

폐콘크리트 미분말을 클링커 원료의 석회석 대체재로 사용하기 위한 CaO 최적 분급 조건*

CaO Optimal Classification Conditions for the Use of Waste Concrete Fine Powder as a Substitute for Limestone in Clinker Raw Materials

김하석** · 신상철***

Ha-Seog Kim** · Sang-Chul Shin***

Abstract

This study aims to reduce CO₂ generated during the manufacturing process by using limestone (CaCO₃), a carbonate mineral used in the production of cement clinker, as a decarbonated raw material that does not contain CO₂. Among various industrial by-products, we attempted to use cement paste attached to waste concrete. In general, limestone for cement must have a CaCO₃ content of at least 80% (CaO, 44% or more) to ensure the quality of cement clinker. However, the CaO content of waste concrete fine powder is about 20% on average, so in order to use it as a cement clinker raw material, the CaO content must be increased to more than 35%. Therefore, by using the difference in hardness of the mineral composition of waste concrete fine powder to selectively crush CaO type minerals with relatively low hardness, classify and sieve, the CaO content can be increased by more than 35%. Accordingly, in this study, we experimentally and statistically reviewed and analyzed the optimal conditions for efficiently separating CaO and SiO₂ and other components by selectively pulverizing minerals containing relatively low CaO through a grinding process. As a result of the optimal grinding conditions experiment, it was found that the optimal conditions were a grinding time of less than 5 minutes, a type of material to be crushed of 30 mm, and an amount of material to be crushed of 1.0 or more. However, it is judged that it is necessary to review pulverized materials of mixed particle sizes rather than pulverized products of single particle size.

Keywords: Carbonated, Decarbonated, Clinker, Waste Concrete, Waste Concrete Powder

1. 서론

1.1 연구 목적

2015년 파리기후변화 협약(Paris Climate Change Accord)에서 설정된 '지구 온도 상승의 1.5도 이하

억제'라는 전 지구적 목표를 달성하기 위하여 이산화탄소 배출량을 약 50% 이상 감축하여야 하며, 이를 통해 2050년 탄소중립(Net Zero)을 달성하여야 한다(배성철 외, 2022). 국내에서도 “한국판 뉴딜-선도국가로 도약하는 대한민국으로 대전환” 종합계획

*본 연구는 과학기술정보통신부-한국연구재단(2022R1C1C2010362)의 지원을 받아 수행된 연구로 관계 기관에 감사의 말씀을 올립니다.

**도담이엔씨 대표이사(주저자: bravo3po@kongju.ac.kr)

***공주대학교 건축공학과 연구교수(교신저자: hiykhj@kongju.ac.kr)

이 발표되었으며 시멘트업계에서는 2050년 탄소중립 추진을 위한 산·학·연·관 협의체인 “시멘트그린 뉴딜위원회”를 출범하고 CO₂ 감축을 위한 다양한 연구를 진행하고 있다(김진만·배성철, 2021). 시멘트 산업에서 발생하는 CO₂는 클링커 소성공정에서 발생하는 CO₂보다 석회석(CaCO₃)을 소성하면서 발생하는 것이 약 65%로 탄산염 원료를 탈탄산화하는 대체원료 개발이 매우 중요한 상황이다. 이에 따라 산업부산물인 슬래그와 페콘크리트에 포함되어 있는 CaO를 탈탄산 원료로 활용에 대한 연구가 진행되고 있다(김상효·황준필, 2013).

페콘크리트를 재활용하여 생산되는 순환골재는 제조 공정 중 미분말의 형태로 10% 정도 발생하게 되며 조성으로는 미수화 CaO와 수화생성물인 Ca(OH)₂, C-S-H(Calcium silicate hydrate) 등으로 구성되어 있다(이승헌·구지술, 2019). 이러한 특성을 갖는 페콘크리트 미분말을 시멘트 원료로 재활용할 경우 CO₂를 배출하지 않는 탈탄산염 원료로 활용할 수 있을 것으로 기대되나, 아직까지 시멘트공장에서 석회석 대체원료로 사용되는 사례는 없다.

일반적으로 시멘트용 석회석은 최소한 CaCO₃의 함유량이 80% 이상(CaO, 44% 이상)의 것을 사용해야만 시멘트 클링커의 품질을 확보할 수 있다. 하지만 페콘크리트 미분말의 CaO 함량은 평균 20% 정도로 시멘트 클링커 원료로 사용하기 위하여 CaO 함량을 35% 이상으로 조성비를 올려줘야 이용이 가능하다(김형석, 2013). 국내에서 1960년도 초반에 습식 공정으로 시멘트를 생산했던 문경 시멘트 공장에서 석회석 원광의 CaCO₃ 함유량이 72%인 석회석을 부유선별(floatation)하여 석회석의 품위를 80% 까지 높여 시멘트 원료로 사용한 실적이 있다(노진환·이현철, 2008). 하지만 페콘크리트 미분말은 습식공정인 부유선별을 이용할 수 없어 건식방법을 이용하여 CaO 품위를 높이는 방법을 이용하여야 한다.

페콘크리트 미분말을 구성하는 광물은 크게 SiO₂,

Al₂O₃, Fe₂O₃, CaSO₄, Ca(OH)₂, CaCO₃가 있으며 SiO₂는 Quarts 광물로 경도 7, Al₂O₃는 경도 17.7, Fe₂O₃는 경도 6~7, CaO로 대변되는 CaSO₄, Ca(OH)₂, CaCO₃가 가지는 경도는 2~2.5 정도이다(최정해 외, 2017). 따라서 조성광물의 경도차이를 이용하여 경도가 상대적으로 낮은 CaO 형태의 광물을 선택적으로 분쇄하여 분급 및 체가름을 할 경우 CaO 함량을 35% 이상 상승시킬 수 있을 것으로 판단된다(Kim et al., 2022).

이에 본 연구에서는 페콘크리트로부터 획득한 페콘크리트 미분말을 조성하고 있는 광물 특성을 이용하여 분쇄공정을 통해 경도가 상대적으로 낮은 CaO를 함유한 광물들을 선택적으로 분쇄하여 효율적으로 CaO와 SiO₂ 외 기타 성분을 분리하는 최적 조건에 대하여 실험적 및 통계적으로 검토·분석하였다. 즉, 분쇄 시 영향을 주는 분쇄 시간, 피분쇄물의 종류(size), 피분쇄물의 양을 실험 인자로 선정한 후 직교배열법에 의하여 그 유효성을 검토하여 최적의 분쇄 조건을 도출하였다.

1.2 연구 방법

분쇄 시간, 피분쇄물의 종류(size), 피분쇄물의 양에 대하여 검토하기 위하여 직교배열법을 사용하였다. 직교배열법은 각 열이 직교가 되게 미리 만들어 놓은 표로서 요인배치법으로 모든 실험을 할 수가 없을 때 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 이루어진다. 요인의 수가 많은 경우에 주효과와 기술적으로 의미 없는 2요인 교호작용에 관한 정보를 희생시켜 실험 횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 할 수 있도록 만들어 놓은 것으로 실험 데이터로부터 요인 변동의 계산이 용이하고 분산분석표 작성과 분석이 수월하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서 결과에 영향을 주는 인자에 관한 정보를 희생시켜서 각 인자와 수준의 유효성을 검증 방법으로 직교배열법을 이용하였다. 즉 인자가 계량치일 경우에 많이 사용되는 식 (1)에 나타낸 3

수준계를 이용하였다(박성현, 2016).

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

여기서, L=직교배열을 나타내는 문구
 m=2 이상의 정수
 3m=실험의 크기
 (3m-1)/2=직교배열의 열의 수

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 실험계획 및 수준은 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1. The Design of Experiment

Factors	Levels			Test Items
	1	2	3	
A Crushing Time (min)	3	5	7	• Average particle size (PSA) • CaO content of fine powder (%)
B Steel Ball Type ¹⁾	1	2	3	
C Steel Ball Ratio ²⁾ (%)	0.5	1.0	1.5	

1) 1=30 mm, 2=20 mm, 3=8 mm (diameter)
 2) Volume ratio of steel ball to total aggregate

Table 2. The Level of Experiment

ID	A	B	C	Levels
	Crushing Time	Steel Ball Type	Steel Ball Ratio	
A ₁ B ₁ C ₁	3	1	0.5	A ₁ =3 min
A ₁ B ₂ C ₂	3	2	1.0	A ₂ =5 min
A ₁ B ₃ C ₃	3	3	1.5	A ₃ =7 min
A ₂ B ₁ C ₂	5	1	1.0	B ₁ =30 mm
A ₂ B ₂ C ₃	5	2	1.5	B ₂ =20 mm
A ₂ B ₃ C ₁	5	3	0.5	B ₃ = 8 mm
A ₃ B ₁ C ₃	7	1	1.5	C ₁ =0.5%
A ₃ B ₂ C ₁	7	2	0.5	C ₂ =1.0%
A ₃ B ₃ C ₂	7	3	1.0	C ₃ =1.5%

Note) 1, 2 and 3 represent experimental level respectively

Table 2에 나타낸 바와 같이 실험인자로서 분쇄 시간, 피분쇄물의 종류(size), 피분쇄물의 양으로 실험 계획법에 의해 27개 실험배치를 직교배열법을 이용하여 9개 실험 수준으로 배치하였다. 본 실험에 사용한 피분쇄물인 강구는 30mm, 20mm, 8mm 사이즈를 사용하였으며, 150µm 이하 폐콘크리트 미분말에 중량으로 대체하여 실험하였다. 또한 분쇄 시간은 5, 7, 10분의 3수준으로 하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 사용재료

본 실험에서 사용된 순환골재는 천안G사중간처리 공정에서 발생한 45mm 이상의 순환굵은골재를 박리 후 얻어진 150µm 이하 CaO 함량 22%의 폐콘크리트 미분말을 사용하였으며, 그 성분은 아래 Table 3과 같다.

2.2.2 실험절차

본 실험은 Fig. 1과 같이 폐콘크리트 미분말을 시험용 볼밀에 1차 투입하고 사용할 피분쇄물을 전체 골재 용적 비율별로 2차 투입한 후 시간별로 분쇄 실험을 실시하였다.

2.2.3 실험장비

아래 Fig. 2는 본 실험에서 폐콘크리트 미분말을

Table 3. Chemical Composition of Recycled Aggregate

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃
1.95	1.91	13.85	49.87	1.94
Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	etc
0.46	3.80	22.24	3.94	0.05

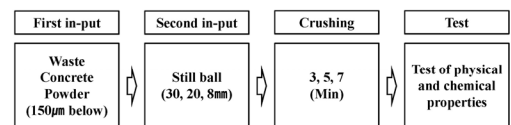


Fig. 1. Experimental Method



Fig. 2. Ball Mill as a Crushing Device

경도 차이를 이용하여 효율적으로 분쇄하기 위한 실험 장치이다. 본 연구에서 사용한 실험용 Ball mill은 Max 500 RPM의 성능을 갖는 실험용 장비를 사용하였다. 또한 실험에 사용한 30mm, 20mm, 8mm 강구를 나타냈다.

2.2.4 측정항목 및 방법

본 실험을 통하여 생산한 폐콘크리트 미분말의 평균입경을 Particle Size Analyzer(PSA)를 이용하여 측정하였으며, 미분말을 체가름하여 45 μ m 미만, 45~75 μ m, 75 μ m 초과와 입도별 CaO 함량을 X-Ray Fluorescence Spectrometry(XRF)를 이용하여 측정하였다. XRF 측정은 각 시료를 105°C에서 24시간 건조 후 Thermo Gravimetric Analysis(TGA)를 통해 1000°C에서 Loss On Ignition(LOI)를 측정 후 시료 압착법을 이용하여 XRF를 측정하였으며, 측정결과를 LOI를 고려하여 보정 값을 이용하였다. 위의 측정값은 분쇄작용으로 인하여 CaO의 분쇄효율을 살펴보기 위한 것이며, 위의 측정결과를 이용하여 통계 분석하였다.

Table 4. Test Results

ID	Average Particle Size (μ m)	CaO Content of Fine Powder (%)		
		45 μ m Below	45~75 μ m	75 μ m Over
A ₁ B ₁ C ₁	92.39	34.38	32.26	27.05
A ₁ B ₂ C ₂	71.99	33.41	32.92	27.72
A ₁ B ₃ C ₃	58.75	35.42	32.76	25.77
A ₂ B ₁ C ₂	87.23	32.92	34.21	28.09
A ₂ B ₂ C ₃	82.75	34.19	32.58	26.62
A ₂ B ₃ C ₁	77.41	34.22	32.40	26.90
A ₃ B ₁ C ₃	86.49	32.73	34.07	27.44
A ₃ B ₂ C ₁	69.56	32.77	33.01	27.76
A ₃ B ₃ C ₂	70.21	34.69	33.29	26.77

Table 5. Fine Powder Production Dispersion Analysis Results

Factors	\emptyset	S	F ₀	Evaluation ^(Rew)
Crushing Time	2	30.48	3.47	-
Steel Ball Type	2	15.59	1.26	·
Steel Ball Ratio	2	22.47	0.77	·
Error	6	45.63		
Total	12	76.12		

Rew) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

3. 결과 및 고찰

Table 4는 분쇄 조건에 따른 미분말의 평균입도, 입도별 CaO 함량을 실험계획법에 따라 실시한 결과표이다.

3.1 미분말 입도

Table 5는 미분말 입도의 측정값을 분산분석하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다.

분산분석 결과를 살펴보면 실험요인인 분쇄시간,

분쇄물량, 분쇄물의 종류(size)의 F 값은 3.47, 0.77, 1.26이며, 실험치가 자유도 2, 에러 6이므로 신뢰한 계 99%(유의수준 $\alpha=0.01$), 95%(유의수준 $\alpha=0.05$) 및 90%(유의수준 $\alpha=0.10$)에서 기각치 F0.01, F0.05 및 F0.10은 각각 10.9, 5.14, 3.46으로 3개 실험 요인 중 분쇄시간은 90%(유의수준 $\alpha=0.10$) 수준을 만족하여 가장 크게 영향을 주는 요인인 것을 알 수 있었다.

하지만 분쇄물량, 분쇄물의 종류(size)는 90%(유의수준 $\alpha=0.10$)에서도 유의하지 않는 것으로 나타나 분쇄 후 입도에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

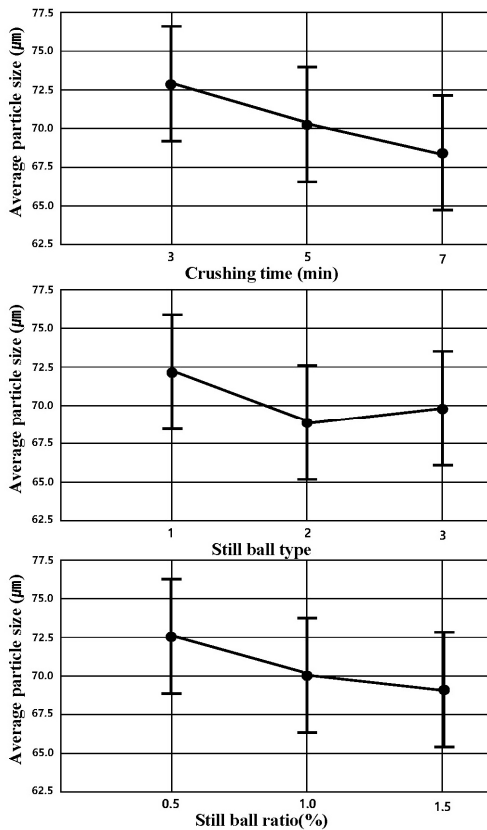


Fig. 3. Results of Variance Analysis at the Level of Each Factor on the Particle Size of Fine Powder

Fig. 3은 시험 결과를 이용하여 추정된 미분말 평균입경 값을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 분쇄시간의 증가는 미분말 입도 변화의 주요한 요인으로 나타났다.

또한 분쇄물량, 분쇄물의 종류(size)의 경우도 미세하지만 분쇄물량의 증대는 미분말의 입도변화를 유발하며, 분쇄물의 사이즈가 20mm인 경우 입도 변화에 효율적인 것으로 관찰되었다.

3.2 45µm 이하 미분말의 CaO 함량

Table 6은 분쇄 후 45µm 이하 미분말의 CaO 함량 측정값을 분산분석하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다.

분산분석 결과를 살펴보면 실험요인인 분쇄시간, 분쇄물량, 분쇄물의 종류(size)의 F 값은 0.82, 0.14, 3.49이며, 실험치가 자유도 6, 에러 18이므로 신뢰한 계 99%(유의수준 $\alpha=0.01$), 95%(유의수준 $\alpha=0.05$) 및 90%(유의수준 $\alpha=0.10$)에서 기각치 F0.01, F0.05 및 F0.10은 각각 10.9, 5.14, 3.46으로 3개 실험 요인 중 분쇄물 양은 90%(유의수준 $\alpha=0.10$) 수준을 만족하여 가장 크게 영향을 주는 요인인 것을 알 수 있었다.

Table 6. Calcium Content Analysis Result of Fine Powder Less than 45 µm

Factors	∅	S	F ₀	Evaluation ^(Rew)
Crushing Time	2	1.543	0.82	·
Steel Ball Type	2	3.802	0.14	·
Steel Ball Ratio	2	0.3117	3.49	-
Error	6	5.625		
Total	12	7.168		

Rew) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

하지만 분쇄시간, 분쇄물 종류는 90%(유의수준 $\alpha=0.10$)에서도 유의하지 않는 것으로 나타나 분쇄 후 45 μm 이하 미분말의 CaO 함량에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4는 시험 결과를 이용하여 추정한 45 μm 이하 미분말의 CaO 함량값을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 분쇄시간이 길어질수록 45 μm 이하 미분말의 CaO 함량이 낮아지는 결과를 나타내고 있다. 이는 분쇄시간이 길어질수록 CaO 광물뿐만 아니라 SiO₂로 대변되는 Quarts 등과 같은 광물이 함께 분쇄된 결과로 분석된다. 분쇄물량의 경우 45 μm 이하 미분말의 CaO 함량값에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

반면 분쇄물 종류(size)는 분쇄물 사이즈가 가장

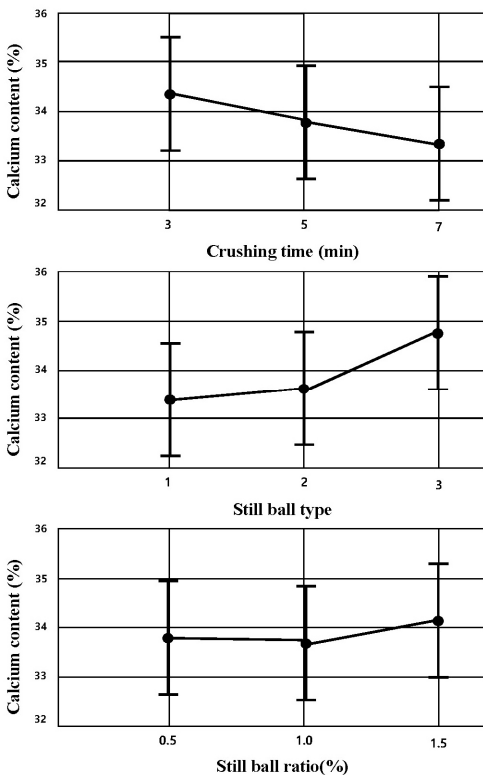


Fig. 4. Results of Variance Analysis at the Factor-Level for Calcium Content of Fine Powder Less than 45 μm

작은 8mm 강구를 이용하였을 때 45 μm 이하 미분말의 CaO 함량값의 가장 큰 상승을 나타냈다. 45 μm 이하 미분말의 CaO 함량 결과를 바탕으로 분쇄시간은 CaO 광물만을 선택적으로 분쇄하기 위하여 짧은 시간에 분쇄공정을 수행하고 분쇄물 종류(size)는 8mm 이하의 작은 분쇄물을 분쇄하고자 하는 대상물질의 1.5배 정도 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

3.3 45~75 μm 미분말의 CaO 함량

Table 7은 분쇄 후 45~75 μm 미분말의 CaO 함량 측정값을 분산분석하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다.

분산분석 결과를 살펴보면 실험요인인 분쇄시간, 분쇄물량, 분쇄물의 종류(size)의 F 값은 4.05, 1.53, 1.00이며, 실험치가 자유도 6, 에러 18이므로 신뢰한계 99%(유의수준 $\alpha=0.01$), 95%(유의수준 $\alpha=0.05$) 및 90%(유의수준 $\alpha=0.10$)에서 각각치 F0.01, F0.05 및 F0.10은 각각 10.9, 5.14, 3.46으로 3개 실험요인 중 분쇄시간은 90%(유의수준 $\alpha=0.10$) 수준을 만족하여 가장 크게 영향을 주는 요인인 것으로 분석되었다.

Table 7. Calcium Content Analysis Result of Fine Powder 45~75 μm

Factors	\emptyset	S	F ₀	Evaluation ^{Rew)}
Crushing Time	2	0.9845	4.05	-
Steel Ball Type	2	0.9497	1.53	·
Steel Ball Ratio	2	1.284	1.00	·
Error	6	2.8244		
Total	12	3.8089		

Rew) ** Accepted at 0.01 of significance level

* Accepted at 0.05 of significance level

- Accepted at 0.10 of significance level

· Not accepted

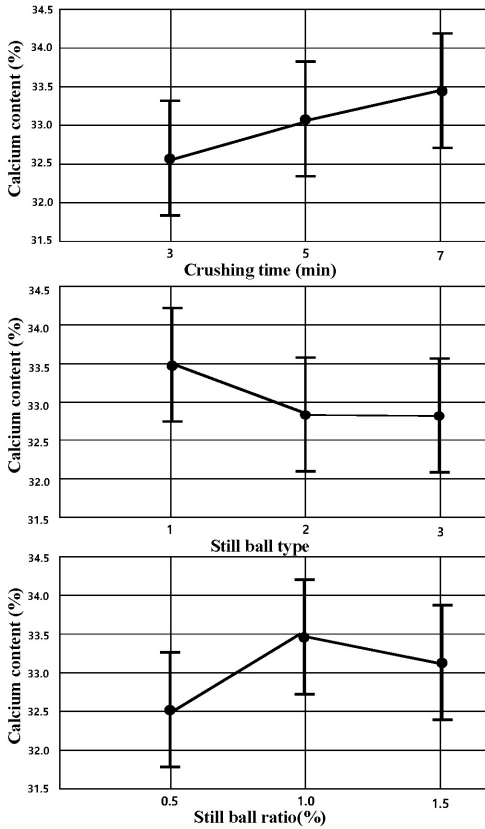


Fig. 5. Results of Variance Analysis at the Factor-Level for Calcium Content of Fine Powder 45~75 μm

하지만 분쇄물양, 분쇄물의 종류(size)는 90%(유의수준 $\alpha=0.10$)에서도 유의하지 않는 것으로 나타나 분쇄 후 45~75μm 미분말의 CaO 함량에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 시험 결과를 이용하여 추정한 45~75μm 미분말의 CaO 함량값을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 분쇄시간이 길어질수록 45~75μm 미분말의 CaO 함량이 상승하는 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 45μm 이하 미분말의 CaO 함량 결과와 반대되는 결과로 45~75μm 미분말은 45μm 이하 미분말과 비교시 상대적으로 입자가 큰 Quarts 등과 같은 경도가 높은 광물 분포도가 높아 분쇄 시간이

길어지는 결과를 초래한 것으로 분석된다(김도겸 외, 2021).

또한 분쇄물양의 경우 45μm 이하 미분말의 CaO 함량값에 크게 영향을 미치지 않았지만, 45~75μm 미분말의 CaO 함량값에서 분쇄 대상물질과 1:1 비율로 혼합한 시험체의 CaO 함량이 가장 큰 것으로 나타났다.

분쇄물 종류는 분쇄물 사이즈가 가장 작은 8mm 강구를 이용하였을 때 45μm 이하 미분말의 CaO 함량값의 가장 큰 상승을 나타낸 것과 반대로 45~75 μm 미분말은 분쇄물 사이즈가 가장 큰 30mm 강구를 이용하였을 때 CaO 함량이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 상대적으로 입자가 큰 Quarts 등과 같은 경도가 높은 광물 분포도가 높은 이유로 인하여 발생하는 결과로 판단된다.

45~75μm 미분말의 CaO 함량값 결과를 바탕으로 분쇄시간은 경도가 높은 광물분포가 높은 이유로 분쇄시간이 길어져야 하며, 분쇄물 종류는 75μm 이상의 비교적 사이즈가 큰 분쇄물을 분쇄하고자하는 대상물질의 1:1 비율로 이용하는 것이 유리 할 것으로 판단된다.

3.4 75μm 이상 미분말의 CaO 함량

Table 8은 분쇄 후 75μm 이상 미분말의 CaO 함량 측정값을 분산분석하여 그 결과를 실험요인별로 F-검정한 것이다.

분산분석 결과를 살펴보면 실험요인인 분쇄시간, 분쇄물양, 분쇄물의 종류(size)의 F 값은 1.30, 3.67, 2.44이며, 실험치가 자유도 6, 에러 18이므로 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 8.26, 4.21, 3.01로 3개 실험 요인 중 분쇄물양은 90%(유의수준 $\alpha=0.10$) 수준을 만족하여 가장 크게 영향을 주는 요인인 것으로 분석되었다.

하지만 분쇄시간, 분쇄물의 종류(size)는 90%(유

Table 8. Calcium Content Analysis Result of Fine Powder Over than 75 μm

Factors	\emptyset	S	F_0	Evaluation ^(Rew)
Crushing Time	2	0.3673	1.30	·
Steel Ball Type	2	1.318	3.67	-
Steel Ball Ratio	2	1.192	2.44	·
Error	6	3.6921		
Total	12	4.0594		

Rew) ** Accepted at 0.01 of significance level
 * Accepted at 0.05 of significance level
 - Accepted at 0.10 of significance level
 · Not accepted

의수준 $\alpha=0.10$)에서도 유의하지 않는 것으로 나타나 분쇄 후 75 μm 이상 미분말의 CaO 함량에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 6은 시험결과를 이용하여 추정한 75 μm 이상 미분말의 CaO 함량값을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 분쇄시간이 길어질수록 75 μm 미분말의 CaO 함량이 상승하는 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 45~75 μm 미분말의 CaO 함량 결과와 유사한 것으로 75 μm 이상 미분말 또한 상대적으로 입자가 큰 Quarts 등과 같은 경도가 높은 광물 분포도가 높아 분쇄시간이 길어지는 결과를 초래한 것으로 분석된다.

분쇄물량의 인자 또한 75 μm 이상 미분말의 CaO 함량값에서 분쇄 대상물질과 1:1 비율로 혼입한 시험체의 CaO 함량이 가장 큰 것으로 나타났다.

분쇄물 종류는 분쇄물 사이즈가 가장 작은 8mm 강구를 이용하였을 때 45~75 μm 미분말 결과와 유사하게 분쇄물 사이즈가 가장 큰 30mm 강구를 이용하였을 때 CaO 함량이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 상대적으로 입자가 큰 Quarts 등과 같은 경도가 높은 광물 분포도가 높을 이유로 인하여 발생하는 결과로 판단된다.

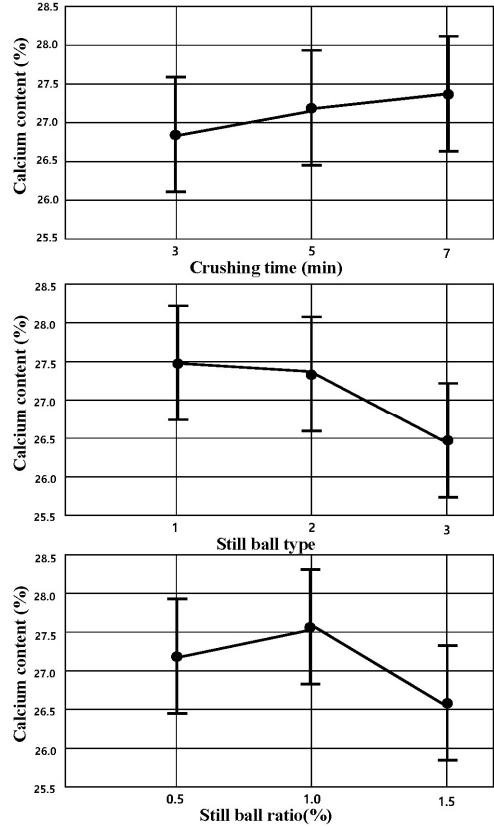


Fig. 6. Results of Variance Analysis at the Factor-Level for Calcium Content of Fine Powder Over than 75 μm

4. 결론

본 연구는 국내 건설폐기물인 폐콘크리트를 재활용하는 공정에서 순환골재 생산 시 필연적으로 발생하는 폐콘크리트 미분말 시멘트 크링거 원료로 사용 가능성을 확인하기 위한 것으로, 20% 수준인 폐콘크리트 미분말의 CaO 함량을 35% 이상 상승시키기 위하여 분급을 위한 최적 분쇄 조건을 시험한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

1. 분쇄시간, 피분쇄물 종류, 피분쇄물량의 변화에 따른 폐콘크리트 미분말 입도 변화를 살펴본 결과, 분쇄 시간이 입도 변화에 가장 주요한 인자로

나타났으나 분쇄 시간이 길어질수록 상대적으로 경도가 높은 광물도 함께 분쇄되는 효과를 가져와 적절한 분쇄 시간을 갖도록 하는 것이 중요 요인으로 분석된다.

2. 45 μ m 이하 미분말의 경우 분쇄물 사이즈가 폐콘크리트 미분말의 CaO 함량에 가장 영향을 주는 유효 인자로 나타났다. CaO 광물만을 선택적으로 분쇄하기 위하여 짧은 시간에 분쇄 공정을 수행하고 분쇄물 종류는 사이즈가 작은 분쇄물을 분쇄하고자 하는 대상물질의 1.5배 정도 이용하는 것이 효과적이었다.
3. 45~75 μ m 미분말의 경우 45 μ m 이하와 같이 분쇄물 사이즈가 유효한 인자로 분석되었으나, 반대로 사이즈가 큰 분쇄물을 사용할수록 CaO 함량은 상승하는 결과를 나타냈다.
4. 75 μ m 이상 미분말의 경우 앞선 분석과 달리 분쇄 시간이 길어질수록 CaO 함량이 상승하는 결과를 나타냈다. 이는 상대적으로 입자가 큰 Quarts 등과 같은 경도가 높은 광물 분포도가 높아 분쇄 시간이 길어지는 결과를 초래한 것으로 분석된다.
5. 시멘트 클링커 원료로서 탈탄산된 35% 이상 CaO를 함유한 폐콘크리트 미분말 제조를 위한 최적 분쇄 조건 실험 결과, 분쇄 시간 5분 이내, 피분쇄물 종류 30mm, 피분쇄물량 1.0 이상이 최적 조건인 것을 알 수 있었다. 하지만 단일 입도의 분쇄물이 아닌 혼합입도의 분쇄물에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김도겸·양근혁·서은아·윤현섭(2021), "폐콘크리트 및 폐모르타르로부터 분리된 미분말의 물리적·화학적 특성 평가", 「한국콘크리트학회 논문집」, 33(4): 327~334.
2. 김상효·황준필(2013), "시멘트 생산과정에 따른 CaO 함량과 CO₂의 발생량", 「한국콘크리트학회 논문집」, 25(4): 365~370.
3. 김진만·배성철(2021), "시멘트-콘크리트 그린뉴딜 위원회", 「한국콘크리트학회 논문집」, 33(3): 87~90.
4. 김형석(2013), "분리 선별을 통한 저품위 석회석의 고품위화 연구", 「시멘트 심포지엄」, 40: 20~28.
5. 노진환·이현철(2008), "생석회 공장에서의 풍층층 고품위 석회석의 소성특성", 「한국광물학회 논문집」, 21(2): 209~224.
6. 박성현(2016), 「현대 실험 계획법」, 서울: 민영사.
7. 배성철·문주혁·남정수(2022), "세계 각국의 시멘트: 콘크리트 탄소중립 추진현황", 「한국콘크리트학회 논문집」, 34(1): 50~57.
8. 이승현·구자술(2019), "시멘트계 재료의 CO₂ 고정화에 의한 온실가스 저감", 「한국콘크리트학회 논문집」, 28(4): 10~14.
9. 최정해·신주호·장형두·강성승(2017), "동적 초미소 경도법에 의한 심도별 대전화강암 내 광물들의 역학적 특성", 「한국암반공학회 논문집」, 27(3): 172~184.
10. Kim, J., N. Nciri, A. Sicakova and N. Kim (2022), "Characteristics of Waste Concrete Powder from Multi-Recycled Coarse Aggregate Concrete and Their Effects as Cement Replacements," *Construction and Building Materials*, 398: 1~12.

요약

본 연구는 시멘트 클링커 제조에 사용되는 탄산염 광물인 석회석(CaCO_3)을 CO_2 가 결합되어 있지 않은 탈탄산 원료를 사용하여 제조 공정 중에 발생하는 CO_2 를 저감하고자 하는 연구로 다양한 산업부산물 중 폐콘크리트에 부착되어 있는 시멘트페이스트를 이용하고자 하였다. 일반적으로 시멘트용 석회석은 최소한 CaCO_3 의 함유량이 80% 이상(CaO , 44% 이상)의 것을 사용해야만 시멘트 클링커의 품질을 확보할 수 있다. 하지만 폐콘크리트 미분말의 CaO 함량은 평균 20% 정도로 시멘트 클링커 원료로 사용하기 위하여 CaO 함량을 35% 이상으로 조성비를 올려줘야 이용이 가능하다. 따라서 폐콘크리트 미분말의 조성 광물 경도차이를 이용하여 경도가 상대적으로 낮은 CaO 형태의 광물을 선택적으로 분쇄하여 분급 및 체가름을 할 경우 CaO 함량을 35% 이상 상승시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 분쇄 공정을 통해 경도가 상대적으로 낮은 CaO 를 함유한 광물들을 선택적으로 분쇄하여 효율적으로 CaO 와 SiO_2 외 기타 성분을 분리하는 최적 조건에 대하여 실험적 및 통계적으로 검토·분석하였다. 시멘트 클링커 원료로서 탈탄산된 35% 이상 CaO 를 함유한 폐콘크리트 미분말 제조를 위한 최적 분쇄 조건 실험 결과, 분쇄 시간 5분 이내, 피분쇄물 종류 30mm, 피분쇄물양 1.0 이상이 최적 조건인 것을 알 수 있었지만 단일 입도의 분쇄물이 아닌 혼합입도의 분쇄물에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

주제어: 탄산염, 탈탄산염, 클링커, 폐콘크리트, 폐콘크리트 미분말