



황산수를 사용한 저속 습식 마쇄법에 의한 순환잔골재의 최적 마쇄조건

김진만¹⁾ · 김하석^{1)*} · 박선규²⁾ · 김봉주¹⁾ · 곽은구¹⁾

¹⁾공주대학교 건축공학과 ²⁾기술보증기금 수원기술평가센터

Optimum Abrasing Condition for Recycled Fine Aggregate Produced by Low Speed Wet Abraser Using Sulfur

Jin-Man Kim,¹⁾ Ha-Seog Kim,^{1)*} Sun-Gyu Park,²⁾ Bong-Ju Kim,¹⁾ and Eun-Gu Kwak¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

²⁾Kibo Technology Fund, Busan 600-711, Korea

ABSTRACT Recently, the amount of disposed construction materials like demolished concrete is growing fast and the shortage of natural concrete aggregate is becoming serious. Therefore, recycling of aggregate extracted from the demolished concrete is getting important and use of the recycled aggregate for concrete has been seriously considered. However, the use of the recycled aggregate even for low performance concrete is very limited because recycled aggregate which contains large amount of old mortar has very low quality. Therefore, removing the paste stuck to the recycled aggregate is very important in the manufacturing of high quality recycled aggregate. We have studied a series of research according to complex crushing method, which is removed the ingredient of cement paste from recycled fine aggregate using both the low speed wet abrasion crusher as mechanical process and the acid treatment as chemical processes. This paper is to analyze the quality of the recycled fine aggregate produced by those complex method and investigate optimum manufacturing condition for recycled fine aggregate by the design of experiments. The experimental parameters considered are water ratio, coarse aggregate ratio, and abrasion time. As a result, data concerning the properties of recycled sand were obtained. It was found that high quality recycled fine aggregate could be to obtain at the condition of the fifteen minute of abrasion-crusher time and the over 1.0 of recycled coarse aggregate ratio.

Keywords : recycled fine aggregate, physical properties, design of experiments, abrasion-crusher time

1. 서 론

1.1 연구의 목적

구조물의 노후화 및 도시재개발 등으로 인하여 철근콘크리트구조물의 해체는 증가되어 가고 있으며, 이러한 구조물의 해체공사 시 발생하는 막대한 양의 건설 폐기물은 도시 및 주거환경 파괴의 주범이 되고 있다. 이에 국내에는 300여개 이상의 건설폐기물 처리업체가 성업중에 있으며, 순환골재를 생산하고 있는 실정이다. 그러나 생산되는 순환골재는 다각도로 활용되지 못하고 단순매립 등의 저부가가치용으로 사용되고 있다. 이는 생산된 골재 품질이 저급하기 때문인 것으로 판단된다.

최근 고품질의 순환잔골재를 생산하기 위한 기술이 개발되고 있으며, 그 결과 잔골재의 생산방식은 단순파쇄 공정 위주의 건식공정에서 골재의 세척과 선별 등을 포

함한 습식공정으로 바뀌어가는 추세이다. 그러나 습식공정을 사용하여 순환잔골재를 생산하는 경우에도 그 품질이 구조용 콘크리트에 적용하기에는 아직까지 부적합한 실정이다. 이와 같이 품질이 저조한 가장 큰 이유는 골재에 다량의 시멘트페이스트 성분이 포함되어 있기 때문이다.¹⁻³⁾

일반적인 습식공정은 순환잔골재를 생산할 목적으로 4차 이상의 파쇄와 골재에 구 모르타르 성분 및 미분의 제거를 위해 골재 세척이 병행되고 있다. 하지만 기존의 파·분쇄 방법만으로는 골재에 포함되어 있는 시멘트페이스트 성분을 효율적으로 떨어내지 못하며 씻기 작업에 사용되어지는 세척수는 씻기 작업 후 별다른 처리 없이 순환하여 사용되어 지고 있기 때문에 칼슘 성분을 다량 함유한 pH 12~13의 고알칼리성수로 변화된다. 따라서 골재 내 폐모르타르분을 효과적으로 제거하지 못할 뿐더러 용수 또한 지정폐기물로 분류되어 방류 시 별도의 처리를 해야만 하는 추가적인 비용이 발생하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구팀에서는 기존 파·분쇄 방법이 아닌 마쇄 방법과 사용되는 공정수

*Corresponding author E-mail : bravo3po@kongju.ac.kr

Received January 23, 2008, Revised April 30, 2008, Accepted July 25, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

를 산성수로 대체하는 방법을 이용하였다. 마쇄방법은 파쇄와 분쇄 방법과는 달리 골재간의 마찰과 자유낙하에 의한 운동에너지로 골재표면에 페모르타르 성분을 탈리시키는 방법이며, 산성수 적용은 중화반응을 이용하는 방법으로 공정수에 염산, 황산 등과 같은 산성계 물질을 투여함으로써 공정수를 pH 6~7의 중성 또는 약산성화하는 방법이다.^{4,5)} 이러한 방법을 사용할 경우 공정수를 강알칼리에서 중성화함으로써 폐수의 발생이 없다는 중요한 이점을 제공함은 물론, 골재 세척효율의 향상을 기대할 수 있게 된다.^{6,7)} 특히 높은 흡수율과 낮은 밀도로 인해 저부가가치로 사용되고 있는 순환잔골재의 생산에 있어 효과적일 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 기존 순환골재 생산 방식 중 문제시 되어온 파·분쇄 방법의 문제점을 보완하고 강알칼리수를 중화시켜 순환잔골재를 생산할 수 있는 최적 조건에 대하여 실험적 및 통계적으로 검토·분석하고자 하였다. 즉, 마쇄 시 영향을 주는 세척수량, 피분쇄물인 굵은골재량, 마쇄시간을 실험인자로 선정 후 직교배열법에 의하여 순환 잔골재와 물비, 순환 잔골재와 굵은골재비 및 마쇄시간에 대하여 그 유효성을 검토하였으며, 반응 표면분석법⁸⁾을 이용하여 순환잔골재를 생산하기 위한 최적의 마쇄조건을 도출하고자 하였다.

1.2 연구의 방법

물비, 굵은골재비 및 마쇄시간에 대하여 검토하기 위하여 사용한 직교배열법은 결과에 영향을 주는 인자에 관한 정보를 희생시켜서 실험횟수를 적게 할 수 있도록 한 실험 계획의 한 방법이다. 본 연구에서는 인자가 계량치일 경우에 많이 사용되는 식 (1)에 나타난 3수준계를 이용하였다.⁸⁾

$$L_{3m}(3^{(3m-1)/2}) \quad (1)$$

여기서 L = 직교배열을 나타내는 문구

m = 2 이상의 정수

3m = 실험의 크기

(3m-1)/2 = 직교배열의 열의 수

또한, 순환잔골재를 생산하기 위한 최적의 마쇄조건을 도출하기 위하여 사용된 반응표면분석법은 여러 개의 설명변수 ($\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \dots, \xi_n$)가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 변수 η 에 영향을 주고 있을 때 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석 방법을 말한다.⁸⁾ 본 연구에서 사용한 반응표면분석법은 2차 회귀모형을 사용하였으며 그 T표면은 식 (2)에 나타난 바와 같이 표현된다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij}x_i x_j + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij}x_i x_j \quad (2)$$

여기서 η = 종속변수, x_{ij} = 독립변수, β = 상수

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 실험계획 및 수준은 Tables 1 및 2에 나타난 바와 같이 실험인자로서 잔골재와 물비, 잔골재와 굵은골재비, 마쇄시간으로 실험계획법에 의해 27개 실험배치를 직교배열법을 이용하여 9개 실험 수준으로 배치하였다. 또한, 직교배열법을 적용하여 도출된 결과를 바탕으로 반응표면분석법을 이용하여 최적마쇄조건을 도출하였다. 본 실험에 사용한 피분쇄물인 굵은골재는 100 mm 이상의 갯자갈을 사용하였으며 잔골재에 중량으로 대체하여 실험하였다. 세척수는 잔골재와 굵은골재를 포함한 전체 용적에 대하여 세척수 양을 선정하였다. 또한 마쇄시간은 5, 10, 15분의 3수준으로 하였다. 이는 본 실험 방법을 현장생산에 적용할 경우 장시간의 처리공정은 생산율을 저하시켜 경제성 저하를 야기시키기 때문이다.

2.2 실험 방법

2.2.1 사용 재료

본 실험에서 사용된 순환잔골재는 충남 천안 D사에서

Table 1 The design of experiment

Factors	Levels			Test items
	0	1	2	
A Water ratio ¹⁾ (%)	0.7	1.0	1.3	·Density ·Absorption ratio ·Percentage of solid volume ·Density
B Coarse agg. ratio ²⁾ (%)	0.5	1.0	1.5	
C Abrasion time (min)	5	10	15	

¹⁾ Volume ratio of water to total aggregate

²⁾ Weight ratio of coarse aggregate to fine aggregate

Table 2 The level of experiment

ID	A	B	C	Levels
	Water ratio	Coarse aggregate ratio	Abrasion time (min)	
A ₀ B ₀ C ₀	0.7	0.5	5	A ₀ =0.7
A ₁ B ₀ C ₂	1.0	0.5	15	A ₁ =1.0
A ₂ B ₀ C ₁	1.3	0.5	10	A ₂ =1.3
A ₀ B ₁ C ₁	0.7	1.0	10	B ₀ =0.5
A ₁ B ₁ C ₀	1.0	1.0	5	B ₁ =1.0
A ₂ B ₁ C ₂	1.3	1.0	15	B ₂ =1.5
A ₀ B ₂ C ₂	0.7	1.5	15	C ₀ =5
A ₁ B ₂ C ₁	1.0	1.5	10	C ₁ =10
A ₂ B ₂ C ₀	1.3	1.5	5	C ₂ =15

Rew) 0, 1 and 2 represent experimental level respectively

Table 3 The physical properties of recycled fine aggregate

Density (g/cm ³)	Absorption ratio (%)	FM	Solid content in aggregate (%)	Unit weight (kg/m ³)
2.27	6.56	3.40	59.6	1,443

생산된 순환잔골재를 사용하였으며 물리적 특성은 Table 3에 나타난 바와 같다. 또한 실험에 사용한 세척수는 일반적으로 순환골재 생산업체에서 사용하는 상수도용 물을 사용하였으며 황산은 비중이 1.84이고 무취에 맑은 연한노란색을 띠는 순도 98%인 L사 제품을 사용하였다.

2.2.2 실험 방법

본 실험은 Fig. 1과 같이 순환잔골재와 굵은골재를 중량비율별로 1차 투입하고 사용할 세척수를 전체골재 용적비율별로 2차 투입한 후 최종적으로 황산을 투입하여 시간별로 마쇄실험을 실시하였다. 일반적으로 폐콘크리트에 포함되어 있는 구 모르타르 성분은 그 양이 모두 달라 황산을 세척수에 미리 희석하여 일정한 pH를 기준으로 하여 실험을 실시할 경우 그 포함된 양의 차이로 인하여 최종 pH가 적정 수준에 도달하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이는 골재 내에 구 모르타르 성분이 완전히 제거되지 않았음을 나타내는 것이다. 따라서 본 실험에서는 시작점의 pH를 조절하지 않고 최종 pH를 6~7로 기준하여 실험을 실시하였다.

2.2.3 실험 장비

Fig. 2는 본 실험에서 저품질의 순환잔골재를 고품질의 것으로 생산하기 위한 실험 장치이다. 본 연구에서 사용한 마쇄기는 저속의 회전력으로부터 골재간의 마찰과 자유낙하로 인한 충격력으로 골재에 달라붙어 있는

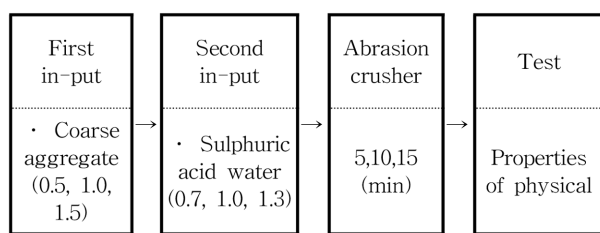


Fig. 1 Experimental method

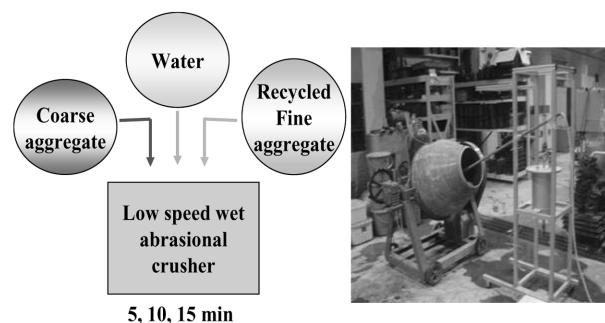


Fig. 2 Low speed wet abrasional crusher

구 모르타르 성분을 효과적으로 제거하는 것으로 8 rpm, 50 l/min 일반 가정식 믹서를 사용하였다.

2.2.4 측정 방법

순환골재의 품질시험은 순환골재 품질기준안 (콘크리트용 순환잔골재에 한함)의 규정 항목을 대상으로 하였으며, 품질기준안에서 제시하고 있는 물리적 특성 중 순환잔골재의 가장 중요한 품질특성만을 검토하여 그 결과값을 통계분석 하였다. Table 4는 본 연구의 측정 항목을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 직교배열법에 의한 실험 결과의 분석

Table 5는 마쇄조건에 따른 밀도, 흡수율, 실적률을 실험계획법에 따라 실시한 결과표이다.

3.1.1 절건 밀도

Table 6은 밀도 측정값을 분산 분석하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다. 분산 분석 결과를 살펴보면 실험요인인 A (물비), B (굵은골재비), C (마쇄시간)의 F 값은 3.0, 31.0, 169.0이며, 실험치가 자유도 2, 에러 2 이므로, 신뢰한계 99% (유의수준 $\alpha=0.01$), 95% (유의수준 $\alpha=0.05$) 및 90% (유의수준 $\alpha=0.10$)에서 각각 $F_{0.01}$, $F_{0.05}$ 및 $F_{0.10}$ 은 각각 99.0, 19.0, 9.0으로 나타나 3개 실험 요인 중 C (마쇄시간)는 99% (유의수준 $\alpha=0.01$)수준을 만족하여 가장 크게 영향을 주는 요인인 것을 알 수 있

Table 4 Test items

ID	Experimental method	Recycled fine aggregate
Density (g/cm ³)	KS F 2503	2.2 over
Absorption ratio (%)	KS F 2504	5.0 under
Solid content in aggregate (%)	KS F 2505	53 over

Table 5 Test results

ID	Density (g/cm ³)		Absorption ratio (%)	Solid content in aggregate (%)
	Oven-dry	Saturated surface-dry		
B	2.27	2.42	6.56	59.6
A ₀ B ₀ C ₀	2.41	2.5	3.43	60.7
A ₁ B ₀ C ₂	2.48	2.54	2.46	65.4
A ₂ B ₀ C ₁	2.44	2.52	3.2	64.6
A ₀ B ₁ C ₁	2.46	2.54	3.03	64.6
A ₁ B ₁ C ₀	2.41	2.5	3.95	62.3
A ₂ B ₁ C ₂	2.5	2.55	2.02	65.3
A ₀ B ₂ C ₂	2.53	2.57	1.65	65.7
A ₁ B ₂ C ₁	2.48	2.55	2.9	64.7
A ₂ B ₂ C ₀	2.43	2.5	3.24	62.7

Table 6 Variance analysis for density of recycled fine aggregate

ID	Factors	S	Ø	V	F ₀	Evaluation ^{ReW)}
A	Washing water	0.0002	2	0.0001	3.00	.
B	Coarse aggregate	0.0021	2	0.0010	31.0	*
C	Abrasion time	0.0113	2	0.0056	169	**
Error		0.0001	2	0.0000		
Total		0.0136	8			

ReW) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

었다. 또한 B (굵은골재비)의 경우 95% (유의수준 $\alpha=0.05$) 수준을 만족하여 골재품질 향상에 영향을 주는 것으로 나타났다. 하지만 A (물비)는 90% (유의수준 $\alpha=0.10$)에서도 유의하지 않는 것으로 나타나 품질 변화에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 3은 시험 결과를 이용하여 추정한 밀도 값을 나타낸 것으로 밀도의 평균값은 2.24~2.51 사이의 범위에서 변화하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 굵은골재비와 마쇄시간의 증가는 밀도의 증가에 유효하였으며 특히 마쇄시간이 밀도 증가에 주요한 요인으로 나타났다. 반면 F-검정 결과 거의 유효하지 않은 것으로 나타난 물비의 경우도 미세하지만 물비의 증대는 밀도의 감소를 유발하는 것으로 나타났다.

3.1.2 흡수율

Table 7은 흡수율 측정값을 분산 분석하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다. A (물비), B (굵은골재비), C (마쇄시간)의 F 값은 6.50, 9.00, 89.2로 나타나, C (마쇄시간)는 신뢰한계 95% (유의수준 $\alpha=0.05$)의 기각치인 19.0보다 크므로 마쇄 후 골재 흡수율에 가장 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 B (굵은골재비)는 신뢰한계 90% (유의수준 $\alpha=0.10$)수준에서 유효한 인자로 나타났다. 물비의 경우는 신뢰한계 90% (유의수준 $\alpha=0.10$)의

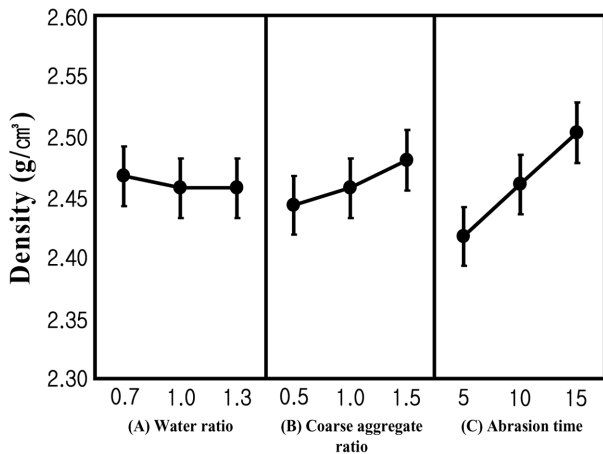


Fig. 3 Assumed density of recycled fine aggregate by variance analysis

Table 7 Variance analysis for absorption ratio of recycled fine aggregate

ID	Factors	S	Ø	V	F ₀	Evaluation ^{ReW)}
A	Washing water	0.2539	2	0.1269	6.50	.
B	Coarse aggregate	0.3514	2	0.1757	9.00	-
C	Abrasion time	3.4867	2	1.7433	89.2	**
Error		0.0391	2	0.0195		
Total		4.1310	8			

ReW) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

기각치인 9.0보다 작아 마쇄실험 후 골재 흡수율에 미치는 영향이 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 흡수율에 대한 실험인자의 수준별 모평균 측정치의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 마쇄시간의 증가에 의해 흡수율은 크게 감소하였으며 굵은골재비 또한 증가함에 따라 순환골재의 흡수율이 감소하지만 마쇄시간처럼 현저한 차이를 보이지 않았다. 반면 물비의 경우는 1.0에서 변곡점을 보이고 있어 일관된 경향을 파악하기가 곤란하였다.

Table 9는 풀링 결과는 나타낸 것으로 C (마쇄시간)는

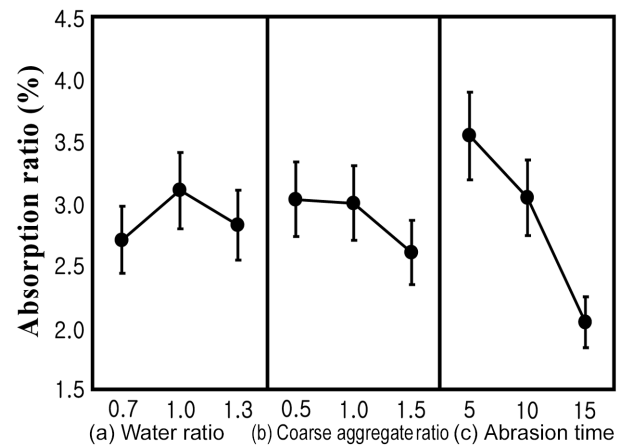


Fig. 4 Assumed absorption ratio of recycled fine aggregate by variance analysis

Table 8 Variance analysis for solid content in aggregate of recycled fine aggregate

ID	Factors	S	Ø	V	F ₀	Evaluation ^{ReW)}
A	Washing water	0.5067	2	0.2533	0.60	.
B	Coarse aggregate	0.9800	2	0.4900	1.16	.
C	Abrasion time	20.887	2	10.443	24.7	**
Error		0.8467	2	0.4233	-	
Total			8	-	-	

ReW) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

Table 9 Variance analysis for solid content in aggregate of recycled fine aggregate after pooling

ID	Factors	S	Ø	V	F ₀	Evaluation ^(Rew)
B	Coarse aggregate	0.9800	2	0.4900	1.45	.
C	Abrasion time	20.887	2	10.443	30.9	**
	Error	1.3534	4	0.3384	-	
	Total		8	-	-	

(Rew) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

신뢰한계 99% (유의수준 $\alpha = 0.01$)의 기각치인 18.0보다 크게 나타났고 B (굵은골재비)는 신뢰한계 90% (유의수준 $\alpha = 0.10$)의 기각치인 4.32 보다 작게 나타났다. 따라서 실적을 또한 C (마쇄시간)가 가장 유의한 인자인 것으로 나타났으며 A (물비)와 B (굵은골재비)는 유효하지 않음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 실적률에 대한 실험인자의 수준별 모평균 측정치의 변화를 나타낸 것이다. 밀도 및 흡수율의 실험 결과와 유사하게 마쇄시간의 증가에 따라 실적율의 증가는 현저하며, 특히 마쇄시간 5분에서 10분 사이에 그 값은 대폭 상승하였다. 반면 물비와 굵은골재비의 증가에 따른 실적율의 증가는 매우 미비한 것으로 나타났다.

3.2 반응표면 분석

직교배열법을 적용하여 도출된 결과를 바탕으로 최적 성능을 발현하는 마쇄조건을 찾기 위하여 반응표면 분석을 실시하였다. 반응표면 분석의 목표 성능은 절건밀도의 경우 2.50 이상, 흡수율의 경우는 3.0 미만으로 설정하였고, 실적률은 실험치 모두에서 매우 우수한 값인 60% 이상을 보이고 있어 생략하였다. 또한 앞에서 분석한 바와 같이 A (물비)인자는 유의성이 낮은 것으로 판별되어 제외하고 B (굵은골재비)와 C (마쇄시간)를 반응표면 분석한 후 각각의 결과 값을 중첩하여 최적마쇄 조건을 도출하였다.

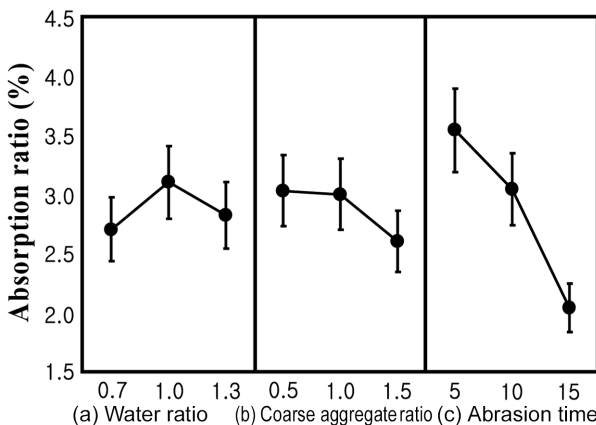


Fig. 5 Assumed solid content in aggregate of recycled fine aggregate by variance analysis

3.2.1 밀도

Table 10은 B (굵은골재비)와 C (마쇄시간)가 변할 때 밀도에 대한 반응표면분석 결과를 나타낸 것이다. 밀도에 대한 회귀식의 결정계수 R^2 는 0.99로서 유의수준 99% 이내에서 유의성이 인정되었다.

Fig. 6은 B (굵은골재비)와 C (마쇄시간)로 부터 얻은 순환잔골재의 절건밀도에 관한 반응표면분석 결과를 나타낸 것이다. 선T는 절건밀도의 목표성능인 2.5를 만족하는 선이다. 순환잔골재의 경우에는 밀도가 증가하면 품질이 향상되기 때문에 선T의 윗부분은 목표성능을 만족하는 영역이다. 정략적으로 살펴보면 굵은골재비 0.5의 경우에는 마쇄시간 13분 이상, 굵은골재비 1.0은 마쇄시간 10분 이상, 굵은골재비 1.5의 경우에는 마쇄시간 8분 이상, 굵은골재비 2.0인 경우에는 마쇄시간 5분 이상에서 목표성능을 만족하고 있다. 마쇄시간의 증가는 에너지 투입량의 증가를 의미하고 순환골재의 품질이 향상을 가져오며, 굵은골재비의 증가는 마쇄기 용량이 정하여져 있기 때문에 목표로 하는 순환잔골재의 양이 상대적으로 줄어드는 결과를 야기한다. 그러므로 이러한 변수를 고

Table 10 Variance analysis for density of recycled fine aggregate

Factors	S	Ø	V	F ₀	Evaluation ^(Rew)
Regression	0.0136	5	0.0027	195	**
Error	0.0000	3	0.0000		
Total	0.0136	8			

$$Y = 2.411 + 0.056X_1 - 0.003X_2 - 0.013X_1X_2 + 0.005X_2^2$$

Y is the density of recycled fine aggregate, X_1 is the coarse aggregate ratio, and X_2 is the abrasion time.

(Rew) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

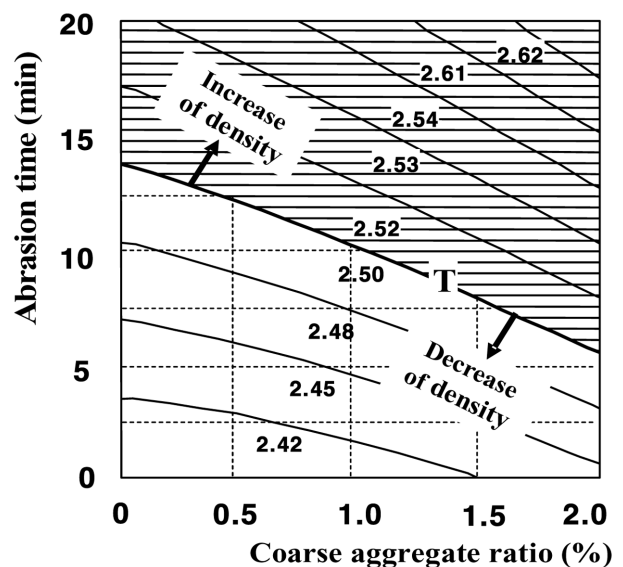


Fig. 6 Analysis response surface for the density of recycled fine aggregate driven from coarse aggregate ratio and abrasion time

려하여 최적의 굵은골재비 및 마쇄시간을 결정할 필요가 있다.

3.2.2 흡수율

Table 11은 B (굵은골재비)와 C (마쇄시간)가 변화할 때 흡수율에 대한 반응표면분석 결과를 나타낸 것이다. 흡수율은 회귀식의 결정계수 $R^2=0.95$ 로서 유의수준 90% 이내에서 유의성이 인정되었다.

Fig. 7은 B (굵은골재비)와 C (마쇄시간)에 따른 흡수율의 최적마쇄범위의 등고선분석을 나타낸 것으로 등고선분석 결과를 살펴보면, 밀도와 유사하게 마쇄시간 15분 이상과 잔골재와 굵은골재비 1:1 이상일 경우가 순환잔골재 품질기준안에서 제시하고 있는 요구 성능 이상을 넘어 천연 잔골재 수준을 만족하는 평균 범위인 것으로 나타났다.

3.2.3 최적마쇄조건의 도출

Fig. 8은 밀도를 분석한 Fig. 6과 흡수율을 분석한 Fig. 7을 중첩해 요구 성능을 만족하는 최적배합범위를 나타낸 것이다. 등고선 분석 결과를 살펴보면, 요구 성능을

Table 11 Variance analysis for absorption ratio of recycled fine aggregate

Factors	S	Ø	V	F ₀	Evaluation ^{ReW)}
Regression	3.9341	5	0.7868	12.0	*
Error	0.1969	3	0.0656		
Total	4.1310	8			

$$Y = 2.411 + 0.056X_1 - 0.003X_2 - 0.013X_1X_2 + 0.005X_2^2$$

Y is the density of recycled fine aggregate, X_1 is the coarse aggregate ratio, and X_2 is the abrasion time.

ReW) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

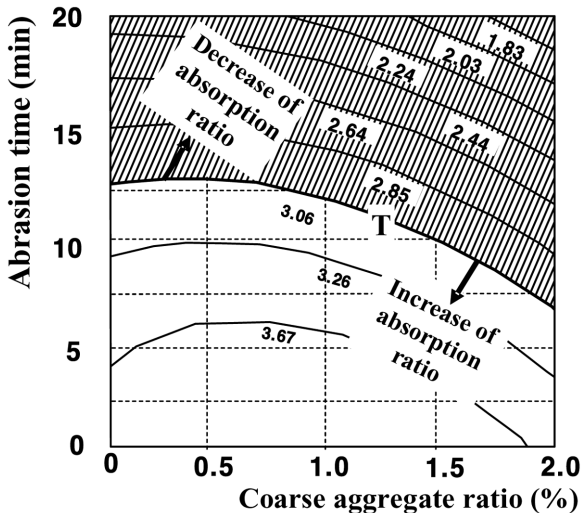


Fig. 7 Analysis response surface for the absorption ratio of recycled fine aggregate divided from coarse aggregate ratio and abrasion time

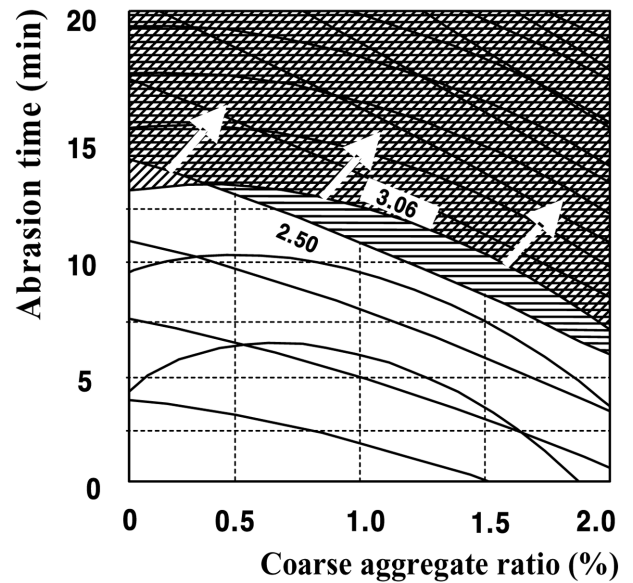


Fig. 8 The optimum condition

만족하는 범위 중에서 마쇄시간 15분과 굵은골재비 1:1 이상이 순환골재 품질 기준안에서 제시하는 콘크리트용 골재 기준인 절건밀도 2.2 g/cm^3 이상, 흡수율 5% 이하를 만족할 뿐만 아니라 KS에서 제시하고 있는 천연골재 기준밀도 2.5 g/cm^3 이상, 흡수율 3% 이하를 만족하는 평균범위인 것을 알 수 있었다. 따라서 순환잔골재 제조시 생산성을 감안할 경우 굵은골재를 비교적 많은 양을 투입하여 생산 시간을 줄이는 방향이 경제적이라고 사료되며 생산성과 경제성 면에서 최적의 마쇄 조건은 마쇄시간 10분, 굵은골재비 1.5 이상이 적절할 것으로 판단된다.

4. 결 론

순환잔골재의 품질기준에 만족하는 순환잔골재의 제조 방법에 관한 연구 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 물비, 굵은골재비, 마쇄시간 변화에 따른 순환잔골재 품질 변화는 마쇄시간이 밀도 변화에 있어 마쇄 조건 중 가장 유효하며 물비는 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.
- 2) 물비, 굵은골재비, 마쇄시간 변화에 따른 순환잔골재의 품질 변화를 살펴본 결과, 흡수율의 변화에서는 밀도와 마찬가지로 마쇄시간이 흡수율 변화에 있어 가장 주요한 인자로 나타났으며 흡수율 변화의 경향은 밀도 변화와 유사하게 나타났다.
- 3) 순환골재의 품질기준에 만족하는 순환잔골재의 제조를 위한 마쇄실험 결과, 마쇄시간 15분, 굵은골재비 1.0 이상이 목표품질 절건밀도 2.5 g/cm^3 이상, 흡수율 3% 이하의 골재를 생산하는데 최적조건인 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 05건설핵심기술연구개발사업 (과제 번호 : 05건설핵심D02)의 지원 하에 대한주택공사와 공주대학교 자원재활용소재연구센터 (RIC/NMR)가 공동으로 수행한 연구의 일부이며 이 연구에 참여한 연구자 (의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받은 것으로 관계 기관에 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. 阿部道彦, “콘크리트用再生骨材,” 콘크리트工学, Vol. 35, No. 7, 1997, pp. 42~48.
2. 건설교통부, 건설산업폐기물의 리사이클링시스템 및 재활용기술개발에 관한 연구, 건설교통부, 2002, pp. 6~125.
3. 주택도시연구원, 건설폐기물 재활용 정책 및 기술개발 동향, 주택도시 연구원, 2006, pp. 61~96.
4. 김진만, 김하석, 선정수, 곽은구, 한기석, 전명훈, “산
5. 김진만, 김하석, 선정수, 곽은구, 한기석, 이도현, “A Study on the Quality and Properties of Mortar of Recycled Fine Aggregate through Acid Treatment,” 한일국제심포지엄, 8권, 2006. 09, pp. 133~136.
6. 김진만, 김하석, 선정수, 곽은구, 임대빈, “CO₂ 가스를 이용한 마쇄방법에 따른 순환골재 품질 검토 (시멘트의 석회성분을 CO₂ 가스에 처리한 골재 품질에 관한 시험),” 한국폐기물학회 추계학술연구회발표논문집, 2006. 11, pp. 344~348.
7. 김진만, 김하석, 선정수, 최훈국, 장서연, 임대빈, “실험계획법에 의한 고품질 순환잔골재 제조에 관한 기초적 연구,” 한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집, 19권, 1호, 2007, pp. 617~620.
8. 박성현, 현대 실험 계획법, 민영사, 2006, pp. 413~416, 453~460.

요 약 순환잔골재를 생산하는데 있어서 기존의 습식공정에서 사용되는 파·분쇄 방법만으로는 골재에 포함되어 있는 시멘트페이스트 성분을 효율적으로 떨어내지 못하며, 씻기 작업에 사용되어지는 세척수는 씻기 작업 후 별다른 처리 없이 순환하여 사용되어 지고 있기 때문에 칼슘 성분을 다량 함유한 pH 12~13의 고알칼리성수로 변화된다. 따라서 골재 내 페모르타르분을 효과적으로 제거하지 못할 뿐더러 용수 또한 지정폐기물로 분류되어 방류 시 별도의 처리를 해야만 하는 추가적인 비용이 발생하게 된다. 이에 본 연구에서는 기존 순환골재 생산 방식 중 문제시 되어온 파·분쇄 방법의 문제점을 보완하고 강알칼리수를 중화시켜 순환골재의 품질기준에 만족하는 순환잔골재의 최적 생산조건에 대하여 실험적 및 통계적으로 검토·분석하고자 하였다. 즉, 순환잔골재의 물리적 특성에 영향을 미치는 세척수량, 피분쇄물인 굵은골재량, 마쇄시간을 실험인자로 선정 후 실험계획법에 의하여 순환 잔골재와 물비, 순환 잔골재와 굵은골재비 및 마쇄시간에 대하여 그 유효성을 검토하였으며, 품질규격에 적합한 순환잔골재를 생산하기 위한 최적의 마쇄조건을 도출하고자 하였다. 순환골재의 품질기준에 만족하는 순환잔골재의 제조 방법에 관한 연구결과, 물비, 굵은골재비, 마쇄시간 변화에 따른 순환잔골재 품질 변화는 마쇄시간이 밀도 변화에 있어 마쇄조건 중 가장 유효하며 물비는 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 또한 마쇄시간 15분, 굵은골재비 1.0 이상이 목표품질 절건밀도 2.5 g/cm³ 이상 흡수율 3% 이하의 골재를 생산하는데 최적조건인 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 순환잔골재, 물리적 특성, 실험계획법, 마쇄시간