opportunities for Replenishment", *Production and Inventory Control Management*, 2nd Quarter, pp. 64-74, 1973.
37. Sobel, M. J., "Smoothing Start-Up and Shut-Down Costs: Concave Case", *Management Science*, Vol. 17, No. 1, pp. 78-91, 1970.
38. Sung, C. S., and W. S. Lee, "Rolling Schedules for a Dynamic Lot-Sizing Problem with Start-Up Costs", *Engineering Optimization*, Vol. 22, No. 2, pp. 137-152, 1994.
39. Sung, C. S., and W. S. Lee, "Setup Cost Reduction in a Dynamic Lot Size Model with Multiple Finite Production Rates", *Engineering Optimization*, Vol. 24., pp. 19-37, 1995.
40. Swoveland, C., "A Deterministic Multi-Period Production Planning Model With Piecewise Concave Production and Holding-Backorder Costs", *Management Science*, Vol. 21, No. 9, pp. 1007-1013, 1975.
41. Thizy, J. M. and L. N. Van Wassenhove, "Lagrangean Relaxation for the Multi-Item Capacitated Lot-sizing Problem: A Heuristic Implementation", *IIE Transactions*, Vol. 17, No. 4, pp. 308-313, 1985.
42. Thizy, J. M., "Analysis of Lagrangean Decomposition for the Multi-Item

- Capacitated Lot-Sizing Problem", *INFOR*, Vol. 29, No. 4, pp. 271-283, 1991.
43. Trigeiro, W. W., "A Dual-Based Heuristic for the Capacitated Lot Sizing Problem", PhD thesis, Graduate school of Business and Public Administration, Cornell university, 1985.
  44. Wagner, H. M. and T. M. Whitin, "Dynamic Version of the Economic Lot Size Model", *Management Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 89-96, 1958.
  45. Zangwill, W. I., "A Deterministic Multi-Period Production Scheduling Model with Backlogging", *Management Science*, Vol. 13, No. 1, pp. 105-119, 1966.
  46. Zangwill, W. I., "A Backlogging Model and a Multi-Echelon Model of a Dynamic Lot Size Production System - A Network Approach", *Management Science*, Vol. 15, No. 9, pp. 506-527, 1969.

[ 부록-1 ] 문제 P의 AMPL을 이용한 모델링

• File Name : p.mod

param M; #아이템의 수(M)

param T; #계획기간의 길이(T)

param N; #컨테이너의 수

param W { j in 1..N}; #컨테이너의 화물 적재량(W)

param f { j in 1..N}; #단위 컨테이너당 수송비(F)

param SetUp {i in 1..M}; #제품 i에 대한 생산준비비용(Si)

param HCost {i in 1..M}; #제품 i에 대한 단위당 재고비용(Hi)

param d {i in 1..M , t in 1..T}; #기간 t에서의 제품i 대한 수요량(Dti)

#기간 t에 사용되고 컨테이너를 사용하여 수송되는 양을 나타내는 변수 (Xti)

var X {t in 1..T, i in 1..M, j in 0..N} >= 0;

#기간 t말에서의 제품 i에 대한 재고량을 나타내는 변수(Iti)

var I { t in 0..T , i in 1..M } >= 0;

#기간 t에 사용되는 컨테이너의 수(비음정수)를 나타내는 변수(Yij)

var Y {t in 1..T , j in 0..N} integer >=0;

# x > 0 이면 1, 아니면 0을 나타내는 변수 (delta(x))

var Z { t in 1..T , i in 1..M} binary ;

#문제 P의 목적함수

minimize TC :

$$\begin{aligned} & \text{sum} \{ t \text{ in } 1..T , i \text{ in } 1..M \} \text{SetUp}[i] * Z[t,i] + \\ & \text{sum} \{ t \text{ in } 1..T , i \text{ in } 1..M \} \text{HCost}[i] * I[t,i] + \\ & \text{sum} \{ t \text{ in } 1..T , j \text{ in } 1..N \} f[j] * Y[t,j]; \end{aligned}$$

#문제 p의 제약식 (2)

subject to C3{i in 1..M}:

$$I[0,i] = 0;$$

#문제 p의 제약식 (3)

subject to C3\_1{i in 1..M}:

$$I[T,i] = 0;$$

#문제 P의 제약식 (4)

subject to C1 {t in 1..T, i in 1..M} :

$$I[t,i] - I[t-1,i] - \text{sum}\{j \text{ in } 1..N\} X[t,i,j] + d[i,t] = 0;$$

#문제 p의 제약식 (5)

subject to C2 {t in 1..T , j in 1..N}:

$$\text{sum}\{i \text{ in } 1..M\}X[t,i,j] \leq W[j] * Y[t,j];$$

#delta(x)때문에 사용된 제약식

subject to C4{ t in 1..T, i in 1..M}:

sum{j in 1..N}X[t,i,j] <= 10000\*Z[t,i];param M; # 아이템의 수(M)

[ 부록-2 ] 문제P의 Sample Data

• File Name : p.dat

param T := 4;

param M := 3;

param N := 2;

param :W f :=

1 100 100

2 200 200;

param :SetUp HCost :=

1 12.5 1

2 180 1

3 990 1;

param d: 1 2 3 4 :=

1 21 24 24 30

2 42 36 48 39

3 0 93 51 63;

### [ 부록-3 ] 문제P의 배치처리를 위한 파일

• FileName : p.run

```
reset; # 현재 입력된 데이터를 초기화 시킨다.
```

```
model p.mod; # 모델링 정보를 입력한다.
```

```
data p.dat; # 모델링 정보에 따른 실험데이터를 입력한다.
```

```
option solver cplexamp.exe; # Solver Engine으로 CPLEX를 이용한다.
```

```
# AMPL에서 CPLEX의 Parameter를 조정한다
```

```
# nodes = 500000 : Branch and Bound의 탐색노드 수를 500,000으로 고정시킨다.
```

```
# backtrack = 1 : 소요시간을 단축하기 위한 Parameter 조정.
```

```
option cplex_options 'nodes = 500000 backtrack = 1';
```

```
# 현재 입력된 모델 데이터와 실험 데이터를 가지고 문제를 계산한다.
```

```
solve;
```

```
# 목적함수 값을 보여준다.
```

```
display TC;
```

```
# 문제를 계산하는데 소요된 시간을 보여준다.
```

```
display _solve_time;
```

[ 부록-4 ] 문제 *SPR*의 AMPL을 이용한 모델링

• File Name : spr.mod

param M: #아이템의 수(M)

param T: #계획기간의 길이(T)

param N: #컨테이너의 수

param W { j in 1..N}; #컨테이너의 화물 적재량(W)

param f { j in 1..N}; #단위 컨테이너당 수송비(F)

param SetUp {i in 1..M}; #제품 i에 대한 생산준비비용( $S_i$ )

param HCost {i in 1..M}; #제품 i에 대한 단위당 재고비용( $H_i$ )

param b {i in 1..M}; # 최초 수요가 발생하는 기간

param d {i in 1..M , t in 1..T}; #기간 t에서의 제품i 대한 수요량( $D_{ti}$ )

param D {i in 1..M, s in 1..T, t in 1..T : t>=s} := sum { k in 1..T : k>=s  
and k<=t} d[i,k]; # 기간 s에서 t까지 누적 수요량

#param c {i in 1..M, t in 1..T, k in 1..T : k>=t} := sum {s in 1..T: s>=t  
and s<=k-1}HCost[i]\*D[i, s+1, k];

param c {i in 1..M, t in 1..T, k in 1..T : k>=t} := SetUp[i] + sum {s in  
1..T: s>=t and s<=k-1}HCost[i]\*D[i, s+1, k];

param LB {t in 1..T} := min{j in 1..N} := ceil( sum {i in 1..M, s in  
1..T : s <=t} d[i, s]/W[j]);

param UB {t in 1..T} := max{j in 1..N} := ceil( sum {i in 1..M, s in  
1..T : s >=t} d[i, s]/W[j]);

# 결정 변수...

var u { i in 1..M, t in 1..T } >=0;

var w { i in 1..M, t in 1..T, k in 1..T : k>=t } >= 0;

var z { i in 1..M, t in 1..T } >= 0 ;

var y { t in 1..T , j in 1..N } >=0;

# 문제 P의 목적함수

minimize TC :

sum { i in 1..M, t in 1..T , k in 1..T : k>=t } c[i, t, k]\*w[i, t,  
k] +

sum { i in 1..M, t in 1..T } SetUp[i] \* u[i, t] +

sum { t in 1..T , j in 1..N } f[j] \* y[t,j];

# 문제 P의 제약식 (1)

subject to C1 { t in 1..T}:

sum { i in 1..M, k in 1..T : k>=t } D[i, t, k]\*w[i, t, k] <= sum { j  
in 1..N } W[j]\*y[t,j];

# 문제 p의 제약식 (2)

subject to C2 { i in 1..M}:

sum{t in 1..T, k in 1..T : t<=b[i] and k >= b[i]}w[i, t, k] = 1;

# 문제 p의 제약식 (3)

subject to C3 {i in 1..M, t in 1..T : t>b[i]}:

$$\sum\{k \text{ in } 1..T : k < t\} w[i, k, t-1] - \sum\{k \text{ in } 1..T : k \geq t\} w[i, t, k] = 0;$$

# 문제 p의 제약식 (4)

subject to C4 {i in 1..M, t in 1..T }:

$$\sum\{k \text{ in } t..T : k \geq t\} w[i, t, k] + u[i, t] = z[i, t];$$

# 문제 p의 제약식 (5)

subject to C5 {t in 1..T}:

$$\sum\{s \text{ in } 1..T, j \text{ in } 1..N : s \leq t\} y[s, j] \geq LB[t];$$

# 문제 p의 제약식 (6)

subject to C6 {t in 1..T}:

$$\sum\{s \text{ in } 1..T, j \text{ in } 1..N : s \geq t\} y[s, j] \leq UB[t];$$

subject to C7 {i in 1..M, t in 1..T}:

$$z[i, t] \leq 1;$$

[ 부록-5 ] 문제 SPR의 Sample Data

• File Name : spr.dat

param T := 4;

param M := 3;

param N := 2;

param : W f :=

1 100 100

2 200 200;

param : SetUp HCost b :=

1 12.5 1 1

2 180 1 1

3 990 1 2;

param d: 1 2 3 4 :=

1 21 24 24 30

2 42 36 48 39

3 0 93 51 63;

[ 부록-6 ] 문제 *SPR*의 배치처리를 위한 파일

• File Name : spr.run

```
reset; # 현재 입력된 데이터를 초기화 시킨다.  
model spr.mod; # 모델링 정보를 입력한다.  
data spr.dat; # 모델링 정보에 따른 실험데이터를 입력한다.  
option solver cplexamp.exe; # Solver Engine으로 CPLEX를 이용한다.  
# 현재 입력된 모델 데이터와 실험 데이터를 가지고 문제를 계산한다.  
solve;  
# 목적함수 값을 보여준다.  
display TC;  
# 문제를 계산하는데 소요된 시간을 보여준다.  
display _solve_time;
```

[ 부록-7 ] 휴리스틱 알고리즘 코드

**File Name : frmDocument.frm**

Option Explicit

' 변수 선언

Private TC As Single	' Total Cost
Private M As Integer	' # of Item
Private BT As Integer	' Period
Private N As Integer	' # of Container
Private sT As Integer	' 기간2
Private W_index As Integer	' 컨테이너 진행 첨자
Private A_index As Integer	' 제품 진행 첨자
Private dti(30, 10) As Integer	' 수요
Private dti2(30, 10) As Integer	' 수요
Private Si(10) As Single	' SetUp 비용
Private Hi(10) As Single	' 재고비용
Private Wj(4) As Integer	' 화물적재량
Private Fj(4) As Integer	' 운송비

' 최소단위당 운송비용을 가지는 컨테이너의 적재량

Private W\_hat As Integer

Private Xt(30) As Integer	' 생산량
Private Xti(30, 10) As Integer	' 생산량
Private Xtij(30, 10, 4) As Integer	' 생산량
Private XHtij(30, 10, 4) As Integer	' 생산량
Private Xtj(30, 4) As Integer	' 생산량
Private Mti(30, 10) As Integer	' 한계비용계수

Private Mti2(30, 10) As Integer	' 포함기간
Private Ati(30, 10) As Integer	' 할당매커니즘을 위한 순서
Private Ytj(30, 4) As Integer	' 컨테이너의 수
Private U_Fj(4) As Single	' 단위당 운송비
Private S_UFj(4) As Integer	' 단위당 운송비 순서
Private Ktj(30, 4) As Integer	' 단일 컨테이너의 운송 수
Private U_Fj2(4) As Single	' 단위당 운송비
Private S_UFj2(4) As Integer	' 단위당 운송비 순서
Private Ktj2(30, 4) As Integer	' 단일 컨테이너의 운송 수

Private Etj(30, 4) As Integer	' 생산량
Private t1 As Integer	
Private t2 As Integer	
Private j1 As Integer	
Private j2 As Integer	
Private j3 As Integer	
Private W_max As Integer	
Private H_cum As Integer	
Private M1i(10) As Integer	
Private M2i(10) As Integer	
Private M3i(10) As Integer	
Private M4i(10) As Integer	
Private M5i(10) As Integer	
Private M6i(10) As Integer	
Private FRi(10) As Integer	
Private kj(4) As Integer	
Private Uj(4) As Single	

```

Private Sub H_Step01() ' 한계비용계수법 1단계
    Dim j As Integer
    For j = 1 To N
        U_Fj(j) = Fj(j) / Wj(j)
    
```

```

Next
' 현기간
sT = 1
' 한계비용계수법의 단계 2로 간다.
Call H_Step02
End Sub

Private Sub H_Step02() ' 한계비용계수법 2단계
' 현재의 로트에 현기간의 제품의 수요를 포함시킨다.
Dim i As Integer
For i = 1 To M
    Xti(sT, i) = dti(sT, i)
Next
' If sT = BT Then Exit Sub
' 한계비용계수법의 단계 3.1로 간다.
Call H_Step03
End Sub

Private Sub H_Step03() ' 한계비용계수법 3단계
' 각 제품에 대해
' 한계비용의 계수가 0보다 크면 현재의 로트에 수요를 포함시킨다.
Dim i, t As Integer
For i = 1 To M
    ' 현기간이 기간과 같으면 종료
    If sT = BT Then Exit For
    ' 현기간의 수요가 0이면 고려하지 않는다.
    If Xti(sT, i) = 0 Then
    Else
        ' 한계비용의 계수가 0보다 큰 수요를 현 로트에 포함시킨다.
        For t = sT + 1 To BT
            If M_i_t(i, sT, t) > 0 Then
                Xti(sT, i) = Xti(sT, i) + dti(t, i)
            End If
        Next t
    End If
Next i

```

```

        Else
            Exit For
        End If
    Next
    ' 한계비용계수, 포함된기간 저장
    Mti(sT, i) = M_i_t(i, sT, t - 1)
    Mti2(sT, i) = t - 1
End If
Next
Call H_Step04
End Sub

```

```

Private Function M_i_t(ByVal ai As Integer, ByVal ts As Integer, ByVal te As Integer) As Single
    If te = ts Then
        M_i_t = 0
        Exit Function
    End If
    Dim H_sum As Single
    Dim k As Integer
    For k = ts To te - 1
        H_sum = H_sum + Hi(ai) * (k - ts) * dti(k, ai)
    Next
    M_i_t = (Si(ai) + H_sum - Hi(ai) * (te - ts) * (te - ts) * dti(te, ai)) / (te * (te - ts))
End Function

```

```

Private Sub H_Step04() ' 한계비용계수법 4단계
    ' 수요행렬 수정
    Dim i, t, k, sort2 As Integer
    For i = 1 To M
        For t = sT To Mti2(sT, i)
            dti(t, i) = 0
        Next
    Next

```

```

Next
Next
' 가장 많은 기간을 포함시킨 제품 순서 정렬
For i = 1 To M
  For k = 1 To i
    If k = i Then
      Ati(sT, i - k + 1) = i
      Exit For
    End If
    If Mti2(sT, i) < Mti2(sT, Ati(sT, i - k)) Then
      Ati(sT, i - k + 1) = i
      Exit For
    End If
    If Mti2(sT, i) = Mti2(sT, Ati(sT, i - k)) Then
      If Mti(sT, i) < Mti(sT, Ati(sT, i - k)) Then
        Ati(sT, i - k + 1) = i
        Exit For
      ElseIf Mti(sT, i) = Mti(sT, Ati(sT, i - k)) Then
        If Xti(sT, i) <= Xti(sT, Ati(sT, i - k)) Then
          Ati(sT, i - k + 1) = i
          Exit For
        Else
          Ati(sT, i - k + 1) = Ati(sT, i - k)
        End If
      Else
        Ati(sT, i - k + 1) = Ati(sT, i - k)
      End If
    End If
    If Mti2(sT, i) > Mti2(sT, Ati(sT, i - k)) Then
      Ati(sT, i - k + 1) = Ati(sT, i - k)
    End If
  End If
Next

```

```

Next
Call A_Step01
If sT = BT Then Exit Sub
sT = sT + 1
Call H_Step02
End Sub

```

```

Private Sub A_Step01() ' 할당 매커니즘 단계1
' 단위당 수송비
Dim j, k As Integer
For j = 1 To N
    U_Fj(j) = Fj(j) / Wj(j)
Next
' 단위당 수송비 오름차순 정렬
For j = 1 To N
    For k = 1 To j
        If U_Fj(j - k) > U_Fj(j) Then
            S_UFj(j - k + 1) = S_UFj(j - k)
        Else
            S_UFj(j - k + 1) = j
        End If
    Next
Next
Call A_Step02
End Sub

```

```

Private Sub A_Step02() ' 할당 매커니즘 단계2
' 현기간의 총 생산량
Dim i, j As Integer
For i = 1 To M
    Xt(sT) = Xt(sT) + Xti(sT, i)
Next

```

' 단일 컨테이너 운송 수

For j = 1 To N

If (Xt(sT) Mod Wj(j)) = 0 Then

Ktj(sT, j) = Fix(Xt(sT) / Wj(j))

Else

Ktj(sT, j) = Fix(Xt(sT) / Wj(j)) + 1

End If

Next

' 할당을 위한 제품 인덱스

A\_index = 1

' 단위당 수송비가 가장작은 컨테이너의 인덱스, 적재량

W\_index = 1

W\_hat = Wj(S\_UFj(W\_index))

Call A\_Step02\_01

End Sub

Private Sub A\_Step02\_01() ' 할당 매커니즘 단계 2.1

If Ktj(sT, S\_UFj(1)) <= 1 Then

Call A\_Step02\_02

Exit Sub

End If

If Xti(sT, Ati(sT, A\_index)) >= W\_hat Then

Ytj(sT, S\_UFj(W\_index)) = Ytj(sT, S\_UFj(W\_index)) + 1

Ktj(sT, S\_UFj(1)) = Ktj(sT, S\_UFj(1)) - 1

Xti(sT, Ati(sT, A\_index)) = Xti(sT, Ati(sT, A\_index)) - W\_hat

Xt(sT) = Xt(sT) - W\_hat

Xtij(sT, Ati(sT, A\_index), S\_UFj(W\_index)) = Xtij(sT, Ati(sT, A\_index),

S\_UFj(W\_index)) + W\_hat

W\_hat = Wj(S\_UFj(W\_index))

Call A\_Step02\_01

Else

Xt(sT) = Xt(sT) - Xti(sT, Ati(sT, A\_index))

```

        Xtij(sT, Ati(sT, A_index), S_UFj(W_index)) = Xtij(sT, Ati(sT, A_index),
S_UFj(W_index)) + Xti(sT, Ati(sT, A_index))
        W_hat = W_hat - Xti(sT, Ati(sT, A_index))
        A_index = A_index + 1
        If A_index > M Then
            Call A_Step02_02
        Else
            Call A_Step02_01
        End If
    End If
End Sub

```

Private Sub A\_Step02\_02() ' 할당 매커니즘 단계 2.2

```

    If Xt(sT) = 0 Then Exit Sub
    ' 잔량에 대한 단일 컨테이너 운송 수
    Dim j, k As Integer
    For j = 1 To N
        If (Xt(sT) Mod Wj(j)) = 0 Then
            Ktj2(sT, j) = Fix(Xt(sT) / Wj(j))
        Else
            Ktj2(sT, j) = Fix(Xt(sT) / Wj(j)) + 1
        End If
    Next
    ' 잔량에 대한 단위당 수송비
    For j = 1 To N
        U_Fj2(j) = Ktj2(sT, j) * Fj(j) / Xt(sT)
    Next
    ' 잔량에 대한 단위당 수송비 오름차순 정렬
    For j = 1 To N
        For k = 1 To j
            If U_Fj2(j - k) > U_Fj2(j) Then
                S_UFj2(j - k + 1) = S_UFj2(j - k)
            End If
        Next k
    Next j

```

```

        Else
            S_UFj2(j - k + 1) = j
            Exit For
        End If
    Next
Next
' 잔량 할당
Dim i As Integer
For i = A_index To M
    Xtij(sT, Ati(sT, i), S_UFj2(1)) = Xtij(sT, Ati(sT, i), S_UFj2(1)) + Xti(sT, Ati(sT, i))
Next
End Sub

```

Private Sub G\_Step01() ' 조정 매커니즘 단계 1

```

'backward
t1 = BT
Dim j As Integer
' 컨테이너의 최대용량을 구한다.
For j = 1 To N
    If W_max < Wj(j) Then W_max = Wj(j)
Next
Call G_Step01_01
End Sub

```

Private Sub G\_Step01\_01() ' 조정 매커니즘 단계 1.1

```

Dim t, i, j, t_max, j_max As Integer
For t = 1 To BT
    For j = 1 To N
        Xtj(t, j) = 0
    Next
Next
For t = 1 To BT

```

```

For i = 1 To M
    For j = 1 To N
         $X_{tj}(t, j) = X_{tj}(t, j) + X_{tij}(t, i, j)$ 
    Next
Next
Next
For t = 1 To t1
    For j = 1 To N
         $E_{tj}(t, j) = X_{tj}(t, j) \text{ Mod } W_j(j)$ 
    Next
Next
't1, j1을 계산한다.
t_max = 0
For t = t1 To 1 Step -1
    For j = 1 To N
        If  $E_{tj}(t, j) > 0$  Then
            t_max = t
            j_max = j
            Exit For
        End If
    Next
    If j <= N Then Exit For
Next
t1 = t_max
j1 = j_max
If t1 = 0 Or t1 = 1 Then
    Call G_Step02
    Exit Sub
End If
't2, j2를 계산한다.
t_max = 0
For t = t1 - 1 To 1 Step -1

```

```

For j = 1 To N
    If Etj(t, j) > 0 Then
        t_max = t
        j_max = j
        Exit For
    End If
Next
If j <= N Then Exit For
Next
t2 = t_max
j2 = j_max

If t2 = 0 Then
    Call G_Step02
    Exit Sub
End If
If Etj(t1, j1) + Etj(t2, j2) <= Wj(j2) Then
    Call G_Step01_02
    Exit Sub
End If
If Etj(t1, j1) + Etj(t2, j2) > W_max Then
    t1 = t2
    Call G_Step01_01
    Exit Sub
Else
    Call G_Step01_03
End If
End Sub

Private Sub G_Step01_02_01()' 조정 매커니즘 단계 1.2.1
    H_cum = 0
    Dim i, j, s_cost1, s_cost2 As Integer

```

```

Dim XHt1ij_sum, XHt2ij_sum As Integer
For i = 1 To M
    If M2i(i) = 1 Then
        For j = 1 To N
            XHt1ij_sum = XHtij(t1, i, j)
            XHt2ij_sum = XHtij(t2, i, j)
        Next
        If XHt1ij_sum > 0 And XHtij(t1, i, j1) = XHt1ij_sum Then
            H_cum = H_cum + Si(i)
        End If
        H_cum = H_cum - Hi(i) * (t1 - t2) * XHtij(t1, i, j1)
        If XHt1ij_sum > 0 And XHt2ij_sum = 0 Then
            H_cum = H_cum - Si(i)
        End If
    End If
Next
For i = 1 To M
    If M2i(i) = 1 Then
        XHtij(t2, i, j2) = XHtij(t2, i, j2) + XHtij(t1, i, j1)
        Etj(t1, j1) = Etj(t1, j1) - XHtij(t1, i, j1)
        XHtij(t1, i, j1) = 0
    End If
Next
If Etj(t1, j1) > 0 Then
    Call G_Step01_02_03
    Exit Sub
Else
    Call G_Step01_02_02
    Exit Sub
End If
End Sub

```

Private Sub G\_Step01\_02\_02() ' 조정 매커니즘 단계 1.2.2

```
    If Fj(j1) + H_cum <= 0 Then
        t1 = t2
        Call G_Step01_01
    Else
        Dim i, j As Integer
        For i = 1 To M
            For j = 1 To N
                Xtij(t1, i, j) = XHtj(t1, i, j)
                Xtij(t2, i, j) = XHtj(t2, i, j)
            Next
        Next
        t1 = t2
        Call G_Step01_01
    End If
```

End Sub

Private Sub G\_Step01\_02\_03() ' 조정 매커니즘 단계 1.2.3

```
    Dim i, j, FR_max, i_max As Integer
    Dim XHt1ij_sum, XHt2ij_sum As Integer
    For i = 1 To M
        If M1i(i) = 1 And M2i(i) = 0 Then
            FRi(i) = Fj(j1) + H_cum - Hi(i) * (t1 - t2) * Etj(t1, j1)
            For j = 1 To N
                XHt1ij_sum = XHtj(t1, i, j)
                XHt2ij_sum = XHtj(t2, i, j)
            Next
            If XHt1ij_sum > 0 And XHt2ij_sum = 0 Then
                FRi(i) = FRi(i) - Si(i)
            End If
            If FR_max < FRi(i) Then
                FR_max = FRi(i)
            End If
        End If
    Next
```

```

        i_max = i
    End If
Else
    FRi(i) = 0
End If
Next
If FR_max > 0 Then
    Xtij(t2, i_max, j2) = Xtij(t2, i_max, j2) + Etj(t1, j1)
    Xtij(t1, i_max, j1) = Xtij(t1, i_max, j1) - Etj(t1, j1)
    t1 = t2
    Call G_Step01_01
Else
    t1 = t2
    Call G_Step01_01
End If
End Sub

```

Private Sub G\_Step01\_03() ' 조정 매커니즘 1.3

```

    H_cum = 0
    Dim i, j As Integer
    For i = 1 To M
        For j = 1 To N
            XHtij(t1, i, j) = Xtij(t1, i, j)
            XHtij(t2, i, j) = Xtij(t2, i, j)
        Next
    Next
    Next
    ' 단일컨테이너의 운송수 및 운송비를 계산
    Dim j_min As Integer
    For j = j2 To N
        If ((Etj(t1, j1) + Etj(t2, j2)) Mod Wj(j)) = 0 Then
            kj(j) = Fix((Etj(t1, j1) + Etj(t2, j2)) / Wj(j))
        Else

```

```

        kj(j) = Fix((Etj(t1, j1) + Etj(t2, j2)) / Wj(j)) + 1
    End If
    Uj(j) = kj(j) * Fj(j) / (Etj(t1, j1) + Etj(t2, j2))
Next
j3 = j2
For j = j2 To N
    If Uj(j3) > Uj(j) Then
        j3 = j
    End If
Next
For i = 1 To M
    If XHtij(t1, i, j1) > 0 Then
        M3i(i) = 1
    Else
        M3i(i) = 0
    End If
Next
Dim count As Integer
count = 0
For i = 1 To M
    If M3i(i) = 1 And XHtij(t1, i, j1) <= Etj(t1, j1) Then
        M4i(i) = 1
        count = count + 1
    Else
        M4i(i) = 0
    End If
Next
If count = 0 Then
    Call G_Step01_03_03
    Exit Sub
Else
    Call G_Step01_03_01

```

```

Exit Sub
End If
End Sub

Private Sub G_Step01_03_01() ' 조정 매커니즘 단계 1.3.1
    H_cum = 0
    Dim i, j As Integer
    Dim XHt1ij_sum, XHt2ij_sum As Integer
    For i = 1 To M
        If M4i(i) = 1 Then
            For j = 1 To N
                XHt1ij_sum = XHt1ij_sum + XHtij(t1, i, j)
                XHt2ij_sum = XHt2ij_sum + XHtij(t2, i, j)
            Next
            If XHt1ij_sum > 0 And Xtij(t1, i, j1) = XHt1ij_sum Then
                H_cum = H_cum + Si(i)
            End If
            H_cum = H_cum - Hi(i) * (t1 - t2) * Xtij(t1, i, j1)
            If XHt1ij_sum > 0 And XHt2ij_sum = 0 Then
                H_cum = H_cum - Si(i)
            End If
            XHtij(t2, i, j3) = XHtij(t2, i, j3) + XHtij(t1, i, j1)
            Etj(t1, j1) = Etj(t1, j1) - XHtij(t1, i, j1)
            ' If j3 <> j2 Then XHtij(t2, i, j2) = 0
            XHtij(t1, i, j1) = 0
        End If
    Next
    If Etj(t1, j1) > 0 Then
        Call G_Step01_03_03
        Exit Sub
    Else
        Call G_Step01_03_02
    End If
End Sub

```

```

Exit Sub
End If
End Sub

```

```

Private Sub G_Step01_03_02() ' 조정 매커니즘 1.3.2
    If Fj(j1) + Fj(j2) - Fj(j3) + H_cum > 0 Then
        Call G_Step01_04
    Else
        t1 = t2
        Call G_Step01_01
    End If
End Sub

```

```

Private Sub G_Step01_03_03() ' 조정 매커니즘 1.3.3
    Dim i, j, FR_max, i_max As Integer
    Dim XHt1ij_sum, XHt2ij_sum As Integer
    For i = 1 To M
        If M3i(i) = 1 And M4i(i) = 0 Then
            FRi(i) = Fj(j1) + Fj(j2) - Fj(j3) + H_cum - Hi(i) * (t1 - t2) * Etj(t1, j1)
            For j = 1 To N
                XHt1ij_sum = XHtij(t1, i, j)
                XHt2ij_sum = XHtij(t2, i, j)
            Next
            If XHt1ij_sum > 0 And XHt2ij_sum = 0 Then
                FRi(i) = FRi(i) - Si(i)
            End If
            If FR_max < FRi(i) Then
                FR_max = FRi(i)
                i_max = i
            End If
        Else
            FRi(i) = 0
        End If
    Next
End Sub

```

```

        End If
    Next
    If FR_max > 0 Then
        XHtij(t2, i_max, j2) = XHtij(t2, i_max, j2) + Etj(t1, j1)
        XHtij(t1, i_max, j1) = XHtij(t1, i_max, j1) - Etj(t1, j1)
        t1 = t2
        Call G_Step01_01
    Else
        t1 = t2
        Call G_Step01_01
    End If
End Sub

```

Private Sub G\_Step01\_04() ' 조정 매커니즘 1.4

```

    Dim i As Integer
    For i = 1 To M
        If XHtij(t2, i, j2) > 0 Then
            M5i(i) = 1
        Else
            M5i(i) = 0
        End If
    Next
    Dim count As Integer
    count = 0
    For i = 1 To M
        If M5i(i) = 1 And XHtij(t2, i, j2) <= Etj(t2, j2) Then
            M6i(i) = 1
            count = count + 1
        Else
            M6i(i) = 0
        End If
    Next

```

```

If count = 0 Then
    Call G_Step01_04_02
    Exit Sub
Else
    Call G_Step01_04_01
    Exit Sub
End If
End Sub

Private Sub G_Step01_04_01() ' 조정 매커니즘 1.4.1
    Dim i, j As Integer
    For i = 1 To M
        If M6i(i) = 1 And j3 <> j2 Then
            XHtij(t2, i, j3) = XHtij(t2, i, j3) + XHtij(t2, i, j2)
            Etj(t2, j2) = Etj(t2, j2) - XHtij(t2, i, j2)
            XHtij(t2, i, j2) = 0
        End If
    Next
    If Etj(t2, j2) > 0 Then
        Call G_Step01_04_02
        Exit Sub
    Else
        For i = 1 To M
            For j = 1 To N
                Xtij(t1, i, j) = XHtij(t1, i, j)
                Xtij(t2, i, j) = XHtij(t2, i, j)
            Next
        Next
        t1 = t2
        Call G_Step01_01
        Exit Sub
    End If
End Sub

```

End Sub

Private Sub G\_Step01\_04\_02() ' 조정 매커니즘 1.4.2

Dim i, j, i\_min As Integer

For i = 1 To M

    If M5i(i) = 1 And M6i(i) = 0 Then

        i\_min = i

    Exit For

    End If

Next

XHtij(t2, i\_min, j3) = XHtij(t2, i\_min, j3) + Etj(t2, j2)

XHtij(t2, i\_min, j2) = XHtij(t2, i\_min, j2) - Etj(t2, j2)

For i = 1 To M

    For j = 1 To N

        Xtij(t1, i, j) = XHtij(t1, i, j)

        Xtij(t2, i, j) = XHtij(t2, i, j)

    Next

Next

t1 = t2

Call G\_Step01\_01

End Sub

Private Sub G\_Step02() ' 조정 매커니즘 2

Dim t, i, j, t\_min1, t\_min2, jtemp1, jtemp2, j\_min As Integer

For t = 1 To BT

    For i = 1 To M

        For j = 1 To N

            If i = 1 Then

                Xtj(t, j) = Xtij(t, i, j)

            Else

                Xtj(t, j) = Xtj(t, j) + Xtij(t, i, j)

            End If

```

        Next
    Next
Next
For t = 1 To BT
    For j = 1 To N
        Etj(t, j) = Xtj(t, j) Mod Wj(j)
    Next
Next
t_min1 = 0
For t = 2 To BT
    If t_min1 > 0 Then Exit For
    For i = 1 To M
        For j = 1 To N
            If Xtij(t, i, j) > 0 Then
                t_min1 = t
            End If
        Next
    Next
Next
t_min2 = 0
For t = 2 To BT
    If t_min2 > 0 Then Exit For
    For j = 1 To N
        If Etj(t, j) > 0 Then
            t_min2 = t
        End If
    Next
Next
Next
Dim count As Integer
For i = 1 To M
    For jtemp1 = 1 To N
        If Xtij(1, i, jtemp1) > 0 Then Exit For
    
```

```

Next
For jtemp2 = 1 To N
    If Xtij(t_min2, i, jtemp2) > 0 Then Exit For
Next
If jtemp1 < N And jtemp2 < N Then
    M3i(i) = 1
    count = count + 1
Else
    M3i(i) = 0
End If
Next
If t_min1 <> t_min2 Or count = 0 Then Exit Sub
For j = 1 To N
    If Etj(t_min2, j) > 0 Then
        j_min = j
        Exit For
    End If
Next
End Sub

```

## 감사의 글

대학원생으로서 그리고 사회 초년생으로서 공부와 일 두 마리 토끼를 잡겠다는 저의 생각이 지나친 욕심은 아니었나 돌이켜 봅니다. 감사의 글로 지난 3년을 마무리하는 이 시점에서 기간이 길었던 만큼 훌가분한 마음이야 이루 말할 수 없지만, 그 마음 한편에 좀 더 잘 했더라면 하는 후회와 섭섭한 마음 또한 떨쳐 버릴 수 없습니다.

먼저 저에게 이런 특별한 기회를 주시고 도와 주신 많은 분들께 감사하다는 말씀을 전하고 싶습니다. 건강이 악화되고 별이가 넉넉치 못한 상황에서도 끝까지 저를 믿어주셨던 아버지 정말 감사 드립니다. 저의 불평불만은 모두 받아 주셨던 어머니께도 정말 감사 드립니다. 저녁 늦게까지 공부 할 때면 어김없이 커피를 타다 주었던 여동생 연옥이, 동생이라는 이유만으로 모든 잔 심부름을 해주었던 남동생 창섭이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

제가 군대를 제대한 후 2학년에 복학 했을 때부터 지금까지 항상 저를 이끌어 주시고 믿어주셨던 이운식 교수님께 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 4학년 여름 방학 끝 무렵에 여러 가지 사정으로 고민에 빠져 있을 때 교수님께서 저를 이끌어 주시지 않았다면 지금의 저는 없었을 거라 생각합니다. 교수님 정말 감사 드립니다. “산업공학이 뭐 하는 거냐?”라는 질문에 대답할 수 있게끔 해주시고 산업공학을 한다는 자부심을 가질 수 있게끔 때론 술자리에서 때론 강의실에서 열강을 해주셨던 김병남 교수님, 옥영석 교수님, 오수철 교수님, 김수용 교수님, 권혁무 교수님, 구평희 교수님, 고시근 교수님께 머리 숙여 감사의 마음

을 전합니다. 산업공학인으로서 당당한 사회인이 되겠습니다.

사회 초년생으로서 부족한 저를 이끌어 주셨던 (주)캐드앤소프트의 신준기 사장님, 정경태부사장님, 임종현부장님께도 감사의 마음 전합니다. 부족한 저에게 많은 힘을 주었던 정승원과장, 김수홍과장에게도 고맙다는 말 전합니다. 그 외 (주)캐드앤소프트의 직장 동료들과 후배들에게도 고맙다고 전하고 싶습니다.

부족한 저를 믿고 강사로서의 경험을 갖게 해 주신 우성직업전문학교의 김성대교장선생님께도 감사의 마음 전합니다. 항성 옆에서 도와주신 김호진선생님과 다른 모든 동료 선생님들께도 고맙다는 말 전하고 싶습니다.

모든 기쁨과 고민을 함께했던 제곤이형과 저를 프로그램의 세계로 이끌어 주었던 종한선배, 논문을 완성하는데 지대한 공헌을 했던 원일리와 동은이, 그리고 실험실 생활을 하며 많은 추억을 함께했던 성환형, 재홍, 용락, 병근, 석열, 경덕, 인진, 정은, 은정, 윤진에게도 고맙다는 말을 전합니다.

대학원 선배로서 많은 도움을 주었던 정택선배, 영일선배, 병수선배, 종호선배, 상현에게도 고맙다는 말을 전합니다. 무엇보다도 같이 대학원에 입학하여 최고의 친구로서 그 많은 술 자리를 대작해준 두영이에게 고맙다는 말을 전합니다. 그리고 대학원 후배 민곤, 승현, 동원, 미정에게도 고맙다는 말을 전합니다.

저의 썬더가 되어주었던 CISO회원인 용주, 용국, 혜정에게도 고맙다는 말을 전합니다. 특히, 저에게 용기와 희망을 주었던 정선이에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

사춘기 시절부터 인생을 논했던 친구들 정목, 광욱, 종호, 남환, 동명, 정식에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 지난해 하늘 나라로 간 정운이에게도 고맙

고 행복하라는 말을 전하고 싶습니다.

모든 분들께 다시 한번 머리 숙여 감사드립니다.