

Global Report

콘크리트에 페소다석회유리 활용으로 지속가능한 친환경 건설재 구현

1. 개요
2. 소개
3. 실험계획
4. 실험방법
5. 결과 검토
6. 결론

1. 개요

폐기물의 재활용 및 재사용은 폐기물 감소를 위한 주요 방안으로 여겨지고 있으며, 천연자원이 고갈되는 것을 막고 온실가스 배출을 감소시킴으로서 지속가능한 친환경 조성에 기여한다. 본 연구에서는 일반콘크리트의 천연 조골재 대체재로서 조골재 크기로 분쇄된 폐소다 석회유리를 재사용하는 것에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 본 연구에서 변동성을 가지는 요소는 조골재로 시멘트, 모래 및 물시멘트비는 일정하게 유지하였다. 분쇄된 폐유리는 콘크리트 배합의 조골재를 대체하기 위하여 중량비로 0-100%까지의 범위 내에서 25%씩 변경시켰다. 콘크리트 배합은 설계 강도 20MPa를 목표로 하여 물시멘트비 0.5에 시멘트, 모래, 자갈의 배합비 1:2:4를 사용하여 준비하였다. 슬럼프 시험은 미경화 콘크리트(fresh concrete)배합상태에서 수행하였으며 콘크리트 큐브 시편(150x150x150mm) 60개와 콘크리트 실린더 시편(지름 100mm, 높이 200mm) 60개를 가지고 재령 3, 7, 28일 및 90일 상태에서 시험을 시행하였다. 슬럼프 시험 결과 폐유리 함유량이 증가함에 따라 콘크리트의 시공연도(workability)가 감소하는 것으로 나타났다. 경화 후 콘크리트에 대한 압축강도 및 쪼갬인장강도 시험결과도 관리기준 콘크리트와 비교하여 폐유리 함유량을 증가시키면 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 폐유리함유량 25% 배합으로 만들어진 콘크리트의 경우 관리기준 콘크리트와 비교하여 큰 차이가 없었으므로 이러한 비율의 폐유리는 일반 콘크리트의 제조 시 적절히 사용될 수 있을 것으로 확인되었다.

2. 소개

콘크리트 업계에서 폐유리를 활용하는 것은 매립지에 버려지는 폐유리의 효과적인 관리가 가능하도록 하는데 도움이 되어 결과적으로 환경오염 예방에도 기여하게 되는 매력적인 방안 중 하나이다. 또한 콘크리트 제조에 폐유리를 재사용함에 따른 또 다른 장점으로 천연자원 고갈의 방지, 온실가스 배출 감소 및 에너지 절약 등에 기여하여 환경보호와 환경의 지속가능성을 달성하는 것 등이 있다. Mehta K.P., Monteiro P.J.M.의 콘크리트에 관한 연구보고서 자료(본문 Reference [3])에 따르면 연간 콘크리트 제조 시 약 15억 톤의 시멘트, 90억 톤의 골재와 10억 톤의 배합용수가 소비된다고 하며, Meyer C.의 보고서(본문 Reference [2])는 이러한 소비량 추세는 환경에 엄청난 영향을 미치는 것으로 천연자원 고갈, 에너지 과소비 및 온실가스 배출 등의 결과를 초래 한다고 지적하였다. 건설 활동의 증가로 인해 2050년까지 콘크리트 수요가 180억 톤으로 증가할 것으로 예상됨에 따라, 가까운 장래에 콘크리트가 아주 큰 중요성을 가지게 될 것으로 내다 볼 수 있다. (본문 Reference [4])의 자료에 따르면 건설업계의 지속가능성, 특히 건설자재의 지속가능성은 중요한 이슈가 되었다. (본문 Reference [5, 6, 7, 8])의 연구 자료에서 알 수 있듯이 최근에 고형 폐기물을 관리하는 측면에서 콘크리트를 사용하는 것에 관한 많은 연구 노력들이 이루어져왔다. 콘크리트는 콘크리트 구성 재료의 대체 재료로서 유리, 플라이애시 및 왕겨와 같은 많은 양의 고형 폐기물을 재활용할 수 있는 실질적인 방안이 될 수 있는 것으로 알려져 왔다. 또한 상당히 많은 양의 해당 폐기물이 고품질이 요구되거나 그렇지 않은 콘크리트에 재사용될 수 있기 때문에 콘크리트 업계에서 폐기물을 재사용하는 것은 폐기물을 관리할 수 있는 가장 효과적인 방법 중 하나라고 알려져 있다. 미경화 콘크리트 제조 시 폐유리를 사용하는 것은 최근 몇 년간 관심이 증가하고 있다. (본문 Reference [10])의 자료에 따르면 최근 수년간 유리 제품의 생산과 사용이 계속해서 이어지고 있기 때문에 폐유리의 발생량이 꾸준히 증가하고 있으며, 이렇게 발생된 폐유리의 엄청난 양은 매립지로 처리되고 있다고 한다. 환경 보호국(Environmental Protection Agency)의 도시 고형폐기물(MSW - Municipal solid waste)에 관한 보고서에서는 미국에서 발생된 폐유리 11.5 백만 톤 중 많은 부분은 소다석회 유리이며 주로 유리병, 평판유리 및 포장용 유리에서 나오는 것이라고 한다. 유리는 비교적 많은 양의 실리

카와 칼슘을 함유하는 비정질 재료이다. 이 재료는 비 생분해성 물질로서 매립에 큰 문제를 야기하기도 한다. 2013년 EPA 보고서에서는 비록 폐유리의 재활용 증가가 이루어지고 있지만 수집되는 폐유리의 약 74%는 여전히 매립지에 버려지고 있다고 한다. 당면한 문제들 중에는 폐유리의 화학적 오염과 잔류물 제거에 따른 문제점뿐만 아니라, 비용문제 그리고 다양한 종류의 색상이 혼합된 상태 등에 따른 문제점들이 있다. 따라서 폐유리 관리에 환경 친화적인 해결책을 찾아내기 위하여 콘크리트 제조 시 포틀랜드 시멘트 및 자갈의 대체재로서 분쇄된 입상 또는 분말재의 형태로 콘크리트에 폐유리를 사용하는 것에 관한 광범위한 조사연구가 수행되어왔다.

3. 실험계획

본 연구를 위해 < 표. 1 >에 콘크리트 배합의 천연 조골재의 대체재로서 분쇄된 폐유리골재(CWG - Crushed Waste Glass)를 사용하는 일반 콘크리트의 배합별 사용 재료량을 표시하였다. 또한 CWG가 전혀 들어가지 않은 관리기준배합의 재료량도 표시하였다.

< 표. 1 - 콘크리트 배합에 사용된 재료 사용량 >

배합구분	조골재 종류	시멘트 종류	골재		
		포틀랜드 시멘트	세골재	조골재	
			강모래	화강석 골재(CA)	폐유리골재(CWG)
관리기준 _CA	천연골재(CA)	100%	100%	100%	0
25% _CWG	폐유리골재	100%	100%	75%	25%
50% _CWG		100%	100%	50%	50%
75% _CWG		100%	100%	25%	75%
100% _CWG		100%	100%	0	100%

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 상업용으로 제조된 그레이드 42.5(ASTM 타입 1)에 해당하는 포틀랜드 시멘트이다. $\text{Na}_2\text{O}_{eq} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 산식으로 산출된 포틀랜드 시멘트 등가 나트륨 알칼리 함량은 0.89%이었다.

3.1.2 골재

본 연구에 사용된 강모래와 화강석골재(천연골재)는 시중에 판매하는 것이었다. 콘크리트 제조 시 본 연구에 사용된 강모래의 규격은 0.075~4.75mm 이고, 화강석 조골재의 최대치수는 12.5mm 이었다.

3.1.3 분쇄된 폐유리골재(CWG - Crushed Waste Glass Aggregate Material)

본 연구 작업에 사용된 폐소다유리는 나이지리아의 오건주 오타지역 야적장과 수거센터에서 수집하였다. 폐유리는 창문용 평판유리와 유리병이 주류를 이루었다. 이물질 및 오염물질을 제거하기 위하여 금속 및 플라스틱 조각과 라벨 등을 제거한 후 식용수로 폐유리를 세척하였으며 분쇄기(jaw crusher)를 사용하여 천연골재의 규격과 같이 필요한 입상의 형태로 분쇄하기에 앞서 공기로 건조시켰다. 골재의 상세한 화학성분 및 입도분포 등에 대한 내용은 본문에 수록된 그림과 표에 나타나있다.

4. 실험 방법

본 연구에 사용된 관리기준 콘크리트를 제조하기 위하여 콘크리트 배합에 쓰인 주재료는 포틀랜드 시멘트, 4.75mm 체를 통과하고 0.075mm 체에 남는 강모래 그리고 10~12.5mm 규격의 자갈이었다. 모래와 자갈의 조립률(fineness modulus)과 입도분포(particle size distributions)는 체가름 분석법으로 확인되었다. 모든 배합은 재령 28일 설계강도 20MPa를 목표로 하여 중량비로 배치(batch)하였으며, 시멘트:모래:자갈의 배합비는 1:2:4, 물시멘트비는 0.5로 하였다. 4개의 콘크리트 배합을 화강석 조골재의 대체재로서 분쇄된 폐유리골재를 함유량 25%, 50%, 75%, 100%로 제작하고 물시멘트비는 0.5로 일정하게 유지시켜 준비하였다. 다양한 비율의 콘크리트 배합에 따른 시공연도를 확인하기 위하여 슬럼프 시험을 실시하였다. 콘크리트의 혼합과 양생에는 식용수가 사용되었다.

150mmx150mmx150mm 크기의 콘크리트 입면체와 지름 100mm, 높이 200mm인 실린더 형틀에 콘크리트를 타설하고 24시간 경과 후 탈형하였다. 형틀에는 50mm씩 층을 이루며 콘크리트를 붓고 철제 다짐봉으로 다짐작업을 하였으며 각층마다, 최소 35회 다짐작업을 하였다. 각층 다짐작업 후 형틀면을 가볍게 두드려 각층의 표면의 평활도를 유지시켰다. 맨 마지막 층은 형틀 맨 윗면에서 약간 흘러넘칠 정도로 한 후 몰드면과 일치하도록 흙손으로 깎아 내었다. 모든 시편은 식별을 위해 적절히 표시를 하였다. 폐유리골재로 화강석 골재를 비율별로 대체하여 준비한 입방체와 실린더 시험공시체들 모두 실온상태의 수조에서 침지법으로 식용수 속에서 양생을 시켰으며, 재령 3, 7, 14, 28 및 90일 상태에서 압축강도와 쪼갬 인장강도 시험을 실시하였다. 경화된 콘크리트의 양생기간별, 그리고 화강석골재 대체 폐유리골재 비율별로 콘크리트 강도를 알아보기 위하여 세 개의 시편에 대한 평균 강도를 구하였다. 콘크리트 입방체의 압축강도와 콘크리트 실린더의 쪼갬 인장강도는 YES-2000 디지털 압축강도기계를 사용하여 확인하였다.

콘크리트 샘플의 준비와 시험은 오건(Ogun)주, 오타 지역에 위치한 Covenant 대학교 토목공학과 구조재료 실험실에서 시행하였다.

콘크리트의 파쇄부분에 대한 미세구조 검사는 SEM(전자현미경)을 사용하여 시행하였다. 재료의 미세구조 형상에 대한 종류, 양, 크기, 모양 및 분포 등 SEM기술을 통해 1 마이크로미터 크기의 재료의 미세구조를 분석하는 것이 가능하다. Mehta와 Monteiro는 그의 논문(본문 Reference [3])에서 발표하기를, 콘크리트는 가장 널리 쓰이는 구조용 재료이지만 육안으로 식별할 수 있는 상태에서 콘크리트는 시멘트 페이스트 매트릭스 속에 분포된 골재입자로 이루어진 이상(two-phase)의 재료로 간주될 수 있기 때문에 미세 구조수준에서 콘크리트의 구조는 이상 재료로 이루어져 있고, 이러한 두 재료가 서로 균등하게 분포되어 있지도 않으며, 균질하지도 않다는 것을 명확히 보여준다. 이러한 콘크리트의 미세구조 조사는 부서진 콘크리트 표면의 관찰로 수행되었다. 부서진 작은 콘크리트 샘플조각이 코팅처리하지 않은 상태로 SEM 스테브 위에 올려졌다. 선택된 콘크리트 샘플과 구성 재료에 대한 SEM 연구는 탁상형 주사전자 현미경인 Phenom ProX SEM을 사용하여 시행하였다. SEM 시험은 상온에서 28일 동안 수중 양생한 콘크리트 시편을 가지고 수행하였다.

5. 결과 검토

5.1 미경화 콘크리트의 특성 : 슬럼프

콘크리트 배합의 시공연도를 측정하기 위하여 슬럼프 시험방법이 사용되었다. 관리기준배합은 물시멘트비 0.5 상태에서 슬럼프 값 40mm를 나타내었으나, 폐유리골재를 함유하는 배합의 경우 같은 물시멘트비 상태에서 폐유리골재 함유량을 증가시키면 슬럼프 값이 점점 감소하는 것으로 나타났다. 폐유리골재 함

유 콘크리트의 슬럼프 값은 관리기준 콘크리트에 비하여 유리함유량 증가에 따라 20~50% 정도 감소하였다. 폐유리골재 함유비 증가에 따른 슬럼프 값 감소는 $r = -0.986$ 에 해당하는 밀접한 상관관계가 확인되었다. 슬럼프 값의 이러한 감소는 입상의 유리골재 형상이 각이 진 형태에 기인된 것으로 보인다. 또한 유리골재를 함유하는 콘크리트의 경우 전통적인 일반 콘크리트와 같은 정도의 시공연도를 얻으려면 물시멘트비가 더 커져야 할 것이다. 그러나 모든 배합은 과도한 골재분리 현상의 발생 없이 작업이 가능한 정도였으며 특히 폐유리골재 25%를 함유하는 콘크리트 배합의 경우 시공연도에 큰 무리가 없었다.

5.2 경화콘크리트의 특성

5.2.1 압축강도

압축강도 시험결과 유리골재로 화강석 골재를 대체한 비율이 25% 이상으로 증가함에 따라 재령 3일 및 7일 나중에 재령 28일 및 90일에 이르기까지 콘크리트의 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. 재령 28일과 90일에 콘크리트 압축강도의 감소관련 상관관계 값은 각각 $r=-0.787$ 및 $r=-0.640$ 이었다.

폐유리골재로 일반콘크리트 배합의 화강석 골재를 75% 및 100% 대체한 후 콘크리트의 압축강도는 재령 28일의 경우 15.1% 및 16.2% 그리고 재령 90일의 경우 13.7% 및 12.2%씩 각각 감소하였다. 분쇄된 폐유리조골재 75% 및 100%를 함유하는 콘크리트 배합의 압축강도 더 낮게 발생한 원인은 유리골재의 각진 모양 및 매끈한 표면과 시멘트 페이스트 사이의 계면부(ITZ) 접착강도가 취약한 때문인 것으로 판단된다. 접착력이 약한 콘크리트는 일반적으로 압축강도가 더 약해지게 된다.

5.2.2 쏘갠 인장강도

재령 28일 상태에서 쏘갠 인장강도의 경우 관리기준 콘크리트가 3.8MPa인데 비하여 유리골재 함유 콘크리트는 2.14MPa~2.5MPa의 결과를 나타내었다. 재령 90일 상태에서 관리기준 콘크리트가 4.2MPa인데 비하여 유리골재 함유 콘크리트는 3.71MPa~3.19MPa의 결과를 나타내었다. 시험결과 유리골재 함유량이 증가하면 관리기준 배합 콘크리트에 비하여 쏘갠 인장강도 값이 감소하였는데, 그것은 유리함유량 비율이 증가함에 따라 유리함유 콘크리트의 부착강도 감소에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 유리골재 대체 함유량 25% 배합의 경우 쏘갠 인장강도가 대체배합 중 관리기준 배합에 비교하여 가장 큰 것으로 나타났다. 하지만, 유리함유량이 25% 이상 대체되는 경우 쏘갠 인장강도는 감소하는 것으로 나타났다. 쏘갠 인장강도의 감소는 유리함유량 25%의 경우 덜 두드러져 보인다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 분쇄유리골재의 각진 모양과 날카로운 모서리 등으로 골재 내부마찰각이 커진데 따른 것으로 보인다. 관리기준 배합 및 유리골재 함유 배합 콘크리트 모두 재령이 증가함에 따라 강도발현이 증가하는 것으로 나타났으며 유리골재 함유 배합 중에서는 25% 대체의 경우 가장 높은 강도 값을 나타내었다.

일반콘크리트 제조 시 최소 20MPa의 압축하중을 견딜 수 있는 적절한 강도발현을 보장하기 위해 폐소다 석회유리로 조골재를 25% 이상 사용하는 것은 권장하지 않는다. 또한 이렇게 발현된 압축강도 값은 다양한 구조용 콘크리트 부재의 구조설계에 사용될 수 있다.

5.2.3 미세구조 검사

시멘트 페이스트와 골재 사이의 계면부 접착력을 추가적으로 평가하기 위해 유리골재를 함유한 콘크리트 샘플에 대해 SEM을 사용하여 미세구조 검사를 실시하였다. 재령 28일 상태의 콘크리트 입방체 샘플을 조사하였다. 연구보고서 자료(본문 Reference [43])에 따르면 시멘트 페이스트와 골재사이의 접착력은 매우 중요하다고 언급하고 있다. 그 이유는 이러한 점착력이 콘크리트의 기계적 특성에 영향을 주는 시멘트 페이스트와 골재 사이의 응력 전달에 핵심요소인 것으로 간주되기 때문이라고 한다. 재령 28일 상태의 폐유리골재 함유 콘크리트 샘플의 SEM 이미지를 조사한 결과 유리골재 부분이 시멘트 페이스트와

접하는 곳에서 매끈한 표면을 가지고 있어서 계면부의 양면에 서로 물어주는 힘이 약해, 콘크리트의 기계적 특성이 약한 결과를 나타낸 것으로 보인다. 시멘트 페이스트와 골재 사이의 화학적 상호작용, 골재 표면의 거칠기, 미세충진재(micro-fillers)의 사용 등을 포함한 다양한 요인들에 의해 계면부(ITZ)의 접착능이 영향을 받는 것으로 연구보고서 자료(본문 Reference [43, 44])에 언급되어 있다. SEM 이미지조사결과 시멘트 페이스트와 유리골재 사이의 접착강도 부족이 재령 28일 상태에서, 특히 유리함유비율이 커지는 경우 압축강도와 인장강도가 낮아지는 양상을 확실히 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구조사에서 얻은 시험결과를 바탕으로 미경화 콘크리트 및 경화된 콘크리트의 천연 조골재 대체재로서 분쇄된 입상의 폐유리골재의 사용에 따른 효과에 대해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

6.1 일정한 물시멘트비 상태에서 천연골재를 사용하는 동일한 배합의 콘크리트에 비해 폐유리골재의 함유량을 증가시키면 미경화 콘크리트 상태의 분쇄된 폐유리골재를 함유하는 콘크리트의 시공연도는 감소하는 것으로 관찰되었다. 시공연도의 이러한 감소는 분쇄된 유리골재의 각진 모양과 입도가 좋지 않은 것에 기인한다. 그러나 분쇄된 유리골재를 함유하는 콘크리트의 배합에서 과도한 골재분리는 관찰되지 않았다.

6.2 유리함유량 비율이 25% 이상에서 100%에 이르기까지 일반 화강석골재를 대체하는 재령 3일 및 7일의 콘크리트의 경우, 분쇄된 유리골재를 함유하는 경화 후 콘크리트의 압축강도가 크게 감소하는 것으로 관찰되었다. 재령 28일로 80% 이상 일반 골재를 대체한 경우에도 압축강도가 크게 감소하였는데 재령 90일의 경우 강도가 약간 회복되었다. 그 이유는 콘크리트에서 발생한 공극과 부드러운 유리표면 및 각진 유리골재 모양에 따른 유리골재와 시멘트 페이스트 사이에 계면부(ITZ - interfacial transition zone) 접착력이 취약한 때문인 것으로 판단된다. 유리함유량 비율이 0%에서 80%까지 증가함에 따라 폐분쇄유리를 함유하는 경화 후 콘크리트 실린더의 인장강도가 꾸준히 감소되었다. 한편 모든 샘플에서 유리함유량 비율이 80% 이상이 되면 인장강도가 상당부분 회복되는 것으로 관찰되었다.

6.3 그러나 분쇄유리골재로 25% 천연골재를 대체한 경우 화강석 골재로 만든 관리기준 콘크리트에 비해 압축강도가 더 크게 나타났다. 또한 일반골재와 유리골재 사용 콘크리트의 강도 발현은 재령이 늘어남에 따라 압축강도와 인장강도 모두 증가하였다.

6.4 따라서 연구결과를 바탕으로 목표 강도 20MPa 일반콘크리트는 조골재 규격으로 분쇄된 폐소다 석회유리로 제조될 수 있으며, 콘크리트 배합에 대체율 25%까지 천연조골재와 혼합하여 쓸 수 있다고 판단된다. 본 연구결과, 폐유리를 매립지에 버리는 대신에 콘크리트 제조용으로 폐유리가 재사용될 수 있음을 알 수 있다.