

쾌속조형공정의 원리 및 기술 동향

양동열[#] · 김효찬¹ · 박상후¹

Principle and Recent Trend of Rapid Prototyping Technology

D. Y. Yang, H. C. Kim, S. H. Park

1. 서 론

오늘날 수요자의 다양한 기호에 따라 제품 모델이 다양화되고, 국내외 시장에서 경쟁이 치열해지면서 제품의 개발기간과 시작기간 및 비용의 단축이 절실하게 요구되고 있어 모든 산업분야에서 제품의 시장도입시기, 즉 제품의 납기를 앞당기려는 여러 가지 시도를 경주하고 있다. 특히, 세계적으로 경쟁이 치열한 자동차, 가전, 전자산업 및 건축 등의 분야에서는 제품 모델 다양화 및 빈번한 제품 설계 변경이 필수적으로 요구된다. 이러한 시장의 요구에 효과적으로 대처하고, 제품의 경쟁력을 제고하기 위해서는 제품의 설계에서부터 시작품 생산에 이르는 제품 개발에 소요되는 비용과 시간을 절감하여 신속하고 저렴한 제품을 시장에 출하하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

기존의 제품 개발 방식에서는 제품의 설계에서부터 시장에 제품을 출하하기까지 대부분의 개발 과정이 순차적으로 진행되어 각 단계에서 소요되는 시간이 누적되어 총 제품 개발 기간이 되므로 당연히 제품 개발 기간이 길어지게 된다. 또한, 제품 개발 초기 단계에서 제품에 대한 정보 부족으로 인하여 오류가 발생하는 경우에 오류의 원인이 발생한 단계로 되돌아가서 오류를 수정하고 이후의 작업을 반복 수행해야 하는 시행착오가 빈번히 발생하여 제품 개발에 더욱 많은 시간, 인력 및 경비를 소모하게 된다.

따라서, 시작품의 설계 및 개발의 동시공학적 추구가 가능하고, 소요 비용 및 시간을 획기적으

로 단축함으로써 제품의 다양성, 납기 등과 같은 시장의 요구를 만족시키고, 제품 적응력을 제고할 수 있는 시작품 제작기법으로 쾌속조형기술(Rapid Prototyping Technology)이 도입되었다[1~8].

1987년 미국의 3D Systems사에서 처음으로 개발된 쾌속조형공정은 제품의 CAD 데이터로부터 플라스틱, 종이, 광경화성 수지 및 금속 등의 재료를 이용하여 제품을 직접 만들 수 있는 새로운 개념의 공정이다. 즉, 쾌속조형기술은 3차원의 형상을 2차원의 얇은 판의 집합으로 변환하여 순차적으로 한 층씩 적층해 나감으로써 복잡한 3차원 형상을 빠른 시간에 조형 가능한 기술이다.

쾌속 조형법은 초기에는 광(beam)에 의해 형상이 만들어진다고 하여 광조형법이라고 불렸다. 그 후 시작품(Prototype)을 신속(Rapid)하게 제작할 수 있다는 사실로부터 ‘Rapid Prototyping’ 또는 ‘쾌속조형법’이라고 불리게 되었다. 더욱이 이 명칭에서는 절삭 가공이나 방전 가공도 포함된다는 점과, 용도가 시작품 제작에만 한정되지 않는 것도 있어서 보다 일반적인 명칭으로 적층 조형법(Layered Manufacturing), 자유 형상 조형법(Solid Freeform Fabrication)이라고 하는 명칭이 사용되게 되었다.

쾌속조형기술은 개발 초기에는 주로 자동차와 항공산업에서 주로 응용되었으나, 현재는 전자, 가전 산업, 중공업 및 건축 등 거의 모든 산업에서 설계된 제품의 디자인 검증(design verification)과 2차공정을 위한 원형제작에 응용되어 제품개발에 소요되는 시간과 비용을 절감하는 필수적인 공정으로써 사용되고 있다. 일반적으로 쾌속 조형

1. 한국과학기술원 기계공학과

교신저자 : 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : dyyang@hanbit.kaist.ac.kr

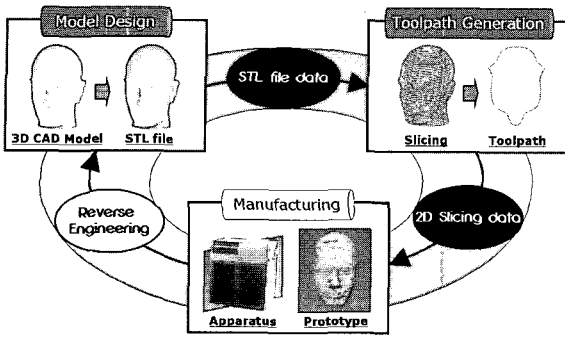


Fig. 1 Fundamental process of rapid prototyping technology

공정의 기본 원리는 Fig. 1과 같이 3단계로 구성된다.

· 단계 1

CAD 를 이용하여 제작하고자 하는 제품을 3 차원 솔리드 모델링(Solid Modeling)한 후, 이 CAD 데이터의 표면만을 삼각형 격자로 나타내는 ASCII 또는 Binary 파일 형태의 .STL 파일로 변화시킨다. 이때 생성되는 삼각형 격자는 3 개의 꼭지점 좌표와 방향 벡터를 가진다.

· 단계 2

1 단계에서 생성된 .STL 파일을 이용하여 쾌속 조형 장치가 최적의 조건에서 조형할 수 있도록 모델링 데이터를 이용하여 공정 계획을 수립하는 단계이다. 이 단계에서는 모델링 데이터의 조형 방향(Orientation) 결정, 필요한 경우에 지지대 위치(Supports)와 갯수 결정, 슬라이싱(Slicing)방법 결정 및 이동 경로 결정(Path Planning)을 수행한다.

모델링 생성 방향은 조형 높이, 조형 속도, 지지대(Supports) 생성, 표면 조도 및 수축 공차에 현저한 영향을 미친다. 지지대 생성은 제품의 조형시 안정성을 고려하여 지지대의 위치와 개수를 결정하여야 한다. 슬라이싱에서는 모델링 데이터 조형 방향과 지지대 생성이 완료된 .STL 파일 데이터를 한층의 조형 두께 만큼 수직 방향으로 나눈다. 이 때 형성된 각 층의 데이터를 이용하여 레이저, 노즐 등 투사/절단 장비, XYZ 이동 테이블 및 적층/접착 장치의 이동 경로를 결정한다.

· 단계 3

세 번째 단계는 두 번째 단계에서 생성된 데이

터를 쾌속조형장치에 입력하여 실제 제품을 조형하는 단계이다. 각 공정의 특징에 따라 조형 방법에 조금씩 차이가 있으나, 슬라이싱 된 한 층에 대하여 형상을 생성하고 동시에 이전 층(previous layer)에 접착하는 과정을 반복하여 제품을 제작한다.

이와 같은 쾌속 조형법의 특징은 다음과 같다.

- (1) 단면 데이터를 생성시킬 수 있는 3D CAD 데이터만 있으면 별도의 공정계획 없이 쉽게 공구 경로 데이터의 생성이 가능하다.
- (2) 재료 제거 가공이 아니라 재료 부가 가공이다.
- (3) 공작물의 고정을 위한 지그(jig)나 고정구(fixture)가 필요 없다.
- (4) 금형 없이 복잡한 형상의 제품도 쉽고 빠르게 제작할 수 있다.

2. 쾌속 조형 공정의 종류

세계적으로 20 여가지 이상의 공정들이 상용으로 개발되었으며, 새로운 공정의 개발을 위한 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근에 들어 두드러진 현상은 기존의 대형 장비보다 3 차원 프린터 역할을 대신할 수 있는 소형 장비가 많이 개발되고 있다.

광조형법(StereoLithography)라는 명칭으로 3 차원 쾌속 조형 공정이 산업 사회 도입된 후 3 차원 프린터 및 시작품 제작 역할을 수행하는 여러 가지 3 차원 쾌속 조형 공정들이 개발 되었다. 현재 상용화 되었거나, 개발중인 대표적인 공정들은 접착 방법에 따라 Fig. 2와 같이 용착을 이용하는 공정, 광경화성을 이용하는 공정, 소결을 이용하는 공정 및 접착제를 이용하는 공정으로 분류할 수 있다. 용착을 이용하는 공정으로는 용착 조형 공정(Fused Deposition Manufacturing : FDM), Shape Deposition Manufacturing(SDM), 다중 제트 분사 공정(Multi-Jet Modeling : MJM) 등이 있다. 광경화를 이용하는 공정으로는 광조형법(StereoLithography : SLA), Solid Ground Curing (SGC), 다중 분사 노즐과 UV 램프 경화를 이용한 공정 (Objet) 등이 있다. 소결을 이용하는 공정으로는 선택적 레이저 소결 공정 (Selective Laser Sintering : SLS), Electro Optical Systems(EOS) 등이 있다. 또한, 접착제를 이용하는 방법으로는 박판 재료 적층 공정 (Laminated Object

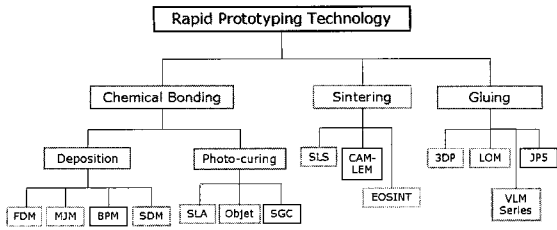


Fig. 2 Classification of rapid prototyping process into method of adhesion

Manufacturing : LOM), 3 차원 프린팅 (Three-dimensional Printing : 3DP), 박판재료 자동 절단과 수동 접착을 이용한 공정(JP5)등이 있다.

이와 같은 종래의 쾌속조형시스템들은 아주 얇은 층을 적층하여 3 차원 형상을 제작한다. 이러한 이유로 인하여 조형하고자 하는 모델의 크기가 큰 대형 시작품을 제작하는 경우, 전체 조형 시간과 제작 비용이 급격히 증가하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 두꺼운 두께의 층을 적층하여 전체 조형시간을 대폭 줄이려는 후판 적층 조형공정(Thick Layered Manufacturing)에 관한 연구가 활발하게 진행 중이며, 두께가 두꺼워져서 더욱 두드러지는 측면의 계단 형상의 단차를 제거하기 위해서 경사를 부여하여 임의의 3 차원 형상을 제작하려는 연구가 병행되고 있다. 이와 같이 경사면을 가진 층을 절단하기 위해서는 4 축 내지 5 축 제어기가 필요하다. 그래서 이것은 장비 제작비를 증가 시키는 요인이 된다. 그럼에도 불구하고 실제 시작품을 제작하는데 있어서 경사면을 가진 층을 사용하는 것은 두 가지 큰 장 점을 가지고 있다. 첫째, 계단형상을 가진 층을 사용하는 것보다 3D CAD 모델의 표면 정밀도를 향상 시킬 수 있을 뿐만 아니라, 후처리에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 둘째, 비교적 단순한 형상의 부품을 제작할 때, 더 두꺼운 층을 사용할 수 있기 때문에 전체 조형시간을 줄일 수 있다. 따라서, 1m³ 이상의 크기를 갖는 대형 시작품을 제작하는데 유리하다.

적층 형상 생성 공구에 따라서 후판 적층 조형공정은 Fig. 3 과 같이 나누어 진다. 레이저 절단을 이용하는 방법으로 CAM-LEM (Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials)과 LaserCamm 등이 있다. 열선 절단을 이용하는 방법으로 TLOM(Thick-Layered Objet Manufacturing), ShapeMaker II 과 VLM series 등이 있다. Waterjet

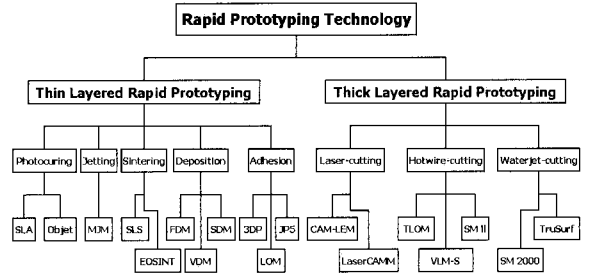


Fig. 3 Classification of rapid prototyping process into layer thickness

절단을 이용하는 방법으로 ShapeMaker 2000 과 TruSurf 등이 있다.

2.1 광조형법 (SLA: StereoLithography)[9]

광조형법(SLA)은 액체상태의 광경화성 수지(photo sensitive liquid polymer)에 레이저광을 선택적으로 조사하여 한 층씩 적층해 나가는 방법이다. 광조형법의 제작원리는 다음과 같다.

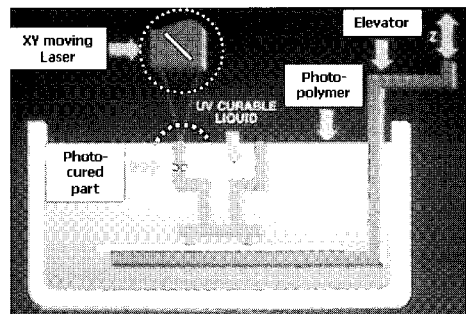
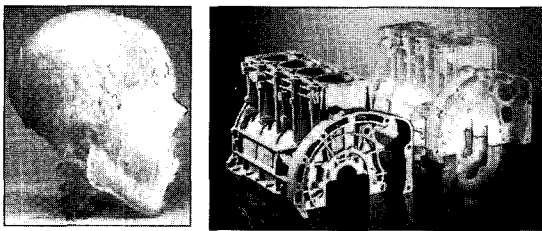


Fig. 4 Principle of stereolithography process

Fig. 4와 같이 같이 평판 형태의 받침대가 들어 있는 용기 안에 광경화성 수지를 채운다. 이때 수지의 표면과 받침대의 표면은 서로 일치하게 된다. 공정이 시작되면, 받침대가 수지 표면에서 일정한 간격만큼 수지 안으로 잠긴다. 그러면 실제로 받침대 위에 얇은 한 층의 광경화성 수지가 깔린 것이 된다. 다음에 그 층위로 레이저 광선을 제작 하고자 하는 제품의 단면 형상대로 조사하면 레이저 광선이 조사된 부분은 수지의 특성상 경화되면서 받침대에 붙게 된다. 레이저 광선이 조사되지 않은 나머지 부분은 액체상태를 그대로 유지하고 있다. 한 층에 대한 레이저 광선의 조사가 끝나면, 다시 받침대가 일정한 간격만큼 내려가서 앞서 경화된 층위로 같은 두께의 액

체 수지가 잘리게 된다. 다음에 이전과 같이 레이저 광선을 해당하는 단면의 형상대로 조사하면 레이저 광선이 조사된 부분 만 경화되면서 아래 층과 붙게 된다. 이때 사용되는 단면 정보는 제품의 .STL 파일로부터 얻어진다. 이 과정을 계속적으로 제품의 단면을 모두 제작할 때까지 반복하면 원하는 제품을 제작할 수 있다.

적층이 끝난 제품은 아직 완전히 경화(curing)가 끝난 상태가 아니기 때문에 가열로에 넣어 일정 시간 동안 경화를 시키게 되며 이 과정 중에 광경화 수지의 특성상 휨이나 비틀림이 발생하여 제품의 치수 정밀도가 떨어질 수 있다. 광조형법으로 제작된 제품은 정밀도가 우수하고, 얇고 미세한 형상도 잘 표현할 수 있는 특징이 있다. 1999년 개발된 SLA-7000에서는 층 두께를 0.025 mm까지 제작할 수 있어서 후처리 공정에 소요되는 노력이 절감될 수 있다. 또한 SLA-7000의 최대 부품 제작 크기는 500×500×600mm 이다. SLA에서는 3차원 CAD 데이터로부터 2차원 단면 데이터를 얻기 위해서 "3D Lightyear"라는 소프트웨어를 사용한다.



(a) Skull (b) Cylinder block

Fig. 5 Applications of stereolithography process

Fig. 5는 SLA 공정의 주요 응용 사례를 보여주는데 Fig. 5(a)는 사람의 두개골 형상을 나타낸 것이며 Fig. 5(b)는 자동차의 실린더 블록을 나타낸 것으로 core나 주입구 등을 동시 설계해서 Cast용으로 사용할 수 있다.

2.2 용착 조형 공정 (FDM: Fused Deposition Modeling)[10]

1991년 미국의 Stratasys사에 의해서 상용화된 FDM(Fused Deposition Modeling)은 용착조형공정이라 불리며 공정 원리는 다음과 같다. Fig. 6에서와 같이 선(filament) 형태의 열경화성 수지 재료가 가열된 노즐을 통과하는 동안 용융되며, 이때 노즐이

제품의 CAD 모델의 단면 데이터를 따라 이동하면서 용융재료를 압출하여 붙이는 방식으로 입체 형상을 제작하는 공정이다. 용착조형공정에서는 레이저를 이용하지 않기 때문에 기계장치가 간단하고, 사무실 환경에서도 사용할 수 있는 이점이 있다. 최근에는 치수가 큰 제품의 제작을 위해 대형 장비가 개발되어 시판되고 있으며, 공정 속도를 개선하기 위해 자력을 이용하여 노즐을 이송함으로써 노즐의 이송 속도를 크게 증가시켰다.

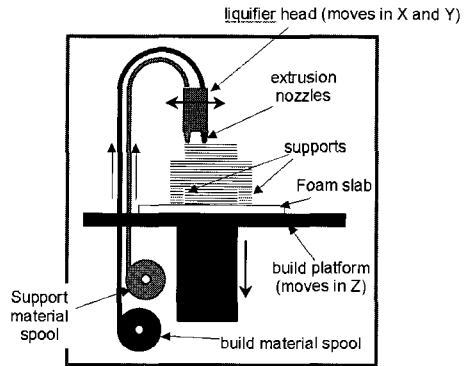
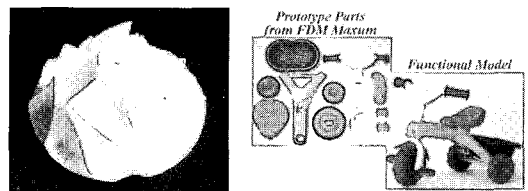


Fig. 6 Principle of fused deposition modeling process

2000년에 개발된 FDM Maxum의 경우, FDM공정으로 제작된 ABS 부품의 지지대를 손쉽게 제거할 수 있게 되었다. 'WaterWorks'로 명명된 이 지지대 (support) 제거 방법을 이용하면 FDM 장비에서 제작된 ABS부품을 수용성 용액에 담그기만 하면 지지대가 화학적으로 분해되며, 또한 지지대가 닿았던 부분도 깨끗하고 매끈하게 유지되는 장점이 있다. FDM Maxum의 노즐의 최대 직경은 0.635mm 이고 층 두께는 0.25mm이며, 최대 부품 제작 크기는 600×500×600mm 이다. FDM Maxum에서는 3차원 CAD 데이터로부터 2차원 단면 데이터를 얻기 위해서 "Insight"라는 소프트웨어를 사용한다.



(a) Fan

(b) Functional model

Fig. 7 Applications of fused deposition modeling process

FDM은 SLA 장비와 달리 레이저를 쓰지 않기 때문에 기계 장치가 간단하고, 다른 RP장비에 비해 구입가격과 유지보수비가 저렴하고, 데스크탑 형태의 사무실 작업환경에서 사용 할 수 있고, 재료가 ABS 수지로 절삭 등 추가가공이 가능하다. 또한, 서포트(support) 재료가 수용성이라 좁은 공간구조에 쌓인 서포트를 깨끗이 녹일 수 있어 공간표현이 우수하다. 그리고, 운용 시스템 간편하고, 스폴형태의 재료의 장착과 탈착이 쉽다. 이러한 장점이 있는 반면에, 레이저를 사용하지 않기 때문에 성형속도는 SLA에 비해 떨어진다. 치수가 큰 대형부품의 조형이 어렵다.

2.3 선택적 레이저 소결 공정 (SLS: Selective Laser Sintering)

Fig. 8에 보여진 것과 같이 1992년 미국의 DTM사에서 개발한 SLS(Selective Laser Sintering)는 선택적 레이저 소결 공정으로 균일한 크기의 고체분말을 한 층씩 균일하게 도포한 후, 제품 단면의 형상대로 레이저 광선을 조사하여 고체분말을 용융결합시켜 3차원 형상을 제작하는 공정이다. 광조형법의 경우와 같이 레이저 광선이 조사되지 않은 부분의 분말은 재사용이 가능하다. 사용하는 분말의 크기가 표면의 조도를 결정하게 되며, 고분자 재료 분말을 사용하기 때문에 기능성 부품을 직접 제작 할 수 있다는 장점이 있다. 다양한 종류의 재료가 개발되어 있으며, 고분자가 표면에 코팅된 금속분말을 사용하여 시작금형을 직접 제작할 수도 있다. 이 경우에는 소결(sintering)과 용침(infiltration)의 다소 번거로운 후처리 공정을 거치게 된다.

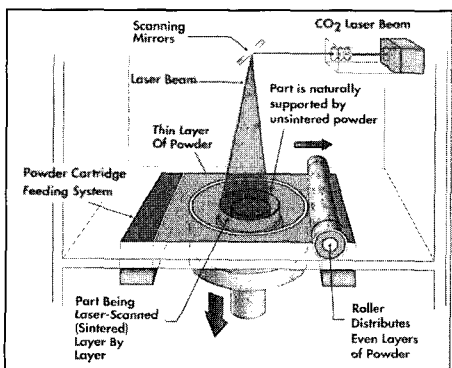
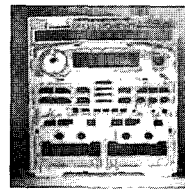
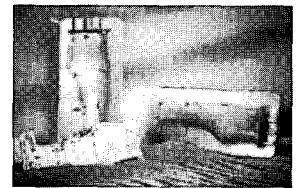


Fig. 8 Principle of selective laser sintering process

1998년 개발된 Sinterstation 2500Plus의 경우, 최대 부품 제작 크기는 375×330×450mm 이다. SLS에서는 3차원 CAD 데이터로부터 2차원 단면 데이터를 얻기 위해서 "Sinterstation system application"이라는 소프트웨어를 사용한다. SLS공정에서는 소결재로 코팅된 재료를 사용하기 때문에 금속분말이나 모래 등도 재료로 사용할 수 있다. 금속분말이나 모래등으로 성형된 파트는 수지나 왁스 등의 재료보다 강도면에서 좋은 특성을 가지고 있기 때문에 틀링으로의 응용이 용이하게 된다. 또한, 소결된 조형물의 주위에 소결되지 않는 분말이 충전된 상태이어서 광 조형과 같이 서포트를 필요로 하지 않기 때문에 성가신 서포트부착에서 해방된다. 조형 후 미소결 분말이 용이하게 제거되어 서포트제거 작업이 없다. 그리고 의장부품이 아닌 기능부품으로써 시험할 수 있는 시제품을 만들 수 있다. FDM과 LOM방식에 비해 성형시간이 빠르다는 장점이 있다. 단점으로는 여타 방식의 장비보다 비교적 가격이 비싸고, 노즐을 비롯한 고가의 부대장비가 필요하다는 것이다.



(a) Audio: front panel



(b) Mold

Fig. 9 Applications of selective laser sintering process

SLS 공정은 사용되는 재료에 따라서 다양한 분야에 적용되고 있다. Fig. 9(a)에 나타낸 바와 같이 DTM Nylon(Polyamides)은 엔지니어링 플라스틱으로 만들어져 있으며 Fig. 9(b)에 나타낸 바와 같이 RapidSteel 2.0 Metal은 내구성 있는 금속재료의 mold insert를 제작하는데 사용된다.

2.4 박판재료 적층공정 (LOM: Laminated Object Manufacturing)

1991년 미국의 Helisys사에서 상용화한 LOM (Laminated Object Manufacturing)은 박판재료적층공정으로 불리며 열을 가하면 붙는 접착제를 바른 종이를 한 층씩 적층하여 가열된 롤러로 붙인 후, 레이저 광선을 원하는 형상의 외곽선을 따라 조사하여 절단하는 것을 반복하여 제품을 만드는 방법이다. Fig. 10은 LOM공정의 개념도를 보여준다.

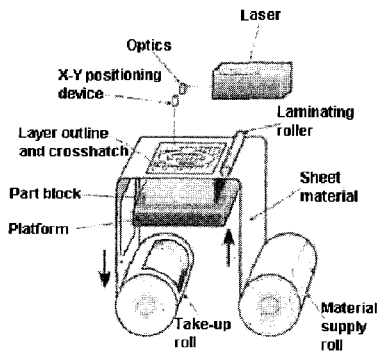


Fig.10 Principle of laminated object manufacturing process

박판재료 적층공정(LOM)의 제작 원리는 다음과 같다. 먼저 한 쪽 면에 접착제가 코팅되어 있는 종이를 이전 층위로 이송한다. 다음에 가열된 롤러(roller)를 이용하여 압착하여 이전 층위에 붙인다. 레이저 광선을 이용하여 접착된 종이 위에 제품의 해당 단면의 외곽선만을 조사하고 나머지 외곽선 바깥 부분은 바둑판 형태(hatching pattern)로 조사한다. 이와 같은 공정을 반복하여 전공정이 끝나면 바둑판 형태로 절단된 부분은 4각 기둥의 형태로 제품의 주변에 붙어 있게 된다. 이 4각 기둥을 모두 제거(decubing)하면 제작된 최종 형상을 얻을 수 있다. 이 작업은 다소 시간이 소요되는데 이는 박판재료 적층공정의 단점으로도 작용하고 있다. 제작된 형상은 거의 나무와 같은 성질을 가지고 있기 때문에 후가공이 비교적 용이한 이점이 있으며, 비교적 치수가 큰 형상의 제품 제작이 유리하다. 1996년 개발된 LOM-2030H의 경우, 층 두께는 0.1067mm이고, 최대 제품 제작 크기는 815×550×500mm이다. LOM에서는 3차원 CAD 데이터로부터 2차원 단면 데이터를 얻기 위해서 "LOMSlice"라는 소프트웨어를 사용한다.

LOM 장비의 장점은 외부지지 구조물이 필요치 않다는 것이다. 꼭 맞는 형상의 지지재료 블록 안에 부품을 만들기 때문에 제작 중 부품의 전체 형상을 안정시킬 수 있으며 자기 자신의 중량에 의한 변형을 예방할 수 있다. 더욱이 CAD솔리드 모델을 각 층으로 얇게 썰 때에 자주 발생하는 고립된 섬 형태의 윤곽(Island contours)에 대하여 걱정할 필요가 없다. 일부 타공정에서는 제작 중 섬이 부품의 나머지 부분과 연결되는 다리가 후에 생성될 때까지 이 섬을 공간상에 정확히 위치

시키기 위한 특정 지지대(Support)를 설계해야 했다. 그러나 LOM공정은 이러한 특정 지지대를 설계하지 않아도 된다는 것이다. 하지만 적층이 완료된 후 불필요한 부분의 재료를 제거하는 것이 간단한 일이 아니다. 버려야 할 부분만 제거하고 섬세한 부분이 부서지지 않도록 하기 위해서는 조심스러운 수작업과정이 요구된다. 더욱이 겉표면이 단혀 있는 속이 빈 구조물은 외벽에 의해서 내부에 갇혀 있는 재료를 제거할 수 없기 때문에 하나의 부품으로 만들 수 없다. 불필요한 재료의 제거가 곤란한 상황은 좁은 통로, 접근이 제한된 내부 동공, 막힌 구멍 등과 같은 형상을 가진 부품에까지 확대된다.

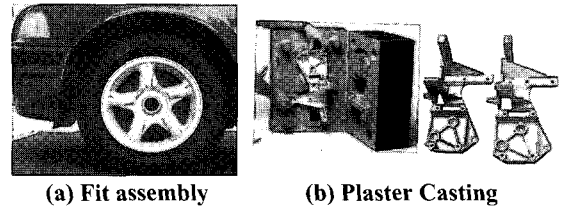


Fig.11 Applications of laminated object manufacturing process

2.5 Solid Ground Curing (SGC)

Fig. 12에 보여진 것과 같은 SGC 공정에서는 Zerox 복사 과정에서와 같이 포토마스크(photomask)를 만들어 광경화성 수지 위로 이송시킨다. 이때 이 포토마스크에는 제작하고자 하는 단면의 형상이 인쇄되어 있다. 다음에 UV 광선을 포토마스크 위로 한번에 조사하면 광선이 마스크를 통과하여 그 아래에 광경화성 수지를 일시에 단면의 형상대로 경화 시키게 된다. 레이저 광선이 조사되지 않은 수지는 흡입하여 제거하고 그 부분은 왁스를 채워 경화 시킨다. 이 왁스는 일종의 받침구조 역할을 하게 된다. 경화가 되면 밀링공정을 이용하여 원하는 두께를 가지도록 윗면을 가공한다. 밀링 가공이 끝나면 다시 광경화성 수지를 깔고, 다음 단면의 형상대로 포토마스크를 만든 다음 같은 공정을 반복함으로써 3차원의 형상을 만들어 낸다. SGC 공정에서는 한번에 여러 가지 형상을 만들 수 있으며, 적층 방향으로 비교적 양호한 정밀도를 가지는 장점이 있다. 반면 한번에 많은 형상을 제작해야 하는 어려운 점이 있다.

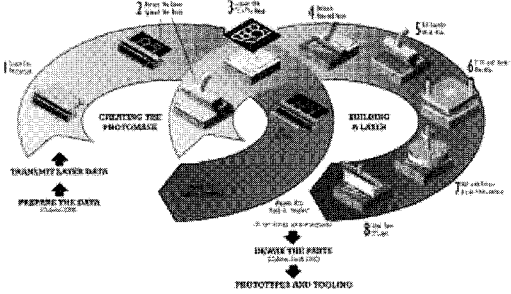


Fig.12 Principle of Solid Ground Curing process

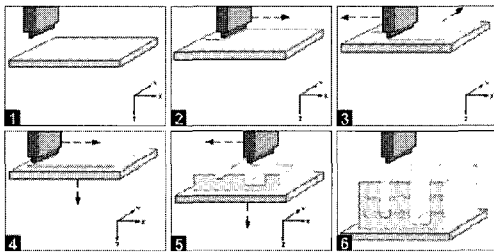


Fig.13 Principle of multi-jet modeling process

2.6 다중 제트 분사 공정 (MJM: Multi-Jet Modeling)

본 공정은 용착 조형 공정의 일종으로 용착 조형 공정에서는 1개의 노즐을 사용하여 조형을 수행하나, 다중 제트 분사 공정에서는 수십에서 수백개의 노즐을 사용하여 선택적으로 재료를 분사한 후 용착 시키는 방식을 사용한다. 그러므로, 폭 방향 이동의 경우 수 회 미만의 이동으로 제품을 조형할 수 있어 기존 용착 조형 공정에 비하여 조형 속도가 매우 빠르다. 다중 제트 분사 공정의 대표적인 장치는 Fig. 13 보여진 것과 같이 1999년 미국의 3D Systems사에서 개발한 Thermojet을 들 수 있다. 본 장비의 경우 352개의 제트를 분사하여 한 층에 해당되는 폭을 한번에 조형함으로써 한번의 노즐 세트 이동으로 한 층을 조형할 수 있다. 시작품 제작에 사용되는 소재는 열가소성수지이며 황토색의 자연색상과 검정, 회색의 세가지 색상의 재료가 쓰인다. 장비 가격도 기존의 중대형 장비에 비하여 매우 저렴하고, 사용이 편리하며 사무실 환경에서 사용할 수 있을 만큼의 정숙성과 빠른 시간에 시제품을 만들 수 있는 특징을 갖고 있다. Thermojet의 층 두께는 50 μ m이고, 최대 부품 제작 크기는 250 \times 190 \times 200mm이다. Thermojet에서는 3차원 CAD 데이터로부터 2차원 단면 데이터를 얻기 위해서 "AllegroClientMan (thermojet-208)"라는 소프트웨어를 사용한다.

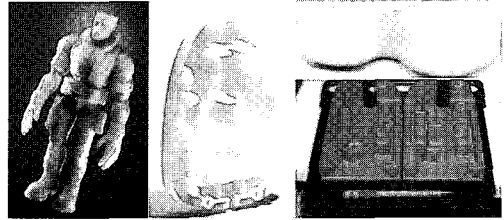


Fig.14 Applications of multi-jet modeling process

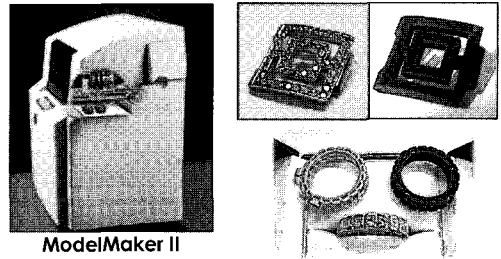


Fig.15 Apparatus and applications of SolidScape

2.7 잉크젯방식 공정 (Inkjet Modeling Technology - SolidScape)[11]

본 공정은 잉크젯 인쇄기(inkjet printer)의 원리를 그대로 도입하여 한 층씩 연속적으로 적층하는 쾌속조형 원리로 3 차원 형상을 제작하는 방식은 공정 원리가 간단하여 장비의 가격이 비교적 저렴하다. 잉크젯 방식의 대표적인 공정으로 ModelMaker II를 들 수 있다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 잉크젯 방식의 노즐을 통해 용융된 플라스틱 방울을 한 층 도포하고 경화된 후에 밀링 가공하여 원하는 두께를 가지도록 도포된 층의 윗면을 가공하게 된다. 밀링 가공 시에 가공 두께를 조절할 수 있기 때문에 필요에 따라 층의 두께를 다르게 가공할 수도 있다. 밀링 가공으로 한 층의 두께를 매우 얇게 가공하여 후가공이 필요 없을 정도로 정밀한 제품을 제작할 수 있는 점이 장점이라고 할 수 있다. 주로 정밀하고 크기가 작은 제품의 원형 가공에 많이 응용되고 있다.

2.8 3 차원 프린팅 (3DP: Three-Dimensional Printing)[12]

미국 MIT 공대에서 개발된 이 공정은 Fig. 16에서 보여진 바와 같이 분말을 한 층 도포한 후 그 위에 점도가 낮은 액상의 접착제(binder)를 잉크젯 방식으로 제품의 CAD 모델의 단면형상을 따라 분사하여 입체 형상을 만든다. 경우에 따라서는

접착제가 분사되어 결합된 형상(green parts)은 후 공정으로 소결공정을 거치게 된다.

현재까지 5개의 회사가 이 공정에 대한 라이선스를 가지고 있으며, 그 중에서 ExtrudeHone사와 Z-Corp. 사가 쾌속조형기계를 판매하고 있다. 1998년 ExtrudeHone사가 개발한 ProMetal 공정은 도포된 스테인레스강 또는 공구강 분말 위에 중합 접착제를 도포하여 그린파트(green part)를 만든 후 소결하고 구리합금을 용침하여 부품을 제작한다.

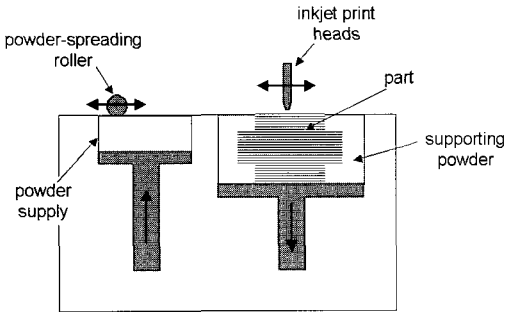


Fig.16 Principle of three-dimensional printing

1996년 Z Corp.사가 Z400을 개발하였으며 2001년에는 Z406을 개발하였다. Z406은 석고나 전분 분말에 수용성 용액을 분사하여 입체형상을 제작한다. 분말을 사용하는 공정이므로 지지대가 필요 없으며 빠른 조형속도를 가지며, 장비 가격도 저렴하여 그 활용도가 부각되고 있다. 제작 가능한 제품의 최대크기는 203× 254× 203mm 이고, 적층 두께는 0.076 - 0.254 mm까지 조절 가능하다.

Z Corp.사에서 개발한 3D Printer의 특징은 다음과 같다.

① 다양성 : 어떠한 디자인이나 설계 모두 제작 가능하며 또한 어떠한 구조 지원없이 형상을 만든다. 그리고 제작된 파트는 용도에 따라 다양한 성질을 지니도록 만들어질 수 있다.

② 빠른 속도 : Z406은 지금까지 나온 여러 RP 장비 중 가장 빠른 쾌속조형장비 중의 하나이다. 시간당 2.4인치를 제작할 수 있으며 대부분의 소형 모델은 2시간 이내 만들 수 있다. 그리고 후처리 등의 가공으로 디자이너들이 원하는 다양한 모델을 구현 할 수 있다.

③ 쉬운 작동법 : 간단한 작동법으로 전문가가 아니어도 2시간만 교육받으면 쉽게 작동시킬 수 있는 구조로 설계되었다.

④ 가격 : 기존의 타사의 3D 조형기에 비해 가

격 경쟁력이 뛰어나며 빠른 조형속도로 시간절약 및 소요되는 소모품의 재료가 저렴하다.

⑤ 재료 재활용 : 산업폐기물이 없는 자연 친화적인 시스템으로 소모품의 재활용이 가능하여 소모품 절약과 환경보호가 모두 충족된다.

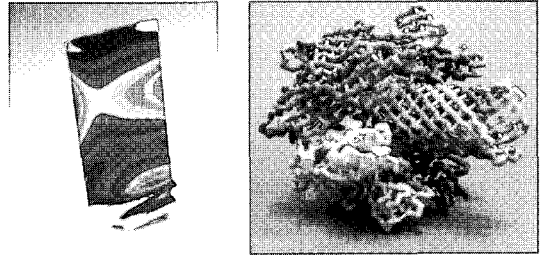


Fig.17 Applications of three-dimensional printing

Fig. 17에서 보는 것과 같이 3D Printer는 색상을 가진 형상에 대한 조형이 가능하기 때문에 수치 해석의 시각화 모델이나 바이오 모델에 대한 조형이 가능하다.

2.9 다중 분사 노즐과 UV 램프 경화를 이용한 공정 (Objet)[13]

2000년 이스라엘의 Objet Geometries사에 의해 처음으로 소개된 Objet Quadra를 개발하였으며 2003년에는 EDEN330을 개발하였다. 본 공정은 다중 제트 분사 공정과 자외선(Ultra-Violet) 광선에 의한 전체 경화 공정을 혼합한 공정이다.

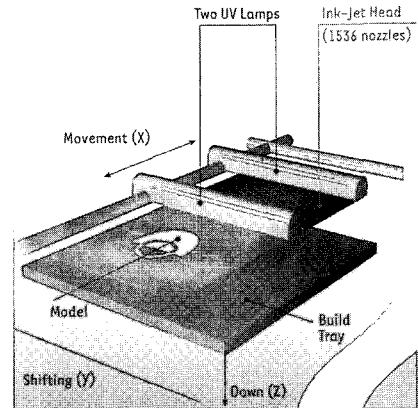


Fig.18 Principle of EDEN330

Fig. 18과 같이 1,536개의 미세한 잉크젯 노즐의 아래쪽에 장착된 프린터 헤드는 그 폭이 60mm로

한 층을 2-12초 내에 도포할 수 있으며, 이 프린터 헤드의 노즐을 통해서 선택적으로 광경화성 수지 또는 지지대 재료가 도포 된다. EDEN330의 부품제작 원리는 다음과 같다. 먼저 프린터 헤드가 이송하면서 장착된 노즐을 통해서 부품의 CAD 모델의 단면형상에 따라 광경화성 수지 또는 지지대 재료를 도포한다. 이때 프린터 헤드의 양쪽 끝에 부착되어 있는 2개의 UV 램프 중에서 프린터 헤드 이송방향의 반대쪽에 있는 UV 램프에서 UV 자외선이 조사되어 도포된 재료를 경화시키게 된다. 프린터 헤드가 완전히 한 쪽 끝으로 이송되면 한 층이 완성되며, 이를 반복하여 원하는 부품을 제작하게 된다. EDEN330의 크기의 최대 부품 제작 크기는 340×330×200mm 이며 층 두께가 16 μ m, XY 평면 해상도가 600dpi인 층의 도포가 가능하여, 제작된 부품의 표면 거칠기가 매우 우수하다. 또한, 한가지 주목할 만한 것은 이 공정의 지지대 생성 방식이다. 부품을 지지하기 위해 왁스와 유사한 재료를 도포하는데 이 재료는 다른 쾌속조형공정의 경우와는 달리 부품에 붙거나, 파고들지 않을 뿐만 아니라, 지지대를 물에 녹기 때문에 제거하기도 쉽고 지지대를 제거한 표면도 비교적 깨끗하다. 그리고 광경화성 수지를 사용하는 다른 공정들과는 달리 경화된 부품의 표면에 광경화성 수지 찌꺼기가 남지 않는다.

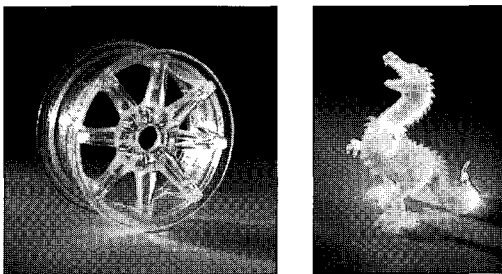


Fig.19 Applications of EDEN330

2.10 단속형 가변 적층 쾌속조형공정 (VLM-ST) [14~15]

VLM-ST 공정은 단속적으로 공급되는 여러 가지 두께를 가진 판재 형태의 재료를 실시간으로 동시 4축 제어되는 4자유도 열선절단기를 사용하여 CAD 형상과 일치하도록 가변 폭, 가변 경사 및 가변 길이로 절단하여 단위형상층 (Unit shape layer : USL) 을 생성한 후 안내 구멍 (Pilot hole)

과 적층 보조 장치 (Building board) 를 사용하여 반자동으로 적층함으로써 임의 3차원 형상의 제품을 쾌속 조형 한다.

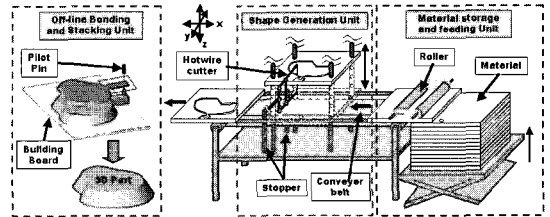


Fig.20 Principle of VLM-ST

VLM-ST 공정의 주요 특성은 다음과 같다.

(1) 종래의 쾌속조형공정들의 경우, 수직벽의 얇은 층 ($\approx 0.1\sim 1\text{mm}$) 을 연속적으로 적층함하기 때문에 장시간의 조형 시간과 측면의 단차 현상 발생 등의 문제점을 가지고 있다. VLM-ST 공정은 4mm 내외의 두꺼운 층의 측면에 경사를 부여하여 연속적으로 적층함으로써 제품 정밀도를 유지하면서 조형시간과 측면 단차 현상을 최소화하였다.

(2) VLM-ST 공정 설계는 USL 개념과 재료 절단 후 적층 및 접착 수행 방법 및 파일럿 홀과 적층 보조 장치를 이용한 반자동 적층/접착 방법의 3가지 특징을 가지고 있다. USL 개념은 연결자 (connector)와 횡단선 (cross-cut)을 이용하여 단순 연결된 3차원 형상내의 한 층을 생성함으로써 구멍이나 고립 형상 (island)이 존재하는 다중 연결 영역 (multiple connected domain)을 포함하는 다양한 형상을 절단할 수 있도록 하였다. 또한, 단위 형상층은 적층/접착의 기준인 파일럿 구멍과 실제 형상 부분의 연결자인 적층 기준 형상 (reference shape)을 가지도록 하였다. 재료 절단 후 적층 및 접착을 수행하는 방법은 기존 쾌속 조형 공정에 의해 조형된 제품에 존재하는 지지대 제거, 후 경화 (Post-curing) 및 후 가공 등의 후처리 (Post-processing)에 요구되는 시간과 추가적으로 장치를 최소화 하였다.

(3) 열선 절단기는 발포 폴리스티렌 폼 절단시 절삭 저항이 매우 작기 때문에 매우 빨리 절단할 수 있다. 또한, VLM-ST 공정은 레이저와 같은 고가의 절단 장치나 광경화 수지 및 특수 급속/플라스틱 분말등 고가의 재료를 사용하지 않고, 전기 저항을 이용하는 4축 동시제어 열선 절단기와 발포 폴리스티렌 폼을 사용함으로 장치의 도

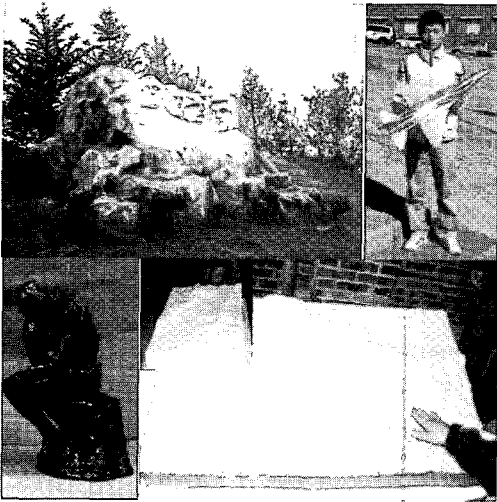


Fig.21 Applications of VLM-ST process

임비와 운영/유지비가 매우 저렴하다. 또한, 발포 폴리스티렌 폼이 매우 다루기 쉬우므로 제작된 3차원 형상의 후처리가 용이하다.

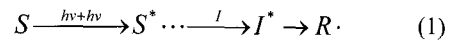
Fig. 21에서 보는 것과 같이 VLM-ST 공정은 Z축 방향으로 적층한계가 존재하지 않기 때문에 다른 공정에 비해 대형 형상을 제작하는데 유리하다. 또한, VLM 시제품의 표면 처리 과정을 개발 및 적용함으로써 실제품에 가까운 표면 조도를 얻을 수 있었다.

2.11 이광자 광중합을 이용한 나노 스테레오리소그래피 공정 (NSL) [16~20]

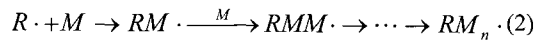
최근 나노기술(nanotechnology: NT)에 대한 집중적인 연구에 의하여 바이오, 차세대 반도체 및 디스플레이 산업 등에서 새로운 차원의 공정개발과 상품개발에 진전이 이루어지고 있다. 그 중에서도 특히 신 개념의 상품개발에 응용될 수 있는 초정밀, 저비용 및 3차원 형상제작에 적합한 새로운 차원의 나노 공정기술은 매우 중요하여 이에 대한 다각적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 이를 위하여 이광자 흡수 중합법(two-photon polymerization, TPP)을 이용한 3차원 나노 및 마이크로 형상제작 기술은 차세대 나노 공정기술로 자리잡을 수 있어 최근 이 분야의 연구 열기가 매우 높아지고 있다.

이광자 흡수(two-photon absorption: TPA) 현상은 이광자 흡수 물질(photo curable resin)이 한 개의 광

자를 받은 후 약 10^{-15} 초 이내에 다른 광자를 받아들여 광자에너지가 두 배로 큰 에너지로 흡수되어 고분자로 상변화가 발생하는 현상을 말한다. 광 에너지에 의하여 중합반응이 진행되는 과정에서 중요한 역할을 하는 것은 광개시제 (photo-initiator)와 이광자 흡수 색소 (photosensitizer)이다. 광개시제는 중합반응 개시를 위하여 빛에 민감하게 반응하는 저분자 물질이며 식(1)과 같이 이광자 흡수 색소가 발광하는 빛을 받아서 라디칼(radical)로 변환하게 된다.



여기서 S는 이광자 흡수 색소, I는 광개시제, R·은 라디칼을 나타낸다. 그리고 *는 각 화합물이 에너지를 받아서 일시적인 들뜬 상태를 의미한다. 생성된 라디칼이 고분자화 되기 위해서는 일정 수준 이상의 충분한 라디칼 밀도를 가져야 하기 때문에 중합반응을 위한 임계 에너지(threshold energy)가 존재하게 된다. 식(2)는 라디칼이 단량체(monomer)와 연속적으로 결합하여 고분자로 진행되는 것을 나타낸 것이다. 또한 이러한 반응은 다른 라디칼과 결합을 하는 순간 멈추게 된다.



이러한 현상을 유발하기 위해서는 첨두출력이 MW급이 되는 펨토초 레이저(femtosecond laser) 시스템과 빔의 초점크기를 줄이고 위치를 정밀하게 제어하는 광학기술 및 제어기술 그리고 이광자 흡수물질에 대한 고분자 재료기술이 필수적으로 요구된다. 기존의 UV광을 이용한 단광자 흡수(single-photon absorption)로 형상을 제작하는 마이크로 스테레오리소그래피 공정(microstereolithography)에 비하여 그 정밀도가 100nm 수준으로 매우 높은 편이다. 또한 고기능성 고분자 재료의 개발을 통하여 50nm 수준으로 정밀도를 향상시킬 수 있기 때문에 전자빔 리소그래피 공정(e-beam lithography)을 일부 대체할 수 있는 차세대 패터닝 공정장치 및 나노급 정밀도의 3차원 형상을 제작하는 공정으로 발전될 전망이다.

현재까지 나노 스테레오리소그래피 공정은 상용화된 제품은 없으며 일본, 독일, 한국에서 연구 단계에서 개발되고 있다. 2002년부터 개발이 진행된 KAIST 연구사례를 살펴보면 Fig. 22와 같다.

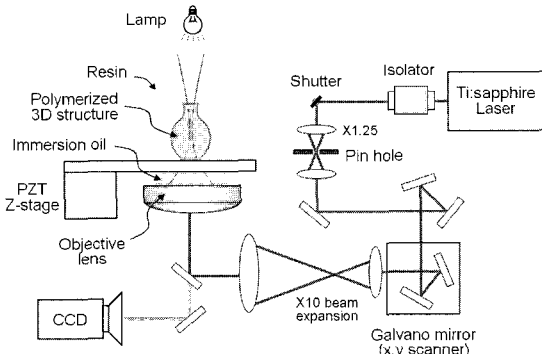


Fig.22 Schematic diagram of laser set-up for nano-stereolithography

펄스 폭을 갖는 티타늄-사파이어 레이저이며, 작동주파수는 80MHz, 파장은 780nm 이었다. 레이저 빔의 x, y 축 제어는 1.2nm 분해능을 갖는 갈바노(galvano-mirrors) 스캐너를 이용하였다. z 축 방향에 대한 제어는 피에조 스테이지 (piezoelectric stage) 를 이용하여 적층 간격을 10nm 수준으로 조절이 가능하였고, 레이저 빔의 조사시간은 갈바노 셔터를 이용하여 1ms 수준까지 제어하도록 하였다. 그리고 대물렌즈 (NA 1.25,×100)와 광중합 레진이 올려지는 유리판 사이의 개수구 (numerical aperture; NA)를 높이기 위해 담금 기름(immersion oil)을 사용하였다. 제작되는 과정을 확인하기 위하여 고배율 렌즈 (X 1000)가 부착된 CCD 카메라를 이용하여 모니터링 하였다. 제작과정은 기존의 SLA 공정과 유사하게 3차원 형상을 슬라이싱하여 2차원 평면데이터로 전환하여 한 층씩 적층하여 3차원 형상을 제작하도록 하였다. 개발된 공정을 이용하여 제작한 3차원 형상을 Fig. 23과 Fig. 24에 나타내었다.

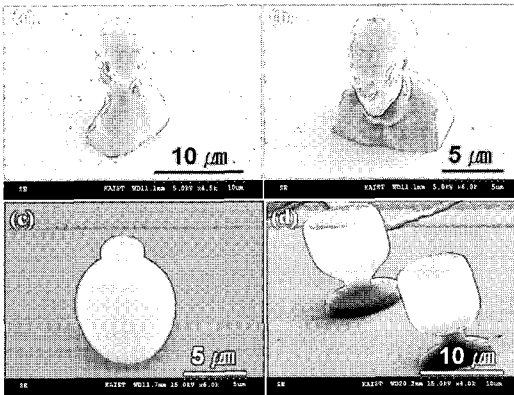


Fig.23 SEM images of fabricated 3D microstructures; (a), (b) human head, (c) micro-jar, and (d) micro-cups

3. 쾌속 조형 기술 및 시장 동향[4~5]

현재 세계적으로 20여가지 이상의 쾌속조형기술들이 상용화 되었으며, 새로운 공정 개발을 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 쾌속조형 기술은 Fig. 25에서 보는 것과 같이 다양한 분야에 활용되고 있다.

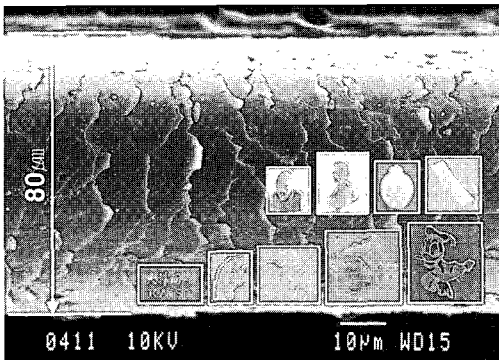


Fig.24 Comparison of human hair (diameter, 80μm) with fabricated 2D patterns and 3D microstructures

개발된 나노 스테레오리소그래피 공정의 개략적인 구성과 작동원리는 사용된 레이저는 80 fs 의

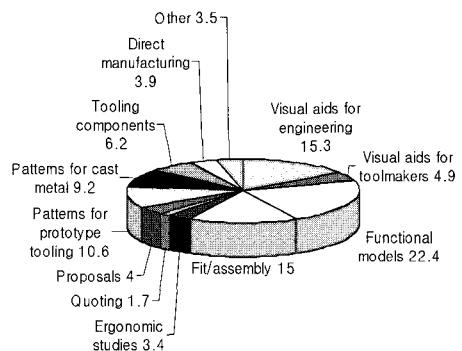


Fig.25 How RP models are being used

1988년 미국의 3 D Systems 사에 의해 처음으로 상용화된 SLA 장비 이후에 2003년 말 까지 전세계에 11,376대의 쾌속조형장비가 설치되었고, 이 중에서 거의 80%인 9,102대가 미국의 쾌속조형장비 제조업체에 의해서 전세계에 판매 되었고, 약

11.3%인 1,296대가 일본의 쾌속조형 장비 제조 업체에 의해서 판매 되었다. 현재 쾌속조형장비들의 가격은 점점더 저렴해지고 조형속도는 더욱더 빨라지고 있다.

Table 1 Scale of overall rapid prototyping market

year	1999	2000	2001	2002	2003
Scale	\$1,046 million	\$1,137 million	\$923.9 million	\$798.2 million	\$851.9 million

또한, 개념모델과 프리젠테이션 모델 개발에 관련된 시장이 급격하게 확대되고 있다. 쾌속조형공정 및 응용기술관련 전세계시장규모는 2000년대 초반에 약10억불(1조2천억원)을 돌파 하였다. 하지만, 전세계적인 경기침체의 여파로 2002년도에는 2001년도 대비 13.6%가 감소하였으나 반등현상으로 2003년도에는 2002년도 6.7% 증가하여 8억 5천 1백만불이 되었다. 이와 함께, RP 관련 Service Bureaus 들도 2002년도 대비 2.5%의 수입이 증가하였다. RP 장치 판매는 2002년도 1482대에서 2003년도 말 1864대로 382대가 증가하여 점점 시장이 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과의 주역은 장치 가격이 저렴하고 사용법이 간편한 3D Printer (Dimension, Objet, Z40x series 등)의 보급이 급증하였기 때문이다. 이러한 3D Printer 시장의 성장 추세는 향후에도 지속적으로 계속될 것으로 사료되며, 향후 각각의 RP 장비 제조사들은 고속저가의 3D Printer 개발에 더욱 박차를 가할 것이다.

Fig. 26에 보여진 바와 같이 쾌속조형기술은 설계 검증용 가시화 모델 제작과 조립성 테스트를 위한 시작품 제작 등에 그치지 않고, 점차 직접 양산에까지 적용할 수 있는 쾌속생산에 대한 연

구 개발이 활발히 이루어 질 것으로 사료된다. 이와 병행해서 기존의 개념 모델 제작용 고속저가 3D Printer 시장도 꾸준히 확대 될 것으로 전망된다. 이러한 관점에서 본 연구를 통해서 개발된 한국형 고속저가 가변적층 쾌속조형공정의 경우, 장치 가격과 조형속도 측면에서 기존의 쾌속조형장비에 비해서 월등하기 때문에 단계적으로 상용화가 이루어 질 경우, 전 세계 시장에서 경쟁력을 발휘할 것으로 사료된다.

4. 결론

Stereolithography 에 의해 쾌속 조형 공정이 산업 시장에 출현한지 17년이 지난 지금 많은 쾌속조형 공정들이 개발되어 상용화되었다. 쾌속 조형 시장도 10억불 시장으로 성장하였다. 그러나, 시장내에서의 경쟁은 점점 치열해지고 있다. 이러한 시장에서 생존하고 발전하기 위해서는 기존 시장 외에 새로운 시장으로 눈길을 돌려야 하며, 기존 시장과 새로운 시장을 점유할 수 있는 혁신적인 쾌속조형 기술 개발, 서비스 방법 개선 및 생존 전략이 필요할 것으로 사료된다. 특히, 혁신적인 쾌속조형 기술 개발의 경우 Objet와 같이 저가, 고속, 소형 및 고정밀도 장비와 이에 따른 2차 공정의 개발이 시장의 주요 흐름일 것으로 사료된다.

또한, 쾌속 조형 공정을 유연 생산 방식의 구성 요소로 사용하는 혼합 생산 시스템(Hybrid Manufacturing System) 개발과 이종 재료를 가지는 제품 생산을 위한 쾌속 조형 공정 개발등도 주요 개발 방향이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 자료를 조사하는데 도움을 주신 (주) LG전자 생산기술원의 이상호 박사님과 조선대학교 기계공학과 의 안동규 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Paul F. Jacobs, 1996, Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press.
- [2] 박근, 윤정환, 양동열, 조종래, 1996, 쾌속 3 차원 조형법과 유한요소해석을 연계한 소성가

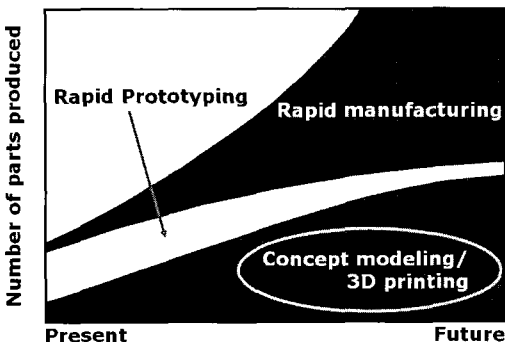


Fig.26 Prediction of rapid prototyping industry

- 공 금형설계의 동시공학적 접근방법, 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 8, pp. 146~154.
- [3] 양동열, 손현기, 2000, 쾌속제품개발(RPD)을 위한 쾌속조형기술의 최근동향, 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 10, pp. 5~10.
- [4] T. T. Wohler, 2004, Wohlers Report 2004, Rapid Prototyping & Tooling State of the industry, Wohler's Associates Inc..
- [5] <http://www.cadcamnet.com>
- [6] P. Kulkarni, A. Marsan, D. Dutta, 2000, A review of process planning techniques in layered manufacturing, Rapid Prototyping J., Vol.6, No.1, pp. 18~35.
- [7] X. Yan, P. Gu, 1996, A review of rapid prototyping technologies and systems, Computer Aided Design, Vol.28, No.4, pp. 307~318.
- [8] D. T. Pham, R. S. Gault, 1997, A comparison of rapid prototyping technologies, Int. J. Mach. Tool. Manu., Vol.38, pp. 1257~1287.
- [9] <http://www.3dsystems.com>
- [10] <http://www.stratasys.com>
- [11] <http://solid-scape.com>
- [12] <http://www.zcorp.com>
- [13] <http://www.2objet.com>
- [14] D. G. Ahn, S. H. Lee, D. Y. Yang, 2002, Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam, Int. J. Mach. Tool. Manu., Vol. 42, No. 4, pp. 427~439.
- [15] 안동규, 이상호, 양동열, 신보성, 박승교, 이용일, 2001, 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변적층 쾌속 조형 공정 및 장치 개발, 한국정밀공학회지, Vol. 18, No. 8, pp. 54~63.
- [16] S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka, K. Takada, 2001, Finer features for functional microdevices, Nature, Vol.412, No.16, pp. 697~698.
- [17] J. Serbin, A. Egbert, A. Ostendorf, B. N. Chichkov, 2003, Femtosecond laser-induced two-photon polymerization of inorganic-organic hybrid materials for applications in photonics, Optics letters, Vol.28, No.5, pp. 301~303.
- [18] S. H. Park, T. W. Lim, D. Y. Yang, H. J. Kong, K. S. Kim, K. S. Lee, 2004, Fabrication of Nanoprecision PDMS Replica using Two-photon Photopolymerization and Vacuum Pressure Difference Technique, B. Korean Chem. Soc. (communication), Vol. 25, No.8, pp. 1119~1120.
- [19] 박상후, 임태우, 이상호, 양동열, 공홍진, 이광섭, 2005, 이광자 광중합의 윤곽선 스캐닝법에 의한 마이크로 입체형상 제작, Polym. Korea, Vol. 29, No. 2, pp. 146~150.
- [20] T. W. Lim, S. H. Park, D. Y. Yang, 2005, Contour Offset Algorithm (COA) for Precise Patterning in Two-photon Polymerization, Microelectron. Eng., Vol.77, pp. 382~388.