

Global Report

친환경 엔지니어링 재료에 의한 지속 가능한 개발

1. 개요
2. 소개
3. 지속가능한 친환경 금속 재료
4. 친환경 폴리머 재료
5. 친환경 콘크리트 재료
6. 결론

1. 개요

인구 증가, 지구 온난화, 자원 부족, 세계화 및 환경 악화에 대한 우려가 증가함에 따라 지속 가능성 목표 달성을 촉진시키기 위해 엔지니어링 재료설계가 보다 효과적으로 추진되어야 한다는 것이 분명해졌다. 이를 위해서는 명확한 성능 기준으로 지속 가능성 요소(factors)들을 포함한 새로운 재료 개발을 필요로 할 것이다. 지속 가능한 개발이란 다중분야 개념으로서(multi discipline concept), 살기 좋은 인간 생활시스템을 구축하기 위해 환경적 및 생태적, 사회적 및 환경적 측면이 결합된 개념이다. 지속가능한 개발은 친환경 엔지니어링 재료 개발을 통해 지원 될 수 있다. 친환경 엔지니어링 재료는 자연 속에 풍부하고 독성이 적으며 저렴하여 경제적이고 물리적 및 화학적 특성 측면에서 다양성을 포함하여 독특한 특징과 특성을 제공한다. 금속재료로 친환경 엔지니어링 재료, 폴리머 재료, 콘서트 재료(concert materials) 등은 에너지, 건축, 자동차, 항공기, 도시생활 분야, 해양 산업, 건설 및 인프라를 포함한 과학기술 응용분야의 수많은 분야에 적용될 수 있다.

2. 소개

인구와 소비는 계속 증가하고 재생 불가능한 화석 연료와 기타 원자재 소비도 끊임없이 증가하며 고갈되고 있어서 세계는 심각한 과제에 직면하여 있다. 친환경 엔지니어링은 엔지니어링 설계와 분석을 사용하여 이러한 문제를 해결하는 기술적 접근방식이다. 친환경 엔지니어링의 범위는 개인의 관점과 원칙에 따라 다르지만 제품, 프로세스 및 시스템의 설계 및 엔지니어링의 모든 생애주기단계에 걸쳐 환경영향을 최소화하는 것으로 광의로 정의할 수 있다. 친환경 엔지니어링은 환경적, 경제적 및 사회적 측면을 포함하는 지속 가능성의 더 큰 문제를 해결하는 하나의 가능한 접근 방법일 뿐이라는 것을 인식하는 것이 중요하다. 친환경 엔지니어링은 필연적으로 많은 학문분야와 관련이 있음에 따라 엔지니어링 전 분야에 적용될 수 있는 일련의 개념으로 간주된다. 즉, 재료 과학과 엔지니어링 분야는 본질적으로 사람이 상상할 수 있는 모든 것의 디자인이 재료를 필요로 하기 때문에 핵심 영역이다. 따라서 재료 과학자와 엔지니어는 설계 요건을 충족할 뿐만 아니라 생애주기에 걸쳐 환경, 건강 및 사회적 영향을 고려한 재료를 사용하여 설계해야 할 책임이 있다. 어떤 한 제품의 생애주기는 친환경 엔지니어링 재료 고려사항의 핵심 개념이다.

그 생애주기는 원료의 추출에서 제조, 사용 및 최종적으로 폐기처분에 이르는데 요구되는 모든 인풋(inputs) 및 아웃풋(outputs)으로 이루어져 있다. 어떤 특정 제품의 경우, 원료가 흙에서 추출되는데 폐기물, 생태계 파괴 및 에너지 사용뿐만 아니라 이러한 재료의 고갈을 유발한다. 원료는 제조(정제, 정화, 혼합, 형성, 합금, 화학 반응, 성형 등)되어 원하는 특성과 성능을 가진 재료로 탈바꿈한다. 이 단계에서 에너지 및 화학물질은 지상, 해상 또는 대기로 고체, 액체 및 기체의 산출물을 생산하는 기본적인 원료들이다. 많은 제품을 사용한다는 것은 에너지와 연료뿐만 아니라 유지관리를 위해 추가적인 화학물질이나 재료를 필요로 하게 된다. 최종적으로 제품의 유효 수명이 끝나면 일반적으로 매립지 또는 소각장으로 버려진다. 경우에 따라 제품은 재사용, 퇴비화 또는 재활용될 수도 있다. 이러한 각각의 폐기 방법은 잠재적인 환경영향을 미친다. 운송 또한 생애주기 단계 내에서 또는 주기 사이에서 고려될 필요성이 있다. 생애주기 평가(LCA - Life Cycle Assessment)는 친환경 엔지니어링에서 많은 용도로 사용되는 강력한 분석 도구이다. 이 공식 분야에는 한 제품의 모든 인풋 및 아웃풋에 대한 환경영향을 객관적으로 수량화하기 위한 특정 방법론 및 국제 표준(ISO 14040: 2006 and ISO 14044: 2006)이 있다. LCA는 다양한 제품 또는 어떤 주어진 제품의 다양한 생애주기 단계의 환경 영향을 비교하는데 사용될 수 있다.

3. 지속가능한 친환경 금속 재료

증가하고 있는 지속가능한 재료에 대한 고려와 사용의 중요성은 천연자원의 재생가능성과 이를 이용해서 만들어내는 제품 간의 관계에 달려있다. 재생가능한 자원은 자연 환경에 속하는 것으로 간주되며 생태계의 일부로 해당 환경에서 발생하는 자연적인 프로세스(natural processes)에 의해 대체된다. 재생 불가능한 자원(Nonrenewable resources)이란 그 양이 한정되어 있거나 자연이 지질시대 기간(geological time spans)에 걸쳐 자원을 생성하고 보충할 수 있는 것 보다 더 빨리 소모되는 천연자원이다. 천연자원 고갈의 리스크는 보다 지속가능한 다른 대안이 존재할 때 그 자원의 사용을 덜 바람직하게 할 수 있다.

금속은 자연적으로 생성되는 고체물질인 광석에서 나오는 것이다. 광석, 특히 보크사이트는 채굴을 통해 지각에서 추출된다. 보크사이트는 알루미늄을 구성하는 주요 상업용 광석인 비정질 점토와 같은 암석이다. 보크사이트는 대체로 산화철이 다양한 비율로 함유되어 수화된 알루미늄으로 구성되어 있다. 여기에서 보크사이트는 알루미나와 알루미늄으로 가공된다. 광석이 채굴된다는 사실은 천연자원을 고갈시킨다는 오해를 불러일으킨다. 그러나 알루미늄과 철과 같은 금속은 원소이므로 파괴되거나 고갈시킬 수 없다. 지구 전체의 금속 원소 자원 매장량은 줄어들지 않고 단순히 위치가 변하거나 다양한 형태로 남아있는 것이다. 알루미늄과 철은 많은 제품을 만드는 용도로 쓰이며 이러한 제품의 용도가 쓸모가 없게 되면 금속재의 경우 재료 수명이 끝이 나는 것이 아니고 알루미늄과 철은 재활용되거나 다른 제품을 만드는데 재사용될 수 있다. 이러한 사이클은 알루미늄과 철을 재활용을 통해 영구적으로 이용 가능한 재료로 남아있게 한다. 결과적으로 알루미늄과 철 제품이 새로운 제품으로 재활용될 때 마다 그 금속의 특성은 유지되는 것이다. 즉, 이러한 사이클은 금속 고유의 특성에 거의 또는 전혀 변화 없이 무한히 반복될 수 있다.

또한 금속은 목재 및 플라스틱 재료의 대체재로서 가볍고, 내화성이 있으며, 내구성이 있는 재료이다. 목재와 달리 금속은 썩거나 흰개미 또는 곰팡이에 취약하지 않다. 예를 들어 금속재 지붕은 전통적인 아스팔트 지붕에 비해 몇 배 더 수명이 길다. 뉴욕 클라이슬러사(社)의 건물지붕은 거의 100년이 되었는데 딱 한번만 청소가 이루어졌다. 이 지붕은 향후 최소 한 세기 정도는 그 성능을 잘 발휘할 것이다. 파리의 아연재 지붕들은 나폴레옹 시대 이래로 유지되어 왔다. 금속재로 공사하는 것은 대부분의 제작 및 조립작업이 현장 외에서 이루어져야 해서 현장 인건비 및 공기의 절약과 건설 폐기물 감소라는 장점이 있다. 만약 2천 평방피트 정도의 주택이 철강재로 지어진다면 남는 재료가 2% 미만이 되고 모든 잔재가 재활용될 수 있다.

같은 규모의 주택을 목재로 짓는 경우와 비교해 볼 때 목재에서 생성되는 폐기물은 20%에 가까우며 그 잔재 대부분은 매립지로 가게 될 것이다. 건축 재료에 관련한 철제는 가장 지속가능한 재료 중 하나이다. 철제는 환경적으로도 유리하지만 그 고유의 수명과 내구성으로 경제적으로도 전략적이다. 철제는 세상에서 가장 재활용이 잘되는 재료이다.

매년 알루미늄, 종이, 유리 및 플라스틱을 합친 것보다 더 많은 철제가 재활용된다. 철제는 목재와 플라스틱과 달리 사용되지만 결코 없어지지 않기 때문이다. 철을 만드는 과정에 그만큼 에너지를 쏟아 부을 가치가 있다는 것은 의심할 여지는 없다. 재료가 한번 생산되면 무한히 재사용됨에 따라 진정으로 유일한 C2C(cradle to cradle - 요람에서 요람으로) 재료 중 하나로 만들기 때문이다. 알루미늄도 가장 효율적이고 지속 가능한 재료 중 하나로 고려된다. 알루미늄을 용융된 형태로 녹이는 과정은 그 금속의 어떤 특성도 변화시키지 않는다. 따라서 철과 같이 알루미늄은 무한히 재활용될 수 있다. 알루미늄은 가장 널리 재활용되는 재료 중 하나이며 재활용 공정을 통해서 새로운 알루미늄을 생산하는데 비용의 95%를 절약한다. 알루미늄과 철과 같이 구리는 100% 재활용이 가능하며 원료 또는 제조된 제품의 상

태에 관계없이 금속의 무결성이 저하되지 않는다. 물량 측면에서 구리는 철과 알루미늄에 이어 세 번째로 가장 잘 재활용되는 금속이다.

4. 친환경 폴리머 재료(Green Polymer Materials Directional Solidification)

그 이름으로 알 수 있듯이, 천연 폴리머(또는 바이오 폴리머)는 자연적으로 발생하거나 살아있는 유기체(셀룰로오스, 실크, 키틴, 단백질, DNA)에 의해 생성되는 폴리머이다. 보다 넓은 의미에서 천연 폴리머는 자연에서 발견되는 원료로 인공적으로 만들어 질 수 있다. 천연 폴리머는 아직 연간 생산되는 플라스틱 3억 톤 중 1% 미만이지만 그 생산은 꾸준히 증가하고 있다. 미국에서 천연 폴리머에 대한 수요는 매년 6.9% 증가할 것으로 예측되어 왔는데 2012년 33억 달러에서 2016년 46억 달러로 증가하였다. 천연 폴리머 시장은 제약 및 의료분야의 천연 폴리머 수요 증가에 의해 주도되었다. 또한 천연 폴리머는 페인트 및 잉크 분야뿐만 아니라 건설 분야와 접착제, 식품, 식품 포장 및 음료 산업 및 화장품과 세면용품 등으로 사용된다. 그 시장은 셀룰로오스 에테르에 의해 주도되며 또한 전분 및 발효 폴리머(fermentation polymers), 삼출물(exudates) 및 식물성 검(vegetable gums), 단백질 기반의 폴리머 및 해양 폴리머 등을 포함한다.

반면에 친환경 폴리머는 1990년대에 등장한 용어인 친환경(또는 지속 가능한) 화학기법을 사용하여 생산되는 것들이다. 국제순수응용화학연합(IUPAC - the International Union of Pure and Applied Chemistry) 정의에 따르면 친환경 화학기법은 “인간, 동물, 식물 및 환경에 유해한 물질의 사용 또는 생성을 줄이거나 제거하는 화학적 제품 및 프로세스 설계”와 관련이 있다. 따라서 친환경 화학기법은 오염원을 줄이고 방지하기 위해 노력한다. 천연 폴리머는 항상 친환경이다. 21세기 초 우리는 재생 가능한 폴리머의 르네상스와 생체기반 거대 분자물질의 개발을 향한 큰 진전을 경험하고 있다. 이러한 패러다임 전환과 석유화학에서 바이오 경제로의 전환이 필요한 데에는 몇 가지 이유가 있다. 경제적인 관점에서 석유공급의 감소는 특히 전 세계 에너지 수요의 급격한 증가를 감안할 때 석유가격을 추가 상승시킬 것으로 보인다.

이것은 플라스틱의 비용효과성과 경쟁력에 큰 영향을 줄 수 있다. 화학원료 생산을 재생 가능한 자원 또는 석탄으로 전환하면 예상되는 새로운 미래 석유 위기로부터 플라스틱 생산을 보호할 수 있다. 따라서 더 중요한 또 다른 이유는 지구 온난화에 대한 소비자의 우려가 커져 가고 있어 지속 가능하고 친환경적인 제품에 대한 수요가 급증하고 있기 때문이다. 또한 환경 법규와 규정의 쓰나미가 탄소 발자국이 적은 환경 친화적인 제품의 개발을 촉진하고 있다. 폴리머 생산에 있어서 친환경 원칙에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 제품에 높은 함량의 천연재료를 사용
- 깨끗한(폐기물이 없는) 생산 공정
- 유기 용제와 같은 추가적인 물질의 사용 금지
- 제조 시 높은 에너지 효율
- 재생 가능한 자원 및 재생 가능한 에너지의 사용
- 건강 및 환경 위험성의 부재
- 높은 안전 기준
- 저탄소 발자국(Low carbon footprint)
- 효과적인 폐기물 재활용으로 제어되는 제품 생애주기

또한 친환경 폴리머 제조를 위해 재생 가능한 자원의 사용은 식품 생산에 영향을 주어서는 안 되고, 집약적 농업(intensified farming)이나 삼림 벌채를 조장해서는 안 되며, 유전자 변형 식물이나 유전자 변

형 박테리아를 사용해서는 안 된다; 생분해성 폴리머는 흡입 가능한 포자 또는 나노입자를 생성하지 않아야 한다. 재생 가능한 플라스틱을 생산하기 위한 세 가지 기본 전략이 있다:

- a. 고도로 자원 및 에너지 효과적인 폴리머 제조 공정을 위한 재생 오일 및 친환경 모노머(monomers)를 생산하기 위하여 바이오매스 및 이산화탄소를 사용하는 것
- b. 태양에너지 화학 반응기로 변환되는 살아있는 세포를 통해 바이오폴리머 및 바이오 기반 폴리머를 생산하기 위해 유전자 공학 및 생명 공학적 방법을 사용하는 것
- c. 이산화탄소의 활성화 및 중합(polymerization)에 의해 생산

친환경 폴리머, 재생 가능한 폴리머 및 바이오 플라스틱은 이미 여러분이 생각하는 것보다 더 일반화되어 있다. 우리 모두 사탕수수 또는 셀룰로오스에서 얻은 설탕을 발효시켜 생산되는 새로운 바이오 연료인 바이오 에탄올에 관해 알고 있다. 또한 바이오 에탄올은 에틸렌, 프로필렌 및 부타디엔을 포함하여 올레핀 및 디올레핀 단량체를 제조하기 위한 다목적 원료 바이오물질이다. 2010년 브라질의 브라스کم(Braskem)은 100% 재활용 가능한 친환경 폴리에틸렌을 생산하기 위해 사탕수수 바이오 에탄올에서 친환경 에틸렌을 생산하는 연간 200킬로톤의 공장을 설립하였다. 훨씬 더 에너지 효율적인 공정을 사용하면 바이오매스는 재생 가능한 석탄과 오일로 바로 변환될 수 있다. 이미 농업 및 임업 폐기물은 재생 가능한 단량체(monomers)를 생산하는데 사용되고 있다. 이산화탄소를 일산화탄소, 메탄올, 프롬산 및 포름알데히드로 전환시키는 공정이 개발되었다. 식물성 오일은 부산물로서 바이오디젤과 글리세롤을 생산하는데 사용될 수 있으며 이 부산물은 예폭시 수지 생산을 위한 프로판 디올, 아크릴산 및 심지어 에피클로로히드린(epichlorohydrin)과 같은 다양한 단량체를 제조하는데 사용될 수 있다. 탄수화물, 테르펜, 단백질 및 폴리에스테르는 화학적으로 수정되어 폴리머 가공 및 적용에 사용된다. 천연 섬유는 열경화성 수지 및 열가소성 수지에 탁월한 섬유 강화 기능을 제공한다. 미세 섬유화 된 셀룰로오스(Microfibrillated cellulose)된 의료 임플란트의 적용을 포함하여 폴리머 나노 복합물에 사용되어져 왔다. 리그닌은 종이 제조, 시멘트 용 필러로서 그리고 다양한 폴리머 및 고무의 재생 가능한 에너지원으로 쓰인다. 천연 섬유(Arboform)와 혼합된 열가소성 리그닌은 목재 및 합성 열가소성 수지의 장점을 결합한다. 바이오 하이브리드는 폴리올레핀 및 퇴비화 가능한 폴리에스테르(Ecoflex)와의 블랜드 성분으로 전분을 사용해 왔다. 키토산과 폴리락트 산은 수많은 의학적 용도를 가지고 있다. 카세인은 접착제 및 결합제로 사용된다. 재생 가능한 단량체는 이미 오일로 만든 단량체를 대체하고 있다. 썩지 않는 플라스틱 병은 이러한 사례 중 하나이다. 2011년 코카콜라 사에서는 100% 바이오 기반의 재료로 플라스틱 병을 만드는 목표를 발표하였다. 최대 30%의 바이오 기반 단량체를 사용하는 재활용 가능한 PET “PlantBottles”는 2009년에 도입되었는데 여전히 재활용이 가능하다.

5. 친환경 콘크리트 재료

친환경 콘크리트 폐기물로 만들어진 콘크리트는 “친환경 콘크리트 재료(Green concrete Materials)”로 불리어진다. 친환경 콘크리트는 에너지 절약, 이산화탄소 배출, 폐기물 등 유지관리 측면에서 유리하면서 지속 가능하고 긴 생애주기를 보장하기 위해 콘크리트 배합설계와 콘크리트 타설에 몇 가지 추가적인 조치를 취한 콘크리트에 사용되는 용어이다. “친환경 콘크리트”는 콘크리트 산업의 역사에 있어서 아주 혁신적인 주제이다. 이것은 1998년 덴마크의 WG 박사[2, 17]가 처음 발명하였다. 슬래그, 발전소 폐기물, 재활용 콘크리트, 광산 및 채석장 폐기물, 폐유리, 소각로 잔류물, 붉은 진흙, 구운 점토, 톱밥, 연소기의 재 및 주조사와 같은 콘크리트 폐기물(concrete wastes)이 있다. 친환경 콘크리트 센터의 목표는 콘크리트의 환경 영향을 감소시키는 것이다. 이를 가능하게하기 위해 새로운 기술이 개발되었다. 이 기술은 콘크리트 구조물 생애주기의 모든 단계 즉, 구조설계, 시방서, 제조 및 유지보수를 고려하며

아래와 같은 모든 측면의 성능을 포함한다.

- 기계적 특성(강도, 수축, 크리프, 정적 거동 등)
- 내화성(콘크리트의 박락, 열전달 등)
- 시공성(작업성, 강도 발현, 양생 등)
- 내구성(부식 방지, 내한성, 새로운 열화 메카니즘 등)
- 열화학적 특성(다른 특성에 인풋)
- 환경적 측면(이산화탄소 배출, 에너지, 재활용 등)

친환경 구조물이 따라야 할 아래와 같은 많은 대체 환경 요구조건들이 있다.

- a. 이산화탄소 배출은 최소 30% 이상 감소되어야 한다.
- b. 콘크리트의 최소 20% 이상이 골재로 사용될 수 있는 부산물이 되어야 한다.
- c. 콘크리트 업계는 자체 부산물을 콘크리트 제조에 사용해야 한다.
- d. 이전에는 매립하였거나 다른 방법으로 폐기처리를 했었던 새로운 타입의 부산물을 사용
- e. 이산화탄소 배출이 없고 폐기물에서 추출되는 연료를 시멘트 생산에 쓰이는 화석연료를 최소 10% 이상 대체해야 한다.

환경 목표 이외에도 많은 환경적인 목적이 있다. 가장 중요한 것들에는 다음과 같은 것이 있다 :

- a. 기존 콘크리트와 비교하여 친환경 콘크리트의 재활용 역량을 감소시키지 않고 기존 유형의 콘크리트 제조 시 나오는 폐수와 비교하여 친 환경 콘크리트 제조 시 나오는 폐수에 유해물질 함유량을 증가시키지 않으면서 환경보호국(Environmental Protection Agency's list)의 원치 않는 재료에 관한 물질을 포함하는 재료의 사용을 피하는 것.
- b. 다양한 콘크리트 유형에 대해 시공연도, 30분 후 시공연도의 변화, 공기함유량, 압축강도 발현, 탄성계수(Emodulus), 발열, 균질성, 수분 분리, 응결시간, 밀도 및 압송성능 등의 시험을 실시. 또한 공격적인 환경 등급의 콘크리트를 위해 내동해성 시험, 염화물 침투 및 공극분석을 실시
- c. 물시멘트비, 물 결합재 비율 및 염화물 함량은 정확한 혼합비에 대한 배합보고서 및 다양한 원료의 염화물 함량을 산출한다.

친환경 콘크리트의 장점은 다음과 같다 :

- a. 콘크리트 산업의 이산화탄소 배출량 30% 감소
- b. 콘크리트 산업의 폐기물 사용량을 20%까지 증대
- c. 환경오염이 없고 지속 가능한 개발을 추구
- d. 친환경 콘크리트는 유지보수 및 보수에 대한 노력의 감소
- e. 친환경 콘크리트는 기존 콘크리트에 비하여 시공연도가 더 우수함
- f. 내열성 및 내화성이 우수
- g. 물시멘트비에 따른 콘크리트 압축강도는 기존 콘크리트와 유사함
- h. 친환경 콘크리트의 휨 강도는 기존 콘크리트와 거의 동일함.

친환경 콘크리트의 한계는 다음과 같다 :

- a. 스테인레스 스틸을 사용함으로 보강비용은 증가한다.
- b. 친환경 콘크리트로 건축된 구조물은 기존 콘크리트 구조물에 비해 비교적 수명이 짧다.
- c. 친환경 콘크리트의 쏘갠 인장강도는 기존 콘크리트에 비해 낮다.

6. 결론

화석 연료와 석유 자원에 대한 부담이 증가하고 전 세계의 시장이 늘어남에 따라 재정적으로나 환경적으로 신뢰성이 있는 재료의 중요성이 그 어느 때 보다도 증대되었다. 친환경 금속 재료, 친환경 폴리머 재료 등과 같은 친환경 엔지니어링 재료 등이 그러한 예이다. 제품의 설계, 제조 및 적용에 있어서 유해 물질을 줄이거나 없애기 위한 원칙의 활용이 중요하다. 제품 생산과정에서의 생애주기 평가는 지속 가능한 엔지니어링 재료의 사용에 관한 사회적 관점과 함께 도입되어야 할 것이다. 재료에 대한 친환경 엔지니어링 재료 개념은 설계단계 외에도 모든 생애주기 단계에서도 적용되어야 한다. 이에 대한 사례에는 성능은 유사하지만 내재 에너지가 적고 자연 속에 매장량은 풍부하며 에너지나 화학물질의 강도 높은 추출 또는 제조가 덜하고 독성이 비교적 낮으며 유지보수가 용이하며 재활용성이 우수하거나 내구성이 더 긴 대체재료 들이 있다. 엔지니어링 재료 설계가 지속 가능성 목표를 달성하기 위해 보다 효과적으로 적용되어야 한다는 것이 명백해졌다. 친환경 엔지니어링 재료의 개발을 통해 지속 가능한 개발을 지원할 수 있다.

<원문제목> Sustainable Development by Green Engineering Materials

<원문출처> South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.