

# 일관제철소 생산계획 및 일정계획 모형에 관한 조사연구

성덕현  
부경대학교 경영학부

## A Survey of the Modeling of the Production Planning and Scheduling in an Integrated Steel Mill

Deokhyun Seong

Division of Business Administration, Pukyong National University

**요약** 일관제철소의 모든 공정은 서로 연결됨으로써 단일공정에서의 효율성을 향상시킬 수 있는 최적화도 중요하지만 무엇보다도 전체 공정의 연결 관점에서의 최적화가 중요하다. 일관제철소에서의 경영과학 모형 적용에 관한 조사연구는 대부분 특정 공정만을 대상으로 문제해결을 위한 모형에 집중하고 있거나 혹은 일관제철소에서 발생하는 문제에 대해 어떤 기법이 적용되고 있는지에 대한 조사에 집중되고 있다. 그러나 이보다는 일관제철소에서 해결되어야만 하는 문제를 우선 정의하고, 이를 모형화 할 수 있는 목적과 제약조건 등에 대해 파악하며, 현실적으로 적용 가능한 해를 구할 수 있는 방법론이 무엇인지에 대한 연구가 어떻게 이루어져 왔는지에 대해 조사가 필요하다. 이 연구에서는 일관제철소 공정을 대상으로 생산운영관리 관점에서의 효율성 향상을 위해 필요한 연구가 무엇인지를 기술한 후, 이를 해결하기 위해 어떤 연구들이 진행되어 왔는지에 대해 조사하였다. 이를 위해 6가지 영역으로 분류하여 기존 연구에 대해 조사하였으며, 전체최적화 관점에서 향후의 연구방안에 대해 제시하였다. 이를 바탕으로 일관제철소에서의 공정 효율성 제고를 위한 연구주제가 도출될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** Global optimization that considers the processes at integrated steel mills is more important than the local optimization to improve the efficiency of a single process. Research utilizing mathematical models at integrated steel mills predominantly focus on solving problems solely for a specific process or focusing on what techniques are applied to. However, it is important to define the problems that must be solved at the steelworks, identify the objectives and constraints that can be modeled, and selection of methodologies that can be applied to the problems. The purpose of this study is to investigate the problems in improving efficiency at integrated steel mills from the viewpoint of production & operations management. We review the research have been conducted in order to solve those problems. We classified the research into 6 categories and suggested future research direction based on the global optimization. It is expected that research themes for improving the efficiency at integrated steel mills will be derived.

**Keywords** : Efficiency, Integrated Steel Mill, Mathematical Model, Production Planning and Scheduling, Survey

### 1. 서론

철강을 생산하는 과정은 다음의 Fig. 1에서와 같이 분말 혹은 덩어리 형태의 원료인 철광석과 유연탄 등을 고

로에 넣어 액체 상태의 용선(Hot metal)을 만들고, 용선에서 불순물을 제거하여 용강(Liquid steel)으로 변환하는 제강공정을 거쳐 이를 몰드(Mould)를 통해 흘러내려 고형화 함으로써 고체상태의 슬라브를 생산하는 연주공

이 논문은 2014학년도 부경대학교 연구년[II] 교수 지원사업에 의하여 연구되었음 (CD-2014-0707)

\*Corresponding Author : Deokhyun Seong(Pukyong National University)

Tel: +82-51-629-5739 email: dhsung@pknu.ac.kr

Received August 25, 2017

Revised October 10, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

정, 그리고 롤러를 이용하여 슬라브를 보다 얇은 판(Hot strips)이나 후판(Plates)으로 압연하는 압연공정으로 구성된다. 이상의 모든 공정을 갖춘 제철소를 일관제철소라 한다.[1]

철강 생산공정의 특징으로서는 원료의 투입으로부터 압연공정에 이르기까지 모든 단계가 연결되어 있으면서도 각 공정에서의 산출물의 형태와 취급할 수 있는 단위인 로트크기가 달라진다는 점이다. 예를 들면 고로에서 생산된 용선과 제강공정의 용강은 액체이며, 제강공정의 전로와 연주기에서의 용강의 로트크기는 보통 300톤이다. 연주가 끝나 생산된 슬라브는 약 25톤의 두꺼운 판 형태를 띠며 최종적으로 압연을 마친 제품은 얇고 긴 코일이나 두터운 후판의 형태를 띠게 된다.

한편, 생산운영관리(POM: Production & operations management) 관점에서 일관제철소 공정의 특징은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 일관제철소의 생산방식은 주문에 의한 생산방식이며, 주문은 다양한 강종(Steel grade)과 규격의 제품에 대해 이루어진다.
- 철강제품의 품질은 흔히 강종으로 분류하며, 품질을 결정짓는 가장 중요한 제강공정에서의 작업물은 액체상태로서 로트크기는 보통 300톤 단위이다. 따라서 동일한 로트는 동일하거나 유사한 강종의 주문으로 구성해야 하며, 주문을 생산공정에 투입하기 위해서는 동일한 강종 혹은 유사한 강종을 갖는 300톤 단위로 그룹핑을 해야 한다. 만약 그룹핑 결과 최소단위인 300톤에 미달할 경우에도 최소단위인 300톤 규모로 작업이 이루어져야 하므로 주문이 없음에도 생산을 해야만 하는 재고가 발생될 수밖에 없게 되

며, 이를 최소화할 필요도 제기된다.

- 철강업은 프로세스 공정으로서 일단 원료가 투입되고 난 이후에는 공정들이 서로 연결되어 있어, 작업 대상물이 중간에 막힘이 없이 유연하게 흐를 수 있도록 하는 것이 중요하다. 예를 들어, 고로(高爐 Blast furnace)에서 생산된 용선은 온도하락을 최소화하여 전로(轉爐 Converter)로 운송되어 작업이 이루어져야 하며, 연속적으로 온도의 하락을 최소화한 상태로 2차정련과 연주 작업이 연속적으로 이루어져야 한다. 또한, 연주에서 생산된 슬라브는 에너지를 최소화하기 위해서는 1,100도 이상의 고온을 유지한 상태로 압연이 이루어지는 것이 에너지 소비를 최소화할 수 있는 방법이다.
- 철강생산공정은 에너지를 매우 많이 소비하면서도 유연탄을 사용하는 공정의 특성 상 부산물로서 에너지를 만들 수 있는 가스가 발생된다. 따라서 비용최소화 관점에서는 에너지 사용비용뿐만 아니라 에너지 생산에 의한 이익도 고려해야 한다.

이상에서와 같이 일관제철소의 모든 공정은 서로 연결됨으로써, 단일공정에서의 효율성을 향상시킬 수 있는 최적화도 중요하지만 무엇보다도 전체 공정의 연결 관점에서의 최적화가 중요하다. 예를 들면, 사용하는 석탄의 품질은 제련에서의 용선품질에 영향을 미치게 되고, 또한 발생하는 에너지원인 부생가스의 발생량과도 직접 관련이 있어 비용에 영향을 미치게 된다. 따라서 최근 이루어진 연구를 대상으로 전체최적화 관점에서는 어떤 연구가 진행되어 왔는지, 그리고 앞으로 어떤 연구가 더 필요한지에 대한 조사와 함께 총비용 최소화를 위한 방향 제시가 필요할 것으로 판단된다.

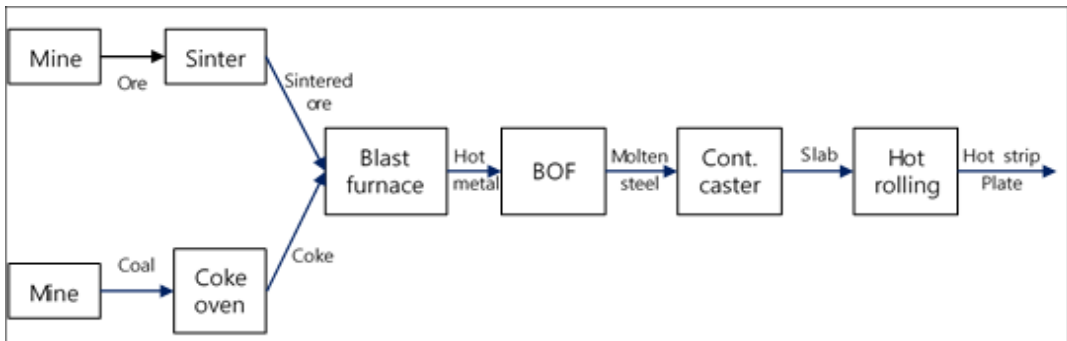


Fig. 1. Production process of an integrated steel mill

이 연구에서는 우선 일관제철소에서 단일 공정 혹은 연결된 공정을 대상으로 효율성 향상을 위해 어떤 유형의 문제가 해결되어야 하는가를 파악하고자 하며, 그 문제를 풀기 위한 POM 관점에서의 시도와 모형에 대해 조사하고, 모형에서 반영이 되지 않은 조건과 앞으로의 연구방향에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 기존 연구

일관제철소의 일부 공정 혹은 연결된 공정들을 대상으로 효율성 향상을 위한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이들에 대한 조사연구는 다음과 같이 여러 관점에서 이루어졌다.

McCulloch and Bandyopadhyay[2]는 철강업에서 OR이 어떻게 응용되고 있는지에 대해 시기적으로 3단계로 구분하여 조사연구를 한 바 있다. 1단계는 2차대전 직후 시기(50년대 초)로서 철강생산의 개별 공정을 대상으로 집중되었던 시기로 분류하였고, 2단계는 50년대 후반부터 60년대 초까지 여러 공정에 걸쳐 발생하는 문제에 대해 보다 정교한 기법을 적용하는 단계, 마지막 3단계는 60년대 후반으로서 철강생산의 모든 공정을 고려하여 기법을 적용하는 단계로 정의하고 있다. 즉, 60년대 후반기에 이미 철강생산의 모든 공정을 대상으로 하는 문제해결에 관한 연구가 진행되기 시작하였음을 볼 수 있다. Yamasaki et al.[3]은 AI(Artificial intelligence)기법이 Kawasaki 제철소에서 적용되고 있는 사례에 대해 조사연구를 진행하였다. 결과에 의하면 AI기법은 철강생산공정에서 주로 준비시간 제어(32%)와 생산계획 수립(45%) 등 문제의 유형에 사용되고 있음을 보여주고 있다. Basu et al.[4]은 철강업에서의 비최적화기법에 대한 70여편의 조사연구를 하였으며, 분류체계는 대기행렬이론, 시뮬레이션, 통계적 공정관리, AI 등 적용하고 있는 기법 별로 조사하였다. Dutta and Fourer[5]는 전 세계 일관제철소 혹은 대규모 제철소에서 수리계획법(Mathematical programming)을 적용하고 있는 사례에 대해 제철소별로 조사하였다. 그들은 국가차원의 계획수립, 최적 제품구성(Product mix), 원료의 배합, 일정계획/재고관리/물류, 집합포괄(Set covering), 절단평면(Cutting stock) 등 발생하는 문제의 유형에 따라 분류하여 조사하였으며, 제철소별로 대상 문제의 특징, 수리모

형과 해법에 대해 제시하고 있다. Tang et al.[6]은 연주~압연에 이르기까지의 동기화에 관한 77편 논문의 조사연구를 하였으며, 일관제철소 공정 중에서 제강~압연에 이르기까지만을 대상으로 하고, 주로 최적화 모형 및 해를 찾는 방법에 초점을 맞추고 있다. 즉, 이상의 연구들은 대부분 특정 공정만을 대상으로 문제해결을 위한 모형에 집중하고 있거나 혹은 일관제철소에서 발생하는 문제에 대해 어떤 기법이 적용되고 있는지에 대한 조사에 집중되고 있다.

따라서 일관제철소 생산계획 및 일정계획 수립을 통한 효율성 향상에 관한 연구는 기법 위주가 아니라 일관제철소에서 해결되어야만 하는 문제를 우선 정의하고, 이를 모형화할 수 있는 목적과 제약조건 등에 대해 파악하며, 현실적으로 적용 가능한 해를 구할 수 있는 방법론이 무엇인지에 대한 연구가 어떻게 이루어져 왔는지에 대해 조사할 필요가 있다. 이 연구에서는 일관제철소의 전 공정에 걸쳐 POM 관점에서의 효율성 향상을 위해 필요한 연구가 무엇인지를 기술한 후 이를 해결하기 위해 어떤 연구들이 진행되어 왔는지에 대해 조사하고자 한다. 조사를 위한 분류는 일관제철소를 시스템 관점에서 파악하여 우선 전체 최적화를 추구하는 관점으로부터 개별 공정에서의 부분최적화 관점에서 어떤 연구들이 진행되어 왔는지를 조사하고자 다음과 같은 영역으로 분류하여 조사하고자 한다.

- 일관제철소 경제성/효율성 평가에 관한 연구
- 제철 원료의 조달, 수송, 야드공간 배치에 관한 연구
- 제강-연주-열연 공정의 통합된 일정계획 수립에 관한 연구
- 제철소 적정 재고수준과 자재관리에 관한 연구
- 기타 단일 공정별 최적화에 관한 연구

## 3. 일관제철소 경제성 및 효율성 평가

### 3.1 철강공급사슬관리(Steel SCM)

일관제철소는 원료를 공급하는 후방산업인 광업, 전방산업인 자동차와 조선업 등으로 이루어진 공급사슬로 볼 수 있으며, 일관제철소를 ‘생산자’로 하는 공급사슬 관점에서의 평가에 관한 연구가 진행되어 왔다. Sandhu et al.[7]은 철강공급사슬에서 정보의 상호조화 여부에

따른 체적효과를 예측할 수 있는 시뮬레이션 분석을 실시하였다. 그러나 수요와 서비스 시간의 분포를 실제로부터 도출된 분포가 아닌 단순한 이론적인 분포를 사용함으로써 현실성이 떨어지는 단점이 있다. Zadeh et al.[8]은 국가차원의 철강재 공급사슬 네트워크를 설계할 수 있는 MIP(Mixed integer programming) 모형을 제시한 바 있다. 즉, 철강재 공급사슬을 원료공급자, 슬라브 생산자, 그리고 압연사(Rolling mills)의 단계로 분류하여 각 단계에서의 최적 생산량, 재고수준, 수송량 등을 결정하였다. 그들의 모형에서는 투자비, 원료의 배합, 각 단계에서의 안전재고수준을 고려하고 있는데, 이 모형을 국가차원이 아닌 일관제철소 차원으로 축소할 경우 기업의 수익성 극대화를 위한 모형으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 한편, Lin and Wang[9]과 Kim et al.[10]은 각각 중국 및 전 세계 철강기업들을 SFA(Stochastic frontier analysis) 방법을 이용하여 효율성 관점에서 비교하였는데, 철강기업별, 기업 형태별, 지역별 에너지 소비 관점에서의 효율성을 평가하였다. Deng et al.[11]은 철강 공급사슬에서 원료 조달 방법 중 상호조정(Coordination)을 통한 전략적 조달이 개별적인 조달보다 유리하다는 점을 보일 수 있는 다목적 수리계획 모형을 수립하고, 이를 Simulated annealing 방법으로 해결하였다. 한편, Seifbarghy et al.[12]은 이란의 Mobarakeh 제철소를 대상으로 SCOR 모형(Supply chain operations reference model)을 적용하였는데, SCOR 모형은 참조모형으로서 동종의 공급사슬에 대한 비교가 가능토록하기 위해서는 보다 많은 철강업체에 대해 모형을 적용함으로써 비교가 가능하도록 할 필요가 있다.

향후 공급사슬관리 관점에서의 전체최적화를 도모할 수 있도록 일관제철소를 생산자로 하는 공급사슬에 대한 성과측정과 함께 상호비교가 가능한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 즉, 국가단위 혹은 제철소 단위가 아닌 공급사슬단위의 성과측정 및 비교에 관한 연구가 있어야 할 것이다.

### 3.2 Product mix 도출과 판매가격 연동

제철소에서 생산하는 제품에 대해 최적의 제품구색(Product mix)에 관한 연구는 총비용 최소화 관점에서 중요하게 취급되고 있다. 이에 관한 선구적인 연구가 Fabian[13]에 의해 이루어졌고, 그 후 인도 제철소에서의 적용사례[14]가 제시되었다. Singer and Donoso[15]

는 LP모형에 의한 최적 제품구색을 도출한 후 ABC 분류에 의해 각 제품에 사용되는 자원을 찾아 이를 바탕으로 가격대별 전략적인 경계수준을 명시할 수 있는 모형을 제시하였다. 이로부터 어떤 유형의 제품이 기업의 이익에 어떤 기여를 하고 있는지에 대해 4가지 수준(퇴장, 현상유지, 안전수준, 위험수준)으로 판별이 가능하게 됨으로써 제품구색에 관한 연구를 기업의 전략적 차원에서 활용될 수 있도록 하고 있다. Soltany et al.[16]은 Coke를 구입하여 사용하는 이란의 고로를 이용한 생산활동을 하는 회사에서 원료구입비, 철강생산비, 제품수송비의 합을 최소화할 수 있는 LP모형을 수립하였다. 그들은 원료 구입량 및 수송량, 생산량, 제품 수송량 등을 결정할 수 있는 모형이지만, 부생가스나 부산물 등을 반영하지 않은 수준의 연구에 그치고 있다. 한편, Letmathe and Balakrishnan[17]은 환경규제가 일관제철소의 최적 제품구색에 어떤 영향을 미치는 지에 관해 LP와 MIP 모형을 이용한 연구결과를 제시함으로써 환경규제에 대응한 기업의 전략적 생산계획을 수립할 수 있도록 하고 있다. 이와 같이 일관제철소에서 최적 제품구색에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 민감도분석을 수행함으로써 기업의 전략적인 의사결정에 이용될 수 있도록 하고 있다. 앞으로 친환경제철소에 대한 수요가 증대됨에 따라 향후 다양한 환경규제뿐만 아니라 시장상황이나 환율의 변동 등에 대응할 수 있는 제품구색 도출에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 이들의 연구는 궁극적으로 다음에 소개되는 전과정평가(LCA: Life cycle assessment)에 의한 분석으로 이어질 것으로 기대된다.

### 3.3 전과정평가(LCA)에 의한 경제성 분석

일관제철소는 제철원료를 이용하여 최종적으로는 코일이나 후판 등의 완제품을 생산하는 과정인데, 각 공정에서의 산출물은 생산되는 제품이나 반제품뿐만 아니라 활용 가능한 가스, 폐기되어야 할 오염물, 그리고 판매나 재활용이 가능한 부산물 등이 있다. 특히, 일관제철소 가동을 위해서는 매우 많은 에너지를 사용해야 하는데, 석탄을 건류하는 과정에서 발생하는 COG(Coke oven gas)와 고로공정에서 발생하는 BFG(Blast furnace gas)등 자체생산 에너지, 중유나 전력 등 외부로부터 구매하여 사용하는 에너지 등을 들 수 있다. 따라서 최근에는 (경제성) = (생산되는 제품 비용) + (생산되는 부생 에너지와 부산물 비용) - (폐기물이나 오염물질 등 비용)에서와

같이 제품 이외의 부산물(By-product)에 의한 비용까지를 모두 포함한 전과정평가(LCA)에 의한 경제성 분석을 하는 경우가 많다. 이들 모형에서는 원료구입을 포함하여 각 공정별 투입물과 산출물의 양을 어떻게 하는 것이 경제적인지를 결정하는 과정으로서, 제약조건 중에서는 각 공정에서의 투입과 산출은 유지된다는(Flow conservation) 조건을 두고 있다.

Szekely et al.[18]과 Ray et al.[19]은 주요 원료와 산출물인 소결광, 펠릿, Coke, 용선, 고철(Scrap), 탄화규소(SiC), 조강(Crude steel) 등의 총 비용을 최소화할 수 있도록 공정별 최적의 투입과 산출량을 결정할 수 있는 LP와 NLP 모형을 개발하였다. 이들의 연구는 원료구입비, 부산물이나 부생가스 비용 등을 고려하지 않아 총비용 관점에서 부족한 점이 있다. Mackulak et al.[20]과 Lin and Moodie[21]는 조괴(Ingot) 생산공정에 사용되는 에너지 발생 및 사용과 관련되는 비용을 최소화할 수 있는 목표계획법(Goal programming)모형을 개발하였고, Larsson and Dahl[22]은 원료구입으로부터 연주공정에 이르기까지 발생/사용되는 에너지 비용을 최소화할 수 있도록 MIP모형을 개발하였다. 그러나 제철소 에너지원인 가스의 발생량은 사용하는 석탄 성분과 직접적으로 연관되어 있어 어떤 원료를 얼마나 사용하는지에 따라 달라지는데, 이를 반영하지 못하고 있다. 따라서 에너지 발생량과 석탄 배합과 연동되도록 하는 모형의 개발이 필요하다. 한편, Sinha et al.[23]은 Tata Steel에서 제철소 수익에 영향을 주는 제품, 반제품, 에너지, 산소 등을 고려하여 순이익 극대화를 할 수 있는 MILP(Mixed integer linear programming)모형을 제시하였다. 그들은 전기요금에 올라감에 따라 ‘최대산출’이 아닌 ‘최대 수익’을 목표로 모형화 함으로써 에너지 구입비용이 달라지는 상황에 따라 최대수익을 낼 수 있는 생산전략을 수립할 수 있도록 하였다.

본격적인 LCA 모형화에 관해서 Bieda[24]는 MC(Markov chain)와 시뮬레이션을 이용하여 LCA 입력자료인 공정별 생산량을 95% 신뢰구간에서 생성하였으며, Iosif et al.[25]은 소결공정에 대해서만 LCA 모형화를 함으로써 부생가스 중에서 가장 큰 에너지원인 COG를 고려하지 않아 미흡한 것으로 평가된다. Kong et al.[26]은 원료처리과정(소결, Coke)으로부터 전로공정에 이르기까지 LCA분석을 실시하였으며, Li and Shang[27]은 제철소 전체 공정을 대상으로 LCA 분석을

실시하였는데, 이들의 연구로부터 총비용을 최소화할 수 있도록 공정별 투입과 산출량을 결정할 수 있다.

일관제철소에서 생산되는 모든 제품과 부산물을 포함하여 수명주기 동안의 경제성 평가(LCA)는 모든 투입물과 산출물들을 고려하여 평가가 가능하다. 이 때 부산물로서 경제적인 가치를 가지는 부생가스는 COG와 BFG가 대표적인데, 이들 부생가스의 발생량은 원료로 사용되는 석탄의 성분과 직접적인 연관이 있다. 또한, 석탄의 성분은 원료의 구매가격과 연관되어 있고, 최종적으로는 고로에서 생산되는 용선(Molten pig iron)의 품질과도 관련이 있으므로, 향후 LCA분석 과정에서는 원료의 사용 및 산출물들에 대한 실시간 자료를 이용하여 분석할 필요성이 제기된다. 예를 들어 석탄의 배합비율이 달라짐에 따라 부생가스의 발생량이 달라지므로 이를 실시간으로 반영한 모형화가 필요하다.

### 3.4 시뮬레이션 모형을 이용한 효율성 평가

일관제철소의 각 공정별 다루는 원자재 형태는 이미 설명하였듯이 덩어리 혹은 분말→벽돌형태/구멍뚫린 덩어리 → 액체 → 슬라브 → 열연강판(Sheet/ Coil/Plate) 등으로 변화한다. 따라서 일관제철소 공정의 효율성을 평가하기 위한 시뮬레이션 모형에 관해서 모든 공정을 대상으로 한 연구는 거의 없는 실정이며, 로트(Lot) 형태가 동일한 일부 공정만을 대상으로 효율성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 연구가 진행되어 왔다.

Paul and Chaney[28]는 고로~토포도~전로에 이르기까지의 공정에 필요한 설비대수(토포도 대수와 용량, 전로 개수, 크레인 개수)를 결정할 수 있는 시뮬레이션 모형을 제시하였으나 용선예비처리, 2차정련, 전로에서의 고철투입 등 주요공정을 생략한 매우 단순화된 모형만을 대상으로 하고 있다. Fioroni et al.[29]은 제강공정과 원료야드 각각을 대상으로 시뮬레이션을 이용하여 효율성을 평가할 수 있는 모형을 제시하였다. 한편, Azadeh and Maghsoudi[30]는 고로공정 이후로부터 제강공정에 이르기까지 슬래그발생, 용강온도, 고장 및 수리 등 다양한 조건의 변화에 따라 생산계획의 효율성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모형을 제시하고, 실험계획법과 회귀분석을 통해 최적화 조건을 찾을 수 있도록 하였으며 타부탐색(Tabu search)으로 최적해를 구하였다. 그러나 생산계획이 실행되기 위해서는 원료의 구입 및 사용과 관련된 변수가 반영되어야 함에도 불구하고 이를 반영하지

않은 단점이 있다. Seong and Suh[31]는 원료의 선적항~선박수송~제철소 하역~컨베이어수송~야드적차~불출에 이르기까지의 과정을 시뮬레이션 모형으로 제시하여 생산일정의 효율성을 평가할 수 있도록 하고 있다.

항후 원료의 투입으로부터 생산, 출하에 이르기까지 제철소 전 과정에 대해 효율성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모형의 개발이 필요할 것이다. 특히, 각 공정에 따라 취급하는 로트형태가 다르고 로트의 크기 또한 달라지는 일관제철소에서의 전체 효율성 평가를 위한 시뮬레이션 모형은 전체 적화 관점에서의 효율성 평가에 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 원료의 조달, 수송, 야드공간 배치

### 4.1 제철원료 수송계획과 야드공간 배치

제철원료(석탄, 철광석)는 대부분 벌크선박 수송에 의존하고 있으며, 철광석과 석탄 구매를 위해 지불하는 가격(CIF: Cost, insurance, and freight)은 그 종류와 생산되는 국가에 따라 달라진다. 일반적으로 품질이 좋은 원료일수록 가격이 비싼데, 이 때의 가격이란 FOB(Free on board) 가격을 의미한다. 그러나 최종수요자인 제철소에서 실제 지불해야 하는 원료의 가격은 FOB가 아닌 CIF이므로, 단위당 수송비와 보험료가 증가할 경우 품질이 낮은 원료가 좋은 원료에 비해 CIF가격이 더 비싸지는 가격 역전현상이 발생할 수도 있다. 구매계약이 체결된 원료는 생산지인 선적항에서 선적되어 해상수송을 거쳐 하역항(제철소)에서 하역된 후 제철소 저장고(貯藏庫)인 야드(Yard)에 재고로 저장되며, 생산공정에서는 다양한 종류의 원료를 배합하여 사용하게 된다.

제철원료는 종류별로 그 산지에 따라 종류와 구성성분, 그리고 가격(FOB)이 달라진다. 예를 들면 철광석은 자철광, 갈철광 등 종류와 형태에 따라 괴광, 분광, 펠릿 등으로 분류하는데, 철광석 산지별로 고유한 브랜드(Brand) 명을 사용하고 있다. 마찬가지로 석탄 탄종은 점도를 기준으로 강점탄, 준강점탄, 미점탄으로 분류하며, 강점탄은 다시 유동도에 따라 고유동, 중유동, 저유동 강점탄으로 분류하는데, 채굴지역에 따라 석탄을 용이하게 판별하기 위해 고유의 브랜드(Brand) 명을 사용하고 있다. 따라서 제철원료는 산지에 따라 브랜드가 다르고 이에 따라 구성성분, 가격, 그리고 수송비가 달라진

다. 반면에 제철소에서 사용하는 기준은 원료의 종류별 사용량이 정해져 있으며, 이를 충족할 수 있도록 조달하기 위해 다양한 브랜드를 구입하여 사용하게 된다.

우선, 제철소에서 어떤 브랜드의 원료를 구매하는 것이 경제적인지에 대한 연구가 이루어졌는데, Seong and Byeon[32]와 Seong and Suh[33]는 DEA모형을 이용하여 철광석과 석탄에 대해 브랜드별 경제성(효율성)을 평가하였다. DEA(Data envelopment analysis) 모형에서의 투입요소(Input)는 가격(CIF)으로 하고 산출요소(Output)는 원료의 구성성분으로 하여 브랜드별로 상대적인 효율성을 평가함으로써, 가격 대비 경제적인 원료 브랜드를 선정할 수 있는 모형을 제시하였다.

다음으로 제철원료의 구매는 브랜드별로 연간 단위로 계약한 후 필요 시 벌크선박으로 수송하여 제철소에서 사용하게 된다. 원료의 구입비용(FOB)은 분기 혹은 반기별로 일정 기간 동안 고정되며, 수송비는 매번 달라진다. 따라서 제철원료는 연간 단위로 계약된 물량을 필요한 시기별로 얼마만큼씩 수송할 것인가를 결정하는 과정이 중요하다.

Gao and Tang[3435]등은 제철원료에 대해 필요한 시기와 량이 브랜드별로 고정되어 있다는 전제 하에 원료의 구입비(CIF)와 재고유지비를 최소화할 수 있도록 구매량과 수송일정을 결정할 수 있는 LP 모형을 제시하였으며, Samolejovet al.[36]등은 원료의 구매량과 수송일정을 결정할 수 있는 DSS모형을 제시하였다. 그러나 이들의 연구에서는 원료별 월간 수송량만을 결정함으로써 계획(Planning)수준에서의 결과를 제시하고 있어, 제철소 생산일정에 따라 실시간으로 달라지는 브랜드별 재고수준을 반영하기 위한 일정계획(Scheduling) 수준에서의 연구가 필요하다. 한편, Luo et al.[37]은 원료의 구매비용(CIF)과 소결광 생산비용을 최소화할 수 있도록 시기별 브랜드별 수송량을 결정할 수 있는 MIP모형을 제시하였다. 그들은 원료의 수송일정이 미리 고정된 것으로 가정하였는데, 실제 선박에 의한 수송은 변동성이 매우 크다는 점을 반영하지 않아 제철소 원료 재고수준의 급격한 변동성을 초래할 수 있다.

Seong and Suh[31]는 개방형 야드(Open yard)가 아닌 밀폐형 원료야드(Enclosed yard)를 운영하는 제철소에서 원료의 브랜드별 수송일정을 결정할 수 있는 MILP 모형을 개발하였다. 그들은 원료의 연간 총 구매비용(CIF)은 장기계약에 의해 고정적이라는 점과 밀폐형 원

료야드에서는 원료의 총 재고수준을 일정수준 이하로 관리해야 한다는 점에 근거하여 제철소 원료야드의 총 재고수준이 일정 수준을 넘지 않도록 목적함수를 설정하였으며, 원료의 재고수준은 원료의 사용량에 따라 달라진다는 점을 반영하기 위해 원료의 사용량을 결정할 수 있는 원료배합모형과 결합한 통합모형을 제시하였다. 특히 수송선박의 홀드크기와 하역에 필요한 시간의 보장 등을 반영함으로써 모형의 활용도를 높일 수 있다.

이상의 연구들은 연간 계약된 제철원료를 언제 얼마만큼 수송하여 사용할 것인지에 대한 의사결정을 다룬 연구로서, 고려해야 할 비용으로서는 원료의 구입비(CIF), 재고유지비용, 재고고갈비용 등을 들 수 있다. 이 중에서 연간 총 구입비용(FOB)은 수송일정과 무관하게 고정된 값으로 볼 수 있다. 따라서 장기적으로 계약이 이루어지는 제철원료에 대해 어떤 브랜드의 원료를 구매하는 것이 장기적으로 경제적인지에 대한 연구가 필요한 실정이다.

또한, 일관제철소의 특징 중 원료의 고갈은 심각하게 큰 비용을 초래하는데, 이를 방지하기 위해 원료 종류별 적절한 안전재고수준을 확보하는 것이 필요하다. 한편, 어떤 종류의 원료를 언제 얼마만큼 수송할 것인지에 대한 의사결정은 해당 원료의 재고수준과 직접 관련되어 있고, 이는 다시 해당 원료의 사용량에 따라 달라질 것으로 예상된다. 따라서 제철원료의 종류별 수송일정은 제철소에서의 원료 사용일정과 직접적으로 연관되므로 이를 반영한 모형의 개발이 필요하다. 또한, 일반적으로 품질이 좋은 원료는 가격이 비싼 반면에 그것을 사용할 경우 생산과정에서의 부하가 적어져 생산비용이 감소하면서도 생산되는 제품의 품질이 좋을 것이므로, 생산비용과 제품의 품질비용까지를 고려한 경제성을 기준으로 원료의 종류별 수송량을 결정하는 것이 필요할 것이다. Gerardi et al.[38]은 원료구입비와 부산물, 그리고 생산비용을 모두 고려한 총비용을 최소화할 수 있도록 원료의 종류별 구매량과 공정별 생산량을 결정할 수 있는 비선형 정수계획법 모형을 개발하였다. 다만, 이들은 원료 구입~Coke 생산~고로~전로 공정만을 대상으로 하여 완제품의 품질비용은 반영되지 않았으며, 선박에 의해 수송되는 원료의 도착일정에 따른 가용성 여부, 원료별 안전재고수준과 제철소에서의 적치능력, 그리고 실시간으로 적용되어야 하는 원료의 배합량 결정 등에 관해서 반영하지 않고 있다

제철소에 도착한 원료에 대해 Lu et al.[39]은 중앙집중형 원료야드로부터 각 제철소 공장에 경제적으로 원료를 배분할 수 있도록 최소의 수송비용을 추구하는 수송계획법 모형을 제시하였다. 이 연구는 수송량을 결정하는 연구로서 일정계획(Scheduling) 수준이 아닌 계획(Planning) 수준의 연구로 판단되며, 따라서 각 제철소 공장마다 사용하는 원료의 양은 실시간으로 달라지는데 이를 반영하지 못하는 단점이 있다. 한편, Kim et al.[40]과 Li and Tang[41]은 개방형 원료야드에서 원료 종류별 적치공간을 할당할 수 있는 MIP모형을 개발하였다. 그들은 수송비용을 포함하여 야드에서 원료 종류별 인접가능성을 비용으로 환산하여 총비용 최소화를 달성할 수 있도록 하였는데, 원료 재고수준이 높아 적치공간이 부족하게 되면 새로이 수송된 원료를 야드에 적치할 수 없게 되고, 이로 인하여 원료수송선박에 대한 체선료가 발생하게 되는데, 이를 반영할 필요성이 제기되고 있다. 또한, 미래의 제철소는 친환경 제철소로 이행되는 추세에 있는데, 이를 달성할 수 있는 효율적인 방법 중의 하나가 원료야드를 개방형에서 밀폐형으로 운영하는 추세이다 [42]. 밀폐형 원료야드의 경우 원료의 적치 효율은 높아 지지만 운영의 유연성은 급격히 감소되는데, 향후 밀폐형 원료야드에서의 종류별 야드공간 할당과 운영에 관한 연구가 필요할 것이다.

#### 4.2 경제적인 고철 조달계획

고철은 일관제철소의 제강공정에서 냉각재로 사용되는 원료로서 용선에 비해 가격이 저렴하며 재활용(Recycling)이 가능하기에 다양한 구입경로를 갖는다. 따라서 어떤 경로로부터 어떤 품질의 고철을 얼마만큼 구입하여 조달할 것인지를 결정이 중요하다.

Bernatzki et al.[43]은 전로에 투입되는 용선과 냉각제로 사용되는 고철의 구매 및 수송비용을 고려한 총비용을 최소화할 수 있도록 고철의 종류별 사용량을 결정할 수 있는 MIP모형을 제시하였다. Vahdani and Naderi-Beni[44]는 종류별 고철 구입량을 결정하기 위하여 고정비용(시설투자)과 변동비용(시설간의 수송비용)으로 나누어 총비용을 최소화할 수 있는 입지배분네트워크(Location allocation network) 모형을 제시하였다. 또한, Chen and Wang[45]과 Roy and Guin[46]은 전기로 제강공정을 대상으로 지역적으로 흩어져 있는 고철 공급자와 전기로, 물류수송자들을 통합하여 고철구매량, 용

강생산량, 배송량 등을 결정할 수 있는 LP모형을 제시하였다. 이상의 연구들은 복잡한 고철의 유통경로별로 고철의 구입 및 수송량을 결정할 수 있는 모형으로서 생산계획(Planning) 수준의 결과를 제시하고 있다.

향후 생산 일정계획(Scheduling) 수준에서 고철의 사용과 관련된 재고유지 및 품질비용을 고려하고, 생산되는 용강의 품질수준과 생산비용 등을 반영한 총비용 최소화 관점에서의 모형이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 고철은 전량이 재활용이 가능한 소재로서 철강업을 중심으로 후방산업을 포함한 재활용네트워크(Recycling network) 관점에서의 모형을 통해 안정적인 공급계획의 수립이 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 제강-연주-열연 일정계획 편성

일관제철소의 제강 및 열연공정은 제품생산에 가장 핵심적인 공정이라 할 수 있다. 일관제철소의 생산은 일반적으로 주문생산방식인데, 고객으로부터의 주문은 제품인 코일이나 후판 등에 대한 강종, 폭, 두께, 납기, 주문량 등의 사양이 명시된다. 제철소에서의 로트크기는 Fig. 2에서와 같이 보통 전로와 연주의 턴디쉬(Tundish)에서는 300톤의 용강, 연주기의 몰드를 통해 생산되는 슬라브는 보통 25톤의 육각형 고체소재, 그리고 열연강판은 슬라브를 여러 개의 롤(Roll) 사이를 통과시켜 연속적인 힘을 가함으로써 늘리거나 얇게 만든 제품으로 슬라브와 동일한 중량을 가지게 되며[1], 이를 고객이 원하는 중량을 갖는 제품으로 절단하여 납품하게 된다. 이와

같이 공정들은 처리하는 로트크기가 다르기 때문에 발생되는 문제가 있다. 예를 들어, 전로에서의 생산단위는 300톤으로서 유사한 강종, 폭, 두께 등의 주문으로 채워야 하는데 이를 다 채우지 못하더라도 생산을 해야 하며, 따라서 고객의 주문이 없는 슬라브를 생산할 수밖에 없게 된다. 이에 대해 Song[47]은 고객의 주문을 현재 보유하고 있는 재고상태의 슬라브와 매칭할 수 있는 MIP 모형을 제시한 바 있다.

슬라브(Slab) 설계란 고객의 다양한 주문조건에 따라 이미 설계된 열연강판이나 후판을 조합하여 가장 적합한 슬라브 규격 및 중량을 계산하여 정하는 것이며, 전로에서의 Charge 편성(Charge forming)이란 설계된 슬라브를 전로에서 생산이 가능하도록 약 300톤의 Charge단위로 그룹핑하는 것을 의미한다. 이 때 동일한 Charge는 동일하거나 유사한 납기, 성분, 폭, 중량 등을 갖도록 구성해야 한다. 다음으로 Cast 편성(Cast design)이란 연주기에서 연속으로 연주(연연주: Continuous continuous casting)가 가능하도록 5~7개의 Charges로 묶는 작업을 말하며, 연연주가 가능하도록 하기 위해 동일한 Cast 내에서 연결된 Charge는 동일하거나 유사한 성분과 폭으로 구성되어야 한다. 일반적으로 연주기에는 두 개의 몰드를 동시에 사용하여 연주가 이루어지며, 동일한 몰드 내에서의 연주는 폭을 변경해가며 연주가 가능토록 하고 있다. 마지막으로 열연에서의 롤단위 편성(Rolling batch scheduling)이란 압연규칙에 따라 슬라브를 롤러에 그룹핑하고 그들간의 압연순서를 결정하는 것으로서, 연속하는 슬라브는 강종이 동일 혹은 유사해야 하며, 폭, 두께, 경도, 온도 등은 일정범위 이내에서 변화가 가능하다. 이

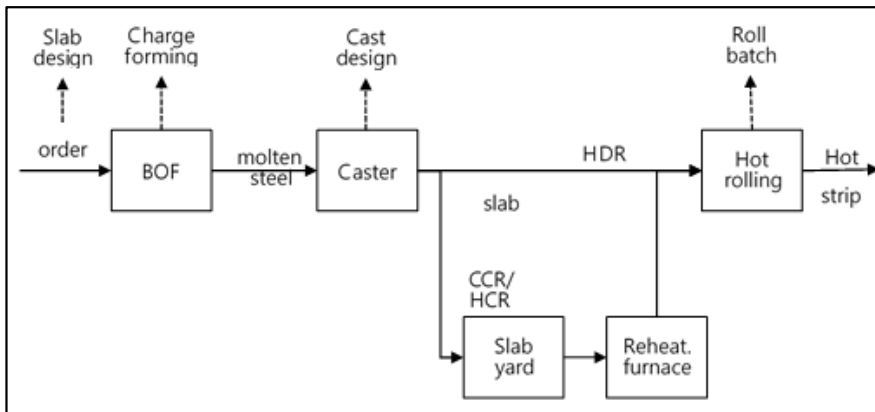


Fig. 2. BOF-Caster-Hot Rolling process



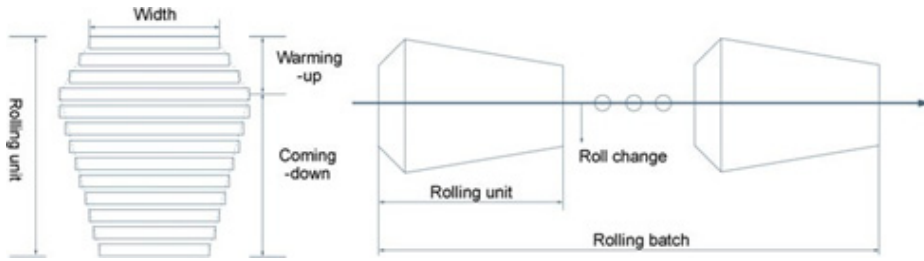


Fig. 3. Conceptual diagram of rolling batch scheduling

때 롤단위(Roll batch)란 작업롤(Work rolls)을 교환하기 전까지 압연할 수 있는 슬라브로서 Fig. 3와 같은 관모양(Coffin shape)을 이룬다. 관모양의 롤단위 전반부는 준비구간(Warming up section)으로서 슬라브는 좁은 폭으로부터 넓은 폭 순서로 정렬되어야 하며, 후반부는 작업구간(Coming down section)으로서 압연된 코일 표면의 흠집을 방지하기 위해 슬라브는 폭이 넓은 것로부터 좁은 것으로 정렬되어야 한다.

한편, 슬라브가 열연 압연기에 연결되는 온도에 따라 CCR, HCR, HDR 등으로 구분하고 있는데, CCR(Cold charge roll)이란 400도 이하의 슬라브를 압연하는 경우로서, 압연순서에 따라 가열로(Heating furnace)에서 가열한 후 압연해야 하며, 따라서 에너지 소모가 많게 된다. HCR(Hot charge roll)이란 보열장소(Heat preservation pit)에 보관된 섭씨 약 400~800도의 슬라브를 압연순서에 따라 가열로에서 가열 후 압연하는 것으로 CCR에 비해 에너지 소모량이 적다. 마지막으로 HDR(Hot direct roll)이란 보통 1,100도 이상의 슬라브를 압연하는 것으로서 가열로에서 가열하지 않고 압연이 가능하므로 에너지 소모가 거의 없게 된다[47].

이상에서와 같이 일관제철소에서 전로-연주-열연 공정은 에너지 손실을 최소화하기 위해 모든 공정이 직접 연결되어 이루어지는 것이 가장 경제적이다. 이를 위하여 최적화 관점에서는 슬라브설계 → Charge 편성(전로) → Cast 편성(연주) → 롤단위편성(열연) 등을 통합하여 일정계획을 수립함으로써 최적화를 도모할 수 있다. 즉, 가장 경제적인 생산방식이란 전로에서 용강이 Charge 단위로 배출되면 이를 곧바로 연주기의 Tundish에 연속적으로 부어 일정 개수의 연주주를 통해 슬라브를 생산하고, 생산된 슬라브는 압연공정의 가열로를 거치지 않은 채 직접 압연기로 연결되어 압연함으로써(HDR) 열연제품을 생산하는 것이다. 따라서 이를 달성하기 위해

서는 전로, 연주, 압연 공정의 일정계획을 통합하여 동기화되도록(Synchronized) 수립해야만 한다.

### 5.1 Charge편성과 Cast편성

우선 Cast 편성에 관한 연구 중에서 후공정인 롤단위 편성과 연계하지 않은 연주기에서의 일정계획 수립에 관한 연구를 들 수 있다. 기초수준의 연구로서 Dorn and Slany[48]는 전기로 용강의 연주 일정계획을 퍼지모형을 이용하여 수립하였으며, Missbauer et al.[49]은 전로-2차정련-연주를 모두 연결할 수 있도록 각 설비에서의 작업개시시간을 결정할 수 있는 MIP모형을 제시하였다. 그러나 이들의 연구는 강종 이외의 폭, 두께, 온도, 납기, 폭변경 조건 등은 반영하지 않았다. Wei and Sun[50]은 연주와 조피를 동시에 생산할 수 있는 연주가 가능한 일정계획을 수립할 수 있도록 IP모형을 개발하였다. 그들은 각각의 Charge에 대해 전체(Full charge)와 절반(Half charge)의 개념을 이용하여 모형화 하였으나, 앞서의 연구와 마찬가지로 Cast편성 제약조건을 남기 이외에는 반영하지 않고 있다. Kumar et al.[51]도 마찬가지로 Cast 편성에 관해 오로지 납기만을 고려한 MIP모형을 제시하였다. Zandoni and Zavarella[52]는 빌렛 연주기에서 생산일정을 수립할 수 있는 MIP모형을 제시하였는데 빌렛의 유형별 수요와 재고, 냉각기간 등을 고려하였다. 그들의 연구에서도 마찬가지로 폭 등의 연주 제약조건을 반영하지 않았다.

한편, 연주에서의 강종 이외의 폭, 두께, 폭가변 등의 제약조건을 고려하여 미리 연주기에 할당된 후 cast를 편성하는 연구가 진행되었다. Tang et al.[53]은 연주기마다 연주대상의 Charge들이 미리 할당된 경우에서의 Cast편성에 관한 MILP모형을 제시하였다. Bellabdaoui and Tegham[54]는 Tang et al.[53]의 연구에 비해 연주기에서의 감속에 관한 제약조건을 반영하고 있으나, 두

연구 모두 연주기에 연주 대상의 Charge들을 미리 할당함으로써 선택의 폭을 좁히게 되었다.

이상의 연구에 비해 보다 동기화된 연구로서 Charge 편성과 Cast편성에 관한 모든 제약조건을 반영한 모형에 관한 연구가 진행되어 왔다.

Box and Herbe Jr[55]은 Cast편성과 Charge편성을 동기화하면서 Cast를 편성할 수 있는 발견적 해법을 개발하였다. 그들의 연구에서는 강종, 폭, 속도, 납기뿐만 아니라 폭 변경도 가능토록 하는 Cast편성에 관한 모든 제약조건을 반영하였다. Vaessen and Nerom[56]은 주문을 조합하여 Charge를 편성하고 이를 Two-strand 연주기에 할당한 후 연주가 끝나 절단할 수 있는 문제에 대해 AI를 이용한 근사해를 낼 수 있도록 모형화하였다. 그들의 모형에서는 폭가변을 제외한 강종, 폭, 길이, 중량 등의 제약조건을 반영하였다. Tang et al.[57]은 Charge편성과 Cast 편성이 가능한 MIP모형을 제시하였다. 그들의 연구에서는 로트설계 단계에서 Charge를 편성하고, 각각의 Charge는 어떤 Cast에 어떤 순서로 할당되는지가 결정된 후 이를 이용하여 일정계획을 수립하도록 하였다. 따라서 Cast편성과 관련된 제약조건 중에서 강종, 폭, 두께 등에 관한 조건은 이미 반영하여 Cast내에서의 순서가 결정된 것으로 가정하고 있다. Harjunkoski et al.[58]는 전기로~연주에 이르기까지 연결된 생산일정을 수립할 수 있는 3개의 MILP 모형과 하나의 LP 모형을 개발하였다. 그들은 주문을 Charge 및 Cast를 편성하고 이를 각 기계에 할당하는 방법으로 수립하였으며, 특히 Cast편성에서의 강종, 폭, 폭 변경 등 조건을 모두 반영함으로써 현실성 있는 해를 도출하였다.

이상의 연구들은 대부분 Charge편성과 Cast편성을 동기화하면서 관련된 제약조건을 모두 반영할 수 있는 모형과 해를 제시하고 있다.

## 5.2 가열로 운영 효율화

연주에서 생산된 후 슬라브 저장소에서 저장되어 온도가 낮아진 상태(400도 이하)인 CCR 슬라브는 가열로에서 다시 가열되어 열연 과정을 거쳐 열연강판(Hot strip)으로 생산되며, 생산된 열연강판은 저장장소에서 온도가 낮아진 후 다음 공정인 냉간압연 공정으로 투입되거나 혹은 수요자에게 조달된다. 이 과정에서 가열로에서의 에너지 소비를 최소화하기 위해 가열로에 투입되는 슬라브의 순서를 결정하는 모형에 관한 연구가 진행

되었는데, Bin-packing방법으로[59], 시물레이션을 이용한 모형[60, 61], GP를 이용한 모형[21]등이 있다. 그러나 가열로에 투입되는 슬라브의 순서는 롤단위 편성과 동기화되어야 함에도 불구하고 이를 반영치 않아 현실성이 떨어진다는 단점이 있다. 이상의 연구는 슬라브 투입순서를 결정하는 일정계획수립 모형이며, Tang et al.[62]은 확정적 수요에 대응하여 생산 시나리오를 작성하고, 그에 따라 가열 및 압연, 저장의 과정에 관한 확률적 문제를 MINLP(Mixed integer nonlinear programming)법으로 모델링하고 이를 휴리스틱(Heuristic)으로 해결하였다.

## 5.3 슬라브의 압연기 할당

연주기로부터 생산된 슬라브나 혹은 단조로부터 생산된 조괴를 압연기에서 작업하기 위해서는 소재를 압연기에 할당해야 하며, 이에 관한 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 압연기 작업순서를 결정하기 위한 롤단위 편성에 필요한 다양한 제약조건을 반영하지 않은 상태의 결과를 도출함으로써 계획(Planning) 수준에서의 결과를 제시하고 있다.

As'ad and Demirli[63]은 빌렛트를 슬라브압연기에 할당하는 주일정계획(MPS: Master production schedule) 수준에서의 일일단위의 생산계획수립문제를 MIBLP(Mixed integer bilinear LP)로 정형화하고 B&B(Branch and bound)로 해결하였다. 목적함수는 주문, 생산, 재고유지, 준비, 추후납품 등을 포함하는 총비용 최소화하고 있으며, 제약조건으로는 생산량, 준비, 가용능력, 배치크기, 밸런싱 등을 고려하고 있다. Mohanty and Singh[64]는 수요가의 주문을 충족시키기 위해 조괴를 압연기에 할당할 수 있는 문제에 대해 해를 이용하여 모형화하였다. 그들의 모형은 일정계획 수립이 아닌 할당에 관한 문제로서 총비용 최소화를 위한 최적제품구색을 결정하고, 이를 각각의 압연기에 할당할 수 있도록 하고 있다. Sasidhar and Achary[65]는 마찬가지로 조괴를 압연기에 최소의 롤단위 개수로 할당하는 로트크기결정 문제에 대해 Multiple arc network로 모형화하고 최대흐름(Max flow with priority arcs) 방법으로 해결하였다. 그들의 모형은 롤단위 편성에서의 제약조건을 반영하지 않음으로써 일정계획 수립이 아닌 할당의 문제로 볼 수 있다. 한편, Yanagisawa[66]는 슬라브를 제품인 코일과 매칭할 수 있는 문제에 대해 MINLP로 모형화하고 두 변수

를 갖는 정수계획 모형의 탐색적 방법으로 해결하였다. 그의 목적함수는 슬라브로부터 제품을 절단 후 남은 여백을 최소화함으로써 생산된 제품의 이익(중량) 최대화를 도모하고 있다. Denton et al.[67]은 고객의 주문을 슬라브와 매칭시킬 수 있는 문제에 대해 이익을 최대화할 수 있도록 MIS 모형과 탐색적 해법(Greedy interchange heuristic)을 제시하였다. Tang et al.[68]은 창고에 저장된 슬라브를 대상으로 주문에 맞추어 재할당할 수 있는 MINLP모형을 개발하고 이를 MILP 모형을 완화한 타부탐색방법으로 해결하였다. 그들은 슬라브를 주문에 재할당하는 모형으로서 매칭조건을 비용함수화하고, 매칭에 필요한 제약조건을 반영하고 있으나, 롤단위편성에 필요한 제약조건 중에서 강종과 폭, 총 중량 만을 반영함으로써 일정계획수립에 관한 문제가 아닌 할당(Planning) 수준의 해를 제시하였다.

이상의 연구들은 압연을 위한 소재들을 압연기에 할당하는 계획(Planning) 수준의 모형을 다룬 것으로서, 롤단위편성에 필요한 제약조건을 모두 반영하지 않아 경제적인 롤단위편성에는 이르지 못한 것으로 평가된다.

#### 5.4 롤단위 편성

롤단위 편성만을 다룬 연구는 전공정인 Cast 편성과 연계하지 않은 채 독립적으로 이루어진 연구로서 CCR 슬라브 압연이 이에 해당된다.

Vanhoucke and Debels[69]는 일반적으로 여러 단계로 구성된 공정에서 일정계획을 수립할 수 있는 다목적 MIP모형을 제시하였으며, 이를 슬라브 압연공정에 적용하였다. 그들은 총괄생산계획으로부터 도출된 슬라브 생산계획 결과를 압연공정에 할당하고, 이를 바탕으로 일일단위의 일정계획을 수립하였다. 그러나 그들은 조기완료(Earliness) 혹은 지체(Tardiness) 등만을 반영함으로써 Charge, Cast, Roll 편성을 위한 제약조건인 강종, 두께, 폭, 이로 인한 재고 등의 조건을 반영하지 않고 있다. Assaf et al.[70]은 조피로부터 생산된 슬라브에 대해 가열로~ 열연의 일정계획 문제를 MIP로 모형화 하였다. 그들의 목적식은 시간과 비용에 관한 두 가지를 고려하고 있으며, 롤단위 편성 및 연주기에서의 제약조건을 고려하였으나 Cast편성은 연연주가 아닌 상황으로 단순화하고 있다. Baccus et al.[71]은 롤단위편성 문제에 대해 연속되는 슬라브가 맞지 않아서 발생하는 벌점(Penalty)을 최소화할 수 있는 모형을 개발하고, 이를 공정관리자

가 반복과정을 통해 찾을 수 있는 방법을 제시하고 있다. 한편, Chen et al.[72]은 슬라브압연을 위한 롤단위편성 문제를 시간창을 갖는 차량경로문제(Vehicle routing problem with time window)로 모형화하고 유전자해법(GA: Genetic algorithm)을 제시하였다. 그들은 롤단위편성에 관한 제약조건을 벌점함수로 정의하여 목적함수화하여 모든 제약조건을 반영하고 있다. 이어서 Tang et al.[73]도 상해 바오제철소(Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex)에서 열연의 롤단위 편성문제를 다수의 외관원 방문문제(TSP: Traveling salesman problem)로 모형화하고 이에 대해 수정된 유전자해법으로 해결하였는데, Chen et al.[72]과 동일하게 제약조건을 페널티함수로 한 목적함수화하여 모든 제약조건을 반영하고 있다. Jia et al.[74, 75]은 열연 롤단위편성에 대해 복수의 시간대(Time window)를 갖는 다목적 VRP(Vehicle routing problem)로 모형화하고 이를 분해법으로 해결하고 있다. 그들의 연구에서는 목적함수들 간의 계층구조로서 우선 롤단위 수를 최소화, 연속되는 슬라브들 간의 폭, 게이지, 경도 등 급격한 변화를 벌점함수화하여 그 값을 최소화, 마지막으로 롤링시간 지연을 최소화 등으로 삼고 있다. Wang and Tang[76]은 열연 롤단위 편성에 관한 문제를 다목적 MIP로 모형화하고 이를 Heuristic으로 해결하였다. 그들은 앞선 연구인 Chen et al.[72]과 Tang et al.[73]과는 달리 연속하는 슬라브 사이의 폭, 두께, 경도에 관한 제약조건은 벌점함수로 하지 않고 제약조건으로 반영할 수 있는 모형을 제시하고 있다. Suh et al.[77]은 열연 롤단위편성문제에 대해 CSP (Constraint satisfaction problem)를 이용하여 해결방안을 제시하고 있으며, 마찬가지로 폭, 두께, 경도 등에 관한 제약조건과 기술적인 제약조건, 그리고 납기에 관한 제약을 반영하고 있다. Cowling[78]은 열연 롤단위 편성에 관해 수리모형의 제시는 없이 의사결정지원체제를 구축하여 Heuristics을 개발하였다. 그들 역시 롤단위편성에 관한 폭, 두께, 경도 등과 함께 납기 등을 반영하고 있다. Lopez et al.[79]은 열연 롤단위편성문제를 TSP로 모형화하고 Tabu탐색으로 해결하였다. 그는 롤단위 편성에 관한 제약조건 뿐만 아니라 가열로 제약을 시뮬레이션을 통해 모형에 반영하고 있다.

#### 5.5 Charge편성~Cast편성~롤단위편성 동기화

Mattik et al.[80]은 Charge편성~ Cast편성~롤단위편

성을 위한 MIP모형을 수립하였는데, 그들은 cast 편성 시 동일한 강종으로 편성하고, cast에서의 순서는 미리 정해진 것으로 가정하였다. 따라서 폭, 두께, 폭가변 등을 미반영하였으며, 롤단위편성에서도 강종과 납기만 반영하고, 두께와 폭을 고려하지 않은 단순한 모형을 제시하였다.

Lee et al.[81]은 Cast편성과 롤단위편성을 통합하는 일정계획 문제에 대한 휴리스틱을 제시하였으며 슬라브 교환 방식으로 해를 개선하였다. Sato et al.[82]은 시뮬레이션을 이용하여 Charge편성~열연~냉연~파이프/튜브 생산의 모든 공정을 대상으로 일정계획을 수립할 수 있는 모형을 제시하였으나, 시뮬레이션에 의한 방법으로서 최적해가 아닌 대안을 평가하는 수준의 결과를 제시하고 있다. Cowling and Rezig[83]은 연주로부터 열연에 이르기까지의 일정계획 수립에 관한 혼합네트워크 모형을 개발하였다. 그들은 가상의 슬라브로 최적의 롤단위를 편성한 후 다시 전 단계인 Cast 편성을 하였으며, 코일의 납기, 코일의 실제 존재여부, 연주일정과 롤일정과 연계, 코일이 특정 롤단위에 잘 어울리는지의 여부(경도, 두께, 폭의 함수)와 더불어 작업자가 롤단위 편성과 Cast 편성 안에 대해 부여하는 피드백까지도 반영토록 하였다. Appelqvist and Lehtonen[84]은 수리적인 모형은 제시되지 않았으나 전로~슬라브 생산까지 일정계획 수립에 관해 최적해를 도출하고 이를 시뮬레이션을 통해 타당성을 확인하였다고 제시하였다.

이상 연구들은 Charge편성-Cast편성-롤단위편성의 공정을 상호 연결하여 동기화된 일정계획을 편성할 수 있도록 하는 연구에 집중하고 있다. 그러나 Tang et al.[6]의 조사연구에서 지적하였듯이 이 세 공정을 완전히 동기화하여 일정계획을 수립할 수 있는 실시간 운영이 가능한 모형은 추후 개발되어야 할 연구과제로 남아 있다.

## 6. 적정 재고수준 및 자재관리

### 6.1 공정별 적정 재고수준

일관제철소는 연속생산방식으로서 재고고갈로 인한 손실비용이 재고유지비용에 비해 매우 큰 특징을 가진다. 따라서 원료 혹은 생산용 자재들은 적정수준의 안전 재고를 확보하여 생산계획을 편성할 필요가 있다.

Xiong and Petri[85]는 시뮬레이션을 활용한 제철원료 재고관리 모형을(s, S)모형과 퍼지모형으로 비교하였는데, 원료의 조달에 관해 실적자료를 근거로 한 분포가 아닌 난수를 이용한 분포를 사용함으로써 현실성이 부족한 것으로 판단된다. Melouk et al.[86]은 일관제철소 각 공정별 적정 재고수준을 결정할 수 있는 시뮬레이션과 최적화를 결합한 모형을 제시하였다. 그러나 최적화 모형에서는 Charge/Cast/Roll 편성 등 다양한 제약조건을 반영하지 않아 실질적인 적용은 어려울 것으로 판단된다. Denton and Gupta[87]는 원료~열연의 전 과정에서 주문생산(MTO: Make-to-order)와 계획생산(MTS: Make-to-stock)을 구현할 수 있도록 어떤 위치에 얼마의 재고가 필요한지 결정할 수 있는 모형을 제시하여, 주문 생산을 기반으로 하는 일관제철소에서 주문의 형태가 규칙적인 경우에 대한 적정재고수준 산출을 제시하였다. 이들의 연구를 발전시켜 Kumar et al.[88]은 중간제품인 슬라브, 코일 등의 재고를 어느 단계에서 얼마만큼 보유하고 있어야 하는지 결정할 수 있는 확률적 LP모형을 개발하고, 이를 ESPC(Endosymbiotic psychoclonal) 해법으로 해결하였다.

제철공정은 연속적으로 이루어지는 공정으로서 원료와 중간재고(WIP: Work-in-process)의 조달이 품질이 생겨서는 안된다. 따라서 향후 원료와 생산용 자재에 대해 적절한 안전재고 수준의 결정에 관한 연구가 필요할 것으로 보이며, 안전재고는 조달기간 동안의 불규칙성을 모형화 함으로써 가능할 것으로 판단된다. 또한, 일관제철소는 근본적으로 주문생산 방식으로 운영되어야 하는데, 효율성을 도모할 수 있도록 규칙성을 가지는 주문에 대한 계획생산(MTS) 방식을 적용할 수 있는 범위와 재고수준에 대한 의사결정도 필요할 것으로 판단된다.

## 6.2 전략적 자재 구매

Liu and Xu[89]는 철강업에서의 구매물품을 Kraljick's model[90]에 의해 분류하여 전략적인 구매를 달성할 수 있는 모형을 제시하였다. 이 모형은 전략적 구매에 관한 연구[91]를 일관제철소에 적용한 연구로서, 규모가 방대한 제철소에서의 활용가치가 높음을 보여주고 있다.

## 7. 공정별 최적화

### 7.1 용강 온도예측 모형

연구과정에서는 몰드로 주입되는 용강의 온도를 제어하는 것이 매우 중요하다. 온도가 높으면 연구과정에서 몰드 밖으로 용강이 새어나와 작업이 중단되거나 (Breakout 현상), 온도가 너무 낮으면 용강이 몰드에 들어붙는 현상이 발생하기 때문이다. 따라서 진로를 통과한 용강은 2차정련(Secondary refinery) 과정을 거쳐 연구 주기의 Tundish에 주입되어야 하는데, Tundish의 도착 온도를 예측하여 제어할 필요가 있으며, 이에 관한 연구가 진행되어 왔다. 우선 Feng et al.[92]은 2차정련 공정 중 RH공정의 최종온도를 예측할 수 있는 개선된 CBR(Case based reasoning) 모형을 개발하였다. 그들은 우선 선형회귀분석으로부터 온도에 영향을 미치는 요인들을 도출하고, AHP(Analytic hierarchy process)를 이용하여 요인들간의 중요도를 결정하였으며, 이를 이용하여 온도를 예측할 수 있는 개선된 CBR모형을 제시하고 있다. Ahmad et al.[93]은 연구기 Tundish 도착온도 예측모형을 Gray-box modeling 개념으로 모형화 하였으며, Kim et al.[94]은 퍼지회귀모형을 이용하여 예측한 바 있다. 이들 연구의 예측 정확도는 매우 높게 나타나 시계열자료를 바탕으로 한 용강 온도예측모형은 실제 현장에 적용이 잘 되는 것으로 판단된다.

### 7.2 제품의 절단

완제품인 열연강관은 고객의 주문에 맞추어 제품으로 절단해야만 한다. 이 때 산출(Yield)을 최대화하면서 절단으로 인해 발생하는 손실 혹은 규격초과(Overgrading)를 최소화할 수 있는 절단평면문제 모형을 하였다[95]. 한편, 중간소재인 슬라브로부터 제품인 후판을 생산할 경우, 고객에게 납품을 위해서는 생산된 후판을 제품으로 절단해야 하는데, 후판생산에 사용되는 슬라브 수를 최소화하는 문제로 모형화하였다. Dash et al.[96]은 정수계획법으로 모형화하여 AI 방법으로 해결하였으며, Wy and Kim[97]은 절단평면 문제로 해결하였다.

### 7.3 창고 적치 및 불출

일관제철소의 제품관련 저장공간은 중간제품인 슬라브 저장공간과 완제품인 코일이나 후판등의 저장공간을 들 수 있다. 이들은 모두 자재를 겹쳐 적치하기 때문에 나중에 불출을 고려하여 적치장소와 적치순서를 결정하는 것이 효율성에 영향을 미치게 된다. 따라서 주로 RFID(Radio frequency identification) 기술을 이용하여

[98] 스캐닝 함으로써 정보수집을 하고 있다.

우선 반제품인 슬라브 적치에 관한 연구로서는 슬라브를 저장공간에 섞는 방법이 주요 연구대상이며, 유전자해법[99, 100]과 DP(Dynamic programming)에 기반을 둔 휴리스틱[101]등의 연구가 있다. 완제품인 후판이나 코일의 적치순서 결정에 관해서는 타부탐색에 의한 모형[101], 휴리스틱에 의한 모형[102]등이 제시되었으나, 그들의 연구는 크레인의 이동거리를 고려하지 않아 창고 일정계획의 현실성이 결여되어 있다.

이상에서와 같이 제철소에서의 중간제품이나 완제품 저장창고 효율화 관련 연구는 대부분 적치/불출방법과 순서에 집중하고 있다. 완제품의 경우 동일한 고객으로부터 주문된 완제품은 다양한 것이 일반적이며, 따라서 생산 완료시기가 모두 다를 수 있다. 이 경우 창고로부터 불출은 동일한 고객의 제품을 묶어 동시에 출하하는 것이 일반적이며, 동일한 고객으로부터의 제품들에 대한 생산완료시점이 크게 차이가 날 경우 창고에 저장되어 있는 기간이 길어질 수밖에 없다. 따라서 창고운영의 효율성 제고를 위해 동일한 고객으로부터의 주문집약에 관한 방법, 이를 근거로 창고의 적정규모 산정, 그리고 마지막으로 창고의 적치 및 불출에 관한 방법 등에 관한 연구가 필요할 것으로 예상된다.

## 8. 향후 연구를 위한 이슈들

일관제철소의 운영과 관련하여 POM 관점에서의 효율성 제고를 위한 연구를 조사하였다. 이를 바탕으로 다음과 같이 향후 추가적으로 연구가 이루어질 필요가 있다고 판단된다.

- 1) 일관제철소는 원료공급자 - 제철소(생산자) - 냉연사(고객)와 각 단계를 연결하는 수송자로 이어지는 공급사슬을 구성하고 있다. 기존의 연구에서는 생산자인 제철소만의 효율성 평가가 이루어져 왔는데, 앞으로 각 단계를 모두 포함하는 공급사슬관점에서의 효율성 평가가 이루어져야 하며, 다양한 일관제철소 공급사슬에 대한 비교도 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- 2) 일관제철소의 제품에 대한 최적제품구색에 관한 연구가 이루어져 왔는데, 이에 관해서도 다양한 환경규

제, 환율의 변동 등에 대응할 수 있는 제품구색의 도출에 관한 연구가 필요할 것이다. 또한 일관제철소에서 생산되는 모든 제품과 아울러 발생하는 부생가스, 부산물, 폐기물 등을 포함한 경제성을 판단할 수 있는 Product mix 모형에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 기대된다.

- 3) 일관제철소 수명주기 동안의 경제성 평가(LCA)는 지속가능성 관점에서 중요한 이슈로 대두되고 있다. 이를 통해 사용되는 원료와 생산물 등의 상호 보완 및 대체관계 등을 반영함으로써 경제성을 추구할 수 있는 모형의 개발이 필요할 것이다. 예를 들면, 석탄의 성분은 원료의 구매가격과 연관되어 있고, 배합비율이 달라짐에 따라 부생가스의 발생량이 달라지며, 최종적으로는 고로에서 생산되는 용선의 품질과도 관련이 있으므로, 이를 반영할 수 있는 LCA 모형의 개발이 필요하다. 한편, 보다 적은 규모의 이슈로서 고철은 전량이 재활용이 가능한 소재로서 철강업의 전방산업을 포함한 자원재생네트워크 관점에서의 모형의 개발도 필요할 것으로 보인다.
- 4) 다음은 제철원료의 구매와 사용에 관한 연구로서, 우선 장기적으로 구매계약이 이루어지는 제철원료에 대해 어떤 브랜드의 원료를 얼마나 구매하는 것이 경제적인지에 대한 연구가 필요하다. 일반적으로 품질이 좋은 원료는 가격(FOB)이 비싸지만 수송비와 보험료를 반영할 경우(CIF) 가격 역전현상이 발생할 가능성도 존재한다. 또한, 좋은 원료를 사용할 경우 생산과정에서의 부하가 적어져 생산비용이 감소하면서도 제품의 품질이 좋을 것이므로, 생산비용과 제품의 품질비용까지를 고려한 경제성을 기준으로 원료의 구매전략을 수립할 필요가 있다. 따라서 제철원료의 경제적인 구매방안은 원료 자체의 가격뿐만 아니라 생산이 이루어질 경우의 생산비용, 제품의 품질비용까지를 반영한 경제성을 판단하는 것이 필요할 것이다. 한편, 원료의 구매, 수송, 생산, 출하 등의 다양한 시나리오에 대해 효율성을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모형이 개발됨으로써 전략적 대안에 대한 평가가 가능해질 것으로 판단된다. 이를 위해 원료의 구매와 수송 및 하역으로부터 생산에 투입되어 공정을 거쳐 제품출하에 이르기까지 제철소 전 과정에 대해 시뮬레이션으로 모형화할 필요성이 제기된다.
- 5) 일관제철소의 특정 중 원료의 고갈은 심각하게 큰 비

용을 초래하는데, 이를 방지하기 위해 종류별 원료에 대해 적절한 안전재고수준의 결정이 필요하다. 또한, 일관제철소는 근본적으로 주문생산 방식으로 운영되어야 하는데, 주문 분석으로 통해 규칙성을 가지는 주문에 대해 계획생산(MTS) 방식을 적용할 수 있는 범위를 경정하고 그 적정 재고수준에 대한 의사결정도 필요할 것으로 판단된다.

- 6) 제강-연주-압연 공정은 에너지를 가장 효율적으로 활용할 수 있도록 HDR을 목표로 서로 직접 연결되어 공정관리가 이루어져야 한다. Tang et al.[6]에서도 제시하였듯이 이들 세 공정에서 통합적인 생산계획 및 일정계획 수립뿐만 아니라 각 공정에서의 다양한 제약조건을 모두 반영한 실시간 생산일정계획 수립에 관한 모형의 개발이 필요하다.
- 7) 미래의 제철소는 친환경 제철소로 이행되는 추세에 있는데, 이를 달성할 수 있는 방법 중의 하나로서 원료야드를 개방형에서 밀폐형으로 운영하는 추세이다. 밀폐형 원료야드의 경우 단위면적당 원료의 적치 효율은 높아지지만 운영의 유연성은 급격히 감소되는데, 향후 밀폐형 원료야드에서의 야드공간 할당과 운영에 관한 연구가 필요할 것이다.

## 9. 결 론

일관제철소에서 효율성 제고를 위한 수리모형의 적용에 관한 조사연구는 대부분 특정 공정만을 대상으로 문제해결을 위한 모형에 집중하고 있거나 혹은 일관제철소에서 발생하는 문제에 대해 어떤 기법이 적용되고 있는지에 대한 조사에 집중되고 있다. 그러나 일관제철소 생산계획 및 일정계획 수립을 통한 효율성 향상에 관한 연구는 기법 위주가 아니라 일관제철소에서 해결되어야만 하는 문제를 우선 정의하고, 이를 모형화할 수 있는 목적과 제약조건 등에 대해 파악하며, 현실적으로 적용 가능한 해를 구할 수 있는 방법론이 무엇인지에 대한 연구가 어떻게 이루어져 왔는지에 대해 조사가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 일관제철소의 전 공정에 걸쳐 생산운영관리 관점에서의 효율성 향상을 위해 필요한 연구가 무엇인지를 기술한 후 이를 해결하기 위해 어떤 연구들이 진행되어 왔는지에 대해 조사하였다. 조사는 일관제철소를 하나의 공급사슬의 관점에서 다룸으로써 전체 최

적화를 추구하는 관점으로부터 개별 공정에서의 부분최적화 관점에서 어떤 연구들이 진행되어 왔는지를 조사할 수 있도록 6가지 영역으로 분류하여 조사하였다. 기존에 이루어진 연구에 대한 조사와 더불어 실제 제철소 문제의 제약조건 반영이 이루어지지 않았거나 혹은 공정 상호간의 보완 및 대체관계를 파악함으로써, 부분최적화가 아닌 전체최적화 관점에서 향후의 연구방안에 대해 제시하였다. 이로부터 일관제철소에서의 효율성 제고를 위한 연구주제가 도출될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] A Compilation Society of Glossary of Metal Terms, Glossary of metal terms, <http://terms.naver.com/list.nhn?cid=42325&category=42325>.
- [2] G. A. McCulloch, R. Bandyopadhyay, "Application of operational research in production problems in the steel industry," *Int J Prod Res*, 10(1), pp. 77-91, 1972. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207547208929907>
- [3] J. Yamasaki, T. Iwamura, S. Arai, "Artificial Intelligence Applications at Kawasaki Steel," *Kawasaki Steel Giho*, 23(3), pp. 171-177, 1991.
- [4] S. Basu, G. Dutta, R. Seth, "A survey of the application of non-optimization techniques in an integrated steel plants," *preparation for submission to Interactive Transactions of Operation Research*, [www.iimahd.ernet.in/~goutam/survey2.htm](http://www.iimahd.ernet.in/~goutam/survey2.htm), 2004.
- [5] G. Dutta, R. Fourer, "A Survey of Mathematical Programming Applications in Integrated Steel Plants," *M&SOM*, 3(4), pp. 387-400, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1287/msom.3.4.387.9972>
- [6] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang, "A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production," *Eur J Oper Res*, 133(1), pp. 1-20, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00240-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00240-X)
- [7] A. S. Maqsood, P. Helo, Y. Kristianto, "Steel supply chain management by simulation modelling," *Benchmarking*, 20(1), pp. 45-61, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1108/14635771311299489>
- [8] A. S. Zadeh, R. Sahraeian, S. M. Homayouni, "A dynamic multi-commodity inventory and facility location problem in steel supply chain network design," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), pp. 1267-1282, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5358-2>
- [9] B. Lin, X. Wang, "Exploring Energy Efficiency in China's Iron and Steel Industry: A Stochastic Frontier Approach," *Energy Policy*, 72, pp. 87-96, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.043>
- [10] J. W. Kim, J. Y. Lee, J. Y. Kim, H. K. Lee, "Sources of Productive Efficiency: International Comparison of Iron and Steel Firms," *Resources Policy*, 31(4), pp. 239-246, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2007.03.003>
- [11] L. Deng, Z. Qiu, P. Liu, W. Xiao, "Optimal coordinated strategy analysis for the procurement logistics of a steel group," *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 2014.
- [12] M. Seifbarghy, M. R. Akbari, M. S. Sajadieh, "Analyzing the supply chain using SCOR model in a steel producing company," *The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, pp. 1-6, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2010.5668328>
- [13] T. Fabian, "A Linear Programming Model of Integrated Iron and Steel Production," *Management Science*, 4(4), pp. 415-449, 1958. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.4.4.415>
- [14] A. Sharma, S. K. Sinha, "Product mix optimization: a case study of integrated steel plants of SAIL," *Opsearch*, 28, pp. 188-201, 1991.
- [15] M. Singer, P. Donoso, "Strategic decision-making at a steel manufacturer assisted by linear programming," *Journal of Business Research*, 59(3), pp. 387-390, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2005.09.017>
- [16] M. R. Soltany, A. R. Sayadi, M. Monjezi, M. Hayati, "Productivity Improvement in a Steel Industry using Supply Chain Management Technique," *IJMGE*, 47(1), pp. 51-59, 2013. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijmge.2013.50090>
- [17] P. Letmathe, N. Balakrishnan, "Environmental considerations on the optimal product mix," *Eur J Oper Res*, 167(2), pp. 398-412, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.025>
- [18] J. Szekely, W. H. Ray, S. Fang, "On the optimization of the primary end of integrated steelplants," *Can Metall Q*, 12(2), pp. 177-184, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1179/cm.1973.12.2.177>
- [19] W. H. Ray, J. Szekely, M. B. Ajinkya, "Optimization of the ironmaking-steelmaking sequence in an integrated steel plant having non-linear and distributed elements," *Metallurgical Transactions*, 4(6), pp. 1607-1614, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02668015>
- [20] G. T. Mackulak, C. L. Moodie, T. J. Williams, "Computerized hierarchical production control in steel manufacture," *Int J Prod Res*, 18(4), pp. 455-465, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207548008919682>
- [21] C. Lin, C. L. Moodie, "Hierarchical production planning for a modern steel manufacturing system," *Int J Prod Res*, 27(4), pp. 613-628, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207548908942572>
- [22] M. Larsson, J. Dahl, "Reduction of the Specific Energy Use in an Integrated Steel Plant-The Effect of an Optimization Model," *ISIJ Int*, 43(10), pp. 1664-1673, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1664>
- [23] G. P. Sinha, B. S. Chandrasekaran, N. Mitter, et al., "Strategic and Operational Management with Optimization at Tata Steel," *Interfaces*, 25(1), pp. 6-19, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1287/inte.25.1.6>



- [24] B. Bieda, "Application of Stochastic Approach Based on Monte Carlo (MC) Simulation for Life Cycle Inventory (LCI) to the Steel Process Chain: Case Study," *Science of The Total Environment*, 481, pp. 649-655, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.123>
- [25] A. Iosif, F. Hanrot, D. Ablitzer, "Process Integrated Modelling for Steelmaking Life Cycle Inventory Analysis," *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), pp. 429-438, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2007.10.003>
- [26] H. Kong, E. Qi, H. Li, G. Li, X. Zhang, "An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant," *Appl Energy*, 87(7), pp. 2156-2163, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.031>
- [27] H. Li, J. Shang, "Integrated model for production planning in a large iron and steel manufacturing environment," *Int J Prod Res*, 39(9), pp. 2037-2062, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540110035200>
- [28] R. J. Paul, T. S. Chaney, "Optimising a complex discrete event simulation model using a genetic algorithm," *Neural Computing & Applications*, 6(4), pp. 229-237, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01501509>
- [29] M. M. Fioroni, L. A. G. Franzese, E. L. M. Harano, et al., "Simulation based decision for steelmaking operations challenges," *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2005, p. 6, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574566>
- [30] A. Azadeh, A. Maghsoudi, "Optimization of production systems through integration of computer simulation, design of experiment, and Tabu search: the case of a large steelmaking workshop," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5), pp. 785-800, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2305-3>
- [31] D. Seong, M. S. Suh, "An integrated modelling approach for raw material management in a steel mill," *Production Planning & Control*, 23(12), pp. 922-934, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.586651>
- [32] D. Seong, G. Byeon, "The Efficiency Assessment of the Iron Ore Brands Using DEA-AR Model in an Integrated Steel Mill," *Journal of the Korea society of IT services*, 12(4), pp. 255-265, 2013.
- [33] D. Seong, M. Suh, "The Efficiency Evaluation of Coking Coals Using Data Envelopment Analysis," *Journal of the Korea society of IT services*, 10(2), pp. 177-188, 2011.
- [34] Z. Gao, L. Tang, "A Multi-Objective Model for Purchasing of Bulk Raw Materials of a Large-Scale Integrated Steel Plant," *International Journal of Production Economics*, 83(3), pp. 325-334, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00373-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00373-0)
- [35] Z. Gao, L. Tang, "Combine column generation with GUB to solve the steel-iron raw materials purchasing lot-sizing problem," *Acta Automatica Sinica*, 30(1), pp. 20-26, 2004.
- [36] A. Samolejov, J. Feliks, R. Lenort, P. Besta, "A hybrid decision support system for iron ore supply," *Metal*, 51(1), pp. 91-93, 2012.
- [37] Z. H. Luo, L.X. Tang, W. Y. Zhang, "Using Branch-and-Price Algorithm to Solve Raw Materials Logistics Planning Problem in Iron and Steel Industry," *2007 International Conference on Management Science and Engineering*, pp. 529-536, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMSE.2007.4421901>
- [38] D. Gerardi, T. E. Marlin, C. L. E. Swartz, "Optimization of Primary Steelmaking Purchasing and Operation under Raw Material Uncertainty," *Ind Eng Chem Res*, 52(35), pp. 12383-12398, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie3035543>
- [39] J. Lu, M. Fu, J. Sha, "Research of import iron ore logistics system based on the minimum cost theory," *Proceedings of ICSSSM '05 2005 International Conference on Services Systems and Services Management*, 2005 1, pp. 396 Vol. 1, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2005.1499502>
- [40] B. Kim, J. Koo, B. S. Park, "A raw material storage yard allocation problem for a large-scale steelworks," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(9), pp. 880-884, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1538-x>
- [41] S. Li, L. X. Tang, "Improved Tabu Search Algorithms for Storage Space Allocation in Integrated Iron and Steel Plant," *2005 ICSC Congress on Computational Intelligence Methods and Applications*, p. 6, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/CIMA.2005.1662319>
- [42] Hyundai Steel Company, *Hyundai Steel Company*, <https://www.hyundai-steel.com/en/she/environment/eco-friendlyfacilities.hds>
- [43] K. Bernatzki, M. R. Bussieck, T. Lindner, M. E. Lübbecke, "Optimal scrap combination for steel production," *Operations-Research-Spektrum*, 20(4), pp. 251-258, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01539743>
- [44] B. Vahdani, M. Naderi-Beni, "A mathematical programming model for recycling network design under uncertainty: an interval-stochastic robust optimization model," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5), pp. 1057-1071, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5852-1>
- [45] M. Chen, W. Wang, "A linear programming model for integrated steel production and distribution planning," *Int Jnl of Op & Prod Mngemnt*, 17(6), pp. 592-610, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1108/01443579710167276>
- [46] R. N. Roy, K. K. Guin, "A proposed model of JIT purchasing in an integrated steel plant," *Int J Prod Econ*, 59(1), pp. 179-187, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00099-1)
- [47] S. H. Song, "A nested column generation algorithm to the meta slab allocation problem in the steel making industry," *Int J Prod Res*, 47(13), pp. 3625-3638, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540801968625>
- [48] J. Dorn, W. Slany. *A flow shop with compatibility constraints in a steelmaking plant*, 1994.
- [49] H. Missbauer, W. Hauber, W. Stadler, "A scheduling system for the steelmaking-continuous casting process. A case study from the steel-making industry," *Int J Prod Res*, 47(15), pp. 4147-4172, 2009.



- DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540801950136>
- [50] L. Wei, L. SUN, "Steel-making and continuous/ingot casting scheduling of mixed charging plan based on batch splitting policy," *Journal of Iron and Steel Research, International*, 19(2), pp. 17-21, 2012.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60054-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60054-5)
- [51] V. Kumar, S. Kumar, M. K. Tiwari, F. T. S. Chan, "Auction-based approach to resolve the scheduling problem in the steel making process," *Int J Prod Res*, 44(8), pp. 1503-1522, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540500434713>
- [52] S. Zanoni, L. Zavanella, "Model and analysis of integrated production - inventory system: The case of steel production," *Int J Prod Econ*, 93, pp. 197-205, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.018>
- [53] L. Tang, P. B. Luh, J. Liu, L. Fang, "Steel-making process scheduling using Lagrangian relaxation," *Int J Prod Res*, 40(1), pp. 55-70, 2002.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540110073000>
- [54] A. Bellabdaoui, J. Teghem, "A Mixed-Integer Linear Programming Model for the Continuous Casting Planning," *International Journal of Production Economics*, 104(2), pp. 260-270, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.10.016>
- [55] R. E. Box, D. G. Herbe, "A Scheduling Model for LTV Steel's Cleveland Works' Twin Strand Continuous Slab Caster," *Interfaces*, 18(1), pp. 42-56, 1988.  
DOI: <https://doi.org/10.1287/inte.18.1.42>
- [56] N. Vaessen, L. Van Nerom, "Continuous caster planning using advanced search algorithms," *Steel Times International*, 18(1), pp. 18-19, 1994.
- [57] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang, "A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production," *Eur J Oper Res*, 120(2), pp. 423-435, 2000.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00041-7)
- [58] I. Harjunkoski, I. E. Grossmann, "A decomposition approach for the scheduling of a steel plant production," *Comput Chem Eng*, 25(11), pp. 1647-1660, 2001.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(01\)00729-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(01)00729-3)
- [59] P. P. Mohanty, "An agent-oriented approach to resolve the production planning complexities for a modern steel manufacturing system," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(3), pp. 199-205, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1673-3>
- [60] D. A. Linkens, Y. Y. Yang, "Scheduling and optimization for heating of steel soaking pits: case study for hybrid systems," *IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 142(5), pp. 362-370, 1995.  
DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-smt:19952056>
- [61] J. Storck, "Exploring improvement trajectories with dynamic process cost modelling: a case from the steel industry," *Int J Prod Res*, 48(12), pp. 3493-3511, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540902725288>
- [62] L. Tang, P. Che, J. Liu, "A stochastic production planning problem with nonlinear cost," *Comput Oper Res*, 39(9), pp. 1977-1987, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.007>
- [63] R. As'ad, K. Demirli, "A bilinear programming model and a modified branch-and-bound algorithm for production planning in steel rolling mills with substitutable demand," *Int J Prod Res*, 49(12), pp. 3731-3749, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207541003690116>
- [64] R. P. Mohanty, R. Singh, "A Hierarchical Production Planning Approach for a Steel Manufacturing System," *Int Jnl of Op & Prod Mngemnt*, 12(5), pp. 69-78, 1992.  
DOI: <https://doi.org/10.1108/01443579210011426>
- [65] B. Sasidhar, K. K. Achary, "A multiple arc network model of production planning in a steel mill," *Int J Prod Econ*, 22(3), pp. 195-202, 1991.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(91\)90095-B](https://doi.org/10.1016/0925-5273(91)90095-B)
- [66] H. Yanagisawa, "The material allocation problem in the steel industry," *IBM Journal of Research and Development*, 51(3.4), pp. 363-374, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.513.0363>
- [67] B. Denton, D. Gupta, K. Jawahir, "Managing Increasing Product Variety at Integrated Steel Mills," *Interfaces*, 33(2), pp. 41-53, 2003.  
DOI: <https://doi.org/10.1287/inte.33.2.41.16373>
- [68] L. Tang, J. Luo, J. Liu, "Modelling and a tabu search solution for the slab reallocation problem in the steel industry," *Int J Prod Res*, 51(14), pp. 4405-4420, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.788796>
- [69] M. Vanhoucke, D. Debels, "A finite-capacity production scheduling procedure for a Belgian steel company," *Int J Prod Res*, 47(3), pp. 561-584, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540701441970>
- [70] I. Assaf, M. Chen, J. Katzberg, "Steel production schedule generation," *Int J Prod Res*, 35(2), pp. 467-477, 1997.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/002075497195858>
- [71] F. Baccus, P. Cowling, N. Vaessen, L. Van Nerom, "Optimal rolling mill planning at Usines Gustave Boël," *Steel Times*, p S4, 1995.
- [72] X. Chen, W. Wan, X. Xu, "Modeling Rolling Batch Planning as Vehicle Routing Problem with Time Windows," *Computers & Operations Research*, 25(12), pp. 1127-1136, 1998.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(98)00018-5)
- [73] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang, "A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex," *Eur J Oper Res*, 124(2), pp. 267-282, 2000.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00380-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00380-X)
- [74] S. Jia, J. Zhu, G. Yang, J. Yi, B. Du, "A decomposition-based hierarchical optimization algorithm for hot rolling batch scheduling problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5), pp. 487-501, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3749-9>
- [75] S. J. Jia, J. Yi, G. K. Yang, B. Du, J. Zhu, "A multi-objective optimization algorithm for the hot rolling batch scheduling problem," *Int J Prod Res*, 51(3), pp. 667-681, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.654138>

- [76] X. Wang, L. Tang, "Integration of batching and scheduling for hot rolling production in the steel industry," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(5), pp. 431-441, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0857-z>
- [77] M. S. Suh, A. Lee, Y. J. Lee, Y. K. Ko, "Evaluation of ordering strategies for constraint satisfaction reactive scheduling," *Decis Support Syst*, 22(2), pp. 187-197, 1998.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(97\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(97)00052-3)
- [78] P. Cowling, "A Flexible Decision Support System for Steel Hot Rolling Mill Scheduling," *Computers & Industrial Engineering*, 45(2), pp. 307-321, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(03\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(03)00038-X)
- [79] L. Lopez, M. W. Carter, M. Gendreau, "The hot strip mill production scheduling problem: A tabu search approach," *Eur J Oper Res*, 106(2-3), pp. 317-335, 1998.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00277-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00277-4)
- [80] I. Mattik, P. Amorim, H. Günther, "Hierarchical scheduling of continuous casters and hot strip mills in the steel industry: a block planning application," *Int J Prod Res*, 52(9), pp. 2576-2591, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.860248>
- [81] H. S. Lee, S. S. Murthy, S. W. Haider, D. V. Morse, "Primary production scheduling at steelmaking industries," *IBM Journal of Research and Development*, 40(2), pp. 231-252, 1996.  
DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.402.0231>
- [82] S. Sato, T. Yamaoka, Y. Aoki, T. Ueda, "Development of integrated production scheduling system for iron and steel works," *Int J Prod Res*, 15(6), pp. 539-552, 1977.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207547708943148>
- [83] P. Cowling, W. Rezig, "Integration of continuous caster and hot strip mill planning for steel production," *Journal of Scheduling*, 3(4), pp. 185-208, 2000.  
DOI: [https://doi.org/10.1002/1099-1425\(200007/08\)3:4<185::AID-JOS42>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1099-1425(200007/08)3:4<185::AID-JOS42>3.0.CO;2-G)
- [84] P. Appelqvist, J. Lehtonen, "Combining optimisation and simulation for steel production scheduling," *Jnl of Manu Tech Mngmnt*, 16(2), pp. 197-210, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1108/17410380510576831>
- [85] G. Y. Xiong, H. Petri, "Supply Chain Inventory Control in Iron & Steel Industry: A Case Study," In *Granular Computing, 2005 IEEE International Conference on IEEE*, pp. 314-317, 2005. 10.1109/GRC.2005.1547293.
- [86] S. H. Melouk, N. K. Freeman, D. Miller, M. Dunning, "Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing," *Int J Prod Econ*, 141(1), pp. 269-276, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.08.001>
- [87] B. Denton, D. Gupta, "Strategic inventory deployment in the steel industry," *IIE Transactions*, 36(11), pp. 1083-1097, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/07408170490500663>
- [88] V. Kumar, S. Kumar, M. K. Tiwari, F. Chan, "Stochastic make-to-stock inventory deployment problem: an endosymbiotic psychoclonal algorithm based approach," *Int J Prod Res*, 44(11), pp. 2245-2263, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540500459678>
- [89] X. Liu, J. Xu, "Research on the Purchasing Portfolio Approach for Steel Industry," *2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 4911-4916, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2008.4593721>
- [90] P. Kraljic, "Purchasing must become supply management," *Harv Bus Rev*, 61(5), pp. 109-117, 1983.
- [91] C. J. Gelderman, A. J. Weele, "Strategic direction through purchasing portfolio management: a case study," *Journal of Supply Chain Management*, 38(1), pp. 30-37, 2002.  
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00127.x>
- [92] K. Feng, H. Wang, A. Xu, D. He, "Endpoint temperature prediction of molten steel in RH using improved case-based reasoning," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(12), pp. 1148-1154, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0848-7>
- [93] I. Ahmad, M. Kano, S. Hashers, H. Kitada, N. Murata, "Gray-box modeling for prediction and control of molten steel temperature in tundish," *J Process Control*, 24(4), pp. 375-382, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.01.018>
- [94] J. H. Kim, N. K. Oh, J. W. Park, "Temperature Prediction System for Steel Making Processes using Fuzzy Regression Model," *Proceedings of The Korean Operations Research and Management Science Society (KORMS)*, pp. 181-185, 2002.
- [95] F. J. Vasko, D. D. Newhart, K. L. Stott Jr, "A hierarchical approach for one-dimensional cutting stock problems in the steel industry that maximizes yield and minimizes overgrading," *Eur J Oper Res*, 114(1), pp. 72-82, 1999.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00035-6)
- [96] S. Dash, J. Kalaganam, C. Reddy, S. H. Song, "Production design for plate products in the steel industry," *IBM Journal of Research and Development*, 51(3.4), pp. 345-362, 2007. 10.1147/rd.513.0345.
- [97] J. Wy, B. Kim, "Two-staged guillotine cut, two-dimensional bin packing optimization with flexible bin size for steel mother plate design," *Int J Prod Res*, 48(22), pp. 6799-6820, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540903317523>
- [98] K. H. Lee, S. Y. Min, J. H. Lee, "Development of robotic system based on RFID scanning for efficient inventory management of thick plates," *J of the Korean Academia-Industrial Cooperation Soc.*, 17(10), pp. 1-8, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.1>
- [99] K. A. Singh, M. K. Tiwari, "Modelling the slab stack shuffling problem in developing steel rolling schedules and its solution using improved Parallel Genetic Algorithms," *Int J Prod Econ*, 91(2), pp. 135-147, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.07.005>
- [100] L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang, "Modelling and a genetic algorithm solution for the slab stack shuffling problem when implementing steel rolling schedules," *Int J Prod Res*, 40(7), pp. 1583-1595, 2002.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540110110118424>
- [101] L. Tang, R. Zhao, J. Liu, "Models and algorithms for shuffling problems in steel plants," *Naval Research*

*Logistics (NRL)*, 59(7), pp. 502-524, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/nav.21503>

- [102] G. Zäpfel, M. Wasner, "Warehouse sequencing in the steel supply chain as a generalized job shop model," *Int J Prod Econ*, 104(2), pp. 482-501, 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.10.005>

성 덕 현(Deokhyun Seong)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 산업공학과 (석사)
- 1993년 2월 : 포항공과대학교 산업공학과 (박사)
- 1985년 10월 ~ 1994년 9월 : 포스코경영연구소 책임연구원
- 1995년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 경영학부 교수

<관심분야>

공급사슬관리, 생산관리, 철강물류, 다변량분석