

다수의 Feedstock을 이용하는 메탄가스 생산시스템의 일정계획에 관한 발견적 기법

A Heuristic for Sequencing and Scheduling of Multiple Feedstock Biogas
Production Systems

김 봉 진*

Bongjin Gim*

Abstract

Biomass to methane via anaerobic digestion conversion is a good supply method of substitutable energy resources. The economic viability of this technology is contingent upon managing the production facilities in a cost effective manner. The problem is to determine the batch production sequence as well as the batch residence times in the digester so as to maximize total gas production over a given planning horizon. The problem is difficult to solve since the batch sequencing decisions and the batch residence time decisions cannot be isolated. This paper develops a heuristic algorithm which is based on a dynamic programming procedure for the multiple feedstock sequencing and scheduling biogas production systems and demonstrates to yield good results.

1. 서론

재생 에너지(renewable energy)는 두 차례의 석유파동을 계기로 많은 관심을 끌게 되었으며, 바이오매스나 농업 폐기물로 부터 재생 에너지인 메탄가스를 생산하는 방법은 태양열 및 태양광, 풍력, 조력 등의 에너지화와 더불어 대표적인 재생 에너지원의 이용 방안

이다. 바이오매스로 부터 메탄가스를 생산하는 방식은 혐기소화(anaerobic digestion) 방식과 열화학적(thermal gasification) 방식으로 대별되며, 그 중에서 혐기소화 방식은 Gas Research Institute 등 여러기관에서 중점을 두어 연구하여 왔다. 주로 batch 생산에 의존하는 혐기소화 방식은 소화조(digester)에 일정량의 바이오매스와 돈분과 같은 부가물을 넣

* 단국대학교 산업공학과

고 소화조를 밀봉하여 일정시간이 경과한 후에 생성된 메탄가스를 이용하는 방법으로 대규모의 메탄가스 생산시스템에서 많이 사용된다. 가스는 미생물의 분해에 의해 생산되며 시간의 흐름에 따라 단위 가스 생산량은 감소한다.

대규모의 batch 생산시스템에서는 수확된 feedstock 들의 저장시설과 메탄가스 생산시설이 필요하며, 이러한 시스템의 경제성은 생산설비의 운영에 따른 여러가지 의사결정에 따라 많이 좌우된다. 사탕수수, kelp, napier grass 등과 같은 feedstock 들은 각기 동일한 여러 개의 batch로 이루어져 있으며, 사탕수수와 같은 feedstock은 여름과 같은 생장기간 동안에 재배하여 저장설비에 보관한 다음에 필요할 때마다 사용하며 가스 생산량이 많은 반면에 높은 고정투자비를 요구한다. Kelp나 napier grass 같은 feedstock 들은 가스 생산량이 적은 반면에 필요할 때마다 생산할 수 있기 때문에 main feedstock과 병용하여 보조 feedstock으로 사용하는 것이 경제적이다. 저장된 바이오매스는 시간의 흐름에 따라 질이 저하되기 때문에 각 batch의 처리 개시시간 및 소화조에서의 체류시간은 총 메탄가스 생산량에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 바이오매스의 일반적인 특성은 각 feedstock 들이 저장되는 동안에 질이 저하되는 부패 현상을 나타내는 점이다. 따라서 silo나 bale 같은 저장 방법에 따라라도 가스 생산량은 영향을 받는다.

본 연구와 관련하여 Hill [6, 7, 8]을 위시하여 Chynoweth, Curry, Deuermeyer, Feldman, Hiler, Isaacson [1, 2, 3, 4, 5, 9]과 같은 다수의 연구자는 바이오매스로 부터의 메탄가스

생산방법에 대한 연구를 하였다. Hill [6, 7, 8]은 feedstock의 저장중에 발생하는 부패 현상을 무시하고 각 batch의 최적 체류시간을 결정하는 방법을 개발하였다. Deuermeyer [3] 등은 feedstock의 저장중에 발생하는 부패 현상을 고려하여 한 종류의 feedstock으로 이루어진 여러 batch의 최적 체류시간을 구하는 방법에 대해 연구하였고, Curry와 Deuermeyer [2]는 여러 종류의 feedstock이 이용 가능할 때 각 batch의 최적 체류시간을 결정하는 방법을 개발하였다. Feldman [4] 등은 두 종류의 feedstock에 대해 한 번의 feedstock 교체를 허용하는 가정하에 각 batch의 최적 체류시간을 구하는 동적 계획법 모형을 개발하였다.

기존의 연구들이 각 batch의 최적 체류시간에 초점을 맞추어 연구하였으나, 본 연구에서는 각 batch의 최적 체류시간과 최적 처리순서를 결정하는 문제를 다루었다. 본 논문은 Curry와 Deuermeyer [2]의 연구를 확장시킨 것으로서, 도착시점이 상이한 여러 종류의 feedstock을 대상으로 각 batch의 최적 체류시간 뿐만 아니라 최적 처리순서를 동시에 결정함으로써 정해진 계획 기간 동안의 가스 생산량을 최대화하는 것을 목적으로 한다. 각 batch의 처리순서의 선택에 따라 총 가스생산량은 증가될 수 있으며, 이런 유형의 문제는 메탄가스 생산시스템에서 실제로 발생하는 문제이다. 본 논문에서 다루는 문제는 각 batch의 처리순서 결정과 체류시간 결정을 분리시킬 수 없는 풀기 어려운 문제가 되며, 본 논문에서는 위와 같은 문제에 대해 최적해 또는 최적해와 근사한 해를 구할 수 있는 능률적인 발견적 기법을 제시하고자

한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제 2절에서는 다수의 feedstock을 이용하는 매탄가스 생산시스템의 일정계획 문제에 대한 수리모형을 제시한다. 제 3절에서는 제안된 발견적 기법을 서술하고, 제 4절에서는 수치예를 이용하여 제안된 발견적 기법의 과정들을 구체적으로 설명한다. 제 5절에서는 제안된 발견적 기법의 효율성 및 성능평가를 위하여 제안된 발견적 기법의 해를 최적해와 비교하는 수치실험을 수행하고, 마지막 절에서는 본 논문의 결과와 확장 방안에 대해 논한다.

2. 수리 모형

위와 같은 문제에 대한 일정계획은 하나의 소화조를 대상으로 정해진 계획 기간 $[0, T]$ 동안의 총 가스생산량을 최대화하기 위하여 Z -feedstock에 시간을 할당하고, 또한 각 feedstock 내의 모든 batch 별로 소화조 내에서의 체류시간과 처리순서를 결정하는 것이다. 한편 각 feedstock의 소화조에의 도착시간 (arrival time)은 각 feedstock의 수확시간에 소화조까지의 수송시간을 더한 시간이며, 소화조에서 임의의 feedstock을 처리할 수 있는 시점은 해당 feedstock의 도착시간 이후가 된다. 문제의 정형화를 위하여 다음과 같은 기호를 사용하기로 하자.

M = feedstocks의 수,

n_i = feedstock i 형의 batch수, for $i = 1, 2, \dots, M$,

$N = \sum_{i=1}^M n_i$, 총 batch의 수,

d = batch의 교환시에 소요되는 setup 시간,

r_i = feedstock i 의 소화조에의 도착시간,

$g_i(t)$ = 체류시간이 t 로 주어졌을 때 feedstock i 형의 batch의 가스생산 함수,

$$g_i(t) = \alpha_i \{1 - \exp(-\beta_i[t-d]^+)\},$$

여기서 α_i, β_i 는 feedstock i 의 바이오매스-가스 변환계수이고 $[t-d]^+$ 는 0과 $t-d$ 의 최대치를 나타낸다.

$h_i(s)$ = 저장시간이 s 로 주어졌을 때 feedstock i 형의 부패손실 함수,

$$h_i(s) = \exp\{-\gamma_i(s+d)\},$$

여기서 γ_i 는 feedstock i 의 부패손실 계수이다.

한편 feedstock 들은 도착시간에 따라 번호가 차례대로 부여되며 처음 도착하는 feedstock의 도착시간, r_i , 은 0로 하였고, $i < j$ 이면 $r_i < r_j$ 관계가 성립되도록 하였다. 또한 모든 feedstock에는 부분 batch가 없어서 동일한 feedstock의 모든 batch는 크기가 모두 같은 것으로 가정하였다.

다수의 feedstock을 이용하는 매탄가스 생산시스템의 일정계획 문제를 정형화하기 위하여 다음과 같은 의사결정 변수 들을 정의하자.

$x_{ij} = 1$ 만약에 j 번 째로 처리되는 batch가 feedstock i 형일 때,

$= 0$ 그렇지 않을 때,

$t_j = j$ 번 째 batch의 소화조 내에서의 체류 시간, for $j = 1, 2, \dots, N$.

여기서 j 번 째로 처리되는 batch가 feedstock i 형인 것으로 가정하자. 그러면 j 번째로 처리되는 batch의 소화조 내에서의 개시시간은 $\sum_{k=1}^{j-1} t_k$ 이고, feedstock i 가 j 번 째로 처리되기 위해서는 feedstock i 의 도착시간인 r_i 가 j 번 째로 처리되는 batch의 소화조 내에서의 개시시간 보다는 늦지 않아야 된다. 따라서 j 번 째 batch의 feedstock 형은 i 이고, 소화조 내에서의 체류시간이 t_j 일 때의 해당 batch의 가스 생산량, $f_{ij}(t_j)$,은 다음과 같다:

$$f_{ij}(t_j) = h_i \left(\sum_{k=1}^{j-1} t_k - r_i \right) g_i(t_j) \text{ 만약에}$$

$$\sum_{k=1}^{j-1} t_k \geq r_i \text{ 일 때,}$$

$$= 0 \text{ 그렇지 않을 때.}$$

위와 같은 가스생산 함수 $f_{ij}(t_j)$ 는 오목 함수는 아니나, 체류시간인 t_j 가 증가함에 따라 $f_{ij}(t_j)$ 의 값은 감소하지 않는 비감소(non-decreasing) 함수가 된다.

그러면 다수의 feedstock을 이용하는 메탄 가스 생산시스템의 일정계획 문제의 수리식은 다음과 같다:

$$(P) \text{ maximize } \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}(t_j) x_{ij}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^N t_j = T, \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = 1, \text{ for } j = 1, 2, \dots, N, \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = n_i, \text{ for } i = 1, 2, \dots, M, \tag{3}$$

$$t_j \geq 0, \text{ for } j = 1, 2, \dots, N, \tag{4}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \text{ for all } i \text{ and } j. \tag{5}$$

문제 (P) 에서 제약조건 (1)은 소화조의 총 체류시간에 대한 제약조건이고, 제약조건 (2)및 (3)은 한 번에 한 batch씩 처리되고 결국에는 모든 batch 들이 처리되어야 하는 제약조건이다. 또한 제약조건 (4)는 체류시간들의 비음수 조건이고, 제약조건 (5)는 j 번 째로 처리되는 batch에 대한 feedstock의 형태를 나타내는 either-or 제약조건을 나타낸다.

3. 발견적 기법

문제 (P)는 각 batch의 체류시간 결정과 처리순서의 결정이 동시에 문제가 되므로 굉장히 풀기 어려운 문제가 된다. 문제 (P)는 가스 생산량에 대한 목적 함수가 비오목함수이고 각 작업(batch)의 도착시간이 상이한 경우에 대한 최적 순서를 결정하는 문제로 축소될 수 있으므로, 문제 (P)에 대해 polynomial time 으로 최적해를 구하는 해법을 찾는 힘들다. 따라서 실제 문제를 풀기 위해서는 능률적인 발견적 기법이 필요하다.

본 논문에서 제안된 발견적 기법은 각 batch의 초기 처리순서의 결정으로 부터 시작된다. Ω 를 N 개의 batch에 대해서 소화조에서 처리되는 순서대로 해당되는 feedstock의 번호를 정렬한 집합으로 정의하면, Ω 의 모든 요소(element)에는 모든 i 가 n_i 개씩 들어

있게 된다. 그러면 하나의 가능한 batch들의 처리순서, S,는 Ω 의 한 요소로서 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$S = \langle S_N(1), S_N(2), \dots, S_N(N) \rangle.$$

여기서 $S_N(j)$ 는 총 N 개의 batch 중에서 소화조에서 j번 째로 처리되는 batch의 feedstock 형태를 나타낸다. 따라서 $S_N(j) = i$ 는 소화조에서 j번 째로 처리되는 batch의 feedstock 형태가 i 임을 나타내고, 또한 이 식은 $x_{ij} = 1$ 을 의미한다. 제안된 발견적 기법에서는 각 batch의 초기 처리순서를 해당되는 feedstock의 번호가 작은 순서대로 정렬하여 결정한다. 예를 들어, 첫번째 feedstock의 batch 수가 2이고, 두번째 feedstock의 batch 수가 1인 경우를 생각해 보자. 그러면 제안된 발견적 기법에 따른 각 batch의 초기 처리순서, S,는 $\langle 1, 1, 2 \rangle$ 가 된다.

한편 batch 들의 처리순서, S,가 주어진 경우를 생각해 보자. 또한 u_i 를 첫번째 batch 부터 i번째 batch 까지의 총 체류시간을 나타내는 stage i에서의 상황 변수(state variable)로 정의하자. 그러면 계획기간이 T 이고 batch 들의 처리순서 S가 주어진 경우의 최대 가스생산량, $F_N(T)$,은 다음과 같은 동적 계획법(DPP)의 순환 관계를 이용하여 얻을 수 있다:

Stage 1

$$F_1(u_1) = h_{SD}(0) g_{SD}(u_1 - r_{SD}),$$

for $u_1 \in [r_{SD}, T]$.

Stage k (for k = 2, 3, ..., N-1)

$$F_k(u_k) = \max \{ h_{SD}(u_k - x - r_{SD}) g_{SD}(x) + F_{k-1}(u_k - x) \},$$

$$0 \leq x \leq u_k - r(k)$$

for $r(k) \leq u_k \leq T$, where $r(k) = \max \{ r_{SD} : i \in \{1, 2, \dots, k\} \}$

Stage N

$$F_N(T) = \max \{ h_{SD}(T - x - r_{SD}) g_{SD}(x) + F_{N-1}(T - x) \},$$

$$0 \leq x \leq T - r(N)$$

where $r(N) = \max \{ r_{SD} : i \in \{1, 2, \dots, N\} \}$.

또한 각 batch 들의 처리순서 S가 주어진 경우에 각 batch의 최적 체류시간, t_i ,은 위와 같은 DPP의 결과와 다음과 같은 back substitution 관계를 이용하여 얻는다:

$$t_N = x_N^*(T), t_{N-1} = x_{N-1}^*(T - t_N),$$

$$t_{N-2} = x_{N-2}^*(T - t_{N-1}), \text{ etc.} \quad (6)$$

본 논문에서 제시할 발견적 기법은 세 단계로 구성된다. 첫번째 단계에서는 각 batch 들의 초기 처리순서를 해당되는 feedstock의 번호가 작은 순서대로 정렬하여 결정하고, 각 batch의 초기 체류시간은 DPP를 이용하여 구한다. 제시할 발견적 기법은 첫번째 단계에서 얻은 초기 해로부터 시작하여 같은 과정의 반복을 통하여 해를 개선해 나가는 하나의 개선 기법(improvement algorithm)으로서 제안될 발견적 기법의 구체적인 과정은 다음과 같다:

단계 1. 각 batch 들의 초기 처리순서를 해당되는 feedstock의 번호가 작은 순서대로 정

렬하여 결정하고, 각 batch 들의 초기 체류시간은 DPP를 이용하여 구한다.

단계 2. 각 batch의 체류시간을 고정된 것으로 가정하고 adjacent pairwise interchanges 방법에 의해 각 batch 들의 처리순서를 조정한다. 만약에 각 batch 들의 처리순서가 변화되었으면 단계 3으로 간다. 그렇지 않으면, 모든 과정을 끝낸다.

단계 3. 각 batch 들의 처리순서를 고정된 것으로 가정하고 각 batch 들의 최적 체류시간을 DPP에 의해 결정한다. 만약에 각 batch 들의 체류시간이 변화되었으면 단계 2로 간다. 그렇지 않으면, 모든 과정을 끝낸다.

제안된 발견적 기법은 모든 단계마다 가능한 해를 생성하므로, 단계를 반복함에 따라 전 단계보다는 좋거나 같은 해를 찾는다. 한편 현 단계의 해가 전 단계의 해보다 개선되지 못하면 모든 과정을 끝낸다. 다음 절에서는 수치 예제를 통하여 제안된 발견적 기법의 구체적인 과정을 설명한다.

4. 수치 예제

다음과 같이 단일 소화조에서 3 개의 feedstock을 이용하여 가스를 생산하는 시스템에 대한 일정계획 문제를 생각해 보자. 한편 계산상의 편의를 위하여 기간의 간격은 5 일, batch의 교환시간(d)은 1일, 계획기간(T)은 50일인 것으로 가정하자. 또한 각 feedstock에 관한 자료가 표 1과 같이 주어졌다고 가정하자.

표 1을 보면 feedstock 1을 이용하여 가스를 생산할 수 있는 최대 기간은 50일(T)이고, feedstock 2는 15일 이후에 이용 가능하

표 1. 예제의 각 feedstock별 자료

Feedstock	g(t)		h(s)		도착 시간	Batch 수
	i	α_i	β_i	γ_i	r_i	n_i
1		28.0	0.1	0.021	0	2
2		13.2	0.09	0.015	15	2
3		18.0	0.12	0.02	25	1

므로 feedstock 2를 이용한 가스의 최대 생산기간은 35일이다. 마찬가지로, feedstock 3을 이용한 가스의 최대 생산기간은 25일이 된다.

단계 1에서 각 batch들의 초기 처리순서는 각 batch의 feedstock 번호를 작은 순서대로 정렬하여 얻으며, $S = \langle 1, 1, 2, 2, 3 \rangle$ 이 된다. 한편 각 batch들의 초기 처리순서 $S = \langle 1, 1, 2, 2, 3 \rangle$ 와 첫번째 batch 부터 i번째 batch 까지의 총 체류시간을 나타내는 상황 변수 u_i 가 주어진 경우에, 3 종류의 feedstock으로 부터 얻을 수 있는 stage i에서의 최대 가스생산량 $F_i(u_i)$ 와 그에 대응되는 최적 결정 x_i 는 DPP에 의해 얻을 수 있으며 그 결과를 표 2에 수록하였다.

표 2의 결과를 보면 각 batch들의 처리 순서 $S = \langle 1, 1, 2, 2, 3 \rangle$ 가 주어진 경우에 51.07 만큼의 가스 생산량을 얻을 수 있는 것을 나타내고 있다. 또한 각 batch들의 최적 체류시간, t_i ,은 표 2의 결과를 이용하여 얻을 수 있으며, (6)의 back-substitution 관계를 이용하여 얻은 각 batch들의 최적 체류시간을 표 3에 수록하였다.

단계 2에서 각 batch들의 체류시간을 고정 한 후 adjacent pairwise interchanges 방법에 의해 각 batch들의 처리순서를 구하면 $S = \langle 1, 1, 2, 3, 2 \rangle$ 로 변화한다. 한편 특기할 사항은 각 batch들의 체류시간은 고정되나 처리순서

표 2. 처리순서 S = < 1, 1, 2, 2, 3 >에 대한 최대 가스 생산량 및 최적 결정

시간	최대 가스 생산량 & 최적 결정										
	u_1	$F_1(u_1)$	x_1	$F_2(u_2)$	x_2	$F_3(u_3)$	x_3	$F_4(u_4)$	x_4	$F_5(T)$	x_5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	9.04	5	9.04	0	0	0	0	0	0	0	0
10	16.27	10	17.18	5	0	0	0	0	0	0	0
15	20.66	15	23.69	10	23.69	0	23.69	0	0	0	0
20	23.32	20	29.46	10	29.46	0	29.46	0	0	0	0
25	24.93	25	32.53	15	33.11	5	33.11	0	0	0	0
30	25.91	30	35.73	15	36.16	10	36.49	5	0	0	0
35	26.50	35	37.67	20	38.87	5	39.32	10	0	0	0
40	26.86	40	38.85	25	41.50	10	41.92	10	0	0	0
45	27.08	45	39.70	25	43.17	15	44.22	10	0	0	0
50	27.21	50	40.34	30	44.57	15	46.46	10	51.07	15	15

표 3. 처리순서 S = < 1, 1, 2, 2, 3 >에 대한 각 batch의 최적 체류시간

최적 체류시간 (ti)	
$u_5 = T = 50;$	$t_5 = x_5(50) = 15$
$u_4 = T - t_5 = 50 - 15 = 35;$	$t_4 = x_4(35) = 10$
$u_3 = T - t_5 - t_4 = 25;$	$t_3 = x_3(25) = 5$
$u_2 = T - t_5 - t_4 - t_3 = 20;$	$t_2 = x_2(20) = 10$
$u_1 = T - t_5 - t_4 - t_3 - t_2 = 10;$	$t_1 = x_1(10) = 10$

가 변화되었으므로 $t_1 = 10, t_2 = 10, t_3 = 5, t_4 = 15, t_5 = 10$ 이 된다. 위와 같은 경우에 총 가스 생산량은 52.43으로 증가하게 된다.

단계 3에서 S = < 1, 1, 2, 3, 2 >에 대한 각 batch들의 최적 체류시간을 다시 계산하며, 상황 변수 u_i 가 주어진 경우에 DPP에 의해 얻어진 stage i에서의 최대 가스생산량 $F_i(u_i)$ 와 그에 대응되는 최적 결정 x_i 를 표 4에 수록하였다. 또한 S = < 1, 1, 2, 3, 2 >가 주어진 경우에 (6)의 back-substitution 관계를

이용하여 얻은 각 batch들의 최적 체류시간, t_i 을 표 5에 수록하였다. 그런데 단계 3에서의 해는 단계 2에서의 해와 동일하므로 여기서 모든 과정을 끝낸다.

5. 수치 실험

본 논문에서 제안된 발전적 기법의 효율성 및 성능평가를 위하여 다음과 같이 실제 상황을 가장 잘 반영한다고 생각되는 문제에 대하여 수치실험을 수행하였다. 계획기간(T)은 1년, batch의 교환시간(d)은 1일, Feedstock의 수는 3으로 선택하였다. 첫번째 batch의 도착시간(t_1)은 0이고, t_2 는 $[T/4, T/2]$ 사이의 시간공간, t_3 는 $[T/2, 0.75 T]$ 사이의 시간공간에서 랜덤하게 선택되었다. 일반적으로 한 batch의 소화조에서의 체류시간은 30일에서 45일 정도이므로 계획기간 동안의 필요한 batch 수는 대략 8 내지 12이나, 총 나열기법(exhaustive enumeration method)에 의

표 4. 처리순서 $S = \langle 1, 1, 2, 3, 2 \rangle$ 에 대한 최대 가스 생산량 및 최적 결정

시간	최대 가스 생산량 & 최적 결정										
	u_1	$F_1(u_1)$	x_1	$F_2(u_2)$	x_2	$F_3(u_3)$	x_3	$F_4(u_4)$	x_4	$F_5(T)$	x_5
0	0	0	0	0	0						
5	9.04	5	9.04	0							
10	16.27	10	17.18	5							
15	20.66	15	23.69	10	23.69	0					
20	23.32	20	29.46	10	29.46	0					
25	24.93	25	32.53	15	33.11	5	33.11	0			
30	25.91	30	35.73	15	36.16	10	39.83	5			
35	26.50	35	37.67	20	38.87	5	44.76	10			
40	26.86	40	38.85	25	41.50	10	47.46	15			
45	27.08	45	39.70	25	43.17	15	49.14	15			
50	27.21	50	40.34	30	44.57	15	51.99	20	52.43	10	

표 5. 처리순서 $S = \langle 1, 1, 2, 3, 2 \rangle$ 에 대한 각 batch의 최적 체류시간

최적 체류시간 (t_i)	
$u_5 = T = 50;$	$t_5 = x_5(50) = 10$
$u_4 = T - t_5 = 50 - 5 = 40;$	$t_4 = x_4(40) = 15$
$u_3 = T - t_5 - t_4 = 25;$	$t_3 = x_3(25) = 5$
$u_2 = T - t_5 - t_4 - t_3 = 20;$	$t_2 = x_2(20) = 10$
$u_1 = T - t_5 - t_4 - t_3 - t_2 = 10;$	$t_1 = x_1(10) = 10$

해서 구할 수 있는 최적해와 발견적 기법의 해를 비교하기 위하여 총 batch의 수는 6, 7, 8으로 선택하였다. 총 나열기법에 의한 최적해는 모든 가능한 batch 들의 처리순서를 나열한 후, 각 처리순서에 대하여 모든 batch의 최적 체류시간을 DPP를 이용하여 구하면 얻을 수 있다. 각 batch 수에 대하여 20 개의 문제가 랜덤하게 발생되었으며, 따라서 발생된 총 문제의 수는 60이다.

총 나열기법과 제안된 발견적기법의 계산시간은 총 batch의 수와 계획기간을 균등

간격으로 세분한 격자점(grid point)의 수에 의해서 크게 영향을 받는다. 한편 계획기간 동안의 격자점의 수가 증가함에 따라 총 나열기법의 계산시간은 기하급수적으로 증가하므로, 정해진 계산시간 내에 발견적 기법에 의한 해와 최적해를 동시에 구하기 위하여 계획기간 동안의 격자점의 수를 50으로 선택하였다. 총 나열기법과 제안된 발견적기법의 과정들은 모두 MS-FORTRAN을 이용하여 프로그램이 작성되었으며, 50 MHz 80486 개인용 컴퓨터로 해를 구하였다. 또한 총 나열기법의 계산시간은 60 분을 초과하지 않도록 하였다. 위와 같이 발생된 문제에 대한 발견적 기법의 계산시간 및 수행도에 관한 평가 결과를 표 6에 수록하였다.

표 6은 위와 같이 발생된 문제에 대하여 발견적 기법 및 총 나열기법의 계산시간, 발견적 기법에 의한 해의 최적해에 대한 근접도, 발견적 기법에 의한 최적해의 발견 수를 보여주고 있다. 표 6의 결과를 보면 총 batch

표 6. 발견적 기법의 계산시간 및 수행도 평가 결과

총 batch의 수	계산시간 ¹ 발견적 기법/총 나열기법	근접도 ²	최적해 발견 ³
6	0.12 / 4.27	99.7 %	18
7	0.17 / 13.52	99.5 %	17
8	0.24 / 48.97	99.1 %	14

계산시간: 편집 및 연결 시간을 제외한 평균 계산시간 (분).

근접도²: 발견적 기법의 해를 최적해로 나눈 비율.

최적해 발견³: 20 개의 발생 문제 중 발견적 기법에 의해 발견된 최적해의 수.

의 수가 증가함에 따라 발견적 기법의 계산 시간은 완만하게 증가하나 총 나열기법의 계산 시간은 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 표 6을 보면 발견적 기법에 의한 해의 최적해에 대한 근접도는 총 batch의 수가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있으나 발생된 문제에 대하여 평균 99.4 %의 근접도를 나타내며 가장 나쁜 근접도도 98.6 %인 것으로 나타났다. 따라서 실제 문제의 총 batch 수가 최대 12인 것을 감안하면, 일반적으로 제안된 발견적 기법의 근접도는 우수한 것으로 평가할 수 있다. 또한 제안된 발견적 기법의 해는 총 60 개의 검사 문제 중 49 (81.7 %) 개의 문제에서 최적해와 일치하였다. 한편 계획기간은 1 년이므로 계획기간 동안의 격자점의 수는 360이 되는 것이 바람직하나, batch의 수가 8인 경우에도 격자점의 수가 53을 초과하면 총 나열기법의 평균 계산시간이 1 시간을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 실제 문제에 총 나열기법을 적용하기는 힘든 것으로 사료되며, 위의 결과와 같은 제안된 발견적 기법의 수행도와 계산시간을 고려하

여 볼 때 제안된 발견적 기법은 실제 문제를 해결하는 하나의 유력한 방법이라고 결론지을 수 있다.

6. 결론

본 논문은 각 batch의 체류시간과 체류시간이 동시에 의사결정 변수가 되는 새로운 유형의 일정계획 문제를 다루었다. 본 논문에서 다루는 문제는 부패 물질에 대한 생산 및 재고관리 문제로 분류될 수 있으며, 도착시점이 상이한 여러 종류의 feedstock을 대상으로 각 batch의 최적 체류시간 뿐만 아니라 최적 처리순서를 동시에 결정함으로써 정해진 계획 기간 동안의 가스 생산량을 최대화하는 것을 목적으로 한다. 이러한 문제는 각 batch의 체류시간 결정과 처리순서의 결정을 분리시킬 수 없는 풀기 어려운 문제가 된다. 제안된 발견적 기법은 가능한 초기 일정계획에서 출발하여 동적 계획법과 adjacent pairwise interchanges 방법을 이용하여 개선된 일정계획을 찾아가는 하나의 개선기법으로서, 우리는 여러 검사 문제를 통하여 제안된 발견적 기법이 좋은 결과를 나타냄을 확인하였다.

본 논문에서는 각 feedstock의 batch 수가 알려진 것으로 가정하였으나, 실제 문제에서는 각 batch의 구입시 상당한 경비가 소요되므로 한 소화조에서 처리하는 각 feedstock별 batch 수가 의사결정 변수가 될 수 있다. 따라서 각 feedstock의 batch 수가 의사결정 변수가 되는 문제에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 논문에서는 각 feedstock의 도착시간이 알려진 것으로 가정하였으나,

실제로는 모든 feedstock의 수확시기(도착시간)가 확률변수이다. 그러므로, 각 feedstock의 수확시기가 확률변수인 경우에 다수의 feedstock을 이용하는 메탄가스 생산시스템의 일정계획 문제는 추계적 과정(stochastic process)으로 취급될 수 있는 문제로서 이에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Chynoweth, D. P., Ghosh, S., and Klass, D. L., *Anaerobic Digestion of Kelp*, Chapter 17 in *Biomass Conversion Process for Energy and Fuels*, Plenum Press, New York, 315-318 (1981).
- [2] Curry, G. L., and Deuermeyer, B. L., "Optimal Scheduling of Multiple Feedstock Batch Biogas Production Systems," *IIE Transactions* 18, 367-373(1986).
- [3] Deuermeyer, B. L., Lee, H., and Curry, G. L., "Optimal Residence Times for a Batch Biomass-to-Methane Conversion System," *Management Science* 32, 1104-1113 (1986).
- [4] Feldman, R. M., Deuermeyer, B. L., and Curry, G. L., "A Dynamic Programming Optimization Procedure for a Two-Product Biomass-to-Methane Conversion System," *J. Math. Anal. & Appl.* 125, 203-212 (1987).
- [5] Hiler, E. A., and Isaacson, H. R., "Sorghums for Methane Production," *Proceeding of the International Gas Research Conference*, Gas Research Institute, Chicago, Illinois, 605-612 (1984).
- [6] Hill, D. T., "Design Parameters and Operating Characteristics of Animal Waste Anaerobic Digestion Systems. I. Swine and Poultry," *Agricultural Wastes* 5, 157-178 (1983).
- [7] Hill, D. T., "Design Parameters and Operating Characteristics of Animal Waste Anaerobic Digestion Systems. II. Beef," *Agricultural Wastes* 5, 205-210 (1983).
- [8] Hill, D. T., "Economically Optimized Design of Methane Fermentation Systems for Swine Production Facilities," *ASAE Transactions* 27, 525-552(1984).
- [9] Isaacson, H. R., Hayes, T. D., and Chynoweth D. P., "Pipeline Quality Methane from Biomass and Wastes," *Proceeding of the Energy Technology Conference XI*, Washington, D.C., 1984.