

Global Report

폐재료를 혼합하여 만드는
지속가능하고 혁신적이며 에너지
효율적인 콘크리트의 개발

1. 개요
2. 소개
3. 재료 및 방법
4. 시험결과 및 검토
5. 결론

1. 개요

전 세계적으로 건설부문은 연간 40억 톤의 시멘트를 생산하고 있고, 전 세계 에너지의 40% 이상을 소비하며, 전체 이산화탄소 배출의 약 8%를 차지하고 있다. SUS-CON(SUStainable, innovative and energy-efficient CONcrete, based on the integration of all-waste materials - 폐기물을 혼합 사용하는 지속가능하고 혁신적이며 에너지 효율적인 콘크리트) 프로젝트는 레미콘이나 프리캐스트 제품용으로 콘크리트 제조 시 폐기물을 혼합 사용하는 것을 목표로 하고 있다. 이것이 달성되면 경량의 제품으로서 친환경적이고 비용효과적인 획기적인 건설재가 만들어지게 되는 것이다. 이 친환경 콘크리트는 온갖 종류의 폐기물로 만들어 질 수 있으며 제조 시 소요되는 에너지 및 이산화탄소 발생량이 작고, 단열성능이 향상되는 특징을 갖는다. 최근에는 환경 친화적인 건설재로 등장한 시멘트를 사용하지 않는 알칼리 활성화 결합재와 경량 재활용 골재가 다양한 적용분야에서 지속가능한 콘크리트를 제조하기 위하여 사용되고 있다. 이 보고서에서는 지오폴리머 결합재(알칼리 활성화 플라이애시)와 재활용 혼합 플라스틱 골재로 만든 콘크리트의 개발결과를 제시코자 한다. 결합재와 골재의 제조 매개변수를 바탕으로 광범위한 조사를 통해 최적의 배합이 달성되었다. 이 배합 기법은 생 콘크리트 및 경화 후 콘크리트에 요구되는 특성들이 목표치에 도달되도록 개발되었다. 최적의 배합에 따른 콘크리트의 압축강도는 약 7MPa, 휨강도는 약 1.3MPa 그리고 열전도율(thermal conductivity)은 0.34W/mK이었다. 생 콘크리트 및 경화 후 콘크리트의 특성은 프리캐스트 제품의 공장생산에 적절한 것으로 판단되었다. 시범 건물 공사를 위해 PC 패널이 설계, 제작되었다. SUS-CON과 포틀랜드 시멘트 콘크리트로 만든 약 2.5 x 2.5 x 2.5m 크기의 모형이 스페인의 데모 파크에 건설되었고 내외부 온도가 측정되었다. 현장 시험결과 SUS-CON 실물 모형이 보다 우수한 단열성을 가진 것으로 나타났다. 가장 무더운 날에도 SUS-CON 실물 모형에서 측정된 온도가 더 낮았다.

2. 소개

UNEP의 보고 데이터에 따르면 전 세계적으로 건설부문은 1억 11백만 명을 고용하고 있으며 수자원의 20%, 에너지의 25%-40%를 소비한다고 하며, 전 세계 고형 폐기물의 30-40%, 그리고 세계 온실가스(GHGs)의 30-40%를 만들어내고 있다고 한다.

지속가능한 대체 건축재 분야에 대한 공적인 개입은 지구온난화를 멈추게 하고 지속가능한 발전을 위해 설정된 국제적 목표를 달성하는데 아주 절박한 실정이다. 이런 이유로 유럽위원회는 혁신적이고 친환경적인 건축재의 개발이 우선시되는 야심찬 과제를 설정하였다. 이러한 맥락에서 FP7(the 7th Framework Programme - EU의 제7차 연구·기술개발을 위한 공동 프로그램)에 따라 “내재에너지를 줄인 새로운 에너지 효율적인 건축 구성재(the call EeB.NMP.2011-1)”에 대한 성명서가 발표되었다.

SUS-CON 프로젝트는 이와 같은 사명을 달성하기 위해 자금을 지원받았으며 레미콘과 프리캐스트 콘크리트 생산 시 2차 재료(secondary materials)를 혼합할 수 있는 새로운 개념이나 기술경로를 개발하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 아래와 같은 특성을 지닌 혁신적이고 친환경적이며 비용효과적인 건설자재를 만들어내게 될 것이다.

- * 경량
- * 적은 제작 소요 에너지
- * 적은 이산화탄소 배출량
- * 단열성 및 흡음성 개선(다기능)

이 프로젝트의 초점은 현재 재활용되고 있지 않은 유럽전역에서 주로 이용 가능한 폐기물에 관한 것으

로서, 2차 재료(secondary materials)에서 골재와 결합재를 찾아내어 100% 재활용 콘크리트를 개발하는 것이다. 골재는 경량소재(폐타이어, MPW, WEEE 및 경질폴리우레탄폼 등)에서 얻어진 반면에 결합재는 알루미늄규산염이 풍부한 전구체(석탄재, 야금슬래그, 펄라이트 찌꺼기 등)에서 개발되었으며, 활성화제(activators)로서 알칼리성 재료를 사용하였다. 이 프로젝트에 관한 세부내용은 출판물이나 프로젝트 웹사이트에서 볼 수 있다. 이 프로젝트는 2015년에 선정된 SUS-CON 재료로 제조기법을 활용하여 패널, 블록 및 바닥용 레미탈(ready-mix floor screed)의 공장생산이 이루어져 성공적으로 완료되었다. SUS-CON과 포틀랜드 시멘트 콘크리트로 시공한 건축물로 조성한 세 곳의 시험현장이 유럽(스페인, 터키 및 루마니아)에 들어서게 되었다.

이 보고서에서는 프리캐스트 판넬 제조를 위한 재활용 혼합 플라스틱으로 만든 골재와 지오폴리머 결합재(알칼리 활성화 플라이애시)로 만든 콘크리트 개발로 얻어진 일부 결과들이 제시된다. 배합 제조기법은 생 콘크리트 및 경화 후 콘크리트의 소요특성을 발휘할 수 있도록 개발되었다. 프리캐스트 판넬은 시험 건축물의 시공을 위해 설계 제작되었다. SUS-CON과 포틀랜드 시멘트 콘크리트로 만든 약 2.5 x 2.5 x 2.5m 크기의 실물모형(Mock-ups)이 스페인의 데모 파크에 건설되었고 내외부 온도가 측정되었다.

3. 재료 및 방법

3.1 재활용 골재 개발

플라스틱 재활용 선별과정 후 획득되는 혼합 플라스틱 폐기물(MPW - Mixed Plastic Wastes)이 이번 연구에서 조사되었는데 MPW를 경량 콘크리트 골재로 가공할 수 있는지를 평가하기 위해서였다. 혁신적인 경량 골재를 생산하는 기술적인 프로세스가 재료 재활용 부문을 연구하는 이태리 회사(Centro Riciclo Vedelago)와 협력하여 개발되었다. 원재료로 사용되는 플라스틱 스크랩은 주로 폴리에틸렌(PE)과 폴리프로필렌(PP)로 이루어져 있으나 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)와 기타 약간의 불순물을 함유하고 있기도 하다. 기본적으로 두 가지 종류의 골재를 생산하는 프로세스는 압출과 팽창으로 되어 있다. 프로세스 매개변수는 제품 품질과 생산비용을 고려하여 세밀하게 최적화되었다. 경량 골재(Remix - RX라 칭함)는 RX HD(밀도가 더 큰 단단한 박편형태)와 RX LD(저밀도 팽창 과립형태)로 서로 다른 밀도의 골재로 제조되었다. RX HD 골재는 원재료를 압출기로 가공하여 생산하였는데 플라스틱을 녹이고 단단하게 한 다음 냉각하여 적절한 크기로 줄여 생산되었다. RX LD 골재는 역시 폐기물에서 얻은 거품제를 사용하여 특허를 받은 발포 공정으로 생산되었다.

콘크리트 제조를 위해 생산된 골재의 적합성을 평가하기 위해서 이 골재들은 특정 기준에 따라 물리적, 기계적 그리고 화학적 특성 측면으로 완전히 구분시켰다. 고밀도형과 팽창형 이 두 종류의 Remix 골재들은 입자 밀도가 2000kg/m³ 이하임으로 EN 206-1의 기준에 따른 경량 골재로 분류될 수 있었다. 또한 화학시험 결과 관련 기준요건에 부합하는 것으로 확인되었으며 안전보건환경(HSE) 평가결과에 따라 개발된 골재들이 유해하지 않은 것으로 분류될 수 있었다.

3.2 알칼리 활성화 결합재

플라이애시는 영국 노스 요크셔 트랙스 발전소 (주)Power Minerals에 의해 공급되었다. 분말 입자의 평균 크기는 18μm이었다. 광물학적 구성성분은 x선 회절분석기를 가지고 평가되었다. 내부표준으로서 강옥(산화알루미늄) 중량의 20%를 첨가 블렌딩하는 Rietveld 방법은 비정질 및 결정질 부스러기(crystalline fractions)의 정량적 평가를 가능하게 하였다. 비정질 함유량은 86%인 것으로 확인된 반면 검출된 주요

결정질 상(main crystalline phases)은 석영(4.6%), 물라이트(8.1%), 적철광(0.5%) 등이었다.

상업용 화학물질이 활성화제로 사용되었는데 순도 99%의 상업용 고체 수산화나트륨과 이산화규소와 산화나트륨 질량비가 2인 규산화나트륨용액을 사용하였다.

3.3 외장용 판넬과 재료 특성화에 적합한 배합설계의 개발

다음 요건들은 외장용 판넬 생산에 적합한 배합을 위해 산업계 협력사들에 의해 결정되었다 : 슬럼프 9-20cm, 밀도 약 1,100kg/m³, 압축강도 범위 5-20MPa. 이러한 요건을 충족할 수 있는 배합설계가 개발되었고 그 전반적인 특성을 만족시키는지에 대해 광범위하게 조사하였다. 기계적 특성(압축강도, 영율, 포와송비, 휨강도, UPV 등) 그리고 단열특성(열전도율, 열팽창 계수, 열용량, 축열용량 등)이 측정되었다.

4. 시험결과 및 검토

4.1 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 재활용 골재 사용의 적절성

이전의 실험활동을 통해 Remix HD 및 LD의 형태로 지속가능한 골재를 얻는 목적으로 재활용 혼합 플라스틱 스크랩 사용의 적절성이 입증되었다. 다음 단계는 경량 콘크리트에 사용될 수 있는지 그 가능성을 검증하는 것이었다. 따라서 기존의 보통 포틀랜드 시멘트와의 융화성(Compatibility)이 평가되어야 했다. 그 구체적인 목표는 건물 외장용 판넬처럼 프리캐스트(PC) 건축 구성부재로 적절한 콘크리트 배합을 개발하는 것이었다. 이러한 콘크리트 부재를 만들기 위해 시험에 요구되는 요건들은 밀도 350-1700 kg/m³, 시공연도 S4-SCC 그리고 압축강도 5-24MPa 등이었다. 이를 위해 다양한 콘크리트 배합이 RX골재, 천연골재 및 PC(타입 I 42.5R, 밀도 3.1kg/m³)등 혼합하여 설계 및 생산되었다. 배합은 특정 표준에 따라 생 콘크리트(밀도, 시공연도, 공기함유량) 및 경화된 콘크리트(기계적 특성, 단열성, 초음파 조사)의 목표특성과 성능을 얻기 위해 최적화되었다.

다양한 최적화 작업이 실험실에서 실행되었다. 초기에 RX 골재의 융화성 평가가 실시되었는데, 이는 예비 콘크리트 배합을 먼저 생산하고 이를 생 콘크리트 상태에서 조사되었다. 콘크리트 배합에 RX 골재의 사용으로 부풀음 현상(swelling phenomena) 등 일부 바람직하지 않은 결과가 일어났다. 이러한 거동은 골재 생산 시 사용된 원재료에 잔류 불순물의 영향과 관련이 있었다. 후속 실험에서는 좀 더 깨끗한 골재가 사용되었고 이러한 문제는 해결되었다. 다음 단계는 두 개의 실험실에서 수행된 체계적인 실험 프로그램으로 목표치의 적용성 확보가 가능한 최상의 RX 기반의 콘크리트를 식별하고 그 재생산성(reproducibility)을 평가하기 위한 것이었다. 제1차 실험기간 동안 여러 가지 배합설계 매개변수(즉, 물시멘트비, 골재/페이스트 및 골재 배합비 등)가 적절한 밀도, 반죽질기 및 기계적 성능 등을 가진 콘크리트를 얻기 위해 적절히 조정되었다.

얻어진 실험결과들을 바탕으로 추가적인 최적화 조치가 두 번째 실험실에서 수행되었다. 참고로 배합 2를 사용하여 보다 구체적인 연구가 수행되었는데, 그것은 최종 콘크리트 성능에 관한 특정 설계 매개변수(즉, RX 골재 비율, 물시멘트비 및 시멘트 함유량 등)에 대한 효과를 모니터링하는 것이었다. 따라서 70%에서 100%까지 다양한 용적의 RX 골재, 세 종류의 물시멘트비(0.37, 0.4 및 0.45) 그리고 두 종류의 시멘트 함유량(400 및 450kg/m³)의 배합에 대한 시험이 실시되었다. 상기 언급한 매개변수들 중 하나는 각각의 시험마다 변경되었다.

RX골재를 기반으로 한 모든 콘크리트는 기존 배합 절차와의 호환성이 우수할 뿐만 아니라 재생산성도 우수한 것으로 나타났다. 개발된 모든 콘크리트의 밀도는 목표로 하는 용도에 적합하였다. 다양한 비율

의 RX골재를 사용해도 콘크리트의 시공연도(모든 시험에 반죽질기 S4급 적용)에 영향을 주지 않았다. 예상대로 플라스틱 골재량을 증가시키면 압축강도는 약해지는 결과가 초래되었다. 시멘트 400kg/m³ 및 물시멘트비 0.45를 사용할 경우 압축강도 목표는 RX 70%의 경우에만 달성되지만 좀 더 많은 시멘트 (450kg/m³)와 물시멘트비 0.4를 사용할 경우 모든 배합이 판넬 설치용으로 적절하였다.

4.2 재생골재와 지오폴리머 결합재를 사용하는 배합설계 개발

최적의 배합설계는 페이스트와 미세골재의 배합비율을 다양화하는 것을 시작으로 조사하였다. 0/2mm RX골재는 골재내부에 알미늄 금속과 같은 잔류불순물이 있을 수 있기 때문에 콘크리트에 열 생성, 속건성 및 부풀음 현상을 일으키는 것으로 알려져 사용되지 않았다. 따라서 세골재(fine fraction)는 천연모래로 대체되었다.

50%(RX1 배합)의 페이스트 비율은 골재를 포함시키기에 너무 적은 것으로 확인됨에 따라 60% 비율로 증가시켰다. 천연모래는 전체 골재 부피의 20%(RX2 배합) 및 30%(RX3 배합)씩 사용되었다. 그러나 블리딩 현상 및 골재분리 현상이 관찰되었다. 유동성이 너무 큼에 따라 후속 조사에서는 물시멘트비를 감소시켰다.

압축강도는 신속한 강도발현 결과를 확인하기 위하여 재령 6일째 측정되었다. 60% 페이스트의 배합은 5MPa를 초과해야하는 요건을 만족시키는 것으로 확인되었지만 콘크리트의 밀도가 목표치(즉, 1100kg/m³)보다 약간 더 큰 것으로 확인되었다. 함수량을 감소시킬 목적으로 RX3 배합과 유사한 2개의 추가배합(RX4 및 RX5)이 시도되었는데 결과는 강도가 증가되고 블리딩 현상이나 골재분리 현상이 최소화되는 것으로 나타났다. RX4 배합은 골재 함유량을 증가시킬 목적으로 55% 미만의 페이스트로 준비되었다. 모래 함유량은 전체 골재용적의 30%로 동일하게 유지되었다.

함수량의 감소에도 배합의 시공연도는 요건에 맞는 것으로 관찰되었다. 그러나 스프레드 시험(spread test)을 하는 동안 여전히 약간의 블리딩 현상이 관찰되었다. 재령 28일 강도는 5MPa 초과로 만족스러운 것으로 확인되었다. 시공연도와 강도 등 기술적 요건들은 기준에 적합하였지만 측정된 밀도는 기준치를 초과하는 것으로 확인되었다. 그러나 PC 산업계 협력사들이 외장용 판넬을 생산하는 데에는 만족스러운 것으로 판단되었다. 따라서 RX4 배합이 외장 판넬 생산용으로 선택되었다.

4.3 기계적, 열적 특성에 대한 평가

배합설계가 확정된 후 SUS-CON 콘크리트의 기계적, 열적 특성 등 종합적인 특성 분석이 이루어졌다. 관련 기준에 따라 RX4 배합에 관한 시험들이 실시되어 결과가 도출되었다. 생 콘크리트의 특성, 경화 후 콘크리트의 압축강도 및 밀도 등이 만족스러운 것으로 확인되었고 단열성능 측정을 위한 데이터도 획득되었다. 압축강도, 영률(Young modulus) 및 프와송비는 Magnetti Building사(이 프로젝트 산업계 협력사)에 의해 평가되었다.

4.4 판넬과 실물모형 제작 및 모니터링 시스템

실제 크기의 건축물로 SUS-CON 제품의 타당성과 에너지 효율성 측면에서 실질적인 성능을 입증하기 위하여 판넬 구성재로 두 개(하나는 SUS-CON 판넬, 다른 하나는 포틀랜드 시멘트 콘크리트로 만든 관리기준 판넬)의 실물모형이 시공되었다. 실물모형은 스페인 마드리드의 ACCIONA Demo-Park에 건설되었다.

Magnetti Building 회사는 기성 건축자재의 설계 및 생산에 대한 책임을 지고 있었다. 판넬은 샌드위치 방식이 선택되었는데 두 겹의 외부 SUS-CON 층과 EPS100의 내부 층으로 이루어져 있었다. 판넬 설계는 일반적으로 생산되는 포틀랜드 시멘트 기반의 콘크리트 판넬과 같은 중량 및 열전도율을 유지하는 수준으로 정해졌다. 판넬은 이탈리아의 Magnetti Building 회사에서 제작되어 스페인으로 운송되었다.

실물모형의 크기는 가로, 세로, 높이 각각 2.5m이었으며 출입문과 창문이 설치되었다. 실물모형의 출입문은 북측 벽에 설치되었고 창문은 동측 벽에 설치되었다. 실물모형의 내벽은 단열 몰탈이 시공되었고 외부벽체는 회색의 방수페인트가 칠해졌다.

실물모형의 단열성능을 모니터링하기 위하여 여러 개의 탐침(probes)이 설치되었다. 실내온도 측정용(T1, T2) 2개, 벽면의 실내온도 측정을 위해 1개(T3), 남쪽 벽의 열전도 측정을 위해 1개(T5), 외부온도(T8)와 외벽면(T9)의 온도측정을 위해 각 1개 등이 설치되었다. 탐침이 직사광선으로 인해 과열되는 것을 막기 위해 창문은 반사 알루미늄 막으로 가리어졌다. 이 보고서에 제시된 모니터링 결과는 2015년 8월과 10월 사이 53일 동안 기록된 측정치이다.

4.5 실물모형 온도 측정 값

시공된 실물모형의 에너지 효율성을 분석하기 위하여 시간대별 온도와 시간대별 열전도 등에 대한 다양한 조사결과가 획득되었다. 판넬로 만든 실물모형에 대한 시험결과, 낮에는 SUS-CON 판넬로 만든 실물모형의 실내온도가 섭씨 0.5도 낮았으며 밤에는 관리기준 판넬 보다 섭씨 1도에서 1.5도 높은 것으로 관찰되었다. 이 두 가지 결과 모두 에너지 효율성 측면에서 긍정적인 것으로 간주되었다. SUS-CON 판넬과 관리기준 판넬 실물모형 사이에 온도 패턴은 거의 유사한 것으로 기록되었다. 판넬의 EPS 층이 단열 특성에 영향을 미쳐 SUS-CON과 관리기준 콘크리트 판넬 사이에 매우 유사한 결과를 이끌어낸 것으로 본다. SUS-CON 판넬 실물모형의 열유속(heat flux)이 관리기준 판넬 실물모형에서 얻어진 열유속에 비하여 약간 더 큰 결과를 나타내었다.

SUS-CON 재료의 열관성(thermal inertia)이 관리기준 시공재료의 열관성에 비해 더 낮은 것으로 확인되었는데 이것은 에너지 효율성 측면에서 확실한 장점인 것이다.

5. 결론

본 SUS-CON 프로젝트는 레미콘과 PC 콘크리트를 사용하는 건축자재의 생산에 2차 재료(secondary materials)를 함께 사용하려는 새로운 접근방법을 개발할 목적으로 EU의 제7차 연구·기술개발을 위한 공동 프로그램(FP7)의 자금지원을 받았다. 이 프로젝트는 2015년 말 성공적으로 완료되었으며, 유럽의 3개 시범 현장에 실물 모형이 시공되었다. 생애주기분석과 생애주기비용 분석결과 개발된 재료가 이산화탄소 배출감소, 내재에너지 감소 및 비용감소 요건을 충족하는 것으로 나타났다. 개발된 재료의 실질적인 활용도로는 건축용 블록, 외장용 판넬 및 바닥미장용 레미탈(floor screed) 등이다.

이 보고서에는 혼합 플라스틱 폐기물 골재와 플라이애시 결합재의 조합으로 얻어진 일부 결과들이 소개되었다. 골재가 개발되었고 콘크리트에 적합한지 여부가 포틀랜드 시멘트와의 광범위한 시험을 통해 평가되었다. pfa 기반의 알칼리 활성화 결합재가 개발되었고 결합재와 골재 이 두 가지 구성재의 상용성이 평가되었다. 외장용 판넬 생산을 위해 산업계 협력사에 의해 설정된 기술적 요건들을 충족하는 배합설계가 개발되었는데 그 구체적인 요건은 압축강도 약 7MPa, 휨강도 약 1.3MPa 그리고 열전도율은 0.34W/mK이었다. 2.5m x 2.5m x 2.5m 크기의 실물 모형 설치를 위한 판넬은 Magnetti Building사에 의해 설계 및 제조되었다. SUS-CON 실물모형과 포틀랜드 시멘트 기반의 콘크리트로 만든 관리기준 실물모

형이 ACCIONA사에 의해 스페인의 홍보 공원에 설치되었고 50일 이상 모니터링 되었다. 현장의 내외부 온도를 측정한 결과 SUS-CON 자재가 우수한 단열성을 가지고 있고 관리기준 시공재료 보다 열전도도 (thermal inertia)가 더 낮은 것으로 나타났다. SUS-CON 패널의 공장 생산은 현재의 포틀랜드 시멘트 기반의 콘크리트 생산시스템에 큰 변화 없이 실현가능성이 있는 것으로 입증되었다.