

강좌

왕겨의 효율적 이용 방법

Effective Utilization Methods of Rice Husk

노수영\*

정희원

S. Y. No

1. 서론

세계에서 가장 주된 곡물중의 하나인 벼의 생산은 세계의 주된 폐기물 즉 왕겨와 벃짚을 발생시킨다. 1993년 기준으로 세계 벃 생산량은 5억톤이며 이중 10~20%를 왕겨로 보고 있다. 국내의 경우 1997년에 5백 45만톤으로 16~18%를 왕겨로 추정하고 있다. 따라서 농산폐기물의 효율적 이용이 절박한 실정이다.

왕겨를 효율적으로 이용하려는 노력은 왕겨의 까슬거리는 특성, 영양분이 적은 점, 잘 썩지 않는다는 점, 낮은 걸보기 밀도, 그리고 높은 회분 함량 등으로 제한을 받아왔다. 그럼에도 불구하고 여러가지 방면으로 왕겨를 이용하는 방법들이 계속 연구되어 왔다. 특히 우리나라의 경우는 60~70년대까지 농가에서 난방연료로 사용하거나 사과상자용 충진제, 베갯속 등으로 쓰이다가 생활수준이 높아짐에 따라 일부 축사용 깔개 등으로 사용되어 왔다. 그러나 미곡 종합처리장의 증가에 따라 짧은 시간내에 집중적이며 대량으로 발생하는 왕겨의 처리가 문제가 된다. 따라서 왕겨의 효율적 이용의 세계적 추세를 검토하는 것이 필요하다.

왕겨의 여러가지 이용방법 중 주로 에너지로 사용하는데 대해 1978년까지 세계적인 개발현황을 정리한 총설이 Beagle(1978)에 의해 발표되었다. 이 보고서의 부록에는 왕겨의 에너지 이용 이외의 응용분야에 대한 현황도 잘 정리되어 있는 연구보고서이므로

왕겨 이용에 관한 지침서로 충분하다. 그러나 이 연구보고서는 20여년전까지의 자료를 분석하였으므로 여기서는 가능한 한 1980년대 이후의 현황을 분석하기로 한다.

우선 왕겨와 왕겨회분의 기본적인 성질과 연구를 검토하고 효율적 이용방법에 관해 세부적으로 분석, 검토하기로 한다.

2. 왕겨의 기본적 성질

보통 고체 연료의 화학적 성질을 표현할 때 공업 분석(proximate analysis)과 원소분석(ultimate analysis)을 하여 성분을 나타낸다(김과 노, 1996). 표 1에 여러 가지 출처가 다른 왕겨의 원소분석치를 정리하였다. 표로부터 왕겨에는 보통 회분이 17~25% 함유되어 있으므로 연료로 사용할 경우 회분을 처리하는 방법이 수반되지 않으면 곤란한 것을 알 수 있다.

표 2에는 여러 가지 왕겨의 발열량을 나타내었다. 표에서 한국의 경우 고발열량 및 저발열량중 작은 값은 일반벼 계통이고, 큰 값은 통일벼 계통을 의미한다. 표로부터 왕겨의 저발열량은 세계적으로 13~20 MJ/kg 범위에 있는 것을 알 수 있으며, 발열량 자체를 이용하기 위해 연료로서의 이용 가능성을 시사해 주고 있다.

표 1과 2로부터 벃의 품종, 왕겨의 출처에 따라 조성과 발열량이 차이가 나므로 우리나라에서 재배되는 벃의 품종과 지역에 따른 왕겨의 기본적인 성질

\* 충북대학교 농업기계공학과

의 변화가 연구되어야 할 것이다.

표 3에 왕겨 회분의 조성을 여러 데이터를 조합하여 나타내었다. 왕겨 회분의 광물질중 Haxo와 Mehta(1974)는 1974년까지 데이터를 종합해서 나타낸 것이다. 대부분 왕겨의 회분중 SiO<sub>2</sub>가 80~97% 차지하므로 이를 효율적으로 이용하는 방법들이 여

러 해에 걸쳐 다방면으로 연구되어 왔다. 왕겨 회분이 아닌 왕겨자체의 광물질 조성을 보면(Ikpong and Okpala, 1996) 왕겨회분을 이용하는 것이 경제적이란 사실을 알 수 있다. 또 왕겨회분을 제조할 경우 가능한 SiO<sub>2</sub>성분이 많게 연소시킨 후 회분을 이용하는 것이 타당성이 있다.

Table 1 Ultimate analysis of different rice husk (wt %)

Origin	C	H	O	N	S	ash	Reference
Guyana	0.481	0.060	0.453	0.006		0.215	Boateng et al. (1991) (daf)
North Italy	0.494	0.070	0.436	0.000		0.189	Boateng et al. (1991) (daf)
India	0.528	0.067	0.398	0.006	0.001	0.255	Boateng et al. (1991) (daf)
Java	0.511	0.062	0.404	0.015	0.001	0.239	Boateng et al. (1991) (daf)
California	0.472	0.061	0.466			0.187	Boateng et al. (1991) (daf)
Taiwan	0.473	0.066	0.454	0.006	0.001	0.165	Boateng et al. (1991) (daf)
India	0.380	0.040	0.380	0.004	0.002	0.20	Ganesh et al. (1992) (db)
Korea	0.476	0.068	0.450	0.006		0.106	김과 최 (1980)
India	0.389	0.051	0.320	0.006		0.235	Raveendran et al. (1995) (db)
India	0.3926	0.0499	0.327	0.0199	0.001	0.174	Singh et al. (1980) (as received) moisture = 0.0356

db : dry basis, daf : dry-ash-free.

Table 2 Calorific value of various rice husk

Origin	Calorific Value (MJ/kg)		Reference
	HHV	LHV	
Philippine	14.49	13.14	박영재 등 (1980)
California	16.79	15.61	박영재 등 (1980)
Japan	14.64	13.28	박영재 등 (1980)
Korea	14.94~15.69	13.74~14.43	박영재 등 (1980)
Seokwang	15.87		박과 노 (1983)
Milyang	16.74		김과 최 (1980)
India		13.7	Borthakur et al. (1993)
India	14.0		Ganesh et al. (1992)
India	15.29		Raveendran et al. (1992)
India	20.00		Raveendran and Ganesh (1996)

HHV : higher heating value.

LHV : lower heating value.

Table 3 Ash composition of rice husk

Reference	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
Haxo and Mehta (1974)	86.0~97.3	0.58~2.5	0.6~1.75	0.2~1.15	0.12~1.96	trace~0.54	0.2~2.85	0.1~1.13	0	0
Ikpong and Okpala (1996)	82.13	1.23	0.14	0.16	1.65	0.38	1.44	0	4.27	8.60
Fuad et al. (1993)(WRHA)	96.2	1.62	0.09	0.13	0.36	0.05	trace	-	trace	1.62
Fuad et al. (1993)(BRHA)	54.1	1.11	0.06	0.06	0.16	0.03	trace	-	trace	44.48
Khangaonkar et al. (1992)	93.91			0.40	0.36	0.24	-	-	2.10	2.54
Borthakur et al. (1993)	88.60	1.82	2.54	1.85	0.46	0.26	-	-	3.54	-
Ganesh et al. (1992)	95.0	2.0	1.5	1.5	1.5	-	-	-	-	-

WRHA : White Rice Husk Ash.

BRHA : Black Rice Husk Ash.

LOI : Loss on Ignition.

### 3. 기초연구

왕겨의 연소에 관한 기초적 연구는 왕겨의 효율적 이용을 위해 회분을 이용하기 위해서는 회분의 수율을 높이거나, 연료로 사용하기 위해서는 높은 탄소 전환율을 얻는 것이 바람직하므로 중요하다.

왕겨의 연소와 가스화에 관한 연구를 살펴보면 왕겨내의 실리카가 973~1,173K 범위에서 구조적인 변화를 일으키기 때문에 973K 이상의 온도에서 부분 연소가 일어나고 그 이하에서 완전한 탄소전환이 일어난다고 한다(Ganesh et al., 1992). 따라서 비결정구조의 실리카를 얻기 위해서는 973K 이하에서 왕겨를 연소시키는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 이 사실은 앞으로 언급할 실리콘 및 탄화수소의 제조를 위한 연구에서 대부분 연소온도가 973K 이하인 것과 일치한다. 또 이 사실은 탄화 왕겨를 제조하기 위해서는 973K 이상의 온도에서 왕겨를 연소시켜야 한다는 것을 시사해 준다.

일본의 경우 농업기계화연구소에서 1981년부터 3년 계획으로 왕겨가스화 장치의 개발 및 가스이용방법에 대하여 연구를 한 것으로 알려져 있다. 또 기초

적인 왕겨의 연소특성에 대한 기초연구가 이루어졌다(清水와 木村, 1984). 한편 왕겨의 집적, 수송수단의 개발을 최종 목적으로 저압축력에 의한 압축성형의 가능성을 알아보기 위해 왕겨의 역학적 특성에 대하여 실험한 연구도 있다(江崎와 佐竹, 1983).

왕겨의 가스화 과정에서 형태적 변화가 중요하므로 기본적인 표면구조의 변화에 대하여 이해가 필요하다. 따라서 열분해된 왕겨의 표면 구조해석에 기존의 SEM(Scanning Electronic Microscopy) 대신에 SFM(Scanning Force Microscopy)을 사용하는 방법이 개발되었다(Vempati et al., 1995) 한편 왕겨의 열분해 특성에 미치는 광물질의 영향에 관한 연구도 이루어졌다(Raveendran et al., 1995).

왕겨와 왕겨의 열분해 생성물의 발열량에 관한 연구가 근래 이루어졌다(Raveendran and Ganesh, 1996). 왕겨의 고발열량은 20 MJ/kg 이고 열분해 후 얻어진 왕겨 찌( char)의 경우는 44.2 MJ/kg으로 왕겨보다 두 배 이상 고발열량이 큰 것으로 나타났다. 더 나아가 여러 가지 바이오 매스의 열분해로 얻어진 찌, 액체, 가스 등의 고발열량을 예측하는 식을 제안하였다. 보통 다른 식의 경우는 C, H, O, N 등 원소분석

치가 요구되지만 이 제안식에서는 셀룰로오스, 리그닌, 실리카 그리고 회분의 함량을 알고 있을 때 사용할 수 있다

#### 4. 왕겨의 효율적 이용 방법

왕겨의 기본적 성질과 기초연구에 대하여 검토한 결과 왕겨의 효율적 이용 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 즉 왕겨 자체를 이용하는 방법과 왕겨 회분을 이용하는 방법이다. 이 두 가지에 대하여 아래에서 세부적으로 검토하기로 한다.

##### 가. 왕겨 자체 이용 방법

왕겨 자체를 이용하는 방법에는 연료로 이용하는 방법, 왕겨를 탈취발화시킨 탄화왕겨로 활용하는 방법, 왕겨탄을 제조하여 연료로 이용하는 방법 등이 여기에 해당된다. 각각을 분리해서 검토하기로 한다.

##### 1) 연 료

Singh(1980)은 곡물건조를 위한 열에너지로 이용하기 위하여 왕겨를 연료로 하는 화격자로와 사이클론 연소기를 개발하였다. 화격자로의 경우 과잉공기 285.7%에서 왕겨공급량을 14.25 kg/h로 했을 때 64.5%의 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다. 배기가스 분석 결과  $CO_2 = 4.0\%$ ,  $O_2 = 15.8\%$ 로 연소가스를 건조목적으로 사용하는데 문제가 없었다. 사이클론 연소기의 경우 30도 경사형 비용융방식을 채택하여 20 kg/h의 왕겨공급량, 공기량 2.83 m<sup>3</sup>/min에서 80%의 효율을 얻을 수 있었다.

또 일본에서 왕겨를 곡물 건조에 이용하는 방법으로 왕겨연소로를 벼 건조용(직화, 간접 열풍방식)으로 시스템화한 경우가 있다(山下와 李, 1990, 農業機械學會, 1981). 그러나 왕겨저장, 수송방법, 열교환방법 및 열의 분배, 회분제거방법 등의 문제점 때문에 본격적인 보급단계에 이르지 못하고 있다. 따라서 위의 문제점 외에 왕겨연소기에 연속적·정량공급 문제, 재나 혼탄의 연속제거방법, 혼탄활용을 위한 혼탄생산형 버너의 개발 등을 앞으로의 과제로 지적하고 있다.

또 black meal 공정에 기초한 시멘트 제조에서 비

교적 낮은 온도에서 만족스런 물리적 성질을 갖는 클링커 생성에 왕겨를 이용하는 연구가 시도되었다(Borthakur et al., 1993). 다섯가지 혼합재료중 하나는 석회석, 점토, 왕겨만으로 이루어지고, 나머지는 연료로 석탄과 왕겨를 혼합한 것을 사용하였다. 왕겨를 무게로 11~27%까지 혼합시켰다. 결과적으로 왕겨만 사용한 경우보다 석회석 69.2%, 점토 5.42%, 왕겨 23.08%, 석탄 2.30%의 혼합재료를 1,593K로 연소시켰을 경우 이 클링커로 제조한 시멘트가 가장 좋은 제반성질을 갖는 것으로 나타났다.

Boateng 등(1991)은 미곡종합처리장에서 에너지 공급을 위해 연료로 왕겨를 사용하는 유동층 반응기에서 가스화하기 위한 기초적 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 유동층 반응기에서 왕겨를 연료로 사용할 경우 중요한 성질중의 하나가 왕겨의 형태적 변화라고 보아 표면적, 표면의 불규칙성, 세공크기와 수, 탈취발화온도 등을 변수로 하여 측정하였다.

국내에서 진 등(1995)은 미곡종합처리장에서 발생하는 왕겨의 소각 및 연소열 활용을 목적으로 화격자식 소각로를 선택하여 연소실험을 한 결과 30 kg/h, 과잉공기 50%가 최적 연소조건임을 찾아내고 열교환기를 부착하여 연소열의 이용가능성을 타진하였다.

왕겨의 가스화에 의한 연구는 국내에서도 이루어졌다(김과 최, 1980). 왕겨로부터 가연성 가스를 제조하는 것을 목적으로 왕겨의 열분해 특성을 질소와 증기 분위기 하에서 각각 실험하고, 회분식 반응기를 통한 열분해 물질의 열량, 발생량, 유동화 특성 등을 고찰하였다. 증기분위기 하에서 열분해 생성 가스는 수소가 더 많으며, 1,183K에서 왕겨 1g당 980ml의 가연성 가스가 생성되며 발열량은 12.55 MJ/m<sup>3</sup> 이었다.

한편 조와 이(1983)는 왕겨 가스화장치를 제작하고 여기에서 생성된 가연성 가스를 농용석유기관에 적용하여 그 구동 가능성 및 기관 성능에 대하여 연구하였다. 제조된 가연성 가스는 1.577~4.535 MJ/m<sup>3</sup>의 저발열량을 가지며 압축비 4.5에서 7PS의 출력을, 압축비 6.0에서 9PS의 출력을 얻을 수 있었다. 실제 적용하기 위해서는 가스화 장치의 보온과 연료공급장치의 설계변경 등이 필요하다고 지적하였다.

농가에서 다목적용으로 쓰일 수 있는 소형 왕겨 연소기를 개발하기 위한 연구가 '박'과 '노'(1983)에

의하여 이루어졌다. 우선 농가에서의 소형 왕겨 연소기의 이용 가능성을 농가 가구당 왕겨 생산량과 난방에 필요한 에너지를 기초로 검토한 결과 동절기 4개월간 난방부담의 50% 정도 대체할 수 있는 것이 판단되었다. 그리고 왕겨의 연소효율과 연소기의 연료율을 측정된 결과 모두 90% 이상의 효율을 얻었다.

또 왕겨연소 보일러를 개발한 연구도 있다(박 등, 1980). 하입식 화격자, 계단식 화격자, 스프레더 화격자의 세 가지 종류 연소기중 효율적인 장치를 개발 제작하여 보일러에 적용시켰다. 하입식 화격자의 경우 유류 대체가 용이하여 중·소형 보일러(0.837 - 25.1 × 10<sup>5</sup> KJ/h)에 적용이 가능하고, 스프레더 화격자는 대형보일러에 적합하여 연료대체가 가능한 결과를 얻어냈다.

## 2) 탄화왕겨

탄화왕겨(carbonized rice husk)는 왕겨훈탄 또는 영어로는 carbonated rice husk, char from rice husk, chaff sinder, chaff charcoal 등 여러 가지 용어를 동의어로 혼용하고 있지만 휘발분이 연소되고 일부탄소와 회분만이 남아있는 상태의 검은 색을 띤 상태를 말한다. Beagle(1978)에 의하면 이탈리아의 화훼 지배농가에서, 인도 남부의 양파와 감자 재배농가에서, 그 외 일본, 필리핀 및 동남아에서 전통적으로 탄화왕겨가 사용되어 왔다고 보고하고 있다.

국내에서는 70년대 초부터 일부 연초 재배농가에서 미경작지 토양과 탄화왕겨를 혼합하여 무균상토 재료로 이용해 왔지만 사용량은 많지 않았다. 탄화왕겨를 일부 또는 전량을 사용하여 담배의 육묘생산에 미치는 영향을 실험한 연구가 이루어졌다(신과 노, 1993a, 1993b, 신 등, 1995, 배와 신, 1995).

이와같이 탄화왕겨는 조립 및 목료 생산, 원예, 과수 및 채소재배에 있어서 토양을 개선해 주는 역할을 한다. 탄화왕겨는 비료는 아니지만 식물을 빠르게 그리고 원기왕성하게 성장시킨다. 따라서 탄화왕겨는 양호한 통기성과 수분 보존능력을 가지며 토양 및 수분의 온도를 유지시켜주는 배양토로 바람직한 물질이다.

기존의 탄화왕겨 제조는 노천에서 재래식으로 소량을 제조하던가 일부 상용화된 탄화왕겨 제조기는 연속적 생산이 불가능하고 중화처리가 되지 않은 상

태이다. 따라서 연속적으로 대량생산이 가능한 탄화왕겨 제조방법에 대한 연구가 최근에 이루어졌다(고와 노, 1998, Kim and No, 1998). 탄화조건으로는 왕겨가 연소된 후에도 양호한 통기성과 수분보존 능력을 가지기 위해 원래 왕겨의 형상을 유지하고, 병원성 미생물이 살균이 될 수 있는 온도 이상으로 탈휘발화가 되어야 한다. 무게 감량 50%의 탄화왕겨가 LP가스를 3.22~6.43 l/min 보조연료로 사용하고 1,273~1,373K, 그리고 당량비 1.68~2.17 상태에서 얻어질 수 있었으나 배양토로 직접 사용하기 위해서는 중화처리 장치와 CO 배출 문제가 해결되어야 한다고 지적하고 있다.

## 3) 왕겨탄 제조

한편 왕겨를 전처리하여 연료화하는 방법으로 왕겨탄을 만들어 연소시키는 장치의 개발에 관한 연구도 이루어졌다(윤 등, 1990). 왕겨탄은 발열량이 16.74~17.15 MJ/kg으로 분쇄한 후 473~303K의 온도에서 표면을 탄화시켜 압출하는 방식으로 제조한다. 제품은 직경 55mm, 길이 400mm, 내경 13mm의 구멍이 뚫린 막대기 형태의 제품으로 생산된다. 기존의 복사형 난로, 순환형 난로, 상향유동 난로, 대각선 유동난로, S형 유동 난로 등을 시험한 결과 열효율이 낮고 매년 발생량이 많고, 또 연료공급 및 회재처리에 문제 등이 많아 새롭게 T형, G형, D형 모델 연소기를 제작하여 연소실험을 수행하였다. 각 모델에 대해 매연발생량, 발열량 분포, 연소가스 성분 및 회분발생량을 분석한 결과 T형 모델이 가장 우월한 성능을 나타내었다. 이 경우 왕겨탄 제조 비용이 드는 단점이 있지만 연료 규격화, 지속적, 안정적, 공급 문제 등이 해결되는 장점이 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 왕겨를 연료로 응용하는 방법은 시멘트 제조과정, 곡물건조, 미곡종합처리장에서 에너지 공급, 가스화 연료, 보일러 연료, 탄화왕겨, 왕겨탄 제조 연료화 등이 있다. 따라서 이러한 연구를 토대로 시설원예용 왕겨 연소 열풍기 개발도 가능하다고 본다.

## 나. 왕겨회분 이용 방법

앞에서 언급한 바와 같이 왕겨 회분을 이용하는

방법에는 회분에서 실리카를 추출하거나 회분의 성질을 이용하는 여러 가지 방법이 대두된다. 즉 실리콘 및 탄화규소 제조, 체올라이트 합성, 시멘트 혼화재 및 강화재, 고무 또는 프로필렌의 충전재, 점토개량제 등이 이에 속한다. 이들 각각의 이용방법에 대해 세부적으로 검토하기로 한다.

1) 실리카 추출

왕겨로부터 실리콘이나 탄화규소를 제조하는 데는 실리카의 추출이 필요하다. 실리카를 얻기까지의 과정은 그림 1에 나타낸 바와 같이 같은 과정을 거치지만 실리카를 탄소와 반응시킬 경우는 탄화규소를 얻게 되고, 마그네슘과 반응시킬 경우는 실리콘을 추출하게 된다.

왕겨에서 실리카를 제조하는 방법은 다음과 같다. 우선 왕겨를 체로 걸르고 중류수로 세척하여 진흙, 먼지 등을 제거한 후 태양광으로 건조시킨다. 건조된 왕겨에서 실리카 외에 불순물은 칼륨, 나트륨, 칼슘, 마그네슘, 철 그리고 규산염이나 산화물 형태로 존재하는 인과 알루미늄이다. 이러한 불순물의 농도를 최소화하는 여러 가지 방법이 연구되었다.

우선, 전처리를 한시간 동안 348K에서 1N HCl로 침출시킨다(Malhotra, 1993; Chakraverty and Kaleemullah, 1991). 전처리 효과를 알아보기 위해 전처리 안한 경우 HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH로 전처리한 것과 HCl로 전후처리한 것 5가지 종류의 연소된 후 회분에서 실리카 함유량을 조사한 결과 HCl로 전후처리한 것이 수율이 가장 높고, 전처리 중에는 HCl로 전처리한 것이 수율이 가장 높았다(Conradt et al., 1992).

반면 전처리 없이 바로 다음단계인 회분을 얻기 위한 연소과정을 시험한 결과도 있다(Nandi et al., 1991). 왕겨 회분을 얻기 위한 연소온도는 기존의 연구에 대하여 표 4에 정리한 결과 연구자, 조건에 따라 또 회분의 사용목적에 따라 다르다. 또 연소시간

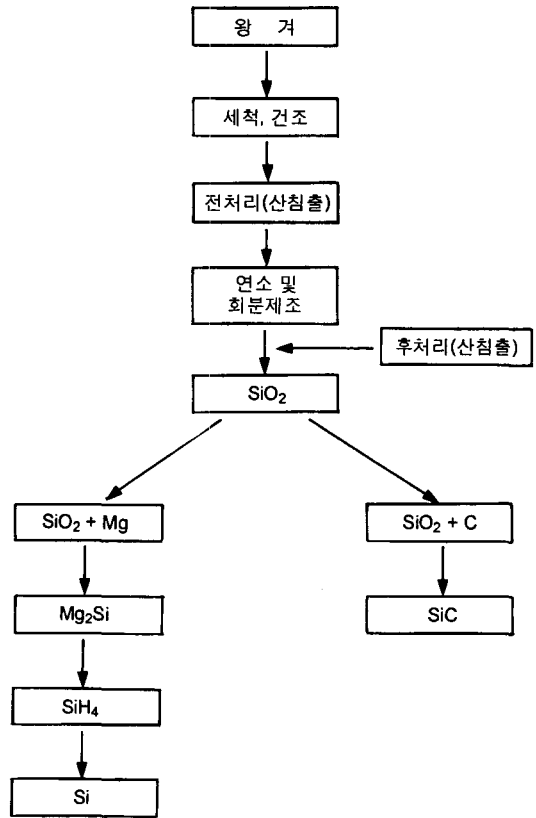


그림. 1 실리콘 및 탄화규소 제조과정 블록선도.

Table 4 Burning temperature for producing rice husk ash

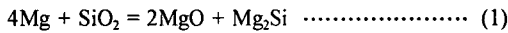
Reference	Burning temperature (K)	Condition
Bose (1992)	773	muffle furnace with air
Chakraverty and Kaleemullah (1991)	963 ~ 1,023	electric furnace with air
Nandi et al. (1991)	733	electric furnace with oxygen
Acharya et al. (1980)	873	electric furnace with oxygen
Ikram and Akhter (1988)	893	muffle furnace with air
Hussain and Suleman (1992)	1,473	muffle furnace with air
Conradt et al. (1992)	873	silica tube with static and flowing condition (air, oxygen or steam)
Krishnarao and Godkhindi (1992)	1,573 ~ 1,643	vacuum pyrolysis

을 3~4 시간 후와 45시간 후의 왕겨재의 샘플을 분석하기도 하였다(Hussain and Suleman, 1992).

후처리로 HCl과 HF + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 이용하여 침출하거나(Ikram and Akhter, 1988) 분석은 X-선 회절법과 분광기법을 사용하여 조성을 분석한다. 보통 입도조직과 분포는 SEM과 TEM을 사용하여 측정하였다.

(가) 실리콘 제조

그림 1에서 알 수 있듯이 실리콘을 제조하기 위해서는 우선 Silane(SiH<sub>4</sub> 또는 Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)를 제조해야 한다. 그 과정은 다음 반응에 따른다.



이 반응은 973~1,073K의 온도에서 이루어진다. 이 과정의 자세한 사항은 Acharya 등(1980)에 의해 자세히 설명되어 있다.

Mg<sub>2</sub>Si로부터 실리콘을 제조하는 공정에 대해서는 Nandi 등(1991)에 의하여 개발되었다. 한편, Mg<sub>2</sub>Si의 기초적 성질중의 하나인 열전도도의 측정에 관한 연구도 보고되어 있다(Bose, 1992).

현재 태양전지는 반도체급 규소(실리콘)를 사용하여 제조되기 때문에 가격이 비싸다. 그러나 태양전지급 실리콘은 반도체급 실리콘보다 순도가 훨씬 떨어지기 때문에 새로운 저렴한 가격의 원자재로부터 실리콘을 추출할 수 있다면 태양전지의 제조가격은 상당히 떨어질 수 있다.

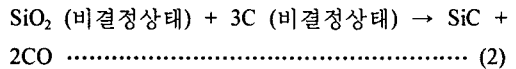
현재 실리콘은 여러 가지 실리콘 화합물 즉 석영(SiO<sub>2</sub>), fluorosilicic acid solution(H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>), Silicon tetrachloride(SiCl<sub>4</sub>), trichlorosilane(SiHCl<sub>3</sub>) 등으로부터 얻을 수 있다. 그러나 왕겨는 실리콘을 추출할 수 있는 높은 함량의 수화물 형태의 실리카를 보유하고 있다. 이러한 연구결과 태양전지급이나 광전지급의 실리콘을 제조하는데 원자재로서 충분하게 낮은 불순물 농도를 갖는 분말 실리콘을 추출할 수 있다고 보고하고 있다.

또 연소과정은 열중량 분석(TGA)으로 분석하여 질량감소로 보아 3단계 과정, 즉 건조, 탈휘발화, 그리고 연소과정을 거쳐 회분이 얻어지는데 전처리한 샘플과 하지않은 샘플의 경우 각 단계 온도가 다르다고 보고하고 있다. 검토한 결과 전처리와 연소온

도 및 시간 등에 따라 실리카의 수율이 달라진다는 것을 알 수 있다.

(나) 탄화규소 제조

경량이며 열응력에 견딜 뿐 아니라 고온 상태에서 강도를 유지하는 성질을 가지는 세라믹의 강화재로서 대두되고 있는 것 중의 하나가 탄화규소 섬유 또는 whisker 이다. 또 높은 밀도와 낮은 소결 온도를 가지는 소결 생산품을 개발하는데 초미세 세라믹 분말이 중요한데 그 세라믹 물질중의 하나가 탄화규소이다. 따라서 탄화규소를 왕겨로부터 제조하는 연구가 이루어졌다(Singh et al., 1993, Ray et al., 1993, Krishnarao and Godkhindi, 1992). 탄화규소의 생성반응은 다음 반응식으로 알려져 있다.



반응시간은 온도를 증가시키면 현저하게 감소시킬 수 있다. 왕겨에 묻어있는 불순물을 제거하기 위해 증류수로 씻은 후 353K 정도에서 하루동안 건조시킨다. 수분과 휘발성 성분을 제거하기 위해 676K 근처의 불활성 분위기하에서 건조된 왕겨를 코우크스화 한다. 그리고 염산용액으로 처리한 후 촉매를 첨가한다. 생성물은 불활성 분위기하에서 고온으로 가열하게 되면 위의 반응에 따라 탄화규소( $\beta$ -SiC)가 생성된다. 촉매는 촉매가 없는 경우의 Fe, Ni, Pt, Pd를 첨가하고 가열온도를 1,673~2,073K 사이로 변화시켜 그 영향을 살펴 보았다. 촉매가 탄화규소의 수율에 미치는 영향은 없었지만 SEM에 의해 분석한 결과 Ni, Pt, Pd 촉매를 첨가한 경우 Whisker 형성이 잘 되었다. 온도의 영향은 1,973K에서 최대 수율이 가능한 최적 열분해 온도였다.

Singh(1993)은 왕겨로부터 초미세 탄화규소 분말을 얻기 위해서 열 플라즈마 합성을 응용하였다. 고온(10<sup>4</sup>K), 큰 온도구배(10<sup>6</sup>K m<sup>-1</sup>), 높은 급냉효과(10<sup>6</sup>K s<sup>-1</sup>)의 특성을 갖는 아르곤 플라즈마의 특성을 이용하여 기존의 긴 제조시간을 단축시킬 수 있고 과정중의 변수를 더 잘 조절시켜가며 연속적인 탄화규소 분말을 제조할 수 있었다.

한편 기존의 탄화규소 제조과정은 3단계였지만 1

단계로 줄이기 위해 진공 상태에서 열분해를 하는 방법이 개발되었다. 여러가지 연소온도에서 실험한 결과 연소온도는 1,573~1,643K에서 CO 존재하의 경우가 가장 탄화규소의 생성에 적합한 조건임을 알았다(Krishnarao and Godkhindi, 1992).

### 2) 제올라이트 합성

제올라이트는 수소첨가 분해반응(hydrocracking), 수소첨가 이성체반응(hydro-isomerization), 알킬화반응, 개질반응, 열분해반응 등과 닮은 여러가지 산업분야에서 중요한 반응들에서 촉매로서 광범위하게 이용된다. 기존의 방법은 화학적 원료로부터 제올라이트를 합성하였지만 농산폐기물의 일종인 왕겨재로부터 실리카를 사용하여 제올라이트를 합성하는 방법이 개발되었다.

Bajpai 등(1981)은 mordenite 형태의 제올라이트를 왕겨재로부터 얻은 실리카를 사용하여 408~437K 범위의 온도에서 합성하였고, Dalai 등(1985)은 왕겨재로부터 얻은 실리카를 사용하여 NaX 형태의 제올라이트를 368~393K 범위의 온도에서 합성하였다.

### 3) 시멘트 혼화재 및 강화재

레미콘 산업이 발전함에 따라 시멘트 가격을 낮추는 방법의 하나로 일부 시멘트를 대체할 수 있는 원료로 비산재(fly ash), 농축된 규소 증기(fume), 용광로 슬래그(slag), 철을 함유하지 않은 슬래그, 왕겨회분 등이 대두되고 있다(Malhotra, 1993). 이 중에서 왕겨회분의 경우 콘크리트에서 일부 시멘트를 대체할 수 있는 혼화재로 적당하다는 연구가 많이 이루어졌다.

국내의 경우 근래 김 등(1997)에 의해 왕겨회분을 분쇄하여 콘크리트 혼화용 재료로 이용하려는 연구의 일환으로 파이로트 규모의 다목적 왕겨 소각로를 설계 제작하여 그 성능을 분석한 연구가 있다. 1,023 K 이하에서 비결정구조의 왕겨회분을 얻었고, 소각로의 작동온도는 873K로 연소시 발생하는 열에너지를 회수·이용하는 시도도 동시에 이루어졌다.

혼화용 왕겨회분은 923~973K 사이의 온도에서 제조될 경우 비결정 구조의 왕겨 회분을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 왕겨 회분으로 얼마의 시멘트를 대체하느냐 하는 혼화비율에 관한 연구는 대체로

세 가지 종류로 나눌 수 있다.

첫째, 왕겨 회분 비율의 상한선을 20~25%로 하는 경우이다. 이 경우 28일 강도가 기존의 콘크리트보다 같거나 더 크게 나타났다. 그러나 물-시멘트 비는 기존 콘크리트보다 아주 낮거나 같게 유지되어야만 한다. 또, 실제 구조물에 콘크리트 처리할 경우 진동이 필요하게 된다.

둘째, 왕겨회분 비율을 30~40%로 하는 경우이다. 이 경우 가동성(workability)이 기존 콘크리트와 같거나 중간정도이며 진동이 필요하지 않다. 그러나 28일 강도는 기존 콘크리트보다 낮게 나타났다.

셋째, 왕겨회분 비율을 35~50%로 하는 경우이다. 이 경우 28일 강도는 기존 콘크리트보다 더 크게 나타났다. 그러나 물-시멘트 비를 기존 콘크리트보다 같거나 더 낮게 유지해야만 한다. 기존 콘크리트와 같은 가동성을 얻기 위해서는 진동이 필요하다.

Ikpong과 Okpala(1996)의 연구에 의하면 40%의 왕겨 회분 비율의 28일 강도로 30 N/mm<sup>2</sup>을 사용할 때 적당하다고 하였다. Malhotra(1993)는 왕겨를 773~973K에서 연소시킨 후 얻은 왕겨의 표면적은 60~100 m<sup>2</sup>/g이었고 실리카 함유량이 90~95%이었다고 발표하였다. 한편 시멘트 원료로서 석회와 왕겨회분의 혼합물에 대한 연구가 있다(James and Rao, 1986). 이 경우는 머플爐(muffle furnace)에서 773K 로 12시간 왕겨를 연소하여 회분을 얻어 석회와 왕겨 회분의 혼합비율을 물비로 1:3과 2:1로 각각 약간의 물과 함께 섞어 반죽을 만든 후 1.0 cm<sup>3</sup>의 블록을 제조한다. 머플로는 전기로의 일종으로 가열되는 재료가 산화되는 것을 방지하기 위하여 보호용기(머플)속에서 가열하는 구조의 로를 말한다.

왕겨재와 석회시멘트는 재의 반응성에 따라 강도가 달라지는데 28일까지는 강도가 증가하다가 그 이후 약간 감소하는 경향이 있는데 그 이유는 C-S-H의 결정구조의 변화에 기인하는 것으로 나타났다. 위의 연구와 유사하게 석회와 왕겨회분로 熱水(hydro thermal) 조건인 353~413K에서 반응에 대한 연구가 있다(Khangaonkar et al., 1992). 이 경우는 머플로에서 873K로 15시간 왕겨를 연소하여 회분을 얻었다.

혼합재로써 적정 왕겨 함량은 석회 함량에 따라 6~12% 정도인 것으로 나타났다(Ali et al., 1992). 또



혼합재로 왕겨회분을 사용할 경우 미리 분쇄하는 것이 높은 강도의 모르타르를 얻는데 필수적이었다 (Yogananda and Jagadish, 1988). 순수한 portland 시멘트는 강도가 15.0 MPa 이상이 요구되는 경우 사용하는 것이 적당한 반면 masonry와 plastering 경우 4.0 MPa 정도의 강도가 요구되므로 이러한 작업에 왕겨회분을 혼합한 시멘트가 적합한 것으로 나타났다 (Mehta, 1977). 또 전체 시멘트 물질중 중량혼합비로 30%의 왕겨 회분을 포함하는 콘크리트 경우 기존 콘크리트보다 7일, 28일 압축강도가 높고 단열온도는 10K 낮출 수 있다는 연구 결과도 있다 (Mehta and Pirtz, 1978).

한편, 왕겨 회분은 10% 첨가했을 경우 최대 28일 압축강도가 얻어지고 다른 성질도 바람직하다는 연구도 있다 (Desai and Dighe, 1978). 시멘트의 강도 특성은 실리카 함량에 따라 달라진다. 왕겨 회분을 시멘트에 35% 대체와 50% 대체한 경우, 시험결과 50%까지 대체시켰을 때 기존의 콘크리트와 여러가지 물리적 성질이 필적할만 하다고 하였다 (Loo et al., 1984). 또 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 ASTM · No 325체를 85~95% 통과하는 입도를 가지는 것을 사용해야만 한다고 강조하고 있다. 중요한 것은 왕겨 회분을 만드는데 연소조건과 분쇄과정이다.

#### 4) 고무 또는 폴리프로필렌의 충전재

충전재는 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 부피를 늘려서 결국 단가를 낮추는 중량제 역할을 하는 충전재와 기계적성질, 특히 인장강도를 증진시키는 강화제 역할을 하는 충전재로 나뉘어진다. 고무공업에서 충전재는 그 역할을 하든 안하든 중요한 물질중 하나이다. 고무의 충전재로써 새로운 물질을 평가할 때 입자크기, 표면활성(surface activity), 구조 등이 고려되어야 한다. Haxo와 Metha(1974)에 의하면 왕겨를 연소시켜 85~90% 비결정 구조의 Silica와 10~15% 탄소를 함유하는 왕겨재를 만들어 0.1~2.0 μm 크기로 분쇄한 것이 상당한 강화제 역할을 하는 고무 충전재로 사용될 수 있다고 보고하고 있다. 프로필렌은 종래의 재료를 대체할 수 있는 우수한 강성(剛性)의 성질로 전자나 자동차공업에서 근래 사용이 증가되고 있다. 대표적인 프로필렌의 충전재로는

유리섬유, 유리구, 활석, 운모, 석면, 목재분말, 탄산칼슘, 규토(무수규산) 등이 있다. 근래 새로운 프로필렌의 충전재로서 왕겨회분의 가능성에 대한 연구가 발표되었다 (Fuad et al., 1993). 노천에서 왕겨를 쌓아놓고 연소를 시켜서 표층에서는 흑색회분을 얻고 내층에서는 온도가 높아 백색회분을 얻어 앞에서 언급하였듯이 두 가지 회분의 화학적 성질을 분석하고 충전재로서의 가능성을 실험한 결과 중합체와 충전제의 접착이 잘 되지 않았지만 다른 성질의 경우 충분히 기존의 충전재를 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 한편 석회와 왕겨회분과의 반응을 시키면 시멘트 pastes의 주된 성분과 유사한 겔(gel) 화합물을 형성한다. 따라서 이에 관한 기초적 연구가 이루어졌다 (Khangaonkar et al., 1992).

#### 5) 도로 점토 강화제

Ali 등(1992)은 도로건설에 있어서 노반과 지반의 안정화를 위해 보통 점토에 석회를 사용하는데 석회에 왕겨 회분을 여러 비율로 섞어 강도, 내구성 등에 미치는 영향을 연구하였다. 석회만 점토에 섞는 것보다 석회와 왕겨 회분을 함께 섞었을 때 압축강도가 훨씬 증가되었다. 따라서 이와 같은 방법이 내구성이 향상되므로 폐기물 재활용 면에서나 건설비용의 저감면에서 매우 바람직하다고 결론짓고 있다.

#### 6) 기 타

위에서 살펴 본 왕겨의 효율적 이용 방법외에도 왕겨의 낮은 열전도율을 이용하는 단열재, 왕겨회분중 실리카 성분의 기름에 대한 친화성을 이용한 바닷물에 오염된 기름 흡수제, 탄화 왕겨의 높은 기공율을 이용한 물의 여과 및 정화제, 주철 제조시 보온재, 연마제, 미끄럼 방지 첨가제, 제설작업용 등 여러가지 이용 가능성이 존재한다 (Beagle, 1978).

### 5. 결 론

농산 폐기물중 하나인 왕겨의 효율적 이용에 대해 다방면으로 검토한 결과 요약된 분류체계를 그림 2에 나타내었다. 대부분 왕겨의 이용시 연소과정을 거치게 되는데 가장 중요한 것은 용도에 따라 어느 조건(온도, 분위기 상태, 연소시간 등)에서 어떤 방

식으로 연소시켜 목적에 맞게 이용하느냐는 것이다.

폐기물의 특성 중의 하나가 단 시간내에 대량으로 배출되지만 처리에는 장시간이 필요하고 소량씩 처리 가능하기 때문에 폐기물 처리가 문제시된다. 왕겨 자체 이용방법은 단시간에 다량으로 처리하는 것이 가능하지만 회분이 남게 되고 배기가스 문제도 고려되어야 한다. 한편 왕겨 회분 이용방법은 장시간에 소량처리이지만 회분을 유효하게 이용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 왕겨를 폐기물처리 대상으로 볼 때 여러 가지 처리 및 이용방법이 개발되어 있어 동시에 여러방법으로 이용하게 되면 처리문제가 해결될 수 있다. 왕겨 자체 이용과 회분이용 두 방법을 조합해서 연구를 시도하는 것이 바람직할 것이다. 그러므로 왕겨의 효율적 이용에 관한 체계적 및 동시적 연구개발이 필요하다.

구체적으로 국내의 관련연구소, 관련산업체, 대학교의 관련 전공교수 등이 협력하여 우선 세계적으로

이미 개발된 기존의 연구를 방법별로 나누어 심층적으로 검토한 후에 우리 실정에 맞으며 실현 가능성이 있다고 생각되는 이용방법을 선정하여 연구개발을 연구비 지원기관을 통해 시도하는 것이 바람직하다고 생각된다.

그리고 이 글이 위와 같은 연구개발의 매개체가 되며, 왕겨의 효율적 이용 방법에 대해 연구를 시작하는 연구자에게 조금이나마 도움이 되면 다행이라고 생각한다.

### 참 고 문 헌

1. 고길표, 노수영. 1988. 사이클론 연소기를 이용한 탄화왕겨의 제조(I). 한국농업기계학회지 23(1):13-20.
2. 김광렬, 노수영. 1995. 연소공학, 동화기술.
3. 김명호, 김철수, 박승제. 1997. 파이로트 규모 왕겨 조각로의 성능에 관한 연구. 한국농업기계학회지 2(1):21-29.
4. 김지동 외. 1980. 왕겨로부터 가연성 가스 제조에 관한 실험 연구. KERI report KE-8010.
5. 박승제, 노상하. 1983. 왕겨 연소기의 성능에 영향을 미치는 설계 및 작동인자에 관한 연구. 한국농업기계학회지 8(2):39-48.
6. 배길관, 신주식. 1995. 燠炭을 利用한 담배 育苗에 관한 研究, VI. 灌水量 및 왕겨 燠炭比率의 影響과 育苗特性. 煙草研究. 충북대학교 業연초연구소 논문집 15:9-18.
7. 山下津也, 李昇揆. 1990. 일본의 수확 후 처리기술의 발전 (I). 한국농업기계학회지 15(1):63-76.
8. 신주식, 노재영. 1993a. 왕겨 燠炭을 利用한 담배 育苗에 관한 研究, I. 育苗포트이 크기, 床土의 充填密度 및 硬化前 灌水量의 差異가 苗의 生育 및 素質에 미치는 影響, 煙草研究, 충북대학교 業연초연구소논문집 14:65-76.
9. 신주식, 노재영. 1993b. 왕겨 燠炭을 利用한 담배 育苗에 관한 研究, II. 育苗포트이 크기와 硬化處理가 苗의 生育 및 素質에 미치는 影響. 煙草研究. 충북대학교 業연초연구소 논문집 14:77-86.
10. 신주식, 노재영, 변주섭. 1995. 왕겨 燠炭을 利用한 담배 育苗에 관한 研究, III. 灌水量 調節을 통

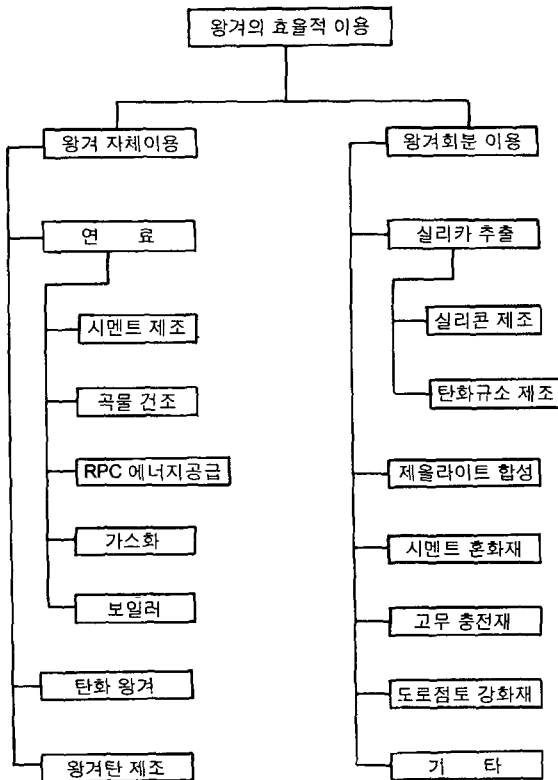


그림. 2 왕겨의 효율적 이용방법 분류도.

- 한 왕겨 燻炭과 腐葉土의 育苗特性. 煙草研究. 충북대학교 楨楨초楨연구소 논문집 15:1-8.
11. 윤형기 외. 1990. 왕겨탄 연소장치 개발(I). 한국동력자원연구소. KERI report. 89-C901-103DG.
  12. 조명제, 이영재. 1983. 왕겨 가스에 의한 농용석 유기판의 구동에 관한 연구. 대한기계학회논문집 7(2):233-239.
  13. 진영덕, 장동일, 장동순, 김만수, 장홍희. 1995. 미국종합처리장 발생왕겨 폐기물의 소각처리 및 연소열의 활용에 관한 연구. 한국농업기계학회지 20(3):250-261.
  14. Acharya, H. N., S. K. Dutta and H. D. Banerjee. 1980. Production of magnesium silicide and silane from rice husk ash. Solar Energy Materials 3:441-445.
  15. 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.
  16. Bajpai, P. K., M. S. Rao and K. V. G. K. Gokhale. 1981. Synthesis of mordenite type zeolite using silica from rice husk ash. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 20(4):721-726.
  17. Beagle, E. C. 1978. Rice-husk : Conversion to energy. FAO Agricultural Services Bulletin 31.
  18. Borthakur, P. C., P. Barkakati, D. Bordoloi and S. L. Sarkar. 1993. Producing black meal clinkers using rice husk as a fuel. World Cement 24:45-49.
  19. Boateng, A. A., L. T. Fan, W. P. Walawender and C. S. Chee. 1986. Morphological development of rice-hull-derived charcoal in a fluidized-bed reactor. Fuel 65:1759-1762.
  20. Bose, S. 1992. Thermal conductivity of magnesium silicide semiconductor prepared from rice husk. Phys. Stat. Sol. (a). 127:127-134.
  21. Chakraverty, A. and S. Kaleemullah. 1991. Conversion of rice husk into amorphous silica and combustible gas. Energy Convers. Mgmt. 32(6):565-570.
  22. Conradt, R., P. Pinkhaokham and U. Leela-Adisorn. 1992. Nano structured silica from rice husk. Journal of Non-Crystalline Solids 145:75-79.
  23. Dalai, A. K., M. S. Rao and K. V. G. K. Gokhale. 1985. Synthesis of NaX zeolite using silica from rice husk ash. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 24(3):465-468.
  24. Desai, J. B. and R. S. Dighe. 1978. The effect of rice hull ash cement on the compressive strength of concrete. Indian Concrete Journal 52:215-216.
  25. Fuad, A. M. Y., M. Jamaludin, M. Z. A. Ishak and M. A. K. Dmar. 1993. Rice husk ash as fillers in polypropylene : A preliminary study. Intern. J. Polymetric Mater 19:75-92.
  26. Ganesh, A., P. D. Grover and P. V. R. Iyer. 1992. Combustion and gasification characteristics of rice husk. Fuel 71:889-894.
  27. Haxo, H. E. and P. K. Mehta. Ground rice-hull ash as a filler for rubber. 1974. Rubber Chemistry and Technology 48:271-288.
  28. Hussian, K. and M. Suleman. 1992. Analysis of rice husk ash by power X-ray diffraction and auger spectroscopy. Journal of National Sciences and Mathematics 32(2):191-196.
  29. Ikram, N. and M. Akhter. 1988. X-ray diffraction analysis of silicon prepared from rice husk ash. J. of Materials Science 23:2379-2381.
  30. Ikpong, A. H. and D. C. Okpala. 1996. Strength characteristics of medium workability ordinary portland cement-rice husk ash concrete. Build. Environ. 75(15):1715-1720.
  31. James, J. and M. S. Rao. 1986. Reaction product of lime and silica from rice husk ash. Cement and Concrete Research 16:67-73.
  32. Khangaonkar, P. K., A. Rahmat and K. G. J. Kutty. 1992. Kinetic study of the hydro-thermal reaction between lime and rice husk ash silica. Cement and Concrete Research 22:577-588.
  33. Krishnarao, R. V. and M. M. Godkhindi. 1992. Studies on the formation of SiC whiskers from pulverized rice husk ashes. Ceramics International 18:35-42.
  34. Kim, W. T. and S. Y. No. 1998. Development of cyclone combustor for producing carbonized rice

- husk. Proc. of Sustainable Energy and Environmental Technology-Challenges and opportunities 14-17 June 1998 Gold Coast, Australia pp. 437-444.
35. Loo, Y. C., P. Nimityongskul and P. Karasudhi. 1984. Economical rice husk-ash concrete. Bldg. Res. Prac. 12:233-238.
  36. Malhotra, V. M. 1993. Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete : A review, Concrete International. pp. 23-28.
  37. Mehta, P. K. 1977. Properties of blended cements made from rice husk ash. ACI Journal 74(40):440-442.
  38. Mehta, P. K. and D. Pirtz. 1978. Use of rice hull ash to reduce temperature in high-strength mass concrete. ACI Journal 75(7):60-63.
  39. Nandi, K. C., D. Mukherjee, A. K. Biswas and H. N. Acharya. 1991. A novel and inexpensive method of Production of silanes from rice husk and their gas chromatographic analyses. Solar Energy Materials 22:161-167.
  40. Ray, A. J., G. Mahanty and A. Ghose. 1991. Effect of catalysts and temperature on silicon carbide whiskers formation from rice husk. J. Mat. Sci. Lett. 10:227-229.
  41. Raveendran, K., A. Ganesh and K. C. Khilar. 1995. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. Fuel 74(12):1812-1822.
  42. Raveendran, K. and A. Ganesh. 1996. Heating value of biomass and biomass pyrolysis products, Fuel 75(15):1715-1720.
  43. Singh, R., R. C. Machshwari and T. P. Ojha. 1980. Efficient use of agricultural wastes for energy production, Agricultural Mechanization in Asia 11 (4):31-37.
  44. Singh, S. K., L. Stachowicz, S. L. Girshick and E. Pfender. 1993. Thermal plasma synthesis of SiC from rice hull(husk). Journal of Material Science Letters 12:659-660.
  45. Vempati, R. K., S. C. Musthyala, M. Yousuf, A. Mollah and P. L. Cocke. 1995. Surface analyses of pyrolysed rice husk using scanning force microscopy. Fuel 74(11):1722-1725.
  46. Yogananda, M. R. and K. S. Jagadish. 1988. Pozzolanic properties of rice husk ash, Burnt Clay and Red Mud. Building and Environment 23(4):303-308.
  47. 農業機械學會. 1981. もみがらの穀物乾燥への利用.
  48. 清水浩, 木村俊範. 1984. もみがらの直接燃焼時の特性についての基礎研究. 農業機械學會誌 46 (1):633-638.
  49. 江崎春雄, 佐竹隆顯. 1983. 穀の壓縮成形特性に関する研究(第1報), 農業機械學會誌 44(4):625-631.