

Global Report

새로운 건설 및 철거 폐기물(CDW) 처리 및 재사용과 재활용 극대화를 위한 용도

서론

구조 부재 CDW의 재사용과 재활용

비구조 부재 CDW의 재사용과 재활용

재사용, 재활용, 조립, 개조

(REuse, REcycling, PREfabrication, REfurbishment – RE⁴)

구조 부재 CDW의 재활용과 사용

라이프 사이클 지속가능성 평가

결론

서론

건설 및 철거 폐기물 (CDW)은 유럽 연합(European Union, EU)에서 가장 큰 폐기물 흐름을 구성하며 절토된 토양과 준설용 폐기물을 제외하고 매년 3억 5천만 톤 이상을 차지한다(European Commission, 2017). 건설 및 철거 폐기물은 콘크리트, 모르타르, 벽돌들, 타일들, 광물 골재, 역청, 철, 플라스틱, 목재 및 유기 경량 입자의 이질적인 혼합물로 구성되어 있다. (European Commission, 2018). 현재 건축 실무에서는 해체가 용이하지 않다. '소프트 스트리핑(soft stripping)'으로 알려진 공정인 모든 건물 설비와 부속들을 제거한 후에 골격은 효과적으로 철거되고 생성된 CDW들은 매립된다(Sassi, 2019). 또한, 대부분의 회수된 CDW 은 구성요소들 중 일부 성분이 높은 자원 가치를 갖고 있음에도 불구하고, 파이프 토대(bedding)나 도로 포장용 보조기층(subbase)과 노반과 같은 저가(低價)의 적용물에 한정되었다. 회원국의 CDW 재활용률을 높이기 위해, EU 폐기물 프레임워크 지침 2008/98/EC(European Commission)가 2008년에 도입되었다. 이에 따르면 모든 회원국은 2020년까지 무해한 CDW의 재사용, 재활용 또는 기타 복구방식으로 적어도 무게량의 70%의 재활용률을 달성하기 위해 필요한 모든 조치를 취해야 한다. 또한, 2015년 말에 유럽 위원회(European Commission, 이하 EC)는 '루프 만들기- 순환 경제를 위한 EU의 행동 계획'이라는 새로운 순환경제 행동계획을 채택하였다(European Commission, 2015). 이 계획은 일자리, 성장, 투자에 새로운 활력을 불어넣고 지속 가능한, 저탄소, 효율적 자원, 경쟁력 있는 경제를 개발하는 것을 목표로 한다. 이 문서에서 채택된 입법안은 재사용과 재활용을 통한 생산과 소비행태의 변화와 매립지로 보내는 폐기물의 양을 줄이기 위한 폐기물 관리에 초점을 두고 있다. 이것은 차례로 가치 사슬의 각 단계에서 순환경제를 지원하면서 제품 수명 주기의 루프를 형성할 것이다. 집행을 돕고, 경제적 인센티브들을 장려하며 확장된 생산자의 책임 제도를 개선하기 위한 추가 조치들이 제안되었다(Dodick & Kauffman, 2017). 이 계획에는 다음과 같은 54가지 실천 사항들이 포함되어 있다:

- * Eco design Directive 2009/125/EC(European Commission, 2009)에 따라 내구성, 수리성 및 재활용성과 관련된 제품 요구 사항들을 개발한다.
- * 어떤 산업의 부산물들이 다른 산업의 자원들로 사용되는 산업 공생 촉진을 위해 부산물들에 대한 규칙들을 명확히 한다.
- * 폐기물 관리와 자원 효율성에 대한 최고의 사용 가능한 기술 참조 문서(Best Available Techniques Reference Documents, BREF)의 지침을 포함한다.
- * 새로운 내구성 요건들을 갖춘 제품들에 대한 새로운 에너지 라벨링 시스템을 제작한다.
- * 계획된 노후화에 대해 연구한다.
- * 순환경제 기준을 통합하여 녹색공공조달에 대한 조치를 취한다.
- * 2009/125/EC(European Commission, 2009)에 따라 수리 정보 규정들에 대해 연구한다.
- * 폐기물 제도를 수정한다.
- * 폐기물 수거 시스템에 대한 최상의 실무 사례들을 발굴한다.
- * 2차 원료들에 대한 EU의 광범위한 표준들을 개발한다.
- * 건설 분야의 철거 전 평가 지침을 개발한다.
- * CDW를 위한 업계 전반의 자발적 재활용 프로토콜을 개발한다.
- * 건물의 수명 주기 환경 성과 평가를 위한 핵심 지표들 및 그들의 사용에 대한 인센티브들(incentives)을 개발한다.
- * 연구 및 혁신을 위한 Horizon 2020 프레임워크 프로그램으로 '산업 2020과 순환 경제'를 통한 혁신과 투자를 지원한다.
- * 순환경제를 위한 모니터링 프레임워크를 개발한다.

2019년 3월 EC는 순환경제 행동 계획의 이행에 관한 종합 보고서를 채택했다(European Commission, 2019). 위 보고서에 따르면 실천사항들 중 일부분에 대한 작업이 2019년 이후에도

계속될 것임에도 불구하고 순환경제행동계획 54개 실천사항들이 모두 전달됐다. 위의 내용에 따라 다음과 같은 신뢰할 수 있는 전략들과 혁신적인 기술들의 개발이 필요하다:

- * 새로운 주택 건설에서 CDW 파생 재료들의 비율을 늘린다.
- * CDW 파생 재료들의 기술 및 경제적 가치를 높인다.
- * 차세대 건물들에서 발생하게 될 미래의 CDW를 최소화 한다.
- * 건물 에너지 효율을 높인다.

대량의 CDW 파생 재료들을 통합하는 (구조적 그리고 비구조적) 조립식 요소들은 상기의 목표들을 성취하는데 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이 논문은 최소한 CDW 파생 재료 전체무게의 65% 이상을 통합하는 조립식 건물 구성 요소를 개발하기 위해 호라이즌 2020 프레임워크 프로그램이 자금을 지원하는 6개 부문 프로젝트들 중 하나인 RE4 프로젝트 컨소시엄(RE4, 2019)의 노력들에 대한 개요를 소개하면서 그 과정에서 직면했던 도전들을 설명하는 것을 목표로 한다.

구조 부재 CDW의 재사용 및 재활용

콘크리트의 재활용 골재들

원(原) CDW를 재활용 골재로 적합하게 사용하기 위해 먼저 처리단계를 거쳐야 한다. 여기에는 경량 입자들 (플라스틱, 목재 입자), 진흙, 토양, 철을 함유한 금속들, 고무 및 석고와 같은 원하지 않는 파편들을 제거하는 작업이 포함된다. 일단 CDW 재활용 골재가 얻어지면, 구조용 콘크리트의 작업에 사용할 수 있다. 처리 후 CDW에서 얻어진 재활용 골재는 부분적으로 시멘트, 모르타르, 벽돌 및 타일로 덮인 광물 골재와 소량의 유리, 금속 및 역청을 포함한 다양한 성분으로 구성된다 (그림 1).

현재 EN 206:2013 + A1:2016 (EN 206, 2013) 및 EN 12620:2013 (EN 12620, 2013)은 노출 조건에 따라 구조용 콘크리트 생산시 재생 골재로 대체될 수 있는 거친 천연 골재의 양을 최대 50%까지 제한하고 있다. 이것은 콘크리트의 작업성, 압축 강도, 탄성 계수 및 장기 내구성의 손실을 제한하기 위해 수행된다. 일반적으로, 재활용 잔골재들은 새로운 구조용 콘크리트의 제조에 허용되지 않는다.

그림설명: 재생 골재의 성분별 함량을 %단위로 표현

그림 1. 프랑스 마르세유 인근 재활용 공장에서 생산되는 8-16mm의 가공된 재생 골재의 전형적인 구성

목재

구조용 목재 조각들은 구조용 목재와 집성목(glulam)에 대해 EN 14081-1:2016 (EN14081-1, 2016) 및 EN 14080:2013 (EN 14080, 2013)에 각각 명시된 일반적 요구 사항들을 충족하는 경우에 구조용 부재로 재사용 및 재활용될 가능성이 크다. 목재는 목재나 원목을 재활용할 수 있는 규모로 인해 재활용 잠재력이 크다. 구조용 목재가 구조 부재 자체로 재사용할 수 없는 경우에는 집성목으로 변환시키거나 더 나아가 비구조용 부재들인 패널들, 웨더보드, 칩 혹은 섬유 기반 제품들로 처리할 수 있다(그림 2). 전제 조건으로 재활용 목재 조각들은 반드시 목재 방부제, 곰팡이 또는 곤충 침입 및 심각한 손상이 없어야 한다. 현장 육안검사는 곰팡이나 곤충 침입 및 잠재적인 손상을 확인하기에 충분하다. 또한 수종, 목질, 그리고 수분 함량의 식별을 가능하게 한다. 원래의 밀도는 CDW 목재의 성장 위치에 대한 정보가 없을 경우에 문헌 데이터를 통해 추정할 수 있다. 그 다음으로 회수된 조각들은 균열, 가지, 그리고 나무결 경사의 치수와 위치를 평가하기 위해 반드시 금속 부품, 페인트 등과 같은 불순물을 청소해야 한다. 오염물 존재를 확인하기 위해 육안 검사는 실험실 연구들로 보완될 수 있다. 현장 조사와 실험실 조사에 따라 목재 조각은 손상된 부분들을 제거하고 전체 조각들을 재사용하기 위해 다듬어지거나 집성목을 준비하거나 웨더 보드로 재사용하기 위해 처리될 수 있다.

그림설명: 원목이 구조용 목재, 칩기반 제품, 섬유 기반 제품으로 재활용되는 재료의 라이프 사이클을 보여줌.

그림 2. 목재 제품들의 라이프사이클과 재활용

비구조 부재 CDW의 재사용과 재활용

재활용 골재들이 포함된 설계 요소들의 구조 성능을 넘어 CDW에 포함된 경량 파편을 사용하여 재활용 단열재들을 준비할 수 있다. 본 프로젝트에서 경량 파편은 경질 플라스틱 입자들, 혼합된 나무/플라스틱 스크랩들 또는 나무 섬유들로 구분되었다. 한편, 콘크리트에 재활용 골재들을 사용하면 향상된 열 성능을 보여줄 수 있음을 이미 확인 하였다.(Diez, Munoz, Lopez, & Polanco, 2013; Kim, Jeon, & Kim, 2003). Bravo와 Evangelista(2017)는 잔골재나 거친 골재 파편을 재생 골재(recycled aggregates, 이하 RA)로 대체하는 콘크리트들을 준비하였다. 처녀골재들로 만든 제어 콘크리트는 2.08W/mK의 열전도율을 나타냈으며 이는 20°C 표본에 대해 Eurocode 2에 명시된 한계를 약간 넘어 섰고 처녀골재들을 재활용 골재들로 대체하니 열전도율이 최소값인 1.2W/mK로 감소되었다. 하지만 플라스틱과 나무 섬유와 같은 저밀도 경량 골재들을 사용하면 그 값을 더 줄일 수 있다. CDW의 경량 파편은 주로 플라스틱과 나무로 구성된다. 그들은 폐기되는 대신 단열 목적으로 재사용될 수 있다. 플라스틱 입자는 예전에 콘크리트 복합물의 골재들로 사용되었다. 그리고 Ati (2013)는 0.39W/mK의 열전도율을 가진, 폐플라스틱이 60% 함유된 콘크리트를 생산했다. 반면에 모래의 열전도율은 약 2W/mK이다. 다른 저밀도 골재들과 입자들은 열적으로 효율적인 콘크리트를 생산하는데 사용될 수 있고, 사용되어 왔다(Abidi, Nait-Ali, Joliff, & Favotto, 2015; Herki & Khatib, 2017; Jedidi, Benjeddou, & Soussi, 2015; Kekavovic, Kukaras, Ceh, & Karaman, 2014). Kekavovic 등(2014)은 파쇄한 발포 폴리스티렌(expanded polystyrene, EPS)를 포함한 경량 콘크리트의 성능을 연구했다. 그들은 열전도율 0.074W/mK 밀도 350kg/m³에 해당하는 폐 EPS를 함유한 콘크리트를 생산하였다. 그러나 이러한 열효율들을 달성하기 위해 강도가 약해져서 테스트된 혼합 설계물 들은 28일의 양생 후 강도가 단지 7.5MPa에 불과했다. 유사하게 펄라이트와 질석이 콘크리트의 경량 골재들로 사용될 수 있다(Abidi et al., 2015; Jedidi et al., 2015). Abidi 등(2015)은 강도 손실을 감수하고 약 80%의 펄라이트나 질석을 함유한 시스템들에서 열전도율이 절반 이상 감소된 것을 발견했다. 펄라이트와 질석은 그 자체로 단열재로 사용될 수 있다는 점을 주목해야 한다. 재활용 가능성이 있는 나무 섬유들과 관련하여 Sekino와 Kawamura(2004)는 나무 프레임들에 사용하기 위해 고안된, 나무 부스러기들을 포함한 접착제 미사용(binderless) 패널들을 계획하였다. 이 패널들은 80 ~ 120kg/m³의 다양한 밀도들로 준비되었다. 패널의 밀도와 나무 부스러기들의 크기에 따라 열전도율을 0.06W/mk로 낮춘 패널들이 완성되었다.

재사용, 재활용, 조립, 개조 (REuse, REcycling, PREfabrication, REfurbishment – RE⁴)

RE⁴는 CDW가 구조적 및 비구조적 조립식 건물 구성요소들에 통합될 수 있는 다양한 방법들을 조사하여 CDW의 재활용율을 향상시키는 것을 목표로 한다. 다음 절들에서는 프로젝트 파트너 국가들이 폐기물 프레임워크 지침(2008)과 순환경제 실행 계획(2015)의 요구 사항들을 해결하기 위해 채택한 방법론을 강조하고자 한다.

재활용율을 촉진하고 개선하기 위한 건설 실무들의 변경

조립식 사례

프리캐스트 콘크리트는 현장 콘크리트와 다르다. 전자는 먼저 프리캐스트 콘크리트 공장에서 제작된 후 현장으로 전달되기 때문이다. 프리캐스트 콘크리트는 더 나은 품질 관리, 폐기물 감소, 건강 및

안전성 향상, 제조 속도 증가 및 비용 절감 등 많은 추가된 이점들이 있다(Wong, Hao, & Ho, 2003). 또한, 프리캐스트 콘크리트는 표준화된 제품들을 구축할 수 있을 뿐만 아니라 맞춤형 부재들로 고객의 요구들에 부응할 수 있다.

모듈식 설계

건물 부재들을 포함하는 CDW의 개발과 병행하여 조립식 부재들은 전체 기능 단위들로 재사용할 수 있도록 설계되었다. 이를 위해 RE⁴ 범위 내에서 설계된 건물들은 각 '모듈' (보, 기둥, 슬래브, 파사드 패널 등)이 설계 수명 후반에 제거되고 재사용할 수 있는 모듈식이 되어야 한다. 이는 다음과 같은 일련의 과제들을 제시한다:

- * 모든 부재들이 기존 건축법들을 준수하고 있는지 확인한다.
- * 가능한 기계적 연결들을 사용하여 조립 및 분해를 용이하게 한다.
- * 다른 부재들의 개수를 합당한 개수로 제한하여 향후 사용을 가능하게 한다.
- * 표준 트럭 운송을 위해 부재 크기를 제한하여 시간과 비용을 절약한다.
- * 수명 주기, 수리 용이성, 유지보수 또는 교체
- * 추적성 즉, 건물 정보 모델링(BIM)에 정보를 명세화 한다.

기초구조는 토양 조건에 의존하기 때문에 이들을 제외한 모든 부재들의 성능이 모듈식 설계에 적합하다고 간주되었다.

CDW에서 비롯된 재생 골재의 재활용을 증가

CDW 골재의 품질 향상

모든 RA 성분들이 동일한 것은 아니고 프로젝트에서 광물 골재들은 페이스트로 더럽혀졌지만 모르타르 및 콘크리트 입자들처럼 성능이 우수한 것으로 확인되었다. 따라서, RA의 품질을 향상시키고 콘크리트의 RA의 재활용율을 증가시키기 위해 결함이 있는 입자들은 제거되어야 한다 (예: 벽돌들, 타일들, 유리 및 역청). RE⁴ 컨소시엄은 재활용 골재들의 품질 개선을 위한 새로운 기술들을 시험하고자 했다(그림 3(a-c)). 이러한 입자들은 다양한 유형들의 CDW의 적외선 반사 특성을 기반으로 고급 전자 및 광학 시스템들을 사용하여 실시간으로 결정된다. 감지 장치는 서로 다른 파장들(1000–1700nm, 즉 근적외선)의 입자들의 반사를 결정하여 불필요한 입자를 구별한 후에 6개의 자유도를 가진 로봇 팔을 사용하여 제거한다. CDW 파편들의 물리적 처리는 벤츨리 효과(Venturi effect)에 기초한 진공 발전기에 의해 이루어지므로 분리될 부품의 모양과 크기 측면에서 시스템에 높은 유연성을 부여한다. 이 조각들은 움직이는 컨베이어 벨트로부터 선별된 다음에 재료 등급에 따라 다른 통들에 배치된다.

그림설명: 로봇 팔 및 컨베이어 벨트, 분해셀, 중력 기둥 등의 광물 파편 선별기 사진을 보여줌.

그림 3. CDW에서 파생된 광물 파편들의 품질 개선에 사용되는 신기술 사례들

현재 이 시스템은 여전히 교정 중이며 곧 테스트를 통해 재활용의 효용성을 판단할 예정이다. 완료되면 개선된 재생 골재들이 콘크리트에서 테스트될 수 있다.

세라믹 파편으로 무엇을 할 수 있을까?

벽돌들과 타일들은 단순한 골재보다 더 실용적인 용도로 사용할 수 있으며 시멘트 보조재로 사용 (Heikal, Zohdy, & Abdelkreem, 2013; Naceri & Hamina, 2009; Schackow, Stringari, Senff, Correia,

& Segadaes, 2015)되거나 알칼리 활성 결합제를 제조하기 위한 전구체(precursor)로 사용될 수 있다 (Komnitsas, Zaharaki, Vlachou, Bartzas, & Galetakis, 2015; Reig et al., 2013; Robayo-Salazar, Rivera, & Mejia de Gutierrez, 2017). Naceri와 Hamina(2009)의 결과들은 벽돌 폐기물을 시멘트와 혼합하면 파쇄 시간과 혼합물의 특정 무게를 효과적으로 줄이고 응고 시간을 늘릴 수 있음을 보여 주었다. 장기간 양생(90일)을 했지만 최대 중량 10%의 벽돌 폐기물을 함유한 혼합체들의 강도가 증가하였다. Heikal et al.(2013)은 폴리카복실레이트(poly-carboxylate)기반의 초가소제(superplasticizer)로 제조된 파쇄된 점토 벽돌을 포함한 자가 압축 콘크리트의 강도 증가를 측정하였다. 흥미롭게도, 혼합제 없이 제조된 콘크리트는 강도가 감소되었다. Reig 등(2013)은 65°C에서 경화된 수산화나트륨(NaOH)과 규산나트륨(Na_2SiO_3)으로만 활성화된 붉은 벽돌 폐기물을 사용하여 페이스트와 모르타르를 준비했다. 저자들은 활성화 용액의 구성을 변화시켜서 7일 간의 양생 후 최대 50MPa의 강도에 달하는 모르타르들을 준비하였다. Komnitsas 등(2015)은 마찬가지로 알칼리 활성화 벽돌과 타일 그리고 콘크리트 폐기물을 조사했다. 그들은 양생 온도와 NaOH 농도를 다양하게 하여 규산나트륨의 양을 일정하게 유지하였다. 성능은 사용된 전구체 (벽돌, 타일 또는 콘크리트), 온도 및 NaOH 농도에 따라 달라진다. 벽돌 및 타일 기반 전구체들은 ‘올바른’ 활성화제 조성 및 온도 조건으로 40MPa를 초과하는 더 높은 강도에 도달했다. RE^4 는 세라믹 폐기물을 알칼리 활성화 바인더들의 전구체로 먼저 재사용하려고 하였다. 파쇄 분말은 붉은 벽돌과 타일 폐기물로 구성되었다. 그런 다음에 이것은 산화나트륨(Na_2O)과 Na_2SiO_3 의 비율을 변화시킨 혼합물 사용으로 활성화되었다. Na_2O 함량 M+는 질량별 전구체의 백분율로 정해졌다. Na_2SiO_3 함량은 알칼리 계수, 즉 AM(alkali modulu)으로 알려진 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 의 비율로 표현되었으며 0.5에서 $+\infty$ (규산 나트륨 첨가 없음)까지 다양하다. 물/바인더(w/b) 함량은 0.37로 고정 되었다. 활성화 용액의 화학적 성질에 따라 70°C에서 28일 동안 양생한 50mm 모르타르 큐브들은 최대 30MPa의 강도에 달했다. 세라믹들은 바닥 타일이나 벽 타일들로도 재사용되었다. 이것은 수지에 파쇄 세라믹 파편을 혼합하여 금형에서 경화되도록 하였다. 원하는 강도와 시공성(workability) 속성들을 달성하기 위해 세라믹 분말의 등급과 세라믹 파편에 대한 수지 비율을 조사하였다. 실험실 규모의 생산라인으로 얻어진 최적의 성능은 질량 기준으로 수지 3, 파쇄 세라믹 7의 비율로 혼합할 경우에 달성되었다. EN 14617-2:2016 (EN 14617-2, 2016)에 따른 19.7MPa의 굴곡 강도와 EN14671-15:2005 (EN 14671-15, 2005)에 따른 54.4MPa의 압축 강도가 이러한 재구성된 타일들에서 얻어졌다.

구조 부재 CDW의 재활용과 사용

콘크리트

콘크리트는 프로젝트의 범위 내에서 설계될 수 있는 구조용 부재와 비구조용 부재의 다양성으로 인해 중요한 재료로 간주된다. 이 프로젝트의 접근방식은 다양한 부재들 (보, 기둥, 슬래브, 블록, 파사드, 계단 등)을 만들 수 있는 다양한 콘크리트 유형들과 강도 등급들을 설계하는 것이었다. 설계된 콘크리트들의 유형은 표 1에 상술(詳述)되었고 프로젝트와 관련된 파트너들의 요구들에 적합한 진동(vibrated, VC), 자체 압축(self-compacted, SCC) 및 반건조(semi-dry, SD) 등 3가지 유형의 콘크리트 혼합물들을 포함한다. 시험적인 혼합들을 수행한 후에 설계된 콘크리트들은 프로젝트 내에서 제조업체들이 설정한 강도 및 시공성 목표에 도달하였다. 처녀 골재 교체는 재생 골재의 출처와 생산된 콘크리트의 유형에 따라 70%에서 100%까지 다양했다.

목재

전술한 바와 같이 제공된 목재 파편이 손상되지 않은 경우에 DIN 4074-1:2012(DIN4074-1, 2012)에 따라 분류하기 위해 세척과 표준화된 크기로의 절단과 같은 최소한의 처리로 그 파편이 재사용될 수 있다. 이는 차례로 EN 338:2016 (EN338, 2016)에 따라 각각의 강도 등급으로 이어진다. 이러한 절차는 구조용 부재들로 재사용을 위해 성능 손실을 최소화하면서 폐목재를 효율적으로 재사용하고 재활용할 수 있다. (Cavalli, Cibecchini, Tongi, & Sousa, 2016). 재생 목재는 또한 집성목을 제조하기 위해 추가적으로 처리될 수 있다. 최종 강도 등급, 부재 성질 및 보존 상태에 따라

다음과 같이 목재 재사용을 위한 몇 가지 전략들을 채택할 수 있다.:

- * 최소한의 처리로 부재의 완전한 재사용 (그림 4(a)).
- * 표준화된 횡단면으로 재가공
- * 집성목 제작을 위해 박판들(lamellas)로 재가공 (그림 4(b)).

표 1. 높은 수준의 CDW 파생 골재를 함유한 다양한 콘크리트 유형들

제품	강도	반죽질기(Consistency) 등급	RA 함량(%)	용도
VC	C25/30 C32/40	S2/S3 S3	100	구조용
SCC	C40/50	슬럼프 흐름 테스트 기반에서 640-770mm	40-80	구조용
SD	7.3MPa	해당무	70	건물 블록

RE⁴에서 재생 목재는 현장에서 받은 모든 조각들이나 집성목으로 사용되는 것으로 테스트 되었다. 집성목 목재 보들의 경우에 목재 강도 등급은 GL24를 목표로 삼았고 이는 그 목재가 24MPa의 목표 휨 강도에 도달했음을 의미한다. 만일에 부재들이 구조 부재로 사용하기에 적합하지 않은 것으로 간주되는 경우, 목재는 잠재적으로 여전히 비구조적 부재들을 준비하는데 재사용 될 수 있다. 예를 들어 (CDW 재활용 목재 칩을 포함하는 단열재로 완성된) 패널이나 클래딩으로 재활용될 수 있다. 목재가 취할 수 있는 다양한 형태들과 계단식 사용 가능성으로 인해, 모든 나무와 목재 제품들의 재활용율은 매우 높게 유지된다(그림 2).

CDW로 만든 단열재 개발

단열재 준비를 위한 경량 입자들

이 프로젝트에 사용된 전형적인 경량 CDW 입자들은 단단한 플라스틱 입자들, 혼합 목재/플라스틱 스크랩들 및 나무 섬유들로 만들어졌다. RE⁴는 이러한 파편들을 저밀도와 낮은 열전도율을 갖는 단열재 개발에 활용하려고 시도했다. 구체적으로 경량 CDW 입자들은 저밀도 콘크리트들과 단열 패널들을 개발하는데 사용되었다. 표 2는 경량 포틀랜드 시멘트(PC) 콘크리트를 개발하기 위한 목표 속성들과 이러한 목표들을 충족하는 최적화된 혼합물들을 강조하였다. 출처에 따르면, 단단한 플라스틱 입자들이나 혼합된 나무/플라스틱 스크랩들은 천연 골재 파편의 각각 최대 70%와 50%를 대체할 수 있었다.

그림설명: a) 재활용 목재 조각 b) 재활용 목재로 만든 집성목

그림 4. 재활용 목재 조각을 집성목으로 변환

표 2. 단단한 플라스틱 입자와 혼합 목재/플라스틱 스크랩으로 만든 패널의 경량 콘크리트에 대한 요구조건

요구조건	목표 성능	단단한 플라스틱	나무/플라스틱
반죽질기 등급	S4	S4/S5	S5
밀도(kg/m ³) @ 28일	800-1400	1260	1250
압축 강도(MPa) @ 28일	4.5-24.0	7.5	4.5
열전도율(W/mK) @ 28일	0.16-1.00	0.31	0.29

단단한 플라스틱이 들어있는 단열 패널들의 경우에 플라스틱 입자들은 이미 일반적으로 사용되는 속이 빈 단열재인 폴리우레탄 폼에 내장되어 있다. 바인더에 대한 혼합재의 비율은 부피별로 5% 에서

50% 까지 서로 다른 밀도 값의 패널들을 만들기 위해 다양화했다. 패널들은 밀도와 열계수를 낮게 유지하려면 플라스틱 함량 5%일 때 최상의 성능을 발휘했다. 나무 섬유들 (≤ 4 mm 크기)과 단단한 플라스틱들도 단열 패널을 준비하는데 사용되었으며, 금형으로 모양이 만들어졌다. 패널들의 생산 과정은 사용되는 재료에 따라 다르다. 나무 섬유 패널들의 경우, 나무는 먼저 72시간 동안 물에 적셨다. 그 후에 나무는 금형으로 압축되고 3시간 반에서 30시간 동안 120°C 또는 160°C 에서 15바(bar)의 압력 하에 놓였다. 마침내 패널들이 건조되었다. 내화성 향상을 위해 패널 제작 전에 나무는 (8바)의 압력 하에서 MgO 용액에 넣어 광물화되었다. 양생 기간이 가장 길 때 나무 패널들은 밀도가 가장 낮은 것으로 밝혀졌다. 최적화된 나무 섬유 패널들은 $215\text{kg}/\text{m}^3$ 의 밀도와 $0.07\text{W}/\text{mK}$ 의 열전도율을 달성했다. 그림 5에서 사례 패널을 볼 수 있다.

그림 5. 나무 섬유들로 만든 단열 패널

파일럿 시험들

콘크리트 제품들의 경우에 예상되는 재활용율은 부재들에 따라 40%에서 90%까지 다양하다. 목부재들의 경우에 재활용율은 100%에 이를 수 있다.

표 3. 시험할 2층 건물의 (내력 및 비내력) 부재들과 구성재들의 유형들

부재/구성재 유형	2층 시험 건물 측면도
철근콘크리트빔, 기둥, 슬래브, 계단 샌드위치 패널(내력 및 비내력) 반건조 혼합 콘크리트 블록 목재 파사드 목재 칸막이 나무 섬유 단열패널 단단한 플라스틱 단열패널 콘크리트 기와 (압출식 제작)	측면도

프로젝트의 현 시점에서 (내력 및 비내력) 부재들과 구성재들의 설계 및 생산이 완료되었다. 현재 북 아일랜드와 스페인에서는 시범 건물들의 건설, 이탈리아에서는 건물 개조가 진행되고 있다. 건설 및 개조가 일단 완료되면, 세 건물 모두 에너지 효율 측면에서 모니터링 되어 기존 건물들과 비교될 것이다. 그림 6과 7은 RE⁴에서 설계한 요소들의 사례들을 보여준다. 첫 번째 사례는 100% 재생 골재들이 포함된 프리캐스트 콘크리트 보(그림 6)를 나타낸다. 이 보는 4 -지점 굽힘 테스트를 하기 위해 제작되었다. 큐브 표본들도 동일한 틀(batch)에서 제작되었고 28일간의 양생 후 61MPa 강도에 도달했다.

그림 6. 고급 테스트를 위한 프리캐스트 콘크리트 보 주물(cast)

그림설명: a) 목 부재, b)목재 부산물, c) 목재 파사드 패널

그림 7. 오래된 목부재 처리과정에서 얻어진 부산물을 사용하여 만든 파사드 패널.

그림 7은 단일 목부재(그림 7(a))가 자투리(off-cuts), 표준 목재 조각, 그리고 톱밥(그림 7(b))을 포함한 일련의 부산물들을 생성하기 위해 처리되는 방법을 보여준다. 이러한 부산물들은 (그림 7(c))과

같이 클래딩과 단열 패널들을 만드는데 재활용된다. 그림 7(c)에서 프레임은 목재 섬유 보드, 샷기둥, 오리목(battens)들로 더 고정되고 외부 클래딩은 (여기서 보이지는 않지만) 재활용된 웨더 보드로 제작될 것이다.

라이프 사이클 지속가능성 평가(LCSA; Life Cycle Sustainability Assessment)

LCSA를 사용하여 평가된 부재들/구성재들의 유형

환경 라이프 사이클 평가 (E-LCA; Environmental-Life Cycle Assessment) 및 라이프 사이클 비용(LCC; Life Cycle Costing) 형식의 라이프 사이클 지속 가능성 평가(LCSA)는 현재 다수의 RE⁴ 개발 제품들의 환경 영향 및 비용 절감 효과를 평가하고 있다. 보다 구체적으로 6가지 유형의 RE⁴ 부재들/구성재들을 조사한다. 각 부재/구성재는 기존의 최첨단 부재/구성재의 참조물과 비교된다. 기존 부재와 RE⁴ 부재는 남 유럽 (S-EU)와 북 유럽 (N-EU) 기후 조건들에 의해 결정되는 3개 시범 부지들의 다양한 에너지 요구사항들을 고려하여 설계되었다. RE⁴ 평가할 부재들/구성재들은 다음과 같다.:

- * 내력 샌드위치 패널 (북유럽 기후 조건용으로 설계)
- * 비내력 샌드위치 패널 (남유럽 기후 조건용으로 설계)
- * 비내력 목재 파사드 패널 (남유럽 기후 조건용으로 설계)
- * 비내력 목재 파사드 패널 (북유럽 기후 조건용으로 설계)
- * 목재 기반 내부 칸막이 벽
- * 개조 프로젝트에 사용될 환기 파사드 (남유럽 기후 조건용으로 설계)

내력 샌드위치 패널에서 수행된 LCSA의 사례

부재 유형

이번 사례에서 분석된 요소는 남유럽 기후 조건을 위해 설계된 샌드위치 로드 베어링 패널이다. Analysis is performed in accordance with EN 15804:2012 + A1:2013 (EN15804, 2013). 분석은 EN 15804:2012 + A1:2013 (EN15804, 2013)에 근거하여 진행하였다.

시스템 경계

기존의 내력 샌드위치 패널들은 서비스 수명이 50년으로 추정되어 수명이 다한 것으로 본다. 기존 패널들이 수명을 다하면 표준 철거 방법으로 철거되어 매립장에서 폐기된다. RE⁴ 내력 샌드위치 패널들도 서비스 수명이 50년인 것으로 추정된다. 그러나 RE⁴의 대부분 제품들처럼 그들은 쉽게 분해되고 재사용될 수 있도록 설계되었다. RE⁴ 패널들이 서비스 수명이 끝나면 선택적으로 철거되거나 분해된 후에 신제품 제작을 위해 재사용되며 이는 재차 50년의 서비스 수명을 갖게 될 것으로 추정된다. 재사용 단계(즉, 50년 후)가 끝나면 원래 RE⁴ 패널을 기준으로 만들어진 제품이 철거되고 매립지에 폐기된다. 이와 같이, RE⁴ 패널들은 총 100년의 서비스 수명을 가지고 있고 따라서 100년 만에 수명을 다한다. 그림 8은 남유럽 기후 조건에 노출된 기존 패널과 RE⁴ 패널의 E-LCA와 LCC를 위해 고려되는 시스템 경계들에 포함된 재료/에너지 흐름들과 과정들을 보여준다. 그림 8에서 보이는 처녀/재활용 원료는 1m²의 패널을 제조하는데 필요한 양을 나타낸다. 패널의 재사용 단계에서 신제품을 만드는 데 필요한 에너지도 분석에 고려된다. 검정색 선들은 기존 패널에 대해 고려된 시스템 경계를 나타내고 빨간색 선들은 RE⁴ 패널이 채택된 경계 시스템을 나타낸다.

그림설명: 패널 생산단계와 수명 종료 단계에서 시스템 경계별 자원 흐름을 보여주는 도식

그림 8. 비내력 샌드위치 패널의 E-LCA 및 LCC를 위해 고려된 시스템 경계.

기능 단위

분석에 사용되는 기능 단위는 1m²이다. 균일한 열 성능(U-값)의 패널의 북유럽 기후 조건에 노출된

두 가지 유형의 패널에 대한 U-값은 0.21 W/m^2 로 추정된다. 그림 9는 두 유형의 패널들에 대한 다이어그램을 보여준다.

그림설명: a) 기존 샌드위치 패널의 구조와 b) RE⁴ 내력 샌드위치 패널의 구조를 보여주는 도식

그림 9. 북유럽 기후 조건용으로 설계된 기존 및 RE⁴ 내력 샌드위치 패널들의 도식

환경 영향들

이 분석의 목적을 위해, 다음과 같은 환경 영향들이 고려되었다.: 지구 온난화 잠재력(GWP; Global Warming Potential), 오존 고갈 잠재력(ODP; Ozone Depletion Potential), 산성화 잠재력(AP; Acidification Potential), 부영양화 잠재력(EP; Eutrophication Potential), 광화학 오존 생성 잠재력(POCP; Photochemical Ozone Creation Potential), 그리고 구현된 에너지(EE; Embodied Energy).

E-LCA 결과물들

E-LCA 결과물들은 기존 패널과 RE⁴ 샌드위치 패널들 모두에 대한 환경 영향의 주요 원인이 생산 단계에서 비롯되는 것으로 나타났다. 더 구체적으로 말하면, 기존 패널의 생산단계는 전술한 6가지 환경 영향들 중 각각에 대해 75%~95%를 차지했다. RE⁴ 패널의 경우, 생산단계는 전술한 6가지 환경 영향들 중 각각에 대해 76%~ 99%의 범위에서 작용했다. 그러나 RE⁴ 패널의 생산은 그림10에서 나타나는 것처럼 기존 패널에 비해 환경 영향들이 현저히 적게 나타났다.

그림 설명: 생산단계에서 기존 패널과 RE⁴ 패널의 항목별 환경영향을 %로 표현한 그래프

그림 10. 생산단계에서 기존 및 RE⁴ 패널 간의 환경 영향 비교

마찬가지로, RE⁴ 패널의 수명 종료 단계에서는 기존 패널에 비해 환경 영향이 훨씬 적었다. (그림 11).

그림 설명: 수명 종료 단계에서 기존 패널과 RE⁴ 패널의 항목별 환경영향을 %로 표현한 그래프

그림 11. 패널의 수명 종료 단계에서 기존 및 RE⁴ 패널 간의 환경 영향 비교

LCC 결과들

이미 언급했듯이 기존 패널의 서비스 수명은 50년인 반면 RE⁴ 패널의 수명은 100년 이다. 따라서, 두 가지 유형의 패널 간의 LCC 결과를 비교하기 위해 50년 내에 제조되고 지금으로부터 100년 이내에 폐기될 기존 패널의 LCC가 결정되었다. 그림12는 3% 할인율을 가정하여 기존 부재와 RE⁴ 부재의 LCC 결과들을 비교한 것이다.

그림 설명: 기존 패널과 RE⁴ 패널의 LCC의 순 현재 값(Net Present Value)을 유로(€)화 가격으로 표현

그림 12. 기존 및 RE⁴ 패널 간의 LCC 비교

그림 12에서와 같이 RE⁴ 패널은 전체 서비스 수명 동안 기존 패널에 비해 비용 효율적이다. RE⁴ 패널

의 총 NPV(Net Present Value; 순 현재 값)는 기존 패널보다 24% 적다.

결론

RE⁴ 프로젝트는 CDW를 다시 건조 환경으로 재사용 및 재활용하는 개념을 다루어왔다. 이 프로젝트는 재생 골재, 큰 목재 조각과 경량 입자(예 : 목재 플레이크 및 혼합된 목재/ 플라스틱 입자)와 같은 CDW 파생 재료들을 적어도 65 % 이상을 함유한 조립식 구조 및 비구조 부재들과 건물 구성재들을 개발하여 수행되었다. 또한 개발 부재들과 구성재들의 모듈식 설계가 사용 수명이 끝날 때 쉽게 재사용 및 재활용할 수 있도록 가역(reversible) 연결물들을 사용과 함께 채택되었다. 상기 목표는 CDW에서 파생된 재료들이 물리적, 화학적, 기계적 및 내구적 속성들에 관한 기존의 국가 건축법 및 유럽 구조 설계 기준을 준수하는지 확인하기 위해 광범위한 테스트 체제 채택을 통해 성취되었다. 또한 원 CDW의 처리 공정을 개선하여 CDW 유래 재료의 품질 개선을 위한 신기술이 개발되었다. 결국, 특정 CDW 파편들, 즉 세라믹(벽돌 및 타일)의 가치 평가는 (a) 몰딩(moulding)에 의한 바닥/벽 타일들과 (b) 구조 및 비구조용 적용물들을 위한 알칼리 활성화 모르타르의 개발에 CDW 파편들을 사용하여 성취되었다. 다음으로, 실물 크기의 부재들과 구성재들이 만들어졌고 이들은 현재 스페인과 북아일랜드에 2층짜리 시범 주택들을 짓고, 이탈리아에 있는 기존 건물에도 새로운 파사드 시스템을 설치하여 평가되고 있다. 마지막으로 관련된 절약들과 함께 환경 및 비용 영향은 현재 E-LCA (Environmental Life Cycle Analysis) 및 LCC (Life Cycle Cost) 평가를 사용하여 평가되고 있다. 성공한다면 건설에서 CDW의 활용을 촉진시키기 위해 기존 표준들과 실무 방식들은 도전을 받게 될 것이다.

<원문제목> Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling

<원문출처> Advances in Building Energy Research