

교반 볼밀을 이용한 왕겨재의 습식 미세분쇄에 관한 연구⁺

Wet Fine Grinding of Rice Husk Ash using Stirred Ball mill

최연규*	이종호*	김명호*	박승제*
	정회원	정회원	정회원
Y.G. Choi	C.H.Lee	M. H. Kim	S.J. Park

1. 서론

현재 우리 나라에서 왕겨는 매년 약 80만톤이 생산되는 것으로 추정 하는데 이러한 왕겨는 대표적으로 가축분뇨의 수분 흡수재로서 축사바닥 깔개로 이용되어 퇴비화되고, 월동작물 보온재, 등으로 이용되고 있다. 그러나 왕겨에 함유된 규소 성분이 잘 부패가 되지 않기 때문에 퇴비화가 어려우며 축사 바닥용 깔개로 이용할 경우 많은 분진이 발생하여 어린 가축의 호흡기 질환의 발생원이 되고 있는 바 왕겨는 토양오염 및 환경오염에 심각한 영향을 미치고 있다고 할 수 있다.

따라서 왕겨를 농업적으로 이용하는 방법보다는 1차적으로 고유가 시대에 왕겨를 농업용 대체에너지원으로 활용하고, 폐기물로 남게 되는 재를 공업 원료로 이용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

왕겨재를 공업적으로 이용하기 위한 연구를 살펴보면 Haxo 등(1974)은 왕겨를 연소시켜 85~90%범위의 비결정 구조 실리카와 10~15%범위의 탄소를 함유하는 왕겨재를 만들어 0.1~2.0 μm 크기로 분쇄하여 강화재 역할을 하는 고무 충전재로 사용될 수 있다고 보고한 바 있으며, Metha (1976)는 또한 왕겨재를 고무의 첨가제로 사용할 수 있는 기술을 개발하여 미국 특허를 획득한 바 있다.

박승제(1988), Park과 Kim(1996)은 왕겨의 소각에 관한 연구를 체계적으로 수행한 바 있으며, 윤상대 등(1997)은 콘크리트 혼화재로서의 왕겨재의 특성에 관한 연구에서 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 보통의 콘크리트에 비해서 20~28% 압축강도가 증가하며 내황산염 저항성이 크고 투수에 대한 저항성이 큼과 동시에 내부식성이 크게 향상된다고 보고한 바 있다. 또한 낙하충격식 분쇄기를 이용하여 분쇄한 왕겨재를 시료로 사용한 실험결과 왕겨재를 미세하게 분쇄할수록 콘크리트 혼화재로서의 특성이 좋아진다고 보고한 바 있다.

그러나 왕겨재를 산업용 소재로 활용하기 위한 가공기술과 시설에 대한 연구는 물론 왕겨재의 분쇄특성 구명 및 분쇄기에 관한 연구도 거의 전무한 실정이므로 이에 대한 연구가 절실히 요구된다.

일반적인 분쇄기로는 콘크리트용 혼화재로 적합한 10 μm 이하의 입도까지 얻기가 어렵다.

+ 본 연구는 농림특정연구사업의 지원에 의하여 수행되었음

* 전북대학교 농과대학 농업기계공학과

분쇄기에서 분쇄되는 물질의 경도에 따라서 분쇄기를 분류하면, 고경도물 분쇄(시멘트, 화산암, 슬래그 등), 중간경도물 분쇄(석회석, 무연탄), 연성 분쇄(갈탄, 압연, 곡물)에 이용되는 분쇄기로 나눌 수 있다. 또한 분쇄물의 입도 범위에 따라서도 분류할 수 있는데 조분쇄(coarse crushing), 중간분쇄(fine crushing), 미분쇄(fine grinding), 초미분쇄(ultrafine grinding) 등으로 분류할 수 있다. 그리고 초미세분쇄기는 원료 입도가 작을수록 더 효과적인 특징을 가지고 있기 때문에 적절한 원료입도를 만들기 위한 전처리 분쇄 과정이 필요하다. 왕겨재의 전처리 분쇄는 연성분쇄에 속하지만 초미세 분쇄는 왕겨재 성분의 90% 이상이 고경도인 실리카(SiO_2)이므로 고경도물 분쇄에 속한다고 할 수 있다. 초미분쇄가 가능한 분쇄기는 고속해머밀, 유체에너지밀, 교반밀이 있다. 교반밀은 입도 100~200 μm 정도의 투입시료를 1~2 μm 까지 효율적으로 분쇄할 수 있고, 입도분포가 좁은 특징을 가지고 있다. 또한 분쇄방식은 크게 회분형 건식과 순환형 습식으로 분류되며 이들의 형태는 수직형과 수평형이 있다(강석호,1995).

본 연구에서는 콘크리트용 혼화재로 이용 가능한 10 μm 이하의 왕겨재 미세 분체를 효과적으로 생산하는 방법을 구명하기 위하여 실용화를 위한 초미세 분쇄기로서는 입도 1~2 μm 까지 효율적으로 분쇄할 수 있으면서 비교적 장치가 간단한 연속형 습식 교반볼밀(wet type stirred ball mill)을 선택하였다. 주요 작동인자인 분쇄시간, 교반속도, 혼합율에 대한 요인 실험을 수행하여 작동인자가 분쇄에너지효율과 분체입도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

시료는 96년에 도정된 전북 김제산 동진벼의 왕겨를 소각한 재료로서, 콘크리트 혼화재용 재료로 이용하기 위하여 Park과 Kim (1996)이 연구 개발한 파이로트 규모 왕겨 소각로에서 평균온도 약 670 $^{\circ}\text{C}$ 로 연소된 것이며, 조분쇄기로 회전수 4,000 rpm, 투입율 60 kg/h 조건으로 통과하여 조분쇄된 왕겨재를 수집하여 분쇄실험에 사용하였다. 소각로에서 바로 배출되어 수집된 왕겨재의 산물밀도는 약 67 kg/m³, 진밀도 2.0~2.1 g/cm³, SiO_2 함량 90% 이상이다. 소각로에서 배출된 왕겨재와 미세분쇄 실험에 사용된 원료시료의 입도 분포를 진탕기를 이용한 표준체 분석법(ASAE,1997)으로 분석한 결과, 평균입도는 각각 487.4 μm 와 177.8 μm 이다.

나. 실험장치

1) 습식 미세분쇄장치

실험장치는 건식 실험결과, 분쇄성능은 매우 좋으나 미세입자들이 공기중에 비산하여 연속식 실용화 장치로 이용하기가 매우 어려웠기 때문에 건식 분쇄탱크의 주요 구성체는 그대로 이용하면서 습식 연속공정이 가능하도록 제작하였다. 습식 교반볼밀은 건식 분쇄방법에

순환매체인 물과 분쇄시료를 연속적으로 공급하여 적당한 농도의 광액을 만들고 이 광액을 분쇄탱크에서 분쇄시키고 분쇄가 완료된 광액은 배출시키는 원리이다.

습식 미세분쇄 실험을 위하여 제작한 습식 교반볼밀은 그림 1과 같이 콘트롤러, 분쇄탱크, 혼합탱크, 재 저장탱크, 순환펌프등으로 구성되어 있다. 분쇄탱크의 4편 임펠러는 분쇄탱크에 투입된 분쇄용 볼과 광액(분쇄물)을 강력하게 교반하며, 분쇄용 볼은 분쇄 용기 내에서 분쇄물에 충격, 전단, 마찰작용을 일으켜 효과적인 분쇄가 이루어지도록 작용을 한다. 분쇄용 볼은 지름이 3 mm, 진밀도 3.527 g/cm³, 재질은 지르코늄(ZrO₂)이고 4편 임펠러도 볼과 같은 재질이 사용되었다. 분쇄용 볼과 분쇄물을 넣는 분쇄탱크(1,000 cm³)는 분쇄물의 순환이 가능하도록 하부 바닥에 분쇄물은 통과하고 분쇄매체인 볼은 통과할 수 없는 스크린이 설치되어 있다. 열과 소음이 발생하므로 이를 방지하기 위하여 용기 내부면에는 폴리우레탄 재질을 7 mm 두께로 코팅하였고, 용기 벽면은 이중구조로 되어 있어 냉각수로써 용기를 냉각할 수 있다.

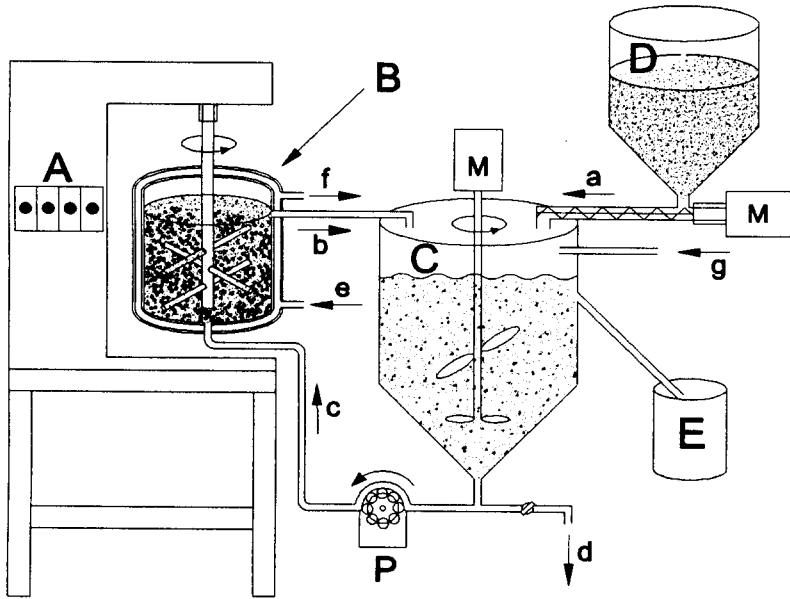


Fig. 1. Schematic of circulation wet-type stirred ball mill system
 A=controller, B=grinding chamber, C=mixture tank, D=ash tank
 E=fine pulp tank, M=motor, P=pump, a=rice husk ash, b,c=pulp
 flow, d=drain, e=cooling water in, f=cooling water out, g=feed
 water

또한 왕겨재를 저장할 수 있는 탱크 하부에는 재를 연속적으로 정량 공급할 수 있는 오우거(max. 50 g/min)가 부착되어 있으며, 혼합탱크에는 분쇄물의 침강을 방지하고 균일한 농도유지를 위한 분산용 스크류가 장착 되어있고, 정량펌프(max. 2,000 cm³/min)는 분쇄물을

순환시키는 작용을 한다. 본 실험에서는 분쇄물을 분쇄탱크에 수회 반복 순환시키면서 분쇄시킨후 배출시키는 방법으로 실험을 수행하였다.

2) 입도측정 장치

교반 불밀에서 분쇄된 미세분체는 레이저 회절산란방식 입도분포 측정장치(SALD-2001, SHIMADZU)를 사용하였다. 이 장치의 측정 범위는 0.03~280 μm , 분석에 필요한 시료의량은 10 mg~1 g이며, 미세분쇄된 왕겨재를 분산제인 증류수 280 cm^3 에 혼합하고, 초음파를 발생시켜 분체가 서로 재응집되는 현상을 방지시키면서 순환펌프로 측정시스템 경로를 반복 순환시킨다. 레이저의 파장은 680 nm이고 출력은 3 mW이다.

3) 에너지측정 장치

습식분쇄시 처리별 사용된 전력량은(kWh) 디지털 정밀 Watt meter인 Elcontrol (MICROVIP-MK 1.1)로 측정하여 분석하였다. 본 실험에 사용된 MK 1.1의 측정요소들은 Volt, Amp, Cos ϕ P.F., kW, kWh, Hz등이며, 분쇄시간 동안에 소비되는 전기에너지를 측정하여 출력하는 형태로 본 실험에서는 전력량을 환산하여 분쇄 에너지를 분석하였다.

다. 실험방법

분쇄효율과 입도에 영향을 주는 분쇄기의 작동인자인 분쇄시간 (15 min, 30 min, 45 min), 교반속도 (250 rpm, 500 rpm, 750 rpm) 및 혼합율(분쇄용 볼의 체적/분쇄된 분체의 체적 비로서 6.7, 8.4, 11.1, 20.9, mixed ratio)에 대하여 요인 실험을 수행하였다. 실험설계는 혼합율을 주구, 교반속도를 세구, 분쇄시간을 세세구로 하는 2반복 분할구 계획법으로 하였다. 정량 펌프의 유량은 광액의 퇴적성을 고려하여 25 cm^3/sec 로 고정하였으며, 요인별 수준은 예비실험을 통하여 미세분쇄(10 μm 이하)가 가능한 수준을 선택하였다.

분쇄기 작동시간은 분쇄탱크내에 분쇄물이 체류하면서 실제로 분쇄되는 분쇄시간 요인의 수준이 되도록 설정하였다. 분쇄용 볼은 용기 부피의 70%정도 장입을 하였는데 이는 습식 분쇄에서 일반적인 볼의 최적 장입 조건으로 알려져 있다. 이 때 볼 700 cm^3 의 진부피 V_m 은 417.2 cm^3 로 실측되었다.

습식 분쇄에서 분쇄량과 관계되는 혼합율은 식(1)에 의하여 계산하였다.

$$R = \frac{V_m}{V_p} \text{-----} \quad (1)$$

R = 혼합율

V_m = 분쇄용 볼의 진부피(cm^3)

V_p = 왕겨재의 진부피(cm^3)

왕겨재의 진부피는 윤상대 등(1997)이 측정한 진밀도 2.0 g/cm^3 (진비체적 0.5 cm^3/g)를 이용하여 계산하였다. 실험은 분쇄탱크 용기바닥과 임펠러와의 간격을 5~6 mm로 유지한 다음 분쇄용 볼을 용기 부피의 70%정도 장입 시킨후, 분쇄 원료인 왕겨재 실험처리량 각각 200 g,

375 g, 500 g, 625 g을 재 공급탱크에 투입하고 혼합탱크에 순환 매체인 물 3,000 cm³를 채우고 분산용 스크류, 정량펌프를 작동시키면서 물이 순환하기 시작하면 공급탱크의 재를 매분 45~50 g씩 일정하게 투입한다. 이 때 분쇄탱크의 임펠러 회전속도는 분쇄가 이루어지지 않도록 약 50 rpm으로 하였다. 재가 혼합탱크에 전량투입 되고 물과 혼합이 완전하게 이루어지면, 콘트롤러에 실험수준의 분쇄시간과 교반속도(rpm)를 설정하여 분쇄시키고 동시에 에너지 측정기를 작동시킨다. 분쇄가 종료되면 배출(drain)밸브를 통하여 분쇄물을 배출시키고 배출된 분쇄물을 잘 혼합한후 350 cm³정도를 분석용 시료로 채취하여 밀폐용기에 저장, 레이저 입도 분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 평균입도와 분쇄에너지

본 실험의 결과에서 입도에 대한 요인의 분산분석결과 회전수, 분쇄시간은 고도의 유의성이 인정되었지만 혼합율은 유의성이 인정되지 않았다. 미세분쇄의 평균입도는 2.831~9.58 μm 로 나타났으며 불을 물과 같이 회전시키고 물과 분체의 분쇄물을 계속 순환시키기 때문에 분쇄 에너지가 매우 증가한 반면, 비산 먼지가 없고 연속 작동이 용이하였다. 그림 2는 실험 처리별 평균입도를 나타낸 것이다. 경향은 건식과 마찬가지로 요인수준이 증가할수록 입도는 작아진다. 그러나 특이한 것은 광액의 농도가 지나치게 낮으면(그림에서 R이 커지면) 평균입도가 오히려 커지는 경향을 나타내었다. 이것은 농도가 낮으면 분체입자가 물(순환매체)의 유선을 따라 운동함으로써 불과의 충돌이 미진하였기 때문으로 판단된다. 또한 500 rpm과 750 rpm의 분쇄시간 30 분이상에서 분쇄된 입도의 크기가 유사하게 나타나 습식의 경우 회전수 보다는 분쇄시간의 요인이 더 크게 작용함을 알 수 있다. 또한 혼합율이 11.1 이하에서는 입도의 차이가 크게 나타나지 않고 있다.

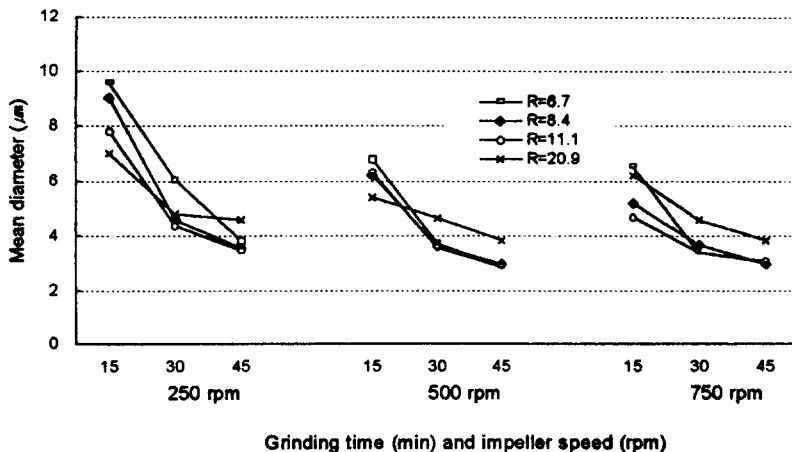


Fig. 2. Mean diameter of particle at each experimental condition of wet fine grinding

그림 3은 분체의 단위질량당 투입된 분쇄에너지(비에너지)를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 분쇄시간이 증가할수록 비에너지는 선형적으로 증가하고 있으며 혼합율 20.9 수준은 다른 혼합율 수준에 비하여 월등히 크다. 회전수 수준증가에 따라서는 약간씩 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이런 특징을 종합하여 볼 때 투입된 에너지는 분쇄용 불과 분쇄물의 회전운동에 주로 이용되며 분쇄에 이용되는 에너지는 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다.

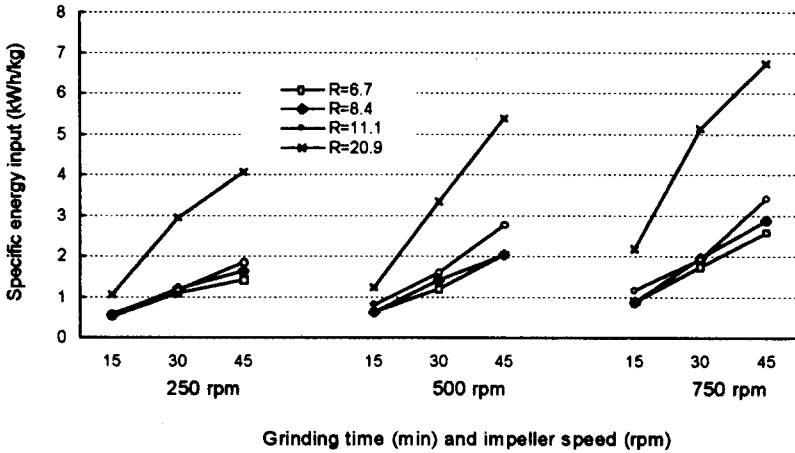


Fig. 3. Specific energy input at each experimental condition of wet fine grinding

나. 분쇄에너지 효율과 비표면적차

에너지 효율과 비표면적차를 분석하기 위하여 Zheng 등(1996)이 이용한 분체의 비표면적 변화에 따른 에너지 효율의 개념을 사용하였다. 입도가 작아진다는 것은 입자의 단위 부피당 표면적이 증가되는 것으로 생각할 수 있다. 분체 입자의 형상이 구라고 가정하면 분체의 단위체적당 표면적은 식(2)와 같이 표현된다.

$$S = \frac{6}{d_{MA}} \quad \text{-----} \quad (2)$$

S는 비표면적(m^2/cm^3)이며, d_{MA} 는 평균직경(μm)이다. 또한 분쇄에너지는 투입되는 원료의 입도와 분쇄된 분체의 입도의 차이가 클수록 증가할 것이며 따라서 분쇄가 진행된 정도를 표현하기 위하여 식(3)의 개념을 도입하였다.

$$\Delta S = S_p - S_f \quad \text{-----} \quad (3)$$

여기서 ΔS 는 비표면적차, S_f 는 원료시료의 비표면적, S_p 는 분쇄된 분체시료의 비표면적이다. 따라서 동일한 원료시료일 때 ΔS 가 증가한다는 것은 분쇄 후 분체의 평균입도가 작다는 것을 의미하며 분쇄가 많이 진행되었다는 것을 나타낸다. 분쇄에너지 효율의 개념은 식

(4)으로 나타내어진다.

$$E_f = \frac{\Delta S}{E_v} \quad \text{-----} \quad (4)$$

여기서 E_f 는 분쇄에너지 효율 (m^2/Wh), E_v 는 분쇄된 분체의 단위 체적당의 분쇄에너지 (Wh/cm^3)이다. 따라서 E_f 는 생산된 분체의 단위체적당 소요된 분쇄 에너지에 대한 분쇄 진행정도를 나타내는 것이다.

그림 4는 혼합율에 대한 분쇄에너지 효율과 비표면적 차를 분쇄시간 3 조건에 대한 평균 값으로 나타낸 것이다. 그림에서 혼합율이 증가하면 에너지 효율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 분쇄시 시료 투입율이 에너지 효율에 영향을 주고 있음을 나타내는 것이다. 혼합율에 따른 비표면적 차이를 보면 혼합율 11.1 이하에서는 비표면적차는 큰 차이가 없는 것으로 나타나며 본 실험조건에서는 혼합율의 적정수준을 판단하기가 어려운 것으로 분석된다.

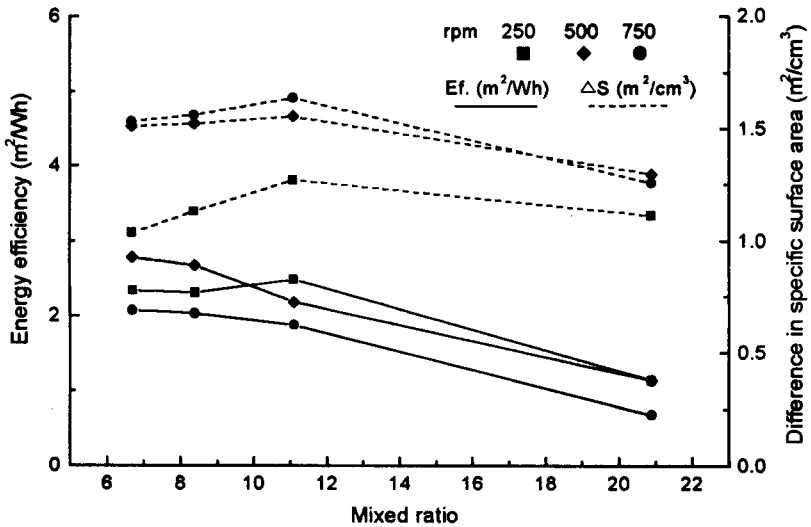


Fig. 4. Energy efficiency and difference in specific surface area according to mixed ratio

일반적으로 혼합율의 최적조건은 나타나게 되는데 황기환 (1991)이 불밀을 이용한 활석 분쇄실험 결과에서 낮은 시료 충전율과 과도한 충전율은 분쇄속도를 저하시키는 요인으로 보고하였으며, 또한 Zheng 등 (1996)이 교반불밀을 사용하여 석회석을 분쇄실험한 결과에서 광액의 농도 차이에 의하여 비표면적차가 변하며 입계농도가 있는 것으로 보고하였다. 본 연구의 결과에서 혼합율 11.1이 임계치라고 판단하기는 어려우며 추가 연구의 필요성이 있는 것으로 생각된다.

그림 5는 임펠러 총회전수에 따른 비표면적 차이를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 회전수의 대수값에 따라 비표면적차는 선형적으로 증가하고 있다. 선형관계식은 식(5)와 같다.

$$Y = 0.5604 \ln(X) - 3.9175 \quad (R^2=0.9847) \quad \text{-----} \quad (5)$$

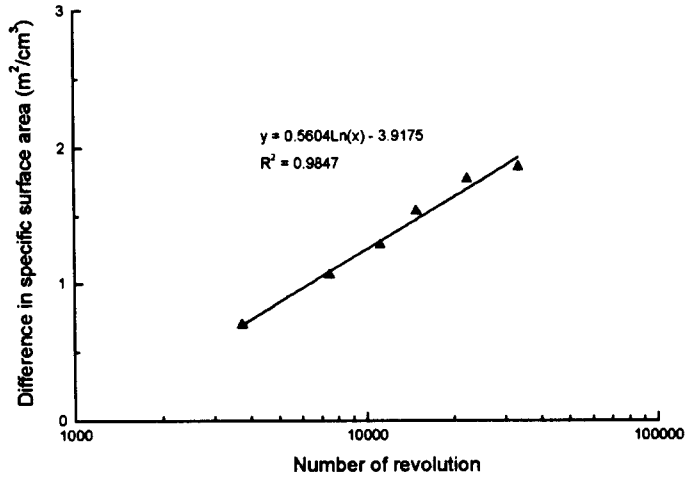


Fig. 5. Relation between number of impeller revolution and difference in specific surface area

그림 6은 임펠러 총회전수와 에너지효율과의 관계를 나타낸 그림이다. 비표면적차와는 반대로 분쇄시간의 증가와 회전수 증가에 따른 총회전수의 대수값에 따라 에너지 효율은 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 선형관계식은 식(6)과 같다.

$$Y = -0.5194 \ln(X) + 6.8585 \quad (R^2 = 0.8486) \quad \text{-----} \quad (6)$$

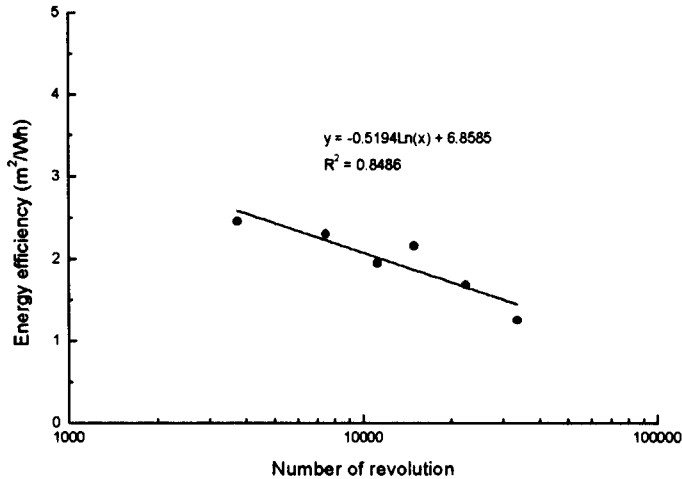


Fig. 6. Relation between number of impeller revolution and energy efficiency

다. 최적분쇄조건 분석

실험조건의 범위에서 습식 미세분쇄기의 최적 분쇄조건을 분석하기 위한 전제조건은 첫째, 요구되는 분체 입도를 만족하는 것이며, 둘째는 분쇄용량이 클 것, 셋째는 에너지 효율이 높을 것 등이다. 본 연구의 목적에서 요구하는 분체입도는 작을수록 좋으나 건식 분쇄기와 같은 수준인 $3 \mu\text{m}$ ($\Delta S=1.96$)로 결정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

표 1은 실험처리별로 분쇄진행정도를 나타내는 비표면적 차와 분쇄 에너지효율, 비에너지 및 분쇄용량을 분석하여 나타낸 것이다.

Table 1. Analysis of experimental results for wet fine grinding

Operating Parameters Item	rpm	R=20.9			R=11.1			R=8.4			R=6.7		
		Grinding time (min)			Grinding time (min)			Grinding time (min)			Grinding time (min)		
		15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
ΔS (m^2/cm^2)	250	0.82	1.22	1.28	0.74	1.35	1.71	0.62	1.15	1.61	0.59	0.96	1.54
	500	1.08	1.26	1.55	0.92	1.65	2.03	0.91	1.62	2.03	0.85	1.59	2.08
	750	0.94	1.28	1.54	1.24	1.75	1.92	1.03	1.65	1.99	0.89	1.73	1.97
E_r (m^3/Wh)	250	1.77	0.93	0.70	2.84	2.54	2.04	2.58	2.15	2.17	2.63	1.94	2.41
	500	1.92	0.83	0.64	2.55	2.32	1.67	3.27	2.51	2.21	3.09	2.95	2.28
	750	0.95	0.56	0.51	2.35	2.01	1.24	2.65	1.88	1.54	2.30	2.20	1.70
\bar{E} (kWh/kg)	250	1.04	2.94	4.07	0.58	1.18	1.86	0.53	1.19	1.65	0.50	1.10	1.42
	500	1.25	3.36	5.38	0.80	1.59	2.78	0.62	1.44	2.05	0.61	1.20	2.03
	750	2.19	5.11	6.73	1.17	1.93	3.43	0.87	1.95	2.88	0.86	1.75	2.57
Capacity (kg/h)		0.16	0.08	0.05	0.30	0.15	0.10	0.40	0.20	0.13	0.50	0.25	0.167

표 1에서 요구된 입도에 만족되는 비표면적 차 ΔS 가 1.96이상인 조건과 이에 상응하는 에너지효율 E_r 의 조건은 음영으로 나타내었다. 실험 처리 조건 중에서 분쇄용량이 큰 조건을 찾으면 혼합물 6.7, 분쇄시간 45분에서 임펠러 회전수 500 rpm과 750 rpm 두 조건으로 압축된다. 이 두 조건을 비교해보면 분쇄용량이 같기 때문에 500 rpm 조건이 입도의 크기를 의미하는 $\Delta S(2.08 > 1.97)$ 와 에너지효율($2.28 > 1.70$), 비에너지($2.03 < 2.57$)가 모두 유리한 것으로 분석 되었다. 따라서 최종적으로 최적조건은 혼합물 6.7, 분쇄시간 45분, 임펠러 회전수 500 rpm으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 수도작 부산물인 왕겨를 소각로에서 소각하여 열에너지를 이용하고 왕겨재는 콘크리트용 혼화재로 활용할 목적으로 $10 \mu\text{m}$ 이하의 왕겨재 미세분체를 생산하기 위한 효율적인 분쇄 시스템을 개발하고자 하였다. 미세 분쇄기로는 습식 교반분쇄를 선택하여 분쇄기

의 중요 작동인자가 분쇄특성에 미치는 영향을 구명하였다.

습식 미세분쇄의 작동인자로서는 분쇄시간(15, 30, 45 min), 임펠러 회전수(250, 500, 750 rpm), 혼합율(6.7, 8.4, 11.1, 20.9)이었으며 요인 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 습식 미세분쇄 실험조건 범위에서 분체의 평균입도는 2.83~9.58 μm , 분쇄에너지효율은 0.51~3.27 m^3/Wh , 비에너지는 0.5~6.73 kWh/kg 으로 나타났다.
2. 본 연구에 사용된 습식 교반볼밀은 분쇄시간과 임펠러 회전수 및 혼합율이 증가할수록 분쇄에너지 효율은 감소하는 경향을 나타내었다.
3. 분쇄탱크 임펠러의 총회전수의 대수값에 따라 비표면적차는 선형적으로 증가하고, 분쇄에너지효율은 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다.
4. 최적 작동조건은 본실험의 범위에서 분쇄시간 45분, 임펠러 회전수 500 rpm, 혼합율 6.7로 분석되었으며 이 때의 평균입도는 2.837 μm , 분쇄 에너지효율은 2.28 m^3/Wh 분쇄용량 0.17 kg/h , 비에너지는 2.03 kWh/kg 이었다.
5. 습식 미세분쇄는 오염을 유발하는 비산 먼지가 없고 연속 작동이 용이하여 분쇄공정의 자동화와 실용화에 이용될 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. 강석호. 1995. 분쇄공학. 회중당.
2. 박승제. 1988. 왕겨 연소기를 이용한 온수보일러 시스템 개발에 관한 연구. 박사학위논문. 서울대학교.
3. 윤상대 등. 1997. 콘크리트용 혼화재로서 왕겨활용에 관한 연구. 농림부 보고서.
4. 황기환. 1991. 불밀에 의한 활석의 분쇄속도 및 수학적 모델에 관한 연구. 박사학위논문. 한양대학교.
5. ASAE Standard. 1997
6. Haxo, H.E. and P. K. Mehta. 1974. Ground rice-hull ash as a filler for rubber. *Rubber Chemistry and Technology* 48: 271~288.
7. Park. S. J. and M. H. Kim, 1996. Performance of a Pilot-Rice Husk Incinerator. Korean society for Agricultural Machinery. ICAM'95, Proceedings Vol. II(III).
8. P.K. Metha. 1976. United States Patent. No.3, 951, 907, Apr., 20.
9. Prasher C.L. 1987. *Crushing and grinding process handbook*. John Wiley. 441~448.
10. Zheng, J, Harris. C. C., and P. Somasundaran, 1996. A study on grinding and energy input in stirred media mills, *Powder Technolgy*, 86:171-178.