

철강 공정의 일정계획을 위한 혼합정수계획 모델

Mixed-Integer Programming Model for Scheduling of Steelmaking Processes

복진광, 이동엽, 박선원
(Jin-Kwang Bok, Dong-Yup Lee and Sunwon Park)

Abstract · This paper presents a short-term scheduling algorithm for the operation of steelmaking processes. The scope of the problem covers refining of the hot iron transferred from a blast furnace, ladle treatment, continuous casting, hot-rolling, and coiling for the final products that should satisfy the given demand. The processing time at each unit depends on how much the batch amount is treated, and the dedicated intermediate storage with finite capacity between the units is considered. Resource constraints and initial amount of each state are incorporated into the presented scheduling model for the algorithm of on-line scheduling. We propose a mixed integer linear programming (MILP) model with two objectives for the scheduling. The first is to maximize the total profit while satisfying the due date constraint for each product. And the second is to minimize the total processing time, makespan, while satisfying the demand for each product. Especially, we observe the effect of penalizing the intermediate storage and the inventory level of the final product on the scheduling results.

Keywords : steelmaking, scheduling, mixed-integer programming

II. 서론

최근 이십여 년 넘게 철강산업은 폭발적으로 성장하는 전세계 경제시장의 주요 산업으로 여겨져 왔다. 한때 미국에 의해 좌지우지되었던 철강산업은 현재 후진국 및 개발도상국으로 전환되고 있고 미국 철강 회사들은 재생 물성을 가진 철강에 관심을 가지며 한국, 일본, 독일 등과 번창하는 시장을 공유하고 있다. 수많은 새로운 제조 및 건설 재료의 혁명이 일어나는 동안 철강은 여전히 자동차, 선박 그리고 배선의 주요 성분으로서의 그 중요성을 유지하고 있고, 새로운 합금의 출현으로 음식포장에서 전구의 필라민트에 이르는 다양한 형태의 새로운 물성의 적용이 가능하게 되었다. 건설 산업으로써 철강은 상업적 건물, 다리 그리고 산업시설의 재료로서 오랫동안 선택되어져 왔고 최근에는 주택 건설에 비용이 덜 들고 유연한 재료로 각광을 받아왔다. 다른 상품에 비해서 철강의 이점은 최소한의 비용으로 원료로부터 시장성이 높은 형태로 전환할 수 있다는 점이다. flat-rolled sheet와 같은 반제품의 경우 톤당 가격이 약 \$340 이다. 1995년에만 철광석의 전세계 생산량이 7억 3천만 톤이 넘고 한국의 경우 포항제철과 다른 회사들에 의해 1996년에 4천만 톤 가량의 철광석을 생산했다(Lee et al., 1996; Hong and Seong, 1998).

철강공정에서의 일정계획 문제는 여러 가지 산업의 일정계획 문제 중에 가장 어려운 것 중의 하나로 알려져

있는데, 그 이유는 다음과 같은 공정의 특성에 기인한다. 철강생산의 주요과정은 주조한 원료 혼합물로부터 시작하여 후속공정에서 다양한 제품을 만드는데 사용되는 재료를 저장하는 데에서 끝이 난다. 철강공정은 다른 공정에 비해 보기 드문 제조 환경을 가진다. 우선 주조된 금속을 다루는 초기 공정은 연속 공정이고 각각의 다양한 크기와 형태의 철강제품을 다루는 마지막 단계는 불연속 공정으로 이루어진다. 이러한 공정 특성으로 주요 철강제조공정의 일정계획이 어렵고 standard packaged solution의 사용을 불가능하게 만든다. 이러한 어려운 점에도 불구하고 문제를 다루야 하는 필연적인 이유가 있는데, 그 중 하나는 향상된 철강 생산성을 위해 개발하는 소프트웨어의 ROI(Return On Investment, 투자회수)가 아주 높다는 점이다. 철강공정에서의 일정계획 문제는 운전비를 최소화시키면서 고객의 납기일에 맞추어 정련된 철강을 생산, 배달하는 것으로 정의할 수 있다. 컴퓨터를 이용한 이에 대한 연구는 포괄적으로 이루어져 왔는데 크게 분류해보면 OR(Operation Research) 기법(Lally et al, 1987, Jain and Grossmann, 1998), 인공지능 기법(Masayuki and Morishita, 1991)으로 거론할 수 있다.

본 논문에서는 어떻게 복잡한 주요 철강생산공정의 최적화를 계산할 것인가를 생산 효율의 특정한 면에서 다룬다. 우선 철강 산업에서의 제조 공정의 특성을 알아보고, 일정계획을 수립하는 데에 발생할 수 있는 여러 가지 문제점들에 대하여 소개하고자 한다. 또한 기존에 발표된 여러 가지의 일정계획법들을 간단히 소개하며, 이를 바탕으로 수학적 접근 방법의 하나인 혼합정수계획(mixed integer linear programming) 모델을 제안

접수일자 : 1999. 1. 16., 수정완료 : 1999. 7. 10

복진광, 이동엽, 박선원 : 한국과학기술원 화학공학과

※ 본 논문은 한국과학재단 지정 우수연구센터인 공정산업의지능 자동화 연구센터 지원 및 포항공대의 지능자동화 연구센터를 통한 과학재단의 부분적인 재정지원에 의해 연구하였습니다

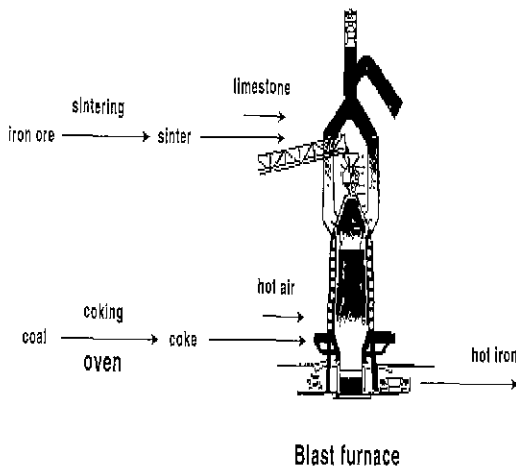


그림 1 Ironmaking 공정에 대한 개략도.
Fig. 1. Schematic diagram for ironmaking process.

할 것이다. Primary steelmaking 공정에 대해 만들어진 예제에 적용하여 나온 결과를 통해, 고려할 수 있는 여러 가지 공정 특성들에 대하여 논의하고자 한다. 일반적으로 수학적 모델식의 개발은 그 공정의 특성을 쉽게 파악할 수 있도록 해주며, 또한 주어진 목적함수를 최적화하기 위한 새로운 체계적인 알고리즘의 개발에 많은 기여를 할 수 있다.

II. 철강공정의 개요

대부분의 일관제철소에서 나타나는 전체 철강생산공정은 크게 3가지로 나눌 수 있다. ironmaking(제선), primary steelmaking, 그리고 finishing 이다. 앞으로 생산일정계획을 논의하기 위한 배경으로 primary steelmaking을 중심으로 이 3가지 단계에 대해 간단히 살펴볼 것이다. Primary steelmaking은 일정계획 관점에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있다(Lee et al., 1996; Lopez et al., 1998).

1. 철강공정의 3단계

1.1 Ironmaking

Ironmaking은 철강원료로부터 hot iron 또는 선철로 알려진 중간제품을 만드는 단계이다. 그림 1은 ironmaking 공정을 대략적으로 설명하는 그림이다. 원료는 이 공정의 준비단계에서 미리 준비되어져 있다. 철광석은 소결기(sinter)로 진행하여 좀더 일정한 규격과 밀도를 가지게 된다. Ironmaking의 또 다른 원료인 석탄은 높은 연소효율을 가지는 제품인 코크스를 생산하기 위해 오븐에서 구워지게 된다(건류). 소결광과 코크스는 큰 원주형의 용기인 고로(Blast furnace)에서 환원반응을 얻기 위해 석회석과 결합한다. 뜨거운 공기와 코크스는 고로의 아래 부분에서 넣어지고 석회석과 철광석(ore pellets)은 위쪽부분에서 들어가게 된다. 이 때 용기의 온도는 아래쪽에서는 약 1400℃ 위쪽에서 약 250℃를 형성하게

된다. 이러한 고로에서의 온도차이 때문에 여러 가지 작용들이 일어나게 된다. 철광석은 코크스의 탄소와 연소하여 점차로 용해되어 줄어든다. 주조된 석회석은 액체 슬래그를 형성하여 코크스 재와 주조된 금속으로부터 나온 다른 불순물들을 운반하게 된다. 고로 바닥에서 슬래그는 처리를 위해 잡아늘여지고 선철은 primary steelmaking으로 이동하기 위해 잡아늘여진다. 연속적으로 물질들이 도입되고 정기적으로 제품이 나오면서 고로는 끊임없이 운전되어진다. 고로의 조업정지는 rebuild를 필요로 하기 때문에 이것이 이러한 운전조건이 필수적이다. (고로를 복구하고 내화성의 내벽을 교체하는데 7천만에서 1억 달러가 들며 기간도 1년이나 소요된다.) 이러한 이유로 고로에서 생산되는 뜨거운 철은 연속적인 공급으로 정의된 생산계획단계의 관점으로 보아야 한다. 그리고 이러한 연속적인 공급의 소비는 다음 단계인 primary steelmaking의 생산계획과 일정계획의 중요한 제한조건으로 작용한다.

1.2 Primary steelmaking

Primary steelmaking 단계는 고로에서 나오는 뜨거운 철의 도입에서 그것을 다양한 등급(specific metallurgical compositions of steel), 모양, 그리고 치수의 반제품으로 전환시키는 단계이다. 그림 2는 primary steelmaking 공정의 대략적인 과정을 나타낸다. 선철은 단열

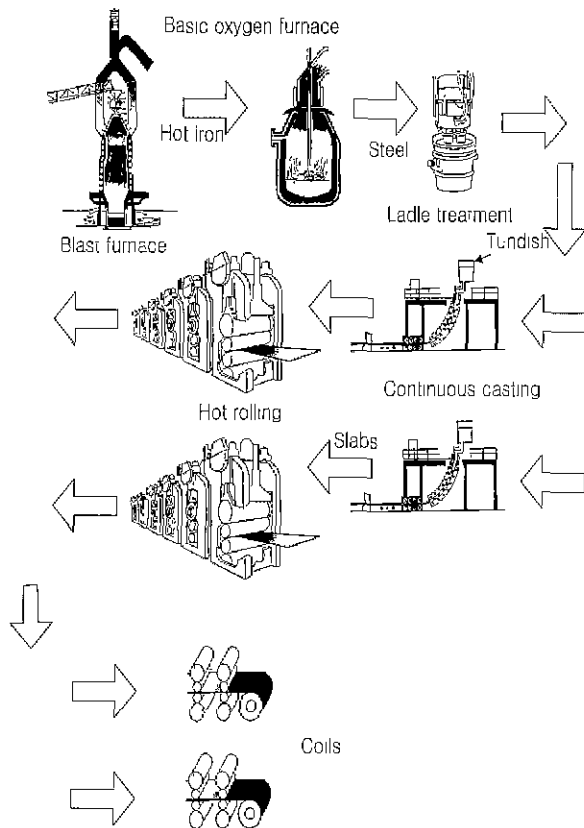


그림 2. Primary steelmaking 공정의 설명도.
Fig. 2. Scheme for primary steelmaking process.

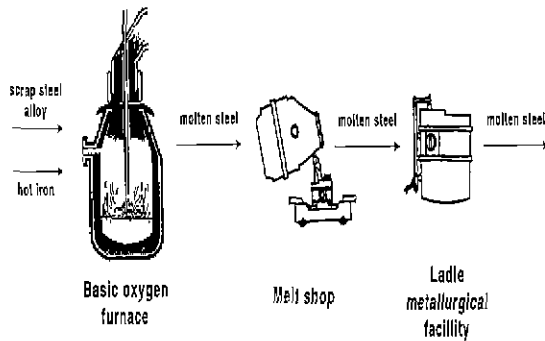


그림 3. Hot iron에서 Molten steel이 만들어지기까지의 과정.

Fig. 3. Process for making the molten steel from hot iron.

된 용기에 도착한다. 때때로 레일을 통하기도 한다. 이 단계에서 철의 야금학적 조성은 당연히 제조업자사에서 일정하도록 정해져 있다. Primary steelmaking 공정의 시작단계에서 선철은 고철과 결합하고 전로(basic oxygen furnace)와 같은 제련용광로(refining furnace)에서 좀더 달구어 진다. 철유분과 합금성분의 선택적인 첨가, 그리고 melt의 탄소성분을 조절하기 위해 열을 가하는 것을 통해서 변형과 정련의 과정이 이루어진다. 이것은 야금학적으로 매우 다양하며 때때로 백 여가지 등급의 철강들을 생산하기 위한 것이다. 원하는 조성이 얻어졌을 때 각 용광로의 철강 부하물들은 고체 형태로 버려지게 되고 고체 형태를 유지하기 위해 냉각되어진다. 이러한 관점에서 고체 제품의 조성은 정의된 등급에 맞게 형성되어 진다. 하지만 모양은 여러 모양 가운데 하나이다. 일반적인 주조모양은 slabs, billets, 그리고 blooms이다. 적당한 주형 모양의 선택은 원하는 모양의 완제품이나 반제품을 얻기 위해 필요한 추가적인 가공을 용이하게 한다. 예를 들어 flat-rolled sheet steel은 slabs로부터 얻어지고, 반면에 대부분의 구조적 형태들은 billets나 blooms로부터 압연기에서 만들어진다. 주형에서 만들어진 모양들은 높은 온도에서 압연된다. primary steelmaking의 생산품들은 고객들에게 운반되어 고객에 의해 또 다른 과정을 거치거나 통합된 steelmaking 공정의 3번째 단계인 finishing 작업으로 바로 연결된다.

1.3 Finishing

Finishing 작업은 primary steelmaking 공정의 반제품들을 선택적으로 적용할 수 있는 수많은 조작들로 구성되어 있다. 이것들은 고객이 원하는 최종적인 치수, 표면 마무리, 기계적 물성, 그리고 코팅을 얻기 위한 작업들이다. 냉압연(cold-rolling)은 대기에서 시트나 모양을 압연하는 것으로 정확한 치수로 제품을 만들고 더 좋은 표면 처리를 하거나 기계적 물성을 수정하기 위해서 행해진다. 단련(鍛鍊, annealing)은 물질의 grain size를 향상시키고 연성에 영향을 준다. 불림(tempering)은 내부 응력을 감소시키고 연성을 좋게 한다. Pickling이라고 알려진 공정은 강철의 표면을 깨끗하게 하기 위해 수행된다. 부

식방지를 위해 아연도금과 같은 코팅을 한다. 확실히 finishing 단계에서는 수많은 선택이 존재한다. 그러나 일정계획 관점으로 볼 때는 전체 finishing 작업 중에 어떤 부분에 대해서만 필요성이 있다. 예를 들어 코팅 조작에 있어서는 연속적인 pickling 공정과 일련의 작용에 속하는 후속적인 코팅 공정이 행해지는 것이 바람직하다. 그러나 많은 finishing 작업은 작업간의 시간적 여유를 들 수 있다. 작업들이 연결될 때 합쳐진 제한조건들은 primary steelmaking 작업 때문에 일어나는 합쳐진 제한조건들보다 덜 복잡하다. 왜냐하면 상태의 변화들이 포함되어 있지 않고 다양한 finishing 장치들에 대한 batch들의 크기들이 상당히 일관되기 때문이다. 결론적으로 general-purpose discrete manufacturing-scheduling 방법들은 finishing 작업의 일정계획에서 상당한 성공을 거두어 왔다. 반면에 유사한 방법들이 primary 작업에서는 그렇지 못하다.

2. Scheduling issues in primary steel production

일정계획의 1차적인 의무는 더 높은 단계의 계획(a higher-level plan)을 세부적인 운전 순서들(detailed operating sequences)로 전환시키는 것이다. 전형적으로 일정계획은 각 제조 단위나 공장 안에서 밀접하게 연관된 그룹들에 대해 자동적으로 수행되어 진다. 일정계획은 1주일이나 그 미만을 주기로 이루어진다. Primary steelmaking 단계의 일정계획은 다음의 문제들과 관계가 있다.

제조장치들의 이용 : 앞부분에서 지적했듯이 철강공정의 시설들은 매우 비싸다. (특히 연속주형과 hot strip mill) 따라서 일정계획의 목적중에 하나는 이러한 장치들을 잘 이용할 수 있도록 일정계획을 만들어내는 것이다.

병렬적인 제조장치사이의 생산의 할당 : 이것은 철강제조부분에서 두 개 혹은 더 많은 연속주형들과 같이 기능적으로 유사한 장치들 사이에 어떻게 표준 작업량을 부과해야 하느냐를 결정하는 문제이다. 표준작업량의 균형을 맞추고, 품질과 야금학적인 요구를 만족시키고, 주문 기한을 맞추고 효과적으로 가공장치들을 이용하며, 사용자의 취향을 만족시키는 고려가 포함된다. 많은 경우에 있어서 할당은 높은 수준의 공장 주문 가공시스템에 의해 미리 결정될 수도 있다.

열(heats)과 열그룹(heat groups)의 사양 : 정확한 heat를 결정해야하는 과정에서는 정확한 야금학적 물성과 heat에 대한 정당한 용량을 가진 충분한 수의 계획된 생산 순서들을 그룹화 시켜야 한다. 때때로 하나의 heat 대신에 그룹의 heats가 정해지게 되는데 이러한 경우에 그룹내의 heats는 동일한 야금학적 물성을 가질 필요는 없다. 그러나 이러한 물성들은 연속 주조의 필요성 때문에 모순이 없어야 한다.

압연 그룹(rounds)의 사양 : 압연공작기계에 대해 slabs, blooms, 또는 billets는 롤의 변화와 setup 사이의 효과적인 가공을 위해 rounds 또는 압연그룹이라고 불리는 충분히 큰 batch들로 그룹화 되어야 한다. 다양한 너비의 슬래브가 다양한 두께들로 압연되어지는 flat-rolled

material 의 경우 그룹내의 슬래브들의 순서가 이러한 작업의 부분으로써 특정화된다.

제조장치들에 대한 heats/rolling groups의 순서 정하기 : 전로와 연주기의 경우에 강철의 heats가 장치들을 통해서 진행되는 순서들을 결정해야만 한다. 압연공작기계의 경우 압연그룹은 시설유지 일정계획과 다른 운전상의 제한조건들이 만족되기 위해서 전체 일정계획 기간에 대한 순서가 정해져야 한다.

생산단계들 사이의 일정계획의 조정 : 상류흐름의 장치와 하류흐름의 장치간의 생산과 소비속도간의 균형이 여기에서 고려된다. 예로써 주형이 효과적으로 운전되도록 유지하는 적당한 시간에 적당한 등급의 뜨거운 금속이 제공되도록 BOFs와 연주기에 대한 일정계획들이 조정되어야 한다. 게다가 주조와 압연 운전사이의 빈틈없는 연결이 요구된다면 주형과 hot mills에 있는 slab 순서는 빈틈없이 조정되어야만 한다.

재일정계획(Rescheduling) : 생산중단이 발생하거나 실제 생산이 계획된 생산일정과 많이 벗어날 경우 재일정계획이 필요하다. 이러한 경우들은 다음과 같은 이유로 발생할 수 있다.

- 제조장치의 down
- 운전 중에 과잉부족이 일어날 때
- 새롭고 우선적인 주문이 도입될 때
- 주문이 취소될 때

중단과 편차의 엄격성에 의존한 적당한 대답은 전체 일정계획을 다시 생각하는 것이다. 재일정계획이 요구될 때 범위와 정도의 결정이 중요한 문제이다. 최선의 방법은 할당된 제조 장치로부터 사용 가능한 용량을 가지고 기능적으로 유사한 다른 장치로 전환시키는 것이다.

1차 생산부분의 환경은 제조장치의 용량, 운전 방법과 목적, 그리고 물리적 공장배치의 차이 때문에 철강 공장마다 매우 다를 수 있다. 예를 들어 flat-rolled products를 생산하는 공장들 사이에 주형은 하나 또는 다수의 strands를 가질 수 있고 너비가 조절되거나 고정된 주형을 가질 수 있다. 게다가 공장은 하나 또는 다음의 모드의 결합으로 운전된다.

· Cold-charge : 여기에서 연주기와 rolling mill은 완전히 분리되어 있다. flat-rolled steel의 경우에 슬래브들은 그것들이 주조된 후에 slab yard에서 대기 온도로 냉각된다. 나중에 슬래브들은 hot strip mill로 들어가기 앞서 재가열 용광로(reheat furnace)에서 압연 온도로 가열된다.

· Hot-charge : 여기에서 슬래브들을 압연하기 전에 단열된 방(chamber)에서 제한된 시간(8에서 16시간)동안 불집아 놓는다. 이 모드의 운전으로 압연되기 전에 요구되는 재가열량을 감소시킨다. 그러한 경우 연주기는 hot strip mill에 느슨하게 연결되어 있다.

· Direct-hot-charge : 여기에서 연주기로부터 나온 슬래브는 hot strip mill에서 압연되는 것에 대해 같은 순서를 유지한다. 이 모드의 운전은 연주기와 hot strip mill 사이의 빈틈없는 연결을 요구한다.

게다가 어떤 철강 공장은 재가열 용광로를 가진 단일 hot strip mill에 공급하는 주형을 하나 이상 가지고 있다. 이것은 혼합된 압연 모드(mixed-rolling mode)에서 운전하는 가능성을 말하는 것이다. 즉 cold-charge 슬래브들은 hot strip mill에 있는 같은 압연 그룹에서 direct-hot-charge나 hot-charge 슬래브들과 혼합될 수 있다. 이것은 재가열 용광로를 가진 hot strip mill의 유연성을 증가시키기 위함이다.

이러한 보기를 들어 설명할 때 매우 다양한 환경이 primary steelmaking부분에서 존재할 수 있다. 각 경우 다음과 같이 특별한 문제들을 설명하는 서로 다른 형태의 일정계획을 요구한다.

slab casting에서 뜨거운 금속의 소비는 직접적으로 cast 되는 슬래브의 두께에 비례한다. 다수의 연주기가 존재하는 상황에서는 결합된 슬래브 두께 순서들이 뜨거운 금속에 대한 요구로 더 큰 편차를 나타낼 수 있다. 이것은 잠재적으로 뜨거운 금속 재고에 심한 변동을 초래한다.

주조 조작성에 대한 생산 순서들을 그룹화시킬 때 정련용 광로에 의해 제공되는 열량의 크기뿐만 아니라 주조 기계의 너비-편차 제한조건들도 고려해야 한다. 다수의 strands와 너비가 조절되는 주형을 가진 연주기에 대해서 이러한 문제가 특히 어렵게 된다.

이미 기술했듯이 연주기와 hot strip mill사이의 다른 정도의 연결은 순서를 정할 때 심각한 영향을 초래할 수 있다. 장치들 사이에서 존재하는 연결이 hot-charge와 direct-hot-charge 모드로 운전될 때 다음의 모순점들이 일정계획 논리에서 적당히 설명되어야 한다.

· 슬래브 caster는 주조되는 순서에 있어 너비 변화의 수를 최소화 시켜야 한다. 그러나 hot strip mill은 슬래브를 압연하는데 있어 width profile (너비 변화를 고려한 사양들)을 따라야 한다. hot strip mill은 여러 개의 표준 rolling profile들 (standard rolling profiles)을 가진다. 순서들은 압연시키는데 대해 그룹화 되어야 하는데 이것은 그러한 순서들에 있는 슬래브들이 표준 profiles 중의 하나와 맞게 하기 위해서이다. 슬래브의 너비와 치수의 변화, 그리고 다른 특성들의 관점에서 각 profile은 일정한 제한조건을 가진다.

· 주형은 가능한 한 오래 동안 같거나 서로 양립할 수 있는 등급들을 주조해야 한다. 그러나 등급들이 유사한 정도를 가진다면 압연 공장기계의 경우 단일 rolling profile에서 다수의 등급들을 인정할 수 있다.

· 치수는 주조 조작성에 무관하지만 압연 순서를 만드는데 중요한 고려사항이 된다.

· 알맞은 수준의 뜨거운 금속 소비속도를 유지하기 위해 A double-strand slab caster는 하나의 strand에 대해 넓은 너비에서 좁은 너비로 주조하고 다른 하나에 대해 좁은 데서 넓은 너비로 주조해야 한다. 그러나 hot strip mill은 너비들이 생산 주기에 따라 감소하는 profile을 가져야 한다.

tundish와 롤의 실용적인 수명이 고려되어야 되는데 이

것은 가능한 한 완전한 정도로 이것들이 이용될 수 있도록 보장하기 위해서이다.

확실히 주형과 압연공장기제는 과정 중에 함께 그룹 지을 수 있는 형태의 항목들에 대해서 그리고 이러한 그룹들 내에 개별적인 항목의 생산순서에 대해서 중요한 제한 조건들을 부과한다. 너비가 변화되는 문제 때문에 이러한 제한조건들은 슬래브 주조와 압연의 경우에 대부분 선언된다. blooms나 billets의 1차 생산에 있어 일정계획 문제들은 유사하지만 다소 덜 복잡하다. blooms와 billet casters는 전형적으로 다수의 strands를 가지는 반면에 각 strand는 같은 크기의 고정된 주형을 가진다. 게다가 bloom과 billet을 보유한 대부분의 철강 회사들은 cold-charge mode에서 운전한다. 반면에 flat-rolled steel를 만드는 대부분의 생산자들은 운전되는 hot-charge mode를 최대화시키는데 초점을 맞춘다. 에너지의 경제적 사용이 중요한 현안인 시점에서 direct hot-charging으로 향하는 경향을 보인다.

1차 단계에서의 스케줄러는 또한 제시간에 finishing 지역에 물질을 배달하고 caster와 hot strip mill 사이의 반완전생산품의 제고를 최소화하며 caster와 hot strip mill의 사용과 tundish의 사용을 최대화하는 것을 포함하는 여러 가지 목적들을 다루어야 한다. 이러한 목적들을 전부 만족시킬 수는 없기 때문에 스케줄러는 요구되는 모든 제한조건을 만족시키며 목적들을 만족시키는 최적의 해를 찾아야 한다.

III. 일정계획을 위한 수학적 모델

본 절에서는 철강공정 중 primary steel을 만드는 공정에 대한 일정계획 알고리즘을 제안한다. 우선 대상으로 하는 범위는 그림 2에서와 같이 용광로에서 녹여진 상태의 철을 산소로(oxygen furnace)를 통해 제련을 하고, ladle treatment에서 각종 합금 성분과 화학물질을 첨가 한 후, 연속 주조공정 거쳐 압연 작업과 coiling 작업으로 주문 생산량을 만족시키는 문제로 정의한다. 본 모델에서는 혼합정수계획을 이용한 수학적 방법으로 그 해를 제시하고자 한다. 화학공정에서 회분식 공정의 일정계획에 대해서는 많은 연구결과가 발표되어오고 있다. 특히, 시간표현법에 대한 연구결과가 큰 주류를 형성하고 있는데, 근래에는 연속시간표현법(continuous time representation)을 이용한 연구가 활발하다. 이산시간표현법(그림 4)이 사건(event)들이 가지는 시간단위의 최대공약수 크기로 전체 시간을 나누어야 하는 반면, 연속시간표현법은 시작과 끝을 나타내는 time slot의 불필요한 grid를 없애고자 하는 알고리즘이다.

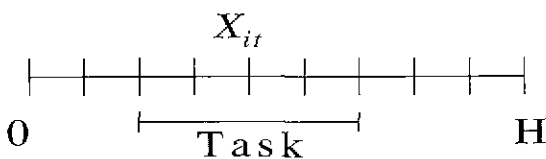


그림 4. 이산시간 표현법.
Fig. 4. Discrete time representation.

각각의 grid에서 사건이 발생여부를 결정해야하는 0-1변수가 필요하고 많은 계산시간을 요구하게 된다. 따라서 연속시간표현을 이용한 알고리즘이 더욱 효과적이라고 할 수 있다. 연속시간표현법을 이용한 일정계획 알고리즘에 대해서는 Pinto and Grossmann(1995), Bok and Park(1998a, 1999a, 1999b), Ierapetritou and Floudas (1998a, 1998b) 등이 발표하였다. Pinto and Grossmann (1995)은 다단 다품종 회분식 공정(multiple stage multiproduct batch process)에 대하여 Bok and Park (1998a)은 다단 다목적 회분식 공정(multiple stage multipurpose batch process)에 대한 연속시간표현법에 대한 연구를 발표하였다. 특히 Bok and Park(1999a, 1999b)은 연속시간표현법을 이용해 실제 공정의 적용도를 높이기 위해 순서의존 준비시간(sequence dependent changeovers)을 고려하였다. Ierapetritou and Floudas (1998a, 1998b)는 state-task network에 기반을 둔 연속시간표현법을 발표하였다. 장점은 중간저장과 원료물질에 대한 제약조건을 고려할 수 있다는 점이다. 특히 Ierapetritou and Floudas(1998b)는 연속공정에 대해서는 적용함으로써 그 효용성을 보였다. 수학적 모델을 이용한 철강공정의 일정계획에 대한 연구는 Lally et al.(1987), Jain and Grossmann(1998)에 의해 시도되었지만 전체 공정을 다루기보다는 특정 장치 내에서 일정계획 모델에 관한 것이었다.

본 논문에서는 Ierapetritou and Floudas(1998a)에서 제시한 알고리즘을 이용해 철강공정의 일정계획에 적용하고자 한다. 우선 다루고자 하는 공정의 state-task network를 그림 5에 나타내었다. 각 공정장치는 장치들

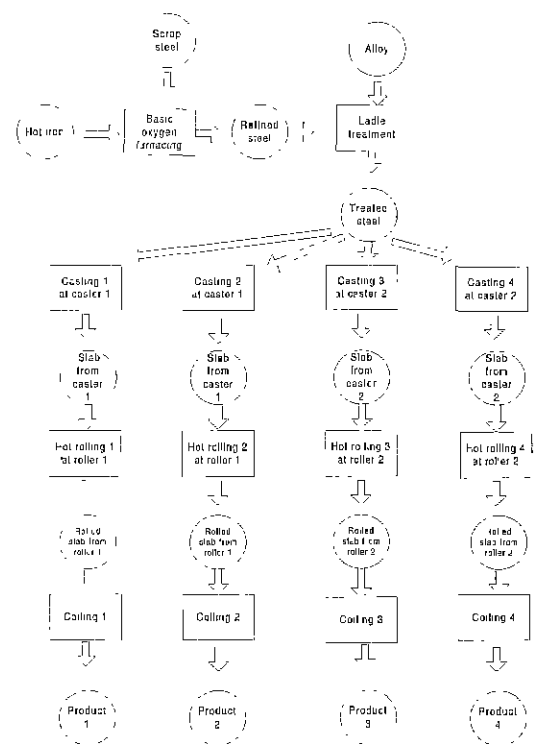


그림 5. 예제에 대한 State-task network.
Fig. 5. State-task network for example

이 수행하는 조업(task)을, 원은 조업을 수행하기 전에 준비된 또는 수행한 후의 상태(state)를 나타낸다. 가령 산소로에서의 furnace 작업은 hot iron 상태의 철과 철 유분(scrap steel)을 가지고 이루어지며, 결과로는 re-fined steel을 만들게 된다. 동일한 장치가 이용되더라도 다른 state를 받아들이거나 만들어내는 조업은 다른 task로 표현하였다.

제조공정의 일정계획에서 주로 고려되는 목적식은 납기일을 만족하면서 최대 이윤을 낼 수 있도록 하는 것으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Maximize PROFIT} \quad (1)$$

생산이윤 PROFIT는 최종생산물의 생산량과 해당되는 판매가격의 곱의 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\text{PROFIT} = \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \lambda_s Q_{sn} \quad (2)$$

만약 재고비용을 고려해 재고량에 벌칙을 가한다면 다음과 같이 변경될 수 있다.

$$\text{PROFIT} = \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \lambda_s Q_{sn} - \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \mu_s ST_{sn} \quad (2')$$

각 생산량은 (3)과 같이 기본 구매 요구량을 만족해야 한다.

$$\sum_{n \in N} Q_{sn} \geq R_s \quad \forall s \in S \quad (3)$$

최종생산물은 다음의 물질수지식을 통해 구할 수 있다.

$$ST_{sn} = ST_{s, n-1} - Q_{sn} + \sum_{i \in I} \rho_{si}^b \sum_{j \in J_i} B_{i,j, n-1} \quad (4)$$

$$(\forall s \in S_F, n \in N) \wedge (n \geq 2)$$

Event slot n에서 생기는 state s의 양은 그 전 slot n-1에서 생기는 양에 만들어지는 회분량을 더하고 최종생산물로 나간 양을 제하면 된다. 중간 state의 양들은 비슷하게 다음과 같이 표현된다.

$$ST_{sn} = ST_{s, n-1} + \sum_{i \in I} \rho_{si}^b \sum_{j \in J_i} B_{i,j, n-1} + \sum_{i \in I} \rho_{si}^c \sum_{j \in J_i} B_{i,j, n} \quad (5)$$

$$(\forall s \in (S - S_F), n \in N) \wedge (n \geq 2)$$

여기서는 전 slot에서 생성되는 회분량 이외에 현재 slot에서 조업을 위해 필요한 양을 고려해야 한다.

첫번째 slot에서의 state s의 양은 초기 원료의 양에 의해 제한된다.

$$ST_{sn} \leq SIN_s \quad \forall s \in S, \|n\| = 1 \quad (6)$$

여기서 $\|\cdot\|$ 은 cardinality를 나타낸다.

회분량은 다음과 같은 제한크기를 갖는다.

$$B_j^{\min} W_m \leq B_m \leq B_j^{\max} W_m \quad \forall i \in I, j \in J_i, n \in N \quad (7)$$

주의 깊게 봐야할 점은 task가 slot에 대응되었을 때 ($W_m = 1$)만 회분량이 정의된다는 점이다. 이는 0-1변수를 사용하여 표현할 수 있었다.

또한 각 slot에 대해 각 장치에는 모든 task 중에 하나만 을 수행할 수 있다. 이는 (8)식과 같이 표현된다.

$$\sum_{m \in M} W_m = Y_{jn} \quad \forall j \in J, n \in N \quad (8)$$

여기서 Y_{jn} 가 장치 j가 slot n에 대응될 때 1, 나머지 경우는 0을 갖는다고 해서 반드시 0-1변수로 선언할 필요는 없다. W_m 이 0-1변수이므로 Y_{jn} 은 $[0, 1]$ 의 범위를 갖는 연속변수로 선언해도 무방하다. 또한 변수의 수를 줄이고자 할 때는 (8)식을 이용하여 Y_{jn} 변수를 모두 치환함으로써 그 수를 줄일 수 있다. 각 task에 대한 시작시간과 종결시간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TE_{im} = TS_{jm} + \alpha_j B_{jm} \quad \forall i \in I, j \in J_i, n \in N \quad (9)$$

Task i의 장치 j에서의 종결시간은 시작시간에 단위 부피당의 처리시간과 회분량의 곱을 합한 것으로 나타낼 수 있다

Event slot은 각 사건들의 순서를 나타내는데 유용하다 모든 사건은 slot을 기준으로 그 시간적 관계를 알 수 있다. 장치와 task를 막론하고 그 slot의 크기가 큰 경우는 작은 경우보다 항상 시간적으로 뒤에 일어나게 된다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$TS_{i'j'n} \geq TE_{im} - U(2 - W_m - Y_{jn}) \quad (10)$$

$$(\forall i, i' \in I, j \in J_i, j' \in J_{i'}, n, n' \in N) \wedge (\|n\| < \|n'\|)$$

Task i가 slot n에서 장치 j에서 이루어 졌다면, 그 이후 slot인 n'에서의 작업의 시작시간은 n에서의 종결시간보다 항상 크거나 같아야 한다는 것을 나타내고 있다. 여기서 U의 값은 가능하면 작은 값으로 tight하게 식을 만들어주어야 계산하게 되는 정수계획문제의 node수를 줄일 수 있다. 주형과 압연사이 direct-hot-charge의 경우는 zero-wait가 이루어져야 하므로 해당 task에 대해 (10)을 등식으로 바꾸어 표현할 수 있다.

동일한 장치에서의 시작시간 역시 slot의 크기로 그 관계를 결정할 수 있다

$$TS_{i'm'} \geq \sum_{n \in N, \|n\| < \|n'\|} \sum_{i \in I} (TE_{im} - TS_{jn}) \quad (11)$$

$$\forall i \in I, j \in J_i, n \in N$$

각 생산물은 주어진 납기일을 갖게되므로 이는 다음과 같이 표현된다.

$$TE_{im} \leq D_i \quad \forall i \in I, j \in J_i, n \in N \quad (12)$$

제조공정에서 또 다른 목적함수로 이용되는 것은 주어진 주문량을 만족하면서 최종생산시간을 최소화시키는 경우이다. 그런 경우는 다음과 같이 목적함수가 바뀌어야 한다.

$$\text{Minimize MS} \quad (13)$$

최종생산시간인 MS는 모든 task 중에 종결시간이 가장 늦은 것에 해당된다.

$$MS \geq TE_{im} \quad \forall i \in I, j \in J_i, n \in N \quad (14)$$

표 5. 계산된 각 장치에서의 조업량.
Table 5. Batch amount at each unit.

	n01	n02	n03	n04	n05	n06	n07	n08	n09	n10
i01,j01	73.4	48.9	32.6	21.7	14.5					
i02,j02		73.4	48.9	32.6	21.7	14.5				
i03,j03						18.8	11.1			
i04,j03			31.1	20.7	8.9					
i05,j04			40.0	30.6						
i06,j04					23.7	6.2				
i07,j05						18.8	11.1			
i08,j05				31.1	20.7	8.9				
i09,j06				40.0	30.6					
i10,j06						22.9	0.7	6.2		
i11,j07							18.8	11.1		
i12,j07					31.1	20.7	8.9			
i13,j08					40.6	30.6				
i14,j08							22.9	0.7	6.2	

표 6. 각 state의 intermediate inventory.
Table 6. Intermediate inventory of each state.

	n01	n02	n03	n04	n05	n06	n07	n08	n09	n10
s01	117.9	68.9	36.2	14.5						
s02										
s03			2.3		2.8					
s07					0.7					
s12								18.8	30.3	
s13					31.1	51.8	60.7	60.7	60.7	
s14					40.0	70.6	70.6	70.6	70.6	
s15							22.9	23.7	30.0	

각 task가 해당 장치에서 만들어내는 회분의 양과 각 state의 양은 표 5와 6에 나타내었다.

최종생산물의 생산량은 제품 1에서 4까지 각각 {30.0, 60.7, 70.6, 30.0}으로 구해졌다. 동일한 장치를 사용하는 제품 1과 2의 경우 제품 1의 최소 판매 요구량을 만족하면서 판매가격이 높은 2에 생산량이 치중되는 것을 볼 수 있고, 제품 3과 4의 경우도 역시 상대적으로 가격이 높은 3의 생산량이 훨씬 많다는 것을 볼 수 있다. 표 7과 8은 각 중간저장 상태에 벌칙을 가한 경우의 회분량을 보여준다. 각 상태를 저장하기 위해서는 재고비용이 뒤따르므로 이는 실용적인 관점에서 살펴볼 수 있다. 표 7은 각 상태의 재고량에 0.3을 표 8은 1을 곱해서 목적 함수에서 배준 일정계획 모델의 최적화 결과이다.

표 7. 재고량의 벌칙으로 0.3을 곱한 경우.
Table 7. Penalizing the inventory by 0.3.

	n01	n02	n03	n04	n05	n06	n07	n08	n09	n10
s01	118.1	68.9	36.1	19.9						
s02				8.5						
s03			1.1							
s05							4.7			
s09						16.1			24.6	

표 8. 재고량의 벌칙으로 1을 곱한 경우.
Table 8. Penalizing the inventory by 1

	n01	n02	n03	n04	n05	n06	n07	n08	n09	n10
s01	77.4	22.4								

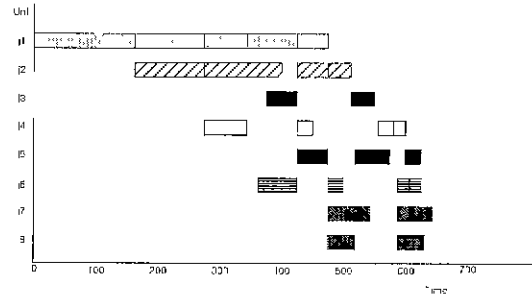


그림 7. 주문량을 만족하면서 최종 생산시간을 최소화 한 결과.

Fig 7. Scheduling results to minimize makespan satisfying demand amount.

두개의 표에서 보는 것처럼 재고비용을 고려하는 벌칙이 강화될 수록 제품의 재고량이 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다. 하지만, 제품의 생산판매 이윤 또한, 필요한 양만큼만 만들려고 하는 경향이 강해져 각각 282.3과 178.6으로 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

그림 7은 제품의 판매 요구량을 만족하면서 빠른 시간 내에 제품을 생산하도록 한 일정계획 결과이다.

V. 결론

본 연구에서는 철강공정에 대한 심도 있는 관찰을 통해 공정의 특성을 분석하였고, 거기에 따른 일정계획 문제의 중요성을 도출하였다. 철강공정은 고가의 장치산업으로 운영되면서 복잡한 제약조건들을 지니기 때문에 일정계획 문제로써 다루기가 어려운 편이었다. 이에 본 논문에서는 혼합정수계획 모델을 이용한 수학적인 접근방법으로 일정계획 해를 얻어내었다. 다른 대상 공정은 primary steel-making 부분으로써, 주어진 납기일을 만족하면서 생산이득을 최대화 하는 경우와 주문량을 만족하면서 총 생산시간을 최소화 할 수 있는 두 가지 목적 함수를 이용하여 모델을 구성하였다. 특히, 원료물질의 제약조건을 다룰 수 있고, 중간 저장능력을 고려할 수 있다는 면에서 실용적이라고 할 수 있다. 또한, 연속 시간표현법을 이용하여 모델의 효율성을 꾀하였고, 이는 예제를 통하여 보였다. 예제에서는 재고량에 벌칙을 가함으로써 각 state의 재고량이 줄어드는 것을 관찰하였다. 각 state의 초기조건을 가지고 최적화 작업을 수행할 수 있기 때문에, 공정에 이상이 발생하여 다시 일정계획이 필요한 경우에도 이를 빠르게 처리할 수 있는 재생산 계획(rescheduling) on-line 일정계획 알고리즘으로써 기여할 수 있으리라 본다.

Nomenclature

Indices

i = task

J = unit
 n = event slot
 s = state

Sets

I = set of task
 I_j = set of task that performed by unit j
 I_s = set of task that related to state s
 J = set of unit
 J_i = set of unit that performing task i
 N = set of event slot
 S = set of state
 S_F = set of final state

Parameters

B_j^{\max} = maximum volume of unit j
 B_j^{\min} = minimum volume of unit j
 H = due date
 SIN_s = initial inventory of state s
 ST_s^{\max} = maximum inventory for state s
 R_s = demand amount for state s
 α_i = processing time for unit volume for task i at unit j
 μ_s = penalty term in order to consider the inventory cost for state s
 ρ_{si}^c = proportion of state s consumed by task i
 ρ_{si}^p = proportion of state s produced by task i
 λ_s = price for state s
 U = upper bound in big-M constraints

Variables

Q_{sn} = amount of state s being delivered to the market at event point n
 B_{ijn} = batch processing amount of task i at unit j
 ST_{sn} = amount of state s at event slot n
 TE_{ijn} = end time of task i at unit j
 TS_{ijn} = start time of task i at unit j
 W_{in} = 0-1 variable that denote whether task i is assigned to slot n or not
 Y_{jn} = 0-1 variable that denote whether unit j is assigned to slot n or not

참고문헌

- [1] A. Brooke, D. Kendrick and A. Meeraus, *GAMS : Users Manual*, Scientific Press, Redwood City, CA, 1992
- [2] IBM : *OSL (Optimization Subroutine Library) Guide and reference*, release 2; Kingston, NY, 1991.
- [3] J.-K. Bok and S. Park, "Continuous-time modeling for short-term scheduling of multipurpose pipeless plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 9, pp. 3652-3659, 1998.
- [4] J.-K. Bok, S. Moon and S. Park, "Scheduling of multipurpose batch plants with sequence dependent changeovers," *Ind. Eng. Chem. Res.*, submitted.
- [5] J.-K. Bok and S. Park, "Scheduling of pipeless processes considering sequence dependent setup time and transferring time." *Hwahak Konghak*, in press.
- [6] Y. Hong and D. Seong, "Production planning and control in major industries in Korea," *Production Planning & Control*, vol. 9, no. 2, pp. 114-120, 1998.
- [7] L. Lopez, M. W. Carter and M. Gendreau, "The hot strip mill production scheduling problem : A tabu search approach," *European Journal of Operation Research* 106 pp. 317-335, 1998.
- [8] H. S. Lee, S. S. Murthy, S. W. Haider and D. V. Morse, "Primary production scheduling at steelmaking industry," *IBM. J. Res. Develop.*, vol. 40, no. 2, pp.231-252, 1996.
- [9] M. G. Ierapetritou and C. A. Floudas, "Effective continuous-time formulation for short-term scheduling. 1. Multipurpose batch processes", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 10, pp. 4341-4359, 1998.
- [10] M. G. Ierapetritou and C. A. Floudas, "Effective continuous-time formulation for short-term scheduling. 2. Continuous and semicontinuous processes," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 10, pp. 4360-4374, 1998.
- [11] V. Jain and I. E. Grossmann, "Integrated scheduling in steel plants," FOCAP0 1998, Snowbird, Utah, USA, 1998.
- [12] J. M. Pinto and I. E. Grossmann, "A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 3037-3051, 1995.
- [13] M. Numao and S. Morishita, "Cooperative scheduling and its application to steelmaking processes", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 38, no. 2, pp. 150-155, 1991. 1.



복진광

1994년 KAIST 화학공학과 졸업. 동대학원 석사(1996). 동원학원 박사(1999). 1999년-현재 MIT 화학공학과 박사후과정. 관심분야는 화학산업의 일정계획 및 생산계획.



이동엽

1998년 연세대학교 화학공학과 졸업. 1998년-현재 KAIST 화학공학과 석사과정. 관심분야는 환경을 고려한 공정합성, 일정계획 및 생산계획.



박선원

1970년 서울대학교 화학공학과 졸업. 1974년 Oklahoma State University 화학공학과 졸업(석사). 1979년 Univ. of Houston-Clear Lake(MBA). 1979년-1988년 Hoechst Celanese, System Engineer, Sr. Process Control Engineer, Staff Engineer

1988년-현재 KAIST 화학공학과 교수.