

교반 볼밀을 이용한 왕겨재의 건식 미세분쇄에 관한 연구†

Dry Fine Grinding of Rice Husk Ash using a Stirred Ball Mill

박 승 제*	최 연 규*	김 명 호*	이 종 호*
정회원		정회원	정회원
S. J. Park	Y. K. Choi	M. H. Kim	C. H. Lee

SUMMARY

This work was conducted to study the operating characteristics of a grinding system designed to obtain fine rice husk ash powder. To find better utilization of rice husk, a valuable by-product from rice production, once the rice husk was incinerated 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 manufacturing. The rice husk ash grinding system consisted of a high speed centrifugal fan for the preliminary coarse milling and a dry-type stirred ball mill for the subsequent fine grinding. Total grinding time (5, 15, 30, 45 min), impeller speed (250, 500, 750 rpm), and mixed ratio (4.8, 7.9, 14.9) were three operating factors examined for the performance of a stirred ball mill used for the fine grinding of ash.

With the stirred ball mill used in this study, the minimum attainable mean diameter of rice husk ash powder appeared to be 2 μm . During the fine grinding, the difference in specific surface area of powder showed an increase and the grinding energy efficiency decreased with the increase in total grinding time, impeller speed, and mixed ratio. For the operating conditions employed, the resulting mean diameter of fine ash powder, specific energy input, and grinding energy efficiency were in the range of 1.79~16.04 μm , 0.072~5.226kWh/kg, and 1.11~12.15m²/Wh, respectively. Grinding time of 30min, impeller speed of 750 rpm, and mixed ratio of 4.8 were chosen as the best operating conditions of the stirred ball mill for fine grinding. At these conditions, mean particle diameter of the fine ash, grinding energy efficiency, grinding throughput, and specific energy input were 2.73 μm , 3.95m²/Wh, 0.25kg/h, and 1.22kWh/kg, respectively.

주요용어 (Key Words) : 왕겨재 (Rice husk ash), 분쇄 (Grinding), 교반 볼밀 (Stirred ball mill), 분쇄에너지 효율 (Grinding energy efficiency), 비에너지 (Specific energy input)

1. 서 론

벼의 부산물인 왕겨의 생산량은 벼의 수확량에 비례하며 그 비율은 벼 생산지와 품종, 작황 및 도정수율 등에 따라 조금씩 차이가 있으나 약 16~

18% 정도이다. 1997년 국내 벼 총 수확량은 545만톤으로서 왕겨생산량은 약 80만톤으로 추정된다 (농림부, 1997).

왕겨는 대부분 버려지거나 농촌연료, 퇴비 등으로 사용되어 왔으며 최근 들어서는 축사바닥 깔

† 1997년도 농림기술개발연구비 지원에 의하여 수행되었음.

* 全北大學校 農科大學 生物資源시스템工學部 (농업과학기술연구소)

개, 월동작물의 보온재, 축분과 혼합된 발효퇴비 등으로 이용되고 있다. 그러나 왕겨는 함유한 난분해성 규소 성분에 의해 퇴비화가 어려우며 축사 바닥의 깔개로 이용할 경우 많은 분진이 발생하여 어린 가축의 호흡기 질환을 유발할 소지가 있어 왕겨는 농촌 토양과 환경오염에 심각한 영향을 미치고 있다고 판단된다.

따라서 왕겨를 농업적으로 이용하는 방법보다는 1차적으로 고유가 시대에 왕겨를 농업용 대체에너지원으로 활용하고, 폐기물로 남게 되는 재는 공업원료로 이용하는 방안이 이용의 극대화 면에서 바람직하다고 생각된다. 왕겨재의 공업적 활용에 관한 몇 가지 연구로서는 연소에 관한 연구는 김 등 (1997)이 왕겨재를 콘크리트 혼화용 재료로 활용하기 위하여 왕겨 조각로의 최적 연소특성을 조사하였고,尹 등 (1997)은 낙하충격식 분쇄기로 왕겨재를 분쇄하여 콘크리트 혼화재로 사용할 경우, 왕겨재를 미분체로 만들수록 혼화재로서의 특성이 좋아진다고 보고하였다.

분쇄조작은 모든 단위조작 중에서 가장 비효율적인 조작 중의 하나이며 공급된 에너지의 98% 이상이 분쇄장치의 운전과 조업시 생기는 마찰열과 소음으로 소모된다고 알려져 있다 (姜, 1995). 분쇄물질의 경도에 따라서 분쇄기를 분류하면, 고경도물 분쇄 (시멘트, 화산암, 슬래그 등), 중간경도물 분쇄 (석회석, 무연탄), 연성 분쇄 (갈탄, 압연, 곡물)용 분쇄기로 나눌 수 있다. 또한 분쇄물의 입도범위에 따라서 분쇄는 조분쇄 (coarse crushing), 중간분쇄 (fine crushing), 미분쇄 (fine grinding), 초미분쇄 (ultrafine grinding) 등으로 분류하는데, 미분쇄와 초미분쇄는 각각 최종 분쇄물의 평균입도가 10 μm 및 1 μm 가 되는 분쇄로 정의한다. 초미분쇄는 원료물의 입도가 작을수록 더 효율적인 결과를 얻게 되므로 적절한 원료입도를 만들기 위한 전처리 분쇄 과정이 필요하며, 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.

본 연구에서는 콘크리트용 혼화재로 이용 가능한 왕겨재의 미세 분체를 효과적으로 생산하는 방법을 구명하고자 전처리 조분쇄기로서 왕겨재 이송용 원심팬을, 초미분쇄기로서는 입도 1~2 μm 까지 효율적으로 분쇄할 수 있으면서 비교적 구조가 간단한 배치형 건식 교반 볼밀 (stirred ball mill)을 선택하여, 초미분쇄기의 주요 작동인자인 분쇄시간, 교반속도, 혼합율에 대한 요인 실험을 수행하여 이들 작동인자들이 왕겨재의 분쇄특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

96년에 수확된 전북 김제산 동진벼의 왕겨를 김 등 (1997)의 파이로트 규모 왕겨 조각로에서 약 670 $^{\circ}\text{C}$ 로 연소시켜 시료로 사용하였다. 조각로에서 배출되어 수집된 왕겨재를 곧바로 회전속도 4,000 rpm, 투입율 60kg/h 조건의 조분쇄기를 통과시켜 1차 분쇄시킨 후 미세분쇄 실험에 사용하였다. 그림 1은 조분쇄 실험의 원료시료와 미세분쇄 실험에 사용된 원료시료의 입도분포를 진탕기를 이용한 표준체 분석법 (ASAE, 1997)으로 구하여 나타낸 것으로서 평균입도는 각각 487.4 μm 와 177.8 μm 이었다.

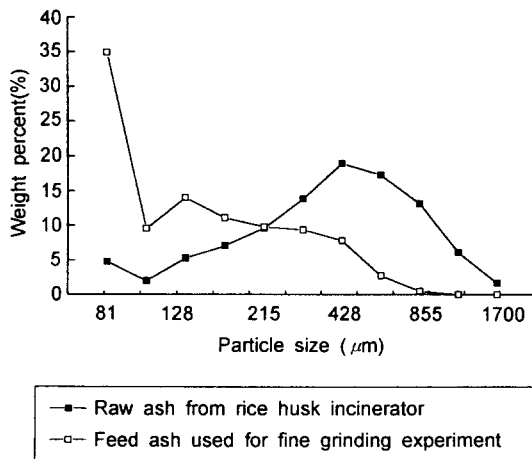


Fig. 1 Size distributions of feed ash used for experiments.

나. 실험장치

미세분쇄 실험에 사용된 분쇄장치는 실험용 배치타입 초미분쇄기인 교반 볼밀 (고려소재개발(주), KMD-1B)로서, VS모터, 임펠러, 분쇄용기, 분쇄용 볼, 콘트롤러 등으로 구성되어 있다 (그림 2). VS모터는 임펠러의 회전속도를 1,000 rpm까지 변화시킬 수 있으며, 4편 임펠러는 분쇄용기에 투입된 분쇄용 볼과 분쇄원료인 분체를 강력하게 교반하며 이 때 분쇄용 볼은 시료에 충격, 전단, 마찰을 가해 효과적인 분쇄가 이루어지게 된다. 분쇄용 볼과 분쇄원료를 넣는 분쇄용기 (용량 1,000 cc)는 분쇄시 발생하는 많은 열과 소음을 방지하기 위하여 내벽에는 폴리우레탄이 7mm 두께로 코팅되어 있으며, 벽체에는 냉각수 순환을 위한 재킷이 설치되어 있다. 분쇄용 볼은 지름이 3mm, 진밀도 3.527g/cm³, 재질은 지르코늄(ZrO₂)이고 4편 임펠러 역시 지르코늄 재질로 제작되었다. 콘트롤러는 VS 모터의 회전수와 분쇄시간의 설정을 위한 조작스위치로 구성되어 있다.

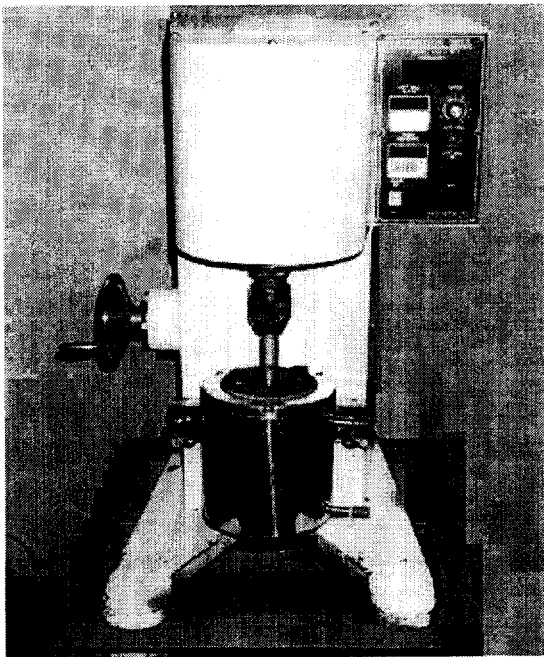
교반 볼밀에서 분쇄된 미세분쇄의 입도 측정에

는 측정범위 0.03~280 μm인 레이저 회절산란방식 입도분포 측정장치 (SALD-2001, SHIMADZU)를 사용하였다. 입도 측정에 사용한 시료의 양은 10mg~1g이었으며, 분쇄된 왕겨재를 분산제인 증류수 280ml에 혼합하고, 초음파를 발생시켜 분체가 서로 재응집되는 현상을 방지시키면서 순환펌프로 측정 시스템 경로를 반복 순환시켰다.

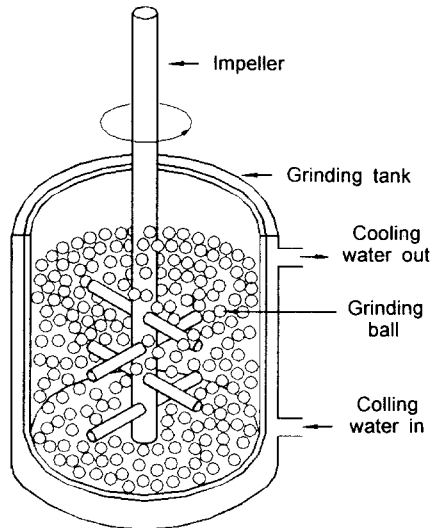
다. 실험방법

콘크리트 혼화재로서 요구되는 입도까지 왕겨재를 효과적으로 분쇄하기 위한 최적 작동 조건을 분석하기 위하여 분쇄효율과 입도에 큰 영향을 미친다고 알려져 있는 작동인자인 분쇄시간 (5min, 15min, 30min, 45min), 교반속도 (250 rpm, 500 rpm, 750 rpm) 및 혼합율 R(분쇄용 볼의 체적/분쇄된 분체의 체적 비; 4.8, 7.9, 14.9)에 대하여 3반복으로 요인 실험을 수행하였다. 요인별 수준은 예비실험을 통하여 미세분쇄 (3 μm 이하)가 가능한 범위를 먼저 파악한 후 선택하였다.

미세분쇄 실험시 분쇄기의 용기바닥과 임펠러와



[a] Batch type stirred ball mill



[b] Schematic of grinding tank

Fig. 2 Batch type stirred ball mill used for experiment.

의 간격을 5~6mm로 유지한 다음 분쇄용 볼을 용기 부피의 50% 정도 투입하고, 분쇄 원료인 왕겨재를 실험처리량 만큼 서서히 투입하면서 분쇄는 이루어지지 않도록 교반속도를 약 50 rpm으로 하여 혼합시켰다. 이후 콘트롤러에 분쇄시간과 교반속도를 설정하여 시료를 분쇄시켰고 분쇄 소요에너지 (kWh)는 디지털 정밀 Watt meter (MICROVIP-MIP 1.1)를 사용하여 측정하였다. 분쇄기의 작동이 멈추면 임펠러와 용기를 분리시킨 후 미세분쇄된 왕겨재와 분쇄용 볼을 체로 분리한 다음 미세분쇄된 왕겨재 (분쇄)는 비닐 팩에 보관, 레이저 입도분석의 시료로 사용하였다.

실험조건별 분쇄공정의 효율 분석에는 Zheng et al., (1996)이 사용한 분쇄의 비표면적 변화 ΔS^* 와 이를 기준으로 한 분쇄에너지 효율 E_f 이 사용되었다. 즉, 분쇄 입자의 형상을 평균직경 d_{50} (μm)의 구라고 가정하면, 표면적 S 와 부피 V 로부터 분쇄의 단위체적당 표면적 S^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$S^*(\text{m}^2/\text{cm}^3) = \frac{S}{V} = \frac{\pi (d_{50} \times 10^{-6})^2}{\frac{\pi}{6} (d_{50} \times 10^{-4})^3} \cdot \frac{6}{d_{50}} \dots (1)$$

분쇄가 진행되어 입도가 작아지면 단위체적당 표면적인 S^* 은 증가하게 되며, 따라서 분쇄 진행도는 아래와 같이 원료시료와 분쇄된 분쇄시료의 비표면적 S_p^* 와 S_f^* 의 차이로 정의되는 비표면적차 ΔS^* 로 표시할 수 있다.

$$\Delta S^* = S_p^* - S_f^* \dots (2)$$

ΔS^* 가 크다는 것은 분쇄 후 분쇄의 평균입도가 작다는 것을 의미하며 분쇄가 더 많이 진행되었음을 나타낸다. 즉, 분쇄란 고체 입자를 잘게 부수어 입도를 작게 만들거나 단위 부피당 표면적을 증가시키는 공정이라 볼 때, 분쇄에너지 효율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_f = \frac{\Delta S^*}{E_v} \dots (3)$$

여기서 E_f 는 분쇄에너지 효율 (m^2/Wh)이며, E_v 는 분쇄된 분쇄의 단위 체적당 분쇄에너지 (Wh/cm^3)

이다. 즉, 분쇄에너지 효율 E_f 는 생산된 분쇄 단위 체적당 소요된 분쇄 에너지에 대한 분쇄의 진행 정도를 나타내는 척도이다.

3. 결과 및 고찰

가. 평균 입도와 분쇄에너지

그림 3은 임펠러 회전속도와 분쇄시간, 그리고 혼합을 별로 얻어진 평균입도를 나타낸 것으로, 본 실험에서 사용한 작동조건 하에서 교반 볼밀로부터 얻을 수 있는 왕겨재 분쇄의 평균입도는 1.79~16.04 μm 로, 한계입도는 약 2 μm 로 판단되었다. 왕겨재 분쇄의 평균입도는 대체적으로 실험처리의 요인별 수준에 반비례하였는데, 즉 임펠러의 회전속도, 분쇄시간, 혼합율 R이 커질수록 왕겨재는 더욱 미세하게 분쇄되었다. 임펠러 회전속도와 분쇄시간의 증가는 결국 총 분쇄횟수의 증가로 이어져 최종 분쇄물의 입도 감소를 가져오리라는 것은 미리 예견된 결과이며, 단 회전속도와 입도, 그리고 분쇄시간과 입도 간의 관계는 선형적이기보다는 지수함수적인 반비례 관계로 생각된다.

그림 3에 보인 것과 같이 임펠러의 회전속도가 250 rpm일 경우는 분쇄시간의 증가에 따라 입도가 작아지는 현상을 뚜렷이 볼 수 있으나, 500 rpm 및 750 rpm의 경우 분쇄공정 초반부에 이미 대부분의 분쇄가 이뤄져 30분 이상의 분쇄시에는 분쇄시간 증가에 따른 입도의 감소 정도가 아주 적음을 알 수 있다. 혼합율 R은 투입한 분쇄원료의 체적에 대한 분쇄용 볼의 전체 체적비로서 혼합율이 크다는 것은 피분쇄물의 양에 비해 분쇄용 매체의 양이 상대적으로 많거나 또는 분쇄용 매체의 양에 비해 피분쇄물의 투입량이 상대적으로 적음을 의미한다. 따라서 혼합율이 커질수록 피분쇄물은 더욱 큰 분쇄강도로 분쇄되며 이로 인해 그림 3에서와 같은 최종 입도의 감소가 나타난 것으로 생각된다. 그러나 임펠러 회전속도가 비교적 고속인 500 rpm과 750 rpm에서는 혼합율이 커지면 분쇄시간을 증가시켜도 입도가 거의 변하지 않는 현상을 볼 수 있는데, 이는 곧 피분쇄물인 왕겨재 분쇄가 한계입도에 거의 도달하였음을 의미한다. 일반적인 상업용 낙하식 볼밀에 의해 얻어지는 최종 분쇄물의 평균입도는 30 μm 인데 비하

여 본 실험에서 사용된 교반 불밀은 평균입도 10 μm 이하 수준의 분쇄가 가능하여 매우 우수한 성능을 가진 미분쇄기로 판단된다.

그림 4는 왕겨재 시료의 단위질량당 투입된 분쇄에너지 (比에너지)를 나타낸 것으로서 최종 입도의 경우와는 정반대로 모든 실험처리의 요인별

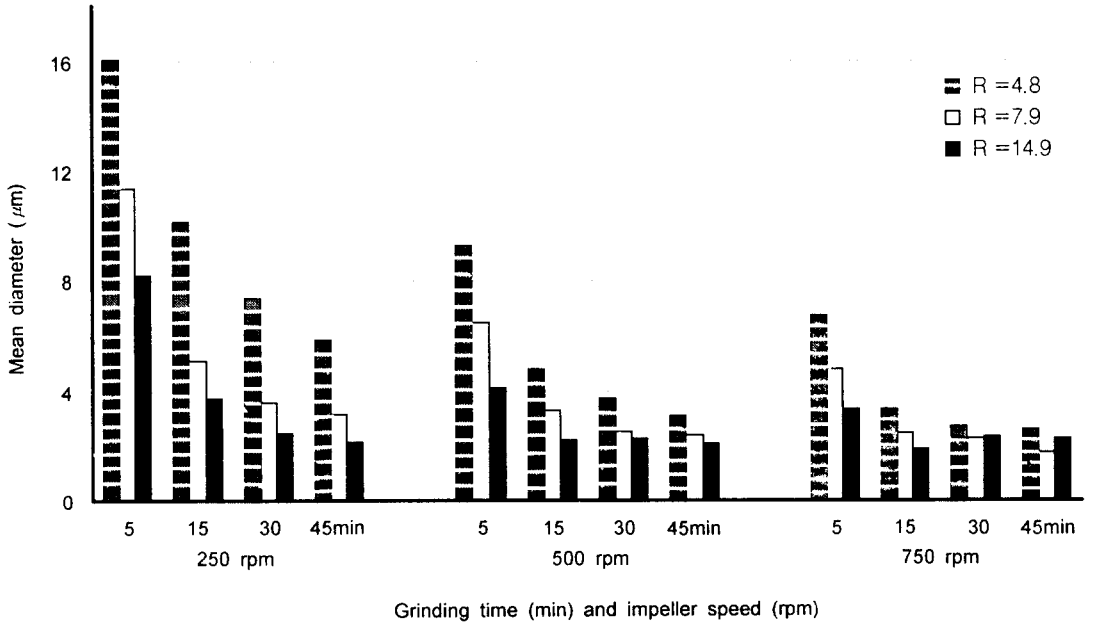


Fig. 3 Mean diameter of particle size at each experimental condition of fine grinding.

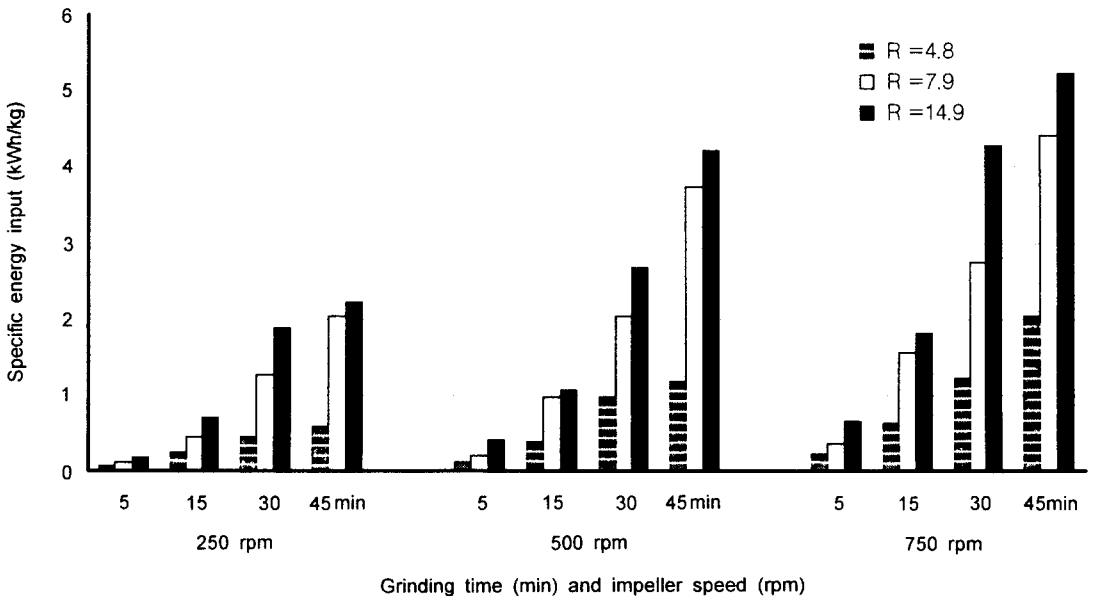


Fig. 4 Specific energy input at each experimental condition of fine grinding.

(임펠러 회전속도, 분쇄시간, 혼합율) 수준이 증가할수록 비에너지는 증가하였다. 비에너지에 대한 이와 같은 실험 결과는 앞에서 살펴본 임펠러 회전속도, 분쇄시간 및 혼합율이 최종 입도에 미치는 영향과 관련이 있다고 생각된다. 즉, 일정 질량을 가진 피분쇄물의 평균 입도가 작아질수록 그 구성성분인 분체의 개체 수는 많아지게 될 것이며, 따라서 평균 입도가 작은 피분쇄물의 분쇄는 개체 크기가 작은 많은 개수의 분체를 대상으로 행해져야 하며, 이에 따라 분쇄에 필요한 충격, 전단, 마찰 횟수가 증가하여 더욱 많은 분쇄에너지가 소요된 것으로 추정된다. 또한, 높은 혼합율의 고속회전 분쇄시 분쇄시간을 증가시켜도 입도는 거의 변하지 않지만 (그림 3), 비에너지는 분쇄시간에 비례하여 꾸준히 증가함을 그림 4에서 볼 수 있었다. 이는 피분쇄물의 양에 비해 상대적으로 많은 분쇄용 볼의 양 및 그들이 갖는 큰 운동에너지가 실제 시료의 분쇄가 더 이상 진행되지 않는 상황에서도 볼들 간의 충돌과 마찰작용에 의해 소진되어 전체 소요에너지는 시간에 비례하여 꾸준히 증가하였기 때문으로 판단된다.

나. 분쇄에너지 효율

그림 5는 분쇄시간 4조건에 대한 분쇄에너지 효율 및 비표면적 차들의 값을 평균한 후, 이들과 혼합율 간의 관계를 임펠러의 회전속도별로 나타낸 것이다. 혼합율이 증가함에 따라 에너지 효율

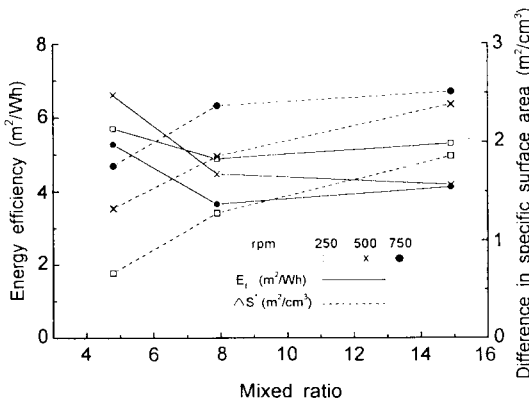


Fig. 5 Energy efficiency and difference in specific surface area according to mixed ratio.

은 낮아지고 비표면적 차는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 분쇄시료의 투입량을 상대적으로 감소시키면 최종 분쇄물의 평균입도는 작아져 분쇄는 많이 진행되지만 분쇄공정의 전체적인 에너지 효율은 감소하고 있음을 의미한다. 따라서 혼합율 R이 작아 시료의 상대적 투입량이 많을 때 분쇄에너지 효율은 높게 유지됨을 알 수 있다. 임펠러 회전속도 250과 750 rpm에서 혼합율 7.9와 14.9의 에너지 효율이 별차이를 보이지 않는 것은 혼합율 14.9는 시료 투입량이 적었기 때문에 분쇄된 분체의 단위 체적당 분쇄에너지 (Wh/cm³) 계산에서 분쇄에너지 측정의 오차가 상대적으로 컸기 때문으로 판단된다. 또한 그림에서 보면 임펠러 회전속도가 증가함에 따라 에너지 효율은 낮아지고 비표면적 차는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 혼합율 4.8에서 에너지 효율이 임펠러 회전속도 250 rpm 조건이 500 rpm 조건보다 오히려 낮은 결과를 보이는 것은 250 rpm인 경우는 회전 속도가 너무 낮아 투입량이 많을 때 분쇄시료의 혼합이 원활하지 않아 분쇄가 효과적으로 이루어지지 않은 결과로 판단된다.

그림 6은 임펠러 총 회전수와 실험처리별 비표면적 차 사이의 관계를 도시한 것으로 비표면적 차는 총 회전수에 대해 대수적인 선형 비례관계를 보였다. 임펠러의 회전속도와 분쇄시간이 증가할수록 총 회전수는 증가하므로 분쇄시스템의 운전 조건 결정시 이 양자를 적절히 조합하는 것이 중요하리라 생각된다. 그림 7은 임펠러 총 회전수와

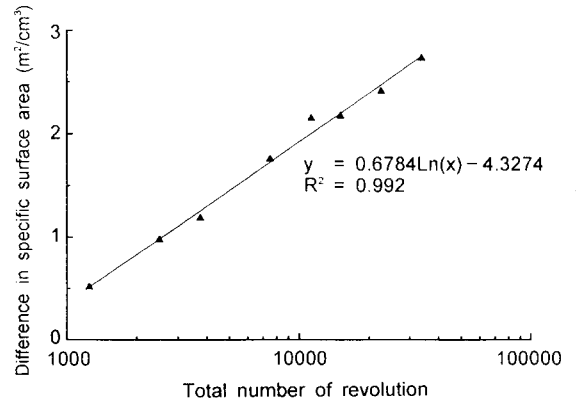


Fig. 6 Relationship between the total number of impeller revolution and difference in specific surface area.

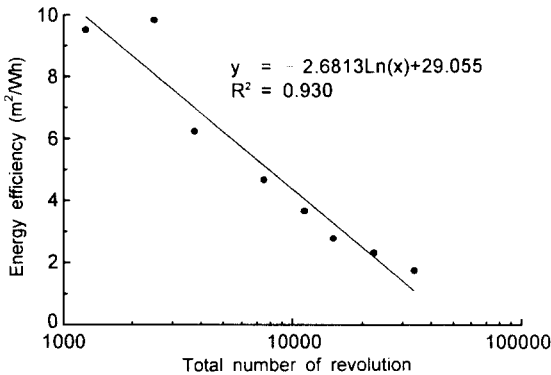


Fig. 7 Relationship between the total number of impeller revolution and energy efficiency.

분쇄에너지 효율과의 관계를 나타내며 분쇄시간의 증가나 임펠러 회전속도의 증가에 따라 총 회전수가 증가하면 에너지 효율은 감소하였다. 비표면적 증가에 따라 에너지 효율이 감소하는 경향은 분쇄기 작동시 일반적으로 나타나는 것으로서 (Manokosa et al., 1989), 본 연구에서 사용한 교반 볼밀의 경우, 임펠러 총 회전수에 따라 비표면적 차와 에너지효율은 각각 대수적으로 선형 증가 및 감소하는 특성을 보였으며, 이는 아래와 같은 회귀식들로 수식화 할 수 있었다.

$$\Delta S^* = 0.6784 \ln(N) - 4.3274 \quad (R^2 = 0.992) \quad (4)$$

$$E_f = -2.6813 \ln(N) + 29.055 \quad (R^2 = 0.930) \quad (5)$$

다. 최적 분쇄조건의 분석

본 연구의 실험조건 범위 내에서 최적 분쇄조건을 결정하기 위해 다음과 같은 기준을 먼저 설정하였다. 첫째, 최종 분쇄 생성물은 콘크리트 혼화재로서 요구되는 입도를 만족시킬 것, 둘째로 시료투입율 (분쇄용량)이 클 것, 셋째, 분쇄에너지 효율이 높을 것 등이다.

먼저, 콘크리트 혼화재로서 왕겨재 분쇄의 입도는 작을수록 좋으나 실험에 사용한 분쇄기의 한계 입도를 고려할 때 최종 분쇄물의 평균입도는 3 μm (ΔS* = 1.96에 상당)로 결정하는 것이 타당할 것으로 판단하였다. 표 1에 ΔS*가 1.96 이상인 경우와 이때의 E_f 값을 음영으로 나타냈는데, 이 가운데 시료투입율 (분쇄용량) 역시 큰 경우는 혼합율 7.9, 분쇄시간 15분, 임펠러 회전속도 750 rpm 및 혼합율 4.8, 분쇄시간 30분, 임펠러 회전속도 750 rpm인 실험처리 조건이었다. 이 두 조건을 비교해 보면 평균입도와 시료투입율의 관점에서는 혼합율 7.9인 조건이, 분쇄에너지 효율 면에서는 혼합율 4.8인 조건이 약간 유리하여 최종 결정이 불가능하였다. 따라서 마지막으로 이 두 조건에서의 비에너지 (kWh/kg)를 계산하여 서로 비교해 보았는데, 혼합율 7.9인 경우는 1.553, 혼합율 4.8인

Table 1 Experimental results for fine grinding of rice husk ash by a stirred ball mill

Operating Parameters	rpm	R = 14.9				R = 7.9				R = 4.8			
		Grinding time (min)				Grinding time (min)				Grinding time (min)			
		5	15	30	45	5	15	30	45	5	15	30	45
ΔS* (m²/cm³)	250	0.70	1.59	2.43	2.72	0.49	1.14	1.63	1.88	0.34	0.56	0.78	0.98
	500	1.42	2.72	2.58	2.83	0.89	1.77	2.35	2.43	0.61	1.22	1.58	1.91
	750	1.77	3.16	2.53	2.60	1.21	2.38	2.58	3.33	0.85	1.77	2.16	2.26
E _f (m²/Wh)	250	8.87	5.04	4.55	2.73	9.16	5.50	2.85	2.05	10.50	4.82	3.84	3.64
	500	7.43	5.62	2.16	1.50	9.89	4.04	2.56	1.45	12.15	7.10	3.61	3.60
	750	6.05	3.87	1.31	1.11	7.47	3.40	2.10	1.68	8.46	6.22	3.95	2.47
Capacity (kg/h)		0.48	0.16	0.08	0.053	0.9	0.3	0.15	0.1	1.5	0.5	0.25	0.167

경우는 1.216으로서, 혼합율 4.8, 분쇄시간 30분, 임펠러 회전속도 750 rpm인 조건을 최적의 분쇄 조건으로 판단하였다.

rpm, 혼합율 4.8로 분석되었으며, 이 때 평균입도는 2.73 μm , 분쇄에너지 효율은 3.95m²/Wh, 시료투입율은 0.25kg/h, 비에너지는 1.22kWh/kg 이었다.

4. 결 론

수도작 부산물인 왕겨 조각시 생성되는 재를 콘크리트용 혼화재의 원료로서 활용하기 위한 목적으로 건식 교반 볼밀의 주요 작동인자가 왕겨재의 분쇄특성에 미치는 영향을 구명하였다. 분쇄기의 중요 작동인자로 분쇄시간 (5, 15, 30, 45분), 분쇄기 임펠러의 회전속도 (250, 500, 750 rpm), 그리고 혼합율 (4.8, 7.9, 14.9)을 선택하여 요인 실험을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 왕겨재의 분쇄실험 결과, 분체의 평균입도는 1.79~16.04 μm , 분쇄에너지 효율은 1.11~12.15m²/Wh, 비에너지는 0.072~5.226kWh/kg의 범위를 보였다.

2. 본 연구에서 사용된 교반 볼밀로부터 얻을 수 있는 왕겨재 분체의 한계 입도는 약 2 μm 로 판단되었으며, 분쇄시간, 임펠러 회전속도, 혼합율이 증가할수록 비표면적 차는 증가하고 (평균입도는 감소), 분쇄에너지 효율은 감소하였다.

3. 실험조건인 범위 내에서 왕겨재 미세분쇄의 최적조건은 분쇄시간 30분, 임펠러 회전속도 750

참 고 문 헌

1. 강석호. 1995. 분체공학. 회중당.
2. 김명호, 김철수, 박승제. 1997. 파이로트 규모 왕겨 조각로의 성능에 관한 연구. 한국농업기계학회지 22(1):21-29.
3. 농림부. 1997. 통계연보. p. 12.
4. 윤상대 등. 1997. 콘크리트용 혼화재로서 왕겨활용에 관한 연구. 농림부 보고서.
5. ASAE Standards. 1997. ASAE S319.3 OCT96 : Methods of determining and expressing fineness of feed materials by sieving. Am. Soc. of Agr. Engrs.
6. Mankosa, M. J., G. T. Adel and R. H. Yoon. 1989. Effect of operating parameters in stirred ball grinding of coal. Powder Technology 59: 255-260.
7. 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.