

3D 인체 기반 가상착의 기술 동향 및 적용 사례



이원섭

- 2006. 한동대학교 산업정보디자인 학사
- 2013. 포항공과대학교 산업경영공학 박사
- 2023-2024. 포항공과대학교 산업경영공학 연구원
- 2015-2017. 델프트공과대학교 산업디자인공학 연구원
- 2018-2024. 한동대학교 ICT창업학부 교수
- 2024-현재. (주)컴포랩스 대표/설립자

1. 서 론

온라인 쇼핑의 급격한 확산과 글로벌 패션 산업의 디지털 전환 가속화는 가상피팅(virtual fitting room, VFR; virtual try on, VTO) 기술의 필요성을 크게 부각시키고 있다. 소비자 측면에서, 비대면 구매 환경에서는 구매 전 의복의 핏(fit), 스타일, 사이즈를 사전에 확인할 수 있는 수단이 필수적이다. 가상착의 기술은 이러한 불확실성을 해소하여 구매 만족도를 향상시키고, 불필요한 반품과 교환을 줄인다[1,2]. AI 기반 사이즈 추천, 3D 아바타 생성(예: Zalando, Reactive Reality, SenseMi의 ViuBOX), AR 오버레이(예: PERFECT, WANNA, Warby Parker, Perfit, 딥픽셀의 StyleAR 등) 기술을 활용한 경우 반품률이 최대 60% 감소하고 구매 전환율이 34% 향상된 사례가 보고되었다[3,4]. 최근에는 생성형 AI 기술 및 컴퓨터 비전 기술을 활용하여 사진이나 영상에서 옷을 자동으로 합성 및 변환하거나 착의 시뮬레이션을 생성하는 연구가 활발히 진행되고 있다[5-7]. 예를 들어 구글의 Dopple 프로젝트[8]는 사용자의 전신 이미지로부터 다양한 의상을 사실적으로 입힌 결과를 생성하여 맞춤형 스타일 제안과 가상 피팅에 적용하고 있다.

가상착의 기술은 소비자 만족과 브랜드 신뢰 제고를 넘어, 패션 및 섬유 산업 전반의 효율성, 지속가능성, 그리고 경쟁력 강화를 동시에 실현하는 핵심 도구로 부상하고 있다. 가상착의 기술은 소비자의 심리적 불안 감소

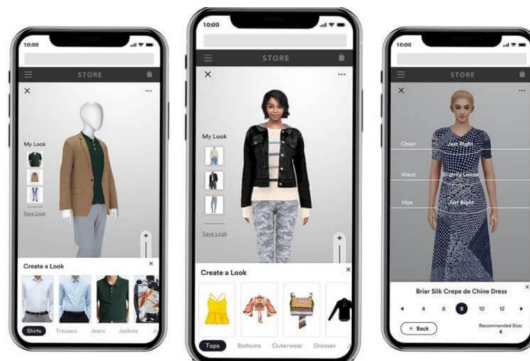


Figure 1. Example of virtual fitting room (VFR) or virtual try-on (VTO) (ShopExp Case).

와 함께 브랜드 신뢰도 제고에도 기여한다. 생산자 및 소매업자 측면에서는 반품 및 교환으로 인한 물류 및 재고 관리 비용을 절감할 수 있으며, 축적된 피팅 데이터와 소비자 행동 데이터를 활용하여 맞춤형 마케팅, 제품 기획, 재고 최적화 전략 수립이 가능하다[9-12]. 또한, 온라인 판매 환경에서의 차별화된 사용자 경험 제공을 통해 e-커머스 경쟁력을 강화할 수 있다[2,3,13]. 환경적 측면에서는 가상착의가 물리적 샘플 제작과 오프라인 피팅 과정에서 발생하는 불필요한 자원 낭비를 줄이고, 반품 및 폐기물 발생을 최소화함으로써 패션 산업의 탄소 발자국(carbon footprint) 저감에 기여한다[14,15]. 더 나아가 섬유 산업 전반에서는 의류 개발 초기 단계에서부터 원단 선택, 패턴 설계, 소재 물성 테스트를 가상 환경에서 수행함으로써 샘플 제작 횟수와 소재 사용량을 크게 줄일 수 있을 것이다[16,17]. 이는 소재 연구개발(R&D) 효율을 높이고, 신제품 출시 시간을 단축시키며, 친환경 섬유 활용 촉진에도 기여하여 섬유 산업의 지속가능성과 경쟁력을 동시에 강화하는 결과를 가져올 수 있다[11,18,19]. 이러한 특징은 순환 경제(circular economy) 구현과 지속가능 패션(sustainable fashion) 실현을 위한 핵심 전략 중 하나로 평가되며, 이에 따라 글로벌 브랜드들이 가상착의 기술 도입을 확대하는 중요한 동인이 되고 있다.

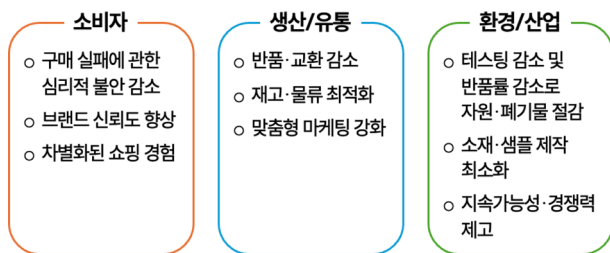


Figure 2. Key benefits of virtual fitting technology for consumers, production/distribution, and environment/industry.

글로벌 가상착의 시장은 첨단 디지털 기술과 지속가능 패션 수요를 기반으로, 향후 10년간 큰 폭의 성장을 이어갈 것으로 전망된다. 여러 보고서들에 따르면, 이 시장은 2023년 약 55억 달러 규모에서 2030년에는 최대 460억 달러 규모로 확대될 것으로 예측되며, 연평균 성장률(CAGR)은 약 20~25% 수준에 이를 것으로 전망된다[4,21,22]. 특히 AR/VR 기반 실시간 착의 시뮬레이션, AI 기반 사이즈 추천, 그리고 클라우드 및 모바일 환경에서의 접근성 향상 등이 시장 확대를 견인하는 주요 기술 요인으로 분석된다. 또한, 환경 규제 강화와 소비자의 친환경 구매 성향 증가는 물리적 샘플 제작과 반품 및 폐기 절감을 가능케 하는 가상피팅 솔루션 수요를 촉진하고 있다. 이러한 흐름은 단순한 패션 산업의 디지털화에 그치지 않고, 섬유 산업 전반에서의 제품 개발, 유통, 마케팅 방식까지 변화시키며, 글로벌 공급망 재편과 신제품

출시 주기의 단축이라는 부가적 효과를 가져올 것으로 예상된다[11,12,16].

가상착의 구현을 위한 기술은 AI, AR, 컴퓨터 비전 기반의 추정 기법 등 다양한 접근법이 존재하지만, 3D 인체 스캔 데이터를 활용하지 않으면 사진 및 영상 기반의 인체 형상 추정은 포즈 및 의복 종류에 따른 인식 오류, 세부 형상 및 체형 차이 반영 한계 등으로 인해 실제 체형을 완벽히 재현하기 어렵다. 이에 비해 3D 인체 스캔 데이터는 사용자의 체형을 정밀하게 측정 및 재현함으로써, 보다 실감 있고 정확한 가상착의를 가능하게 한다. 특히 전신 스캐너를 통해 확보한 고정밀 3D 데이터는 의복의 주름, 압박, 여유분 등 착용 상태를 정밀하게 시뮬레이션 할 수 있으며[22-24], 이를 AI 학습 데이터로 활용하면 사진 및 영상에서 추정한 인체 형상의 정확도 또한 크게 향상된다[25,26]. 호카(HOKA), 뉴발란스(New Balance), 아디다스(Adidas) 등 글로벌 브랜드는 발 전용 스캐너를 활용해 발 모양과 치수를 정밀 측정하고, 이를 바탕으로 맞춤형 신발 추천 서비스를 제공하고 있다[27]. 전통적인 3D 스캐닝은 물리적 공간과 장비가 필요하다는 제약이 있었으나, MyFit Solution, Luxolis와 같이 모바일 카메라 영상 기반으로 3D 인체 데이터를 생성하는 서비스가 등장하며 3D 인체 스캔에 대한 접근성도 점차 확대되고 있다. 한편, 3D 인체 스캔 데이터는 의복뿐만 아니라 웨어러블 기기의 인체 적합성 설계, 편안함 평가, 착용 안정성 분석에도 활용 가능하다[28-30]. 국내 스타트업인 컴포랩스는 SIZE LAB 시스템을 통해 3D 인체 데이터 기반의 3D 페르소나를 활용해 가구나 웨어러블 기기 등 다양한 제품의 가상 피팅 및 사용성 시뮬레이션을 제공하고 있다[31]. 이러한 흐름은 점차 소비자의 일상 속에서 ‘맞는 옷’을 넘어 ‘편안한 옷과 제품’을 제공하는 방향으로 발전하고 있으며, 3D 인체 스캔 데이터는 향후 패션, 섬유, 웨어러블 산업 전반에서 핵심 설계 자원으로서의 중요성이 더욱 커질 것으로 예상된다.

본고는 3D 인체 기반 가상착의 기술의 최신 동향과 핵심 적용 사례를 산업적 및 기술적 관점에서 종합적으로 분석하는 것을 목적으로 한다. 특히 3D 인체 스캔 데이터를 활용한 가상착의 구현에 초점을 맞추어, 스캔 방식별 특징과 장단점, 이를 활용한 시뮬레이션 기법, 그리고 상용 솔루션 및 산업 적용 사례를 체계적으로 정리한다. 생성형 AI나 단순 이미지 및 영상 합성 방식은 범위에서 제외하고, 정밀한 인체 형상 재현과 물리 기반 착의 시뮬레이션이 가능한 기술을 중심으로 고찰한다. 이를 통해 3D 인체 스캔 기반 가상착의 기술이 패션 및 섬유 산업의 생산성 향상, 맞춤형 서비스, 지속가능성 확보 등에 미치는 파급효과를 분석하고, 향후 기술 발전 방향과 연구개발 전략을 제안한다.

2. 기술 동향

2.1. 개별 3D 인체 스캔 기반 가상 착의 기술

개별 3D 인체 스캔 기반 가상 착의 기술은 사용자의 실제 신체 치수와 체형을 고정밀로 측정하여 디지털 아바타를 생성하고, 해당 아바타에 의복 데이터를 적용해 가상 피팅을 수행하는 방식이다. 각 3차원 인체 스캔 방식은 정확도, 비용, 촬영 환경, 처리 속도 등에서 서로 다른 장단점을 지닌다[32-41]. 먼저, 3차원 인체 스캔 데이터를 확보하는 방안으로서, 초기 상용 시스템은 주로 structured light projection 또는 레이저 스캐닝을 활용해 인체 표면의 깊이 정보를 추출하였다. 이러한 방식은 높은 정확도를 제공하였지만, 장비 비용과 촬영 환경 제약이 컸다. 이후 고품질 데이터를 확보하기 위해 수십에서 수백 대의 고해상도 카메라를 동기화하여 촬영한 이미지를 포토그래메트리(photogrammetry) 및 다중시점 재구성(multi-view reconstruction) 기법으로 처리하는 방식이 등장했다. 이 방법은 인체 표면 형상과 질감(texture)을 매우 정밀하게 복원할 수 있어 맞춤형 의복 제작, 디지털 패션 콘텐츠 제작 등에 활용되고 있다. 한편, 보다 간편하고 저비용의 대안으로는 마이크로소프트의 Kinect나 인텔의 RealSense, 또는 스마트폰에 탑재된 심도센서(depth sensor)를 활용하는 방식이 보급되었다. 깊이 센서는 해상도는 낮지만 실시간 3D 데이터 획득이 가능하며, 소비자용 기기와 연계해 가상 피팅룸 등에 널리 적용된다. 최근에는 스마트폰 카메라로 촬영한 짧은 동영상을 3D 모델로 변환하는 모바일 기반 솔루션도 등장하고 있다. 동영상의 여러 frame들을 이용해 다중시점 재구성 기술을 응용하여 3D 이미지화하는 것으로, 스마트폰 내에서 처리하지 못하므로 동영상을 서버로 전송한 후에 서버로부터 생성된 3D 이미지를 다시 전송받는 방식으로 처리된다. 가령, MyFit Solution과 Luxolis는 사용자의 전신 또는 일부 신체 부위를 다각도로 촬영한 영상 데이터를 3D 인체 모델로 변환하여, 별도의 전문 장비 없이도 온라인 가상착의 서비스에 활용할 수 있도록 한다.

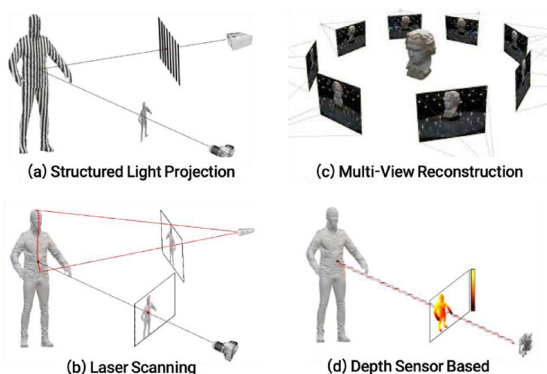


Figure 3. Various 3D Scanning Methods: (a), (b), and (d) are adapted from Bartol et al.'s paper[32].

다양한 상용 가상착의 솔루션들은 3D 인체 스캔 데이터를 기반으로 고정밀 맞춤 시뮬레이션을 제공하며, 패션 및 섬유 산업의 효율성과 지속가능성을 동시에 향상시키고 있다. CLO Virtual Fashion, Browzwear, Optitex, M Tailor, Brizm 등 다양한 상용 솔루션은 다양한 3D 인체 스캔 데이터를 불러와 체형에 맞춘 착의 시뮬레이션을 제공하거나 맞춤형 제품을 제공한다[42-51]. 기업용 소프트웨어는 사용자의 신체 크기와 체형에 적합한 제품을 제작할 수 있으며, 의복이나 제품의 핏(fit), 여유분, 압박 정도를 사전에 확인할 수 있다. M Tailor와 같은 맞춤형 의복 제작 기업은 사용자들이 휴대폰으로 자신의 인체를 촬영할 수 있는 모바일 앱을 제공하여 사용자의 이미지를 수집하고, AI 기반의 알고리즘을 활용하여 3차원 인체 형상을 추정하여 제품 설계에 활용한다[52]. 사용자는 자신의 실제 체형과 동일한 디지털 아바타(또는 단순한 신체 크기와 체형 정보)를 통해 신체에 적합한 의복의 디자인과 착용감을 사전에 확인할 수 있으며, 구매 전 의사결정의 정확성을 높이고 불필요한 반품을 줄이며 보다 개인화된 쇼핑 경험을 누릴 수 있다. 가상착의 솔루션들의 예로, CLO Virtual Fashion은 사실적인 의복 물리 시뮬레이션과 직관적인 인터페이스를 강점으로 하여 패션 브랜드의 샘플 제작 횟수를 줄이고 제품 개발 속도를 향상시키고 있다. Browzwear는 디자인-생산-유통 전 과정을 연결하는 디지털 워크플로우를 제공해 글로벌 의류 제조사의 협업 효율성을 높이고 원가 절감에 기여한다. Optitex는 CAD 기반 패턴 설계와 3D 착의 기능을 통합해 의류 제조업체의 설계 정확도와 생산 효율을 동시에 향상시키고 있다. M Tailor는 모바일 기반 신체 스캔과 맞춤 패턴 제작 기능을 결합하여 소비자 개인화 서비스를 강화하고, 온라인 맞춤복 시장의 접근성을 확대하고 있다. Brizm은 AI 기반 안경 사이즈 추천과 3D 시뮬레이션을 결합해 고객 경험을 개선하는 데 중점을 두고 있다. 이러한 기술 발전은 오프라인 피팅에 근접한 경험을 온라인 환경에서 제공함으로써 구매 의사결정의 정확성을 높이고 반품률을 줄이는 동시에, 패션 분야를 비롯한 제품 산업 전반의 디지털 전환과 지속가능성 확보에도 중요한 역할을 하고 있다.

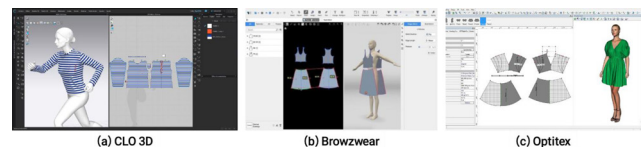


Figure 4. Representative commercial virtual fitting solutions utilizing 3D human.

2.2. 3D 인체 데이터 기반 시뮬레이션 모델

3D 인체 데이터 기반 시뮬레이션 모델은 스캔된 인체 형상과 치수를 바탕으로 의복 및 제품의 착용이나 접촉/밀착 상태를 물리적으로 재현하는 기술로, 가상착의의 사실성과 신뢰성을 결정짓는 핵심 요소이다. 이러한 시뮬레이션은 주로 의복/제품과 인체 간의 상호작용을 물리 기반 알고리즘으로 계산한다. 구현 방식은 크게

particle-based 모델, position-based dynamics(PBD), 유한요소법(finite element method, FEM) 등으로 구분된다. Particle-based 모델은 의복을 다수의 입자(particle)로 분해해 변형과 충돌을 계산하므로 빠른 연산이 가능하며 실시간 응용에 적합하다[13]. PBD는 입자의 위치를 직접 제어하여 물리적 안정성을 유지하면서도 높은 시뮬레이션 속도를 제공하며, 주름이나 접힘과 같은 세부 변화를 표현하는데 유리하다[53,54]. FEM(finite element method) 기반 인체-제품 상호작용 시뮬레이션은 제품 설계 초기 단계에서 맞춤 적합성(fit)과 착용감을 예측하는 핵심 기술로 활용되고 있다[55-57]. 예를 들어, Kwon 등은 다양한 3D 인체 데이터를 활용하여 개별 사용자에게 맞춤 맞춤형 안면 마스크의 접촉 특성을 효율적으로 모델링하는 프레임워크를 제안하였다[30]. 이 연구에서는 여러 체형의 3D 얼굴 데이터를 빠르게 FEM 환경에 적용할 수 있는 전처리, 메시 생성, 경계조건 자동화 절차를 구축함으로써, 사용자 별 착용압 분포와 변형 양상을 정밀하게 분석하였다. 이러한 접근은 다수의 사용자 데이터를 신속히 시뮬레이션하여, 맞춤형 제품 설계 시간을 크게 단축하고 프로토타입 제작 전 단계에서 최적 설계를 도출하는 데 기여한다. 나아가, 의복, 헬멧, 보호구 등 다양한 착용형 제품에도 동일한 워크플로우를 적용할 수 있어 산업 전반의 설계 효율과 사용자 만족도를 동시에 향상시킬 수 있다. 제시된 모든 방식에서, 소재 물성에 관한 데이터(예: 중량, 두께, 인장 및 전단 계수 등)와 외부 물리요인(중력, 압박, 마찰, 접힘/구김 발생 메커니즘)이 과학적으로 반영되는 것이 필요하며, 이 데이터의 정밀도는 시뮬레이션의 품질을 직접적으로 좌우한다. 최근에는 이러한 물리 기반 시뮬레이션에 AI 및 머신러닝 기법을 결합해 계산 속도를 향상시키고, 데이터 부족 시에도 현실적인 거동을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 통해 디자이너와 제조사는 제품 개발 단계에서 다양한 소재와 패턴을 시험하고, 소비자는 온라인 환경에서 실제와 유사한 착용 경험을 얻을 수 있어, 시제품 제작 비용 절감과 반품률 감소라는 산업적 효과가 동시에 달성되고 있다.

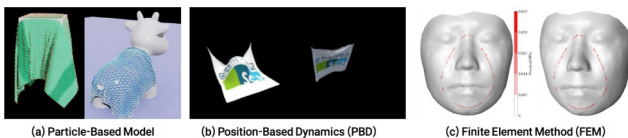


Figure 5. Simulation approaches for physical properties and fit analysis.

2.3. AI 기반 가상착의 기술의 고도화

AI 기반 가상착의 기술은 기존의 단순한 3D 의류 시뮬레이션을 넘어, 실제 착용감, 핏, 동작 반응까지 정밀하게 재현하는 단계로 고도화되고 있다. 이를 위해 SMPL(skinny multi-person linear model)과 같은 3D 인체 파라메트릭 모델이 널리 활용되며, 다양한 체형 및 자세 데이터를 기반으로 사용자의 실제 신체 치수와 형상을 반영한 아바타를 생성할 수 있다. 최신 기술

은 다중 시점 이미지, 깊이 센서, 혹은 단일 영상 입력만으로도 인체 형상을 고해상도로 복원하고, AI 기반 의류 물성 시뮬레이션 엔진과 결합하여 움직임에 따른 옷의 주름, 변형, 압박 분포까지 분석 가능하다. 또한, 인종, 성별, 연령별 체형 데이터베이스와 연결해 글로벌 소비자 맞춤형 의류 설계가 가능하며, 가상 피팅 결과를 B2B 의류 설계 및 제조 과정에 바로 반영하여 샘플 제작 횟수를 줄이고 생산성을 극대화한다. 이러한 고도화된 가상착의 기술은 패션 및 리테일 뿐 아니라 스포츠웨어, 안전보호구, 의료복 설계 등 다양한 산업에 확산되고 있다.

3. 적용 사례

3.1. 패션 산업

패션 및 섬유 산업에서는 소비자 맞춤형 설계와 생산을 지원하기 위해 다양한 디지털 가상착의 솔루션이 활용되고 있다. CLO Virtual Fashion은 사용자의 신체 치수를 측정해 아바타를 생성하고, 가상 피팅 환경에서 투명 실루엣 비교를 통해 의류의 맞음새를 직관적으로 확인할 수 있도록 한다[23]. 아마존 Made for You 서비스는 신장, 체중, 신체 스타일, 사진 두 장을 입력하면 이를 기반으로 3D 인체 모델을 생성하며, 8가지 색상과 다양한 소매, 길이, 목선, 소재 등을 선택해 맞춤형 티셔츠를 제작하며, 주문 전 가상 제품 확인과 저렴한 가격을 통해 맞춤 제작의 대중화를 시도하는 동시에 고객 데이터를 확보한다. 펄핏(perfitt)은 AI 기반 컴퓨터비전 측정엔진과 추천엔진으로 구성된 'PerfittSize' 솔루션을 제공해, 사용자가 스마트폰 카메라로 발을 촬영하면 발 길이와 발볼을 정밀 측정하고, 최적의 신발 사이즈를 추천하여 반품률과 재고 부담을 줄인다[58]. M Tailor는 스마트폰 영상 촬영을 통해 3D 포인트 클라우드 데이터를 생성, 60개 신체 치수를 산출하고 이를 기반으로 디지털 패턴을 제작해 온디맨드 방식으로 맞춤 의류를 제작함으로써 평균 20% 높은 측정 정확도와 재고 최소화를 동시에 달성한다[52]. 한편 스포츠웨어 및 기능성 의류 분야에서는 3D 아바타 생성과 가상착의 시뮬레이션을 이용해 실제 주행 및 운동자세를 반영한 입체 패턴 개발이 가능해졌으며, 모터사이클 팬츠 패턴 개발 사례처럼 안전성, 착용성, 기능성을 동시에 향상시키는 동작 기반 설계 방식이 제시되고 있다.

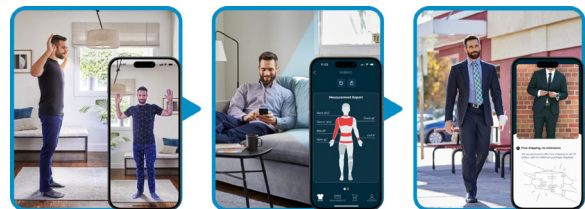


Figure 6. Illustration of mobile human body data analysis for custom apparel manufacturing (M Tailor case).

3.2. 의료 및 재활 분야

의료 및 재활 영역에서는 3D 인체 스캐닝과 가상착의 및 3D 프린팅 기술이 결합되어 맞춤형 제품 설계, 착용감 개선, 치료 효율 증대에 기여하고 있다. 예를 들어, 하네스(harness)의 경우 다양한 용도(안전, 군사용, 의료용 등)로 제작되어 왔으나, 기존 제품은 단일 목적에 맞춰 고정된 형태로 설계되어 사용자의 체형에 맞지 않을 경우 통증과 불편함을 초래했다. 이를 개선하기 위해 3D 가상착의 시스템(CLO 3D)을 활용해 하네스를 가상 모델에 착의시키고 압박도를 시뮬레이션한 뒤 실제 하중 압력분포 측정값과 비교함으로써, 활동 시 불편감을 최소화할 수 있는 설계 방향과 착용감 개선의 기초자료를 마련하였다[59]. 또한, 거북목 증후군과 같이 체형 불균형을 가진 착용자를 위해 목 각도별(CVA 48°, 50°, 52°) 3D 가상 모델을 제작하고, 가상착의를 기반으로 맞춤형 재킷 패턴을 개발한 사례에서는 CAD 기반 규칙성 분석을 통해 목 각도별 제도법을 제시, 동작 적합성과 외관 품질 모두에서 높은 평가를 받았다[60]. 발 보조기기 분야에서는 피츠인솔이 1만 2,000개의 센서를 내장한 측정 장치를 통해 0.005초 단위의 동적 보행 데이터를 수집, 발바닥 위치별 압력이나 힘 분포와 압력 이동 경로를 포함한 33가지 분석 지표를 산출하고, 이를 토대로 부위별 탄성을 다섯 단계로 조절한 3D 프린팅 맞춤형 인솔을 제작하여 보행 패턴 교정과 부상 예방에 활용하고 있다[61]. 한편, 엑스퍼트코리아는 영국 Xkelet과 공동으로 환자 맞춤형 성형부목 및 김스 솔루션 엑스 스프린트 에어(Xsplint Air)를 개발, 3D 스캐닝 데이터, AI 기반 해부학 분석, 인체공학 설계를 통합해 방수 및 통기성을 갖춘 경량 구조를 구현하고, 착용 상태에서 샤워나 수영이 가능하도록 하여 치료 기간 중 일상생활 제약을 최소화하였다[62].

3.3. 엔터테인먼트 등 기타 분야

엔터테인먼트, 메타버스 및 실시간 방송 영역에서도 3D 아바타 착의 기술이 폭넓게 활용되고 있다. 네이버 Z의 Zepeto는 전 세계 4억 명 이상 가입자를 보유한 아시아 최대 메타버스 플랫폼으로, 사용자 아바타에 명품 브랜드를 포함한 다양한 디지털 의상을 적용해 Z세대나 알파세대와의 실시간 상호작용과 브랜드 인지도 제고에 기여하고 있다. Roblox는 약 5천만 명의 일일 활성 사용자를 대상으로 'Layered Clothing' 시스템을 도입, 다양한 형태의 아바타에 동일 의상을 자연스럽게 적용 가능하게 하여 커스터마이징 범용성을 높였으며, Gucci나 Louis Vuitton 등 명품 브랜드가 이를 활용해 디지털 패션 마케팅을 전개하고 있다. 실시간 스트리밍 분야에서는 싱가포르의 BocaLive가 방송 중 아바타 의상과 배경을 즉시 변경하는 기능과 다국어 송출을 지원, 라이브 커머스에서 스타일 전환과 소비자 인터랙션을 극대화하고 있다. 또한 CodeMiko 사례처럼 Xsens 모션 캡처 수트와 VR 장갑 및 얼굴 추적 헬멧을 활용한 실시간 아바타 의상

및 환경 변경은 방송 몰입도와 참여도를 높이며, 개인화된 인터랙티브 콘텐츠 제작의 가능성을 확장하고 있다. 하지만 이와 같은 엔터테인먼트 분야에서의 가상 착의는 3D 인체 스캔 데이터와 같은 정교하고 실제적인 인체 형상보다는, 엔터테인먼트 목적에 맞게 단순화되거나 스타일화된 애니메이션과 게임 캐릭터를 기반으로 하는 경우가 주를 이룬다. 그러나 최근 실제 사람과 매우 유사한 외형과 표정을 구현하는 버추얼 휴먼(virtual human)의 등장은 향후 보다 정밀한 3D 인체 데이터와 결합된 가상 착의 경험을 가능하게 함으로써 현실감과 몰입도가 한층 향상된 디지털 패션 및 엔터테인먼트 서비스를 확산시킬 잠재력을 보여주고 있다.

4. 토 론

3D 인체 기반 가상착의 기술은 높은 몰입감과 정확성을 제공하지만, 여전히 해결해야 할 기술적 과제가 존재한다. 첫째, 정확도와 연산 속도의 균형 문제이다. 유한요소방법(FEM)과 같은 물리 정확성이 높은 기법은 착용감과 소재 거동을 정밀하게 재현할 수 있으나, 연산량이 커 실시간 응용에 제약이 따른다. 반면, particle-based 모델이나 position-based dynamics(PBD)는 연산 효율이 높지만, 복잡한 변형이나 미세한 주름 표현에서는 한계가 있다. 따라서 응용 목적과 환경에 따라 시뮬레이션의 정밀도와 속도 간 최적화가 필요하다. 둘째, 다양한 체형 및 자세 대응성이다. Max Planck Institute의 SMPL 계열 파라메트릭 모델과 같이 광범위한 체형 및 자세 데이터셋을 반영한 접근이 확산되고 있으나, 극단적인 체형 및 특수 자세에 대한 정확도 보장은 여전히 쉽지 않다. 셋째, 소재 물성 데이터 확보의 어려움이다. 섬유의 인장, 전단, 굽힘, 압축 특성 등은 시뮬레이션의 사실성을 좌우하지만, 이를 표준화된 절차로 정밀 측정하고 디지털 형식으로 제공하는 체계는 아직 부족하다. 특히 신소재나 복합소재의 경우 R&D 단계에서 물성 데이터가 제한적이어서 가상착의에 바로 적용하기 어렵다. 넷째, 개인정보 보호와 인체 데이터 보안 문제이다. 3D 인체 스캔 데이터는 개인 식별 가능성이 매우 높아, 저장, 전송, 처리 단계에서의 암호화와 익명화 기술, 그리고 관련 법과 제도의 정비도 필수적이다.

한편, 향후 기술 발전은 다음과 같은 방향으로 전개될 것으로 예상된다. 첫째, AI 기반 체형 예측과 자동 보정 기술의 고도화 측면에서, 소량의 이미지나 불완전한 스캔 데이터를 입력으로 하여 전체 체형을 보정 및 복원하는 생성형 모델이 상용화된 전망이다. 둘째, 클라우드-온디바이스 하이브리드 시뮬레이션 구조 확산 측면이다. 고정밀 연산은 클라우드에서, 저지연 피드백은 로컬 디바이스에서 처리하는 분산형 아키텍처를 통해 실시간성과 정확성을 동시에 확보할 수 있다. 셋째, 대규모 사용자 데이터 기반 맞춤형 추천이다. 장기간 축적된 인체, 착의, 반품

데이터는 개인화 추천 알고리즘의 정확도를 크게 높이고, 소비자 만족도와 재구매율을 향상시킬 것이다. 넷째, 지속가능 패션 분야에서 가상착의는 물리적 샘플 제작 횟수를 줄이고, 친환경 소재의 가상 테스트를 가능케 함으로써, 섬유 및 패션 산업의 탄소 배출 저감과 순환 경제 실현에 기여할 것이다[63].

3D 인체 기반 가상착의 기술은 정밀한 인체 형상 데이터와 물리 기반 시뮬레이션을 결합함으로써, 온라인 비대면 환경에서도 실제 착용과 유사한 피팅 경험을 제공한다는 점에서 기술적 의미가 크다. Particle-based, PBD, FEM 등 다양한 시뮬레이션 기법과 AI 및 컴퓨터 비전 기술의 융합은 착용감, 핏, 주름, 압박 분포까지 정밀하게 재현할 수 있는 기반을 마련하였다. 이러한 기술은 단순한 시각적 재현을 넘어, 소재 물성 분석, 맞춤형 제품 설계, 사용성 평가 등 산업 전반에 걸친 설계 효율화와 비용 절감을 가능하게 한다. 이러한 기술들을 기반으로 산업적 측면에서 가상착의는 패션 및 섬유 분야의 제품 개발 주기 단축, 반품과 교환 감소, 재고 최적화, 글로벌 소비자 맞춤형 서비스를 실현하는 핵심 도구로 부상하고 있다. 또한, 샘플 제작과 오프라인 피팅에 소요되는 자원, 시간, 비용을 절감함으로써, 친환경 지속가능 패션 구현에도 직접 기여한다. 나아가 웨어러블, 스포츠웨어, 의료 및 재활용 착용형 제품 등 다양한 분야로 확장이 가능해, 산업 전반의 경쟁력을 높일 수 있다.

향후 3D 인체 기반 가상착의는 스마트 제조 기술과 더불어 섬유 및 패션 산업에서 필수 인프라로 자리 잡을 가능성이 높다. 특히 한국 섬유산업의 경쟁력 강화를 위해서는 국내 표준화된 3D 인체 데이터베이스 구축, 고정밀 저연산 하이브리드 시뮬레이션 엔진 개발, 소재 물성 데이터 측정 및 공유 플랫폼 확립, AI 기반 체형 예측 및 자동 보정 알고리즘의 상용화, 개인정보 보호와 보안 강화를 위한 법과 기술적 장치 마련이 요구된다. 이러한 R&D 전략은 국내 섬유 및 패션 산업이 글로벌 디지털 전환 흐름 속에서 지속적으로 경쟁 우위를 확보하는 기반이 될 것이다.

참고문헌

1. H. Yang, J. Yu, M. S. Lee, H. J. Ha, and J. S. Roh, "Effects of 3D virtual fitting system's characteristics on usage attitude and purchase intention", *Korean Consumption Culture Association*, 2020, **23**(3), 31-52.
2. R. H. Kim and S. H. Yang, "Online fitting service study: Focusing on interface design", *Journal of the Korea Convergence Society*, 2021, **12**(2), 147-154.
3. H. Hwangbo, E. H. Kim, S. H. Lee, and Y. J. Jang, "Effects of 3D virtual "Try-on" on online sales and customers' purchasing experiences", *IEEE Access*, 2020, **8**, 189479-189489.
4. Mordor Intelligence, "Virtual fitting room market size and share analysis - Growth trends & forecasts (2025 - 2030)", <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/virtual-fitting-room-market> (accessed August 9, 2025).
5. W. L. Hsiao, I. Katsman, C. Y. Wu, D. Parikh, and K. Grauman, "Fashion++: Minimal edits for outfit improvement", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.
6. Z. He, Y. Ning, Y. Qin, G. Wang, S. Yang, L. Lin, and G. Li, "VTON 360: High-fidelity virtual try-on from any viewing direction", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2025.
7. J. Liu, Z. He, G. Wang, G. Li, and L. Lin, "One model for all: Partial diffusion for unified try-on and try-off in any pose", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2025.
8. Google Doppl Home Page, <https://labs.google/doppl> (accessed August 9, 2025).
9. S. Yang and G. Xiong, "Try it on! Contingency effects of virtual fitting rooms", *Journal of Management Information Systems*, 2019, **36**(3), 789-822.
10. Y. H. Song, "Case study on the effectiveness of digital fashion process technology", Master Thesis, Pukyong National University, 2020.
11. R. Batool and J. Mou, "A systematic literature review and analysis of try-on technology: Virtual fitting rooms", *Data and Information Management*, 2024, **8**:100060.
12. H. J. Park, "A study on research trends in digital fashion based on CLO 3D", *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 2025, **27**(2), 117-130.
13. G. Chen, S. Suri, Y. Wu, E. Voulga, D. I. W. Levin, and D. K. Pai, "Learning simulatable models of cloth with spatially-varying constitutive properties", *Graphics*, 2025.
14. L. S. Vitola, "Digital innovation for sustainable fashion: Virtual fitting room as a strategy to minimize waste and e-commerce returns", Master Thesis, Ryerson University, 2021.
15. E. Kim, "Sustainable fashion design with DfD : Using the 3D virtual clothing program", Master Thesis, Kyunghee University, 2020.
16. S. E. Kim and M. J. Kim, "Analysis of fashion brand cases using 3D virtual clothing technology: Focusing on green design perspective", *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 2024, **26**(2), 115-127.
17. K. O. Ryu, "Study on evaluate 3D virtual versus actual fitting", *Journal of the Korean Society of Costume Design Association*, 2024, **26**(2), 33-43.
18. S. Kim and H. Lee, "Tightness evaluation of smart sportswear using 3D virtual clothing", *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 2023, **47**(1), 123-136.
19. M. A. Habib, A. Ullah, M. M. Maha, and A. A. Bristy, "Advancing sustainable fashion through 3D virtual design for

- reduced environmental impact”, *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 2025, **11**(3), 135-142.
20. Fortune Business Insights, “Virtual fitting room market”, https://www.fortunebusinessinsights.com/ko/industry-reports/virtual-fitting-room-vfr-market-100322?utm_source=chatgpt.com (accessed August 9, 2025).
21. Grand View Research, “Virtual try-on market summary”, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-try-on-market-report> (accessed August 9, 2025).
22. H. Lee and Y. Lee, “Ergonomic 3D pattern development of outdoor T-shirt for men”, *Korean Journal of Human Ecology*, 2016, **25**(4), 451-462.
23. CLO Home Page, <https://www.clo3d.com/> (accessed August 9, 2025).
24. N. Y. Kim and H. Lee, “Comparative analysis of changes in body surface dimensions between 3D human body scan data and dynamic avatars in dynamic postures”, *Journal of the Korean Society of Costume*, 2025, **75**(2), 85-104.
25. C. Zhang, S. Pujades, M. Black, and G. Pons-Moll, “Detailed, accurate, human shape estimation from clothed 3D scan sequences”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017.
26. Perceiving Systems at Max Planck Institute for Intelligent Systems Home Page, <https://is.mpg.de/ps> (accessed August 9, 2025).
27. SafeSize Home Page, <https://www.safesize.com/> (accessed August 9, 2025).
28. H. Jung, S. Y. Kim, X. Cui, W. Lee, D. Kwon, Z. W. Seo, H. Y. Ko, S. H. Kim, R. Y. Yun, H. You, and S. Huh, “Postural facial deformation of patients with bulbar amyotrophic lateral sclerosis and virtual fit of non-invasive ventilation mask”, *Respiratory Care*, 2023, **68**(2), 265-269.
29. H. Jung, W. Lee, S. Mun, and H. You, “Deformation of palmar hand measurements in power grip by wrist ulnar/radial deviation”, *Applied Ergonomics*, 2024, **114**, 104157.
30. Y. J. Kwon, J. G. Kim, and W. Lee, “A framework for effective face-mask contact modeling based on finite element analysis for custom design of a facial mask”, *PLoS ONE*, 2022, **17**(7), e0270092.
31. Comfo Labs, “Size Lab Platform”, <https://comfolabs.com/platform/> (accessed August 9, 2025).
32. K. Bartol, D. Bojanić, T. Petković, and T. Pribanić, “A review of body measurement using 3D scanning”, *IEEE Access*, 2006, **9**, 67281-67301.
33. S. M. Park and Y. J. Nam, “The verification of accuracy of 3D body scan data: Focused on the Cyberware WB4 whole body scanner”, *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 2012, **14**(1), 81-96.
34. M. Arbutina, S. Mihic, and D. Dragan, “Techniques for 3D human body scanning”, In 7th International Conference on Mass Customization and Personalization in Central Europe (MCP-CE 2016), 2016.
35. M. Daneshmand, A. Helmi, E. Avots, F. Noroozi, F. Alisinanoglu, H. S. Arslan, J. Gorbova, R. E. Haamer, C. Ozcinar, and G. Anbarjafari, “3D scanning: A comprehensive survey”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
36. A. Venkat, S. S. Jinka, and A. Sharma, “Deep textured 3D reconstruction of human bodies”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
37. T. Yu, Z. Zheng, K. Guo, J. Zhao, Q. Dai, H. Li, G. Pons-Moll, and Y. Liu, “DoubleFusion: Real-time capture of human performances with inner body shapes from a single depth sensor”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
38. R. A. Clark, B. F. Mentiplay, E. Hough, and Y. H. Pua, “Three-dimensional cameras and skeleton pose tracking for physical function assessment: A review of uses, validity, current developments and Kinect alternatives”, *Gait and Posture*, 2019, **68**, 193-200.
39. Z. Li, M. Oskarsson, and A. Heyden, “Detailed 3D human body reconstruction from multi-view images combining voxel super-resolution and learned implicit representation”, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020.
40. T. Krzeszowski, B. Dziadek, C. França, F. Martins, É. R. Gouveia, and K. Przednowek, “System for estimation of human anthropometric parameters based on data from Kinect v2 depth camera”, *Sensors*, 2023, **23**(7), 3459.
41. M. Trojnack, P. Dąbek, and P. Jaroszek, “Mechatronic design and experimental research of an automated photogrammetry-based human body scanner”, *Sensors*, 2023, **23**(13), 5840.
42. E. J. Power, P. R. Apeagyei, and A. M. Jefferson, “Integrating 3D scanning data and textile parameters into virtual clothing”, In 2nd International Conference on 3D Body Scanning Technologies, 2011.
43. E. H. Hong, “Usability verification of virtual clothing system for the production of a 3D avatar reproduced from 3D human body scan shape data : Focusing on the CLO 3D program”, *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 2020, **22**(1), 1-13.
44. S. Lin, J. M. Kang, and L. M. Boorady, “Experiencing the difference between a virtual and in-person fit session”, In International Textile and Apparel Association Annual Conference, 2020.
45. F. Zangue, C. Pirch, A. Klepser, and S. Morlock, “Virtual fit vs. physical fit: How well does 3D simulation represent the physical reality”, In 11th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, 2020.

45. K. H. Choi, "3D dynamic fashion design development using digital technology and its potential in online platforms", *Fashion and Textiles*, 2022, **9**(1), 9.
46. S. Lin, L. Boorady, and J. Y. M. Kang, "Experiencing body scan and computer simulation virtual fitting", *International Journal of Computer Trends and Technology*, 2022, **10**(7), 21-29.
47. N. Y. Dik, P. W. K. Tsang, A. P. Chan, C. K. Lo, and W. C. Chu, "A novel approach in predicting virtual garment fitting sizes with psychographic characteristics and 3D body measurements using artificial neural network and visualizing fitted bodies using generative adversarial network", *Heliyon*, 2023, **9**(7), e17916.
48. S. Youn, and K. Mathur, "A review of 3D digital garment simulation strategies for enhanced wearables and medical-grade applications", *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 2023, **16**(3), 193-211.
49. Y. Yang and F. Baytar, "Fit models' roles in identifying fit issues in the apparel technical design process and implications for improving 3D virtual fitting", *Fashion and Textiles*, 2024, **11**, 32.
50. Z. Huang and F. Sahari, "An overview of current technological developments in apparel fit customization", *Research Journal of Textile and Apparel*, 2025.
51. S. Youn, C. G. Knowles, A. C. Mills, and K. Mathur, "Comparative study of physical and virtual fabric parameters: physical versus virtual drape test using commercial 3D garment software", *The Journal of the Textile Institute*, 2025, **116**(1).
52. M Tailor Home Page, <https://www.mtailor.com/> (accessed August 9, 2025).
53. I. R. Ali, M. A. Mohammed, T. A. Al-Sharify, and H. Kolivand, "Real-time cloth simulation on virtual human character using enhanced position based dynamic framework technique", *Baghdad Science Journal*, 2020, **17**(4), 1294-1303.
54. M. Mao, H. Va, and M. Hong, "Video classification of cloth simulations: Deep learning and position-based dynamics for stiffness prediction", *Sensors*, 2024, **24**(2):549.
55. F. Li, Y. Li, and Y. Wang, "A 3D finite element thermal model for clothed human body", *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 2013, **6**(2), 149-160.
56. D. Harrison, Y. Fan, E. Larionov, and D. K. Pai, "Fitting close-to-body garments with 3D soft body avatars", In 9th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, 2018.
57. A. M. Schmidt and Y. Kyosev, "Finite element modelling of textile-soft material interaction using 3D/4D scan data", In 14th European LS-DYNA Conference, 2023.
58. Perfitt Home Page, <https://www.perfitt.io/>, 2025 (accessed August 9, 2025).
59. M. Kwon, S. Choi, and J. Kim, "Investigation of the body distribution of load pressure and virtual wear design according to the corset type harness", *Journal of the Korea Fashion and Costume Design Association*, 2021, **23**(3), 1-10.
60. Y. R. Seo, "Development of jacket patterns for women in their 20s with turtle neck syndrome through virtual fit assessment", Ph. D. Thesis, Konkuk University, 2022.
61. Phits Home Page, <http://phits.co.kr/>, 2025 (accessed August 9, 2025).
62. XKelet Home Page, <http://xkelet.co.kr/>, 2025 (accessed August 9, 2025).
63. Vogue Business, "Fashion's circular economy could be worth \$5 trillion", https://www.voguebusiness.com/sustainability/fashions-circular-economy-could-be-worth-5-trillion?utm_source=chatgpt.com (accessed August 9, 2025).