Journal of the Korean
OR/MS Society
Vol.15, No.1, June, 1990

두 개의 동일한 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제의 경제적 운영에 관한 연구*

김 봉 진**

Economic Scheduling of Multiple Feedstock Biogas Production Systems on Two Identical Digesters

Bongjin Gim**

Abstract

Biomass to methane production is a good supply method of substitutable energy resources. The economic viability of these systems depends a great deal on cost effective production methods and facilities. The operational problem is to determine the time to allocate to each batch of several feedstocks for each digester and to determine the number of batches for each digester so as to maximize biogas production for two identical digesters over a fixed planning horizon. This paper provides an efficient approximation procedure which is based on the decomposition of the problem and the analysis of incremental gas production function for each feedstock. The computational experience for the heuristic procedure was also reported.

* 이 논문은 1989년도 한국과학재단의 신진 연구비에 의하여 연구되었음.
** 단국대학교, 산업공학과

1. 서 론

재생 에너지원은 두 차례의 석유파동을 계기로 하여 많은 관심을 끌게 되었다. 최근에는 혐기소화(anaerobic digestion) 방법에 의한 바이오매스나 농업 폐기물로 부터 메탄가스를 생산하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 우리나라에서는 주로 축분에 의한 메탄가스 생산에 초점을 맞추어 연구하여 왔으나 미국에서는 사탕수수로 부터의 메탄가스 생산에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국에서는 이러한 재생 에너지원에 의한 메탄가스 생산량이 총 천연가스 수요량의 25%를 차지할 수 있을 것으로 보고되었다[8].

바이오매스로 부터 메탄가스를 생산하는 데에는 기본적으로 두가지 방법이 있다. 첫번 째 방법은 혐기소화이고 다른 방법은 열화학적 가스화(thermal gasfication)인 데, 그 중에서 혐기소화 방식은 Gas Research Institute 등 여러 기관에서 중점을 두어 연구하여 왔다. 주로 batch생산에 의존하는 혐기 소화 방식은 소화조에 바이오매스와 돈분과 같은 부가물을 넣고 소화조를 밀봉하여 메탄가스를 생산하는 방법으로서 대규모의 메탄가스 생산체제에서 많이 사용된다. 가스는 미생물의 분해에 의해 생산되며 시간의 흐름에 따라 단위가스 생산량은 감소한다.

대규모의 batch 생산체제에서는 생산설비의 운영에 따른 여러가지 의사결정이 필요하게 된다. 사탕수수, kelp, napier grass 등과 같은 feedstock들은 각기 동일한 여러 개의 batch로 이루어져 있으며, 이러한 batch들의 소화조 내에서의 처리 개시시간 및 체류시간은 중요한 의사결정 변수이다. 소화조의 용량은 한정되어 있고 또한 각 feedstock의 수확시기가 상이하기 때문에 바이오매스의 저장은 필수적이다. 저장된 바이오매스는 시간의 흐름에 따라 질이 저하되기 때문에 각 batch의 처리 개시시간 및 체류시간은 총 메탄가스 생산량에 큰 영향을 미치게 된다. 사탕수수와 같이 가스 생산량이 많은 feedstock은 여름과 같은 생장기간 동안에 재배하여 저장설비에 보관한 다음에 필요할 때마다 사용하게 되는 데, 이것은 높은 고정투자비와 많은 부패 손실을 초래한다. 따라서 napier grass와 같이 가스 생산량은 적지만 필요할 때마다 생산할 수 있는 보조 feedstock을 사탕수수와 같은 주 feedstock과 병행하여 사용하는 것이 경제적인 경우가 대부분이다. 또한 바이오매스의 일반적인 특성은 각 feedstock들이 저장되는 동안에 질이 저하되는 부패현상을 나타내는 점이다. 따라서 silo나 bale같은 저장방법에 따라서도 가스 생산량은 영향을 받는다.

본 연구와 관련하여 Hill[5, 6] 등을 위시하여 Chynoweth, Curry, Deuermeyer, Feldman, Hiler, Isaacson[2, 3, 4, 5, 8]과 같은 다수의 연구자 들이 바이오매스로 부터의 메탄가스 생산방법에 대한 연구를 하였다. Hill[6, 7]은 feedstock의 저장 중에 일어나는 부패현상을 무시하고 각 batch의 최적체류시간을 결정하는 방법을 개발하였다. Deuermeyer[3] 등은 feedstock의 부패현상을 고려하여 한 종류의 feedstock으로 이루어진 여러 batch의 최적체류시간을 구하는 방법에 대하여 연구하였고, Curry와 Deuermeyer[2]

는 여러 개의 feedstock이 존재할 때 각 batch의 최적 체류시간의 결정 방법에 대한 연구를 하였다. Feldman〔4〕 등은 두 개의 feedstock에 대한 각 batch의 최적 처리순서와 체류시간을 구하는 모형을 동적 계획법을 이용하여 개발하였다.

위의 모든 연구는 소화조가 하나인 메탄가스 생산체제에 관한 연구이며, 본 논문에서는 도착 시점이 다른 여러 개의 feedstock이 이용 가능할 때 각 batch의 저장시 발생하는 부패현상을 고려하여 두 개의 동일한 소화조를 경제적으로 운영하는 모델을 개발하였다. 본 논문은 Curry와 Deuermeyer〔2〕의 하나의 소화조에 대한 연구를 두 개의 동일한 소화조에 대한 연구로 확장시킨 것으로서, 각 소화조의 feedstock별 처리 batch 수와 각 batch의 최적 체류시간을 구함으로써 정해진 계획기간 동안의 가스 생산량을 최대화하는 것을 목적으로 한다.

다음 장에서는 두개의 동일한 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제에 대한 문제를 수리 모형으로 정립하였고, 3장에서는 분해를 통하여 위와 같은 문제를 계층적 구조로 변환하였다. 4장에서는 3장의 분해를 이용한 휴리스틱 해법을 예제를 통하여 서술하였다. 또한 5장에서는 휴리스틱 해법의 계산 결과를 설명하였으며 마지막으로 결론을 맺었다.

2. 수리 모형

도착(수확)시간이 다른 여러 개의 feedstock이 이용 가능할 때 두개의 동일한 소화조를 운영하여 정해진 계획시간〔O, T〕 내에 최대 가스 생산량을 얻기 위하여는 각 소화조의 feedstock별 처리 batch 수와 각 batch의 최적 체류시간을 결정하여야 한다. 문제의 정형화를 위하여 다음과 같은 기호를 사용하기로 하고 다음은 모두 알려진 사항으로 가정하자.

기 호

N=feedstock의 수,

a_j=feedstock j의 도착 시간,

n_j=feedstock j의 batch 수,

d=batch의 교환을 위해 소요되는 setup시간,

$g_j(t)$=체류시간이 t로 주어졌을 때 feedstock j형의 batch의 가스생산 함수,

$$g_j(t)=\alpha_j(1-e^{-\beta_j(t-d)^+}),$$

여기서 α_j, β_j는 feedstock j의 바이오매스-가스 변환 계수이고〔x〕$^+$는 0와 x의 최대치를 나타낸다.

$h_j(t)$=저장시간이 t로 주어졌을 때 feedstock j형의 batch의 부패손실 함수,

$$h_j(t)=e^{-\gamma_j t}$$

여기서 γ_j는 feedstock j의 부패손실 계수이다. Feedstock 들은 도착시간에 따라 순서가 정해지며 처음 feedstock의 도착시간 a_1은 0로 하였고, 만약 $i<j$ 이면 $a_i<a_j$가 되도록 하였다. 또한 모든 feedstock에는 부분 batch가 없는 것으로 가정하였다. 즉 동일한 feedstock의 모든 batch는 크기가 모두 같은 것으로 가정하였다.

두개의 동일한 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제의 최적운영에 관한 의사결정 변수들을 다음과 같이 정의하였다.

n_{ij}=소화조 i에서 처리되는 feedstock j형의 batch 수,

t_{ijk}=소화조 i에서 처리되는 feedstokc j형의 batch중 k번째로 처리되는 batch의 소화조 내에서의 체류 시간.

그러면 소화조 i에서 처리되는 feedstock j형의 batch중 k번째로 처리되는 batch의 소화조 내에서의 처리 개시 시간은 $\sum_{p=1}^{j}\sum_{q=1}^{k}t_{ipq}-t_{ijk}$이고 도착시간은 a_j이므로, 해당 batch의 가스 생산량은 다음과 같다 :

$$g_j(t_{ijk})h_j(\sum_{p=1}^{j}\sum_{q=1}^{k}t_{ipq}-t_{ijk}-a_j).$$

이것을 모든 소화조, 모든 batch에 대하여 합하면 다음과 같은 총 가스생산량을 나타내는 목적함수가 얻어진다 :

$$\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{n_{ij}}g_j(t_{ijk})h_j(\sum_{p=1}^{j}\sum_{q=1}^{k}t_{ipq}-t_{ijk}-a_j).$$

그러면 도착시점이 다른 여러 개의 feedstock이 이용 가능할 때의 두개의 동일한 소화조를 최적으로 운영하는 문제에 대한 수리식은 다음과 같다 :

$$(\mathrm{P})\ \text{maximize}\ \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{n_{ij}}g_j(t_{ijk})h_j(\sum_{p=1}^{j}\sum_{q=1}^{k}t_{ipq}-t_{ijk}-a_j).$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{n_{ij}}t_{ijk}=T,\quad i=1,2, \qquad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{2}n_{ij}=n_j,\quad j=1,2,\cdots,N, \qquad (2)$$

$$\sum_{p=1}^{j}\sum_{q=1}^{k}t_{ipq}-t_{ijk}\geq a_j,\quad \forall\ i,j,k,$$

$$t_{ijk}\geq 0,\quad \forall\ i,j,k, \qquad (4)$$

$$n_{ij}=0,1,\cdots,n_j,\quad \forall\ i,j, \qquad (5)$$

여기서 제약식 (1)은 소화조의 총 처리시간이 T임을 나타내고, 제약식 (2)는 모든 batch가 소화조 1이나 소화조 2에서 처리되어야 하는 조건을 나타낸다. 제약식 (3)은 소화조 i에서 처리되는 feedstock j형의 batch 중에서 k번째로 처리되는 batch의 처리 개시시간이 해당 feedstock의 도착시간보다 늦어야 되는 조건을 나타낸다.

3. 분 해

두 개의 동일한 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제의 최적화 문제는 각 batch의 소화조별 처리갯수와 체류시간을 결정하는 문제이다. 문제 (P)는 많은 수의 의사결정 변수를 갖고있기 때문에 문제 (P)에 대한 최적해를 직접 구하는 데에는 많은 시간이 소요된다. 그러나 의사결정 변수를 분해(decompose) 함으로써 문제 (P)를 계층적 의사결정 문제로 변환할 수 있다. 즉 높은 수준에서는 각 소화조에서 사용되는 모든 feedstock의 생산기간을 설정하고, 낮은 수준에서는 각 소화조에서 사용되는 모든 feedstock의 생산기간이 주어진 것으로 가정하여 각 batch에 대한 체류시간을 결정하는 계층적 의사결정 형태로 문제 (P)를 변환시킬 수 있다.

T_{ij}를 소화조 i에서 처리되는 feedstock j의 총 체류시간이라 정의하면 다음과 같은관계식이 성립된다 :

$$T_{ij}=\sum_{k=1}^{n_{ij}}t_{ijk}. \qquad (6)$$

또한 Y_{ij}를 소화조 i에서 feedstock j형의 batch가 처음으로 처리되는 시간이라 정의하면 다음의 관계식이 성립한다 :

$$\begin{aligned}
&Y_{i1} = a_1 = 0,\ \ T_{i1} \geq 0; \\
&Y_{i2} = Y_{i1} + T_{i1} \geq a_2,\ \ T_{i2} \geq 0; \\
&\ \vdots \\
&Y_{ij} = Y_{i(j-1)} + T_{i(j-1)} \geq a_j,\ \text{ and } T_{ij} \geq 0, \\
&\text{for all } i \text{ and } j \geq 2.
\end{aligned} \tag{7}$$

특기할 사항은 Y_{ij}는 T_{ij}의 종속변수로서 모든 T_{ij}가 정해지면 자동적으로 결정된다. 그러면 각 소화조별 이용 가능한 시간은 T이므로 다음 식을 만족시켜야 한다 :

$$\sum_{j=1}^{N} T_{ij} = T,\ \ i = 1, 2. \tag{8}$$

$P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij})$를 Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij}가 주어졌을때의 소화조 i에서의 feedstock j형의 최대 가스 생산량으로 정의하면 낮은 수준의 문제 (LP)는 $P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij})$를 얻을 수 있는 t_{ijk}들을 결정하는 문제로서 다음 수리식에 의해 구할 수 있다. 참고로 t_{ijk}는 소화조 i에서 처리되는 feedstock j형의 batch중 k번째로 처리되는 batch의 체류 시간을 나타낸다.

$$\text{(LP)}\ P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij}) = \max \sum_{k=1}^{n_{ij}} g_j(t_{ijk})\, h_j\Big(\sum_{q=1}^{k-1} t_{ijq} + Y_{ij} - a_j\Big)$$

$$\text{subject to}\quad \sum_{k=1}^{n_{ij}} t_{ijk} = T_{ij}, \quad t_{ijk} \geq 0,$$

여기서 지표(index)를 1에서 0까지 더한 양은 0가 되는 것으로 간주하였다. 문제(LP)는 knapsack 형의 문제로서 동적 계획법 등을 이용하여 쉽게 해를 구할 수 있다.

높은 수준의 문제(HP)는 모든 소화조 i와 모든 feedstock j에 대하여 총 가스 생산량을 최대화할 수 있는 Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij}들을 구하는 문제로서 다음 수리식에 의하여 얻을 수 있다 :

$$\text{(HP)}\ \text{maximize} \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{N} P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij})$$

$$\begin{aligned}
\text{subject to}\quad & Y_{i1} = 1,\ \ i = 1, 2 \\
& Y_{ij} = Y_{i(j-1)} + T_{i(j-1)},\ \forall\ i, j, \\
& \sum_{j=1}^{N} T_{ij} = T,\ \ i = 1, 2, \\
& Y_{ij} \geq a_j,\ \ \forall\ i, j, \\
& T_{ij} \geq 0,\ \ \forall\ i, j.
\end{aligned}$$

4. 휴리스틱

4.1 해법

문제(P)는 제약식이 선형이고, 목적함수가 비볼록형인 비선형 정수 계획법 문제로서 실제 일어나는 문제에 대한 최적해를 구하는 것은 불가능하다. 또한 문제(P)를 분해하여도 위와 같은 어려움은 그대로 남게 된다. 그러므로, 최적해에 근사한 값을 얻게해 주는 휴리스틱(heuristic) 방법에 의한 메탄가스 생산 체제의 운영이 필요하다. 본 논문에서는 3장의 분해방법을 이용한 휴리스틱 해법을 개발하였으며, 휴리스틱 해법의 절차는 다음과 같다.

단계 1) n_{1j}와 n_{2j}가 가능하면 동일하도록 n_j를 배분한다. 즉, n_j가 짝수이면 $n_{1j} = n_{2j} = n_j/2$가 되도록 한다. 만약 n_j가 홀수이면 다음 법칙에 의하여 n_j를 배분한다. 여기서 집합 S를 n_j가 홀수인 지표의 집합으로 정의하자. 그러면 n_{1j}와 n_{2j}는 다음과 같이 결정된다.

$n_{1j}=[(n_j+1)/2]$, $n_{2j}=[n_j/2]$, 만약 S 내의 지표 j가 홀수번 째일 때,

$n_{1j}=[n_j/2]$, $n_{2j}=[(n_j+1)/2]$, 만약 S 내의 지표 j가 짝수번 째일 때,

여기서 $[x]$는 x의 최대 정수를 나타낸다. 예를 들어 $n_1=3$, $n_2=2$, $n_3=4$, $n_4=5$이면, $S=\{1, 4\}$이고 n_{ij}는 다음과 같이 정해진다.

$n_{11}=2$, $n_{21}=1$, $n_{12}=1$, $n_{22}=1$,

$n_{13}=2$, $n_{23}=2$, $n_{14}=2$, $n_{24}=3$.

단계 2) 초기치 T_{ij}들을 다음과 같이 선정한다.

$$T_{11} = T_{21} = a_2 - a_1 = a_2,$$
$$\vdots$$
$$T_{1j} = T_{2j} = a_{j+1} - a_j,$$
$$\vdots$$
$$T_{1N} = T_{2N} = T - a_N.$$

위와 같은 T_{ij} 들은 제약식 (8)을 만족하므로 가능한 해이며, T_{ij}가 모두 정해지면 관계식 (7)에 의하여 Y_{ij}들은 자동으로 결정된다.

단계 3) 앞의 단계에서 주어진 n_{ij}, T_{ij}, Y_{ij}를 입력자료로 하여 낮은 수준의 문제(LP)를 푼다. 그러면 모든 i와 j에 대하여 대응되는 $P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij})$와 t_{ijk}가 얻어진다.

단계 4) 적은 양의 증분 시간량 t에 대하여 $T_{ij}^+ = T_{ij}+t$, $T_{ij}^-=T_{ij}+t$로 정의하자. 또한 n_{ij}는 그대로 두고, T_{ij} 대신 T_{ij}^+를 대입하여 문제(LP)를 풀어 얻어지는 가스 생산량 $P_{ij}^+(Y_{ij}^+, T_{ij}^+, n_{ij}^+)$, T_{ij}^-를 대입하여 얻어지는 가스 생산량을 $P_{ij}^-(Y_{ij}^-, T_{ij}^-, n_{ij})$라 표시하자. 그러면 모든 i와 모든 j에 대하여 C_{ij}^+, C_{ij}^-를 다음 식에 의하여 계산한다.

$$C_{ij}^+=P_{ij}^+(Y_{ij}^+, T_{ij}^+, n_{ij})-P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij}),$$
$$C_{ij}^-=P_{ij}(Y_{ij}, T_{ij}, n_{ij})-P_{ij}^-(Y_{ij}^-, T_{ij}^-, n_{ij}).$$

만약 T_{ij}를 T_{ij}^+로 증가시키는 것이 불가능할 때에는 해당 C_{ij}^+를 0로 놓고, T_{ij}를 T_{ij}^-로 감소시키는 것이 불가능할 경우에는 해당 C_{ij}^-를 양의 큰 수 M으로 놓는다.

단계 5) 각 소화조 i에 대하여 D_{iq}^+, D_{ir}^-를 다음 식에 의해 얻는다.

$$D_{iq}^+=\max\{C_{ij}^+ : 1\leqq j\leqq N\},$$
$$D_{ir}^- =\min\{C_{ij}^- : 1\leqq j\leqq n,\ j\neq q\}.$$

만약 $D_{iq}^+\leqq D_{ir}^-$이면, 소화조 i에 대한 할당을 끝내고 현재의 n_{ij}와 t_{ijk}를 소화조 i에 대한 최종해로 정한다. 만약 $D_{iq}^+ > D_{ir}^-$이면, $T_{iq}=T_{iq}+t$, $T_{ir}=T_{ir}-t$, $T_{ij}=T_{ij}$ for all $j\neq q, r$로 조정하고 단계 3으로 되돌아 간다.

만약 모든 소화조에 대하여 최종해가 얻어지면 여기서 모든 과정을 끝낸다.

위와 같은 휴리스틱 해법은 단계 5의 정지조건을 만족시킬 때까지 T_{ij}를 조정해 나가면서 낮은 수준의 문제(LP)를 계속 반복하여 푸는 것이다. 그런데, 동적 계획법을 이용하여 문제(LP)를 풀기 위해서는 $0(n_{ij}T_{ij})$의 시간이 소요되므로, 이것은 유사 다항식(pseudo-polynomial) 형태를 취하게 된다. 따라서 polynomial time 내에 문제(LP)를 풀기 위해서는 연속형 변수들인 T_{ij}들을 이산화하는 것이 필요하므로, T_{ij}를 각기 동일한 간격의 격자점들(grid points)로 나타낼 수 있는 것으로 가정하였다.

4.2 예제

다음과 같이 계획기간 $T=50$, setup시간 $d=0$이고, 세 개의 feedstock으로 이루어진 문제를

표 1. 각 feedstock에 대한 사항

feedstock	$g_i(t)$		$h_i(t)$	도착 시간	batch 수
i	α_i	β_i	r_i	a_i	n_i
1	24.0	0.08	0.012	0	4
2	12.0	0.10	0.015	10	4
3	18.0	0.12	0.02	30	2

생각해 보자. 각 feedstock에 대한 사항들은 표1에 나타냈으며, 각 batch의 체류시간은 5일 간격으로 제한하였다.

위와 같은 예제에 대한 휴리스틱 해법의 5단계를 한번 반복한 결과는 다음과 같다.

단계 1) $n_{11}=n_{21}=2$, $n_{12}=n_{22}=2$, $n_{13}=T_{23}=1$.

단계 2) $T_{11}=T_{21}=10$, $T_{12}=T_{22}=20$, $T_{13}=T_{23}=20$.

단계 3) 단계 2의 T_{ij}들을 입력으로 하여 관계식 7에 대입하면, $Y_{11}=Y_{21}=0$, $Y_{12}=Y_{22}=10$, $Y_{13}=Y_{23}=30$이다. 이러한 n_{ij}, T_{ij}, Y_{ij}들을 입력자료로 하여 문제(LP)를 풀면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$t_{111}=t_{211}=5$, $t_{112}=t_{212}=5$, $t_{121}=t_{221}=10$, $t_{122}=t_{222}=10$, $t_{131}=t_{231}=20$,

$P_{11}(Y_{11}, T_{11}, n_{11})=P_{21}(Y_{21}, Y_{21}, n_{21})=13.216$,

$P_{12}(Y_{12}, T_{12}, n_{12})=P_{22}(Y_{22}, T_{22}, n_{22})=10.376$,

$P_{13}(Y_{13}, T_{13}, n_{13})=P_{23}(Y_{23}, T_{23}, n_{23})=16.367$,

초기 해의 총 가스 생산량$=77.234$.

단계 4) 편의상 $P_{ij}^{+}(Y_{ij}^{+}, T_{ij}^{+}, n_{ij})=P_{ij}^{+}$, $P_{ij}^{-}(Y_{ij}^{-}, T_{ij}^{-}, n_{ij}^{-})=P_{ij}^{-}$로 표시하기로 하자. 그러면, 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$T_{11}^{+}=T_{21}^{+}=15$, $T_{11}^{-}=T_{21}^{-}=5$, $T_{12}^{+}=T_{22}^{+}=25$,

$T_{12}^{-}=T_{22}^{-}=15$, $T_{13}^{+}=T_{23}^{+}=25$, $T_{13}^{-}=T_{23}^{-}=15$,

$P_{11}^{+}=P_{21}^{+}=16.771$, $P_{11}^{-}=P_{21}^{-}=7.912$,

$P_{12}^{+}=P_{22}^{+}=11.015$,

$P_{12}^{-}=P_{22}^{-}=13.216$, $P_{13}^{+}=P_{23}^{+}=17.104$,

$P_{13}^{-}=P_{23}^{-}=15.025$.

위와 같은 P_{ij}^{+}, P_{ij}^{-}를 이용하여 다음과 같은 C_{ij}^{+}, C_{ij}^{-}를 얻는다.

$C_{11}^{+}=C_{21}^{+}=3.555$, $C_{11}^{-}=C_{21}^{-}=M$,

$C_{12}^{+}=C_{22}^{+}=0.639$, $C_{12}^{-}=C_{22}^{-}=1.054$,

$C_{13}^{+}=C_{23}^{+}=0$, $C_{13}^{-}=C_{23}^{-}=1.342$.

단계 5) $D_{11}^{+}=D_{21}^{+}=3.555$, $D_{12}^{-}=D_{22}^{-}=1.054$. $D_{11}^{+}>D_{12}^{-}$이므로 $T_{11}=15$, $T_{12}=15$, $T_{13}=20$으로 조정한다. 마찬가지로, 소화조 2의 feedstock 시간을 $T_{21}=15$, $T_{22}=15$, $T_{23}=20$으로 조정하고 단계 3으로 되돌아간다.

위와 같은 과정을 휴리스틱 해법에 의해 계속 반복하면 다음과 같은 최종 해를 얻는다.

$n_{11}=n_{21}=2$, $n_{12}=n_{22}=2$, $n_{13}=n_{23}=1$,

$t_{111}=t_{211}=10$, $t_{112}=t_{212}=10$, $t_{121}=t_{221}=5$,

$t_{122}=t_{222}=10$, $t_{131}=t_{231}=15$,

총 가스 생산량=81.156.

5. 계산 결과

4장의 휴리스틱 해법은 삼우 마이크로 컴퓨터 (10MHz 80286 with 80287 coprocessor)에 Turbo-Pascal로 프로그램화 하였으며, 휴리스틱 해법의 성취도(performance)를 측정하기 위하여 60개의 문제를 다음과 같이 발생시켰다. 실제 문제에서 N이 4 이상인 경우는 거의 없으므로 N을 3으로 고정하였고, 한 소화조에서 처리되는 총 batch의 수는 10개로 한정하였다. 첫번째 feedstock의 수확시기 $a_1=0$ 로 하였고, a_2와 a_3는 〔0, T〕에서 랜덤하게 발생되어 $a_2 < a_3$가 되도록 조정하였다. 바이오메스-가스 변환계수(α_i, β_i)와 부패 손실 계수 γ_i는 실제 feedstock의 계수중에서 랜덤하게 선택되었으며, d는 2일으로 고정하였다. 또한 삼우 마이크로 컴퓨터를 사용하여 3분 이내에 최적해를 얻을 수 있는 격자점의 수는 8개이므로, 시간 공간 〔0, T〕 내의 격자점의 수를 6, 7, 8개로 하여 각 격자점의 수 마다 20개의 문제들을 발생시켰다. 위와 같은 방법으로 발생시킨 60개의 문제들에 대한 휴리스틱의 결과치와 최적해를 비교한 결과를 표 2에 수록하였다.

표 2. 휴리스틱의 성취도에 대한 계산결과

격자점의 수	시간(분) 휴리스틱/최적해	성취도 휴리스틱/최적해
6	0.24/0.78	98.2%
7	0.29/1.04	97.7%
8	0.37/2.57	97.4%

위와 같이 발생된 60개의 문제에 대하여 휴리스틱 해법은 최적해로 부터 평균 2.4%의 편차를 나타내는 좋은 성취도를 보여 주었으며, 최대 편차도 6.6%로 나타났다. 또한 휴리스틱 해법은 26문제(43.3%)에 대하여 최적해와 일치되는 결과를 보여 주었으나, 격자점의 수가 증가할 수록 성취도가 떨어지는 경향을 나타냈다. 표 2에 나타난 계산시간에 대한 결과는 격자점의 수가 증가함에 따라 최적해를 얻는 데 걸리는 시간은 지수형으로 증가하나, 휴리스틱 해를 얻는 데 소요되는 시간은 선형에 가깝게 증가하는 것을 보여주고 있다.

6. 결 론

본 논문은 두 개의 동일한 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제에 대한 연구로서 저장물질의 부패현상과 수확시기가 상이한 여러 feedstock들의 이용 가능성을 고려하여 두 개의 소화조를 경제적으로 운영하는 방안을 제시하였다. 두 개의 동일한 소화조를 운영하는 휴리스틱 방안은 문제(P)의 분해와 단위 시간당 가스 생산량의 분석을 통한 효과적인 접근방안으로서, 이러한 휴리스틱 절차는 Turbo-Pascal로 프로그램이 작성되었다.

두 개의 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제에 대한 문제는 부패재고/생산계획 문제로 분류될 수 있으며, 각 feedstock이 저장기간 동안에 부패로 인한 손실이 발생되는 특징이 있다.

본 논문에서는 각 feedstock의 수확시기가 고정된 것으로 가정하였으나 실제로는 모든 feedstock의 수확시기가 확률변수이다. 따라서 두개의 소화조로 이루어진 메탄가스 생산체제에 대한 문제는 추계적 과정(stochastic process)으로 취급될 수 있는 문제이다. 또한 대규모의 메탄가스 생산체제에서는 여러 개의 소화조를 운영하는 것이 일반적이므로 3개 이상의 소화조로 이루어진 메탄가스 생산 체제에 대한 연구가 필요할 것으로 사료되며 본 논문의 결과가 미래의 에너지 생산에 기여할 수 있게 되기를 바란다.

참 고 문 헌

1. Chynoweth, D. P., S. Ghosh, and D. L. Klass, "Anaerobic Digestion of kelp", Chapter 17 in Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels, Plenum Press, New York, 315~338(1981).
2. Curry, G. L., and B. L. Deuermeyer, "Optimal Scheduling of Multiple Feedstock Batch Biogas Production Systems", *AIIE Transactions 18*, 367~373(1986).
3. Deuermeyer, B. L., H. Lee, and G. L. Curry, "Optimal Residence Times for a Batch Biomass-to-Methane Conversion System", *Management Science 32*, 1104~1143(1986).
4. Feldman, R. M., B. L. Deuermeyer, and G. L. Curry, "A Dynamic Programming Optimization Procedure for a Two-Product Biomass-to-Methane Conversion System", *Journal of Math. Anal. and Appl. 125, No. 1*, 203~212(1987).
5. Hiler, E. A., and H. R. Isaacson, "Sorghum for Methane Procuction", Proceeding of the International Gas Research Conference, Gas Reserarch Institute, Chicago, Illinois, 605~612(1984).
6. Hill, D. T., "Design Parameters and Operating Characteristics of Animal Waste Anaerobic Digestion Systems : Part I. Swine and Poultry", *Agricultural Waste 5*, 157~178(1983).
7. Hill, D. T., "Economically Optimized Design of Methane Fermentation Systems for Swine Production Facilities", *ASAE Transactions 27*, 525~552(1984).

8. Isaacson, H. R., T. D. Hayes, and D. P. Chynoweth, "Pipeline Quality Methane from Biomass and Wastes, "Proceeding of the Energy Technology Conference, Washington D. C., 1984.