
Global Report

혁신적인 건설재료 검토 연구

1. 개요
2. 소개
3. 나노기술의 적용
4. 광물질 혼화재의 사용
5. 생물학적 재료
6. 벽돌의 제조
7. 목재
8. 유리 및 플라스틱
9. 결론

1. 개요

이번 연구는 이용 가능한 다양한 종류의 혁신적인 건설재료를 검토하기 위하여 수행되었다. 검토 결과, 나노기술의 발전, 광물질 혼화재, 유리 및 플라스틱, 생물학적 재료, 목재 및 기타 건설재료 등의 사용은 혁신적인 건설재료의 발견 및 생산에 획기적으로 기여한 것으로 밝혀졌다. 몇몇 혁신적인 건설재료의 활용은 지속가능성, 내구성, 신뢰성, 안전성, 비용 절감, 품질향상, 더 우수한 기계적 및 물리적 특성, 극한 상황과 지역에서의 유연성, 조립의 단순화 및 환경 친화적인 측면에서 많은 요건들을 만족시키고 있다. 프로젝트 수행에 사용된 건설재료 비용은 건설업 프로젝트 전체 비용의 약 40%를 소비한다. 산업 및 농업 폐기물을 재화로 바꾸는 분야의 성공 사례들이 기록되었다. 이 검토 보고서는 건설 산업에 진입하는 혁신적인 재료에 대한 데이터 베이스를 풍부하게 만들 것이다.

2. 소개

건설재료는 건설 엔지니어링의 중심축(mainstay)으로 설명될 수 있다. 건설재료는 건물 건축, 도로, 철도, 비행장, 육교, 굴, 교량, 댐, 해상구조물, 텔레비전 송신탑, 저수지 건설 등 지구의 모든 분야를 개발하고, 안전성을 향상시키며, 오염을 최소화하고, 환경 친화적이며, 사용자 친화적이면서 미관을 아름답게 하고, 궁극적으로 건강한 생활환경을 만드는 모든 영역에 활용되고 있다. 건설재료에 소요되는 비용 부담은 건설 프로젝트 전체 비용의 40% 이상을 차지해왔다. “필요는 발명의 어머니”라는 말이 있다. 더 나은 삶을 추구하기 위해 인간은 신뢰성, 내구성, 기능성을 제공하고 아름다움과 조화로운 요소를 가지는 보다 안전하고 보다 나은 삶의 여건을 만들도록 노력해왔다. 혁신적인 건설재료의 수용 가능성은 지속가능성, 내구성, 신뢰성, 안전성, 비용절감, 품질향상, 보다 나은 기계적 및 물리적 특성, 극한 상황 하에서의 유연성, 조립이 간단하고 환경 친화적인 이 모든 요건들을 만족시키는 것을 기반으로 해야 한다. 혁신적인 건설재료 중 일부에는 3D 인쇄 사암, 알루미늄, 폼 그리고 대나무 강화 콘크리트, 생물 수용성 콘크리트(bio-receptive concrete), 오염물질로 만들어진 벽돌(bricks made from pollutants), 미생물 셀룰로오스 직조(plaited microbial cellulose), 그리고 고유동화제 등이 포함된다. 콘크리트 생산에 모래 및 시멘트를 매립회(pond ash) 및 플라이애시로 대체함으로써 폐기물을 재화로 변화시키는 분야의 성공적인 사례도 존재한다. 이로 인해 비용이 절감되고 발전소에서 나오는 열기 가득한 폐기물을 처리하는 해결책을 제공한다. 모든 건설용 재료 선택에는 프로젝트의 요건과 적합성을 기반으로 해야 한다. 콘크리트, 금속재, 벽돌, 세라믹 및 플라스틱 등과 같은 일부 인공적인 건설재료는 환경을 오염시켜왔다. 건설재료는 건설업계와 최종 사용자에 의해 널리 수용되어 져야 한다. 경제적 타당성은 모든 건설재료의 선택과 수용에 있어 중요하다. 새로운 건설재료는 건설 현장에서 노동력을 감소시켜야 하고 프로젝트의 건설비용을 더욱 절감하도록 하는 것이 매우 중요하다. 현대에 있어서 건설재료는 지속 가능해야 하며, 환경 친화적이어야 한다. 새로운 건설재료의 수용에 영향을 미치는 많은 요인들 중 하나는 불가용성(non-availability)과 신규 재료의 현지 생산성이다. 혁신적인 재료는 해당 시점의 요건에 적합하고 추가적인 개선 가능성이 있어야 한다. 폐기물의 채택은 그 처리에 대한 비용과 공간을 절감해야 한다. 혁신적인 재료는 환경에 긍정적인 영향을 미쳐야 하며 과도한 플라스틱의 활용은 지양해야 한다. 태초에 우리 조상들이 지은 쉼터는 단순했기 때문에 수명이 수개월에 불과할 정도로 짧았다. 인간을 위한 쉼터와 농작물 저장소와 축사는 풀잎, 나뭇가지, 대나무 및 잔가지 등의 생태계 재료로 지어졌다. 시간이 흐르면서 건설재료는 목재, 점토, 바윗돌, 모래 및 석재 등과 같은 보다 내구성이 있는 재료로 개선되었다. 몇 년 전에 블록, 몰탈 및 시멘트와 금속재 등과 같은 인공재료의 개선을 이루어낸 보다 내구성이 있고, 신뢰할 수 있으며 지속 가능한 재료에 대한 연구가 급속히 증가했었다. 본 연구는 이용 가능한 다양한 종류의 혁신적인 건설재료를 검토하기 위하여 수행되었다.

3. 나노기술의 적용

나노기술은 나노입자를 설명하는 재료 과학의 중요한 부분 중 하나이다. 나노기술에서는 나노미터(10^{-9}m)로 최소입자 크기를 나타낸다. 나노입자 크기에서의 이 재료는 마이크로 및 매크로 크기와는 비교할 수 없을 정도로 매우 독특한 특성을 보여준다. 나노입자는 같은 물질의 마이크로 크기의 재료에 비해 용적비율 대비 더 큰 표면적을 가지고 있기 때문에 수화작용을 개선하고 궁극적으로 초기 및 최종 강도 모두를 향상시킨다. 토건공사에서 나노재료의 역할은 아무리 강조해도 지나치지 않는다. 나노재료는 그 특수성으로 인해 건설 산업에 우수한 후보물질이다. 이것은 건설용으로 이상적인 후보 재료인 것이다. 나노물질이 작동할 수 있는 방법에는 두 가지가 있다. 콘크리트 및 페인트와 같은 재료에 나노재료를 직접 혼합시키거나 또는 시멘트와 같은 기존 재료를 나노 크기로 그라인딩 하는 것이다. 몇 나노미터 크기인 고운 입자의 시멘트는 나노 시멘트라 불리어질 수 있다. 시멘트계 재료 및 시멘트계 보충재는 토건분야에서 중요하다. 시멘트계 재료는 토건분야의 핵심이라 할 수 있다. 시멘트계 재료에는 콘크리트, 몰탈 및 시멘트 페이스트 등을 들 수 있다. 추가적인 시멘트계 재료에는 플라이 피어리 데브리시(fly fiery debris), 히터 슬래그(granulated impact heater slag), 실리카 흙(silica fumes), 사탕수수 버가스 재(sugarcane bagasse ash) 등과 같은 현시대의 주요 폐기물을 포함한다. 콘크리트 제조과정에 시멘트 보충재료를 사용하는 것은 산업폐기물을 자원으로 변화시키고 환경오염을 감소시키며 강도, 불침투성, 시공연도와 내화학적 성 등과 같이 제조된 콘크리트에 가치를 더하는 장점들을 가지게 한다. 많은 연구자들이 콘크리트에 나노입자 재료를 포함시키는 것에 관한 연구를 수행해 왔다. 콘크리트에 포함된 나노재료 중 일부에는 탄소 나노 튜브(Carbon Nano Tubes), 나노 실리카(Nano silica), 나노 티타니아(Nanotitania) 및 나노 점토(Nano clay) 등이 포함된다. 콘크리트에 탄소 나노 튜브를 포함시키는 것은 강도 증진과 균열을 막기 위하여 필요하다. 나노 티타니아를 추가하는 것은 자가 세척기능을 발휘하게 하려는 것이다. 콘크리트에 나노 실리카와 나노 점토를 각각 포함시키면 내화학적 성과 유동성을 향상시킬 수 있다.

4. 광물질 혼화재의 사용

내구성이 있는 콘크리트 구조물과 관련된 것들이 최근 발전을 이루었으며 콘크리트 구성성분에 변화가 일어나고 있다. 지금까지 콘크리트는 서너 가지 재료로 생산되었다. 즉, 시멘트, 골재, 모래 및 물이다. 그러나 현재 내구성 콘크리트는 6개 또는 그 이상의 건설재료를 복합하여 만든다. 광물질 혼화제에 관한 다양한 연구들이 수행되어왔다. 콘크리트의 미세균열을 최소화하는 것은 배치 플랜트에서 광물질 혼화제를 콘크리트에 혼합함으로써 달성될 수 있으며 이것은 비용 효과적인 방법으로 콘크리트 구조물의 수명을 향상시킨다.

4.1 플라이애시(Fly Ash)

이 재료는 화력발전소에서 석탄을 태울 때 발생하는 원하지 않는 고운 고체의 잔류물이다. 이 재료는 대량으로 생겨난다. 플라이애시를 활용하지 않고 처리하려면 화력발전소에 비용부담을 미치게 된다. 현재 해마다 약 1억 2천만 톤의 플라이애시가 생겨나며, 생겨난 플라이애시를 모두 가공 처리하지 않고 사용할 수 있는 것은 아니다. 플라이애시는 SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 및 CaO 를 포함하는 다양한 성분을 가지고 있다. 플라이애시는 무정형 또는 기타 다양한 형태가 될 수 있으며, 콘크리트에 필러 혼화재로 활용될 때 공극량 최소화의 역할을 한다는 것이 입증되었다. 유럽의 콘크리트 규정에 의하면 시멘트 함량의 35%에 해당하는 플라이애시가 콘크리트의 시멘트를 대체할 수 있다고 한다. 시멘트를 대체하는 플

라이애시는 광물질 혼화재로 콘크리트에 사용할 때 관련 규정에 따라 처리하는 것이 엄격히 요구되었다. 유럽 콘크리트 표준에 따라 처리되는 플라이애시 광물질 혼화재는 콘크리트에 허용이 되며 콘크리트 속 시멘트량의 약 35% 이내에서 플라이애시로 대체될 수 있으며, 실제 대체비율은 시험배합 결과에 따라 달라진다. 또한 플라이애시의 영향 연구와 플라이 애시의 지오폐리머 적용에 관한 연구가 진행 중이다.

4.2 고로슬래그 미분말(Ground Granulated Blast-Furnace Slag - GGBS)

GGBS는 철광석을 제련하는 동안 용광로에서 생성되는 슬래그라고 불리는 폐기물로서 액냉(liquid cooling)으로 형성되는 콘크리트 혼화재이다. 콘크리트에 함유된 광물질 혼화재는 건설공사에서 경제적이고, 신뢰할만하며 지속 가능한 재료이다. GGBS는 부르즈 할리파(Burj Khalifa)와 같은 내구성이 요구되는 획기적인 구조물에 사용되어 왔는데 미국, 일본, 싱가포르 및 유럽 나라 등과 같은 많은 국가들에서 내구성을 확보하고 장수명의 콘크리트 구조물을 건설하기 위하여 사용되고 있다. GGBS를 활용하면 콘크리트의 시공연도를 향상시키고 낮은 온도 상승으로 균열발생 리스크를 감소시킨다. 또한 염화물 침투에 대한 강한 저항성과 지속성의 이점, 황산염 공격 저항성 등으로 인해 철근 부식을 감소시키며 PC 콘크리트 및 토양의 현장 안정화 작업에서 사용될 수 있다. 본문 참고문서 [22, 24, 25]에 소개된 바와 같이 GGBS의 실험적 조사 및 적용을 포함한 다양한 연구들이 수행되어 왔다.

4.3 혼화재로서의 농축 실리카 흙(Concentrated Silica Fume - CSF)

Ferro-Silicon 업체에서 구입한 CSF는 시멘트 입자 보다 훨씬 작은 입자로서 시멘트 입자 사이에서 콘크리트 배합의 시멘트 입자간의 공극을 차지하면서 물 수요를 감소시키고 조밀하게 다져진 콘크리트에 높은 내구성을 더하게 해준다. CSF로 시멘트량의 5~10%를 대체시키면 내구성이 있는 콘크리트가 될 수 있다. 낮은 등급의 콘크리트에 CSF를 사용하면 기술적 이점이 없이 프로젝트 비용만 상승한다. 혼화재로서 농축 실리카 흙에 관한 조사연구는 본문 참고문서 [27]에 기록되어 있다.

4.4 3성분계 시멘트(Ternary Blended Cement - TBC)

많은 나라들이 콘크리트 생산에 3성분계 시멘트(TBC)를 사용하였다. TBC에는 플라이 신더 슬래그(fly cinder slag), 플라이 피어리 데브리스(fly fiery debris) 실리카 흙 또는 슬래그 실리카 스몰더(slag-silica smolder)가 포함된다. 시멘트에 대한 유럽표준 EN 197에는 시멘트용 27개의 각종 배합이 기록되어 있다. 대체로 광물질 혼화재는 시멘트의 수화작용에 보완적으로 영향을 미친다. 더구나 석회석 충전재는 시멘트 시험에 긍정적인 영향을 미친다. 약 12~30%의 GGBS로 석회석 충전재가 거의 없는 3성분계 콘크리트는 염화물 침투에 대한 우수성과 황산염이 적은 환경에서 우수한 성능을 발휘한다. 다양한 연구자들이 3성분계 시멘트에 관한 연구기록 수행은 본문 참고문서 [28~33]을 참고하기 바란다.

5. 생물학적 재료

특히 습한 환경에 노출될 때 콘크리트 구조물의 미세 균열 발생으로 인한 위험 때문에 균열을 회피할 수 있는 내구성이 있는 콘크리트 구조물을 개발하는 것이 필수적이다. 이러한 것이 연구원들로 하여금 다양한 방법으로 환경 친화적인 기술을 개발하도록 노력하게 하는 원동력이 되어왔다. 이전에는 합성 고분자재료를 정기적으로 사용하여 대부분 균열보수를 실시해 왔는데 이러한 화학적인 재료는 환경 친화적이지 못하다. 현재 박테리아 유도 탄산 염화방법(bacterial induced carbonate mineralization)은 균열을 개선하기 위한 환경 친화적인 방법으로 권장되어 왔다. 이러한 기술은 자가치유 기술이라 불리워진다. 이러한 근본적인 자가치유 메커니즘은 많은 물리적, 화학적 및 기계적 프로세스에 따라 달라진다.

탄산칼슘의 생기는 것은 이 프로세스에서 아주 중요하다. 일부 박테리아는 미세 균열을 보수할 수 있는 잠재력이 있으며 이러한 박테리아는 흙, 모래 및 기타 몇몇 천연 미네랄에서 발견될 수 있다. 바이오 콘크리트는 콘크리트의 균열을 완화하고 콘크리트에 미적 가치를 더함으로서 하나의 공식적인 생산품이다. 이 바이오 콘크리트는 건물 구조체에 물이 들어오는 것과 철근을 부식시키는 것을 완벽하게 막아준다.

6. 벽돌의 제조

내구성이 있고, 신뢰할 수 있으며 고강도인 벽돌제품의 제조에 크나큰 기술적 혁신이 이루어져 왔다.

6.1 벽돌 제조에 담배꽂이를 사용(Use of Cigarette Butts in Production of Bricks)

Dziadosz & Kończak에 따르면 담배꽂이로 보다 가볍고 효과적이며 효율적인 벽돌을 만드는 혁신적인 건설기술이 있다고 한다.

6.2 오염 흡수 벽돌(Pollution absorbing bricks)

오염 흡수 벽돌은 그 단열보온성으로 인해 건축 표준 환기시스템의 일부로 포함되었다. 이 재료는 외부 외관용 벽돌과 실내 단열용으로 이루어져 있다. 벽돌에 있어서 여과 시스템은 벽체 하단(the base wall)에 제거 가능한 호퍼에 매달린 입자들을 제거할 수 있도록 한다. 이 벽돌은 보다 나은 공기의 질을 제공하며 또한 공기 중 호흡문제를 감소시키는데 도움을 준다.

6.3 토건분야의 3D 프린팅

3D 프린팅이란 컴퓨터 제어 하에서 재료(예 : 액체 물질 또는 분말 형태의 입자)를 조합하여 3차원 물체를 만들기 위해 그 재료가 연결되거나 응고되는 여러 프로세스 중 하나이다. 3D 프린팅은 래피드 프로토타이핑(prototyping)이나 적층 가공방식(production of additives) 두 가지 방식 모두에 사용될 수 있다. 거의 모든 형상이나 형태의 물체는 3D 모델 데이터를 사용하여 생성될 수 있다. 프린터는 건설 작업장에서 보조 용량설계(auxiliary capacity design)를 가지고 현장 토기블록(in-situ earthenware blocks)을 생산한다. 이러한 벽돌들은 15~20분 이내에 대량 생산이 가능하다. 경화된 벽돌들은 조적작업이 이루어져 벽체, 둥근 천장 또는 기둥들을 만든다. 많은 연구자들에 의해 토건 분야의 3D 작업에 관한 연구가 이루어져 왔다.

6.4 벽돌의 냉각 시스템(Cooling system in bricks)

하이드로겔(Hydrogel)과 점토는 건물 내부에 냉각 효과가 있는 재료를 만들게 한다. 하이드로 세라믹(Hydro-ceramics)은 실내 온도를 6도 정도까지 낮출 수 있다. 이 냉각 효과는 다량의 물을 흡수하는 하이드로 겔의 존재 때문이다. 흡수된 물은 열이 존재할 때 온도를 낮추어 준다.

7. 목재

건설재료로서의 목재는 획기적인 발전을 이루었다. 대량의 목재 사용이 현재 건설업계에서 선호되고 있다.

7.1 펠루시드 목재(Pellucid wood material)

크리스탈린 목재(The crystalline wood)는 건설업계에서 창문과 태양광 패널의 제조 분야에 유용한 재

료이다. 반투명 목재의 생산은 나노 스케일의 맞춤형 제작을 통해 목재 베니어 라이닝을 분리함으로서 만드는 것이 가능하다. 반투명 목재의 대규모 생산도 가능하다.

7.2 집성목재(Laminated timber)

구조용 집성목재는 길이 방향으로 두 개 또는 그 이상의 목재를 접착제로 붙여 만드는 응력 수용 등급이 부여된 제품이다. 이 복합재료는 일반 목재에 비하여 보다 균질의 재료로 기계적 특성도 우수하다. 집성목재는 구조용 직교집성판재(Cross Laminated Timber - CLT)로 불리기로 한다. 상업용 고층 건축 재료로 사용될 수 있다. 집성목재는 놀랄만한 인장강도와 압축강도를 가지고 있다. 집성목재는 원목 제품을 대체할 수 있는 재료로 지속 가능하고 환경 친화적이다. 집성목재는 다양한 모양과 크기를 가지고 있으며 미리 제작되어 활용준비가 된 제품이다.

8. 유리 및 플라스틱

유리 및 플라스틱이 혁신의 흐름 속에서 제외되는 것은 아니다. 현재 플라스틱과 유리에서 파생되어지는 많은 혁신적인 재료들이 있다. 일부는 이미 내화염성(blast resistant), 내충격성, 방탄성(bullet resistant) 및 내화성(fire resistant) 있는 유리재료 등이 폴란드 시장에 존재한다. 이러한 완제품 중 일부는 일반 유리에 비하여 3~6배 이상의 기계적 강도와 높은 내열성 및 온도변화에 대한 내성 등을 가지고 있다. 일반적으로, 고속도로의 소음을 차단하고 건물 정면과 채광창 등과 같은 건물 구성 부분에서 큰 하중을 지탱할 수 있기 때문에 이러한 재료 들은 보다 우수한 재료들이다. 연구에 따르면 고분자량 플라스틱(plastics of high molecular weight)은 경량성, 큰 내화특성과 광 투과성으로 인해 건축물에 적합하지만 낮은 탄성계수, 고유동성인 단점, 낮은 내열성, 낮은 인장강도와 자외선에 노출 시 열화되는 결점이 있다. 유리섬유 강화 플라스틱은 지속 가능하고 신뢰할 수 있으며 플라스틱 강도는 10~80MPa에서 130~600MPa로 증가한다.

9. 결론

현재 실행되고 있는 콘크리트 공사는 지속가능성, 내구성, 신뢰성, 비용, 인간과 환경에 대한 안전성 및 강도에 의해 주도되고 있다. 콘크리트 건축물을 효율적인 방법으로 개선하기 위해 배치 플랜트에서 적절하게 혼합재를 포함시킨 바인더를 통해 콘크리트의 미세균열을 최소화하는 것이 달성될 수 있다. 건설재료는 건설공사 프로젝트 전체 공사비의 최대 40%를 차지한다. 혁신적인 건설재료 중 일부에는 3D 프린팅, 3D 인쇄 세라믹, 오염물질을 흡수하는 콘크리트, 집성목재(laminated timber), 알루미늄 폼(aluminum foam), 대나무 강화 콘크리트(bamboo reinforced concrete), 생물 수용성 콘크리트(bio-receptive concrete), 오염물질로 만든 벽돌(bricks made from pollutants), 미생물 셀룰로오스 직조(plaited microbial cellulose), 고유동화제(super plasticizers) 등이 포함된다. 지진 발생 시 사용되는 고연성 내진 철근(Super Ductile Rebars)을 만드는 것은 건설재료 분야의 혁신이라 할 수 있다. 폐기물을 재화를 변화시키는 분야의 성공 사례가 기록되었다. 건설재료는 건설공사 프로젝트 전체 비용의 최대 40%를 차지한다고 한다. 혁신적인 건설재료의 구현에 있어서 보다 중요한 것은 지속가능성, 내구성, 신뢰성, 안전성, 경제성, 품질향상, 향상된 기계적 및 물리적 특성, 극한의 상황과 위치에서의 유연성, 조립의 단순성과 환경친화적 것 등 이러한 요건들을 만족시키는 것을 기반으로 해야 한다는 것이다. 본 연구는 시장에서 이용 가능한 일련의 혁신적인 건설재료에 관한 최신 정보를 건설업계에 제공한다. 이러한 연구는 건설재료의 데이터베이스를 보다 풍부하게 할 것이다.

<원문제목> Innovation in Construction Materials-A Review

<원문출처> IOP Conference Series – Materials Science and Engineering