

◆특집◆ 3D 프린팅 기술 동향과 응용

3D 프린팅 기술 동향

최재원^{*,#}, 김호찬^{**}

^{*}애크런대학교 기계공학과, ^{**}안동대학교 기계자동차공학과

3D Printing Technologies - A Review

Jae-Won Choi^{*,#}, Ho-Chan Kim^{**}

^{*}Department of Mechanical Engineering, The University of Akron, ^{**}Department of Automotive and Mechanical Engineering, Andong National University

(Received 8 June 2015; accepted 17 June 2015)

ABSTRACT

Recently, a great interest in 3D printing has emerged, although many existing 3D printing technologies were first developed 2-3 decades ago. There are many mature 3D printing processes and materials; however, active research and development efforts are ongoing in this area to advance the technologies. Several companies have already started to use 3D printed parts as actual components. Many low-cost 3D printers have been released on the market, which are of particular interest to educators and hobbyists. This paper provides a brief review of 3D printing technologies and research trends. In addition, several state-of-the-art technologies and applications are introduced.

Key Words : 3D Printing(3차원 프린팅), Additive Manufacturing(적층 가공)

1. 서 론

최근 들어 3차원 프린팅에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 2012년 이전에는 주로 연구자들에 의해서 주목을 받아왔으나, 그 이후로는 일반 대중들에게까지 널리 알려지고 있다. 세계적으로는 1987년 3D System사에서 처음으로 광조형 장치(Stereolithography Apparatus, SLA)를 개발하여 판매하기 시작하였다. 국내의 3차원 프린팅에 대한 연구는 1994년 부산대 이석희 교수 연구실을 기점으로 한국과학기술원, 서울대, 한국기계연구원, 포항

공과대학교 등 많은 대학 및 연구소에서 진행이 되었다. 이 기술은 쾌속 조형(Rapid Prototyping)으로 처음에는 불렸으며, 2007년 미국 ASTM F42 위원회에서 Additive Manufacturing(AM)으로 명칭을 통일하였으며, 미국에서 개최되는 많은 학회 및 국제 저널에서는 AM을 공식 용어로 사용하고 있다. 2012년 미국 정부 주도로 첨단가공(Advanced Manufacturing)에 대한 국가적인 지원이 시작되면서 첫번째 시범 첨단가공기술로 Additive Manufacturing이 선정이 되었으며, 이로 인해 일반 대중들에게 널리 알리는 계기가 되었다¹⁾. 일반 대중들에게 친숙한 용어인 3차원 프린팅이 AM과 혼용하여 사용되었으며, 현재 학계에서는 두 용어를 혼용하여 사용하고 있다. 본래의 3차원 프린팅은

Corresponding Author : jchoil@uakron.edu

Tel: +1-330-972-5276, Fax: +1-330-972-5276

Three-Dimensional Printing(3DP)을 가리키며, 이는 MIT에서 개발한 제팅 방식의 AM 공정의 한 종류이다. 현재 미국과 국내뿐만 아니라 유럽, 중국 등이 대대적인 투자를 통하여 기술 개발을 진행하고 있다.

본 논문은 이러한 대중적인 관심을 얻고 있는 3차원 프린팅에 대해서 그 기술 및 동향을 검토하며 나아가 다양한 첨단 응용 분야를 소개한다.

2. 3차원 프린팅 대표 공정

2.1 압출 공정(Material extrusion)

거의 대부분의 압출 공정은 필라멘트 형태의 열가소성 플라스틱 재료를 녹는점 이상의 온도에서 가는 노즐을 통해서 압출함으로써 원하는 단면 형상을 제작한다. 이는 일반 공작기계처럼 xyz 스테이지와 재료 압출 헤드를 동시에 제어함으로써 2차원 단면 형상을 적층하여 최종적으로 3차원 형상을 제작한다. 오버행잉(overhanging) 구조의 제작을 위해서 구조물지지(support) 재료가 같이 사용이 되며, 제작이 완료된 다음 물과 같은 액체에 의해서 쉽게 제거되는 재료가 사용이 된다. 대표적인 시스템으로는 Stratasys사의 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식이 있으며, 현재 출시되고 있는 거의 대부분의 저가형 장치는 이 기술을 채택하고 있다. 이는 최근 들어 이 기술에 대한 특허권이 만료가 되었고, 또한 구현하기 쉬운 기술이기 때문이다. 2000년에는 미국 코넬대(Cornell University)의 Hod Lipson교수팀은 Fab@Home 프로젝트를 시작하여, 누구나 제작이 가능한 모듈형이면서 저가의 3차원 프린팅 장치를 선보였다^[2]. 이 방식은 열가소성 고체 고분자를 사용하기보다는 액상 혹은 페이스트상태의 재료를 이용하는 방법으로 현재 Food Printing 등의 방법으로도 사용이 되고 있다. 또한 다양한 바이오 재료의 프린팅도 이 방식을 취하고 있다^[3]. 대표적인 제품이 EnvisionTek사의 3D Bioplotter다.

2.2 재료 제팅 공정(Material jetting)

이 방식은 실제 형상을 이루는 재료를 일반 2차

원 종이 인쇄처럼 제팅함으로써 단면을 제작하는 방식이다. 이 제팅 기술의 핵심은 액적(droplet)을 형성하는 방법이며, 이는 크게 가열을 통한 버블젯(bubble-jet) 방식과 피에조 액추에이터를 이용하는 방식이 있다. 이 기술의 장점은 2차원 종이 인쇄에서의 여러 개의 잉크를 동시에 사용하는 것처럼 여러 종류의 폴리머를 동시에 사용하여 다양한 소재 및 이들의 복합재료를 프린팅 할 수 있다는 것이다. 예를 들면, 하나의 구조물 안에 단단한 부분 및 유연한 부분을 동시에 제작할 수 있다. 이 방식은 Stratasys사(합병되기 전 Objet사)의 Polyjet 방식이 대표적인 것이며, 이는 젤 형태의 광경화성 수지를 프린팅 한 다음 곧바로 자외선을 이용하여 최종 경화시킨다. 복잡한 형상을 제작하기 위해서 서포트(support) 재료가 동시에 프린팅이 되며, 형상 제작이 완료된 다음에 Waterjet과 같은 방식으로 이 재료들을 제거한다. 이 방식의 단점은 재료의 점도에 의해서 제팅 헤드에서 막힘(clogging) 현상이 자주 발생한다는 것이다.

2.3 바인더 제팅 공정(Binder jetting)

바인더 제팅 공정은 재료 제팅 공정과는 달리, 간혀진 베드에 파우더 형태의 주재료를 바인더를 이용하여 선택적으로 2차원 단면을 형성하는 기술이다. 바인더는 주로 저점성으로 재료 제팅 공정과는 달리 헤드 막힘 현상이 많이 발생하지 않는다. 또한 색깔의 구현 측면에서는 가장 우수한 성능을 보인다. 이는 2차원 종이 인쇄처럼 RGB 혹은 CMYK 색을 혼합하여 트루 컬러 이상의 색 조합을 만들어낼 수 있기 때문이다. 따라서, 최종 형상은 거의 원하는 색상대로 프린팅이 된다. 주재료가 파우더 형태로 베드에 위치하고 있기 때문에 오버행잉을 포함한 복잡한 형상을 제작할 때에도 별도의 서포트 재료가 필요없다. 이는 경화되지 않은 파우더들이 지지대 역할을 하기 때문이다. 이 방식의 단점은 파트의 강도가 다른 공정에서 제작된 파트에 비해서 약하며 표면 거칠기 또한 떨어진다는 것이다. 이는 주재료 자체의 결합보다는 바인더의 결합력에 의존하기 때문이다. 소개에서 언급하였듯이 MIT에서 이 기술을 처음 개발하였으며, 초기에는

Three-Dimensional Printing으로 불렸다. 이 기술은 또한 금속 부품을 제작하는 경우에도 많이 사용된다. 폴리머 파우더 대신에 금속 파우더를 사용하며, 금속 부품이 3차원 프린팅이 된 다음에 고온의로(furnace)에서 추가 재료의 침투(infiltration) 작업을 통해서 밀도가 높은 최종 금속 부품을 얻게 된다. Exone사가 대표적인 장비를 생산하고 있다.

2.4 박판 공정(Sheet lamination)

이 기술은 3차원 프린팅의 초창기인 1991년에 개발되었으며, Helisys사(이후 Cubic Tech사)가 개발한 LOM(Laminated Object Manufacturing)이 대표적이다. 이는 박판을 레이저 등으로 자르고 접착제 혹은 외부 에너지로 아래층과 접착을 하는 방식을 취한다. 3차원 프린팅 공정이 끝난 다음, decubing 공정으로 불필요한 부분들을 제거하여 최종 형상을 획득한다. 재료의 커팅 및 접착의 순서에 따라서 bond-then-form 과 form-then-bond 방식으로 구분된다. 기본적으로 박판으로 만들어질 수 있는 거의 모든 재료가 다 이용될 수 있다. 따라서, 종이를 비롯해서, 알루미늄, 플라스틱 필름 등도 사용된다. 대표적인 금속 공정으로 UC(Ultrasonic Consolidation)이 있다. 이 공정에서는 약 100-150 마이크론의 알루미늄과 같은 금속 박판이 주재료로 사용되며, 약 20kHz 주파수의 sonotrode가 초음파 에너지를 만들어 내면서 동시에 회전하면서 아래층과 접착을 시킨다. 아래층과 접합이 완료된 다음에는 CNC 장비를 이용하여 필요한 부분만 남기는 트림 작업이 진행된다. 최근 들어서는 일반 잉크젯 및 레이저 프린팅에서 사용하는 종이 인쇄로 3차원 프린팅이 가능한 공정이 MCor Technology 사로부터 개발을 되었다. 이 시스템의 장점은 재료를 포함한 유지보수 비용이 적게 든다는 것이다.

2.5 컨테이너 광경화 공정

(Vat photopolymerization)

이 기술은 컨테이너속에 갇혀진 광경화성 액상 수지(photopolymer)를 고 집적 레이저 빔을 이용하여 수지 표면을 주사(scanning) 함으로써, 원하는 2차원 단면을 경화하고 한 층씩 쌓아서 3차원 형상

을 제작한다. 처음으로 상용화 된 3D Systems사의 Stereolithography Apparatus(SLA)가 대표적인 장비이다. 광경화반응은 광개시제가 포함된 액상 수지에 레이저로부터 광자(photon)들이 전달이 되어 광개시(photoinitiation)반응을 일으킨다. 이 개시반응으로 수많은 불안정한 라디칼(radical)들이 생기고, 이 라디칼들은 약한 화학 결합(주로 탄소 이중 결합 등)을 가진 주변 모노머/올리고머들을 공격하여 체인을 형성함으로써 안정화가 되며, 동시에 공격을 받아 결합된 체인들은 다시 화학적으로 불안정하게 되어 주변 모노머/올리고머들과 결합하게 된다. 이러한 연쇄적인 체인형성 과정(propagation)을 거쳐서 최종적으로 안정화(termination)가 되면서 광경화반응이 종료된다. 주로 아크릴레이트 계열의 재료는 라디칼 반응을 일으키며, 에폭시 계열의 재료는 이온결합으로 체인을 형성하게 된다. 이 광경화 반응은 열을 이용하는 경화에 비해 매우 빠른 시간에 이루어지기 때문에, 100 마이크론 이하로 집광된 레이저 빔을 이용하여 매우 미세한 패턴의 형성이 가능하다. 따라서, 현존하는 기술 중에 표면정밀도가 높은 기술 중의 하나로 손꼽힌다. 주재료가 액상의 수지이기 때문에 오버행잉 형상 등의 복잡한 부분을 제작하기 위해서 서포트 구조물이 필요하다. 이는 동일한 재료에서 매우 미세한 그물구조의 지지 형상을 파트 형상과 동시에 제작하여 경화된 파트의 하중을 견디게 한다. 제작이 완료된 다음에는 물리적인 힘으로 서포트 구조물을 제거하고, 서포트가 제거된 부분을 그라인딩 작업으로 부드럽게 해준다. 또한 후경화장치를 통해서 최종 경화가 이루어지게 된다. 국내에서는 이 기술이 1994년 처음으로 도입되었으며, 많은 연구가 수행이 되었다. 또 다른 제작 방법으로는 동적 마스크를 이용해서 단면을 경화하는 방식이 있다. 이는 레이저를 사용하여 단면을 주사하는 것과는 달리, 패턴 형성기(pattern generator)를 이용하여 원하는 광의 형상을 만들고 이를 수지 표면에 전사를 시킴으로써, 복잡한 형상의 2차원 단면이 한꺼번에 경화가 된다. 주사 및 전사 방식의 발전으로 인해서 마이크로광조형(micro-stereolithography) 장치도 개발이 되었다. 주로 UV광을 이용하기 때문에 매우 정밀한 패턴을 형성할 수 있고, 이로 인해서 3차원 마이크로구조

물의 제작에 많이 사용이 되었다. 이는 수 마이크론의 미세한 레이저 빔을 이용하거나, 패턴된 광을 현미경과 같은 광학구조로 집광을 하여 단면을 제작하는 방식이다. 국내에서는 포항공대 및 부산대에서 많은 연구를 수행하였다^[4,5].

2.6 분말 베드 융합 공정(Powder bed fusion)

이 공정은 파우더 형태의 재료를 간혀진 베드에 위치시키고, 적외선 레이저와 같은 고집적 에너지 빔을 파우더 표면에 주사함으로써, 재료를 용융(melting) 혹은 소결(sintering)시켜서 2차원 단면을 형성시키고 최종적으로 3차원 형상을 획득한다. 이를 위해 재료의 녹는점 이하의 온도를 유지하며 불활성 기체를 포함하는 챔버가 필요하다. 대표적인 방식으로는 3D Systems사(이전의 DTM사)의 SLS(Selective Laser Sintering)이다. 국내에서도 부산대와 KIMM등에서 많은 연구를 수행하였다. 또한 재료 기술 및 레이저 기술의 발전으로 인해서 금속 3차원 프린팅 공정이 이 기술을 이용하여 많이 개발이 되었다. 대표적으로는 독일의 EOS사의 Eosint 시리즈가 있으며, SLM(Selective Laser Melting) 혹은 DMLS(Direct Metal Laser Sintering)으로 불린다. Arcam에서는 EBM(Electron Beam Melting) 공정을 개발하여 더욱 밀도가 높은 금속 부품을 가공한다. 최근 들어서 많은 연구가 금속 3D 프린팅에 집중이 되고 있다. 예를 들면, melt pool에 대한 모델링 및 시뮬레이션, 열 감지를 통한 폐루프구조의 시스템 등이다.

2.7 에너지 유도 침적 공정(Directed energy deposition)

이 방식은 금속 분말을 노즐을 통해서 특정 위치로 분사를 시키고 이를 집적화된 레이저 빔으로 용융하여 적층하는 방식이다. 분말 베드 방식에 비해서 노즐 및 레이저의 위치 이동의 수월성 때문에 가공의 자유도가 뛰어나다. 예를 들면, 분말 베드 방식에서는 기존 부품을 보수하는 것이 쉽지 않은 반면, 이 방식에서는 기존 부품의 크랙 및 손상이

있는 부분을 쉽게 수리할 수 있다. 국내에서는 Inssstek사에서 이 장비를 개발 및 생산하고 있다. 해외에서는 LENS(Laser Engineered Net Shaping), DMD(Direct Metal Deposition)의 공정으로 다수의 장비가 개발이 되어 있다.

2.8 그 외 공정 및 재료

위의 대표적인 공정 외에도 수많은 공정이 개발이 되었으며, 연구가 진행 중이다. 최근에는 노스캐롤라이나 화학과 교수인 Dr. DeSimone는 기존 공정에 비해서 수 십 배 빠른 CLIP(Continuous Liquid Interface Production)^[6] 공정을 개발하여, Carbon3D라는 회사를 공동 창업하였다^[7]. 이는 장치의 하부에서 전사하는 방식의 광조형 공정이며, 특수처리되어 산소가 투과될 수 있는 투명 기판과 고속 제어되는 패턴 형성기를 이용하여 기판부근에서의 광경화를 억제하며 동시에 연속적인 패턴을 전사하여 매우 빠르면서도 부드러운 곡면을 형성하는 기술이다. 이와 같이 최근의 기술동향은 고속 및 고정밀 공정의 개발에 초점이 맞춰지고 있으며, 이는 기존의 3차원 프린팅에 대한 일반적인 인식인 느린 가공 속도를 혁신적으로 개선하여 실제 양산에 투입하려고 하는 시도들의 일환이다.

3차원 프린팅에서 사용되는 재료는 종이 재료부터 해서 폴리머, 세라믹, 금속, 복합재 등 매우 다양하다. 각 공정별로 사용 가능한 재료가 존재하며, 최근 Senvol사^[8]에서 특정 공정에서 사용가능한 재료, 혹은 특정 재료를 사용할 수 있는 공정에 대해서 데이터베이스를 구축하였다.

3. 3차원 프린팅 동향

3.1 America Makes

2012년 미 행정부는 15개의 지역 가공 혁신 센터를 세우기로 계획(현재는 60 여개까지 그 개수를 늘리는 법안이 상정되었음)을 세우고 그 첫 번째 첨단가공기술로 3차원 프린팅이 선정하였다. 미국

전역에서 컨소시엄 형태로 구성된 팀들의 경쟁을 통해서 최종적으로 University of Akron, Case Western Reserve University을 포함한 오하이오주, 펜실베이니아주에 위치한 대학, 연구소 및 기업들이 주축이 된 TechBelt팀이 최종 선정이 되어 센터를 유치하게 되었다. 처음 설립 당시, 그 센터 이름을 NAMII(National Additive Manufacturing Innovation Institute)로 하였으며, 오하이오주의 Youngstown시에 설립하였다. 최근 들어 이름을 America Makes로 변경을 하고 각종 연구, 교육, 산학협력 지원을 수행하고 있다. America Makes의 주된 업무는 정부로부터 지원된 약 30 million 달러의 연구비를 최근까지 3차례의 Project call을 통해서 연구지원을 하고 있는 것이다. 이를 통해서 현재까지 약 20개 이상의 과제가 선정이 되어, 과제가 완료가 되었거나 진행 중이며, 현재 세 번째 Project call에서 접수가 된 과제들을 심사하고 있으며 약 8 million 달러가 책정이 되어 있다. 주된 연구 분야는 3차원 프린팅을 위한 설계, 신뢰성, 재료, 공정, 표준화 등에 대한 것이다. 과제를 지원하기 위해서는 3단계로 차별화된 회원으로 가입이 되어야 하며, 현재까지 약 140개 이상의 회원이 가입되어 있다.

3.2 신간 저널

2012년 이후로 3차원 프린팅에 대한 관심이 커지고, 또한 기존 연구자들 외에 다양한 분야의 연구자들이 3차원 프린팅을 연구하기 시작했다. 이러한 학계의 분위기를 바탕으로 2014년 2개의 새로운 학술지가 출간되었다. 기존의 Rapid Prototyping을 비롯해서 엘파소에 소재한 텍사스 주립대(University of Texas at El Paso(UTEP))의 Dr. Wicker가 편집장으로 있는 Additive Manufacturing(Elsevier)와 코넬 대학의 의 Dr. Hod Lipson이 편집장(최근 MIT의 Dr. Tibbits 교수로 바뀌었음)으로 있는 3D Printing and Additive Manufacturing(Mary Ann Liebert)가 거의 동일한 시점에 출간되었다. 따라서 현재 총 3개의 국제 저널이 있으며, 늘어나는 학계의 연구 결과에 대한 발표물을 이 저널들을 통해서 공유할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 학술 대회

대표적으로 오래된 학술대회는 미국 오스틴에 위치한 텍사스 주립대(University of Texas at Austin)에서 매년 개최되고 있는 Solid Freeform Fabrication Symposium이 있다. 2015년 8월 10일부터 12일까지 개최되는 이 학회는 올해가 26회째이다. 주로 학계에서 많이 참석을 하며, 연구 동향을 파악하는데 있어서 추천할 만한 학회이다. 올해 5월 16일부터 19일까지는 미국 캘리포니아 롱비치에서는 SME(Society of Manufacturing Engineers)가 주관하는 25번째 RAPID 학회 및 전시회가 개최되었다. 3개의 Keynote 발표, 6개의 워크샵, 약 130개 이상의 학술 발표 및 약 195개 이상의 3차원 프린팅 관련 업체가 참석하여 RAPID 학회가 생긴 이래로 현재까지 가장 큰 규모의 행사였다. 거의 대부분의 3차원 프린팅 관련 업체가 전시회에 참가하기 때문에 신제품 및 신기술에 대한 동향을 파악하는데 매우 유익한 학회이다. 올해 8월 2일에서 5일 사이에는 미국 보스턴에서 미국기계학회 주관으로 AM3D 학회 및 전시회가 개최된다. 각 세부 분야별로 학회 및 산업계의 전문가가 발표 및 각종 산업장비 및 기술들에 대한 전시가 있을 예정이다. 미국기계학회에서 주관하는 IMECE(International Mechanical Engineering congress & Exposition)에서는 2013년부터 첨단가공트랙 아래에 3차원 프린팅에 대한 토픽이 신설되었다. 저자는 3년간 토픽 오거나이저를 맡아왔으며, 올해 약 40개 가량의 논문이 접수되어 심사가 진행 중에 있다. 유럽에서는 10회째를 맞는 International Conference on Additive Manufacturing & 3D Printing이 7월 7일에서 9일까지 영국 Nottingham에서 개최된다. 올해 9월 23일부터 25일까지 Euromold에서 3차원 프린팅에 대한 학회가 개최가 된다. 각 국가별로 keynote 발표가 있으며, 다양한 분야의 전문가들이 발표를 할 예정이다. 한국에서는 생산기술연구원 경기지역본부 3차원 프린팅 기술사업단장 이낙규 박사가 대표로 발표를 할 예정이다. 이 외에도 각 대륙별 국가별로 기존 및 새로운 학회들이 많이 개최되었으며 개최될 예정이다. 향후 몇 년간 이러한 학회들은 더 많이 생겨난 것으로 기대된다.

4. 3차원 프린팅 선도 연구 분야

4.1 4D 프린팅

4D 프린팅은 3차원 프린팅된 형상이 추가적인 외부의 자극(에너지)에 의해서 변형 혹은 반응을 하는 스마트 3차원 프린팅 기술이다. MIT와 Georgia Tech을 선두로 해서 최근 들어 많은 연구들이 이루어지고 있다. 최근까지의 연구는 주로 형상기억 폴리머를 이용하여 외부에서 열을 가하여 형상을 변하시키거나^[9], 수분을 흡수하여 부피의 차등변화에 따른 형상 변화에 대한 것들이다^[10]. 이 외에도 주변 환경에 따라서 선택적으로 형상이 변화하거나 반응을 하는 분야의 연구는 향후 지속적으로 이루어질 것으로 기대된다.

4.2 3차원 구조 전자체(3D structural electronics)

인쇄 전자 기술과 3차원 프린팅 기술의 결합으로 3차원 구조 전자체 개발에 대한 연구들이 수행되었다. 이는 기존의 PCB를 바탕으로 하는 전자기기의 패러다임에서 3차원의 부피를 갖는 형태의 전자기기를 제작할 수 있는 신개념 기술이다. UTEP을 중심으로 많은 연구^[11]들이 수행되었으며, 독일에서는 MID(Molded Interconnect Device)로 불리는 회로 제작 기술에 대한 연구가 많이 진행이 되었다^[12]. 국내에서는 안동대와 충북대를 중심으로 University of Akron과 협력하여 국제공동과제가 완료되었다.

4.3 스마트 구조물의 3차원 프린팅

재료 및 공정 기술의 발달로 단순한 3차원 형상이 아닌 스마트 구조물을 제작하는 3차원 프린팅에 대한 연구가 진행이 되고 있다. 대표적인 연구로는 부경대 주관의 국제공동연구인 3차원 프린팅을 이용한 유연 촉각 센서 개발이 있다^[13,14]. 또한 저자를 포함한 University of Akron의 폴리머 연구진들은 스마트 3차원 프린팅을 위한 신소재 개발을 연구하고 있다. 이는 색상 변화, 단방향 크

기 변화, 형상 변화, 표면 상태 변화 등이 가능한 첨단 스마트 재료들이다.

4.4 대형 구조물의 3차원 프린팅

최근 들어 건물과 같은 대형 구조물을 3차원 프린팅으로 제작하는 연구가 많이 진행이 되고 있다. University of Southern California를 중심으로 건축물 3차원 프린팅 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근 들어 뉴욕의 D-Shape Enterprises사는 약 2400 평방피트의 집 및 수영장을 3차원 프린팅으로 제작하는 계획을 세웠고 실행중이다. 중국의 WinSun Decoration Design Engineering사는 이 기술을 이용하여 다층의 집을 건설하는 사업을 수행하고 있다.

4.5 음식물의 3차원 프린팅

3차원 프린팅이 점차 대중화되면서 실생활에 사용가능한 기술들이 개발이 되고 있다. 이에 대표적인 것이 음식을 3차원 프린팅으로 제작하는 것이다. 초콜렛, 아이스크림, 피자 등 다양한 음식들에 대해서 3차원 프린팅이 시도되고 있다. 3D Systems사는 ChefJetTM이라는 음식 프린팅 장비를 최근에 선보였다.

4.6 저/무중력 3차원 프린팅

미 항공우주국은 저중력상태에서 3차원 프린팅을 최근 연구하고 있다. 이는 우주선 등에서 필요한 부품들을 프린팅하여 사용하기 위한 것이다. 2014년 9월 Made in Space사는 미 항공우주국과의 협력을 통해서 우주선에서 3차원 프린팅 연구를 수행하였다. 또한 미 항공우주국은 달기지 건설을 위해서 달에 존재하는 물질들을 3차원 프린팅하는 것에 대한 계획을 최근 수립하였다.

5. 결 론

3차원 프린팅은 더 이상 연구차원에서의 기술이 아니라 일반 대중이 사용할 수 있는 소비자 기술이며, 연구자들이 주도하는 기술보다는 소비자들이 주도하는 기술개발이 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 물론 연구자들은 더욱 진보된 공정 및 재료 기술 개발에 기여를 할 것이다. 3차원 프린팅에 대한 미래는 밝다. 또한 더욱 진보된 기술개발을 위해서는 보이지 않는 많은 기술적인 장벽들도 존재한다. 3차원 프린팅에 대한 미래 청사진을 그리기에는 상상할 수 있는 분야보다 아마도 상상할 수 없는 분야가 더 많을 수도 있다. 이는 아마도 인터넷이 처음 개발되었을 때, facebook, twitter처럼 미래에 어떤 식으로 인터넷이 사용될 지 예상을 하고 개발하지 않은 것과 마찬가지로 일 수 있다. 아마도 3차원 프린팅의 미래는 미래 세대들에게 1인 디자인-1인 가공 시대와 같은 새로운 비즈니스 모델을 제공할 수도 있다. 미래 세대는 이 기술을 이용하여 또 다른 응용분야를 개척할 수도 있다. 3차원 프린팅을 오랜 기간 연구한 공학자로서, 1960대의 인터넷처럼 현재의 3차원 프린팅이 무한한 잠재 가능성이 있는 기술이라 믿으며, 그 미래는 인터넷이 보여준 가능성 이상이길 기대한다.

후 기

“이 논문은 University of Akron 및 한국연구재단 과제(NRF-2013R1A1A2012654) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. <http://manufacturing.gov/nmmi.html>
2. Malone, E. and Lipson, H., “Fab@Home: the personal desktop fabricator kit,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13, No. 4, pp. 245~255, 2007.
3. Jeong, H.J., Jee, M.H., Kim, H.Y. and Lee, S.J., “Measurement of the compressive force on the knee joint model fabricated by 3D printing,” *KSMPE*, Vol. 13, No. 2, pp. 1~7, 2014.
4. Lee, I.H. and Cho, D.W., “Microstereolithography photopolymer solidification patterns for various laser beam exposure conditions,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, pp. 410~416, 2003.
5. Choi, J.W., Wicker, R.B., Choi, S.H., Ha, C.S. and Lee, S.H., “Cure depth control for complex 3D microstructure fabrication in dynamic mask projection microstereolithography,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 59~70, 2009.
6. Tumbleston, J.R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A.R., Kelly, D., Chen, K., Pinschmidt, R., Rolland, J.P., Ermoshkin, A., Samulski, E.T. and DeSimone J.M., “Continuous liquid interface production of 3D objects,” *Science*, Vol. 247, No. 6228, pp. 1349~1352, 2015.
7. <http://carbon3d.com>
8. <http://senvol.com>
9. Ge, Q., Qi, H.J. and Dunn, M.L., “Active materials by four-dimension printing,” *Applied Physics Letters*, Vol. 103, pp. 131901(1~5), 2013.
10. Campbell, T.A., Tibbits, S. and Garrett, B., “The next wave: 4D printing programming the material world,” *Atlantic Council, Brent Scowcroft Center on International Security*, 2015.
11. MacDonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D. and Wicker, R.B., “3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics,” *IEEE*, Vol. 2, pp. 234~242, 2014.
12. Zhuo, Y., Alvarez, C. and Feldmann, K., “An integrated design system for molded interconnect devices (3d-Mid),” *Digital Enterprise Technology*, Springer, pp. 193~200, 2007.
13. Vatani, M., Lu, Y., Engeberg, E.D. and Choi, J.W., “Combined 3D printing technologies and materials for fabrication of tactile sensors,” *International Journal of Precision Engineering and*

Manufacturing, Vol. 16, No. 17, pp. 1375~1383, 2015.

14. Vatani, M., Engeberg, E.D. and Choi, J.W., "Detection of the position, direction, and speed of sliding contact with a multi-layer compliant tactile sensor fabricated using direct-print technology," Smart Materials and Structures, Vol. 23, pp. 0905008 (11pp), 2014.