

Global Report

보다 친환경적인 재료사용으로 건축공사에 시멘트 활용의 지속가능성 극대화

1. 소개
2. 재료 및 방법
3. 결과 및 검토
4. 결론 및 권고사항

1. 소개

지속가능성으로 나아가는 길은 현재와 미래 모두에 있어서 건강하고 균형이 잡힌 환경, 경제 및 사회 이 세 가지 중요한 구성요소를 제공한다. 이 세 가지 구성요소는 3대축(TBL - Triple Bottom Line)이라 불리어왔으며 세 가지 구성요소 중 어떤 것에도 부정적인 영향을 미치는 프로젝트는 지속가능성을 위태롭게 한다. 지속가능성이라는 용어는 수많은 정의를 가지고 있으나 많은 연구자들이 주장하는 거의 모든 정의에는 “친환경(green)”이라는 말과 유사하다는 공통점이 있다. 친환경 재료는 적은 에너지 및 자원을 가지고 고성능을 발휘한다는 특징을 가지고 있다. 가장 친환경적인 프로젝트와 제품들은 그 자체가 모두 친환경은 아니며 경제 및 사회뿐만 아니라 환경에 미치는 영향을 최소화하는데 사용된다고 언급되어왔다. 지속가능성과 친환경 기술이라는 용어는 1987년 Brundtland 보고서에서 제공된 지속가능성에 대한 정의에 따라 잘 정리되어 있다. 이 보고서에서 지속가능성을 정의하기를 그들 자신의 니즈에 부합하기 위하여 미래 세대의 역량을 손상시키지 않고 현 세대의 니즈에 부합하는 개발이라고 하였다. 요즈음 지속가능성의 구성요소에 대한 위협문제들이 지속가능한 개발에 관한 세계적인 관심의 주류를 이루고 있다.

전 세계의 건설 산업은 지속가능한 개발에 큰 위협이 되고 있다. 현대적인 건설은 시멘트를 사용하지 않고는 사실상 불가능하다. 콘크리트 및 몰탈 등 시멘트 기반의 재료 생산은 엄청난 양의 시멘트를 사용한다. 이외에도 수중콘크리트는 세계에서 두 번째로 가장 널리 사용되는 재료인 것으로 알려져 있다. 시멘트 및 콘크리트 산업은 매우 중요하며 많은 국가경제가 좌지우지되는 역동적인 부문이다. 시멘트 및 콘크리트 산업의 수많은 이점에도 불구하고 시멘트 제조와 소비부문들은 지속가능성을 위협하는 많은 과제들에 직면해 있다. 시멘트는 근본적으로 에너지 집약적인 재료이며 더욱이 그 제조에는 많은 양의 재생 불가능한 재료를 사용한다. 시멘트 1톤 생산에 일반적으로 약 4.882MJ의 에너지가 소비된다. 또한 시멘트 산업은 대기에 부정적인 영향을 미치는 전 세계 인위적 유해가스의 5%~10%를 생성한다. 전 세계 시멘트 생산이 2030년까지 50억 톤에 달할 것으로 추정되면서 미래에는 놀라운 상황이 전개될 것으로 보인다. 최근 시멘트 업계 및 건설 전문가들은 지속가능한 개발을 위협하는 부정적인 영향을 완화할 수 있는 친환경 재료나 산업부산물 사용을 주장하고 있다.

가나와 같은 대부분의 개발도상국들의 시멘트 업계는 거의 모든 인프라 프로젝트용 시멘트를 수입에만 의존하고 있다. 가나에서 지난 수년간의 시멘트 소비 추세는 점차 증가해 왔으며 현재 년 간 4백만 톤의 소비에서 2020년까지 6백만 톤을 넘어설 것으로 추정되고 있다. 시멘트 클링커 수입에 따른 비용변동으로 불안정한 시멘트 가격은 이러한 국가들에서 지속될 수 있다. 가나에서 시멘트 가격은 여러 해 동안 매년 증가하고 있다. 예를 들어 2009년 대도시에서의 평균가격은 15GhC(약 4달러)였으나 2013년 23GhC(약 6달러) 그리고 현재 30GhC(약 9달러)DP 달하고 있다. 이러한 상황은 결과적으로 건설공사의 비용을 크게 올리게 되었고 임대료에 실질적인 영향을 주어 많은 사람들 특히 도시 거주자들에게 적절한 숙소를 구하는데 어려움을 주게 하고 있다. 한편 개발도상국 인구 절반정도의 많은 사람들은 하루

에 1달러 미만으로 생활하는데 결과적으로 이는 구매력에 영향을 미치는 것이다.

가나를 포함한 서아프리카 국가들 대부분의 도시 주변에 들어서는 불쾌한 빈민가의 증가는 서아프리카 대부분의 국가들에 있어서 시멘트 비용에 직간접적인 영향을 줄 가능성이 있다. 보통 사람들을 위한 양호한 거주시설이 사실상 어려운 국가들에서 열악한 환경조건은 지속가능한 개발 부문에 부정적으로 영향을 미치는 중요한 이슈가 된다. 시멘트 제조공장이 없는 가나에서 건설업체에게 이용 가능할 수 있는 친환경 제품을 찾도록 하는 것이 경제적인 개선에 도움이 될 수 있을까 하는 것은 중요한 문제라고 생각한다. 가나에서 이용할 수 있는 보다 더 친환경적인 재료는 시멘트 수입에 소비되는 비용을 크게 줄이고 시멘트 비용을 감소시킬 수 있기 때문에 참신한 재료로 사용될 수 있을 것이다. 보다 친환경적이고 지속가능한 재료로 불리며 시멘트 산업에 사용되는 재료들에 관한 많은 정보가 관련문헌에도 제공되고 있다. 그러한 재료에는 플라이애시, 실리카 흙 및 슬래그와 같은 산업부산물 등이 있다. 소성점토(calcined clay), 혈암(shales), 메타카올린(metakaolin)과 같은 소성재(calcined materials)와 기타 천연 재료들도 보다 더 친환경적인 재료 부문에 속하는 광물질 혼화제로 시멘트에 사용된다. 이 모든 재료는 포틀랜드 시멘트에 비하여 내재에너지가 적기 때문에 사용된다. 보다 더 친환경적인 재료를 가공하는데 시멘트 제조에 사용되는 에너지(약 2.1MJ)의 절반이하가 소요된다고 알려져 있다. 이러한 친환경 재료들은 내재에너지 외에도 콘크리트 구조물의 지속가능성을 증진하는 재료로 관련문헌에 아주 잘 소개되어져 왔다. 앞서 언급한 친환경 재료로 시멘트의 20% 및 30%를 대체하는 것은 콘크리트나 몰탈과 같은 시멘트 기반 제품의 성능을 개선하는데 적합한 것으로 알려져 왔다. 가나는 국토는 15억 톤이 넘는 것으로 추정되는 다양한 성분의 점토가 풍부하기 때문에 점토를 가공하여 사용해 왔다. 점토를 가공처리하고 그것을 활용한다면 포틀랜드 시멘트 사용을 감소시키고 그 비용을 줄일 수도 있는 완벽한 방법이 될 수 있을 것이다. 많은 연구자들이 섭씨 600도에서 900도 사이의 온도에서 가공 처리한 점토가 포틀랜드 시멘트와 반응하는 점토광물(clay minerals)을 만드는데 도움이 된다는 것을 보여 주었다. 어떤 면에서 가공 처리된 점토의 사용이 가나의 건설 산업의 지속가능성을 보장하는 하나의 수단이 될 수 있을 것이다. 본 연구는 시멘트에 보다 친환경적인 재료인 가공점토의 사용에 따른 성능과 친환경 시멘트로서 가공점토와 혼합시멘트를 활용했던 일부 성공적인 프로젝트들을 개략적으로 살펴보고 그러한 친환경 재료와 포틀랜드 시멘트간의 어떤 차이점이 있는지를 조사하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 ASTM 타입 1, 2 포틀랜드 시멘트, 파이로 가공 처리한 점토(pyroprocessed clay), 천연 규사(natural silica sand), 폴리카본산계 고유동화제(super plasticizer of a polycarboxylate origin), 글레니움(Glenium) 7500 및 음용수 등이었다. 시멘트는 미국 캔자스 차누테의 애쉬 그로브(Ash grove) 시멘트를 사용하였고 점토재료는 가나 아산티 지역의 만크란소(Mankranso)에서 채취하였다. 본 연구에 사용된 모래는 ASTM C778에 따른 규사이었다.

2.2 방법

점토원료는 분말로 분쇄하여 도자기 사발(지름 0.3m, 높이 0.15m)에 담아 2시간 동안 섭씨 800도의 온도에서 파이로 가공처리를 위해 전기로(electric furnace)에 두었다. 2시간이 지난 후 전기로의 가열을 멈추고 도자기 사발과 그 내용물을 전기로 내에서 24시간 동안 냉각시켰다. 분말상의 파이로 가공 처리한 점토는 중량비로 시멘트의 30%를 대체하는데 사용하였고 그 결과는 가공처리한 점토를 섞지 않은 시멘트 배합과 비교하였다.

표준 반죽 질기(normal consistency)와 초기 및 최종 응결시간에 대한 시험을 ASTM C187에 따라 수행하였다. 이 표준에는 비카트 시험기(Vicat apparatus)의 사용을 기술하고 있다. 포틀랜드 시멘트에 대한 반죽질기를 얻은 후에 시멘트계 결합재의 반죽질기는 포틀랜드 시멘트의 물시멘트비를 사용하여 반복적인 방법을 통하여 픽스시켜 놓고 추가적으로 고유동화제의 사용량을 달리하였다. 압축강도 시험은 ASTM C109에 따라서 이루어졌다. 몰탈의 유동성은 ASTM C1437에 따라서 고유동화제의 도움으로 조정되었다. 몰탈 큐브는 2개의 금속제 4각 몰드에서 제작되었고 요구되는 유동성이 이루어진 후 24시간 동안 젖은 마대와 흰색 플라스틱 고무로 덮어주었다. 각각의 몰탈 배합별로 6개의 시편을 제작하였다. 24시간이 지난 후 몰탈 시편을 탈형하였고 재령 3, 7, 14 및 28일 동안 석회 포화수(saturated lime water) 속에서 양생하였다.

수축시험(shrinkage test)은 ASTM C596에 따라 이루어졌다. 몰탈 시편은 $110 \pm 5\%$ 의 유동성(flow)을 발휘하도록 준비되었다. 시멘트 혼합 몰탈의 요구되는 유동성은 HRWR(Glenium 7500)을 사용하여 얻을 수 있었다. 규격 25 x 25 x 285mm의 몰탈 프리즘 6개가 각각의 프리즘 몰드에서 제작되었다. 그 시편들은 투명한 플라스틱 시트와 젖은 마대로 수분 증발을 막기 위하여 덮어 주었다. 24시간 습윤 양생을 실시한 후에 그 시편들을 탈형하고 두 개의 그룹으로 나누었다. 각 그룹별 세 개의 시편이 총수축과 자기수축(autogenous shrinkage)용으로 지정되었다. 시편의 초기 길이는 24시간 양생 후에 ASTM C490에 따라서 길이 비교측정기(length comparator)를 가지고 이루어졌다. 자기수축용으로 지정된 시편은 왁스로 밀봉하여 섭씨 23도, 상대습도 50% 상태의 챔버에 보관한 반면 총수축용으로 지정된 시편들은 초기길이를 기록한 후 72시간 동안 수중양생을 실시하였다. 수중양생이 완료된 샘플들은 챔버 내에서 보관되었는데 보관시작 4, 7, 11, 18 및 25일이 경과되는 시점에서 길이 측정한 값이 기록되었다.

이러한 친환경 시멘트를 사용하는 일부 프로젝트들이 본 연구에서 선정되었다. 이러한 프로젝트에는 가나 쿠마시(Kumasi)에 소재하는 창고형 공장건설, 목교(Timber bridge) 보수공사 및 시장 등이 있다. 친환경 시멘트에 관한 실험연구에서 얻어진 결과는 친환경 시멘트 생산을 확대하는 결정을 내리는데 도움이 되었다. 이것은 보통포틀랜드 시멘트(OPC - 42.5R)와 원통형 기계식 믹서(높이 1.5m, 직경 1.7m) 안에서 분쇄 파이로 가공 처리한 점토(PC - milled pyroprocessed clay)를 혼합하여 이루어졌다. 혼합 비율은 디지털 저울을 사용하여 중량비로 OPC 70% 및 PC 30%이었다. 믹서의 용량은 50kg 포대로 한 배치(batch)당 친환경 시멘트 23포를 제조할 수 있을 정도였다. 제조된 친환경 시멘트는 콘크리트,

몰탈 및 시멘트 블록을 만드는 분야에서 주원료로 사용되었다. 이 분야에서 친환경 시멘트 사용은 포틀랜드 시멘트를 사용하는 방법과 같은 식으로 쓰여 졌다.

3. 결과 및 검토

3.1 일반적인 반죽질기와 응결시간

포틀랜드 시멘트(CON3)와 친환경 시멘트(PC3)에 대한 반죽질기와 응결시간 시험결과를 표를 만들어 보았다. 표에서 PC3는 CON3에 비하여 요구되는 반죽질기를 얻는데 많은 양의 혼화재(고유동화재)를 필요로 하였다. 이것은 Ganesan et al. [14]와 Sinthaworn 및 Nimityongskul [15]의 연구에서도 확인된 바와 같이 결합재에서 파이로 가공처리된 점토의 많은 표면적과 다공질성에 기인된 것일 수 있을 것이다.

친환경 시멘트(PC3)의 초기 및 최종응결시간 모두 포틀랜드 시멘트 결합재 풀(Portland cement binder paste - CON3)에 비하여 지연되었다. 화학혼화재의 첨가로 응결시간 지연에 어떤 특이할 만한 영향을 미치지 않는 것이다. 이러한 결과는 벌써 800도에서 가공 처리된 점토가 포졸란으로써 작용한다고 언급했던 Brooks et al. [16] 및 Fu et al. [17]의 연구결과에서도 확인되었다. 일반적으로 포졸란 재료는 포틀랜드 시멘트와의 반응을 느리게 하는 특성이 있다.

3.2 압축강도

모든 재령에서 친환경 시멘트에 의한 강도가 포틀랜드 시멘트에 의한 것보다 우수한 것으로 나타났다. 친환경 시멘트에 의한 재령 3, 7, 14 및 28일 시편의 강도는 관리기준 시편의 강도에 비해 19%, 11%, 19% 및 30%씩 각각 더 큰 것으로 나타났다. 시험결과 파이로 가공 처리한 점토 재료가 3일 및 7일의 초기양생 기간 중 필러로서 작용함으로써 시멘트 수화작용 즉 용액에서 수산화칼슘이 방출되어 결정질을 만들게 되었던 것으로 나타났다. 재령 7일 이후 재료의 거동도 가공 처리한 점토의 포졸란 영향을 받은 것으로 나타났다. 포졸란 효과는 시멘트나 포졸란의 강도특성을 증진하는 칼슘 알루미늄 및 칼슘 실리케이트 수화물을 포함한 부수적인 수화작용 화합물을 형성하기 위해 석회분을 흡수하는 것이다. 두 가지 시멘트에 대한 student *t*-test 결과, 두 재료에 의한 강도는 통계적으로 유의할 만한 차이는 없는 것으로 나타났다. 이것은 재령 3, 7, 14 및 28일의 강도측면에서 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 따라서 친환경 시멘트의 사용은 포틀랜드 시멘트 대신 어떤 공사에도 매우 적합하다.

3.3 수축

두 가지 시멘트에 대한 총 수축과 자기수축을 살펴 본 결과, 대체로 총수축은 시멘트 기반의 재료(콘크리트 또는 몰탈)와 특정 상대습도 및 온도와 같은 환경 사이에 증발수분의 손실로 인해 발생하는데 반해 자기수축은 수화작용에 의한 형성의 결과로서 공극내의 상대습도의 감소에 기인하여 발생한다. 몰탈

의 총수축은 자기수축에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 두 가지 시멘트에 대한 총수축과 자기수축은 student t -test 결과, 통계적으로 큰 차이가 없었다. 따라서 친환경 시멘트는 수축문제의 경우 그 내구성에 위협이 될 만한 요인이 없이 포틀랜드 시멘트의 대체시멘트로서 사용될 수 있는 것으로 추론할 수 있다.

3.4 친환경 시멘트의 현장 적용

성공적인 실험실 조사연구 이후 친환경 시멘트 재료를 현장작업에 사용해 보았다. 친환경 시멘트를 사용한 건축 제품에는 중공블록(sandcrete blocks), 매스콘크리트 및 철근콘크리트 등이 있었다. 본문 그림 3은 포틀랜드 시멘트와 소성 점토 포졸란 혼합물로 제조된 친환경 시멘트를 사용하는 진행 중인 공사현장을 보여준다.

4. 결론 및 권고사항

4.1 결론

포틀랜드 시멘트와 소성 점토 포졸란의 혼합물로 제조되는 보다 친환경적인 시멘트에 대해 연구를 수행하였다. 제조된 친환경 시멘트에 대한 성능은 응결시간, 강도 및 수축 등의 특성에 관한 것이었다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

4.1.1 이 친환경 시멘트는 포틀랜드 시멘트에 비하여 응결시간이 지연되었다.

4.2.2 친환경 시멘트의 유동성을 개선하기 위하여 화학 혼화재의 첨가가 요구된다.

4.1.3 친환경 시멘트에 의한 강도는 모든 재령에서 포틀랜드 시멘트에 의한 것과 유사하였다.

4.1.4 친환경 시멘트와 포틀랜드 시멘트에 의한 수축관련 문제는 통계적으로 살펴본 결과 유의할 만한 차이점은 발견되지 않았다.

4.1.5 친환경 시멘트의 사용은 지속가능성을 극대화하기 위하여 포틀랜드 시멘트의 대체 방안이 될 수 있다.

4.2 권고사항

본 연구결과 친환경 시멘트와 포틀랜드 시멘트에 대한 생애주기 분석연구를 추가적으로 시행할 것을 권장한다. 또한 가나의 건설업계는 건설계약 체결 전에 고려되어야 할 조치의 일환이 될 친환경 등급 체계의 개발을 시도하기 위해 노력해야만 한다. 이렇게 노력한다면 가나 시장에서 가나의 건설제품을 가

장 잘 이용할 수 있도록 만들 것이다.