# 불확실 변수를 고려한 불연속 화학공정의 Computer-Aided Production Scheduling 모델

하진국, 이의수*
동국대학교 생명화학공학과
(eslee@dgu.edu*)

# Computer-Aided Production Scheduling Model of Non-continuous Chemical Process considering uncertainty

Jin-Kuk Ha, Euy-Soo Lee*
Department of Chemical & Biochemical Engineering, Dongguk University
(eslee@dgu.edu*)

## 서론

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 또는 불확실 변수에 의한 차이가 자주 발생하는 단점이 있다. 이러한 변수들의 변화에 따라 실시간으로 최적 생산 일정 계획을 수정 제시하여 주는 생산 계획 시스템인 동적 생산계획(reactive scheduling) 모델의 개발과 이에 불연속 화학공정의 생산계획과 변수들의 변화에 따른 개조 모델의 통합시스템 개발을 위해서는 상호간의 정보전달을 위한 기법이 필요하다. 상호간의 정보전달을 위해 본 논문에서는 데이터 마이닝 기법을 이용하여 Predictive Scheduling으로부터 얻은 검토기간(scheduling horizon)에서 장치 및 제품별 정보를 데이터베이스화하여 m 장치에서 장치 고장이 발생한 시점 $T_{failure}$에서 장치 고장으로 인해 영향을 받는 장치 및 제품을 선별, 추출하여 유용한 정보만을 이용하여 변수의 변화에 따른 개조모델을 scheduling 하는 기법을 개발하였다. 특히 rescheduling factors 중에서 장치 이상(machine failure)이 발생하였을 때 공정 운전조건의 변화를 실시간으로 반영하여 예측 생산계획 모델에 의하여 제시된 생산 일정 계획을 수정하고, 불연속 화학공정 생산계획과 개조모델의 통합시스템 구축을 위한 Computer-Aided Production Scheduling 모델을 개발하였다.

## Computer-Aided Production Planning

본 논문에서는 rescheduling factors 중에서 장치 이상(machine failure)이 발생하였을 때 공정 운전조건의 변화를 실시간으로 반영하여 예측 생산계획(predictive scheduling) 모델에 의하여 제시된 생산 일정 계획을 수정하여, 전체 생산 계획을 최대한 유지하면서 공정 변수의 변화를 반영하여 생산 일정 계획의 수정하기 위하여 그림 1에서와 같이 Computer-Aided Production Planning 모델을 개발하였다. 그림 1에서와 같이 본 모델의 구성은 다음 세 가지의 모듈로 구성되어있다.

- Predictive Scheduling 모듈: 불연속 화학공정의 모든 공정 변수 값들이 특정한 값으로 고정되어 있을 경우의 생산계획을 담당하는 곳으로 MILP모델로 시스템을 구성하였다.
- Reactive Scheduling 모듈: 시간의 경과에 따라 발생하는 불확실 변수인 장치이상(machine failure)이 발생함에 따라 실시간으로 최적 생산 일정 계획을 수정 제시하여 주는 생산 계획 시스템으로 구성되어 있다.
- Data Mining 모듈: m 장치에서 장치이상(machine failure)이 시간 t에서 발생하였을 때 Predictive Scheduling 모듈에서 계산된 장치 및 제품별 생산계획 정보 데이터를 장치이

상으로 영향을 받는 장치 및 제품들의 정보 데이터를 분석, 추출하여 제공하는 시스템이다.

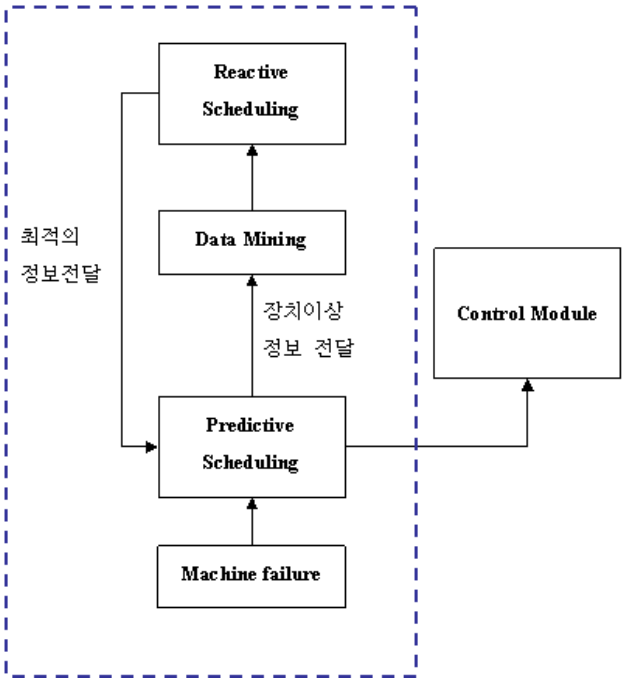


그림 1. Computer-Aided Production Planning 모델

본 논문에서 고려한 생산공정은 다품종 불연속 생산공정과 순차적 다목적 불연속 생산공정에 대하여 장치이상이 발생하였을 때, 전체 생산 계획을 최대한 유지하면서 공정 변수의 변화를 실시간으로 반영하여 생산 일정 계획을 수정하는 Computer-Aided Production Planning 모델을 적용하였다.

**(1) Predictive Scheduling 모듈**

Predictive Scheduling은 불연속 화학공정의 모든 공정 변수 값들이 특정한 값으로 고정되어 있을 경우의 생산계획 모델로 본 논문에서 고려한 생산공정은 다품종 불연속 생산공정과 순차적 다목적 회분공정을 대상으로 하였다. 다목적 회분식 공정에서의 최소생산시간을 위한 조업순서 및 조업시간을 결정하는 혼합정수선형계획법(MILP) 모델로 혼합생산방식(mixed product campaign, MPC)을 고려한 순차적 다목적 회분식 공정의 일정 계획을 위한 수학적 모델을 적용하였다.

**(2) Reactive Scheduling 모듈**

예측 생산계획 모델에서 불확실 변수가 발생했을 때 실시간으로 최적 생산일정계획을 수정 제시하여 주는 동적 생산계획(reactive scheduling) 모델 전략에는 Robust Scheduling, Right-shift scheduling, Partial rescheduling 그리고 Complete regeneration이 있다. 본 논문에서는 장치이상이 발생하였을 때 Right-shift scheduling 기법과 Complete regeneration 기법을 모두 고려하여 최적의 값을 찾는 방법을 사용하였다. Right-shift scheduling은 predictive scheduling에서 계산된 데이터 값에 장치의 고장시간과 고치는 시간을 감안하여 데이터의 값을 수정하면 된다. 이러한 데이터의 값의 수정을 위한 알고리즘을 간략하게 나타내었다.

Step 1: 시간 $T_{failure}$에서 장치 m에서 장치이상이 발생하면

```
For(i=N, j=M)
    IF (m ≠ j and m >j)
        THEN
            { Ts^[i,j]=Ts[i,j]
              Te^[i,j]=Te[i,j]  }
    IF ( m=j and Te[i,j]>T_failure[i,j])
        THEN
            { Ts^[i,j]=Ts[i,j]
              Te^[i,j]=T_failure[i,j]+T_refair[i,j]  }
    IF ( m=j and Te[i,j]<T_failure[i,j])
        THEN
            { Ts^[i,j]=Ts[i,j]
              Te^[i,j]=Te[i,j]  }
    IF (m ≠ j and m < j and Te[i,j]≤T_failure[i,j])
        THEN
            { Ts^[i,j]=Ts[i,j]
              Te^[i,j]=Te[i,j]  }
    IF (m ≠ j and m < j and Te[i,j]>T_failure[i,j])
        THEN
            { Ts^[i,j]=Ts[i,j]
              Te^[i,j]=Te[i,j]+T_failure[i,j]  }
```

Step 2: 장치이상의 발생으로 Right-shift scheduling을 적용함으로써 목적함수인 최종조업완료시간은 다음 식으로 변경됨

$$\text{Makespan} = Te^{\wedge}[N,M]$$

또한, 위에서 언급한 Right-shift scheduling과 비교하여 최적의 값을 찾기 위하여 Complete regeneration기법을 개발하였다. Complete regeneration기법은 공정의 운전상황에서 장치 이상 등과 같은 외란이 발생한 시점, 즉 rescheduling point 시점에서 공정의 운전상황에서 외란의 영향을 받지 않는 변수들뿐만 아니라 공정을 시작하지 않은 변수 모두에 대하여 새롭게 rescheduling 하는 기법이다. 그리고 장치이상이 발생하였을 때 예측 생산계획 모델에서 결정된 전체 생산계획의 변화 정도를 평가하고 측정할 수 있는 기준(criteria)이 필요한데 본 논문에서는 최대 허용 유휴시간(maximum allowable idle time)을 그 평가 기준으로 삼았다. 유휴시간(idle time)은 장치가 아무 작업도 하지 않고 쉬고 있는 시간을 의미한다. 예측 생산계획 모델에서 결정된 생산 일정 계획에서 시간의 경과에 따른 각 장치에서의 유휴시간을 구할 수 있으며 따라서 전체 공정에 대한 최대 허용 유휴시간을 구할 수 있다. 이는 총 공정운전 시간에서 특정시간에 장치 m에서 장치 이상이 발생하더라도 장치 이상이 발생한 시점에서의 전체 고장시간 값이 최대 허용 유휴시간을 초과하지 않으면 전체 생산계획의 목적함수에는 영향을 미치지 못하므로 단순하게 장치 m 에서의 조업완료시간을 조절하면 된다.

**(3) Data Mining 모듈**

데이터 마이닝은 수많은 데이터의 홍수 속에서 그 안에 함축되어 있는 유용한 지식이

나 패턴을 찾아내는 기술이며, 또한 거대한 양의 데이터베이스 혹은 자료로부터 의사결정에 유용한 정보 및 지식을 발견하려는 일련의 자료 분석 및 모형 선정 과정을 일컫는다. 본 논문에서는 데이터 마이닝 기법을 이용하여 Predictive Scheduling으로부터 얻은 검토기간(scheduling horizon)에서 장치 및 제품별 정보를 데이터베이스화하여 m 장치에서 장치 고장이 발생한 시점 $T_{failure}$에서 장치 고장으로 인해 영향을 받는 장치 및 제품을 선별, 추출하여 rescheduling 하는 기법을 적용하였다. 데이터 마이닝의 기법에는 의사결정나무(decision tree)기법, 인공신경회로망(artificial neural network), Project pursuit 및 Data mining Hybrid 기법 등이 있다. 본 논문에는 predictive scheduling에서 얻은 데이터에서 필요한 데이터를 분류, 추출하기 위하여 데이터 마이닝 기법 중에서 분류와 예측의 근거를 쉽게 알려주고, 연속형이나 명목형 데이터 값을 기록된 그래도 처리할 수 있기 때문에 지식발견 process 중 데이터의 변환단계에 소요되는 기간과 노력을 단축시킬 수 있는 의사결정나무 기법을 적용하였다. 또한, 의사결정나무 기법에는 단일 의사결정나무와 복수 의사결정나무로 나누어지는데, 데이터의 수와 부류 값의 수가 증가하게 되면 최종적으로 단일 의사결정나무의 너비와 깊이, 즉 모형을 구성하는 내부 마디와 잎의 수가 불필요하게 많아지고 복잡하게 된다. 이에 반해 복수 의사결정나무 기법은 사례를 분류하는데 있어서 가장 중요한 속성을 우선적으로 고려하며, 데이터의 수와 부류 값의 수가 증가하여도 유용한 정보를 선택, 추출하는데 짧은 시간을 제공한다. 불연속 화학공정의 생산일정계획의 정보 데이터는 생산계획의 검토기간(scheduling horizon) 동안 제품의 수, 단위공정의 수가 증가할수록 데이터의 수가 증가되며, 장치고장의 개수와 $T_{failure}$ 값에 따라 부류 값의 수가 증가하는 경향을 보인다. 이에 본 논문에서는 복수 의사결정나무 기법을 적용하였다. 의사결정나무 기법을 이용하여 predictive scheduling의 정보 데이터로부터 추출하는 데이터는 고장 난 장치의 위치와 개수, 장치이상으로 영향을 받는 제품들과 장치, 제품별 단위공정에서 공정시간 등이다.

## 결론 및 향후계획

본 논문에서는 rescheduling factors 중에서 장치 이상(machine failure)이 발생하였을 때 공정 운전조건의 변화를 실시간으로 반영하여 예측 생산계획(predictive scheduling) 모델에 의하여 제시된 생산 일정 계획을 수정하여, 전체 생산 계획을 최대한 유지하면서 공정 변수의 변화를 반영하여 생산 일정 계획의 수정하기 위한 Computer-Aided Production Planning 모델을 개발하였다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 의사결정나무는 데이터 값들을 기록된 그대로 처리할 수 있기 때문에 데이터의 변환단계에 소요되는 기간과 노력을 단축할 수 있으며, 이를 이용하여 GUI를 바탕으로 하는 프로그램의 입출력 환경 메뉴를 구축하여 Predictive 생산일정계획과 reactive 생산일정계획에서 공정 전반에 대한 운전 현황을 파악하고 최적 생산일정계획의 결과를 파악할 수 있는 간트 차트(Gantt Chart)를 구축할 수 있다.

## 참고문헌

1. Carlos A. Mendez, Jaime Cerda, "Dynamic scheduling in multiproduct batch plants", *Computer & Chemical Engineering*, **27**, 1247-1259(2003)

2. R. J. Abumaiza and J. A. Svestka, "Rescheduling job shops under disruptions", *INT. J. PROD. RES.*, **35**, 2065-2082(1997)

## 감사

본 연구는 한국과학재단(R01-2002-000-00007-0)의 지원에 연구되었으며, 이에 감사드립니다.