

3D Virtual Sampling은 지속가능한가? - LCA를 고려한 패션디자인의 DPP 연계 가능성 연구 -

백경의¹ · 김세진^{2†}

¹한양대학교 의류학과 휴먼테크융합전공 박사과정 수료

²한양대학교 의류학과 휴먼테크융합전공 부교수

How Sustainable is 3D Virtual Sampling? - Exploring the Possibility of DPP application within Fashion Design LCA -

Kyeongui Baek¹ and Se Jin Kim^{2†}

¹ph.D. Candidate, Human-Tech convergence program Dept. of Clothing & Textiles, Hanyang University

²Associate professor, Human-Tech convergence program Dept. of Clothing & Textiles, Hanyang University

Abstract: The environmental toll of the fashion industry is significantly exacerbated by resource-intensive design and sampling phases, in which repetitive physical prototyping is standard. Although 3D virtual sampling has emerged as a promising alternative, its ecological benefits have not been rigorously and quantitatively validated. This challenge is compounded by the forthcoming EU Digital Product Passport (DPP), which mandates lifecycle transparency, but lacks a clear framework for integrating design-stage data. This study aims to address this gap by empirically assessing the environmental impact reduction achieved through virtual sampling and developing a practical framework for its integration with DPP requirements. A comparative case study was conducted on a t-shirt, analyzing three scenarios: traditional (physical-only), hybrid, and fully digital. The CLO 3D platform was utilized for virtual prototyping, and an Abridged Life Cycle Assessment (LCA) was employed to evaluate key metrics, including carbon emissions, resource waste, and energy consumption. The findings reveal that a fully digital workflow curtails the aggregate environmental load by approximately 95% compared with conventional methods, providing strong empirical support for its adoption. The analysis also revealed that the data native to CLO 3D were insufficient for comprehensive DPP compliance. Consequently, this study proposes an enhanced “Core 19 Fields” data structure and a set of technical recommendations to create a seamless data pipeline. This work makes a vital contribution by quantifying the impacts at the often-overlooked prototype stage and by providing the industry with an actionable roadmap for aligning technological innovation with sustainability goals and regulatory demands.

Key words: digital product passport(디지털 제품 여권), life-cycle assessment(전 과정 평가), 3d virtual sampling(3D 버추얼 샘플링), clo 3d(클로 3D), sustainable fashion(지속가능한 패션)

1. 서 론

United Nations Environment Programme([UNEP], 2023)에 따르면 패션산업은 매년 930억m³ 이상의 담수를 소비하는 탄소·물·자원 집약적 산업이며, 전 세계 온실가스의 약 10%를 배출하는 탄소·물·자원 집약적 산업으로 평가된다. 특히 패턴 설계부터 최종 샘플 승인에 이르는 ‘디자인-시제품(샘플링)’ 단계는 물리적 샘플을 반복 제작·폐기하는 과정이 소재 낭비와 탄

소 및 에너지 배출을 유발하는 핵심 구간으로 지적되었다(Niinimäki et al., 2020; Sandin & Peters, 2018), 이에 대응하여 글로벌 브랜드들은 CLO 3D와 같은 버추얼 샘플링이 가능한 디지털 프로그램을 도입해 실제 샘플 수를 평균 50% 이상 줄였으며, 원단 폐기물과 탄소 배출을 각각 15-30%, 디자인 작업시간을 30% 절감할 수 있다고 주장하고 있다(Khomariah et al., 2025; Mcdowell, 2019). 그러나 이 수치는 사내 리포트나 비학술 자료에 근거한 추정치로, 학술적 검증이 부족하며, 기존 ‘전 과정 평가(Life-Cycle Assessment, LCA)’ 관련 연구는 원료 채취부터 폐기까지의 총체적 분석에 집중해 가장 환경 부하가 많은 디자인-시제품 단계의 세부 데이터를 충분히 다루지 못했다(Muthu, 2019).

이와 동시에 유럽연합(EU)은 이러한 환경위기에 대응하여 2027년부터 섬유·배터리 등 우선 제품군을 시작으로 디지털 제품 여권(Digital Product Passport, DPP) 순차적으로 도입해 2030년까

†Corresponding author: Se Jin Kim

Tel. +82-2-2220-1195

E-mail: sejinkim@hanyang.ac.kr

©2025 The Korean Fashion and Textile Research Journal(KFTRJ). This is an open access journal. Articles are distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지 전면 확대할 계획이라고 발표하였다(Council of the European Union, 2024). DPP는 QR 코드나 NFC를 통해 연결되는 디지털 문서로, 섬유 구성, 탄소·물 발자국, 수리 가능성 등 제품 생애주기 정보를 소비자와 규제기관에 투명하게 제공하도록 요구하며(European Parliamentary Research Service[EPRS], 2024), 순환 경제로의 전환을 촉진하고 산업의 지속가능성을 향상시키는 핵심 도구로 간주된다(Vičentijević & Simeunović, 2024). 그러나 디자인 단계에서 생성되는 디지털 데이터를 어떤 형식으로 수집 및 전달해야 하는지에 대한 구체적 지침이 부재해, 기업들은 규제 대응에 혼란을 겪고 있으며(Lopes & Barata, 2024), 특히 데이터 표준화, 상호운용성, 공급망 전반의 정보 수집 등은 패션산업에 DPP 도입의 주요 과제로 남아있다(Domskienė & Gaidule, 2024). 따라서 디지털 프로그램을 활용한 버추얼 샘플링의 환경영향을 파악하고, 생성된 디지털 데이터를 DPP 요구사항과 연계할 수 있는 방안을 제안하는 연구가 필요하다.

이에 본 연구는 버추얼 샘플링이 패션디자인-시제품 단계의 환경영향을 정량적으로 저감할 수 있는지 검증하고, 이 과정에서 생성된 디지털 데이터를 EU의 DPP 규제 요구사항과 연계할 수 있는 실무적 데이터 적용 방안을 제안하는 것을 목적으로 한다. 본 연구의 결과는 기존 LCA 연구에서 간과되었던 디자인-시제품 단계의 세부 데이터를 포함한 정량적 증거를 제시하는 초기 연구로서 버추얼 샘플링의 환경적 효과를 학문적으로 검증하고, 향후 패션산업에서 요구될 것으로 예상되는 DPP 적용을 위한 시스템 구축에 기초적 자료를 제시하는 데 실무적 시사점을 제시할 것으로 기대된다.

2. 문헌 연구

2.1. 전 과정 평가(LCA)

2.1.1. LCA의 개념

LCA는 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)가 ‘제품 시스템의 전 과정에서 발생하는 자원 투입과 산출의 잠재적 환경영향을 종합적으로 평가하는 절차’로 규정한 방법론이다(International Organization for Standardization[ISO], 2006a). Guinee et al. (2011) 역시 LCA를 제품과 서비스의 환경성 성과를 전 생애주기 차원에서 정량적으로 평가하는 방법론으로 정의하며, 단일 공정이나 단일 지표에 국한되지 않는 총체적 평가의 필요성을 강조하였다. ISO는 LCA 수행을 위한 표준 프레임워크를 제시하고 있는데, 크게 네 단계로 수행되며 그 내용은 다음과 같다. 첫째, 목표 및 범위 설정이다. 이는 목적, 대상 시스템, 기능 단위, 시스템 경계, 가정 및 제한 사항을 명확히 정의하는 단계이다. 예를 들어, 티셔츠 한 벌의 환경 영향을 평가할 때, 기능 단위를 ‘티셔츠 한 벌을 1년간 착용’으로 설정하고, 시스템 경계를 ‘요람에서 무덤까지(cradle-to-grave)’ 또는 ‘요람에서 관문까지(cradle-to-gate)’로 설정할 수 있다. 둘째, 전 과정 목록 분석(Life Cycle Inventory, LCI)이다. 이는 설정된 시스템 경계 내에서 제품 시스템의 모

든 단위 공정에 대해 투입물(원료, 에너지, 물 등)과 산출물(제품, 부산물, 배출물 등)의 목록을 작성하고 정량화하는 단계이다. 이 단계에서 수집된 데이터의 정확성이 LCA 결과의 신뢰도를 좌우한다. 셋째, 전 과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)이다. 이는 목록 분석 결과를 바탕으로 잠재적인 환경영향을 평가하는 단계이다. 지구 온난화, 자원 고갈, 산성화, 부영양화 등 다양한 영향 범주에 대해 LCI 데이터를 변환하여 환경영향의 크기를 산출하는데, 각 영향 범주별 특성화 계수(characterization factor)를 LCI 투입·배출량에 곱한 뒤 합산하여 잠재적 환경 영향을 정량화한다. 넷째, 전 과정 해석(Life Cycle Interpretation)이다. 이는 LCI 및 LCIA 결과를 종합하여 첫 단계(목표 및 범위 설정)에서 도출한 목적에 부합하는 결론과 가이드라인을 도출하는 단계이다. 결과의 불확실성과 민감도를 분석하고, 연구의 한계를 명확히 기술한다(ISO, 2006a; ISO, 2006b).

2.1.2. 패션산업에서의 LCA

패션 분야에서는 2000년대 중반부터 섬유별 연구가 활발히 진행되어 면, 폴리에스터, 양모 등의 물발자국·탄소 배출을 비교하였다(Horrocks & Anand, 2015; Muthu, 2016). 이는 소재 선택 단계에서 환경 성과를 빠르게 가능하게 해 기여하였고, 섬유협회나 브랜드가 ‘Preferred Fiber Index’와 같은 우선순위 체계를 수립하는 근거가 되었다. 2010년 이후부터는 시스템 경계를 확장하여 의류의 사용 단계(세탁, 건조, 다림질)와 폐기 단계(매립, 소각, 재활용)를 포함하는 ‘요람에서 무덤까지(cradle-to-grave)’ 분석으로 발전하였다. Sandin & Peters(2018)의 연구는 의류의 재활용 보다 재사용이 더 환경적이며, 두 가지 모두 소각이나 매립보다 훨씬 나은 대안이라는 것을 41편의 LCA 연구를 통해 입증했다. 또한, Niinimäki et al.(2020)은 패스트패션 부상으로 인한 잦은 구매와 폐기로 인한 의류의 사용 수명에 대한 총체적 환경 영향이 증폭되고 있음을 지적했다.

이렇듯 기존 LCA 연구는 원료·제조·사용·폐기 단계의 총량 분석에 집중하여 디자인-시제품 단계의 ‘물리적 샘플 반복 제작’으로 발생하는 자원 낭비와 탄소 배출을 체계적으로 반영하지 못하였다(Niinimäki et al, 2020). 샘플 데이터가 LCI에서 누락되면 결과가 체계적으로 왜곡될 위험이 크다(Sandin & Peters, 2018). 따라서 최근 문헌은 순환경제 전략 평가(UNEP, 2023), 섬유 소재별 환경성 비교(Sandin et al, 2019)와 같이 범위, 지표, 지역을 정교화하는 방향으로 발전하고 있다. 즉, 이를 종합하면 전체 수명주기 대신 샘플링 단계만을 독립적으로 평가하는 LCA 연구가 필요하다. ISO 14067는 이러한 부분 경계 연구를 정식으로 허용하면서, 제품 탄소발자국 연구가 특정 단계에 집중할 수 있는 근거를 마련하였다(Fonseca et al., 2023).

2.2. 디지털 제품 여권(DPP)

2.2.1. 패션산업에서 DPP의 도입과 사례

DPP는 지속가능한 제품을 위한 에코디자인 규정(Ecodesign



Fig. 1. Checking DPP with QR code. <https://www.peoplegate.co.kr>.

for Sustainable Products Regulation, ESPR) 제8조에서 “제품별 필수 정보를 전자적 수단으로 연결하고 제공하는 체계”를 말하며, 각 제품은 고유 식별자와 데이터 캐리어(QR·RFID 등)를 통해 생애주기 전반의 정보를 이해관계자에게 실시간으로 공개하도록 설계된다(European Commission, 2022a)(Fig. 1). DPP 도입은 2019년 유럽 EU의 ‘그린 딜(Green Deal)’에서 처음 제시되었고, 2020년 ‘순환경제 실행계획(Circular Economy Action Plan, CEAP)’에서 공식 과제로 구체화 되었다(European Commission, 2019; 2020). CEAP은 섬유, 배터리, 전자제품을 우선 가치사슬로 지정하며 DPP 개념을 공식화했고, 이어 2021년 Digital Europe Programme 공모에서 전자, 배터리, 섬유 3개 분야의 시범 DPP 개발 프로젝트를 지원하며 기술적 실행 기반을 마련했다(European Commission, 2022b). 2022년 3월 ESPR 초안이 발표되면서 법적 프레임워크와 데이터 요건이 구체화되었고, 2024년 5월 최종 승인을 거쳐 2027년부터 EU 시장에 출시되는 모든 섬유제품은 DPP를 보유해야 하며 2030년까지 다른 제품군으로 확대될 전망이다(Council of the EU, 2024). 다만 섬유제품에 적용될 구체적 친환경 설계 및 DPP 세부 규제 항목은 현재 공식적으로 발표되지 않은 상태이다(TrusTrace, 2025).

규제 정착을 위해 패션산업에서 선도적 실증 연구 및 사업이 다수 추진되었다. 대표적으로 EU 지원 프로젝트 CIRPASS는 DPP 상호운용 로드맵, 공통 정보 요건, 프로토타입 아키텍처를 정리했고 31개 파트너가 참여해 표준화 담론을 주도했으며, D2.2 보고서는 섬유 부문에서 중의류 처리 효율 향상, 소비자 재판매 가치 제고 등 여섯 개의 구체적 DPP 사례를 제시하며 보상 메커니즘과 장벽을 분석했다 (CIRPASS Consortium, 2024). 스웨덴의 RISE 연구소와 Vinnova가 주관한 Trace4Value 예비 연구는 Kappahl과 Marimekko 등과 같은 브랜드와 협력해 3,000여 벌의 의류에 QR 코드 기반 DPP를 부착하고, 분산 데이터 저장과 소비자 인터페이스를 검증함으로써 섬유 공급망에서 기술적 실현 가능성을 입증했다 (Trace4Value, n.d.).

2.2.2. 코어 15 필드

본 연구에서 ‘코어 필드(Core Field)’란 EU의 DPP 체계에서 모든 제품이 공통으로 충족해야 할 최소의 필수 데이터 항

목 집합을 의미하며, 법적·실무적 요구를 동시에 담보하기 위해 코어 필드 도출을 위한 데이터 구조의 객관성과 확장성을 위해 ISO/IEC 15459가 제시하는 ‘식별자 컨테이너-도메인 페이로드’ 원칙을 준용하여 헤더(식별·컴플라이언스)와 콘텐츠(제품·환경 정보)의 2계층으로 나누어 통합하였다(ISO/IEC 15459-1:2014; ISO/IEC 15459-6:2014). 헤더 계층에는 DPP의 법적 근거가 되는 ESPR 부속서 III가 의무화한 식별 데이터와 규제 준수 데이터를 포함하고, 콘텐츠는 산업 및 연구 현장의 실무 타당성을 확보하기 위해 EU의 지원을 받은 ‘CIRPASS’, 스웨덴 혁신청(Vinnova)의 지원을 받고, 최종 보고서가 EU 집행위의 검증을 통과한 ‘Trace4Value’에서 제안된 섬유와 환경 데이터를 다룬다(CIRPASS Consortium, 2023; Trace4Value, 2023). ESPR 부속서 III가 의무화한 식별·컴플라이언스 데이터를 헤더로 두고, 콘텐츠인 CIRPASS가 제안한 섬유 정보 항목과 Trace4Value가 제시한 속성을 교차 매핑을 수행하여 양 파일럿에서 공통으로 확인되는 9개, 한 가지의 속성이라도 ESPR 데이터와 중복되는 5개, 그리고 CIRPASS와 Trace4Value의 공통 요소는 아니지만 ESPR은 법적 규제이기 때문에 DPP 세부 규제에 필수로 포함될 항목으로 1개, 총 15개의 항목으로 나타났다. 2계층 구조는 상위 규범(ESPR)의 법적 구속력과 공공 연구 프로젝트(CIRPASS, Trace4Value)의 실무 타당성을 동시에 담보하며, 헤더를 고정된 상태에서 향후 위임 규칙이 새로운 지표를 의무화할 경우 콘텐츠 영역만 확장·갱신하면 되는 유연성을 제공한다. 위와 같은 방법으로 도출된 ‘코어 15 필드’는 다음 표와 같다(Table 1).

2.3. 디지털 패션 프로그램의 종류와 환경적 성과

본 절은 패션 디자인 프로세스에서 활용되는 디지털 프로그램의 종류를 알아보고, 지속가능한 패션디자인 수립에 환경 측면으로 어떠한 기여를 해왔는지 선행연구를 통해 분석하고자 한다. 최근 5년(2020~2025년)간의 국내·외 선행연구 25편을 검토한 결과, CLO 3D, Browzwear, Marvelous Designer, Optitex, TUKAcad, Adobe Illustrator 등이 핵심 디지털 디자인 프로그램으로 반복적으로 지목되었다. 특히 CLO 3D의 환경 기여를 논의한 선행 연구가 가장 많았다. Khomariah et al.(2025)은 3D 가상 시뮬레이션 기술과 환경성 성과를 다룬 국내의 논문 27편을 체계적으로 비교하였는데, 전체 논문 중 12편(44%)이 CLO 3D 사례를 포함하며, 이 프로그램이 가상 프로토타이핑과 패턴 최적화를 통해 직물 폐기량을 최대 80%까지 줄이고 설계 시간을 단축한다고 보고하였다. 구체적으로는 예코백 개발에서 원단 사용량 22%와 작업시간 30%를 절감할 수 있고 (Kim, 2024), 여성 피트니스 의류 설계 과정에서 프로토타입의 수의 감소(Kim & Joo, 2022), 한복 패턴의 컷팅 부산물의 평균 18% 역제가 가능하다(Yoo & Lee, 2020). 이는 CLO 3D와 같은 버추얼 샘플링이 패턴 정밀도와 가상 핏 품질을 높여 재작업·운송 단계를 단축함으로써 설계, 생산, 물류 전 과정의 탄소 배출 저감으로 직결될 수 있음을 의미한다. 다른 프로그

Table 1. ‘Core 15 field’ contents

No.	Core 15 field	Evidences		
		ESPR	CIRPASS	Trace4Value
1	Unique product ID	Product-specific identifier	DPP identifier (DPP ID)	Unique identifier
2	Basic product information	Model, batch, or serial number	Product name, Product image	Product name, Description
3	Material composition	Information on substances of concern	Bill of materials (BOM)	Material composition
4	Country of origin	Place of manufacture	Country of Origin	Country of manufacturing
5	Supply chain & traceability	Information on the supply chain	Traceability Events	Traceability information
6	Environmental impact indicators	Environmental performance	Carbon footprint of product	Environmental footprint
7	Recyclability information	Information on recycled content	Recyclability information	Recycled content
8	End-of-life instructions	Instructions on end-of-life treatment	End-of-life Information	Disposal information
9	Brand/manufacturer information	Name and contact details of manufacturer	Manufacturer name	Brand
10	Durability information	Expected lifetime, durability	Durability	-
11	Repairability information	Information on repair	Repair information	-
12	Care & maintenance instructions	Instructions for use and maintenance	-	Care instructions
13	Certifications & labels	Applicable conformity marking	-	Certificates
14	Corporate social responsibility	Information on social compliance	Social compliance	-
15	Date of market placement	Date of placing on the market	-	-

램으로 Oasis는 Browzwear 도입 후 초기 프로토타입 25% 개발 샘플 33%를 가상 모델로 대체할 수 있음이 발표되었고 (Browzwear, 2025), Optitex는 3D 패턴 그레이딩과 자동 마커 배치(automatic nesting) 방법으로 샘플을 3벌에서 1벌로 줄이고 개발 비용을 40% 낮췄으며(EFI Optitex, n.d.), TUKAcad SMARTmark의 사용은 원단 소비를 7-20% 절감할 수 있다 (Tukatech, 2020). 또한 Adobe Illustrator를 3D 도구와 연동하면 패턴 수정만으로 종이 및 잉크 사용량을 15-25% 줄여 설계 단계의 자원 사용을 완화하는 효과가 확인되었다(Kim, 2024). 샘플 제작뿐만 아니라 샘플 운송에서도 Odlo는 세일즈 샘플 70%를 3D로 전환해 운송 단계의 탄소 배출을 크게 줄였다.

이를 종합하면, 디지털 패션 프로그램은 물리적 샘플링 및 원단 폐기물 감소, 설계와 생산 공정 효율화로 인한 시간-비용 절감, 실시간 데이터 피드백을 통해 LCA 지표 정밀도 향상이라는 세 가지 차원의 제품 생애주기 전반의 환경 부담을 완화할 수 있다.

3. 연구 방법

3.1. 연구 문제 설정

본 연구는 서론에서 제기된 문제의식을 바탕으로 다음과 같은 연구 문제를 설정하였다. 첫째, 패션디자인의 비추얼 샘플링 과정에서 생성되는 데이터 중 DPP에 포함할 수 있는 핵심 데이터 항목과 그 수집 및 전달 절차는 무엇인가? 둘째, 의류제품의 LCA 관점에서 비추얼 샘플링은 디자인 개발의 환경적 지

속가능성의 개선에 실질적으로 어떻게 기여할 수 있는가? 셋째, 패션디자인 단계에 적용할 수 있는 DPP의 구성 요소와 데이터 연계 가이드라인은 무엇인가?

3.2. 연구 설계

3.2.1. 비교 사례연구

비교 사례연구는 둘 이상의 사례를 체계적으로 비교하여 현상 간의 유사점과 차이점을 설명하고, 특정 개입의 효과를 분석하는 데 효과적인 연구 방법이다(Yin, 2018). 본 연구 설계의 핵심은 3D 비추얼 샘플링 기술 도입이라는 단일 변수(샘플링 방식)가 환경에 미치는 인과 효과를 분리하는 데 있다. 따라서 다른 교란 요인들을 엄격히 통제된 상태에서 세 가지 가상 시나리오를 비교하는 실험을 진행하였다.

3.2.2. 연구 대상 및 시나리오 설정

실질적인 영향을 정량적으로 확인하기 위한 연구 범위로 비교 분석이 용이한 기본 디자인의 티셔츠를 아이템으로 선정하였다. 연구 대상 제품은 남성용 기본 반소매 티셔츠(L 사이즈) 1종으로 진행한다. 비교의 일관성을 위해 소재는 100% 면 저지(20수, 180g/m²)로 통일한다. 또한, 본 연구에서 패션디자인 LCA의 범위는 디자인 구상에서부터 시제품이 만들어지는 단계로 한정하였다. 시스템 범위는 ‘디자인·샘플, 원단 생산, 재단·봉제’까지의 cradle-to-gate로 설정한다(ISO, 2018). 모든 시나리오는 동일한 디자인 사양(Tech Pack)을 가지며, 대량 생산 승인을 위한 최종 1종을 확정을 목표로 설정한다. 각 샘플링

Table 2. Features of sampling scenario

Category	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
	Physical sampling	Hybrid sampling	Virtual sampling
Key Method	100% physical sample production and review	Final one physical sample after digital sample review	100% digital sample production and review
Major Process	Pattern production → Overseas factory shipment → Physical sample production (2 times) → Air transport → Fittings and modifications	Pattern production → 3D virtual sample production and modification (2 times) → Domestic factory shipment → Physical sample production (1 time) → Fitting and final approval	Create Pattern → 3D Virtual Sampling, Fitting, Modification, Final Approval (all digital)
Estimated results	High cost, long lead time, maximum environmental load	Medium cost/lead time, Significantly reduce environmental load	Minimum cost, lead time, Environmental Load

방식의 디지털 전환 수준에 따라 환경영향을 비교 분석한다. 시나리오는 전통(physical), 혼합(hybrid), 디지털(digital) 세 가지로, 전통 샘플링(Scenario 1)은 실제 샘플 3회, 혼합 샘플링(Scenario 2)은 버추얼 샘플링 2회와 실제 샘플 1회, 디지털 샘플링(Scenario 3)은 3회 모두 버추얼 샘플링으로 설계 및 승인을 완료한다. 각 시나리오의 샘플링 방법과 과정 그리고 예상 결과를 정리하여 Table 2로 정리하였다.

3.3. 버추얼 샘플링 프로그램

본 연구는 버추얼 샘플링 제작 및 데이터 수집에 여러 패션 버추얼 프로그램 중에서 CLO 3D를 대표 도구로 선택하였다. 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 학술적 선행연구에서의 높은 활용 빈도이다. 패션디자인, 디지털 프로토타이핑, 지속가능성 관련 최근 연구들에서 CLO 3D는 가장 빈번하게 언급되고 활용되는 도구로, 연구 결과의 비교 및 검증에 용이하다(Khomariah et al, 2025; Prasetya et al, 2025). 둘째, CLO 3D는 Tech Pack 내보내기 기능을 통해 자재 명세서(Bill of Materials,

BOM), 패턴, 2D·3D 이미지 등 제품 개발 핵심 데이터를 XML, CSV, PNG 형식으로 일괄 추출할 수 있어 DPP가 요구하는 정형 데이터 필드와 직접 매핑하기에 적합하다(CLO Support, n.d.). 셋째, 실제 천의 무게, 두께, 신축성을 손쉽게 측정해 컴퓨터 안으로 옮겨 주는 ‘Fabric Kit 2.0’은 실제와 유사한 물성 재현이 가능하며, 이로써 물리적 샘플 제작 횟수를 줄여 환경영향을 경감할 수 있음이 실증 연구에서 확인되었다(Habib et al, 2025; Svilokos, 2022). 마지막으로 CLO API/SDK-사용자가 플러그인이라는 작은 프로그램을 직접 만들어 메뉴에 끼워 넣을 수 있게 하는 개발 도구-를 이용하면 추출한 데이터를 제품 수명주기 관리(PLM) 시스템—상품 기획부터 폐기까지 모든 정보를 한곳에서 관리하는 중앙 창고—으로 자동 전송해, DPP가 요구하는 공급망과 인증 정보를 함께 관리할 수 있다(CLO Virtual Fashion, 2024; Stark, 2015). 이러한 특성은 CLO 3D가 DPP 데이터 구조와 기술적 상호운용성을 자연스럽게 연결하는 매개 플랫폼으로 기능함을 의미하며, 문헌 연구를 통해 도출한 DPP 코어 15 필드와 CLO 3D 프로그램

Table 3. Mapping CLO 3D extractable data to DPP core fields

Core 15 field	CLO 3D extractable data	Extraction method/procedure	Mapping possibilities
Unique product ID	Style_number, Garment_Name	Extract after manual input within BOM/Tech pack	Partial
Basic product information	Color_name, size, Image_files	BOM/Tech Pack extraction, saving rendering images	High
Material composition	Fabric_name, Fabric_composition	BOM extraction (Fabric Library Information Base)	High
Country of origin	-	External data interworking required	Low
Supply chain & traceability	-	External data interworking required	Low
Environmental impact indicators	Pattern_efficiency, Fabric_weight	Check pattern window, calculate after extracting BOM	Partial
Recyclability information	-	External data interworking required	Low
End-of-life instructions	-	External data interworking required	Low
Brand/manufacturer information	Brand_name	Extract after manual input within BOM/Tech pack	High
Durability information	-	External data interworking required	Low
Repairability information	Button_spec, Zipper_spec	BOM extraction	Partial
Care & maintenance instructions	Care_label_text	Extract after manual input within Tech Pack	High
Certifications & labels	-	External data interworking required	Low
Corporate social responsibility	-	External data interworking required	Low
Date of market placement	-	External data interworking required	Low

에서 추출할 수 있는 데이터를 매핑하여 CLO 3D 프로그램과 DPP 규제 간의 매핑 가능성을 Table 3으로 나타내었다. Table 3의 매핑 가능성은 CLO 3D 프로그램에서 BOM/Tech Pack 등으로 즉시 추출이나 확인할 수 있는 경우를 High, CLO 3D 산출물에 근거한 수동 계산 또는 외부 시스템 연계를 통해서 확인할 수 있는 경우를 Partial, CLO 3D만으로는 생성과 검증이 불가능하여 외부 공급망 및 별도 데이터가 필요한 경우를 Low로 판단하였다.

3.4. 평가 방법: 약식 전 과정 평가 매트릭스(Abridged LCA Matrix)

본 연구는 LCA의 네 단계(목표·범위 설정, LCI, LCIA, 해석)를 모두 수행하기에는 연구 범위가 ‘디자인-시제품’ 단계로 한정되어 있어 데이터 확보와 분석의 효율성을 우선할 필요가 있으므로, Graedel et al.(2012)이 제안한 복잡한 LCA 절차를 간소화한 약식 전 과정 평가(Abridged LCA) 방법론을 채택하였다. 평가지표는 패션산업의 주요 환경 영향 요인으로 지목되는 탄소 배출, 자원 폐기물, 에너지 소비 세 가지로 선정했다(UNEP, 2023). 탄소 배출량(kg CO₂-eq)은 샘플 운송(항공), 생산 및 디자인 과정에서의 전기 에너지 사용으로 인해 발생하는 온실가스를 이산화탄소 환산량으로 계산하고, 자원 폐기물(kg)은 샘플 제작 과정에서 사용 후 폐기되는 원단의 무게를 기준으로 산정하며, 에너지소비량(kWh)은 봉제 기기, 컴퓨터 등 샘플링 과정에 사용되는 장비의 총 전력 소비량을 측정한다.

또한 각 환경 영향 지표의 상대적 중요도는 상이할 수 있으므로, 이를 종합적으로 평가하기 위해 가중치를 부여한다. 본 연구에서는 기후 변화 대응의 시급성(탄소)과 자원 순환의 중요성(폐기물)을 가장 중요한 요소로 판단한 UNEP(2023)의 글로벌 로드맵의 정책적 우선순위를 참고하여 기준 가중치를 탄소(0.5), 폐기물(0.3), 에너지(0.2)로 설정하였으며, 이는 디자인 단계의 결정이 DPP가 요구하는 순환성 및 환경 데이터에 미치는 영향을 고려한 것이다(Carvalho et al., 2025). 최종 환경 영향 점수인 ALCAM(Abridged Life Cycle Assessment Matrix) 점수는 Graedel et al.(1995)의 연구에서 제안한 Environmentally Responsible Product Assessment Matrix에 기반하며, 각 환경지표를 0-1로 정규화한 뒤 정책적·환경적 중요도를 반영한 가중치와 곱해 합산해 단일 점수를 도출하도록

설계된 계산식으로 산출한다.

$$ALCAM \text{ 점수} = \sum (\text{정규화된 지점값 } i \times \text{가중치 } i)$$

$$ALCAM \text{ score} = \sum (\text{normalized indicator value } i \times \text{weight } i)$$

여기서 '정규화된 지점값 i'는 각 시나리오의 지점값을 기준 시나리오인 전통 방식(Scenario 1)의 값으로 나눈 상대적 수치로, 0과 1 사이의 값을 가진다. 이를 통해 각기 다른 단위를 가진 지표들을 동일한 척도에서 비교할 수 있다. 평가 프레임워크는 전통 샘플링(Scenario 1), 혼합 샘플링(Scenario 2), 버추얼 샘플링(Scenario 3) 세 가지 시나리오를 「Category」 축에 배치하고, 시나리오별로 탄소 배출량(kg CO₂eq), 자원 폐기물(kg), 에너지소비량(kWh)을 계량한다. 이렇게 얻은 지점값을 기준 시나리오 대비 0-1로 정규화한 뒤, 탄소 0.5, 폐기물 0.3, 에너지 0.2의 가중치를 적용해 단일 환경 점수인 ALCAM 점수를 도출하도록 설계한다.

4. 연구 결과

4.1. 시나리오별 패션 LCA 산출 및 비교 분석

세 가지 샘플링 시나리오에 대해 ‘디자인-시제품’ 단계의 환경 부하를 산출한 결과는 Table 4와 같다. 모든 계산은 본 연구에서 설정한 가정에 기반하며, 산출 근거는 다음과 같다. 운송 경로는 한국 패션기업의 주요 의류 생산기지 중 하나가 베트남이라는 점을 고려하여, 서울(인천공항)과 호찌민 간 왕복 항공운송으로 가정했다. 탄소 배출량은 운송(서울-호찌민 왕복 항공 화물 1 kg당 11.5 kg CO₂-eq)과 전기 사용(한국 전력거래소의 2023년 배출계수 기준 1 kWh당 0.424 kg CO₂-eq)을 합산했다. 에너지소비량은 각 공정에 필요한 장비(산업용 재봉틀 0.5 kWh/h, 고사양 PC 0.3 kWh/h)의 가동 시간을 기반으로 산출했으며, 장비별 전력 소비량은 제조사 사양 및 에너지 효율 관련 연구를 참고했다.

산출 결과를 통해, 디지털 기술의 도입 수준이 높아질수록 환경 영향이 극적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히 전통 샘플링 방식(Scenario 1)은 두 번의 국제 항공 운송으로 인해 탄소 배출량이 25.5 kg CO₂-eq로 압도적으로 높게 나타났다. 반면, 혼합 샘플링 방식(Scenario 2)은 물리적 샘플을 한 번만

Table 4. Results of environmental load calculation by sampling scenario

Environmental Impact Indicators (Units)	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Grounds for calculation
	Physical	Hybrid	Virtual	
Fabric consumption (m)	3.0	1.5	0	1.5 m per sample, twice (traditional) / once (mixed)
Resource waste (kg)	0.81	0.41	0	Apply fabric weight (180g/m ²) and pattern efficiency (85%)
Transport distance (km)	14,400	0	0	2 round trips between Seoul and Ho Chi Minh City
carbon emissions (kg CO ₂ -eq)	25.5	1.2	0.5	Transportation, electricity usage-based calculation
energy consumption (kWh)	10.2	6.5	4.8	Sewing instruments, calculations based on computer usage time
ALCAM Score	1.00	0.21	0.05	Weight application (carbon 0.5/waste 0.3/energy 0.2)

제작하고 국제 운송을 배제함으로써 탄소 배출량을 95% 이상 감소했고, 비추얼 샘플링 방식(Scenario 3)은 컴퓨터 사용 에너지로 인한 미미한 탄소 배출(0.5 kg CO₂-eq) 외에는 다른 환경 부하가 거의 발생하지 않아 Scenario 1 대비 98% 낮은 수치를 보였다. ALCAM 종합점수에서도 혼합 방식은 전통 방식 대비 79%, 디지털 방식은 95%의 환경영향 감소 효과를 보였다. ALCAM 종합점수는 전통 샘플링 방식 = 1.00점, 혼합 샘플링 방식 = 0.21점, 비추얼 샘플링 방식 = 0.05점으로 산출되었으며, 비추얼 샘플링 방식은 전통 방식 대비 총점에서 약 95% 낮은 환경 영향을 보였다. 이러한 감소의 주요 원인은 실물 샘플 제작 및 수정 과정의 반복 제거, 국제 물류 이동의 제거에 따른 운송 에너지 절감, 원단 및 부자재의 물리적 투입 절감으로 인한 폐기물 감소이다. 이는 비추얼 샘플링이 패션디자인 단계의 지속가능성을 개선하는 데 매우 효과적인 수단임을 정량적으로 입증한다.

4.2. 비추얼 샘플링의 ‘코어 15 필드’ 매핑(mapping) 분석

연구 결과를 바탕으로, 비추얼 샘플링 방식(Scenario 3)에서 생성된 데이터를 DPP 코어 필드 15개에 매핑하여 CLO 3D 데이터와 얼마나 연동 가능한지 확인하고자 한다. 이는 패션기업이 디자인 단계에서부터 체계적으로 DPP 데이터를 구축하는 실무적 로드맵이 될 수 있다. DPP 데이터는 시스템 간 상호운

용성을 위해 표준화된 형식이 필수적이다. Table 5는 CLO 3D에서 추출한 데이터를 DPP 코어 15 필드에 매핑하여 QR 코드로 연결될 정보의 원본 구조와 연계 방법을 제시한다(Table 5).

본 연구에서 도출한 ‘코어 15 필드’에 대해 CLO 3D가 제공할 수 있는 데이터의 수준을 분석한 결과, CLO 3D 단독으로는 전체 DPP 요구사항의 약 46.7%를 직접적, 부분적으로 충족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 나머지 53.3%는 외부 시스템과의 연동이나 수동으로 데이터 입력이 필요하다. 이는 CLO 3D가 DPP 데이터 구축의 유효한 출발점이지만, 단독으로는 완전한 해법이 될 수 없음을 시사한다. 따라서 자동 데이터 추출 범위를 확대하고, 데이터 표준화를 통해 정보의 일관성을 확보하며, 외부 시스템과의 연동을 강화할 필요가 있다. 아울러 패션산업의 특수성을 반영하기 위해 앞서 도출한 코어 15 필드에서 필드의 항목 보완과 CLO 3D의 기능적 개선이 요구된다.

개선점을 고려하여 ‘코어 19 필드’로 변경하고 효율적인 인식을 위해 그룹화하여 정리한 내용은 Table 6와 같다. 이는 비추얼 샘플링의 환경 성과를 정밀하게 입증하고, 패션 공급망과 사용 단계까지 확장된 지속가능성 요구를 충족시켜 DPP의 신뢰성과 실효성을 향상할 것이다. 이와 같은 개선 사항을 바탕으로 제작한 Scenario 3을 예시로 제작한 DPP 라벨 디자인은 Fig. 2와 같다. QR 코드는 QRFY 사이트에서 무료로 QR 코

Table 5. Core 15 field mapping in scenario 3

Core 15 field		Scenario 3
Unique product ID		Scenario3_basic_TS
Basic product information		A Men’s basic round neck t-shirt white, L size
Material composition		Organic cotton 100%
Country of origin		South Korea (material: china/ sewing: south korea)
Supply chain & traceability		75%
Environmental impact indicators	Carbon footprints	0.5 kg CO ₂ -eq
	Energy consumption	4.8kWh
	Water consumption	0L
	Waste generation	0kg
Recyclability information		Recycling potential: 95%
End-of-life instructions		Deliver clothing collection box discharge or textile recycling company
Brand/manufacturer information		Scenario 3
Durability information	Tensile strength	650 N warp / 480 N weft
	Shrinkage after 5 washes	-2.5 % warp / -3 % weft
	Pilling	Grade 4-5
	Color fastness to washing (ISO 105 C06)	Grade 4-5
	Abrasion	25 000 cycles
Repairability information		Repair ease score: 4.0/5(no detail)
Care & maintenance instructions	Machine wash cold (40°C) gentle cycle, Do not bleach, Tumble dry low or line dry in shade, Warm iron (150°C) if needed	
Certifications & labels		GOTS, OEKO-TEX Standard 100
Corporate social responsibility		Obey FLA(fair labor association)
Date of market placement		2025 S/S

Table 6. Core 19 field (required fields: bold)

Core 19 field	
Product identification	Unique product ID
	Basic product information
	Material composition
	Country of origin
	Brand/manufacturer information
	Date of market placement
	Sampling method
	Dyeing process
Social responsibility	Supply chain & traceability
	Corporate social responsibility
Environmental impact	Producer tracking information by process
	Environmental impact indicators
Circularity management	Recyclability information
	End-of-life instructions
Use & maintenance	Durability information
	Care & maintenance instructions
	Repairability information
	Microplastic emission possibility class
Certifications	Certifications & labels



Fig 2. A DPP label produced as an example of Scenario 3 (July 26th 2025).

드 생성이 가능한 ‘QR Code Generator PRO’를 이용하여 제작하였다.

5. 결 론

패션산업의 디자인-샘플링 단계에서 환경 부담이 증가하자 글로벌 브랜드들은 버추얼 샘플링 프로그램을 도입하고 있으며, EU 역시 2027년부터 DPP 규제를 통해 제품 전 과정 데이터를 요구할 예정이다. 이에 본 연구는 버추얼 샘플링 프로그램의 실제 환경적 영향과 DPP 연계 가능성을 규명하는 연구의 필요성으로 디지털 디자인 기반 버추얼 샘플링이 디자인-시제품 단계에서의 환경영향을 정량적으로 저감할 수 있는지를 검증하고, 해당 디지털 데이터가 DPP 요구사항에 연동될 수 있는 기준을 제안하는 데 목적을 두었다.

연구 결과는 다음과 같다. 첫째, 패션디자인 단계에서 생성되는 데이터와 DPP 요구사항 간의 연계 가능성을 분석하기 위해 DPP 규제의 동향과 파일럿 프로젝트를 분석하는 문헌 연구를 통해 패션제품에 적용할 수 있는 ‘코어 15 필드’를 도출하였다. 이 코어 필드와 CLO 3D 프로그램에서 추출할 수 있는 데이터를 매핑한 결과, CLO 3D는 단독으로 코어 15 필드 중 ‘기본 제품정보’, ‘소재 구성’, ‘브랜드/제조사 정보’, ‘수선 및 유지보수 지침’ 등 4개 항목(26.7%)을 높은 수준으로 직접 충족시킬 수 있었다. 또한 ‘고유 제품 ID’, ‘환경영향 지표’, ‘수리 가능성 정보’ 등 3개 항목(20.0%)은 프로그램 내 수동 입력이나 계산을 통해 부분적으로 데이터를 생성할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 원산지, 공급망 추적, 재활용성, 인증 등 나머지 8개 항목(53.3%)은 외부 PLM, SCM 시스템과의 연동이나 추가적인 데이터 입력이 필수적임을 확인하였다. 이는 CLO 3D가 DPP 데이터 구축의 강력한 출발점이지만, 완전한 DPP 준수를 위해서는 외부 데이터와의 통합이 필수적이라는 점을 알 수 있었다.

둘째, 버추얼 샘플링의 환경적 기여도를 정량적으로 평가하기 위해 전통적, 혼합형, 전면 디지털 방식의 세 가지 샘플링 시나리오를 설정하고 약식 전과정평가를 수행하였다. 그 결과, 전면 버추얼 샘플링(Scenario 3) 방식은 전통 방식(Scenario 1) 대비 탄소 배출량, 자원 폐기물, 에너지 소비 등 모든 지표에서 가장 우수한 지속가능성을 보였다. 특히 ALCAM 종합 점수 기준으로 약 95%의 총체적 환경 영향을 감소시키는 것으로 나타났고, 3D 버추얼 샘플링이 디자인 단계의 환경 부하를 획기적으로 줄일 수 있는 매우 효과적인 수단임을 정량적으로 입증하였다. 혼합 방식(Scenario 2) 역시 약 79%의 환경영향 감소 효과를 보여, 전면적인 디지털 전환이 어려운 기업도 점진적인 도입을 통해 지속가능성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 약식 전과정평가를 통해 버추얼 샘플링이 전통 방식 대비 환경 영향 감소를 정량적으로 입증했다. 이러한 결과는 디자인 단계의 의사결정이 제품 수명주기 전반의 환경 부하를 결정하는 핵심 요인임을 강조한 선행연구와 맥을 같이한다 (Fonseca et al, 2023, Niinimäki et al, 2020). 특히, Xiong(2020)의 연구는 디지털 의류가 물리적 제품 대비 탄소 배출을 96% 줄일 수 있다고 보고하여 본 연구와 가장 유사한 연구로 보인다. 하지만 본 연구는 샘플링 과정의 반복적 국제 운송을 구체적으로 반영하고, 생성된 데이터를 DPP 규제와 직접 연계했다는 점에서 차이가 있었다. 본 연구는 국제 운송을 포함한 ‘디자인-시제품’ 단계에 집중하여 버추얼 샘플링으로 인한 운송 부문의 극적인 탄소 감소 효과가 점수에 크게 반영됐지만, 다수의 선행연구는 원단 소비 및 재료 효율성(Esra & Kipöz, 2020; Liang et al., 2025), 생산 공정 효율성(Baria et al., 2025; Boldt & Carvalho, 2018), 전체 의류 수명주기 평가(Ahmed et al., 2024; Chen et al., 2023)에 초점이 맞추어져 있었으며, 이에 따라 샘플링 단계의 환경 영향이 희석되어 환경 저감 수

치가 본 연구보다 낮게 도출되었다. 또한 본 연구는 DPP 연계를 목표로 데이터 필드를 구조화했지만, 기존 DPP 관련 연구들은 주로 DPP의 필요성과 일반 원칙을 설명하는 개념적 프레임워크를 구축하거나(Buchel & Neligan, 2025; Regulation (EU) 2024/1781, 2024), 섬유 산업의 도입 과제 및 공급망 구현 장벽을 분석하는 데(Domskienė & Gaidule, 2024; Lopes & Barata, 2024) 집중하였다. 그러나 제품의 생산과정에서 생성되는 구체적인 데이터를 DPP 규제 요구사항과 직접 연결하는 실무적 방법론은 제시하지 않았다. 결론적으로 본 연구는 버추얼 샘플링의 환경적 이점을 정량화했을 뿐만 아니라, 그 과정에서 생성된 데이터를 DPP라는 규제 프레임워크와 연결하는 실무적 로드맵(Table 5, Table 6)을 제안함으로써 기술과 정책적 요구를 결합했다는 점에서 차별화된다.

마지막으로, 본 연구는 패션산업의 특수성을 반영한 DPP 규제 적용을 위한 개선 방안을 제안한다. 사례 비교연구를 통해 탄소배출량을 줄인 효과가 DPP 구조 안에서 충분히 증명되지 못하였고, CLO 3D가 제공하는 자동 추출 데이터로는 수기 입력 또는 외부 시스템 연동이 필요하다는 사실이 확인되었다. 이러한 정보 공백을 해소하고 의류 특수성을 반영한 DPP 적용을 위해 앞서 도출한 코어 15 필드에서 필드 항목 보완과 CLO 3D의 기술적 기능 개선이 요구된다. 따라서 샘플링 방법, 염색·가공 공정 유형, 미세플라스틱 배출 가능성 등급, 공정별 생산자 추적 정보를 추가한 ‘코어 19 필드’로 확장하고, 효율적인 인식을 위해 그룹화하여 Table 6로 정리하였다. 이는 버추얼 샘플링의 환경 성과를 정밀하게 입증하고 패션 공급망 전반의 지속가능성 요구를 충족시킬 수 있다. 기술적 측면에서는 CLO 3D 등 버추얼 샘플링 프로그램이 표준화된 DPP 리포트 자동 생성, 실시간 LCA 시뮬레이션 엔진 내장, 기업 핵심 시스템과의 개방형 API 연동 강화, 블록체인 기반 공급망 데이터 동기화 등의 기능을 갖추어야 한다. 이러한 개선이 이루어지면 버추얼 샘플링 프로그램은 DPP 요구사항을 완전히 충족하는 데이터 허브로 발전할 수 있으며, 디자인 단계에서 창출된 환경적 가치를 손실 없이 규제 당국과 소비자에게 전달할 수 있을 것이다. 이와 같은 개선 사항을 바탕으로 제작한 예시 DPP 라벨 디자인은 Fig. 3으로 제시하였다.

본 연구의 의의는 다음과 같다. 먼저 학술적으로는 첫째, 기존 LCA 연구에서 간과되었던 ‘디자인-시제품’ 단계의 환경영향을 정량화해 후속 연구가 활용할 기초적인 데이터를 마련했다. 둘째, 3D 버추얼 샘플링이라는 디지털 기술과 EU DPP 규제라는 환경 정책을 실증적으로 연결함으로써 기술-정책 융합 연구의 새로운 지평을 열었다. 아직 초기 단계인 의류 산업 분야의 DPP 관련 후속 연구에 자료 제공에 의미가 있다. 산업적으로 본 연구는 3D 버추얼 샘플링 도입을 검토하는 패션기업에 비용 절감뿐 아니라 탄소·자원 절감과 규제 준수를 고려할 수 있는 객관적 근거를 제공하고, DPP 의무화를 앞둔 산업 현장에 디자인 단계부터 데이터를 체계적으로 수집·관리하는 구체적 지침을 제안해 실무적 시사점을 제공한 데 의미가 있다.

이는 전면적 디지털 전환이 어려운 중소기업이나 특정 복종을 다루는 기업도 혼합 방식을 통해 점진적으로 지속가능성을 개선하고 규제에 대응할 수 있는 현실적인 로드맵을 제시함으로써 산업 전반의 단계적 전환에 도움이 될 것이다. 한편, 본 연구는 분석 대상이 기본 티셔츠에 국한되어 다양한 디자인 상황을 포함하지 못한다는 점과 LCA 입력값을 선행연구와 업계 평균에 의존하였기 때문에 실제 기업별 생산 환경과 오차가 발생할 수 있다는 한계점이 있다. 따라서 향후 다양한 복종과 소재를 포함한 비교 사례연구가 필요하며, 패션기업과 협업하여 현장 실측 데이터를 적용한 LCA로 가정치를 검증하는 후속 연구가 요구된다.

Reference

- Ahmed, S., Liscio, M. C., Papamichael, I., Sospiro, P., Voukkali, I., & Zorpas, A. A. (2024). Life cycle assessment to advance the fashion industry's sustainability: A review. *Waste Management & Research*, OnlineFirst. doi:10.1177/0734242X251343793
- Baria, B., Shahid, M. A., Misra, A., Hoque, M. B., Rahman, M. M., Hossain, M. D., & Das, D. (2025). Transformative effect of 3D sampling technology for the ready-made garment industry: A review. *Textile Research Journal*, OnlineFirst. doi:10.1177/00405175251360399
- Boldt, R., & Carvalho, M. (2018). Virtual prototyping as an evaluation method for functional clothing. *AUTEX Research Journal*, 18(3), 1-8. doi: 10.1088/1757-899X/460/1/012040
- Browzwear. (2025, April 24). *Oasis Garment Company: 25% Faster, 33% Leaner, 100% Quality* [Company case study]. <https://browzwear.com/success-stories/how-oasis-achieves-accuracy-faster-turnaround-with-browzwear>
- Buchel, J., & Neligan, A. (2025). Digital product passport: Finding the right balance between transparency for circularity and added red tape. *Intereconomics*, 60(3), 160-164. doi: 10.2478/ie-2025-0031
- Carvalho, C., Silva, C. J., & Abreu, M. J. (2025). Circular economy: Literature Review on the Implementation of the Digital Product Passport (DPP) in the Textile Industry. *Sustainability*, 17(5), 1802. doi:10.3390/su17051802
- Chen, S., Zhu, L., Sun, L., Huang, Q., Zhang, Y., Li, X., Ye, X., Li, Y., & Wang, L. (2023). A systematic review of the life cycle environmental performance of cotton textile products. *Science of The Total Environment*, 881, 163458. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.163458
- CIRPASS Consortium. (2023). *D2.1 Mapping of legal and voluntary requirements and screening of emerging DPP-related pilots (v 2.0)*. https://cirpassproject.eu/wp-content/uploads/2023/07/D2.1_July_2023.pdf
- CIRPASS Consortium. (2024). *D2.2 DPP use cases in battery, electronics and textile sectors*. <https://cirpassproject.eu/>
- CLO Support. (n.d.). *BOM(XML) export*. Retrieved September 29, 2025, from <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/115000525207-BOM-XML-Export>
- Council of the European Union. (2024, May 27). *Green transition: Council gives its final approval to the ecodesign regulation* [Press release]. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/>

- 2024/05/27/green-transition-council-gives-its-final-approval-to-the-ecodesign-regulation/
- Domskienė, J., & Gaidule, E. (2024). An overview of technological challenges in implementing the digital product passport in the textile and clothing industry. *AUTEX Research Journal*, 24(1). doi:10.1515/aut-2024-0002
- EFI Optitex. (n.d.). *Virtutek-X Precisionwear: Driving fashion innovation with Optitex* [case study PDF]. https://optitex.com/media/Optitex_Virtutek_x_case_study-EN.pdf
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>
- Esra, E., & Kipöz, Ş. (2020). The role of fabric usage for minimization of cut-and-sew waste within the apparel production line: Case of a summer dress. *Journal of Cleaner Production*, 248(1), 119221 doi:10.1016/j.jclepro.2019.119221
- European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM (2019) 640 final). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- European Commission. (2020). *A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe* (COM (2020) 98 final). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- European Commission. (2022a). *Proposal for a Regulation establishing a framework for ecodesign for sustainable products* (COM (2022) 142 final). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0142>
- European Commission. (2022b). *Proposal for a Regulation on ecodesign for sustainable products* (Council doc. ST 7854/22). Retrieved from <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-7854-2022-INIT/en/pdf>
- European Parliamentary Research Service. (2024). *Digital product passport for the textile sector* (PE 757.808). doi:10.2861/947638
- Fonseca, A., Ramalho, E., Gouveia, A., Henriques, R., Figueiredo, F., & Nunes, J. (2023). Systematic insights into a textile industry: reviewing life cycle assessment and eco-design. *Sustainability*, 15(21), 15267. doi:10.3390/su152115267
- Graedel, T. E., Allenby, B. R., & Comrie, P. R. (1995). Matrix approaches to abridged life-cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, 29(3), 134-139. doi:10.1021/es00003a751
- Habib, M. A., Ullah, A., Maha, M. M., & Bristy, A. A. (2025). Advancing sustainable fashion through 3D virtual design for reduced environmental impact. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 11(3), 135-142. doi:10.15406/jteft.2025.11.00415
- Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (Eds.). (2015). *Handbook of technical textiles: Technical textile processes* (2nd ed.). Woodhead Publishing. <https://www.sciencedirect.com/book/9781782424581/handbook-of-technical-textiles>
- International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2014). *Information technology - Automatic identification and data capture techniques - Unique identification - Part 1: Individual transport units (ISO/IEC 15459-1:2014)*. <https://www.iso.org/standard/54779.html>
- International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2014). *Information technology - Automatic identification and data capture techniques - Unique identification - Part 6: Unique identifier for product group (ISO/IEC 15459-6:2014)*. <https://www.iso.org/standard/62774.html>
- International Organization for Standardization. (2006a). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006)*. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2006b). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- International Organization for Standardization. (2018). *Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification (ISO 14067:2018)*. <https://www.iso.org/standard/71206.html>
- Khomariah, S., Febriana, R., & Putri, V. U. G. (2025). The influence of CLO 3D software on sustainable fashion practices: A comprehensive literature analysis. *Global Synthesis in Education Journal*, 3(1), 48-56. doi:10.61667/jf3jxx34
- Kim, C. R., & Joo, B. R. (2022). Developing women's fitness wear design using 3D CLO. *Journal of the Korean Society of Design Culture*, 22(4), 135-149. doi:10.18652/2022.22.4.9
- Kim, H. J. (2024). Development of Fashion Eco Bag Design Using 3D CLO -Based on A/W 2024/25 Textile Trends-. *Journal of the Korean Society of Fashion Design*, 30(2), 77-99. doi: 10.18208/ksdc.2024.30.2.77
- Liang, J., Dong, W., & Suh, S. (2025). Application of 3D digital technology in design practices within the circular fashion system: Implications for sustainability. *Textile Research Journal*, OnlineFirst. doi:10.1177/00405175251339102
- Lopes, C., & Barata, J. (2024). Digital product passport: A review and research agenda. *Procedia Computer Science*, 246, 981-990. doi:10.1016/j.procs.2024.02.078
- McDowell, M. (2019, October 21). Tommy Hilfiger goes all in on digital design. *Vogue Business*. <https://www.voguebusiness.com/technology/tommy-hilfiger-pvh-corp-3d-design-digital-clothing-innovation-sustainability>
- Muthu, S. S. (Ed.). (2016). *Handbook of life cycle assessment (LCA) of textiles and clothing*. Woodhead Publishing. doi:10.1016/C2014-0-00761-7
- Muthu, S. S. (Ed.). (2019). *Sustainable fashion: Consumer awareness and education*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1262-5>
- Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189-200. doi:10.1038/s43017-020-0039-9
- Prasetya, L. A., Widiyawati, I., Rofiudin, A., Haq, S. T. N., Hendranawan, R. S., Permataningtyas, A., & Ichwanto, M. A. (2025). The use of CLO 3D application in vocational school fashion expertise program: Innovations, challenges and recommendations. *Journal of Research in Instructional*, 5(1), 287-299. doi:10.30862/jri.v5i1.550
- Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA relevance). (2024). Official Journal of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>
- Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile

- reuse and recycling – A review. *Journal of Cleaner Production*, 184, 353–365. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.266
- Sandin, G., Roos, S., Spak, B., Zamani, B., & Peters, G. (2019). Environmental assessment of Swedish clothing consumption – six garments, sustainable futures (Mistra Future Fashion Report 2019:05). RISE Research Institutes of Sweden. <https://research.chalmers.se/en/publication/514322>
- Stark, J. (2015). *Product lifecycle management: 21st-century paradigm for product realisation* (3rd ed.). Springer. doi:10.1007/978-3-319-17440-2
- Svilokos, L. V. (2022). Digitalising the product development of suits through the analysis of layered fabric properties (Bachelor's thesis, Saxion University of Applied Sciences). https://hbo-kennisbank.nl/details/saxion_scripties%3A354395D8-FC89-46FC-A4C1FB23ED8EF3B7
- Trace4Value. (2023, September 6). *Digital product passport in textile: Data protocol*. <https://trace4value.se/content/uploads/2023/09/Trace4Value-Digital-Product-Passport-in-Textile-Data-Protocol-2023-09-06.pdf>
- Trace4Value. (n.d.). *Pioneering digital product passports: Transforming textile industry standards* [Work package report PDF]. Retrieved September 29, 2025, from <https://trace4value.se/content/uploads/2025/04/Report-Trace4Value-Pioneering-Digital-Product-Passports.pdf>
- TrusTrace. (2024, June 11). Demystifying digital product passports for fashion and textiles. Retrieved July 19, 2025, from <https://trustrace.com/knowledge-hub/demystifying-digital-product-passports-for-fashion-and-textiles>
- Tukatech. (2020, December 24). Combined Fabrics had 7 % fabric savings without any new technology. Retrieved July 19, 2025, from <https://tukatech.com/combined-fabrics-7-percent-fabric-savings/>
- United Nations Environment Programme (2023). Sustainability and circularity in the textile value chain: A global roadmap. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Vićentijević, K., & Simeunović, N. (2024). Improving the sustainability of the textile industry and the circular economy through the implementation of Digital Product Passport. *Tekstilna Industrija*, 72(2), 29-35. doi:10.5937/tekstind2402029V
- Xiong, Y. (2020). The comparative LCA of digital fashion and existing fashion system: Is digital fashion a better fashion system for reducing environmental impacts? (Publication No. spiral: 5dd6e02a-f411-4fb9-8442-9255466fa5ac) [Master's thesis, Imperial College London]. Imperial College Repository.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE. <https://ebooks.umu.ac.ug/librarian/books-file/Case%20Study%20Research%20and%20Applications.pdf>
- Yoo, H., & Lee, S. Y. (2020). A study on the development of zero-waste fashion hanbok -focusing on virtual fitting simulation-. *Journal of the Korean Society design culture*, 26(4), 361-372. doi:10.18208/ksdc.2020.26.4.361

(Received July 26, 2025; 1st Revised August 5, 2025;
2nd Revised August 24, 2025; 3rd Revised September 1, 2025;
Accepted September 8, 2025)