

시멘트 산업 탄소중립을 위한 폐콘크리트 미분말의 재활용 기술 동향

Recycling Technology Trend of Waste Concrete Powder for Carbon Neutrality in the Cement Industry

신상철¹ · 김진만^{2*} · 김건우³ · 강인규³

Sang-Chul Shin¹ · Jin-Man Kim^{2*} · Geon-Woo Kim³ · In-Gyu Kang³

(Received November 11, 2022 / Revised December 14, 2022 / Accepted December 14, 2022)

Research on the recycling of waste concrete has been conducted mainly focusing on the production of high-quality recycled aggregate, and as a result, standards and specifications for recycled aggregate have been established. However, in the case of waste concrete powder, although a lot of research on its utilization has been conducted in Korea, an innovative technology leading to commercialization has not yet been announced. Recently, research on technology using waste concrete powder as a raw material for clinker or cement has been actively conducted in major overseas advanced countries. This study investigated the overseas cases with regard to high value-added recycling technology and commercialization trend of waste concrete powder for carbon neutrality in cement and concrete industries. A number of studies have reported that it is essential to completely separate the aggregate and hydrated cement paste fraction for recycling of waste concrete powder. Also in major foreign countries such as EU and USA, commercialization and standardization of using waste concrete powder as a raw material for clinker or a additive for cement are now in progress beyond the R&D stage. Therefore, Research and standardization for recycling of waste concrete powder should be urgently carried out from the perspective of carbon neutrality in Korea.

키워드 : 탄소중립, 폐콘크리트 미분말, 재활용, 클링커, 표준화, 상용화

Keywords : Carbon neutrality, Waste concrete powder, Recycling, Clinker, Standardization, Commercialization

1. 서론

최근 세계적으로 「2050 탄소중립」이 이슈화됨에 따라 세계 각국은 탄소중립 목표 달성을 위한 장기비전 및 전략을 수립하였다. 유럽은 European Green Deal 및 탄소감축 입법안 패키지(Fit for 55)를 발표하고 탄소중립을 도입하는 등 탄소중립 정책에 있어 선도적인 움직임을 보이고 있고, 미국, 캐나다, 일본 등 선진국에서도 탄소중립을 위해 다양한 접근을 시도하고 있다. 우리나라에서도 2020년 「2050 탄소중립선언」을 시작으로 「2030 NDC 상황안」 및 「2050 탄소중립시나리오최종안」을 발표하는 등 적극적인 대응을 이어가고 있다.

건설산업은 건설자재 제조단계의 탄소배출 비중이 90 % 이상

으로 가장 높고 시공단계에서의 탄소배출은 상대적으로 낮은 특징을 갖는데, 이는 국내 건설현장에서 사용되는 건설자재의 대부분이 탄소 다배출 재료인 시멘트 기반 제품 및 철강 제품이기 때문이다. 특히, 시멘트는 석회석의 화학적 분해가 필연적으로 발생하므로 이 과정에서 시멘트 제조 공정 전체의 60 %에 상당하는 CO₂가 배출된다고 알려져 있다.

철강, 발전과 더불어 온실가스 다배출 업종으로 인식되고 있는 시멘트 산업에서 온실가스를 줄일 수 있는 대표적인 기술은, 원료 전환, 연료전환, CCUS(Carbon Capture, Utilization & Storage) 기술로 요약할 수 있다. 이 중 원료전환을 통한 탄소배출 감축 방향은 단기간에 가장 큰 효과를 가져올 수 있는 분야이다. 2021년 10월 관계부처 합동으로 발표한 「2050 탄소중립 시나리오안」에 의하

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

¹공주대학교 친환경콘크리트연구소 연구교수 (Eco Friendly Concrete Research Center, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

²공주대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

³공주대학교 건축공학과 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Kongju National University, Chungnam, 31080, Korea)

Table 1. Changes in domestic construction waste generation

(Unit : 10,000 ton)

Category		'15	'16	'17	'18	'19	'20	
Total		7,236	7,280	7,164	7,554	8,070	8,644	
Combustible materials	Subtotal	94	82	95	97	91	102	
	Waste wood	34	29	29	29	31	42	
	Waste synthetic resin	60	52	66	67	59	59	
	Etc	0.4	0.4	0.4	1	1	1	
Uncombustible materials	Subtotal	6,274	6,387	6,259	6,598	7,080	7,681	
	Construction waste materials	Waste concrete	4,542	4,675	4,499	4,783	5,030	5,394
		Waste asphalt concrete	1,296	1,285	1,309	1,378	1,502	1,584
		Construction waste soil	280	236	273	259	306	409
		Etc	118	117	111	130	199	209
	Construction sludge	36	70	67	46	41	84	
	Etc	1	3	2	2	1	1	
Mixed construction waste	863	808	806	858	897	860		
Etc	6	3	3	1	2	2		

면, 시멘트 제조 과정에 투입되는 화석 연·원료를 재생 연·원료로 전환하여 2018년 대비 배출량을 53% 감축한다는 시나리오가 제시되었다. 이 중 원료전환 분야에서는 석회석 원료 대체율을 12%, 포틀랜드 시멘트의 혼합재 비중을 20%로 확대 추진한다는 계획이다. 원료전환 기술, 즉 탈탄산염 등 저탄소 원료를 사용하여 클링커를 생산하거나, 시멘트 제조 시 클링커에 혼합할 수 있는 다양한 혼합재를 확대 적용하는 기술은 이미 오래전부터 다수의 연구자들에 의해 긍정적인 연구성과가 보고된 바 있다. 이러한 기술은 유럽과 북미 등에서는 수 십년간의 연구 개발을 통해 표준화/상용화 단계에 접어들었으며, 시멘트 산업의 탄소중립 달성을 위한 핵심기술로 인정받고 있다.

특히, 클링커 또는 시멘트 원료로 사용할 수 있는 다양한 무기재료 중 페콘크리트 미분말을 원료전환 기술에 활용하는 것에 시선을 돌릴 필요가 있다. 페콘크리트 미분말은 페콘크리트의 파/분쇄 공정에서 발생하는 비산 분체계 재료이다. 페콘크리트의 재활용에 대한 연구는 주로 고품질 순환골재 생산에 포커스를 맞춰 연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 순환골재 국가표준을 제정하는 등 적극적으로 사용할 수 있는 환경이 조성되었다. 하지만 페콘크리트 미분말의 경우, 그 활용에 대한 연구가 국내에서 많이 진행되었지만 상용화로 이어지는 획기적인 기술은 아직 발표되지 않은 실정이다.

Table 1은 환경부 통계자료에 의한 국내 건설폐기물 종류별 발생량 변화를 나타낸 것이다. 2020년 기준 국내 페콘크리트 발생량은 약 5,394만 톤으로 이는 전년 대비 7.2% 증가한 것으로 발표되었다. 동년 건설폐기물의 재활용률은 Fig. 1과 같이 약 99.0%

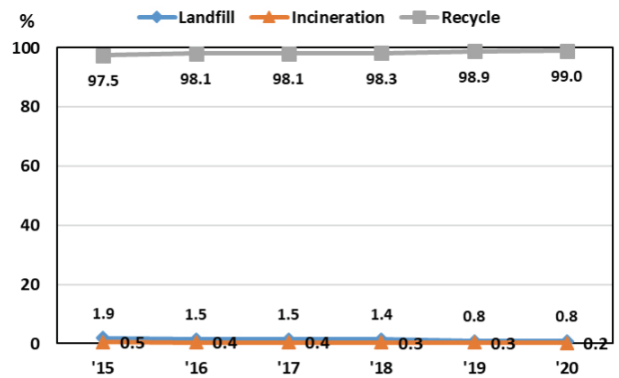


Fig. 1. Changes of construction waste treatment method

집계되고 있지만 대부분 성토 및 복토, 되메우기 및 뒷채움용 등 단순처리일 뿐이다. 특히 페콘크리트 미분말의 경우, 국내에서 연간 1,000만 톤 이상 발생하는 것으로 추정됨에도 불구하고 마땅한 고부가가치 재활용처가 없는 것이 국내의 현실이다.

본 연구의 목적은 해외에서 상용화 단계까지 기술 발전을 이루어 낸 과학적인 근거를 분석하고, 시멘트 산업 탄소중립을 위한 국내 페콘크리트 미분말의 고부가가치 재활용 방향을 제시하는 것이다. 이는 탄소중립 사회로의 전환기에서 시멘트-콘크리트 산업에서 가장 먼저 다루어져야 할 원료전환 기술의 한가지 가능성을 제시하는 것으로, 본 연구에서는 페콘크리트 미분말의 최신 재활용 기술 및 상용화, 표준화 동향에 대한 해외 사례를 조사하였고 최종적으로는 탄소배출량 저감 효과 및 경제성 분석을 수행하였다.

2. 페콘크리트 미분말 관련 연구동향

2.1 국내 연구 동향

페콘크리트 재활용에 관한 국내의 연구는 1980년대 중반부터 시작되었다. 당시에는 주로 일본 등 선진국의 연구 사례를 참고하여 페콘크리트를 콘크리트용 대체골재로 활용한 콘크리트와 천연골재를 사용한 일반콘크리트를 비교, 검토한 연구가 대부분이었는데, 실험에 사용된 페콘크리트 순환골재를 이미 밀도, 흡수율 및 공극율이 큰 저급품 콘크리트용 골재로 인식하면서 품질 평가를 수행하였다. 다만, Kim et al.(1986)은 일부 실험에서 일반콘크리트의 물성보다 유효한 결과를 얻었다고 보고하면서, 페콘크리트 순환골재의 유효활용 가능성을 제시하였다. 또한, Song(1989)은 페콘크리트 순환골재를 활용한 콘크리트의 시공성 및 공학적 품질이 저하되는 것에 대한 해결책으로, 당시 각광을 받고 있던 고성능 감수제를 활용하는 방법을 제안하였다.

1990년대에 들어서면서 주로 콘크리트 및 아스팔트 도로 포장의 기층 재료 및 도로 노반재 등으로 활용하는 방안에 대한 연구가 수행되었다. 이러한 연구에서는 마모감량, 소성지수, 노상지력 등의 물리적 특성과 역학적 특성, 환경영향평가 시험을 통해 지반공학 분야에서 페콘크리트를 사용하더라도 요구조건을 만족한다는 결과를 도출하였다.

동시에 건축 분야에서 페콘크리트를 활용하기 위해 고품질 순환골재에 대한 연구도 활발히 진행되었다. 순환골재의 품질을 향상시키는 것은 골재 계면에 부착되어 있는 시멘트 페이스트를 얼마나 효율적으로 분리해 낼 수 있는가에 달려있다. Kim et al.(1997)은 순환골재를 사용한 콘크리트의 압축강도가 일반콘크리트의 70 % 수준이지만, 깨끗이 세척한 후 사용하면 강도 증진 효과를 볼 수 있다고 주장하였다. 또 다른 연구(Kim et al. 2006)에서는 순환골재의 석회 성분을 황산, 염산 등의 산 또는 CO₂를 이용하여 제거함으로써 순환골재의 품질을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 또한, Kim et al.(2007)은 순환골재로 만든 콘크리트 부재의 구조실험을 실시하여 천연골재 콘크리트와 대등한 구조적 성능을 발휘한다는 연구 결과를 발표하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 2007년 순환골재 품질인증 제도가 시작되었고, 2013년에는 「순환골재 사용 건축물 시범사업」의 일환으로 세계 최초 순환골재만을 100 % 사용한 건축물(입장휴게소, 되돌림화장실)을 건설하여 대대적으로 홍보하기도 하였다. 이러한 과정에서 마련된 순환골재 국가표준은 여러번의 개정을 거쳐 2018년 「KS F 2527-콘크리트용 골재(구 KS F 2573-콘크리트용 순환골재) 표준으로 통합

되어 현재에 이르고 있다.

이와 같이 페콘크리트로부터 발생한 순환골재는 비교적 많은 연구가 수행되어 표준화, 상용화 단계에 접어들었지만 페콘크리트 미분말은 폐기처리되는 폐기물이라는 인식이 지배적인 상황이었다. 일부 연구자들에 의해 연구가 진행되었지만 단순 잔골재 치환이나 콘크리트 필러로의 활용 등에 관한 기술 등이 대부분이었고, 시멘트 원료 적용 연구는 주로 규산질 원료와 점토질 원료 대체 목적으로 진행되었다.

Ahn et al.(2003)은 페콘크리트를 가열 분쇄하여 얻은 미분말을 보통포틀랜드시멘트의 SiO₂ 및 Al₂O₃ 원료 물질인 Shale에 대해 100 % 대체하여 사용할 수 있다고 보고하였다. 이 연구는 자원 재활용이라는 측면에서는 의미가 있지만 석회석 원료 대체를 통한 탄소배출 감축 기술과는 거리감이 있다. 한편 Song et al.(2014)는 페콘크리트 미분말의 화학적 특성을 기반으로 배합조건을 조절하여 클링커를 제조하는 연구를 수행하였는데, 페콘크리트 미분말의 혼입률이 증가할수록 클링커 모듈러스를 만족하기 위해 석회석 및 전로슬래그의 혼입률도 급격하게 증가할 수 밖에 없다고 보고하였다. 이 연구에서 사용한 페콘크리트 미분말의 CaO 성분은 13.7~17.4 %로 골재 성분이 많이 함유되어 결과적으로 시멘트에 사용할 수는 있지만 수화속도 및 수화열은 다소 낮아지는 특성을 나타냈다. 앞서 소개한 국내 연구 사례를 탄소중립의 측면에서 발전시키려면 페콘크리트 미분말의 화학조성, 즉 CaO/SiO₂를 높이는 방향의 전처리 기술이 반드시 개발되어야 할 것이다.

2.2 해외 연구 동향

페콘크리트 미분말의 고부가가치 재활용 기술에 대한 해외의 최근 연구 동향을 살펴보면, 골재(SiO₂)와 시멘트 페이스트(CaO)를 완벽히 분리하는 기술에 초점을 맞추고 있다. 페콘크리트 중 골재와 미분말의 성분 분리가 완벽하게 이루어진다면 페콘크리트의 완전한 업사이클이 가능하다는 연구가 활발하게 이루어지고 있으며 2010년대부터 이러한 연구들이 본격적으로 수행되어 왔다.

2.2.1 모델시료 기반 연구

Gastaldi et al.(2015)는 페콘크리트 미분말의 클링커 원료 대체 가능성을 제시하였는데, 실험실에서 W/C 40 %로 제조한 시멘트 페이스트를 28일 동안 진공상태로 봉함양생 후 파/분쇄하여 90 μm 이하의 순수한 HCW(Hydrated Cement Waste)를 대상으로 실험을 수행하였다. 클링커 원료 대체율은 OPc(Ordinary Portland clinker) 대비 30 %(CWc-A)와 55 %(CWc-B)의 두 수준으로 하여

Table 2. Rietveld semi-quantitative mineralogical composition of produced clinker in study by D. Gastaldi et al.

	OPc	CWc-A	CWc-B
C ₃ S(%)	47.5	49.7	-
C ₂ S-β(%)	31.6	28.7	78.4
C ₂ S-γ(%)	-	-	10.8
C ₃ A/C ₄ AF(%)	16.1	16.7	10.4
MgO(%)	3.3	3.1	0.6
CaO(%)	1.5	0.6	-

1,500 °C에서 30분간 소성한 클링커의 특성을 분석하였다. Table 2은 Rietveld 분석법을 이용하여 정량한 광물조성을 나타낸 것으로, HCW를 30 % 사용한 경우 약 30 %의 CO₂ 저감 효과를 가져오면서도 포틀랜드 클링커와 매우 유사한 광물 조성(C₃S가 전체의 50 % 차지)을 나타내었다. HCW를 55 % 사용한 경우에는 C₂S-β의 생성량이 78.4 %로 매우 높기 때문에 단독 사용은 어렵지만 SCM(Supplementary cementitious Material)으로의 활용 가능성을 제시하였다. 일반 포틀랜드 클링커에 20 % 및 40 % 혼합한 시멘트의 강도특성을 분석하였는데, 두 경우 모두 장기 수경성을 특징으로 하여 유럽의 Limestone cement Type II 및 Pozzolanic cement Type IV와 유사한 강도를 나타내었다. 이 연구는 불순물이 포함되지 않은 순수한 시멘트 페이스트만을 임의로 제조하여 실험한 것이지만, 클링커 원료로의 사용 가능성, 나아가 시멘트 혼합재로의 사용 가능성을 제시한 데에 의미가 있다.

Zhutovsky and Shishkin(2021)은 600~1,450 °C 범위에서 열처리된 수화 시멘트 페이스트의 상변화를 분석한 결과, 새로운 클링커로 완전히 회복되어 시멘트 생산에 재활용할 수 있는 매우 큰 가능성을 확인했다고 발표하였다. Fig. 2는 XRD 분석 결과를 나타낸 것으로, 시멘트 페이스트를 재활용하여 얻은 새로운 클링커에는 주요 클링커

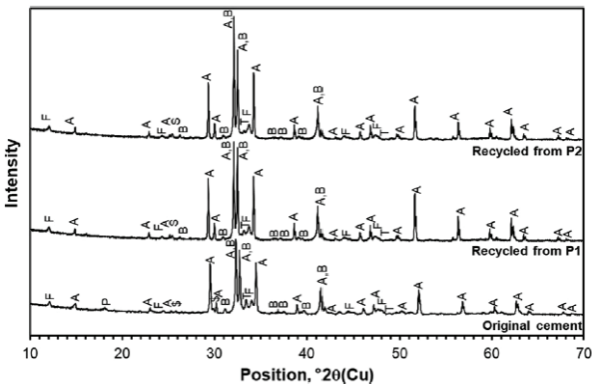


Fig. 2. Comparison of XRD patterns of original Portland cement and clinkers recycled P1 and P2 cement pastes in study by Zhutovsky and Shishkin

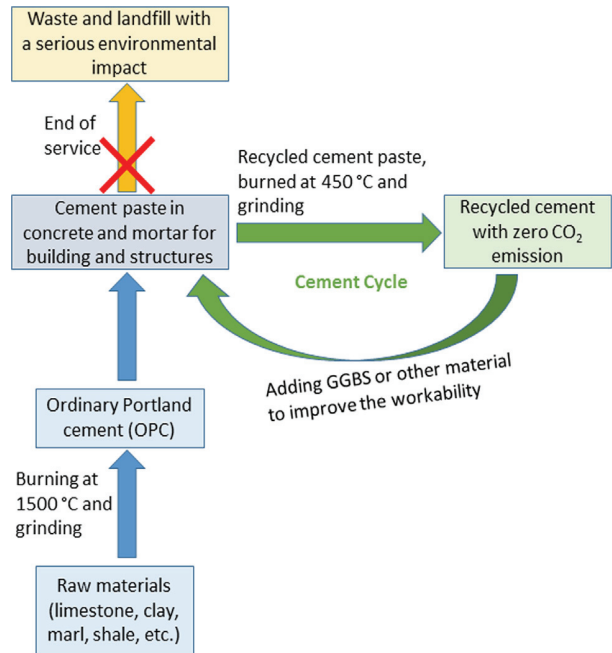


Fig. 3. The abstract of Cement Cycle in study by Wang et al.

광물이 포함되어 있으며 Alite 함량은 만족스러운 수준을 나타냈다. XRD 분석을 통해 재활용된 클링커의 belite는 기존의 β-belite뿐만 아니라 반응성 α-belite도 상당 부분 포함하는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과로부터 CO₂ 배출량을 현저히 줄이는 포틀랜드 시멘트의 생산 및 콘크리트의 완전 재사용이 가능하다고 결론지었다.

Wang et al.(2018)은 실험실에서 만들어지지 2년이 지난 시멘트 페이스트를 120 °C, 450 °C, 750 °C, 1,100 °C의 다양한 온도조건으로 소성한 후 분쇄한 분말의 특성을 검토하였다. 온도 조건은 열중량 분석(TGA) 결과를 기반으로 상당한 질량 손실이 있던 온도를 실험 수준으로 설정하였다. 실험 결과, 450 °C에서 시멘트 페이스트를 소성한 것이 가장 높은 수화열과 압축강도를 보였고, 수경성이 회복되어 OPC 페이스트와 동일한 강도를 나타낸다고 주장하였다. 반면 120 °C와 1,100 °C에서 생산된 재활용 시멘트는 반응성은 거의 없었다. 결론적으로 450 °C의 낮은 소성온도는 OPC의 소성온도 1,450 °C에 비해 에너지 및 CO₂ 배출량이 매우 적기 때문에 OPC와 유사한 강도와 작업성을 가지면서 동시에 CO₂ 배출량과 에너지 비용이 낮은 재활용 시멘트를 생산할 수 있다고 주장하였다. 탄소 배출량 분석 결과, Recycled Cement-450 °C 1톤 생산 시 CO₂ 배출량은 약 0.048톤으로 OPC 평균 배출량 0.78톤에 비해 매우 낮은 수준이며 OPC CO₂ 배출량의 94 %를 줄일 수 있다고 발표하였다. 이 연구에서 발표한 시멘트 사이클의 기본 개념은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다.

이러한 모델시료 기반 연구는 시멘트 페이스트의 성능 저하 없는 재활용이 가능하다는 점에서 매우 혁신적인 연구로 평가되지만, 실험실에서 제조한 시멘트 페이스트만을 대상으로 한 연구이므로 실제 건설폐기물에 적용하기에는 무리가 있다. 결국 폐콘크리트 미분말의 고부가가치 재활용을 위한 Key Point는 골재와의 성분 분리 및 불순물의 완전제거 기술이라고 할 수 있고 이러한 기술이 개발된다면, 전술한 바와 같이 다양한 재활용이 가능할 것이다.

2.2.2 실제 폐콘크리트 대상 연구

Schoon et al.(2015)은 골재와 미분의 다양한 분급·분리 기술을 검토하여 폐콘크리트 미분말을 클링커의 석회석 대체원료로 사용할 수 있다고 보고하였다. ARM(Alternative Raw Material)의 본질적 특성에 미치는 영향은 입자 크기 분포, 화학 조성 및 생성된 양이며, 입자크기가 작을수록 SiO₂ 함량이 감소함에 따라 포틀랜드 클링커 생산을 위한 ARM으로 더 적합하다는 것을 입증하였다.

2018년 중국의 Xiao et al.(2018)은 RP(Recycled Powder)를 시멘트의 혼합재로 활용하기 위한 연구 내용을 발표하였다. 이 연구에서 사용된 RP 제조공정을 Fig. 4에 나타내었다. 폐콘크리트를 조크러셔(1st Crushing)와 임팩트 크러셔(2nd Crushing)로 파쇄한 후 불밀을 사용하여 분쇄, 75 μm 이하의 분말을 45 μm 통과율에 따라 등급화하고 이것을 실험에 사용하였다. 실험요인 및 수준은 W/B 40 % 및 50 %, RP 대체율 15 %, 30 %, 45 %로 하였다. Fig. 5는 압축강도 실험결과를 나타낸 것으로, RP의 높은 입도와 반응성으로 인해 시멘트의 30 %까지를 RP로 대체하더라도 일반 콘크리트와 비교하여 압축강도에 대한 부정적인 영향은 최소화되

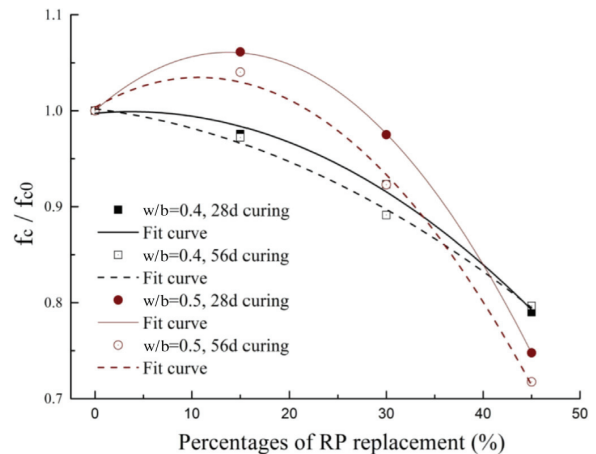


Fig. 5. Relationship between RP replacement ratio and the relative compressive strength normal concrete in study by Xiao et al.

는 반면 휨강도 및 쪼갬 인장강도에는 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이 연구에서 조사한 RP는 일반적으로 소성벽돌을 함유하고 있는 C&D 폐기물을 이용하여 생산된 것이다. 다수의 문헌에서 향후 소성점토가 시멘트 혼합재로 활용될 가능성이 매우 높다고 보고하고 있어 소성점토 기반의 건설폐기물 재활용 기술의 기초연구로서 의미가 있다. 현재 Xiao 연구팀은 지역에 따라 C&D 폐기물 조성이 다르기 때문에 RP의 반응성과 RP를 사용한 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 추가 연구를 진행 중이다.

한편, Prošek et al.(2020)은 anhydrous clinker가 오래된 폐콘크리트에 존재하며 분쇄에 의해 회수될 수 있음을 현미경 관찰, XRF 및 열량계 측정에 의해 밝혀냈다. 이 연구에 사용된 재료의 정보는 재령 50년의 Railway sleeper, 재령 4년의 Drainage channel, 그리고 1911년에 지어진 Walter Motors 공장의 콘크리트 부재로부터 회수한 미분말을 대상으로 하였으며 특히, RC1과 RC2는 처리방법을 달리하여 전처리 방법의 영향을 검토하였다. 각각의 폐콘크리트 미분말을 시멘트 질량의 10~50 % 혼합한 시멘트 페이스트의 28일 강도를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 RC1의 시료의 경우 시멘트의 20 %까지는 Plain 배합과 동등한 강도를 얻을 수 있다. 사용한 지 100년 이상 된 콘크리트라 할지라도 파/분쇄 및 전처리 방법에 따라 시멘트계 재료로 재사용할 수 있다는 점에 주목할 필요가 있으며 콘크리트의 “재사용 수명 주기”에 대해서도 더 자세히 조사할 필요가 있을 것이다.

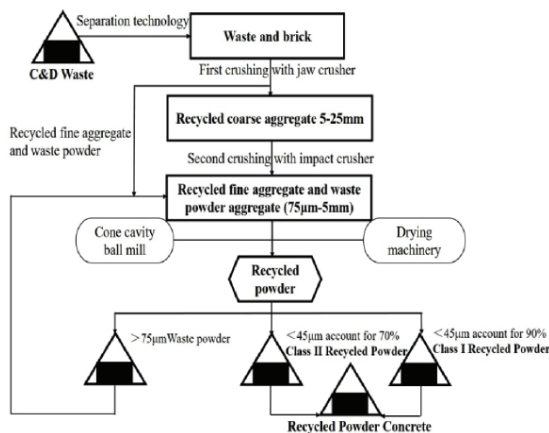


Fig. 4. Preparation method of RP from C&D waste in study by Xiao et al.

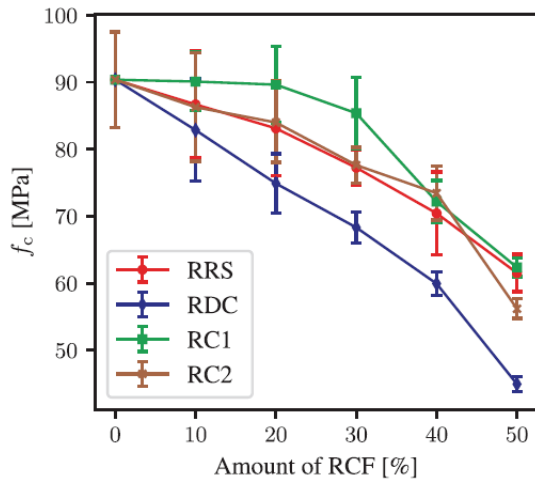


Fig. 6. Tst results of compressive strength in study by Z. Prošek et al.

Delft University of Technology 등 14개 기관이 협력하여 수행한 국제 프로젝트인 C2CA Project(Cement and Clean Aggregates from CDW) 연구단은 칼슘이 풍부한 시멘트 페이스트의 회수를 위해 HAS(Heating-Air classification System) 기술을 제안하였다. 이 기술을 요약하면 Fig. 7에 나타난 것과 같이 고칼슘 폐콘크리트 미분말은 시멘트 킬른에 투입하여 새로운 결합재로 전환되고 고품질 순환골재와 혼합되어 새로운 콘크리트가 된다는 건설폐기물 순환 리사이클 시스템을 주장하였다.

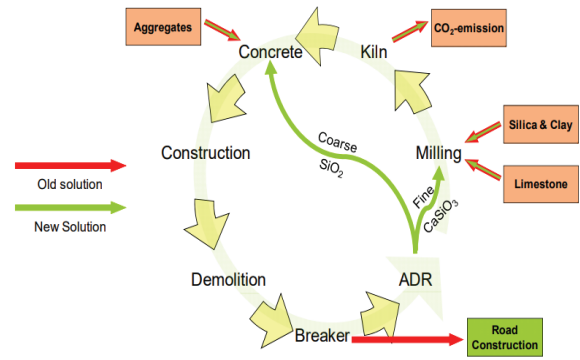


Fig. 7. The abstract of C2CA project

3. 폐콘크리트 미분말 표준화 및 상용화 동향

유럽은 시멘트 산업의 탄소중립을 위해 지금까지 매우 적극적인 행보를 보였으며, 클링커의 사용량을 저감시키고자 다양한 혼합시멘트의 표준화 및 상용화를 추진해 왔다. EN 197-1을 통해 무려 9가지 무기 혼합재를 사용할 수 있는 환경을 구축했음에도 불구하고 새로운 혼합시멘트에 대한 표준화를 시도하고 있다. 그 노력의 일환으로 2022년 6월 「EN 197-6: Cement with recycled building materials」 표준의 초안이 발표되었다. 유럽에서 새롭게 제정하려고 하는 EN 197-6은 Table 3과 같이 폐콘크리트 미분말을 시멘트에 최대 20%까지 사용할 수 있는 시멘트에 대한 표준이

Table 3. Draft of EN 197-6: Cement with recycled building materials

Main types	Notation of the products (types of cement)		Composition (percentage by mass) ^a										Minor additional constituents	
			Main constituents											
			Clinker	Recycled concrete fines	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Lime-stone		
							nat-ural	natural calcined	silic-eous	calcar-eous		L ^c		LL ^c
Type name	Type notation	K	F	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c		
CEM II	Portland-recycled-fines cement	CEM II/A-F	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-composite cement ^d	CEM II/A-M	80-88	6-14	<----- 6-14 ----->								0-5	
		CEM II/B-M	65-79	6-20	<----- 6-29 ----->								0-5	
		CEM II/C-M	50-64	6-20	<----- 16-44 ----->								0-5	

a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.
 b In case of the use of silica fume, the proportion of silica fume is limited to 6-10 % by mass.
 c In case of the use of limestone, the proportion of the sum of limestone and recycled concrete fines (sum of L, LL and F) is limited to 6-20 % by mass.
 d The number of main constituents other than clinker is limited to two and these main constituents shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 6).

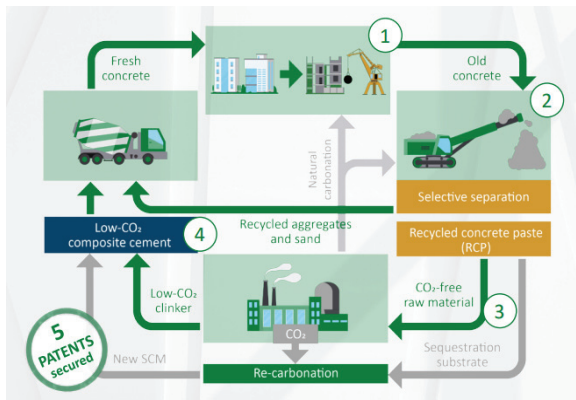


Fig. 8. Loop of materials and CO₂ in concrete lifecycle by B Cement Co., Ltd.

다. 2024년 제정을 목표로 하고 있는 이 시멘트 표준이 제정된다면 유럽 내에서 페콘크리트 미분말의 고부가가치 리사이클은 매우 활발하게 진행될 것으로 보여진다.

해외 메이저 시멘트 회사인 A사에서는 OPC와 비교하여 성능 저하 없는 저탄소 시멘트를 2021년에 이미 15개국에 출시하였고, 2022년에는 30개국에 출시할 예정이다. 이 새로운 개념의 시멘트는 소성점토와 건설폐기물을 클링커 원료로 20% 사용하여 클링커 생산 공정에서의 탄소배출량을 30%까지 줄일 수 있다고 홍보하고 있다.

한편, B 시멘트사에서 2022년 5월 Capital Markets Day에서 콘크리트 생애주기를 고려한 재료와 CO₂의 순환 시스템(Fig. 8)을 자사의 장기전략으로 발표하면서 향후 시멘트-콘크리트 산업의 변화를 예고하였다. 이 자료에 의하면, ①기존 건축물이 해체되면 ②굵은골재, 잔골재, 시멘트 페이스트 부분을 선별 분리한다. 굵은골재와 잔골재는 레미콘사로 보내져 콘크리트 제조에 재활용되며, 시멘트 페이스트는 ③탄소 배출 없는 탈탄산염 원료로서 시멘트 제조에 투입되어 Low-CO₂ Clinker로 재사용하거나 재탄산화를 거쳐 새로운 SCM으로 활용할 수 있다는 개념이다. Fig. 8의 ③은 시멘트 페이스트, 즉 SiO₂ 성분을 최대한 배제한 페콘크리트 미분말을 클링커의 원료 또는 시멘트 혼합재로 사용하는 전략을 의미하며, 전술한 EN 197-6 표준의 제정과 맞아 떨어진다. 즉, 건설폐기물로부터 발생하는 순환골재와 미분말 모두를 ④저탄소 혼합시멘트로 활용한다는 전략이다. 이는 전술한 해외 연구 동향의 기술적 연장이며 이미 해외 메이저 시멘트사는 이러한 방식의 새로운 고부가가치 리사이클 기술을 상용화 단계까지 끌어올리는 노력을 하고 있어 탄소중립의 측면에서 매우 의미 있고 바람직한 시도라고 평가할 수 있다. 건축물 철거과정에서 발생하는 페콘크리트 미

분말을 새롭게 건설되어질 건축물의 원료로 사용하는 것은 한 분야의 폐기물을 그 분야에서 다시 활용한다는 점에서 매우 의미 있는 기술이다.

4. 페콘크리트 미분말의 고부가가치 재활용을 통한 효과 분석

앞서 소개한 바와 같이 페콘크리트 미분말의 CaO 성분을 최대한 확보하는 방식의 파쇄/마쇄/정밀분급 및 재소성 등의 전처리를 통해 클링커 원료 또는 시멘트 혼합재로 사용한다면, 탄소중립의 관점에서 매우 중요한 시멘트 혼합재 기술이 될 수 있다. 아래에 국내 페콘크리트 미분말의 발생량을 기준으로 탄소배출 감축효과 및 경제적 효과를 분석하여 나타내었다. 재활용에 사용될 페콘크리트 미분말의 양은 국내 연간 페콘크리트 발생량 약 5,000만 톤 중 순환골재 제조 시 추정되는 발생량인 1,000만 톤을 대상으로 하였다. 또한, 국내 중간처리업체 중 건설공정의 비율(약 10%)을 고려하여 100만 톤으로 가정하였다. 이하에 제시하고 있는 탄소배출 저감 효과는 대략적인 추정값을 나타낸 것이다. 또한, 페콘크리트 미분말 전처리에 사용되는 에너지에 의한 탄소배출량은 배제하여 계산하였다.

4.1 클링커 원료로 사용할 경우의 효과

페콘크리트 미분말을 클링커 원료로 연간 100만 톤 사용할 경우의 효과를 Table 4에 나타내었다. 여기에서는 사용되는 페콘크리트 미분말의 CaO 함량, 탄산화 정도 등에 따라 달라질 수 있는 클링커의 품질은 배제하고 “석회석 : 페콘크리트 미분말”의 대체비율을 1:1로 하여 단순 계산하였다. 석회석 원료를 100만 톤 저감함으로써 탈탄산 반응에 의해 배출되는 CO₂를 약 44만 톤 저감할 수 있다. 또한 이에 따른 부가가치로서 경제적 효과는 약 154억 원인 것을 알 수 있다. 탄소 배출권 가격은 Fig. 9와 같이 최근의 등락 추이를 고려하여 3,5만 원으로 가정하였다. 그러나, 향후 탄소 배출권 가격의 급등이 예상되기 때문에 페콘크리트 미분말의 클링커 원료 대체 재활용을 통한 경제적 효과는 Table 4에서 제시한 값을 상회할 것으로 예상할 수 있다. 또한, 현재 페콘크리트 미분말의 처리비용 즉, 매립비용을 5만원/톤, 석회석 원료의 물질비용을 1만원/톤으로 가정하면 약 600억 원의 경제적 이익을 취할 수 있을 것으로 확인되었다.

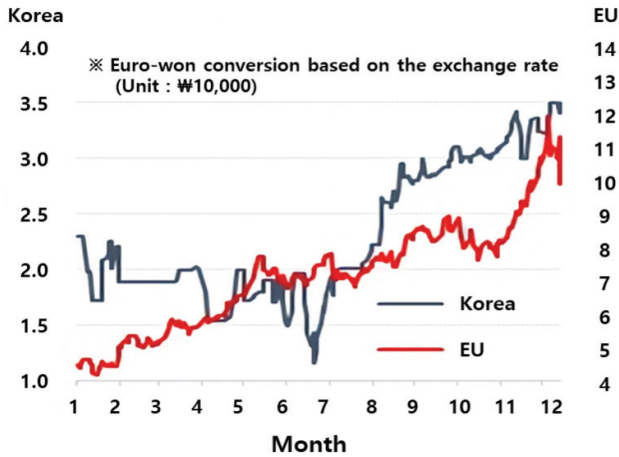


Fig. 9. Carbon Emissions Prices in Korea and Europe in 2021

4.2 시멘트 혼합재로 사용할 경우의 효과

1종보통포틀랜드시멘트의 탄소배출계수는 2002년 구축된 국가 LCI DB에 따르면 0.931 ton-CO₂/ton이다. 최근 국내 시멘트사에서 모니터링하고 있는 클링커의 탄소배출계수는 0.84 수준으로 알려져 있고 1종보통포틀랜드시멘트의 클링커계수가 0.85인 것을 고려한다면, 0.931 ton-CO₂/ton이라는 값은 현실을 전혀 반영하지 못한 값이라고도 볼 수 있다. 하지만 시멘트의 탄소배출계수를 정량적으로 평가할 수 있는 Tool이나 기술은 아직 부족한 실정이라 이미 20년 전에 정해진 이 값을 아직도 많은 연구논문이나 보고서에서 인용하고 있다. 본 연구에서는 클링커의 탄소배출계수인 0.84를 기준으로 탄소배출 감축량 및 경제적 효과를 검토하였다.

Table 4. Effect of using waste concrete powder as clinker raw materials

Category	Value	Statement of calculation
Annual consumption of WCP ¹⁾	1 million tons	50 million tons × 0.2 × 0.1
Reductions of limestone raw material	1 million tons	Equivalent to the annual consumption of WCP
Carbon reductions by limestone reduction	0.44 million tons	1 million tons × (44/100)
Reductions of WCP disposal cost	50 billion won	1 million tons × 50,000won/ton ²⁾
Limestone raw material cost saving	10 billion won	1 million tons × 10,000won/ton ³⁾
Economic effect of carbon reduction	15.4 billion won	0.44 million tons × 35,000won/ton ⁴⁾

1) WCP : Waste Concrete Powder, 2) WCP disposal cost ₩50,000
 3) Limestone raw material cost ₩10,000, 4) Carbon emission price ₩35,000

Table 5는 국내 시멘트 산업 탄소중립 추진전략으로 개발 중인 보통포틀랜드시멘트의 혼합재량을 2030년 15 %까지 확대하였을 경우로 가정된 것이며, 클링커의 생산량 저감을 기준으로 작성한 것이다. 페콘크리트 미분말을 시멘트 혼합재로 사용함으로써 클링커의 생산량을 100만 톤 감축한다면, 84만 톤의 탄소를 감축할 수 있으며, 탄소 배출권을 고려한다면 약 294억 원의 부가가치를 창출하게 된다. 또한, 페콘크리트 미분말의 처리비용과 클링커 생산비용 절감액으로 500억 원 +α 의 경제적 이득을 얻을 수 있을 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 페콘크리트 미분말의 최신 재활용 기술 및 상용화, 표준화 동향에 대한 사례 조사를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 구조물은 내구수명 종료 후 건설폐기물로 발생되며, 이 중 페콘크리트는 약 60 % 이상으로 가장 큰 비율을 차지한다. 국내에서 연간 5,000만 톤 이상 발생하는 페콘크리트를 순환골재로 재활용하는 과정에서의 미분말 발생량은 약 20 %로서 연간 1,000만 톤 수준으로 추산된다.
2. 페콘크리트 미분말의 최신 연구 및 기술 동향 분석 결과, 페콘크리트 미분말은 시멘트가 주성분으로 미수화 CaO와 수화생성물인 Ca(OH)₂, C-S-H (Calcium silicate hydrate) 등으로 구성되어 있어 적절한 전처리 과정을 거친다면 건설분야의 고부가가

Table 5. Effect of using waste concrete powder as cement additives

Category	Value	Statement of calculation
Annual consumption of WCP ¹⁾	1 million tons	50 million tons × 0.2 × 0.1
Reductions of Clinker Production	1 million tons	Equivalent to the annual consumption of WCP
Carbon reductions by clinker reduction	0.84 million tons	1 million tons × 0.84 ²⁾
Reductions of WCP disposal cost	50 billion won	1 million tons × 50,000won/ton ³⁾
Clinker production cost saving	+α	-
Economic effect of carbon reduction	29.4 billion won	0.84 million tons × 35,000won/ton ⁴⁾

1) WCP : Waste Concrete Powder, 2) Carbon emission factor of clinker 0.84.
 3) WCP disposal cost ₩50,000, 4) Carbon emission price ₩35,000

치 재료로의 활용 가능성은 매우 크다. 페콘크리트 미분말을 클링커 원료로 재활용하여 CO₂를 배출하지 않는 탈탄산염 원료로 활용하거나 SCM으로 활용하는 기술의 가능성은 많은 연구자들에 의해 밝혀졌다.

3. 페콘크리트 재활용 분야와 관련된 국내 실정을 고려해보면, 순환골재 생산에 있어 습식 플랜트가 대부분인 국내 건설폐기물 중간처리업체의 설비를 건식공정으로 전환할 필요가 있다. 현재의 습식공정은 비산먼지가 발생하지 않고 생산되는 골재의 세척이 용이하다는 장점이 있지만 필연적으로 발생하는 슬러지 처리에 문제가 있고 이를 활용하기 위해서는 건조 과정이 필수적이다. 따라서 건식공정, 즉 비산 분체를 집진하는 방식의 미분말 회수공정으로 전환해야 페콘크리트 미분말의 재활용이 용이해 질 것이다.
4. 건설폐기물의 고부가가치 재활용 기술이 실용화된다면, 선진 기술 확보 및 환경 리스크와 비용 저감, 시멘트 제조에 사용되는 석회석 자원 절약 및 클링커 생산량 저감을 통해 탄소중립에 직접적으로 기여할 수 있을 것이다.
5. 또한, 해외 메이저 시멘트사에서 추진 중인 건설폐기물 완전 리사이클링 시스템을 국내에서도 구축한다면, 기존의 환경유해 산업이라는 오명을 벗고 친환경 산업의 이미지를 구축할 수 있는 방향으로 갈 수 있을 것으로 생각된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상부의 재원으로 한국산업기술평가관리원-시멘트원료(석회석)대체순환자원기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-00155067).

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20020839).

References

Ahn, J.C., Oh, S.G., Kang, B.H. (2005). Hydraulic properties of the recycled cement made of by-product cementitious powder from concrete waste, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **21(9)**, 121–128 [in Korean].

- Ahn, J.W., Kim, H.S., Cho, J.S., Han, G.C., Han, K.S., Kim, H. (2003). Manufacture of ordinary Portland cement clinker using cement paste of the waste concrete, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **40(8)**, 804–810.
- Caneda-Martínez, L., Monasterio, M., Moreno-Juez, J., Martínez-Ramírez, S., García, R., Frías, M. (2021). Behaviour and properties of eco-cement pastes elaborated with recycled concrete powder from construction and demolition wastes, *Materials*, **14(5)**, 1299.
- Gastaldi, D., Canonico, F., Capelli, L., Buzzi, L., Boccaleri, E., Irico, S. (2015). An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste, *Cement and Concrete Composites*, **61**, 29–35.
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., Wang, Y. (2019). Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production, *Construction and Building Materials*, **211**, 965–973.
- Kim, H.S., Kim, J.M. (2018). The optimum production method for quality improvement of recycled aggregates using sulfuric acid and the abrasion method, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **20**, 754–765.
- Kim, H.S., Kim, J.M. (2016). Quality improvement of recycled aggregates using the acid treatment method and the strength characteristics of the resulting mortar, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **19**, 968–976.
- Kim, H.S., Sun, J.S., Kang, E.G., Han, K.S., Lee, D.H., Kim, J.M. (2006). “A study on the recycled fine aggregate and properties of mortar by the acid treatment”, *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, **6(1)**, 81–84 [in Korean].
- Kim, M.S., Lim, K.T., Yun, H.D., Chung, S.Y. (1997). Mechanical properties of recycled aggregate concrete, *Journal-Architertural Institute of Korea*, **13(9)**, 305–312 [in Korean].
- Kim, Y.S., Byun, J.B., Yun, H.D., Choi, K.S., You, Y.C., Kim, K.H. (2007). “Compression behavior of reinforced recycled coarse aggregates concrete column”, *Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute*, **27(1)**, 203–206 [in Korean].
- Lotfi, S., Eggimann, M., Wagner, E., Mróz, R., Deja, J. (2015). Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, *Construction and Building Materials*, **95**, 243–256.
- Lotfi, S., Rem, P. (2016). Recycling of end of life concrete fines into hardened cement and clean sand, *Journal of Environmental Protection*, **7(6)**, 934–950.

- Loffi, S., Rem, P., Deja, J., Mróz, R. (2017). An experimental study on the relation between input variables and output quality of a new concrete recycling process, *Construction and Building Materials*, **137**, 128–140.
- Oh, S.C., Han, C.G., Kim, M.H. (1986). “The application of non-destructive testing on concrete using waste concrete as the aggregate”, *Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute*, **6(2)**, 543–546 [in Korean].
- Oh, S.G. (2004). An experimental study of the recycled cement used waste cement mortar for improving the material quality, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **20(1)**, 133–140 [in Korean].
- Oh, S.G., Hong, Y.T. (2007). The development of high quality recyclable cement made from waste concrete using micro separating system, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **23(9)**, 167–174.
- Prošek, Z., Trejbal, J., Nežerka, V., Goliáš, V., Faltus, M., Tesárek, P. (2020). Recovery of residual anhydrous clinker in finely ground recycled concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, **155**, 104640.
- Schoon, J., De Buysser, K., Van Driessche, I., De Belie, N. (2015). Fines extracted from recycled concrete as alternative raw material for Portland cement clinker production, *Cement and Concrete Composites*, **58**, 70–80.
- Song, H., Shin, H.U., Lee, J.K., Chu, Y.S., Park, D.C. (2014). Image and phase analysis of low carbon type recycled cement using waste concrete powder, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **2(4)**, 314–320 [in Korean].
- Song, H.Y. (1989). An experimental study on the use of waste concrete as coarse aggregate for concrete, *Journal of Taejeon National University of Technology*, **6(2)**, 73–89 [in Korean].
- Wang, J., Mu, M., Liu, Y. (2018). Recycled cement, *Construction and Building Materials*, **190**, 1124–1132.
- Xiao, J., Ma, Z., Sui, T., Akbarnezhad, A., Duan, Z. (2018). Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste, *Journal of Cleaner Production*, **188**, 720–731.
- Zhutovsky, S., Shishkin, A. (2021). Recycling of hydrated Portland cement paste into new clinker, *Construction and Building Materials*, **280**, 122510.

시멘트 산업 탄소중립을 위한 폐콘크리트 미분말의 재활용 기술 동향

폐콘크리트의 재활용에 대한 연구는 주로 고품질 순환골재 생산에 포커스를 맞춰 연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 순환골재 국가표준을 제정하는 등 적극적으로 사용할 수 있는 환경이 조성되었다. 하지만 폐콘크리트 미분말의 경우, 그 활용에 대한 연구가 국내에서 많이 수행되었음에도 불구하고 상용화로 이어지는 획기적인 기술은 아직 발표되지 않은 실정이다. 최근 해외 주요 선진국에서는 폐콘크리트 미분말을 클링커나 시멘트의 원료로 사용하는 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서는 시멘트-콘크리트 산업의 탄소중립을 위한 폐콘크리트 미분말의 고부가가치 재활용 기술 및 상용화 동향에 대한 사례조사를 실시하였다. 폐콘크리트 미분말의 고부가가치 리사이클을 위해서는 골재와 시멘트 페이스트의 완벽한 성분 분리가 필수적이며, 해외 주요국에서는 연구 개발 단계를 넘어 클링커의 원료 또는 시멘트의 혼합재로 사용하는 것에 대한 상용화 및 표준화가 진행 중이다. 따라서, 국내에서도 탄소중립의 관점에서 폐콘크리트의 재활용을 위한 연구 개발 및 표준화에 대한 논의가 시급하게 이루어져야 할 것이다.