

## 장치이상을 고려한 동적 생산계획 최적화 모델 개발

하진국 · 이의수<sup>†</sup>

동국대학교 생명화학공학과  
100-715 서울시 중구 필동 3가 26  
(2005년 8월 5일 접수, 2005년 9월 5일 채택)

### A Development of the Optimization Model for Reactive Scheduling Considering Equipment Failure

Jin-Kuk Ha and Euy Soo Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical & Biochemical Engineering, Dongguk University, 26, 3-ga, Pil-dong, Chung-gu, Seoul 100-715, Korea  
(Received 5 August 2005; accepted 5 September 2005)

#### 요 약

불연속 화학공정은 소비자 수요에 탄력성 있게 대처할 수 있는 장점이 있는 반면에 그 특유의 동특성 때문에 복잡하고, 계획된 조업 시간과 실제 조업 시간 사이에서 외란(disruption) 또는 불확실 변수(uncertainty)에 의한 차이가 자주 발생하는 단점이 있다. 이에, 본 논문에서는 예측 생산계획(predictive scheduling)에 의해 결정된 생산계획에서 미래에 발생하는 공정 변수 값의 변화를 실시간으로 예측 생산계획을 수정, 제시하여 주는 생산 계획 시스템인 동적 생산계획(reactive scheduling) 기법을 개발하였다. 불확실 인자를 고려한 동적 생산계획에서, 본 논문에서는 장치 이상(equipment failure)이 발생하였을 때 공정 운전조건의 변화를 실시간으로 반영하여, 예측 생산계획(predictive scheduling) 모델에 의하여 제시된 전체 생산 계획을 최대한 유지하고 공정 변수의 변화를 실시간으로 반영하기 위하여 right shift rescheduling과 total regeneration 기법을 사용하였다. 또한, 불확실 인자의 발생 전후의 predictive scheduling과 reactive scheduling 간의 변화 정도를 측정하는 수단인 schedule stability 위하여, 본 논문에서는 수정된 sequence deviation과 percentage change in makespan을 사용하여 제안된 동적 생산계획의 안정성을 측정하였다. 본 논문에서 제안한 동적 생산계획 시스템은 기존에 제시되었던 경험 법칙에 의한 결과값에 비해 좋은 결과를 보여주었다.

**Abstract** – We propose a new optimization framework for the reactive scheduling. The proposed rescheduling scheme is specially focused on how to generate rescheduling results when equipment failure occurs. The approach is based on a continuous-time problem representation that takes into account the schedule in progress, the updated information on the batches still to be processed, the present plant state, the deviations in plant parameters and the time data. To update the predictive scheduling, we used right shift rescheduling and total regeneration when equipment failure occurs. And, a practical solution to the rescheduling problem requires satisfaction of two often confliction measures: the efficiency measure that evaluates the satisfaction of a desired objective function value and the stability measure that evaluates the amount of change between the schedules before and after the disruption. In this paper, the efficiency is measured by the makespan of all jobs in the system. And, the stability is measured by the percentage change in makespan and the modified sequence deviation in the predictive scheduling and rescheduling.

Key words: Reactive Scheduling, Optimization, Machine Failure, Uncertainty

#### 1. 서 론

오늘날 글로벌 시장경쟁에서 시간과 가격에서의 효과적인 생산계획이 더욱 중요시되고 있다. 따라서, 제품의 생산계획(production scheduling)은 제조공정에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 불연속 화학공정은 소비자 수요에 탄력성 있게 대처할 수 있는 장

점이 있는 반면에 그 특유의 동특성 때문에 복잡하고, 계획된 조업 시간과 실제 조업 시간 사이에서 외란 또는 불확실 변수(uncertainty)에 의한 차이가 자주 발생하는 단점이 있다. 일반적으로 생산계획을 고려하는데 있어서 대부분의 연구에서는 공정의 변수 값들이 생산공정의 전 공정시간까지 결정론적이며 어떠한 변화가 일어나지 않는다고 가정하여 생산계획 문제를 다루어 왔다. 이러한 공정의 변수가 결정론적인 경우(deterministic case)의 생산계획은 제품을 생산하는 운전의 관리와 원료의 수습, 원료의 할당과 같은 계획된 작

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: eslee@dgu.edu

업들을 위하여 항상 선행되어왔다. 그러나 회분식 생산공정은 그 특유의 동적성적인 환경 때문에 계획된 조업과 실제 조업 사이에서 장치이상, 원료의 공급지연, 제품의 생산시간 변경 등의 외란(disruption) 또는 불확실 변수(uncertainty)에 의한 차이가 자주 발생한다. 이러한 외란은 이미 결정된 생산계획 즉 예측 생산계획(predictive scheduling)의 효율성을 낮추며, 더는 새로운 환경에 적용할 수 없게 된다. 이에 외란이 발생하였을 때의 생산계획 문제는 더는 예측 생산계획의 문제가 아니고 동적 생산계획(reactive scheduling)의 문제가 된다. 동적 생산계획은 외란이 발생하였을 때 새로운 환경에서 생산계획을 실행할 수 있게 예측 생산계획을 새롭게 형성시키는 작업이라고 할 수 있으며, 또한 외란의 영향을 최소화시키기 위한 실질적이고 강제적인 생산공정의 운전 작업이다. 앞서 언급한 바와 같이, 지금까지 최적 예측 생산계획에 관한 연구와 예측 생산계획의 목적함수에 대한 최적화를 위한 방법에 관한 연구에 많은 노력이 행해졌으며, 이러한 연구는 조합의 최적화에 관한 최적 예측 생산계획을 수식화 하는데 있다.

불연속 화학공정의 실제 운전상황에서 결정된 공정 변수 값들의 변동이나, 공정의 운전상황에서 예기치 않는 불확실 변수들을 rescheduling factors라고 한다. 생산 공정의 환경에서 발생하는 rescheduling factors는 갑작스런 파업(strike)과 같은 전혀 알 수 없는 인자(complete unknowns), 작업자의 숙련도에 의해 발생하는 미래에 대한 추론(suspensions about the future) 그리고 장치이상, 원료의 부족 등과 같이 일반적으로 자주 발생할 수 있는 알려진 인자(known uncertainties)로 구분할 수 있다. 예측 생산계획 모델에서 불확실 변수가 발생했을 때 실시간으로 최적 생산일정계획을 수정 제시하여 주는 동적 생산계획 모델 전략에는 robust scheduling, right shift rescheduling, regeneration 그리고 partial rescheduling 등의 전략들이 있다. 공정의 운전상황에서 외란이 발생하였을 때, 공정의 변화에 빠르게 대처하고 그 다음 단계의 대책을 세우는 것이 가장 좋은 방법이나, 불연속 화학공정에서는 예측하기 어려운 부분이 많이 발생하므로 외란 발생 시에도 영향을 적게 받는 방안을 마련하고 변화의 추세를 미리 예측하여 생산계획 모델을 강건하게 할 필요가 있다. 이와 같이 통계적인 데이터를 기초로 앞으로의 변화추세를 나타내는 파라미터를 이용한 통계적인 기법을 사용하여 외란(disruption)이 발생하여도 이를 흡수할 수 있도록 강건한 예측 생산계획을 세우는 기법을 robust scheduling이라 한다. Robust scheduling은 실제 생산공정에서 외란이 발생하였을 때 빠른 대처가 어려우며, 외란과 통계 데이터 값의 차이가 발생하면 목적함수가 계속 증가하여 좋지 않은 결과를 가져온다. Right-shift rescheduling은 Fig. 1에서와 같이 장치  $U_1$ 에서  $T_{break}$  시간에 장치 고장이 일어났을 때 장치  $U_1$ 의 고치는 시간인  $T_{repair}$  동안 제품의 처리를 중단하였다가 장치  $U_1$ 이 정상이 되면 공정을 계속하도록 하는 기법으로 Fig. 1과 같이 Gantt chart를 오른쪽으로 이동시켜 계속 공정운전을 할 수 있도록 하는 동적 생산계획 기법이다. 즉, 장치  $U_1$ 가 정상이 되는 시간 동안 이후 제품들에 대한 각 공정에서의 조업시작시간을 늦추는 생산계획 기법이다. Partial rescheduling은 공정의 운전상황에서 외란이 발생했을 경우, 직·간접적으로 영향을 받는 생산관련 변수 및 소비자 변수만을 rescheduling 하는 기법이다. 이러한 이유로 partial rescheduling을 'affected operations rescheduling'이라고도 한다. Regeneration은 공정의 운전상황에서 장치 이상 등과 같은 외란이 발생한 시점, 즉 rescheduling point에서 공정의 운전상황에서 외란

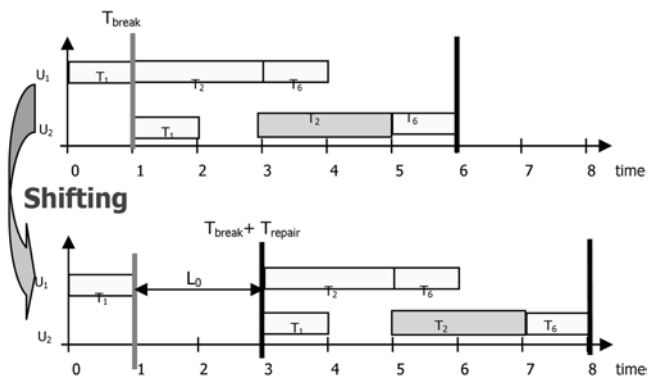


Fig. 1. Right-shift rescheduling on Gantt chart.

의 영향을 받지 않는 변수들뿐만 아니라 공정을 시작하지 않은 변수 모두에 대하여 새롭게 rescheduling하는 기법이다. 이러한 이유로 total regeneration 또는 complete regeneration 이라고도 한다.

동적 생산계획(Rescheduling) 문제는 예측 생산계획(predictive scheduling)의 연구에 비해 최근에 와서야 연구되었다. Hasebe 등[2]은 다품종 회분식 공정에서 reordering 알고리즘을 이용하여 initial scheduling을 수정하는 모델을 발표하였다. Wu 등[3]은 단일장치에서의 장치이상(machine failure)이 발생하였을 때 initial scheduling과 new scheduling의 각 단위공정에서의 시작시간(starting time)과 생산순서(production sequence)의 차이와 조업완료시간을 최소화하는 rescheduling 기법을 발표하였다. Unal 등[4]은 새로운 작업이 발생하였을 때 전체 생산계획의 순수납기지연(tardiness)과 전체 생산시간(total flow time)을 최적화하는 기법을 개발하였으며, 단일장치에서 장치이상 시 순수납기지연을 최적화하는 rescheduling은 Ronan 등[11]에 의해 제안되었다. 또한, Carlo와 Jaime[12]는 다품종 회분식 공정에서 새로운 작업(jobs)이 발생하였을 때 rescheduling을 위한 MILP 모델을 발표하였다. Carlo에 의해 제안된 rescheduling 모델은 local reordering과 장치의 재할당 기법을 이용하였다.

본 논문에서는 UIS 저장 운용 방안을 채택한 다품종 회분식 공정에서 장치이상 발생하였을 때, 예측 생산계획(predictive scheduling)에 의해 결정된 최적 생산계획을 미래에 발생하는 공정 변수 값의 변화에 대해 실시간으로 수정 제시하여 주는 생산계획 시스템인 동적 생산계획(reactive scheduling) 기법을 개발하였다. 불확실 인자를 고려한 동적 생산계획에서 장치 이상(equipment failure)이 발생하였을 때 공정 운전조건의 변화를 실시간으로 반영하여 예측 생산계획(predictive scheduling) 모델에 의하여 제시된 전체 생산 계획을 최대한 유지하면서, 공정 변수의 변화를 실시간으로 반영하기 위하여 right shift rescheduling과 total regeneration 기법을 사용하였다. 또한, 불확실 인자의 발생 전후의 predictive scheduling과 rescheduling 간의 변화 정도를 측정하는 수단인 schedule stability 측정을 위하여, 본 논문에서는 수정된 sequence deviation과 percentage change in makespan을 사용하여 제안된 동적 생산계획의 안정성을 측정하였다.

## 2. 다품종 회분식 공정에서 장치이상을 고려한 동적 생산계획

먼저, 회분식 공정의 운전상황에서 장치 이상이 발생하였을 때,

장치 이상이 예측 생산계획에 의해 결정된 전체 생산일정계획에 미치는 영향을 알아보면 다음과 같다.

(1) 실제 생산과정 상황에서 장치 이상 혹은 고장이 발생하게 되면, 예측 생산계획 모델에 의해 결정된 생산일정계획을 불가피하게 일부 또는 전체 생산과정에서의 조업시작시간을 조절해야 한다.

(2) 생산 제품들의 due date를 맞추기 위해서는 일부 또는 전체 제품의 생산 순서를 변경해야 하는 상황이 발생하게 된다.

(3) 장치고장으로 인해 직·간접으로 영향을 받는 제품 및 장치를 분류하여 새롭게 작업(task)을 재할당해야 한다.

본 논문에서는 이러한 영향들을 고려하여 실시간으로 대처할 수 있는 동적 생산계획 모델을 개발하였다. 그리고 공정의 운전상황에서 발생하는 예기하지 않은 rescheduling factors에 대한 동적 생산계획의 연구에서 요구되는 특징은 공정 변수값이 특정한 값으로 고정되어 있을 경우에 대한 예측 생산계획 모델로부터 결정된 전체 생산계획을 최대한 유지되어야 하며, 얼마나 빨리 대처해야 하는가에 달렸다. 따라서 불확실 변수가 발생하였을 때 예측 생산계획 모델에서 결정된 전체 생산계획의 변화 정도를 평가하고 측정할 수 있는 기준(criteria)이 필요하다. 즉, 동적 생산계획(rescheduling)에서는 불확실 인자의 발생 전후의 predictive scheduling과 rescheduling 간의 변화 정도를 측정하는 수단(measures)을 요구한다. 이러한 수단(measures)에는 다음 세 가지 그룹으로 나눌 수 있다. (1) schedule efficiency, (2) schedule stability 그리고 (3) cost로 나눈다. Schedule efficiency에는 공정의 조업 시간과 관련하여 측정하는 수단으로 일반적으로 생산계획에서의 최종조업완료시간(makespan), mean tardiness, mean flow-time 그리고 maximum lateness를 측정 수단으로 사용한다. 생산계획의 안정성(Schedule stability)은 생산공정의 수정이 필요하지 않은 예측 생산계획에서는 의미가 없으나, 동적 생산계획 환경에서는 아주 중요한 측정 수단으로 알려졌다. 이를 불규칙한 공정 운영을 측정한다고 하여 'impact of schedule change'라 불리기도 한다. 이러한 측정 수단으로는 predictive scheduling과 rescheduling 간의 각 단위공정에서의 시작시간(starting time)과 제품생산순서(sequence)의 차이를 분석하는 두 가지 방법이 있으며, Abumaizar와 Sevstka[6]이 제안한 최종조업완료시간의 percentage change 등이 있다. 이들 방법에 대한 측정 방법은 다음과 같다.

(1) 제품생산순서의 차이를 측정하는 방법은 Watatani와 Fujii[5]가 제안한 방법을 사용하였으며, 제품생산순서(sequence)의 차이를 측정하는 방법은 아래와 같다.

For every machine j:

For every job i on machine j in the rescheduling:

Define:

$S_1$ =set of operations processed before job i in the predictive scheduling

$S_2$ =set of operations processed after job i in the rescheduling

$S=S_1 \cap S_2$

$N_{ij}$ =cardinality of S

$$\text{Sequence deviation} = \sum_i \sum_j N_{ij} \quad (1)$$

(2) 조업 시작시간(starting time)의 차이를 측정하는 것은 rush order cost와 원료의 조기 도착 등에 외란이 발생하였을 때 경제적

측면에서의 중요한 측정 수단이며 장치 설비에 관계된 동적 생산계획 알고리즘에서는 유용한 측정 방법으로 알려졌다. 이 방법은 Wu 등[3]에 의해 제안되었다. 조업 시간의 차이는 두 개의 요소로 구성되어있으며 다음과 같다.

delay=the sum of the positive differences in ending times, and  
rush=the sum of the absolute value of negative difference in ending times

starting time deviation=delay+rush

(3) Percentage change in makespan (P)

$$P = \left\{ \frac{M_{method} - M_0}{M_0} \right\} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $M_{method} = M_R, M_A$  또는  $M_T, M_R$ 은 right shift rescheduling의 최종조업완료시간,  $M_A$ 는 affected operations rescheduling의 최종조업완료시간을 나타내며,  $M_R$ 은 total regeneration의 최종조업완료시간을 나타낸다.  $M_0$ 은 예측 생산계획의 최종조업완료시간을 의미한다.

본 논문에서는 schedule efficiency는 대상공정에서의 최종조업완료시간(makespan)을 사용하였으며, schedule stability를 측정하기 위하여 식 (2)에 주어진 최종조업시간의 percentage change를 이용하여 예측 생산계획과 본 논문에서 제안한 동적 생산계획간의 schedule stability를 측정하였다. 또한, predictive scheduling과 rescheduling 간의 각 단위공정에서의 제품생산순서(sequence)의 차이를 측정하는 방법인 식 (1)을 수정하여, 다품종 회분식 공정에서의 제품생산순서(sequence)의 차이를 적용하였다. 이는 본 논문에서 동적 생산계획을 위한 대상공정인 다품종 회분식 공정의 운영 특성상 생산순서가 결정되면 각 단위공정에서의 생산순서는 일정하기 때문이다. 따라서, 식 (1)은 다음 식 (3)과 같이 수정될 수 있다.

$$\text{Sequence deviation} = \frac{\sum_i \sum_j N_{ij}}{\text{cardinality of J}} \quad (3)$$

여기서, cardinality of J는 단위공정의 총 개수를 의미한다.

## 2-1. UIS 운영방안을 채택한 다품종 회분식 공정에서의 rescheduling 기법

### 2-1-1. Deterministic scheduling with UIS

Predictive scheduling은 불연속 화학공정의 모든 공정 변수 값들이 특정한 값으로 고정되어 있을 경우의 생산계획 모델로 본 논문에서 고려한 생산공정은 UIS 운영방안을 채택한 다품종 회분식 공정을 대상으로 하였다. 공정 변수 값들의 고정되어 있을 경우의 상세일정계획(short-term scheduling) 문제를 위하여, 본 논문에서는 사건의 시작과 끝만을 결정하는 이진변수(binary variable)만이 필요한 연속시간표현기법과 장치의 할당을 위한 시간 간격을 나타내는 time slots(or time events)을 기초로 한 MILP(mixed-integer linear programming) 모델을 이용하였다. 이는 장치이상(machine failure)이 발생하였을 때 reschedule을 위하여 필요한 정보는 고장이 난 장치  $j_{break}$ , 고장이 발생한 시점(rescheduling point)  $T_{break}$ , 장치이상을 보수하는 시간  $T_{repair}$  그리고 고장이 발생한 시점에서의 각 단위공정의 운영 상태이다. 앞에서 언급한 정보들 중  $j_{break}$ ,  $T_{break}$  그리고

$T_{repair}$  정보는 장치이상이 발생하였을 때 결정되는 데이터 값들이지만, 각 단위공정에서의 운영 상태를 알기 위해서는 각 단위공정에서 제품들의 공정 시작시간(starting time),  $ST_{kj}$ 과 끝나는 시간(ending time),  $ET_{kj}$ 을 알고 있으면 쉽게 각 공정의 운영 상태를 알 수 있으며, 또한 장치  $j_{break}$ 에서 고장이 발생한 시점(rescheduling point)  $T_{break}$ 에 의해 직·간접적으로 영향을 받는 제품들을 분류하기가 용이하기 때문이다.

다품종 회분식 공정의 상세일정계획은 목적함수인 최종조업완료 시간을 최소화하는 문제로 구성된다.

$$\text{Minimize Makespan} \geq ET_{kj} \quad (4)$$

먼저, 모든 생산은 생산순서에 따라 정확히 할당되어야 하며, 이 진변수  $X_{ik}$ 는 다음의 제약식을 만족하여야 한다.

Allocation constraints:

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ik} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

이진변수  $X_{ik}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$X_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{if product } i \text{ is manufactured in time slot } k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Time slot  $k$ 에 있는 단위공정  $j$ 를 위한 시작시간  $ST_{kj}$ 와 끝나는 시간  $ET_{kj}$ 는 다음과 같이 정의된다.

Sequencing constraints

$$ET_{kj} - ST_{kj} = \sum_{i \in I} X_{ik} P_{ij} \quad \forall k \in K, j \in J \quad (7)$$

여기서,  $P_{ij}$ 는 단위공정  $j$ 에서의 제품  $i$ 의 공정시간(processing time)이다.

주어진 경로에서 연속적인 단위공정  $j$ 와  $j+1$  사이의 시간은 식 (8)과 같이 표현되고 식 (9)는 연속적인 time slot 사이의 관계를 나타내는 식이다.

$$ST_{kj+1} - ET_{kj} \geq 0 \quad \forall k \in K, j \in J - \{\bar{j}\} \quad (8)$$

$$ST_{k+1j} - ET_{kj} \geq 0 \quad \forall k \in K - \{\bar{k}\}, j \in J \quad (9)$$

여기서  $\bar{j}$ 는 마지막 단위공정,  $\bar{k}$ 는 마지막 time slot을 의미한다.

이상과 같이 MPC에서 UIS 운용방안을 채택한 다품종 회분식 공정에서의 최종조업완료시간을 최소화하는 식은 식 (4)와 같으며 제약조건은 식 (5)-(9)로 표현된다.

#### 2-1-2. Right-shift rescheduling approach

Right shift rescheduling은 장치이상이 발생하였을 때 계획된 예측 생산계획(predictive scheduling)에 의해 결정된 스케줄을 실행할 수 있도록 필요한 시간(장치 수리시간,  $T_{repair}$ )만큼 각 단위공정에서 남아있는 제품의 시작시간과 끝나는 시간을 연기하는 기법이다.

본 논문에서는 회분식 공정에서 장치이상이 발생하였을 때 right shift rescheduling을 위하여 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- 각 단위공정은 특정시간에서 하나의 제품만 생산할 수 있다.

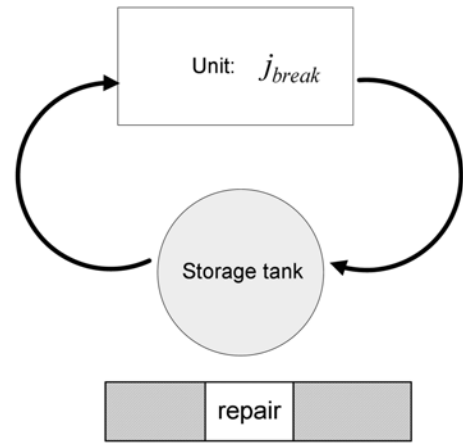


Fig. 2. Operation strategy on machine  $j_{break}$  when machine failure occurs

- 전체 단위공정에서 제품의 우선권조업(preemptions)은 허락하지 않는다.
- 특정시간에 장치이상이 발생하였을 때  $T_{repair}$  동안에는 다른 단위공정에서 외란은 발생하지 않는다.
- 장치이상이 발생한 시점,  $T_{break}$  그리고 장치 수리시간,  $T_{repair}$
- $T_{break}$ 에 장치이상이 발생한 단위공정에서 조업 중인 제품  $i$ 는 reschedule 된다.

위 가정에서 마지막 가정한  $T_{break}$ 에 장치이상이 발생한 단위공정에서 조업 중인 제품  $i$ 는 reschedule 된다는 의미는 Fig. 2에서와 같이  $T_{repair}$  시간 동안 일시적으로 중간저장조에 저장 후 장치이상이 발생한 단위공정이 수리된 후 즉시 투입되어 공정을 재 시작한다는 의미이다.

Predictive scheduling(deterministic schedule)은 앞에서 언급한 MILP 모델식을 이용하여 먼저 계산된다. 따라서, 모든 이진변수  $X_{ik}$ 는 각 단위공정에 모든 제품들을 할당 하며 연속변수들은 정해진 제품의 순서와 각 단위공정에서 시작시간과 끝나는 시간에 따라 공정 운영을 시작하게 된다. 만약 특별한 시간,  $T_{break}$ 에 단위공정  $j_{break}$ 에서 장치이상이 발생하였을 때, 장치이상의 영향을 반영하기 위하여 새로운 제약조건 및 집합이 도입된다. 장치이상이  $T_{break}$ 에 단위공정  $j_{break}$ 에서 발생하고, 고치는 시간  $T_{repair}$ 이 요구되는 right shift rescheduling은 다음 알고리즘을 통하여 고려될 수 있다.

Step 1: Predictive schedule에서의 할당된 각 단위공정에서의 제품순서를 위하여 이진변수  $X_{ik}$ 를 고정한다.

Step 2: Step 1은 장치고장에 의하여 영향을 받지 않는 제품  $i$ 와 time slot  $k$ 에 대한 right shift rescheduling 단계이다.

For ( $j \in J, k \in K$ ) {

IF ( $j \neq j_{break}$  and  $ST_{kj} < T_{break}$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} ST_{kj} = ST_{kj}^r \\ ET_{kj} = ET_{kj}^r \end{array} \right\}$$

IF ( $j = j_{break}$ ) and ( $ST_{kj} < T_{break}$  and  $ET_{kj} \leq T_{break}$ )

$$\left\{ \begin{array}{l} ST_{kj} = ST_{kj}^r \\ ET_{kj} = ET_{kj}^r \end{array} \right\}$$

Step 3: 장치고장에 의하여 영향을 받는 product  $i$ 와 time slot  $k$ 에 대한 right shift rescheduling 단계이다. 또한, 장치고장이 발생한 단위공정  $j_{break}$ 에서의 shift starting times( $=T_{repair}$ )을 위한 time constraints 조건식이 추가된다.

For ( $j=j_{break}, k \in K$ ) {

Case 1: IF ( $ST_{kj} > T_{break}$ )

$$\{ ST_{kj}^r \geq T_{break} + T_{repair} \quad \forall j = j_{break}, k \in K - \{\bar{k}\} \}$$

Case 2: IF ( $ST_{kj} > T_{break}$  and  $ET_{kj} > T_{break}$ )

$$\{ ST_{kj}^r = ST_{kj}^r \text{ and } ET_{kj}^r \geq ST_{kj}^r + \sum_{i \in I'} X_{ik} P_{ij} + T_{repair} \\ \forall j = j_{break}, k \in K - \{\bar{k}\} \}$$

Step 4: 각 단위공정에서 남아있는 제품의 시작시간과 끝나는 시간의 재설정으로 인하여 아래 식과 같이 목적함수가 변경된다.

$$\text{Minimize Makespan} \geq ET_{kj}^r$$

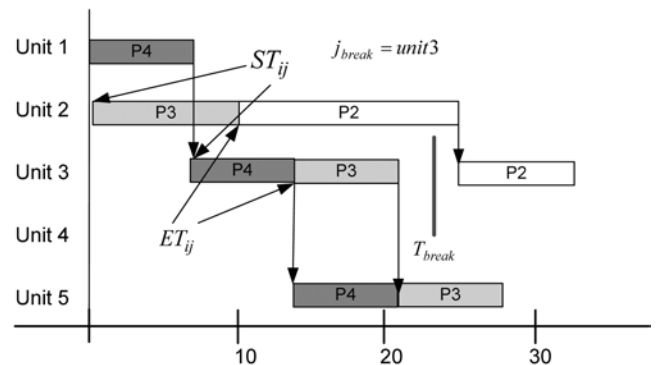
Fig. 3, 4와 5는 right shift rescheduling의 Step 2과 Step 3의 단계를 설명하기 위해 특별한 시간  $T_{break}$ 에 단위공정  $j_{break}$ 에서 장치 이상이 발생하였을 때 각 단위공정의 상태를 간트 차트(Gantt chart)로 나타내었다. Fig. 3(a)는 predictive scheduling에 의해 결정된 각 단위공정에서의 공정상황을 그림으로 나타내었으며, Fig. 3(b)는 단위공정 3에서 특별한 시간  $T_{break}$ 에 장치이상이 발생하였을 때 장치 수리시간( $=T_{break}$ ) 동안 right shift rescheduling한 간트 차트로 Step 2에서와 같이 장치이상으로 영향을 받지 않는 작업들인 P3, P4의  $ST_{kj} = ST_{kj}^r$  값과 같다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 predictive scheduling에 의해 결정된 각 단위공정에서의 공정상황을 그림으로 나타내었으며, Fig. 4(b)는  $j_{break}$ 인 단위공정 3에서 특별한 시간  $T_{break}$ 에 장치이상이 발생하였을 때 장치 수리시간( $=T_{repair}$ )으로 right shift rescheduling한 간트 차트로 Step 3에서의 case 1과 같이 장치이상으로 직접적으로 영향을 받는 작업인 P3의 시작시간이  $ST_{kj} > T_{break}$  일 경우에는  $ST_{kj}^r \geq T_{break} + T_{repair}$ 를 만족해야 함을 알 수 있다.

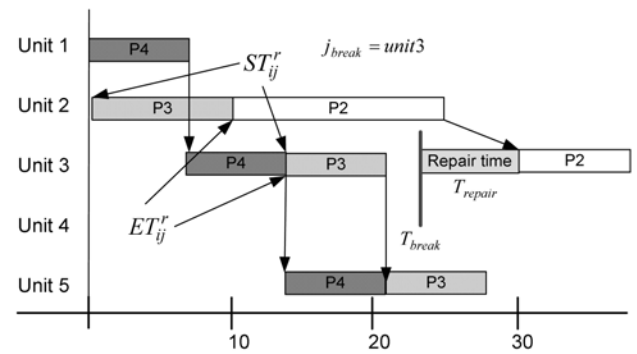
Fig. 5(a)는 predictive scheduling에 의해 결정된 각 단위공정에서의 공정상황을 그림으로 나타내었으며, Fig. 5(b)는  $j_{break}$ 인 단위공정 3에서 특별한 시간  $T_{break}$ 에 장치이상이 발생하였을 때 장치 수리시간( $=T_{repair}$ )으로 right shift rescheduling한 간트 차트로 Step 3에서의 case 2와 같이 장치이상으로 직접적으로 영향을 받는 작업인 P3의 시작시간이  $ST_{kj} < T_{break}$  그리고  $ET_{kj} > T_{break}$  일 경우에는  $ST_{kj} = ST_{kj}^r$ 와  $ET_{kj}^r \geq ST_{kj}^r + \sum_{i \in I'} X_{ik} P_{ij} + T_{repair}$ 를 만족해야 함을 알 수 있다.

### 2-1-3. Total regeneration approach

Total regeneration은 제품의 생산공정에서 외란이 발생하였을 때 외란에 의해 직접·간접적으로 영향을 받는 제품과 외란이 발생한 시점에서 공정을 시작하지 않은 제품을 reschedule하는 기법이다. 따라서, initial schedule(predictive scheduling)에 의해서 결정된 정보로부터 외란이 발생한 시점에서 동적 생산계획을 위한 필수적인 데이터를 분류, 추출이 필요하다. 외란이 발생하였을 때 새로운 스케줄을 위해 예측 생산계획(predictive scheduling)에서 얻어지는 정보는 다음과 같다.

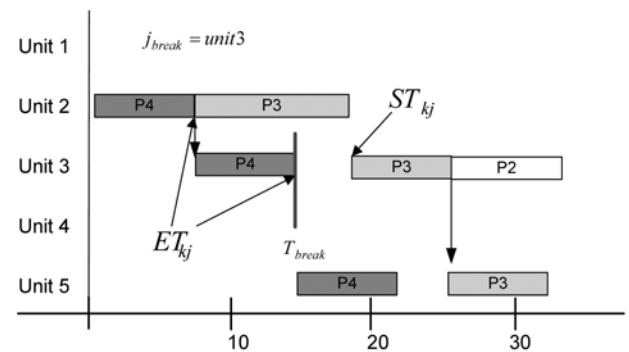


(a) Predictive scheduling

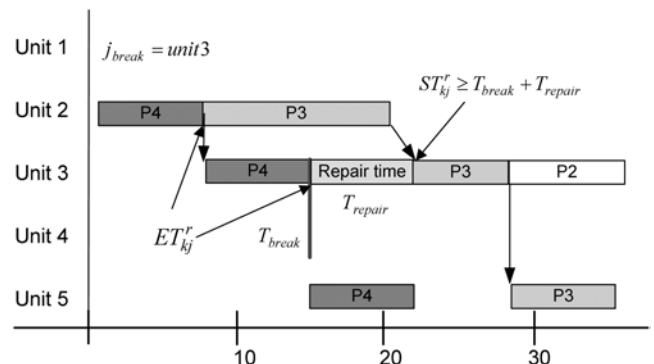


(b) Right shift rescheduling

Fig. 3. Case of Step 2 on right shift rescheduling.



(a) Predictive scheduling



(b) Right shift rescheduling

Fig. 4. Case 1 of Step 3 on right shift rescheduling.

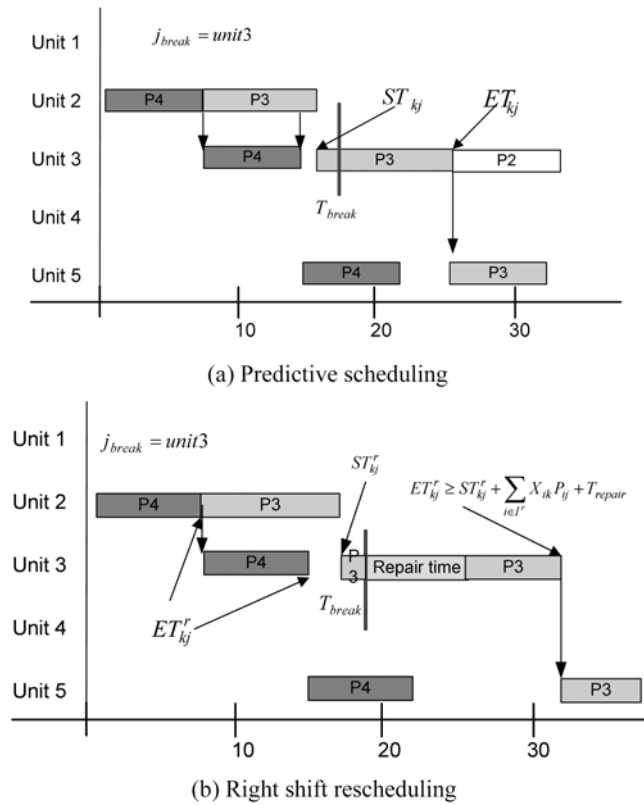


Fig. 5. Case 2 of Step 3 on right shift rescheduling.

- the present state
- production order of products  $i$  in machine  $j$
- starting & ending times of product  $i$  in machine  $j$

또한, 장치이상이 단위공정  $j$ 에서 특별한 시간,  $T_{break}$ 에 발생하였을 때 다음과 같은 데이터를 분류할 수 있다.

- the entire set of jobs not processed at  $T_{break}$ ,  $I_{NP}^r$
- the set of jobs affected directly or indirectly by machine failure on unit  $j$ ,  $I_{AP}^r$
- the set of jobs not affected by machine failure on unit  $j$ ,  $I_{NAP}^r$
- $I^r = I_{NAP}^r \cup I_{AP}^r$
- the entire set of time slots not processed at  $T_{break}$ ,  $K_{NA}^r$
- the set of time slots affected directly or indirectly by machine failure on unit  $j$ ,  $K_{AA}^r$
- the set of time slots not affected by machine failure on unit  $j$ ,  $K_{NAA}^r$
- $K^r = K_{NAA}^r \cup K_{AA}^r$

따라서, total regeneration은 단위공정  $j$ 에서  $T_{break}$  시간에 장치이상이 발생하였을 때 대상공정의 예측 생산계획을 수정·보완하기 위하여 집합  $K^r$ 에 대하여 동적 생산계획(rescheduling) 기법인 total regeneration을 실행한다. 이를 위하여 다품종 회분식 공정의 생산계획 모델인 MILP 수학적 모델은 다음과 같이 수정되며, 새로운 제약조건 식 (13), 식 (17)과 식 (18)이 추가된다.

$$\text{Minimize Makespan} \geq ET_{kj}^r \quad (10)$$

Allocation constraints

$$\sum_{k \in K^r} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in I^r \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I^r} X_{ik} = 1 \quad \forall k \in K^r \quad (12)$$

$$X_{ik} = 1 \quad \forall i \in I_{NAP}^r, k \in K_{NAA}^r \quad (13)$$

Sequencing constraints

$$ET_{kj}^r - ST_{kj}^r \geq \sum_{i \in I^r} X_{ik} P_{ij} \quad \forall k \in K^r, j \in J \quad (14)$$

$$ST_{k,j+1}^r - ET_{kj}^r \geq 0 \quad \forall k \in K^r, j \in J - \{\bar{j}\} \quad (15)$$

$$ST_{k+1,j}^r \geq ET_{kj}^r \quad \forall k \in K^r - \{\bar{k}\}, j \in J \quad (16)$$

$$ST_{kj}^r \geq T_{break} + T_{repair} \quad \forall k \in K^r, j = j_{break} \quad (17)$$

$$ET_{kj}^r \geq ST_{kj}^r + \sum_{i \in I^r} X_{ik} P_{ij} + T_{repair} \quad \forall k \in K_{AA}^r, j = j_{break} \quad (18)$$

식 (13)은 데이터 분석에 의해 분류된 집합  $I_{NAA}^r$ 은 장치이상이 발생하였을 때 생산공정에서 영향을 받지 않는 제품군으로 예측 생산계획에서 할당받은 time slot에  $X_{ik}=1$ 이 되게 고정한다. 식 (17)은 장치이상이 발생한 단위공정이 비워져 있을 때 제품의 시간에 대한 제약조건이다. 식 (18)은 장치이상이 발생한 단위공정에서 장치이상이 발생한 시점에서 공정을 마치지 못한 제품의 끝나는 시간에 대한 제약조건이다.

### 3. 적용 예제

Guo와 Nonaka[7]는 다품종 회분식 공정에서 장치이상이 발생하였을 때 right shift scheduling 기법을 이용하여 각 단위공정에서의 시작시간을 변경하였을 때 initial scheduling의 최종조업완료시간의 변화를 최소화하는 제품생산순서를 결정하는 robust scheduling 기법을 제안하였다. 본 예제에서는 Guo에 의해 제안된 기법과 본 논문에서 제안한 rescheduling 기법을 비교하였다. 본 예제의 문제는 Guo가 발표한 논문을 인용하였다. 예제는 7개의 다른 생산물로 이루어진다. 각 생산물은 단계당 하나의 장치를 가지는 3개의 단위공정을 거치며, 모든 제품의 각 단위공정에서의 생산시간은 Table 1과 같다. Guo에 의하면 Fig. 6에서와 같이 다품종 회분식 공정에서 장치이상이 발생하였을 때 initial scheduling의 최종조업완료시간의 변화를 최소화하는 생산순서로 P3-P1-P5-P4-P2-P7-P6으로 결정하였으며 최종조업완료시간은 82 h이다. Guo의 initial scheduling을 단위공정 2에서 장치이상이  $T_{break}=12$  h에서 발생하고, 단위공정 2의 장치 수리시간,  $T_{break}=6$  h일 때 right shift rescheduling에 적용하여 계산한 결과를 Fig. 7에 Gantt chart로 나타내었다. 이때의 최종조업완료시간은 83 h이다.

Guo의 예제를 본 논문에서 제안한 기법을 적용하였다. 예측 생산계획에 의한 최적 조업 순서는 P5-P1-P3-P6-P4-P7-P2이며, 최종조

Table 1. Data for example (flowshop under UIS)

unit \ Product	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Unit 1	15	7	9	28	1	1	7
Unit 2	5	4	14	11	17	8	2
Unit 3	14	2	18	9	4	3	4

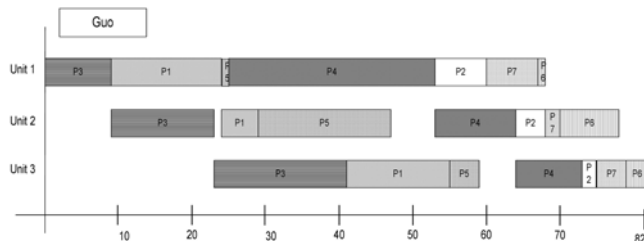


Fig. 6. Gantt chart for example of Guo proposed on flowshop under UIS.

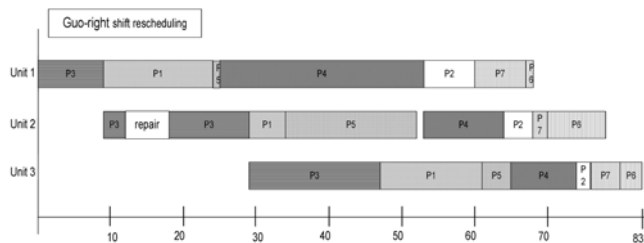


Fig. 7. Gantt chart for example of Guo-right shift rescheduling on flowshop under UIS.

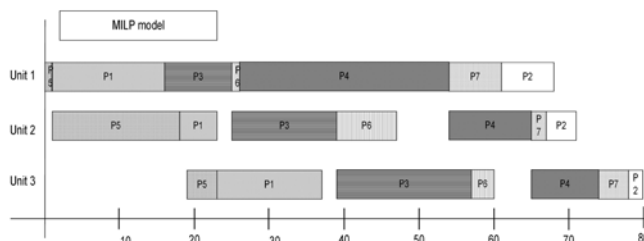


Fig. 8. Gantt chart for example of predictive scheduling on flowshop under UIS.

업완료시간은 80 h이다. Fig. 8은 예측 생산계획에 대한 최적해를 Gantt chart로 나타내었다. 또한, Guo의 initial scheduling에 적용한 장치이상의 정보를 적용하여, 본 논문에서 제안한 right shift rescheduling에 적용한 결과를 Fig. 9에 Gantt chart로 나타내었다.

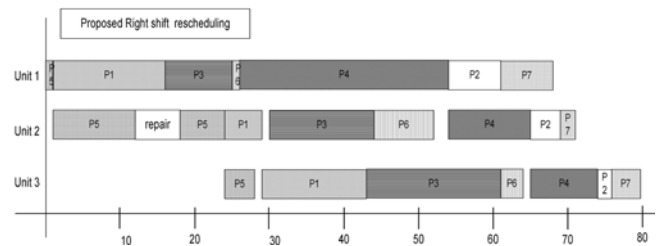


Fig. 9. Gantt chart for example of the right shift rescheduling on flowshop under UIS.

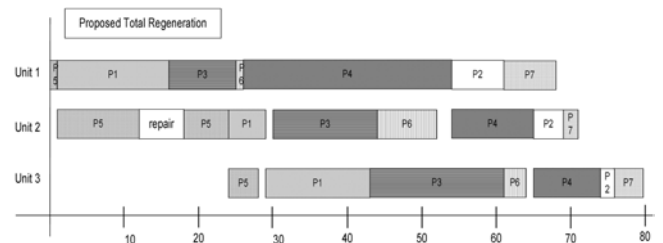


Fig. 10. Gantt chart for example of the total regeneration on flowshop

Table 2. Results of compare with Guo' schedule for example (flowshop under UIS)

	Initial scheduling of Guo	Predictive scheduling
Product order	P3-P1-P5-P4-P2-P7-P6	P5-P1-P3-P6-P4-P7-P2
Makespan	82 h	80 h
Makespan in right shift rescheduling	83 h	80 h
Percentage change in makespan	1.2%	0%

본 논문에서 제안한 right shift rescheduling에 의해 계산된 최종조업완료시간은 80 h이며, 또한 수정된 MILP 모델식 (10)-(18)에 적용한 최적화된 total regeneration 기법을 적용한 최종조업완료시간은 80 h로 제안한 right shift rescheduling의 값과 같은 결과를 보였으며, Guo와 Nonaka[7]가 제안한 robust schedule 보다 좋은 결과를 보였다. 최적화된 동적 생산계획(rescheduling)의 total regeneration 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 최적 제품생산순서는 P5-P1-P3-P6-P4-P2-P7이다. 본 예제의 예측 생산계획, right shift rescheduling과 total regeneration에 의해 계산된 제품순서, 최종조업완료시간, 수정된 sequence deviation과 percentage change of makespan을 비교한 결과는 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Results of the proposed rescheduling for example (flowshop under UIS)

	Predictive scheduling	Right shift rescheduling	Total regeneration
Product order	P5-P1-P3-P6-P4-P7-P2	P5-P1-P3-P6-P4-P7-P2	P5-P1-P3-P6-P4-P2-P7
Makespan	80 h	80 h	80 h
Sequence deviation	-	-	1
Percentage change in makespan	-	0%	0%

#### 4. 결 론

불확실 인자를 고려한 동적 생산계획에서 장치 이상(equipment failure)이 발생하였을 때 공정 운전조건의 변화를 실시간으로 반영하여 예측 생산계획(predictive scheduling) 모델에 의하여 제시된 전체 생산계획을 최대한 유지하면서, 공정 변수의 변화를 실시간으로 반영할 수 있는 right shift rescheduling과 total regeneration을 위한 MILP 모델식을 개발하였다. 또한, 불확실 인자의 발생 전후의 predictive scheduling과 rescheduling 간의 변화 정도를 측정하는 수단인 schedule stability 측정을 위하여, 본 논문에서는 수정된 sequence deviation과 percentage change in makespan을 사용하여 제안된 동적 생산계획의 안정성을 측정하였다. 이러한 schedule stability 측정은 right shift rescheduling과 total regeneration의 선택 기준을 제시해 준다.

#### 감 사

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(R01-2002-000-00007-0)의 연구비지원에 의해 이루어졌으며 지원해주신 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

#### 사용기호

$i$	: product
$j$	: unit
$\bar{j}$	: the last unit
$j_{break}$	: the unit of occurring equipment failure
$k$	: time slot
$\bar{k}$	: the last time slot
$P_{ij}$	: processing time for the product $i$ on unit $j$
$ST_{kj}$	: starting time for unit $j$ on the time slot $k$
$ET_{kj}$	: ending time for unit $j$ on the time slot $k$
$ST_{kj}^r$	: starting time for unit $j$ on the time slot $k$ under rescheduling
$ET_{kj}^r$	: ending time for unit $j$ on the time slot $k$ under rescheduling
$T_{repair}$	: repairing time on the $j_{break}$
$I_{NP}^r$	: the entire set of jobs not processed at $T_{break}$
$I_{AP}^r$	: the set of jobs affected directly or indirectly by machine failure on unit $j$
$I_{NAP}^r$	: the set of jobs not affected by machine failure on unit $j$
$I^r$	: $I_{NAP}^r \cup I_{AP}^r$
$K_{NA}^r$	: the entire set of time slots not processed at $T_{break}$
$K_{AA}^r$	: the set of time slots affected directly or indirectly by

machine failure on unit  $j$

$K_{NAA}^r$  : the set of time slots not affected by machine failure on unit  $j$

$K^r$  :  $K_{NAA}^r \cup K_{AA}^r$

#### 참고문헌

1. Pinto, J. M. and Grossmann, I. E., "A Continuous Time Mixed Integer Linear Programming Model for Short Term Scheduling of Multistage Batch Plants," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**(9), 3037-3055(1995).
2. Hasebe, S., Hashimoto, I. and Ishikawa, A., "General Reordering Algorithm for Scheduling of Batch Process," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **24**(4), 484-489(1991).
3. Wu, D. S., Storer, R. H. and Chang, P. C., "One-Machine Rescheduling Heuristics with Efficiency and Stability as Criteria," *Computers and Operation Research*, **20**(1), 1-14(1993).
4. Unal, A. T., Uzsoy, R. and Kiran, A. S., "Rescheduling on a Single Machine with Part-Type Dependent Setup Times and Deadlines," *Annals of Operation Research*, **70**, 93-113(1997).
5. Watatani, Y. and Fujii, S., "A Study on Rescheduling Policy in Production Systems," *Processings of the JAPAN/USA Symposium on Feasible Automation, ASME*, **2**, 1147-1150(1992).
6. Abumaizar, R. J. and Sevstka, J. A., "Rescheduling Job Shops Under Random Disruption," *INT. J. PROD. RES.*, **35**(7), 2065-2082(1997).
7. Guo, B. and Nonaka, Y., "Rescheduling and Optimization of Schedules Considering Machine Failures," *Int. J. Production Economics*, **60**(61), 503-513(1999).
8. Alagöz, O. and Azizoğlu, M., "Rescheduling of Identical Parallel Machines Under Machine Eligibility Constraints," *European Journal of Operational Research*, **149**(3), 523-532(2003).
9. Li, R.-K., Shyu, Y.-T. and Adiga, S., "A Heuristic Rescheduling Algorithm for Computer-Based Production Scheduling Systems," *INT. J. PROD. RES.*, **31**(8), 1815-1826(1993).
10. Wu, H.-H. and Li, R.-K., "A New Rescheduling Method for Computer Based Scheduling Systems," *INT. J. PROD. RES.*, **33**(8), 2097-2110(1995).
11. Ronan O'Donovan, Reha, Uzsoy and Kenneth, N. Mckay, "Predictive Scheduling of Single Machine with Breakdowns and Sensitive Job," *INT. J. PROD. RES.*, **37**(18), 4217-4233(1999).
12. Carlos, A. M. and Jaime, C., "A MILP Reactive Scheduling Framework for Resource-Constrained Multistage Batch Facilities," *FOCAPO 2003*, 335-338(2003).
13. Abumaiza, R. J. and Svestka, J. A., "Rescheduling Job Shops Under Disruptions," *INT. J. PROD. RES.*, 2065-2082(1997).