

## 사이클론 연소기를 이용한 탄화왕겨의 제조 (I)<sup>+</sup>

# Production of Carbonized Rice Husks by a Cyclone Combustor (I)

고길표*	노수영*
정회원	정회원
G. P. Ko,	S. Y. No

### ABSTRACT

Carbonized rice husk(char from rice husk) can be used to improve soils for planting, seedlings, horiculture, pomiculture and truck gardening. Although it is not a fertilizer in nature, it stimulates the growth of plants. Carbonized rice husk is highly recommended for raising soil/water temperature, keeping moisture and aerating roots of plants.

The objective of this study was to develop the effective production method of carbonized rice husks by a non-slagging vertical cyclone combustor. A cyclone combustor with vortex collector pocket in addition to central collector pocket was selected and tested. Isothermal tests and mixed firing with LPG and rice husk were performed in order to characterize the system. Inert rice husk was used during the isothermal test to find the mass collected of rice husk. It was impossible to ignite rice husk itself over the experimental conditions considered in this experiment. The composition of original and carbonized rice husks was analyzed by the ultimate analysis. With the air flow rate of 20 m<sup>3</sup>/h, LPG flow rate of 0.45 l/min, the required carbonized rice husk could be obtained.

**주요용어(Key Words):** 탄화왕겨(carbonized rice husk), 사이클론연소기(cyclone combustor), 혼소율(mixed firing ratio), 무게 감량(weight loss)

### 1. 서 론

미국 생산에 있어 주된 농업부산물은 왕겨와 벃짚이다. 이 중에서 왕겨는 국민소득증대에 따라 난방 연료 및 그 외의 용도로 활용되지 못하면서 재활용

할 분야가 마땅하지 못한 실정이다. 왕겨는 규소가 많이 함유되어 있어 물성이 까슬거리며 잘 분해되지도 않고 부드럽지 못해 퇴비제조나 축사의 바닥재로서 한동안 비교적 많이 사용되다가 근래에는 그 활용도가 적은 편이다. 또 왕겨는 겉보기 밀도가 낮아

<sup>+</sup> 본 논문은 한국과학재단 지원 첨단원예기술개발연구센터 연구비 지원에 의한 것임

\* 충북대학교 농업기계공학과

취급이 곤란하고 운반비가 많이 들며 수분을 잘 흡수하지 않고 쉽게 부패되지 않을 뿐아니라 먼지 발생이 많다.

이러한 문제점에도 불구하고 지금까지 다방면으로 왕겨의 효율적 이용 방법에 대한 연구가 시도되었고 이에 대한 세계적인 현황이 총설로 발표되었다 (Beagle, 1978). 지금까지 시도되었거나 이용되고 있는 방법은 왕겨를 연소시켜 그 열을 곡물 건조에 이용하는 방법(山下와 李昇揆, 1990), 미곡종합처리장에서 소각하여 연소열을 활용하는 방법(진영덕 등, 1995), 왕겨를 가스화시켜 그 가스를 농용 석유기구의 구동을 위한 연료로 사용하는 방법(조명제와 이영재, 1983), 왕겨내에 규소 성분이 많으므로 연소 후 재로부터 규소를 추출하여 반도체 및 태양전지용 규소로 이용하는 방법(Ikram과 Alchter, 1988), 연소 후 왕겨의 재를 고무의 충전제로 사용하거나(Haxo와 Mehta, 1974), 시멘트의 일부를 대체하는 보조제로 사용하는 방법(Malhotra, 1993, 김명호 등, 1997) 등 여러 가지를 열거할 수 있다. 국내에서는 70년대 초부터 일부 연초 재배 농가에서 미경작지 토양과 혼합하여 무균 상토 재료로서 이용해 왔지만 사용량은 많지 않았다. 최근에는 양액재배가 확산되면서 흐르는 냇물에 양젓물을 제거한 훈탄을 지주물질로 활용되기도 하였으나 확대 보급되지 못하였다.

근래 미국 종합처리장의 설치가 계속 증가해 감에 따라 짧은 시간에 대량으로 배출되는 왕겨의 처리가 관심의 대상이 되고 있는 실정이다. 한편 식생활 향상의 변화에 따라 무공해 혹은 저공해 농산물의 선호도가 높아지면서 수요를 충족시키기 위한 시설재배 면적은 날로 확장되고 있고 최근에는 유리온실의 보급이 크게 증가하고 있는 실정이다. 시설은 현대화되었지만 생산기반인 배양토 재료는 아직 기술확립이 되지 못한 실정이며 기존의 다양한 퇴비상토나 혹은 피트모스, 수피 및 압면 등의 자재들을 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 이러한 실정을 감안할 때 큰 시설비 부담없이 왕겨를 이용하여 청정한 배

양토를 제조한 후 육묘용, 화훼용 그리고 양액 재배용으로 대체하여 활용한다면 왕겨의 효율적 이용 뿐 아니라 미국 종합처리장의 왕겨처리는 물론 농업 생산성을 증대시켜 농업발전에 이바지 할 수 있을 것이다.

따라서 이 연구에서는 연소되기 어려운 물질의 연소에 적합하고 간단한 장치로 시설비가 염가인 사이클론 연소기를 선택하여 짧은 시간에 대량으로 왕겨를 부분 연소된 탄화왕겨를 제조하는 것을 목적으로 한다. 탄화조건에는 왕겨가 연소된 후에도 왕겨의 형태를 거의 유지하여 양호한 통기성과 수분 보존능력을 가지며, 탄화물 자체의 함수능이 높은 특성을 갖고, 더 나아가 병원성 미생물의 살균된 탄화왕겨를 제조해야 하는 점, 무게 감량으로 약 50% 정도 연소시킨 상태의 탄화왕겨의 제조 등이 있다.

## 2. 실험장치 및 방법

연구목적에 달선하기 위해서는 우선 왕겨의 완전 연소가 아닌 탄화조건에서 왕겨를 수거하기에 적합하다고 생각되는 사이클론 연소기를 설계하여야 한다. 또 왕겨가 완전연소가 되지 않는 연소실 온도에서 연소기를 작동시킬 수 있도록 설계하여야 한다. 그러나 제약조건으로 왕겨 자체 발열량을 최대한 이용하여 가능한 한 보조열원을 사용하지 않는 것이 바람직하다.

그림 1은 이 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 터보팬 송풍기(0.75kW)에서 연소실에 공기를 공급하고 송풍량을 조절하기 위하여 글로브 밸브를 설치하였다. 공기유량을 측정하기 위하여 밸브 다음에 유량계(Flowcell FGT 012718)를 설치하였다. 왕겨는 호퍼에서 변속모터와 연결된 로타리 휘더에 의해 공급된다. 연소기는 비용융방식 수직형 사이클론 연소기로 중앙 회분 수거함(CCP: Central Collector Pocket) 외에 또 하나의 보조회분 수거함(VCP: Vortex Collector Pocket)이 부착된 형태를 채

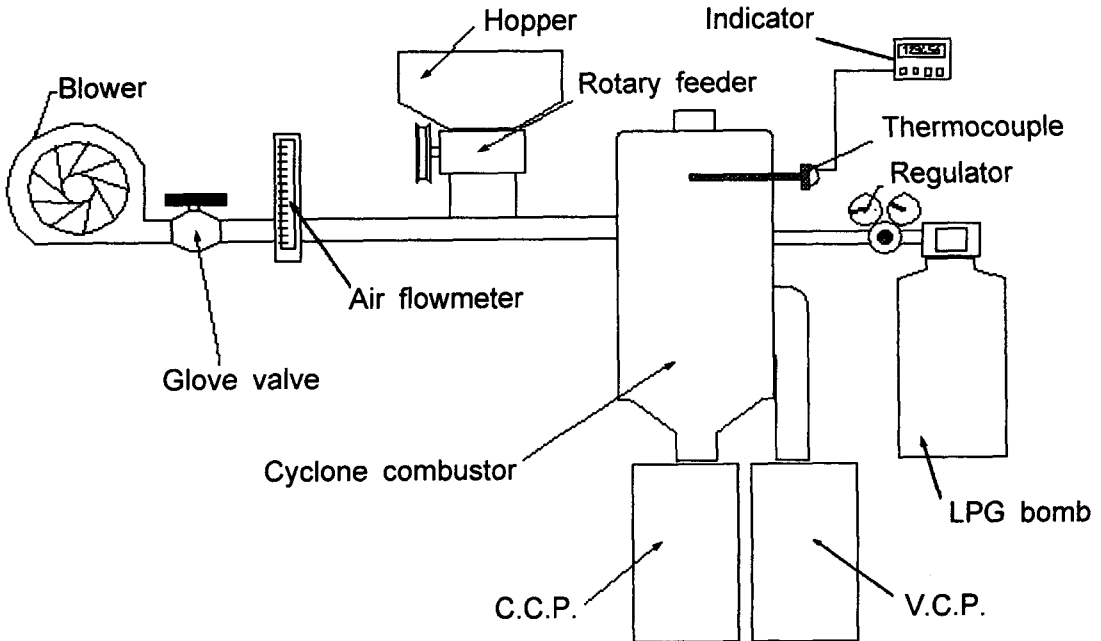


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

택하였다. 보조회분 수거함은 왕겨가 연소되는 도중의 상태에서 탈휘발화가 끝난 상태에서 탄화 왕겨를 수거할 목적으로 설치하였다(MacGregor 등, 1988). 연소실의 주요한 제원은 표 1에 나타내었다. 연소기 내의 온도는 R-Type 열전대를 사용하여 측정하였다. 점화 및 보조 연료는 구입하기 쉽고 염가이며 보통 많이 쓰이는 LPG를 채택하여 사용하였다.

연소실험에 앞서 로타리 휘더의 회전속도에 따라

연소기에 공급되는 왕겨의 양을 측정하기 위하여 비연소 실험을 행하였다. 중앙회분 수거함과 보조회분 수거함에서 포집된 왕겨는 정밀저울(Satorius AG)로 무게를 측정하였다. 송풍기에서 공급되는 공기유량을 글로브 밸브로 조정하여 20~65m<sup>3</sup>/h 사이로 변화시키고, 휘더의 회전속도는 300~1,500rpm 사이에서 변화시켜 두 개의 수거함에 포집된 왕겨의 양을 3회씩 반복하여 정밀저울로 측정하였다.

연소실험은 예비 실험 결과 연소기 내부 온도가 700℃ 이하에서는 왕겨가 완전히 연소되는 반면 그 이상의 온도에서는 어느 정도 탄화 조건에 맞는 탄화왕겨를 제조하는 것이 가능하였다. 이 점은 기존의 왕겨 연소에 관한 연구결과와 일치하였다(Ganesh 등, 1992). 따라서 연소실험을 수행할 때 연소실은 LPG를 연소시켜 예열하여 벽온도를 약 1,000℃±100인 상태에서 왕겨를 공급시켜 실험을 수행하였다. 왕겨가 이 온도에서 연소될 때 병원성 미생물이 살균된 탄화왕겨를 제조할 수 있으리라 생각된다. 또 왕겨가 완전연소가 될 경우는 자체 발열

Table 1 Principal dimension of cyclone combustor

Cyclone combustor	Dimension (mm)
Chamber diameter	158
Chamber length	240
Tangential inlet diameter	26
Vortex finder diameter	76
Exhaust diameter	60
Vortex collector pocket diameter	70

Table 2 Ultimate analysis of rice husk sample used

	C	H	O	N	S	Ash	Calorific value (kJ/kg)
Dry basis (wt %)	39.91	5.58	33.87	0.31	0	20.33	12,160

량에 의해 연소가 지속되지만, 부분연소 및 탄화조건에서 중간에 왕겨를 수거하므로 자체 발열량을 이용하지 못해 혼탄의 생산에서는 보조연료를 사용하지 않은 경우는 연소가 지속되지 않았다.

따라서 보조연료의 혼합정도를 나타내기 위하여 LPG의 혼소율을 다음과 같이 계산하였다.

$$MFR = G_L H_L / (G_R H_R + G_L H_L) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 MFR(Mixed Firing Ratio)은 LPG의 혼소율(%),  $G_R$ 은 왕겨의 공급량(kg/h),  $G_L$ 은 LPG의 공급량( $m^3/h$ ),  $H_R$ 은 왕겨의 고발열량(kJ/kg),  $H_L$ 은 LPG의 고발열량(kJ/ $m^3$ )을 나타낸다. 혼소율은 로타리 휘더의 회전속도에 따라 왕겨 공급량이 달라지고 또 공기유량 및 보조가스 유량에 따라 변수가 되므로 탄화왕겨의 생산에 경제성을 평가하는 하나의 인자가 될 수 있다.

실험에 사용한 시료는 청주근교의 오창 미곡종합처리장에서 채취하였으며 품종은 동진의 왕겨에 해당한다. 원래 왕겨의 원소분석과 발열량을 표 2에

나타내었다. 건조상태의 시료를 세 번 분석한 값의 평균을 취하였다

이 연구에서는 가능한 한 무게 감량이 50% 정도에 가까운 탄화왕겨를 제조하는 것이 목적이므로 무게 감량을 연소전의 왕겨량과 연소 후의 왕겨량의 무게 차이를 연소 전의 왕겨량으로 나눈 값을 백분율로 나타내었다. 또 탄화 왕겨의 연소상태를 알아보기 위해 고려대학교 기초과학연구소에 의뢰하여 탄화된 왕겨의 원소분석(Vario EL, Carlo Erba)을 실시하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 가. 비연소 실험

표 3은 비연소 실험에서 공기유량  $Q_A$ 와 로타리 휘더의 로타 회전수  $V_m$ 에 따라 중앙회분 수거함과 보조회분 수거함에 포집된 왕겨의 양을 각 조건에서 3회 반복 실험하여 1분동안 포집된 양의 평균값을 무게로 나타낸 것이다. 표 3으로부터 유량의 증가에 따라 또 회전수의 증가에 따라 중앙회분 수거함과

Table 3 Collected amounts of rice husks in VCP and CCP [g]

Feeder speed (rpm) Air flow rate ( $m^3/h$ )	300		600		900		1200		1500	
	VCP	CCP	VCP	CCP	VCP	CCP	VCP	CCP	VCP	CCP
20	76.75	145.93	50.73	123.18	38.97	116.22	31.70	109.17	26.70	96.87
25	31.34	134.69	25.94	96.99	22.33	77.78	22.03	56.58	19.03	43.48
35	65.73	20.63	49.91	26.63	46.03	14.31	32.53	16.15	26.46	15.51
45	45.46	0.00	41.85	0.02	39.98	0.08	29.73	0.43	22.29	0.56
55	34.98	0.00	28.86	0.01	27.44	0.00	26.48	0.00	19.61	0.00
65	28.58	0.00	23.13	0.00	22.73	0.00	19.16	0.00	16.15	0.00

보조회분 수거함 모두 포집량이 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 공기유량이 45 m<sup>3</sup>/h 이상에서는 중앙회분 수거함에 포집되는 양이 거의 없고 보조회분 수거함에만 포집되는 현상을 보였다.

그림 2는 표 3의 조건과 같은 실험조건에서 전체 왕겨 포집량의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 로타리 휘더의 로타 회전수의 증가에 따라 전체 포집량은 공기유량 20 m<sup>3</sup>/h의 경우 급격하게 감소하지만 나머지 공기유량의 경우에는 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다. 또 공기유량 45 m<sup>3</sup>/h 이상의 경우에는 포집량이 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 표 3과 그림 2에서 나타나는 현상은 로터리 휘더의 속도가 빨라지면 호퍼에서 자체 하중에 의해 왕겨가 로터리 휘더의 양 날개사이에 채워지지 않고 회전하기 때문이고, 공기 유량이 증가하면 관 내의 공기속도가 증가하게 되고 왕겨 무게가 가벼워 공기 중에 부유되지 않고 오히려 로터리 휘더 출구를 막는 현상이 나타나기 때문인 것으로 추측된다.

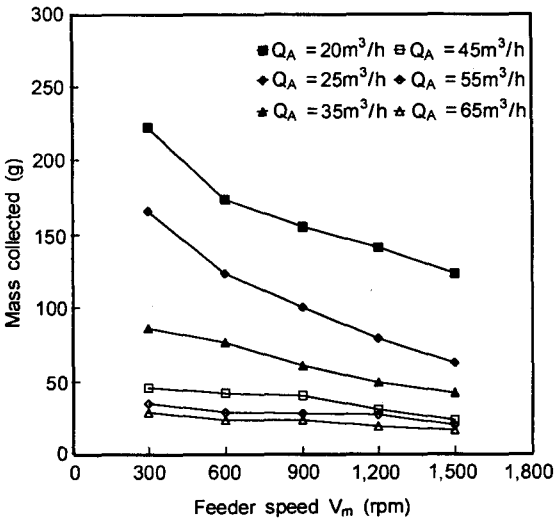


Fig. 2 Effect of feeder speed on mass of rice husks collected for different air flow rates.

#### 나. 연소실험

그림 3은 공기유량이 20 m<sup>3</sup>/h로 일정한 경우 휘더의 속도가 연소된 후 왕겨의 무게 감량에 미치는 영향을 나타낸 것이다. LPG유량이 0.45 l/min의 경우 휘더 속도에 따라 중앙회분 수거함에서는 무게감량이 50% 약간 밑도는 경향을 보이지만 보조회분 수거함에서는 휘더 속도 1,000 rpm 이상이 될 때 무게감량 50% 정도를 나타낸다. 반면에 LPG 유량이 0.96 l/min의 경우는 중앙회분 수거함에 포집된 왕겨 혼탄의 무게감량은 25% 근처이지만 보조회분 수거함에 포집된 왕겨 혼탄의 무게 감량은 50% 근처를 나타내었다.

그림 4는 휘더 속도 300 rpm, LPG유량 0.96 l/min의 경우 공기유량이 연소된 후 왕겨혼탄의 무게감량에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 공기 유량이 45 m<sup>3</sup>/h 이후에서는 왕겨가 중앙회분 수거함에 전혀 포집되지 않았기 때문에 중앙회분 수거함과 보조회분 수거함의 구분없이 전체량으로 표시하였다. 그림

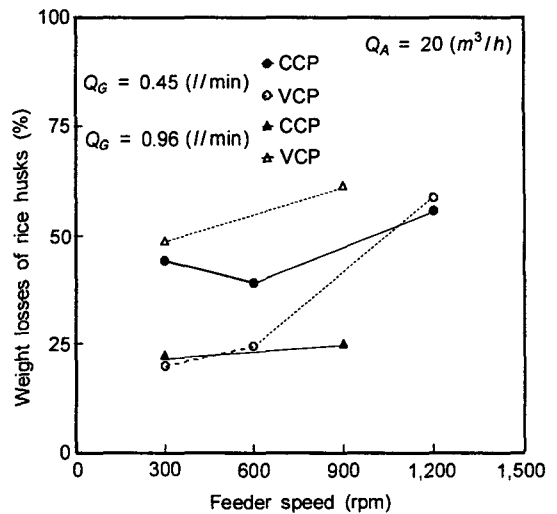


Fig. 3 Variation of weight losses of rice husks with feeder speed.

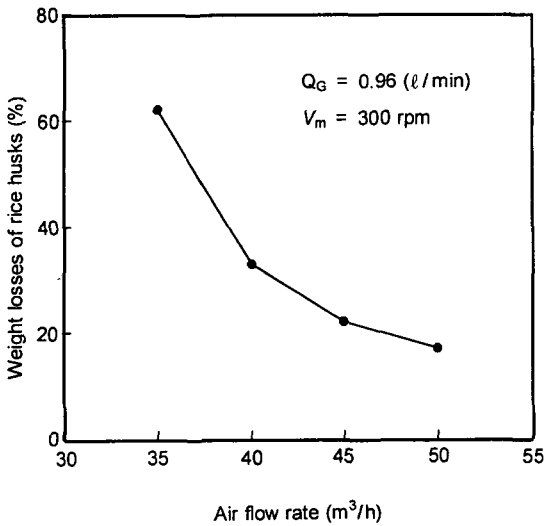


Fig. 4 Variation of weight losses of rice husks with air flow rate.

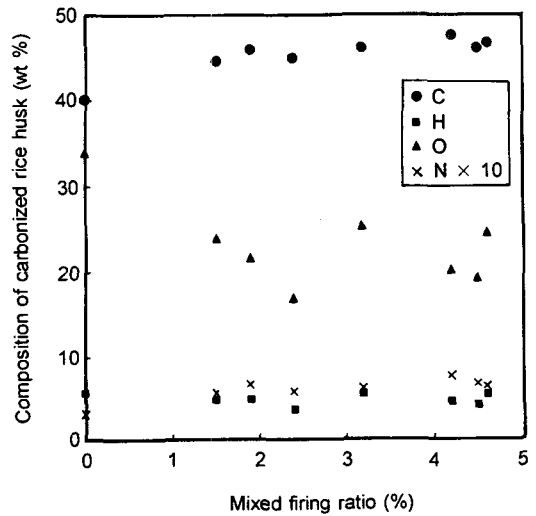


Fig. 5 Effect of mixed firing ratio on composition of carbonized rice husk.

에서 공기유량이 증가할수록 왕겨의 무게 감량은 감소하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 공기 유량의 증가로 관내 공기 속도의 증가를 유발하여 채 연소되지 못하고 원심력에 의하여 보조회분 수거함으로 빠른 속도로 포집되기 때문이다.

그림 5는 혼소율이 탄화된 왕겨의 조성에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 혼소율의 증가에 따라 탄소, 수소, 질소의 양은 그다지 큰 변화를 보이지 않지만 산소의 양은 변화가 심한 것을 알 수 있다. 원래 왕겨의 조성과의 비교를 하기 위해 원래 왕겨의 조성은 편의상 0% 혼소율로 표시하였다.

원래 왕겨의 조성과의 비교할 때 수소와 질소는 그다지 변화가 없지만 나머지 성분은 변화가 심한 것을 알 수 있다. 탄소의 경우 원래 왕겨보다 탄화된 왕겨가 증가하는 반면에 산소의 경우는 원래 왕겨의 함유량보다 탄화된 왕겨가 훨씬 감소하는 것을 알 수 있다. 탄소가 증가하는 것은 왕겨의 수분이나 휘발분만 연소되어 감량이 되고 보조가스의 연소에 의해 생성되는 탄소가 왕겨와 반응하여 생성되는 것으로 추정할 수 있다. 산소가 감소하는 것은 공기 중의

산소가 모두 소비되고 탈휘발화상태에서 왕겨 자체에 함유되어 있는 산소까지 반응에 참여하는 것으로 볼 수 있다.

그림 6은 보조가스의 유량이 탄화된 왕겨의 조성

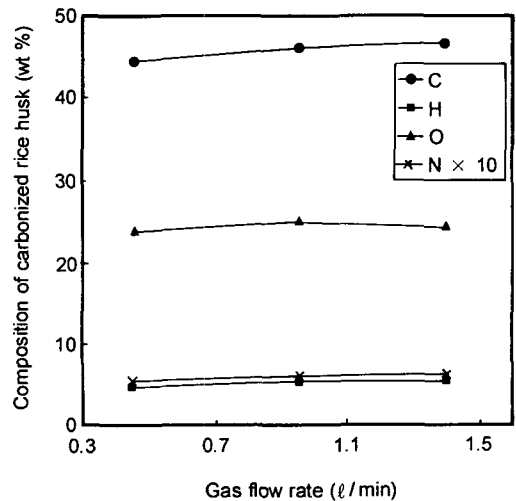


Fig. 6 Effect of gas flow rate on composition of carbonized rice husk.

에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 경우는 공기유량 20 m<sup>3</sup>/h, 로타리 휘터 속도 300 rpm의 같은 조건에서 보조가스의 유량만 변화시킨 것이다. 이 그림으로부터 수소, 산소, 질소는 보조가스 유량의 증가에 따라 그다지 변화하지 않지만 탄소의 경우는 선형적으로 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6의 결과로부터 탄화된 왕겨의 조성 중 탄소가 증가하는 현상은 탄화수소계 연료인 LPG의 연소에서 여분의 탄소가 왕겨와 반응한 결과이며, 산소가 감소하는 현상은 왕겨의 공급량에 따라 달라진다는 사실을 알 수 있다.

전반적으로 불 때 사이클론의 형상에서 보조회분 수거함은 보조가스 유량이 클 때 효과적이지만 보조가스 유량을 가능한 한 적게 하는 것이 경제적으로 바람직하므로 중앙회분 수거함으로 충분한 것을 알 수 있다. 또 탄화왕겨의 제조에는 왕겨 자체 발열량을 전부 이용하지 못하므로 보조 열원을 도입할 수밖에 없었다.

#### 4. 결 론

무게 감량 50% 정도에 가까운 탄화왕겨를 제조하기 위하여 중앙회분 수거함과 보조회분 수거함이 부착된 비용용방식의 사이클론 연소기를 채택하여 실험을 수행하였다.

목적하는 바의 탄화왕겨를 제조하는 것이 가능하였으나 보조 연료없이 연소가 지속되는 것이 불가능하였다. 공기유량은 20 m<sup>3</sup>/h 이하에서, 보조가스의 유량은 0.45 l/min에서 무게 감량이 50% 근처의 왕겨혼탄을 제조할 수 있었다. 이 조건에서 보조회분 수거함의 효용성은 그다지 크지 않은 것을 알 수 있었다. 제조된 왕겨 혼탄의 조성 중 원래 왕겨와 비교해서 탄소의 양이 더 많았는데 그 이유는 보조가스의 연소에 따른 영향임을 알 수 있었다. 또 산소의 양은 감소하는데 그 이유는 왕겨의 공급량의 영향임을 알 수 있었다.

앞으로 보완할 점은 연소실 벽의 단열이 필요하고 경제성을 고려할 때 가능한 한 보조가스의 유량을 적게 하는 것이다. 또 연소실 벽온도를 변화시키고 환경오염문제에 대비하기 위해 배기가스에 대한 분석이 요구된다.

후기 : 이 연구에 많은 조언을 주신 충북대학교 농학과 홍순달 교수님과 실험 수행에 도움을 준 농업기계공학과 4학년 김성언 군에게 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 김명호, 김철수, 박승제. 1997. 파이로트규모 왕겨 소각로의 성능에 관한 연구, 한국농업기계학회지 22(1):21-29.
2. 山下律也, 李昇撥. 1990. 日本의 收穫後處理技術의 發展(I). 한국농업기계학회지 15(1):63-76.
3. 조명제, 이영재. 1983. 왕겨가스에 의한 농용석 유기관의 구동에 관한 연구. 대한기계학회논문집 7(2):233-239.
4. 진영덕, 장동일, 장동순, 김만수, 장홍희. 1995. 미국종합차리장 발생 왕겨 폐기물의 소각처리 및 연소열의 활용에 관한 연구. 한국농업기계학회지 20(3):250-261.
5. Beagle, E. C. 1978. Rice-husk : conversion to energy. FAO Agricultural Services Bulletin 31.
6. Ganesh, A., Grover, P. D. and P. V. R. Iyer. 1992. Combustion and gasification characteristics of rice husk. Fuel. 71:889-894.
7. Haxo, H. E. and P. K. Mehta. 1974. Ground rice-hull ash as a filler for rubber, Rubber Chemistry and Technology. 48:271-288.
8. Ikram, N. and M. Akhter. 1988. X-ray diffraction analysis of silicon prepared from rice husk ash. J. of Materials Science, 23:2379-2381.

9. MacGregor, S. A., S. Y. No and N. Syred. 1988. Exploring the limits of the performance of coal fired cyclone combustors. Coal combustion-Science and Technology of Industrial and Utility Applications. Feng J.K.(ed.). Hemisphere Publish-

ing Corp. 787-794.  
10. Malhotra, V. M. 1993. Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete: a review. Concrete International. 23-28.

수정공고

한국농업기계학회지 22권 4호에 게재된 『지중매설관 특성이 토양-공기 열교환기 성능에 미치는 영향』 논문중 P. 464의 그림 2(a)가 인쇄착오로 잘못 게재되었으므로 아래의 그림으로 수정합니다.

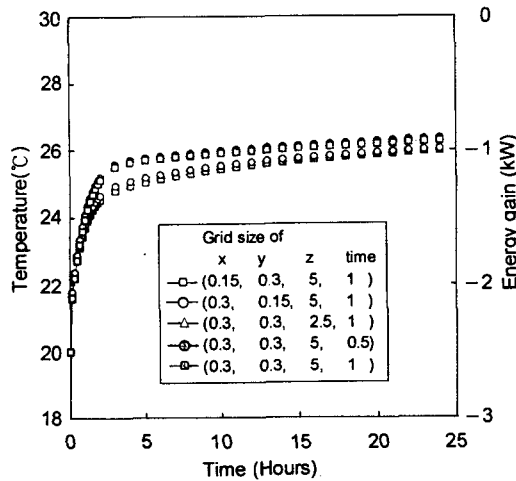


Fig. 2(a) Temperature and energy gain variations of the outlet air depending on the grid size(unit: m) and time(unit: minute) increment for numerical analysis.