

## 연구연속제조업 일정계획 문제에서 기계고장을 고려한 통계적 시뮬레이션 Dispatching 방법 연구

고 동 진\*, 이 철 응\*\*

### A dispatching policy for stochastic scheduling simulation considering machine breakdowns

Dongjin Ko\*, Chulung Lee\*\*

#### 요 약

본 논문에서는 연속제조 생산방식을 취하는 제조업에서 기계고장이 발생하여 생산 일정이 실시간으로 변경되어 야 하는 환경에서도 적용 가능한 dispatching 방법을 개발한다. 개발된 dispatching 방법은 생산지연으로 인한 재료의 재가열 비용과 설치비용, 잔여납기일을 고려하여 지표를 개발하고, 지표의 값이 가장 작은 재료에 우선순위를 부여하여 기계에 할당하는 방식을 취하고 있다. 개발된 dispatching방법의 우수성 입증하기 위해 SPT와 선입선출 방법을 비교대상으로 선출하고, 이들 방법을 통계적 시뮬레이션을 통해 도출된 손실비용을 비교분석한다. 통계적으로 유효성을 입증하기 위해 각 방법별로 200개의 데이터와 20번의 반복을 통해 실험을 실시하며, 실험결과 본 연구에서 제시한 방법이 비교대상 방법에 비해 유효한 손실비용의 감소효과를 보였다. 또한 본 논문에서 개발된 통계적 시뮬레이터는 대기시간에 발생 가능한 비용을 추가하거나 변경이 용이하여 불확실성을 고려한 생산일정계획 부문에 유용하게 사용될 것으로 기대한다.

#### Abstract

We develop a dispatching policy for stochastic scheduling simulation especially for a continuous manufacturing system with machine breakdowns. The proposed dispatching policy computes an urgency index with the consideration of re-heating, setup cost and remaining due date. Prioritized by the index, we execute swapping or reassigning material sequences so as to minimize the total penalty cost. To evaluate the performance of the proposed policy, a discrete event simulation is developed. With 200 data sets and 20 iterations, we compare the performance of the urgency policy with those of SPT (Shortest Processing Time) and FCFS (First Come First Serve) which are the most common policies. The result shows that the proposed policy consistently gives the lowest total costs by reducing the penalty costs for lateness.

▶ Keyword : Dispatching 방법 (Dispatching Policy), 통계적 시뮬레이션 (Stochastic Simulation), 기계고장(Machine breakdowns)

• 제1저자 : 고동진    교신저자 : 이철응

• 투고일 : 2010. 04. 13, 심사일 : 2010. 04. 28, 게재확정일 : 2010. 05. 06.

\* 고려대학교 정보경영전문대학원 석사과정    \*\* 고려대학교 정보경영공학 전문대학원 부교수

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(NRF-2009-0076365)

## I. 서론

최근 10여 년 동안 개별적인 재료가공 방식보다 생산속도가 빠르고 비용이 저렴한 배치 생산방식은 일정계획 문제들 중 지대한 관심분야가 되었으며, [2] 여러 개의 공정단계(Multi-Stage)와 여러 개의 제품(Multi-Product)로 구성된 배치 일정계획 문제(이하, MSMP라 명한다.)가 하나의 공정단계(Single-Stage)와 여러 개의 제품(Multi-Product)으로 구성된 배치 일정계획 문제(이하, SSMP라 명한다.)에 비해 문제의 크기와 경로의 복잡성으로 인해 주된 관심분야로 부각되었다. [14]

제철산업의 경우 대표적인 배치 생산방식을 취하는 제조업으로 최근 신흥시장과 중국시장의 성장으로 철강수요가 늘어나면서 비약적인 발전을 이루어왔다. 다양해진 고객요구에 대응하기 위해 공정단계를 증설함으로써 철강 제품의 다양화를 구현해 왔다. 이렇듯 추가되는 공정단계와 가공기계 수의 증가는 경로의 복잡성을 증대시켰고, 배치방식으로 생산하기 위한 주문의 그룹화 작업 역시 복잡해졌다.

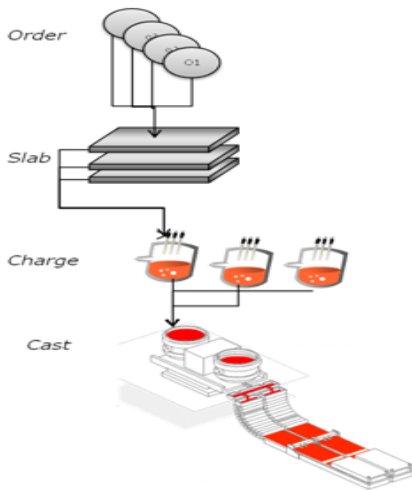


그림 1. 재료단위  
Figure 1. Material Units

스케줄링 문제는 주어진 시간 동안에 최소성이 있는 자원을 어떻게 배분할지에 대한 문제로 [7] 제철생산계획 문제는 다양한 공정 단계를 통해 다양한 제품들을 배치 생산하는 MSMP문제에 포함이 된다. 하지만 '적정 가공온도 유지'와 '연속생산', '주문 그룹'이라는 특수성으로 생산지연에 따른 재

료 손실비용이 다른 재료까지 이전되는 특징을 가지고 있다.

주문의 통합 단위는 그림 1과 같이 세 가지(slab, charge, cast)로 구성되어 있으며 cast는 charge의 묶음을, charge는 slab의 묶음을, slab는 주문의 묶음을 의미한다. 이와 같이 주문의 조합을 slab로 설계하며, slab조합을 charge단위로 그룹화를 한 뒤 재료와 주문을 매칭하고 일정계획을 세우게 된다.

또한 제철산업의 일정계획 연구가 현실적인 모형에 근접하기 위해서는 불확실성 사건(기계고장, 재료부족, 긴급주문 등)에 강건한(robust) 일정계획을 도출할 수 있는 유연성이 내포되어야 한다.

본 연구는 생산지연이 발생하는 경우를 기계 고장으로 제한하고, 손실비용이 고려된 재료의 가공우선순위 할당방법을 개발한다. 개발된 방법의 손실비용을 측정하기 위하여 제강, 제선, 연주 공정을 모형화한 시뮬레이터를 개발하고 선입선출, SPT(Shortest Processing Time) 할당방법을 시뮬레이션에 적용했을 때 도출된 손실비용과 비교분석을 실시한다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2절에서는 제철 일정계획문제들에 대한 기존 연구들을 분석 및 한계점을 도출하고, 3절에서는 2절에서 도출된 한계점을 고려한 본 연구의 문제를 정의한다. 또한 개발된 시뮬레이터 모형에 대하여 설명한다. 4장에서는 기계고장 사건이 발생하였을 경우에도 강건한 생산계획을 도출할 수 있는 재료할당 방법을 개발한다. 5장에서는 시뮬레이션 실험환경과 수준을 결정하고, 시뮬레이션 실험을 통해 각 방법별 손실비용을 비교분석한다.

## II. 기존 연구

제철생산계획 문제는 다양한 공정단계를 통해 다양한 제품들을 생산할 수 있도록 계획되어야 하며, 선행연구들은 대기시간에 따른 비용, 대기시간의 최소화를 목적으로 연구해왔다.

제철생산의 일반적인 제조 공정은 제강, 제선, 연속주조, 압연, 냉연의 순으로 되어있으며, 제품의 종류(자동차 박판, 후판, 스테인리스, 선재)에 따라 제강에서 압연과 냉연공정은 세부공정에 차이점이 발생한다. 특히 공정단계 중 제강, 제선, 연속주조공정(continuous casting)공정은 cast내의 charge의 조합, 고객인도 일자가 결정되는 주요 공정 및 공통 공정으로 다음 공정인 압연, 냉연 등의 생산계획을 결정하는 주요 모형으로 여겨진다. [8][10]

Redwine과 Wismer [4]는 주문 납기일을 만족시키기 위한 수리적 모형을 제시하였다. 목적함수는 납기일에 근거한 납기이후 생산되는 비용의 최소화로 주문을 임의적으로 발생

시키며 발생된 재료는 특정 가공기계 순서를 가지고 있는 것으로 가정하였다. 수리적 모형은 각 공정단계별 한 개의 기계로 설정되어 있으며, 최적해를 찾기 위한 알고리즘을 제시하고 다른 dispatching 알고리즘과 비교분석을 실시하였다. 하지만 공정단계별 기계의 수를 한 개로 제한하여 기계고장이 발생하였을 경우를 고려하지 못한 점과 배치생산이 아닌 단일 주문에 의한 생산방법을 적용하였으며, 손실비용을 납기이후 발생하는 비용으로 한정된 한계점이 있다.

Tang [9] 등은 최소의 손실비용을 도출하기 위한 수리적 일정계획 모형을 MSSP문제로 설계하여 1) 단계 내 대기시간 비용, 2) 단계 간 대기시간 비용, 3) 납기일 전에 생산되어 발생하는 재고비용, 4) 납기 후 생산되어 발생하는 손실비용을 정의하였다. 가공시작 시간을 결정변수로 손실함수의 납기 전 생산에 따른 재고비용의 최소화와 납기 후 생산에 따른 손실비용의 최소화 함수를 결정변수인 가공시작시간으로 치환을 함으로써, 수학적 모형을 제시하고 Lagrangian Relaxation을 통하여 실제 데이터의 가공공장을 임의적으로 발생시켜 상한값과 하한값을 분석하였다. 하지만 모형이 단일 재료에 국한이 되어 있고, 그렇기 때문에 재료의 변경에 따른 설치비용이 총 손실비용함수에 누락이 되었다.

Arezoo [2] 등은 기존의 선행연구들이 정해진 시간 내에 최적 해를 도출하지 못하는 단점을 해결하기 위해 ant colony 알고리즘과 비선형계획법을 혼합한 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 스케줄 문제를 크게 두 단계로 나누고, 첫 번째 단계에서는 기계할당, 가공순서등과 같은 이산변수들의 값을 구하며, 두 번째 단계에서는 작업시간과 같은 연속형 변수들에 값을 도출하는 방법으로 혼합 알고리즘을 구현하였다.

Tang과 Wang [10]은 고객으로부터 들어온 주문을 재료와 매칭시키는 문제와 편성된 재료의 생산계획을 세우는 문제를 통합적으로 관리 할 수 있는 의사결정 지원 시스템을 제안했다. 제안된 시스템은 두 단계의 구조로 되어 있으며 첫 번째 단계에서는 선형계획법으로 재료편성 문제를 제시하고, 두 번째 단계에서는 편성된 배치를 통해 타부서치 알고리즘을 이용하여 생산일정을 도출해 냈다. 하지만 기계고장으로 정보변경이 요구되는 상황이 발생하는 경우, 해당 선행 연구의 모형은 첫 번째 단계부터 문제를 다시 풀어야 하는 단점을 가지고 있으며, 이론적인 스케줄링 연구는 실시간으로 정보 변경이 요구되는 실제 환경에서 거의 사용되지 않는다. [11]

실시간으로 정보변경을 실시하기 위한 방안으로는 dispatching을 통해 재료를 기계에 배정하는 방법이 있으며, 이에 대한 연구는 아래와 같다.

Yao와 Pei [5]는 일반적인 FMS를 가정한 후 일정계획을

수정해야 하는 사건이 발생하였을 때 대체 기계의 경로 유연성을 측정하기 위하여 기계의 고장 확률과 기계의 수리확률을 설정해 entropy이론을 적용하였다. 대체 경로에 재료를 배정함으로써 다음 재료들이 갈 수 있는 대체 경로의 손실분을 계산하여, 가장 적은 손실분을 보유한 기계가 대체경로로 설정되는 dispatching방법을 개발하였다.

Pipani와 Wetjens [12]는 Yao의 유연성 측정방법을 이용하여 남아 있는 재료의 수에 따른 유연성 손실분을 계산한 dispatching 방법을 통하여 재료의 대체기계할당 방법을 개발하였다. 하지만 위의 두 연구는 기계고장 확률과 수리확률, 대기 중인 재료의 수만 이용하여 기계할당을 하기 때문에 재료의 크기와 가공시간이 다양한 제철산업에 적용하기에는 적절하지 못하다.

본 연구에서는 기존연구들의 한계점을 보완할 수 있도록 MSMP환경에서 기계고장 사건이 발생되어도 실시간으로 재료의 가공순서와, 할당기계를 변경할 수 있는 dispatching방법을 개발한다.

### III. 문제정의 및 시뮬레이션 모형

#### 3.1 문제정의

MSMP 환경에서 문제의 사이즈가 큰 경우, 최적의 재료 조합을 찾는 문제는 NP-Hard 문제로 증명이 되었으며 [6], 휴리스틱을 적용한 접근방법은 실시간으로 정보변경을 하기에 시간적 제약으로 인하여 용이하지 못하다. 그렇기 때문에 본 연구의 목적은 MSMP 환경에서 기계고장사건이 발생되었을 때에도 재가열 비용과 설치비용, 잔여납기일을 고려하여 강건한 생산계획을 도출 할 수 있는 dispatching방법을 도출하는 것이다.

재가열 비용은 야드에서 대기하는 시간에 따라 재료의 온도가 떨어져 가공이 불가능한 경우, 재료를 적정 가공온도까지 올리는 비용을 말하며, 설치비용은 가공할 재료와 가공한 재료의 종류가 다른 경우, 기계의 주형틀을 교체하기 때문에 발생하는 비용이다.

본 논문에서 제시한 문제를 실제 환경과 근접한 모형에 실험하기 위하여 기계의 가공속도, 운송시간, 기계고장 위치, 발생시간을 사전에 알 수 없는 확률적(stochastic)분포를 따르는 시뮬레이션을 개발하고 손실비용을 도출한다.

시뮬레이션 모형의 범위는 총 3개의 단계(제선, 제강, 연주)로 구성이 되어 있으며 그림 2와 같이 각 단계 내 기계를

은 병렬로 연결되어 있다. 두 가지 종류의 재료가 존재하며, 도착한 재료는 세 단계의 공정에서 순차적으로 가공 된다.

가공을 위한 다음 공정의 기계 상태가 '가공 중' 혹은 '고장' 일 경우에는 재료 종류에 관계없이 1개의 큐에서 대체기계에 할당될 때까지 대기하게 되고, '가공가능'일 경우에는 야드를 거치지 않고 다음공정에서 가공이 시작된다.

본 연구에서 고려한 각 공정의 기능과 역할은 아래와 같다.

제선공정 : 철광석과 원료탄, 유연탄을 고로에 넣은 뒤 뜨거운 바람을 불어 넣어 쇳물(용선)을 생산하는 공정

제강공정 : 고로에서 생산된 쇳물의 불순물을 제거하는 공정으로 순수한 산소를 불어 넣어 불순물을 제거한 용강을 생산

연주공정 : 액체 상태인 용강을 주형(mold)에 주입하여 연속 주조기를 통해 슬래브나 블룸, 빌릿 등의 중간 소재를 만드는 공정

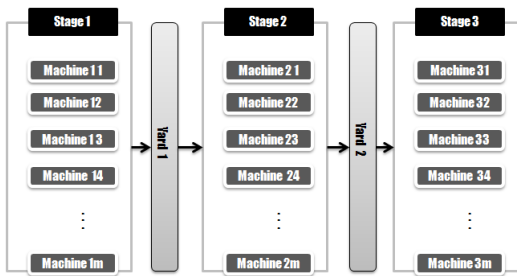


그림 2. 시뮬레이션 모형의 범위  
Figure 2. Simulation Modeling

### 3.2 시뮬레이션 모형 및 구성

개발된 시뮬레이션은 그림 3와 같은 모듈로 구성되어 있으며 데이터베이스와 연동되어 작업이 진행된다. 총 6개의 모듈로 구성되어 있는 시뮬레이션은 설치(set-up) 모듈에서는 시뮬레이션 초기화하고, 입력데이터를 읽어 도착시간에 따른 각 재료할당 방법에 따라 초기 해(공장경로)가 부여된다. 사건(event) 모듈에서는 랜덤 하게 기계고장 사건을 발생시키고, 이를 사건 데이터베이스에 저장한다. 데이터베이스 체크 모듈에서는 기계고장 사건이 발생한 지역과 발생 지속시간을 공장 데이터베이스에 업데이트하고, 각 재료들의 생산계획이 사건에 영향을 받는지를 실시간으로 점검한다. 데이터베이스 체크 모듈을 통하여 실시간으로 공장의 상태를 읽어 오므로써 재료가 기계에 할당이 가능한지에 대한 여부를 판단하고, 사건의 영향으로 가공이 불가능한 경우에는 컨트롤러 모듈을 호출하여 개발된 재료의 종류에 따라 가공가능공장 (alternative machine set)과 순서 재할당 재료를 추출한다. 이벤트에 영향을 받지 않는 재료들은 시뮬레이션 모듈의 입력 값으로 넘어간다. 추출된 재료는 컨트롤러 모듈에서 초기해를 부여한 방법과 동일하게 재료의 할당을 실시한다. 할당된 재료와 기계의 내역은 시뮬레이션 모듈의 입력 값으로 사용되며 각 단계(stage)별로 재료를 할당하여 리포트 모듈을 통해 결과가 도출된다.

### 3.3 가정

앞서 언급하였듯이 기계고장 사건에도 강건한 재료할당방법을 개발하는 것을 목적으로 하며 시뮬레이션 모형을 통해 개발된 방법의 총 손실 비용을 도출하게 된다. 그리고 다음을 추가로 가정한다.

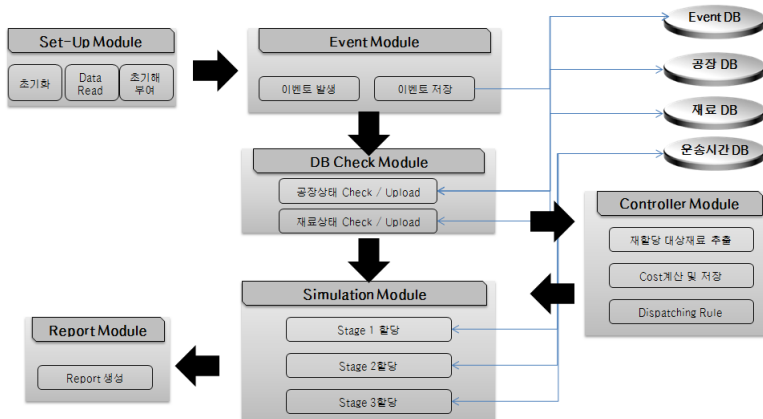


그림 3 시뮬레이션 구조  
Figure 3. Simulation Architecture

- 1) 재료의 도착간격은 포아송 분포(도착률  $\lambda$ )를 따른다.
- 2) 기계들의 가공속도(ton/unit time)는 정규분포  $N(\mu_p, \sigma_p^2)$ 를 따르며, 단계 간 운송시간도  $N(\mu_t, \sigma_t^2)$ 인 정규분포를 따른다.
- 3) 기계마다 특정제품만을 가공할 수 있는 기계와 모든 종류의 재료를 가공할 수 있는 기계로 구분되어 있으며, 생산가능 제품이 아닌 경우 추가적으로 설치 비용이 발생한다.
- 4) 기계고장 사건은 임의적으로 발생되며 종료시간은 사건에 알 수 없다.
- 5) 재가열 비용을 계산하기 위해 이전 단계 가공시간에  $\alpha$ 를 곱한 값을 대기시간의 최대 허용범위로 하며, 범위 내에서는 재가열 비용이 일정하게 증가하나, 초과하면 일정한 재가열 비용이 발생한다.
- 6) 재료의 기계할당 방법은 각 방법들의 할당원칙에 맞게 부여되며, 기계고장이 발생하였을 경우에도 동일한 할당방법이 적용된다.
- 7) 기계에는 한 개의 재료만 할당 가능하며, 사건 발생이 작업 도중 발생한 경우, 해당 작업도 대체기계의 경로를 할당 받아 다시 가공된다.

### 3.4 데이터베이스 구성과 역할

#### 3.4.1 사건(Event) 데이터베이스

사건 데이터베이스는 발생한 이벤트의 단계(stage), 기계번호, 발생시간, 종료시간이 저장되는 장소이며, 저장된 자료는 기계고장사건 체크 모듈의 '정' 혹은 '부'를 판단하는 입력값으로 사용된다. 테이블의 항목구성은 표 1과 같다.

표 1. 사건데이터베이스 테이블 항목  
Table 1. Design of Event Data Table

순서	단계	기계번호	발생시간	종료시간
0	1	2	3	4

#### 3.4.2 공장(Factory) 데이터베이스

공장 데이터베이스는 기계별 가공시간을 기록하는 테이블(factory processing table)과 기계 상태를 저장하는 테이블로 구성되어 있으며 표 2, 표 3과 같은 항목으로 구성되어 있다.

표 2. 기계별 가공시간 기록 테이블 항목  
Table 2. Design of Factory Processing Data Table

단계	기계번호	가공시작시간	가공종료시간
0	1	2	3

표 3. 기계 상태 저장 테이블 항목  
Table 3. Design of Factory Status Data Table

단계	기계번호	기계 상태
0	1	2

기계별 가공시간 테이블(표 2)은  $S$ 단계의 기계  $j$ 에 해당하는 행(row)을 찾아 재료의 가공시작시간과 가공종료시간을 기록하고, 기계 상태 저장 테이블(표 3)에 기계의 상태를 '가공 중(1)'로 변경한다. 기계 상태는 3가지로 구성되어 있으며,  $S$ 단계의 기계  $j$ 의 상태를 저장한다. 저장된 값에 따라 재료의 할당 가능 여부가 판단되며, '고장(2)'일 경우 재할당 대상 재료로 삽입된다.

#### 3.4.3 재료입출력 데이터베이스

재료 데이터베이스는 입력데이터(input data, 표 4) 테이블과 결과데이터(result data, 표 5)테이블로 구성되어 있다. 입력데이터 테이블은 표 4와 같은 항목으로 구성이 되어 있으며, 1, 2, 3 단계의 경로는 각 단계에 가공된 기계번호를 저장하게 된다. 저장된 값은 시뮬레이션의 입력값으로 활용된다.

표 4. 입력데이터 테이블 항목  
Table 4. Design of Input Data Table

순서	Ch/Cast	가공시간	납기일	도착시간
0	1	2	3	4
상태	1단계 경로	2단계 경로	3단계 경로	제품종류
5	6	7	8	9

결과데이터 테이블은 재료들의 작업이 완료될 때마다 해당 작업의 결과 값을 재료별로 저장하는 장소이다. 시뮬레이션 종료 후 총 손실비용을 계산하는 입력값으로 사용된다.

표 5. 결과데이터 테이블 항목  
Table 5. Design of Result Data Table

순서	Ch/Cast	가공시간	납기일	1단계경로
0	1	2	3	4
1단계 시작시간	1단계 종료시간	야드 입고시간	야드 출고시간	2단계경로
5	6	7	8	9
2단계 시작시간	2단계 종료시간	야드 입고시간	야드 출고시간	3단계경로
10	11	12	13	14
3단계 시작시간	3단계 종료시간	재가열 비용	설치비용	제품종류
15	16	17	18	19

3.4.4 운송시간(Transportation) 데이터베이스

운송시간 데이터베이스는 S단계의 기계 j에서 S+1단계의 기계 j'까지 평균운송시간( $E[t_{s,j,j'}]$ )과 분산을 저장해 놓은 테이블로 재료의 움직임이 발생하는 경우에 데이터베이스에 운송시간 결과값을 저장하게 된다.

표 6. 운송시간 테이블 구성항목  
Table 6. Design of Transportation Data Table

단계	출발기계번호	도착기계번호	평균이동시간
0	1	2	3

3.5 기호(Notation)

- $job_{i,k,s}$  : 단계(Stage) s단계 k번째 cast의 i번째 charge
  - $m_{j,s}$  : s단계 j번째 기계
  - $c_{i,j,s}$  : s단계 j번째 기계에서 charge i의 완료시간
  - $p_{i,j,s}$  : s단계 j번째 기계에서 charge i의 가공시간
  - $t_{s,j,j'}$  : s단계 j번째 기계에서 s+1단계 j'기계까지 이동시간
  - $job(i,j)$  : 기계 j에서 charge i 가공 후 가공할 charge
  - $mac(i,j)$  : charge i가 기계 j에서 완료 후 배정 예정기계
  - $C_1_{i,j,s}$  : 대기시간에 따른 손실비용 계수
  - $C_2_{i,j,s}$  : 납기일 이전 생산에 따른 재고비용계수
  - $C_3_{i,j,s}$  : 납기일 이후 생산에 따른 손실비용계수
  - $C_4$  : 제품종류 변경에 따른 설치 손실비용 계수
  - $C_5$  : 재가열 손실비용 계수
  - $d_i$  : charge i의 납기일
- 이진변수
- $$\delta_{i,job(i,j)} = \begin{cases} 1 & \text{type of } job_i = \text{type of } job_{job(i,j)} \\ 0 & \text{type of } job_i \neq \text{type of } job_{job(i,j)} \end{cases}$$
- 결정변수
- $$x_{i,j,s} : \text{단계 } s \text{의 } j \text{번째 기계에서 charge } i \text{의 가공시작 시간}$$

3.6 총 손실비용 함수

손실비용함수는 재료의 가공이 완료된 후 재료 데이터베이스의 자료를 입력 값으로 받아 각각의 재료할당 방법의 손실비용을 도출하는 함수이다. 손실비용 함수는 Tang등(9)[10]이 정의한 손실비용함수를 기반으로 다음과 같은 항목으로 구성하였으며 각 항목은 수학적으로 아래의 식과 같이 표현된다.

- 단계(Stage)간 대기시간에 따른 비용

$$\sum_s \sum_j \sum_i C_1_{i,j,s} \left\{ p_{i,mac(i,j),s} - p_{i,j,s} + (\alpha_{i,j,s} + \beta_{i,j,s}) \right\} - (\alpha_{i,mac(i,j),s} + \beta_{i,mac(i,j),s}) - t_{s,j,j'} \dots (1)$$

- 납기일 이후에 생산됨으로써 발생하는 손실비용

$$\sum_s \sum_j \sum_i C_2_{i,j,s} \times \alpha_{i,j,s} \dots (2)$$

- 납기일 이전에 생산됨으로써 발생하는 재고비용

$$\sum_s \sum_j \sum_i C_3_{i,j,s} \times \beta_{i,j,s} \dots (3)$$

$$\alpha_{i,j,s} = -\min(0, x_{i,j,s} + p_{i,j,s} - d_i) \dots (4)$$

$$\beta_{i,j,s} = \max(0, x_{i,j,s} + p_{i,j,s} - d_i) \dots (5)$$

식 1은 공정 단계 간 이동에 따른 대기시간을 손실비용으로 묘사한 것이고 식 2는 납기일 이후에 생산됨으로써 발생하는 손실비용을 말한다. 식 3은 납기일 이전에 생산되어 발생하는 재고비용을 의미하며, 식 4와 5는 납기일 이전 혹은 이후에 생산되어 발생하는 시간을 치환한 것이다.

IV. Dispatching 방법 개발

본 모형은 확률적 모형에서 실시간으로 정보의 변경이 가능한 dispatching 방법을 개발하여 시뮬레이션을 통한 실험을 실시하며, 설치비용, 재가열 비용, 납기일을 동시에 고려할 수 있는 성과지표를 개발하며 지표값을 기준으로 재료의 기계 할당을 실시한다.

S단계 기계 j에서 고장이 발생되었을 경우, j로 경로할당을 받아 가공중인 재료와 경로할당을 받을 재료들을 재할당 대상으로 선출한다. 하지만, S단계에서 가공중인 기계의 종료시간과 이전단계(S-1)에서 가공완료시간이 정규분포를 따른다는 가정과 사건의 종료시간을 알 수 없기 때문에 사건 발생시간을 기준으로 재할당 대상 재료를 선출할 수 없다.

그렇기 때문에 개발하고자 하는 dispatching 방법은 대기시간과 제품의 종류, 납기 일자를 고려하여 할당에 따른 손실비용을 최소화 할 수 있는 지표를 개발하고 지표의 값에 따라 재료를 기계에 할당하고자 한다. 본 연구에서 개발한 할당 방법은 납기긴급(urgency) dispatching이라고 부른다.

두 종류의 제품이 있을 경우, 할당대상 재료를 선별하는 과정은 첫째, 사건이 발생한 기계의 재료를 가공 할 수 있는 대체기계의 집합을 구해야 한다. 예를 들어 그림 4와 같이 특정제품(예. Type 1)만을 가공할 수 있는 #1 기계가 고장으로 인하여  $job_i$ 를 가공을 할 수 없는 경우  $job_i$ 가 갈수 있는 대체공장 집합은 {#2, #n}공장이 된다. 그리고 #1 기계의 작업종료시간은 사건이 종료되는 시간으로 공장데이터베이스에 해당기계의 종료시간이 업데이트가 되며 이 역할은 데이터베이스 체크 모듈에서 실행된다.

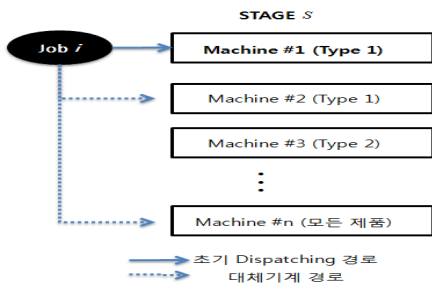


그림 4. 제품종류에 따른 대체가공 경로  
Figure 4. Figure 4. Alternative Routing

대체기계 집합을 도출한 뒤 재료검색 기준시간을 정하고 해당시간에 재료의 상태가 '야드 대기' 혹은 '(S-1)단계에서 가공 완료' 상태를 가진 재료를 대상으로 선출한다. 기준시간은 S단계에서 대체기계 중 작업완료 시간이 가장 빠른 평균종료 시간과 운송시간의 평균값을 차감한 값을 사용한다. S단계에서 대체 가공기계들의 완료 시간과 운송시간은 차이 ( $\min(x_{i,mac(i,j),s} - t_{j,mac(i,j)})$ )는 사전에 알 수 없는 값이기 때문에 기준시간으로 사용될 수 없으며, 평균값을 이용한 차이를 기준 값으로 사용한다. 기준 값은 식 6과 같이 표현한다.

$$\text{기준시간} = \min(E[x_{i,mac(i,j),s}]) - E[t_{j,mac(i,j)}] \quad (6)$$

#### 4.1. 재가열 비용(Reheating Cost)

재가열 비용은 생산지연으로 인하여 재료의 온도가 가공 적정온도 이하로 내려감에 따라 다시 가열을 하는 비용을 의미한다. 대기시간은 다음 가공단계 S에서  $job_i$ 의 예상시작시간과 이전단계 S-1에서  $job_i$ 가 종료된 시간을 차이(식 7)를 의미하며, 대기시간의 허용범위와 비교를 통해 재가열 비용을 도출한다. 그림 5와 같이 대기시간이 허용범위 이내일 경우에는 선형으로 비용이 발생하지만 허용범위를 넘을 경우 재가열 비용이 고정된다.

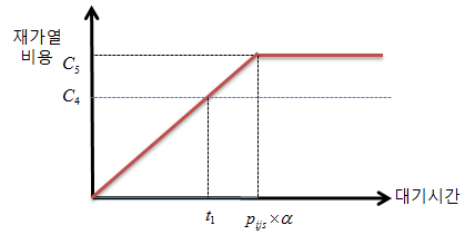


그림 5. 재가열비용과 설치비용의 우선순위  
Figure 5. Priority between Reheating and Setup Cost

$$\begin{aligned} \text{대기시간} (\Delta t) &= (\min(E[x_{i,mac(i,j),s}]) - E[t_{j,mac(i,j),s}]) \\ &\quad - (x_{i,j,s-1} + p_{i,j,s-1}) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

대기시간의 허용범위는 이전단계 S-1에서의 재료의 가공 시간에  $\alpha$ 값( $\alpha \in [0,1]$ )을 곱하여 도출하며, 식 8과 같다. 이전 단계 S-1에서 종료된 시간( $x_{i,j,s-1}$ )은 재료 데이터베이스에서 읽어오고 S-1단계에서 야드까지의 운송시간( $t_{s,j,j'}$ )은 정규분포를 따라 발생시킨다. 발생된 운송시간은 재료 데이터베이스에 저장된다.

$$\text{대기시간 허용범위} = p_{i,j,s-1} \times \alpha \dots\dots\dots (8)$$

$$\tau_{i,j,s} = \begin{cases} 1, & \Delta t \geq p_{i,j,s-1} \times \alpha, \quad \alpha \in [0, 1] \\ t_1, & 0 < \Delta t < p_{i,j,s-1} \times \alpha \quad \alpha \in [0, 1] \\ 0, & \Delta t = 0 \quad \alpha \in [0, 1] \end{cases} \dots\dots\dots (9)$$

식 9은 실제 대기시간과 허용범위의 크기를 비교하여 재가열 비용 값을 계산하기 위한 변수이다.

재가열 비용 =

$$\left( \begin{array}{ll} C_5 \times \tau_{i,j,s} & \Delta t \geq (p_{i,j,s-1} \times \alpha) \\ \frac{C_5}{(p_{i,j,s-1} \times \alpha)} \times \tau_{i,j,s} & 0 < \Delta t < (p_{i,j,s-1} \times \alpha) \\ 0 & \Delta t = 0 \end{array} \right) \dots\dots\dots (10)$$

#### 4.2. 설치비용 (Set-Up Cost)

설치비용은 기계 j에서  $job_i$ 와  $job_{job(i,h)}$ 의 제품 종류가 다를 경우 기계에 다른 주형틀을 교체함으로써 발생하는 비용으로 이진변수  $\delta_{i,fc(i,j)}$ 로 판단한다.

$$\text{setupcost} = C_4 \times \delta_{i,job(i,j)} \dots\dots\dots (11)$$

### 4.3. 재가열비용과 설치비용의 우선순위

재가열 비용은 위의 그림 5와 같이 대기시간의 허용범위까지 일정하게 증가하며, 허용범위를 초과하는 경우 일정한 금액으로 재가열 비용이 소모된다고 가정한다.

$$t_1 = \frac{C_4}{C_5} \times (p_{i,j,s} \times \alpha) \dots\dots\dots (12)$$

식(12)은 재가열 비용과 Set-up비용의 재료가공 우선순위의 기준시간인  $t_1$ 를 도출하는 방법으로  $t_1$  이전에 설치비용이 발생하는 경우에는 설치비용에 우선순위를  $t_1$  이후에 발생하는 설치비용은 재가열 비용이 우선순위를 선점하게 된다.

### 4.4. 납기긴급(Urgency) 지표 개발

납기일을 고려한 지표로는 수정된 납기일(modified due date)방법과 납기일을 재고유지비용과 생산지연비용의 합으로 나누어 납기일을 조정하는 방법이 있다.[3]

Vancheeswaran과 Townsend[13]는 납기일을 고려한 지표를 납기일까지 남아있는 시간을 다음단계에서 가공될 기계의 가공소요시간과 이전단계에서의 가공완료시간의 합으로 나눈 값으로 재료의 긴급성을 지표로 표현하였다(식 13).[10]

$$U = \frac{\text{total work remaining time}}{\text{processing time}(s) + \text{complete time}(s-1)} \dots\dots (13)$$

$job_i$ 가 할당될 기계의 가공예상 시간은 통계적 분포를 따르기 때문에 재료의 긴급성을 식 13과 같이 적용하는 것은 부적절하다. 그래서 납기긴급 지표는 재가열과 설치비용, 잔여 납기일을 고려하며  $S-1$ 단계에서 가공이 종료된 시점부터 납기일까지의 잔여기간을 설치비용과 재가열 비용의 합으로 나누어 납기긴급지표  $U_i$ 를 아래의 식14와 같이 도출하였다.

$$U_i = \frac{d_i - (x_{i,j,s-1} + p_{i,j,s-1} + t_{j',s})}{C_4 \times (\delta_{i,job(i,j)}) + C_5 \times (\Delta t)} \dots\dots\dots (14)$$

$U_i$  값에 따라 가장 작은 값을 가지는 job  $i$ 가 가장 높은 우선순위가 할당되며, 이는 재가열 비용과 설치비용이 큰 재료일수록, 잔여납기일이 적은 재료일수록 가공 우선순위를 먼저 할당하기 위함이다.

## V. 실험방법 결정 및 결과

본 실험의 주목적은 기계고장 사건의 발생에 따른 개발된 dispatching 방법의 손실비용을 비교 평가하여 제시한 방법의 유효성을 검증하기 위한 것이다. 본 논문에서 제시한 방법의 유효성을 검증하기 위해서 SPT(Shortest Processing Time)방법과 선입선출(First-In, First-Out)방법과 비교를 실시하였다. Rajendran과 Zieglerdpdml는 작업시간의 규모가 다양한 재료들의 일정계획문제에서 상대적으로 작업시간이 큰 재료들이 기계의 교체시간과 재고비용이 많이 발생하기 때문에 가공시간이 상대적으로 적은 재료들을 가공하는 것이 효율적인 방법이라고 제시하여 [3], 본 연구에서는 SPT 방법을 개발된 방법의 비교대상으로 선정하였다. 또한 선입선출의 경우는 대기시간에 비례하여 손실비용이 증가되는 모형의 특성을 고려하여 작업이 종료된 재료가 다음 단계 가공의 우선순위를 가지는 특성으로 인해 비교 대상으로 선정하였다.

### 5.1. 할당원칙

각각의 dispatching 방법은 다음과 같은 2가지 경우의 재료할당을 원칙으로 한다.

- 1) 한 개의 재료와 2개 이상의 할당가능 기계의 존재 경우 할당 가능한 기계들의 종료시간이 현 시점에서 가장 오래된 시간(Longest Waiting Time)을 가지고 있는 기계에 재료를 할당한다.
- 2) 여러 개의 재료와 한 개의 할당가능 기계의 존재 경우 각각의 dispatching 방법에 따라 재할당 대상재료의 우선순위를 부여하여 공장 예상 종료 시간이 가장 빠른 기계에 할당한다.

### 5.2. 실험데이터 및 수준 결정

수치시험에 사용될 매개변수(parameter)들은 Tang 등 [9]이 제시한 연구의 매개변수들을 기반으로 설정했으며, 일부는 본 논문의 가정에 맞게 수정하였다.

- 1) 총 200개의 cast를 임의적으로 발생하고 1개의 cast 내에는 최대 5개까지의 charge로 구성될 수 있다.
- 2) 1개의 charge는 20 ton으로 구성되어 있으며 재료의 도착 간격은 포아송 분포를 따르며 재료 도착률( $\lambda$ )은 2, 4, 8로 설정한다.
- 3) 각 Stage별 기계의 가공속도 단위는 ton/unit time이며 가공속도는 정규분포( $N(1, 0.05^2)$ )를 따른다고 가정한다.



4) 운송시간은 거리에 비례한 평균운송시간( $\mu_t$ )과, 분산( $\sigma^2 = 1.5$ )로 가정한다.

5) 대기시간의 허용범위를 결정하는 변수  $\alpha$ 는 0.1로 설정한다.

6) 기계고장 사건은 임의적으로 발생되며, 1개의 사건만이 시뮬레이션 실행 시 마다 발생된다.

7) 총 손실비용 함수의 계수는 Tang 등(5)이 제시한 계수 ( $C_1, C_2, C_3$ )의 분포를 이용하였으며 설치비용계수  $C_4$ 와 재가열 비용계수  $C_5$ 는 각각 100, 110로 설정한다.

$$\begin{cases} C_1 & U(100,110) \\ C_2 & U(10,15) \\ C_3 & U(100,120) \end{cases}$$

실험 데이터 집합을 동일하게 하기 위해 첫 번째 시뮬레이션을 통해 발생한 사건을 SPT와 선입선출에도 동일하게 적용하며, 손실계수 ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ )도 첫 번째 시뮬레이션을 통해 발생한 값을 다른 실험에도 동일하게 적용하여 총 손실비용을 비교분석한다.

표 7. 실험매개변수  
Table 7. Parameters for Simulation Model

변수	경우의 수	값
시뮬레이션모형	2	{ $3 \times 3 \times 3, 4 \times 6 \times 3$ }
재료 도착률	3	{2, 4, 8}
Dispatching	3	{선입선출, SPT, Urgency}

### 5.3. 결과분석

시뮬레이션 분석은 총 20번의 반복실험을 실시하였을 때 중요 변수들의 수치로 판단하였다. 시뮬레이션 분석에 있어 모형은 처음 실행되었을 때 재공품이 존재하는 것이 아니라 시스템이 초기화된 상태에서 시작된다. 따라서 재공품이 존재하여 기계가 기계들의 가공 시작시간과 가공완료시간의 값이 형성될 때까지 준비시간이 필요하다. 준비기간을 1개의 재료가 가공된 다음부터 설정하였다. 시뮬레이션 분석에 사용되는 중요 변수로는 이벤트 발생 단계와 발생시간, 재료의 도착률, 각 단계 내 기계의 수에 따른 총 손실비용을 사용하였다.

#### 5.3.1. 시뮬레이션 손실비용 분석

표 8은 본 논문에서 개발한 Dispatching 방법과 SPT, 선입선출 방법을 통한 시뮬레이션 결과를 비교한 것으로 재료의 도착률이  $\text{Exp}(\lambda = 2, 4, 8)$ 를 따르는 경우로 나누어 실험을 실시하였다. 분석의 동기화를 위하여 시뮬레이션에서 발생한 랜덤한 기계고장 사건의 정보는 동일하게 다른 dispatching 방

법에도 적용을 시켰다. 또한 임의적으로 발생된 손실비용 계수는 첫 실험에서 발생한 계수의 조합을 동일하게 적용하였다.

$$\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\} = \{103, 12, 112, 100, 150\}$$

표 8. 시뮬레이션 결과  
Table 8. Simulation Results

총손실	$\lambda$	Urgency	SPT	선입선출
$3 \times 3 \times 3$	$\lambda = 2$	7,595,711	8,210,341	8,173,789
	$\lambda = 4$	8,215,878	9,395,092	9,444,445
	$\lambda = 8$	8,831,503	10,646,199	11,197,588
$4 \times 6 \times 3$	$\lambda = 2$	7,807,815	9,033,909	8,423,387
	$\lambda = 4$	7,821,905	9,395,092	9,053,101
	$\lambda = 8$	8,416,926	10,646,199	9,635,541

기계고장 사건 : 단계(3), 기계(1), 시작(400), 종료(1100)

첫 번째 모형은 3개의 단계(Stage) 내 기계의 수를  $3 \times 3 \times 3$ 으로 설정한 시뮬레이션 모형으로 총 20번의 실험을 한 결과 본 논문에서 개발된 Dispatching 방법이 재료 도착률  $\lambda = 2$ 인 경우 SPT방법에 비해 7.49%, 선입선출 방법에 비해 7.07% 우수한 결과를 보였다.  $\lambda = 4$ 인 경우 SPT방법에 비해 12.55%, 선입선출 방법에 비해 19.57%의 우수한 결과를 보였으며,  $\lambda = 8$ 인 경우 SPT방법에 비해 17.05%, 선입선출 방법에 비해 32.17% 우수한 결과를 보였다.  $3 \times 3 \times 3$  모형의 상세 손실비용 내역은 표 9와 같다.  $4 \times 6 \times 3$  모형의 경우 손실비용의 상세 내역은 표 10과 같으며 재료 도착률  $\lambda = 2$ 인 경우 SPT방법에 비해 13.57%, 선입선출 방법에 비해 9.83% 우수한 결과를 보였다.  $\lambda = 4$ 인 경우 SPT방법에 비해 16.74%, 선입선출 방법에 비해 16.10%의 우수한 결과를 보였으며,  $\lambda = 8$ 인 경우 SPT방법에 비해 20.94%, 선입선출 방법에 비해 21.17% 우수한 결과를 보였다. 두 개의 모형 총비용을 구성하는 항목 중 '납기일 이후 발생하는 손실비용'이 각 dispatching 방법에 따라 변동 폭이 가장 컸고, 재가열 비용과 설치비용 부문에서는 다른 dispatching 방법과 유사한 결과를 도출하였다. 개발된 dispatching 방법이 잔여 납기일을 고려한 지표에 따라 재료가 할당되기 때문에 다른 dispatching 방법에 비해 '납기일 이후 발생하는 손실비용'의 축소 폭에 민감하게 반응한 것으로 생각되며, 재료의 도착률 증가는 총 손실의 증가를 가져왔으며, 가장 손실폭이 큰 부분은 납기 이후 발생하는 비용으로 관찰되었다.

표 9. 3×3×3 모형의 상세 손실내역 (단위 : 천)  
Table 9. Details of Penalty Cost on 3×3×3 Model

$\lambda$	방법	총 손실	대기 시간	납기 후	납기 전	재가열	설치
2	1*	8,210	749	7,390	0	70,652	0.3
	2*	8,173	714	7,388	0	70,476	0.3
	3*	7,595	748	6,772	0	74,277	0.3
4	1*	9,395	707	8,617	0	69,468	0.3
	2*	9,444	755	8,617	0	71,200	0.3
	3*	8,215	755	7,389	0	70,553	0.3
8	1*	10,646	721	9,848	0	74,956	0.7
	2*	11,197	749	10,406	0.5	40,838	0.5
	3*	8,831	755	8,005	0	70,079	0.3

※ 할당방법 : 1\* (SPT), 2\* (선입선출), 3\* (Urgency)

표 10. 4×6×3 모형의 상세 손실내역 (단위 : 천)  
Table 10. Details of Penalty Cost on 4×6×3 Mode

$\lambda$	방법	총 손실	대기 시간	납기 후	납기 전	재가열	설치
2	1*	9,033	376	8,613	0	43	0.5
	2*	8,423	383	7,995	0	43	0.5
	3*	7,807	384	7,379	0	43	0.5
4	1*	9,660	387	9,228	0	43	0.5
	2*	9,053	398	8,610	0	43	0.5
	3*	7,821	402	7,377	0	42	0.5
8	1*	10,254	369	9,839	0	44	0.5
	2*	9,635	365	9,226	0	42	0.5
	3*	8,416	384	7,990	0	42	0.5

※ 할당방법 : 1\* (SPT), 2\* (선입선출), 3\* (Urgency)

### 5.3.2 손실계수에 따른 각 항목 별 비교

앞서 언급한 실험결과가 특정 손실계수{ $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ } 조합에서만 도출 될 수 있는 결과인지를 검증하기 위해 모든 손실계수 조합을 적용한 모든 재료의 도착률에 대한 총 손실비용의 변동 폭을 아래 그림 6, 그림 7과 같이 나타냈다.

(단위 : 십만)

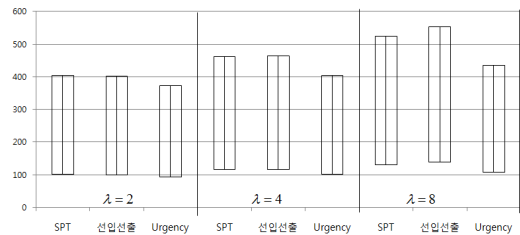


그림 6. 손실계수에 따른 총 손실비용 변동 폭(3×3×3)  
Figure 6. Fluctuation of Total Penalty Cost (3×3×3)

(단위 : 십만)

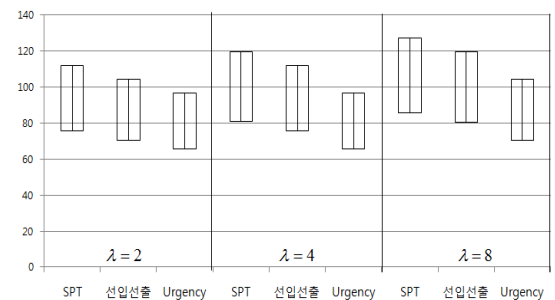


그림 7. 손실계수에 따른 총 손실비용 변동 폭(4×6×3)  
Figure 7. Fluctuation of Total Penalty Cost (4×6×3)

모든 손실계수의 조합을 분석한 결과, 재료의 긴급성을 고려한 urgency dispatching 방법(왼쪽부터 3번째, 6번째, 9번째)이 SPT 방법(왼쪽부터 1번째, 4번째, 7번째)과 선입선출 방법(왼쪽부터 2번째, 5번째, 8번째)에 비해 모든 조합에서 손실 비용이 적게 나타났으며, 재료의 도착이 빈번할수록 손실비용의 감소효과가 뚜렷하게 나타났다. 또한 통계적 검증(신뢰수준 95%) 결과 본 연구에서 제안한 방법이 다른 방법에 비해 손실비용의 절감효과가 유의한 것으로 검증되었다. 본 연구의 결과는 이는 표 9와 표 10의 손실비용 상세내역에서 확인 할 수 있듯이 납기 이후 발생하는 손실비용 항목이 다른 항목에 비해 총 손실비용에 차지하는 비중이 크기 때문이다.

## VI. 결론

현재까지 연구된 연속제조 스케줄링 분야는 불확실성 사건에 대한 유연성과 제품의 종류에 따른 설치비용, 그리고 대기 시간에 따른 재가열 비용이 누락되어 왔다. 또한 불확실성 사

건 하에서 실시간으로 재료의 가공순서의 변경과 재료의 재할당을 하기에 시간적 제약과 현실세계의 적용에 문제점이 있다는 지적이 있었다.[11] 또한 최근의 경영환경은 산출량의 증가와 재고의 최소화 및 운용비용의 절감을 달성하기 위하여 생산 능력의 이용극대화가 아닌 생산시스템의 유연한 흐름을 강조하는 새로운 생산관리 철학을 요구하고 있다.[1]

본 논문에서는 현실세계에 좀 더 부합할 수 있는 모형으로 발전시키기 위하여 불확실성 사건 중 기계고장을 고려하였으며, 현실적인 생산 스케줄링 모형을 반영한 통계적 시뮬레이션을 구현하였다. 구현된 시뮬레이션을 통해 임의적으로 기계고장 사건을 발생시키고 납기긴급(urgency) dispatching방법에 의해 재료의 재할당을 실시하는 방법을 제시하였다. 납기긴급(urgency) dispatching방법은 기계고장이 발생하였을 때에도 손실비용을 줄이기 위해 잔여 납기일과, 재가열 비용, 설치비용을 고려한 방법을 고려하였고, 실시간으로 정보 변경이 가능 할 수 있도록 하기 위해 데이터베이스 모듈과 컨트롤러 모듈을 데이터베이스와 연동하여 시뮬레이션에 구현하였다. 제시된 방법의 효과성을 입증하기 위해 비교대상 방법(SPT, 선입선출)을 선정하여 각각의 방법을 시뮬레이션에 적용하였을 때 도출된 손실비용을 통해 비교분석을 실시하였다.

본 연구에서 개발한 납기긴급(urgency) dispatching은 비교대상 방법에 비해 납기일 이후에 생산됨으로써 발생하는 손실비용이 비교대상 방법에 비해 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 재료의 도착률이 빈번할수록 손실비용의 감소폭이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

향후 연구과제로는 논문의 연구범위인 제선에서 연주공정까지의 모형에 압연 냉연 등의 후속공정들을 추가한 연구가 진행이 되어야 하며, 본 연구의 한계점인 Exact 알고리즘을 통한 최적해를 도출하지 못하는 단점은 실제 사이즈의 문제를 불확실성을 고려하여 시뮬레이션으로 접근하였기 때문이다.

### 참고문헌

[1] 김종상, "공급사슬경영의 유효성 입증을 위한 최적화 생산 시스템의 시뮬레이션," 한국컴퓨터정보학회논문지, v.6, no.1, 2001.3  
 [2] A. Atighenhchain and M. Bijari, and H. Tarkesh, "A novel hybrid algorithm for scheduling steel-making continuous casting production," Computers & Operations Research, Volume 36(8), pp.2450-2461, 2009  
 [3] C. Rajendran and H. Ziegler, "Scheduling to minimize the sum of weighted flowtime and

weighted tardiness of jobs in a flow shop with sequence-dependant setup times," European Journal of Operational Research, Volume 149(3), pp.513-522, 2003  
 [4] C. N. Redwine and D. A. Wismer, "A mixed integer programming model for scheduling order in a steel mill," Journal of Optimization Theory and Applications, Volume 14(3), pp.305-318, 1974  
 [5] D. Yao and F. Pei, "Flexible parts routing in manufacturing systems," IIE Transportations Volume 22(1), pp. 48 - 55, 1990  
 [6] G. N. Ebbe, "Local search algorithm for the multiprocessor flow shop scheduling problem," European Journal of Operational Research, Volume 128(1), pp.147-158, 2001  
 [7] J. Du and J. Y. T. Leung, "Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard," Mathematics of Operations Research, Volume 15(3), pp. 483 - 495, 1990  
 [8] L. X. Tang, J. Y. Liu, and Z. H. Yang, "A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production," European Journal of Operational Research, Volume 120(2), pp. 423-435, 2000  
 [9] L. X. Tang, P. B. Luh, J. Y. Liu, and L. Fang, "Steel-making process scheduling using lagrangian relaxation," International Journal of Production Research, Volume 40(1), pp. 55-70, 2002  
 [10] L. X. Tang, and G. S. Wang, "Decision support system for the batching problems of steelmaking and continuous-casting production," Omega, Volume 36(6), pp.976-991, 2008  
 [11] P. Cowling and M. Johansson, "Using real time information for effective dynamic scheduling," European Journal of Operational Research, Volume 139(2), pp.230-244, 2002  
 [12] R. Hiplani and D. Wetjens, "Evaluation of entropy-based dispatching in flexible manufacturing systems," European Journal of Operational Research, Volume 176(1), pp.317-331, 2007

- [13] R. Vancheeswaran and M. A. Townsend, "Two-Stage heuristic procedure for scheduling job shops," Journal of Manufacturing System, Volume 12(4), pp. 315-325, 1993
- [14] Y. He and C. W. Hui, "Genetic algorithm for large-size multi-stage batch plant scheduling," Chemical Engineering Science, Volume 62(5), pp.1504-1523, 2007

### 저 자 소 개



#### 고 동 진

2007년 2월 : 아주대학교 산업정보  
시스템공학 학사

2008년 ~ 현재 : 고려대학교 정보경  
영전문대학원 석사  
과정

관심분야 : 스케줄링, SCM, Risk  
Management



#### 이 철 응

1992년 2월 : 서울대학교 산업공학  
과 학사

1994년 2월 : 서울대학교 산업공학  
과 석사

2000년 5월 : Pennsylvania State  
Univ. 공학박사

현재 : 고려대학교 정보경영공학부 부  
교수

관심분야 : 항공/해운 교통물류,  
e-Marketplace,  
물류시스템 설계 및 제어