



# 폐콘크리트 미분말 활용 친환경 바인더 개발

## Development of Sustainable Binder Utilizing Activated Waste Concrete Powder

표석훈 Sukhoon Pyo  
울산과학기술원  
부교수

### 1. 머리말

건설폐기물은 매년 전 세계에서 발생하는 고형폐기물의 약 절반을 차지한다고 알려져 있으며<sup>1)</sup>, 이 중 약 35%는 매립되고 있는 실정이다<sup>2)</sup>. World Bank 조사에 의하면 2025년 전 세계 발생 폐기물 총량이 약 22억 톤으로 증가할 것으로 예상되며, 그중 약 11억 톤의 건설폐기물이 발생할 것으로 예상된다<sup>3)</sup>. 한국폐기물협회에 의하면 2021년 국내 건설 폐기물 발생량은 8,381만 톤으로 전체 폐기물의 42% 이상을 차지하고 있다. 국내 폐콘크리트 발생량은 건설폐기물 발생량 중 60% 이상을 차지하고 있다<sup>4)</sup>. 또한 최근 사회적으로 쟁점이 되는 1기 신도시 재건축이 추진된다면 약 6천만 톤의 건설폐기물이 발생할 것으로 추정된다<sup>4)</sup>. 이에 따라 폐콘크리트를 매립하지 않고 재활용하여 대체자원으로 활용할 수 있는 기술개발은 매우 중요한 일이다.

폐콘크리트에서 재생골재를 생산하는 것은 폐콘크리트를 재활용하는 효과적인 해결책으로서, 그동안 많은 연구가 진행되어 다양한 기술들이 개발되었다. 현재 국내에는 558곳의 건설폐기물 중간 처리시설이 운영되고 있으며, 폐콘크리트의 재활용률은 99% 이상으로 알려져 있다<sup>4)</sup>. 보통콘크리트의 단위시멘트량을 260 kg/m<sup>3</sup>인 점을 고려한다면 폐콘크리트의 약 10% 내외는 시멘트수화물(폐콘크리트 미분말)이라고 할 수 있겠다. 전 세계에서 발생하는 폐콘크리트 미분말량은 시멘트 생산량의 약 1/5 수준임을 고려한다면 안정적으로 활용할 가능성이 높은 산업부산물이라고 할 수 있다<sup>5)</sup>.

이미 수화반응이 완료된 폐콘크리트 미분말을 활용하는 초기 연구는 주로 잔골재로 활용하는 것이었다. 이는 폐콘크리트 미분말이 반응성이 낮기 때문이다. 하지만 시멘트 산업이 전 세계적으로 이산화탄소 발생의 약 8%를 차지하는 등 환경에 부담을 많이 주는 재료로 인식되면서, 다양한 산업부산물 활용하는 시멘트 대체 연구가 진행되었고, LC3 시멘트 등 다양한 저탄소 콘크리트가 실제 구조물에 널리 적용되고 있다. 시멘트 바인더에서 요구하는 주요 화학조성을 갖춘 폐콘크리트 미분말도 시멘트를 대체할 수 있는 좋은 산업부산물로 인식되기 시작했다. 만일 폐콘크리트 미분말을 재활용하여 시멘트 바인더로 활용할 수 있는 기술이 개발된다면 콘크리트도 플라스틱과 철강과 같이 이론적으로 100% 재활용이 가능한 친환경 건설재료가 될 수 있을 것이다. 이에 따라 국내외 많은 연구 그룹에서 폐콘크리트 미분

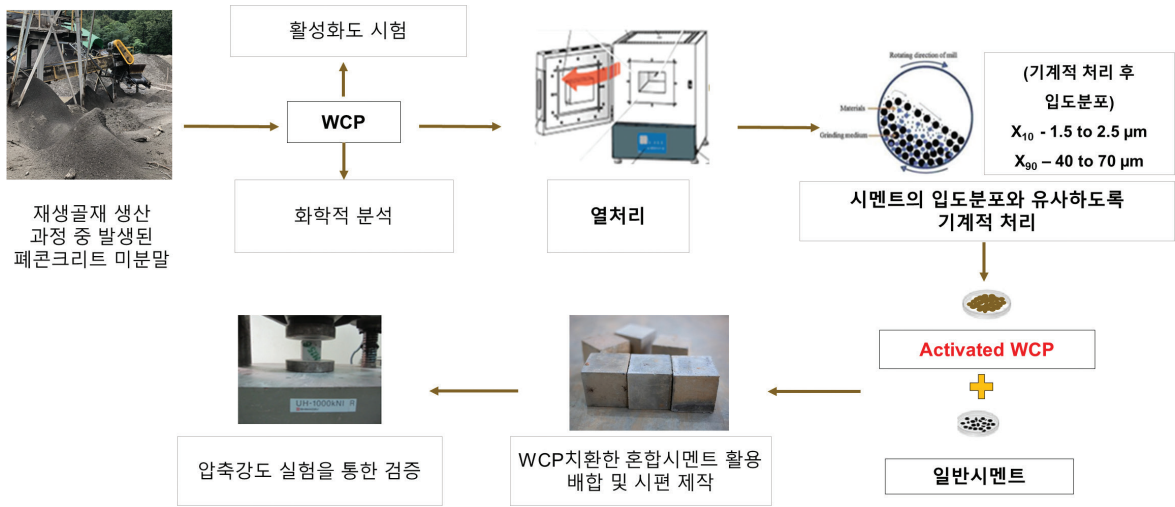


그림 1. 페콘크리트 미분말 활성화 기술 개요<sup>6,7)</sup>

말을 활성화하는 기술을 개발하고 있다. <그림 1>은 본 기술기사에서 소개하는 페콘크리트 미분말 활성화 기술의 개략도를 보여준다<sup>6,7)</sup>.

## 2. 페콘크리트 미분말의 활성화 기술

### 2.1 페콘크리트 미분말의 특징

국내에서 운영 중인 건설폐기물 중간 처리시설의 대부분은 재생골재 생산에 집중하고 있다. 이에 동일 시설에서 페콘크리트뿐만 아니라 페아스콘을 혼합하여 처리하고 있다. <그림 2>와 같이 재생골재 생산시설에서 발생하는 미분들은 페콘크리트 미분말과 함께 다량의 페아스콘 미분말도 함유하고 있다. 반면 많은 나라



그림 2. 수거된 페콘크리트 미분말

들에서는 페콘크리트와 페아스콘을 별도로 처리하고 있다. 수거된 미분말은 최대 입도가 약  $730\mu\text{m}$ 이고, 평균 입도는 약  $470\mu\text{m}$ 이다. 페아스콘 미분말 등의 이물질이 포함되어 있고 이미 수화반응이 종료된 페콘크리트 미분말은 반응성이 거의 없다고 할 수 있다. 이를 활용하여 단순히 시멘트를 치환하게 되면 콘크리트의 강도가 치환율과 선형적으로 감소하는 경향을 보인다<sup>8)</sup>.

### 2.2 활성화 기법

페아스콘과 함께 발생하는 국내 페콘크리트 미분말을 시멘트 대체재료로 활용하기 위해서는 활성화 기술 적용이 필수이다. 본 기사에서 소개하는 기술은 1차 열처리를 이용한 활성화와 2차 밀링을 활용한 기계적 활성화 기법을 적용하였다. <표 1>은 2단계의 활성화 과정 전후의 페콘크리트 미분말의 화학조성을 보여준다.

열처리는  $500^{\circ}\text{C}$ 에서  $700^{\circ}\text{C}$  범위에서 진행되는 데,  $500^{\circ}\text{C}$  이상의 열처리가 필요한 주된 이유는 수산화칼슘(calcium hydroxide)이 분해되어 규산이칼슘(dicalcium silicate)과 산화칼슘(calcium oxide)과 같은 반응성 상(phase)이 형성되기 때문이다. 또한, 페아스콘 등 유기 이물질을 제거하는 목적도 있다.  $700^{\circ}\text{C}$  이하의 열처리가 필요한 주된 이유는  $700^{\circ}\text{C}$  부근에서 탄산칼슘(calcium carbonate)이 분해되기 시작하여 이산화탄소가 발생하기 때문이다. 해당 열처리 온도는

표 1. 활성화 전후 페콘크리트 미분말 XRF 분석 결과

	Weight %					
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Others	LOI
원재료	25.12	29.12	5.56	13.18	9.86	15.1
활성화된 재료	52.13	16.33	12.86	3.57	9.26	5.6

소성온도가 1,450 °C인 시멘트 생산 공정과 비교하면 에너지 사용량이 상당히 낮은 수준이라고 할 수 있다.

페콘크리트 미분말은 실리카 성분이 풍부한 재료(표 1) 참조)로, 입자 크기를 줄이고 비표면적을 늘려 실리카 기반 재료의 반응성을 높일 수 있다. 미분말의 비표면적은 기계적 활성화 과정을 거치지 않으면 반응성이 낮은 규사 모래와 유사하며, 추가적인 기계적 활성화 과정을 통해 표면적을 증가시킬 수 있다. 활성화된 미분말은 최대입도가 약 70 μm이고, 평균입도는 약 8.86 μm로 감소한다. 분쇄를 통해 입자 크기를 줄여 시멘트와 유사한 범위로 만들어졌으며, 이는 실리카 기반 재료의 반응성을 향상하게 만들 수 있다.

활성화 과정 전후의 반응성 비교를 위해 시멘트계 재료의 포졸란반응성을 정량화할 수 있는 Chapelle 시험을 진행하였고, 그 결과 약 26% 향상된 결과를 확인 할 수있다<sup>6)</sup>.

### 2.3 친환경 바인더 활용 결과

활성화 처리된 페콘크리트 미분말의 활용성을 확인하기 위해 시멘트 일부를 치환한 친환경 바인더 및 무시멘트 바인더 배합을 개발하고 시편을 제작하여 압축강도 분석을 진행하였다. 양생 조건은 실험실 환경의 일반 수증양생을 적용하였다.

첫 번째 실험은 물-바인더 비율이 0.35인 시멘트 페이스트를 제작하였고, 활성화 과정을 거치지 않은 페콘크리트 미분말과 활성화된 페콘크리트 미분말을 각각 시멘트 중량 대비 10%에서 40%까지 치환하였다. <그림 3>은 페이스트 시편의 7일과 28일 압축강도를 나타낸다. 활성화되지 않은 페콘크리트 미분말은 그 치환율이 증가함에 따라 거의 선형적으로 압축강도가 저하되는 현상을 확인할 수 있다. 이에 반해 활성화된 페콘크

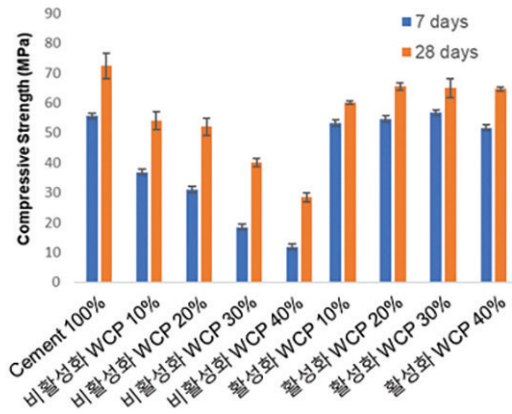


그림 3. 페콘크리트 미분말의 시멘트 치환에 따른 압축강도

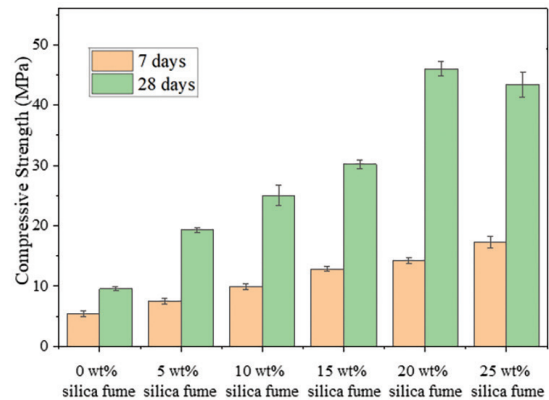


그림 4. 페콘크리트 미분말의 무시멘트 바인더 적용에 따른 압축강도

리트 미분말은 40%까지 시멘트를 치환하여도 강도의 저하가 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

두 번째 실험은 활성화된 페콘크리트 미분말을 화학적 자극을 통해 무시멘트 바인더로 개발하는 것이다. 화학적 자극을 위해 페콘크리트 미분말의 중량 대비 10%의 생석회(calcium oxide), 2%의 포름산칼슘(calcium formate), 그리고 실리카흄을 활용하였다. 물-바인더 비율은 0.35로 고정하였으며, <그림 4>는 실리카흄의 사용량에 따른 무시멘트 바인더의 7일과 28일 압축강도 결과를 나타낸다. 실리카흄을 20% 사용한 경우 약 46MPa의 압축강도를 나타내어 페콘크리트 미분말을 주 바인더로 활용하여 구조용으로 사용할 수 있는 무시멘트 바인더를 개발할 수 있음을 확인하였다. 추가적인 분석을 통해 실리카흄을 20% 사용한 경우 2차 반응 생성물이 생성됨에 따라 내부공극의 크기가 작아지는 현상을 확인할 수 있었다.

### 2.4 환경성 분석


〈표 2〉는 SimaPro 프로그램을 활용하여 분석한 환경영향성 평가 결과 중 배합 별 이산화탄소 발생량을 비교하고 있다. 일반 시멘트 배합 대비 활성화된 페콘크리트 미분말을 20%, 30%, 40% 치환한 바인더는 각각 15.8%, 23.7%, 32.6%의 이산화탄소가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 에너지소비는 각각 9.3%, 14.5%, 19.7% 감소하는 것을 확인하였다. 화학적 자극 방법을 도입하고 실리카흙을 20% 사용한 무시멘트 바인더의 경우 일반 시멘트에 대비하여 69.3%의 이산화탄소가 감소하는 것을 확인하였다.

표 2. 배합별 이산화 탄소 배출량 비교(단위 : kg/ton)<sup>6)</sup>

	cement 100%	활성화 WCP20%	활성화 WCP30%	활성화 WCP40%
CO <sub>2</sub> 배출량	863	726	658	590

### 3. 맺음말

페콘크리트 미분말은 현재 대부분 활용되지 못하고 매립되고 있다. 하지만 그 발생량이 많고, 앞으로도 꾸준히 발생할 것으로 예상되어 유용한 시멘트 대체재료가 될 것으로 예상된다. 본 기술기사에서 소개한 열적/기계적 활성화 기법은 기존 시멘트 생산 공정 대비 경제적 및 환경 측면으로 효과적인 방법이다. 활성화된 페콘크리트 미분말을 시멘트의 최대 40%까지 치환하여 사용하여도 충분한 강도를 발현하는 것을 확인하였다.

활성화된 페콘크리트 미분말에 생석회 등을 이용한 화학적 자극을 추가한다면 무시멘트 바인더로도 활용될 수 있음을 확인하였다. 기초연구를 통해 환경 부담이 큰 재료인 시멘트를 대체할 수 있는 페콘크리트 미분말 활용 기술의 가능성을 확인하였다. 기존 시멘트를 완벽히 대체하기 위해서는 응결 특성을 포함한 시공성, 장기 내구성, 화학적 안정성, 품질변동성을 고려한 배합 설계 기술 및 구조물 적용성 등의 추가 연구와 실용화 연구가 필요하다. 

담당 편집위원 : 남일우(한동대학교) namiru@handong.edu

### 참고문헌

1. Ghosh, S. K., Haldar, H. S. Chatterjee, S., and Ghosh, P. (2016) An optimization model on construction and demolition waste quantification from building. *Procedia Environmental Sciences* 35, 279–288.
2. Menegaki, M., and Damigos, D. (2018) A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 13, 8–15.
3. Jain, M. S. (2021) A mini review on generation, handling, and initiatives to tackle construction and demolition waste in India. *Environmental Technology and Innovation* 22, 101490.
4. 최경호 (2022) 1기 신도시 정비사업과 건설폐기물 문제, 국회의원 심상정. 1–52.
5. Snellings, R. Suraneni, P., and Skibsted, J. (2023) *Future and emerging supplementary cementitious materials*. *Cement and concrete research* 171, 107199.
6. Vashistha, P. Oinam, Y. Kim, H. K., and Pyo, S. (2023) *Effect of thermo-mechanical activation of waste concrete powder (WCP) on the characteristics of cement mixtures*. *Construction and Building Materials* 362, 129713.
7. 표석훈, and Vashistha, P. (2023) *페콘크리트 활성화 방법, 이에 의해 제조된 시멘트 대체재, 페콘크리트를 활용한 시멘트 조성물 제조 방법, 및 이에 의해 제조된 페콘크리트를 활용한 시멘트 조성물*. 등록번호: 10-2529885, PCT 출원번호: PCT/KR2023/095053.



**표석훈 교수**는 미국 미시간 대학교 (University of Michigan, Ann Arbor) 건설환경공학과에서 동적하중을 받는 초고성능 콘크리트의 특성에 관한 연구로 박사학위를 취득하고, 한국철도기술연구원에서 선임연구원으로 근무하였고, 2019년부터 울산과학기술원 지구환경도시 건설공학과 교수로 재직 중이다. 주로 친환경 초고성능 콘크리트, 소음 저감형 고강도 콘크리트 관련 연구를 수행하고 있다.  
shpyo@unist.ac.kr