Global Report

친환경 건축물 시공용 지속가능한 시멘트

1. 개요
2. 소개
3. 시멘트 제조공정
4. 지속가능한 시멘트
5. 결론

KAIA 국토교통과학기술진흥원

작 성 자 | 김 규 남

1. 개요

해마다 매립장에 처분되는 대량의 폐기물, 천연자원의 고갈과 환경의 훼손, 이산화탄소 배출의 비상상황은 연구기관 및 산업계가 토건분야의 지속가능한 솔루션(sustainable solutions)을 향해 나아가도록 주도하는 자극제들(motivations)이 되고 있다. 따라서 친환경 건축물 시공용으로 지속가능한 재료를 사용하는 것은 시급히 달성되어야 할 중요한 목표가 된다. 지속가능한 시멘트는 클링커 함유물을 유해하지 않은 폐기물로 부분 대체하는 방식으로 적용할 수 있다. 사실 폐기물은 재활용 과정을 거치면 특정한 환경저항성(peculiar environmental resistances)을 지닌 새로운 시멘트 구성재의 역할을 하는 이차적인 원료 즉, 지속가능한 바인더로 변환 될 수 있다. 지속가능한 시멘트를 만들기 위해 수행될 수 있는 방안들뿐만 아니라 환경오염에 관한 시멘트의 영향과 시멘트 제조과정에 대한 세부사항들을 검토하고 알리고자 한다.

2. 소개

건축물 건설의 기본적인 요소는 재료이다. 적절한 설계뿐만 아니라 재료의 화학적, 물리적 및 기계적 특성은 건물의 기계적 강도에 직접적인 영향을 미친다. 또한 재료는 건축물의 내구성을 보장하는 목적도 지니고 있다. 이탈리아 각료 법령(The Italian Ministerial Decree-14/01/2008) “건축규정” 리스트의 재료와 제품은 구조용으로 쓰일 수 있는데, 그 특성 및 주요 성능이 충족되어야만 한다. CE(유럽공동체 인증- Conformité Européenne or European Conformity)마크는 “Construction products directive, CPD - 건설자재지침” 89/106/EEC에 따라 시멘트, 콘크리트 및 몰탈용 골재, 강재 등과 같은 가장 중요한 건설 자재에 대해 의무적으로 적용된다. 이 지침서에는 유럽에서 시장에 거래되는 건설 자재는 합리적인 내구연한 기간 동안 기계적 강도 및 안정성, 화재발생시의 안전, 건강 및 환경, 사용 중 안전, 소음으로부터 보호, 에너지 경제 및 보온성 유지 등과 관련한 필수요건을 충족시켜야만 하는 것으로 기술되어 있다. 인증된 재료의 사용, 자재의 내구연한을 고려한 자재의 선택 그리고 적절한 설계는 최소 50년(대형 또는 전략적 공공사업의 경우 100년)에 걸치는 기간 동안 일반적인 유지관리를 포함한 건물 내구성을 보장해야만 하는 것으로 되어 있다.

친환경 건축물의 설계는 기존 건축자재 보다 우수하거나 유사한 특징을 가진 지속가능한 재료의 선택과 사용으로 시작되어야 한다. 그러나 몇 가지 의문점이 생기게 된다 : 시멘트와 같이 자주 사용되는 건축 재료가 지속가능한 재료가 될 수 있으며, 이들을 시장에서 거래가 될 수 있을까? 지속가능한 시멘트가 기존의 시멘트에 요구되는 모든 요건을 준수하는가? 지속가능한 시멘트가 기존의 재료의 성능과 견줄만한 성능을 가지고 있을까?

지속가능한 건축 재료는 일반적으로 적절한 폐기물의 재활용을 기반으로 하는데, 이러한 폐기물의 특성으로 인해 재생 불가능한 자원에서 추출하는 천연 재료를 부분적으로 또는 전적으로 대체할 수 있다. 천연 원료를 얻기 위해 무분별한 분쇄, 세척작업, 천연자원에 일반적으로 수행되는 선택, 기술적인 과정(즉, 벽돌과 타일의 경우 고온에서 소성, 시멘트 제조의 경우 클링커 제조공정 등)은 모두 에너지를 소비하는 절차들이다. 따라서 유럽의 경우 건축 산업은 전체 소비되는 에너지의 약 40%를 차지하며 이산화탄소 배출의 주요 발생원 중 하나이다.

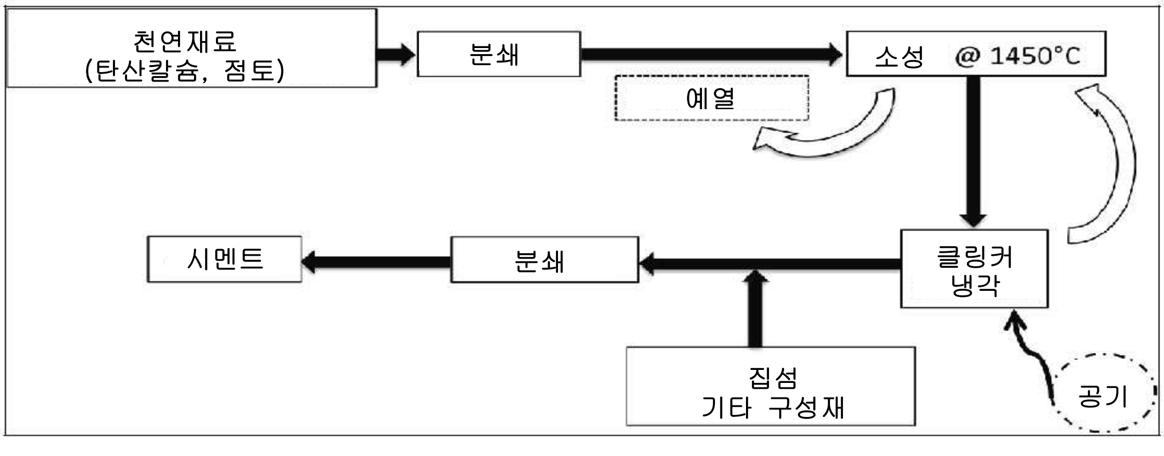
사실 친환경 건축물로 전환한다는 것은 친환경 건축물에 쓰이는 일반적인 건축 재료의 수정을 의미하는 것으로, 지금은 폐기물로 부르지만 앞으로는 마땅히 보조재료(secondary materials)라 불러야 할 것이다. 이러한 전략은 매립 처분되는 물량을 획기적으로 감소시키고, 재생 불가능한 천연자원을 보호하고

, 환경을 보존하며, 에너지를 절약하고 비용을 줄이는 쪽으로 이어질 것이다. 그러나 이러한 변화의 효과성과 성공을 확신하기 위해서 기존 재료들의 기술 표준에 의해 제공되는 모든 요건들은 기존의 재료가 아닌 것들에 대해서도 완벽히 이행되어야 한다는 것은 아주 중요하다. 따라서 유럽의 지침인 CPD(건설자재지침)에서는 자재에 대해 맞는 표준이 존재하지 않을 때, 어떤 표준에 대한 아무런 권한도 유럽 공동체위원회(EC - European Commission)에 의해 부여되지 않았을 때, 표준이 아직 개발되지 않거나 하나의 제품이 해당 표준에서 크게 벗어날 때, 이들에 대한 승인 도구로서 유럽 기술 승인(ETA - European technical approval)을 부여하도록 소개하고 있다. 따라서 ETA는 폐기물을 기반으로 하는 기존의 것이 아닌 건축 재료의 도입에 도움이 될 수 있는 하나의 유럽 인증으로서 신규 건축 자재의 성능 및 특성을 보장하고 아직 CE(유럽 공동체 인증) 마크가 없을지라도 그 자재의 사용이 가능하도록 한다. ETA(유럽 기술 승인)가 발급되면 EEA(유럽경제지역) 모든 국가에서 5년 동안 유효하며, 이후 갱신할 수 있다.

이 보고서의 목적은 유럽에서 가장 대중적인 건축 재료인 시멘트가 그 제조과정에서 폐기물을 도입한 덕분으로 어떻게 지속가능하게 될 수 있는지 그 방법을 강조코자 하는 것이다. 건축 재료의 폐기물 재활용에 관한 검토내용이 수록되어 있지만 그렇다고 폐기물을 기반으로 한 시멘트의 유효성을 확인하고 허용하는데 필요한 모든 매개변수가 고려되거나 보고되고 있는 것은 아니다.

3. 시멘트 제조공정

이탈리아는 2009년에 32백만 톤의 시멘트를 생산하는 주요 국가들 중 하나이다. 2009년에 유럽연합과 세계에서 생산된 시멘트 양은 각각 191백만 톤과 789백만 톤이었다. 시장에서 이용가능한 시멘트, 시멘트 조성재(compositions), 준수해야 할 화학적, 물리적, 기계적 요건과 적합성 기준에 관한 유럽의 기준은 EN 197-1이다. 시멘트의 각 부문은 세부적으로 나눌 수 도 있지만 크게 다섯 가지 종류로 분류할 수 있다. 보통 포틀랜드 시멘트(OPC-Ordinary Portland cement)는 CEM 1으로 분류되며, 혼합 포틀랜드 시멘트(composite Portland cement)는 CEM II, 고로(blast furnace) 시멘트 및 포졸란 시멘트는 각각 CEM III과 CEM IV로 그리고 혼합 시멘트(composite cement)는 CEM V로 분류된다.



<그림 1 - 시멘트 제조 공정 개략도>

시멘트 생산은 많은 에너지를 소비하며 환경에 심각한 영향을 미친다. 클링커는 가장 많이 사용되는 시멘트의 주성분이다 : 이 클링커의 생산에는 천연원료(탄산칼슘 75~80% 및 점토 20~25%)가 대량으

로 소비되며, 고온(섭씨 1500도)의 제조과정과 천연고체연료의 엄청난 소모, 그리고 대기 중에 대량의 이산화탄소를 야기하는 원인이 되고 있다. 그림 1은 시멘트 제조공정의 개략도를 나타내고 있다. 수평 가마에서 발생하는 클링커 제조(소성)공정 외에 약 50μm 평균 크기를 가진 최종 제품을 얻기 위해 여러 가지 분쇄작업이 요구된다. 최근의 경제 위기 때문에 2007년에서 2009년 사이에 시멘트 생산이 전반적인 감소세를 나타내었으나, 이산화탄소/클링커의 중량비는 같은 수준인 0.87로 일정한 추세를 나타내었다. 따라서 매년 생산되는 클링커 톤당 이산화탄소 배출량은 지구온난화와 기후변화에 관해 잘 알려진 사실들과 더불어 대기 중에 방출되는 이산화탄소의 양은 조금씩 적게 방출되고 있다. 2009년 유럽의 시멘트 생산량은 전 세계 총 생산량의 약 25%를 차지했다.

전체 다섯 가지 시멘트의 생산량은 종류별로 다양하다. 가장 많이 생산되는 시멘트는 혼합 포틀랜드 시멘트(CEM II)로 57%를 차지하며, 뒤이어 보통 포틀랜드 시멘트(OPC - CEM I)가 27%를 차지한다. CEM II와 CEM 1의 클링커 함유량은 각각 최소 65% 및 95%로 아주 상이하다. 물론 클링커 생산으로 인한 환경영향이 매우 크므로 클링커 생산이 줄어들거나 시멘트에 함유된 클링커 양이 줄어들면 그만큼 더 시멘트가 지속가능하게 되는 것이다.

그러나 유럽에서 시멘트 생산량의 1/3은 여전히 CEM I 시멘트로 클링커가 시멘트의 기계적 강도 발현 및 조기강도 발현을 위한 기본적인 구성재이다. CEM II 시멘트는 클링커를 제외하고 탄산칼슘 및 천연 포졸란 같은 천연재료이거나 또는 플라이애시, 실리카 흄(silica fume), 고로 슬래그 등의 인공 재료로 다양한 구성재가 복합되어 있다. 후자 즉 인공재료가 아주 중요한데 그 이유는 시멘트의 수화작용에 중요한 역할을 하며 보조재료(secondary materials)로 분류되고 다양한 산업공정(열전력 에너지 생산, 반도체 산업과 제철 생산 등)에서 제각각 나오는 폐기물이기 때문이다. 실제로 플라이애시 또는 실리카 흄 또는 고로 슬래그 등으로 이루어진 혼합 포틀랜드 시멘트는 지속가능한 시멘트의 첫 번째 사례로 간주될 수 있지만 이 혼합 포틀랜드 시멘트의 확산은 약 20~25% 정도로 아직 제한적인 편이다

4. 지속가능한 시멘트

클링커 함유량 감소 및 그 대체재 물색은 지금까지 수행되어온 수많은 연구에 따라 지속가능한 시멘트를 얻기 위해 추구해야 하는 목표이다. 폐기물을 기반으로 한 새로운 시멘트 구성재(시멘트 보충재로도 정의함)를 조사하기 위해 최근 아주 큰 관심이 모아졌다. 분쇄된 소다석회유리(Pulverized soda lime glass), 수집된 폐유리(matt waste from glass separated collection), 소각처리 후 바닥의 잔재(treated bottom ash), 활성화 슬래그(activated slag) 및 심지어 세라믹 잔류물까지 시멘트 보충재(SCM)로 시험되어왔다. 그러나 지속가능한 시멘트가 EN 197-1에 보고된 유럽 시멘트 분류의 일부가 되기 위해 충족되어야 할 기본 요건은 무엇일까?

화학적, 물리적 및 기계적 매개변수는 국제 표준과 각 속성에 대한 최대 수치들이 기존의 일반 시멘트를 기준으로 설정되었다. 따라서 일반적으로 20~35% 범위의 클링커를 대체하는 시멘트 보충재로 구성되는 새로운 지속가능한 시멘트는 그 시멘트의 기계적 강도, 응결시간, 안정성과 수화작용이 일어나는 과정에 잠재적인 화학물질 함유량(예 : 염화물 및 황산염 등)에 따라 분류되어야만 한다. 불행히도 이러한 모든 테스트가 새로운 바인더에 대해 수행되는 것은 아니므로 기계적 특성에 국한된 부분적인 특성화만 수행된다. 그렇기 때문에 이것은 건설부문에서 새로운 지속가능한 시멘트의 적절하고 안전한 사용을 보장하기에 충분하지 못하다.

물리적 및 화학적 한계를 준수하지 않으면 응결 지연, 팽창성 생성물(예 : 에트린 가이트), 철근의 부식 등과 같은 콘크리트의 심각한 문제가 발생할 수 있다. 콘크리트 내구성은 토건기술 분야의 아주 중요한 문제이며 시멘트는 환경에 견디기에 충분한 정도로 콘크리트를 컴팩트하게 만들기 위해 중요한 역할을 한다. 산성비, 오염, 해염(marine aerosol), 해수 및 공업제품의 화학적 침해 등은 시멘트와 콘크리

트에 손상을 일으킬 수 있는 환경들 중 일부이다. 콘크리트 경화과정 동안 규산3석회(tricalcium silicate - 3 CaO.SiO2 또는 C3S)와 규산2석회(bicalcium silicate - 2 CaO.SiO2 또는 C2S), 이 두 가지 주요 클링커 구성재의 발열 수화(exothermic hydration)로 수용성 물질인 수산화칼슘(Ca(OH02)과 불용성 토보모라이트(insoluble tobermorite) 또는 시멘트질 겔(C-S-H)을 형성하게 된다. 따라서 클링커 수화물은 시멘트의 기계적 성능(C-S-H)과 수용성 거동(Ca(OH)2)을 결정하게 된다. 포졸란 성분 또는 고로슬래그(blast-furnace slag)가 첨가되면 클링커 함유량이 줄어들게 되고 일반적으로 시멘트 내구성의 향상으로 이어진다. 비전통적 구성재들도 이렇게 같은 방식으로 작동할 수 있다 : 적절한 천연성분 및 화학성분을 지닌 폐기물은 이러한 첨가물 역할을 할 수 있으며, 포졸란 성분은 이러한 성분과 결합 또는 별도로 내구성이 개선된 지속가능한 시멘트의 제조를 가능하게 한다.

폐유리 수거 과정에서 나오는 것, 연마 잔여물(polishing residues), 도자기 석재타일 생산과정에서 나오는 폐기물은 새로운 지속가능한 시멘트의 새로운 구성재로 성공적으로 사용되어 왔다. 이렇게 새로 탄생된 재료들은 그 화학성분(SiO2가 60% 이상 포함)과 무정형상의 존재로 인해 포졸란 활성이 나타나서 물 또는 화학성분의 침해에 견딜 수 있는 바인더로서의 역할을 가능하게 한다.

5. 결론

폐기물에서 얻은 비전통적인 성분(unconventional constituents)으로 클링커를 대체하는 방법은 지속가능한 시멘트를 제조할 수 있는 매력적인 방법이다. 그러나 선택된 폐기물이 거의 영속적인 구성물이어야 하고 대량으로 이용 가능해야 하며 가능한 그 일대지역에 널리 분포되어 있어야 하는 것이 아주 중요하다. 모든 특성에 대한 완벽한 표준화 프로세스를 도모해야 할 필요성과 원치 않는 팽창성 조성물의 생성과 같은 화학반응이 전혀 없도록 보장을 위해서는, 혁신적인 혼합 시멘트의 개발에 대한 일정한 한계를 규정하는 것이 필요하다. 더욱이, 갑작스러운 구조물의 손상 리스크를 피할 수 있도록 구조물 시공용 신규 바인더의 사용을 승인할 수 있도록 국가차원 또는 유럽연합 차원에서의 법률적 뒷받침이 되어야 한다.

지속가능한 시멘트 생산을 가능하게 하는 다른 방법에는 다양한 방안들이 있다. 예를 들면 대체연료 사용(예 : 폐 타이어 등)은 시멘트 소성로(kilns)에서 인기를 얻고 있다. 지역 및 국가의 법규는 시멘트 소성로에서 태울 수 있는 양과 관련 배출물을 엄격히 통제해야 한다. 폐기물이 이러한 방식으로 사용될 수 있지만 낮은 발열량, 높은 수분 함량, 염소 화합물이나 기타 잠재적으로 위험한 요소가 있는 것과 같은 단점들이 발생할 수 있으므로 이러한 절차에는 한계가 있다.

시멘트 공장의 열 및 전기 효율성은 에너지 손실과 화석연료의 대량 소비를 회피하기 위한 목적으로 장비개선을 통해 향상될 수 있으나 이러한 솔루션은 일반적으로 많은 비용이 소요됨으로 채택되는 경우는 거의 없다.

마지막으로 이산화탄소 배출이 적은 많은 시멘트들이 연구 중에 있다. 그 중에 지오폴리머란 이름으로 불리는 알칼리 활성 시멘트(alkaline activated cements)는 1905년경에 개발되었지만 최근 몇 년 사이에 특히 주목을 받고 있다. 알루미노 규산염(aluminosilicate)이 주성분인 원료를 활성화시키기 위해서는 강한 알칼리용액이 요구된다. 지오폴리머 전구체(Geopolymers precursors)는 약 섭씨 600도(예 : 고령토 소성)에서 일반적으로 수행되는 소성 공정이나 알루미노 규산염은 풍부한 폐기물에서 얻어질 수 있다. 아직까지 유럽에서 지오폴리머는 소규모 공장에서 특수 용도로만 상용화되어 있는 것으로 알고 있다.

<원문제목> Sustainable cements for green buildings construction
<원문출처> 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities