

효과적인 에너지 사용을 위한 열연공정의 생산 일정 계획

마금희, 이규황, 이인범
포항공과대학교 화학공학과

Scheduling of hot strip mill for using effectively energy

Kum-Hee Ma, Kyu-Hwang Lee, In-Beum Lee
Department of Chemical Engineering, POSTECH

서론

철강생산 공정은 크게 primary steelmaking과 finishing steelmaking으로 나누어지며, 열연 공정(hot strip mill)은 제선, 제강, 연주공정과 함께 전단계에 포함된다. 그리고 전체 공정의 병목에 해당하므로 일정계획 관점에서 볼 때 중요하다.[2]

본 연구에서는 열연공정이 전력을 소비하는 비중이 크다는 점을 고려하여 생산일정 계획을 통해 효과적인 에너지 소비가 이루어 지도록 하는 모형과 그 해법을 제시하고자 한다. 먼저, 생산일정 계획은 여러 단위의 열연공정들에 대해 각 공정에서 생산되는 제품들의 순서를 결정해야 한다. 이때 적용되는 수리모형과 이 모형을 풀기 위한 two-step approach method를 제시하였다. 그 다음으로, 전력수요 예측모형을 개발하여 각 제품 생산 순서에 따라 소비되는 전력을 예측하고, 전 공장에 대해 주어진 시간 동안에 가장 효율적인 에너지 사용을 위한 수리모형을 제시하고 예제에 적용하여 보았다.

공정과 생산일정계획

1. 공정설명

열연공정에서는 슬라브를 코일로 변형시키는 작업을 하며, Figure 1에서 보는 것과 같이 재가열로(reheat furnace), 조압연(roughing mill), 사상압연(finishing mill), 권취공정(coiler)으로 나눈다. 먼저 슬라브가 재가열로에서 압연하기에 적당한 온도로 재가열된 후, 조압연기로 들어가서 두께가 줄어들게 되고, 사상압연기로 보내져 마지막으로 요구되는 두께로 줄어들어 얇고 길이가 수천 feet에 해당하는 strip이 만들어지며, 마지막으로 권취공정으로 보내져 열연코일로 완성된다.

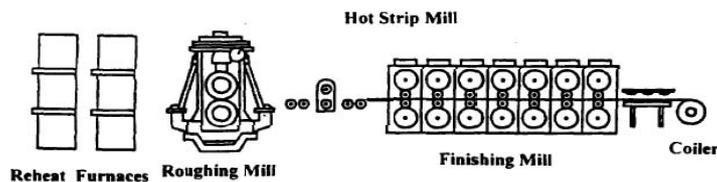


Figure 1 Process of the hot strip rolling mill [2]

2. 생산일정계획의 접근

열연공정에서는 제품 질의 최대화, 생산속도의 최대화, 롤 교체비용의 최소화라는 여러 개의 목적함수들이 상충되기 때문에 일정계획이 어렵다. 그래서 Kosiba 등[1]에 의해 제시된 접근 방법을 이용하였다. 여러 개의 목적함수를 롤 마모도의 최소화라는 하나의 목적함수로 전환함으로써, 롤 교체 비용을 줄이고 생산 시간이 지연되는 것을 막을 수 있다. 롤 마모도의 최소화는 두께와 경도의 변화를 최소로 하는 제품 순서를 결정하는 것을 의미한다. 그리고 제품 질이 최대가 되기 위해서는 하나의 Roll단위 내에서 제품의 폭이 점진적으로 줄어들어야 한다. 최종적으로 sequence-dependent setup penalty를 최소화하

는 코일의 생산 순서를 결정하는 문제가 된다.

3. 수리 모형

Kosiba 등[1]은 하나의 Roll단위로 선택된 제품들에 대해 TSP모델로 적용하였고, Balas 등[2]은 많은 슬라브들 중에 선택하여 하나의 Roll단위를 생성하면서 제품들의 순서를 결정하기 위한 PCTSP(Prize Collecting Traveling Salesman Problem)모델을 처음으로 개발했으며, 와 Lopez 등[3]도 이 모델을 적용하였다. 그리고 여러 개의 Roll단위를 만들면서 동시에 생산순서를 찾기 위해 Cowling [4]은 PCVRP(Prize Collecting Vehicle Routing Problem)로, Tang 등[5]은 MTSP(Multiple TSP)에 적용하였다. 즉, 열연공정의 생산일정계획의 수리모형으로써 주로 TSP가 많이 적용되고, 그에 따른 다양한 해법이 제시되고 있다.

본 연구에서는 열연공정의 기본단위인 압연Roll단위를 일정계획하는 경우는 TSP로 적용하였고, 여러 개의 압연Roll로 구성된 작업교대 단위가 주어질 때는 Roll단위 생성과 동시에 생산 순서를 결정해야 하므로 하나의 dummy노드를 가지는 VRP(Vehicle Routing Problem)로 적용하였으며, Kulkarni 등[6]의 formulation을 사용하였고, formulation중 부분여행제거 제약조건은 좀더 효과적인 Desrocher등[7]에 의해 제안된 식으로 대체하였다.

4. Two-step approach method

적용된 수리 모형들은 전형적인 NP-hard 문제로써 제품의 수가 증가함에 따라 쉽게 풀지 못하는 단점을 가지고 있다. 그러므로 이러한 단점을 해결할 수 있는 two-step approach method을 개발하였으며, Tamura 등[8]의 알고리즘의 개념을 적용하였다. 이 방법은 동일한 규격을 가지는 제품을 묶어 그룹을 만들고, 이 그룹들 사이의 유사한 setup penalty를 가지는 것끼리 그룹화시키기 위해서 single linkage 방법이 사용된 계층적 클러스터링기법을 통해 클러스터를 만들어 수리모형으로부터 생산순서를 결정하는 approximate step과 이 생산순서는 유지하면서, 각 클러스터내의 생산순서를 확정해 주는 detail step으로 구성되며, Figure 2는 방법을 자세히 보여준다.

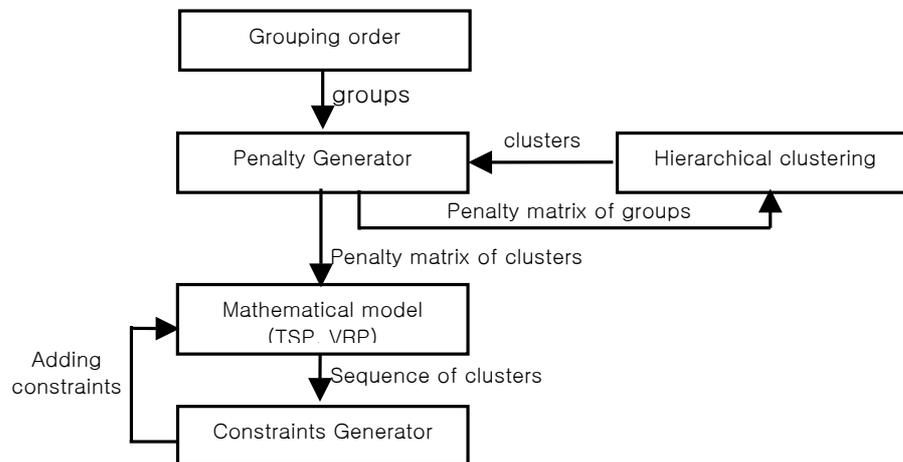


Figure 2 Procedure of two-step approach method

5. 예제 적용

Tang 등[4]의 논문에 있는 예제에 적용하여 봄으로써, 제시한 방법이 효용성을 보이 고자 하였다. Table1을 보면, two-step approach method을 사용하지 않고 모든 제품(68개)에 대하여 풀었을 때(I)와 group(25개)을 만들어 풀었을 때(II)와 클러스터링을 이용하여 클러스터(11개)를 만들어 풀었을 때(III)의 결과를 비교하였다. III에 의한 목적함수는 일정계획자에 의한 목적함수보다 28.80% 감소하였다. 그리고 제시한 방법으로 풀었을 경우에

클러스터를 만들지 않고 풀었을 경우와 같은 목적함수를 얻으면서 훨씬 더 빠른 시간 안에 풀 수 있었다. 또한 문제크기가 큰 현장데이터에 적용하여 풀어본 결과에 더 효과적이었다.

	I 68orders	II 25 groups	III	
			1step 11 clusters	2step 25 groups
binary variables	2796	376	76	195
continuous variables	68	50	22	21
constraints	4694	2285	242	234
Objective value		249	164	249
Integrality gap		0.00%	0.00%	0.00%
CPU time		49sec	0.031sec	0.015sec
PC & Solver	Intel Pentium 4 CPU 2.0GHz & CPLEX 7.0			

Table 1 Result of Example

전력수요 예측모델

전력 사용을 고려한 생산일정계획 문제를 풀기 위해서는 먼저 생산되는 제품의 전력 수요를 알아야 한다. 그래서 제철소의 압연실적과 전력사용 실적 데이터를 분석하고, MLR(multiple linear regression)을 이용하여 전력수요 예측모델을 수립하였다. Figure 3은 3열연공장의 실측과 예측 그래프로써, 실제 소모량과 완전히 일치하지는 않지만 증감하는 경향을 예측하는 데에 사용될 수 있다.

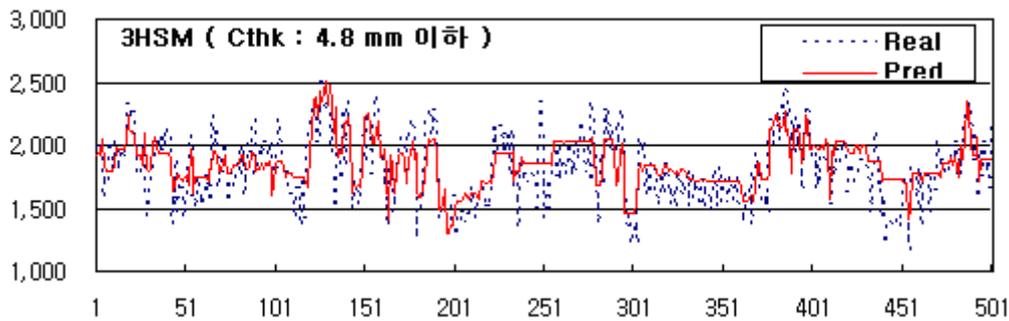


Figure 3 Electric-power prediction graph (Relative error: 3.84%)

전력사용을 고려한 생산 일정 계획

전력을 소비하는 시간 측면에서 보면 모든 열연공정들은 병렬로 연결이 되므로, 전 공장에 대해 주어진 시간 동안에 평균 수요 전력의 최소화과 분산의 최소화라는 목적함수를 가지는 생산일정계획 문제로 확장할 수 있다.

1. 수리 모형

수요 전력의 평균과 분산은 반비례의 관계를 가지므로 평균의 최소화과 분산의 최소화 사이에는 trade-off가 발생한다. 그러므로 먼저 평균의 최소화라는 목적함수(objective 1)를 가지는 모형으로부터 해를 구한 다음에, 구한 최소 평균전력까지라는 제약조건을 가지며 분산의 최소화라는 목적함수의 모형으로부터 새로운 해를 구한다. 이때 분산의 수식은 수리모형을 NLP로 만들기 때문에 전력평균(ElecAvg)으로부터 양의 오차 E1_i, 음의 오차 E2_i 중 최대값을 EMAX라고 하여, EMAX를 최소화하는 것이 objective 2가 되도록 하였다.

$$\text{Objective 1 Minimize } ElecAvg = \frac{\sum_i XPA_i + XPB_i + XPC_i}{I} \quad (1)$$

Objective 2 Minimize $EMAX = \text{Max}(E1_i, E2_i)$ (2)

식(1)에서 XPA_i, XPB_i, XPC_i 는 A, B, C열연공정의 생산시간이 일치하는 시간구간 i 에서의 전력 소비량을 나타내는 변수이다.

2. 예제 적용

제철소의 3개의 열연공정의 데이터에 대해 TSP와 two-step approach method를 이용하여 생산되는 제품들의 순서를 결정하고, 전력수요 예측모델로부터 매 분에 해당하는 전력을 찾고, 시간분할 개수를 줄이기 위해 5분의 시간단위로 만들어 제시된 수리모형에 적용하여 보았다. Table 2는 최적화 결과로써 Figure 4의 OPT라는 점에 해당되고, 모든 열연공정이 동시에 시작하는 O보다 평균전력이 2.59%감소하였다. 그리고 Figure 4는 두 번째 최적화를 풀 때, ElecAvg_{min}의 1.02%까지 증가시킴에 따라 EMAX는 59.6%까지 감소하는 결과를 보여준다. 즉, 선위의 모든 점들이 대안이 되며, 목적하는 바에 따라 선택할 수 있다.

	Frist Optimization	Second Optimization
binary variables	137	92
continuous variables	99	198
Constraints	4507	4703
Objective 1(ElecAvg)	12858	12858
Objective 2(EMAX)	9832.58	9832.58
Integrality gap	5.0 %	5.0 %
CPU time	150sec	460sec
PC & Solver	Intel Pentium 4 CPU 2.0GHz & CPLEX 7.0	

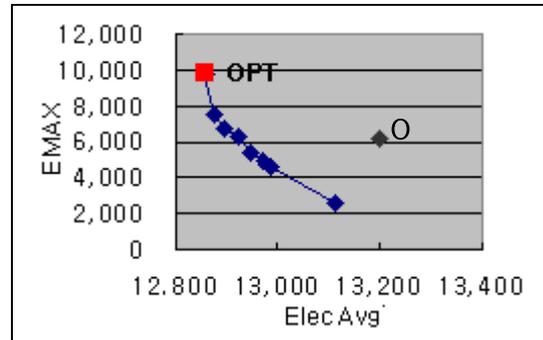


Table 2 Result of Example2

Figure 4 Several alternatives

결론

생산순서를 결정하기 위해 적용된 수리모형들을 효과적으로 풀기 위해 제시한 방법을 통해 보다 짧은 시간에 setup penalty를 최소화하는 해를 얻을 수 있었다. 그리고 이 결과와 개발된 전력수요 예측모델로부터 전력사용을 고려한 생산일정계획을 공정데이터에 적용하여본 결과, 주어진 시간 동안의 평균 전력과 분산이 감소하는 효과가 나타났다. 즉, 평균전력의 감소는 전력수요의 비중이 큰 열연공장의 에너지 비용을 줄이는 효과를 가질 것이며, 분산의 감소는 전력공급 운용에 있어 용이함을 가져다 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. E.D. Kosiba, J.R. Wright and A.E. Cobbs: Computers in Industry, 19, 317-327(1992)
2. E. Balas: Networks, 19, 621-636 (1989).
3. L. Lopez, M.W. Carter and M. Gendreau: European Journal of Operation Research, 106, 317-335(1998)
4. P. Cowling: "Optimization in industry (ch 4: optimization in steel hot rolling)", Will N.Y. (1995)
5. L. Tang, J. Liu, A. Rong and Z. Yang: European Journal of operation Research, 24, 267-282(2000)
6. R.V. Kulkarni and P.R. Bhave: European Journal of Operational Research, 20, 58-67(1985)
7. M. Desrochers and G. Laporte: Operations Research Letters, 10, 27-36(1991)
8. R. Tamura, M. Nagai, Y. Nakagawa, T. Tanizaki and H. Nakajima: International transactions in operational research, 5/3, 189-199(1998)