Check for updates
Journal of the Korean Society of Costume
Vol. 76, No. 5 (October 2026) pp. 41-66
Print ISSN 1229-6880
Online ISSN 2287-7827
https://doi.org/10.7233/jksc.2026.76.5.041

패션 순환경제(CE) 기술 인프라의 학술적 동향과 기술 네트워크 및 성숙도 분석

이 미 숙 · 정 경 희+
전남대학교 의류학과 교수/생활과학연구소 연구원 · 국립창원대학교 의류학과 부교수+

An Analysis of Academic Trends, Technology Networks, and Maturity of Circular Economy (CE) Technology Infrastructure in the Fashion Industry

Misuk Lee · Kyunghee Chung+
Professor, Dept. of Clothing and Textiles, Chonnam National University/Human Ecology Research Institute
Associate Professor, Dept. of Clothing & Textiles, Changwon National University+
(received date: 2026. 5. 30, revised date: 2026. 6. 10, accepted date: 2026. 9. 27)

ABSTRACT

As institutional pressures to transition to a circular economy (CE) in fashion intensify, technological infrastructure has become increasingly important. However, the knowledge structure and technological maturity of related research have not been systematically examined. This study analyzes scholarly trends, core themes, technology networks, and application levels across technology domains to identify the structural characteristics of the technological infrastructure underpinning the fashion CE transition. Text mining, network analysis, and CONCOR analysis were conducted on 266 papers published between 2009 and 2025 (search period: 2000-2025), and the strategic niche management framework was applied to assess technological maturity. First, the research progressed through three stages: initial exploration, technology diversification, and integration acceleration. Early studies focused on individual technologies such as RFID and product-service systems, later expanding to IoT, blockchain, and data/AI. Since 2022, research on traceability and recycling automation has surged amid institutional pressures, including the European Union's digital product passport mandate. Second, sustainability, fashion, industry, and technology emerged as core keywords, and CONCOR analysis derived four clusters: industrial systems and sustainability, resource circulation and production processes, traceability and digital platforms, and smart product innovation. The dense interconnections among clusters indicate that fashion CE research focuses on technology integration and systemic approaches beyond individual technology improvements. Third, traceability, recycling automation, and data/AI dominated the technology domains. SNM analysis found that more than half of the studies were still at the experimental stage, while only a small fraction had reached the scaling stage. This indicates that although the feasibility of individual technologies has been validated, challenges such as standardization and interoperability continue to hinder industrial diffusion. These findings suggest that the fashion CE transition requires interoperability, data standardization, and stakeholder collaboration extending beyond individual technological advances. This study contributes to the field by empirically identifying the structural characteristics and developmental stages of fashion CE technology infrastructure, laying a foundation for future research and policy development.

Key words: circular economy(순환경제), fashion industry(패션 산업), technological infrastructure(기술 인프라)

이 논문은 2024년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2024S1A5A2A01027188).
Corresponding author: Kyunghee Chung, e-mail: pinkdonald@naver.com

I. 서론

지금까지 패션 산업에서 널리 채택되어 온 선형 경제(linear economy) 모델은 심각한 환경 문제를 일으켜 왔다. 2024년 세계 섬유 생산량은 약 1억 3,200만 톤에 달하고(Textile Exchange, 2025), 패스트 패션 확산으로 매년 전 세계에서 약 9,200만 톤의 섬유 폐기물이 발생하고 있다(Joo, 2025). 이러한 선형적 생산·소비 구조는 탄소 중립 및 자원 효율성을 저해하는 요인으로 지목되면서 이에 대한 근본적인 대안으로서 패션 순환경제(circular economy, 이하 CE)로의 패러다임 전환이 요구되고 있다(Niinimaki, 2017).

패션 CE는 제품의 설계부터 생산, 유통, 소비, 폐기에 이르는 전 과정에서 자원의 순환적 이용과 가치 회복을 촉진하는 체계를 의미한다. 이러한 전환은 환경적 이니셔티브를 넘어 경제적 기회를 창출하기도 한다. 예컨대 수리, 재판매, 대여 등과 같은 순환 비즈니스 모델은 2030년까지 7,000억 달러의 규모로 성장하여 전 세계 패션 시장의 23%를 차지할 것으로 전망되고 있다(Ellen MacArthur Foundation, 2023). 복잡하고 파편화된 패션 공급망에서 순환성을 확보하기 위해서는 재활용 기술과 같은 물리적 솔루션뿐 아니라 전 수명 주기에 걸쳐 데이터를 수집·추적·공유하고 이를 투명하게 관리할 수 있는 기술 인프라(technological infrastructure)의 구축이 필수적이다(Colombi & D'Itria, 2023). 특히 EU의 디지털 제품 여권(digital product passport, 이하 DPP) 도입은 패션 산업의 투명성과 추적성을 보장하기 위한 인프라의 시급성을 더 부각시키고 있다.

패션 CE를 위한 기술 인프라 관련 선행 연구들은 블록체인과 IoT를 활용한 공급망 추적성 강화(Alves et al., 2024; Bullón Pérez et al., 2020), 디지털 기반 순환 비즈니스 모델 탐색(Colombi & D'Itria, 2023), DPP 및 RFID(radio-frequency identification) 인프라(Rathnayake, 2023), 스마트 라벨링을 통한 소비자 참여 유도(Cruz & da Cruz, 2023; Heim & Hopper, 2022), 산업 4.0 기술의 순환 설계 적용(Akram et al., 2022; Kanwal et al., 2023), 기술 인프라 확산에서의 장벽 및 촉진 요인(Chen et al., 2021; Frei, 2022; Huynh, 2022) 등 다양한 관점에서 수행되었다. 그러나 이와 같은 선행연구들은 특정 기술의 효과 검증이나 사례 분석 연구로 패션 CE를 구현하기 위한 기술 인프라의 구조적 체계와 연구 네트워크 전반을 포괄적으로 분석했다고 하기에는 다소 부족한 부분이 있다.

이에 본 연구의 목적은 사회-기술적 전환(socio-technical system transition) 관점에서 패션 CE 기술 인프라에 대한 학술적 동향과 기술 네트워크 및 성숙도 등을 분석함으로써 기술 인프라를 체계적으로 파악하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 패션 산업의 CE 전환을 개별 기술의 도입이 아닌 공급망, 데이터 거버넌스, 소비자 참여, 생산 및 재활용 체계가 유기적으로 상호작용하는 사회-기술적 시스템 전환의 과정으로 정의하고자 한다. 이러한 관점에서 기술 인프라는 단순한 운영 도구를 넘어 패션 산업의 자원 순환성과 공급망 투명성, 데이터/AI 기반 의사결정, 순환 비즈니스 모델을 가능하게 하는 핵심 기반 체계로 기능한다. 본 연구의 방법론은 다층적 프레임워크 내에서 양적 분석과 질적 분석을 결합한 혼합 연구 방법론을 활용하고자 한다. 먼저 패션 CE 기술 인프라 관련 연구의 초록을 대상으로 텍스트 마이닝 및 네트워크 분석을 실시하여 핵심 기술 키워드와 키워드 간의 구조적 관계, 클러스터를 도출한 다음, 기술 인프라 영역 내 연구 담론과 기술 간의 연결 구조를 규명하고자 한다. 그리고 질적 코딩을 통해 각 기술 도메인별 기술 성숙도와 적용 수준을 평가하고 한계점을 살펴보고자 한다. 본 연구는 사회-기술적 전환 관점에서 패션 CE 기술 인프라 연구의 학술적 동향과 기술 네트워크 구조를 고찰함으로써 패션 산업의 CE 전환을 구성하는 핵심 기술 영역과 연계 구조를 통합적으로 이해하는 데 기여

하고, 향후 패션 CE 기술 인프라의 전략적 구축과 확산을 위한 이론적·실무적 토대를 제공한다는 점에서 의의를 지닌다. 본 연구는 위의 연구 목표를 달성하기 위해 다음과 같은 연구 문제를 설정하였다.

연구문제 1. 패션 CE 관련 기술 인프라 연구의 전반적 동향은 어떠한가?

연구문제 2. 패션 CE 관련 기술 인프라 연구의 핵심 주제와 기술 네트워크는 어떠한가?

연구문제 3. 패션 CE 관련 기술 인프라 연구가 다루는 기술 영역별 핵심 기술과 기술 적용 수준 및 한계점은 무엇인가?

II. 이론적 배경

1. 사회-기술적 시스템 전환 관점에서의 패션 CE

환경 부담에 대한 인식이 증가함에 따라 패션 산업에서는 지속가능성 실천과 산업 구조 변화의 필요성이 끊임없이 제기되고 있다. 특히 CE는 기존의 선형경제 모델을 자원 순환 중심 체계로 재구성하기 위한 대안적 산업 패러다임으로 논의되고 있다. 패션 기업들은 재활용, 소재 혁신, 지속가능한 생산 및 수급, 비즈니스 모델의 재설계 등 다양한 전략을 통해 자원 효율성 향상, 폐기물 감소, 환경영향 최소화를 실현하고자 노력하고 있다(Gazzola et al., 2020).

패션 산업에 CE를 도입하는 과정에서는 다양한 장벽과 촉진 요인이 존재한다. 패션 CE 전환의 장벽은 사회·문화, 제도·규제, 경제·시장, 기술의 네 차원으로 구분된다. 사회·문화적 차원에서는 소비자의 낮은 인식과 태도-행동 간 격차(Hina et al., 2022), 경영진의 CE 이해 부족(Dissanayake & Weerasinghe, 2022)이 있다. 제도·규제적 차원에서는 정부의 재정 지원 부족과 비일관적인 규제, 표준화 시스템 부재(Chen et al., 2021)가 지적되었다. 경제·시장 차원에서는 높은 초기 투자 비용, 낮은 단기 수익성, 순환형 비즈니스 모델 부재(Hina et al., 2022)가 있다. 기술적 차원에서는 역물류 시스템 부족, 재활용 기술의 한계(Chen et al., 2021), 순환형 설계 역량 부족(Hur & Cassidy, 2019) 등이 주요 과제로 제시되었다. 촉진 요인 역시 네 차원으로 구분되는데 사회·문화적 차원에서는 소비자 인식 증가와 환경적 우려(Todeschini et al., 2017), 제도·규제적 차원에서는 정부 정책 강화와 정부 인센티브(Ranta et al., 2018)가 전환을 촉진한다. 경제·시장적 차원에서는 비용 절감 기회, 신규 시장 창출(Fedele & Formisano, 2023), 공급망 협력(Frei, 2022)이 긍정적 요인으로 작용한다. 기술적 차원에서는 기술 혁신과 가용성 향상, 인프라 구축 및 디지털화(Huynh, 2022)가 CE 전환을 가속하는 주요 요인으로 언급되고 있다. 이러한 장벽과 촉진 요인들은 패션의 CE로의 전환이 단순한 친환경 전략의 도입이 아니라 사회, 기술, 제도, 조직, 시장, 소비자 행동이 결합된 사회-기술적 시스템 전환 과정으로 이해될 필요성을 보여준다.

사회-기술적 시스템 이론은 패션 CE 전환을 다차원적 역학 관계로 해석할 수 있는 프레임워크를 제공한다. 이 이론은 기술 변화가 기술 자체의 고립된 발전이 아닌 산업 구조, 정책과 제도, 시장 환경, 소비자 행동, 문화적 가치 등이 상호작용하는 복합적 과정 속에서 이행된다고 보기 때문이다(Geels, 2002). Geels(2002)의 다층적 관점(multi-level perspective, MLP)에서의 사회-기술적 변화는 거시적 환경(landscape), 기존 산업 체제(regime), 니치 혁신(niche innovation)의 상호작용을 통해 발생한다. 거시 환경은 기존 패션 시스템 외부에서 시스템 전체에 변화를 강제하는 외생적인 매크로 트렌드이다. 가장 대표적인 거시 압박은 기후 위기가 있고, 규제 측면에서는 '지속 가능하고 순환적인 섬유를 위한 EU 전략(2022)'을 필두로 DPP 도

입 의무화(Carvalho et al., 2025), 유럽 전역으로 확산 중인 생산자 책임 재활용 제도(EPR) 등이 강력한 압력으로 작용하고 있다. 사회적으로는 소비자의 지속가능성 인식 고조, 패션 기업에 대한 ESG 공시 의무화, UN 지속가능발전목표 등이 기존 선형 체제를 흔드는 동시에 새로운 니치 혁신이 침투할 수 있는 공간을 열어주고 있다(Gazzola et al., 2020; Geels, 2002). 기존 산업 체제는 고착된 대량생산·폐기 중심의 패션 공급 및 유통, 소비 구조로 정리할 수 있다(Abdelmeguid et al., 2022).

현재 패스트 패션 산업을 지배하는 '채취-제조-폐기' 중심의 선형적 논리와 주류 체제는 CE로의 전환을 저해하고 있다. 대량생산과 비용 절감에 최적화된 파편화된 글로벌 생산 네트워크의 인프라적 고착(Hina et al., 2022)과 빠른 회전율 및 시즌별 컬렉션에 의존하는 비즈니스 모델의 제도적 고착(Gazzola et al., 2020)은 제품의 내구성보다 트렌드를 우선시하는 디자인 관행인 인지적 고착(Abdelmeguid et al., 2022)으로 이어지며, 결과적으로 빈번한 구매와 신속한 폐기를 당연시하는 소비 패턴이라고 할 수 있는 행동적 고착(Gazzola et al., 2020)의 악순환을 야기한다. 이처럼 인프라, 제도, 인지, 행동 차원의 고착 메커니즘이 맞물림에 따라 참여자들은 선형적 수익 구조를 보존하려는 강력한 이해관계를 공유하게 되며, 이는 외부의 거시 환경적 압박 속에서도 체제 개선에 완강히 저항하는 요인으로 작용한다. 니치 혁신은 지배적인 주류 체제의 영향력 밖, 즉 보호된 공간(protected spaces)에서 출현하는 근본적인 대안들을 의미한다(Geels, 2002). 이러한 관점에서 CE 패션 기술 인프라는 실험적 프로젝트나 파일럿 사업, 혁신 네트워크 등을 통해 성장하는 대표적인 니치 혁신이라고 할 수 있다(Geissdoerfer et al., 2022). 즉, 패션 CE는 단순한 친환경 전략이 아니라 기술 혁신을 매개로 공급망 구조, 데이터 관리 체계, 소비 방식 등 패션 산업 체제 재구성을 요구하는 사회-기술적 시스템 전환 과정으로 정의되어야 한다(Geissdoerfer et al., 2022). 다시 말해 패션 CE는 거시 환경의 구조적 압박이 주류 체제의 고착 메커니즘에 균열을 내고, 그 틈새를 통해 준비된 니치 혁신이 확산되어 시스템 전반의 규칙과 네트워크를 재정의할 때 비로소 완성되는 동태적인 과정이다. 이 과정에서 기술 인프라는 선형적 고착을 깨고 순환 비즈니스 모델을 가능하게 하는 핵심 기반 체계로 기능한다.

2. 패션 CE를 위한 기술 인프라와 니치 혁신

기술 인프라가 CE 전환의 촉진 요인으로 간주되면서 패션 산업에서 개별 기술들이 CE 전환을 어떻게 실질적으로 뒷받침할 수 있는지에 대한 연구가 활발하다(Alves et al., 2022; Geissdoerfer et al., 2022). 이러한 연구들은 DPP, 블록체인(blockchain) 기반 추적 시스템, IoT를 이용한 실시간 자원 관리, AI 기반 분류·예측 등 기술적 도구들이 자원의 투명성과 순환성 향상, 폐기물 감축, 지속가능한 유통 확립과 같은 CE 전략의 실질적 실행력을 높이는 핵심적 기반으로서 패션 산업의 구조적 전환에 기여할 수 있음을 강조한다.

선행 연구를 종합하면, 패션 CE 모델을 위한 기술 인프라는 〈Table 1〉과 같이 여섯 영역으로 구분할 수 있다. 첫째, 추적 가능성은 제품의 원재료 공급부터 최종 폐기, 회수 및 재활용에 이르기까지의 전 과정에 대한 데이터 기록과 검증을 위한 필수적 기반 기술을 의미하며, DPP, 블록체인, RFID 등 제품의 고유 식별과 이력 추적을 가능하게 하는 기술이 포함된다. 특히 DPP는 유럽연합을 중심으로 추진되고 있고 의류와 섬유 제품의 정보 투명성을 강화하는 핵심 도구로 주목받고 있다(Domskienė & Gaidule, 2024). 그 외에 블록체인과 RFID와 같은 기술은 제품 출처와 인증을 투명하게 추적할 수 있는 수단을 제공함으로써 데이터의 변조를 방지하고 이해관계자 간 신뢰를 구축하는 데 활용된다(Rejeb & Zailani, 2023). 즉, 추적 가능성은 CE 기준 준수와 신뢰 구축을 위한 추적

성과 책임성 향상에 기여한다.

둘째, 데이터/AI 기술은 수요 예측, 재고·생산계획, 설계/소재 선택, 폐기물 저감 의사결정에 AI, 예측 분석, 빅데이터, 생애주기평가(life cycle assessment, 이하 LCA)를 적용하는 기술로 과잉 생산 문제 해결, 환경영향 최소화 설계, 소재 재활용 가능성 판단 등 수요 예측의 불확실성 문제를 완화하고 자원 효율성을 높이는 역할을 한다(Ramos et al., 2023). 이러한 기술은 판매 극대화 도구가 아니라 의사결정 전 과정에 데이터 기반의 정밀성을 제공함으로써 CE 관점에서 폐기물 저감과 환경 발자국 축소를 목표로 활용된다.

셋째, 재활용 자동화 기술은 사용 후 섬유의 분류와 재활용을 지원하는 근적외선 분광법(near-infrared spectroscopy, NIR), 초분광 이미지(hyperspectral image), 머신 러닝(machine learning, ML) 기반 자동 분류 시스템, 로봇 재활용 기술 등을 포괄하며 섬유의 자동 분류·동정, 블렌드 정량화, 재활용 공정 입력 품질 관리 등을 가능하게 한다(Becker et al., 2024; Riba et al., 2022). 이는 혼방섬유나 복합 소재가 많은 패션 산업 구조의 특성상 대규모 재활용 가능성을 실질적으로 확장하는 역할을 한다.

넷째, 디지털 플랫폼 기술은 재판매, 렌탈, 수선 서비스, 제품・서비스 시스템(product- service system, PSS)과 같은 모델을 통해 의류의 수명을 연장하고 신규 생산을 대체함으로써 자원 절감과 자원의 순환성을 촉진한다. 더불어 플랫폼 기반 운영은 거래를 중개하는 것을 넘어 소비자-기업 간 순환적 상호작용을 매개하는 디지털 인프라로 역물류 관리 및 재고 최적화를 용이하게 하여 순환 흐름을 강화한다(Amasawa et al., 2023).

다섯째, IoT 기반 시스템은 의류 및 패션 제품에 센서를 부착하여 생산·사용·세탁·수선·회수 단계에서 데이터를 수집하고, 이를 기반으로 적절한 회수·재사용·수선 시점을 예측하는 기반을 제공하는 도구이다. 예를 들어, 의류에 부착된 센서와 태그는 세탁 빈도, 사용 패턴, 환경 조건을 기록하여 제품 수명을 관리할 수 있다(Alves et al., 2022). 그러나 스마트 텍스타일은 새로운 폐기물 문제를 야기할 수 있어 분해 및 회수 설계가 반드시 병행되어야 한다(Skrzetuska & Rzeźniczak, 2025)는 점이 중요하다.

여섯째, 가상・물리 시스템은 가상 공간에서의 디자인·시뮬레이션·검증과 물리적 생산 및 운영 과정을 연결하는 기술 인프라이다. 대표적으로 3D 프린팅은 주문형 생산을 지원하여 제품 맞춤화가 가능하고 대규모 재고의 필요성을 줄이고 재활용 소재, 부품 단위 생산으로 제품 수선·수명 연장을 지원한다(Despeisse et al., 2017; Gebler et al., 2014). 이는 분산형 생산, 맞춤형 디자인, 폐기물 최소화라는 효과를 가져온다. 디지털 트윈은 제품이나 공정을 가상 환경에 복제하여 모니터링·시뮬레이션할 수 있는 기술로 LCA, 예측적 유지보수, 재활용 가능성 검증 등을 통해 순환성을 고려한 설계를 촉진한다(Tao et al., 2018).

기술 인프라들이 고착화된 선형 체제를 타파하고 산업 전반으로 확산되는 과정은 전략적 니치 관리(strategic niche management, 이하 SNM) 관점과 연계된다(Hwang & Chung, 2019; Nelson & Winter, 1982). SNM은 지속가능한 혁신 기술이 시장에서 즉각적으로 확산되기 어렵기 때문에 보호된 공간을 창출하고 실험을 통해 기술의 사회적 적용 가능성을 학습하며, 궁극적으로 보호를 단계적으로 해제하여 더 넓은 시장과 산업 체제로 확산시키는 과정이다(Kemp et al., 1998). 니치의 진화 단계는 기술의 선택, 실험의 선택/실행, 실험의 설정, 실험의 확대, 보호정책의 해제 등 5단계로 구분된다. 기술의 선택 단계는 선형 체제의 한계를 극복할 수 있는 유망한 대안 기술을 발굴하는 과정이고, 실험의 선택/실행 단계에서는 선정된 기술의 타당성을 모델, 프로토타입, 데이터셋, 파일럿 프로젝트 등을 통해 실험적으로 검증한다. 실험의 설정 단계는 검증된 기술을 특정 사용자, 공급

자, 공정, 플랫폼 등 구체적인 적용 맥락에 맞추어 구성하는 과정으로, 이 과정에서 규제 유예나 정부 보조금 등의 보호된 공간이 초기 기술이 시장 압박에 위축되지 않도록 뒷받침한다. 실험의 확대 단계는 개별 실험을 통해 축적된 지식과 데이터, 네트워크를 기반으로 기술적 성숙도를 높이고 공급망 내 다양한 참여자의 참여를 유도하여 규모 확장을 도모하는 시기이다. 마지막으로 보호정책의 해제 단계에서는 기술 인프라가 자생적인 시장 경쟁력과 경제성을 확보함에 따라 점진적으로 보호를 제거하고 주류 산업 체제에 성공적으로 안착하여 시스템의 전면적 전환을 완수하게 된다(Kemp et al., 1998).

이처럼 패션 산업의 CE 전환을 위해서는 추적성, 데이터, 재활용 자동화 등 다차원적 기술 인프라의 구축이 선행되어야 하며, 이러한 기술 인프라가 주류 산업 체제에 안착하는 데에는 제도적 보호 및 시장 메커니즘이 다차원적으로 진화하는 SNM 과정을 거치게 된다. 즉, 패션 산업의 CE 전환은 기술적 고도화와 사회적·제도적 지원 아래

〈Table 1〉 Revised Classification of Technology Infrastructures for Circular Fashion

Domain	Key Technologies	CE Contribution	Representative Studies
Traceability	Digital Product Passport(DPP), Blockchain, Radio Frequency Identification(RFID), Textile traceability systems	- End-to-end lifecycle data capture - Increased supply-chain transparency - Prevention of counterfeit or unethical sourcing - Optimized take-back and recycling routes	Domskienė & Gaidule (2024); Rejeb & Zailani (2023)
Data/AI	Artificial Intelligence(AI, ML/DL), Life Cycle Assessment(LCA), Big data circular fashion, Predictive analytics	- Reduction of overproduction through predictive demand - Environmental hotspot identification for CE design - Automated assessment of recyclability and material composition	Ramos et al.(2023); Neri et al. (2025)
Recycling Automation	NIR, Hyperspectral imaging textiles, Machine Learning(ML), Automated textile sorting, Robotics recycling fashion, AI recycling textiles	- Accurate sorting of blended/complex textiles - Higher recycling quality and yield - Cost-efficient large-scale processing	Riba et al. (2022); Shi & Sang (2025); Becker et al. (2024)
Digital Platform	Resale, Rental, Repair/ maintenance service circular fashion, Product-service system(PSS)	- Product life extension and reuse promotion - Substitution effect for new production - Improved reverse-logistics and inventory management	Amasawa et al. (2023)
IoT-enabled systems	IoT-enabled fashion supply chain, Smart textiles CE, Wearable technology sustainability, Smart clothing lifecycle	- Real-time product condition and performance tracking - Automated maintenance and reuse decision-making - Support for circularity in e-textiles and smart garments	Alves et al. (2022); Skrzetuska & Rzeźniczak (2025)
Cyber-Physical Systems	3D printing CE textiles, Digital Twin, Simulation-based CE design	- Waste-reduction design optimization - On-demand manufacturing to reduce inventory waste - LCA-driven circular design integration	Gebler et al. (2014); Despeisse et al. (2017); Tao et al. (2018)

에 기존의 선형적인 구조를 바꾸어 나가는 과정이라고 할 수 있다.

III. 연구 방법

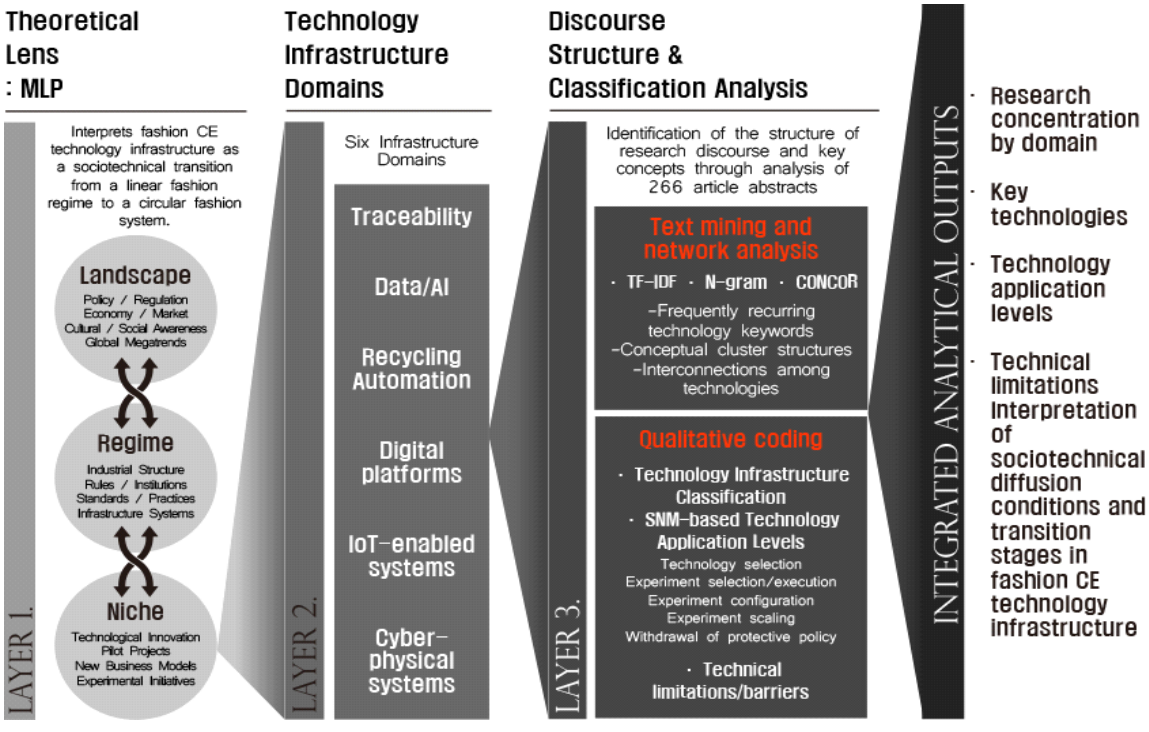
1. MLP-SNM 기반 패션 CE 기술 인프라 분석 모형

본 연구는 사회-기술적 전환 관점에서 패션 CE 기술 인프라 관련 연구를 대상으로 텍스트 마이닝, 네트워크 분석, 그리고 질적 코딩을 결합한 혼합 연구 방법을 적용하여 핵심 기술 영역, 기술 간 구조적 관계, 그리고 기술 성숙도 및 적용 수준을 통합적으로 분석하였다.

본 연구의 분석 프레임워크는 〈Fig. 1〉과 같이 MLP를 패션 CE 기술 인프라를 개별 기술의 집합이 아니라 기존 선형 패션 산업 체제를 변화시키는 사회-기술적 전환 과정으로 이해하기 위한 상위 해석의 틀, 6개 기술 인프라 영역을 패션 CE 전환의 기술적 하위 체계로, SNM 기반 단계 구분을 기술 적용 수준 평가 기준으로 설정하였다. 패션 CE 기술 인프라 연구의 제목 및 초록에 대한 텍스트마이닝과 네트워크 분석은 핵심 주제와 연구 담론의 구조를 파악하기 위한 방법론적 도구로 활용되며, 정성적 코딩은 각 논문의 기술 인프라 영역과 기술 적용 수준을 탐색하기 위한 절차로 사용하였다.

2. 자료 수집 및 분석 방법

본 연구는 PRISMA 절차를 참고해 연구 논문 수집 및 선별과정을 거쳐 자료를 수집하였다. 우선 2000년부터 2025년까지 게재된 패션 CE 기술 인프라 관련 영문 학술 논문을 수집하기 위해 SCOPUS,



〈Fig. 1〉 Analytical Framework for Fashion CE Technology Infrastructure Research

Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Google Scholar, Taylor & Francis Online을 검색하였다. 검색어는 패션 산업의 CE와 기술 인프라를 포괄할 수 있도록 〈Table 1〉을 토대로 "circular economy", "circular fashion", "sustainable fashion", "blockchain", "digital product passport", "RFID", "IoT", "AI", "digital twin", "3D printing", "recycling technology", "fashion", "textile", "apparel" 등을 조합하여 구성하였다. 1차 검색으로 수집된 총 729편 중에서 중복 논문, 학술 논문이 아닌 자료, 패션·섬유 산업의 CE와 직접적 관련성이 낮고 기술 인프라를 주요 분석 대상으로 다루지 않은 연구를 제외한 다음, 제목과 초록을 중심으로 적합성 검토를 수행해서 연구 목적, 적용 기술, CE 관련성, 패션 산업 맥락을 기준으로 선별을 진행하여 본 연구의 분석 목적에 부합하는 266편의 논문을 최종 분석 대상으로 선정하였다.

본 연구는 제목과 초록을 분석 단위로 설정하였는데, 제목과 초록은 연구의 핵심 주제, 연구 목적, 적용 기술, 주요 결과, 한계점 등을 압축적으로 포함하고 있어 연구 동향과 개념 구조를 파악하는 데 효과적이기 때문이다. 수집된 데이터는 텍스트 마이닝 분석 전에 데이터 정제 과정을 거쳤다. 즉, 텍스톰(Textom)의 Core NLP 기반 형태소 분석 기능을 활용하여 영어 텍스트를 대상으로 명사, 형용사, 고유명사를 중심으로 추출하였고 불용어(stopwords), 숫자, 의미 해석이 어려운 단어는 제거하였고, 동일 개념의 표기 일관성 확보 및 단위 중심의 분석을 위해 단어 정규화 작업을 하였다. 예를 들어 "circular economy"는 "CE", "digital product passport"는 "DPP", "supply chain"은 "SC", "second hand"는 "secondhand"로 통합하였다. 처음에 수집된 단어는 3,338건이었지만 텍스트를 정제하는 과정을 거쳐 최종 3,299건이 추출되었다. 이후 단어 빈도 및 TF-IDF(term frequency-inverse document frequency) 분석, N-gram 분석을 실시하였다. TF-IDF 분석은 단순 출현 빈도를 넘어 특정 단어가 전체 연구 논문 집합에서 가지는 상대적 중요도를 파악하기 위해, N-gram 분석은 키워드 간의 공출현 관계를 파악하여 연구 주제 간 연결성과 의미 구조를 확인하기 위해 실시하였다. 패션 CE 기술 인프라 연구의 개념적 구조와 연구 네트워크를 분석하기 위해 상위 빈도 단어 70개를 대상으로 동시 출현 기반의 일원모드(one-mode) 대칭 매트릭스를 구축한 다음, UCINET 6.798과 NetDraw를 활용하여 단어 네트워크를 시각화하였다. 또한 구조적 등위성을 기반으로 의미적 유사성을 지닌 단어 군집을 도출하기 위해 CONCOR (convergence of iterated correlations) 분석을 하였다.

패션 CE를 위한 기술 인프라 관련 연구의 영역별 기술에 대한 현황과 기술 적용 수준을 파악하기 위해 선행 연구 고찰을 통해 도출된 6개 기술 인프라 영역(추적 가능성, 데이터/AI, 재활용 자동화, 디지털 플랫폼, IoT 기반 시스템, 가상·물리 시스템)을 분석 프레임워크로 설정하고 정성적·정량적 분석을 수행하였다. 구체적으로 영역별 핵심 기술 용어를 분류 지표로 활용하고 각 도메인을 대표하는 전문 용어를 코딩 준거로 설정하였으며, 단순 키워드 매칭에 따른 분류 오류를 최소화하기 위해서 기술적 도구와 연구 목적을 교차 검토하였다. 각 연구는 원칙적으로 하나의 분석 영역에 할당하였지만 둘 이상의 기술 인프라가 유사한 수준으로 결합되어 시스템 전반의 전환을 포괄적으로 다루는 경우엔 다분야 융합 연구로 분류하였다. 분류 완료 후에는 영역별 논문 수를 집계하고, 텍스트 마이닝으로 도출된 고빈도 키워드와 초록의 핵심 내용을 대조하여 주요 연구 주제를 도출하였다. 기술 적용 수준 분류는 〈Table 2〉와 같이 SNM 선행 연구(Kemp et al., 1998)를 토대로 기술의 선택, 실험의 선택/실행, 실험의 설정, 실험의 확대, 보호정책의 해제 등 다섯 단계로 분석하였다. 이를 위해 각 단계별 정의를 사전에 구체화하고, 초록에 나타난 연구 목적, 방법, 실증 범위 및 구체적인 적용 맥락을 기준으로 각 단계를 나타내는 핵심 키

〈Table 2〉 Technology Application Maturity Stages

Application Level	Definition	Identifiable in the Text
Technology Selection (Tech-Sel)	The stage in which the necessity, feasibility, and role of a technology are proposed for solving a specific CE problem.	conceptual, framework, potential, review, proposed, opportunity, future direction, theoretical, perspective, roadmap, vision, exploratory, recommendations, suggest, need for, promising, feasibility study, literature review, systematic review, state-of-the-art, emerging
Experiment Selection/ Execution (Exp-SE)	The stage in which a specific technology is experimentally tested through models, prototypes, datasets, or validation activities.	experiment, prototype, pilot, model, dataset, test, validation, simulation, proof-of-concept, laboratory, algorithm development, technique development, testing environment, technical validation, performance evaluation, accuracy assessment, experimental design, trial
Experiment Configuration (Exp-Cfg)	The stage in which the technology is configured according to a specific application context, including users, suppliers, processes, or platforms.	case study, implementation context, stakeholders, supply chain, user, process, field study, real-world application, industry partner, collaboration, specific context, demonstration, business case, value chain integration, organizational implementation, system configuration
Experiment Scaling (Exp-Scl)	The stage in which the technology expands into markets, industries, platforms, and real-world operational systems involving multiple stakeholders.	adoption, scaling, industry-wide, market, commercial, platform operation, real-world deployment, diffusion, mainstream, widespread implementation, market penetration, industrial scale, commercialization, large-scale deployment, multi-stakeholder ecosystem
Withdrawal of Protective Policy (Policy-WD)	The stage in which protected experiments or policy-supported initiatives transition into general market competition and mainstream systems.	policy phase-out, subsidy removal, regulation withdrawal, standardization completion, mainstreaming, market maturity, competitive parity, regulatory integration, industry standard, self-sustaining, unsubsidized operation

워드를 매칭하여 코딩을 수행하였다. 예를 들어 기술의 선택 단계는 개념적 제안과 기술 가능성 탐색을 중심으로 분류하였으며, 실험의 선택/실행 단계는 프로토타입 개발, 성능 검증, 실험실 수준 테스트 등 실증적 검증이 수행된 연구를 중심으로 구분하였다. 한 논문 내에서 실험의 선택/실행과 실험의 설정이 혼재된 경우에는 해당 논문의 궁극적인 '주된 연구 목적 및 실증 범위'를 최우선 기준으로 삼아 최종 단계를 확정하였다. 마지막으로 각 기술 인프라 영역별 한계점은 선행연구에서 반복적으로 제시된 기술적 제약 사항을 종합하여 정리하였다.

이상의 기술 인프라 영역 및 적용 수준 분석은 분석 기준에 따라 연구자 2인이 독립적으로 수행했는데 분류 결과의 일치 여부를 상호 검토하였고 의견 불일치가 발생한 경우엔 논의를 통해 확정하였다. 초기 분류 결과의 일치도를 Cohen's Kappa로 산출한 결과, 기술 인프라 영역 분류는 0.862로 거의 완벽한(almost perfect) 수준, SNM 단계 분류는 0.777로 상당한(substantial) 수준의 일치도를 보였다(Landis & Koch, 1977). 불일치 사례는 주로 한 논문에서 여러 단계가 혼재된 경우에 발생하였고, 이 경우 논문의 주요 연구 초점과 방법론의 기술을 기준으로 최종 판정하였다.

IV. 연구 결과

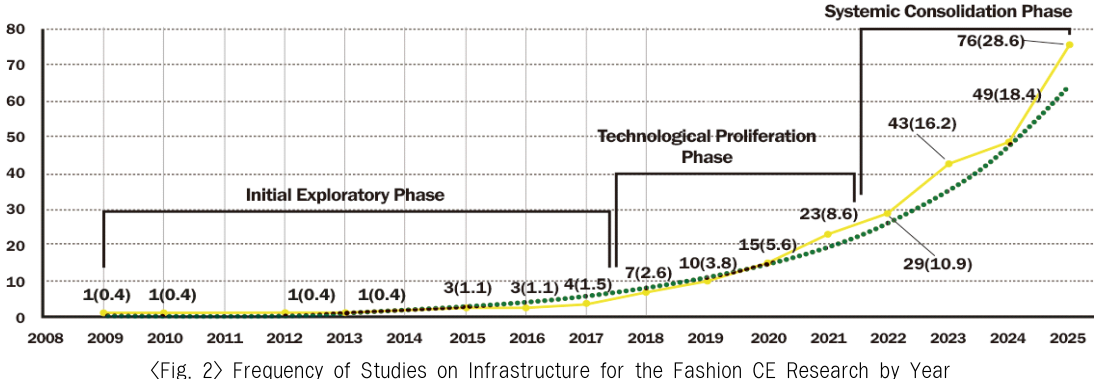
1. 연도별 연구 동향

패션 CE를 위한 기술 인프라 관련 연구 동향은

〈Fig. 2〉와 같이 크게 세 시기로 구분되었다. 초기 탐색기(2009-2017)는 CE 기술들이 보호된 공간에서 가능성을 모색했던 시기로, 글로벌 패스트 패션 확산에 따른 과잉 생산과 폐기물 증가 문제가 본격적으로 제기되었다(Jacometti, 2019). 특히 2015년 파리기후협약과 UN 지속가능발전목표(SDGs) 채택 이후 패션 산업에서도 탄소배출과 자원 순환 문제에 대한 관심 증가로(European Commission, 2022), CE 전환을 지원할 수 있는 디지털 기반 기술의 필요성이 점차 제기되기 시작하였다. 이 시기에는 주로 추적 가능성 기술인 RFID를 섬유·의류 생산 관리에 적용하려는 연구(Nayak et al., 2015)와 재제조 등을 통해 의류 폐기물을 원천적으로 줄이려는 제품 개발 연구(Dissanayake & Sinha, 2015)가 주를 이루었다. 또한 소비 단계에서 소유보다 이용을 강조하는 PSS가 패션 산업에 연계(Zamani et al., 2017)되기도 했으나 전반적으로는 개별 기술의 실제 적용 가능성을 탐색하고 제한된 범위에서 검증하는 연구들이 수행되었다.

기술 다변화기(2018-2021)는 기후 위기와 환경 규제 논의 등 거시 환경의 압박이 더욱 강화되면서 다양한 기술 영역들이 본격적으로 확장된 시기라고 할 수 있다. 특히 2018년 UN 기후 행동을 위한 패션 산업 헌장(fashion industry charter for climate action) 발표와 함께 패션 산업의 탄소 중립 및 공급망 감축 요구가 강화되었으며, 미세플라스틱과 섬유 폐기물 문제가 주요 환경 이슈로 부상하였다(European Parliament, 2022). 2020년 COVID-19 팬데믹은 글로벌 패션 공급망의 취약성을 드러내며 디지털 전환과 데이터 기반 공급망 관리의 중요성을 더욱 부각시키는 계기가 되었다(Vogue Business, 2022). 이러한 배경 속에서 IoT 기반 시스템과 블록체인 기술이 공급망 관리와 추적 가능성 확보를 위해 접목되기 시작했고(Caldarelli et al., 2021; Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018), 데이터 및 AI 기술을 활용해 수요 예측 정확도를 높이고 생산 공정 품질을 관리하려는 연구(Mo & Wong, 2021)도 등장하였다. 또한 가상 시뮬레이션 기반 의류 디자인과 제품수명주기관리(product lifecycle management, PLM) 시스템 연구(Conlon, 2020; Khajavi, 2021) 등 각 기술 영역이 개별적으로 발전하며 기존 선형 시스템의 비효율성을 보완할 수 있는 전략 중심의 연구가 주를 이루었다.

통합 가속화기(2022-2025)는 EU의 DPP 의무화 논의와 지속가능·순환 섬유 전략(EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles) 발표 등 강력한 제도적 규제가 구체화되면서(European Commission, 2022), 니치에 머물던 혁신 기술들이 주류 시장으로의 진입을 가속하기 위한 연구들이 수행된 시기라고 볼 수 있다. 이에 규제 대응과 공급망 투명성 확보를 위한 추적 가능성 연구(Abreu et al., 2025;



〈Fig. 2〉 Frequency of Studies on Infrastructure for the Fashion CE Research by Year

Carvalho et al., 2025)가 급증했고, 순환 체계의 핵심 병목으로 지적되어 온 섬유 폐기물 문제를 해결하기 위해 재활용 자동화 기술의 정확도와 효율성을 고도화하려는 연구(Becker et al., 2024; Riba et al., 2022)가 수행되었다. 또한 생산자책임재활용제도(EPR), 그린 워싱 규제, 환경정보 공시 등 데이터 기반 규제 체계가 확대되면서(Mizrachi & Tal, 2022), 제품 이력 관리와 공급망 데이터 통합 기술의 중요성도 증가하였다. 특히 이 시기의 가장 큰 특징은 파편화된 단일 기술의 한계를 극복하기 위해 블록체인, AI, IoT, 디지털 트윈, PLM 시스템 등 다양한 기술 인프라를 연계하려는 융합 연구가 많았다는 점이다. 이를 통해 개별 기술 인프라를 하나의 유기적인 순환 시스템으로 통합하려는 논의(Cruz & da Cruz, 2023)가 본격화되었다. 2024년과 2025년에는 연간 발표 논문 수가 급증하는 등 패션 CE 기술 인프라 연구가 활발하게 이루어지며 관련 논의가 확장되었다.

2. 단어 빈도 및 TF-IDF, N-gram 분석

패션 CE를 위한 기술 인프라 연구에 나타난 단어의 빈도와 TF-IDF 분석을 정리한 결과는 〈Table 3〉과 같다. 단어 빈도에서 많이 나타난 키워드는 textile(734회), fashion(566회), sustainability(512회), industry(454회), technology(390회), study(298회), waste(262회), product(255회), environment(227회), material(204회) 등으로 섬유·패션 산업이라는 산업적 맥락에서 폐기물 및 지속가능성 압박 등의 거시 환경을 드러내는 단어들이 포함되었다. 그 외에 model, consumer, process, blockchain, SC, traceability, datum, cloth, design, impact, digital 등의 키워드는 패션 CE를 위한 기술 인프라 연구들이 디지털 기술, 데이터 기반 운영 체계, 공급망, 유통, 소비, 데이터 등 다양한 주제로 수행되었음을 알 수 있다.

TF-IDF 분석에서 상위 키워드는 빈도 분석에서 많이 나타난 키워드를 포함해 cloth, recycling, CE, apparel, RFID, fiber, business, smart, 3D 등이 많이 나타났다. 특히 blockchain, SC, traceability, RFID의 높은 TF-IDF는 순환 체계에서 추적 가능성과 정보 흐름의 신뢰성 및 이동 경로 관리가 중요함을 보여준다. 또한 datum 키워드는 데이터/AI 기술 영역, digital과 model은 디지털 플랫폼의 기반 위에서 구현되는 순환형 비즈니스 모델 연구를 나타내고 smart와 3D는 스마트 소재 및 디자인 기술을 다루는 가상·물리 시스템, recycling과 waste는 자원 병목을 해결하기 위한 재활용 자동화 인프라 연구와 연결된다고 할 수 있다. 이상의 단어 빈도 및 TF-IDF 분석 결과를 통해 패션 CE 기술 인프라 연구가 거시 환경적 압박에 대응하여 추적 가능성, 공급망 투명성, 데이터 기반 시스템, 제조 및 소재 혁신 등의 세부 기술 영역들을 중심으로 수행되었음을 알 수 있다.

N-gram 분석에서 바이그램(bigram)은 15회 이상, 트리그램(trigram)은 5회 이상 나타난 결과를 정리하면 〈Table 4〉와 같다. 바이그램에서는 fashion industry(164회), textile waste(88회), textile industry(77회), blockchain technology(67회), environment impact(65회), case study(56회), sustainability fashion(49회), digital technology(48회), business model(42회), electronic textile(37회), post consumer(36회), smart textile(35회), fashion textile(35회), 3D printing(34회), waste management(32회) 순으로 상위 빈도를 차지하였다. 트리그램에서는 post consumer textile(29회), consumer textile waste(24회), sustainability development goal(14회), sustainability fashion industry(14회), textile waste management(13회), fashion textile industry(12회), wearable electronic textile(11회), greenhouse gas emission(11회)가 많이 나타났다. N-gram 분석은 기술 인프라 연구들이 블록체인 기반 추적 가능성, 재활용 자동화 영역의 폐섬유 처리 기술, 디지털 플랫폼, IoT 기반 시스템 영역의 스마트 섬유, 가상·물리 시스템 등 구체적 기

〈Table 3〉 Frequency and TF-IDF Analysis of Top 70 Words on Research

Word	Frequency	Word	TF-IDF
textile	734	textile	432.544
fashion	566	blockchain	321.402
sustainability	512	waste	304.153
industry	454	fashion	271.603
technology	390	technology	265.937
study	298	cloth	243.603
waste	262	digital	243.086
product	255	SC = supply chain	242.12
environment	227	traceability	241.826
material	204	consumer	239.769
model	197	sustainability	236.409
consumer	194	model	226.336
process	180	recycling	220.722
blockchain	179	CE = circular economy	214.915
SC = supply chain	178	apparel	207.556
traceability	178	product	204.155
datum	166	RFID = radio frequency identification	200.282
cloth	164	design	199.352
design	163	fiber	196.157
impact	163	study	194.438
digital	160	material	192.78
production	159	datum	192.708
CE = circular economy	158	environment	189.499
system	145	business	183.448
recycling	142	smart	182.562
challenge	132	3D	180.242
apparel	132	fabric	174.371
development	127	system	173.667
practice	121	process	173.63
method	120	industry	173.08
potential	118	value	172.62
application	110	luxury	171.842
business	110	review	166.674
innovation	108	DPP = digital product passport	165.455
review	106	impact	163.818
value	106	method	163.227
future	102	production	163.111
fiber	101	development	162.009
information	95	practice	161.079

〈Table 3〉 (Continued)

Word	Frequency	Word	TF-IDF
case	94	management	155.476
smart	94	garment	155.21
management	91	secondhand	151.543
fabric	91	wearable	151.095
strategy	90	circular	150.938
company	88	information	147.666
consumption	85	challenge	145.516
high	84	consumption	145.225
3D	84	company	145.016
circular	83	electronic	144.709
efficiency	83	innovation	143.773
garment	81	tag	143.164
use	77	strategy	141.516
RFID = radio frequency identification	76	application	140.323
solution	75	LCA = life cycle assessment	138.68
manufacturing	73	potential	138.415
framework	73	future	137.254
market	69	platform	134.852
significant	64	printing	134.366
role	64	case	133.56
wearable	64	framework	129.434
article	63	firm	129.128
concept	63	market	128.765
literature	62	decision	127.898
secondhand	62	efficiency	127.544
quality	62	leather	127.049
social	60	social	126.84
platform	60	AI	124.225
effect	60	customer	123.33
resource	59	manufacturing	123.217
issue	58	PLM	122.754
integration	58		
technique	58		

술을 주제로 논의되고 있으며, 환경 성과 측정이 UN SDGs와 통합되고 있음을 보여준다.

3. 단어 네트워크 시각화와 CONCOR 분석

패션 CE를 위한 기술 인프라 연구 키워드의 네트워크 내 연결 관계 및 패턴을 시각적으로 도출한 결과는 〈Fig. 3〉과 같이 밀접하게 연계된 고밀

〈Table 4〉 Bigram and Trigram Analysis of the Words

Bigram					
Word 1	Word 2	Frequency	Word 1	Word 2	Frequency
fashion	industry	164	digital	transformation	22
textile	waste	88	RFID	tag	22
textile	industry	77	textile	material	21
blockchain	technology	67	technology	fashion	21
environment	impact	65	textile	cloth	20
case	study	56	sustainability	textile	20
sustainability	fashion	49	luxury	fashion	20
digital	technology	48	big	datum	19
business	model	42	raw	material	19
electronic	textile	37	RFID	technology	18
post	consumer	36	manufacturing	process	18
smart	textile	35	state	art	17
fashion	textile	35	production	process	17
3D	printing	34	sustainability	SC	17
waste	management	32	secondhand	luxury	16
value	chain	29	textile	product	16
consumer	textile	29	fashion	company	16
life	cycle	29	fashion	product	16
waste	textile	29	eco	friendly	16
textile	recycling	28	development	goal	15
textile	apparel	28	industry	sustainability	15
apparel	industry	28	cloth	industry	15
fast	fashion	28	future	direction	15
sustainability	development	26	i4 = industry 4	technology	15
sustainability	practice	25	smart	cloth	15
literature	review	23	fashion	SC	15

Trigram							
Word 1	Word 2	Word 3	Frequency	Word 1	Word 2	Word 3	Frequency
post	consumer	textile	29	fashion	industry	sustainability	6
consumer	textile	waste	24	practice	fashion	industry	6
sustainability	development	goal	14	fashion	textile	SC	6
sustainability	fashion	industry	14	technology	fashion	industry	6
textile	waste	management	13	sustainability	SC	practice	6
fashion	textile	industry	12	sustainability	value	chain	6
wearable	electronic	textile	11	fashion	resale	market	6
greenhouse	gas	emission	11	consumer	purchase	intention	5
orthogonali-zation	external	parameter	9	textile	RFID	tag	5
product	life	cycle	8	textile	cloth	industry	5

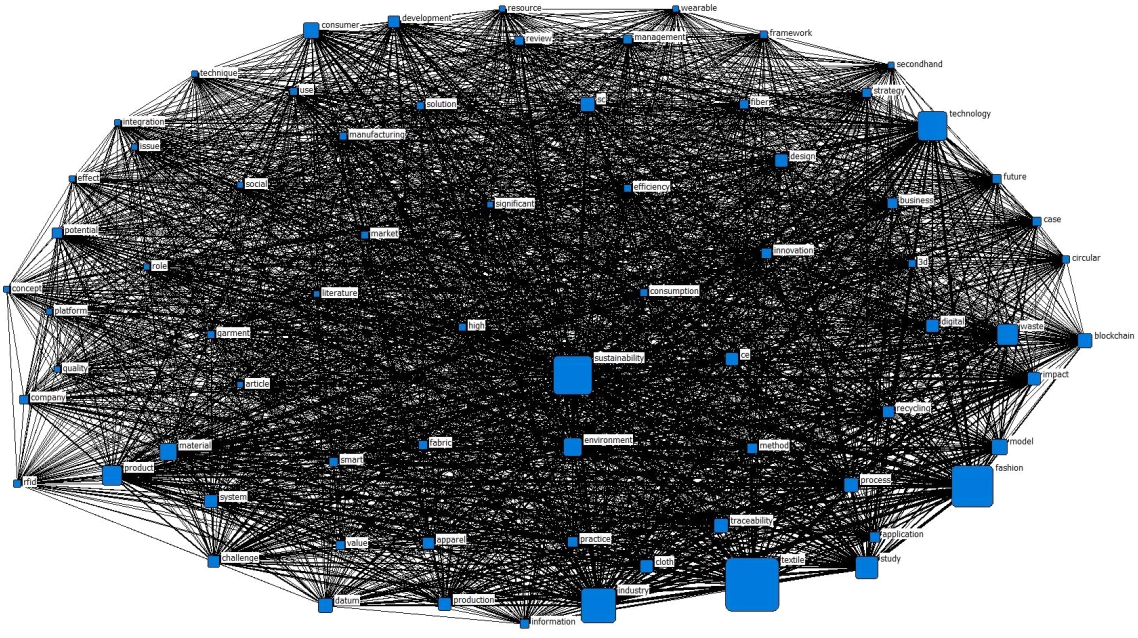
〈Table 4〉 (Continued)

Trigram							
Word 1	Word 2	Word 3	Frequency	Word 1	Word 2	Word 3	Frequency
textile	fashion	industry	8	fast	fashion	industry	5
blockchain	technology	fashion	8	life	cycle	product	5
application	blockchain	technology	7	negative	environment	impact	5
fashion	industry	study	7	business	intelligence	system	5
textile	apparel	industry	7	textile	waste	recycling	5
waste	fashion	industry	7	environment	social	impact	5
systematical	literature	review	7	textile	apparel	fashion	5
environment	impact	fashion	7	technology	fashion	textile	5
secondhand	luxury	market	6	role	blockchain	technology	5
digital	technology	cbmss	6	cloth	consumption	system	5
context	fashion	industry	6	MC = modified cosine	weibull	distribution	5
pull	demand	model	6				

도 네트워크 구조가 형성되어 다양한 연구 영역들이 상호 연계된 형태로 축적되었음을 알 수 있었다. 키워드 textile이 우측 하단부에 가장 큰 노드로 나타났고, sustainability가 네트워크 중앙, fashion은 우측 하단, industry는 하단부, technology는 우측 상단에 큰 노드로 배치되어 패션 CE 기술 인프라 연구에서 높은 출현 빈도를 보이는 핵심 개념임을 확인할 수 있었다. 공출현 매트릭스의 정량적 분석에서 textile은 industry와 104회 sustainability와 85회, fashion과 70회 공출현을 보이며 지속가능한 패션 산업 시스템 관련 키워드들과 긴밀하게 연계되어 있었고, waste와 67회, recycling과 49회의 높은 공출현 빈도를 보여 자원 순환 및 생산 공정 관련 논의에서도 중심 키워드로 기능하였다. 이는 textile이 패션 CE 연구에서 폐기물 관리, 재활용 기술, 산업 전환을 아우르는 핵심 연결고리로 작용하고 있음을 의미한다. 또한 fashion은 industry와 123회, sustainability와 114회 공출현하여 패션 산업의 지속가능성 전환이 연구의 중심 의제임을 확인할 수 있고, sustainability는 fashion과 114회, industry와 118회 공출현하여 환경적 지속가능성 개념이 패션 산업, 섬유 소재, 산업 운영과 밀접하게 연계되어 논의되고 있음을 알 수 있다. 네트워크 내부에서는 의미적으로 연관된 일부 키워드들이 상대적으로 인접하게 배치되었는데, waste와 recycling은 네트워크 우측 중앙부에서 비교적 가까운 위치에 나타나며, 이들은 textile과 각각 67회, 49회 공출현하여 섬유 폐기물 처리 및 재활용 공정과 관련된 연구 흐름을 반영한다. 또한 blockchain, digital, traceability는 디지털 기반 추적성 기술과 관련된 논의를 나타내며, 특히 blockchain과 traceability는 38회 공출현하여 공급망 투명성 확보를 위한 블록체인 기술 활용이 추적 가능성 영역의 주요 연구 주제임을 보여준다.

위의 네트워크는 연결 밀도가 높아 시각적 근접성만으로 구조적 집단을 구분하기 어렵고, force-directed 기반 2차원 시각화 역시 실제 의미적 유사성을 정확히 반영하지 못할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 키워드 간 유사한 연결 패턴을 파악하기 위해 CONCOR 분석을 수행하여 구조적 등위성 기반의 클러스터를 도출하였다. 패션 CE를 위한 기술 인프라 연구에 나타난 키워드는 〈Fig. 4〉와 같이 4개의 주요 클러스터로 구분되었다.

먼저 가장 큰 노드 밀집도를 보인 클러스터 1은



〈Fig. 3〉 Network Visualization of the Top 70 Words

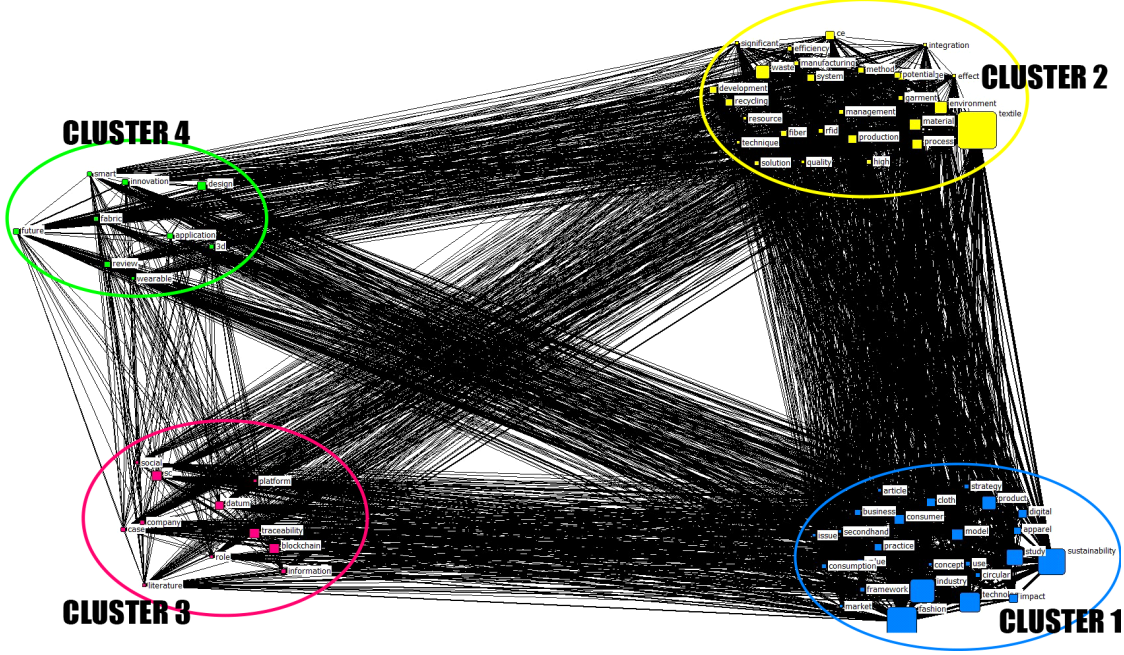
산업 시스템 및 지속가능성 클러스터로 명명할 수 있으며, fashion, sustainability, industry, technology, study, product, model, consumer, cloth, digital, impact, apparel, practice, business 등의 키워드로 구성된다. 이 클러스터는 패션 산업의 CE 모델로의 체제 변화를 다루는 연구 흐름을 나타낸다. 가장 큰 특징은 sustainability, fashion, industry, technology 등의 핵심 키워드들이 모두 포함되어 있다는 점이다. 이는 지속가능성 논의가 패션 산업 전체의 구조적 변화와 맞물려 있음을 의미한다. consumer, use, consumption 키워드의 포함은 산업 체제 전환이 생산자 중심의 기술 혁신을 넘어 소비자 행동 변화와 참여를 중요한 요소로 다루고 있음을 보여준다. 6개 기술 인프라 영역에 있어서 이 클러스터는 특정 기술 영역에 속하기보다는 다양한 기술 영역이 산업 시스템 차원에서 통합적으로 논의되고 있는 경향을 반영한다. MLP 관점에서는 industry, business, fashion, consumer는 기존 패션 산업의 주류 시스템, sustainability, circular는 거시적 환경이라고 할 수 있는 기후 변화, 자원 고갈, 환경 규제 강화 등, 기존 산업 체제의 변화와 관련된 산업 전환 논의와 연결된다. 특히 impact 키워드가 포함된 것은 이러한 전환이 환경적 영향에 대한 평가와 함께 논의되고 있음을 시사한다. study와 article의 포함은 해당 클러스터가 특정 기술보다 산업 전환과 지속가능성 전반에 대한 학술적 논의를 중심으로 형성되고 있다는 것을 알 수 있다.

가장 많은 키워드가 포함된 클러스터 2는 자원 순환 및 생산 공정 클러스터로, textile, waste, environment, material, process, production, CE, recycling, system, method, development, fiber, RFID 등의 키워드로 구성된다. 특히 textile, material, waste, recycling, fiber 키워드는 섬유 폐기물을 자원으로 재순환시키는 기술적 과제가 이 클러스터의 핵심임을 보여주며, process, production, manufacturing은 이러한 순환이 폐기물 처리 단계에서만 이루어지는 것이 아니라 순환 시스템이 생산 공정 수준에서 함께 논의되고 있음을 시사한다.

method와 integration 키워드의 포함은 다양한 기술적 접근과 시스템 연계에 대한 관심을 나타내는 것으로, 클러스터 2가 재활용 자동화 영역과 생산 공정 혁신을 중심으로 한 자원 순환 기술을 반영한다고 추측할 수 있다. MLP 관점에서 manufacturing, production, integration 등이 포함된 점은 기술 혁신이 기존 산업 체제 수준의 생산 시스템으로 확산되는 과정에 있으며, 이러한 기술이 단순한 개념 증명을 넘어 생산 공정 수준과 연계되어 있음을 시사한다. 한편 추적 가능성 기술인 RFID가 이 클러스터에 포함된 것은 RFID가 섬유 생산 공정 및 재활용을 위한 선별·회수 과정에서 식별 수단으로 활용되는 연구 흐름을 반영한 것으로 해석할 수 있다.

클러스터 3은 추적 가능성 및 디지털 플랫폼 클러스터로, SC, traceability, blockchain, datum, company, case, platform, information, social 등 추적 가능성, 디지털 플랫폼, 데이터/AI 기술을 상징하는 키워드를 포함한다. SC, traceability와 blockchain은 공급망 전반의 정보 투명성과 제품 이력 관리 강화와 관련된 연구 흐름을 반영하며, 소비자 신뢰 확보 및 순환 시스템 운영과 연계되어 논의되고 있다. platform 키워드는 플랫폼 기반 순환 비즈니스 모델을 가능하게 하는 디지털 인프라, datum과 information은 데이터 수집, 처리, 공유와 관련된 연구 흐름을 반영한다. company와 social 키워드는 기업의 비즈니스 모델 혁신이 단순히 경제적 이익 추구를 넘어 사회적 책임 및 지속가능성과 함께 논의되고 있음을 시사한다. MLP 관점에서 클러스터 3에 포함된 키워드들은 니치 수준의 혁신이 기존 산업 체제와 연결되는 과정과 관련된 연구 흐름을 보여준다고 할 수 있다.

클러스터 4는 스마트 제품 혁신 클러스터로, design, future, innovation, application, review, smart, fabric, 3D, wearable 등의 키워드로 웨어러블 기기, 스마트 섬유, 3D 프린팅과 같은 신기술 기반의 제품 디자인 및 미래 지향적 혁신 논의를 포함한다. 이 클러스터는 IoT 기반 시스템 및 가상·물리



〈Fig. 4〉 CONCOR Analysis of Top 70 Words

시스템 영역, wearable 기술은 제품 사용 단계 데이터의 수집 및 활용 가능성, 3D 프린팅은 주문형 생산 및 맞춤형 제작과 관련된 미래 기술로 논의되고 있다. MLP 관점에서 이러한 키워드들은 주로 니치 수준의 기술 혁신을 나타내고, 이 기술은 아직 패션 산업 전반에 광범위하게 확산되기보다 탐색적·실험적 성격의 연구 단계에서 주로 논의되고 있다. innovation과 future 키워드의 포함은 패션 시스템의 한계를 보완할 수 있는 패션 CE 시스템의 미래 적용 가능성을 탐색하는 연구 흐름을 보여준다.

클러스터 간 연결선의 밀도는 각 클러스터가 독립적으로 발전하기보다는 상호 연계되어 있음을 보여준다. 특히 클러스터 1은 다른 모든 클러스터와 조밀한 연결을 형성하고 있다. 클러스터 1은 특정 기술 영역보다는 지속가능성과 CE라는 상위 목표를 중심으로 형성되어 있어 6개 영역이 통합적으로 작동하는 맥락을 나타낸다. 클러스터 2는 재활용 자동화와 생산 공정 관련 키워드를 포함하여 물리적 자원 순환이 생산 체계와 구조적으로 연계되어 있음을 시사하고, 클러스터 3은 추적 가능성, 디지털 플랫폼, 데이터/AI 영역의 키워드를 포함하여 정보의 수집·공유·관리를 중심으로 한 인프라를 반영한다. 클러스터 4는 IoT 기반 시스템과 가상・물리 시스템 영역의 키워드를 포함하고 있어 두 영역이 밀접하게 연결되어 있음을 보여준다.

4개의 클러스터는 MLP의 다층적 전환 구조와 부분적으로 대응되는 양상을 보인다. 먼저 거시적 환경 수준에서는 빈도분석과 TF-IDF 분석에서도 높게 나타난 sustainability, environment, waste 등의 키워드가 지속적으로 높은 비중을 차지하였다. 이는 패션 산업 외부에서 작동하는 환경적·사회적 요구가 패션 CE 기술 인프라 연구를 촉진하는 중요한 배경으로 기능하고 있음을 시사한다. 즉, 지속가능성에 대한 사회적 관심과 자원순환에 대한 요구가 패션 산업의 전환을 촉진하는 거시적 압력으로 작용하고 있는 것으로 해석할 수 있다. 기존 산업 체제 수준에서는 기존 패션 산업 시스템 내부의 변화와 적응 과정이 확인되었다. 클러스터 1은 패션 산업의 지속가능성 전환과 산업 구조 변화와 관련된 키워드, 클러스터 2는 자원 순환과 생산 공정 혁신과 관련된 키워드가 포함되었다. 이는 CE 전환이 기존 산업 체제를 대체하기보다는 생산, 소비, 공급망 운영 등 기존 시스템 내부의 구조적 변화를 통해 이루어지고 있음을 보여준다. 니치 혁신 수준에서는 새로운 기술 기반의 혁신이 나타났다. 클러스터 3과 클러스터 4는 디지털 기반 기술, 미래 지향적 기술을 나타내는 키워드를 포함하고 있다. 이러한 기술들은 기존 산업 체제 내에서 아직 완전히 정착되지 않은 혁신적 기술 영역으로서 니치 수준의 기술 혁신 특성을 보여준다. 특히 클러스터 1과 클러스터 3·4 간의 구조적 연결은 니치 수준에서 발전하는 기술이 기존 산업 체제의 지속가능성 전환과 점차 연계되고 있음을 시사한다. 종합하면, 패션 CE 기술 인프라 연구는 환경적 요구와 지속가능성 담론이라는 거시적 배경 속에서 기존 산업 체제의 변화와 새로운 기술 혁신이 상호작용하는 방향으로 발전하고 있으며, 이는 MLP가 설명하는 사회-기술적 전환 과정과 부분적으로 부합하는 양상을 보여준다.

4. 기술 인프라 영역별 현황

패션 CE 관련 기술 인프라 연구를 6개 기술 인프라 영역을 기준으로 분류한 결과는 〈Table 5〉와 같다. 영역별 분포는 추적 가능성 67편(25.2%), 재활용 자동화 62편(23.3%), 데이터/AI 50편(18.8%), IoT 기반 시스템 25편(9.4%), 가상・물리 시스템 23편(8.6%), 디지털 플랫폼 21편(7.9%), 다분야 융합 연구 18편(6.8%) 순으로 나타났다. SNM에 따른 기술 적용 수준을 분석한 결과, 연구의 상당수가 초기 및 중간 단계인 실험의 선택/실행(50.8%), 기술의 선택(21.4%), 실험의 설정(21.4%)에 집중되어 대부분의 연구가 개념적 탐색과 실험적 검증 단계에 있는 것으로 나타났다. 이는 기술 인프라에

대한 실험실 및 파일럿 규모의 연구는 활발히 진행 중이지만 이를 산업 전반으로 확산시키기 위해서는 장벽이 존재함을 보여준다. 기술적 한계에 있어서는 비용과 데이터 표준화, 시스템 상호운용성, 소비자 수용성 등의 문제가 반복적으로 나타났다. 각 기술 인프라 영역별로 키워드와 적용 수준, 한계점 등을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

추적 가능성 영역에서는 DPP, 블록체인, RFID, 제품 이력 추적 시스템, 공급망 투명성 기술이 핵심 기술로 나타났다. 이들은 원재료 공급부터 재활용에 이르는 제품 전 과정의 정보를 기록하고 검증함으로써 CE 실행에 필요한 정보 기반을 제공한다. 기술 적용 수준 측면에서는 실험의 선택/실행 단계가 가장 높게 나타났는데, 이는 추적 가능성 기술이 공급망 투명성, 윤리적 소싱, 제품 정보 공개, 소비자 신뢰 형성 등 구체적인 적용 맥락 속에서 실험적으로 검증되고 있음을 의미한다. 그러나 실험의 확대 단계 등은 매우 제한적으로 나타나 추적 시스템이 패션 CE의 핵심 인프라로 인식되지만, 산업 전반의 표준화된 시스템으로의 확산에 있어서는 아직 제약이 있음을 보여주었다. 주요 한계로는 데이터 표준화 부족, 기업 간 정보 공유 체계 미흡, 기존 ERP·SCM 시스템과의 연계 어려움, 구축 및 운영 비용 부담, 소비자 정보 활용성 문제가 확인되었다.

재활용 자동화 영역에서는 NIR, 초분광 이미징, 자동 섬유 선별, 섬유 조성 분석, 로봇 재활용, ML 기반 분류 기술이 핵심적으로 다루어졌다. 기술 적용 수준은 실험의 선택/실행에 해당하는 연구가 가장 많았지만, 기술의 선택, 실험의 설정 단계의 연구도 비교적 고르게 분포되어 기술적 가능성 탐색과 실험적 검증이 동시에 진행되는 과도기적 단계에 있음을 알 수 있었다. 그러나 연구들이 실험, 모델 검증, 분류 정확도 평가, 제한된 데이터셋 기반 분석에 집중되어 산업적 확산 단계에는 미치지 못하고 있었다. 주요 한계는 혼방섬유와 복합 소재의 식별 정확도, 오염·마모·염색 상태에 따른 모델 일반화 문제, 대규모 처리 비용, 공정 속도, 후속 재활용 공정과의 연계 부족이 나타났다.

데이터/AI 기술 영역에서는 AI, ML/DL, 예측 분석, 빅데이터, LCA, 데이터 기반 최적화 모델이 주요 기술로, 수요 예측 및 환경영향 평가 등 패션 CE의 의사결정 과정에 적용되고 있었다. 기술 적용 수준에서는 실험의 설정과 실험의 선택/실행 단계가 비슷한 수준으로 높게 나타났다. 이는 데이터/AI 기술 연구가 알고리즘, 모델, 데이터셋, 성능 평가를 중심으로 검증되고 있을 뿐 아니라 생산, 유통, 소비, 환경평가와 같은 실제 운영을 위한 방향으로 수행되고 있음을 의미한다. 반면 실험의 확대 단계는 제한적으로 나타나 산업 전반의 자동화된 의사결정 체계로 확산되기 위해서는 고품질 데이터 확보, 데이터 형식의 표준화, 모델 설명 가능성, 알고리즘 윤리성, 기업 간 데이터 연계, 중소기업의 기술 접근성 개선이 필요함을 알 수 있었다.

IoT 기반 시스템 영역에서는 스마트 텍스타일, 웨어러블 기술, 센서, e-textile, 실시간 상태 모니터링, 제품 사용 데이터 수집 기술이 주요하게 나타났다. 기술 적용 수준에서는 기술의 선택 단계가 44.0%로 가장 높은 비중을 차지했으며, 실험의 선택/실행과 실험의 설정이 각각 20.0%로 동일하게 나타났다. 주목할 점은 실험의 확대 단계가 16.0%로 6개 영역 중 가장 높은 비중을 보였다는 것이다. 이는 IoT 기반 시스템 연구가 개념적 탐색에 집중되어 있으면서도, 웨어러블 기기나 스마트 의류처럼 일부 기술은 시장 적용 단계로 진입하는 양극화된 양상을 보이고 있음을 시사한다. 특히 스마트 텍스타일과 e-textile은 섬유와 전자부품이 결합되어 있어 제품 수명 종료 후 분해와 재활용이 어렵고 새로운 전자폐기물을 발생시킬 가능성이 있다. 따라서 IoT 기반 시스템이 확대 단계로 나아가기 위해서는 센서 데이터 표준화, 기기 간 상호운용성, 개인정보 보호와 데이터 보안, 배터리 및 전원 공급 문제, 세탁과 착용 과정에서의 내구성 확보 연구가 활성화되어야 함을 알 수 있다.

가상·물리 시스템에서는 3D 프린팅, 디지털 트윈, 시뮬레이션 기반 설계, 주문형 생산, 가상 프로토타이핑 기술이 나타났다. 이 영역은 물리적 제품 생산과 가상 설계·검증 환경을 연결함으로써 과잉 생산, 재고 폐기물, 소재 사용량, 공정 비효율을 줄이는 데 기여할 수 있다. 기술 적용 수준에서는 기술의 선택 단계가 가장 많고 실험의 선택/실행과 설정 단계가 그 뒤를 이어 고르게 분포되었다. 이는 가상·물리 시스템 관련 연구가 개념적 탐색, 실험적 적용, 구성 설계 단계에서 고르게 진행되고 있음을 보여준다. 한편, 실험의 확대 단계 연구는 2편(8.7%)으로 전체 평균(6.4%)보다는 다소 높으나 절대적인 연구 수가 적어, 해당 기술들이 실제 패션 생산 시스템, 공급망, 운영 구조와 아직 충분히 통합되지 못했음을 시사한다. 주요 한계로는 초기 도입 비용, 전문 인력과 디지털 인프라 부족, 기존 생산 시스템과의 연계 어려움, 소재와 장비의 제약 등이 확인되었다.

디지털 플랫폼 영역에서는 재판매 플랫폼, 중고거래, 렌탈, 수선 서비스, PSS, 역물류 플랫폼을 주제로 한 연구들이 있었다. 기술 적용 수준에서는 실험의 선택/실행 단계가 85.7%로 압도적으로 높았고, 실험의 확대 단계가 14.3%로 나타났으며, 기술의 선택이나 실험의 설정 단계 연구는 없는 것으로 나타났다. 이는 디지털 플랫폼 기반 순환 모델이 개념적 탐색을 넘어 실제 시장 운영 사례와 적극적으로 연결되고 있음을 시사한다. 주요 한계로는 소비자 참여 확보의 어려움, 회수·배송에 따른 물류 부담, 세탁 등 재처리 과정의 환경 영향, 플랫폼 운영 비용, 신규 생산 대체 효과의 불확실성 등이 확인되었다.

다분야 융합 연구는 기술 인프라 영역들이 결합된 통합적 순환 패션 시스템을 다루었다. 기술 적용 수준에서는 실험의 선택/실행 단계가 가장 높게 나타났는데, 이는 다분야 융합 연구가 개별 기술의 성능보다 기술 간 연결 구조와 시스템 구성 방식에 초점을 두고 있음을 의미한다. 반면 실험의 확대 단계는 제한적으로 나타났는데, 이는 실제 산업 규모의 확산이나 제도적 정착까지는 충분히 진전되지 않았음을 시사한다. 주요 한계로는 기술 간 상호운용성 부족, 데이터 표준화 미흡, 기업 간 정보 공유의 제한, 도입 비용과 조직 역량 부담, 정책 및 거버넌스 연계 부족 등이 있었다.

이상의 분석 결과는 패션 CE 기술 인프라 연구가 추적 가능성, 재활용 자동화, 데이터/AI 영역을 중심으로 활발히 진행되고, 다양한 기술 인프라가 개념적 탐색과 실험적 검증 단계에서는 활발히 연구되고 있으나 산업 전반으로 확산되거나 시장 내에서 자생적으로 운영되는 수준에는 아직 도달하지 못했음을 보여준다. 특히 추적 가능성, 재활용 자동화, 데이터/AI 영역에서 실험의 선택/실행 단계 비중이 높게 나타난 결과는 현재 연구가 기술의 성능 검증과 적용 가능성 평가에 집중되어 있음을 보여준다. 즉, 니치 수준에서 개별 기술의 타당성과 잠재력은 검증되고 있지만 산업 전반으로의 확산에 있어서는 상호운용성과 표준화의 부재, 초기 투자 대비 불확실한 수익성, 보호 정책과 규제의 불일치 등의 문제가 주요한 장벽으로 존재함을 알 수 있다.

먼저 기술 간 상호운용성과 데이터 표준화의 부재가 시스템 통합을 둔화시키고 있다. DPP는 제품의 전 생애주기 데이터 통합을 필요로 하지만 섬유 생산, 봉제, 유통, 재활용 단계에서 생성되는 데이터 포맷이 상이하여 추적 시스템 구축에 어려움이 존재한다. 또한 블록체인, IoT, AI 등 개별 기술은 실험적으로 검증되었으나 이들을 연결하는 데이터 스키마, API 표준 및 운영 프로토콜이 충분히 정립되지 않아 기술 간 연계성이 제한되고 있다. 또한 높은 초기 투자 비용과 불확실한 경제적 수익성은 기업의 자발적 도입을 제약하는 요인으로 나타났다. 예를 들어 NIR 분광기 및 로봇 기반 자동 분류 시스템은 상당한 초기 투자를 요구하지만 혼방 섬유 처리의 기술적 한계와 운영 비용 문제로 인해 경제성 확보가 쉽지 않은 것으로

보고되고 있다. 추적 시스템 역시 장기적으로는 공급망 투명성 향상과 브랜드 가치 제고에 기여할 수 있으나 단기적인 투자 효과가 명확하지 않아 기업의 도입 유인이 제한될 수 있다. 마지막으로 제도적·조직적 기반의 미성숙 역시 중요한 제약 요인으로 확인되었다. 여러 기술 영역에서 반복적으로 나타난 이해관계자 간 정보 공유의 한계, 데이터 표준 부재, 정책 연계 부족 등의 문제는 개별 기술의 성능 문제라기보다 니치 혁신이 보다 넓은 산업 체제로 확산되는 과정에서 나타나는 구조적 장벽으로 해석할 수 있다. 이는 MLP와 SNM 관점에서 볼 때 새로운 기술이 기존 산업 체제와 정

〈Table 5〉 Technical Applications and Limitations of Circular Fashion Technology Infrastructures by Domain

Domain / Key Technologies	N (%)	SNM Application Levels					Technical Limitations
		Tech -Sel	Exp -SE	Exp -Cfg	Exp -Scl	Policy -WD	
Traceability: DPP, Blockchain, RFID, traceability systems, supply-chain transparency	67 (25.2)	8 (11.9)	**52 (77.6)**	5 (7.5)	2 (3.0)	0 (0.0)	Data standardization, cost, interoperability, system integration, consumer trust
Recycling Automation: NIR, hyperspectral imaging, automated sorting, fiber analysis, robotics, ML classification	62 (23.3)	15 (24.2)	**25 (40.3)**	19 (30.6)	3 (4.8)	0 (0.0)	Sorting accuracy, blended textiles, processing cost, scalability, recycling yield
Data/AI: AI, ML/DL, predictive analytics, big data, LCA, optimization models	50 (18.8)	9 (18.0)	**19 (38.0)**	**20 (40.0)**	2 (4.0)	0 (0.0)	Data scarcity, algorithm transparency, non-standardized data, ethics, model accuracy
IoT-enabled systems: Smart textiles, wearables, sensors, e-textiles, real-time monitoring	25 (9.4)	**11 (44.0)**	5 (20.0)	5 (20.0)	4 (16.0)	0 (0.0)	E-waste, disassembly, recovery, data standards, interoperability, privacy
Cyber-Physical Systems: 3D printing, digital twin, virtual prototyping, simulation, on-demand manufacturing	23 (8.6)	**9 (39.1)**	6 (26.1)	6 (26.1)	2 (8.7)	0 (0.0)	Investment cost, limited cases, technical infrastructure, operational capability, system integration
Digital Platform: Resale, rental, repair, PSS, reverse logistics, secondhand platforms	21 (7.9)	0 (0.0)	**18 (85.7)**	0 (0.0)	3 (14.3)	0 (0.0)	Consumer participation, logistics burden, laundering impact, platform cost, substitution effect
Multidisciplinary Technology Infrastructures: Integrated framework, digital transformation, data integration, system integration	18 (6.8)	5 (27.8)	**10 (55.6)**	2 (11.1)	1 (5.6)	0 (0.0)	Interoperability, cost, standardization, organizational capability, governance
Total	266 (100.0)	57 (21.4)	**135 (50.8)**	57 (21.4)	17 (6.4)	0 (0.0)	-

※ Technology Selection = Tech-Sel; Experiment Selection/Execution = Exp-SE; Experiment Configuration = Exp-Cfg; Experiment Scaling = Exp-Scl; Withdrawal of Protective Policy = Policy-WD

합성을 확보하고 안정적으로 정착하기 위해서는 기술 개발뿐 아니라 제도적 지원, 표준화 체계 구축, 공급망 참여자 간 협력 네트워크 형성이 함께 이루어질 필요가 있음을 시사한다.

따라서 패션 CE 기술 인프라가 니치 수준의 혁신을 넘어 주류 시스템 차원의 산업 전환으로 나아가기 위해서는 기술적 완성도 제고뿐 아니라 다음과 같은 시스템적 접근이 요구된다. 첫째, 데이터 표준화와 상호운용성 확보를 위한 산업 컨소시엄 구성과 정책적 개입이 필요하다. EU는 DPP 데이터 스키마를 확정하고, 기업 간 데이터 공유를 위한 기술 표준과 거버넌스 프레임워크를 제공해야 한다. 둘째, 기술 도입의 경제적 장벽을 낮추기 위한 정책 지원이 필요하다. 재활용 섬유 사용에 대한 세제 혜택, 탄소세, 재활용 설비 투자에 대한 보조금 등의 경제적 정책 수단이 요구된다. 셋째, 국가별로 다른 EPR 제도를 통일하고, 거버넌스 체계를 구축하여 글로벌 공급망에서 통합된 기술 인프라 운영이 가능하게 해야 한다. 넷째, 기업은 단일 기술 도입을 넘어 추적 가능성, 데이터 분석, 플랫폼 통합이 상호보완적으로 작동하는 기술 생태계 구축 전략을 채택해야 한다. 이러한 다층적 접근을 통해 패션 CE 기술 인프라는 실험 단계에서 산업 확산 단계로의 전환을 가속할 수 있을 것이다.

V. 결론

패션 산업이 환경 오염의 주요 요인으로 지목되면서 이에 대한 대안으로 CE 전환이 요구되고 있고, EU의 DPP 의무화 등 제도적 압력이 강화되면서 기술 인프라의 중요성이 점점 증가함에 따라 본 연구는 패션 CE 전환을 위한 기술 인프라의 구조와 발전 단계를 파악하기 위해 패션 CE 관련 기술 인프라 연구를 대상으로 연구 동향, 핵심 주제 및 네트워크, 기술 영역별 적용 수준과 한계점을 분석하였다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 연구 동향에 있어서 패션 CE 기술 인프라 연구는 초기 탐색기, 기술 다변화기, 통합 가속화기의 세 단계를 거쳐 발전해왔다. 초기 탐색기에는 RFID, PSS 등 개별 기술의 CE 적용 가능성을 탐색하는 연구가 주를 이루었으며, 주로 기술의 개념적 타당성과 잠재적 환경 편익을 검토하는 데 집중하였다. 기술 다변화기에는 IoT, 블록체인, 데이터/AI 등 디지털 기술 영역이 본격적으로 확장되었으며, 각 기술 영역이 전문화되면서 추적 가능성, 데이터 분석, 자동화 등 세부 연구 주제가 분화되었다. 통합 가속화기인 2022년 이후에는 제도적 압력이 강화되면서 추적 가능성과 재활용 자동화 연구가 급증하였고 개별 기술 간 상호운용성과 시스템 통합을 다루는 융합 연구가 증가하였다.

둘째, 키워드 및 네트워크 분석 결과, sustainability, fashion, industry, technology가 핵심 키워드로 나타났고, 이들 간 높은 공출현 빈도를 통해 패션 CE 기술 인프라 연구가 지속가능성 담론, 산업 전환, 기술 혁신이 교차하는 영역에서 전개되고 있음을 확인하였다. N-gram 분석에서는 산업 차원의 폐기물 문제와 디지털 기술 솔루션이 주요 연구 주제임이 나타났다. CONCOR 분석을 통해 도출된 클러스터는 산업 시스템 및 지속가능성, 자원 순환 및 생산 공정, 추적 가능성 및 디지털 플랫폼, 스마트 제품 혁신의 연구 흐름을 반영하였다. 클러스터 1은 거시적 담론과 산업 전환, 클러스터 2는 물질 순환과 생산 프로세스 개선, 클러스터 3은 공급망 투명성과 데이터 기반 추적 시스템, 클러스터 4는 제품 혁신과 스마트 기술 응용을 다루었다. 클러스터 간 조밀한 연결 구조는 패션 CE 연구가 개별 기술의 성능 개선을 넘어 기술 간 통합과 시스템적 접근을 지향하고 있음을 보여주었다.

셋째, 기술 인프라 영역별 분석 결과, 추적 가능성 영역이 가장 많았고 재활용 자동화와 데이터/AI, IoT 기반 시스템, 가상·물리 시스템, 디지털 플랫폼, 다분야 융합 연구 순으로 나타났다. SNM 단계 분석에서는 실험의 선택/실행 단계, 기술의

선택 단계와 실험의 설정 단계 등 대부분의 연구가 개념적 탐색과 실험적 검증 단계에 집중되어 개별 기술의 타당성은 검증되고 있으나, 산업 전반으로의 확산을 위한 표준화, 상호운용성, 비용 효율성 등의 과제가 여전히 남아있음을 보여주었다.

본 연구 결과를 종합하면 패션 CE 기술 인프라 연구가 추적 가능성, 재활용 자동화, 데이터/AI 영역을 중심으로 전개되었으며, 이들 기술이 상호 연계된 고밀도 네트워크 구조를 형성하고 있음을 알 수 있다. 그러나 대부분의 연구가 실험적 검증 단계에 집중되어 있고 산업 확산 단계로의 진입은 제한적이었다. 이는 패션 CE 전환이 개별 기술의 성능 개선을 넘어 기술 간 상호운용성 확보, 데이터 표준화, 이해관계자 간 협력 체계 구축을 필요로 하는 시스템적 과제임을 시사한다. 본 연구는 텍스트 마이닝, 네트워크 분석, 기술 성숙도 평가를 통합하여 패션 CE 기술 인프라의 구조적 특성과 발전 단계를 실증적으로 규명함으로써 이론적·실무적 함의를 제공하였다는 점에서 의의를 지닌다. 그러나 연구의 분석 방법이 논문의 제목과 초록을 대상으로 수행되어 본문의 세부적 기술 구현이나 맥락적 정보를 충분히 반영하지 못했을 수 있고 영문 학술지 논문만을 대상으로 하여 비영어권 연구나 산업 보고서, 특허 등은 포함되지 않아 특정 지역의 기술 개발 동향이나 산업 현장의 실제 적용 사례를 충분히 파악하지 못했을 수 있다는 점에서 한계점이 있다. 따라서 후속 연구에서는 논문 본문 전체를 활용한 심층 텍스트 분석과 함께 특허, 산업 보고서, 정책 문서 등을 통합적으로 분석함으로써 기술 성숙도와 산업 확산 수준을 정교하게 평가할 필요가 있다. 또한, 주요 기술 영역별 사례연구와 실험 단계에서 산업 확산 단계로의 전환을 촉진 또는 저해하는 요인을 실증적으로 분석하고, 종단적 추적 연구를 통해 패션 CE 기술 인프라가 실제 산업 체제로 확산, 환경적·경제적 성과로 이어지는 경로를 실증적으로 규명할 필요가 있다.

References

Abdelmeguid, A., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2022). Investigating the challenges of applying the principles of the circular economy in the fashion industry: A systematic review. *Sustainable Production and Consumption, 32,* 505-518. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.009

Abreu, H., Pereira, V., & Barata, J. (2025). Blockchain-based digital product passport: Design principles and demonstration. *International Journal of Production Research, 63*(16), 5863-5882. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2464161

Akram, S. V., Malik, P. K., Singh, R., Gehlot, A., Juyal, A., Ghafoor, K. Z., & Shrestha, S. (2022). Implementation of digitalized technologies for fashion industry 4.0: Opportunities and challenges. *Scientific Programming, 2022*(1 - 17), 7523246. https://doi.org/10.1155/2022/7523246

Alves, L., Ferreira Cruz, E., Lopes, S. I., Faria, P. M., & Rosado da Cruz, A. M. (2022). Towards circular economy in the textiles and clothing value chain through blockchain technology and IoT: A review. *Waste Management & Research, 40*(1), 3-23. https://doi.org/10.1177/0734242X211052858

Alves, L., Sa, M., Cruz, E. F., Alves, T., Alves, M., Oliveira, J., ... & Rosado da Cruz, A. M. (2024). A traceability platform for monitoring environmental and social sustainability in the textile and clothing value chain: Towards a digital passport for textiles and clothing. *Sustainability, 16*(1), 82. https://doi.org/10.3390/su16010082

Amasawa, E., Brydges, T., Henninger, C. E., & Kimita, K. (2023). Can rental platforms contribute to more sustainable fashion consumption? Evidence from a mixed-method study. *Cleaner and Responsible Consumption, 8,* 100103. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100103.

Becker, A., Datko, A., Kroell, N., Kuppers, B., Greiff, K., & Gries, T. (2024). Nearinfrared-based sorta- bility of polyester-containing textile waste. *Resources, Conservation and Recycling, 206,* 107577. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107577

Bullón Pérez, J. J., Queiruga-Dios, A., Gayoso Martinez, V., & Martin del Rey, A. (2020). Traceability of ready-to-wear clothing through blockchain technology. *Sustainability, 12*(18), 7491. https://doi.org/10.3390/su12187491

Caldarelli, G., Zardini, A., & Rossignoli, C. (2021). Blockchain adoption in the fashion sustainable supply chain: Pragmatically addressing barriers. *Journal of Organizational Change Management, 34*(2), 507-524. https://doi.org/10.1108/JOCM-09-2020-0299

Carvalho, C., Abreu, M. J. A. M., & Silva, C. J. (2025).

The integration of the digital product passport (DPP) in the textile industry: A systematic literature review. In J. Cunha, A. C. Broega, H. Carvalho, & B. Providencia (Eds.), *Advances in fashion and design research III* (pp. 480-489). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83185-0_44

Chen, W. K., Nalluri, V., Hung, H. C., Chang, M. C., & Lin, C. T. (2021). Apply DEMATEL to analyzing key barriers to implementing the circular economy: An application for the textile sector. *Applied Sciences, 11*(8), Article 3335. https://doi.org/10.3390/app11083335

Colombi, C., & D'Itria, E. (2023). Fashion digital transformation: Innovating business models toward circular economy and sustainability. *Sustainability, 15*(6), 4942. https://doi.org/10.3390/su15064942

Conlon, J. (2020). From PLM 1.0 to PLM 2.0: The evolving role of product lifecycle management (PLM) in the textile and apparel industries. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal, 24*(4), 533-553. https://doi.org/10.1108/JFMM-12-2017-0143

Cruz, E. F., & da Cruz, A. R. (2023). Digital solutions for engaging end-consumers in the circular economy of the textile and clothing value chain: A systematic review. *Cleaner and Responsible Consumption, 11,* 100138. https://doi.org/10.1016/j. clrc.2023.100138

Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S. J., Garmulewicz, A., ... Rowley, J. (2017). Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technological Forecasting and Social Change, 115,* 75-84. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021

Dissanayake, D. G. K., & Weerasinghe, D. (2022). Towards circular economy in fashion: Review of strategies, barriers and enablers. *Circular Economy and Sustainability, 2*(1), 25-45.https://doi.org/10.1007/s43615-021-00090-5

Dissanayake, G., & Sinha, P. (2015). An examination of the product development process for fashion remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling, 104,* 94-102. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.008

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), 20240002. https://doi.org/10.1515/aut-2024-0002

Ellen MacArthur Foundation. (2023). The circular economy in detail: deep dive. https://ellenmacarthurfoundation.org/the-circular-economy-in-detail-deep-dive

European Commission. (2022). *EU strategy for sustainable and circular textiles.* European Commission. https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en

European Parliament. (2022). Textiles and the environment (EPRS Briefing PE 729.405). European Parliamentary Research Service. https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)729405

Fedele, M., & Formisano, V. (2023). Waste from criticality to resource through an innovative circular business model: A case study in the manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production, 407,* 137143. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137143

Fernández-Caramés, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2018). Towards the Internet of smart clothing: A review on IoT wearables and garments for creating intelligent connected e-textiles. *Electronics, 7*(12), 405. https://doi.org/10.3390/electronics7120405

Frei, J. (2022). *Managing the transition towards circularity by approaching challenges and opportunities with a focus on digital data technologies* [Unpublished master's thesis]. University of Gavle.

Gazzola, P., Pavione, E., Pezzetti, R., & Grechi, D. (2020). Trends in the fashion industry. The perception of sustainability and circular economy: A gender/generation quantitative approach. *Sustainability, 12*(7), 2809. https://doi.org/10.3390/su12072809

Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy, 74,* 158-167. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033

Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy, 31*(8-9), 1257-1274. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2022). Prototyping, experimentation, and piloting in the business model context. *Industrial Marketing Management, 102,* 564-575. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.12.008

Heim, H., & Hopper, C. (2022). Dress code: the digital transformation of the circular fashion supply chain. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 15*(2), 233-244. https://doi.org/10.1080/17543266.2021.2013956

Hina, M., Chauhan, C., Kaur, P., Kraus, S., & Dhir, A. (2022). Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading. *Journal of Cleaner Production, 333,* 130049. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130049

Hur, E., & Cassidy, T. (2019). Perceptions and attitudes towards sustainable fashion design: Challenges and opportunities for implementing sustainability in fashion. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 12*(2), 208-217. https://doi.org/10.1080/17543266.2019.1572789

Huynh, P. H. (2022). Enabling circular business models in the fashion industry: The role of digital innovation. *International Journal of Productivity and Performance Management, 71*(3), 870-895. https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0683

Hwang, D., & Chung, S. (2019). A study on the socio-technical system transitions for sustainable development: The case of E-mobilities in Korea. *Journal of Korea Technology Innovation Society, 22*(4), 709-747. https://doi.org/10.35978/jktis.2019.08.22.4.709

Jacometti, V. (2019). Circular economy and waste in the fashion industry. *Laws, 8*(4), 27. https://doi.org/10.3390/laws8040027

Joo, Y. (2025, September 30). *92 million tons of discarded clothing annually: The textile industry accelerates competition in new materials for resource recycling [연간 9,200만톤 쏟아지는 폐의류… 섬유업계, '자원 재순환' 신소재 경쟁 본격화].* Megaeconomy. https://megaeconomy.co.kr/news/newsview.php?ncode=1065589142136116

Kanwal, A., Nazeer, M. A., & Rasul, S. (2023). *Digitalization in the textile sector for circularity.* In Circularity in textiles (pp. 213-231). Cham: Springer Nature Switzerland.

Kemp, R., Schot, J., & Hoogma, R. (1998). Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management. *Technology Analysis & Strategic Management, 10*(2), 175 - 196. https://doi.org/10.1080/09537329808524310

Khajavi, S. (2021). Additive manufacturing in the clothing industry: Towards sustainable new business models. *Applied Sciences, 11*(19), 8994. https://doi.org/10.3390/app11198994

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, 33*(1), 159-174. https://doi.org/10.2307/2529310

Mizrachi, M. P., & Tal, A. (2022). Sustainable fashion—Rationale and policies. *Encyclopedia, 2*(2), 1154 - 1167. https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020077

Mo, D., & Wong, W. K. (2021). Fabric defect classification based on deep hashing learning. *AATCC Journal of Research, 8*(1), 191-201. https://doi.org/10.14504/ajr.8.S1.23

Nayak, R., Singh, A., Padhye, R., & Wang, L. (2015). RFID in textile and clothing manufacturing: technology and challenges. *Fashion and Textiles, 2*(1), 9. https://doi.org/10.1186/s40691-015-0034-9

Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An evolutionary theory of economic change.* Harvard University Press.

Neri, A., Cagno, E., Susur, E., Uruena, A., Nuur, C., Kumar, V., ... & Sorrentino, C. (2025). The relationship between digital technologies and the circular economy: A systematic literature review and a research agenda. *R&D Management, 55*(3), 617-713. https://doi.org/10.1111/radm.12715

Niinimäki., K. (2017). Fashion in a circular economy. *In Sustainability in fashion: A cradle to upcycle approach* (pp. 151-169). Cham: Springer International Publishing.

Ramos, L., Rivas-Echeverria, F., Perez, A. G., & Casas, E. (2023). Artificial intelligence and sustainability in the fashion industry: A review from 2010 to 2022. *SN Applied Sciences, 5*(12), 387. https://doi.org/10.1007/s42452-023-05587-2

Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Mäkinen, S. J. (2018). Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe. *Resources, Conservation and Recycling, 135,* 70-82. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.017

Rathnayake, A. (2023). RFiD threads technology for circular economy and future sustainability. *Vidyodaya Journal of Science, 26*(02). https://doi.org/10.31357/ vjs.v26i02.6802

Rejeb, A., & Zailani, S. (2023). Blockchain technology and the circular economy: a systematic literature review. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 11*(2), 1-25. https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d10.0436

Riba, J. R., Cantero, R., Riba-Mosoll, P., & Puig, R. (2022). Post-consumer textile waste classification through near-infrared spectroscopy, using an advanced deep learning approach. *Polymers, 14*(12), 2475. https://doi.org/10.3390/polym14122475

Shi, C., & Sang, J. (2025). Qualitative recognition of waste textiles based on near-infrared spectroscopy and ModernTCN. *Microchemical Journal, 214,* Article 113902. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113902

Skrzetuska, E., & Rzeźniczak, P. (2025). Circularity of smart products and textiles containing flexible electronics: Challenges, opportunities, and future directions. *Sensors, 25*(6), 1787. https://doi.org/10.3390/s25061787

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94*(9-12), 3563-3576. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1

Textile Exchange. (2025). Materials market report 2025. *Textile Exchange.* https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/

Todeschini, B. V., Cortimiglia, M. N., Callegaro-de-Menezes, D., & Ghezzi, A. (2017). Innovative and sustainable business models in the fashion indu-

stry: Entrepreneurial drivers, opportunities, and challenges. *Business Horizons, 60*(6), 759-770. https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.07.003

Vogue Business. (2022, January 6). *Sustainability: Where fashion is heading in 2022.* Vogue Business. https://www.voguebusiness.com/sustainability/sustainability-where-fashion- is-heading-in-2022

Zamani, B., Sandin, G., & Peters, G. M. (2017). Life cycle assessment of clothing libraries: Can collaborative consumption reduce the environmental impact of fast fashion? *Journal of Cleaner Produc- tion, 162,* 1368-1375. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.128