

최 종  
연구보고서

GOVP 12009258

시설원에 난방시스템 및 저가원료  
대체기술 개발

Development of heating system for  
hothouse with sludge

연구기관 : 전남대학교

농 립 부



## 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “시설원에 난방시스템 및 저가원료 대체기술 개발”에  
관한 연구과제의 최종보고서로 제출합니다.

1999. 11. 20.

주관연구기관명 : 전남대학교

총괄연구책임자 : 정 재 택

연 구 원 : 황 갑 운

연 구 원 : 임 용 무

참여기업책임자 : 고 두 수

## 요 약 문

### I. 제 목

시설원에 난방시스템 및 저가원료 대체기술 개발

### II. 연구개발의 목적 및 중요성

현재 시설원에용 온풍난방기는 국내의 중소규모 기업에서 기술개발을 통하여 제품을 생산하고 있는 정도이다. 따라서, 관련된 연구도 중소기업에서 선도하고 있으나 기존의 가정용 난방보일러 제조공정 수준으로 연구가 진행되고 있으며, 특히 폐기물을 난방에너지로 사용하는 측면에서의 연구는 다소 미흡한 실정이다. 현재 대부분의 시설재배 농가에서는 경유보일러의 연소에 의한 열에너지를 시설원에 난방에너지로 사용하는 온풍난방을 하고 있다. 최근 IMF 구제금융과 원유 유가상승에 따른 高油價시대를 맞아 경유보일러는 시설원에 농가의 난방비 부담을 크게 가중시키고 있어 시설원에 농가의 가장 큰 부담으로 작용하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 고유가시대에 생산 작물의 가격 경쟁력을 향상시키고 농가소득을 증대시키기 위하여, 슬러지를 처리가공하여 연료로 이용하는 시설원에 난방시스템을 개발하는데 있다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에서 수행한 연구의 내용 및 범위는 크게 다음의 4가지로 요약할 수 있다.

- 1) 생활하수에서 나온 슬러지를 건조시킨 건조 슬러지의 발열량 등의 특성을 분석하였다.
- 2) 슬러지를 탈수 성형 건조시켜 보일러의 연료로 사용될 수 있도록 슬러지탄을 제조하였다.
- 3) 슬러지탄을 보일러에서 연소시켜 가열된 온수를 이용하여 시설원에 온풍난방을 행하는 경제적인 시설원예용 난방시스템을 설계 제작하였다.
- 4) 연소 후에 얻어지는 슬러지탄재를 열처리하여 수처리용 미생물 담체나 발포성 인조경량골재로 재활용하는 방법에 대해서도 실험 연구하였다.

### Ⅳ. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

#### < 연구결과 >

- 1) 건조 슬러지에 함유된 유기물의 발열량 분석 결과 1844 kcal/kg 로서 가정용 연탄 발열량의 63.7%에 달하여 회수할 만한 열량을 함유하고 있었다.
- 2) 하수슬러지를 이용하여 보일러용 연료를 제조하기 위하여 일종의 토런기의 직경 30mm인 토출구를 빠져나온 원통형 슬러지 시료를 cutting하여 직경 30mm, 길이 30mm의 pellet을 제조하였다.
- 3) 슬러지탄을 보일러 연소실에서 연소시킨 결과 초기점화의 어려움이 나타났으나 보조열원을 사용하고 연료공급속도를 조절한 결과 정상적으로 연소됨을 알 수 있었다. 또한, 타고 남은 슬러지탄재는 잘게 부서지지 않고 딱딱한 고형재로 되어 재의 배출이 용이하지 않았는데, 이는 슬러지탄재의 활용에는 필요한 요소이나 보일러에서는 별도로 재의 이송기구를 필요로 하였다.

4) 보일러용 연소실에서 연소시킨 후 배출되는 슬러지탄재를 800℃에서 100℃ 사이에서 열처리한 결과 슬러지탄재의 부피비중은 1.07, 흡수율은 50.15%로 3종의 국내시판 미생물 담체의 평균치 정도를 보였다. 슬러지탄재로부터 제조한 경량골재를 사용한 콘크리트는 압축강도면에서 천연골재를 사용한 콘크리트용 골재와 비교하여 손색이 없는 결과를 보였다. 또한, 토런지에서 배출된 pellet을 회전원통 속에 넣고 수분간 회전 시켜 구형화한 슬러지탄은 소성 후에도 구형을 유지한 경량골재로 제조가 가능하였다.

< 연구결과의 실용화를 위한 건의 >

슬러지탄의 초기연소를 돕는 보조연료공급장치와 고품질의 이송방법 등에 대한 연구가 계속 필요할 것으로 사료된다. 또한, 본 연구결과의 경제성 평가를 위해서는 환경문제, 에너지절약, 자원의 재활용 등의 다각적인 관점에서 종합적으로 평가되어야 할 것이다. 본 연구결과의 활용을 위해서는 슬러지탄의 제조업체, 슬러지탄을 이용하는 난방기 제작업체, 슬러지탄재의 재활용업체가 공존하여야 한다. 정부의 주도하에 이러한 업체들이 공존하도록 장려한다면 환경, 에너지절약, 자원 재활용 등의 종합적인 관점에서 국익에 도움이 되리라 믿는다.

# S U M M A R Y

## I. TITLE

A study on the development of hothouse heating system and low cost fuel

## II. OBJECT AND SIGNIFICANCE

At present, the hothouse heating systems are produced by technical developments in small and medium enterprises. The related researches are also carried out by small and medium enterprises and the level of research is that of domestic heating system. The research about scrapped materials as fuel in heating system is rather few. Presently, the light oil is used for fuel of heating boiler in the most hothouse. However, the price of the light oil imported from foreign countries becomes expensive caused by the economic crisis relieved by IMF, this high price of light oil used in hothouse heating system burdens farmhouse with much expenditure.

In an effort to make the expenditure for plant productions in hothouse less, the heating system and the utility of sludge as low cost fuel are studied.

## III. SCOPE OF THE RESEARCH

The contents and scope of the research are summed as follows.

1. Analysing the properties of dried sludge from a sewage disposal plant such as calorific value.
2. Manufacturing combustible sludge fuel for heating system by dehydration and drying.
3. Design and manufacturing hothouse heating system which uses

hot water by burning sludge fuel.

4. The method of recycling burnt sludge ash after heat treatment to use microbial media for water treatment or artificial lightweight aggregate.

#### IV. RESULTS OF RESEARCH AND SUGGESTION

< The results of the research >

1. The calorific value of organization in dried sludge is 1844kcal/kg which is equivalent to 63.7% that of domestic briquet.
2. The pellets (cylindrical shape, diameter 30mm, length 30mm), which are used as fuel of heating system, are manufactured by extruding the dehydrated sludge.
3. There was difficulty in initial ignition of sludge fuel in combustion chamber, but assistant fuel makes it possible to burn steadily. The burnt ash was not smashed but became stiff, so that the ash could not be removed from combustion chamber easily. This stiffness of ash is necessary for recycling the ash but it requires a device which discharges the ash in boiler.
4. The properties of sludge ash after the heat treatment at 800°C ~ 1000°C are similar to the microbial media in the markets. The compression strength of concrete using lightweight aggregate from sludge ash is comparable to that using natural aggregate. By rotating the extruded pellets in a rotating cylinder and burning it, we can make spherical lightweight aggregates.

< The suggestion for application >

For the practical use of the results, continuous researches to assist initial ignition of sludge fuel and to remove the hardened sludge ash is necessary. Additionary, to estimate the economic viewpoint of the results, the synthetic estimation should be done at many sides, such as environmental, energy saving, resource recycling etc.



# C O N T E N T S

Chapter 1	Introduction	11
Section 1	Background of the research	11
1.	Present condition of hothouse heating	11
2.	Boiler for hothouse heating	12
3.	Boiler using sludge	13
Section 2	Object and necessity of the research	14
Section 3	Scope of the research	15
Chapter 2	Analysis of properties of sludge	16
Section 1	Introduction of sludge	16
Section 2	Properties of sewage sludge	20
1.	Drying property of dehydrated sludge	20
2.	Composition of dried sludge	20
Section 3	Properties of dehydrated sludge	21
1.	Moisture and solidity analysis	21
2.	Particle size, ignition loss, organic matter analysis	22
3.	Calorific value and sulfur in dried sludge	23
4.	X-ray diffraction (XRD) analysis	24
5.	TG-DTA analysis	24
6.	Minute tissue of dried sludge and exhaust gas	26
Chapter 3	Manufacturing of sludge fuel	29
Section 1	Drying of sludge	29
Section 2	Formation of pellet	31
Section 3	Drying of pellet	32

Chapter 4	Design of hothouse heating system-----	34
Section 1	Structure of hothouse heating system-----	34
1.	Structure of hothouse heating system-----	34
2.	Operation of hothouse heating system-----	36
3.	Elements of hothouse heating system-----	36
Section 2	Design of boiler-----	41
1.	Calculation of boiler strength-----	41
2.	Calculation of heat transfer-----	47
Chapter 5	Combustion of sludge fuel-----	49
Chapter 6	Utility of sludge ash-----	52
Section 1	Manufacturing of microbial media-----	53
1.	Microbial media for water treatment-----	53
2.	Physical properties of sludge ash for microbial media---	54
Section 2	Manufacturing of foamed lightweight aggregate----	58
1.	Procedure for foamed lightweight aggregate-----	58
2.	Foaming property of sludge ash for lightweight aggregate	
	-----	60
3.	Use of artificial lightweight aggregate-----	68
Chapter 7	Conclusion-----	70
References	-----	73

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	11
제1절 연구 배경 .....	11
1. 시설원에 난방의 현황과 종류 .....	11
2. 시설원에 난방용 보일러 .....	12
3. 슬러지 활용 보일러 .....	13
제2절 연구개발의 목적과 필요성 .....	14
제3절 연구개발의 범위 .....	15
제 2 장 슬러지의 특성분석 .....	16
제1절 슬러지의 개요 .....	16
제2절 하수슬러지의 특성 .....	20
1. 탈수슬러지의 건조특성 .....	20
2. 건조슬러지의 구성 .....	20
제3절 탈수슬러지의 특성 .....	21
1. 수분 및 고형물 분석 .....	21
2. 입도, 강열 감량 및 유기물 함량 분석 .....	22
3. 건조 슬러지의 발열량 분석 및 유황분 분석 .....	23
4. X선 회절(XRD) 분석 .....	24
5. TG-DTA 분석 .....	24
6. 건조 슬러지의 미세조직 관찰 및 배가스 측정 .....	26

제 3 장	슬러지탄의 제조	29
제1절	슬러지의 건조	29
제2절	연료형태의 성형	31
제3절	pellet 건조	32
제 4 장	시설원에 난방시스템의 설계제작	34
제1절	시설원에 난방시스템의 구조	34
1.	시설원에 난방시스템의 구조	34
2.	시설원에 난방시스템의 작동원리	36
3.	난방시스템의 주요 제원 및 구성요소	36
제2절	보일러의 구조설계	41
1.	보일러의 강도 계산	41
2.	전열 면적의 계산	47
제 5 장	슬러지탄의 연소	49
제 6 장	슬러지탄재의 활용	52
제1절	미생물 담체의 제조	53
1.	하·폐수처리용 미생물 담체	53
2.	슬러지탄재의 미생물 담체로서의 물리적 특성	54
제2절	발포성 경량골재의 제조	58
1.	발포성 경량골재의 제조과정	58
2.	경량골재용 슬러지탄재의 발포성	60
3.	인조경량골재의 활용	68
제 7 장	결    론	70
참고문헌		73

## 제 1 장 서 론

### 제1절 연구 배경

#### 1. 시설원에 난방의 현황과 종류

우리 나라의 시설원에는 그 동안 짧은 기간 동안에 장족의 발전을 거듭하여 시설재배 면적이 날로 증가하고 있다. 그 배경은 무엇보다 국민소득의 증가에 따른 수요의 증가와 쌀농사 중심의 농촌에서 농한기 유휴노동력을 이용하기 위하여 비닐하우스의 설치로 제철이 아닌 시기에 원예작물을 생산하는 재배농가가 늘어나고 있기 때문이다.

시설원예에서는 외기 온도가 목표 온도보다 낮은 겨울철에 작물의 생육 적온을 유지해 주기 위하여 1차적으로 커튼장치 등에 의해 보온을 해 주고 부족되는 열을 난방기로 공급해 주어야 한다. 현재 사용되고 있는 시설 원예 난방방식의 종류에는 직열식 난방, 전열난방, 온풍난방, 온수난방, 증기난방, 복사난방 등이 있으며 우리나라 난방방식은 온풍난방이 대부분이다.))

가. 직열식 난방 : 난로를 시설 내에 설치하여 석탄이나, 석유, 장작 등의 연료를 연소시켜 난방하는 방식이다. 그러나 난로에 의한 난방은 구조가 간단하고 설치비가 저렴한 반면 난로 주변의 온도가 높아 인접해 있는 작물이 고온과 건조에 의한 발육장애를 받기 쉬우며, 온도조절이 불가능하다는 단점이 있다.

나. 전열난방 : 발열부분의 전기공급을 조절할 수 있어 온도조절이 용이하나 정전이 될 경우 열손실이 빨리 일어나 보온성이 없어 작물에 냉해를 유발할 수 있으며, 대용량인 경우 시설비가 비싸게 되어 소규모 농가에서 이용이 곤란하다.

다. 온풍난방 : 난방기의 연소실 표면에서 공기를 직접 가열하여 현열상태로 가열된 공기를 시설내로 송풍하여 시설내부를 난방하는 방식으

로 온도 상승이 빠르고 난방기의 열효율이 높은 장점은 있으나, 목표온도를 기준으로 볼 때 기온의 공간적 시간적 변화 폭이 크고 공급되는 열이 건조한 현열의 비중이 높아 작물 생리에 적합하지 못한 점이 있다.

라. 온수난방 : 연소부와 방열부가 분리되어 있으며 보일러에서 연소된 열을 비열이 높은 물에 흡수시키고 시설 내에 설치된 방열관을 통해 열을 간접으로 시설 내부에 공급한다. 따라서, 난방 효율이 상대적으로 떨어지고 방열관의 설치에 많은 비용이 소요된다.

마. 증기난방 : 온수난방과 같은 체계로 구성되어 있으나 단지 열전달 매체가 온수가 아닌 증저압 내지 고압의 증기로 방열관을 통하여 열을 실내로 방출하므로 대규모 온실단지나 경사진 끈에 온실단지를 조성할 때 채택되고 있다. 증기가 물보다 비열이 작기 때문에 시간에 따른 실내온도 변화 폭이 크고 고장시에 안전도가 떨어진다.

마. 복사난방 : 고온의 열원을 복사파장에 의해 직접 작물의 체온을 높이는 점이 대류에 의한 온풍, 온수, 증기난방과는 다르다. 대류에 의한 난방방식은 기온이 작물 체온보다 1~1.5℃ 높지만 복사난방은 반대로 작물 체온이 1.5~2℃ 정도 높은 만큼 열이용 효율이 높아진다. 미래의 난방방식이긴 하나 아직까지 농가에 실용적으로 보급되지 않고 있다.

## 2. 시설원에 난방용 보일러

모든 난방 시스템에서 가장 중요한 장치는 열을 공급해 주는 보일러인데, 현재 우리나라에서 사용되고 있는 온풍난방 시스템에 사용되는 보일러는 용량이 20,000~350,000 kcal/hr 범위로서 시설원에, 잡사, 축사, 온실 등 약 5000 ha에 달하는 농업용 시설재배면적에 실내 기온 또는 지온이 작물의 생육 가능한 적

정 온도가 되도록 열을 공급한다. 이러한 시설원예용 보일러는 국내의 중소규모 기업에서 기술개발을 통하여 제품을 생산하고 있는 정도이며, 관련된 연구도 기존의 가정용 난방보일러 제조공정 수준으로 연구가 진행되고 있다. 현재 우리나라 대부분의 시설재배 농가에서 사용되는 보일러의 연료로는 경유에 의존하고 있다. 그러나, 최근 IMF 구제금융에 따른 환율상승과 원유의 유가상승에 따른 高油價 시대를 맞이하여 경유보일러는 시설원예 농가의 난방비 부담(600평 기준, 월동시까지 난방비 약 1500만원 정도)을 가중시키고 있어 시설원예 농가의 가장 큰 부담으로 작용하고 있다.

### 3. 슬러지 활용 보일러

따라서, 값비싼 경유 대신 저가연료를 시설원예 난방에 활용하려는 연구가 시도되고 있는데 페타이어나 석탄을 연료로 사용하는 난방장치는 주목받은 바 있으나 하수처리장에서 발생하는 슬러지를 연료로 사용하는 난방장치에 대한 연구는 다소 미흡한 실정이다.

슬러지란 하수처리시 하수를 따라 부유되어 처리장에 유입되는 유기·무기질 미립자를 침전 후 탈수시킨 반고형액상의 물질을 말한다. 현재 하수처리 공정상 발생하는 슬러지의 양은 하수 1m<sup>3</sup>당 약 0.2~0.25 kg의 범위로서 추산되는 일일 발생량은 현재 약 100만톤에 달하며 이 슬러지 발생량은 앞으로 하수처리장 건설의 확산과 함께 계속 증가할 전망이다. 하수처리시 발생하는 슬러지는 처분형태에 따라 다르게 되나, 현재 우리나라 대부분의 하수처리장에서는 탈수오니에 해당하는 생슬러지 형태로 매립처분하고 있는데 슬러지에 함유되어 있는 유기물의 부패와 악취, 그리고 2차 오염의 가능성이 매우 큰 문제가 되고 있다. 현재 이 슬러지는 대부분 매립이나 해양투기 또는 소각처리 하고 있으나 국제협약에 의하여 2001년부터는 매립 및 해양투기가 금지되므로 탈수 슬러지의 처리방법에 대한 논의가 심각하게 진행되고 있다.

## 제2절 연구개발의 목적과 필요성

시설원에의 난방설비는 실외의 기상조건에 관계없이 난방설비에서 방열되는 열이 항상 설정된 실온과 지온을 자동으로 유지하고 시설내 온도분포를 균일하게 하여야 하며 또한 설치비와 운전경비가 경제적이어야 한다.

따라서, 시설원에 난방에서는 열용량이 많은 물을 이용해 열을 시설 내부로 수송한 후 열이용 효율이 높고 온도를 자동으로 조절할 수 있도록 송풍기를 통해 균일하게 방열하여 실내를 난방하는 방식이 적합하다. 여기에 온수저장탱크를 설치하면 시설내부의 온도를 안정적으로 유지할 수 있다. 이 때 연료로는 경제성을 고려하여 분탄 또는 유기·무기질 복합 폐기물인 생활하수처리장 슬러지를 탈수 및 건조하여 이용하고자 한다.

각 도시의 생활하수처리장에서 나오는 슬러지는 탈수처리 후 다른 쓰레기와 함께 매립하고 있는 실정인데, 매립장 조성이 자유롭지 않으며, 이송 후 매립 처리하고 있어 그 처리 비용이 많이 들므로 적절한 활용이 요망되고 있다. 따라서 폐기 장소의 어려움과 폐기 처리비가 많이 드는 등의 문제점을 안고 있는 가연성 슬러지 폐기물을 시설원에 난방에너지 공급시스템의 연료로 사용하면, 하수처리시 소요되는 별도의 처리비용을 절약하면서 보다 경제적인 연료로 활용함으로써 에너지 활용의 이점이 있다. 또한, 타고 남은 재는 수처리용 미생물 담체나 발포성 경량골재로 활용이 가능하므로 환경오염 물질을 오히려 재활용하는 좋은 본보기가 될 것이다.

분석 결과 이러한 슬러지에는 많은 유기물이 함유되어 있으며 함유된 유기물의 발열량이 연탄 발열량의 63.7%에 달하고 슬러지의 인화점이 낮으므로 착화와 화염의 유지가 쉽다. 따라서, 슬러지의 함유열량을 적절한 방법으로 회수하면 시설원에 난방시스템의 연료로 사용이 가능하다. 즉, 슬러지를 탈수 성형 건조하여 시설원에 난방시스템의 연료로 사용될 수 있는 슬러지탄을 제조하게 되면, 하수슬러지 처리 비용과 환경문제, 에너지절약, 자원의 재활용 등 종합적인 관점에서 매우 경제적이라 할 수 있다. 또한, 슬러지탄의 연소 후에



생성되는 슬러지탄재는 수처리용 담체나 필터, 시멘트-콘크리트 인조경량골재 재료 및 蘭石, 화분석 등 여러가지 요업분야의 산업에 원료로 재활용이 가능한 장점이 있다. 따라서, 온풍난방방식의 효율적인 시설원에 난방시스템을 구축하고 그 난방연료로 사용될 수 있는 슬러지탄을 개발하면 IMF 高油價 시대에 시설원에 농가의 난방비 부담을 크게 격감시켜 경제적인 영농에 기여하게 될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 고유가 시대에 생산 작물의 가격 경쟁력을 향상시키고, 농가소득을 증대시키기 위해 절대적으로 필요한 시설원에 농가의 시설원에 난방비 부담을 경감시킬 수 있는 난방에너지 공급시스템과 그 공급연료로 사용이 가능한 슬러지탄을 개발하는데 있다.

### 제3절 연구개발의 범위

앞에서 기술한 바와 같이 시설원에 난방시스템의 연료로 슬러지탄을 제조하고 이를 연료로 하는 온풍난방 시스템을 제작하기 위하여 다음의 연구를 진행하였다.

- 1) 생활하수에서 나온 슬러지를 건조시킨 건조 슬러지의 발열량 등의 특성을 분석하였다.
- 2) 슬러지를 탈수 성형 건조시켜 보일러의 연료로 사용될 수 있도록 슬러지탄을 제조하였다.
- 3) 슬러지탄을 보일러에서 연소시켜 가열된 온수를 이용하여 시설원에 온풍난방을 행하는 경제적인 시설원에용 난방시스템을 설계 제작하였다.
- 4) 연소 후에 얻어지는 슬러지탄재를 열처리하여 수처리용 미생물 담체나 발포성 인조경량골재로 재활용하는 방법에 대해서 실험 연구하였다.

## 제 2 장 슬러지의 특성분석

### 제1절 슬러지의 개요

슬러지(Sludge)란 수처리(상수, 하수, 폐수처리 포함) 결과로 처리수와 분리되는 농축오염물질로서 중력에 의한 침전고형물 뿐만 아니라 부력작용으로 침전지 표면에 뜬 스킴(Scum), 스크린(Screen)에 걸린 큰 물질인 스크리닝(Screening)도 포함하는 포괄적 의미를 지니고 있다. 폐수처리공정에서 발생하는 슬러지는 반고형액체(Semisolid liquid)이다.

슬러지는 하수처리 시 하수를 따라 부유되어 처리장에 유입되는 오히려 하는 유기, 무기질 미립자를 침전 후 탈수시킨 케이크 형태이며 오히려는 처분 형태에 따라 생(生)오니, 소화(消化)오니, 탈수 오히려, 소각 오히려, 용융 오히려 등이 있다. 현재 우리 나라의 대부분의 하수처리장에서는 탈수 오히려에 해당하는 생슬러지 형태로 매립 처분하고 있는 실정이어서 슬러지에 함유되어 있는 유기물에 의한 부패와 악취, 그리고 중금속등의 2차 오염 가능성이 있다. 따라서 날로 증가해 가는 슬러지의 적절한 처리가 요망된다.

이러한 슬러지는 하수처리 공정상의 발생위치에 따라 1차 침전지에서 발생하는 1차 슬러지와 활성슬러지 공정 이후의 2차 침전조에서 발생하는 폐활성슬러지가 있으며, 이외에 이들을 농축한 후 소화 처리한 소화슬러지가 있으며 국내의 경우 혐기성 소화공정을 택하고 있어서 혐기성 소화슬러지가 발생된다. 이들 3가지 슬러지를 통칭하여 하수슬러지(sewage sludge)라 하며 그 발생량은 하수처리장 건설의 확산과 함께 증가하는 추세를 보인다. 유입되는 하수 1 m<sup>3</sup>당 발생 슬러지의 비율은 평균 0.20~0.25kg의 범위이며 추산되는 전국의 소화 탈수슬러지의 일일 발생량은 현재 약 100만톤에 달하며 이들 대부분이 매립되거나 해양투기 되고 있다(<표 1> 참조). 그러나 국제협약에 의하여 2001

년부터는 매립 및 해양투기가 금지되므로 탈수슬러지의 처리방법에 대한 논의가 심각하게 진행되고 있다. 이 중에서 비료화와 소각에 의한 처리방안이 타당성 있는 것으로 받아들여지고 있다. 소각처리의 경우를 예로 들어보면 탈수슬러지를 건조 후 고형물 중에 함유되어 있는 유기물 성분을 소각 처리하여 유해한 성분을 제거하는 방법으로서 소각 후 재의 처리가 필요하다. 따라서 재의 처리에 소요되는 비용을 절감하는 측면에서 탈수슬러지를 pellet화하여 소각 대신 소성의 방법을 사용하여 산출된 생산품을 원하는 용도로 재활용할 수 있는 방법이 필요하다.

슬러지 처리시 문제점은 냄새가 나거나 다루기 어려울 뿐만 아니라, 환경보전의 관점에서 불 때도 중금속함유 등 위험한 잠재력을 가지고 있고 슬러지내에 다양한 물질들을 함유하고 있어서 이에 의한 2차 오염이 발생하지 않도록 처리, 처분하는 것이 매우 중요하다.

응집공정을 사용하는 정수 및 용수처리장, 하수처리장과 폐수처리장에서 생산된 슬러지는 처분하기 전에 적합한 고형물처리를 하여야 한다. 하수 및 폐수처리장 중 생물학적으로 처리하는 공정에서 생산되는 슬러지는 주로 유기성이며, 고도처리 공정에서 생산되는 슬러지는 응집침전에 의해 형성되기 때문에 무기화학적 성질을 지닌다.

<표 1> 국내 하수처리장 슬러지 처리현황.

시 도	처리장명	시설용량 (천㎡/일)	하수유입량 (천㎡/일)	탈수케이크 발생량 (톤/일)	하수1㎡당 발생슬러지 량(kw/㎡)	탈수케이크 처분방법	비고 (*97년 현재 처분방법)
부산	수영	286.0	281.6	45.5	0.16	해양투기	
	장립	330.0	274.9	155.3	0.56	해양투기	
부산합계		616.0	556.5	200.8	0.36		
대구	신천	350.0	360.0	68.5	0.19	해양투기	
	달서천	400.0	399.8	143.8	0.36	해양투기	
대구합계		750.0	759.8	212.3	0.28		
인천	가좌	190.0	169.8	53.6	0.32	매립	해양투기
	송기	240.0	179.3	32.9	0.18	매립	해양투기
인천합계		430.0	349.1	86.4	0.25		
광주	광주	300.0	330.8	134.9	0.41	해양투기	
광주합계		300.0	330.8	134.9	0.41		
대전	대전	300.0	323.5	107.6	0.33	매립	
대전합계		300.0	323.5	107.6	0.33		
경기	수원	165.0	94.8	6.4	0.07	매립	
	성남	340.0	284.8	103.4	0.36	매립	
	의정부	140.0	55.7	22.7	0.41	매립	
	안양	300.0	264.3	116.4	0.44	매립	
	부천	150.0	119.1	41.3	0.35	매립	
	동두천	47.0	22.4	1.8	0.08	매립	
	안산	121.0	129.3	30.2	0.23	매립	
	고양	135.0	86.7	33.4	0.39	매립	
	파천	30.0	22.6	11.5	0.51	매립39%,지렁이사육(61%)	지렁이사육(100%)
	구리	50.0	51.0	15.1	0.30	매립	
	화도	10.0	8.2	5.2	0.63	유기질비료	
	시흥	176.0	156.3	17.9	0.11	매립	
	용인	24.0	25.3	13.5	0.53	매립	
	광주광동	0.25	0.3	0.1	0.33	매립	
	광주만선	0.15	0.1	0.0	-		
	광주읍	11.0	11.5	6.0	0.52		
	광주분원	0.15	0.2	0.1	0.50		
	광주귀여	0.15	0.1	0.0	-		
	광주매산	0.5	0.2	0.0	-		
	양평	4.2	3.4	2.0	0.59		농가보급
	양서	0.6	0.5	0.3	0.60	농가보급	
	용문	1.2	0.9	0.6	0.67	농가보급	
	하자포	0.2	0.1	0.0	-	농가보급	
경기합계		1,706.4	1,337.8	428.1	0.32		
강원	춘천	100.0	73.0	18.4	0.25	퇴비화	

시 도	처리장명	시설용량 (천㎡/일)	하수유입량 (천㎡/일)	탈수케이크 발생량 (톤/일)	하수1㎡당 발생슬러지 량(kg/㎡)	탈수케이크 처분방법	비고 (‘97년 현재 처분방법)
강원	원주	75.0	68.8	15.5	0.23	매립	
	강원합계	175.0	141.8	33.9	0.24		
충북	청주	15.0	134.2	64.3	0.48	매립	
	충주	50.0	34.9	0.6	0.02	매립	
	제천	35.0	33.0	7.7	0.23	매립	
	문의	1.0	0.6	0.1	0.17	매립	
	보은	6.0	6.5	1.5	0.23	매립	
	옥천	18.0	6.9	5.2	0.75	매립	
	영동	8.0	6.9	1.3	0.19	퇴비화	
	단양	5.0	4.6	1.4	0.30	매립	
충북합계		273.0	227.6	82.1	0.36		
충남	천안	70.0	70.8	19.3	0.27	매립(40%), 농가보급(60%)	
	계룡	23.0	8.6	1.3	0.15	농가보급	
	충남합계	93.0	79.4	20.6	0.26		
전북	전주	103.0	101.8	29.8	0.29	매립	
전북합계		103.0	101.8	29.8	0.29		
전남	나주	22.5	10.6	1.3	0.12	매립	
	광양	5.5	1.3	0.5	0.38	매립	
	순천공단	2.0	0.5	0.1	0.20	매립	
전남합계		30.0	12.4	1.9	0.15		
경북	경주	69.0	47.3	0.1	0.00	매립	
	구미	135.0	183.3	58.7	0.32	매립	
	영천	25.0	28.0	33.1	1.18	매립	
	왜관	20.0	11.6	4.2	0.36	매립(16%), 해양투기(84%)	
	은정	6.5	3.9	0.5	0.13	매립	
경북합계		255.5	274.1	96.6	0.35		
경남	마산	280.0	178.6	15.8	0.09	매립	
	울산	250.0	73.6	1.4	0.02	매립	
	회야	32.0	28.5	9.6	0.34	매립	
	진주	110.0	88.2	29.4	0.33	매립	
	통영	20.0	13.1	1.6	0.12	매립	
	부곡	13.0	5.7	0.9	0.16	매립	
	거창	10.5	11.0	7.2	0.65	매립	
경남합계		715.5	398.7	65.9	0.17		
제주	제주	60.0	54.8	25.6	0.47	매립(14%), 농가보급(86%)	
	중문	5.0	1.4	0.4	0.29	퇴비화	
	제주합계	65.0	56.2	26.0	0.46		

## 제2절 하수 슬러지의 특성

### 1. 탈수 슬러지의 건조특성

하수처리장에서 탈수 후 유출되는 슬러지는 약 80%에 달하는 수분을 함유하고 있으며 자연상태에서의 수분 흡수현상으로 건조가 다소 어렵다는 특징을 갖는다. 따라서 건조공정에 대한 검토가 필요하다. 이는 슬러지에 포함된 유기물의 함량, 입자의 크기, 소화정도, 탈수기의 효율 등에 의해 결정되므로 처리공정을 결정하는 중요한 인자가 된다.

슬러지의 자연 또는 인공적인 탈수에 의하면 그 함유율은 일반적으로 60-80%로 된다. 그러나 일정한 형태로의 가공을 위해서는 최종 함유율을 40% 이하로 하는 것이 바람직하다. 슬러지 내에 함유되는 수분의 종류는 자유수(free water), 간극수(floc water), 모관수(capillary water), 결합수(bound water) 등으로 분류되며 건조에 관여하는 정도가 다르다. 일반적으로 자연건조 및 열풍건조 즉, 기류에 의한 물질의 건조속도에는 다음의 4가지 요소가 있다.

- (ㄱ) 슬러지의 입도를 가능한 작게 해서 증발면적을 크게 하여 수분증발을 신속히 효과적으로 하게 한다.
- (ㄴ) 건조의 열효율을 높이기 위해서 가능한 고온가스를 건조에 이용한다.
- (ㄷ) 고온가스와 건조물질을 충분히 교반하여 건조물질의 열전도 및 수분의 증발 속도를 높여 표면의 증기막을 제거한다.
- (ㄹ) 표면의 수분은 쉽게 제거되지만 내부 수분은 확산에 의해 표면에 도달하므로 가능한 입자를 작게 하여 증발속도와 건조효율을 상승시킨다.

### 2. 건조 슬러지의 구성

Dry oven 등을 이용하여 강제 건조시킨 슬러지를 건조 슬러지라 하며, 이 건조슬러지를 800℃에서 하소한 후 남게 되는 무기질 고형분을 편의상 하소슬러지라고 한다. 건조슬러지 내의 고형분에 대한 무기질, 유기질 성분의 중량비는

약 3:2의 값을 갖고 있으며 소위 유·무기질 복합 구성을 한다. 따라서 본 연구에서 목적하는 슬러지의 열량 회수에 대한 연구에는 유기질 성분이, 그리고 정량골재 등의 세라믹제품에 대한 연구에는 무기질 성분이 연구 대상이 된다. 건조슬러지의 화학조성을 <표 2>에 나타냈다.

<표 2> 건조 슬러지의 화학조성.

composition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ig.loss	Total
sludge cake	30.42	14.17	7.18	2.88	1.33	1.95	0.86	0.71	0.42	3.66	36.42	100.00

건조슬러지는 일반 점토의 성분과 같이 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주성분으로서 45%를 차지하며 특히 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 7.18%에 달하는 높은 함유비를 보인다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 일반적으로 세라믹 소성체에 0.3%이상 함유될 때에는 흑적색의 색조를 발현하며 수%가 함유되면 소성온도를 크게 저하시키거나 소성온도대역이 크게 감소함에 따라 정형소성 제품의 생산이 어렵다는 난점을 준다.

### 제3절 탈수 슬러지의 특성

#### 1. 수분 및 고형물 분석

탈수슬러지의 수분 및 고형물의 구성비를 측정하기 위하여 증발접시를 미리 105~110℃에서 1시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에서 방냉하고 항량으로 하여 무게를(W<sub>1</sub>) 달고 여기에 탈수슬러지를 적당량 취하여 증발접시와 시료의 무게(W<sub>2</sub>)를 단다. 105~110℃의 건조기 안에서 4시간 건조시킨 다음 데시케이터안에 넣어 방냉하고 항량으로 하여 무게(W<sub>3</sub>)를 단 후 다음의 계산에 의하여 측정하였다.

$$\text{수분(\%)} = (W_2 - W_3) / (W_2 - W_1) \times 100$$

$$\text{고형물(\%)} = (W_3 - W_1) / (W_2 - W_1) \times 100$$

2. 입도, 강열 감량 및 유기물 함량 분석

탈수슬러지의 입도분석(particle size analysis)은 표준체(standard sieve)를 습식으로 하였으며, 소각회의 입도분석은 Malvern Ins.사의 MS 1002으로 분석하였다. 강열 감량 및 유기물함량은 사기제 도가니를 600±25℃에서 30분간 강열하고 데시케이터 안에서 방냉한 다음 무게(W<sub>1</sub>)를 달고 여기에 시료 적당량(20g 이상)을 취하여 도가니와 시료의 무게(W<sub>2</sub>)를 단다. 600±25℃의 전기로(영국 Lenton사의 box furnace)에서 30분간 강열하고 데시케이터 안에서 방냉하여 무게(W<sub>3</sub>)를 단 후 다음의 계산식에 의하여 측정하였다.

$$\text{강열감량(\%)} = (W_2 - W_3) / (W_2 - W_1) \times 100$$

$$\text{유기물함량(\%)} = [\text{휘발성고형물(\%)} / \text{고형물(\%)}] \times 100$$

$$\text{단, 휘발성고형물(\%)} = \text{강열감량(\%)} - \text{수분(\%)}$$

가. 입도분포 분석 결과

건조 슬러지의 입도분포의 결과는 다음의 <표 3>과 같다.

<표 3> 건조 슬러지의 입도분포.

Item size(mesh)	particle size		Ignition loss(%)
	wt.(%)	cum.wt.(%)	
100이하	10.94	100.00	39.2
100-200	6.35	89.06	35.9
200-270	7.32	82.71	35.8
270-400	5.92	75.39	43.8
400이상	69.47	69.47	29.9
Total	100.00		Total



분석결과를 보면 탈수슬러지의 경우 83%가 200mesh(74 $\mu$ m)이하의 미립자로 이루어져 있고 강열감량의 분포는 29.9~43.8%의 범위로 대부분 30%정도의 감량이 있으며, 그중 270~400 mesh인 범위에서 43.8%로 가장 높은 강열감량이 있는 것으로 조사되었다.

#### 나. 강열감량 및 유기물함량 분석 결과

건조슬러지에 포함된 유기물의 함량은 발열량을 결정하는 중요한 인자가 된다. 건조슬러지의 고형물에 대한 강열감량의 분석치는 유기물의 함량을 의미한다. 슬러지의 총 강열감량 즉, 유기물의 함량은 37wt%정도로 분석되었다. 보고된 슬러지의 유기물함량은 20-50% 범위로 지역 및 생활환경, 계절별 강수량의 영향으로 유입된 하수의 토사량에 따라 유기물의 함량이 넓게 변한다.

#### 3. 건조슬러지의 발열량 및 유황분 분석

건조 슬러지에 함유된 유기물의 발열량 및 유황분 함량의 분석은 각각 미국 Leco사의 AC-300와 미국 Leco사의 SC-132로 분석하였다.

본 실험에 사용된 건조하수슬러지의 발열량은 <표 4>와 같이 1,844kcal/kg와 유황분은 1.39%로 분석되었다. 선행된 연구에 따르면 가정계 하수슬러지의 보고된 발열량은 1690kcal/kg~3,087kcal/kg 범위의 열량을 보이는데 이는 발열량을 결정하는 유기물의 함량이 지역별과 시기별로 다르기 때문이다. 따라서 계절별로 강수량에 따라 유기물의 혼합비가 변한다.

<표 4> 건조슬러지의 발열량

측정횟수	수거 월	평균발열량	평균유황분함량
5	11~3	1,844 kcal/kg	1.39 %

#### 4. X선 회절(XRD) 분석

건조슬러지의 광물학적 분석을 위해 X-선 회절분석을 행하였다. X-선 회절 장치는 일본 Rigaku사제 Geigerflex X-ray diffractometer를 이용하였으며 분석조건은 Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=1.5418\text{\AA}$ ) Ni-filter, Full scale range 200cps, 주사각도 2 $\theta$ /min. Chart speed 2cm/min. 으로 분석하였다. 이 결과를 그림 1에 제시하였다. 탈수슬러지의 결정상은 현저한 quartz 피크와 미량의 feldspar, montmorillonite, mica, mullite 및 chlorite 등의 피크를 보였으며 이는 일반적인 점토광물의 조성에 해당한다.

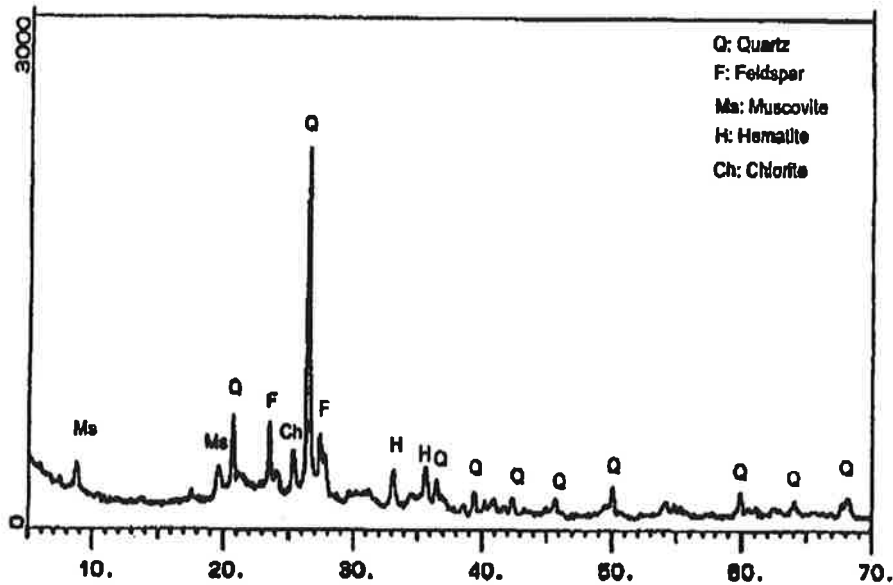


그림 1. 건조슬러지의 X-선 회절 분석도.

#### 5. TG-DTA 분석

건조슬러지의 열적 특성을 고찰하기 위하여 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1200 $^{\circ}\text{C}$ 까지 10 $^{\circ}\text{C}$ /min.로 TG-DTA(Stanton사, STA 1640B) 분석을 행하였다. 그림 2는 건조슬

러지의 열분석 결과로서 약 290℃와 388℃ 영역에서의 급격한 발열피크는 이 온도 대역에서 유기물의 열분해가 있음을 의미하며 약 800℃ 부근에서 열적 평형에 도달하였다. 이로부터 소각의 온도를 800℃로 산정하였으며 이 온도까지의 무게감량은 약 37%에 달하였다. 이는 유기물의 wt%에 해당하며 이 때문에 열량회수에 이용될 수 있다고 판단된다.

건조 슬러지를 열분석기로 시판 중인 가정용 연탄과 함유 열량을 승온속도 10℃/min으로 800℃까지 비교 분석한 결과, 무연탄의 연소로 인한 총 무게 감량은 67.1%이고 슬러지의 경우 37.1%로 각각 그 만큼이 연소에 가담하여 슬러지는 무연탄의 총 발열량의 63.7%에 달하는 높은 열량을 함유하고 있으므로 이 열량을 적절한 방법으로 회수할 경우, 에너지원으로 활용이 가능하다. 또한 연탄의 최대 발열 온도는 675℃이나 슬러지는 312℃로 비교적 낮은 온도에서 최대 발열을 하므로 인화점이 낮다는 장점을 지닌다.

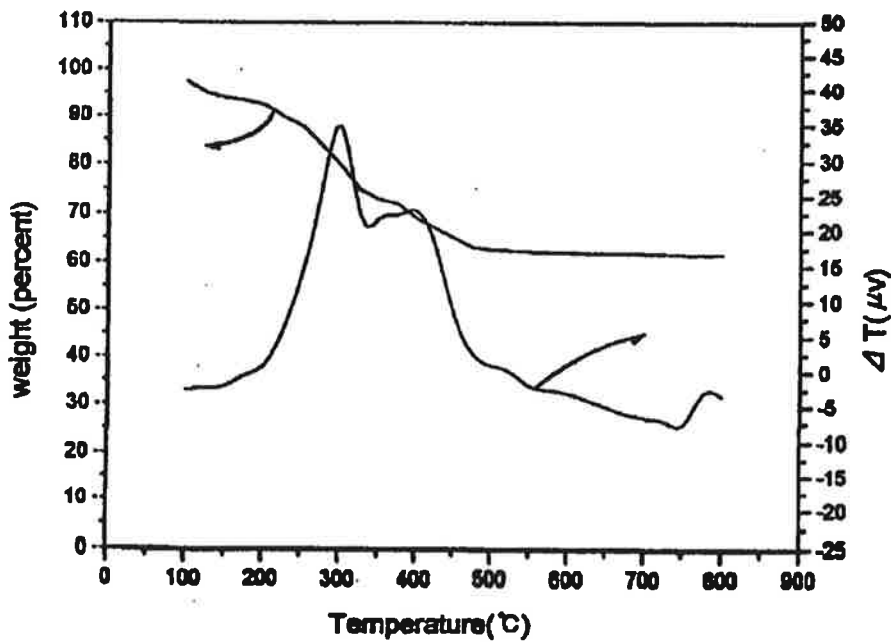


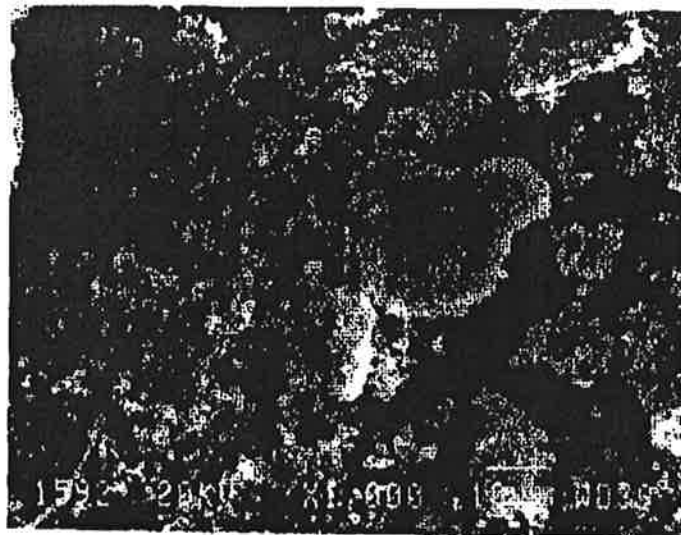
그림 2. 건조 슬러지의 TG-DTA.

## 6. 건조슬러지의 미세조직관찰 및 배가스 측정

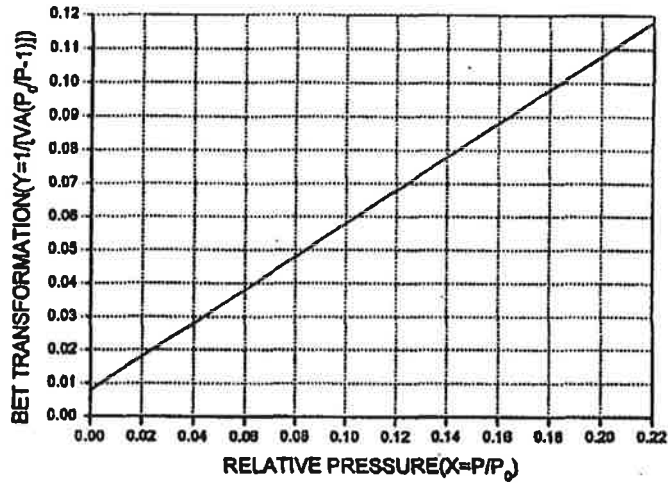
건조슬러지의 미세구조를 관찰하기 위하여 SEM(JOEL사, JSM-5400 Scanning Electronic Microscopy) 및 삼성전관의 광학현미경(칼라영상현미경시스템, microworld mw-200)을 사용하여 관찰하였다. 소각이나 소성시의 배출 가스에 대한 경향을 알아보기 위하여 연소배가스 측정기를 이용하여 측정하였다.

### 가. 미세분석 결과

SEM에 의한 건조슬러지의 구조를 그림 3(a)에 제시하였다. 비교적 1~10 $\mu$ m 정도의 분말이 응집되어 구상체를 형성하고있는 모습을 보여준다. 그림 3(b)는 건조슬러지 분말 0.8488g으로 측정한 질소흡착법에 의한 BET 비표면적을 보인다. 그림 3(a)의 전자현미경사진에서는 응집된 모습만을 볼 수 있는데 그림 3(b)의 결과를 분석하면 입자가 갖는 표면적이 8.5048m<sup>2</sup>/g에 해당되는 정도로 미분임을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 건조슬러지 분말의 SEM 사진(a)과 BET 비표면적 분석도(b).

#### 나. 배출가스 분석 결과

건조슬러지의 가열 온도에 따른 배출가스 특성을 알아보기 위하여 300~1200℃의 온도범위에서 열처리하면서 배출되는 가스를 연소가스분석기(독일, Model 300NSX)를 이용하여 배출구에서 CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> 및 SO<sub>2</sub>를 측정된 결과를 그림 4에 나타냈다. CO<sub>2</sub>는 600℃까지는 증가하다가 600℃를 정점으로 낮아져서 700-1000℃의 범위에서는 5%대를 유지하다가 1050℃부터는 급속히 저하하였다. CO는 400-600℃까지 최대치를 보이다가 600℃~700℃사이에서 급속히 감소하여 250ppm의 낮은 수치를 보였다. NO<sub>x</sub>는 온도변화에 따라 큰 차이를 보이지 않으며, SO<sub>2</sub>는 500℃를 정점으로 온도의 상승에 따라 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

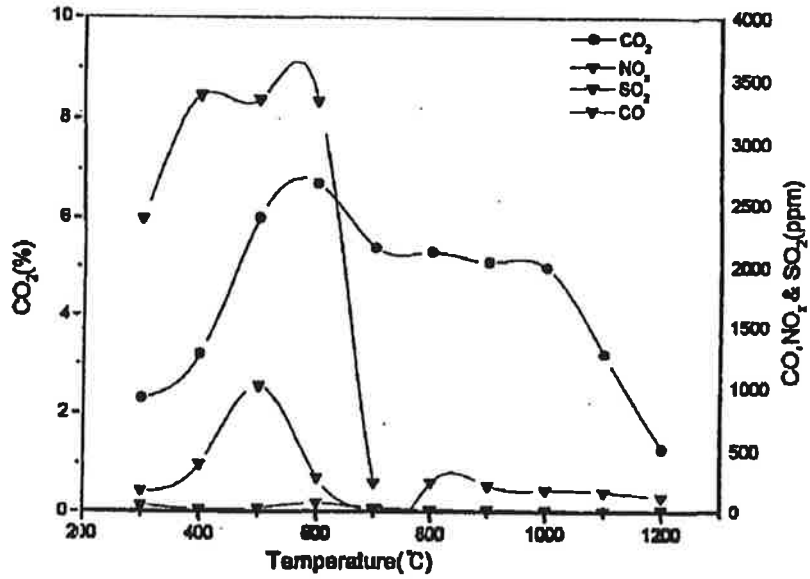


그림 4. 건조슬러지의 가열에 의한 배출가스.

### 제 3 장 슬러지탄의 제조

슬러지를 시설원에 난방보일러의 연료로 사용하기 위하여 연소하기에 적당한 크기의 입방체로 제조하는 것인데, 이 과정은 슬러지를 실온에서 자연건조시킨 후 수분제거 기구를 만들어 수분량이 중량비의 10%가 되게 한다. 수분량을 10%정도 함유한 슬러지에 압력을 가하여 토출시키는 과정(압출:extrusion)에서 원하는 크기로 성형한 다음, 건조에 필요한 에너지를 절약하기 위하여 보일러에서 나오는 배기가스를 이용하여 완전건조 상태로 된 후 연료 자동공급장치를 통하여 연소실에 공급된다.

하수슬러지를 이용하여 보일러용 연료를 제조하기 위해서는 다음의 <표 5>와 같은 공정을 통하여 이루어진다.

<표 5> 하수슬러지를 이용한 보일러용 연료의 제조과정.

공정	재취	원료혼합	탈수	성형	건조	연소	소성	제품
특징	트럭운송	불밀	탈수기	압출가공기	건조기	보일러	가열로	정량골재 수처리용담체 필터 화분석

다음에 주요 공정에 대한 고려점을 기술한다.

#### 제1절 슬러지의 건조

탈수슬러지의 건조를 위해서는 자연건조 방식이나 열풍순환형 건조기를 이용하는 것이 에너지 절약차원에서 타당하다. 보일러의 폐열을 이용하는 경우를 모사하여 다음과 같은 실험을 행하였다. 탈수슬러지를 3cm정도의 두께로 스테

인레스 용기(규격: 가로×세로×높이=47cm×37cm×7cm)에 적재하여 3단으로 된 건조기안에서 건조온도를 50℃에서 100℃까지 10℃의 간격으로 두고, 건조시간을 1시간에서 6시간까지 1시간마다 변화시키면서 건조하였으며 시간마다 시료의 무게를 각각 측정하여 수분의 함량을 분석하였다.

그림 5에 수분량 80%인 탈수슬러지를 건조온도와 시간에 따른 수분함량의 변화를 나타냈다. 두가지 조건 모두 건조온도와 건조시간이 증가함에 따라 수분함량은 점차적으로 낮아지는 경향을 보였다. 이들로부터 나온 데이터를 토런기를 이용한 pellet의 제조에 적당한 수분함량을 결정하기 위한 기초자료로 사용하였다. 80℃ 이상에서 건조된 슬러지는 건조경화 때문에 토런기의 노즐이 막혀 토출이 불가능하였으며, 수분량이 많은 경우에는 토출기를 통과한 탈수슬러지가 늘어지고 떨어지면서 벨트에 붙는 상태가 되어 공정상의 난점이 되었으며 70℃, 5hr과 6hr의 조건에서는 토출상태가 매끄럽고 막힘이 없는 상태가 되었다. 본 실험에서 사용한 토런기에 적절한 수분량은 45~30%정도로 분석되었다. 탈수슬러지의 건조방법을 batch식으로 하였기 때문에 다른 건조방법을 선택한다면 다른 결과가 나타날 수도 있으며 토런기의 성능에 따라 적절한 수분함량도 달라질 것으로 사료된다.



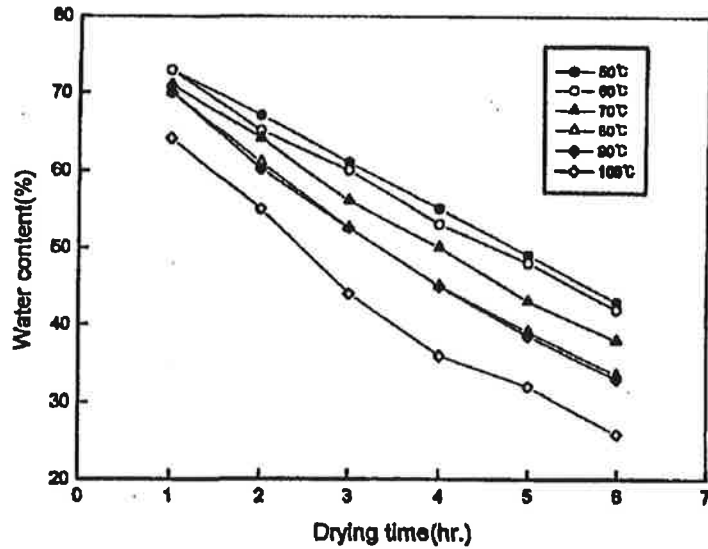


그림 5. 건조온도와 시간에 따른 슬러지의 함수율.

## 제2절 연료형태의 성형

일반적인 pellet의 제조에는 팬형 조립기(disk pelletizer)나 통형조립기(drum pelletizer)가 사용되는데 본 연구에서는 혼합된 시료를 일종의 토련기(요업 제품의 성형에 사용)로 사출하여 직경 30mm인 토출구를 빠져나온 원통형 슬러지 시료를 cutting하여 pellet(직경 30mm, 길이 30mm)을 만들었다. 토련기의 사출속도는 초당 1cm 정도였으며 절단된 pellet은 컨베이어 벨트를 통해서 Hopper에 쌓이도록 하였다. 그림 6에 슬러지탄을 원통형으로 가공하는 토련기의 사진을 나타내었다.

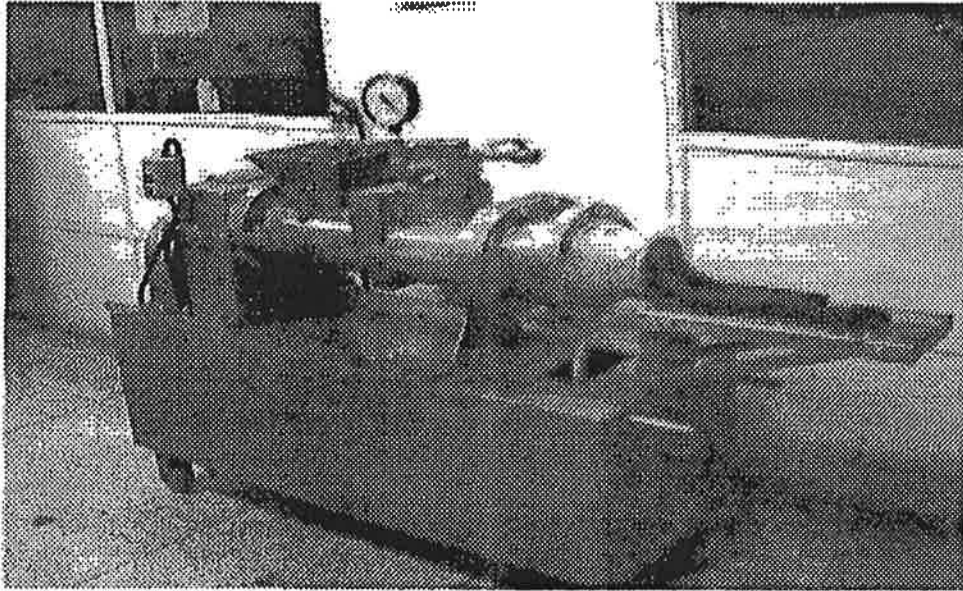


그림 6. 슬러지탄을 성형하는 토런기.

### 제3절 pellet 건조

제조된 pellet을 스테인레스 용기에 1점으로 담아 통풍이 잘되는 곳에서 자연건조 및 열풍순환건조기에서 건조 온도를 40℃에서 10℃의 간격으로 100℃로 두고, 1시간에서 5시간까지 시간단위로 변화시키면서 건조하였으며 각각의 경우 pellet의 무게를 측정하고 수분의 함량을 분석하였다.

그림 7에 탈수슬러지 pellet의 건조온도와 시간에 따른 수분함량의 변화를 나타냈다. 건조온도와 시간이 증가함에 따라 건조되는 속도는 빨라졌으나 60℃ 이상의 온도에서는 고온열풍으로 인한 pellet 표면의 건조속도와 내부에 있는 수분의 이동속도 차이로 인해 pellet의 표면에 crack이 형성되거나 절반으로 나누어지는 경향이 많이 나타났다. 표면이 좋은 상태를 유지하기 위해서는 통기가 잘되는 장소에서 건조시키는 자연건조가 좋으나 연속적인 공정을 위한 조건에서는 50℃이하, 5시가 동안 건조시키는 것이 적당하다고 판단된다. 이렇

게 제조된 pellet형 슬러지를 편의상 슬러지탄이라고 한다. 이 슬러지탄을 자동 공급/배출기가 부착된 보일러에서 연소시켜 목적하는 소정의 열량을 회수한 후, 배출된 슬러지탄재(연소에 의하여 유기물이 제거되고 발열량에 의해 자발적 소결이 다소 일어난 상태의 슬러지탄의 배출된 재)를 이용하면 일반 콘크리트골재, 경량골재, 수처리용 담체 등과 같은 종류의 소성제품을 만들 수 있다.

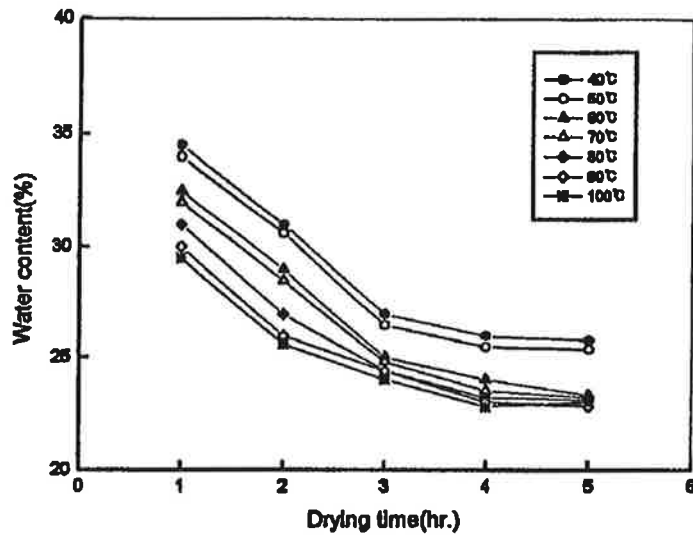


그림 7. 건조온도와 시간에 따른 원료 pellet의 함수율.

## 제 4 장 시설원에 난방시스템의 설계제작

### 제1절 시설원에 난방시스템의 구조

본 연구에서는 기존의 온풍난방과 온수난방을 조합하고 온수저장탱크를 이용한 효율적인 난방시스템을 구축하고 난방연료로는 생활하수 슬러지로부터 제조된 슬러지탄을 연료로 사용 가능하도록 처리하여 이용하는 것이다. 난방시스템의 설계는 연료로 슬러지탄 및 분탄을 이용할 수 있도록 연소실을 설치하고, 연소효율을 높이기 위하여 노통-수관보일러 형태의 보일러 본체를 제작한 후 가열된 물을 온수저장탱크로 보내어 온수저장탱크 내부의 물 온도가 설정값을 유지하도록 하고, 시설 내부의 온도에 따라 온수저장탱크의 물이 순환하여 시설내부의 온도를 일정하게 유지하도록 한다.

#### 1. 시설원에 난방시스템의 구조

시설원에 난방시스템은 보일러에서 연료가 가지고 있는 열을 물에 전달하고 고온의 온수를 순환시키는 과정에서 송풍기에 의해 시설내부의 온도를 높여주는 장치가 되도록 설계 제작하였다. 이때 보일러는 100℃ 이하의 고온으로 물을 가열시켜 물이 증발하지 않는 범위 내에서 가열되도록 하였으며, 물이 80~90℃ 정도 온도가 상승하면 연료의 연소를 중지시키고 물이 시설내부로 순환되도록 하였으며 시설내부에 송풍기를 부착하여 물이 가지고 있는 열량을 시설내부에 공급하도록 하였다. 시설원에 난방시스템의 흐름도는 다음 페이지의 그림 8에 제시하였다.

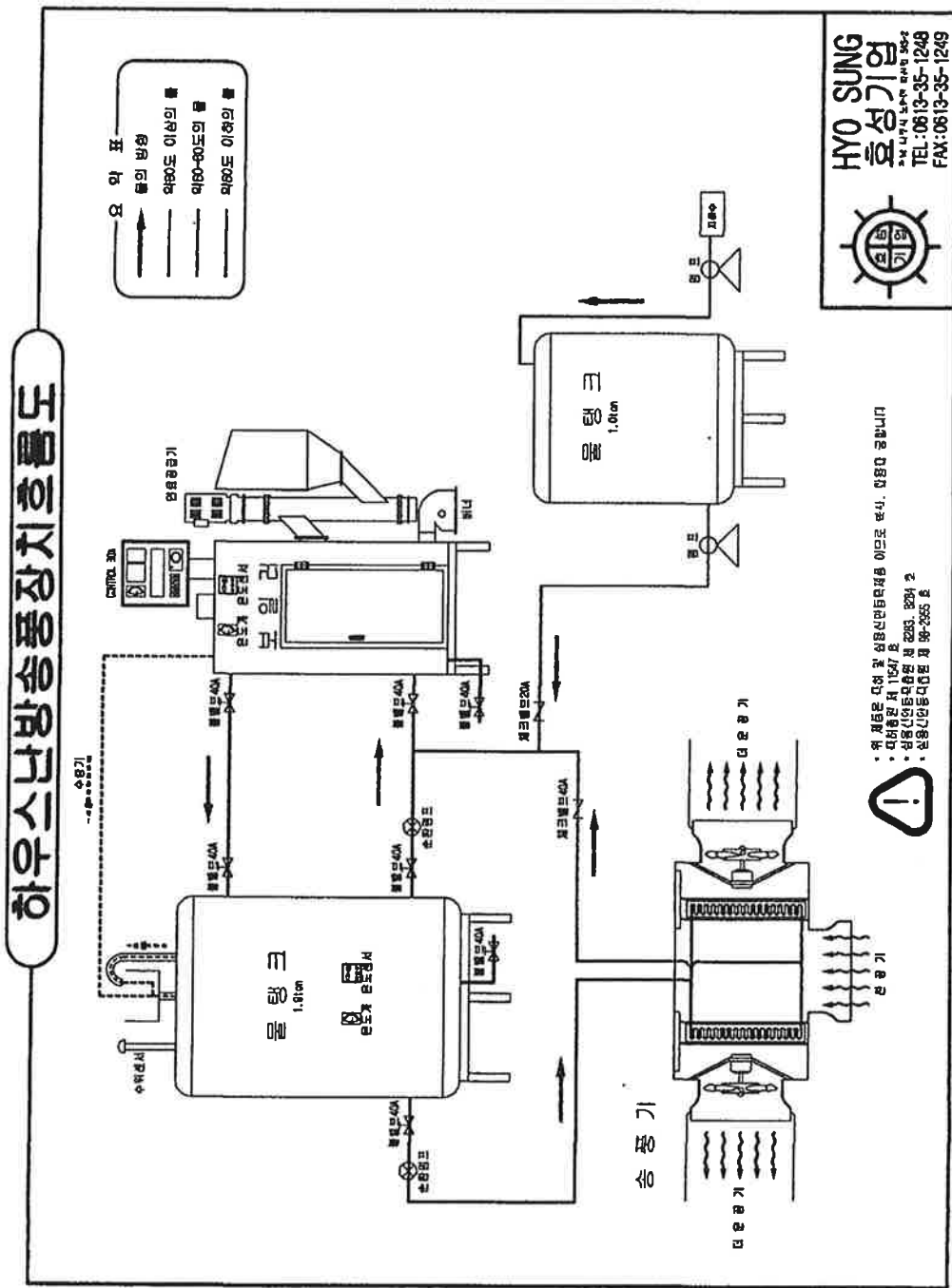


그림 8. 시설원에 난방시스템의 흐름도.

## 2. 시설원에 난방시스템의 작동원리

- 가. 초기에는 보일러에 부착된 경유 버어너를 사용하여 연료를 점화시키고 그 연소열로 물을 가열하여 고온의 물이 온수저장탱크에 순환된다. 이때 온수저장탱크의 물 온도가 설정온도 약 80~90℃까지 상승하면 보일러의 버어너와 송풍기의 작동이 중지되며 연료공급장치도 연료공급을 중단한다. 그러나, 보일러 내는 연료가 천천히 연소하고 있으며 상당기간 고온을 유지한다.
- 나. 시설내부의 목표온도를 설정한 후 시설내부 온도가 설정온도 이하로 내려가면 순환 펌프에 의해 온수저장탱크 내의 온수가 방열기에 순환되고 방열기에 설치된 송풍기가 작동하여 시설 내부에 온풍이 계속 공급된다. 시설 내부의 온도가 설정온도 이상이 되면 순환펌프와 송풍기는 작동이 멈추며 온풍 공급이 중단된다. 따라서, 시설 내부의 온도에 따라 순환펌프와 송풍기는 온도조절 센서와 연계하여 on/off를 반복하며 시설 내부의 온도는 항온으로 유지된다.
- 다. 상기 (나)의 동작에 따라 온수저장탱크의 열이 방출하여 수온이 어느 정도 이하로 낮아지면, 보일러의 연료공급장치(피스톤)가 작동하여 새 연료가 공급되며 보일러 내의 송풍기가 작동하여 연소가 다시 진행된다. 이때에는 그 전의 연소열로 연료가 천천히 연소하고 있었으므로 경유 버어너의 작동은 필요하지 않다. 따라서, 온수저장탱크에 고온의 물이 다시 순환되어 온수저장탱크의 수온이 증가한다. 계속하여 온수저장탱크의 수온이 설정온도(약 80℃~90℃) 이상으로 증가하면, 보일러의 연료공급장치(피스톤)와 송풍기가 작동을 중단하며 새로운 연소는 중지된다. 따라서, 온수저장 탱크의 물 온도에 따라 순환펌프와 보일러의 연료공급장치 및 송풍기는 온도조절 센서와 연계하여 on/off를 반복하며 온수저장 탱크의 물 온도는 일정 범위 내로 유지된다.

### 3. 온풍난방 시스템의 주요 제원 및 구성요소

#### 가. 온풍난방 시스템의 주요 제원

- 난방능력 : 160,000 kcal/hr
- 슬러지, 갈탄과 같은 고체연료 및 폐기물을 완전 연소시킬 수 있는 화격자 구조
- 노통-수관보일러 형식의 2중 구조로 되어 있어 내구성을 유지하며 시간당 4 ton 이상의 급탕 능력을 보유(1ton-4회 순환)
- 갈탄이나 슬러지탄을 일괄 투입하여 버어너에 의하여 자동점화 연소시키고 별도의 가동인력 상주가 불필요한 구조
- 이상 고온으로 과열된 증기를 배출하여 보일러 내부의 압력 상승을 방지하는 스프링 안전밸브 시스템
- 고온으로 가열된 항온의 물(80~90℃ 정도)을 저장하는 온수저장탱크를 설치하여 시설내부에 공급되는 온풍의 온도를 일정하게 함으로써 시설내부의 온도를 항온으로 유지
- 연소실 내 난류형성 촉진과 전열면적 증대로 열효율 증대
- 완전연소에 따른 청정공기 배출
- 수평 화격자에 의한 고체연료의 원활한 연소
- 미연소된 소각재를 완전연소 되도록 연소시켜 완전한 재(ash)가 발생토록 설계
- 슬러지탄 및 고체연료의 연소열을 이용한 난방시설
- 화격자 방식 : 다습성 폐기물(슬러지), 갈탄, 무연탄 등의 연소
- 주요구조 : 고체연료 연소용 보일러, 온수저장탱크, 시설내부 온풍·송풍기

#### 나. 보일러의 구조

보일러의 초기 점화시 시설내부의 온도에 따라 자동으로 고체연료에 점화시

키도록 경유 버너를 연소실에 설치하였으며 연소 후 재의 처리를 위하여 스크류(screw) 형태의 재처리 장치를 부착하여 연료의 공급에서 재처리까지 자동화 할 수 있는 시스템을 구축하였다.

연료가 자연적으로 연소를 계속하도록 하기 위하여 이미 연소되고 있는 부분으로부터의 열이 자동적으로, 되도록 속히 새 연료에 전달되어 그 점화온도까지 도달되어야 한다. 이는 연료가 그 점화온도에 도달되어야 비로소 점화되며 그 자신의 연소를 계속할 수 있기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 연료의 연속적인 점화를 위하여 피스톤의 왕복운동에 의하여 갈탄이나 슬러지탄을 수평으로 화격자 위에 밀어 넣는 방식으로 설계하였으며, 연소실과 연료실을 분리하여 역화현상을 방지하였다. 이때 피스톤은 온도조절 센서와 연계하여 작동되도록 하였다. 또한 연료의 완전연소를 위하여 송풍기를 설치하여 연소실의 하부에서 송풍이 될 수 있도록 하였다.

보일러는 연소실과 연도를 통해 주위의 물에 연소열을 전달 할 수 있도록 하였으며 열효율을 높이기 위하여 연도 내에 수관을 더 배치하였다. 또한, 연도의 전열면적을 늘리기 위하여 연도를 보일러 내에서 Z자 형상이 되게 설계하였다. 그림 9에 참여기업인 효성기업에서 제작한 보일러의 사진을 나타내었으며 그림 10에 보일러 내부 단면의 형상을 나타내었다.



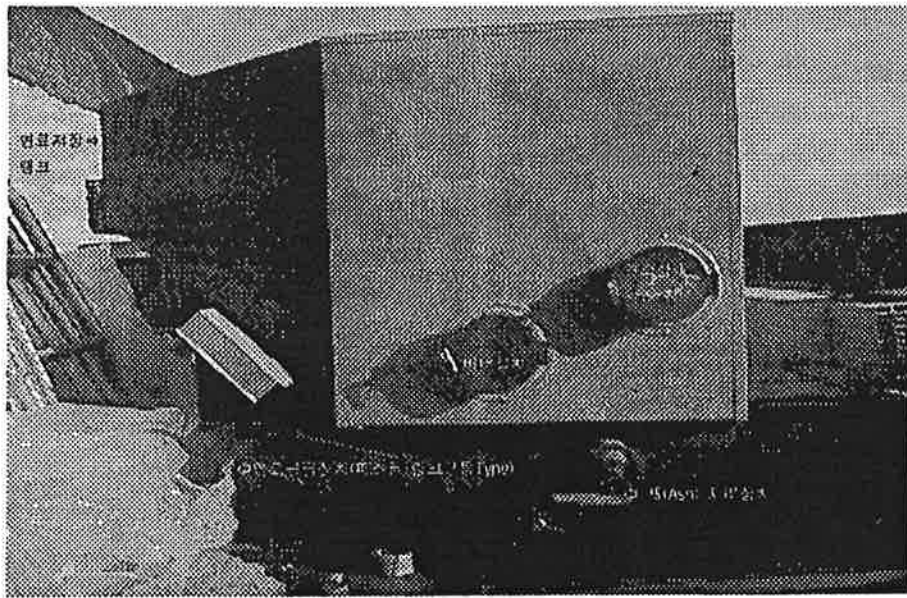


그림 9. 슬러지란 연소용 보일러의 외형.

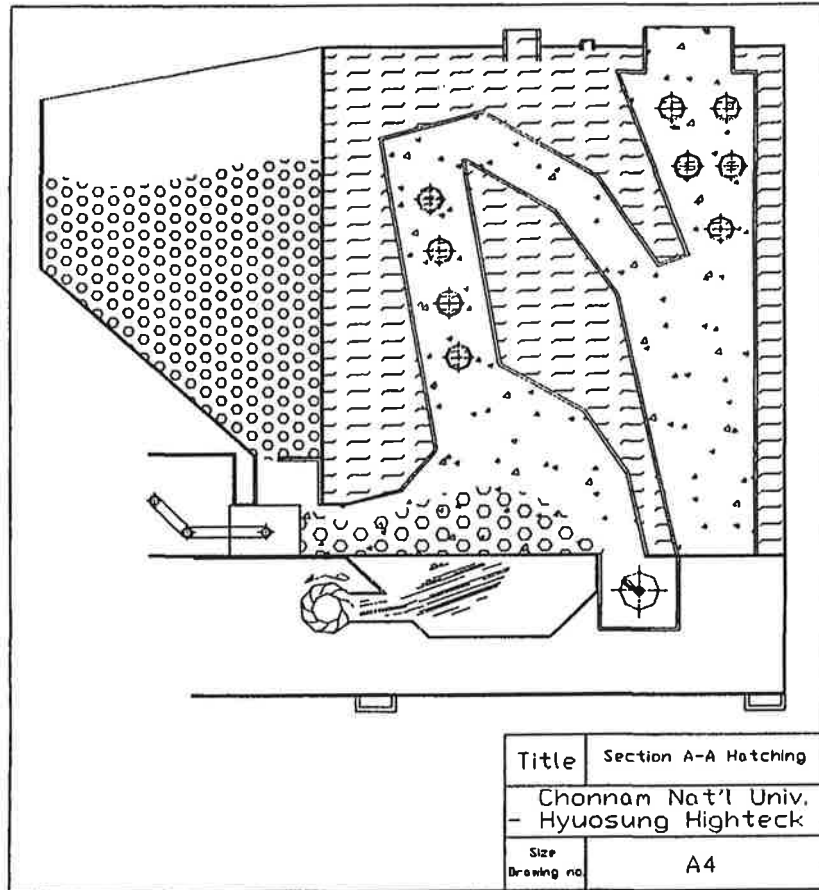


그림 10. 보일러 단면의 내부 형상도.

다. 온수저장탱크

보일러와 병행하여 온수저장탱크를 설치하여 열용량을 높이고 항온의 온수가 시설내부에 공급되도록 하여 시설내부에 공급되는 온수의 온도가 일정하게 되도록 하였다. 온수저장탱크는 약 1톤의 온수를 저장할 수 있도록 하였으며 4톤/hr의 온수를 공급하기 위하여 시간당 4회 순환할 수 있도록 하였다. 또한 이상 고온으로 온수탱크에 과열증기 생길 경우에 압력을 배출하는 스프링 안전 밸브를 부착하였다.

#### 라. 안전밸브

보일러의 내부에 가열에 의하여 온수가 증발하여 최고사용압력을 초과했을 때 자동적으로 안전밸브가 작용하여 증기를 밖으로 배출하여 압력을 내리고 미연에 폭발을 방지하는 기능을 갖게 하였다.

#### 마. 수온계

온수저장탱크에 수온계를 부착하여 온수저장탱크 내부의 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 온수저장탱크의 온도가 설정온도 이하로 내려가면 제어변에 신호를 송출하여 보일러를 가동할 수 있도록 하였다.

#### 바. 송풍기

시설내부에 송풍기를 설치하여 온수저장탱크로부터 공급된 온수의 열량을 시설내부에 보내는 장치로서 라디에이터 방열판을 이용하여 온수의 열량을 방출한 후 송풍기를 가동시켜 시설내부에 온풍이 전달될 수 있는 구조로 하였다.

## 제2절 보일러의 구조설계

### 1. 보일러(Boiler)의 강도계산

시설원에 난방시스템은 시설내부의 온도가 설정온도 이하로 내려갔을 때 온수탱크에 저장된 온수가 시설내부로 순환하는 과정에서 송풍기에 의해 온수의 열량을 시설내부로 전달하는 장치이다. 현재 시설 1동(棟)-600평에 대해 석유 보일러는 160,000 kcal/hr를 사용하여 외기의 온도가 -4℃일 때 시설내부의 온도가 20℃ 정도 되도록 설정하고 있다. 따라서 본 난방시스템에서도 160,000 kcal/hr의 난방능력을 가져야 한다.

#### 가. 온수저장탱크

보일러에서 80~90℃ 정도로 가열된 온수가 시설내부에 열을 공급하고 4

0℃ 정도의 낮은 온도로 보일러에 순환되는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 따라서 시설내부의 온도가 설정온도 이하로 내려갔을 때 160,000 kcal/hr의 난방능력을 갖기 위해서는 펌프에 의해 온수저장탱크로부터 보일러(주 온수탱크)로 압입되는 유량 Q 는 시간당 4 ton 이상의 급탕 능력을 보유하여야 하므로 충분한 유량을 다음과 같이 설정하였다.

$$Q = 4500 \text{ l/hr} = \frac{4500 \times 10^{-3}}{3600} = 1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

펌프의 사양을 온양정 = 7 m, 흡입, 토출관 직경 = 50 mm, 최대 water power = 0.09 Kw을 선정하면 펌프의 출구에서의 압력은

$$0.09 \text{ kw} = \frac{p \cdot Q}{612}$$

$$p = \frac{0.09 \times 612}{75} = 0.7344 \text{ kg/cm}^2$$

이다. 이 압력이 보일러에 작용한다고 하면, 보일러 온수탱크(내경 :  $d = 665 \text{ mm}$ 로 설정)에 작용하는 인장응력은, 그림 11을 참조하면

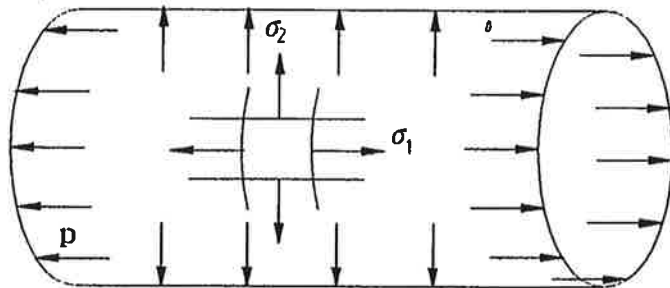


그림 11. 온수저장탱크에 걸리는 인장응력.

$$\sigma_1 = \frac{p \times r}{2t}, \quad \sigma_2 = \frac{p \times r}{t}$$

이고, 보일러 탱크는 304 Stainless steel을 사용하므로, 304 Stainless steel

의 항복강도  $\sigma_y = 30 \text{ kg/mm}^2$ , 연신율 = 55% 이므로 작용응력을 항복응력으로 놓으면

$$\sigma_1 = \sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2 = \frac{0.7344 \times 66.5/2}{2 \times t}$$

$$\sigma_2 = 3000 \text{ kg/cm}^2 = \frac{0.7344 \times 66.5/2}{t}$$

가 된다. 따라서 보일러 탱크에는  $\sigma_2$  의 응력이 가장 크게 작용한다.

$\sigma_2$  의 응력이 항복응력으로 작용할 때 보일러 탱크의 두께는

$$t = \frac{0.7344 \times 66.5/2}{3000} = 0.0082 \text{ cm} = 0.082 \text{ mm}$$

이상이 되어야 한다.

#### 나. 연소실 내의 연관

보일러(주온수탱크)로 압입되는 압력( $p = 0.7344 \text{ kg/cm}^2$ )이 그림 12와 같이 보일러의 연관 외부에 균일한 압력으로 작용하는 경우, 연관(외경 :  $d = 400.0 \text{ mm}$ )에 작용하는 압축응력( $\sigma_2$ )을 항복응력으로 놓으면

$$t = \frac{0.7344 \times 40.0/2}{3000} \approx 0.0049 \text{ cm} = 0.049 \text{ mm}$$

이상의 두께를 가져야 한다.

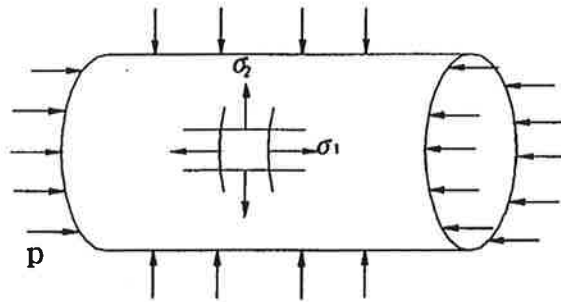


그림 12. 연소실 내의 연관 걸리는 압축응력.

다. 연소실 내의 수관

보일러(주온수탱크)로 유입되는 압력( $p = 0.7344 \text{ kg/cm}^2$ )이 보일러의 수관에 균일한 압력으로 작용하는 경우, 온수저장탱크와 같이 보일러 수관(외경 :  $d = 50.0 \text{ mm}$ )에는 인장응력이 걸리며 이 인장응력( $\sigma_2$ )을 항복응력으로 놓으면

$$t = \frac{0.7344 \times 5.0/2}{3000} = 0.00062 \text{ cm} = 0.0062 \text{ mm}$$

이상의 두께를 가져야 한다.

라. 연소실 벽면의 강도계산

편의상 보일러(주온수탱크)로 압입되는 압력( $p = 0.7344 \text{ kg/cm}^2$ )이 그림 13과 같이 보일러의 연관이나 수관의 중앙부에 집중하중으로 작용한다고 가정한다.

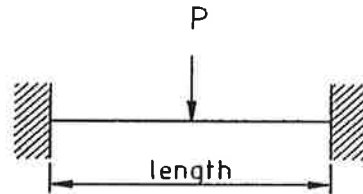


그림 13. 연관이나 수관에 작용하는 압력에 대한 모델링.

① 연관의 중앙부에 집중하중으로 작용하는 경우

보일러의 압력이 화실의 한쪽 면에 작용하는 하중(P)은

$$\text{하중(P)} = \text{단면적(직경} \times \text{길이)} \times \text{압력}$$

$$= (40.0 \text{ cm} \times 61.0 \text{ cm}) \times 0.7344 \text{ kg/cm}^2$$

$$\approx 1792 \text{ kg}$$

로 된다.

이 작용하중이 연관의 중앙부( $l = 30.5 \text{ cm}$ )에 집중하중으로 작용한다고 하면, 화실의 양단이 고정 지지되어 있으므로 최대 굽힘모멘트는

$$M = P \times l = 1792 \times 30.5 = 54656 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

이 굽힘모멘트에 의한 최대응력은

$$\sigma_{\max} = \frac{M y_{\max}}{I}$$

로 되는데, 먼저 단면 2차모멘트( $I$ )를 구하면

$$I = \frac{\pi d_o^4}{64} - \frac{\pi d_i^4}{64} = \frac{\pi (40^4 - d_i^4)}{64}$$

이고, 최대거리( $y_{\max}$ )는 연관 외경의 절반이므로

$$y_{\max} = 20.0 \text{ cm} \text{ 이다.}$$

따라서 최대응력( $\sigma_{\max}$ )는

$$\sigma_{\max} = \frac{M y_{\max}}{I} = \frac{54656 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 20 \text{ cm}}{\frac{\pi (40^4 - d_i^4)}{64}}$$

따라서 최대응력( $\sigma_{\max}$ )이 사용응력(항복응력) 이내로 되기 위한 화실

의 내경( $d_i$ )은

$$3000 \text{ kg/cm}^2 = \frac{54656 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 20.0 \text{ cm}}{\frac{\pi (40^4 - d_i^4)}{64}}$$

$$d_i^4 = 40^4 - 7423 \approx 2552577 \text{ cm}^4$$

$$\therefore d_i = 39.97 \text{ cm}$$

따라서 연관의 두께는 0.3 mm 이상이 되어야 한다.

② 수관(煙管)의 중앙부에 집중하중으로 작용하는 경우  
연관에서와 마찬가지로, 보일러의 압력이 수관의 한쪽 면에 작용하는 하중(P)은

$$\begin{aligned} \text{하중}(P) &= \text{단면적}(\text{직경} \times \text{길이}) \times \text{압력} \\ &= (5 \text{ cm} \times 61.0 \text{ cm}) \times 0.7344 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 224 \text{ kg} \end{aligned}$$

로 된다. 이 작용하중이 수관의 중앙부에 집중하중으로 작용한다고 하면, 수관의 양단이 고정지지되어 있으므로 굽힘모멘트는

$$M = P \times l = 224 \times 30.5 = 6832 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

이며, 이 굽힘모멘트에 의한 최대응력은

$$\sigma_{\max} = \frac{M y_{\max}}{I}$$

로 되는데, 먼저 단면2차모멘트(I)를 계산하면

$$I = \frac{\pi d_o^4}{64} - \frac{\pi d_i^4}{64} = \frac{\pi (5^4 - d_i^4)}{64}$$

이고, 단면의 도심으로부터 최대거리( $y_{\max}$ )는  $y_{\max} = 2.5 \text{ cm}$  이다.

따라서 최대응력( $\sigma_{\max}$ )는

$$\sigma_{\max} = \sigma_y = \frac{6832 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 2.5 \text{ cm}}{\frac{\pi (5^4 - d_i^4)}{64}}$$

따라서 최대응력( $\sigma_{\max}$ )이 사용응력(항복응력) 이내로 되기 위한 수관의 내경( $d_i$ )은

$$d_i \approx 4.75 \text{ cm}$$

따라서 수관의 두께는 1.5 mm 이면 충분하다.



## 2. 전열면적의 계산

전열면적은 한쪽 면이 연소가스에 접촉하고 다른 한쪽 면이 물에 닿은 부분의 면을 연소가스 측에서 측정한 면적이다. 본 연구의 보일러 전열면적은 (그림 10의 보일러 단면 형상 참조) 노통의 전열부 면적과 수관의 전열부 면적으로 구성되어 있다. 노통의 전열부 면적은 연소실과 직접 접촉하는 부위와 열전달 효율을 높이기 위하여 연소가스의 흐름을 조절하여 열효율을 증가시키기 위한 부위로 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned}\text{노통의 전열부 면적} &= \text{직접전열부 면적} + \text{연소가스 전열부 면적} \\ &\approx 11,800 \text{ cm}^2 + 21,200 \text{ cm}^2 \\ &= 33,000 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

또한 수관부의 전열면적은

$$\begin{aligned}\text{수관부 전열면적} &= \text{수관의 둘레} \times \text{길이} \\ &\approx 1,916 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

이 된다. 따라서 전체 전열면적은  $34,916 \text{ cm}^2$  이 된다.

본 연구에 의한 보일러는 물이 증발되기 전 단계인 물의 온도가  $80\sim 90^\circ\text{C}$  까지 가열하므로 증발을 등의 계산은 불필요하며, 연소가스의 흐름을 저해하지 않는 범위에서 전열면적을 크게 하는 것이 연소효율을 높이는 결과를 가져올 수 있다. 이 전열면적과 관련하여 연소실에서 물에 전달되는 열량은

$$Q = h A \Delta T$$

로 표현된다.<sup>3)</sup> 여기서,  $h$ 는 대류와 복사에 의한 열전달계수이고,  $A$ 는 전열면적이며,  $\Delta T$ 는 연소가스와 물의 평균 온도차이다. 이 공급열량이  $160,000 \text{ kcal/hr}$  이상 되도록 전열면적이 설계된다.

또한 보일러의 연소실 및 노통 부위를 제외한 보일러의 물탱크는 내부에 물이 가득 차있는 상태이다. 따라서 보일러 내부에 가득 채워진 물의 체적은 약 80리터 정도이다. 보일러의 순환유량이 4000 l/hr이고 물이 끓기 전까지 평균비열은 1 kcal / kg °C 이므로 보일러 내 물의 온도 상승  $\Delta T$ 는

$$Q = c m \Delta T$$

로부터 계산되며 이 온도차가 40°C 정도 되도록 설계하였다.

## 제 5 장 슬러지탄의 연소

슬러지탄의 연소는 최근의 가용 매립지의 감소와 폐기물 처리기준이 더욱 강화되면서 슬러지 처리의 실용적인 대안으로 대두되고 있다. 이 연소는 적절한 운전 조건하에서 운전하면 슬러지내 유기 잔유물을 완전 산화시킬 수 있으며 슬러지탄재 중에 중금속을 고용할 수 있어서 안정한 슬러지탄재와 양질의 배출가스를 얻을 수 있다. 슬러지탄을 적당히 준비하면 지속적으로 공급, 연소시킬 수 있기 때문에 연료로 사용 가능하다. 연소는 탄소(C), 수소(H) 및 황(S) 등이 산소와 결합하는 과정이고, 이때 열에너지와 연소생성물, 즉 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 물(H<sub>2</sub>O) 및 이산화황(SO<sub>2</sub>)등을 생성한다. 그러나 대부분의 고형물 개입 연소반응의 경우에는 고체성분 내에 미반응 성분이 잔류하게 되며 이 양은 연소반응 분위기에 의존한다<sup>4)</sup>. 또한 연소과정은 대기 질소를 전환시켜 원하지 않는 공해물질인 질소산화물(NOx)을 유발시키기도 하여서 이상적인 연소는 행해지기가 어렵다.

연료 내의 원소들이 공기나 산소 존재 하에 그들의 점화온도까지 상승하여 연소될 때 연료는 충분한 열을 발생해서 그 온도가 유지되는 한 연소는 계속된다. 즉, 이 온도에서는 연료가 산소와 결합하면서 발생하는 열이 외부로 손실되는 것보다 빨리 발생하여 연소가 계속 진행되게 되며 이 온도를 발화점(ignition temperature)이라 한다. 연소원소와 산소와의 빠른 반응에 해당되는 연소는 발화점 이하에서는 일어나지 않지만 연료의 어느 국소 지점에서 일단 발화점에 도달되면 그 다음 연소는 자동으로 진행된다<sup>5)</sup>.

다음의 그림 14는 본 연구에서 제조한 슬러지탄이 연소실 내에서 발화하여 연소하고 있는 장면이다. 슬러지탄내의 유기물이 갈탄이나 무연탄에 비하여 작기 때문에 큰 화염은 일어나지 않으나 온수를 가열하기에는 충분한 열량을 배출하고 있음을 알 수 있다.

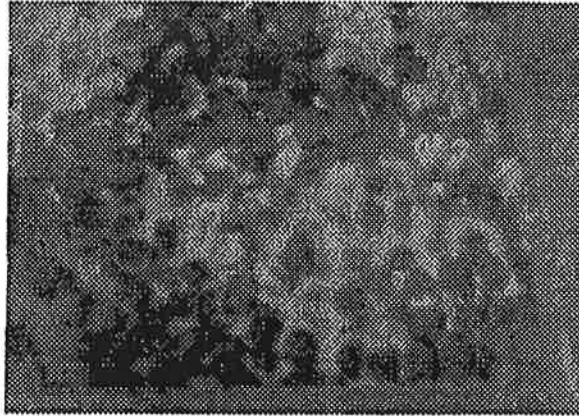


그림 14. 슬러지탄의 연소장면.

그림 15에 연소 전의 슬러지탄과 연소 후의 슬러지탄재를 비교하여 나타내었다. 왼쪽이 연소 전의 슬러지탄이고 오른쪽이 연소 후의 슬러지탄재이다. 연소 후의 슬러지탄재는 부피가 약간 감소하였으나 매우 딱딱하였다. 이 슬러지탄재를 이용하여 미생물 담체나 인조경량 골재를 제조할 수 있다. 그러나, 매우 딱딱한 슬러지탄재는 슬러지탄재의 활용면에는 도움이 되나, 보일러에서 슬러지탄재를 제거하는 것을 어렵게 만들므로 난방시스템에 별도의 재(ash) 이송기구가 필요하게 된다.

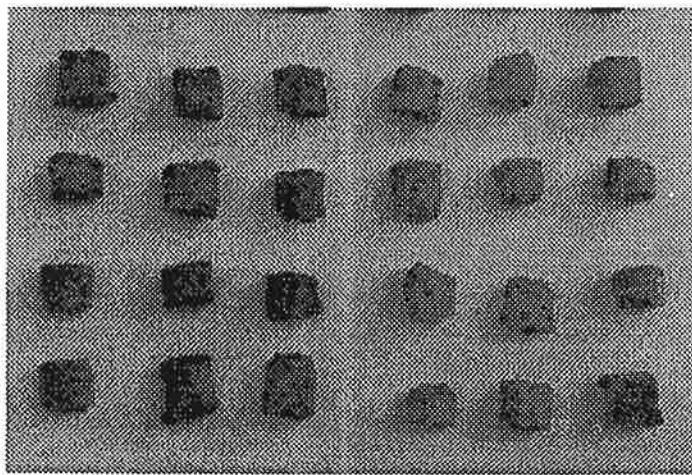


그림 15. 연소 전(좌)과 연소 후(우)의 슬러지탄.

앞의 그림 4에서 전기로 내에서 가열에 의한 건조 슬러지의 연소 가스를 분석, 도시하였다. 이 연소 조건은 실제 보일러 내에서 슬러지탄의 연소 환경과는 거리가 있지만 연소가스의 종류 및 함량을 분석하기 위해서는 좋은 자료가 된다. 이것은 연소 생성 가스별 분석이며 온도에 따라 발생량에 있어서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. CO<sub>2</sub>의 발생량이 상대적으로 가장 많았으며 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO 등의 가스는 미량 배출되고 있으나 실제의 보일러용 연소실 내에서 공기의 공급이 충분하다면 CO 같은 유해 가스의 발생은 거의 없으리라고 생각된다.

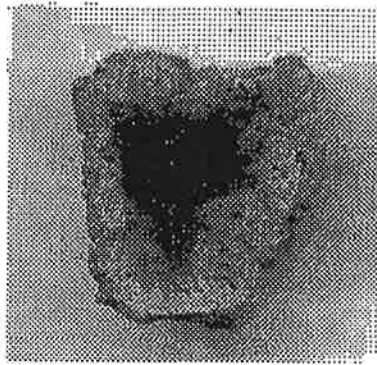


그림 16. 슬러지탄재의 단면사진.

그림 16에 실제 보일러 연소실에서 연소시키고 배출된 슬러지탄의 내부 단면사진을 제시하였다. 그림의 중앙 부분에 미연탄소분으로 보이는 검은 영역이 남아있다. 이 미연 탄소분의 존재는 슬러지탄이 가지고 있는 유기질 성분이 탈타고 남아 있음을 증명한다. 따라서 슬러지탄을 완전 연소시켜 연소열을 회수하기 위해서는 공기의 과잉 공급보다는 순수 산소의 공급을 위하여 oxygen pump 등의 부수적인 part가 부착될 필요가 있다. 이 oxygen pump를 통한 산소의 공급 확대는 미연탄소분의 함량을 줄이며 독성 가스의 배출을 완전히 차단할 수 있는 수단이 된다. 그러나, 슬러지탄을 활용하는 경우에는 다음의 응용제품 생산에 미치는 영향도 함께 고려해 보아야 한다.

## 제 6 장 슬러지탄재의 활용

본 연구는 유기·무기질 복합 폐기물인 생활 하수처리장 슬러지(하수 슬러지)를 농업용 보일러의 보조 또는 전용 연료로 활용하는데 있어서 슬러지가 함유하고 있는 유기물의 열량을 회수하며 부차적으로 생성되는 무기물을 이용하여 인조 경량골재, 화분석, 수처리용 담체, 수처리용 필터류를 제조하는 방법으로 버려지는 폐기물을 재활용하고자 한다.

연소한 슬러지탄재는 <표 2>와 같은 화학 조성의 미립분말로 평균 입경은 22.3 $\mu$ m, 비표면적은 0.4843 m<sup>2</sup>/g에 달하여 분쇄공정이 필요없는 극히 미분으로 반응성이 우수하고, 점토와 석탄의 Fly Ash와도 성분상 유사하여 슬러지 만으로 요업 원료로의 활용이 가능하다. 본 연구에서 슬러지탄은 보일러 연소실에서 400~800 $^{\circ}$ C 온도범위에서 유기물의 연소로 열량을 제공하고, 이 연소열로 인하여 무기질 성분의 가스(incineration)가 일어나서 약간의 소결이 진행된 후 배출된다. 따라서 추가의 열처리 온도 구간에 따라 다음의 <표 6>과 같은 요업제품으로의 생산이 가능하리라 예상된다.

<표 6> 슬러지탄재의 열처리에 따른 생산가능 제품.

추가 열처리온도	400~800 $^{\circ}$ C	800~1150 $^{\circ}$ C	1150~1250 $^{\circ}$ C
생산 가능 제품	<u>다공체</u> (수처리용 담체, 수처리용 필터, 수경재배용 분석)	<u>치밀소성체</u> (일반골재, 지반강화용 골재, 폴리머콘크리트용 골재)	<u>팽창소성체</u> (경량골재)

따라서 허용되는 열처리온도에 따른 슬러지탄재의 물성변화를 파악하여 최적 생산품을 선정하며 이러한 제품으로의 생산 및 활용 가능성에 대하여 연구하였다.

## 제1절 미생물 담체의 제조

슬러지가 상기한 온도 범위의 보일러 연소실내에서 연소된 후에 배출되는 것을 슬러지탄재라 하며, 이는 최소한의 소결이 진행된 즉 가소된 상태 -연소 열에 의한 미소한 소결로 소결강도는 약하지만 분말들의 necking이 상당히 진행된 상태-를 이룬다. 이들은 기본적으로 미세 기공을 다량 함유하는 특성을 갖는다. 따라서 이 슬러지탄재를 이용한 다공성 세라믹스로의 활용이 가능하리라 판단된다. 다공성 세라믹스에는 수처리용 미생물 담체와 각종 필터류 그리고 수경재배용 세라믹 미디어 등이 있다.

### 1. 하·폐수처리용 미생물 담체

하·폐수를 처리하는 방법으로 미생물을 이용하여 수중의 유기물을 산화 분해시켜 물을 정화시킨다. 이때, 이른바 미생물 담체(microbial media)에 고정된 미생물을 이용하여 하·폐수를 처리하는 생물막공정(biofilm process)은 부유상태의 미생물을 이용하는 활성슬러지 공정과는 달리 담체에 미생물이 부착되어 하·폐수와 연속적 또는 간헐적으로 접촉하는 공정이다.

생물막 공정에는 미생물이 담체에 부착되어 생물막을 형성하므로 증식속도가 느린 미생물도 외부로 유출되지 않고 증식될 수 있어 외부로의 유출슬러지 발생량이 적고 미생물종이 다양하게 출현하여 온도, pH, 충격부하의 변동에 강하며 난분해성 물질의 분해력도 강하다. 또한 생물막이 형성되므로 활성슬러지 공정과는 달리 슬러지 팽화(bulking)현상으로 인한 슬러지 부상 현상 등이 없어 운전관리가 용이하고 운전특성상 단위체적당 미생물 농도를 높게 유지할 수 있다는 장점이 있다.

생물막 공정의 처리효율을 증가시키기 위해서는 담체의 단위표면적당 미생물량과 생물막의 표면적이 증가되어야 하며 생물막은 담체표면에 미생물이 부착되어 형성 성장되므로 공학적인 측면에서 담체의 조건은 생물막을 빠르게

형성시키고 고농도의 미생물을 유지할 수 있는 특성을 가져야 한다. 미생물이 담체표면에 부착되어 생물막이 형성되는 현상은 상당히 많은 요소들이 복합적으로 작용하고 있으며, 특히 혼합배양(mixed culture)인 경우에는 이들 요소들의 영향에 대한 구체적인 사항은 아직 명확하지 않다.

## 2. 슬러지탄재의 미생물 담체로서의 물리적 특성

본 연구에서는 슬러지탄재의 미생물 담체로서의 물리적 특성을 조사하였다.

### 가. 담체의 표면 거칠기

이는 초기 생물막 형성 기간에 큰 영향을 미치며 그 부착량을 가름한다. 거친 표면에 미생물이 부착하는 속도가 빠른 이유는 다음과 같다. 첫째, 부착에 이용될 수 있는 표면적이 넓어지며, 둘째, 거친 표면의 틈은 전단력에 보호될 수 있는 피난처가 된다. 즉 담체의 표면 거칠기가 미생물 부착에 영향을 주지만 micro pore의 존재와 입자개체의 표면 형상 등도 미생물 부착 조건에 영향을 준다<sup>6)</sup>.

그림 17은 800℃에서 1000℃ 사이에서의 열처리에 의한 슬러지탄재의 표면 형상이다. 이 온도영역에서 열처리한 이들의 색상은 황토색에 가까웠으며 온도의 증가에 따라 점차 갈색조가 강해지는 양상을 보인다. 하단 좌측이 800℃, 하단 우측이 900℃, 상단이 1000℃에서 각각 열처리한 것이다. 이들의 형상은 물론 자유로이 제조가 가능하나 본 연구에서 사용한 토출기의 토출구 설계가 원형이었기 때문에 실린더형의 모습을 보인다. 그러나 표면의 거친 양상은 상기한 생물막의 형성에 조력이 되며 이들의 미소 소결에 의한 기공의 존재도 예상된다. 따라서 800℃~1000℃ 영역의 온도에서 열처리한 슬러지탄재는 물리적인 특성에 있어서 미생물 담체로서 손색이 없을 것으로 판단된다.



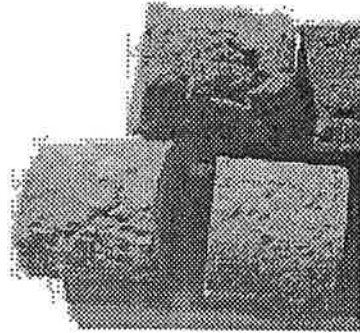


그림 17. 미생물 담체용 슬러지탄재의 표면의 형상.

그림 17과 같이 슬러지탄재로부터 제조된 미생물 담체의 조직형태에 있어서 표면의 거칠기는 보통 입자크기와 성형압 그리고 소성온도 등의 함수이다. 입자크기는 성형체의 제조에 사용되는 입자의 크기를 의미한다. 입자크기가 클수록 성형체 표면의 거칠기는 커지며 입자크기가 미세할수록 표면의 조직형태는 더 매끈해진다. 이는 성형체의 성형압과도 상관관계를 갖는다. 즉, 성형압이 높으면 높을수록 입자들의 충전이 더 치밀해져서 표면의 조직형태도 매끈해지는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 토련기를 이용한 슬러지탄의 제조과정 이므로 슬러지의 수분함량과 토출압이 관여하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서 사용한 토련기(토출구 직경: 30mm, 토출속도: 1cm/s)에 적절한 수분량은 45~30%정도이었으므로 약 40% 전후의 수분이 차지하였던 체적이 건조 후 기공을 형성한다(이때 건조수축이 수반되기 때문에 더 낮은 값을 보이는 하지만). 이는 연료가공용 토련기의 특성에 따라 다소 변화가 가능하다. 또한 소성온도에 따른 표면 거칠기의 변화가 있다. 일반적으로 소성온도의 증가에 따라 소성체는 치밀하게 소결되며 결과적으로 표면의 거칠기는 상대적으로 감소하게 된다. 따라서 임의의 거칠기를 갖는 성형체의 제조(예를 들면 별 모양의 슬러지탄 제조)를 위해서는 최적 거칠기를 위한 제조과정의 고려가 필요하다.

#### 나. 담체의 기공

담체에서의 생물막 발달은 주로 물질 표면의 갈라진 틈새와 기공 내에서 일어난다. macro pore를 가진 다공성 물질은 다량의 미생물들을 함유할 수 있고 확산경로에 따른 제한이 없으며 공극지름이 미생물의 축적에 큰 영향을 미치게 된다<sup>7)</sup>. 미생물의 부착에 미치는 기공의 영향을 고찰하기 위해 슬러지탄재의 재열처리 온도에 따라 시편을 마련하였으며 열처리온도의 범위는 800~1000℃였다. 그림 18은 재열처리 온도에 따른 기공의 구조이다. 보통의 세라믹 성형체는 온도 상승에 따라 소결이 진행되어 점차 치밀해 진다. 이도 마찬가지로 초기의 미소 소결에 의한 열린 구조에서 점점 치밀 소결이 진행되어 폐쇄 구조로 전이함을 보여준다. 이러한 구조 변화는 open pore가 많은 구조에서 closed pore가 많아지는 구조로의 전이이다. 따라서 최적 기공도가 요구되는 다공성 세라믹스의 경우에는 이들 pore의 구성 비율이 중요하므로 인위적인 연소체(카본 등)를 부과하여 조절하기도 한다.

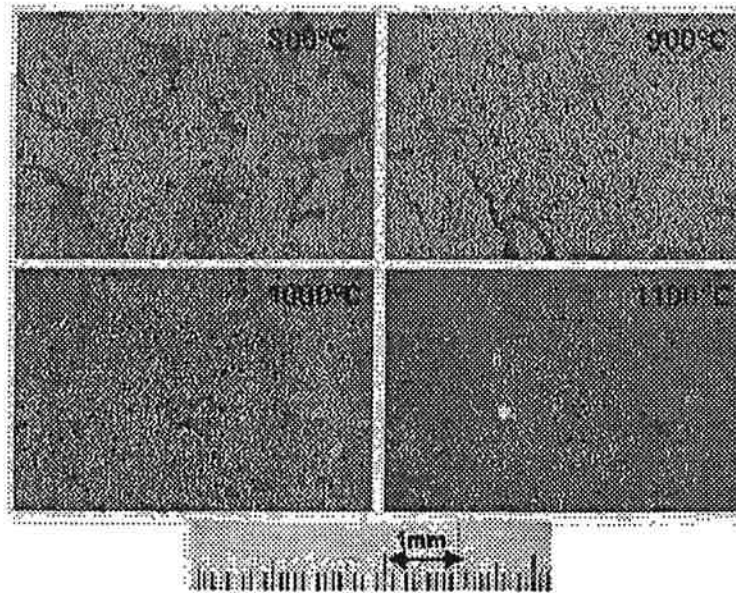


그림 18. 재열처리(800~1100℃)에 의한 슬러지탄재의 연마면의 형상.

담체에 고정된 미생물을 이용하는 생물막 공정은 그 성능과 효율성으로 많은 관심을 끌고 있다. 생물막 공정에서는 담체 표면에 생물막이 빠르게 형성되고 고농도의 미생물을 유지하는 것이 공정 성능을 좌우하는 중요한 요소이다.

본 연구에서는 슬러지탄재의 미생물 담체로서의 물리적 특성을 살펴본 바 미생물의 생물막 형성에 대한 고찰은 많은 시간이 소요되는 관계로 검토하지 못하였으나 물리적인 물성은 검토가 가능하였으며 다공성 담체로서의 응용가능성을 제시하였다.

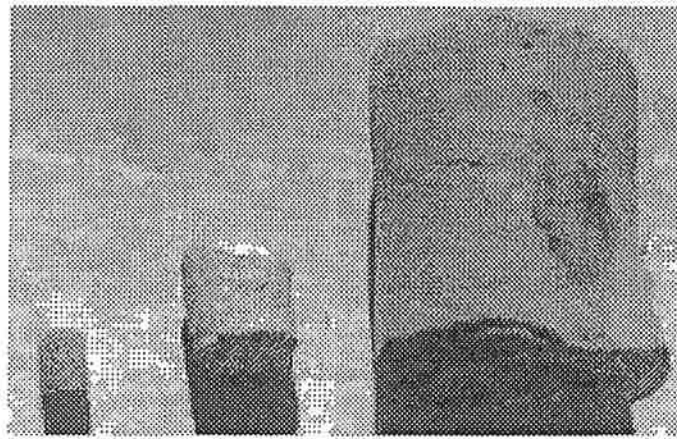


그림 19. 국내에서 시판 중인 3가지 유형의 미생물 담체.

그림 19에 제시한 국내 시판 미생물 담체(소, 중, 대)와 그림 17의 슬러지탄재로부터 제조된 담체에 대한 물성의 분석치는 다음의 <표 7>과 같다. 여기에서 겉보기 비중은 시편의 표면부에 존재하는 open pore까지 고려한 비중이고 부피비중은 시편의 외부 형태를 기준으로한 비중을 의미한다. 미생물 담체의 특성 중에서 가장 중요한 것은 흡수율이며 이는 기공율과 함께 미생물의 고착 면적에 대한 정도를 말한다. 슬러지탄재의 물성치 중에서 비중과 흡수율은 시판용 담체의 중간값 정도에 해당하였으며 이는 슬러지탄재의 미생물 담체로의 활용에 대한 가능성을 보여준다.

〈표 7〉 국내 시판 미생물 담체(소, 중, 대)와 슬러지탄재에 대한 물성

물 성	소	중	대	슬러지탄재
겉보기 비중	1.90	2.03	2.27	2.30
부 피 비 중	1.13	0.92	1.25	1.07
겉보기 기공율(%)	40.49	54.51	44.79	53.56
흡 수 율(%)	35.90	59.18	35.85	50.15

## 제2절 발포성 경량골재의 제조

경량골재의 제조에 있어서는 각종 건축물의 대형화와 고층화에 따른 구조물 자체의 경량화 요구로 여러 종류의 인조 경량 골재가 개발되어 왔으나 발포 플라스틱을 이용한 경우는 골재 자체 강도가 낮고, 연탄재나 규조토 그리고 혈암 등을 원료로 한 경우에는 공정이 복잡하다든지, 부존량이 미비하다든지, 제조비용이 많이 든다는 등의 단점이 있다.

따라서, 최근의 경량골재에 대한 수요 증가에 따라 건축 수요가 높은 대도시 주변에서 쉽게 구할 수 있고 저렴한 가격으로 대량 공급이 가능한 버려지는 폐기물을 이용하여 경량골재를 제조할 수 있다면 자원의 재활용과 함께 환경의 재오염도 줄일 수 있는 일석이조의 이점을 갖는다. 슬러지탄재는 슬러지의 유기물이 연소되고 남은 무기질로서 경량골재에 활용이 가능하다.

### 1. 발포성 경량골재의 제조과정

경량골재는 중량이 가벼울 뿐만 아니라 단열, 방습, 흡음(방음)효과 등이 우

수하여 1900년대 초부터 사용되어왔다. 초기에는 주로 비구조용으로 사용되었으나 최근에는 대형교량, 고층건물, 대형 판넬 등 광범위하게 사용되고 있다. 건설공사의 급속한 증가와 함께, 조만간 인공경량골재를 생산하는데 있어 환경훼손을 방지하고 신건축재료의 욕구, 건축비절감, 에너지 절약에 부응할 제조방법이 필요하다.

경량골재용 발포세라믹스는 천연원료와 발포성 화산재를 사용하며 1250℃ 정도의 소성온도에서 결정을 이룬다. 발포세라믹스는 시멘트계의 제품보다 경량이면서 단열 및 방음성능이 우수하고 인체에 무해한 장점이 있지만 가격이 비싼 단점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 최근에는 폐기물 및 그 부산물을 활용하는 발포세라믹스 제조기술이 활발하게 개발되고 있다. 발포세라믹스에 활용할 수 있는 폐기물로는 플라이애쉬, 제지애쉬, 슬래그, 염색공정 중에 발생하는 폐슬러지와 폐유리 등이 있다. 폐기물 활용 발포세라믹스는 천연의 고품도, 장식, 운모, 규사, 석회석 외에 염색공단의 폐슬러지와 유리공장의 폐유리가 부원료로 이용되고, 발포제로 탄화물 일부가 첨가된다. 이와 같은 천연의 무기원료와 폐부산물 및 발포제를 입도조정을 통해 충분히 혼합 성형한 후, 일반 도자기나 타일보다 비교적 낮은 온도인 1050~1150℃에서 소성하면 폐기공(閉氣孔)을 갖기 때문에 제품의 흡수성이 거의 없는 다공성 고품도 경량 발포세라믹스 (밀도 0.9g/cm이하)를 제조할 수 있다.<sup>8)</sup>

폐기물 활용 발포세라믹스의 제조과정은 다음과 같다.<sup>9)</sup>

#### ①원료의 혼합

천연무기원료 및 폐슬러지, 폐유리의 입도를 먼저 선정한다. 최적 소결(燒結) 조건에서 반응성을 최대로 증대시키기 위해서는 입자들의 표면적을 크게 하여 반응면적을 크게 해주는 것이 좋으나, 너무 입자가 미세하면 굵은 입자와의 혼합시 불균질해 질 수 있기 때문에 입도 범위를 적절하게 조절하여야 한다. 원료혼합은 먼저 장식, 고품도, 제올라이트, 규사 등의 천연원료를 건식 분쇄하고 0.125~0.25mm 범위에서 입도를 고르게 맞춘다. 폐유리와 건조시킨 폐슬러지는 별도로 0.125mm 정도의 입도가 되도록 건식 분쇄한다. 적절한 입도로 분

쇄한 천연 원료, 폐유리, 폐슬러지와 발포제에 물을 30~50% 범위 내에서 섞어 혼합한다.

## ②성형

제품의 성형은 물과 혼합된 원료를 볼밀(Ball Mill)에 넣어 미분쇄하고, 그 슬러리를 압출 성형하여 내화갑(耐火匣)내에 넣고 120~150℃에서 충분히 건조시킨 후 시편의 균열 유무를 확인한 후 전기로에 넣어 소성한다.

## ③발포팽창 및 소성(燒成)

건조가 완료된 재료를 1050~1150℃ 전기로에서 소성 시킨다. 소성은 약 1100℃까지 약 10℃/min로 승온하고 최고 온도에서 30~50분간 유지시키면 재료의 발포가 시작되고 내부에 폐기공(閉氣孔)이 형성된다. 그 후 결정화로 인한 기계적 강도를 얻기 위하여 700~800℃까지 8~10℃/min로 냉각을 실시하며 다시 400~500℃까지 약 4~6℃/min의 하강속도로 서냉(徐冷)하면 발포세라믹스가 제조된다.

이와 같이 제조된 폐기 물 활용 발포세라믹스의 물리적 특성은 휨강도 70~80kgf/cm, 밀도 0.8~0.9g/cm, 흡수율 0.2% 이하로 나타난다. 또한 제품이 경량이며, 다공질이기 때문에 단열, 방음성이 우수하다. 따라서 발포세라믹스에는 많은 소재들이 사용될 수 있으며 하수 슬러지 또한 좋은 원료가 될 수 있다.

## 2. 경량골재용 슬러지탄재의 발포성

앞서 언급한 미생물 담체의 제조와는 달리 경량골재용 슬러지탄재의 공정에는 경량화를 이루기 위한 발포공정이 부가된다. 하수슬러지로부터 제조된 슬러지탄재를 1100℃ 이상의 온도로 재가열 하면 발포할 가능성이 높아진다. 그림 20의 열처리온도에 따른 슬러지탄재의 외형을 보면 1150℃에서부터 발포가 시작되어 1250℃까지 지속 발포 팽창함을 볼 수 있다. 그림 20은 800, 900, 1000, 1100, 1150, 1200, 1250℃에서 각각 재열처리한 슬러지탄재이다. 왼쪽에서 오른쪽으로 온도가 증가하는 순서이다.

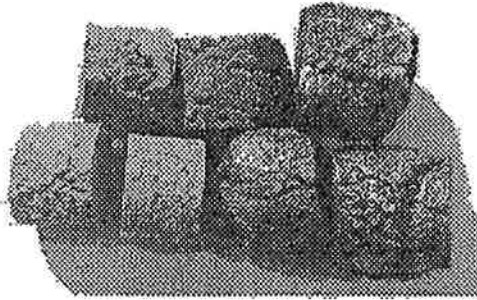


그림 20. 슬러지탄재의 열처리에 의한 외부 형상의 변화.

위의 그림 20의 슬러지탄재의 발포된 온도 영역의 것만을 단면을 잘라내고 연마한 후 현미경으로 관찰한 슬러지탄재의 단면 사진인 그림 21을 보면 내부 발포의 양상이 잘 드러난다. 상술한 바 있는 경량 발포체의 조건인 표면부가 내부와 외부를 차단하고 내부에서 발생하는 가스를 보유하여 발포해야하는 조건을 잘 수행하고 있다. 가장 오른쪽이 1150℃, 중간이 1200℃, 가장 왼쪽이 1250℃에서 열처리한 경우이다. 온도가 증가할 수록 기포의 크기가 점점 커지며 전체 크기가 증가하는 경향을 보인다.

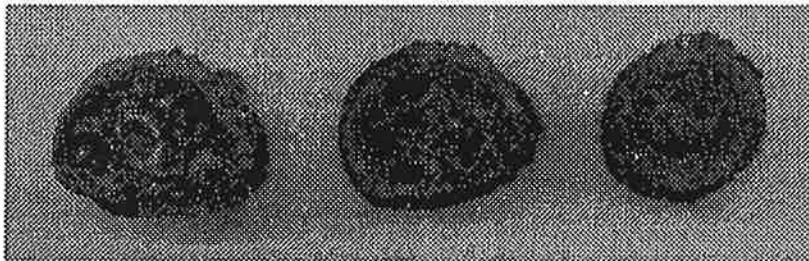


그림 21. 열처리온도에 의한 슬러지탄재의 발포성(1150℃~1250℃).

이와 같은 발포성은 유기물이 차지하고 있던 용적이 그 만큼의 기공을 제공하여 최종 경량골재의 비중 저하에 근본적인 역할을 한다.

1200℃ 부근에서 일어나는 발포 작용은 슬러지에 함유된 미연 탄소분과 각

성분의 고온 반응에 의한 것으로 구상체의 표면이  $Fe_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  등의 성분  
 에 의해 쉽게 유리화 되어 내부와 외부를 격리하므로 내부에서 발생된 가스  
 (일부 무기물에서 열분해 한  $CO_2$  가스와 공기포 그리고 미연 탄소분)가 빠져  
 나오지 못하고 골재 내부에 포착되어 밀폐성 고온 환원 분위기 때문에  $Fe_2O_3$   
 등이 환원 반응( $2Fe_2O_3 \rightarrow 4FeO + O_2$ )하여 발생된 산소와 미연 탄소분이 반  
 응하여  $CO_2$  가스가 발생되어 발포 작용을 조장하여 다공성의 경량체가 된다.  
 유리질화된 표면의 변형을 막기 위해 급냉시켜서 목적하는 경량골재를 제조한  
 다. 상기한 바와 같은 방법으로 제조한 인조 경량골재는 흡수율이 극히 낮고  
 내부에 미세 기공이 형성되어 기계적 강도가 높으면서도 경량성이 우수하여  
 구조용 골재로 사용 할 수 있는 고품위의 것이 가능하다.

다음의 <표 8>은 열처리 온도에 따른 슬러지 성형물의 겉보기 비중과 수축  
 율 그리고 그 때의 압축 강도이다. 발포특성이 조건을 만족시킨다고 하더라도  
 비중과 경량체의 자체강도가 조건을 만족시키지 못한다면 골재로서 활용하기  
 가 어렵다. 따라서 비중과 자체 강도를 검증해야할 필요가 있다.

<표 8> 열처리 온도에 따른 슬러지탄재의 물성.

특성 \ 온도(℃)	1050	1100	1150	1200
부피 수축율 (수축%)	44.5	59.1	60.1	46.3
겉보기 비중	1.39	1.84	1.89	1.16
압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	254.9	348.8	357.1	297.3

위의 특성중 수축율은 이미 언급한 분말의 미립도와 각 성분간의 반응에 따  
 라 달라지며 높은 값일수록 치밀화가 더욱 진행됨을 의미한다. 따라서, 압축강  
 도가 가장 높고 발포변형이 없는 최적 소결온도는 1150℃로 치밀소성체에 이  
 용이 가능하지만 이때의 수축율이 60%에 달하여 여러 장점에도 불구하고 정



형 요업 제품의 생산에는 이용되기 어렵다는 것을 알 수 있다. 1200℃에서 겉보기 비중이 크게 저하하는데 이는 골재 내부의 발포로 인한 총 부피의 팽창이다. 이 때의 겉보기 비중은 1.16, 흡수율은 0~3%, 압축강도는 297.3kgf/cm<sup>3</sup>으로 각종 목적의 경량 콘크리트제조에 필요한 구조용 경량골재에 적합한 값이다.

그림 22와 그림 23은 상기한 수치 자료를 도해한 것이다. 부피수축율과 겉보기비중은 당연히 반대의 경향을 보이며 1150℃에서 변곡점을 각각 보여준다. 그리고 압축강도는 1150℃를 전후하여 최대값을 보인다. 이를 바탕으로 1150℃까지는 소결이 진행되어 부피가 수축하며 높은 강도를 보이는 단계이며 이 온도를 넘어서면 발포하여 오히려 부피가 팽창하며 압축강도가 감소한다. 따라서 슬러지탄재로부터 경량골재를 제조하기 위한 임계온도가 1150℃임을 알 수 있다.

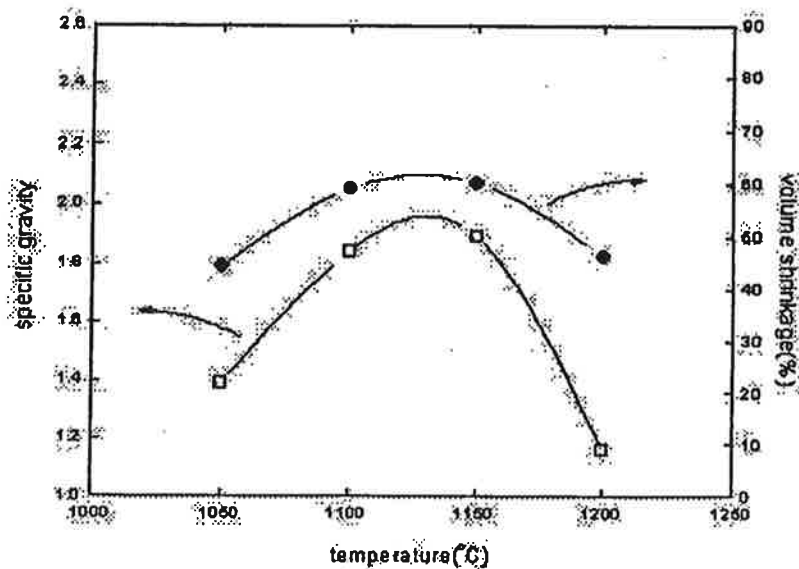


그림 22. 슬러지탄재의 재가열온도에 따른 비중과 수축율의 변화.

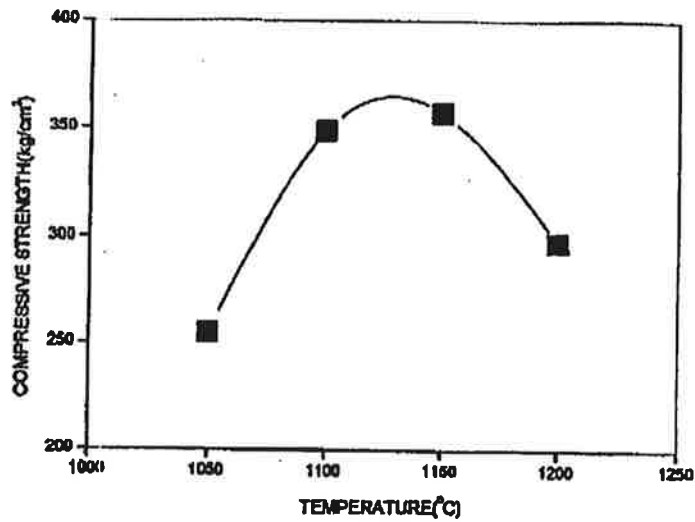


그림 23. 슬러지탄재의 재가열온도에 따른 압축강도의 변화.

그림 24는 그림 22의 슬러지탄재의 재가열온도에 따른 수축율의 변화를 가압성형한 슬러지 성형체의 가열온도에 따른 수축율과 비교하기 위하여 도시한 것이다. 하수슬러지를 건조만한 건조슬러지로 성형한 경우와 800°C에서 하소한 슬러지로 성형한 경우의 두가지인데 건조슬러지와 하소슬러지 모두 1000~1100°C 영역에서 급격한 수축이 발생하여 건조슬러지의 경우 1000°C에서 약 20%, 하소슬러지의 경우 약 10%의 수축율을 보인다. 그리고 이 온도 이상에는 급격히 수축율이 증가함을 알 수 있다. 상기한 바와 같이 이 특성이 슬러지로부터 정형요업제품을 제조하기 어려운 요인이 된다.

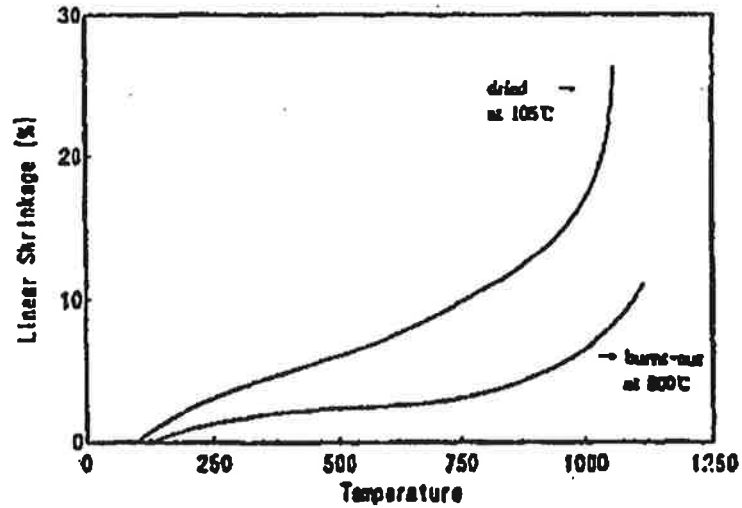


그림 24. 건조슬러지와 하소슬러지 성형체의 열간 수축변화.

그림 25는 슬러지탄재의 소성에 있어서 부과되는 산소분압에 따른 발포성의 변화이다. 산소분압이 높아지면 질수록 발포성이 점차 저하함을 보여준다. 앞서 언급한 바와 같이 보일러 연소실 내의 분위기(산소분압)가 슬러지탄재의 미연탄소분의 함량에 영향을 미치고 이는 다시 슬러지탄재 소성체의 발포성에 영향을 미친다. 이와 같은 현상은 경량골재의 생산을 위해서는 다소의 미연탄소분이 내재해야 하고 이 미연탄소분의 영향으로 경량체를 제조할 수 있음을 의미한다.

미연탄소분에 의한 내부의 뭉친 구조를 “혹심”이라 한다.<sup>10)</sup>  $P_{O_2}=0.7kPa$  이하의 시료에서는 혹심이 형성되었으며,  $P_{O_2}=0.6kPa$  이하에서는 내부에 가스가 발생하여 외측의 치밀층을 확대하여 팽창된 구조를 보여준다. 따라서 소성체의 부피밀도는 산소분압에 크게 좌우되며 이 산소분압은 연소실의 분위기에 좌우되기 때문에 연소실 내의 산소 분압이 최적 관리 되어야 한다.

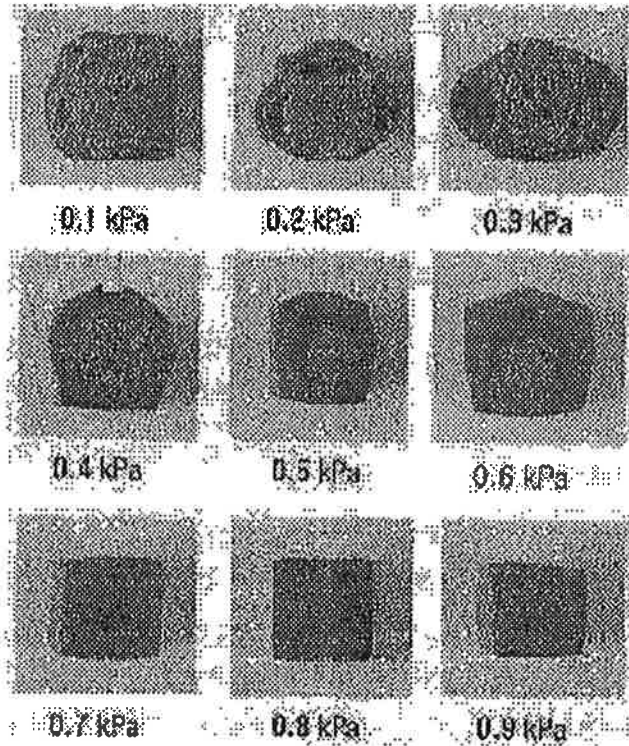


그림 25. 산소분압에 따른 슬러지탄재의 단면 형상( $P_{O_2}=0.1-1.0\text{kPa}$ ).

그림 26은 실제 보일러 연소실에서 연소된 슬러지탄재의 단면사진이다. 이 슬러지탄재의 형상을 보면 내부에 미연탄소분의 잔존이 있으므로 해서 재열처리시에 흑심을 형성하고 이때의 산소분압에 따라 그 팽창성이 변화하게 된다.

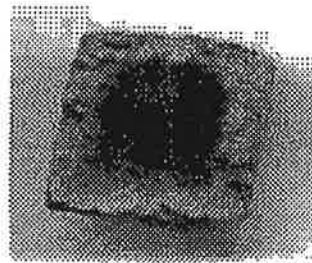


그림 26. 보일러 연소실에서 연소된 슬러지탄재의 단면사진.

이들의 열처리온도에 따른 발포체의 미세구조를 그림 27에 보였다. 온도가

증가함에 따라 내부 기공(closed pore)의 크기가 점차 커지며 상대적인 기공의 크기의 편차가 더욱 극심해져서 1250℃의 경우에 아주 큰 수mm의 기공과 1mm 이하의 기공이 공존하는 반면, 1150℃의 경우에는 0.5mm~1.0mm의 기공이 균일하게 분포하고 있는 구조를 보인다. 이렇게 균일한 기공의 분포는 전술한 바와 같이 발포체의 자체 강도를 증가시키는 결과를 준다. 따라서 임계온도 1150℃의 결정이 미세구조와도 잘 일치한다.

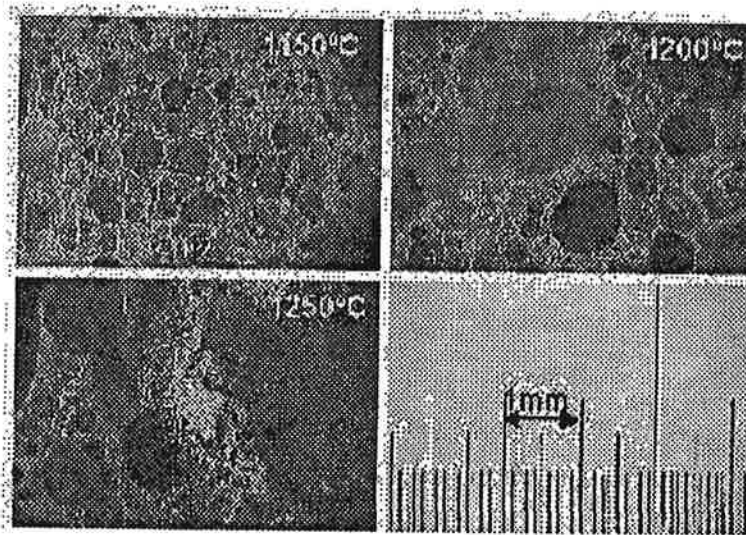


그림 27. 1150~1250℃범위에서 열처리된 숯지탄재의 미세구조.

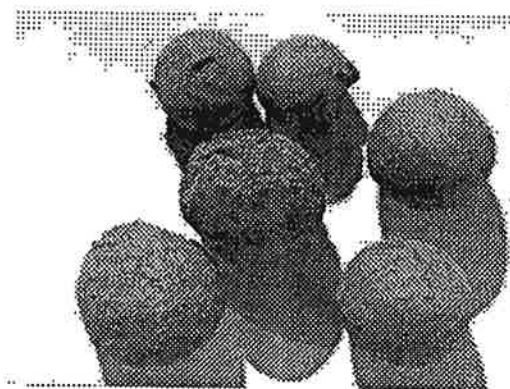


그림 28. 구형 경량골재 사진.

그림 28은 구형으로 경량골재를 제조하기 위하여 토런기에서 배출된 pellet 을 회전원통 속에 넣고 수분간 회전 시켜 구형화한 다음 소성하여 제조한 구형 경량골재의 외형 사진이다. 이와 같은 구형의 것은 성형 단계에서부터 구형 화가 이뤄져야 하며 이 구형의 성형체를 보일러 연소실에 투입, 연소시킨 후 배출하는 공정은 같지만 최종 재열처리공정에서 rotary kiln을 사용하여야 하기 때문에 전용 설비가 요구된다.

### 3. 인조경량골재의 압축강도

슬리지탄재로부터 제조된 경량골재의 특성을 고찰하기 위하여 인조경량골재를 사용한 경우와 천연골재를 사용한 경우를 비교 분석하였다. 콘크리트 시편의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm 였으며 7일과 28일 동안 습식 양생 후 압축 강도를 비교 측정하여 그 결과를 <표 9>에 제시하였다.

<표 9> 양생 시간에 따른 콘크리트 시편의 압축강도 변화.

양생기간(일)	골재종류	압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	
		natural	lightweight
7		95.3	92.4
28		154.7	132.9

여기서 콘크리트의 배합 비율은 sand/aggregate=0.75, cement/(sand+aggregate)=0.17, H<sub>2</sub>O/(cement+sand+aggregate)=0.54 이었다. 7일 양생 후 측정된 콘크리트의 압축강도는 본 연구에서 제조한 경량골재를 사용한 경우에 92.4kg/cm<sup>2</sup>, 일반골재를 사용한 경우에는 95.3kg/cm<sup>2</sup>를 보였으며, 28일 양생 강도는 경량골재의 경우 132.9kg/cm<sup>2</sup>, 일반골재의 경우 154.7kg/cm<sup>2</sup>의 값을 보였다. 양생기간에 상관없이 경량골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 일반골재를 사용한 경우에 비하여 다소 낮은 값을 보였지만 이는 경량골재와 일반골재를

자체의 강도 값의 편차에 기인한 것이다. 그러나 경량골재 콘크리트의 압축강도는 일반 골재를 사용한 경우에 비하여 다른 기준을 적용하며 일반골재와의 압축강도 편차가 아주 작은 값이므로 일반골재의 대체도 가능하리라 판단된다.

인공경량골재는 종래에는 경제적인 이유로 토목구조물에는 그다지 사용되지 않았는데 최근에는 천연골재의 가격상승으로 말미암아 인공경량골재가 부각되고 있으며 구조물의 경량화에도 유리하여 토목구조물에도 사용되고 있는 추세이다. 그러나 고강도와 내구성을 필요로 하는 콘크리트에는 인공경량골재를 사용하지 않는 것이 좋으며 동태를 받을 염려가 있는 프리스트레스 콘크리트 부재에도 인공경량골재를 사용하지 않는 것이 좋으나, 일본에서는 PC교에 인공경량골재를 사용하여 좋은 결과를 얻고 있으며 철도교의 경우에는 내구성을 고려하여 인공경량골재와 천연골재를 적당히 혼용한 공법도 시도되고 있다. 따라서 경량골재의 필요성은 점차 커가고 있으며 여기에 저렴한 비용으로 생산되는 양질의 인공경량골재의 공급이 허용된다면 인공경량골재의 이용을 또한 커질 것으로 생각된다.

## 제 7 장 결 론

하수슬러지(sewage sludge)는 유입되는 하수 1m<sup>3</sup>당 평균 0.20~0.25kg으로 전국의 소화 탈수슬러지의 일일 발생량은 현재 약 100만톤에 달하며 이들 대부분이 매립되거나 해양투기 되고 있으나 국제협약에 의하여 2001년부터는 매립 및 해양투기가 금지되므로 비료화와 소각 등의 탈수슬러지의 처리방안에 대한 논의가 심각하게 진행되고 있는 바, 가장 타당성이 있다고 믿어지는 처리방안으로서 탈수슬러지를 pellet화하여 건조 후 고형물 중에 함유되어 있는 유기물성분을 농업용 보일러에서 연소시킨 후 열량을 회수하며 슬러지탄재를 담체나 경량골재로 재활용할 수 있는 방법에 대하여 실험, 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 슬러지(Sludge)는 수처리(상수, 하수, 폐수처리 포함) 결과로 처리수와 분리되는 농축오염물질로서 중력에 의한 침전고형물 뿐만 아니라 부벽작용으로 침전지 표면에 뜬 스컴(Scum), 스크린(Screen)에 걸린 큰 물질인 스크리닝(Screening)도 포함하는 포괄적 의미를 지니고 있는 반고형 액체(Semisolid liquid)로서 환경보전의 관점에서 불 때도 중금속함유 등 위험한 잠재력을 가지고 있고 슬러지내에 다양한 물질들을 함유하고 있어서 이에 의한 2차 오염이 발생하지 않도록 처리, 처분하는 것이 중요 관점이 된다.
2. 하수처리장에서 탈수 후 유출되는 슬러지는 약 80%에 달하는 수분을 함유하고 있었으며 일정한 형태로의 가공을 위해서는 최종 함수율을 40% 이하로 하는 것이 바람직하였다. 건조 슬러지 내의 고형분에 대한 무기질, 유기질 성분의 중량비는 약 3:2의 값을 가졌으며 소위 유·무기질 복합 구성을 보였다. 건조슬러지에 함유된 유기물의 함량은 37wt%정도로 분석되었다. 건조 슬러지에 함유된 유기물의 발열량 및 유황분 함량은 각각 1,844kcal/kg와 1.39%였다.



3. 하수슬러지를 이용하여 보일러용 연료를 제조하기 위하여 일종의 토런기의 직경 30mm인 토출구를 빠져나온 원통형 슬러지 시료를 cutting하여 슬러지탄(pellet : 직경 30mm, 길이 30mm)을 만들었다.
4. 온수 가열을 이용한 온풍난방기를 설계 제작하였으며 이 보일러 연소실에서 슬러지탄을 연소시켜 보았다.
5. 슬러지탄은 연소 후 부서지지 않고 형상이 보존된 채 딱딱하게 수축되었으며, 이것은 슬러지탄재의 활용에는 필요한 요소이나 난방시스템에는 별도의 타고 남은 재의 이송기구를 필요로 하였다.
6. 슬러지탄의 연소는 갈탄에 비해 화력은 약하지만 온수를 공급하기에는 충분한 열량을 얻을 수 있었다.
7. 슬러지탄재의 외부는 연한 미색을 보였으며 내부에는 검은 미연탄소분을 함유하였다. 이를 800℃에서 1000℃ 사이에서 열처리하면 온도의 증가에 따라 황토색이 진해지며 점차 갈색조가 강해지는 양상을 보임과 동시에 open pore의 크기가 점차 감소하는 경향을 보였다. 슬러지탄재의 부피비중은 1.07, 흡수율은 50.15%로 3종의 국내시판 미생물 담체의 평균치 정도를 보였다.
8. 슬러지탄재를 1100℃ 이상의 온도로 재가열 하면 온도의 증가에 따라 짙은 갈색조가 강해졌으며 1150℃에서 부피수축율과 겉보기 비중이 각각 가장 높은 60.1%와 1.89를 보였다. 그리고 자체의 압축강도도 1150℃에서 최대치인 357.1kg/cm<sup>3</sup>을 보였으며 그 이상의 온도에서는 부피의 팽창과 함께 낮은 값을 보이는 경향을 보였다.
9. 또한 슬러지탄재의 발포현상은 1250℃까지 지속되었으나 온도가 증가할수록 기포의 크기가 점점 커지며 전체 크기가 증가하였다. 1200℃에서 겉보기 비중이 크게 저하하여 1.16을, 흡수율은 0~3%, 압축강도는 297.3kgf/cm<sup>3</sup>으로 각종 목적의 경량 콘크리트제조에 필요한 구조용 경량 골재에 적합한 값을 보였다.

10. 토련기에서 배출된 pellet을 회전원통 속에 넣고 수분간 회전 시켜 구형화한 슬러지탄은 소성 후에도 구형을 유지한 경량골재로 제조가 가능하였다.
11. 슬러지탄재로부터 제조한 경량골재를 사용한 콘크리트의 28일 압축강도는 천연골재의 경우에 154.7kg/cm<sup>2</sup>, 경량골재의 경우에 132.9kg/cm<sup>2</sup>의 값을 보여서 콘크리트용 골재로서 손색이 없는 결과를 보였다.

## 참고문헌

- 1) 박종서, 시설원예의 장기육성계획, 월간냉동공조기술, Vol.12(1995), No.4, pp.42-47.
- 2) J.M.Gere & S.P.Timoshenko, "Mechanics of materials", 3rd ed. 1991, Chapman & Hall.
- 3) 김동원, "중기보일러 및 원동기", 1985, 동명사
- 4) Nissen, W., "Combustion and Incineration Processes." Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. (1978).
- 5) Croft, "Practical Heat," McGraw-Hill, Inc., New York, N.Y., 439(1939).
- 6) Kida, K., Morimura, Y., Sonada, Y., and Yanoh, T., The importance of the surface charge on support media for microbial adhesion, J. of ferment. bioeng., 73(4), pp.323-325 (1992).
- 7) 박태주, SAC매체를 이용한 고정생물막 반응기, 연구보고서, 부산대학교 환경문제연구소(1995).
- 8) Alexander, Y., 경량골재 형성시 팽창성재료, 日時公平, 8-32579, 1996.
- 9) Alexander, Y. 등, "경량골재를 형성할때의 팽창성재료의 열처리 방법 및 그 처리장치", 日時公平 8-32579. 1996.
- 10) 竹内信行, 高橋秀典, 石田信伍, 高橋史郎, 日本窯業學會誌, 107[6], pp.551-554 (1999).