



3D 프린팅을 위한 저작, 검증 및 출력 기술 동향

I. 서론



윤 승 욱
한국전자통신연구원
SW콘텐츠연구소
CG기술연구실



황 분 우
한국전자통신연구원
SW콘텐츠연구소
CG기술연구실



임 성 재
한국전자통신연구원
SW콘텐츠연구소
CG기술연구실



전 혜 령
한국전자통신연구원
SW콘텐츠연구소
CG기술연구실



박 창 준
한국전자통신연구원
SW콘텐츠연구소
CG기술연구실



최 진 성
한국전자통신연구원
SW콘텐츠연구소
CG기술연구실

최근 세계 각국에서 제조업 혁명을 주도하는 기술로 적층 가공 기법 (AM, additive manufacturing) 또는 3D 프린팅에 대한 관심과 지원이 증가하고 있다. 2012년부터 미국을 비롯한 영국, 중국, 독일, 일본 등에서 정부 주도하에 3D 프린팅 지원 및 육성 정책을 정비하고 투자 지원을 확대하고 있다. 국내에서도 2013년부터 국가 주도 3D 프린팅 연구개발 사업을 시작해 선진국에 비해 작은 규모이지만 관련 기술 개발을 추진 중이다^[1].

적층 가공 방식은 1980년대부터 사용돼 왔으나 재료공학의 발달과 오픈 소스 기반 저가형 하드웨어가 급속히 확산되면서 3D 프린팅이라는 키워드로 새롭게 대중적 관심을 받고 있다^[1]. 응용분야는 기계, 항공 우주, 전자제품, 자동차, 의료, 교육, 패션, 디자인, 완구 등 고부가 가치 산업부터 소비재에 이르기까지 다양하다.

기업에서 제품 모형이나 시제품을 테스트하는 용도에서 벗어나 최근에는 개인이 구입하여 직접 프린트할 수 있는 FDM (Fused Deposition Modeling) 방식의 프린터가 확산되고 광조형 (SLA, Stereolithography) 방식이나 선택적 레이저 소결 (SLS, Selective Laser Sintering) 방식의 고가 프린터 가격이 하락하면서 응용분야



가 확대되는 추세며, 이에 따라 일반인의 개인화된 3D 프린팅용 콘텐츠 제작에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 저가형 3D 프린터의 잦은 고장, 3D 프린팅 가능한 데이터 제작의 어려움, 오랜 프린팅 시간, 높은 실패율, 출력물 크기 제약, 컬러 표현의 제약 등 극복해야 할 요소가 많이 남아있다.

대중매체에서는 3D 프린터만 구비하면 누구나 손쉽게 아이디어를 현실화할 수 있는 것처럼 홍보되고 있지만, 실제로 이를 가능케 하려면 3D 프린팅 데이터 저작, 검증 및 출력이라는 일련의 과정이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 이러한 3D 프린팅 수행 절차에 따라 각 단계에서의 요구사항과 문제점을 살펴보고 문제 해결을 위한 관련 기술 및 연구 동향을 소개한다.

II. 3D 프린팅 관련 저작 기술

1. 3D 저작 도구 분류

3D 프린팅을 위해서는 프린트할 대상인 3D 모델을 생성하거나 미리 제작된 모델을 편집해 원하는 데이터를 생성해야 한다. 이를 위한 3D 저작 도구는 크게 유기체나 사람, 동물과 같이 수치적으로 표현이 어렵고 규격화하기 어려운 모델 제작을 위한 3D 모델링 도구와 생성하려는 모델이 정해진 규격과 정확한 치수를 갖는 공학 설계에 기반한 제품 제작을 위한 3D CAD (Computer Aided Design) 모델링 도구로 분류할 수 있다. 하지만 최근에는 3D 프린팅을 위한 저작도구에 대한 수요 증가로 도구에 상관없이 데이터 제작이 가능하도록 도구마다 기본적으로 필요한 기능을 지원하는 추세다. 따라서 용도에 따라 선택적으로 도구를 활용하는 경우가 많다. 또한, 저작 도구에서 지원하는 기능 범위, 주사용 환경 및 사용자의 학습 난이도 등에 따라 전문가용/비전문가용 저작 도구로 나눌 수 있다. 논문에서는 3D 프린터용 모델 저작의 초보자에서 전문가까지 다양한 사용자 관점에서 저작도구를 분류해 살펴본다.

가. 전문가용 3D 저작 도구

전통적인 3D 저작 도구는 다양한 기능과 높은 성능을 제공하기 위해 대부분 데스크탑 환경에서 구동된다. 3D 모델링 도구는 주로 게임, 애니메이션, 영화 등에서 렌더링, 애니메이션 기능이 통합된 형태로 고품질 3D 컴퓨터 그래픽스 응용을 목적으로 사용돼 왔다. 대표적으로 Autodesk사의 Maya, 3ds Max, Softimage 등이 있다. 3D 프린터 시장의 선두 기업 중 하나인 3D Systems사는 3D 스캔과 데이터 정제, 가공 및 3D 프린터 출력 기능을 제공하는 Geomagic 제품군을 판매하고 있다. 그 외에도 ZBrush, Houdini, Lightwave 3D 등 다수의 상용 제품이 3D 전문 디자이너를 중심으로 사용 중이다^[1]. 이런 도구는 범용적이고 전문적인 기능을 제공하지만 방대한 기능 습득에 많은 시간이 소요돼 사용자의 진입 장벽이 높은 단점이 있다.

그 외 무료이면서도 오픈 소스 정책을 채택해 상용 소프트웨어와 유사한 기능을 제공하는 Blender, 유기체 모델링용으로 사용 중인 Sculptis, 주로 연구용으로 사용되는 캐릭터 모델링용 도구인 MakeHuman 등이 있다.

하지만 이런 도구는 무료 정책으로 인한 긴 업그レード 주기, 시스템 안정성 문제 발생 시 즉각적인 해결이 어려운 점 등 유지보수 측면에서 문제점이 있다^[1].

CAD 도구는 주로 산업용 또는 공업용 제품의 개념 및 상세 설계를 위한 용도로 사용돼 왔다. Autodesk사의 AutoCAD, Dassault Systèmes사의 SolidWorks와 CATIA, Siemens사의 Solid Edge, solidThinking사의 Inspire, 그리고 Robert McNeel & Associates사의 Rhinoceros 3D, Trimble사의 SketchUp Pro 등이 전문가용 CAD 저작도구의 대표 제품이다. 국내에서는 (주)인텔리코리아에서 AutoCAD와의 호환성을 강조하는 CADian 제품군을 판매하고 있다. 무료 제품으로 FreeCAD, CAD 플랫폼인 OpenCASCADE 등이 있다^[1]. 이런 도구들은 학습을 위해 공학적인 배경 지식을 요구하는 경우가 많고, 원하는 기능을 의도대로 사용하기 위해서는 오랜 연습과 훈련이 필요하다.

3D 프린트할 대상인 3D 모델을 생성하거나 미리 제작된 모델을 편집해 원하는 데이터를 생성하기 위한 3D 저작 도구를 초보자에서 전문가까지 다양한 사용자 관점에서 분류해 살펴본다.

나. 비전문가용 3D 저작 도구

비전문가를 대상으로 특화된 기능을 지원하는 3D 저작 도구는 최근 주로 웹이나 모바일 앱 형태로 제공되고 있다. Autodesk 123D 제품군(Design, Sculpt+)과 MeshMixer가 대표적 모델링 도구다. 상용 제품 대비 제한적 메쉬 표현, 메쉬 호환성, 모델 변형 및 재활용 미흡으로 범용성에 한계가 있다. 안드로이드용 무료 3D 모델링 도구로는 3D 모델 생성, 다각형 및 패치 모델링, 텍스처 등 전문 3D 모델링 기능을 지원하는 Scalisoft사의 Spacedraw가 있다^[1]. 데이터 크기 무제한, UNDO 기능이 추가된 유료 버전도 판매 중이다. Gravity사의 Gravity Sketch^[2]는 사용자 터치기반 3D 브러시를 사용해 스케치로부터 3D 모델을 자동 생성하는 기능을 제공한다. 기타 iOS용 도구로 단순히 3D 모델 뷰잉만 가능한 MeshLab, 3DVIA Mobile 등이 있다^[1].

비전문가용 3D CAD 도구는 주로 사용자 접근성 향상과 협업을 위해 데스크탑 버전의 일부 기능(주로 3D 뷰잉, 단순 조작, 마킹 등)을 제공하는 형태가 많다. Autodesk사에서는 AutoCAD 360, Fusion 360 등 자사의 CAD 소프트웨어 중 응용에 특화된 기능을 모아 캐주얼 소프트웨어를 배포 중이다. 이 외에도 SketchUp Make, progeCAD smart 등이 존재한다^[1]. iPad Pro용으로 최근 출시된 Shapr3D^[3]는 Apple사의 스타일러스 펜을 사용해 스케치하듯 3D CAD 모델을 생성 및 편집하는 기능을 제공해 사용자 편의성을 향상시켰다. 또한, 클라우드 기반 3D CAD 제품인 OnShape^[4]은 웹 브라우저, 모바일 폰, 태블릿 등 단말에 상관없이 복잡한 모델에 대한 CAD 작업 및 협업을 지원한다.

국내의 경우 (주)인텔리코리아에서 CADian 가정용 버전과 (주)로이비즈에서 한글 3D CAD인 한캐드를 무료로 배포 중이다. 한캐드는 직관적 인터페이스와 기본 도형 불리언 연산, 템플릿 모델을 지원함으로써 초보자도 3D 모델링에 대한 개념을 쉽게 이해하고 활용할 수 있는 장점

이 있다. 그러나 복잡한 모델 처리, 프린팅 가능성 보장, 안정성 측면에서 한계가 있어 개선이 필요하다^[1].

2. 3D 저작 기술 연구동향

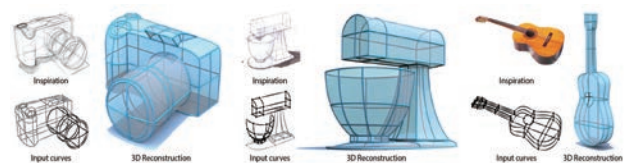
가. 사용 편의성 향상 연구

3D 저작 관련 연구 분야에서는 3D 프린팅에 대한 관심과 손쉬운 모델 저작에 대한 수요가 증가하면서 간편한 사용자 인터페이스 및 가벼운 모델링을 지원하는 3D 모델링 및 CAD 기법 연구가 늘어나는 추세다. 현존하는 대다수의 웹 또는 모바일용 3D 모델링 및 CAD 도구는 2D 모델링 및 데스크탑용 소프트웨어에서 제작된 모델의 뷰잉 및 간단한 조작, 마킹 위주의 제한적 기능만 제공한다. 이런 한계를 극복하고 손쉬운 인터페이스로 다양하고 용도에 맞는 3D 모델 생성 및 편집 작업을 수행할 수 있도록 하는 연구가 증가하고 있다.

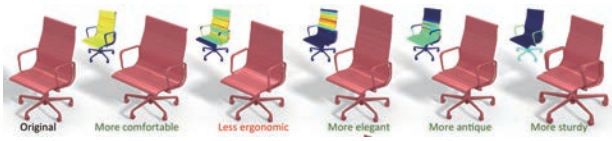
Xu 등은 <그림 1>과 같이 2D 스케치로부터 직교성, 평행성, 대칭성, 곡률 등의 기하학적 특성을 추출하고, 이를 선택적으로 3D로 확장해 최종 3D 모델을 복원하는 방식을 제안했다^[5]. Paoli 등은 3D 체적 모델의 외부에 부착되는 장식물, 의복 등 레이어 구조를 갖는 3D 모델에 대한 디자이너의 2D 스케치를 분석해 이를 자동으로 3D 모델화하는 방법을 제안했다^[6].

Lipp 등은 3D 모델링 작업 중 다각형 모델의 점, 선, 면을 선택/변형하는 편집 작업의 어려움(면(face) 삽입 위치 결정, 에지(edge) 제거, 인접 면 업데이트 등)를 극복해 모델링 복잡도를 줄이고 빠르게 다각형 모델링을 수행하는 방법을 제안했다^[7]. Kang 등은 멀티

최근에는 간편한 사용자 인터페이스 및 가벼운 모델링을 지원하는 3D 모델링 및 CAD 기법 연구가 늘고 있다. 또한, 객체 단위 변형, 편집을 통해 3D 모델을 생성하는 연구가 3D 프린팅 모델 생성에 적합한 방법 중 하나로 새롭게 조명 받고 있다.



<그림 1> 2D 스케치 기반 3D 곡면 모델 복원^[5]



〈그림 2〉 의미론적 속성에 따른 3D 객체 변형^[12]

터치 인터페이스에 매크로 기능을 접목시킨 모바일 CAD 모델링 시스템에 관한 연구를 수행했다^[8].

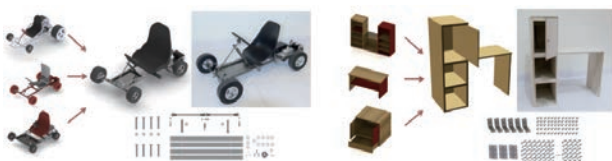
나. 객체 단위 3D 모델 저작 연구

3D 프린팅이 각광을 받으면서 객체 단위의 변형, 편집을 통해 3D 모델을 생성하는 연구가 3D 프린팅 모델 생성에 적합한 방법 중 하나로 새롭게 조명 받고 있다.

객체의 고유 특성을 간직한 제약 영역을 자동 추출하고 이를 고려해 객체의 크기를 변형하는 연구^[9-10], 객체의 서로 다른 구성요소간 기하학적, 공간적 제약 조건을 추출해 변형 핸들을 생성함으로써 객체의 주요 특징을 유지하면서 3D 객체를 변형하는 방법^[11], 〈그림 2〉와 같이 객체 기하정보의 세부 편집보다

는 사용자에게 의미 있는 속성에 따라 3D 객체를 변형하는 연구^[12], 소스와 타겟 3D 모델을 구조 그래프로 표현 후 이를 합성해 다양한 중간 모델을 생성하는 접근^[13] 등이 있다.

한편, 객체 기반 3D 모델 편집이라는 점은 앞서 방식과 유사하나, 이러한 객체를 모아 3D 모델 예제 라이브러리를 구축하고 이로부터 새로운 모델을 생성하는 연구도 진행 중이다^[1]. 〈그림 3〉과 같이 전문가가 제작한 3D 모델을 3D 프린팅 가능한 템플릿 모델로 변환 후, 이 템플릿을 변형해 새로운 프린팅 가능한 3D 객체를 생성하는 접



〈그림 3〉 매개변수화된 템플릿으로부터 3D 프린팅 가능한 모델 생성^[14]

근^[14-15], 매개변수 기반 기능성 모델의 3D 프린팅 가능성을 보장하면서 사용자가 손쉽게 외형을 변형할 수 있도록 하는 연구^[16], 매개변수화된 기계식 3D 홀더 모델 저장소를 만들고, 두 물체를 고정할 수 있는 3D 프린팅 가능한 홀더를 저장소의 예제 홀더 모델을 결합해 자동으로 생성하는 연구^[17] 등이 있다.

이런 연구는 사용자가 3D 프린팅용 3D 모델 생성에 익숙하지 않아도 검증된 예제 모델을 변형해 원하는 모델을 쉽게 생성할 수 있는 장점이 있다. 그러나 규격화하기 어려운 사람, 동물 등과 같은 유기체 모델이나 매개변수로 특성을 정의하기 어려운 모델, 예제 라이브러리에 존재하지 않는 모델에는 적용이 힘든 단점이 있다.

지금까지 3D 프린팅을 위한 3D 저작 기술 연구 동향을 살펴보았다. 기존 3D 모델링 및 CAD 도구 업체들은 자사 제품군에 3D 프린팅 지원 기능을 추가하고, 사용자의 진입 장벽을 낮추기 위해 저가형, 모바일 기기용 제품을 출시하고 있다. 또한, 3D 프린팅용 모델 저작을 위한 사용자 편의성 향상, 객체 단위 편

집, 예제 기반 변형 관련 연구가 활발히 진행 중이다.

III. 3D 프린팅 데이터 검증 기술

1. 3D 프린팅 데이터 오류 탐지 및 수정 도구

앞서 소개한 다양한 방식으로 3D 모델을 생성할 수 있으나, 3D 프린팅용 모델은 실제 3D 프린터로 출력이 가능해야 하므로 이를 위한 제약 조건이 존재한다. 모델 저작 단계에서 제약 조건을 고려해 모델을 생성하지 않으면 출력시 오류가 발생할 확률이 높다.

우선 3D 프린팅용 모델은 실제 물리적인 재료를 적용해 출력하므로 최소한의 두께가 필요하다. 프린터에 따라 외면으로만 이뤄진 모델을 입력해도 자동으로 재료의 두께를 적용하거나 속이 찬 상태로 출력하는 경우도 있지만, 기본적으로 내/외면 구별이 가능한 체적 (volume) 모델이어야 출력이 가능하다. 컴퓨터 그래픽스에서

는 모든 면이 연결돼 닫힌 에지를 갖는 3D 모델을 수밀(watertight) 메쉬로 일컫는다. 또한, 하나의 에지를 공유하는 면이 둘인 경우를 다양체(manifold)로 정의한다. 하나의 에지를 공유하는 면이 하나 또는 셋 이상인 비다양체(non-manifold) 에지가 존재하는 경우 다양체로 수정이 필요하며, 수밀 메쉬 모델이면서 다양체인 모델이어야 출력이 가능하다.

현재 사용되는 3D 프린터는 기본적으로 삼각형 정보(정점과 정점의 연결성)를 담고 있는 파일 포맷(STL, STereoLithography)을 지원한다. 프린터의 종류에 따라 컬러나 텍스처 정보가 포함된 파일 포맷을 추가로 지원하는 경우도 있지만, 기본 정보인 삼각형에 문제가 있으면 오류가 발생하거나 출력이 실패할 수 있다.

삼각형 메쉬 모델의 건전성은 각 삼각형의 법선 벡터가 뒤집어지지 않고 연속적으로 한 방향을 향하는지, 서로 겹치는(overlapping) 삼각형이 존재하는지, 자기겹침(self-intersection) 삼각형이 존재하는지, 연결되지 않은 에지(bad edge)가 있는지 여부와 이로 말미암아 구멍(hole)이 발생하였는지 여부 등으로 확인한다.

자신의 아이디어를 3D 프린터로 출력하기 전 앞서 언급한 조건을 만족하는지를 확인하고 수정하는 절차가 필요하다. 제약 조건이 많고, 실제 많은 데이터를 생성, 출력해 보면서 경험적으로 수정해야 하는 부분이 많은 점도 3D 프린팅용 데이터 생성의 어려운 점이기도 하다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위해 3D 프린팅 데이터 오류 탐

지 및 수정을 위한 소프트웨어가 사용된다.

대표적으로 Materialise사의 Magics^[18]는 수천만 원대의 고가 소프트웨어로 오류 수정, 모델 편집, 텍스처 처리, 마킹, 빌드 볼륨 내 위치 선정 등 3D 프린팅용 모델의 오류 탐지와 수정을 위한 범용적이고 전문적인 기능을 지원한다. Autodesk의 Netfabb^[19]은 기본적인 오류 탐지 및 수정 기능을 제공하는 Netfabb Basic을 무료로, 추가 기능이 포함된 상용버전은 구독형 라이선스 형태로 제공하고 있다. 또한, Microsoft사와의 협력을 통해 클라우드 기반 자동 오류 수정 서비스도 제공하고 있다^[20]. Mixed Dimensions사의 MakePrintable도 유사하게 클라우드 기반 3D 프린팅용 모델 오류 수정 서비스를 제공한다^[21].

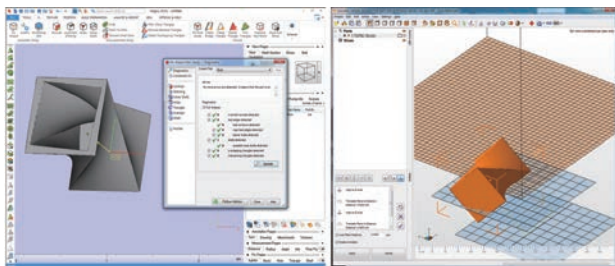
입력 3D 모델을 3D 프린팅 가능한 데이터로 변환한 후에는 출력 모델 크기, 출력물의 균형, 강도, 조립 가능성, 운동성 등을 사전에 테스트하는 절차인 사전 시뮬레이션 단계가 필요하다.

〈그림 4〉는 Magics와 Netfabb의 3D 프린팅 모델 오류 탐지 및 수정 화면을 나타낸다.

무료 버전부터 고가 버전에 이르기까지 몇 종의 3D 프린팅 데이터의 오류 탐지 및 수정 도구가 존재하지만, 기술적 장벽이 존재하

고 난이도가 높아 제품이 다양하진 않다. 이런 도구에서 사용되는 3D 모델 오류 검증 및 수정 기술은 쾌속 조형(Rapid Prototyping) 분야에서부터 오랜 기간 축적된 경우가 많아 신규 업체 진입이 쉽지 않다. 또한, 무료 버전인 경우 입력 모델의 상태에 따라 자동 오류 수정이 불가능한 경우가 있고, 수동 오류 수정 기능은 전문적인 지식과 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서, 모델 제작 시에 앞서의 제약조건을 고려해 모델링하는 편이 오류 수정 난이도를 낮추고 시간을 줄이는데 효과적이다.

이와 같이 입력 3D 모델을 3D 프린팅 가능한 데이터로 변환한 후에는 출력 모델 크기, 출력물의 균형, 강도, 조립 가능성, 운동성 등을 사전에 테스트하는 절차가 필요하다. 오랜 시간을 들여 출력했으나 문제가 발생한 경우, 모델을 수정해 다시 출력하는데 소요되는 노력과 자원을 줄이기 위한 사전 시뮬레이션 단계이다.



(a) Magics^[18]

(b) Netfabb^[19]

〈그림 4〉 3D 프린팅 모델 오류 탐지 및 수정 도구

2. 내구성 및 안정성 시뮬레이션 기술

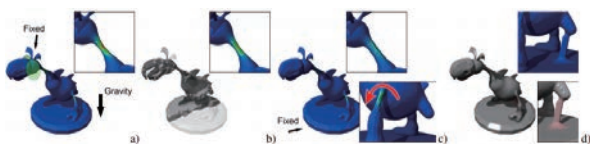
3D 프린터는 제한된 해상도로 3D 모델을 출력하므로

출력하고자 하는 모델이 프린터가 지원하는 해상도 내에서 안정적으로 출력 가능한지 확인이 필요하다. 또한, 3D 프린팅을 통해 실물로 제작된 물체는 후처리 과정이나 배송과정에서 충격에 의해 손상이 발생하는 경우가 많으므로 사전에 내구성에 대한 고려도 필요하다. 예를 들어 출력될 모델의 두께, 얇은 부분과 이를 둘러싼 영역의 기하학적인 구조, 사용자 조작시 예상 가능한 힘의 범위 등 고려할 사항이 다양하다^[22]. 최근에는 이런 특성과 기능을 자동으로 탐지하고, 출력 전에 미리 시뮬레이션해 볼 수 있는 기술이 발표되고 있다.

Telea 등은 출력 모델 중 프린터의 해상도보다 낮은 부분(얇게 돌출된 부분, 모델의 일부를 연결하는 부분, 구멍이 생기는 부분 등)에서 안정적인 출력이 어렵다고 판단하고 이런 부분을 검출하는 연구를 수행했다^[23]. Stava 등은 물체에 가해지는 잠재적인 힘을 자체 하중에 의한 지속적인 힘과 물체의 조작과정에서 발생하는 외부로부터의 힘으로 구분하고 모든 가능한 힘을 고려하여 구조적인 강도를 검사했다. 또한, <그림 5>와 같이 내구성이 약한 부분의 두께 확대(thickening), 지지 구조(struct)

삽입, 모델 내부 비우기(hollowing)의 방법을 적용해 외형은 원래 모델과 유사하게 유지하면서도 내구성/안정성을 개선하는 방법을 제안했다^[22,24].

Zhou 등은 모델에 가해지는 하중에 대한 사전 가정이 없는 상황에서, 주어진 3D 모델의 기하학적 구조와 프린팅 재질만을 고려해 어떤 부분이 가장 취약한지를 검출하는 연구를 수행했다^[25]. 실제 프린트한 결과물에 충격을 통해 손상을 입힌 결과와 계산된 구조분석 결과를 비교하여 제안된 방법의 유효성을 검증했다. 제안된 방법은 취약 부위를 예측하는데 도움을 주긴 하지만, 실제 프린팅



<그림 5> 3D 프린팅 모델의 구조적 강도 개선^[24]

시 재료의 변형을 한 가지 선형 속성으로만 모델링하기 어려워 시뮬레이션과 출력 결과가 항상 일치하지 않는 한계가 있다^[22,25].

3D 프린팅된 물체는 가상의 3D 공간에 있는 3D 모델과 달리 중력과 같은 현실세계 물리 법칙의 영향을 받는다. 따라서 캐리터 등을 출력했을 경우 본래의 제작 의도와는 달리 균형을 잡기 어렵거나 서있지 못하고 쓰러지는 등의 문제가 발생할 수 있다. Prevost 등은 모델의 세부적인 외형은 유지하면서 모델 내부의 체적 변경을 통해 무게중심을 조절하는 방식으로, 균형을 유지하며 서있는 3D 모델을 제작할 수 있도록 돕는 연구를 수행했다^[26]. 만약 내부공간 확보를 통한 무게중심의 이동만으로 원하는 자세를 얻을 수 없다면, 사용자가 인터랙티브하게 3D 모델을 수정할 수 있도록 했다. 이 방법은 프린팅된 물체

를 받침 없이 바닥에 세우거나 실을 이용해 공중에 매다는 경우 원하는 자세를 만들 수 있으나, 사용자가 3D 모델을 수정해야 하는 단점이 있다^[22,26]. 최근에는 3D 프린팅용 모델 내부에 미세 격자구조를 자동으로 생성해 출력물을 가볍게 하거나 탄성을 주기 위한 연구도

발표됐다^[27-28]. 미세 격자구조는 기존 제조 방식으로는 물체 내부에 삽입하기 어렵지만, 3D 프린팅으로는 저비용으로 제작이 가능하다. 또한, 격자의 간격, 구조 등에 따라 재료 절감, 경량화, 물체의 탄성 조절 등이 가능한 장점이 있다.

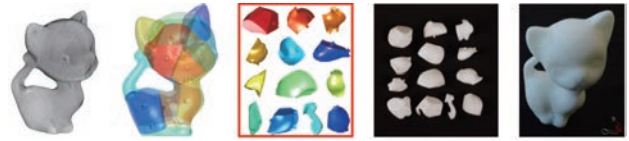
최근 3D 프린터의 가격이 저렴해지고 재질이 다양화되며, 출력 품질도 향상됐으나 재료비 절감이나 모델을 수정해 다시 출력하는데 소요되는 시간을 고려하면, 프린트 결과물의 구조적인 내구성이나 안정성을 사전에 확인하려는 요구는 지속적으로 발생할 것이다. 따라서 관련 연구가 꾸준히 이뤄질 것으로 예상된다.

3. 분해/조립성 시뮬레이션 기술

시중에 출시된 대부분의 3D 프린터는 출력할 수 있는 출력물의 크기가 제한적이다. 프린터 헤드가 움직이는 영

역(빌드 볼륨)에 한계가 있기 때문인데, 이런 문제를 해결하기 위한 대형 프린터들도 새롭게 제작되거나 출시되고 있다. 하지만 오랜 출력시간, 실패시 그때까지 출력한 부분의 재사용이 어려운 점, 처음부터 다시 출력하는 노력 등을 고려하면 물체를 파트로 분해해 출력 후 조립해 원하는 물체를 만드는 접근이 효율적인 경우가 많다. 특히, 교육, 완구, 가구, 건축 관련 응용 분야에서는 3D 모델을 의도적으로 분할해 조립할 수 있게 하려는 요구가 있어 관련 기술이 연구되고 있다^[22].

Luo 등은 3D 프린터 출력 크기를 넘어서는 3D 모델을 입력받아 이를 출력 가능한 작은 파트로 자동 분할하거나 사용자가 지정한 가이드라인에 따라 분할하고, 각 파트의 연결부분에 연결장치를 더해 출력 후 조립할 수 있게 하는 방법을 제안했다^[29]. 파트 분할시 각 파트가 프린터의 빌드 볼륨 안에 들어가는지, 분할된 파트를 서로 간섭 없이 조립해 원래 모델을 만들 수 있는지, 파트 개수는 적절 한지, 파트는 연결 장치를 부착할 수 있는 정도의 크기인지, 구조적으로 안정적인지, 원래 외형을 최대한 유지하는지 등을 고려했다. Kalojanov 등은 건축물과 같은 입력 모델이 주어지면 이를 최소 개수의 구성 부품으로 조립할 수 있게 하는 연구를 발표했다^[30]. 정해진 구성 부품으로 건축물을 조립하는 방식은 다양하므로, 복잡하지 않은 구성 부품을 최소 개수만 사용해 주어진 모델을 조립할 수 있도록 다양한 조합을 자동으로 시도해 최적의 구성품과 모델 분할 구조를 찾는 방식이다. 최근에는 3D 프린팅과 2D 레이저 커팅 방식을 결합해 대형 3D 모델을 적은 비용으로 빠르게 제조하는 연구도 제안됐다^[31]. 3D 모델이 주어지면 우선 모델의 내부 기저 구조를 생성하고 이를 레이저 커팅 가능한 파트로 분할한다. 분할된 파트를 조립해 대략적인 모델의 뼈대를 생성한 후, 정교한 외형은 3D 프린팅 가능한 파트로 분할, 출력해 조립된 뼈대 모형 위에 부착한다. 이 방식은 큰 내부 공간이 존재하는 모델 제작시에는 제조 시간과 비용 절감 측면에서 장점이 있다. 하지만, 좁은 내부 공간이 많거나 굴곡이 심한 모델인 경우 내부 기저



〈그림 6〉프린팅 방향 최적화를 통한 표면 품질 향상^[32]

구조 생성이 어려운 단점이 있다.

출력물의 크기 제한 문제를 해결하려는 시도뿐 아니라 출력물 표면 품질을 향상시키기 위해 프린팅 방향에 따라 모델을 분할하는 연구도 진행됐다^[32]. 〈그림 6〉에 나타난 제안 방식은 대부분 3D 프린터가 한 방향으로 재료를 쌓아가므로 입력 모델 외면의 법선 방향이 출력 방향에 수직일 때 출력물 표면의 품질이 좋아지는 특성을 사용한다. 단점으로는 분할되는 파트 개수를 최적화하기 어렵다는 점, 분할 경계면에서 새롭게 발생하는 오류가 존재하는 점이 있다.

최근 3D 프린팅 성능이 향상되고 있으나, 여전히 3D 프린터에서 출력 가능한 물체 크기는 대부분 30cm 이하이다. 따라서 출력하고자 하는 3D 모델을 분할해 프린트한 후 다시 조립하는 과정을 돕기 위한 관련 기술은 추후에도 계속 연구 주제가 될 것으로 예상된다^[22].

4. 구동/운동성 시뮬레이션 기술

기존의 3D 프린팅은 주로 제품제작을 위한 프로토타입 제작에 많이 활용돼 주로 외형을 정밀하게 표현해 제품의 디자인적인 가시성과 인체공학적 사용성 등을 시험하려는 목적이 강했다. 그러나 3D 프린팅 기술의 급속한 발전과 함께 제품을 직접 제조하는 경우가 증가하고, 최종 제품의 구동성이 나 운동성까지도 3D 프린팅 모델을 통해 확인하려는 시도도 늘고 있다.

관절을 갖는 3D 캐릭터 모델은 컴퓨터 애니메이션 분야에서 널리 사용돼왔다. 하지만 디지털 캐릭터에 가상의 관절을 삽입해 자연스러운 움직임을 만드는 일은 디자이너의 경험에 의존적인 부분이 많다. 3D 프린팅이 각광을 받으면서 캐릭터와 같이 관절을 갖는 모델을 직접 프린트

3D 프린팅 기술의 급속한 발전과 함께 제품을 직접 제조하는 경우가 증가하고, 최종 제품의 구동성이나 운동성까지도 3D 프린팅 모델을 통해 확인하려는 시도가 늘고 있다.



〈그림 7〉스킨드 메쉬로부터 관절 구조 자동 생성^[33]

후 운동성을 테스트하고, 실제 물리적인 움직임에 기반해 모델을 디자인하려는 시도가 늘고 있다.

Bächer 등은 〈그림 7〉과 같이 3D 캐릭터 입력 모델이 정점과 뼈대 사이에 가중치 형태로 중속성 정보를 갖는 스킨드 메쉬 (skinned mesh) 형태로 주어졌을 때, 이 캐릭터의 움직임을 근사하면서 3D 프린팅 가능한 관절 모델을 유추하는 연구를 수행했다^[33].

Cali 등은 뼈대 정보나 뼈대와 정점 사이의 가중치 정보가 없는 일반 3D 메쉬 모델을 기능적인 관절 구동이 가능하면서도 별도의 조립 없이 3D 프린팅 가능한 모델로 변환하는 연구를 발표했다^[34]. 제안 방식은 프린팅 과정에서 관절이 다른 부위에 합쳐지거나 헐거워져 고정된 자세를 취할 수 없게 되는 등의 문제 해결을 위해 다양한 관절 테스트를 수행했다. 사용자가 손쉽게 관절 삽입 위치와 회전 제약 조건을 지정할 수 있는 인터페이스를 제공하며, 입력 3D 모델에 제한이 없는 장점이 있으나, 관절 삽입을 위한 리깅(rigging), 관절의 위치 및 크기 조정, 각 관절에서의 제약조건 지정 등 사용자의 많은 개입이 요구되는 단점이 있다^[22,34].

3D 모델에 직접 관절 삽입을 통해 운동성을 부여하고 이를 프린트하는 방식과는 달리 3D 모델의 움직임을 먼저 입력 받고, 기어, 체인 등 3D 프린팅 가능한 기계적인 구동부를 자동으로 생성하거나 실제 기계 부품을 결합해 동작이 가능한 형태로 변환하는 기술도 발표됐다^[35-37].

이런 접근은 공학적인 배경지식이 없는 비전문가도 움직임이 가능한 물리적인 캐릭터를 디자인하고 출력할 수 있게 도움을 준다.

IV. 3D 프린팅 데이터 출력 기술

3D 프린팅을 위한 모델을 저작한 후 데이터의 오류를 탐지 및 수정하고, 응용에 필요한 특성을 시뮬레이션해 검증한 후에는 실제 출력을 수행한다. 최종 출력 전 단계에서는 출력을 위해 입력된 3D 모델이 슬라이스 단위로 분할되고, 이를 프린팅하기 위해 프린터 헤드가 움직이는 경로를 저장하는 지코드(G-code)가 생성된다. 3D 프린터에서는 지코드에 따라 헤드를 움직이면서 재료를 분사해 한 층씩 슬라이스를 프린팅한다. 슬라이스별로 프린트

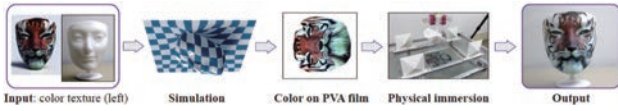
3D 프린팅을 위한 모델을 저작한 후 데이터의 오류를 탐지 및 수정하고, 응용에 필요한 특성을 시뮬레이션해 검증한 후에는 실제 출력을 수행한다. 최근 출력 시 효과적인 지지대 생성 및 컬러 프린팅에 대한 연구가 새롭게 발표되고 있다.

할 때는 먼저 프린팅된 층이 존재해야 그 위에 재료를 적층할 수 있으므로, 지지층이 없는 상태에서 모델의 일부를 출력해야 하는 상황(오버행, overhang)이 발생하면 출력이 힘들다. 따라서 오버행 영역에는 프린팅하는 모델과는 별도로 사전에 지지대를 추가해야 원하는 프린팅 결과를 얻을 수 있다. 지지대의 유

무에 따라 출력 성공률이 달라지며, 재료 및 출력 시간도 변하므로 효과적인 지지대를 생성하는 연구가 진행돼왔다. 또한, 최근에는 3D 프린터의 사용자층이 다양해지면서 단색이 아닌 컬러 프린팅에 대한 수요 증가로 관련 연구도 새롭게 발표되고 있다.

1. 자동 지지대 생성 기술

Dumas 등은 오버행 영역과 구조물의 안정성을 고려해 지지대를 생성할 정점 위치를 선택하고, 선택된 모든 정점을 지탱하는 다리 구조를 갖는 지지대를 생성하는 방법을 제안했다^[38]. 기동만 세우는 기존 방식에 비해 다리 구조는 적은 재료로 더 안정적인 출력물을 얻을 수 있게 해주는 장점이 있다. 하지만 최종 출력물의 전체적인 강도에 대한 보장 없이 지지대 생성에만 초점이 맞춰져 있어



〈그림 8〉 수전사 기반 3D 프린팅 출력물 텍스처 생성^[41]

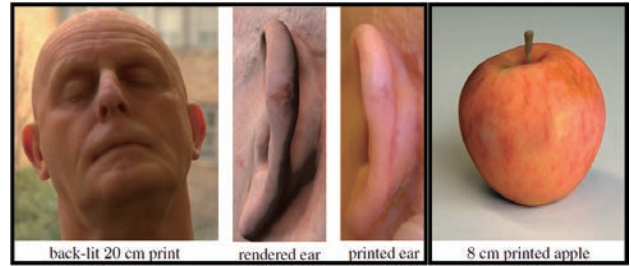
내구성/안정성 시뮬레이션 기능과 연동될 필요가 있다. 이에 반해 Vanek 등은 지지대 생성을 최소화해 프린팅 시간과 재료를 절감하기 위한 연구를 수행했다^[39]. 입력 3D 모델을 최소한의 지지대가 필요한 방향으로 회전하고, 지지대 부착이 필요한 정점을 검출해 이 정점들을 지지하는 지지대를 자동생성한다. 하지만 지지대의 각도와 길이만 고려해 최적화를 수행하므로 어느 정도 하중을 견딜 수 있는지 등 안정성 검증은 미흡한 단점이 있다. 유사하게 Qiu 등은 재료 소모량을 줄이는 것을 목적으로 복잡한 3D 모델의 지지대를 생성하는 방법을 제안했다^[40].

지지대는 적층 가공 방식을 사용하는 3D 프린팅의 주요 요소로 출력물에 직접적인 영향을 준다. 지지대 밀도가 높을수록 출력물의 안정성이 높아지지만 재료 소모나 출력 시간도 늘어나며 출력 후 제거가 어렵고, 밀도가 낮으면 출력 안정성에 문제가 생길 수 있다. 최근에는 다중 노즐을 사용해 지지대를 수용성 재료 또는 용융점이 낮은 재료로 출력해 손쉽게 제거할 수 있게 하는 제품도 출시되는 등 관련 연구와 기술개발이 지속적으로 이뤄지고 있다.

2. 컬러 처리 기술

현재 사용 중인 대부분의 3D 프린터는 재료의 색이 출력물의 색을 결정한다. 수지나 플라스틱을 경화시키거나 녹이는 방식의 프린터는 재료를 중간에 바꿔 출력하는 경우가 아니면 기본적으로 단색 출력만 가능하다. 전통적으로는 선택적 레이저 소결 방식을 사용하는 파우더 기반 프린터에서 컬러 잉크와 바인더를 사용해 다양한 컬러를 지원했다. 최근 FDM 방식의 풀컬러 프린터가 출시되고, 기존 컬러 프린터의 가격이 하락하고 있으며, 종이 컬러 프린터도 출시되고 있다. 하지만 아직은 고가의 제품이 대부분이고 컬러 품질도 개선의 여지가 많아 관련된 새로운 연구가 발표되고 있다.

Zhang 등은 3D 프린터에서 직접 컬러를 출력하는 방식이 아닌 〈그림 8〉과 같이 전통적인 수전사 프린팅



〈그림 9〉 반투명 재료를 사용한 풀컬러 3D 프린팅^[43]

(hydrographic printing)을 3D 프린팅된 출력물에 적용해 고품질의 텍스처를 입히는 방법을 발표했다^[41]. 연구는 복잡한 굴곡을 갖는 3D 출력물에 얇은 필름을 정확히 정렬하는 방법을 시뮬레이션할 수 있는 계산 모델을 제안하고, 자동으로 수전사가 가능한 물리적 시스템도 구축했다. 프린터의 컬러 지원 여부에 상관없이 컬러가 처리된 결과물을 얻을 수 있으나, 전문적인 하드웨어 시스템이 필요하고 여러 번 전사를 하는 경우 컬러 합성 품질이 저하되는 등의 단점이 있다.

최근 Schüller 등은 열성형 (thermoforming) 방법을 적용해 정교한 텍스처가 입혀진 출력물을 생성하는 연구를 제안했다^[42]. 열성형은 산업계에서 대량으로 제품을 제조할 때 주로 사용되며 열을 플라스틱 시트에 가해 원하는 몰드의 형상대로 변형시키는 방식으로 음식 진공포장이나 일회용 접시, 블리스터 포장 등에 응용된다. 이때 플라스틱 시트 위에 영상이나 텍스처가 인쇄돼 있으면 정교한 컬러가 입혀지는 출력물을 만들 수 있다. 직접적으로 3D 프린터의 컬러 성능을 개선하는 방식은 아니며 열에 강한 몰드 제작에 3D 프린팅이 사용된 경우지만, 앞서 소개한 수전사 방식과 유사하게 프린터의 컬러 지원 유무와 관계없이 정밀하게 채색된 출력물을 얻을 수 있다는 점은 강점이다. 단점으로는 몰드와 영상이 인쇄된 플라스틱 시트와의 정렬을 수작업으로 해야 하는 점, 한 겹의 플라스틱 시트를 사용하므로 단한 물체에는 적용이 어렵다는 점을 들 수 있다.

3D 프린터 자체의 컬러 성능 향상에 관한 연구로 Brunton 등은 멀티젯 (multi-jet) 프린터에서 반투명한 재료를 사용할 때 풀컬러 출력물을 얻기 위한 하프토닝 (halftoning) 방법을 제안했다^[43]. 제안 방식은 멀티



젯 프린터에서 아직 풀컬러를 지원하지 않고, 반투명 재료만 컬러 지원이 되는 등 제약조건이 있는 상태에서 컬러 성능을 향상시키는 방법이다. 입력 모델을 복셀화(voxelization)하고 텍스처를 표면 복셀에 할당한 후, 하프토닝 기법을 사용해 표면 복셀의 컬러를 내부 복셀로 전파한다. 즉, 반투명한 재료를 사용하므로 표면으로부터 일정 거리 안 내부 슬라이스층까지 컬러를 할당하는 방식이다. 현재는 재료와 프린터 자체 소프트웨어의 한계로 범용성이 낮으나, <그림 9>의 사람 피부처럼 빛이 투과되는 모델의 컬러 표현에는 유용하다.

V. 결론

최근 3D 프린팅 하드웨어 및 소프트웨어 기술 발전으로 프린터의 가격하락과 더불어 사용자층이 다양해지고, 응용 분야도 확대되고 있다. 이에 따라 일반 사용자도 쉽게 사용할 수 있는 3D 프린팅 데이터 생성 및 처리 기술 전반에 관한 연구개발이 활발히 진행 중이다. 본 논문에서는 이런 추세에 맞춰 3D 프린팅의 기본적인 절차와 각 단계에서의 요구사항 및 문제점을 살펴보고, 이의 해결을 위해 사용되는 기술 및 연구 동향을 소개했다. II장에서는 3D 프린팅용 데이터 저작 기술을, III장에서는 저작된 데이터의 오류 탐지 및 수정과 시뮬레이션을 포함하는 데이터 검증 기술을, IV장에서는 지지대 자동 생성 및 컬러 처리에 관한 출력 기술에 대해 살펴보았다.

3D 프린팅은 3D 디지털 모델을 저작해 최종적으로 물리적인 출력물을 얻기까지 일련의 절차를 모두 포함한다. 절차마다 문제가 중첩되면 출력이 실패했을 경우 어디서 오류가 발생했고 어떤 부분의 문제를 해결해야 하는지 검출하기가 어렵다. 활용 목적에 따라 정도의 차이는 있지만 각 단계마다 제약 조건과 고려해야 할 특성을 만족하도록 사용자의 주의와 노력이 필요하다. 논문에서 소개한 것처럼 최근 이런 문제와 어려움을 해결하기 위한 관련 기술개발과 연구가 증가하고 있으므로, 향후에는 개인이 자신의 아이디어를 쉽고 효과적으로 현실화하고 3D 프린팅을 통해 자신만의 물체나 제품을 출력하는 일이 더욱 확대될 것으로 전망된다.

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임. [No. R0126-16-1025, “모바일 기반의 3D 프린팅 콘텐츠 생성/저작/출력기술 및 응용서비스 개발” 과제의 연구 결과임.]

참고 문헌

- [1] 윤승욱, 전해령, 황본우, 임성재, 박창준, 최진성, “3D 프린팅 관련 3D 저작/편집도구 분석 및 연구동향,” 전자통신동향분석, 제31권, 제1호, pp. 134-145, 2016년 2월.
- [2] <https://gravitysketch.com/index.html>
- [3] <http://shapr3d.com/>
- [4] <https://www.onshape.com/>
- [5] B. Xu, W. Chang, A. Sheffer, A. Bousseau, J. McCrae, and K. Singh, “True2Form: 3D curve networks from 2D sketches via selective regularization,” ACM Trans. on Graph., Vol. 33, No. 4, Article 131, pp. 1-13, 2014.
- [6] C. D. Paoli and K. Singh, “SecondSkin: Sketch-based construction of layered 3D models,” ACM Trans. on Graph., Vol. 34, No. 4, Article 126, pp. 1-10, 2015.
- [7] M. Lipp, P. Wonka, and P. Muller, “Pushpull++,” ACM Trans. on Graph., vol. 33, no. 4, Article 130, pp. 1-9, 2014.
- [8] Y. Kang, H. Kim, H. Suzuki, and S. Han, “Editing 3D models on smart devices,” Computer-Aided Design., Vol. 59, pp. 229-238, 2015.
- [9] V. Kraevoy, A. Sheffer, A. Shamir, and D. C.-Or, “Non-homogeneous resizing of complex models,” ACM Trans. on Graph., Vol. 27, No. 5, Article 111, pp. 1-9, 2008.
- [10] K. P. Wang and C.-M. Zhang, “Content-aware model resizing based on surface deformation,” Computers & Graphics, Vol. 33, pp. 433-438, March 2009.
- [11] M. E. Yumer and L. B. Kara, “Co-constrained handles for deformation in shape collections,” ACM Trans. on Graph., Vol. 33, No. 6, Article 187, pp. 1-11, 2014.
- [12] M. E. Yumer, S. Chaudhuri, J. K. Hodgins, and L. B. Kara, “Semantic shape editing using deformation handles,” ACM Trans. on Graph., Vol. 34, No. 4, Article 86, pp. 1-12, 2015.



- [13] I. Alhashim, H. Li, K. Xu, J. Cao, R. Ma, and H. Zhang, "Topology-varying 3D shape creation via structural blending," *ACM Trans. on Graph.*, Vol. 33, No. 4, Article 158, pp. 1–10, 2014.
- [14] A. Schulz, A. Shamir, D. I. W. Levin, P. Sittiamorn, and W. Matusik, "Design and fabrication by example," *ACM Trans. on Graph.*, Vol. 33, No. 4, Article 62, pp. 1–11, 2014.
- [15] A. Schulz, C. Sung, A. Spieberg, W. Zhao, Y. Cheng, A. Mehta, E. Grinspun, D. Rus, and W. Matusik, "Interactive robogami: data-driven design for 3D print and fold robots with ground locomotion," *SIGGRAPH Studio*, 2015.
- [16] M. Shugrina, A. Shamir, and W. Matusik, "Fab Forms: customizable objects for fabrication with validity and geometry caching," *ACM Trans. on Graph.*, Vol. 34, No. 4, Article 100, pp. 1–12, 2015.
- [17] Y. Koyama, S. Sueda, E. Steinhardt, T. Igarashi, A. Shamir, and W. Matusik, "AutoConnect: computational design of 3D-printable connectors," *ACM Trans. on Graph.*, Vol. 34, No. 6, Article 231, pp. 1–11, 2015.
- [18] <http://software.materialise.com/magics>
- [19] <https://www.netfabb.com/>
- [20] <https://tools3d.azurewebsites.net/>
- [21] <https://makeprintable.com/>
- [22] 표순형, 최진성, "3D 프린팅 소프트웨어 기술동향," *전자통신동향분석*, 제29권, 제1호, pp. 1–10, 2014년 2월.
- [23] A. Telea and A. Jalba, "Voxel-based assessment of printability of 3D shapes," *Proc. Mathematical Morphology Appl. Image Signal Process.*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 393–404, 2011.
- [24] O. Stava, J. Vanek, B. Benes, N. Carr, and R. Měch, "Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 4, Article 48, pp. 1–11, 2012.
- [25] Q. Zhou, J. Panetta, and D. Zorin, "Worst-case structural analysis," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, Article 137, pp. 1–11, 2013.
- [26] R. Prévost et al., "Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, Article 81, pp. 1–10, 2013.
- [27] C. Schumacher, B. Bickel, J. Rys, S. Marschner, C. Daarao, and M. Gross, "Microstructures to control elasticity in 3D printing," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, Article 136, pp. 1–13, 2015.
- [28] J. Martinez, J. Dumas, and S. Lefebvre, "Procedural voronoi foams for additive manufacturing," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, Article 44, pp. 1–12, 2016.
- [29] L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, and W. Matusik, "Chopper: partitioning models into 3D printable parts," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, Article 129, pp. 1–10, 2012.
- [30] J. Kalojanov, M. Wand, and P. Slusallek, "Building construction sets by tiling grammar simplification," *Eurographics*, Vol. 35, No. 2, pp. 1–13, 2016.
- [31] P. Song, B. Deng, Z. Wang, Z. Dong, W. Li, C.-W. Fu, and L. Liu, "CofiFab: coarse-to-fine fabrication of large 3D objects," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 1–11, 2016.
- [32] W. Wang, C. Zanni, and L. Kobbelt, "Improved surface quality in 3D printing by optimizing the printing direction," *Eurographics*, Vol. 35, No. 2, pp. 1–12, 2016.
- [33] M. Bäcker, B. Bickel, D. L. James, and H. Pfister, "Fabricating articulated characters from skinned meshes," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 4, Article 47, pp. 1–9, 2012.
- [34] J. Cali, D. A. Calian, C. Amati, R. Kleinberger, A. Steed, J. Kautz, and T. Weyrich, "3D-printing of non-assembly, articulated models," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, Article 130, pp. 1–8, 2012.
- [35] L. Zhu, W. Xu, J. Snyder, Y. Liu, G. Wang, and B. Guo, "Motion-guided mechanical toy modeling," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, Article 127, pp. 1–10, 2012.
- [36] S. Coros, B. Thomaszewski, G. Noris, S. Sueda, M. Forberg, R. W. Sumner, W. Matusik, and B. Bickel, "Computational design of mechanical characters," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 1–12, 2013.
- [37] D. Ceylan, W. Li, N. J. Mitra, M. Agrawala, and M. Pauly, "Designing and fabricating mechanical automata from mocap sequences," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1–11,



2013.

- [38] J. Dumas, J. Hergel, and S. Lefebvre, "Bridging the gap: automated steady scaffoldings for 3D printing," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 33, No. 4, pp. 1–10, 2014.
- [39] J. Vanek, J. A. G. Galicia, and B. Benes, "Clever support: efficient support structure generation for digital fabrication," *Computer Graph. Forum.*, Vol. 33, No. 5, pp. 117–125, 2014.
- [40] J. Qiu, L. Wu, and Y. Mao, "A novel supporting structure generation scheme to 3D printing," in *Proc. of International Conf. on Internet Multimedia Computing and Service*, pp. 1–4, Zhangjiajie, China, August 2014.
- [41] Y. Zhang, C. Yin, C. Zheng, and K. Zhou, "Computational hydrographic printing," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, Article 131, pp. 1–11, 2015.
- [42] C. Schüller, D. Panozzo, A. Grundhöfer, H. Zimmer, E. Sorkine, and O. S.-Hornung, "Computational thermoforming," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, Article 131, pp. 1–9, 2016.
- [43] A. Brunton, C. A. Arikian, and P. Urban, "Pushing the limits of 3D color printing: error diffusion with translucent materials," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 1, Article 4, pp. 1–15, 2015.



윤승욱

- 2000년 서강대학교 전자공학과 학사
- 2002년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 석사
- 2006년 마이크로소프트 리서치-아시아 (MSRA) 인턴연구원
- 2008년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 박사
- 2009년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원

〈관심분야〉

3D 프린팅, 3D 얼굴복원, 컴퓨터 비전 및 그래픽스



황본우

- 1995년 성균관대학교 전자공학과 학사
- 1997년 성균관대학교 전자공학과 석사
- 2002년 고려대학교 컴퓨터학과 박사
- 2005년 베투얼미디어 기술이사
- 2008년 카네기멜론대학교(CMU) 로봇공학연구소 박사후과정
- 2008년~현재 한국전자통신연구원 (ETRI) 책임연구원

〈관심분야〉

3D 프린팅, 3D 얼굴복원, 컴퓨터 비전 및 그래픽스



임성재

- 2004년 펜실베이니아대학교(UPenn) 의학영상연구소 방문연구원
- 2006년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과 박사
- 2006년~현재 한국전자통신연구원 (ETRI) 선임연구원

〈관심분야〉

3D 프린팅, 3D 얼굴복원, 컴퓨터 비전 및 그래픽스, VR/AR



전혜령

- 2006년 고려대학교 법학과 학사
- 2009년 스튜디오다르다 PM
- 2015년 한국전자통신연구원(ETRI) CG기술연구실 기술원
- 2014년~현재 한국과학기술원(KAIST) 문화기술대학원 석사과정
- 2016년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 위촉연구원

<관심분야>

3D 프린팅, 컴퓨터 그래픽스, 3D 모델링, 애니메이션



박창준

- 1994년 경북대학교 전자공학과 학사
- 1996년 경북대학교 전자공학과 석사
- 2000년 경북대학교 전자공학과 박사
- 1998년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) CG기술연구실 실장

<관심분야>

3D 프린팅, 컴퓨터 비전 및 3D 복원, 게임



최진성

- 1989년 경북대학교 전자공학과 학사
- 1994년 경북대학교 전자공학과 석사
- 1994년 시스템공학연구소
- 1997년~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연구원

<관심분야>

3D 프린팅, VR/AR, 컴퓨터 비전 및 3D 복원