

## 폐 바이오매스를 이용한 폐열 회수 열교환기에 관한 연구

이 충 구, 이 세 균, 이 계 복, 이 석 호<sup>†</sup>, 김 정 현  
충북대학교 공과대학 기계공학부

### Study on Heat Recovery System using Waste Biomass

Chung-Gu Lee, Se-Kyoun Lee, Gye-Bock Lee, Seok-ho Rhi<sup>†</sup>, Jung-Hyun Kim  
School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

(Received October 30, 2003; revision received April 7, 2004)

**ABSTRACT:** Waste heat recovery system was studied numerically and experimentally. Heat exchanger system was designed specially to obtain the optimum heat exchanging performance. Brushwood biomass was used for the present experimental study. Two biomass heat recovery systems were designed and developed. Polyethylene helical pipe line of 0.03 m (inner diameter) was installed to recover the heat of biomass dump. The fermentation process of biomass dump was maintained for 12 weeks. The inner average temperature of biomass was about 51 °C for both heat exchanger systems. The current heat recovery system could recover up to 6 kcal/kg of energy.

**Key words:** Biomass(바이오매스), Heat exchanger(열교환기), Fermentation(발효), Waste heat recovery(폐열 회수)

#### 기 호 설 명

$A_c$  : 단면적 [ $m^2$ ]  
 $C$  : 비열 [ $KJ/(kg \cdot K)$ ]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]  
 $k$  : 열전도계수 [ $W/(m \cdot K)$ ]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [ $kg/s$ ]  
 $p$  : 압력 [ $Pa$ ]  
 $q$  : 열전달량 [ $W$ ]  
 $q''$  : 열유속 [ $W/m^2$ ]  
 $r$  : 관의 반경 [ $m$ ]  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_c$  : 냉각 유체온도 [ $^{\circ}C$ ]

$T_m$  : 평균 온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_s$  : 표면온도 [ $^{\circ}C$ ]  
 $u$  :  $x$ 방향 속도 [ $m/s$ ]  
 $V$  : 평균 속도 [ $m/s$ ]  
 $X$  : 길이 [ $m$ ]  
 $x, y$  : 일반 좌표계

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $\mu$  : 점성계수 [ $N \cdot s/m^2$ ]  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\tau$  : 전단력 [ $N/m^2$ ]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2444; fax: +82-43-263-2441

E-mail address: rhi@chungbuk.ac.kr

#### 하첨자

$fd$  : 완전 발달(fully developed)

$i, o$  : 관 입구/출구(pipe inlet/outlet)  
 $max$  : 최대(maximum)

### 1. 서 론

화석연료는 매장량에 한계가 있으며 더욱이 그 배기가스로 인한 환경오염문제는 매우 심각하다. 원자력, 풍력과 조력은 비교적 공해를 일으키지 않지만 특정 장소에 국한되어 이용이 가능하다는 한계가 있다. 태양열 역시 무한한 무공해 자원이지만 시설비가 상당히 많이 소요된다. 이러한 여러 한계를 극복하고 특히 자연의 조화를 깨뜨리지 않으면서 이용 가능한 에너지이용 방법이 바이오매스를 이용하는 것이다.

바이오매스(biomass)란 어느 시점에 임의의 공간 내에 존재하는 특정한 생물군의 양을 중량이나 에너지량으로 나타낸 것으로 생물체량 또는 생물량이라고도 한다. 건조중량을 사용하는 경우가 많지만, 습중량이나 때로는 생물체의 주요한 구성성분인 탄소나 질소량으로 나타내기도 한다. 지구상의 생물권에는 동식물의 유체를 미생물이 분해하여 무기물로 환원시킨다는 물질순환 사이클이 있는데, 이 미생물(분해자)을 대신하여 인간이 이것을 에너지나 유기원료로 이용하자는 것이다. 바이오매스를 이용하여 증기기관차나 자동차를 굴리는 직접적인 이용방법과, 바이오매스를 이용하여 알코올이나 메탄가스를 생산하는 변환이용방법이 있다. 우리나라 같은 비산유개발 도상국들은 바이오매스를 이용한 에너지개발이 주요 당면과제로 되어 있다. 현재까지의 바이오매스에 대한 연구는 바이오매스를 이용한 연료를 만들거나 발효중 발생하는 가스를 회수 이용하는 기술

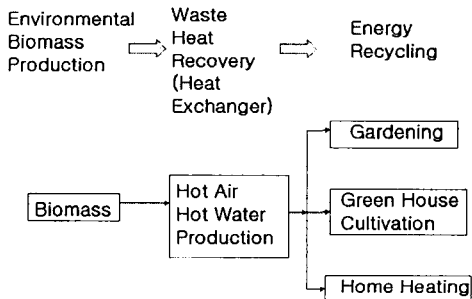


Fig. 1 Energy recovery and recycling of biomass.<sup>(1)</sup>

에 초점을 가지고 연구를 많이 수행해 왔다.<sup>(1-4)</sup>

본 연구에서는 바이오매스를 이용하여 발효를 통해 발생하는 열을 열교환기를 통해서 회수하는데 주목적이 있다. Fig.1에서 볼 수 있듯이 바이오매스로부터 회수된 열을 회수함으로써 농촌에서 가정의 난방, 온실 난방, 온수공급 등으로 이용할 수 있는 열교환 시스템을 개발하는데 목표를 두고 있으며, 바이오매스의 온도가 일정할 경우에 대한 수치해법적인 해석을 통해 열교환기 파이프 직경, 파이프 간의 간격, 파이프 재질 등 여러 가지 변수들에 대한 최적의 열교환 시스템의 설계자료를 얻고, 실험을 통해서 바이오매스의 최적의 재료선정, 실험을 통한 검증 및 향후 최적설계를 위한 자료를 얻기 위해 연구를 수행하였다.

### 2. 이론적 분석

Fig.2에 나타낸 관내의 임의의 검사체적에 대하여 경계조건을 이용하면 관 중심의 속도에 대한 속도 분포식은 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_o} = 1 - \left(\frac{r}{r_o}\right)^2 \quad (1)$$

에너지방정식은

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{u}{a} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

유체유동의 경우 완전히 발달된 영역에서 속도

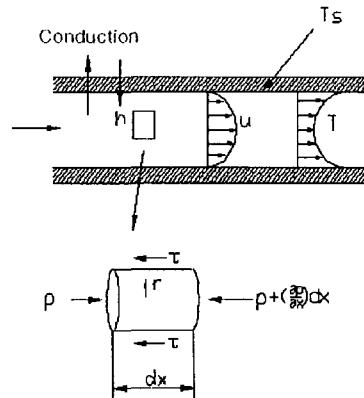


Fig. 2 Cylindrical pipe and control volume.

분포는  $x$ 에 따라 변할지라도 속도변화는 없다는 것을 만족한다.

그러나 온도분포의 경우에는 온도분포가  $x$ 에 따라 변할지라도 다음과 같이 정의된 무차원 온도분포가  $x$ 에 따라 변하지 않는 경우를 열적으로 완전히 발달하였다고 정의한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd, t} = 0 \quad (3)$$

이 조건은 일반적으로 관내에서 일정 열유속 ( $q''$ ) 또는 균일 표면온도 ( $T_s$ )에서 만족된다. 따라서 무차원 온도분포는  $x$ 에 대해 독립이고,  $r$ 의 함수로 예상된다. 이 도함수 또한  $x$ 에 대해 독립이다. 벽에서의 열유속과 같이 적용하면, 다음과 같은 관계식을 얻어 낼 수 있다.

$$\frac{h}{k} = f(x) \quad (4)$$

따라서 일정한 물성치를 가지고 있는 유체는 열적으로 완전히 발달된 유동의 경우 국소대류계수  $h$ 는  $x$ 에 대하여 독립이고 일정하다. 앞의 식들에서 평균 온도 ( $T_m$ )는 내부유동에서 대단히 중요한 값이다.  $T_m$ 의 변화는 유동에서 에너지 평형을 적용함으로써 구할 수 있다.

(1)  $q'' = \text{constant}$ 의 경우

완전히 발달된 영역에서  $h$ 와  $q''$ 가 일정하기 때문에 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT_s}{dx} \Big|_{fd, t} = \frac{dT_m}{dx} \Big|_{fd, t} \quad q'' = \text{constant}$$

에너지방정식으로부터, 일정 열유속일 경우 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} \quad (5)$$

이므로

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{2V}{a} \left( 1 - \frac{r^2}{r_o^2} \right) \left( \frac{dT_m}{dx} \right) \quad (6)$$

관의 벽과 중심에서의 경계조건은, (1)  $r = r_o$ 에서  $T = T_o$ , (2)  $r = 0$ 에서  $\partial T / \partial r = 0$ 이다.

다음과 같이 일정 열유속일 경우의 출구에서의 관 평균 온도를 얻을 수 있다.

$$T_{m, o} = T_{m, i} + \frac{48}{11} \frac{q'' \cdot \alpha \cdot X}{h \cdot V} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C}$$

(2)  $T_s = \text{constant}$ 의 경우

일정 표면 온도일 경우에는  $dT_s/dx = 0$ 이므로  $\partial T / \partial x$ 를 구하면,

$$\frac{dT_s}{dx} \Big|_{fd, t} = \left( \frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \frac{dT_m}{dx} \Big|_{fd, t} \quad (8)$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s'' \cdot p}{m \cdot C} = \frac{p}{m \cdot C} h (T_s - T_m) \quad (9)$$

식(9)를 정리하면 다음과 같이 일정 표면 온도일 경우의 출구에서의 관 평균 온도를 얻을 수 있다.

$$T_{m, o} = T_s - \exp \left[ -\frac{p \cdot X \cdot h}{m \cdot C} \right] (T_s - T_{m, i}) \quad (10)$$

### 3. 실험장치

본 실험을 위하여 Fig. 3의 개략도와 같은 형태로 2개의 열교환기(HX I, II)가 설계 제작되었다. HX II는 HX I의 실험 후 보관을 거쳐 반경을 줄여 바이오매스 내부의 열을 쉽게 회수하도록 제작되었다. 열교환기를 바이오매스 침엽수재 톱밥(Fig. 4, 좌측), 활엽수재 톱밥(Fig. 4, 우측)의 두

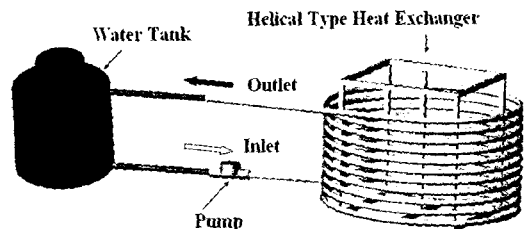
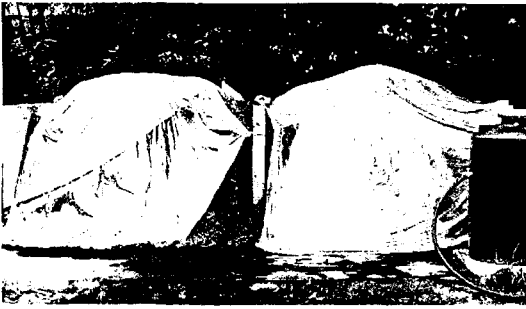


Fig. 3 Experimental schematic.



(a) HX I: Conifer (b) HX II: Non-coniferous

Fig. 4 Experimental setup.

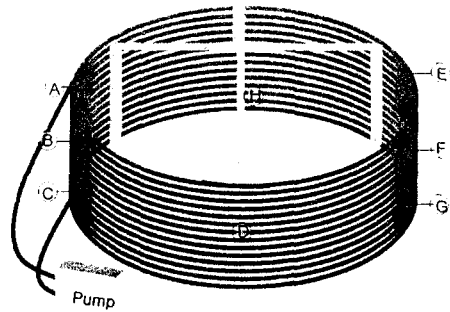


Fig. 5 Thermocouple positions.

Table 1 Heat exchanger description

	HX I	HX II
Biomass material	Conifer	Non-coniferous
Biomass amount (kg)	1,000	1,000
Pipe material	Poly ethylene	Poly ethylene
Pipe diameter (mm) I.O, D.O	30, 42	30, 42
Pipe pitch (mm)	65	65
Pipe length (m)	100	100
Frame dimension (width×length×height)	2200×2200×1500	1800×1800×1500
Heat transfer area (m <sup>2</sup> )	13.2	13.2
Heat exchanger diameter (m)	2.5	2.2

가지 재료에 의한 발효로부터 발생하는 열을 회수하기 위해서 각각의 열교환기가 계산에 의한 결과를 바탕으로 설계 제작되었다. 침엽수재 톱밥의 발효에 의한 열을 회수하기 위해서 열교환기를 설계 제작하였으나, 침엽수재를 재료로 사용했을 경우에는 발효를 통해서 발생하는 열과 지속성을 판단하기 위해서 열교환기를 이용한 열회수는 수행하지 않았으며, 40일 동안 발효에 따른 발열량과 그 지속성을 관찰하였다. 활엽수재 톱밥을 사용했을 경우 역시 침엽수재일 경우와 마찬가지로 내부온도며, 그 지속성을 관찰하였으며, 산야초를 사용하였을 경우도 마찬가지로 내부온도를 계속 관찰하였다.

본 실험을 위해 제작된 열교환기는 실험 전에 수행된 계산에 의해 얻어진 결과를 바탕으로 설계 목표치를 달성할 수 있도록 설계 제작되었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 실험을 위해 제작된 열교환기의 재질은 변형의 용이성과 제작단가의 절감을 위해 PE 파이프(I.O : 30 mm, D.O : 42 mm,  $k=0.33 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ )를 사용하였다. 아울러 파이프의 지

지를 위해 철재 앵글을 이용하여 프레임을 제작하였다. 본 연구를 위해 사용된 열교환기의 규격은 Table 1에 정리하였다.

바이오매스의 온도 및 열교환기를 통해 배출되는 물의 온도를 측정하기 위해 8개의 K-Type ( $\phi=1 \text{ mm}$ ) 열전대를 열교환기 각 부분에 부착하였으며, 각각의 열전대 삽입위치는 Fig.5을 기준으로 바닥으로부터 높이로 Table 2에 나타내었다.

바이오매스를 퇴적시에 열전대의 손상을 방지하기 위해서 파이프의 밑부분에 열전대가 삽입되었다. 3개의 K-Type Probe(Sheath Type,  $\phi=1 \text{ mm}$ )형 열전대가 파이프의 입출구와 물탱크 내부의 온도를 측정하기 위해서 삽입되었다.

Table 2 Thermocouple position of HX I, II

A	136 cm	E	136 cm
B	78 cm	F	78 cm
C	6 cm	G	6 cm
D	107 cm	H	40 cm

열교환기 HX I과 II의 유체순환을 위해서는 8, 16, 그리고 25 LPM의 3단으로 유량을 조절할 수 있는 그린퍼스 펌프(Model : UPS 25-62 Inline Pump)가 1,000리터 용량의 Poly Ethylene 재질 물탱크와 열교환기 사이에 연결되었다. 본 실험에서 열회수를 원활히 하면서도 바이오매스 발효 열을 장시간 유지할 수 있도록 유체의 유동속도를 최소화하기 위해서 8 LPM의 유량을 유지하도록 하며 실험을 수행하였다.

본 실험에서 온도를 측정하기 위하여 Toggle switch와 Digital Thermometer를 이용하여 Switching box를 만들었으며, 이것을 통해 온도를 관찰 기록하였다.

4. 결과 및 분석

Fig. 6은 관 직경의 변화에 따른 열교환기 출구의 온도변화를 계산한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 유량이 0.04, 0.067, 그리고 0.1 kg/s에 대하여 파이프 내경이 각각 0.03, 0.05, 그리고 0.07 m일 경우 열교환기 내부에서의 유동형태는 층류와 난류의 경계에 위치해 있는 것으로 관찰할 수 있다. 열전달 성능을 향상시키기 위해서는 열교환기 내부의 유동이 난류유동을 갖도록 하고 본 연구목표인 열교환기 출구온도가 55°C를 만족시키는 최적 직경은 관 직경이 0.03 m 이하의 되어야 하는 것으로 알 수 있다.

역시 Fig. 7에서 알 수 있듯이 본 연구를 위해 설정한 최소 유체유동량을 0.04 kg/s로 설정시 관 직경은 0.03 m일 경우에 유체 유동은 층류와 난류

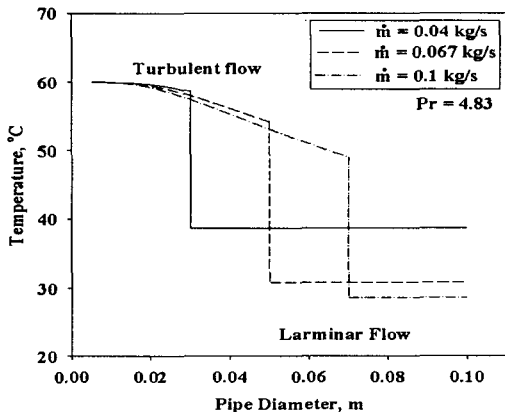


Fig. 6 Effect of pipe diameter.

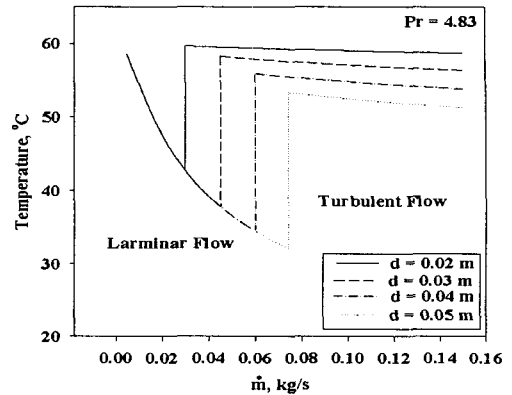


Fig. 7 Effect of mass flow rate.

의 경계에 위치하게 되며, 아울러 Fig. 6과 Fig. 7을 통해서 알 수 있듯이 관 직경이 0.03 m일 경우이고, 유량이 0.04 kg/s 이상일 경우에 열교환기 출구온도는 본 연구의 설계조건인 55°C 이상으로 유지될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이론적 분석을 통한 실험용 열교환기는 관 직경이 0.03 m로 선정이 되었다.

Fig. 8과 Fig. 9은 침엽수와 활엽수를 이용한 바이오매스를 통해서 최초 퇴적 후 발효를 거쳐 열을 발생하는 과정의 온도변화를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 열교환기를 설치한 부분을 기준으로 바이오매스를 쌓기 위한 콘크리트 구조물에서 벽으로 밀폐된 부분에 인접한 곳의 온도가 높았으며, 콘크리트 구조물의 열린 부분에 접한 부분의 온도(A, B, C)는 상대적으로 낮은 온도를 보여주었다. 아울러 바이오매스 더미의 상부 온도 역시 낮은 온도를 보여주었다. 이

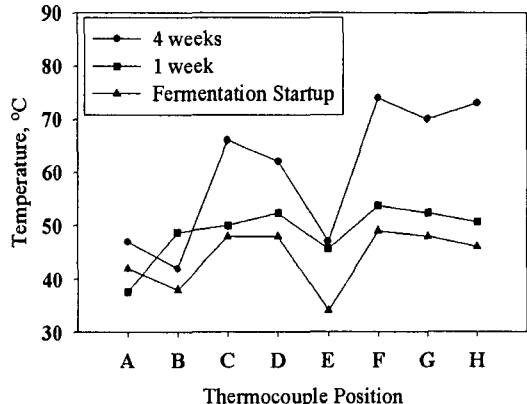


Fig. 8 Temperature profile of biomass, HX I.

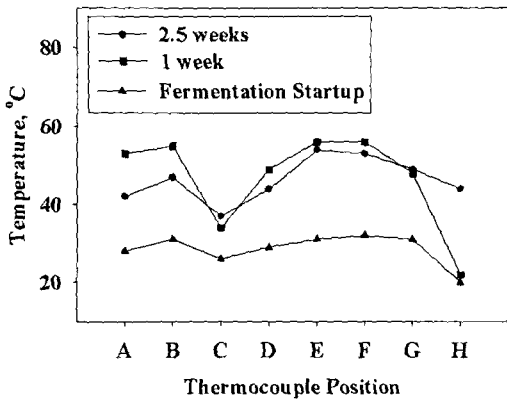


Fig. 9 Temperature profile of biomass, HX II.

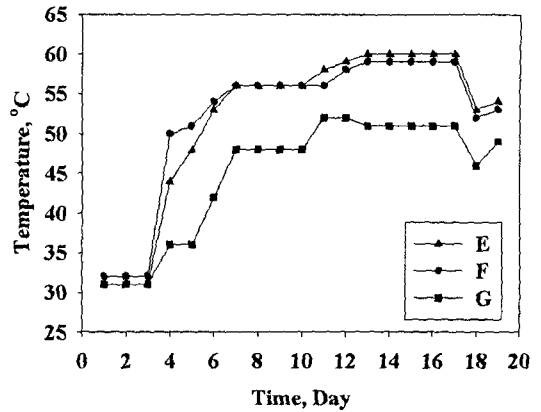


Fig. 11 Temperature variation of biomass, HX II.

런 경향은 열교환기 HX I와 HX II의 경우 모두 유사한 경향을 보여주었다.

Fig. 10와 Fig. 11은 HX I과 HX II의 경우에 대하여 침엽수와 활엽수를 이용한 바이오매스를 퇴적 후 발효를 시작하여 내부 온도변화를 관찰한 것이다. 침엽수를 이용한 HX I의 경우에 온도가 열전대 E와 G의 경우에 74°C 이상, 그리고 하층부 및 상층부도 각각 67°C 및 47°C로 높은 온도를 나타냈으며 10일 후까지 온도가 서서히 감소하였으며, 10일 후 전체적으로 50~60°C 사이의 온도를 유지해 주고 있는 것으로 관찰되었다. 활엽수를 이용한 HX II의 경우에 열전대 C와 H가 이상변화를 보여주었으나, 전체적으로 40~60°C의 온도분포를 보여주고 있다. 활엽수를 사용한 HX

II의 경우에는 HX I의 경우와 달리 초기 발효시의 온도 급상승 현상을 보여주지 않았으며, 발효와 함께 서서히 온도가 상승하였다. 이는 HX I과 HX II의 바이오매스 재료의 특성에 따라 발효의 진행과 발효능력의 차이일 것이다.

Fig. 12과 Fig. 13는 HX II에 대하여 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 내부온도가 55°C 이상을 계속 유지하고 있는 시점에서 열교환기를 가동하여 실험을 한 결과이다. 우선 Fig. 13의 실험을 위하여 물탱크에 초기 온도가 21.9°C인 600리터의 물을 채우고, 펌프를 가동시켜 물을 바이오매스 더미 내부에 있는 열교환기 파이프라인을 통해 유동시킬 수 있도록 하였다. 바이오매스 더미 내부의 중간부 최고점 온도가 65°C일 경우를 시작점으로

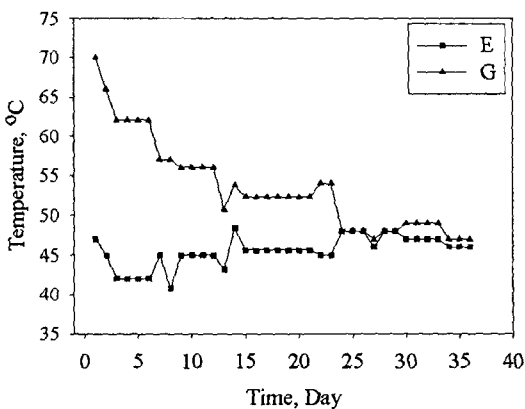


Fig. 10 Temperature variation of biomass, HX II.

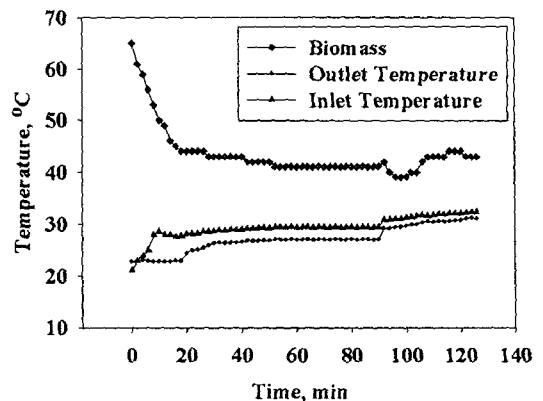


Fig. 12 Experiment no #1, temperature variation of biomass and heat exchanger, HX II.

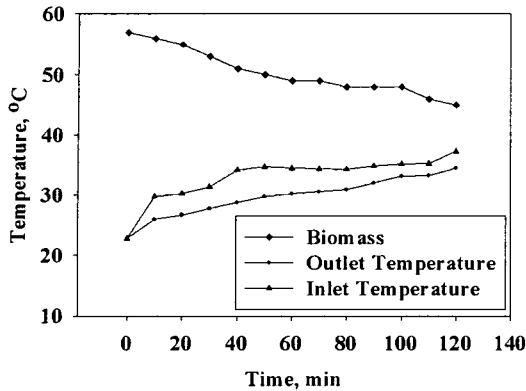


Fig. 13 Experiment no #2, temperature variation of biomass and heat exchanger, HX II.

열교환기를 순환해서 물탱크로 배출되는 출구 온도와 물탱크 내부 물의 온도를 관찰하였다. 물탱크 내부의 온도는 21.9°C에서 서서히 상승하기 시작하였으며, 바이오매스더미의 온도 또한 서서히 떨어지는 것으로 관찰할 수 있었다. 이는 바이오매스를 통해 열을 회수하는 과정을 나타낸다고 할 수 있다. 100분이 지나고 물탱크의 물의 온도가 30°C 되는 시점부터는 바이오매스더미 내부의 온도는 오히려 상승하는 것으로 관찰되었다. 이는 바이오매스로부터 열전달에 의한 열교환이 한계에 이르렀음을 알 수 있다. 4시간 후 물탱크의 물온도는 33°C를 기점으로 더 이상의 상승은 없었다. 실험을 멈추고 12시간 뒤 바이오매스더미의 온도는 다시 상승하여 50°C의 최고점 온도를 보여주었다.

같은 방법으로 물 400리터를 채우고, 펌프를 가동시켜 실험하였다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 바이오매스더미 내부 최고점 온도가 3일 뒤 55°C

가 되었으며, 이 시점을 기준으로 다시 실험을 개시하였다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 열교환기에 의한 열회수 과정에서 온도변화는 첫번째 실험에서와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 초기 22°C의 물의온도를 38°C까지 상승시킬 수 있고, 실험을 수행 후 바이오매스의 내부의 최고온도는 재발효에 따른 약간 상승하였으나, 50°C 이상의 온도를 유지하지는 못하였다.

본 실험을 통하여 열용량( $Q$ ) =  $\dot{m}c\Delta T$ 로부터 물탱크 내의 11°C 물의 온도 상승에 대하여,  $Q = 600 \text{ kg} \times 4,174 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 10^\circ\text{C} = 25,044,000 \text{ J}$  (5,986 kcal)의 열 회수 효과를 얻을 수 있었다. 1,000 kg의 바이오매스에 대하여, 1 kg당 약 5.99 kcal/kg의 열 회수를 얻을 수 있었다. Jean Pain의 실험에서는 4개월간 유용하여 brushwood 10 kg당 11,000 kcal를 회수한다고 하였다.<sup>(1)</sup>

이 두 실험을 같은 단위시간당 열 회수율로 환산하여 비교하면 Table 3와 같다.

Table 3에서 알 수 있듯이 본 실험의 결과를 Jean Pain의 결과와 비교하면 운용시간 및 발효의 지속성에 문제점과 차이가 있으나, 본 실험은 바이오매스의 발효에 따른 열을 열교환기를 통해서 회수할 수 있는 충분한 가능성을 제시해 주고 있다. 본 실험으로부터 향후 해결해야 할 최대 문제점은 바이오매스의 발효에 의한 발효를 지속적으로 유지시킬 수 있는 방법을 연구해야 할 것이다. Table 3에서 알 수 있듯이 Jean Pain의 실험의 경우 열전달 면적 대비 바이오매스 용량은 835배이며, 현재 HX II의 경우 76배이다.<sup>(1)</sup> 이는 결과적으로 충분한 발효열을 공급하기 위해서는 충분한 바이오매스의 공급을 필요로 하며, 지속적인 발효열을 공급받기 위해서는 최소한 10,000 kg의 바이오매스가 필요할 것이라 예측된다. 또

Table 3 Comparison with previous research

	HX II (1)	HX II (2)	Jean Pain <sup>(1)</sup>
Biomass material	Non-coniferous	Non-coniferous	brushwood
Biomass amount (kg)	1,000	1,000	16,800
Heat transfer area (m <sup>2</sup> )	13.2	13.2	20.1
Heat rate (kcal/kg)	5.99	5.19	1100
Operation time	4 hours	2 hours	4 month
Heat rate/sec	144.93	125.6	443.9
Biomass average temperature (°C)	51.3	51.7	60
Amount of water in tank (liter)	600	400	

한, 수치해법과 같은 효과가 나오기 위해서는 일정 표면온도를 유지할 수 있는 최적 발효법의 개발이 필요하다. 아울러 현재 열교환기로부터 원활한 열회수를 위해서는 현재 하나의 나선형 라인보다는 바이오매스 전체 더미로부터 균형적으로 열을 회수하기 위해 열교환기 파이프라인의 분산을 요구한다. 예를 들어, 두 개 혹은 세 개의 나선형 라인이 더욱 효과적일 것이라 생각되며, 이를 위해서는 파이프의 수월한 변곡을 위해 새로운 재질의 선택이 필요할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바이오매스의 표면온도나 발열량이 일정한 경우의 조건을 사용하여 본 연구를 위해 설계목표인 55℃의 출구온도와 유량을 만족시키는 최적의 열교환기의 관 직경은 0.03m였으며, 계산을 통해서 바이오매스 열교환기의 성능은 관 직경과 유동하는 유체의 유량에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

(2) 현재까지 수행된 연구결과를 바탕으로 농가에 활용 가능한 발효 시스템의 바이오매스 최적 규모는 실험결과에서 볼 수 있듯이 지속적인 발효열 회수를 위하여 기존의 바이오매스 용량의

10배 정도의 양이 필요할 것으로 판단할 수 있으며, 열교환기의 열전달 표면의 고른 분포를 위해서는 현재의 나선형 열교환기를 두 개의 나선형 파이프라인을 설치하여 열전달 표면을 분산할 필요가 있는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Pain, I. and Pain, J., 1972, The methods of Jean Pain: Another kind of garden, Commite International Jean Pain, Hof ter Winkelen, Londerzeel, Belgium.
2. Dahn, J., Bales, C., Lorenz, K. and Dalenback, J., 1998, Evaluation of storage configurations with internal heat exchangers, Solar Energy, Vol. 62, No. 6, pp. 407-417.
3. Matsumura, Y., 2002, Evaluation of supercritical water gasification and biomethanation for wet biomass utilization in Japan, Energy Conversion and Management 43, pp. 1301-1310.
4. Hirscha, D., Epsteinb, M. and Steinfelda, M., 2001, The solar thermal decarbonization of natural gas, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, pp. 1023-1033.