

# 냉연 일정계획 시스템의 개발과 적용

김창현<sup>1\*</sup> · 박상혁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>여수대학교 공과대학 교통·물류시스템 공학부

<sup>2</sup>포항산업과학연구원 생산관리연구팀

## Development and Application of Scheduling System in Cold Rolling Mills

Chang Hyun Kim<sup>1</sup> · Sang Hyuck Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Transportation and Logistics System Engineering, Yosu National University, Yeosu, Jeonnam 550-749

<sup>2</sup>Steel Process & Automation Research Center, RIST., Pohang, 790-330

The purpose of this research is to develop a scheduling system for CAL (Continuous Annealing Line) in Cold Rolling Mill. Based on CSP (Constraint Satisfaction Problem) technique in artificial intelligence, appropriate algorithms to provide schedules satisfying all the constraints imposed on CAL are designed and developed. Performance tests show that the proposed scheduling system outperforms human operators in case of aggregating the same attributes and minimizing the thickness differences between two adjacent coils.

**Keywords:** scheduling, cold rolling mill, constraint satisfaction problem

### 1. 서론

냉연공정은 열연 코일을 소재로 사용하여 냉연제품을 만드는 공정이다. 냉연제품은 자동차 외관재, 냉장고 외관, 스틸캔 등과 같이 주위에서 흔히 접할 수 있는 제품에 대한 기초 소재로서 철강업체 입장에서 보면 여러가지 제품, 반제품 가운데 가장 고부가가치를 창출해 낼 수 있는 최종 제품에 속한다. POSCO 만 하더라도 포항제철소에 2개의 냉연 공장을 비롯하여 광양제철소에 4개의 냉연공장 등 총 6개의 냉연 공장을 가동하고 있다. 국내 업체로는 동부제강, 연합철강, 현대하이스코 등이 있으며, 국외 업체로는 신일본 제철, NKK 등과 같은 대부분의 우수 해외 제철업체들이 냉연제품을 생산하고 있어서 가격 및 품질 경쟁이 더욱 격화되고 있는 분야이다. 이러한 상황에서 대외적인 원가 경쟁력을 향상하기 위한 방안은 분야별로 여러 방법이 있겠지만, 그 가운데 한 가지 방안은 최적의 공정관리

를 통한 생산성 향상 및 품질 향상을 들 수 있다. 냉연 공장에서의 공정관리는 크게 두 가지 업무로 구분할 수 있다. 그 하나는 수요가가 요구한 주문량을 납기 지연이 없이 적기에 생산하기 위해서 어떤 제품을, 언제, 어느 공정에서 얼마나 생산할 것인지를 결정해주는 생산계획 측면에서의 문제와 생산계획 단계에서 결정된 물량을 해당 단위 공정에서 어떠한 순서로 작업에 투입시킬 것인가 하는 생산관제 측면에서의 문제로 나눌 수 있다. 후자의 문제는 Roll 작업단위 편성 문제라고도 하는데, Roll 작업단위 편성이란 하루 단위로 작업해야 할 대상재, 즉 단위 코일들을 선정하여 공정의 제약조건을 만족하는 코일 간의 순서를 결정하는 문제를 말한다.

신규로 가동중인 광양제철소 4냉연공장에서의 생산관제는 과거에 구축된 Host 컴퓨터에 의한 자동 Schedule 시스템에 의존하고 있었으나 현행 시스템의 성능이 관제원의 요구 수준을 만족시켜 주지 못하는 바, 관제원의 수작업 판단에 절대 의존

\*연락처 : 김창현 교수, 550-749 전남 여주시 둔덕동 산 96-1 여수대학교 공과대학 교통·물류시스템공학부 물류시스템공학과

Fax : 061-659-3359, e-mail : chkim@yosu.ac.kr

2003년 3월 접수, 2회 수정 후 2003년 5월 게재 승인

하고 있다. 이러한 이유로 인하여 Roll 작업단위 편성시 고려해야 할 여러가지 제약조건들을 동시에 고려하기가 힘들고, 4냉연공장의 신규 가동으로 교대별 2 명의 관제원이 광양제철소 냉연 공장 18개 공정을 담당하고 있기 때문에 업무 부하가 매우 많은 실정이다.

이러한 수작업에 의한 관제는 오랜 동안의 경험을 통한 Know-How가 필요하며 신입 관제원의 자질을 만족할 만한 수준으로 끌어올리기 위해서는 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 관제원 간의 Roll 작업단위 편성에 대한 방법의 차이도 적지 않게 존재하므로 관제원이 누구냐에 따라 생산성이나 품질 측면에서의 차이도 발생한다. 이러한 배경하에 생산성 및 품질 향상을 도모하고자 모든 제약조건을 만족시키면서 최단시간에 가장 바람직한 형태의 Roll 단위편성 시스템의 개발에 대한 요구가 많았다.

이에 부응하고자 본 연구팀에서는 냉연 일정계획 자동화 시스템을 개발하여 현장에 이식, 1998년 11월부터 가동하여 현재까지 운영중에 있다. 최근 POSCO에서는 PI (Process Innovation) 프로젝트 차원에서 각 분야별로 국·내외의 Best Practice를 선정하여 이를 타 공장 및 타 분야에로의 응용을 모색하는 바, 개발된 시스템이 생산관제 부문에서 Best Practice로 선정되었다. 본 논문에서는 냉연공장의 여러 공정 가운데 가장 까다로운 CAL 공정에서의 일정계획 시스템의 개발과 적용에 대하여 소개하고자 한다. 논문의 구성은 2장에서는 독자의 이해를 돕고자 냉연공장의 구성과 물류에 대하여 설명하고, 3장에서는 문제의 정의, 4장에서는 이론적 고찰 및 선행 연구, 5장에서는 냉연 일정계획 시스템의 설계 및 구현을 기술하였다.

## 2. 냉연공정의 개요

냉연제품은 그 종류가 매우 많고, 제조과정이 판이하게 다르기 때문에 제품별로 서로 다른 단위 공정들을 갖고 있다. 다음은 광양제철소의 4 냉연공장을 중심으로 상술하고자 한다. 4 냉연공장의 구성과 물류는 <그림 1>과 같다.

냉연제품들은 열연공장으로부터 소재를 공급 받아 품종별로 해당 단위 공정에서 처리되어 출하된다. PCM (Pickling and

Cold Rolling Mill) 공정에서는 냉연 소재인 열연 코일을 받아 열연 코일에 묻어 있는 불순물을 제거하기 위해서 염산 욕조에서 세척한 후, 상온에서 알맞은 두께의 코일로 얇게 냉간압연한다. 이때, 염산으로 세척하는 과정을 연속적으로 하여 생산성을 높이기 위해 열연 코일을 여러 개 용접하여 붙인 다음 염산 욕조에 투입한다. PCM 공정에서는 해당 공정에서의 최종 생산제품인 FH (Full Hard)재와 CAL (Continuous Annealing Line), CGL (Continuous Galvanizing Line) 공정을 위한 후공정 소재를 생산 공급한다.

CAL 공정에서는 PCM 공정으로부터 소재를 공급받아 최종 생산제품인 냉간압연제품(CR재)과 후공정처리 제품인 전기도금 강판(EG재)용 소재를 생산하며, CAL 공정은 냉간압연 후에 발생하는 경도가 높거나 가공성이 부족한 문제를 해결하기 위해 소둔로에서 600 ~ 900도 정도로 가열해 주는 공정을 말한다. CGL 공정은 아연도금 강판(CG재)을 생산하는 공정이며, EGL (Electronic Galvanizing Line) 공정은 전기도금 강판(EG재)을 생산하는 공정이다.

## 3. 문제 정의

본 연구를 통해서 해결하고자 하는 것은 PCM 공정을 거친 CAL 용 반제품을 대상으로 하여 CAL 공정에 부과된 모든 제약조건들을 만족시키는 Roll 단위를 편성하는 것이다. 다음은 CAL 공정에서 고려해야 할 제약조건과 조업 우선순위를 나타내었다.

### 1) 폭

작업 진행 순서 방향으로 보았을 때 광폭에서 협폭 순으로 배치한다. 이유는 압연시 Roller가 마모되는데, 협폭의 코일을 작업하다가 광폭의 코일을 작업할 경우 협폭에 맞춰진 Roller 자국이 이후의 코일들에 발생되어 불량률이 발생하기 때문이다. 광폭에서 협폭 순의 기본 제약을 폭 역전 범위 내에서는 협폭에서 광폭으로도 역전이 가능한데, 폭 역전 기준은 통상 5mm이다.

### 2) 두께

두께는 전·후 코일 중에서 얇은 두께를 기준으로 범위별 바꿈 기준이 적용된다.

Roll 전체에서의 냉연 두께에 대한 오르내림은 가급적 큰 Sine 곡선을 그리도록 한다. 그 이유는 얇은 두께를 압연한 후 바로 두꺼운 제품을 압연할 수는 없고 중간 두께를 거쳐서 두꺼운 제품을 압연하여야 한다. 또한, 큰 Sine 곡선 모양의 두께 변화를 보일 때 전·후 두 코일 간에 두께 편차가 적어진다.

### 3) 소둔온도

전·후 작업 코일 간의 소둔온도 편차가 30도를 넘지 않도록 한다.

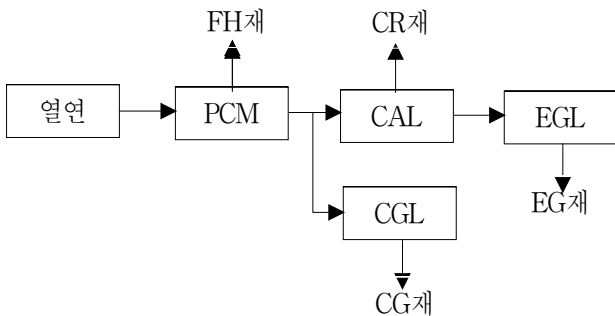


그림 1. 냉연 공장 흐름도.

4) 제품기준

CAL의 작업 대상은 CR재와 EG재이다. 작업 공정상 작업 대상재가 바뀌면 이를 위한 생산준비 시간이 소요된다. 이에 따라, CR재와 EG재는 작업 생산성을 높이기 위하여 폭 역전 기준 이내의 동일 폭 그룹이라면 같은 종류의 제품끼리 가능한 한 서로 모아준다.

5) 내경 기준

코일은 철판을 감아서 말기 때문에 원통형 형상을 하고 있다. 이때 원통의 내부 직경에 해당하는 것이 내경이다. CAL에서는 20인치와 24인치의 두 가지 종류의 내경을 가지는 제품을 생산하는데, 내경의 바뀜에 따른 생산준비 시간을 줄이기 위해 같은 내경의 제품 끼리 가능한 한 묶어준다.

6) Edge 기준

Edge는 철판의 가장자리를 일컫는데, 냉간압연 후에는 Edge가 고르지 않게 된다. Edge를 고르게 하는 방법에는 Mill Edge와 Slit Edge가 있다. Edge 역시 생산성과 관련하여 같은 폭 그룹, 같은 제품, 같은 내경으로 모여진 그룹핑을 해치지 않는 범위 내에서 가능한 같은 Edge 처리 방법끼리 모아준다.

7) 도유기준

도유는 제품의 내구성을 증진시키고자 제품 표면에 보호용 기름 피막을 입히는 것을 말한다. 도유 역시 생산성 증대 목적으로 같은 성격의 도유끼리 묶어준다. 앞서의 Edge기준과 마찬가지로 이미 앞서 만들어진 제품, 내경, Edge 그룹을 해치지 않는 범위에서 무도유, 방청유, DOSA유 구분으로 모아준다.

8) DOSA유 기준

도유 종류 가운데 하나로서 DOSA유 코일 처리는 코일 전후에 반드시 도유를 하지 않은 무도유 코일이 인접하도록 해야 한다는 것이다. DOSA 도유 전·후에는 무도유 코일이 2~3매 배치되도록 순서 조정이 필요하다.

위 8가지 제약조건에 대한 우선순위는 나열된 순서대로 폭, 두께, 소둔온도, 동일 제품, 동일 내경, 동일 Edge, 동일 도유, DOSA유 기준 순이다. 즉, 전·후 두 코일 간에 폭 편차를 최소화하면서 두께 편차를 줄이고, 소둔온도 기준을 유지한다. 이 상태에서 동일 제품끼리 묶어주며, 동일 제품 내에서는 동일 내경끼리 묶어주며, 동일 내경에서는 동일 Edge끼리 묶어주며, 동일 Edge에서는 동일 도유끼리 묶어주며 DOSA유의 경우 DOSA유 기준을 유지하는 것이다. 폭, 두께, 소둔온도, DOSA유 기준에 관한 조건은 반드시 지켜야 하는 강 제약조건인 반면, 동일 속성인 제품, 내경, Edge, 도유들끼리 모아주는 과정은 가능한 한 그렇게 하면 생산성이 올라가므로 바람직하다는 약 제약조건이다.

4. 이론적 고찰 및 선행 연구

본 연구에서의 Roll 작업단위 편성은 Roll 단위로 편성하고자 하는 대상 코일을 선택하는 문제와 선택된 코일을 대상으로 하여 코일 간의 순서를 결정하는 Sequencing 문제이다. Sequencing은 작업 대상물이 N개 있을 때 순서 결정상 모든 경우의 수는 N!개만큼 존재한다. 통상 Roll 단위는 100 ~ 150개의 코일로 구성되는데, N이 15라고 가정하여도 모든 경우의 수는 1조 3000억이나 되어 현실적으로 가능한 조합에 대한 나열은 불가능하다. 제약조건이 없는 단일 평가기준에 의한 Sequencing 문제에 대해서는 작업 대상물 N이 크더라도 빠른 시간 내에 최적해를 찾아주는 많은 연구 결과들이 발표되어 있다(Pinedo, 1995). 하지만 이러한 연구 결과들도 POSCO와 같이 다양한 공정 제약 조건하에서는 수리모형화가 어려울 뿐만 아니라 결과를 적용하기에도 힘든 실정이다.

근래에 들어 현실 세계의 복잡한 일정계획 분야 문제를 해결하기 위하여 탐색에 의한 해의 도출을 주 내용으로 하는 CSP (Constraint Satisfaction Problem) 기법(Fox and Smith, 1984; Dechter and Pearl, 1988)을 비롯하여 전문가 시스템이나 메타휴리스틱 방법(김여근 외, 1997)이 널리 적용되고 있다. 제철산업에서 일정계획 분야의 문제에 대한 이들 방법의 적용사례는 POSCO의 경우 열연공장(포항산업과학연구원, 1992)과 냉연공장(전치혁 외, 1993; POSCO, 1994)에 전문가 시스템과 CSP 기법이 적용된 예가 있다. 외국 타사의 경우 열연공장(Lopez et al., 1988)에서 Tabu Search를 이용하여 열연 Roll 편성에 적용한 예가 있으며, Lee et al.(1996)는 제철소에서 발생하는 제강-열연 부문에서의 일정계획 문제에 대하여 문제 유형별로 적용 가능한 기법들을 소개하였다.

본 문제의 경우에도 시스템화를 통해 Roll 편성 업무에 적용하려는 몇 차례의 시도가 있었다(전치혁 외, 1993; POSCO, 1994). 본 연구는 현장 운용상 이들 시스템들에서 발생하는 문제점을 개선하고자 본 연구를 수행하게 되었는데, 선행 연구(전치혁 외, 1993; POSCO, 1994)와의 차이점에 대해서는 다음 장에서 상술하고자 한다.

5. 냉연 일정계획 시스템의 설계 및 구현

5.1 시스템 구성 및 흐름

문제 해결을 위한 시스템 구성 및 문제 해결상의 흐름은 크게 다음의 6가지 단계로 대별된다.

[단계 1] 조업 서버로부터 Roll 편성 대상의 원시 데이터를 읽어 들이는 과정.

[단계 2] 공정 제약조건들을 사용자로부터 입력 받는 과정.

[단계 3] Roll 전체의 두께 모양을 고려하기 위하여 다음 단

계에서의 진행 결과를 어느 정도 미리 예측하고자 Look Ahead 기법을 적용하여 Roll 전체의 두께 모양을 다듬어 나가는 과정.

본 연구팀에서는 문제해결 기법으로서 CSP 기법에 근거를 둔 휴리스틱을 이용하였다. 동일한 문제에 대하여 선행 연구에서 채택한 문제해결 방법과 본 연구진에서 채택한 문제해결 방법상의 가장 큰 차이점은 다음과 같다. 기존 연구에서는 초기에 Roll이 비어있는 상태에서 대상재 Pool에서 코일을 하나 선택하여 Roll에 추가시킴으로써 제약조건을 만족하는 코일만으로 Roll을 키워 나가는 “선택”과 “Sequencing”이 동시에 발생하는 방법으로서 빈 바구니를 하나씩 채워나가는 방법인데 반해, 본 연구에서는 대상재 Pool에 있는 코일을 모두 전체 Roll에 집어넣은 후 제약조건에 맞게 Roll을 다듬어 나가는 형식이다. 즉, Roll에 담겨져 있는 코일 전체를 대상으로 코일들의 물량 분석을 통해 Roll 전체 모양을 두께를 기준으로 하여 대략적인 모양을 잡는다. 이때 폭은 제약조건을 위반하지 않도록 동일폭 그룹을 형성하여 동일폭 그룹 내에서 두께 모양을 잡지만 두께 기준은 대략적인 Roll 전체 모양을 잡는 데 사용하므로 제약조건을 위반할 수 있다. 여기서 두께 기준에 위반된 코일은 다음 단계에서 해결해준다.

문제해결 진행상 두 가지 방법 사이의 차이점으로서 선행 연구에서의 문제점은 코일을 하나씩 붙여나가는 과정, 즉 대상재 Pool에서 코일을 하나 선택하여 Roll에 추가시켜 나가는 “선택”과 “Sequencing” 과정상의 어느 시점에 Roll을 편성해야 할 물량이 남아있음에도 불구하고 더 이상 다음 코일과 연결시키지 못할 때이다. 이러한 현상은 전 코일의 선택이 잘못되었을 때 발생하는데 이 경우 잘못을 야기한 코일을 포기하고 다른 코일을 찾아 다시 코일을 배치하여야 한다. 인공지능 분야에서는 이를 Backtracking이라고 한다. 인공지능 기법과 같이 탐색적으로 해를 찾아나가는 문제의 경우 이러한 Backtracking의 발생은 매우 치명적이며, 시스템의 성능을 크게 좌우한다. 선행 연구에 의한 방법으로 문제를 풀어나갈 경우 Backtracking을 피할 수 있는 방법은 전혀 없으며, 몇 번까지 거슬러 Backtracking을 허용할 것인지, 어떻게 Backtracking을 만날 가능성을 줄일 것인지 또는 어떻게 Backtracking을 만났을 때 비교적 쉽게 단시간 내에 이를 해결하느냐가 문제의 관건이다. 또 하나의 약점은 Roll 전체에 대한 윤곽을 그릴 수 없다는 것이다. 관제원이 Roll을 편성할 경우 두께에 대해서는 오르내림이 큰 Sine 곡선을 그려가면서 두께가 얇아질 때는 계속 얇아지는 경향으로, 두께가 두꺼워질 때는 계속 두꺼워지는 경향으로 Roll을 편성한다. 그러나, 기존 연구에 의한 방법은 단지 두 개의 전후 코일만을 보기 때문에

Roll 전체 경향을 파악하는 데는 한계가 있다.

본 연구에서와 같이 전체 Roll을 놓고 Roll을 다듬어 나가는 방법의 장점은 선행 연구에서 안고 있는 문제점을 모두 해결한 것으로 대상재의 선택과 Sequencing 상에서 Backtracking 과정이 필요없고, 전체 Roll에 대한 두께의 오르내림을 가급적 관제원들이 작업하는 것과 같은 큰 Sine 곡선을 그리면서 Roll 편성하는 것이 가능하다는 것이다.

[단계 4] 단계 3에서는 전·후 코일 간의 제약조건 만족 여부는 검사하지 않는다. 단계 4는 코일 간의 제약조건 만족 여부를 검사한 뒤 제약조건을 위반한 코일들만을 대상으로 다른 코일들과 순서를 조정하여 제약조건을 만족시켜주는 과정이다. 이 과정을 거친다고 하더라도 전·후 코일 간에 제약조건을 만족시키지 못하는 코일은 존재한다. 이 경우 제약조건을 위반한 코일들을 제거하여 모든 제약조건을 만족하는 초기 Roll 형태로 만든다. 제거된 코일은 다시 대상재 Pool로 들어간다.

[단계 5] 상위의 우선순위를 해치지 않으면서 동일한 속성들을 갖는 코일들을 모아주는 작업을 하고, 전·후 코일 간의 두께 바꿈 편차를 최소화하는 과정을 수행한다.

[단계 6] Roll이 편성된 결과를 출력하여 결과를 확인한다.

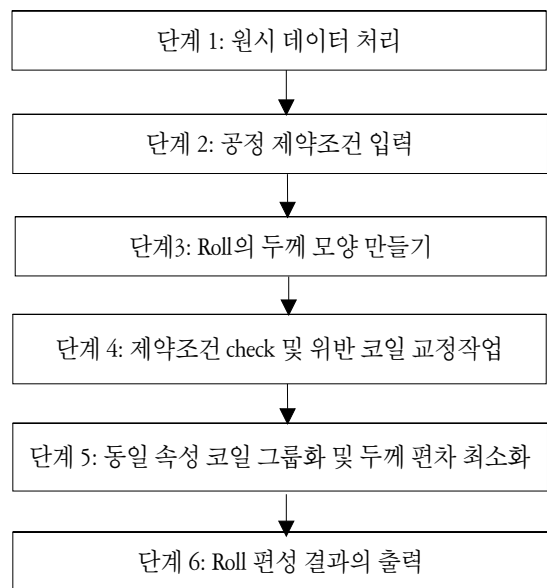


그림 2. 시스템 구성 및 문제 해결상의 흐름.

## 5.2 시스템 흐름 단계별 알고리즘

### 5.2.1 Roll의 두께 모양 만들기

일정계획 대상이 되는 모든 코일을 폭 역전 기준에 의거하여 순서를 바꾸어도 지장이 없는 코일들끼리 묶어 몇 개의 동일폭 그룹을 형성하고, 각 동일폭 그룹을 연결하기 위한 그룹의 시작과 종료 지점의 코일 두께를 결정한 후, 이를 바탕으로 전체 코일들의 배치를 결정함으로써 Roll의 두께 모양을 만드는 것

표 1. 냉연 두께 바꿈 기준(일부)

구 분	Down	Up
$t \leq 0.61$	0.11	0.11
$t \leq 0.72$	0.11	0.16

이 기본 아이디어이다. <그림 3>이 그 결과를 나타내는데, 화살표는 동일폭 그룹 내에서의 두께의 오르내림을 나타낸다.

1) 동일폭 그룹 만들기

대상재 Pool에 있는 모든 코일을 폭으로 정렬한 후 폭 역전 기준 만큼씩 분할하여 동일폭 그룹을 만든다.

2) 동일폭 그룹에 두께 모양 잡기

각 동일폭 그룹이 가지는 두께의 모양을 가능한 한 <그림 3>과 같이 6가지로 단순화함으로써 전체 Roll에서의 두께의 변화를 작게 하도록 하는 것이 목표이며, 각 동일폭 그룹에서 두께 모양을 만드는 과정은 다음과 같이 Depth-First Search에 의해 구하여진 그룹의 첫 시작 코일의 두께값인 Start 값과 그룹의 마지막 코일의 두께값인 End 값을 만족하는 가장 단순한 모양을 결정하는 방법으로 이루어진다.

- step 1: i번째 그룹의 Start 두께값 결정 (1그룹의 Start 두께값은 임의로 결정)
- step 2: i번째 그룹의 Start 값을 결정할 수 없는 경우 i-1번째 그룹의 End 값 결정단계로 Backtracking
- step 3: i번째 그룹의 두께 모양을 단순화하는 최적의 End 값의 결정
- step 4: i번째 그룹의 End 값을 결정할 수 없는 경우 i번째 그룹의 Start 값을 결정하는 step 1으로 Backtracking
- step 5: 결정된 Start 값과 End 값을 연결하는 최적의 두께 모양 결정

위에서의 Backtracking은 동일폭 그룹 내에서 Start 값과 End 값을 구하는 과정에서 발생하는 Backtracking으로 선행 연구에서의 Backtracking과 같이 대상재의 선택과 Sequencing 상에서 발생하는 Backtracking과는 확연히 다르다. 각 단계별 로 값을 결정하는 방법은 다음과 같다.

• 동일폭 그룹의 Start 두께값 결정

어떤 그룹의 Start 두께값을 결정할 때는 이전 그룹의 End 두께값에 근거하여 결정하게 되며 대안이 여러 개일 경우 다음의 결정 우선순위에 따른다.

- i) 이전 그룹의 End 값과 두께 제약조건이 맞는 코일 우선
- ii) 이전 그룹의 End 값이 두께가 감소하거나 증가하는 진행방향을 지키는 코일 우선
- iii) 이전 그룹의 End 두께값과 값 차이가 작은 코일이 우선

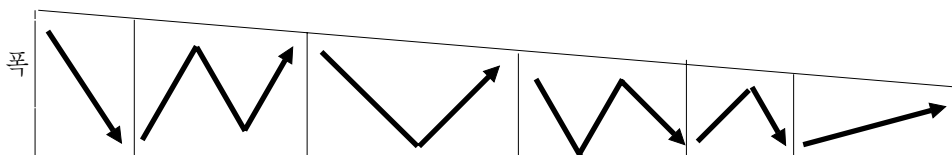


그림 3. 전체 Roll의 두께 모양.

예를 들어, <그림 4>와 같은 예에서 하향하는 값을 가지는 이전 그룹의 End값이 있고, 현재 그룹의 Start값으로 고려할 수 있는 대안이 6개가 있을 경우 우선순위는 ①→②→③→④→⑤→⑥의 순서로 결정한다.

• 그룹의 모양을 단순화하기 위한 End 값의 결정

이미 결정된 현재 그룹의 Start를 고려하고, 다음에 연결될 그룹의 두께값 분포를 고려하여 고려할 수 있는 가능한 End 값들 중 현재 그룹을 단순화 할 수 있는 End 값을 찾고, 코일을 이러한 모양으로 배치한다. <그림 5>는 어떤 그룹 내에서의 두께 모양의 예를 나타내는데 Max는 그룹 내에서 가장 두꺼운 값을, Min은 가장 얇은 두께를 나타낸다.

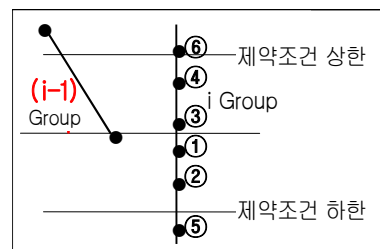


그림 4. 그룹의 Start 값 결정.

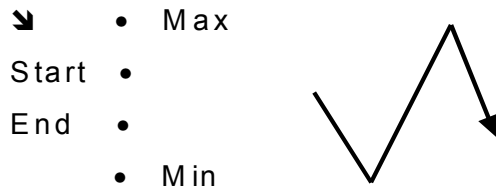


그림 5. 그룹 내에서의 두께 모양의 예.

5.2.2 제약조건 Check 및 제약조건 위반 코일 교정

앞 단계에서 Roll의 두께 모양을 만들 때는 두 코일 간에 적용되는 제약조건, 즉 열연두께, 냉연폭, 냉연두께에 대한 조건을 고려하지 않았다. 이에 따라 조업이 가능할 수 있도록 제약조건을 벗어난 코일들을 제거해야 한다. <그림 6>은 제약조건을 위반한 코일들을 제거하는 예를 든 것으로서 회색부분의 코일은 작업 진행방향에서 보았을 때 제약조건을 위반한 코일을 나타낸다. Case (a), (b) 경우 모두 코일 ① 입장에서는 코일 ②, ③, ④, ⑤, ⑥을 제거해야만 코일 ⑦과 작업을 할 수 있다. 그러나, Case (a)에서 코일 ①만 제거하면 나머지 코일들에 대한 작업이 가능할 경우, 하나의 코일 제거만으로 5개의 코일을 더 작업할

수 있고, Case (b)에서는 코일 ①, ②를 제거함으로써 4개의 코일을 더 작업할 수 있음을 나타낸다. 따라서, 제거 기준은 제거되는 코일의 개수를 최소화하도록 코일을 제거하는 것이다.

본 연구에서는 제약조건을 벗어난 코일들을 제거하는 방법으로 3가지를 사용하였다.

방법 1: 제약조건 위반 코일을 기준으로 작업 진행방향으로 제거하는 방법

예) <그림 6>의 Case (a)에서 코일 ②, ③, ④, ⑤, ⑥을 제거할 경우

방법 2: 제약조건 위반 코일을 기준으로 작업 진행 역방향으로 제거하는 방법

예) <그림 6>의 Case (a)에서 코일 ①을 제거할 경우

방법 3: 제약조건 위반 코일로부터 앞쪽과 뒤쪽 방향으로 교대로 제거하는 방법

예) <그림 6>의 Case (b)에서 코일 ①과 ②를 제거할 경우

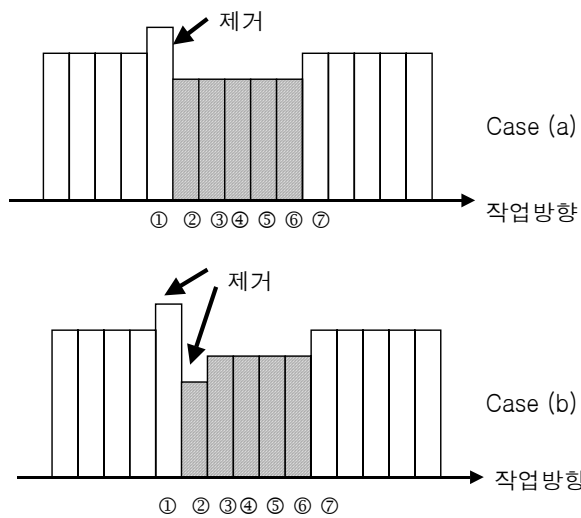


그림 6. 제약조건 위반 코일 제거 예.

위 방법들에 대하여 많은 실험을 해 본 결과, 대체로 방법 3이 제거되는 코일의 수가 가장 적은 것으로 나타났으나, 때에 따라서는 그렇지 않은 경우도 있었기 때문에 세 가지 방법 모두를 적용하여 가장 적게 제거되는 방법을 선택하였다. 이 과정을 Roll 전체에 반복적으로 적용하여 제약조건을 위반한 코일들을 없애나간다.

### 5.2.3 미편성 코일 재편성하기

제약조건을 벗어난 코일들을 미편성으로 제거한 후의 Roll의 모습은 냉연작업이 가능한 코일들로만 이루어지게 된다. 미편성으로 제거된 코일들은 원래자리에서는 제약조건을 위반하지만, 다른 위치에 편성될 가능성은 충분히 있으므로 모든 제

약조건을 만족하는 후보지 중에서 평가를 거쳐 가장 적절한 장소를 찾아 편성시키는 것이다. 이를 위한 절차는 다음과 같다.

step 1: 미편성 코일들 중에서 재편성될 코일을 하나 선택한다.

step 2: 편성 가능 장소 탐색 및 최적지 결정

step 3: 미편성 코일을 Roll 몸체에 편성시킨다.

#### 1) 미편성 코일 중 재편성할 코일의 선택

미편성된 코일들에 대해 우선 순위를 정하는 것은 스케줄링 측면에서는 매우 중요한 의미를 가진다. 왜냐하면 우선순위에 따라서 연속적으로 편성될 수 있는 코일의 개수가 틀릴 수 있고, 이는 시스템의 성능을 좌우하는 요인이 될 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 미편성 코일이 다시 편성되었을 경우 냉연폭이 가장 중요하므로 편성될 코일과 편성된 코일 등 양쪽 코일들 간에 발생하는 폭의 오차가 적은 것을 우선순위가 높은 것으로 하였다.

#### 2) 편성 가능 장소 탐색 및 최적지 결정

선택된 코일에 대해 제약조건을 고려하였을 때 편성이 가능한 장소를 자신의 Roll 몸체에서 찾는다. 최적지 결정은 편성이 가능한 장소들 가운데 비용함수 측면에서 가장 유리한 장소를 찾는 것을 말한다. 본 연구에서의 비용함수 적용은 3장에 기술된 조업 우선순위를 반영하기 위하여 제약조건들에 대한 비용함수를 동시에 고려하는 weighted sum 형식의 비용함수를 사용하지 않고 순차적으로 비교하는 비용함수를 사용하였다. 즉, 냉연폭이 가장 중요한 제약조건이기 때문에 이를 먼저 비교하여 가장 좋은 장소를 찾고 만약에 비용함수값이 같은 장소가 여러 개 있을 때에는 냉연두께를 비교하고 마지막으로 열연두께를 비교하였다.

$$\bullet \text{ 폭(두께) 비용함수} = \text{편성 후의 폭(두께) 비용함수} - \text{편성 전의 폭(두께) 비용함수}$$

여기서 편성 전의 비용함수는 새로운 코일이 삽입되기 전 상황에서의 두 코일 간의 폭(두께) 차이로 정의하였고, 편성 후의 비용함수는 삽입된 코일과 양쪽 코일 간의 폭(두께) 차이로 정의하였다.

미편성 코일의 재편성 과정은 더 이상 진전이 없을 때까지 반복 수행한다.

### 5.2.4 동일 속성 코일 그룹화

작업 생산성을 높이기 위한 방법으로 작업 방법이 동일한 속성을 지닌 코일들을 가능한 한 같이 모아주는 것을 의미한다. 여기에서 속성이란 제품, 내경, Edge, 도유들이 갖는 값을 말한다. 어떤 코일을 동일한 속성을 지닌 코일끼리 인접하도록 하기 위해 이동을 고려한다면 이동 전과 후의 속성 변화에 따라 배치상태를 다음 <그림 7>과 같이 4가지 경우 중 하나로 생각할 수 있다.

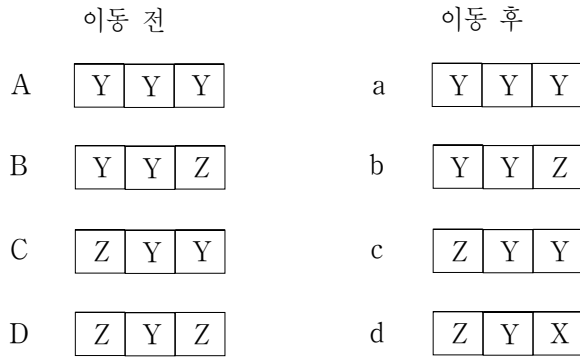


그림 7. 코일 이동 전·후의 속성 배치 상태.

A, B, C, D는 이동 전의 상황을 의미하고, a, b, c, d는 이동 후의 상황을 의미하며, A, a는 같은 속성끼리 인접한 경우를, B, b와 C, c는 앞과 뒤의 어느 한 쪽에 같은 속성이 있는 경우를 의미한다. 즉, 이동 전 상황이 C에서 이동 후 a로 바뀌었다면 이동 대상이 되는 코일의 한쪽에만 같은 속성이 있던 상황에서 양쪽 모두 같은 속성이 놓이게 되는 상황으로 변화하게 됨을 말한다. 이 경우는 속성 측면에서 바람직한 방향의 이동으로서 같은 제품 그룹핑에서 내경이 이와 같은 이동을 하게 되는 것은 무방하다. 그러나 반대의 경우로서 A에서 c로 상태가 변화하게 되는 경우는 바람직하지 못하다. 이동 전·후의 상태를 정량적으로 표현하는 평가 기준을 만들었는데, 상태의 표현은 이동 대상과 이동 대상의 이전 코일 및 이동 대상과 이동 대상 이후의 코일로 쌍대(pairwise) 비교하는 이진함수의 부분상태함수로 표현하였다.

$$Cost(attribute, i) = PairCost(attribute, i-1, i) + PairCost(attribute, i, i+1)$$

$$PairCos(attribute, i, i+1) = \begin{cases} 0, & \text{if } Coil_{i, attribute} \neq Coil_{i+1, attribute} \\ 1, & \text{if } Coil_{i, attribute} = Coil_{i+1, attribute} \end{cases}$$

코일의 이동을 고려할 때 속성 상태의 변화는 앞의 상태함수 값의 어느 하나에서 또 다른 하나로 전이하는 것을 의미하며, 속성별 이동에 따른 비용은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 이동에 따른 비용 = 이동 전  $Cost(attribute, i)$  - 이동 후  $Cost(attribute, i)$

코일의 이동에 따른 비용은 <표 2>와 같다. 코일 이동시 동

표 2. 코일의 이동에 따른 비용

이동 전 \ 이동 후	a	b	c	d
A	OK / 0	OK / 0	OK / 0	No / 2
B	Good / -1	OK / 0	OK / 0	No / 2
C	Good / -1	OK / 0	OK / 0	No / 2
D	Best / -2	Good / -1	Good / -1	OK / 0

일 제품, 내경, Edge, 도유 등 4가지 속성을 동시에 고려해야 하고, 속성들 간에도 우선순위가 존재하므로 이를 종합적으로 고려하여야 한다. 따라서, 종합적인 이동 전 또는 이동 후 비용을 다음과 같이 정의하였다.

- 종합적인 이동 전 또는 이동 후 비용  

$$= 1000 * Cost(\text{제품}, i) + 100 * Cost(\text{내경}, i) + 10 * Cost(\text{Edge}, i) + Cost(\text{도유}, i)$$

위 비용함수에서 각 계수는 임의로 부여한 것으로서 값 설정의 근거는 속성의 그룹화에 대한 우선순위가 제품, 내경, Edge, 도유 순으로 엄격히 구분되어 있다는 상황을 반영한 것이다. 즉, 상위 우선순위가 흐트러지는 것에 대하여 큰 비용을 부과함으로써 하위의 우선순위를 갖는 속성 그룹화를 위해 상위 우선순위의 속성 그룹을 깨뜨리지 못하도록 하는 데 그 목적이 있다.

### 5.2.5 두께 편차 최소화

이전 단계까지의 과정을 마치면 모든 제약조건을 만족하는 Roll이 형성된 상태에서 동일 제품, 내경, Edge, 도유까지 묶여진 상태가 된다. 비록 모든 제약조건을 만족한다고 하더라도 전·후 코일 간 두께 측면에서 편차를 줄일 수 있는 여지는 여전히 남아있다. 이 단계는 Roll에 편성되어 있는 코일들의 두께 편차를 줄여 생산성을 제고하기 위한 기능으로 이미 앞 단계에서 고려되었던 폭과 두께, 소둔온도, 그룹핑된 속성들의 묶음을 준수하면서 코일 간의 두께 편차를 최소화하는 것이 목표이다.

두께 편차는 <그림 8>에서와 같이 두 가지 유형(돌출값, 큰 편차)으로 나눌 수 있으며 두께 편차를 최소화하기 위한 알고리즘은 위의 두 가지 유형에 해당하는 문제를 각각 해결하는 부분으로 구성된다.

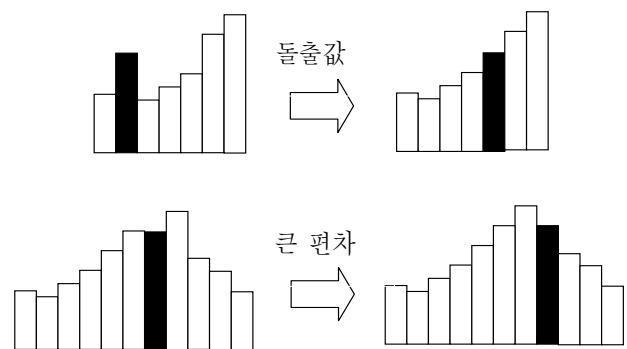


그림 8. 두께 편차의 유형.

#### 1) 돌출값 조정

돌출값의 조정은 다음 순서를 반복적으로 더 이상 개선의 여지가 없을 때까지 시행함으로써 이루어진다.

step 1: 조정 대상이 되는 돌출값 코일의 검색

- step 2: 이동 대상 돌출값 코일의 선정
- step 3: 이동할 수 있는 위치에서의 이익/손실의 계산
- step 4: 이익이 최대화되는 장소로 이동

• 돌출값 코일의 검색

어떤 코일의 두께값을  $T_i$ 라 하고, 이전 코일과 이후 코일의 두께를 각각  $T_{i-1}$ ,  $T_{i+1}$ 이라 할 때 다음을 만족하는 경우는 돌출값 코일이다.

$$(T_{i+1} - T_i)(T_{i-1} - T_i) > 0$$

즉, <그림 9>와 같이 코일들이 배치되어 있는 경우를 ‘돌출값 코일’이라고 정의하였으며, 코일들의 두께값이 순차적으로 증가하거나 감소하는 경우는 돌출값으로 정의되지 않으므로 검색 대상에서 제외된다.

• 이동대상 돌출값 코일의 선정

돌출값 코일들 중 이동하였을때 전·후 코일 간의 편차가 이동 전보다 개선될 수 있는 양이 가장 큰 코일을 우선대상으로 선정한다. 이때 개선되는 양을 SendProfit이라고 하자. 그러면, SendProfit은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{SendProfit} = \max(|T_{i+1} - T_i|, |T_{i-1} - T_i|) - |T_{i+1} - T_{i-1}|$$

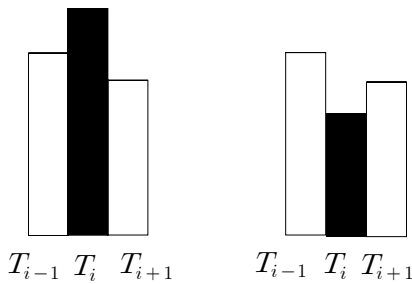


그림 9. 돌출값 코일의 정의.

• 이동장소의 선정

앞에서 이동 대상으로 선정된 돌출값 코일은 같은 그룹 내에 포함된 임의의 두 개의 코일 사이에 위치하게 된다. 이 때 두 개의 인접한 코일들의 두께가 새로 삽입될 코일의 두께와 어울리는 정도에 따라 두께 측면에서의 이익을 생각할 수 있으며 이를 Receive Profit이라고 정의한다. 그러면, Receive Profit은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{ReceiveProfit} = |T_{i+1} - T_{i-1}| - \max(|T_{i+1} - T_i|, |T_{i-1} - T_i|)$$

2) 큰 편차값의 조정

<그림 9>에 나타난 바와 같이 두 코일 간에 두께 제약조건에는 합치되지만 두께 낙차 또는 상승폭이 큰 경우 중간 두께의 다른 코일을 끼워넣음으로써 두께 낙차나 상승폭을 줄이는 과정이다. 조정 대상이 되는 큰 편차값 코일의 검색과정만 돌출값 코일의 조정과 다를 뿐 문제해결 과정은 유사하다.

5.3 결과 예시

<표 3>은 최종적으로 산출되는 결과를 예시한 것이다. 작업 진행은 코일 번호 순서대로 작업지시가 내려진다. 각 제약 조건 측면에서 바라보았을 때, 폭은 대체로 광폭에서 협폭으로 내림차순으로 배치되어 있다. 단, 7번과 12번 코일이 폭 역전 기준 범위 내에서 폭 역전이 발생되었다. 7번 코일은 동일 두께 811을 모아주기 위한 것이고, 12번 코일은 11번과 13번 코일 사이에서 두께 편차를 줄이기 위해 703→753→765로 연결시켜 주는 역할과 소둔온도를 840→810→800으로 이어주는 역할을 하고 있다. 만일 12번 코일이 없으면 소둔온도 편차조건이 30도이므로 11번 코일 작업 후에는 13번 이하의 모든 코일에 대한 작업을 수행할 수 없다. 두께를 보면 작업 진행 방향으로 두 코일 간의 두께 편차를 줄이기 위해 폭 기준 허용범위 내에서 같은 두께의 코일을 모아주었다. 소둔온도 역시 전·후 코일 편

표 3. Roll 편성 결과 예시

코일 번호	폭(mm)	두께(10 <sup>-3</sup> mm)	온도(°C)	제품	내경(인치)	Edge	도유
1	1630	811	820	CR	20	Slit	AH
2	1628	811	820	CR	20	Slit	AH
3	1622	860	830	CR	24	Slit	AH
4	1621	804	850	CR	20	Slit	AH
5	1621	804	850	CR	20	Slit	AH
6	1613	804	850	CR	20	Slit	AH
7	1615	811	820	CR	20	Slit	AH
8	1613	811	820	CR	20	Slit	AH
9	1613	811	820	CR	20	Slit	AH
10	1612	703	840	CR	20	Slit	AH
11	1612	703	840	CR	20	Slit	AH
12	1613	753	810	CR	20	Slit	AH
13	1612	765	800	CR	24	Mill	AG
14	1611	765	800	CR	24	Mill	AG
15	1600	692	800	CR	24	Mill	AG



차 30도 내에서 배치가 되었음을 알 수 있다.

동일 속성 코일 그룹화 측면을 살펴보면 예시된 15개 코일이 내경은 20→24→20→24로 3번의 내경 바뀜이 발생되어 내경 그룹당 15/4=3.75개의 코일을 갖고 있고, Edge와 도유는 각각 Slit에서 Mill로, AH에서 AG로 1번씩만 변경되어 Edge와 도유 그룹당 15/2=7.5개의 코일을 갖고 있다. 만일 13번이나 14번 코일 두 개중 하나 또는 두 코일 모두를 7번, 8번 코일 사이 또는 8번, 9번 코일 사이에 배치한다고 하더라도 제약 조건상 작업은 가능하다. 그러나 이 경우 폭과 두께 측면에서 배치가 악화되는 것뿐만 아니라 내경, Edge, 도유의 묶임이 각 그룹당 2.5개, 3.75개, 3.75개로 잘게 쪼개어져 그룹의 속성이 바뀔 때마다 생산 준비시간이 소요된다는 것을 감안하면 이러한 이동은 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다.

### 6. 시스템 성능

본 시스템의 성능 테스트는 과거 관제원이 수작업으로 Roll을 편성하였던 실적 데이터를 가지고 개발된 시스템이 얼마나 일정계획을 잘 세워주는지에 대하여 알아보았다. 관제원의 수작업 편성은 본 시스템이 개발되기 전 과거 시스템에서 제시하는 결과를 바탕으로 Roll 한 개당 약 30분 정도 직접 사람이 개입하여 편성하는 것을 말한다.

CAL에서 실제 작업지시를 내린 20개의 Roll 작업단위를 원시 데이터로 하여 본 시스템에 의한 결과와 관제원이 수작업으로 한 결과를 직접 비교하였다. 첫째, 대상 Pool에 있는 재료 가운데 관제팀에서 정의한 제약조건을 준수하는 범위 내에서 Roll로 편성되는 비율은 평균 96% 정도의 높은 편성비율을 나타내었다. 실제 관제원의 경우 생산상황에 따라 부분적으로 정의된 제약조건을 약간씩 위반하며 편성하기 때문에 100% 편성으로 작업지시를 내리는 상황을 고려하면 대단히 높은 편성비율인 것으로 평가받았다.

둘째, 앞 절에서의 '5.3 결과 예시'에 제시된 방법으로 동일 속성을 갖는 코일끼리의 그룹핑을 관제원의 수작업 결과와 비교한 결과, 제품 그룹핑은 3.2배, 제품 그룹 내에서의 내경 그룹핑은 1.7배, 제품, 내경 그룹 내에서의 Edge 그룹핑은 1.8배가량 우세한 것으로 나타나 생산 준비시간의 감소로 생산성 향상에 크게 기여할 수 있는 것으로 평가받았다. 셋째, 코일 간 두께 편차 최소화 측면에서는 관제원의 평가 결과 본 시스템이 탁월하게 우위의 성능을 발휘하는 것으로 나타났으며, 시스템의 수행 속도 측면에서도 100~150개 정도의 코일을 처리하는 데 5초 이내의 속도를 보여 더 이상의 속도 개선을 필요로 하지 않는

것으로 평가받았다.

### 7. 끝맺음 말

본 논문에서는 제약조건이 부가된 일정계획 문제에 대하여 철소 냉연공장 사례를 소개하였다. 현장의 일정계획 문제는 공정 제약조건 존재 유무와 제약조건 종류 및 특성에 따라 비슷한 성격의 생산공정이라 하더라도 문제해결을 위한 알고리즘은 확연히 다르다. 그리고, 실제 문제는 복잡한 제약조건으로 인하여 수리적인 모델링은 사실상 매우 힘들며, 대개의 경우 휴리스틱 방법에 의존한다.

이 휴리스틱 방법 또한 개발자의 모델링에 따라 성능이 다르기 때문에 좋은 알고리즘을 개발하는 것은 힘든 과정 중의 하나이다. 본 연구 결과가 현장에서 크게 신뢰를 받을 수 있었던 것은 선행 연구에서의 접근방법과는 정반대의 전략을 택하여 사람의 직관 및 행태와 유사한 방법으로 알고리즘을 구성함으로써 선행 연구에서 안고 있었던 문제점 대부분을 해결하였기 때문인 것으로 사료된다. 본 논문의 의의는 생산설비에 대한 하드웨어 측면에서의 설비투자 없이 단지 소프트웨어적인 방법만으로 제조업체의 운영 경쟁력과 제품의 품질 향상에 일조했다는 데 있다. 문제해결을 위한 알고리즘 전개상의 아이디어가 타 일정계획 분야에 응용되어 기업의 경쟁력을 높일 수 있는 단초가 될 수 있으면 하는 바람이다.

### 참고문헌

전치혁, 이승만, 박철순, 강상엽, 장수영, 최인준, 강전태, 냉연 공정에서의 작업단위 편성, *산업공학지*, 6(2), pp.117-130, 1993  
 포항산업과학연구원, 열연 Roll 단위 재편성을 위한 전문가 시스템 개발, 1992  
 POSCO, 냉연 Scheduling 전문가 시스템 : PCM Line, 1994  
 Fox, M.S., and Smith, F.S., ISIS-A Knowledge-Based System for Factory Scheduling, *Expert Systems*, Vol.1, No.1, pp.25-49, 1984  
 Pinedo, M., Scheduling : Theory, Algorithms, and Systems, *Prentice Hall*, 1995  
 Dechter, R., and Pearl, J., Network-Based Heuristics for Constraint-Satisfaction Problems, *Artificial Intelligence*, Vol. 34, pp.1-38, 1988  
 Lee, H.S., Murthy, S.S., Haider, S.W., and Morse, D.V., Primary Production Scheduling at Steelmaking Industries, *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 40, No. 2, pp.231-252, 1996  
 Lopez, L., Carter, M.W., and Gendreau, M., The Hot Strip Mill Production Scheduling Problem: A Tabu Search Approach, *European Journal of Operational Research*, Vol. 106, pp.317-335, 1998  
 김여근, 윤복식, 이상복, *메타 휴리스틱*, 영지문화사, 1997

**김창현**

한양대학교 산업공학과 학사  
 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 포항공과대학교 산업공학과 박사  
 현재: 여수대학교 교통·물류시스템공학부  
 교수  
 관심분야: 물류 및 생산정보시스템,  
 e-Business, 인공지능 응용

**박상혁**

포항공과대학교 산업공학과 학사  
 포항공과대학교 산업공학과 석사  
 포항공과대학교 산업공학과 박사과정  
 현재: 포항산업과학연구원 생산관리 연구팀  
 관심분야: Production Planning & Scheduling,  
 Bin-packing Problem, Constraint Satisfaction  
 Search