

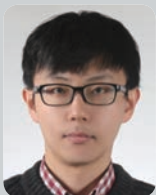
실물 제작을 위한 3D 프린팅 소프트웨어 기술



최수미
세종대학교 컴퓨터공학과



신일규
세종대학교 컴퓨터공학과



최예준
세종대학교 컴퓨터공학과



최강현
세종대학교 컴퓨터공학과

I. 서론

현실 세계로부터 사실적인 데이터를 획득하여 컴퓨터로 모델링한 후, 다시 이를 3D 프린팅을 통해 실물로 제작하는 일련의 프로세스가 간편해지고 있다. 실물 제작을 위한 3D 프린팅 소프트웨어 기술은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 많은 관심을 가지고 연구가 진행 중이다. 이 기술은 기존의 그래픽스 기술과 유사하지만, 실제로 어떠한 재료로 제작되는지 또는 어떠한 움직임으로 제한되는지 등의 물리적인 제약을 고려해야만 한다. 그러므로 프린팅 방식에 적합한 모델링, 출력물의 균형을 고려한 형태 최적화, 움직임 시뮬레이션을 통한 구조 최적화 등의 새로운 문제들을 해결하기 위한 연구가 필요하게 된다. 3D 프린터가 보편화되고 발전함에 따라 관련 소프트웨어 기술에 대한 연구들이 진행되고 있으나, 여러 단계에서의 알고리즘들이 아직 부족한 상황이다. 본 논문에서는 컴퓨터 그래픽스 분야에서 최근 발표된 3D 프린팅 소프트웨어 기술을 살펴보고자 한다. 먼저 주요 3D 프린팅 방식을 II장에서 설명하고, 3D 프린팅 관련 기술 동향 및 주요 이슈들을 III장에서 살펴본 후, 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 3D 프린팅 방식

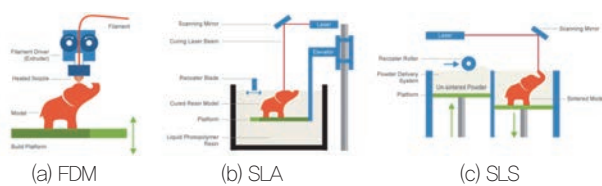
3D 프린팅 기술은 컴퓨터를 이용한 기하학적 모델링 시스템(또는 Computer Aided Design 시스템)을 활용하여 작성된 설계를 직접 물리적인 모형으로 형상화하고자 하는 욕구에서 태동되었다고 한다. 전통적인 기계식 제조방법이 원자재를 잘라내어(subtractive process) 모양을 만드는 데 반하여, 최근 주목 받고 있는 보급형 3D 프린팅 장비는 적층형 방식(additive manufacturing process)을 사용하고 있다.



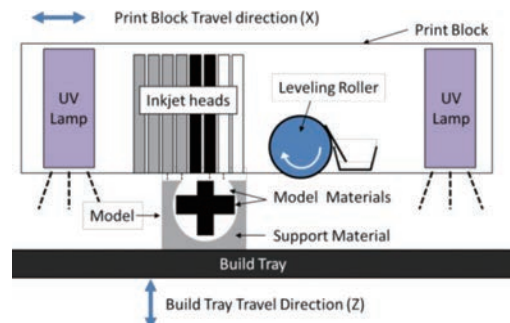
저가형으로 대중화된 FDM(Fused Deposition Modeling)/FFF(Fused Filament Fabrication) 프린터는 가는 실 같은 필라멘트 형태의 열가소성 수지(thermoplastics)를 노즐 안에서 녹여 얇은 필름 형태로 출력하여 적층하는 방식을 사용한다. 프린팅 재료로는 PLA 또는 ABS 플라스틱 필라멘트를 주로 사용한다. 일반적으로 가정용 프린팅을 위해서는 냄새, 수축, 프린팅 최대 속도 등을 고려하여 PLA 필라멘트가 선호되어진다. ABS 필라멘트는 고온(220도 정도)에서 사용 가능하며 출력시 수축현상이 발생하지만, 내구성이 뛰어나고 아세톤을 이용한 화학적인 후처리도 가능하다. FDM/FFF 방식의 경우 일반적으로 대상 물체만큼의 재료를 필요로 한다. 그러나 돌출된 부위를 출력하기 위해서는 추가적인 지지대(support)를 필요로 한다.

보다 정교한 출력이 가능한 고급형 프린터로는 SLA(Stereolithography)와 DLP(Digital Light Processing) 방식이 있다. 두 방식 모두 광경화성 액체 수지(레진)를 프린팅 재료로 사용한다. SLA 프린터는 액체 수지가 담긴 수조에 UV 레이저를 투사하여 경화시키는 방식을 사용하고, DLP프린터는 빔프로젝터를 사용하여 조형하고자 하는 모양의 빛을 투사하여 그 투사한 모양대로 수지를 경화시키는 방식을 사용한다. SLA와 DLP 방식은 FDM/FFF 방식에 비해 정교한 출력이 가능하지만, 프린팅 재료가 고가이고, 레이저를 투사할 수 있는 범위가 좁아 출력 속도가 상당히 느리다.

SLS(Selective Laser Sintering) 프린팅 방식은 액체



〈그림 1〉 적층형 3D 프린팅 방식^[1]



〈그림 2〉 PolyJet 3D 프린팅 방식^[2]

수지 대신에 분말로 된 입자를 얇게 깔아 IR 레이저를 통해 부분적으로 녹여 붙여 소결하는 방식으로, 소결되지 않은 분말들이 지지대 역할을 하기 때문에 따로 지지대가 필요 없다는 게 장점이다. 또한 플라스틱이외에 금속과 같은 다양한 분말 재료도 사용할 수 있어 재료값도 SLA에 비해 저렴한 편이다. 하지만, 프린터 가격이 매우 높고, SLA와 마찬가지로 프린팅 속도가 느려 작고 정교한 프린팅에 적합하다.

고, SLA와 마찬가지로 프린팅 속도가 느려 작고 정교한 프린팅에 적합하다.

복합재료 프린팅(Multi-Material Printing)은 여러 개의 노즐에서 각각 다른 재료가 나와 프린팅을 하거나 마치 잉크젯 잉크가 섞이며 색이 나오는 것과 같이 각 재료가 섞여 또 다른 재료를 만들어 프린팅을 하는 기술이다. 2006년 Stratasys사의 Objet Connex 프린터를 시작으로 계속 발전 중에 있다. 광경화

성수지를 자외선으로 굳히는 방식인 〈그림 2〉의 PolyJet 방식의 Objet Connex 프린터는 잉크젯 프린팅 방식과 유사하지만 종이에 잉크를 분사하는 대신에 트레이에 광경화성 액상 포토폴리머 레이어를 분사하여 제작하는 원리로, 각 재료가 섞여 또 다른 재료를 만들어낸다.

복합재료 프린팅은 기존의 3D 프린터로 제작하기 어려운 물체를 더 쉽고 간단하게 만들 수 있으며 재료의 점착력과 유연성이 사용자의 요구에 맞게 조절 가능하다는 장점이 있다. 그러나 아직 가격 면에서 단일재료 프린터에 비해 많이 비싸기 때문에 지속적인 연구가 필요한 기술이

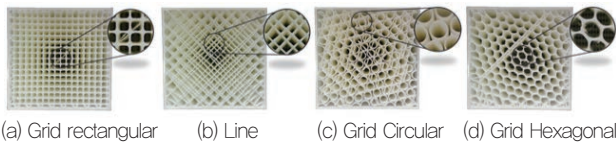
다. 현재 가격, 사용가능한 재료의 개수, 소프트웨어 개발을 중심으로 연구가 활발히 진행 중이다.

III. 3D 프린팅 소프트웨어 기술

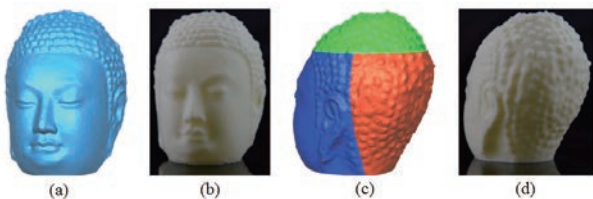
3D 프린팅 소프트웨어는 출력 속도, 소모되는 재료량, 출력물의 견고성, 외관의 품질 등에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 이를 향상시키기 위한 소프트웨어 기술들이 활발히 연구되고 있다. 해결해야 하는 중요한 이슈로는 슬라이싱과 내부채움, 지지대 및 균형잡기, 분할 출력, 외관의 품질 향상 및 텍스처링, 움직임 고려한 구조 최적화, 프린팅을 이용한 캐스팅을 들 수 있다.

1. 슬라이싱과 내부채움 기술

3차원 모델을 프린터에서 층별로 출력할 수 있도록 단층 형태로 변환하는 슬라이싱(slicing) 프로그램은 다양한 내부채움 패턴을 제공함으로써 출력물의 강도, 무게, 재료량 등을 조절할 수 있게 해준다. 대표적인 슬라이싱 프로그램에는 Cura, Slic3r, KISSlicer, Skeinforge 등이 있다. <그림 3>은 Ultimaker사에서 오픈소스로 지원하는 Cura 슬라이싱 프로그램의 내부채움 패턴을 보여준다. FDM/FFF 프린터를 사용할 경우, 이러한 내부채움 조절을 통해 디자인 초기 단계에서는 전체 형상을 보기 위해 내부를 빈 채로 출력하거나 채움 정도를 낮게 출력하여 재료도 절약하고 프린팅 속도도 빠르게 할 수 있다.



<그림 3> Cura 슬라이싱 프로그램의 내부채움 패턴 예^[3]



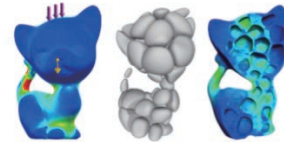
<그림 4> (a) 원 모델, (b) 세일런시를 보존하는 슬라이싱 방법에 의한 출력 결과, (c) 세일런시에 기반하여 분할한 모델, (d) 분할 출력 결과^[4]

반면에 최종적인 디자인이 완성된 후에는 내부채움 정도를 높게 하여 최종 결과물을 출력할 수 있다.

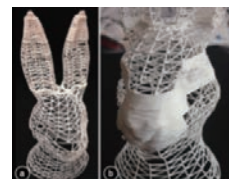
CAD(Computer Aided Design) 모델을 실물로 제작하기 위한 적응형 슬라이싱(adaptive slicing)에 대한 연구들이 소개되었다. 대부분 기하학적 오차를 기준으로 결과물의 품질을 평가하였는데, 최근에 Wang 등^[4]은 saliency를 보존하는 슬라이싱 최적화 방법을 제안하였다. 이 방법은 기하학적 적응형 슬라이싱 방법에 비해 프린팅된 결과물의 시각적 품질이 더 우수하고 출력 시간도 더 줄일 수 있다.

내부채움은 3D 프린터로 출력한 모델의 내부를 어떻게 채울 것인가로, 출력시간, 무게, 강도 등에 영향을 주기 때문에 출력물의 용도에 맞게 사용자가 결정해 주어한다. 슬라이싱 프로그램에 따라 동일한 내부채움 수치임에도 불구하고 출력물의 무게에 차이가 있을 수 있다. 현재 슬라이싱 프로그램들은 표준화가 되어있지 않아 프린터의 기종에 따라 다른 프로그램을 사용해야한다. 따라서 향후 슬라이싱을 위한 표준화 연구가 필요하다.

최근에는 출력 속도를 향상시키면서 견고한 모델을 제작하기 위해, 내부채움을 일정한 구조의 패턴과 알고리즘을 이용하여 출력하고, 그 결과를 분석하는 연구들이 진행되고 있다. Lu 등은 모델의 각 부위별로 받는 중력에 따라 내부채움 비율을 계산하는 알고리즘을 제안하였다^[5]. 이 알고리즘의 핵심은 출력되는 모델의 부위에 따라 적용되는 중력을 측정하여, 그 부위에 해당하는 내부채움 패



<그림 5> 모델이 받는 중력을 계산하여 육각형의 패턴으로 내부를 채워 모델링 하는 과정^[5]



<그림 6> (a)와이어 프레임으로 출력한 모델, (b)출력한 모델의 표면을 붙이는 작업^[6]

턴의 크기와 분포도를 계산한 후 <그림 5>와 같이 육각형 모양의 패턴으로 채운다. 이를 통해 보다 가볍고 튼튼한 모델을 출력할 수 있으며, 재료와 출력 시간을 줄이는 것이 가능해졌다.

또한 내부채움 자체를 <그림 6>과 같이 모델의 외곽과 유사한 와이어 프레임의 형태로 출력하여 차후 표면을 다른 재질이나 동일한 재질로 덮는 방법도 제안되었다^[6]. 다른 방법 보다 튼튼하고 재료와 출력시간 면에서 효율적이나, 따로 표면을 제작해야 하는 불편함이 있다.

2. 지지대 및 균형을 위한 모델링 기술

모델이 복잡하거나 불균형에 의해 쓰러지기 쉬운 경우, 이를 출력하기 위해 3D 프린팅 소프트웨어는 모델의 약한 부분 또는 쓰러질 가능성이 있는 부분에 자동으로 지지대를 생성한다. 지지대가 많을수록 출력물이 안정적으로 출력 되지만, 출력 후 지지대를 제거해야 하는 번거로움이 있으며 출력에 들어가는 시간과 재료 또한 증가하게 된다. 이에 3D 프린팅을 위한 모델 맞춤형 지지대 모델링 기술이 지속적으로 연구되고 있다.

최근 연구 중 모델의 모양을 고려하여 모델의 방향(또는 배치)을 변경하는 방법으로 지지대의 수와 부피를 최

적화하는 방법이 제안되었다^[7]. 이 연구에서는 모델의 모양과 방향에 따라 생성되는 지지대의 수와 부피를 계산하여 가장 적은 부피로 모델의 방향을 설정하고, 이 결과를 원래 방향으로 배치했을 때 생성되는 지지대들의 총 부피와 비교하여 분석하였다. 이를 통해 모델의 모양에 따른 효율적인 지지대 최적화 방법을 제안하였다.

모델의 방향뿐만 아니라 모델 자체의 돌출부들을 확인하고 이를 기준으로 지지대의 모양을 가지(branch) 모양으로 최소한의 부피만을 사용하여 출력하도록 하는 알고리즘도 제안되었다^[8]. 이 알고리즘은 출력될 모델의 최적화된 방향을 찾고, 이후 모델의 돌출부를 분석하여 <그림 8>과 같이 가지 모양으로 지지대를 모델링한다. 이 방법은 두 지점에 작용하는 힘을 계산하여 모델의 돌출부

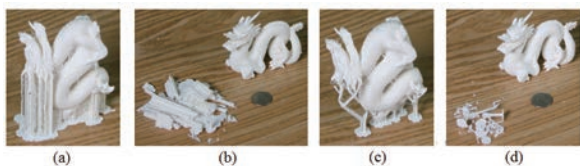
의 넓은 부분을 버틸 수 있도록 가지 모양으로 지지대들을 모델링하는 것이 핵심이다. 이를 통해 많은 양의 재료를 절약함과 동시에 출력 후 지지대 제거가 수월해진다는 장점을 가지고 있다.

3D 프린터로 출력되는 모델은 점점 더 다양해지고 있다. 안정적인 출력을 위해서는 지지대를 포함하여 출력할 수 있지만, 출력 후에는 지지대를 제거해야만 하고 불균형한 모델의 경우 대부분 쓰러지게 된다. 물론, 접착제를 이용하거나 받침대를 이용하면 되지만, 모델링 때부터 균형을 맞춰서 제작한다

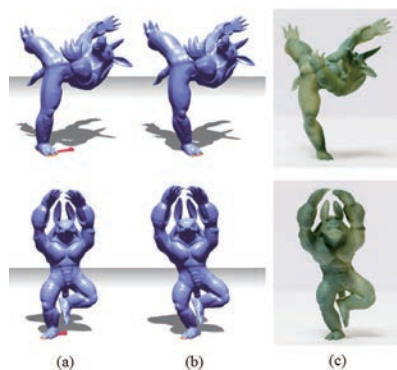
3D 프린팅 과정은 크게 3D 모델링, 프린팅, 후가공 단계로 나뉜다. 지지대란 출력할 모형이 무너지지 않도록 추가된 부분으로 후가공시 불필요한 지지대는 제거되어야만 한다. 저가의 FDM 방식은 불안정한 출력물의 경우 과도한 지지대가 필요하게 되고, 이럴 경우 지지대를 제거하는 후가공에 많은 시간이 소요된다.



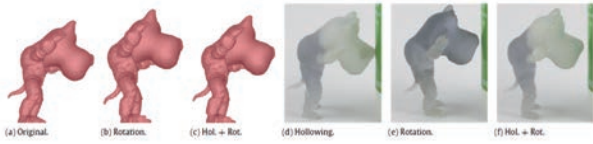
<그림 7> (a) 3D 모델, (b) 프린팅을 위해 최적화된 방향^[7]



<그림 8> (a) 기존의 지지대를 이용한 출력, (b) (a)의 지지대 제거 결과, (c) 가지 모양 지지대 알고리즘을 사용한 결과, (d) (c)의 지지대 제거 결과^[8]



<그림 9> (a) 불안정한 자세의 입력 모델, (b) 균형 잡은 결과 모델, (c) 출력된 결과^[9]



〈그림 10〉 (a) 불균형한 원 모델, (d) 내부 빈 공간이 추가된 불균형한 모델, (b)와 (e)는 회전시켜 균형잡힌 모델, (c)와 (f)는 내부 빈 공간과 회전에 의해 균형잡힌 모델^[10]

면 접착제나 받침대를 사용하지 않고도 모델을 세울 수 있다. 이에 최근 연구에서는 3차원 모델이 어떠한 받침대 없이도 쓰러지지 않도록 균형(balancing)을 잡도록 하는 방법들이 개발되고 있다.

Prévoست 등은 모델 내부의 볼륨과 기하학적 특성을 고려하여 균형을 잡는 알고리즘을 소개하였다^[9]. 이 방법의 특징은 최적화된 볼륨 모델링과 기하학적 특성을 고려하여 모델이 균형을 잡기 불가능한 배치, 자세 또는 방향으로 되어 있어도 균형을 잡고 결과물이 쓰러지지 않도록 해준다. 물론 이로 인해 약간의 기하학적 변형이 생기는 문제가 있지만 원본과 거의 유사한 모델로 출력이 되며, 〈그림 9〉와 같이 서있기 힘든 형태를 가진 물체도 방향이나 배치를 변경하지 않고도 균형을 잡을 수 있게 해준다.

또한 모델의 모양을 고려하여 자동으로 내부채움을 조절하는 연구도 수행되었다^[10]. 이 연구는 모델의 모양과 무게 중심을 분석한 후 지탱되는 부분을 무겁게 만들기 위해 〈그림 10〉과 같이 빈 공간(cavity)을 이용한다. 물론 이때 모델의 배치나 방향이 변경되지만 원본과 크게 차이는 없다. 그리하여 이 방법으로 출력된 모델은 특별한 받침대 없이도 균형을 잡을 수 있으며, 내부의 일부만이 빈 공간이기 때문에 출력속도도 더 빨라지게 된다.

3. 분할 출력 기술

분할하기(partitioning)는 복잡한 모델이나 3D 프린터의 출력 크기보다 큰 모델을 출력하기 위해서 모델자체를 절단 또는 분할하여 모델링하는 기술이다. 최근 연구에서는 프린트 가능성, 조립 가능성, 효율성 등을 고려하여 여

러 방법들이 제안되고 있다.

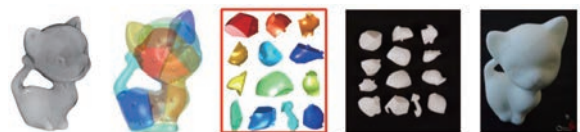
이러한 방법 중 하나는 원본모델의 근사화된 다면체 내부모델을 생성하고, 그 범위를 기준으로 외부모델(즉 원본모델)을 퍼즐조각처럼 분해하여 출력한 후 조립하는 방법이다^[11]. 〈그림 11〉은 왼쪽의 대형 Ruthwell 십자가를 3D 프린팅을 통해 소형으로 복제하기 위해 분할 모델링 방법을 사용하여 출력한 후 조립한 결과이다. 이 십자가는 75개의 조각으로 분할 된 후 퍼즐과 같이 서로 맞물리게 하는 interlocking 메커니즘을 통해 접착제 없이 오른쪽의 최종 결과물을 얻을 수 있다.

또한, 모델 자체의 모든 외부 노멀벡터의 방향을 고려하여 모델 분할을 위한 기준 후보군을 설정하고, 그중 가능성 있는 몇 개의 외부 노멀벡터를 선택해 모델을 여러 부분으로 분할하는 방법이 제안되었다^[12]. 이 방법은 외부 노멀벡터를 프린팅되는 방향과 수직이 되게 모델을 분할함으로써 출력 시 계단 현상이 발생하지 않으며 지지대가 필요 없게 된다. 또한, 잘려진 면 부분에 자동적으로 홈과 홈에 맞는 돌출부를 생성함으로써, 분할된 부분을 조립할 때 결과물을 어긋나지 않게 고정시켜 주는 역할을 한다. 〈그림 12〉는 이 방법을 이용하여 분할한 모델들과 조립된 결과를 보여준다.

3D 프린터의 출력 크기가 출력하고자 하는 물체의 크기보다 작아 출력이 불가능할 경우에는 3D 모델을 여러 개의 작은 파트로 나눠주는 기능이 필요하다. 또한 여러 개로 나눠진 모델을 3D 프린터로 출력한 후 다시 원래의 형태로 조립할 수 있도록 연결부를 생성해 주어야 한다.



〈그림 11〉 분할 모델링한 후 출력된 모델들을 조립하는 과정과 그 결과^[11]



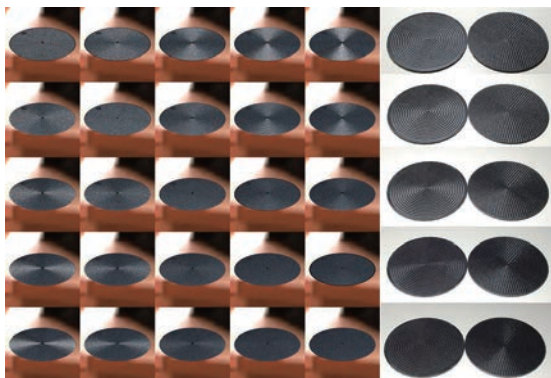
〈그림 12〉 왼쪽부터 원본모델, 분할된 모델, 출력 결과, 출력물을 조립한 결과^[12]

4. 실물 제작을 위한 텍스처링 기술

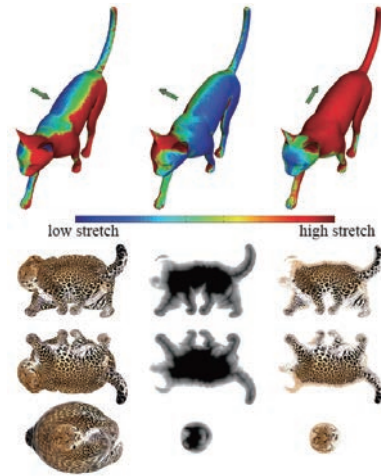
일반적으로 3D 프린터를 이용하여 출력될 모델에 사용자가 원하는 정도의 반사도, 재질감과 같은 텍스처 정보를 부여하려면, 고가의 프린터로 하나의 모델에 여러 가지 색상이나 질감, 물성을 가진 재료를 투입해야 한다. 이러한 이유로, 고가의 장비, 고가의 재료를 투입하지 않고도 모델에 질감을 부여할 수 있도록 해주는 연구가 중요해지고 있다.

Rouiller 등은 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)를 이용하여 3D 프린팅된 모델 표면의 반사도를 조절하는 방법을 제안하였다^[13]. 이를 위해 모델 표면의 미세 기하를 변경하며, 사전 단계에서 미리 측정해둔 3D 프린터 재료의 반사도와 광택 정도를 분석하여 미세 기하를 최적화 시킨다.

Zhang 등은 3D 프린팅된 모델의 컬러 텍스처를 물리적으로 맵핑할 수 있는 수전사(hydrographic printing) 방법을 제안하였다^[14]. 이 방법은 물 위에 맵핑할 이미지를 필름에 출력하여 띄워두고 출력물을 서서히 물 안으로 밀어 넣으면, 물의 표면장력과 필름의 접착력에 의해 물체에 달라붙는 원리를 이용한 방법이다. 보다 정확한 맵핑을 위해 물체와 필름이 붙는 상황을 3D 캡처하고, 물체에 필름이 달라붙는 상황을 시뮬레이션 하여 스트레치 되는 정도를 계산하였다. 그리고 이를 기반으로 필름의 크기와 위치를



〈그림 13〉 Anisotropy dome 형태의 미세 구조를 디스크 형태의 판 위에 렌더링 하여 예측한 그림(좌)과 이를 출력한 결과(우)^[13]

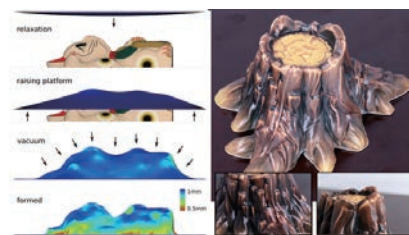


〈그림 14〉 필름의 스트레치 시뮬레이션 및 multi-immersion 이미지 생성 결과^[14]

최적화 하였다.

Schüller 등은 열을 이용하여 모델에 컬러 텍스처를 물리적으로 맵핑하는 열성형(thermoforming) 방법을 제안하였다^[15]. 이 방법은 얇은 플라스틱판에 레이저 프린터로 출력한 텍스처를 옮기고, 3D 프린터로 출력된 몰드를 통해 캐스팅 된 물체 위에서 가열한 후, 모델을 랩핑(wrapping)

하듯 흡입기를 이용하여 흡착시키는 방법이다. 앞선 수전사 방법과 마찬가지로 텍스처가 스트레치 되는 정도와 흡착되는 시점에서 플라스틱 판이 변형되는 정도를 시뮬레이션하며, 이를 기반으로 정확하게 텍스처를 맵핑한다. 이러한 열성형 결과는 매끄러운 플라스틱판이 모델을 감싸면서 모델 형태로 변하기 때문에 FDM 방식의 프린터로 출력한 결과에 비해 표면이 매끄럽고, 수전사 방법에 비해 색상이 더욱 선명하게 맵핑된다.



〈그림 15〉 열성형 시뮬레이션(좌) 및 실제 성형 결과(우)^[15]

5. 움직임을 고려한 구조 최적화 기술

3D 프린팅 기술들은 정적인 모델뿐만 아니라 간단한 움직임을 수행할 수 있는 모델부터 복잡한 움직임이 가능한 모델을 출력할 수 있도록 발전하고 있다. 이러한 기술들은 사용자가 정의한 움직임이 출력된 물체에 반영될 수 있도록 탄성을 가진 재료나 다수의 관절을 이용한다.

일정 수준 이상의 탄성을 가진 재료를 이용하여 간단한 움직임을 모델에 부여하던 기존의 연구는 하나의 모델에 다른 물성을 가진 복수의 재료를 이용하였다. 이는 모델의 관절부위를 탄성을 가진 재료로 구성하고, 사용자가 입력한 자세를 출력물이 수행할 수 있도록 모델 내의 재료의 분포를 최적화 시켰다^[16].

최근에는 동일한 탄성을 가진 재료를 이용하여 프린팅을 하더라도 출력물에 힘이 가해지는 방향이나 부위에 따라 변형되는 정도를 예측하고, 사용자가 원하는 형태로 변형이 가능하도록 모델 내 기하 구조를 최적화 시키는

연구들이 진행되고 있다.

Pérez 등은 탄성을 가진 막대(elastic rod)기반의 네트 워크로 표면을 구성하여 모델을 만들고, 사용자가 여러 목표 자세를 입력하면 출력물이 이를 수행할 수 있도록 막대의 두께를 최적화 시키는 연구를 제안하였다^[17]. 이때 모델의 움직임은 복수의 조정포인트(actuator)를 막대 메시의 일부에 배치하여 사용자가 입력한 목표자세까지 움직일 수 있도록 조정하며, 입력 자세와 모델의 변형 정도의 차이가 최소가 될 때 까지 조정포인트에 힘을 가한다.

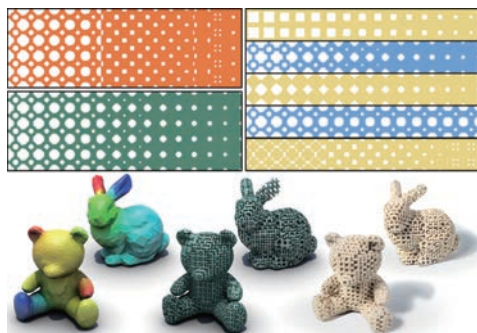
Schumacher 등은 형태와 밀도가 다른 기하구조를 이용하여 모델 내에서 사용자가 원하는 부위의 유연성을 조절할 수 있도록 하면서도 서로 다른 형태의 내부 구조가 매끄럽고 견고하게 연결 될 수 있도록 하는 방법을 제안하였다^[18].

출력된 3D 모델에 움직임을 부여하기 위한 기존의 연구는 변형이 입력된 3D 모델의 메시로부터 관절의 위치를 추정하여 생성하거나, 모델의 말단부가 입력된 모션 커브를 따라 움직일 수 있도록 관절을 정의하고 최적화 시키는데 초점을 맞추었다^[19-20].

Bharaj 등은 앞서 제안된 모션커브를 이용한 관절 생성 및 최적화 방법을 기반으로 사용자가 정의한 3D 모델을 실제로 걸을 수 있는 자동화인형(automata)으로 만들어주는 방법을 제안하였다^[21]. 이때, 다리의 관절은 데이터베이스로부터 사용자가 선택한 링크구조(linkage structure)를 몸체에 붙인 것을 사용하며, 물리 기반 시



〈그림 16〉 탄성을 가진 막대로 구성된 모델과, 막대의 두께 최적화에 따른 변형 차이 (붉은색 모델: 균일한 굵기의 막대를 사용한 모델, 녹색 모델: 최적화된 두께의 막대를 사용한 모델)^[17]



〈그림 17〉 매끄럽게 연결된 다른 형태의 기하구조(상), 모델 내 구조의 분포도 설정 및 출력 결과(하)^[18]



〈그림 18〉 사용자에게 의해 정의된 관절구조를 이용하여 실제로 걸을 수 있는 자동화인형을 생성한 결과^[21]



〈그림 19〉 사용자에게 의해 수정된 모션커브와 변경된 커브가 반영된 관절의 링크구조^[22]

물레이션을 수행할 때에는 건기에 성공한 개체들을 계속해서 학습시키는 확률적 진화 알고리즘을 이용하여 모션을 최적화 시킨다. 이때, 모션은 크랭크의 스피드와 관절의 링크구조의 형태에 따라 결정된다.

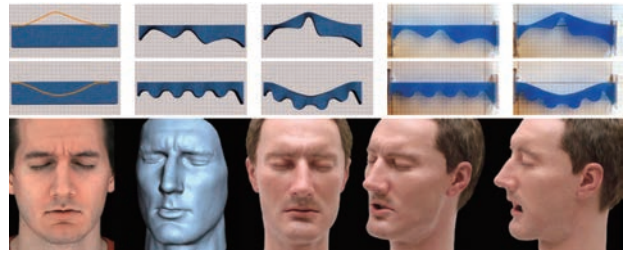
Bächer 등은 이러한 링크구조를 사용자가 인터랙티브하게 수정할 수 있는 방법을 제안하였다^[22]. 이를 위해, 관절의 링크구조와 모션커브의 한 지점에 컨트롤 포인트를 설정하고, 사용자가 이를 직관적으로 잡아당겨 수정할 수 있도록 해주는 인터페이스를 제공한다. 또한, 모델을 감싸고 있는 컨트롤 박스를 채택하여 사용자가 보다 간편하게 관절의 링크구조를 변경시킬 수 있게 하였다.

6. 3D 프린팅을 이용한 캐스팅 기술

최근 3D 프린팅 기술은 모델 그 자체를 출력하기도 하지만, 3D 프린터로 출력할 수 없는 재료의 모델을 캐스팅하기 위한 몰드를 제작하기 위해서도 사용되고 있다. 또한, 이러한 기술들은 단순히 목표한 모델의 캐스팅뿐만 아니라, 재료의 물성을 고려하여 출력물에 움직임을 부여하기 좋은 형태로 몰드의 형태를 최적화 하거나 캐스팅시에 모델의 디테일이 잘 성형될 수 있도록 몰드의 형태를 수정한다.

Bickel 등은 애니메트로닉스(animatronics)를 위한 실리콘 얼굴 마스크를 제작하는 방법을 제안하였다^[23]. 이는 사람의 표정을 모방할 수 있는 몇 개의 컨트롤 포인트를 가진 로봇 위에 씌워져 실제 사람과 유사한 얼굴 주름을 표현하기 위한 마스크 형태의 인공 피부이다. 애니메트로닉스에 씌워진 인공 피부는 컨트롤 포인트의 간격이 조절됨에 따라 주름을 표현할 수 있어야 하고, 이를 위해 실리콘의 탄성을 고려하여 두께를 최적화 하는 방법이 개발되었다.

이와 비슷한 연구로 국내에서는 노역을 위한 실리콘 마스크를 캐스팅하는 과정에 3D 프린터를 도입하여 제작 프로세스를 간편화 시키고, 스케치 인터페이스를 이용하여 인공 주름을 생성하는 단계에서 걸리는 시간과 비용을 줄인 연구 또한 제안되었다^[24].



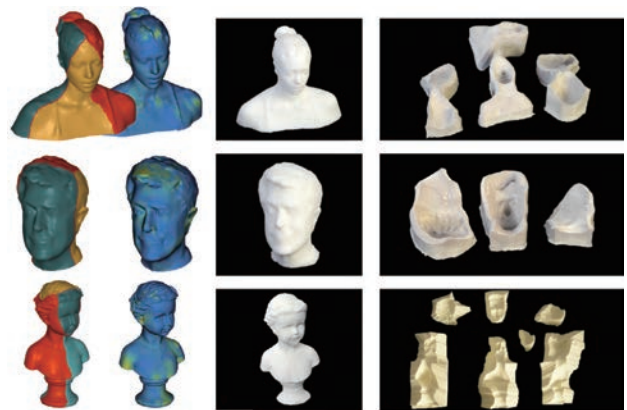
〈그림 20〉 실리콘의 물성을 고려한 두께 최적화 시뮬레이션 및 실제 결과(상), 실제 배우의 표정과 실리콘 마스크가 씌워진 애니메트로닉스 얼굴(하)^[23]



〈그림 21〉 양각 및 음각 몰드의 생성 결과(좌), 캐스팅된 주름 마스크를 얼굴 모델에 씌운 결과(우)^[24]

Herholz 등은 CAD/CAM 분야에서 널리 사용되는 3축 밀링 장비를 이용하여 비정형 3D 모델을 캐스팅하는 방법을 제안하였다^[25]. 이 방법은 비정형 모델을 보다 잘 캐스팅하기 위해 몰드의 메쉬를 하이트필드(height field) 기준으로 형태가 크게 변하지 않는 선에서 최적화 시킨다. 모델의 여러 축을 기준으로 분할된 몰드를 조립하여 하나로 합친 몰드로 캐스팅하며, 몰드의 분할은

모델의 형태를 분석하여 자동으로 할 수 있을 뿐만 아니라, 사용자가 직접 분할을 수행할 수도 있다.



〈그림 22〉 몰드의 분할 및 실리콘 캐스팅 결과^[25]

IV. 결론

본 논문에서는 그래픽스 분야에서 진행되고 있는 3D 프린팅 소프트웨어 기술 개발을 중심으로 최근 연구 동향을 살펴보았다. 전통적인 기하학적 모델링, 물리 기반 모델링, 외관 렌더링, 텍스처링, 움직임 시뮬레이션과 같은 그래픽스 기술들이 보편적으로 사용되는 FDM 방식의 적층형 3D 프린터에서 나타나는 문제들을 어떻게 해결할 수 있는가를 보여주는 흥미로운 연구들이 진행되고 있었다. 특히, 형상 및 움직임을 고려한 모델링에서 나아가, 수전사 방식 또는 열성형 프린팅 기술을 이용해서 저가의 FDM 방식의 프린터로 고가의 SLS 분말 프린터처럼 3D 모델에 텍스처링하는 기술을 보면서, 다양한 그래픽스 렌더링 방법들이 출력물의 외관 품질, 색상, 텍스처를 향상시키는데 적용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 현재 제시된 많은 방법들이 저가의 FDM 방식의 프린터 위주로 개발되었지만, 향후 SLA 또는 SLS 방식의 프린터가 대중화되고 복합재료 프린팅을 위한 여러 소재들이 개발되면 더욱 더 다양한 연구들이 이루어질 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원(2014R1A2A1A11053135)과 대학ICT연구센터육성 지원사업에 의해 수행되었음(IITP-2016-R2718-16-0017).

참고 문헌

- [1] <http://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/>
- [2] A. T. Gaynor, N. A. Mesiel, C. B. Williams and J. K. Guest, "Multiple-Material Topology Optimization of Compliant Mechanisms Created Via PolyJet Three-Dimensional Printing", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 980-997, 2014.
- [3] K. Chynybekova, D. H. Kim, S. M. Choi, "Weight dependency of 3D prints from their interior structure", in *Proc. of HCI Korea*, pp. 151-156, Jeongseon, Republic of Korea, 2016.
- [4] W. Wang, H. Chao, J. Tong et al., "Saliency-Preserving Slicing Optimization for Effective 3D Printing", *Computer Graphics Forum*, Vol. 34, No. 6, pp. 148-160, 2015.
- [5] L. Lu, A. Sharf, H. Sharf et al., "Build-to-Last: Strength to Weight 3D Printed Objects", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 33, No. 4, pp. 97:1-97:10, 2014.
- [6] S. Mueller, S. Im, S. Gurevich et al., "WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping", in *Proc. of 27th annual ACM symposium on user interface software*, pp. 273-280, Hawaii, USA, 2014.
- [7] B. Ezair, F. Massarwi and G. Elber, "Orientation analysis of 3D objects toward minimal support volume in 3D-printing", *Computers & Graphics*, Vol. 51, pp. 117-124, 2015.
- [8] J. Vanek, J. A. G. Galicia and B. Benes, "Clever Support: Efficient Support Structure Generation for Digital Fabrication", *Computer Graphics Forum*, Vol. 33, No. 5, pp. 117-125, 2014.
- [9] P. Prevost, E. Whiting and S. Lefebvre, "Make It Stand: Balancing Shapes for 3D Fabrication", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 32, No. 4, pp. 81:1-81:10, 2013.
- [10] A. N. Christiansen, R. Schmidt and A. Bærentzen, "Automatic balancing of 3D models", *Computer-Aided Design*, Vol. 58, No. c, pp. 236-241, 2015.
- [11] A. Giuseppe, C. Paolo, P. Nico et al., "Interlocking pieces for printing tangible Cultural Heritage replicas", *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, pp. 145-154, Darmstadt, Germany, 2014.
- [12] W. M. Wang, C. Zanni and L. Kobbelt, "Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction", *Computer Graphics Forum*, Vol. 35, No. 2, pp. 59-70, 2016.
- [13] O. Rouiller, B. Bickel, J. Kautz, M. Alexa, "3D-printing spatially varying BRDFs", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 33, No. 6, pp. 48-57, 2013.
- [14] Y. Zhang, C. Yin, C. Zheng, K. Zhou, "Computational hydrographic printing", *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 34, No. 4, pp. 131:1-131:11, 2015.
- [15] C. Schuller, D. Panozzo, A. Grundhofer et al., "Computational



thermoforming”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 35, No. 4, pp. 43:1–43:9, 2016.

[16] M. Skouras, B. Thomaszewski, S. Coros et al., “Computational Design of Actuated Deformable Characters”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 32, No. 4, pp. 82:1–82:9, 2013.

[17] J. Perez, B. Thomaszewski, S. Coros et al., “Design and Fabrication of Flexible Rod Meshes”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 34, No. 4, pp. 138:1–138:11, 2015.

[18] C. Schumacher, B. Bickel, J. Rys et al., “Microstructures to Control Elasticity in 3D Printing”, Design and Fabrication of Flexible Rod Meshes, Vol. 34, No. 4, pp. 136–148, 2015.

[19] M. Bacher, B. Bickel, D. L. James, H. Pfister, “Fabricating Articulated Characters from Skinned Meshes”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 31, No. 4, pp. 47:1–47:9, 2012.

[20] S. Coros, B. Thomaszewski, G. Noris et al., “Computational Design of Mechanical Characters”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 32, No. 4, pp. 83:1–83:12, 2013.

[21] G. Bharaj, S. Coros, B. Thomaszewski et al., “Computational Design of Walking Automata,” in Proc. of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 93–100, California, USA, 2015.

[22] M. Bacher, S. Coros, B. Thomaszewski, “LinkEdit: Interactive Linkage Editing using Symbolic Kinematics”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 34, No. 4, pp. 99:1–99:8, 2015.

[23] B. Bickel, P. Kaufmann, M. Skouras et al., “Physical face cloning”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 31, No. 4, pp. 118:1–118:10, 2012.

[24] Y. Choi, I. Shin, K. Choi, S. Choi, “Fabrication of Face Molds and Silicone Masks using 3D Printing”, Journal of KIISE, Vol. 43, No. 5, pp. 516–523, 2016.

[25] P. Herholz, W. Matusik, M. Alexa, “Approximating Free-form Geometry with Height Fields for Manufacturing”, Computer Graphics Forum, Vol. 34, No. 2, pp. 239–251, 2015.



최수미

- 1993년 2월 이화여자대학교 전자계산학과 학사
- 1995년 2월 이화여자대학교 전자계산학과 석사
- 2001년 2월 이화여자대학교 컴퓨터공학과 박사
- 2001년 3월~2002년 2월 이화여자대학교 컴퓨터그래픽스/가상현실 연구센터 연구교수
- 2008년 9월~2009년 8월 스위스 취리히연방공대 방문교수
- 2002년 3월~현재 세종대학교 컴퓨터공학과 정교수
- 현) 모바일 가상현실 연구센터(ITRC) 센터장, 한국HCI학회 부회장, 한국컴퓨터그래픽스학회 논문지편집위원장

〈관심분야〉
가상현실, 컴퓨터그래픽스, HCI



신일규

- 2012년 세종대학교 컴퓨터공학과 석사
- 2012년~현재 세종대학교 컴퓨터공학과 박사과정

〈관심분야〉
컴퓨터그래픽스, 가상현실, 스테레오 렌더링, 3D 얼굴 렌더링



최예준

- 2014년 세종대학교 컴퓨터공학과 학사
- 2014년~현재 세종대학교 컴퓨터공학과 석사과정

〈관심분야〉

컴퓨터그래픽스, 3D 프린팅, 가상현실



최강현

- 2016년 세종대학교 디지털콘텐츠학과 학사
- 2016년~현재 세종대학교 컴퓨터공학과 석사과정

〈관심분야〉

컴퓨터그래픽스, 가상현실, 스테레오 렌더링, 3D 프린팅