

## 순환사회 구축을 위한 시멘트 클링커 골재를 활용한 기초적 연구

이원준<sup>1\*</sup> · 이승현<sup>1</sup> · 유동우<sup>1</sup> · 박병선<sup>2</sup> · 김원기<sup>3</sup>

<<sup>1</sup>군산대학교, <sup>2</sup>한국건설생활환경시험연구원, <sup>3</sup>아세아시멘트>

### 1. 서 론

최근 시멘트·콘크리트 산업은 전통적인 사회 기초 산업에서 스마트 산업으로의 변화가 일어나고 있으며, 그 중 자기치유(Self healing)는 구조물의 매트릭스에서 발생하는 미세한 균열이 모르타르 및 콘크리트가 외부로부터 행해지는 보수 및 보강 방법이 아니라 그 자체적으로 균열을 sealing 하는 것을 의미하는 것으로서 여러 방면에서 연구가 이루어지고 있다. 모르타르·콘크리트에서의 자기치유 방법으로 박테리어나 캡슐 등을 이용하는 Autonomous healing과 자연적인 시멘트 수화반응을 이용하는 Autogenous healing 등이 있다.<sup>1)</sup>

반면, 모르타르 및 콘크리트의 매트릭스에서 발생하는 미세한 균열이나 0.2 mm 이상의 구조물의 내구성에 영향을 미치는 균열은 주로 골재와 골재 사이의 계면 및 골재와 페이스트 주위의 천이대 부근에서 발생되고 있는 것으로 조사되고 있다.<sup>2)</sup>

콘크리트의 구성하고 있는 재료 중 가장 많은 비중을 차지하는 재료는 골재이다. Fig. 1에 표시한 바와 같이 70% 이상을 골재가 차지하고 있다. 반면, 골재시장은 환경 보호, 천연자원의 고갈 등 상당히 어려운 상황이다. 2012년 한국건설생활환경시험연구원에서 전국의 레미콘 공장을 대상으로 설문 조사를 실시한 결과 중 일부는

Fig. 2에 표시하였다. 이 조사에 따르면 잔골재의 경우 부순모래를 가장 많이 사용하고 있으나, 골재 품질의 저하 특히 입도 및 입형의 문제로 인하여 단독으로 사용하는 경우는 드물며, 다른 모래와 혼합하여 사용하고 있는 실정이다.<sup>3)</sup>

이에 본 연구에서는 콘크리트의 인텔리화·스마트화의 일환으로 시멘트 클링커의 골재로서의 적용 가능성에 대한 제안을 하고자 한다. 일반적으로 모르타르 및 콘크리트의 특정한 성능을 부여하기 위한 방법으로는 Binder로 사용되는 분체의 성능 부여 또는 개선에 주안점을 두고 진행되고 있으나, 모르타르 및 콘크리트의 가장 많은 비중을 차지하고 있는 골재에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. 골재 중 일부에 조절 가능한 반응성을 부여한 반응성 골재를 사용한다면 모르타르 및 콘크리트 매트릭스에서 발생하는 균열의 저감 및 균열 발생시 자기치유 성능 향상에 효과가 있을 것으로 판단된다.<sup>4)</sup>

또한 순환사회의 구축의 측면에서 살펴보면, 시멘트 산업에서는 다량, 다종의 폐기물을 시멘트 클링커 제조시 원료 및 연료로 사용하는 등 자원순환사회의 구축에 기여하고 있다. 이러한 폐기물 중 일부는 다른 산업에서는 처리할 수 없는 여러 가지가 포함되어 있으며, 시멘트 산업에서 사용량이 감소하면 이러한 폐기물은 매립 처리될 수밖에 없는 현실이다. 또한, 우리 나라의 고도 성장 시기인 1970년대부터 1990년대에 만들어진 건축물, 구조물의 경우 내구연한의 도래에 따른 건설폐기물의 양은 상당히 늘어나고 있는 추세이며, 이에 따른 대책이 필요

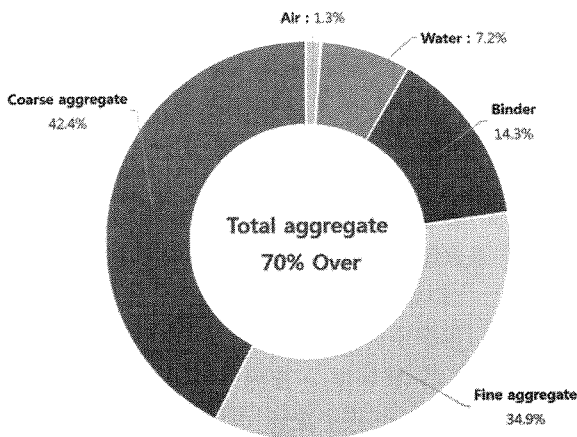


Fig. 1 콘크리트의 구성(배합 설계 기준24-150)

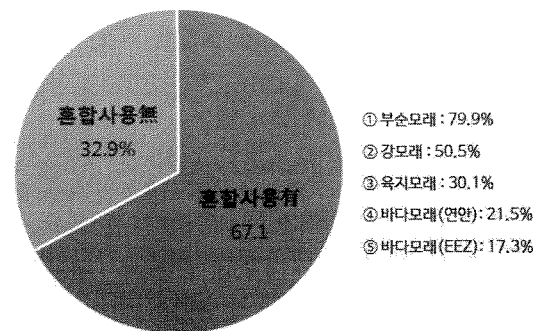


Fig. 2 콘크리트용 잔골재의 사용 현황

Table 1. 원재료

구분	밀도
OPC	Density : 3.15g/cm <sup>3</sup> (S사 1종 보통 포틀랜드 시멘트 시판품)
일반 잔골재(부순모래)	Density in dry condition : 2.63g/cm <sup>3</sup> (H사)
시멘트 클링커	Density in dry condition : 3.16g/cm <sup>3</sup> (A사 1종 보통 포틀랜드 시멘트 제조용)

Table 2. OPC 및 클링커의 화학조성과 광물조성 (wt%)

구분	Chemical composition								Mineral composition			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
OPC	20.7	5.8	3.4	64.2	2.6	0.5	1.2	0.2	69.4	15.4	5.6	8.9
Clinker	20.4	6.0	3.5	63.9	3.0	0.8	1.2	0.3	64.2	16.2	3.4	12.1

Table 3 실험 계획

Factor	Level		비고
Mortar Mixture	Binder	OPC	-
	W/C(%)	65	-
	Fine aggregate	Crushed sand	Plain
		Clinker sand	Before Aging / After Aging
Experiment	Mortar flow	Initial / 60min	-
	Compressive strength	3, 7, 14, 28, 56, 91days	-
	Analysis	SEM, MIP, XRD	-

하다. 이에 정부에서는 순환골재 등을 의무적으로 사용하도록 고시하고 있는 실정이나, 순환골재의 품질 등의 문제로 건축물에는 적용이 거의 안되고 있는 실정이다.<sup>6)</sup> 콘크리트용 골재로서 시멘트 클링커를 적용한다면 건축물이나 토목구조물 해체시 발생하는 건설폐기물의 순환자원화의 일환으로 시멘트 클링커 제조시 원료로서 사용 가능하며, 이렇게 생산된 클링커는 원료로 석회석을 전혀 사용하지 않는 제로 석회석 시멘트 클링커를 생산 가능할 것으로 사료된다. 시멘트 클링커의 순환자원화 구축의 일환으로서 향후 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 반응성 골재로서 시멘트 클링커를 잔골재로 사용한 모르타르의 기초적 특성에 대해 검토하였다. 시멘트 클링커 잔골재 사용에 따른 모르타르의 치밀화를 평가하기 위해 재령별 압축강도를 측정하였으며, 또한 조직의 치밀도를 알아보기 위해 FE-SEM 관찰을 통해 분석하였으며, 최종적으로는 제어 가능한 반응성 골재로서 시멘트 클링커의 이용 가능성에 대하여 검토하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 재료

시멘트 클링커 잔골재가 모르타르의 물성에 미치는 영향에 대하여 평가하고자 Binder로서 OPC를 사용하였으며, 비교군으로는 일반 잔골재(부순모래)를 사용하였다.

각 재료의 특성 및 화학조성을 Table 1, 2에 나타내었다.

### 2.2 실험 계획

Table 3에 실험계획에 대하여 나타내었다. 모르타르 제조에 있어서, Binder로서는 OPC를 사용하였다. 물 시멘트비는 65%로 고정하여 모르타르를 제조하였으며, 시멘트 클링커 잔골재와 비교군으로 일반 잔골재인 부순모래를 설정하여 실험을 진행하였다. 시멘트 클링커 잔골재의 경우, 전처리 전과 후를 비교 평가하였다. 평가항목으로는 모르타르 플로우를 초기 및 경시 변화 60분 후를 측정하여 유동 특성에 대하여 검토하였다. 재령별 압축강도 측정을 통해 시멘트 클링커 잔골재 적용시 모르타르 조직의 변화를 관찰하였으며, 분석방법으로는 SEM, MIP, XRD 등의 기기를 이용하였다.

모르타르 배합은 Table 4에 나타난 바와 같이 물시멘트비는 65%로 고정하였으며, 시멘트 모래 비는 1 : 3으로 모르타르를 제조하였다.

### 2.3 시멘트 클링커 잔골재의 제조

시멘트 클링커를 잔골재로 적용하기 위하여 [KS F 2527 콘크리트용 골재]의 입도를 만족시킬 수 있도록 Fig. 3과 같이 분쇄 및 분급을 실시하였다. 분쇄 및 분급된 시멘트 클링커를 조립율 2.5 정도가 되도록 혼합하여 시멘트 클링커 잔골재를 제조하였다. 일반 잔골재(부순모래) 또한 분급한 후 조립율 2.5에 맞춰 혼합하여 시멘트 클링커 잔골재와 비교 평가하였다.

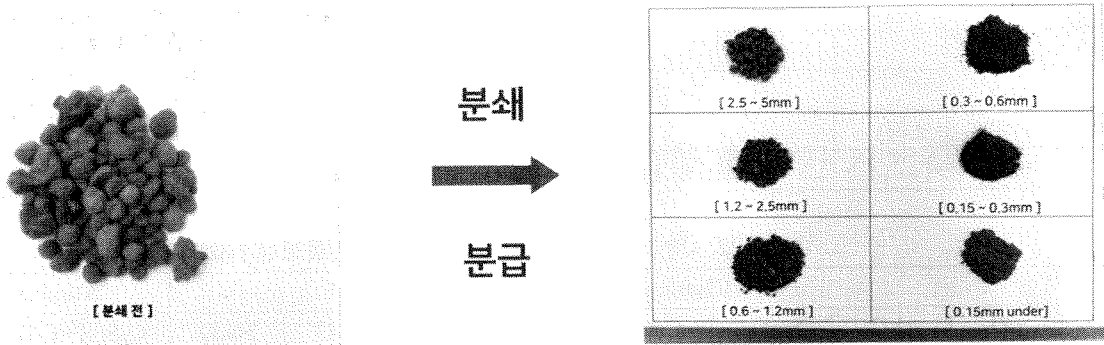


Fig. 3 시멘트 클링커 잔골재의 제조 방법

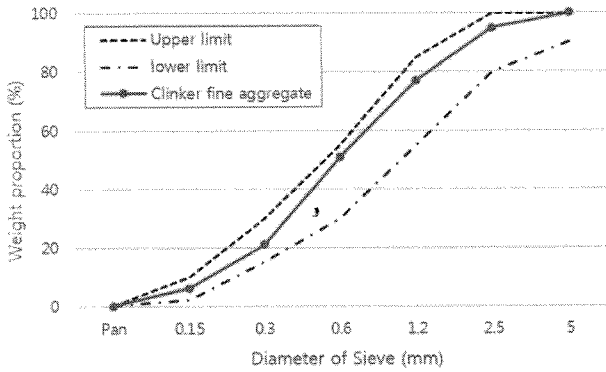


Fig. 4 시멘트 클링커 잔골재 및 일반 잔골재의 입도분포

#### 2.4 시멘트 클링커 잔골재의 기본물성 평가

[KS F 2527 콘크리트용 골재] 중 부순골재(잔골재)의 물리적 성질 기준 및 본 연구에서 사용된 부순모래와 클링커 잔골재의 기본 물성 평가 결과를 Table 5에 표시하였다. 우선 기준으로 절대건조 밀도의 경우  $2.5 \text{ g/cm}^3$  이상, 흡수율 3.0% 이하, 안정성 10% 이하, 입형판정실적율의 경우는 53% 이상으로 규정되어 있다. 본 연구에서 사용된 부순모래의 경우는 절대건조 밀도  $2.63 \text{ g/cm}^3$ , 흡수율 1.2%, 입형판정실적율 54%로 나타났다. 반면, 클링커 잔골재의 경우 절대건조 밀도  $3.16 \text{ g/cm}^3$ , 흡수율 6.7%로 측정되어 KS F 2527의 규격의 품질 기준에는 만족

하지 못한 결과를 얻었다. 절대건조 밀도 및 흡수율 측정 방법은 KS F 2504에 준하여 실시하게 규정되어 있다. 이 방법에 따르면 골재를 24시간 수중 침지한 후 이후의 실험을 진행하도록 규정되어 있다. 이러한 방법을 이용할 경우, 클링커 잔골재는 수화반응이 진행되어 정확한 절대건조 밀도 값을 측정하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 MIP 및 KS L 5110의 실험 방법에서 얻어진  $3.16 \text{ g/cm}^3$ 의 절대건조 밀도 측정값을 이용하여 배합에 적용하였다. 또한 흡수율의 경우, 클링커 잔골재는 물과 접촉시 수화반응이 진행되기 때문에 클링커의 태생적 한계인 것으로 판단되나, 향후 지속적인 연구를 통해서 개선시킬 필요가 있다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 Clinker sand 적용 모르타르의 특성

시멘트 클링커 잔골재를 이용한 모르타르의 Flow 및 재령 14일 까지의 압축강도 측정 결과를 Fig. 5 및 Fig. 6에 표시하였다. 모르타르 Flow의 경우, 부순모래와 비교시 약 68% 수준으로 나타나 유동성 저하가 상당한 것으로 나타났다. 반면, 60분 경시 후 모르타르 Flow는 부순모래가 약 95%, 시멘트 클링커 잔골재가 약 94% 수준으로 나타나 60분 경시변화율은 부순모래와 유사한 수준인 것으로 판단된다. 재령별 압축강도의 경우 재령 3

Table 4 실험 배합비

구분	W/C (%)	S/C	Unit content(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	Crushed sand	Clinker sand
Crushed sand	65	3	339	521	1,305	-
Clinker sand			339	521	-	1,568

Table 5 시멘트 클링커 잔골재의 기본 물성 평가

	절대건조밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	흡수율 (%)	안정성 (%)	입형판정실적율 (%)
기준	2.5 이상	3.0 이하	10 이하	53 이상
Crushed sand	2.63	1.2	-	54
Clinker sand	3.16	6.7	-	58

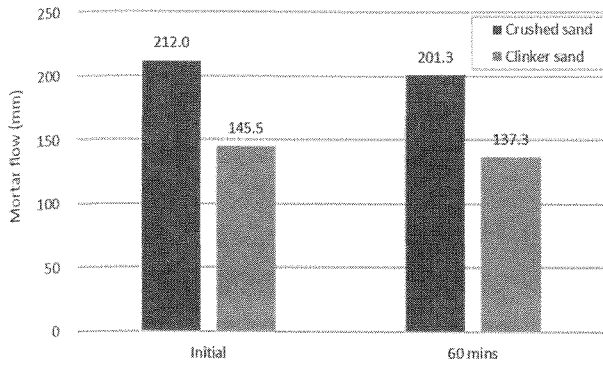


Fig. 5 Clinker sand 적용 모르타르 Flow

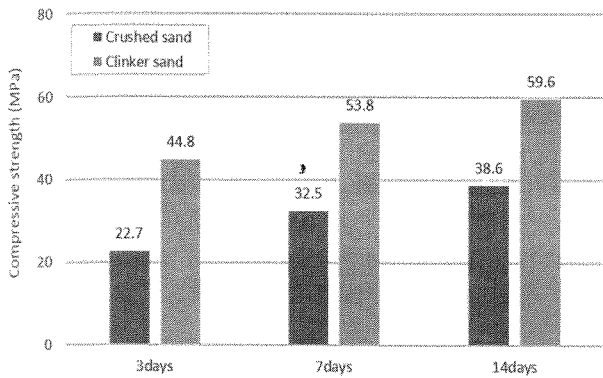


Fig. 6 Clinker sand 적용 모르타르의 재령별 압축강도

일에서 부순모래 대비 약 197%, 재령 7일에서 약 165%, 재령 14일에서는 약 154% 수준으로 압축강도가 높게 나타났다. 이러한 압축강도 결과에 기인하여 시멘트 클링커 잔골재를 적용한 모르타르는 내구성 측면에서 일반 잔골재 적용 모르타르 보다 모르타르 조직의 치밀화가 일어났을 것으로 판단되며, 우수한 성능을 발현할 것으로 판단된다. 반면, 시멘트 클링커를 잔골재로서 적용할 경우의 유동성 측면에서는 상당한 개선이 필요할 것으로 사료된다.

### 3.2 Clinker sand의 전처리

시멘트 클링커를 골재로 적용할 경우 야기될 수 있는 문제점으로 일본의 Miyamoto 등은 수축율의 증가 및 유동성의 저하 등을 지적하고 있다. 이에 대한 해결책으로는 시멘트 클링커의 전처리(Aging)이 필요하다고 언급하고 있다.<sup>5)</sup> 이에 본 연구에서는 시멘트 클링커를 잔골재로 모르타르에 적용한 결과 유동성의 악화를 확인하였으며, 이에 대한 해결책으로 시멘트 클링커에 대하여 전처리를 실시하였다.

전처리 방안으로는 물을 이용한 수중침지법과 NaOH 용액을 이용한 용액침지법을 선택하였다.

첫번째로 수중 침지법은 시멘트 클링커 잔골재를 물속에 침지시켜, 초기 유동성에 영향을 미치는  $C_3A$ 를 제어하는 것이다.  $C_3A$ 는 시멘트 구성광물 중 가장 급속한 수

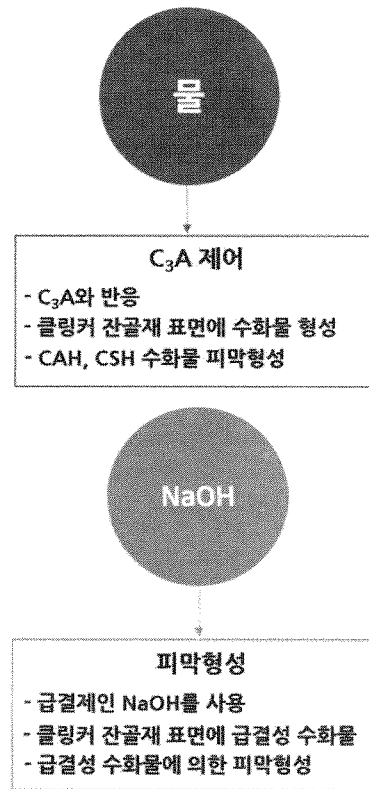


Fig. 7 시멘트 클링커 골재의 전처리 방안 Concept

화반응을 일으킨다. 이에 본 연구에서는 시멘트 클링커 잔골재의 유동성 확보 측면에서 시멘트 클링커 잔골재 중의  $C_3A$ 를 제어하기 위하여 수중 침지를 실시하였다. 수중 침지를 실시할 경우, 시멘트 클링커 잔골재 표면은 CAH, CSH 등의 수화물 피막이 형성되고 형성된 피막이 시멘트 클링커 잔골재의 수화를 지연시켜 유동성 확보에 유리할 것으로 판단된다. Fig. 8에 수중침지 시간에 따른 시멘트 클링커 잔골재 표면의 수화물 피막형성 과정에 대한 SEM Image를 표시하였다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 수중 침지 30초 후부터 시멘트 클링커 잔골재 표면에 Dot 형태의 수화물이 생성되기 시작한 후 시간의 경과에 따라 시멘트 클링커 잔골재 표면에 수화물 피막이 형성되어 수중침지 60분 경과후에는 시멘트 클링커 잔골재의 모든 표면에 수화물 피막이 형성된 것을 확인하였다. Fig. 9에 수중침지 60분 경과후의 시멘트 클링커 잔골재 표면에 형성된 수화물 피막의 두께를 관찰한 결과를 표시하였다. 수중 침지에 의한 수화물 피막의 두께는 약  $1.17\mu m$  정도인 것으로 나타났다.

두번째로 NaOH 용액 침지법은 시멘트계 재료의 급결제로 널리 사용되고 있는 NaOH를 이용하는 것으로서, 시멘트 클링커 잔골재를 NaOH 용액에 침지할 경우, 표면에 급결성 피막이 형성되고, 형성된 피막으로 인하여 시멘트 클링커 잔골재의 유동성을 확보하고자 하였다. Fig. 10에 NaOH 용액침지 시간에 따른 시멘트 클링커 잔골재 표면의 변화를 관찰한 결과를 표시하였다.

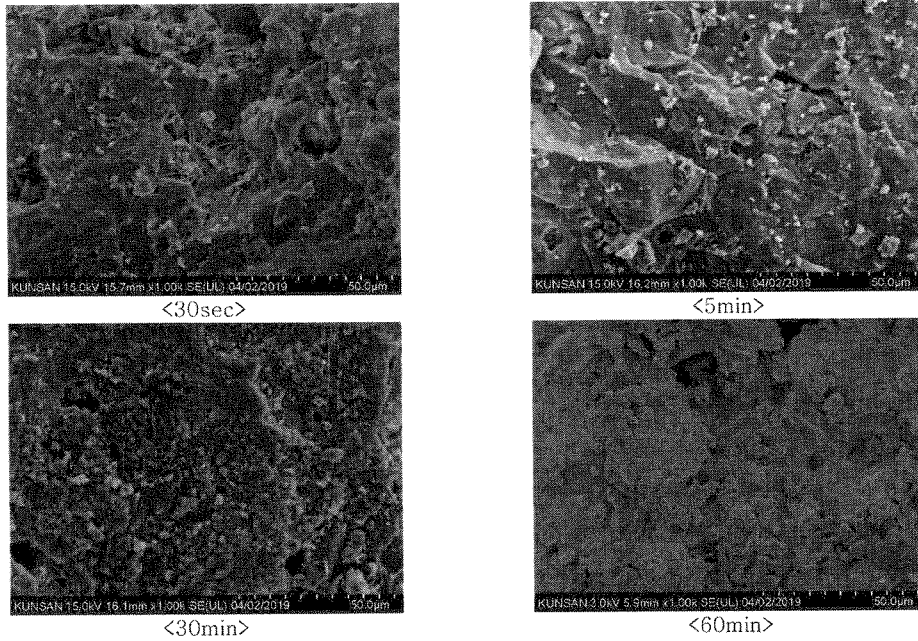


Fig. 8 수중 침지 시간에 따른 시멘트 클링커 잔골재 표면의 변화

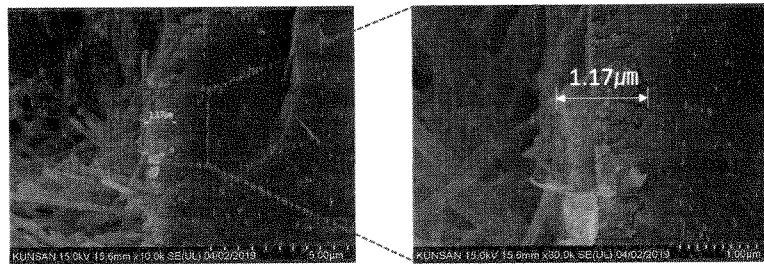


Fig. 9 수중 침지에 따른 시멘트 클링커 잔골재 표면 수화물 피막 형성 (침지 60분)

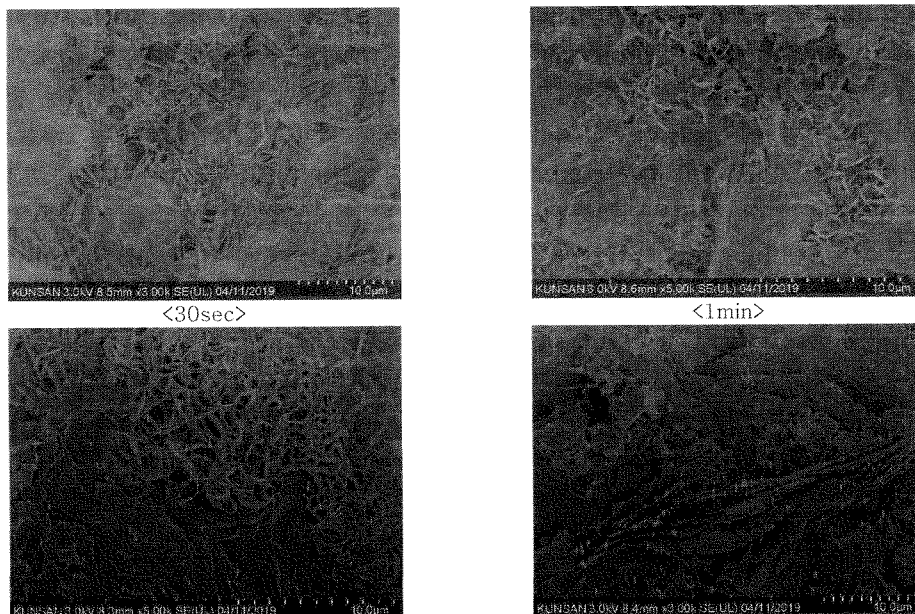


Fig. 10 NaOH 용액 침지 시간에 따른 시멘트 클링커 잔골재 표면의 변화

NaOH 용액은 3% Solution를 이용하였으며, 침지 후 30초 경과 후부터 시멘트 클링커 잔골재 표면에 수화물이 급격하게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로

시멘트 클링커 잔골재 표면에 수화물 피막이 완전하게 형성되는 것은 20분 침지인 것으로 판단된다. 또한 NaOH 용액 침지 20분 후의 시멘트 클링커 잔골재 표면



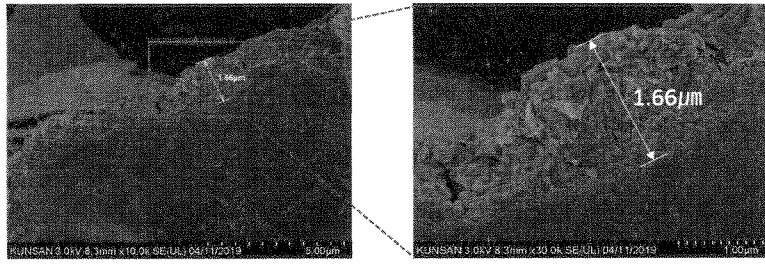


Fig. 11 NaOH 용액 침지에 따른 시멘트 클링커 잔골재 표면 수화물 피막 형성 (침지 20분)

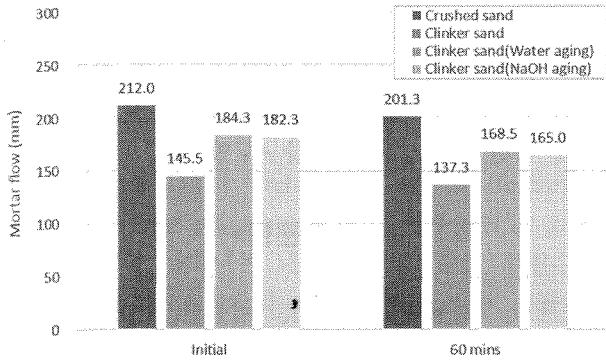


Fig. 12 전처리한 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르의 Flow

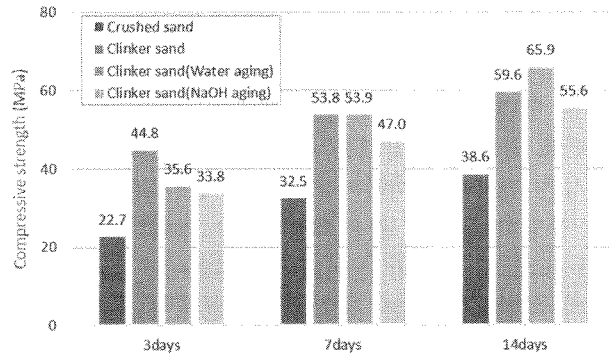
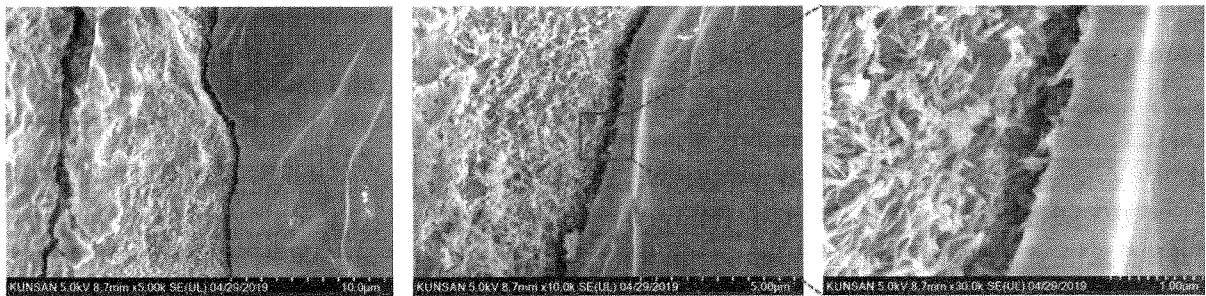
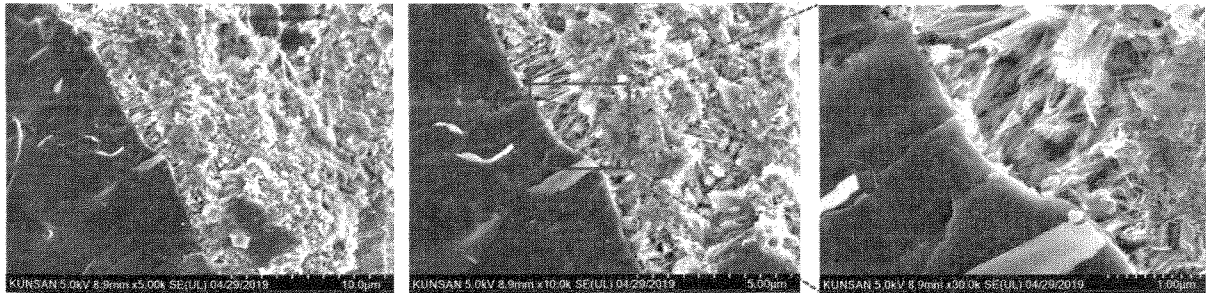


Fig. 13 전처리한 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르의 강도 발현 특성



< 일반 부순모래 적용 모르타르의 천이대 (재령 7일) >



< 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르의 천이대 (재령 7일) >

Fig. 14 천이대의 관찰 SEM Image

에 형성된 수화물의 두께는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 약 1.66  $\mu\text{m}$ 인 것을 확인할 수 있었다. 시멘트 클링커 잔골재 표면에 수화물 형성 피막 두께에 있어서, 수중 침지보다는 NaOH 용액 침지가 다소 두껍게 형성되는 것으로 판단된다.

### 3.3 전처리한 Clinker sand 적용 모르타르의 특성

수중 침지 및 NaOH 용액 침지 등의 전처리를 실시한

시멘트 클링커 잔골재를 사용한 모르타르의 Flow 및 압축강도 측정 결과를 Fig. 12, 13에 표시하였다. 모르타르 Flow의 경우, 전처리를 실시한 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르가 약 120% 개선된 것을 확인할 수 있었다. 수중침지 및 NaOH 용액 침지 등 전처리 방법에 의한 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 반면, 부순모래와 비교시에는 전처리를 실시하였더라도 약 86% 수준으로 나타나 화학혼화제 적용 검토 등의 유동성 개선 방안의 모

차  
한  
관

색이 필요한 것으로 사료된다.

압축강도의 경우, 전처리를 실시한 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르가 초기 재령 3일에서는 전처리 하지 않은 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르보다 다소 감소한 것으로 나타났으나, 재령 7일 이후부터는 유사한 압도강도 발현율을 나타냈다. 특히 전처리 방법 중 수중침지의 경우, 재령 7일 및 14일의 압축강도 발현율이 상당히 높게 나타났다. 이는 전처리 방법에 의해 형성된 피막의 특성에 기인되는 것으로 판단된다. 반면 부순모래와 비교시 전처리를 실시한 시멘트 클링커 잔골재의 경우도 약 144% 이상 압축강도 발현성이 증진된 것을 확인할 수 있었다.

시멘트 클링커 잔골재를 사용한 모르타르의 압축강도 발현성은 전처리의 여부와 상관없이 일반 부순모래와 비교시 상당히 우수한 것을 확인할 수 있었다. 이는 골재와 페이스트의 계면인 천이대의 치밀화에 따른 모르타르 조직의 치밀화에 따른 것으로 판단된다. Fig. 14에 일반 부순모래 및 시멘트 클링커 잔골재와 시멘트 페이스트의 계면인 천이대를 관찰한 SEM Image를 나타내었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시멘트 클링커를 잔골재로 사용한 모르타르의 특성에 관한 기초적 연구로서 부순모래와 비교하여 모르타르 Flow 및 압축강도 발현성에 대하여 평가하였다. 일반 부순모래와 비교시 재령에 따라 약 154% ~ 197%의 우수한 압축강도 발현성을 나타냈다. 이러한 결과는 골재와 페이스트 간의 계면인 천이대의 치밀화에 의한 것으로 사료되며, 시멘트 클링커를 잔골재로 적용시 내구성 확보 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

반면 유동성의 경우, 시멘트 클링커 잔골재 적용 모르타르가 일반 부순모래 대비 약 68% 수준으로 시멘트 클링커를 골재로 활용하고자 한다면 전처리가 필요하다. 전처리 방법으로는 수중침지 및 NaOH 용액 침지의 2가지 방법을 선택하여 실시한 결과 유동성은 약 120% 개선된 것을 확인할 수 있었다. 전처리를 실시한 시멘트 클링커 잔골재 표면에 형성된 피막이 유동성 개선에 영향을 미친 것으로 판단된다. 하지만 일반 부순모래 대비 약 86% 수준이기 때문에 화학혼화제 적용 등 유동성 확보를 위한 연구는 앞으로 진행해야 할 것으로 사료된다.

향후 많은 연구 및 실험이 진행되어야 할 것으로 판단되지만 본 연구의 결과로 시멘트 클링커의 골재로서의 활용에 대한 가능성은 확인할 수 있었다.

#### <참고문헌>

1. 강국희, 김동현, 임영진, 이승현, 'Digital Image Processing을 이용한 시멘트계 재료의 자기치유 정도 평가방법', 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2017.
2. 細田 暁, 渡辺 優樹, 樋口 隆行, 盛岡 実, 'クリンカ細骨材によるモルタルの緻密化と自己治癒機能', Cement Science and Concrete Technology, Vol.67, 187-194.
3. 최영준, 조영근, 문규돈, 최영철, '콘크리트용 혼합골재 표준화를 위한 실태 조사에 관한 연구', 표준과 표준화 연구, 제2권, 제1호, 36-45.
4. 庄司慎, 樋口隆行, 盛岡実, 丸山一平, '産業副産物を原料としたクリンカ骨材の製造と諸特性', Cement Science and Concrete Technology, Vol.69, 672-6785. 宮本慎太郎, 稲田晴香, 皆川浩, 久田真, '細骨材として使用したセメントクリンカーがモルタルの物性に及ぼす影響', Cement Science and Concrete Technology, Vol.69, 169-175.6. 국립환경과학원 통계자료, '전국 폐기물 발생 및 처리 현황', 2012.