

폐복합필름을 활용한 콘크리트용 골재 제조

Production of Recycled Plastic Film-Based Aggregates for Use in Concrete

김태훈¹ · 이제욱^{1,2} · 홍진용^{1,2} | Tae Hun Kim · Jea Uk Lee · Jin-Yong Hong

¹Carbon Industry Frontier Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology(KRICT), 141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, Korea

²Advanced Materials and Chemical Engineering, University of Science and Technology(UST), 217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea
E-mail: jyhong@kRICT.re.kr

1. 서론

코로나19 장기화 및 재확산으로 인한 사회적거리두기 시행으로 포장이나 배달음식 수요가 증가하면서 폐 플라스틱 반입량이 지난해 보다 20% 이상 급증하고 있는 상황이다. 최근 환경부는 ‘자원순환 정책 대전환 추진계획(2020.9)’을 발표하고, 재생원료 인센티브 지원책(2021년) 및 공공부문 재활용제품 구매·사용 의무제(2022년)를 도입하는 등 재활용제품 사용을 핵심 목표로 설정하였다.¹

생활계 플라스틱 폐기물 중 복합재질로 이루어진 필름류 포장재의 경우, 발생량이 지속적으로 증가하고 있다. 플라스틱 폐기물 중 폐복합필름의 경우, 대부분이 복합 재질의 필름류 포장재 및 유색 용기(PET, PP, PS, LDPE, HDPE)이다. 필름류 포장재의 경우 이물질이 많아 분리하여 선별하는 공정 비용이 증가하여 경제성이 낮고, 분리배출 선별 과정이 어려워 재활용률이 저조하며, 매립 및 소각되는 비율이 증가되는 추세이다.² 또한 국내외적으로 폐기물 관리법이 제정되어 폐기물의 매립 등에 대한 규제가 강화되면서 특히, 폐플라스틱(비닐, 복합필름류)의 재활용 방안에 대한 연구가 절실히 필요한 상황이다.

폐플라스틱을 재활용하는 방안 중 하나로 건축 골재로의 이용 방법이 있다.³ 플라스틱의 경우 우수한 내구성과 경량성을 가지고 있고 내화학성과 내충격성 등이 좋아 건축 골재로 사용하기에 좋은 장점이 있다. 하지만 선행 연구에 따르면 플라스틱 골재의 함량이 증가함에 따라 포집된 공기의 양이 증가하여 내부기공이 발생하게 되며 그 결과 전체적인 건축물의 밀도가 선형적으로 감소하는 것으로 밝혀졌다.⁴ 즉, 폐플라스틱만을 100% 사용했을 때 물성이 낮아 골재로 활용이 어렵다는 단점이 존재하는 것이다. 또한, 플라스틱은 기본적으로 소수성 물질이기 때문에 물과 시멘트 분말 사이의 접촉을 낮추고 심지어는 막아버려 수화 속도를 감소시킨다.

Author



김태훈

2020 한밭대학교 화학생명공학과 (학사)
2020-현재 한국화학연구원 연구원



이제욱

2004 서울대학교 재료공학부 (학사)
2010 서울대학교 재료공학부 (박사)
2011-2015 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임연구원
2015-현재 한국화학연구원 책임연구원



홍진용

2006 충남대학교 고분자공학과 (학사)
2013 서울대학교 화학생물공학부 (박사)
2013-2016 MIT 박사후연구원
2016-현재 한국화학연구원 선임연구원

이로 인해 골재와 시멘트 매트릭스 사이에 약한 결합만이 형성되어 시멘트 기재와의 결합 특성이 낮다는 문제점이 지적되어 왔다. 이러한 현실적인 문제점들로 인하여 아직까지 국내에 폐플라스틱을 콘크리트 혼합물에 골재로 적용하는 연구는 선진국에 비해 저조한 상태에 있어 보다 적극적인 연구개발이 요구되는 상황이다.

본 특집에서는 국내 폐플라스틱 발생량/재활용 현황, 폐플라스틱의 건설 재료 활용기술 및 상기 전술한 폐플라스틱 기반 건축 골재 제조공정에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 폐플라스틱 발생량 및 재활용 현황조사

유럽 플라스틱 및 고무 기계 협회(EUROMAP)에서는 ‘전 세계 63개국의 플라스틱 수지 생산·소비 보고서’를 통해서 2020년 우리나라 1인당 플라스틱 소비량을 145.9 kg으로 추정하였다(그림 1a). 이는 미국(100.2 kg), 서유럽(89.9 kg), 중국(72.6 kg), 일본(71.5 kg) 보다 많은 양이며, 그에 따른 폐기물 발생량도 상당한 수준으로 전망된다.

환경부 및 한국환경공단에서 제공하는 ‘폐기물 발생 및 처리현황’을 참고하여 국내 생활폐기물 및 사업장 폐기물에 대한 연 단위 발생 및 처리 현황을 분석하였다(2019년

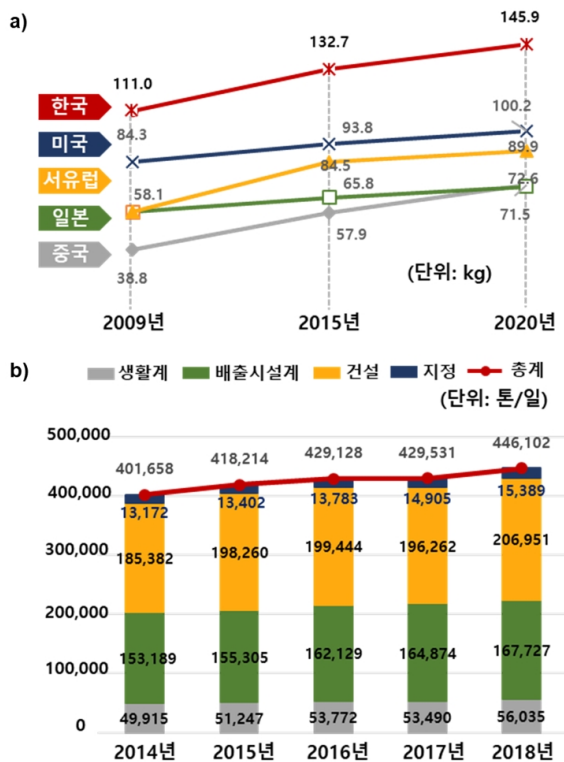


그림 1. (a) 주요국의 1인당 플라스틱 소비량(자료출처: 한국해양수산개발원 ‘폐플라스틱 동향분석’), (b) 연도별 폐기물 발생량(자료출처: 환경부 ‘전국폐기물 발생 및 처리 현황’).

기준 통계는 2020년 12월 공표 예정). 자료에 따르면, 2018년도 폐기물 중 플라스틱류(비닐류 포함)는 전체 생활폐기물(56,035톤/일) 중 8,690톤/일로 15.5%를 차지하며, 전년(8,021톤/일) 대비 8.3% 증가한 것으로 확인되었다(그림 1b).⁵

폐플라스틱 중 ‘폐비닐, 복합필름류’의 경우 연간 약 33만 톤이 발생되고있다(그림 2a). 또한, 최근 환경부에서는 코로나 19로 인한 비대면 소비 등으로 인한 플라스틱 등 포장재 발생 증가로 인하여 2020년 상반기에 전년동기 대비 폐비닐과 폐플라스틱 발생량이 각각 11.1%, 15.16%씩 증가하였다고 발표하였다.⁶ 다만 폐비닐의 경우, 그 적체량이 올해 5월까지 약 23% 증가 후 일부 감소세를 보였으나, 최근 고형연료제품(SRF, Solid Refuse Fuel) 사용시설의 연료 전환으로 재활용 수요가 감소하고 있고 유가하락 및 코로나 19 경기침체에 따른 수요산업의 가동률 단축 가능성이 있어 적체량 추이를 주시 해야할 필요가 있을 것으로 판단된다.

폐기물로 배출된 플라스틱류는 통상적으로 재활용, 소각 및 매립 방식으로 처리된다. 2019년 그린피스의 ‘플라스틱 대한민국’ 보고서에 따르면 우리나라의 플라스틱 폐기물의 재활용 처리비율은 약 62%로 높은 편이지만, 유럽연합(EU) 기준을 적용하면(에너지 회수 미포함) 약 23%로 EU의 재활용률 40%에 크게 미치지 못하고 있는 것으로 파악된다. 더욱이 아직 세분화된 통계 시스템의 부재로 민간에서 처리되는 폐플라스틱에 대해서는 정확한 집계도 이뤄지지 않는 현실이다.⁷

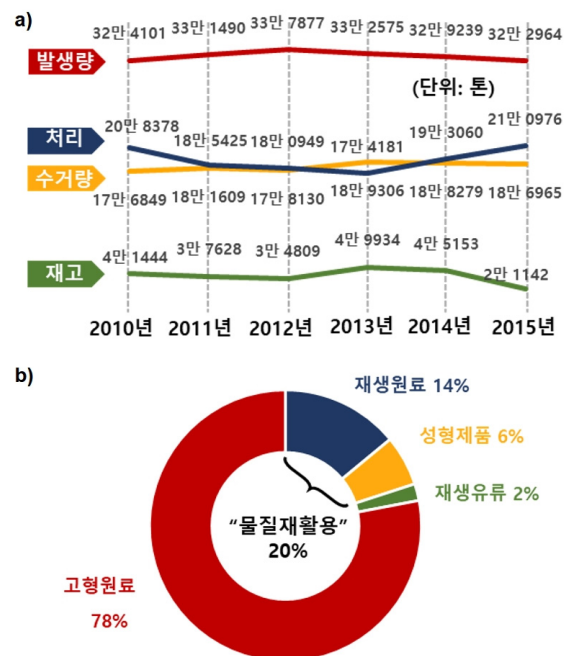


그림 2. (a) 연도별 폐비닐 수거현황, (b) 폐비닐 재활용 현황(자료출처: 한국순환자원유통지원센터).

2019년 환경부자료에 따르면 ‘폐비닐, 복합필름류’의 경우 고형연료로서의 재활용이 80% 이상으로 대부분이며, 물질재활용(재생원료, 성형제품, 재생유류 등)을 통한 재활용 비율은 20% 이하로 상대적으로 낮은 수준임을 알 수 있다(그림 2b).

고형연료로서의 재활용의 경우, 국내 신재생에너지(태양광·풍력 중심) 정책이 폐기물에너지(고형연료를 이용한 전기 생산)를 지양하는 방향으로 전개되어 수요처 불확실성이 증대되고 있는 현실이다. 더욱이, 폐비닐로 고형연료 제조 시 톤당 약 18만원(선별업체 5만원, 생산비 7만원, 운반비 6만원) 소요되며, 현재는 이를 고형연료 판매 수익(6만원/톤)과 판매량 기준 생산자책임재활용제도(EPR, Extended Producer Responsibility) 지원금(12만원/톤)으로 충당하는 구조이므로 향후 고형연료 수요 감소에 대한 관련산업의 영향이 매우 높다고 할 수 있다. 또한, 소규모 업체에서 생산한 1회용 비닐봉투 등 비EPR 적용 대상 폐비닐류는 소각료를 주고 태우는 등의 방식으로 처리하고, 그 비용을 폐지나 고철 같은 다른 재활용 폐기물을 취급해 얻는 수익으로 대체하고 있기에 향후 재활용 처리 비율을 높이기 위해서는 폐플라스틱의 원료물질 및 제품 재활용 기술 개발이 시급한 상황이다.

2.2 폐플라스틱의 건설재료 활용 기술

2018년 특허청에서 발표한 폐비닐, 플라스틱 재활용 기술 관련 국내 특허출원 현황 분석 자료에 따르면, 폐플라스틱 관련 재활용 기술은 고체연료 제조기술, 유화(油化)기술, 건설자재 제조기술 순으로 이루어지고 있는 것으로 조사되었다(그림 3).⁸

고체연료 제조기술은 간단한 제조설비, 경제성 등으로 전체 재활용 기술특허 출원 건수 중 45%를 차지하고 있다. 최근에는 연료의 열량을 높이기 위해 폐목재나 하수슬러지

등 다양한 첨가물을 투입하는 기술이나 제조 생산성을 향상시킬 수 있도록 원료가 되는 폐플라스틱을 종류별로 사전에 선별하는 등 공정을 개선하는 기술이 특허를 받고 있다.

유화기술은 폐비닐 등을 용융시킨 후 400℃ 이상의 고온에서 이를 분해해 경유와 같은 산업용 연료나, 석유화학 원료로 재가공 하는 기술로서, 재활용 기술 특허출원 중 32%를 차지하고 있는데 폐비닐 등을 분해하는 과정에서 많은 에너지가 소요되기 때문에 에너지 소비를 줄일 수 있는 기술이나, 불순물을 제거해 생산된 연료의 품질을 개선할 수 있는 기술 등이 특허를 받고 있다.

건설자재(토목, 건축) 제조기술은 폐플라스틱, 폐비닐 등을 단독 및 다른 금속재료 등과의 복합화 후, 건축자재로 성형하는 기술로, 전체 특허출원 중 23%를 차지하고 있다. 토목분야는 주로 보도용 블록, 건축분야는 지붕 패널, 건물 벽체 등 외장재 제조기술이 주를 이루며, 콘크리트 제조 기술은 미미한 것으로 조사되었다.

국내 폐플라스틱 활용 건설재료 제조기술은 비교적 양호한 품질의 폐플라스틱을 활용하여 소규모 및 제한적으로 이루어지고 있다.

한국전력공사 송영철 박사 연구팀은 폐플라스틱 골재를 이용한 경량 콘크리트에 관한 연구결과를 발표한 바 있다. 본 연구에서는 폐 PET병을 파쇄 후 굵은 골재로 직접 사용하였으며, 실험결과 공시체의 압축강도 20 MPa를 만족하기 위해서는 골재 용적률이 35~40%가 적당한 것으로 나타났다.⁹

한양대학교 조병완 교수 연구팀은 ‘폐합성수지와 석탄회를 재활용한 친환경 건설 신소재 개발 및 비선형 해석·설계 기법 연구’를 통하여 폐PET의 폴리머콘크리트 적용 가능성을 제시한 바 있다. 폐비닐(HDPE/LDPE) 플레이크 및 폐 PET 플레이크를 고열로 용융하여 골재와 혼합, 압출성형공법에 의하여 폴리머콘크리트 제조하고, 폐 PET 재생 불포화 폴리에스테르 수지 활용하여 폴리머콘크리트를 제조하였다.

공주대학교 김봉주 교수 연구팀은 EPS(expandable polystyrene) 비드를 사용한 경량기포 콘크리트의 차열성능을 조사하였다. 콘크리트의 휨 강도는 기포를 증가시킬수록 강도는 줄어들었으며, 압축강도도 동일하였다. 하지만 기포가 증가할수록 내화성능 효과는 증진하는 것을 보고하였다.¹⁰

국외 폐플라스틱의 건설재료 활용 기술은 폐플라스틱을 활용한 콘크리트 재료 개발 위주로 활발히 진행 중이다.¹¹

유럽연합은 2012년부터 4년간 91억 원을 지원하여 혼합 폐비닐을 활용하여 잔골재 및 경량골재를 제조하고, 이를 활용하여 건축용 콘크리트 패널을 개발하는 연구개발 프로젝트(sus-con)를 공동으로 수행한 바 있다. 본 프로젝트에서는 경량, 친환경, 저비용 건축자재 제조를 위한 새로운 골재화 방법들을 개발하였으며, 발전소 부산물과의 복합화를

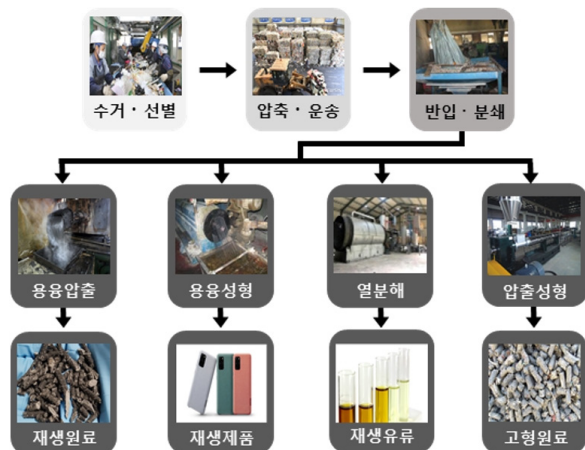


그림 3. 폐플라스틱 재활용 공정 및 활용분야 예시.

통하여 폐기물 원료의 고부가가치화를 진행하였다(그림 4a).

미국 벤처회사 'ByFusion Global Inc.'은 접착제나 첨가제 등을 전혀 사용하지 않고 뜨거운 물과 높은 압력을 이용하여 폐플라스틱 벽돌을 친환경적으로 제작하였다. 기존 콘크리트 벽돌과 비교하여 온실가스 발생을 95% 이상 절감할 수 있으며, 폐플라스틱을 바로 재활용하여 사용하기 때문에 쓰레기로 처리할 필요 없이 추가 운송 및 매립 비용을 절감할 수 있다고 발표하였다(그림 4b).

대만의 폐기물 재활용 전문 벤처기업인 Newatlas社는 폐플라스틱을 활용하여 건축 및 인테리어 소재의 새로운 대안을 제시하였다. '폴리브릭(Polli-Brick)'이라는 재활용 벽돌 대체재는 빌딩 무게를 50%이상 경량화 하였으며, 반투명한 재질로 채광량을 증가시켜 전력을 아낄 수 있다고 발표하였다(그림 4c).

벨기에의 ART(Advanced Recycling Technik GmbH)社는 특수 extruder를 이용하여 혼합재생공법을 통해 혼합 폐플라스틱으로 건축용 목재 대용품 생산하고 있으며, 목재 대용품은 별다른 약품의 추가적 투입 없이 녹는 물질을 모두 혼입하며, 세척이나 이물질의 제거도 생략하여 생산할 수 있다는 장점이 있다.

이라크 바스라대학교 Jassim 교수는 친환경적인 폐기물 처리방법으로서 폐플라스틱(HDPE)을 잔골재로 사용하여 10~80% 부피 비 범위 내에서 플라스틱 시멘트를 제조하였

다. 제조된 플라스틱 시멘트는 밀도가 감소하고 연성이 증가하며, 작업성이 향상된다고 보고하였다(그림 5a).¹²

루마니아 건축자재 회사인 'Iridex Group Plastic'社는 폐플라스틱/고무 혼합물(폴리우레탄, 페타이어 등) 기반 경량 콘크리트를 개발하였다. 개발된 콘크리트는 1050~1130 kg/m³ 밀도와 낮은 열전도율(0.20~0.33 W/mK)을 보여주었다(그림 5b).¹³

이처럼 국·내외 폐플라스틱 활용 콘크리트 및 콘크리트 2차 제품 제조 기술은 시멘트 골재 적용 기초 단계 수준이며, 일부 몇몇 연관된 제품들만이 상용화된 상황이다.

2.3 건축용 폐복합필름기반 골재 제조 방법

그림 6a에서 볼 수 있듯이, 폐복합필름을 기반 골재를 제조하는 방법은 '수거/선별' → '분쇄' → '수세' → '탈수/건조' → '용융/성형(압출)' → '냉각(수냉/공냉)' → '권취/절단'의 순으로 진행된다.

수거된 폐복합필름은 배출 및 보관 중에 일부분 다른 재질들(유리, 종이, 고철류 등)과 혼합되어 있어 재생 시 큰 저해요소가 되므로 적당한 수단을 가동하여 선별하여 제거한다.

'분쇄공정'은 폐복합필름을 세척, 선별, 건조, 성형 등의 후단 공정에 적합하도록 잘게 부수는 공정이다. 분쇄는 최종 제품의 질적 균질화를 위해서 필수적이며, 일반적으로 폐복합필름류의 경우 절단식(cutting) 장비를 사용하여 분쇄과정을 거친다. 또한, 폐복합필름 표면에는 음식물, 내용물, 토사 등과 같은 이물질들이 잔류하기에 '수세공정'을 통해 분쇄된 폐복합필름에서 오염물질을 세척하게 된다. 일반적으로 비중차 및 마찰을 통한 습식분리를 실시한다.

수세공정을 거친 폐복합필름은 '탈수/건조' 공정을 거친다. 습식분리된 폐복합필름의 경우 남아 있는 수분이 가공 공정에서 물성에 치명적인 문제를 발생시키기 때문에 필히 건조 공정을 진행해야한다.

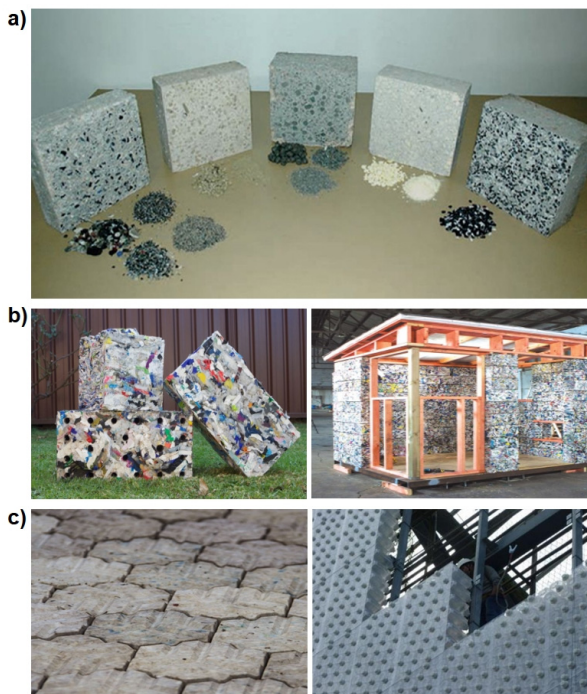


그림 4. (a) Sus-con프로젝트 개발 재료(자료출처: <https://cordis.europa.eu>), (b) 미국 'ByFusion'의 폐플라스틱 활용 벽돌(자료출처: <http://www.byfusion.com>), (c) 대만 'Newatlas'의 폐플라스틱기반 경량 벽돌(자료출처: <https://newatlas.com>).

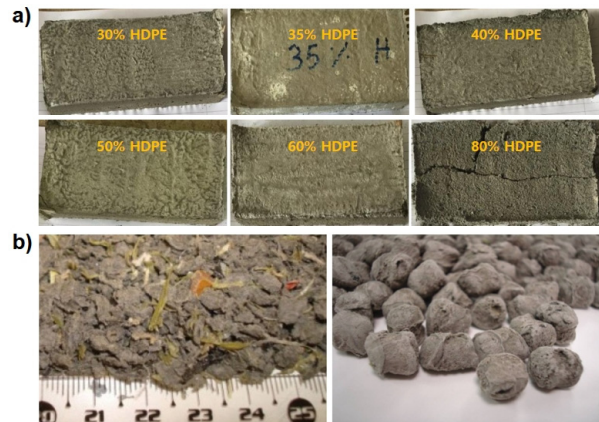


그림 5. (a) 폐플라스틱(HDPE) 재활용에 따른 폴란드 시멘트 구조체,¹² (b) HDPE 가공 잔골재 및 경량골재.¹³

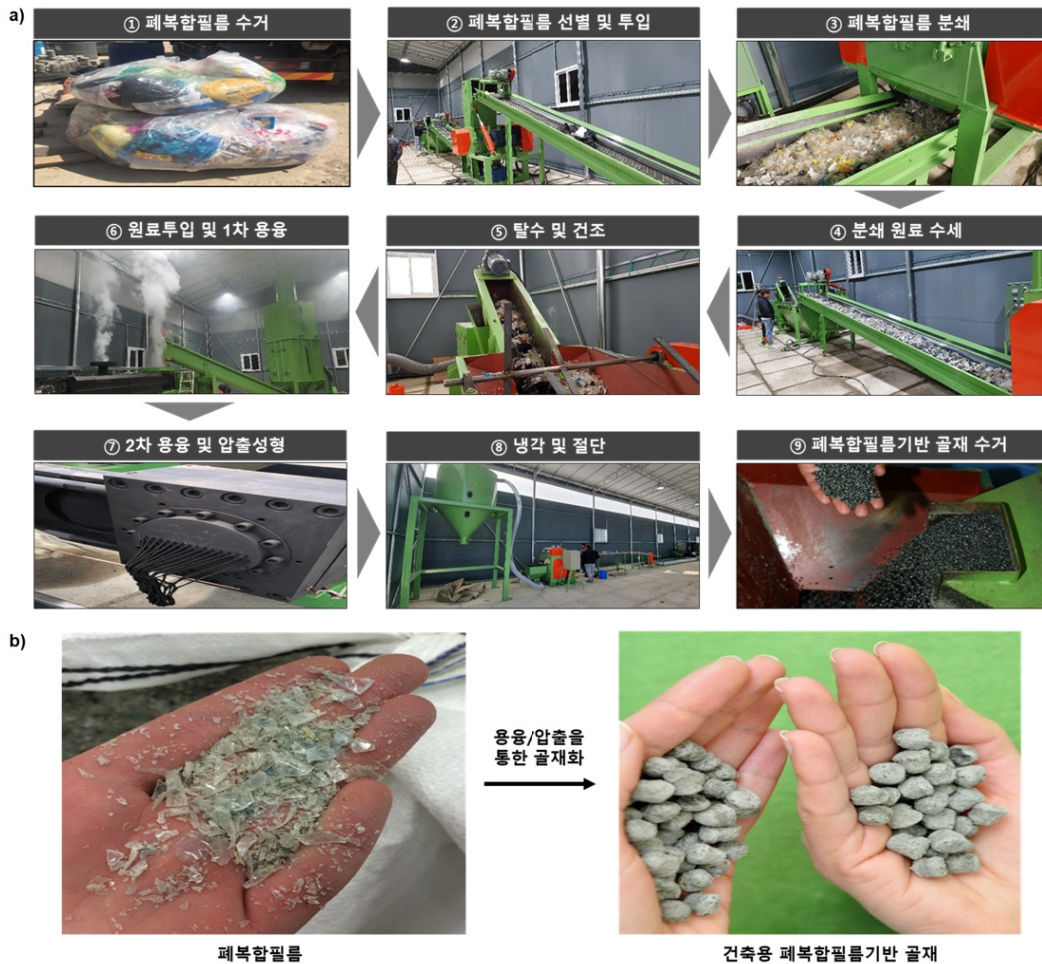


그림 6. (a) 폐복합필름 기반 골재제조 공정, (b) 폐복합필름(좌)으로 제조된 건축용 골재(우) 이미지.

건조공정까지 거친 폐복합필름은 1차용융, 압출성형을 거쳐서 최종적인 골재형태로 가공된다. 1차용융 공정에서는 고분자의 용융온도(T_m) 이상 열분해온도(T_d) 이하에서 폐복합필름을 용융시킨다. 용융된 겔형태의 폐복합필름은 압출성형기로 투입되며 다이(die)를 통해 압출성형된다. 다이 크기에 따라 잔골재(5 mm 이하) 및 굵은골재(20 mm 이하)로 변경하여 제조 가능하다(KS F 2527 규정 기준). 또한, 폐복합필름 골재와 시멘트 페이스트(cement paste)간 맞물림 응력 증대를 위하여 다이의 형태를 원형, 삼각형, 사각형, 또는 십자형상과 같이 표면거칠기를 증가시킨 형태로도 적용할 수 있다.

다이를 통해 압출된 폐복합필름은 즉시 물이 담겨져 있는 냉각조 내로 투입되며, 냉각, 권취, 및 절단 순으로 진행되어 최종적으로 골재형태로 수득된다(그림 6b).

3. 결론

본 특집에서는 국내 폐복합필름 발생현황, 폐복합필름의

건설재료 활용기술 및 폐복합필름을 활용한 콘크리트용 골재 제조에 관한 최근 연구동향을 보고하였다.

페플라스틱 중 ‘폐비닐, 복합필름류’의 경우 그 발생량이 매년 빠르게 증가하고 있으며, 최근 온라인 쇼핑, 배달음식, 새벽배송 등의 비대면 소비문화 확산과 기업 판촉용 포장재, 과대포장제품 및 재활용 어려운 복합 재질 포장은 쓰레기 발생을 부추기고 있다. 더욱이 최근 고체연료의 환경관리기준 강화에 따라 고체연료에 대한 수요 감소 및 매립, 소각으로 인한 추가비용 증가에 따라 폐복합필름의 ‘물질재활용’ 기술 개발이 시급한 상황이다.

본 기고에서 명시된 것처럼 페플라스틱(폐복합필름)을 건축골재로 활용하는 기술은 물질 재활용이라는 측면에서 지속 가능한 대안이라 할 수 있다. 플라스틱의 경우 우수한 물성(내구성, 경량성, 내화학성, 내충격성 등)을 바탕으로 건축 골재로 사용하기에 좋은 장점이 있으며, 재활용 시 매립지의 폐기물 규모를 대폭 감소시키고 신규 자재의 채취 및 처리과정으로 인해 유발되는 환경영향도 감소시키기에 이에 대한 연구는 가치가 높다고 판단된다.

열가소성의 폐복합필름은 몇 가지 전처리 및 성형 공정을 통해 골재 형태로 가공이 가능하며, 콘크리트의 작업성(workability), 성형성(plasticity), 및 마감성(finishability)을 위해서 골재의 입경 및 입도 또한 다양한 성형공정들을 통해 용이하게 조절할 수 있다.

한편, 콘크리트 혼합물의 인성증대, 소성변형, 피로균열 등의 문제 해결을 위하여 천연골재 및 무기충진제와의 복합화 연구가 향후 필요할 것으로 판단된다. 더 나아가 시멘트 기재와 폐복합필름 간의 친화성(compatibaility) 향상을 위한 골재 표면개질화 관련 연구도 동시에 수반될 경우 기존 폐복합필름 기반 골재가 가지고 있는 단점을 극복할 뿐만 아니라 시너지 효과를 나타낼 수 있기에 향후 건축용 골재로서 폐플라스틱/폐비닐 소재의 응용 가치는 무궁무진하리라 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활폐기물 재활용 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002730004).

참고문헌

1. 환경부 ‘자원순환 정책 대전환 추진계획’ 발표 [웹사이트]. (2020.09.23). URL: <http://www.me.go.kr/>
2. J. Lee, K. -M. Kim, Y. -K. Cho, H. -K. Kim, and Y. -U Kim, *J. Korean Recycl. Constr. Resour. Inst.*, **7**, 383 (2019).
3. R. Siddique, J. Khatib, and I. Kaur, *Waste Manage.*, **28**, 1835 (2008).
4. F. Colangelo, R. Cioffi, B. Liguori, and F. Iucolano, *Compos. B Eng.*, **106**, 234 (2016).
5. 환경부, 한국환경공단 ‘2018년도 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 [웹사이트]. (2019.12.31). URL: <https://www.recyclinginfo.or.kr>
6. 환경부, ‘추석·거리두기 강화 등 재활용시장 적체증가 대비 선제대책 마련’ 발표 [웹사이트]. (2020.09.11). URL: <http://www.me.go.kr>
7. 그린피스, 플라스틱 대한민국 (2019).
8. 특허청, ‘폐비닐 플라스틱 재활용 기술 어디까지 왔나’ 보도자료 [웹사이트] (2018.09.18). URL: <https://www.kipo.go.kr>
9. 한상묵, 조명석, 송영철, *한국콘크리트학회 봄 학술발표논문집*, **15**, 7 (2003)
10. 홍상훈, 송승리, 유남규, 정의인, 김봉주, *한국건축시공학회 춘계학술발표대회 논문집*, **18**, 21 (2018).
11. L. Gu and T. Ozbakkaloglu, *Waste Manage.*, **51**, 19 (2016).
12. A. K. Jassim, *Procedia Manuf.*, **8**, 635 (2017).
13. A. Attanasil, A. Largo, I. L. Álvarez, F. Sonzogno, and L. Balaceanu, *Heron*, **60**, 5 (2015).