

최 중
연구보고서

농촌폐비닐과 하수슬러지를 혼합한
재생에너지 생산 시스템 및 난방열
공급시스템 개발

Development of Greenhouse Heating System &
Renewable Energy Production System Using Waste
Vinyl and Sewage Sludge

연구기관
(주) 리젠코리아
순천대학교

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농촌폐비닐과 하수슬러지를 혼합한 재생에너지 생산 시스템 및 난방열 공급시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2008 년 6 월 24 일

주관연구기관명 : (주)리젠코리아

총괄연구책임자 : 신현충

연 구 원 : 사토시게루

연 구 원 : 조익준

연 구 원 : 김영상

연 구 원 : 박진하

협동연구기관명 : 순천대학교

협동연구책임자 : 박금주

연 구 원 : 안병주

연 구 원 : 오민석

요 약 문

I. 제 목

농촌폐비닐과 하수슬러지를 혼합한 재생에너지 생산 시스템 및 난방열 공급시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

영농 후 발생하는 농촌 폐비닐은 토양오염 등 농촌 환경오염의 주범으로 작용하고 있는 실정으로 최근 들어 농촌 폐비닐의 발생량은 점차 증가하고 있으나 농촌인구의 고령화와 재활용 시 수익성 저조 등의 문제점 때문에 원활한 수거가 이루어 지지 않고 있다. 특히, 농촌 폐비닐 중 하우스용을 제외한 ‘멀칭용’은 침착토사의 탈리나 파쇄, 세척, 건조 등 전처리 기술의 미비와 마땅한 재활용 사용처가 없는 관계로 그 처리에 심각한 문제점을 안고 있는 상황이다.

지자체가 발생시키는 생활폐기물 중 재활용처리가 가장 어려운 것이 하수 슬러지이며, 그 이유는 하수처리과정 중 마지막 단계에서 ‘물’과‘고형물 찌꺼기’로 분리하기 위해서 투입하는 응집제로 인해 탈수나 건조가 어렵기 때문이다.

본 연구의 목적은 농촌 폐비닐과 탈수된 하수슬러지를 이용하여 GR 슬러지 연료탄을 제조하여 농촌 비닐하우스 난방에 적용하는 것이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 농촌폐비닐 및 하수슬러지 특성조사
2. 고품연료 제작을 위한 전처리 기술개발

3. 고품연료 성형기 개발
4. 온실용 순환보일러 개발
5. 보일러의 성능분석

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

농업용 멀칭폐비닐과 하수슬러지를 이용하여 고품연료를 제조할 수 있는지를 판단하기 위하여 폐비닐과 하수슬러지의 발생량을 조사하고 삼성분, 중금속 및 발열량 등을 분석하였다. 농업용 멀칭폐비닐과 하수슬러지를 이용하여 고품연료를 제조하였으며, 제조한 고품연료를 이용하여 온실을 가온할 수 있는 순환보일러를 개발 제작하였다. 고품연료로 보일러를 가동하여 300평 규모의 장미온실을 가온하고 보일러의 효율, 온실의 가온효과 및 배기가스 분석을 수행하여 고품연료와 보일러의 성능을 분석하였다.

1. 농촌폐비닐 및 하수슬러지 특성 조사

농촌폐비닐 및 하수슬러지의 성분조사를 위해서 전남지역 7개 폐비닐 수거장, 5개 지역의 하수처리장에서 폐비닐과 하수슬러지를 샘플링하였으며, 삼성분분석, 중금속 분석, 원소분석 및 발열량분석을 수행하였다.

1) 2005년도 국내 영농폐비닐 발생량은 322,947톤으로 추정되며, 2004년의 264,880톤보다 58,067톤이 증가하였다. 영농폐비닐 발생량의 재질별 증감을 살펴보면 멀칭용 LDPE는 26,474톤, HDPE는 42,844톤 증가한 반면 하우스용 LDPE는 4,314톤, 기타(PVC, EVA) 6,938톤이 감소하였다. 국내 하수슬러지 발생량은 2002년도 207만톤으로부터 2005년 256만톤으로 증가하였으며, 처리시설도 207개소로부터 294개소로 증가하였다.

2) 폐비닐과 하수슬러지의 중금속 함유량은 납, 구리, 비소, 수은, 카드뮴, 6가 크롬, 시안 및 기름성분에 대하여 측정 분석하였다. 폐비닐과 하수슬러지 모두 중금속 함유량이 허용 값보다 적은 것으로 나타나 고형연료의 원료로서 문제점이 없었다.

3) 하수슬러지의 수분함량은 70.10%~84.30%의 범위에 있었다. 고형연료의 제작을 위해서는 탈수 및 건조의 과정이 필요한 것으로 나타났다. 저위발열량이 8,291kcal/kg 인 폐비닐과 10%로 건조한 하수슬러지를 효과적으로 배합하면 5,000~6,000kcal/kg의 열량을 발생하는 고형연료를 제작할 수 있을 것으로 판단되었다.

2. 고형연료 제작을 위한 전처리 기술개발

대상물을 활용하여 고형연료를 생산하기 위한 필수 선결조건은 함수율의 저감이다. 이를 위한 기존 기술은 대부분 물리적 압착방식(벨트프레스탈수기 등)이나 물리적 원심분리방식(데칸타 등)을 채택하고 있다. 그러나 이러한 기술로는 대상물의 함수율을 80%대 미만으로 떨어뜨리기가 어렵고 또한 대상물의 성상에 큰 변화가 없으므로 탈수 이후 건조기술의 적용에 있어서도 애로사항이 발생하고 있는 실정이다. 본 과제에서는 대상물에 전기를 침투시켜 전자(e^-)의 흐름에 의한 작용으로 대상물의 세포막이 찢어지는 원리를 활용하여 함수율을 60%미만으로 저감시키는 고효율 탈수기술의 개발을 완성하였으며, 특히 3상교류의 전기를 활용함으로써 탈수 효율성과 전기안전성을 확보할 수 있었다.

3. 고형연료 성형기 개발

본 연구에서는 전처리가 끝난 원재료(슬러지, 기타 가연성 폐기물)를 일정한 비율로 균질하게 혼합하여 난방필요 발열량을 갖는 고형연료로 성형·제조하였다.

4. 온실용 순환보일러 개발

본 연구에서는 탈수·건조된 대상물에 발열량이 높은 고분자 유기성폐기물(폐비닐)을 첨가하여 발열량 조절이나 연료성형의 효율성을 기하는 기술을 개발하고자 하였으며, “고형연료(GR 슬러지 연료탄)의 사용기술” 개발 범위에 포함될 ‘고형연료 연소 전용 순환보일러’에서 혼합 연소하는 기술을 제시하였다.

5. 보일러의 성능분석

보일러 성능분석을 위하여 폐비닐과 하수슬러지를 혼합하여 고형연료를 성형 제작하였다. 고형연료와 보일러의 성능을 분석하기 위하여 300평 규모의 장미온실을 가온 시험하였다. 열교환기 입출구의 온수온도와 유량을 측정하여 보일러 효율을 분석하였으며, 온실 내에 8개의 T/C 온도센서를 설치하고 온도변화 및 온도분포를 측정하여 온실의 가온효과를 분석하였으며, 휴대용 배기가스분석기(GreenLine MK2)를 이용하여 보일러 연도의 배기가스 성분을 측정 분석하였다.

1) 고형연료 제조를 위하여 사용된 폐비닐, 하수슬러지, 탈수슬러지, 고형연료의 공업분석과 고형연료의 발열량을 분석하였다. 저위발열량은 9,782 kcal/kg으로서 고형연료로서 매우 높은 열량을 나타냈으며, 수분함량도 0.43%, 회분이 10.73%, 가연분이 88.84%로서 매우 좋은 조건의 연료가 생산되었다. 성형된 고형연료를 완전 연소시키는데 필요한 이론공기량은 고형연료에 포함된 탄소, 수소, 산소 및 황의 성분 함량을 대입하여 다음과 같이 구한 결과 $6.68 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ 으로 나타났다.

2) 보일러의 열효율은 입출열법에 의하여 산정하였다. 보일러의 입구와 출구에서의 물의 온도 차이를 구하여 유효 출열을 계산하였다. 보일러가 정상적으로 작동하지 않음으로 말미암아 연소실 상부온도가 50 °C 이상 올라가지 않았으며, 따라서 배출수의 온도는 40~50 °C의 범위에서 변화하였다. 보일러 효율은 3.6%에 불과하였다.

3) 보일러 연소가스 분석은 연도 배기가스의 O_2 , CO, CO_2 , SO_2 , NO_x 등을 측정 분석하였다. CO는 초기에 1,000 ppm을 상회하는 경우도 있었으나 점차적으로 감소하여 중반부터는 거의 나타나지 않았다. SO_2 는 초기에는 전혀 검출되지 않았으며, 시험 중반 이후에 1ppm 이하의 범위에서 검출되었다. NO_x 는 초기에는 0~100ppm의 범위에서 변화하였으며, 중반 이후는 거의 배출되지 않았다. 배출가스의 농도는 대기오염물질 농도기준 이내의 범위에서 배출되어 고품연료로서 사용이 가능한 것으로 나타났다.

4) 온실의 위치에 따라 6개의 온도센서를 지면으로부터 1.7m의 높이에 설치하였으며, 높이별 온도분포를 파악하기 위하여 3개의 센서를 지면으로부터 1.7, 1.2 및 0.7m의 높이에 설치하였다. 온실의 수평방향 및 수직방향 위치별 온도분포는 $1^{\circ}C$ 이내로서 차이가 없었으나, 시간별 온도는 증가하지 않고 오히려 시험 기간 동안 약 $4^{\circ}C$ 감소하였다. 온도가 감소한 이유는 방열기를 작동하였을 때 보일러 배출수 온도 상승에 의한 효과는 거의 없는 반면에 외기 온도가 낮아졌기 때문인 것으로 판단되었다.

5) 연소 잔재물 분석하기 위하여 연소 후 바닥재를 채취하여 성분분석을 수행하였다. 연소 잔재물의 수분함량은 0.09%, 회분이 0.84, 가연성분이 99.07%로서 연료가 거의 연소되지 않고 배출되는 것으로 나타났다. 이는 보일러의 작동이 양호하지 않아 가연성의 성분이 타지 않고 연소 잔재물로 배출되었다.

SUMMARY

I. Title of research

Development of Greenhouse Heating System & Renewable Energy Production System Using Waste Vinyl and Sewage Sludge

II. Objective of research

Farm village waste vinyl that is produced after engaging in agriculture by real condition acting by main mast of farm village environmental pollution such as ground pollution recently occurrence amount of farm village lungs vinyl gradually increase but when recycle with rural population's graying, smooth removal is not achieved because of problem of profitability low tone etc. Specially, among farm village waste vinyl, 'Mulching' except house is circumstance that know controversial point that is serious in the processing by relation that unpreparedness and befit recycling use place of pretreatment technology such as secession or crush of composure earth and sand, washing, dry etc. do not exist.

It is sewage sludge that recycling processing among life waste that local government breeds is the most difficult, and the reason is that dehydration or dry is difficult from coagulant that medicate to separate by 'Water' and 'Solid dregs' at last step among sewage process.

Purpose of this study is to make GR sludge bunker coal because uses farm village waste vinyl and dried sewage sludge and applies to farm village greenhouse heating.

III. Scope and contents of the research

1. To investigate the characteristics of waste vinyl and sewage sludge, and possibility of producing of refuse derived fuel(RDF) using waste vinyl and sewage sludge.

2. To develop pre-treatment system for producing RDF such as dehydration and drying machine.

3. To develop forming machine of RDF using waste vinyl and sewage sludge.

4. To develop boiler which could be used in greenhouse for plant cultivation,

5. To analyze the performance of the boiler such as boiler efficiency, heating effect on greenhouse, and exhaust gas component.

IV. Summary and Conclusions

1. Investigation of characteristics of waste vinyl and sewage sludge

To analyze the components and heating values of materials, waste vinyl and sewage sludge were sampled from 7 waste vinyl collection plants and 5 sewage treatment plants. The results are summarized as followings:

1) About 323,000 tons' waste vinyl from agricultural production was generated during 2005 showing increase every year. About 2,560,000 tons' sewage sludge was generated during 2005, most of which was discharged into the ocean.

2) Low heating values (LHV) of waste vinyl were from 7,329 to 9,584 kcal/kg

showing the mean of 8,291 kcal/kg. Low heating values of sewage sludge from three plants were below zero which means that those sludge need heat to burn out. However, if they are dried to MC of 10%, they could be used as fuel sources. Low heating values of sewage sludge, when dried to MC of 10%, were from 1,723% to 3,246% with the mean of 1,998 kcal/kg.

3) Moisture content of waste vinyl varied from 0.02% to 2.80% representing small difference possibly due to weather condition of sampling date. Combustible content varied from 58.3% to 92.5% showing much difference. Moisture content of sewage sludge varied from 70.1% to 84.3% according to regions. Sewage sludge needs dewatering and drying process to reduce moisture content to about 10% for RDF formation.

4) Heavy metal component of the RDF should not exceed the permit limit to prevent air and soil pollution after burning. From the quality standard of RDF of our country, contents of Hg, Cd, Pb and As are specified not to exceed limit values such as Hg; 1.20 mg/kg, Cd; 9.0 mg/kg, Pb; 200.0 mg/kg, and As; 13.0 mg/kg. Heavy metal components, Pb, Cu, As, Hg, Cd, Cr⁶⁺,CN and Oil, of waste vinyl were less than the limit showing the usability of waste vinyl for raw materials of RDF. Heavy metal components of sewage sludge were less than permit limit showing the usability of sewage for RDF materials.

2. Development of pre-treatment system for producing RDF

Essential prerequisite to utilizes object and produces solid fuel is reduction of percentage of moisture content. Existing technology for this is selecting most physical compression method (belt press hydroextractor etc.) or physical original

decision separation method (Deccan other back). But, I hard to debase percentage of moisture content of object less than 80% by this technology and it is real condition that bottleneck problem is happening even if there is in application of a dry technology since dehydration because there is no big change in years of object. In this subject, could completed development of a high effectiveness dehydration technology that do to reduce percentage of moisture content less than 60% because cell membrane of object takes advantage of tearing principle by function by flowing of electron (e⁻) because is infiltrated juice to object, and secure dehydration efficiency and electricity safety by taking advantage of technique of three-phase alternating current specially.

3. Development of RDF forming machine

In this study, I molded raw material (sludge, other combustible refuse) that pretreatment finishes by solid fuel that have heating need caloric value mixing fixed at the rate of as is uniform.

4. Development of boiler for plastic film house

In this study, wished to develop a technology that caloric value promises efficiency of caloric value control or fuel correction of deformities adding high polymer organic sex deadly wastes (waste vinyl) to object that dry and dehydrate, and presented a mixing young technology in 'Solid fuel burning exclusive use circulation boiler' to be included in "Use technology of solid fuel (GR sludge bunker coal)" development extent.

5. Analysis of the boiler performance

This study was performed to analyze performance of boiler by heating the plastic film house for rose cultivation. Inlet and outlet temperatures of boiler and water flow were measured to get boiler efficiency. Eight thermocouple temperature sensors was installed to find out temperature variation with time and spaces in the plastic film house. Exhaust gas was analyzed using the gas analyzer(GreenLine MK2). The results are as followings:

1) Proximate analysis of waste plastic film, sewage sludge and RDF was accomplished. Heating value of RDF was 9,782 kcal/kg with 0.43% of the moisture content, 10.73% of ash and 88.84% of combustible content representing good condition as a solid fuel.

2) Boiler efficiency was acquired by input and output heat energy. The temperature of exit water from boiler was varied in the range of 40~50°C. Efficiency of boiler was 3.6% because the boiler was not operated normally. The air line of the combustion chamber was closed by melting of the fuel and did not supply the air into the fuel.

3) CO, CO₂, SO₂ and NO_x gas of exhaust line was measured using the gas analyzer. Exhaust gas concentration was below permit limit for the RDF combustion in the boiler.

4) Temperature variation according to horizontal position and vertical height was within 1°C and the temperature was decreased with time because the boiler did not operate properly and the outer air temperature was decreased.

5) Bottom ash of the boiler contained the 0.09% of moisture content, 0.84% of ash and 99.07% of combustible content because the RDF was not burned enough in the combustion chamber.

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	20
Section 1	Purpose and necessity of study	20
Part 1	Technological side	20
Part 2	Economy/industrial side	22
Chapter 2	Investigation of characteristics of waste vinyl and sewage	24
Section 1	Introduction	24
Section 2	Generation and treatment of waste materials	25
Part 1	The waste occurrence amount	25
Part 2	Domestic engaging in agriculture waste vinyl and sewage sludge occurrence present condition and practical use actual conditions	28
Section 3	Component of waste vinyl and sewage sludge	33
Part 1	Three componential analysis	33
Part 2	Heavy metals content analysis	34
Part 3	Solid fuel waste vinyl and sewage sludge caloric value analysis	36
Part 4	Ultimate analysis	37
Section 4	Pre-treatment of raw materials for RDF formation	39
Section 5	Results and discussion	40
Chapter 3	Development of pre-treatment system for producing RDF	41
Section 1	Technology abstract and principle	41

Part 1 Dehydration technology abstract	41
Part 2 Eletro-osmosis dehydration technology principle	43
Section 2 Development manufacture of Electro-osmosis dehydrator	46
Part 1 Manufacture of Electro-osmosis dehydrator	46
Part 2 Sewage sludge dehydration	47
Chapter 4 Development of RDF forming machine	52
Section 1 RDF forming machine design	52
Section 2 System manufacture and establishment	55
Chapter 5 Development of boiler for plastic film house	58
Section 1 Boiler for plastic film house design	58
Section 2 System manufacture and establishment	59
Chapter 6 Analysis of the boiler performance	62
Section 1 Introduction	62
Section 2 Materials and methods	62
Part 1 Ingredient of solid fuel, caloric value and amount of theoretical combustion air analysis	65
Part 2 Composition and boiler service test of instrumentation system ·	65
Part 3 Boiler thermal efficiency analysis	69
Part 4 Boiler combustion gas analysis	71
Part 5 Greenhouse heating effect analysis	77
Part 6 Burning ashes analysis	79
Section 3 Problem of a technology and solution	80
References	81

목 차

요약문	3
SUMMARY	8
제 1 장 서론	20
제 1 절 연구의 목적 및 필요성	20
1. 기술적 측면	20
2. 경제 · 산업적 측면	22
제 2 장 농촌폐비닐 및 하수슬러지 특성 조사	24
제 1 절 서언	24
제 2 절 국내 폐기물 발생 및 처리현황	25
1. 폐기물 발생량	25
2. 국내 영농폐비닐 및 하수슬러지 발생현황 및 활용실태	28
제 3 절 고품연료제조작용 폐비닐 및 하수슬러지 성분조사	33
1. 삼성분 분석	33
2. 중금속 함유량 분석	34
3. 고품연료용 폐비닐 및 하수슬러지 발열량분석	36
4. 원소분석	37
제 4 절 고품연료 원료의 전처리 및 발열량	39
제 5 절 결과 및 고찰	40
제 3 장 고품연료 제작을 위한 전처리 기술개발	41
제 1 절 기술개요 및 원리	41
1. 탈수기술 개요	41
2. 전기침투탈수 기술 원리	43
제 2 절 전기침투탈수기의 개발 제작	46
1. 전기침투탈수기의 제작	46

2. 하수슬러지 탈수	47
제 4 장 고탄연료 성형기 개발	52
제 1 절 성형기 설계	52
제 2 절 시스템 제작 및 설치	55
제 5 장 온실용 순환보일러 개발	58
제 1 절 순환보일러 설계	58
제 2 절 시스템 제작 및 설치	59
제 6 장 보일러의 성능분석	62
제 1 절 서언	62
제 2 절 재료 및 방법	62
1. 고탄연료의 성분, 발열량 및 이론공기량 분석	62
2. 계측시스템의 구성과 보일러 작동 시험	65
3. 보일러 열효율 분석	69
4. 보일러 연소가스 분석	71
5. 온실가온효과 분석	77
6. 연소잔재물 분석	79
제 3 절 기술의 문제점 및 해결방안	80
참고문헌	81

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 목적 및 필요성

1. 기술적 측면

영농 후 매년 30만톤 가까이 발생하는 농촌폐비닐은 토양오염등 농촌 환경오염의 주범으로 작용하고 있고 특히 농촌 폐비닐 중 하우스용을 제외한 '멀칭용'은 침착토사의 탈리나 파쇄, 세척, 건조등 전처리 기술의 미비와 마땅한 재활용 용처가 없다. 현재 농촌의 노지 내지 들판에는 과묵혀 있는 폐비닐을 쉽게 발견할 수 있다. 이 폐비닐은 토지를 황폐화시키는 것은 물론 농업생산성을 크게 저하시키고 있는 요인이며 수거 또한 원활하게 이루어지지 못하고 있다. 이는 폐비닐을 수거하더라도 쉽게 재활용하지 못하는 현실적 문제가 있다. 수거된 폐비닐의 경우, 50%이상 흙과 같은 이물질이 부착 또는 점착되어 있어 이를 제거(습식공정)해야 재활용 할 수 있다. 이러한 습식공정 중 3차에 걸친 세정공정과 이와 관련된 설비들로 인해 공정이 복잡해지고 처리단가가 상승하게 되는 것이다. 농업도 다른 산업과 마찬가지로 가격 경쟁력을 갖추기 위해서는 당연히 원가 절감을 필요로 하며 이를 위해서 관련분야의 부단한 연구개발이 병행되어야 한다. 특히, 비닐하우스 시설농가의 생산원가 중 비중이 큰 부분은 난방비용인 데 최근 계속되고 있는 고유가 행진과 조만간 중단이 예상되는 면세유 공급문제등 때문에 근본적 대책이 절실히 요구되는 실정이다.

표 1-1. 비닐하우스 장미 재배 시 소요되는 연간 연료비용

구분	내용		비고
경유 사용량	3만L/년		원유 가격상승으로 매년 큰 폭으로 난방비 증가 추세
연료비중	단가(L)	면세 590원/일반 1,100원	
	총비용	면세 1,770만원 /일반 3,300만원	

(시설면적 1,000평기준)

본 연구개발결과로서 시현될 '저비용의 연료생산'과 '고효율의 보일러 연소열 공급'은 위와 같은 문제를 상당부분 해소할 것이며, 더 나아가 WTO체제나 FTA협정 여건 하에서도 우리 농산물의 가격 경쟁력을 충분히 갖출 수 있는 요소로 작용할 것이다.

한편, 지정폐기물을 제외한 일반폐기물중 국내외를 막론하고 그 처리가 가장 어려운 것이 슬러지라고 할 수 있으며, 국내에서 발생하는 '하수슬러지'만 보더라도 2004년도 기준으로 전국 250여개소 하수종말처리장에서 매일 8,000여ton씩 배출되어 이중 77% 인 6,200ton이 날마다 바다에 버려지고 있다.

표 1-2. 2004년 국내 하수슬러지 발생량 및 처리방식 (단위 : ton)

구분	총 발생량	처리 방식				비고
		해양투기	소각	재활용	육상 매립	
년간	2,426,070	1,869,334	283,356	239,885	34,295	
일간(300일/년)	8,086	6,231	944	796	114	
비율(%)	100	77	11.7	9.9	1.4	

(출처 : 환경관리공단, 2004)

이처럼 슬러지(하·폐수)의 육상 재활용처리가 어려운 가장 큰 이유는 하·폐수 처리과정 중 마지막 단계에서 '물'과 '고형물찌꺼기'를 분리하기 위해서 투입하는 화학약품인 「고분자응집제」 성분 때문에, 슬러지의 물리적 방식에 의한 탈수가 어렵고, 따라서 재활용 처리를 위하여 필수적으로 요구되는 함수율 20%대의 달성에 탈수·건조 비용이 과다하게 소요(평균 10만원/ton 내외)되기 때문이다. 이에 따라 슬러지의 해양투기를 대체하기 위한 재활용 처리기술의 선결과제는 경제성있는 방식으로 슬러지의 전처리(탈수 및 건조)가 가능해야 함을 인지해야한다.

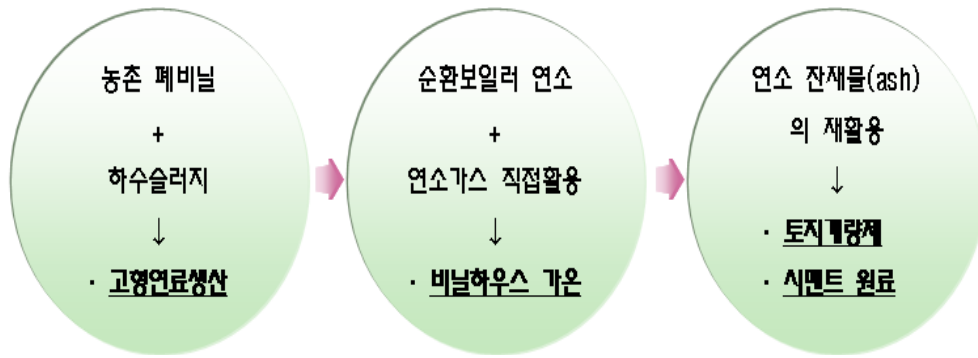


그림 1-1. 하수슬러지와 폐비닐 재활용 시스템의 예상 공정도

본 과제에서는 국가규격(산업자원부 기술표준원 GR M 9004 하수슬러지 연료탄)에 부합하는 슬러지 재활용 제품의 효율적 생산기술의 개발과 이를 토대로한 관련 실증 플랜트 구현에 의한 고형연료를 생산하고, 이를 안정적으로 활용할 수 있는 최종처리 방안을 제시하는 것이다. 궁극적으로 본 과제의 수행결과 슬러지의 해양투기 방지와 농촌 폐비닐의 재활용처리에 따른 환경보전의 기여는 물론이거니와 농가 난방비 절감 등의 경제적 효과를 창출할 수 있다.

2. 경제·산업적 측면

2007년도 우리나라의 에너지 수입 의존도는 97%에 달하고 있으며 수입 금액은 945억 달러로 총 수입액 중 27%를 차지하였다.

한편 수입에너지 원별 비중에서 원유와 가스 수입액이 80% 이상을 차지하고 있는데 현재 원유가격은 이미 배럴당 120달러를 넘어서고 있어서 국가 경제적으로 초비상이 걸려 있는 상태이다. 이에 우리 정부도 10여년 전부터 신재생에너지 기술 개발 및 이용 보급등에 상당한 노력을 기울이고 있지만 지금까지는 주로 ‘태양광’, ‘풍력’, ‘수소에너지’의 3분야에 집중하고 있어서 실제 에너지 대체 효과는 미미한 실정이다.

이러한 문제점을 인식한 정부(환경부, 지식경제부등)도 최근 신재생에너지 정책 방향을 현실화하여 "폐기물 에너지 이용 활성화 방침"을 확정 발표하였다.

표 1-3. 폐비닐을 활용한 GR 슬러지 연료탄의 대체·감소효과

경제적 이익분야	대체/감소효과
폐기물 관리 측면	향후 소각장 신규설치, 가동 감소
에너지 측면	에너지 수입대체 효과
지구환경 측면	화석연료 사용감소로 인한 탄소 247만톤 감소효과
대기오염 측면	화석연료 대체연료 활용으로 대기오염 총량측면에서 대기오염물질 감소효과

제 2 장 농촌폐비닐 및 하수슬러지 특성 조사

제 1 절 서언

우리가 사용하고 있는 화석에너지는 대부분 수입에 의존하고 있으며 또한 화석에너지는 토양 및 대기환경오염의 주요 원인으로 작용하고 있다. 외화의 절감과 환경오염의 방지측면에서 신재생에너지의 확보가 매우 중요하다. 정부는 신재생에너지를 신에너지 3개분야(연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지), 재생에너지 8개분야(태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지)로 구분하여 개발추진하고 있다. 재생에너지 중에서 폐기물이 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

생활폐기물을 이용한 고품연료(Refuse Derived Fuel, RDF)는 시멘트 소성로, 고품연료 전용보일러, 화력발전소 등에서 주 연료 내지는 보조연료로 이용이 가능하며, 저장 및 운송 등 취급이 용이하다. RDF의 원료로 사용할 수 있는 농촌 폐비닐은 연간 323,000톤이 발생하며 2005년 이후로 해마다 증가 추세에 있다. 일부는 재활용되고 있지만 멀칭용 폐비닐은 재활용되지 못하고 논두렁 또는 폐비닐 수거장에 방치되어 있는 경우가 많다. 하수슬러지는 연간 대략 2,560,000톤이 발생되며 지렁이 사육 등으로 활용되는 경우를 제외하면 대부분 해양투기 되고 있는 실정이다. 본 연구는 농촌 폐비닐과 하수슬러지를 이용한 고품연료 제조 가능성을 발열량, 중금속 함유량 등의 관점에서 검토하고자 한다.

제 2 절 국내 폐기물 발생 및 처리현황

1. 폐기물 발생량

폐기물은 일반폐기물과 지정폐기물로 구분하고 다시 일반폐기물은 생활폐기물과 사업장폐기물로 구분한다. 사업장일반폐기물은 다시 사업장배출시설계폐기물과 건설폐기물로 구분한다. 사업장배출시설계폐기물은 배출시설을 설치운영하고 있는 사업장에서 발생하는 폐기물이다. 일반폐기물 발생량은 1995년 143,597톤/일로부터 2004년 303,514톤/일로 지속적으로 증가되어 왔다. 2004년도에 발생한 일반폐기물은 생활폐기물 50,007톤/일, 사업장폐기물 253,507톤/일로 구성되어 있다.

표 2-1. 폐기물 발생량

(단위 : 톤/일)

연도	일반폐기물			지정폐기물
	소계	생활폐기물	사업장폐기물	
1995	143,597	47,774	95,823	4,445
1996	175,334	49,925	125,409	5,239
1997	189,200	47,895	141,305	6,075
1998	184,989	44,583	140,406	5,266
1999	219,217	45,614	173,603	7,489
2000	226,668	46,438	180,230	7,614
2001	252,927	48,499	204,428	8,105
2002	269,548	49,902	219,646	7,985
2003	295,047	50,736	244,311	7,982
2004	303,514	50,007	253,507	8,152

자료 : 환경통계연감(2006)

생활폐기물 중에서 음식물류 폐기물은 1996년 14,532톤/일로부터 정부의 쓰레기종량제 및 음식물분리수거 정책에 따라 1998년도에 11,798톤/일로 감소하였으며, 그 이후에는 거의 일정한 수준으로 발생하고 있다.

표 2-2. 생활폐기물의 재료별 발생량 (단위 : 톤/일)

연도	종이	연탄재	금속 & 유리	음식물류	기타
1996	13,327	1,853	5,262	14,532	14,951
1997	12,926	1,255	5,690	13,063	14,961
1998	11,942	917	6,063	11,798	13,863
1999	12,221	746	6,011	11,577	15,059
2000	11,999	648	6,252	11,434	16,105
2001	12,173	601	6,618	11,237	17,870
2002	12,171	535	6,621	11,397	19,178
2003	12,411	595	6,695	11,398	19,637
2004	12,176	574	6,588	11,464	19,205

자료 : 환경통계연감(2006)

2004년도 사업장 배출시설계 폐기물은 가연성이 105,018톤/일, 불연성이 76,936톤/일 발생하였으며, 가연성폐기물은 폐수처리오니 11,302톤/일, 하수처리오니 6,269톤/일, 폐합성수지 4,561톤/일 등으로 구성되어 있다. 건설폐기물은 가연성이 148,489톤/일, 불연성이 141,468톤/일 발생하였다.

폐기물은 매립, 소각, 해양투기 및 재활용에 의하여 처리되어 왔다. 폐기물 처리현황을 전체적으로 보면 재활용이 확대되고 매립이 감소하고, 소각처리는 점진적으로 증가하는 추세에 있다. 1998년에는 생활폐기물의 56%를 매립하고 35%를 재활용하였으나 2004년도에는 매립은 36%로 줄고, 재활용은 49%로 증가하였다.

해양투기량은 1996년도 5,014천톤/년으로부터 2005년에는 9,929천톤/년으로 증가하였다. 2005년도 해양배출 폐기물은 재료의 종류별로 분뇨가 36%, 유기성폐수가 23% 등으로 배출되었다.

표 2-3. 생활폐기물의 연도별 처리현황

(단위 : 톤/일)

연도	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
발생량	44,583	45,614	46,438	48,499	49,902	50,736	50,007
매립 (%)	25,074	23,544	21,831	21,000	20,724	20,450	18,195
	56	52	47	43	42	40	36
소각 (%)	3,943	4,676	5,440	6,577	7,229	7,348	7,224
	9	10	12	14	14	14	14
재활용 (%)	15,566	17,394	19,167	20,922	21,949	21,938	24,588
	35	38	41	43	44	43	49

자료: 환경백서(2006)

표 2-4. 연도별 폐기물 해양배출량

(단위 : 1,000톤/년)

연도	합계	분뇨	유기성 폐수	폐산, 폐알칼리	폐수처리 오니	하수처리 오니	수산 잔재물	무기성 오니
2000	7,104	2,432	1,256	107	1,837	1,050	13	409
2001	7,671	2,681	1,476	67	1,848	1,156	12	491
2002	8,475	3,164	1,520		1,794	1,280	32	685
2003	8,874	3,599	1,660		1,674	1,382	50	509
2004	9,749	3,928	1,956		1,660	1,570	41	594
2005	9,929	3,552	2,275		1,460	1,655	28	959

자료 : 환경통계연감(2006)

2. 국내 영농폐비닐 및 하수슬러지 발생현황 및 활용실태

가. 국내 영농폐비닐 발생 및 처리 현황

2005년도 국내 영농폐비닐 발생량은 322,947톤으로 추정되며, 2004년의 264,880톤보다 58,067톤이 증가하였다. 영농폐비닐 발생량의 재질별 증감을 살펴보면 멀칭용 LDPE는 26,474톤, 멀칭용 HDPE는 42,844톤 증가한 반면 하우스용 LDPE는 4,314톤, 기타(PVC, EVA) 6,938톤이 감소하여 전체적으로 58,067톤이 증가한 것으로 나타났다.



그림 2-1. 수거된 농촌 폐비닐(멀칭용)

2-5. 국내 영농폐비닐 년도별 발생량

(단위: 톤, %)

	2003	2004 (A)	2005 (B)	전년대비증감△
				B-A
계	257,140	264,880	322,947	58,067
하우스용LDPE	25,965	36,732	32,418	△4,314
멀칭용LDPE	109,659	97,604	124,078	26,474
HDPE	106,910	117,323	160,167	42,844
기타(PVC,EVA)	14,606	13,222	6,284	△6,938

자료 : 영농폐기물통계(2006, 한국환경자원공사)

2005년도 영농폐비닐의 수거량은 213,723톤으로 2004년의 218,069톤보다 4,346톤이 감소하였다. 영농폐비닐의 재질별 증감을 살펴보면 하우스용 LDPE 6,842톤, HDPE 5,344톤이 증가한 반면, 멀칭용 LDPE 16,062톤, 기타 품목인 PVC, EVA가 470톤 감소하여 전체적으로 4,366톤이 감소한 것이다.

2005년도 영농폐비닐의 재활용량은 242,715톤으로서 2004년의 244,400톤보다 1,685톤 감소하였다.

표 2-6. 영농폐비닐 수거량

(단위: 톤(ton), %)

	2003	2004 (A)	2005 (B)	전년대비증감△
				B-A
계	150,818	218,069	213,723	△4,346
하우스용LDPE	14,193	29,868	36,710	6,842
멀칭용LDPE	94,475	136,238	120,176	△16,062
HDPE	37,576	48,878	54,222	5,344
기타(PVC,EVA)	4,573	3,085	2,615	△470

자료 : 영농폐기물통계(2006, 한국환경자원공사)

표 2-7. 영농폐비닐 재활용 현황

(단위: 톤(ton), %)

	2003	2004 (A)	2005 (B)	전년대비증감△
				B-A
계	139,555	244,400	242,715	△1,685

자료 : 영농폐기물통계(2006, 한국환경자원공사)

나. 국내 하수슬러지 발생 및 처리 현황

국내 하수슬러지 발생량은 2002년도 207만톤으로부터 2005년 256만톤으로 증가하였으며, 처리시설도 207개소로부터 294개소로 증가하였다. 하수도 보급률은 2005년도 말 기준 83.5%로서 앞으로 하수도 보급률과 하수발생량이 증가될 것으로 예상된다. 하수슬러지는 주로 해양투기에 의하여 처리되고 있다.

표 2-8. 연도별 국내 하수슬러지 발생량 및 처리현황

년도	하수 처리장 갯수	발생량 (A) = (B)+(C)	처분량						미처분량 (이월량) (C)
			계(B)	재활용	육상매립	소각	해양투기	기타	
2002	207	2,073,095	2,072,972	106,624	254,919	200,338	1,471,472	39,619	123
2003	242	2,266,888	2,266,661	152,124	113,419	279,527	1,625,676	95,915	227
2004	268	2,426,070	2,426,070	239,085	34,295	283,356	1,869,334		
2005	294	2,560,959	2,560,196	122,365	43,740	285,778	1,993,865	114,449	763

자료 : 하수도 통계(2006)

다. 국내 고품연료 산업현황

정부는 2003년 8월 폐플라스틱 재활용 향상을 위하여 ‘폐플라스틱 고품연료제품(Refuse Plastic Fuel, RPF) 품질기준 등에 관한 기준’ (환경부 고시 제2003-127호)을 고시하였다. 2005년 18개의 폐플라스틱 고품연료 생산업체에서 약 18,000톤의 RPF를 생산하여 시멘트 회사 등에서 연료로 사용되었다.

2006년 11월 ‘자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률’에 따라 고품연료제품을 종전의 폐플라스틱 고품연료(RPF)에 생활폐기물 고품연료제품(Refuse Derived Fuel, RDF)을 추가하여 고품연료를 2가지 유형으로 구분하고 고품연료 제품의 품질, 등급 등을 구체화하였다(표 2-9). 또한 폐기물 고품연료제품의 제조·사용에 관한 근거를 마련했으며, 2006년에는 생활폐기물 고품연료제품(RDF)의 품질기준, 고품연료제품을 사용할 수 있는 시설, 제조자와 사용자의 준수사항 등 고품연료제품에 관한 구체적인 관리방안을 마련했다.

매립·소각됐던 가연성 생활폐기물을 연료로 재활용하기 위해 지난 2003년부터 원주시 생활폐기물 연료화시설 설치사업을 시범적으로 추진해 왔다. 원주시는 2006년 11월 준공한 연료화시설을 통해 그동안 매립하던 생활폐기물 중 매일 80톤을 가공해 40톤의 고품연료제품을 생산하고 있다.

표 2-9. 고형연료 제품의 품질기준 및 등급기준

항목	품질 기준	등급 기준
형상 및 크기	직경 30 mm 이하, 길이 100 mm 이하 (단, RPF는 직경 50 mm 이하)	
저위발열량	3,500 kcal/kg 이상 (단, RPF 는 6,000 kcal/kg 이상)	가: 6,500 kcal/kg 이상 나: 5,500 이상 6,500 kcal/kg 미만 나: 4,500 이상 5,500 kcal/kg 미만 나: 3,500 이상 4,500 kcal/kg 미만
수분함량	10% 이하	
회분	20%이하	
염소	2%이하	1등급: 0.50%미만 2등급: 0.50% 이상 1.00% 미만 3등급: 1.00% 이상 1.50% 미만 4등급: 1.50% 이상 2.00% 미만
황	0.6%이하	
금속성분	수은 : 1.20 mg/kg 이하 카드뮴 : 9.0 mg/kg 이하 납 : 200.0 mg/kg 이하 비소 : 13.0 mg/kg 이하	

또한 고형연료를 부적절한 조건에서 연료로 사용함으로써 연소 후 대기오염의 가능성을 예방하기 위하여 고형연료의 사용처를 다음과 같이 제한하고 있다.

- 시멘트 소성로
- 고형연료제품 전용발전소 및 10MW 이상인 화력발전소
- 석탄사용량이 시간당 2톤 이상인 지역난방시설·산업용보일러·제철소로
- 고형연료제품 사용량이 시간당 400 킬로그램 이상인 전용보일러시설 또는 시간당 200 킬로그램 이상이고 연속적으로 가동하는 전용보일러시설
- 그밖에 환경부장관이 고형연료제품의 사용에 적합하다고 인정하여 고시하는 시설

제 3 절 고품연료제작용 폐비닐 및 하수슬러지 성분조사

영농폐비닐과 하수슬러지를 이용하여 고품연료를 제작할 수 있는지를 검토하기 위하여 전남지역의 7개 폐비닐 수거장, 5개 하수종말처리장에서 영농폐비닐과 하수슬러지를 수거하여 삼성분 분석, 중금속 함유량분석, 원소분석, 발열량 분석을 실시하였다.

1. 삼성분 분석

가. 폐비닐

삼성분 분석은 수분함량, 회분 및 가연분의 값을 측정 분석하였다. 폐비닐의 수분함량은 0.02 - 2.80%의 범위의 값을 나타냈으나, 평균은 0.96% 이었다. 회분은 9.8~39.2의 범위로 비교적 넓은 분포를 나타냈으며 품질에 차이가 있었으며, 평균값이 23.5%로서 고품연료 평균값을 약간 상회하는 것으로 나타났다. 가연분은 58.3~90.1% 범위를 나타냈으며 평균값이 75.14%이었다.

표 2-10. 폐비닐의 삼성분

지역	수분함량(%)	회분(%)	가연분(%)
나주	2.80	30.40	66.80
광주	0.02	14.50	85.30
담양	0.02	9.80	90.10
보성	0.03	39.20	58.30
영암	1.69	31.26	67.04
함평	1.22	10.59	88.19
해남	0.96	28.78	70.26
평균	0.96	23.50	75.14

나. 하수슬러지

하수슬러지의 수분함량은 70.10%~84.30%의 범위에 있었다. 고형연료의 제작을 위해서는 탈수 및 건조의 과정이 필요한 것으로 나타났다. 회분은 5.81~11.68의 범위에 있었으며, 평균값이 8.43%로서 고형연료의 허용값 20%보다 적은 것으로 나타났다. 가연분은 9.64~22.34% 범위를 나타냈으며 평균값이 11.42%이었다.

표 2-11. 하수슬러지의 삼성분

지역	수분함량(%)	회분(%)	가연분(%)
순천	84.30	5.81	9.89
나주	78.60	8.87	12.53
영암	78.68	11.68	9.64
합평	77.16	8.23	14.61
해남	70.10	7.56	22.34
평균	77.77	8.43	11.42

2. 중금속 함유량 분석

가. 폐비닐 중금속 함유량

폐비닐의 중금속 함유량은 납, 구리, 비소, 수은, 카드뮴, 6가크롬, 시안 및 기름성분에 대하여 측정 분석하였다. 이들의 값은 표 2-12에서와 같이 전체적으로 허용기준의 범위를 크게 밑도는 값으로 나타나 고형연료 제작에 문제점이 없는 것으로 판단되었다.

표 2-12. 페비닐의 중금속 함유량

지역	납 (mg/L)	구리 (mg/L)	비소, (mg/L)	수은 (mg/L)	카드뮴 (mg/L)	6가크롬 (mg/L)	시안 (mg/L)	기름성분 (%)
나주	-	0.025	0.014	-	0.003	-	-	0.02
광주	-	-	-	0.0008	0.004	-	0.027	-
담양	-	-	0.031	0.0006	0.005	-	0.026	-
보성	-	-	0.012	0.0008	0.003	-	0.026	-
영암	0.07	-	0.012	0.0008	-	-	-	-
함평	0.05	-	0.009	-	-	-	-	-
해남	-	-	0.006	-	0.003	-	0.027	0.01
비고 (허용기준)	3	3	1.5	0.005	0.3	1.5	1	5

나. 하수슬러지 중금속 함유량

하수슬러지의 중금속 함유량도 표 2-13에서와 같이 전체적으로 허용기준의 범위를 크게 밑도는 값으로 나타나 고품연료 제작에 문제점이 없는 것으로 판단되었다.

표 2-13. 하수슬러지의 중금속 함유량

지역	납 (mg/L)	구리 (mg/L)	비소, (mg/L)	수은 (mg/L)	카드뮴 (mg/L)	6가크롬 (mg/L)	시안 (mg/L)	유기인 (mg/L)	기름 성분 (%)
순천	-	-	0.013	0.0021	-	-	-	-	-
나주	-	-	0.006	-	0.003	-	-	-	-
영암	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-
함평	0.09	0.072	0.004	-	-	-	-	-	-
해남	-	0.314	0.008	0.0005	0.002	-	-	-	-
비고 (허용기준)	3	3	1.5	0.005	0.3	1.5	1	1	5

3. 고품연료용 페비닐 및 하수슬러지 발열량분석

고위발열량은 Bomb 칼로리미터에 의하여 고위발열량을 측정하고 저위발열량은 수분함량과 수소원소의 성분을 측정하여 다음 식으로부터 산출하였다. 수소원소의 양은 원소분석기를 이용하여 측정하였다.

$$Q_L = Q_H \left(1 - \frac{W}{100}\right) - 600 \times \left(\frac{9H}{100} + \frac{W}{100}\right)$$

여기서, Q_L = 저위발열량(kcal/kg)

Q_H = 고위발열량(kcal/kg)

W = 수분함량(%)

H = 수소성분(%)

페비닐의 고위발열량은 7,887 kcal/kg ~ 10,277 kcal/kg의 범위에 있었으며, 평균 9,174kcal/kg의 값을 가지고 있었다. 저위발열량은 7,329 kcal/kg ~ 9,584 kcal/kg의 범위에 있었으며, 평균 8,291kcal/kg의 값을 가지고 있었다. 이값은 하수슬러지에 첨가하여 고품연료를 제작하면 충분한 발열량을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

표 2-14. 페비닐의 발열량

지역	고위발열량 (kcal/kg)	저위발열량 (kcal/kg)	수분함량 (%)	회분 (%)	가연분 (%)
나주	8,556	7,329	2.80	30.40	66.80
광주	9,656	9,154	0.02	14.50	85.30
담양	10,277	9,584	0.02	9.80	90.10
보성	7,887	7,361	0.03	39.20	58.30
영암	9,417	8,271	1.69	31.26	67.04
함평	8,843	7,743	1.22	10.59	88.19
해남	9,584	8,592	0.96	28.78	70.26
평균	9,174	8,291	0.84	23.50	75.14

하수슬러지의 고위발열량은 2,194kcal/kg ~ 4,015kcal/kg의 범위에 있었으며, 평균 2,972kcal/kg의 값을 가지고 있었다. 저위발열량은 평균하면 음의 값을 가지고 있었다.

이는 수분함량이 과다하여 연소하는데 오히려 연료가 요구됨을 나타낸다. 고품연료로 제조하기 위해서는 약 10%정도로 건조한 후 폐비닐가 혼합하여 제조가 가능할 것으로 판단되었다. 10%로 건조하였을 때 평균발열량은 1,998 kcal/kg로서 높은 발열량의 폐비닐과 혼합하면 고품연료를 생산할 수 있을 것으로 판단되었다.

표 2-15. 하수슬러지의 발열량

지역	고위발열량 (kcal/kg)	저위발열량 (kcal/kg)	수분함량 (%)	가연분 (%)	회분(%)	저위발열량, 10% (kcal/kg)
순천	3,322	-174	84.30	9.890	5.81	2,742
나주	2,796	-197	78.60	12.53	8.87	2,133
영암	2,194	-196	78.68	9.64	11.68	1,723
함평	2,533	27	77.16	14.61	8.23	2,131
해남	4,015	472	70.10	22.34	7.56	3,246
평균	2,972	-13.60	77.77	13.80	8.43	1,998

4. 원소분석

가. 폐비닐 원소분석

폐비닐의 원소분석 결과는 표 2-16과 같다. 탄소는 평균 77.55%, 수소는 16.89%, 질소는 3.88% 포함하고 있으며, 황은 검출되지 않았다. 산소는 측정하지 않았지만 산소 외에 다른 물질이 없다고 가정하면 산소의 양은 1.68% 포함된 것으로 추정할 수 있었다.

표 2-16. 페비닐 원소분석 결과

단위 : %

		Carbon(C)	Hydrogen(H)	Nitrogen(N)	Sulfur(S)	비고
나주	W	73.801	17.986	2.644	0	
	B	83.066	15.783	4.772	0	
영암	W	72.598	18.079	2.719	0	
	B	81.239	16.140	5.169	0	
함평	W	69.742	18.238	2.752	0	
	B	78.475	16.524	3.332	0	
해남	W	79.881	16.558	3.961	0	
	B	81.614	15.811	5.696	0	
평균		77.55	16.89	3.88	0	

나. 하수슬러지 원소분석

페비닐의 원소분석 결과는 표 2-17과 같다. 탄소는 평균 27.25%, 수소는 4.22%, 질소는 9.79% 포함하고 있으며, 황은 검출되지 않았다. 산소는 측정하지 않았지만 산소 외에 다른 물질이 없다고 가정하면 산소의 양은 58.74% 포함된 것으로 추정할 수 있었다.

표 2-17. 하수슬러지 원소분석 결과

단위 : %

	Carbon(C)	Hydrogen(H)	Nitrogen(N)	Sulfur(S)	비고
나주	28.244	6.000	7.920	0	
영암	21.267	3.549	6.177	0	
함평	22.447	1.644	14.193	0	
해남	37.055	5.694	10.878	0	
평균	27.25	4.22	9.79	0	

제 4 절 고품연료 원료의 전처리 및 발열량

고형연료의 제작은 원료의 파쇄, 건조, 혼합 및 성형의 과정을 통하여 제작한다. 원료로서는 폐비닐과 하수슬러지를 이용한다. 하수처리장으로부터 배출된 하수슬러지는 수분함량이 85% 정도의 값을 가지고 있으므로 이를 다시 탈수하여 60% 정도로 만든다. 60%로 탈수된 하수슬러지를 10% 이하로 건조한 다음 파쇄된 폐비닐과 혼합하여 성형기에 넣어 고품연료를 제작한다.

폐비닐의 평균발열량은 8,291kcal/kg, 10%로 건조하였을 경우에 하수슬러지의 평균발열량은 1,998kcal/kg 이므로, 이 두 가지의 원료를 적절히 배합하면 5,000 ~ 6,000kcal/kg의 열량을 발생하는 고품연료를 제작할 수 있다.

이론적으로 폐비닐과 하수슬러지를 중량비로 배합하였을 때, 각 배합비에 따른 고품연료의 발열량을 계산하여 나타내면 표 16과 같다.

표 2-18. 폐비닐과 하수슬러지의 혼합비율에 따른 고품연료 발열량

폐비닐비율 (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
하수슬러지비율 (%)	90	80	70	60	50	40	30	20	10
발열량 (kcal/kg)	3,592	4,212	4,833	5,453	6,073	6,693	7,313	7,934	8,554

제 5 절 결과 및 고찰

농업용 멀칭폐비닐은 대부분 재활용되지 못하고 방치되고 있다. 또한 하수처리장에서 발생된 하수슬러지는 대부분 해양투기 되고 있다. 이러한 폐기물을 자원으로 재활용한다면 토양, 수질 및 대기의 환경오염을 감소시킬 뿐만아니라 에너지를 절약하는 일석이조의 효과를 달성할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 폐기물의 발생 및 처리현황을 분석하였다. 농업용 멀칭폐비닐과 하수슬러지를 이용하여 고형연료를 제조하려고 할 때 고형연료의 발열량, 중금속 함량 등의 관점에서 고형연료 제조에 대한 타당성을 검토하였다.

저위발열량이 8,291kcal/kg 인 폐비닐과 10%로 건조한 하수슬러지를 효과적으로 배합하면 5,000 ~ 6,000kcal/kg의 열량을 발생하는 고형연료를 제작할 수 있을 것으로 판단되었다.

제 3 장 고�형연료 제작을 위한 전처리 기술

제 1 절 기술개요 및 원리

1. 탈수기술 개요

하수처리장에서 배출되는 함수율 75~85% 상태의 하수슬러지를 전기침투방식으로 2차 탈수되어 함수율 60%이하로 저감시킨다. 전기침투탈수기는 회전드럼과 회전드럼에 슬러지의 통로가 되는 공간을 구비한 상태로 감싸지는 압착벨트와 회전드럼과 압착벨트에 각 상별로 정류된 맥류전원을 공급함으로써 슬러지에 함유된 수분을 탈수시킨다.

가. 국내·외 슬러지 탈수기술 원리 개요

탈수 기술	내 용
벨트프레스 탈수기술	일종의 가압탈수기로 여과와 압착을 연속해서 행하는 탈수방법인데, 상하 2매의 여포와 이것에 장력을 주는 로울러 및 압력을 가하는 로울러가 주요부분이며, 슬러지의 개량에는 유기 고분자 응집제를 사용하며, 현재 국내 하수종말처리장의 탈수시설에는 대부분 벨트프레스 방식이 장착되어 있음.
가압 탈수기술 (Filter press)	여포에 싼 슬러지에 압력을 가해서 탈수하는 방법이며, 높은 여과압력(보통 3~15 kg/cm ²)에서 압착이 이루어지기 때문에 함수율을 40~70% 정도까지 저하시킬 수 있는 특징이 있으나 간헐적 처리방식에 의해 단위시간당 처리량이 적다는 단점이 있음.
스크류 프레스	스크류로 응집슬러지를 압착하여 압출하여 나가는 동안에 탈수하는 것으로, 스크류샤프트를 스팀으로 가열하여 탈수성의 개선을 도모하기도 함. 개량에는 고분자응집제를 사용하며 분리액은 SS은 1000~3000 mg/L로 높은 경우가 많음.

진공 탈수기	회전드럼의 외주를 여포로 덮고, 드럼내측을 진공펌프에 의하여 부압(300-600mmHg)을 유지하면서 드럼을 회전시키는데, 이 때 드럼의 40-45%는 슬러지에 침적되어 있음. 이 부분에서 슬러지를 여포면에 흡착시키고 드럼이 회전함에 따라 여포면이 슬러지 수면에서 떨어진 위치에서 부터 흡착슬러지의 탈수가 행해지고, 여포가 돌아오기 전에 케익을 박리하게 됨. 진공탈수기에는 로타리드럼(Rotary Drum)형과 벨트(Belt)형 등이 있으며, 최근에는 유지관리가 용이한점 등 때문에 벨트형이 많이 쓰이고 있음.
원심탈수기 (데칸타)	고형물의 입자가 회전운동에 의해 1000~3000 G의 원심효과를 받아 중력작용에 의해 분리되는 원리이며, 분리된 슬러지케익의 함수율은 70~85% 정도이며, 1대당 처리능력은 여과기의 규모에 따라 다르나 지금까지 적용된 최대규모는 약 20 m ³ /시간 정도임.

나. 국내의 슬러지 탈수기술 현황 비교 분석

탈수방식	당사기술	기 존 기 술			
	전기침투 탈수	필터프레스	데칸타	벨트프레스	진공탈수
적용원리	전기분해	슬러지공급압력	원심력	전단력, 여포압착력	감압여과
탈수후 함수율	60%미만	80~70%	85~70%	85~70%	85~70%
운전 비용	전력비	고압 탈수부문 전력비가 추가됨	전력소비를 적음	고압 탈수부문 전력비가 추가됨	에너지소비가 많음

사용 압력	전력공급의 단순압착	15Kg/cm ²	1,500 ~3,000G	10~20 Kg/m ³ /hr	10~25 kg/m ³ /hr
부대 설비	스팀제거시 설	반응시설 약품시설 세척시설	세척시설 방음장치 제진설비	반응시설 약품시설	교반장치 세척장치 탈수케익배출 용컨베어
슬러지 공급방법	연속	간헐	연속	연속	연속
슬러지성 상변동에 대한 적용성	좋음	좋음	불량	좋음	보통
기 타	전력공급량 에 따라 처리효율이 달라짐	batch타입 운전으로 연속작업곤란	고형물회수 율이 적음. 고속회전상 의 문제	약품주입필수	취기 발생, 부대설비가 많음

2. 전기침투탈수 기술 원리

전기침투탈수기는 기계적 압착탈수와 하이드로졸의 전기적 성질을 이용하여 슬러지에 함유된 수분을 효과적으로 제거한다. 압착에 의한 탈수(Pressure Filtration)와 슬러지층에 전기장을 형성시켜 전기삼투성(Electro-osmosis)과 전기영동성(Electrophoresis)이 슬러지 입자에 작용하여 탈수가 진행된다.

압착에 의해 입자의 기공 혹은 모세관을 통해 수분을 강제적으로 탈수시키며 동시에 전기장이 형성되어 있으므로 액체 슬러지에 대전된 입자는 전기영동현상에 의해 슬러지 입자가 띠고 있는 전하와 반대 전극 측으로 이동하게 된다. 일단 압착에 의해 충분한 수분이 제거되어 케이크가 형성된 후, 수분 내에 용해되어 있는 이온이 전기적 삼투현상에 의해 반대 극으로 이동하면서 다시 수분이 제거되는 것이다. 일

반적으로 슬러지 입자는 (-) 표면전하를 띠므로 슬러지에 전기장을 형성시키면 슬러지 입자는 갖고 있는 전하와 반대전극인 (+)극으로 이동하게 된다. 반면 슬러지 입자층 내의 수분은 (-)극으로 끌려 당겨져 탈수가 촉진된다.

아래 그림 2-1은 전기침투탈수 메카니즘을 나타낸 그림이다.

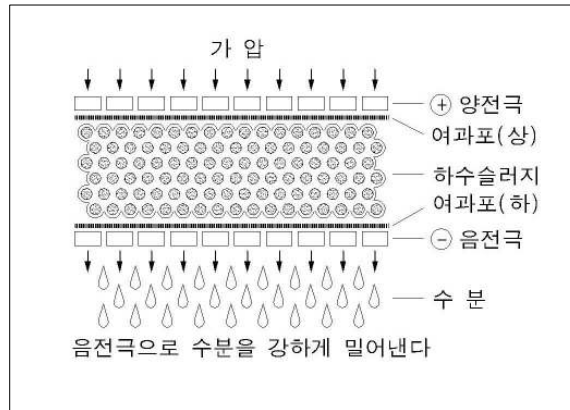


그림 3-1. 전기침투탈수 메카니즘

가. 전기영동성

전기영동성은 전기장 하에서 용액 중에 분산되어 있는 전기적으로 대전된 물질의 이동현상을 나타내는 것으로서, 물과 같은 액체 중에 고체입자들은 대개 (-)전하를 띠며 분산되어 있는데, (+)전극을 액 중에 설치하면 전기적 인력에 의해 입자들이 (+)극 주위에 집중되는 현상을 말한다. 슬러지의 탈수에 있어서도 슬러지 입자의 대부분은 (-)의 전하를 띠고 있으므로 (+)전극을 슬러지 내에 설치하면 고체입자들이 전극 주위에 집중하게 되고 그로 인해 탈수가 촉진되는 특성을 가지고 있다.

나. 전기 삼투압

전기 삼투는 고체, 액체의 혼합체의 상하에 전기를 공급함으로써 액체가 이동하는 현상이다. 전기 이중층은 액 중 입자 주위에 전하 밀도가 높은 Stern Layer와 전하 밀도가 낮은 Diffusion Layer로 형성된다. 액 중 입자에 전기적 이중층이 형성되지 않을 경우 Van der Waals의 힘에 의해 입자들은 응집되는 현상이 발생할 것이다.

그러나 입자주위에 전기력이 작용할 경우 전기 이중층이 형성되어 인접인자를 서로 밀어내려는 반발력이 존재하여 어떤 거리를 두고서 존재하게 된다. 따라서 슬러지의 상하에 양(+), 음(-)전극을 걸어주면 입자는 고정상태가 되고 입자 사이로 물의 이동을 야기 시키는 전기 삼투 유동현상이 발생한다.

다. 물리적 인자

슬러지의 물리적 인자로는 슬러지 자체성질인 입자크기 분포, 입나의 형상과 압축성, 슬러지의 고형물 농도 등이 있다. 교반 또는 전단으로 인한 평균 입자크기가 감소함에 따라 표면/부피비가 지수배로 증가한다. 증가된 표면은 큰 수화작용과 높은 약품요구량, 그리고 탈수에 있어 저항을 증가시킨다.

라. 화학적 인자

슬러지의 화학적 개량 시 탈수특성에 영향을 주는 인자로는 슬러지의 이온 강도, pH와 Alkalinity 그리고 슬러지 표면의 전위 등이며, 화학약품으로 개량을 할 경우에는 부유슬러지 입자 표면의 전하 밀도(charge Density)는 pH의 함수이므로 탈수의 화학적 인자가 될 수 있다. 큰 Alkalinity는 많은 양의 무기화학약품을 필요로 한다. 보통의 슬러지는 음(-)으로 하전된 표면을 가지고 있고 상호간의 반발력 때문에 분산상태를 유지한다. 따라서 약품에 의한 슬러지 입자가 표면 전위가 "0"에 도달하는 경우 즉, 입자의 전하 중화점일 경우에 최고의 탈수성을 유지한다.

제 2 절 전기침투탈수기의 개발 제작

1. 전기침투탈수기의 제작

기존의 직류전압(DC Voltage)을 사용하는 전기침투탈수장치의 경우 슬러지의 탈수가 진행되는 동안 액체 입자의 분리가 되면서 슬러지의 전기적 저항이 증가하게 된다. 이는 슬러지의 액체 부분이 탈수가 되어 이루어지면서 슬러지의 고체성분만이 남게 되는데, 이러한 고체성분에 의해 전기적 저항은 증가하는 것이 일반적이다. 또한 슬러지 액체성분의 전기 분해에 의해 (+)극에서 발생되어지는 수소이온(H⁺)에 의한 (+)극 주위의 수소이온농도가 증가하여 산성화를 야기시키게 된다. 이러한 슬러지의 산성화는 슬러지 입자의 제타전위가 감소하게 되는 등의 악영향을 미쳐 결국, 슬러지의 전기인가에 의한 탈수효과를 감소시키는 역할을 하게 된다.

그림 3-2에서 보는 것과 같이 양(+)^{전극}인 드럼과 음(-)^{전극}인 캐터필러 사이에 슬러지를 투입하고 전기를 인가하면 (-)성향을 띄고 있는 슬러지 입자는 (+)전극 쪽으로 이동하고 (+)성향을 띄고 있는 물은 (-)전극 쪽으로 이동해서 탈수가 되는 현상을 나타내고 있다. 그림 3-3은 전기침투탈수기 설계도 양(+)^{전극}은 SUS304 재질로 드럼을 제작하여 3상 교류를 인가하였고, 음(-)^{전극} 또한 SUS304로 캐터필러를 제작하여 전극의 안정성을 높일 수 있게 되었다.



그림 3-2. 전기침투탈수기

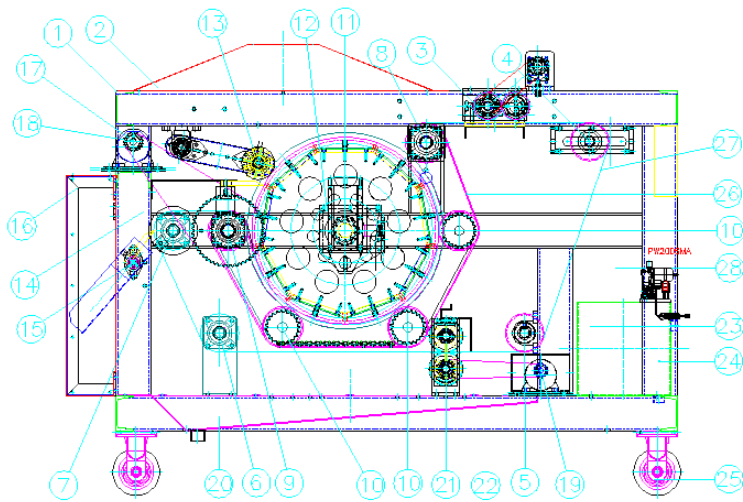


그림 3-3. 전기침투탈수기의 구성도

2. 하수슬러지 탈수

전기침투탈수기의 탈수성능을 확인하고 GR 슬러지 연료탄을 제조하기 위한 하수슬러지 원료를 확보하고자 하수슬러지는 벨트프레스탈수기에 의해서 탈수된 G하수처리장의 슬러지를 사용하였다. 표 3-1에서 보는 바와 같이 함수율 82.64%대의 하수슬러지를 전기침투탈수기(LOEDE-sim W1000)으로 탈수하여 함수율 평균 63.3%대의 탈수슬러지를 배출하였다. 이는 그림 3-4의 탈수슬러지 비교표에서 확인할 수 있다. 그림 3-6, 7, 8, 9, 10, 11은 탈수테스트 과정을 나타내었다.

표 3-1. 하수슬러지 탈수결과표

투입 전압 (V)	함수율(%)			처리량 (kg)	발생량 (kg)	소요전력량 (kw/ton)
	탈수 전	탈수 후				
		1	2			
50	82.64	64.04	62.9	1,000	453	150



그림 3-4. Belt Press와 전기침투탈수기의 탈수슬러지 비교

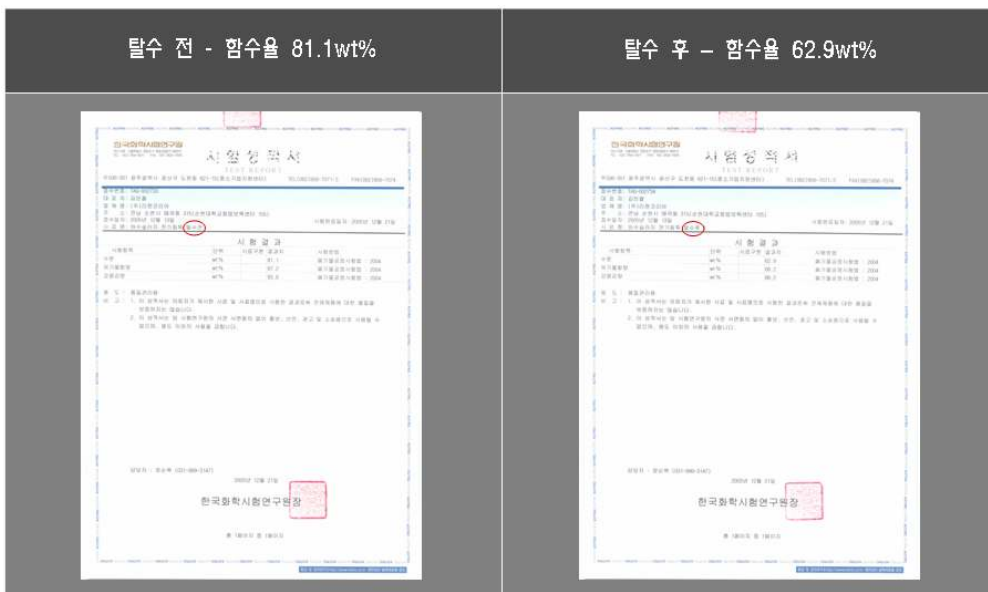


그림 3-5. 하수슬러지 탈수 전/후 시험성적서



그림 3-6. 하수슬러지 탈수



그림 3-6. 드럼세척 및 전기침투탈수



그림 3-7. 함수율 측정



그림 3-8. 제어반



그림 3-9. 탈수슬러지

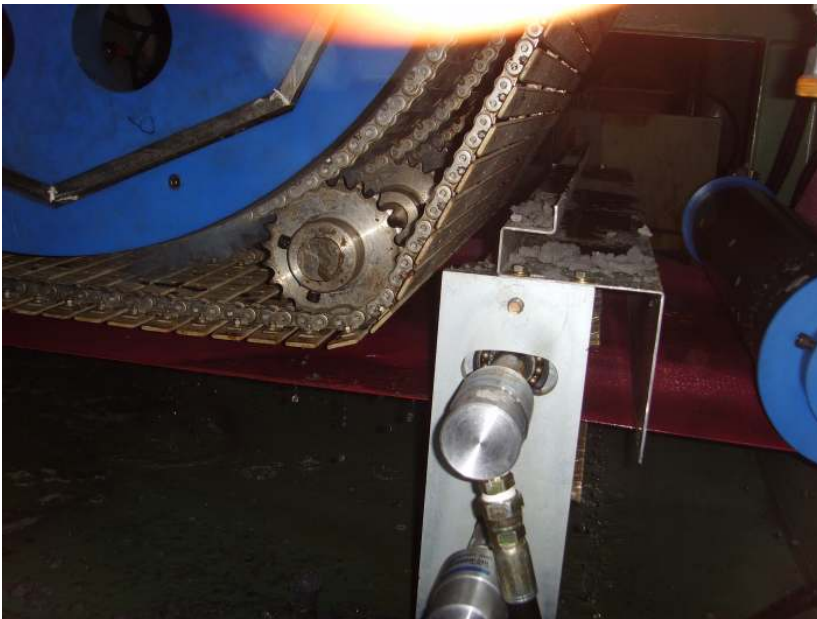


그림 3-10. 캐터필러 및 여과벨트 세척

제 4 장 고품연료 성형기 개발

제 1 절 성형기 설계

당사에서 개발한 회전형 성형기는 압출 스크류에 의하여 폐기물을 압출하지 않고 그림 4-2의 주축에 부착된 블레이드를 고속 회전하여 폐비닐과 하수슬러지와 마찰열을 극대화 시켜 유기적으로 원재료들 간에 혼합을 자연스럽게 유도하는 원리이며 블레이드와 원재료간의 마찰열을 보조하고자 열매체유를 160℃까지 승온하여 더블 챔버 내로 순환하여 GR 슬러지 연료탄을 제조한다. GR 슬러지 연료탄은 표 4-1에 서와 같이 연료별 경제성 비교 분석에서 보듯이 발열량 대비 구매단가가 저렴하여 상용화 시 농가의 난방비 절감에 큰 도움이 예상된다. GR 슬러지 연료탄의 원료가 되는 하수슬러지는 전기침투탈수기를 통해 확보 하였으며 그림 4-1의 폐비닐은 한국 환경자원공사 전북지소에서 플러프 형태로 약 1톤가량 확보하였다.

표 4-1. 연료별 경제성 비교 분석

연료종류 분야	경 유	무연탄	GR 연료탄
발 열 량	10,000kcal/kg	6,000kcal/kg	6,000kcal/kg
구입가격	1,500천원/ton	120천원/ton	100천원/ton



그림 4-1. 플러프 형태의 펄비닐

※ 신재생에너지 대체효과(TOE 환산)

1. 국내 유기성폐기물의 에너지 대체효과(2004년 전국 통계자료 기준)

가. 하수슬러지

- 1) 발생량 : 2,400,000ton/Y(함수율 80%) \Rightarrow 600,000ton/Y(함수율 20%)
- 2) 발열량 : 2,500Kcal/kg
- 3) TOE = 600,000ton/Y \times (2,500 \div 10,000)Kcal/kg = 150,000TOE/Y

나. 가연성폐기물

- 1) 발생량 : 19,000,000ton/Y(함수율 45%) \Rightarrow 13,570,000ton/Y(함수율 20%)
- 2) 발열량 : 4,500Kcal/kg
- 3) TOE = 13,570,000ton/Y \times (4,500 \div 10,000)Kcal/kg = 6,106,500TOE

\Rightarrow 하수슬러지 + 가연성폐기물

$$\begin{aligned} &= (150,000+6,106,500)\text{TOE/Y} \\ &= 6,256,500\text{TOE/Y}(\text{원유 약 } 5,000\text{만 배럴에 해당}) \\ &= 60\text{억 달러/Y}(\text{원유 } 1\text{배럴당 } 120\text{달러 기준}) \end{aligned}$$

제 2 절 시스템 제작 및 설치

그림 4-3은 당사에서 개발한 성형기를 나타내고 있으며 그림 4-4는 관련 도면을 나타내고 있다. 기존의 압출 스크류 방식을 통하여 생산되는 고휘연료의 생산량을 증대시키기 위해서는 구조적으로 많은 한계가 있지만 당사의 생산 방식은 연속투입 공정을 채택하고 블레이드가 회전할 수 있는 원형의 공간만 확보한다면 얼마든지 생산량을 증가할 수 있는 특징을 지니며 더블 챔버 내에 열매체유가 보조 열원을 공급하여 생산되어지므로 이때 생산된 고휘원료의 표면을 1/10로 압축·성형할 수 있으며 연소실에서는 용융된 겔표면이 터져 공기 공급량을 충분히 흡수하여 연소효과를 극대화 할 수 있도록 구성되었으며 특히 압착을 위한 별도의 기계장치가 필요치 않고 구조가 간단하여 유지보수가 쉽다. 그림 4-5는 GR 슬러지 연료탄을 나타낸다.



그림 4-2. 성형기 반응 챔버/블레이드



그림 4-3. 성형기 구성도

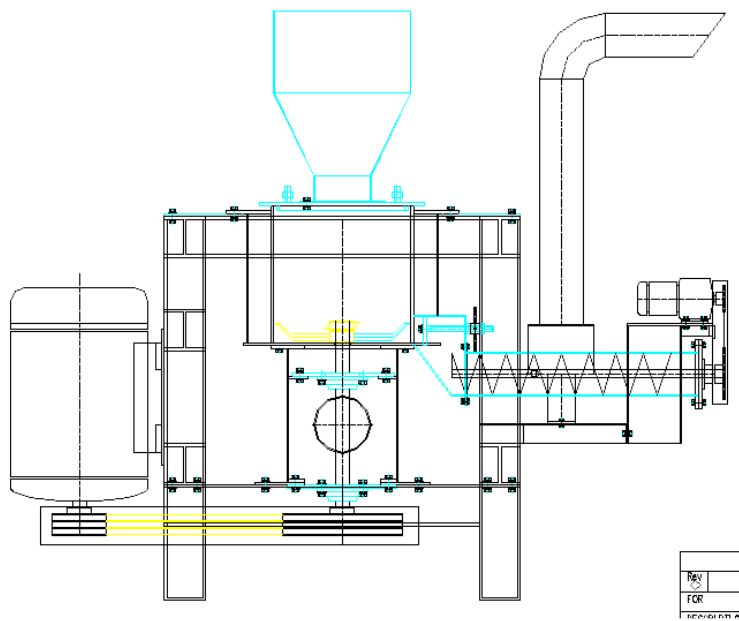


그림 4-4. 성형기 제작도면



그림 4-5. GR 슬러지 연료탄

제 5 장 온실용 순환보일러 개발

제 1 절 순환보일러의 설계

일반적인 증기 보일러는 연소실에서 발생된 공기가 곧바로 상승하면서 배출되도록 구성되어 연소가스의 열이 충분히 물과 열교환되지 않는 문제를 갖는다.

본 개발은 상기와 같은 점을 인식하여 안출된 것으로, 본 개발의 목적은 연소실에서 발생된 연소가스가 하방으로 진행하여 꺾여 상방으로 배출되도록 함으로써 열교환을 극대화시킬 수 있다.

또한, 그림 5-1에서와 같이 연소실 내부의 열교환관을 연소되는 연료를 둘러싸도록 배치하고 열교환관이 연소가스가 흐르는 방향으로 배열되어 열교환율을 극대화시킬 수 있고 고체연료를 투입하고 배출하기 용이한 구조로 되어 슬러지 등을 이용하여 생산된 고체연료를 사용하여 증기를 생산할 수 있으며 연소실 및 연소가스통로를 형성하는 벽체의 상부가 개폐되도록 하여 연소실 및 연소가스통로에 설치된 열교환관의 설치 및 보수가 용이한 증기 보일러이다.

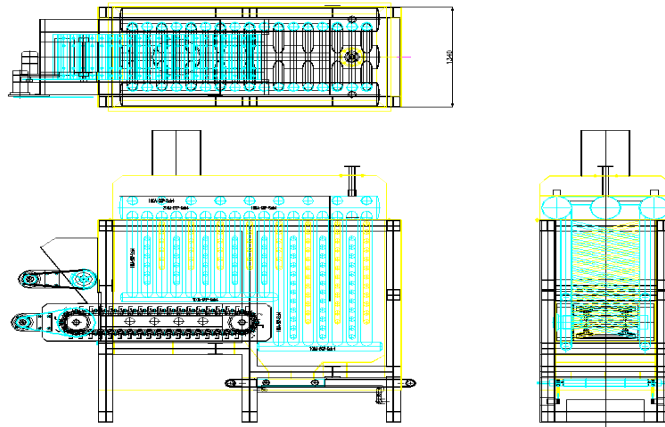


그림 5-1. 온실용 순환보일러 제작도면

제 2 절 시스템 제작 및 설치

1. 벽체로 둘러싸여 연료가 연소되면서 연소가스가 발생하는 연소실과, 연소실에서 발생되어 그 연소실의 내부를 흐르는 연소가스가 하방으로 흐르다가 그 진행방향이 전환되어 다시 상방으로 흘러 배출되도록 소정의 벽체로 형성된 연소가스통로와, 응축수 유입구를 통해 내부로 유입된 응축수가 연소가스에 의해 가열되어 증기 배출구를 통해 증기가 배출되도록 연소실 및 연소가스통로의 내부를 흐르는 연소가스와 접촉되게 설치되어 상호 연결된 복수의 열교환관을 포함한다.

2. 연소실 내부에 설치된 열교환관은 연소실의 하부에서 연소되는 연료를 둘러싸도록 \cap 형상으로 연결되어 복수개가 수평방향으로 나란하게 배열되어 서로 연결되었으며 연소가스통로 내부에 설치된 열교환관은 연소가스의 진행방향으로 나란하게 배열되어 서로 연결되었다.

3. 연소실에 투입되는 연료는 고체연료이고, 연소실 내부의 하부에는 투입된 고체연료가 쌓여 이송되기 위한 무한궤도 구조를 갖는 체인스토커가 설치되며, 연소실의 벽체에는 상기 체인스토커의 상부로 고체연료를 투입하기 위한 연료 투입구와, 체인스토커에 의해 이송되면서 연소된 고체연료의 애쉬를 배출하기 위한 애쉬 배출구가 구비되고, 연료 투입구와 상기 애쉬 배출구 각각에는 투입구 개폐수단과 배출구 개폐수단이 설치되었다.

4. 투입구를 통해 상기 체인스토커 상부로 투입된 고체연료를 연소실 내부로 밀어넣기 위한 푸싱수단이 더 구비되었다.

5. 연소실의 벽체 하부에는 연소실의 하부로 공기가 유입되기 위한 송풍구가 구비되고, 송풍구로 공기를 송풍하도록 송풍구에 연결된 송풍수단이 더 구비되며, 체인스토

커는 송풍구로 유입된 공기가 체인스토커 상부에 놓인 연료로 흐르기 위한 통로를 갖도록 형성되었다.

6. 연소실의 상부 및 연소가스통로의 상부가 개폐가 가능하도록 벽체 상부는 분리 가능하게 형성되고, 상기 열교환관은 연소실 및 연소가스통로의 상부가 개방된 상태에서 그 개방된 통로를 통하여 연소실의 내부로 투입 및 배출되는 것을 특징으로 한다.

7. 용량

가. 크기 : W90×L130×H190

나. 배출열량 : 200,000Kcal/hr 이상

다. 소각능력 : 20kg/hr

라. 중량 : 950kg

마. 정격전압 : 220V/60Hz

8. 온실용 순환보일러 전경





제 6 장 보일러의 성능분석

제 1 절 서 언

농업용으로 이용되는 고품연료는 석탄, 연탄, 폐타이어, RDF 등이 있다. 고품연료의 특징은 일반적으로 액체연료에 비하여 발열량이 낮으며 취급과 연소제어가 어렵다. 액체연료나 기체연료는 목표온도의 유지가 용이한 반면 고품연료는 연소가 시작되면 완전히 연소될 때 까지 지속되어야 하기 때문에 큰 용량의 축열조가 필요하다.

고형연료를 열원으로 하는 장치는 온수보일러 형식이 많으며, 온실 내의 온도상승은 라디에터를 통하여 이루어진다.

본 연구는 RDF를 온수보일러에서 연소하여 장미온실을 가온하였을 때 보일러의 열효율 분석, 보일러 연소가스 분석, 온실가온효과 분석을 실시하였다.

제 2 절 재료 및 방법

1. 고품연료의 성분, 발열량 및 이론공기량 분석

보일러 성능분석을 위하여 폐비닐과 하수슬러지를 혼합하여 고품연료를 성형 제작하였다. 고품연료 제조를 위하여 사용된 폐비닐, 하수슬러지, 탈수슬러지, 고품연료의 공업분석 결과와 성형된 고품연료의 고위발열량은 표 6-1과 같다. 재료의 수분함량은 재료를 105℃에서 24시간 건조 후 감량된 양을 측정하여 구하였으며, 회분과 가연분은 재료를 전기로에서 850℃에서 3시간 동안 휘발 시킨 후 휘발된 양을 측정하여 산정하였다. 고품연료의 고위발열량은 한국화학시험연구원에 의뢰하여 시험방법 KS E3707:2001에 의하여 측정 분석하였다.

표 6-1. 원료와 고행연료의 삼성분과 발열량

항목	수분함량(%)	회분(%)	가연분(%)	고위발열량(kcal/kg)
폐비닐	0.25	0.90	98.85	
하수슬러지	80.51	9.36	10.13	
탈수슬러지	66.20	18.29	15.51	
고형연료	0.43	10.73	88.84	10,683

저위발열량은 고위발열량, 수분함량 및 수소함량을 이용하여 다음의 식에 의하여 계산하였다. 저위발열량은 9,782 kcal/kg으로서 고행연료로서 매우 높은 열량을 나타냈으며, 수분함량도 0.43%, 회분이 10.73%, 가연분이 88.84%로서 매우 좋은 조건의 연료가 생산되었다.

$$\begin{aligned}
 Q_L &= Q_H \left(1 - \frac{W}{100} \right) - 600 \left(\frac{9H}{100} + \frac{W}{100} \right) \\
 &= 10,683 \left(1 - \frac{0.43}{100} \right) - 600 \left(\frac{9 \times 15.78}{100} + \frac{0.43}{100} \right) = 9,782 \text{ kcal/kg}
 \end{aligned}$$

고형 연료의 원료로 이용한 폐비닐과 하수슬러지 그리고 성형된 고행 연료에 대한 중금속 등 폐기물 성분분석은 (주)원일화학환경에 의뢰하여 분석하였으며 분석결과는 표 6-2와 같다. 원료와 고행연료의 중금속 함량은 허용기준값보다 적게 나타났다.

표 6-2. 고행연료 재료 및 고행연료의 중금속 및 폐기물 성분분석 결과

항목	납 (mg/L)	구리 (mg/L)	비소, (mg/L)	수은 (mg/L)	카드뮴 (mg/L)	6가크롬 (mg/L)	시안 (mg/L)	유기인 (mg/L)	기름성분 (%)
페비닐	-		0.007	-	-	-	-	-	-
탈수슬러지	-	0.163	0.009	-	-	-	-	-	0.01
고형연료	-	0.033	0.003	-	-	-	-	-	0.01
분석기기	ICP	ICP	ICP	ICP	ICP	UV-vis	UV-vis	GC	중량법

고형 연료의 원료로 이용한 페비닐과 하수슬러지 그리고 성형된 고행 연료에 대한 원소분석은 (주)원일화학환경에 의뢰하여 원소분석기를 이용하여 측정 분석하였으며, 원소 함유량은 표 6-3과 같다.

표 6-3. 원료와 고행연료의 성분

단위: %

항목	MC	Ash	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur	Oxygen
			(C)	(H ₂)	(N ₂)	(S)	(O ₂)
페비닐	0.25	0.90	87.83	15.06	0.00	0.00	16.79
탈수슬러지	66.20	18.29	8.52	1.63	1.47	0.22	57.47
고형 연료	0.43	10.73	33.99	15.78	3.81	0.41	16.82

연료가 연소하기 위하여 필요한 공기량을 공급하여야 완전연소가 가능하다. 연료 성분을 알면 연소의 반응식으로부터 이론적으로 필요한 공기량을 계산할 수 있으며, 이 공기량을 이론 공기량(theoretical quantity of air)이라고 한다. 소요 공기량을 계산하기 전에 소요 산소량을 계산하고 공기 중에 포함된 산소의 비율을 체적으로 약 21%, 중량으로 약 23.2%로 가정하여 이론 공기량을 산출할 수 있다.

고형 연료 1kg을 완전 연소시키는데 소요되는 최소 산소량, O_{min} 은 다음과 같이 구한다.

$$O_{\min} = \frac{C}{12} \times 22.4 + \frac{(H - O/8)}{2} \times 11.2 + \frac{S}{32} \times 22.4$$

$$= 1.867 C + 5.6 H - 0.7 O + 0.7 S \quad [Nm^3/kg]$$

고형 연료 1kg을 완전 연소시키는데 소요되는 최소 공기량, 즉 이론 공기량 Air_{th} 은 다음과 같이 구한다.

$$Air_{th} = \frac{1}{0.21} (1.867 C + 5.6 H - 0.7 O + 0.7 S) \quad [Nm^3/kg]$$

성형된 고형연료를 완전 연소시키는데 필요한 이론공기량은 고형연료에 포함된 탄소, 수소, 산소 및 황의 성분 함량을 대입하여 다음과 같이 구하였다.

$$Air_{th} = \frac{1}{0.21} (1.867 \times 0.3399 + 5.6 \times 0.1578 - 0.7 \times 0.1682 + 0.7 \times 0.0041)$$

$$= 6.68 \quad [Nm^3/kg]$$

2. 계측시스템의 구성과 보일러 작동 시험

RDF를 연소하여 온실난방을 수행하기 위하여 온수보일러를 제작하였다. 온수보일러의 열효율 분석, 보일러 연소가스 분석 및 온실가온효과 분석을 위하여 그림 6-1과 같이 300평 규모(10m × 100m)의 온실에 온수보일러를 설치하여 가온하였다. 온실의 종방향 위치별 온도분포를 알아보기 위하여 온실 내에 T-type 서모커플 온도센서를 지상 1.7m에 종방향 10-20m의 간격으로 6개소 설치하였으며, 수직 높이별 온도분포를 구하기 위하여 온실 중앙의 지면에서 0.7m, 1.2m 및 1.7m의 위치에 온도센서를 설치하여 온도분포 및 온도변화를 계측하였다.

보일러용량은 150,000kcal/hr으로 25kg/h 의 연료를 연소시킬 수 있으며, 연료의 공급은 캐터필러식 공급장치에 의하여 일정 속도로 공급할 수 있도록 제작하였다.

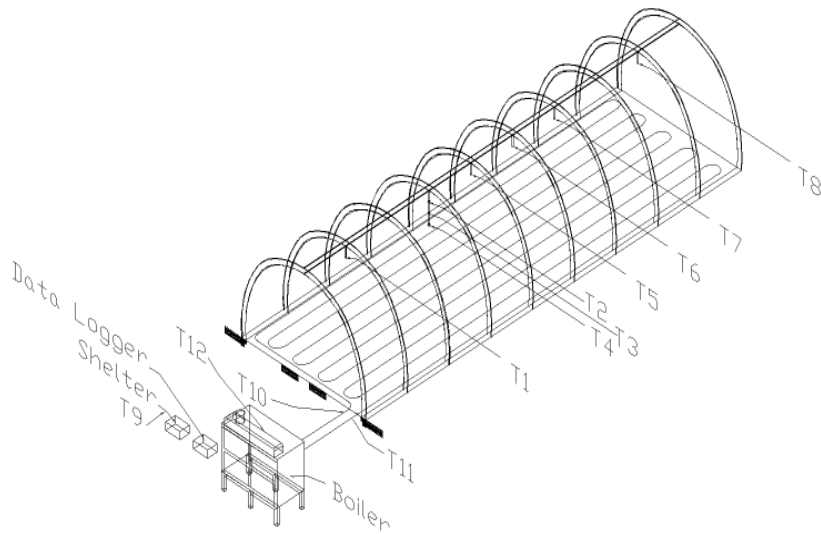


그림 6-1. 보일러 성능시험을 위한 온실 및 센서 배치도

연료의 공급은 캐터필러의 운동을 60초 동안 정지, 10초 동안 이동을 반복적으로 수행하여 연료를 공급하였으며, 주어진 시간동안 호퍼에서 감량된 연료를 보일러 작동시간으로 나누어 단위시간당 연료공급량을 계산하였다. 연소실에 공기를 공급하기 위하여 원심블로워(최대 송풍량 9.28 m³/min)를 이용하였다. 연료의 이론공기비를 계산하여 흡입구 단면적을 조절하여 송풍량을 조절하려 하였으나, 보일러 작동이 원활하지 못한 관계로 송풍기를 전개로 하여 공급하였으며, 보일러 작동상태에 따라 송풍기 작동을 단속하였다.

보일러 열효율 분석, 배기가스 분석 및 가온효과 분석을 위하여 보일러 관내의 급수 온도, 배기가스 성분, 온실 내외의 온도 등의 자료를 계측하기 위하여 Labview 데이터 수집시스템을 이용하였으며, 온실과 보일러수 온도는 10초 간격으로 측정 및 기록하였으며, 배기가스 성분은 5초 간격으로 측정 및 기록하였다. 자료수집시스템의 구성도는 그림 6-2와 같으며, Labview 프로그램은 그림 6-3과 같다.

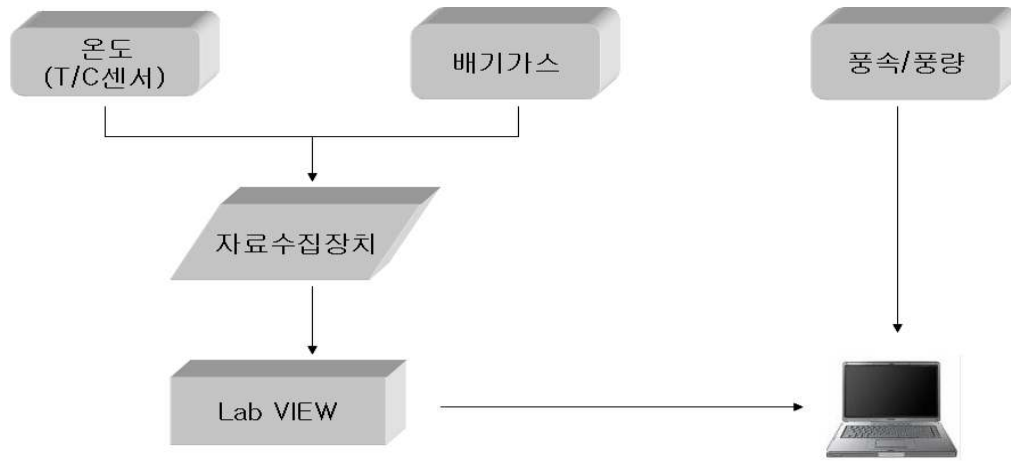


그림 6-2. 계측시스템 구성도

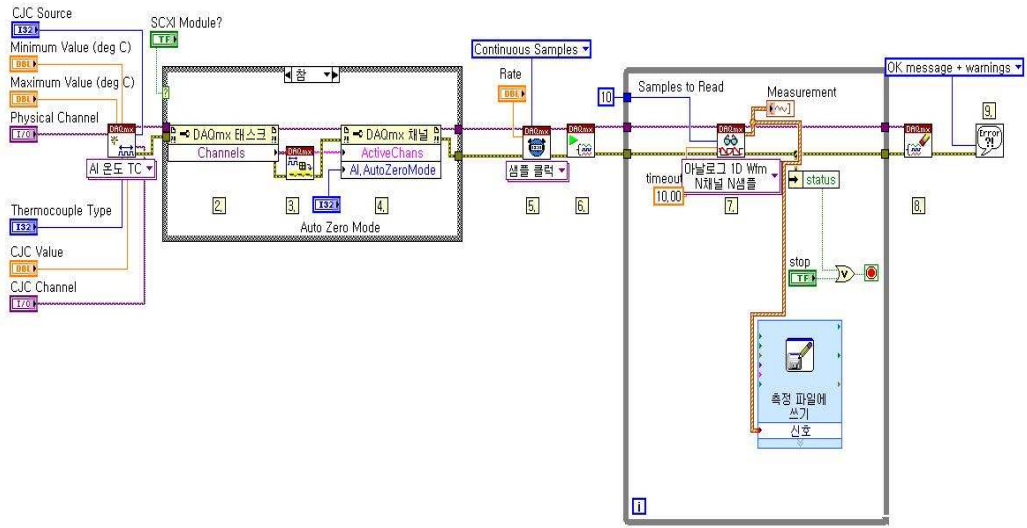


그림 6-3. Labview 프로그램

그림 6-4는 온실 내외의 온도, 배기가스 계측을 수행하는 Labview 자료수집장치이며, 그림 6-5는 컴퓨터 화면에 나타난 경시적 변화량을 보여주고 있다.



그림 6-4. Labview 자료수집장치

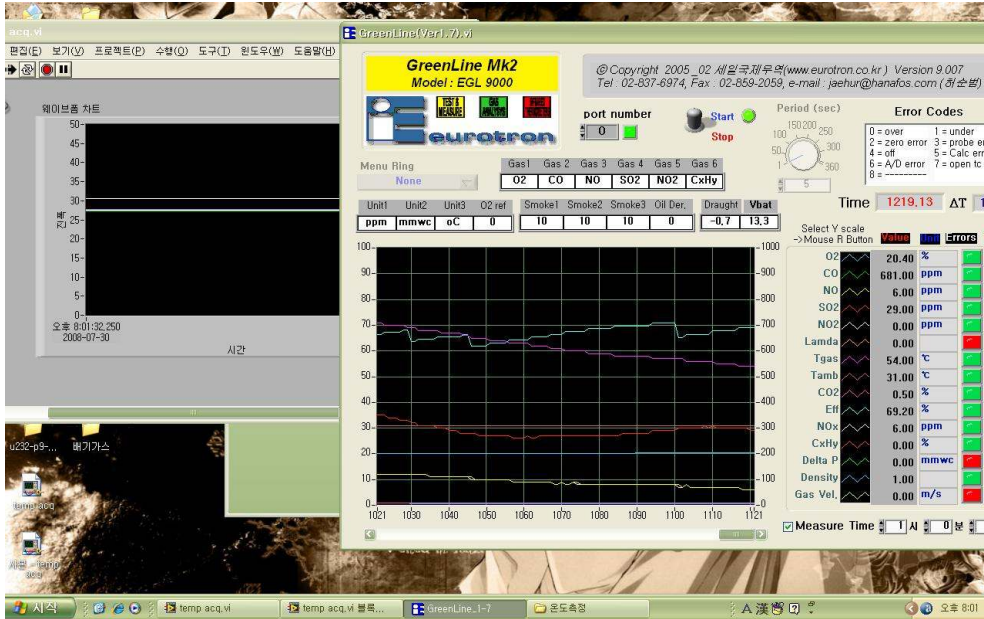


그림 6-5. 측정값의 경시적 변화

3. 보일러의 열효율 분석

보일러의 열효율은 입출열법에 의하여 산정하였다. 입출열법에 의한 보일러 효율 (η)은 일반적으로 다음 식에 따라 구한다.

$$\eta = \frac{\text{유효출열}}{\text{입열합계}} \times 100 = \frac{Q_s}{H_h + Q} \times 100$$

여기서 입열은 고위발열량과 공기/연료의 현열에 의한 입열 등의 합으로 구할 수 있으나 본 연구에서는 공기/연료의 현열은 무시하고 고위발열량만을 고려하여 구하였다.

유효출열(Q_s)은 발생증기의 보유열에서 급수의 현열을 감한 값이다. 과열기가 없는 보일러의 경우에는 다음과 같이 구한다.

$$Q_s = W(h_2 - h_1) = WC_p(t_2 - t_1)$$

여기서 W 는 증기발생량이며, 일반적으로 급수량으로 한다. h_2 는 발생포화증기의 엔탈피(kcal/kg)이며, h_1 은 급수의 엔탈피이다. 본 연구에서는 보일러의 입구와 출구에서의 물의 온도 차이를 구하여 유효 출열을 계산하였다. 보일러의 입구와 출구의 온도는 K-type 서머커플 온도센서를 사용하였으며, 유량은 수도용 급수량계로 측정하였다. 보일러 입구와 출구의 온도는 연속적으로 측정하였으며, 급수의 유량은 보일러가 작동하는 동안 유량의 누적 값을 읽어서 평균유량을 구하였다.

보일러 입구와 출구의 온도 및 연소실 온도 변화는 그림 6-6과 같다. 그림에서와 같이 보일러가 정상적으로 작동하지 않음으로 말미암아 연소실 상부온도가 50 °C 이상 올라가지 않았으며, 따라서 배출수의 온도는 40~50 °C의 범위에서 변화하였다.

보일러가 약 66분 동안 작동하는 동안 효율은 다음과 같이 구하였다. 보일러 작동 기간 동안 배출수와 유입수의 온도 차이, 급수량, 정압비열의 관계식으로 유효출열은 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} Q_s &= W(h_2 - h_1) = WC_p(t_2 - t_1) = 0.5 \text{ m}^3 \times 1,000 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ kcal/(kg} \cdot \text{C)} \times 7 \text{ C} \\ &= 3,500 \text{ kcal} \end{aligned}$$

보일러 작동기간 동안 연료의 소비량은 호퍼의 연료 감소량으로 계산하였으며, 66분 동안 10kg의 연료가 공급되었다. 따라서 보일러 효율은 다음과 같이 구하였다. 공기와 연료의 현열을 무시하였다.

$$\eta = \frac{\text{유효출열}}{\text{입열합계}} \times 100 = \frac{Q_s}{H_h + Q} \times 100 = \frac{3,500 \text{ kcal}}{9,782 \text{ kcal/kg} \times 10 \text{ kg}} \times 100 = 3.6\%$$

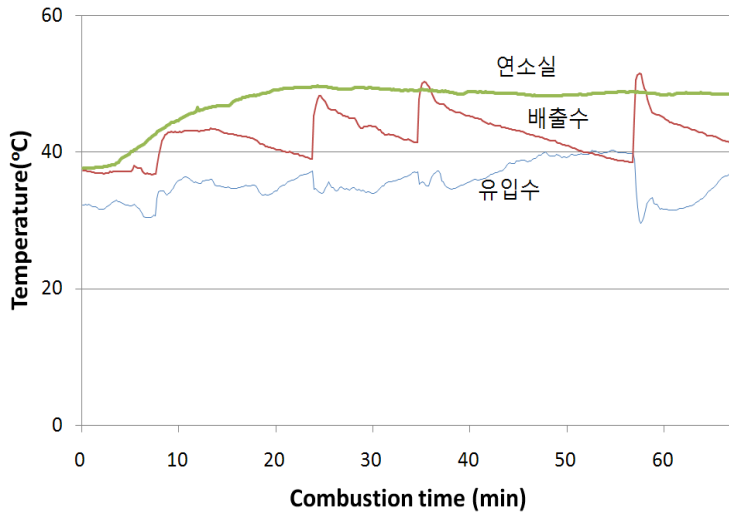


그림 6-6. 시간 경과별 보일러수 및 연소실 온도

4. 보일러 연소가스 분석

고형연료를 보일러 또는 소각로 등에서 연소시켰을 때 배출가스 성분의 허용한도는 대기환경보전법 대기오염물질의 배출허용기준 제 15조에 의하여 표 6-4와 같이 설정되어 있다. 고형연료의 사용량이 시간당 2톤 이상의 시설과 200kg~2톤의 시설에 대하여 허용기준을 설정하였으나 사용량이 시간당 200kg 미만의 시설에 대해서는 규제를 하고 있지 않다.

표 6-4. 대기오염물질의 배출허용기준

배출가스	사용량		비고
	200kg~2톤	2톤 이상	
CO	200(12)	50(12)	
SO ₂	50(12)	30(12)	
NO _x	100(12)	70(12)	
HCl	20(12)	20(12)	

자료: 대기환경보전법 대기오염물질의 배출허용기준 제 15조

보일러 연소가스 분석은 그림 6-7과 같은 휴대용 가스분석기(GreenLine MK2,

Eurotron, Italy)를 이용하여 연도 배기가스의 O₂, CO, CO₂, SO₂, NO_x 등을 측정 분석하였다. 배기가스를 측정하기 위하여 센서를 스크러버 상부로부터 연도의 1m의 높이에 설치하였다



그림 6-7. 휴대용 가스분석기

고형연료를 보일러의 호퍼에 투입하여 일정한 양을 저장하게 한 다음, 스토커를 10초 작동, 60초 정지의 과정을 반복하면서 호퍼의 연료를 연소실로 공급하였다. 연소기간 동안 투입된 연료의 무게를 측정하여 연료 공급량을 계산하였다. 번개탄으로 고형연료를 점화시킨 후 66분간 배기가스의 성분을 분석하였다. 배기가스의 CO, CO₂, SO₂ 및 NO_x의 시간 경과별 농도 변화량은 그림 6-9~그림 6-12와 같다. CO, SO₂ 및 NO_x의 값은 산소농도 12%를 기준으로 산출하여 나타내었다.

CO는 초기에 1,000 ppm을 상회하는 경우도 있었으나 시험 시작 17분 후부터는 거의 나타나지 않았다. 고형연료의 시간당 200kg 이상 사용하는 보일러에서 규정한 연소배출기준 200ppm 이하로 떨어진 것으로 나타났다.

CO₂는 초기에 2-4%의 범위에서 변화한 후에 18분 경과 후에는 2% 이하로 감소하였다.

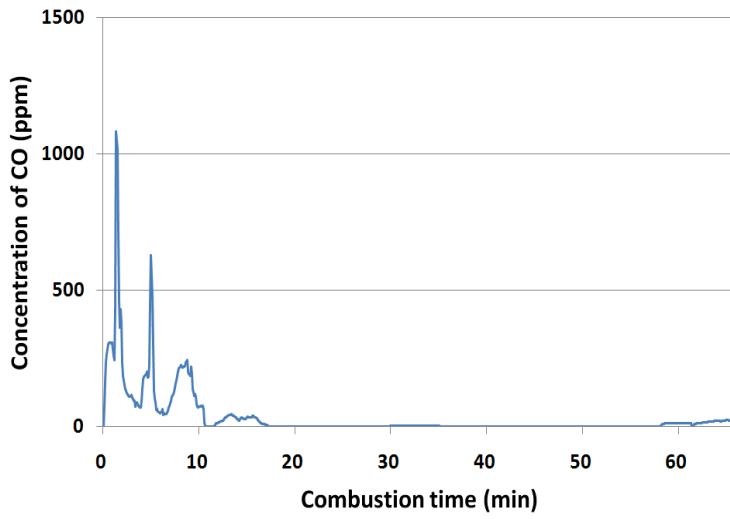


그림 6-9. 시간 경과별 CO 의 농도변화

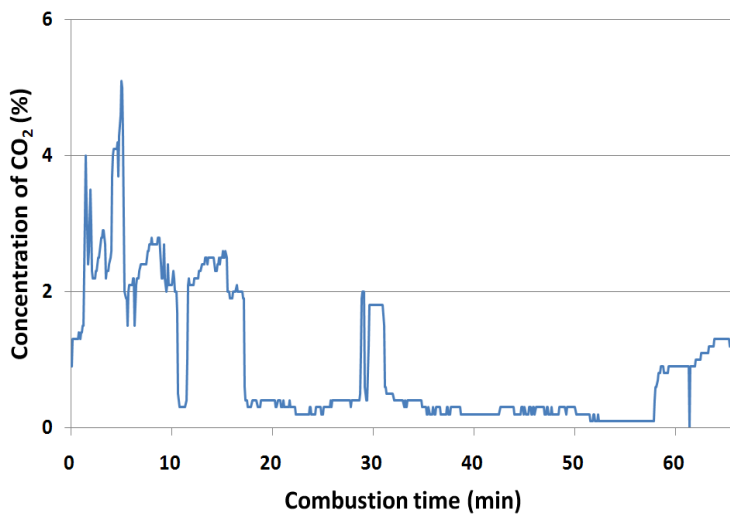


그림 6-10. 시간 경과별 CO₂ 의 농도변화

SO₂는 초기에는 전혀 검출되지 않았으며, 시험 시작 30분 후에 배출허용한계값 50 ppm 보다 훨씬 낮은 1ppm 이하의 범위에서 검출되었다.

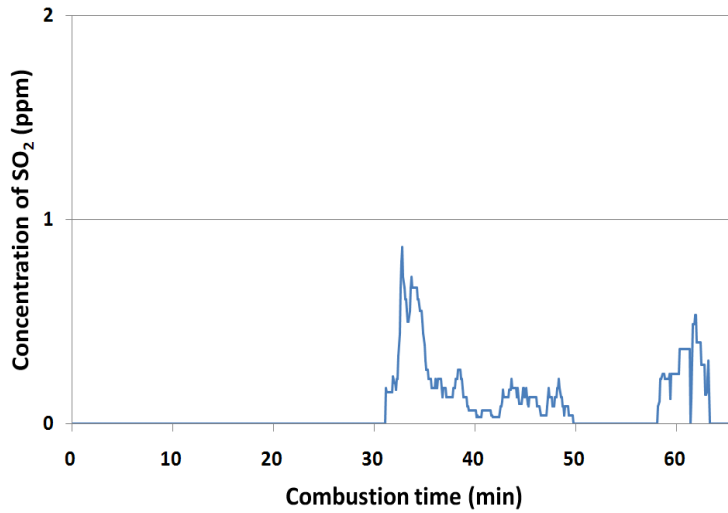


그림 6-11. 시간 경과별 SO₂ 의 농도변화

NO_x는 초기에는 배출허용한계 값 100ppm 보다 낮은 0~100ppm의 범위에서 변화하였으며, 시험 20분 후는 거의 배출되지 않았다.

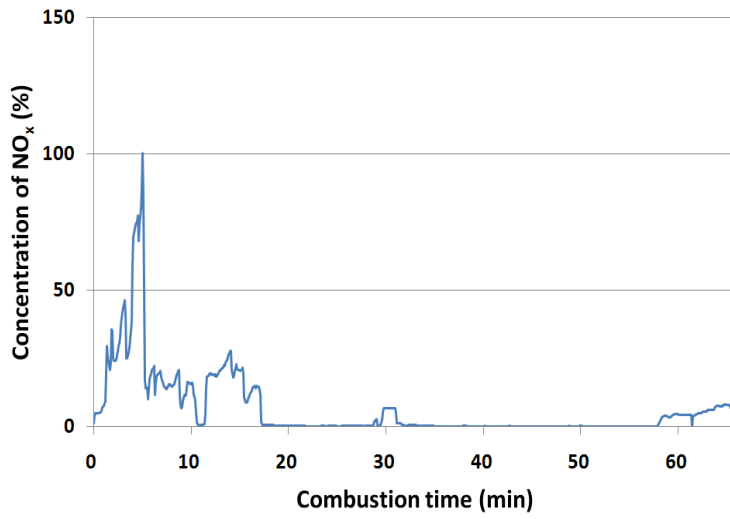


그림 6-12. 시간 경과별 NO_x 의 농도변화

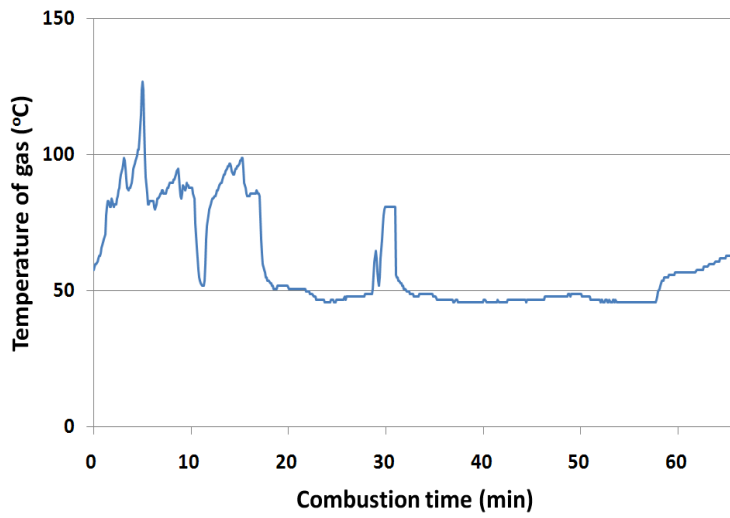


그림 6-13. 시간 경과별 배기가스 온도변화

5. 온실가온효과 분석

보일러를 이용하여 장미 온실의 가온은 외기온도가 높으므로 낮에는 오히려 냉방을 하여야 하므로 보일러를 작동시킬 수 없었으며, 야간에 가온하여 외기온도와 온실 내의 온도를 비교 분석하였다.

온실을 가온하기 위해서 보일러로부터 나온 배출수 관을 6개로 분할하여 배출수가 분산하여 흐르도록 하였다. 이 중에서 2개의 관은 방열기를 통하여 열을 온실에 공급하도록 하였으며, 나머지 4개의 관은 방열기를 설치하지 않고 관 자체의 방열을 통하여 열이 공급되도록 온실의 종방향으로 길게 부설하였다.

온실의 위치에 따라 6개의 온도센서를 지면으로부터 1.7m의 높이에 설치하였으며, 높이별 온도분포를 파악하기 위하여 3개의 센서를 지면으로부터 1.7, 1.2 및 0.7m의 높이에 설치하였다.

온실의 위치에 따른 온도의 분포와 시간대별 변화량은 그림 6-14와 같으며, 수직 위치별 온도의 분포는 그림 6-15와 같다. 온실의 수평방향 및 수직방향 위치별 온도 분포는 1℃ 이내로서 차이가 없었으나, 시간별 온도는 증가하지 않고 오히려 시험 기간 동안 약 4℃ 감소하였다. 온도가 감소한 이유는 방열기를 작동하였을 때 보일러 배출수 온도 상승에 의한 효과는 거의 없는 반면에 외기 온도가 낮아졌기 때문인 것으로 판단되었다.

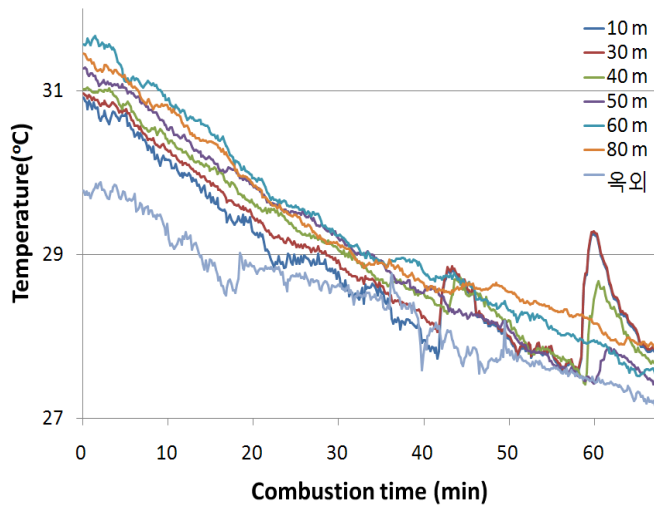


그림 6-14. 외부기온 및 온실내 위치에 따른 온도분포

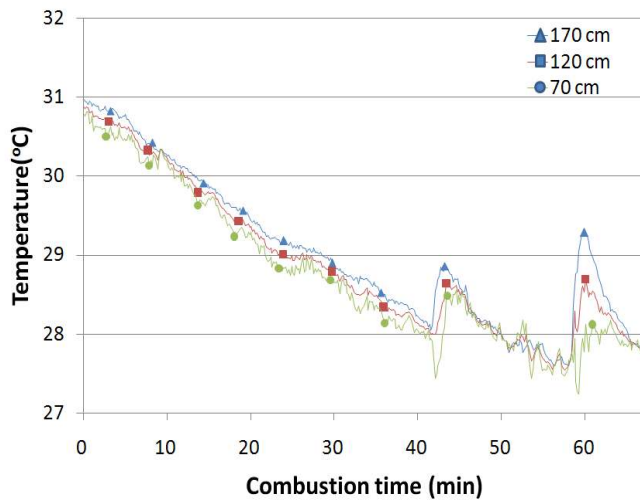


그림 6-15. 온실내 수직 위치에 따른 온도분포

6. 연소잔재물 분석

연소 후 바닥재를 채취하여 성분분석을 수행하였다. 분석결과는 표 6-5와 같다. 표 6-5에서와 같이 수분함량은 0.09%, 회분이 0.84, 가연성분이 99.07%로서 연료의 성분은 매우 좋은 상태이었으나 보일러의 작동이 원활하지 않아 가연성의 성분이 타지 않고 연소잔재물로 배출되었다.

표 6-5. 연소잔재물의 삼성분 분석

항목	함수율(%)	회분(%)	가연분(%)
시료 1	0.08	1.03	98.89
시료 2	0.19	0.66	99.16
시료 3	0.00	0.83	99.17
평균	0.09	0.84	99.07
표준편차	0.09	0.19	0.16

제 3 절 기술의 문제점 및 해결방안

분 류	문제점	현상	원 인	해결방안
전기점두 탈수기	소요전력비 과다		직류방식의 전기인가	맥류방식의 전기인가 방식 채택
성형기	불균일한 인료 생산		블레이드 구동속도 저하 블레이드 삭양 설계 오류	구동모터 교체 및 블레이드의 크기 및 규격 향상
보일러	보일러 인소효율 급박한 저하		GR 슬러지 인료단 영김현상으로 인한 송풍노즐 막힘 현상	케터필러의 구조개선으로 액체 상태의 인료가 노즐을 막히게 하는 문제점 보완

참 고 문 헌

1. 김석준, 최연석, 김우현. 2000. 폐기물고형연료(RDF)의 국내외 기술 동향. 한국기계연구원 환경기계기술연구부.
2. 김영재. 2000. RDF 기술의 현상과 과제. 폐기물고형연료(RDF) 제조 및 이용기술 워크샵. 한국기계연구원 열유체환경연구부. 37-62.
3. 김종진 외. 2001. 시설원예난방의 저가연료 대체기술 개발. 농림부.
4. 노남선 외. 2002. 폐기물 고형연료(RDF)의 고효율 연소보일러 개발에 관한 연구. 산업자원부.
5. 박죽량 외. 2005. 슬러지 건조기를 이용한 RDF 제조기술 및 연소기술의 실증연구. 산업자원부.
6. 산업자원부. 2006. 폐기물고형연료(RDF) 전용보일러 기술개발에 관한 연구.
7. 신병철. 2002. RDF 제조 및 연소기술. 폐기물의 에너지화 기술 세미나. 폐기물연구회. 35-55.
8. 신병철, 이조영, 최형욱. 2002. 폐기물 고형연료(RDF)의 활용방안 및 전망. 고분자과학과 기술. 13(3).
9. 안양규 외. 2004. 하수슬러지를 이용한 고형연료의 제조 및 이용기술 실증연구. 산업자원부.
10. 윤석표 외. 2003. 폐기물 실험방법. 신광문화사.
11. 이동규, 이종석, 곽 현, 배성렬. 2005. 폐기물 고형연료(RDF)의 연소 특성. 한국폐기물학회지. 22(1): 101-112.
12. 이동규, 신희용, 곽 현, 배성렬. 2005. 하수 슬러지와 폐기물 고형연료(RDF)의 혼합 연소 특성. 한국폐기물학회지. 22(6): 533-540.
13. 정재택 외. 1999. 시설원예난방시스템 및 저가원료 대체기술 개발. 농림부.

14. 최연석, 김석준, 최갑석, 권영배, 김부웅. 2001. 폐기물고형연료(RDF)를 활용한 화력발전사업 타당성 연구. 한국폐기물학회지. 18(4): 69-79.
15. 최연석, 권영배. 1998. 폐기물 고형연료(RDF)의 특성 및 전망. 한국폐기물학회지. 15(4): 287-299.
16. 한국환경자원공사. 영농폐기물통계 2006.
17. 현명택 외. 2000. 시설재배용 석탄 자동 난방시스템 개발. 농림부.
18. 환경부. 하수도 통계 2006.
19. 환경부. 환경백서 2006.
20. 환경부. 환경통계연감 2006.
21. 김형식, 2005. 유·무기성 슬러지 성상에 따른 건조로 플랜트의 최적 운전 에 관한 연구. 충주대학교.
22. 신희수, 2004. 하이드로졸 계에서 전기영동과 삼투압에 의한 액체-입자 분리 및 슬러지 탈수특성에 관한 연구. 부산대학교
23. 박죽량, 2005. 슬러지 건조기를 이용한 RDF 제조기술 및 연소기술의 실 증 연구. 산업자원부
24. 심성훈, 2004. 건식 농업용 폐비닐 열분해 재활용시스템 실용화 개발. 농림부
25. A.K. Gupta, E.M. Rohrbach, Refuse Derived Fuel. Technology, processing, quality and combustion experiences, International Joint Power Generation Conference, San Diego, CA, October 6-10, 1991, pp. 49-59.
26. Antonio C. Caputo, Pacifico M. Pelagagge. RDF production plants: I Design and costs. Applied Thermal Engineering 22(2002). 423-437.
27. Guilin Piao, Shigeru Aono, Motohiro Kondoh, Ryohei Yamazaki, Shigekatsu Mori. Combustion test of refuse derived fuel in a fluidized bed. Waste Management 20(2000). 443-447
28. Ministry of Environment of Korean Government, Statistics of Sewage, 2006.
29. Y.H. Chang, W.C. Chen. N.B. Chang, Comparative evaluation of RDF and MSW incineration, Journal of Hazardous Materials, Vol. 58, 1998, pp. 33-45

주 의

1. 이 보고서는 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산식품부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.