
Global Report

건설용 인공 사암재료

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

1. 개요

건설 연구에 관한 최근 문헌에 따르면 재생 가능한 자원으로 만든 건축재료로서 기계적 및 생분해성 특성이 우수한 기존의 시멘트를 대체하는 천연 폴리머를 사용하는 지속 가능한 콘크리트가 하나의 대체 재료로서 알려지게 되었다.

이 예비연구의 주요 목적 중 하나는 젤리화된 전분을 결합재로 사용하고 모래를 충전재로 사용하는 사암 건축재료 생산을 위한 새로운 기술의 타당성과 정확성을 검증하는 것이다. 그런 다음 산업용으로 바람직한 내구성을 달성하기 위하여 이러한 건축재료의 소수성을 증가시키는 기존의 천연 코팅 재료를 사용하여 다양한 처리방법들이 시도되었다. 모든 종류의 건축재료를 위한 분류 체계를 기반으로 테스트 결과 이 인공 전분을 기반으로 한 사암 재료가 열가소성 기계적 거동을 갖는 폴리머 복합재료(polymer - matrix composites)로 거동하지만 전분 대비 모래 비율이 작아질수록 소성영역은 감소하고 더 잘 부서지는 특성을 갖는다는 것이 밝혀졌다.

2. 소개

대기 중의 온실가스 증가로 인한 지구 온난화는 인류의 삶에 거의 불가피한 위협이 되었으며, 기후변화에 대한 적응전략을 위해서는 이산화탄소 배출량의 신속한 감소가 요구된다. 건축물의 건설로 인한 에너지 소비는 이산화탄소의 주요 원천 중 하나이므로 온실가스 배출 감소에 관한 전략은 기후 변화의 완화, 적응 및 지속 가능한 개발에 있어서 중요한 역할을 해야 한다. 따라서 노후화 방지 및 강화 효과가 있는 여러 가지 화학 및 천연 첨가제가 기존 플라스틱 및 건축재료의 물리적 및 기계적 특성을 개선하기 위해 연구되어왔다. 광범위한 문헌조사에 따르면 폐기물 관리 및 재활용, 보다 지속 가능하고 환경친화적인 건축재료의 개발 및 사용 잠재력은 건설 활동으로 인한 환경 영향을 완화할 수 있는 중요한 단계이다. 지난 수십 년 동안 석유와 같은 재생 불가능한 자원으로부터 추출된 합성 고분자물질(synthetic polymers)로 인한 환경오염을 감소시키기 위해서 전분 및 셀룰로오스 제품과 같은 재생 가능한 자원으로부터 포장 산업의 고분자 필름과 같은 생분해성 바이오 플라스틱 재료(biodegradable bioplastic materials)의 개발과 생체 고분자(biopolymers) 재료 탐사에 관한 관심이 증가하고 있다. 기후변화 전략에는 벽돌, 시멘트 및 콘크리트 제품, 목재, 금속 및 유리 등 기존의 전통적인 건축재료를 저가의 천연 바이오 기반 건축재료로 점진적으로 대체하는 것도 포함된다. 특히 건설 복합재료의 특성을 향상시키는 콘크리트 제조 첨가제로서 생분해성 및 재생 가능한 바이오폴리머의 사용에 대한 관심이 증가하고 있다. 전분 및 셀룰로오스와 같은 다당류(Polysaccharides)는 식물에서 가장 풍부한 생체 고분자 재료이다. 전분은 재생 가능성, 풍부함, 저비용 및 생분해성을 포함한 많은 이점들로 인해 생분해성 플라스틱 및 건축재료의 생산을 위한 매력적인 천연 폴리머이다. 전분 및 그 유도체(종종 황마, 사이잘삼, 면 및 대마와 같은 천연 섬유로 강화됨)의 적용은 건축 및 건설 부문에서 증가하고 있다. 그런데 이와 같은 재료는 시멘트, 콘크리트, 아스팔트, 모르타르 등과 같은 다양한 재료의 기계적, 유변학적, 열화, 단열 및 기타 물리적 특성을 개선하기 위한 결합재료로서 널리 건설 분야에 사용되어 왔다.

열가소성 전분 기술의 가장 최근에 발전된 기술 중 하나는 건설용 생체 재료의 생산에 전분을 적용하는 것이다. 전분은 생분해성 플라스틱 및 건축재료의 생산을 위한 광범위한 플라스틱, 겔화, 단열 및 질감 특성을 갖는 천연 고분자 재료이다. 델프트 공과대학(Delft University of Technology)의 연구진들은 최근 연구에서 아주 흥미로운 생분해성 신규 건축 재료(일명 CoRncrete)를 개발하였다. 이 재료는 일반 붉은 점토벽돌과 비교하여 비용 효율적이고 환경친화적인 특성과 만족스러운 압축강도를 지니고 있으며 옥수수 전분과 모래와 물을 혼합하여 가열함으로써 만들어진다.

위와 같은 연구로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 이러한 유형의 고체 고분자 재료를 준비하는 기술은 전분 입자의 젤라틴화, 전분의 물리적 변형 및 모래 입자를 결합하고 급속한 경화 복합구조를 형성하는 겔 매트릭스의 형성을 초래하는 과정을 기반으로 한다. 이 전분계 제품의 압축강도에 영향을 미치는 것으로 알려진 가장 중요한 요소는 수분 함량, 모래 입자 크기 분포 및 모래의 조성, 가열방식, 옥수수 전분의 겔화과정(gelatinization process) 및 전분기질과 모래입자의 결합이었다. 가열속도, 가열온도 및 젤라틴화 정도가 더 커지기 때문에 대류 오븐 가열방식 보다 마이크로웨이브 가열방식이 더 큰 압축강도를 얻을 수 있었다. 재료의 압축강도, 건조 밀도 및 수분 함량(전분 대비 모래 비율이 일정) 간의 관계도 조사되었다. 전분의 젤라틴화 정도는 수분 함량, 가열속도, 가열시간, 가열원에 따라 크게 좌우되는 것으로 관찰되었다. 낮은 수분 함량에서 이 재료의 압축강도는 전분의 부분적인 젤라틴화로 인해 감소한 반면, 일반적으로 전분과 충분한 양의 물을 혼합하면 강도가 증가했는데 그것은 더 큰 젤라틴화(전분입자가 완전히 젤라틴화될 때까지)가 일어나기 때문이다. 하지만 수분 함량이 일정수준 이상으로 증가하면 압축강도는 다시 감소했는데 그것은 가열속도와 내부 수증기압으로 인해 복합재료에 균열이 발생했기 때문이다. 최대 건조 밀도에 따른 최적의 수분 함량에서 최대의 압축강도가 추가로 달성되었다. 이 제품의 압축강도는 일반적인 붉은 점토벽돌과 비교하여 유사하지만 제조 방법상 산업차원에서 사용하기에 적합하지 않기 때문에 건축재료로 특정지을 수 없다. 구조적 성분도 습기에 의해 부정적인 영향을 받을 수 있으므로 이러한 전분-모래 합성재료는 대기 중에 노출하는 과정에 내구성이 감소된다.

3. 재료 및 방법

이번 연구에서는 모래 입자를 결합하고 급속 경화 복합재를 이루는 젤라틴화 전분 매트릭스의 형성을 기반으로 한 고체 고분자 재료를 제조하는 기술을 다룬다. 제시된 전분 모래 재료는 순수한 석영 모래와 옥수수 전분 및 물의 혼합물을 전자레인지 가열방식으로 가열하여 제조하였다.

3.1 재료

천연 일반 옥수수 전분은 그리스의 Nestlé Hellas가 공급하였고 겔보기 및 총 아밀로스 함량은 각각 21.5%(± 0.6) 및 26.0%(± 0.3) 이었다. 전분의 수분 함량은 일정한 질량(constant mass)으로 건조하여 측정한 12 wt%이었다. 그리스의 Thessaloniki시에 위치한 Kourasanit사(社)에서 입자 크기 0.125-0.25 mm의 고순도 석영 모래를 고압게도 제공해 주었다. 오일, 지방 및 왁스를 포함한 많은 종류의 지질이 코팅 재료, 특히 수분 차단재로 사용되었다. 연구 제품의 소수성을 증가시키기 위해 사용된 아마인유, 순수 밀립, 카르나우바 왁스 및 트리스테아린 등을 포함한 천연 생분해성 코팅 재료는 그리스 아테네시에 위치한 ABIO사(社)에서 공급해 주었다. 브라질 야자수 잎에서 추출되는 천연 식물성 왁스인 카나우바 왁스. 이런 종류의 식물성 왁스는 녹는점이 섭씨 82~86도(천연 왁스 중 가장 높음) 정도이다. 식품 첨가물로서 카나우바 왁스는 E-식품번호 코드가 E309이다. 트리글리세리드는 코팅 응용 분야에서 널리 사용되어온 천연오일 및 지방의 주요 성분이다. 트리스테아린은 에스테르 결합을 통해 글리세롤 분자에 연결된 세 분자의 스테아르산을 포함하는 일종의 트리글리세리드(녹는점이 섭씨 약 73도)이다. 일반적인 파라핀 왁스는 석유에서 증류하여 얻어지는 포화탄화수소의 혼합물이다. 이것은 실온에서 고체형태이며 물에 녹지 않으며 일반적인 녹는점은 약 섭씨 43도에서 77도 범위이다. 파라핀은 물과 습기에 대한 저항성이 크기 때문에 방수용으로도 널리 사용된다. 실란과 실록산의 혼합물을 포함하는 기존의 소수성 Silres BS 4004에멀전은 Wacker Chemie(독일)에서 공급했다. 또한 소수성 코팅제 KSE100은 Remmers(UK)에서 공급한 석재 강화제(규산 에틸 에스테르 기반)이다.

3.2 방법

적절한 가열방식의 선택은 복합재의 종류(구성요소의 비율 및 유전 특성), 모래 입자 크기 및 수분 함량, 마이크로파 출력 및 시편 크기와 형상에 따라 달라진다. 앞서 검토한 바와 같이 마이크로파 가열 방법으로 얻은 연구 재료의 시편은 대류 오븐 가열 방법으로 얻은 것에 비하여 실질적으로 향상된 열적 및 기계적 특성을 나타냈다. 본 연구에서는 옥수수 전분에 모래 및 물을 혼합하여 전분·모래 재료를 만들었고 마이크로웨이브 가열방식으로 가열하였다.

3.2.1. 전분-모래 복합재의 제조

전분-모래 복합재의 시편이 실리콘 고무 몰드(원통형 또는 큐빅형 또는 세 개의 4x4x4cm 큐빅형 시편 세트)에서 혼합물을 성형하여 제조되었으며 재료를 경화시키기 위하여 마이크로웨이브 오븐(대우 모델 KOR-6C17, 출력 800W)에서 5분간(처음엔 해동모드로 1.5분 그리고 최대 전력모드로 3.5분) 가열하였다. 옥수수 전분 대비 모래의 건조중량비를 1:5로 일정하게 유지하면서 물, 전분 및 모래에 대한 다양한 비율로 시행한 예비 압축강도 시험이 이번 연구에 전반적으로 채택되었다. 전분, 물 및 모래를 1:1:5의 비율로 혼합한 최적의 복합재 시료가 가장 우수한 기계적 성능을 나타내었다. 다양한 구성의 많은 샘플들이 제조되었고 각 재료 구성별로 최소 5개의 시편이 시험되었다.

3.2.2 새로운 제작 방법

앞서 설명한 절차의 단점은 마이크로파 가열방법의 경우 샘플 위를 눌러주어야 하는 요건이 필요하다는 것이다. 그래서 가열하는 동안 시편이 튀어나오는 것을 방지하기 위해 샘플 위에 무게가 나가는 것을 올려두었다. 또한 높은 내부 압력으로 인한 재료 변형을 방지하기 위해 샘플 위에 압축 하중을 유지하기 위해 추가적인 노력이 이루어져야 한다. 시편의 변형과 후속적인 균열 발생은 더 큰 가열 속도에서 발생하는 더 큰 내부 압력과 더불어 가열 속도에 민감한 것으로 드러났다. 본 예비 연구에서 우리는 앞서 제기한 대부분의 문제를 해결하거나 완화하는데 도움이 되는 본 계획의 개선사항을 설명코자 한다. 이러한 대체 기술은 2단계 또는 3단계에 이를 수도 있다. 시편은 혼합물을 개방형 몰드에서 제작하였으며 증발과정에서 과도한 수분을 흡수하기 위해 마른 모래를 덮었다. 마이크로웨이브 가열 방법의 경우 가열하는 동안 시편의 균열과 튀어 나감 방지를 위해 두 개의 평평한 테프론 플레이트(테프론 나사로 단단히 고정하였음) 사이에 몰드를 압축하여 만족스러운 결과를 얻어 내었다. 이 기술은 아주 간단하고 시행하기가 용이하며 마이크로웨이브 오븐에서 가열하는 경우 직면하는 대부분의 문제점을 해결한다. 선택적으로 테프론 플레이트와 나사못은 간단한 산업용 프레스 기계로 쉽게 대체될 수 있다. 이 절차는 또한 서보 제어 프레스 시스템으로 여러 가지 레벨로 자동화 될 수도 있다. 따라서 위와 같은 방법은 실험실 차원에서 산업용 차원으로 전환할 수 있는 대체 기술이 될 수 있음이 분명하다.

3.2.3 기계적 특성

일축 압축강도 시험이 다양한 크기를 갖는 큐빅형 및 원통형 샘플로 수행되었으며, 세부적으로 $H/D = 1$ (H = 높이, L = 정방형의 길이, 4cm)인 정방 기둥형과 원형 실린더형 $L/D = 2$ (L = 길이, 5.0 cm, D = 직경, 2.5 cm)의 시험체가 사용되었다.. 인장강도는 간접시험 방식인 브라질 시험방법으로 확인되었는데 길이 대비 직경 비율이 0.5로서 원통형의 축방향으로 하중이 가해졌다. 압축 탄성계수는 일축 압축강도의 응력-변형을 곡선에 대한 탄젠트 기울기로 확인되었다. 모든 시험은 서보 제어 INSTRON 압축강도 시험기로 변형률 8.3×10^{-5} 상태로 시험이 이루어졌다. 이번 개발된 복합재료에 대한 기계적 특성을 조사하기 위하여 인장 및 압축강도 시험이 실시되었다.

4. 시험결과 및 검토

연구대상인 전분 모래 복합재는 사암과 같은 천연암석의 일부 기본적인 범주의 재료뿐만 아니라 시멘트 모르타르 재료와 유사하다. 모래와 결합재의 일종인 시멘트를 함유하는 시멘트 모르타르처럼 천연사암은 모래, 방해석, 점토, 실리카, 유기물질 및 물에 의해 모래 입자 사이의 공극에 축적될 뿐만 아니라 결합재로도 작용하는 일부 시멘트 광물질 재료를 함유한다. 여기에서 검토되는 고품질의 고분자 재료를 제조하는 기술은 젤라틴화된 옥수수 전분을 결합재로 사용하고 모래를 충전재로 사용한다. 상기 분석을 토대로 앞서 언급한 고품질의 전분-모래 모르타르는 형태학적으로 인조 사암 재료와 유사하다는 결론을 내리게 된다.

4.1 암석재료의 공학적 분류

응용 지리학(Applied Geomechanics) 분야 특히 토건 건설분야에서 재료는 암석, 모래 및 점토와 같은 천연 건축 재료와 시멘트 모르타르, 콘크리트 및 벽돌과 같은 인공 건축재료로 분류할 수 있다. 세부적으로 재료는 응력하에서의 거동에 따라 두 가지 부류로 나눌 수 있다. 취성이 있는 재료(일반적으로 부서지기 쉬운 구조)는 파괴되기 전에 소성 변형(plastic deformation)이 거의 또는 전혀 없이 작거나 큰 탄성 거동(elastic behavior) 구간이 있다. 연성이 있는 재료는 탄성 변형(elastic deformation)이 미미하고 파괴되기 전에 큰 소성 거동(소성 거동 plastic behavior)이 있다. 대부분의 암석과 건축재료는 압축 시험(실온)을 할 경우 작은 조각으로 부서지는 경향이 있으므로 취성이 있는 재료로 분류된다. 본문 참고문서 [40]에서 ISRM은 압축강도 대비 인장강도의 비율이 0.23-0.41 정도이고 압축탄성계수가 약 5-100GPa으로서 일축압축강도가 100, 50, 25 및 15MPa를 경계로 하여 천연암을 강암, 일반암, 중정도암 및 연암으로 각각 분류하였다.

4.2 전분-모래 복합재의 공학적 특성

시멘트 모르타르의 강도는 시멘트, 물 및 모래의 비율에 따라 달라지며, 이에 함께 전분 복합재의 강도는 주로 전분, 물 및 모래의 비율에 따라 좌우된다. 앞서 언급한 바와 같이 이러한 재료의 특성은 퇴적암의 가장 일반적인 종류인 사암과 어느 정도 유사하다. 이 연구에서 전분 복합재료의 샘플이 시험되었는데 실온에서 측정된 그 결과는 압축강도 대비 인장강도의 비율이 약 0.2정도로 압축강도가 약 30MPa인 것으로 드러났다. 모든 경우에 있어 이러한 전분 기반의 재료 시편은 압축탄성계수 값이 2GPa 미만(평균 1.5GPa)으로 상당히 낮은 값을 나타내었다. 일축 압축강도 시험과 브라질 시험(Brazilian test) 결과를 통해 개발된 제품이 일반 콘크리트나 시멘트 모르타르(R-0.10)에 비하여 훨씬 큰 연성 재료(R-0.20)인 것을 알 수 있다. 모든 종류의 천연 암석 및 건축재료의 탄성계수 대비 압축강도에 관한 Tatsuoka와 Shibuya의 제안 분류 체계에 따르면 이러한 유형의 고분자 재료(전분을 결합재로 모래를 채움재로 사용)는 기존 시멘트 모르타르와 여러 다양한 종류의 천연 연암(사암, 석회암, 적층 사암, 이암 등)과 동일한 범주로 분류될 수 있으므로 인조사암으로 간주될 수 있다. 또한 일축 압축강도에 있어 본 연구 재료에 대한 실험적 응력-변형곡선을 기반으로 이러한 인공 고분자재료도 열가소성 수지로 분류될 수 있지만 전분 대비 모래 비율이 작아질수록 소성 영역이 감소하고 파괴시 부서지는 성질이 더하게 된다. 이러한 거동이 일반적인 폴리머-매트릭스 복합재에서 일어난다. 본문 참고문서 [49]에서 Miller가 제안한 분류 체계에 따르면 대부분의 천연암석 재료가 일반적으로 취성이 있는 재료(본문 그림 1의 사암, 석회암 및 대리석 등)로 간주되지만 본문 그림 1에 제시된 암염과 같은 많은 암석들은 큰 응력 여건에서 덜 부서지고 더 큰 소성 거동을 나타낸다. 또한 나바호 사암(미국 콜로라도주 애리조나), 베드포드 석회암(미국 인디애나주 베드포드), 타코닉 백색 대리석(미국 버몬트주 댄비), 다이아몬드 크리스탈 암염(미국 미시간주 매컴 카운티) 및 인공 전분 사암 샘플이(실온에서) 각각 시험되었고 압축강도가 약 42, 53, 62, 23 및 30 MPa를 갖는 것으로 밝혀졌으며, 각각의 탄성 계수(암석의 영 계수) 값은 약 13.5, 30, 50, 23입니다. 및 1.5GPa인 것으로 나타났다. 본문 그림 1i 및 j에 나와 있는 대표적인 사례

에서 볼 수 있듯이 천연암석의 영 탄성계수는 약 13 GPa에서 약 50 GPa 범위인 반면에, 인조 전분-사암은 약 1.5GPa 정도로 매우 낮은 값을 나타내는 것이 특징이다. 따라서 대부분의 천연암석이 취성 재료로 거동하는 반면에, 증발성 암염(암염 evaporitic rock salt)은 소성-크리핑 변형 거동(파괴 전)을 나타내는 것이 특징이고 인공 전분-사암은 고분자 재료의 전형적인 열가소성 거동을 나타내는 것이 분명하다.(본문 그림 1i 및 j).

4.3 습한 환경조건에서의 전분-사암재료

고온다습한 환경에서 전분-모래 복합재의 수분 흡수는 일반적으로 이 복합재의 물리적 및 화학적 특성에 부정적인 영향을 미친다. 본 연구 재료의 기계적 특성도 본문 그림 1k 및 l에 표시된 SEM 이미지에서 확인되는 바와 같이 전분 기반의 바이오폴리머의 친수성과 이 복합재의 큰 다공성 구조로 인하여 수분에 따른 부정적인 영향을 받는다. 아래에서 볼 수 있듯이 이 재료의 시편은 물에 잠겼을 때 며칠 이 내로 완전히 분해되었다. 따라서 이 다공성 바이오폴리머 제품의 소수성을 증가시키는 것이 바람직할 것이다. 다공성 석재 표면을 보호하고 이 재료의 방수성을 증가시키기 위해 많은 저가의 코팅 재료가 널리 사용되어왔다. 소수성 코팅 재료는 일반적으로 상업용 파라핀 왁스 및 기존의 폴리머기반의 방수재 유형 뿐만 아니라 식물성 기름, 밀랍, 카로나우바왁스 및 트리스테아린과 같은 천연 재료를 기반으로 하고 있다. 습윤 특성은 주로 코팅의 성분, 표면 거칠기 및 표면구조와 형태에 따라 달라진다. 본 연구에서 습윤 특성의 확인은 재표 표면 접촉각의 측정을 기반으로 하였다. 또한 최대 15일 동안 물에 잠긴 상태의 경우 전분 기반의 재료에 대한 분해 정도를 조사하였다.

5. 결론

지난 수십 년 동안 재생 가능한 소스에서 생분해성 바이오폴리머의 개발과 사용 잠재력에 대한 관심이 증가하고 있으며 건설 산업에서 사용되는 저가의 천연 폴리머 재료로 전통적인 건축재료를 점진적으로 대체하고자 하는 데에도 관심이 모아지고 있다. 현재의 연구 결과로는 기존 문헌과 비교하여 천연 바이오기반의 건설 재료에 관한 새로운 통찰력을 기대해 볼 수 있다. 이번 연구의 주요 목적 중 하나는 실험실 차원에서 산업적인 규모로 생산 공정을 전환하는 기술적 대안이 될 가능성이 있는 모래-전분 모르타르를 준비하기 위한 예비적 방법의 타당성과 정확성을 검증하는 것이었다. 문헌에서 발견된 다른 기술들과의 비교를 통해서 제시된 절차가 전자레인지의 가열과 관련된 대부분의 문제를 해결한다는 결론을 내릴 수 있다. 이러한 종류의 고형 제품의 물리적 및 형태학적 특성은 젤라틴화된 전분을 결합제로 사용하고 모래를 충전제로 사용하는 사암의 특성과 어느 정도 유사하지만 폴리머 매트릭스 복합 재료의 열가소성 기계적 거동을 나타내기도 한다. 시험 결과, 이러한 종류의 인공 전분 사암은 약 30MPa 압축강도, 압축강도와 인장강도의 비율이 약 0.2 정도이고 탄성 계수 값이 2GPa 미만으로 상당히 낮은 것으로 나타났다. 이러한 전분 기반의 건축 재료의 소수성을 증가시키기 위해 기존 재료인 생분해성 코팅 복합재를 사용하여 다양한 예비적 처리 방법들도 적용되었다. 이로 인해 이 복합재의 흡수성이 감소되었고 건축 및 건설용으로 바람직한 내구성을 가지면서 건축물의 완벽한 방수성능이 점진적으로 달성되었다.

<원문제목> Starch-sandstone materials in the construction industry

<원문출처> ELSEVIER