

열간 자유 단조 공정의 에너지 효율화를 위한 모형 기반 작업 계획 최적화

이정미, 김세영, 류광렬
부산대학교 전기전자컴퓨터공학과
e-mail : wjda19764@pusan.ac.kr

Model-Based Scheduling Optimization of Hot Press Forging Process for Energy Efficiency

Jeongmi Lee, Seyoung Kim, Kwang Ryel Ryu
Dept. of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

요 약

열간 자유 단조는 고온으로 가열한 강괴에 압력을 가하여 원하는 형상을 빚는 공정이다. 가열로에서 여러 개의 강괴를 동시에 가열하며 목표 온도에 도달하면 꺼내어 다음 공정을 진행한다. 이때 가열로에 투입하는 소재의 조합과 후단 공정을 위해 소재를 꺼내는 순서가 가열로의 에너지 효율에 영향을 끼친다. 본 논문에서는 열간 자유 단조의 에너지 효율을 높이기 위한 비용 예측 모형 기반 작업 계획 최적화 방안을 제안한다. 유전 알고리즘을 이용하여 가열로 강괴 조합을 최적화하며 각 설비별 작업 할당 규칙에 따라 전체 작업 계획을 수립한다. 시뮬레이션 기반으로 후보 작업 계획을 평가하여 계획을 최적화 하며 이를 위해 각 설비별 공정 소요 시간 및 에너지 사용량 예측 모형을 이용한다. 예측 모형은 공정 데이터를 기반으로 기계 학습 알고리즘을 적용하여 학습한다. 또한 주기적인 재계획을 통해 예측의 불확실성으로 인해 작업의 진행이 계획대로 이루어지지 않는 문제점을 해결하고자 한다.

1. 서론

열간 단조 공정이란 다양한 금속 강괴들을 특정한 온도로 가열하여 정해진 공정 순서에 따라 제품을 생산하는 공정을 말한다. 단조 공정은 가열, 절단, 단조, 열처리 등의 작업을 포함한다. 중량이 큰 금속을 다루는 공정으로 고온, 고압이 필요하며 그에 따른 에너지 사용량이 많고 생산 기간 또한 오래 걸린다.

가열로는 여러 개의 강괴를 일정 온도로 가열시킨다. 가열로는 내부 온도가 일정 온도까지 도달하지 않으면 문을 열 수 없다. 또한 강괴 장입 및 취출 시 문을 여닫을 때마다 열 손실로 인해 재가열을 해야 한다.

단조 및 절단은 작업자에 의해 수동으로 이루어진다. 강괴의 종류, 제품 종류뿐만 아니라 작업 환경 및 작업자의 숙련도 또한 작업 시간과 에너지 소비량에 영향을 끼친다. 또한 가열 및 재가열 시 강괴 조합에 따라 가열 시간 및 가스 소비량이 달라진다. 또한 가열 완료된 강괴 취출 순서에 따라서 가열로 작업 시간 및 에너지, 후단 공정의 작업 시간이 달라지게 된다. 이렇듯 제품 생산 시간과 에너지 사용량에 영향을 끼치는 요소가 많다. 또한 가열로 강괴 조합 및 취출 순서 계획에 따라 생산 비용이 크게 달라질 수 있다.

작업 계획 방법으로는 혼합 정수 계획법(Mixed

Integer Programming)이 있다 [1]. 혼합 정수 계획법은 의사 결정 변수가 정수의 값을 갖게 하는 선형 계획법이다. 혼합 정수 계획법은 쉽고 간단하다는 장점이 있지만, 작업 계획에 영향을 끼치는 요소가 많은 경우 문제를 풀기가 어렵다. 기존 연구[2]에서는 대량의 작업 계획을 유전 알고리즘[3]을 이용해서 최적화하는 방법을 제안하였다. 유전 알고리즘은 생태계의 진화 과정을 기초로 하는 계산 모델로 문제의 해를 문자열 형태의 유전자로 표현하고, 적합도 함수를 통해 해를 평가해 세대를 반복한다. [2]는 작업이 제품에 따라 각기 다른 생산 공정 순서를 가지는 Job-shop 형태의 작업을 고려하여 계획한다. [2]에서는 [1]과 달리 좀 더 복잡하고 많은 물량의 작업 계획이 가능하다. 그러나 단조 공정은 작업 환경과 설비에 따라 공정 시간이 달라질 수 있는 점 때문에 설비별 공정 시간을 고려한 방안이 필요하다. 에너지 절약을 위한 가열로 강괴 장입을 결정하는 기존 연구 [4]에서는 유전 알고리즘을 이용한 최적화 방안을 제안하였다. [4]에서 대상으로 하는 가열로는 강괴가 연속적으로 장입 및 취출되는 연속적 가열로를 대상으로 하였다. 한 번에 많은 물량을 넣고 가열이 완료될 때까지 문 개폐가 불가능한 배치형 가열로와는 차이가 있다. 또한 다른 설비의 계획은 고려하지 않았다.

생산 비용을 줄이고 작업 계획을 최적화하기 위해서는 각 공정 소요 시간과 에너지 사용량을 예측해야 한다. 공정 소요 시간 및 에너지 사용량을 예측할 때 여러 요인을 고려할 필요가 있다.

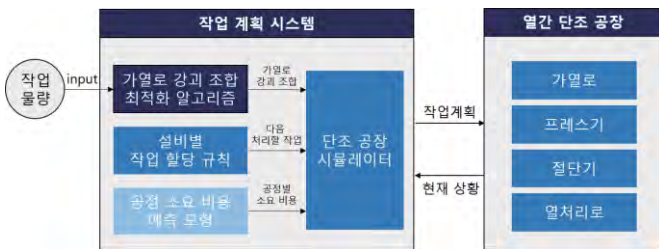
본 논문에서는 에너지 사용량 및 공정 소요 시간 예측 모형 기반 시뮬레이션을 통한 작업 계획 최적화 방안을 제안한다. 설비별 과거 공정 데이터를 기반으로 기계학습 알고리즘을 이용하여 학습한 시간 및 에너지 비용 예측 모형을 작업 계획에 사용한다. 우리는 유전 알고리즘을 이용해서 가열로 강괴 조합을 최적화하고 현장의 작업 계획 방법을 고려하여 각 설비가 처리할 작업과 그 순서를 결정하는 작업 할당 휴리스틱을 고안하였다. 가열로 및 그 외 설비 작업 할당 방안과 비용 예측 모형을 이용해 열간 단조 공정을 시뮬레이션하여 최적 작업 계획을 수립하였다.

과거의 공정 데이터를 이용해 학습한 비용 예측 모형을 사용했을 때, 계획 실행 결과가 기대와 다를 수 있다. 현실 작업 환경 차이 등에 의해서 공정 소요 시간 및 에너지 사용량이 달라질 수 있다. 작업을 일정 시간 단위로 재계획 한다면 이러한 문제를 피하고 변화를 반영하는 최적의 작업 계획을 수립할 수 있다. 따라서 주기적으로 계획을 갱신하는 Rolling Horizon 방안[5]을 적용한다.

다음으로 제 2 장에서는 본 논문에서 제안하는 단조 공정 작업 계획 최적화 시스템을 소개한다. 시스템의 전체적인 개요 및 흐름에 관해 설명한다. 그리고 시스템의 각 구조에 관해서 설명한다. 제 3 장에서 결론 및 향후 연구 과제를 제시한다.

2. 단조 공정 작업 계획 최적화 시스템

A. 시스템 개요 및 흐름



(그림 1) 시스템 흐름도

본 시스템의 목적은 총 작업 소요 시간 및 에너지 사용량을 최소화해 작업 계획을 최적화하는 것이다. 작업 계획을 위해서는 가열로 및 열처리로의 강괴 조합, 가열로 내 가열이 완료된 강괴의 취출 순서, 설비별 작업 순서 등을 정해야 한다. 먼저 강괴 조합 최적화 알고리즘을 이용해서 주어진 작업들을 가열로에 할당한다. 각 작업은 현재 작업이 완료되면, 차후 공정 순서에 따라 프레스기, 절단기, 열처리로로 이동하게 된다. 이때 작업을 각 설비에 할당해주는 규칙이 필요하다. 우리는 현장의 작업 계획 방법을 고려하여 각 설비가 처리할 작업과 그 순서를 결정하는 작업

할당 휴리스틱을 구현하였다. 각 설비는 작업 할당 휴리스틱에 따라 작업을 할당받는다. 작업별 에너지 사용량과 공정 소요 시간은 과거 공정 데이터를 기반으로 학습한 모형을 통해 예측한다. 학습 모형을 통해 예측한 총 작업 시간 및 에너지 사용량으로 작업 계획을 평가한다.

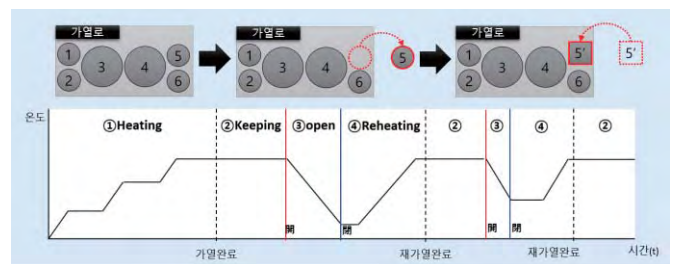
작업 계획이 완료되면 공장 환경에 작업 계획을 적용한다. 그러나 모형의 예측값의 오차 또는 실제 환경의 변화로 인해 계획 실행의 결과가 달라질 수 있다. 이를 보완하기 위해 일정 시간 작업 계획을 진행한 뒤, 현재까지 진행 상황에서 계획을 다시 세운다. 이러한 반복적 재계획을 통해 환경 변화에 따라 계획을 최적화한다.

B. 생산 비용 예측 모형 학습

공정 작업 시뮬레이션을 위해서는 공정별 작업 시간과 에너지 사용량을 알아야 한다. 각 공정 비용에 영향을 끼치는 요소는 매우 많아, 단순한 계산 식을 도출해내기는 어렵다.

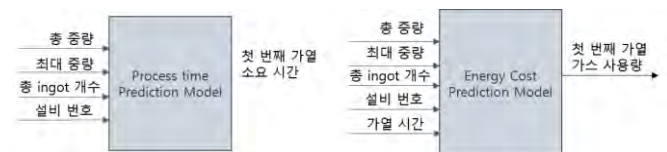
설비별 작업 시간과 에너지 사용량을 예측하기 위한 비용 예측 모형은 설비별 과거 공정 데이터를 기반으로 기계 학습 알고리즘을 이용해 학습시킨다. 각 공정을 할당할 때마다 작업 소요 시간과 에너지 소모량을 예측한다. 학습 모형으로 예측된 시간을 작업 종료 시각으로 한다.

가열로는 한번 가열하기 시작하면 적정온도 도달까지 문을 열지 못한다. 내부 온도가 일정 온도에 도달하고 나면 내부 온도를 일정하게 유지한다. 가열이 완료된 상태에서 강괴 장입 및 취출을 위해서 문을 여닫는다. 이때 문 열림으로 인한 열 손실로 재가열을 필요로 한다. 따라서 가열로는 가열, 문 개폐, 재가열, 유지 상태를 가진다. 가열로 온도 변화는 그림 2와 같다.

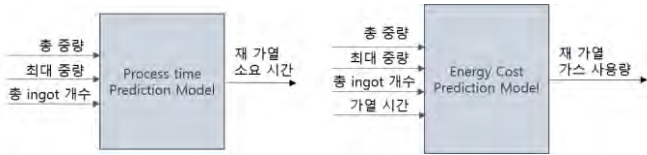


(그림 2) 가열로 상태에 따른 내부 온도 변화

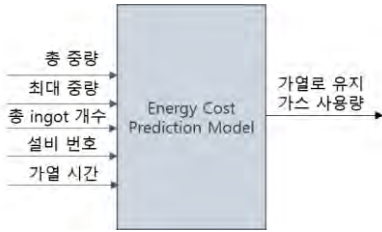
가열로의 상태별 비용 예측 모형은 다음 그림 3-5과 같다.



(그림 3) 가열 비용 예측 모형

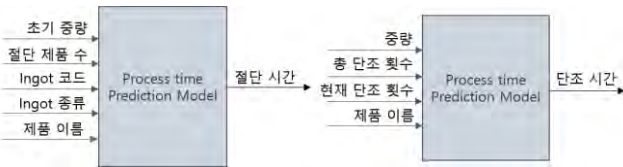


(그림 4) 재가열 비용 예측 모형



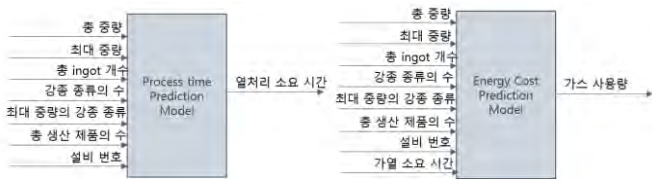
(그림 5) 가열로 유지 구간 에너지 사용량 예측 모형

절단 및 단조는 제품에 따라서 공정 시간이 달라진다. 따라서 강괴의 특성과 제품의 특징 또한 고려해야 한다. 절단 및 단조 에너지 사용량은 가열로 및 열처리로의 사용량에 비해 매우 미미한 양으로, 에너지 효율에 큰 영향을 끼치지 못한다. 따라서 본 연구에서는 예측하지 않는다. 절단 및 단조 비용 예측 모형은 다음 그림 6 과 같다.



(그림 6) 절단 및 단조 시간 예측 모형

열처리로는 가열로와 마찬가지로 강괴 조합에 영향을 받는다. 열처리 비용 예측 모형은 그림 7 과 같다.



(그림 7) 열처리 비용 예측 모형

C. 유전 알고리즘 기반 가열로 강괴 조합 최적화

	강괴1	강괴2	강괴3	강괴4	강괴5	강괴6	강괴7	
가열로 번호	1	3	4	2	1	4	5	...

(그림 8) 가열로 강괴 조합 해 표현

주어진 작업 물량은 가장 먼저 1 차 가열을 위해 각 가열로로 할당해야 한다. 가열로 강괴 조합 최적

화를 위해서 유전 알고리즘[6]을 이용한다.

각 강괴마다 가열로 번호를 할당한다. 마감기한이 빠른 강괴를 가열로에 우선 할당한다. 가열로가 이전 작업을 완료하고 다음 작업이 가능할 때, 강괴 조합을 할당한다. 가열로의 Capacity 가 찰 때까지 강괴를 할당한다. 할당이 완료된 가열로는 가열을 시작한다. 모든 강괴가 가열로에 할당될 때까지 반복한다.

가열로는 모든 강괴가 취출 되고 나면 현재 작업을 종료하고 다음 강괴 조합이 할당될 때까지 대기한다. 작업을 종료한 가열로는 첫 번째 가열이 완료된 직후 처음 문 열림까지 가열 유지 시간만큼 가열 시작 시간을 앞당긴다. 가열 시작 시간을 조정해서 가열로 공정 시간을 줄여 에너지 사용을 줄인다.

가열이 완료된 강괴는 다음 공정을 시작한다. 비용 예측 모형과 현장의 작업 할당 방법을 고려한 휴리스틱 규칙을 기반으로 전체 작업 계획을 시뮬레이션한다. 전체 계획이 완료되면 작업 계획을 평가한다. 평가 기준은 전체 생산량, 총 작업 기간 및 에너지 사용량을 포함한다. 생산 비용이 적게 들고 생산량이 많은 작업 계획을 높게 평가한다.

D. 설비별 작업 할당 휴리스틱 규칙

첫 번째 가열 작업 외 다른 작업은 현장의 방식을 차용한 작업 할당 휴리스틱 규칙을 따른다.

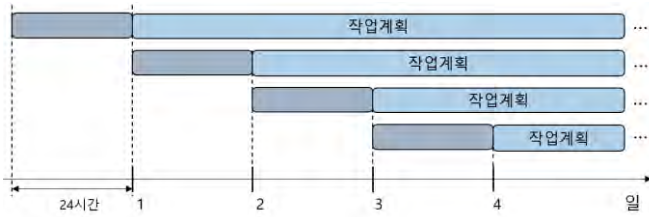
가열로는 한번 문을 열고 나면 가열로 열 손실로 인해 다시 가열해야 한다. 따라서 가열로 문 개폐를 최소화할 수록 에너지를 절약하게 된다. 재가열이 필요한 강괴는 재가열이 필요한 시점에 문이 열려있는 가열로에 우선 할당한다. 모든 가열로가 닫혀있는 경우 가열 중이 아닌 가열로 문을 열어 할당한다.

절단기 및 프레스기는 마감 기한이 빠른 작업을 우선 처리한다. 이전 작업이 완료된 작업 중 절단 또는 단조 작업을 해야 하는 강괴를 가져온다. 가열로의 작업은 지금 문을 열 수 있으면 작업을 가져온다. 모든 절단 및 단조 공정이 종료될 때까지 반복한다.

열처리는 한 번에 여러 강괴를 넣고 작업을 한다. 따라서 열처리는 열처리가 필요한 작업들이 열처리로 Capacity 만큼 모이게 되면 열처리로에 넣고 작업을 시작한다. 이때 마감 기한이 빠른 작업을 열처리로에 우선 할당한다. 만약 열처리 완료 예측 시간이 마감 기한을 넘기게 되면, Capacity 만큼 모일 때까지 기다리지 않고 바로 작업을 시작한다.

E. 반복적 재계획

주어진 모든 작업에 대해 계획 수립이 완료되면 계획을 적용한다. 예측 모형의 오차율과 현실 상황에서의 변화 또는 사고로 인해 계획이 기대와 달라질 수 있다. 실제 공정 상황을 파악하고 계획에 작용하기 위해서 일정 시간마다 계획을 재수립한다.



(그림 9) 작업계획의 반복적 재수립

그림 9 와 같이 수립이 완료된 계획을 24 시간 동안 진행하고, 진행 후 상황을 반영하여 계획을 보완하여 재수립한다. 반복적인 계획 재수립을 통해서 계획을 최적화한다.

3. 결론 및 향후 연구과제

단조 공정의 작업 계획을 최적화함으로써 제품 생산 비용을 절감하고, 생산성을 높일 수 있는 시스템 구조를 제안한다. 유전 알고리즘을 통해서 가열로 강 피 조합을 최적화하고 작업 할당 휴리스틱을 이용해 작업 계획을 세울 수 있다. 과거 데이터 기반 비용 예측 모델을 이용해 작업 계획의 에너지 사용량과 소요 시간을 측정하고 작업 계획을 평가하고 반복적 재 계획을 통해 변화에 적응할 수 있는 최적화된 계획을 수립한다.

향후에는 작업자의 숙련도를 고려하여 예측 모델을 학습 시킬 수 있도록 작업자별 공정 데이터를 수집하여 숙련도를 고려한 작업 시간 및 에너지 사용량 예측을 가능하게 할 것이다. 또한 가열로 강 피 조합뿐만 아니라 그 외 설비의 작업 할당 규칙 또한 좀 더 최적화된 방법을 고려해볼 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20182020109660)

참고문헌

- [1] Harjunkski, I. and Grossmann, I. E.; “A Decomposition Approach for the Scheduling of a Steel Plant Production,” Computers and Chemical Engineering, 25 : 1647-1660, 2001.
- [2] Deb, K. and Reddy, A. R.; “Large-Scale Scheduling of Casting Sequences Using a Customized Genetic Algorithm,” Lecture Notes in Computer Science, 2936 : 141-152, 2004.
- [3] E. Falkenauer, S. Bouffoix “A genetic algorithm for job shop” Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1991)
- [4] Fei He, Kang Shen *, Li Guan and Mingming Jiang; “Research on Energy-Saving Scheduling of a Forging Stock Charging Furnace Based on an Improved SPEA2 Algorithm,” Sustainability, MDPI, Open Access Journal, vol. 9(11), pages 1-21, 2017
- [5] Dimitriadis, A.D., Shah, N., Pantelides, C.C., 1997.

“RTN-based rolling horizon algorithms for medium term scheduling of multipurpose plants.” Computers and Chemical Engineering 21, S1061–S1066.

- [6] D.E. Goldberg Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning Addison Wesley, New York (1989)