

미곡종합처리장 발생 왕겨폐기물의 소각처리 및 연소열의 활용에 관한 연구⁺

Study on the Incinerating Treatment of Rice Hull Produced by RPC and Its Heat Utilization

진영덕* 장동일** 장동순* 김만수** 장홍희**
정희원 정희원 정희원 정희원
Y. D. Jin D. I. Chang D. S. Chang M. S. Kim H. H. Chang

ABSTRACT

This study has been performed to develop an agricultural waste incinerator to combust the rice hull originated from RPC with the typical disposal treatment capacity of 30kg/h and to test performance of the developed incinerator.

Experimental results are summarized as following :

1. The optimum feed rate of rice hull of the incinerator is 30kg/h with air ratio of 1.5.
2. The contents of SO₂ in flue gas is maximum 18ppm (when rice hull feed rate was 20kg/h and air ratio of 1.5), minimum 7ppm (when rice hull feed rate was 30kg/h and air ratio of 1.5) and average 11ppm. So there is no environmental pollution problem for the incinerating treatment of rice hull of the RPC.
3. The temperature of water of heat exchanger are 53°C and 62°C with water flow rate 3ℓ/min and 1.5ℓ/min at the optimum combustion condition, respectively.
4. According to theoretical energy calculation, the energy from rice hull combustion may be amounted as much as 80% ~ 190% of energy supplied by kerosene required by RPC.

주요 용어(Key Words) : 왕겨(Rice Hull), 미곡종합처리장(RPC ; Rice Processing Complex), 소각(Incinerating)

1. 서론

미곡을 주곡으로 한 한국농업은 그간 생산증대에 치우친 나머지 수확후 관리기술에 소홀하였다. 그 결과 품질관리나 유통상의 낙후를 가져왔고, 산업화에 따른 노동력 부족 상태와 UR의 파고에 심각한 위기상태에 직면하게 되었다. 따라서, 생산비 절감과 미질 향상을 통한 소득향상 및

국제경쟁력강화가 당면과제가 되었다. 이러한 제반 문제점을 해결하기 위하여 도정공정의 건조, 저장, 정선, 도정, 포장 등의 전 작업과정을 일괄처리 할 수 있는 미곡종합처리장의 건설을 추진하게 되었다. 국내의 미곡종합처리시설은 '91년도에 2개소를 시작으로 농협을 통해 설치하기 시작하여 '93년도까지 전국에 83개소가 설치되었으며 '97년까지 농림수산부의 재정적 보조

+ 본 연구는 대산농촌문화재단의 1994년도 연구비 지원에 의하여 수행되었음

* 충남대학교 공과대학 환경공학과

** 충남대학교 농과대학 농업기계공학과

에 의하여 전국에 300개가 설치될 예정이다. 그런데 미곡종합처리장(RPC)의 건설을 통하여 곡물의 질적향상과 생산비의 감소로 상품의 경쟁력은 강화되었으나, 곡물처리의 집중화에 따른 왕겨폐기물 처리문제가 중요한 현실적 과제로 대두되고 있다.

농산물가공 산업장에서 발생하는 폐기물의 경우 특히, 미곡종합처리장에서 발생하는 왕겨폐기물은 그 성분의 균일성이 뛰어나며 소각처리에 좋은 여러 가지 특성들을 가지고 있다. 따라서 왕겨폐기물의 특성에 맞는 소각로를 만들어 소각처리한다면 어떤 산업장에서 보다 훌륭한 폐기물 처리방법이 될 수 있을 것으로 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 미곡종합처리장에서 발생하는 왕겨폐기물의 처리문제를 해결하기 위해 왕겨의 물리적, 화학적, 그리고 열적특성을 고려한 왕겨소각로를 설계·제작하고, 제작된 왕겨소각로의 연소실험을 통하여 왕겨의 연소특성을 분석하고, 왕겨소각로의 성능을 규명하고자 하였다. 또한 이때 발생하는 소각폐열을 활용함으로써 미곡종합처리장의 소요에너지의 일부를 충당할 수 있는 방안을 제안하고자 하였다.

2. 연구사

왕겨의 특성은 벼의 품종, 경작지의 기후조건, 토질 및 경작법에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다. 그러나, 작은 국토의 면적에서 자연환경이 크게 다르지 않으며 대부분의 농가에서 일반벼를 재배하므로 우리나라에서 발생하는 왕겨의

특성은 그 차이가 크지 않을 것으로 판단된다. 김등(김지동 외 4인, 1980)은 석탄의 공업분석 및 원소분석 방법에 따라 왕겨의 화학적, 물리적, 열적 특성을 정리하였다.

가. 왕겨의 화학적 특성

왕겨의 공업분석 및 원소분석은 연소성의 예측과 연소시 필요한 소요공기량의 계산등 소각로 설계를 위한 중요한 자료가 된다. 이러한 왕겨의 성분분석 결과는 表 1에 나타나 있다.

Table 1. Proximate and element analysis of the rice hull(김지동 외 4인, 1980).

Proximate analysis		Element analysis	
Property	Value(wt%)	Property	Value(wt%)
Ash	13.20	C	47.6
Volatile matter	64.10	H	6.8
Moisture	8.90	O	45.0
Fixed carbon	13.80	N	0.6
Total	100	S	<0.1

表 1에 나타난 공업분석에 따르면 왕겨 중 휘발분은 60% 이상을 보이고 있다.

이것은 表 2에 나타난 석탄의 휘발분 함량이 약 53% 미만인 것을 감안한다면 휘발분이 비교적 많은 양이며, 고정탄소분은 약 14%로 석탄에 비하여 상당히 적은 양으로 나타나고 있다. 고정탄소분이 적고 휘발분이 많기 때문에 단위 무게당 발열량은 적으나 착화가 쉬울 것으로 판단된다.

Table 2. Proximate and element analysis of the coal(최병윤 외 1인, 1993).

Coal species	Proximate analysis				Elementary analysis				
	Moisture	Ash	Volatile matter	Fixed carbon	C	H	O	N	S
Anthracite		19.8	6.6	71.9	73.6	2.5	2.6	0.9	0.37
Batuminous	7.2	8.9	28.2	60.0	77.9	4.5	7.0	0.9	0.7
Subbituminous	23.5	10.5	47.5	42.0	69.1	5.5	24.6	0.8	0.19
Lignitie	67.5	1.2	52.8	46.0	67.8	4.8	26.7	0.6	0.25

한편, 왕겨의 원소분석에 따르면 황(S)과 질소(N)의 성분이 1% 미만의 적은 양을 보이고 있다. 이는 일반폐기물 또는 산업폐기물의 소각 처리시 발생될 수 있는 유해물질의 문제가 왕겨의 소각에서는 발생되지 않을 것을 뜻한다. 또한, 소각처리시 발생하는 황산화물에 의한 소각 시스템의 산화부식의 문제가 적어 소각로설계시 열교환기의 전열면적을 최대로 할 수 있을 것으로 판단된다.

나. 왕겨의 물리적 특성

왕겨를 다루는데 있어 가장 큰 문제점은 단위 질량당 부피가 크기 때문에 운송이 어렵다는 것과 단위 체적당의 발열량이 매우 작다는 것이다. 김 등(김지동 외 4인, 1980)이 연구한 왕겨에 대한 여러 가지 물리적 특성을 표 3에 나타냈다.

왕겨는 입자의 표면이 거칠고 경도(Mohs scale로 5~6 정도)가 커서 관동을 통한 이송시 연마제 역할을 하여 관을 마모시키는 것은 이미 RPC등에서 확인된 바 있다. 왕겨의 진밀도는 0.73 g/cm³ 이지만 용적밀도(bulk density)는 0.1 g/cm³ 정도로 상당히 부피를 많이 차지하기 때문에 왕겨를 발생 장소로부터 다른 장소로 이동시키거나 보관할 때 어려움이 따른다. 왕겨의 안식각은 계단식 스토킨 소각로의 설계시 계단의 경사각 설계에 중요한 영향인자가 된다.

Table 3. Physical properties of rice hull.

Property		Value
Specific gravity		0.095
Density(g/cm ³)	True density	0.73
	Bulk density	0.1
Hardness(Mohs scale)		5½~6½
Repose angle		42°~45°

다. 왕겨의 연소 특성

왕겨는 그 조성상 휘발분이 64% 나 되고, 재 및 수분을 제외한 휘발분과 고정탄소만으로 계산하면, 휘발분이 약 78%로서 나무류의 80%와

거의 같고 유연탄류의 18~45%나 무연탄의 7%보다 훨씬 많다(박영재 외 4인, 1984). 따라서 일반적인 왕겨의 착화온도는 나무와 유사한 약 300°C 정도로서 쉽게 착화될 것이다.

3. 왕겨소각로 개발

가. 왕겨소각로의 설계기준

1) 왕겨의 발생량 계산

농협중앙회의 '94 미곡종합처리장의 설계기준에 의하면 각 시공업체에서 개발한 RPC모델을 접수한 후 업체를 선정하여 참여토록 할 계획이기 때문에 당분간 건조규모가 1,800 t/yr 규모인 모델이 대부분 보급될 전망이다. 1,800 t/yr 규모의 미곡종합처리장에서의 왕겨의 발생량을 계산하기 위하여 반입물벼의 수분 22%, 현미가공전벼의 수분 15%, 그리고 왕겨의 발생량은 벼무게의 20%로 가정하였다. 현미기 전의 벼의 무게는 식 (1)로 구한다(윤형기 외 4인, 1990).

$$W_2 = \frac{W_1 \times (100 - m_1)}{(100 - m_2)} \text{ (kg)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, m₁은 건조전 벼의 습량기준 함수율(%), m₂는 건조후 벼의 습량기준 함수율(%), W₁은 건조전 벼의 무게(kg), 그리고 W₂는 건조후 벼의 무게(kg)를 각각 나타낸다. 여기서 미곡종합처리장의 연간 가동일수를 200일로 하고 일일 가동시간을 8시간으로 하면 일일 왕겨폐기물의 발생량은 약 245kg이 된다.

나. 소각로 설계

1) 왕겨공급장치

소각로의 안정된 연소를 위해서는 무엇보다도 연소물질의 일정량 연속주입이 중요하다. 왕겨의 경우 입자의 크기가 균일하고 가볍기 때문에 구조가 비교적 간단한 스크류컨베이어를 선택하였다. 스크류컨베이어의 반송능력은 다음 식에 의해 계산된다(이종호, 1994).

$$Q = 60 \cdot n \cdot \phi \cdot P \cdot \gamma \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \dots\dots (2)$$

ω : 각속도

여기서,

- Q : 반송능력(t/h)
- n : 스크류회전수(rpm)
- ϕ : 충만효율(decimal)
- P : 스크류 간격(m)
- γ : 반송물의 비중(t/m^3)
- D : 스크류의 외경(m)
- d : 스크류 축외경(m)

본 소각로의 설계에서는 식 (2)의 변수중에서 스크류의 회전수 n을 바꾸어 가면서 투입량을 조절할 수 있도록 하였으며 나머지는 알고 있는 상수로 놓았다. 즉, ϕ 는 0.8, P는 0.09, γ 는 $0.095 t/m^3$, D는 0.12m, d는 0.022m의 값을 갖으며, 투입량 Q를 20kg/h, 30kg/h, 50kg/h로 변화시키기 위해 n값을 4, 6, 11로 바꿔 주어 투입량을 조절할 수 있도록 하였다. 스크류에 전달하는 소요동력은 다음의 식으로 구한다(이종호, 1994).

$$L = C \cdot l \cdot Q \dots\dots (3)$$

여기서,

- L : 소요동력(kW)
- C : 계수
- l : 스크류콘베이어의 길이(m)
- Q : 반송능력(t/h)

식 (3)에서 계수는 일반적으로 0.005로 한다. 그러나, 본 소각로의 설계에서는 소요동력이 크지 않고 회전수가 중요 요소이기 때문에 0.187 kW(1/4 Hp)의 저속 모터(29 rpm)와 V풀리를 사용하여 풀리의 직경에 따른 회전수의 차이로 투입량을 조절할 수 있도록 하였다. 풀리의 직경과 회전수와 관계는 다음의 식으로 나타난다.

$$v = \pi D_A N_A = \pi D_B N_B \dots\dots (4)$$

$$\therefore \frac{N_A}{N_B} = \frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{D_B}{D_A}$$

여기서,

- v : 선속도
- N : 회전속도
- D : 직경

2) 화격자(火格子)

연소장치는 무엇보다도 먼저 사용연료의 종류 및 형태에 따라 결정된다. 연소장치의 운전에서 있어서 가장 중요한 점은 연료가 자연적으로 연소를 계속하도록 하는 것이다. 이렇게 하기 위해서는 이미 연소되고 있는 부분으로부터의 열(점화열)이, 자동적으로 또한 되도록 속히 새 연료에 전달되며 그 점화온도까지 도달되어야 한다. 이는 연료가 그 점화온도에 도달되어 비로소 점화되며 그 자신의 연소를 계속할 수 있는 까닭이다. 따라서 연소실의 구조와 아울러 새 연료의 공급방법이 극히 중요해지며, 연소장치의 구조도 이에 따라 크게 좌우된다. 연소장치 중에서 화격자의 크기는 매우 중요한데, 이것은 식(5)에 의하여 계산된다.

$$A_c = \frac{J_f \times h_f}{I_A} \dots\dots (5)$$

여기서,

- A_c : 화격자의 크기(m^2)
- J_f : 연료 주입량(kg/h)
- h_f : 왕겨의 발열량(kcal/kg)
- I_A : 면적연소강도($kcal/h \cdot m^2$)

보통의 고체연료연소에는 화격자 연소장치가 이용되며, 연료의 공급방법에 따라 화격자 연소장치는 대략 수평 화격자, 계단 화격자, 요동 화격자, 상입 및 하입식 화격자, 이동 화격자등을 들 수 있다. 사용연료인 왕겨폐기물은 화격자의 상부와 위쪽의 연소실 공간에서 연소가 이루어지게 된다. 연소가 완료된 재는 화격자의 밑으로 떨어져 재처리 장치에 의해서 제거된다. 따라서, 최소의 파잉공기와 최대의 접촉을 할 수 있도록 충분한 면적과 연소공간을 가질 수 있도록 설계되어야 한다.

3) 연소실 체적

화격자의 크기가 결정된 다음 연소실을 설계하는데 우선 화층의 두께가 가정되어야 하며, 연료의 연소특성이 고려되어야 한다. 화층을 두껍게 하면 연소공기의 원활한 공급을 방해함으로

매연의 발생 가능성은 높으나 연소실 내의 연소 분위기 온도를 충분히 유지시킬 수 있어 착화를 용이하게 한다. 왕겨의 경우도 왕겨탄의 경우와 마찬가지로 휘발분이 약 65% 정도이므로 화염이 길고 급격한 연소가 예상되므로 연소실의 높이를 높게 설계하여 화염이 연소실과 직접 접촉하여 수트(soot)가 생기지 않도록 하여야 한다. 또한 1차 공기만으로는 65% 정도로 휘발분이 많은 왕겨를 완전 연소하기는 어려우므로 2차공기를 공급할 수 있는 장치를 설계하였다. 연소실의 체적은 식 (6)을 이용하여 구하였다(윤형기 외 4인, 1990).

$$V_c = \frac{J_f \times h_f}{I_v \times P} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

V_c : 연소실의 크기(m^3)

J_f : 연료 주입량(kg/h)

h_f : 왕겨의 발열량($kcal/kg$)

I_v : 체적연소강도($kcal/h \cdot m^3$)

P : 연소실내 압력(atm)

연소장치에서 화격자의 크기와 연소실의 체적을 구하기 위하여 필요한 값은 表 4에 나타나 있다.

4) 송풍장치

소각로에 필요한 공기의 공급에는 일반적으로

압입송풍기가 사용된다. 압입송풍기의 풍량은 소각용량, 온도 및 압력보정, 공기중의 수증기량, 기타 여유 등을 고려한 여유율로부터 구할 수 있다. 본 소각로의 설계에서는 이론적으로 구한 완전연소를 위한 최소 공기량에 최대 200%까지 공급할 수 있는 용량의 송풍기를 선택하였다.

5) 재처리장치

재처리 설비로는 소각재와 각부에서 포집한 먼지(dust)를 외부에 반출하기 위한 설비로서 먼지(dust)반출장치, 재냉각장치, 재콘베이어, 재비트, 재크레인 등을 들 수 있다. 그러나, 본 소각로는 실험용으로 축소 제작된 관계로 소각로 밖으로 재의 반출만을 장치에 고려하였다.

소각로 밖으로 재를 반출하는데 가장 큰 문제가 되는 것은 가교(bridge)현상이다. 왕겨재는 SiO_2 와 K_2O 의 2원 혼합물로 볼 수 있다. 일반적으로 왕겨의 경우 정전기의 발생과 지방분의 복합작용으로 인한 가교현상이 생겨 문제를 야기시킬 수 있다(박영재 외 4인, 1984). 이러한 현상을 극복하고 원활한 재처리를 위해서는 필요에 따라 햄머링 또는 바이브레이터를 설치하여야 한다. 본 소각로 제작에서는 스크류를 설치하여 연속적으로 재처리를 함으로써 가교현상을 극복하도록 하였다. 또한 왕겨재의 발생량은 무게비로 왕겨의 약 18% 정도 되는 것으로 가정하였다.

Table 4. Comparison of empirical performance of various coal combustions(윤형기 외 4인, 1990).

Parameter	Stoker	Fluidized bed	Pulverized coal combustion
Heating rate per hour MW(t)	0.3~30	(Predicted value) less than 30	(0.3)30~3,000
Volumetric burning intensity I_v (kW/m^3)	250~750	(i) less than 2,000 (ii) less than 500	150~250
Effective reactor height $H_c = I_A/I_v$ (m)	1.5~7.5	(i) less than 1.5 (ii) less than 6	less than 45
Volumetric density on combustion $J_{L,v}$ (kg/m^3h)	30~100	(~250)	15~30
Area density on combustion $J_{L,A}$ (kg/m^2h)	40~250	less than 500	less than 1,000

Table 5. Comparison of energy requirements for two different drying methods.

Item	Drying method	Condition 1	Condition 2
		Heated air drying	Combination drying
Fuel consumption rate(ℓ/h)		6.6	6.6
Kerosene energy content(kcal/kg)		11,000	11,000
Kerosene specific gravity		0.81	0.81
No. of dryer(unit)		8	8
Drying time(h)		7.38	3.12
Energy requirement(kWh/day)		3.74×10^3	1.58×10^3

4. 실험장치 및 방법

RPC에서 물벼의 건조에 소요되는 에너지를 구하기 위하여 두 가지 조건으로 나누어 이론적 소요에너지를 계산하였고, RPC에서 발생하는 왕겨를 연소하였을 때 발생하는 이론연소에너지를 구하여 RPC의 건조시 소요되는 에너지와 비교하였다.

또한, 상기 설계기준에 의해 제작된 왕겨소각로의 성능을 규명하기 위하여 연소실험을 실시하였다. 이때 공기유량, 연소실 및 출구가스 온도, 배기가스 농도를 측정하였으며, 이들의 측정값을 분석하여 소각로의 성능특성을 파악하였다.

가. RPC 및 왕겨 연소에너지 계산

1) RPC(건조, 저장) 소요에너지

미곡종합처리장에서 곡물은 장기저장을 위하여 안전함수율까지 건조한 후 저장고에 저장하게 된다. 곡물의 건조방법으로 가장 널리 사용되는 방법으로는 열풍건조방법(heated air drying), 상온통풍건조(natural air drying) 및 조합건조방법(combination drying)이다.

열풍건조방법은 곡물층에 열풍을 송풍하여 대류열전달에 의해 건조하는 방법으로 건조속도는 빠르지만 곡물이 열 손상을 받을 우려가 있으며 비교적 큰 에너지가 소요된다. 상온통풍건조는 상온의 공기 또는 상온의 공기를 약간 가열하여 곡물층에 송풍하여 건조하는 방법으로 장기간에 걸쳐서 저장을 겸하여 건조하므로 품질의 유지특성이 우수하며 소요에너지가 적고, 유지관리

가 편리한 반면 건조기간이 길고 기상의 영향을 크게 받게 되는 단점이 있다. 조합건조방식은 상기 두 방법을 적절히 조합하여 이용하는 방법으로, 고함수율의 곡물을 열풍건조로 신속히 건조하여 함수율을 낮춘 후에 상온통풍건조장치에 투입하여 저장을 겸한 장기건조를 행하거나, 곡물의 반입 상황에 따라서 상온통풍건조 후에 열풍건조로 마무리 건조하는 방법이다. 이 방법은 곡물의 품질 유지, 건조소요에너지 및 시설의 이용 측면에서 가장 유리한 방법으로 대부분의 미곡종합처리장에서 이 방법을 채택하고 있다(김동혁, 1994).

'94년 미곡종합처리장 설계조건(농협중앙회, 1994)을 전제로 하여 연료를 등유로 사용하였을 때 열풍건조방식과 조합건조방식에 대하여 건조·저장소요에너지를 식(7)에 의하여 분석하면 表 5와 같다.

$$\text{소요에너지} = \text{연료소비율}(\ell/h) \times \text{비중} \times \text{건조시간}(h) \times \text{발열량}(kcal/kg) \times \text{건조기수}(\text{unit}) \dots\dots\dots(7)$$

<조건 1> : 열풍건조방식

1일 처리량 27t을 화력건조기를 이용하여 함수율 22%에서 15%로 건조할 때의 소요에너지

<조건 2> : 조합건조방식

1일 처리량 27t을 수분 22%에서 18%로 상온통풍건조하고 화력건조기를 이용하여 함수율 18%에서 15%로 건조할 때의 소요에너지

2) 왕겨의 연소에너지

1일 27톤의 벼를 도정할 때 발생하는 왕겨의 양은 약 4900kg이 된다. 제작된 왕겨 소각로의 연소효율을 약 80%, 그리고 열교환기의 효율을

약 30%로 가정하고 연소에너지를 계산하면 ;

$$= 3.08 \times 10^3 (\text{kWh/day})$$

연소에너지 = 연료량 × 왕겨의 발열량 × 연소
효율 × 열교환기 효율

$$= 49900 \text{kg} \times 3,280 \text{Kcal/kg} \times 0.8 \times 0.3$$

$$= 2.57 \times 10^6 (\text{kcal})$$

나. 성능시험 장치

그림 1은 설계된 소각로의 정면도를 보여주며,

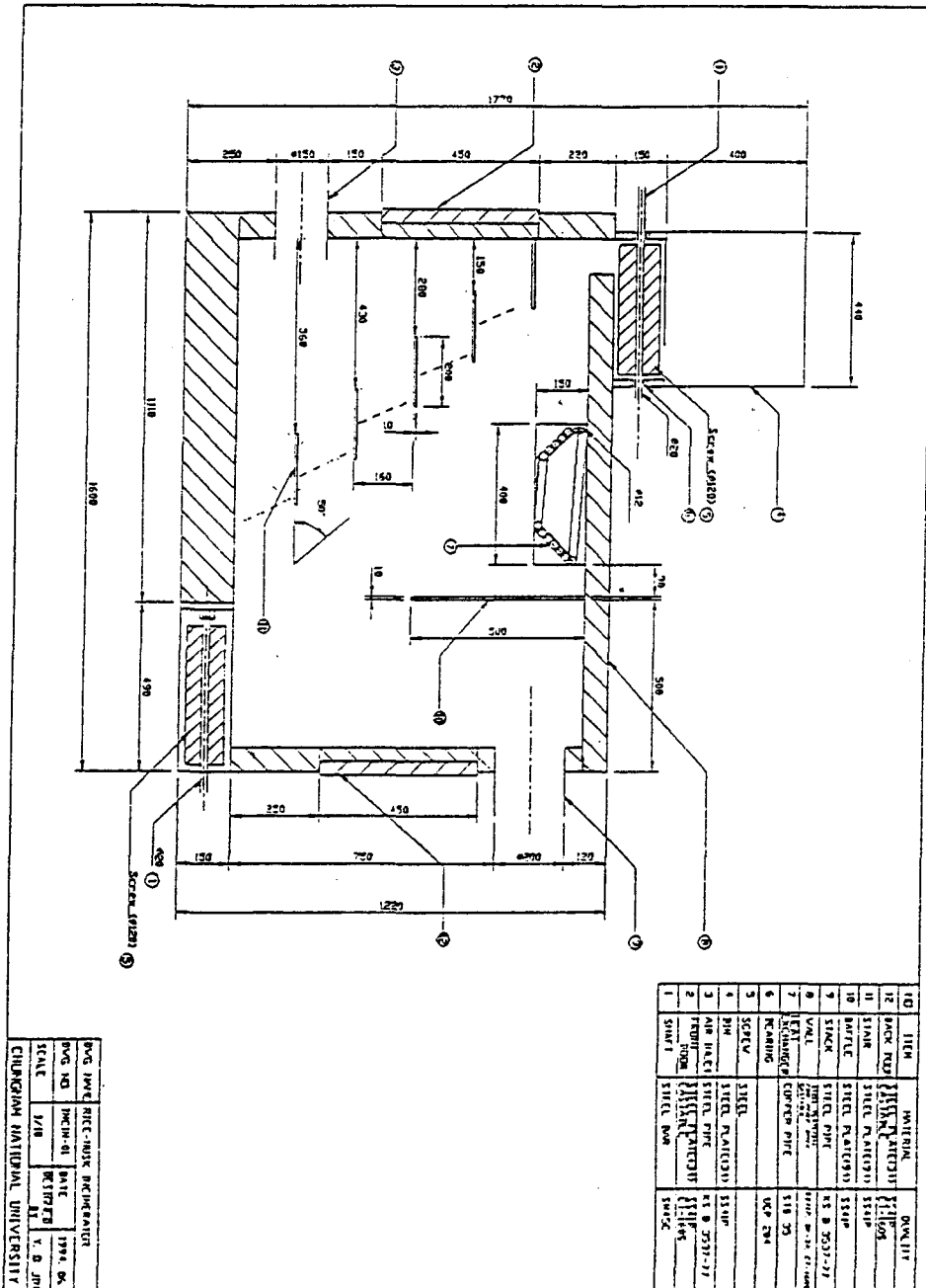


Fig. 1. Front view of the developed rice hull in cinerator.

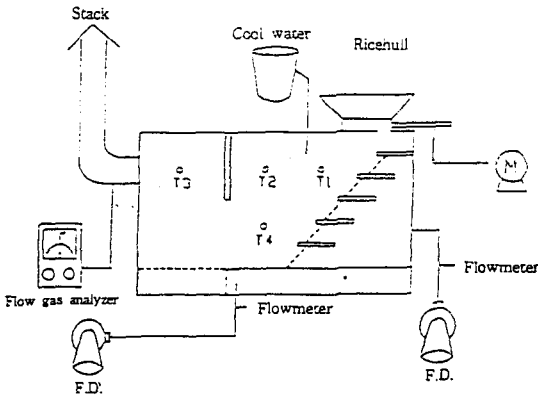


Fig. 2. Schematic diagram of a rice hull incinerator and testing system

그림 2는 성능시험장치의 구성과 측정장치의 설정위치를 개략적으로 나타낸 것이다.

왕겨의 투입장치는 저속모터(0.187kW, 29 rpm)와 스크류에 풀리를 장착하고, 풀리의 크기를 바꿔 스크류의 회전속도를 변화시키는 방법으로 왕겨의 투입량을 조절하였다.

공기공급은 2대의 송풍기를 설치하였다. 화상 공급용(1차공기) Fan은 회전속도를 변화시킬 수 있는 DC모터(1.5kW)를 사용하여 소각로의 바닥으로부터 150mm 높이에서 수평방향으로 공기가 주입되도록 설치하였다. 2차공기 공급(0.375kW)은 노내에 설치된 배플(baffle) 밑 바닥에 설치하여 계단을 내려오면서 완전연소 되지 않은 왕겨의 완전연소와 불완전연소된 가스의 완전연소를 돕도록 하였다. 또한, 2차공기 공급장치는 초기연소시 1차공기의 주입없이 안정된 초기연소를 돕도록 하였다. 열교환기는 직경이 12mm인 동파이프를 원형으로 말아 상부직경이 500mm이고 아래로 내려갈수록 원형의 직경이 점점 작아져 마지막에는 직경이 250mm로 한 다음 직선으로 소각로 밖으로 나오게 설치하였다. 열교환기의 위치는 노내 1-3번째 계단의 수직상단에 설치하였다.

재처리장치는 왕겨의 투입구와 마찬가지로 스크류를 설치하여 연소상황에 따라 연속적으로 재처리를 할 수 있도록 설치하였다. 밖으로 방출된 재는 열교환기를 통하여 나온 순환수로 냉각

시켰다.

열교환기의 급수장치로는 100리터 용량의 플라스틱통에 수돗물을 연속적으로 공급하며 노내의 열교환기에 일정 유량이 공급될 수 있도록 수통의 하부에 유량조절장치를 부착하였다.

굴뚝은 직경이 200mm인 가정용 보일러 연통을 사용하여 높이가 4m되게 설치하였으며, 노의 출구로부터 1.5m 되는 지점에 배출가스 분석구멍($\phi 10\text{mm}$)을 만들었다.

노내의 온도특성을 규명하기 위한 온도측정의 위치로 T1은 투입구 앞, T2는 열교환기와 baffle 사이, T3은 배플(baffle)과 출구사이, 그리고 T4는 주연소가 이루어 질 것으로 예상되는 첫번째 계단 앞 부분으로 정했다.

다. 측정장치

공기공급량은 주입관의 단면적과 공기의 유속으로 측정하였다. 유속측정은 공기유속계(Air velocity meter : Model NO. 37000-00)로 하였으며, 이 장치는 유속, 대기온도, 상대습도 등도 측정할 수 있는 센서이다.

노내의 온도측정은 내부에 백금정선(junction)이 있고 외부는 세라믹으로 보호된 열전대(thermocouple)가 디지털장치에 연결되어 측정 온도값을 나타내는 장치를 이용하였다.

배출가스의 성분 및 그 농도는 휴대용 배출가스분석기(Portable flue gas analyzer : Model NO. : 6500)를 사용하여 측정하였다. 이 분석기에는 5개의 연료형식(나무, 경유, 중유, 천연가스, 석탄)에 대하여 가스센서와 옵션에 대한 프로그램이 내장되어 있고, 4가지 다른 연료에 대하여 표준연료를 설정할 수 있게 되어 있다. 그러나, 본 실험에서는 표준연료 설정을 위한 왕겨의 계수에 대한 정보는 없었으나, 왕겨의 제반특성이 나무와 유사한 점을 고려하여 나무연료형(Wood fuel type)으로 설정하였다.

열교환기를 통하여 나오는 수온은 열전도 온도계를 사용하여 측정하였다.

表 6은 측정에서 사용된 각 측정장치에 대한 자세한 사양을 보여준다.

Table 6. Measuring instrumentation and its specification

Equipment	Maker	Capacity and range
Air velocity meter	Cole-Parmer Instrument Co.	Model NO. : 37000-00 Range : 0.03-25.41mps Accuracy : $\pm 2\%$ of reading ± 20 fpm
Portable flue gas analyzer	Land Instrument Co.	Model NO. : 6500 Range : O ₂ 0 - 25.0% vol. $\pm 1\%$ CO(low) 0-2000ppm CO(high) 0-4000ppm SO ₂ 0-2000ppm NO 0-1000ppm NO ₂ 0-100ppm Accuracy : $\pm 4\%$ of all
Thermocouple	Han-Young Electronics	Model NO. : HY-800 Range : 0-1690°C
Thermometer	Yokogawa-Hokushin	Model NO. : 2542 Range : -50-600°C

라. 성능시험방법

성능시험은 점화전에 먼저 급수밸브를 열고 노내의 열교환기에 물이 가득차 연속적으로 흐르게 한다. 연소물질인 왕겨를 일정량의 무게를 측정하여 투입구에 넣는다. 소량의 왕겨에 등유를 묻힌 후 1번 계단에서 10cm정도 떨어진 위치 즉, 2차 공기공급파이프 위에 쌓은 다음 점화시킨다. 초기 연소상태를 확인하면서 2차공기의 밸브를 여닫으면서 초기연소의 상태가 안정하게 유지될 수 있게 한다. 초기 연소상태가 안정되면 1차공기를 정해진 양으로 공급하면서 왕겨 투입구의 모터를 가동시킨다. 소각로의 앞·뒷문을 닫은 다음 일정 위치 (그림의 장치 대략도 참고 T1, T2, T3, T4)에 대하여 열전대(thermocouple)를 이용하여 20분 간격으로 각 지점에서의 노내온도를 측정한다. 배출가스 분석기를 이용하여 연소시작 후 20분이 지난 다음부터 30분간격으로 배출가스의 농도를 측정한다. 열교환기에서 가열되어 방출되는 가열수의 온도는 열전대(thermometer)를 이용하여 20분 간격으로 측정한다. 연소의 마지막에는 왕겨의 투입을 멈춘 후 수분간 공기공급을 계속한다.

이와 같은 방법으로 투입량 20kg에 대하여 1차공기량 대 2차공기량의 공기비율 1.2, 1.5, 2.0

으로 변화시켜 시험을 하였고, 30, 50kg에 대하여 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 열교환기의 성능실험은 각 투입량의 실험결과 최적연소조건에 대하여 유량을 3ℓ/min, 1.5ℓ/min, 0.5ℓ/min의 3수준으로 하고 연소시간에 따른 수온의 변화를 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

가. RPC(건조, 저장) 소요에너지 및 왕겨연소 에너지의 비교

RPC의 공정 중 열에너지의 주된 소요공정은 저장 및 건조시설이다. 이론적인 계산에 의하면 1일 처리량 27톤을 화력건조기를 이용하여 함수율 22%에서 15%로 건조할 때의 소요에너지는 3.74×10^3 (kWh/day)이고, 1일 처리량 27톤을 수분 22%에서 18%로 상온통풍건조하고 화력건조기를 이용하여 함수율 18%에서 15%로 건조할 때의 소요에너지는 1.58×10^3 (kWh/day)으로 계산된다. 왕겨소각에 의한 발생가능 에너지는 3.08×10^3 (kWh/day)으로 건조 방식에 따른 RPC 소요에너지 중 등유에 의한 소요에너지 80%와, 190%를 충당할 수 있는 것으로 분석되었다. 이

것은 전체 소요에너지(전기, 노동 등) 중에서 동유 소비에너지 만을 고려한 것이기 때문에 위의 백분율이 실제로는 상당히 떨어질 것으로 생각되나 왕겨 폐기물의 잠재적 에너지를 볼 때 상당히 경제성이 있는 것으로 판단된다.

나. 최적연소조건

소각로의 주요 작동인자인 왕겨의 투입량과 공기비에 따른 노내의 온도분포, 배출가스의 농도는 각 인자에 대하여 각기 다른 양상을 나타냈다. 왕겨의 투입량과 공기비에 따른 각 측정점의 온도변화는 각각의 특성을 나타내고 있다. 그러나 각 투입량 및 공기비에서 공통적으로 나타나는 것은 T1지점의 온도가 가장 낮고 T4 지점의 온도가 가장 높게 나타나고 있다. 이것은 처음 예상했던 대로 T4지점에서 가장 활발한 연소가 이루어지고 있음을 나타내고 있다. T1지점에서 온도가 낮게 나타나는 것은 T1 지점에 형성된 온도가 계속해서 공급되는 왕겨를 건조, 가열시키는데 온도를 빼앗기기 때문으로 사료된다. 투입량 및 공기비에 따라 다소 차이는 있으나 노내의 온도정상상태는 연소시작후 약 30~40분이면 도달하는 것으로 나타났다.

왕겨의 투입량이 20kg/h, 공기비 1.2일 경우는 공기의 유량이 적고 노내에 형성된 압력이 작아서 원활한 연소를 이룰 수가 없었으며, 50kg/h, 공기비 2.0의 경우 노내에 형성된 압력이 너무 강하여 불완전연소가스의 체류시간이 짧고 연통을 통한 본진의 배출이 심하여 원활한 연소가 되지 않았다.

그림 3은 왕겨 투입량 30kg/h에 대하여 공기비를 1.5로 하였을 때 시간에 따른 온도변화이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 소각로는 연소시작 후 약 35분에 정상상태(steady-state)에 이르는 것을 볼 수 있다. 각 지점의 온도분포를 보면 T4가 평균 760°C로 가장 높게 나타났고 T1, T2, T3이 유사한 온도분포를 유지하고 있다. 또한 T3과 T2지점의 온도가 약 100°C 정도의 차이를 보이고 있음을 볼 때 노내에 설치된 baffle의 역할이 어

는 정도 실효를 거두어 불완전 연소된 가스의 체류시간과 출구로 직접 배출되는 열에너지의 손실을 막아 주는 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

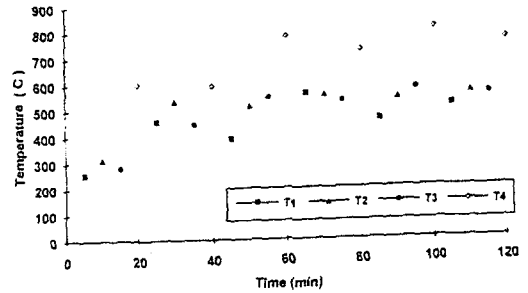


Fig. 3. Inside temperature variations of rice hull incinerator with time for feed rate of 30kg/h.

다. 배출가스의 농도변화

그림 4는 왕겨 투입량이 시간당 30kg일 때 공기비를 1.2, 1.5, 2.0으로 한 경우 시간에 따른 CO의 농도변화이다. 약 80분 경에 공기비 1.5에서 이상적으로 높은 일산화탄소의 농도를 보이고 있는데 이것은 왕겨의 낙하시 노내 계단의 경사 및 왕겨의 안식각에 의해 잠시 뭉쳤던 왕겨가 일시에 낙하하여 소요공기량이 순간적으로 부족했던 것으로 사료된다. 이것을 제외하면 온도분포와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 투입량 30kg/h일 때 산성가스인 NOx의 농도변화를 나타낸 것이다. NOx의 경우 NO와 NO2의 합으로 측정되어진다. NOx는 크게 Thermal NOx와 Fuel NOx가 있는데, Thermal NOx의 경우 켈도비츠 미커니즘에 의하여 약 1300°C에서 생성되는 것으로 볼 때 그림 3의 온도분포 그림에서 보는 바와 같이 소각로 내에 형성된 온도가 900°C를 넘지 않는 것으로 보아 배출가스 중 NOx는 모두 Fuel NOx인 것으로 판단된다.

그림 6은 SO2에 대한 실험결과이며, SO2의 경

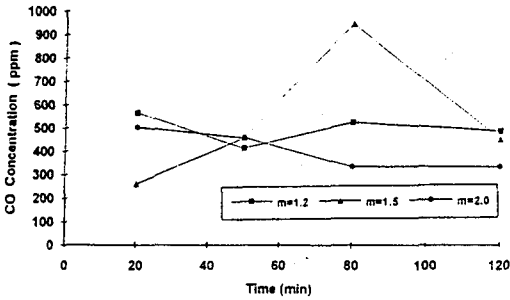


Fig. 4. CO concentration variations from incinerator with time for three different air-flow rates of 1.2, 1.5, and 2.0, and for rice hull feed rate of 30kg/h.

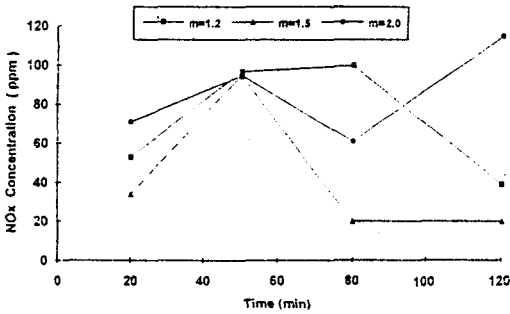


Fig. 5. NOx concentration variations from incinerator with time for three different air-flow rates of 1.2, 1.5, and 2.0, and for rice hull feed rate of 30kg/h.

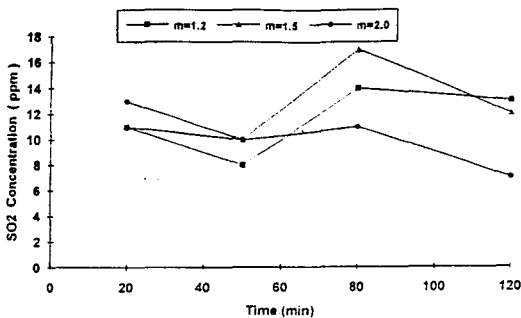


Fig. 6. SO₂ concentration variations from incinerator with time for three different air-flow rates of 1.2, 1.5, and 2.0, and for rice hull feed rate of 30kg/h.

우 연소조건에 관계없이 연료속에 함유된 황성분에 의해 발생하는 것으로 배출가스 허용기준 1,950ppm을 크게 밀도는 양으로 왕겨를 소각처리하여도 법규에는 저촉되지 않을 것으로 보인다.

라. 최적연소 조건하에서 열교환기의 성능

최적연소조건 하에서 열교환기의 성능을 알아보기 위하여 유량을 3ℓ/min, 1.5ℓ/min, 그리고 0.5ℓ/min에 대하여 실험을 해보았다. 그러나 본 실험에서는 물을 강제로 순환시키지 않고 높이차에 의한 압력으로 물이 순환하도록 하였기 때문에 분당 0.5리터의 경우 열교환기 내에 스팀의 발생으로 압력이 형성되어 물을 순환시키지 못하였다.

그림 7은 열교환기의 성능을 알아보기 위한 실험의 결과이다. 온도분포에서와 마찬가지로 약 35분경부터 정상상태를 보이고 있다. 실제 미곡종합처리장에서 온수로 쓰기 위해서는 유량을 좀더 크게 하여야 하며 건조 및 저장시설에서 사용하기 위해서는 스팀발생장치를 따로 설치해야만 할 것으로 사료된다.

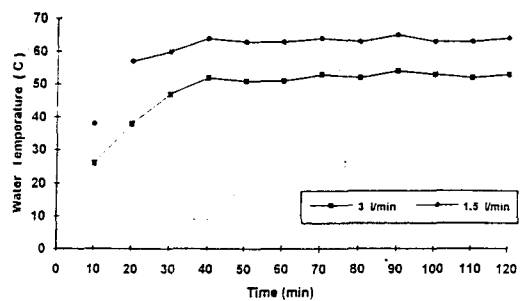


Fig. 7. Water temperature variations of heat exchanger for two different water flow rates of 3ℓ/min, 1.5ℓ/min, and rice hull feed rate of 30kg/h.

마. 소각로의 개선점 분석

제작된 소각로는 연소실험을 통하여 몇 가지

문제점을 가지고 있는 것으로 나타났다. 첫째는 노내에 설치된 배플(baffle)이다. 설계시 baffle은 연소가스를 재순환 시킴으로써 연소가스의 체류시간을 길게 하고 대류 또는 복사열을 연소물질에 반사시켜 연소효율을 높일 목적이었다. 그러나 제작된 소각로의 경우 약간 길어 재순환 공기가 많아서 투입구 쪽으로 더운 공기가 올라온다는 점이다.

둘째는 재처리장치이다. 계단을 타고 내려오며 건조, 가열되어 바닥과 첫번째 계단에서 가장 활발한 연소가 이루어지나 재처리장치의 스크류는 계단 앞쪽 약 200mm정도까지만 닿도록 설계, 제작되었기 때문에 스크류쪽으로 들어오는 재의 양보다 그 자리에 쌓이는 경향이 있어 재처리가 원활하지 않았다. 그러나 이러한 문제는 첫번째 계단까지 스크류를 늘려 제작하든지 계단과 같은 방향으로 재처리 장치를 설치하면 쉽게 해결될 것으로 생각된다.

셋째는 계단의 경사이다. 설계도면 상에는 55도의 경사였으나 실제 제작과정에서 약 40도 정도로 경사가 줄었다. 따라서, 경사를 유지하고 공기공급시 충분한 압력을 유지하기 위하여 계단 사이에 경사판을 설치하여 이러한 문제를 해결할 수가 있었다.

6. 결론

RPC의 공정 중 열에너지의 주된 소요공정은 저장 및 건조시설이다. 이론적인 계산에 의하면 1일 처리량 27톤을 화력건조기를 이용하여 함수율 22%에서 15%로 건조할 때의 소요에너지는 3.74×10^3 (kWh/day)이고, 1일 처리량 27톤을 수분 22%에서 18%로 상온통풍건조하고 화력건조기를 이용하여 함수율 18%에서 15%로 건조할 때의 소요에너지는 1.58×10^3 (kWh/day)으로 계산된다. 왕겨소각에 의한 발생가능 에너지는 3.08×10^3 (kWh/day)으로 건조 방식에 따른 RPC 소요에너지 중 등유에 의한 소요에너지 80%와

190%를 충당할 수 있는 것으로 분석되었다. 이것은 전체 소요에너지(전기, 노동 등) 중에서 등유 소비에너지만을 고려한 것이기 때문에 위의 백분율이 실제로는 상당히 떨어질 것으로 생각되나 왕겨폐기물의 잠재적 에너지를 볼 때 상당히 경제성이 있는 것으로 판단된다.

제작한 소각로를 이용하여 수행한 실험의 결과로는 왕겨폐기물 소각용량은 20, 30, 50kg중 투입량 30kg, 과잉공기 50%(이론공기량에 대하여)가 최적 연소조건으로 나타났으며, 이때 배출가스 중 CO의 평균농도가 349.0ppm으로 아주 낮은 값을 나타냈다.

각각의 실험결과 중 SO₂의 농도는 투입량 20kg, 과잉공기 100%일 때 가장 높아 18ppm으로 나타났는데 이것은 배출가스중 SO₂에 의한 공해 문제는 없을 것으로 보인다.

열교환기의 성능 시험결과 본 소각로의 용량으로는 분당 3리터에서 평균수온이 약 52°C, 분당 1.5리터에서 64°C로 나타났다.

참고 문헌

1. 금동혁. 1995. "곡물건조기". 미곡종합처리시설. pp 85~168. 향문사.
2. 김지동 외 4인. 1980. "왕겨로부터 가연성 가스 제조에 관한 실험 연구". KE-8010. 한국종합에너지연구소.
3. 농협중앙회. 1994. '95 농협 미곡종합처리장 설계기준.
4. 박영재 외 4인. 1984. "왕겨 연소 보일러 개발에 관한 연구". KE-8007. 한국종합에너지연구소.
5. 이종호. 1995. "반송 및 선별기계". 미곡종합처리시설. 한국농업기계학회 출판도서 (2). pp 245~274. 향문사.
6. 윤형기 외 4인. 1990. "왕겨탄 연소 장치 개발(I)". 동력자원부.
7. 최병윤, 이도형. 1993. "연소공학". 동명사.