

최 종
연구보고서

산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치
개발

Development of Fermentation-Heat Exchanger
for the Use of Forest Biomass and Products

연구기관

서울대학교

(충북대학교)

농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005년 11월 14일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 이 돈 구

연 구 원 : 권 기 철

연 구 조 원 : 김 지 혜

협동연구기관명 : 충북대학교

협동연구책임자 : 이 충 구

세부연구책임자 : 조 남 석

선 임 연 구 원 : 이 세 균

선 임 연 구 원 : 이 계 복

선 임 연 구 원 : 이 석 호

선 임 연 구 원 : 김 홍 은

선 임 연 구 원 : 최 태 호

참 여 기 업 : 신홍기업사

연 구 원 : 함 택 모

요 약 문

I. 제 목

산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

화석에너지 자원은 전 세계적으로 가장 광범위하게 쓰이고 있는 열에너지 자원이지만 원유는 앞으로 40년 후, 석탄은 80년 후에 고갈될 것으로 예측되고 있어서 대체에너지 자원의 개발이 범지구적인 당면 과제로 부각되고 있다. 특히 우리나라의 경우 화석에너지를 거의 수입에 의존하고 있기 때문에 대체에너지 개발이 매우 시급하다. 대체에너지 자원에는 태양열, 풍력, 지열, 바이오매스 등이 있는데, 이 중 우리가 가장 풍부하게 가지고 있는 바이오매스, 특히 산림 바이오매스의 활용 기술 개발은 매우 중요하다.

지금까지 국내에서 대체에너지 자원으로서 폐 바이오매스 자원을 이용하는 기술 개발은 주정폐기물과 축산폐기물 위주로 이루어졌고, 산림 및 농산 폐기물에 대한 에너지 관련 연구는 미흡하다. 또한 축산 폐기물의 경우도 메탄가스 제조 및 저장 기술 개발 위주로 진행되어 발효열의 에너지 전환과 저장에 관한 기술 개발은 거의 이루어지지 않았으며, 농가에서 사용할 수 있는 에너지 변환 기술 역시 개발되지 않았다. 특히 산림 폐 바이오매스에 대해서는 톱밥을 이용한 비료화를 제외하고는 실용화 단계에 이른 활용 방안이 아직 부족하다.

산림 및 농경지에서는 간벌목, 왕겨, 볏짚 등의 산림 부산물 및 농산 폐기물이 매년 대량으로 발생하는데, 실제 경제성을 가지고 이것들을 활용할 수 있는 기술은 거의 없다. 활용되지 못한 산림 부산물 및 농산 폐기물은 방치·폐기됨으로서 경제적으로 손실을 불러오고 환경오염도 부추기고 있다. 따라서 산림 폐 바이오매스를 경제적으로 활용할 수 있는 방안으로 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 자연 발효를 이용한 열에너지 이용 방안을 개발할 필요가 있다.

산림 폐 바이오매스 자원의 활용을 위해서는 발효를 신속하게 개시시키고 장기간 일정하게 지속시킬 수 있는 기술이 필요하며, 발생된 에너지의 전환 및 저장 기술 역시 필요하다. 따라서 산림 폐 바이오매스의 실질적 사용 기술을 개발해야 하며, 산림 폐 바이오매스로 발효열을 대체에너지 자원으로 활용하기 위한 발효 프로세스 조절 기술과 발효열교환장치의 개발이 필요하고, 발효후의 부산물을 생물비료로서 사용하는 등의 극대화된 활용방안이 필요하다. 발효과정을 통해 발생하는 에너지를 열원으로 사용함으로써 농가의 화석연료 의존도를 낮춤과 동시에 친환경적인 시설 농업을 유도하여 농촌의 경쟁력을 증진시킬 수 있을 것이다. 또한 폐 바이오매스의 이용을 통해 토양 오염을 방지하고 폐기물 처리 비용도 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구 과제에서는 농촌이나 산촌 주변의 산림에서 숲가꾸기 작업 후 나오는 폐 바이오매스 자원량을 조사하였으며, 폐 바이오매스의 발효과정을 통해 발생하는 열을 농가에서 대체에너지로서 직접 이용할 수 있도록 발효 특성을 분석하고 최적화된 저비용 고효율의 발효열교환장치를 개발하였다. 그 주요 개발 내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 산림 폐 바이오매스 자원의 공급 및 활용 기술 개발

- 1) 산림 바이오매스 자원 조사
- 2) 산림 폐 바이오매스 자원 활용과 경제성 분석

2. 산림 및 농산 폐 바이오매스의 최적 발효 기술 개발

- 1) 재료별 발효 특성 분석
- 2) 발효 프로세스 조절 기술 개발

3. 발효열 이용 열교환기 개발

- 1) 폐 바이오매스 이용 발효열교환장치 설계 및 개발
- 2) 발효열교환장치의 사용방법과 경제성 검토

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

산림 폐 바이오매스를 이용하여 자연 발효 과정을 통해 생성되는 열을 농가에서 직접 이용할 수 있도록 산림의 바이오매스를 추정하였으며, 발효 프로세스를 구명하였고, 발효열교환장치를 개발하여 그 경제성 분석을 하였다. 또한 발효 후 산물에 대한 비료로서의 효과도 조사하였다.

1. 산림 폐 바이오매스 자원의 공급 및 활용 기술 개발

현재 우리나라의 산림 축적은 해마다 늘어나고 있으며, 많은 지역에서 해마다 숲가꾸기 작업을 통해 잘린 가지나 간벌목과 같은 산림 폐 바이오매스가 대량으로 나오고 있다. 이 중 우리나라에 가장 많이 분포하고 있는 5개 수종 - 신갈나무, 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무를 대상으로 바이오매스와 연간 순생산량을 조사하고 숲가꾸기 작업에 따른 폐 바이오매스 산출량을 추정한 결과는 다음과 같다.

충북 월악산 지역에서 해발 300m 북사면의 35년생 신갈나무림은 줄기부 104.2 ton/ha (변재부 53.1 ton/ha, 51.1 ton/ha), 수피부 18.5 ton/ha, 살아있는 가지부 26.4 ton/ha, 잎 8.2 ton/ha으로서 지상부 합계가 157.4 ton/ha이었고, 지하부(뿌리)는 41.4 ton/ha으로서 전체 바이오매스는 198.8 ton/ha으로 추정되었다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 6.1 ton/ha/yr, 수피부 0.9 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 1.6 ton/ha/yr, 잎 8.1 ton/ha/yr으로서 지상부 합계는 16.8 ton/ha/yr이었고, 지하부는 4.4 ton/ha/yr으로서 전체 신갈나무림의 연간 순생산량은 21.2 ton/ha/yr으로 추정되었다. 이것을 석유환산톤으로 변환하면, 월악산 신갈나무림은 전체 90.71 TOE/ha(지상부 71.65 TOE/ha)이고 연간 임분에 고정되는 양은 12.56 TOE/ha/yr(지상부 10.53 TOE/ha/yr)이다. 만일 이 지역에서 20% 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 5 ton의 바이오매스를 이용할 수 있으며, 이것은 현재 월악산 신갈나무림의 성장속도로 보았을 때 3년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 16 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 1년간의 성장량에 해당한다.

강원 중왕산 지역에서 해발 1000m에 있는 60~70년생 신갈나무림의 바이오매스는 북사면에서 줄기부 137.5 ton/ha (변재부 65.8 ton/ha, 심재부 71.7 ton/ha), 수피부 16.3 ton/ha, 살아있는 가지부 54.3 ton/ha, 잎 3.8 ton/ha이고, 지상부 합계는

211.9 ton/ha, 지하부(뿌리) 40.7 ton/ha으로서 전체 252.6 ton/ha로 추정되었으며, 남사면에서는 줄기부 122.1 ton/ha (변재부 41.1 ton/ha, 심재부 81.0 ton/ha), 수피부 19.0 ton/ha, 살아있는 가지부 34.0 ton/ha, 잎 2.4 ton/ha이고, 지상부 합계는 177.4 ton/ha, 지하부(뿌리) 34.9 ton/ha으로서 전체 212.3 ton/ha로 추정되었다. 연간 순생산량은 북사면에서 줄기부 6.5 ton/ha/yr, 수피부 0.7 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 3.3 ton/ha/yr, 잎 4.1 ton/ha/yr으로서 지상부 합계는 14.5 ton/ha/yr, 지하부 2.8 ton/ha/yr이고, 전체 17.3 ton/ha/yr으로 추정되었으며, 남사면에서 줄기부 6.6 ton/ha/yr, 수피부 1.0 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 2.0 ton/ha/yr, 잎 2.4 ton/ha/yr, 지상부 합계는 11.9 ton/ha/yr, 지하부 2.3 ton/ha/yr, 전체 14.2 ton/ha/yr으로 추정되었다. 이것을 같은 열량의 석유량으로 환산하면 중왕산 북사면의 60년생 신갈나무림은 전체 119.18 TOE/ha (지상부 100.43 TOE/ha)이고 연간 8.24 TOE/ha/yr (지상부 6.97 TOE/ha/yr)가 저장되며, 중왕산 남사면의 70년생 신갈나무림은 전체 99.86 TOE/ha (지상부 83.78 TOE/ha)이고 연간 6.78 TOE/ha/yr (지상부 5.68 TOE/ha/yr)가 저장된다. 전체 바이오매스량은 북사면이 남사면보다 더 많은 것으로 나타났으며, 연간 순생산량 역시 북사면이 남사면보다 더 많은 것으로 추정되었다. 이것은 광합성에 중요한 역할을 하는 잎과 가지의 중량이 북사면에서 남사면보다 더 큰 비중을 차지하고 광합성에 필요한 물을 공급해주는 변재부도 북사면에서 더 큰 비중을 차지하고 있기 때문으로 판단된다. 또한 신갈나무는 엽중량이나 엽면적이 연간 순생산량에 많은 영향을 미치는 것으로 보이는데, 월악산 신갈나무림의 엽면적지수는 13.04인 반면, 중왕산 북사면은 6.10, 남사면은 4.40으로 나타났다. 따라서 임령이 60년생 이상인 신갈나무림에서는 가지치기보다는 간벌 위주로 하는 것이 효율적이라고 보여지며, 한번에 많은 양을 벌채하기 보다는 대경급의 나무들이므로 택벌식으로 수형이 나쁜 것들로만 간벌하는 것이 좋을 것으로 보인다.

충북 월악산 동사면 지역(해발 300m)에서 48년생 소나무림의 바이오매스는 줄기부 187.0 ton/ha, 가지부 61.3 ton/ha, 잎 31.9 ton/ha로서 지상부 전체의 바이오매스는 280.4 ton/ha로 추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 4.9 ton/ha/yr, 가지부 1.6 ton/ha/yr, 잎 10.5 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산량은 17.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 월악산 지역 35년생 신갈나무와 비교하였을 때 전체 바이오매스는 소나무림이 더 많은 반면 연간 순생산량은 비슷한 것으로 나타났는데, 소나무림에서 잎의 바이오매스가 더 많기 때문으로 추정된다. 월악산 지역 35년생

신갈나무와 비교하였을 때 전체 바이오매스는 소나무림이 더 많은 반면 연간 순생산량은 비슷한 것으로 나타났는데, 소나무림에서 잎의 바이오매스가 가장 큰 비중(전체 지상부 순생산량의 62%)을 차지하고 있기 때문으로 추정된다. 이것을 석유환산톤으로 보면 48년생 소나무림의 지상부는 145.1 TOE/ha이고, 연간 생산되어 지상부에 고정되는 양은 9.4 TOE/ha이다. 월악산 지역 소나무림에서 10% 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 6 ton의 바이오매스를 이용할 수 있는데, 이것은 4년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 28 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하므로 신갈나무림보다 간벌의 주기와 강도를 낮춰 잡아야 한다.

충북 월악산 북동사면 지역(해발 380m)에서 24년생 잣나무 인공림의 임분 바이오매스는 줄기부 26.6 ton/ha, 수피부 4.3 ton/ha, 1년생 가지 0.2 ton/ha, 가지부 8.6 ton/ha, 고사지 1.5 ton/ha, 당년생 잎 1.3 ton/ha, 전년생 잎 6.1 ton/ha로서 고사지를 제외한 지상부 전체는 47.0 ton/ha으로 나타났다. 연간 순생산량은 줄기부 3.0 ton/ha/yr, 수피부 0.4 ton/ha/yr, 1년생 가지 0.2 ton/ha/yr, 가지부 1.1 ton/ha/yr, 당년생 잎 1.3 ton/ha/yr, 지상부 합계 6.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 같은 열량의 석유로 환산하였을 때 지상부 전체가 24.5 TOE/ha, 연간 지상부에 고정되는 양은 3.2 TOE/ha에 해당한다. 이 지역의 잣나무림은 심한 경쟁과 줄기 아랫부분까지 달려있는 살아있는 가지들로 인해 고사지와 고사목이 발생하고 있으므로 가지치기와 간벌이 시급한 곳이다. 가지치기를 30%의 강도로 할 필요가 있으며, 간벌 역시 20%의 중도 간벌이 필요하다. 30% 강도의 가지치기시 2.6 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 20% 강도의 간벌을 시행하면 9.4 ton/ha의 폐 바이오매스가 나온다. 이것은 현재의 연간 순생산량으로 복구되는 시간을 추정하였을 때 가지치기는 8년, 간벌은 1~2년에 해당되지만, 지금 유령림을 벗어나는 단계이기 때문에 숲가꾸기 작업으로 인해 생장이 더욱 왕성해질 것으로 기대된다.

충북 월악산 남사면 지역(해발 520m)에서 30년생 낙엽송 인공림은 1996년에 20% 강도의 간벌작업이 시행된 지역이다. 월악산 낙엽송림의 총 바이오매스는 줄기부 286.8 ton/ha, 가지부 68.7 ton/ha, 잎 31.1 ton/ha로서 지상부 전체의 바이오매스는 386.6 ton/ha로 추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 18.1 ton/ha/yr, 가지부 5.5 ton/ha/yr, 잎 31.1 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산량은 54.7 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 같은 열량의 석유로 환산하면 199.2 TOE/ha, 연간 지상부에 고정되는 양은 29.9 TOE/ha/yr에 해당된다. 월악산 낙엽송림은 유령

림을 막 벗어난 단계이며, 연간 잎의 생산량이 매우 높은데다가 10여년 전에 간벌 작업이 시행된 바 있어서 생육이 우수한 것으로 나타났다. 낙엽송림은 자연낙지가 잘 되고, 현재 가장 아래쪽의 가지가 10m 이상의 높이에 있으므로 실질적으로 가지치기는 어렵다. 20%의 중도간벌을 시행하였을 때 약 58 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 이것은 1년간의 성장량에 불과할 정도로 30년생 낙엽송림의 생장이 우수하다.

경기 태화산 북서사면(해발 250m)의 36년생 리기다소나무 인공림은 아직 간벌이 시행되지 않아 임내에 고사지와 고사목이 많이 발생하고 있는 지역이다. 이 임분의 총 바이오매스는 줄기부 243.7 ton/ha, 수피부 32.8 ton/ha, 가지부 76.3 ton/ha, 고사지 23.4 ton/ha, 당년생 잎 5.5 ton/ha, 전년생 잎 9.6 ton/ha, 구과 1.84 ton/ha로서 고사지를 제외한 지상부 전체는 369.8 ton/ha로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 24.5 ton/ha/yr, 수피부 2.6 ton/ha/yr, 가지부 8.3 ton/ha/yr, 당년생 잎 5.5 ton/ha/yr, 구과 1.84 ton/ha, 지상부 합계 42.8 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 석유환산톤으로 지상부 전체 190.0 TOE/ha이고, 연간 지상부에 고정되는 양은 22.2 TOE/ha에 해당한다. 리기다소나무는 극양수로서 자연낙지가 잘 되어 가지치기로 얻을 수 있는 바이오매스는 상대적으로 적은 편이다. 반면에 생장이 매우 좋으므로 20%의 간벌을 시행하면 약 74 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 이것은 1~2년간의 성장량에 해당된다. 또한 줄기 아랫부분은 고사지가 다수 발생하고 있으므로, 20% 강도로 가지치기를 한다면 15 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하는 것이다.

우리나라에서 가장 많이 분포하고 있는 5개 수종(신갈나무, 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무)의 임분에 대한 연구 결과를 종합하면 다음과 같다. 신갈나무는 농촌 주변의 산림에서는 맹아지로 갱신된 30~40년생의 임령으로 주로 분포하고 있으며, 고산 지대에서는 60년생 이상으로 자라고 있다. 소나무는 주로 40년생 이상의 장령림으로 대경급 위주로 분포하고 있으며, 일부 지역을 제외하고는 유지되지 못하고 점차 밀려나는 추세이다. 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무는 지난 60~70년대에 주로 심겨져서 오늘날 대부분 지역에서 30년생 이상으로 자라고 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구 대상지를 우리나라의 평균적인 임상을 보이는 임분으로 선정하였다. 이상을 종합하면, 36년생 리기다소나무 조림지와 30년생 낙엽송 조림지가 간벌작업으로 가장 많은 폐 바이오매스를 얻을 수 있는 것으로 나타

났으며, 24년생 잣나무 조림지는 심한 경쟁으로 생장이 많이 떨어지고 있기 때문에 가지치기와 간벌작업을 병행할 필요가 있다. 35년생 신갈나무림은 가지치기와 10%의 약도 간벌로 약 20 ton/ha의 폐 바이오매스를 얻을 수 있으며, 60년생 이상의 신갈나무림은 주로 대경급으로 존재하므로 가지치기보다는 택벌식의 간벌로 수형이 나쁜 것들을 벌채하되, 후계목들이 다치지 않도록 주의해야 한다. 소나무림은 다른 수종에 비해 생장이 느린 편이므로 가지치기와 간벌에서 과도한 작업이 이루어지지 않도록 신중을 기해야 한다.

2. 산림 및 농산 폐 바이오매스의 최적 발효 기술 개발

본 연구에서는 산림 및 농산 폐 바이오매스의 발효 특성을 구명하기 위하여 톱밥, 수피, 간벌재, 과피, 왕겨, 볏짚 등의 재료에 대한 계절별 발효특성을 분석하고, 발효열 지속시간을 측정하였다. 또한 발효 프로세스 조절기술과 관련하여 각 재료의 혼합시 발효특성, 발열지속시간의 변화를 분석하며, 수분 및 재료 혼합비율에 따른 발효특성을 분석함으로써 궁극적으로 최대 발효열 효율을 얻기 위한 재료, 배합비, 최적수분함량 등을 구명하였다.

시멘트 블록조 발효상을 축조하고, 활엽수재(참나무류가 중심이 되는 활잡목) 톱밥, 침엽수(낙엽송) 톱밥, 낙엽류(소나무 및 플라타너스 낙엽), 볏짚, 산야초류 등 5종을 발효재료로 사용하였다. 발효첨가제로서 요소, 발효용 부속비료, 석회 등을 첨가하였고, 전체의 함수율을 55~60%가 되도록 조절하여 발효시켰다.

1) 동절기 발효시, 침엽수재 톱밥의 경우 퇴적 7일~10일 만에 42℃까지 온도가 상승하였고, 최고온도는 발효시작 21일에 48℃까지 상승하였다. 온도 수준은 약 10일정도 유지되다 26일이 지나면서 감소하였다. 발효 퇴적 90일이 지나면서 34℃의 온도로 감소되었으며, 겨울철 조건으로 인하여 발효상 온도는 48℃ 이상 올리지 못하였다. 활엽수재 톱밥의 경우에는 퇴적 14일 만에 48℃까지 온도가 상승하였으며, 24일째까지 최고온도 수준(약 50℃ 전후)을 유지하다가, 28일이 지나면서 다시 감소하였다. 활엽수재 톱밥의 발효상온도 변화를 침엽수재 톱밥의 발효와 비교하였을 때, 활엽수재의 발열이 2℃ 높았으며, 온도 유지 기간에 있어서는 활엽수재 톱밥(10~14일)이 침엽수재 톱밥(8~12일)보다 긴 것으로 나타났다.

2) 하절기 발효시, 퇴적 즉시 온도가 상승하기 시작하였으며, 침엽수재 톱밥의 경우에는 온도상승이 활엽수재에 비해 완만하게 증가하였고, 15일간 계속 증가하여 중층부의 경우 퇴적 14일째 최고온도인 64℃에 달하였고, 상층부는 퇴적 10일

만에 55℃, 하층부는 퇴적 18일째 42℃의 온도를 나타냈다. 활엽수재 톱밥은 온도 상승이 침엽수재 톱밥보다 매우 빨라 퇴적 5일 만에 중앙부에서 최고온도인 74℃에 달하였으며, 하층부 및 상층부도 각각 67℃ 및 47℃로 높은 온도를 나타냈고, 그 이후부터 1개월간 점차 서서히 42~52℃의 범위까지 감소되는 경향을 보였다. 산야초 하절기 발효 실험의 경우, 발효시작 2일 만에 상부는 38℃, 중·하부는 80℃까지 온도가 급격한 상승을 보였으나, 그 후 급격히 온도가 하강하면서 발효 6일 만에 30℃로 낮아졌다.

3) 재료별 혼합비에 따른 발열지속시간 및 발효특성을 살펴본 결과, 낙엽류-짚-산야초 조합의 발열 특성이 가장 열등하였으며, 이들을 특히 겨울철에 실시하였을 경우에는 0~15℃ 정도로서 발열온도가 대기온도를 약간 상회하는 정도에 그쳤다. 한편 침엽수재 톱밥만을 사용한 경우에는 최고온도 60~65℃, 평균온도 40~50℃, 유지기간이 불과 14일 정도로서 그다지 좋지 않았다. 활엽수재 톱밥을 사용한 경우, 최고온도 65~74℃, 평균온도 40~50℃를 나타냈으며, 발효첨가제의 비율에서 요소를 종전의 10 kg에서 15 kg으로 올리고, 발효용 부숙 비료를 15 kg에서 20 kg으로 증가시킨 결과, 최고온도 80~90℃, 평균온도 50~60℃, 유지기간이 20~30일 정도로 늘어났다. 침엽수재 톱밥의 경우, 온도 상승이 활엽수재에 비해 완만하게 증가되는 현상을 보였으며, 15일간 계속 증가하여 중층부의 경우 퇴적 14일째 최고온도인 64℃에 달하였으며, 상층부는 퇴적 1일 만에 55℃, 하층부는 퇴적 18일째 42℃로 가장 높은 온도를 나타냈다. 한편 침엽수 톱밥-활엽수재 톱밥을 50:50으로 혼합한 경우, 최고온도 58~60℃, 평균온도 35~55℃ 정도로서 침엽수 단독보다는 좋은 결과를 보여주었다. 한편 활엽수 톱밥-산야초 (50:50)의 경우, 최고온도 58~60℃, 평균온도 50~55℃를 나타냈으며, 유지기간 또한 활엽수재 톱밥 단독 발효구와 마찬가지로 20~30일 정도로 늘어났다.

이상의 결과를 정리하면 활엽수재 톱밥 단독 및 침·활엽수 톱밥구가 가장 좋았으며, 발열 온도에서도 최고온도 60~90℃, 최저온도 40℃전후, 평균온도 50~60℃의 범위를 20~30일간 유지하였다. 이 때 첨가제는 발효재료 1 톤에 대하여 요소 15 kg, 발효용 부숙비료 20 kg, 석회 10 kg, 합수율 55%이었다.

4) 발효재료의 합수율이 발효에 미치는 영향을 조사한 결과, 합수율이 낮은 45%의 경우는 10일이 되어서야 46℃의 최고온도를 나타냈는데 대하여, 합수율 55% 파일의 최고온도가 발효시작 16일 만에 74℃까지 상승하였으며, 50℃까지는 급격한 저하를 보였고 그 이후는 40~55℃범위로 서서히 감소되는 현상을 나타내

어 가장 양호한 결과를 보여 주었다. 함수율 65%의 경우는 14일째 55℃의 최고온도를 보였으며, 함수율 55% 및 65% 처리에서는 발효열이 55℃의 최고온도가 되면서 하강하기 시작하였고, 함수율 45% 처리구는 40℃ 전후의 온도가 장시간 유지되는데 그쳤다.

5) 최적발효조건에서 온수탱크의 온도변화를 측정한 결과, 활엽수 톱밥과 산야초를 50:50으로 혼합한 경우, 측정부위에 따라 온도가 상당한 편차를 보이고 있으며, 대체적으로 중부 및 상부의 온도가 높았고, 하부 및 표층의 온도가 낮았다. 탱크의 출구 및 내부온도를 45일간 측정한 결과, 탱크의 온도는 30~45℃ 범위를 나타냈으며 전 기간을 통하여 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 탱크출구의 수온은 33~48℃ 범위로 탱크온도보다 약간 높았으며, 발효초기의 온도가 40~50℃ 범위로 발효후반기의 32~40℃보다 높은 것으로 나타났다.

6) 발효열 이용 후 재료의 이용과 관련하여 유기질 비료로서의 이용 가능성을 검토하였다. 활엽수재 톱밥 유기질비료의 성분이 산야초 재료에 비해 질소 함량이 높았으며, 특히 활엽수재 톱밥으로 유기질비료를 만들면 발효과정에서 유기물 함량이 많이 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 목재 톱밥은 칼슘 함량이 높은 것이 특징이었다. 어린 식물 파종 실험에서 유기질비료의 혼합량이 많아질수록 무의 생장이 우수한 것으로 나타났으며, 유기질비료 시용이 토양온도 변화에 미치는 영향에 관해서는 유기질비료의 혼합율이 증가함에 따라 토양의 온도가 높아지는 경향을 보여주었다. 한편 외기 온도가 높으면 유기질비료는 자체가 가지고 있는 수분 및 단열작용에 의하여 토양의 온도를 적절하게 조절하는 것으로 나타났으며, 유기질비료의 혼합비가 클수록 이러한 완충효과는 더 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 강우량이 적은 여름철의 고온 환경 하에서 한발의 피해를 방지하는데 도움을 줄 것으로 생각된다.

3. 발효열 이용 열교환기 개발

본 연구는 바이오매스를 이용하여 발효에 의해 발생하는 열을 열교환기로 회수하는데 목적이 있다. 바이오매스에서 생성된 발효열을 회수함으로써 농촌 가정의 난방, 작물재배를 위한 온실 난방이나 가정용 온수로 이용할 수 있는 열 교환 시스템을 개발하는데 목표를 두고 바이오매스의 온도가 일정할 경우, 열교환기 파이프 직경, 파이프간의 간격, 파이프 재질 등 여러 가지 변수들에 대한 최적의 열 교환시스템의 설계 자료를 얻도록 하였으며, 실험을 통해서도 침엽수재 톱밥, 낙엽,

산야초, 퇴비 등 다양한 재료의 바이오매스의 발효를 통한 최적의 재료선정, 그리고 열교환기 시스템을 제작 실험을 통한 검증 및 향후 최적 설계를 위한 자료를 얻고자 하는데 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

기존의 연구 사례가 없기 때문에 다양한 바이오매스 재료로부터 적절한 원료 배합 조건 및 구조적인 개선점을 중점적으로 실험을 통하여 실증하였으며, 실험을 수행한 8개의 바이오매스 재료 배합 및 열교환기 구조로부터 평판형 열교환기의 최적 구조를 얻었다. 톱밥의 배합이 많은 경우 톱밥만의 발효일 경우보다 발효 온도가 더 높았으며, 발효 지속시간이 오래되었다. 8개의 실험을 통하여 발효열 교환기를 온수로 이용시 35℃ 이상의 온수를 최대 60일 이상 공급할 수 있었으며, 실험데이터를 수집한 이후에도 바이오매스의 온도는 지속적으로 50~60℃의 온도를 유지하고 있었으며, 이를 바탕으로 바이오매스 열교환기를 상용화 하였을 경우 가정의 온수 및 난방수로 최대 4개월까지도 가능할 수 있는 것으로 나타났다. 아울러 농가의 실용을 위해서는 나선형의 배관구조 보다는 평판형의 배관구조가 제작 설치 및 해체가 용이 했으며, 성능 또한 우수한 것으로 관찰되었다. 열교환기의 실제 응용 가능한 소형 온수기 분야에 대한 실용 모델링을 시도하였으며, 이를 통하여 본 연구를 통해 개발된 시스템이 온수기로 이용될 경우 태양열 온수기의 에너지 공급량을 50% 이상 증가하는 것으로 확인되었다.

본 발효열 교환기의 최종 목표는 폐 바이오매스를 이용한 난방 및 급탕을 가능 하도록 하는 열교환기의 상품화이다. 실험의 주된 관점은 실제 농가에 적용이 가능하며, 쉽고 용이한 설치 및 해체가 가능한가를 확인하는 것이다. 설치 및 해체가 용이하면서도 성능 향상을 가져올 수 있는 다양한 방법이 시도 되었으나, 열교환기 파이프의 직경이 감소하면 열 교환에 더 유리함을 이론 분석과 실험을 통하여 확인할 수 있었으며, 최종적으로 설치 및 해체가 용이한 평판형태의 열교환기가 설계 제작 되었다. 이론적인 분석을 통하여 유량이 0.2 kg/s 이상이고 직경이 0.02 m 이하인 최적의 조건을 만족시키도록 설계를 하여 실험하였다. 실험을 통하여 겨울철 난방을 위한 20℃ 정도의 난방용 온수를 공급할 수 있는 것으로 알 수 있었으며, 평판형 열교환기의 경우 40여 일 이상을 24시간 40℃ 정도의 온수를 공급할 수 있는 것으로 실험을 통하여 관찰되었다.

본 연구에서 개발된 바이오매스의 발효열교환기는 실연을 통해 농가의 난방 및 온수 급탕이 충분히 가능한 것을 알 수 있었으며, 향후 상품화를 위해서는 나선형 시스템보다는 평판형 시스템이 유리한 것으로 나타났다.

SUMMARY

I. Title

Development of Fermentation-Heat Exchanger for the Use of Forest Biomass and Products

II. Purpose and Necessity of Project

Fossil fuel is a non-renewable energy source. Crude oil and coals are supposed to be exhausted within 40 and 80 years, respectively. Alternative energy resource development is becoming global task, especially urgent for the Republic of Korea (ROK) because Korea depends mostly on fossil fuel. Alternative energy resources includes solar energy, wind energy, tidal energy, biomass and other renewable energy sources. The development of application technology to use biomass as an energy, particularly forest biomass which is abundant in Korea, is important.

Research how to use forest and agricultural waste biomass is lack, application and technology development of waste biomass resource converted to alcohol has been taking first consideration. In addition, research on the use of livestock wastes for energy has been executed. thus, energy-exchange technology which is useful for rural households is insufficient. There has been no other way using forest waste biomass except for sawdust.

Large quantity of forest and agricultural wastes including thinned logs, rice hulls, and rice straws is produced annually, but there are almost no technology to use them. Unused forest and agricultural wastes, which were left or removed, caused economical loss and environmental pollution. Therefore, it is necessary to develop energy utilization ways by natural fermentation which can be involved relatively easily as a method of economical utilization of forest and agricultural wastes.

It is also needed to develop technology to facilitate and continue fermentation and to exchange and store the generated energy. Consequently, it is required to develop practical technology for the use of forest and agricultural waste biomass. It is also useful if fermentation process and fermentation-heat exchanger for producing bio-fertilizer and utilizing fermentation heat as alternative energy would be developed. Fermentation heat, which can be used for the supply of warm water to rural households and greenhouses, can decrease dependency on fossil fuel and induce environmental friendly agriculture in rural areas. Furthermore, bio-fertilizer obtained after fermentation of those wastes will prevent from soil pollution and reduce waste treatment costs.

III. Contents and Scope of the Project

Forest biomass obtained after forest tending in rural villages was investigated. Fermentation characteristics was analyzed for agricultural and forest biomass and fermentation-heat exchanger with low priced and high efficiency for those biomass was developed. Major contents and scope are as follow:

1. Supply and utilization technology of forest waste biomass

- 1) Investigation of forest biomass resources
- 2) Utilization of forest waste biomass and economic analysis

2. Optimum fermentation technology of agricultural and forest waste biomass

- 1) Analysis for fermentation characteristics of substrates.
- 2) Development of technology for fermentation process

3. Development of heat exchanger for biomass fermentation

- 1) Design and development of heat exchanger for biomass fermentation
- 2) The use and examination of fermentation-heat exchanger for its efficiency

IV. Results of Project and Suggestion for Application

Forest biomass of *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Larix kaemferi* and *Pinus rigida* was estimated. Fermentation process with agricultural and forest biomass was obtained. Fermentation-heat exchanger for those biomass uses was developed and analyzed for the cost. Fermentation of those products as bio-fertilizers was investigated.

1. Supply and utilization technology of forest waste biomass

Forest biomass accumulation in Korea is increasing now, and a large quantity of forest waste biomass such as thinned logs has been produced annually. Biomass and annual net production of five most common tree species - *Quercus mongolica*, *Pinus densiflora*, *Pinus koraiensis*, *Larix kaemferi* and *Pinus rigida* were investigated.

In Mt. Wolak, Chungbuk, biomass accumulation of 35-year-old *Quercus mongolica* stand in north slope was 104.2 ton/ha in stem (53.1 ton/ha in sapwood, 51.1 ton/ha in heartwood), 18.5 ton/ha in bark, 26.4 ton/ha in living branches, and 8.2 ton/ha in leaves, totally 198.8 ton/ha for above ground, and 41.4 ton/ha for below ground at 300m above sea level. annual net production was 6.1 ton/ha/yr for stems, 0.9 ton/ha/yr, 1.6 ton/ha/yr and 8.1 ton/ha/yr for barks, living branches, and leaves respectively. Total above ground annual net production was 16.8 ton/ha/yr while below ground annual net production was 4.4 ton/ha/yr. Total annual net production in *Q. mongolica* was 21.2 ton/ha/yr. Biomass of 5 ton/ha, which was as much as 3-year-growth, would be produced if 20% of pruning is applied. Above biomass of 16ton/ha, which was as much as 1-year-growth, would be produced if 10% of thinning is applied.

In Mt. Jungwang, Kangwon-do, biomass accumulation of 60~70-year-old *Q. mongolica* stand was 137.5 ton/ha in stems (65.8 ton/ha in sapwood, 71.7 ton/ha in heartwood), 16.3 ton/ha in barks, 54.3 ton/ha in living branches and 3.8 ton/ha in leaves, and totally 211.9 ton/ha above the ground while 40.7 ton/ha bellow the ground. Total biomass accumulation in north slope was 212.3 ton/ha at 1000m above sea level. annual net production was 6.5 ton/ha/yr in

stems, 0.7 ton/ha/yr in barks, 3.3 ton/ha/yr in living branches, and 4.1 ton/ha/yr in leaves. Thus, total above ground annual net production was 14.5 ton/ha/yr while below ground annual net production was 2.8 ton/ha/yr in north slope. Estimated annual net production was 14.2 ton/ha/yr. Total biomass in north slope was greater than that in south slope. It seemed that it was because there was larger portion of leaves and branches that function important roles in photosynthesis and sapwood transporting water in north slope than in south slope.

In Mt. Wolak, Chungbuk, biomass accumulation of 45-year-old *Pinus densiflora* stand was 187.0 ton/ha in stems, 61.3 ton/ha in branches and 31.7 ton/ha in leaves. The total of 280.4 ton/ha above the ground was shown at 300m above sea level, in eastern slope. Estimated annual net production was 17.0 ton/ha/yr. Compared to 35-year-old *Q. mongolica* stand in Mt. Wolak, biomass production of *P. densiflora* stand was abundant while annual net production was similar. It was because of great leaf biomass of *P. densiflora* stand. Biomass of 6 ton/ha, which was as much as 4-year-growth, would be produced if 10% of pruning is applied. Above ground biomass of 28 ton/ha, which was as much as 2-year-growth, would be produced if 10% of thinning is applied.

In Mt. Wolak, Chungbuk, biomass accumulation of 45-year-old *Pinus koraiensis* stand was 26.6 ton/ha in stems, 4.3 ton/ha in barks, 0.2 ton/ha in 1-year-old branches, 8.6 ton/ha in branches, 1.3 ton/ha in 1-year-old leaves and 6.1 ton/ha in 2-year-old leaves. The total of 47.0 ton/ha above the ground except for dead branches was shown at 380m above sea level, in eastern north slope. Annual net production was 3.0 ton/ha/yr in stems, 0.4 ton/ha/yr in barks, 0.2 ton/ha/yr in 1-year-old branches, 101 ton/ha/yr in branches, and 1.3 ton/ha/yr in 1-year-old leaves. Thus total above ground annual net production was 6.0 ton/ha/yr while below ground annual net production was 2.8 ton/ha/yr in north slope. Dead branches and trees were produced by severe competition, which needs urgent pruning and thinning. Biomass of 2.6 ton/ha would be produced if 30% of pruning is applied. Above biomass of 9.4 ton/ha would be

produced if 20% of thinning is applied. About 8 years after pruning or 1~2 year after thinning was required to recover its annual net production. But more vigorous growth was expected because it was just at young stage.

In Mt. Wolak, Chungbuk, 30-year-old *Larix kaemferi* plantation stand was the area in south slope (520m from sea level) where thinning of 20% was applied in 1996. Biomass accumulation of *L. kaemferi* stand was 286.8 ton/ha in stems, 68.7 ton/ha in branches and 31.1 ton/ha in leaves, and the total was 386.6 ton/ha above the ground. Annual net production was 18.1 ton/ha/yr in stems, 5.5 ton/ha/yr in branches, and 31.1 ton/ha/yr in leaves. Total above ground annual net production was 54.7 ton/ha/yr. *L. kaemferi* stand was just after young stand stage, and annual leaf production was high. Natural pruning occurs commonly in *L. kaemferi* stand, and pruning above 10m in height was too difficult. Biomass of 58 ton/ha, which was as much as 1-year-growth, would be produced if 20% of thinning is applied.

Mt. Taehwa in Kyeonggi-do is the site where 36-year-old *Pinus rigida* plantation stand was not thinned at all in western north slope (250m from sea level). Thus, many dead branches and trees were occurred. Biomass accumulation of *P. rigida* stand was 243.7 ton/ha in stems, 32.8 ton/ha in barks, 76.3 ton/ha in branches, 23.4 ton/ha in dead branches, 5.5 ton/ha in 1-year-old leaves, 9.6 ton/ha in 2-year-old leaves, and 1.84 ton/ha in cones, The total was 396.8 ton/ha above the ground except for dead branches. Annual net production was 24.5 ton/ha/yr in stems, 2.6 ton/ha/yr in barks, 8.3 ton/ha/yr in branches, 5.5 ton/ha/yr in 1-year-old leaves, and 1.84 ton/ha/yr in cones. Estimated total above ground annual net production was 42.8 ton/ha/yr. *P. rigida* is shade-intolerant species, and is well pruned naturally. However biomass production by pruning was quite small. On the other hand, biomass of 74 ton/ha, which was as much as 1~2-year-growth, would be produced if 20% of thinning is applied because *P. rigida* grew very well.

In summary, the largest quantity of biomass seemed to be obtained in 36-year-old *P. rigida* plantation and 30-year-old *L. kaemferi* plantation by thinning. 24-year-old *P. koraiensis* plantation needed both of pruning and

thinning. 35-year-old *Q. mongolica* stand seemed to produce biomass of 20 ton/ha by 10% thinning. A careful thinning and pruning is needed to *P. densiflora* stand because of its slow growth.

2. Optimum fermentation technology of agricultural and forest waste biomass

According to recent high oil price, worldwide interests in alternative energy resources instead of fossil fuels have been focused, and above all utilization of plant biomass for energy is especially highlighted. Lignocelluloses resources are the most abundant source on the earth, and are obtainable as the original biomass on the land and residues or by-products, and even as municipal solid wastes. Recently the use of lignocellulose resources as a source for fuel and heat energy production becomes more attractive.

In this study, fermentation characteristics of agricultural and forest waste biomass for production of heat energy were focused to be used in agricultural farm households. Fermentation process was examined in terms of different raw-materials and their mixture with different ratios. Eventually the optimum fermentation condition through careful investigation on various factors, such as raw-materials, moisture contents, fermenting aids, and practical measurement of hot-water temperature during fermentation were investigated. In addition, reutilization of fermentation residues, the effect of these organic biocomposts on the seed, plant growth and soil temperature were discussed.

Fermenting aids were urea, lime, and bioaid. Moisture contents of fermenting substrates were adjusted by 55-60%.

1) Fermentation process of softwood and hardwood beds during winter season shows almost similar temperature patterns. Temperature increased in first and second weeks to be about 42~48⁰C, and then maintained approximately around 50⁰C. Later it gradually decreased. Maintenance period around 50⁰C was longer in hardwood (10-14 days) than in softwood (8-12 days).

2) Fermentation process during summer season showed different results. Bed

temperature abruptly increased for hardwood than softwood, and then slowly decreased and maintained approximately around 42-52⁰C for one month.

During fermentation in summer season, bed temperatures abruptly increased in hardwood (74⁰C on 5th day after piling) than softwood (64⁰C on 14th day after piling), and afterward slowly decreased and maintained to 42~52⁰C for one month.

In the case of grasses and hardwood, almost similar temperature patterns was shown during fermentation process. Bed temperature quickly increased up to 38⁰C at upper part, while 80⁰C at mid- and lower- parts on the second day after piling, and then rapidly decreased to 30⁰C on the sixth day.

3) The results of substrates and their mixtures with different ratios on fermentation process were as follows; hardwood bed showed highest temperature (high temperature of 65~74⁰C, average temperature of 40~50⁰C) followed by hardwood: softwood mixture (highest temperature were 58~60⁰C with average temperature of 35~55⁰C) and hardwood: grass mixture bed (highest temperature approximately 58~60⁰C and average temperature of 50~55⁰C), respectively.

In particular, increased application of fermenting aids, with 15 kg from 10 kg urea and 20 kg from 15 kg bioaid, has resulted in high temperatures of 80~90⁰ C (average temperature of 50~60⁰C, and with 20~30 days of maintaining periods).

In conclusion, the best fermenting results were obtained from hardwood only and hardwood: softwood (50:50) beds (high temperatures of 60~90⁰C, more or less 40⁰C low temperature with average temperature of 50~60⁰C and 20~30 days of maintaining periods). Optimum additives per ton of substrates were 15 kg of urea, 20 kg of bioacid, and 10 kg of lime.

4) The results of fermenting substrate moisture content shows that 55% was the optimum for highest temperature among three moisture content treatments 45%, 55% and 65%. The low (45%) and high (65%) moisture content of substrates have shown lower temperature compared to 55% moisture content of substrates.

5) The temperature of hot-water tank installed in fermenting bed of hardwood:grass (50:50) showed very different temperature patterns according to measurement positions. In general, measurement of mid- and upper-parts showed higher temperature than lower and surface parts during 45-day fermentation process. The temperature of initial fermenting stage was 40~50⁰C, and that of later stage, 32~40⁰C. Average temperature of the tank ranged approximately 30~45⁰C.

6) Further utilization of fermenting residues from hardwood sawdust and grass was examined whether those could be an organic soil conditioner for growth of radish and tree seedlings.

The results of chemical analysis for fermenting residues were almost same in all residues of hardwood, softwood and grasses, 20.7~28.6% of high organic matter, 0.88~1.41% nitrogen, pH = 6.75 and C/N ratio = 25~30, except higher concentration of Ca in hardwood and potassium in grass.

No harmful effect was discovered on germination and positively affected plant growth, such as radish and softwood and hardwood seedlings. Also fermenting residues did not affect soil temperature change, but increased daily soil temperature fluctuation, such as small increase in the early morning, a small decrease in the mid-day or afternoon (2:00pm), and increased in the early evening (6:00 pm). This compensating effect became higher with increasing contents of organic residues.

3. Development of heat exchanger for biomass fermentation

Waste heat recovery system was studied numerically and experimentally. In the present study, heat exchangers for biomass fermentation were developed as a waste heat recovery system. The developed heat exchanger is a system to supply the hot water using fermentation of waste biomass. Heat exchanger systems were designed specially to obtain the optimum heat exchanging performance.

For the experiments, various biomass materials were examined to obtain the best heat recovery. Sawdust of softwood, hardwood and grasses were used for

the present experimental study. Eight biomass heat recovery systems were designed. The developed heat exchangers kept farm households warm by providing. They were concentrated to improve the overall efficiency of their heat capture system. One obvious way to minimize heat loss at the atmosphere was to build the piles in a circular fashion, which offered less surface area for a given volume. Furthermore, such an approach promised to simplify both the assembly and the tearing down of the heaps. The basis of the present cylindrical compost pile was similar to some sort of tower built from steel frame, which will hold the inner brush in place. One example incorporates a retainer 2 m in diameter and 1.5 m tall. Once the tower has been filled with brush clippings, polyethylene helical (0.03 m I.O) and plate type(0.2 m IO) pipe line were installed to recover the heat from biomass fermentation. The intake and exhaust ends of the pipes should be connected to form a closed loop running to and from the building being heated.

The fermentation process of biomass dump was maintained for maximum 3 months with HX 8 (Plate Type). While composting goes on, the bacterial activity within a biomass dump produces a considerable amount of heat, averaging about 50–65°C. Thus, it was possible to tap a significant source of thermal energy by intertwining heat exchanging pipes throughout the interior of the stack. The current heat recovery system could recover over daily average usage (16,500 kcal/day). The optimum state of biomass heat exchanger was obtained from HX 8 (plate type). The composition of HX was 90 % of wood sawdust and 10 % of grasses. If waste logs obtained from thinning may reach diameters of up to 50 cm, then heavy duty machinery may be needed to chip the wood. Though the shavings may be as much as an 2 cm long, the ideal thickness is about 5 mm.

The present developed heat exchanger with 1 ton of those biomass could heat a room, and produce hot water for at least 3 months.

CONTENTS

Chapter 1. Outline of this Project	23
Chapter 2. Status of technology developed in Korea and abroad	27
Chapter 3. Contents and results	29
Section 1. The present state and supply of forest waste biomass	29
Section 2. Optimum fermentation technology of agricultural and forest waste biomass	93
Section 3. Development of heat exchanger for biomass fermentation	112
Section 4. Utilization and economic analysis of forest biomass after fermentation	202
Chapter 4. Contribution to related fields	216
Chapter 5. Application plan of research results	219
Chapter 6. Technical information from abroad during the research	221
Chapter 7. References	223

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	23
제 2 장	국내외 기술개발 현황	27
제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	29
제 1 절	산림 폐 바이오매스 자원의 현황과 공급 방안	29
제 2 절	산림 폐 바이오매스의 최적 발효 기술 개발	93
제 3 절	발효열 이용 열교환기 개발	112
제 4 절	산림 폐 바이오매스 자원의 발효 후 활용 방안과 경제성 분석	202
제 4 장	목표달성도 및 관련분야에의 기여도	216
제 5 장	연구개발결과의 활용계획	219
제 6 장	연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	221
제 7 장	참고문헌	223

제 1 장 연구개발 과제의 개요

역사가 진행됨에 따라 인류는 많은 에너지를 소모하며 오늘날의 문명을 쌓아올렸다. 지금 우리가 주로 사용하고 있는 에너지원은 화석에너지인데, 대표적인 화석에너지인 원유는 앞으로 40년, 석탄은 80년 후에 고갈될 것으로 추정되고 있어 전 세계적으로 새로운 대체 에너지 자원의 개발에 총력을 기울이고 있는 실정이다. 더욱이 우리나라와 같이 화석에너지 자원이 부족한 나라에서 갈수록 높아지고 있는 에너지원의 가격은 개인과 기업의 경제에 있어서 매우 중요한 위치를 차지하게 되었으며, 국가적으로도 정치와 경제 문제의 중심이 되고 있다.

오늘날 대체에너지 자원의 개발은 범지구적인 당면과제로 부각되었으며, 우리나라처럼 대부분의 에너지 자원을 수입에 의존하고 있는 나라에서는 대체에너지 자원의 개발이 매우 시급하다. 최근 10년간 우리나라의 에너지 소비는 매년 10%라는 세계 최고의 증가율을 기록하고 있으며, 온실가스배출량 증가율 역시 세계 1위를 기록하고 있다. 다행히 세계기후협약 이행이 늦추어지고는 있지만 머지않아 우리도 여기에 참여하지 않을 수 없는 형편이어서 대체에너지 개발의 필요성은 더욱 무게 중심을 더해가고 있는 실정이다. 이에 우리나라는 대체에너지 개발 및 이용·보급 촉진법 제 2 조에서 미래에 사용될 대체에너지로 재생에너지 8개 분야(태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지)와 신 에너지 3개 분야(연료전지, 석탄액화·가스화, 수소에너지)를 지정하였다.

현재 선진국에서 실용화 단계에 접어든 대체에너지로는 태양에너지, 풍력에너지가 주종을 이루며, 그 외에도 바이오매스, 지열, 파력, 조력 등을 이용한 대체에너지 개발이 활발히 진행되고 있다. 미국은 2010년경 전체 에너지 소비량의 10%를 대체에너지로 충당할 계획에 있으며(미국의 미래기술, 1998), 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.

이에 비해 우리나라는 여전히 원자력 위주의 에너지정책에서 탈피하지 못하고 2015년까지 원자력발전의 비중을 27.5%(1998년)에서 34.2%로 늘릴 계획이며, 대체에너지의 개발은 아직까지도 초보 단계를 벗어나지 못한 상태이다. 현재 우리나라

의 대체에너지 비율은 0.82%에 불과하며, 앞으로 수십 년 안에 에너지 고갈 시대가 올 것이라는 예측이 현실성을 가진 상황에서 대체에너지의 개발은 더욱 시급한 과제이다.

특히 산림이 전 국토의 65%를 차지하고 있는 우리나라에서는 우리에게 가장 풍부한 산림의 바이오매스 자원을 이용한 대체에너지의 연구와 개발이 매우 중요하다고 생각된다. 우리나라의 산림은 지난 1960년대와 1970년대의 산림조성사업을 통해 현재 간벌과 같은 무육작업이 집중적으로 투입되는 시기를 맞고 있다. 그러나 풀베기, 가지치기, 간벌 등의 무육작업으로 대량의 산림 폐 바이오매스가 발생하고 있는 상황이지만, 이것을 실제 활용할 수 있는 기술이 부족하므로 발효열 이용, 메탄가스 저장과 같은 에너지 자원화 및 활용 기술 개발이 시급하다. 또한 발효를 이용한 열에너지 추출 기술은 발효후의 산물을 생물비료 및 조사료로 사용 가능하여 경제성도 높을 것으로 기대된다.

1) 기술적인 측면

산림의 무육작업에서 대량으로 발생하는 침엽수와 활엽수의 간벌 소경재 및 가지와 풀과 같은 폐 바이오매스를 이용하는 방안으로서 바이오매스를 퇴적한 후 자연적으로 발효하면서 생기는 열을 농가에서 직접 이용할 수 있도록 열교환장치를 개발하였다. 기존의 바이오매스를 활용한 열에너지 자원은 주로 고체 연료(Pellet 등), 액체 연료(Bioethanol 등), 기체 연료(메탄가스 등)로 연구되었지만, 바이오매스의 잠재적 활용가치가 극대화되도록 자연적 발효과정을 이용한 저열(低熱) 에너지와 같은 더 다양한 에너지 활용 기술의 개발이 필요하다고 본다.

이렇듯 산림 폐 바이오매스를 소각하지 않고 재활용함으로써 환경오염의 저감효과를 기대할 수 있으며, 발효 후에는 산림 폐기물을 퇴비화 함으로써 자원 재활용 및 임업의 생산성과 경제성을 제고할 수 있다. 또한 현재 대체에너지 자원으로 축산폐기물은 발효 지속시간이 24시간 정도로 매우 짧은 것에 비해, 산림 폐 바이오매스의 발효개시시간은 7일 정도로 느린 반면 오래 지속할 수 있는 장점이 있다. 따라서 산림 폐 바이오매스의 발효를 신속하게 개시시키고 장기간 지속시킬 수 있는 기술이 필요하며, 발생한 바이오에너지의 저장기술도 필요하다.

아직까지 발효열 에너지원으로서 산림 폐 바이오매스의 혼합 사용에 관한 연구는 부족하지만, 미활용 자연에너지인 산림 폐기물의 퇴비화 과정 중 생성되는 발효열 에너지 이용 기술의 개발을 통하여 농촌지역에서 상당한 에너지 절약 효과

를 얻을 것으로 기대된다. 본 연구과제에서는 발효 프로세스 조절기술 및 에너지 절약형 발효열교환장치를 개발하여 농가에 온수를 제공하고 온실에 열원(지중가온 또는 보조 열원)을 제공하고자 하였다.

2) 경제·산업적 측면

오늘날 에너지를 이용하는 방법에는 화력, 원자력, 풍력, 태양열 등이 있으나, 화석 연료는 전 세계적으로 매장량에 한계가 있고 배출가스로 인한 환경오염 문제가 매우 심각하다. 원자력이나 풍력은 화력에 비해 공해를 일으키지 않지만 특정 장소에 국한되어 이용할 수 있다는 한계가 있다. 태양열 역시 아주 넓은 면적의 집적이 필요하여 우리나라처럼 인구밀도가 높은 곳에서는 이용하기 어렵다. 이러한 여러 한계를 극복하고 자연과 조화를 이루면서 에너지를 이용할 수 있는 방법이 바이오매스를 이용하는 것이다.

바이오매스 자원은 지속적으로 재생할 수 있으며 광역분산형의 자원으로 지역 에너지원으로 사용할 수 있다. 에너지원으로서 바이오매스의 장점은 에너지의 저장에 용이, 재생이 가능, 물과 온도 조건만 맞으면 어디에서나 얻는 것이 가능, 적은 자본으로 이용 기술 개발이 가능, 그리고 원자력 이용 등과 비교할 때 환경보전적으로 안전한 점 등이 있다.

한편 단점으로는 넓은 면적의 토지가 필요, 토지 이용 면에서 농업과 경합, 자원부존량에서 지역차가 큼, 비료·토양·물·에너지의 투입이 필요, 지나친 개발은 환경파괴를 초래하는 것 등을 들 수 있다. 또 바이오매스의 생산, 수집, 운반, 변환에 관련한 기술적 문제, 그리고 경제성과 에너지 밸런스(에너지 투입량에 대한 에너지 산출량의 비율)에 대한 문제도 있다. 이와 같이 바이오매스 에너지의 이용 및 개발은 많은 문제를 안고 있으며, 또 바이오매스 자원의 부존량은 지역에 따라 큰 차이가 있다. 그러나 우리나라에서 산림이 차지하는 면적이 전 국토의 65%나 되는 것을 고려하면 생태적으로 건전한 산림을 육성함으로써 산림 바이오매스 자원을 우리에게 가장 풍부한 에너지원으로 키울 수 있다.

2000년대에 들어서 계속되는 숲가꾸기 사업으로 산림 폐 바이오매스는 농가에서 비교적 쉽게 구할 수 있는 자원이 되었으며, 이 폐 바이오매스를 자연친화적 에너지원으로 이용함으로써 경제적으로 어려운 농가의 에너지 자급률을 높여주어 농산촌의 경제를 제고시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 화석 에너지 의존도를 낮추는 환경 보전형의 시설농업으로 유도하는 효과도 있다.

본 연구 과제에서 개발한 발효열교환장치는 소규모 발열시설로서 농가에서 간단하게 사용이 가능하도록 설계되었으며, 발효 후 산물은 생물비료로 이용이 가능해 화학비료보다 높은 부가가치를 창출할 것으로 기대된다. 이러한 효과는 결국 농가 소득에 일조하여 농업 경영의 안정화 및 환경 보전에 중요한 역할을 하고, 농촌 경제성 제고 및 경쟁력 증진에 큰 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 임업적인 측면에서도 숲가꾸기 작업 후 폐잔재의 처리 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

3) 사회·문화적 측면

산림과 농촌의 가치 향상을 위해서는 우선 국가 내 전 자원의 관리와 개발이라는 측면에서 효율적인 폐 바이오매스의 자원화 개발이 필요하며, 산림 폐 바이오매스의 활용으로 농가의 소득 증대 및 생활수준 향상을 도모할 필요가 있다. 또한 산림 폐 바이오매스 활용으로 재활용과 생산, 환경친화라는 농산촌의 에너지 자원 복합 관리 체계를 도입하고, 농산촌의 에너지 및 자원 생산의 기술화를 통한 미래 농산촌 모델의 원형을 제공함으로써 선진국형 농업기반을 조성하고 농촌 환경을 개선할 필요가 있다. 그 외에도 범국가적인 환경 보전 대책이 필요한데, 바이오매스의 청정에너지를 이용함으로써 대기오염을 감소시킬 수 있고, 폐기물에 의한 환경오염을 저감시킬 수 있다. 온실가스의 저감 대책 마련과 화석 연료에 대한 의존도를 감소할 수 있는 기술 개발이 시급하며, 미활용 폐기물의 활용으로 화석연료 의존도를 낮추어 위생 및 환경 개선에 일조할 수 있다. 또한 농업 기술 관련 업체의 시장 확장에도 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1) 국내 기술 현황

우리나라에서 산림 폐 바이오매스의 자연적 발효 과정을 이용한 열교환 장치에 대한 연구는 전무한 실정으로서, 일반 열교환기를 본 연구에 적용하기는 힘들고 농가의 경제성을 고려한 발효열을 최대한 회수할 수 있는 특수 열교환 장치의 개발이 필요하다. 또한 열교환 장치의 설치와 발효열을 회수한 후 열교환 장치에서 임산 폐기물의 수거가 용이한 장치나 방안의 모색이 필요하다.

임산물의 발효열을 최대한 회수할 수 있는 열교환기의 최적 설계기준을 얻기 위해서는 우선 실험과 해석적 연구를 병행해야 하는데, 그동안 대체에너지 자원으로 농축산 폐기물 자원을 이용하는 기술개발 과정은 주정폐기물과 축산폐기물 위주로 이루어졌으며, 산림 폐기물은 연구가 미흡하다. 축산 폐기물의 경우 메탄가스 제조 및 저장기술 개발 위주로 진행되었으며, 농가에서 바로 활용할 수 있는 발효열의 에너지 전환과 저장에 관한 기술은 아직 개발되지 않았다.

한편 축산 폐 바이오매스의 경우, 퇴비화 시설을 온실 내부의 작물 상토층 사이에 설치하여 지중에 방열하는 지중 전열장치에 대한 연구는 일부 수행되었으나 아직 실용화되지는 못하였으며, 축산 폐 바이오매스와 산림 폐 바이오매스의 발효 특성이 서로 상이하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 특히 산림 폐 바이오매스의 경우 상당량이 재활용되지 않고 방치 또는 소각되고 있는 실정이고, 숲가꾸기 작업시 나오는 간벌목과 나뭇가지 및 기타 산림 부산물에 대한 활용이 거의 없으므로 본 연구과제에서 자연적 발효과정을 이용한 발효열 교환 장치의 개발에 착수하게 되었다.

2) 국외 기술 현황

바이오매스의 이용에 대한 연구는 Jean Pain의 연구가 대표적인 것으로 평가된다. Jean Pain은 바이오매스를 이용하여 온수를 공급하고 그 부산물로 발생하는 암모니아 가스를 연료로 사용할 수 있는 방법을 제시하였다. 그러나 제시된 방법은 바이오매스를 퇴적하고 그 속에 파이프 배관을 설치하여 발효열과 암모니아 가스의 회수 장치를 만드는 극히 단순한 시스템으로 구성되어 효율성이 많이 떨어진다. 다른 선진국에서는 대부분의 연구가 바이오매스를 1차적인 연소재료로서

이용하는 기술의 개발에 주안점을 두고 있으며, 바이오매스의 발효열을 이용한 연구 사례는 극히 드물다.

미국에서는 일부 발효조로 가스 공급을 하고 있으나 주로 폐수처리를 목적으로 연구가 진행되고 있으며, 프랑스의 경우 발효열을 이용한 온수 공급에 대한 연구가 시도되고 있다. 프랑스, 벨기에 등 유럽에서는 2차 대전 직후 부족한 에너지 공급을 위하여 혐기발효에 관한 연구를 활발히 진행한 바 있으며, 특히 유럽과 일본에서 메탄가스 회수에 대한 연구가 많이 수행된 상태이다.

벨기에에서는 발효열 및 메탄가스 회수에 대한 연구가 많은 진척을 보이고 있는 것으로 알려져 있다. 또한 독일에서는 1975년 바이오가스를 압축 보관하여 연료로 사용할 수 있는 형태의 발효조를 개발하였으며, 현재는 전기발전을 위한 시설까지 보급 이용하고 있다. 그리고 영국의 Exeter 시에서는 분뇨의 혐기성 소화로 나온 메탄가스를 가로등에 사용한 바 있다.

그 외에도 인도에서는 오래전부터 농촌연료로 메탄가스를 이용하여 왔으며, 중국 황하강 남쪽 지역에서는 총 600억 톤의 바이오가스를 생산하여 가정용 에너지로 공급하고 있고, 중국 Szechuan에서는 1974년 전 인구의 75%가 취사연료로 바이오가스를 사용하고 있다. 한편 대만에서는 혐기적 발효를 에너지 생산 측면보다 돈분 발효비용의 활용에 주목적을 두어 연간 600만 톤의 비료를 생산하고 있다. 또한 일본과 미국에서는 바이오가스의 생산보다는 산업폐수 처리에서 발생하는 슬러지 처분을 주목적으로 연구가 진행되고 있다.

각 나라별로 폐 바이오매스의 이용은 에너지 공급 또는 발효 이후의 부산물 획득에 중점을 두고 연구와 상용화가 이루어지고 있으나, 주로 지역적 또는 국가적 차원에서의 대규모로 이용되고 있다. 따라서 각 농가 단위별로 일정 부분 자급자족할 수 있는 에너지 공급 시스템을 갖추도록 저비용 고효율의 소형 폐 바이오매스 발효열교환기를 개발할 필요가 충분한 것으로 판단된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 산림 폐 바이오매스 자원의 현황과 공급 방안

1. 우리나라의 산림 자원 현황

가. 발생량 추정 및 전망

주벌, 간벌, 천연림 보육, 어린나무 가꾸기 등 산림작업에 의해 생산되는 바이오매스 자원은 에너지 자원으로서 이용할 수 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 1998년 간벌 등 산림사업은 약 260,000 ha의 면적에 시행되었으며, 1999년에는 숲가꾸기 공공근로사업의 확대로 280,000 ha가 시행되었고, 이후 매년 약 280,000 ha가 시행되고 있다. 2002년도로 숲가꾸기 공공근로사업은 종료되었으나 천연림 보육작업을 비롯한 숲가꾸기 작업에 지속적인 투자가 이루어지고 있으며, 산림청의 제4차 산림기본계획(1998~2007)에 따르면 2000년부터 2007년까지 간벌, 천연림보육, 어린나무 가꾸기를 매년 약 115,000ha~118,000ha 시행할 계획이 있다.

간벌 등 산림사업으로부터 발생하는 수종별 폐 바이오매스의 발생량을 추정하기 위해 시업종 및 수종별 단위면적당 생지엽 및 목질부(원목)의 발생량 자료와 시업종별 수종구성비율 자료를 이용하였다.

표 1. 산림작업별 작업의 추진실적 및 계획 (단위: ha)

구 분	실 적						계 획			
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
간 벌	29,196	20,447	19,439	17,637	42,035	68,432	48,000	48,000	48,000	50,105
천연림보육	12,511	10,075	13,797	16,827	48,449	103,312	31,000	31,000	31,000	28,455
어린나무가꾸기	26,031	17,408	16,237	14,959	33,530	38,285	38,000	38,000	37,000	36,769
덩굴제거	48,100	33,491	36,195	26,877	54,245	64,451				
풀베기	99,357	72,890	73,015	57,394	66,481	70,955				
숲가꾸기 공공근로사업	43,145	129,466	117,097	95,378	51,505	-	-	-	-	-

주 : 2004년 이후의 계획면적은 제4차 산림기본계획 수치임.

숲가꾸기 공공근로사업은 1998~2002년도로 종료되었음.

자료 : 산림청

1998년 임업연구원에서 전국의 간벌사업지 16개소, 천연림보육사업지 16개소, 어린나무 가꾸기 사업지 9개소를 대상으로 단위면적당 지엽 및 목질부의 생체량을 조사한 결과는 표 2와 같다. 같은 사업종이라 하더라도 단위면적당 발생량이 수종별로 큰 차이를 보이고 있으며, 지엽은 참나무가 잣나무, 리기다, 소나무 등 침엽수에 비해 더 크지만, 목질부(원목)는 활엽수가 침엽수보다 훨씬 적은 것으로 나타나고 있다.

표 2. 사업종 및 수종별 지엽 및 목질부(원목) 발생량 (단위: 톤/ha)

구 분	간 별		천연림보육		어린나무가꾸기		
	잣나무	리기다	소나무	참나무	잣나무	소나무	참나무
지엽	13.8	7.9	13.0	16.0	22.9	14.9	22.2
목질부	17.2	16.3	6.9	1.9	-	-	-

한편, 간벌 등 사업종별 수종 구성 비율은 표 3과 같으며, 표 4에서의 기타 수종은 대부분 낙엽송 등이다. 특히 간벌의 경우 낙엽송이 전체 사업면적의 25%를 차지하고 있으며, 그 외 활엽수가 6%를 점하는 것으로 추정되고 있다. 이를 감안하여 수종별 지엽 및 목질부(원목)의 발생량을 추정하기 위해 기타 수종의 경우에는 각 사업종별 침엽수종의 단위면적당 발생량의 평균치를 적용하였다.

표 3. 사업종별 수종구성 비율 (단위: %)

사업종	간 별			천연림보육			어린나무가꾸기			
	잣나무	소나무등	기타	소나무	참나무	기타	잣나무	소나무	참나무	기타
구성비	21	48	31	30	70	0	60	10	10	20

자료 : 산림청

이와 같이 사업종·수종별 지엽 및 목질부(원목) 발생량과 사업종별 수종구성 비율이 앞으로 일정하다고 가정하여 추정한 1999년도의 지엽 및 목질부의 발생량과 2000년 이후의 지엽 및 목질부의 발생량에 대한 전망치는 표 4, 표 5와 같다.

먼저 지엽 발생량을 표 4에서 보면, 1999년에 발생한 지엽량은 총 1,843,800 톤으로 추정되었으며, 이 중 천연림보육을 통해 발생한 지엽량이 전체 발생량 중

42.8%를 차지하고 간벌 및 어린나무가꾸기 사업을 통해 발생한 지엽량은 비슷한 것으로 추정되었다. 2000년부터 2007년까지는 평균 1.8백만 톤 전후의 지엽이 매년 발생할 것으로 추정되었다.

표 4. 산림 사업에 의한 지엽의 추정발생량 및 전망 (단위: 천톤)

사업종	수 종	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
간 벌	잣나무	152.5	139.1	139.1	139.1	139.1	139.1	139.1	139.1	145.2
	소나무	199.6	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	182.0	190.0
	기 타	177.1	161.4	161.4	161.4	161.4	161.4	161.4	161.4	168.5
	계	529.2	482.6	482.6	482.6	482.6	482.6	482.6	482.6	503.7
천연림 보육	소나무	204.0	120.9	120.9	120.9	120.9	120.9	120.9	120.9	111.0
	참나무	585.9	347.2	347.2	347.2	347.2	347.2	347.2	347.2	318.7
	계	789.9	468.1	468.1	468.1	468.1	468.1	468.1	468.1	429.7
어린나무 가꾸기	잣나무	339.6	508.4	522.1	535.9	535.9	522.1	522.1	508.4	505.2
	소나무	36.8	55.1	56.6	58.1	58.1	56.6	56.6	55.1	54.8
	참나무	54.9	82.1	84.4	86.6	86.6	84.4	84.4	82.1	81.6
	기 타	93.4	139.9	143.6	147.4	147.4	143.6	143.6	139.9	139.0
	계	524.7	785.5	806.7	828.0	828.0	806.7	806.7	785.5	780.6
전 체	잣나무	492.1	647.5	661.2	675.0	675.0	661.2	661.2	647.5	650.4
	소나무	440.4	358.0	359.5	361.0	361.0	359.5	359.5	358.0	355.8
	참나무	640.8	429.3	431.6	433.8	433.8	431.6	431.6	429.3	400.3
	기 타	270.5	301.3	305.1	308.9	308.9	305.1	305.1	301.3	307.5
	계	1,843.8	1,736.2	1,757.4	1,778.6	1,778.6	1,757.4	1,757.4	1,736.2	1,714.0

주 : 소나무에는 소나무 이외에 리기다소나무 등 포함.

표 5. 산림 사업에 의한 목질부(원목)의 추정발생량 및 전망 (단위: 톤/ha)

사업종	수 종	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
간 벌	잣나무	190.1	173.4	173.4	173.4	173.4	173.4	173.4	173.4	181.0
	소나무	411.8	375.6	375.6	375.6	375.6	375.6	375.6	375.6	392.0
	기 타	273.3	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	260.2
	계	875.3	798.2	798.2	798.2	798.2	798.2	798.2	798.2	833.2
천연림 보 육	소나무	108.3	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2	58.9
	참나무	69.6	41.2	41.2	41.2	41.2	41.2	41.2	41.2	37.8
	계	177.9	105.4	105.4	105.4	105.4	105.4	105.4	105.4	96.7
전 체	잣나무	190.1	173.4	173.4	173.4	173.4	173.4	173.4	173.4	181.0
	소나무	520.1	439.7	439.7	439.7	439.7	439.7	439.7	439.7	450.9
	참나무	69.6	41.2	41.2	41.2	41.2	41.2	41.2	41.2	37.8
	기 타	273.3	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	249.2	260.2
	계	1,053.2	903.6	903.6	903.6	903.6	903.6	903.6	903.6	929.9

주 : 소나무에는 소나무 이외에 리기다소나무 등 포함.

한편, 1999년 목질부의 발생량은 총 1,053.200 톤이고, 이 중 간벌작업을 통해 발생된 목질부량이 전체의 83.1%로 대부분을 차지하는 것으로 추정되었다. 2000년부터 2007년까지는 매년 약 0.9백만 톤 내외의 목질부가 발생할 것으로 추정되었다.

이를 종합하여 보면, 2000년부터 목질조사료로 이용할 수 있는 목질부 및 지엽이 매년 약 2.7백만 톤이 발생하는 것으로 추정되며, 따라서 산림사업으로부터 발생하는 폐 바이오매스 자원을 활용하여 대체 조사료를 개발한다면 이상적인 조사료의 배합비율을 달성하기 위해 소요되는 조사료의 상당부분을 공급할 수 있을 것으로 보인다.

나. 산림작업 산물의 수집·활용현황

1999년 숲가꾸기 공공근로 사업에 의한 산물수집 및 활용실적을 보면, 전체 산물수집량이 120,224 m³로 전체 사업면적 127,792 ha로 나눈 ha당 수집량은 0.94m³이었다(표 6). 그러나 대부분의 산물이 간벌, 천연림보육, 어린나무 가꾸기 사업에 의해 생산되는 상황을 감안한다면 간벌, 천연림보육, 어린나무 가꾸기 사업면적 81,719 ha로 나눈 ha당 수집량은 1.5 m³이었다.

전체 수집량 중 활용량의 비율은 약 89%였으며, 전체 활용량 중 톱밥으로 약 34% 활용되었으며, 원목형태로 약 38% 활용되었다. 이를 소유별로 보면, 국유림의 경우에는 톱밥생산 및 원목형태의 판매가 대부분을 차지하고 있으나 민유림의 경우는 톱밥생산 및 임산연료 등으로 약 90%가 활용되고 있다.

1999년 숲 가꾸기 공공근로 사업 면적 중 간벌, 천연림보육, 어린나무 가꾸기 사업면적은 일반사업을 포함한 전체 산림사업면적의 약 63%를 점하고 있다. 전체

표 6. 숲가꾸기 공공근로 사업의 산물수집 및 활용실적(1999) (단위: m³)

구 분	수집량	활 용 량						기타 (연료재등)	계
		톱 밥	원 목			소계			
			원주목 가공용	제재,갱목 펄프용	조사료 용				
국 유 림	80,469	28,772	4	35,949	-	35,953	9,087	73,812	
민 유 림	36,850	7,942	1,841	509	919	3,269	20,001	31,212	
생명의숲	2,905	-	-	1,487	-	1,487	80	1,567	
계	120,224	36,714	1,845	37,945	919	40,709	29,168	106,591	

자료 : 산림청, 숲가꾸기 공공근로 사업 추진성과와 과제, 2000.2.

숲 가꾸기 공공근로 사업에 의한 산물이 전량 간벌, 천연림보육, 어린나무 가꾸기 사업에 의해 생산되고 일반사업으로부터 생산되는 ha당 산물재적과 수집량이 숲 가꾸기 공공근로 사업과 동일하다고 가정한다면, 1999년 전체 산림사업 중 간벌, 천연림보육, 어린나무 가꾸기 사업으로부터 수집되는 폐 바이오매스는 약 200천 m³이다. 이 수집량은 표 5의 우리나라 전체 사업에서 발생하는 폐 바이오매스 약 740천 m³ (전환계수 0.7 m³/톤 적용)의 27% 정도로 추정된다. 따라서 전체 목질자원의 발생량 중 약 30%가 판매 가능하여 수집되고 있다고 할 수 있다.

다. 지엽 및 목질톱밥의 이용실태

1997년 말 환율 인상에 따른 외국산 조사료가격의 상승으로 축산농가의 경제적 부담은 커져갔다. 당시 외국산 조사료를 대체하기 위한 방안으로 산림자원을 이용한 목질조사료 공급, 즉 목질 톱밥을 조사료로 일부 공급한다는 정책을 수립하고, 그 구체적인 대안으로 TMR(섬유질 사료; Total Mixed Rations)을 이용한 축산농가의 자가 사료 제조가 권장되었다.

그러나 현재는 환율이 안정됨에 따라 외국산 조사료가 국내 볏짚보다 싼 가격에 들어오고 있으며 목질 톱밥의 가격이 높아짐에 따라 원자재 공급에 어려움이 더해져 현재 조사료용 목질 톱밥의 생산 및 이용은 거의 없다. 현재 축산농가에서 원목톱밥을 구입하여 쓰는 용도는 주로 축사깔개용이며 대규모 돈사나 계사의 경우 분뇨처리를 위해 제재톱밥을 이용하고 있다. 1999년 숲 가꾸기 공공근로 사업에 의해 수집된 산물량 중 조사료용 919 m³의 대부분은 경남 김해시(764 m³)에서 이루어진 것인데, 이것은 목질 조사료의 이용가능성을 타진한 시범사업의 결과로 나타난 것일 뿐 현실 시장에서 거래된 것은 아니었다(산림청, 2000).

1) 톱밥 발생실태 및 이용 실태

1999년도 톱밥 총수요량은 2,826천 m³였으며 총공급량은 총수요량의 55.4%인 1,566천 m³였다. 산림청의 2000년도 수요조사결과(시·도) 총수요는 1999년 대비 40% 증가한 3,953천 m³, 공급은 19% 증가한 1,839천 m³로 조사되었다. 특히 산림조합, 축협 등의 생산·공급 계획량이 크게 증가하여 1999년 196천 m³에서 2000년도에는 385천 m³로 증가할 것으로 예상된다(표 7).

다음으로 용도별, 생산자별 공급실적 및 계획을 살펴보면, 가장 많이 이용되는 용도는 가축분뇨의 수분조절재로 이용되는 축사깔개로 '99년 총 톱밥사용량 중 약

표 7. 1999년 톱밥 수급실적 및 2000년도 계획 (단위: 천㎥, %)

연 도	수요량(A)	공급량(B)	증감량(B-A)	증감률(B/A)
1999년도 실적	2,826	1,566	△1,260	55.4
2000년도 계획	3,953	1,839	△2,114	46.5

자료 : 산림청내부자료(톱밥생산확대 공급방안, 2000.9., 산림소득과)

91%를 차지하였다. 공급원별 공급비율을 보면, 제재소 82.6%, 산림조합·축협 12.5%, 국유림관리소 4.3%, 시·군 0.6% 순으로, 제재톱밥이 대부분 공급되는 것으로 나타났다(표 8). 이중 소경간벌재 등 원목을 가공·생산하여 공급되는 톱밥은 매우 적은데, 그 이유는 원목톱밥의 원재료비가 커 제재톱밥에 비해 가격경쟁력 면에서 떨어지기 때문인데, 제재톱밥은 원목을 가공하면서 발생하는 부산물이기 때문이다.

표 8. 용도별, 생산자별 공급실적 및 계획 (단위: 천 ㎥, %)

연 도	총수요			공급처별 공급량				
	계	축분	기타	계	제재소	임협·축협	관리소	시·군
1999년도 실 적	2,829 (100.0)	2,574 (91.0)	252 (9.0)	1,566 (100.0)	1,294 (82.6)	196 (12.5)	68 (4.3)	8 (0.6)
2000년도 계 획	3,953 (100.0)	3,880 (98.2)	338 (1.8)	1,839 (100.0)	1,299 (70.6)	385 (20.9)	50 (2.7)	105 (5.8)

자료 : 산림청내부자료(톱밥생산확대 공급방안, 2000.9., 산림소득과)

현재 톱밥의 원자재로 이용되는 간벌목과 제재소 폐목재를 이용하여 톱밥을 제조할 경우 표 9와 같이 ㎥당 제재소 톱밥이 8,878원 더 저렴한 것으로 나타나, 실제 축산농가가 질이 좋은 원목 톱밥보다 제재소 톱밥을 이용하는 가장 큰 이유가 된다고 생각된다.

톱밥의 판매가격 역시 농가 도착가격을 기준으로 할 때, 산림조합에서 제조한 원목용 톱밥가격이 제일 높은 33,040 원/㎥이며, 인천지역의 제재 톱밥은 25,200 원/㎥로 원목용 톱밥 보다 7,840원이 저렴하였다. 반면 국유림관리소에 판매하는 숲가꾸기 톱밥은 17,000 원/㎥로 제일 저렴한데, 이것은 간벌목 수집비가 숲가꾸기 공공근로자의 노임으로 보조되었기 때문이다.

표 9. 간벌목 및 제재소 폐목재를 이용한 톱밥 제조원가 (단위: 원/m³, (%))

구분	계	원재료비	경비	노무비	관리비	이윤
간벌목 (A)	37,390 (100.0)	22,760 (60.9)	5,270 (14.1)	7,020 (18.8)	1,610 (4.3)	700 (1.9)
제재소 (B)	28,512 (100.0)	13,913 (48.8)	7,024 (24.6)	5,267 (18.5)	1,613 (5.7)	695 (2.4)
A-B	8,878	8,847	-1,754	1,753	-3	

자료 : 산림청내부자료 (톱밥생산확대 공급방안, 2000. 9., 산림소득과)

2) 국유림에서의 톱밥 발생 및 이용 실태

국유림에서의 톱밥 발생 및 이용 실태는 크게 전체 산림사업과 숲가꾸기 공공근로사업에서 나온 폐 바이오매스로 구분하였다. 그리고 각각의 폐 바이오매스를 원목과 톱밥, 기타로 구분하였다. 여기서 원목은 원주목, 제재목, 톱밥용으로 구분하였고 톱밥은 국유림관리소가 직접 톱밥을 생산하여 축사갈개용과 조사료용으로 판매한 것을 조사하였으며, 기타는 앞서 말한 용도 외에 임산연료 등으로 판매된 것을 조사하였다(표 10).

1999년 19개 국유림관리소가 수집한 폐 바이오매스는 92,063 m³로, 이중 88.7%인 79,786 m³는 숲가꾸기 공공근로사업에서 나온 것이다. 여기서 원목 수집량은 총 수집량의 59%인 54,157 m³이었으며, 톱밥(전량 축사갈개용) 32,418 m³ (35%), 기타 5,488 m³ (6%)로 조사되었다. 원목은 대부분 제재용으로 총 원목 수집량의 82%, 총 수집량의 49%를 차지하였다. 반면 톱밥용 원목 형태로 판매할 목적으로 수집된 원목량과 톱밥 형태로 판매할 목적으로 수집된 톱밥용 원목량을 합치면 총 수집량의 45%를 차지하였다(표 11). 따라서 국유림에서 산림사업을 통해 수집된 폐 바이오매스의 대부분은 제재목용과 톱밥용으로 판매되었다고 볼 수 있다.

표 10. 국유림관리소에서 수집한 용도별 총수집량(1999) (단위: m³, %)

구분	원 목								톱 밥		기 타		합 계	
	원주목용		제재목용		톱밥용		소 계							
	수집	판매	수집	판매	수집	판매	수집	판매	수집	판매	수집	판매	수집	판매
전 체(a)	71	61	44,664	43,059	9,442	3,739	54,157	46,859	32,418	28,563	5,488	5,392	92,063	80,814
공공근로(b)	71	61	34,516	32,996	8,536	3,193	43,240	36,367	31,872	28,017	4,791	4,750	79,786	69,027
비율(b/a)	100.0	100.0	77.3	76.6	90.4	85.4	79.8	77.6	98.3	98.1	87.3	88.1	86.7	85.4

주 : 국유림관리소는 구미, 단양, 무주, 보은, 부여, 삼척, 양구, 양산, 연곡, 영덕, 영암, 영월, 울진, 인제, 정선, 정읍, 태백, 함양, 홍천임.

표 11. 국유림관리소에서 수집한 수종별 총 수집량(1999) (단위: m³)

구 분	원 목								톱 밥		기 타		합 계	
	원주가공용		제재목용		톱밥용		소 계		수집	판매	수집	판매	수집	판매
	수집	판매	수집	판매	수집	판매	수집	판매						
소나무	-	-	14,698	14,662	687	-	15,385	14,662	7,075	6,691	2,078	2,078	24,538	23,431
잣나무	-	-	2,494	2,474	2,858	-	5,352	2,474	7,187	6,854	257	257	12,798	9,585
낙엽송	-	-	12,581	12,234	-	-	12,581	12,234	704	483	112	112	13,396	12,828
참나무	71	61	2,171	1,912	413	-	2,655	1,973	8,293	6,662	1,597	1,501	12,545	10,136
기 타	-	-	12,720	11,777	5,484	3,739	18,184	15,516	9,159	7,873	1,444	1,444	28,788	24,834
합 계	71	61	44,664	43,059	9,442	3,739	54,157	46,859	32,418	28,563	5,488	5,392	92,063	80,814

국유림에서 산림사업을 통해 수집된 폐 바이오매스의 수종별, 용도별 이용실태를 살펴보면, 기타를 제외한 수종별 수집량은 소나무, 낙엽송, 잣나무, 참나무 순이었으며, 침엽수가 활엽수에 비해 수집량이 상대적으로 많았음을 알 수 있다. 그 이유는 숲가꾸기 공공근로사업을 포함한 대부분의 산림사업이 침엽수 인공림을 대상으로 하였기 때문이다.

한편 수종별 이용 현황을 보면 앞서 살펴본 바와 같이 대부분 제재목용과 톱밥용으로 이용되고 있었는데, 참나무류는 제재목용보다는 톱밥용으로 많이 이용된 반면 수피가 거친 낙엽송은 톱밥용보다 제재목용으로 대부분 이용되었다. 낙엽송 톱밥의 경우 축사갈개용으로 사용할 경우 피부염 등을 유발시켜 축사농가에서 기피하고 있어 축사갈개용보다는 유기질퇴비 원료로 이용된 것으로 추측된다.

표 12. 톱밥원목 및 톱밥가격(1999년) (단위: 천원/톤)

구 분	톱밥용 원목가격	원목톱밥 가격	제재톱밥가격
산림조합	41	100~110	70
C사	44	90	

주 : 톱밥용 원목은 공장 도착 가격이며 원목톱밥과 제재톱밥은 농가 도착 가격 기준

2. 신갈나무림의 바이오매스와 연간 순생산량

가. 서론

신갈나무는 우리나라에서 가장 넓은 분포면적을 가지고 있는 대표적인 활엽수 종으로서 만주와 연해주 일대부터 제주도과 일본에까지 우리나라 전역에서 자라고 있다. 특히 신갈나무는 도시근교림과 농촌 산림과 같이 산불과 벌채로 파괴된 후 형성된 2차림에서 우점하고 있어서 대부분의 지역에서 쉽게 발견된다.

나무의 생육은 동화기관인 잎에서 태양에너지를 이용한 물질 생산의 결과로서, 산림의 생장은 그 숲의 바이오매스 생산과 분배를 파악하여 알 수 있다. 이런 측면에서 산림의 바이오매스 생산 연구는 큰 의의를 갖게 된다(이와 박, 1987). 산림의 바이오매스 분포와 생장을 알아낸다면, 그 산림의 태양에너지 고정과 대기의 각종 원소의 화학적 합성 작용의 결과치(생산량)를 추정할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 우리나라 이차림에서 우점하고 있는 수종인 신갈나무 임분의 바이오매스 생산기구를 파악하여 그 생산량을 추정하고, 가지치기와 간벌 작업으로 얻을 수 있는 폐 바이오매스 자원량을 추정하는데 있다.

나. 재료 및 방법

1) 조사지 선정

본 연구는 충북 제천시 월악산(충북대학교 농과대학 연습림) 지역과 강원도 평창군 중왕산 지역을 중심으로 수행되었다(표 13, 그림 1, 2 참조). 충북 월악산 지역의 산림은 과거 화전민에 의해 산림이 훼손된 이후 이차림이 조성된 전형적인 한국의 산림 환경을 보여주고 있다. 반면 강원도 중왕산 지역의 산림은 인위적 훼손이 거의 일어나지 않은 장령의 이차림으로서 산림의 구조와 기능이 비교적 우수하여 천연림의 생산구조 및 연간 순생산량 파악에 적절한 환경이다.

2) 임분 및 바이오매스 조사

임분의 바이오매스 측정을 위해서 각 지역별로 신갈나무림에 20m×20m 크기의 조사구를 설치하여 매목조사를 실시하였다. 그리고 흉고직경이 6cm 이상인 임목

을 각 흉고직경급별로 1본씩 각 지역별로 6~9본을 선정하여 별목하고 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지, 잎의 생중량을 측정하였다(표 14). 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며, 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시킨 후 건조량지수를 산출하고 생중량에 적용시켜 전체 건조량을 계산하였다. 또한 각 지역별로 2~3본의 신갈나무를 굴취하여 지하부(뿌리)의 바이오매스를 측정하였다(그림 3, 4).

표 13. 조사지역 및 연구수행내용

조사 지역	대상 임분	연구 수행 내용
월악산, 충북 제천시	북사면 신갈나무(35년생)	바이오매스, 엽면적 측정
중왕산, 강원도 평창군	북사면 신갈나무(60년생) 남사면 신갈나무(70년생)	바이오매스, 엽면적 측정



그림 1. 월악산내 조사지 위치도



그림 2. 중왕산내 신갈나무림 조사지 위치도



그림 3. 신갈나무의 뿌리 굴취 사진

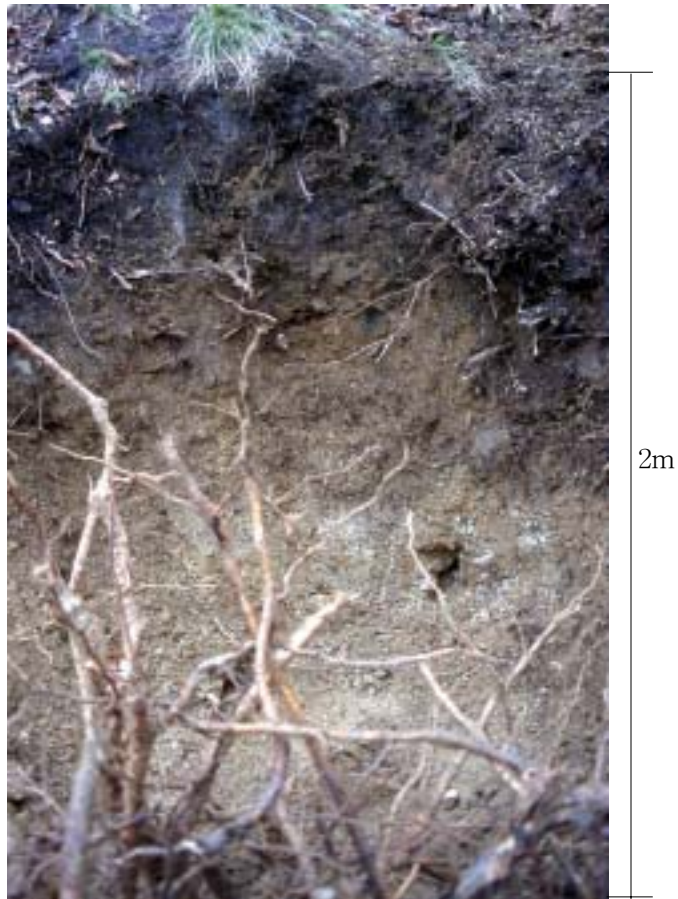


그림 4. 신갈나무의 뿌리 굴취 사진

표 14. 바이오매스 측정에 이용된 표본목

월악산 (300m, 북)			중왕산 (1000m, 북)			중왕산 (1000m, 남)		
DBH (cm)	수고 (m)	연령	DBH (cm)	수고 (m)	연령	DBH (cm)	수고 (m)	연령
4.3	4.21	24	6.4	6.90	22	6.2	6.65	18
5.9	8.60	28	9.4	10.45	50	14.2	13.40	52
6.5	9.18	28	13.5	15.20	54	18.0	13.20	70
7.8	11.00	31	16.1	15.60	55	20.4	17.80	66
9.4	11.10	32	22.5	16.48	57	23.5	18.70	73
10.2	11.10	36	26.5	18.10	64	27.0	18.90	71
13.0	12.30	37	34.0	18.40	60			
13.2	14.35	37						
14.3	14.40	38						
17.6	14.78	38						

3) 현존량 및 순생산량 추정

현존량의 추정은 D^2H 와 W_s (줄기 건조), W_b (가지 건조), W_l (잎 건조)과의 관계를 대수회귀식으로 한 상대성장식에 의해서 계산했다. 조사지내의 지상부 현존량(W_t)의 추정은 이 상대성장식을 전입목에 적용시켜,

$W_t = W_s + W_b + W_l$ 로 구하였다.

연간 순생산량의 추정은 수간석해를 하여 1년간의 수고 및 흉고직경의 성장량을 조사하고 여기서 얻은 연간 흉고직경 성장량(D)과 연간 수고성장량(H)에서 D^2H 를 계산하고 이를 상대성장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다. 지하부의 연간 순생산량은 지상부 현존량에 대한 지상부 연간 순생산량의 비율을 지하부 현존량에 곱하여 추정하였다.

4) 엽면적 측정

신갈나무의 엽면적 측정은 일정량의 잎 시료의 무게를 1/100g 저울로 측정 한 후, Delta-T Area Meter(1998)를 사용하여 측정하였다.

5) 임분 환경 분석

바이오매스를 조사한 각 임분의 물리적 환경 특성을 파악하기 위해, 지형, 해발고, 사면방위, 경사도, 기상 환경, 토양 특성 등을 조사하였다. 토양 특성을 조사하기 위해 각 조사구마다 3군데에서 낙엽층을 제거한 후 A층 토양을 균등 채취하였다. 이렇게 채취된 토양은 토양채취비닐에 밀봉한 후 실험실로 운반하여 물리·화학적 분석을 하였다.

각 조사구에서 채집한 토양의 물리적 성질 및 화학적 성질에 대한 분석을 위해 실험실로 운반한 후 15일간 음건시켰다. 음건시킨 토양은 2mm 표준망체를 이용하여 입자의 직경이 2mm 이하인 토양에 대하여 토성, 토양 수분, 토양 pH, 전질소함량, 유기물함량 등을 측정하였다. 여기서 토성의 결정은 비중계법으로 점토, 미사, 모래의 비율을 구하여 미국 농무성(USDA ; U. S. Department of Agriculture)법에 따랐다. 토양내 전질소함량은 Kjeldahl 분석방법을 이용하였고, 수분함량은 신선토양을 건조기에서 100℃로 24시간 건조시켜 그 무게를 측정하여 계산하였다. 유기물함량은 전건 토양을 전기화로에서 450℃로 12시간 태워 측정하였으며, 토양 pH는 신선토양 10g에 H_2O 와 $CaCl_2$ 를 각각 1:5의 비율로 혼합하여 24시간 진탕한 후 측정하였다.

다. 결과 및 고찰

1) 조사지 개황

본 연구가 시행된 조사지의 개황은 다음 표 15와 같다. 이 중 중왕산 지역은 북사면과 남사면 각각에 대해 신갈나무림의 현존량과 연간 순생산량을 조사하여 사면에 따른 생산구조와 현존량 차이를 비교하였다.

표 15. 조사지 개황

조사지	월악산	중왕산	중왕산
위치	충북 제천시	강원도 평창군	강원도 평창군
해발 (m)	300	1,000	1,000
방위	NE60	NE8	SE15
연평균 온도 (°C)	11.0	7.1	7.1
연평균 강수량 (mm)	1,570	1,900	1,900
평균경사도 (°)	10	23	27
입령 (년)	35	60	70
상층 수고 (m)	12	18	18
평균 DBH (cm)	13.48	17.50	16.25
ha당 본수	2,425	750	900

2) 토양 환경

본 조사지의 토양 특성을 다음 표 16에 요약하였다. 월악산 신갈나무림의 조사지 토양은 계곡에 걸친 사면하부라는 지형 특성상 토양수분이 많았으나, 전질소 함량과 유기물 함량은 비교적 적은 것으로 나타났다. 토성은 사양토로 나타나 식물생육에 적당하였다. 한편, 중왕산 신갈나무림 지역은 전체적으로 사질식양토의 토양으로 나타났다. 북사면 지역이 남사면 지역에 비해 토양 pH가 낮지만, 토양수분이 더 많고 전질소함량과 유기물함량이 높게 나타나 식물생육에 북사면 지역의 토양 환경이 좀 더 유리한 것으로 보인다.

표 16. 신갈나무림 조사지의 토양(A층) 특성

조사구	토성	토양수분 (%)	토양pH (H ₂ O)	토양pH (CaCl ₂)	전질소함량 (%)	유기물함량 (%)
월악산 N	사양토	38.20	5.68	4.78	0.33	4.78
중왕산 N	사질식양토	41.42	4.58	3.97	0.49	11.85
중왕산 S	사질식양토	29.30	5.00	4.20	0.29	10.21

3) 식생 개황

충북 제천시 월악산 신갈나무림은 평균흉고직경 13.5cm/6cm-50cm로서 신갈나무가 우점하고 있지만, 굴참나무와 졸참나무도 함께 상층임관을 형성하고 있다. 중층에는 굴피나무와 쪽동백이 우점하고 있다. ha당 본수는 약 2,425본 수준이다.

강원도 평창군 중왕산 지역은 많은 지역에서 신갈나무가 우점하고 있다. 북사면에서는 신갈나무, 사시나무, 느릅나무, 다릅나무, 고로쇠나무, 난티나무, 층층나무, 피나무 등이 상층임관을 구성하고 있으며, 남사면에서는 신갈나무, 피나무, 느릅나무, 물푸레나무 등이 상층임관을 이루고 있다. 임목의 대부분이 흉고직경 20cm가 넘고, 30cm가 넘는 임목도 많은 장령림이다(표 15 참조).

4) 생산구조 분석

월악산 지역 신갈나무림에서 최대광합성부는 지상부 9.2m부터 시작하여 최대광합성부가 11.2m-13.2m 사이에서 나타나고 있다(그림 5 참조). 강원도 중왕산 지역 신갈나무림을 사면별로 비교해보면, 북사면 지역은 광합성부가 지상 7.2m부터 시작하여 13.2m-17.2m 사이에서 최대광합성부가 형성되지만, 남사면 지역은 광합성부가 지상 7.2m부터 시작하여 9.2-17.2m 사이에 형성된다(그림 6, 7 참조). 비슷한 경급끼리 비교했을 때, 흉고직경 20cm 이상인 신갈나무 우점종은 남사면에 자라는 것의 수고생장이 약 2m 가량 더 우세한데, 이것은 남사면 신갈나무림의 임분 밀도가 북사면보다 더 높기 때문으로 여겨진다. 한편 흉고직경 15cm 이하에서는 남사면보다 북사면에 자라는 신갈나무의 수고생장이 더 빠른 것으로 나타났으며, 최대광합성부도 더 위로 치우치는 경향을 보인다.

5) 현존량 추정

별채한 표본목에서 유도된 상대생장식을 표 17에 정리하였다. 표 17을 보면, 월악산과 중왕산의 신갈나무는 조금씩 다른 생산구조를 보이고 있다. 흉고직경과 수고가 커짐에 따른 수간부의 바이오매스는 중왕산 남사면의 신갈나무가 가장 크고, 중왕산 북사면의 신갈나무가 그 다음, 월악산의 신갈나무가 가장 적게 나타났다. 한편, 흉고직경과 수고의 증가에 따른 가지부의 바이오매스는 중왕산 북사면, 중왕산 남사면, 월악산 북사면의 순이며, 잎 바이오매스는 월악산 북사면, 중왕산 북사면, 중왕산 남사면의 신갈나무 순이었다(그림 8, 10, 12 참조).

이렇게 지역에 따라 상이한 결과가 나온 이유는, 우선 두 지역의 해발고가 크게

차이나고(월악산 300m, 중왕산 1,000m), 임령이 틀리기 때문(월악산 35년, 중왕산 60-70년)인 것으로 생각된다. 중왕산의 신갈나무림을 사면별로 비교해봤을 때, 앞은 임목의 크기가 커짐에 따라 남사면보다 북사면이 더 많이 달리는 경향으로 보이고 있는데 이것은 남사면에 비해 부족한 광량에 따른 것으로 판단된다.

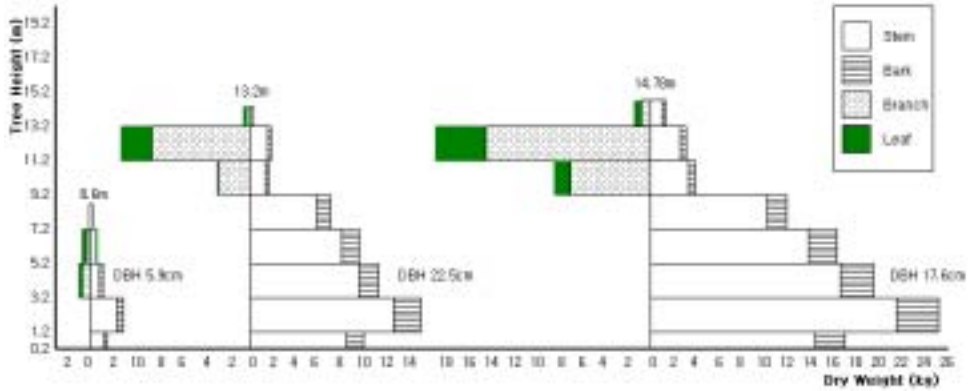


그림 5. 충북 월악산 지역 신갈나무림의 바이오매스 수직분포도

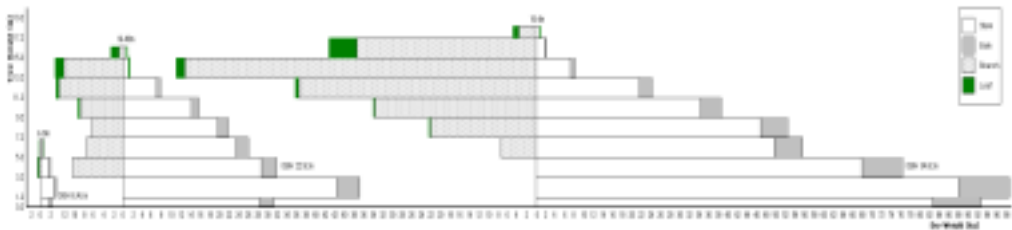


그림 6. 강원도 중왕산 북사면 지역 신갈나무림의 바이오매스 수직분포도

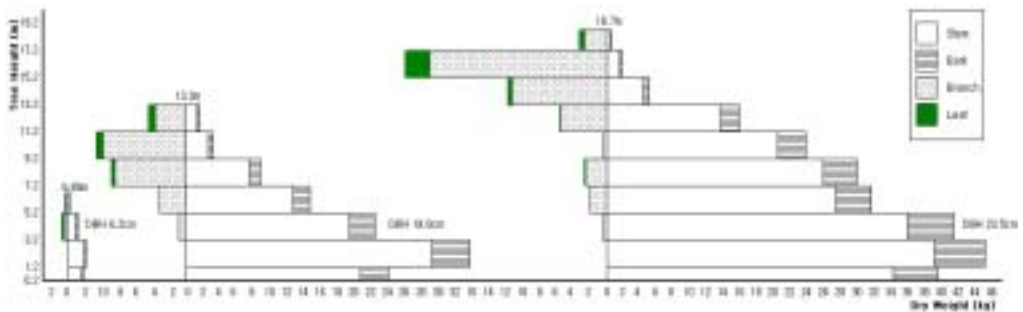


그림 7. 강원도 중왕산 남사면 지역 신갈나무림의 바이오매스 수직분포도

표 17. 신갈나무 바이오매스의 상대생장식

충북 제천시 월악산

상대생장식	결정계수 (R ²)	F값
$\log W_s = 0.9198 \log D^2 H + 1.5307$	0.94	126.35***
$\log W_{bk} = 0.7187 \log D^2 H + 1.4997$	0.94	132.42***
$\log W_b = 0.9964 \log D^2 H + 0.6542$	0.97	221.66***
$\log W_l = 0.9469 \log D^2 H + 0.3293$	0.98	501.30***

강원 평창군 중왕산(북사면)

$\log W_s = 0.9758 \log D^2 H + 1.3912$	0.99	3012.54***
$\log W_{bk} = 0.8702 \log D^2 H + 0.8843$	0.99	1282.83***
$\log W_b = 1.4415 \log D^2 H - 0.8900$	0.95	95.15***
$\log W_l = 0.8636 \log D^2 H + 0.2714$	0.99	590.33***

강원 평창군 중왕산(남사면)

$\log W_s = 1.0276 \log D^2 H + 1.1965$	0.99	2091.09***
$\log W_{bk} = 0.9985 \log D^2 H + 0.5048$	0.99	1379.56***
$\log W_b = 1.1449 \log D^2 H + 0.1690$	0.98	213.82***
$\log W_l = 0.7927 \log D^2 H + 0.4140$	0.99	340.98***

*** 0.001에서 유의성 인정

표 18. 신갈나무 바이오매스의 부위간 상대생장식

충북 제천시 월악산

상대생장식	결정계수 (R ²)	F값
$\log W_l = 0.9932 \log W_s - 1.0921$	0.97	302.37***
$\log W_l = 1.2710 \log W_{bk} - 1.4780$	0.97	273.01***
$\log W_l = 0.9376 \log W_b - 0.2465$	0.99	1093.52***
$\log W_b = 1.0600 \log W_s - 0.9048$	0.98	453.97***

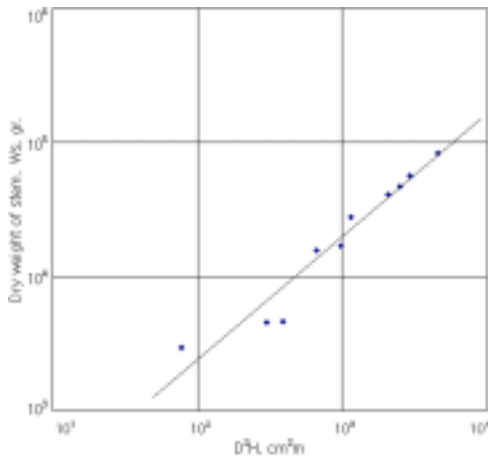
강원 평창군 중왕산(북사면)

$\log W_l = 0.8842 \log W_s - 0.9560$	0.99	579.95***
$\log W_l = 0.9922 \log W_{bk} - 0.6050$	0.99	961.63***
$\log W_l = 0.5717 \log W_b - 0.9204$	0.95	95.64***
$\log W_b = 1.4874 \log W_s - 2.9945$	0.96	137.03***

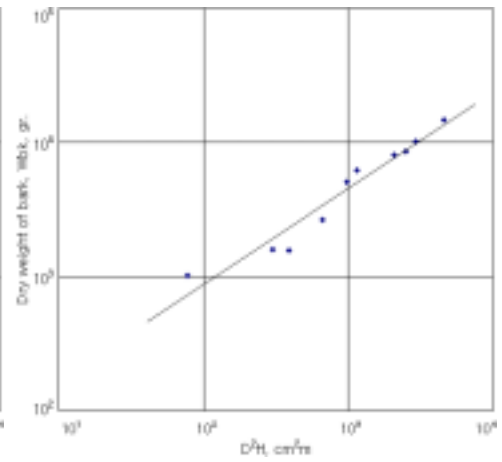
강원 평창군 중왕산(남사면)

$\log W_l = 0.7690 \log W_s - 0.4973$	0.98	248.06***
$\log W_l = 0.7902 \log W_{bk} + 0.0283$	0.98	218.44***
$\log W_l = 0.6815 \log W_b + 0.3434$	0.98	159.63***
$\log W_b = 1.1174 \log W_s - 1.1798$	0.99	367.23***

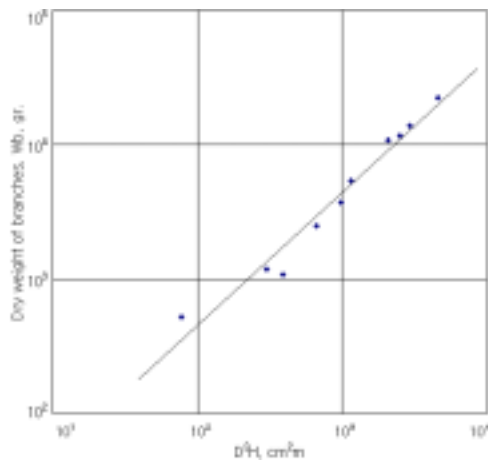
*** 0.001에서 유의성 인정



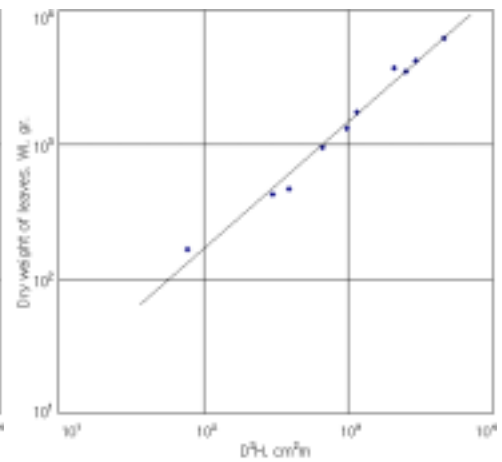
(가) 줄기(W_s) - D^2H



(나) 수피(W_{bk}) - D^2H

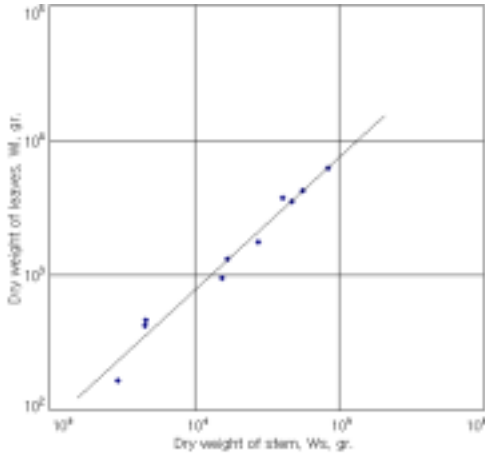


(다) 가지(W_b) - D^2H

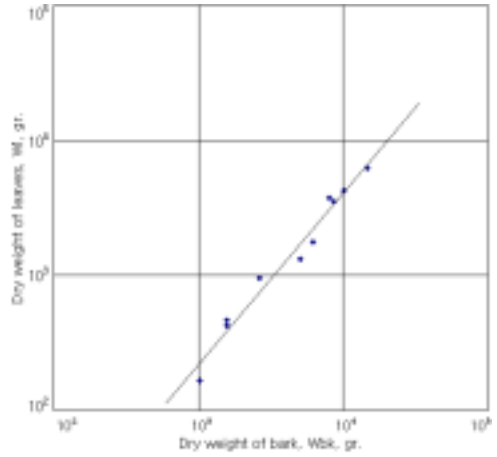


(라) 잎(W_l) - D^2H

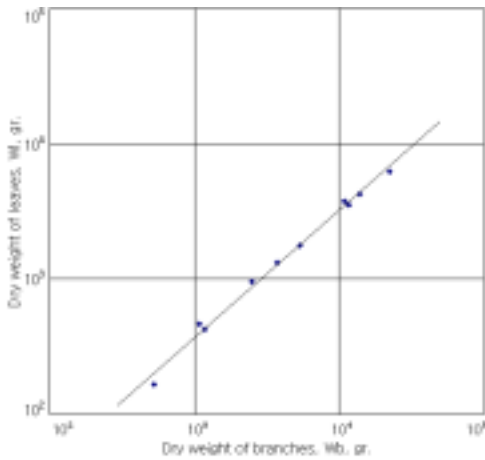
그림 8. 충북 월악산 신갈나무림의 줄기(W_s), 수피(W_{bk}), 가지(W_b), 잎(W_l)
건중량과 D^2H (흉고직경²×수피)간 대수 상관관계



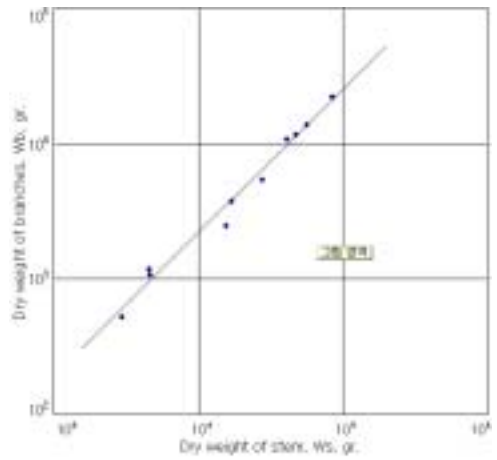
(가) 잎(Wl) - 가지(Wb)



(나) 잎(Wl) - 수피(Wbk)

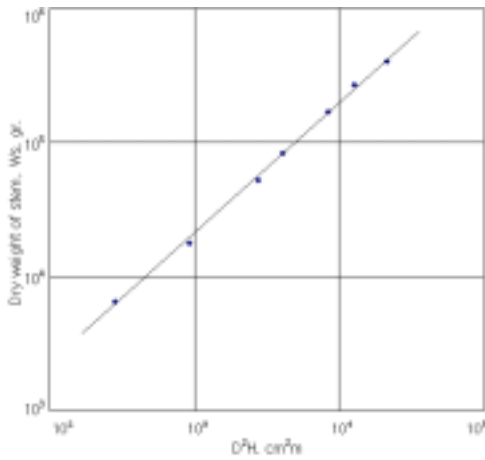


(다) 잎(Wl) - 줄기(Ws)

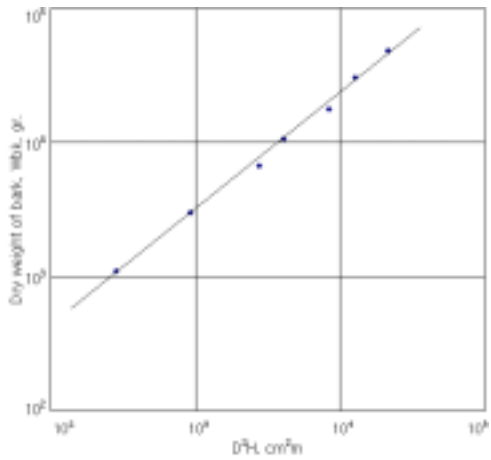


(라) 가지(Wb) - 줄기(Ws)

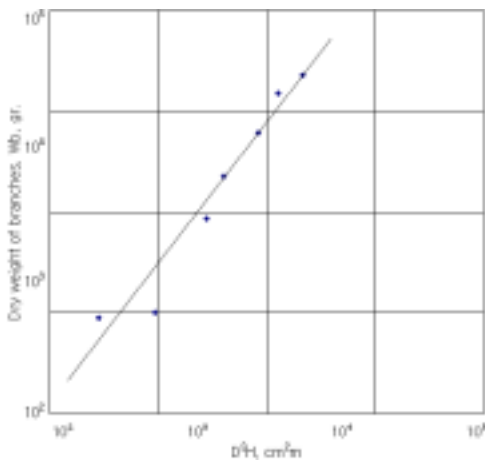
그림 9. 충북 월악산 신갈나무림의 줄기(Ws), 수피(Wbk), 가지(Wb), 잎(Wl) 건중량간 대수 상관관계



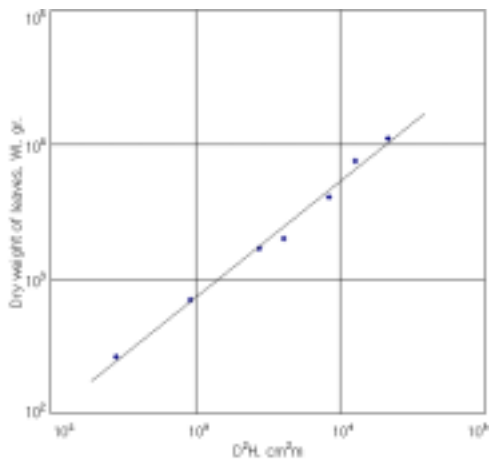
(가) 줄기(Ws) - D²H



(나) 수피(Wbk) - D²H

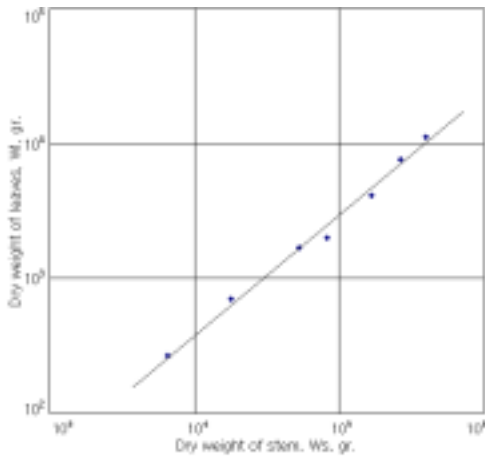


(다) 가지(Wb) - D²H

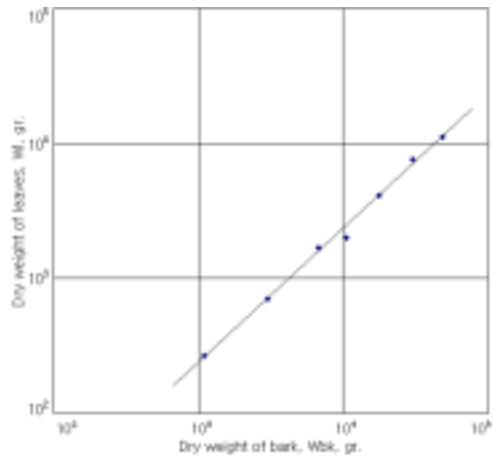


(라) 잎(Wl) - D²H

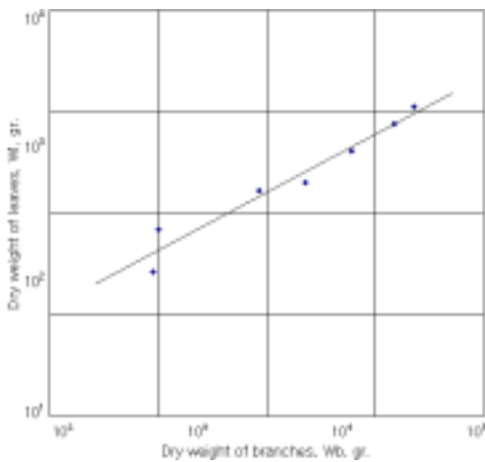
그림 10. 강원도 중왕산 신갈나무림(북사면)의 줄기(Ws), 수피(Wbk), 가지(Wb), 잎(Wl) 건중량과 D²H(흉고직경²×수피)간 대수 상관관계



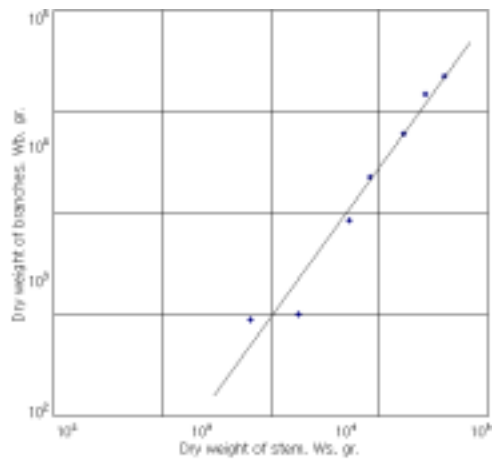
(가) 잎(Wl) - 가지(Wb)



(나) 잎(Wl) - 수피(Wbk)

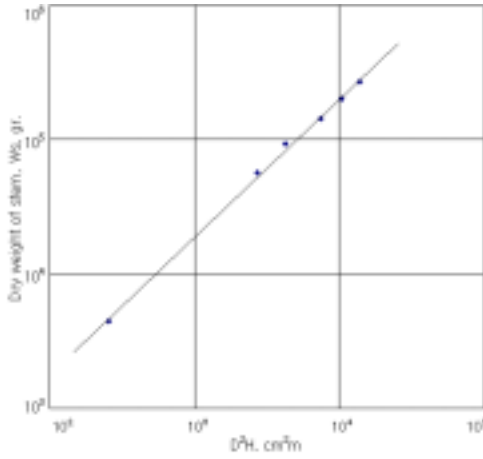


(다) 잎(Wl) - 줄기(Ws)

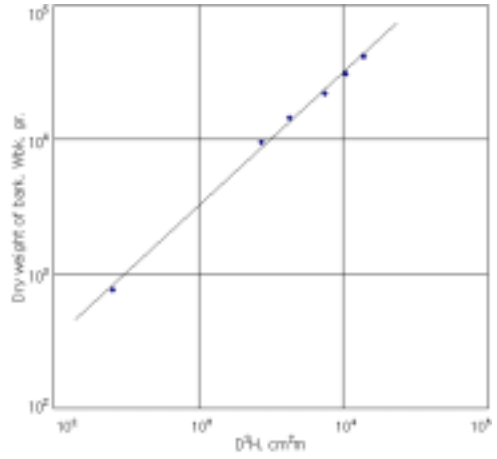


(라) 가지(Wb) - 줄기(Ws)

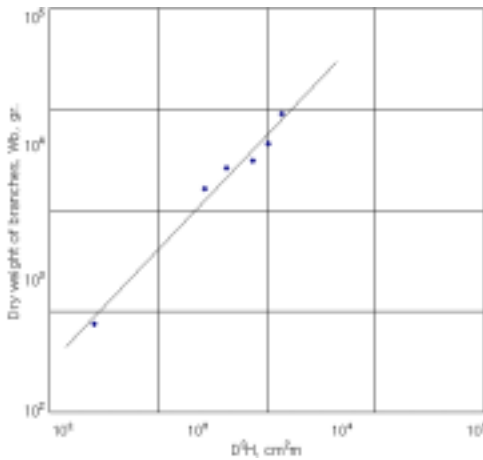
그림 11. 강원도 중왕산 신갈나무림(북사면)의 줄기(Ws), 수피(Wbk), 가지(Wb), 잎(Wl) 건중량간 대수 상관관계



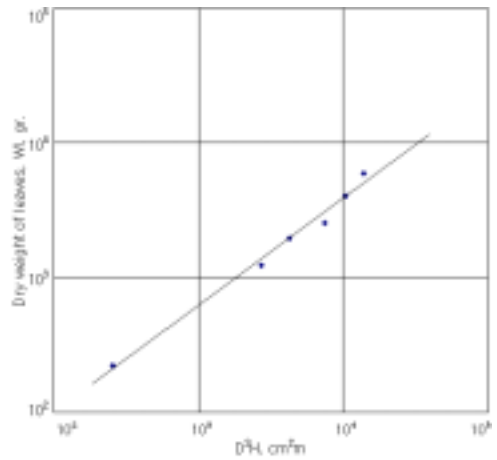
(가) 줄기(W_s) - D^2H



(나) 수피(W_{bk}) - D^2H

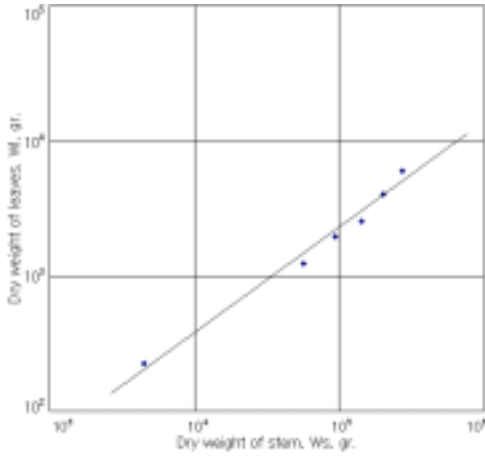


(다) 가지(W_b) - D^2H

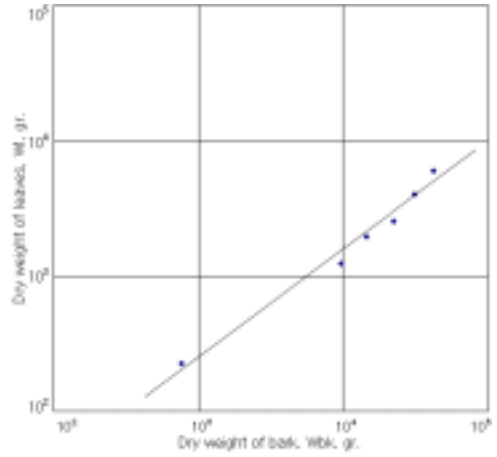


(라) 잎(W_l) - D^2H

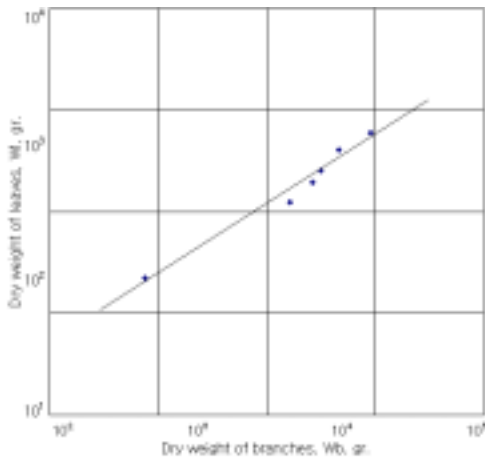
그림 12. 강원도 중왕산 신갈나무림(남사면)의 줄기(W_s), 수피(W_{bk}), 가지(W_b), 잎(W_l) 건중량과 D^2H (흉고직경²×수피)간 대수 상관관계



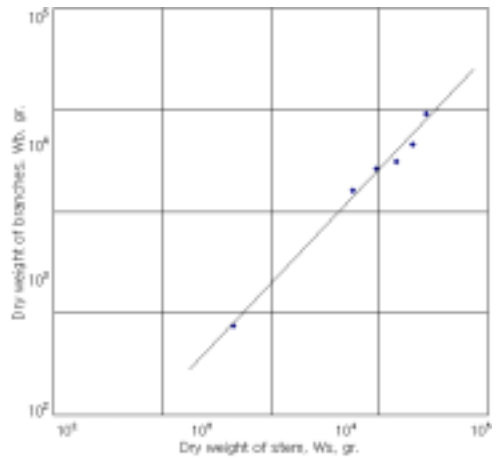
(가) 잎(Wl) - 가지(Wb)



(나) 잎(Wl) - 수피(Wbk)



(다) 잎(Wl) - 줄기(Ws)



(라) 가지(Wb) - 줄기(Ws)

그림 13. 강원도 중왕산 신갈나무림(남사면)의 줄기(Ws), 수피(Wbk), 가지(Wb), 잎(Wl) 건중량간 대수 상관관계

각 지역별 신갈나무의 W1~Ws, W1~Wbk, W1~Wb, Wb~Ws의 관계를 회귀분석한 결과 표 18과 같은 식이 얻어졌다. 이 식에서 가지 건중량과 잎 건중량은 줄기 건중량의 증가에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다(그림 9, 11, 13 참조).

손 등(2002)은 경기도 광주지방 25년생 신갈나무의 $D^2H \sim Ws$, $D^2H \sim Wb$, $D^2H \sim W1$ 사이의 상대성장계수를 각각 0.9652, 1.4201, 1.1947로 보고하였으며, 이와 박(1987)은 경기도 광주 22년생 신갈나무림의 상대성장계수가 각각 0.9013, 1.1377, 0.9788인 것으로 발표하였다. 본 연구결과와 비교해보면, 월악산 지역은 대체적으로 상기 연구 결과와 유사한 경향을 나타내고 있지만, 중왕산 지역의 경우 남, 북사면 수간부의 기울기가 1.0276, 0.9758로서 다소 급한 편이다. 이러한 결과가 나온 것은 본 연구에서 정밀 조사를 위해 수간부의 재부와 수피를 박리하여 측정했기 때문인 점도 있겠으나, 이 임분의 신갈나무가 대체적으로 대경목이기 때문으로 생각된다.

Murayama 등(1953)은 적송임분이 17-18년, Ovington(1957)은 *Pinus sylvestris* 임분이 20년 전후에서 최고엽량에 도달한다고 보고하였는데, 표 17에서 잎과 가지의 기울기를 각각 비교해보았을 때 모든 지역에서 잎보다 가지의 기울기가 더 급하게 나왔는데, 이것은 D^2H 의 증가에 따라 잎의 증가가 다른 목질부의 증가를 따르지 못하고 있다는 의미로서 35년 이전에 이미 숲의 최대엽량을 보이는 시기가 지났음을 알 수 있다.

6) 신갈나무림의 바이오매스 및 연간 순생산량과 숲가꾸기 작업에 따른 폐 바이오매스 산출량 추정

앞에서 유도한 대수회귀식을 가지고 월악산 북사면 지역 35년생 신갈나무림의 ha당 바이오매스(건중)를 추정하면 표 19와 같이 줄기부 104.2 ton/ha (변재부 53.1 ton/ha, 51.1 ton/ha), 수피부 18.5 ton/ha, 살아있는 가지부 26.4 ton/ha, 잎 8.2 ton/ha으로서 지상부 합계가 157.4 ton/ha이었고, 지하부(뿌리)는 41.4 ton/ha으로서 전체 바이오매스는 198.8 ton/ha으로 추정되었다. 전체에 대한 각 기관의 비율은 줄기 52% (변재부 27%, 심재부 26%), 수피 9%, 가지 13%, 잎 4%, 뿌리 21%로 나타났다. 또한 표 20과 같이 이 지역 임분의 연간 순생산량은 줄기부 6.1 ton/ha/yr, 수피부 0.9 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 1.6 ton/ha/yr, 잎 8.1 ton/ha/yr으로서 지상부 합계는 16.8 ton/ha/yr이었고, 지하부는 4.4 ton/ha/yr으로서 전체 신갈나무림의 연간 순생산량은 21.2 ton/ha/yr으로 추정되었다.

표 19. 신갈나무림의 부위별 바이오매스(ton/ha)와 비율(%)

줄기	수피	생가지	잎	번재	심재	지상부 합계	뿌리	전체 합계
월악산 (300m, 북사면)								
104.25 (52.44)	18.54 (9.33)	26.36 (13.26)	8.22 (4.14)	53.13 (26.72)	51.13 (25.72)	157.38 (79.16)	41.42 (20.84)	198.80 (100.00)
중왕산 (1000m, 북사면)								
137.50 (54.44)	16.32 (6.46)	54.28 (21.49)	3.75 (1.48)	65.77 (26.04)	71.73 (28.40)	211.85 (83.87)	40.73 (16.13)	252.59 (100.00)
중왕산 (1000m, 남사면)								
122.05 (57.49)	18.98 (8.94)	33.99 (16.01)	2.35 (1.11)	41.08 (19.35)	80.98 (38.14)	177.37 (83.55)	34.93 (16.45)	212.30 (100.00)

표 20. 신갈나무림의 부위별 연간 순생산량(ton/ha/yr)과 비율(%)

줄기	수피	생가지	잎	번재	심재	지상부 합계	뿌리	전체 합계
월악산 (300m, 북사면)								
6.09 (28.78)	0.92 (4.35)	1.60 (7.57)	8.14 (38.46)	2.85 (13.47)	3.24 (15.31)	16.76 (79.16)	4.41 (20.84)	21.17 (100.00)
중왕산 (1000m, 북사면)								
6.47 (37.35)	0.69 (3.98)	3.29 (19.00)	4.07 (23.52)	2.90 (16.72)	3.57 (20.63)	14.52 (83.86)	2.80 (16.14)	17.32 (100.00)
중왕산 (1000m, 남사면)								
6.59 (46.31)	1.00 (7.06)	1.95 (13.67)	2.35 (16.50)	1.93 (13.53)	4.67 (32.78)	11.89 (83.54)	2.34 (16.46)	14.23 (100.00)

그림 5의 수직분포도를 보면 9.2m에서 11.2m 사이의 가지는 광합성부인 잎이 적게 달려있기 때문에 가지치기를 하는 것이 좋은 목재를 만드는데도 도움이 될 것으로 보인다. 따라서 만일 이 지역에서 20% 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 5 ton의 바이오매스를 이용할 수 있으며, 이것은 현재 월악산 신갈나무림의 성장 속도로 보았을 때 3년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 16 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 1년간의 성장량에 해당한다.

한편, 표 19에서 중왕산 해발 1000m 지역의 경우 북사면은 252.6 tons/ha, 남사면은 212.3 tons/ha 으로 추정되었으며, 중왕산 북사면 60년생 신갈나무림의 기관별 건중량 비율은 줄기 54%(번재부 26%, 심재부 28%), 수피 6%, 가지 21%, 잎 1.5%, 뿌리 16%이고, 남사면 70년생 신갈나무림은 줄기 57%(번재부 19%, 심재부 38%),

수피 9%, 가지 16%, 잎 1%, 뿌리 16%로 나타났다. 표 20에서 중왕산 신갈나무림의 연간 순생산량은 북사면에서 줄기부 6.5 ton/ha/yr, 수피부 0.7 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 3.3 ton/ha/yr, 잎 4.1 ton/ha/yr으로서 지상부 합계는 14.5 ton/ha/yr, 지하부 2.8 ton/ha/yr이고, 전체 17.3 ton/ha/yr으로 추정되었으며, 남사면에서 줄기부 6.6 ton/ha/yr, 수피부 1.0 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 2.0 ton/ha/yr, 잎 2.4 ton/ha/yr, 지상부 합계는 11.9 ton/ha/yr, 지하부 2.3 ton/ha/yr, 전체 14.2 ton/ha/yr으로 추정되었다.

월악산 지역과 비교해서 중왕산 지역의 부위별 바이오매스에서 특히 잎의 바이오매스가 크게 적었는데, 해발고가 높을수록 그리고 임분이 성숙되어 갈수록 전체 바이오매스에서 잎이 차지하는 비중이 줄어들고 있는 경향이 나타났다. 중왕산 지역에서 전체 바이오매스량은 북사면이 남사면보다 더 많은 것으로 나타났으며, 연간 순생산량 역시 북사면이 남사면보다 더 많은 것으로 추정되었다. 이것은 광합성에 중요한 역할을 하는 잎과 가지의 중량이 북사면에서 남사면보다 더 큰 비중을 차지하고 광합성에 필요한 물을 공급해주는 변재부도 북사면에서 더 큰 비중을 차지하고 있기 때문으로 판단된다.

Rundel(1980)은 다년생 식물의 지하부(뿌리) 바이오매스 비율은 환경조건이 열악할수록 증가하는 경향이 있다고 하였으며, Laclau(2003)는 10년생 *ponderosa pine*의 지하부 비율을 27%로, 20년생 *ponderosa pine*의 지하부 비율을 22%라고 하며, 나무의 크기가 커질수록 지하부의 비율이 줄어든다고 하였으며, Art와 Marks(1971)는 지상부 현존량에 대한 뿌리 현존량의 비율을 묘목 0.4, 유령목 0.2~0.3, 성숙목 0.2 이하라고 하였는데, 본 연구에서도 신갈나무의 흉고직경급이 클수록 지상부 현존량에 대한 뿌리 현존량의 비율이 감소하는 추세를 보이고 있었다. Ovington(1962)은 러시아의 22년생 참나무속의 지하부 비율이 31.8%, 42년생 17.1%, 56년생 16.5%, 200년생 9.5%이고, 미국 Minnesota 주에 있는 57년생 *Quercus borealis* 천연림의 지하부 비율은 8.3%라고 하였다. 박 등(2003)도 신갈나무 유령목에서는 지상부 중량에 대한 뿌리 중량이 크지만 직경급이 커질수록 점차 작아져서 8% 수준까지 떨어진다고 하였다. 월악산은 21%, 중왕산은 16%로 나타나 선행 연구들과 유사한 경향을 보여주고 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 월악산과 중왕산의 바이오매스 총량을 다른 연구와 비교하면, 박 등(2003)이 연구한 강원도 춘천지방의 50년생 신갈나무림(지상부 438 ton/ha, 전체 495.07 ton/ha)보다는 적지만, 충북 지역의 67년생 신갈나무림 125.8 ton/ha(송

과 이, 1996), 충북 충주지역의 신갈나무림 130.58 ton/ha(송 등, 1997) 등에 비해서는 높게 나타났다. 또한 손 등(2002)은 경기 태화산 지역에서 30년생 신갈나무림의 줄기 건조 51.3 ton/ha, 가지 건조 13.1 ton/ha, 잎 건조 3.5 ton/ha로서 지상부 건조량이 67.9 ton/ha이라고 하였다. 본 연구 결과 각 부위별 현존량에서 선행 연구들보다 대부분 더 높은 값을 보이고 있는데, 그 이유로는 조사지내에 흉고직경급이 큰 나무들이 많았기 때문이다. 영국의 Waters와 Christie(1958)과 독일의 Schwappach(1912)는 *Quercus robur*에 대한 바이오매스 조사에서 개체목이 클수록 바이오매스량이 현격히 증가한다고 보고한 바 있다. 한편, Ovington(1962)은 42년생의 *Quercus*속이 러시아에서 169.8 ton/ha이며, 온대지방 참나무속의 평균치는 174.6 ton/ha라고 하였고(Ovington, 1965), Burgess(1981)는 온대활엽수림의 평균치가 173.52 ± 22.35 ton/ha라고 하였는데, 월악산 지역보다는 높고 중왕산 북사면 지역보다는 낮지만 대체적으로 유사한 결과를 보이고 있다.

그림 6과 7에서 중왕산 신갈나무림의 수직분포도를 보면 수고 11m 이하의 가지에서는 잎이 거의 붙어있지 않은 큰 가지들이 많이 분포하여 있다. 따라서 이 지역은 간벌보다는 가지치기에 더 중점을 두고 관리를 할 필요가 있는 것으로 판단된다. 만일 이 지역에서 30% 강도의 가지치기를 한다면 북사면에서는 ha당 약 16 ton, 남사면에서는 ha당 약 10 ton의 바이오매스를 이용할 수 있으며, 이것은 현재의 연간 순생산량을 기준으로 5년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 21 ton/ha(북사면)과 18 ton/ha(남사면)의 바이오매스가 나오는데, 이것은 1년간의 성장량에 해당한다.

7) 신갈나무림의 에너지량

표 19와 표 20에서 각 부위별로 열량을 측정하여 신갈나무림의 총 에너지량과 연간 에너지고정량을 계산하여 표 21과 표 22에 나타내었다. 월악산 신갈나무림의 총 에너지량은 3,898,000 MJ/ha(지상부는 3,000,000 MJ/ha)이고, 중왕산 북사면 신갈나무림의 총 에너지량은 4,990,000 MJ/ha(지상부는 4,205,000 MJ/ha), 중왕산 남사면 신갈나무림의 총 에너지량은 4,181,000 MJ/ha(지상부는 3,508,000 MJ/ha)로 계산되었다. 또한 태양에너지로부터 연간 고정되는 에너지량은 월악산 신갈나무림 526,000 MJ/ha/yr(지상부 441,000 MJ/ha/yr), 중왕산 북사면 신갈나무림 345,000 MJ/ha/yr(지상부 292,000 MJ/ha/yr), 중왕산 남사면 신갈나무림 284,000 MJ/ha/yr(지상부 238,000 MJ/ha/yr)이다.

이것을 다시 석유환산톤(TOE; tons of oil equivalent)으로 환산하면, 월악산 신갈나무림은 90.71 TOE/ha(지상부 71.65 TOE/ha), 중왕산 북사면 신갈나무림은 119.18 TOE/ha(지상부 100.43 TOE/ha), 중왕산 남사면 신갈나무림은 99.86 TOE/ha(지상부 83.78 TOE/ha)의 석유량에 해당된다. 또한 신갈나무림에 연간 저장되는 에너지량은 월악산 지역 12.56 TOE/ha/yr(지상부 10.53 TOE/ha/yr), 중왕산 북사면 지역 8.24 TOE/ha/yr(지상부 6.97 TOE/ha/yr), 중왕산 남사면 지역 6.78 TOE/ha/yr(지상부 5.68 TOE/ha/yr)의 석유량에 해당된다. 임분 전체의 에너지량은 중왕산 지역이 더 많지만 연간 고정되는 에너지량은 월악산 지역이 더 많은 것으로 나타났다. 그 이유는 해발고에 따른 온도의 차이와 임령에 따른 생장 활력도의 차이로 인한 것으로 생각된다.

표 21. 신갈나무림의 부위별 열에너지량(GJ/ha)과 비율(%)

조사지	수피	생가지	잎	변재	심재	지상부 합계	뿌리	전체 합계
월악산 (300m, 북사면)	339 (8.93)	504 (13.27)	170 (4.47)	1,004 (26.42)	983 (25.88)	3,000 (78.98)	798 (21.02)	3,798 (100.00)
중왕산 (1000m, 북사면)	324 (6.50)	1,088 (21.80)	77 (1.53)	1,316 (26.37)	1,401 (28.06)	4,205 (84.27)	785 (15.73)	4,990 (100.00)
중왕산 (1000m, 남사면)	378 (9.04)	680 (16.26)	49 (1.17)	820 (19.62)	1,581 (37.82)	3,508 (83.90)	673 (16.10)	4,181 (100.00)

표 22. 신갈나무림의 부위별 연간 열에너지 생산량(GJ/ha/yr)과 비율(%)

조사지	수피	생가지	잎	변재	심재	지상부 합계	뿌리	전체 합계
월악산 (300m, 북사면)	17 (3.19)	31 (5.80)	168 (31.97)	62 (11.84)	163 (31.02)	441 (83.84)	85 (16.16)	526 (100.00)
중왕산 (1000m, 북사면)	14 (3.96)	66 (19.19)	83 (24.05)	59 (16.97)	70 (20.23)	292 (84.40)	54 (15.60)	345 (100.00)
중왕산 (1000m, 남사면)	20 (7.04)	39 (13.67)	49 (17.23)	39 (13.65)	92 (32.48)	238 (84.07)	45 (15.93)	284 (100.00)

8) 신갈나무림의 총 엽면적

표 23에서 신갈나무 잎의 건조량과 엽면적의 비(월악산 1.3728 ha/ton, 중왕산(북) 1.4179 ha/ton, 중왕산(남) 1.6906 ha/ton)를 각 조사구별로 대입하면, 월악산 신갈나무림의 엽면적지수는 13.04, 중왕산 북사면 신갈나무림은 6.10, 중왕산 남사면 신갈나무림은 4.40으로 추정되었다.

표 23. 신갈나무의 엽중량과 엽면적

월악산 (300m, 북사면)				
표본 번호	측정엽수	생중량 (g)	건중량 (g)	엽면적 (cm ²)
1-4	50	48	17.3	3291.8
1-5	50	82	28.7	3981.4
1-6	50	76	26.9	3868.4
2-5	50	51	18.8	2960.1
2-6	50	66	27.6	3202.6
3-7	100	107	41.8	4987.2
4-6	50	52	20.3	2611.8
계		482	181.4	24903.2
중왕산 (1000m, 북사면)				
표본 번호	측정엽수	생중량 (g)	건중량 (g)	엽면적 (cm ²)
N-1	62	60	24.1	3346.0
N-2	91	72	31.0	3847.6
N-3	66	81	32.3	4461.7
N-4	143	85	34.2	5586.2
합계	362	298	121.6	17241.5
중왕산 (1000m, 남사면)				
표본 번호	측정엽수	생중량 (g)	건중량 (g)	엽면적 (cm ²)
S-1	90	111	40.7	5268.4
S-2	84	111	38.8	6208.3
S-3	217	135	48.2	10112.8
합계	391	357	127.7	21589.5

라. 결론

우리나라에서 가장 넓은 분포를 보이고 있는 신갈나무 임분의 바이오매스와 연간 순생산량을 구명하고, 가지치기와 간벌 작업을 통해 얻을 수 있는 폐 바이오매스를 추정하기 위해 충북 월악산 지역과 강원 중왕산의 북사면과 남사면 지역에

서 각각 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

충북 월악산 지역에서 해발 300m 북사면의 35년생 신갈나무림은 줄기부 104.2 ton/ha (변재부 53.1 ton/ha, 51.1 ton/ha), 수피부 18.5 ton/ha, 살아있는 가지부 26.4 ton/ha, 잎 8.2 ton/ha으로서 지상부 합계가 157.4 ton/ha이었고, 지하부(뿌리)는 41.4 ton/ha으로서 전체 바이오매스는 198.8 ton/ha으로 추정되었다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 6.1 ton/ha/yr, 수피부 0.9 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 1.6 ton/ha/yr, 잎 8.1 ton/ha/yr으로서 지상부 합계는 16.8 ton/ha/yr이었고, 지하부는 4.4 ton/ha/yr으로서 전체 신갈나무림의 연간 순생산량은 21.2 ton/ha/yr으로 추정되었다. 만일 이 지역에서 20% 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 5 ton의 바이오매스를 이용할 수 있으며, 이것은 현재 월악산 신갈나무림의 성장속도로 보았을 때 3년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 16 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 1년간의 성장량에 해당한다.

강원 중왕산 지역에서 해발 1000m에 있는 60~70년생 신갈나무림의 바이오매스는 북사면에서 줄기부 137.5 ton/ha (변재부 65.8 ton/ha, 심재부 71.7 ton/ha), 수피부 16.3 ton/ha, 살아있는 가지부 54.3 ton/ha, 잎 3.8 ton/ha이고, 지상부 합계는 211.9 ton/ha, 지하부(뿌리) 40.7 ton/ha으로서 전체 252.6 ton/ha로 추정되었으며, 남사면에서는 줄기부 122.1 ton/ha (변재부 41.1 ton/ha, 심재부 81.0 ton/ha), 수피부 19.0 ton/ha, 살아있는 가지부 34.0 ton/ha, 잎 2.4 ton/ha이고, 지상부 합계는 177.4 ton/ha, 지하부(뿌리) 34.9 ton/ha으로서 전체 212.3 ton/ha로 추정되었다. 연간 순생산량은 북사면에서 줄기부 6.5 ton/ha/yr, 수피부 0.7 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 3.3 ton/ha/yr, 잎 4.1 ton/ha/yr으로서 지상부 합계는 14.5 ton/ha/yr, 지하부 2.8 ton/ha/yr이고, 전체 17.3 ton/ha/yr으로 추정되었으며, 남사면에서 줄기부 6.6 ton/ha/yr, 수피부 1.0 ton/ha/yr, 살아있는 가지부 2.0 ton/ha/yr, 잎 2.4 ton/ha/yr, 지상부 합계는 11.9 ton/ha/yr, 지하부 2.3 ton/ha/yr, 전체 14.2 ton/ha/yr으로 추정되었다. 전체 바이오매스량은 북사면이 남사면보다 더 많은 것으로 나타났으며, 연간 순생산량 역시 북사면이 남사면보다 더 많은 것으로 추정되었다. 이것은 광합성에 중요한 역할을 하는 잎과 가지의 중량이 북사면에서 남사면보다 더 큰 비중을 차지하고 엽면적지수도 북사면(6.10)이 남사면(4.40)보다 더 많으며 또한 광합성에 필요한 물을 공급해주는 변재부도 북사면에서 더 큰 비중을 차지하고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 신갈나무가 자라는데는 사면에 따른 광조건보다는 수분이나 잎의 광합성 효율이 더 영향을 미치는 것으로 보인다.

3. 소나무림의 바이오매스와 연간 순생산량

가. 서론

오늘날 산림생태계에서 바이오매스에 관한 연구들은 목재 수요의 증가와 대체 에너지원으로서의 기능으로 많은 관심이 되고 있으나, 연구에 투입되는 시간과 노동의 강도로 인해 집중적인 연구는 좀처럼 이루어지지 않고 몇몇 연구자들에 의해서만 산발적으로 이루어지고 있다. 그러나 산림생태계는 지구상에서 단위면적당 순광합성량이 가장 높은 것으로 알려져 있으며, 최근 산림의 이용율을 극대화시키기 위한 “whole tree harvest” 기술에 의해 줄기 뿐만 아니라 가지, 뿌리, 잎, 수피 등 나무의 모든 부위들이 이용되고 있는 추세이다. 또한 2000년 이후 또다시 시작된 에너지 고갈 위기로 많은 나라에서 에너지를 확보하기 위한 갈등이 심화되고 있으므로, renewable energy resources이자 대체에너지원으로서 산림의 바이오매스에 대한 연구는 어느 때보다 절실하다.

소나무는 우리나라의 천연림에서 우점을 이루고 있는 대표적인 침엽수종으로서 해발 700m 이하의 산림중 남사면이나 능선, 산정부에 주로 자라고 있다. 특히 소나무는 다른 수종에 비해 많은 지역에서 장령림으로 분포하고 있어서 순생산성이 높을 것으로 기대되고 있다(이, 1985). 따라서 본 연구에서는 우리나라의 천연림에서 우점하고 있는 수종인 소나무 임분의 바이오매스 생산기구를 파악하여 그 생산량을 추정하고, 가지치기와 간벌 작업으로 얻을 수 있는 폐 바이오매스 자원량을 추정하는데 그 목적이 있다.

나. 재료 및 방법

1) 조사지 선정

본 연구는 충북 제천시 월악산(충북대학교 농과대학 연습림) 지역의 소나무림을 중심으로 수행되었다(그림 1 참조). 충북 월악산 지역의 산림은 과거 화전민에 의해 산림이 훼손된 이후 조성된 이차림이며, 남사면과 능선, 산정부에서는 소나무가 우점하고 있고, 계곡 주변의 평탄지에도 소나무림이 분포하고 있다. 월악산 지역 소나무림은 대부분 평균 임령이 40년 이상인 장령림으로서 어린나무가 거의 없다.

2) 임분 및 바이오매스 조사

임분의 바이오매스 측정을 위해서 소나무림을 대상으로 20m×20m 크기의 조사구를 설치하여 매목조사를 실시하였다. 그리고 흉고직경이 6cm 이상인 임목을 각 흉고직경급별로 1본씩 총 5본을 선정하여 벌목하고 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지, 잎의 생중량을 측정하였다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며, 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시킨 후 건조량지수를 산출하고 생중량에 적용시켜 전체 건조량을 계산하였다(표 24).

표 24. 월악산 소나무 천연림내 소나무의 부위별 건조량

흉고직경 (cm)	수고 (m)	D ² H	수간 (kg)	가지 (kg)	잎 (kg)
6.0	5.2	187.20	6.80	0.92	0.410
7.8	6.7	407.63	24.00	3.08	0.780
10.5	11.4	1256.85	39.13	12.04	6.171
13.3	9.7	1715.83	54.61	13.18	8.385
18.8	13.5	4771.44	121.58	25.94	9.895

3) 현존량 및 순생산량 추정

현존량의 추정은 D²H와 Ws(줄기 건조), Wb(가지 건조), Wl(잎 건조)과의 관계를 대수회귀식으로 한 상대생장식에 의해서 계산했다. 조사지내의 지상부 현존량(Wt)의 추정은 이 상대생장식을 전임목에 적용시켜,

$W_t = W_s + W_b + W_l$ 로 구하였다.

연간 순생산량의 추정은 수간석해를 하여 1년간의 수고 및 흉고직경의 성장량을 조사하고 여기서 얻은 연간 흉고직경 성장량(D)과 연간 수고성장량(H)에서 D²H를 계산하고 이를 상대생장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다.

4) 엽면적 측정

소나무의 엽면적은 Johnson(1984)의 침엽 표면적 계산식을 이용하여 측정하였으며, 여기서 부피는 마이크로 피펫을 이용하여 50개씩의 침엽 전체 부피를 측정하였고, 각 침엽의 길이와 폭을 마이크로미터로 측정하였다.

$$A = 2l(1 + \frac{\pi}{n}) \cdot \sqrt{\frac{m}{\pi l}}$$

l = 부피, n = 침엽의 개수, v = 침엽의 부피

5) 임분 환경 분석

바이오매스를 조사한 각 임분의 물리적 환경 특성을 파악하기 위해, 지형, 해발고, 사면방위, 경사도, 기상 환경, 토양 특성 등을 조사하였다. 토양 특성을 조사하기 위해 각 조사구마다 3군데에서 낙엽층을 제거한 후 A층 토양을 균등 채취하였다. 이렇게 채취된 토양은 토양채취비닐에 밀봉한 후 실험실로 운반하여 물리·화학적 분석을 하였다.

각 조사구에서 채집한 토양의 물리적 성질 및 화학적 성질에 대한 분석을 위해 실험실로 운반한 후 15일간 음건시켰다. 음건시킨 토양은 2mm 표준망체를 이용하여 입자의 직경이 2mm 이하인 토양에 대하여 토성, 토양 수분, 토양 pH, 전질소함량, 유기물함량 등을 측정하였다. 여기서 토성의 결정은 비중계법으로 점토, 미사, 모래의 비율을 구하여 미국농무성(USDA ; U. S. Department of Agriculture)법에 따랐다. 토양내 전질소함량은 Kjeldahl 분석방법을 이용하였고, 수분함량은 신선토양을 건조기에서 100℃로 24시간 건조시켜 그 무게를 측정하여 계산하였다. 유기물함량은 전건 토양을 전기화로에서 450℃로 12시간 태워 측정하였으며, 토양pH는 신선토양 10g에 H₂O와 CaCl₂를 각각 1:5의 비율로 혼합하여 24시간 진탕한 후 측정하였다.

다. 결과 및 고찰

본 연구에서 조사된 충북 제천시 월악산내 소나무림의 개황을 표 25에 정리하였다. 평균임령이 48년생이고 평균 흉고직경이 23cm로서 장령림에 속하며, 흉고직경 2cm 이상의 유령목을 포함한 ha당 본수가 525본에 불과해 임분밀도가 상당히 낮은 편이다. 표 26에서 소나무림의 토양 환경을 보면, 토성은 대부분 사토이고 토양수분이 적으며 토양pH가 매우 낮은 등, 전반적으로 식물 생육에 불리한 조건이다. 척박한 토양 특성 덕분에 참나무류와 다른 활엽수종들의 침입이 적어 이 지역에서 소나무림이 계속 유지되고 있는 것으로 판단된다.

표 25. 조사지의 개황

평균임령 (년)	48	연평균 온도 (°C)	4.4~15.9
평균수고 (m)	12.3	연평균 강수량 (mm)	1,200
평균 DBH (cm)	22.70	평균경사도 (°)	10
ha당 본수	525	방위	NE80
해발고 (m)	300	토성	사토, 사양토
		토양 pH (A층)	5.5

표 26. 월악산 소나무림 조사지의 토양(A층) 특성

토성	토양수분 (%)	토양pH (H ₂ O)	토양pH (CaCl ₂)	전질소함량 (%)	유기물함량 (%)
사토	18.72	4.45	3.80	0.121	4.06

별채한 표본목의 D²H와 줄기 건중(Ws), 가지 건중(Wb), 잎 건중(Wl)을 표 24에 나타내었으며, 이 결과에서 유도된 상대생장식을 표 27, 표 28, 그림 14, 그림 15에 나타내었다. 표 15는 표 27에 유도된 상대생장식을 이용하여 월악산 동사면 지역(해발 300m)에서 48년생 소나무림의 총생산량과 순생산량을 계산한 것이다. 여기에 따르면 월악산 소나무림의 바이오매스는 줄기부 186.99 ton/ha, 가지부 61.31 ton/ha, 잎 31.89 ton/ha로서 지상부 전체의 바이오매스는 280.41 ton/ha로 추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 4.87 ton/ha/yr, 가지부 1.63 ton/ha/yr, 잎 (1년생) 10.45 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산량은 16.94 ton/ha/yr로 추정되었다. 월악산 지역 35년생 신갈나무와 비교하였을 때 전체 바이오매스는 소나무림이 더 많은 반면 연간 순생산량은 비슷한 것으로 나타났는데, 소나무림에서 잎의 바이오매스가 차지하는 비율이 61.65%로서 더 많기 때문으로 판단된다.

본 연구결과를 타 연구논문과 비교하면, 김(1972)이 발표한 춘천지방의 소나무 자연림 현존량 26.87tons/ha보다는 훨씬 크고, 이(1985)가 발표한 평균임령 36년생 인 강원도 소나무 천연림 현존량 198.82tons/ha보다도 다소 크다. 또한 연간 순생산량을 비교하면 이(1985)가 연구한 강원도 소나무림은 연간 순생산량이 15.87 ton/ha/yr에 비해 16.94 ton/ha/yr로서 약간 더 높다. 따라서 월악산 지역의 소나무림은 상당히 높은 축적을 보여주고 있는 것으로 나타났는데, 이것은 이 지역의 소나무림이 장령림인데다, 타 식생의 침입이 거의 없어 경쟁에 의한 스트레스를 거의 받지 않기 때문으로 생각된다.

월악산 지역 소나무림은 수간 하부에 굵은 가지가 필요 이상으로 많이 뻗어나와있기 때문에 가지치기 작업이 필요하다. 만일 이 지역에서 10% 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 6 ton의 바이오매스를 이용할 수 있는데, 이것은 4년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 28 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하여 신갈나무림에 비해 성장속도가 느리다. 따라서 소나무림에서는 가지치기 및 간벌의 주기와 강도를 신갈나무림보다 좀 더 낮춰 잡아야 할 필요가 있는 것으로 보인다.

표 27. 소나무 바이오매스의 상대성장식

상대성장식	결정계수(R ²)	F값
$\log W_s = 0.8275 \log D^2H + 2.0604$	0.96	63.94**
$\log W_b = 1.0384 \log D^2H + 0.7201$	0.96	71.37**
$\log W_l = 1.1131 \log D^2H + 0.1269$	0.91	28.54**

** 0.01에서 유의성 인정

표 28. 소나무 바이오매스의 부위간 상대성장식

상대성장식	결정계수(R ²)	F값
$\log W_l = 1.0759 \log W_b - 0.6601$	0.95	56.85**
$\log W_b = 1.2214 \log W_s - 2.2661$	0.95	59.25**
$\log W_l = 1.2615 \log W_s - 1.7138$	0.83	14.98*

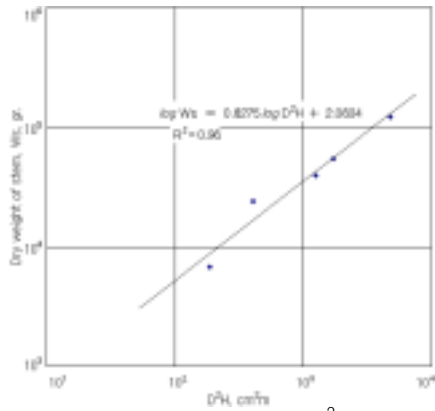
** 0.01에서 유의성 인정, * 0.05에서 유의성 인정

표 29. 월악산 소나무림의 총생산량과 연간 순생산량

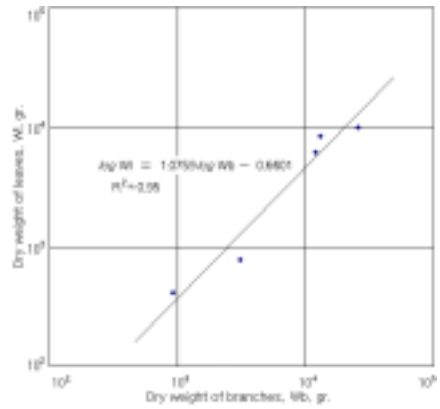
항 목	줄기	가지	잎	지상부 합계
당년도 임분 총생산량(ton/ha)	186.99	61.31	31.89	280.41
전년도 임분 총생산량(ton/ha)	182.12	59.68	30.90	272.69
연간 순생산량(ton/ha)	4.87	1.63	10.45	16.94
순생산량 분포(%)	28.73	9.62	61.65	100.00

표 30. 월악산 소나무림의 열에너지량과 연간 에너지 고정량 (GJ/ha)

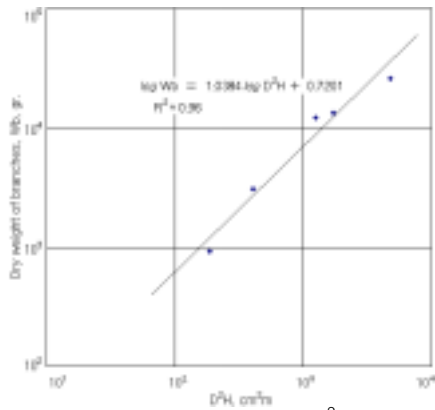
항 목	줄기	가지	잎	지상부 합계
당년도 임분 총생산량 (GJ/ha)	4,001	1,312	774	6,087
연간 순생산량 (GJ/ha/yr)	104	35	254	393



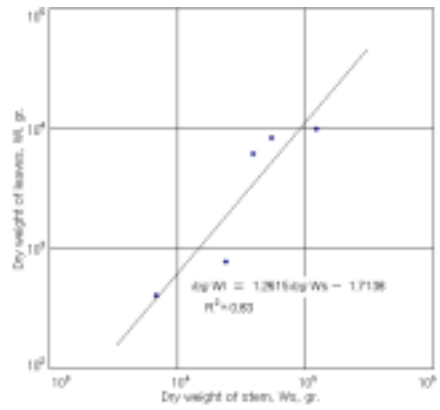
(가) 줄기(Ws) - D²H



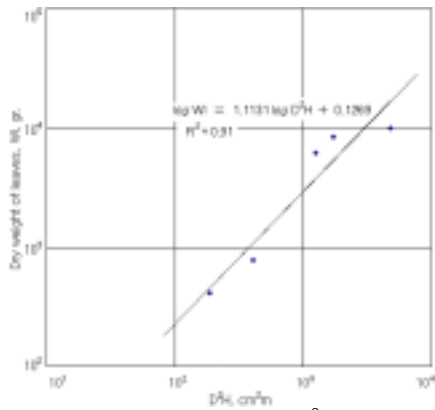
(가) 잎(Wl) - 가지(Wb)



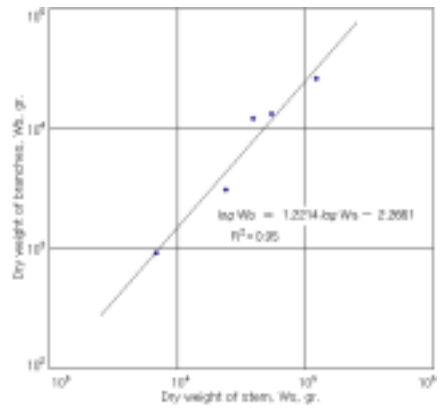
(나) 가지(Wb) - D²H



(나) 잎(Wl) - 줄기(Ws)



(다) 잎(Wl) - D²H



(다) 가지(Wb) - 줄기(Ws)

그림 14. 충북 월악산 소나무림의 줄기(Ws), 가지(Wb), 잎(Wl)의 건중량과 D²H(흉고직경²×수피)간 상관관계

그림 15. 충북 월악산 소나무림의 줄기(Ws), 가지(Wb), 잎(Wl)의 건중량간 대수 상관관계

본 연구에서 소나무의 부위별 발열량을 측정하여 평균을 낸 결과, 신갈나무의 목질부가 4,750 kcal/kg이고 잎이 4,900 kcal/kg인 것에 비해 소나무는 목질부가 5,110 kcal/kg, 잎이 5,770 kcal/kg으로 측정되어 같은 단위 중량당 소나무의 열에너지량이 신갈나무보다 더 높은 것으로 나타났다.

이러한 실험 결과에 따라 월악산 소나무림의 총 에너지량(지상부)과 연간 에너지 고정량(지상부)을 계산한 결과를 표 30에 나타내었다. 표 30을 보면 월악산 소나무림의 총 에너지량은 6,086,665 MJ/ha이고 연간 에너지 고정량은 392,827 MJ/ha으로 나타났다. 임분 전체의 총 에너지량을 보면 월악산 35년생 신갈나무림(지상부 3,000,000 MJ/ha)보다 많고 중왕산 60~70년생 신갈나무림(북사면 지상부 4,205,000 MJ/ha, 남사면 지상부 3,508,000 MJ/ha)과는 비슷하지만, 연간 고정되는 에너지량은 월악산 신갈나무림(지상부 441,000 MJ/ha/yr)보다 더 적고, 중왕산 신갈나무림(북사면 지상부 292,000 MJ/ha/yr, 남사면 지상부 238,000 MJ/ha/yr)보다는 많은 것으로 나타났다.

월악산 지역 소나무림의 에너지량을 다시 석유환산톤으로 환산하면, 줄기 95.4 TOE/ha (66%), 가지 31.3 TOE/ha (22%), 잎 18.5 TOE/ha (13%), 지상부 전체는 145.1 TOE/ha에 해당하며, 연간 고정되는 에너지량을 환산하면, 줄기 2.5 TOE/ha/yr (27%), 가지 0.8 TOE/ha/yr (9%), 잎 6.0 TOE/ha/yr (64%), 지상부 전체 9.4 TOE/ha/yr이다. 즉, 48년생 소나무림 1ha는 1년에 9.4 ton 분량의 석유를 지상부에 생산하여 비축하는 셈이다.

아래의 표 31은 소나무의 엽중량과 엽면적을 측정한 결과치이며, 이 결과를 가지고 건중량에 대한 엽면적 비를 계산하면 약 69.97 cm²/g이 된다. 따라서 표 29에서 엽중량 31.89 ton/ha에 대입하면 월악산 소나무림의 엽면적지수는 22.31로 계산된다. 이 값은 월악산 신갈나무림의 13.04나 중왕산 신갈나무림의 6.10(북사면), 4.40(남사면)에 비해 높은 값으로서, 침엽과 활엽의 중량 차이에 의한 것이다.

표 31. 소나무의 엽중량과 엽면적

표본	생중량(g)	건중량(g)	부피(ml)	엽면적(cm ²)
A	1.20	0.64	1.00	43.99
B	1.40	0.78	1.34	55.18
C	1.01	0.51	0.78	35.87
계	3.61	1.93		135.04

라. 결론

우리나라에서 소나무림은 대부분 40년생 이상의 장령림으로 분포하고 있기 때문에 충북 월악산 동사면 지역(해발 300m)에서 48년생 소나무 천연림을 대상으로 바이오매스와 연간 순생산량을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. 월악산 소나무림의 현존량은 줄기부 187.0 ton/ha, 가지부 61.3 ton/ha, 잎 31.9 ton/ha로서 지상부 전체의 바이오매스는 280.4 ton/ha로 추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 4.9 ton/ha/yr, 가지부 1.6 ton/ha/yr, 잎 10.5 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산량은 17.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 월악산 지역 35년생 신갈나무와 비교하였을 때 전체 바이오매스는 소나무림이 더 많은 반면 연간 순생산량은 비슷한 것으로 나타났는데, 소나무림에서 잎의 바이오매스가 가장 큰 비중(전체 지상부 순생산량의 62%)을 차지하고 있기 때문으로 추정된다. 이것을 석유환산톤으로 보면 48년생 소나무림의 지상부는 145.1 TOE/ha이고, 연간 생산되어 지상부에 고정되는 양은 9.4 TOE/ha이다.

월악산 지역 소나무림에서 10% 강도의 가지치기를 한다면 ha당 약 6 ton의 바이오매스를 이용할 수 있는데, 이것은 4년간의 성장량에 해당하는 것이다. 또한 10%의 약도 간벌을 실시하면 지상부 약 28 ton/ha의 바이오매스가 나오는데, 이것은 2년간의 성장량에 해당하므로 신갈나무림보다 간벌의 주기와 강도를 낮춰 잡아야 한다.

4. 잣나무림의 바이오매스와 연간 순생산량

가. 서론

나무의 생육은 잎에서 받아들인 태양에너지를 이용한 광합성 작용으로 생산된 물질(바이오매스)의 축적이며, 산림에서의 나무의 생장은 그 임분의 바이오매스 생산과 분배를 파악하여 알아낼 수 있다. 또한 바이오매스의 열량 측정은 나무가 받아들인 태양에너지를 고정한 결과이므로 태양에너지의 이용 효율이란 측면에서 다를 수도 있다. 이런 측면에서 산림의 바이오매스 생산 연구는 대체에너지 자원의 개발에도 큰 의의를 갖게 된다. 따라서 산림의 바이오매스 분포와 생장을 알아낸다면, 그 산림의 태양에너지 고정과 대기의 각종 원소의 화학적 합성 작용 기작의 결과치를 추정할 수 있다.

잣나무는 낙엽송과 함께 지난 1960년대 이래 우리나라에서 가장 많이 식재된 2대 조림수종으로서, 그림 16에서처럼 온대북부 위쪽의 지역에서는 천연적으로 군락을 이루며 동북아 일대에 자생하는 수종이다(임 등 1984, 李景文 등 1997). 잣나



그림 16. 잣나무 천연림 분포 구역

무는 생리적 특성상 상대적으로 적은 광량에서도 자랄 수 있는 내음성 수종으로서 자연상태에서 극상림을 이루는 주요 수종이다. 본 연구의 목적은 우리나라의 주요 조림수종인 잣나무 조림지(20년생)의 바이오매스 생산기구를 파악하고 그 생산량을 추정함과 동시에, 엽면적지수를 측정하여 잣나무 임분의 광합성 효율을 알아내고, 각 산림 작업에 따른 폐 바이오매스의 산출량을 추정하는데 있다.

나. 재료 및 방법

1) 조사지 선정

본 연구는 그림 1과 같이 충북 제천시 월악산에 위치한 충북대학교 연습림내 24년생 잣나무 조림지에서 수행하였다. 조사 대상지는 온난습윤한 전형적인 온대중부의 기후를 보이고 있으며, 조림 당시 1.8m×1.8m의 정방형 식재방식으로서 3,086본/ha의 식재밀도가 적용되었으며, 조림후 가지치기와 간벌 등의 산림 작업 일체가 시행된 적이 없다.

표 32는 조사지의 개황이며, 조사지 방위는 NE70~45°, 해발고는 약 300m, 평균 경사도는 30°, 토성은 사양토이다. 하층식생으로는 갈참나무, 신갈나무, 굴참나무, 진달래, 철쭉, 생강나무, 국수나무, 산딸기, 팔배나무, 물푸레나무, 개암나무, 난티잎 개암나무, 산초나무, 병조희풀 등이 자라고 있다.

표 32. 조사지 개황

해발 (m)	300	평균 경사도 (°)	30
방위 (°)	NE70~45	토성	사양토
연평균 기온 (°C)	11.0	임령 (년)	24
연평균 강수량 (mm)	1,570	ha당 본수	3,086

2) 임분 및 바이오매스 조사

잣나무 임분의 바이오매스 측정을 위해서 2004년 7월 10일부터 8월 10일까지 24년생 잣나무 조림지를 대상으로 20m×20m 크기의 방형구를 3곳 설치하여 매목 조사를 실시하였다(그림 17). 그리고 흉고직경이 4cm 이상인 생입목(生立木)을 각 흉고직경급별로 표본목을 1본씩 각 지역별로 9본을 선정하여 별목하고 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지(1년생 가지, 다년생 가지), 잎(당년생 잎,

다년생 잎), 고사지의 생중량을 각각 분리하여 측정하였다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며(줄기는 2m 간격으로 단판 채취, 가지와 잎은 각 높이별로 일정량씩 계층 채취), 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시킨 후 건조량지수를 산출하여 생중량에 적용시켜 전체 건조량을 계산하였다.



그림 17. 잣나무 조림지 조사

3) 현존량 및 순생산량 추정

현존량의 추정은 D^2H 와 Ws (줄기 건조), Wb (가지 건조), Wl (잎 건조)과의 관계를 대수회귀식으로 한 상대성장식에 의해서 계산했다. 연간 순생산량의 추정은 수간석해를 하여 1년간의 수고 및 흉고직경의 성장량을 조사하여 전년도 D^2H 를 계산한 다음 상대성장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다. 이 때 수간석해에 이용된 나무는 24년생 잣나무 9본이며, 조제간격은 지상부 20cm에서 시작하여 1.2m, 3.2m, 5.2m, ……와 같이 하였고, 연륜폭의 측정은 쌍안 실물 현미경과 연륜폭측정기 또는 디지털 버어니어캘리퍼를 이용하여 0.01mm단위로 측정하였다. 각 단판의 연륜폭은 등각법으로 2방향 반복 측정하였으며, 형상이 부정형으로 일그러진 단판은 원주등분법으로 2방향 측정하였다.

4) 잣나무 임분의 엽면적지수 측정

잣나무의 엽면적을 측정하기 위해 20년생 잣나무 조림지에서 채취한 5본의 표본목에서 당년생 잎과 다년생 잎 각각 무작위로 50개씩의 잎을 선택하여 길이, 폭, 부피 등을 마이크로미터와 마이크로 피펫을 이용하여 측정하였다. 잣나무 침엽의

표면적은 Johnson(1984)의 침엽 표면적 계산식을 이용하여 측정하였다.

$$A = 2l(1 + \frac{\pi}{n}) \cdot \sqrt{\frac{vn}{\pi l}} \quad \dots\dots\dots (f \text{부피}, n = \text{침엽의 개수}, v = \text{침엽의 부피})$$

다. 결과 및 고찰

1) 생산구조분석

그림 18과 같이 24년생 잣나무 조림지의 광합성부는 지상 3m부터 시작되고 있으며, 최대광합성부는 지상 7~9 m 높이에서 나타나고 있다. 잣나무는 내음성이 강한 수종이기 때문에 자연낙지가 거의 없어 비슷한 임령의 낙엽송에 비해 수고가 낮고 광합성층도 낮게 형성되어 있는 것이 특징이다.

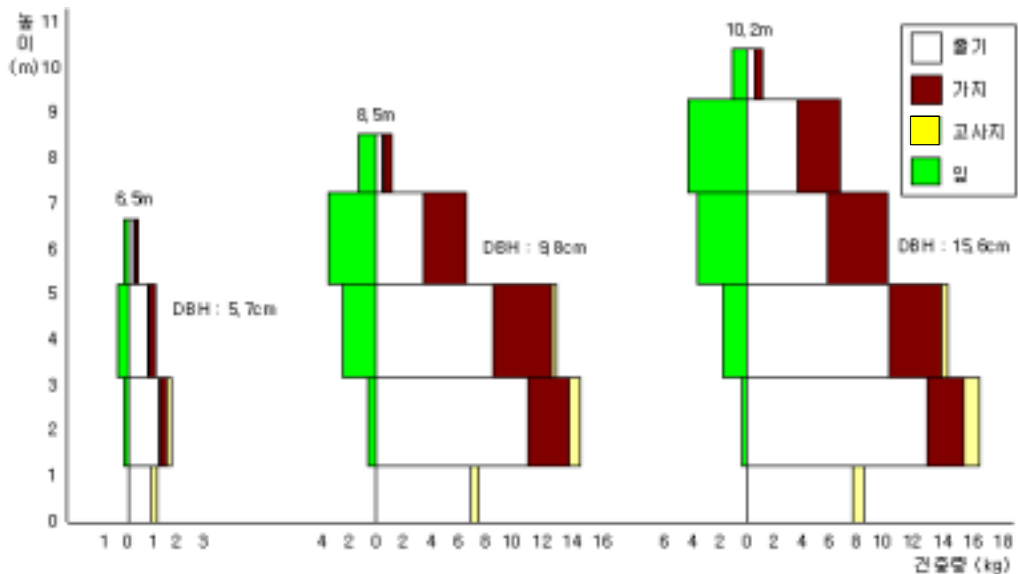


그림 18. 월악산 24년생 잣나무림의 수직분포도

2) 현존량 추정

별채한 20년생 잣나무 표본목의 D^2H 와 줄기 건중(W_s), 수간목질부 건중(W_{st}), 수간수피부 건중(W_{bk}), 당년생 가지 건중(W_{b1}), 가지 건중(W_b), 고사지 건중(W_{db}), 당년생 잎 건중(W_{l1}), 전년생 잎 건중(W_{l2})은 표 33과 같이 나타났으며, 이 결과에서 유도된 상대성장식은 표 34, 35와 같다.

표 33. 잣나무의 부위별 건조량 (g)

흉고직경 (cm)	수고 (m)	줄기	수간 목질부	수간 수피부	죽은 가지	당년생 가지	가지	당년생 잎	전년생 잎
4.5	5.5	1,998	1,627	371	111	41	421	100	236
5.5	5.1	3,789	3,200	589	515	32	650	165	458
5.7	6.5	3,696	3,095	600	511	49	593	252	668
7.5	6.8	6,696	5,633	1,063	613	73	1,052	385	1,014
9.8	8.5	13,955	11,916	2,039	681	111	3,186	485	2,384
10.4	8.1	15,940	13,642	2,299	783	121	3,335	626	2,949
13.2	9.3	27,943	24,078	3,865	877	172	8,103	1,121	5,782
14.2	9.2	32,901	28,468	4,433	1,398	187	11,010	1,333	6,499
15.6	10.2	43,533	37,868	5,665	1,515	221	13,801	1,659	8,413

표 34. 월악산 지역 24년생 잣나무 바이오매스의 상대생장식

상대생장식	결정계수 (R ²)	t 값	Pr>[t]
$\log W_s = 0.9543 \log D^2 H + 1.3875$	0.99	28.88	< 0.001
$\log W_{st} = 0.9708 \log D^2 H + 1.2712$	0.99	27.58	< 0.001
$\log W_{bk} = 0.8641 \log D^2 H + 0.8125$	0.99	37.54	< 0.001
$\log W_{b_1} = 0.6087 \log D^2 H + 0.2797$	0.97	16.23	< 0.001
$\log W_b = 1.1598 \log D^2 H + 0.1672$	0.97	17.60	< 0.001
$\log W_{db} = 0.5744 \log D^2 H + 1.2181$	0.70	4.45	< 0.01
$\log W_{l_1} = 0.8321 \log D^2 H + 0.3763$	0.97	16.92	< 0.001
$\log W_{l_2} = 1.1107 \log D^2 H + 0.1765$	0.99	31.34	< 0.001

Ws=줄기 건조량(g), Wst=수간목질부 건조량(g), Wbk=수간수피부 건조량(g), Wb₁=당년생 가지 건조량(g), Wb=가지 건조량(g), Wdb=고사지 건조량(g), Wl₁=당년생 잎 건조량(g), Wl₂=전년생 잎 건조량(g).

표 35. 월악산 지역 24년생 잣나무 잎 건조량의 상대생장식

상대생장식	결정계수 (R ²)	t 값	Pr>[t]
$\log W_{l_1} = 0.8663 \log W_s - 0.8110$	0.97	15.53	< 0.001
$\log W_{l_1} = 0.9394 \log W_{bk} - 0.3307$	0.96	13.16	< 0.001
$\log W_{l_1} = 1.3206 \log W_{b_1} + 0.0853$	0.93	10.03	< 0.001
$\log W_{l_1} = 0.6973 \log W_b + 0.3242$	0.93	10.76	< 0.001
$\log W_{l_1} = 0.7495 \log W_{l_2} + 0.2430$	0.98	20.72	< 0.001
$\log W_{l_2} = 1.1583 \log W_s - 1.4163$	0.99	29.27	< 0.001
$\log W_{l_2} = 1.2605 \log W_{bk} - 0.7883$	0.99	23.97	< 0.001
$\log W_{l_2} = 0.9361 \log W_b + 0.0891$	0.97	15.08	< 0.001
$\log W_{l_2} = 1.3128 \log W_{l_1} - 0.2669$	0.98	20.72	< 0.001

본 연구에서 얻은 상대성장계수를 유사한 연령의 낙엽송과 비교해보면, 월악산 지역 24년생 낙엽송(권 등, 1998)의 상대성장계수 0.94810(줄기), 1.18013(가지), 1.13797(잎)과 수간, 가지, 잎의 기율기 값이 유사하게 나타났다. 한편 권(1982)이 보고한 경기도 광주지역의 18년생 잣나무 인공림에서의 상대성장계수는 각각 0.9288(줄기), 1.1306(가지), 1.0102(잎)이었고, 이(1984)는 전남 광양지역의 63년생 잣나무 인공림의 경우 상대성장계수가 0.9672, 1.1343, 1.0471이라고 하였는데, 본 연구결과의 상대성장계수는 선행연구들의 범위에 포함되었다.

3) 잣나무림의 바이오매스와 숲가꾸기 작업에 따른 폐 바이오매스 산출량 추정

본 연구에서 24년생 월악산 잣나무 조림지의 바이오매스와 연간 순생산량을 표 36에 나타내었다. 잣나무림의 줄기부 바이오매스는 26.57 ton/ha (56.5%), 수피 4.27 ton/ha (9.1%), 1년생 가지 0.21 ton/ha (0.4%), 가지 8.64 ton/ha/yr (18.4%), 고사지 1.45ton/ha, 당년생 잎 1.25 ton/ha (2.6%), 전년생 잎 6.07 ton/ha (12.9%), 지상부 전체 47.01 ton/ha이었다. 이러한 결과는 13년생의 낙엽송 임분에서 줄기 51.7 ton/ha (74.5%), 가지 12.4 ton/ha (17.9%), 잎 5.3 ton/ha (7.6%), 지상부 현존량은 69.4 ton/ha (Hatiya 등, 1966), 15년생 낙엽송 임분에서 줄기 47.70 ton/ha (74.9%), 가지 11.85 ton/ha (18.6%), 잎 4.11 ton/ha (6.5%)로 지상부의 현존량을 63.66 ton/ha (임 등, 1981), 리기다소나무 임분의 지상부 현존량 55.25 ton/ha (김, 1971), 8년생 리기다소나무와 리기테다소나무 임분의 현존량이 각각 21.60 ton/ha 와 22.80 ton/ha (김, 1976), *Pinus sylbestris* 조림지에서 11년생 15.36 ton/ha, 17

표 36. 24년생 잣나무 조림지의 ha당 현존량과 순생산량(충북 제천시 월악산)

부 위	줄기	수간 목질부	수간 수피부	1년생 가지	가지	고사지	당년생 잎	전년생 잎	합계
임분 총생산량 (tons/ha)	30.84	26.57	4.27	0.21	8.64	(1.45)	1.25	6.07	47.01
현존량 분포 (%)	65.60	(56.53)	(9.07)	0.45	18.38	-	2.65	12.92	100.00
전년도 생산량 (tons/ha)	27.40	23.57	3.83	0.20	7.52	-	1.12	5.31	41.55
임분 순생산량 (tons/ha)	3.44	3.00	0.44	0.21	1.12	-	1.25	-	6.02
순생산량 분포 (%)	57.14	(49.83)	(7.31)	3.49	18.61	-	20.76		100.00

년생 22.93 ton/ha (Ovington, 1957) 등의 연구결과와 비교하였을 때, 수종과 연령의 차이를 고려하면 월악산 지역의 24년생 잣나무 현존량은 다른 침엽수종에 비해 평균적인 수준인 것으로 판단된다.

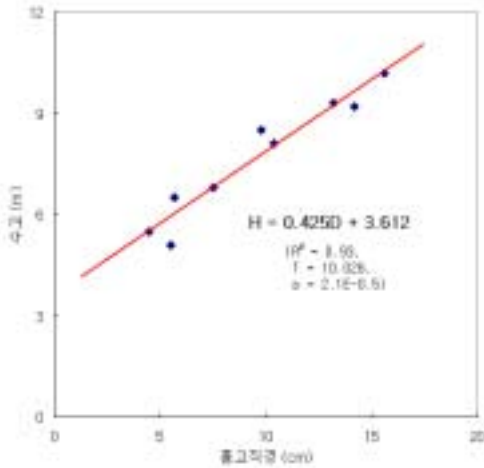


그림 19. 월악산 잣나무림의 수고곡선

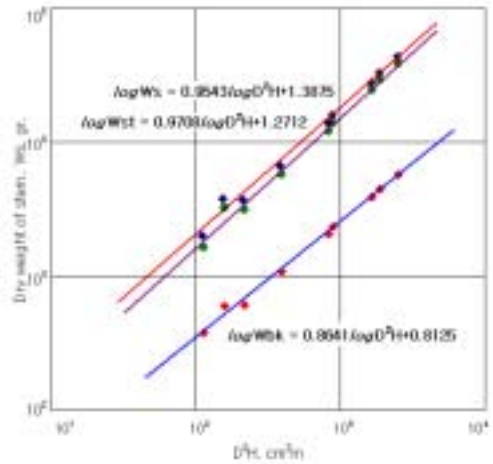


그림 20. 월악산 잣나무림의 D^2H 와 수간부 건조량과의 상관관계
 $W_s(\blacklozenge)$ = 수간부(g), $W_{st}(\bullet)$ = 수간목 질부(g), $W_{bk}(\blacklozenge)$ = 수간수피부(g)

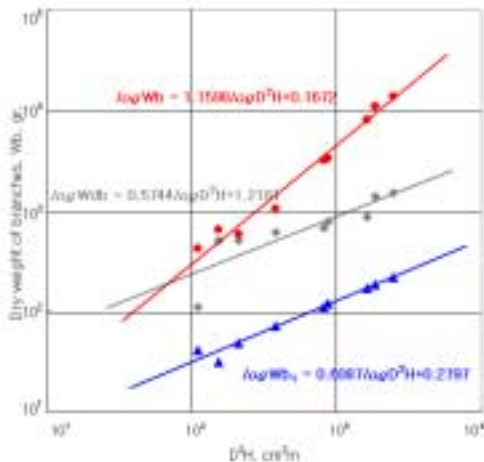


그림 21. 월악산 잣나무림의 D^2H 와 가지부 건조량과의 상관관계
 $(W_{db}$ = 고사지, W_{b1} = 1년생 가지, W_b = 다년생 가지)

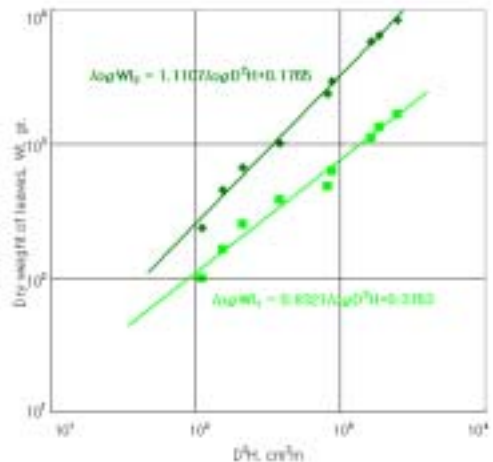


그림 22. 월악산 잣나무림의 D^2H 와 잎 건조량과의 상관관계
 $(W_{l1}$ = 1년생 잎, W_{l2} = 다년생 잎)

월악산 잣나무림의 연간 순생산량은 줄기 3.0 ton/ha/yr (49.8%), 수피 0.4 ton/ha/yr (7.3%), 1년생 가지 0.2 ton/ha/yr (3.5%), 가지 1.1 ton/ha/yr (18.6%), 당년생 잎 1.3 ton/ha/yr (20.8%), 지상부 합계 6.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 이 지역의 20여년전 조림된 이후 가지치기와 간벌 등 숲가꾸기 작업이 전혀 시행되지 않아 개체간 심한 경쟁과 줄기 아랫부분까지 달려있는 살아있는 가지들로 인해 고사지와 고사목이 대량 발생하고 있으므로 가지치기와 간벌이 시급한 곳이다. 따라서 가지치기를 30%의 강도로 할 필요가 있으며, 간벌 역시 20%의 중도 간벌이 필요하다. 30% 강도의 가지치기시 2.6 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 20% 강도의 간벌을 시행하면 9.4 ton/ha의 폐 바이오매스가 나온다. 이것은 현재의 연간 순생산량으로 복구되는 시간을 추정하였을 때 가지치기는 8년, 간벌은 1~2년에 해당되지만, 지금 유령림을 벗어나는 단계이기 때문에 숲가꾸기 작업으로 생장이 더욱 왕성해져서 이 기간이 크게 단축될 것으로 기대된다.

4) 월악산 잣나무림의 에너지량

표 37에서 월악산 지역 24년생 잣나무 임분의 ha당 총 에너지량(지상부)은 1,028,314 MJ/ha이며, 연간 에너지 고정량(지상부)은 132,678 MJ/ha로 나타났다. 총 에너지량은 35년생 월악산 신갈나무림 지상부 3,000,000 MJ/ha나 48년생 월악산 소나무림 지상부 6,086,665 MJ/ha에 비해서 매우 적은 것으로 나타났으며, 연간 고정되는 에너지량 역시 신갈나무림 441,000 MJ/ha, 소나무림 392,827 MJ/ha에 비해 적게 나타났다. 그 이유는 초기 생장이 느린 잣나무의 생리적 특징과 이 지역에서 조림후 숲가꾸기 작업이 전혀 이루어지지 않은데 있다고 생각된다.

월악산 잣나무림의 총 에너지량을 석유환산톤으로 바꾸면 지상부 전체는 24.5 TOE/ha이며, 연간 지상부에 고정되는 에너지량은 3.2 TOE/ha이고, 이 중 줄기부에만 연간 1.8 TOE/ha (56%)가 고정되고 있다.

표 37. 월악산 지역 24년생 잣나무림의 ha당 에너지량과 연간 에너지 고정량

부 위	줄기	수간 목질부	수간 수피부	1년생 가지	가지	고사지	당년생 잎	전년생 잎	합계
임분 에너지량 (GJ/ha)	660	568	92	5	186	(31)	30	147	1,028
연간 에너지량 (GJ/ha/yr)	73	64	9	5	24	-	30	-	133

5) 잣나무 조림지의 엽면적 지수 측정

잣나무 침엽의 건조량비 엽면적을 계산하기 위해 침엽 표본의 건조량, 부피, 길이, 폭 등을 측정하여 표 38과 표 39에 나타내었다. 잣나무 침엽의 g당 엽면적은 당년생 잎 3.1221, 전년생 잎 2.6884로서 ha당 엽중량(건중) 당년생 잎 1.25 ton, 전년생 잎 6.07 ton에 대입하면 월악산 24년생 잣나무림의 엽면적지수는 20.2211 (당년생 잎 3.9026, 전년생 잎 16.3185)으로 추정된다.

표 38. 각 표본목별 잎 샘플의 건조량 및 부피

표본목 번호	잎 50개 건조량		잎 50개 부피	
	1년생	다년생	1년생	다년생
1	0.5	0.6	0.44ml	0.92ml
2	0.6	0.6	0.61ml	1.28ml
3	0.6	1.7	0.72ml	1.86ml
4	0.4	0.7	0.71ml	1.42ml
5	0.4	1.2	0.91ml	2.11ml

표 39. 잣나무 침엽의 엽면적

시료	평균 길이 (mm)	평균 부피 (ml)	엽면적 (mm ²)	건중량 (g)
당년생 시료 1	6.81	0.0092	1.17	0.5
당년생 시료 2	7.55	0.0127	1.45	0.6
당년생 시료 3	10.26	0.0150	1.83	0.6
당년생 시료 4	8.71	0.0148	1.68	0.4
당년생 시료 5	6.80	0.0190	1.68	0.4
전년생 시료 1	8.70	0.0184	1.87	0.6
전년생 시료 2	7.91	0.0256	2.10	0.6
전년생 시료 3	14.84	0.0372	3.47	1.7
전년생 시료 4	10.24	0.0284	2.52	0.7
전년생 시료 5	9.37	0.0422	2.94	1.2

라. 결론

충북 월악산 북동사면 지역(해발 380m)에서 24년생 잣나무 인공림의 바이오매스를 추정하고 숲가꾸기 작업으로 나오는 폐 바이오매스를 추정한 결과는 다음과 같다. 월악산 잣나무림의 바이오매스는 줄기부 26.6 ton/ha, 수피부 4.3 ton/ha, 1

년생 가지 0.2 ton/ha, 가지부 8.6 ton/ha, 고사지 1.5 ton/ha, 당년생 잎 1.3 ton/ha, 전년생 잎 6.1 ton/ha로서 고사지를 제외한 지상부 전체는 47.0 ton/ha으로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 3.0 ton/ha/yr, 수피부 0.4 ton/ha/yr, 1년생 가지 0.2 ton/ha/yr, 가지부 1.1 ton/ha/yr, 당년생 잎 1.3 ton/ha/yr, 지상부 합계 6.0 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 같은 열량의 석유로 환산하였을 때 지상부 전체가 24.5 TOE/ha, 연간 지상부에 고정되는 양은 3.2 TOE/ha에 해당한다.

월악산 지역의 잣나무림은 심한 경쟁과 줄기 아랫부분까지 달려있는 살아있는 가지들로 인해 고사지와 고사목이 발생하고 있으므로 가지치기와 간벌이 시급한 곳이다. 가지치기를 30%의 강도로 할 필요가 있으며, 간벌 역시 20%의 중도 간벌이 필요하다. 30% 강도의 가지치기시 2.6 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 20% 강도의 간벌을 시행하면 9.4 ton/ha의 폐 바이오매스가 나온다. 이것은 현재의 연간 순생산량으로 복구되는 시간을 추정하였을 때 가지치기는 8년, 간벌은 1~2년에 해당되지만, 지금 유령림을 벗어나는 단계이기 때문에 무육작업으로 생장이 더욱 왕성해질 것으로 기대된다.

5. 낙엽송림의 바이오매스와 연간 순생산량

가. 서론

오늘날 전세계적으로 에너지를 비롯한 각종 자원 부족의 문제가 심각하게 대두되면서 대체에너지원의 개발에 많은 관심이 집중되었고, 이에 따라 산림생태계의 물질생산기구에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 우리나라와 같이 산림의 단위면적당 축적량이 적은 경우, 산림생태계의 물질생산력에 대한 기작의 정확한 파악과 생산력의 향상에 관한 연구가 필요하다. 산림생태계에 있어서 생산력은 자연의 힘에 크게 의존하므로 자연이 허용하는 범위에서 그 생산력을 인위적으로 조절가능하게 한다는 점에서 볼 때 수종 고유의 생산력과 생산구조를 구명하는 일은 곧 생산력 향상의 기술 개발의 계기가 된다.

특히, 낙엽송(*Larix kaemferi*)은 지난 1960년대부터 지금까지 약 20억 본이 식재된 한국의 주요 조림수종이며(Kwon 등, 1997), 현재 우리나라에 심겨진 대부분의 낙엽송들은 30년 이상의 임령에 이르렀다. 그러나 지금까지 낙엽송 임분에 대한 물질생산 연구는 20년생 미만의 임분에서 이루어졌을 뿐, 현재 우리나라에서 30년생 이상의 낙엽송 임분에서 생산력에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에, 본 연구의 목적은 우리나라의 대표적인 조림수종인 30년생 낙엽송 인공림의 물질생산기구를 파악하고 그 생산력을 알아보며, 숲가꾸기 사업으로 나오는 폐 바이오매스를 추정하는데 있다.

나. 재료 및 방법

1) 조사지 선정

본 연구는 충북 제천시 월악산(충북대학교 농과대학 연습림) 9임반 지역의 30년생 낙엽송 조림지(해발 520m, 남사면)에서 수행되었다(그림 1 참조). 조사 대상지는 온난습윤한 전형적인 온대중부의 기후를 보이고 있고, 조림 당시 1.8m×1.8m의 정방형 식재방식으로서 3,086본/ha의 식재밀도가 적용되었으며, 1996년에 20% 강도의 간벌작업이 시행된 지역이다. 하층식생으로는 물푸레나무, 딱총나무, 싸리, 당단풍, 고추나무, 고로쇠나무, 느릅나무, 비목, 화살나무, 산딸기, 산뽕나무, 조릿대 등이 자라고 있으며, 상층목 중 층층나무가 일부 포함된 지역도 있다.

표 40은 조사지의 입지환경을 나타낸 것으로써, 토성은 사양토이며 토양pH는 5.8로서 임목의 생육에 적합한 것으로 나타났다. 정(1981, 1982)은 임목의 생장에 토양의 물리적 성질 못지않게 화학적 성질도 중요한 영향을 미치며, 낙엽송의 생육에 알맞은 토양pH는 5.5~6.5 정도이고 질소(N), 인산(P), 칼륨(K)의 순으로 비료 3요소를 요구하는 경향이 있는 것으로 보고하였으며, 본 조사지의 화학적 토양 조건은 한국 산림의 평균적인 값을 나타내고 있었다.

표 40. 조사지 개황

임분 특성		환경 특성	
임령 (년)	30	연평균 기온 (°C)	11.0
평균 수고 (m)	16.43	연 강수량 (mm)	1,100 ~ 1,800
평균 DBH (cm)	15.21	평균 경사도 (°)	18
단면적 (m ² /ha)	39.20	토성	사양토
총 체적 (m ³ /ha)	396.54	토양 pH (H ₂ O)	5.8
ha 당 본수	2028.57	Nitrate-nitrogen (ppm)	17.88
		P (ppm)	91.25
		K (ml/g)	28.01

2) 임분 및 바이오매스 조사

임분의 바이오매스 측정을 위해서 30년생 낙엽송 조림지를 대상으로 20m×20m 크기의 조사구에서 매목조사를 실시하였다. 그리고 흉고직경이 6cm 이상인 임목을 각 흉고직경급별로 1본씩 총 8본을 선정하여 벌목하고 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지, 잎의 생중량을 측정하였다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며, 80°C 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시켜 건중량지수를 산출하고 생중량에 적용시켜 전체 건중량을 계산하였다(표 41).

표 41. 낙엽송의 부위별 건중량

DBH (cm)	수고 (m)	D ² H	줄기 건중 (Ws, kg)	가지 건중 (Wb, kg)	잎 건중 (Wi, kg)
12.9	19.1	3178.43	58.93	5.72	1.94
14	21.3	4174.8	62.88	7.27	2.32
15.7	21.8	5373.48	83.83	7.7	3.17
17.7	22.6	7080.35	101.69	11.56	4.67
20.5	23.2	9749.8	169.59	24.07	7.18
22.1	23.8	11624.16	194.54	26.46	10.16
23.9	24.3	13880.4	229.32	31.85	11.84
25.2	25.1	15939.5	260.68	39.48	13.73

3) 현존량 및 순생산량 추정

현존량의 추정은 D^2H 와 Ws (줄기 건조), Wb (가지 건조), Wl (잎 건조)과의 관계를 대수회귀식으로 한 상대성장식에 의해서 계산했다. 연간 순생산량은 수간석해로 알아낸 전년도의 흉고직경 및 수고를 상대성장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다.

4) 임분 환경 분석

바이오매스를 조사한 각 임분의 물리적 환경 특성을 파악하기 위해, 지형, 해발고, 사면방위, 경사도, 기상 환경, 토양 특성 등을 조사하였다. 토양 특성을 조사하기 위해 각 조사구마다 3군데에서 낙엽층을 제거한 후 A층 토양을 균등 채취하였다. 채취된 토양은 밀봉한 후 실험실로 운반하여 물리·화학 분석을 하였다.

각 조사구에서 채집한 토양의 물리적 성질 및 화학적 성질에 대한 분석을 위해 실험실로 운반한 후 15일간 음건시켰다. 음건시킨 토양은 2mm 표준망체를 이용하여 입자의 직경이 2mm 이하인 토양에 대하여 토성, 토양 수분, 토양 pH 등을 측정하였다. 여기서 토성의 결정은 비중계법으로 점토, 미사, 모래의 비율을 구하여 미국농무성(USDA ; U. S. Department of Agriculture)법에 따랐다. 토양내 pH, 질소 함량, 인 함량, 칼륨 함량은 LaMotte 토양 분석 장비를 사용하였다.

다. 결과 및 고찰

1) 생산구조분석

그림 23은 조사목 중 열세목, 중간목, 우세목을 각 1본씩 선택하여 수직 생산 구조도로 작성한 것이다. 광합성부는 지상 15m부터 시작되고 있으며, 최대광합성부는 지상 17m~19m 높이에서 나타나고 있다. 낙엽송은 생리적 특성상 통직하고 수고가 높으며 빨리 자라는 극양성(shade-intolerant) 수종이기 때문에 자연전지가 잘 되어 다른 수종에 비해 광합성층이 매우 높이 형성되어 있다.

2) 현존량 추정

별채한 표준목의 D^2H 와 줄기 건조(Ws), 가지 건조(Wb), 잎 건조(Wl)은 표 41에 나타내었으며, 이 결과에서 유도된 상대성장식은 표 42, 표 43과 같다.

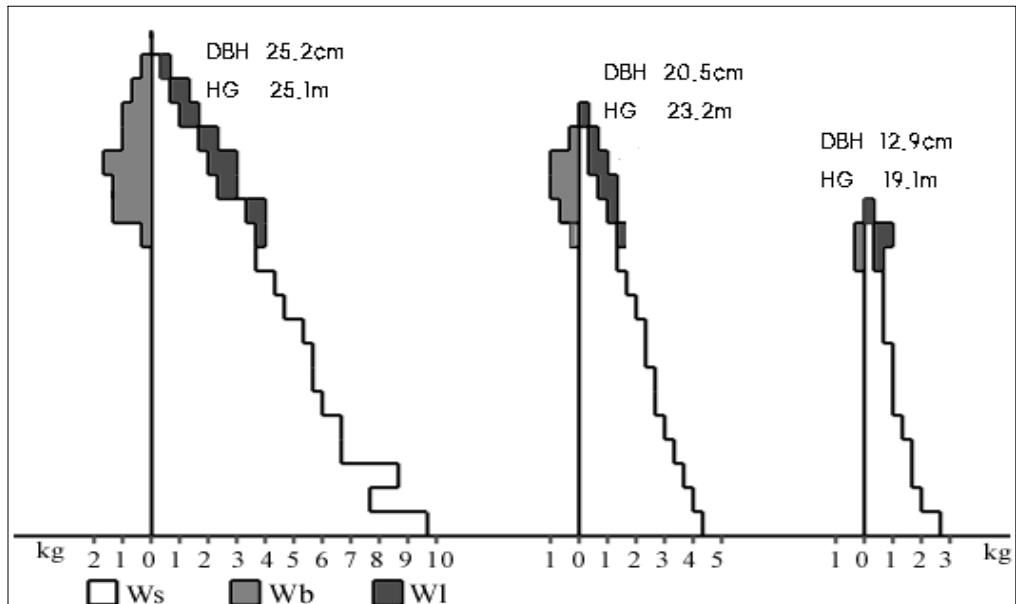


그림 23. 낙엽송림에서 우세목, 중간목, 열세목의 바이오매스 수직분포도 (Ws, 줄기 건조; Wb, 가지 건조; WI, 잎 건조)

표 42. 낙엽송 바이오매스의 상대생장식(충북 제천시 월악산)

상대생장식	결정계수(R ²)	F값
$\log Ws = 0.9989 \log D^2H + 1.2183$	0.98	312.80***
$\log Wb = 1.2734 \log D^2H - 0.7666$	0.97	181.66***
$\log WI = 1.2920 \log D^2H - 1.2859$	0.99	711.35***

*** 0.001에서 유의성 인정

표 43. 낙엽송 바이오매스의 부위간 상대생장식(충북 제천시 월악산)

상대생장식	결정계수(R ²)	F값
$\log WI = 0.9912 \log Wb - 0.4100$	0.98	261.73***
$\log WI = 1.2810 \log Ws - 2.7994$	0.99	684.88***
$\log Wb = 1.2745 \log Ws - 2.3193$	0.99	429.58***

*** 0.001에서 유의성 인정

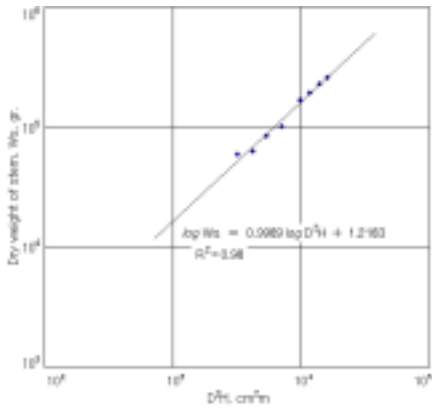
본 연구에서 얻은 낙엽송의 $D^2H \sim Ws$, $D^2H \sim Wb$, $D^2H \sim WI$ 사이의 상대생장식을 표 42에 나타내었으며, 상대생장계수는 각각 0.9989, 1.2734, 1.2745이었다. 이것은 임 등(1981)이 보고한 15년생 낙엽송 임분에서 얻은 상대생장계수 0.9634,

1.0403, 1.1350, 그리고 권 등(1998)이 보고한 월악산 지역 24년생 낙엽송 임분의 상대성장계수 0.94810, 1.18013, 1.13797과 비교하였을 때 흉고직경과 수고의 증가에 따라 바이오매스의 증가율이 더 커지는 경향을 보이고 있었다(그림 24 참조). 이것은 이 지역이 적정 2차 간벌시기를 놓친 지역으로서 다수의 고사목이 발생하고 있는 점을 미루어봤을 때 경쟁에 의해 피압목과 우세목의 차이가 더욱 크게 벌어지고 있기 때문으로 판단된다. Murayama 등(1953)은 적송임분이 17-18년, Ovington(1957)은 *Pinus sylvestris* 임분이 20년 전후에서 최고엽량에 도달한다고 보고하였는데, 권 등(1998)이 월악산 지역에 대해 발표한 연구결과에 의하면 24년생 낙엽송 임분에서 $D^2H \sim WI$ 사이의 상대성장계수 값이 가장 크게 나타나 이미 최고엽량을 보이는 시기가 지난 것으로 나타났다.

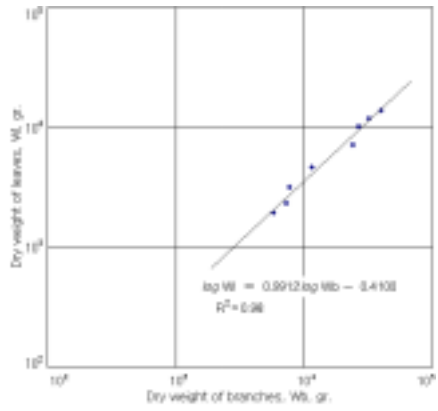
한편, $Ws \sim Wb$, $Wb \sim WI$, $WI \sim Ws$ 의 관계를 회귀분석한 결과 표 43과 같은 식이 얻어졌다. 이 식에서 볼 때 가지 건중량과 잎 건중량은 다같이 줄기 건중량이 증가함에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다(그림 25 참조). 조사지내의 추정현존량으로 ha당 현존량을 추정하면 표 44와 같이 Ws 는 286.8 ton/ha, Wb 는 68.7 ton/ha, WI 는 31.1 ton/ha, 그리고 지상부 전체는 386.6 ton/ha로 나타났다.

Hatiya 등(1966)은 13년생의 낙엽송 임분에서 줄기 51.7 ton/ha (74.5%), 가지 12.4 ton/ha (17.9%), 잎 5.3 ton/ha (7.6%)로 지상부 바이오매스는 69.4 ton/ha이라고 보고했으며, 임 등(1981)은 15년생 낙엽송 임분에서 줄기 47.70 ton/ha (74.9%), 가지 11.85 ton/ha (18.6%), 잎 4.11 ton/ha (6.5%)로 지상부 바이오매스를 63.66 ton/ha으로 보고한 바 있다. 또한 권 등(1998)은 24년생 낙엽송 임분에서 줄기 160.75 ton/ha, 가지 18.42 ton/ha, 잎 7.08 ton/ha, 지상부 전체를 186.25 ton/ha으로 보고하였다.

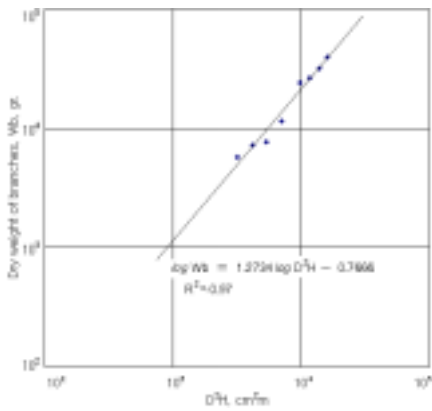
한편 온대지방에서 다른 침엽수종의 현존량을 비교해 보면, 리기다소나무 임분이 55.25 ton/ha (김, 1971), 춘천지방의 소나무 천연림이 26.87 ton/ha (김, 1972), 8년생 리기다소나무와 리기테다소나무 임분이 각각 21.60 ton/ha와 22.80 ton/ha (김, 1976), 강원도 소나무 천연림은 198.82 ton/ha (이, 1985)이고, *Pinus sylbestris* 조림지에서 11년생 15.36 ton/ha, 17년생 22.93 ton/ha (Ovington, 1957), 31년생 *Pinus banksiana* 임분은 60.89~106.39 ton/ha (Doucet 등, 1976)로 보고되었다. 이상의 연구결과와 비교하였을 때, 입지조건과 임령에 따른 차이를 고려하더라도 월악산 지역 30년생 낙엽송 임분의 현존량은 다른 침엽수종에 비해 대단히 높은 것으로 나타났다.



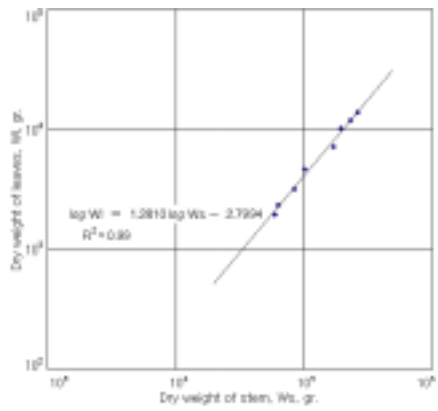
(가) 줄기(Ws) - D²H



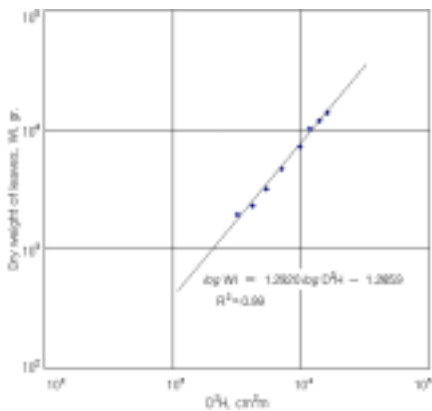
(가) 잎(Wl) - 가지(Wb)



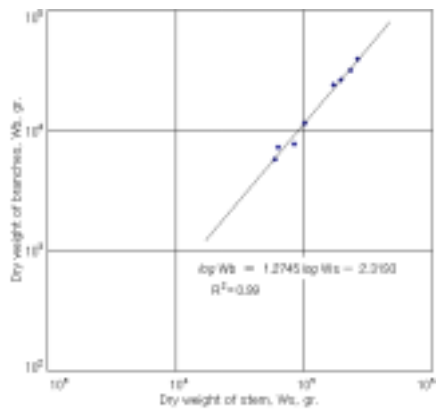
(나) 가지(Wb) - D²H



(나) 잎(Wl) - 줄기(Ws)



(다) 잎(Wl) - D²H



(다) 가지(Wb) - 줄기(Ws)

그림 24. 충북 월악산 낙엽송림에서 D²H와 각 부위간의 상관

그림 25. 충북 월악산 낙엽송림의 부위간 대수 상관

3) 연간 순생산량

표 44를 보면 월악산 지역 30년생 낙엽송 조림지의 연간 순생산량은 줄기 18.1 ton/ha/yr (33.1%), 가지 5.5 ton/ha/yr (10.0%), 잎 31.1 ton/ha/yr (56.9%), 지상부 전체 54.7 ton/ha/yr로 나타났다. 일본에서 Satoo(1970, 1974)가 조사한 낙엽송을 보면, 21년생의 순생산량은 줄기 6.8 ton/ha/yr (46.9%), 가지 3.2 ton/ha/yr (22.1%), 잎 4.5 ton/ha/yr (31.0%), 지상부 14.5 ton/ha/yr이고, 39년생의 순생산량은 줄기 5.79 ton/ha/yr (45.8%), 가지 3.26 ton/ha/yr (25.8%), 잎 3.59 ton/ha/yr (28.4%), 지상부 12.64 ton/ha/yr로 나타났다. 이상 Satoo의 연구결과와 본 연구결과를 비교해보면 30년생 월악산 낙엽송림의 연간 순생산량은 매우 높은 것으로 평가되는데, 이것은 입지조건이 더 유리하기 때문인 것으로 생각된다.

표 44. 낙엽송 조림지의 순 생산량(충북 제천시 월악산)

항 목	줄기	가지	잎	지상부 합계
당년도 임분 총생산량 (ton/ha)	286.8	68.7	31.1	386.6
전년도 임분 총생산량 (ton/ha)	268.7	63.2	28.8	360.6
연간 순생산량 (ton/ha/yr)	18.1	5.5	31.1	54.7
순생산량 분포(%)	33.1	10.0	56.9	100.0

4) 숲가꾸기에 따른 폐 바이오매스의 산출량 추정

월악산 지역의 30년생 낙엽송 임분은 유행림을 벗어난 단계이며, 연간 잎의 생산량이 매우 높은데다가 10여년 전에 20% 중도 간벌 작업이 시행된 바 있어서 생육이 매우 우수한 것으로 나타났다. 낙엽송은 자라나는데 많은 햇빛을 필요로 하는 극양수로서 자연낙지가 잘 되고, 또한 현재 가장 아래쪽의 가지가 10m 이상의 높이에 있으므로 실질적으로 가지치기 작업을 시행하기는 어렵다. 최근 임관층이 서로 겹쳐지면서 다시 임목간 경쟁이 시작되고 있는 것을 볼 수 있는데, 재차 간벌할 시기가 온 것으로 보인다. 이 지역에서 20%의 중도간벌을 시행하였을 때 약 58 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오는데, 현재 1년간의 성장량에 불과할 정도로 30년생 낙엽송림의 생장은 아주 우수하다.

5) 월악산 낙엽송 임분의 에너지량

표 45에서 월악산 지역 30년생 낙엽송 임분의 ha당 총 에너지량(지상부)은 8,357,071 MJ/ha이며, 연간 에너지 고정량(지상부)은 1,256,220 MJ/ha로 나타났다.

총 에너지량은 35년생 월악산 신갈나무림 지상부 3,000,000 MJ/ha나 48년생 월악산 소나무림 지상부 6,086,665 MJ/ha에 비해서 훨씬 많은 것으로 나타났으며, 연간 고정되는 에너지량 역시 신갈나무림 441,000 MJ/ha, 소나무림 392,827 MJ/ha에 비해 아주 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 생장이 아주 빠른 낙엽송의 생리적 특징과 적합한 임분 환경, 그리고 조림후 숲가꾸기 작업이 이루어진 것에 있다고 생각된다. 월악산 낙엽송림의 총 에너지량을 석유환산톤으로 바꾸면 199.2 TOE이며, 연간 고정되는 에너지량은 29.9 TOE이고, 연간 줄기부에서 9.2 TOE와 가지부에서 2.8 TOE가 고정되는 것에 비해 잎에서 무려 17.9 TOE (59.8%)가 고정되고 있어 다른 수종에 비해 부위별 에너지 고정량 분포에서 차이를 보이고 있다.

표 45. 월악산 지역 30년생 낙엽송림의 ha당 에너지량과 연간 에너지 고정량

항 목	줄기	가지	잎	지상부 합계
임분 에너지량 (GJ/ha)	6,136	1,470	751	8,357
연간 에너지량 (GJ/ha)	387	118	751	1,256

라. 결론

충북 월악산 남사면 지역(해발 520m)에서 30년생 낙엽송 인공림은 1996년에 20% 강도의 간벌작업이 시행된 지역이다. 월악산 낙엽송림의 총 바이오매스와 순생산량 및 숲가꾸기 사업에 따른 폐 바이오매스 산출량을 추정한 결과는 다음과 같다. 낙엽송림의 바이오매스는 줄기 286.8 ton/ha, 가지 68.7 ton/ha, 잎 31.1 ton/ha로서 지상부 전체는 386.6 ton/ha로 추정되었으며, 연간 순생산량은 줄기부 18.1 ton/ha/yr, 가지부 5.5 ton/ha/yr, 잎 31.1 ton/ha/yr로서 지상부 전체의 연간 순생산량은 54.7 ton/ha/yr로 추정되었다. 월악산 낙엽송림은 유령림을 막 벗어난 단계이며, 연간 잎의 생산량이 매우 높은데다가 10여년 전에 간벌작업이 시행된 바 있어서 생육이 우수한 것으로 나타났다. 낙엽송은 극양수로서 자연낙지가 잘 되고, 현재 가장 아래쪽의 가지가 10m 이상의 높이에 있으므로 실질적으로 가지 치기는 어렵다. 20%의 중도간벌을 시행하였을 때 약 58 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 이것은 1년간의 성장량에 불과할 정도로 30년생 낙엽송림의 생장이 매우 우수하다.

6. 리기다소나무림의 바이오매스와 연간 순생산량

가. 서론

리기다소나무(*Pinus rigida* Miller)는 소나무과에 속하면서 북아메리카와 대서양 연안이 원산지인 도입수종이다. 생장이 빠르고 줄기가 곧아 지난 1960년대와 1970년대에 우리나라 중부지방에서 잣나무와 낙엽송 다음으로 많이 심겨진 3대 조림수종 중 하나로서, 오늘날에는 대부분의 조림지가 30년생 이상의 임령을 보이고 있다. 그러나 지금까지 리기다소나무 임분에 대한 물질생산 연구는 20년생 이하의 조림지에서 이루어졌을 뿐, 현재 우리나라에서 30년생 이상의 리기다소나무 임분에서 바이오매스 생산력에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 그 이유는 흉고 직경과 수고가 커짐에 따라 나무 각 부위의 중량이 기하급수적으로 늘어나 시간과 노동력이 크게 들기 때문이다. 본 연구의 목적은 우리나라의 대표적인 조림수종인 36년생 리기다소나무 인공림의 물질생산기구를 파악하고 그 생산력을 알아 보며, 숲가꾸기 사업으로 나오는 폐 바이오매스의 산출량을 추정하고자 한다.

나. 재료 및 방법

1) 조사지 선정

본 연구가 시행된 경기도 광주시 태화산(서울대학교 중부 학술림)내 리기다소나무림은 과거 벌채후 맹아갱신된 임분으로서 임령은 약 36년 정도이다. 해발고는 250m이고, 사면은 북서쪽, 지형은 사면 중, 하부에 걸쳐서 있다(표 46 참조). 이 임분은 2000년도에 간벌과 가지치기가 시행된 지역으로서 임관 울폐도가 50-60%에 불과하여, 하층식생으로 밤나무, 병꽃나무, 산초나무(다수), 청미래덩굴, 신갈나무, 줄참나무, 잣나무, 붉나무, 개울나무, 갈참나무, 개암나무, 떡갈나무, 노린재나무, 산뽕나무, 죽제비싸리, 두릅나무, 국수나무, 산딸기, 으름덩굴, 담쟁이덩굴, 고추나무, 명석딸기 등이 다수 자라고 있다.

2) 임분 및 바이오매스 조사

임분의 바이오매스 측정을 위해서 2005년 6월 20일부터 7월 20일까지 경기도

광주군 태화산 (서울대학교 중부학술림)에서 36년생 리기다소나무 조림지를 대상으로 20m×20m 크기의 조사구를 3곳 설치하여 매목조사를 실시하였다. 그리고 흉고직경이 10cm 이상인 임목을 각 흉고직경급별로 표본목을 1본씩 총 5본을 선정하여 벌목하고 지상부에서 2m 간격으로 줄기(수피, 목부), 가지, 고사지, 1년생 잎, 다년생 잎, 구과의 중량을 측정하였다. 이때 각 표본목에서 줄기, 가지, 잎의 일부를 채취하였으며(줄기는 2m 간격으로 단편 채취, 가지와 잎은 각 높이별로 일정량씩 계층 채취), 실험실에서 건조기로 80℃ 이상에서 항중량에 이를 때까지 건조시킨 후 건조중량지수를 산출하여 생중량에 적용시켜 전체 건조중량을 계산하였다. 표 47은 리기다소나무 표본목의 흉고직경과 수고, 그리고 각 부위별 건조중량을 정리한 것이다.

표 46. 조사지 개황

임령(년)	36	연평균 온도(℃)	15.9
평균수고(m)	16	연평균 강수량(mm)	1,300
평균 DBH(cm)	25.74	평균경사도(°)	20~28
ha당 본수	1,025	사면방위(°)	NW40~50
해발고(m)	250	토성	사양토, 사토
임관율폐도(%)	50~60	토양 pH (A층)	5.4

표 47. 리기다소나무의 부위별 건조중량 (g)

DBH (cm)	수고 (m)	줄기	수간 목질부	수피	가지	고사지	1년생 잎	2년생 잎	구과
17.0	12.1	79,465	68,382	11,083	20,523	8,940	1,665	3,396	748
21.4	15.2	154,311	131,942	22,369	34,527	12,927	3,377	6,049	1,649
24.0	15.5	199,471	171,360	28,111	49,185	15,306	3,817	6,286	1,107
27.1	17.9	309,934	276,059	33,875	90,316	28,817	6,347	11,423	2,194
29.5	18.6	374,082	333,502	40,580	112,031	32,083	7,217	12,811	2,243

3) 현존량 및 연간 순생산량 추정

현존량의 추정은 D^2H 와 Ws (줄기 건조), Wb (가지 건조), WI (잎 건조)과의 관계를 대수회귀식으로 한 상대생장식에 의해서 계산했다. 연간 순생산량은 수간석해로 알아낸 전년도의 흉고직경 및 수고를 상대생장식에 대입하여 전년과 당년의 현존량차로 계산하였다.

다. 결과 및 고찰

1) 생산구조 분석

경기 태화산 지역 북서사면의 36년생 리기다소나무 조림지의 바이오매스 수직 분포도를 그림 26에 나타내었다. 광합성부는 지상 5.2m부터 시작되고 있으며, 최대광합성부는 지상 11m~13m 사이의 높이에서 나타나고 있다. 리기다소나무는 내음성이 약한 수종이기 때문에 자연낙지가 많이 되는데, 지상부 3.2m부터 13.2m 사이에서 수간에 붙어있는 고사지가 발견되고 있다. 고사지가 가장 많이 발견되고 있는 평균 수고가 9.2m임을 고려하면, 가지치기를 할 때 10m 이하의 가지 위주로 시행하는 것이 적절할 것으로 보인다.

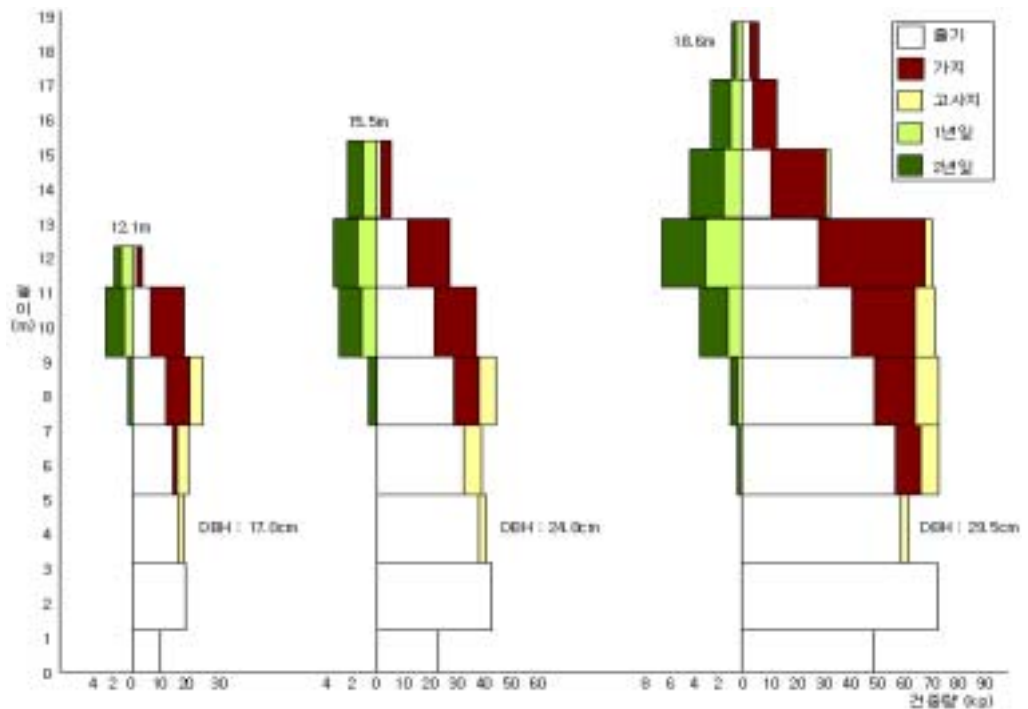


그림 26. 경기 태화산 지역 리기다소나무의 바이오매스 수직분포도

2) 리기다소나무의 부위별 바이오매스 추정식

별채한 36년생 리기다소나무 표본목의 D^2H 와 줄기 건중(W_s), 수간목질부 건중(W_{st}), 수간수피부 건중(W_{bk}), 가지 건중(W_b), 고사지 건중(W_{db}), 당년생 잎 건

중(Wl₁), 전년생 잎 건조중(Wl₂) 및 구과 건조중(Wc)을 표 47에 정리하였으며, 이 결과에서 유도된 상대성장식은 표 48과 같다.

표 48. 태화산 지역 36년생 리기다소나무 바이오매스의 상대성장식

상대성장식	결정 계수 (R ²)	t 값	Pr>[t]
$\log W_s = 1.0223 \log D^2 H + 1.2699$	0.99	47.45	< 0.001
$\log W_{st} = 1.0492 \log D^2 H + 1.1046$	0.99	31.07	< 0.001
$\log W_{bk} = 0.8331 \log D^2 H + 1.1199$	0.97	12.30	< 0.005
$\log W_b = 1.1433 \log D^2 H + 0.2130$	0.96	10.20	< 0.005
$\log W_{db} = 0.8769 \log D^2 H + 0.7941$	0.91	6.65	< 0.01
$\log W_{l1} = 0.9700 \log D^2 H - 0.2165$	0.98	18.79	< 0.001
$\log W_{l2} = 0.8838 \log D^2 H + 0.3797$	0.95	9.30	< 0.005
$\log W_c = 0.7040 \log D^2 H + 0.3966$	0.73	3.46	< 0.05

Ws=줄기 건조중(g), Wst=수간목질부 건조중(g), Wbk=수간수피부 건조중(g), Wb=가지 건조중(g), Wdb=고사지 건조중(g), Wl₁=당년생 잎 건조중(g), Wl₂=전년생 잎 건조중(g), Wc=구과 건조중(g).

본 연구에서 얻은 36년생 리기다소나무의 상대성장계수를 24년생 잣나무와 30년생 낙엽송과 비교해보면, 24년생 잣나무의 경우 0.9543(줄기), 0.9708(수간목부), 0.8641(수피), 0.6087(1년생 가지), 1.1598(가지), 0.5744(죽은 가지), 0.8321(당년생 잎), 1.1107(전년생 잎)이었고, 30년생 낙엽송의 경우 0.9989(줄기), 1.2734(가지), 1.2920(잎)으로서 수고와 흉고직경의 증가에 따라 리기다소나무는 잣나무나 낙엽송보다 줄기부 바이오매스가 더 많이 증가하는 경향이 나타났다. 반면에 가지부 바이오매스는 잣나무나 낙엽송보다 적게 증가하고 있었으며, 고사지는 잣나무보다 더 크게 증가하였는데 이것은 잣나무가 내음성이 강한 수종인 것에 비해 리기다소나무는 극양수로서 광이 부족해지면 고사지가 크게 증가하기 때문이다. 당년생 잎은 수고와 흉고직경이 증가할수록 리기다소나무가 잣나무보다 더 많아지고 있는 반면 전년생 잎은 잣나무가 리기다소나무보다 더 많아지고 있는데, 그 이유는 가지와 고사지의 경우에서와 마찬가지로 두 수종간 내음성의 차이 때문으로 생각된다.

3) 리기다소나무림의 바이오매스와 숲가꾸기 작업에 따른 폐 바이오매스 산출량

본 연구에서 36년생 태화산 리기다소나무 조림지의 바이오매스와 연간 순생산량을 표 49에 나타내었다. 리기다소나무림의 줄기부 바이오매스는 276.53 ton/ha

(74.79%)로서 리기다소나무림의 지상부 바이오매스의 대부분을 차지하고 있으며, 이 중 수간 목부는 243.75 ton/ha (65.92%), 수간 수피부는 32.78 ton/ha (8.87%)이다. 그 외의 부위로는 가지 76.28 ton/ha/yr (20.63%), 고사지 23.40tons/ha, 당년생 잎 5.50 ton/ha (1.49%), 전년생 잎 9.62 ton/ha (2.60%), 구과 1.84 ton/ha (0.50%)로서 지상부 전체는 369.77 ton/ha이었다. 이러한 결과는 리기다소나무 임분의 지상부 현존량 55.25 ton/ha (김, 1971), 8년생 리기다소나무와 리기테다소나무 임분의 현존량이 각각 21.60 ton/ha와 22.80 ton/ha (김, 1976), *Pinus sylbestris* 조림지에서 11년생 15.36 ton/ha, 17년생 22.93 ton/ha (Ovington, 1957) 등의 연구결과와 비교하였을 때, 매우 큰 것인데, 임령이 늘어나면서 리기다소나무 조림지의 바이오매스가 크게 증가하고 있음을 보여주는 것이다.

한편 태화산 리기다소나무림의 연간 순생산량은 줄기 27.09 ton/ha/yr (62.16%), 수간 목부 24.47 ton/ha/yr (56.15%), 수피 2.62 ton/ha/yr (6.01%), 가지 8.34 ton/ha/yr (19.13%), 당년생 잎 5.50 ton/ha/yr (12.62%), 구과 1.84 ton/ha/yr (4.22%), 지상부 합계 43.58 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 월악산 35년생 신갈나무림 지상부의 연간 순생산량 16.8 ton/ha/yr, 중왕산 60년생 신갈나무림 14.5 ton/ha/yr, 중왕산 70년생 신갈나무림 11.9 ton/ha/yr, 월악산 48년생 소나무림 17.0 ton/ha/yr, 월악산 24년생 잣나무림 6.0 ton/ha/yr 등에 비해 월등히 높은 생산량이며, 월악산 30년생 낙엽송림 54.7 ton/ha/yr보다는 다소 떨어진다. 이 지역은 현재 임내 경쟁이 심해지면서 고사지가 대량 발생하고 있으므로 가지치기와 간벌 등 숲가꾸기 작업을 할 때가 된 곳이다.

표 49. 36년생 리기다소나무 조림지의 ha당 현존량과 순생산량 (경기 태화산)

	줄기	수간 목질부	수간 수피부	가지	고사지	당년생 잎	전년생 잎	구과	합계
임분 총생산량 (tons/ha)	276.53	243.75	32.78	76.28	(23.40)	5.50	9.62	1.84	369.77
현존량 분포 (%)	74.79	(65.92)	(8.87)	20.63	-	1.49	2.60	0.50	100.00
전년도 생산량 (tons/ha)	249.44	219.28	30.16	67.94	-	-	8.80	-	326.19
임분 순생산량 (tons/ha)	27.09	24.47	2.62	8.34	-	5.50	-	1.84	43.58
순생산량 분포 (%)	62.16	(56.15)	(6.01)	19.13	-	12.62	-	4.22	100.00

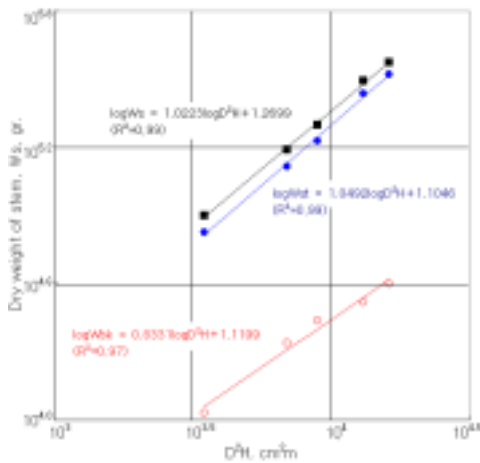


그림 27. 태화산 리기다소나무림의 D^2H 와 수간부 건조량과의 상관관계
 W_s = 수간부(g), W_{st} = 수간목질부(g),
 W_{bk} = 수간수피부(g)

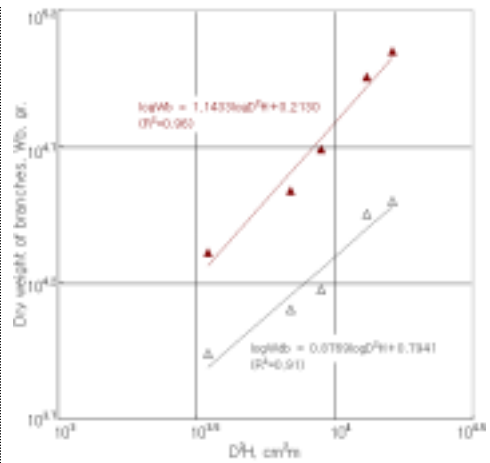


그림 28. 태화산 리기다소나무림의 D^2H 와 가지부 건조량과의 상관관계
 $(W_{db}$ = 고사지, W_b = 가지)

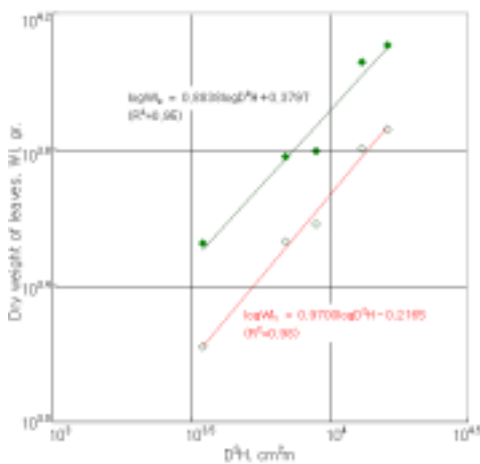


그림 29. 태화산 리기다소나무림의 D^2H 와 잎 건조량과의 상관관계
 $(W_{l1}$ = 1년생 잎, W_{l2} = 다년생 잎)

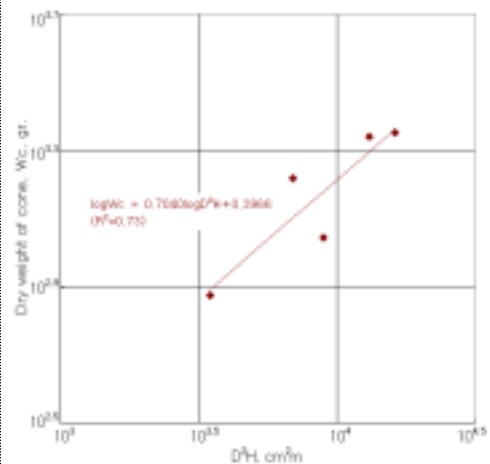


그림 30. 태화산 리기다소나무림의 D^2H 와 구과 건조량과의 상관관계
 $(W_c$ = 구과)

리기다소나무는 극양수이기 때문에 자연전지가 잘 되는 편이어서 가지치기로 얻을 수 있는 바이오매스는 잣나무나 신갈나무에 비해 상대적으로 적은 편이다. 반면에 생장이 매우 빠르므로 20%의 간벌을 시행하면 약 74 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 이것은 1~2년간의 성장량에 해당된다. 또한 가지치기를 20% 강도로 실시하면 15 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오는데, 현재의 성장속도로 2년간의 성장량에 해당하는 것이다.

4) 태화산 리기다소나무림의 에너지량

표 50에서 태화산 지역 36년생 리기다소나무 임분의 ha당 총 에너지량(지상부)은 7,971,416 MJ/ha이며, 연간 에너지 고정량(지상부)은 932,387 MJ/ha로 나타났다. 총 에너지량은 35년생 월악산 신갈나무림 지상부 3,000,000 MJ/ha나 48년생 월악산 소나무림 지상부 6,086,665 MJ/ha에 비해서 더 많은 것으로 나타났으며, 30년생 월악산 낙엽송림의 지상부 8,357,071 MJ/ha와 유사하게 나타났다. 연간 고정되는 에너지량 역시 신갈나무림 441,000 MJ/ha, 소나무림 392,827 MJ/ha에 비해 훨씬 많은 것으로 나타났으며, 낙엽송림 1,256,220 MJ/ha보다는 적은 것으로 나타났다. 태화산 리기다소나무림의 총 에너지량을 석유환산톤으로 바꾸면 지상부 전체는 190.0 TOE/ha이며, 연간 지상부에 고정되는 에너지량은 22.2 TOE/ha이고, 이 중 줄기부에만 연간 13.8 TOE/ha (62.2%)가 고정되고 있다.

표 50. 태화산 36년생 리기다소나무림의 ha당 에너지량과 연간 에너지 고정량

부 위	줄기	수간 목질부	수간 수피부	가지	고사지	당년생 잎	전년생 잎	구과	합계
임분 에너지량 (GJ/ha)	5,922	5,215	707	1,645	(505)	133	232	40	7,971
연간 에너지량 (GJ/ha/yr)	580	524	56	180	-	133	-	40	932

라. 결론

경기 태화산 북서사면(해발 250m)의 36년생 리기다소나무 조림지에서 바이오매스와 연간 순생산량을 알아보고, 임분구조를 분석하여 숲가꾸기 사업으로 산출되는 폐 바이오매스를 추정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

태화산의 리기다소나무림은 아직 간벌이 시행되지 않아 임내에 고사지와 고사목이 많이 발생하고 있는 지역이다. 이 임분의 총 바이오매스는 줄기부 243.7 ton/ha, 수피부 32.8 ton/ha, 가지부 76.3 ton/ha, 고사지 23.4 ton/ha, 당년생 잎 5.5 ton/ha, 전년생 잎 9.6 ton/ha, 구과 1.84 ton/ha로서 고사지를 제외한 지상부 전체는 369.8 ton/ha으로 나타났다. 또한 연간 순생산량은 줄기부 24.5 ton/ha/yr, 수피부 2.6 ton/ha/yr, 가지부 8.3 ton/ha/yr, 당년생 잎 5.5 ton/ha/yr, 구과 1.84 ton/ha, 지상부 합계 42.8 ton/ha/yr로 추정되었다. 이것은 석유환산톤으로 지상부 전체 190.0 TOE/ha이고, 연간 지상부에 고정되는 양은 22.2 TOE/ha에 해당한다.

리기다소나무는 극양수로서 줄기 아랫부분의 가지들은 고사지로 떨어지고 있어 가지치기를 시행할 필요가 있다. 리기다소나무의 생장은 매우 좋으므로 20%의 간벌을 시행하면 약 74 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오며, 이것은 1~2년간의 성장량에 해당된다. 또한 20% 강도로 가지치기를 하면 15 ton/ha의 폐 바이오매스가 나오는데, 2년간의 성장량에 해당하는 것이다.

지금까지 우리나라에서 가장 많이 분포하고 있는 5개 수종(신갈나무, 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무)의 임분에 대한 연구 결과를 종합하면 다음과 같다. 신갈나무는 농촌 주변의 산림에서는 맹아지로 갱신된 30~40년생의 임령으로 주로 분포하고 있으며, 고산 지대에서는 60년생 이상으로 자라고 있다. 소나무는 주로 40년생 이상의 장령림으로 대경급 위주로 분포하고 있으며, 일부 지역을 제외하고는 유지되지 못하고 점차 밀려나는 추세이다. 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무는 지난 60~70년대에 주로 심겨져서 오늘날 대부분 지역에서 30년생 이상으로 자라고 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구 대상지를 우리나라의 평균적인 임상을 보이는 임분으로 선정하였다.

태화산 36년생 리기다소나무 조림지와 월악산 30년생 낙엽송 조림지가 간벌작업으로 가장 많은 폐 바이오매스를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 월악산 24년생 잣나무 조림지는 심한 경쟁으로 생장이 많이 떨어지고 있기 때문에 가지치기와 간벌작업을 병행할 필요가 있다. 월악산 35년생 신갈나무림은 가지치기와 10%의 약도 간벌로 약 20 ton/ha의 폐 바이오매스를 얻을 수 있다. 소나무림은 우리나라에서 대부분 장령림으로 분포하고 있으나, 척박한 곳에 주로 나타나고 있어서 생장이 빠르지 못하므로 가지치기와 간벌작업에서 과도하게 되지 않도록 신중을 기해야 한다.

제 2 절 산림 폐 바이오매스의 최적 발효 기술 개발

1. 서론

유한자원인 화석자원의 대체자원으로서 가장 축적량이 풍부(1.84x10¹¹ ton)하고, 그 분포도 광범위하며 재생산가능(년간 1.7x10¹⁰ ton)한 바이오매스 자원의 이용에 관한 많은 관심이 집중되고 있으며, 따라서 이들 자원을 원료로 한 에너지원 및 화학공업 원료로의 전환기술을 개발하려는 연구가 세계적으로 활발히 추진되고 있다.

바이오매스를 대체에너지화 하려는 연구는 과학기술연구원, 국립 산림과학원 및 농촌진흥청을 중심으로 과거 10여 년간에 걸쳐 널리 연구되어 왔으며, 그 연구의 중심은 에틸알콜 생산, 메틸알콜 생산, 메탄가스 생산 등으로 집약할 수 있다. 바이오매스의 에틸 알콜 생산과 관련된 연구에 있어서는 바이오매스자원의 전처리(1~3)가 연구의 핵심을 이루었고, 이러한 전처리의 경제성은 전분질 원료와의 경합을 불리하게 하여, 목질계 바이오매스 자원은 에틸 알콜 생산을 위해서는 비경제적인 원료라는 결론을 얻게 되었을 뿐이다. 그리고 전처리로서 물리적 처리, 화학적 처리, 생물학적 처리와 같은 전통적인 방법만 적용하여 보았을 뿐, 효과적인 전처리 장치를 개발하지 않고서는 실현에 많은 문제점을 가지고 있다.

2004년도 우리나라의 목재사용량은 약 1,200만 m³으로서 여기서 발생하는 폐 바이오매스는 약 30%인 360만 m³에 달하고 있으며(조, 1987), 이 가운데 폐 바이오매스는 일부만 보일러 연료로 사용되고 나머지는 폐기 또는 공해원으로 취급되어 많은 기업들이 그 처리대책에 고심하고 있다. 한편 농업, 임업, 원예 분야에서의 목질계 퇴비는 퇴구비에 대체되는 우수한 유기질 공급원으로서 선진 각국에서는 많은 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 산림 및 농산 폐 바이오매스의 고효율의 발효열 교환장치 개발을 위해 우선 발효 특성을 구명하고자 하였다. 톱밥, 수피, 간벌재, 과피, 왕겨, 볏짚 등의 재료에 대한 계절별 발효특성을 분석하고, 발효열 지속시간을 측정하였다. 또한 발효 프로세스 조절기술과 관련하여 각 재료의 혼합시 발효특성, 발열지속기간의 변화를 분석하며, 수분 및 재료 혼합비율에 따른 발효특성을 분석함으로써 궁극적으로 최대 발효열효율을 얻기 위한 재료, 배합비, 최적수분함량 등을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 산림 폐 바이오매스의 발효 특성 분석

1) 산림 폐 바이오매스의 겨울철 발효특성

가) 공시재료

침엽수재 원료로서 낙엽송재 톱밥은 산림조합연합회 청원군지부에서 생산되는 톱밥을 공시하였으며, 신갈나무를 주종으로 한 활엽수재로서의 참나무류는 월악산 충북대학교 부속 학술림으로부터 벌채하여 톱밥제조기를 사용하여 톱밥을 제조하여 공시재료로 사용하였다.

나) 실험방법

(1) 발효상 설계 및 축조

유기질비료를 제조하기 위해 Fig. 1과 같은 발효상을 축조하였으며, 한 개 발효상의 크기는 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 높이 2 m로서 시멘트블록을 이용하였다. 이러한 발효상을 연속하여 2개 축조하여 발효과정이 진행됨에 따라 뒤집기를 하면서 비어있는 옆의 발효상으로 이적할 수 있도록 하였다.

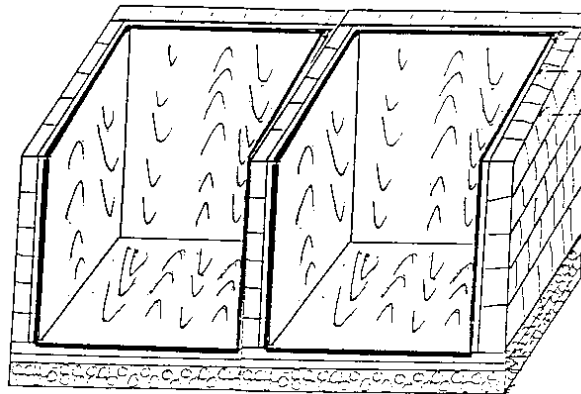


Fig. 1. Fermenting Bed

(2) 원재료의 배합 및 퇴적

재료의 발효시 가장 중요한 사항은 목질계 폐재가 일반적으로 C/N 율이 매우 높을뿐 만 아니라 미생물에 의해 분해되기 어려운 리그닌 성분을 많이 함유하고 있으므로, 자연 분해시키기가 다른 유기재료에 비하여 매우 어렵다. Table 1 은 본 실험에서 사용한 원료의 배합비율을 나타낸 것이다.

Table 1. Mixing of raw materials for composting

Raw materials	Japan		This Exp.
	A	B	
Sawdusts	1,000 kg	1,000 kg	1,000 kg
Urea	10 kg	-	12 kg
Chicken shit	50 kg	-	50 kg
Fermentation aids	little	little	10 kg
Lime	-	10 kg	20 kg
M. C. (%)	50 ~ 60	50 ~ 60	50 ~ 60

본 실험에서 사용된 배합비 및 발효 조건은 많은 예비실험 결과를 거쳐 이루어진 것이며 발효 촉진을 위하여 발효 첨가제를 1% 정도 첨가하였다. 이와 같이 배합된 원재료를 1.5 m 내지 2.0 m 의 높이로 공기가 잘 통하도록 쌓았으며, 함수율 또한 발열을 좌우하는 가장 중요한 인자중 하나이므로 약 55% 전.후가 되도록 조절하였다.

2) 활엽수재 및 침엽수재톱밥을 이용한 하절기 발효특성

가) 공시재료

활엽수재 원료로서 참나무류를 주축으로 한 활잡류톱밥, 침엽수재 원료로서 낙엽송 톱밥을 피산군소재 풍림산업(주)으로부터 구입하여 공시하였다.

나) 실험방법

(1) 발효상 설계 및 축조

톱밥의 발효상을 축조하였으며(Fig. 2), 각 발효상의 크기는 가로 3.0 m, 세로 3.0 m, 높이 1.5 m로서, 시멘트 콘크리트 조로 제작하였다. 발효상을 연속하여 2개 축조하여 활엽수재 톱밥과 침엽수재 톱밥을 동시에 발효하도록 설계하였다.



Fig. 2. Fermenting bed (left) and pipe installation (right) for hot water

(2) 원재료의 배합 및 퇴적

본 실험에서는 Table 2의 배합비에 따라 원재료들을 혼합하면서 배합된 원 재료를 2.0 m의 높이로 공기가 잘 통하도록 쌓았으며, 함수율을 55~60%가 되도록 조절하면서 발효과일을 완성하고 내부에 균일하게 분포된 온도측정용 센서를 이용하여 내부의 온도변화를 경시적으로 측정하였다(Fig. 3).

Table 2. Mixing of raw materials for sawdust fermenting

Raw materials	Mixing
Sawdusts	1,000 kg
Urea	10 kg
Chicken shit	15 kg
Lime	10 kg
M. C.(%)	55~60



Fig. 3. Piling of hardwood sawdusts and its completed pile

3) 산야초를 이용한 하절기 발효특성

가) 공시재료

갈대류를 주축으로 한 산야초(갈대류+소나무낙엽+활잡목낙엽+벚짚).

나) 실험방법

(1) 발효상 설계 및 축조

톱밥의 발효를 위한 발효상을 사용하지 않고, 노천에 바닥을 특수 패널로 깔고 그 위에 Fig. 4에서 보는 바와 같은 온수용 파이프와 온도센서를 설치하고 발효 재료를 퇴적하였다.



Fig. 4. Pipe installation(left) for hot water and fermenting bed (right)

(2) 재료의 배합 및 퇴적

본 실험에서 사용한 원료의 배합비율은 Table 2에 준하며 배합비에 따라 원재료들을 혼합하면서 배합된 원재료를 3.0 m의 높이로 공기가 잘 통하도록 쌓았으며, 함수율을 55~60%가 되도록 조절하였다. 완성한 발효파일 내부에 온도측정용 센서를 설치하여 내부의 온도변화를 경시적으로 측정하였다.

나. 재료별 혼합비율에 따른 발효 특성

1) 침엽수톱밥 : 활엽수 톱밥 = 50 : 50

2) 침엽수낙엽 : 활엽수낙엽 : 산야초 = 40 : 40 : 20

3) 활엽수톱밥 : 산야초 = 50 : 50

4) 활엽수톱밥 = 100

다. 발효 프로세스 조절 및 발효의 최적화기술개발

1) 재료의 혼합비율

가) 활엽수톱밥 = 100

나) 침엽수톱밥 = 100

다) 산야초 = 100

라) 침엽수톱밥 : 활엽수 톱밥 = 50 : 50

마) 활엽수톱밥 : 산야초 = 50 : 50

2) 최대 발효열을 얻기 위한 재료의 혼합비율 및 수분함량 영향

가) 재료의 혼합비율의 영향

나) 수분함량의 영향

3. 결과 및 고찰

가. 산림 폐 바이오매스의 발효 특성 분석

1) 산림 폐바이오매스의 동절기 발효특성

가) 침엽수재 톱밥의 발효과정에서 온도 변화

소정의 배합비로 혼합된 톱밥재료를 발효상에 퇴적하고 1 개월마다 환적하였으며, 그간의 발효상 온도변화를 측정된 결과, Fig. 5에서 보는 바와 같이 낙엽송 톱밥의 경우 퇴적 7일에서 10 일만에 42℃까지 온도가 상승하였으며, 최고온도는 발효시작 21 일만에 48℃까지 상승하다. 이러한 온도수준이 약 10 일정도 경과되다가 26 일이 지나면서 감소하기 시작하였으며, 1개월이 지나서 뒤집기를 실시하였

다. 발효과정에서 상승되었던 온도가 감소되는 이유로서는 발효중 분해되기 용이한 유기물부분의 소멸 및 수분함량과도 관계가 깊은 것으로 생각된다.

뒤집기의 목적은 톱밥의 발효과정에서 호기성균의 생육을 도와주기 위한 공기 유통의 조절과 외부의 기상조건 및 톱밥발효에 의한 발열이 재료의 건조를 야기하여 톱밥발효기질의 수분부족을 보충함으로서 미생물의 활동을 재차 촉진시키는데 있다.

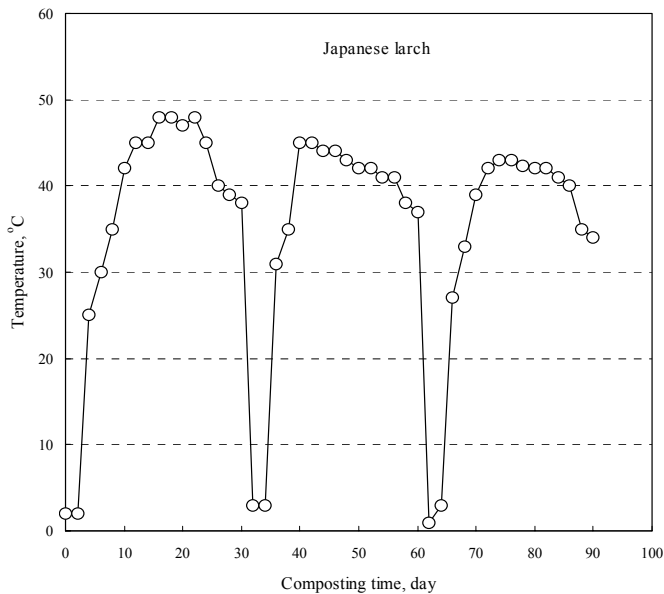


Fig. 5. Changes in temperature during composting process (*Larix kaemferi* sawdust)

환적시 다시 수분함량이 60% 전후가 되도록 조절 후 인접 발효상으로 이적하였으며, 이적후 발효상의 온도 역시 6일이 되면서 30°C로 상승하기 시작하여 10일만에 45°C의 최고 온도로 상승하였다. 최고 발열온도는 제1차 48°C보다 낮았다. 58일이 지나면서 온도가 하강하기 시작하였으므로 퇴적 60일 만에 2차 환적하였으며, 온도는 43°C를 유지하였다. 발효퇴적 90일이 지나면서 34°C의 온도로 레벨오프되는 결과를 나타냈다. 발효과정에서 온도는 48°C 이상을 올리지 못하였는데, 이는 겨울철이라는 특수한 외기조건이 미생물의 활동을 제한하게 한 것으로 생각되며, 환적의 반복으로 최고온도는 점차 낮아지는 것으로 나타났다.

나) 활엽수재 톱밥의 발효과정에서 온도 변화

Fig. 6은 소정의 배합비로 혼합된 활엽수재 톱밥재료를 발효상에 퇴적하고 1 개월마다 환적하였으며, 그간의 발효상 온도변화를 측정된 결과, 퇴적 14일만에 48℃ 까지 온도가 상승하였으며, 24일째까지 최고온도 수준(본 실험에서는 약 50℃ 전후)을 유지하다가, 28일이 지나면서 다시 감소하기 시작하였다. 이러한 온도의 감소는 부숙중 유기물의 소멸 및 수분함량과도 관계가 깊은 것으로 생각된다. 매 뒤집기 이후에도 온도는 다소 높게 올라갔지만 초기만큼은 올라가지 못하고 43~49℃를 기록하였는데, 이는 분해되기 용이한 성분이 잔존하기 때문으로 생각된다. 활엽수재 톱밥의 발효상온도 변화를 침엽수재 톱밥의 발효시와 비교하였을 때, 활엽수재의 발열이 2℃ 정도 높았으며, 온도의 유지기간에 있어서는 활엽수재 톱밥쪽이 10~14 일로서 침엽수재 톱밥의 8~12 일보다 긴 것으로 나타났다.

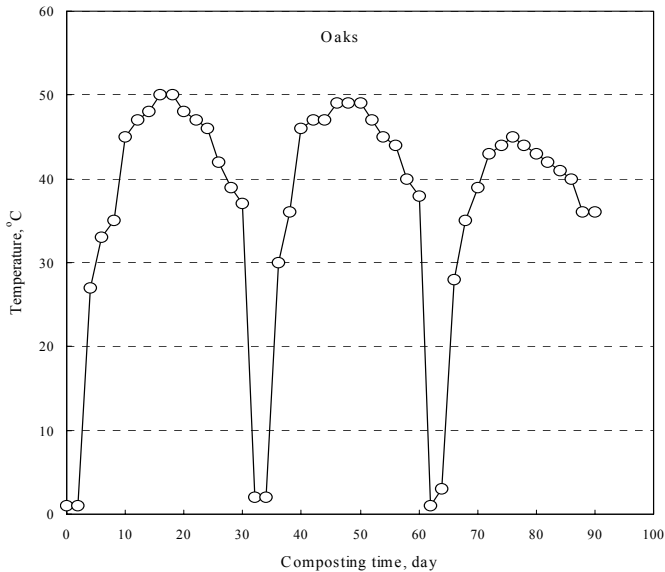


Fig. 6. Changes in temperature during composting process (Oaks sawdust)

2) 산림폐바이오매스의 하절기 발효특성

본 실험에서 사용한 원료의 배합비율은 Table 2에 준하며 배합비에 따라 원재료들을 혼합하면서 배합된 원재료를 3.0 m의 높이로 공기가 잘 통하도록 쌓았으며, 함수율을 55~60%가 되도록 조절하였다. 완성된 발효파일의 내부에 설치한 온도측정용 센서를 이용하여 내부의 온도변화를 경시적으로 측정하였다.

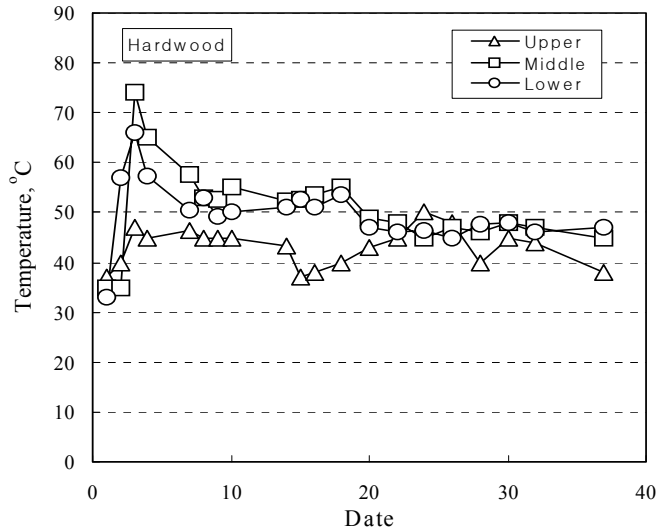


Fig. 7. Temperature profile during fermenting process (Hardwood sawdust)

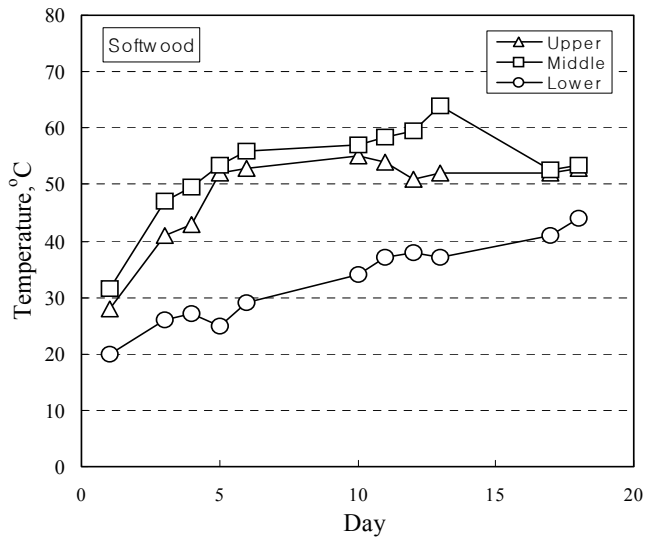


Fig. 8. Temperature profile during fermenting process (Softwood sawdust)

재료를 퇴적한 후의 발열경과를 보면 퇴적즉시 온도가 상승하기 시작하였으며, 활엽수재톱밥의 경우는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 온도상승이 매우 빨라 퇴적 5일만에 중앙부에서 최고온도인 74°C에 달하였으며, 하층부 및 상층부도 각각 67°C 및 47°C로 높은 온도를 나타냈으며, 그 이후부터 1개월간 점차 서서히 42~52°C

의 범위까지 감소되는 경향을 보였다. 침엽수재 톱밥의 경우에는 Fig. 8에서처럼 온도 상승이 활엽수재에 비해 완만하게 증가되었으며, 15일간 계속 증가하여 중층부의 경우 퇴적 14일째 최고온도인 64℃에 달하였고, 상층부는 퇴적 10일만에 55℃, 하층부는 퇴적 18일째 42℃의 가장 높은 온도를 나타냈다.

3) 산야초의 발효특성 (하절기)

산야초 하절기 발효 실험에서, 퇴적하여 발효시작 2일만에 상부는 38℃, 중·하부는 80℃까지 온도가 급격한 상승을 보였으나, 이후 온도가 급히 하강하면서 발효 6일 만에 30℃ 정도의 기온으로 돌아오는 결과를 보였다(Fig. 9). 그 원인으로서 생각할 수 있는 것은, 갈대류가 대부분을 이루는 산야초의 길이가 매우 길었으므로 이를 10 cm 전후의 길이로 절단하는데 어려움이 많아서 일정한 크기로 재단하지 못한 것과 이로 인해 여타 발효재료와의 균일한 혼합이 이루어지지 못한 점을 들 수 있다. 한편 내부에 온수용 파이프 설치를 위하여 넣었던 철제 frame이 산야초 퇴적 더미의 과다한 무게로 인하여 찌그러져 발효재료 사이에 공간이 생겨 발효가 순조롭게 진행되지 않았으며, 퇴적 7일째부터 시작된 장마로 인하여 발효가 불량하게 된 것으로 생각된다. 14일간 계속된 온도측정 결과는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 40℃ 전후의 온도분포를 나타내고 있다.

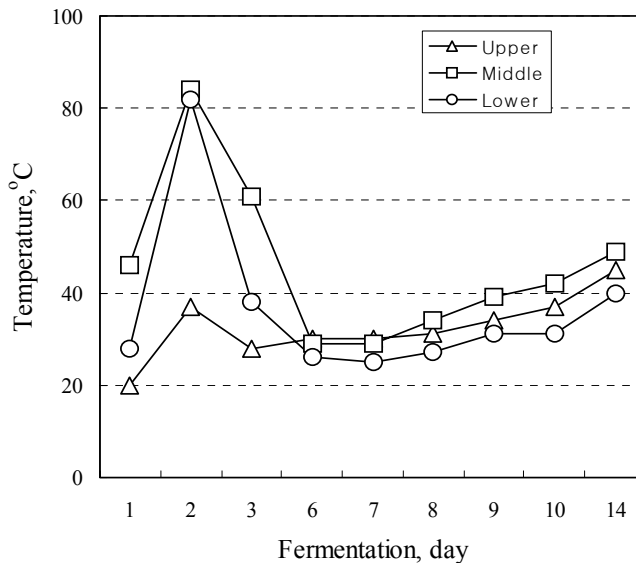


Fig. 9. Temperature profile during fermenting process (HW-Grass)

나. 재료별 혼합비에 따른 발열지속시간 및 발효특성

1) 침엽수 톱밥-활엽수 톱밥 (50:50) 혼합발효

재료를 퇴적한 후의 발열 경과를 보면 Fig. 10에서와 같이 온도상승이 매우 빨라 퇴적 5일 만에 상부 및 중앙부 50~55℃, 하층부 37℃에 달하였으며, 이후 2주일간 상층·중층부에서 50~60℃, 하층부 35~40℃를 보였다. 침엽수재 톱밥의 경우 활엽수재에 비해 온도 상승이 완만하였으며, 활엽수재만 사용하면 퇴적 5일에 중앙부에서 최고온도 74℃, 하층부 67℃를 나타내었다. 따라서 침엽수-활엽수 톱밥 (50:50)의 혼합 발효는 침엽수재 톱밥만 사용하는 것과 큰 차이가 없었다.

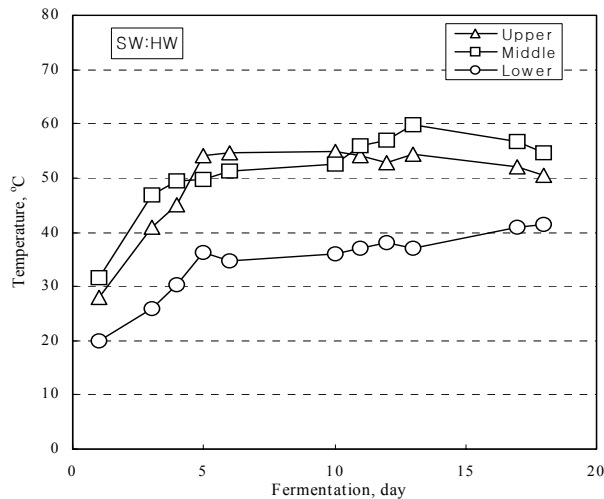


Fig. 10. Temperature profile during fermenting process (HW-SW)

2) 침엽수낙엽-활엽수낙엽-산야초 (40:40:20) 혼합

침엽수낙엽-활엽수낙엽-산야초를 40:40:20으로 혼합한 경우 Fig. 11에서처럼 퇴적하자마자 온도가 27~37℃까지 급히 상승하여 3~4일 지속되다 다시 감소하여 10일 만에 0~3℃가 되었다. 이 낮은 온도는 10일 이상 지속되었으며, 이후 온도가 증가하여 발효시작 25일째 16~22℃를 나타냈다. 이러한 결과의 원인을 보면, 12월 마지막 주에 퇴적하여 외기 온도가 영하 10℃를 전후하는 저온이어서 발효 재료의 충분한 혼합이 이루어지지 못하고, 재료들이 발효를 위해 유지해야 하는 적정 함수율 50~60%를 혼합시 물이 얼어 만들지 못했다는 점 등을 들 수 있다.

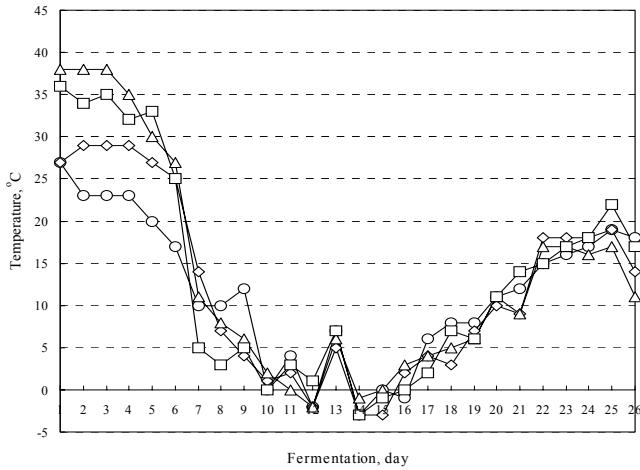


Fig. 11. Temperature profile during fermenting process (HW-Leaves-Grass)

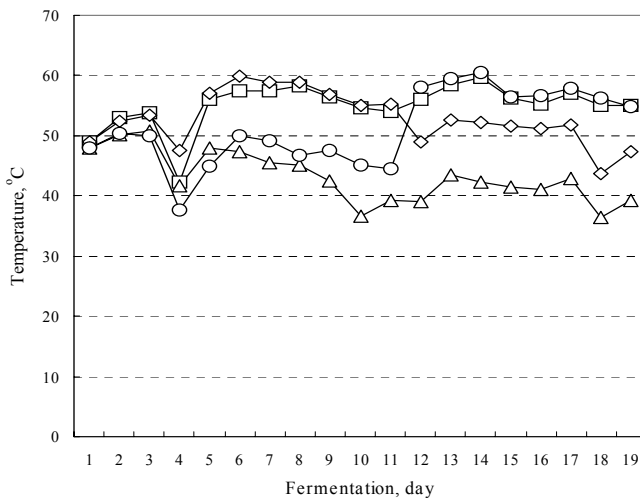


Fig. 12. Temperature profile during fermenting process (HW-Grass)

3) 활엽수 톱밥-산야초 (50:50) 혼합

Fig. 12에서 보는 바와 같이 퇴적하자마자 발효더미의 온도가 47°C 전후까지 상승하였으며, 온도가 3일까지 계속 증가하여 55°C까지 되었다가 4일째 갑자기 온도가 38~48°C로 감소하였고, 그 후 다시 증가하여 발효시작 21일경에 50~60°C를 유지하였다. 이러한 발효온도는 축정부위에 따라서 다소 상이하였는데, 발효상의 좌측이 발효상 우측보다 5~15°C 정도 온도가 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 발효퇴적시의 균일한 혼합이 이루어지지 않았기 때문으로 생각된다.

4) 활엽수 톱밥 (100%)

Fig. 13은 배합비를 개선하여 활엽수 톱밥만 발효시킨 발열 경과를 나타낸 것으로서, 퇴적 2일째부터 온도가 상승하여 50~80°C가 되었고, 발효더미 우측 부위의 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. 발열온도가 측정부위에 따라 다르게 나타났는데, 이러한 결과의 원인으로는 발효퇴적시 균일한 혼합이 이루어지지 않았던 것으로 추측된다.

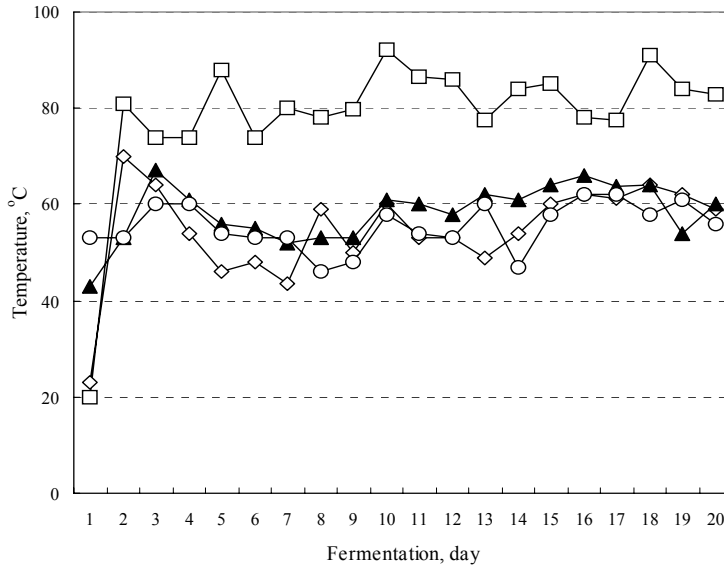


Fig. 13. Temperature profile during fermenting process (HW sawdust)

다. 발효 프로세스 조절 및 발효의 최적화 기술 개발

1) 재료 혼합 비율에 따른 발효 프로세스 개발

발효에 사용한 재료는 활엽수재 톱밥 (참나무 중심의 활잡목), 침엽수 톱밥 (낙엽송), 낙엽류 (소나무 및 플라타너스 낙엽), 볏짚, 산야초류 등 5종을 사용하였고, 발효첨가제로 요소, 발효용 부숙비료, 석회를 첨가하고, 전체 함수율이 50~60%가 되도록 혼합하였다. 재료의 혼합비율에 따른 발효특성을 Table 3에 정리하였다.

낙엽류-짚-산야초 조합의 발열이 가장 나뉘었으며, 이들을 겨울철에 실시했을 때는 0~15℃ 정도로 발열온도가 대기온도를 약간 상회하는 정도에 그쳤다. 한편 침엽수재 톱밥만 사용한 경우에는 최고온도 60~65℃, 평균온도 40~50℃, 유지기간이 2주 정도로 좋지 않았다.

활엽수재 톱밥은 최고온도 65~74℃, 평균온도 40~50℃를 나타냈으며, 발효첨가제의 비율에서 요소를 종전의 10 kg에서 15 kg으로 올리고, 발효용 부숙비료를 15 kg에서 20 kg으로 증가시킨 결과, 최고온도 80~90℃, 평균온도 50~60℃, 유지기간은 20~30일 정도로 늘어나는 결과를 얻었다. 한편 침엽수 톱밥-활엽수 톱밥을 50:50으로 혼합한 경우, 최고온도 58~60℃, 평균온도 35~55℃ 정도로 침엽수 단독보다는 좋은 결과를 보여 주었다. 활엽수재 톱밥-산야초 (50:50)은 최고온도 58~60℃, 평균온도 50~55℃를 나타냈으며, 유지기간 또한 활엽수 톱밥 단독 발효구와 마찬가지로 20~30일 정도로 늘어났다.

Table 3. Effect of Mixing Ratios of raw materials on the fermentation

Raw materials	Hardwood	Softwood	Leaves+Straw +Grass	Leaves+Straw +Grass
Main source, kg	1,000	1,000	1,000	1,000
Urea, kg	10	10	10	10
Fermenting Fertilizer, kg	15	15	15	15
Lime, kg	10	10	10	10
Moisture content, %	50~60	50~60	50~60	50~60
Temperature, Mean (°C)	43~49	40~50	35~40	5~15(15)
Maximum	65~74	60~65	73~92	30~38(10)
Low	33	20	20	0
Maintaing period, day	≒ 25	≒ 15	≒ 7~10	Dec. 10~35℃ Jan. 0~20℃ Feb. 0℃전후 Mar. 0~7℃ Apr. 3~20℃
Raw materials	Hardwood+Softwood (50:50)	Hardwood	Hardwood+Grass (50:50)	
Main source, kg	1,000	1,000	1,000	
Urea, kg	10	15	15	
Fermenting Fertilizer, kg	15	20	20	
Lime, kg	10	10	10	
Moisture content, %	50~60	50~60	50~60	
Temperature, Mean (°C)	35~55	50~60	50~55	
Maximum	58~60	80~90	58~60	
Low	35	43	40	
Maintaing period, day	≒ 15	≒ 20~30	≒ 20~30	

2) 최대 발효열을 위한 구성요소, 성분비 및 수분함량 구명

가) 수분 함량이 발효열에 미치는 영향

발효용 재료의 함수율은 미생물의 활동 및 발효열에 매우 큰 영향을 준다. Fig. 14는 발효재료의 함수율을 45, 55, 65%로 각각 조절하고 동일한 조건에서 발효시켰을 때의 발효열을 측정된 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 되어서야 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 소실되기 때문이며, 또한 발열로 재료내 수분이 증발되어 적정발효를 위한 수분이 부족한 상태가 되기 때문이다. 이러한 온도 감소를 방지, 회복시키기 위해서는 수분을 보충하고, 기질을 혼합시켜 미생물이 선호하는 호기적 환경으로 바꾸어 주어야 한다.

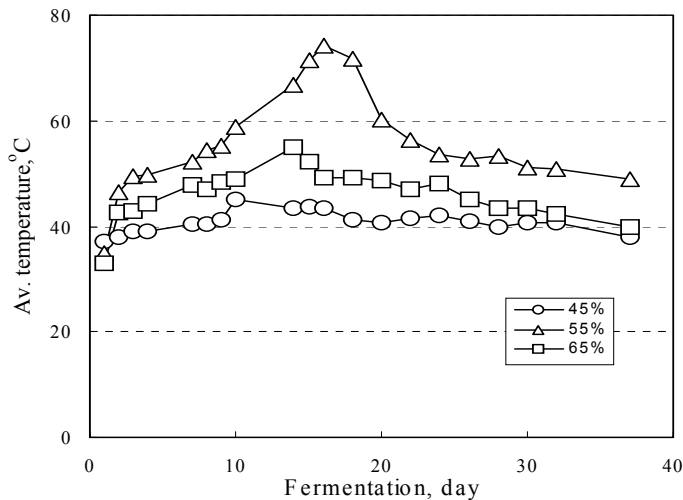


Fig. 14. Effect of moisture contents of substrates on fermenting process (Hardwood sawdust)

나) 재료 혼합비율이 발효에 미치는 영향

최대 발효열을 내기 위한 최적조건을 제시하기 위하여 재료별 발효열의 경과를 재검토한 결과를 Fig. 15에 나타냈다. 발효가 시작되면서 최고온도에 도달하는 시간은 14일 만에 산야초구가 70°C, 활엽수 톱밥-산야초구의 70°C, 침·활엽수 톱밥 혼합구가 65°C를 달하였으며, 침엽수 톱밥은 16일 만에 최고온도 64°C에 달하였다. 활엽수 톱밥구는 18일이 되어서야 발열 최고온도에 달하였다. 발열 최고온도 면에서는 활엽수재 톱밥구가 75°C로 가장 높았고, 다음이 활엽수톱밥+산야초구, 산야초구가 70 전후의 온도를 나타냈다. 침엽수 톱밥 및 침·활엽수 톱밥 혼합구는 65°C전후로 상대적으로 낮았다. 발열 지속시간 면에서는 활엽수 톱밥, 침·활엽수 톱밥 혼합구, 침엽수 톱밥구가 좋았으며, 산야초구는 최고온도에 도달한 후 신속히 온도가 떨어지는 특징을 보였다.

이상의 결과를 정리하면 활엽수재 톱밥 단독 및 침·활엽수 톱밥구가 가장 좋았으며, 발열에서 최고온도 60~90°C, 최저온도 40°C전후, 평균온도 50~60°C를 20~30일간 유지하였다. 이 때의 첨가제는 발효재료 1 톤에 대하여 요소 15 kg, 발효용 부숙비료 20 kg, 석회 10 kg, 함수율 55%이었다.

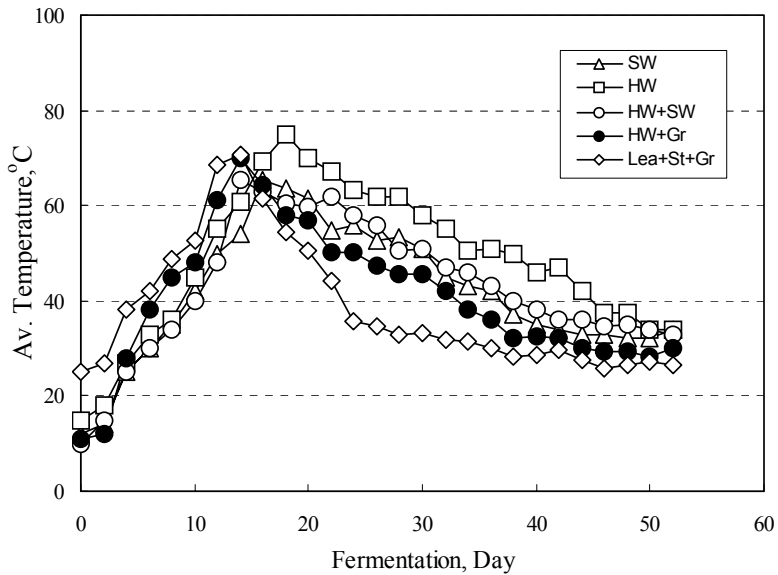


Fig. 15. Effect of substrate compositions on fermenting process.

3) 최적발효조건에서의 온수탱크의 온도변화

Fig. 16은 활엽수 톱밥과 산야초를 50:50으로 혼합한 재료의 발열특성 및 발효상 내부에 설치한 온수 파이프 내로 도입된 물의 온도를 경시적으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 측정부위에 따라 온도가 상당한 편차를 보이고 있으며, 대체적으로 중부 및 상부의 온도가 높았으며, 하부 및 표층의 온도가 낮았다. 탱크의 출구 및 내부온도를 45일간 측정된 결과, 탱크의 온도는 30~45°C였으며, 전 기간을 통하여 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 이에 대하여 탱크 출구의 수온은 33~48°C로 탱크 온도보다 높았으며, 초기 온도가 40~50°C 범위로 후반부의 32~40°C보다 높은 것으로 나타났다.

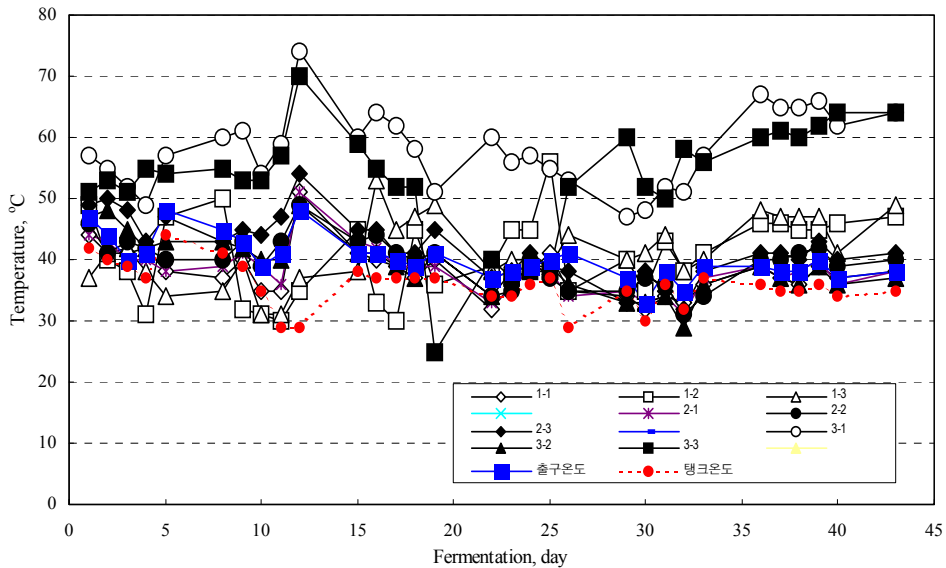


Fig. 16. Temperature profile of exit water in water tank during fermentation

4. 결론

시멘트 블록조 발효상을 축조하고, 활엽수 톱밥 (참나무 위주), 침엽수 톱밥 (낙엽송), 낙엽류 (소나무와 플라타너스 낙엽), 볏짚, 산야초류 등 5종을 발효재료로 사용하였다. 발효첨가제로는 요소, 발효용 부숙비료, 석회 등을 첨가하고, 전체 함

수율을 55~60%로 조절하여 발효시켰으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 동절기발효시, 침엽수재 톱밥의 경우 퇴적 7일~10일 만에 42℃까지 온도가 상승하였으며, 최고온도는 발효시작 21일 만에 48℃까지 상승하였다. 이러한 온도 수준이 약 10일 정도 경과되다가 26일이 지나면서 감소하였다. 발효 퇴적 90일이 지나면서 34℃의 온도로 레벨 오프되었으며, 겨울철이란 조건으로 인하여 발효상 온도는 48℃ 이상 올리지 못하였다. 활엽수 톱밥의 경우에는 퇴적 14일 만에 48℃까지 온도가 상승하였으며, 24일째까지 최고온도 수준(약 50℃ 전후)을 유지하다가 28일이 지나면서 다시 감소하였다. 활엽수 톱밥의 발효상 온도 변화를 침엽수 톱밥의 발효시와 비교하였을 때 활엽수의 발열이 2℃ 정도 높았으며, 온도의 유지 기간에 있어서는 활엽수 톱밥 쪽이 10~14일로서 침엽수 톱밥의 8~12일보다 길게 나타났다.

2) 하절기 발효에서는 퇴적 즉시 온도가 상승하였으며, 침엽수재 톱밥은 활엽수재에 비해 완만하게 온도가 증가하였다. 이후 15일간 계속 증가하여 중층부에서는 퇴적 14일째 최고온도인 64℃에 달하였고, 상층부는 퇴적 10일 만에 55℃, 하층부는 퇴적 18 일째 42℃의 온도에 달하였다. 활엽수재 톱밥은 온도 상승이 침엽수재 톱밥보다 매우 빨라 퇴적 5일 만에 중앙부에서 최고온도인 74℃에 달하였으며, 하층부 및 상층부도 각각 67℃ 및 47℃로 높은 온도를 나타냈다. 그 이후부터 1개월간은 서서히 42~52℃의 범위까지 감소되었다. 산야초 하절기 발효 실험은 발효 시작 2일만에 상부 38℃, 중·하부 80℃까지 온도가 급격한 상승을 보였으나, 그 후 급격히 온도가 하강하여 발효 6일만에 30℃로 낮아졌다.

3) 재료별 혼합비에 따른 발열지속시간 및 발효특성을 살펴본 결과, 낙엽류-짚-산야초 조합의 발열특성이 가장 열등하였으며, 이들을 겨울철에 실시하였을 경우에는 0~15℃ 정도로 발열온도가 대기온도를 약간 상회하는 정도에 그쳤다. 한편 침엽수재 톱밥만을 사용한 경우 최고온도 60~65℃, 평균온도 40~50℃, 유지기간이 14일 정도로서 그다지 좋지 않았다. 활엽수재 톱밥을 사용한 경우 최고온도 65~74℃, 평균온도 40~50℃를 나타냈으며, 발효첨가제의 비율에서 요소를 종전의 10 kg에서 15 kg으로 올리고 발효용 부숙비료를 15 kg에서 20 kg으로 증가시킨 결과 최고온도 80~90℃, 평균온도 50~60℃, 유지기간이 20~30일 정도로 늘어났다. 침엽수재 톱밥의 경우, 온도 상승이 활엽수재에 비해 완만하게 증가하였으며,

15일간 계속 증가하여 중층부는 퇴적 14일째 최고온도인 64℃에 달하였고, 상층부는 퇴적 10일 만에 55℃, 하층부는 퇴적 18일째 42℃의 가장 높은 온도를 나타냈다. 한편 침엽수 톱밥-활엽수 톱밥을 50:50으로 혼합한 경우 최고온도 58~60℃, 평균온도 35~55℃ 정도로 침엽수 단독보다는 좋은 결과를 보여주었다. 한편 활엽수재톱밥-산야초 (50:50)의 경우, 최고온도 58~60℃, 평균온도 50~55℃를 나타냈으며, 유지기간 또한 활엽수 톱밥 단독 발효구와 마찬가지로 20~30일 정도로 늘어나는 결과를 얻었다.

이상의 결과를 정리하면 활엽수재 톱밥 단독 및 침·활엽수 톱밥구가 가장 좋았으며, 발효온도에서도 최고온도 60~90℃, 최저온도 40℃전후, 평균온도 50~60℃를 20~30일간 유지하였다. 이 때의 첨가제는 발효재료 1 톤에 대하여 요소 15 kg, 발효용 부숙비료 20 kg, 석회 10 kg, 함수율 55%이었다.

4) 발효재료의 함수율이 발효에 미치는 영향을 조사한 결과, 함수율이 낮은 45%의 경우는 10일째 46℃의 최고온도를 나타냈는데 반하여, 함수율 55% 과일은 발효시작 16일 만에 최고온도인 74℃까지 상승하였으며, 50℃까지는 급격한 저하를 보였고 그 이후 40~55℃ 범위로 서서히 감소되어 가장 좋은 발효결과를 보여주었다. 함수율 65%는 14일째 55℃의 최고온도를 보였으며, 함수율 55% 및 65% 처리에서는 발효열이 55℃의 최고온도가 되면서 하강하기 시작하였으며, 함수율 45% 처리구는 40℃ 전후의 온도가 장시간 유지되는데 그쳤다.

5) 최적 발효 조건에서 온수 탱크의 온도 변화를 측정된 결과, 활엽수 톱밥+산야초 (50:50)를 혼합한 재료의 경우, 측정 부위에 따라 온도가 큰 편차를 보이고 있었다. 대체적으로 중부와 상부의 온도가 높았으며, 하부 및 표층의 온도가 낮았다. 탱크의 출구 및 내부온도를 45일간 측정된 결과 탱크 온도는 30~45℃를 나타냈으며, 전 기간을 통해 거의 유사한 결과를 보여주고 있었다. 탱크 출구의 수온은 33~48℃로 탱크온도보다 높았으며, 발효 초기의 온도가 40~50℃ 범위로 발효 후 반기의 32~40℃보다 높은 것으로 나타났다.

제 3 절 발효열 이용 열교환기 개발

1. 서론

가. 연구배경

유사 이래 인류는 여러 가지 형태의 에너지원을 이용하였으며, 특히 16세기 산업혁명 이후 엄청난 양의 에너지를 사용하여 현재에 이르렀다. 최근에 발표되는 자료를 보면 현재 인간이 가진 기술로는 향후 20년 이내 에너지 수요와 공급에 있어 불균형이 시작되고 50년 이내에는 에너지가 고갈될 것으로 예측하고 있다. 특히 우리나라와 같은 자원이 빈약한 나라에서는 과거 오일쇼크와 같은 위기를 만날 때마다 큰 충격을 받을 확률이 많기 때문에 신속한 대체에너지 개발이 이루어져야 하며, 환경문제로 인한 지구 생태계의 변화에도 주의를 기울여야 한다. 우리가 현재 사용하고 있는 석유, 석탄 등과 같은 화석에너지가 연소 후에 많은 양의 CO₂를 대기로 방출하고 이것이 지구 복사열을 차단하여 지구의 온도가 증가한다. 온실효과에 따른 해수면의 상승과 태평양에서 일어나는 엘니뇨는 우리가 경계해야 할 대상이며 화석에너지가 아닌 다른 대체에너지의 개발이 필요하다.

더욱이 오늘날 기름값 상승에 따른 문제점은 대체에너지의 필요성을 절실히 느끼게 해 줄 뿐 아니라 대체에너지의 개발을 적극적인 관심을 가지도록 독려할 때인 듯싶다. 환경과 에너지의 두 가지 측면을 모두 만족시킬 수 있는 대체에너지원의 개발은 우리의 미래 생존과도 직결된 중대 관심사이다.

대체에너지란 석탄, 석유, 원자력 및 천연가스가 아닌 태양에너지, 바이오매스, 풍력, 소수력, 연료전지, 석탄의 액화, 가스화, 해양에너지, 폐기물에너지 및 기타로 구분되고 있고 이외에도 지열, 수소, 석탄에 의한 물질을 혼합한 유동성 연료를 의미한다. 그러나 실질적인 대체에너지란 넓은 의미로는 석유를 대체하는 에너지원을, 좁은 의미로는 신·재생에너지원을 나타낸다. 우리나라에서는 미래에 사용될 대체에너지로 석유, 석탄, 원자력, 천연가스가 아닌 에너지로 11개 분야를 지정하였고 세분하여 보면 아래와 같다.

구분	대체에너지
재생에너지 8개 분야	태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지
신 에너지 3개 분야	연료전지, 석탄액화·가스화 수소건전지

태양광 발전은 무한정, 무공해의 태양 에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 기술이다. 태양광발전의 일반적인 특성은 무한정, 무공해의 태양 에너지를 이용하므로 연료비가 불필요하고, 대기오염이나 폐기물 발생이 없으며, 발전 부위가 반도체소자이고 제어부가 전자 부품이므로 기계적인 진동과 소음이 없으며, 운전 및 유지 관리에 따른 비용을 최소화 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 그러나 태양 전지는 가격이 비싸 많은 태양광 발전시스템의 건설에는 초기 투자가 요구되므로 상용 전력에 비하여 발전 단가가 높고, 일사량에 따른 발전량 편차가 심하므로 안정된 전력 공급을 위한 추가적인 건설비 보완이 필요한 단점이 있다.

태양열 발전은 무공무진한 태양열 에너지를 이용하는 기술로 아직까지 전 세계적으로 태양 에너지 연구는 주택의 난방 및 급탕 시스템, 온수기, 농·수산물 건조기, 저가 집열기 및 소규모 태양광발전 등이 주류를 이루고 있으며, 태양열 발전에 관한 연구는 발전에 필요한 고온 획득 방법과 고온 재료 개발 등이 문제가 되어 큰 진전을 보지 못하고 있다.

풍력 발전은 어느 곳이나 산재되어 있는 무공해, 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없고, 국토를 효율적으로 이용할 수 있으며, 대규모 발전 단지의 경우에는 발전 단가도 기존의 발전 방식과 경쟁 가능한 수준의 신 에너지 발전 기술이다. 그러나 우리나라와 같이 바람을 이용할 수 있는 환경이 적은 곳에서는 대규모 발전 시스템을 구성하기에는 부적합하다.

소수력 발전은 공해가 없는 청정에너지로서 많은 부존량이 확인되어 있으며, 다른 대체 에너지원에 비해 높은 에너지 밀도를 가지고 있기 때문에 개발 가치가 큰 부존자원으로 평가되어지고 있으나 환경 파괴 등의 악영향을 초래 할 수 있다는 점에서 개발에 반대하고 있는 실정이다.

지열은 지구 내부에서 표면을 거쳐 외부로 나오게 되는 열을 말하며, 이러한 지열은 열전도에 의해서나 가스, 온수 및 화산분출 등에 의해 유출되는데, 그 양은 지역적으로 크게 다르지만 지구의 모든 표면에서 방출된다. 엄밀히 말해 지열 에너지는 재생이 불가능한 에너지원이지만 지구 자체가 가지고 있는 에너지이므로 굴착하는 깊이에 따라 잠재력은 거의 무한하다고 할 수 있다. 발전 비용이 비교적 저렴하고 운전 기술도 간단하며, 공해물질 배출이 없고, 가동률이 높으며 잉여열을 지역에너지로 이용할 수 있다는 장점과는 달리 지열 발전이 가능한 지역이 한정되어 우리나라는 적격지가 드물고, 다시 보충할 수 없어 재생 불가능한 에너지이며, 땅의 침전이 있을 수 있으며 지중상황 파악이 곤란하다는 단점이 있다.

해양에너지(해양 온도차 발전)은 열대 부근의 바다는 태양열로 데워진 해수면과 수심 600~700m의 바닷물 사이에 20℃ 이상 온도차가 있다는 것에서 출발한다. 가열된 바닷물을 파이프라인으로 끌어 증기를 만드는 장치에 보내면 뜨거운 바닷물이, 끓는점이 낮은 암모니아나 프레온을 증기로 만들고, 이 증기의 힘으로 터빈을 돌려 발전한다. 터빈을 돌리고 난 증기는 심해의 찬 바닷물로 생각해서 다시 유체로 만들어 계속 사용한다. 터빈을 나온 증기는 심해에서 펌프로 퍼 올려진 냉수로 열교환기에서 응축되어 부산물로 담수를 얻게 한다. 이러한 직접접촉 열교환 방식은 그 효율이 높아 더 많은 전력을 생산하는 장점이 있으나 에너지 변환 효율이 낮고 시설비가 많이 드는 단점이 있다.

폐기물 에너지란 사업장 또는 가정에서 발생하는 가연성 폐기물 중 에너지 함량이 높은 폐기물을 열분해에 의한 오일화 기술, 성형고체연료의 제조기술, 가스화에 의한 가연성 가스 제조기술 및 소각에 의한 열회수 기술 등의 가공·처리 방법을 통해 고체 연료, 액체 연료, 가스 연료, 폐열 등을 생산하고, 이를 산업생산 활동에 필요한 에너지로 이용될 수 있도록 한 재생에너지이다. 이 방법은 비교적 단기간 내에 상용화가 가능하며, 폐기물 자원의 적극적인 에너지자원으로의 활용으로 인류 생존권을 위협하는 폐기물 환경문제의 해소가 가능하다는 특징이 있다.

연료전지는 수소와 산소가 가진 화학적 에너지를 직접 전기 에너지로 변환시키는 전기화학적 장치로서 수소와 산소를 양극과 음극에 공급하여 연속적으로 전기를 생산하는 새로운 발전 기술이다. 연료 전지 발전 시스템은 수소를 함유한 일반 연료(LPG, LNG, 메탄, 석탄가스 메탄올 등)로부터 연료 전지가 요구하는 수소를 많이 포함하는 가스로 변환하는 연료 개질 장치, 연료 개질 장치에서 들어오는 수소와 공기 중의 산소로 직류 전기와 물 및 부산물인 열을 발생시키는 연료 전지 본체, 그리고 연료 전지에서 나오는 직류를 교류로 변환시키는 전력 변환 장치로 구성된다. 이와 같은 기본적인 장치 외에도 플랜트의 효율을 높이기 위해서는 연료 전지 반응에서 생기는 반응열과 연료 개질 과정에서 나오는 폐열 등을 이용하는 장치가 부수적으로 필요하다.

수소에너지는 미래의 청정에너지원 가운데 하나이다. 수소가 미래의 궁극적인 대체에너지원 또는 에너지매체로 꼽히고 있는 것은 현재의 화석연료나 원자력 등이 따를 수 없는 장점을 갖고 있기 때문이다. 또한 수소는 연소시 극소량의 질소가 생성되는 것을 제외하고는 공해물질이 배출되지 않으며, 직접 연소를 위한 연료 또는 연료전지 등의 연료로 사용이 간편하다. 또 무한정인 물을 원료로 해 제

조할 수 있으며 가스나 액체로 쉽게 저장 수송할 수 있는 장점이 있다. 게다가 산업용 기초소재에서부터 일반연료, 자동차, 비행기, 연료전지 등 현재의 에너지시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에 응용돼 미래의 에너지시스템에 가장 적합한 에너지원으로 평가되고 있는 것이다.

바이오매스는 원래 생태학의 용어로서 생물량 또는 생체량이라고 번역되어 있다. 이것은 살아 있는 동물·식물·미생물의 유기물량(보통 건조중량)을 의미한다. 따라서 생태학의 용어법에서는 나무의 줄기 뿌리, 잎 등이 대표적인 바이오매스이며 죽은 유기물인 유기계 폐기물은 바이오매스가 아니라고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 생태학의 용어법과는 달라서 산업계에서는 유기계 폐기물도 바이오매스에 포함시키는 것이 보통이다.

바이오매스의 연료화, 즉 바이오매스를 에너지원으로 이용하는 방법에도 여러 가지가 있다. 바이오매스의 직접연소는 바이오매스 중에서 가장 저위의 것이다. 그러나 오늘날세계 연간 에너지공급량의 1/6은 바이오매스로부터 이며 벌채된 수목의 약 절반이 요리용과 난방용으로 이용되고 있는 것도 사실이다. 고품연료는 가장 오래된 이용방법이지만 연료의 균질성과 에너지 밀도가 높고, 취급이 용이하다는 점 등에서 보면 연료의 유체 쪽의 이점이 많다. 그러기 위해서 여러 가지의 전환기술이 개발되어 있는데 가장 보급되어 있는 것이 알콜화(액체화)와 메탄의 생성(가스화)이다. 바이오매스는 다소간의 수분을 포함하며 유기계 폐기물 중에서도 분뇨, 폐액 등은 특히 수분이 많다. 이 수분을 증발시키려면 대량의 에너지가 필요하다. 그러나 메탄의 발효는 물을 포함하는 유기물로부터 연료에 해당되는 부분을 기체의 형태로 농축, 분리할 수가 있기 때문에 분리 그 자체에는 에너지가 필요하지 않다. 또 알콜 발효에서는 물보다 비등점이 낮은 알콜을 증류, 분리하기 때문에 물을 증발시키는 것보다는 에너지 절약적이다.

연료화의 대상이 되는 주요 바이오매스 자원에는 목질계(특히 고성장 수종), 당질계(사탕수수, 과실폐액), 전분질계(고구마, 강냉이), 에너지식물, 초본식물, 수생식물, 해조, 조류, 광합성 세균, 유기계 폐기물, 농산폐기물, 임산폐기물, 축 산폐기물, 산업폐기물, 도시 쓰레기 등이 있다.

바이오매스 자원은 재생이 가능하며 또 광역분산형의 자원으로서 지역 에너지원으로서 주목받고 있다. 에너지원으로서 바이오매스의 장점은 에너지를 저장할 수 있다는 점, 재생이 가능하다는 점, 물과 온도조건만 맞으면 지구상 어느 곳에서나 얻을 수 있다는 점, 최소의 자본으로 이용기술의 개발이 가능하다는 점, 그리고

원자력의 이용 등과 비교할 때 환경 보존적으로 안전하다는 점 등이다. 한편 단점으로는 넓은 면적의 토지가 필요하다는 점, 토지 이용 면에서 농업과 경합한다는 점, 자원 부존량의 지역차가 크다는 점, 비료, 토양, 물 그리고 에너지의 투입이 필요하다는 점, 문란하게 개발하면 환경파괴를 초래한다는 점 등을 들 수 있다. 또 바이오매스의 생산, 수집, 운반, 변환에 관련한 기술적 문제, 경제성과 에너지 발란스(투입에너지에 대한 산출에너지의 비율)에 대한 문제도 있다. 이와 같이 바이오매스 에너지의 이용 및 개발은 대단히 많은 문제를 안고 있으며, 또 바이오매스 자원의 부존량은 지역에 따라 큰 차이가 있다. 바이오매스를 에너지원으로 이용하는 방법에도 여러 가지가 있다. 바이오매스에서 온 유기물을 연료화 할 경우의 변환방법과 생성물을 정리하여 Table. 1에 나타내었다.

Table 1. 생물자원의 연료화 방법과 생성물

건조 바이오매스 (목재, 폐재)	직접연소 가스화	열, 전기, 가스연료, 메탄올, 암모니아, 기름, 가스, 목탄
함수 바이오매스 (분뇨, 폐액, 수초)	혐기성 발효 화학적 분해	메탄, 에탄올
탄수화물 (당분, 전분, 셀룰로오스)		에너지 식물 바이오매스, 물
추출, 분해 광합성 반응		탄화수소, 유지 수소

바이오매스에 대한 연구는 Jean Pain의 연구가 대표적으로 Jean Pain의 다양한 이용방법을 바탕으로 선진국에서도 그 연구 사례가 있으나 대부분의 연구가 바이오매스를 1차적인 연소재료로서 이용하는 기술의 개발에 주안점을 두고 연구를 진행하고 있으며, 바이오매스의 발효열을 이용한 연구 사례는 극히 드문 실정이다. Jean Pain의 연구의 주된 방법은 Fig. 1에서 바이오매스를 이용하여 온수 공급 및 난방과 그 부산물로 발생하는 암모니아 가스를 이용하여 연료로 사용할 수 있는 방법으로 단순히 발효열을 회수 할 수 있는 파이프 배관을 하고 수집된 바이오매스를 퇴적하여 발효열을 회수 할 수 있는 장치를 만들고 그와 더불어 암모니아 가스를 회수하는 장치를 만드는 극히 단순한 시스템으로 구성되어 있다. Fig. 2, 3, 4는 Jean Pain의 바이오매스 열교환기 이용 실례를 보여주고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 바이오매스의 발효를 통해서 바이오매스 내부의 온도는 외부온도 10℃

에서 60°C (140 oF) 정도의 온도가 유지될 수 있으며, 이때 발생된 열을 Fig. 4에서 처럼 비닐하우스 혹은 난방, 온수공급용으로 이용할 수 있다.

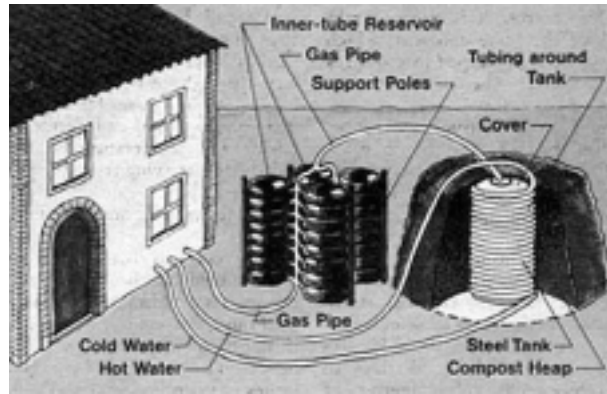
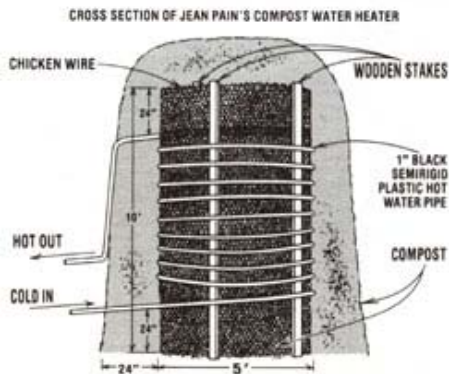


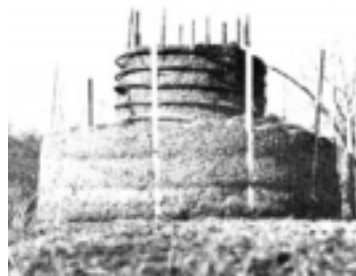
Fig. 1. Jean Pain's Biomass Usage Idea



(a) Biomass Heat Exchanger Schematics



(b) Biomass Heat Exchanger interior Line



(c) Biomass Heat Exchanger Setup

Fig. 2. Jean Pain's Biomass Experimental Setup

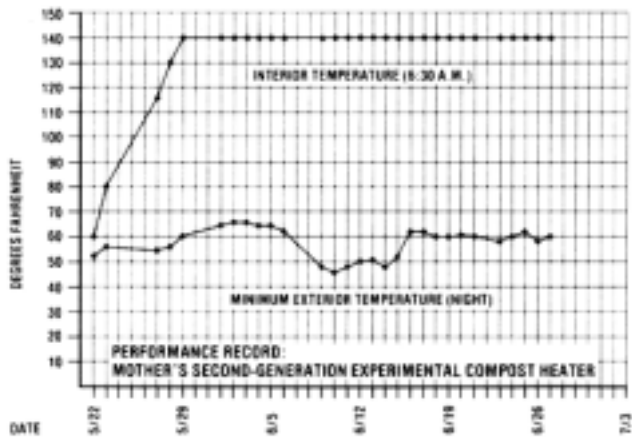


Fig. 3. Temperature Profile in Biomass Dump



Fig. 4. Greenhouse Heated by Biomass Heat Exchanger

나. 연구 개요

본 연구에서는 바이오매스를 이용하여 발효에 의해 발생하는 열을 열교환기를 통해서 회수하는데 주 목적이 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 바이오매스로부터 생성된 열을 회수함으로써 농촌 가정의 난방, 작물재배를 위한 온실 난방, 혹은 회수된 열을 이용하여 가정용 온수로 이용할 수 있는 열 교환 시스템을 개발하는데 목표를 두고 바이오매스의 온도가 일정할 경우, 열교환기 파이프 직경, 파이프간의 간격, 파이프 재질 등 여러 가지 변수들에 대한 최적의 열 교환시스템의 설계 자료를 얻도록 하였으며, 실험을 통해서는 침엽수재 톱밥, 낙엽, 산야초, 퇴비 등 다양한 재료의 바이오매스의 발효를 통한 최적의 재료선정, 그리고 열교환기 시스템을 제작 실험을 통한 검증 및 향후 최적 설계를 위한 자료를 얻고자 하는데 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

본 연구는 바이오매스를 이용한 열교환 시스템이 충분한 이용가치가 있음을 알 수 있으며, 본 연구를 통하여 실증할 수 있었다. 기존의 연구 사례가 부재한 관계로 다양한 바이오매스 재료로부터 적절한 원료 배합 조건 및 구조적인 개선점을 중점적으로 실험을 통하여 실증을 하였으며, 본 연구에서는 실험을 수행한 7개의 바이오매스 재료 배합 및 열교환기 구조로부터 평판형 열교환기의 최적 구조를 얻을 수 있었다(Table 2 참조). 3년간의 실험으로 톱밥의 배합이 많은 경우 톱밥만의 발효일 경우보다 발효 온도가 더 높았으며 발효 지속시간이 오래되었다. 8개의 실험을 통하여 발효열 교환기를 온수로 이용시 35℃ 이상의 온수를 최대 60일 이상 공급할 수 있었으며, 난방시스템으로 이용시 겨울의 물탱크 단열 및 바이오매스의 단열을 통하여 내부 공급 수온이 20℃ 이상의 난방수를 공급할 수 있었다. 실험 데이터를 수집한 이후에도 바이오매스의 온도는 지속적으로 50-60℃의 온도를 유지하고 있었으며, 이를 바탕으로 바이오매스 열교환기를 상용화하였을 경우 가정의 온수 및 난방수로 최대 4개월까지도 가능할 수 있을 것이다. 아울러 Table 3에서 보듯이 농가 실용을 위해서는 나선형 배관구조 보다는 평판형 배관구조가 제작 설치 및 해체가 용이했으며, 성능 또한 우수한 것으로 나타났다.

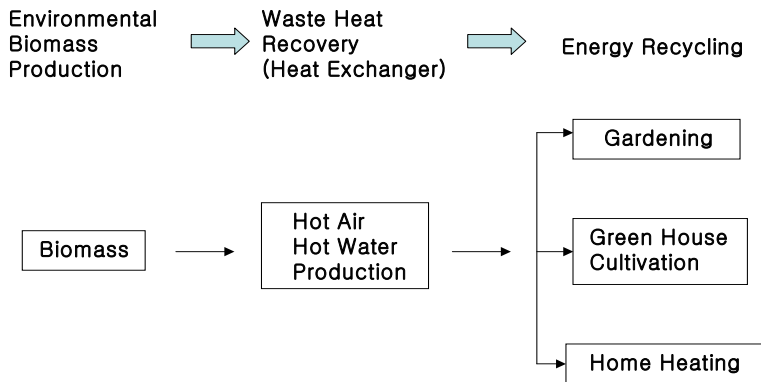


Fig. 5. Energy Recovery and Recycling of Biomass

Table 2. Experimental Setups of Biomass Heat Exchanger

구 분	2003년			2004년			2005년	
	HX1	HX2	HX3	HX4	HX5	HX6	HX7	HX8
바이오매스재료	침엽수	활엽수	산야초	나뭇잎+뽕 짚+산야초	침엽수+ 활엽수	활엽수+뽕 짚+산야초	산야초+활 엽수톱밥	산야초+활 엽수톱밥
열교환기형식	나선형	나선형	나선형	나선형	나선형	나선형	나선형	평판형
파이프직경(mm) I.D,O.D	30,42	30,42	30,42	30,42	30,42	30,42	25,32	15,20

Table 3. Biomass Heat Exchanger Experimental Summary

구분 \ 년도	2003 (HX1,2,3)	2004 (HX4,5,6)	2005 (HX7,8)
실 험	침엽수재, 활엽수재, 그리고 산야초의 세 가지 재료에 의한 발효로부터 발생하는 열을 회수하기 위해서 각각의 열교환기가 계산에 의한 결과를 바탕으로 설계 제작되었으며, 40일 동안 발효에 따른 발열량과 그 지속성을 관찰하였다.	나뭇잎, 침엽수+활엽수, 활엽수+산야초를 바이오매스로 선택하여, 열전대를 통해 내부 열을 관찰하였으며, HX 6의 경우 발효 시 부수적으로 발생하는 가스 중 매탄가스(CH ₄)를 회수하여 실용성 여부를 분석하였다	내부 난방을 위한 HX7과 온수 급탕용 HX8, 2개의 열교환기 장치로 실험이 이루어 졌으며, HX7은 하루에 1회 20-30분 실험 하였고, HX8은 24시간 순환펌프를 작동시켜 언제든지 온수공급이 가능할 수 있는 환경이 이루어지도록 하였다.
결과고찰	물 온도 11°C 상승에 대해, 25044000J(5986kcal)의 열 회수효과를 얻었다. 향후 해결 할 문제는 발열의 지속적 유지로서, 이를 위해서는 충분한 바이오매스의 공급을 필요로 하며 (10,000 kg), 수치해법과 같은 효과를 위해서는 일정 표면온도유지를 위한 최적 발효법의 개발이 필요하다. 또한, 현재 열교환기로부터 원활한 열 회수를 위해서 열교환기 파이프라인의 분산을 요구한다. 즉, 두개 혹은 세 개의 나선형 라인이 더욱 효과적 일 것이라 생각된다	이론적 해석을 통한 최적 설계로 제작된 열교환기와, 재료의 파쇄에 의한 발효의 원활로 만족 할만한 결과를 얻었다. 또한, 소형 온수기의 실용 모델링을 시도하여 태양열 온수기 에너지 공급량을 50%이상 증가하는 것으로 확인되었다. 매탄 회수를 위한 연구는, 다량의 이산화탄소 발생이 관찰된 바 혐기성 발효를 조합한 형태의 보완이 필요한 것으로 판단된다. 그리고 보온을 위한 보완장치의 필요성이 분석되었다.	HX7의 실험 결과 열교환기파이프 직경의 감소가 열 교환에 유리함을 확인할 수 있었으며, 동절기 20°C정도의 난방용 온수공급이 가능함을 알 수 있었다. 최적 설계를 통해 유량이 0.2 kg/s이상 이고 직경이 0.02 m이하 인 최적인 조건을 만족시키도록 설계 제작 된 평판형 열교환기 HX8은 40여일이상을 24시간 40°C 정도의 온수 능력을 갖는 것으로 관찰되었다.
비교분석	3차년도 HX8을 통한 폐열 회수량은 연속적으로 물 순환이 이루어지도록 운용을 하였기에 전체 열용량은 판단하기 어려우나 1, 2차년도의 발효 열교환기 및 HX7을 훨씬 능가하는 열용량을 갖는 것으로, 2차년도 개발 비교 대상이었던 태양열 온수시스템의 1일 급탕부하(4-6인 가족 기준)인 15,600 kcal/day를 훨씬 뛰어 넘는 열 교환 성능을 발휘하는 것으로 알 수 있다.		
결 론	1,2,3차년도 다양한 종류의 바이오매스와 다른 성분비로 실험을 하였으며, 실험 결과 산야초의 양이 일부 섞인 활엽수 바이오매스 파쇄 재료의 성분비를 유지하는 것이 이상적인 배합임이 분석 되었으며, 연구의 최종 목표인 실제실연을 통하여 바이오매스 발효 열교환기는 농가의 난방 및 온수 급탕이 충분하게 가능 한 것을 알 수 있었고, 향후 상품화를 위해서는 나선형 형태보다는 평판형 시스템이 유리할 것으로 판단된다.		

2. 바이오매스 열교환기

가. 바이오매스를 이용한 열교환기(Heat Exchanger)의 이론적 해석

1) 관내에서 열전달에 대한 이론적 배경

관내에서의 유체 유동에 따른 온도 및 유속 분포는 Fig. 6에서 운동량과 에너지 평형을 근거로 분석하게 되며, 이에 따른 힘의 평형과 에너지 평형식에서 온도 분포식의 유도과정은 다음과 같다.

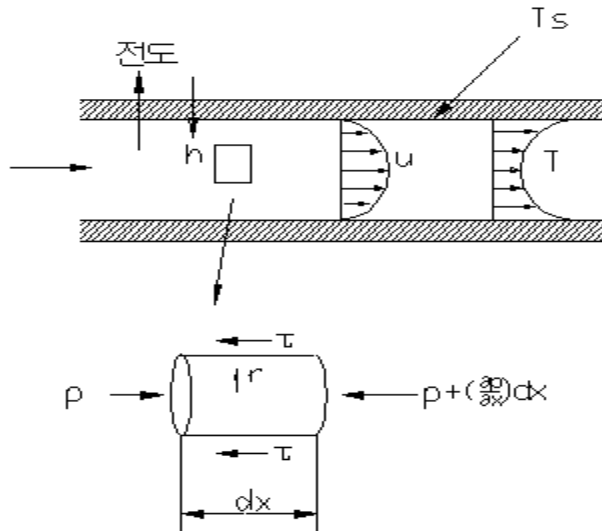


Fig. 6. Cylindrical Pipe and Control Volume

우선 힘의 평형으로부터

$$p\pi r^2 - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx\right)\pi r^2 - \tau(2\pi r)dx = 0, \quad \tau = -\mu \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$\therefore -\frac{\partial p}{\partial x} dx\pi r^2 = -\mu \frac{\partial u}{\partial r} 2\pi r dx = 0, \quad \frac{du}{dr} = \frac{1}{2\mu} \left(r \frac{\partial p}{\partial x}\right)$$

적분하면,

$$\therefore u = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right) r^2 + C$$

$r = r_0$ 일 때 $u = 0$ 인 경계조건을 사용하면, $u = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - r_0^2)$

관중심의 속도를 u_0 라 하면 $\frac{u}{u_0} = 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2$

에너지 평형을 고려하면, $(q_{cond})_{IN} + (q_{conv})_{IN} = (q_{cond})_{OUT} + (q_{conv})_{OUT}$

i) 전도에 의한 열전달

$$(q_{cond})_{IN} = -kA_r \frac{\partial T}{\partial r} = -k(2\pi r dx) \frac{\partial T}{\partial r}$$

$$(q_{cond})_{OUT} = -k2\pi(r+dr)dx \left[\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right]$$

ii) 대류에 의한 열전달

$$(q_{conv})_{IN} = \rho T c u \pi [(r+dr)^2 - r^2] = \rho c u T (2\pi r dr)$$

$$(q_{conv})_{OUT} = \rho c u \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) 2\pi r dr$$

$$\text{정리하면, } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{u}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x}$$

유체 유동의 완전히 발달된 난류영역에서 속도분포는 $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)=0$ 을 만족한다. 그러나 온도분포의 경우에는 온도분포가 x 에 따라 변할지라도 다음과 같이 정의된 무차원 온도분포가 x 에 따라 변하지 않는 경우를 열적으로 완전히 발달되었다고 정의한다.

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

이 조건은 일반적으로 관내에서 일정 열유속 (q'') 또는 균일 표면온도(T_s)에서 만족된다. 따라서 온도비인 $\frac{T_s - T}{T_s - T_m}$ 은 x 에 대해 독립이고, r 에 대하여 기대되는 $\frac{T_s - T}{T_s - T_m}$ 의 도함수 또한 x 에 대해 독립이다. 따라서,

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \Big|_{r=r_0} = \frac{-\partial T / \partial r|_{r=r_0}}{T_s - T_m} \neq f(x)$$

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_o}, \quad q'' = h(T_s - T_m) \text{의 관계를 사용하면,}$$

$$\frac{h}{k} \neq f(x)$$

따라서 일정한 물성치를 가지고 있는 유체는 열적으로 완전 발달된 유동의 경우 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 국소대류계수 h 는 x 에 대하여 독립이고 일정하다.

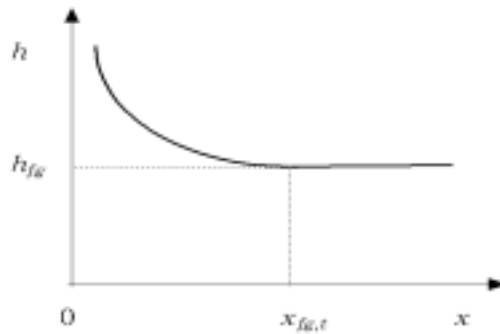


Fig. 7. Heat Transfer Coefficient on Flow Direction

앞의 식들에서 평균온도는 내부유동에서 대단히 중요한 값이다. x 에 대한 T_m 의 변화를 알아야만 한다. Fig. 8에 보이는 것되 같이 T_m 의 변화는 유동에서 에너지 평형을 적용함으로써 구할 수 있다.

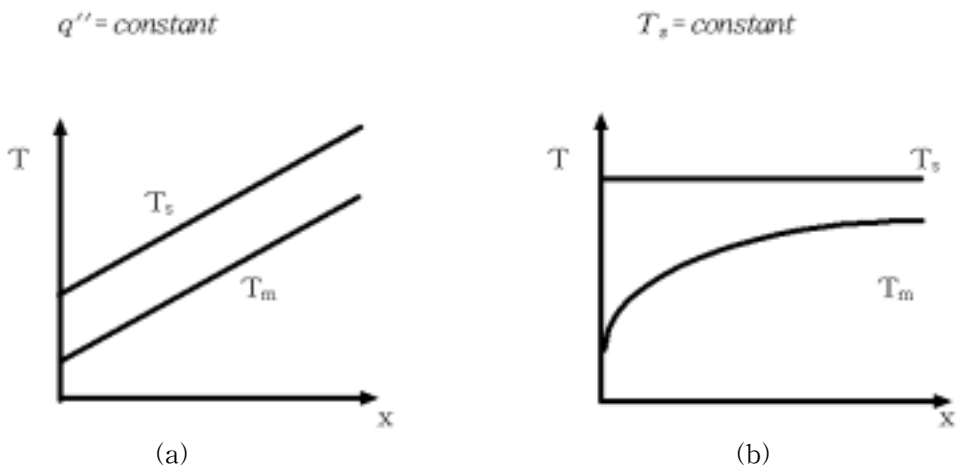


Fig. 8. Temperature Profile on Flow Direction

① Constant surface heat flux ($q'' = constant$) : 일정 열유속

완전 발달 영역에서 h 와 q'' 가 일정하기 때문에 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t}, \quad q'' = constant$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] \right|_{fd,t} = 0 \text{ 를 정리하여 } \frac{\partial T}{\partial x} \text{ 를 구하면,}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} - \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} + \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t}$$

$$\text{또 } \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t} \text{ 이므로,}$$

$$\text{따라서 } \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t}$$

앞에서 유도한 에너지 방정식으로부터, 일정 열 유속일 경우

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} \text{ 이다. (} q'' = \text{const. 라면 유체의 평균온도는 } x \text{ 에 따라}$$

선형적으로 증가한다. 즉, $\frac{\partial T}{\partial x} = \text{const.}$) 따라서,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{u}{a} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \text{ 이다.}$$

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

V 는 평균 속도이므로,

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

다음의 경계조건을 사용하면

$$\text{경계조건: } \quad \text{i) } r = r_o \text{에서 } T = T_o, \quad \text{ii) } r = 0 \text{에서 } \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$\text{따라서, } T = T_s - \frac{2V}{a} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left(\frac{3r_o^3}{16} + \frac{r^4}{16r_o^2} + \frac{r^2}{4} \right)$$

축 방향으로 전달되는 열에너지를 구하면

$\dot{m} \cdot C \cdot T_m = (A_c \cdot \rho \cdot V) C \cdot T_m = \int_{A_c} u \cdot \rho \cdot C \cdot T \cdot dA_c$ 이다. 따라서,

$$T_m = \frac{1}{A_c \cdot V} \int_{A_c} u \cdot T \cdot dA_c$$

앞의 두 식

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} \text{ 와 } T = T_s - \frac{2V}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left(\frac{3r_o^3}{16} + \frac{r^4}{16r_o^2} + \frac{r^2}{4} \right) \text{ 를}$$

정리하여 적분하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 따라서,

$$T_m = T_s - \frac{11}{96} \frac{2V}{\alpha} \frac{dT_m}{dx} r_o^2$$

$$q'' = h(T_s - T_m) \text{ 에서 } T_s - T_m = \frac{11}{96} \frac{2V}{\alpha} \frac{dT_m}{dx} r_o^2 \text{ 이므로}$$

$$q'' = h(T_s - T_m) = h \frac{11}{96} \frac{2V}{\alpha} \frac{dT_m}{dx} r_o^2$$

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{48}{11} \frac{q'' \cdot \alpha}{h \cdot V}, \quad \frac{dT_m}{dx} \frac{T_{m,o} - T_{m,i}}{X} \text{ 이므로 (선형적으로 변화하므로)}$$

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

② Constant surface temperature($T_s = constant$): 일정 벽온도

일정 벽온도일 경우에는 $\frac{dT_s}{dx} = 0$ 이므로 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 를 구하면,

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{fd,t} = \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} - \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \left. \frac{dT_s}{dx} \right|_{fd,t} + \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_m} \right) \left. \frac{dT_m}{dx} \right|_{fd,t}$$

이므로 $\frac{dT_s}{dx} = 0$ 이다. 따라서,

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

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

$q = \dot{m}C(T_{m,o} - T_{m,i})$ 에서 $dq = q_s'' \cdot p \cdot dx = \dot{m} \cdot C \cdot dT_m$ 이다. 따라서,

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

$$\text{정리하면, } T_{m,o} = T_s - \exp\left[-\frac{h \cdot X \cdot A}{\dot{m} \cdot C}\right] (T_s - T_{m,i})$$

2) 유도된 식의 실제 적용

본 계산에 사용된 열교환기의 계산 모델은 Fig. 9에 보이고 있으며, 본 모델을 바탕으로 계산을 수행한 예를 보면 다음과 같다.

① 유량 $Q = 4 \text{ l/min}$ 일 때 $Q = 4000 \text{ cm}^3/\text{min} = 0.004 \text{ m}^3/\text{min} = 0.000067 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 경우 질량 유량 (\dot{m}) = ρQ 이므로 하여 T_s (표면온도) = 60°C 일 경우 구하려는 $T_{m,o}$ (출구의 평균온도)을 대략 $50\sim 60^\circ\text{C}$ 사이로 가정하여 T_f (막온도)을 구하면 T_f 에 따른 물의 물성치를 구할 수 있다. ($T_{m,i}$ (입구의 평균온도)를 10°C 로 가정하면) 다음과 같은 평균온도를 구할 수 있다.

$$\therefore T_f = \frac{T_{surf} + T_\infty}{2} \approx 35^\circ\text{C} \text{의 물의 } \rho, C_p, \mu, Pr \dots \text{을 구할 수 있다.}$$

$$\therefore \dot{m} = \rho Q = 993.95 \text{ kg/m}^3 \times 0.000067 \text{ m}^3/\text{s} = 0.067 \text{ kg/s}$$

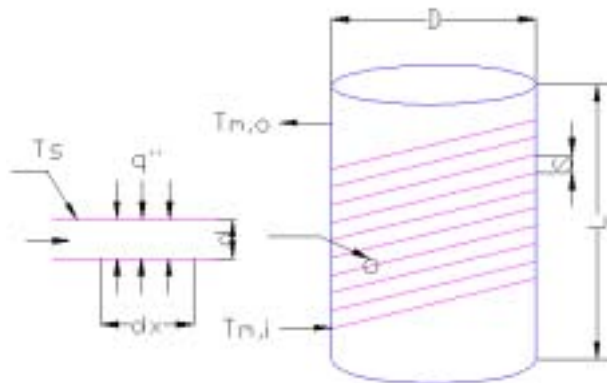


Fig. 9 Numerical Model for Biomass Heat Exchanger

질량 유량으로부터 레이놀즈수를 구할 수 있다.

($d = 0.05\text{m}$, μ 는 $T_f=35^\circ\text{C}$ 일 때 7.235×10^{-4} 로 가정하면)

$$\therefore Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d \cdot \mu} = \frac{4 \times 0.067}{\pi \times 0.05 \times 7.235} \times 10^4 = 2358.18$$

또한 파이프 사이의 간격 (N을 10회라 가정하고 X는 감겨진 파이프의 총 길이, 파이프 간격을 20cm로 원통의 둘레에 감으면)

$$\therefore S = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{X} = \frac{\pi \times 1 \times 10}{31.5} = 26 \text{ cm}$$

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot d}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.3} \text{에서 } h \text{를 구하면}$$

(Pr은 Tf=35℃에서 4.825로 가정, k(파이프의 열전도계수)=0.33w/m·℃이다.)

$$\text{따라서 } h = \frac{0.023 \cdot k \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.3}}{d} = \frac{0.023 \times 0.33 \times (2358.18)^{0.8} \times 4.825^{0.3}}{0.05} = 121.45 \text{ w/m}^2 \text{℃}$$

$$\frac{T_s - T_{m,o}}{T_s - T_{m,i}} = \exp\left[-\frac{P \cdot X \cdot h}{\dot{m} \cdot C_p}\right] = \frac{60 - T_{m,o}}{60 - 10} = \exp\left[-\frac{\pi \times (0.05) \times (31.5) \times (121.45)}{(0.067) \times (4174)}\right] \text{이다.}$$

$$\therefore T_{m,o} = 54.17 \text{℃}$$

② 민감도 분석

a. \dot{m} =일정, d를 변화($\dot{m}=0.067$, d = 0.005 ~ 0.1)

◇ 난류식(Dittus & Boelter식)을 사용한 경우

Ts	TmI	P	Pr	X	v	Re	Nu	h	m	Qp	d	Tmo	q
60	10	0.016	4.825	31.5	3.43	23581.8	4.606	304	0.067	4174	0.005	30.8	5817
60	10	0.031	4.825	31.5	0.857	11790.9	4.606	152	0.067	4174	0.01	30.8	5817
60	10	0.047	4.825	31.5	0.381	7860.59	4.606	101.3	0.067	4174	0.015	30.8	5817
60	10	0.063	4.825	31.5	0.214	5895.44	4.606	76	0.067	4174	0.02	30.8	5817
60	10	0.079	4.825	31.5	0.137	4716.35	4.606	60.8	0.067	4174	0.025	30.8	5817
60	10	0.094	4.825	31.5	0.095	3930.3	4.606	50.67	0.067	4174	0.03	30.8	5817
60	10	0.11	4.825	31.5	0.07	3368.82	4.606	43.43	0.067	4174	0.035	30.8	5817
60	10	0.126	4.825	31.5	0.054	2947.72	4.606	38	0.067	4174	0.04	30.8	5817
60	10	0.141	4.825	31.5	0.042	2620.2	4.606	33.78	0.067	4174	0.045	30.8	5817
60	10	0.157	4.825	31.5	0.034	2358.18	4.606	30.4	0.067	4174	0.05	30.8	5817
60	10	0.173	4.825	31.5	0.028	2143.8	4.606	27.64	0.067	4174	0.055	30.8	5817
60	10	0.188	4.825	31.5	0.024	1965.15	4.606	25.33	0.067	4174	0.06	30.8	5817
60	10	0.204	4.825	31.5	0.02	1813.98	4.606	23.38	0.067	4174	0.065	30.8	5817
60	10	0.22	4.825	31.5	0.017	1684.41	4.606	21.71	0.067	4174	0.07	30.8	5817
60	10	0.236	4.825	31.5	0.015	1572.12	4.606	20.27	0.067	4174	0.075	30.8	5817
60	10	0.251	4.825	31.5	0.013	1473.86	4.606	19	0.067	4174	0.08	30.8	5817
60	10	0.267	4.825	31.5	0.012	1387.16	4.606	17.88	0.067	4174	0.085	30.8	5817
60	10	0.283	4.825	31.5	0.011	1310.1	4.606	16.89	0.067	4174	0.09	30.8	5817
60	10	0.298	4.825	31.5	0.01	1241.15	4.606	16	0.067	4174	0.095	30.8	5817
60	10	0.314	4.825	31.5	0.009	1179.09	4.606	15.2	0.067	4174	0.1	30.8	5817

난류식 적용

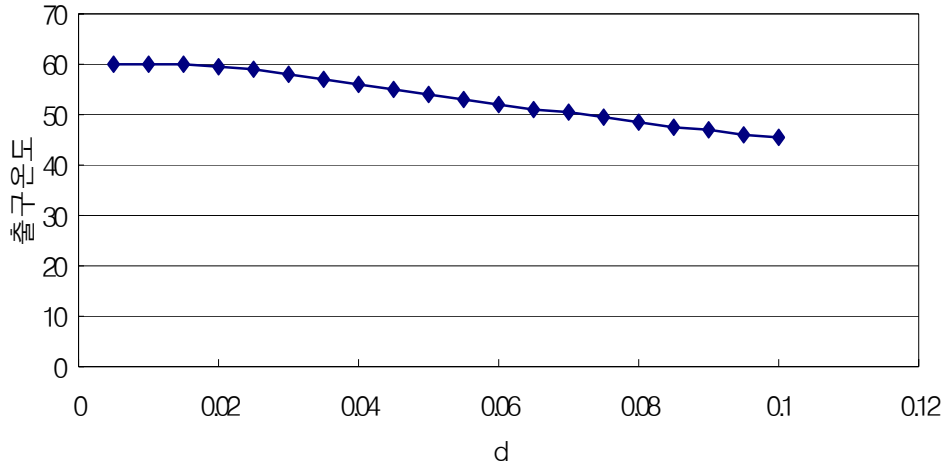


Fig. 10. Effect of Pipe Diameter on Outlet Temperature
(Turbulent Flow, Dittus & Boelter's Correlation)

◇ 층류식(Sieder & Tate식)을 사용한 경우 계산 값들

Ts	Tm,i	P	Pr	X	v	Re	Nu	h	m	Cp	d	Tm,o	q
60	10	0.016	4.8	31.5	3.43	23582	4.61	304	0.067	4174	0.005	30.8	5816.91
60	10	0.031	4.8	31.5	0.86	11791	4.61	152	0.067	4174	0.01	30.8	5816.91
60	10	0.047	4.8	31.5	0.38	7860.6	4.61	101.3	0.067	4174	0.015	30.8	5816.91
60	10	0.063	4.8	31.5	0.21	5895.4	4.61	76	0.067	4174	0.02	30.8	5816.91
60	10	0.079	4.8	31.5	0.14	4716.4	4.61	60.8	0.067	4174	0.025	30.8	5816.91
60	10	0.094	4.8	31.5	0.1	3930.3	4.61	50.67	0.067	4174	0.03	30.8	5816.91
60	10	0.11	4.8	31.5	0.07	3368.8	4.61	43.43	0.067	4174	0.035	30.8	5816.91
60	10	0.126	4.8	31.5	0.05	2947.7	4.61	38	0.067	4174	0.04	30.8	5816.91
60	10	0.141	4.8	31.5	0.04	2620.2	4.61	33.78	0.067	4174	0.045	30.8	5816.91
60	10	0.157	4.8	31.5	0.03	2358.2	4.61	30.4	0.067	4174	0.05	30.8	5816.91
60	10	0.173	4.8	31.5	0.03	2143.8	4.61	27.64	0.067	4174	0.055	30.8	5816.91
60	10	0.188	4.8	31.5	0.02	1965.1	4.61	25.33	0.067	4174	0.06	30.8	5816.91
60	10	0.204	4.8	31.5	0.02	1814	4.61	23.38	0.067	4174	0.065	30.8	5816.91
60	10	0.22	4.8	31.5	0.02	1684.4	4.61	21.71	0.067	4174	0.07	30.8	5816.91
60	10	0.236	4.8	31.5	0.02	1572.1	4.61	20.27	0.067	4174	0.075	30.8	5816.91
60	10	0.251	4.8	31.5	0.01	1473.9	4.61	19	0.067	4174	0.08	30.8	5816.91
60	10	0.267	4.8	31.5	0.01	1387.2	4.61	17.88	0.067	4174	0.085	30.8	5816.91
60	10	0.283	4.8	31.5	0.01	1310.1	4.61	16.89	0.067	4174	0.09	30.8	5816.91
60	10	0.298	4.8	31.5	0.01	1241.1	4.61	16	0.067	4174	0.095	30.8	5816.91
60	10	0.314	4.8	31.5	0.01	1179.1	4.61	15.2	0.067	4174	0.1	30.8	5816.91

◇ 난류식(Dittus와 Boelter식)과 층류식(Sieder & Tate식)

Ts	TmI	P	Pr	X	v	Re	Nu	h	m	Op	d	Tmo	q
60	10	0.016	4.825	31.5	3.433	23581.8	116.1	7662.7	0.067	4174	0.005	60	13982.9
60	10	0.031	4.825	31.5	0.858	11790.9	66.683	2200.5	0.067	4174	0.01	59.98	13977.1
60	10	0.047	4.825	31.5	0.381	7860.59	48.21	1060.6	0.067	4174	0.015	59.82	13932.7
60	10	0.063	4.825	31.5	0.215	5895.44	38.299	631.94	0.067	4174	0.02	59.43	13823.2
60	10	0.079	4.825	31.5	0.137	4716.35	32.038	422.9	0.067	4174	0.025	58.81	13651.1
60	10	0.094	4.825	31.5	0.095	3930.3	27.69	304.59	0.067	4174	0.03	58.03	13431.7
60	10	0.11	4.825	31.5	0.07	3368.82	24.477	230.78	0.067	4174	0.035	57.13	13180.7
60	10	0.126	4.825	31.5	0.054	2947.72	21.997	181.48	0.067	4174	0.04	56.17	12911.3
60	10	0.141	4.825	31.5	0.042	2620.2	20.019	146.81	0.067	4174	0.045	55.17	12632.9
60	10	0.157	4.825	31.5	0.034	2358.18	18.401	121.45	0.067	4174	0.05	54.17	12352.1
60	10	0.157	4.825	31.5	0.034	2358.18	4.606	30.399	0.067	4174	0.05	30.8	5816.91
60	10	0.173	4.825	31.5	0.028	2143.8	4.606	27.636	0.067	4174	0.055	30.8	5816.91
60	10	0.188	4.825	31.5	0.024	1965.15	4.606	25.333	0.067	4174	0.06	30.8	5816.91
60	10	0.204	4.825	31.5	0.02	1813.98	4.606	23.384	0.067	4174	0.065	30.8	5816.91
60	10	0.22	4.825	31.5	0.017	1684.41	4.606	21.714	0.067	4174	0.07	30.8	5816.91
60	10	0.236	4.825	31.5	0.015	1572.12	4.606	20.266	0.067	4174	0.075	30.8	5816.91
60	10	0.251	4.825	31.5	0.013	1473.86	4.606	19	0.067	4174	0.08	30.8	5816.91
60	10	0.267	4.825	31.5	0.012	1387.16	4.606	17.882	0.067	4174	0.085	30.8	5816.91
60	10	0.283	4.825	31.5	0.011	1310.1	4.606	16.889	0.067	4174	0.09	30.8	5816.91
60	10	0.298	4.825	31.5	0.01	1241.15	4.606	16	0.067	4174	0.095	30.8	5816.91
60	10	0.314	4.825	31.5	0.009	1179.09	4.606	15.2	0.067	4174	0.1	30.8	5816.91

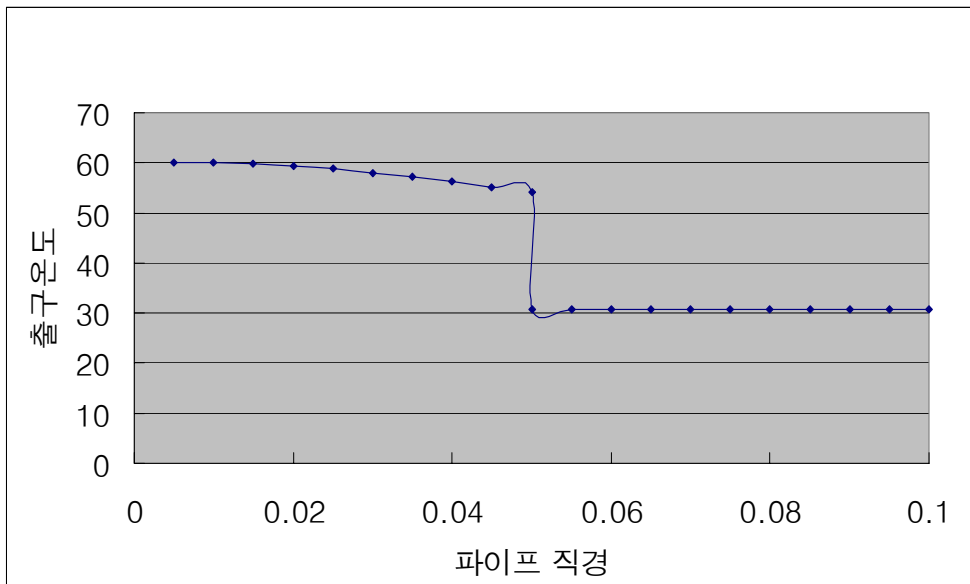


Fig. 11. Effect of Pipe Diameter on Outlet Temperature, Comparison between Dittus & Boelter and Sieder & Tate Corr.

◇ Sieder & Tate 의 층류식 과 Hausen의 층류식의 출구 온도 비교

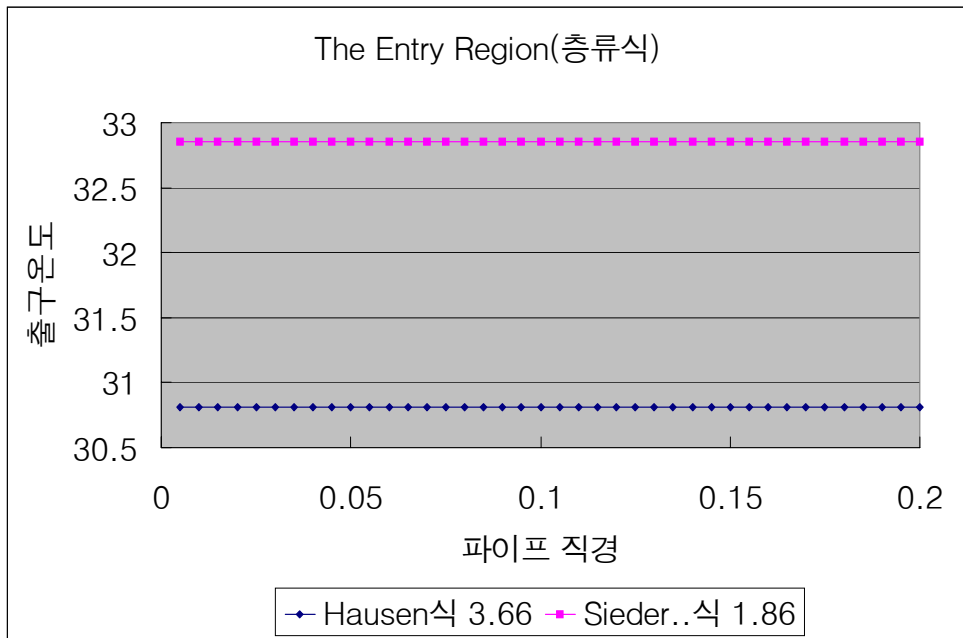


Fig. 12. Effect of Pipe Diameter on Outlet Temperature

b. d =일정, \dot{m} 을 변화($d=0.03\text{m}$, $\dot{m}=0.065 \sim 0.15$)

◇ 난류식(Dittus & Boelter식)

Ts	Tm1	P	Pr	X	v	Re	Nu	h	m	Cp	d	Tmo	q
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.09	3606.126	26.96	296.5	0.065	4174	0.03	58.05	13036.7
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.1	3883.52	26.96	296.5	0.07	4174	0.03	57.54	13891
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.11	4160.914	26.96	296.5	0.075	4174	0.03	57	14712.1
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.11	4438.309	26.96	296.5	0.08	4174	0.03	56.42	15500.2
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.12	4715.703	26.96	296.5	0.085	4174	0.03	55.82	16255.8
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.13	4993.097	26.96	296.5	0.09	4174	0.03	55.2	16979.9
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.14	5270.492	26.96	296.5	0.095	4174	0.03	54.57	17673.3
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.14	5547.886	26.96	296.5	0.1	4174	0.03	53.93	18337.4
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.15	5825.28	26.96	296.5	0.105	4174	0.03	53.29	18973.4
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.16	6102.674	26.96	296.5	0.11	4174	0.03	52.65	19582.4
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.16	6380.069	26.96	296.5	0.115	4174	0.03	52.01	20165.8
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.17	6657.463	26.96	296.5	0.12	4174	0.03	51.38	20724.8
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.18	6934.857	26.96	296.5	0.125	4174	0.03	50.75	21260.6
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.19	7212.252	26.96	296.5	0.13	4174	0.03	50.13	21774.5
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.19	7489.646	26.96	296.5	0.135	4174	0.03	49.52	22267.5
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.2	7767.04	26.96	296.5	0.14	4174	0.03	48.92	22740.7
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.21	8044.435	26.96	296.5	0.145	4174	0.03	48.32	23195.2
60	10	0.0942	5.12	31.5	0.21	8321.829	26.96	296.5	0.15	4174	0.03	47.74	23631.9

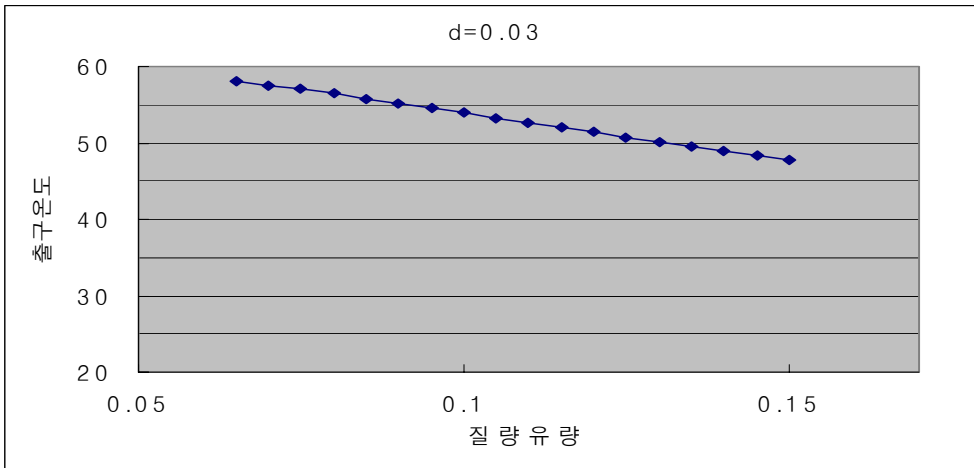


Fig. 13. Effect of Mass Flow Rate on Outlet Temperature (Turbulent Flow, Dittus & Boelter's Correlation)

◇ 층류식(Sieder & Tate식)

Ts	Tm,l	P	Pr	X	v	Re	Nu	h	m
60	10	0.094	4.83	31.5	0.007	293.31	2.243	24.7	0.005
60	10	0.094	4.83	31.5	0.014	586.61	2.826	31.1	0.01
60	10	0.094	4.83	31.5	0.021	879.92	3.235	35.6	0.015
60	10	0.094	4.83	31.5	0.028	1173.2	3.56	39.2	0.02
60	10	0.094	4.83	31.5	0.036	1466.5	3.835	42.2	0.025
60	10	0.094	4.83	31.5	0.043	1759.8	4.076	44.8	0.03
60	10	0.094	4.83	31.5	0.05	2053.1	4.29	47.2	0.035
60	10	0.094	4.83	31.5	0.057	2346.4	4.486	49.3	0.04
60	10	0.094	4.83	31.5	0.064	2639.8	4.665	51.3	0.045
60	10	0.094	4.83	31.5	0.071	2933.1	4.832	53.2	0.05

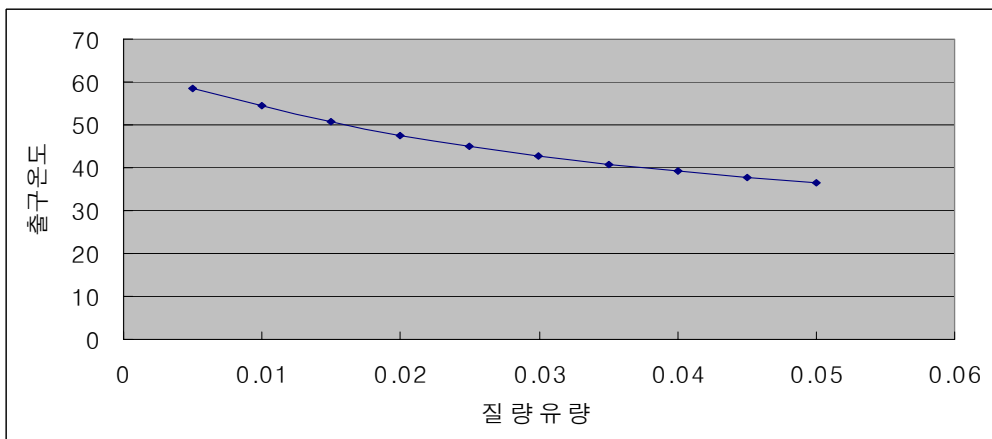


Fig. 14 Effect of Mass Flow Rate on Outlet Temperature Comparison between Dittus & Boelter and Sieder & Tate Corr.

난류와 층류식(직경=0.03일때)

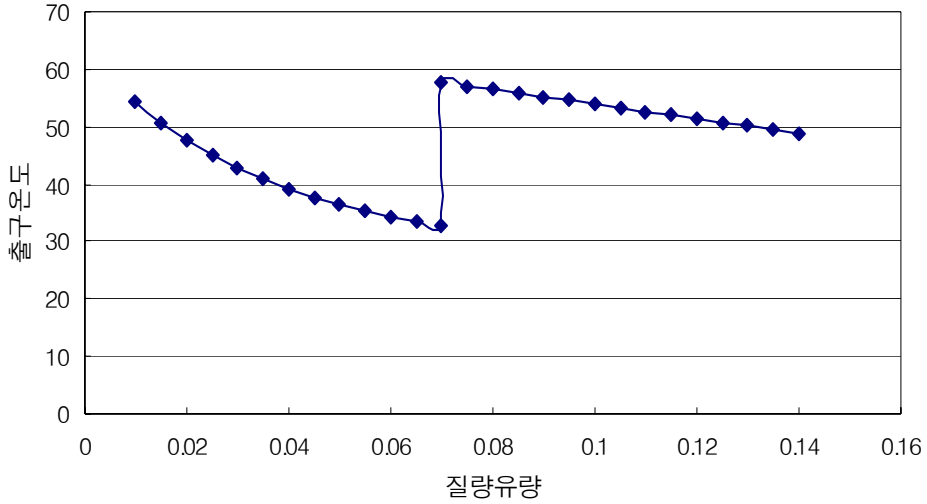


Fig. 15 Effect of Mass Flow Rate on Outlet Temperature

◇ 난류식(Dittus & Boelter식)과 층류식(Sieder & Tate식)

Ts	Tm1	P	Pr	X	v	Re	Nu	h	m	Qp	d	Tmo	q
60	10	0.094	4.825	31.5	0.014	586.61	2.826	31.084	0.01	4174	0.03	54.52	1858.26
60	10	0.094	4.825	31.5	0.021	879.92	3.235	35.582	0.015	4174	0.03	50.748	2551.26
60	10	0.094	4.825	31.5	0.028	1173.2	3.56	39.164	0.02	4174	0.03	47.581	3137.24
60	10	0.094	4.825	31.5	0.036	1466.5	3.835	42.188	0.025	4174	0.03	44.944	3646.43
60	10	0.094	4.825	31.5	0.043	1759.8	4.076	44.831	0.03	4174	0.03	42.727	4098.09
60	10	0.094	4.825	31.5	0.05	2053.1	4.29	47.195	0.035	4174	0.03	40.838	4505.09
60	10	0.094	4.825	31.5	0.057	2346.4	4.486	49.343	0.04	4174	0.03	39.207	4876.36
60	10	0.094	4.825	31.5	0.064	2639.8	4.665	51.319	0.045	4174	0.03	37.782	5218.35
60	10	0.094	4.825	31.5	0.071	2933.1	4.832	53.153	0.05	4174	0.03	36.526	5535.91
60	10	0.094	4.825	31.5	0.078	3226.4	4.988	54.869	0.055	4174	0.03	35.407	5832.71
60	10	0.094	4.825	31.5	0.085	3519.7	5.135	56.484	0.06	4174	0.03	34.404	6111.68
60	10	0.094	4.825	31.5	0.093	3813	5.274	58.011	0.065	4174	0.03	33.497	6375.11
60	10	0.094	4.825	31.5	0.1	4106.3	5.406	59.462	0.07	4174	0.03	32.674	6624.89
60	10	0.094	4.825	31.5	0.1	4106.3	26.96	296.53	0.07	4174	0.03	57.543	13891
60	10	0.094	4.825	31.5	0.107	4399.6	26.96	296.53	0.075	4174	0.03	56.996	14712.1
60	10	0.094	4.825	31.5	0.114	4692.9	26.96	296.53	0.08	4174	0.03	56.419	15500.2
60	10	0.094	4.825	31.5	0.121	4986.2	26.96	296.53	0.085	4174	0.03	55.818	16255.8
60	10	0.094	4.825	31.5	0.128	5279.5	26.96	296.53	0.09	4174	0.03	55.2	16979.9
60	10	0.094	4.825	31.5	0.135	5572.8	26.96	296.53	0.095	4174	0.03	54.57	17673.3
60	10	0.094	4.825	31.5	0.142	5866.1	26.96	296.53	0.1	4174	0.03	53.933	18337.4
60	10	0.094	4.825	31.5	0.149	6159.4	26.96	296.53	0.105	4174	0.03	53.291	18973.4
60	10	0.094	4.825	31.5	0.157	6452.7	26.96	296.53	0.11	4174	0.03	52.65	19582.4
60	10	0.094	4.825	31.5	0.164	6746	26.96	296.53	0.115	4174	0.03	52.011	20165.8
60	10	0.094	4.825	31.5	0.171	7039.3	26.96	296.53	0.12	4174	0.03	51.377	20724.8

③ 수치해석 결과의 적용

본 수치해석에 사용된 가정은 바이오매스의 표면온도나 발열량이 일정한 경우의 조건을 사용하였으므로 실제 실험에서 이 조건이 만족되지 않으면 차이가 발생할 수 있다. 이론적 해석을 통하여 열교환기의 성능에 영향을 미치는 주요인자(유량, 열교환기 직경, 열전달계수 등)의 민감도 분석을 수행하여 각 인자에 따른 영향을 평가하였고 최적 조건을 찾는 데 활용할 수 있다. 평판형 열교환기로의 변경을 위하여 실제 얼마만큼의 압력 손실이 발생하고 압력 손실을 최소화하기 위한 직경과 유동량의 관계를 분석하기 위하여 평판형 열교환기에서의 관내에서의 마찰 및 유동방향 변경에 따른 압력 손실을 다음과 같이 계산해 보았다.

관에서의 완전 개발된 난류유동에 따른 마찰에 의한 압력 강하 식은

$$\Delta p = 4f \frac{L}{D} \left(\frac{\rho U^2}{2} \right)$$

$$f = 0.079 Re^{-1/4} \quad \text{for } Re \leq 2 \times 10^4$$

$$f = 0.046 Re^{-1/5} \quad \text{for } Re > 2 \times 10^4$$

유체의 유동방향 변경(Flow Turning)에 따른 압력강하식은

$$\Delta p = K_{turn} \left(\frac{\bar{m}^2}{2\rho_L} \right)$$

여기서 K_{turn} 은 유동방향 변경에 따른 압력 손실계수이다.

나. 바이오매스 열교환기 실험

1) 열교환기 실험개요

본 연구를 위해 서로 다른 규격의 열교환기 8개가 제작 되었다. Table 4는 각각의 열교환기 구조 및 사용 바이오매스의 규격을 설명하고 있다. 표에서 볼 수 있듯이 바이오매스 열교환기는 구조적인 개선과 바이오매스 재료의 배합에 따라 서로 다른 형태의 열교환기를 제작하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 바이오매스 발효열 교환기는 계절에 따라 공급 가능한 재료를 바탕으로 실험을 수행하였기 때문에 어느 계절일지라도 재료 공급이 가능할 수 있었으며, 각 공급된 재료의 차이에 따라 발효열 교환기의 성능 및 재료 배합의 차이는 있었다.

Table 4 바이오매스 열교환기 규격

구 분	2003년			2004년			2005년	
	HX1	HX2	HX3	HX4	HX5	HX6	HX7	HX8
바이오매스재료	침엽수	활엽수	산야초	나뭇잎+ 벗짚+산 야초	침엽수+ 활엽수	활엽수+ 벗짚+산 야초	산야초+ 활엽수 톱밥	산야초+ 활엽수 톱밥
바이오매스 사용량(kg)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
배합비(%)				40:20:4 0	50:50	50:10:4 0	60:40	10:90
바이오매스규격				파쇄없 이원재 료	wood chip	길이, 직 경 각 5mm	파쇄	파쇄
파이프재질	poly ethylene	poly ethylene	poly ethylene	poly ethylene	poly ethylene	poly ethylene	poly ethylene	poly ethylene
열교환기형식	나선형	나선형	나선형	나선형	나선형	나선형	나선형	평판형
파이프직경(mm) I.D,O.D	30,42	30,42	30,42	30,42	30,42	30,42	25,32	15,20
파이프피치(mm)	65	65	100	100	100	50	100	250
파이프길이(m)	100	100	120	100	100	120	100	100
프레임규격 (가로*세로*높이)	2200*2 200 *1500	1800*1 800 *1500	2400*2 400 *1500	1800*1 800 *1500	2200*2 200 *1500	1800*1 800 *1500	1500*1 500 *1500	2000*2 000 *1500
열전달면적(m ²)	13.2	13.2	15.8	13.2	13.2	15.8	10.5	6.3
열교환기직경 (m)	2.5	2.2	2.8	2.2	2.5	2.2	2.2	

2) 열교환기 제작 및 실험 과정

Fig. 16의 개략도는 열교환기 HX 1, HX 2, 그리고 HX 3의 개략도이다. 침엽수재 톱밥(Fig. 17, 좌측), 활엽수재 톱밥(Fig. 17, 우측), 그리고 산야초(Fig. 18)의 세 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 열 회수는 수행하지 않았으며, 40일 동안 발효에 따른 발열량과 그 지속성을 관찰하였다. 활엽수재 톱밥을 사용했을 경우 역시 침엽수재일 경우와 마찬가지로 내부 온도며, 그 지속성을 관찰하였으며, 산야초를 사용하였을 경우도 마찬가지로 내부 온도를 계속 관찰하였다.

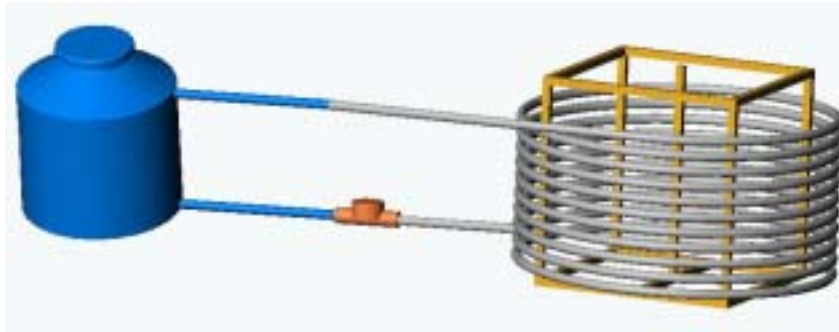


Fig.16. Experimental Schematic



Fig. 17. Experimental Setup for HX 1 and HX 2



Fig. 18. Experimental Setup for HX 3

제작된 열교환기는 이론 계산 결과를 바탕으로 최적조건을 얻도록 설계하였다. 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, $k = 0.33 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)를 사용하였다(Fig. 19). 아울러 파이프의 지지를 위해 철재 앵글을 이용하여 프레임을 제작하였다. 열교환기의 규격은 Table 4 에 정리하였다. 바이오매스의 온도 및 열교환기를 통해 배출되는 물의 온도를 측정하기 위해 K-Type ($\Phi = 1 \text{ mm}$) 열전대를 HX 1는 8개, HX 2는 8개, HX 3는 13개 삽입하였다. 열전대 삽입 위치는 Fig. 20을 기준으로 Table 5에서 7에 나타내었다. 3개의 K-Type Probe(Sheath Type, $\Phi = 1 \text{ mm}$)형 열전대가 파이프의 입출구와 물탱크 내부의 온도를 측정하기 위해서 삽입되었다.



Fig. 19. Heat Exchanger System

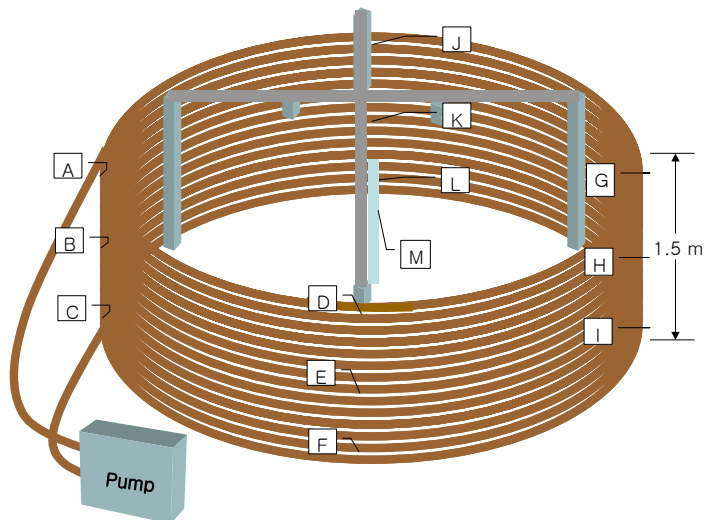


Fig. 20. Thermocouple Positions.



Fig. 21. Thermocouple Installation

Table 5. Thermocouple Position of HX I

A	136 cm	G	136 cm
B	78 cm	H	78 cm
C	6 cm	I	6 cm
E	107 cm	L	40 cm

Table 6 Thermocouple Position of HX II

A	136 cm	G	136cm
B	78 cm	H	78 cm
C	6 cm	I	6 cm
E	107cm	L	40 cm

Table 7 Thermocouple Position of HX II

A	136cm	G	136 cm
B	78 cm	H	78 cm
C	6 cm	I	6 cm
D	136 cm	J	136 cm
E	78 cm	K	78 cm
F	6 cm	L	6 cm
		M	70 cm

Fig. 22에서 볼 수 있듯이 열교환기의 유체 순환을 위해서는 8, 16, 그리고 25 LPM의 3단 으로 유량을 조절 할 수 있는 그린피스 펌프(Model : UPS 25-62 Inline Pump)가 1,000리터 용량의 Poly Ethylene 재질 물탱크와 열교환기 사이에 연결 되었다. 본 실험에서 열 회수를 원활히 하면서도 바이오매스의 발효열을 장 시간 유지 할 수 있도록 유체의 유동 속도를 최소화하기 위해서 8 LPM의 유량을 유지하도록 하며 실험을 수행하였다.



Fig. 22. Circulation Pump



Fig. 23. Switching Box

열전대의 온도를 관찰하기 위해서 Toggle switch와 Digital Thermometer로 Switching box를 만들었다. Fig. 23에 보이는 것과 같이 Switching Box를 통해서 본 실험을 수행하는 동안 온도를 계속 관찰할 수 있었다

열교환 장치 HX 4, 5, 6은 Fig. 24~26서 볼 수 있듯이 1차 년도에 설치한 윗면과 앞면만 개방된 콘크리트 구조물 안에 철재 프레임을 세우고 유체 순환용 파이프를 고정시킨 기본 구조를 하고 있다. 기본 구조물 공간에 바이오매스의 선택에 따라 실험 장치는 다음과 같이 구분된다.

HX 4(Fig. 24)은 낙엽을 바이오매스로 선택, 열교환기 제작 시 변형의 용이성과 경제적 제작 단가를 위해 XL 파이프(I.O:30mm, D.O:42mm), 피치는 10cm으로 12회 회전하였다.

HX 5(Fig. 25)는 한국의 가장 보편적인 수종인 침엽수재 톱밥을 바이오매스로 선택하였다. HX 6 (Fig. 26)는 발효의 최적 조건을 찾기 위해 산야초와 침엽수재 톱밥, 그리고 발효제와 섞어 바이오매스로 사용하여 실험하였다.

산야초는 톱밥을 얻기 위한 재료인 나무가 수년간의 성장 후 얻을 수 있는 단점이 있으므로 한국의 지리적, 기후적 특성(온대기후)를 고려하여 분포와 수급이 보장된 단년생 산야초를 바이오매스로 선택하여 실험을 하였다.

발효제의 성분과 혼합 비율은 석회, 퇴비, 비료이며 1 : 2 : 1.5 으로 하였고, 실험장치의 발효열의 용량과 성능을 측정하기 위해 HX 1과 같은 XL 파이프(I.O: 30mm, D.O: 42mm)를 유체 순환 장치로 선택하였고, 피치는 5cm로 하였다.

Fig. 23에 보이는 상단의 앵글과 용기는 발효 시 부수적으로 발생하는 가스 중 (자료 삽입 가능성 보여줌) 매탄가스(CH₄)를 이용한 제 2차적 에너지원 회수를 위해 제작된 구조물이다. HX 4의 개략적 구성도는 Fig. 24에 나타냈으며, 파이프의 회전직경은 2.2m, 높이는 1.5m이며, 물 저장탱크와 펌프의 조합 구성으로 되어 있다.

유체는 펌프를 이용하여 열교환장치의 하단부로 유입되어 발효열을 흡수하여 상단으로 나와 저장탱크의 남은 유체와 혼합되는 시스템을 하고 있다. 유체는 경제적으로 저렴하고 수급이 용이하며 뛰어난 열 회수율을 얻을 수 있는 물을 사용하였다. 열 회수의 공학적 해석을 위해 300리터의 물을 유지하며 실험하였다. 실험 장치 HX 4, 5, 6은 지속적인 발효를 유지하기 위해 정기적으로 충분한 물을 제공하였고, 발효열의 외부 출입을 막고 성능 향상을 위해 비닐로 상단과 옆면을 막았다.



Fig. 24. Heat Exchanger 4



Fig. 25. Heat Exchanger 5



Fig. 26. Heat Exchanger 6

HX 6의 개략적 구성도는 Fig. 27에 나타냈으며, 파이프의 회전반경은 1.1m, 높이는 1.5m이며, 물 저장탱크와 펌프의 조합 구성으로 되어있다. 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 300리터의 물을 유지하며 실험하였다.

Fig. 28에서 볼 수 있듯이 메탄(CH₄)회수를 목적으로 열교환기 내부에 네 개의 파이프가 심어졌다. 메탄회수를 목적으로 열교환기를 설치하고, 바이오매스를 퇴적한 후에 공기 접촉을 최대한 줄이도록 윗면은 Fig.28에서 볼 수 있듯이 비닐로 완전히 덮었으며, 메탄회수를 위해 심어놓은 네 개의 파이프가 메탄회수 탱크에 연결 되도록 하였다.

Fig. 29은 HX 4, 6의 유체 순환을 위해서 8, 16, 25 LPM의 3단으로 유량을 조절 할 수 있는 그린퍼스 펌프(Model : UPS 25-62 Inline Pump)를 나타냈고 1,000 리터 용량의 Poly Ethylene 재질의 물탱크와 연결되어 열교환기를 구성하고 있다. 실험에서 펌프는 발효열을 최적으로 회수 할 수 있도록 유체의 유동 속도를 16 LPM(liter per minute)의 유량을 사용 하였다.

실험 장치 HX 4, 5, 6은 지속적인 발효를 유지하기 위해 정기적으로 충분한 물을 제공하였고, 발효열의 외부 출입을 막고 성능 향상을 위해 비닐로 상단과 옆면을 막았다.

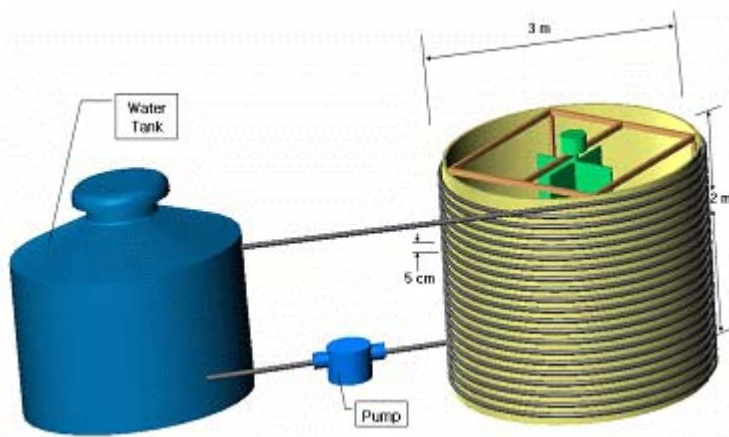


Fig. 27. Design of Heat Exchanger 6

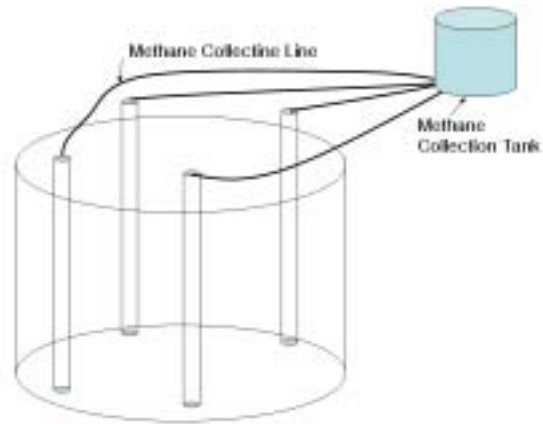


Fig. 28. Experimental setup to Collect Methane Gas .(HX 6)



Fig 29. Circulation Pump



Fig. 30. Prototype Silo of Industrial Heat Exchanger



Fig. 31. Ceiling of Silo



Fig. 32. Wood Chip Maker



Fig. 33. Gas Analyzer

Fig. 30은 HX 4, 5, 6 의 각 장치의 실험적 결과를 토대로 개선하여 열교환기 시스템의 원활한 설치 및 분해를 위하여 농가 보급시 경제성과 제작-해체의 용이성을 기본으로 시스템을 제작, 앞으로 농가에 보급될 시제품, 열교환 장치의 싸이로이다. Fig. 31은 시제품에서 발생하는 메탄가스 회수를 목적으로 만든 가스회수구이다. 이 싸이로형 시제품은 향후 메탄회수를 위한 시설 및 내부의 바이오매스를 자체 교반 할 수 있도록 교반장치가 추가로 설치될 예정이다.

Fig. 32은 HX 6 열 교환 시스템의 바이오매스의 재료를 길이 5mm 직경, 5 mm 로 파쇄하기 위하여 설계 제작된 파쇄기이다. 그림에 보이는 것처럼 HX III을 위해 활엽수, 벚집, 산야초등을 입구에 넣어 바이오매스 재료들을 동일한 크기로 절단하여 50 : 10 : 40(활엽수: 벚집: 산야초)의 비율로 혼합하여 퇴적하였다.

Fig. 33은 본 실험장치에서 배출되는 가스의 성분 및 용량을 확인하기 위하여 사용된 가스분석장치(KEMIK corporation, Model G4.18)이다. 본 분석장치는 CO₂, CH₄ 등 여러 가스를 실시간으로 분석할 수 있으며, 메탄 량을 전체 가스에 대한 함유량(%), 폭발성 용량인 5% 대비 용량 등, LEL % 용량으로 표시할 수 있다.

HX 4, 5, 6의 열교환기의 성능 비교 평가를 위해 K-Type(Sheath Type, $\Phi = 1\text{mm}$)의 열전대를 각각 사용하였고, HX 4, 5는 실험의 열전대 온도를 관찰하기 위해 Toggle Switch와 Digital Thermometer를 이용하여Switching box(Fig. 33)을 만들어 실험하였다.



Fig. 34. Switching box (HX 4 5)

HX 4의 열전대의 위치는 Fig. 35에 나타냈고, 총 16개의 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다. HX 5의 열전대의 위치는 Fig. 36에 나타냈고 총 12개의 열전대를 이용하여 온도를 측정하였다.

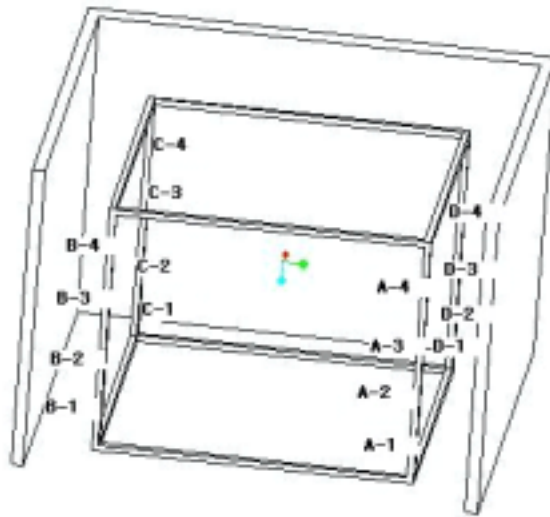


Fig. 35. Position of Thermocouple (HX 4)

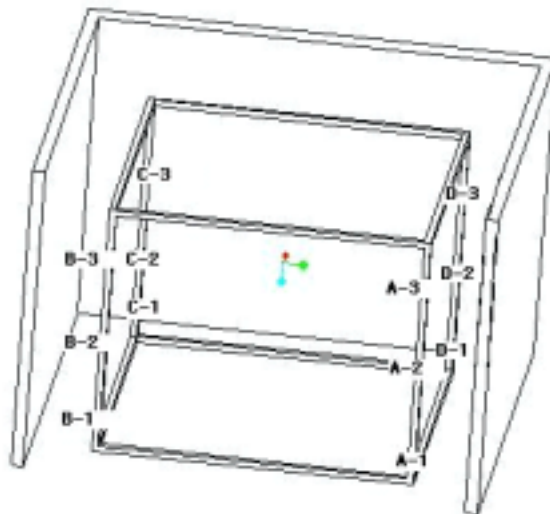


Fig. 36. Position of Thermocouple (HX 5)

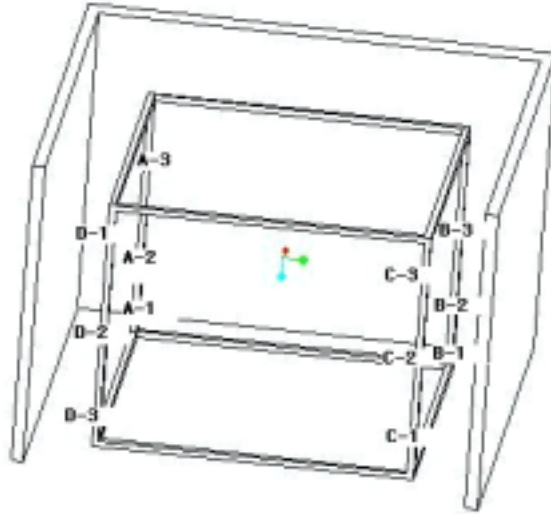


Fig. 37. Position of Thermocouple (HX 6)

Fig. 34는 HX 6의 열전대 위치를 나타낸 것이다. 열전대 A-1~3과 B-1~3은 콘크리트 구조물의 뒤쪽 벽면에 근접한 위치에 부착하였고, 열전대 C-1~3과 D-1~3은 콘크리트 구조물의 열린 부분인 앞쪽에 부착하였다. 각 열교환기의 성능 비교 평가를 위해 HX 1, 2와 동일한 K-Type(Sheath Type, $\phi = 1\text{mm}$)의 열전대를 사용하였고, 본 실험의 열전대 온도를 측정하기 위해 3개의 5채널 Digital Thermometer를 이용하여 Switching box(Fig. 38)를 만들어 온도를 측정하였다.



Fig. 38. Switch Box (HX 6)

HX 4 는 농가에서 파쇄 등의 별다른 가공 없이 바로 원재료 그대로를 사용했을 경우를 위하여, 나뭇잎, 벚꽃, 그리고 산야초를 원재료 그대로 층을 이루도록 각 재료를 섞지 않고 층층으로 쌓았다. HX 5 의 경우에는 침엽수와 활엽수를 50 : 50의 비율로 섞어 퇴적하였다. HX 6 의 경우 HX 4 와 5 에서의 발효진행 속도와, 지속 시간을 향상시킬 목적으로 Fig. 28 에서 볼 수 있듯이 설계 제작된 파쇄기를 이용해 바이오매스 재료의 길이와 직경을 5 mm이하로 만들었다. 아울러 HX 6 의 경우에는 열교환기의 열전달 성능을 향상시킬 목적으로 나선형 열교환기의 파이프간의 피치를 5 mm로 줄였다. 아울러 HX 6 의 바이오매스는 재료 사이의 빈 공간을 없앨 목적으로 퇴적 시 각각의 층을 퇴적 후 매번 압축이 되도록 밟아 주었다. 이로 인해 HI 4, 과 5에서 볼 수 있었던 바이오매스의 침하현상은 관찰되지 않았다.

HX 7과 8은 열교환장치 실연을 통하여 실용가능성을 확인하고 상품화가 가능하도록 다양한 가능성을 평가하기 위해 실연하였다. 실험연구를 통해 다음과 같은 연구목표가 가능하도록 실험 장치를 구성하였다.

- 열 교환 장치 제작·운용 후 모델화
- 농가설치 후 실제운용 및 문제점 분석
- 열 교환 장치 개량 및 상품화

3차년도 실험장치는 내부 난방을 위한 HX 7과 온수 급탕용 HX 8 등 2개의 열교환기 장치로 실험이 이루어 졌으며, HX 7은 Fig. 39에서 볼 수 있듯이 실제 가정을 모델링하기 위하여 4평 규모의 방을 난방하기 위한 실연을 위하여 실연용 방 옆에 제작 설치하였다. 아울러 방안의 난방을 위하여 내부에 Fig. 40에서 볼 수 있듯이 라이에이터를 연결하여 바이오매스로부터 가열된 난방수가 방안의 난방을 위해 공급되도록 하였다. HX 7은 1,2 차 년도에 수행했던 같은 구조의 내경 25 mm의 파이프를 나선형으로 제작하였으며 파이프철재 프레임 위에 유체 순환용 파이프를 고정시킨 구조를 하고 있으며, 파이프 피치를 50 mm로 하였고, HX 7의 각각의 구성 및 치수는 Fig. 41과 같다. HX 8은 실제 농가에 제작 보급이 용이하면서도 이전의 열교환 능력을 보강하기 위하여 Fig.42와 같이 사각기둥형 철재 프레임(2,000 mm × 2,000 mm × 1,500 mm)규격으로 제작되었으며 프레임 사이에 순환 파이프를 고정하여 구성하였고, 그 구성 및 규격은 Fig. 43과 같다. 특히, HX 8은 농가의 설치 및 해체의 용이성에 중점을 두고 설계하였다. 바이오매스의 선택에 따른 실험 장치의 구분은 다음과 같다..

HX 7 (Fig. 39)은 나뭇잎, 톱밥, 산야초를 바이오매스로 선택, 열교환기 제작 시 변형의 용이성과 경제적 제작 단가를 위해 XL 파이프(ID : 25mm, OD : 32mm), 피치는 (50 mm)로 19회 회전하였다. HX 8 (Fig. 42)은 톱밥을 주로 하고 산야초 파쇄 재료를 구성하여 실험 하였다. 산야초는 한국의 지리적, 기후적 특성(온대기후)을 고려하여 분포와 수급이 보장된 일년 생 산야초를 바이오매스로 선택하여 실험을 하였다. 발효제의 성분과 혼합 비율은 석회, 퇴비, 비료이며 1 : 2 : 1.5 으로 하였고, 실험장치의 발효열 용량과 성능을 측정하기 위해 HX 7과 같은 XL 파이프를 유체 순환 장치로 선택하였고, 피치는 50 mm로 하였다.

Fig. 43은 HX 8의 구성 시설로 발효열에 의해 가열된 온수를 이용한 샤워시설이다. 유체는 펌프를 이용하여 열교환장치의 하단부로 유입되어 발효열을 흡수하여 상단으로 나와 저장탱크의 남은 유체와 혼합되는 시스템을 하고 있다. 유체는 경제적으로 저렴하고 수급이 용이하며 뛰어난 열 회수율을 얻을 수 있는 물을 사용하였다. 열 회수의 공학적 해석을 위해 300리터의 물을 유지하며 실험 하였다. 아울러 HX 7은 하루에 1회씩 20- 30분의 운용시간을 정하여 실험에 임하였으나, HX 8은 실험 초기 단계부터 지속적으로 열 교환이 가능한지를 판단하기 위하여 24시간 순환펌프가 작동되어 언제든지 온수공급이 가능할 수 있는 환경이 이루어지도록 하였다.



Fig. 39. Heat Exchanger I (HX 7)



Fig. 40. Radiator (HX 7)

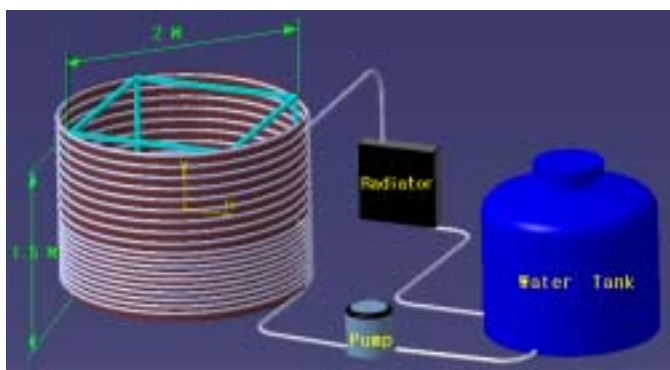


Fig. 41. Design of Heat Exchanger I (HX 7)



Fig. 42. Biomass Dump (HX 8)

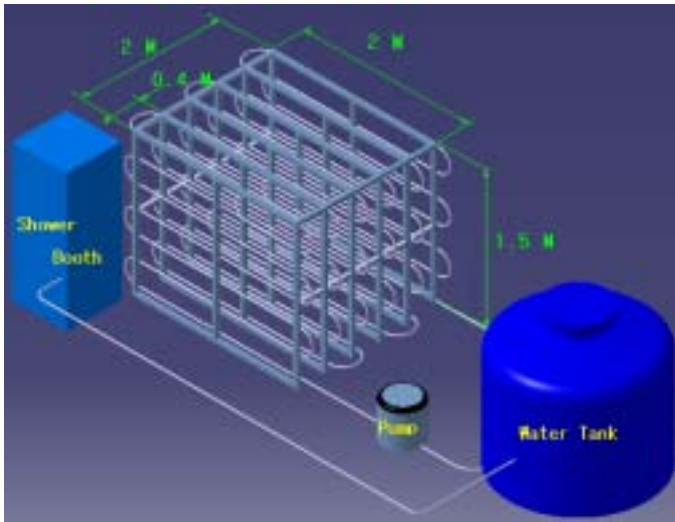


Fig. 43. Design of Heat Exchanger (HX 8)

실험 장치 HX 7, 8은 지속적인 발효를 유지하기 위해 정기적으로 충분한 물을 제공하였고, 발효열의 외부 출입을 막고 성능 향상을 위해 비닐로 상단과 옆면을 막았다.

Fig. 44는 HX 7의 열전대 위치를 나타낸 것으로 총 12개의 열전대를 사용하여 온도를 측정하였고, Fig. 45은 HX 8 열전대 위치를 보여 준 것으로 총 9개의 열전대를 이용하여 온도를 관찰하였다.

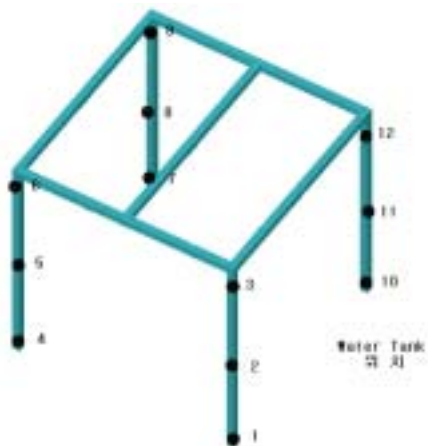


Fig.44. Position of Thermocouple (HX 7)

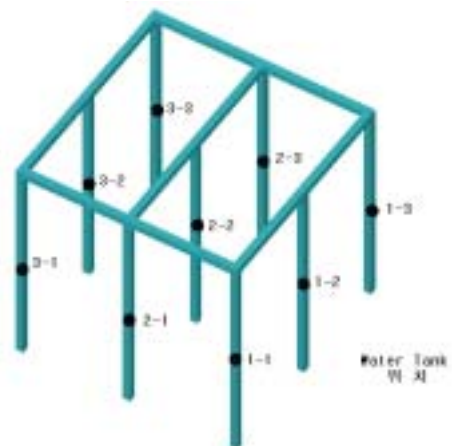


Fig.45. Position of Thermocouple (HX 8)

각 열교환기의 성능 비교 평가를 위해 HX 7, 8 과 동일한 K-Type(Sheath Type, $\Phi = 1\text{mm}$)의 열전대를 사용하였고, 본 실험의 열전대 온도를 측정하기 위해 3개의 5채널 Digital Thermometer를 이용하여 Switching box(Fig. 56)를 만들어 온도를 측정하였다.

HX 7은 바이오매스로 사용된 재료 중 나뭇잎과 산야초는 파쇄하여 사용하였으며, 3종류의 재료를 섞지 않고 층을 이루도록 층층이 쌓았다. HX 8의 경우에는 톱밥과 산야초를 90 : 10의 비율로 섞어 퇴적하였다. 파쇄기는 지난 실험에서 사용되었던 Fig.43의 자체 설계 제작된 파쇄기를 이용해 바이오매스 재료의 길이와 직경을 5 mm이하로 만들었다. 또한 두개의 열교환기 모두 바이오매스는 재료 사이의 빈 공간을 없앨 목적으로 퇴적 시 각각의 층을 매번 압축이 되도록 밟아 주었는데 이와 같이 함으로써 바이오매스의 침하현상은 관찰되지 않았다. HX 7과 8을 그 구조와 성능 면에서 비교해 볼 때 HX 7은 제작, 설치 및 해체의 불편과 바이오매스 퇴적 및 철거의 어려움이 있었던데 반해, HX 8은 제작, 설치 및 해체의 용이성이 뛰어났고, 높은 열 교환 성능을 보였으며, 용량에 따른 Sizing이 편리하다는 장점이 있었다.

다. 실험 결과 및 고찰

1) HX 1, 2, 3 실험 결과 및 고찰

Fig. 46과 Fig. 47은 침엽수와 활엽수를 이용한 바이오매스를 통해서 최초 퇴적 후 발효를 거쳐 열을 발생시키는 과정의 온도 변화를 나타내고 있다. 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 보여 주었다. 아울러 바이오매스 더미의 상부의 온도 역시 낮은 온도를 보여주었다. 이런 경향은 열교환기 HX 1, HX2, 그리고 HX 3의 경우 모두 유사한 경향을 보여 주었다.

Fig. 48와 49는 HX 1과 HX 2에 대하여 침엽수와 활엽수를 이용한 바이오매스를 퇴적 후 발효를 시작하여 내부 온도변화를 관찰한 것이다. 침엽수를 이용한 HX 1의 경우에 온도가 열전대 G, H, I의 경우에 74℃ 이상, 그리고 하층부 및 상층부도 각각 67℃ 및 47℃로 높은 온도를 나타냈으며 10일후까지 온도가 서서히

감소하였다. 10일 후 전체적으로 40-55℃의 온도를 유지해 주고 있는 것으로 관찰되었다. 활엽수를 이용한 HX 2는 열전대 C, L이 이상 변화를 보여주었으나 전체적으로 40-60℃의 온도 분포를 보여주고 있다. 활엽수를 사용한 HX 2의 경우에는 HX 1의 경우와 달리 초기 발효시의 온도 급상승 현상을 보여주지 않았으며, 발효와 함께 서서히 온도가 상승하였다. 다만 HX 2는 HX 1의 경우와 달리 삽입된 열전대의 온도 분포가 각 열전대 사이의 온도차가 크지 않았으나, HX 2의 경우에는 발효가 최대점에 이르기까지 40℃의 온도차를 보여주었다.

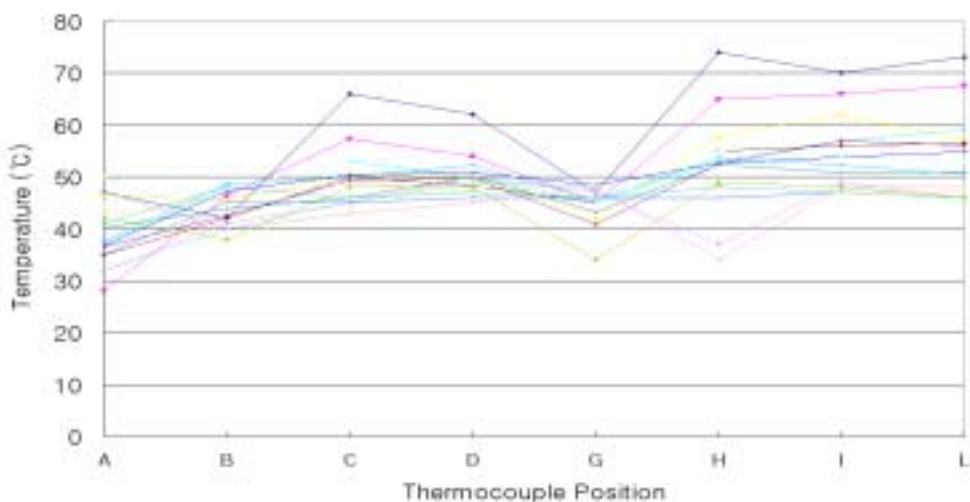


Fig. 46. Temperature Profile with Thermocouple Positions (HX 1)

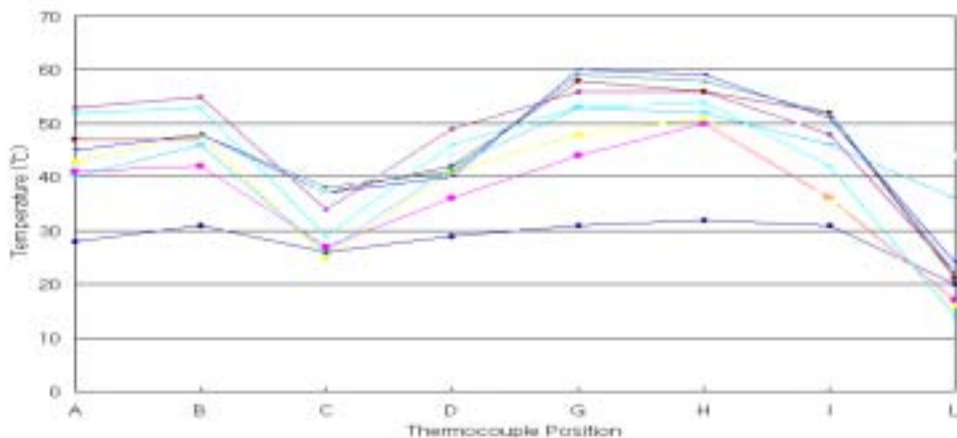


Fig. 47. Temperature Profile with Thermocouple Positions (HX 2)

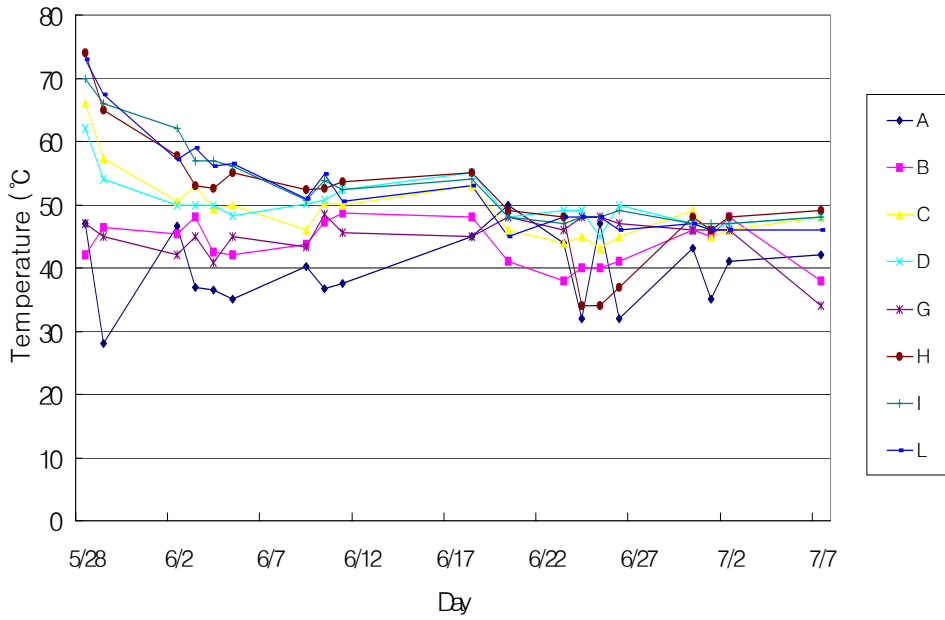


Fig. 48. Temperature Variations depending on Biomass Fermentation (HX1)

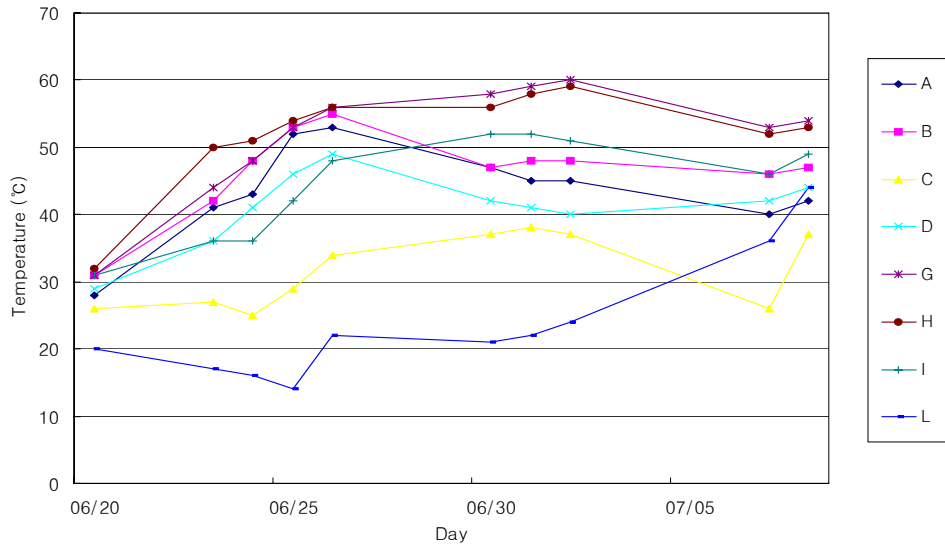


Fig. 49. Temperature Variations depending on Biomass Fermentation (HX2)

T _h	바이오매스 내부의 최고점 온도
T _{c.i}	순환하는 유체(물)의 입구온도
T _{c.o}	순환하는 유체(물)의 출구온도

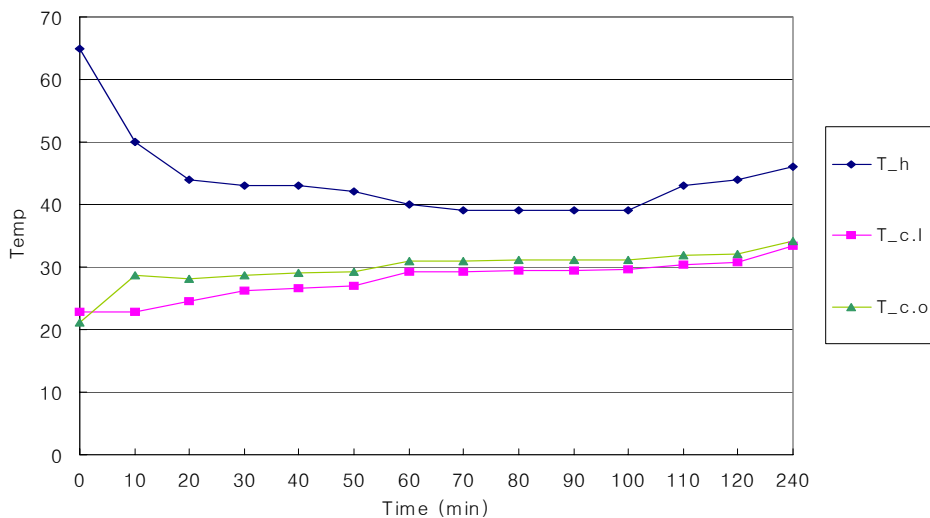


Fig. 50. Temperature Variation of Inlet–Outlet Fluid in Heat Exchanger $T_{\infty} = 28.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (HX II)

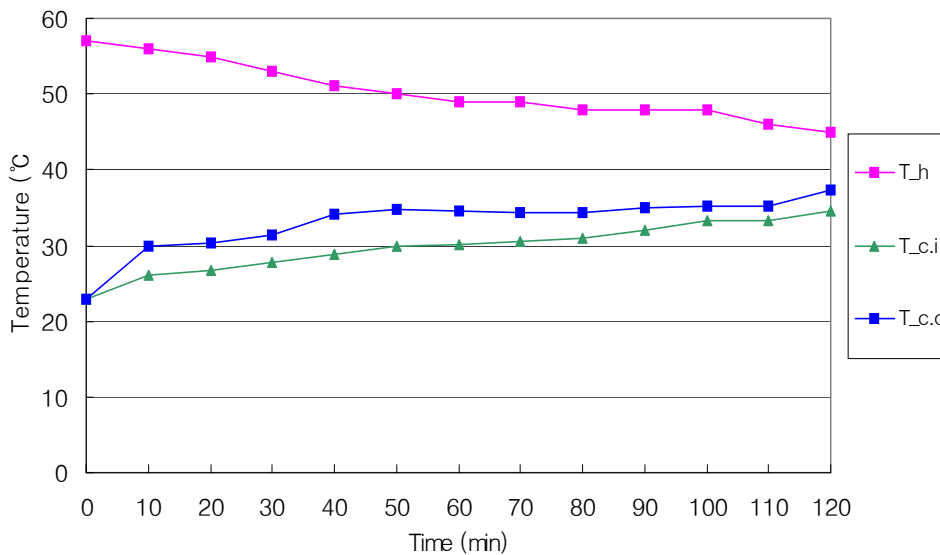


Fig. 51. Temperature Variation of Inlet–Outlet Fluid in Heat Exchanger $T_{\infty} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (HX II)

Fig. 50과 Fig. 51은 HX 2에 대하여 Fig. 51에서 볼 수 있듯이 내부온도가 55 °C 이상을 계속 유지하고 있는 시점에서 열교환기를 가동하여 실험을 한 결과이다. 우선 Fig. 50의 실험을 위하여 물탱크에 초기 물의 온도가 21.9°C, 600 리터의

물을 채우고, 펌프를 가동시켜 물을 바이오매스더미 내부에 있는 열교환기 파이프 라인을 통해 유동을 할 수 있도록 하였다. 바이오매스더미 내부의 중간부 최고점 온도가 65℃를 시작점으로 열교환기를 순환해서 물탱크로 배출되는 출구 온도와 물탱크 내부 물의 온도를 관찰하였다. 물탱크 내부의 온도는 21.9℃에서 상승하기 시작하였으며, 바이오매스더미의 온도 또한 감소하는 것으로 관찰할 수 있었다. 이는 바이오매스를 통해서 열을 회수하는 과정을 나타내는 그림이다. 100분이 지나고 물탱크의 물의 온도가 30℃ 되는 시점부터는 바이오매스 더미 내부의 온도는 오히려 상승하는 것으로 관찰되었고, 4시간 후 물탱크 물의 온도는 33℃를 기점으로 더 이상의 상승은 없었다. 실험을 멈추고 12시간 뒤 바이오매스더미의 온도는 다시 상승하여 50℃의 최고점 온도를 보여 주었다.

같은 방법으로 400 리터의 물을 채우고, 펌프의 가동시켜 실험해 보았다. Fig. 50에서 볼 수 있듯이 바이오매스 더미 내부 최고점 온도가 3일 뒤 55℃가 되었으며, 이 시점을 기준으로 다시 실험을 개시 하였다. Fig. 51에서 볼 수 있듯이 열교환기에 의한 열 회수 과정에서 온도 변화는 첫 번째 실험에서와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 초기 22℃의 물의온도가 38℃까지 상승 시킬 수 있었으며, 실험을 수행 후 바이오매스의 내부온도는 약간의 상승은 있었으나, 더 이상 50℃ 이상의 온도를 유지하지는 못하였다.

본 실험을 통하여 열용량(Q) = $mc\Delta T$ 로부터 물탱크내의 110℃의 물의 온도 상승에 대하여, $Q = 600 \text{ kg} \times 4174 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 10^\circ\text{C} = 25044000 \text{ J}$ (5986kcal) 의 열 회수효과를 얻을 수 있었다. 1000kg의 바이오매스에 대하여, 1kg당 약 5.99kcal/kg 의 열 회수 결과를 얻을 수 있었다. Jean Pain의 실험은 4개월간 유용하여 brushwood 10kg당 11000 kcal를 회수한다고 하였다.

이 두 실험을 같은 단위 시간당 열 회수율로 환산하여 비교하면 Table 8과 같다. 표에서 볼 수 있듯이 본 실험의 결과를 Jean Pain의 결과와 비교시 운용 시간상의 문제점과 발효의 지속성에 차이와 문제성이 있으나, 본 실험은 바이오매스의 발효에 따른 열을 열교환기를 통해서 회수 할 수 있는 충분한 가능성을 제시해주고 있다. 본 실험으로부터 향후 해결해야 할 최대 문제점은 바이오매스의 발효에 의한 발열을 지속적으로 유지시킬 수 있는 방법을 연구해야 할 것이다. Table 7에서 볼 수 있듯이 Jean Pain의 실험의 경우 열전달 면적 대비 바이오매스 용량은 835배이며, 현재 HX 2의 경우 76배이다. 이는 결과 적으로 충분한 발효열을 공급하기 위해서는 충분한 바이오매스의 공급을 필요로 하며, 지속적인 발효열을

공급받기 위해서는 최소한 10,000 kg의 바이오매스가 필요할 것이라 예측된다. 또한, 수치해법과 같은 효과가 나오기 위해서는 일정 표면온도를 유지 할 수 있는 최적 발효법의 개발이 필요하다. 아울러 현재 열교환기로부터 원활한 열 회수를 위해서는 현재의 하나의 나선형 라인 보다는 바이오매스전체 더미로부터 고루 열을 회수 하기위해 열교환기 파이프라인의 분산을 요구한다. 한 예로 두개 혹은 세개의 나선형 라인이 더욱 효과적 일 것이라 생각되며, 이를 위해서는 파이프의 수월한 변곡을 위한 새로운 재질의 선택을 필요로 한다.

Table 8. Comparison with Previous Research

	HX 2- (1)	HX 2- (2)	JEAN PAIN
바이오매스 재료	활엽수	활엽수	brushwood
바이오매스 용량(kg)	1,000	1,000	16,800
열전달면적(m ²)	13.2	13.2	20.1
발생 열량 (kcal/kg)	5.99	5.19	1100
운용시간	4 hours	2 hours	4 month
단위 시간(s)당 열발생률, W	144.93	125.6	443.9
바이오매스 평균온도(°C)	51.3	51.7	60
물탱크 유체용량	물 600 리터	물 400 리터	

2) HX 4, 5, 6 실험결과 및 고찰

HX 4, 5, 6의 실험을 통하여 열교환기의 최적 설계를 위하여 이론적 분석을 통하여 여러 가지 변수들의 영향을 분석하였다. 열교환기 제작을 위하여 중요한 변수 중의 하나인 열교환기 내부 유량, 열교환기의 열전달 면적을 좌우하는 파이프 직경의 영향을 분석하였다. HX 1-3에서 얻어진 실험 결과인 열교환기 출구온도 평균 33°C를 향상시킬 목적으로 열전달 면적을 증가 시켜 이론적 분석을 수행하였다. Fig. 54와 55는 이론적 분석을 통하여 열교환기 내부의 유량 및 파이프 직경의 영향을 분석한 결과이다.

Fig. 52와 53를 보면 열전달 성능을 향상시키는 내부의 난류 유동을 일으키는 시점인 유량 0.1-0.2 kg/s사이, 그리고, 지름 0.03 이었다. 따라서 본 이론 분석을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 설계하였으며, 실험결과와 비교 분석되었다.

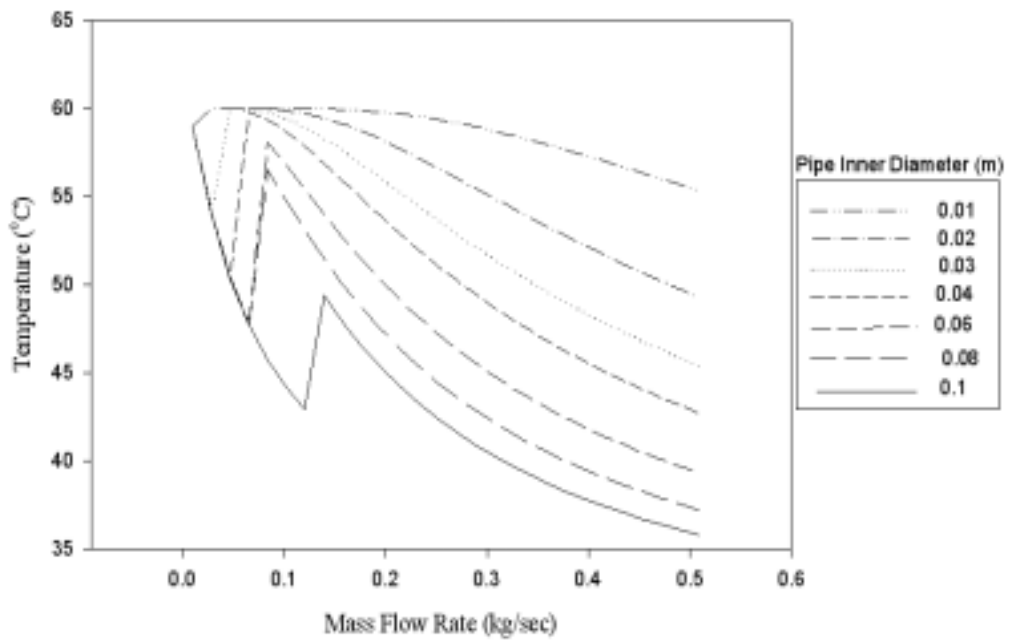


Fig. 52 Effect of Mass Flow Rate.

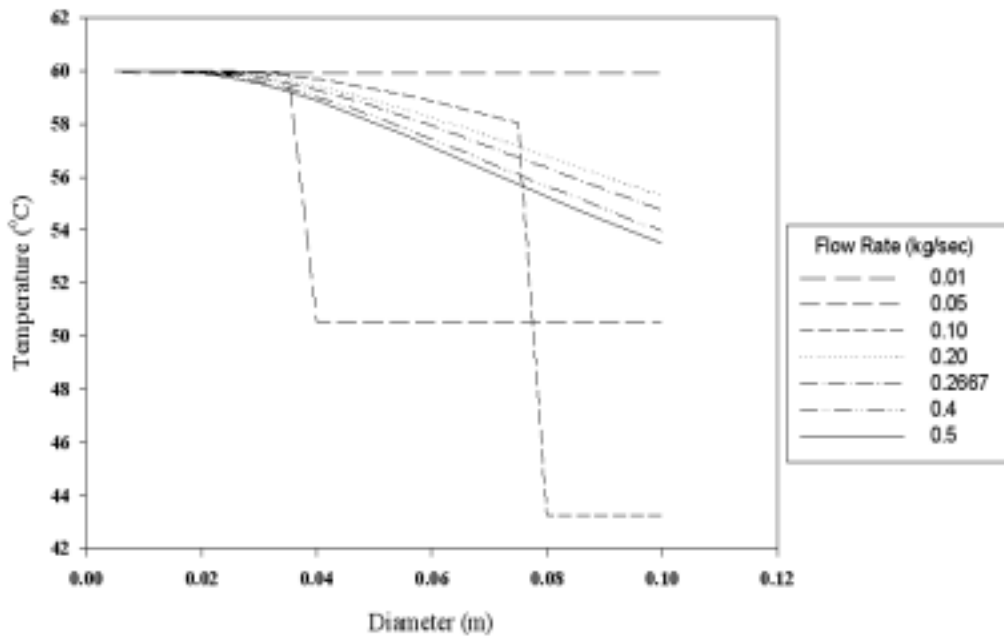


Fig. 53 Effect of Pipe Diameter.

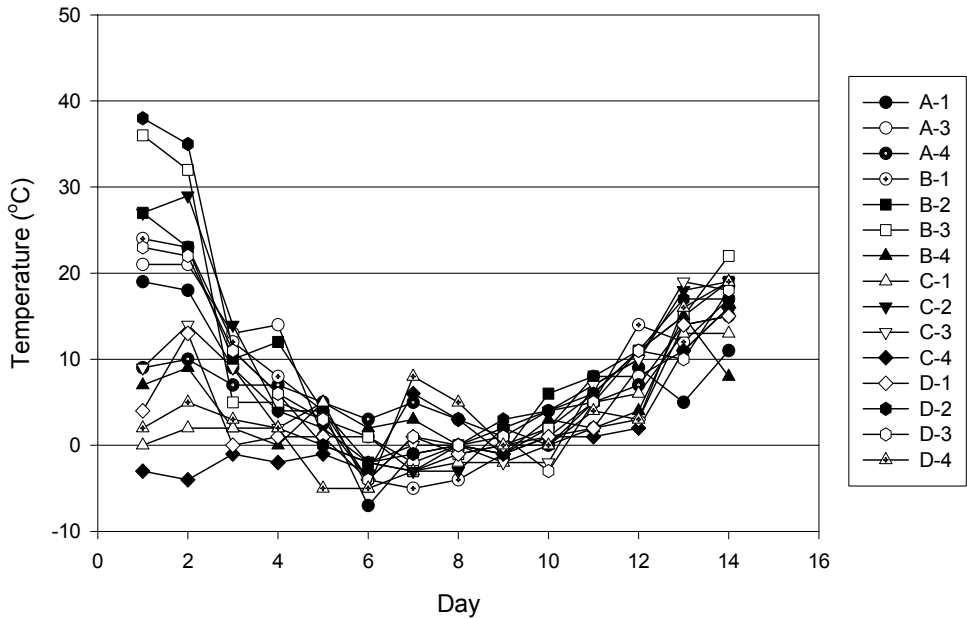


Fig. 54. Temperature Variation depending on Biomass Fermentation (HX 4)

Fig. 54는 HX 4에 대하여 산야초와 벼짚, 그리고 나뭇잎을 파쇄 절단 없이 원재료 그대로 퇴적한 바이오매스를 퇴적 후 발효를 시작하여 시간에 따라 각 위치별 열전대의 온도 변화를 측정하여 나타내었다. 전체적으로 온도는 0~10°C에 분포하였으나 열전대 A-1, A-2, B-1, B-2, B-3, C-2, D-2, D-3은 퇴적 후 온도 관찰 첫 날부터 이틀 동안 20°C이상의 온도가 관찰되었다. 이는 열전대 각 부분의 퇴적 후 발효가 활발히 일어나 초기 온도 급상승 효과를 나타낸 것으로 보이며, 시간이 지나면서 대기 온도의 영향과 발효가 점차 늦어지면서 온도가 다른 부분과 거의 비슷해 졌다. 열전대 C-4 부분의 온도 특이성은 그 위치가 장치의 윗부분으로 대기 온도의 영향과 겨울에 낙엽이 얼었기 때문에 온도가 낮다고 본다. 각 열전대는 퇴적 후 초기 이틀 동안 최대 40°C의 온도 차이를 보이다가 시간이 지나면서 점차 비슷해 졌다. 퇴적 후 열흘 이후에는 온도가 상승하게 되는데 이는, 대기 온도가 높아지면서 퇴적물의 온도도 서서히 증가하여 발효에 영향을 주었다고 생각한다. 본 연구를 위해 사용된 시스템은 우선 원재료를 절단 없이 사용하게 됨으로써 바이오매스의 재료간의 밀착도가 현저히 떨어지는 관계로 발효가 원

활하지 않았으며, 두 번째 재료의 보온이 미흡함에 따라 겨울철 발효열의 많은 양이 외부로 손실됨을 관찰할 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 약 이틀 동안 발효로 인해 온도가 상승하다가, 혹한기에 접하여 급강하하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 겨울철 발효를 위해서는 단순 퇴적이 아니라 보온을 위한 대책을 마련해야 할 듯싶다.

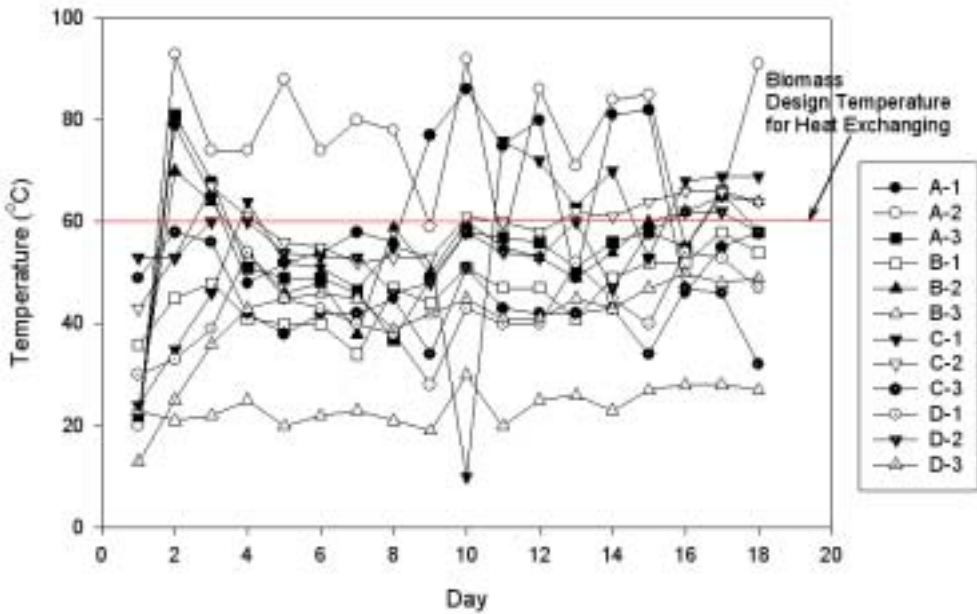


Fig. 55. Temperature Variation depending on Biomass Fermentation (HX 5)

Fig. 55는 HX 5에 대하여 침엽수와 활엽수의 50 : 50의 비율로 혼합한 경우를 이용한 바이오매스를 퇴적 후 발효를 시작하여 시간에 따라 각 위치별 열전대의 온도 변화를 측정하여 나타내었다. 전체적으로 온도는 40~60°C에 분포하였으나 열전대 A-1, A-2는 80°C 이상, 그리고 B-3은 20°C에 분포하고 있다. B-3번은 열교환기 앵글의 윗부분에 위치하고 있고 밑의 부분이 발효가 되면서 점차 가라앉아 대기와 접촉하게 되고 대기의 영향을 받아서 낮다고 생각한다. A-1, A-2번의 온도는 각 열전대가 붙여진 부분이 발효가 다른 부분보다 더 활발히 일어나 온도에 영향을 미쳤다고 생각한다. 이는 퇴적 시 요소 및 질소 비료의 부정확한 배합으로 인해 국지적인 발효의 불균형 때문이라 생각된다. 각 열전대 사이의 온도차는 크게 60°C 이상까지 나타났다. 그림에서 볼 수 있듯이 바이오매스 발효 열

교환기의 작동을 위해서는 이론적 분석을 통하여 열교환기 표면온도가 60°C일 경우를 바탕으로 설계되었기 때문에 열 교환을 위한 외부 표면온도에는 도달하는 것으로 관찰되었다.

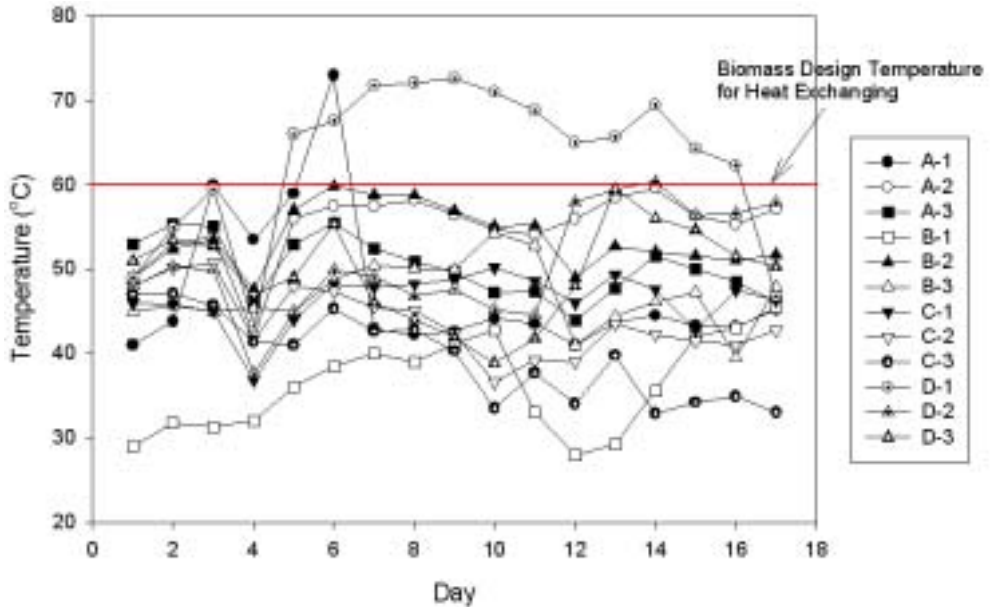


Fig. 56. Temperature Variation depending on Biomass Fermentation (HX 6)

Fig. 56은 HX 6에 대해 활엽수재 톱밥과 산야초를 이용한 바이오매스를 퇴적 후 발효를 시작하여 시간에 따라 위치별 열전대의 온도 변화를 측정하여 나타내었다. HX 4의 경우와 달리 HX 6의 경우는 산야초의 양을 줄이고 대신 활엽수 톱밥을 혼합하였으며, HX 4의 경우처럼 원재료를 그대로 사용함으로써 발생하는 바이오매스 사이의 밀착도 부족으로 발생했던 침하현상을 보완하기 위하여 평균 5 mm × 5 mm 크기로 파쇄 절단하여 압축 퇴적하였다. Fig. 22에서 볼 수 있듯이 HX 4와 5보다 적지만 초기에 온도 급상승 현상이 나타났다. 전체적으로 온도는 40~60°C에 분포하였으나 D-1번은 측정 6일째부터 평균 70°C, 그리고 B-1번은 가장 낮은 30~40°C에 분포하고 있다. D-1위치는 콘크리트 구조물의 좌측 벽과 근접한 부분으로 옆의 HX 5의 영향과 발효제의 과다 퇴적으로 발효가 활발히 일어나서 온도가 다른 위치보다 높다고 생각된다. HX 6 역시 본 연구의 주된 목표인 발효열 이용 열교환기의 작동을 위한 설계온도인 60°C에는 도달할 수 있었다.

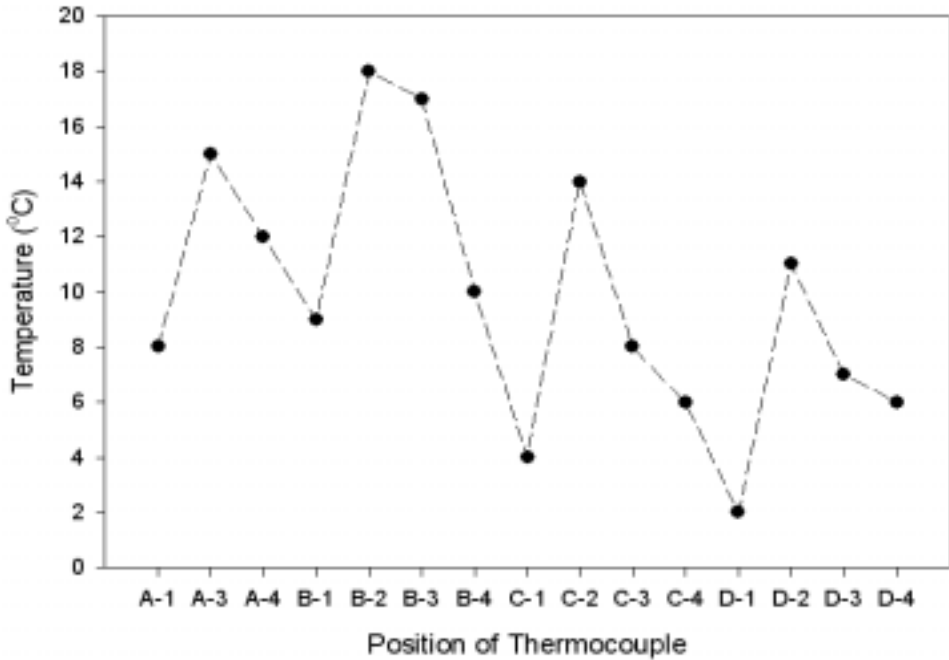


Fig. 57. Temperature Profile with Thermocouple Position (HX 4)

Fig. 57은 HX 4에 대하여 임의의 시간에서 각 열전대위치에서의 온도 분포 변화를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 31에서 볼 수 있듯이 각각의 열전대의 위치를 통해 바이오매스 전체의 각 부분별 온도 분포를 알 수 있다. Fig. 14와 23에 의하면, HX I의 경우에 바이오매스 더미의 전면이 온도가 더 높게 형성되는 것으로 알 수 있다. 아울러 중간 높이에 위치한 열전대의 온도가 높은 것으로 알 수 있다. 또한, HX 4의 경우에 1차적으로 수분공급을 하고, 보온을 하지 않은 관계로 초기 발효 진행 후 전체적으로 온도가 급강하한 것으로 알 수 있었으며, 이는 바이오매스의 외부가 일부 보온 단열재 역할을 수행하게 됨으로써 중심부의 온도가 다른 부분의 온도보다 높게 나타나는 것으로 판단 할 수 있다.

Fig. 58는 HX 5에 대하여 침엽수를 이용한 바이오매스를 통해서 퇴적 후 발효를 시작하여 열을 발생하는 과정의 온도변화를 위치별로 나타냈다. HX 5의 경우에도 마찬가지로 바이오매스 더미의 전면부의 온도가 다른 부분보다 높은 것으로 나타났으며, 본 연구에서 수행하고 있는 발효가 공기의 도움으로 진행되는 호기성 발효이기 때문에 공기와 접한 부분인 전면부의 온도가 약간 더 높은 것으로 관찰 되었으며, HX 5역시 HX 4과 마찬가지로 바이오매스 더미의 중간 높이에서 더 높

은 온도를 유지하는 것으로 관찰 되었다. 이는 호기성 발효 자체는 공기와 수분의 도움이 가장 큰 역할을 하기 때문에 외부에 접한 부분은 쉽게 건조해지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 59은 HX 6에 대하여 활엽수재 톱밥과 산야초, 그리고 발효제를 이용한 바이오매스를 통해서 퇴적 후 발효를 시작하여 열을 발생하는 과정의 온도변화를 위치별로 나타냈다. HX 6역시 전체적인 온도 분포 경향은 HX 5와 6과 비슷한 경향을 보이는 것으로 알 수 있었다. Fig. 61에서 볼 수 있듯이 콘크리트 구조물의 전면부에 위치한 열전대의 온도가 퇴적 후 처음에는 다른 부분과 비슷하게 나타났으나 시간이 흐름에 따라 큰 온도 차이를 보이며 나타났다. 그 원인 역시 앞의 HX 4와 5의 경우와 마찬가지로 공기와 수분의 분포에 따라 온도 분포의 차이가 있는 것으로 판단된다. 그 외 위치의 온도는 40~60℃의 온도분포를 보였다. 전체적으로 평균 온도는 같은 시기에 측정한 HX 6 보다는 10℃정도 낮았으나 HX 5의 온도 변화보다 온도변화가 적어 HX 6가 더 안정적이라고 생각한다.

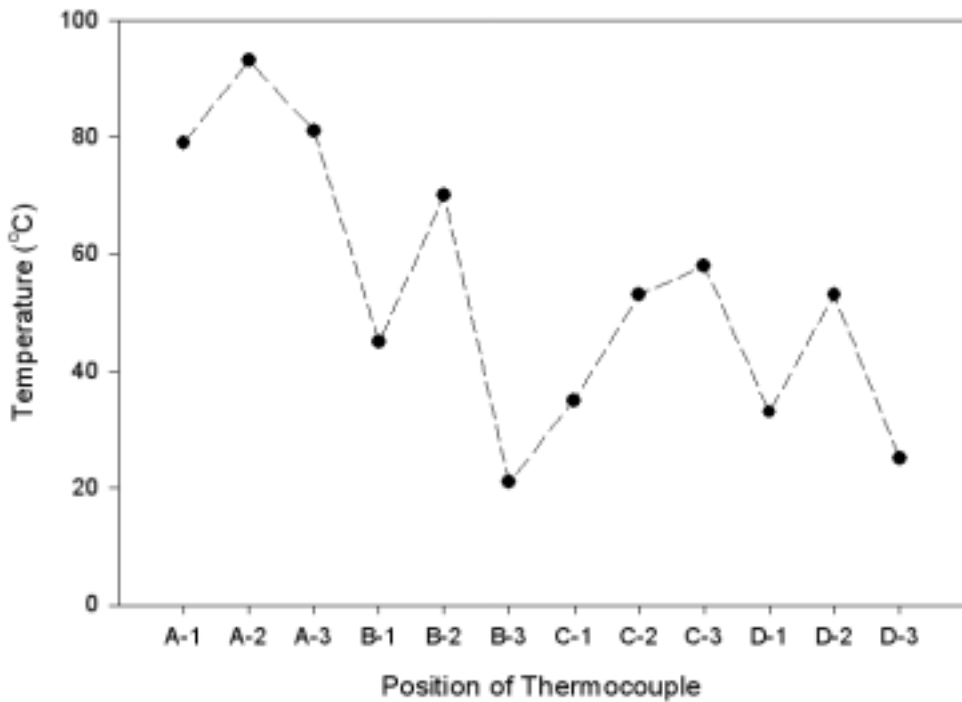


Fig. 58. Temperature Profile with Thermocouple Position (HX 5)

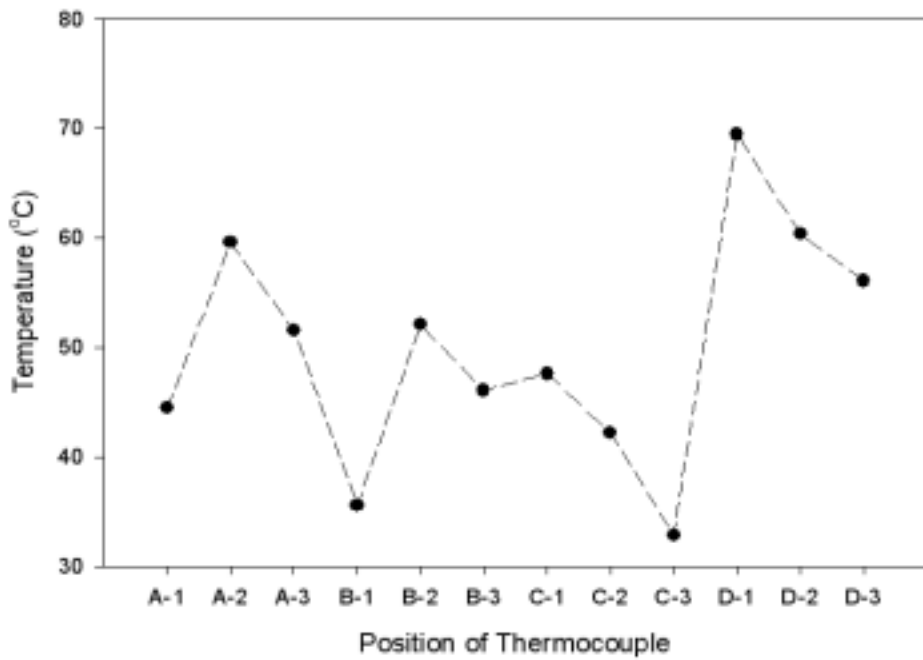


Fig. 59. Temperature Profile with Thermocouple Position (HX 6)

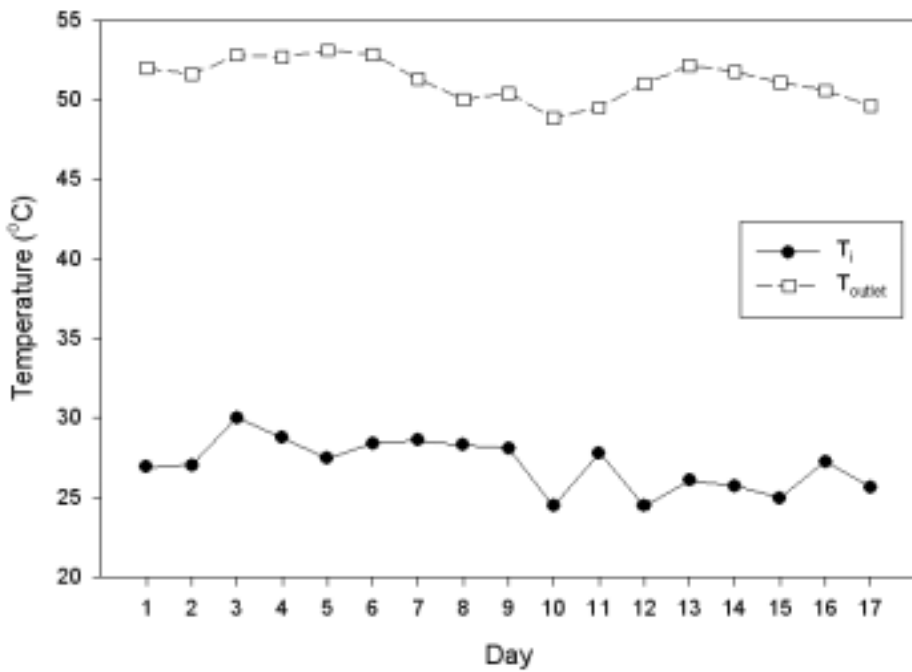


Fig. 60. Temperature Variation of Inlet-Outlet Fluid in HX 6

Fig. 60은 HX 6에 대하여 열교환기를 작동시켜 열교환기에서의 유체 입·출구 온도를 관찰해 보았다. 본 실험을 위해서는 본 열교환기 시스템이 실제 가정용 온수기로 사용된다는 가정 하에 실험을 구성하여 수행하였다. 일일 가정에서 사용하는 온수 량은 60 Liter정도이며, 이를 4-5인 기준의 가정을 모델로 설정하여 300 Liter(0.267 k/s의 유량으로 20분)가 공급되는 것으로 실험 모델을 구성하였다. 온수의 적정온도인 50°C를 기준으로 온수를 공급할 수 있도록 열교환기를 작동시켰다. Fig. 60은 열교환기와 물탱크가 연결된 펌프를 이용하여 열교환기를 20분간 작동시켰을 경우 물의 입출구부의 수온의 온도를 나타낸 그래프이다. 열교환기의 초기 온도 급상승 효과와는 달리 각각의 온도는 시간이 지남에 따라 거의 일정한 분포를 보이고 있다. Fig. 60에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 설계 제작된 바이오매스 열교환기는 4-5인 기준의 가정용 일일 온수공급을 위해서 충분한 성능을 발휘하는 것으로 검증되었음을 알 수 있다.

Fig. 61은 HX 6의 초기 실험일의 입출구부의 수온의 온도를 20분간 매 2분씩 측정하여 나타낸 그래프이다. Fig. 19에서 알 수 있듯이 열교환기의 내부온도는 거의 45°C 이상 유지하고 있는 시점에서 실험을 하였다. 실험 전 물탱크에 400 L의 물을 채우고 펌프를 16 LPM으로 가동시켜 유체가 열교환기를 순환할 수 있도록 하였다. 초기 30°C가 안 되던 출구온도가 열교환기의 하단부로 유입되어 순환하고 다시 물탱크로 들어온 2분후의 출구온도는 48°C로 급상승하였다. 실험에서는 출구온도는 30초만 되어도 실험 전보다 10°C 이상 상승하였다. 그 이후 20분까지 출구온도는 50°C 정도의 온도를 나타냈다.

Fig. 62는 HX 6의 초기 실험 일에 20분간 펌프를 가동하여 실험했을 때의 바이오매스의 온도를 측정 한 것이다. 열전대 B-3, C-1, C-3 위치의 경우 처음 온도보다 실험 20분후의 온도는 18°C 정도의 온도 차이를 보였다. 전체적으로는 물을 순환시키면서 바이오매스의 발효열은 열전달을 통하여 외부로 회수되는 것으로 관찰할 수 있었다.

Fig. 63은 계산에 의한 예측 값과 실험값을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열전달성능에 열교환기 내부의 유동유량이 미치는 영향을 보여 주고 있다. 본 실험에 사용된 펌프는 0.133, 0.267와 0.417 kg/s의 유량을 변경할 수 있으며, 실험에서 0.133 kg/s의 유량으로 열교환기의 유체를 순환시켰을 경우에는 유체의 순환이 이루어지지 않았기 때문에 0.267과 0.417 kg/s의 유량에 대한 실험 결과만을 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산 결과는 0.03m의 관경을 갖는 파

이프와 0.15kg/s의 유량을 갖을 경우 본 연구의 설계 목표인 출구 온도 55oC를 얻을 수 있는 것으로 알 수 있었으며, 본 실험에서도 유량을 변화시킴에 따라 최대 21oC정도의 출구온도 변화를 가져올 수 있는 것으로 알 수 있었다.

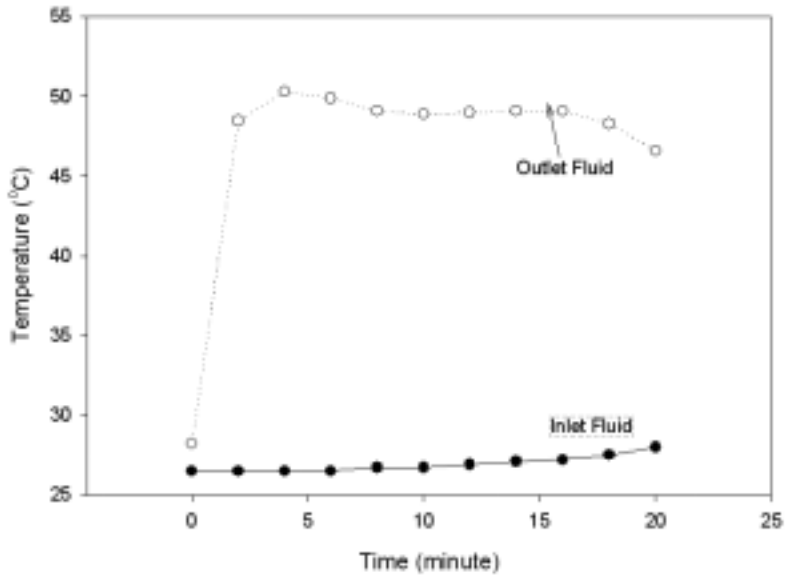


Fig. 61. Temperature Variation of Inlet-Outlet Fluid in Heat Exchanger 6

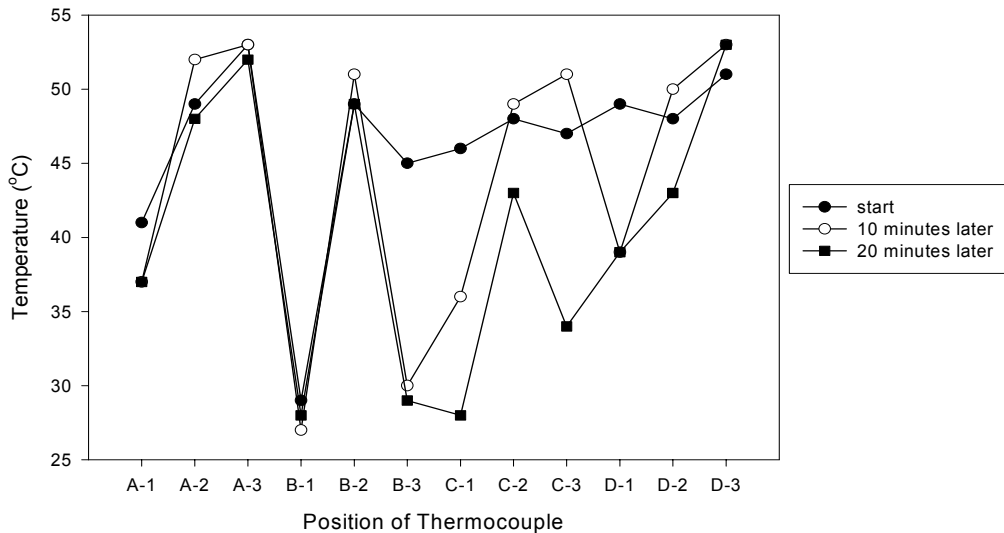


Fig. 62. Biomass Temperature Variation with Time

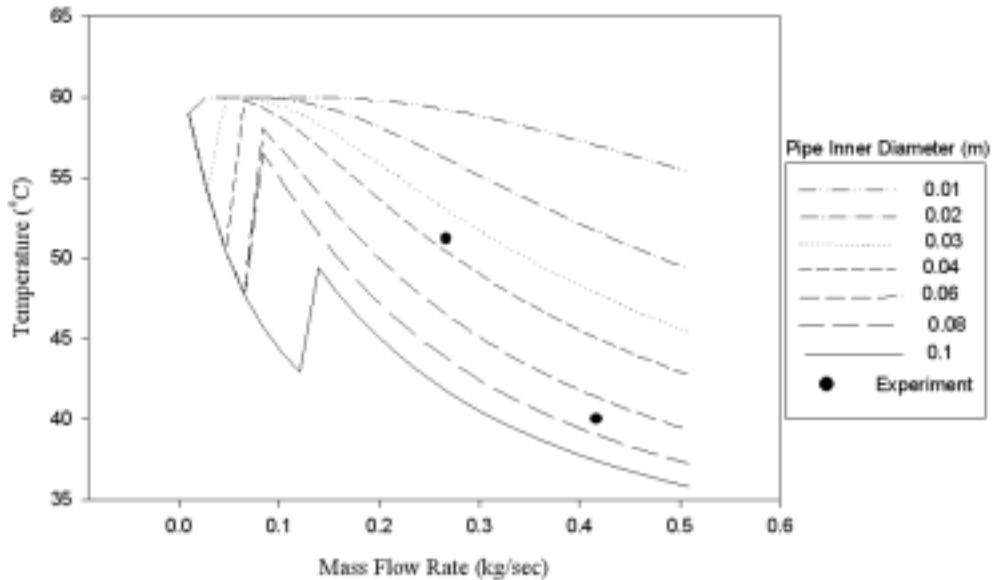


Fig. 63. Comparison Between Experiment and Analysis, Effect of Mass Flow Rate on Outlet Temperature with Pipe Diameter

열용량(Q) = $mc\Delta T$ 에서 15일째의 입·출구 평균온도를 토대로 계산했더니 5,291,114 J (= 1,260kcal)의 열을 회수하는 효과를 얻을 수 있었다. 1000kg의 바이오매스에 대하여 물 용량이 300kg 일 때, 바이오매스 1kg당 1.26kcal/kg의 열 회수 결과를 얻을 수 있었다.

자연대류식 태양열 온수기의 적정규모 선정에 있어서는 급탕부하, 시스템의 효율, 그리고 설치비 등이 고려되어야 하며, 본문에서는 우리나라의 기후조건과 태양열 집열기의 효율 등을 고려하여 분석한 결과를 기초로 본 연구에서 수행된 발효열 이용 열교환기의 실험결과와 비교 분석하였다.

보통 태양열 온수기설계를 위한 하루 소요 온수량은 1인당 50°C 온수 60ℓ를 기준으로 한다. 따라서 5인 가족의 경우는 하루 약 300ℓ의 온수가 필요하며, 온수기의 축열조 용량은 하루 온수소요량을 기준으로 한다.

온수소요량에 따른 집열기의 면적은 온수 1ℓ당 0.011~0.016m²를 기준으로 하고, 또 매일 사용을 위한 집열 면적은 온수 1ℓ당 0.0135m² 이상이어야 한다. 따라서 축열조의 용량이 300ℓ일 경우의 집열기 면적은 4.05~4.8m²의 것을 선정하는 것이 적절하다.

Table 9 소형 태양열 온수기와 바이오매스 온수기 비교.

	태양열 온수기(H사) ⁽⁷⁾	바이오매스 열교환기
1일 급탕부하(4-6인가족 기준), kcal/day	15,600	15,600
집열면적(열전달 면적), m ²	19.8	15.8
온수량 (Liter)	300	300
열교환기 규격	사각 집열판(1020×1940) 1.98m ² 의 집열판 10개	직경 1.8 m 나선형, 50 mm 피치
온수저장탱크 (Liter)	1,000	1,000
온수기 일일 평균 가능 열량(kcal/day)(중부지방 평균 일사량 기준)	42,230 (서울 일사량 기준)	62,400 (1일 3회 운용시)
열전달 면적대비 평균 급탕부하,kcal/day	787.9	987.34
재료	태양열	바이오매스

(7) 통상 4-5인 가족의 일일 온수 사용량 통계 적용 (liter/day)

일본 : 180-300, 유럽 : 220-270, 호주 : 180-300

Table 8에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 수행된 바이오매스 열교환기의 온수공급능력을 상용화되어 판매중인 태양열 온수기의 성능과 비교해 보았다. 표에서 볼 수 있듯이 태양열 온수기는 일일 일사량을 기준으로 설계되었으며, 집열 면적도 일일 일사량을 최대한 흡수할 수 있도록 설계되었다. 표에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 수행된 바이오매스 열교환기는 동일한 급탕부하를 기준으로 비교해 보았을 때 열전달 면적대비 공급가능 열량이 787.9 : 987.3 kcal/day로 뛰어나며, 바이오매스 열교환기는 실험을 위해 하루 20분씩 운용을 했으나, 1시간여가 지나면 다시 바이오매스의 온도가 상승하여 지속적으로 운용가능하다는 장점이 있으며, 표에서 볼 수 있듯이 일일 3회 운용시 62,400 kcal/day의 에너지를 공급할 수 있음을 알 수 있다. 이는 태양열 온수기의 일일 공급 가능량인 42,230 kcal/day에 비하여 가능한 에너지 량이 월등히 뛰어난 것으로 나타난다.

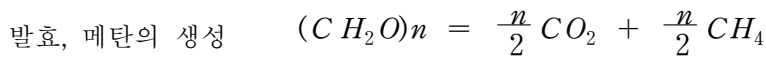
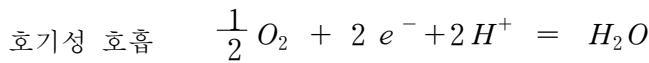
메탄 발효화: 현재 실용화되고 있는 농업 폐기물의 발효방식은 호기성 방식으로 많이 설치·운영되고 있는데 이는 호기성방식이 악취발생을 줄일 수 있고 동시에 위생적인 안전화를 도모할 수 있기 때문이다. 그러나 호기성 발효방식도 완

전 호기적 상태를 유지하지 못함으로써 악취가 발생하므로 에너지 낭비를 보완하고 처리과정에서의 에너지 생산이 가능한 혐기성 발효방식이 점차 확산되고 있다. 아울러 Table 8에는 혐기성 메탄발효에 의한 연구 사례와 본 연구에서 수행된 실험 결과를 비교분석하였다.

《메탄발효를 위한 호기성 발효와 혐기성 발효의 과정》

① 호기성발효

호기성 조건에서 1g의 분해 유기탄소는 33.49~41.87kJ의 에너지를 발생한다. 일반적으로 냄새 유발성 화합물의 생성은 주로 혐기성 조건에 기인하지만 호기성 조건에서도 황, 무기 및 유기 질소화합물, 분자량이 작은 지방산, terpene, carbonyls 및 alcohol 등의 화합물에 의해 냄새가 발생한다. 아울러 식 (18)과 (19)에서 볼 수 있듯이 발효 중 공기와 접하게 됨으로써 메탄(CH₄) 보다도 이산화탄소(CO₂)의 발생량이 증가하는 것으로 알 수 있다. 이는 현재의 개방형 호기성 발효로는 메탄회수의 어려움이 많음을 알 수 있다.



② 혐기성 발효

유기물을 혐기성으로 처리하면 보통 3단계에 걸쳐 CH₄ 와 CO₂가 발생된다. 1차로 Fats는 세포외효소인 Lipase 에 의하여 가수분해 되는데, 단순지질의 경우 1몰의 중성지질로부터 1몰의 글리세롤과 3몰의 고급지방산이 생성된다. 글리세롤은 알코올의 분해경로에 따라서 더 분해되며, 고급지방산은 보다 저급의 지방산을 거쳐 아세트산과 수소로 분해된다. 그러나 조건에 따라서 프로피온산과 브티르산으로 될 때도 있다. Fats, Cellulose, Proteins등이 가수분해 된 후 발효세균에게 섭취되어 생성된 이러한 물질들은 아직도 상당 수준의 에너지를 함유하고 있지만 일반 발효세균이 더 이상 소화하지 못한다.

2차에서의 진행과정은 산생성과 아세트산생성으로 진행되는데, 산생성은 기질이

가수분해 된 후부터 세포에 의하여 이산화탄소, 수소, 여러 가지 카르복시산으로 생성될 때까지의 과정을 가리킨다.

3차에서의 메탄생성은 메탄성 세균에 의해 이루어지는데 메탄생성 세균은 형태상으로 Methanobacterium, Methanococcus, Methanosarcina, Methanospirillum의 4속으로 분류되고 있다. 이러한 세균들이 직접 이용할 수 있는 기질은 아세트산, 수소, 이산화탄소, 포름산, 메탄올뿐이며 이외의 지방산과 알콜 등은 비메탄 세균과 메탄 세균의 상호 하에 메탄과 이산화탄소로 전환되는데 그러한 비메탄 세균이 일부의 아세트 생성 세균이다.

또한 메탄생성 세균은 약하고 증식속도가 느리므로 온도, pH, 등의 조건을 적당하게 안정시키는 것이 중요하다. 호기성 및 혐기성과정의 분해상태를 비교하면 호기성상태에서는 유기물구성원소가 모두 호기성미생물에 의해 산소와 결합된 상태로 발생됨으로써 악취가 발생되지 않고 또 발열량이 높아 퇴비기초재의 각종 병원균과 씨앗들을 사멸시킬 수 있으나 혐기성상태에서는 H₂S, NH₃ 등의 가스가 발생되어 악취를 발생시킬 수 있고 CH₄ 가스가 발생되어 에너지원으로 이용될 수 있으나 발열량이 적어 인공적으로 가열하지 않으면 필요한 온도에 도달되지 못하는 단점을 가지고 있으나 중온정도의 가열에 필요한 CH₄ 가스량은 발생하는 CH₄의 1/3 정도이고 고온에는 거의 대부분의 CH₄ 가스가 소모되는 것으로 알려지고 있다. 그러나 악취는 반응조로 밀폐하면 호기성보다 완전하게 제어할 수 있고 오수도 동시에 처리할 수 있어 장래 관심이 큰 처리방식이다.

아울러 본 연구에서 수행된 발효열 회수 열교환기의 부산물로서 메탄을 에너지원으로 회수하는 실험을 수행하였다. Table 10 에서 본 연구에서 얻어진 실험결과와 실제 메탄만의 생성을 위한 메탄발효와의 연구결과를 비교해본다. (8)

본 실험은 호기성 발효를 이용한 열교환기 실험장치의 개발로 본 실험에서 메탄의 발생을 확인 할 수 있었으나. 호기성발효의 특성상 다량의 공기와 접촉하여 다량의 CO₂가 검출되고 CH₄의 량은 극히 미미한 것으로 관찰되었다. 본 실험은 싸이로를 사용하기 전단계의 실험으로서 완전히 밀폐하고, 외부에서 공기를 일정량 공급해주는 시스템일 경우 메탄의 발생량은 증가 할 것이나, 오히려 혐기성 발효 형태로 발열량은 감소하게 되리라 생각된다. 이를 극복하기 위하여 이후의 연구는 메탄 발효와 발효열 회수의 두가지 목적을 달성하기 위하여 싸이로(시제품)의 구조를 수정 보완해야 할 것이라 생각된다. 아울러, 열이 공급되지 않는 혐기성 발효일 경우는 열이 공급되어 최적의 메탄발효환경을 만들어 줄 경우보다는 메탄

발생량이 감소하리라 예측되나, 메탄발효를 위한 조건을 만들어 주기 위한 시스템을 호기성 발효조건과 조합된 형태로 수정 보완해야 할 듯싶다.

Table 10. 메탄발효 실험 비교

비교인자	호기성메탄발효(본 실험)	혐기성메탄발효 ⁽⁸⁾
메탄 함유량	최대 1 %	60%
발열량	20,800J/day	37°C 열을 일정하게 공급
바이오매스 재료	활엽수+벗집+산야초 칩 (50 : 10 : 40)	음식물+비닐+종이+기타 (60.98 : 7.93 : 7.62 : 3.96 : 19.51)
실험장치 개요	개방형	완전 밀폐형 및 열원공급장치

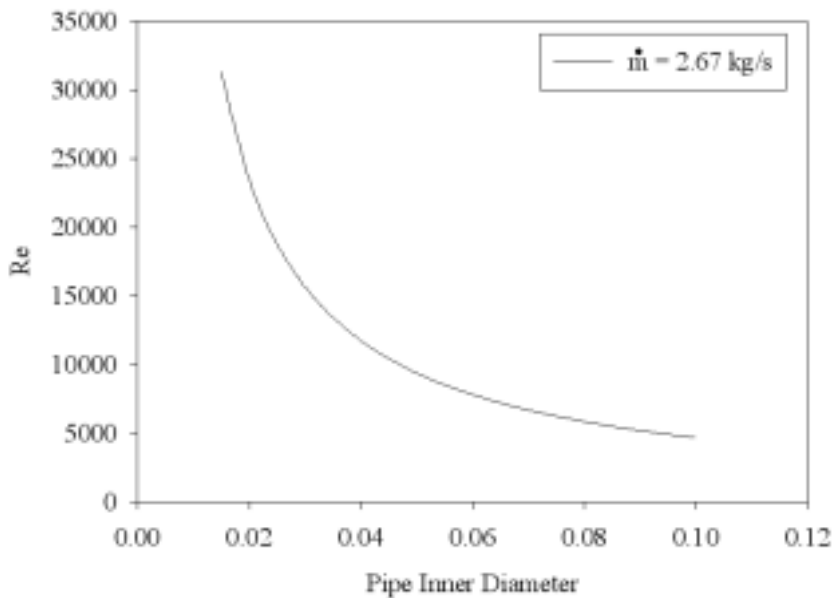


Fig. 64. Effect of Pipe Inner Diameter on Re

3) HX 7과 8의 실험결과 및 고찰

본 연구에서 열교환기의 최적 설계를 위하여 이론적 분석을 통하여 여러 가지 변수들의 영향을 분석하였다. 또한 3차 년도에서는 농가의 실연을 위하여 제작 및 설치가 용이한 구조를 개발하기 위하여 다양한 이론적 분석을 통하여 최적의 열교환기를 제작하기 위하여 중요한 변수 중의 하나인 열교환기 내부 유량, 열교환

기의 열전달 면적을 좌우하는 파이프 직경 및 압력강하에 따른 성능 평가를 통하여 발효열 교환기를 분석하였다. 2, 3차 년도에서 얻어진 실험 결과인 열교환기 출구온도인 평균 33oC를 향상시킬 목적으로 열전달 면적을 증가 시켜 이론적 분석을 수행하였다. Fig. 66과 67은 파이프 내부의 유량 및 직경 변화에 따른 레이놀즈수의 변화를 분석하였으며, 유동이 완전히 발달된 난류유동을 유지하기 위해서는 0.1 kg/s이상의 유동량을 유지해야하며 1, 2차년도에 사용하였던 같은 유량을 유지할 경우 파이프 직경에 상관없이 난류 유동을 유지하는 것으로 분석되었다.

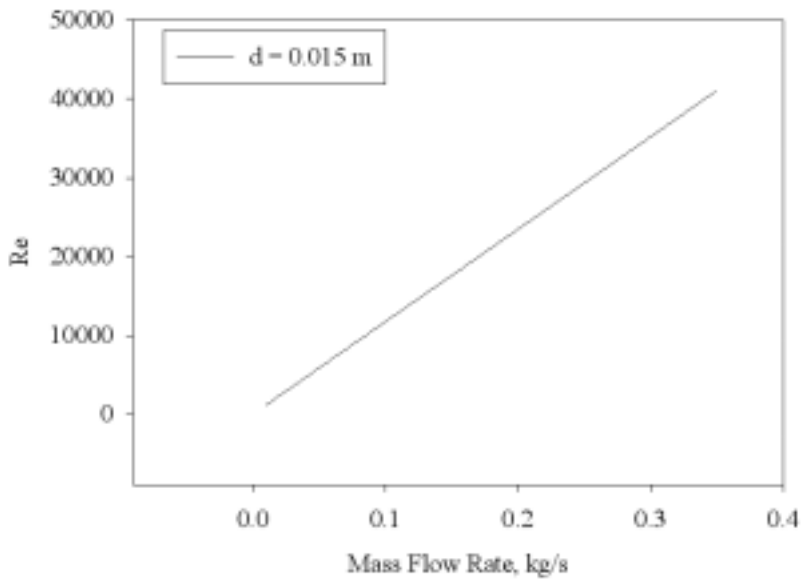


Fig. 65. Effect of Mass Flow Rate on Re

Fig. 64과 65를 보면 열전달 성능을 향상시키는 내부의 난류 유동을 일으키는 시점인 유량 0.1-0.2 kg/s사이, 그리고, 지름 0.03m이면 출구 온도를 55oC 이상으로 유지 할 수 있음을 1, 2차년도 연구 결과로부터 알 수 있었으나, 3차년도의 HX 7과 8는 1, 2차년도의 연구 결과보다 나은 성능 향상을 기대하기 위한 방법으로 Fig. 65에서처럼 유동 온도를 향상시키기 위한 방법은 유량의 증가 보다는 파이프 직경을 감소시키는 방법이 유리함을 알 수 있다. 따라서 본 이론적 분석을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 HX 7은 내부직경이 25 mm인 파이프를 HX 8은 HX 7의 실험 결과를 바탕으로 직경의 축소를 설계 방향으로 잡고 실험 장치를 설계하였다.

Fig. 66과 67은 HX 7을 바탕으로 설계 변경을 하였을 경우 농가 설치의 용이성을 부가하기 위하여 열교환기 형태를 평판 형태로 제작할 경우의 많은 파이프 변곡에 따른 유동 방향이 계속 순차하기 때문에 생기는 압력 손실을 평가하기 위하여 이론적으로 분석을 실시한 결과이다. Fig. 66-68에서 볼 수 있듯이 파이프간의 피치를 25 cm에서 10 cm로 줄였을 경우 파이프 피치가 20 cm이하일 경우 압력 강하량이 급격히 증가하는 것으로 관찰할 수 있다. 따라서 파이프 피치는 20 cm 이상으로 하는 것이 적당 할 것이며, Fig. 69에서 볼 수 있듯이 본 연구의 비교를 위한 1일 필요한 가정용 부하인 15,600 kcal/day이상의 발효열교환기의 성능 유지를 위해서는 파이프 직경은 0.02 m 이하여야 하며, 유동량은 0.2 kg/s 이상이어야 함을 알 수 있었다.

이런 분석 결과를 바탕으로 HX 7은 직경 25 mm의 관으로 제작이 되었으며, HX 8는 보다 나은 성능 향상을 위해 20 mm이하의 관 직경을 갖는 파이프를 가지고 설계를 하였다. 아울러 유동량을 0.2 kg/s 이상을 유지할 수 있도록 순환펌프를 사용하도록 하였다.

Fig. 70은 HX 7에 대하여 산야초, 나뭇잎, 톱밥을 퇴적한 바이오매스가 발효를 시작하여 시간 경과에 따른 각 위치별 열전대의 온도 변화를 관찰하여 나타내었다. 전체적으로 바이오매스를 퇴적한 발효 초기에는 온도가 40~80°C 사이를 유지하였으나, 세 달여의 발효과정을 거치는 동안 온도는 10~20°C의 분포를 나타냈으며, 별도의 바이오매스의 보강이 없는 한 발효과정이 끝난 것으로 판단되었다.

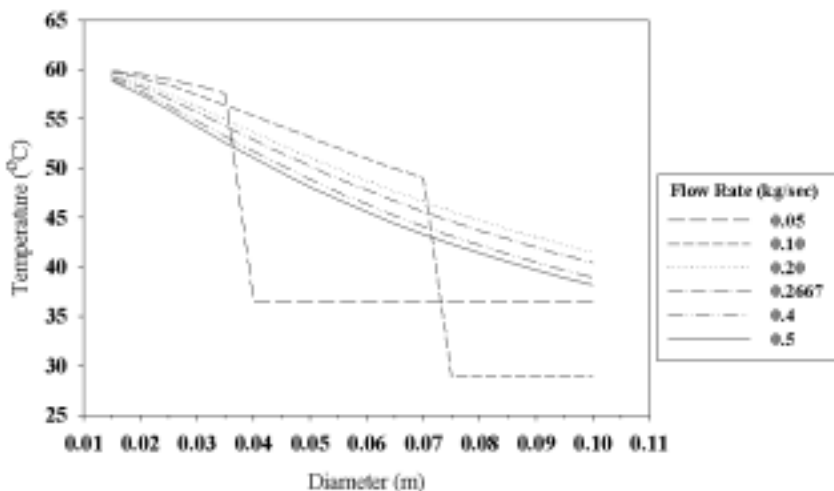


Fig. 66. Effect of Inner diameter on outlet temperature with different mass flow rate

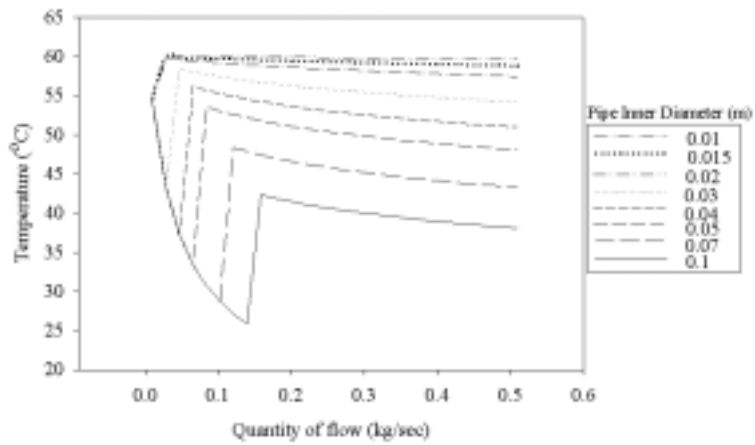


Fig. 67. Effect of mass flow rate on outlet temperature with different Inner diameter

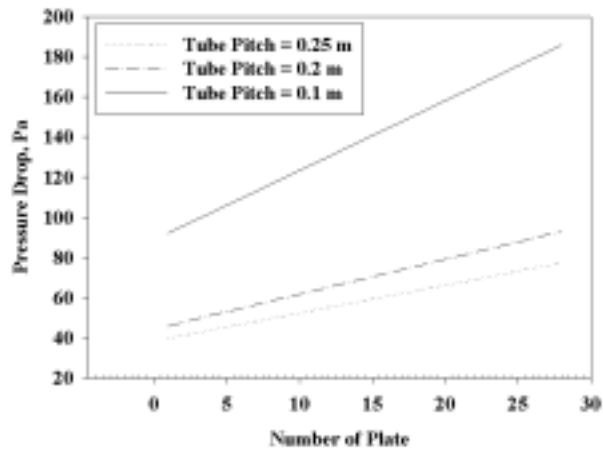


Fig. 68. Effect of the number of Pipe Plate on Pressure Drop (HX 8)

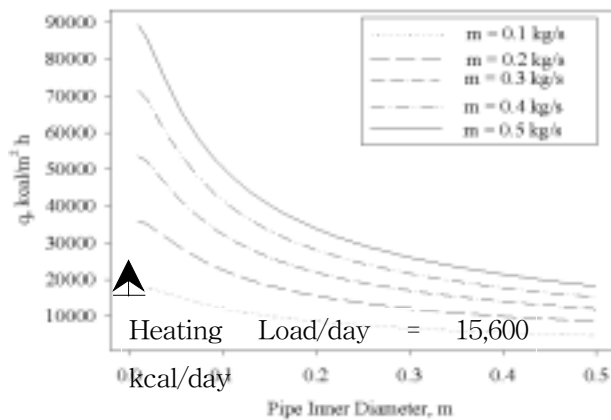


Fig. 69. Effect of Pipe Inner Diameter on Heating Load

HX 7은 실제 농가 실연을 모델링하기 위하여 겨울철 난방 목적으로 제작하였으나, 순환수 물탱크의 동결로 지속적으로 순환을 시킬 수는 없었다. 초기 겨울철 혹한에 따른 파이프 및 물탱크의 동결을 방지하기 위하여 단열을 시켰다. Fig. 70에서 볼 수 있듯이 바이오매스 내부의 온도는 40~50℃의 온도를 유지하는 것으로 보아 단열이 잘 이루어진 것으로 관찰할 수 있다. 겨울철 난방용으로 발효열 교환기의 제작 시 물탱크의 동결을 방지하기 위한 단열 방법이 보장되어야 할 것이다.

Fig. 71은 HX 8 대하여 산야초와 톱밥 (9:1)을 퇴적한 바이오매스가 발효를 시작하여 시간 경과에 따른 각 위치별 열전대의 온도 변화를 측정하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 바이오매스의 온도 분포가 40여 일 동안 큰 변화가 없이 전체적으로 온도는 40~60℃에 분포하였으며, 온도의 급감 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 활엽수를 이용한 바이오매스가 온도 지속에는 더욱 유리함을 알 수 있었으며, 아울러 HX 8는 농가의 항시 온수 급탕가능성을 확인하기 위하여 순환펌프를 24시간 작동시키는 운용환경이며, 이런 운용환경에서도 항시 35℃이상의 급탕온도를 유지하였다.

Fig. 72은 HX 7에 대하여 임의의 시간에서 각 열전대 위치에서의 온도 분포 변화를 나타낸 것이다. Fig. 55와 같이 각 열전대의 위치를 통해 바이오매스의 부분

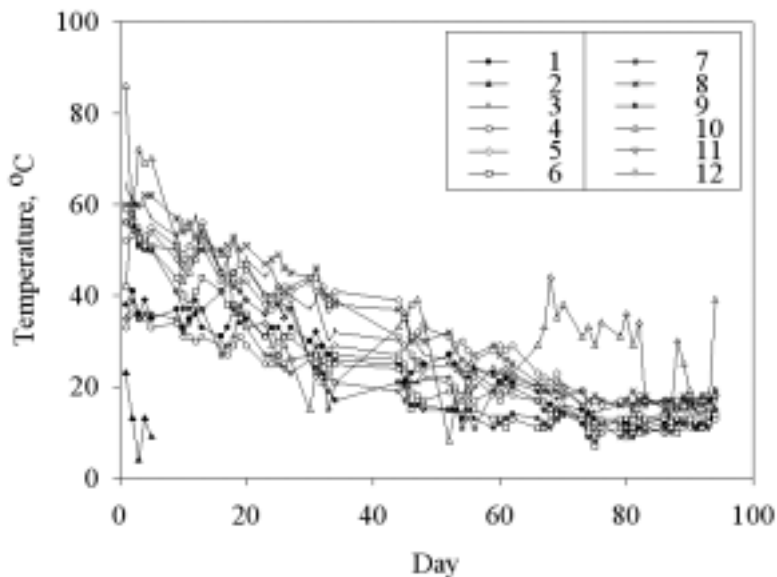


Fig. 70. Temperature Variation depending on Biomass Fermentation (HX 7)

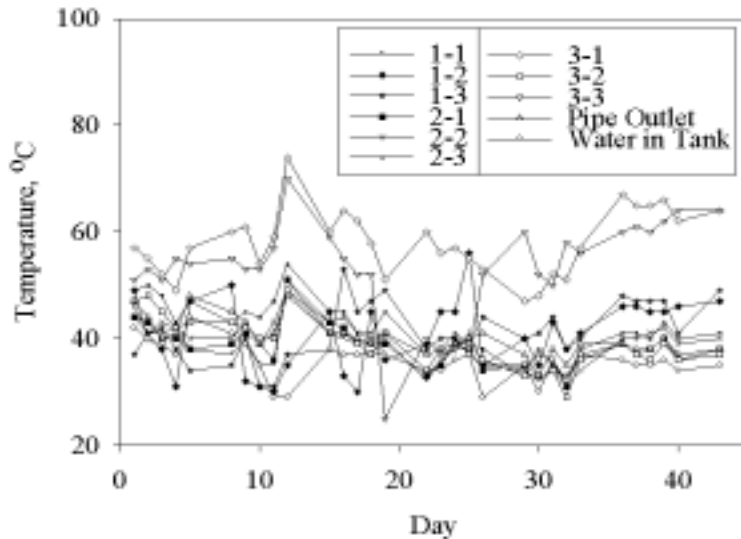


Fig. 71. Temperature Variation depending on Biomass Fermentation (HX 8)

별 온도 상태를 알 수 있다. 2번 열전대의 온도 값이 없는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 열전대의 파손으로 인해 측정이 불가능했기 때문이다. 3, 5, 8, 10번 열전대의 온도가 비교적 높게 나타났다. 이는 바이오매스 더미의 중간 부분의 온도가 가장 높게 나타난 것으로 향후 열 교환이 중간부분에서 많이 일어나도록 보강할 필요가 있는 것으로 관찰되었다.

Fig. 73은 HX 8에 대하여 임의의 시간에서 각 열전대 위치에서의 온도 분포 변화를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 55와 같이 각 열전대의 위치를 통해 바이오매스 전체의 각 부분별 온도 분포를 알 수 있다. Fig. 84에서 볼 수 있듯이 HX 8의 온도 분포는 HX 7과 달리 전체적으로 고른 온도 분포를 가지고 있는 것으로 관찰할 수 있었으며, 24시간 연속적인 물 순환이 있을 지라도 온도 급감은 없는 것으로 관찰되고 있다.

Fig. 74는 겨울철 난방을 위한 HX 7의 난방 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였으며, 그림에서 볼 수 있듯이 초기 순환펌프를 작동 시킨 후 방열판의 온도는 바이오매스의 내부온도에 따라 열 교환이 이루어져 60°C까지 상승하였다가 시간이 지남에 따라 온도는 강하하여 20°C 정도를 유지하였으며, 이는 겨울철 난방을 위한 충분한 열을 공급할 수 있는 것이다. 물탱크의 동결에 의해 실험이 불가능해지기 전까지 10여 일 동안 비슷한 온도를 방열판이 가질 수 있도록 열을 공급할 수 있었다.

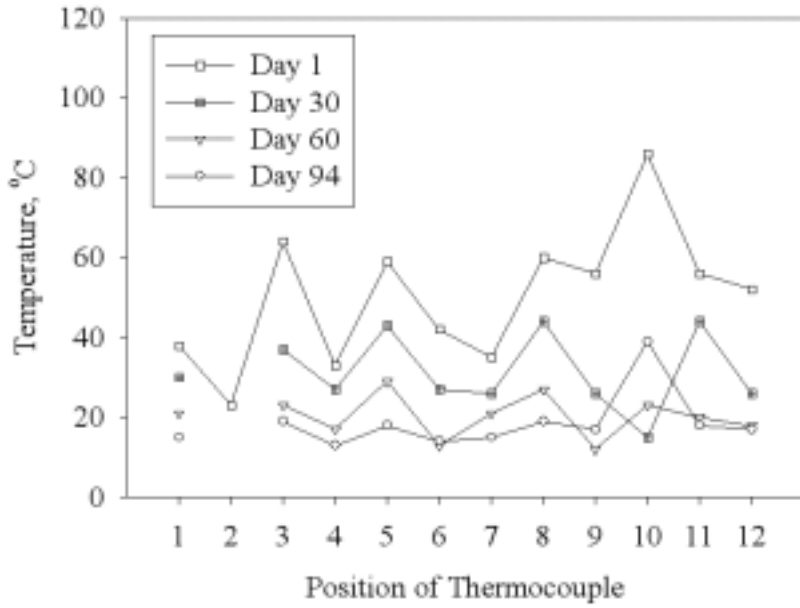


Fig. 72 Temperature Profile with Thermocouple Position. HX I

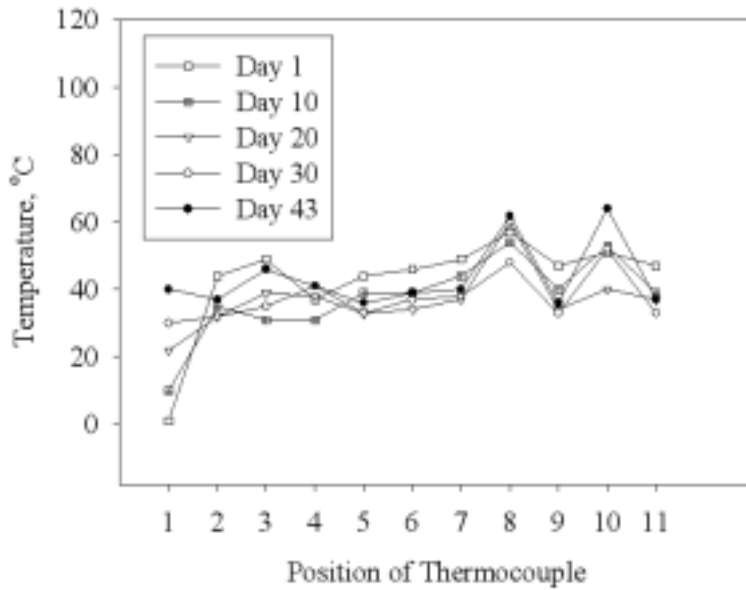


Fig. 73. Temperature Profile with Thermocouple Position (HX II)

1, 2, 3 = 1-1, 1-2, 1-3; 4, 5, 6 = 2-1, 2-2, 2-3; 7, 8, 9 = 3-1, 3-2, 3-3; 10 = Outlet Temperature; 11 = Temperature of Water Tank

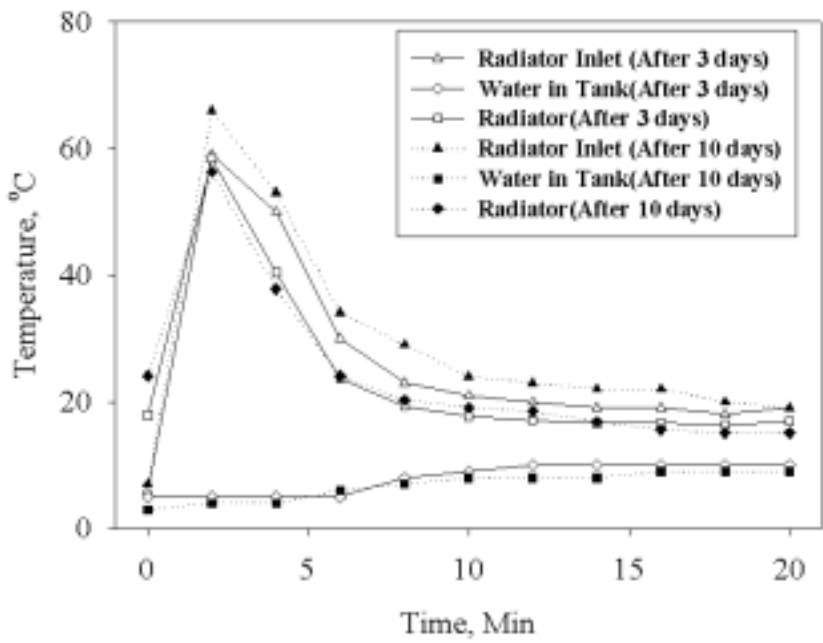


Fig. 74. Temperature Variation of Radiator installed in Room (HX 7)

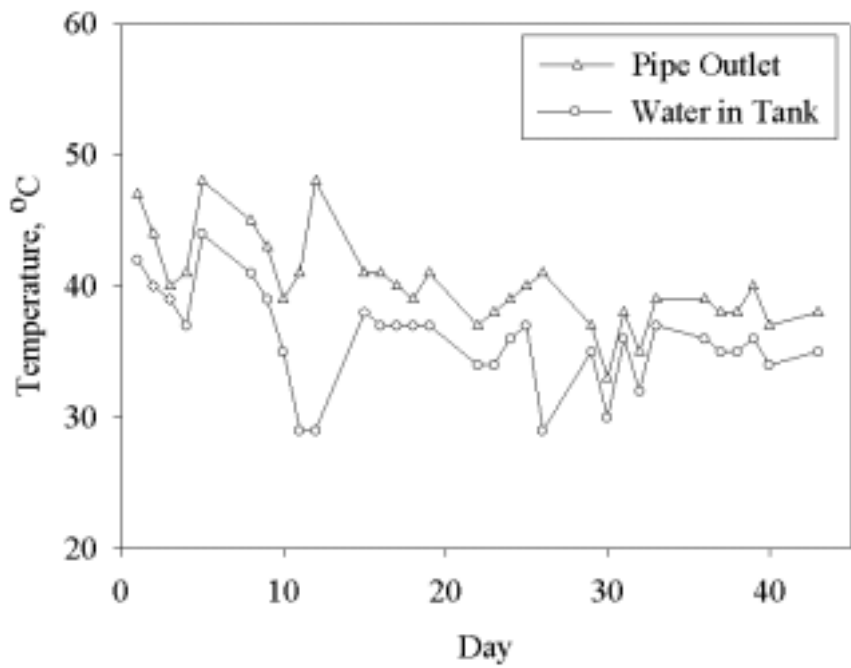


Fig. 75. Temperature Variation of Inlet-Outlet Fluid in (HXII)

HX 8을 통하여 온수공급을 위한 발효열교환기 시스템의 가능성을 확인하였다. Fig. 75에서 볼 수 있듯이, 발효열 교환기의 설치 후 40여일의 기간이 지났을 지라도 지속적으로 40℃ 이상의 온수를 공급하고 있음을 알 수 있었다. 실제 가정용 온수기로 사용된다는 가정 하에 시스템을 구성하여 수행하였다. 일일 가정에서 사용하는 온수 량은 60 Liter정도이며, 이를 4~5인 기준의 가정을 모델로 설정하여 300 Liter (0.267 kg/s의 유량으로 20분)가 공급되는 것으로 구성하였다.

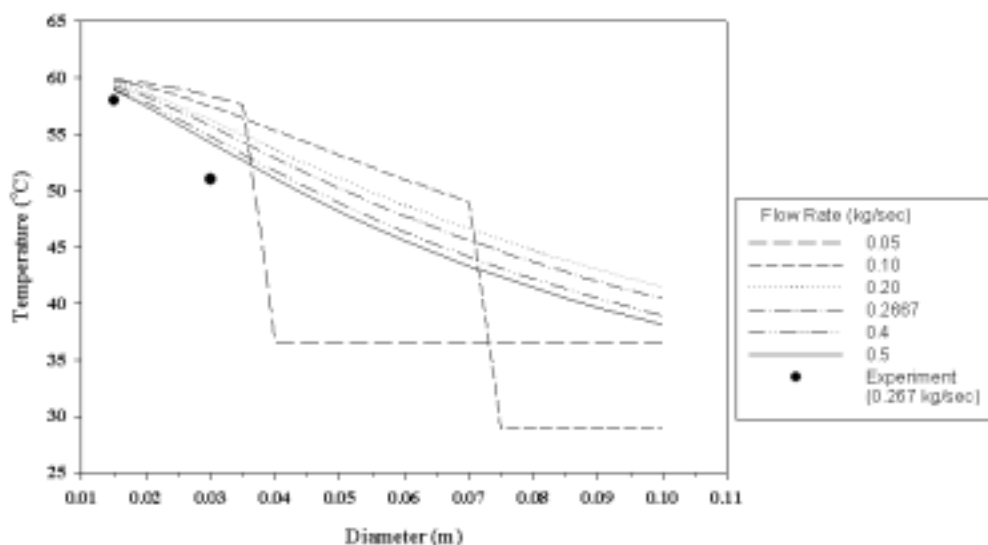


Fig. 76. Comparison between Experiment and Simulation, Effect of Inner Diameter on Outlet Temperature with different Mass Flow Rate

Fig. 76과 77은 실험장치의 제작 전 시뮬레이션에 의한 예측 값과 실험값을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 열전달성능에 열교환기 내부의 유동유량과 직경이 미치는 영향을 보여 주고 있다. 유량이 0.267 kg/s일 경우 직경의 감소가 열전달 성능향상에 크게 기여함을 알 수 있었으며, 실험 결과는 예측 값과 근사하게 일치함을 알 수 있었다. 실험값은 물 순환을 시켰을 경우의 초기 온도 값이다.

3차년도의 HX 7의 열용량은 2차년도의 시스템 열용량 (5,291,114 J (= 1,260 kcal))을 증가하는 것으로 판단 할 수 있었으나, HX 8를 통한 폐열 회수량은 연속적으로 물 순환이 이루어지도록 운용을 하였기에 전체 열용량은 판단하기 어려우나 1, 2차년도의 발효열교환기 및 HX 7을 훨씬 증가하는 열용량을 갖는 것으로

판단 할 수 있었다.

3차년도에 발효열 교환기중 HX 8는 2차년도 개발 비교 대상이었던 태양열 온수시스템의 1일 급탕부하(4-6인 가족 기준)인 15,600 kcal/day 를 훨씬 뛰어 넘는 열 교환 성능을 발휘하는 것으로 알 수 있다.

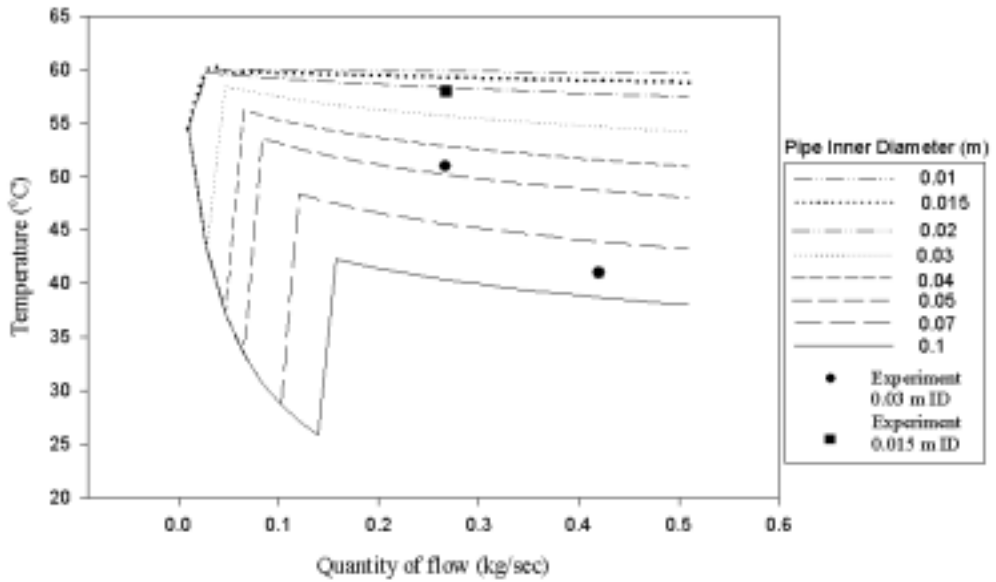


Fig. 77. Comparison between Experiment and Simulation, Effect of Mass Flow Rate on Outlet Temperature with different Inner Diameter

3. 바이오매스 열교환기 연구 결과 고찰

가. 바이오매스 재료 선택 및 퇴적

본 연구에 사용된 바이오매스는 산야초, 나뭇잎, 볏짚, 나뭇가지, 톱밥 등 농가에서 쉽게 구할 수 있는 것으로 발효열 교환기의 재료로 사용했다. 무엇보다도 본 연구의 목적인 발효열을 이용한 열교환기의 성능 및 개발 목적을 달성하기 위하여 발효열 교환기의 재료의 선택에 신중을 기하였다. 아래의 조건을 모두 갖춘 재료를 선택하기 위하여 연구기간 중 다양한 배합을 시도하였으며, 농가에서 구하기 쉬운 재료를 기준으로 재료를 선택하였다.

- 발효기간이 오랫동안 지속 될 수 있어야한다.
- 재료 공급이 손쉬워야 한다.
- 재료 손질이 손쉬워야 한다.
- 재료의 발효과정 후 퇴비로서 활용이 쉬워야 한다.
- 재료 공급 가격이 저렴해야 한다.
- 재료가 호기 발효가 쉽도록 기공률을 유지 할 수 있어야 한다.

1) 톱밥 (Wood Chip)

톱밥은 침엽수와 활엽수를 재료로 사용했으며 톱밥은 제재소로부터 나무 가공 후 남은 폐 톱밥을 수거하여 구입하였다. 활엽수와 침엽수 공히 구입시 10 만원 /ton 정도의 가격으로 구입할 수 있었다. 톱밥은 나무 가공시 나온 것으로 일정한 규격(길이 0.5-2 cm)으로 가공이 되어진 상태로 바이오매스 재료로 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 문제는 항시 수용에 맞게 일정하게 공급이 될 수 없다는 단점이 있다. 농가에서는 발효열 교환기를 위해서 항시 공급이 원활하지는 못하다. 농가에서 톱밥을 사용시는 톱밥보다는 폐 나뭇가지를 사용하여 가공하여 사용하는 방법이 더 손쉬울 듯하다. 아울러 톱밥은 일정한 규격으로 다른 여타 재료에 비해 하중에도 견디기 쉽기 때문에 우수한 바이오매스 재료일 것이다.

2) 산야초 및 볏짚

산야초는 농가에서 손쉽게 구할 수 있는 재료를 기준으로 수집하였다. 우선 강

독에 자라는 갈대나, 산과 들의 잡풀, 농 토옆의 잡풀 등을 수집하여 바이오매스 재료로 사용하였다. 산야초 수집시의 문제점은 수집을 위한 단가가 높다는 단점이 있으며, 수집에 필요한 단가의 큰 부분이 인건비로 농가에서 자체 조달시에는 인건비 비중이 큰 문제는 아닐 것이라 생각된다. 둘째는 산야초를 수집시 봄에 수집시 산야초는 수분을 많이 포함하고 있기에 적은 양으로도 바이오매스 열교환기를 충분히 퇴적할 수 있었으나, 향후 퇴적후 수분이 없어졌을 때는 바이오매스 더미의 침하가 발생해 더 지속적인 추가 퇴적이 필요했으며, 지속적인 침하 때문에 더 이상의 실험이 불가능할 정도가 되었다. 따라서 산야초를 수집 시에는 가을에 마른 산야초를 수집해야 적당할 것으로 판단된다. 벚짚은 가을의 마른 벚짚을 사용시 좋은 바이오매스로의 가치가 있으나 톱밥에 비하여 발효의 지속성이 떨어진다는 단점이 있다.



Fig. 78. Biomass Material : Wood Chip



Fig. 79. 산야초 및 벚짚

3) 나뭇잎

나뭇잎은 가을에 마른 낙엽을 수집하여 사용하였으며, 많은 양을 수집할 수 있는 장점이 있었다. 나뭇잎은 수집시 운반 및 수집 인건비가 주로 소요되었으며, 향후 농가에서 자체 조달시 재료비의 단가는 많이 낮아지리라 생각된다. 그림에서 볼 수 있듯이 나뭇잎은 재료의 특성상 작은 크기로 파쇄가 어려운 단점이 있었으며, 수분이 공급되었을 경우 나뭇잎이 서로 부착이 되어 통기가 어려운 단점이 있었다. 재료의 특성상 본 연구를 위한 바이오매스 열교환기의 실험을 위해서 퇴적시 침하가 심하게 이루어졌으며, 톱밥과 함께 혼합하여 사용 했을지라도 바이오매스 더미의 침하는 지속적으로 진행 되었다. 아울러 여타 재료에 비하여 발효가 원활히 진행되지 않았으며, 바이오매스 재료로는 부적합한 것으로 판단된다.



Fig. 80. 나뭇잎

4) 나뭇가지

나뭇가지는 산야초와 같이 재료의 수집을 위해서는 인건비 비중이 상당히 큰 비율을 차지하고 있으며, 봄에 수집된 재료는 수분을 많이 함유하고 있어 바이오매스 재료로는 부적합하였으며, 가을에 수집된 마른 나뭇가지의 사용시 톱밥과 같은 효과가 발생하는 것으로 관찰 되었다. 톱밥과 달리 나뭇가지를 바이오매스 재료로 사용시 적당한 크기로 파쇄가 되어야 바이오매스 재료로 사용할 수 있다.



Fig. 81. 나뭇가지

Table 11. Comparison of Biomass Materials

바이오매스 재료	발효기간 지속성	재료공급 원활	재료손질 원활	퇴비 가능성	가격 (실험용)	호기성
톱밥	4개월이상	공급처에 따라 차이가 있음	이미 1차 손질이 되어 공급되므로 바이오매스 재료로 손쉬움.	퇴비로 활용가능	50만원/ton	높은 기공률 유지
산야초	2개월정도	5-7월, 10-11월에 가능하나 봄에 수집된 재료는 수분 함량이 많아 부적합.	봄에 수집된 재료는 수분 함량이 많아 손질이 어려움. 가을의 마른 재료는 파쇄기로 파쇄해야함.	퇴비로 활용가능	100만원/ton (재료 수집인건비 포함)	재료의 파쇄 및 수분 함량에 따라 차이
나뭇가지	3개월정도	10-11월 마른 가지가 적당.	가을의 마른 가지는 파쇄기로 파쇄 후 사용 가능	퇴비로 활용가능	100만원/ton (재료 수집인건비 포함)	높은 기공률 유지
벗짚	2개월정도	10-12월 마른 벗짚은 사료용으로 사용하기에 공급이 어려움	가을의 마른 벗짚은 파쇄기로 파쇄 후 사용 가능	퇴비로 활용가능	50만원/ton (재료 수집인건비 포함)	재료의 파쇄 및 수분 함량에 따라 차이
나뭇잎	2개월정도	10-11월에 수집이 원활	가을의 마른 나뭇잎이 적당하나 재료의 특성상 파쇄가 어려움.	퇴비로 활용가능	30만원/ton (재료 수집인건비 포함)	재료의 파쇄 및 수분 함량에 따라 차이가 있으나 호기도 떨어짐.

나. 바이오매스 열교환기 제작법

Table 12에는 본 바이오매스 열교환기 실험에 사용된 배관구조에 따른 차이를 비교하였으며, 각각의 특성은 다음과 같다.

1) 나선형 열교환기

바이오매스 열교환기 제작을 위해 우선 최종적으로 농가에 실용가능성 및 상업화 가능성을 중심으로 열교환기 제작을 하였으며, 열교환기 개발 초기에는 바이오매스 열교환기의 이론적인 분석을 바탕으로 이론적인 접근이 쉬운 구조로 설계를 수행하는데 치중한 문제점이 있었으며, 농가에서 손쉽게 외부 도움없이 진행하는데에는 나선형이 손쉬운 점이 있었다. 실험을 위한 열교환기가 아니라 농가에서의 사용을 위해서는 별도의 프레임이나 복잡한 구조 없이 나선형으로 관을 매설하는 방법으로 사용시 간단한 설치가 가능한 장점이 있었으나, 관 직경이 증가하면 설치의 어려움이 있어 관직경이 20 mm정도의 관을 사용시 별 어려움 없이 설치가 가능하리라 생각이 된다. 본 여구에서 이론적인 분석을 통해 최적의 유체 순환을 위해서는 30 mm정도의 관이 적당한 것으로 나와 직경 30 mm의 관을 사용하여 열교환기를 제작하였으며, 이 경우의 문제는 관이 변곡이 어려워 프레임에 관을 지지할 수 있도록 제작해야 하는 어려움이 있었다. 3차년도 실험의 결과에서 볼수



Fig. 82. Helical Type Heat Exchanger

있듯이 발효열 교환기의 내부 배관을 위한 관의 직경이 20 mm 일 경우에는 오히려 더 나은 온도 결과가 나오는 것으로 관찰 되었으며, 이를 바탕으로 변곡이 쉬운 20 mm의 XL 파이프를 사용시에는 농가에서 손쉽게 프레임 없이 제작이 가능할 수도 있으리라 판단이 된다.

문제는 나선형으로 할 경우 발효열 교환기의 중심 및 주변에서의 발생열을 회수하기에는 어려움이 있다는 점이다. 이를 극복하기 위해서는 중심에 또 다른 나선형 열교환기 배관을 하여야 하지만 20 mm 관일지라도 내부의 직경 1 m 이하의 배관에는 변곡이 어려워 제작이 어려운 점이 있다.

2) 평판형 열교환기

평판형 열교환기는 상업화시 쉽게 제작 및 설치가 가능하다는 장점이 있다. 우선 평판형 열교환기를 위한 관의 직경은 25 mm이하의 관을 사용해야만 많은 변곡에 따른 배관이 손쉬웠다. 평판형 열교환기는 바이오매스 더미 전면적을 통해 발생하는 발효열을 충분히 회수 할 수 있다는 장점이 있으며, 나선형 열교환기에 비해 전 면적에 고무관이 배치되기에 열 회수량이 많다는 장점이 있다. 또한 장시간 운용할 때 온도의 급강하가 발생하지 않는 장점이 있다. 무엇보다도 평판형 열교환기는 평판을 미리 제작하여 시험시 연결만 하면 된다는 장점이 있다. 또한 발효열 교환기의 사용이 끝난 후 바이오매스의 퇴비로 이용시 해체가 각각의 평판만 해체하면 손쉽게 퇴비 수거가 가능하다는 장점이 있다.



Fig. 83. Plate Type Heat Exchanger

Table 12. Comparison between Helical and Plate Type Heat Exchanger

	나선형 열교환기	평판형 열교환기
열전달 면적(m ²)	10-15	6.3
제작방법	발효열 교환기 설치 장소에서 직접 제작	판넬을 미리 제작하여 연결가능
관직경	20 - 30 mm 프레임이 없을 경우 20 mm 이하가 적당.	20-25 mm 가 적당
상업화 가능성	상업화가 손쉽지 않음	상업화가 가능
열교환기 성능	바이오매스 온도가 장시간 지속 어려움 바이오매스 전체에 걸쳐 열회수가 어려움	바이오매스 전 면적에 걸쳐 발효열 회수 가능
설치 해체의 용이점	설치 및 해체가 쉽지 않음, 설치 보다는 해체의 어려움이 있다.	판넬의 선 제작이 가능한 후 설치 및 해체가 손쉽다.

3) 발효 촉진제

그림에서 볼 수 있듯이 바이오매스의 발효를 진행시키기 위해서는 발효 촉진을 위한 부합제가 사용되었다. 퇴비, 요소, 석회를 1: 1: 1의 비율로 섞어 사용하였다. 발효제는 바이오매스의 퇴적시 매 10 cm 높이로 퇴적후 그 위에 발효제를 뿌려주고 섞어 주는 방법으로 매 퇴적시마다 뿌려주어 전체적으로 섞이도록 하였다. 바이오매스 퇴적시 발효제를 혼합시켜 퇴적후 추가로 뿌려주지는 않았다.



Fig. 84. Fermentation Reinforcement



Fig. 85. Mixing



Fig. 86. 매 10cm 높이마다 퇴적후 발효제 퇴적

4) 바이오매스의 혼합

바이오매스의 혼합은 톱밥만을 사용하는 경우와는 달리 다른 재료와 함께 혼합 시 골고루 섞여야하는 문제가 있었다. 재료의 혼합을 위해서는 반드시 파쇄를 해야 하는 어려움이 있었다. 본 연구를 위해서 바이오매스의 적절한 파쇄를 위해서 최대 2 cm 의 바이오매스 재료가 되도록 파쇄기를 설계 제작하였다. 1차년도에 바이오매스의 파쇄없이 실험을 수행시에 바이오매스의 침하가 심하였으며, 발효가 원활히 진행되지 않는 것으로 관찰되었다. 따라서 2, 3차년도에 사용된 바이오매스재료는 톱밥과 동일한 크기로 그림과 같이 파쇄시켜 재료로 사용하였다.



Fig. 87. 바이오매스 파쇄

5) 바이오매스 열교환기 전체 제작 순서

① 바이오매스 준비

바이오매스 열교환기의 제작을 위해서는 아래 그림의 순서대로 진행이 되었다. 제일 먼저 바이오매스 재료의 우선적인 수집이 관건이었으며, 실험을 위한 바이오매스 재료는 1차년도의 오류를 바탕으로 가능한 수분이 많은 재료는 말려서 사용했다. 바이오매스 재료의 건조가 충분히 진행되었을 경우에 열교환기 제작이 진행되었다. 발효열 교환기 제작을 위해서 우선적으로 열교환기의 배관을 진행하였으며, 배관은 설계를 바탕으로 진행되었다.

② 배관 및 열전대 설치

바이오매스 열교환기의 배관은 우선적으로 프레임을 제작한 후 바이오매스 열교환기 실험장소로 옮겨져 그 위에 배관을 설치하였다. 배관시 실험을 위한 온도 측정을 위해 열전대를 미리 설치 되도록 하였다. 각각의 열전대가 바이오매스 퇴적시 손상이 가지 않도록 보호하였다.

③ 바이오매스 혼합

바이오매스의 혼합은 파쇄기에 의한 동일한 크기로 파쇄후 진행 되었다.



1a. 바이오매스 재료 준비 (산야초)



1b. 바이오매스 재료 준비 (톱밥)



2. 바이오매스 열교환기 배관 조립



3. 바이오매스 혼합

④ 바이오매스 퇴적 준비 및 발효제 준비

바이오매스 퇴적 전에 미리 발효제를 퇴비:요소:석회 = 1:1:1 이 되도록 준비하였으며 바이오매스 퇴적을 위해 재료의 혼합 및 파쇄가 이루어지도록 하였다.

⑤ 바이오매스 퇴적

바이오매스 퇴적은 매 10cm 퇴적후 물을 뿌려주고, 발효제를 섞는 순으로 진행되었다. 발효를 위해 바이오매스의 수분함량이 50 %이상을 유지해야 하기에 충분히 물을 뿌려 준 다음에 퇴적이 이루어 졌다.



4. 질소, 요소 비료 혼합



5. 바이오매스 퇴적 준비



6. 바이오매스 퇴적



7. 바이오매스 퇴적 완료



8. 바이오매스 열교환기 설치 완료 모습

6) 대용량 바이오매스 열교환기 바이오매스 퇴적법

① 바이오매스의 대량 분리 채취

본 연구에 사용된 바이오매스의 사용량은 1 - 2 ton 정도의 소량이 사용된 관계로 사람에 의한 작업이 충분히 가능하였으나, 실제 농가에서의 대용량 발효열 교환기의 제작시에는 단순 수작업에 의한 방법은 어려움이 있는 것으로 판단이 된다. 대용량의 발효열 교환기의 제작을 위해서는 바이오매스 공급을 위해 충분한 대형화가 가능해야 한다. 대형화를 위해서는 우선적으로 바이오매스의 분리 채집이 이루어져 있어야 한다. 바이오매스의 재료인 다양한 재료가 항시 공급이 가능하도록 대량으로 채집 수집이 되어 있어 필요시 상시 공급이 이루어지도록 해야 할 것이다.

② 바이오매스의 기초 파쇄 혼합

분리 채집된 재료의 공급전 미리 혼합하여 완벽한 혼합이 이루어지도록 해야 할 것이다. 농가에서 수작업에 의한 혼합은 많은 노동력과 시간을 요하기에 기계적인 혼합이 가능하다면 바이오매스 열교환기의 제작이 손쉬울 것이다.

③ 바이오매스 재료와 발효제의 혼합

바이오매스의 기초혼합이 이루어지면 바이오매스와 발효제사이의 원활한 혼합이 이루어지도록 기계적인 혼합이 이루어져야 한다. 바이오매스 열교환기의 제작

전단계로 이 과정을 거쳐 바이오매스가 발효제와 완전하게 혼합이 되었을 경우 농가에서는 배관 후 퇴적만 진행하면 되는 손쉬운 제작이 가능할 것이다.

④ 바이오매스 퇴적

바이오매스 퇴적 전에 과쇄 및 혼합이 미리 이루어진 재료이기에 배관이 이루어진 열교환기에 바이오매스를 퇴적하기만 되도록 할 수 있는 체계가 갖추어진다면 바이오매스 발효열 열교환기가 손쉽게 제작 될 수 있을 것이다. 기계적인 방법으로 대용량의 바이오매스를 한 두 번의 기계적인 작업으로 퇴적이 가능하기에 대용량의 바이오매스 열교환기 제작이 손쉬울 것이다.



1. 재료별 분리 채집



2. 바이오매스 재료 기초 혼합



3. 바이오매스 재료 및 비료 혼합



4. 바이오매스 퇴적

다. 최적 바이오매스 열교환기 선정

1) 발효열 교환기 선정

앞의 연차별 열교환기 실험 결과를 바탕으로 분석해 보면 HX 1, 2는 발효열의 지속성을 평가하기 위하여 열교환기를 설치하지 않고 발효 온도 및 시간만을 측정하여 실험을 수행하였다. HX 2 에서부터 발효열 회수를 위한 실험을 수행하였다. HX 1-6까지는 발효열을 회수하여 온수 공급이 가능한 가를 평가하기 위하여 매일 20분동안 300 liter의 온수가능성을 실험하였다. 실험을 통하여 매일 20분간 온수를 공급할 수 있는 열교환기의 가능성이 실험되었으며, 2차년도까지의 실험결과는 바이오매스의 파쇄가 원활하지 않은 관계로 발효열의 지속시간이 20여일에 불과하였으나, 바이오매스의 배합비에 따라서도 발효지속시간이 차이가 있었다. 바이오매스의 파쇄가 원활히 있었을지라도 바이오매스의 배합이 산야초의 양이 많을수록 발효 지속 시간은 오래 지속되지 않았으며, 산야초의 배합이 많을 경우 지속시간은 20-30일 정도에서 발효가 멈추는 것으로 판단되었다. 3차년도의 HX 8 일 경우 바이오매스의 배합은 톱밥을 90%로 사용했으며, 이럴 경우 활엽수 톱밥만을 사용 시의 발효열 지속시간보다 더 오래 발효시간이 지속되고 있었다. 3차년도 발효열의 지속 시간은 60여일 이상으로 단순 활엽수 톱밥을 사용 시보다 발효 지속시간이 오래 지속 되었다. 더욱이 열회수 기간은 HX 8일 경우 온수 순환을 24시간 지속적으로 진행되도록 하였기 때문에 다른 실험에 사용된 열교환기에 비하여 많은 열 회수가 진행되었음에도 온도 지속 시간이 장시간 이루어 졌다. 따라서 최적의 발효열 교환기로는 활엽수 톱밥과 산야초를 9:1정도의 배합과 함께 평판형 열교환기를 사용했을 경우가 최적임을 알 수 있다.

2) 발효열 교환기의 이용

발효열 교환기의 최종 목적은 발효를 통해 발생하는 열을 온수 혹은 난방을 위해 사용할 수 있느냐 일 것이다. 발효열 교환기의 사용 방법은 온수로 공급하는 방법과 회수된 열을 난방에 이용하는 방법으로 실험을 수행하였다. Table에서 볼 수 있듯이 바이오매스 열교환기는 다양한 재료를 기준으로 실험을 수행하였으나, 바이오매스의 발효지속시간이 제일 오래가는 시스템을 기준으로 온수 공급 및 난방에 대한 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 바이오매스 열교환기는 태양열에 의한 온수 공급시스템보다 나은 열량을 공급 할 수 있는 것을 알 수 있었으며, 발효

지속시간에 따라 그 성능에는 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 총 7개의 열교환기에 실험을 통하여 최적의 발효열 교환기는 3차년도에 수행한 평판형 열교환기이며, 바이오매스 재료는 활엽수 톱밥과 산야초를 9:1정도의 배합으로 섞었을 경우에 최적의 실험 결과를 얻을 수 있었다.

3) 메탄 회수

본 연구에서는 폐 바이오매스로부터 열을 회수하는 발효열 교환기의 본래의 목적 외에 메탄을 회수하여 연료로 사용할 수 있는 가능성을 수행하였다. 본 연구의 발효열 교환기의 발효는 호기성 발효일 경우에 발효에 의한 열 발생이 원활하기에 메탄 회수만을 위한 바이오매스 활용 방법에 대한 추가적인 연구가 필요한 듯하다. 향후 암모니아만의 회수를 목적으로 연구를 수행시 필요한 바이오매스 열교환기의 형태 및 개략도를 Fig. 89와 90에 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 암모니아를 추출하기 위한 구조는 호기 발효가 아닌 공기와와의 차단에 의한 혐기성 발효이다. 혐기성 발효를 위해서는 우선 바이오매스의 공기와와의 차단을 위한 밀폐구조로 열교환기를 제작해야하며, 바이오매스의 발효에 따라 발생하는 순수 암모니아를 추출할 수 있는 배관구조로 제작 설치되어야 하며, 암모니아 외의 발생하는 부가적인 가스와의 분리할 수 있는 화학적공정이 필요할 것이다.

Table 13. Comparison of Experimental Heat Exchangers

	열교환기 형태	바이오매스 재료	배합비	발효지속시간	열회수 기간	비고
HX 1	나선형	침엽수 톱밥	100	20여일		
HX 2	나선형	활엽수 톱밥	100	20여일	4 hours/day	열회수 실험
HX 3	나선형	산야초	100	15여일		
HX 4	나선형	나뭇잎+벚짚+산야초	40:20:40	20여일		
HX 5	나선형	침엽수+활엽수	50:50	20여일		
HX 6	나선형	활엽수+벚짚+산야초	50:10:40	20여일	20분/day	열회수 실험
HX 7	나선형	산야초+톱밥	60:40	30여일	20분/day	열회수 실험
HX 8	평판형	산야초+톱밥	90:10	60여일 이상	60여일	열회수 실험

Table 14. Usage of Biomass Heat Exchangers

	운용시간	온수공급 열회수량	온수온도	난방 열 회수량	난방온도
HX 2	4 hours/day	5,986 kcal/day 이상	33°C		
HX 6	20분/day	15,600 kcal/day 이상	26°C		
HX 7				2,900 kcal/day 이상	18°C
HX 8	60 days	15,600 kcal/day 이상	38°C		

Table 15. Optimum Design of Biomass Heat Exchangers

	태양열 온수기(H사)	최적 바이오매스 열교환기
1일 급탕부하(4-6인가족 기준), kcal/day	15,600	15,600 이상
집열면적(열전달 면적), m ²	19.8	6.3
온수량 (Liter)	300	500
열교환기 규격	사각 집열판(1020×1940) 1.98m ² 의 집열판 10개	2000*2000*1500 평판형
온수저장탱크 (Liter)	1,000	1,000
온수기 일일 평균 가능 열량(kcal/day)(중부지방 평균 일사량 기준)	42,230(서울 일사량 기준)	100,000 이상
열전달 면적대비 평균 급탕부하,kcal/day	788	2,476
재료	태양열	바이오매스

라. 바이오매스 열교환기의 발효지속시간 연장법

바이오매스 열교환기의 발효시간을 지속시키는 것은 본 연구의 중요한 과제이다. 발효열을 지속시키기 위하여 다양한 재료의 조합을 찾고자 했으며, 톱밥과 약간의 산야초를 파쇄하여 섞는 경우에 최대의 발효 지속시간과 열회수가 가능하였다. 그러나 본 연구의 호기성 발효의 특성상 향시 공기의 통풍과 수분의 함유가 중요한 발효의 조건이었으며, 또한 발생하는 발효열을 효과적으로 손실을 막는 단열 방법 또한 중요한 방법중의 하나였다.

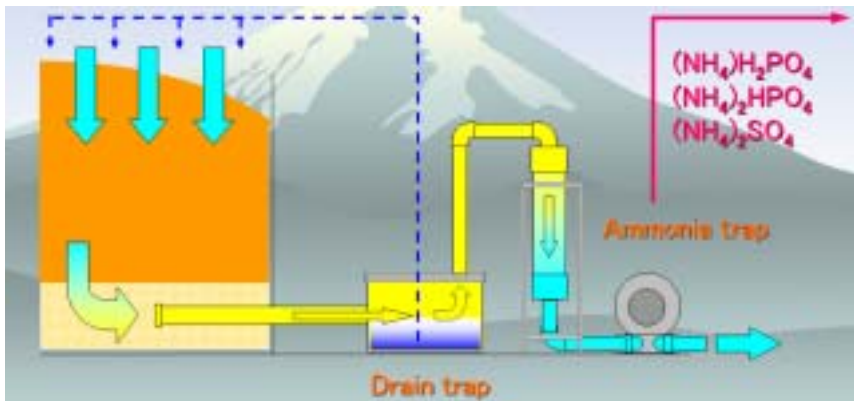


Fig. 89. Ammonia Trap from Biomass Fermentation

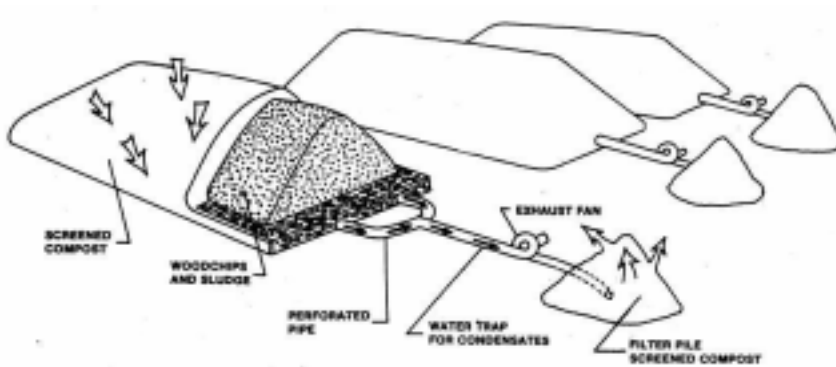


Fig. 90. Ammonia Trap Sketch from Biomass Fermentation

본 연구에서는 발효열을 지속시키기 위하여 바이오매스 더미 내부에 통기를 위한 통기 송풍장치를 설치하여 실험을 수행하였으나 큰 효과를 관찰 할 수는 없었다. 가장 중요한 것은 수분공급과 잦은 외부 통기 그리고 단열이 더 발효지속시간 향상에 도움이 되었던 듯 싶다. 실험 중 발효열 교환기는 항상 단열재를 덮어 열의 손실을 막았으나, 일주일에 두 번 정도는 수분공급 및 통기를 위하여 단열재를 제거하여 주었다.

마. 바이오매스 열교환기의 발효후 처리

발효열 교환기는 HX 1부터 8까지 실험을 수행하였으며, 열교환기마다 발효지속

시간의 차이는 있었으나, 발효가 끝난 열교환기는 바이오매스를 해체하여 퇴비로 사용하도록 충북대학교 원예학과에서 수거하였다. 발효가 끝난 바이오매스는 풍부한 유기 생물질로 인해 퇴비로서는 최고의 품질을 가지고 있었으며 발효후 다른 목적으로 다시 사용하여 재생할 수 있다는 측면에서 환경친화적인 시스템인 것으로 판명났다. 500평의 농가의 농사를 위해 퇴비필요량은 20 kg (2,900원)이 약 60-70포가 필요한 것으로 알려져 있다. 운반비 포함 약 25만원정도의 퇴비가 필요하다. 여기에 화학비료를 섞어 만들 경우 그 비용은 추가되리라 생각이 든다. 그러나 본 바이오매스 열교환기에서 사용되는 바이오매스량은 약 1,000 kg(1 ton)으로 소규모 농가에서 필요로 하는 퇴비량을 공급할 수 있을뿐더러 이미 내부에 충분한 발효로 유기물이 풍부한 우수한 퇴비를 공급할 수 있다. 여기에 대해서는 “제 4 절 산림 폐 바이오매스 자원의 발효 후 활용 방안과 경제성 분석” 편에서 자세히 다루었다.

바. 향후 보완 및 개선점

본 연구를 통하여 다양한 재료와 형태의 발효열 교환기 8가지를 실험을 통해서 연구하였다. 본 연구의 궁극적인 목적인 폐 바이오매스에서의 발효열을 회수하여 농가의 하우스 난방이나 농가의 가정용 온수 공급을 하는것이 최우선이었으며, 그 제일 우선시 되는 것이 아래와 같은 세부 목표를 달성함이었다.

- 바이오매스의 발효열 발생을 위한 재료 선택
- 바이오매스의 발효열의 지속시간 연장법
- 바이오매스로부터의 많은 열회수
- 바이오매스 열교환기의 제작, 설치 및 해체의 용이
- 바이오매스 발효열 교환기의 상업화의 방법

위의 목표를 달성하기 위하여 다양한 연구를 수행하였으며, 소기의 성과를 달성하였다고 생각한다. 실제 농가에서의 바이오매스 발효열 교환기의 제작 및 설치를 위해서는 다음과 같은 몇가지 보완점이 있다고 생각되며, 추후의 지속적인 연구가 가능하다면 보완연구가 수행되어야 할 것이다.

- 바이오매스 재료 수급의 용이점을 실제 농가에 사전 설문조사를 통한 자료를 수집할 수 있다면 학교에서의 연구가 실제 상용화를 이루는데 수월할 것이다.
- 바이오매스의 재료간 배합을 통하여 최적의 배합을 선택하는데는 아직 더 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.
- 바이오매스의 발효열을 지속시키기 위한 부가적인 요소 및 질소 비료의 혼합량을 다양한 방법으로 연구를 지속해 볼 수 있어야 할 것이다.
- 실험의 특성상 많은 인력과 시간이 필요한 연구이기에 충분한 여유를 가지고 연구의 지속성이 유지될 수 있어야 할 것이다.
- 열교환기의 배관의 특성상 열회수를 원활히 하기 위한 다양한 형태를 시도해 볼 필요가 있다.
- 농가에서의 제작, 설치, 및 해체의 용이성을 확보하기 위한 체계를 갖출 필요가 있다. (바이오매스 퇴적 및 해체를 기계적으로 할 방법)

4. 결론

현재까지 수행된 연구결과를 바탕으로 농가에 활용 가능한 발효 시스템의 바이오매스 최적 규모는 실험 결과에서 볼 수 있듯이 지속적인 발효열 회수를 위하여 기존의 바이오매스 용량의 10배 정도의 양이 필요할 것으로 판단할 수 있으며, 원활한 내부의 발효 상태 및 발효 열량 환산을 위해 현재의 열전대 삽입 수량은 적당한 것으로 판단되나 농가에서 쉽게 발효 상태를 관찰 할 수 있도록 기존의 Switching Box의 개선이 필요하다. 아울러 농가에서 충분히 이용 가능한 바이오매스 퇴적더미의 크기에 따른 발효열의 지속성 및 경제성분석을 위한 바이오매스의 양과 열교환기 시스템의 규모사이의 관계를 지속적으로 연구할 필요가 있다. 열교환기의 열전달 표면의 고른 분포를 위해서는 열전달 표면의 분산을 필요로 한다. 열교환기 시스템의 원활한 설치 및 분해를 위하여 실제 농가에 설치한다는 가정하에 경제성 및 제작-해체의 용이성을 기본으로 시스템은 설계 제작 되었으며, 최소의 부품을 사용하여 최적의 열교환 능력을 발휘할 수 있도록 설계 제작되었다. 아울러 폐 바이오매스의 퇴적 및 고정을 위하여 기계적인 요소를 경제성 및 운용상의 용이성 등을 바탕으로 설계하였다.

HX 4의 경우 산야초+벼짚+나뭇잎의 원재료를 파쇄 절단 없이 퇴적하여 실험을 수행하였으나, 바이오매스 입자간의 공간이 많이 발생하여 바이오매스 입자간의 발효가 원활하기 이루어지지 않는 문제점이 있었으며, 무엇보다도 겨울철에 이용 시 전체 시스템의 보온 문제가 제일 시급한 것으로 분석 되었다. HX 5와 HX 6의 바이오매스는 1차년도에 비하여 발효열의 발생이 지속적으로 발생하였으며, 온도 면에서도 1차년도에 비하여 안정적인 것으로 관찰되었다. HX 6의 경우 바이오매스 재료의 파쇄 절단을 위하여 파쇄기가 설계 제작되었으며, 파쇄기를 통하여 5 mm길이의 일정 규격의 바이오매스를 이용하여 압착 퇴적하였다. 그로 인해 HX 4에서 발생했던 바이오매스 더미의 침하 등의 문제는 발생하지 않았으며, 전체 바이오매스 더미가 안정적으로 형태를 유지할 수 있었다. 아울러 HX 6은 1차년도에서 문제시되었던 열 회수 능력의 보강을 위하여 열교환기 파이프 피치와 열전달 면적을 증가시켜 가능한 많은 열을 회수 할 수 있도록 하였으며, 1차년도의 바이오매스의 량의 부족에 따른 열 회수 능력의 부족한 면을 열전달 면적을 증가시킴으로써 설계 목표에 근접한 실험결과를 얻을 수 있었다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

- 발효열 이용 열교환기 개발을 위해 이론적 해석을 통해 최적 설계점을 찾았고 실제 열교환기를 제작하여 만족 할 만한 결과를 얻었다.

- 열교환기의 실제 응용 가능한 소형 온수기 분야에 대한 실용 모델링을 시도하였으며, 이를 통하여 본 연구를 통해 개발된 시스템이 온수기로 이용될 경우 태양열 온수기의 에너지 공급량을 50 %이상 월등히 증가하는 것으로 확인되었다.

- 메탄의 회수를 위한 장치가 시도되었으나, 최대 1% 정도의 메탄이 발생하는 것으로 관찰 되었고, 다량의 이산화탄소가 발생하는 것으로 관찰되었다. 따라서 메탄회수 능력을 보강하기 위한 방법으로 메탄회수를 위해서는 혐기성 발효를 조합한 형태의 보완이 필요한 것으로 판단된다.

- 본 연구로 개발된 시제품은 싸이로 형태로 제작되었으며, 설치와 제거가 용이하도록 조립식 구조로 제작되었다. 시제품을 통한 본 연구의 목표 달성을 위하여, 메탄발효, 발열량 증가 및 교반기 설치, 그리고 보온을 위한 추가적인 보완장치가 필요할 것으로 판단된다.

본 발효열 교환기의 최종 목표는 농가의 폐 바이오매스를 이용한 저가의 난방 및 급탕을 가능하도록 하는 열교환기의 상품화이다. 3차년도 실험의 주된 관점은 실제 농가에 적용이 가능하며, 상품화가 되어 쉽고 용이한 설치 및 해체가 가능

할 것인가를 확인하는 것이다. 이런 관점에서 연구가 수행 되었으며, 설치 및 해체가 용이하면서도 성능 향상을 가져올 수 있는 다양한 방법이 시도 되었으나, HX 7의 실험을 바탕으로 열교환기 파이프의 직경이 감소하면 열 교환에 더 유리함을 이론 분석과 실험을 통하여 확인 할 수 있었으며, 최종적으로 설치 및 해체가 용이한 평판형태의 열교환기가 설계 제작 되었다. 이론적인 분석을 통하여 유량이 0.2 kg/s이상이고 직경이 0.02 m이하인 최적인 조건을 만족시키도록 설계를 하여 실험을 수행하였다.

실험을 통하여 HX 7은 겨울철 난방을 위한 20 ℃정도의 난방용 온수를 공급할 수 있는 것으로 알 수 있었으며, HX 8은 40여일이상을 24시간 40 ℃정도의 온수를 공급 할 수 있는 것으로 실험을 통하여 관찰 되었다. 1, 2차년도에는 다양한 바이오매스의 성분비등을 가지고 실험을 하였으며, 3차년도에는 1, 2차년도의 결과를 바탕으로 보완하여 실험을 수행하였다. 실험 결과를 보면 산야초의 양이 일부 섞인 활엽수 바이오매스 위주의 성분비를 유지하는 것이 이상적인 배합임을 HX 8을 통하여 알 수 있었다.

연구의 최종 목표인 실제실연을 통하여 바이오매스 발효열교환기는 농가의 난방 및 온수 급탕이 충분히 가능한 것을 알 수 있었으며, 향후 상품화를 위해서는 나선형 형태보다는 평판형 시스템이 유리한 것을 알 수 있었다.

제 4 절 산림 폐 바이오매스 자원의 발효 후 활용 방안과 경제성 분석

1. 발효열 이용 후 산물에 대한 활용 방안 (생물비료)

가. 서론

2004년도 우리나라의 목재사용량은 약 1,200만 m³으로서 여기서 발생하는 폐 바이오매스는 약 30%인 360만 m³에 달하고 있으며(조, 1987), 이 가운데 폐 바이오매스는 일부만 보일러 연료로 사용되고 나머지는 폐기 또는 공해원으로 취급되어 많은 기업들이 그 처리대책에 고심하고 있다. 한편 농업, 임업, 원예 분야에서의 목질계 퇴비는 퇴구비에 대체되는 우수한 유기질 공급원으로서 선진 각국에서는 많은 주목을 받고 있다.

톱밥을 비롯한 목질계 폐재 퇴비라 하더라도 폐재의 종류에 따라 각기 원소의 조성이나 그 성질이 전혀 다르며, 일반적으로 짚류, 풀, 낙엽등 보다는 분해가 어렵고(조, 1987), 수중에 따라서는 식물의 생육을 저해하는 물질을 포함(河田, 1981; 日本科學技術廳 資源調査會, 1971)하는 경우도 많다. 그리고 탄소율(C/N율)이 매우 높기 때문에(河田, 1981) 그대로 사용하면 질소 결핍이나(Allison 등, 1963) 병해가 발생되기 쉽고, 다량 시용하면 건조의 해를 입게 되는 경우도 있다. 그러나 원료의 특성과 퇴비화의 과정을 면밀히 파악하여 제조하고, 그 성질을 살려 사용하면 매우 효과적인 유기질 비료 내지는 토양개량제로서 지력의 유지 증진에 크게 도움을 줄 수 있기 때문에 이미 미국과 일본 등지에서는 널리 시판되고 있으며, 공급이 수요를 따르지 못하고 있는 실정에 있다.

우리나라는 산림 바이오매스(풀, 간벌목 등) 및 임산물 처리에 의한 대량의 산림 부산물 발생하고 있으며, 농산폐자원으로서는 집약적 농업구조에 따른 왕겨, 벧짚 등 대규모의 농산폐기물이 발생하고 있으나, 이러한 대량의 폐 바이오매스 자원을 실제로 활용할 수 있는 기술이 부족하여 이들 자원들을 이용한 발효열 이용, 메탄 가스 생산과 같은 에너지 생산, 유기질 비료의 공급 및 반추가축의 사료로서 활용할 수 있는 기술 개발이 시급하다. 농작물의 유체, 낙엽 혹은 풀 등을 이용한 에너지원 및 유기질비료로서의 이용은 이미 오래전부터 농업분야에서 행해져 왔으나, 목재공업 분야에서 대량으로 배출되는 목질계 폐재(수피, 톱밥등)도 동일한 식물

유체이나 미생물에 의해 분해가 곤란하여 미생물을 이용한 발효용 원료로서 이용되지 못하였다. 따라서 목질계 자원의 미생물에 의한 분해역사는 그리 오래된 것이 아니며, 미국의 경우 1950년대 초부터, 그리고 가까이 일본의 경우 1960년대 초부터 이루어졌다.

우리나라의 경우 1974년 산림청 임업시험장에서 최초로 목질계 폐재를 이용한 퇴비화 및 사료화에 관한 교재(조, 1974)가 발간되었고, 1985년 산림청 임업연구원에서 목질계 폐재의 퇴비화 및 에너지화의 가능성에 관한 진단을 실시한 바 있다. 톱밥 퇴비의 실용화에 관하여 1977년부터 반도목재(주)에서 톱밥을 이용한 특수 퇴비의 개발에 착수하여 1983년 봄부터 풍성이란 상품명으로 시판되기에 이르렀다. 이외에도 대삼기업(주)으로부터 수퍼그린, 미원유기질비료, 연암축산에서 하이바야크, 계분발효 비료 등 몇 종류의 유기질비료가 생산되고 있다. 그러나 목질계 폐재의 퇴비화 및 부숙톱밥 퇴비의 성능에 관한 연구는 조(1990)가 실시한 연구를 제외하고는 전무한 실정이다.

미국의 경우 유기질비료의 원료로서 목재 폐재를 이용한 것은 1950년대 초 Dunn 등(1952, 1953)이 검토한 것이 최초의 것이며, Wisconsin 대학의 Davey 등(1953, 1955)에 의해 Sugar maple 톱밥을 이용, 분해균을 접종하여 퇴비화하는 방법을 연구, 실용화까지 이르렀다. 그 후 1970년대 초 이미 18개의 주립대학, 농림업 관계연구소 및 민간기업에서 목질계 폐재톱밥 이용개발에 관한 연구가 강력히 추진되어 그 성과가 급속히 실용화되어(Sales, 1973), 오늘날 Bark dust, Fertile mulch Forest gold, Forest humus, Ivory orchid bark, Oregon black gold, Silvacon 등의 상품명으로 농업, 원예, 임업 분야에서 널리 이용되고 있다.

일본에 있어서는 1956년 Shimamoto(1956)가 발효 첨가제를 사용한 톱밥 퇴비화에 관한 연구가 처음으로 실시되었으며, 오사카 영림국 Ootaki(1971)가 퇴비화를 실용화하는데 성공하였다. 그 후 농림성 임업시험장, 북해도 임업시험장, 시미즈항 목재산업 협동조합등이 중심이 되어 1968년부터 본격적인 목질계 퇴비의 기업화를 추진하였으며, 근년에 와서 약 80개 공장에서 연간 생산량이 약 40만 톤에 달하고 있다.

본 연구에서는 산림 폐 바이오매스 자원을 발효시켜 나오는 열을 이용한 후의 산물을 유기질 비료로써 이용할 수 있는지, 그리고 비료로서의 효과는 어느 정도인지 알아보았으며, 이 연구를 통해 폐 바이오매스 자원의 재활용 및 농·임업의 생산성과 경제성을 제고시키는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

나. 재료 및 방법

1) 공시 재료

활엽수재 톱밥으로서 참나무류를 주축으로 한 활엽수 톱밥은 풍림산업(주), 산야초(갈대류+소나무 낙엽+활잡목 낙엽+벚짚)를 충북대학교 구내 수집 및 인근 농가에서 구입하여 공시하였다.

2) 공시 발효비료

활엽수재 톱밥 및 산야초 재료에 발효첨가제로서 요소, 발효용 부숙비료, 석회 등을 첨가하고, 전체의 함수율을 50~60%가 되도록 혼합하여 발효시켜 제조된 것을 유기질비료로서 공시하였다.

3) 유기질비료의 비료성분 분석 및 유식물 파종 실험

가) 비료 성분 분석 : 산도, 질소, 인산, 칼륨 및 유기물함량을 분석하였다.

나) 유식물파종실험 : 유기질비료와 모래를 0%, 50%, 100% 비율로 혼합한 포트에 무 종자를 파종하고 2일마다 1회 관수하면서 생육상황을 관찰하였다.

다) 활엽수 및 침엽수 식재시험 : 일반 포장에서 토양과 유기질비료를 여러 가지 혼합비(30, 50, 70%)로 섞은 다음, 이들 혼합비의 공시상토를 직경 30 cm, 높이 30 cm의 화분에 넣고, 침엽수 2 수종 (측백나무, 낙엽송) 및 활엽수 2 수종 (회양목, 철쭉)을 각각 5분씩 식재하고 활착율을 조사하였다.

라) 토양 온도 변화에 미치는 영향 : 유기질비료의 혼합율이 토양 온도의 변화에 미치는 영향을 8:00, 14:00 및 18:00에 3 회 측정하였다.

다. 결과 및 고찰

1) 비료 성분 분석

표 1은 활엽수재 톱밥으로 제조한 유기질비료의 성분을 산야초 재료로 제조한 유기질비료와 비교한 결과를 나타낸 것이다. 산야초 재료에 비해 활엽수재 유기질비료의 질소 함량이 다소 높았으며, 특히 활엽수재 톱밥으로 유기질비료를 만들게 되면 발효과정에서 유기물함량이 많이 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 목재 톱밥은 칼슘 함량이 높은 것이 특징이었다.

Table 1. Chemical components of organic wood composts

L/I	Hardwood sawdust	Leaves + grass
P ₂ O, %	1.02	0.95
Total N, %	1.41	0.88
K ₂ O, %	0.33	1.46
CaO, %	2.82	0.16
MgO, %	0.19	0.13
Organic matter, %	20.7	28.6

2) 유식물 파종실험

유기질비료와 모래에 유기질비료를 0%, 50% 혼합한 것과 유기질비료가 100% 인 포트에 생육 저해 물질에 가장 민감한 것으로 알려진 무 종자를 파종하고 2 일마다 1회 관수하면서 생육상황을 관찰하였다. 모든 처리에서 무 종자가 발아되었으며, 모래만의 대조구에 비해 유기질비료의 혼합량이 많아질수록 무의 생장이 우수한 것으로 나타났다(표 2, 그림 1과 2 참조).

모래와 유기질비료를 여러 가지의 혼합비 (0, 30, 50, 80, 100%)로 섞고, 이를 직경 20 cm, 높이 30 cm 의 화분에 넣은 다음, 식물 생육 검정 재료로서 많이 사용되는 무 종자를 파종하고, 2일 1회 관수하면서 생육 상황을 관찰하였다.

무 종자를 파종하고 4~5일이 지나 모두 발아하였으며, 모래로만 이루어진 100 :



Fig. 1. Growth of radish on 3 days after seeding



Control Leaves+Grass(B-1) Hardwood sawdust(B-2)

Fig. 2. Growth of radish on 10 days after seeding

Table 2. The effect of organic wood composts on growth of radish

Organic composts	Days after seeding	Mixing ratio with sand, %		
		0	50	100
Hardwood sawdust	5	9.5/2.5	11.5/3.5	14.5/5.0
	10	11.0/3.5	14.5/3.8	15.8/7.5
Leaves + grass	5	8.0/2.1	11.0/3.5	13.5/4.2
	10	11.5/3.0	12.5/3.0	14.5/8.0

* All values are top/root length(unit : cm) of radish.

0 구가 1일 늦게 발아하였다. 그리고 파종하여 10일이 경과한 무의 지상부 및 지하부 생육 상황을 관찰한 결과, Fig. 3에서 보는 바와 같이 유기질비료를 첨가하지 않은 100:0 구를 제외하고는 거의 동일한 성장을 보여주었다. 무의 생장은 유기질비료의 첨가율이 높아짐에 따라 생장이 좋아졌으나, 50% 이상 첨가에서는 차이가 거의 없었다. 지하부는 80% 첨가구까지 생장이 왕성하였다.

파종 후 15일이 경과한 무의 생장은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 100:0 구를 제외하고는 거의 균일한 성장을 보여주었으며, 유기질비료의 첨가 효과는 파종 후 10일의 결과와 동일하였다. 특히 지하부의 생장은 거의 안정화되는 양상으로 나타났다. 파종 후 25일이 경과하면 Fig. 5에서처럼 처리간에 현저한 차이가 나타났으며, 유기질비료 혼합율이 증가됨에 따라 지상부 및 지하부의 생육이 크게 증가하였다. 특히 지상부는 지하부 생장의 약 2배에 이를 정도로 왕성한 성장을 보였다. 그리고 유기질비료 혼합율이 적을수록 떡잎의 황화 현상이 일어났다.

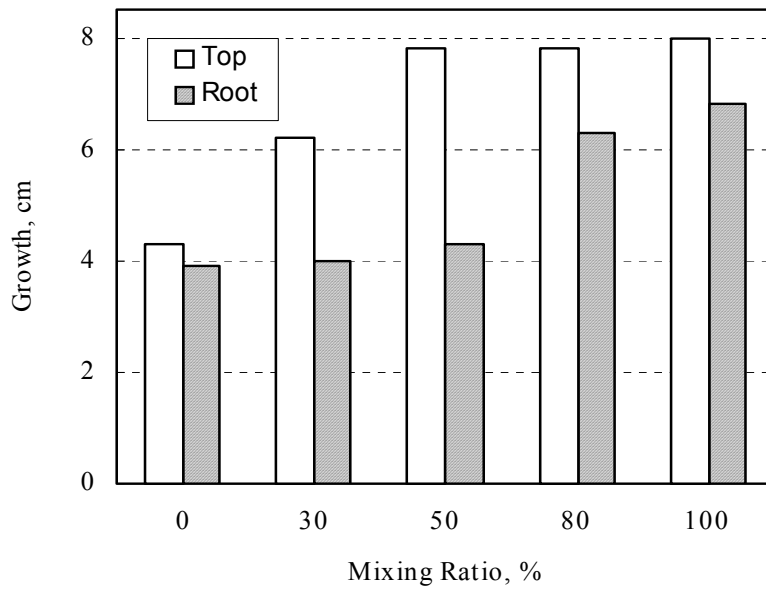


Fig. 3. The effect of organic wood compost on growth of radish (10 days after seeding)

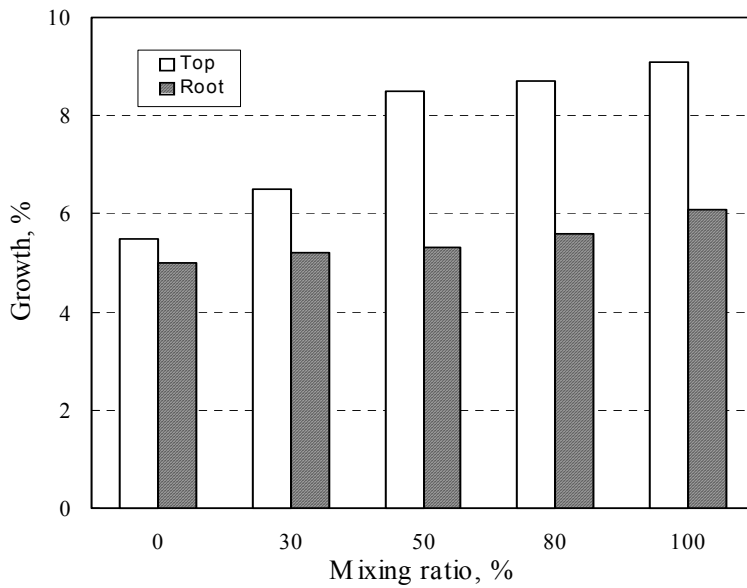


Fig. 4. The effect of organic wood compost on growth of radish (15 days after seeding)

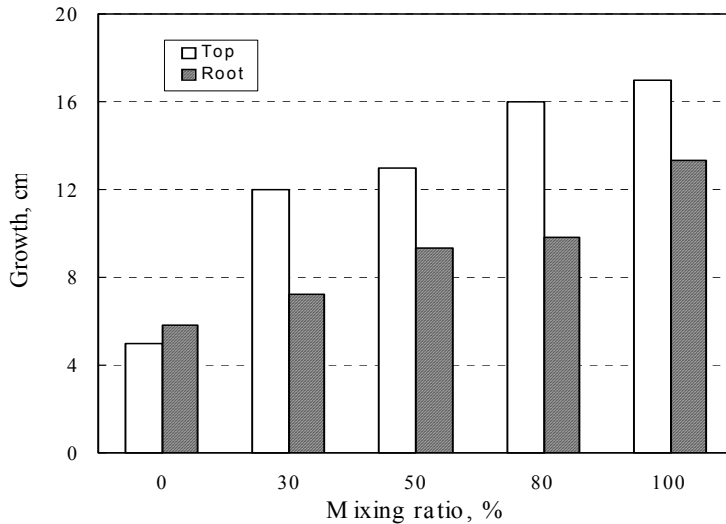


Fig. 5. The effect of organic wood compost on growth of radish (25 days after seeding)

3) 활엽수 및 침엽수 식재시험

일반 포장에서 토양과 유기질비료를 여러 가지의 혼합비(30, 50, 70%)로 섞고, 이들 혼합비의 공시상토를 직경 30 cm, 높이 30 cm 의 화분에 넣어, 침엽수 2 수종 (측백나무, 개잎갈나무) 및 활엽수 2 수종 (회양목, 철쭉)을 각각 5본씩 식재하였다. 모두 100%의 성공적인 활착율을 보였고, 120 일이 경과한 현재까지 생육 장애가 없이 잘 자라고 있다.

4) 토양 온도 변화에 미치는 영향

유기질비료의 혼합율이 증가함에 따라 토양 온도가 다소 높아지는 경향을 보여주었다. Fig. 6은 오전 8:00 에 측정된 토양 온도 변화를 나타내는 것이며, 아침 외기의 온도가 내려가면, 파종 후 5일 및 15일에서 보는 것처럼 토양의 온도를 높게 유지시키며, 외기의 온도가 높은 파종 후 25일 처리구에서는 오히려 토양 온도를 낮추는 효과를 주고 있다. 한편 유기질비료의 혼합비가 높아질수록 이러한 완충효과는 더욱 커지는 것으로 나타났다. 외기 온도가 높으면 유기질비료는 자체가 가지고 있는 수분 및 단열작용에 의하여 토양 온도를 적절하게 조절하는 현상을 관찰할 수 있으며, 따라서 강우량이 적은 여름철의 고온 환경 하에서 한발의 피해에 어느 정도 기여할 것으로 기대된다.

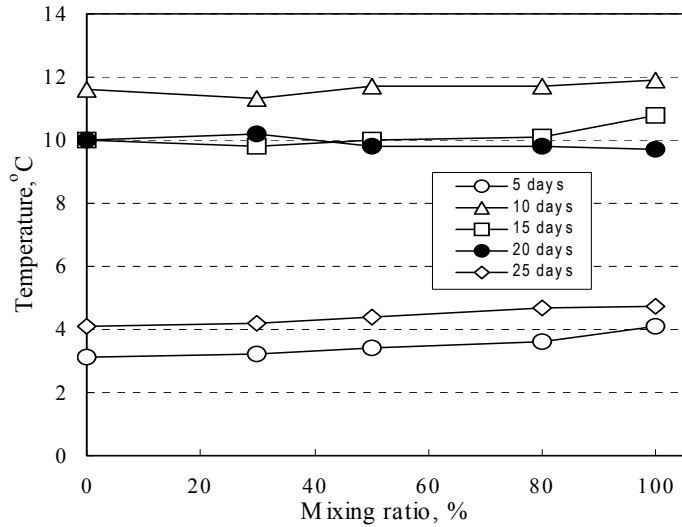


Fig. 6. The effect of organic wood compost on soil temperature of radish pot at 8:00

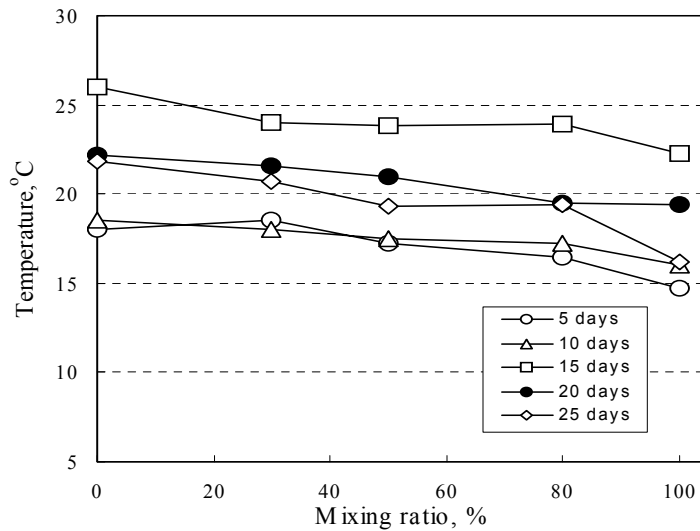


Fig. 7. The effect of organic wood compost on soil temperature of radish pot at 14:00

Fig. 7은 오후 2:00에 측정된 토양 온도의 변화를 나타낸 것이며, 외기 온도가 높아지면 토양 온도는 낮게 유지되었으며, 특히 유기질비료의 혼합을 증가에 따라 토양 온도가 4~5°C 정도로 더욱 현저하게 감소하는 결과를 보여주었다.

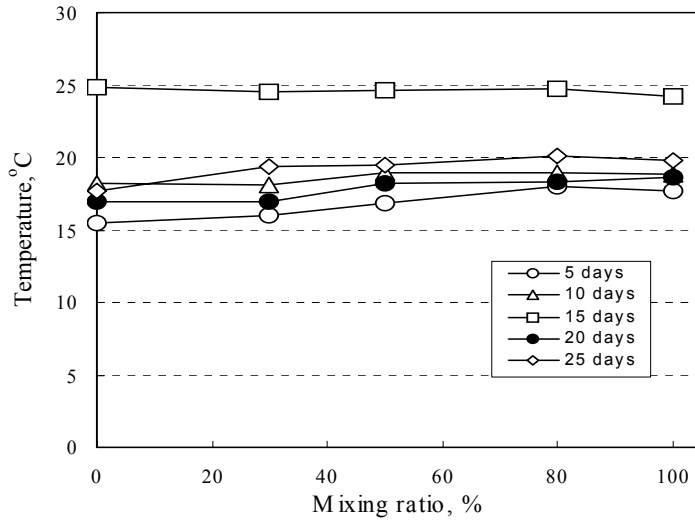


Fig. 8. The effect of organic wood compost on soil temperature of radish pot at 18:00

Fig. 8을 보면 저녁(18:00)에도 외기 온도가 낮아지는 경우는 높은 토양 온도를 유지하고 있었고, 유기질비료의 함량이 토양 중에 증가됨에 따라 외기 온도가 낮아지더라도 열을 유지하였으며, 유기질비료 증가와 함께 토양의 온도를 그대로 유지시키거나 다소 높게 하는 것으로 나타났다. 전체적으로 유기질비료의 함량이 높아질수록 토양 온도 상승 효과가 큰 것으로 나타났으며, 이는 유기질비료의 온도 보상 효과를 보여주는 것이다.

Fig. 는 야외의 침엽수 및 활엽수 식재포장의 온도변화를 5월 20일 부터 1개월 간 측정 한 결과로서, 아침 08:00에는 지온이 8.5°C 전후로서 매우 낮았으며 오후와 저녁의 온도는 15°C로 유기질비료의 혼합량에 따라 큰 지온의 변화를 관찰할 수 없었다.

발효열이 뿌리에 미치는 영향을 알기 위해 토양 온도를 측정한 결과, 유기질비료로 인한 온도의 변화(온도의 급격한 증가 혹은 고온발생)는 없었다. 그리고 하루 중 온도 변화는 아침에는 지온이 기온보다 낮은 것이 일반적인 바, 유기질비료의 혼합율이 증가함에 따라 지온이 약간 증가하였다. 오후(14:00)의 경우 유기질비료의 함량이 증가함에 따라 토양 온도가 오히려 낮아지는 결과를 얻었다. 저녁(18:00)이 되면 기온보다 토양온도가 높았으며 유기질비료 함량의 증가와 함께 지온이 높아지는 경향을 보여주었다.

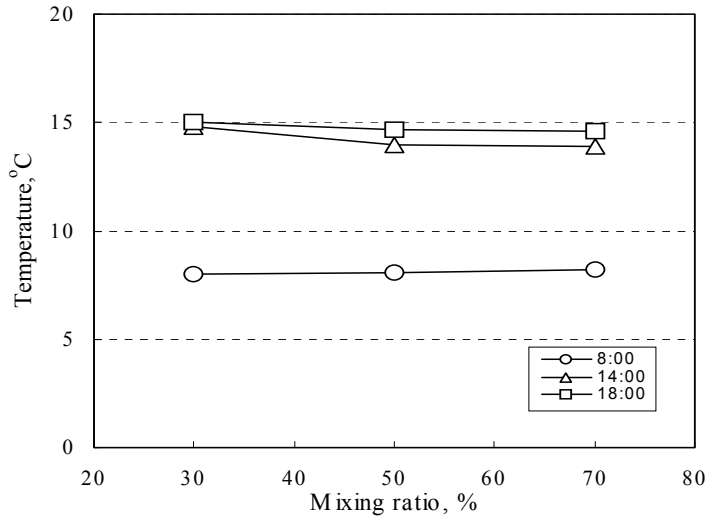


Fig. 9. The effect of organic wood compost on soil temperature of tree planting field

결론적으로 본 연구에서 발효후 산물로써 제조·공시된 유기질비료는 어린 식물의 발아 및 생장에 나쁜 영향을 주지 않는다는 긍정적인 결과를 얻었으며, 80% 이상의 높은 유기물을 함유함에도 불구하고 잔존 유기물의 분해로부터 야기될지도 모르는 고온 발생으로 인한 토양 온도의 증가현상이 전혀 없었던 결과를 볼 때, 본 유기질비료는 우수한 유기질비료로서 사용할 수 있는 것으로 생각된다.

5) 파종묘의 생장

유기질비료를 m^2 당 3 kg 시비 후 붉은 아카시아 종자를 파종하고 6개월 후 생장량을 조사하였으며, 산야초 비료구에 비하여 활엽수재 톱밥 비료 시용구가 근원경 및 수고 성장에서 가장 우수하였다. 수고에서도 Fig. 10에서 보는 바와 같이 유기질 비료구가 우수하였다.

라. 결론

발효열 이용 후 산물의 이용과 관련하여 유기질비료로서의 이용가능성을 검토하였으며, 활엽수재 톱밥 유기질비료의 성분이 산야초 재료에 비해 질소 함량이



Leaves+Grass

Control

Hardwood sawdust

Fig. 10. Effect of wood organic compost on the growth of red acacia

더 높았으며, 특히 활엽수재 톱밥으로 유기질비료를 만들면 발효과정에서 유기물 함량이 많이 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 목재 톱밥은 칼슘 함량이 높은 것이 특징이었다.

어린 식물 파종 실험에서 유기질비료의 혼합량이 많아질수록 무의 생장이 우수한 것으로 나타났으며, 유기질비료 시용이 토양 온도 변화에 미치는 영향에 관해서는 유기질비료의 혼합율이 증가함에 따라 토양의 온도가 높아지는 경향을 보여주었다.

한편 외기온도가 높으면 유기질비료는 자체가 가지고 있는 수분 및 단열 작용에 의하여 토양의 온도를 적절하게 조절하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 유기질비료의 혼합비가 높아질수록 이러한 완충효과는 더욱 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 유기질비료의 사용은 강우량이 적은 여름철의 고온 환경 하에서 한발의 피해방지에 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열 교환장치의 경제성 분석

바이오매스 열교환기 제작과 운영에 따른 비용 분석을 위해 우선 실험용으로 사용된 톱밥 및 산야초를 기준으로 계산하였으며, 실제 농가에서는 농사 후 발생하는 재료를 사용할 경우 부수적인 비용은 들어가지 않을 것으로 생각된다.

가. 전제조건

▷ 톱밥 함수율 : 90%

▷ 톱밥 가격 : 5톤차 (20m³(루베)) 50만원정도

☞ m³당 25,000원(연구에 사용된 실험용 톱밥 재료비 기준)

☞ 실험에 사용된 산야초는 채취에 필요한 인건비를 산정한 금액이며, 실제 농가 기준으로 산정시 소요되지 않는 비용일 수 있음.

(본 연구에 사용된 산야초는 채취를 위한 인건비 지급에 따른 비용이며, 실제 농가에서 사용시는 부가적인 비용이 산출되지 않을 수 있다.)

나. 산야초와 톱밥의 혼합비

바이오매스 1,000kg용량의 발효열 교환기 제작시 전체 체적은 약 10m³(본 연구에 사용된 규모를 기준으로 산정)

▷ 함수율 65%일 때, 톱밥:산야초 = 6.5 : 3.5 = (6.5m³×25,000원) = 162,500원

▷ 함수율 70%일 때, 톱밥:산야초 = 7.0 : 3.0 = (7.0m³×25,000원) = 175,000원

▷ 함수율 75%일 때, 톱밥:산야초 = 7.5 : 2.5 = (7.5m³×25,000원) = 187,500원

▷ 함수율 80%일 때, 톱밥:산야초 = 8.0 : 2.0 = (8.0m³×25,000원) = 200,000원

▷ 함수율 85%일 때, 톱밥:산야초 = 8.5 : 1.5 = (8.5m³×25,000원) = 212,500원

▷ 함수율 90%일 때, 톱밥:산야초 = 9.0 : 1.0 = (9.0m³×25,000원) = 225,000원

다. 열교환기 배관 및 부자재비용(100만원)

실험에 사용된 여러 가지 배관은 최종 평판형 열교환기를 기준으로

XL 파이프 100 m = 20만원 (재질 및 직경에 따라 가격의 편차가 있음)

온수 순환용 펌프 2개 = 15만원/개 = 30만원

물탱크 = 1000리터/ 30만원 = 30만원

단열재 = 약 10만원

기타 부속류 = 10만원

라. 처리방법별 톤당 비용

단순 사람에 의한 퇴적 방법일 경우 비용이 들어가지 않을 것이나, 부가적인 인건비가 소요될 경우 그에 따른 비용이 추가될 것이다. 그러나 기계에 의한 퇴적 및 혼합, 교반 등의 작업이 들어 갈 경우 부가적인 비용은 산정할 필요가 있다.

마. 발효후 처리

바이오매스 열교환기의 발효 후 퇴비로 사용시 500평 규모의 농사를 지을 경우 소요되는 퇴비의 비용은 약25만원의 비용이 들것이며, 이는 톱밥을 통한 발효열 교환기의 제작에 필요한 비용을 상쇄할 수 있으리라 생각된다.

바. 비용 계산에 고려할 점

본 비용계산은 실험에 사용된 재료를 기준으로 계산된 것이며, 향후 상업화에 따른 재료비는 크게 감소할 것으로 생각된다.

사. 총 비용

◇ $225,000 + 1,000,000 + 100,000(\text{부가적인 비용}) - 250,000 = 1,075,000\text{원}$

◇ 가정용 기름 보일러의 겨울철 4개월 소요비용

= (2005년 10월) 기름 값 기준 (20만원/드럼) = 40~50만원

◇ 따라서 $1,075,000 - 400,000 = 675,000\text{원}$

675,000원 보일러를 처음 설치시 필요한 비용을 감안할 때 초기 소요 비용으로 고려될 수 있는 비용이며, 전체 비용은 실험용을 기준으로 계산되었기에 상업화 혹은 저가의 재료를 공급할 경우 많은 감소 요인이 발생하리라 생각된다. 따라서 본 연구에 사용된 발효열 교환기의 계산기준을 실험용으로 했을 경우 소요된 비용은 향후 고유가 시대에 농가의 경비 절감을 위한 대체 에너지원으로 충분한 가능성이 있는 것을 알 수 있다.

아. 발효 후 산물을 생물비료로 이용할 때

표 3의 견적을 기준으로, 1 ton의 톱밥과 건계분 20 kg, 석회 10 kg, 요소 15

kg을 섞어서 발효열을 이용한 후의 산물에 대한 비용 분석을 해보았다. 재료 구입으로 투입되는 총 비용은 약 11만원이고, 발효 후 산물의 무게(55~65%의 수분이 함유된 상태로 1 ton 이상)를 생물비료로서 구입시에는 약 10만원 이상 (2004년 기준, 생물비료 20 kg당 2천원 적용)이다. 따라서 농가에서 직접 여러 농산 폐기물이나 산림 폐 바이오매스를 이용하는 외에 톱밥 등을 구입해서 발효열을 이용해도, 발효 후 산물을 생물비료로서 이용한다면 충분한 경제적 가치가 있을 것으로 기대된다.

표 3. 톱밥 및 발효첨가제 가격 (2004년, 견적: 흙사랑농약종묘사)

품명	수량	가격 (세금 포함)
침엽수재 톱밥	1 ton	97,900
활엽수재 톱밥	1 ton	97,900
건계분	20 kg	5,500
석회분말	20 kg	4,950
요소 비료	20 kg	10,020

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 산림 폐 바이오매스 자원의 공급 및 활용 기술 개발

우리나라에서 가장 많이 분포하고 있는 수종인 신갈나무, 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무림에 대해서 산림의 바이오매스 자원을 조사하였고, 숲가꾸기 사업으로 얻을 수 있는 폐 바이오매스 자원량을 추정하였다.

신갈나무는 우리나라 전역에 걸쳐 분포하고 있는 수종으로서 농촌 주변의 야산에서는 임령이 30년 전후이며, 고산 지대에서는 임령이 60년 이상으로 많이 분포해 있는데, 이들에 대해 각각 바이오매스를 조사하고 특히 고산 지대에 분포하는 임령 60년 이상인 곳에서는 남사면과 북사면을 나누어 조사함으로써, 북사면에서도 남사면 이상의 좋은 생장을 보이는 것을 확인하였다.

소나무는 우리나라에서 주로 40년생 이상의 대경급으로 자라고 있기 때문에 바이오매스 조사에 들어가는 시간과 노력이 많아 좀처럼 연구가 많이 이루어지지 않았으나, 본 연구로 월악산 지역 48년생 소나무림의 바이오매스와 연간 순생산량 및 엽면적지수를 알아내었다.

잣나무는 우리나라에서 가장 많이 심겨진 조림수종이나, 여기에 대한 바이오매스 조사 역시 충분히 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 우리나라의 많은 산림에서 보여지듯이 전혀 숲가꾸기 사업이 이루어진 바 없는 24년생 잣나무 임분을 대상으로 바이오매스와 연간 순생산량을 구명하였다.

낙엽송은 잣나무와 함께 주요 조림수종으로 과거 60년대와 70년대에 대단위로 조림되어 지금은 대부분의 임분이 30년생 이상이 되었으나, 아직까지 우리나라에서 낙엽송에 대한 연구는 20년생 이전의 것들에 국한되어, 유효령을 벗어난 30년생 이상의 낙엽송림의 생산구조에 관한 연구가 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 월악산 지역에서 30년생의 낙엽송 임분의 생산구조를 파악하고 바이오매스 자원량을 밝혀내었다.

리기다소나무림 역시 우리나라의 중부지방에 많이 심겨진 대표적인 조림수종이지만, 오늘날 30년생 이상의 숲이 대부분인 것에 비해 30년생 이상의 임분에서 바이오매스 생산에 관한 연구는 전무하다. 본 연구에서는 경기도 광주시 태화산 지역에서 36년생 리기다소나무림을 대상으로 바이오매스와 생산구조를 파악하였다.

또한 본 연구에서는 5개 임분에 대하여 열량 측정을 함께 시행함으로써, 각 임

분의 바이오매스 자원을 에너지원으로 직접 환산하였으며, 이것을 통해 매년 숲이 생산하는 바이오매스가 대체에너지원으로서 어느 정도의 석유량인지를 계산하여 제시함으로써 앞으로의 정책 자료로 쓸 수 있도록 하였다.

2. 산림 및 농산 폐 바이오매스의 최적 발효 기술 개발

산림 및 농산 폐 바이오매스의 발효 특성을 구명하기 위하여 톱밥, 수피, 간벌재, 과피, 왕겨, 볏짚 등의 재료에 대한 계절별 발효특성을 분석하고, 발효열 지속시간을 측정하였다. 또한 발효 프로세스 조절기술과 관련하여 각 재료의 혼합시 발효특성, 발효지속기간의 변화를 분석하며, 수분 및 재료 혼합비율에 따른 발효특성을 분석함으로써 궁극적으로 최대 발효열효율을 얻기 위한 재료, 배합비, 최적수분함량 등을 구명하였다. 이 연구를 통하여 발효열을 이용할 수 있는 폐 바이오매스 자원의 발효 프로세스를 알아내었고, 최적 발효열을 얻기 위한 조건과 발효열의 개시와 지속을 일정 범위 안에서 조절할 수 있는 기술을 습득하였다. 따라서 이 기술은 폐 바이오매스를 이용한 열교환기의 효율적인 이용 뿐만 아니라, 퇴비 제조 및 메탄 가스 생성 등 많은 분야에도 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 발효후 산물을 생물비료로 쓸 때의 효과도 검정하여, 유기농 사업에도 이용될 수 있을 것이다.

3. 발효열 이용 열교환기 개발

본 연구를 통하여 본 연구의 목표인 ‘산림 폐 바이오매스를 활용한 발효열교환장치 개발’에 대하여 연구를 수행하였으며, 실제 농가의 적용을 위한 농가를 모델링하여 실험을 수행하였고, 실연을 통하여 실제 농가의 적용가능성을 확인하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 목표를 달성하였다.

- 본 연구의 주된 목표인 바이오매스 열교환기를 이용하여 일일 가정 공급 온수량을 공급할 수 있는 능력을 가진 열교환기를 설계 개발하였다.

- 실제 농가에서 이용 가능한 바이오매스의 적용을 위하여 침엽수 톱밥, 활엽수 톱밥, 산야초, 볏짚등 농가에서 사용가능한 재료들을 사용하여 최적의 조합을 찾아 실험에 적용하여 톱밥과 산야초를 9:1비율로 혼합시 가장 우수한 실험결과를 획득하였다.

- 메탄회수 가능성을 평가하기 위하여 메탄 회수 장치를 설치하여 실험하였으나, 호기성발효에서는 메탄회수가 극히 미미하였으며, 향후 메탄회수를 위한 보완이 필요할 것이다.

- 바이오매스 발효열 교환기를 실연하기 위하여 농가에서 설치 및 해체가 용이한 평판형 열교환기를 개발하여 적용하였으며, 이를 이용해 일일 급탕량을 뛰어넘는 열교환 능력을 가진 열교환기를 개발하는데 성공하였다.

- 실험을 통하여 본 여구에서 개발된 바이오매스 발효열교환기는 겨울철 난방을 위한 20 ℃ 정도의 난방용 온수를 공급할 수 있는 것으로 알 수 있었으며, 40여 일 이상 40℃ 정도의 온수를 공급 할 수 있는 것으로 관찰되었다.

바이오매스를 이용한 에너지 활용은 현재까지 원재료를 가공하여 직접 연소를 통하여 에너지로 변환하는 기술, 바이오매스의 발효를 통하여 가스화 하는 기술 등 바이오매스를 이용하여 사용할 수 있는 1차적인 방법에 대한 기술 개발이 주를 이루었으나, 본 연구에서는 바이오매스를 발효하여 그 과정에서 발생하는 열을 이용하고, 가스를 추출하고, 사용된 바이오매스를 퇴비로 재활용하여 바이오매스의 채집부터 사용 후 재처리 까지 모든 활용가능 방안을 실제 농가에서 사용할 수 있도록 하였다.

향후 본 연구를 통하여 얻어진 기술은 다양한 분야에 파급효과가 있을 것이다. 본 연구는 에너지자원의 활용방법으로 에너지자원의 단수 폐기에서 이를 에너지원으로 재활용하게 됨으로서 국가 에너지 정책에 부합할 수 있을 뿐 아니라, 다음과 같은 관련분야에 파급효과가 지대하리라 생각된다.

- 바이오매스 열교환기의 내부 배관관련업체가 손쉬운 배관 및 열전달 향상방법의 연구가 개발되고, 상업화가 가능할 것이다.

- 현재 농가에서 폐 바이오매스를 자체 공급할 수 있는 방법이 있으나, 이와는 별도로 바이오매스의 원재료 및 혼합공급업체의 활성화가 가능하리라 생각된다.

- 에너지 활용방법으로 농가의 가정용 혹은 비닐하우스의 난방을 위한 난방기기 공급업체의 부가적인 활성화가 가능하리라 여겨진다.

이와는 부수적으로 다양한 에너지 자원 공급 및 활용을 위한 관련 분야에 지대한 파급효과를 줄 것으로 기대된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

산림 폐 바이오매스 자원의 공급 및 활용 기술 개발에서 주요 5개 수종(신갈나무, 소나무, 잣나무, 낙엽송, 리기다소나무)에 대해서 현재 우리나라에서 주로 분포하고 있는 환경과 임황(임령 등)에 있는 임분을 대상으로 바이오매스와 연간 순생산량을 조사하였으며, 이 결과를 토대로 숲가꾸기 사업시 생산되는 폐 바이오매스 자원량을 추정하였다. 따라서 본 연구의 결과를 토대로 임분의 생산량과 생산구조에 따른 ‘맞춤형’ 영림계획을 세울 수 있으며, 숲가꾸기 사업을 실시하였을 때 나오는 폐 바이오매스를 미리 추정할 수 있어서 농가나 산업체에서 적극적으로 작업후의 산림 부산물을 이용할 수 있을 것으로 본다. 또한 이 연구에서는 신갈나무림을 복사면과 남사면으로 나누어 사면에 따른 바이오매스와 연간 순생산량의 차이를 조사하고 생산구조도를 작성하여 서로 비교하였으나, 다양한 환경인자들에 비해 조사구의 수가 적음에 따른 연구의 한계가 있었다. 따라서 앞으로 주요 수종들에 대해서는 해발고와 사면 등 여러 환경인자에 따른 바이오매스의 변화 양상을 살펴볼 필요가 있으나, 많은 시간과 인력이 투입되어야 하므로 연구지원기관의 적극적인 협조가 필요하다.

산림 폐 바이오매스를 발효시켜 그 발열과 발효후 산물을 이용하고자 할 때, 발효 프로세스의 조절 기술은 매우 중요한 것이다. 본 연구를 통하여 각 재료별(활엽수 톱밥, 침엽수 톱밥, 산야초 등) 발효 특성을 알아냄으로서 인위적으로 손쉽게 재료의 종류와 혼합비를 바꾸어 주거나 수분량을 바꿔 줌으로서 발효의 속도를 일정 범위 내에서 조절할 수 있도록 하였다. 또한 최적 발효 조건을 밝혀내어 발효열교환장치를 사용할 때 최대한의 열효율을 얻을 수 있도록 하였다.

그리고 발효후 산물을 생물비료로 사용할 때 아주 뛰어난 효과를 얻을 수 있음을 알아냄으로서, 발효후 산물의 경제적 가치가 재료 구입가와 비슷하기 때문에, 발효되는 중간에 발생하는 발효열을 이용한다면 실질적으로 무료나 다름없는 대체 열에너지로서 매우 뛰어난 경제성이 있다는 것을 밝혀내었다.

바이오매스를 이용한 에너지 활용은 현재까지 원재료를 가공하여 직접 연소를 통하여 에너지로 변환하는 기술이나 바이오매스의 발효를 통하여 가스화하는 기술처럼 바이오매스를 이용하여 사용할 수 있는 1차적인 방법에 대한 기술 개발이

주를 이루었으나, 본 연구에서는 바이오매스를 발효하여 그 과정에서 발생하는 열을 이용하고, 가스를 추출하고, 사용된 바이오매스를 퇴비로 재활용하여 바이오매스를 채집하여 사용 후 재처리 까지 바이오매스로부터 얻을 수 있는 모든 에너지 활용가능 방안을 기술적인 방법의 모색을 통하여 실제 농가에 사용할 수 있는 가능성을 평가하였다.

향후 본 연구를 통하여 얻어진 기술은 업체의 상업화를 위하여 추가적인 보완점을 개선한 후 다음과 같이 새로운 친환경 에너지원 활용방법으로 발전시킬 예정이다.

- 연구결과를 보완 수정하여 향후 업체의 실제 판매 가능한 제품으로의 개선점 모색
- 업체와의 상업화 추진을 통하여 판매 가능한 상품으로의 개발
- 농가의 홍보를 통하여 바이오매스 발효열 교환기가 에너지 활용 방법으로서의 가능성을 전파
- 농가의 바이오매스 온수 공급 장치로의 상업화를 통해 농가의 에너지 절약을 위한 대체 수단으로 제공
- 농가의 바이오매스 폐기물을 이용한 에너지 활용방법을 전파하여 에너지 재활용기회 제공
- 농가의 폐 에너지 활용을 통하여 정부의 에너지 절약 및 재활용 정책에 부합

최종적으로 본 연구의 목적은 농가에서 개별적으로 운영할 수 있는 소규모의 고효율 발효열교환기의 제작인데, 발효열교환장치의 개발을 성공적으로 수행함으로써 앞으로 상품화가 충분하다는 것을 입증하였다. 본 연구에서 개발한 발효열교환기는 앞으로 특허를 출원할 예정에 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

바이오매스는 다양한 방법으로 활용 가능하기에 본 연구 취지와 부합하는 그 외국 연구 사례를 찾기는 쉽지 않으며, 더욱이 바이오매스의 발효에 의한 열을 이용한 연구는 극히 드문 실정이다. 현재 유럽 및 일본, 그리고 남미에서 주로 연구되는 바이오매스 이용기술은 바이오매스를 연소재료로 이용하는 기술이 주를 이루며, 남미에서는 폐 사탕수수로부터 알코올을 회수하는 에너지원 추출방법을 주로 연구하고 있다. 유럽에서 Jean Pain의 연구 사례가 본 연구 목표와 가까우며, 일본의 阿部佳之에 의한 퇴비화 기술이 연구의 사후 처리와 메탄 채취를 위한 방법으로 참고 할 수 있는 중용한 외국 연구 사례일 것이다.

Jean Pain의 연구는 원재료의 연소화를 위한 바이오매스를 이용한 연구와는 달리, 바이오매스의 발효를 통하여 발생하는 열, 가스, 그리고 발효 종료 후 바이오매스를 퇴비로 활용하는 복합적인 이용방법을 연구한 예는 Jean Pain의 연구가 대표적이며, 본 연구에서 사용된 바이오매스 용량의 10배의 용량을 가지고 4개월여 동안 온수와 가스를 공급하는 연구를 수행하였다. 그의 저서 “The methods of Jean Pain: Another kind of garden”를 통하여 그의 연구 결과를 총 정리 하였으며, 그의 저서에는 바이오매스를 가공하는 방법, 바이오매스를 이용하여 발효열을 이용하는 방법, 발효를 통해 가스를 추출하는 방법 등에 대한 정보를 다루고 있다. 그는 농사꾼으로서 실제 자신의 농사를 위해 바이오매스를 이용하여 에너지원으로 이용하였으며, 그 가능성을 보여주고 있다. 그의 연구는 실제 농가의 비닐하우스 농사 및 가정의 난방을 위해 바이오매스를 이용하였으며, 그로 인해 이용한 바이오매스가 대용량이었다. 10여 톤의 바이오매스를 이용하여 4개월 이상 온수를 공급하였으며, 메탄을 추출해 에너지로 활용하였다. 비록 그의 연구 사례가 대용량이었으나 바이오매스를 이용하여 다양한 에너지원으로의 변환을 가능하도록 하였다는 점에서 훌륭한 연구 사례일 것이다.

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, 阿部佳之)에 대한 정보를 수집하였다. 阿部佳之의 연구 사례는 일본에서 추진중인 에너지 활용방법에 대한 최신 정보로서 일본에서의 바이오매스를 이용한 퇴비화에 대한 연구와 실용사례를 수집하였다. 일본에서는 현재 에너지 자원의 재활용과 에너

지 자원의 이용을 위하여 많은 바이오매스 활용 연구가 수행되고 있다고 한다. 현재 阿部佳之 연구원의 활용 연구 사례를 보면 바이오매스를 이용하여 퇴비화를 수행하고 그 과정에서 발생하는 가스를 회수하는 기술에 대한 연구를 수행하고 있었으며, 이런 과정에서 퇴비화와 가스 회수의 두 가지 목적을 달성하기 위한 바이오매스의 처리 방법에 대하여 이미 상업적으로 큰 성공을 거둔 것으로 생각된다. 그의 연구 사례에서 볼 수 있듯이 바이오매스를 이용하여 가스를 추출하는 방법은 혐기성 발효를 통하여 바이오매스가 공기에 노출되지 않도록 완전 밀폐할 수 있도록 하는 기술이 핵심이라고 생각되며, 그런 후에 바이오매스로부터 가스를 회수하기 위하여 메탄 가스를 추출할 수 있는 필터과정이 중요한 것으로 보인다. 이를 위하여 阿部佳之는 메탄 추출 trap을 만들어 메탄만을 추출하고 나머지 부산물은 배출하여 폐기 할 수 있는 기술을 보유하고 있었으며, 이러한 기술은 본 연구에서 수행한 기술과 접목할 경우 본 연구개발의 효과를 더욱 높일 수 있는 기회가 될 수도 있으리라 여겨진다. 또한 퇴비화 촉진 기술에 대한 연구사례를 정리한 자료를 접할 수 있는 기회를 가질 수 있었으며 미국의 퇴비화 과정에 대한 매뉴얼을 통한 퇴비화 기술의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

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. 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.

제 7 장 참고문헌

1. 산림 폐 바이오매스 자원의 공급 및 활용 기술 개발

1. Art, H.W. and J.T. Marks. 1971. A summary table of biomass and net annual primary production in forest ecosystems of the world. Pages 3-32 in H.E. Young(ed). Forest Biomass Studies. University of Maine. Orono, USA.
2. Caldwell, M.M. and O.A. Fernandez. 1975. Dynamics of Great Basin shrub root systems. Pages 38-51 in Hadley N.F.(ed). Environmental physiology of desert organisms. Halstead Press. New York.
3. Canadell, J., A. Djema, B. López, F. Lloret, S. Sabaté, D. Siscart and C.A. Gracia. 1999. Structure and Dynamics of the Root System. Pages 47-59 in F. Rodà, J. Retana, C.A. Gracia and J. Bellot(eds). Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests. Ecological Studies 137. Springer.
4. Daubenmire, R. 1966. Vegetation: Identification of typical communities. Science151:291-298.
5. Doucet, R., J.V. Berglund and C.E. Farnsworth. 1976. Dry matter production in 40-year-old *Pinus banksiana* stands in Quebec. Can. J. For. Res. 6 : 357-367.
6. Finney, H.R., N.H. Holoway and M.R. Heddleson. 1962. The influence of microclimate on the morphology of certain soils of the Allegheny Plateau Ohio. Soil Sci. Soc. Ann. Proc. 26:287-292.
7. Hatiya, K. et al. 1966. Analysis on the growth of a young larch(*Larix leptolepis*) plantation with excessively high density. J. Jap. For. Soc. 48(12) : 445-448.
8. Hellmers, H. and J. Bonner. 1959. Photosynthetic limits of forest tree yields. Proc. Soc. Amer. For.:32-55.
9. IEA. 2001. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 1971-1999 (2001 Edition).
10. Johnson, F.L. and P.G. Risser. 1974. Biomass, annual net primary production, and dynamics of six mineral elements in a post oak-blackjack

- oak forest. *Ecology* 55:1246-1258.
11. Johnson, F.L. and P.G. Risser. 1974. Biomass, annual net primary production and dynamics of six mineral elements in a post oak-blackjack oak forest. *Ecology* 55(6):1246-1258.
 12. Kim, J.-U. and Y.-J. Yim. 1988. Phytosociological classification of plant communities in Mt. Naejang, southwestern Korea. *Korean J. Bot.* 31: 1-31.
 13. Kim, J.-U. and Y.-J. Yim. 1992. Distribution patterns of species population along the environmental gradient in Mt. Moak provincial park, Korea. *Korean J. Ecol.* 15: 365-375.
 14. Kim, J.-U., Y.-J. Yim and B.-S. Kil. 1988. Classification and pattern analysis of forest vegetation in Daedunsan provincial park, Korea. *Korean J. Ecol.* 11: 109-122.
 15. Kimmins, J.P. 1997. *Forest Ecology* 2nd ed. Prentice-Hall, Inc. 596pp.
 16. Kwon, K.C., J.H. Lee, H.E. Kim. 1997. Estimation of thinning period of *Larix leptolepis* GORDON plantation in the central part of Korea. *Proc. of the East Asia Workshop on Tree-ring Analysis* : 133-140.
 17. Laclau, P. 2003. Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantation. *For. Ecol. Manage.* 173:353-360.
 18. Lag, V. 1990. Forest increment and distribution of plant species in relation to forest soil conditions. In *proceedings of the First International Symposium on Forest Soils*, July 22-27, 1990. Harbin, China.
 19. Lee, E.B. and J.U. Kim. 1997. Syntaxonomy of the oak forest in the Pukhansan national park, mid-western Korea. *Korean J. Ecol.* 20:365-375.
 20. Loomis, R.S. and W.A. Williams. 1963. Maximum crop productivity: An estimate. *Crop Science* 3(1):67-72.
 21. Minckler, L. 1961. *Silviculture considerations in the challengers for forestry.* State U. of New York, College of For., Syracuse, N.Y.
 22. Monteith, J.L. 1959. The reflection of short-wave radiation by vegetation. *Quart. J. R. met. Soc.* 85:386-392.
 23. Monteith, J.L. 1981. Does light limit crop production? Pages 23-38 in C.B. Johnson(ed). *Physiological Process Limiting Plant Productivity.*

Butterworths.

24. Murayama, I. and T. Satoo. 1953. Estimation of amount of foliage of tree and stand. I. Bull. Gov. For. Exp. Sta. Tokyo 65 : 1-10.
25. Ogawa, H., K. Yoda and T. Kira. 1961. A Preliminary survey on the vegetation of Thailand. Pages 21-157 in Nature and Life in South east Asia 1.
26. Ovington, J.D. 1957. Dry-matter production by *Pinus sylvestris* L. Ann. Bot. N.S. 21:287-314.
27. Ovington, J.D. 1962. Quantitative Ecology and the Woodland Ecosystem Concept. Pages 103-192 in J.B. Cragg(ed). Advances in Ecological Research vol.1. Academic Press.
28. Ovington, J.D. and D. Heitkamp. 1960. The accumulation of energy in forest plantations in Britain. J. Ecol. 48:639-646.
29. Rodin, L.E. and N.I. Bazilevich. 1967. Production and Mineral Cycling in Terrestrial Vegetation. Oliver and Boyd, London.
30. Rundel, P.W. 1980. Adaptations of Mediterranean-climate oaks to environmental stress. Pages 43-54 in Ecology, management, and utilization of California oaks. USDA For Serv Gen Tech Rep PSW-44.
31. Schwappach, A. 1912. Ertragstabeln der Wichtigeren Holzarten, Neudamn. 83pp.
32. šesták, Z. 1981. Leaf ontogeny and photosynthesis. Pages 147-158 in C.B. Johnson(ed). Physiological Process Limiting Plant Productivity. Butterworths.
33. Smith, H. Adaptation to shade. Pages 159-173 in C.B. Johnson(ed). Physiological Process Limiting Plant Productivity. Butterworths.
34. Satoo, T. 1970. Primary production in a plantation of Japanese Larch. J. Jap. For. Soc. 52(5) : 154-158.
35. Satoo, T. 1974. Primary production relation in a plantation of *Larix leptolepis* in Hokkaido. Bull. Tokyo Uni. For. 66 : 119-126.
36. Stoo, T. and H.A.I. Madgwick. 1982. Forest Biomass. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers. 152pp.

37. U.S. Department of Energy. 1986. The National Energy Policy Plan Projections to 2010 (NEPP-5). DOE/PE-0029/3. U.S. Gov. Print. Off.
38. Waters, W.T. and J.M. Christie. 1958. Provisional yield tables for oak and beech in Great Britain. For. Rec. 36, 31pp.
39. Whittaker, R.H. 1966. Forest dimension and production in the Great Smoky Mountains. Ecology 47(1):103-121.
40. Whittaker, R.H. 1975. Communities and Ecosystems. MacMillan Publishing Co., Inc., New York. 385pp.
41. Whittaker, R.H. and P.L. Marks. 1975. Methods of assessing terrestrial productivity. pages 55-118. In H. Lieth and R.H. Whittaker. (ed.) Primary Productivity of the Biosphere. Springer-Verlag. New York.
42. Woolhouse, H.W. 1981. Crop physiology in relation to agricultural production: The genetic link. Pages 1-21 in C.B. Johnson(ed). Physiological Process Limiting Plant Productivity. Butterworths.
43. 강상준. 1996. 식물생태계. 「월악산 국립공원 자연자원 조사」. 국립공원관리공단. p.35-101.
44. 강상준, 곽애경. 1998. 상대생장법에 의한 남한강 유역 삼림의 생산량 및 생산성 비교. 한림에 17(1) : 8-22.
45. 곽동훈. 1991. 월악산 삼림군집의 식물사회학적 연구 -사면방위를 중심으로. 동국대학교 석사학위논문. 43pp.
46. 권기철. 1998. 천연갱신을 위한 월악산 천연림의 군집생태학적 무육방안. 충북대학교 농학석사학위논문. 85pp.
47. 권기철, 김홍은, 이종희. 1998. 낙엽송 인공 조림 임분의 생산구조와 생산성. 한림에 17(1):1-7.
48. 권태호. 1982. 경기도지방 잣나무인공림의 물질생산에 관한 연구. 서울대학교 대학원석사학위논문. 58pp.
49. 吉良龍夫. 1976. 陸上生態界:概論. 共立出版株式會社. 166pp.
50. 吉良龍夫. 1971. 作物の光合成と物質生産. 養賢堂. p.225-243.
51. 김문홍. 2004. 한라산 국립공원내의 식생. 한라산 국립공원 자연자원조사(송인순 편). 국립공원관리공단. p.106-138.
52. 김성덕, 김윤동. 1995. 점봉산 신갈나무림의 갱신 과정에 관한 연구. 한국임학

- 회지 84(4):447-455.
53. 김시경, 정좌용. 1985. 굴참나무 천연림의 생산구조 및 물질생산력에 관한 연구. 한국임학회지 70:91-102.
 54. 김장수, 김진수, 박용구, 윤일병, 이종은, 임양재, 한상섭. 1990. 생태학과 삼림. 향문사. 363pp.
 55. 김정언, 길봉섭. 2000. 한국의 신갈나무 숲. 원광대학교 출판국. 511pp.
 56. 김정언, 임양재, 길봉섭. 1988. 대둔산 도립공원 삼림식생의 분류와 유형분석. 한국생태학회지 11:109-122.
 57. 김정언, 임양재. 1989. 청량산 도립공원의 현존식생. 자연보존 68:32-48.
 58. 김준민, 장남기. 1972. 무주구천동의 삼림군락의 식물사회학적 분석. 한국자연보존연구회조사보고 5:55-64.
 59. 김준호. 1971. 삼림의 생산구조와 생산력에 대한 연구 I. 리기다소나무 조림지에 대하여. 식물학회지 14(4) : 19-26.
 60. 김준호, 윤성모. 1972. 삼림의 생산구조와 생산력에 대한 연구 II. 춘천지방의 소나무림과 신갈나무림의 비교. 식물학회지 15(3) : 1-8.
 61. 김준호. 1976. 삼림의 생산구조와 생산력에 대한 연구 III. 리기다소나무와 리기테다소나무의 비교. 식물학회지 19(3) : 85-91.
 62. 김창환. 1992. 덕유산 국립공원 삼림식생의 구조와 2차 천이에 관한 연구. 원광대학교 대학원 박사학위논문 156pp.
 63. 김창환, 강선희, 길봉섭. 1994. 분류법과 경도분석에 의한 무등산 삼림식생분석. 한국생태학회지 17:471-484.
 64. 김철수, 오장근. 1993. 무등산 식생의 식물사회학적 연구. 한국생태학회지 16:93-114.
 65. 박관수. 1999. 충주지역의 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 지상부 및 토양 중 탄소고정에 관한 연구. 한국임학회지 88(1):93-100.
 66. 박관수. 2003. 광양, 평창, 영동 지역 신갈나무 임분의 현존생물량 및 순생산량. 한국임학회지 92(6):567-574.
 67. 박봉규, 이현순. 1981. 도봉산의 사면에 따른 식생구조에 관한 연구. 한국생활과학연구원 논총 제27집. 81-94pp.
 68. 박성현. 1998. 회귀분석(제3판). 민영사. 666pp.
 69. 박은숙. 1987. 황학산 천연활엽수 이차림의 식물사회학적 특성과 물질생산에

- 관한 연구. 경희대학교 대학원 박사학위논문. 46-47pp.
70. 박은식, 정주상. 2000. 탄소저장 및 목재생산효과 중심의 산림경영계획을 위한 다목적 선형계획법의 적용. 한국임학회지 89(3): 335-341.
 71. 박인협. 1985. 백운산지역의 천연림생태계의 삼림구조 및 물질생산에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문. 48pp.
 72. 박인협, 김갑덕. 1986. 백운산지역 천연림생태계의 삼림구조 및 물질생산에 관한 연구. 한림에 6(1): 1-45.
 73. 박인협, 문광선. 1994. 주요 참나무류 천연림의 물질생산 및 현존량 추정식에 관한 연구. 한국임학회지 83(23):246-253.
 74. 박인협, 서영권, 김동엽, 손요환, 이명중, 진현오. 2003. 강원도 춘천지역 신갈나무 임분과 굴참나무 임분의 물질생산. 한국임학회지 92(1):52-57.
 75. 박인협, 이돈구, 이경준, 문광선. 1996. 참나무류의 성장 및 물질생산에 관한 연구(I) -경기도 광주지방의 굴참나무, 상수리나무, 떡갈나무, 신갈나무 천연임분을 대상으로-. 한국임학회지 85(1):76-83.
 76. 백승연. 1968. 월악산 식물조사보고(完). 충북임학회지 3:8-20.
 77. 백원기, 이우철. 1994. 청옥산과 두타산의 산림식생. 한국생태학회지 16:93-114.
 78. 四大學合同調査班. 1966. 森林の生産力に關する研究. 第3報. スギ人工林の物質生産について. 日本林業技術協會育林技術研究會. 東京. p.1-63.
 79. 산림청. 2004. 임업통계연보 33호. 산림청.
 80. 산림청. 2004. 임업통계연보 34호. 산림청.
 81. 손석용, 권기철, 정택상. 2002. 경기도 광주시 태화산 신갈나무림의 생산구조와 생산성. 임산에너지 21(1):76-82.
 82. 송칠영, 이수옥. 1996. 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 현존량 및 물질생산성에 관한 연구. 한국임학회지 85(3):443-452.
 83. 송칠영, 장관순, 박관수, 이승우. 1997. 신갈나무와 굴참나무 천연림의 탄소 고정량 분석. 한국임학회지 86(1):35-45.
 84. 송호경. 1990. DCCA에 의한 신갈나무군락과 환경의 상관관계 분석. 충남대학교 환경문제연구소 연구보고 8:1-5.
 85. 송호경, 김성덕. 1992. TWINSPLAN과 DCCA ordination에 의한 백두산 삼림군집의 분석. 한국임학회지 81:310-319.
 86. 송호경, 장규관, 권기원. 1995. TWINSPLAN과 CANOCO에 의한 주요 활엽수

- 군집과 환경의 상관관계 분석. 한국생태학회지 18:99-108.
87. 송철영, 이수욱. 1996. 신갈나무와 굴참나무 천연림 생태계의 현존량 및 물질 생산성에 관한 연구. 한국임학회지 85(3):443-452.
 88. 신현철, 이강영. 1990. 금산의 남북사면에 따른 삼림樹 보고. 한국임학회지 79:245-254.
 89. 오구균, 이경재, 임경빈. 1988. 식물사회학적 특성을 고려한 남산공원 식생의 관리대책. 한국임학회지 77(1):1-9.
 90. 이경재. 1990. '90 자연생태계 전국조사(II-3)-제5차년도(경남의 식생), 환경처. p. 17-82.
 91. 이경재. 1984. 잣나무인공림에서 밀도조절에 따른 생장 및 물질생산의 비교연구. 서울대학교대학원박사학위논문. 42pp.
 92. 이경재, 박인협. 1987. 경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질 생산량과 무기영양물분포. 한림에 7(1) : 11-21
 93. 이경재, 박인협, 오구균. 1987. 남산자연공원의 식물군집구조 및 8년간의 식생 변화분석. 한국임학회지76(3) : 206-217.
 94. 이경재, 김갑덕, 김재생, 박인협. 1985. 광주지방의 리기다소나무 및 리기테다 소나무조림지의 물질생산량에 관한 연구. 한국임학회지 69 : 28-35.
 95. 이경재, 김갑덕, 김재생, 박인협. 1985. 광주지방의 리기다소나무 및 리기테다 소나무 조림지의 물질생산량에 관한 연구. 한국임학회지 69:28-35.
 96. 이경재, 박인협. 1987. 경기도 광주지방 22년생 잣나무 및 신갈나무림의 물질 생산량과 무기영양물 분포. 한림에 7(1):11-21.
 97. 이경준. 1993. 수목 생리학. 서울대학교 출판부. p.173-194.
 98. 이돈구 등. 1990-1999. 국유림 경영 현대화 산학 협동 실연 연구 (I)-(X). 산림청.
 99. 이돈구 등. 2000-2004. 환경친화적 조림기술과 지속가능한 산림관리 기술 개발 연구 (I)-(V). 동부지방산림관리청.
 100. 이수욱. 1985. 강원도산 소나무천연림생태계의 Biomass 및 Net Primary Production에 관한 연구. 한국임학회지 71 : 74-81.
 101. 이수욱, 박관화. 1986. 한국의 소나무 및 참나무 천연림 생태계의 Biomass 및 유기Energy 생산에 관한 연구. 한림에 6(1) : 46-58.
 102. 이우철, 백원기, 김문기. 1994. 설악산 신갈나무림의 식물사회학적 연구. 한국

- 생태학회지 17:319-331.
103. 이은복, 임양재. 1989. 북한산국립공원의 식생에 관한 연구. 대한민국학술원논문집(자연과학편) 28:61-123.
 104. 이호준, 김종홍, 강제구, 전문영, 배병호. 1995. 모후산 삼림식생과 토양 환경. 한국생태학회지 18:367-383.
 105. 이호준, 김하송, 조은부. 1991. 금단산 삼림식생의 식물사회학적 연구. 한국생태학회지 14: 273-303.
 106. 이호준, 변두원, 김원식, 이재석, 김창호. 1993. 가야산 삼림식생에 대한 식물사회학적 연구. 한국생태학회지 16:287-303.
 107. 이호준, 이재석, 변두원. 1994. 명지산 신갈나무림의 군락분류와 식생패턴. 한국생태학회지 17:185-201.
 108. 이호준, 정홍락, 변두원, 김창호. 1993. 일월산의 삼림식생분석. 한국생태학회지 16:239-259.
 109. 이호준, 정홍락, 배병호. 1995. 청량산 삼림식생의 군락분류 및 종간연관분석. 한국생태학회지 18:121-136.
 110. 임경빈, 김갑덕, 이경재, 권태호. 1981. 낙엽송조림지의 생산구조에 관한 연구. 서울대학교 농과대학 연습림보고 17 : 31-37.
 111. 임양재, 김정연. 1992. 지리산의 식생, 중앙대학교 출판부. 467pp.
 112. 임양재, 백광수, 이남주. 1990. 한라산의 식생. 중앙대학교 출판부. 291pp.
 113. 임양재, 백순달. 1985. 설악산의 식생. 중앙대학교 출판부. 198pp.
 114. 임양재, 이종복, 윤경원. 1985. 함양 백운산 일대의 식생. 한국자연보존협회 조사보고서 24: 73-85.
 115. 제주도. 1985. 한라산 천연보호구역 학술조사보고서. 제주대학교. p.30.
 116. 정인구. 1981. 수량화에 의한 우리나라 삼림토양의 형태학적 및 이화학적 성질과 잣나무 및 낙엽송의 생장 상관분석. 한국임학회지 53 : 1-26.
 117. 정인구. 1982. 삼림토양의 이화학적 성질과 곰솔 외 3수종에 대한 적지특성에 관한 연구. 임업시험장연구보고 29 : 263-315.
 118. 조경엽, 권태규. 1999. 한국의 지구온실가스 배출과 저감정책 도입방안 연구. 에너지경제연구원. 120pp.
 119. 주린원. 1995. 속성수 조림을 확대하자. 산림. 임업협동조합중앙회. 197pp.
 120. 中井猛之進. 1976. 朝鮮森林植物編. 國書刊行會. 1(3):25.

121. 只本良也, 峰屋欣二. 1968. 森林生態學とその物質生産. わかりやすい林業解説シリーズ p.2. 林業科學技術振興所. 66pp.
122. 芝本武夫. 1954. 森林土壤學. 朝倉書店. 439pp.
123. 진현오, 이명중, 신영오, 김정제, 전상근. 1994. 삼림토양학. 향문사. 325pp.
124. 차윤정. 2001. 전남 백운산지역 낙엽활엽수림에서 벌채후 산림발달단계별 조릿대의 생리적 특성과 생태적 역할. 서울대학교 농학박사학위논문. 105pp.
125. 최기룡, 임양재. 1984. 설악산 산림식생의 우점도와 다양성에 관하여. 한국식물학회지 27:25-32.
126. 한상돈. 1995. 다중회귀 및 경로분석에 의한 참나무류 입지요인 평가. 충북대학교 농학박사학위논문. 173pp.
127. 한상섭. 1996. 산림생태계의 에너지론. 「산림생태학」. 향문사. p.215-246.
128. 한상섭, 김도영, 심주석. 1992. 신갈나무 장령임분의 물질생산 구조에 관한 연구. 한국임학회지 81(1):1-10.

2. 산림 및 농산 폐 바이오매스의 최적 발효 기술 개발

- 1) Kim, B.H. Korean Appl. Microbial. Bioeng. 6:197~203 (1978)
- 2) Reese, E.T. & M. Mandels, Biotechnol. Bioeng. 22:323~335 (1980)
- 3) Ferchak, J.D., D. Haegerdal, E.K. Pye, Biotechnol. Bioeng. 22: 1527~1542 (1980)
- 4) J.M. Jo, Illustration of wood demand-supply and forest products industries in Korea. Mokjaebojon 5(1):22~38 (1987)
- 5) Nam-Seok Cho, C. Y. Lee, B. H. Yoon, B. H. Whang, Wood Chemistry, Yeungnam Univ. Publ., (1987)
- 6) 河田 弘, Bark 堆肥, 博友社 p.41 (1981)
- 7) 河田 弘, Bark 堆肥, 博友社 p.15 (1981)
- 8) 日本科學技術廳 資源調査會編, 木材工業의 廢材의 그 利用 (1971)
- 9) Allison, F. E., W. H., Demar, & J. H. Smith, Toxicity to garden peas of certain finely ground wood and barks mixed with soil. Agron. J. 55 : 358~360 (1963)

- 10) Allison, F.E., R.M. Murphy, & C.J. Klein, Nitrogen requirements for the decomposition of various kinds of finely ground wood in soil. *Soil Sci.* 96 : 187~190 (1963)
- 11) Nam-Seok Cho, On the manufacturing of soil conditioner and fodder from waste wooden materials. *Forest Res. Inst.* (1974)
- 12) 조 남석. 목질계 폐재를 이용한 토양개량제 제조에 관한 연구, 영남대 자원문제연구논문집 9(1):1~9 (1990)
- 13) Dunn, S., L.P. Jr. Wolfe, W.A. Macdonald, & J. R. Baker. Field plot studies with sawdust for soil improvement. *Plant & Soil* 2:164~170 (1952)
- 14) Macdonald, W.A.& S. Dunn, Sawdust composts in soil improvemet. Pot culture studies with compost mixtures of sawdust and manure, steam treated composts and miscellaneous mixtures. *Plant & Soil* 4: 235~247 (1953)
- 15) Wolf, S.P.Jr. & S. Dunn, Sawdust composts in soil improvement. - Studies on aeration, acid hydrolysis, manure, and waste materials as composting aid. *Plant & Soil* 4:223~234 (1953)
- 16) Baker, J.R. & S. Dunn, sawdust composts in soil improvement.-Pot studies with composts from out-door pits, wooden bins with high moisture, and other mixtures. *Plant & Soil* 6:113~128 (1955)
- 17) Davey, C., Sawdust composts: their preparation and effect on plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17:59~60 (1953)
- 18) Davey, C., transformation of sawdust in the course of its decomposition under the influence *Coprinus ephemerus*. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19 : 376~377 (1955)
- 19) Sales, R.L., Using and marketing bark residues. *For. Proc. J.* 23(8) : 10~14 (1973)
- 20) 島本賞也, 最近 微生物農法, 酵素의 世界社 (1956)
- 21) 十河村男, 樹皮lignin及び樹皮phenolに關する研究, 香川大學 農學部 紀要 25: 1~76 (1971)

3. 발효열 이용 열교환기 개발

1. http://www.motherearthnews.com/library/1980_September_October/Update_II_Mother_s_Compost_Heater
1. 이충구, 이세균, 이계복, 이석호, 김정현, “폐 바이오매스를 이용한 폐열 회수 열교환기에 관한 연구,” 설비공학회 논문집, Vol. 16, No. 6, pp. 514-521, 2004.
2. Pain, I., and Pain, J., 1972, The Methods of Jean Pain: Another Kind of Garden. Commite International Jean Pain, Hofter Winkelen, Londerzeel, Belgium.
3. Dahn, J., Bales, C., Lorenz, K. and Dalenback, J., 1998, Evaluation of Storage Configurations with Internal Heat Exchangers, Solar Energy, Vol. 62, No. 6, p. 407-417.
4. Matsumura, Y., 2002, Evaluation of Supercritical Water Gasification and Biomethanation for Wet Biomass Utilization in Japan, Energy Conversion and Management 43. 1301-1310.
5. Hirscha, D., Epsteinb, M., Steinfelda, M., 2001, The Solar Thermal Decarbonization of Natural Gas, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 26, pp. 1023-1033.
6. Holman, J. P., " Heat Transfer," McGraw Hill, New York, 1997.
7. 솔라 하트 교동, <http://www.solakorea.com>.
8. 김지동 외 6인, “유기물 폐기물의 고속 혐기발효 및 메탄가스 정제 이용기술,” 한국에너지기술 연구원, 과학기술부 연구보고서, No. 99-I-01-04-A-023, 2001

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.