

# 다이캐스팅 스케줄링의 결품 방지 기법

박용국<sup>1\*</sup>, 양정민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>대구가톨릭대학교 전자공학과

## A Scheme of Preventing Product Shortage for Die Casting Scheduling

Yong Kuk Park<sup>1\*</sup> and Jung-Min Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Catholic University of Daegu

요 약 다이캐스팅 스케줄링은 각 쉬프트마다 생산되는 주조제품의 개수를 결정하여 주어진 성능지수를 최적화하는 작업이다. 본 논문은 다이캐스팅 스케줄을 실제 주조공정에 적용할 때 불량주물 등의 이유로 발생하는 결품을 방지하는 새로운 기법을 제안한다. 선형계획법으로 모델링된 기존의 다이캐스팅 스케줄링은 용탕에 대한 용융로의 평균효율을 최대로 하지만 주조공정에서 불량품이 발생하는 문제에는 대처하지 못한다. 제안된 기법에서는 이전 쉬프트에서 불량주물이 발생하는 경우, 이를 대체할 수 있도록 현재 쉬프트에서 주조공정이 끝나고 남은 용탕의 잔여량을 이용하여 추가로 생산한다. 이 방법은 이미 최적화된 투입 용탕의 양이나 스케줄링 결과를 변경하지 않고도 불량이 발생한 주조제품의 생산량을 최대한 보상할 수 있는 장점을 지닌다. 사례 연구를 통하여 새로 제안된 기법의 우수성과 응용가능성을 검증한다.

**Abstract** Scheduling of die casting is a procedure of determining quantities of cast products so as to optimize a predetermined performance criterion. This paper presents a novel scheme of preventing product shortage raised by defective castings when die casting scheduling is applied to real casting operations. The previously developed linear programming (LP) model for die casting scheduling maximizes the average efficiency of melting furnaces in regard of the usage of molten alloy. However, the LP model is not able to cope with the problem of defective products occurring in the casting process. The proposed scheme is that whenever defective products are found in a shift, the foundryman produces additional cast products using the residue of molten alloy left at the end of the next shift. Neither the calculated amount of molten alloy nor the scheduling result of the LP model does not have to be altered for this method. The simulation result demonstrates the superiority and applicability of the newly proposed scheme.

**Key Words** : Die Casting, Scheduling, Linear Programming, Product Shortage, Efficiency of Molten Alloy

### 1. 서론

주조란 용융금속을 주형에 주입한 후 응고시켜 여러 가지 형상을 가진 제품을 성형하는 제조공법을 통칭한다. 주조는 액체금속을 사용해서 복잡한 형상이라도 한 번에 성형할 수 있기 때문에 몇 천 년 전부터 현재까지도 인류

의 주요한 제조기법으로 널리 쓰이고 있다. 여러 주조공법 중 다이캐스팅은 응고된 주물을 쉽게 취출할 수 있도록 두 개 이상으로 분리되어 제작된 금속주형 즉 금형에 용탕을 가압 주입하여 고속으로 주조하는 방법이다. 일반적으로 다이캐스팅은 타 주조공법에 비해 미세조직이 치밀하고 치수정밀도가 높은 주물생산에 적합하며, 단가가

이 논문은 2011년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임

\*교신저자 : 박용국(ykpark@cu.ac.kr)

접수일 11년 02월 24일

수정일 (1차 11년 03월 23일, 2차 11년 03월 28일)

게재확정일 11년 04월 07일

싸고 생산속도가 큰 동시에 복잡한 모양의 주물생산이 가능하다는 장점을 지닌다[1,2].

통상 주조공정은 합금 용융, 용탕 주입, 응고, 취출, 주물로부터 탕구계(gating system) 등 스크랩 제거, 주물의 기계가공, 다듬질 및 조립, 그리고 품질검사 등의 일련작업을 여러 번의 쉬프트(shift, 교대근무)를 거쳐서 반복적으로 수행한다. 이때 쉬프트마다 주조제품의 생산량에 차이가 발생할 수 있으며, 또한 쉬프트별 제품생산량에 따라서 변하는 주조공정의 성능 지수(performance criterion)를 정의할 수 있다. 쉬프트 기반으로 작업하는 주조공정을 위한 스케줄링은 각 쉬프트마다 생산되는 주조제품의 개수를 결정하여 주어진 성능지수를 최적화하는 작업이다[3].

주조 스케줄링에 대한 선행 연구들은 소모성주형 주조[4], 적시생산(JIT)[5], 이산잉곳무게(discrete ingot size)[4,6], 재가공시 스케줄링[7] 등 특정한 제한조건을 만족시키며 동시에 용융로의 평균효율을 최대로 하는 제품 생산량을 구하는 데 초점을 맞추었다. 그런데 다이캐스팅에서 최적화된 스케줄링 결과를 실제 주조공정에 적용하더라도 불량률이 발생하는 경우, 부득이하게 계획된 양의 주조제품을 생산할 수 없다. 실제로 용탕내 불순물, 레이들의 주입속도, 유지시간, 저속샷과 고속샷의 샷 프로파일(shot profile) 또는 주입속도, 가압, 용탕 유동, 응고 중 용탕 온도분포 등 주물 품질에 영향을 미치는 많은 공정변수에 따르는 여러 요인으로 인해, 불량이 발견되는 불량주물이 발생할 수 있다[2,8]. 금속출출, 기공, 불연속, 표면결함, 불안전주물, 치수오차, 개재물 등은 주조 직후 또는 기계가공 후 흔히 발견되는 다이캐스팅 제품의 불량들이다. 그런데 선행 연구들은 최대 효율을 가지는 주조 생산 계획만을 계산하여 제공해줄 뿐 불량품을 진단하거나 보상하는 일 같은 ‘스케줄링 후-공정’은 전혀 다루지 않았다.

본 논문은 이러한 스케줄링 후-공정에 대한 연구로서, 스케줄링 결과를 실행할 때 발생하는 결품(product shortage)을 방지하는 기법을 다이캐스팅 공정에 대해서 제안한다. 이전 연구와 마찬가지로 다이캐스팅 공정은 선형계획법으로 스케줄링되며, 용탕에 대한 용융로의 평균 효율을 최대로 하는 제품생산량을 쉬프트별로 구한다. 본 논문에서 가장 주목하는 것은 선형계획법으로 쉬프트별 생산 계획을 구했을 때 용융로의 효율이 100%가 되지 않으면 투입한 용탕의 일부가 필연적으로 남는다는 사실이다. 용탕 잔여량을 줄이기 위해 선형계획법 결과에서 투입하는 잉곳의 개수를 미리 줄이는 시도는 선행연구 [4]와 [6]에서 이루어졌다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 이전 연구들은 본 연구의 주제인 불량으로 인한 결품을 방지하는 문제를 해결할 수는 없다.

본 논문에서는 한 쉬프트에서 어떤 주조제품의 불량률이 발생하면, 차후 쉬프트에서 그 제품의 소재가 되는 용탕의 잔여량을 이용하여 불량품의 일부 또는 전부를 추가 생산하여 결과적으로 결품을 방지하는 새로운 기법을 제안한다. 이 기법이 가지는 가장 큰 장점은 선형계획법으로 구한 스케줄링 결과를 전혀 바꾸지 않고 결품을 추가 생산을 할 수 있다는 것이다. 또 제안하는 기법은 이번 연구에서 다루는 다이캐스팅 공정 스케줄링뿐만 아니라 기존의 저압주조 공정[9]이나 혼합주조 공정[6] 스케줄링에도 수정이 필요 없이 바로 적용 가능하다.

본 연구의 기법이 가지는 또 하나의 장점은, 불량품을 만들기 위해서 미리 정해진 양 이외의 용탕을 새로 투입하지 않는다는 점이다. 현재 쉬프트에서 발생하는 불량품을 선형계획법 스케줄링 결과로 생기는 차기 쉬프트의 용탕 잔여량을 활용하여 생산하기 때문에 추가로 잉곳을 녹일 필요가 없으며 따라서 전력 사용량 측면에서도 매우 효율적이다.

## 2. 다이캐스팅 공정 및 불량품

### 2.1 다이캐스팅 공정

일반적인 다이캐스팅 주조공장은 용융로, 레이들(ladle) 및 왕복기구(reciprocator)와 함께 금형을 장착한 다이캐스팅 기계, 응고된 주물을 취출하는 산업용 로봇, 컨베이어, 주물로부터 탕구계 등 스크랩을 제거하는 트림프레스(trim press), 주물의 기계가공 및 조립, 그리고 품질검사(QC) 등으로 이루어진 일관 생산현장을 의미한다. 다이캐스팅 공정의 특징은 0.6~275[MPa]의 높은 압력으로 금형공동부에 비철금속 용탕을 주입하여 주물을 생산한다는 점이다. 다이캐스팅 공정은 다시 구즈넥과 노즐을 사용하여 약 15~35[MPa]의 압력으로 주입하는 고온챔버공정, 그리고 샷슬리브를 사용하여 약 20~150[MPa]의 압력으로 주입하는 저온챔버공정으로 분류할 수 있다. 전자는 아연, 주석, 납 등의 낮은 용융온도 금속을 주로 사용하며, 후자는 비교적 높은 용융점을 가진 알루미늄, 구리, 마그네슘, 등의 비철금속과 합금을 사용한다[8,10].

앞서 기술한 장점 이외에도 다이캐스팅은 생산성이 높으며 형상의 복잡성, 표면정도, 치수정밀도도 우수하여 타 주조공정에 비해 후 공정이 적은 특징이 있다. 공차는 다이캐스팅 제품의 크기와 합금 종류에 따라 차이가 있지만 작은 주물의 경우 약 +/-0.025~0.25[mm]이며, 아연 다이캐스팅의 치수정밀도가 가장 우수하다[1]. 비록 다이캐스팅 기계와 금형제작비가 커 초기 투자비가 많이 소

요되지만, 자동화가 쉬우며 인건비도 절감할 수 있는 장점도 있다[8,10]. 그림 1은 수평형 저온챔버 다이캐스팅 기계를 보여준다.



[그림 1] 수평형 저온챔버 다이캐스팅 기계

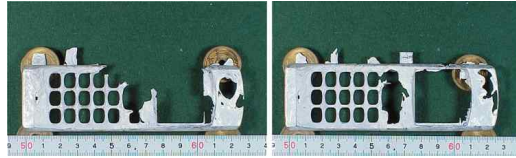
다이캐스팅 주조공장의 생산 계획 또는 스케줄링은 저압주조공장, 원심주조공장 등 일반 주조공장의 그것과 유사하다. 즉, 제한된 자원(용융로, 주조기계 등)을 이용하여 제한된 시간 또는 쉬프트내에 주문량을 모두 생산하여 납기일을 만족시키는 것이다. 따라서 [3,6,9] 등의 선행연구와 같이 주조공정의 성능 지수를 정의하고 쉬프트 기반으로 각 쉬프트마다 생산되는 주조제품의 개수를 결정하여 주어진 성능 지수를 최적화한다.

### 2.2 다이캐스팅 제품의 불량

전술한 바대로 일반적으로 다이캐스팅 주물은 치밀한 미세조직, 우수한 기계적 성질, 그리고 미려한 표면 등 품질이 우수하다. 그럼에도 사형주조법이나 정밀주조법에 의한 주물과 마찬가지로 다이캐스팅 제품 또한 표면결함, 형상 및 치수결함, 미스런(misrun) 또는 불완전주물, 치수 오차, 개재물, 금속돌출, 기공과 수축공, 불연속부분 등이 주조 직후 또는 기계가공 후 발견된다. 그리고 이 경우 불량주물로 판정 받을 수 있다.



(a)



(b)

[그림 2] 수축공 및 미스런 불량: (a) 다이캐스팅 주물들의 수축공, (b) 휴대전화기 프레임의 미스런

양품 또는 불량 주조품을 결정하는 요소들은 매우 다양한데, 용탕 온도, 용탕내 가스함유량, 가스 조성, 개재물 등의 불순물, 챔버내 유지시간, 플런저 속도와 변화, 챔버 압력, 금형공동부 압력, 용탕의 유동, 금형온도 및 분포 등의 많은 다이캐스팅 공정변수들의 제어에 의하여 품질이 결정된다[11].

불량의 판정은 흔히 육안 및 광학적 검사, X선 등의 비파괴검사(NDT) 또는 파괴검사를 통하여 이루어진다. 특히 기밀성과 수밀성, 내압성을 요구하는 밸브, 펌프용 다이캐스팅 제품의 경우는 유체 또는 공기 충전 후 압력을 측정하는 기밀 및 수밀 테스트를 실시한다. 또한 기계가공, 열처리 등의 후 공정을 거친 후 표면의 결함 등이 발견되는 경우도 흔하다. 그림 2는 수축공과 미스런 불량으로 인한 불량 다이캐스팅 제품을 보여주고 있다.

### 3. 선형계획법 스케줄링

[6]에서 제안된 혼합주조 공정 모델과 [9]에서 제안된 저압주조 공정 모델을 확장하여 다이캐스팅 공정을 위한 선형계획법 모델을 유도한다. 먼저 다이캐스팅 공정을 정확히 모델링하기위해 다음과 같은 매개변수들을 정의한다.

- N: 다이캐스팅 공정이 생산하는 주물제품의 종류
- n: 주물제품 종류의 인덱스(index),  $n=1, \dots, N$
- M: 다이캐스팅 공정이 거치는 쉬프트 횟수
- m: 쉬프트 인덱스,  $m=1, \dots, M$
- P: 한 쉬프트에서 동시에 사용되는 용융로 종류
- p: 용융로 인덱스,  $p=1, \dots, P$
- Q: 다이캐스팅 기계의 종류
- q: 다이캐스팅 기계의 인덱스,  $q=1, \dots, Q$
- $x_{nm}$ : m번째 쉬프트에서 주조되는 제품 n의 생산량
- $w_n$ : 제품 n의 단위 무게
- $t_n$ : 제품 n 1개가 생산되는 데 걸리는 시간
- $u_n$ : 제품 n의 다이(die)를 장착하는 데 걸리는 셋업(set-up) 시간

- $d_n$ : 제품  $n$ 의 생산 주문량
- $W_{pm}$ :  $m$ 번째 쉬프트에서 용융로  $p$ 가 녹이는 용탕의 양
- $T_m$ :  $m$ 번째 쉬프트에서 주조 기계에 할당되는 최대 작업 시간
- $r_p$ : 용융로  $p$ 의 용탕으로 제조되는 제품 종류
- $p(i)$ : 용융로  $p$ 의 용탕으로 제조되는 제품 종류의 인덱스,  $i=1, \dots, r_p$
- $s_q$ : 다이캐스팅 기계  $q$ 가 생산하는 제품 종류
- $q(i)$ : 다이캐스팅 기계  $q$ 가 생산하는 제품 종류의 인덱스,  $i=1, \dots, s_q$

다이캐스팅 공장의 주요 생산설비는  $P$ 개의 용융로와  $Q$ 개의 다이캐스팅 기계로 구성되며, 총  $M$ 번의 쉬프트를 거치면서 주조제품을 생산한다. 고객으로부터 주문을 받아 이 공장은 납기 기한 내에  $N$ 개 종류의 제품들을 각각  $d_1, d_2, \dots, d_N$ 개씩 생산해야 한다. 따라서 스케줄링을 통해 결정해야 하는 의사결정 변수는 각 쉬프트  $m$ 마다 생산해야 하는 주조제품  $n$ 의 생산량  $x_{nm}$ 이다.  $1 \leq m \leq M$ 이고  $1 \leq n \leq N$ 이므로  $x_{nm}$ 은 총  $NM$ 개의 변수로 구성된다.

선형계획법 모델의 목적함수는 전체 주조공정에 대한 용탕의 평균효율이다[4,6]. 각 용융로가 가지는 용탕의 효율은 ‘공급하는 용탕 대비 실제 소비되는 용탕의 비’로 정의된다.  $m$ 번째 쉬프트에서  $p$ 번째 용융로가 공급하는 용탕의 양은  $W_{pm}$ 이다. 로  $p$ 가 녹이는 용탕으로 주조되는 제품 종류 개수가  $r_p$ , 제품 종류의 인덱스가  $p(1), \dots, p(r_p)$ , 그리고 제품  $n$ 의 단위 무게가  $w_n$ 이라고 정의했으므로  $m$ 번째 쉬프트에서 로  $p$ 의 용탕으로 만들어지는 주조제품의 총 무게는  $\sum_{i=1}^{r_p} W_{p(i)}x_{p(i)m}$ 이다.  $m$ 번째 쉬프트에서 로  $p$ 가 가지는 용탕 효율을  $E_{pm}$ 이라고 하면  $E_{pm}$ 은 아래와 같이 유도된다.

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

선형계획법의 목적함수를  $E$ 라 하면,  $E$ 는  $E_{pm}$ 을 모든 용융로  $p=1, \dots, P$ 와 쉬프트  $m=1, \dots, M$ 에 대해 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.

다음으로 다이캐스팅 공정이 만족시켜야 할 제한조건을 선형방정식으로 표현한다. 먼저 각 쉬프트에서 주조되는 제품  $n$  생산량의 총합이 주문량  $d_n$ 과 일치해야 한다.

$m$ 번째 쉬프트에서 제품  $n$ 이  $x_{nm}$ 개 만들어지므로

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

와 같은  $N$ 개의 선형등식이 성립되어야 한다. 다음으로 용융로가 공급하는 용탕의 양보다 생산되는 제품의 총 무게가 더 클 수 없다는 부등식이 성립되어야 한다. 이 조건은 용탕 효율  $E_{pm}$ 이 1보다 클 수 없다는 명제와 같으므로  $E_{pm}$  식으로부터 아래와 같은  $PM$ 개의 부등식을 유도한다.

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

다이캐스팅 기계의 작업 과정에서도 위와 유사한 부등식을 얻을 수 있다. 다이캐스팅 기계  $q$ 가 생산하는 주조 제품 종류가  $s_q$ 개 있고 각 제품의 인덱스가  $q(1), \dots, q(s_q)$ , 그리고 제품  $n$ 의 단위 작업시간이  $t_n$ 이므로 기계  $q$ 가  $m$ 번째 쉬프트에서 제품을 만드는 데 소요되는 작업시간은  $\sum_{i=1}^{s_q} (t_{q(i)}x_{q(i)m} + u_{q(i)})$ 이다.  $u_{q(i)}$ 은 제품  $q(i)$ 에 해당하는 금형을 새로 장착하는 데 걸리는 셋업시간이다. 다이캐스팅 기계  $q$ 가  $m$ 번째 쉬프트에서 최대로 작업할 수 있는 시간이  $T_m$ 이라고 정의했으므로 아래와 같은  $QM$ 개의 부등식을 얻는다.

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

[표 1] 다이캐스팅 공정 스케줄링을 위한 선형계획법

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

마지막으로 의사 결정 변수  $x_{nm}$ 은 주조제품 생산량을 의미하므로 모두 0보다 크거나 같은 정수이다. 즉

$$x_{nm} \geq 0, x_{nm} \in \mathbf{I}, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M \quad (6)$$

이다( $\mathbf{I}$ 는 정수 집합).

위에서 구한 목적함수와 제한조건을 결합하여 [표 1]과 같은 다이캐스팅 공정 스케줄링을 위한 표준 선형계

획법을 완성한다[12].

#### 4. 결품 추가 생산

우선, 최적화된 스케줄링 결과를 실제 다이캐스팅 공정에 적용했을 때 발생하는 불량품을 표시하는 변수를 정의한다. m번째 쉬프트에서 생산되는 종류 n의 주조제품 중 불량주물의 개수를  $\theta_{nm}$ 이라고 정의하자.  $\theta_{nm}$ 은 2장에서 소개한 다양한 다이캐스팅 공정변수들과 외부 환경의 변화, 그리고 종류 n 제품의 생산량  $x_{nm}$ 에 따라서 생기는 확률변수(random variable)이다. 물론 스케줄링 결과 생산량  $x_{nm}$ 이 상대적으로 적게 나오는 쉬프트에서는  $\theta_{nm}=0$ 이 될 수도 있다.

본 논문에서는 불량품이 생긴 쉬프트 이후에 일어나는 쉬프트에서 남은 용탕의 잔여량을 이용하여, 불량이 발생한 제품을 추가 생산하는 방법을 제안한다. 선형계획법 스케줄링 결과를 적용한 후 m번째 쉬프트의 용융로 p에서 남은 잔여량을  $R_{pm}$ 이라 하면  $R_{pm}$ 은 아래와 같다.

$$R_{pm} = W_{pm} - \sum_{i=1}^{r_n} W_{p(i)} X_{p(i)m} \quad (7)$$

예를 들어, m번째 쉬프트에서 생산된 주조제품 n 중 불량품이 발생하여  $\theta_{nm}>0$ 이라고 하자. 또 제품 n은 용융로 p가 용융하는 용탕으로 만들어진다고 가정한다. 즉  $n \in \{p(1), \dots, p(r_p)\}$ 이다. 제품 n의 불량품을 추가 생산하기 위해서 m번째 쉬프트 이후에 오는 쉬프트에서 소비되고 남은 로 p의 용탕 잔여량을 조사한다. 이 잔여량이 제품 n의 단위 무게  $w_n$ 보다 크거나 같으면 최소한 1개 이상의 제품 n을 추가 생산할 수 있다. 그런데 불량품을 추가 생산하는 데 사용되는 용탕의 잔여량이  $\theta_{nm}$ 개의 불량품을 모두 만들기에 부족한 경우가 생긴다. 또한 동일한 용탕으로 만들어지는 2종류 이상의 제품이 동일한 쉬프트에서 동시에 불량품을 생산하여, 현재 잔여량으로 여러 종류의 제품을 모두 추가 생산하기가 불가능한 경우도 발생할 수 있다.

불량품에 대한 추가 생산은 스케줄링에 의해 사전에 결정된 생산 계획이 아니기 때문에, 되도록 추가 생산하는 횟수와 추가 생산하는 제품의 종류를 줄이는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 이러한 특성을 감안하여 아래와 같이 세 가지의 다이캐스팅 불량품 추가 생산 원칙을 세운다.

- 1) 어떤 쉬프트에서 한 가지 용탕으로 추가 생산하는 제품의 종류는 한 가지로 한다.
- 2) 발생한 불량품을 여러 쉬프트에서 나누어서 추가

생산하지 않는다.

- 3) 먼저 발생한 불량품을 우선적으로 추가 생산한다.

1)~3)의 원칙을 준수하면 마지막 쉬프트 M이 끝날 때까지 불량품  $\theta_{nm}$ 을 100% 추가 생산할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 물론 종류 n의 주물을 만드는 용탕의 잔여량이 충분하지 않을 때에도 완전한 추가 생산이 불가능하다. 이러한 경우에는 선형계획법 스케줄링 결과에 대한 주조공정이 끝난 후 결품을 막기 위한 작업을 불가피하게 한 번 더 수행해야 한다.

결품 추가생산 알고리즘을 서술하기 위해 m번째 쉬프트에서 제품 n의 생산품 중  $\theta_{nm}$ 개 불량주물이 발생하였다고 다시 가정하자. 또 제품 n의 합금을 용융하는 로를 p라 하자. 불량품  $\theta_{nm}$ 을 추가 생산할 수 있는 로 p의 잔여량은 m번째 쉬프트 이후에 발생하는 것들이므로  $R_{p(m+1)}, R_{p(m+2)}, \dots, R_{pM}$ 이다. 이 중 불량품  $\theta_{nm}$ 을 추가 생산하는 데 사용될 잔여량을 찾는 알고리즘은 다음과 같다.

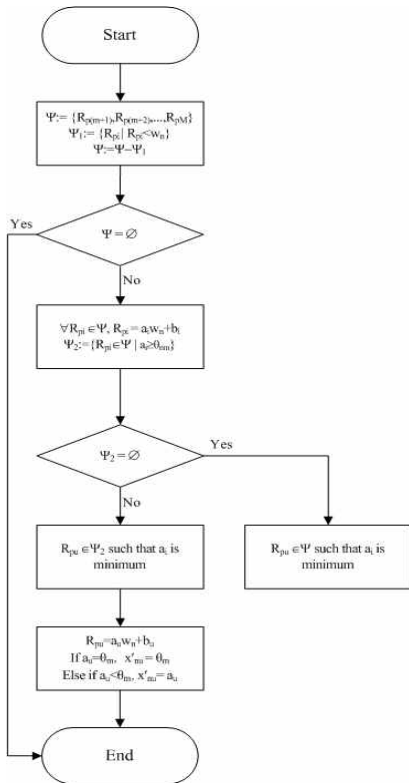
##### 알고리즘 1: 불량품 $\theta_{nm}$ 에 대한 결품 추가 생산

- i)  $\Psi := \{R_{p(m+1)}, R_{p(m+2)}, \dots, R_{pM}\}$ 라고 정의한다.  $\Psi=\emptyset$ 이면 알고리즘을 끝낸다.
- ii)  $R_{pi} \in \Psi$  중  $R_{pi} < w_n$ 인 원소로 이루어진 집합을  $\Psi_1$ 이라 하자.  $\Psi := \Psi - \Psi_1$ 로 치환한다.  $\Psi=\emptyset$ 이면 알고리즘을 끝낸다.
- iii)  $R_{pi} \in \Psi$ 인 모든  $R_{pi}$ 를  $w_n$ 으로 나눈 몫을  $a_i$ , 나머지를  $b_i$ 라 하자.  $a_i \geq \theta_{nm}$ 인  $R_{pi}$ 로 이루어진  $\Psi$ 의 부분 집합을  $\Psi_2$ 라 한다.
- iv) If  $\Psi_2 \neq \emptyset$ :  $\Psi_2$ 에 속한 원소 중  $w_n$ 으로 나눈 몫이 최소인 잔여량을  $R_{pu}$ 라 하자. 몫이 최소인 잔여량이 둘 이상 존재하면 쉬프트 값이 최소인 잔여량을  $R_{pu}$ 라 한다.
- v) Else if  $\Psi_2 = \emptyset$ :  $\Psi$ 에 속한 원소 중  $w_n$ 으로 나눈 몫이 최대인 잔여량을  $R_{pu}$ 라 하자. 몫이 최대인 잔여량이 둘 이상 존재하면 쉬프트 값이 최소인 잔여량을  $R_{pu}$ 라 한다.
- vi)  $R_{pu}$ 를 이용하여 추가 생산하는 제품 n의 개수를  $x'_{nu}$ 라 하자.  $R_{pu} = a_u w_n + b_u$ 에서  $a_u \geq \theta_{nm}$ 이면 쉬프트 u에서 제품 n을  $\theta_{nm}$ 개 모두 추가 생산할 수 있으므로  $x'_{nu} = \theta_{nm}$ 이다.  $a_u < \theta_{nm}$ 이면 쉬프트 u에서 제품 n을  $a_u$ 개 추가 생산하므로  $x'_{nu} = a_u$ 이다.

위 알고리즘의 의미를 설명하면 다음과 같다. 먼저 제품 n을 위해 사용되는 잔여량이 제품 n의 단위 무게  $w_n$ 보다 크거나 같아야만, 최소한 한 개 이상의 제품을 추가 생산할 수 있다. 따라서 단계 ii)의  $\Psi$ 와 같이  $w_n$  이상의

무게를 가지는 잔여량을 가려내야 한다.

다음으로는 불량품 개수  $\theta_{nm}$ 을 모두 추가 생산할 수 있는 잔여량을 찾는다. 단계 iii)에서 구한  $\Psi_2$ 가 이러한 잔여량들의 집합이다. 단계 iv)에서는  $\Psi_2$ 에 속하는 원소 중 몫이 최소인 값을 추가 생산하는 데 사용하기로 정한다. 즉  $\theta_{nm}$ 을 생산하기에 충분한 잔여량 중 가장 적은 값을 선택해야 다른 불량품에 대한 추가 생산 가능성이 더 높아진다. 반면  $\Psi_2 = \emptyset$ 이라면 단계 v)에서처럼  $\Psi$ 의 원소 중 몫이 최대인 잔여량을 선택한다. 즉  $\theta_{nm}$ 을 전부 추가 생산할 만큼 큰 잔여량이 존재하지는 않지만 그 중에서 되도록이면 더 많은 개수의 제품을 생산할 수 있는 값을 선택하는 것이 최선이다. 또 단계 iv)와 v)에서 동일한 몫을 가지는 잔여량이 둘 이상 나오면 모두 쉬프트 값이 최소인 잔여량을 택하도록 정하였다. 이것은 먼저 발생한 불량품에 대한 추가 생산을 우선적으로 수행한다는 원칙 3)을 지키기 위함이다. 그림 3은 알고리즘 1의 흐름도를 도시한 것이다.



[그림 3] 알고리즘 1의 흐름도

알고리즘 1의 방법을 모든 종류의 주물에서 발생하는 불량품에 적용시키면, 불량품을 추가 생산하는 순서 지정과 쉬프트 위치 결정이 완성된다. 원칙 3)을 만족시키기

위해서는 알고리즘 1을 첫 번째 쉬프트  $m=1$ 에서부터 순차적으로 적용시켜야 한다. 또 원칙 1)이 지켜지기 위해서 한 번 사용한 잔여량  $R_{pu}$ 를 이용하여 다시 불량품에 대한 추가 생산을 할 수 없다.  $R_{pu}$ 를 이용하여  $a_n$ 개의 제품  $n$ 을 만들면 다시 잔여량  $b_n$ 가 남는다. 그러나 원칙 1)에 따라서  $b_n$ 를 용융로  $p$ 의 용탕으로 주조되는 다른 주물의 불량품을 추가로 만드는 데 사용하지 않는다. 따라서  $\theta_{nm}$ 을 추가 생산하는 잔여량  $R_{pu}$ 를 결정한 이후 다른 제품과 쉬프트에서 발생하는 불량품에 알고리즘 1을 적용시킬 때에는 단계 i)의  $\Psi$ 에서  $R_{pu}$ 를 제외시켜야 한다.

$m$ 번째 쉬프트에서 용융로  $p$ 의 용탕으로 만들어지는 두 종류 이상의 제품으로부터 동시에 불량품이 발생하는 상황을 생각하자. 예를 들어 제품  $n$ 과 제품  $l$ 에서 불량품이 각각  $\theta_{nm}$ ,  $\theta_{lm}$ 개씩 발생하였다고 가정한다. 두 제품 모두  $m$ 번째 쉬프트 이후에 생기는 용융로  $p$ 의 잔여량을 이용하여 추가 생산될 수 있다.  $\theta_{nm}$ 과  $\theta_{lm}$ 에 알고리즘 1을 각각 적용시켜 나온 결과가 서로 다르면, 즉 각 제품의 추가 생산에 서로 다른 쉬프트의 잔여량이 할당되면, 알고리즘 적용 순서와 상관없이 결품 추가 생산 계획을 작성할 수 있다. 하지만 알고리즘의 결과로 두 제품의 추가 생산에 하나의 잔여량이 할당될 수 있다. 이때는 제품  $n$ 과 제품  $l$  중 우선순위를 미리 정해놓고 동시에 불량품이 생겼을 경우 결품 추가 생산 알고리즘을 어떤 제품에 먼저 적용할 것인가를 결정해야 한다.

우선순위를 정하는 방법은 다이캐스팅 공정의 특성과 각 제품의 중요도에 따라 다르다. 통상 단위 무게가 무거운 주물이 가벼운 제품보다 고가인 경우가 많다. 이러한 특성에 따라서 본 논문에서는 한 쉬프트에서 동시에 불량품이 발생했을 경우 단위 무게가 무거운 순서대로 알고리즘 적용 우선순위를 정하기로 한다. 쉬프트  $m$ 에서 동시에 발생한 제품  $n$ 과 제품  $l$ 의 불량품  $\theta_{nm}$ 과  $\theta_{lm}$ 이 순서를 따른다.  $w_n > w_l$ 이면  $\theta_{nm}$ 에 먼저 알고리즘 1을 적용해야 하고 반대로  $w_n < w_l$ 이면  $\theta_{lm}$ 에 결품 추가 생산 알고리즘이 먼저 작용된다. (다른 두 종류의 주물 제품의 단위 무게가 완전히 동일한 경우는 없다고 설정한다.) 이런 식으로 우선순위를 정해 순위가 높은 제품에 대한 추가 생산을 하고 다시 나머지 제품에 대해서 알고리즘을 계속 적용한다.

위에서 제안한 알고리즘은, 일반적인 스케줄링 기법에서는 폐기 처분될 용탕의 잔여량을 이용하여 불량품이 발생한 제품을 최대한 보상한다는 데 의의가 있다. 전술한 바와 같이 최적화된 스케줄링 결과로 나오는 용탕의 잔여량이 충분하지 않으면 발생한 불량품을 완전히 추가 생산하지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 그러나 이것은 불량률이 매우 높아 불량품 발생 빈도가 높으면 피할 수

없는 문제이므로 제안된 알고리즘의 성능과는 무관하다.

### 5. 예제

#### 5.1 용융로 효율 최적화 결과

다이캐스팅 주조공장의 데이터를 이용하여 용융로 효율 최적화 스케줄링과 결품 추가 생산 알고리즘에 대한 사례 연구를 실시한다. 본 논문에서는 [13]의 실제 주조공장과 다이캐스팅 공정의 스케줄링 문제를 벤치마크(benchmark)로 사용한다. 이 문제에서 주물 제품 종류 및 주조 공정 데이터는 표 2와 같이 정의된다. 표 2에서 볼 수 있듯이 다이캐스팅 공정은 P=2개의 용융로와 Q=2개의 다이캐스팅 기계로 구성되며, 각각 다른 중량과 단위 생산 시간을 가진 총 N=5 종류의 주물 제품을 M=14 쉬프트 동안 주문 생산량  $d_1 \sim d_5$ 만큼 생산하여야 한다.

[표 2] 다이캐스팅 공정 데이터

n (N=4)	A (n=1)	B (n=2)	C (n=3)	D (n=4)	E (n=5)
$d_n$ [개]	250	220	500	320	400
$w_n$ [kg]	17.9	24.2	10.1	8.7	9.6
$t_n$ [min]	10.7	11.8	6.2	5.3	4.6
$u_n$ [min]	10	11	8	7	8
p (P=2)	1	2	1	2	2
q (Q=2)	1	1	2	2	2
M [회]	14				
$W_{pm}$ [kg]	m=odd : $W_{1m}=700, W_{2m}=800$				
	m=even : $W_{2m}=800, W_{2m}=1000$				
$T_m$ [min]	500, $\forall m=1, \dots, 14$				

[표 3] 선형계획법 결과

m	$x_{1m}$	$x_{2m}$	$x_{3m}$	$x_{4m}$	$x_{5m}$	$E_{1m}$	$E_{2m}$
1	5	26	60	19	0	99.4	99.3
2	40	4	0	90	0	89.5	88.0
3	3	27	63	14	2	98.6	99.3
4	44	0	1	22	77	99.7	93.0
5	27	7	21	42	27	99.3	99.2
6	14	8	0	90	0	31.3	97.7
7	25	5	22	12	59	95.7	99.0
8	12	29	56	1	27	97.6	96.1
9	31	0	14	5	78	99.5	99.0
10	0	38	71	0	8	89.6	99.6
11	22	9	30	10	51	99.5	99.3
12	0	38	71	0	8	89.9	99.6
13	27	4	21	15	58	99.3	98.0
14	0	25	73	0	5	92.2	65.3
E(%)							93.4

표 3은 표 1에서 세운 선형계획법을 표 2의 공정 문제에 적용하여 용탕의 평균 효율을 최대로 하는 생산 계획 결과를 구한 것이다. 생산 계획의 전체 평균 효율은 E=93.4%로서 비교적 우수한 수치가 나왔다. 또 각 쉬프트별 제품 생산량  $x_{nm}$ 은 표 1의 제한 조건들을 모두 만족시킨다. 예를 들어 첫 번째 쉬프트에서  $x_{11}=5, x_{13}=60$ 이고 표 2에서  $w_1=17.9, w_3=10.1$ 이다. 제품 1과 제품 3은 모두 용융로 p=1이 녹이는 용탕으로 만들어진다. 첫 번째 쉬프트에서 용융로 1의 용탕 무게는 표 2로부터  $W_{11}=700$ 이다. 따라서

$$w_1 \times x_{11} + w_3 \times x_{31} = 17.9 \times 5 + 10.1 \times 60 = 695.5 < W_{11} = 700 \quad (8)$$

이므로  $x_{11}$ 과  $x_{31}$ 은 표 1의 용탕 무게 제한 조건을 만족시킨다. 또 기계 2대만을 이용하고 금형을 교체하여 5종류의 주물을 생산하므로, 비록 생산되는 제품 수에 편차는 크나 대신 용탕효율은 최적화되었다 표 3.

#### 5.2 불량품 발생과 결품 추가 생산

결품 추가 생산 알고리즘을 적용하기 위해서 실제 다이캐스팅 공장에서 표 3의 스케줄링 결과대로 주물제품을 생산한 후 표 4와 같이 불량품이 발생하였다고 가정하자. 먼저 표 3의 스케줄링 결과를 이용하여 각 쉬프트에서 사용된 용융로가 남기는 잔여량  $R_{pm}$ 을 모두 구한다. 그런 다음 알고리즘 1을 이용하여 불량품에 대한 결품 추가 생산 계획을 완성한다.

[표 4] 불량품 발생 개수

m	$\Theta_{1m}$	$\Theta_{2m}$	$\Theta_{3m}$	$\Theta_{4m}$	$\Theta_{5m}$
1	0	0	3	0	0
2	1	0	0	3	0
3	0	0	2	0	0
4	2	0	0	0	1
5	0	0	0	1	1
6	0	0	0	2	0
7	1	0	2	0	2
8	0	1	2	0	1
9	1	0	0	0	2
10	0	2	2	0	0
11	0	0	0	0	1
12	0	1	0	0	0
13	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0
합계	5	4	12	6	8

[표 5] 용융로 1로 주조되는 제품 A(n=1) 및 제품 C(n=3)에 대한 결품 추가 생산

u	R <sub>1u</sub>	x' <sub>1u</sub>	x' <sub>3u</sub>	결품 발생 쉬프트 (m)
1	4.5	-	-	-
2	84	0	0	-
3	10	0	0	-
4	2.3	0	0	-
5	4.6	0	0	-
6	549.4	0	0	-
7	30.3	0	3	1
8	19.6	1	0	2
9	3.7	0	0	-
10	82.9	2	0	4
11	3.2	0	0	-
12	82.9	1	0	7
13	4.6	0	0	-
14	62.7	0	2	3
합계		4	5	

표 5는 용융로 1로 제조되는 제품 1과 제품 3에 대한 결품 추가 생산 계획이다. 표 5에서 x'<sub>1u</sub>와 x'<sub>3u</sub>는 각각 쉬프트 u에서 추가 생산되는 제품 1과 제품 3의 생산량을 의미하고, '결품 발생 쉬프트(m)'는 쉬프트 u에서 만들어지는 제품이 어느 쉬프트(m)에서 발생한 불량품에 대한 추가 생산인지를 의미한다. 표 4의 첫 번째 쉬프트 m=1을 예를 들어 알고리즘 1의 구동 과정을 설명한다. 표에서 θ<sub>31</sub>=3이므로 제품 3의 총 생산량 x<sub>31</sub>=60 중 (표 3 참조) 세 개가 불량품으로 판정되었다.

- i) 아직 결품 추가 생산에 이용하기로 결정된 잔여량이 없으므로 집합 Ψ를 구하면 Ψ={R<sub>1,2</sub>, R<sub>1,3</sub>, ..., R<sub>1,14</sub>}이다.
- ii) Ψ의 원소 중 제품 3의 단위 무게 w<sub>3</sub>=10.1[kg]보다 작은 값을 표 5에서 찾으면 Ψ<sub>1</sub>={R<sub>1,3</sub>, R<sub>1,4</sub>, R<sub>1,5</sub>, R<sub>1,9</sub>, R<sub>1,11</sub>, R<sub>1,13</sub>}이다. Ψ에서 Ψ<sub>1</sub>의 원소를 제외한 집합을 다시 Ψ로 치환하면 Ψ={R<sub>1,2</sub>, R<sub>1,6</sub>, R<sub>1,7</sub>, R<sub>1,8</sub>, R<sub>1,10</sub>, R<sub>1,12</sub>, R<sub>1,14</sub>}이다.
- iii) Ψ의 각 원소 R<sub>pi</sub>를 w<sub>3</sub>=10.1로 나눈 몫 a<sub>i</sub>가 θ<sub>31</sub>=3보다 크거나 같은 집합 Ψ<sub>2</sub>를 구하면 Ψ<sub>2</sub>={R<sub>1,2</sub>, R<sub>1,6</sub>, R<sub>1,7</sub>, R<sub>1,10</sub>, R<sub>1,12</sub>, R<sub>1,14</sub>}이다.
- iv) Ψ<sub>2</sub>≠∅이므로 Ψ<sub>2</sub>에 속한 원소 중 w<sub>3</sub>으로 나눈 나머지가 최소인 원소를 찾는다. R<sub>1,7</sub>=30.3=3×w<sub>3</sub>+0이므로 b<sub>7</sub>=0이고 따라서 나머지가 최소인 원소는 R<sub>1,7</sub>이다.
- v) 해당 사항 없음.
- vi) R<sub>1,7</sub>을 이용하여 추가 생산하는 제품 3의 개수 x'<sub>37</sub>을 결정한다. a<sub>7</sub>=3≥θ<sub>31</sub>=3이므로 첫 번째 쉬프트에

서 발생한 제품 3의 불량품 세 개를 쉬프트 7에서 모두 추가 생산할 수 있다. 따라서 [표 5]의 u=7에서 볼 수 있듯이 쉬프트 7에서 결품 발생 쉬프트 m=1에 대한 추가 생산 계획 x'<sub>37</sub>=3이 세워진다.

다른 쉬프트에서 발생한 불량품에 대해서도 위의 절차와 동일하게 알고리즘 1을 구동하여 추가 생산 계획을 구한다. 한편 한 쉬프트에서 제품 1과 제품 3에 동시에 불량품이 발생했을 경우는 본 논문에서 제안한 대로 단위 무게가 더 무거운 제품에 알고리즘 1을 먼저 적용한다. 표 2를 보면 제품 1의 단위 무게 w<sub>1</sub>=17.9[kg]가 제품 3의 단위 무게 w<sub>3</sub>=10.1[kg]보다 더 무거우므로 제품 1에 우선적으로 결품 추가 생산 계획을 실시한다. 예를 들어 표 4의 m=7에서 θ<sub>17</sub>=1이고 θ<sub>37</sub>=2이므로 두 제품에서 동시에 불량품이 발생하였다. 하지만 표 5를 보면 알고리즘 1의 구동 결과 쉬프트 u=12에서 θ<sub>17</sub>을 위한 결품 추가 생산 계획이 우선적으로 나왔다는 사실을 알 수 있다. θ<sub>37</sub>에 대해서는 알고리즘 1의 선택 조건들을 만족시키는 잔여량이 없기 때문에 추가 생산 계획이 세워지지 않았다.

[표 6] 용융로 2로 주조되는 제품 B(n=2), 제품 D(n=4) 및 제품 E(n=5)에 대한 결품 추가 생산

u	R <sub>1u</sub>	x' <sub>2u</sub>	x' <sub>4u</sub>	x' <sub>5u</sub>	결품 발생 쉬프트 (m)
1	5.5	-	-	-	-
2	120.2	0	0	0	-
3	5.6	0	0	0	-
4	69.4	0	0	0	-
5	6	0	0	0	-
6	23.4	0	0	1	5
7	8.2	0	0	0	-
8	39	0	3	0	2
9	7.7	0	0	0	-
10	3.6	0	0	0	-
11	5.6	0	0	0	-
12	3.6	0	0	0	-
13	15.9	0	0	1	4
14	347	0	1	0	5
합계		0	4	2	

표 6은 용융로 2로 제조되는 제품 2, 4, 5에 대한 결품 추가 생산 계획이다. 각 불량품을 추가 생산하기 위한 잔여량 할당 과정은 표 5와 유사하게 해석할 수 있다.

본 모의실험에서 설정한 불량품 발생 총 개수를 표 4의 맨 마지막 행으로부터 구하면 35개이다. 또 표 5에서는 9개, 표 6에서는 6개의 제품이 각각 생산되므로 다이캐스팅 스케줄링 결과에 결품 추가 생산 알고리즘을 적



용한 결과, 총 15개의 제품이 추가 생산된다는 것을 알 수 있다. 즉, 제안된 결품 추가 생산 알고리즘은 본 모의 실험에서 가정한 스케줄링 문제에서 발생하는 불량품에 대해서 약 43%의 추가 생산율을 가진다. 이 결과는 제안된 기법이 용탕을 추가로 녹이거나 선형계획법으로 구한 최적 스케줄링 결과를 전혀 바꾸지 않으면서 불량품에 대한 결품 방지 기능을 구현한다는 사실을 입증한다.

## 6. 결론

다이캐스팅 스케줄링은 주어진 성능 지수를 최적화하도록 각 쉬프트별로 생산할 주물의 종류와 개수를 결정한다. 그런데 최적화된 스케줄링 결과를 실제 다이캐스팅 공장에 적용할 때 예기치 않은 불량품이 발생하는 경우는 계산된 양만큼 양품을 생산하지 못하기 때문에 납기 내에 주문량을 채우지 못하는 결품 상황이 발생할 수 있다.

- 1) 본 연구에서는 스케줄링 결과를 실제 다이캐스팅 공정에 적용할 때 생기는 결품을 방지하는 새로운 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 어떤 쉬프트에서 불량주물이 발생하는 경우 이를 대체할 수 있도록 다음 쉬프트에서 생산이 끝나고 남은 용탕의 잔여량을 이용하여 추가로 생산하는 것이다.
- 2) 이를 위하여 추가 생산할 주물의 종류와 쉬프트를 결정하고 추가 생산할 주물의 우선순위를 정하는 경험적 방법(heuristic method)을 제안하였다. 이 방법은 이미 최적화된 투입 용탕의 양이나 스케줄링 결과를 변경하지 않고도 불량이 발생한 주요 제품의 생산량을 최대한 보상할 수 있는 장점을 지닌다.
- 3) 실제 사례연구를 통하여 새로운 기법의 우수성과 실용성을 검증하였다.

## 참고문헌

[1] B. H. Amstead, P. F. Ostwald, and M. L. “Begeman, Manufacturing Processes”, 8th ed., Wiley, Singapore, pp. 104-109, 1987.

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

[3] 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.

[4] 박용국, 양정민, “잉곳 무게 제한 조건을 고려한 job-shop형 주물공장의 스케줄링”, 산업경영시스템학회지, 제31권, 제3호, pp. 17-23, 2008.

[5] 박용국, 양정민, “적시 생산 방식에서의 주조공정 스케줄링”, 산업경영시스템학회지, 제32권, 제3호, pp. 40-48, 2009.

[6] Y. K. Park and J.-M. Yang, “Optimization of mixed casting processes considering discrete ingot sizes”, Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 23, no. 7, pp. 1899-1910, 2009.

[7] 신현준, 유재필, ‘비안정적인 Rework 확률이 존재하는 제조공정을 위한 적응형 스케줄링 알고리즘’, 한국산학기술학회논문지, 제11권, 제11호, pp. 4174-4181, 2010.

[8] A. Kaye and A. Street, “Die Casting Metallurgy”, pp. 1-9, Butterworths and Co., London, 1982.

[9] 박용국, 양정민, 김진곤, “Permanent Mold를 이용한 저압주조공정의 스케줄링”, 한국경영공학회지, 제14권, 제1호, pp. 99-109, 2009.

[10] S. Kalpakjian, “Manufacturing Engineering and Technology”, 3rd ed., Addison-Wesley, U.S.A., pp. 313-316, 1995.

[11] J. A. Schey, “Introduction to Manufacturing Processes”, 2nd ed., McGraw-Hill, U.S.A., pp. 171-172, 1987.

[12] D. G. Luenberger, “Linear and Nonlinear Programming”, 2nd ed., Addison-Wesley, 1989.

[13] 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. 224, 2011, in press.

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, 주조공정 스케줄링

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