

# 사이클론 연소기를 이용한 탄화왕겨의 제조(II)<sup>†</sup>

## Production of Carbonized Rice Husk by a Cyclone Combustor(II)

김 원 태\*      노 수 영\*\*  
정희원      정희원  
W. T. Kim      S. Y. No

### ABSTRACT

One of effective utilization method of rice husk is to utilize it as culture material by carbonizing the rice husk. As a second part of a series to investigate the effective and continuous production of carbonized rice husk by a cyclone combustor, a non-slugging vertical cyclone combustor without vortex collector pocket was introduced. Isothermal and mixed firing with LPG and rice husk were undertaken in order to characterize the system. Inert rice husk was used during the isothermal test to find mass of rice husk collected. It was impossible to ignite rice husk itself over the experimental conditions considered in this experiment.

Cyclone combustor was operated at temperatures of 1,273~1,473K. Detailed combustion data were obtained from a pilot unit with the air flow rate of 70m<sup>3</sup>/h and rice husk feed of 2kg. The equivalence ratio ranged from 0.66 to 3.48. The auxiliary gas flow rate was varied from 3.22 to 12.86ℓ/min. The weight reduction, pH and particle size distribution of carbonized rice husk were measured to evaluate the quality of carbonized rice husk. An analysis of exhaust gas emission was conducted to characterize the combustor. The required carbonized rice husk could be obtained at equivalence ratio of 1.68~2.17, combustor temperature of 1,273~1,373K and auxiliary gas flow rate of 3.22~6.43ℓ/min. A method to reduce CO emissions should be employed.

**주요-용어(Key Words):** 탄화왕겨(Carbonized rice husk), 사이클론 연소기(Cyclone combustor), 혼소율(Mixed firing ratio), 보조연료(Auxiliary fuel), 당량비(Equivalence ratio)

### 1. 서      론

왕겨는 쌀을 생산하는 나라에서 많이 발생하는 농업부산물이다. 우리 나라에서 연간 생산되는 미곡 및 맥류의 생산량은 조곡기준으로 1997년 현재 약 7,314천 톤이다.<sup>1)</sup> 벼로부터의 왕겨는 곡물의 품질, 기후 조건에 따라 약간씩 차이가 나지만 생산량중 약 10~20%가 왕겨로 발생된다고 한다.<sup>2)</sup> 까슬거리는 특성, 낮은 영양분, 연마에 대한 높은 저항성, 낮은 산물체적밀도, 그리고 왕겨의 높은 회분 함량 등은 왕겨의 효율적인 이용에 있어서 많은 제한을 주

고 있다. 왕겨는 17~22%의 높은 회분 함량을 갖고 있고 그 회분에는 높은 규소 성분을 지니고 있는데 약 95~97%의 실리카를 포함하고 있다고 보고되어 있다.<sup>3)</sup>

에너지원으로서의 왕겨의 이용에 대한 포괄적인 연구는 Beagle에 의해서 보고되었다.<sup>4)</sup> 실제로 일부 왕겨를 효율적으로 이용하려는 노력은 실리콘 원료로서의 이용<sup>5)</sup>, SiC<sup>6)</sup>, 곡물 건조용 연료<sup>7)</sup>, 가스엔진용 연료<sup>8)</sup>, 시멘트 혼화재 및 시멘트 물질<sup>9)</sup>, 고무 충전재<sup>10)</sup>, 축산농가에서 가축의 깔개, 가축용 사료, 여과재, 도로건설에 있어서 노반과 지반의 안정화를 위한 도

<sup>†</sup> 이 연구는 한국과학재단지정 충북대학교 첨단원예기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

\* 충북대학교 대학원

\*\* 충북대학교 농업기계공학과

로점토 강화재<sup>11)</sup>, 판자생산, 활성탄 등 그 외 여러 가지가 있다. 또 다른 왕겨의 효율적인 이용법은 무균 상토재료로서의 탄화왕겨이다.<sup>12-15)</sup>

여러가지 문헌에서 탄화왕겨(carbonized rice husk)는 왕겨혼탄, carbonated rice husk, char from rice husk, chaff cinder, chaff charcoal 등으로 종종 혼용되어 불리고 있다. 탄화왕겨는 조립, 목목생산, 원예, 과수 및 채소재배에 있어서 토양을 개선해 줄 목적으로 사용될 수 있다. 탄화왕겨는 비료는 아니지만 식물을 빠르게 그리고 원기왕성하게 성장시킨다. 따라서 탄화왕겨는 양호한 통기성과 수분보존 능력을 가지며 토양 및 수분의 온도를 유지시켜 주는 배양토로 바람직한 물질이다.

이 연구는 사이클론 연소기를 이용하여 탄화왕겨를 연속적으로 생산하기 위한 연구의 연속적인 결과이다. 연속적인 연구의 첫 번째 연구에서는 탄화왕겨의 효율적인 생산을<sup>16)</sup> 위한 보조회분 수거함을 장착한 사이클론 연소기<sup>17)</sup>의 가능성을 입증하였다. 그러한 결과로부터 보조회분 수거함은 효율적이지 못하고 연소기는 내화벽을 설치해 주어야 함을 알 수

있었다.

따라서 이 연구의 목적은 내화벽을 설치한 일반적인 비용융방식의 수평형 사이클론 연소기를 이용해 탄화왕겨의 효율적이고 연속적인 생산방법을 개발하기 위한 것이다. 무균 상토재료용 탄화왕겨는 원래의 왕겨의 형태를 그대로 유지해야 하며 모든 균들이 제거되어야만 한다. 왕겨의 무게 감량은 재래식으로 왕겨혼탄 제조시 상토재료용 탄화왕겨는 무게 감량 50%인 것으로 나타났다. 무게 감량의 정의는 (탄화왕겨무게/생왕겨무게)×100(%)로 하였다. 이는 기존의 탄화도 또는 무게 감소율로 호칭하기도 한다.<sup>12-14)</sup>

## 2. 재료 및 방법

실험장치의 전체적인 개략도를 그림 1에 나타내었다. 주된 실험장치로는 비용융 방식 수직형 사이클론 연소기, 왕겨의 연속적인 공급을 위한 스크류 워더, 호퍼, 그리고 스크류 워더를 구동시키기 위한 VS-전동기를 사용하였다. 또한 연소실 내부로의 강

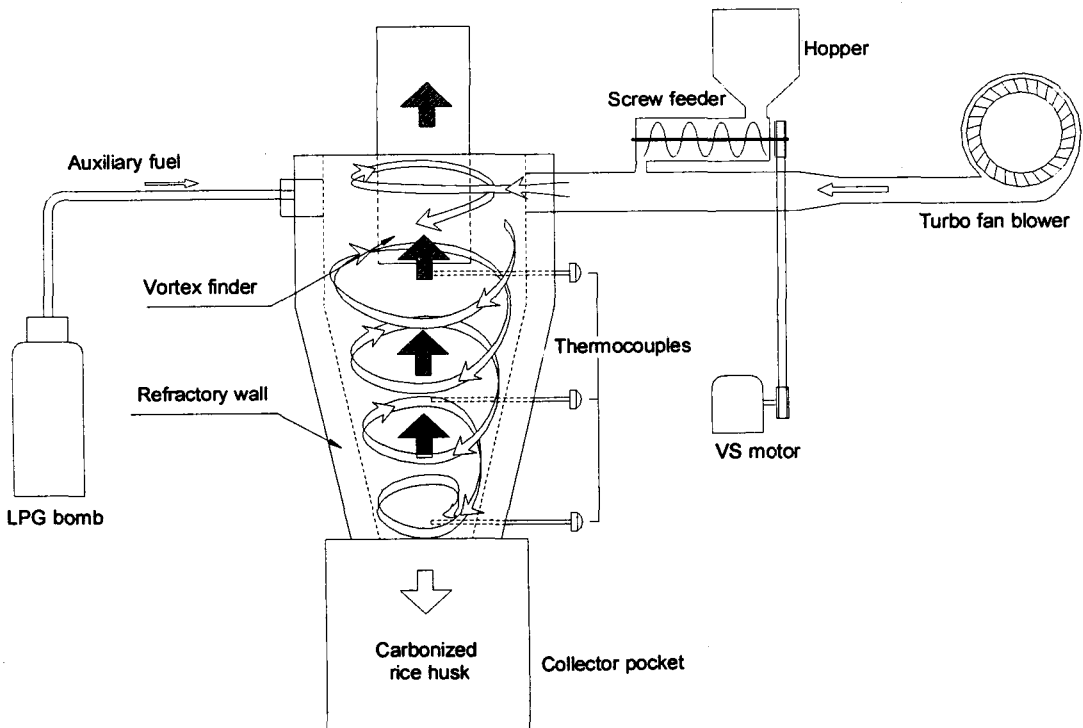


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Dimension of cyclone combustor test-ed

Cyclone combustor	Dimension (mm)
Chamber diameter	460
Chamber length	891
Tangential inlet diameter	75
Exhaust diameter	230
Central pocket diameter	230

한 선회와 연소에 필요한 공기의 공급을 위해서 0.76kW의 터보팬 송풍기를 사용하였다. 실험에 사용된 연소기의 주된 재원을 표 1에 나타내었다. 공기는 터보팬 송풍기에 의해 사이클론 연소기로 공급된다. 호퍼 안에 투입된 왕겨는 스크류 컨베이어를 통하여 이송이 되는데 이때 공기와 혼합되어 연소기 내부로 공급된다. 왕겨와 공기는 배기가스 출구인 볼텍스 파인더(vortex finder)에 인접한 벽면에 단일 접선방향으로 연소기 내부로 흘러 들어가게 된다. 볼텍스 파인더는 접선 방향의 흡입구 바로 아래까지 설치되어 있으며 연소실 바닥을 향해 유동을 유도하는 역할을 한다. 연소실 벽과 볼텍스 파인더 사이에 공간이 형성되고 유동은 원형선회제트가 여기에서부터 형성된다. 유동은 연소실의 가장 자리를 따라 연소실 바닥의 벽까지 통과하게 된다. 유동의 대부분이 연소실 전체로 확장되지 않고 점차적으로 배기로 빠져나가게 된다.<sup>18)</sup>

왕겨 시료의 원소 분석과 발열량 값은 표 2에 나타내었다. 실험에 사용된 공시재료는 청주 근교의 오창 미곡종합처리장(RPC)에서 수집하였으며, 이 근방에서 채매되는 대부분의 벼 품종은 '동진'이었다. 비연소 실험 및 혼소 실험은 장치의 조건을 찾아내기 위해 실시되었다. 포집된 왕겨의 질량을 찾아내기 위해 비연소 실험에서 비연소 상태의 왕겨가 사용되었다. 상용 LPG는 연소실을 예열하고 보조 연료의 목적으로 사용되었다. 장치내로 공급되는 공기는 일정하게 유지하였으며 혼합은 왕겨의 공급을

변화에 의해 변경하였다. 한 조건의 실험에 사용된 왕겨는 2kg( $M_p$ )이었고 공기유량은 70m<sup>3</sup>/h( $Q_a$ )로 유지하였다. 이것은 대략 5m/s의 연소기 입구 속도에 상당하는 것이다.

온도의 분포는 3개의 연소실 내부에서 각기 다른 위치, 즉 (1) 볼텍스 파인더 아래  $T_1$ , (2) 연소기 중간  $T_2$ , (3) 연소기 하단부  $T_3$ 에서 측정하여 구하였다. 이것은 상단, 중간, 하단부의 연소실 온도로서 각각 호칭하기로 한다. 온도의 측정에는 R형의 열전대를 이용하였다. 연소기의 초기 온도는 상단부 온도를 기준으로 하였다.

Ganesh 등은 불완전한 탄소의 변환에 관한 문제를 이해하기 위해서 왕겨의 연소 및 가스화 특성에 대해 연구하였다.<sup>19)</sup> 그들의 결과에 의하면 973K보다 높은 온도에서는 불완전한 연소가 진행되며 반면에 그보다 낮은 온도에서는 완전한 연소가 진행되었다. 이 연구의 목적, 즉 왕겨의 부분적인 연소를 달성하기 위해서 연소기의 초기 예열온도를 1,273K, 1,373K, 1,473K로 각각 선택하였다. 연소기를 이러한 온도까지 예열시키는데 걸리는 시간은 약 30분이었는데 이 때 소모된 LPG의 양은 약 6kg 정도였다. 최적의 보조가스 유량을 찾아내기 위해서 LPG의 공급유량( $Q_g$ )은 혼소를 실험에서 3.22~12.86 l/min 사이에서 변화시켰다. 이론 공연비 대 실제 공연비로서 정의된 당량비는 연소기 내부로 공급된 공기와 연료로서 사용된 왕겨만 고려하여 계산하였다. 당량비는 0.66~3.48의 범위에서 실험이 진행되었다. 배기가스의 분석은 휴대용 오염물질 분석기(ENERAC-2000E, U.S.A.)를 통해 실시하였다. 탄화시킨 왕겨의 pH 측정을 위해서는 이온미터(ATI Orion 940, U.S.A.)를 사용하였다. 또한 탄화왕겨의 입자크기 분포를 파악하기 위해 표준체를 사용하였다.

실험은 왕겨의 무게 감량에 미치는 연소기의 온도, 당량비와 보조가스의 공급량의 영향을 파악하고 생산된 탄화왕겨의 pH 및 입자크기 분포 등을 주로 조사하는 것으로 이루어졌다.

Table 2 Ultimate analysis of rice husk

	C	H	O	N	S	Ash	Calorific value (MJ/kg)
Dry basis (wt %)	39.91	5.58	33.87	0.31	0	20.33	12.16

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 연소실 상단 예열온도  $T_{1b} = 1,373K$ 에서 보조가스 유량의 변화에 따른 연소기내의 중간 및 하단부의 온도 분포에 대한 전형적인 예를 보여주고 있다. 당량비의 증가에 따라 왕겨의 연소 후 연소실 하단부  $T_{3a}$ 의 경우를 제외하곤 모든 조건에서 온도의 차이가 거의 없다. 또한 보조가스 유량의 변화에 따른 모든 당량비에 대해 온도변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 연소전( $T_{2b}$  또는  $T_{3b}$ )과 연소 후( $T_{2a}$  또는  $T_{3a}$ ) 사이에 왕겨의 연소때문에 약 300~350K의 온도차가 있음이 분명하다. 또한 연소전 연소실 중간부에서 보다 연소실 하단부에서 더 낮은 온도가 나타남을 발견할 수 있었다. 연소실 상단부의 각각 다른 예열온도에서는  $T_{1b} = 1,373K$ 에서와 비슷한 경향을 나타내었다.

예열온도  $T_{1b} = 1,373K$ 에서 각각의 보조가스 연료량에 따른 탄화왕겨의 무게 감량에 있어서의 당량비 효과를 그림 3에 나타내었다. 탄화왕겨의 무게 감량은 당량비의 증가에 따라 두드러지게 감소하였다. 탄화왕겨의 무게 감량에 미치는 보조가스 유량의 영향은 그다지 크지 않았다. 또 무게 감량 50% 근처의 탄화왕겨는 당량비  $\phi = 1.5 \sim 2.2$  근처임을 알 수 있었다. 이런 경향은 다른 초기 예열온도에서도 거의 유사하였다.

그림 4는 당량비  $\phi = 1.68$  과  $\phi = 2.17$ 의 경우에 보조가스 유량의 변화가 탄화왕겨의 무게 감량에 미치는 정도를 각각의 연소기 예열온도별로 나타낸 것이다. 탄화왕겨의 무게 감량은 당량비  $\phi = 2.17$ , 연소기 예열온도  $T_{1b} = 1,273K$ 의 경우를 제외하고는 보조가스 유량 5.15ℓ/min 이상에서 50~60%의 무게 감량을 나타내고 있다. 이것은 탄화왕겨를 제조하기 위해서 연소기의 예열온도  $T_{1b} = 1,273 \sim 1,373K$ , 보조가스 유량 5.15ℓ/min 이상으로 운전조건을 맞추어 주어야 함을 의미한다.

예열온도  $T_{1b} = 1,273K$ 에서 서로 다른 보조가스 유량에 대한 탄화왕겨의 pH에 미치는 당량비의 영향은 그림 5에 나타나 있다. 탄화왕겨의 pH는 당량비의 증가와 함께 감소하였다. 보조가스 유량의 증가는 몇 가지 조건을 제외하곤 탄화왕겨의 pH를 증가시켰다. 식물의 성장 조건에 적절한 pH = 6.0~6.5와 비교해 볼 때 결과에서 보여주는 것은 부가적인 중화처리가 필요함을 알 수 있었다. 위에서 논의된 결과들은 그림 6은 당량비  $\phi = 2.17$ , 예열온도  $T_{1b} = 1,373K$ 에서 각기 다른 보조가스 유량에 대한 탄화왕겨의 전형적인 입자크기 분포를 나타내고 있다. 모든 보조가스 유량에 대해서 탄화왕겨의 입자크기 분포에 대한 누적분포(cumulative frequency)가 생왕겨의 분포와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 입자크기 분포에 있어서 보조가스 유량의 효과는 거의 없었다. 또한 이것은 왕겨의 연소로 인해 입자크기의 근소한 감소가 있었음을 알 수 있었다. 이것은 작

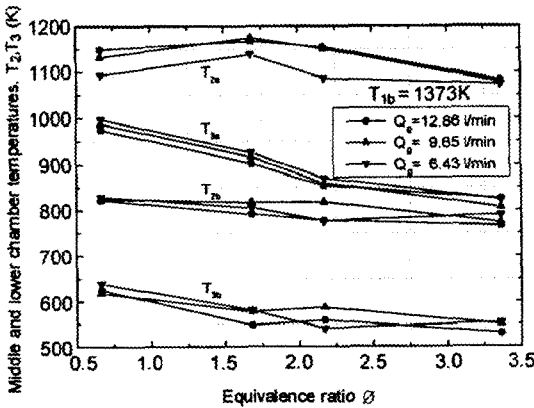


Fig. 2 Effect of equivalence ratio on middle and lower chamber temperatures for gas flow rates. (a : after combustion, b : before combustion,  $T_{1b} = 1,373K$ ).

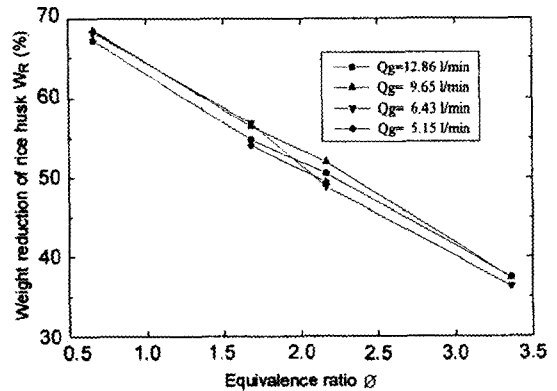


Fig. 3 Effect of equivalence ratio on weight reduction for different gas flow rates. ( $T_{1b} = 1,373K$ ).

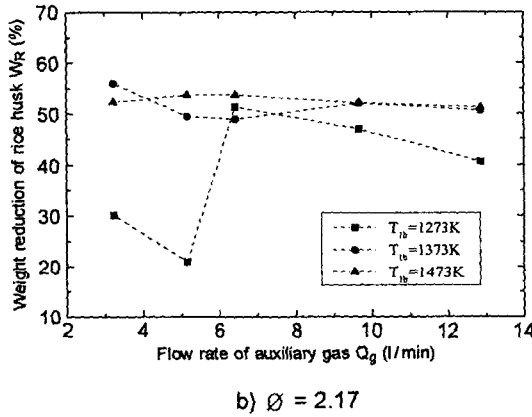
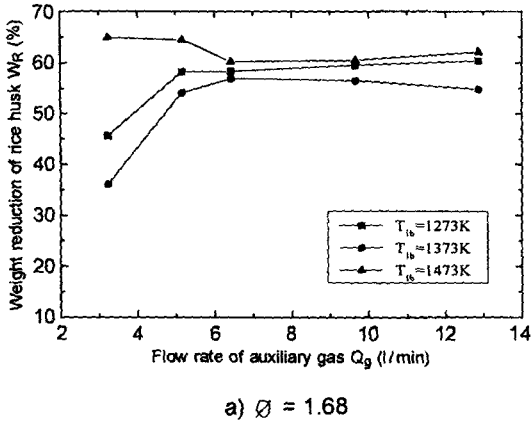


Fig. 4 Influence of auxiliary gas flow rate on weight reduction for various preheat combustor temperatures.

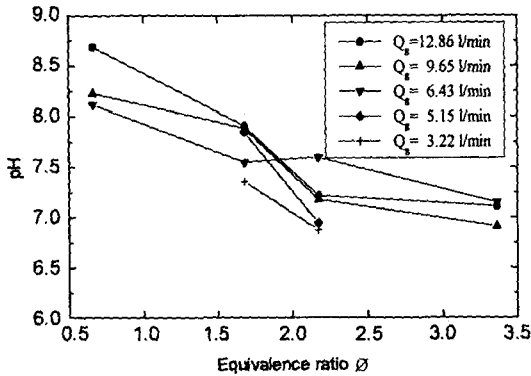


Fig. 5 Effect of equivalence ratio on pH of carbonized rice husk for different gas flow rates. ( $T_{ib} = 1,273K$ ).

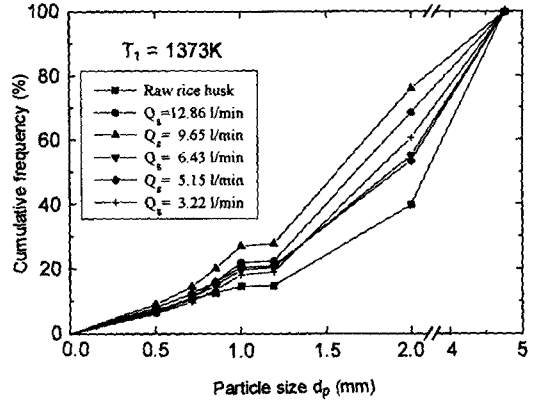


Fig. 6 Particle size distribution of carbonized rice husk for different gas flow rates. ( $\phi = 2.17$ ).

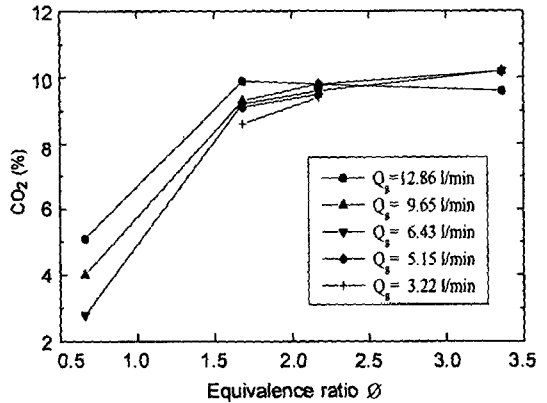


Fig. 7 Effect of equivalence ratio on  $CO_2$  emission for different gas flow rates ( $T_{ib} = 1,373K$ ).

은 입자의 크기 변화보다는 오히려 큰 입자크기의 변화라는 것을 확인할 수 있었다. 연소기 상단부의 각각 다른 예열온도와 당량비의 변화에서 입자크기의 분포는 위에서 이미 언급한 것과 같은 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 60%의 생왕겨와 25~45%의 탄화왕겨가 2~4.76mm 크기 폭에 속하고 있었다.

연소기 예열온도가  $T_{ib} = 1,373K$ 일 때 각각 다른 보조가스 유량에 대한  $CO_2$  발생에 미치는 당량비의 영향을 그림 7에 나타내었다. 당량비  $\phi = 1.68$ 에서  $CO_2$  발생은 상대적으로 10% 이하의 낮은 값에 머물렀다.  $NO_x$ 와  $CO$ 의 분석도 동시에 수행하였다.

당량비가  $\varnothing > 1.68$  인 혼합기일 경우 NOx의 배출은 검출되지 않았다. 반면, CO의 배출량은 1,990 ppm 이상으로 나타났는데 이것은 CO<sub>2</sub>로의 연료내 탄소의 완전한 산화가 불충분한 산소로 인해 불가능하였기 때문이었다. CO 배출은 부가적인 공기의 공급과 같은 방법에 의해 조절될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

비용용 방식, 수직형 사이클론 연소기를 이용하여 효율적이고 연속적인 탄화왕겨의 제조방법을 개발하기 위해서 무게 감량에 미치는 연소기 온도, 당량비 및 보조가스 유량의 영향, 그리고 탄화왕겨의 pH와 입자크기 분포를 분석하였다. 이러한 실험적인 연구로부터 얻을 수 있는 중요한 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 50% 근처의 무게 감량을 가진 탄화왕겨는  $T_{1b} = 1,273 \sim 1,373K$  사이의 연소실 상단부 예열온도, 6 l/min 이상의 보조가스 유량, 1.68~2.17 사이의 당량비의 실험조건에서 운전할 때 얻을 수 있었다.

2) 모든 실험 조건에 있어서 탄화왕겨의 pH 값은 식물생장 조건에 알맞은 pH 보다 훨씬 높게 나타났다. 그러므로 제조된 탄화왕겨는 약간의 중화처리가 필요한 것을 알 수 있었다.

3) 탄화왕겨와 생왕겨의 입자크기 분포는 미미한 크기의 감소와 더불어 유사한 경향을 보여 주었다.

4) 앞으로 CO 배출을 저감할 수 있는 방법이 처리 과정에서 도입되어야 할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. 고길표, 노수영. 1998. 사이클론 연소기를 이용한 탄화왕겨의 제조(I), 한국농업기계학회지 23(1):13-20.
2. 농림부. 1998. 농림통계연보.
3. 이운환, 홍순달, 김용연, 정훈채, 강서규. 1981. 연초용 상토재료로서의 왕겨숯(훈탄)의 질산중화 효과, 한국토양비료학회지 14(3):130-136.
4. 이운환, 홍순달. 1985. 煙草加功副産物の炭化程度에 따른 窒酸中和能力과 肥效, 한국토양비료학회지 18(1):89-93.
5. 임재하, 윤재탁, 김임수, 최부술, 권영석. 1995. 양액재배용 재료로서 왕겨의 양이 토마토의 생

- 육 및 수량에 미치는 영향, 농업논문집 37(1):363-366.
6. 조명제, 이영재. 1983. 왕겨가스에 의한 농용 석유기관의 구동에 관한 연구, 대한기계학회논문집 7(2):223-239.
7. 홍순달. 1992. 채소작물의 시설재배 상토재료로서 왕겨훈탄의 활용방법에 관한 연구, 충북대학교 농업과학연구소 논문집 10(1):125-132.
8. 山下津也, 李昇揆, 1990, 일본의 수확 후 처리기술의 발전(I), 한국농업기계학회지 15(1):63-76.
9. Ali, F. H., A. Adnan and C. K. Choy. 1992. Use of rice husk ash to enhance lime treatment of soil, *Can. Geotech. J.* 29:843-852.
10. Beagle, E. C. 1978. Rice-Husk : conversion to energy, *FAO Agricultural Services Bulletin* 31.
11. Boateng, A.A., L. T. Fan, W. P. Walawender and C. S. Chee. 1986. Morphological development of rice hull derived char coal in a fluidized-bed Reactor, *Fuel* 70:995-1000.
12. Condrat, R., P. Pinkhaokham and U. Leela-adisorn. 1992. Nano structured silica from rice husk, *Journal of Non-Crystalline Solids* 145:75-79.
13. Ganesh, A., P. D. Grover and P. V. R. Iyer. 1992. Combustion and Gasification Characteristics of Rice-Husk, *Fuel* 71:889-894.
14. Gupta, A. K., D. G. Lilley and N. Syred. 1984. *Swirl Flows*, *Abacus Press*.
15. Haxo, H. E. and P. K. Mehta. 1974. Ground rice-hull ash as a filler for rubber, *Rubber Chemistry and Technology* 48:271-288.
16. Krishnarao, R. V. and M. M. Godkhindi. 1992. Studies on the Formation of SiC whiskers from pulverised rice husk ashes, *Ceramics International* 18:35-42.
17. 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 Pub. Co. pp. 787-794.
18. Malhotra, V. M. 1993. Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete : A Review, *Concrete International* pp. 23-28.
19. Vempati, R. K., S. C. Musthyala, Yousuf A. Mollah and David I. P. O. Cocke. 1995. Surface analyses of pyrolysed rice husk using scanning force microscopy, *Fuel* 74(11):1722-1725.