

# 화력발전소 원료 공급계획을 위한 휴리스틱 알고리즘

김철연<sup>1</sup> · 문형근<sup>1</sup> · 최경현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>한양대학교 기술경영전문대학원

## A Heuristic Algorithm for Power Plant Coal Supply Planning Problems

Chulyeon Kim<sup>1</sup> · Hyunggen Moon<sup>1</sup> · Gyunghyun Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2</sup>Graduate School of Technology and Innovation Management, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

This paper deals with a coal supply planning problem for power plants. We propose a mathematical optimization model to make decisions for coal pile sections, movement of reclaimers, and operation time of conveyor belts. The objective of the proposed model is to minimize the total operation time of conveyor belts and total movement time of reclaimers. The algorithm firstly selects a pile section by considering both the location of reclaimers and the stock amount on that pile section. And then the shortest path from the selected pile section has to be put into the operation schedule and check whether the total operation time is satisfied. Then finally the new schedule is updated. To this end, we have tested the proposed algorithm comparing with the general standard optimization package for the simplified problem SCSP. From the numerous test runs for comparing with the existing coal supply scheduling methods, We see that the proposed model may improve the coal supply operation by reducing significant coal supply costs.

**Keywords:** Power Plants, the Coal Supply Planning, Optimization, the Operation Schedule, Heuristic

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

발전소는 사용하는 자원의 종류에 따라 수력발전소, 화력발전소, 원자력발전소, 조력발전소, 풍력발전소 등으로 구분한다. 연구 대상인 화력발전소는 원료의 열 효율성을 높이기 위해 몇 가지 종류의 석탄을 혼합한 원료를 연소시켜 발생하는 열을 이용하여 고온, 고압의 수증기를 만들고 증기터빈을 돌려 전기를 얻는 발전소이다. 발전소 원료공급계획은 발전기 가동계획을 지시하는 발전부에서 발전기를 가동시키기 위한 원료의 종류와 양에 대한 수요량 계획인 혼탄 계획이 주어지면, 혼탄 계획을 고려한 저탄소에서 발전기까지의 원료 공급 일정계획을 수립하는 것이다.

실제 원료 공급 공정작업은 작업자의 경험적 지식에 의존하

고 있으며, 표준화 수준이 미흡하여 설비 운전자간의 조업 효율 편차가 많이 발생 될 수 있는 문제점이 있다. 그리고 원료를 운반하기 위해 구성되는 컨베이어 벨트의 조합을 컨베이어 벨트의 경로(route)라 하는데, 화력발전소의 경우 수백 개의 컨베이어 벨트의 경로가 있으며 하루에 약 100회 이상의 반입 혹은 반출 작업을 위해 적절한 컨베이어 벨트의 경로를 작업자가 직접 선택해야 한다. 이 컨베이어 벨트의 경로를 선택하기 위해 작업자는 경로의 길이, 경로의 시작 위치 및 최종 목적지를 숙지하고 있어야 된다. 따라서 숙련된 작업자의 경우에도 작업 효율이 떨어질 뿐만 아니라, 원료를 다른 발전소에 공급하는 경우도 발생한다(Lee, 2005). 또한, 원료 공급계획 수립 시 원료 공급 설비의 가동비용을 고려하고 있지 않다.

본 논문의 목적은 혼탄 계획과 각 저탄소의 재고량과 원료 종류, 설비 정보를 이용하여 최적의 원료 공급 일정계획을 제

\* 연락저자 : 최경현 교수, 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 HIT 402호 기술경영전문대학원, Tel : 02-2220-2250,

Fax : 02-2220-2255, E-mail : ghchoi@hanyang.ac.kr

2011년 5월 6일 접수; 2011년 5월 19일 게재 확정.

공하여 발전소 원료 공급비용을 최소화 하는 것이다. 이를 위하여 발전소 원료 공급계획문제의 설비 환경을 고려한 수리 모델과 컨베이어벨트의 가동시간과 불출기의 이동시간을 최소화하는 휴리스틱 알고리즘을 제안하고자 한다. 우선 제 2장에서는 발전소 원료 공급계획문제에 대한 기존 연구에 대해 알아본다. 제 3장에서는 발전소 원료 공급계획 문제와 수리 모델에 대해 알아본다. 그리고 제 4장에서는 문제를 해결하기 위하여 제안하는 휴리스틱 알고리즘의 단계와 특징에 대해 알아본다. 제 5장에서는 제안 휴리스틱 알고리즘에 대한 성능 비교 실험 결과를 보여주고 그 결과를 분석하며, 마지막으로 6장에서는 결론 및 추후 연구 과제를 제시한다.

### 1.2 발전소 원료공급계획문제

기존 연구를 살펴보기 전에 먼저 발전소 원료 공급계획문제에 대해 알아보기로 한다. 발전소 원료 공급계획 문제의 목적은 혼탄 계획을 만족하면서 원료 공급을 위한 설비인 컨베이어벨트의 총 가동시간과 불출기의 이동시간을 최소화하는 원료 공급계획을 수립하는 것이다. 발전소 원료 공급계획은 발전기 가동계획을 지시하는 발전부의 혼탄 계획을 고려하여 수립한다. 혼탄 계획은 발전기를 가동시키기 위한 원료의 종류와 양에 대한 수요량 계획이다. 즉, 발전소 원료 공급계획문제는 혼탄 계획이 주어지면 원료를 공급하는 각 저탄소의 재고량과 저탄소에서 컨베이어벨트로 이송작업을 하는 불출기의 현재위치, 저탄소에서 발전기로 원료를 운송하는 컨베이어벨트의 설비 가동상태를 고려하여 원료를 공급할 저탄소와 공급량을 결정하고 원료를 운반할 컨베이어벨트의 경로를 결정하는 원료 공급일정계획을 수립하는 것이다. 발전소 원료 공급계획을 수립하는데 고려하여야할 사항은 발전기의 원료 수요량을 만족하여야 하며, 총 원료 공급 완료시간이 원료 공급계획 시간을 만족하여야 한다. 원료 공급시간은 저탄소에서 원료를 컨베이어벨트로 하역하기 위한 불출기의 총 이동시간과 저탄소에서 원료를 운반하는 조합 컨베이어벨트의 총 가동시간, 이미 계획된 원료 공급 컨베이어벨트의 가동시간과 중복되어 발생하는 컨베이어벨트의 가동 대기시간의 합이다. 원료 공급 비용은 모든 컨베이어벨트의 가동시간과 불출기의 이동시간, 불출기의 불출 작업시간으로 인해 발생한다. 하지만 불출기의 불출 작업시간은 원료 공급일정과 관계없이 원료 수요량만큼 동일하게 발생하므로, 불출기의 불출 작업시간은 별도로 고려할 필요가 없다.

발전소 원료 공급관련 설비는 원료를 보관하는 저탄장, 원료를 운반하는 컨베이어벨트, 저탄장의 원료를 컨베이어벨트로 이송하는 불출기로 구성되어있다. 저탄장에는 여러 개의 저탄소가 있으며, 각 저탄소는 서로 다른 종류의 원료를 보관하고 있다. 저탄소의 원료는 실외에 더미(Dummy) 형태로 보관되어 있으며, 각 저탄소와 발전기는 컨베이어벨트로 연결되어 있다. 저탄소에서 컨베이어벨트를 이용하여 원료를 공급하기

위해서는 저탄소의 더미 형태 원료를 컨베이어벨트로 이송하는 설비인 불출기의 불출작업이 필요하다. <Figure 1>은 발전소 설비 환경의 예이다.

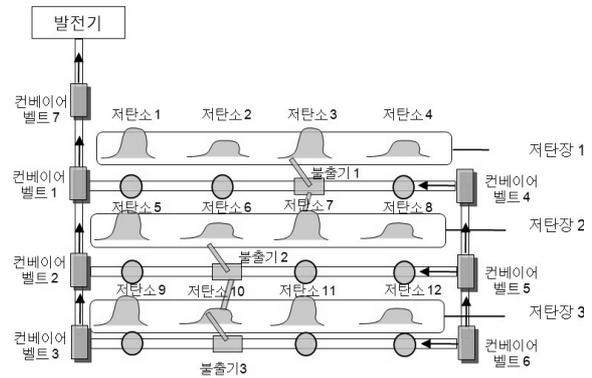


Figure 1. Power plant facilities

저탄장은 여러 개의 저탄소로 이루어져 있으며 각 저탄소는 서로 다른 종류의 원료를 보관하고 있다. <Figure 1>의 예를 보면 발전소 설비 환경에는 3개의 저탄장이 있으며, 각 저탄장은 4개의 저탄소로 이루어져 있다. 그리고 저탄장과 저탄장 사이에 불출기가 배치되어 2개의 저탄장에 있는 원료를 모두 불출할 수 있게 하는 경우도 있으며, 저탄장의 좌우로 이동할 수 있다. <Figure 1>에서 불출기 2는 저탄소 5에서 저탄소 12까지 8개의 저탄소로부터 원료를 불출할 수 있으며, 불출기 3은 저탄소 9에서 저탄소 12까지 4개의 저탄소에서 원료를 불출할 수 있다. 저탄소와 저탄소 간의 거리는 발전소의 크기에 따라 다르지만, 본 연구의 대상이 되는 화력 발전소의 저탄소와 저탄소 간의 거리는 약 100m이며, 이 거리를 이동하는 불출기의 시간은 약 20분이 소요된다. 그러므로 저탄장의 맨 끝의 저탄소에서 반대쪽 맨 끝의 저탄소로 이동하는 불출기의 시간은 약 60분이 소요된다(<Figure 1>의 경우). 불출기의 이동시간은 저탄소에서 원료를 불출하기 위한 준비시간이므로 각 불출기의 위치는 공급 저탄소의 선택과 원료 공급시간을 단축하는데 중요한 요인이 된다. 각 저탄소와 발전기가 연결된 컨베이어벨트의 조합을 컨베이어벨트의 운반 경로라 하며, 저탄소마다 여러 개의 공급 가능한 경로를 가지고 있다. 원료의 운반 경로를 단일 컨베이어벨트로 구성하면 원료 공급계획이 간단하게 이루어질 수 있지만 컨베이어벨트의 고장이나 정기적인 수리로 인하여 원료를 공급하지 못하는 경우를 방지하기 위해 여러 개의 단위 컨베이어벨트로 구성된 컨베이어벨트의 경로를 보유하고 있다.

## 2. 기존연구

발전소 원료 공급 및 관리와 관련된 문제는 선박접안 및 원료 하역, 컨베이어 벨트를 통한 원료 공급 일정계획 및 최적의 재

고관리 방안 수립 문제와 많은 관련이 있으며 기본적으로 다 품종 흐름 네트워크, 일정계획 모델 및 배송 모델이 복합적으로 최적화 모델로 구성되는 특징을 가지고 있다. Seo and Go(1996)는 원료 운송과 관련한 선박 접안, 원료 하역 및 컨베이어벨트의 수송 일정계획을 효과적으로 수립하기 위하여 이단계 계층적 구조를 이용한 일정계획 휴리스틱을 개발하고 이를 구현하기 위한 전문가 시스템을 개발하였다. Yeom(1997)은 역청탄 최적 재고산정 및 수급계획 시스템에 대한 연구를 수행하여 전문가시스템 개발 도구와 최적화 기법을 통합하여 활용하는 방법론인 Unified Programming에 대한 체계를 확립하고 그 결과를 적용하여 역청탄 수급을 위한 배선일정계획 수립 전문가 시스템을 제시하였다. Shih(1997)는 다양한 원료 공급지로부터 원료를 공급받는 발전소 원료공급계획문제에 대해 원료의 재고비용과 운송비용, 원료 가공비용을 최소화하는 혼합정수모델을 제시하였지만 이를 풀기위한 알고리즘은 제시하지 않았다. Kozan and Peter(1999)는 다양한 하역 장비와 장소를 가진 컨테이너 하역 일정계획문제에 대해 컨테이너의 하역 및 이송 시간을 최소화하는 모델을 제시하고 근사해를 빠르게 찾는 유전자 알고리즘을 이용한 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Jang(2000)은 일관제철소 부두의 대형 원료 수송선으로부터 철광석, 석탄 등의 원료를 하역하여 컨베이어벨트를 통해 원료 적치장으로 이동하는 원료 하역 및 공급문제를 푸는 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. 하지만 일반화된 수리모델을 제시하지 않고, 각 공정의 단계별 모형과 발전적 기법을 제시하였다. Tang and Liu(2000)는 JIT 생산 시스템 방식을 고려하여 실제 제철소 철강 제조 공정계획 문제에 대한 비선형 모델을 제시하였으며, 비선형 모델에서 설비간의 공정 중복 제약을 완화한 선형 모델을 제시 하였지만 선형 모델을 풀기 위한 알고리즘은 제시하지 않았다. Kim and Moon(2003)은 컨테이너의 하역 시간과 위치를 결정하는 선박 부두하역 일정계획문제에 대한 혼합정수계획모델을 제시하고 근사해를 제공하는 변형된 Simulated Annealing을 이용한 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Kim and Park(2004)은 부두에서의 컨테이너 터미널에서의 컨테이너 적하순서, 픽업 순서, 경로문제를 동시에 고려한 트랜스퍼 크레인 운영계획문제에 대해 혼합정수계획모델을 제시하고, 이를 해결하기 위한 방법으로 분지한계법과 Greedy 방법의 일종인 GRASP 방법을 사용하여 최적해를 구했다.

한편 고정된 컨베이어에서 원료를 공급하는 발전소 원료공급계획문제와 철도를 이용한 배송 일정계획을 수립하는 문제는 서로 매우 유사한 환경을 지녔다. 따라서 발전소 원료공급문제에 대한 수리모형을 수립하고 해법을 찾기 위해서는 철도 배송 계획문제의 수리모형 및 해법을 살펴볼 필요가 있다. Gorman(1998)은 미국의 화물열차 일정계획문제에 대한 수리모델을 제시하고 이 모델을 풀기위해 유전자 알고리즘의 전역적 최적해의 탐색능력과 Random Tabu 탐색법의 빠른 탐색속도를 조합한 휴리스틱 알고리즘을 제시하였다. Newman(2000)은 열차를 이용하여 많은 거점을 거쳐 다양한 형태의 컨테이너를 열차

에 할당하고 운송하는 일정계획문제에 대한 수리모델을 제시하고 근사해를 찾기 위한 방법으로 분할 알고리즘과 휴리스틱 알고리즘을 혼합한 알고리즘을 제시하였다. Lin(2001)은 화물 열차를 이용한 제품 운송계획문제에 대하여 제품 운송비용과 하역비용을 최소화하는 수리모델을 제시하고 라그랑주 이완 기법 기반의 알고리즘을 제시하였다.

### 3. 수리모델

#### 3.1 발전소 원료공급계획문제(CSPP : Coal Supply Planning Problem)

발전소 원료 공급계획문제(CSPP)에 대한 수리 모델에서 결정변수는 원료를 불출할 저탄소와 공급량, 원료 불출 순서를 결정하고 원료 공급 컨베이어벨트의 경로와 작업 시간을 결정하는 변수로 구성되어 있다. 목적식은 컨베이어벨트의 가동시간과 불출기의 이동시간의 합을 최소화하는 것이다. 원료 공급을 위한 설비 가동시간은 컨베이어벨트의 가동시간과 불출기의 이동시간, 불출기의 불출작업시간으로 구성되어 있으나, 불출기의 불출작업시간은 원료 공급 저탄소의 선택과 관계없이 수요량에 따라 동일하게 발생하므로, 불출기의 불출 작업 시간을 고려하지 않는다. 제약식은 원료 공급계획시간과 수요량 만족에 대한 제약식과 저탄소 재고량에 대한 제약식으로 구성되어 있다. 원료 공급 작업시간은 선택된 저탄소의 원료 공급 작업별로 구성되어 있으며, 모든 저탄소의 원료 공급 완료시간이 총 원료 공급계획 시간을 만족하여야 한다. 원료 공급 작업시간은 선택된 저탄소에서 불출작업을 하기위한 불출기의 이동시간과 원료 공급 조합 컨베이어벨트 경로의 흐름시간, 컨베이어벨트의 중복 사용으로 발생하는 컨베이어벨트 가동 대기시간의 합이다. 그리고 발전소 원료 공급계획문제에서 네트워크의 노드(node)는 불출기의 위치와 각 컨베이어벨트의 연결지점이며, 호(arc)는 불출기의 이동구간과 컨베이어벨트이다. 모델에 사용되는 결정변수와 매개변수, 집합은 다음과 같다.

- 결정변수

$y_p$  : 저탄소 p가 원료 공급지로 선택되면 1, 아니면 0

$pt_p$  : 저탄소 p의 원료 불출 시작시점

$x_{ij}^p$  : 저탄소 p의 원료를 운반하는 컨베이어벨트(i, j)의 흐름량(톤)

$st_{ij}^p$  : 저탄소 p의 원료를 운반하는 컨베이어벨트(i, j)의 가동 시작시점

$et_{ij}^p$  : 저탄소 p의 공급량을 운반하는 컨베이어벨트(i, j)의 가동 종료시간

$RC_r$  : 불출기 r의 총 이동시간

• 매개변수

$f_{ij}$ : 컨베이어벨트(i,j)의 원료 톤당 흐름시간

$m_{ab}^r$ : 불출기 r의 a위치에서 b위치로의 이동시간

$S_i$ : 저탄소 i의 원료 재고량

$T$ : 총 원료 공급계획시간

• 집합

$P$ : 저탄소의 집합

$R$ : 불출기의 집합

$N$ : 노드의 집합

$CA$ : 컨베이어벨트의 집합

$R_p$ : 저탄소 p를 불출하는 불출기의 이동 가능한 노드의 집합

$SP_p$ : 불출을 위해 선택된 저탄소 중에서  $pt_p$ 보다 이른 시간에 불출 작업하는 저탄소의 집합

$s(p)$ : 저탄소 p에서 불출한 원료가 이동하는 호의 출발점 (origin)의 집합

$t(p)$ : 저탄소 p에서 불출한 원료가 이동하는 호의 도착점 (destination)의 집합

그리고 발전소 원료 공급계획 문제(CSP)는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\min \sum_{(i,j) \in CA} \sum_{p \in P} f_{ij} x_{ij}^p + \sum_{r \in R} RC_r \quad (1)$$

$$RC_r = \min(\max_l(m_{kl}^r y_l), \max_l(m_{kl}^r y_l) + \max_l(m_{kl}^r y_l) + \max_l(m_{kl}^r y_l))$$

subject to

$$\sum_{j: (i,j) \in CA} x_{ij}^p - \sum_{j: (j,i) \in CA} x_{ji}^p = d_i^p, \quad i \in N, p \in P \quad (2)$$

$$pt^p = \min(\max_l(m_{kl}^r y_l), \max_l(m_{kl}^r y_l) + \max_l(m_{kl}^r y_l) + \max_l(m_{kl}^r y_l)) \quad (3)$$

$$st_{ij}^p \geq pt^p y_i + et_{i-1,j-1}^p, p \in P, (i, j) \in CA \quad (4)$$

$$st_{ij}^p \geq et_{ij}^k, p \in P, k \in SP_p, (i, j) \in CA \quad (5)$$

$$et_{ij}^p \geq st_{ij}^k + f_{ij} x_{ij}^p, p \in P, (i, j) \in CA \quad (6)$$

$$et_{ij}^p \leq T, p \in P, (i, j) \in CA \quad (7)$$

$$x_{ij}^p \leq y_i S_i, (i, j) \in RA, i \in P \quad (8)$$

$$x_{ij}^p \geq 0, (i, j) \in CA, i \in P \quad (9)$$

$$y_i = \{0, 1\}, i \in P \quad (10)$$

$$\begin{cases} d_i^p = b^p, & \text{if } i = s(p) \\ d_i^p = -b^p, & \text{if } i = t(p) \\ d_i^p = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 식 (1), 식 (3)의 첨자 k는 불출기 r의 초기 위치를 의미하며 최소, 최대값은  $t < k < l$  ( $t, l \in R_p \cap SP_p$ )이다. 목적식 (1)은 공급설비 가동시간인 컨베이어벨트의 가동시간과 불출기의 이동시간을 최소화하는 식이다. 식 (1)의 불출기의

총 이동시간( $RC_r$ )을 불출기가 현재 위치에서 각 공급 저탄소로 이동할 때의 이동시간을 최소의 이동시간으로 계산하는 식이다. 식 (2)는 컨베이어벨트 네트워크의 형태와 시작노드, 도착노드의 공급량을 나타낸다. 식 (3)은 저탄소의 원료공급을 하기 위해서는 불출기가 불출 가능한 위치로 이동해야 한다는 저탄소 원료 공급시작시간에 대한 제약으로 식 (1)의 불출기의 총 이동시간( $RC_r$ )의 계산과 같이 불출기가 현재 위치에서 각 공급 저탄소로 이동할 때의 이동시간을 최소의 이동시간으로 계산하는 식이다. 식 (4)는 컨베이어벨트를 가동하기 위해서는 저탄소 원료 공급시간과 이미 계획된 컨베이어벨트의 가동시간이 완료되어야 한다는 컨베이어벨트 가동시작 시간의 제약이다. 식 (5)는 이미 계획된 원료 공급을 위한 중복 컨베이어벨트의 가동시간이 완료된 후에 컨베이어벨트가 가동될 수 있다는 컨베이어벨트의 중복 호(arc)에 대한 제약이다. 식 (6)는 컨베이어벨트의 가동 완료시간은 컨베이어벨트의 시작시간과 컨베이어벨트의 흐름시간의 합이라는 제약이다. 식 (7)는 모든 컨베이어벨트의 가동 완료시간은 원료 공급시간보다 작거나 같다는 원료공급계획 시간에 대한 제약이다. 식 (8)는 저탄소의 공급량은 재고량보다 작거나 같다는 저탄소 재고량에 대한 제약이며, 식 (9) 및 식 (10)는 비음수 및 이진변수 제약이다. 식 (11)은 만일 노드 i가 저탄소(불출기의 위치)이면  $d_i^p$  값은 양수이고, 도착지이면  $d_i^p$  값은 음수임을 나타낸다.

발전소 원료 공급계획문제 모델은 식 (1)과 식 (3)의 불출기의 총 이동시간을 계산함에 있어서 불출기의 위치가 동적으로 변하기 때문에 비선형 혼합정수 구조를 가지고 있다. 따라서 알고리즘의 성능을 최적해와 비교 및 평가하는 데 어려우므로 다음 절에서 일반적인 최적화 도구를 이용하여 최적해를 구할 수 있는 선형 혼합정수 모델을 제시한다.

### 3.2 단순화된 발전소 원료공급계획문제(SCSP : Simplified CSPP)

단순화된 발전소 원료 공급계획 문제(Simplified Coal Supply Planning Problem)의 생성 목적은 휴리스틱 알고리즘의 성능을 일반적인 최적화 Software Package를 통한 최적해와 비교 및 평가하기 위함이다. 이 문제는 발전소 원료 공급계획문제에서 저탄소의 선택 순서와 원료 공급계획시간 제약을 이완하여 표현한 문제이다. 그리고 모든 불출기의 초기 위치는 저탄장의 맨 왼쪽에 위치하고 있으며, 오른쪽 방향으로만 이동할 수 있다고 가정하여 다음과 같은 단순화된 발전소 원료 공급계획 문제(SCSP)를 구성하였다.

$$\min \sum_{(i,j) \in CA} \sum_{p \in P} f_{ij} x_{ij}^p + \sum_{r \in R} RC_r \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j: (i,j) \in CA} x_{ij}^p - \sum_{j: (j,i) \in CA} x_{ji}^p = d_i^p, \quad (2)$$

$$i \in N, p \in P$$

$$RC_r \geq m_{ap}^r y_p, p \in P, r \in R \quad (12)$$

(a = 불출기 r의 맨왼쪽위치)

$$x_{ij}^p \leq y_i S_i, (i, j) \in CA, p \in P \quad (8)$$

$$x_{ij}^p \geq 0, (i, j) \in CA, p \in P \quad (9)$$

$$y_i = \{0, 1\}, i \in P \quad (10)$$

$$\begin{cases} d_i^p = b^p, & \text{if } i = s(p) \\ d_i^p = -b^p, & \text{if } i = t(p) \\ d_i^p = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

SCSPP의 목적식 (11)과 CSPP의 목적식 (1)의 차이점은 불출기의 총 이동시간( $RC_r$ )의 계산이다. CSPP의 불출기 총 이동시간의 계산은 불출기의 위치와 관계없이 계산할 수 있지만, SCSPP의 불출기 총 이동시간은 식 (12)를 통해 계산된다. 식 (12)는 불출기의 총 이동시간을 계산하는 식으로 초기 불출기의 위치가 맨 왼쪽에 있고, 오른쪽 방향으로만 이동할 수 있기 때문에 불출기의 총 이동시간은 초기 불출기의 위치에서 가장 먼 저탄소의 위치로 이동한 시간과 같다는 불출기 이동에 대한 제약이다. SCSPP의 제약식 (2), 식 (8)~식 (11)은 CSPP의 제약식과 같고 공급 계획시간에 대한 제약식 (3)~식 (7)은 고려하지 않는다.

### 4. 제안 알고리즘

제 4장에서는 본 연구에서 제안하는 휴리스틱 알고리즘에 대하여 설명한다. 우선 제안 휴리스틱 알고리즘의 아이디어는 선택 원료를 공급할 저탄소를 선택하기 위해 먼저 불출기의 불출 가능한 단일 저탄장 또는 복수 저탄장의 수요 공급 가능량의 합이 가장 큰 불출기를 선택하고, 선택된 불출기의 위치를 고려하여 사전에 정의된 저탄소 탐색 순으로 원료를 공급할 저탄소를 선택하는 것이다. 그리고 호 중복성 여부를 검사하여 선택된 저탄소에서의 조합 컨베이어벨트의 경로와 이전에 선택된 저탄소에서의 조합 컨베이어벨트의 경로가 중복되지 않도록 하는 것이다. 그리고 각 저탄장은 수요량을 만족할 수 있는 재고량을 보유하고 있으며, 모든 저탄소의 원료 공급 컨베이어벨트의 경로는 컨베이어벨트의 가동 대기시간이 발생하지 않을 경우 선택 경로를 통한 원료 공급완료시간은 원료 공급계획 시간을 만족한다고 가정한다. 알고리즘의 단계는 총 7단계로 구성되어 있다. 각 단계를 간단히 설명하면, 1단계에서 공급할 원료의 종류를 선택한다. 그리고 2단계에서 선택된 원료의 종류를 가지고 있는 저탄장에서 원료를 컨베이어벨트로 이송할 불출기를 선택하고, 3단계에서 선택 불출기를 통해 원료를 공급할 저탄소를 선택한다. 4단계에서 선택 저탄소에서의 원료 공급 컨베이어벨트 경로와 이전에 선택된 경로간의 중복성 여부를 검사하고, 5단계에서 원료 공급일정계획을 수립한다. 그리고 6단계에서 선택 컨베이어벨트 경로를 통한

원료 공급완료 시간의 공급 계획시간 만족 여부를 검사한다. 그리고 7단계에서는 선택된 원료 공급 저탄소와 공급량, 컨베이어벨트의 경로, 불출기의 총 이동시간, 컨베이어벨트의 총 가동시간을 저장하고 변경된 수요량, 저탄소의 재고량, 불출기의 위치를 저장한다. 이와 같은 알고리즘 단계는 선택된 종류의 원료가 수요량을 만족할 때까지 반복되며, 모든 수요량을 만족할 때까지 공급 원료 종류를 선택하여 알고리즘을 반복한다. <Figure 2>는 본 연구에서 제안하는 휴리스틱 알고리즘의 전체 흐름도이다.

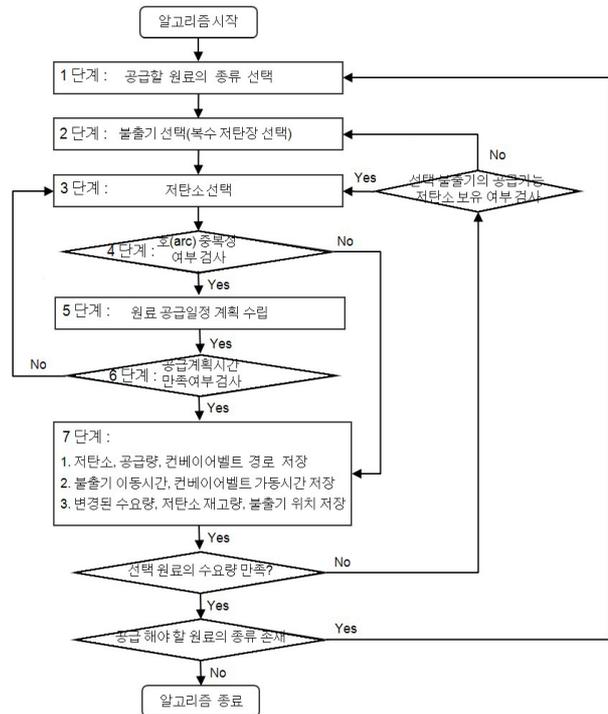


Figure 2. Flow chart of a proposed heuristic algorithm

제안 휴리스틱 알고리즘의 각 단계를 자세히 살펴보면 알고리즘 1단계인 공급할 원료의 종류 선택 단계는 공급할 원료를 순서대로 선택하는 단계이다. 알고리즘은 선택된 원료 종류의 수요량이 만족될 때까지 알고리즘 2단계에서 7단계를 반복적으로 수행한다.

알고리즘 2단계인 불출기 선택 단계는 불출기의 불출 가능한 단일 저탄장 또는 복수 저탄장의 선택 원료에 대한 수요 공급 가능량의 합이 가장 큰 불출기를 선택하는 단계이다. 공급 가능량의 합이 같으면 발전기와 가까운 위치에 있는 불출기를 선택한다.

알고리즘은 선택된 불출기의 공급가능 저탄소가 원료를 모두 공급할 때까지 알고리즘 3단계에서 7단계를 반복적으로 수행한다. <Figure 3>의 발전소 설비 네트워크의 예를 보면, 수요량은 A 종류의 원료 300, B 종류의 원료 100, C 종류의 원료 300, D 종류의 원료 100이며, 발전소에 원료를 공급할 수 있는 저탄장은 저탄장 1, 저탄장 2, 저탄장 3이 있다. 저탄장 1은 저탄소

1, 2, 3, 4가 있고, 저탄장 2는 저탄소 5, 6, 7, 8이 있고, 저탄장 3은 저탄소 9, 10, 11, 12가 있다. 불출기 1의 이동 가능한 위치는 58, 59, 60, 61이며, 불출 가능한 저탄장은 저탄장 1과 2이다. 그리고 불출기 2의 이동 가능한 위치는 52, 53, 54, 55이며, 불출 가능한 저탄장은 저탄장 2와 3이다. 선택된 원료와 수요량은 각각 A종류의 원료, 300일 경우, 불출기 1의 불출 가능한 저탄장은 1, 2이며, 공급 가능량의 합은 200이다. 그리고 불출기 2의 불출 가능한 저탄장은 2, 3이며, 공급 가능량의 합은 300이다. 불출기 2의 불출 가능한 저탄장을 통한 공급 가능 양이 더 많으므로 불출기 2를 선택한다.

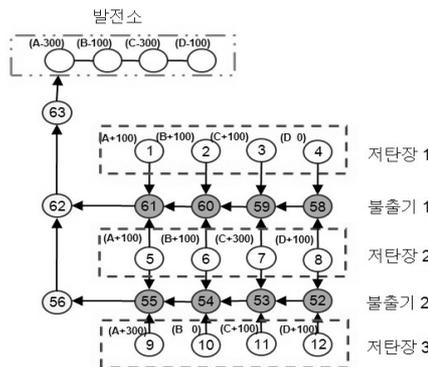


Figure 3. Networks of power plant facilities

알고리즘 3단계는 선택된 불출기의 불출 가능한 저탄소 중에서 우선적으로 원료를 공급할 저탄소를 선택하는 단계이다. 본 연구에서 고려하는 발전소 원료 공급계획 문제의 저탄장에 있는 저탄소의 수는 4개이며, 불출기의 불출 가능한 저탄장의 수는 1 또는 2이다. 선택된 불출기의 불출 가능한 저탄소 중에서 불출기의 위치를 고려하여 정의된 저탄소 탐색 순서로 원료를 공급할 저탄소를 선택한다. 정의된 저탄소 탐색 순서는 불출기의 이동 시간을 최소화하는 순으로 설정하였다. <Figure 4>는 저탄소 탐색 순서의 예이다.

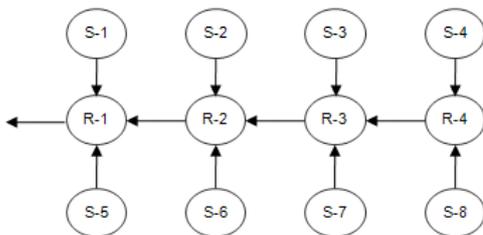


Figure 4. An example of search for coal pile sections

- 불출기의 이동 가능한 위치 : R-1, R-2, R-3, R-4
- 불출기의 불출 가능한 저탄소 : S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-6, S-7, S-8
- Case 1 : 불출기의 위치가 R-1인 경우의 저탄소 탐색 순서 : S-1(S-5) → S-2(S-6) → S-3(S-7) → S-4(S-8)
- Case 2 : 불출기의 위치가 R-2인 경우의 저탄소 탐색 순서

- : S-2(S-6) → S-1(S-5) → S-3(S-7) → S-4(S-8)
- Case 3 : 불출기의 위치가 R-3인 경우의 저탄소 탐색 순서 : S-3(S-7) → S-4(S-8) → S-2(S-6) → S-1(S-5)
- Case 4 : 불출기의 위치가 R-3인 경우의 저탄소 탐색 순서 : S-4(S-8) → S-3(S-7) → S-2(S-6) → S-1(S-5)

알고리즘 4단계는 선택된 저탄소에서 공급 가능한 경로 중에 조합 컨베이어벨트의 가동시간이 가장 작은 경로와 이미 계획된 경로간의 중복 컨베이어벨트 사용여부를 검사하는 호중복성 여부 검사 단계이다. 중복 컨베이어벨트의 사용여부 검사 방법은 이전에 저장된 경로의 각 컨베이어벨트의 종료시간이 현재 선택된 컨베이어벨트의 시작시간보다 큰 컨베이어벨트의 존재 유무에 따라 판단한다. 중복 호가 없으면 컨베이어벨트의 가동 대기시간이 발생하지 않으므로 다음 5단계인 원료 공급일정 계획수립과 6단계인 공급계획시간 만족여부 검사를 하지 않고, 중복 호가 있으면, 다음 5단계에서 기존의 경로를 통한 컨베이어벨트의 가동시간과 새로 추가된 경로를 통한 컨베이어벨트의 가동시간을 고려하여 원료 공급일정 계획수립을 하고, 6단계에서 컨베이어벨트의 가동 대기시간이 추가된 공급 완료시간이 공급계획 시간을 만족하는지 판단하기 위해 공급계획시간 만족 여부 검사를 수행한다.

알고리즘 5단계는 이미 계획된 경로를 통한 컨베이어벨트의 가동시간과 새로 추가된 경로를 통한 컨베이어벨트의 가동시간이 중복되지 않도록 새로 추가된 경로의 컨베이어벨트의 가동 시작시간과 종료시간을 변경하는 원료 공급일정 계획수립단계이다. 원료 공급일정 계획은 선택된 원료의 공급을 위해 저탄소의 공급량을 운반하는 컨베이어벨트의 가동 시작시간과 종료시간으로 구성되어있다.

컨베이어벨트의 가동 시작시간은 이전 컨베이어벨트의 가동 종료시간과 같다. 하지만 기존의 경로를 통한 컨베이어벨트 가동 종료시간이 가동 시작시간보다 큰 경우 가동 시작시간은 기존의 경로를 통한 컨베이어벨트의 가동 종료시간이 된다. 그리고 가동 종료시간은 컨베이어벨트의 가동 시작시간에서 컨베이어벨트의 원료 운반 흐름시간을 더한 시간이다.

- 가동 시작시간 = max(이전 컨베이어벨트의 가동 종료시간, 기존의 경로를 통한 컨베이어벨트 가동 종료시간)
- 가동 종료시간 = 가동 시작시간 + 공급량 × 컨베이어벨트의 톤당 운반시간

<Figure 5>의 원료공급 예를 보면 수요량은 A종류의 원료 100과 B종류와 원료 100이고, 이미 계획된 원료 공급 경로는 저탄소 2의 B종류 원료 100을 컨베이어벨트 60 → 61 → 62 → 63를 통해 공급하는 것이다. 새로 선택된 경로는 저탄소 9의 A종류 원료 100을 컨베이어벨트 55 → 56 → 62 → 63를 통해 공급하는 것이다. 이러한 경우의 원료 공급 일정계획 수립은 <Table 1>의 원료 공급일정 계획 차트와 같다.

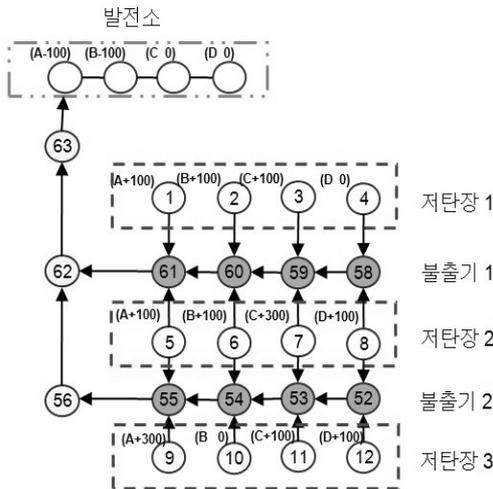


Figure 5. An example of coal supplies

Table 1. An example of coal supply scheduling chart

컨베이어					
CV-52					
CV-53					
CV-54					
CV-55	1111111111				
CV-56		1111111111			
CV-58					
CV-59					
CV-60	0000000000				
CV-61		0000000000			
CV-62			0000000000 #####	1111111111	
CV-63				0000000000	1111111111
	0	100	200	300	400
	시간(분)				

원료 공급일정 계획 차트의 세로축은 발전소 원료 공급 설비 네트워크에 있는 컨베이어벨트이고, 가로축은 컨베이어벨트의 가동시간이다. <Table 1> 안에 숫자 0은 저탄소 이전의 원료 공급 작업인 저탄소 2를 통한 원료공급 작업을 의미하고, 숫자 1은 현재 수립할 원료공급 작업인 저탄소 9를 통한 원료공급 작업을 의미한다. 그리고 #는 기존의 원료공급 작업의 컨베이어벨트의 가동시간과 새로 선택된 원료공급 작업의 컨베이어벨트 가동시간 중복으로 인해 발생하는 컨베이어벨트의 가동 대기시간을 의미한다. 각 컨베이어벨트의 톤당 가동시간은 1 일 경우, 저탄소 2의 공급량은 100이므로 저탄소 2의 공급량을 운반하는 각 컨베이어벨트의 가동시간은 100이고, 공급 경로에 있는 컨베이어벨트의 운반 완료시간은 컨베이어벨트 63의 가동 종료시간인 400이다. 저탄소 9의 공급량 또한 100이므로 저탄소 9의 공급량을 운반하는 각 컨베이어벨트의 가동시간

도 100이다. 기존의 경로에서 컨베이어벨트 62에서 저탄소 2의 원료공급을 위한 컨베이어벨트 가동시간과 중복되므로 저탄소 9의 원료공급을 위한 컨베이어벨트의 가동 시작시간은 저탄소 2의 원료공급을 위한 컨베이어벨트 62의 가동 종료시간인 300이다. 따라서 공급 경로에 있는 컨베이어벨트의 운반 완료시간은 컨베이어벨트 63의 가동 종료 시간인 500이 된다.

알고리즘 6단계는 선택된 경로를 통한 원료 공급 완료시간의 공급계획 시간 만족 여부를 검사하는 단계이다. 원료 공급 완료시간은 공급 저탄소로 이동하는 불출기의 총 이동시간과 경로의 조합 컨베이어벨트의 총 가동시간, 이전에 저장된 경로의 컨베이어벨트 가동시간과 중복되어 발생하는 컨베이어벨트의 가동 대기시간의 합이다. 원료 공급 완료시간이 총 공급계획 시간을 만족하지 못할 경우 현재 선택된 경로를 삭제하고 알고리즘 3단계인 저탄소 선택 단계로 돌아가 알고리즘을 반복한다.

알고리즘 7단계는 선택된 원료 공급 저탄소와 공급량, 컨베이어벨트의 경로, 불출기의 총 이동시간, 컨베이어벨트의 총 가동시간을 저장하고 변경된 수요량, 저탄소의 재고량, 불출기의 위치를 저장하여 기존의 원료 공급일정 계획에 선택된 공급 저탄소의 원료 공급일정 계획을 추가하는 단계이다.

## 5. 실험 결과

### 5.1 문제생성 및 실험환경

본 연구에서 제안하는 휴리스틱 알고리즘의 실험은 단순화된 발전소 원료 공급계획 문제(SCSPP)에 대해 CPLEX 11.0과 비교 실험을 하고, 발전소 원료 공급계획 문제(CSPP)에 대해 기존의 원료 공급 두 가지 방법과 비교하는 실험을 수행한다. 실험을 위한 문제는 저탄소와 불출기의 크기가 서로 다르게 생성하였으며, 불출기의 한 구간의 이동시간( $m_{ab}^r$ )은 20, 컨베이어벨트 구간(i, j)의 톤당 가동시간( $f_{ij}$ )은 0.05로 동일하게 설정하고, 저탄소 재고량  $M_i \sim U[200, 600]$ 로 생성하였다. 문제는 <Table 2> 실험 문제와 같이 불출기, 저탄소, 컨베이어벨트의 수가 다른 유형 3개에 대해 각각 수요량이 다른 20개의 문제를 가지고 실험하였다. 각 유형의 실험 문제는 이산 일양분포의 하한값과 상한값을 조정하여 문제 번호가 커질수록 수요량이 커지도록 생성했다. 그리고 실험은 Pentium 4 3.00GHz, 1024 Mb RAM, Windows XP, Visual C++을 이용하여 수행하였다.

Table 2. Test problems

유형	Problem No	(불출기, 저탄소, 컨베이어벨트)	(수요량)
1	1~20	(6, 24, 69)	$d_i \sim U[400, 1600]$
2	21~40	(12, 48, 138)	$d_i \sim U[800, 2000]$
3	41~60	(16, 76, 189)	$d_i \sim U[1200, 2400]$

## 5.2 알고리즘 성능 비교

본 연구에서 제안하는 휴리스틱 알고리즘의 첫 번째 실험은 단순화된 발전소 원료 공급계획 문제(SCSPP)에 대해 CPLEX 11.0를 통한 최적 목적값과 비교 하는 실험이다. SCSPP는 CSPP에서 저탄소의 선택 순서와 원료 공급계획시간 제약을 고려하지 않고, 모든 불출기의 초기 위치는 저탄장의 맨 왼쪽에 위치하고 있으며, 오른쪽 방향으로만 이동할 수 있다고 가정한 문제이다. 본 실험의 목적은 간접적으로 제안 휴리스틱 알고리즘의 성능을 판단하기 위함이다. 제안 휴리스틱 알고리즘의 목적값과 CPLEX(MIP)의 최적 목적값과의 비교를 위해  $\epsilon^{opt}$ 를 사용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$\epsilon^{opt} = \left( \frac{Z_H - Z^*}{Z^*} \right) \times 100$$

그리고 제안하는 휴리스틱 알고리즘의 두 번째 실험은 발전소 원료 공급계획문제(CSPP)에 대해 발전소 원료 공급계획 문제를 푸는 기존의 방법 두 가지 중에 좋은 해를 가지는 방법이 무엇인지 확인하기 위해 성능을 비교하는 실험이다. 기존의 원료 공급계획 방법 1(C1)은 발전기와 가까운 저탄장에 있는 저탄소로부터 원료를 공급하는 방법이며, 기존의 원료 공급계획 방법 2(C2)는 발전기와 가까운 불출기의 불출 가능한 저탄장에 있는 저탄소로부터 원료를 공급하는 방법이다. 제안 휴리스틱 알고리즘의 목적값과 기존 방법의 목적값과의 비교를 위해 기존 방법 중에 좋은 목적값과 제안 휴리스틱 알고리즘의 목적값의 차이를 뜻하는 C-H Gap을 사용하였으며 그 식은 아래와 같다.

$$C - H \text{ Gap} = \frac{|Z_C - Z_H|}{Z_H} \times 100$$

<Table 3>~<Table 5>은 단순화된 발전소 원료 공급계획 문제(SCSPP)에 대해 CPLEX의 최적 목적값( $Z^*$ )과 제안 휴리스틱 알고리즘의 목적값( $Z_H$ )을 비교한 실험 결과이다. 모든 실험 문제에 대해 제안 휴리스틱 알고리즘의 계산시간이 CPLEX의 계산시간보다 빠르게 나타났다. 그리고 제안 휴리스틱 알고리즘의 목적값( $Z_H$ )과 최적 목적값( $Z^*$ )의 평균 차이는 4.91%로 제안 알고리즘의 해는 최적해와 근사하게 나오는 것을 알 수 있다.

<Table 6>~<Table-8>은 발전소 원료 공급계획문제(CSPP)에 대해 기존의 두 가지 원료 공급 방법 C1, C2의 목적값( $Z_{C1}$ ,  $Z_{C2}$ )중에 좋은 목적값( $Z_C$ )과 제안 휴리스틱 알고리즘의 목적값( $Z_H$ )을 비교한 실험 결과이다. 모든 실험 문제에 대하여 제안 휴리스틱 알고리즘의 계산시간은 기존의 방법의 계산시간보다 다소 느리지만, 목적값( $Z_H$ )은 기존의 방법을 통한 목적값( $Z_C$ )보다 모두 좋은 값이 나오는 것을 알 수 있으며, 목적값의 차이는 평균 약 16%를 보였다.

## 6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 발전소 원료 공급계획 문제에 대해 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 원료 공급비용에 영향을 주는 컨베이어 벨트의 가동시간과 불출기의 이동시간을 최소화하고 발전기의 수요계획인 혼탄 계획과 설비제약을 만족시키는 수리모형을 제시하고, 최적해를 구하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. 제안 휴리스틱 알고리즘의 단계는 원료를 공급할 저탄소를 선택하기 위해 먼저 불출기의 불출 가능한 단일 저탄장 또는 복수 저탄장의 선택 원료에 대한 수요 공급 가능 양의 합이 가장 큰 불출기를 선택하고, 선택된 불출기의 위치를 고려하여 사전에 정의된 저탄소 탐색 순으로 원료를 공급할 저탄소를 선택한다. 그리고 선택된 저탄소에서의 원료 공급 조합 컨베이어벨트의 경로와 이미 계획된 저탄소에서의 조합 컨베이어벨트의 경로가 중복되는지 검사하고, 컨베이어벨트의 공급 종료시간이 원료 공급계획시간을 만족하면 선택된 원료 공급 저탄소와 공급량, 컨베이어벨트의 경로, 불출기의 총 이동시간, 컨베이어벨트의 총 가동시간을 저장하고 변경된 수요량, 저탄소의 재고량, 불출기의 위치를 저장한다.

이와 같은 알고리즘 단계는 선택된 종류의 원료가 수요량을 만족할 때 까지 반복되며, 모든 수요량을 만족할 때까지 수공급 원료 종류를 선택하여 알고리즘을 반복한다.

알고리즘의 성능실험은 단순화된 발전소 원료 공급계획 문제(SCSPP)에 대해 CPLEX 11.0를 통한 최적 목적값과 비교하는 실험과 발전소 원료 공급계획문제(CSPP)에 대해 발전소 원료 공급계획 문제를 푸는 기존의 방법 두 가지 중에 좋은 해를 가지는 방법과 성능을 비교하는 실험을 수행하였다. CPLEX 11.0를 통한 최적 목적값과 비교하는 실험결과는 최적해와의 오차가 평균 약 4.91%로 제안하는 휴리스틱 알고리즘이 발전소 원료 공급계획문제에서 효과적이었다. 그리고 기존의 원료 공급 방법과 비교한 실험 결과는 모든 실험 문제에서 향상된 해를 보여주었으며, 평균 약 16% 차이를 보였다. 추후 연구 과제로는 보다 큰 문제에 대한 실험을 수행하여 추가적인 알고리즘의 성능 실험이 필요하며, 발전소 원료 공급계획 문제 뿐만 아니라, 다양한 응용 분야의 문제들에 대한 적용 및 실험도 필요할 것이다.

## 참고문헌

- Gorman, M. F. (1998), An application of genetic and tabu searches to the freight railroad operating plan problem, *Annals of Operations Research*, **78**, 51-69.
- Jang, S. Y. (2006), An optimization model for scheduling unloading operations at an integrated steel mill, *KORMS*, **1**, 273-276.
- Kim, K. H. and Moon, K. C. (2003), Berth scheduling by simulated annealing, *Transportation Research part*, **B(37)**, 541-560.
- Kim, K. H. and Park, Y. M. (2004), A crane scheduling method for port

- container terminals, *European journal of Operational Research*, **156**, 752-768.
- Kozan, E. and Peter, P. (1999), Genetic algorithms to schedule container transfers at multimodal terminals, *International Transactions in Operational Research*, **6**, 311-329.
- Lee, K. H. and Lee, J. Y. (2005), A automation system to decide optimal coal supply routings, *RIST*, **19**(3)
- Lin, C. C. (2001), The freight routing problem of time-definite freight delivery common carriers, *Transportation Research*, **35**, 525-547.
- Newman, A. M. (2000), Scheduling direct and indirect trains and containers in an intermodal setting, *Transportation Science*, **34**(3), 256-270.
- Seo, M. S. and Go, Y. K. (1996), A Two-Level Hierarchical Expert System for Raw Material Scheduling, *Journal of Intelligence and Information Systems*, **2**(1), 75-91.
- Shih, L. H. (1997), Planning of fuel coal imports using a mixed integer programming method, *International Journal of Production Economics*, **51**, 243-249.
- Tang, L. and Liu, J. (2000), A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production, *European Journal of Operational Research*, **120**, 423-435.
- Yeom, K. (1997), Vessel scheduling expert system for bituminous coal supply, *KESS*, **1**, 96-106.

<부록 1> SCSPP와 CSPP의 유형별 CPLEX와의 성능 비교 실험결과

Table 3. CPLEX vs. a proposed algorithm for SCSPP of Type 1

Problem No	CPLEX(MIP)		제안 휴리스틱 알고리즘		
	$Z^*$	CPU Time(초)	$Z_H$	CPU Time(초)	$\frac{ z_H - z^* }{z^*} \times 100$
1	535	1.83	556	0.43	3.93
2	553	1.71	579	0.55	4.70
3	564	1.82	592	0.43	4.96
4	615	1.71	625	0.43	1.63
5	729	1.95	729	0.55	0.0
6	684	2.07	684	0.43	0.0
7	713	1.71	713	0.55	0.0
8	608	2.19	634	0.43	4.28
9	660	1.95	687	0.43	4.09
10	710	2.07	748	0.43	5.35
11	763	1.71	783	0.32	2.62
12	773	1.83	799	0.33	3.36
13	755	1.95	775	0.32	2.65
14	726	1.83	763	0.32	5.10
15	912	1.95	948	0.44	3.95
16	902	1.86	982	0.32	8.87
17	1042	1.84	1142	0.43	9.60
18	1089	2.31	1105	0.43	1.47
19	826	1.71	838	0.33	1.45
20	887	2.07	939	0.43	5.86
			평균		3.69

Table 4. CPLEX vs. a proposed algorithm for SCSPP of Type 2

Problem No	CPLEX(MIP)		제안 휴리스틱 알고리즘		
	$Z^*$	CPU Time (초)	$Z_H$	CPU Time (초)	$\frac{ z_H - z^* }{z^*} \times 100$
21	741	2.68	775	0.55	4.59
22	878	2.44	929	0.44	5.81
23	1093	1.09	1199	0.55	9.70
24	908	1.22	985	0.54	8.48
25	1093	2.32	1136	0.66	3.93
26	1207	2.31	1235	0.76	2.32
27	1331	2.44	1431	0.77	7.51
28	1408	3.05	1478	0.87	4.97
29	1362	2.44	1426	0.76	4.70
30	1410	2.19	1524	0.66	8.09
31	1345	1.58	1446	0.76	7.51
32	1543	2.07	1610	0.88	4.34
33	1507	1.95	1612	0.88	6.97
34	1680	2.19	1701	0.76	1.25
35	1631	2.56	1740	0.98	6.68
36	1729	2.07	1853	0.76	7.17
37	1856	2.31	1957	0.98	5.44
38	2139	1.82	2226	0.98	4.07
39	2004	2.31	2125	0.99	6.04
40	1987	1.82	2121	0.98	6.74
			평균		5.82

**Table 5.** CPLEX vs. a proposed algorithm for SCSPP of Type 3

Problem No	CPLEX(MIP)		제안 휴리스틱 알고리즘		
	$Z^*$	CPU Time (초)	$Z_H$	CPU Time (초)	$\frac{ z_H - z^* }{z^*} \times 100$
41	911	2.55	955	0.76	4.83
42	1068	2.19	1072	0.55	0.37
43	1118	1.71	1208	0.65	8.05
44	1292	2.32	1335	0.77	3.33
45	1125	2.31	1185	0.54	5.33
46	1265	2.08	1299	0.65	2.69
47	1301	1.95	1446	0.66	11.15
48	1393	2.19	1583	0.77	13.64
49	1521	2.56	1606	0.88	5.59
50	1628	1.95	1656	0.86	1.72
51	1523	2.07	1619	0.88	6.30
52	1664	1.95	1769	0.87	6.31
53	1701	2.43	1767	0.98	3.88
54	1807	2.20	1888	0.98	4.48
55	1832	2.07	1917	0.98	4.64
56	1823	2.08	1933	0.98	6.03
57	2112	2.81	2212	1.09	4.73
58	1958	2.68	2059	0.98	5.16
59	2220	2.56	2315	1.19	4.28
60	2380	2.07	2423	1.31	1.81
평균					5.22

**Table 6.** CPLEX vs. a proposed algorithm for CSPP of Type 1

Problem No	C1		C2		제안 휴리스틱		$\frac{ Z_C - Z_H }{Z_H} \times 100$
	$Z_{C1}$	CPU Time (초)	$Z_{C2}$	CPU Time (초)	$Z_H$	CPU Time (초)	
1	664	0.32	622	0.32	500	0.43	24.40
2	680	0.33	629	0.21	483	0.43	30.23
3	680	0.32	645	0.32	543	0.45	18.78
4	840	0.33	663	0.33	602	0.55	10.13
5	905	0.32	892	0.33	786	0.54	13.49
6	933	0.43	882	0.32	714	0.54	23.53
7	930	0.32	924	0.32	715	0.43	29.23
8	745	0.32	700	0.21	611	0.43	14.57
9	759	0.32	731	0.32	592	0.44	23.48
10	974	0.33	815	0.32	716	0.43	13.83
11	816	0.22	837	0.33	565	0.32	44.42
12	861	0.21	924	0.21	859	0.34	0.23
13	889	0.23	768	0.22	674	0.32	13.61
14	770	0.22	858	0.33	727	0.43	5.91
15	964	0.21	991	0.32	912	0.44	5.7
16	981	0.22	995	0.44	954	0.55	2.83
17	1113	0.32	1306	0.32	1020	0.44	9.12
18	1189	0.44	1336	0.32	1073	0.43	10.81
19	926	0.21	839	0.33	703	0.33	19.35
20	1168	0.21	1126	0.33	785	0.32	43.44
평균							17.85

**Table 7.** CPLEX vs. a proposed algorithm for CSPP of Type 2

Problem No	C1		C2		제안 휴리스틱		$\frac{ Z_C - Z_H }{Z_H} \times 100$
	$Z_{C1}$	CPU Time (초)	$Z_{C2}$	CPU Time (초)	$Z_H$	CPU Time (초)	
21	907	0.44	864	0.43	815	0.65	6.01
22	1104	0.43	988	0.44	869	0.55	13.69
23	1292	0.66	1283	0.55	1199	0.65	7.01
24	1187	0.55	1172	0.44	1025	0.54	14.34
25	1320	0.66	1247	0.44	1176	0.65	6.04
26	1558	0.65	1439	0.65	1236	0.67	16.42
27	1748	0.65	1625	0.77	1539	0.88	5.59
28	1898	0.76	1781	0.65	1545	0.87	15.28
29	1765	0.65	1719	0.65	1466	0.77	17.26
30	1830	0.77	1680	0.55	1524	0.76	10.24
31	1824	0.76	1666	0.55	1516	0.77	9.89
32	2027	0.77	2014	0.76	1690	0.87	19.17
33	1993	0.86	1882	0.65	1610	0.98	16.89
34	2264	0.88	2156	0.65	1741	0.88	23.84
35	2010	0.76	1948	0.66	1740	0.98	11.95
36	2267	0.98	2168	0.76	1893	0.99	14.53
37	2429	0.88	2295	0.77	2077	1.09	10.50
38	2712	1.09	2690	1.10	2266	1.09	18.71
39	2595	0.98	2570	0.98	2165	1.09	18.71
40	2512	0.98	2681	1.09	2161	1.19	16.24
						평균	13.62

**Table 8.** CPLEX vs. a proposed algorithm for CSPP of Type 3

Problem No	C1		C2		제안 휴리스틱		$\frac{ Z_C - Z_H }{Z_H} \times 100$
	$Z_{C1}$	CPU Time (초)	$Z_{C2}$	CPU Time (초)	$Z_H$	CPU Time (초)	
41	1182	0.55	1047	0.76	895	1.09	16.98
42	1362	0.54	1207	0.87	1102	1.19	9.53
43	1346	0.65	1329	0.98	1208	1.20	10.02
44	1657	0.77	1552	0.98	1335	1.31	16.25
45	1355	0.54	1340	0.76	1185	1.30	13.08
46	1634	0.65	1480	0.65	1299	1.42	13.93
47	1598	0.65	1588	0.65	1446	1.30	9.82
48	1814	0.88	1737	0.76	1583	1.64	9.76
49	1933	0.87	1807	0.76	1646	1.63	7.78
50	2106	0.87	2013	0.88	1616	1.86	24.57
51	2044	1.09	1983	0.87	1659	1.64	19.53
52	2175	1.09	2058	0.76	1809	1.32	13.76
53	2217	1.31	2189	0.98	1807	1.09	21.14
54	2300	1.19	2285	0.99	1928	2.18	18.52
55	2417	1.42	2321	0.98	1917	2.40	21.07
56	2390	2.40	2256	0.98	1973	1.53	14.34
57	2712	1.85	2605	1.09	2252	1.42	15.67
58	2502	1.42	2460	1.09	2099	2.40	17.20
59	2771	2.07	2795	1.31	2255	2.95	22.88
60	3138	2.07	3099	1.42	2426	2.73	27.74
						평균	16.28