

천연가죽 피할 가공 부산물 재활용 소재를 활용한 신발 제작 연구

- 3D 프린팅을 활용한 웰딩 가공 적용을 중심으로 -

김 영 환 · 이 현 승*

세명대학교 패션디자인학과 조교수
인천대학교 패션산업학과 조교수*

요 약

지속 가능성에 관한 관심이 증가함에 따라 패션 산업에서도 생산 과정에서 발생하는 부산물의 재활용과 소재 활용 효율을 높이기 위한 시도가 요구되고 있다. 특히 천연가죽은 신발, 가방, 보호 기능성 패션 제품 등에 널리 활용되는 소재이나, 두께 조절을 위한 피할 가공 과정에서 발생하는 스플릿 레더는 소재의 취약성으로 인해 부산물로 처리되는 경우가 일반적이다. 이에 본 연구는 스플릿 레더의 강성을 보완하여 신발 갑피 소재로 재활용하기 위해 보급형 FFF 방식 3D 프린터를 활용한 TPU 웰딩 가공을 적용한 소재 재활용 방안과, 해당 재활용 소재의 일반적 신발 제작 공정으로의 적용 가능성, 제작된 재활용 소재가 활용된 신발의 실제 사용성을 파악하는 데 목적을 두었다. 이를 위해 스플릿 레더 표면에 TPU를 1.0mm부터 2.0mm까지 0.2mm 간격으로 적층한 6종의 3D 프린팅 웰딩 실험물을 제작하고, 비가공 스플릿 레더 및 천연가죽과의 인장강도 비교 실험을 수행하였다. 실험 결과, 1.8mm 두께의 TPU 웰딩 실험물부터 1259.63N의 강도 평균을 보여 천연가죽보다 높은 인장강도를 나타냈다. 이에 따라 1.8mm를 기준 웰딩층 두께로 설정하고, 단화형과 장화형의 신발 2종을 제작하였다. 신발 제작은 라스트를 활용한 갑피 패턴 도출, 패턴 디지털화, 3D 프린팅 웰딩층 및 웰딩 패턴 모델링, 갑피 출력, 봉제, 라스팅, 본딩, 밑창 결합의 과정으로 수행되었다. 제작 결과, TPU 소재 간 접착을 위한 접착 촉진제 도포 과정이 추가적으로 요구되었으나, 3D 프린팅 웰딩이 적용된 스플릿 레더 재활용 소재는 일반적 신발 제작 공정에 적용 가능함을 확인하였다. 또한 성인 15인을 대상으로 착용성 및 활동성 평가를 수행한 결과, 단화형은 전체 평균 3.81점, 장화형은 전체 평균 3.96점으로 평가되어 전반적으로 실제 착용 및 활동이 가능한 수준의 사용성을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 가죽 가공 부산물인 스플릿 레더가 3D 프린팅 기반 TPU 웰딩 가공을 통해 신발 갑피 소재로 활용될 수 있는 가능성을 제시함으로써, 지속가능한 패션 소재 개발과 디지털 제작 기술을 활용한 신발 제작 연구를 위한 기초 자료 제시에 의의를 둔다.

주제어 : 3D 프린팅, 3D 프린팅 웰딩, 신발 제작 공정, 재활용

*교신저자: 이현승, [srwalph@inu.ac.kr](mailto:srwalpha@inu.ac.kr)

접수일: 2026년 6월 11일, 수정논문접수일: 2026년 6월 29일, 게재확정일: 2026년 6월 30일

I. 서론

최근 지속 가능성(sustainability)과 친환경적 소비에 관한 관심이 증가함에 따라, 패션 산업에서도 환경적 영향을 최소화할 수 있는 생산과 소비를 위한 실천이 확산되고 있다. 패션 산업은 소비 활성화를 통한 시장 경제 성장에 기여해 왔으나, 대량 생산과 과잉 소비로 인한 자원 낭용, 폐기물 증가 등 한계성 또한 내포한다(Syn & Geum, 2014). 이에 따라 패션 산업의 지속 가능성 실천은 디자인과 생산 전 과정에서 요구되며, 제로 웨이스트(zero-waste), 리사이클(recycling), 업사이클(upcycling) 등 다양한 접근이 제안되어 왔다. 패션 산업 중에서 신발 산업의 경우, 의류 산업에서 나타나는 제로 웨이스트 등 디자인 중심의 접근에 비해, 소재의 재생, 재활용 등 자원 순환에 상대적으로 더 초점이 맞춰진 특징을 보인다. 이는 신발이 의류에 비해 정형적인 구조를 가짐에 따라, 패턴 도안 시 필연적으로 입체적 구조를 형성해야 하여 제로 웨이스트와 같은 접근이 어려울 수 있고, 소재 측면에서도 섬유 대비 낮은 유연성이 요구되는 대신 갑피, 밑창 등 구성요소에서 상대적으로 높은 강성 및 형태 유지 성능이 요구되기 때문이다(Ghimouz et al., 2023). 따라서 안전성에 문제가 없다는 전제하에, 국제적 스포츠 패션 브랜드에서는 폐기 신발을 회수, 재가공하여 재활용 소재를 활용한 제품을 출시하는 등의 자원순환을 시도해 왔다(Bianchi et al., 2023; Nike, n.d.). 이와 같은 밑창을 중심으로 한 소재 재활용 시도에 비해, 신발의 외관과 기능, 구조를 크게 좌우하는 갑피 제작을 위한 재생, 재활용 소재의 개발 혹은 적용 가능성 다루는 연구 사례는 상대적으로 드문 실정이며, 가죽 갑피 소재를 재활용하거나, 가죽 폐기물이나 부산물을 재활용하여 갑피 소재로 재활용하는 연구나 산업적 사례는 더욱 사례를 찾기 어렵다.

가죽은 높은 내구성과 원천의 다양성에 따른 고유한 표면 질감으로 인해 신발 및 잡화 분야에서 널

리 활용되어 왔다(Bitlisli et al., 2013; Hossain et al., 2021; Yoon & Lee, 2018), 신발은 사용 환경 특성상 의류보다 높은 내구성을 요구하므로 전통적으로 갑피 소재에 천연가죽의 활용성이 높다. 그러나 천연가죽은 최종 소재로 전환되는 과정에서 제품 제작을 위해 적합한 두께와 유연성 확보를 위한 피할(splitting) 등의 가공을 거치며, 이 과정에서 표피층 아래의 피하층인 스플릿 레더(split leather)는 강도 저하 및 규격 불균일 등의 이유로 부산물로 처리되거나 폐기되는 경우가 많다(Kim, 2021). 이에 따라 천연가죽은 일반적인 섬유 소재에 비해 상대적으로 고가임에도 불구하고 가공 단계에서 원재료 활용률이 낮아질 수 있으며, 이는 지속 가능성에 입각한 생산 관점에서 볼 경우 폐기물 저감과 자원 효율 향상을 위한 개선이 필요하다. 따라서 취약한 스플릿 레더의 물성을 보강하여 실제 제품 제작에 활용할 수 있다면, 가죽 가공 단계에서 발생하는 폐기 자원 감소와 더불어 폐기 소재를 재생함으로써 소재적 측면의 부가가치 생성, 신발 소재 선택의 범위 확장에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 신발 갑피 소재의 물성 보강 및 기능 향상을 위해 활용되어 온 웰딩(welding) 가공을 스플릿 레더 재활용에 접목하고자 하였다. 웰딩은 PU(Polyurethane), TPU(Thermoplastic Polyurethane), PVC(Polyvinyl chloride) 또는 직물 필름 등을 가열 프레스·초음파·레이저·적외선 등의 방식으로 갑피 표면에 용착하여, 갑피 특정 부위의 표면 강도, 형태 유지력, 방수 성능을 향상하는 기법이다(Hussain & Nazeer, 2025). 또한 웰딩은 기능적 목적뿐 아니라 특정 형태를 가지는 소재 표면에 패턴을 적용하여 심미성을 강화하기 위한 용도로도 활용된다. 본 연구에서는 소재 표면에 추가적인 층을 형성하여 물성과 기능을 보강하는 웰딩을 구현하기 위해 상대적으로 접근이 용이한 방법으로서, 프린팅 베드 위에 재료를 적층하는 FFF(fused filament fabrication) 방식 3D 프린팅의 작동 원리의 활용에 주목하였다.

이를 통해, 첫째, 소재 준비와 후가공 단계를 통합할 수 있고, 둘째, 갑피의 패턴, 두께, 배치를 디자인어 개인 단계에서 그래픽 기반으로 설계, 관리할 수 있으며, 셋째, 보급형 장비를 활용하는 방식으로 신발은 물론 의류 등 패션 제품 제작 현장에서도 접근이 용이한 실용적 장점이 있을 것으로 사료된다.

이에 따라, 본 연구에서는 천연가죽 피할 가공 과정에서 발생하는 스플릿 레더를 신발 갑피 소재로 재활용하기 위해, 보급형 FFF 방식 3D 프린팅을 활용한 TPU 웰딩 가공을 적용하고, 이를 통해 스플릿 레더의 인장강도 보완 가능성, 일반적인 신발 제작 공정으로의 적용 가능성, 제작된 신발의 초기 사용성을 탐색하는 데 목적을 두었다.

상기 연구 목적에 따른 연구 수행 과정 및 내용은 다음과 같다. 첫째, 3D 프린터를 활용하여 스플릿 레더 표면에 TPU 웰딩층을 1.0mm에서 2.0mm 범위로 단계적으로 적층한 실험물을 제작하고, 비가공 스플릿 레더 및 천연가죽과의 인장강도 비교를 통해 기준 웰딩층 두께를 설정한다. 둘째, 설정된 기준 두께를 바탕으로 단화형과 장화형 신발 2종의 갑피 디자인 및 패턴을 도출하고, 2D 및 3D CAD 프로그램을 활용하여 3D 프린팅 웰딩층과 웰딩 패턴을 설계한다. 셋째, 스플릿 레더 표면에 TPU 웰딩층을 적용한 갑피 패턴을 출력하고, 봉제, 라스팅, 본딩, 밑창 결합 등 일반적인 신발 제작 공정을 통해 시제품을 제작한다. 넷째, 성인 착용자를 대상으로 착용성 및 활동성 평가를 수행하여 3D 프린팅 웰딩 적용 스플릿 레더 재활용 신발의 초기 사용성을 파악한다.

II. 이론적 고찰

1. 패션에서 지속 가능한 소재의 재활용

지속 가능성은 환경, 사회, 경제적 요소의 균형

을 통해 현재 세대의 필요를 충족시키면서도 미래 세대의 생존과 발전 가능성을 보장하는 개념으로 이해된다. 패션 산업에서 지속 가능성은 단순히 친환경 소재를 사용하는 차원을 넘어, 자원 채굴, 소재 생산, 제품 제조, 유통, 사용, 폐기의 전 생애주기에서 자원 소모와 환경적 부담을 줄이고 사회·경제적 지속 가능성을 함께 확보하려는 방향으로 확장되어 왔다(Na & Lee, 2013; Syn & Geum, 2014). 특히 패션 산업에서는 대량 생산과 빠른 소비주기에 따른 자원 과용, 사용 전후의 폐기물 발생 등 다양한 지속 가능성과 연관된 문제가 논의되어 왔으며, 이에 따라 다양한 지속 가능한 패션 개념이 제시되어 왔다.

지속 가능성에 기반한 패션의 실천은 업사이클링, 리사이클링, 리디자인, 재사용, 재제조 등으로 유형화될 수 있으며, 이는 사용 후 폐기물 또는 부산물을 어느 단계에서, 어떠한 방식으로 다시 활용하는가에 따라 구분된다(Jia et al., 2020). 특히 업사이클링은 폐기물이나 부산물을 단순히 원료로 환원하는 데 그치지 않고, 기존 소재가 가진 형태적·물성적 한계와 불균일성을 디자인 요소로 재해석하여 새로운 부가 가치를 창출하는 방식으로 이해된다(Park & Kim, 2016). 이와 같은 관점에서 패션 산업의 지속 가능성은 제품 사용 후 발생하는 사용 후 폐기물뿐만 아니라, 생산 및 가공 과정에서 발생하는 부산물이나 사용 전 폐기물 또한 재활용하기 위한 다층적 자원순환 체계로의 확장이 모색되고 있다(Jia et al., 2020; Leal Filho et al., 2019).

생산단계 폐기물에 대한 접근은 일반적으로 패턴 및 마커 최적화를 통한 제조 단계(upstream) 폐기물 감축형, 생산 현장에서 발생한 잉여 소재를 제품화하는 직접 재사용(direct-reuse)형, 분쇄 등의 재가공을 통해 2차 원자재로 전환하는 재활용(recycling)형, 타 산업을 위한 소재나 제품으로 전환하는 교차산업전용(cross-industry)형 등이 있다(Jia et al., 2020; Leal Filho et al., 2019). 이러한 방식이 실질적인 제

품 제조 단계로 이어지기 위해서는 폐기물 또는 부산물의 재활용 가능성뿐 아니라, 최종 제품에서 요구되는 강도, 형태 유지성, 내구성, 가공 적합성 등의 물성 기준을 충족해야 한다. 따라서 지속 가능한 패션 소재의 재생, 재활용 분야에서는 재활용 소재가 실제 제품 제작 공정 및 사용 조건에 적합한 성능을 확보할 수 있는지가 중요한 판단 기준이 된다(Jia et al., 2020).

신발 산업은 상기한 물성 기준의 중요성이 보다 강조되는 분야로 볼 수 있다. 신발은 갑피, 중창, 밑창 등 복수의 구성요소가 결합된 정형적 구조를 가지며, 착용자의 보행 및 활동 과정에서 반복적인 굴곡, 마찰, 압력, 충격을 받기 때문에 의류에 비해 높은 강성, 형태 유지성, 내구성이 요구된다(Ghimouz et al., 2023). 이에 따라 신발 분야에서의 지속 가능성 실천은 의류 분야에서 주로 논의되어 온 제로 웨이스트 패턴 설계나 리디자인 측면의 접근에 비해, 재생 소재의 물성 확보와 제품 구조 내 적용 가능성에 초점이 두어지는 경향이 있다. 국제적 신발 브랜드에서는 제조 시 발생하는 폐기 소재나 사용 후 신발을 회수하여 고무, 폼 등의 소재를 재활용하기 위한 업사이클링 프로그램을 운영하고 있으며, 주로 밑창, 폼, 고무계 소재의 업사이클링에 초점을 두고 있다(Ghimouz et al., 2023; Nike, n.d.).

패션에서의 지속 가능성 실천 양상을 요약하면, 의류 산업의 경우 사용 후 폐기물의 재활용뿐 아니라 생산 및 가공 과정에서 발생하는 부산물의 활용으로 확장되고 있으며, 신발 산업의 경우 갑피, 중창, 밑창 등 복합 구조와 반복적인 보행 하중을 고려하여 재생 소재의 물성 확보에 초점을 둔 업사이클링 양상을 보인다.

2. 천연가죽 가공 및 재활용 양상

천연가죽은 원피 상태에서 제품화되기까지 일

련의 화학·물리 가공 단계를 거치며, 이 과정에서 적용되는 처리 기술에 따라 기능적·외관적 특성이 결정된다(Kim, 2021; Thomasset & Perwuelz, 2024). 일반적으로 가죽 가공은, 첫째, 준비 공정, 둘째, 탄닝(tanning) 공정, 셋째, 마무리 공정 3단계로 구성된다. 준비 공정에서는 불순물 제거, 방부, 석회 처리 등 후속 공정을 위한 전처리가 수행되며, 탄닝 공정에서는 베지터블 탄닝(vegetable tanning), 크로미움 탄닝(Chrome tanning), 금속염 탄닝, 화이트 탄닝(white tanning) 등 다양한 기법이 적용되어 원소재의 기본 물성이 결정되고, 마무리 공정에서는 건조·염색·도장과 함께, 최종 용도에 맞추어 물성을 조절하기 위한 리탄닝(retanning) 및 두께 조절을 위한 피할과 웨이빙과 같은 절삭 공정이 수행된다(Kim, 2021; Thomasset & Perwuelz, 2024).

상기 공정 중 패션 제품 제조에 적합한 두께와 유연성을 확보하기 위해 수행되는 피할과 웨이빙(shaving) 과정에서는 다양한 형태의 부산물이 발생한다(Thomasset & Perwuelz, 2024). 피할 과정에서는 표피층이 제거되어 피하층 중심으로 남는 스플릿 레더가 생성되며, 웨이빙 과정에서는 스플릿 레더에 비해 형태와 크기가 불균일한 잔여물이 발생한다. 이러한 부산물들은 표피층 결여 및 구조 손상에 의해 내구성이 현저히 저하되고, 형태적으로 규격화가 어려워 폐기되는 경우가 많다. 따라서 천연가죽은 최종 제품 생산 단계로 이전되기 전 가공 단계에서 원소재 활용비율이 떨어질 수 있는 한계성이 있으며, 이는 지속 가능한 생산과 소비가 주목받는 현시점에 보안을 위한 시도가 요구됨을 시사한다(Thomasset & Perwuelz, 2024; Parisi et al., 2021).

상기와 같은 맥락에서 천연가죽 가공 과정에서 발생하는 부산물을 재활용하거나 폐기되는 가죽 소재를 재활용하기 위한 기법과 공정에 관한 연구가 진행되어 왔다. Sang and Park(2021)은 가죽 폐기물을 수지와 혼합해 레더 보드(leather board) 형

태로 제작하고, 이를 신발 아웃솔(outsole) 소재로 활용하기 위한 연구를 수행하였다. Kang(2020)은 가죽 부산물의 “텍스타일화” 관점에서, 베지터블 가죽을 대상으로 커피 염색, 알코올 염료 염색, 철 염 등 비교적 접근 가능한 염색 기법을 실험하고 지속 가능한 가죽 텍스타일 소재 개발 가능성을 제안하였다. 또한 소재의 교차산업전용 관점에서 크롬 탄닝 가죽을 포함한 가죽 폐기물을 파쇄하여 이후 타 소재와 혼합하여 건축을 위한 복합재로 활용하거나 폴리머와 혼합하여 수지 소재화하는 공정이 제안되어 왔다(Parisi et al., 2021; Thomasset & Perwuelz, 2024).

상기와 같은 천연가죽의 특성에 따른 재활용 양상은, 분쇄, 혼합, 성형 등을 통한 복합재 또는 보드형 소재 개발로 요약해 볼 수 있다. 그러나 이러한 방식은 별도의 공정 장비와 재료 관리가 요구된다는 점에서 패션 디자인 분야에서 접근이 용이하지 않을 수 있는 한계성이 있다(Parisi et al., 2021).

3. 신발 제조를 위한 웰딩 가공

신발은 사용 목적에 따라 정도의 차이는 있을 수 있으나, 착용자가 활동 시 지면과의 반복 접촉 과정에서 발생하는 충격 하중과 마찰 등 물리적 스트레스 환경에 놓인다. 따라서 실내에서의 사용을 전제한 일부 유형을 제외하고 타 패션 제품에 비해 높은 내구성을 가지는 소재를 활용하거나, 내구성을 향상하기 위한 기법을 적용되어 제작된다(Yi, 2011). 신발 제작 시 갑피의 내구성을 향상하기 위한 대표적인 제작 기법으로 웰딩 가공을 꼽을 수 있다. 웰딩은 PU, TPU, PVC 필름, 코팅 직물 등, 주로 열가소성(thermoplastic) 소재를 열, 압력, 진동 등의 수단을 통해 기저체가 되는 소재에 용착하여 일체화함으로써, 소재의 내구성과 방수성 등을 향상하기 위한 목적으로 이용된다(Hussen et al., 2022). 웰딩 공정은 구현 방식에 따라 열압착

웰딩, 초음파웰딩, 고주파 웰딩, 레이저 웰딩 등으로 분류될 수 있으며, 각 방식은 접합 원리와 장단점, 적용 가능한 소재 범위가 다르나, 박막화된 열가소성 소재를 기저체가 되는 섬유나 가죽 등의 표면에 압착·용착하여 소재를 강화한다는 점은 공통적이다(Hussen et al., 2022; Kuo et al., 2019a; Kuo et al., 2019b).

일반적으로 웰딩은 신발 갑피, 특히 스포츠화 및 캐주얼화 제조 시 갑피의 형태 유지력, 소재 강도, 방수 성능 향상을 위한 후가공 기법으로서 활용되며, 구체적인 활용 용도는 세 가지로 요약 가능하다. 첫째, 갑피의 앞코, 측면, 개구부 등의 특정 부분에 내마모성 및 형태 유지력 향상, 방수, 방오 등의 기능을 부여하는 표면 보강 목적으로 활용된다(Jevšnik et al., 2017). 둘째, 봉제선을 대체 혹은 보조하여 접합부의 손상 가능성을 줄이거나 수분이 유입되는 경로를 줄이기 위한 갑피의 보강 작업의 공정을 단순화하는 용도로 활용된다(Hussen et al., 2022). 셋째, 특정 형태의 반복 패턴을 디자인 요소로 활용하여, 갑피 소재 표면의 기능성을 강화함과 동시에 심미성을 부가하기 위한 목적으로 활용된다(Jevšnik et al., 2017).

상기와 같은 웰딩의 기법적 원리와 특성은, 소재의 강도와 내구성이 부족한 재생·부산물 소재에 광범위한 혹은 국소적인 보강층을 적용하여 재사용하기 위한 강도 성능 향상에 응용될 수 있다(Naderizadeh et al., 2025; Parisi et al., 2021). 스플릿 레더는 표피층이 제거되어 상대적으로 표면 내구 및 강도 특성이 약해질 수 있으므로, 갑피 적용을 위해서는 추가적인 물성 보강 메커니즘이 요구된다(Parisi et al., 2021). 이에 대해 웰딩 기반 보강은 스플릿 레더의 약점을 보완하면서도, 보강층의 두께, 배치 위치와 면적을 조절할 수 있어, 갑피에서 중요한 부위별 강성 조절에 효과적일 수 있다(Jevšnik et al., 2017; Naderizadeh et al., 2025).

상기와 같이, 웰딩 가공은 열가소성 소재를 갑

피 표면에 용착하여 표면 보강, 접합부 보완, 방수성 및 형태 유지성 향상, 장식적 패턴 형성 등을 가능하게 하는 후가공 기법이자, 소재 물성 보완과 차별적인 소재 표면 디자인 적용이 동시에 가능할 수 있는 기법으로 요약될 수 있다.

III. 스플릿 레더 재활용 소재를 활용한 신발 제작

패션 산업의 지속 가능성 논의는 사용 후 폐기물뿐 아니라 생산 및 가공 과정에서 발생하는 부산물의 재활용으로 확장되고 있다. 신발은 반복적인 보행 하중과 마찰, 굴곡을 받는 제품이므로, 재활용 소재를 적용하기 위해서는 단순한 소재 대체를 넘어 물성 보완, 가공 적합성, 착용성에 대한 검토가 함께 이루어져야 한다. 또한 천연가죽 피할 가공 과정에서 발생하는 스플릿 레더는 표피층 부재와 물성 취약성으로 인해 소재의 형태를 유지하면서도 필요한 인장 저항성과 형태 유지성을 보완할 수 있는 가공 방식이 요구된다. 이에 따라, 본 연구에서는 보급형 FFF 방식 3D 프린팅을 활용하여 스플릿 레더 표면에 TPU 웰딩층을 직접 적층하고, 이를 신발 갑피 소재로 활용하기 위한 제작 실험을 수행하고자 한다.

연구 과정은 크게 세 단계로 구성된다. 첫째, 스플릿 레더 표면에 TPU 웰딩층을 두께별로 적층한 실험물을 제작하고 인장강도 비교를 통해 신발 갑피 제작에 적합한 수준의 인장강도를 가지는 기준 웰딩층 두께를 파악한다. 둘째, 기준 두께를 적용한 스플릿 레더 재활용 소재를 활용하여 단화형과 장화형 신발 2종을 제작함으로써, 3D 프린팅 웰딩이 적용된 스플릿 레더 재활용 소재가 일반적인 신발 제작 공정으로의 적용 가능성이 있는지 파악한다. 셋째, 제작된 신발 2종을 대상으로 착용성 및 활동성 평가를 수행하여 3D 프린팅 웰딩이 적

용된 재활용 소재로 제작된 신발 시제품의 사용성을 파악한다.

1. 스플릿 레더 재활용을 위한 3D 프린팅 웰딩 조건 탐색

실험물은 스플릿 레더 표면에 TPU를 적층하여 웰딩층을 형성한 이중 구조로 구성된다. 코팅층 두께는 1.0mm부터 2.0mm까지 0.2mm 간격으로 증가시키며 1.0mm, 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm, 1.8mm, 2.0mm 두께의 실험물 6종을 제작하였다. 각 두께별 실험물은 가능한 동일한 스플릿 레더 시트에서 절단하여 각 시편 간의 기초 물성 편차를 최소화하고자 하였으나, 피할 과정의 부산물인 스플릿 레더의 특성상 동일한 스플릿 레더라도 각 부위별 두께가 상이할 수 있음에 따라 절대적으로 동일한 조건으로 규정할 수 없는 한계성이 발생하였다.

TPU 웰딩층의 적층에는 보급형 FFF 3D 프린터 (Bambu Lab H2D)를 활용하였으며, TPU 소재는 Bambu 90A 모델을 사용하였다. 프린팅 시의 조건인 경우, 노즐은 0.4mm 구경 노즐을 활용하였으며, 출력 시 노즐 온도는 230°C, 프린팅 베드 온도는 40°C로 설정되었다. 프린팅 베드 온도의 경우 프린팅 베드 표면에 스플릿 레더를 고정함에 따라 기본 출력 설정인 30-35°C에 비해 표면 온도가 저하될 수 있어, 기본 설정에 비해 온도를 높게 설정하였다. 또한 프린팅 레이어의 높이는 0.2mm로, 내부 채움 밀도는 100%, 출력 속도는 첫 레이어 50mm/s, 이후 레이어는 100mm/s로 설정되었다. 상기의 출력 설정을 유지한 상태에서 적층되는 웰딩층의 높이만을 다르게 설정하여 출력하여 실험물을 제작하였다. 출력 시 스플릿 레더가 베드 위에서 유동하여 웰딩층이 균일하지 못하게 출력되는 현상을 방지하기 위해 프린팅 베드와 스플릿 레더를 테이프로 고정하여 웰딩층이 평탄하게 적층되도록 조치하였다.

두께를 달리한 각 3D 프린팅 웰딩 실험물의 강도를 파악하기 위해, 인장강도 실험기(SGA-E-0.3LD)를 활용하여 실험을 수행하였다. 실험 시 대조를 위해 비가공 스플릿 레더와 운동화 제작 시 사용되는 1.7mm 두께로 피할 가공된 천연가죽의 인장강도를 함께 측정하였다. 이를 통해 3D 프린팅 웰딩층의 두께별 인장강도 변화와 천연가죽 대비 인장 저항성 보완 가능성을 비교하여, 이후 신발 제작 시 활용될 3D 프린팅 웰딩층 높이의 기준을 설정하고자 하였다.

인장강도 실험 시, 소재에 가해지는 하중 범위는 최대 3000N(306.12kg)으로, 장비의 인장 속도는 분당 5mm로 설정하여 각 실험물이 파단되는 시점(peak point)의 최대 하중 수치(N)와 인장거리(mm)를 측정하였다. 천연가죽의 경우, 동물의 피혁이기 때문에 부위별 조직 밀도와 물성이 균일하지 않을 수 있으며, 스플릿 레더 역시 피할 가공 과정에서 동일 시트 내에서도 두께 및 조직 상태의 차이가

발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 소재의 불균일성을 고려하여 각 조건별 실험물을 3개씩 제작하고 반복 측정하였다. 해당 실험의 반복 측정 회수가 3회로 제한됨에 따라 통계적으로 정량적 유의성 검정을 수행하기에는 표본의 수가 충분하지 못한 한계점이 있어, 스플릿 레더 표면에 적용되는 3D 프린팅 웰딩층의 두께가 인장강도와 거리 변화에 미치는 영향을 탐색적으로 파악하는 데 초점을 두었음을 밝힌다. 실험 결과는 각 실험물별 3회 실험 시 나타난 측정값, 평균, 표준편차, 최솟값, 최댓값으로 정리하였으며, 조건별 인장강도 변화 경향을 파악하고자 하였다(Table 1).

먼저 천연가죽과 비가공 스플릿 레더의 인장강도를 측정하여 3D 프린팅 TPU 웰딩 실험물의 비교 기준으로 삼았다. 실험 결과, 비가공 스플릿 레더(0.5-0.7mm)의 인장강도 평균은 29.30N(SD=7.86N), 인장거리 평균은 13.77mm(SD=2.62mm)로 나타났으며 천연가죽(1.7mm)의 인장강도 평균은 990.50N

Table 1. 두께별 3D 프린팅 TPU 웰딩 실험물의 인장강도 및 인장거리 측정 결과.

종류		비가공 스플릿 레더(0.5-0.7mm)			천연가죽(1.7mm)			
대조군	유형	인장강도		인장거리	인장강도		인장거리	
	1회차	35.4N		15.18mm	1300.2N		29.76mm	
	2회차	20.4N		15.38mm	711.6N		27.90mm	
	3회차	32.1N		10.75mm	959.7N		30.17mm	
	평균	29.30N		13.77mm	990.500N		29.38mm	
	표준편차(SD)	7.86N		2.62mm	295.51N		1.21mm	
실험물	3D 프린팅 웰딩 두께		1.0mm	1.2mm	1.4mm	1.6mm	1.8mm	2.0mm
	인장강도	1회차	509.40N	574.20N	726.90N	810.46N	1161.70N	1354.50N
		2회차	777.00N	914.10N	1072.80N	1169.40N	1240.20N	1204.20N
		3회차	768.60N	804.90N	862.80N	959.10N	1377.00N	1621.80N
		평균	685.00N	764.40N	887.50N	979.65N	1259.63N	1393.50N
		표준편차(SD)	152.13N	173.53N	174.27N	180.35N	108.96N	211.51N
	인장거리	1회차	59.36mm	57.99mm	56.06mm	34.21mm	56.65mm	63.37mm
		2회차	44.73mm	46.71mm	55.41mm	45.00mm	52.15mm	47.12mm
		3회차	29.93mm	67.10mm	36.56mm	75.13mm	41.68mm	44.72mm
		평균	44.67mm	57.27mm	49.34mm	51.45mm	50.16mm	51.74mm
		표준편차(SD)	14.71mm	10.21mm	11.08mm	21.21mm	7.68mm	10.15mm

Authors organized

(SD=295.51N), 인장거리 평균은 29.38mm(SD=1.21mm)로 확인되었다. 천연가죽의 경우 인장강도 표준편차가 비교적 크게 나타났는데, 이는 피혁 소재의 부위별 조직 밀도와 물성 차이에 따른 결과로 해석된다. 한편, TPU 웰딩층이 적용된 6종의 실험물은 모두 비가공 스플릿 레더에 비해 현저히 높은 인장강도를 보였다(Table 1). 특히 1.8mm 및 2.0mm 두께로 설정된 3D 프린팅 웰딩이 적용된 실험물의 인장강도는 각각 1259.63N(SD=108.96N)와 1393.50N(SD=211.51N)으로, 천연가죽의 평균 인장강도보다 높은 수치를 보였다. 이에 따라 TPU 웰딩층의 적용이 스플릿 레더의 낮은 인장 저항성을 보완에 사용 가능하며, 동시에 1.8mm 두께 이상의 TPU 웰딩층이 적용된다면 취약한 강도를 가지는 스플릿 레더라도 내구성이 중요시되는 운동화 제작을 위해 사용되는 표피층이 있는 천연가죽과 유사한 사용성이 있을 수 있음을 파악할 수 있었다. 2.0mm 두께의 실험물은 인장강도 평균값이 가장 높았으나 표준편차 역시 211.51N으로 비교적 크게 나타났다. 이는 기저체가 되는 스플릿 레더의 균일하지 못한 소재적 한계점 및 출력 당시 3D 프린팅 필라멘트 소재 출력 품질에 영향을 미치는 습도 등의 변수에 따른 것으로 해석된다.

각 실험물별 인장거리의 경우, 모든 실험물에서 비가공 스플릿 레더 및 천연가죽보다 높은 평균값이 나타났다. 이는 TPU 웰딩층이 스플릿 레더 표면에 형성됨으로써 파단 전 변형 수용성에도 영향을 미친 것으로 사료된다. 그러나 각 실험물별 인장거리 수치가 웰딩층 두께 증가에 비례하는 등의 유의미한 변화 경향이 발견되지 않아, 향후 추가적인 반복 실험을 통한 웰딩층의 두께와 연식 특성 간의 상관관계 파악이 요구되는 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고, 측정된 인장 거리 역시 대조군에 비해 전반적으로 향상된 수치를 보였다. 이를 두고 보았을 때, 본 연구의 실험 결과를 일반화하기에는 통계적인 한계점이 있으나, 3D 프린팅

을 활용한 웰딩 기법은 패션 분야에서 접근이 용이한 기술을 활용하여 기존의 취약한 스플릿 레더의 인장보완이라는 목적을 위해서는 사용성이 있는 것으로 판단된다.

상기의 실험 결과를 토대로, 이후 스플릿 레더 재활용 소재의 실제 신발 제작 공정에서의 활용성을 파악하기 위한 신발 2종 제작 시 웰딩층의 두께를 설정하였다. 본 연구의 실험은 통계적으로 판단하기에 부족한 3회의 반복 실험이 수행되어 결과를 일반화할 수 없으나, 3D 프린팅 웰딩 두께의 차이가 스플릿 레더의 인장강도 향상에 미치는 영향 파악을 위한 기초 자료로서 활용 가능할 것으로 판단된다. 따라서 실험 시 천연가죽을 상회한 인장강도 평균 수치를 보임과 동시에 가장 인장강도의 편차 수치가 낮았던 1.8mm 두께를 기본 웰딩층 두께로 설정하였다. 인장강도는 2.0mm 두께가 더 우수한 것으로 나타났으나, 1.8mm 두께 또한 대조군이었던 천연가죽에 비해 높은 인장강도 수치를 보임과 동시에 편차가 적었던 점, 소재 제작 시 출력소요 시간이 적은 점, 또한 웰딩 적용 소재로 신발을 제작할 시, 보행 시 갑피의 굴곡 유연성에 영향을 미치는 웰딩층의 출력 두께에 따른 유연성 저하 등을 종합적으로 고려하여 1.8mm 두께를 기본 두께로 선정하였다. 또한 각 신발 갑피 디자인에 따라, 1.8mm의 웰딩층 위에 추가적인 스트라이프와 허니콤 등의 패턴 층을 적용하여 소재 강성 강화 및 각 신발 프로토타입별 디자인에 차별성을 확보하고, 입체적인 패턴이 소재 표면에 적용되었을 때, 신발의 정형적인 형태, 구조 형성에 미치는 영향이 있는지 파악하고자 하였다.

2. 3D 프린팅 웰딩 가공 재활용 소재를 활용한 신발 제작

본 연구의 스플릿 레더 재활용 소재가 일반적인 신발 제작 공정에서 활용 가능한지 여부를 파악하기

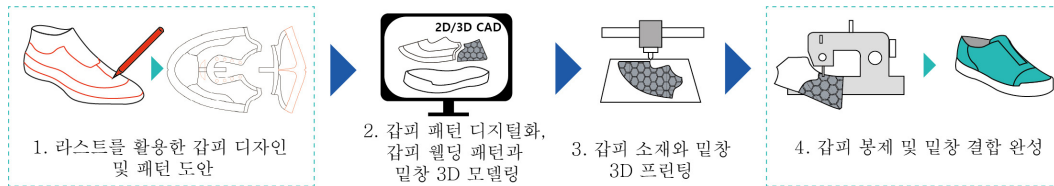


Figure 1. 스플릿 레더 재활용 소재를 활용한 신발 디자인 및 제작 과정.
Made by the author. (June 25, 2026).

위해 신발 2종의 제작하였으며, 과정은 <Figure 1>과 같다.

첫 번째 단계에서는 260mm 사이즈의 라스트를 기준으로 신발 2종의 갑피와 아웃솔 디자인을 개발하고 갑피의 패턴을 도출하였다. 본 연구에서는 3D 프린팅 웰딩을 적용한 스플릿 레더 재활용 갑피 소재 제작뿐 아닌, 밑창 제작에도 3D 프린터를 활용하였다. 연구에 활용된 보급형 FFF 3D 프린팅 장비의 경우, TPU와 같은 유연 소재를 활용하여 입체적인 밑창 구조물을 출력할 때, 출력 모델이 베드에 안정적으로 안착시키기 위해서는 실제 출력 모델보다 범위가 넓은 라프트(raft)층의 출력 설정이 요구될 수 있다. 따라서 한정된 프린팅 베드 사이즈에서 안정적으로 출력이 가능한 밑창의 크기를 고려하여 신발의 착용 사이즈를 260mm로 설정할 수 밖에 없는 한계점이 발생하였다.

신발 갑피 디자인 과정에서는 본 연구의 스플릿 레더 재활용 소재의 신발 제작 공정으로의 적용성과 더불어, 제작된 신발의 실용성을 파악하고자 단화형과 발목 부분이 연장된 장화형, 두 종류로 갑피의 디자인 방향성을 설정하였다. 두 가지 신발 디자인 모두 신발 개구부 뒷부분에 착용 시

손가락을 걸고 당길 수 있는 고리 구조를 적용하여 사용성을 확보하고자 하였다. 단화형의 경우 대중적으로 널리 소비되는 캐주얼 스타일 단화의 형태 및 구조로 디자인되었다(Figure 2). 웰딩 패턴의 경우 갑피 소재 전반에 1.8mm 두께의 웰딩층을 적용하며, 신발 착용 후 보행 시 다른 부위에 비해 상대적으로 큰 압력이 가해지는 앞코와 양 발볼, 뒤꿈치 부분에는 추가적으로 4mm 높이의 방사형과 사선의 스트라이프 패턴을 웰딩층 위에 추가 적용할 것을 계획하였다. 이를 통해 타 부위에 비해 보행 시 압력 부하가 큰 해당 부위의 내구성과 형태 유지력을 향상하고, 장화형의 갑피 웰딩 패턴 디자인과 차별성을 두고자 하였다(Figure 3). 장화형은 농구화와 같이 갑피가 발목 복사뼈까지 연장되는 형태로 기본 구조를 디자인하였다(Figure 4). 장화형 역시 앞선 단화형과 같이 갑피 소재 전반에 1.8mm 두께의 웰딩층을 적용하며, 착용 후 보행 시 부하가 큰 앞코, 양 발볼, 뒤꿈치 부분에 2.4mm 높이의 허니콤 패턴을 웰딩층 위에 추가 적용하였다. 장화형의 경우 단화형에 비해 갑피의 면적이 넓음에 따라 내구성 보완 및 단화형과의 디자인의 차별성을 위해 2mm의 불규칙한 형태의

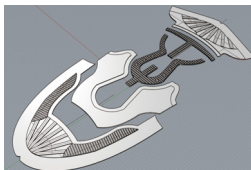


Figure 2. 단화형 패턴 3D 모델.
Made by the author.
(August 20, 2025).

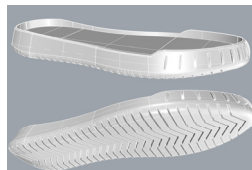


Figure 3. 단화형 밑창 3D 모델.
Made by the author.
(August 20, 2025).

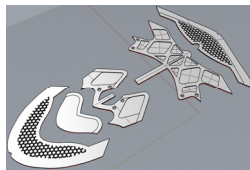


Figure 4. 장화형 패턴 3D 모델..
Made by the author.
(August 20, 2025).

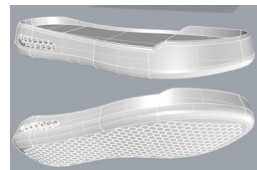


Figure 5. 장화형 밑창 3D 모델.
Made by the author.
(August 20, 2025).

기하학적 패턴을 추가 적용되는 웰딩 패턴의 적용을 계획하였다(Figure 5).

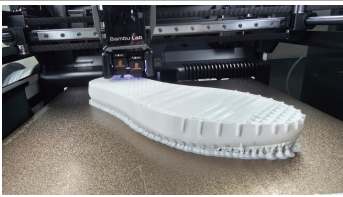
상기와 같은 디자인 계획에 따라, 먼저 우측 라스트에 마스킹 테이프를 부착하여 절개 라인 등을 적용하여 신발 2종의 갑피를 디자인하였고, 디자인 선이 적용된 마스킹 테이프를 떼어내어 평면 상태로 변형하여 스캔한 후, 패턴의 갑피 웰딩 패턴 디자인을 위한 패턴 디지털화에 활용하였다.

두 번째 단계에서는 어도비 일러스트레이터(Adobe Illustrator)를 활용하여 갑피 패턴을 디지털화하였다. 이후 일러스트레이터의 AI 포맷 파일을 라이노 세로스(Rhino ceros)에서 불러들여, 각 패턴의 웰딩 층과 추가적인 웰딩 패턴층을 적용하여 갑피 패턴을 모델링하였다. 모델링 과정에서 갑피 패턴의 디자인 선에 따라 각 패턴을 분할하고, 분할된 패턴에 1.8mm의 기본 웰딩층을 먼저 적용한 후, 앞코와 양 발볼, 뒷꿈치 부위에 추가 웰딩 패턴을 배치하는 순서로 모델링 작업을 진행하였다.

모델링 과정에서 각 신발 갑피의 디자인을 참고한 밑창을 함께 모델링하였다. 단화형의 밑창은 앞코 주변에 수직 스트라이프 양각을 적용하고, 바닥 부분은 갑피에 적용된 방사형과 사선 스트라이프 웰딩 패턴과 디자인적 유사성을 강조함과 동시에 보행 시 지면과의 마찰력을 높이고자 수평선과 사선이 결합된 스트라이프 홈을 적용하였다(Figure 3). 장화형의 밑창은 뒷꿈치 부위에 허니콤 구조의 쿠션 구조물을 적용하였으며, 밑창의 바닥 부분에 허니콤 패턴을 음각하여 마찰력 향상 및 갑피의 웰딩 패턴과 디자인적 유사성을 강조하고자 하였다(Figure 5).

세 번째 단계에서는 설계된 각 갑피 웰딩 패턴과 밑창 프린팅 작업이 수행되었다. 앞서 설정된 1.8mm의 기준 웰딩층과 단화형과 장화형에 차별적으로 적용된 추가적인 2.4mm와 2mm의 웰딩 패턴 층을 피할 업체에서 수거한 0.5-0.7mm의 두께 범위를 가지는 스플릿 레더 시트 표면에 출력하였다(Figure 6). 갑피 패턴 출력 시 사용되는 TPU 소

Table 2. 스플릿 레더 웰딩 갑피 및 밑창 소재 출력 설정값 및 출력 이미지.

3D 프린팅출력 설정	갑피 패턴 출력 설정			밑창 출력 설정		
	노즐구경	0.4mm		노즐구경	0.4mm	
	노즐 온도	230°C		노즐 온도	230°C	
	베드 온도	40°C		베드 온도	35°C	
	프린팅 레이어 높이	0.2mm		프린팅 레이어 높이	0.2mm	
	내부 채움 밀도	100%		내부 채움 밀도	25%	
	첫 레이어 출력 속도	50mm/s		첫 레이어 출력 속도	105mm/s	
	출력 속도	외벽	100mm/s	출력 속도	외벽	200mm/s
		내벽	100mm/s		내벽	300mm/s
3D 프린팅상황	갑피 패턴출력			밑창 모델 출력		
						
	Figure 6. 갑피 패턴 출력. Made by the author. (August 20, 2025).			Figure 7. 밑창 출력. Made by the author. (August 20, 2025).		

Authors organized

재 및 3D 프린터의 출력 세팅 값은 앞선 실험물 제작 단계와 동일하게 적용하였다(Table 2). 밑창은 보행 시 밑창이 발가락의 접힘에 맞춰 접혀야 함에 따라 TPU 소재를 밑창 모델 출력에 활용하였으나, 라프트와 서포터(supporter) 출력에는 딱딱한 물성의 PLA를 사용하여 출력 종료 후 서포터 탈거가 용이하도록 출력하였다(Figure 7). 3D 프린터의 출력 설정의 경우, 보행 시 발의 움직임 반응성을 향상하기 위해 내부 채움을 25%로 설정하되, 밑창의 정형적인 구조 유지력 향상을 위해 외곽선 출력을 5겹으로 설정하였다. 이외의 출력 온도 등의 설정값은 연구에 활용된 프린팅 장비 제조사의 기본 설정값을 사용하였다(Table 2).

마지막 네 번째 단계에서는 3D 프린팅 웰딩 가공 처리된 각 스플릿 레더 재활용 갑피 패턴들의 봉제하여 갑피를 완성하고, 밑창과 결합하여 시제품을 완성하는 작업이 수행되었다(Figure 8). 작업 과정에서는 3D 프린팅 웰딩이 적용된 스플릿 레더 재활용 소재의 범용적 활용성을 파악하기 위해 일반적으로 신발 제작에 널리 활용되는 봉제 장비와 본딩 기법을 활용하였다.

먼저 3D 프린팅 웰딩이 적용된 갑피 패턴을 트리밍한 이후, 평면적인 상태의 패턴은 일반적인 의류 봉제 작업에 활용되는 플랫 베드(flat bed) 봉제 장비를 활용하여 봉제하였고, 봉제 과정에서 갑피의 입체화가 진행된 이후에는 포스트(post) 장비를 활용하여 봉제를 마무리하였다. 제작된 갑피는 목재 라스트에 못으로 고정하여 입체적인 형태를 잡은 후, 밑창에 고정되어야 하는 하단 시점 부

분에 칼집을 내어 겹치는 부분을 제거하여 평탄화하였다. 갑피 표면과 밑창이 TPU 소재로 구성됨에 따라, 신발 제작 시 갑피와 밑창 접착에 일반적으로 활용되는 스타 본드나 936 본드가 표면에 균일하게 도포되지 않을 수 있는 우려가 있다. 따라서 갑피와 밑창이 접착되어야 하는 각 부위에는 폴리우레탄 접착 촉진제(TR-10)를 도포하여 TPU의 표면을 용해한 이후, 936 본드를 도포하고 갑피와 밑창을 견고히 접착하여 신발 시제품 2종을 완성하였다(Table 3). 각 신발 시제품별 세부 개요는 <Figure 9>와 <Figure 10>과 같다.

제작 과정에서 일부 장비 상의 특이점 및 TPU 소재를 접착 처리하기 위한 필요사항과 3D 프린팅 웰딩이 적용된 소재를 활용한 신발 제작 시의 부수적인 이점을 발견할 수 있었다. 첫째, 봉제 장비의 경우, TPU 웰딩 코팅이 적용된 소재는 평면적인 상태에서는 플랫 베드 봉제 장비의 활용이 가능하였다. 그러나 앞코와 뒤꿈치의 경우 상대적으로 두꺼운 코팅층이 적용되었음에 따라, 입체적인 구조 형성을 위해서는 일반적인 신발 제작용 천 연가죽과 같이 특수 봉제 장비인 실린더암(cylinder arm) 장비나 포스트(post) 장비의 활용이 요구됨을 확인하였다. 둘째, 신발 제작 시 갑피 뒤꿈치 부위의 형태 유지력 향상을 위해 내부에 접착되는 월형의 경우, TPU 웰딩 가공을 통해 소재의 형태 유지력이 일반 천연가죽에 비해 향상됨에 따라 부수적으로 월형을 부착하지 않더라도 신발을 신고 벗을 때 발생하는 뒤꿈치의 압력, 무게 부하에도 갑피의 형태가 무너지지 않고 원활히 신고 벗는 동

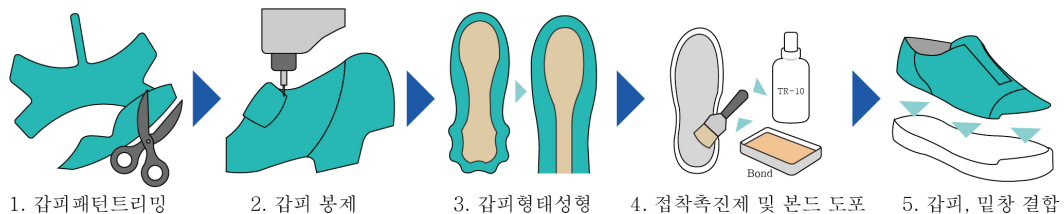


Figure 8. 3D 프린팅 웰딩 적용 재활용 소재를 활용한 신발 제작 과정.

Made by the author. (September 15, 2025).

Table 3. 신발 시제품 2종 완성 개요.



Figure 9. 단화형 갑피 웰딩 패턴 적용 및 밑창 패턴 적용 개요.
Made by the author. (October 5, 2025).



Figure 10. 장화형 갑피 웰딩 패턴 적용 및 밑창 패턴 적용 개요.
Made by the author. (October 5, 2025).

Authors organized

작이 가능함을 확인하였다. 이를 통해 3D 프린팅을 활용한 웰딩이 적용된 갑피 소재는 해당 부자재의 적용이 요구되지 않는 이점이 있음 또한 발견하였다. 셋째, TPU 웰딩 소재와 TPU로 출력된 아웃솔의 접착의 경우, 3D 프린팅용 TPU 소재가 고온 압출을 위해 소재의 구성비가 일반 웰딩 코팅용 TPU와 차이가 있어 별다른 조치 없이는 신발 제작용의 고접착성 본드로도 충분한 접착 효과가 나타나지 않음을 확인하였다. 이에 따라 TPU의

표면을 용해하여 접착을 촉진하는 접착 촉진제를 먼저 도포한 이후 접착제로 갑피와 아웃솔을 결합하였으며, 접착 성능은 일반적인 신발의 경우와 크게 상이하지 않음을 확인하였다.

제작 결과, 본 연구의 3D 프린팅 웰딩이 적용된 스플릿 레더 재활용 소재는 TPU 소재 간의 접착을 위한 부수적인 접착 촉진제의 도포 과정이 요구되는 한계성이 있었으나, 트리밍, 봉제, 라스팅, 본딩, 밑창 결합으로 구성되는 일반적인 신발 제작 공정에

적용될 수 있는 가능성이 있음을 확인할 수 있었다.

3. 3D 프린팅 웰딩 적용 재활용 스플릿 레더 소재 활용 신발 사용성 평가

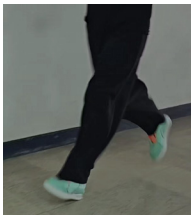
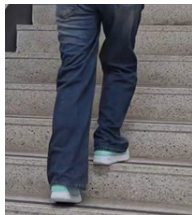
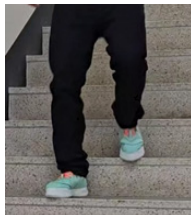
260mm 사이즈 신발을 착용 가능한 성인 남녀 15인을 대상으로, 개발된 신발 2종의 착용성과 활동성으로 구성되는 사용성 평가를 수행하였다. 본 연구의 인간 대상 평가실험은 연구자 소속 대학 기관생명윤리위원회의 심사 및 승인하에 이루어졌으며, 자발적으로 평가실험에 참여 동의한 인원만을 대상으로 하였다(IRB 승인 번호: SMU-2026-02-001). 평가 참여자는 260mm 사이즈 신발 착용이 가능한 20대 성인 남성 4인과 여성 11인으로 한정되었으며, 연령대는 20대 12인 30대 3인으로 구성되었다. 남성 4인의 일상생활 시 착용 신발 사이즈는 260mm이며, 여성 11인의 경우 3인은 255mm-260mm, 5인은 250-255mm, 3인은 250mm로 조사되었다. 이에 따라 평가자의 연령과 성별이 20대와 여성으로 편중된 점, 8인의 평가자의 일상생활 시 착용하는 신발 사이즈가 260mm 보다 작은 신발을 착용한다는 점에서 평가 결과의 일반화가 어려운 한계성이 있

음을 밝힌다.

사용성 평가는 동일한 실내 환경에서 수행되었다. 평가 동작은 Han et al.(2008)과 Song et al.(2009)의 선행 연구를 참고하여 정적인 착용성 및 보행, 달리기, 계단 이동 등 실제 사용 동작에서의 압박감, 안정성 등을 평가하기 위해 서기, 좁은 보폭 자세, 넓은 보폭 자세, 바닥에 쪼그려 앉기, 무릎 앉기와 같은 자세 동작과, 평지에서의 걷기와 뛰기, 계단 오르내리기와 같은 연속 동작으로 설정하였다(Figure 11-18). 각 동작별 평가 문항은 <Table 4>에 표기된 바와 같다. 각 평가자는 연구 목적, 신발 소재, 평가 동작에 관한 설명을 들은 후 단화형과 장화형 신발을 순차적으로 착용하였다. 각 신발에 대해 작은 보폭 자세, 넓은 보폭 자세, 쪼그려 앉기, 무릎 앉기, 평지 걷기, 가볍게 뛰기, 계단 오르기, 계단 내려가기 동작을 각각 3회 반복 수행한 후, (1) 매우 불편함, (2) 불편함, (3) 보통, (4) 편함, (5) 매우 편함으로 설정된 5점 리커트 척도(Likert scale) 설문과 개방형 인터뷰에 응답하였다(Table 4). 이를 통해 점수만으로 파악하기 어려운 불편 부위에 관한 구체적 피드백을 수집하고자 하

Table 4. 3D 프린팅 웰딩 신발 평가 문항 및 수행 동작.

구분	질문 문항			
자세 동작	1) 신발을 신고 걷는 동작(작은 보폭)을 취할 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	2) 신발을 신고 걷는 동작(넓은 보폭)을 취할 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	3) 신발을 신고 바닥에 쪼그려 앉는 동작을 취할 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	4) 신발을 신고 바닥에 무릎 앉아 동작을 취할 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	각 동작 수행 촬영 사진			
				
	Figure 11. 작은 보폭 보행. Made by the author. (May 29, 2026).	Figure 12. 넓은 보폭 보행. Made by the author. (May 29, 2026).	Figure 13. 쪼그려 앉기. Made by the author. (May 29, 2026).	Figure 14. 무릎 앉기. Made by the author. (May 29, 2026).

구분	질문 문항			
연속 동작	5) 신발을 신고 평지를 일반적인 속도로 보행할 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	6) 신발을 신고 평지를 가볍게 뛰는 활동을 수행할 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	7) 신발을 신고 계단을 일반적인 속도로 걸어 올라갈 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	8) 신발을 신고 계단을 일반적인 속도로 걸어 내려갈 시 불편함을 느끼는가? 불편함을 느끼는 부위가 있다면 어디인가?			
	각 동작 수행 촬영 사진			
	 Figure 15. 걷기. Made by the author. (May 29, 2026).	 Figure 16. 뛰기. Made by the author. (May 29, 2026).	 Figure 17. 계단 오르기. Made by the author. (May 29, 2026).	 Figure 18. 계단 내려가기. Made by the author. (May 29, 2026).

Authors organized

였다. 본 연구의 사용성 평가는 단화형을 먼저 착용하고 이후 장화형을 착용하는 고정된 순서로 진행되었음에 따라, 착용 순서에 따른 학습 효과나 비교 효과를 완전히 배제하기 어려우며, 260mm 단일 사이즈를 기준으로 제작된 시제품을 대상으로 하였기 때문에 다양한 발 치수, 발볼, 성별 및 연령 특성을 충분히 반영하지 못한 한계점이 있음을 밝힌다.

실험 수행 결과 수집된 5점 리커트 척도의 설문 평가 결과 및 각 평가자가 인터뷰 시 개진한 피드백을 종합하면 다음의 <Table 5>와 같다.

먼저 단화형의 평가 결과를 요약하면, 설문 평가 결과의 전체 평균은 3.81점으로 나타났다. 이는 5점 리커트 척도에서 ‘보통’과 ‘편함’ 사이에 위치하는 결과로, 평가자들이 해당 신발을 착용 후 활동하였을 때 전반적으로 심각한 불편감을 느끼지 않은 것으로 해석된다. 평가 결과를 구체적으로 보면 바닥에 쪼그려 앉기와 무릎 앉기 자세 동작이 걷기, 뛰기, 계단 오르기, 계단 내려가기 등 연속 동작에 비해 긍정적으로 평가되었다(Table 5). 이는 해당 신발이 동적 자세에 비해 정적 자세에

서 보다 안정감을 주는 것으로 해석할 수도 있으나, 개방형 인터뷰에서 평가자들이 지적한 바에 따르면 신발 혀 부분의 물성이 동적 활동 시 발등 부위의 착용감에 부정적인 영향을 미친 것으로 파악된다. 평가자 15인 중 3인이 연속 동작 수행 시 신발 혀 부분의 딱딱함 또는 이질감을 지적하였다. 따라서 신발의 혀 부분의 경우, TPU 웰등층의 두께를 현재의 1.8mm 보다 얇게, 혹은 내부채움 밀도를 낮추거나, 별도의 쿠션 구조를 적용하는 등의 향후 개선이 필요한 것으로 나타났다.

장화형의 설문 평가 결과 전체 평균은 3.96점으로 나타나 단화형에 비해 다소 높게 평가되어, 착용하기에 심각한 불편감은 없는 것으로 판단된다. 전반적인 평가 결과의 양상은 정적인 자세의 점수가 상대적으로 높고 연속 동작이 상대적으로 낮은, 단화형과 유사한 결과를 보였으나, 연속 동작에서 걷기에 비해 뛰기의 평가 수치가 높은 특이점을 보였다. 이는 농구화와 같이 발목을 감싸서 조이는 장화형의 구조로 인해 강도 높은 동작 수행 시 구조적인 안정성을 제공하나, 강도가 낮은 일상적 동작 수행 시에는 발목에 압박감을 느끼게 하는

Table 5. 신발 2종 사용성 평가 결과.

	실험물	동작유형	설문 문항별 평가 항목	응답 점수 평균
5점 리커트 척도 설문	단화형	자세 동작	1) 작은 보폭 보행 시 착용감	3.73
			2) 넓은 보폭 보행 시 착용감	3.73
			3) 바닥에 쭈그러 앉는 동작 시 착용감	4.07
			4) 바닥에 무릎 앉는 동작 시 착용감	4.00
		연속 동작	5) 평지 일반 보행 시 착용감	3.73
			6) 평지 가벼운 뛰기 동작 시 착용감	3.80
			7) 계단 오르기 동작 시 착용감	3.67
			8) 계단 내려가기 동작 시 착용감	3.73
	장화형	자세 동작	1) 작은 보폭 보행 시 착용감	3.87
			2) 넓은 보폭 보행 시 착용감	3.93
			3) 바닥에 쭈그러 앉는 동작 시 착용감	4.20
			4) 바닥에 무릎 앉는 동작 시 착용감	4.27
		연속 동작	5) 평지 일반 보행 시 착용감	3.73
			6) 평지 가벼운 뛰기 동작 시 착용감	3.93
			7) 계단 오르기 동작 시 착용감	3.87
			8) 계단 내려가기 동작 시 착용감	3.87
개방형 피드백	평가자	평가자별 피드백		
	실험자 1	단화형은 신발 혀 부분이 느껴짐, 장화형은 움직임에 문제 없지만 발목 부분이 의식됨		
	실험자 2	단화형 혀 부분이 약간 딱딱한 것 같지만 일상용 신발로 충분히 사용 가능		
	실험자 5	단화형 계단 걸어올라갈 때 혀부분이 느껴짐		
	실험자 6	장화형 발목뒷부분(발목 상부 뒷 부분)이 약간 딱딱하게 느껴짐		
	실험자 7	단화형은 일상용으로 사용 가능, 장화형은 발목부분이 약간 의식됨		
	실험자 8	단화형은 혀 부분의 유연성이 부족함, 장화형은 발목 부분을 꼭 조이면 조금 딱딱하게 느껴짐		
	실험자 9	장화형 발목 부분이 조금 딱딱하게 느껴짐		
	실험자 10	장화형 발목 부분이 걸을 때 약간 의식됨		
	실험자 12	장화형 발목 부분이 약간 딱딱하게 느껴짐		

Authors organized

것으로 해석된다. 개방형 인터뷰에서 15인 중 5인이 장화형의 발목 부분이 의식되거나 딱딱하게 느껴진다고 응답하여, 단화형의 혀 부분과 같이 장화형의 발목 부위 또한 TPU 웰딩층의 두께나 내부채움 비율 조절, 추가 쿠션 구조의 적용 등의 향후 개선이 필요한 것으로 나타났다.

사용성 평가 결과, 3D 프린팅 웰딩을 적용하여 재활용한 스피릿 레더 소재로 제작된 신발 2종이 전반적으로 착용 가능한 수준의 사용성을 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나 동시에 신발 혀와 발목

부위의 웰딩층 두께 및 패턴 배치가 착용감 저하 요인으로 작용하여 향후 개선이 필요함을 확인하였다. 마지막으로 본 연구의 착용성 평가 실험에서는 제작된 스피릿 레더 재활용 소재를 활용한 신발 시제품 2종 외에 상용 제품 신발을 대조 대상으로 함께 실험하지 않았음에 따라, 설문 평가 점수를 일반 상용 제품 신발과 비교하여 일반화하기에는 한계성이 있음을 밝힌다.

IV. 결 론

본 연구에서는 가죽 가공 부산물인 스플릿 레더의 강성을 향상하여 신발 갑피 소재로 재활용하기 위한 방법으로, 보급형 FFF 방식 3D 프린터를 활용한 TPU 웰딩 가공을 적용하였다. 이를 통해 생산단계에서 발생하는 가죽 부산물의 활용 가능성을 높이고, 신발 제작에서 지속 가능한 소재 재활용과 표면 가공 기법의 확장 가능성을 탐색하고자 하였다.

상기의 목표에 따라, 먼저 스플릿 레더 표면에 TPU를 직접 적층하여 웰딩층을 형성하고, 1.0mm에서 2.0mm까지 0.2mm 간격으로 두께를 달리한 총 6종의 실험물을 제작하고, 비가공 스플릿 레더, 천연가죽, 3D TPU 웰딩 가공 실험물 간의 인장강도 대조 실험을 수행하여, 일정 두께 이상의 TPU 웰딩층이 스플릿 레더의 낮은 강도를 보완할 수 있으며, 신발 갑피와 같이 내구성과 형태 유지력이 요구되는 제품 제작에 적용 가능한 물성을 확보할 수 있음을 파악하였다. 이후 앞선 실험 결과 운동화 제조에 활용되는 1.7mm 두께의 천연가죽에 비해 높은 강도를 보인 1.8mm를 기준 웰딩 두께로 설정하고, 제작된 3D 프린팅 웰딩이 적용된 스플릿 레더 소재가 일반적 신발 제작 공정에 활용 가능한지 파악하기 위해 단화형과 장화형의 신발 2종을 디자인, 제작하였다. 제작은 일반적인 신발 제작 공정에 따라 라스트를 활용하여 갑피의 디자인과 패턴을 도출한 이후, 봉제 장비와 본딩 기법을 활용하여 신발을 제작하였다. 마지막으로 재활용 소재를 활용한 신발의 사용성을 파악하기 위해 성인 15인을 대상으로 5점 리커트 척도의 설문과 개방형 인터뷰를 활용하여 사용성 평가를 수행하였다. 해당 실험은 260mm 사이즈의 신발이 착용 가능한 인원만을 대상으로 수행되었고, 일반 상용 제품을 비교군으로 설정한 대조실험이 수행되지 않아 실험 결과의 일반화에 한계성이 있다.

그럼에도 불구하고, 단화형 3.81점, 장화형 3.96점의 전체 평균이 도출되어, 신발 2종이 대체로 수용 가능한 수준의 사용성이 있음을 확인할 수 있었으며, 향후 개선이 필요한 사항을 파악할 수 있었다.

연구 수행 과정에서 도출된 주요 발견점은 다음과 같다.

첫째, FFF 3D 프린팅의 적층 매커니즘을 응용한 TPU 웰딩은 상대적으로 접근이 용이한 저가의 기술, 장비를 활용하더라도 강도가 낮은 스플릿 레더의 물성을 보완하는 데 효과적임을 확인하였다. 기초가 되는 가죽 소재에 따른 수치 차이는 발생할 수 있으나, 1.6mm 이상의 TPU 웰딩층이 적용될 경우 운동화 제작에 사용되는 1.7mm 두께의 천연가죽에 준하는 인장강도가 확보될 수 있으며, 1.8mm 두께부터는 이를 상회하는 강도 확보가 가능할 수 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 3D 프린팅 웰딩이 적용된 스플릿 레더 재활용 소재는 봉제, 라스팅, 본딩, 밀착 결합 등 일반적인 신발 제작 공정에 적용이 가능함을 확인하였다. 단, 3D 프린팅을 위한 TPU 소재의 경우, 일반적인 폴리우레탄 소재에 비해 접착제만 도포하였을 시 충분한 접착 효과가 발생하지 않으므로, TPU의 표면을 일부 용해하여 접착을 촉진하는 폴리우레탄접착 촉진제의 사전 도포가 요구됨을 파악하였다.

셋째, 소재의 강도가 취약한 스플릿 레더라도 1.8mm 이상의 TPU 웰딩층이 적용될 경우 높은 형태 유지력이 발생되어, 신발의 형태 유지를 위해 갑피 뒷꿈치 내부에 부착되는 월형과 같은 부자재의 적용 필요성이 감소됨을 확인하였다. 이는 향후 신발 갑피의 부위별로 최적화된 TPU 웰딩 적용을 통해 신발 제작 시 형태 유지를 위해 요구되는 부자재 필요성을 감소하여 궁극적으로 신발 제작 공정의 단축, 간소화가 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

넷째, 스플릿 레더를 재활용하기 위해 3D 프린

팅 웰딩을 신발 갑피에 적용할 경우, 신발의 착용 이후 활동 시 신발에 가해지는 역학적 부하를 고려하여 신발 갑피의 각 부위별로 웰딩층의 두께를 달리 적용할 필요성이 있음을 발견하였다. 본 연구의 신발 2종의 사용성 평가 시 수집된 인터뷰 결과와 같이, 신발의 형태유지와 크게 관련이 없지만 착용시 착용감에 밀접한 연관을 가지는 3D 프린팅 웰딩나 발목 부위와 같은 부위의 경우 유연성 확보에 보다 초점을 둔 웰딩층의 두께를 설정하고, 웰딩 패턴이 적용될 경우 패턴의 밀도를 조절하는 고려가 필요하다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 실험에 사용된 스플릿 레더는 가죽 피할 공정에서 발생한 부산물임에 따라, 같은 스플릿 레더 시트라 할지라도 각 부위별 두께와 기초 물성이 균일하지 않아, 스플릿 레더 재활용 소재의 실험물이 동일 두께 조건으로 제작될 수 없었다. 둘째, 본 연구는 특정 제조사의 보급형 3D 프린터와 특정 TPU 필라멘트를 활용하여 수행되었으므로, 장비와 소재 조건에 따른 결과를 일반화하기에 무리가 있다. 셋째, 신발 시제품이 260mm 사이즈로 제작되어 해당 사이즈를 착용 가능한 20-30대 성인 여성 11인과 남성 4인의 한정된 인원을 대상으로 착용성 평가가 수행되었다. 실험 인원의 연령대와 성별이 20대 여성이 다수를 차지함으로 인해, 다양한 발치수와 착용자 특성을 충분히 반영되지 못함에 따라, 결과의 일반화에 무리가 있다. 넷째, 본 연구의 사용성 평가가 제작된 신발 2종의 착용성과 활동성 파악을 위한 내용으로 구성되어, 신발의 내마모성, 내구성 파악을 위한 장기 착용 실험이 포함되지 못한 한계성이 있다.

상기와 같은 한계점이 있으나, 본 연구는 가죽 가공 부산물인 스플릿 레더를 단순 폐기 또는 저부가가치 활용에 머물게 하지 않고, 3D 프린팅 기반 TPU 웰딩 가공을 통해 신발 갑피 소재로 재생하기 위한 소재 표면 보강, 패턴 형성, 디자인 차

별화, 제작 공정 적용 가능성을 탐색하고 제시함으로써, 향후 패션 등 디자인 분야에서 손쉽게 활용할 수 있는 디지털 제작 기술을 활용한 지속 가능한 패션 소재 개발 사례를 제시한다는 점에 의의가 있다. 이를 통해 향후 보급형 3D 프린팅 기술을 활용하여 스플릿 레더뿐만 아니라 다양한 가죽 및 섬유 부산물의 물성 보강과 제품화를 다루는 후속 연구를 위한 기초 자료로서 기여할 수 있기를 기대한다.

References

- Bianchi, I., Forcellese, A., Simoncini, M., & Vita, A. (2023). Mechanical characterization and sustainability assessment of recycled EVA for footwears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126, 3149-3160. doi:10.1007/s00170-023-11332-1
- Bitlisli, B., Adigüzel Zengin, A., Yeldiyar, G., Kairanbekov, G., & Küçükakın, E. (2013). Upper leathers in shoe manufacturing. *Journal of Industrial Technology and Engineering*, 2(7), 37-41.
- Ghimouz, C., Kenné, J. P., & Hof, L. A. (2023). On sustainable design and manufacturing for the footwear industry: Towards circular manufacturing. *Materials & Design*, 233, 112224. doi:10.1016/j.matdes.2023.112224
- Han, J. T., Kim, K., & Lim, S. G. (2008). Comparison of plantar foot pressure and shift of COP among level walking, stairs and slope climbing. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 18(4), 59-65. doi:10.5103/KJSB.2008.18.4.059
- Hossain, M. D., Azam, F. A. B., & Chowdhury, M. (2021). Quality assessment of shoe leather based on the properties of strength and comfort, collected from different footwear and leather industries in Bangladesh. *Textile & Leather Review*, 4(1), 30-37. doi:10.31881/TLR.2020.20
- Hussen, M. S., Kyosev, Y. K., Pietsch, K., Rothe, S., & Kabish, A. K. (2022). Effect of ultrasonic welding process parameters on seam strength of PVC-coated hybrid textiles for weather protection. *Journal of Industrial Textiles*, 52(1), 1-27. doi:10.1177/15280837211057579
- Hussain, R., & Nazeer, M. A. (2025). Fabric-based patchwork on shoes through ultrasonic welding. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 20. doi:10.1177/15589250251314469
- Jevšnik, S., Eryürük, S. H., Kalaoglu, F., Karagüzel Kayaoğlu, B., Komarkova, P., Golombikova, V., & Stjepanović, Z. (2017). Seam properties of ultrasonic welded multilayered textile materials. *Journal of Industrial Textiles*, 46(5),

- 1193-1211. doi:10.1177/1528083715613632
- Jia, F., Yin, S., Chen, L., & Chen, X. (2020). The circular economy in the textile and apparel industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120728. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120728
- Kang, K. Y. (2020). A study on textile design research using leather material: Focusing on iron dyeing of vegetable leather. *Journal of Basic Design & Art*, 21(1), 1-13. doi:10.47294/KSBDA.21.1.1
- Kim, H. R. (2021). *Study on properties of SBR composites with leather waste*. Unpublished master's thesis, Pukyong University, Busan.
- Kuo, C.-F. J., Chen, J.-B., Lin, P.-H., & Yen, H.-T. (2019a). Hot-melt pressure-sensitive adhesive for seamless bonding of nylon fabric part I: Effect of a functional monomer. *Textile Research Journal*, 89(6), 926-935. doi:10.1177/0040517518763993
- Kuo, C.-F. J., Lan, W.-L., Wang, J.-W., Chen, J.-B., & Lin, P.-H. (2019b). Hot-melt pressure-sensitive adhesive for seamless bonding of nylon fabric part II: Process parameter optimization for seamless bonding of nylon fabric. *Textile Research Journal*, 89(12). doi:10.1177/0040517518790970
- Leal Filho, W., Ellams, D., Han, S., Tyler, D., Boiten, V. J., Paço, A., Moora, H., & Balogun, A. L. (2019). A review of the socio-economic advantages of textile recycling. *Journal of Cleaner Production*, 218, 10-20. doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.210
- Na, Y. J., & Lee, H. K. (2013). An exploration according to clothing category for increasing the sustainability of fashion and textiles. *Fashion & Textile Research Journal*, 15(2), 294-301. doi:10.5805/SFTI.2013.15.2.294
- Naderizadeh, S., Faggionato, A., Nazir, M. U., Mascolo, R., Hassan, M. M., Bilotti, E., & Busfield, J. J. C. (2025). The thermal and mechanical performance of leather waste-filled bio-based thermoplastic polyurethane composites. *Polymers*, 17(9), 1202. doi:10.3390/polym17091202
- Park, J. H., & Kim, H. J. (2016). Development of upcycled fashion design using leather waste. *Journal of Basic Design & Art*, 17(3), 189-206.
- Parisi, M. L., Nanni, A., & Colonna, M. (2021). Recycling of chrome-tanned leather and its utilization as polymeric materials and in polymer-based composites: A review. *Polymers*, 13(3), 429. doi:10.3390/polym13030429
- Sang, J. S., & Park, M. J. (2021). Localization development of environmentally-friendly high-functional outsole material using leather scrap. *Journal of the Korean Fashion & Costume Design Association*, 23(2), 165-176. doi:10.30751/kfcd.2021.23.2.165
- Song, C. H., Lee, J. D., Kwon, Y. J., Lee, J. H., Park, J. H., Song, H. N., & Kim, K. (2009). The study of footwear preferences and the wearing conditions in the older women. *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*, 4(2), 63-71.
- Syn, H. Y., & Geum, K. S. (2014). Study on practical evaluation for sustainability in textile and fashion companies. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 38(2), 137-146. doi:10.5850/JKSCT.2014.38.2.137
- Thomasset, N., & Perwuelz, A. (2024). Review: leather sustainability, an industrial ecology in process. *Journal of Industrial Ecology*, 28, 1842-1856. doi:10.1111/jiec.13547
- Nike. (n.d.). What is Nike Grind?. *Nike*. Retrieved June 6, 2026, from <https://www.nike.com/help/a/nike-grind>
- Yi, K. O. (2011). The effects of shoe type on ground reaction force. *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 21(1), 9-16.
- Yoon, S. H., & Lee, H. G. (2018). A study on the sustainable environment-friendly leather-materials. *Journal of the Korean Society of Design Culture*, 24(4), 251-262. doi:10.18208/ksdc.2018.24.4.251

Developing Casual Shoes Using Recycled Split Leather

- Focused on Material Reinforcement with 3D Printing Welding Technique -

Younghwan Kim · Hyunseung Lee⁺

Assistant Professor, Dept. of Fashion Design, Semyung University
Assistant Professor, Dept. of Fashion Industry, Incheon National University⁺

Abstract

As the interest in the sustainability grows, fashion industries are increasingly required to improve material-use efficiency and recycle by-products generated during production. Natural leather is widely used in footwear, bags, and apparel products. However, split leather generated during the splitting process for thickness control is often treated as waste due to its low durability. This study aimed to reinforce split leather for reuse as footwear upper material by applying TPU welding using an accessible low-cost FFF (fused filament fabrication) 3D printer and to evaluate its manufacturability and usability. Six experimental samples were fabricated by depositing TPU layers from 1.0 to 2.0 mm at 0.2 mm intervals on split leather, followed by tensile testing against untreated split leather and natural leather. The results showed that the 3D welding samples with a 1.8 mm TPU layer achieved a mean tensile strength of 1259.63 N, exceeding that of natural leather. Based on this outcome, 1.8 mm was selected as the standard welding thickness, and two footwear designs (low-cut and boot types) were developed. The manufacturing process involved last-based upper pattern development, pattern digitization, 3D modeling of the welding layer and patterns, upper printing, stitching, lasting, bonding, and outsole assembly. Although an adhesion promoter was also required to improve TPU-to-TPU bonding, the welded split leather was compatible with conventional footwear production. Wearability and mobility evaluations conducted with 15 adults yielded overall mean scores of 3.81 (low-cut) and 3.96 (boots), indicating a modest level of positive usability. This study demonstrates the potential of converting split leather by-products into functional footwear upper materials via 3D printing-based TPU welding and provides foundational data for sustainable material development and digitally enabled footwear manufacturing.

Key words : 3D printing, 3D welding, shoe making process, recycling

