

의약품 중간체 생산 공정의 전사적 자원 관리 및 생산 계획 수립을 위한 최적 의사결정 시스템

정창주*[‡] · 조선희**[‡] · 김지용**[†]

*인천대학교 산업경영공학과
22012 인천광역시 연구구 아카데미로 119
**인천대학교 에너지화학공학과
22012 인천광역시 연구구 아카데미로 119

(2020년 2월 5일 접수, 2020년 4월 11일 수정본 접수, 2020년 4월 30일 채택)

RFID-Based Integrated Decision Making Framework for Resource Planning and Process Scheduling for a Pharmaceutical Intermediates Manufacturing Plant

Changjoo Jeong*[‡], Seolhee Cho**[‡] and Jiyong Kim**[†]

*Department of Industrial & Management Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea

**Department of Energy & Chemical Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea

(Received 5 February 2020; Received in revised form 11 April 2020; accepted 30 April 2020)

요 약

의약품 중간체 제조 공장을 포함한 정밀 화학 산업에서 생산 계획 및 전사적 자원 관리(enterprise resource planning) 관한 의사 결정은 기업 운영 효율성 최적화에 매우 주요한 연구 주제이다. 기존의 의사 결정 시스템은 공장 간의 자원 관리와 공장내 생산 계획이 분리되어, 전사적 관점에서의 전역 해를 도출하는데 한계가 있다. 본 연구에서는 무선 식별 시스템(Radio Frequency Identification; RFID) 기반의 실시간 물류 관리 시스템을 이용하여 의약품 중간체 산업의 전사적 자원 관리와 최적 생산 계획 수립을 동시에 수행할 수 있는 의사결정 플랫폼을 개발하고, 실제 제조 공정에 적용하여 그 효과를 분석한다. 기존의 분리된 운영 체제와는 달린 본 연구에서 제안하는 통합 의사결정 플랫폼은 원료 주문 및 운송 시간에 관한 정보가 RFID 기술을 통해 제조 공정 생산 계획 수립의 핵심 데이터로 사용됨으로써, 별도의 재고 관리 시설 없이 공장간 물류 현황에 대응하여 최적 생산 계획이 수립된다. 이를 위하여 제품 생산 시간 최소화를 목적 함수로 설정하고, 마감 기한 및 주문량에 대한 제약조건 등을 포함한 혼합정수선형계획 모델을 개발하였다. 이후 개발된 최적화 모델을 실제 의약품 중간체 생산 문제로 적용함으로써, 제안한 통합 의사결정 플랫폼의 효율성을 입증하였다. 본 연구 결과로 생산 시간 최적화를 위해 단순한 공정 조합을 필요로 하는 생산물이 먼저 제조되고 복잡한 공정 구조를 가진 생산물이 순차적으로 생산되는 생산 일정이 최적임을 확인하였다.

Abstract – This study proposed a new optimization-based decision model for an enterprise resource planning and production scheduling of a pharmaceutical intermediates manufacturing plant. To do this work, we first define the inflow and outflow information as well as the model structure, and develop an optimization model to minimize the production time (i.e., makespan) using a mixed integer linear programming (MILP). The unique feature of the proposed model is that the optimal process scheduling is established based on real-time resource logistics information using a radio frequency identification (RFID) technology, thereby theoretically requiring no material inventories. essential information for process operation, such as the required amount of raw materials and estimated arrival timing to manufacturing plant, is used as logistics constraints in the optimization model to yield the optimal manufacturing scheduling to satisfy final production demands. We illustrated the capability of the proposed decision model by applying the optimization model to two scheduling problems in a real pharmaceutical intermediates manufacturing process. As a result, the optimal production schedule and raw materials order timing were identified to minimize the makespan while satisfying all the product demands.

Key words: Enterprise resource planning, Process scheduling, Pharmaceutical plant, optimization

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jykim77@inu.ac.kr

[‡]These authors contributed equally.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

제약 산업은 고순도 및 고부가가치의 제품을 생산하는 정밀 화학 산업의 한 종류로, 인류의 고령화 및 보건 의식 향상과 맞물려 다른 산업에 비해 가파른 성장세를 보이고 있다[1]. 특히 제약 산업은 다양한 원료 물질과 많은 단일 공정을 필요로 하기 때문에 긴 제조 시간을 가지며, 대형 화학 산업에 비해 소량 생산을 하기 때문에 주로 배치 공정(batch process)을 이용하고 이로 인해 사용 가능한 설비가 제한적이다[2]. 이러한 이유 때문에 제약 산업에 있어서 공정의 생산 효율을 증대시키기 위한 최적의 공정 운전 전략 수립은 필수적이며 이와 관련된 여러 연구가 수행되었다. Stefansson 등은 이용 가능한 데이터가 충분하지 않은 상황에서 최적 생산 일정 계획 수립을 위한 동적 프로세스를 개발하였다. 이를 위해 저자는 계층 구조 체계(hierarchically structured framework)를 개발하였으며 각 단계별로 최적의 운전 전략을 제시하였다[3]. Kim 등은 의약품 중간체 산업의 생산 일정 계획에 관한 연구를 수행하였으며 특히 제품 생산에 소요되는 시간(makespan) 및 제품 납기일 초과 시 지연 시간(delay time) 최소화를 목적으로 하는 최적화 모델을 개발하였다. 또한 저자는 휴리스틱 기법을 활용하여 수리 모델 내 변수를 줄이고 최적화 모델의 복잡도를 낮추었으며 개발된 수리모델을 패키징하여 프로그램을 개발하였다[4]. Varma 등은 최적 운전 계획 수립 뿐만 아니라 시장의 불확정성을 반영하여 한정적 자원을 효과적으로 사용하기 위한 방안에도 분석하였다. 이를 위해 저자는 의약품 제조 시간을 줄이고 순 현재가치(net present value)를 최대화 하는 최적화 모델을 개발하였다[5].

한편, 제조 공정의 생산 일정 계획에 관한 연구와 함께 전사적 자원 관리(Enterprise resource planning)에 대한 연구도 활발히 수행되었다. 전사적 자원 관리란 원료 공급, 제조, 분배, 유통에 이르기까지 모든 흐름을 통합하여 분석하는 방법으로 공급망 관리(supply chain management)와 같은 방법론이 이에 속한다[6]. 공정 운전 집중하는 생산 일정 계획 연구와 달리 원료 공급에서 제품 유통까지 고려하는 공급망 연구는 공급과 수요의 차이를 완충하기 위해 효과적인 재고 관리 시스템(inventory management)을 구축하는 것이 중요하다[7]. 이로 인해 공급망 내 재고 관리 시스템에 관한 다양한 연구가 진행되었다. Uthayakumar 등은 라그랑주 승수법(lagrange multiplier)을 이용하여 2단계 재고 관리 수리 모델을 개발하였으며 이를 활용하여 최적 생산 계획, 리드 타임, 총 기술 개수 등을 분석하였다[8]. Sarin 등은 배치 생산(batch production)의 특징, 생산 일정에 따른 비용과 시간 변화 등 다변수를 고려하여 수리 모델을 개발하였고 이를 생산 계획 문제에 적용하였다[9]. Papageorgiou 등은 제약 산업의 최적 공급망 설계에 관한 의사결정 모델을 개발하였으며 최적 생산 계획을 분석하고 장기적 투자 계획에 관한 실증적인 전략을 제시하였다[10].

앞선 문헌 조사에서 살펴 본 바와 같이, 효율적인 생산 일정 계획 수립 및 유연한 재고 관리는 의약품 제조 산업을 비롯한 화학 공정을 이용하는 대부분의 산업에서 매우 중요한 의사 결정 문제이다. 특히, 병원, 약국 등 중대 소비자를 대상으로 하는 대형 제약 회사는 기 확보된 물류망, 안정적인 시장 관리 전략 등 지속가능한 경영이 가능한 반면, 대부분의 의약품 중간체 제조 기업은 중소기업으로써 시장 변화에 상대적으로 취약한 사업 모델(business model)을 가지고 있다. 의약품 중간체 제조 산업은 다양한 임상 실험용 물질 등

다품종 물질 생산 능력이 요구되며, 더욱이 갑작스러운 납품 일정 등으로 지속가능한 생산 일정 수립이 매우 어려운 실정이다. 즉, 이러한 다품종 소량 생산 및 불확실한 수요 등의 산업 생태학적 한계를 갖는 의약품 중간체 제조 산업에 적합한 최적 의사결정 모델 개발은 그 파급효과가 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 다품종 소량 생산의 의약품 중간체 제조 공정에 적합한 의사결정 모델 개발을 목표로 한다. 이를 위하여 실시간 물류 추적 및 관리에 용이한 무선 식별 시스템(Radio Frequency Identification; RFID) 기반의 원료 관리 및 다양한 단위조작으로 구성된 제조 공정의 생산 일정 계획 수립을 동시에 수행 가능한 최적화 모델을 제안한다. 상기 제안된 의사 결정 모델을 실제 의약품 중간체 제조 공정에 적용함으로써, 제안된 모델의 효과를 검증한다.

2. 시스템 설명

2-1. 연구 목적

본 연구의 목적은 의약품 중간체 제조 공정에서의 효율적인 생산 일정 계획 수립 및 원료 재고 관리를 지원하는 의사결정 모델 개발로써, Fig. 1에 본 연구에서 제안하는 모델의 특징을 나타내었다. Fig. 1(a) 및 1(b)에서 보는 바와 같이 기존의 생산 일정 계획은 각각 공장 내 최적 운전 순서 결정, 공장 외 물류 관리를 목표로 한다. 본 연구에서는 Fig. 1(c)에 보인 바와 같이 생산 일정 계획 및 공급망 관리를 함께 처리하기 위한 최적화 기반 의사 결정 모델을 개발한다. 기존의 의사 결정 모델은 공장 내외의 물류 흐름을 완충하기 위한 재고 시설(inventory system)을 반드시 필요한 반면, 본 연구에서 제안한 의사결정 모델은 이론적으로 재고 시설 없이 실시간으로 물류를 관리할 수 있는 특징이 있다. 즉, 주문(order)이 발생했을 경우 주문 관련 정보가 원료 공급 시설로 전달되고, 제조에 필요한 원료 정보를 기반으로 실시간으로 원료 물질을 수급 한다. 이 때, 원료 시설에서 제조 공정까지 물류 이동 시간은 유비쿼터스 기술 중 하나인 RFID를 통해 시간 단위로 예측되며, 예상되는 물류 시간을 포함하여 공정 운전 계획에 대응 가능한 원료 수급 계획(즉, 주문 타임 및 수급 타이밍)을 수립한다.

2-2. Radio Frequency Identification (RFID)

RFID란 전파를 이용해 원거리에서 정보를 인식하는 기술로 전자기 유도 방식을 이용한다. 이 기술에는 직접 회로와 안테나로 구성된 태그와 판독기가 필요하며 그 작동 원리는 다음과 같다. 태그 내 직접 회로 안에 원하는 정보를 기록하고 안테나를 통해 판독기로 정보를 송신하면 판독기는 정보를 읽어 물체를 식별한다. 이 기술은 그 편리성 및 정확성 덕분에 산업체 전반에 걸쳐서 다양하게 사용되고 있다. 구체적으로 벡텔(Bechtel)사는 건설 자재의 위치 파악 및 추적 관리에 RFID 기술을 활용하여 작업시간을 30% 단축시켰으며 IBM사는 재고 관리에 이 기술을 활용하여 연간 재고량의 5-25%를 감소시켰다[11]. 또 자동차부품 제조 공정에서는 소요인력 50%, 처리 시간 75%를 절감시켰다[12]. 뿐만 아니라 농업분야에서도 작물의 무게 측정, 세척, 샘플링, 등급 판정 등에 이 기술을 활용하여 기존 출하 시간의 60%를 단축시켰다[13]. 이 뿐만 아니라 이 기술은 공급망 관리에도 사용할 수 있다. 원료에 부착하여 자원의 가용량을 확인하고, 공정 운전 전에 따른 자재 투입 시에 활용할 수 있으며, 원료 또는 제품의 위치와 수량을 신속하고 정확하게 파악하

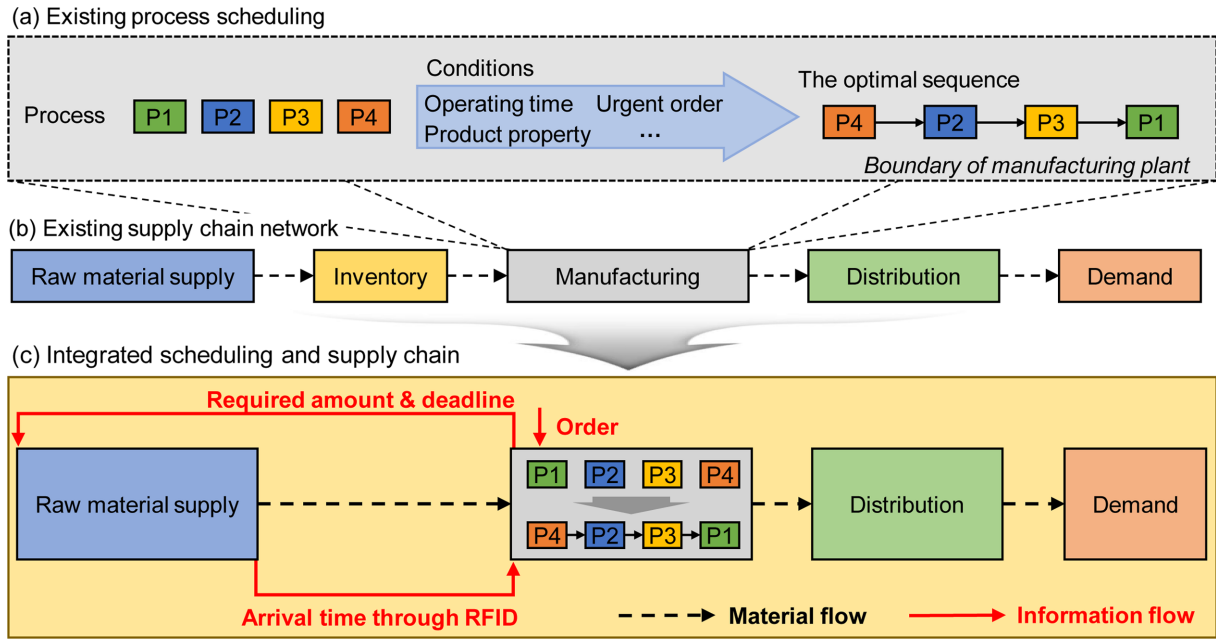


Fig. 1. Scheme of (a) existing process scheduling, (b) supply chain network, and (c) integrated scheduling and supply chain system.

여 효율적인 배송을 가능하게 할 수 있다[14]. 본 연구에서는 이러한 RFID 기술의 장점을 재고 시스템 대신 활용하고자 한다. 즉, 물량 조절을 위해 RFID 기술이 사용되고 이 기술을 통해 제조 공정으로의 원료 도착시간이 예측 가능하다고 가정하였다.

3. 최적화 모델 개발

본 연구에서는 혼합정수선형계획(mixed-integer linear programming) 기법을 사용하여 의약품 중간체 제조 공정의 생산 일정 계획 및 공급망에 관한 최적화 모델을 개발하였으며 수리 모델 개발을 위해 Kim 등의 논문을 참조하였다[4].

3-1. 목적 함수

본 연구에서는 소요 시간 최소화를 목적 함수로 하며 이는 각 제품 생산에 소요되는 식의 합으로 표현된다.

$$\text{Min} \sum_i TFT_i \tag{1}$$

여기서 TFT_i 는 제품 i 의 생산이 끝난 시점을 나타낸다.

3-2. 제약조건

3-2-1. 시간 일치(Time-matching constraints)

제품 i 가 시간 슬롯 n 일 때 장치 j 에 할당된다면($w_{ijn}=1$) 두 좌표의 시작 시간이 동일하다.

$$TST_i \leq EST_{jn} + \chi(1 - w_{ijn}) \quad \forall i, j, n \tag{2}$$

$$TST_i \geq EST_{jn} - \chi(1 - w_{ijn}) \quad \forall i, j, n \tag{3}$$

여기서 TST_i 는 제품 i 의 생산이 시작된 시점이며 EST_{jn} 은 시간 슬롯 n 일 때 제품 i 가 장치 j 에서 생산이 시작된 시점을 나타낸다. 또한 χ 는 취할 수 있는 최대값을 나타낸다. 시작 시간 조건과 마찬가지로

종료 시간 또한 동일하게 표현된다.

$$TFT_i \leq EFT_{jn} + \chi(1 - w_{ijn}) \quad \forall i, j, n \tag{4}$$

$$TFT_i \geq EFT_{jn} - \chi(1 - w_{ijn}) \quad \forall i, j, n \tag{5}$$

여기서 EFT_{jn} 은 시간 슬롯 n 일 때 제품 i 가 장치 j 에서 생산이 종료된 시점을 나타낸다.

3-2-2. 장치 및 시간 슬롯 할당(Unit and time slot assignment)

장치 집합 I 에 속하는 장치 j 의 이용 가능한 개수는 전체 이용 가능한 장치 개수에 영향을 받는다(식 (6)). 또한 모든 제품 및 모든 단계에 있어서 하나의 시간 슬롯에는 하나의 장치만 할당된다(식 (7)).

$$\sum_j w_{ijn} \leq \omega_i \quad \forall i, n, l \tag{6}$$

$$\sum_n w_{ijn} \leq \beta_j \quad \forall i, j \tag{7}$$

여기서 ω_i 는 제품 i 를 생산하기 위해 필요한 장치의 개수로 이때 장치는 장치 집합 I 에 속한다. β_j 는 제품 i 를 위해 필요한 배치(batch)의 수를 나타낸다. 연속 시간 슬롯의 시작 및 종료 시간 간의 관계는 식 (8)와 식 (9)으로 표현된다.

$$EST_{j(n+1)} \geq EST_{jn} \quad \forall i, j, n \tag{8}$$

$$EFT_{j(n+1)} \geq EFT_{jn} \quad \forall i, j, n \tag{9}$$

제품 i 가 시간 슬롯 n 에 장치 j 에 할당된다면 종료 시간은 장치 j 에서 제품 i 생산에 소요된 처리 시간에 영향을 받는다(식 (10)). 만약 서로 다른 제품 i 가 연속된 시간에 같은 장치 j 에 할당된다면 최종 종료 시간은 세척 시간을 고려해야 한다(식 (11)).

$$EFT_{jn} = EST_{jn} + w_{ijn} \rho_i \quad \forall i, j, n \tag{10}$$

$$EST_{ijn+1} \geq EFT_{ijn} + w_{ijn}\rho_i - R(2 - w_{ijn} - w_{i'jn}) \quad \forall i, i' (i \neq i'), j, n \quad (11)$$

여기서 ρ_i 는 제품 i 의 처리 시간을 나타내며, φ_i 는 제품 i 생산에 소요되는 세척 시간을 나타낸다. 한편, 다른 제품 생산 시 제품 간 주기 시간을 고려해야 한다.

$$TST_i \geq TST_i + \delta_i \quad \forall i, i', i \neq i' \quad (12)$$

여기서 δ_i 는 주기 시간으로 다른 제품을 생산할 시 제품 교체를 위해 필요한 시간을 말한다.

3-2-3. 주문 시간 및 주문량(The time and amount of order)
 제품의 생산량은 그 수요보다 많거나 같아야 한다.

$$\alpha_i \geq \sigma_i \quad \forall i \quad (13)$$

여기서 α_i 는 제품 i 의 생산량, σ_i 는 제품 i 의 수요를 나타낸다. 식 (14)는 제품 i 가 마감기한 내에 완성되어야 함을 의미한다. 한편 재고 시스템이 없는 본 연구에서는 제품 i 를 생산하기 위해서 제품에 필요한 원료를 주문하고 이를 받아야만 한다. 식 (15)은 원료의 주문 및 운송에 관한 제약 조건을 나타낸다.

$$TFT_i \leq \theta_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$\gamma^o + \gamma^T \leq TST_i \quad \forall i \quad (15)$$

여기서 θ_i 는 지연 시간, γ^o 는 원료 주문 시간, γ^T 는 원료의 운송 시간을 의미한다.

3-2-4. 설비 용량 및 사용(The capacity and utilization)

제품 i 를 위해 사용되는 반응기 r 의 용량은 장치 j 의 용량보다 작아야 한다.

$$v_{ir}^R \leq v_j \quad \forall i, r, j \quad (16)$$

여기서 v_{ir}^R 는 제품 i 를 위한 반응기 r 의 최대 용량을 나타내며 v_j 는 장치 j 의 최대 용량을 나타낸다.

실제 의약품 중간체 제조 공정은 대부분 중소기업으로 다양한 제품 생산에 대응 가능한 모든 설비를 충분히 보유하기는 현실적 어려운 실정이다. 예를 들어, 일부 의약품 중간체는 기본적인 회분식 반응기 외에 별도의 냉각 공정을 포함하기도 한다. 즉, 냉각 공정을 필요로 하는 의약품 중간체들의 동시 제조는 공장 내 설비된 냉각 장치의 수에 제한을 받는다(식 (17)-(19)).

$$y_{ik} \leq \sum_{j,r} z_{irj} \phi_{jk} \omega_r \quad \forall i, k \quad (17)$$

$$EST_{ijn+1} \geq EFT_{ijn} - \chi(2 - y_{ik} - y_{i'k}) \quad \forall i, i' (i \neq i'), j, n, k \quad (18)$$

$$w_{ijn} + w_{i'jn} \leq 1 + \chi(2 - y_{ik} - y_{i'k}) \quad \forall i, i' (i \neq i'), j, n, k \quad (19)$$

여기서 y_{ik} 는 냉각기 k 와 관련된 제품 i 에 관한 변수이며 z_{irj} 는 제품 i 를 위한 반응기 r 과 관련된 장치 j 에 대한 변수이다. 또한 ϕ_{jk} 는 냉각기 k 가 설치된 기술 j 이며 ω_r 는 제품 i 를 위해 필요한 반응기 r 의 개수이다.

4. 모델 적용

본 연구에서는 원료 운송지에 따라 2가지 시나리오를 개발하고 앞서 개발된 최적화 모델을 활용하여 생산 일정 계획 및 공급망을 분석한다. 이때 각각의 모든 단계가 지연 없이 운전이 된다고 가정하였다. 상기 의약품 제조 공정 의사 결정 예제는 상용 최적화 소프트웨어인 대수모델(GAMS)을 사용하여 나타냈으며 선형 알고리즘 중 하나인 단계법 알고리즘(CPELX)을 이용하여 해결되었다 [15].

4-1. 원료 및 생성물 특징

Table 1은 반응물과 생성물, 수요량 및 제품 납기일을 나타낸다. 본 연구에서는 6개 반응물(X, Y, Z, L, M, N)을 활용하여 7개의 중간체를 만들고 최종적으로 4개의 생성물을 만든다. A, B, C, D가 최종 생산물이며 A-1, A-2, C-1, C-2, D-1, D-2, D-3은 최종 생산물을 만들기 위해 필요한 중간물질이다. 최종 생산물 A를 만들기 위해서는 A-1과 A-2 중간체를 먼저 만들어야 한다. Table 2는 원료지가 국내인 경우, 국내와 국외가 함께인 경우에 대해 원료 물질의 운송 소요 시간을 나타낸다.

4-2. 공정 정보

의약품 중간체는 3가지 공정(반응기, 여과기, 건조기)을 거쳐서 생산된다. 첫 번째 단계에서 원료가 특정 온도, 압력을 가진 반응기로 투입되고 반응기에서 생산된 물질이 불순물 제거를 위해 여과기로 투입된다. 이후 물질에 따라 건조기를 통해 정제되고 최종 생산물이 이동한다. 본 연구에서는 Table 3에서와 같이 11개의 반응기, 7개의 여과기, 4개의 건조기로 구성된 의약품 중간체 제조 공정을 고려하였으며 각 장치 별 특징은 다음과 같다.

Table 1. Product demand and material information

Product	Required reactants	Demand (kg)	Due date (hr)
A-1	X,Y		
A-2	X,Y,Z	1,000	3,000
A	X,Y,Z,M		
B	L,M	1,300	2,100
C-1	X,N		
C-2	Y,Z	524	1,800
C	X,Y,Z,N		
D-1	Y,M		
D-2	X,L		
D-3	X,Y,L,M	900	3,500
D	X,Y,L,N,M		

Table 2. Transport time from domestic/outside site [4]

Reactants	Transport time from domestic resource site (hr)	Transport time from both domestic/outside resource sites (hr)
X	37	144
Y	35	48
Z	38	36
L	34	72
M	36	216
N	39	168

Table 3. Equipment information about pharmaceutical intermediate industry [4]

Reactor (R)	Type	Max. volume (kg)	Shared condenser	Filter data		Dryer data	
				Filter (F)	Type	Dryer (D)	Type
R1	GL	7,800	R5	F1	F/P	D1	F/D
R2	GL	7,500	R3	F2	F/P	D2	F/D
R3	GL	4,400	R2	F3	H/F	D3	F/D
R4	SS	3,700		F4	H/F	D4	F/D
R5	GL	7,800	R1	F5	H/F		
R6	SS	3,100		F6	H/F		
R7	SS	5,300		F7	H/F		
R8	GL	4,300	R9				
R9	GL	3,000	R8				
R10	GL	4,200					
R11	SS	5,200					

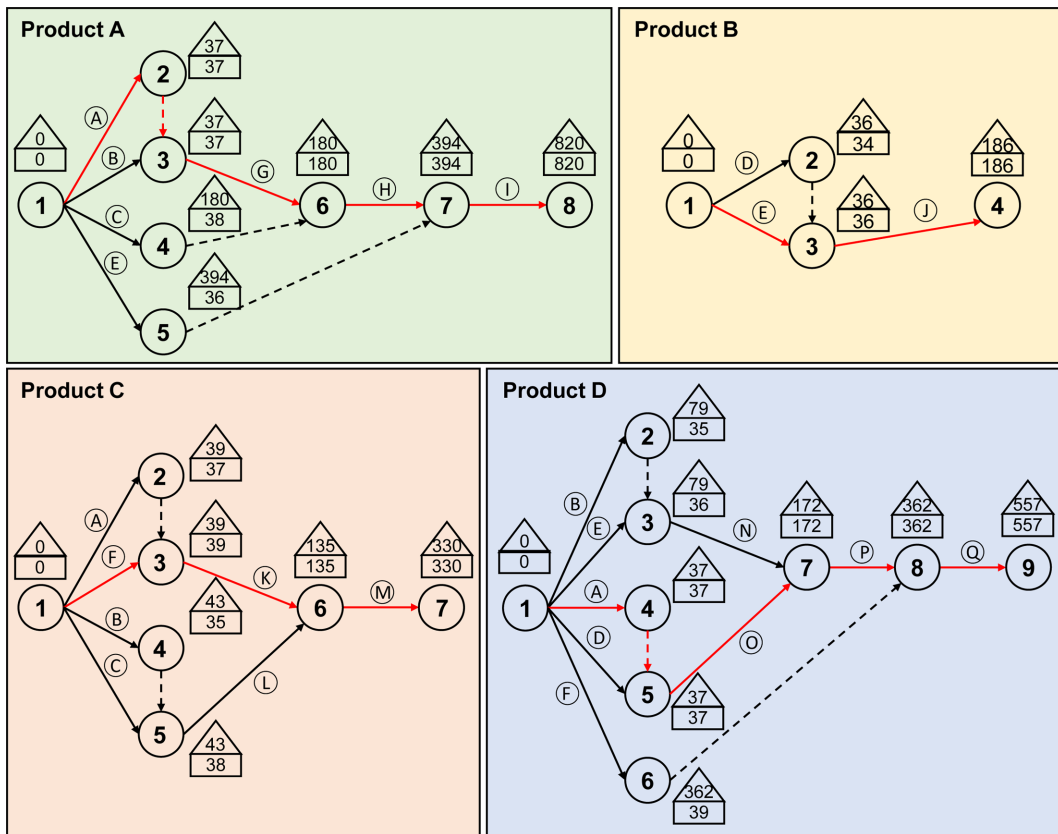
• GL은 글라스라이닝(glass lining) 물질로 구성된 반응기이며 SS는 스테인리스강(stainless steel)으로 제작된 반응기를 뜻한다. GL 반응기는 운전 조건에 관계없이 사용될 수 있으나 SS 반응기는 오히려 낮은 온도, 압력에서만 사용 가능하다. SS 반응기는 GL 반응기로 대체할 수 있으나 GL 반응기는 대체하여 사용할 수 있는 반응기가 없다[4].

• 반응기의 용량은 3100-7800 kg으로 다양하다[4].

• 앞서 설명하였듯이 냉각기가 필요한 공정들은 한번에 운전될 수 없다. Table 1에서 보이는 바와 같이 R1 반응기는 R5 반응기와 냉각기를 공유하기 때문에 동시에 운전될 수 없다.

• 가압식 여과기(Filter press; F/P)는 고체로부터 액체를 분리하기 위해 사용되며, heap 필터(heap filter; H/F)는 매우 작은 물질을 분리할 때 사용한다.

Fig. 2는 생산물 A,B,C,D에 대한 생산 경로 및 이론적 최소 소요



Activities

- (A) Transport of material X
- (B) Transport of material Y
- (C) Transport of material Z
- (D) Transport of material L
- (E) Transport of material M
- (F) Transport of material N
- (G) Synthesis of X,Y
- (H) Synthesis of X,Y,Z
- (I) Synthesis of X,Y,Z,M
- (J) Synthesis of L,M
- (K) Synthesis of X,N
- (L) Synthesis of Y,Z
- (M) Synthesis of X,Y,N,Z
- (N) Synthesis of Y,M
- (O) Synthesis of X,L
- (P) Synthesis of X,Y,L,M
- (Q) Synthesis of X,Y,L,M,N

Fig. 2. Production routes and theoretical minimum time for products.

시간을 네트워크 모형으로 나타낸 것이다. 네트워크 모형이란 프로젝트에 포함된 다수의 활동에 대해서 활동 간 선후 관계를 분석하고 소요시간을 평가하는 방법으로 생산 일정 및 비용 등을 합리적으로 계획하고 관리하기 위해 사용된다. 원 안의 숫자는 단계(Event)을 지칭하고 원 안의 알파벳은 시간 안에서 일어나는 활동(activity)을 나타낸다. 구체적으로 생산물 A의 네트워크 모형을 보면 활동 A가 단계 1에서 시작하여 단계 2에서 종료된다고 해석한다. 이때 실선 화살표는 단계 1에서 단계 2로 활동이 발생했음을 뜻하며 점선 화살표는 단계들을 연결하기 위해 추가된 것으로 활동의 발생과는 무관하다. 또한 네모는 활동의 가장 빠른 시작시간을 나타내며 세모는 활동의 가장 늦은 완료 시간을 의미한다. 네모와 세모의 값이 일치하는 단계들을 연결한 경로를 주공정 경로라 하며 이는 시작에서 종료까지 가장 오래 걸리는 경로를 뜻한다. 그림에서는 주공정 경로에 대한 화살표를 빨간색으로 표시하였다.

Fig. 2는 원료를 모두 국내 원료지에서 공급한다고 가정했을 때의 네트워크 모형으로, 이론적으로 가장 최단시간에 제품을 생산할 수 있는 경로 및 시간을 나타낸다. Fig. 2를 보면 생산물 B는 186시간 안에 생산이 가능하여 생산물 중 가장 단기간에 완성되지만 생산물 A는 820시간이 필요하다. 이 시스템의 최종 makespan은 4가지 생산물 중 가장 오랜 시간이 걸리는 생산물 A의 제조 시간과 같으며 그 값은 820시간이다. 그러나 이 결과값은 최종 생산량이나 공장의 개수 및 규모를 고려하지 않은 이론적인 최소 생산시간이기 때문에 실제 운전 시 이보다 오랜 시간이 필요하다.

Table 4은 구체적인 공정 순서와 장치의 소요시간 및 생산량을 나타낸다. 예를 들어, A-1 중간체는 2단계 전환 반응과 여과/건조 반응을 거쳐서 생산된다. 구체적으로, GL (3500) 반응기와 SS (4000) 반응기로 구성된 1단계 반응이 끝나면 SS (3500) 반응기로 주입되어 2단계 반응이 일어난다. 이후 H/F여과기 및 F/D건조기를 사용하여 중간체인 A-1이 생성된다. 초기 원료에서부터 최종 생산물 A까지 생산하기 위해서는 5번의 반응이 일어나야 하며 1개의 여과기와 건조기가 필요하다. 여기서 3500, 4000과 같은 괄호 안의 숫자는 최소 크기를 의미한다. 즉, GL (3500)이란 3500kg이상의 GL 반

응기를 사용해야 한다는 뜻이다. 한편 processing time은 물질 생성에 소요되는 시간을 나타내며 batch production은 한 배치공정에서 생성되는 양을 나타낸다. 한 배치 공정이 끝나고 다음 공정을 위해 공정을 준비하는 시간을 bottleneck time이라 한다.

5. 결과 분석

본 연구에서는 원료를 국내에서 조달 받는 경우와 국내 및 국외에서 동시에 조달 받는 경우로 2가지의 시나리오를 개발하였으며 각 시나리오에 대해 공급망 및 최적 공정 운전 전략을 분석하였다.

5-1. 원료 공급에 따른 공급망 네트워크 분석

Fig. 3은 각 시나리오에 대한 네트워크 모형을 나타내며 주공정 경로에 대해서만 그 값을 기입하였다. 두 시나리오에서 모든 생산물은 목표량을 충족시키면서 마감 기한 내에 생산하였다(Table 1 참조). 구체적으로 각 시나리오의 makespan은 968시간, 1014시간으로 Fig. 2에서의 이론적 최소 생산 시간인 820시간보다 각각 18%, 27% 증가하였다. 이는 실제 산업현장에서는 사용 가능한 반응기의 개수와 용량이 제한적이기 때문이다. 또한 원료를 국외에서 조달 받는 경우 국내에서 공급받는 경우보다 운송에 오랜 시간이 소요되기 때문에 더 긴 makespan을 갖는다. 생산물 B와 같이 한 번의 반응으로 최종 생산물을 얻는 공정은 빠르게 완료되는 반면 생산물 A 또는 D와 같이 다양한 물질 및 여러 단계의 반응을 필요로 하는 경우는 최종 생산물을 만드는 데에 보다 오랜 시간이 소요된다. 본 결과로부터 알 수 있는 다른 결과는 전체 시스템의 makespan이 곧 생산물 A의 생산 시간과 같다는 것이다. 이를 통해 생산물 A의 효과적인 생산 계획이 전체 시스템 운전 전략을 결정한다는 것을 알 수 있다.

5-2. 장치 별 최적 운전 전략

Fig. 4는 장치 별 사용 현황 및 원료 발주, 생산물 생산 시간에 대해 모두 나타낸 간트차트(Gantt chart)이다. 두 가지 원료 물질의

Table 4. Summary of quantity and type of ordered product and processes [4]

Product	Required process	Sequence of equipment	Bottleneck time (hr)	Processing time (hr)	Batch production (kg)	Required amount (kg)
A-1	R	• GL (3500) → SS (4000) SS (3500)	48	95	500	1,563
	F	• H/F				
	D	• F/D				
A-2	R	• GL(6000) → SS(4000) SS(3000)	50	164	488	1,544
A	R	• SS(3500) → SS(2500)	36	390	140	1,000
B	R	• GL(3000) → GL(3500)	60	90	400	1,300
		• GL(2000) → SS(1000)				
C-1	R	• SS(3000) → SS(2000)	36	60	380	600
	D	• F/D				
C-2	R	• GL(5500) → SS(2300)	40	52	270	640
C	R	• GL(3600) → GL(3200)	60	135	200	524
D-1	R	• GL(5000) → SS(4000)	35	58	256	401
	D	• F/D				
D-2	R	• GL(3000) → GL(5500)	60	75	312	500
	F	• SS(3000) → SS(2000)				
D-3	R	• SS(4000) → SS(3000)	47	143	500	800
D	R	• GL(4000)	45	150	450	900

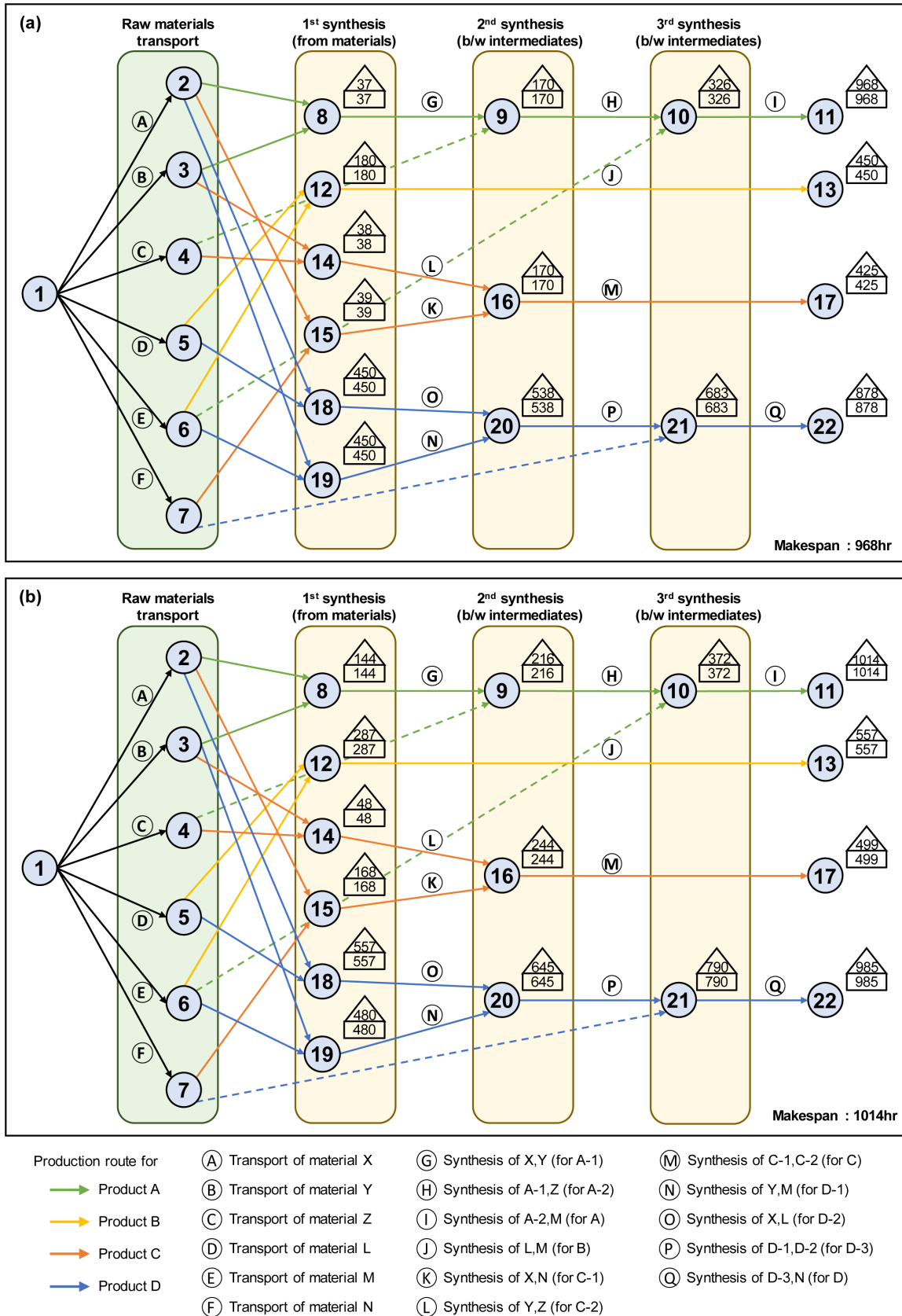


Fig. 3. The optimal supply networks by scenarios: (a) Sc1 (b) Sc2.

이동을 나타내는 경우 더 오랜 시간이 소요되는 물질을 기준으로 작성하였다. 예를 들어 Fig. 4(b)의 원료 X, Y의 운송은 X가 144시

간, Y가 48시간이 소요되기 때문에(Table 2 참조) X 기준으로 표시 하였다. 총 11개의 반응기, 7개의 여과기, 4개의 건조기 중에서 반

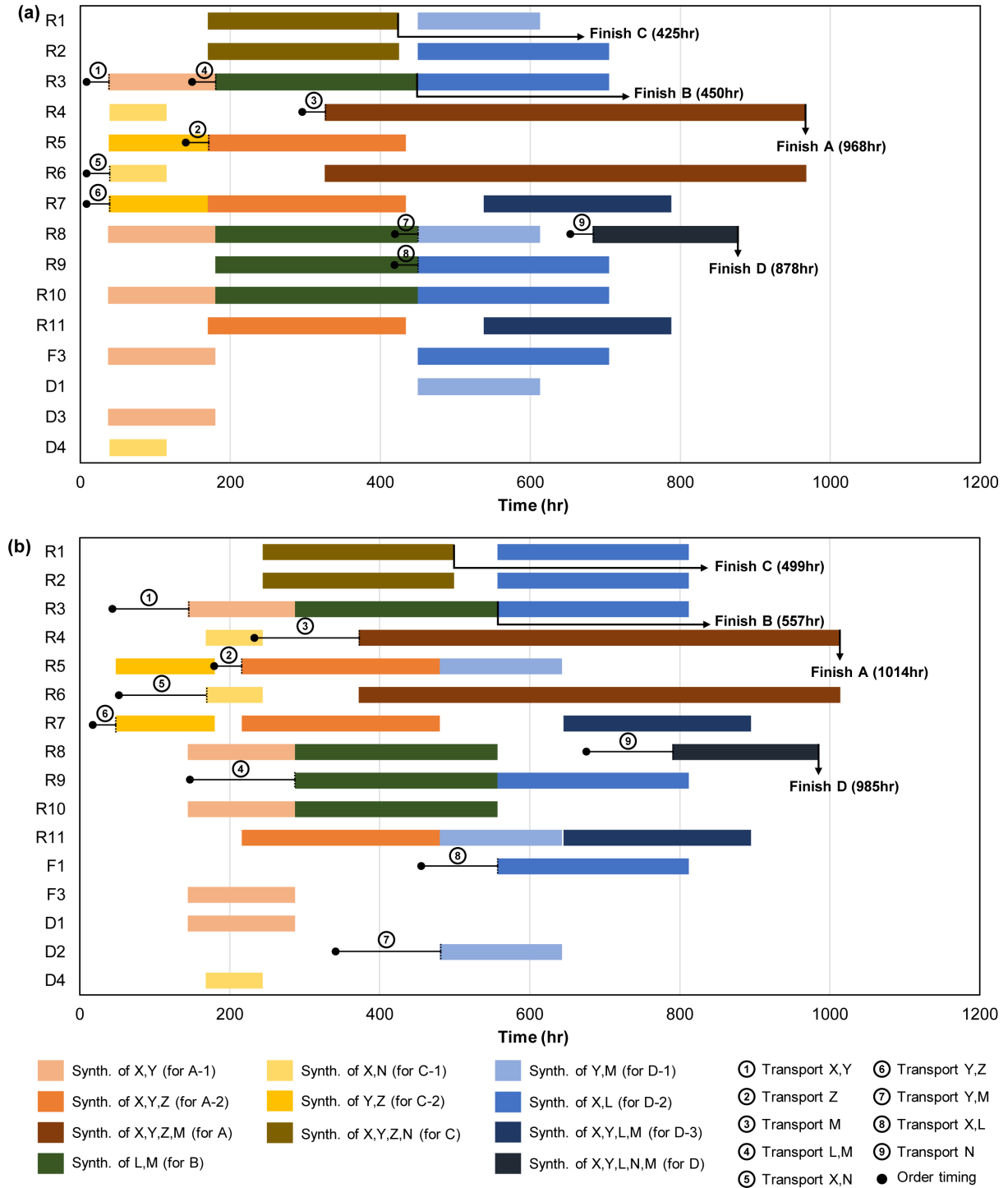


Fig. 4. The optimal Gantt chart for products by technologies: (a) Sc1 (b) Sc2.

응기는 모두 사용되었으나 여과기와 건조기는 필요에 맞게 소량 사용되었다. 도표에서 막대 그래프는 생산 시간을, 검은 원은 원료의 주문 시간을, 실선은 주문한 원료의 운송 시간을 나타낸다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)를 보면 공통적으로 가장 오랜 시간이 소요되는 공정은 최종 생산물 A 합성 공정으로 642시간이 소요된다. 이를 통해 두 가지 시나리오에 있어서 전체 makespan은 최종 생산물 A의 합성 공정에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 각 장치에 따른 생산물의 생산 순서를 보면 생산물 B, C가 먼저 생산되고 이후 D

가 생산된 뒤 A가 최종적으로 가장 마지막에 완성된다. 국내에서 원료를 조달하는 경우 원료 운송 시간 차이가 미비하기 때문에 조달 되는대로 바로 생산공정이 가동되는 반면 국내 및 국외에서 조달 받는 경우 가장 빠른 시간에 도달할 수 있는 원료 Y, Z 합성이 가장 먼저 시작되고 뒤이어 X, N 합성이 진행된다. 반응기 3,8,9,10에서 원료 L과 M의 합성 반응이 동시에 일어나는 것은 한 배치 공정에서 반응기가 한번에 생산할 수 있는 양이 제한적이기 때문이다 (Table 4 참조).

6. 결 론

본 연구에서는 의약품 중간체 제조 공정 등 정밀 화학 산업의 전사적 자원 관리 및 최적 생산 계획을 동시에 수립할 수 있는 통합 의사결정 플랫폼을 개발하고 그 효용성을 실제 문제 해결을 통하여 입증하였다. 기존 공정에서 필수적인 원료 재고 관리 시설이 없는 반면, 원료 주문 및 운송 시간에 관한 정보가 RFID 기술을 통해 제조 시설의 생산 계획의 수립의 핵심 데이터로 사용되며, 실시간 물류 흐름에 대응하여 최적의 생산 일정 수립이 가능하다. 이를 위하여 본 연구에서는 제품 생산 시간 최소화를 목적 함수로 하는 최적화 모델을 개발하였으며, 원료 공급지가 국내인 경우, 국내와 국외와 동시에 존재하는 시나리오에 따라 실제 운영 중인 의약품 중간체 생산 계획 수립 문제에 적용 하였다. 본 연구 결과로 최종 생산 시간을 단축시키기 위하여 각 원료 물질의 주문 타이밍을 비롯하여 공장 내 주요 장치(반응기, 정제기, 수분 제거기 등)의 운전 전략을 수립하였다, 특히, 원료를 국내 또는 국외에서 조달하는 경우 원료 운송 시간 차이로 인해 makespan이 다르지만 두 경우 모두 제한 시간 안에 생산됨을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 이론적으로 재고 시설이 없는 상황에서의 전사적 자원 관리 및 생산 일정 수립에 관련된 통합 의사결정 플랫폼의 방법론과 그 효용성에 관하여 논의하였다.

본 연구에서 제안한 의사 결정 모델을 통해 실시간 물류 관리와 생산 일정 계획 수립에 관한 전략을 동시에 수행할 수 있는 가능성을 확인한 반면, 향후 제고 시설 건설 비용 등, 정확한 제고 관리 비용 산정을 통하여 본 연구에 제안한 방법론의 경제적 효과를 분석할 필요가 있다. 더불어, 본 연구의 결과를 기반으로 원료 물질 가격의 불확실성 및 생산품 공급 전략과의 통합 등의 확장된 연구 수행으로, 4차 산업 기술을 중심으로 한 정밀 화학 시장의 전자 상거래(E-commerce) 체제의 핵심 기술 확보할 수 있다.

Acknowledgments

이 논문은 인천대학교 2018년도 자체연구비 (2018-0220) 지원에 의하여 연구 되었습니다.

Nomenclature

Indices

i	: order (product)
j	: unit equipment
l	: equipment group
n	: time slot for equipment
r	: reactor number
k	: overhead condenser

Parameters

χ	: large number
ω_i	: the available number of equipment for order i in equipment group l
β_i	: the required number of batch for order i
ρ_i	: process time of order i

φ_i	: cleanup time of order i
δ_i	: cycle time of order i
α_i	: production amount of order i
σ_i	: demand of order i
θ_i	: delay time of order i
γ^o	: order time of raw materials
γ^T	: transport time of raw materials to manufacturing plant
ν_r^R	: maximum capacity of reactor r used for order i
ν_j	: maximum capacity of unit equipment j
ϕ_{jk}	: unit equipment j equipped with overhead condenser k
ω_{ir}	: the number of reactor r in order i that uses overhead condenser k

Continuous variables

TFT_i	: finish time for order i
TST_i	: start time for order i
EFT_{ijn}	: finish time for order i assigned to unit j at time slot n
EST_{ijn}	: start time for order i assigned to unit j at time slot n

Binary variables

w_{ijn}	: 1 if order i is assigned to unit equipment j at time slot n , 0 otherwise.
y_{ik}	: 1 if order i related to overhead condenser k is happened, 0 otherwise.
z_{nr}	: 1 if unit equipment j that corresponds to reactor r is used for order i , 0 otherwise.

References

- Kim, J., "The Present Status and Prospect for Pharmaceutical Raw Material Industry in Korea," *Prospective of Industrial Chemistry*, **3**(6), 1-6(2000).
- Marques, C. M., Moniz, S., Sousa, J. P., Barbosa-Povoa, A. P. and Reklaitis, G. V., "Decision-support Challenges in the Chemical-pharmaceutical Industry: Findings and Future Research Directions," *Computers & Chemical Engineering*, **134**, 106672(2020).
- Stefansson, H. and Shah, N., "Multi-scale Planning and Scheduling in the Pharmaceutical Industry," *Aided Chemical Engineering*, **20**, 1003-1008(2005).
- Kim, J., Kim, J., Lee, T., Lee, I. and Moon, I., "A Heuristic-embedded Scheduling System for a Pharmaceutical Intermediates Manufacturing Plant," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 12646-12653(2010).
- Varma, V. A., Pekny, J. F., Blau, G. E. and Reklaitis, G. V., "A Framework for Addressing Stochastic and Combinatorial Aspects of Scheduling and Resource Allocation in Pharmaceutical R&D Pipelines," *Computers & Chemical Engineering*, **32**(4), 1000-1015(2008).
- Láinez, J. M., Schaefer, E. and Reklaitis, G. V., "Challenges and Opportunities in Enterprise-wide Optimization in the Pharmaceutical Industry," *Computers & Chemical Engineering*, **47**, 19-28(2012).
- Waller, M. A. and Esper, T. L., "The Definitive Guide to Inventory Management: Principles and Strategies for the Efficient Flow of Inventory Across the Supply Chain," *Council of Supply Chain*

- Management Professionals*(2014).
8. Uthayakumar, R. and Priyan, S., "Pharmaceutical Supply Chain and Inventory Management Strategies: Optimization for a Pharmaceutical Company and a Hospital," *Operations Research for Health Care*, **2**(3), 52-64(2013).
 9. Sarin, S. C., Sherali, H. D. and Liao, L., "Primary Pharmaceutical Manufacturing Scheduling Problem," *IIE Transactions*, **46**(12), 1298-1314(2014).
 10. Papageorgiou, L. G., Rotstein, G. E. and Shah, N., "Strategic Supply Chain Optimization for the Pharmaceutical Industries," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**(1), 275-286(2001).
 11. Kwon, S., "Ubiquitous Sensor Networks and RFID Technology in Construction Industry," *Review of Architecture and Building Science*, **50**(10), 37-41(2006).
 12. Moon, T. S., Choi, S. M. and Kang, S. B., "Design and Implementation of RFID-based U-SCM System for Automobile Part Industry," *The Journal of Society for e-Business Studies*, **14**(4), 267-286(2009).
 13. Lee, C., Shim, K. S. and Lee, Y. J., "Study on RFID for Agricultural and Livestock Products and Under Ubiquitous," *Rural Development Administration*, 1-295(2005).
 14. Leem, S., Um, W. and Lee, Y., "A Study on the Decrease of Information Distortion Effect in the Supply Chain Management Using Ubiquitous Technology," *The Journal of Internet Electronic Commerce Research*, **10**(4), 1-12(2010).
 15. McCarl, A. B., "McCarl GAMS User Guide," GAMS Development Corporation, 1-950(2009).