

목질계 폐바이오메스의 발효열이용 열교환기의 개발*1

조 남 석*2† · 최 태 호*2 · 김 홍 은*2 · 이 석 호*3 · 이 충 구*3

Development of Heat Exchanger for Fermentation Heat Utilization from Waste Woody Biomass*1

Nam-Seok Cho*2† · Tae-Ho Choi*2 · Hong-Eun Kim*2 · Suk-Ho Lee*3 · Chung-Koo Lee*3

요 약

본 연구는 폐바이오메스로서 활엽수(hardwood, HW)톱밥, 침엽수(softwood, SW)톱밥, 산야초류(grass) 등 3종의 발효재료를 이용, 3종의 나선형 열교환기와 1종의 평판형 열교환기를 제작하여 발효과정에서 생산되는 발효열을 가장 효율적으로 회수할 수 있는 발효열 교환장치 개발을 위하여 실시하였다. 본 연구에서는 다양한 바이오메스재료의 적절한 원료 배합을 통한 발열 및 열교환 특성을 조사하고 실제 농가에 설치 및 해체가 용이한 열교환기를 개발하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 나선형 열교환기를 사용한 발효열 실험에서 활엽수톱밥 및 침엽수 : 활엽수톱밥(50 : 50) 처리보다는 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10)의 발효가 약 3개월간의 긴 발열기간을 나타냈으며, 발효상을 통과한 물의 온도를 100일간 측정된 결과, 중앙부가 64.5~76.5°C로 매우 높았고, 물탱크 온도는 33~48°C 범위였으며, 출구의 수온은 33~44°C로서 4~5인 기준의 가정용 온수공급이 가능함이 확인되었다. 수행한 4종의 열교환기 실험 결과, 나선형 열교환기 HX-H1은 수온이 35~36°C범위로서 더 이상의 온도상승이 없었고, HX-H2는 수온이 40~45°C로서 실험기간 중 일정한 온도분포를 보였다. 한편 HX-H3는 최고온도 68~70°C, 최저온도 30°C, 평균온도 50°C였고, 출구의 온수온도는 33~44°C 범위로서 45일간 공급 가능하였다. 평판형 열교환기 HX-P는 수온이 42~58°C로서 3개월 이상 온수공급이 가능하였으므로 4~5인 기준의 가정용 난방 및 온수공급에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 그러므로 평판형 열교환기 HX-P는 나선형 열교환기 HX-H에 비해 발효상 내부에 열교환용 파이프가 빈틈없이 배치되어 발효상 전면적을 통해 발효열을 최대 회수할 수 있었으며, 42~58°C의 발효열을 최대 3개월정도 이용 가능하였고, 장시간 운용에도 온도가 급강하 하는 등의 문제가 발생되지 않았다. 따라서 발효열교환기는 나선형 시스템보다는 발효열의 회수 효율이 매우 높으면서도, 열교환장치의 제작, 설치, 해체가 용이한 평판형 시스템이 유리한 것으로 나타났다.

* 1 접수 2008년 8월 4일, 채택 2008년 9월 10일

본 연구는 농림부 농림기술개발사업(2003 산림폐바이오메스를 활용한 발효열교환장치 개발)의 지원으로 수행되었음.

* 2 충북대학교 목재중이과학전공. Wood and Paper Science, Chungbuk National University, Cheongju, Korea.

* 3 충북대학교 기계공학부. School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea.

† 주저자(corresponding author) : 조남석(e-mail: nscho@chungbuk.ac.kr)

ABSTRACT

It is urgently required to develop the production of fermentation-heat energy from the waste agricultural and forest biomass and its effective heat exchanging system for the supply of warm water to rural households and greenhouses. In this study 3 helical-type and 1 plate-type heat exchangers using 3 different waste biomasses [eg hardwood (HW) sawdust (100%), softwood (SW) sawdust : HW sawdust (50 : 50) and HW sawdust : grass (90 : 10)] were applied in order to find out the best heat recovery system. The heat exchanger was basically considered to improve the overall heat recovery efficiency, to minimize heat loss and to simplify manufacturing, assembling and breaking up the fermenting beds. The helical-type heat exchanger (HX-H3) installed in fermenting bed of HW sawdust : grass (90 : 10) showed relatively higher temperature profiles, in particular mid- and upper-parts than lower and surface parts during 45-day fermentation process. The maximum temperature was ranged from 40°C to 65°C with average 60°C. The water temperature of tank outlet was ranged to 33~48°C during whole measuring periods. By the way plate-type one (HX-P) installed in same biomass compositional fermenting bed showed 64.5~76.5°C at center part, and 43~56°C and 42~58°C, water tank and tank outlet temperatures, respectively, during 100 day measurement. It could be concluded that the plate-type heat exchanger (HX-P) provides not only the effective heating for the rural households and greenhouses, but also having the best heat recovery performance, easy manufacturing, assembling and breaking up the systems.

Keywords: fermentation, waste biomass, heat exchanger, helical-type heat exchanger, plate-type heat exchanger, heat recovery

1. 서 론

우리나라의 경우 산림 및 농산 폐바이오메스(이하 폐바이오메스)를 이용한 바이오메스의 에너지화 연구는 한국과학기술연구원(1981), 국립산림과학원(안 등, 1981) 및 조(1983) 등을 중심으로 널리 연구되었는데, 그 연구의 중심은 바이오에탄올 생산을 위한 전처리(조 및 민, 1990; 조 등, 1991; 이 등, 1989; 조, 1989a; 조, 1989b), 메탄가스 생산(김 등, 2001) 등으로 집약된다. 한편 폐바이오메스를 이용한 발효열생산 연구는 조 등(2003; 2006; 2008)에 의하여 수행되었으나, 발효과정에서 발생하는 열을 효과적으로 회수하여 작물재배를 위한 온실과 농촌 가정의 난방 및 가정용 온수로 이용할 수 있는 열교환 시스템을 개발하는 연구(이 등, 2004)는 거의 없는 실정이다.

유럽에서는 프랑스, 벨기에 등에서 2차 대전 직후 부족한 에너지 공급을 위하여 혐기적 발효에 관한 연구를 활발히 진행한 바 있으며, 특히 메탄가스 회수에 대한 연구(Grethlein and Jain, 1993; Gil *et al.*, 1997; Arvelakis and Koukios, 2002; Lucas *et al.*, 2004)가 많이 수행되었다. 유럽연합(EU) (Faaij, 2006)은 2010년까지 대체에너지의 비중을 현재의 2배인 12%까지 끌어올리는 계획으로 있으며, 독일에서는 1975년 바이오가스 생산용 발효조를 개발, 전기발전을 위한 시설까지 보급, 이용하고 있다. 한편 Jean Pain (Paine and Paine, 1972)은 바이오메스를 이용한 온수생산 및 그 부산물로부터 메탄가스를 연료로 사용할 수 있는 방법을 제시하였다. 미국의 경우 Dunn (1952) 등, Davey (1953; 1955) 등에 의한 톱밥의 발효연구가 초기에 이루어졌으며, 목질계 바이오메스의 전처리를 통한 바이오가스 및 바이오



Fig. 1. Fermenting beds and pipe installation (helical type) for heat exchanger.



Fig. 2. Fermenting beds and pipe installation (plate type) for heat exchanger.

에탄올 생산연구(Goldstein, 1981; Strakanen and Tillman, 1979)가 시작되었고, 2010년경 전체 에너지 소비량의 10%를 대체에너지로 충당할 계획을 수립하고 있다. 일본의 경우 Shimizu (1981) 및 Muraki 등(1982), Yoshioka 등(2005)에 의한 바이오메스의 연료화 연구, 阿部(2005)에 의한 톱밥의 발효를 통한 발효열과 잔사의 유기질비료로서의 이용 및 Matsumura (2002)에 의한 메탄가스의 에너지화 연구, Lin 및 Tanaka (2006)에 의한 바이오에탄올 발효연구도 보고되었다.

본 연구는 폐바이오메스로서 활엽수톱밥, 침엽수톱밥, 산야초류 등 3종의 발효재료를 이용하여 발효 과정에서 생산되는 발효열을 가장 효율적으로 회수할 수 있는 발효열 교환장치 개발을 위하여 실시하였다.

Table 1. Substrate mixing ratio for fermentation

Raw materials	Weight
Waste biomass	1,000 kg
Urea	15 kg
Fermenting aids	15 kg
Lime	10 kg
Moisture contents (%)	55~60

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

폐바이오메스는 활엽수(hardwood, HW)톱밥, 침엽수(softwood, SW)톱밥, 산야초류 등 3종의 발효재료로 구성되며, 침엽수톱밥은 산림조합연합회 충청북도 청원군지부에서 생산되는 낙엽송재 톱밥을, 활엽수톱밥은 신갈나무를 주종으로 한 활잡류 톱밥을 충청북도 청원군소재 (주)풍림으로부터 구입하여 공시하였다. 갈대류를 주축으로 한 산야초(갈대

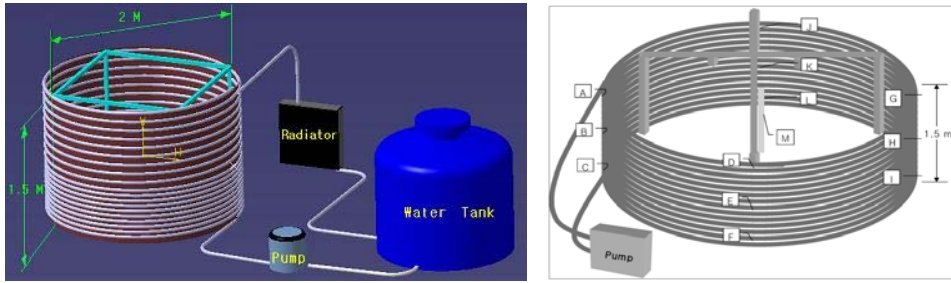


Fig. 3. Helical type heat exchanger and its thermocouple positions.

Table 2. Experimental setups of biomass heat exchanger

Heat exchanger	HX-H1	HX-H2	HX-H3	HX-P
Heat exchanger type	Helical	Helical	Helical	Plate
Dimension (ID, O.D. mm)	30, 42	25, 32	25, 32	15, 20
Pipe pitch (mm)	65	100	50	250
Pipe length (m)	100	100	100	100
Frame (L × W × T)	1,800 × 1,800 × 1,500	2,200 × 2,200 × 1,500	1,500 × 1,500 × 1,500	2,000 × 2,000 × 1,500
Heat exchanging area (m ²)	13.2	13.2	10.5	63
Heat exchanger dia (m)	2.2	2.5	2.2	

류, 볏짚)는 충북대학교 교내의 부속농장, 수목원으로부터 수집하여 공시하였다. 본 연구에서는 수행한 재료의 배합비는 활엽수톱밥(100%), 침엽수 : 활엽수톱밥(50 : 50, w/w), 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10, w/w) 등 3종이었다.

2.2. 페바이오매스의 발효상 및 원재료의 배합

발효상의 축조는 Fig. 1의 나선형 열교환방식과 Fig. 2의 평판형 열교환방식 2종으로 하였으며, 발효상의 크기는 가로 3.0 m, 세로 3.0 m, 높이 1.5 m였다.

본 실험에서 사용된 배합비 및 발효 조건은 많은 예비실험 결과를 거쳐 이루어진 것인데, 목질계 페바이오매스는 리그닌 성분을 많이 함유하고 있으며(조 등, 1987), 종류에 따라 각기 원소의 조성이나 성질이 전혀 다르고, 짚류, 풀, 낙엽 등보다는 분해가 어려울뿐 만 아니라(조 등, 1987; 조, 1990), 미

생물의 생육을 저해하는 항균성물질을 포함하거나, 특히 탄소율(C/N율)이 매우 높기 때문에(河田, 1981) 그대로 발효할 경우, 발효가 진행되지 않는 문제점이 있다. 그러므로 초기의 발효를 돕기 위해서 C/N 율을 낮추어야만 하므로 Table 1에서 보는 바와 같은 발효조제로서 요소, 발효용 부속비료 1.5%, 석회 1.0% 첨가하였다. 배합된 원재료를 1.5 m의 높이로 공기가 잘 통하도록 쌓았으며, 함수율을 55~60%가 되도록 조절하면서 발효과일을 완성하였다.

2.3. 페바이오매스의 발효열 교환기의 제작 및 발효

2.3.1. 나선형 열교환기

바이오매스 열교환기 제작을 위해 실용화 및 상업화 가능성을 중심으로 Table 2에서 보는 바와 같은 열교환기 3종(heat exchanger-helical type: HX-H1, HX-H2, HX-H3)을 제작하였는데, 우선 농가에서

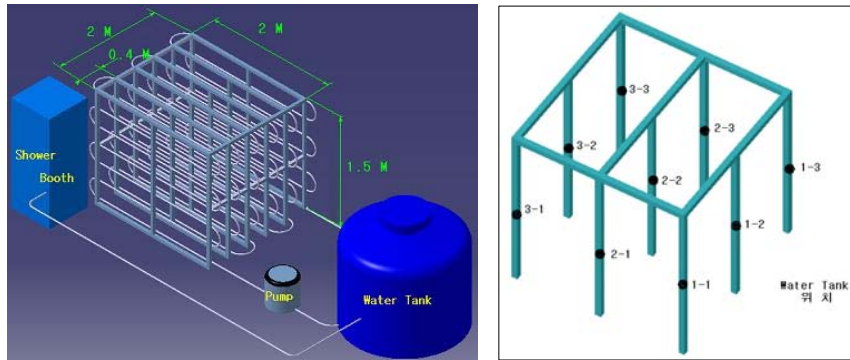


Fig. 4. Plate type heat exchanger and its thermocouple positions.

손쉽게 만들 수 있는 나선형 열교환기(Dahn *et al.*, 1998; 이 등, 2004)를 시도하였다. 이 열교환기는 별도의 프레임이나 복잡한 구조없이 나선형으로 관을 매설하는 방법으로 사용시 설치가 간단한 장점이 있었으며, 온수의 유동량을 0.2 kg/s 이상 유지되도록 순환펌프를 설치하였다.

열교환기의 관 재질은 변형이 용이하고 농촌보급을 목적으로 제작비가 저렴한 폴리에틸렌(PE) 관(내경 = 30 mm, 외경 = 42 mm)을 사용하였으며, 수온을 측정하기 위해 K-type ($\phi = 1$ mm) 열전대를 12곳에 삽입하였다(Fig. 3). 파이프의 회전반경은 2 m, 높이는 1.5 m이며, 19회 회전하였고, 이들 파이프의 지지를 위해 철제 앵글을 이용, 프레임을 제작하였으며, 물 저장탱크와 펌프가 부착되었다. HX-H2의 경우 관 직경을 30 mm로 하였을 때 만족이 되지 않아서 설치가 불가능하였기 때문에 HX-H2, HX-H3에서는 25 mm의 관(외경 = 32 mm)을 사용하였다. 제작된 열교환기의 상세한 내용은 Table 2에 정리하였다.

2.3.2. 평판형 열교환기

평판형 열교환기(heat exchanger-plate type: HX-P)에서 사용하는 파이프는 직경이 20 mm 이하를 사용해야만 변곡점이 많은 열교환기의 구조상 배관이 용이하였다. 예비실험 결과(이 등, 2004), 1일 필요한 가정용 부하인 15,600 kcal/day 이상의 발효열교환기의 성능 유지를 위해서는 파이프 직경은

20 mm 이하여야 하였으며, 유동량은 0.2 kg/s 이상이어야 함을 알 수 있었으므로 나선형 열교환기의 직경 25 mm보다 작은 내경 = 15 mm (외경 = 20 mm)의 관을 사용, 실제 제작 및 보급이 용이하면서도 해체의 용이성에 중점을 두고 설계하였다. 사각기 등형 철제 프레임(2,000 × 2,000 × 1,500 mm)을 설치하고 프레임에 순환 파이프를 고정시켰다(Fig. 4).

온도측정을 위한 열전대는 배관시 미리 설치하였으며, 총 9개의 열전대를 이용하여 온도를 측정하였다. 각각의 열전대는 바이오매스 퇴적시 손상이 가지 않도록 하였고, 3개의 K-type probe (sheath type, $\phi = 1$ mm)형 열전대가 파이프의 입·출구와 물탱크 내부의 온도를 측정하기 위해서 삽입, 3개의 5채널 digital thermometer를 이용하여 측정하였다. 유체는 경제적으로 저렴하고 수급이 쉬우며 뛰어난 열 회수율을 얻을 수 있는 물을 사용하였다. 물은 펌프를 이용하여 열교환장치의 하단부로 유입되어 발효열을 흡수하여 상단으로 나와 저장탱크의 남은 유체와 혼합되는 시스템을 하고 있다. 열 회수의 공학적 해석을 위해 300 리터의 물을 유지하며 실험하였다.

2.3.3. 발효열 교환특성

본 연구를 위해 서로 다른 배합비의 발효재료를 사용하여 4종의 열교환기(Table 2 참조)를 이용하여 상이한 배합비의 바이오매스재료(Table 3 참조)를 퇴적시켜, 최적의 발효열교환기 개발을 위한 발

Table 3. Biomasses used for heat exchanger

Heat exchanger	HX-H1	HX-H2	HX-H3	HX-P1
Biomass	HW 100%	SW : HW (50 : 50)	HW : Grass (90 : 10)	HW : Grass (90 : 10)
Total biomass weight, kg	1,000	1,000	1,000	1,000
Heat exchanger type	Helical	Helical	Helical	Plate

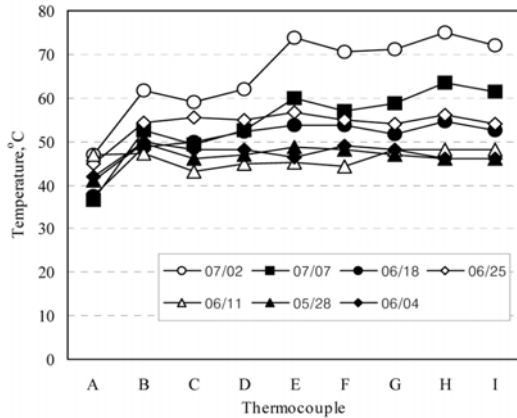


Fig. 5. Temperature profile with thermocouple positions during fermentation (HX-H1).

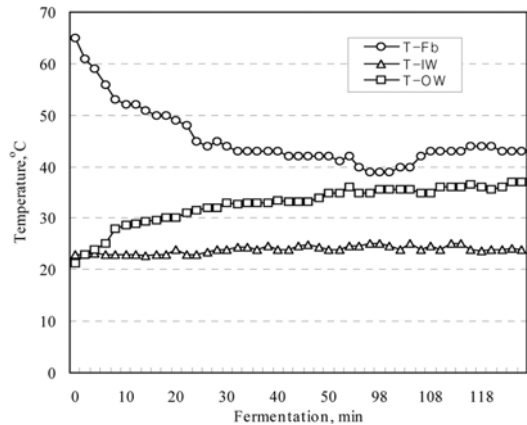


Fig. 6. Temperature changes on inlet-outlet water temperature during fermentation (HX-H1). T-Fb: Temp. of fermenting bed; T-IW: Inlet water temp.; T-OW: Outlet water temp.

효율특성 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 활엽수톱밥(100%)을 이용한 나선형 열교환기(HX-H1)의 발효열 특성

활엽수톱밥(100%)의 발효시 온도 변화를 경시적으로 측정(Fig. 5 참조)하였다. 발열경과를 보면 중층부(열전대 위치 E, H) 및 하층부(열전대 위치 F, I)의 경우 최저 45°C, 최고 71°C, 평균 60°C 전후의 온도를 나타냈으며 10일 이후에는 온도의 큰 변화 없이 전체적으로 42~55°C의 온도를 유지하는 것으로 관찰되었다. 활엽수톱밥을 사용한 경우 전보(조 등, 2003; 조 및 최, 2008)와는 달리 발효시 초기의 온도가 급상승하는 현상을 보여주지 않았으며, 발효가 진행되면서 서서히 온도가 상승하였다. 발효상 구조물에서 전면부 및 발효상 상부(열전대 위치 A)

는 발열온도가 낮았다.

발효상의 내부온도가 55°C 이상을 유지하고 있는 시점(Fig. 5, 6월 25일)에서 초기온도 22.9°C의 물 600 리터를 물탱크에 채우고, 펌프를 가동시켜 발효상 내부에 설치된 열교환기 파이프 라인을 통과시켜 입구 및 출구의 수온 변화를 측정된 결과, Fig. 6에서 보는 바와 같이 발효상내로 물이 공급되면서 내부열이 회수되는 과정에서 발효상의 온도가 65°C에서 약 30분간 45°C부근까지 빠른 속도로 하강함을 관찰할 수 있었다. 이와 연동하여 출구의 수온도 초기 30분까지는 계속 상승하여 33°C가 되면서 약 30분간 유지되었고, 그 후 다시 35~36°C까지 상승, 계속 유지되는 경향을 보였으며, 100분이 지나면서 발효상 내부의 온도도 다시 상승하는 것으로 관찰되었다. 4시간 후 수온은 35~36°C를 기점으로 더 이상

Table 4. Comparison with previous experimental result

L/I	HX-H1	Jean Pain (Pain & Pain, 1972)
Biomass	Hardwood	Hardwood
Biomass weight (kg)	1,000	16,800
Heat exchanging area (m ²)	13.2	201
Heat (kcal/kg)	7.24	1,100
Operated time	4 hours	4 month
Recovered heat, W/s	1449	4439

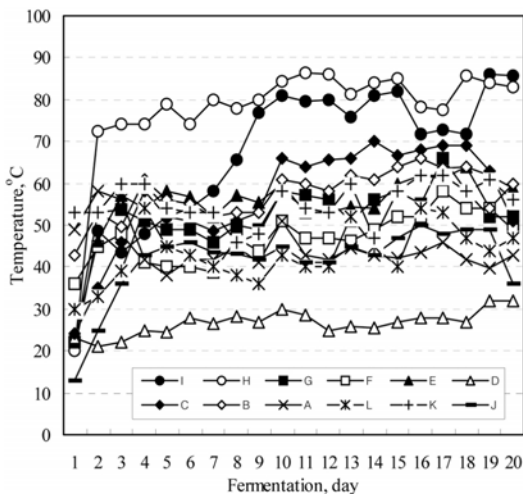


Fig. 7. Temperature changes on different thermocouple positions during fermentation (HX-H2). Symbols refer to thermocouple positions.

의 상승은 없었다. 물의 공급을 멈추고 12시간이 지나면 발효상의 내부온도는 다시 50°C까지 상승하였다.

본 실험을 통하여 물의 온도를 22.9°C에서 출구의 35°C까지 상승하였을 때의 열용량을 계산(Holman, 1997)하면, 열용량공식 $Q = mc\Delta T$ 식에서 $Q = 600 \text{ kg} \times 4,174 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 12.1^\circ\text{C} = 30,303,240 \text{ J}$ (7,243 kcal)의 열 회수효과를 얻을 수 있었다. 1,000 kg의 바이오매스에 대하여, 1 kg당 약 7.24 kcal/kg의 열회수 결과를 얻을 수 있었다. Pain 및 Pain (1972)은 4개월간 계속 실험하여 활엽수재 1 kg당 1,100 kcal를 회수하였다고 보고하였다(Table 4 참조). 본 실험에서 향후 해결해야 할 문제점은 발

효상의 발열을 여하히 지속시킬 수 있는 방법을 찾는 일인데, Jean Pain의 보고(Pain and Pain, 1972)에서 열전달 면적 대비 바이오매스 용량이 835배이었는데 대하여, 본 실험의 그것은 76배에 불과하다. 이는 장시간 발효열을 유지시키기 위해서 충분한 량의 바이오매스가 필요하다는 것이며, 지속적인 발효열 발생을 위해서는 최소한 10,000 kg 이상의 바이오매스가 필요할 것이라 예측된다. 아울러 현재 열교환기로부터 원활한 열 회수를 위해서는 지금 사용한 한 개의 나선형 라인보다는 발효상 전체로부터 열을 회수할 수 있도록 2 혹은 3개의 나선형 관의 배치가 더욱 효과적 일 것이라 생각되며, 이를 위해서는 관의 변곡이 용이한 새로운 재질의 선택이 요구된다.

3.2. 침엽수 : 활엽수톱밥(50 : 50)을 이용한 나선형 열교환기(HX-H2)의 발효 열특성

침엽수 : 활엽수톱밥(50 : 50)의 발효상에서 퇴적 후 위치별 열전대의 온도 변화를 경시적으로 측정된 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 전체적으로 온도는 평균 40~60°C에 분포하였으나 열전대 I, H부위는 80°C의 높은 온도를, 반대로 D는 25°C 전후의 온도를 나타냈다. D는 열교환기의 상층부에 위치하여 방사열량이 많고, 하층부는 발효의 진행과 함께 점차 가라앉아 단열이 되지 않은 대지의 영향을 받아서 온도가 낮게 측정된 것으로 생각된다. 각 열전대 사이의 온도차는 크게 50~60°C까지 나타났는데, 이는 발효상 퇴적 시 발효조제의 불균일한 배합으로

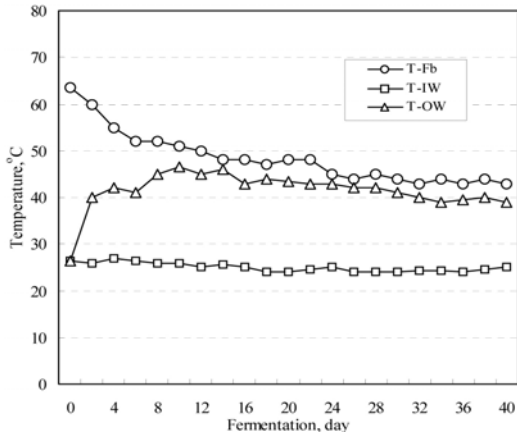


Fig. 8. Temperature changes of inlet-outlet water temperature during fermentation (HX-H2). T-Fb: Temp. of fermenting bed; T-IW: Inlet water temp.; T-OW: Outlet water temp.

인해 국지적인 발효의 불균형 때문에 일어난 것으로 생각된다.

본 실험은 열교환기가 실제 가정용 온수기로의 사용가능성을 확인하기 위하여 수행되었다. 일일 가정에서 사용하는 온수량은 1인당 60 리터 정도로 계산 시, 5인 가족의 온수필요량 300 리터(0.267 k/s의 유량으로 20분)로 공급되는 실험 모델을 구성하였다. 일정 온도의 온수(수온 45°C를 기준)를 공급할 수 있도록 열교환기와 물탱크가 연결된 펌프를 이용, 열교환기를 작동시킨 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 열교환기의 초기 온도가 급상승하는 효과와는 달리 발효상 및 출구의 온도는 시간이 지남에 따라 근접되면서, 출구 수온이 40~45°C로 거의 일정한 분포를 보였다. 본 연구에서 설계 제작된 바이오매스 열교환기는 4~5인 기준의 가정용 일일 온수공급을 위해서 충분한 성능을 가지는 것으로 확인되었다.

3.3. 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10)를 이용한 나선형 열교환기(HX-H3)의 발효열특성

HX-H3장치는 실제 4평 규모의 방을 난방하기 위

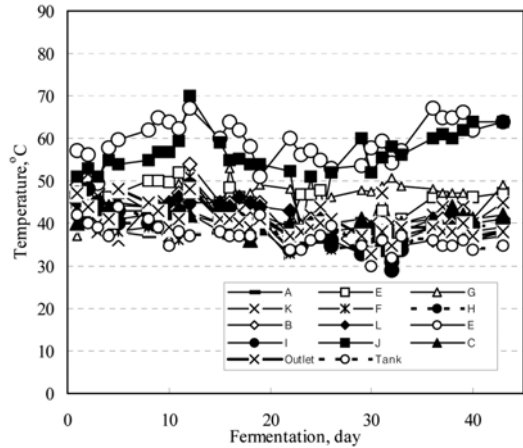


Fig. 9. Temperature profile of exit water in water tank during fermentation (HX-H3) Symbols refer to thermocouple positions.

해 실연용 방을 열교환기 옆에 제작 설치하였다. 아울러 방안에는 라지에이터를 연결하여 발효상에서 가열된 난방수가 공급되도록 하여 난방효과를 확인하였다. 내경 25 mm의 파이프를 나선형으로 제작하였으며, 철제 프레임에 온수 순환용 파이프를 고정시킨 구조를 하고 있으며, 파이프 피치를 50 mm로 하였다. 열 회수의 공학적 해석을 위해 300 리터의 물을 유지하였으며, 하루에 3회, 1회당 30분의 운용시간을 정하여 실험에 임하였다.

Fig. 9는 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10) 혼합 재료의 발열특성 및 발효상 내부에 설치한 온수 파이프로 공급된 물의 온도를 경시적으로 측정된 결과로써, 측정부위에 따라 온도가 상당한 편차를 보이고 있으며, 최고온도 68~70°C, 최저온도 30°C 전후, 평균온도 50°C였다. 열전대 위치별로는 발효상 중앙부위가 대체적으로 가장 높은 온도를 보였고, 그 다음이 상부, 하부의 온도가 비교적 낮은 것으로 관찰되었다. 물탱크의 온도 및 출구의 수온을 45일간 측정된 결과, 물탱크의 온도는 33~48°C 범위를 나타냈으며, 전 기간을 통하여 거의 유사한 결과를 보여주었고, 탱크출구의 수온은 33~44°C 범위로 탱크온도와 유사하였다.

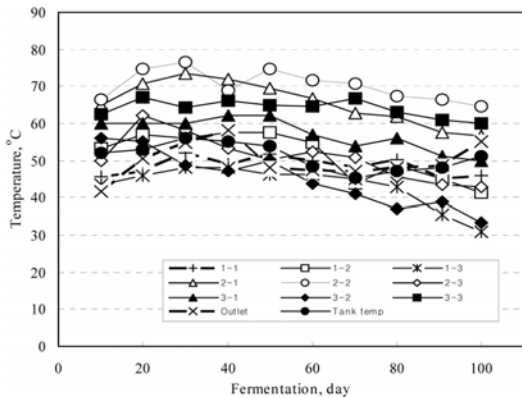


Fig. 10. Temperature profile of exit water in water tank during fermentation (HX-P) Symbols refer to thermocouple positions.

3.4. 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10)를 이용한 평판형 열교환기(HX-P)의 발효열 특성

온수 급탕용 평판형 열교환기(HX-P)는 사전의 실험에서 발견된 문제점들을 보완하였고, 사각기둥형 철재 프레임 사용, 순환 파이프를 고정하였는데, 그 구성 및 규격은 Fig. 2, Table 2에 상세히 나타냈다. 특히, 이 모델은 농가에 설치 및 해체의 용이성에 중점을 두고 설계되었다. 전술한 바와 같이 발효재료는 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10)의 비율로 퇴적하였다. 열 회수의 공학적 해석을 위해 300 리터의 물을 유지하였고, 실험 초기 단계부터 지속적으로 24시간 순환펌프가 작동되어 언제나 온수공급이 가능하도록 하였다. 실험결과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 나선형 열교환기(HX-H3)에서처럼 측정 부위에 따라 상당한 온도편차를 확인할 수 있었고, 대체로 중앙부의 온도가 64.5~76.5°C로 매우 높았으며, 햇빛이 들지 않았던 부위가 37~67°C로 상대적으로 낮은 온도로 관찰되었다. 물탱크의 출구 및 내부온도를 100일간 측정한 결과, 물탱크 온도는 43~56°C, 출구의 수온이 42~58°C로서 물탱크 온도보다 약 2°C정도 낮았다.

발효재료를 활엽수톱밥이나 침엽수톱밥을 단독으로 사용한 경우 발효 지속시간이 20시간 정도였는데(이 등, 2005) 비하여, 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10)를 사용함으로써 발효열 지속 시간이 약 3개월 증가하였다. 더욱이 열회수 기간(이 등, 2005)을 비교하면 HX-H1은 10일, HX-H2는 40일, HX-H3은 45일이었는데 비해서 HX-P는 온수 순환을 24시간 지속적으로 진행하였기 때문에 타 열교환기에 비하여 100일정도 많은 열 회수가 이루어졌음을 알 수 있었다. 따라서 최적의 발효열 교환기로는 활엽수톱밥 : 산야초(90 : 10)를 이용한 평판형 열교환기가 가장 우수한 결과를 나타냈다. 나아가서 이 장치의 제작, 설치 및 해체가 매우 용이하였고, 높은 열교환 성능을 보였으며, 용량에 따른 크기의 조절이 편리하다는 장점이 있었다.

3.5. 발효열교환기의 평가

발효열교환기의 최종 목표는 농가에서 폐 바이오매스를 이용한 저가의 난방 및 급탕을 가능케 할 열교환기의 상품화이다. 따라서 본 연구의 궁극적인 관점은 실제 농가에 적용이 가능하며, 상품화가 쉽고, 설치 및 해체가 용이함을 확인하는 것이었다. 이러한 관점에서 성능 향상을 가져올 수 있는 다양한 방법이 시도된 결과, 열교환기 파이프의 직경이 감소하면 열 교환에 더 유리함을 이론적 분석과 실험(이 등, 2004)을 통하여 확인하였고, 유량이 0.2 kg/s 이상, 온수파이프 직경 20 mm 이하가 최적임을 확인할 수 있었다.

지금까지 수행한 4종의 열교환기실험 결과를 종합하면 나선형 열교환기 HX-H1은 수온이 35~36°C 범위로서 더 이상의 온도상승이 없었고, HX-H2는 온수온도가 40~45°C로서 일정한 분포를 보였다. 한편 HX-H3는 최고온도 68~70°C, 최저온도 30°C, 평균온도 50°C였고, 출구의 온수온도는 33~44°C 범위로서 45일간 온수공급이 가능하였다. 한편 평판형 열교환기 HX-P는 42~58°C의 온도를 지속시킬 수 있었으며, 80여 일 이상 온수를 공급할 수 있는 것으로 관찰됨으로써 4~5인 기준의 일일 온수공급을 위해서 충분한 성능을 발휘하는 것으로

확인되어, 가정용 급탕 및 난방목적으로 가장 좋은 결과를 나타냈다.

한편 나선형 열교환기(HX-H) 및 평판형 열교환기(HX-P)의 성능을 비교한 결과, 전자의 경우 나선형으로 관을 설치하게 되므로 발효상의 전 면적에서의 발효열을 효과적으로 회수하기 어려웠으며, 이를 개선하기 위해서 내부에 또 다른 나선형 배관을 설치하여야 하지만 직경 20 mm 관일지라도 배관시 변곡이 어려워 제작이 불가능하였고, 특히 바이오매스재료의 퇴적 및 철거가 용이하지 않았다. 이에 대하여 평판형 열교환기는 전 면적에 고무 관이 배치되어 발효상 전면적을 통해 발생하는 열을 충분히 회수 할 수 있었으며, 장시간 운용시에도 온도의 급강하가 발생하지 않았다는 장점이 있었다. 한편 평판을 미리 제작하여 연결만 하면 사용가능하였고, 발효가 끝난 바이오매스를 유기질비료 등으로 이용시 평판만 해체하면 손쉽게 잔사의 수거가 가능하였다. 농가에서 실용화에는 나선형 배관구조보다 평판형구조가 제작, 설치 및 해체가 용이했으며, 성능 또한 우수한 것으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구는 페바이오매스로서 활엽수톱밥, 침엽수톱밥, 산야초류 등 3종의 발효재료를 이용, 3종의 나선형 열교환기와 1종의 평판형 열교환기를 제작하여 발효과정에서 생산되는 발효열을 가장 효율적으로 회수할 수 있는 발효열 교환장치 개발을 위하여 실시하였다. 본 연구에서는 다양한 바이오매스재료의 배합을 통한 발효 및 열교환 특성을 조사하고 실제 농가에 설치 및 해체가 용이한 열교환기를 개발하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

나선형 열교환기의 경우 HX-H1은 수온이 35~36°C범위로서 더 이상의 온도상승이 없었고, HX-H2는 온수온도가 40~45°C로서 일정한 분포를 보였으며, HX-H3은 최고온도 68~70°C, 최저온도 30°C, 평균온도 50°C였고, 출구의 온수온도는 33~44°C 범위로서 45일간 온수공급이 가능하였다. 한편 평판형 열교환기 HX-P는 중앙부의 온도가 64.5~76.5°C로 매우 높았고, 물탱크의 출구 및 내부온도를 3개월 이상 측정할 결과, 물탱크의 수온이 43~

56°C, 출구 수온이 42~58°C로서 3개월 이상 온수공급이 가능하여 4~5인 기준의 가정용 난방 및 온수공급에 문제가 없음이 확인되었다.

한편 나선형 열교환기 HX-H 및 평판형 열교환기 HX-P의 성능을 비교한 결과, 나선형 열교환기는 나선형으로 관이 설치되므로 발효상 전 면적에서의 발효열을 효과적으로 회수하기 어려웠으며, 이의 개선을 위해서 내부에 또 다른 나선형 배관을 설치하여야 하지만 직경 20 mm 관일지라도 배관시 변곡이 어려워 제작이 불가능하였고, 특히 바이오매스재료의 퇴적 및 철거가 용이하지 않았다. 평판형 열교환기는 나선형 열교환기에 비해 발효상 전 면적에 관이 배치되어 발효상에서 발생하는 발효열을 최대한 회수할 수 있었으며, 평판을 미리 제작하여 연결만 하면 사용가능하고, 발효가 끝난 바이오매스를 유기질비료 등으로 이용시 평판만 해체하면 손쉽게 잔사의 수거가 가능하였다. 본 연구에서 개발된 페바이오매스를 이용한 발효열교환기는 농가의 난방 및 온수공급 목적으로 충분히 이용가능한 것을 확인하였으며, 향후 상품화는 나선형 시스템보다는 성능이 우수하면서도 발효상의 제작, 설치, 해체가 용이한 평판형 시스템이 유리한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김지동. 2001. 유기물 폐기물의 고속 혐기발효 및 메탄가스 정제 이용기술, 한국에너지기술 연구원, 과학기술부 연구보고서, No. 99-I-01-04-A-023.
2. 안원영, 조재명, 공영도. 1981. 목질계에너지 자원과 이용방향. 임산에너지학회지 1(1): 30~34.
3. 이종운, 박상진, 이건석, 조남석, 장준복, 안병조. 1989. 목질계바이오매스의 이용(1). 폭쇄장치의 제작 및 폭쇄재의 조성. 목재공학 17(2): 65~73.
4. 이충구, 이세균, 이계복, 이석호, 김정현. 2004. 페 바이오매스를 이용한 폐열 회수 열교환기에 관한 연구. 설비공학회 논문집 16(6): 514~521.
5. 이돈구, 이충구, 조남석. 2005. 산림 페 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발. 농림기술과제연구보고서(농림기술관리센터). pp. 1~245.
6. 조남석. 1983. 목질계자원을 이용한 대체에너지 개발. 영남대 자원문제연구 2: 1~13.
7. 조남석. 1989a. 자기가수분해와 효소적 당화(I). 한국펄

- 프종이공학회지 21(3): 24~34.
8. 조남석. 1989b. 자기가수분해와 효소적 당화(2). 한국 펄프종이공학회지 21(4): 21~30.
 9. 조남석. 1990. 목질계 폐재를 이용한 토양개량제 제조에 관한 연구, 영남대 자원문제연구논문집 9(1): 1~9.
 10. 조남석, 민두식. 1990. 대체연료생산을 위한 목질재료의 가수분해에 관한 연구(제5보). 묶은 황산에 의한 폭쇄처리재의 가수분해. 한국펄프종이공학회지 22(4): 35~40.
 11. 조남석, 이종윤, 윤병호, 황병호. 1987. 목재화학. 영남대출판부. pp. 371~401.
 12. 조남석, 임창숙, 이재성, 박신. 1991. 대체연료생산을 위한 목질재료의 가수분해에 관한 연구(제3보). 폭쇄처리재의 효소분해시 cellulase효소의 전량적 회수에 관하여. 목재공학 19(1): 14~21.
 13. 조남석, 최태호, 정선화, 김홍은, 이충구. 2003. 바이오에너지생산을 위한 산림폐바이오메스의 발효. 한국목재공학회 추계학술발표논문집. pp. 366~369.
 14. 조남석, 최태호, 김홍은, 이충구. 2006. 산림폐바이오메스를 활용한 발효열장치의 개발. 한국목재공학회 추계학술발표논문집. pp. 324~325.
 15. 조남석, 최태호. 2008. 바이오에너지생산을 위한 목질계 폐바이오메스의 발효. 목재공학 (투고중).
 16. 한국과학기술원. 1981. 목질자원의 사료화 및 연료에너지생산을 위한 연구. 한국과학기술연구원 보고서. pp. 1~28.
 17. 阿部佳之. 2005. 흡인 통기식 퇴비화 처리기술의 개발. 일본 농업생물특정산업 기술연구기구(農業生物特定産業 技術研究機構) 축산조지연구소(畜産草地研究所), 축산환경부. pp. 1~219.
 18. 日本科學技術廳. 1971. 木材工業의 廢材의 그 利用. 資源調查會編. pp. 1~385.
 19. 河田 弘. 1981. Bark 堆肥. 博友社 pp.15~41.
 20. Arvelakis, S. and E. G. Koukios. 2002. Physicochemical upgrading of agroresidues as feedstocks for energy production via thermochemical conversion methods. Biomass & Bioenergy 22: 331~348.
 21. Dahn, J., C. Bales, K. Lorenz, and J. Dalenback. 1998. Evaluation of storage configurations with internal heat exchangers. Solar Energy 62(6): 407~417.
 22. Davey, C. 1953. Sawdust composts: their preparation and effect on plant growth. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 59~60.
 23. Davey, C. 1955. Transformation of sawdust in the course of its decomposition under the influence *Coprinus ephemerus*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19: 376~377.
 24. Dunn, S., L. P. Jr. Wolfe, W. A. Macdonald, and J. R. Baker. 1952. Field plot studies with sawdust for soil improvement. Plant & Soil 2: 164~170.
 25. Faaij, A. P. C. 2006. Bio-energy in Europe: Changing technology choices. Energy Policy 34: 322~342.
 26. Gil, J., J. Corella, M. P. Aznar, and M. A. Caballero. 1999. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution. Biomass & Bioenergy 17: 389~403.
 27. Goldstein, I. S. 1981. Organic Chemicals from Biomass. CRC Press, Boca Raton, pp. 1~100.
 28. Grethlein, A. J. and M. K. Jain. 1993. Bioprocessing of coal-derived synthesis gases by anaerobic bacteria. Trends in Biotechnology 10: 418~423.
 29. Holman, J. P. 1997. Heat Transfer, McGraw Hill, New York, pp. 30~125.
 30. Lin, Y. and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Applied Microbiology and Biotechnology 69: 627~642.
 31. Lucas, C. D. Szewczyk, W. Blasiak, and S. Mochida. 2004. High-temperature air and steam gasification of densified biofuels. Biomass & Bioenergy 27: 563~575.
 32. Matsumura, Y. 2002. Evaluation of Supercritical Water Gasification and Biomethanation for Wet Biomass Utilization in Japan, Energy Conversion & Management 43: 1301~1310.
 33. Muraki, E., F. Yaku, R. Tanaka, and T. Koshijima. 1982. Enzymatic degradation of finely divided wood meal. Mukuzai Gakkaishi 28: 122~128.
 34. Pain, I. and J. Pain. 1972. The Methods of Jean Pain: Another Kind of Garden. Commite International Jean Pain, Hofter Winkelen, Londerzeel, Belgium.
 35. Shimizu, K. 1981. Development of Fuels and Chemicals from Biomass. Fuji Technosystem 275. pp. 25~150.
 36. Strakanen, K. and D. A. Tillman. 1979. Progress in Biomass Conversion. Academic Press, New York. pp. 6~126.
 37. Yoshioka, T., S. Hirata, Y. Matsumura, and K. Sakanishi. 2005. Woody biomass resources and conversion in Japan: The current situation and projections to 2010 and 2050. Biomass & Bioenergy 29: 336~346.