

전력 사용을 고려한 다이캐스팅 공정의 스케줄링

양정민^{1*}, 박용국²

¹대구가톨릭대학교 전자공학과, ²대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Scheduling of Die Casting Processes Considering Power Usage

Jung-Min Yang^{1*} and Yong Kuk Park²

¹Department of Electrical Engineering, Catholic University of Daegu

²School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

요약 본 논문은 전력 효율을 고려한 다이캐스팅 공정의 스케줄링 기법을 제안한다. 시프트(shift)마다 반복 작업하는 다이캐스팅 공정의 스케줄링 문제는 각 제품의 시프트별 생산량을 의사결정변수로 정의하여 용탕 효율을 최대화시키는 선형계획법으로 표현 가능하다. 본 연구에서는 주조 공장의 전력 사용에 대한 제한 조건까지 고려하는 새로운 선형계획법 모델을 제시한다. 제안된 모델은 다이캐스팅 공정의 한 시프트가 소비하는 전력 사용량이 주어진 한계 전력량 범위를 넘지 않도록 하는 스케줄링 결과를 유도한다. 사례 연구를 통하여 제안된 모델의 우수성과 응용가능성을 검증한다. 본 논문은 스마트 그리드 환경에서 지능형 소비자로서 분류되는 주조 공장이 전력 사용 제한 조건을 만족시켜야 하는 문제에 대한 기초 연구의 역할을 할 것이다.

Abstract This paper presents a scheduling scheme for die casting processes considering power usage. The scheduling problem of a shift-based die casting process is represented by a linear programming (LP) model that maximizes the average efficiency of melting furnaces in regard of the usage of molten alloy, where the product quantities of each shift are used as primary variables. In this research, we propose a novel LP model that considers power usage of foundries. The developed LP model can derive product plans in which the expended power of a casting shift does not exceed a prescribed limit, while optimizing the efficiency of alloy usage. The simulation result of a case study demonstrates the superiority and applicability of the proposed scheme. This paper serves as a basic research on the role of foundries as an intelligent customer in smart grid environment where the limit of power usage should be fulfilled.

Key Words : Die Casting, Scheduling, Linear Programming, Power Usage, Efficiency of Molten Alloy, Smart Grid

1. 서론

다이캐스팅 주조 공정은 합금의 용융, 용탕 주입, 응고, 취출(取出), 주물로부터 탕구계(gating system)를 포함한 스크랩 제거, 주물의 기계가공과 다듬질 등 후가공 및 조립, 그리고 품질검사 등의 일련작업을 여러 번의 시프트(shift, 교대근무)를 거쳐서 반복적으로 수행한다[1]. 공정이 일정한 이러한 다이캐스팅은 일견 스케줄링

(scheduling) 문제와는 무관하게 보인다. 그러나 한 시프트마다 잉곳을 용융한 용탕의 양은 고정되어 있고 주조 후 남은 용탕의 양은 달라지므로 시프트별로 생산하는 주물의 생산량에 따라 용탕 효율이 변한다. 주조에서 용탕이 차지하는 비용이 매우 크므로 용탕 효율을 높이는 방향으로 시프트별 제품 생산량을 결정하는 일은 큰 의미를 가진다. 최근 이 문제를 해결하기 위해서 주조 공정의 용탕 효율을 최대화하는 시프트별 생산 계획(product

본 연구는 2012년 (재)동일문화장학재단 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Jung-Min Yang

Tel: +82-10-3186-0358 email: jmyang@cu.ac.kr

접수일 12년 05월 17일

수정일 12년 06월 07일

게재확정일 12년 08월 09일

plan)을 제시하는 스케줄링 방법이 여러 가지 접근 방식으로 연구되었으며 국제 학계에서도 주목 받고 있다 [2-4].

저자들의 선행 연구에서는 주조 공정의 스케줄링 문제를 선형계획법(LP: linear programming)으로 모델링한 후 생산 계획을 구하는 방법을 다루었다. Yang & Park[5]에서는 사형 주조(sand casting)와 저압 주조(low-pressure casting), 자동 주조 라인(automated casting line)이 결합된 주물 공장을 위한 스케줄링 문제를 다루었다. Park & Yang[6]은 주물의 부산물인 스크랩(scrap)과 용탕 잔여량(alloy residue)을 이용하여 선형계획법이 구한 스케줄링의 효율을 높이는 후(後)최적화 과정(post-optimization procedure)을 제안하였다. 또 Park & Yang[7]은 Yang & Park[5]의 연구결과를 바탕으로 하여 실제 다이캐스팅 공정에서 발생하는 불량품(defective unit)을 추가 생산하는 기법을 제시하였다.

본 논문의 목적은 다이캐스팅 공장의 전력 사용에 대한 제한 조건까지 고려하는 새로운 선형계획법 모델을 제안하는 일이다. 선행 연구 [5-7]의 선형계획법이 표현하는 다이캐스팅 공정의 제한 조건은 주물의 생산량, 시프트별 주물의 총 무게, 그리고 주조 기계(die casting machine)의 작업 시간 등이었다. 하지만 최근 스마트 그리드(smart grid)로 대표되는 지능형 전력망 개념이 도입되면서 전력을 지속적으로 대량 소비하는 주조공장에 지능형 소비자(intelligent customer)의 역할을 부과하는 계획이 구체화되고 있다[8, 9]. 과거의 단방향 전력 공급 및 소비 형태에서 탈피하여 공급자(발전소)와 소비자(공장) 간에 특정 시간에서 소비하는 전력량을 제한하고 조절하는 프로토콜(protocol)을 도입하는 등 ‘양방향 전력 사용’ 개념이 등장하였다[10]. 또한 전력 수요를 예측하여[11] 새로운 전력 과금 제도를 적용하려는 연구도 수행되고 있다. 따라서 시프트별로 생산하는 다이캐스팅 공정에서 한 시프트 당 소비되는 전력 총량이 주어진 특정 범위를 넘기지 않도록 해주는 스케줄링을 구할 필요가 대두되었다.

본 논문에서는 우선 다이캐스팅 공정이 소비하는 전력을 제품 생산량에 대한 선형 조합식으로 구한다. 그런 다음 각 시프트별 전력 사용량이 주어진 최대 혹은 최저 전력량을 넘지 않도록 하는 선형계획법 제한 조건(constraint) 식을 제안하고 기존의 선형계획법 모델에 추가한다. 또 실제 다이캐스팅 공장에서 획득한 데이터를 이용하여 사례 연구 모의실험을 실시하고 제안된 선형계획법 모델의 우수성과 응용가능성을 입증한다.

2. 주조 공장의 전력 사용

본 연구에서 주목하는 사항은 다이캐스팅 공정 스케줄링을 통해 용탕 효율을 높이면서 동시에 전력 사용량을 시프트에 따라서 제한하는 일이다. 시프트를 거치는 다이캐스팅 공정에서 주물의 생산량에 따라서 용탕의 효율이나 작업시간의 효율도 결정되지만 소비되는 전력도 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 다이캐스팅 공정이 소비하는 전력을 정의하고 제품 생산량과 기타 스케줄링 매개변수에 따라서 소비 전력이 어떻게 변화하는지 분석한다.

그림 1은 다이캐스팅 공정에서 사용되는 전력을 분류한 그림이다. 그림과 같이 다이캐스팅 공정은 먼저 고체 상태의 잉곳(ingot)을 해당 용융로(furnace)에 투입한 후 열을 가해 액체 상태의 용탕(molten alloy)을 만든다. 용융로가 용탕을 녹이고 보온하는 작업은 다이캐스팅 공정의 전체 전력 소비에서 가장 큰 부분을 차지한다(그림 1의 Power #1). 따라서 잉곳을 용융하는 비용뿐만 아니라 용융로 예열 및 용탕 보온 등 제품 생산량에 따라서 변화되는 전력 사용량을 다각도로 유도해야 한다[12]. 용융로에서 용탕이 만들어지면 다이캐스팅 기계로 옮긴 후(ladling) 금형에 주입하여 고압을 가해 동일한 주물을 반복적으로 생산한다. 어떤 한 종류의 주물은 해당 금형을 장착한 특정 주조기계에서만 생산되나, 다른 금형으로 교체하여 장착하면 주조기계 하나가 다른 종류의 주물을 생산할 수도 있다(그림 1의 ‘machine 1’ 참조). 따라서 주조기계가 소비하는 전력(Power #2)도 제품 생산량에 대한 함수이므로 선형계획법의 제한 조건으로 표현 가능하다. 마지막으로 그림 1의 Power #3은 주물이 생산된 후 스크랩(scrap)을 절단하고 여러 후(後)공정을 거쳐서 최종 제품을 만드는 데 드는 전력을 포함한다.

전술했듯이 다이캐스팅 공정의 전력 사용을 고려해야 하는 중요한 동기 중의 하나는 주조 공장이 ‘지능형 소비자’로서 스마트 그리드 시스템에 편입되는 경우에 대비하기 위함이다. 현재 국가적으로 추진하고 있는 스마트 그리드 사업에서 주조 공장은 화석연료를 사용하는 대표적인 전력 소비 주체로 분류된다. 따라서 소비자 전력 사용 장치 부착, 시간에 따른 차등적인 전기세 요금 부과 등 스마트 그리드 시스템이 추구하는 여러 가지 제한 조건이 존재할 때 다이캐스팅 공정을 어떻게 운용할지에 대한 세부 기법과 스마트 그리드 제한 시나리오에 대비한 유연한 공장 운용 기법을 전력 사용량을 중심으로 마련해야 한다[13,14].

3. 선형계획법 모델

본 장에서는 참고문헌 [5-7]에서 발표된 다이캐스팅 주조를 위한 모델을 기반으로 전력 사용량을 고려한 새로운 선형계획법을 제안한다.

P개의 용융로와 Q개의 주조 기계로 구성된 다이캐스팅 공장을 설정하자. 이 공장에 납품 주문이 들어오면 총 M번의 시프트를 거쳐 주조제품을 생산한다. 납품 주문은 N개 종류의 주조 제품들을 각각 d_1, d_2, \dots, d_N 개씩 생산하는 것이라고 하자. 각 시프트마다 생산되는 모든 제품의 생산량을 의사결정변수로 정의하면 변수 개수는 총 NM 개이다.

용융로, 주조 기계, 주조 제품, 그리고 시프트를 가리키는 매개변수를 아래와 같이 각각 정의하자.

- 용융로: $p = 1, \dots, P$
- 주조 기계: $q = 1, \dots, Q$
- 주조 제품: $n = 1, \dots, N$
- 시프트: $m = 1, \dots, M$

m번째 시프트에서 생산되는 제품 n의 생산량을 x_{nm} 이라고 하고 의사결정변수로 사용한다.

선형계획법 모델의 목적함수는 전체 주조공정에 대한 용탕의 평균효율이다[5-7]. 한 시프트에서 각 용융로가 가지는 용탕의 효율은 ‘공급하는 용탕 대비 실제 제품을

만드는 데 소비된 용탕의 비’로 정의된다. 이 값을 나타내기 위하여 시프트마다 공급되는 용탕의 양과 공급된 용탕으로 생산되는 주조 제품의 무게를 표현해야 한다. m번째 시프트에서 p번째 용융로가 공급하는 용탕의 양을 W_{pm} 이라고 하자. 로 p가 녹이는 용탕으로 주조되는 제품이 r_p 개 있으며, 각 제품의 인덱스(index)를 $p(1), \dots, p(r_p)$ 라고 가정한다. 또한 제품 n의 단위 무게를 w_n 이라고 정의한다.

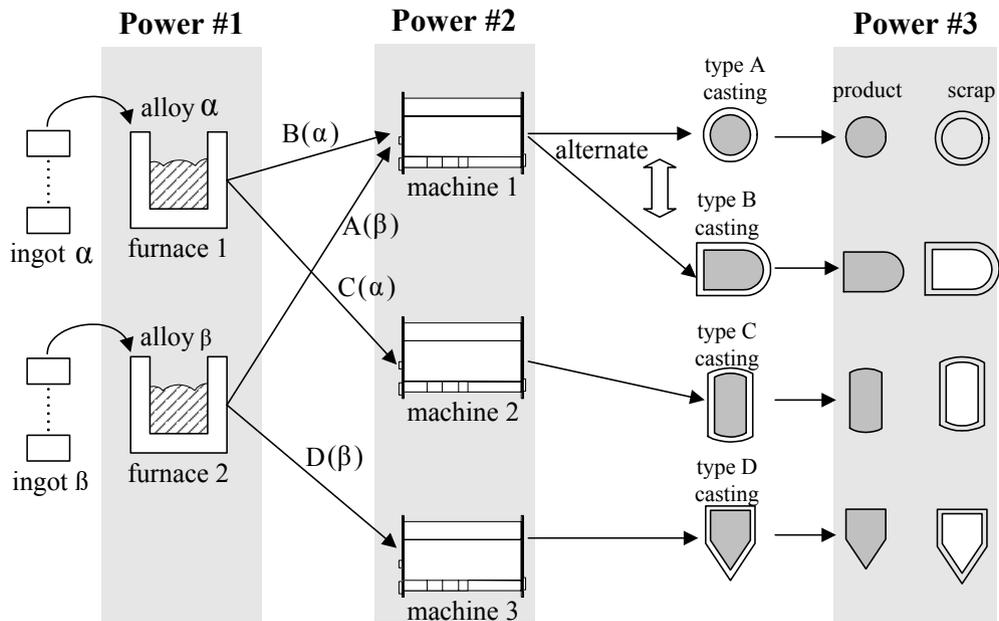
m번째 시프트에서 로 p의 용탕으로 만들어지는 주조 제품의 총 무게를 앞에서 정의한 매개변수와 의사결정변수로 표현하면 $\sum_{i=1}^{r_p} w_{p(i)} x_{p(i)m}$ 이다. 이 값을 공급된 용탕으로 나누면 현 시프트에서의 용탕 효율이 유도된다. m번째 시프트에서 로 p가 가지는 용탕 효율을 E_{pm} 이라고 하면 E_{pm} 은 아래와 같다.

$$E_{pm} = \frac{\sum_{i=1}^{r_p} w_{p(i)} x_{p(i)m}}{W_{pm}}, \quad 0 \leq E_{pm} \leq 1 \quad (1)$$

선형계획법의 목적함수를 E라 하면, E는 E_{pm} 을 모든 용융로 $p=1, \dots, P$ 와 시프트 $m=1, \dots, M$ 에 대해서 평균한 값이므로

$$E = \frac{1}{MP} \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{r_p} \frac{w_{p(i)} x_{p(i)m}}{W_{pm}} \quad (2)$$

이다.



[그림 1] 다이캐스팅 공정에서의 전력 사용
[Fig. 1] Power usage in die casting processes

선형 연구에서 다이캐스팅 공정이 만족시켜야 할 제한 조건을 제품 생산량, 시프트별 제품 총 무게, 주조 기계의 작업 시간 등 세 가지로 분류하였다. 식 (3)~(5)는 기존의 선형계획법에 포함된 세 가지 제한조건식을 나타낸다.

$$\sum_{m=1}^M x_{nm} = d_n, n = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{r_p} w_{p(i)} x_{p(i)m} \leq W_{pm}, p = 1, \dots, P, m = 1, \dots, M \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{s_q} (t_{q(i)} x_{q(i)m} + u_{q(i)}) \leq T_m, q = 1, \dots, Q, m = 1, \dots, M \quad (5)$$

식 (3)은 첫 번째 시프트에서 M번째 시프트까지 만들어지는 제품 n의 생산량 총합이 주문량 d_n 과 일치해야 한다는 조건을 표현한다. 식 (4)는 용융로가 공급하는 용탕의 양보다 생산되는 제품의 총 무게가 더 클 수 없다는 조건, 즉 $E_{pm} \leq 1$ 의 조건을 구현한다. 또 식 (5)는 주조 기계의 작업 시간이 주어진 한계 작업 시간을 넘길 수 없다는 제한 조건을 나타낸다. s_q 는 주조 기계 q가 생산하는 주조제품 종류 수이며 $q(1), \dots, q(s_q)$ 는 각 주조제품의 인덱스이다. $t_{q(i)}$ 는 제품 $q(i)$ 1개를 생산하는 데 소요되는 단위 작업시간 즉 사이클 타임(cycle time)이며, $u_{q(i)}$ 는 제품 $q(i)$ 에 해당하는 금형(die)을 새로 장착하는 데 걸리는 셋업시간(setup time)이다. 따라서 식 (5)의 좌변은 주조 기계 q가 m번째 시프트에서 작업할 때 소요되는 총 시간이다. 이 값이 m번째 시프트에 주어진 한계 작업 시간 T_m 보다 클 수 없으므로 상기와 같은 제한식이 유도된다.

다음으로 본 논문의 주제인 다이캐스팅 공정의 전력 사용량 제한조건을 선형 부등식으로 표현한다. 그림 1에 나타내었듯이 다이캐스팅 공정의 한 시프트를 운용하는데 필요한 전력은, 잉곳을 녹이고 보존하는 전력(Power #1), 주조 기계가 소비하는 전력(Power #2), 그리고 주물의 후공정에 소요되는 전력(Power #3) 등 3가지로 나뉜다.

1) Power #1

임의의 시프트에서 용융로가 녹이는 잉곳의 양 또는 용탕은 일정하며 소요 전력 또한 용탕 양에 비례하기 때문에, 본 값은 스케줄링 의사결정변수 x_{nm} 에 상관없이 상수가 된다. m번째 shift에서 소요되는 이 전력 값을 P_{1m} 이라 하면 P_{1m} 은 다음과 같이 유도된다.

$$P_{1m} = \sum_{p=1}^P G_p W_{pm}, m = 1, \dots, M \quad (6)$$

위 식에서 G_p 는 용융로 p가 녹이는 용탕의 단위 무게당 소비되는 전력량을 가리키는 비례상수이며 단위는 [kWh/kg]이다.

2) Power #2

주조 기계가 소비하는 전력은 생산되는 주조 제품의 개수에 비례한다. 제품이 많이 주조될수록 기계가 소비하는 전력은 더 커진다. 또한 주조 제품 1개를 만드는 데 소요되는 전력은 제품 종류에 따라서도 달라진다. 제품 n 한 개가 해당 주조 기계에서 생산되는 데 소요되는 전력량을 K_n [kWh]이라고 정의하자. 모든 주조 기계가 m번째 시프트에서 생산 작업을 수행하면서 소비하는 전력을 P_{2m} 이라고 하면 P_{2m} 은 다음과 같이 나온다.

$$P_{2m} = \sum_{n=1}^N K_n x_{nm}, m = 1, \dots, M \quad (7)$$

3) Power #3

마지막으로 주조가 완료된 제품의 후공정에 소비되는 전력을 의사결정변수로 표현한다. 앞서 설명했듯이 주조 제품이 주조 기계로부터 추출되면 트림프레스에서 주물의 스크랩 제거, 기계가공, 다듬질 그리고 열처리 등을 거쳐 완전한 제품이 된다. 이 과정에서 일정 전력이 소비되며, 소비 전력량 역시 제품 생산량에 비례한다. 제품 n 한 개가 주조된 후 후공정을 거치는 데 소요되는 전력량을 L_n [kWh]이라고 하고 m번째 시프트의 후공정에서 소비되는 전력량 총계를 P_{3m} 이라 하자. x_{nm} 으로 P_{3m} 을 나타내면 식 (7)과 유사하며 아래와 같다.

$$P_{3m} = \sum_{n=1}^N L_n x_{nm}, m = 1, \dots, M \quad (8)$$

위에서 구한 P_{1m} , P_{2m} , P_{3m} 를 더해서 m번째 시프트에서 다이캐스팅 공정이 소비하는 전력량 총합을 구한다. 이 값이 주조 공장에 미리 주어진 전력량 범위를 넘지 않도록 제한조건을 가해줌으로써 선형계획법 모델을 완성한다.

그런데 주조공장이 만족시켜야 하는 전력량 범위는 일반적으로 시프트별로 다르게 결정될 수 있다. 예를 들어 다이캐스팅 공정 시프트가 낮과 밤의 교대근무를 의미하고 스마트 그리드 시스템이 심야전력과 일반전력에 과금 등에서 차등적인 정책을 편다고 가정한다면[15], 지능형 소비자로서의 주조공장에 주어진 사용 전력량 범위는 필연적으로 시프트마다 달라진다.

본 논문에서도 이러한 일반적인 상황을 고려하여 시프트마다 다른 전력량 범위를 부과한다. m번째 시프트에서 다이캐스팅 공정이 소비하는 전력량 총합이 $[B_m, C_m]$ 의 범위를 넘지 못한다고 설정하자($B_m < C_m$, $B_m > 0$, $C_m > 0$). 세 전력 사용량의 합

$$P_m := P_{1m} + P_{2m} + P_{3m} \text{ [kWh]} \quad (9)$$

이 항상 이 범위 안에 머물러야 하므로 전력 사용량에

대한 제한조건은 다음과 같이 유도된다.

$$B_m \leq P_{1m} + P_{2m} + P_{3m} \leq C_m \quad (10)$$

$$B_m \leq \sum_{p=1}^P G_p W_{pm} + \sum_{n=1}^N (K_n + L_n) x_{nm} \leq C_m$$

$m = 1, \dots, M$

[표 1] 전력 사용량을 고려한 다이캐스팅 공정 스케줄링을 위한 선형계획법

[Table 1] LP model for scheduling of die casting processes considering power usage

<p>Maximize $E = \frac{1}{MP} \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^{r_p} \frac{w_{p(i)} x_{p(i)m}}{W_{pm}}$</p>
<p>Subject to</p> $\sum_{m=1}^M x_{nm} = d_n, n = 1, \dots, N$ $B_m \leq \sum_{p=1}^P G_p W_{pm} + \sum_{n=1}^N (K_n + L_n) x_{nm} \leq C_m$ <p>$m = 1, \dots, M$</p> $\sum_{i=1}^{r_p} w_{p(i)} x_{p(i)m} \leq W_{pm}, p = 1, \dots, P, m = 1, \dots, M$ $\sum_{i=1}^{s_q} (t_{q(i)} x_{q(i)m} + u_{q(i)}) \leq T_m, q = 1, \dots, Q, m = 1, \dots, M$ $x_{nm} \geq 0, x_{nm} \in \mathbf{I}, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M$

위에서 구한 전력 사용량에 대한 제한조건을 결합하여 표 1과 같은 다이캐스팅 공정 스케줄링을 위한 선형계획법을 완성한다. 의사결정변수 x_{nm} 이 0 또는 자연수이어야 하므로 본 모델은 정수계획법(Integer Programming)의 일종이다. 또 표 1을 보면 제안된 모델은 N개의 등식 제한조건과 (P+Q+1)M개의 부등식 제한조건으로 구성됨을 알 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 문제 설정

다이캐스팅 주조공장의 데이터를 이용하여 전력 사용량을 고려한 선형계획법 스케줄링 사례 연구를 실시한다. 본 논문에서는 Daeshin Metal[16]의 실제 주조공장에서 가져온 데이터와 Vaccaro 등[14]의 연구에서 제안된 스마트 그리드 내의 전력 사용 정책을 활용하여 표 2와 같은 공정 데이터를 구성하였다. 사례 연구 주조공장은 P=2개의 용융로와 Q=2개의 다이캐스팅 기계로 구성되며, 각기 다른 중량과 단위 생산 시간을 가진 총 N=5 종류의 주물 제품을 M=15 시프트 동안 주문 생산량 $d_1 \sim d_5$ 만큼 생산

한다. 다이캐스팅 공정 전력 사용량의 시프트별 제한 범위인 $[B_m, C_m]$ 은(m=1,...,15) 표 2에서 알 수 있듯이 홀수(odd) 시프트와 짝수(even) 시프트별로 다르게 할당되었다. 또 전력 사용량 매개변수 G_p, K_n, L_n 도 주조공장의 실제 전력 사용 정보를 바탕으로 표 2와 같이 구했다.

본 실험 설정에서는 주조공장에 공급되는 전력 사용량의 시프트별 제한 범위 중 하한 값 B_m 을 모든 시프트에서 2000[kWh]로 정하였다. 한편 상한 값 C_m 은 480분간 진행되는 8번의 홀수 시프트(주간 교대근무)의 경우 3000[kWh], 그리고 마찬가지로 480분간 진행되는 7번의 짝수 시프트(야간 교대근무)의 경우 3500[kWh]로 정하였다. Brevick 등[12]에서 조사한 바대로 미국 다이캐스팅 공장에서 사용하는 가스 도가니 용융로의 경우, 8.2% 에너지 평균효율을 고려할 때 알루미늄 인got 1kg을 용융하는 데 12.18×10^6 [J]의 에너지가 필요하다. 우리나라에서는 주로 효율이 더 높은 전기로를 사용하는데 약 20%의 효율을 적용하면, 약 5.0×10^6 [J]의 에너지를 사용한다. 이를 전력량(G_p)으로 환산하면 1kg당 약 1.5 [kWh]이다. 본 연구에서 사용된 로 1과 로 2에 모두 이 값을 적용하였다. 마지막으로 주조기계와 완성된 주물의 후공정에 사용하는 주물 중량 1kg당 전력량은 용융로가 사용하는 전력량의 각각 약 1/4과 1/5 정도이며, 실제 주물 중량을 고려한 주물 제품 (A~E) 1개당 전력량인 K_n [kWh]과 L_n [kWh]의 데이터도 표 2에 나타나 있다[16].

[표 2] 사례 연구를 위한 다이캐스팅 공정 데이터

[Table 2] Data of a die casting process for the case study

n (N=5)	A (n=1)	B (n=2)	C (n=3)	D (n=4)	E (n=5)
d_n [개]	350	350	430	300	380
w_n [kg]	14.7	14.2	12.5	9.7	10.4
t_n [min]	9.4	9.2	6.7	5.5	5.6
u_n [min]	10	10	8	7	8
K_n [kWh]	5	5	3	2.5	2.5
L_n [kWh]	3	3.5	2	3	2.5
p (P=2)	1	2	1	2	2
G_p [kWh/kg]	1.5				
q (Q=2)	1	1	2	2	2
M [회]	15				
T_m [min]	480, $\forall m=1, \dots, 15$				
W_{pm} [kg]	m=odd: $W_{1m}=700, W_{2m}=800$				
	m=even: $W_{1m}=800, W_{2m}=900$				
B_m [kWh]	m=odd: $B_m=2000$		m=even: $B_m=2000$		
C_m [kWh]	m=odd: $C_m=3000$		m=even: $C_m=3500$		

4.2 최적화 결과

표 3은 표 1에서 세운 선형계획법에서 전력 사용량 제한 조건 식 (10)을 제외하고 표 2의 공정 문제에 적용하여 용탕의 평균 효율을 최대로 하는 생산 계획 결과를 구한 것이다. 생산 계획의 전체 평균 효율은 E=93.9%로서 비교적 우수한 수치가 나왔다. 또 각 시프트별 제품 생산량 x_{m} 은 표 1의 제한 조건들을 모두 만족시킨다. 예를 들어 첫 번째 시프트 m=1에서 $x_{11}=0$, $x_{31}=56$ 이고 표 2에서 $w_1=14.7$, $w_3=12.5$ 이다. 제품 1(주물 A)과 제품 3(주물 C)은 모두 용융률 $p=1$ 이 녹이는 용탕으로 만들어진다. 첫 번째 시프트에서 용융률 1의 용탕 무게는 표 2로부터 $W_{11}=700$ 이다. 따라서

$$w_1 \times x_{11} + w_3 \times x_{31} = 14.7 \times 0 + 12.5 \times 56 = 700 \leq W_{11}$$

이므로 x_{11} 과 x_{31} 은 표 1의 용탕 무게 제한 조건 식 (4)를 만족시킨다. 표 3의 결과에 대한 나머지 제한 조건들도 이와 유사하게 검증 가능하다.

[표 3] 전력 사용을 고려하지 않은 선형계획법 결과
[Table 3] LP scheduling result without considering power usage

m	x_{1m}	x_{2m}	x_{3m}	x_{4m}	x_{5m}	P_m (kWh)	E_m (%)
1	0	50	56	9	0	3004.5	99.8
2	45	4	1	81	0	3394.5	88.9
3	2	47	53	6	7	2998.5	99.3
4	43	5	0	83	0	3393	88.2
5	47	0	0	0	76	3006	98.8
6	43	6	0	82	1	3401	89.0
7	0	50	56	0	8	2995	99.6
8	24	6	23	0	54	3178	76.0
9	0	46	56	1	13	2991.5	99.9
10	0	49	63	5	1	3314	91.1
11	39	5	10	0	69	2999.5	99.2
12	0	50	64	3	2	3321.5	92.2
13	45	0	3	0	76	3005	99.3
14	19	30	40	29	0	3316.5	88.0
15	43	2	5	1	73	3006.5	99.4
E(%)							93.9

하지만 표 3의 결과는 전력 사용량 제한 조건을 고려하지 않았기 때문에 한계치 이상의 전력량을 소비하는 시프트가 존재할 수 있다. 표 3에서 볼 수 있듯이 실제로 시프트 1, 5, 13, 15의 전력 사용량 P_m 이 모두 전력 사용량 상한 값 $C_m=3000$ [KWh]을 초과한다. 해당 주조공장이 실제 스마트그리드 운영 체제에서 동작한다면 이들 시프트 생산 과정으로 인해 주조공장은 전력에 대한 과금 등에서 불이익을 받게 되고 이는 결국 주조공정 효율의 저하를 야기하게 될 것이다.

표 4는 전력 사용량 제한 조건을 포함시킨 완전한 선형계획법으로 표 2의 다이캐스팅 주조공정 스케줄링 문제를 푼 결과이다. 표에서 확인할 수 있듯이 시프트 1, 5, 13, 15의 전력 사용량이 모두 상한 값 3000 이하로 제한되었다. 또 스케줄링 전체 평균 효율도 93.9%로서(소수 둘째자리에서 반올림) 전력 사용량을 고려하지 않은 이전 결과에 비해서 거의 차이가 나지 않는다. 이 결과는 본 논문에서 제안한 선형계획법이 용탕 효율 최적화를 구현하면서 동시에 전력 사용을 제한하는 스케줄링 해를 찾을 수 있음을 입증한다.

첫 번째 시프트에서의 생산량 변화를 예를 들어 설명한다. 표 3에서는 $x_{11}=0$, $x_{21}=50$, $x_{31}=56$, $x_{41}=9$, $x_{51}=0$ 이었으나 표 4에서는 $x_{11}=0$, $x_{21}=49$, $x_{31}=56$, $x_{41}=0$, $x_{51}=10$ 이다. 즉 전력 사용량을 고려하여 선형계획법을 풀면 첫 번째 시프트에서 제품 2(주물 B) 1 unit와 제품 4(주물 D) 9 unit 대신 제품 5(주물 E) 10 unit를 생산한다. 표 2를 보면 제품 5의 전력량 매개 변수 K_5 와 L_5 의 합은 $2.5+2.5=5$ 이며, 이 값은 제품 2와 제품 4의 매개 변수 합 $K_2+L_2=8.5$, $K_4+L_4=5.5$ 보다 작다. 따라서 표 4의 첫 번째 시프트가 보이는 생산량 변화는 이 시프트의 전체 전력 사용량 감소를 의미한다. 반면 첫 번째 시프트의 용탕 효율 E_1 은 전력 사용량을 고려하기 전 값이 99.8%이고 전력 사용량을 고려한 결과가 100%로서 거의 변화가 없다. 즉 제안된 선형계획법은 시프트의 용탕 효율 변화를 되도록 줄이면서 전력 사용량이 한계치를 넘기지 않는 새로운 생산 계획을 찾는다. 다른 시프트에서도 동일한 방법으로 전력 사용량 조절에 대한 분석이 가능하다.

[표 4] 전력 사용을 고려한 선형계획법 결과
[Table 4] LP scheduling result considering power usage

m	x_{1m}	x_{2m}	x_{3m}	x_{4m}	x_{5m}	P_m (kWh)	E_m (%)
1	0	49	56	0	10	2996.5	100
2	47	0	8	70	0	3351	87.2
3	4	42	51	11	9	2999.5	99.5
4	48	0	6	74	0	3371	88.7
5	23	23	28	1	44	2995	98.8
6	46	2	0	83	0	3391.5	88.6
7	0	50	56	6	2	2998	99.3
8	46	1	7	47	27	3355	64.1
9	4	45	51	0	15	2994.5	99.4
10	48	0	2	0	79	3339	91.3
11	0	46	56	1	13	2991.5	99.9
12	32	0	0	0	81	3211	76.2
13	4	43	51	2	16	2993.5	99.5
14	48	0	2	1	78	3339.5	91.3
15	0	49	56	4	6	2998.5	99.8
E(%)							93.9

5. 결론

과거 제안된 다이캐스팅 스케줄링 기법은 주조 공장이 사용 가능한 전력이 무제한이라고 가정하였다. 한 시프트에서 주조 기계를 총동원하여 특정 제품을 대량 생산하면 용탕 효율을 높일 수 있지만 소비되는 전력 사용량도 급격하게 증가하는 문제가 생긴다. 본 논문에서는 최근 스마트 그리드를 중심으로 연구되고 있는 양방향 전력 사용 및 전력 사용량 제한 정책에 대처할 수 있는 다이캐스팅 스케줄링 모델을 선형계획법을 이용하여 제안하였다. 본 연구의 핵심은 다이캐스팅 공정이 임의의 시프트에서 미리 주어진 범위의 전력 사용량을 넘기지 않도록 하는 스케줄링 결과를 얻는 것이다. 제안된 모델은 전력 사용량을 고려하지 않는 기존 모델보다 용탕 효율을 높이지는 않지만 주조 공장에 전력 사용량 제한이 가해지는 상황에 보다 유연하게 대처할 수 있는 장점을 지닌다. 현실적인 다이캐스팅 데이터와 전력 매개변수를 이용하여 사례 연구를 실시하고 제안된 선형계획법의 우수성과 응용가능성을 입증하였다.

References

[1] S. Kalpakjian and S. Schmid, "Manufacturing Processes for Engineering Materials," 5th ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 188-189, 2008.

[2] K. Deb, A. R. Reddy, and G. Singh, "Optimal scheduling of casting sequence using genetic algorithms," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 18, no. 3, pp. 409-432, 2003.

[3] R. Ruiz, F. S. Serifoglu, and T. Urlings, "Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems," *Computers & Operations Research*, vol. 35, pp. 1151-1175, 2008.

[4] S. W. Lin and K. C. Ying, "Applying a hybrid simulated annealing and tabu search approach to non-permutation flowshop scheduling problems," *International Journal of Production Research*, vol. 47, no. 5, pp. 1411-1424, 2009.

[5] J.-M. Yang and Y. K. Park, "Scheduling of casting in real foundries using linear programming," *Proceedings of IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 223, no. 10, pp. 1351-1360, 2009.

[6] Y. K. Park and J.-M. Yang, "Enhancing the efficiency of a die casting process using scrap recycling and ingot adjustment," *Proceedings of IMechE, Part B: Journal of*

Engineering Manufacture, vol. 225, no. 7, pp. 1105-1116, 2011.

[7] Y. K. Park and J.-M. Yang, "A scheme of preventing product shortage for die casting scheduling," *Journal of Korea Academia Industrial Cooperation Society*, vol. 12, no. 4, pp. 1565-1574, 2011.

[8] F. Pettersson and H. Saxén, "Model for economic optimization of iron production in the blast furnace," *ISIJ International*, vol. 46, pp. 1297-1305, 2006.

[9] J. H. Choi and C. W. Jung, "Ultra-broadband resistive power divider for smart grid application," *Journal of Korea Academia Industrial Cooperation Society*, vol. 12, no. 1, pp. 384-389, 2011.

[10] G. W. Arnold, "Challenges and opportunities in smart grid: a position article," *Proceedings of IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 922-927, 2011.

[11] J. H. Han and J. K. Baek, "The load forecasting in summer considering day factor," *Journal of Korea Academia Industrial Cooperation Society*, vol. 11, no. 8, pp. 2793-2800, 2010.

[12] J. Brevick, C. Mount-Campbell, and C. Mobley, *Final Report on Energy Consumption of Die Casting Operations*, U.S. DOE and O.S.U., p. 4, 2004.

[13] S. Massoud Amin and B. F. Wollenberg, "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century," *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, 2005.

[14] A. Vaccaro, M. Popov, D. Villacci, and V. Terzija, "An integrated framework for smart microgrids modeling, monitoring, control, communication, and verification," *Proceedings of IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 119-132, 2010.

[15] C. S. Kim and J. H. Kim, "A new market transformation policy for the mid-night demand discount program," *Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 22, no. 2, pp. 19-25, 2008.

[16] Daeshin Metal. <http://www.ds-al.com>.

양 정 민(Jung-Min Yang)

[정회원]



- 1993년2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 전자공학과 부교수

<관심분야>

비동기 머신 교정 제어, 구조공정 스케줄링

박 용 국(Yong Kuk Park)

[정회원]



- 1987년2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1988년 12월 : 미국 미시간대학교 산업공학과 (공학석사)
- 1995년 12월 : 미국 오하이오주립대학교 생산공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

피로파괴, 정형제조, 품질관리, 생산설계, 구조공정 스케줄링