

Global Report

효율적이며 환경친화적으로 지속가능한 건설재인 친환경 콘크리트

1. 개요
2. 소개
3. 친환경 콘크리트의 제조
4. 결론

0. 개요

친환경 콘크리트는 배합설계를 통한 원료 생산에서부터 구조설계, 시공 및 운영에 이르기까지 모든 측면을 고려하는 콘크리트에 환경을 생각하는 개념이다. 친환경 콘크리트는 기존 콘크리트와 유사한 콘크리트의 일종이지만 콘크리트의 생산 또는 사용에 최소한의 에너지를 사용하고 환경에 피해를 최소화하는 콘크리트이다. 친환경 콘크리트는 재활용골재와 재활용재를 사용하기 때문에 매립지에 부담을 줄여주며 골재의 낭비를 완화시켜준다. 따라서 이산화탄소 배출도 감소된다. 재료를 재사용하는 것도 경제적인 측면에서 크게 기여한다. 친환경 콘크리트는 그 자체가 환경 친화적이기 때문에 지속가능한 개발의 요소로 간주될 수 있다. 친환경 콘크리트 제조를 실천하는 방안 중 하나는 콘크리트 배합에 시멘트의 양을 감소시켜 전체적인 시멘트 소비를 줄이는데 도움을 주는 것이다. 폐기물을 사용하는 것도 과도한 양의 산업폐기물을 처리하는 문제를 해결하는 것이다. 이 보고서에서는 현 상황에서 친환경 콘크리트의 중요성을 다루고자 하며 지구온난화를 통해 환경에 심각한 위협을 가하는 기존 콘크리트와는 달리 친환경 콘크리트가 가지고 있는 장점들을 강조하고자 한다.

1. 소개

세계적으로 콘크리트는 물에 이어 두 번째로 소비가 많으며 세계 총 이산화탄소 배출량의 5%(Worrell, 2001)를 차지한다. 이러한 환경 문제에 대한 해법은 콘크리트를 다른 재료로 대체하는 것이 아니라 콘크리트와 시멘트의 환경적 영향을 줄이려는 것이다. 환경을 보존하려는 인식과 활동이 증가하는 것과 더불어 콘크리트 제조로 대기 중에 상당한 양의 이산화탄소가 배출된다는 사실을 깨닫는 것이야말로 친환경 콘크리트의 도입을 촉진시키는 강력한 계기가 된다. 친환경 콘크리트는 1998년 덴마크에서 처음으로 발명되었는데 이 친환경 녹색콘크리트는 색상과는 아무 상관이 없다. 친환경 콘크리트는 배합설계를 통한 원료 생산에서부터 구조설계, 시공 및 운영에 이르기까지 모든 측면을 고려하는 콘크리트에 환경을 생각하는 개념이다. 일명 녹색 콘크리트라고도 하는 친환경 콘크리트는 폐기물이 시멘트의 부분 대체재로서 사용되기 때문에 제조비용도 저렴하며 폐기물의 처리비용이 불필요하고 생산에 소비되는 에너지가 상대적으로 감소되며 내구성도 더 크다. 친환경 콘크리트는 기존 콘크리트와 유사한 콘크리트의 일종이지만 콘크리트의 생산 또는 사용에 최소한의 에너지를 사용하고 환경에 피해를 최소화하는 콘크리트이다. 친환경 콘크리트는 명확히 환경적 의무를 완수하는 것으로 생각할 수 있다. 친환경 콘크리트는 1997년 교토 의정서에 따라 이산화탄소배출을 21%까지 감소시킨다. 친환경 콘크리트는 콘크리트 산업 이외에서 발생하는 무기 부산물 사용을 20%까지 증가시키며 시멘트 업계에서 폐기물로 인한 연료사용을 절약하고 화석연료의 사용을 감소시키기도 한다. 친환경 콘크리트의 재활용 역량은 기존 콘크리트 유형과 비교되어서는 안 되며, 친환경 콘크리트 제조와 그 사용으로 작업환경이 나빠져서도 안 된다. 친환경 콘크리트를 사용한 건축물은 운영단계에 환경에 큰 피해를 주지 않아야 한다. 시멘트 1톤을 생산할 때 마다 약 0.9톤의 이산화탄소가 배출되며 콘크리트 1입방 야드(0.7643입방미터)에는 중량비로 약 10%의 시멘트가 포함된다. 콘크리트 1입방 야드의 무게는 약 2톤이기 때문에 콘크리트 1톤에서 발생하는 이산화탄소 배출은 0.05톤에서 0.13톤에 이른다. 콘크리트 1입방 야드에서 발생하는 이산화탄소 배출의 약 95%는 시멘트 제조로 인한 것이다.

2. 친환경 콘크리트의 제조

2.1 친환경 콘크리트의 바람직한 특성

아주 우수한 친환경 콘크리트를 생산 및 타설하는 것이 이제는 가능하게 되었다. 심지어 시멘트 없이 제조한 수퍼급 친환경 콘크리트, 예를 들면 300kg 플라이애시로 시멘트를 대체한 콘크리트가 제조설비의 변경 없이도 생산 및 타설될 수 있다. 그러나 이 친환경 콘크리트는 강도가 떨어지며 물론 내구성도 없다. 따라서 친환경 콘크리트는 다음과 같은 측면의 성능이 확보되어야 한다.

- a) 기계적 특성(강도, 수축, 크리프, 정적 거동 등)
- b) 내화성(열전달 등)
- c) 작업성(시공연도, 강도 발현, 양생 등)
- d) 내구성(부식방지, 동파방지, 열화 메커니즘 등)
- e) 환경에 미치는 영향(친환경 콘크리트가 얼마나 친환경적 인가?)

이러한 요건들을 만족시키는 것은 쉬운 일이 아니며 만약 시공자들이 친환경 콘크리트를 써야 하는 경우 모든 요건들이 동시에 만족되어야만 한다. 어떤 시공업체는 일반 콘크리트에 비해 친환경 콘크리트의 수명이 저하되는 경우 친환경 콘크리트를 쓰려하지 않을 것이다. 따라서 가능한 일반 콘크리트와 유사한 특성을 가진 친환경 콘크리트를 개발할 새로운 기술의 필요성이 있다.

2.2 생산에 소모되는 에너지

2.2.1 콘크리트 배합설계상 에너지 소모

시멘트 제조에 대한 에너지 소모가 콘크리트의 모든 구성재에 대한 총 에너지 소모량의 90% 이상을 차지하며 콘크리트를 만드는데 필요한 총 에너지 소모량의 약 1/3을 차지한다. 환경에 미치는 영향이 감소되는 시멘트를 선택하거나 시멘트 양을 최소화함으로써 콘크리트의 환경적 영향은 획기적으로 변하게 된다. 그러나 이 경우 시멘트의 종류와 양을 필요로 하는 콘크리트의 기술적 요건을 고려하면서 이루어져야만 한다. 콘크리트 배합의 시멘트 함유량을 최소화하는 한 가지 방법은 패킹 계산법(packing calculations)을 사용하여 골재에 대한 최적의 구성비를 결정하는 것이다. 골재 패킹을 고도화하면 골재사이의 공극이 감소됨에 따라 시멘트 페이스트의 필요성도 줄어든다. 이렇게 하면 콘크리트의 특성이 개선된다. 콘크리트내의 시멘트 함유량을 최소화하는 또 다른 방법은 다른 포졸란 소재로 시멘트를 부분 대체하는 것이다. 이런 방법에는 일반적으로 플라이애시 또는 마이크로 실리카를 쓰는 경우가 많다. 이 재료 모두 발전소 및 실리콘 제조과정에서 나오는 부산물이고 두 가지 재료 모두 포졸란 효과를 나타낼 수 있다. 따라서 환경영향이 큰 재료인 시멘트는 환경영향이 적은 재료들로 대체될 수 있다.

2.2.2 시멘트 및 콘크리트 제조에 소모되는 에너지

시멘트 및 콘크리트 제조에 따른 환경영향을 감소시킴으로서 콘크리트의 환경 영향을 감소시키는 것도 가능하다. 콘크리트 제조와 관련 용수, 에너지 소모 및 폐기물 생성에 따른 경험 자료들도 이용가능하다. 콘크리트 제조가 환경에 미치는 영향이 미미한 수준이긴 하지만 단일 콘크리트 제조업체에게는 환경적 그리고 경제적으로 중요하다. 환경에 영향을 덜미치는 시멘트 종류를 선택하고 시멘트의 양을 최소화함으로써 콘크리트의 환경적 특성은 크게 바뀌게 된다. 그러나 이 경우 시멘트의 종류와 양을 필요

로 하는 콘크리트의 기술적 요건을 고려하면서 이루어져야만 한다.

2.3 무기질 폐기물에 대한 평가

콘크리트 업체에서 나오는 무기 부산물(예 : 돌가루 및 콘크리트 슬러리)과 사회에서 발생하는 엄청난 폐기물과 정치적 초점이 되고 있는 제품들(예 : 정수장에서 발생하는 연소재, 폐기물 연소로 인한 연기 및 설탕 제조에서 나오는 플라이애시)은 최우선 처리과제가 되고 있다. 돌가루는 채석장에서 나오는 부산물이다. 이 돌가루는 시멘트와 모래입자 크기의 중간 정도 크기인 불활성 물질이다. 돌가루는 모래를 부분 대체할 수 있을 것으로 예상된다. 콘크리트 슬러리는 콘크리트 제조 즉, 믹서기 및 기타 장비 청소 시 나오는 부산물이다. 콘크리트 슬러리는 건조된 상태이거나 물에 젖어있는 상태일 수 있으며 건조된 분말이나 물과 함께 재활용될 수 있다. 건조된 재료로 재활용할 경우 분말 형태로 콘크리트 슬러리를 가공할 필요가 있다. 콘크리트 슬러리는 약간의 포졸란 효과를 나타낼 수 있기 때문에 시멘트의 부분 대체재로 사용될 수도 있고 플라이애시와 같은 다른 종류의 포졸란 재료로 사용될 수도 있다. 정수장에서 나오는 연소재(Combustion ash)는 플라이애시와 크기나 모양이 유사하다. 이 콘크리트 슬러리 내의 중금속 함유량은 플라이애시에 포함된 중금속 함유량과 유사한 정도일 것으로 예상된다. 이 콘크리트 슬러리는 약간의 포졸란 특성도 나타내는데 폐기물 연소시 나오는 폐 연소재에서도 약간의 포졸란 특성이 있다. 중금속의 함유량은 일반적인 플라이애시 보다 훨씬 더 많다. 또한 염화물, 불화물 및 황산염 함유량은 철근의 부식, 경화지연 및 쓰머싸이트 반응(thaumasite reactions) 등의 부정적인 영향을 일으킬 수 있다. 또한 콘크리트에 사용하기에 앞서 추가적인 가공처리가 필요할 수 있다.

2.4 친환경 콘크리트 제조 방법

2.4.1 보다 많은 양의 플라이애시와 마이크로 실리카로 시멘트를 대체함으로써 기존 부산물의 사용을 증가시키고 클링카 함유량을 최소화하는 것이 가능하다.

2.4.2 대체 원료 및 대체 연료의 사용을 증가시키고 에너지 저소모 시멘트를 개발/개선하는 등의 새로운 친환경 시멘트 및 바인딩 재료를 개발하여 친환경 콘크리트 제조가 가능하다.

2.4.3 돌가루, 콘크리트 채석 등의 대량의 무기 부산물 골재로 만든 콘크리트가 폐 소각로 슬래그(waste incinerator slag), 저급한 플라이애시 또는 기타 무기 부산물과 함께 시멘트 안정화 기초(cement stabilised foundation)에 사용될 수 있다. 먼저, 잠재적인 무기 부산물에 대한 정보 선별작업이 수행된다. 부산물에 대한 출처, 수량, 입자 크기 및 구조, 화학성분과 환경에 미치는 영향 등이 분석되어야 한다.

2.5 대리석 슬러지 분말과 채석장 석분을 함유하는 친환경 콘크리트

2.5.1 사용재료

IS 8112-1989 기준에 따른 표면적비(specific surface) 3300cm²/g, 28%의 표준반죽질기(normal consistency)의 보통포틀랜드 시멘트(그레이트 43)가 사용되었다. 대리석 공장의 야적장에서 직접 채취한 대리석 슬러지 분말은 표면적비가 크고 물탈이나 콘크리트와의 응집력이 우수하였다. 대리석 슬러지 분말의 비중은 2.212이고 채석장 석분은 비중이 2.677이었다. 폐재의 수분 함량과 부피밀도는 모래보다 적었다. 세골 재료는 조립률 2.2, 비중 2.677, 실트함유량 0.8%의 일반적인 입도로 중간 크기의 모래가 사용되었다. 조

골재로는 일반적인 입도를 가지고 크기 5-20mm의 채석이 사용되었다. 판상의 입자나 길쭉한 입자의 함유량은 3% 초과, 파쇄지수(crushing index)는 6% 이상 그리고 비중은 2.738이었다. 용수는 식음수가 사용되었다. 설계상의 시공연도 확보를 위해 숄폰산염 기반의 고유동화제인 “Roff Superplast 320” 제품이 사용되었다.

2.5.2 콘크리트의 배합비

원료의 특성에 따라 두 종류의 배합이 사용되었다. 배합 A는 하천 모래를 사용한 관리기준 콘크리트이며 배합 B는 친환경 콘크리트(그린 콘크리트)로 세골재와 같은 산업부산물(50% 채석장 석분과 50%의 대리석 슬러지 분말)을 사용하는 친환경 콘크리트이다. 두 배합 모두 물시멘트비는 중량비로 0.55%이다. 감수제가 시공연도 개선을 위해 사용되었고 사용량은 시멘트 50kg 당 250ml로 고정시켰다.

2.5.3 시험결과

두 배합의 시험결과는 표 1과 같다.

배합	슬럼프(mm)	슬럼프 플로우(mm)	깔때기 유하시간(초)
배합 A	210	420	23
배합 B	255	657	14

<표 1 - 시공연도 비교>

압축강도와 쪼갬 인장강도를 확인하기 위하여 150mm 규격의 콘크리트 큐브와 지름 150mm, 높이 300mm 크기의 콘크리트 실린더가 시편의 시험에 사용되었다. 시편의 시험결과는 표 2와 같다.

배합	평균 압축강도(N/mm ²)			쪼갬 인장강도(N/mm ²)		
	3일	7일	28일	3일	7일	28일
배합 A	15.45	18.33	36.85	2.40	2.60	4.62
배합 B	13.54	19.52	40.35	2.15	2.98	5.02

<표 2 - 콘크리트의 압축강도와 쪼갬 인장강도>

배합	28일 후 흡수율(%)	중량 손실비(Percentage of weight loss)					
		28일		90일		150일	
		황산나트륨 및 황산마그네슘	황산	황산나트륨 및 황산마그네슘	황산	황산나트륨 및 황산마그네슘	황산
배합 A	2.85	1.65	2.10	2.20	2.65	2.95	3.15
배합 B	3.74	1.15	0.80	1.95	1.10	2.10	1.80

<표 3 - 중량 손실비(Percentage of weight loss)>

황산염 침투에 대한 내성은 시험용 수조(물에 대한 중량비로 황산마그네슘은 7.5%, 황산나트륨은 7.5%를 함유)에서 28일, 90일 및 150일 동안 프리즘 시편을 침지시켜 조사하였다. 위의 표에서 황산염 침투 여건 속에서 친환경 콘크리트의 내구성이 기존 콘크리트 보다 더 크다는 것을 추론 할 수 있다. 이것은

대리석 슬러지 분말과 채석장 석분속의 활성 이산화규소(규산)가 콘크리트의 산화칼슘과 반응하여 이차 규산칼슘 수화물을 형성하기 때문이며, 화학적으로 안정적이고 구조적으로 치밀하게 콘크리트를 만들고 콘크리트의 불침투성이 개선된다. 또한 대리석 분말은 시멘트 계 재료 속에서 칼슘 알루미늄산염의 함량을 감소시켜 콘크리트의 황산염에 대한 내성을 증가시키게 된다.

2.5.4 검토

모든 실험 데이터를 조사해본 결과 폐 산업 부산물을 첨가하면 물리적 또는 기계적 특성이 개선되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이런 종류의 혁신적인 콘크리트가 대량의 미립자들을 필요로 하기 때문에 매우 중요하다. 대리석 슬러지 분말의 분말도가 높기 때문에 콘크리트의 응집력을 확보하는데 아주 효과적으로 작용한다. 위의 연구를 통해 채석장 석분과 대리석 슬러지 분말은 세골재의 대체재로 사용될 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

- * 채석장 석분과 대리석 슬러지 분말의 화학성분은 시멘트의 성분과 유사하다.
- * 친환경 콘크리트에서 50%의 대리석 슬러지 분말과 50%의 채석장 석분으로 세골재를 대체하면 강도 측면이나 품질측면에서 우수한 결과를 나타낸다. 시험결과 M4 배합이 보다 더 큰 압축강도와 쪼갬 인장강도를 나타내는 것으로 밝혀졌다. 대리석 슬러지 분말의 함유량을 50% 이상으로 증가시키면 콘크리트의 시공연도는 개선되나 압축강도와 쪼갬 인장강도에 영향을 미치게 된다.
- * 친환경 콘크리트는 콘크리트의 강도에 영향을 주지 않으면서 슬럼프 플로우가 657mm인 경우 시공 연도는 더 좋아지고 자가 다짐 콘크리트의 성능도 만족시킨다. 대리석 슬러지 분말의 함량을 증가시키면 슬럼프 플로우도 증가한다. 대리석 슬러지 분말의 함량을 증가시키면 깔때기 유하시간(V-funnel time)은 감소한다.
- * 시험결과 이러한 폐 산업부산물이 경화 콘크리트의 성능을 개선할 수 있는 것으로 나타났다.
- * 친환경 콘크리트는 생 콘크리트의 거동을 개선하며 백시멘트를 함유하는 건축마감용 콘크리트 배합에도 사용될 수 있다.
- * 친환경 콘크리트의 흡수율은 기존 콘크리트에 비하여 약간 더 높다.
- * 황산염 침투여건하의 친환경 콘크리트의 내구성은 기존 콘크리트에 비하여 더 우수하다. 황산염 용액 침투 90일의 시험결과에서 7.5% 황산염 용액속의 친환경 콘크리트 몰탈 시편은 28일 침투 시편의 결과와 유사하지만 7.5% 황산마그네슘 용액에서의 경우 내부식성에 대한 영향은 분명하지 않다.

채석장 석분과 대리석 슬러지 분말을 복합적으로 사용하면 미세공극 충전 능력과 포졸란 활성화가 좋아지기 때문에 우수한 성능을 나타내었다. 따라서 본 연구 결과 콘크리트 제조시 세골재로 채석장 석분과 대리석 슬러지 분말을 사용할 것을 적극적으로 추천하는 바이다.

3. 결론

친환경 콘크리트는 기존 콘크리트에 비하여 여러 가지 장점들이 있다. 친환경 콘크리트는 재활용 골재 및 재활용재를 사용하기 때문에 매립지의 과도한 부담을 줄여주며 폐골재를 감소시킨다. 따라서 이산화탄소 배출도 감소된다. 재료를 재사용하면 경제적으로도 크게 도움이 된다. 인근에서 나오는 폐골재나 화력발전소 인근에서 나오는 플라이애시는 비용이 저렴하고 운반비도 최소화되기 때문에 산업폐기물을 재활용하는데 도움이 된다. 이러한 산업폐기물을 사용한 친환경 콘크리트는 시멘트의 소비를 줄여주며 일반 콘크리트에 비해 시공연도, 강도 및 내구성이 더 우수하다. 압축강도와 휨강도는 기존 콘크리트와 거의 동일하다. 따라서 친환경 콘크리트는 친환경 건축물용 미래소재라고 결론 내릴 수 있다.