

## 중간저장조의 저장시간과 저장제품의 제약을 고려한 다품종 회분공정의 조업완료시간 알고리즘

### Completion Time Algorithm in Multiproduct Batch Processes with Storage Time and Product Allocation Restriction in Intermediate Storage Tank

하진국, 이경범, 이인범, 이의수\*  
(Jin-Kuk Ha, Gyeongbeom Yi, In-Beum Lee, and Euy Soo Lee)

**Abstract** : The determination of completion time constitutes an important step in developing algorithms for short-term production scheduling. Existing completion time algorithms of multi-product batch processes often assume that intermediate storage tanks are always available when it is needed. In this paper, we consider a serial multi-product batch plants with ZW and NIS policy intermediate storage tank. We limit storage residence time and allocated products in the intermediate storage tank to minimize the quality change of the stored material as well as to reduce the clearing time during product change. A set of recurrence relations is suggested to calculate the completion times for the given batch sequence of products on all processing units. Also analytic solution for the suggested model is solved by a graphical method. The effectiveness of these results is proved by a few illustrative examples.

**Keywords** : multiproduct, storage time restriction, product allocation, completion time algorithm

#### I. 서론

최근 산업은 양적 생산체제에서 질적 생산체제로 전환되고 있으며, 또한 소비 형태나 소비자의 취향이 매우 다양해지면서 점점 짧은 시간 내에 변동하는 수요에 대응할 수 있는 다품종, 고부가가치, 소량생산의 회분 화학공정이 점차 각광을 받기 시작하였다. 회분 공정에서 일어나는 문제는 주로 다수의 주어진 생산품들을 제조하는데 드는 총 조업시간을 최소화 할 수 있는 제품의 조업순서 즉 생산계획(production sequencing and scheduling)을 결정하는데 있으며, 생산계획 문제는 생산설비의 유형에 따라 생산될 제품들이 원료로부터 제품까지의 제조과정이 모두 일정하게 주어진 다품종용(multi-product) flowshop문제와 생산순서가 각 제품별로 다를 수 있거나 일정치 않은 다목적용(multi-purpose) jobshop문제로 나눌 수 있다[1]. 또한 화학공학적인 측면에서의 생산계획은 기술 집약적인 소량 다품종, 고부가가치 제품의 생산이 각광을 받기 시작하고, 특히 정밀화학, 제약, 식품, 시약, 생물 공학, 고분자 공업, 첨단재료 산업 등에서 회분 다품종 생산체제를 도입함에 따라 그 관심이 고조되어 활발한 연구가 진행되어지고 있다. 회분 공정에서는 공정내의 중간저장조의 크기, 위치 및 역할에 따라 조업하는 공정 특성상 그 사용 유형에 따라 여러 가지 중간저장조 사용방안으로 조업을 정의하였다. 각 장치사이에 중간저장조가 필요한 만큼 충분히 존재한다고 가정한 것이 UIS(unlimited intermediate storage)방안이며, 중간저장조 없이 회분 조업을 진행하는데, 만약 다음 장치가 조업 중일 경우 그 장치는 조업이 끝났더라도 중간제품은 그

장치에 그대로 머물수 있는 방안이 NIS(no intermediate storage)방안이다. 또 장치와 장치사이에 한정된 수의 중간저장조가 존재한다고 가정한 것이 FIS(finite intermediate storage)방안이며, 중간저장조 없이 조업을 하지만 장치가 주어진 조업을 완성한 후 지체없이 반드시 다음 장치로 제품을 보내어져야 하는 경우의 생산 방안을 ZW(zero waste) 방안이라 한다 [1,2]. 또한 회분 조업의 각 단계에서 서로 다르거나 적어도 두 가지 이상의 방안을 사용하게 되는 생산방안을 MIS(mixed intermediate storage)방안이라고 한다[3,7]. 회분 조업에서 중간저장조를 사용하는 것은 생산효율의 증대방안에 관한 기술 중 하나로 각 회분 장치들 사이에 한 장치에서 병목현상(bottleneck)이 생길 때, 그 장치 이전의 모든 장치에 생기는 조업대기현상을 완화시키는 역할을 하기 때문이다[1,2,3].

이러한 중간저장조가 개입된 생산계획을 다루면서 연구되어야 할 것이  $i$  장치가  $j$ 번째의 제품의 조업을 완료하는 시간의 적절한 표현법(completion time algorithm)이다. 이들 조업 완료시간 표현법은 주로 수학적 회귀공식(recurrence relation)과 Gantt chart으로 표현된다. 지금까지, Wiede Jr.과 Reklaitis[3]는 2-unit FIS, multi-unit FIS 그리고 기본적인 4가지 유형의 중간저장조 운용방안을 조합적으로 사용하여야 하는 경우인 MIS 방안에 있어서의 조업완료시간을 얻어내는 알고리즘을 개발하여 발표하였으며, Rajagoplan과 Karimi[7]는 전달시간과 조업준비시간을 고려한 MIS방안에서의 조업 완료시간을 구하는 방법을 수식화하였다. Ku 와 Karimi [6]는 MIS방안에서 중간저장조를 공유하는 shared storage block을 두는 방안에 대한 조업완료시간을 얻어내는 알고리즘을 발표하였다. Jung 등 [5]은 Ku 와 Karimi의 중간저장조의 공유화(shared storage)를 전공정에 적용하는 CIS(common intermediate storage) 방안에 대한 조업완료시간을 얻어내는 알고리즘을 개발하였다. 그리고 최근까지 FIS방안에서 유용한 중간저장조가 없을 경우의 운전방안이 NIS방안인가 ZW방안인가에 따라 FIS/NIS방안과 FIS/ZW방안으로 나누는 연구가 있었고, 또한 공유 중간저장

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 4. 9., 채택확정 : 2003. 6. 18.

하진국, 이의수 : 동국대학교 생명화학공학과.

(hasung@dgu.ac.kr/eslee@dongguk.edu)

이경범 : 부경대학교 응용화학공학부(gbyi@pknu.ac.kr)

이인범 : 포항공과대학교 화학공학과(iblee@postech.ac.kr)

\* 본 연구는 한국과학재단 목적기초(R01-2002-000-00007-0)지원으로 수행되었음.

조 block이 있는 MIS방안에서는 두 제품이 한 중간저장조를 놓고 서로 사용하고자 하는 시간이 겹쳐졌을 때 순서상으로 앞의 제품에 사용우선권을 주는 제품 중심(product priority)의 계산방법과 조금이라도 먼저 도달하는 제품에 중간저장조 사용우선권을 주는 사건중심(event priority)의 계산법 등이 발표되었다.

이와같이 조업완료시간을 나타내는 알고리즘의 개발은 단순화된 공정을 대상으로 한 생산계획 연구에서 점차 보다 실질적으로 현장에서 접할 수 있는 복잡한 공정을 다루는 방향으로 연구되고 있다.

현재까지 발표된 조업완료시간 알고리즘에서는 다양한 중간저장조의 운용방안에 대한 생산계획을 다루면서 각 공정 단계에서 중간제품이 중간저장조를 이용할 때 각 제품마다 중간저장조에서의 사용시간과 제품에 대한 제한을 두지 않았다. 그러나 정밀화학 제품들은 시간의 경과에 따라 제품의 물성이 민감하게 변하는 경시변화를 수반한다. 따라서 생산 과정의 중간 제품을 일시적으로 저장하거나, 최종제품을 출하를 위하여 저장할 경우에 있어서 대부분의 경우 제품의 품질변화를 최소화하기 위해서는 중간저장조에서의 저장시간 제약을 받게된다. 이와 함께 한 제품이 중간저장조를 사용한 후 다른 제품을 저장하기 위해서는 제품의 품질을 고려하여 세척을 해야한다.

본 논문에서는 중간저장조에서 세척시간을 줄이기 위한 방안으로 회분 장치사이에 중간저장조가 parallel하게 위치시켜 각 중간저장조에서 저장할 수 있는 제품에 제한을 주는 즉 유사한 제품끼리 동일한 중간저장조를 사용하여 세척시간을 줄이는 방안을 제안하였다. 이에 본 논문에서는 실제 산업현장의 회분 공정의 운용 방안인 ZW 와 NIS 운영 방안 대해서 ZW-NIS 운용방안 및 NIS-ZW 운용방안 그리고 ZW 와 NIS 의 운영형태가 변갈아 발생하는 운용방안에 대해서 중간저장조의 제품의 저장시간 제약과 저장할 수 있는 제품에 제한이 있을 경우를 함께 고려한 회분 공정운용의 모델 개발, 제시하였으며 각 모델에 대한 조업완료시간을 구하는 방법을 제시하였다. 또한 이들 모델에 대한 수식해를 구하였으며, 예제 및 graphic method인 Gantt chart를 통하여 결과를 검증하였다.

**II. 조업완료시간 결정을 위한 가정 및 변수**

실제 산업현장의 회분 공정의 운용 방안인 ZW 와 NIS 운영 방안에서 중간저장조의 저장시간 제약 및 저장할 수 있는 제품에 제한이 있을 경우의 모델 개발을 위하여 도입된 가정은 다음과 같다.

- 1) 모든 제품은 모든 장치에서 같은 순서로 처리된다.
- 2) 현재 진행되고 있는 공정이 항상 우선이다.
- 3) 상류 단위공정에서의 중간생성물은 하류 단위공정이 비어 있어도 반드시 중간저장조를 거쳐서 하류 단위공정으로 이동한다.
- 4) 중간저장조는 공유되지 않고 장치와 장치사이에 parallel하게 위치한다.
- 5) 중간저장조에서 다음 단위공정으로의 이동시간은 이전 단위공정에서 중간저장조로의 전달시간과 동일하다.

- 6) 각 제품에 대해 중간저장조의 사용 시간이 제한되어 있다.
- 7) 각 중간저장조는 세척시간을 줄이기 위해 유사한 제품끼리 저장되기 때문에 저장할 수 있는 제품에 제한이 있다.
- 8) 회분 공정의 특성이 공장 전체에 적용된다. 즉 중간생성물을 합치거나 나누지 않는다.

본 논문은 전체적인 생산계획이 주어졌을 때 제품 j가 단위공정 i에서 빠져나가는 시간 즉, 각 단위공정에서의 조업 완료시간  $C_{ij}$  및 makespan을 구하는 방법에 대한 것이다. 대상공정 형태는 실제 화학공정에서의 회분 공정의 운용 방안인 ZW 와 NIS 운용 형태에서 중간저장조의 제품 저장시간 및 저장할 수 있는 제품의 제한이 있을 경우에 ZW-NIS 운용방안 및 NIS-ZW 운용방안을 채택하고 있는 serial 구조의 각각에 대한 조업완료시간을 구하며 최종적으로는 이들 각각의 방안이 하나로 모아져 있는 형태인 NIS-ZW-NIS 운용방안을 채택한 serial 구조에 대한 조업완료시간을 구하였다.

이러한 운용방안에서 Rajagoplan과 Karimi[7]의 논문에서는 ZW 운영방안을 사용하는 경우의 마지막 공정에서 holding을 허용하였는데, 본 논문에서는 ZW 운영방침에 따라 holding을 허용하지 않았다.

본 논문에서 사용되는 변수들의 정의는 다음과 같다.

- N: 주어진 생산계획을 구성하는 제품의 수
- M: 공장내 각 단위 공정들의 수
- $t_{ij}$ : 단위공정 i에서 제품 j를 처리하는 시간
- $a_j$ : 단위공정 i에서 외부로 제품 j를 보내는 시간
- $s_{kj}$ : 단위공정 k에서 제품 i를 내보낸 후 제품j를 처리하기 위해 준비하는 시간
- $C_{ij}$ : 단위공정 i에서 j번째 제품까지 처리하는데 걸리는 시간. 즉 제품이 단위공정 밖으로 보내지기 시작하는 시간
- $\alpha_{ijl}$ : 단위공정 사이에 존재하는 i번째 중간저장조들 중에서 l 중간저장조에서 j 제품을 저장할 때의 저장제한시간
- $d_j$ : 연속제품인 제품 i 와 j 의 최대 지연 시간
- $z_i$ : 단위공정 i 와 i+1 사이에 존재하는 중간저장조의 수

**III. 공정 형태**

본 논문에서 제시한 공정형태는 장치와 장치사이에 존재하는 중간저장조가 parallel하게 위치하는 공정형태로 Fig. 1과 같다. 이때 중간저장조  $S_1$ 에서  $S_L$  은 세척시간을 줄이기 위해 유사한 제품끼리 저장되기 때문에 저장할 수 있는 제품

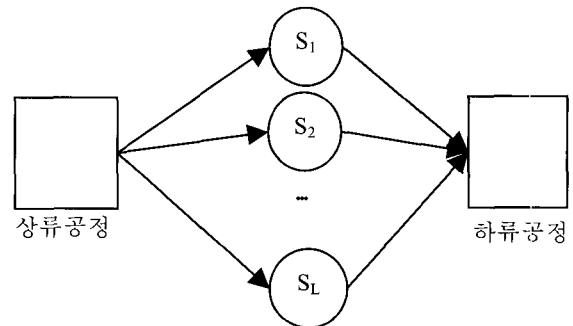


그림 1. 생산공정.  
Fig. 1. Process structure.

이 제한되며 또한 각 제품은 저장될 수 있는 중간저장조에서 제품의 품질변화를 고려하여 저장시간의 제약을 가지는 공정운영 형태이다.

단위공정 사이에 존재하는 중간저장조가 parallel하게 위치하고 있을 때 Fig. 1에서와 같이 상류공정과 하류공정의 회분 공정 운용 방안은 실제 산업현장에서의 운용방안인 ZW와 NIS 운용방안을 채택한 구조에서 ZW-NIS 운용방안 및 NIS-ZW 운용방안을 채택한 serial process network 구조 또한 이 각각의 방안이 하나로 혼합된 구조인 NIS-ZW-NIS 운용방안에 대한 운용형태에 대한 조업완료시간을 구하였다.

1. ZW-NIS 운용방안을 채택하고 있는 Serial process network 구조

각 제품에 대한 저장시간에 제약이 있는 중간저장조가 parallel하게 위치하며 상류공정이 ZW 공정운영을 하류공정이 NIS 공정운영을 채택한 구조로 Fig. 2와 같다. 이때 transfer time과 set-up time을 고려하였으며, ZW 공정의 마지막 공정에서의 holding이 허용되지 않는 경우에 대해서 고려하였다.

Fig. 2와 같이 중간저장조가 parallel하게 위치하고 중간저장조 \$S\_i\$에서 \$S\_L\$에서의 세척시간을 줄이기 위해서 유사한 제품끼리 저장하도록 제한되어 있으므로 저장할 수 있는 제품에 제한이 있을 경우의 저장제한시간을 \$\alpha\_{ijL}\$로 표시하였다. 여기서 \$L\$은 중간저장조가 parallel하게 위치할 때 제품 \$j\$를 저장할 수 있는 중간저장조를 표시한다. 만약 제품 \$j\$가 중간저장조 \$S\_i\$에서만 저장할 수 있다면 \$\alpha\_{ijL} = \alpha\_{ijl}\$이 된다.

ZW/ 방침을 사용하는 공정은 중간제품이 전 단위 공정에서 기다림 없이 다음 단위공정을 수행한다는 의미이므로 ZW 방침을 사용하는 구간의 첫 단위공정에 들어올 제품들은 적절한 시간동안 공정의 시작을 미루어야 할 필요가 생긴다. 따라서 ZW 방침을 사용하는 공정에서는 제품간의 지연시간을 고려해야 하므로 첫 단위공정에서의 제품의 조업완료시간은 다음의 관계를 만족하여야 한다.

$$C_{i,j} = C_{(i-1),j} + a_{(i-1),j} + d_{(i-1),j} + t_{i,j} \quad (1)$$

Unit 2~Unit P-1 단위공정에서는 첫 단위공정에서 제품간의 지연시간을 고려함으로써 제품 \$j\$는 \$i-1\$ 단위공정에서 공정을 끝낸 후 바로 다음 단위공정 \$i\$로 바로 보내어져 공정을 시작

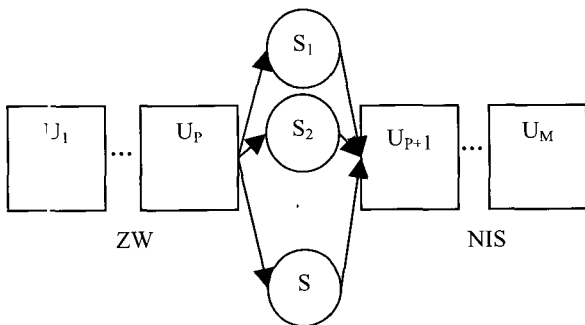


그림 2. ZW-NIS 운용방안의 Serial process network 구조.  
Fig. 2. A serial process networks with ZW/NIS policy.

할 수 있기 때문에 제품 \$j\$에 대한 각 단위공정에서의 조업완료시간 \$C\_{ij}\$는 다음 관계를 만족해야 한다.

$$C_{ij} = C_{(i-1),j} + a_{(i-1),j} + t_{i,j} \quad (i=2,3,\dots,P-1) \quad (2)$$

Unit P 단위공정에서는 제품 \$j\$가 단위공정 P의 밖으로 내보내어지기 시작하는 시간은 다음 세 가지의 경우로 발생될 수 있다.

Case 1: 첫 번째 경우는 단위공정 P와 P+1 사이의 중간저장조가 비워져 있고 단위공정 P+1이 다음 제품을 받을 준비가 되어있을 경우로, 이 경우 제품 \$j\$는 단위공정 P에서 공정을 끝낸 후 즉시 중간저장조를 거쳐서 단위공정 P+1로 이동할 수 있기 때문에 제품 \$j\$에 대한 단위공정 P에서의 조업완료시간 \$C\_{ij}\$는 다음 관계를 만족해야 한다.

$$C_{pj} = C_{(P-1),j} + a_{(P-1),j} + t_{Pj} \quad (3)$$

Case 2: 다음 경우는 단위공정 P와 P+1 사이의 중간저장조가 비워져 있고 단위공정 P+1이 다음 제품을 받을 준비가 되어 있지 않을 경우가 있다. 이 경우에는 다음 두 가지의 경우가 발생되는데, 첫 번째 경우는 제품 \$j\$가 단위공정 P+1이 준비가 되어질 때까지 중간저장조를 사용할 수 있을 경우로 이때는 제품 \$j\$는 단위공정 P에서 공정이 끝난 후 즉시 중간저장조를 사용할 수 있는 경우이다. 따라서 단위공정 P에서 제품 \$j\$의 조업완료시간은 다음 관계를 만족해야 한다.

$$C_{pj} = C_{(P-1),j} + a_{(P-1),j} + t_{Pj} \quad (4)$$

두 번째 경우는 중간저장조의 제품 \$j\$에 대한 저장제한 시간으로 발생하는 경우로 중간저장조가 단위공정 P+1이 준비되어질 때까지 제품 \$j\$를 저장할 수 없다. 따라서 단위공정 P에서의 제품 \$j\$의 조업완료시간은 다음과 같다.

$$C_{pj} = C_{(P-1)(j-1)} + a_{(P-1)(j-1)} + s_{(P-1)(j-1),j} - \alpha_{1jL} \quad (5)$$

Case 3: 단위공정 P와 P+1 사이의 제품 \$j\$가 저장할 수 있는 중간저장조에 제품 \$j-1\$이 저장되어 있을 경우이다. 이 경우는 단위공정 P에서의 제품 \$j\$의 조업완료시간은 제품 \$j-1\$이 단위공정 P+1에서 공정을 마치고 단위공정 P+1이 다음 제품을 받을 준비가 되어있을 때까지 기다려야 하므로 다음 관계를 만족해야 한다.

$$C_{pj} = C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1),j} - \alpha_{1jL} \quad (6)$$

이상과 같이 제품 \$j\$가 단위공정 P에서의 조업완료시간은 (3)~(6)을 하나로 합하여 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{pj} = \max \{ C_{(P-1),j} + t_{Pj} + a_{(P-1),j}, C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1),j} - \alpha_{1jL} \} \quad (7)$$

앞에서 언급한 바와 같이 ZW운용방침의 마지막 공정에서 holding을 허용하지 않기 때문에 제품 \$j\$가 단위공정 P에서 공

정이 끝나는 즉시 다음 단위공정이나 중간저장조를 사용하기 위해서는 공정을 시작하지 전에 기다리는 시간  $\delta_j$ 를 구하여 (1)의 연속제품인 제품 i와 j의 실제 지연시간  $d_{ij}$ 를 구해야 한다. 기다리는 시간  $\delta_j$ 는 (8)로 구할 수 있으며, 따라서 실제 지연시간  $d_{ij}$ 는 (9)와 (10)으로 구한다.

$$\delta_j = \left[ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)} + a_{Pj} \right] - \left[ C_{P(j-1)} + a_{P(j-1)} + s_{P(j-1)} + t_{Pj} + d_{(j-1)j}^{**} + a_{(P-1)j} + \alpha_{1jL} \right] \quad (8)$$

여기서

$$d_{ij}^{**} = d_{ij}^* + t_{1j} + \sum_{k=2}^{P-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}] - s_{Pj} - \sum_{k=2}^P [t_{ki} + a_{ki}]$$

(8)에서

$$\text{if } \delta_j \leq 0, \quad d_{ij} = d_{ij}^* \quad (9)$$

$$\text{if } \delta_j > 0, \quad d_{ij} = d_{ij}^* + \delta_j \quad (10)$$

(9) 과 (10)을 하나로 쓰면 다음과 같다.

$$d_{ij} = d_{ij}^* + \max\{ 0, \delta_j \} \quad (11)$$

여기서

$$d_{ij}^* = \max\{s_{ij} + a_{0j}, \sum_{k=2}^P [t_{ki} + a_{ki}] + s_{Pj} - t_{1j} - \sum_{k=2}^{P-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}]\}$$

Unit P+1 ~ Unit M 단위공정은 NIS 운용방안이므로 각 단위공정에서 holding이 허용되기 때문에 제품 j가 단위공정 i의 밖으로 내보내어지기 시작하는 시간은 다음 세 가지 경우로 발생된다.

첫 번째 경우는 단위공정 i가 제품 j를 받을 준비가 된 채로 비워져 있을 경우인데 이 경우에는 제품 j가 단위공정 i-1에서 공정을 끝마친 후 바로 중간저장조를 거쳐서 다음 단위공정으로 이동하여 공정을 시작할 수 있다. 그러므로 단위공정 i에서 제품 j의 조업완료시간은 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$C_{ij} = C_{(i-1)j} + k_i a_{(i-1)j} + t_{ij} \quad (i=P+1, P+2 \sim M) \quad (12)$$

여기서  $k_i$ 는 단위공정 i-1와 i 사이에 중간저장조가 있을 경우에  $k_i=2$ 이며, 중간저장조가 없을 경우에는  $k_i=1$  된다.

두 번째 경우는 단위공정 i가 제품 j-1로 채워져 있는 경우인데 이 경우에는 단위공정 i가 제품 j-1을 내 보낸 후 다음 제품을 받을 수 있게 준비가 되어 있어야 제품 j는 단위공정 i에서 공정을 시작할 수 있다. 그러므로 단위공정 i에서 제품 j의 조업완료시간은 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$C_{ij} = C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j} \quad (i=P+1, P+2 \sim M) \quad (13)$$

세 번째 경우는 제품 j가 단위공정 i에서 공정을 끝마쳤지만, 단위공정 i+1에 제품 j-1이 채워져 있는 경우로 제품 j는 단위공정 i+1이 제품 j를 받을 준비가 될 때까지 단위공정 i에서 holding해야 하는 경우로 다음과 같은 관계를 만족해야 한다.

$$C_{ij} = C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j} \quad (i=P+1, P+2 \sim M) \quad (14)$$

위 세 가지 경우에 대한 (12)-(14)를 하나로 쓰면 다음과 같다.

$$C_{ij} = \max\{C_{(i-1)j} + t_{ij} + k_i a_{(i-1)j}, C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j}, C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j}\} \quad (i=P+1 \sim M) \quad (15)$$

Fig. 2와 같이 상류공정이 ZW 운용방안을 하류공정은 NIS 운용방안을 채택하며 각 제품의 중간저장조에서의 저장시간과 저장제품 제약을 고려한 구조에서 ZW운용방안의 마지막 공정에서의 holding을 허용하지 않을 경우에 대한 모든 제품 j의 각 단위공정에서의 조업완료시간 및 makespan의 수식해를 정리하면 다음과 같다.

$$C_{1j} = C_{(1-1)j} + a_{(1-1)j} + d_{(j-1)j} + t_{1j}$$

$$C_{ij} = C_{(i-1)j} + a_{(i-1)j} + t_{ij} \quad (i=2, 3, \sim P-1)$$

$$C_{Pj} = \max\{C_{(P-1)j} + t_{Pj} + a_{(P-1)j}, C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} - \alpha_{1jL}\}$$

$$C_{ij} = \max\{C_{(i-1)j} + t_{ij} + k_i a_{(i-1)j}, C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j}, C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j}\} \quad (i=P+1 \sim M)$$

$$\text{Makespan} = C_{NM} + a_{NM}$$

여기서

$$d_{ij} = d_{ij}^* + \max\{ 0, \delta_j \}$$

$$d_{ij}^* = \max\{s_{ij} + a_{0j}, \sum_{k=2}^P [t_{ki} + a_{ki}] + s_{Pj} - t_{1j} - \sum_{k=2}^{P-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}]\}$$

$$d_{ij}^{**} = d_{ij}^* + t_{1j} + \sum_{k=2}^{P-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}] - s_{Pj} - \sum_{k=2}^P [t_{ki} + a_{ki}]$$

$$\delta_j = \left[ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} + a_{Pj} \right] - \left[ C_{P(j-1)} + a_{P(j-1)} + s_{P(j-1)j} + t_{Pj} + d_{(j-1)j}^{**} + a_{(P-1)j} + \alpha_{1jL} \right]$$

2. NIS-ZW 운용방안을 채택하고 있는 Serial process network 구조

본 대상구조는 Fig. 3에서와 같이 각 제품의 저장시간에 제약이 있는 중간저장조가 parallel하게 위치하고 상류공정이 NIS 공정운용을 하류공정은 ZW 공정운용을 채택한 경우이다. 또한 중간저장조 \$S\_i\$에서 \$S\_{iL}\$은 세척시간을 줄이기 위해 저장할 수 있는 제품에 제한을 두었다.

Unit 1~Unit P-1 단위공정은 NIS 방안으로 각 단위공정에서 holding이 허용된다. 제품 \$j\$가 단위공정 \$i\$의 밖으로 내보내어지기 시작하는 시간은 다음 세 가지 경우로 발생될 수 있다.

첫 번째 경우는 단위공정 \$i\$가 제품 \$j\$를 받을 준비가 된 채로 비워져 있을 경우로 제품 \$j\$가 단위공정 \$i-1\$에서 공정을 끝마친 후 바로 다음 단위공정으로 이동하여 공정을 시작할 수 있다. 그러므로 단위공정 \$i\$에서 제품 \$j\$의 조업 완료시간은 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$C_{ij} = C_{(i-1)j} + a_{(i-1)j} + t_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, P-1) \quad (16)$$

두 번째 경우는 단위공정 \$i\$가 제품 \$j-1\$로 채워져 있는 경우인데 이 경우에는 제품 \$j-1\$이 단위공정 \$i\$에서 조업을 끝낸 후 다음 공정으로 보낸 후 단위공정 \$i\$가 제품 \$j\$를 받을 준비가 되어진 후에 공정을 시작할 수 있다. 그러므로 단위공정 \$i\$에서 제품 \$j\$의 조업완료시간은 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$C_{ij} = C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j} \quad (i=1, 2, \dots, P-1) \quad (17)$$

세 번째 경우는 단위공정 \$i+1\$에서 제품 \$j-1\$이 작업 중일 경우로 단위공정 \$i+1\$이 제품 \$j\$를 받을 준비가 되어야 단위공정 \$i\$를 떠날 수 있는 경우로 다음과 같은 관계를 만족해야 한다

$$C_{ij} = C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j} \quad (i=1, 2, \dots, P-1) \quad (18)$$

위의 세 가지 경우인 (16)-(18)을 하나로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{ij} = \max \{ C_{(i-1)j} + t_{ij} + a_{(i-1)j}, C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j}, C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j} \} \quad (i=1 \sim P-1) \quad (19)$$

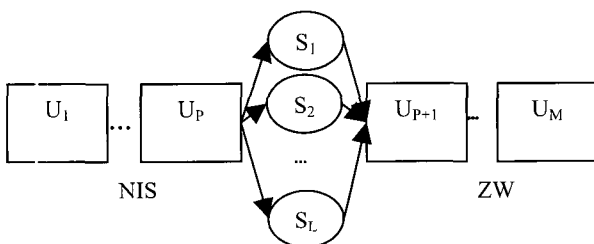


그림 3. NIS-ZW 운용방안의 Serial process network 구조.  
Fig. 3. A serial process networks with NIS/ZW policy.

Unit P의 단위공정에서는 NIS 공정의 마지막 단위공정으로 제품 \$j\$가 단위공정 P의 밖으로 내보내어지는 시간은 다음 세 가지 경우로 발생된다.

Case 1: 단위공정 P가 다음 제품을 받을 준비가 된 채 비워져 있을 경우인데 제품 \$j\$는 단위공정 P-1에서 공정이 끝나는 즉시 단위공정 P로 이동하여 공정을 시작할 수 있으므로 다음 식을 만족해야 한다.

$$C_{Pj} = C_{(P-1)j} + a_{(P-1)j} + t_{Pj} \quad (20)$$

Case 2: 단위공정 P에서 제품 \$j-1\$이 작업 중일 경우로 제품 \$j\$는 단위공정 P가 제품 \$j-1\$의 공정을 마친 후 다음 제품을 받을 준비가 될 때 단위공정 P에서 공정을 시작할 수 있기 때문에 단위공정 P에서 제품 \$j\$의 공정 완료시간은 다음으로 나타낼 수 있다.

$$C_{Pj} = C_{P(j-1)} + t_{Pj} + a_{P(j-1)} + s_{P(j-1)j} + a_{(P-1)j} \quad (21)$$

Case 3: 단위공정 P와 P+1 사이에 있는 중간저장조가 비워져 있을 때로 제품 \$j\$는 단위공정 P에서 공정을 끝나는 즉시 중간저장조를 사용할 수 있다. 하지만 중간저장조의 저장시간이 제한되어 있기 때문에 다음 두 가지 경우가 발생된다. 중간저장조의 다음 단위공정 P+1이 제품 \$j\$를 받을 준비가 되어 있는 경우와 받을 준비가 되어있지 않은 경우로 발생된다.

첫 번째 경우로 단위공정 P+1이 제품 \$j\$를 받을 준비가 되어있는 경우이다. 제품 \$j\$는 단위공정 P+1이 받을 준비가 되어있어 단위공정 P에서 공정을 끝마친 후 바로 중간저장조를 거쳐 단위공정 P+1로 갈 수 있지만 단위공정 P+1은 ZW 방안을 사용하는 구간의 맨 첫 단위공정이므로 들어올 제품들은 적절한 시간동안 공정의 시작을 미루어야 할 필요가 생긴다. 이때 제품 \$j\$는 중간저장조를 사용하면 되지만 중간저장조의 저장시간이 제한되어있는 관계로 \$d\_{ij} \le \alpha\_{ijL}\$인 경우는 제품 \$j\$는 단위공정 P에서 공정을 끝마친 후 즉시 중간저장조로 이동할 수 있으며, \$d\_{ij} > \alpha\_{ijL}\$인 경우는 제품 \$j\$는 단위공정 P에서 공정이 끝난 후 바로 중간저장조로 이동할 수도 있고 또한 단위공정 P에서 일정 시간만큼 holding해야 할 때로 나누어 발생한다. 첫 번째 경우의 조업완료시간을 식으로 나타내면 다음과 같다.

if \$d\_{ij} \le \alpha\_{ijL}\$

$$C_{Pj} = C_{(P-1)j} + a_{(P-1)j} + t_{Pj} \quad (22)$$

if \$d\_{ij} > \alpha\_{ijL}\$

$$C_{Pj} = C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} - \alpha_{ijL} \quad (23)$$

$$C_{Pj} = C_{(P-1)j} + a_{(P-1)j} + t_{Pj} \quad (24)$$

두 번째 경우는 단위공정 P+1이 제품 \$j\$를 받을 준비가 되어있지 않을 경우로 제품 \$j\$는 단위공정 P+1이 준비가 될 때까지 또한 Fig. 3에서 단위공정 P+1은 ZW 방침을 사용하는 구간의 맨 첫 단위공정이므로 들어올 제품들은 적절한 시간동안 공정의 시작을 미루어야 한다. 이런 시간동안 제품 \$j\$는

중간저장조를 사용하면 된다. 그러나 제품 j에 대한 중간저장조의 사용 제한시간이 있는 관계로 중간저장조에서 저장할 수 있는 저장시간의 크기에 따라 제품 j는 단위공정 P에서 일정 시간만큼 holding해야 하는 경우와 바로 중간저장조를 사용할 수 있는 경우로 나누어진다. 두 번째 경우의 조업완료시간을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{pj} = C_{(P-1)j} + a_{(P-1)j} + t_{pj} \quad (25)$$

$$C_{pj} = C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} - \alpha_{1jL} \quad (26)$$

위에서 Unit P의 단위공정에서 제품 j가 밖으로 내보내어지기 시작하는 경우들을 만족하는 (20)-(26)에서 단위공정 P에서의 제품 j의 조업완료시간은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{pj} = \max \{ C_{(P-1)j} + t_{pj} + a_{(P-1)j}, \\ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} - \alpha_{1jL}, \\ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} - \alpha_{1jL} + d_{(j-1)j} \} \quad (27)$$

Unit P+1의 단위공정에서 제품 j의 조업완료시간은 다음 두 가지 경우로 발생된다.

첫 번째 경우는 단위공정 P+1이 다음 제품을 받을 준비가 되어 있는 경우로 제품 j는 단위공정 P에서 공정이 끝나는 즉시 중간저장조를 거쳐 단위공정 P+1로 이동하여 공정을 시작할 수 있다. 그러므로 단위공정 P+1에서의 제품 j의 조업완료시간은 다음과 같다.

$$C_{(P+1)j} = C_{pj} + k_i a_{pj} + t_{(P+1)j} \quad (28)$$

두 번째 경우는 단위공정 P+1이 다음 제품을 받을 준비가 되어 있지 않은 경우로 이 경우 단위공정 P+1은 ZW 방침을 사용하는 구간의 맨 첫 단위공정이므로 들어올 제품들은 직 절한 시간동안 공정의 시작을 미루어야 할 필요가 생기며 단위공정 P+1이 다음 제품을 받을 준비가 될 때까지 기다려야 한다. 그러므로 단위공정 P+1에서의 제품 j의 조업완료시간은 다음과 같다.

$$C_{(P+1)j} = C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + d_{(j-1)j} + t_{(P+1)j} \quad (29)$$

따라서 Unit P+1의 단위공정에서 제품 j가 밖으로 내보내어지기 시작하는 경우들을 만족하는 (28)-(29)에서 단위공정 P+1에서의 제품 j의 조업완료시간은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{(P+1)j} = \max \{ C_{pj} + k_i a_{pj}, \\ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(j-1)j} + a_{(P+1)(j-1)} \} + t_{(P+1)j} \quad (30)$$

여기서 연속제품인 제품 i와 j의 실제지연시간  $d_{ij}$ 는 단위공정 M에서  $z_M = \infty$  이기 때문에 다음의 관계를 만족한다.

$$d_{ij} = d_{ij}^*$$

$$d_{ij}^* = \max \{ s_{(P+1)ij} + a_{pj}, \sum_{k=P+2}^M [t_{ki} + a_{ki}] + s_{Mij} \\ - t_{(P+1)j} - \sum_{k=P+2}^{M-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}] \}$$

Unit P+2 ~ Unit M 단위공정에서는 단위공정 P+1에서 제품 j의 지연시간을 고려함으로써 제품 j는 i-1 단위공정에서 공정을 끝낸 후 바로 다음 단위공정 i로 바로 보내어져 공정을 시작할 수 있기 때문에 제품 j에 대한 각 단위공정에서의 조업완료시간  $C_{ij}$ 는 다음 관계를 만족하여야 한다. ( $z_M = \infty$ )

$$C_{ij} = C_{(i-1)j} + a_{(i-1)j} + t_{ij} \quad (i = P+2 \sim M) \quad (31)$$

이상과 같이 Fig. 3의 대상구조에 대한 모든 제품 j의 각 단위공정에서의 조업완료시간 및 makespan의 수식해를 정리하면 다음과 같다.

$$C_{ij} = \max \{ C_{(i-1)j} + t_{ij} + a_{(i-1)j}, \\ C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j}, \\ C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j} \} \quad (i = 1 \sim P-1)$$

$$C_{pj} = \max \{ C_{(P-1)j} + t_{pj} + a_{(P-1)j}, \\ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} - \alpha_{1jL}, \\ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} - \alpha_{1jL} + d_{(j-1)j} \}$$

$$C_{(P+1)j} = \max \{ C_{pj} + k_i a_{pj} + t_{(P+1)j}, \\ C_{(P+1)(j-1)} + a_{(j-1)j} + a_{(P+1)(j-1)} + t_{(P+1)j} \}$$

$$C_{ij} = C_{(i-1)j} + a_{(i-1)j} + t_{ij} \quad (i = P+2 \sim M)$$

$$\text{Makespan} = C_{NM} + a_{NM}$$

위에서

$$d_{ij} = d_{ij}^*$$

$$d_{ij}^* = \max \{ s_{(P+1)ij} + a_{pj}, \sum_{k=P+2}^M [t_{ki} + a_{ki}] + s_{Mij} \\ - t_{(P+1)j} - \sum_{k=P+2}^{M-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}] \}$$

### 3. NIS-ZW-NIS 운용방안을 채택하고 있는 Serial process network 구조

본 대상구조는 Fig. 4와 같이 1과 2에서 고려한 구조의 연결된 구조로 transfer time과 set-up time 그리고 ZW의 마지막 공정에서의 holding을 허용하지 않은 경우로 1과 2에서의 식들로 모든 제품 j의 각 단위공정에서의 조업완료시간  $C_{ij}$  및 makespan을 계산하는 식을 정리하면 다음과 같다. 여기서 각

제품에 대한 중간저장조의 저장제한시간을  $\alpha_{1jL}$ ,  $\alpha_{2jL}$  로 표시하였다.

ZW 운용방침을 사용하는 첫 단위공정을 P+1, 마지막 공정을 Q라 하고  $z_M = \infty$  이면,

$$C_{ij} = \max \{ C_{(i-1)j} + t_{ij} + k_i a_{(i-1)j}, C_{i(j-1)} + t_{ij} + a_{i(j-1)} + s_{i(j-1)j} + a_{(i-1)j}, C_{(i+1)(j-1)} + a_{(i+1)(j-1)} + s_{(i+1)(j-1)j} \} \quad (32)$$

(i = 1, 2 ~ P-1, Q+1 ~ M)

$$C_{Pj} = \max \{ C_{(P-1)j} + t_{Pj} + a_{(P-1)j}, C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} + s_{(P+1)(j-1)j} - \alpha_{1jL}, C_{(P+1)(j-1)} + a_{(P+1)(j-1)} - \alpha_{1jL} + d_{(j-1)j} \} \quad (33)$$

$$C_{(P+1)j} = \max \{ C_{Pj} + k_i a_{Pj} + t_{(P+1)j}, C_{(P+1)(j-1)} + a_{(j-1)j} + a_{(P+1)(j-1)} + t_{(P+1)j} \} \quad (34)$$

$$C_{ij} = C_{(i-1)j} + a_{(i-1)j} + t_{ij} \quad (i = P+2 \sim Q-1) \quad (35)$$

$$C_{Qj} = \max \{ C_{(Q-1)j} + t_{Qj} + a_{(Q-1)j}, C_{(Q+1)(j-1)} + t_{Qj} + a_{Q(j-1)} + s_{Q(j-1)j} - a_{(Q-1)j}, C_{(Q+1)(j-1)} + a_{(Q+1)(j-1)} s_{Q(j-1)j} - \alpha_{2jL} \} \quad (36)$$

$$Mak : span = C_{NM} + a_{NM}$$

여기서

$$d_{ij} = d_{ij}^* + \max \{ 0, \delta_j \} \quad (37)$$

$$d_{ij}^* = \max \{ s_{(P+1)ij} + a_{Pj}, \sum_{k=P+2}^Q [t_{ki} + a_{ki}] + s_{Qij} - t_{(P+1)j} - \sum_{k=P+2}^{Q-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}] \} \quad (38)$$

$$d_{ij}^* = d_{ij}^* + t_{(P+1)j} + \sum_{k=P+2}^{Q-1} [t_{kj} + a_{(k-1)j}] - s_{Pj} - \sum_{k=P+2}^Q [t_{ki} + a_{ki}] \} \quad (39)$$

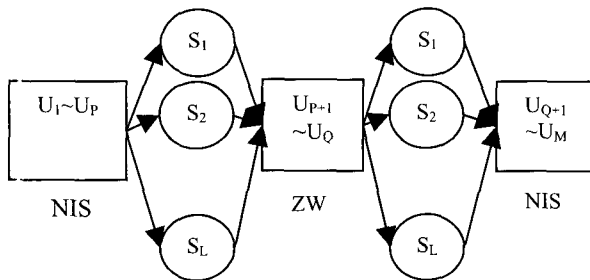


그림 4. NIS-ZW-NIS 운용방침의 Serial process network 구조.  
Fig. 4. A serial process networks with NIS/ZW/NIS policy.

$$\delta_j = \left[ C_{(Q+1)(j-1)} + a_{(Q+1)(j-1)} + s_{(Q+1)(j-1)j} + a_{Qj} \right] - \left[ C_{Q(j-1)} + a_{Q(j-1)} + s_{Q(j-1)j} + t_{Qj} + d_{(j-1)j}^* + a_{(Q-1)j} + \alpha_{2jL} \right] \quad (40)$$

IV. 예제 및 풀이

Fig. 4와 같은 운영형태를 가지며, 회분공정 장치는 6개이다. 장치와 장치 사이에 parallel하게 위치한 중간저장조의 수는 각각 2개가 있고 생산하고자 하는 제품의 수는 4개일 경우에 대한 각 장치에서의 조업완료시간 및 makespan을 계산한 결과이다. 여기서 각각의 중간저장조의 저장 제한 시간은  $\alpha_{1jL} = \alpha_{2jL} = 10$  이며, 각 중간저장조에 저장할 수 있는 제품은  $\alpha_{1j1} = \{1, 4\}$ ,  $\alpha_{1j2} = \{2, 3\}$ ,  $\alpha_{2j1} = \{1, 2\}$ ,  $\alpha_{2j2} = \{3, 4\}$ 로 두었다.  $U_2$  와  $U_3$  는 ZW 공정이다.

Table 1의 Data를 (32)-(40)를 가지고 계산한 각각의  $C_{ij}$ 값과 Makespan값은 다음과 같다.

$C_{11}=3, C_{21}=14, C_{31}=23, C_{41}=35, C_{51}=41, C_{61}=50, C_{12}=21, C_{22}=25, C_{32}=42, C_{42}=46, C_{52}=65, C_{62}=74, C_{13}=38, C_{23}=46, C_{33}=59, C_{43}=64, C_{53}=84, C_{63}=96, C_{14}=47, C_{24}=57, C_{34}=74, C_{44}=82, C_{54}=101, C_{64}=106,$

Makespan=106+3=109.

표 1. 예제의 data.

Table 1. Date for the example.

	Processing times				Transfer times				Set-up times				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
					2	4	5	1	0				
Unit 1	1	1	6	9	5	3	1	2	4	1			
Unit 2	2	8	2	6	2	2	3	3	5	2	1	-	5
Unit 3	3	5	7	3	7	4	2	2	4	3	2	1	-
Unit 4	4	8	2	3	4	1	5	4	3	4	3	3	4
Unit 5	5	4	9	10	1	3	3	4	2	5	4	4	2
Unit 6	6	6	6	8	3	3	4	4	3	6	product		
unit											unit		

\* 중간저장조의 저장제한시간  $\alpha_{1jL} = \alpha_{2jL} = 10$

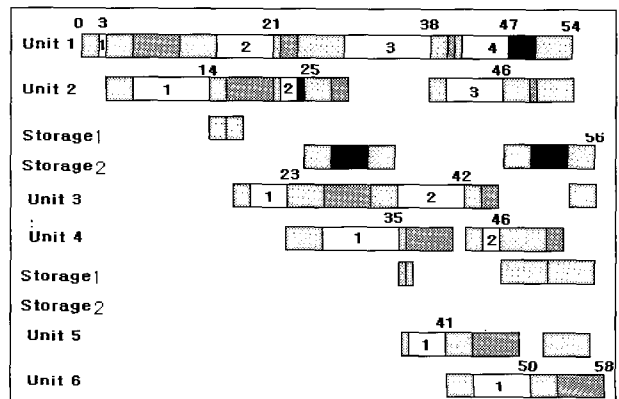


그림 5. 예제의 Gantt chart.  
Fig. 5. Gantt chart for the example.

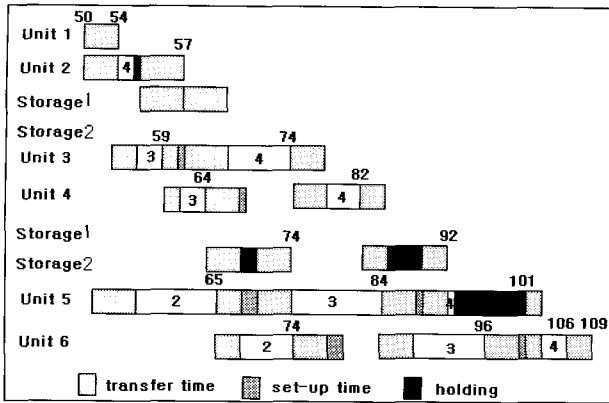


그림 6. 예제의 Gantt chart(계속).

Fig. 6. Gantt chart for the example(continued).

또한, 본 예제의 데이터 값을 가지고 Fig. 5과 Fig. 6과 같이 graphic method인 Gantt Chart로 표현하였으며, 앞에서 계산한 결과값과 일치함을 알 수 있다.

**V. 결론**

회분공정은 연속공정에 비하여 생산효율에 커다란 제한을 받게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 일반적으로 회분 공정내에서 중간저장조를 설치함으로써 공정의 흐름에 완충 지대를 형성, 생산성 향상을 기하게 된다. 이러한 중간저장조가 개입된 조업완료시간을 나타내는 알고리즘의 개발은 단순화된 공정을 대상으로 한 생산계획 연구에서 점차 보다 실질적으로 현장에서 접할 수 있는 복잡한 공정을 다루는 방향으로 연구되어 지고 있다. 본 논문에서는 현재까지 발표된 다양한 중간저장조의 운용방안에 대한 생산계획을 다루면서 고려하지 않았던 중간저장조에서의 각 제품마다의 저장시간과 저장제품에 대한 제약을 고려한 조업완료시간 알고리즘을 개발, 제시하였다. 본 논문의 회분공정 운용 방안은 실제 산업현장의 운영방안인 NIS 와 ZW 운용형태가 ZW-NIS 운용방안 및 NIS-ZW 운용방안을 채택하고 있는 serial process network 구조의 각각에 대한 조업완료시간을 구하였으며 최종적으로는 이들 각각의 방안이 하나로 모아져 있는 형태인 NIS-ZW-NIS 운용방안을 채택한 serial 구조에 대한 조업완료시간을 구하는 방법 및 이들 모델에 대한 수식해를 구하였다.

**Notation**

**Parameters**

- $a_{ij}$  : Transfer time of product  $j$  from batch unit  $i$
- $C_j$  : Completion time of the  $j$ th product in the sequence on batch unit  $i$
- $d_{ij}$  : Delay on the first ZW unit, between products  $i$  and  $j$
- $d_{ij}^*$  : Delay on the first ZW unit, between products  $i$  and  $j$ , provided product  $i$  does not wait on the last ZW unit

- $d_{ij}^{**}$  : Idle time on the last ZW unit when product  $j$  follows product  $i$
- $s_{kij}$  : Set-up time required for processing product  $j$  after product  $i$  on batch unit  $k$
- $t_{ij}$  : Processing time of product  $j$  on batch unit  $i$
- $z_i$  : Number of storage units between units  $i-1$  and  $i$
- $\delta_j$  : Time for which product  $j$  has to wait on the last restriction ZW unit with storage time
- $\alpha_{jL}$  : Storage restriction time of product  $j$  on the  $L$  intermediate storage in the  $i$ -th intermediate storage
- $U_i$  :  $i$ -th unit

**Indices**

- $i$  = index of unit or product
- $j$  = index of unit or product
- $k$  = index of unit
- $L$  = index of intermediate storage
- $M$  : Number of batch units or machines
- $N$  : Number of products or jobs

**참고문헌**

- [1] G. V. Reklaitis, "Review of scheduling of process operation," *AIChE Symp. Ser.*, vol. 78, pp. 119-133, 1982.
- [2] H. M. Ku, D. Rajagopalan, I. A. Karimi, "Scheduling in batch processes," *Chem. Engng. Prog.*, vol. 83, pp. 35-52, 1987.
- [3] W. JR. Wiede, K. Kuriyan, G. V. Reklaitis, "Determination of completion times for serial multiproduct processes-3:mixed intermediate storage systems," *Comput. Chem. Engng.*, vol. 11, pp. 357-368, 1987.
- [4] M. S. Kim, J. H. Jung, I. B. Lee, "Optimal scheduling of multiproduct batch processes for various intermediate storage policies," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, no. 11, pp. 4058-4066, 1996.
- [5] J. H. Jung, H. K. Lee, I. B. Lee, "Completion times and optimal scheduling for serial multi-product processes with transfer and set-up times in zero-wait policy," *Comput. Chem. Engng.*, vol. 18, no. 6, pp. 537-544, 1994.
- [6] H. M. Ku, I. Karimi, "Completion time algorithms for serial multiproduct batch processes with shared storage," *Comput. Chem. Engng.*, vol. 14, no. 1, pp. 49-69, 1990.
- [7] D. Rajagopalan, I. A. Karimi, "Completion time in serial mixed storage multiproduct processes with transfer and set up times," *Comput. Chem. Engng.*, vol. 13, no. 1/2, pp. 175-186, 1989.
- [8] H. M. Ku, I. Karimi, "Scheduling in serial multiproduct batch processes with finite intermediate storage : a mixed integer linear programming formulation," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 27, pp. 1840-1848, 1988.
- [9] 김민석, 이인범, "일반화된 망형 회분 공정의 생산계획", 한국자동제어학술회의논문집, pp. 1133-1136, 1995.





**하진국**

1969년 12월 23 일생. 1996년에 동국대학교 화학공학과 학사. 1998년에 동국대학교에서 화학공학과 석사학위를 받았으며, 1999년~현재까지 동국대학교 화학공학과 박사과정 재학 중. 주요관심분야는 회분식 공정설계, 공정스케줄링

및 최적화, 공정자동화 등이다.



**이경범**

1961년 1월 3일생. 1983년에 서울대학교에서 화학공학과 학사. 1985년에 KAIST에서 화학공학과 석사학위를 받았으며 1992년 PURDUE 대학 화학공학과에서 박사학위를 하였다. 1985-1988년 쌍용정유에서 공정기사로, 1992-1996년 호남정유

기술연구소에서 연구원으로, 1996년부터 부경대학교 화학공학과 부교수로 있음. 주요 관심 분야는 화학공장 생산계획 및 물류 최적화, 재고관리, 공정제어 및 최적화 등이다.



**이의수**

1955년 3월 30일생. 1978년에 서울대학교에서 화학공학과 학사. 1980년에 KAIST에서 화학공학과 석사학위를 받았으며 1988년 PURDUE 대학 화학공학과에서 박사학위를 하였다. 1980-1994년 (주)포스코켄 중앙연구소에서 연구실장으로,

1994년부터 동국대학교 생명화학공학과 교수로 있음. 주요관심분야는 회분식 공정설계 및 합성, 공정 스케줄링 및 최적화, 공정자동화 등이다.



**이인범**

1955년 8월 25일생. 1977년 연세대학교 화학공학과 학사. 1979년 한국과학기술원에서 화학공학과 석사학위를 받았으며 1987년 Purdue University 화학공학과에서 박사학위를 하였다. 1988년부터 포항공과대학교 화학공학과 교수로 있음.

주요관심분야는 회분식 조업 최적화, 환경시스템공학, 생명정보학 등이다.