

바이오에너지생산을 위한 목질계 폐바이오매스의 발효*1

조남석*2† · 최태호*2

Fermentation of Waste Woody Biomass for the Production of Bioenergy*1

Nam-Seok Cho*2† · Tae-Ho Choi*2

요 약

본 연구는 시멘트 블록조 발효상을 축조하고, 산림 및 농산 폐바이오매스의 발효 특성을 구명하기 위하여 수행되었다. 활엽수(신갈나무가 중심이 되는 활잡목)톱밥, 침엽수(낙엽송)톱밥, 낙엽류(소나무 및 플라타너스 낙엽), 볏짚, 산야초류 등 5종의 발효재료를 사용, 발효첨가제로서 요소, 발효용 부숙비료, 석회 등을 첨가하였고, 전체의 함수율을 55~60%가 되도록 조절하여 발효시켰으며, 궁극적으로 최대 발효열 효율을 얻기 위한 재료의 배합비, 최적수분함량 등을 검토하였다. 발효온도는 활엽수톱밥(100%)가 가장 좋았고 침·활엽수톱밥(50:50)구도 비교적 좋은 편이었다. 발효온도가 가장 높았던 활엽수톱밥 단독의 경우, 최고온도 60~90°C, 최저온도 40°C 전후, 평균온도 50~60°C의 범위를 20~30일간 유지하였으며, 이 때 최적 배합비율은 발효재료 1 톤에 대하여 요소 15 kg, 발효용 부숙비료 20 kg, 석회 10 kg, 함수율 55%이었다. 최적발효조건에서 온수탱크의 수온을 측정 한 결과, 활엽수톱밥과 산야초를 50 : 50으로 혼합한 경우, 측정부위에 따라 상당한 편차를 보였으며, 발효상 중부 및 상부의 온도가 대체적으로 높았고, 하부층의 온도가 낮았다. 발효온도는 최고 65°C, 최저 40°C 전후, 평균온도 60°C였으며, 온수탱크의 온도를 45일간 측정한 결과, 30~45°C 범위를 나타냈으며 전 기간을 통하여 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 탱크출구의 수온은 33~48°C 범위로 탱크온도보다 약간 높았다. 본 실험에서 개발된 열교환기(HX-helical type)를 사용한 경우, 50~60°C의 발효열을 최대 3개월정도 이용 가능하였다.

ABSTRACT

In this study, fermentation characteristics of waste agricultural and forest biomass for production of heat energy were focused to be used in agricultural farm households. The purpose

*1 접수 2008년 6월 30일, 채택 2008년 8월 6일

본 연구는 2007학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

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

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

of this study was focused on seeking practical utilization of agricultural and forest biomass wastes in agricultural farm households in the form of thermal energy by means of simple fermentation process. Fermentation process was performed in terms of different raw-materials and their mixture with different ratios. Urea, lime, and bioaids were added as fermenting aids. Moisture contents of fermenting substrates were adjusted to 55~65%. In order to optimize the fermentation process various factors, such as raw-materials, moisture contents, amount of fermenting aids, and practical measurement of hot-water temperature during fermentation were carefully investigated. The optimum condition of fermenting process were obtained from hardwood only and hardwood: softwood (50 : 50) beds. In case of hardwood only the highest temperature was recorded between 60 to 90°C the lowest temperature was determined to more or less 40°C and the average temperature was ranged to 50~60°C and this temperature ranges were maintained up to 20~30 days. The optimum amount of additives were estimated to ca. 15 kg of urea, 20 kg of bioaids, and 10 kg of lime for 1 ton of substrate. To reach the highest temperature the optimum moisture content of fermenting substrate was proved to 55% among three moisture content treatments of 45%, 55% and 65%. The temperature of hot-water tank installed in fermenting bed of hardwood : grass (50 : 50) showed very different patterns according to measuring positions. In general, temperatures in the mid- and upper-parts of substrate piling were relative higher than lower and surface parts during 45-day fermentation process. The maximum temperature of fermenting stage was determined to 65°C, minimum temperature, more or less 40°C, and average temperature was 60°C. The water temperature of tank exit was ranged to 33~48°C during whole measuring periods. It could be concluded that fermentation process of waste agricultural and forest biomass produces a considerable amounts of heat, averaging about 50~60°C for maximum 3 months by using the heat exchanger (HX-helical type).

Keywords: fermentation, woody biomass, alternative energy resources, waste forest biomass, agricultural biomass, heat exchanger

1. 서 론

오늘날 대체에너지 자원의 개발은 범지구적인 당면과제로 부각되었으며, 유한자원인 화석자원의 대체자원으로서 가장 축적량이 풍부(1.84×10^{11} ton)하고, 그 분포도 광범위하며 재생산가능(년간 1.7×10^{10} ton)한 바이오매스 자원의 이용에 관한 많은 관심이 세계적으로 집중되고 있으며, 따라서 이들 자원을 원료로 한 에너지원 및 화학공업 원료로의 전환기술을 개발하려는 연구가 세계적으로 활발히 추진되고 있다. 대부분의 에너지 자원을 수입에 의존하고 있는 우리나라에서는 대체에너지 자원의 개발

이 매우 시급하다. 최근 10년간 국내 에너지 소비는 매년 10%의 높은 증가율을 기록하고 있으며, 온실가스배출량 증가율 역시 세계 1위를 기록하고 있다. 이에 대체에너지 개발 및 이용·보급 촉진법 제2조에서 대체에너지로 재생에너지 8개 분야(태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지)와 신에너지 3개 분야(연료전지, 석탄액화·가스화, 수소에너지)를 지정하였다. 미국은 2010년경 전체 에너지 소비량의 10%를 대체에너지로 충당할 계획에 있으며, 목질계 바이오매스의 전처리를 통한 바이오가스 및 바이오에탄올의 생산연구(Goldstein, 1981; Strakanen and Tillman,

1981)를 시작하였다. 유럽연합(EU)은 2010년까지 대체에너지의 비중을 현재의 2배인 12%까지 끌어올리는 계획이 있다(에너지백서, 1997). 또한 덴마크는 1990년대에 이미 4,900개의 풍력터빈에서 1,135 MW의 전기(전체 전기소비량의 7%)를 생산하고 있었으며, 2030년까지 전체 전기소비량의 50%를 풍력으로 대체할 목표로 대체에너지의 개발에 노력하고 있다.

바이오매스의 에너지화 이용연구와 관련하여 Jean Pain은 바이오매스를 이용하여 온수를 공급하고 그 부산물로 발생하는 암모니아 가스를 연료로 사용할 수 있는 방법(Paine and Paine, 1972)을 제시하였다. 미국의 경우 목재톱밥을 이용한 연구로서 1950년대 초 Dunn 등(1952)이 행한 계분 첨가 및 기타처리에 의한 톱밥의 발효, Wisconsin 대학의 Davey (1953: 1955) 등에 의해 Sugar maple 톱밥을 이용, 분해균을 접종하여 발효시키는 방법의 연구, 일부 발효조로 가스 공급을 하는 연구가 주류를 이루었다. 프랑스의 경우 발효열을 이용한 온수 공급에 대한 연구가 시도되었으며, 프랑스, 벨기에 등 유럽에서는 2차 대전 직후 부족한 에너지 공급을 위하여 혐기발효에 관한 연구를 활발히 진행한 바 있으며, 특히 유럽에서는 메탄가스 회수에 대한 연구가 많다(Caputo *et al.*, 2005; Faaij, 2006; Rapagna *et al.*, 2000; Gil *et al.*, 1997) 이 수행된 상태이다. 벨기에에서는 발효열 및 메탄가스 회수에 대한 연구가 많은 진척을 보이고 있으며, 독일에서는 1975년 바이오가스를 압축 보관하여 연료로 사용할 수 있는 형태의 발효조를 개발, 전기발전 을 위한 시설까지 보급 이용하고 있다(Grethlein and Jain, 1993; Gil *et al.*, 1997; Arvelakis and Koukios, 2002; Lucas *et al.*, 2004). 일본의 경우 島本 (1956)가 발효첨가제를 사용하여 톱밥발효연구를 실시하였고, 일본 과학기술청(1971)이 목재공업폐계의 종합적 이용에 관한 보고서를 발표하였다. 일본의 경우 목질계 바이오매스를 이용한 바이오에탄올(Shimizu, 1981; Muraki *et al.*, 1982; Yoshioka *et al.*, 2005; Lin and Tanaka, 2006) 연구, 그리고 阿副 (2005)에 의한 톱밥의 발효를 통한 발효열과 잔사의 유기질비료로서의 이용 및 Matsumura (2002)에 의한 메탄가스의 에너지화 연구도 보고되었다.

우리나라는 여전히 원자력 위주의 에너지정책에서 탈피하지 못하고 2015년까지 원자력발전의 비중을 27.5% (1998년)에서 34.2%로 늘릴 계획이며, 현재 우리나라의 대체에너지 비율은 2.24% (2006년 기준)에 불과하여 대체에너지의 개발은 더욱 시급한 과제로 되고 있다. 특히 산림이 전 국토의 65%를 차지하고 있는 우리나라는 산림면적이 650만 ha, 연간 목재사용량은 약 2,700만 m²으로서 목재자급률이 9%에 지나지 않으며, 여기서 발생하는 폐재량이 약 500만 m²에 달하고 있으며(산림청, 2008). 이 가운데 폐 바이오매스는 일부만 보일러 연료로 사용되고 나머지는 폐기 또는 공해원으로 취급되어 많은 기업들이 그 처리대책에 고심하고 있다. 한편, 산림 바이오매스 자원을 이용한 대체에너지의 연구와 개발이 매우 중요하다고 생각된다. 바이오매스의 에너지화 연구는 1980년대 초부터 한국과학기술연구원 (1981), 안 등(1981) 및 조(1983) 등을 중심으로 연구되어 왔으며, 그 연구의 중심은 바이오에탄올, 메탄가스 생산(김 등, 2001) 등으로 집약된다. 바이오매스를 이용한 에탄올 생산과 관련된 연구는 바이오매스자원의 전처리(조·민, 1990; 조 등, 1991; 이 등, 1989; 조, 1989a; 조, 1989b)가 연구의 핵심을 이루었고, 이러한 전처리의 추가적 비용 때문에 전분질 원료에 비해서 목질계 바이오매스 자원이 바이오에탄올 생산에는 당시의 상황에서는 경쟁력이 떨어지는 것으로 평가되었다. 그러나 근년 석유가격이 앙등되고, 식량과의 경합으로 전분질원료의 가격이 상승하여 목질계 바이오매스의 에너지화가 가격 경쟁력을 갖게 되면서 각국이 앞다투어 목질계 바이오매스의 연료화를 위한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 산림 및 농산 폐바이오매스(이하 폐바이오매스)를 이용한 고효율의 발효열 교환장치 개발을 위한 전단계로서 이들 폐 바이오매스자원의 발효 특성을 검토하였다. 공시재료로서 활엽수(신갈나무가 중심이 되는 활잡목)톱밥, 침엽수(낙엽송) 톱밥, 벚짚, 산야초류 등 4종의 발효재료에 대하여 각 재료의 혼합비 및 수분함량에 따른 발효특성을 분석함으로써 궁극적으로 최대 발효열을 얻기 위한 최적조건을 구명하고자 하였다.

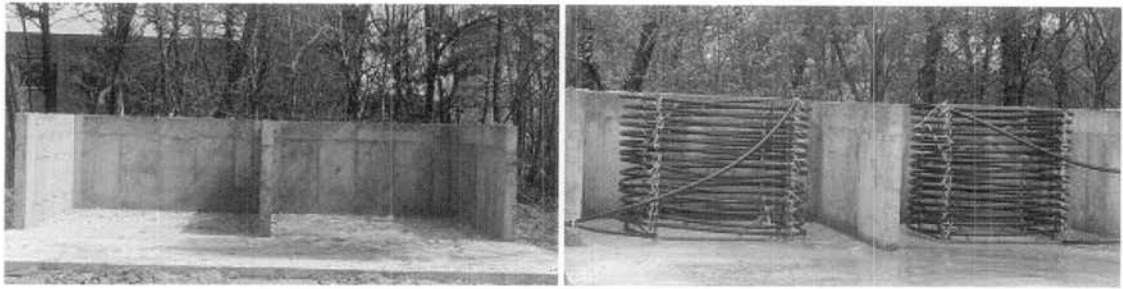


Fig. 1. Fermenting bed (left) and pipe installation (right) for hot water.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

산림 및 농산 폐바이오매스는 활엽수(hardwood, HW)톱밥, 침엽수(softwood, SW)톱밥, 볏짚(straw), 산야초류(grass) 등 4종의 발효재료로 구성되며, 침엽수재 원료로서 낙엽송재 톱밥은 산림조합연합회 충북도 청원군지부에서 생산되는 톱밥을 공시하였고, 신갈나무를 주종으로 한 HW톱밥은 충북도 청원군소재 (주)풍림으로부터 구입하였다. 갈대류를 주종으로 한 산야초(갈대류, 볏짚)는 충북대학교 부속 농장, 수목원으로부터 수집, 공시하였다.

2.2. 폐바이오매스의 발효상 및 원재료의 배합

발효상은 가로 3.0 m, 세로 3.0 m, 높이 1.5 m로서, Fig. 1에서 보는 바와 같이 시멘트 콘크리트 조로 축조하였다. 발효상을 연속하여 2개 축조하여 2종의 발효재료를 동시에 발효하도록 하였다. 목질계 폐바이오매스는 펄프프로판구조를 가진 리그닌 성분을 많이 함유하고 있으며(조 등, 1987), 종류에 따라 각기 원소의 조성이나 성질이 전혀 다르고, 일반적으로 짚류, 풀, 낙엽 등 보다는 분해가 어려울 뿐만 아니라(조 등, 1987; 조, 1990a; 1990b), 수중에 따라서는 미생물의 생육을 저해하는 항균성물질을 포함하거나, 탄소율(C/N율)이 매우 높기 때문에(河田, 1981) 그대로 발효할 경우, 발효가 진행되지 않

Table 1. Basic mixing ratio of fermenting substrates

Substrates	Mixing ratio
Sawdusts, kg	1,000
Urea, kg	10
Fermenting aids, kg	15
Lime, kg	10
Moisture contents (%)	55~60

는 문제점이 있다. 따라서 초기의 발효를 돕기 위해서 C/N 율을 낮추어야만 하므로 Table 1에서 보는 바와 같은 뇨소, 발효용 비숙비료 및 석회 등 발효조제를 기질중량에 대하여 1~1.5% 첨가하였다.

본 실험에서 사용된 배합비는 많은 예비실험 결과를 거쳐 이루어진 것이며, Table 1의 배합비에 따라 원재료들을 혼합하여 1.5 m의 높이로 공기가 잘 통하도록 쌓았으며, 함수율을 55~60%가 되도록 조절하여 발효상을 완성하였다. 수분의 일산을 막고, 폐바이오매스 내의 함수율을 일정하게 하기 유지시키기 위하여 비닐로 상부를 피복, 강우와 수분증발에 대비하였다(Fig. 2).

발효과정에서 경시적 온도변화를 측정하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같은 열교환기(Heat exchanger, HX-helical type)를 제작(Dunn *et al.*, 1952; 이 등, 2004)하여 발효상 내부에 설치하였다. Fig. 3의 열교환기는 SW톱밥, HW톱밥, 볏짚 그리고 산야초의 4종 재료에 대한 발효로부터 발생하는 열을 회수하기 위해서 각각의 열교환기에 대한 계산결과(이 등, 2004)를 바탕으로 설계 제작되었으며, 발효를 통해서 발생하는 열과 지속성을 판단하기 위해서 40일

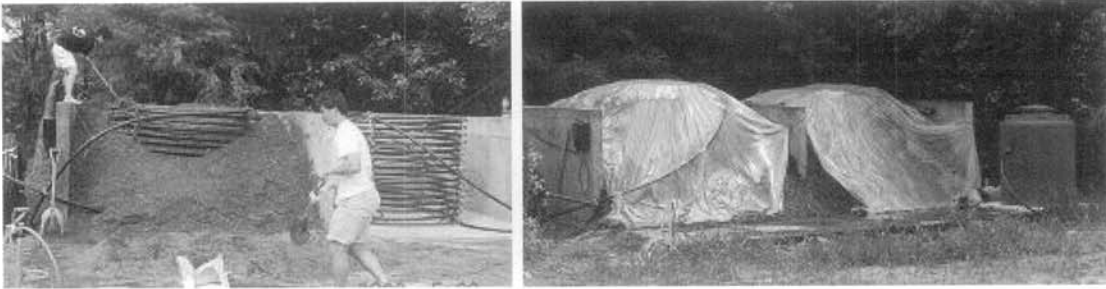


Fig. 2. Piling of fermenting substrates and its pile.

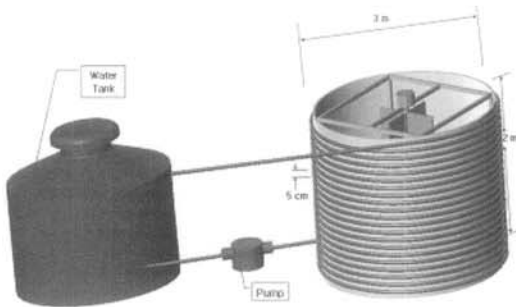


Fig. 3. Design of heat exchanger (HX).

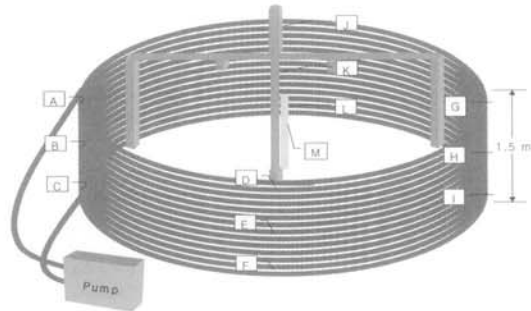


Fig. 4. Thermocouple position.

Table 2. Specifications of biomass heat exchanger

Biomass	SW	HW	HW-Leaves-Grass
Total weight, kg	1,000	1,000	1,000
Heat exchanger type	helical	helical	helical
Dimension (I.D, O.D. (mm))	30, 42	30, 42	30, 42
Pipe pitch (mm)	65	65	100
Pipe length (m)	100	100	120
Frame (L × W × T)	2,200 × 2,200 × 1,500	1,800 × 1,800 × 1,500	2,400 × 2,400 × 1,500
Heat exchanging area (m ²)	13.2	13.2	15.8
Heat exchanger dia. (m)	25	22	28

동안 발효에 따른 발열량 특성을 관찰하였다.

열교환기의 재질은 나선형의 열교환기의 제작을 위해 변형의 용이성과 본 연구가 향후 농촌의 에너지 재활용을 위한 목적으로 제작단가의 절감을 위해 PE 파이프(I.O.: 30 mm, D.O.: 42 mm, k = 0.33

W/m°C)를 사용하였다(Fig. 3). 파이프의 회전반경은 1.1 m, 높이는 1.5 m이며, 물 저장탱크와 펌프의 조합으로 구성하였다. 아울러 파이프의 지지를 위해 철재 앵글을 이용하여 프레임을 제작하였다. 열교환기의 규격은 Table 2에 정리하였다. 물의 온도를 측

정하기 위해 K-type ($\phi=1$ mm) 열전대를 SW 및 HW톱밥용은 8개, 산야초용은 13개 삽입하였다. 열전대 삽입 위치는 Fig. 4와 같이 배치하였으며, 3개의 K-Type probe (sheath type, $\phi=1$ mm)형 열전대가 파이프의 입출구와 물탱크 내부의 온도를 측정하기 위해서 삽입되었다. 유체는 펌프를 이용하여 열교환장치의 하단부로 유입되어 발효열을 흡수하여 상단으로 나와 저장탱크의 남은 유체와 혼합되는 시스템을 하고 있다. 유체는 경제적으로 저렴하고 수급이 쉬우며 뛰어난 열 회수율을 얻을 수 있는 물을 사용하였다. 열 회수의 공학적 해석을 위해 300 리터의 물을 유지하며 실험하였다.

2.3. 폐 바이오매스의 혼합비 및 함수율에 따른 발효특성

재료별 혼합비율에 따른 발효 특성을 파악하기 위하여 HW톱밥 100%, SW톱밥 100%, SW톱밥:HW톱밥 = 50:50, HW톱밥:산야초 = 50:50 등으로 실험하였다. 소정의 배합비로 혼합된 톱밥재료를 발효상에 퇴적하고, 발효상 온도변화를 매 2일마다 측정하였으며, 수분의 일산을 막고, 폐바이오매스 내의 함수율을 일정하게 하기 유지시키기 위하여 비닐로 상부를 피복, 강우와 수분증발을 대비하였다(Fig. 2). 한편 함수율이 발효열에 미치는 영향을 알기 위하여 발효용 재료의 함수율을 45, 55, 65%로 각각 조절하고 동일한 조건에서 발효시켰을 때의 발효열을 측정하였다. 발효과정에서 발효조제의 첨가량이 발효열에 매우 큰 영향이 있음을 알게 되었으며, 가장 발효열특성이 좋았던 HW톱밥의 최적 발효열 특성을 알기 위하여 요소를 당초 기질중량의 1%에서 1.5%로, 발효용 부숙비료를 1.5%에서 2%로 증가시켜 발효열측정을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재료에 따른 폐바이오매스의 발효 특성

HW톱밥을 Table 1의 배합비로, 함수율을 55~

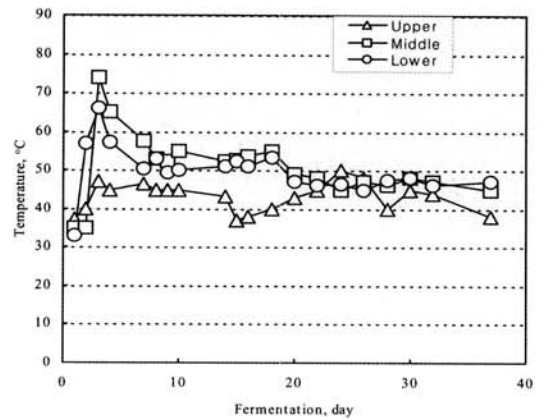


Fig. 5. Temperature profile during fermenting process (HW sawdust).

60%가 되도록 혼합하여 1.5 m의 높이로 적재하였으며, 재료를 적재하기 전에 발효상 내부에 설치한 온도측정용 센서를 이용, 내부의 온도변화를 경시적으로 측정한 결과는 Fig. 5와 같다.

HW톱밥의 경우는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 발효상의 온도상승이 매우 빨라 퇴적 5일 만에 중앙부에서 최고온도 74°C에 달하였고, 하층부 및 상층부도 각각 67°C 및 47°C로 높은 온도를 나타냈으며, 그 이후부터 1개월간 점차 서서히 42~52°C의 범위까지 유지되는 경향을 보였다. 발효과정에서 상승되었던 온도가 감소되는 이유로서는 발효 중 분해되기 용이한 유기물부분의 소멸 및 수분함량과도 관계가 깊은 것으로 생각되며, 따라서 발효온도를 더욱 상승 혹은 지속시키기 위해서는 톱밥의 발효과정에서 공기유통이 잘 되도록 하고, 외부의 기상조건 및 발효과정에서의 발열이 발효상의 수분부족을 가져오므로 적절한 함수율이 되도록 수분을 보충하여 호기적 미생물의 활동을 재차 촉진시키는 것이 바람직하나, 본 실험조건에서는 발효상 내부에 온수파이프가 배관되어 있어서 발효재료의 재 배합이 불가능하였다. 그러나 수분의 보충 및 재료의 교반이 수반되면 다시 발효온도가 상승하는 것은 유기질 토양개량제 연구(조, 1990)에서 이미 확인한 바 있다.

SW톱밥(낙엽송재)의 경우, 톱밥재료를 발효상에 퇴적하고 온도변화를 경시적으로 측정한 결과, Fig.

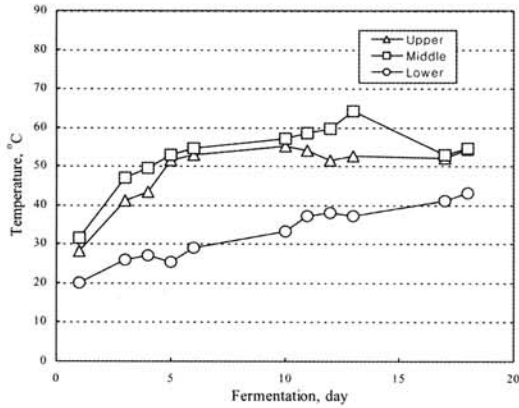


Fig. 6. Temperature profile during fermenting process (SW sawdust).

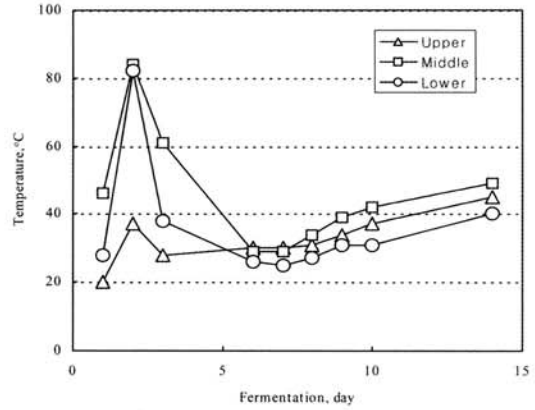


Fig. 7. Temperature profile during fermenting process (HW sawdust-Grass).

6에서 보는 바와 같이 발효온도가 HW톱밥에 비해 완만하게 상승하였으며, 15일간 계속 증가하여 중층부의 경우 퇴적 14일째 최고온도인 64°C에 달하였고, 상층부는 퇴적 10일만에 55°C의 가장 높은 온도를, 하층부는 퇴적 18일째 42°C의 온도를 나타냈다. HW톱밥의 경우에는 퇴적 5일 만에 중앙부에서 최고온도인 74°C, 하층부 및 상층부도 각각 67°C 및 47°C로 높은 온도를 나타냈는데 비하여 SW톱밥의 경우에는 13~15일이나 되서 최고온도인 67°C에 달하였다. 온도의 유지시간에 있어서도 HW톱밥은 최고온도 도달 후 1개월간 서서히 42~52°C를 유지하는 경향을 보여 주었는데 비하여, SW톱밥은 그 이후도 계속해서 온도가 유지되거나 다소 증가되는 상태를 보여주어 SW톱밥이 HW톱밥에 비해서 발효가 완만히 진행되면서 발효온도가 장기간 유지됨을 알 수 있었다.

산야초의 발효는 퇴적하여 발효시작 2일 만에 상부는 38°C, 중·하부는 80°C까지 온도가 급격한 상승을 보였으나, 이후 온도가 급히 하강하면서 발효 6일 만에 30°C 전후의 온도로 하강하였으며, 그 후 다시 서서히 증가하여 40°C전후를 나타냈다(Fig. 7). 그 원인은 산야초의 주종을 이루는 갈대류의 길이 매우 길었으나, 일정한 크기로 절단하지 못한 채 공시하여 타 발효재료와의 균일한 혼합이 이루어지지 못한 점을 들 수 있다. 한편 내부에 온수용 파

이프 설치를 위하여 넣었던 철제 frame이 산야초 발효상의 과다한 무게로 인하여 찌그러지면서 공간이 생겨 발효가 순조롭게 진행되지 않았으며, 퇴적 7일째부터 시작된 장마로 인하여 발효가 불량하게 된 것으로 생각된다.

3.2. 페바이오매스의 혼합비에 따른 발효특성

발효에 사용한 재료는 HW톱밥, SW톱밥, 볏짚, 산야초류 등 4종을 사용, 발효첨가제로 요소, 발효용 부숙비료, 석회를 첨가하고, 전체 함수율이 50~60%가 되도록 혼합하였다. 발효 시 온도상승이 매우 빨라 퇴적 5일 만에 중앙부에서 최고온도인 74°C, 하층부 및 상층부도 각각 67°C 및 47°C로 높은 온도를 나타냈던 HW톱밥(100%)의 발효를 다시 실시한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 퇴적 2일째부터 온도가 상승하여 50~80°C가 되었고, 발효 7일 상부의 온도가 20일 내내 77~90°C 전후로 나타났다. 온도가 3일까지 계속 증가하여 55°C로 되었다가 4일째 갑자기 온도가 38~48°C로 감소하였다. 그 후 다시 증가하여 발효시작 3주째 50~60°C를 유지하였다. 발효온도가 측정부위에 따라 다르게 나타났는데, 이러한 결과의 원인으로서는 발효퇴적 시 균일한 혼합이 이루어지지 않았던 것으로 추측된다.

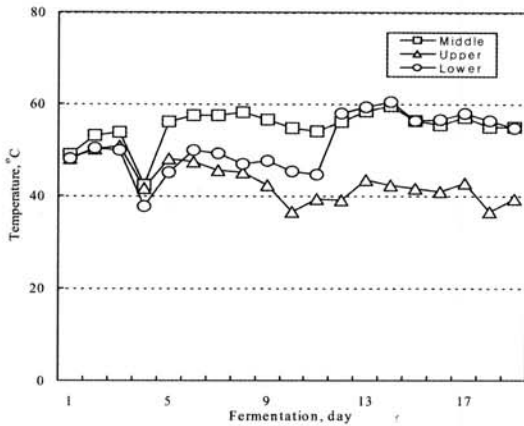


Fig. 8. Temperature profile during fermenting process (HW sawdust). Symbols are the same as Fig. 6.

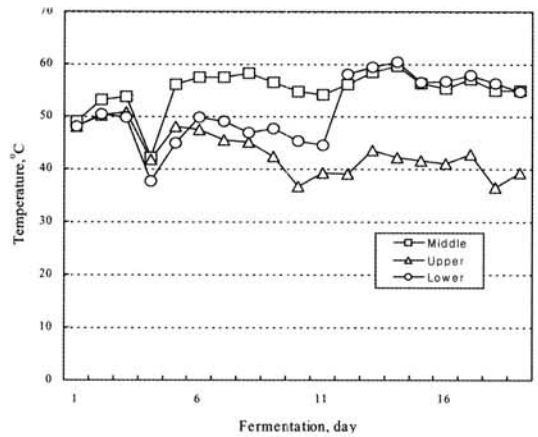


Fig. 10. Temperature profile during fermenting process (HW sawdust-Grass).

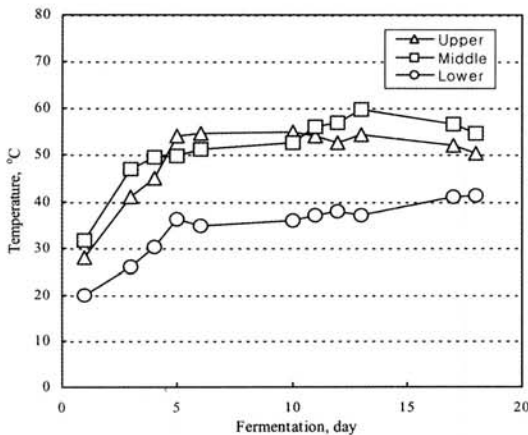


Fig. 9. Temperature profile during fermenting process (HW-SW sawdust).

HW톱밥-SW톱밥(50 : 50)의 발효시, 발열 경과를 보면 Fig. 9에서와 같이 온도상승이 매우 빨라 퇴적 5일 만에 상부 및 중앙부 50~55°C, 하층부 37°C에 달하였으며, 이후 2주일간 상층·중층부에서 50~60°C, 하층부 35~40°C를 보였다. SW톱밥의 경우 HW톱밥에 비해 온도 상승이 완만하였으며, HW톱밥만 사용하면 퇴적 5일에 중앙부에서 최고온도 74°C, 하층부는 67°C를 나타냈다. 따라서 HW톱밥-SW톱밥(50 : 50)의 발효는 SW톱밥만 사용하는 것

과 큰 차이가 없었다.

HW톱밥-산야초(50:50) 혼합의 경우, Fig. 10에서 보는 바와 같이 퇴적하자마자 발효더미의 온도가 47°C 전후까지 상승하였으며, 온도가 3일까지 50~54°C로 증가하다가 4일째 급격히 38~48°C로 하락(기계적 전기적 오차로 사료됨)하였으며, 그 후 다시 상승하였다. 측정부위별로는 발효상 중심부의 온도가 가장 높은 55~60°C를 20일간 유지하였으며, 중앙부는 45~65°C로서 중간 정도를, 하부는 40°C 전후로 상대적으로 낮은 온도를 보였다.

재료혼합 비율에 따른 발효특성을 Table 3에 정리하였는바, HW톱밥은 최고온도 65~74°C, 평균온도 43~49°C를 나타냈으며, 발효첨가제의 비율에서 요소를 종전의 10 kg에서 15 kg으로 올리고, 발효용 부숙비료를 15 kg에서 20 kg으로 증가시킨 결과, 최고온도 80~90°C, 평균온도 50~60°C, 유지기간은 20~30일 정도로 늘어나는 결과를 얻었다. 침엽수톱밥만 사용한 경우에는 최고온도 60~65°C, 평균온도 40~50°C, 유지기간이 2주 정도로 좋지 않았다. 한편 침엽수-활엽수톱밥을 50:50으로 혼합한 경우, 최고온도 58~60°C, 평균온도 35~55°C 정도로 침엽수 단독보다는 좋은 결과를 보여 주었다. HW톱밥-산야초(50:50)는 최고온도 58~60°C, 평균온도 50~55°C를 나타냈으며, 유지기간 또한 HW톱밥 단독 발효구와 마찬가지로 20~30일 정도로 늘어났다.

Table 3. Effect of mixing ratios of substrates on the fermentation

Raw materials	HW	SW	HW + SW (50:50)	HW + Grass (50:50)
Temperature, Mean (°C)	43~49	40~50	35~55	50~55
Maximum	65~74	60~65	58~60	58~60
Low	33	20	35	40
Maintaining period, day	≒ 25	≒ 15	≒ 15	≒ 20~30

3.3. 페바이오매스 함수율에 따른 발효특성

Fig. 11은 발효재료의 함수율을 45, 55, 65%로 각각 조절하고 동일한 조건에서 발효시켰을 때의 발효열을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 발효가 경과됨에 따라 온도가 급격히 증가하였으며, 함수율 55% 파일의 최고온도가 발효시작 16일 만에 74°C까지 상승하였다. 함수율 65%는 14일째 최고온도(55°C)를 보였으며, 함수율 45%의 경우에는 10일이 되어야 46°C의 최고온도를 보였다. 함수율 55% 및 65% 처리에서는 발효열이 최고온도로 되면서 급격히 하강하기 시작하였으며, 함수율 45% 처리구는 40°C 전후의 온도가 장시간 유지되었다. 한편, 65%의 처리구는 50°C 전후의 완만한 감소곡선을 나타내는데 비하여, 55% 처리구에서는 50°C까지는 급격한 저하를 보였고 그 이후는 40~55°C 범위로 서서히 감소되는 현상을 나타냈다. 이러한 온도의 감소는 발효에 사용되는 재료가 미생물의 분해로 소실되어 가용 영양기질이 감소하였고, 또한 발열로 설사 비닐피복을 하였다 할지라도 발효상의 수분이 증발되면서 적정발효를 위한 함수율이 부족한 상태가 되기 때문으로 생각된다(조, 1990). 발효과정에서의 함수율은 미생물의 활동 및 발효열에 매우 큰 영향을 주는데, 발효과정에서 발열온도가 떨어지는 것을 방지하기 위해서는 수분을 보충하고, 기질을 혼합시켜 미생물이 선호하는 호기적 환경으로 바꾸어 주어야 한다.

3.4. 최적발효 시 온수탱크의 수온

Fig. 12는 HW톱밥과 산야초를 50 : 50으로 혼합

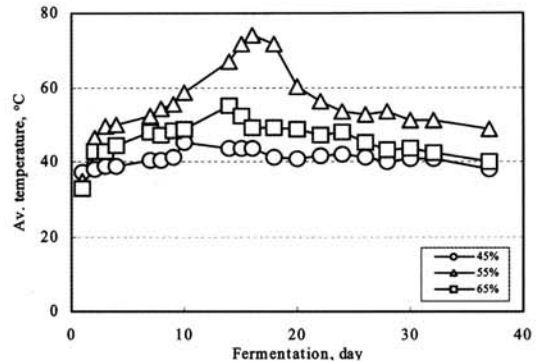


Fig. 11. Effect of moisture contents of substrates on fermenting process (HW).

한 재료의 발열특성 및 발효상 내부에 설치한 온수파이프 내로 도입된 물의 온도를 경시적으로 측정된 결과로서, 측정부위에 따라 온도가 상당한 편차를 보이고 있으며, 대체적으로 중부 및 상부의 온도가 높았으며, 하부의 온도가 낮았다. 탱크의 출구 및 내부온도를 45일간 측정된 결과, 최적발효조건에서 온수탱크의 수온을 측정된 결과, 측정부위에 따라 온도가 상당한 편차를 보였고, 최고온도 65°C, 최저온도 35°C전후, 평균온도 50°C였으며, 온수탱크의 출구 및 내부온도를 45일간 측정된 결과, 탱크의 온도는 30~45°C 범위를 나타냈으며 전 기간을 통하여 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 탱크출구의 수온은 33~48°C 범위로 탱크온도보다 약간 높았다. 본 실험을 통하여 발효열 교환기를 이용 시 35°C 이상의 온수를 최대 60일 이상 공급할 수 있었으며, 실험데이터를 수집한 이후에도 바이오매스의 온도는 지속적으로 50~60°C의 온도를 유지하고 있었다. 이러한 기초적 연구를 바탕으로 바이오매스 열교환

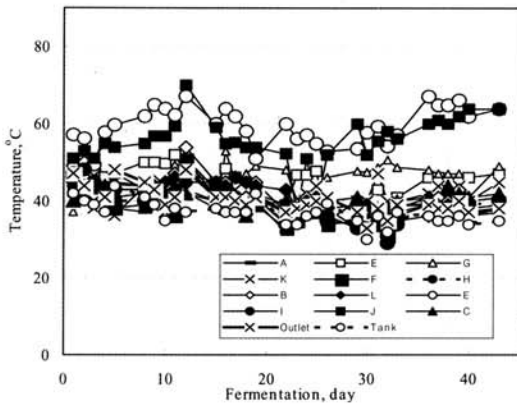


Fig. 12. Temperature profile of outlet water in water tank during fermentation. Symbols refer to thermocouple position.

기를 상용화 하였을 경우 1톤의 HW툽밥을 사용하여 가정용 온수 및 난방수로 최대 3개월까지도 이용 가능할 것으로 전망된다.

4. 결 론

본 연구에서는 산림 및 농산 폐바이오매스의 재료 혼합비율, 첨가제 및 수분함량에 따른 발효특성을 분석함으로써 궁극적으로 최대 발효열 효율을 얻기 위한 재료, 배합비, 최적수분함량 등을 구명코자 하였다.

시멘트 블록조 발효상을 축조하고, 활엽수툽밥(신갈나무 위주), 침엽수툽밥(낙엽송), 볏짚, 산야초류 등 4종을 발효재료로 사용하였다. 발효첨가제로는 요소, 발효용 부숙비료, 석회 등을 첨가하고, 함수율을 55~65%로 조절하여 발효시켰으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

HW툽밥은 온도 상승이 매우 빨라 퇴적 5일 만에 중앙부의 온도가 74°C로 가장 높았으며, 하층부 및 상층부도 각각 67°C 및 47°C의 온도를 나타냈다. 그 이후 1개월간은 42~52°C의 범위로 유지되었다. SW툽밥은 HW툽밥에 비해 완만하게 온도가 증가하였으며, 15일간 계속 증가하여 중층부에서는 퇴적 14일째 최고온도인 64°C에 달하였고, 상층부는 퇴

적 10일 만에 55°C, 하층부는 퇴적 18일째 42°C의 온도에 달하였다.

재료별 혼합비에 따른 발열지속시간 및 발효특성을 살펴본 결과, SW툽밥만을 사용한 경우 최고온도 60~65°C, 평균온도 40~50°C, 유지기간이 14일 정도로서 그다지 좋지 않았고, HW툽밥의 경우 최고온도 65~74°C, 평균온도 40~50°C를 나타냈으며, 발효첨가제의 비율에서 요소를 10 kg에서 15 kg, 발효용 부숙비료를 15 kg에서 20 kg으로 증가시킨 결과, 최고온도 80~90°C, 평균온도 50~60°C, 유지기간이 20~30일로 늘어났다. SW툽밥의 경우, 온도 상승이 HW툽밥에 비해 완만하게 증가하였으며, 15일간 계속 증가하여 중층부는 퇴적 14일째 최고온도인 64°C, 상층부는 퇴적 10일 만에 55°C, 하층부는 퇴적 18일째 42°C의 온도를 나타냈다. 한편 SW툽밥-HW툽밥을 50:50으로 혼합한 경우 최고온도 58~60°C, 평균온도 35~55°C 정도로 SW툽밥 단독보다는 좋은 결과를 보여주었다. 한편 HW툽밥-산야초(50:50)의 경우, 최고온도 58~60°C, 평균온도 50~55°C를 나타냈으며, 유지기간 또한 HW툽밥 단독 발효구와 마찬가지로 20~30일 정도로 늘어나는 결과를 얻었다.

발효재료의 함수율이 발효에 미치는 영향을 조사한 결과, 함수율 45%의 경우는 10일째 46°C의 최고 온도를 나타냈는데 반하여, 함수율 55% 처리는 발효시작 16일 만에 최고온도인 74°C까지 상승하였으며, 50°C까지는 급격한 저하를 보였고 그 이후 40~55°C 범위로 서서히 감소되어 가장 좋은 발효결과를 보여 주었다. 함수율 65%는 14일째 55°C의 최고 온도를 보였으며, 함수율 55% 및 65% 처리에서는 발효열이 55°C의 최고온도가 되면서 하강하기 시작하였으며, 함수율 45% 처리구는 40°C 전후의 온도가 장시간 유지되는데 그쳤다.

활엽수툽밥과 산야초를 50:50으로 혼합한 경우, 최적발효조건에서 온수탱크의 수온변화를 측정된 결과, 측정부위에 따라 온도가 상당한 편차를 보였고, 발효상 중부 및 상부의 온도가 대체적으로 높았으며, 하부층의 온도가 낮았다. 최고온도 65°C, 최저 온도 40°C전후, 평균온도 60°C였으며, 온수탱크의

온도를 45일간 측정한 결과, 33~48°C 범위를 나타냈으며 전 기간을 통하여 거의 유사하였다. 본 연구에서 개발된 열교환기(HX-helical type)를 사용한 경우, 50~60°C의 발효열을 최대 3개월정도 이용 가능하였다.

참 고 문 헌

- 김지동. 2001. "유기물 폐기물의 고속 혐기발효 및 메탄 가스 정제 이용기술," 한국에너지기술 연구원, 과학기술부 연구보고서, No. 99-I-01-04-A-023.
- 산림청. 2008. 참여정부 산림정책백서.
- 안원영, 조재명, 공영도. 1981. 목질계에너지 자원과 이용방향. 임산에너지학회지. 1(1): 30~34.
- 이종윤, 박상진, 이건설, 조남석, 장준복, 안병조. 1989. 목질계바이오매스의 이용(1). 폭쇄장치의 제작 및 폭쇄재의 조성. 목재공학. 17(2): 65~73.
- 이충구, 이세균, 이계복, 이석호, 김정현. 2004. "페 바이오매스를 이용한 폐열 회수 열교환기에 관한 연구," 설비공학회 논문집. 16(6): 514~521.
- 조남석. 1983. 목질계자원을 이용한 대체에너지 개발. 영남대 자원문제연구. 2: 1~13.
- 조남석. 1989a. 자기가수분해와 효소적 당화(2). 한국 펄프종이공학회지. 21(4): 21~30.
- 조남석. 1989b. 자기가수분해와 효소적 당화(1). 한국 펄프종이공학회지. 21(3): 24~34.
- 조남석. 1990. 목질계 폐재를 이용한 토양개량제 제조에 관한 연구, 영남대 자원문제연구논문집. 9(1): 1~9.
- 조남석, 민두식. 1990. 대체연료생산을 위한 목질재료의 가수분해에 관한 연구(제5보). 물은 황산에 의한 폭쇄처리재의 가수분해. 한국펄프종이공학회지. 22(4): 35~40.
- 조남석, 이종윤, 윤병호, 황병호. 1987. 목재화학. 영남대출판부.
- 조남석, 임창숙, 이재성, 박신. 1991. 대체연료생산을 위한 목질재료의 가수분해에 관한 연구(제3보). 폭쇄처리재의 효소분해시 cellulase효소의 전략적 회수에 대하여. 목재공학. 19(1): 14~21.
- 한국과학기술원. 1981. 목질자원의 사료화 및 연료에너지생산을 위한 연구. 한국과학기술연구원 보고서.
- 鳥本實也. 1956. 最近 微生物農法, 酵素의 世界社.
- 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) 축산초지연구소(畜産草地研究所), 축산환경부.
- 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.
- 河田 弘. 1981. Bark 堆肥, 博友社 pp. 15~41.
- Arvelakis, S. and E. G. Koukios. 2002. Physico-chemical upgrading of agroresidues as feedstocks for energy production via thermochemical conversion methods. Biomass & Bioenergy. 22: 331~348.
- Caputo, A. C., M. Palumbo, P. M. Pelagagge, and F. Scacchia. 2005. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. Biomass & Bioenergy. 28: 35~51.
- 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.
- 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.
- Faaij, A. P. C. 2006. Bio-energy in Europe: Changing technology choices. Energy Policy. 34: 322~342.
- 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.
- Goldstein, I. S. 1981. Organic Chemicals from Biomass. CRC Press, Boca Raton, pp. 1~100.
- Grethlein, A. J. and M. K. Jain. 1993. Bioprocessing of coal-derived synthesis gases by anaerobic bacteria. Trends in Biotechnology. 10: 418~423.
- Lin, Y. and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Applied Microbiology and Biotechnology. 69: 627~642.
- Lucas, C. D. Szewczyk, W. Blasiak, and S. Mochida. 2004. High-temperature air and steam gasification of densified biofuels. Biomass & Bioenergy. 27: 563~575.
- Matsumura, Y. 2002. Evaluation of Supercritical Water Gasification and Biomethanation for Wet Biomass Utilization in Japan, Energy Conversion & Management. 43: 1301~1310.
- Muraki, E., F. Yaku, R. Tanaka, and T. Koshijima.

1982. Enzymatic degradation of finely divided wood meal. *Mukuzai Gakkaishi*. 28: 122~128.
30. Pain, I. and J. Pain. 1972. *The Methods of Jean Pain: Another Kind of Garden*. Commite International Jean Pain, Hofter Winkelen, Londerzeel, Belgium.
31. Rapagna, S., N. Jand, A. Kiennemann, and P. U. Foscolo. 2000. Steam gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles. *Biomass & Bioenergy*. 19: 187~197.
32. Shimizu, K. 1981. Development of Fuels and Chemicals from Biomass. *Fuji Technosystem* 275. pp. 25~150.
33. Strakanen, K. and D. A. Tillman. 1979. *Progress in Biomass Conversion*. Academic Press, New York. pp. 6~126.
34. 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.