

## 교반 볼밀을 이용한 왕겨재의 습식 미세분쇄에 관한 연구

박승제 김명호 최연규

### Wet Fine Grinding of Rice Husk Ash using a Stirred Ball Mill

S. J. Park M. H. Kim Y. K. Choi

#### Abstract

This work was conducted to find the operating characteristics of an efficient wet grinding system designed to obtain fine rice husk ash powder. Once the rice husk was combusted and the thermal energy was recovered from the furnace, the ash was fed and pulverized in the grinding system resulting a fine powder to be used as a supplementary adding material to the portland cement. Grinding time (15, 30, 45 min), impeller speed (250, 500, 750 rpm), and mixed ratio (6.7, 8.4, 11.1, 20.9) were three operating factors examined for the performance of a wet-type stirred ball mill grinding system. For the operating conditions employed, mean diameter of fine ash powder, specific energy input, and grinding energy efficiency were in the range of 2.83~9.58  $\mu\text{m}$ , 0.5~6.73 kWh/kg, and 0.51~3.27  $\text{m}^2/\text{Wh}$ , respectively. With the wet-type stirred ball mill grinding system used in this study, the grinding energy efficiency decreased with the increase in total grinding time, impeller speed, and mixed ratio. The difference in specific surface area of powder linearly increased with logarithm in total number of impeller revolution and the grinding energy efficiency linearly decreased. Grinding time of 45 min, impeller speed of 500 rpm, and mixed ratio of 6.7 were chosen as the best operating condition. At this condition, mean particle diameter of the fine ash, grinding energy efficiency, grinding throughput, and specific energy input were 2.84  $\mu\text{m}$ , 2.28  $\text{m}^2/\text{Wh}$ , 0.17 kg/h, and 2.03 kWh/kg, respectively. Wet fine grinding which generates no fly dust causing pollution and makes continuous operation easy, is appeared to be a promising solution to the automatization of rice husk ash grinding process.

**Keywords :** Grinding, Grinding energy efficiency, Rice husk ash, Specific energy input, Wet-type stirred ball mill

### 1. 서론

현재 우리나라에서 왕겨는 매년 약 80 만톤이 생산되는 것으로 추정되며, 생산된 왕겨는 대표적으로 가축분뇨의 수분 흡수재로서 축사바닥 깔개로 이용되어 퇴비화 되거나, 월동작물의 보온재 등으로 이용되고 있다. 그러나 왕겨는 퇴비성분이 많지 않고, 함유된 규소 성분은 쉽게 부패가 되지 않아 왕겨의 퇴비화는 부적합한 것으로 알려져 있다. 따라서, 왕겨는 농업적으로 이용하는 방법보다는 연소를 통해 왕겨를 고유가시대에 농업용 대체에너지원으로 활용하고, 폐기물로 남

게 되는 재를 공업 원료로 이용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

왕겨재를 공업적으로 이용하기 위한 연구로는 Haxo and Metha(1974)가 왕겨를 연소시켜 85~90% 범위의 비결정구조 실리카와 10~15% 범위의 탄소를 함유하는 왕겨재를 만들어 0.1~2.0  $\mu\text{m}$  크기로 분쇄하여 강화재 역할을 하는 고무 충전재로 사용할 수 있다고 보고한 바 있으며, Metha(1976)는 왕겨재를 고무의 첨가제로 사용할 수 있는 기술을 개발하여 미국 특허를 획득한 바 있다. 박(1988)과 Kim et al.(1997)은 왕겨의 연소에 관한 연구를 체계적으로 수행한 바 있으며, 윤 등(1997)은 콘크리트 혼화재로서의 왕겨재의 특성에 관한

This article was submitted for publication in December 2005, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in January 2006. The authors are Seung Je Park, Professor, KSAM member, Myoung Ho Kim, Associate Professor, KSAM member, and Yeon Kyu Choi, Former Graduate Student, Bioindustrial Machinery Engineering Major, Chonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk, Korea. The corresponding author is S. J. Park, KSAM member, Professor, Bioindustrial Machinery Eng. Major, Division of Bioresource Systems Engineering (Institute of Agri. Sci. & Tech.), Chonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk, 561-756, Korea; Tel : +82-63-270-2615; Fax : +82-63-270-2620; E-mail : <sjpark@chonbuk.ac.kr>

연구에서 왕겨재를 혼입한 콘크리트는 보통의 콘크리트에 비해 압축강도가 20~28% 증가했고 내황산염 저항성과 투수에 대한 저항성이 커짐과 동시에 내부식성이 크게 향상되었고, 또한 왕겨재를 미세하게 분쇄할수록 콘크리트 혼화재로서의 특성이 좋아진다고 보고한 바 있다.

일반적인 분쇄기로는 콘크리트용 혼화재로 적합한 10 μm 이하 입도의 분체를 얻기가 어렵지만 교반볼밀은 입도 100~200 μm 정도의 투입시료를 1~2 μm까지 효율적으로 분쇄할 수 있고, 입도분포가 좁은 특징을 가지고 있다(강, 1995). 박 등(2000)은 왕겨재를 콘크리트 혼화재로 사용할 목적으로 건식 교반볼밀을 이용해 왕겨재의 미세분쇄 실험을 수행한 결과 최적 작동조건에서 평균입도는 2.73 μm, 분쇄에너지 효율은 3.95 m<sup>2</sup>/Wh, 분쇄용량은 0.25 kg/h, 비에너지는 1.22 kWh/kg으로 나타나 콘크리트 혼화재로 사용하기에 적절한 분체를 얻을 수 있었으나 건식 교반볼밀을 이용한 왕겨재의 분쇄공정은 미세분진 발생의 문제로 실용화의 어려움이 있었다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트용 혼화재로 이용 가능한 10 μm 이하의 왕겨재 미세 분체를 효과적으로 생산하는 방법을 구명하기 위하여 실용화를 위한 초미세 분쇄기로서 비교적 장치가 간단한 연속형 습식 교반볼밀 분쇄시스템을 구성한 후, 주요 작동인자인 분쇄시간, 교반속도, 혼합율에 대한 요인 실험을 수행하여 작동인자가 분쇄에너지 효율과 분쇄입도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험재료

시료는 1996년에 도정된 전북 김제산 동진벼의 왕겨를 연소한 재료로서, Kim et al.(1997)이 연구, 개발한 파이로트 규모 왕겨 소각로에서 평균온도 약 670°C로 연소시킨 다음 왕겨재 이송용 원심팬의 역할도 동시에 수행하는 조분쇄기에 회전수 4,000 rpm, 투입율 60 kg/h 조건으로 통과시켜 1차 분쇄시킨 후 미세분쇄 실험에 사용하였다. 소각로에서 바로 배출되어 수집된 왕겨재의 산물밀도는 약 67 kg/m<sup>3</sup>, 진밀도는 2.0~2.1 g/cm<sup>3</sup>, SiO<sub>2</sub> 함량은 90% 이상이었다. 소각로에서 배출된 왕겨재와 미세분쇄 실험에 사용된 원료시료의 입도 분포를 진탕기를 이용한 표준체 분석법(ASAE, 1997)으로 분석한 결과, 평균입도는 각각 487.4 μm와 177.8 μm였다.

### 나. 실험장치 및 측정항목

#### 1) 습식 미세분쇄장치

습식 분쇄란 순환매체인 물과 분쇄시료를 연속적으로 공급

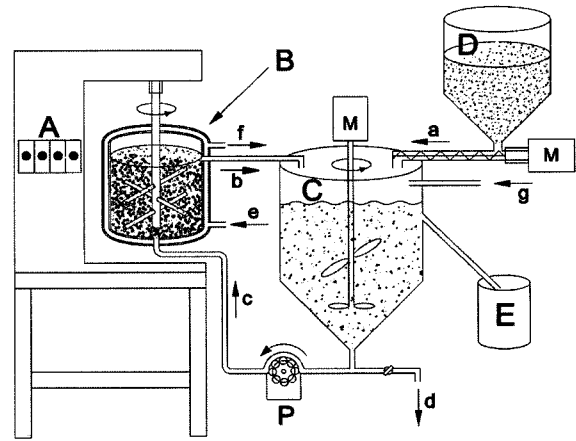


Fig. 1 Schematic diagram of wet-type stirred ball mill grinding system. [A=controller, B=grinding chamber, C=mixture tank, D=ash tank, E=fine pulp tank, M=motor, P=pump, a=rice husk ash, b, c=pulp flow, d=drain, e, f=cooling water in & out, g=feed water]

하여 적당한 농도의 광액을 만들고 이 광액을 분쇄탱크 내에서 분쇄시키고 분쇄가 완료된 광액은 배출시키는 분쇄방법이다. 본 연구에서는 건식 교반볼밀(고려소재개발(주), KMD-1B)의 주요 구성체를 중심으로 습식 분쇄시스템을 그림 1과 같이 구성하여 왕겨재의 습식 미세분쇄에 사용하였다.

분쇄탱크의 4핀 임펠러는 분쇄탱크에 투입된 분쇄용 볼과 광액(분쇄물)을 강력하게 교반하며, 분쇄용 볼은 분쇄탱크 내에서 분쇄물에 충격, 전단, 마찰작용을 가해 효과적인 분쇄가 이뤄지도록 한다. 분쇄용 볼은 지름이 3 mm, 진밀도가 3.527 g/cm<sup>3</sup>, 재질은 지르코늄(ZrO<sub>2</sub>)이고, 4핀 임펠러도 역시 지르코늄 재질로 제작되었다. 용량 1,000 cm<sup>3</sup>의 분쇄탱크 하부 바닥에는 분쇄물의 순환이 가능하도록 분쇄물은 통과하고 분쇄매체인 볼은 통과할 수 없는 스크린이 설치되었고, 분쇄시 발생하는 열과 소음문제를 처리하기 위해 분쇄탱크 내 벽에는 폴리에탄이 7 mm 두께로 코팅되어 있으며, 벽체에는 냉각수 순환을 위한 재킷이 설치되어 있다.

또한 왕겨재 저장탱크 하부에는 왕겨재를 연속적으로 정량 공급할 수 있는 오우거(max.50 g/min)가 부착되어 있으며, 혼합탱크에는 분쇄물의 침강을 방지하고 균일한 광액농도 유지를 위한 분산용 스크류가 장착되어 있고, 분쇄탱크와 혼합탱크 간 광액(분쇄물)의 순환을 위해 정량펌프(연동펌프; 용량 2,000 cm<sup>3</sup>/min)가 설치되었다. 본 연구에서는 광액을 분쇄탱크에 수회 반복 순환시켜 분쇄한 후 배출시키는 방법으로 분쇄실험을 수행하였다.

#### 2) 입도 및 분쇄 소요에너지 측정

분쇄된 미세분체(광액)의 입도 측정에는 측정범위 0.03~280 μm인 레이저 회절산란방식 입도분포 측정장치(SALD-

2001, SHIMADZU)를 사용하였다. 시료의 량은 10 mg~1 g 이었으며, 초음파를 발생시켜 분체가 서로 재응집 되는 현상을 방지시키면서 순환펌프로 측정시스템 경로를 반복 순환시켰다.

분쇄 소요에너지(kWh)는 분쇄시간 동안에 소비되는 전기 에너지를 디지털 정밀 Watt meter(MICROVIP-MK 1.1)로 측정, 전력량으로 환산하여 계산하였다.

#### 다. 실험방법

분쇄효율과 입도에 영향을 주는 작동인자인 분쇄시간(15, 30, 45 min), 교반속도(250, 500, 750 rpm) 및 혼합율(분쇄용 볼의 체적/분쇄된 분체의 체적 비; 6.7, 8.4, 11.1, 20.9)에 대하여 요인 실험을 수행하였다. 실험설계는 혼합율을 주구, 교반속도를 세구, 분쇄시간을 세세구로 하는 2반복 분할구 계획법으로 하였다. 정량펌프의 유량은 광액의 퇴적성을 고려하여 25 cm<sup>3</sup>/sec로 고정하였고, 요인별 수준은 예비실험을 통하여 미세분쇄(10 μm 이하)가 가능하도록 선택하였다. 모든 처리에서 분쇄용 볼은 습식 분쇄에서 일반적으로 사용하고 있는 조건인 분쇄탱크 부피의 70% 정도를 차지하도록 장입하였는데, 이 때 볼의 산물부피 700 cm<sup>3</sup>의 진부피는 417.2 cm<sup>3</sup>로 실측되었다.

분쇄실험은 분쇄탱크 용기 바닥과 임펠러와의 간격을 5~6 mm로 유지한 다음 분쇄용 볼을 용기 부피의 70% 정도 장입한 후, 혼합율의 수준에 따라 식 (1)로부터 계산된 왕겨재의 실험처리량(200, 375, 500, 625 g)을 재 공급탱크에 투입함으로써 시작하였다.

$$R = \frac{V_m}{V_p} = \frac{V_m}{M_p/\rho_p} \quad (1)$$

여기서, R은 혼합율(mixed ratio), V<sub>m</sub>은 분쇄용 볼의 진부피(cm<sup>3</sup>), V<sub>p</sub>는 왕겨재의 진부피(cm<sup>3</sup>), M<sub>p</sub>는 왕겨재의 질량(g), ρ<sub>p</sub>는 왕겨재의 진밀도(2.0 g/cm<sup>3</sup>)이다.

다음, 혼합탱크에 순환 매체인 물 3,000 cm<sup>3</sup>를 채우고 분산용 스크류와 정량펌프를 작동시키면서 물이 순환되기 시작하면 공급탱크의 왕겨재를 매분 45~50 g씩 일정하게 투입하였다. 이 때 분쇄탱크의 임펠러 회전속도는 임펠러에 의한 분쇄가 이루어지지 않도록 약 50 rpm으로 하였다. 왕겨재가 혼합탱크에 전량 투입되고 완전하게 물과 혼합이 된 후, 컨트롤러에 작동시간과 회전속도(rpm)를 설정하여 분쇄시키고 동시에 에너지측정기를 작동시켰다. 이 때, 분쇄기의 작동시간은 분쇄탱크 내에 광액이 채류하면서 실제로 분쇄되는 분쇄시간 요인의 수준이 되도록 설정하였다. 분쇄가 종료되면 배출

(drain)밸브를 통해 광액을 배출시키고 배출된 광액을 충분히 혼합한 후 350 cm<sup>3</sup> 정도를 입도분석용 시료로 채취하여 밀폐 용기에 저장하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 평균입도와 분쇄에너지

그림 2는 실험처리별 평균입도를 나타낸 것이다. 입도에 대한 요인의 분산분석 결과, 임펠러 회전속도와 분쇄시간은 고도의 유의성이 인정되었지만 혼합율은 유의성이 인정되지 않았다. 분체의 평균입도는 2.83~9.58 μm로 나타났으며 분쇄탱크에서 볼을 광액과 같이 회전시키고 또한 정량펌프로써 광액을 계속 순환시키기 때문에 습식분쇄는 분쇄 소요에너지가 건식분쇄의 경우에 비해 크게 증가한 반면, 비산 먼지가 없고 연속 작동이 용이하였다. 또, 건식분쇄와 마찬가지로 습식분쇄에서도 요인의 수준이 증가할수록 분체의 입도는 작아졌다. 그러나 광액의 농도가 지나치게 낮으면(R이 커지면) 평균입도가 오히려 커지는 특이한 경향을 나타내었는데, 이는 광액의 농도가 지나치게 낮으면 광액 내의 분체입자가 물(순환매체)의 유선을 따른 운동이 주로 이뤄져 분쇄용 볼과의 충돌이 미진하였기 때문으로 판단된다. 또한 500 rpm과 750 rpm의 분쇄시간 30분 이상에서는 분체 입도가 유사하게 나타나 임계 회전속도가 존재하는 것으로 생각되며 혼합율 11.1 이하에서는 입도의 차이가 크게 나타나지 않았다.

그림 3은 분체 단위질량당 투입된 분쇄에너지(비에너지)를 나타낸 것이다. 분쇄시간의 증가에 따라 비에너지는 선형적으로 증가했으며, 혼합율 20.9 수준에서는 다른 혼합율 수준에 비해 비에너지가 월등히 컸다. 또한, 임펠러 회전속도가 증가할수록 비에너지는 약간씩 증가하는 경향을 보였다. 분

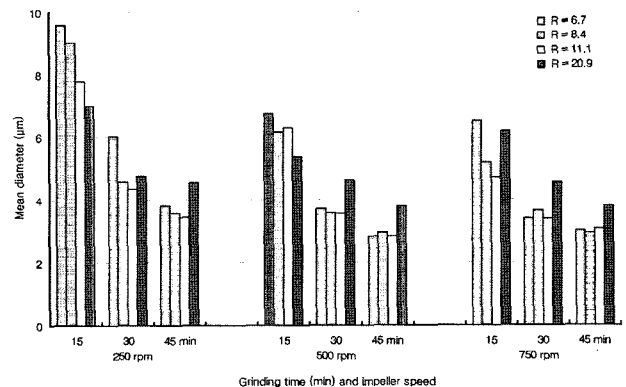


Fig. 2 Mean diameter of particle size at each experimental condition of wet fine grinding.

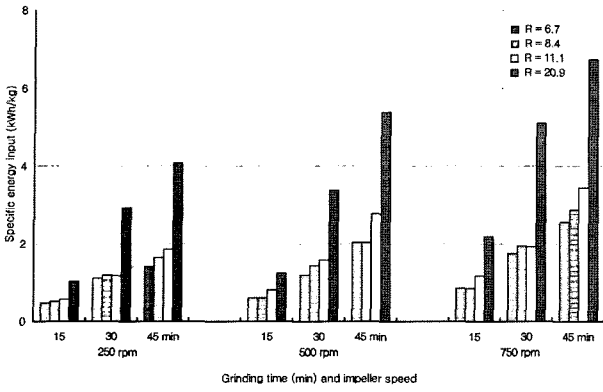


Fig. 3 Specific energy input at each experimental condition of wet fine grinding.

체 입도는 차이가 없으나 분쇄에너지는 증가하는 이러한 특징을 종합해 볼 때, 투입된 분쇄에너지는 분쇄용 볼과 광액의 회전운동에 주로 이용되며 분쇄 입자의 분쇄에 실제로 이용되는 에너지는 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다.

나. 분쇄에너지 효율과 비표면적차

에너지 효율과 비표면적차를 분석하기 위해 Zheng et al. (1996)이 이용한 분체의 비표면적 변화에 따른 에너지 효율의 개념을 사용하였다. 즉, 입도가 작아진다는 것은 입자의 단위 부피당 표면적이 증가되는 것으로 생각할 수 있으며, 분쇄 입자의 형상을 구라고 가정하면 분체의 단위체적당 표면적은 식 (2)와 같이 표현된다.

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

여기서, S는 비표면적(m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>)이며, d<sub>MA</sub>는 평균직경(μm)이다.

한편 분쇄 소요에너지는 투입원료의 입도와 분쇄된 결과물의 입도 간 차이가 클수록 증가할 것이며 따라서 분쇄가 진행된 정도를 표현하기 위하여 식 (3)과 같이 정의되는 비표면적차의 개념을 도입하였다.

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

여기서 ΔS는 비표면적차, S<sub>f</sub>는 원료시료의 비표면적, S<sub>p</sub>는 분쇄된 분체시료의 비표면적이다. 따라서 동일한 원료시료를 분쇄했을 때, ΔS가 크다는 것은 분쇄 후 분체의 평균입도가 작다는 것을 의미하며 분쇄가 더 많이 진행되었음을 나타낸다.

분쇄에너지 효율 E<sub>f</sub>는 생산된 분체의 단위체적당 소요된 분쇄 에너지에 대한 분쇄 진행 정도를 나타내는 척도로서 식 (4)와 같이 정의된다.

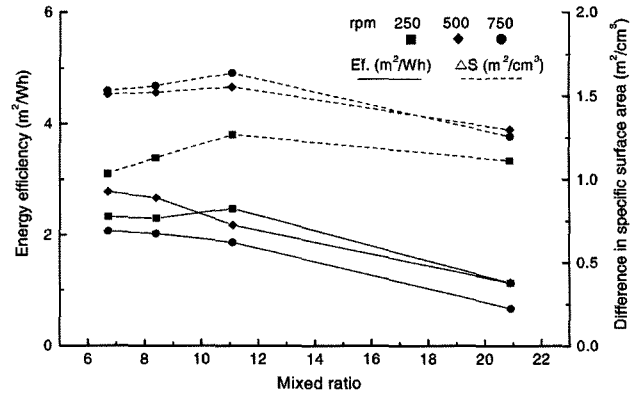


Fig. 4 Energy efficiency and difference in specific surface area according to mixed ratio.

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

여기서 E<sub>f</sub>는 분쇄에너지 효율(m<sup>2</sup>/Wh), E<sub>v</sub>는 분쇄된 분체의 단위 체적당의 분쇄에너지(Wh/cm<sup>3</sup>)이다. 즉, E<sub>f</sub>가 크다는 것은 동일한 양의 원료시료에 동일한 양의 에너지를 투입해 분쇄한 결과, 분체의 평균입도가 작아져 그 비표면적차는 커졌다는 것을 의미함으로써 분쇄가 더 많이 진행되었다는 것을 나타낸다.

그림 4는 혼합율에 대한 분쇄에너지 효율과 비표면적차를 분쇄시간 세 조건에 대한 평균값으로 나타낸 것이다. 그림에서 혼합율이 증가하면 에너지 효율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 분쇄탱크 내 광액의 농도가 낮으면 광액 내의 분쇄 입자가 물(순환매체)의 유선을 따른 운동을 주로 하여 분쇄용 볼과의 충돌은 미진하였기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 건식 교반볼밀 분쇄에서는 나타나지 않는 현상이다.

혼합율에 따른 비표면적차는 혼합율 11.1 이하에서는 큰 변화가 없는 것으로 보여, 본 실험조건에서는 혼합율의 적정 수준을 판단하기가 어려운 것으로 생각된다. 습식분쇄에서는 일반적으로 최적 혼합율이 존재하는 것으로 알려져 있는데 황(1991)은 볼밀을 이용한 활석 분쇄실험 결과, 너무 낮거나 과도한 시료 충전율은 분쇄속도를 저하시키는 요인으로 보고했으며, Zheng et al.(1996)은 교반볼밀을 사용하여 석회석을 분쇄 실험한 결과, 광액의 농도 차이에 의해 비표면적차가 변하며 임계농도(최적 혼합율)가 있는 것으로 보고하였다. 본 연구에서 혼합율 11.1이 임계치라고 판단하기는 어려우며, 추가 연구의 필요성이 인정된다.

그림 5는 임펠러 총 회전수에 따른 비표면적차를 나타낸 것으로서, 총 회전수의 대수값에 따라 비표면적차는 선형적으로 증가하며, 회귀식은 식 (5)와 같다. Zheng et al.(1996)의 연구에서는 비표면적차의 대수값과 총 회전수의 대수값이 선

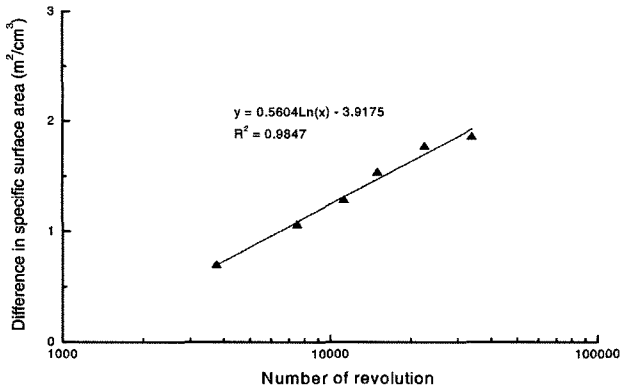


Fig. 5 Relation between number of impeller revolution and difference in specific surface area.

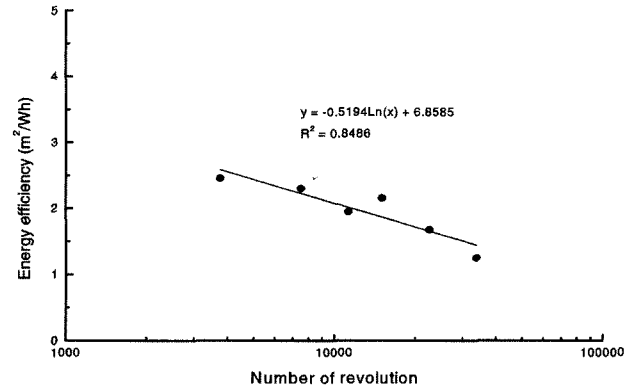


Fig. 6 Relation between number of impeller revolution and energy efficiency.

형적인 비례관계를 갖는 것으로 보고되었는데, 이와 같은 차이는 분쇄시스템 및 분쇄물질의 차이에 기인된 것으로 판단된다.

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

그림 6은 임펠러 총 회전수와 분쇄에너지 효율 간 관계를 나타낸 것이다. 비표면적차와는 반대로 총 회전수의 대수값에 따라 에너지 효율은 선형적으로 감소하는 경향을 보이며 회귀식은 식 (6)과 같다.

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

#### 다. 최적 분쇄조건 분석

실험조건의 범위 내에서 본 분쇄시스템의 최적 분쇄조건을 결정하기 위한 전제조건은 첫째, 요구되는 분쇄 입도를 만족시킬 것, 둘째는 분쇄용량이 클 것, 셋째는 분쇄에너지 효율

이 높을 것 등이다. 단, 본 연구에서 최종 분쇄 생성물의 입도는 작을수록 좋으나 건식 분쇄기와 같은 수준인  $3 \mu\text{m}$  ( $\Delta S = 1.96$ 에 상당)로 결정하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

표 1에 실험처리별 비표면적차와 분쇄에너지 효율, 비에너지 및 분쇄용량을 나타냈는데, 요구되는 입도를 만족시키는 비표면적차  $\Delta S$ 값 1.96 이상인 조건과 이때의 에너지효율  $E_r$  값을 음영으로 표시하였다. 실험처리 조건 중에서 분쇄용량이 큰 조건을 찾으면, 혼합율 6.7, 분쇄시간 45분에서(분쇄용량 0.17 kg/h) 임펠러 회전속도 500 rpm과 750 rpm 두 조건으로 압축된다. 이 둘을 비교해 보면 분쇄용량이 같기 때문에 500 rpm 조건이 입도의 크기를 의미하는 비표면적차(2.08 > 1.97)와 분쇄에너지 효율(2.28 > 1.70), 비에너지(2.03 < 2.57) 면에서 모두 유리한 것으로 분석되었다. 따라서 본 분쇄시스템의 최적 작동조건은 혼합율 6.7, 분쇄시간 45분, 임펠러 회전속도 500 rpm으로 판단된다. 본 연구에 사용된 연속형 습식 교반볼밀 분쇄시스템은 전체적으로 분쇄성능이 우수하였고

Table 1 Analysis of experimental results for wet fine grinding

Operating Parameters	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
$\Delta S$ ( $\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	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	<b>2.09</b>	0.91	1.62	<b>2.03</b>	0.85	1.59	<b>2.08</b>
	750	0.94	1.28	1.54	1.24	1.75	1.92	1.03	1.65	<b>1.99</b>	0.89	1.73	1.97
$E_r$ ( $\text{m}^2/\text{Wh}$ )	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	<b>2.28</b>
	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	<b>2.03</b>
	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	<b>0.10</b>	0.40	0.20	<b>0.13</b>	0.50	0.25	<b>0.17</b>

건식분쇄의 단점인 분진발생 문제와 연속식 운전이 힘든 난점(분쇄물과 불과의 분리가 매우 어려움)이 해결되어 실용화 가능성이 높은 것으로 생각되지만, 광액의 농도가 높아지면 연동펌프 관(tube)이 파열되는 등 광액 순환용 펌프로 연동펌프를 사용하는 것은 본 시스템에 부적합한 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 수도작 부산물인 왕겨를 소각하여 에너지 회수를 한 후, 왕겨재를 콘크리트용 혼화재로 이용하기 위해 10  $\mu\text{m}$  이하의 왕겨재 미세분체를 효과적으로 생산하는 방법을 구명하고자 실용화를 위한 초미세 분쇄기로서는 비교적 장치가 간단한 연속형 습식 교반불밀(wet type stirred ball mill)을 선택하고 주요 작동인자가 분쇄에너지 효율과 분체입도에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 주요 작동인자는 분쇄시간(15, 30, 45 min), 임펠러 회전속도(250, 500, 750 rpm), 혼합율(6.7, 8.4, 11.1, 20.9)이었으며, 요인실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실험조건 범위에서 분체의 평균입도는 2.83~9.58  $\mu\text{m}$ , 분쇄에너지 효율은 0.51~3.27  $\text{m}^2/\text{Wh}$ , 비에너지는 0.5~6.73  $\text{kWh/kg}$ 으로 나타났다.
2. 분쇄시간과 임펠러 회전속도 및 혼합율이 증가할수록 분쇄에너지 효율은 감소하는 경향을 나타냈다.
3. 분쇄탱크 임펠러의 총 회전수의 대수값에 따라 비표면적 차는 선형적으로 증가하고, 분쇄에너지 효율은 선형적으로 감소하였다.
4. 최적 작동조건은 실험조건 범위에서 분쇄시간 45분, 임펠러 회전속도 500 rpm, 혼합율 6.7로 분석되었으며, 이때 평균입도는 2.84  $\mu\text{m}$ , 분쇄에너지 효율은 2.28  $\text{m}^2/\text{Wh}$ , 분쇄용량은 0.17  $\text{kg/h}$ , 비에너지는 2.03  $\text{kWh/kg}$ 이었다.

5. 습식 교반불밀 분쇄시스템은 오염을 유발하는 비산 먼지를 발생시키지 않으며 연속작동이 용이하여 왕겨재 분쇄공정의 자동화와 실용화를 실현시킬 수 있을 것으로 생각되었다.

#### 참고 문헌

1. ASAE Standard. 1997. ASAE S319.3 OCT96 : Methods of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. Am. Soc. of Agr. Engrs.
2. Haxo, H. E. and P. K. Metha. 1974. Ground rice-hull ash as a filler for rubber. Rubber Chemistry and Technology. 48:271~288.
3. Kim, M. H., C. S. Kim and S. J. Park. 1997. Performance of a pilot-scale rice husk incinerator. J. of Korean Soc. Agric. Mach. 22(1):21~29.
4. Metha, P. K. 1976. United States Patent No. 3,907,951.
5. Prasher, C. L. 1987. Crushing and Grinding Process Handbook. John Wiley & Sons, New York, N.Y., pp. 441~448.
6. Zheng, J., C. C. Harris and P. Somasundaran. 1996. A study on grinding and energy input in stirred media mills. Powder Technology. 86:171~178.
7. 강석호. 1995. 분체공학. 회중당.
8. 박승제. 1988. 왕겨 연소기를 이용한 온수보일러 시스템 개발에 관한 연구. 박사학위논문. 서울대학교.
9. 박승제, 최연규, 김명호, 이종호. 2000. 교반 불밀을 이용한 왕겨재의 건식 미세 분쇄에 관한 연구. 한국농업기계학회지 25(1):39-46.
10. 윤상대 등. 1997. 콘크리트용 혼화재로서 왕겨활용에 관한 연구. 농림부 보고서.
11. 황기환. 1991. 불밀에 의한 활석의 분쇄속도 및 수학적 모델에 관한 연구. 박사학위논문. 한양대학교.