

## 디지털 3차원 실물복제기 시스템 및 공정기술 개발

김동수, 안영진, 이원희, 최병오(한국기계연구원), 장민호((주)솔루션닉스),  
백영종(성광정기(주)), 최경현(제주대학교 기계공학과)

### Development of Digital 3D Real Object Duplication System and Process Technology

D. S. Kim, Y. J. An, W. H. Lee, B. O. Choi(IT Machinery Research Center, KIMM),  
M. H. Chang(Solutionix Corp.), Y. J. Back(SKEM Co. Ltd.), K. H. Choi(Mech. Eng. Dept., CJU)

#### ABSTRACT

Distal 3D Real Object Duplication System (RODS) consists of 3D Scanner and Solid Freeform Fabrication System (SFFS). It is a device to make three-dimensional objects directly from the drawing or the scanning data. In this research, we developed an office type SFFS based on Three Dimensional Printing Process and a industrial SFFS using Dual Laser. An office type SFFS applied sliding mode control with sliding perturbation observer (SMC/SPO) algorithm for control of this system. And we measured process variables about droplet diameter measurement and powder bed formation etc. through experiments. Also, in order to develop more elaborate and speedy system for large objects than existing SLS process, this study applies a new Selective Multi-Laser Sintering (SMLS) process and 3-axis Dynamic Focusing Scanner for scanning large area instead of the existing  $\theta$  lens. In this process, the temperature has a great influence on sintering of the polymer. Also the laser parameters are considered like that laser beam power, scan speed, scan spacing. Now, this study is in progress to evaluate the effect of experimental parameters on the sintering process.

**Key Words** : RODS (Real Object Duplication System, 실물복제기), 3D Scanner (3차원 스캐너), Solid Freeform Fabrication System (임의형상제작 시스템), MMJ (Multiple Micro Jet, 다중 마이크로젯), MSLS (Multi Selective Laser Sintering, 선택적 다중 레이저 소결), 3-axis Dynamic Focusing Scanner (3축 다이내믹 초점 스캐너)

#### 1. 서론

신제품 개발 과정에서 이루어지는 프로토타입의 빠른 제작 및 수정은 제품 개발기간 단축 및 제품의 시장경쟁력과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 1987년 미국의 3D System사가 처음으로 SLA 제품을 시장에 선보인 이후 평균 18%의 고성장을 거듭하면서, 임의형상제작 (SFF: Solid Freeform Fabrication) 분야의 시장이 급속히 증가하고 있다. 최근에는 3D 캐드 파일을 이용한 임의형상 제작뿐만 아니라 3차원 형상의 물체를 신속하고 정밀하게 스캔 (Scanning), 전송 (Transfer), 복제 (Duplication) 할 수 있는 복합기능의 임의형상제작 시스템에 대한 활발한 연구가 진행 중에 있다. 또한 RP 기술의 발전에 따라 RP 공

정에 적합한 재료 기술, CAD 데이터 생성기술, 공정 기술 및 후처리 기술도 중요한 요소기술로서 연구되고 있다. 임의형상제작 시스템은 제조 공정에 따라 SLA (Stereo Lithographic), SLS (Selective Laser Sintering), LOM (Laminated Object Manufacturing), FDM (Fused Deposition Modeling), LENS (Laser Engineering Net Shaping), 3DP (Three Dimensional Printing) 등으로 나뉘며 시제품의 설계검증 및 기능성 시험, 소량생산 등에 사용되고 있다.

그 중 3DP 공정기술은 80~250um 두께의 파우더 베드(powder bed) 위에 프린터헤드를 통해서 접착액을 분사하는 방식이다. 이 기술은 다수의 프린팅 노즐을 이용하여 고속 제작이 가능하다. 또한 저가의 프린터헤드를 사용함으로써, 고가의 SFF 시장에서

큰 관심을 모으고 있다. 또한 산업용 임의형상 제작 시스템으로 널리 사용되고 있는 SLS 공정을 이용한 폐속조형은 고분자 분말 또는 금속분말, 세라믹 분말 등을 적층한 후 레이저를 조사하여 프로토타입을 만드는 방법으로 정밀도와 정확도가 우수하고 공정 중에 지지대를 사용하지 않는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서는 3D 스캐너, 임의형상제작시스템 및 네트워크 등의 복합기능을 가지고 있는 디지털 3차원 실물복제기를 제작하였다. 오피스용 SFFS의 경우 3DP 공정기술을 채택하였고, 산업용 SFFS는 SLS 공정을 채택하여 각각의 요소기술과 공정기술을 개발하였다. 오피스용 SFF 시스템은 임의형상의 모델을 저가적, 고속 제작이 가능하도록 3개의 프린thead를 사용하여 900개의 노즐을 동시에 제어하였다. 그리고 공정 실험을 통해 기존의 3DP 공정기술 분석하였다. 산업용 SFFS는 대면적의 실물복제가 가능하도록 기존의 SLS 공정에 사용되고 있는 10 렌즈 대신 3축 다이나믹 초점 스캐너 (3-axis Dynamic Focusing scanner)를 사용하여 산업용 SFF 시스템을 제작하였다. 또한 폴리아미드 파우더 (polyamid powder)를 출발원료로 선정하여 CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 소결실험을 통해 시스템의 소결특성을 고찰하였다.

## 2. 로봇시물레이터를 이용한 3D 스캐너

### 2.1 측정자동화 시스템

최근의 광학식 스캐너는 정밀도와 해상도가 매우 높아져 검사공정에 필수적인 장비로 자리 잡고 있다. 본 논문에서는 (주)솔루전닉스의 비접촉식 광학 스캐너인 REXCAN™ 460과 로봇을 이용하여 3차원 실물 자동측정 시스템 (auto-scanning system)을 구축하였다. 본 시스템은 로봇과 스캐너를 비롯한 하드웨어와 이를 제어하고, 자동으로 정렬(alignment)된 3차원 데이터를 획득하는 소프트웨어로 구분된다. 시스템에 사용된 로봇은 SAMMSUNG FARAMAN AW1.0이며, 로봇 전용 컨트롤러인 MMC모드를 사용하여 구동하였다. Table 1과 Table 2는 Raxca 460과 FARMAN AW1.0의 사양을 각각 나타내며, Fig. 1에 스캐너와 로봇으로 구성된 측정자동화 시스템을 나타내었다.

### 2.2 자동 측정 구현

산업체에서 측정하고자 하는 측정대상물의 대부분은 CAD 데이터를 가지고 있다. 자동측정을 위해서는 로봇의 좌표계, 스캐너 좌표계 그리고 측정대상물의 좌표계를 일치 시켜 스캐너에서 측정된 결과가 로봇 좌표계를 기준으로 자동으로 정렬(alignment)되어야 한다. 획득된 CAD 데이터를 이용하여 로봇

시물레이터 안에서 측정 경로(scanning path)를 쉽게 생성하고 실제로봇이 이 경로대로 측정을 할 수 있도록 구현되었다. Fig.2는 자동측정 시스템의 전체적인 흐름을 보여주고 있다. 로봇 시물레이터에서

Table 1. Specification of scanner

Specification	REXCAN 460
측정 영역(mm <sup>2</sup> )	300 × 225
스캔폭장거리(mm)	690
측정 타입	Structured lighted method
텍스처 맵핑	24Bit Grav
측정시간(초)	5
카메라 해상도	1392 × 1040(pixels)
광원	Halogen Lamp
작동온도(℃)	18~30 (℃)
크기(mm <sup>3</sup> )	450 × 347.5 × 80

Table 2. Specification of robot

Specification	FARAMAN AW1.0
반복정밀도(mm)	± 0.1
동작자유도	6
가방중량(kgf)	6
소비전력(KVA)	1.6
중량(kg)	125
컨트롤러	25
최대길이(mm)	1339

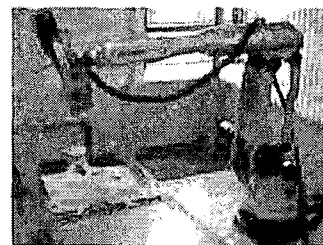


Fig. 1 Robot control and scanning

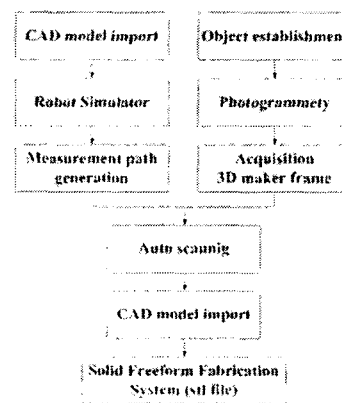


Fig. 2: Overview of the scanning process

CAD 데이터를 읽어 들인 후 스캐너의 측정 볼륨(volume)을 고려하여 적절한 측정 위치들을 잡아 측정 경로를 생성한다. 측정 완료 후 획득된 측정 데이터는 품질검사, 해석(FEM), PR 시스템, 리버스 엔지니어링(reverse engineering) 등 다양한 용도로 활용된다.

### 3. 오피스용 임의형상 제작 시스템

#### 3.1 3DP 공정

오피스용 SFF 시스템은 3DP 공정 기술을 기반으로 개발되었다. 3DP 공정이란, Fig. 3와 같이 파우더 위에 임의형상의 최하위 단면정보를 2차원 프린팅하고, 프린팅 된 단면 위에 다시 일정량의 파우더를 적층한 뒤, 다음 레이어에 해당되는 단면 정보를 프린팅 함으로써 3차원 형상을 제작하는 공정을 말한다. 파우더 베드 위에 프린터 헤드를 통해서 잉크 대신 저점성의 접착제를 분사하게 된다. 그러나 사용되는 접착재료가 프린터 헤드를 통해서 분사되기 위해서는 물에 가까운 극 저점성일 수밖에 없어, 접착된 부분 또한 높은 강도를 기대하기 어렵다. 따라서 제작완료 후 3차원 구조물에 순간접착제를 이용하여 외각부분을 코팅함으로써, 외부 형상을 보다 단단하게 할 수 있다.

#### 3.2 프린터 헤드

본 연구에서는 저 점성의 접착제를 분사할 수 있는 버블젯(Thermal/Bubble jet) 방식의 프린터헤드를 사용하였다. 버블젯 방식의 프린터헤드는 챔버 또는 노즐 내에 히터를 설치하고 절연시킨 다음, 히터에 순간적인(2~5 $\mu$ s) 펄스를 가하여 히터의 온도를 300~310 $^{\circ}$ C 정도로 높여 줌으로써 챔버 또는 노즐 내에 버블을 형성하는 방식이다. 본 연구에서는 HP 45 series의 프린터헤드를 사용하였다. HP45 프린터헤드는 300개의 노즐을 가지고 있어(Table 3 참조), 여러 헤드를 사용할 경우, 고속 프린팅이 가능하다. Fig. 4은 본 연구에 사용된 프린터헤드와 제어장치이다. 제어장치는 INCJET사의 IMAGER를 사용하였으며, 오피스용 SFF 시스템에서 접착액을 프린팅 할 수 있도록 프린터 시스템을 통합 하였다.

#### 3.3 임의형상 제작 실험

개발된 오피스용 SFF 시스템을 이용하여 시제품 제작 실험을 수행하였다. 1차 시제품 제작에서는 레이어 두께를 300 $\mu$ m로하고, 프린팅 분해능은 600 $\times$ 600dpi, Fire pulse length를 2 $\mu$ s로 설정하여 드롭젯의 직경이 약 55 $\mu$ m인 조건에서 실험을 수행하였다. 실험결과 레이어 두께에 비해 상대적으로 파인더의 분사량이 너무 작아 표면에만 정화가 일어나는 것을

Table 3. Spec. of print head system

항목	사항
노즐 직경	40 $\mu$ m
노즐 수	300 cartridge, total 900
카트리지가 수	3 EA (max. 12 EA)
인쇄 면적	0.5 inch/cart., total 1.5 inch
분해능	600 x 600 dpi (42.3 $\mu$ m)
통신포트	Ethernet port, RS-232C port, DIO port, Power port

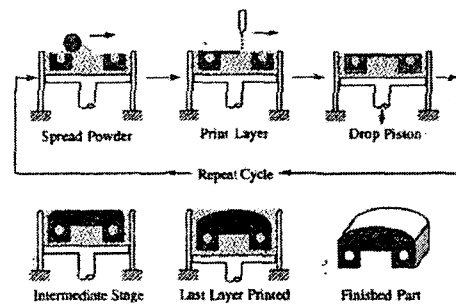


Fig. 3 The sequence of operation in 3DP

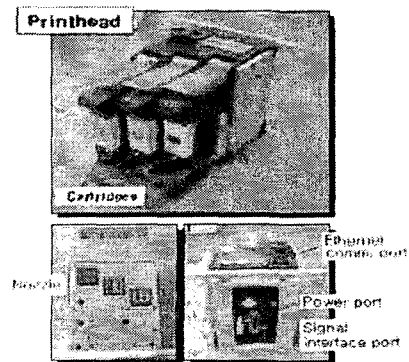


Fig. 4 The Structure of print head system

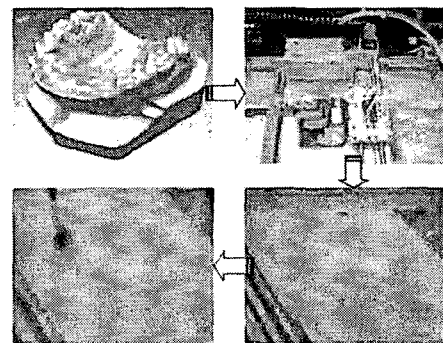


Fig. 5 The fabricated processing of 4th specimen

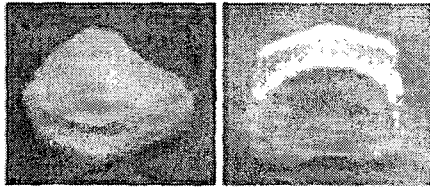


Fig. 6 The 4th specimen

확인하였다. 그 결과 각 레이어 사이에 비점착 영역이 존재하면서 층 분리 현상이 잘 하였다. 레이어 두께가 작으면 작을수록 제품의 정밀도 및 계단현상을 줄일 수 있어, 2차 시제품 제작 실험에서는 레이어 두께를 50um로 설정하고 그 외 조건은 1차 실험과 동일한 조건에서 실험하였다. 첫 번째 레이어에서 프린팅을 하고, 다음 레이어의 파우더 베드풀 생성하고 2차 프린팅을 하는데 까지는 순조롭게 진행 되었으나, 3차 파우더 베드를 생성하는 과정에서 롤러에 의해 Z축으로 가해지는 압력의 영향으로 기 제작된 하부 구조물의 붕괴 현상이 발생하였다. 그리고 레이어 두께를 100um, 드롭렛 직경을 80um, 프린팅 분해능은 동일하게 600x600dpi로 설정하여, 재 실험을 수행하였다. 2차 실험에서 3차원 구조물 제작에는 성공하였으나, 길이 방향으로 약 1.3배 늘어나는 현상이 발생하였다. 이는 프린팅 분해능과 엔코더 펄스가 일치하지 않아 발생한 문제이며, 1, 2차 실험에서 사용된 엔코더 펄스는 463ppi (pulse per inch) 이나, 프린팅 분해능은 600dpi (300 or 600 dpi 선택 가능)로 설정하였다. 3차 시제품 제작 실험에서는 치수 변형을 방지하기 위하여 엔코더 펄스를 300dpi로 낮추고 프린팅 분해능 또한 300dpi로 설정하였다. 그리고 분사량을 최대(100um)로 하였으며, 그 외 조건은 2차 실험과 동일하게 하였다. 실험결과 치수 변형은 없으나, 600dpi에서 300dpi로 낮추므로 인해 상대적으로 분사량이 적어 결합력이 약해졌다. 이는 레이어들간의 층 결합은 가능한 정도였으나, 프린팅 분해능이 낮아지면서 드롭렛들 간의 간격이 넓어 매우 약하게 결합되었다. Fig. 5와 같은 4차 시제품 제작에서는 치아 형상의 모델을 제작해 보았으며, 실험조건은 다음과 같다. 레이어 두께를 100um, 분사량 제어 요소인 Fire pulse length를 5us, 드롭렛의 직경을 100um, 레이어 횟수를 340회, Part size: 70x55x34mm, 프린팅 분해능을 600x600 dpi로 설정하였다. 4차 시제품 제작에서는 엔코더를 교체하여 엔코더 펄스를 630ppi, 프린팅 분해능을 300에서 600dpi로 올리고 동일한 영역 내에 비인티 분사량의 증가로 3차원 치아형상 구조물이 이전 실험보다 많이 단단하게 제작 되었다. 그리고 Fig. 6과 같이 후처리 또한 시제품의 손상 없이 깨끗하게 처리 할 수 있었다. 하지만, 2-3회외 X축 위치제어 오차 발생으로 일부

레이어가 1mm 정도 이탈되는 현상이 발생하였다. X축 제어 정밀도 개선을 위해 엔드의 장력 및 케이블 코리즘 등의 안정화가 추가적으로 요구된다.

#### 4. 산업용 임의형상제작 시스템 개발

##### 4.1 산업용 임의형상제작 시스템

산업용 임의형상제작 시뮬레이터는 Fig. 7과 같이 파우더의 공급 및 이송을 담당하는 기구부, 파우더의 예열을 위한 히팅부, 워크룸의 전소분위기를 형성하기 위한 질소 공급부, 델타레이저를 구현하기 위한 레이저부, SFF 시스템의 모든 장치를 제어하기 위한 제어부 등으로 구성된다. SLS의 공정에서 폴리 아미드 파우더를 사용하여 레이저 소결을 할 경우 파우더의 예열을 위해 150°C 이상의 빌드룸 온도와 184°C정도의 소결온도가 요구된다. 따라서 열에 의한 워크룸의 안정성은 SFF 시스템에서 중요한 공정 변수로, 고려되며 상용 유한요소 해석 프로그램인

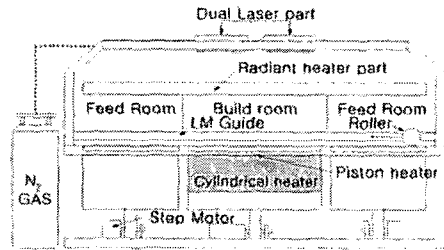


Fig. 7 Schematic diagram of industrial SFF system

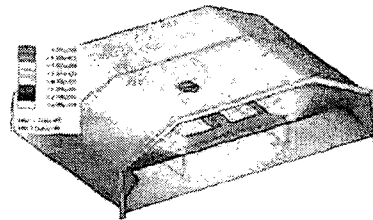


Fig. 8 Temperature distribution of work room

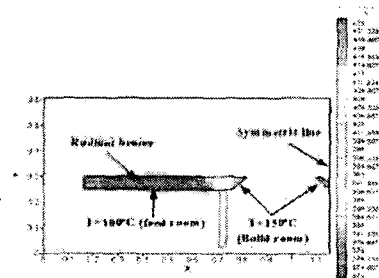


Fig. 9 Effect of temperature distribution near the radiant heater of working room (unit: meter)

ANSYS를 사용하여 Fig. 8과 같이 워크룸의 내부 온도분포를 확인하였다. 파우더의 적층방법으로는 롤러의 역회전을 통해 파우더를 고르게 적층하는 롤러 메카니즘을 적용하였다. SLS 공정을 위한 히터부는 복사열을 이용하여 빌드룸과 피드룸의 파우더를 예열하는 히터 시스템을 선정하였다. SLS 소결공정에서 파우더 표면의 온도는 파우더의 소결과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 파우더의 표면온도를 제어하기 위해 CFD 해석을 통해 넓은 면적에 대해서 적은 오차범위로 파우더를 예열 할 수 있는 판형히터를 선정하였다. 실제 소결 시 빌드룸의 온도는 150°C, 피드룸의 온도는 130°C 정도를 유지해야 하며, 두 부분에서 발생할 수 있는 열유속 (heat flux)이 빌드룸 바닥에 있는 파우더 표면 온도에 어떠한 영향을 미치는지를 상용 CFD 프로그램을 이용하여 고찰하였다. Fig. 9에 빌드룸과 피드룸을 각각 제어했을 경우 발생할 수 있는 열유속에 대한 CFD 해석 결과를 나타내었다. CFD 해석을 통해 파우더의 표면에 최소한의 열유속이 발생하고 있으며, 균일한 열원을 전달할 수 있는 조건을 찾을 수 있었다. 그리고 히터부의 정확한 제어를 위해 PID 제어방법을 적용하여 1°C 이내의 온도제어가 가능하도록 히터부를 제작 하였다. 레이저부의 경우 듀얼레이저 (dual laser) 소결방식을 구현하기 위해 최적의 레이저 헤드 유닛을 설계하였고, 듀얼레이저를 이용하여 500×800×500 (mm<sup>3</sup>, W×D×H) 크기의 시제품을 제작할 수 있도록 레이저부를 3축 다이내믹 초점 렌즈를 이용하여 제작하였다. Fig. 10은 본 연구에 사용된 레이저부의 개략도로 레이저 엔진 (laser engine), 스캐너 (scanner), 빔 익스펜더 (beam expander), 반사거울 (reflection mirror) 등으로 구성되어있다. 레이저 헤드에서 조사되는 레이저 빔의 직경 (1/e<sup>2</sup>)은 1.8mm±0.2mm이므로, 소결을 위한 레이저 빔의 스팟 크기 (spot size)인 0.5mm를 얻기 위해 조사되는 레이저 빔의 직경을 빔 익스펜더를 이용하여 사용하였다.

#### 4.2 폴리아미드 파우더의 소결 변수 실험

CO<sub>2</sub> 레이저의 파장은 10.6μm로 레이저 소결 공정에 사용되는 폴리머 (polymer)는 대부분 C-C 또는 C-O 결합으로 이루어져있으며, 조사된 광의 파장이 10μm 근처인 경우 진동이 급격하게 증가하면서 응용된다. Fig. 11에 계층 제작을 위한 SLS 공정의 전체 흐름을 나타내었다. 먼저 질소 주입을 통해 95% 이상의 질소 분위기를 조성한 후 빌드룸과 피드룸의 파우더 온도를 각각 제어한다. 그 후 파우더의 적층과 CO<sub>2</sub> 레이저 빔의 조사를 반복하여 다층의 임의 형상을 제조하게 된다. 본 연구에서는 SLS의 소결공정 시 중요한 변수들인 CO<sub>2</sub> 레이저의 스캔 간격, 스캔 속도, 레이저 빔 파워, 빌드룸의 온도를 공정변

Table 2 Sintering process variable of SFF system

Variable	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Scan spacing (mm)	0.2-0.4	0.35	0.35	0.35
Scan speed (m/s)	1	0.6	1	1
Laser power (Watts)	14	14	12-16	14
Temperature (°C)	150	150	150	150-170

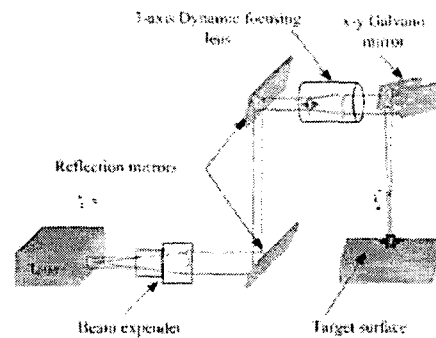


Fig. 10 Schematic diagram of laser part

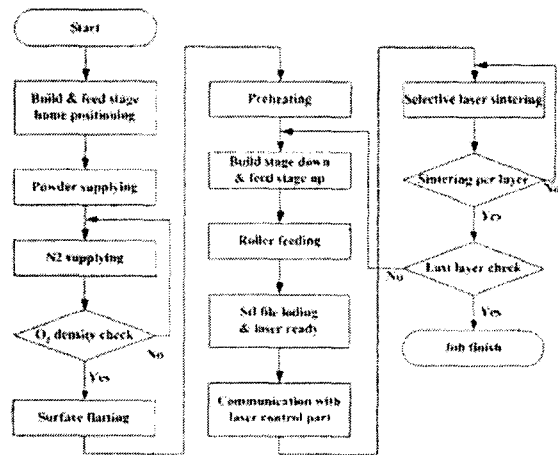


Fig. 11 Block diagram of SFF process

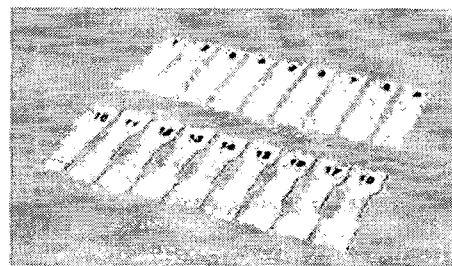


Fig. 12 Test of parameters to sinter polyamide powder

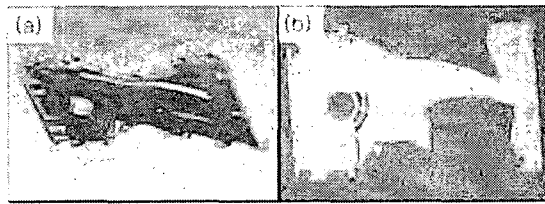


Fig. 13 Duplicated 3D object through stl file

수로 설정하여 산업용 임의형상 제작 시스템에서 폴리머드 최적의 소결 조건을 선정하기 위해 반복 실험을 수행하였다. SLS 공정에서 소결 변수 실험을 위해 사용된 출발원료로 폴리머드 (Average grain size  $58\mu\text{m}$ , Duralform PA & GF, 3D Systems, USA)를 사용하였다. 폴리머드의 소결을 위해 워크룸의 PID 온도 제어, CO<sub>2</sub> 레이저의 스캔 간격, 스캔 속도, 레이저 빔 파워를 변수로 하여 Fig. 12과 같은 동일한 시편 형상에 대해 소결 변수 결정 실험을 수행하였다. Table 4는 소결 변수 실험의 결과 값을 나타내며, 스캔 간격 0.35mm, 스캔 속도 1m/s, 레이저 빔 파워 13 Watts, 빌드룸의 온도 165°C에서 폴리머드의 소결이 이루어 졌다. 본 연구에서는 변수 실험을 통하여 얻은 최적의 값을 이용하여 Fig. 13(a)에서 보여 주는 것과 같이 3차원 스캐너에 의해서 스캐닝 된 임의형상에 대한 stl 파일을 산업용 SFF 시스템으로 전송하여 Fig. 13(b)에서 보여주는 것과 같이 3차원 형상을 제작하였다. 그러나 스캐닝 된 이미지의 메시(mesh) 데이터가 조밀하지 못하였기 때문에 형상의 일부가 정확하게 제작되지 않았다. 따라서 3차원 임의형상에 대한 stl 파일의 정확도를 높이고 임의형상제작 시스템의 정밀도를 높이기 위해서 지속적인 실험이 요구된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 3D 스캐너와 오피스용 SFF 시스템, 산업용 SFF 시스템을 제작하여 각각의 핵심 요소기술을 파악하고 공정기술을 개발하였다.

3DP 공정 기반의 오피스용 SFF 시스템은 구동 펄스 길이에 따른 드롭렛의 직경을 측정하여, 폴리머 및 이송속도 등의 변수에 따라 파우더베드의 표면상태 측정실험을 수행하였다. 또한 임의형상 제작 실험을 수행하여 3차원 구조물을 성공적으로 제작하였다.

CO<sub>2</sub> 레이저를 이용한 산업용 임의형상제작 시스템은 각파트별 해석과 실험을 통하여 시스템의 요소기술을 개발하고 듀얼레이저와 다이아믹 초점렌즈를 이용하여 대면적의 실물복제가 가능한 시스템을 구축하였다. 본 연구를 위해 선정된 출발원료인 폴리머드 파우더의 SLS 소결 실험에서 스캔 간격 0.35mm, 스캔 속도 1m/s, 레이저 파워 13Watts, 빌드

룸 온도 165°C에서 폴리머드를 소결할 수 있었다 또한 3차원 스캐너를 이용해 얻은 stl 데이터로부터 임의 형상을 제작할 수 있는 네트워크 기반의 3차원 실물복제 시스템을 도입하여 실물복제를 하였다.

## 후기

본 연구는 산업자원부의 “디지털 3차원 실물복제기 개발”과제 지원으로 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사함을 드립니다.

## 참고문헌

1. Y.J.Lee “An analysis Inverse Kinematics for Real Time Operation of Industrial Robot”, Proceeding of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp.104-111, 1998, 2,
2. S.H.Han, M.Y.Lee “Development of a 3D Off-line Graphic Simulator for Industrial Robot”, Proceeding of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp.19-25, 2001, 6,
3. H.B.Shin, D.H.Jung, S.H.Han, “Development of Off-line Simulator for Robots with Auto-teaching”, Proceeding of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp.319-326,2003,
4. Terry J. Wohlers, “Wohlers Report 2003”, WOHLERS Associates, pp. 13-16, 2003
5. Jairo Terra, M., Elmaili, H. and Olgac, N., “Sliding Mode Control With Sliding Perturbation Observer”, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 119, pp. 657-665, 1997.
6. James, C.N., “Selective Laser Sintering: A Definition of the process and an Empirical Sintering Model”, PhD Thesis, The University of Texas at Austin, May 1993
7. John, D.W. and Carl, R.D., “Advances in Modeling the Effects of Selected Parameters on the SLS process”, Rapid Prototyping Journal, Vol.4, pp.90-100, 1998
8. Benda, J., “Temperatruce Controlled Selective Laser Sintering”, Proceeding of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, TX, Vol.5, pp.277-284, 1994
9. Badrinarayan, B., “Study of the Selective Laser Sintering of Metal-polymer powders”, PhD Thesis, The University of Texas at Austin, December, 1995