

食醢 生産라인의 工程/配置 設計에 대한 사례 연구

양 문 희[†]

단국대학교 공학부 산업공학 전공

A Case Study for a Process/Layout Design of a Sikhye Production Line

Moonhee Yang

Department of Industrial Engineering, Dankook University, Cheonan, 330-714

In this paper, we deal with a process and layout design for producing a planned amount of Sikhye in a given limited time period under a reasonable production schedule. We represent a Sikhye production line as a vector N , the element of which denotes the number of tanks required in each process and our objective is to find an appropriate vector which minimizes the total investment cost.

We suggest a systematic method for finding an appropriate N and an appropriate layout to N . In detail, first, we decide the required sequence of processes and the required operations for each process and we estimate standard operating times. Second, constructing a precedence diagram, we find a critical path in order to reduce the total production lead time for a batch of Sikhye. Third, given a limited N space, we manage to construct manually each production schedule using both the processing times of the critical operations and transfer times. Finally, we find an optimal vector N which gives a minimum investment cost and meets both the time constraint and quantity constraint. In addition, with the estimated relative size of each tank, we suggest an appropriate conceptual layout design including an expansion area for future demands, based on the span technique used in the field of architectural design.

Keywords: Sikhye, process design, layout design

1. 서론

단술, 감주, 감차, 예주 등으로 명명되는 식혜는 효소를 이용하여 전분을 당화시킨 전통음료로서 수분, 당분(Glucose, Maltose, Dextrin을 포함함), 단백질, 지질, 섬유질로 구성되어 있으며, 기호에 따라 생강, 잣, 대추, 향신료, 비타민, 무기질, 설탕 등과 방부제(소디움 벤조레이트)가 첨가될 수 있다.

비락식혜(비락), 큰집식혜(해태), 잔칫집식혜(롯데칠성) 등 대규모 식혜공장에서 생산되는 캔 식혜의 음료시장 점유율은 1996년도에 6.3% 수준까지 상승하다가 1996년을 정점으로 점차적으로 하락하고 있는 추세이며, 2002년 현재 약 2% 수준을 상회하고 있는 실정이다. 식혜음료 시장의 추락 원인은 캔 식

혜가 전통민속 식혜의 맛과 향에 비해 품질이 떨어진다는 측면과 신세대의 답답한 옛기름 맛에 대한 외면, 그리고 지속적 으로 개발되는 기능성 음료시장의 팽창에서도 찾을 수 있을 것이다.

이러한 식혜산업의 하향 추세에도 불구하고, 전통민속제품 을 제조하는 소규모 생산업체인 D사는 떡과 궁합이 맞는 전통 민속식혜를 캔이 아닌 펫(Pet)병 형태로 공급하기 위해 일 생산 량 5톤(연간 1,250톤, 연간 250일 기준) 규모의 소형 식혜공장 건설을 계획하였다. 계획 동기는 다음과 같다. 첫째로 시장조 사에 따르면 방부제를 첨가하지 않은 전통민속식혜의 수요는 흑자를 달성할 수 있을 정도로 충분하여 경제적 사업타당성이 있었으며, 둘째로, 새로 개발된 전통민속식혜는 수요조사 결

이 연구는 2003학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

[†]연락처 : 양문희 교수, 330-714 충남 천안시 안서동 산29번지 단국대학교 공학부 산업공학 전공,

Fax : 041-550-3570, E-mail : myfriend@dku.edu

2003년 3월 접수, 2회 수정 후 2003년 10월 게재 확정.

과 젊은 세대로부터 호응을 얻을 수 있었으며, 셋째로, 전통민속식혜 시장은 지역을 중심으로 소량 생산/소량 유통체제로 전환될 가능성이 높아 소규모 생산업체가 장기적으로 생존할 수 있다고 판단하였기 때문이었다.

전통민속식혜의 신설공장을 건설하려는 D사의 첫 번째 당면과제는 유통기간과 소비기간을 감안하여 당일 생산/당일 출하가 가능하도록 총제조공기(Production Lead Time)를 단 1시간이라도 단축하는 제조 방법론을 찾는 것이었다. 그 이유는 방부제가 없는 전통민속식혜의 유통기간은 냉장유통이라 할지라도 4~5일 정도로 매우 짧기 때문이었다. 참고로 식혜공장은 식혜를 생산하여 탱크에 저장하는 ‘연속생산 흐름라인(continuous production flow line)’과 탱크에 저장된 식혜를 순간살균과 멸균공정을 거쳐, 캔이나 팻병에 주입하고, 단위화물로 제작하는 ‘이산생산 흐름라인(discrete production flow line)’으로 구분할 수 있으며, 이산생산 흐름라인의 제조공기는 일반적으로 1시간 이내로 설계가 가능하기 때문에 총제조공기에 큰 영향을 미치지 않지만, 연속생산 흐름라인의 제조공기는 약 11~14시간이 소요되므로 총제조공기에 매우 중요한 변수가

된다.

대규모 캔 식혜공장인 경우 유통기간에 거의 무관하므로 총제조공기에 대한 문제점이 없으나 소규모 전통민속식혜 공장인 경우 연속생산 흐름라인의 제조공기에 대한 제약조건은 매우 크다. 오전 6시부터 작업을 시작하더라도 빨라야 17~20시에 첫 식혜 뱃취가 생산되며, 이산생산 흐름라인을 거쳐 대략 18~22시에 창고에서 출하가 되지만 슈퍼마켓이나 할인점, 백화점 등의 입고마감 시각을 지킬 수가 없다. 운반시간까지 감안한다면 당일 출하는 불가능하며 익일배달을 하여야 한다. 냉장유통시 4~5일 정도 되는 유통기간을 하루라도 연장하여야 판매기간을 늘릴 수 있기 때문에 새로운 제조기법에 의한 총제조공기의 단축은 절대적이었다.

총제조공기를 단축하는 방안은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 새로운 공정방법의 발견에 의한 공정시간의 혁신적 단축과 Critical Path (이하 CP라고 함)에 의한 적극적 시간단축이다. 그러나 식혜와 관련된 논문검색 결과, 새로운 공정방법에 의하여 공정시간을 단축한 논문은 한편도 존재하지 않았으며, 일반적인 제조기법 하에 투입원료의 제조과정과 공정온도에 따

표 1. 본고에서 사용된 변수의 정의

변수	정 의	추정치
i	공정을 나타내는 지표(Index)	
c_i	탱크 i 의 투자 비용	본문 참조
C	탱크의 투자 비용을 나타내는 벡터, (c_1, c_2, c_3)	
H_i	탱크의 최대수면고	본문 참조
T_D	하루 동안에 생산할 수 있는 시간	16시간
n_i	공정 i 에 필요한 탱크 수	본문 참조
n_B	T_D 시간 내에 가능한 뱃취생산 횟수	5회
N	공정별로 필요한 탱크 수를 나타내는 벡터, (n_1, n_2, n_3)	
q	당화탱크에서 한번에 생산할 수 있는 뱃취 생산량	1톤
Q	식혜 생산목표량	5톤($T_D=16$)
r_i	탱크 i 의 내부반경	본문 참조
S_i	탱크 i 의 최소필요면적, $S_i = 4r_i^2$	본문 참조
T	공정작업시간을 나타내는 벡터, (T_1, T_2, T_3)	
T_C	연속적인 뱃취 간의 생산주기 시간	본문 참조
$TC(N)$	공정별로 투입된 탱크들의 총투자 비용	
T_i	공정 i 의 작업시간	본문 참조
T_{ij}	공정 i 의 중간생성물을 공정 j 의 탱크로 이송하는 데 소요되는 시간	본문 참조
T_P	첫 번째 뱃취를 생산하는 데 소요되는 총생산 시간	490분
U_i	탱크 i 의 내부용적에 대한 사용용적의 비율	
V_i	최대수면고 기준의 탱크 i 의 내부용적	
α_i	1 Kl의 뱃취를 생산하기 위하여 필요한 공정 i 의 탱크 사용용적	본문 참조
γ_i	반경에 대한 탱크 i 의 최대 수면고의 비율, $H_i = \gamma_i r_i$	2.4

른 식혜의 맛과 향에 대한 논문은 다수 있었다(Lee, 1976; Cho, 1983; Yuk, 1990; Suh, 1997). 따라서 본고에서는 식혜전문가로부터 입수한 전통민속식혜 제조비법에 의한 공정시간을 가정하며 CP에 의한 제조공기 단축 방법론을 적용하였다.

두 번째 당면과제는 적은 투자비로 16시간(2교대 기준) 내에 식혜 5톤을 생산할 수 있는 연속생산 흐름라인의 설계였으며, 이 라인은 수요증가에 대비하여 쉽게 확장할 수 있어야 한다는 것이었다.

본 논문에서는 가장 적은 설비투자비로 H시간 내에 일 생산량 Q톤을 생산할 수 있으며, 실제 적용이 가능한 식혜 연속생산 흐름라인의 효율적인 공정설계에 대하여 서술한다. 제2장에서는 식혜제조의 주요 공정에 대하여 약속한 후, 일 생산량 Q톤 규모의 연속생산 흐름라인의 문제를 정립하고, 입력자료의 추정을 통하여 16시간 내에 5톤을 생산할 수 있는 공정설계를 제시한다. 제3장에서는 공정별 투입 원료량과 중간생성물량을 추정하고, 5톤 생산이 가능한 탱크의 적정크기를 제시한다. 탱크의 적정면적, 정비, 작업 등을 고려하고, 스팬 기법(Span Technique)을 이용한 배치설계도(안)를 제시한다. 참고로 본 논문에서 사용된 변수의 정의는 <표 1>에 요약하였다.

2. 전통민속식혜의 공정분석 및 설계

2.1 전통민속식혜 제조공정의 개요

전통민속식혜의 제조를 위한 연속생산 흐름라인은 다양하지만 <그림 1>에서 제시된 바, 세 대의 탱크에서 이루어지는

주요 공정, 즉 추출공정, 침전공정, 당화공정 등으로 구분할 수 있다. 추출공정은 추출탱크 내의 식수에 엿기름(보통 6조 겔보리를 15℃~25℃에서 9일 정도 발아시켜 맥아 잎논의 길이가 1.2~1.95Cm가 될 때 건조시켜 잘게 분쇄한 것)을 투입하여 엿기름에 존재하는 α-amylase, β-amylase, gluco-amylase 등의 효소를 식수에 최대한 용해시키는 공정으로, 엿기름물(효소+맥아전분+물+겔보리겨+잡티)을 다음 공정인 침전공정으로 보낸다. 참고로 엿기름에 존재하는 효소를 빠른 시간 내에 최대한 용해시키기 위하여 모터를 이용하여 정기적으로 회전하며, 침전된 겔보리겨는 수압으로 제거되어야 추출탱크에서 연속적으로 생산이 가능하다.

침전공정은 추출공정에서 유입된 엿기름물에서 3단계 필터기(upper, middle, lower filter)를 이용하여 추출탱크에서 걸러지지 않은 매우 작은 겔보리겨와 잡티를 제거하고, 물보다 비중이 높은 맥아전분을 시간이 경과함에 따라 침전탱크 아래로 침전시킨 다음 효소물(효소+물)만 추출하여 당화공정으로 보낸다. 일반적으로 효소물은 매우 작은 잡티가 있을 수 있으므로 이들을 제거하기 위하여 침전탱크와 당화탱크 사이에 필터기를 설치한다. 한편 침전공정에서 생성된 맥아전분은 재활용될 수 있다.

취반공정은 멥쌀과 식수를 이용하여 지에밥(일명 고두밥)을 제조하는 공정이다(<표 2>). 당화공정은 침전공정에서 유입된 효소물에 지에밥을 투입하고, 효소물에 존재하는 효소를 이용하여 다당인 지에밥을 단당으로 발효시키는 공정으로, 밥알이 수면으로 떠오르는 시점에서 부유밥알을 걷어낸다. 다음에 당수와 첨가제를 투입한 후 끓인 다음 저장탱크로 보낸다. 당화공정에서 생성된 침전밥알은 별도의 체에 받아서 부유밥

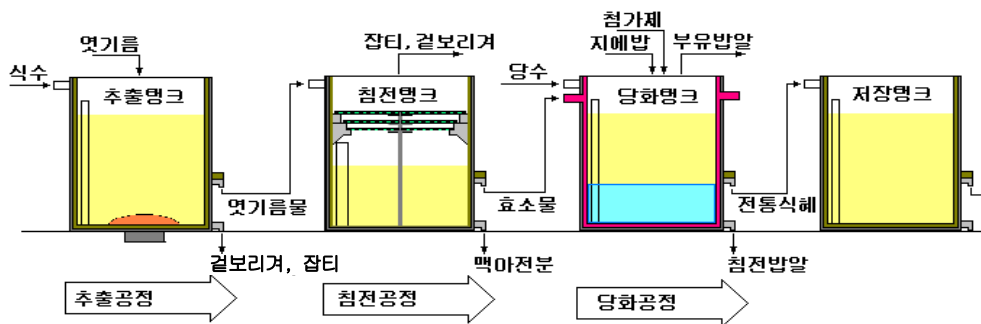


그림 1. 식혜 생산을 위한 연속생산 흐름라인의 개요도.

표 2. 식혜 제조를 위한 주요 공정의 입출력

공정	투입물(입력)	중간생성물(출력)	재활용물 또는 폐기물
추출공정	엿기름, 식수	엿기름물, 겔보리겨, 잡티	겔보리겨, 잡티
침전공정	엿기름물	효소물, 맥아전분, 잡티	맥아전분, 겔보리겨, 잡티
취반공정	멥쌀, 식수	지에밥	
당화공정	효소물, 지에밥, 당수, 첨가제	식혜, 부유밥알, 침전밥알	침전밥알, 부유밥알

알과 함께 식혜에 투입할 수도 있다.

2.2 일 생산량 Q톤 규모 연속생산 흐름라인 문제의 정립

<그림 1>에서 제시된 바, 공정별로 탱크가 한 대씩 배치된 기본라인은 일반적으로 주어진 T_D 시간 내에 목표로 설정한 생산량 Q톤을 달성할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 기본라인의 공정별 탱크 수를 증가시키면서 주어진 제반 조건을 만족시키는 일산 Q톤 체제의 라인을 구축하고자 한다.

현실적으로 일산 Q톤을 생산하기 위하여 필요한 식수량은 야간동안 식수탱크에 충분히 저장될 수 있으며, 복수배관과 펌프를 이용하여 여러 대의 추출탱크에 식수를 공급할 수 있으므로, 식수탱크는 한 대면 충분하다. 또한 저장탱크도 한 대면 충분하다. 전통식혜는 저장탱크에 냉장 보관하여도 4~5일 만에 변질되므로, 유통공기를 줄이기 위하여 저장탱크에 저장되자마자 바로 순간살균공정, 멸균공정 등 이산생산 흐름라인으로 흘러가야 한다. 따라서 연속생산 흐름라인의 생산속도와 이산생산 흐름라인의 소비속도는 균형을 이룰 수가 있어 저장탱크의 크기는 클 필요가 없으며 한 대면 충분하다. 따라서 본고에서는 식수탱크와 저장탱크는 한 대로 가정한다. 전개의 편의상 식수저장, 추출, 침전, 당화, 저장공정을 순서대로 공정 i ($0 \leq i \leq 4$)로 정의하고, 공정 i 의 탱크를 탱크 i 로, 공정 i 에서 필요한 탱크 수를 n_i 로, 벡터 N을 (n_1, n_2, n_3) 으로 정의하면 N은 연속생산 흐름라인에 일대일 대응이 된다고 볼 수 있다. <그림 2>는 $N=(2, 3, 4)$ 인 연속생산 흐름라인을 보여주고 있다.

그림에서 제시된 바, 공정 1의 추출탱크 1에서 생산된 효소물은 침전탱크 1과 침전탱크 2로 분할되어 이송할 수 있으나 일정한 품질을 기대할 수 없으므로, 일반적으로 임의의 탱크에서 생산된 중간생성물은 다음 공정에 있는 한 대의 탱크에 전량 이송된다고 가정한다. 또한 추출탱크 1에서 침전탱크 1로의 이송은 독립적으로 수행될 수 있다고 가정한다. 즉 전후 공정의 탱크 간 Cross Transfer는 독립적으로 이송이 가능하도록 배관이 설계되어 있다고 가정한다.

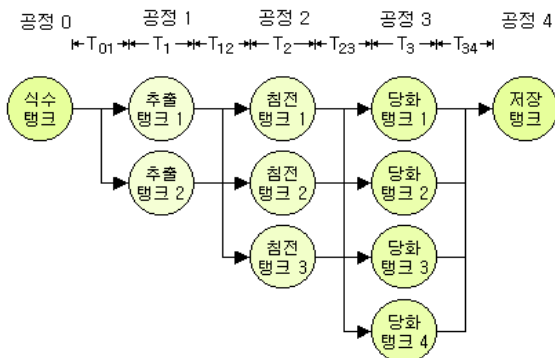


그림 2. $N=(2, 3, 4)$ 인 연속생산 흐름라인.

식혜 연속생산 흐름라인을 구축할 때 필요조건은 목표로 설정한 생산량을 일정한 시간 내에 달성할 수 있어야 하며 설비 투자비가 최소화되어야 한다. 당화탱크에서 배취로 생산되는 물량을 q (단위: 톤), $T_D(\leq 16)$ 시간 동안 당화탱크 전체에서 생산되는 배취 수를 n_B 라고 하면, 일생산량 Q (단위: 톤)는 $Q \leq n_B q$ 를 만족시켜야 하므로

$$n_B = \lceil \frac{Q}{q} \rceil \tag{1}$$

여기서 $\lceil x \rceil$ 는 x 보다 적지 않는 정수 중에서 가장 작은 정수이다.

T_i (단위: 분)를 공정 i 의 중간생성물을 공정 i 까지 전량 이송하기 위하여 소요되는 시간, T_i (단위: 분)를 공정 i 에서 소요되는 시간으로, $T=(T_1, T_2, T_3)$ 으로 정의하면, 연속생산 흐름라인에서 첫 번째 배취를 생산하는 생산공기(Production Lead Time), T_P 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$T_P = \sum_{i=1}^3 T_i + \sum_{i=0}^3 T_{i,i+1} \tag{2}$$

T_C (단위: 분)를 연속적인 배취 간의 생산주기 시간이라고 정의하면, T_D 시간 내에 생산이 되어야 하므로 제조시간 조건식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_P + T_C(n_B - 1) \leq 60 T_D \tag{3}$$

따라서 식 (1)을 식 (3)에 대입하면 식 (4)가 성립된다. 만약 식 (4)가 성립되지 않으면 T_D 시간 내에 Q를 생산할 수 없다는 의미가 된다.

$$T_C \leq \frac{60 T_D - T_P}{\lceil \frac{Q}{q} \rceil - 1} \tag{4}$$

식혜 연속생산 흐름라인을 구축할 때 투입되는 설비투자비는 탱크에 대한 투자비가 80% 이상을 점유하므로 본 논문에서는 T_D 시간 내에 Q톤을 생산할 수 있는 조건 하에 탱크 설비투자비를 최소로 하는 것을 목적으로 한다. 공정 i 에 필요한 탱크의 구입단가를 c_i (단위:만원)로, C를 (c_1, c_2, c_3) 로 정의하면 총설비투자비, T_C 는 $\sum_{i=1}^3 c_i n_i$ 가 된다. 따라서 식혜 연속생산 흐름라인의 설계문제, PDS는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\text{PDS: Min } TC(N) = \sum_{i=1}^3 c_i n_i$$

$$\text{단, } T_C \leq \frac{60 T_D - T_P}{\lceil \frac{Q}{q} \rceil - 1}$$

$$T_P = \sum_{i=1}^3 T_i + \sum_{i=0}^3 T_{i(i+1)}$$

PDS를 살펴보면, 다음의 사실을 알 수 있다. (1) 의사결정변수는 N 이다. (2) PDS의 생산주기 제한식에서 오른쪽 항은 모두 입력변수이다. (3) (T_D, Q) 는 경영정책변수이다. (4) q 와 C 는 현장에서 수집된 자료를 이용하여 추정될 수 있다. (5) T_P 는 (T_i, T_{ij}) 로부터 추정될 수 있다. (6) T_C 는 (T_i, T_{ij}) 와 N 의 합수로 생산스케줄에 따라 산출될 수 있다. 참고로 T_C 는

$$\max_{1 \leq i \leq 3} \left(\frac{T_{i-1,i} + T_i + T_{i,i+1}}{n_i} \right)$$

으로 추측되어 효율적인 알고리즘이 존재할 것으로 추론되었으나 수학적 증명이 용이하지 않았다.

PDS의 특이한 점은 다음과 같다. (1) Flow shop scheduling 문제를 포함하고 있으며, (2) 목적함수가 makespan(수행되어야 할 모든 작업이 완료되기까지 소요되는 시간), tardiness(최대지연 시간) 등을 최소화하는 것이 아니라 비용함수를 최소화하는 것이며, (3) 추출, 침전, 당화탱크 등 3종류의 탱크가 병렬로 복수의 탱크로 배치될 수 있으며, (4) 이송시간인 T_{ij} 가 존재하며, (5) 탱크 i 에서 탱크 $(i+1)$ 로 중간생성물이 이송될 경우, बैच로 생산하기 때문에 탱크 i 와 탱크 $(i+1)$ 는 다른 작업으로 사용될 수 없으며, (6) 중간생성물은 बैच 형태이나 이산생산시스템에서와 같이 다음 공정으로 분할되어 흘러갈 수 없으며, (7) 생산시 대기과 지연이 존재하여서는 안 된다는 점이다.

일반적으로 기계 대수가 3대 이상인 Flow shop scheduling 문제는 NP-complete이며, 기계 대수가 2인 경우 효율적인 polyno-

mialtime 알고리즘이 존재한다(Garey, 1978). 본 논문에서는 PDS의 알고리즘으로 나열법(Enumeration Method)을 사용하였다. 나열법을 사용한 이유는 다음과 같다. 일산 5톤을 생산하기 위해 많아야 1톤급 추출, 침전, 당화탱크가 각각 5대가 있어야 되므로 경우의 수는 많아야 125가지에 불과하다. 또한 $TC(N)$ 은 N 의 증가함수이므로 최적해 N^* 는 가능해 영역(feasible region, 식 (4)를 만족하는 해의 영역)에서 불가능해 영역(infeasible region)과 인접한 경계영역(boundary region)에 존재한다는 사실은 쉽게 알 수 있다. 따라서 (1,1,1), (2,1,1), (1,2,1), (1,1,2) 등의 순서로 N 공간영역의 일부 가능해에 대하여 각각의 생산스케줄을 수작업으로 도출하였으며, T_C 와 $TC(N)$ 을 산출한 다음, $TC(N)$ 값 중 최소값에 해당하는 N^* 을 도출하였다. 상기 나열법은 일반적으로 효율적인 해법으로 볼 수 없으나 현실적으로 탱크가 5대 이상 배치될 가능성은 없기 때문에 현장에서 적절하게 사용될 수 있다고 사료된다.

2.3 일 생산 5톤 규모 연속생산 흐름라인의 공정설계

2.3.1 입력변수 (T_D, Q) 의 설정과 q, C 의 추정

서론에서 제시된 바, Q 는 5톤으로 설정하였다. 식혜 전문가의 조언에 따르면, बैच 생산량을 높이기 위하여 당화탱크를 1톤을 초과하여 제작할 경우 당화가 균일하게 이루어지지 않으며, 1톤 미만일 경우 당화시간의 분산이 커서 공정시간의 편차

표 3. 1톤 생산시 기본라인의 작업분석

공정	작업번호	요소작업 내역	표준작업 추정시간(분)
식수 저장	WS	식수저장	-
식수-추출 운반	M01	추출탱크로 식수 운반	10
추출공정	E1	엿기름 넣기 및 추출반응	60
	E2	추출탱크 세척	20
추출-침전 운반	M12	침전탱크로 (효소물+맥아전분) 운반	10
침전공정	S1	침전반응	180
	S2	침전탱크 세척 침전탱크의 필터 제거 및 설정	20
침전-당화 운반	M23	당화탱크로 효소물 운반	10
취반공정	B2	지에밥 짓기	60
당화공정	G1	효소물 예열	20
	G2	지에밥 및 첨가제 운반 지에밥 운반/넣기 및 당화반응 당수 및 첨가제 넣기 및 끓이기	180
	G3	당화탱크 세척	10
당화-저장 운반	M34	저장탱크로 식혜 운반	10
식혜 저장	SS	식혜 임시저장	-

가 심하므로, 당화탱크의 크기는 배취 생산량 기준으로 1톤이 적정하다는 것이다. 따라서 본 논문에서는 $q=1$ 톤으로 가정하였다. 따라서 식 (1)에 의하여 $n_B=5$, 즉 일산 5톤을 생산하기 위하여 당화탱크에서 적어도 5번은 생산되어야 한다. 한편 탱크 제작업체에 의뢰한 추정단가는 $C=(1200, 1600, 1100)$ 으로 추정되었다.

2.3.2 입력변수 (T_i, T_{ij})와 T_p 의 추정

(T_i, T_{ij})를 추정하기 위하여 공정별 작업분석이 선행되어야 한다. 주요 공정을 수행하기 위한 작업은 공정별 또는 공정 전체의 자동화 수준에 따라 달라지나, 본 논문에서는 탱크 내의 화학반응은 자동조절장치에 의하여 제어되며, 중간생성물의 탱크 간 이동은 배관시스템 제어기(Controller)의 조작으로 가능하다고 가정한다. 또한 식혜 제조과정에서 필요한 자원인 UML 필터와 취반기의 세척, 운반, 작업대 대기, 투입원료의 운반, 저장, 대기 등의 보조작업은 임시직 종업원에 의하여 사전에 수행된다고 가정한다.

식혜제조 전문가의 조언과 대략적인 배치도를 기준으로 1톤 생산시 <표 3>과 같이 주작업 내용이 설정되었으며, 배취 생산량 1톤 기준으로 상응한 표준시간이 추정되었다. 표에서 제시된 바, T_{ij} 는 배관직경과 펌프능력을 조정하여 10분이면 충분하다고 추정되었다.

표에서 제시된 바, 각각의 주요 공정은 반응과 반응 후의 작업으로 구성되어 있다. 예로 추출공정은 추출반응(E1 작업)과 후작업(E2 작업)으로 구성되어 있으며 침전공정은 침전반응(S1 작업)과 후작업(S2 작업)으로, 당화공정은 당화반응(G1, G2 작업)과 후작업(G3 작업)으로 구성되어 있다. 특이사항으로 1

톤 기준으로 추출공정에서 효소 추출을 위한 반응시간은 60분(E1 작업)이고, 침전공정에서 맥아전분을 침전시키기 위하여 필요한 시간은 180분(S1 작업)이며, 당화공정에서 발효반응을 위하여 필요한 시간은 200분(G1, G2 작업)으로 모두 실험결과에 의하여 추정되었다는 점이다. 이 추정시간은 식혜와 관련된 제반 논문에서 추정된 수치보다 다소 짧게 추정되었으며, 그 원인은 공정제어를 위한 적정온도와 G1과 같은 특별한 작업이 추가되었기 때문이다.

배취생산이 반복될 때 후작업이 선행되어야 하므로 T의 추정을 위하여 CP 상의 공정별 작업시간의 추정이 필요하다. CP를 도출하기 위하여, <표 3>에서 요약된 총 14개 작업의 전후관계도(precedence diagram)를 <그림 3>에 제시하였다. 그림에서 제시된 바, 원은 작업을, 역삼각형은 탱크 내에서의 화학반응 및 저장, 그리고 탱크와 관련된 작업을, 화살모양은 운반과 관련된 작업을, 선으로 표시된 화살표는 작업의 선후관계를 의미한다. 원, 역삼각형 및 화살모양의 상단은 <표 3>의 2열에서 제시된 작업번호를, 하단은 작업시간(단위: 분)을 의미한다. 예를 들면, 침전공정의 S2 작업은 20분이 소요되며 S1 작업과 M23 작업이 종료되어야 작업을 수행할 수 있음을 의미한다. 쇄선 화살표는 다음 주기 전에 완료되어 있어야 한다는 관계를 의미한다. 예를 들면, M23 작업을 수행하기 위하여 G3 작업은 전 생산주기에서 종료되어야 한다는 의미이다.

CP를 도출하기 위하여 각 작업의 최조가능 시간(earliest time)과 최후가능 시간(latest time)은 <표 4>의 3, 4번째 열에 각각 산출되었다. 최조가능 시간=최후가능 시간을 만족하는 경로, 즉 CP는 <표 4>의 5번째 열에 '○'로 제시되어 있으며, 굵은 화살표로 <그림 3>에 표시되어 있다.

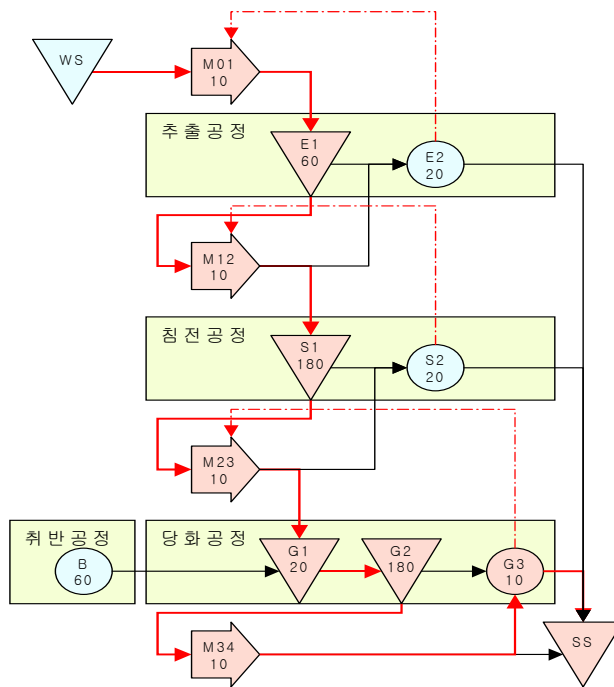


그림 3. precedence diagram과 critical path.

작업의 최초가능 시간과 최후가능 시간을 고려하여 CP 상의 작업을 중심으로 제반 작업을 시간대별로 할당한 스케줄은 <그림 4>에 제시하였다. CP 상의 작업은 검은색 셀로 표시되었으며 라인에서 필요한 제반 수작업은 옅은 검은색으로 표시하였다. 그림에서 제시된 바, 당화공정의 경우 예상 밖으로 G3 작업이 CP 상에 존재하기 때문에 T_3 는 G3 작업시간을 더하여 210분으로, 즉 $T=(60, 180, 210)$ 으로 추정되었다. 한편 식 (2)에 의하여 $T_p=490$ 분으로 추정되었다.

2.3.3 N값의 변화에 따른 T_c 및 $Tc(N)$ 의 추정과 N^* 의 도출 <그림 5>의 (1)에서 x축은 시간의 진행을, y축은 (1,1,1)의 뱃취별 생산스케줄을 의미하며, ET는 추출공정을, ST는 침전공정을, GT는 당화공정을, 공정간 흰 부분은 탱크간 운반을, 띠 모양의 길이는 공정시간을 의미한다. GT 오른쪽에 있는 첫 번째 흰 부분은 당화탱크에서 저장탱크로 운반되는 시간 (T_{34})을, 두 번째 흰 부분은 당화탱크의 세척에 소요되는 작업시간을 의미한다. 두 번째 뱃취는 당화공정 시간이 길어서 $T_c=230$

표 4. CP를 찾기 위한 도표

공정	공정 설명	최초 가능 시간(분)	최후 가능 시간(분)	임계경로 해당 여부
1	WS ~ M01	0	0	○
2	M01 ~ E1	10	10	○
3	E1 ~ E2	70	470	
5	E1 ~ M12	70	70	○
6	M12 ~ S1	80	80	○
7	S1 ~ S2	260	470	
8	S1 ~ M23	260	260	○
9	B ~ G1	60	270	
10	M23 ~ G1	270	270	○
11	G1 ~ G2	290	290	○
12	G2 ~ G3	470	480	
13	G2 ~ M34	470	470	○
14	M34 ~ G3	480	480	○
15	E2 ~ SS	100	490	
16	S2 ~ SS	290	490	
17	G3 ~ SS	490	490	○

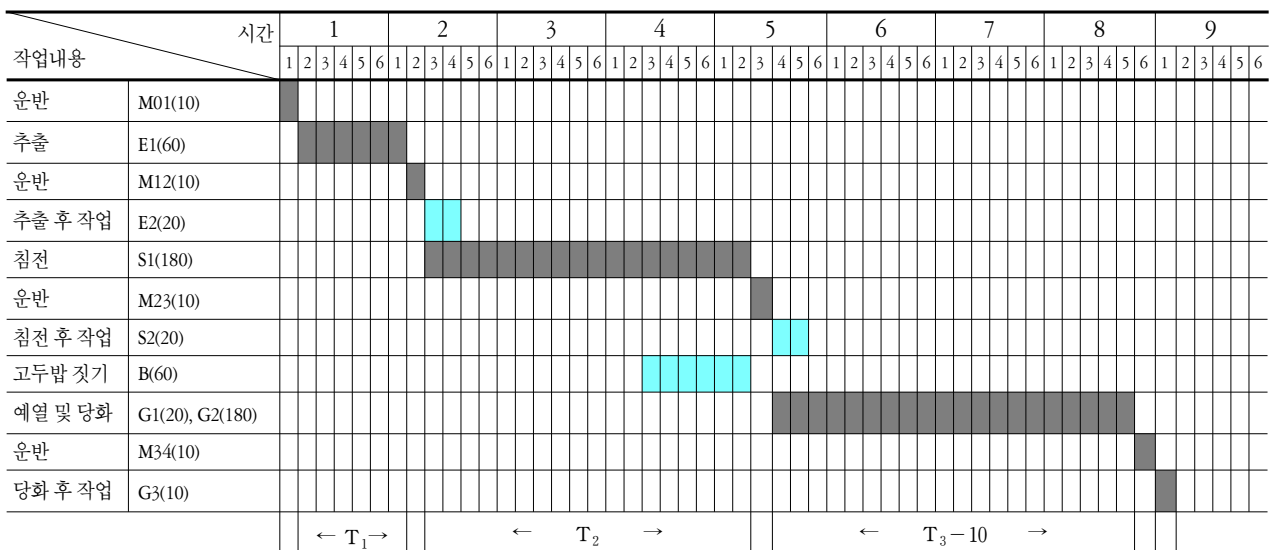


그림 4. CP 기준 작업 스케줄의 한 예.

표 5. $T=(60, 180, 210)$, $T_{ij}=10$, $C=(1200, 1600, 1100)$ 일 때, N 값에 따른 T_c (단위 : 분)와 $TC(N)$ (단위 : 만원)

n_1	$n_2 \backslash n_3$		1	2	3	4	5
1	1	T_c	230.0	200.0	200.0	200.0	200.0
		TC	3,900.0	5,000.0	6,100.0	7,200.0	8,300.0
	2	T_c	230.0	115.0*	100.0	100.0	100.0
		TC	5,500.0	6,600.0*	7,700.0	8,800.0	9,900.0
	3	T_c	230.0	115.0	80.0	80.0	80.0
		TC	7,100.0	8,200.0	9,300.0	10,400.0	11,500.0
	4	T_c	230.0	115.0	80.0	80.0	80.0
		TC	8,700.0	9,800.0	10,900.0	12,000.0	13,100.0
	5	T_c	230.0	115.0	80.0	80.0	80.0
		TC	10,300.0	11,400.0	12,500.0	13,600.0	14,700.0
2	1	T_c	230.0	200.0	200.0	200.0	200.0
		TC	5,100.0	6,200.0	7,300.0	8,400.0	9,500.0
	2	T_c	230.0	115.0	100.0	100.0	100.0
		TC	6,700.0	7,800.0	8,900.0	10,000.0	11,100.0
	3	T_c	230.0	115.0	76.7	66.7	66.7
		TC	8,300.0	9,400.0	10,500.0	11,600.0	12,700.0
	4	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	50.0
		TC	9,900.0	11,000.0	12,100.0	13,200.0	14,300.0
	5	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	46.0
		TC	11,500.0	12,600.0	13,700.0	14,800.0	15,900.0
3	1	T_c	230.0	200.0	200.0	200.0	200.0
		TC	6,300.0	7,400.0	8,500.0	9,600.0	10,700.0
	2	T_c	230.0	115.0	100.0	100.0	100.0
		TC	7,900.0	9,000.0	10,100.0	11,200.0	12,300.0
	3	T_c	230.0	115.0	76.7	66.7	66.7
		TC	9,500.0	10,600.0	11,700.0	12,800.0	13,900.0
	4	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	50.0
		TC	11,100.0	12,200.0	13,300.0	14,400.0	15,500.0
	5	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	46.0
		TC	12,700.0	13,800.0	14,900.0	16,000.0	17,100.0
4	1	T_c	230.0	200.0	200.0	200.0	200.0
		TC	7,500.0	8,600.0	9,700.0	10,800.0	11,900.0
	2	T_c	230.0	115.0	100.0	100.0	100.0
		TC	9,100.0	10,200.0	11,300.0	12,400.0	13,500.0
	3	T_c	230.0	115.0	76.7	66.7	66.7
		TC	10,700.0	11,800.0	12,900.0	14,000.0	15,100.0
	4	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	50.0
		TC	12,300.0	13,400.0	14,500.0	15,600.0	16,700.0
	5	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	46.0
		TC	13,900.0	15,000.0	16,100.0	17,200.0	18,300.0
5	1	T_c	230.0	200.0	200.0	200.0	200.0
		TC	8,700.0	9,800.0	10,900.0	12,000.0	13,100.0
	2	T_c	230.0	115.0	100.0	100.0	100.0
		TC	10,300.0	11,400.0	12,500.0	13,600.0	14,700.0
	3	T_c	230.0	115.0	76.7	66.7	66.7
		TC	11,900.0	13,000.0	14,100.0	15,200.0	16,300.0
	4	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	50.0
		TC	13,500.0	14,600.0	15,700.0	16,800.0	17,900.0
	5	T_c	230.0	115.0	76.7	57.5	46.0
		TC	15,100.0	16,200.0	17,300.0	18,400.0	19,500.0

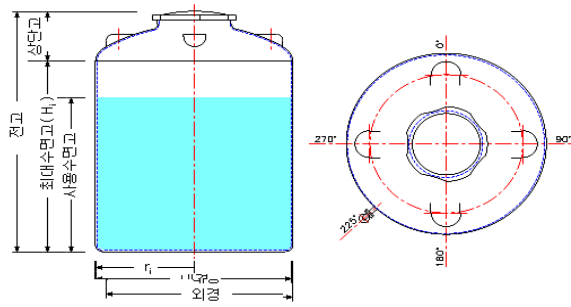


그림 7. 탱크의 정면도와 평면도.

에 투입되는 제반 원료의 배합비율과 중간 공정에서 폐기 또는 소실되는 중간생성물의 소실량, 그리고 후공정으로 이동될 수 있는 중간생성물의 양에 대한 추정이 필요하다.

원료의 배합비율은 식체의 맛과 향에 영향을 미친다. 식체의 맛과 향으로 대변되는 식체의 품질에 영향을 미치는 요인은 매우 많으나, 일부 요인에 대한 실험 결과만 보고 되어 있어 향후 체계적인 연구가 필요하다. <그림 9>에서 제시된 바, 일반적으로 당도가 높은 식체를 생산하기 위하여, 투입원료의 종류, 투입원료의 생산 및 저장과정, 투입원료의 배합비, 시간 경과에 따른 공정상의 제어온도, 공정순서, 배척 생산량 등에 따라 다르다.

공정별 탱크의 크기를 산출하기 위하여, 추출 및 당화공정

엿기름의 생산시점과 쌀의 종류에 따라 엿기름양: 쌀의 양:

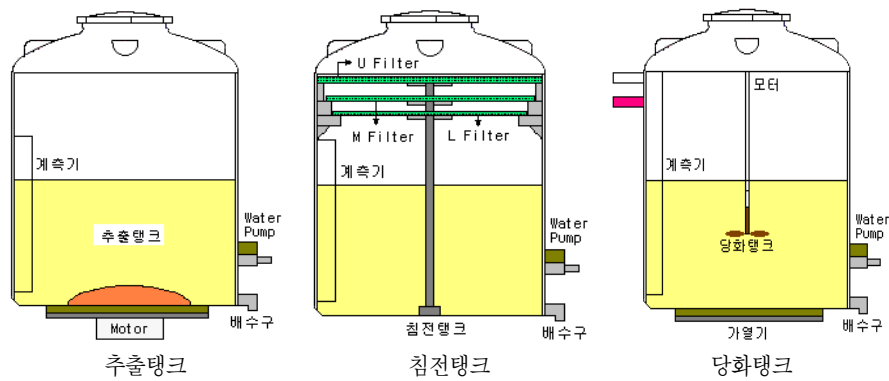


그림 8. 공정별 탱크의 개념도.

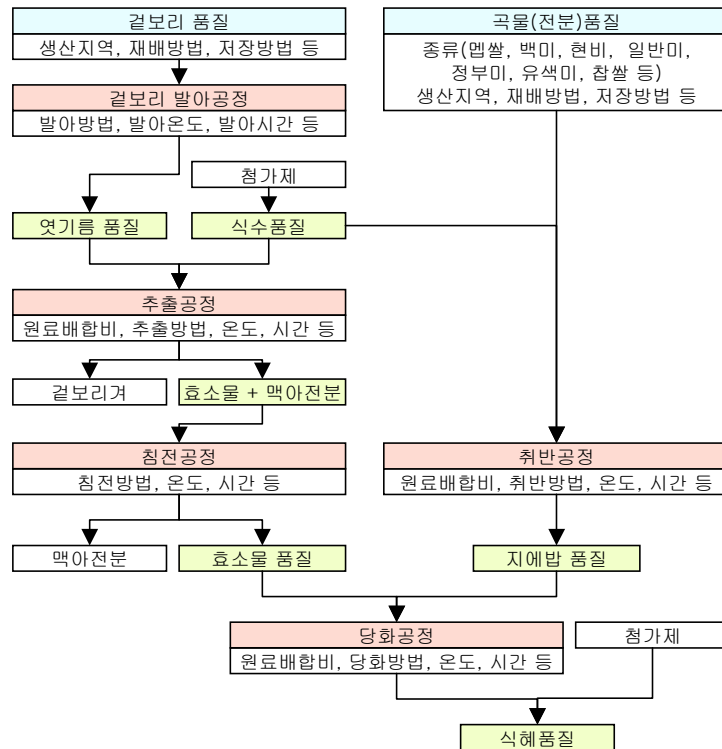


그림 9. 식체 품질의 요인도.

물의 양을 1:1:7.2에서 1:2:9.6로 투입하고, 당화온도를 40℃에서 60℃의 특정온도로 설정한다면 식체의 당도를 극대화시킬 수 있다고 주장하였다(이효지 외, 1976). 엿기름과 물의 배합비율을 1:1:10으로 권유하는 보고서(조순옥 외, 1983; 서형주의, 1997)도 다수 있으나 모두 소량의 식체생산량을 기준으로 도출된 결과이었다. 따라서 본 고에서는 연구협력팀의 실험에 의하여 결정된 1:1.04:14(<그림 10>)를 가정하였고, 실험결과 추정된 중간생성물의 생성량과 소실량을 가정하였다. <그림 10>에서 제시된 바, 당화탱크 기준 배취생산량 1톤을 생산하기 위하여 전공정 i의 탱크에서 최소로 필요한 사용용적을 α_i 라고 하면 $\alpha_1=1.50$, $\alpha_2=1.30$, $\alpha_3=1.18$ 이 된다. 참고로 설당 60kg과 첨가제는 당화공정이 종료될 때 투입되며 그 사이에 식수 240kg에 해당하는 증기가 증발되므로 당화탱크는 효소물, 1000kg과 지에밥 180kg을 수용하면 되므로 당화탱크의 사용용적은 1.18 Kl 가 되어야 하며 $\alpha_3=1.18$ 이 된다. 한편 식수 저장 탱크와 식체 저장탱크는 미래 확장을 고려하여 $\alpha_0=3$, $\alpha_4=3$ 으로 결정하였다.

3.1.2 공정별 탱크의 상대적 크기 결정

탱크의 크기를 결정하기 위하여 탱크의 최대 수면고와 내부 반경을 산출하여야 한다. 탱크 i의 내부반경을 γ_i , 탱크의 최대 수면고를 H_i , 최대 수면고 기준의 내부용적(탱크 상단의 미사용공간은 제외함)을 V_i 라 하면 $V_i = \pi r_i^2 H_i$ 이다. γ_i 를 반경에 대한 탱크 i의 최대 수면고의 비율이라고 하면 $H_i = \gamma_i r_i$ 이므로,

$$V_i = \pi \gamma_i r_i^3 \tag{5}$$

단 $i=0, \dots, 4$

탱크 i의 내부용적에 대한 사용용적(사용 수면고 기준 부피)의 비율, 즉 용적이용률을 U_i 라 하면 사용용적은 $U_i V_i$ 가 되며,

$$\alpha_i = \frac{U_i V_i}{q} \text{ 이므로 식 (6)이 성립한다.}$$

$$V_i = \frac{\alpha_i q}{U_i} \tag{6}$$

단 $i=0, \dots, 4$

식 (5)와 식 (6)에서 r_i 는 식 (7)로 산출될 수 있으며, 공정 i의 탱크를 설치하기 위한 최소면적 S_i 는 식 (8)로 추정할 수 있다.

$$r_i = \sqrt[3]{\frac{\alpha_i q}{\pi \gamma_i U_i}} \tag{7}$$

단 $i=0, \dots, 4$

$$r S_i = 4 r_i^2 \tag{8}$$

단 $i=0, \dots, 4$

본 논문에서는 (r_i, H_i)를 산출하기 위하여 $U_i=0.8$ 를 가정하였으며, 일반적으로 탱크설계시 자재투입비용과 제조비용을 최소화하기 위하여 식체제조에 사용되는 r_i 는 2~3.4를 사용하기 때문에 $r_i=2.4$ 를 가정하였다. 공정별 탱크의 내부용적, 반경, 높이 등에 대한 추정치는 <표 6>에 요약되어 있다.

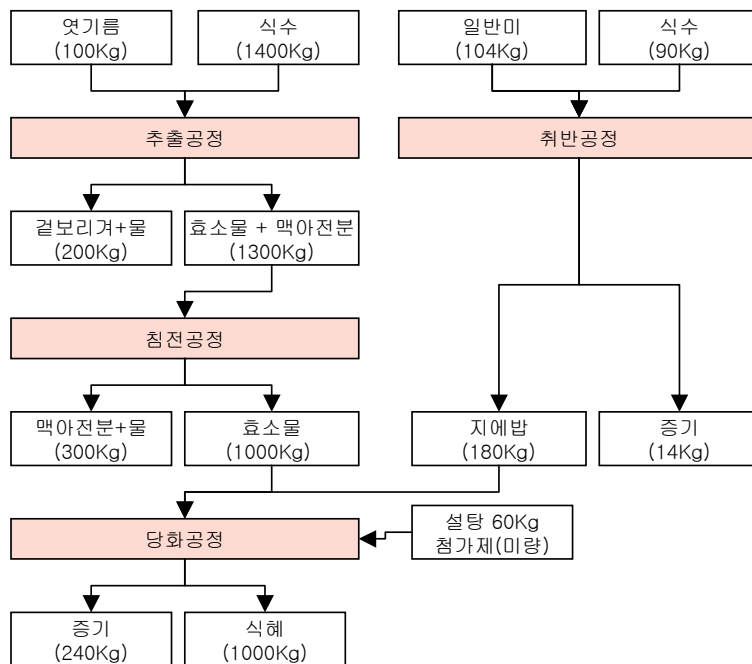


그림 10. 당화탱크기준 식체 1톤 생산을 위한 공정별 원료투입량과 중간생성물량.

표 6. 공정별 탱크의 규격, 내부용적, 최소 필요면적의 추정

공정 번호	탱크	사용용적 상대계수 (α_i)	이용률(%) (U_i)	내부용적 상대계수 ($\frac{\alpha_i}{U_i}$)	탱크반경 (r_i) (mm)	탱크높이 (H_i) (mm)	탱크 최소 필요면적 (S_i)	
							m ²	평
0	식수탱크	3.00	80	3.750	792	1902	2.511	0.76
1	추출탱크	1.50	80	1.875	629	1509	1.582	0.48
2	침전탱크	1.30	80	1.625	600	1439	1.438	0.44
3	당화탱크	1.18	80	1.475	581	1393	1.348	0.41
4	저장탱크	3.00	80	3.750	792	1902	2.511	0.76

3.2 식혜 연속생산 흐름라인의 배치설계(안)

전통민속식혜 공장은 연속생산 흐름라인과 이산생산 흐름라인에 필요한 면적, 그리고 보조 설비를 위한 면적으로 대별할 수 있다. 일반적으로 설비면적을 산출할 경우 스펠기법(span technique)을 이용하며, 스펠(span)을 설정하고 필요한 설비면적을 스펠의 배수로 한다. 본 논문에서도 이러한 개념을 적용하였다. 즉 탱크의 최소 필요면적, 정비면적, 배관면적, 작업면적, 협로용 지게차 운행폭 등을 고려하여 스펠의 넓이를 2.5m x 2.5m로 가정하였다.

연속생산 흐름라인은 공정순서에 따라 탱크나 보조설비를 배치하면 되지만 수요증가에 대비하여 확장면적(expansion area)을 감안하여야 한다. <표 5>에서 제시된 바, (2,4,4)라인은 $T_C=57.5$ 분으로 2대의 독립된 (1,2,2) 라인과 동일한 효과가 있지만, Shut-down을 고려하여 상호 독립된 (1,2,2) 생산라인이 미래에 구축될 수 있도록 가정하였다. 따라서 확장면적은 16스팬으로 추정되었다. 또한 <그림 11>에 주통로를 포함한 식혜 연속생산 흐름라인의 개념설계도(안)를 제시하였다.

표 7. 면적분석표

	Span 수	넓이	
		m ²	평
식수탱크	1	6.25	1.89
추출탱크	1	6.25	1.89
침전탱크	2	12.50	3.78
필터기	2	12.50	3.78
당수탱크	1	6.25	1.89
당화탱크	2	12.50	3.78
저장탱크	1	6.25	1.89
기타 작업면적	6	37.50	3.78
Expansion area	16	100.00	30.24
주통로	8	50.00	15.12
계	40	250.00	75.60

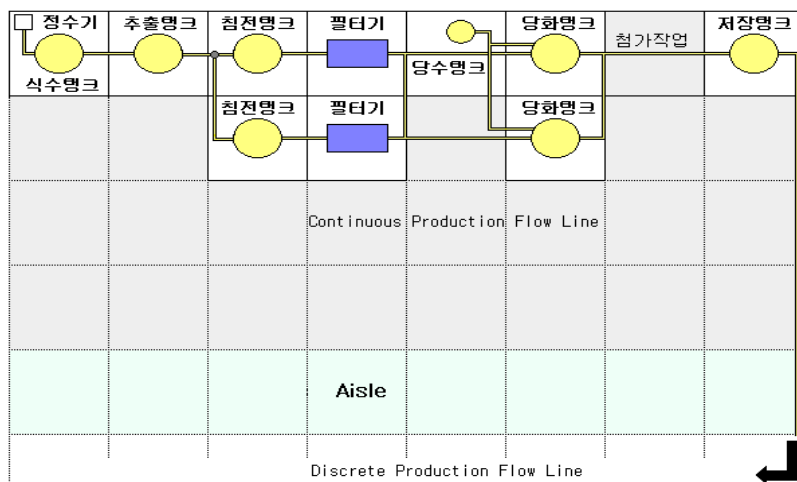


그림 11. 일산 5톤 규모 식혜공장 연속생산 흐름라인의 개념설계도(안).

4. 결 론

본 논문에서는 Q톤 규모의 전통민속식혜를 제한된 시간 내에 생산할 수 있고, 동시에 탱크 설비투자비를 최소화하는 연속 생산 흐름라인의 문제를 제기하였으며, 최적해 도출을 위한 실질적인 열거법을 제시하였다. 또한 현장에서 요구한 16시간 기준 5톤 규모의 소규모 식혜공장의 연속생산 흐름라인의 개념설계와 배치(안)를 제시하였다.

세부적으로, Critical Path에 의한 제조공기 단축 방법론을 적용하여, 최소 투자비로 16시간(2교대 기준) 내에 식혜 5톤을 생산할 수 있는 연속생산 흐름라인의 최적해 $N^*=(1, 2, 2)$ 와 생산 스케줄을 제시하였다. 배치설계를 위하여 공정별 상대적인 탱크 크기를 산출하는 방법론을 제시하였으며, 투입원료들의 배합비율과 무게, 중간생성물의 무게에 대한 자료 수집을 통하여 공정별 탱크의 적정 크기를 제시하였다. 또한 수요증가에 대비하여 쉽게 확장할 수 있도록 Span기법을 적용하여 실질적인 배치(안)를 제시하였다.

그러나 본 연구도 여타 연구와 마찬가지로 여러 가지 한계 점을 노출하고 있다. 예를 들면, 공정상의 불량률이 고려되지 않은 점, 운영비 측면에서 주요작업과 보조작업의 작업자별 할당 문제가 고려되지 않은 점 등 현장의 상황이 적극적으로 감안되어야 할 것이며, 향후 연구가 심도 있게 진행되어야 할 것이다. 본 연구에서 언급되지는 않았으나 공정온도에 따른 공정시간의 변동에 대한 연구도 식품공학자에 의하여 지속적으로 연구가 되어야 할 것이다. 예를 들면, 추출과 침전 및 당화 공정의 온도를 16.5℃ 보다 25℃로 유지한다면, 또는 당화공정 시 증탕을 한다면 각각의 공정시간을 상당히 단축할 수 있을

것이라는 주장이 일부 식품공학자에 의하여 제기되었으나 제조공기 단축차원에서 세밀한 연구와 과학적 검증이 필요할 것으로 사료된다.

마지막으로, 미국경제전망에 따르면, 향후 실리콘밸리의 IT 산업은 침체되고, 실리콘밸리의 CT(Culture Technology) 산업은 약진할 것으로 예측되고 있다. 국민소득의 증가에 따라 CT 산업의 한 분야인 전통음료산업도 약진할 것으로 전망되므로, 우리나라의 전통민속음료인 식혜를 코카콜라와 게토레이와 같이 세계적 상품으로 만들기 위하여 품질향상과 원가절감에 대한 다각적인 연구가 지속되어야 할 것이다.

참고문헌

- Yuk, C., Whang, Y. H., Back, H. ., and Pak, K. W., (1990), A Sikhye Production Method using Amylase and a paper bag, Korean J. Food Sci. Technol, 22(3), 296-299
- Lee, H. J. and Chun, H. J., (1976), A Scientific Study for the Production of Sikhye, Journal of Korean Home Economics Association, 14(7), 685-693
- Cho, S. O., (1983), A Comparison Study of Sikhye processed by three different factors; Water-soaping time, Barley Sprout, Rice, and Boiling Method of Rice, Journal of Korean Home Economics Association, 21(3)
- Garey and Johnson (1978), Computers and Intractability, A Guide to the Theory of NP-Completeness, W. H. Freeman and Company, NY
- Salah E. Elmaghraby (1977), Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models, John Wiley & Sons, NY
- Suh, H. J., Chung, S. H., Whang, J. H. (1997), Characteristic of Sikhye produced with malt of naked barley, covered barley and wheat, Korean J. Food Sci. Technol., 29, 716



양 문 회

서울대학교 자원공학 학사

서울대학교 산업공학 석사

미국 Georgia Institute of Technology 산업공학 박사

현재: 단국대학교 공학부(산업공학전공) 교수

관심분야: 물류자동화, SCM, 수요예측