

페플라스틱 및 폐석분 등 폐자원을 재활용한 복합인공 바닥재의 기계적 특성 연구

갈준총¹, 김득주², 강지호², 최낙정^{1*}
¹전북대학교 기계설계공학부, ²(주)아트스톤

A Study on the Mechanical Properties of Composite Artificial Flooring Materials Reused from Waste Plastic, Waste Stone Powder and Others

Jun-Cong Ge¹, Deuk-Ju Kim², Ji-Ho Kang², Nag-Jung Choi^{1*}
¹Division of Mechanical Design Engineering, Jeonbuk National University
²Art Stone Co., Ltd.

요약 산업현장이나 일상생활에서 발생하는 다양한 폐기물을 재활용하여 새로운 고부가가치 제품을 개발하는 것은 오늘날 날의 순환경제 구현 및 녹색산업 활성화에 매우 큰 도움이 된다. 특히 페플라스틱 등 폐자원의 재활용은 탄소중립 목표 달성에 중요한 역할을 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 복합인공석재를 개발하기 위해 페플라스틱인 폴리프로필렌(PP), 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질을 이용하여 다양한 시험 시편을 제조하였으며, 그들의 인장강도, 굽힘강도 및 충격강도를 ASTM D638, ASTM D790 및 ASTM D256 시험 기준으로 측정하여 비교 분석하였다. 주요 결과는 페PP의 함유량이 59~84 wt%까지 변동에 따른 모든 복합인공석재 시편을 성공적으로 제조하였고, P59C1를 제외하고 코코넛 껍질 첨가의 경우 복합석재 시험시편의 인장강도, 굽힘강도 및 충격강도는 코코넛 껍질을 첨가하지 않았을 때에 비해 모두 증가하였다. 본 연구에서 얻은 연구결과는 향후 페플라스틱, 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 천연섬유질 등의 재활용 기술의 발전 및 새로운 고부가가치 제품 개발에 중요한 데이터베이스를 제공할 수 있다.

Abstract Developing new high-value-added products by recycling various wastes generated in industrial sites or daily life is of great help in realizing the daily circulation economy and revitalizing the green industry. In particular, the recycling of waste resources, such as waste plastics, can play an important role in achieving carbon neutrality. Therefore, this study prepared various composite artificial stone samples using waste polypropylene (PP), waste stone powder, fly ash, and coconut shells. The tensile, bending, and impact strengths were measured and analyzed according to ASTM D638, ASTM D790, and ASTM D256 standard test methods. The main result was that all composite artificial stone samples were prepared as the content of waste PP fluctuated from 59 to 84 wt.%. Except for P59C1, when adding coconut shells, the tensile, bending, and impact strengths of the composite stone samples were higher than those without coconut shells. The research results obtained in this study can provide an important database for developing recycling technologies, such as waste plastics, waste stone powder, fly ash, and coconut natural fibers, as well as the development of new high-value-added products in the future.

Keywords : Composite Artificial Stone, Coconut Shell, Fly Ash, Waste Plastic, Waste Stone Powder

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [S3288085].

*Corresponding Author : Nag-Jung Choi(Jeonbuk National Univ.)

email: njchoi@jbnu.ac.kr

Received May 27, 2024

Accepted August 2, 2024

Revised June 19, 2024

Published August 31, 2024

1. 서론

플라스틱(plastic)은 주로 석유에서 유기 화합물을 추출하여 고분자화 반응에 노출시켜 수소 및 탄소 원자 고리로 구성된 탄화수소 고분자 물질로 만들어진다. 플라스틱의 가장 중요한 장점은 무게가 가볍고 기계강도와 내식성이 우수하여 포장재, 자동차 부품, 전기·전자제품, 파이프, 기계 부품, 용기 등 다양한 분야에 널리 사용되고 있다[1]. 플라스틱의 종류는 크게 열가소성수지(thermoplastic)와 열경화성수지(thermoset)로 나눌 수 있다[2]. 열가소성 플라스틱은 열을 가하면 쉽게 녹거나 액체 형태로 부드러워지기 때문에 성형과 재활용이 쉽고 유연성이 있으며 수축에 강한 성질을 가지고 있다. 열경화성 플라스틱은 열을 가하면 용해되지 않고 경화되는 수지이다. 대표적인 열가소성 플라스틱에는 폴리프로필렌(PP, polypropylene), 폴리에틸렌(PE, polyethylene), 폴리염화비닐(PVC, polyvinyl chloride), 폴리스티렌(PS, polystyrene), 폴리에스터(PET, polyethylene terephthalate) 등이 있다[3]. 대표적인 열경화성 플라스틱에는 폴리우레탄(PU, polyurethane), 페놀수지(phenol resin), 멜라민수지(melamine resin) 등이 있다[4]. 열경화성 플라스틱에 비해 열가소성 플라스틱은 일상생활에서 흔히 볼 수 있으며 열을 가한 상태에서 압출과 사출, 진공성형 등을 이용하여 다양한 제품을 제조할 수 있다. 그러나 플라스틱의 가장 큰 문제는 생분해가 되지 않아 무단으로 버리면 환경을 오염시킬 수 있다[5].

사회의 급속한 발전에 따라 전 세계적으로 플라스틱에 대한 수용도 급증하고 있는 추세이다. 유럽 플라스틱 산업 협회인 플라스틱스유럽(Plastics Europe)에 따르면 2020년 전 세계 플라스틱 생산량은 3억 6,700만 톤에 달했다[6]. 전 세계 플라스틱 사용량 증가에 따른 폐플라스틱의 발생량도 급증하고 있는 실정이다. 한국환경산업기술원 국제환경협력센터의 보고에 따르면 전 세계 플라스틱 폐기물 발생량이 2000년 1억 5,600만 톤에서 2019년 3억 5,300만 톤으로 2배 이상 증가하였다[7]. 경제협력개발기구(OECD)의 2022년 분석결과에 따르면, 전 세계적으로 플라스틱 생산량과 폐기량은 꾸준히 늘어나고 있으나 재활용 비율은 9%에 불과하였다. 폐플라스틱의 14%는 소각되고 76%가 매립된다. 폐플라스틱을 매립하는 경우에는 자연분해되려면 500년 이상이 걸리며 또한 분해과정에서 토양오염, 수질오염 및 미세플라스틱 등 다양한 문제를 초래할 수 있다. 따라서 폐플라스틱 재활용 기술을 개발해야 폐플라스틱의 재활용 비율

를 극대화하고 석유원료 사용량을 줄여 2050년 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있다[8].

한편, 폐석분은 주로 석산 채석 및 석재 가공공정에서 많이 발생되어지고 있으며, 일부 순환골재로만 재활용되고 있지만, 이를 제외한 나머지는 대부분 불법 매립 또는 무단방치 되어 있는 실정이다. 폐석분은 매립으로 인하여 환경이 오염되고 자연이 훼손되는 등의 다양한 문제가 대두되며 매립지도 따로 확보해야 하는데 국토면적이 좁은 우리나라에 제한이 있다[9]. 폐석분은 채석장에 아적 상태로 무단 방치할 경우 미세먼지, 대기오염 등의 문제를 일으킬 수 있다. 또한 플라이애쉬(fly ash)는 석탄 화력발전소에서 미분탄을 약 1,400~1,500 °C로 연소시킨 후 집진장치로 수집되는 분말이다. 그의 주성분은 폐석분과 유사하여 주로 이산화규소(SiO₂)와 알루미늄(Al₂O₃)로 구성된다. 현재까지 회분함량이 낮은 플라이애쉬는 시멘트, 콘크리트, 벽돌 및 경량 건축골재 등에 재활용되고 있으나, 회분함량이 높은 것은 대부분 폐기되고 있는 실정이다[10].

따라서, 폐플라스틱, 폐석분 및 플라이애쉬 등 폐기물을 한꺼번에 동시에 재활용하여 인공석재 바닥재를 개발하는 것은 본 연구의 핵심 목표이다. 복합인공석재 바닥재의 기계적 특성을 파악하기 위해 폐플라스틱과 코코넛 껍질 혼합비율에 따른 먼저 압출성형법으로 복합펠렛을 제조한 다음에 사출성형기계를 이용하여 다양한 시험 시편을 제조하였다. ASTM 시험 규격에 따른 인장강도, 굽힘강도 및 충격강도를 비교 분석하여 폐플라스틱과 코코넛 껍질 최적의 혼합비율을 도출하고 기계적 특성에 관한 메커니즘을 규명하였다. 본 연구에서는 폐플라스틱, 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질 폐자원을 동시에 재활용 기술을 확보하여 향후 다양한 폐자원을 재활용한 기타 고부가가치 제품의 개발에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 연구의 실험에 사용하는 폐플라스틱은 열가소성 폴리프로필렌(PP)이며 주로 정수기 케이스와 필터 폐기물 등에서 확보하였다. 폐석분과 플라이애쉬는 국내 A와 B 회사에서 구입하였으며, 코코넛 껍질은 국내 C업체에서 구입하여 자연건조한 다음에 분쇄기로 미분쇄하여 사용하였다.

2.2 복합펠릿 제조

복합인공석 바닥재를 제조하기 위해 페플라стик, 폐석분, 플라이애쉬와 코코넛 껍질을 이용하여 복합펠릿을 먼저 제조하였다. 선행연구^[11]에서는 폐석분과 플라이애쉬 혼합물(질량비율 1:1)에 페PP를 50%, 60%, 70%, 80%, 90% 및 100% 질량비율로 첨가하여 PP50, PP60, PP70, PP80, PP90 및 PP100 6가지 시편을 제조하였으며, 인장강도, 굽힘강도 및 충격강도를 비교 분석하였다. 선행연구에서는 폐석분과 플라이애쉬의 유효 재활용 비율을 종합적으로 고려하여 페PP 최적의 재활용 비율은 70%로 결정하였다. 본 연구에서 PP70에 코코넛 껍질 충격보강제로 첨가할 경우 기계적 특성을 파악하기 위해 그림 1에 보는 바와 같이 페PP, 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질을 68:15:15:2의 질량 비율로 믹서기에서 균일하게 혼합하고 압출성형기계를 통해 복합펠릿(P68C2)을 제조하였다.

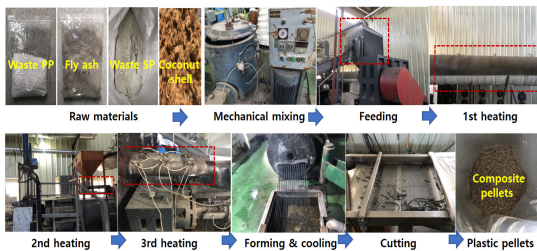


Fig. 1. Schematic diagram of composite pellet manufacturing

2.3 시험 시편 제조

다양한 비교 시편을 제조하기 위해 P68C2 기준으로 희석법을 이용하여 순수한 페PP(P100) 및 P50 펠릿을 18:82, 36:64, 68:32의 질량비율로 혼합하여 P59, P68, P84의 복합 펠릿을 제조하였다. P50 펠릿 및 P68C2를 1:1 질량비율로 혼합하여 P59C1 복합 펠릿을 제조하였다. 그리고 P100 및 P68C2를 1:1 질량비율로 혼합하여 P84C1 복합 펠릿을 제조하였다. 그림 2에 보는 바와 같이 상기 제조된 복합 펠릿을 170 ton 사출기로 기계적 특성 분석용 시험 시편을 제조하였다.



Fig. 2. Schematic diagram of injection molding

2.4 기계특성 시험

기계적 특성을 분석하기 위해 제조된 복합인공석 바닥재 시편은 그림3에 보는 바와 같이 각각 인장강도 시험시편, 굽힘강도 시험시편 및 충격강도 시험시편으로 제조하였다. 인장시험, 굽힘시험 및 충격시험은 국제 시험규격에 맞도록 각각 ASTM D638, ASTM D790 및 ASTM D256 시험을 기준으로 진행하였다. 인장시험은 3,000 kgf 로드셀이 장착된 만능시험기(ST-1002, SALT, Korea)를 이용하여 10 mm/min의 속도로 샘플 별로 3개씩 시험을 진행하였다. 굽힘강도는 3점 굽힘시험으로 만능시험기를 이용하여 1.27 mm/min의 이송속도로 샘플 별로 3개씩을 측정하였다. 충격강도는 최대 용량 2 J의 낙하식 충격시험기(PIT-J, China)를 사용하여 시편 중앙부위에 노치 아이조드법(notched Izod impact test)으로 샘플 별로 3개씩을 측정하였다.

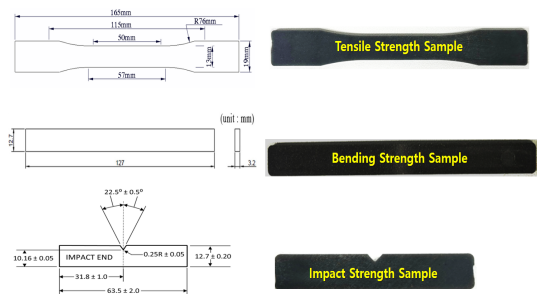


Fig. 3. Mechanical properties analysis for the test sample

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장강도

인장강도는 복합인공석재 제조과정에서 매우 중요한 역할을 하며, 이는 제품의 내구성, 안정성 및 견고성 등에 큰 영향을 미치기 때문이다. 만약 복합인공석재의 인장강도가 충분하지 않으면 그 제품의 불량품이 될 수 있는 확률이 높으며, 사용 중에 부서지거나 파손될 가능성도 높다. 따라서 복합인공석재 시편의 인장강도는 매우 중요한 성능 요소 중 하나이다.

Fig. 4에는 페PP, 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질을 이용하여 다양한 조성으로 제작된 시편들의 인장강도에 대한 실험결과를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 복합시편의 인장강도는 모두 P100보다 낮아 PP 수지 함유량이 감소함에 따라 감소하는 것으로 나타났으

며, 이것은 다른 연구자의 선행연구결과와 일치한다[12]. 자세히 살펴보면 P100, P59, P59C1, P68, P68C2, P84 및 P84C1의 인장강도는 각각 34.32, 21.67, 20.74, 22.71, 29.16, 26.65 및 28.84 MPa 이다. 또한 복합시편 중에 P68C2와 P84C1의 인장강도는 상대적으로 높게 나타났다. 이것은 코코넛 껍질이 천연섬유로서 각각 2 wt% 및 1 wt% 혼합되어 코코넛 섬유와 PP수지, 폐석분 그리고 플라이애쉬 사이의 계면 결합의 효과가 있어 파열이나 균열 등 문제가 발생하는 것을 억제하기 때문이다[13]. 따라서, 코코넛 껍질 폐기물을 재활용함으로 환경문제를 해결함과 동시에 인장강도 특성도 개선할 수 있어 향후 다른 복합시료 개발 시 보강제로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

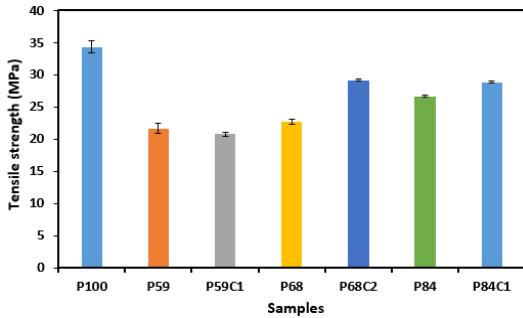


Fig. 4. Tensile strength for all test samples

3.2 굽힘강도

기계적 특성 테스트는 다양한 시험방법으로 수행 할 수 있으며 본 연구에서는 ASTM D790 국제기준으로 수행하였으나, 이 측정방법을 통해 제조된 복합인공석재 시편의 굽힘 변형 등 굴곡 특성을 분석하였다. 굽힘시험은 시편의 깊이에 비례하는 속도에서 3점 굽힘 치구를 이용하는 만능 재료 시험기에서 수행하였다.

Fig. 5에는 페PP, 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질을 이용하여 다양한 조성으로 제작된 시편들의 굽힘강도에 대한 실험결과를 나타내었다. 전반적으로 폐석분과 플라이애쉬의 첨가는 굽힘강도를 감소 시킨 것을 알 수 있으며, 이는 이전연구 결과와 유사하다[14]. Fig. 5에서 보는 바와 같이 P68C2의 굽힘강도는 54.90 MPa로 가장 높게 나타났으며, P100, P84C1, P68, P84, P59, P59C1이 각각 53.76, 46.72, 45.01, 44.94, 44.21, 43.20 MPa로 그 뒤를 이었다. 폐석분 및 플라이애쉬의 첨가로 인해 복합시편의 굽힘강도가 P100에 비해 16~20%로 떨어졌으며, 이는 석분과 플라이애쉬 입자들

이 PP 수지의 C-C 결합 사이에 들어가 결합능력을 감소 시키기 때문이다. 또한, P68C2 및 P84C1의 경우, 코코넛 껍질이 각각 2 wt% 및 1 wt%로 첨가되었을 때 그들의 굽힘강도는 코코넛 껍질을 첨가하지 않았을 때보다 각각 21.98% 및 3.97%로 증가하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 코코넛 껍질은 천연섬유로서 계면 결합의 특성을 가지고 있기 때문이다[15]. 대표적인 인공합성 섬유인 폴리에스터, 나일론, 아크릴, 폴리우레탄 등에 비해 코코넛 껍질은 천연섬유로서 대량 입수가 용이하고 단가가 저렴하여 첨가제로서 향후 높은 시장경쟁력을 가질 것으로 판단된다.

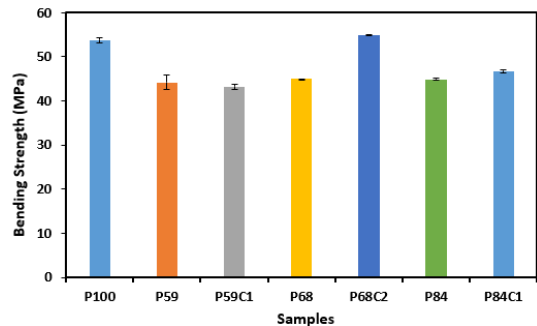


Fig. 5. Bending strength for all test samples

3.3 충격강도

충격특성은 기계적 성질을 대표하는 특성 중 하나인데, 한 물체가 충격을 받았을 때 나타나는 저항에 대한 강도로 표현한다. 하중에 의해서 재료를 파괴하는 데 필요한 에너지를 재료의 단위 면적당 또는 단위 폭당으로 나눈 수치를 말하며, ASTM D 256으로는 충격면의 폭으로 나눈 값으로 나타낸다. 일반적으로 분자량이 클수록 유리전이온도가 높아 충격강도는 감소한다. 충격시험방법에는 일반적으로 아이조드(Izod) 법과 샤르피(Charpy)법이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 노치 아이조드법을 이용하여 다양한 시험 시편의 충격강도를 비교 분석하였다.

Fig. 6은 순수한 페PP(P100)와 복합 펠렛을 이용하여 사출된 복합 시험 시편들의 충격강도를 나타낸 그래프이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 복합시편의 충격강도는 모두 P100보다 높은 것으로 나타났다. 자세히 살펴보면 P100, P59, P59C1, P68, P68C2, P84 및 P84C1의 충격강도는 각각 1.44, 1.60, 1.69, 1.60, 1.76, 1.79 및 1.98 kJ/m²이다. 그래프에서 P84C1의 충격강도는 가장 높음을 알 수 있으며, 이는 P100의 충격강도보다 38.46%로 증가하였다. 폐석분 및 플라이애쉬의 첨가는 복합 시

편의 충격강도를 증가시킬 수 있으며, 이는 분말 내 실리카(SiO₂)의 존재와 관련이 있는 것으로 사료된다. 실리카 또는 이산화규소는 고강도 재료 제조의 기본 성분이기 때문이다. 많은 연구자들이 복합소재 제조 시 실리카의 첨가는 기계적 특성, 열 및 기타 성능을 향상시킬 수 있다고 보고하였다[16,17]. 또한 코코넛 껍질의 첨가는 복합시편(P59C1, P68C2, 984C1)의 충격강도도 증가시켰으며, 이는 코코넛 껍질들이 서로 교차 분포되어 복합시편 제조 시 발행할 수 있는 균열이나 파열문제를 억제할 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 코코넛 껍질은 경량 고강도 콘크리트 제조를 위한 기능성 첨가제로도 사용된다 [18,19]. 따라서 본 연구를 통해 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질은 충격 보강제로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

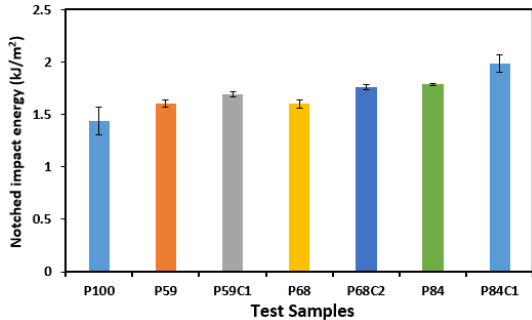


Fig. 6. Notched impact energy for all test samples

3.4 복합인공석재 바닥재 합성

전반적으로 복합인공석재 시편의 인장강도, 굽힘강도를 통해 P68C2의 기계적 특성은 제일 우수한 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 P68C2 복합펠렛을 이용하여 45ton 복합재료 Blanket Press를 통해 Fig. 7에 보는 바와 같은 복합인공석재 바닥재를 압축 성형하였다. 성형된 바닥재의 표면은 매끄럽고 균열이나 깨짐 등의 문제가 발생하지 않았다. 이 바닥재의 가로, 세로 및 높이가 각각 160, 160 및 20 mm 이며, 그의 질량은 378~450 g이다. 벽돌, 시멘트 및 석분의 비중은 각 1.25, 3.15 및 2.18이고, 이것들을 이용하여 본 연구와 같은 바닥재를 제조하였을 때 질량은 각각 640, 1,613 및 1,116 g이 되었다. 따라서 본 연구에서 제조된 바닥재는 페플라스틱이 들어있기 때문에 기존의 벽돌, 시멘트 및 석분 바닥재보다 질량을 대략 3~4배 줄일 수 있다. 즉 페플라스틱을 재활용한 인공석재 바닥재는 경량화의 특징이 있어 운송 및 시공의 편의성이 있기 때문에 향후 전통적인 바닥재를 대체하여 큰 시장을 창출할 것

으로 기대된다. 또한 코코넛 껍질과 페플라스틱, 폐석분 등 폐기물을 재활용함으로써 환경문제를 해결함과 동시에 인장강도, 굽힘강도 및 충격강도 특성이 우수한 바닥재를 성공하게 개발하였다. 따라서 본 연구는 다양한 폐자원을 재활용한 기타 고부가가치 제품개발에 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

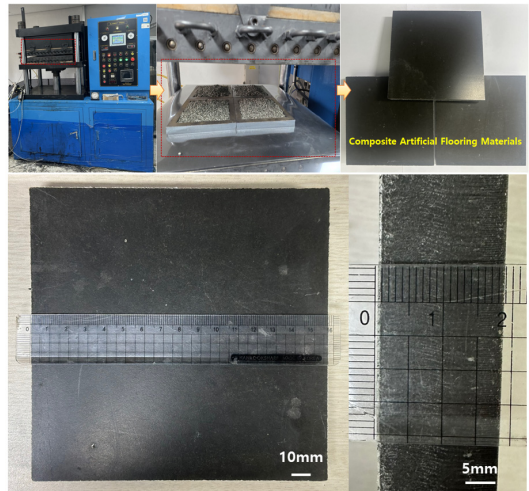


Fig. 7. Preparation of composite artificial stone flooring materials

4. 결론

본 연구에서는 다양한 폐자원(페플라스틱, 폐석분, 플라이애쉬, 코코넛 껍질)을 재활용하여 복합인공석재 바닥재를 개발하였다. 다양한 시험 시편의 기계적 성질을 만능시험기와 충격시험기를 통해 비교 분석하였다. 각 혼합물의 조성비에 기초하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 페PP, 폐석분, 플라이애쉬 및 코코넛 껍질을 활용하여 다양한 복합인공석재 바닥재를 성공적으로 압출해 재활용 폐기물을 활용한 내구성 있는 건축 자재 생산의 타당성을 입증하였다.
2. 모든 복합인공석재 바닥재의 인장강도는 순수 페PP에 비해 낮은 것으로 나타났다. 그 중 P68C2가 가장 높은 인장강도를 보였으며, P84C1, P84, P68, P59, P59C1 순으로 나타났다. 이는 코코넛 껍질을 첨가하면 특정 비율의 다른 재료와 결합할 때 인장 강도를 향상시킬 수 있음을 연구결과를 통해 알 수 있었다.

3. 굽힘강도는 P68C2가 54.90 MPa로 가장 높았고, P100, P84C1, P68, P84, P59, P59C1 순으로 나타났다. 모든 복합인공석재 바닥재의 충격강도는 순수 페PP에 비해 높은 것으로 나타났다. 그 중 P84C1가 가장 높은 충격강도를 보였으며, P84, P68C2, P59C1, P68, P59, P100 순으로 나타났다. 코코넛 껍질 함유가 복합재료의 굽힘강도와 충격강도에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

References

- [1] A.T. Williams, N. Rangel-Buitrago, "The past, present, and future of plastic pollution." *Marine Pollution Bulletin* 176 (2022): 113429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113429>
- [2] A. Bircă, O. Gherasim, V. Grumezescu, A. M. Grumezescu, "Introduction in thermoplastic and thermosetting polymers." *Materials for biomedical engineering*. Elsevier, 2019. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816874-5.00001-3>
- [3] N. Singh and R. Demirsöz, "Recycling of traditional plastics: PP, PS, PVC, PET, HDPE, and LDPE, and their blends and composites." *Book: Nanomaterials in Manufacturing Processes*. CRC Press, 2022. 235-258.
- [4] S. Wang, Y. Shen, G. Du, S. Jiang, S. Liu, H. Niu, L. Li, T. Qin, Z. Duan, T. Li, "Novel melamine-based engineering thermosets: Facile synthesis, extraordinary thermostability, high strength and toughness." *Chemical Engineering Journal* 461 (2023): 141886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141886>
- [5] J.M. Millican and A. Seema, "Plastic pollution: a material problem?." *Macromolecules* 54.10 (2021): 4455-4469. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c02814>
- [6] L. Mai, X. Sun, and E. Y. Zeng, "Country-specific riverine contributions to marine plastic pollution." *Science of The Total Environment* 874 (2023): 162552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162552>
- [7] T.J. Kang, Y.J. Lee, H.S. Kim, N.K. Park, S.C. Lee, B.C. Choi, D.M. Jeon, S.H. Kang, "Analysis of Domestic and International Policies and Market Trends to Promote a Circular Economy based on Waste Plastics", *Korea Society of Energy & Climate Change*, Vol. 18, No. 2, 2023. DOI: <https://data.doi.or.kr/10.22728/jecc.2023.18.2.205>
- [8] S. Kwon, J. Kang, B. Lee, S. Hong, Y. Jeon, M. Bak and S.K. Im, "Nonviable carbon neutrality with plastic waste-to-energy." *Energy & Environmental Science* 16.7 (2023): 3074-3087. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3EE00969F>
- [9] J. Li, J. Li, K. Zhu, P. Huang, N. Wu, Y. Yang, P. Jin, Q. Xu, "Utilizing waste stone powder for improving properties of phosphogypsum-based composite prepared by semi-dry method." *Construction and Building Materials* 426 (2024): 136095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136095>
- [10] Y. Dong, S. Hampshire, J. Zhou, B. Lin, Z. Ji, X. Zhang, G. Meng, "Recycling of fly ash for preparing porous mullite membrane supports with titania addition." *Journal of hazardous materials* 180.1-3 (2010): 173-180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.010>
- [11] J.C. Ge, E.S. Lee, D.J. Kim, J. H. Kang, I.T. Im, N.J. Choi, "Preparation of waste PP/fly ash/waste stone powder composites and evaluation of their mechanical properties." *Materials* 16.10 (2023): 3687. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16103687>
- [12] S.A. Satapathy, A.Nag, and G. Bi.Nando. "Thermoplastic elastomers from waste polyethylene and reclaim rubber blends and their composites with fly ash." *Process Safety and Environmental Protection* 88.2 (2010): 131-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2009.12.001>
- [13] C.L. Hwang, V.A. Tran, J.W. Hong, Y.C. Hsieh, "Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites." *Construction and Building Materials* 127 (2016): 984-992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.118>
- [14] S.Sengupta, D. Ray, and A. Mukhopadhyay. "Sustainable materials: value-added composites from recycled polypropylene and fly ash using a green coupling agent." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 1.6 (2013): 574-584. DOI: <https://doi.org/10.1021/sc3000948>
- [15] S. Kuma, M.S. Shamprasad, Y.S. Varadarajan, M.A. Sangamesha, "Coconut coir fiber reinforced polypropylene composites: Investigation on fracture toughness and mechanical properties." *Materials Today: Proceedings* 46 (2021): 2471-2476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.402>
- [16] M. Farsi, Effect of nano-SiO₂ and bark flour content on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 2017, 25.2: 308-314. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0813-4>
- [17] S. Siengchin, Impact, thermal and mechanical properties of high density polyethylene/flax/SiO₂ composites: Effect of flax reinforcing structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, 31.14: 959-966. DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684412451333>
- [18] A. Sekar, G. Kandasamy, Optimization of coconut fiber in coconut shell concrete and its mechanical and bond properties. *Materials*, 2018, 11.9: 1726. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11091726>
- [19] K. Gunasekaran, P.S. Kumar, M. Lakshmiathy. Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Construction and building materials*, 2011, 25.1: 92-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.053>

갈 준 총(Jun-Cong Ge)

[종신회원]



- 2019년 2월 : 전북대학교 기계설계공학과 (공학박사)
- 2019년 3월 ~ 2019년 5월 : 전북대학교 기계설계공학부 박사후연구원
- 2019년 6월 ~ 2023년 5월 : 전북대학교 기계설계공학부 연구조교수
- 2023년 6월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부 연구부교수

<관심분야>

폐자원 재활용 기술 개발, 다기능성 복합소재 개발

최 낙 정(Nag-Jung Choi)

[정회원]



- 1995년 8월 : 한양대학교 기계공학 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계설계공학부 교수

<관심분야>

폐자원 재활용 기술 개발, 인공석 복합소재 개발

김 득 주(Deuk-Ju Kim)

[정회원]



- 2010년 3월 : 명지대학교 산업공학과(공학석사)
- 1995년 1월 ~ 2008년 8월 : (주)초석석재산업 대표이사 역임
- 2012년 5월 ~ 현재 : (주)아트스톤 CTO, 책임연구원
- 2023년 10월 ~ 현재 : 아트테크 대표

<관심분야>

페석분 재활용 기술, 복합인공석재 개발, 기타 석제품

강 지 호(Ji-Ho Kang)

[정회원]



- 1980년 2월 : 한양대학교 산업공학과 (공학학사)
- 1986년 8월 : 한양대학교 산업공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 명지대학교 산업공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 2021년 2월 : 군장대학교 자동차기계계열 교수
- 2021년 3월 ~ 현재 : (주)아트스톤 기술연구소 연구소장

<관심분야>

복합인공석재 개발, 바닥재 표면 가공기술 개발