



하는 방법을 구명하기 위하여 균일한 입도를 갖는 초미세 분쇄기인 실험용 교반 볼밀의 주요 작동인자들이 분쇄특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

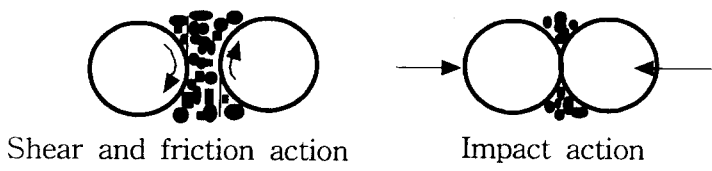


Fig. 1 Principle of ball mill grinding

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

시료는 96년에 도정된 전북 김제산 동진벼의 왕겨를 소각한 재로서, 콘크리트 혼화 재용 재료로 이용하기 위하여 Park, Kim등(1996)이 연구개발한 파이로트 규모 왕겨 소각로에서 약600℃(저온소각)로 연소된 왕겨재 이다. 소각로에서 바로 배출되는 왕겨재의 평균입도는 487.3 $\mu$ m이고, 이 재가 다시 소각로에서 왕겨재 저장 탱크로 이송하는 시스템이 공기 이송식이기 때문에 이송원심팬을 통과한 왕겨재는 조분쇄되어 최종적으로 실험에 사용된 재는 탱크에 수집된 재로서 평균입도는 177.8 $\mu$ m이다. 이결과는 체분석으로서 로탐 진탕기에 표준체 #14, #18, #25, #35, #45, #60, #80, #100, #140, #170의 11개의 체를 설치하고 시료 50g을 넣고 15분동안 진탕후 각 체에 남아있는 잔류량의 무게비로 나타낸것이며, 이들의 입도분포도는 그림 2와 같다.

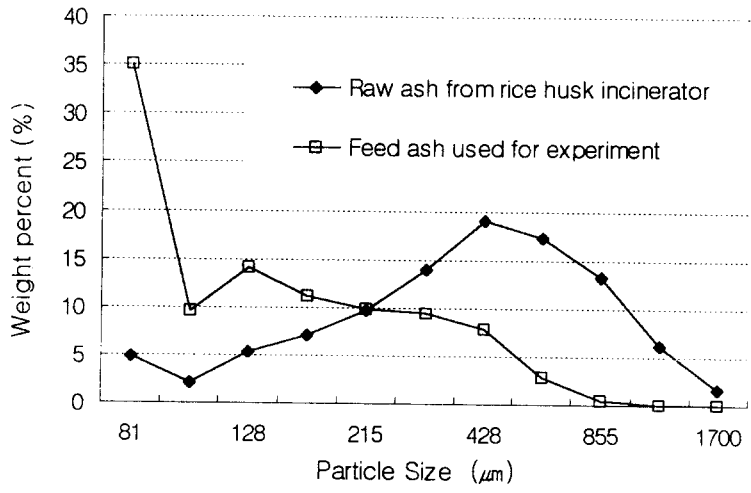


Fig. 2 Size distribution of feed ash used for grinding experiments

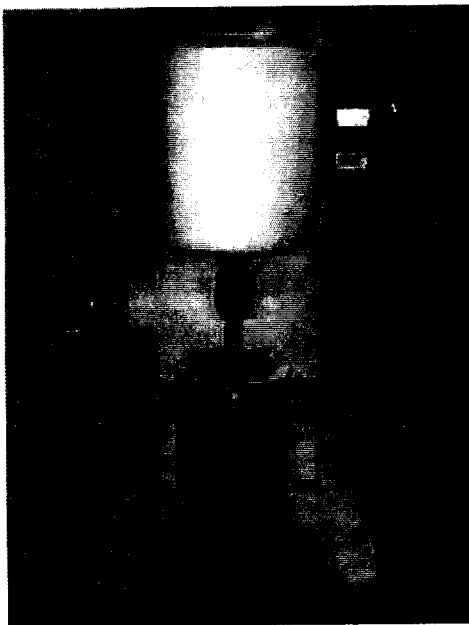
## 2.2 실험장치

### 2.2.1 분쇄기

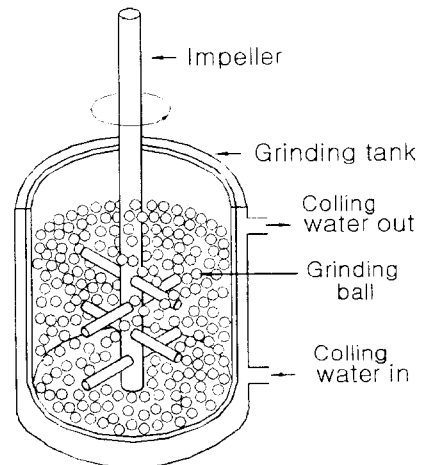
본 연구에 사용된 분쇄장치는 실험용 배치타입 미세분쇄기인 교반 볼밀(Stirred ball mill)로서(고려소재개발에서 제작된 KMD-1B) 그림 3에 나타낸 바와 같이 크게 VS모터, 임펠러, 분쇄용기, 분쇄용 볼, 컨트롤러 등으로 구성 되어있다. VS모터는 임펠러를 1000 rpm 까지 회전수를 변화시킬수 있고 4핀 임펠러는 분쇄용기에 투입된 분쇄용 볼과 분쇄재료인(분체)에 힘을 전달하며, 분쇄용 볼은 분쇄 용기내에서 분체에 충격, 전단·마찰작용을 발생시켜 분쇄가 이루어지는 작용을 한다. 분쇄용 볼과 분체를 넣는 분쇄용기(용량 1000 cc)는 분쇄작용시 많은 열과 소음이 발생하므로 이를 방지하기 위하여 용기 내부면에는 폴리우레탄 재질을 7mm 두께로 코팅 하였고, 이중구조의 용기 내부에는 물을 공급하여 용기가 냉각되도록 하였다.

임펠러와 분쇄용기는 분쇄기 본체와 결합과 분리가 가능하다. 그림 3은 본실험에 사용한 분쇄기를 나타낸 것이다.

분쇄용 볼은 지름이 3mm, 밀도  $3.527\text{g/cm}^3$ , 재질은 지르코늄( $\text{ZrO}_2$ )이고 4핀 임펠러도 볼과 같은 지르코늄 재질이 사용되었다. 컨트롤러는 VS모터의 회전수, 분쇄시간등을 설정하고 전반적인 분쇄기 조작스위치로 구성되어 있다.



(a) Batch type stirred ball mill



(b) Grind tank In

Fig. 3 Batch type used for experiment stirred ball mill

## 2.2.2 입도측정 장치

입도분포측정을 위해 레이저 회절산란방식 입도분포측정장치를 사용하였다 (SALD-2001, SHIMADZU). 이 장치의 측정 범위는 0.03 - 280  $\mu\text{m}$ , 분석에 필요한 시료의 양은 10mg-1g이며, 미세분쇄된 왕겨재를 분산제인 증류수 280ml에 혼합하고, 초음파를 발생시켜 분체가 서로 재응집되는 현상을 방지시키면서 순환펌프로 측정 시스템 경로를 반복 순환시킨다. 레이저의 파장은 680nm이고 출력은 3mW이다.

## 2.3 실험방법

왕겨재를 효과적으로 분쇄하기 위한 작동 조건들을 알기 위하여 분쇄효율과 입도에 큰 영향을 미치는 분쇄기의 작동인자인 분쇄시간(15min, 30min, 45min), 교반속도 (250 rpm, 500rpm, 750rpm) 및 혼합율(분쇄용불의 체적/분쇄된 분체의 체적비로 4.8, 7.9, 14.9)에 대하여 3반복으로 요인 실험을 수행하였다. 요인별 수준은 예비실험을 통하여 미세분쇄(3 $\mu\text{m}$  이하)가 가능한 수준을 선택하였다.

처리별 분쇄실험에 사용된 전력량은(kWh) 에너지 측정기(MICROVIP-MIP 1.1)를 사용하여 측정하였다. 실험은 분쇄기의 용기바닥과 임펠러와의 간격을 5-6mm로 유지한 다음 분쇄용 불을 용기부피의 50%정도 투입하고 난 후 분체 원료인 왕겨재를 실험처리량만큼 투입하면서 혼합시킨다. 콘트롤러에 분쇄시간과 교반속도(rpm)를 입력하여 분쇄시키고 동시에 에너지 측정기를 작동시킨다. 분쇄가 종료되면 임펠러와 용기를 분리시킨후 분체와 혼합되어있는 분쇄용 불을 체분리로 선별한 다음 미세분쇄된 왕겨재(분체)는 밀폐용기에 저장, 레이저 입도분석에 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 평균 입도와 분쇄에너지

본 실험조건에서 평균입도는 1.79~10.18 $\mu\text{m}$  로 나타났으며 한계입도는 약 2 $\mu\text{m}$ 로 판단된다. 그림 4에는 실험 처리별 분쇄된 왕겨재의 평균입도를, 그림 5에는 분체의 단위질량당 투입된 분쇄에너지(비에너지)를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 실험처리 요인별 수준이 증가할수록 평균입도는 작아지고 비에너지는 증가한다. 이것은 입도가 작아질수록 분쇄에너지는 증가하는 것을 의미하며 결국 입도가 작아질수록 분쇄가 많이 이루어지기 때문에 충격, 전단 및 마찰 횟수가 증가하기 때문으로서 당연한 결과로 판단된다.

상업용 낙하식 불밀의 평균입도는 30 $\mu\text{m}$  인데 반하여 본실험에 사용된 교반불밀은 10 $\mu\text{m}$  이하 수준으로 매우 우수한 성능을 가지는 것으로 판단된다.

그림 6은 분쇄시간 30분, 혼합율 4.8, 임펠러 회전수 750rpm으로 본 연구에서 제시하는 최적 분쇄조건에서의 입도분포를 대표적으로 나타낸 것인데 입도의 크기와 이들의 분포를 쉽게 알아볼수 있다.

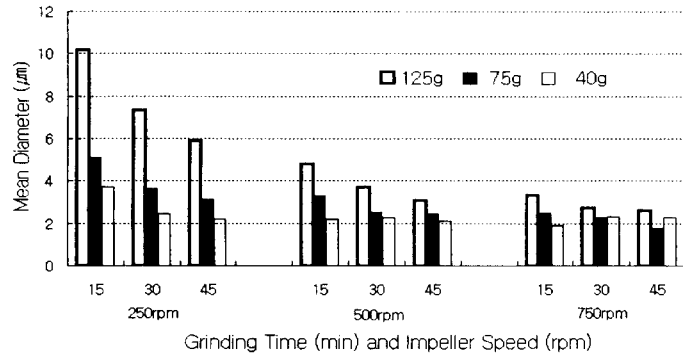


Fig. 4 Mean diameter of particle size at each experimental condition

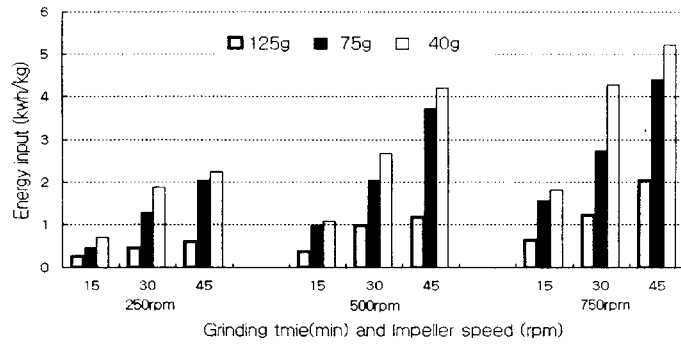


Fig. 5 Specific energy input at each experimental condition

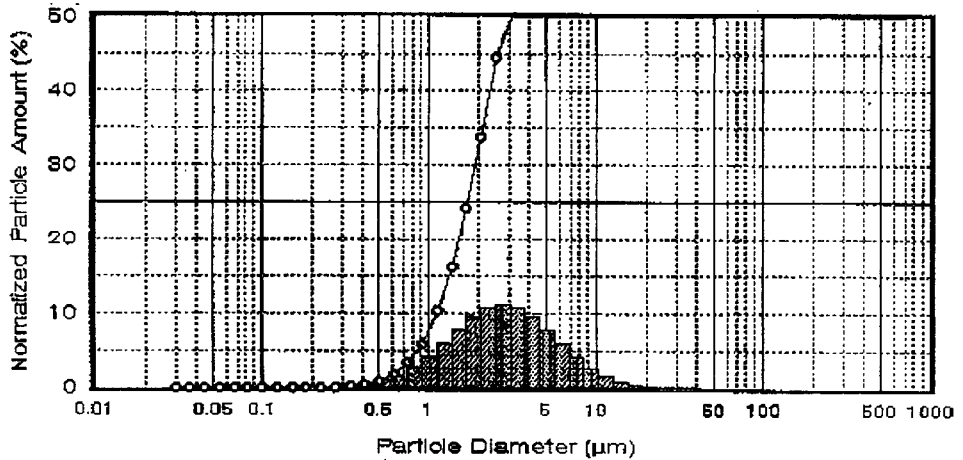


Fig. 6 Particle size distribution (R=4.8, 30min, 750rpm. mean=2.76µm)

### 3.2 분쇄에너지 효율

분쇄에너지 효율을 분석하기 위하여 Jie Zheng의 2인(1996) 이 이용한 분체의 비표면적 변화에 따른 에너지 효율의 개념을 사용하였다. 앞절에서 입도가 작아질수록 분쇄에너지가 증가하였는데 입도가 작아 진다는 것은, 입자의 단위 부피당 표면적이 증가되는 것으로 생각할 수 있다. 분체 입자의 형상이 구라고 가정 하면 분체의 단위체적당 표면적은 식(1)으로 표현된다.

$$S = \frac{6}{d_{MA}} \quad \text{----- (1)}$$

S는 비표면적으로서 단위는  $m^2/cm^3$ 를 가지며,  $d_{MA}$ 는 평균직경으로 단위는  $\mu m$ 를 가진다.

또한 분쇄에너지는 투입되는 원료의 입도와 분쇄된 분체의 입도의 차이가 클수록 증가할 것이며 따라서 분쇄가 진행된 정도를 표현하기 위하여 식(2)의 개념을 도입하였다.

$$\Delta S = S_p - S_f \quad \text{----- (2)}$$

여기서  $\Delta S$ 는 비표면적차,  $S_f$ 는 원료시료의 비표면적,  $S_p$ 는 분쇄된 분체시료의 비표면적이다. 따라서 동일한 원료시료일 때  $\Delta S$ 가 증가한다는 것은 분쇄후 분체의 평균입도가 작다는 것을 의미하며 분쇄가 많이 진행되었다는 것을 나타낸다. 분쇄에너지 효율의 개념은 식(3)으로 나타내어진다.

$$E_f = \frac{\Delta S}{E_v} (m^2/Wh) \quad \text{----- (3)}$$

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.

Table 1 Experimental results analysis

Operating Parameters Item	rpm	R = 14.9			R = 7.9			R = 4.8		
		Grinding time (min)			Grinding time (min)			Grinding time (min)		
		15	30	45	15	30	45	15	30	45
$\Delta S$ ( $m^2/cm^3$ )	250	1.59	2.43	2.72	1.14	1.63	1.88	0.56	0.78	0.98
	500	2.72	2.58	2.83	1.77	2.35	2.43	1.22	1.58	1.91
	750	3.16	2.53	2.60	2.38	2.58	3.33	1.77	2.16	2.26
Ef ( $m^2/wh$ )	250	5.04	4.55	2.73	5.50	2.85	2.05	4.82	3.84	3.64
	500	5.62	2.16	1.50	4.04	2.56	1.45	7.10	3.61	3.60
	750	3.87	1.31	1.11	3.40	2.10	1.68	6.22	3.95	2.47
Capacity (Kg/h)		0.16	0.08	0.053	0.3	0.15	0.1	0.5	0.25	0.167

표 1은 실험처리별로 분쇄진행정도를 나타내는 비표면적차와 분쇄에너지효율 및 분쇄기의 분쇄용량을 분석하여 나타낸 것이며 그림 7은 혼합율에 대한 분쇄에너지 효율과 비표면적차를 분쇄시간 3조건에 대한 평균값을 나타낸 것이다.

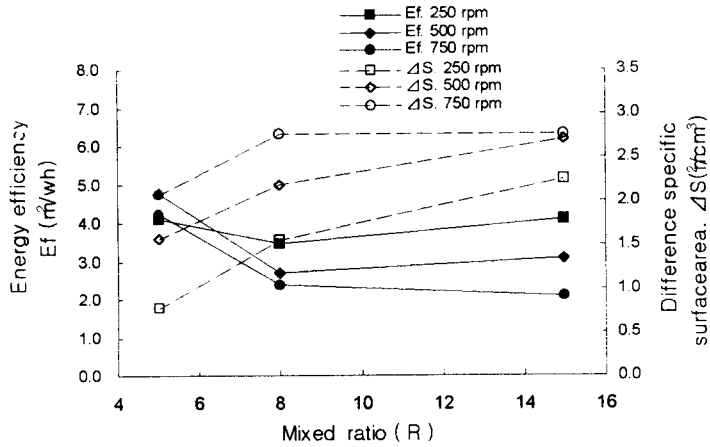


Fig. 7 Energy efficiency difference of specific surface area according to mixed ratio

그림 7에서 보면 혼합율이 증가함에 따라 에너지 효율은 낮아지고 비표면적 차이는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 분쇄 시료투입량을 감소시키면 에너지 효율은 감소되고 대신 분체의 평균입도는 작아지므로써 분쇄는 많이 진행되는 것을 의미하는 것이다.

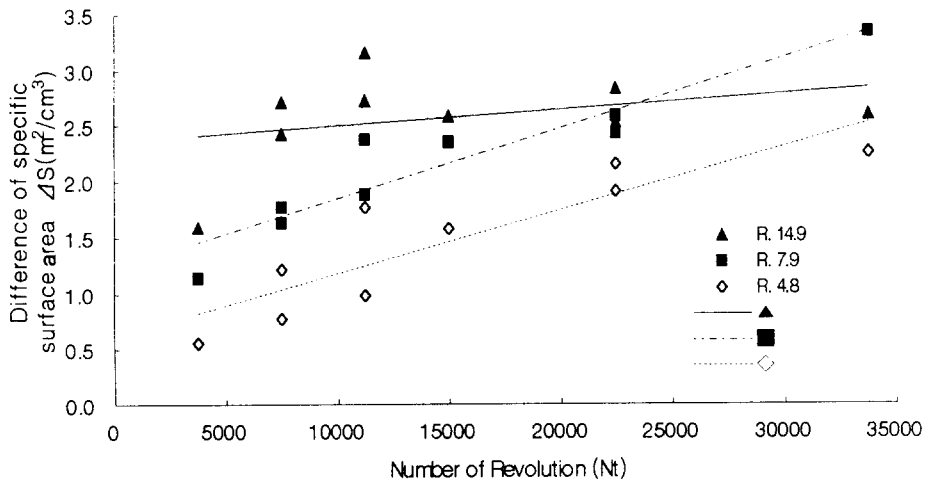


Fig. 8 Effect of number of impeller revolution on difference of specific surface area with mixed ratio.

또한 회전수와 분쇄시간이 증가할수록 에너지 효율은 감소하고 비표면적 차는 증가하는 현상이 그림 7과 비슷한 경향으로 나타났다. 그림 8과 그림 9는 임펠러 총회전수와 혼합율에 따른 비표면적 차와 분쇄에너지효율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 총회전수가 증가할수록 비표면적 차는 증가하고 에너지 효율은 감소하고 있으며, 또한 혼합율이 증가할수록(시료투입량이 적어질수록)비표면적 차는 증가하며 에너지 효율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 분쇄기의 작동에서 일반적으로 나타나는 것이나 직선적인 경향과 곡선적인 경향을 보이는 등 약간의 차이는 있다.

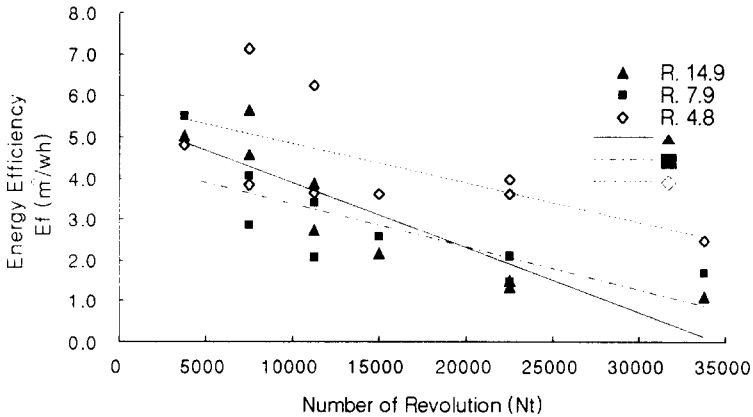


Fig. 9 Effect of number of impeller revolution on energy efficiency with mixed ratio.

### 3.3 최적 분쇄조건 분석

본 연구에서 수행한 실험조건의 범위에서 최적 분쇄조건을 분석하기 위한 전제조건은 요구되는 분체 입도를 만족하는 것이 첫째이며 둘째는 분쇄용량이 클 것, 셋째는 에너지 효율이 높을 것 등이다. 본 연구의 목적에서 요구하는 분체입도는 작을수록 좋으나 실험에 사용한 분쇄기의 한계입도를 고려하면  $3\mu\text{m}$  ( $\Delta S=1.96$ )로 결정하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

표1에서  $\Delta S$ 가 1.96이상인 조건과 이에 상응하는 Ef의 조건은 음영으로 나타나 있는 것인데 이 실험 처리 조건 중에서 분쇄 용량이 큰 조건을 찾으면 혼합율 7.9, 분쇄시간 15분, 임펠러 회전수 750rpm조건과 혼합율 4.8, 분쇄시간 30분, 임펠러 회전수 750rpm이다. 이 두 조건을 비교해보면 입도와 분쇄용량은 혼합율 7.9인 조건이 약간 유리하나 분쇄에너지 효율은 혼합율 4.8인 조건이 약간 유리한 것으로 나타나 전체적으로 서로 유사하다고 분석된다.

따라서 최종적으로 이 두 조건의 비에너지(kWh/kg)를 비교해보면 혼합율 7.9인 경우 1.553, 혼합율 4.8인 경우 1.216으로서 혼합율 4.8, 분쇄시간 30분, 임펠러 회전수 750rpm인 조건이 최적의 조건으로 판단된다.

일반적으로 대형 상용으로 사용되는 미세분쇄기의 비에너지는 약 0.1~1.0정도인데



비하여 본실험의 최적 조건에서의 비에너지가 좀 큰편으로 나타났는데 이는 실험용 소형 분쇄기였기에 분쇄용량에 비하여 지나치게 큰 전동기가 사용되었기 때문으로 판단된다. 본 실험조건의 범위에서 비에너지는 0.256~5.226(kWh/kg)으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 수도작 부산물인 왕겨를 소각로에서 소각하여 에너지를 이용하고 왕겨재는 콘크리트용 혼화재로 활용할 목적으로 가능한 미세분쇄된 왕겨재의 분체를 얻기 위해 건식 교반 볼밀을 선택하고 교반볼밀의 중요 작동인자인 분쇄시간(15, 30, 45분), 분쇄기 임펠러 회전수(250, 500, 750 rpm), 혼합율(4.8, 7.9, 14.9)을 요인으로 하여 분쇄실험을 수행하였다. 분쇄실험을 통하여 분쇄기의 최적 작동 조건을 구명하고자 하였으며 중요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실험 조건범위에서 분체의 평균입도는 1.79~10.18 $\mu$ m, 분쇄에너지효율은 1.11~7.1 m<sup>3</sup>/Wh, 비에너지는 0.256~5.226(kWh/kg)으로 나타났다.
2. 본 실험에 사용된 교반볼밀의 한계 입도는 약 2 $\mu$ m로 판단되며 분쇄시간과 임펠러 회전수 및 혼합율이 증가할수록 비표면적차는 증가하고(평균입도는 감소함)분쇄에너지 효율은 감소하는 경향을 나타내었다.
3. 본 실험의 범위에서 최적 분쇄 조건은 분쇄시간 30분, 임펠러회전수 750rpm, 혼합율4.8로 분석되었으며 이때의 평균입도는 2.73 $\mu$ m, 분쇄에너지 효율은 3.95m<sup>3</sup>/Wh, 분쇄용량은 0.25kg/h, 비에너지는 1.22kWh/kg 이었다.

#### 5.참고문헌

1. 강석호. 1995. 분체공학, 회중당
2. 농림부, 1997. 통계연보. 12.
3. 윤상대등, 1997. 콘크리트용 혼화재로서 왕겨활용에 관한 연구, 농림부보고서
4. 화학공학편람편찬위원회. 1995. 화학공학편람, 지문사
5. Jie Zhen, Colin C.Harris and P.Somasundaran, 1996. A study on grinding and energy input in stirred media mills, *Powder Technolgy*, 86:171-178.
6. Jie Zheng, Colin C. Harris and P. Somasundaran. (1997). The effect of additives on stirred media milling of limestone. *Powder Technolgy*, 91:173-179.
7. M.J.Mankosa, G. T. Adel and R.H.Yoon. 1989. Effect of operating parameters in stirred ball grinding of coal. *Powder Technolgy*, 59:255-260.
8. Mingwei Gao, Eric Forssberg, 1995. Prediction of product size distributions for a stirred ball mil, *Powder Technolgy*, 84 : 101-106.
9. Park. S. J. and M. H. Kim, (1996). Performance of a Pilot-Rice Husk Incinerator. ICAM'95, Proceedings Vol. II(III). Korea society of agricultural machinery.