



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2013년 8월
박사학위논문

SLS 시스템의 최적 설계 및 소결 공정
특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

안 영 진

SLS 시스템의 최적 설계 및 소결 공정 특성에 관한 연구

A Study on the Optimum Design and Sintering Process
Characteristics of SLS System

2013년 8월 23일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

안 영 진

SLS 시스템의 최적 설계 및 소결 공정 특성에 관한 연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함.

2013년 4 월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

안 영 진

안영진의 박사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 심재기 (인)

위원 조선대학교 교수 윤성운 (인)

위원 전주대학교 교수 김홍건 (인)

위원 조선어공대학교 교수 이종인 (인)

위원 조선대학교 교수 김재열 (인)

2013년 6월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	vi
ABSTRACT	ix
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구동향	3
제 3 절 연구목적 및 방법	5
제 2 장 배경이론	7
제 1 절 레이저 소결법	7
1. SLS(Selective Laser Sintering)	7
2. SLA(Stereo Lithography Apparatus)	7
3. LENS(Laser Engineering Net Shaping)	8
4. SGC(Solid Ground Curing)	8
제 2 절 고분자의 특성	11
1. 고분자 특성	11
2. 고분자의 레이저 소결 특성	13
제 3 절 레이저 스캐너	14
제 3 장 실험장치 및 방법	17
제 1 절 SLS 시스템의 최적 설계	17

2. 분말 적층부	21
3. 질소 공급부	26
4. 소결 분위기 온도 제어부	30
5. 레이저 제어부	34
6. 시스템 제어부	36
제 2 절 SLS 시스템의 제어 방법	37
1. 주사경로 생성 및 레이저 궤적 제어	37
2. SLS 시스템 제어	43
제 3 절 소결 공정 설계	48
1. PA-12 분말의 소결 특성 분석	48
2. 소결 공정 설계 및 실험 변수 선정	51
제 4 장 결과 및 고찰	56
제 1 절 시스템의 제어 결과 및 고찰	56
1. 적층 표면 특성	56
2. 소결 분위기 온도 제어 특성	59
3. 레이저 및 광학계 특성	62
제 2 절 소결 공정 특성	64
1. 소결 공정 변수 특성	64
2. 레이저 On/Off 딜레이에 따른 소결 특성	66
3. 적층 두께에 따른 치수정밀도	67
4. 최적 조건에 따른 치수정밀도 검증	69
제 3 절 소결 시편 분석 및 특성 고찰	71
1. 소결 밀도	71
2. 소결표면 특성 및 미세구조 관찰	72

3. 화학적 특성 분석	83
4. 열 특성 분석	90
제 5 장 결 론	95
참 고 문 헌	96

LIST OF TABLES

Table 2.1 Melting point of various polymer	13
Table 3.1 Specification of SLS system	19
Table 3.2 Specification of stage control part	22
Table 3.3 Specification of roller control part	23
Table 3.4 Specification of O ₂ sensor	27
Table 3.5 Specification of Heater control part	31
Table 3.6 Specification of Laser part	35
Table 3.7 Properties of PA-12	52
Table 3.8 Sintering variable test conditions	53
Table 4.1 Thermal characteristic of polyamide powder	59
Table 4.2 Value of Polynomial fit when unused laser unit	62
Table 4.3 Analysis of Polynomial fit when installation of laser unit	62
Table 4.4 Optimized Sintering condition of SLS system	64
Table 4.5 Conditions for sintering precision improvement	66
Table 4.6 Sintering conditions for z-axis precision evaluation	67
Table 4.7 Results of precision measurement	68
Table 4.8 Optimized sintering conditions of SLS system	69
Table 4.9 The results of dimensions measurements	70
Table 4.10 The results of density measurement	71
Table 4.11 The results of flat direction surface roughness measurement	76
Table 4.12 The results of hight direction surface roughness measurement	76
Table 4.13 The results of flat direction porosity	79
Table 4.14 The results of hight direction porosity	79
Table 4.15 The analysis results of EDS line spectrum	84
Table 4.16 The analysis results of EDS spectrum	84
Table 4.17 XRD Measurement conditions	88
Table 4.18 XRD peak list of sintered sample	88
Table 4.19 Results of Coefficient of expansion	91

Table 4.20 Results of Coefficient of expansion by temperature91
Table 4.21 Results of Thermal conductivity by temperature93

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Selective Laser Sintering	9
Fig. 2.2 Stereo Lithography Apparatus	9
Fig. 2.3 Laser Engineering Net Shaping	10
Fig. 2.4 Solid Ground Curing	10
Fig. 2.5 Effective beam spot size	16
Fig. 2.6 Schematic diagram of f-theta lens	17
Fig. 2.7 Schematic diagram of 3-axis dynamic scanner	17
Fig. 3.1 Developed SLS system and Schematic diagram	20
Fig. 3.2 Build & Feed stage control mechanism	24
Fig. 3.3 Roller moving & rotation mechanism	25
Fig. 3.4 N ₂ supply unit	27
Fig. 3.5 O ₂ sensor part and sensor signal	28
Fig. 3.6 Air curtain for powder adhesion prevention at scanner system	29
Fig. 3.7 Temperature control of SLS	32
Fig. 3.8 Heater control of SLS system	33
Fig. 3.9 Schematic diagram of laser part	35
Fig. 3.10 Laser part of SLS system	36
Fig. 3.11 Image field correction of galvanometer scanner	39
Fig. 3.12 Scan path generation for scan speed improvement	39
Fig. 3.13 Algorithm for scan path gemination & laser scan control	40
Fig. 3.14 Generated scanning path	41
Fig. 3.15 Generated laser scan points by STL file	41
Fig. 3.16 Laser scan S/W and control parameters	42
Fig. 3.17 Selective laser sintering Process	44
Fig. 3.18 Selective laser sintering schedule	44
Fig. 3.19 Build room temperature control by laminating process	45
Fig. 3.20 Message exchange of System control & Laser control S/W	45

Fig. 3.21 Information structure chart of SLS system controller	46
Fig. 3.22 System control S/W of SLS system	47
Fig. 3.23 Chemical structure of PA-12	49
Fig. 3.24 Grain size distribution of PA-12	49
Fig. 3.25 SEM Image of PA-12 powder	50
Fig. 3.26 Selective laser sintering process	54
Fig. 3.27 Pre-test of laser scan speed	55
Fig. 4.1 Speed response characteristic of AC Servo motor by gain value	57
Fig. 4.2 Powder surface by powder supply & roller speed	58
Fig. 4.3 Schismatic diagram of heaters & sensors	60
Fig. 4.4 Performance curve of Radiation heater	60
Fig. 4.5 X bar R Chart of Radiation heater(30min~50min)	61
Fig. 4.6 Laser beam power meter	63
Fig. 4.7 Performance curve of laser unit	63
Fig. 4.8 Results of sintering variable	65
Fig. 4.9 Over sintering phenomenon by laser On/Off delay time	66
Fig. 4.10 3D model for z-axis precision evaluation by laminating thickness	67
Fig. 4.11 Results of precision measurement	68
Fig. 4.12 Fabricated scale bar and dimensions	70
Fig. 4.13 FE-SEM image of flat direction surface	74
Fig. 4.14 FE-SEM image of hight direction surface	75
Fig. 4.15 Results of surface roughness	77
Fig. 4.16 Optical microscope image of Flat direction	78
Fig. 4.17 Optical microscope image of Hight direction	78
Fig. 4.18 Optical microscope image for porosity measurement	80
Fig. 4.19 FE-SEM image of flat direction porosity	81
Fig. 4.20 FE-SEM image of hight direction porosity	82
Fig. 4.21 EDS Spectrum for elements analysis	85
Fig. 4.22 Measurement result of EDS line spectrum	85
Fig. 4.23 Measurement results of EDS point spectrum	86

Fig. 4.24 EDS images of elements dispersion	87
Fig. 4.25 Results of XRD analysis	89
Fig. 4.26 Analysis result of coefficient of expansion	92
Fig. 4.27 Analysis result of thermal conductivity	94

Abstract

A Study on the Optimum Design and Sintering Process Characteristics of SLS System

By Young-Jin An

Advisor : Prof. Jae-Yeol Kim, Ph.D

Dept. of Advanced Parts & Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, in order rapid growth of high-tech and customer diverse need, rapid manufacturing of product or modification make accessory effect such as a competitive price, the reduction of the new product development time, etc. Due to SFF(Solid Freeform Fabrication) system of using various process and materials, demand is being continuously increase. For this reason, the multi-functional SFF systems are actively being studied into the real manufacturing process, which are used not only for fabricating a solid freeform 3D CAD files but also for scanning a 3D object rapidly and precisely.

Especially, A SFF system using selective laser sintering (SLS) is currently recognized as a leading process and SLS extends the application to machinery and automobiles due to the various materials employed.

SLS process creates 3D object, layer-by-layer, using powder materials with heat generated by a CO₂ laser. With SLS process, prototypes have been produced with various uses of thermoplastic, metal composite and ceramic composite powder. SLS system is consist of various elemental technique such as the powder laminate for control of build room and feed room position, control of roller velocity, powder

sintering for control of temperature, scan path generation etc.

SLS system is that the surface quality of prototypes and the processing time are significantly affected by several parameters such as laser power, laser beam size, heat temperature and laminate thickness. In order to develop a more elaborate and rapid system for fabricating compared to existing SLS, this study developments a SLS system and sintering process. It contains a 3-axis dynamic focusing scanner system for maintaining uniform laser beam size everywhere instead of the $f\theta$ lens used in commercial SLS.

In this study, experiments were performed to evaluate the effect of various laser scan parameters and fabrication parameters on sintering process and to fabricate the various 3D objects using a PA-12 starting material. The results of optimized process are able to reduce process time and improve fabrication accuracy and efficiency. Also, this study suggest a scan path generation method to fabricate more 3D objects quickly and precisely. The results of experiment showed excellent sintering capabilities through the proposed methods. This study also evaluated the characteristics of fabricated sample by optimized sintering conditions such as the sintering density, the surface roughness, microstructure, chemical and thermal properties, etc.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

임의형상제작 시스템(SFFS : Solid Freeform Fabrication System)은 다품종 소량생산 환경에 적합한 제품의 제작방식으로 수 시간 내에 3차원 형상을 직접 제작·검증 할 수 있는 장점을 가지고 있으며, CNC선반, 머시닝센터 등을 이용하여 가공이 불가능한 복잡한 3차원 형상까지 제작이 가능하여 임의형상제작 제작기술은 전 세계적으로 큰 주목을 받고 있다.⁽¹⁾

특히, 산업분야에 있어 신제품 개발과정에서 이루어지는 시제품(Prototype)의 빠른 제작 및 검증은 제품 개발기간 단축, 제조 원가절감 및 시장경쟁력 확보 등과 밀접한 관계가 있어 산업현장에서 그 수요가 지속적으로 증가하고 있다.

3차원 임의형상제작 기술은 산업, 영화, 게임, 교육 및 광고 등 다양한 분야에 적용되고 있으며, 최근에는 글로벌 생산 체제가 확산되면서 서로 떨어진 지역 간 협업(Collaboration)이 중요한 이슈로 부각되고 있어 향후 임의형상제작 기술의 잠재 수요는 매우 크다고 할 수 있다.

국내에는 1991년 미쯔비시 상사의 SOUP장비가 삼성전자에 처음 도입되었으나, 그 당시 임의형상제작 시스템은 상당히 고가였으며, 3차원 캐드(3D CAD)의 보급이 활성화 되지 못했기 때문에 시제품 제작 분야에서 많은 관심을 받았음에도 불구하고 널리 활용되지 못했다.

2000년대 이후 현대자동차, 대우자동차 등 자동차 관련 대기업과 국책 연구소를 중심으로 임의형상제작 시스템들이 보급되기 시작했으며, 최근 국내·외에 임의형상제작 시스템의 시장이 지속적으로 성장함에 따라 국내에서도 대학 및 국책연구소를 중심으로 임의형상제작 기술 및 다양한 소재의 연구가 활발히 진행 중이다.

임의형상제작 기술은 레이저(Laser), 프린팅(Printing) 등을 이용한 접합기술과 소재, 기구 및 온도 제어, CAD/CAM 등의 다양한 요소기술이 복합된 융합 가공기술로서 3D CAD 또는 3D 스캔 데이터를 일정한 두께로 슬라이싱(Slicing) 하여 얻은 2D 단면들을 한층씩 적층하여 원하는 3차원 형상을 제작하는 방법이다.

임의형상제작 시스템은 제조공정에 따라 SLS (Selective Laser Sintering), SLA (Stereo Lithographic Apparatus), FDM (Fused Deposition Modeling) LOM (Laminated Object Manufacturing), MJM(Multi-jet Modeling), DLS(Direct Laser Sintering), LENS(Laser Engineering Net Shaping), SGC(Solid Ground Curing), 3DP (Three Dimensional Printing) 등 다양한 기술이 개발되어 있으며, 기존 절삭가공 방법과 달리 적층 공정을 사용함으로써 형상이 복잡한 제품의 제작이 가능하여 전자제품, 휴대폰, 항공부품, 기계부품, 신발금형, 의공학, 건축, 선박 모형실험, 조형품, 건축 모형 제작 등 전 산업분야에서 광범위하게 이용되고 있다.

이 중 SLS 방법은 고분자 분말(Polymer), 금속분말(Metal powder), 고분자가 코팅된 세라믹 분말(Polymer coated ceramics powder) 등의 다양한 소재를 일정한 높이로 적층한 후 CO₂ 레이저를 주사하여 소결하는 방법으로 타 공정에 비해 강도 및 경도가 우수하고 고온에서 사용 가능한 기능성 부품을 제작할 수 있는 특징을 가지고 있어 주로 자동차, 항공, 금형, 기계 등 다양한 산업분야에 적용되고 있다.

하지만 타 공정에 비해 SLS 공정은 레이저를 사용함으로써 발생하는 낮은 치수 정밀도와 고온 공정에 따른 긴 제작 시간 및 열변형 등 다양한 문제점을 안고 있다.

본 논문에서는 SLS공정에서 3차원 형상의 정밀도를 높이기 위해 기존 SLS공정에서 사용하고 있는 $f\theta$ 렌즈 대신에 3축 다이내믹 포커싱 스캐너(3-axis dynamic focusing scanner)를 적용한 SLS 시스템을 개발하고, 폴리머 분말 적층을 위한 스테이지 위치 제어 및 적층 롤러의 속도제어, 출발원료의 소결(Sintering)을 위한 온도 및 질소 분위기 제어, 레이저의 궤적 생성 및 제어 등을 위한 다양한 제어 요소기술에 대해 연구하였다.

또한 PA-12 분말(Polyamide-12 powder)을 출발원료로 선정하여 소결온도, 적층높이, 레이저 파워, 주사 속도(Scan speed), 주사 간격(Scan space) 등 다양한 소결변수 실험과 제작 시간 단축 등 소결 성능 향상을 위한 실험을 수행하여 최적 공정 조건을 도출하고, 소결 시편의 밀도, 미세구조관찰, 화학적 특성 및 열 특성 등을 고찰하였다.

제 2 절 연구동향

임의형상제작 시스템은 미국, 일본, 이스라엘 등 선진국을 중심으로 1980년대부터 개발되기 시작하였으며, 최근 임의형상제작시스템의 성장 추세에 발맞추어 다양한 형태의 장비가 개발되어 판매되고 있다.^(1~5)

현재 전 세계적으로는 미국에서 가장 활발한 연구가 이뤄지고 있으며, 특히 임의형상 제작 시스템을 최초로 상용화 한 회사인 3D systems를 비롯하여 Stratasys 등 임의형상 제작 시스템을 선도하는 기업들을 보유하고 있어 생산과 판매에 있어서도 가장 주도적인 역할을 하고 있다.⁽¹⁾

일본의 경우 최근 임의형상제작 시스템 업계에서 두드러진 발전을 보이고 있으며, Autostrade, NTT Data CMET, Meiko, Kira 등의 제조사를 중심으로 현재 세계에서 미국 다음으로 2번째로 높은 누적 판매량을 기록하고 있다. 그 외에도 유럽 각국과 이스라엘 등이 독창성 있는 임의형상제작 시스템을 개발하여 세계시장에서 경쟁하고 있다.⁽¹⁾

전 세계적인 임의형상 제작 시스템의 연구개발 추세는 시제품이나 금형 또는 각종 산업 분야에서 정밀한 부품의 대체 사용이 가능한 Work-modeler와 영화, 광고, 게임, 교육, 생활용품 등에 필요한 임의형상 제작을 위해 디자인에 초점을 맞춘 Concept-modeler로 구분되어 사용목적에 따라 최적화 된 각각의 새로운 공정 방식을 연구하고 이에 대한 제품개발이 진행되고 있다.^(1~5, 18)

현재 Work-modeler로 세계 시장에서 가장 많이 판매되고 있는 제품은 SLS와 SLA 등의 공정을 사용하는 제품으로 미국의 3D systems, 독일의 EOS INT 등 대표적인 회사가 있으며, Concept-modeler는 3DP 방식을 사용하는 미국의 Z-corp사나 Poly-jet 방식을 사용하는 이스라엘의 Objet사 등이 다양한 제품을 생산하고 있다.⁽¹⁾

최근에는 3DP 방식을 사용하고 있는 제품의 경우 디자인, 설계 외에도 인공뼈 제작 등 바이오 산업분야에서도 그 가능성을 검증받고 있다.^(1, 44)

국내에서는 경질스티로폼을 사용하여 다양한 형상을 조형할 수 있는 VLM (Variable Lamination Manufacturing) 장비가 KAIST 양동열 교수팀과 (주)메닉스에서 개발되어 현재 교육용과 건축, 산업디자인, 문화제 복원 등에 사용되고 있다. 또한 벤처 기업인 인스텍 (InssTek)에서 레이저 클래딩을 이용한 금속적층 RP장비가 개발되어

해의 수입 장비와 함께 소규모 시장을 형성하고 있다.⁽¹⁾

국내 산업분야에서 SFF 시스템의 경우 아직까지는 선진국 같은 대형시장을 형성하지 못하고 소규모 시장 형성단계에 머무르고 있다. 하지만 임의형상제작 시스템에 대한 관심은 현저히 증가되고 있으며, 이 분야에 대한 연구개발 및 제품화 추진이 지속적으로 추진되고 있다.⁽¹⁾

SLS 공정은 3차원 형상을 높이 방향으로 일정한 간격으로 슬라이싱(Slicing) 하여 얻어진 2차원 단면에 레이저 주사경로를 생성하고 CO₂ 레이저를 선택적으로 주사(Scan)하여 소결(Sintering)하는 방법으로 각각의 단면을 한 층씩 적층하여 3차원 형상을 제작하는 기술로 1986년 미국의 텍사스 오스틴 대학의 대학원생 Carl Deckhard에 의해 처음 연구되었으며⁽⁷⁾, 미국의 3D Systems, 독일의 EOS INT 등과 같은 기업에서 제품화하여 판매되고 있다.^(1, 34)

처음 SLS 공정이 개발 될 당시에는 폴리머(Polymer) 분말만을 사용하여 임의형상 제작이 가능하였으나, 이후 폴리머가 코팅된 메탈 및 세라믹 분말 등과 같은 다양한 소재 기술이 개발됨에 따라 자동차산업, 세라믹산업, 금형산업 등에 활용되고 있다.^(1, 34, 23~25)

SLS 공정의 연구 분야는 크게 폴리머, 메탈 및 세라믹 분말 등의 원료 개발과 치수 정밀도 향상 및 고속 제작 등을 위한 공정 기술 개발로 구분되며, 최근에는 다양한 재료를 이용하기 위한 공정연구와 치수정밀도 향상 연구가 주로 수행되고 있다.^(1, 19, 23~28, 33, 38)

국내에서는 2005년 이후 한국기계연구원을 중심으로 고가의 PA-11, PA-12 폴리머 대신 PA-6 등 저가의 폴리머를 원료개발과 메탈에 폴리머를 코팅하는 기술 등이 연구되었고, 대면적 주사가 가능한 듀얼레이저(Dual laser)를 이용한 SLS 시스템의 공정연구, 디지털미러시스템(Digital mirror system)을 적용한 치수정밀도 향상 연구 등이 수행되었다.^(26~28)

제 3 절 연구목적 및 방법

SLS 공정은 타 공정에 비해 고분자 분말, 금속분말, 세라믹 분말 등 다양한 소재의 사용이 가능하고 우수한 기계적 성질 및 고온 특성을 가지고 있어 광범위한 산업 분야에 적용되고 있다.

하지만 SLS 공정은 출발 원료로 미세 분말을 사용하여 일정 높이로 적층하고 고온에서 레이저를 사용하여 분말을 용융시킴으로써 낮은 치수 정밀도를 갖게 되고, 고온 공정에 따른 긴 제작 시간 및 열 변형 등 다양한 문제점을 안고 있다.

본 논문에서는 SLS 공정의 이러한 문제점들을 해결하기 위해 SLS 시스템의 중요한 요소기술인 분말적층 높이 제어, 소결 분위기 제어, 소결 온도 제어, 레이저 및 스캐너 제어 등 각각의 제어 요소 기술들에 대해 연구하였다. 또한 치수정밀도 및 제작 시간 등을 단축시키기 위해 다양한 방법들을 제안 하고 소결변수 실험 등을 통해 최적 소결 공정을 도출하였고, 소결 시편의 밀도, 미세구조관찰, 화학적 특성 및 열 특성 등을 고찰 하였다.

SLS 공정에서 제작된 3차원 형상의 치수 정밀도에 영향을 미치는 변수는 여러 가지가 있지만, 그중에서 x-y 평면의 치수정밀도는 레이저 빔의 사이즈와 밀접한 관계가 있다.

따라서 SLS 공정을 위한 광학계 설계 시 레이저 빔의 사이즈는 소결 평면 어디에서나 항상 균일하게 유지 되어야 한다.

하지만 기존 SLS 공정에서 레이저 빔의 포커싱(Focusing)을 위해 사용되고 있는 $f\theta$ 렌즈는 광학계의 특성상 왜곡수차(Distortion)를 가지고 있어 레이저 주사 면적이 커질 수록 레이저 빔의 사이즈가 커지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존에 사용되고 있는 $f\theta$ 렌즈 대신에 레이저 빔의 주사 시 직선 이송을 하는 대물렌즈를 적용한 다이내믹 포커싱 스캐너를 사용하여 레이저가 주사되는 모든 단면에서 레이저 빔의 사이즈를 일정하게 유지할 수 있도록 하여 레이저 소결에 따른 치수정밀도를 향상시킬 수 있도록 하였다.

또한 z축 스테이지 제어를 통해 $2.5\mu\text{m}$ 단위로 적층 높이를 정밀하게 제어 할 수 있도록 하였고, 롤러의 수평이송과 롤러 진행 방향의 역방향으로 롤러를 회전할 수 있도록 하여 적층 분말의 표면 조도를 최적화 하여 적층 두께에 따른 제작 오차를 최소화 할 수 있도록 하였다.

소결 온도 및 후처리 과정에서의 열변형 방지를 위해 판형 복사 히터와 실리콘 히터를

적용하여 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내로 온도를 제어 하였고, 레이저 소결 과정 중 산화를 방지하기 위해 95% 이상의 질소 가스 분위기를 조성할 수 있도록 하였다.

최적 소결 공정을 도출하기 위한 방법으로는 PA-12 분말을 출발원료로 선정하여 소결 온도, 레이저 파워, 주사 속도, 주사간격, 레이저 딜레이 시간 등을 변수로 하여 실험하였으며, 기존에 사용되고 있는 레이저 주사생성경로 대신 영역분할법을 적용하여 주사경로를 재생성함으로써 불필요한 레이저 딜레이 시간 및 점프 요소를 제거하여 소결 속도 향상시킬 수 있도록 하였다.

소결 시편의 고찰 방법으로는 기계적 특성과 밀접한 관계가 있는 치밀화 정도 및 표면 조도를 분석하였고, 미세구조를 통해 소결 표면 특성, 기공률, 소결 정도 등을 관찰 하였다. 또한 소결에 따른 화학적 변화를 관찰하기 위해 원소 검출 및 화학 구조를 분석 하였고, 열팽창에 따른 치수 변화와 열전달 능력 등 열적 특성을 고찰 하였다.

제 2 장 배경이론

제 1 절 레이저 소결법

레이저를 이용한 대표적인 임의형상제작 방법으로는 SLS(Selective Laser Sintering), SLA(Stereo Lithography Apparatus), DLS(Direct Laser Sintering), LENS(Laser Engineering Net Shaping) 등이 있으며, 레이저 소결 공정은 폴리머, 금속, 세라믹 분말 및 광 경화성수지 등을 레이저를 선택적으로 주사하여 한 층씩 적층함으로써 임의형상을 제작하는 방법이다.

1. SLS(Selective Laser Sintering)

Fig. 2.1 은 SLS 공정의 개념을 나타내며, SLS는 균질한 크기의 폴리머, 금속, 세라믹 등 고체분말을 균일하게 도포한 후 제품 단면의 형상대로 CO₂ 레이저를 주사하여 한 층씩 고체 분말을 용융 결합시켜 3차원형상을 제작하는 공정이다.

이 때 레이저의 파워, 주사속도 및 방법 등에 따라 제품의 정밀도가 결정되며, 사용하는 분말의 사이즈(Grain size) 및 용융 정도가 표면 조도에 밀접한 관계를 가지게 된다.

SLS 공정으로 제작된 제품은 정밀도가 우수하고, 높은 강도 및 경도 특성을 가지고 있어 특히 자동차산업, 신발산업, 금형산업 등에 널리 활용되고 있다.

2. SLA(Stereo Lithography Apparatus)

SLA 공정은 Fig. 2.2과 같이 액체상태의 광 경화성수지에 레이저광을 선택적으로 주사하여 한 층씩 적층해 나가는 방법이다.

SLA 공정은 평판 형태의 받침대가 들어있는 용기 안에 광 경화성 수지를 채우고 받침대를 하강시켜 액체상태의 광경화성수지로 얇은 층을 만들고 레이저 광선을 주사해 제품의 단면을 제작한 후 다시 받침대를 하강시켜 광경화성 수지로 얇은 층을 만들고 레이저를 주사하는 방법을 반복함으로써 3차원 형상의 시제품을 제작하는 방법이다.

이때 적층이 끝난 제품은 완전 경화된 상태가 아니어서, 가열로에 넣어 일정 시간 동안 경화시키게 되며 이 과정에서 광경화성 수지의 특성상 휨이나 비틀림 등이 발생

하여 제품의 치수정밀도가 떨어지는 단점을 가지고 있으나, 대면적 및 비교적 높은 강도의 제품을 제작할 수 있는 장점을 가지고 있어 자동차 등 산업 분야에 널리 활용되고 있다.

3. LENS(Laser Engineering Net Shaping)

직접 용융증착공정은 Fig. 2.3과 고출력 Nd:YAG 레이저를 이용하여 금속 분말을 용융시켜 적층시키는 방식으로 미국 Optomec Design사에 의해서 1997년 상용화 되었다.

LENS 공정은 SLS, SLA 등과 유사한 방법으로 2차원 단면을 CAD 소프트웨어를 이용해 일정한 패턴을 생성하고 고출력 Nd:YAG 레이저가 패턴을 따라 금속 분말을 용융하여 3차원 형상을 제작하는 공정이다.

LENS의 경우 고출력 Nd:YAG 레이저를 사용함으로써 SLS, SLA 등의 공정에서 제작이 어려운 티타늄과 스테인리스 스틸, 알루미늄 등의 다양한 금속 및 합금을 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다.

특히 LENS 공정은 타 공정에 비해 열변형이 작아 높은 치수정밀도를 가지고 있어 자동차 부품, 금형, 항공기 부품 및 군용 부품 등의 시작품 개발 및 유지 보수용으로 많이 활용되고 있다.

4. SGC(Solid Ground Curing)

SGC 공정은 Fig. 2.4와 같이 UV 광선이 투과하여 경화시킬 평면에 포토마스크(Photomask)를 만들어 광경화성 수지 위로 이송시킨 후, 포토마스크위에 UV 광선을 주사하여 마스크(Mask)를 통과한 영역만 경화시켜 단면의 형상을 제작하는 방법이다.

이때 UV 광선이 주사되지 않은 수지는 흡입하여 제거하고 그 부분은 왁스(Wax)를 채워 경화시키게 되고, 이 왁스는 일종의 받침구조 역할을 하게 된다.

경화가 되면 밀링 공정을 이용하여 원하는 두께를 가지도록 윗면을 가공하고, 밀링 가공이 끝나면 다시 광경화성 수지를 깔고, 다음 단면의 형상대로 포토마스크를 만든 다음 같은 공정을 반복함으로써 3차원의 형상을 만들어 내는 방법이다.

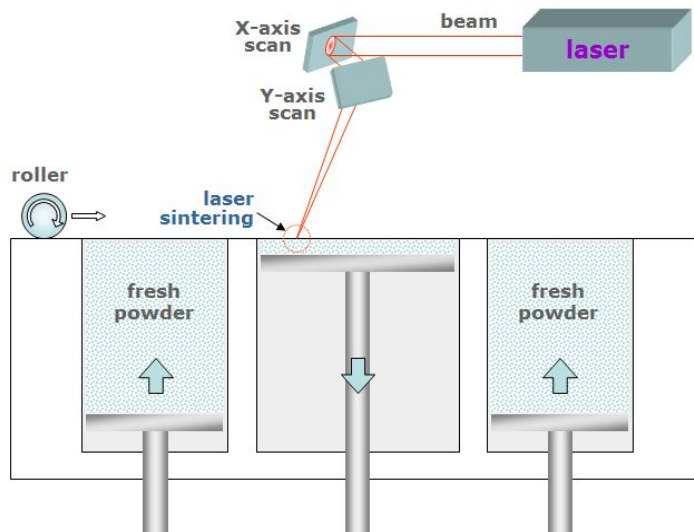


Fig. 2.1 Selective Laser Sintering

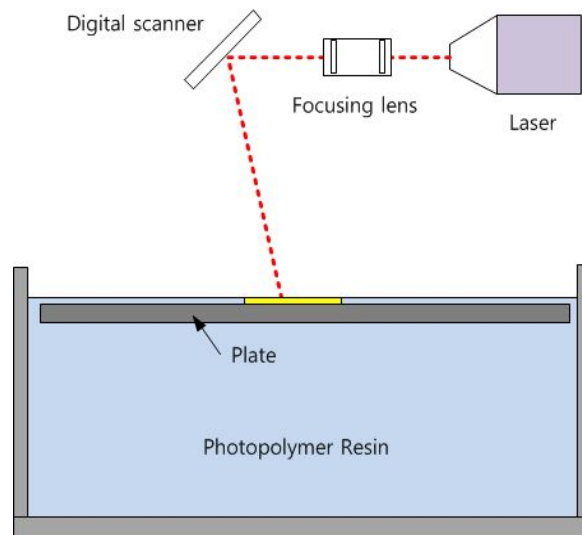


Fig. 2.2 Stereo Lithography Apparatus

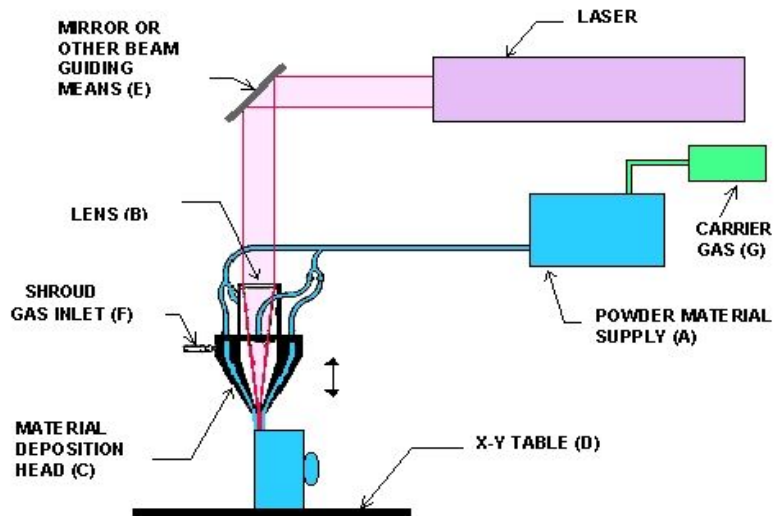


Fig. 2.3 Laser Engineering Net Shaping

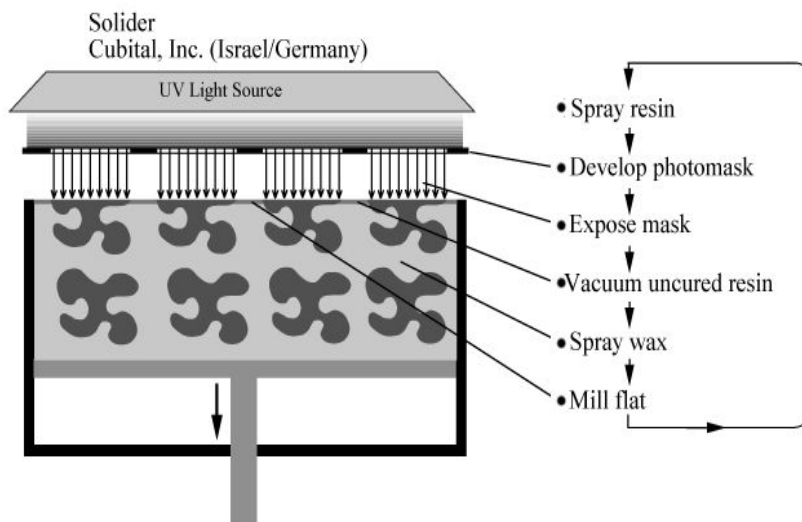


Fig. 2.4 Solid Ground Curing

제 2 절 고분자의 특성

1. 고분자 특성

고분자(Polymer)는 그리스어인 poly(즉 “많다”는 의미)와 mer(“부분”이라는 의미)에서 따온 것이다. 고분자는 단량체라 불리는 저분자들로부터 합성이라는 공정을 통하여 제조되며, 블렌딩(Blending) 기술이나 복합체 제조 기술들을 응용하여 높은 물성을 보이는 소재를 제조할 수 있기 때문에 최근 경제적인 측면과 쉬운 가공성으로 금속과 합금의 사용량을 초과하고 있는 추세이다.

이러한 고분자의 가장 큰 특징은 분자량이 높다는 데에 있으며, 일반적으로 분자량이 10,000이상인 물질을 고분자라 칭하며, 이러한 고분자량으로 인해 상이한 물성을 보인다. 또한, 고분자의 가공에 있어서 유리전이온도와 용융온도와 같은 열적 성질은 중요한 변수로 작용할 수 있다.

1.1 유리전이 온도

일반적으로 결정성고분자는 결정영역과 비결정영역을 모두 갖고 있으며, 비결정 영역으로만 이루어진 무정형고분자는 가열하면 분자들의 운동에너지는 증가하게 된다.

그러나 고분자가 유리같은 특성을 가지는 동안에는 분자의 움직임이 좁은 범위에서 진동과 회전 운동으로 제한되어, 온도를 더 올리면 물성에 결정적인 변화가 일어나게 된다. 이와 같이 고분자는 유리 같은 단단한 특성을 잃게 되는 시점에 이르고, 고무와 같이 무른 성질을 나타나게 되는 현상이 일어나는 온도를 유리전이온도(Glass transition temperature)라고 한다. 이러한 유리전이온도는 고분자의 물성과 가공에 관련된 가장 기본적인 특성 중의 하나이다.

1.2 결정성

고분자가 입체 규칙성이 높고, 결사슬이 없거나 적은 경우, 또는 쌍극자 상호 작용을 일으키는 극성이 큰 치환기를 갖는 경우 결정형태로 존재할 수 있다. 이러한 결정성은 분자량이 작은 화합물에서와는 달리, 고분자 분자들이 열역학적으로 선호하는 배열 형태로 질서를 갖춘 고분자 매트릭스 영역에 존재한다.

결정도는 몇 가지 방법으로 유도되어진다. 용융고분자의 냉각, 고분자용액의 증발, 어닐링(Annealing)을 이용하는 방법 등이 있다. 형성된 각각의 결정영역들은 무정형

영역으로 서로 연결되어 있는 구조를 취한다.

결정성 고분자는 일반적으로 무정형 고분자에 비하여 질기고, 강하며, 불투명하고, 또한 용매에 대한 저항성과 보다 높은 밀도 등의 특성을 나타낸다.

이러한 특성들은 결정화도가 높을수록 더욱 뚜렷하게 나타난다. 우수한 기계적 물성은 조밀하게 쌓인 분자들 사이에서 보다 효과적인 분자간의 2차적인 힘에 의해서 비롯된 높은 응집력이 반영된 것이다.

1.3 연화온도와 용융온도

무정형 고분자와 달리 결정성 고분자는 비교적 좁은 온도 범위에서 녹게 되며, 용융온도는 고체상태에서 유동성 액체 상태로 변화하는 온도로서, 결정부분의 유동이 시작되는 온도를 말한다.

열가소성 수지는 온도 상승에 따라 유연해지다가 일정 온도 이상으로 온도를 올리면 유동이 시작되고 점도가 낮아진다. 이는 상승된 온도로 인하여 고분자 내의 분자들의 운동에너지가 증가하여 고분자 사슬 간의 간격이 멀어짐으로 인하여 부피의 변화와 더불어 용융되게 된다.

Table 2.1은 다양한 종류의 폴리머 용융온도를 나타내며, 연화 온도는 본래의 물성을 잃고 연화되는 온도로 탐침의 하중을 지지하지 못하고 흐름이 시작되는 점을 말한다.

결정화온도는 무정형중합체들이 가열되면 온도가 일정한계에 도달했을 때 열을 방출하면서 결정화가 일어나기 시작하면서 미세결정조직을 만드는 온도이다.

이때 고분자분말의 성형온도범위는 연화점부터 결정화온도까지로 폴리머의 경우 분자수가 증가할수록 성형온도 범위가 넓어져 성형이 용이해 진다.

Table 2.1 Melting point of various polymer

Polymer	Melting point	Polymer	Melting point
5	250-270	66	265
6	233	76	220
7	233	68	240
8	200	69	205
9	188	410	236
10	188	510	186
11	190	610	225
12	179	612	212

2. 고분자의 레이저 소결 특성

고분자를 분류하는 가장 일반적인 방법은 열가소성 플라스틱(thermoplastics), 탄성체(elastomers), 그리고 열경화성 고분자(thermoses)로 구분되고, 열가소성 플라스틱은 무정형(amorphous)과 결정형(crystalline)으로 더욱 세분화된다.

열가소성 플라스틱은 가열에 의해 용융되는 선형 또는 가지 고분자로 사출과 압출 성형과 같은 공정 기술을 사용하여 어떤 모양으로도 구조가 가능하며 다시 구조를 할 수도 있어서 현재까지 산업에 응용되는 고분자 중에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다.

일반적으로, 열가소성 플라스틱은 고체 상태로 냉각시키는 것으로 쉽게 결정화되지 않는데, 그 이유는 액체 상태에서 꼬여져 있고 엉켜져 있는 정도가 커서 거대분자는 그에 따른 상당한 규칙성이 요구되기 때문이다. 이러한 고분자들의 결정상은 그들의 용융온도(T_m)에 영향을 미친다.

열경화성 수지는 높은 가교밀도에 의해 사슬의 운동이 크게 제한되는 망상 고분자로 일단 형성이 되면 탄성체에 비해 다루기 어렵고 열을 가했을 경우 녹기 보다는 쉽게 분해된다.

일반적으로 분말형태로 재료를 도포하고 레이저 빔을 주사하여 임의형상을 제작하는 SLS 공정에서는 열가소성 플라스틱 그 재료로 사용되고 있다.

고분자에서의 에너지 흡수는 적외선(Infrared)이 주사되었을 때 보다 높은 에너지 상태로 여기(excited) 되고, 고분자 분말은 특정한 진동수의 적외선만을 흡수한다.

이때 고분자 분말이 적외선을 흡수하는 것은 8-10 kJ/mole의 에너지 변화에 해당하는 것으로, 이 범위는 공유 결합된 분자들의 경우에 stretching과 bending 진동에 의한 에너지 흡수 영역에 해당한다. 적외선 에너지 흡수에 있어서 이 범위 내의 진동수는 적외선이 주사되는 분자의 고유 진동수와 일치하는 것이고, 또한 흡수된 에너지는 분자 고리의 진동 진폭을 증가시키게 된다.

레이저 소결 공정에 사용되는 소재인 PA-11과 PA-12 분말은 백본(backbone) 결합이 C-C 또는 C-O 로 이루어져 있어, 주사된 레이저광의 파장에 따라 백본 결합이 진동되면서 열이 발생하여 분말이 용융된다. 분광분석에 의하면 C-C, C-O 결합은 주사된 광의 파장이 10 μ m 근처인 경우에 진동이 급격하게 증가하면서 용융되는 것을 알 수 있다. 때문에 레이저의 파장(Wavelength)이 10.6 μ m인 CO₂ 레이저는 고분자 분말의 소결을 위한 SLS 공정에서 널리 사용되고 있다.

제 3 절 레이저 스캐너

레이저 소결 공정으로 제작된 부품의 치수 정밀도에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있지만, 그중에서 레이저 광의 사이즈는 매우 중요한 역할을 한다.

도포된 폴리머 분말 층에 레이저 광이 주사되어 소결이 일어나는 경우에 레이저 광의 사이즈와 소결된 선폭이 일치하지 않는다. 그 이유는 레이저 광의 에너지 분포가 Fig. 2.5에서 보는 바와 같이 Gaussian 형태이기 때문이다. 즉 레이저 광의 에너지가 광의 반지름 방향으로 비선형 변화를 보이기 때문에 소결이 일어나기 시작하는 임계 에너지 값이 존재하게 된다.

이때의 레이저 빔 크기를 유효 빔 사이즈(d_{eff} , Effective beam spot size)라 정의하고, 유효 빔 사이즈는 레이저 출력, 분말 재료의 물성치, 레이저 광의 흡수율, 분말 층의 겉보기 밀도(apparent density), 분말 입자의 분포 등에 의해 결정되고, 치수정밀도, 소결 속도 등에 밀접한 관계를 가지게 된다. 따라서 SLS 공정을 위한 광학계 설계 시 레이저 빔의 사이즈는 항상 균일하게 유지되어야 한다.

일반적인 SLS 공정에 많이 사용되고 있는 f-theta 렌즈는 레이저광을 이용하여 문자 또는 이미지를 읽거나 쓰기 위한 목적으로 각인(Engraving), 이미지 전사(Image transfer), 재료 가공(Materials processing) 등에 주로 사용되고 있다.

f-theta 렌즈를 이용한 스캐닝 방법은 Fig. 2.6과 같이 레이저 광의 집속은 대물렌즈(Objective lens)를, 레이저 광의 편향은 2축의 반사경을 가진 갈바 미러(Galvano-mirror)를 이용한다.

일반적으로 렌즈는 피사체(Object)와 기하학적으로 유사한 이미지를 얻기 위해서 왜곡 수차(distortion)가 없도록 만들어야 하고, 이미지의 높이 y' 이 피사체의 높이에 비례하여 피사체 각도 θ 에 대해 $y' = f \times \tan\theta$ 의 관계가 성립해야한다.

만약 f-theta 렌즈가 $y' = f \times \theta$ 의 관계식을 만족하기 위해서는 술통형(barrel-shaped) 왜곡수차를 가져야 하는데 f-theta 렌즈는 이러한 조건을 만족시킬 수 없고, 레이저 주사 면적이 커질수록 레이저 빔의 사이즈가 커져 제작된 형상의 치수 정밀도를 얻기 어려워진다. 때문에 f-theta 렌즈는 주로 레이저 마킹(marking)에 응용되고 있으며, 주사면적도 50mm×50mm 이하에서 주로 사용되고 있다.

3축 다이내믹 포커싱 스캐너(3-axis dynamic focusing scanner)의 경우에 f-theta 렌즈를 사용할 경우와 마찬가지로 2축의 갈바 미러를 사용하고, Fig. 2.7과 같이 추가적

으로 갈바 미리 앞에 레이저 빔의 사이즈를 조절하기 위한 직선운동을 하는 다이내믹 포커싱 렌즈(Dynamic focusing lens)가 사용된다.

레이저 광의 주사 시 직선 이송 렌즈가 대물렌즈(objective lens)와 동축 상에서 전후로 이송하면서 초점거리를 조절하게 되므로 초점거리(f)가 고정되기 때문에 초점의 궤적이 3차원 곡면이 된다. 또한 레이저 광이 주사되는 위치에 따라 이 렌즈를 앞뒤로 이송시켜 주면 2차원 평면에 항상 레이저 광의 초점이 위치하게 된다.

3축 다이내믹 포커싱 스캐너는 f -theta 렌즈를 이용한 스캐너에 비해 구동축이 하나 많기 때문에 주사속도가 상대적으로 느리다. 반면 넓은 면적에 걸쳐 레이저광을 주사하는 경우에 f -theta 렌즈는 주사 면적의 크기에 따라 렌즈의 크기가 커져야 하므로 렌즈 가공이 어려운 문제점이 있지만, 3-axis dynamic 스캐너를 쓰는 경우에는 초점 거리가 길어질 경우에도 다이내믹 포커싱 스캐너를 이용하면 넓은 주사 면적에서도 레이저 빔의 사이즈를 정밀하게 제어할 수 있다.

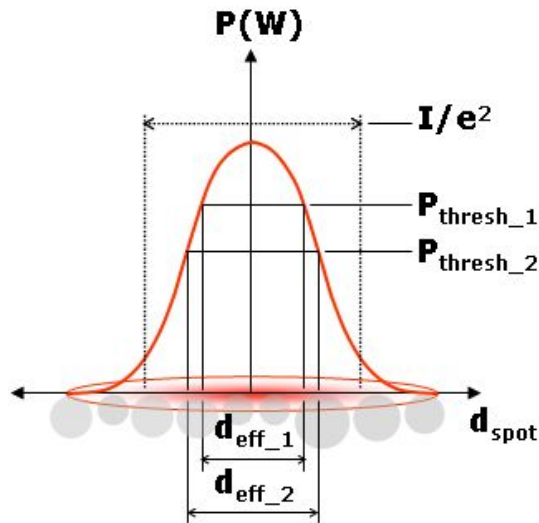


Fig. 2.5 Effective beam spot size

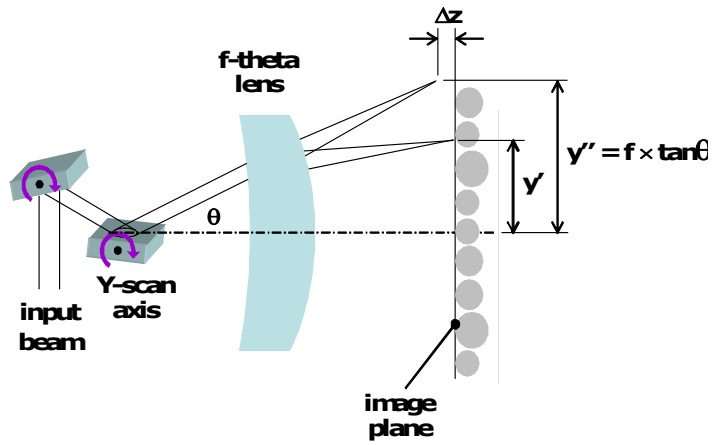


Fig. 2.6 Schematic diagram of f-theta lens

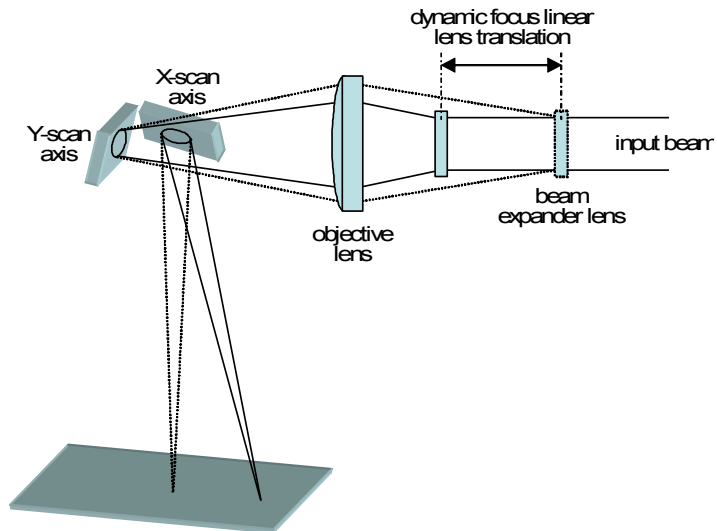


Fig. 2.7 Schematic diagram of 3-axis dynamic scanner

제 3 장 실험장치 및 방법

제 1 절 SLS 시스템의 최적 설계

1. SLS 시스템의 설계 개요

본 연구에서 고분자 분말 및 금속 분말의 소결 특성을 실험하기 위해 개발한 선택적 레이저 소결 시스템은 Fig. 3.1과 같고, 개발 장비의 사양은 Table 3.1과 같다.

선택적 레이저 소결시스템은 빌드룸(Build room)에 레이저를 주사하기 위한 레이저 제어부(Laser control part), 분말의 공급 및 이송을 위한 적층부(Lamination part), 분말 예열 및 워크룸(Work room)의 온도 분위기 제어를 위한 히팅부(Heating part), 워크룸의 소결 분위기 제어부(Sintering condition control part), 전체 시스템을 제어하기 위한 통합 제어부(Integration control part) 등으로 구성되며, PC기반의 전용 제어기를 통해 레이저 소결 공정을 제어한다.

개발된 SLS 시스템의 크기는 1150(W)×1560(H)×850(L)mm이며, 제어부의 크기는 700(W)×1560(H)×850(L)mm로, 본 시스템의 경우 레이저를 이용하여 200(W)×150(H)×200(L)mm의 3차원 형상을 제작할 수 있도록 빌드룸을 설계하였다.

빌드룸에 분말을 공급하기 위한 피드룸(Feed room)은 200(W)×200(H)×200(L)mm로 빌드룸의 우측에 설치하고, 빌드룸의 좌측에 분말 수집을 위한 장치를 배치하였다.

또한 빌드 스테이지(Build stage)에 레이저가 주사될 수 있도록 시스템의 상부에 레이저와 3축 다이내믹 포커싱 스캐너, 빔익스팬더(Beam expander), 반사 미러 유닛(Reflection mirror units) 등을 배치하였다.

롤러 이송을 위한 기구부는 LM가이드와 서보모터(Servo-motor)를 적용하였으며, 분말의 적층은 서보모터를 이용하여 롤러를 역회전 시키는 방법을 사용하였다.

빌드 스테이지와 피드 스테이지(Feed stage)의 제어는 스텝모터와 감속기를 이용하여 정확한 z축 제어가 가능하도록 구성하여, 분말의 적층 두께를 최적화 할 수 있도록 하였다.

워크룸의 히팅부는 복사열을 이용하여 예열하는 시스템을 선정하였고, 빌드룸에는 실리콘 히터를 이용한 예열 시스템을 적용하였다.

워크룸의 질소 분위기 제어를 위해 산소센서를 이용하여 계측할 수 있도록 구성하였으며, 레이저가 주사되는 부분의 청결을 위해 설치된 에어커튼(Air curtain)에도 질소가

공급될 수 있도록 하였다.

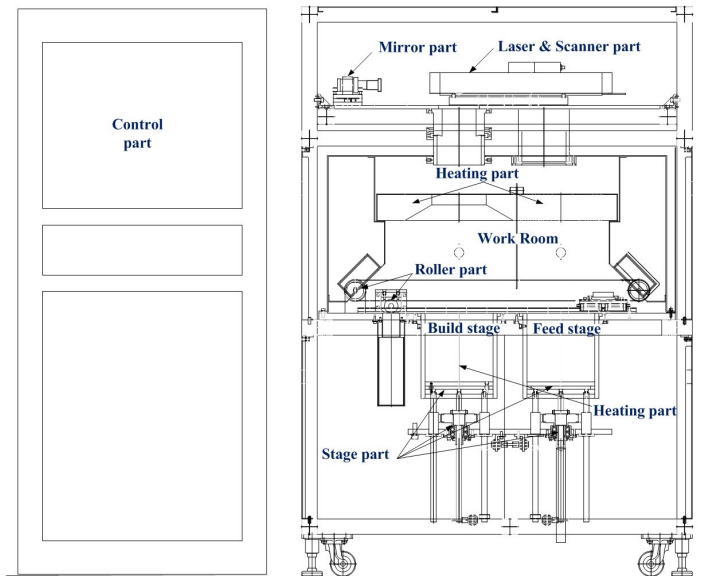
제어부(Control part)의 경우, 전체 시스템에 파워 공급을 원활히 하기 위한 자동전압조정기(AVR), 정전 등으로부터 시스템을 보호할 수 있도록 무정전전원장치(UPS) 등을 설치하였고, 각 센서에서 발생할 수 있는 노이즈를 방지하기 위한 노이즈 필터, 시스템 제어를 위한 제어기, 시스템 모니터링을 위한 지시기(Indicator) 등을 설치하였다.

Table 3.1 Specification of SLS system

Items	Specifications
System size	- 1150(W)×1560(H)×850(L)mm
Control part size	- 700(W)×1560(H)×850(L)mm
Build size	- 200(W)×150(H) ×200(L)mm
Feed room size	- 200(W)×200(H)×200(L)mm
Powder basket	- 72(W)×200(H)×72(L)mm
Accuracy	- 0.3%(X, Y, Z)mm



(a) Developed SLS system



(b) Schematic diagram of SLS system

Fig. 3.1 Developed SLS system and Schematic diagram

2. 분말 적층부

SLS 공정은 3차원 CAD 모델을 일정높이로 슬라이싱(Slicing)한 후 다양한 분말을 한 층씩 적층하고, 레이저 소결을 통해 구조물을 제작하는 방법을 사용하기 때문에 분말의 적층을 위한 z축 스테이지 제어와 롤러를 이용한 x축의 분말 이송 제어는 소결체의 정밀도와 밀접한 관계를 가지게 된다.

본 연구에서는 빌드 스테이지와 피드 스테이지의 위치 제어, 롤러의 수평 이송 속도 및 회전 속도 제어를 위해서 8축의 MMC(Multi Motion Controller) 보드를 적용하고 PID 제어기법을 사용하였다.

2.1 빌드 및 피드 스테이지

일반적인 SLS 공정의 경우 적층두께는 80~150 μ m로 빌드 스테이지에서 일정한 높이로 분말 적층하고, 레이저 소결을 통해 구조물을 제작하기 위해서는 정밀한 위치 제어가 필요하다.

이를 위해 큰 토크로 정밀한 위치 제어가 가능한 스텝모터(Step motor) 선정하고, 빌드 립과 피드 립의 하중을 고려하여 Table 3.2와 같이 규격을 결정하였다.

빌드 스테이지와 피드 스테이지의 수직 방향 이송 메커니즘은 Fig. 3.2와 같이 스텝모터와 타이밍 벨트(Timing belt) 구조로 스텝모터의 분해능은 1회전 당 500 펄스이며, 빌드 스테이지와 피드 스테이지의 가이드 빔(Guide beam)의 볼스크류(Ball screw) 피치가 5mm이고, 입출력축의 풀리의 비가 1:4로 식 3.1로부터 1펄스당 2.5 μ m의 변위로 빌드 스테이지와 피드 스테이지의 정밀한 Z축 제어가 가능하도록 하였다.

$$z = \frac{1rev}{500pulse} \times \frac{1}{4} \times 5mm = 2.5\mu m \quad (3.1)$$

2.2 분말 공급 롤러

레이저 소결을 위한 빌드 립에 분말 공급은 빌드 스테이지를 적층두께만큼 수직 방향으로 하강시키고, 피드 스테이지를 적층두께만큼 수직 방향으로 상승시킨 후 롤러를 회전시키면서 수평 방향으로 이송시켜 빌드 립에 분말을 공급하게 된다.

이때 롤러는 레이저 소결에 영향이 없도록 분말을 빌드 립 표면에 고르게 적층시켜야 한다. 이를 위해서 롤러의 수평 이송 속도와 회전 속도를 일정하게 제어되어야 하며,

속도 제어와 토크 제어가 가능하도록 롤러의 수평 이송 메커니즘은 Fig. 3.3과 같이 AC 서보 모터와 타이밍 벨트를 적용하였고, 워크룸 내부의 분말이 분말공급 롤러 제어 장치부에 인입되지 않도록 가이드 벨트(Guide belt)를 설치하였다.

또한 롤러의 수평 이송과 함께, 롤러 진행방향의 역방향으로 롤러를 회전시킬 수 있도록 장치를 구성함으로써 분말이 이송 중에 불필요하게 압축되거나 멩치는 현상을 방지하였고, 건조한 워크 룸의 환경과 분말의 이송 중에 발생하는 정전기를 제거를 위해 정전기 방지 코팅을 롤러 표면에 적용하였다.

Table. 3.3은 롤러의 수평이송 및 회전을 제어하기 위해 선정된 AC 서보모터, 타이밍 벨트 및 풀리, 분말 적층을 위한 롤러 등의 규격을 각각 나타낸다.

롤러의 수평 이송을 제어하기 위한 AC 서보 모터의 최대 속도는 3000rpm이고, 타이밍 벨트의 풀리 외경이 60mm 이므로 식 3.2로부터 롤러의 최대 수평 이송 속도는 약 9.43m/s로 SLS 공정상 분말을 적층하기에 충분한 속도를 갖도록 하였다.

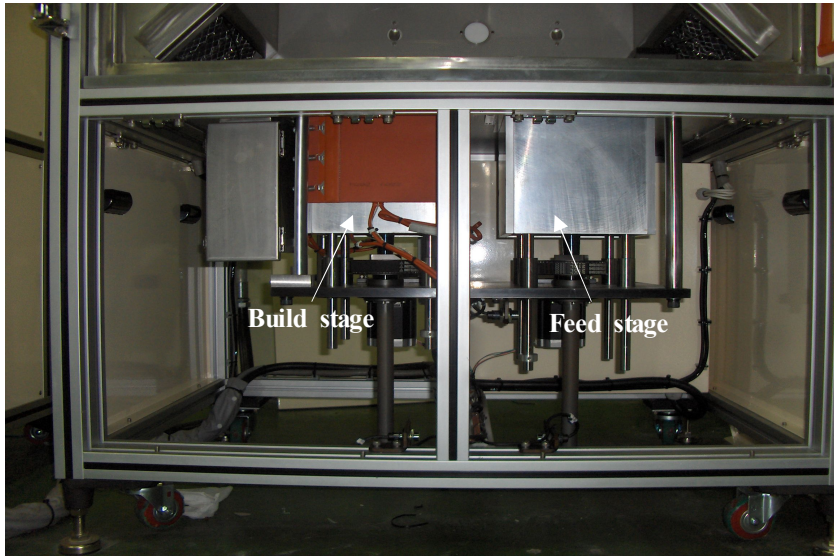
$$V_x = \frac{\pi DN}{1000} = \frac{\pi \times 60 \times 3000}{1000 \times 60} \approx 9.43m/s \quad (3.2)$$

Table 3.2 Specification of stage control part

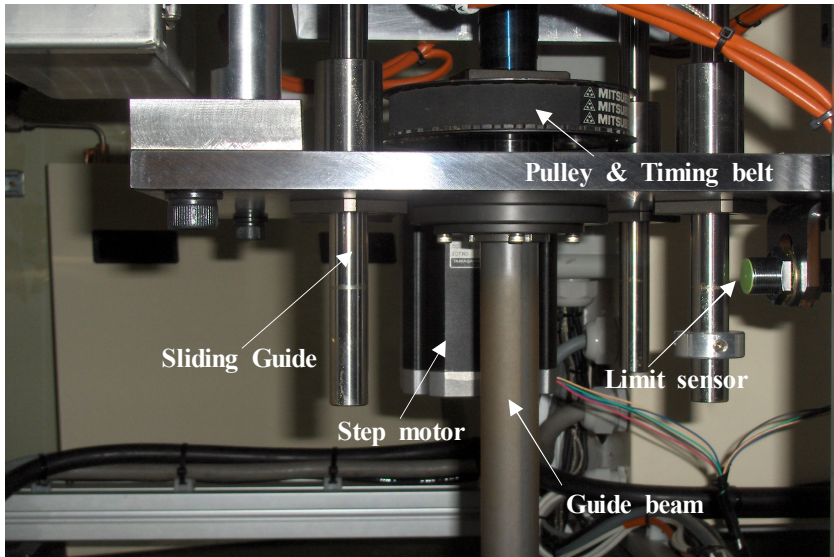
Div.	Specifications
Step motor (Build stage)	- Torque : 63 kgf·cm - Resolution : 500 pulse/1rev
Step motor (Feed stage)	- Torque : 15 kgf·cm - Resolution : 500 pulse/1rev
Guide beam	- Screw pitch : 5 mm

Table 3.3 Specification of roller control part

Div.	Specifications
AC Servo motor (Horizontal transportation)	<ul style="list-style-type: none"> - Torque : 39.0 kgf·cm - Rotation speed : 3000 rpm
AC Servo motor (Rotation)	<ul style="list-style-type: none"> - Torque : 9.7 kgf·cm - Rotation speed : 3000 rpm
Roller	<ul style="list-style-type: none"> - Diameter : 55 mm - Static electricity prevention coating
Timing belt & Pulley (Horizontal transportation)	<ul style="list-style-type: none"> - External diameter : 97.02 mm - Internal diameter : 95.65 mm - Reduction gear ratio : 1:25
Timing belt & Pulley (Rotation)	<ul style="list-style-type: none"> - External diameter : 32.0 mm - Internal diameter : 20.0 mm - Non-Reduction gear

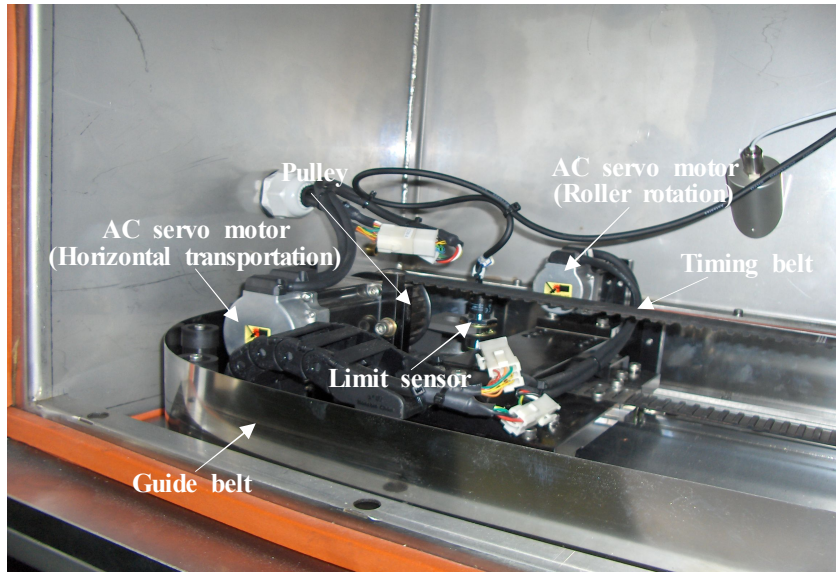


(a) Build & Feed stage

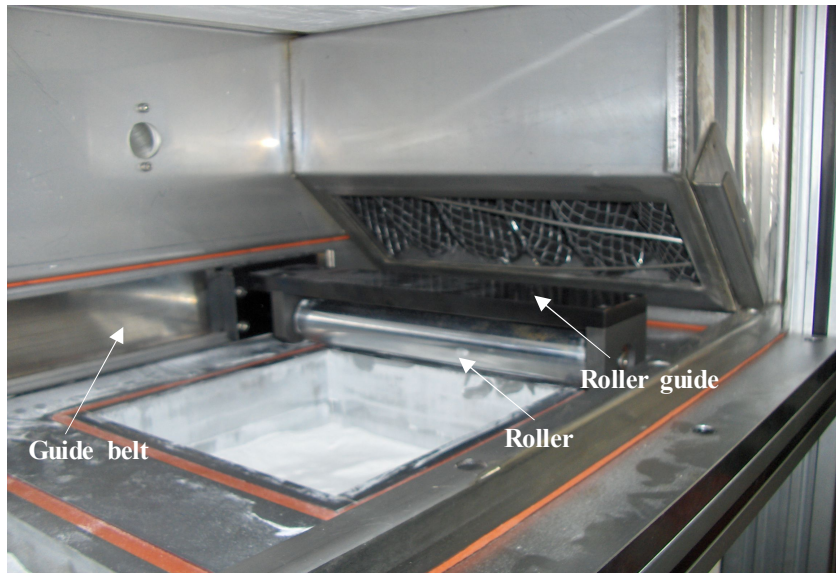


(b) Control device of stage

Fig. 3.2 Build & Feed stage control mechanism



(a) Control device of Roller



(b) Roller for laminating powder

Fig. 3.3 Roller moving & rotation mechanism

3. 질소 공급부

폴리머 분말이 레이저로 소결되는 과정에서 산소에 의한 산화를 방지하기 위해서는 SLS 시스템의 워크룸 내부를 질소 환경으로 만들어야 한다.

본 연구를 위해 개발한 SLS 시스템에는 원활한 질소 공급을 위해 워크룸에 2개의 질소 주입구 및 배기구와 스캐닝 미러 부분에 에어커튼(Air curtain)을, 분말 적층 롤러 제어 장치부의 냉각을 위한 질소 노즐을 각각 설치하였다.

질소 공급의 제어는 볼 플로메타(Ball flowmeter)를 사용하여 기본 유량을 정하고, 솔레노이드 밸브를 제어하여 질소 농도를 조절할 수 있도록 Fig. 3.4와 같이 장치를 구성하였다. SLS 시스템에서 레이저를 이용하여 소결할 경우 워크룸 내부의 95%이상의 질소 분위기가 요구되며, 본 연구에서는 Table. 3.4와 같은 규격을 가지고 있는 산소센서(A-01S, IT Co.,Ltd.)를 이용하여 산소의 비율을 실시간으로 모니터링하고 산소의 농도에 따라 질소 가스 주입을 제어할 수 있도록 하였다.

Fig. 3.5(a)는 본 연구에 사용된 산소센서를 나타내고, Fig. 3.6(b)는 산소센서로부터 측정된 출력 값을 모니터링 하기 위한 모니터링 보드를 나타낸다.

산소 센서는 산소 비율에 비례하여 4~20mA의 전류 값이 출력되므로 별도의 회로를 구성하여 전압 출력 값을 제어기에 보내줄 수 있도록 장치를 구성하였고, 산소 센서의 전압 값에 따른 질소의 농도 값은 식 3.3과 같다.

이때, 전압 출력 값을 오실로스코프(Oscilloscope)로 확인한 결과 Fig. 3.5(c)와 같이 많은 노이즈 신호가 포함되어 있었다. 산소 센서 출력 값의 노이즈를 제거하기 위해 저역 통과 필터(Low-pass filter)를 사용하였고, Fig. 3.5(d)와 같이 노이즈가 제거됨을 확인할 수 있었다.

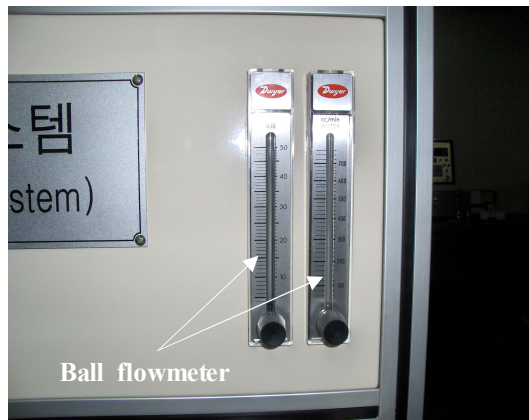
$$O_2 \text{ concentration} = \frac{100}{0.016} \times \frac{V}{R} - 25 \quad (3.3)$$

또한 SLS 시스템에 다이내믹 포커싱 스캐너 시스템(Dynamic focusing scanner system)을 그대로 적용할 경우 Fig. 3.6(a)와 같이 다이내믹 포커싱 렌즈와 x-y 갈바 미러에 분말이 점착되어 레이저 파워의 감소 및 렌즈의 파손을 일으키게 된다.

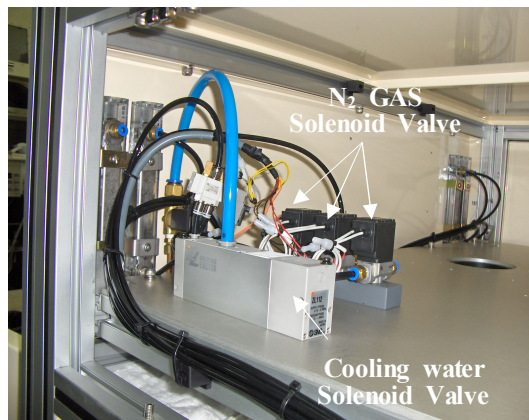
따라서 본 연구에서는 Fig. 3.6(b)와 같은 유동해석을 통해 워크룸 내부에 떠다니는 미세 분말들이 갈바 미러에 부착되지 않도록 Fig. 3.6(d)와 같이 에어커튼(Air curtain)을 제작하여 레이저 주사부에 설치하였다.

Table 3.4 Specification of O₂ sensor

Div.	Specifications
O ₂ sensor	- 3Pic(Response time 5sec) - Measurement range 0~100%



(a) Ball flowmeter

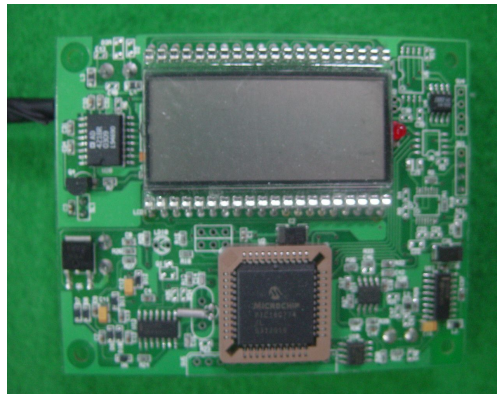


(b) N₂ Gas control unit

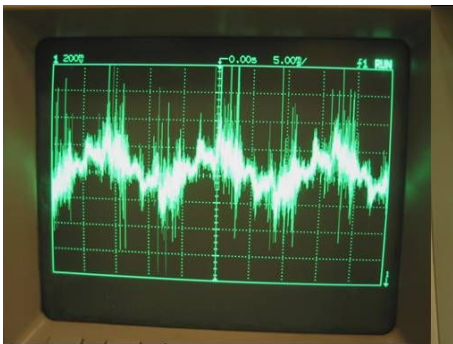
Fig. 3.4 N₂ supply unit



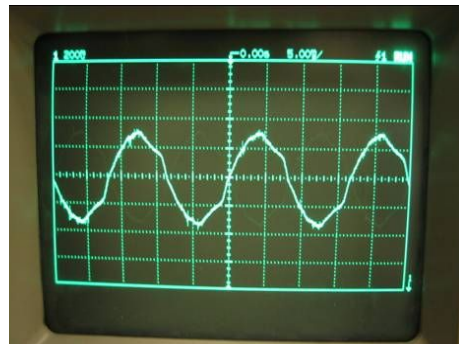
(a) O₂ sensor



(b) O₂ Monitoring board

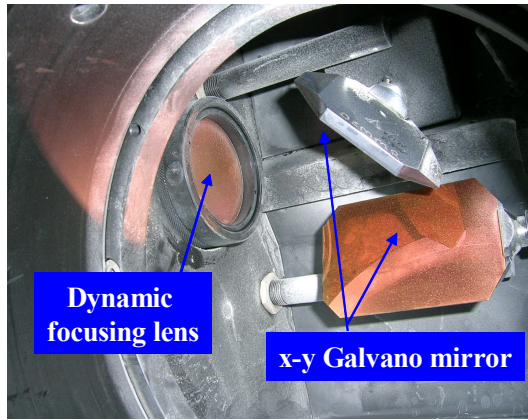


(c) Original sensor signal

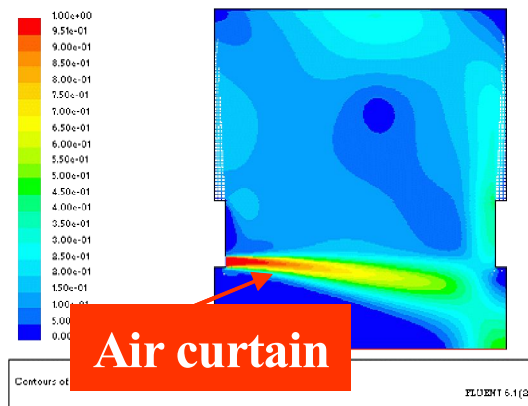


(d) Low-pass filter App. signal

Fig. 3.5 O₂ sensor part and sensor signal



(a) Laser scanner system



(b) Analysis result of fluid



(c) Air curtain part



(d) Air curtain effect

Fig. 3.6 Air curtain for powder adhesion prevention at scanner system

4. 소결 분위기 온도 제어부

폴리머 분말 소결 온도는 약 184°C로 SLS 공정에서 레이저로 소결을 할 경우 150°C 이상의 예열과 소결 후 변형 방지를 위한 온도 유지가 필요하다.

본 연구에서는 Fig. 3.7(a)와 같은 복사열을 이용하여 빌드룸과 피드룸의 분말을 예열하는 히터 시스템을 선정하였고, 히터부의 정확한 제어를 위해 PID 제어방법을 적용하여 1°C 이내의 온도제어가 가능하도록 소결 온도 제어부를 제작 하였다.

Table 3.5는 히터부에 적용된 히터와 센서의 규격을 나타내며, 폴리머 분말의 예열을 위해 워크룸과 피드룸의 상부에 각각 2.2kW의 판형 복사 히터(Radiation heater)를 적용하였다. 또한 소결 후 변형 방지를 위해 빌드 룸에 1.2kW의 실리콘 히터(Silicone heater)를 Fig. 3.7(b)와 같이 적용하였다.

빌드룸과 피드룸의 온도 제어는 Fig. 3.7(a)와 같이 비접촉식 적외선 센서(Infrared rays sensor, Rayomatic 14, Eurotron Instrument)를 설치하여 각각 분말 표면의 온도를 측정하도록 하였다. 본 연구에 적용한 비접촉식 적외선 센서는 0~900°C의 온도 측정이 가능하고 측정 온도를 4~20mA의 출력으로 내보낸다.

비접촉식 적외선 센서로터 측정된 값은 A/D 변환(Analog to Digital conversion)하여 주제어기 에서 식 3.4와 같이 계산 한 후 D/A 변환(Digital to Analog conversion) 하여 SCR(Silicon Control Rectifier)을 통해 판형 복사 히터를 독립적으로 제어하도록 하였다.

$$T_{cal} = \frac{500}{0.016} \times \frac{v - 0.05}{R} - 125^{\circ} C \quad (3.4)$$

빌드 룸의 실리콘 히터(Silicone heater) 제어는 열전대(Thermocouple)를 이용하여 실시간으로 온도를 측정하고, 온도 값을 릴레이(Relay)를 이용하여 On/Off 제어하였다.

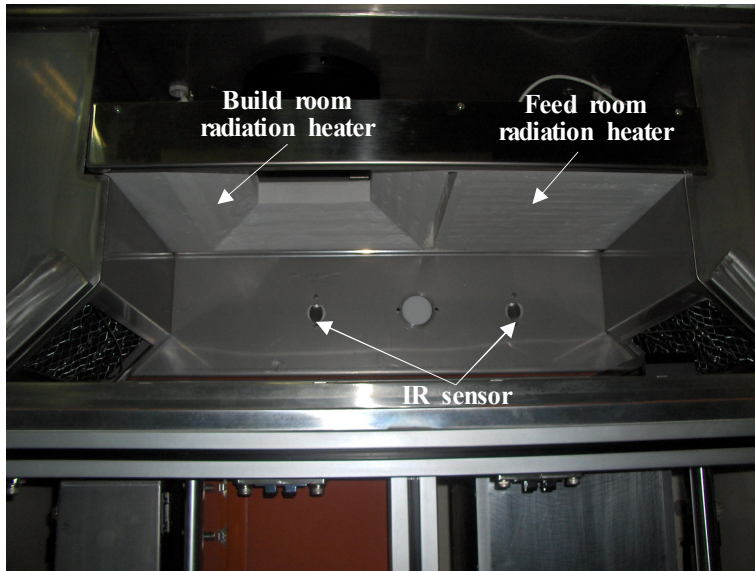
또한 측정된 온도 데이터로 부터 원하는 목표 온도에 도달 후에는 소결품의 변형방지를 위해 일정한 온도를 유지하도록 하였다.

Fig. 3.8(a)는 워크룸과 피드룸의 히터 제어부를 나타내고, Fig. 3.8(b)는 빌드룸의 실리콘 히터 제어부를 각각 나타낸다. 워크룸의 제어부는 제어기로부터 D/A 변화를 통해 전압을 출력한 후 저항회로를 통해 전류로 변화되어 SCR에 입력되며, SCR은 4~20mA의 전류 입력에 따라 히터의 출력을 제어하게 된다.

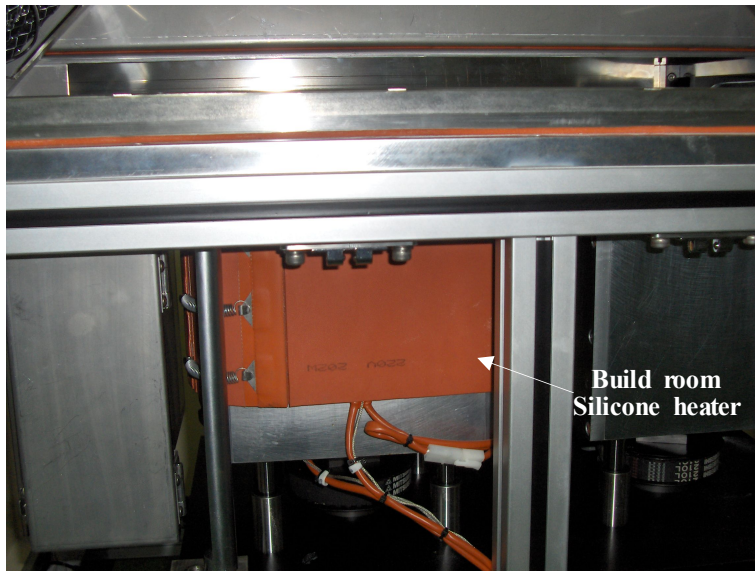
빌드룸의 히터는 SSR (Solid State Relay)를 이용하여 출력전압에 따라 회로를 개폐하도록 하고 주제어기의 DO(Digital Output)으로 온도제어를 할 수 있도록 하였다.

Table 3.5 Specification of Heater control part

Div.	Specifications
Radiation heater (Build room)	<ul style="list-style-type: none"> · Size : 320(w)×76(h) mm · Heater power : 2.2 kW
Radiation heater (Feed room)	<ul style="list-style-type: none"> · Size : 240(w)×76(h) mm · Heater power : 2.2 kW
Silicone heater	<ul style="list-style-type: none"> · Size : 224(w)×150(h) mm(4EA) · Heater power : 1.2 kW
IR sensor	<ul style="list-style-type: none"> · Sensing head : 20:1 · Ambient temperature : 0 ~ 180°C · Temperature range : -40 ~ 900°C · Response time : 150 ms · Accuracy/ Repeatability : ±1°C/ ±0.5°C · Spectral range : 8~14 um · Temperature resolution : 0.1°C
Thermocouple	<ul style="list-style-type: none"> · J type TC · Temperature range : 0 ~ 300°C

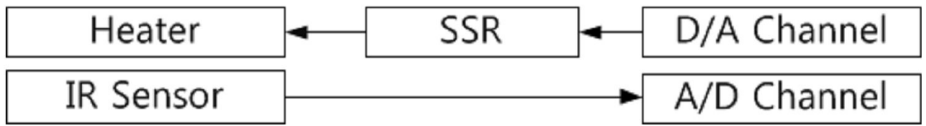


(a) Radiation heater

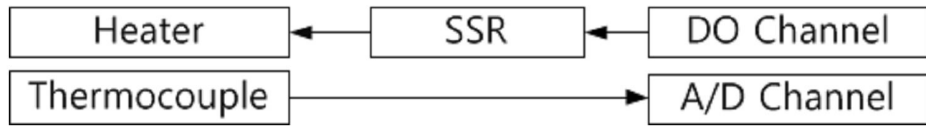


(b) Silicone heater

Fig. 3.7 Temperature control of SLS



(a) Radiation heater control



(b) Silicone heater control

Fig. 3.8 Heater control of SLS system

5. 레이저 제어부

Fig. 3.9는 SLS 시스템의 레이저부의 개념도를 나타내고, Fig. 3.10과 같이 레이저 제어부는 레이저 발생기(Laser generator), 빔익스팬더(Beam expander), 반사거울(Reflection mirror), 3축 다이내믹 포커싱 스캐너 등으로 구성되고, Table 3.6에 레이저부의 주요 규격을 나타내었다.

레이저 소결 공정에 사용되는 폴리머 분말은 C-C 또는 C-O의 결합으로 이루어져 있으며, 레이저가 분말에 주사되면 레이저의 파장에 따라 Backbone 결합이 진동하면서 열이 발생하여 용융된다. 폴리머의 경우 10 μ m의 파장대(Wavelength range)에서 급격한 진동이 발생하여 용융되므로, 본 연구에서는 50Watts 급 CO₂ 레이저(GEM-50L, Coherent Co.,Ltd.)를 적용하였다.

SLS 공정에서 레이저 빔의 사이즈는 소결 정밀도에 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 본 연구에서는 레이저 빔을 주사할 때 발생하는 스팟 크기(Spot size)의 찌그러짐 현상을 방지하기 위해 렌즈의 초점 거리를 가변할 수 있는 3축 다이내믹 포커싱 스캐너 (Power scan 33, SCANLAB Inc.,)를 적용하였다.

3축 다이내믹 포커싱 스캐너는 대물렌즈(Object lens), 포커싱 렌즈(Focusing lens), 갈바 미러(Galvano-mirror) 구성되며, 대물렌즈는 고정되어 있고 오목렌즈가 전후로 움직이면서 레이저 빔의 초점거리를 조절하여 스팟 크기를 일정하게 유지할 수 있게 한다.

본 연구에 사용된 CO₂ 레이저 빔의 직경(I/e²)은 1.8 \pm 0.2mm로 SLS 공정에서 확대시키고, 식 3.5에 따라 레이저 빔의 스팟 사이즈(Spot size)를 구하여 \approx 500 μ m의 스팟 크기를 갖도록 장치를 구성하였다.

$$d = \frac{\lambda f}{\pi D} M^2 \quad (3.5)$$

여기서, d : 출력 빔의 사이즈(output beam size), λ : 레이저 파장(Wavelength), D : 입력 빔의 사이즈(Input beam size), M^2 : 빔의 품질(Beam quality) 이다.

이때 레이저 헤드로 목표로 하는 스팟 사이즈를 얻기 위해서는 레이저 빔의 직경을 빔익스팬더를 이용하여 주사된 레이저 빔의 확산 (diversion)을 최소화하기 위해 Fig. 3.10과 같이 빔 익스팬더를 레이저 헤드 바로 앞에 위치시켰으며, 대물렌즈와 포커싱 렌즈의 초점을 일치시켜 확장된 평행 레이저 빔을 주사할 수 있도록 하였다.

Table 3.6 Specification of Laser part

Div.	Specifications
CO ₂ Laser	<ul style="list-style-type: none"> · Power : 50Watts ± 3% · Wavelength : 10.6 μm · Spot size(1/e²) : 1.8±0.2 mm · Beam quality(M²) : 1.2
Beam expander	<ul style="list-style-type: none"> · Magnification : ×5
Dynamic focusing scanner	<ul style="list-style-type: none"> · Image field : max. 500×500 mm · Marking speed : max. 7 m/s · Working wave length : 9.3 ~ 10.6 μm · Laser power density : max. 500W/cm² · Typical positioning speed : 18rad/s

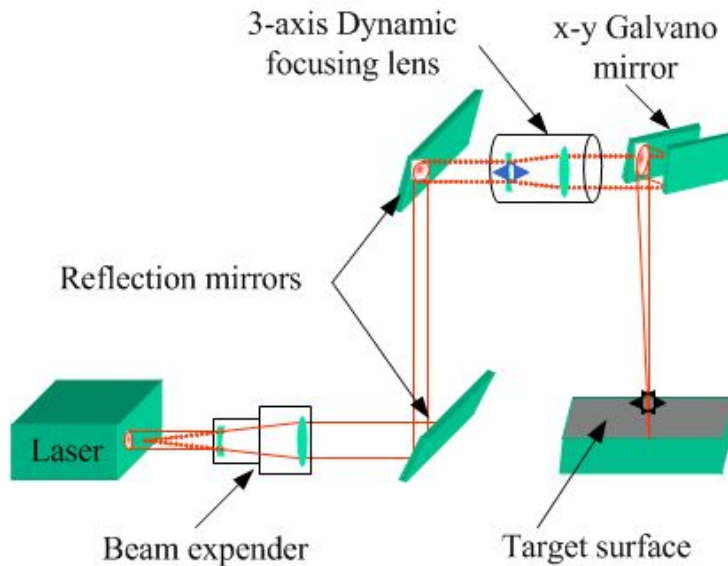


Fig. 3.9 Schematic diagram of laser part

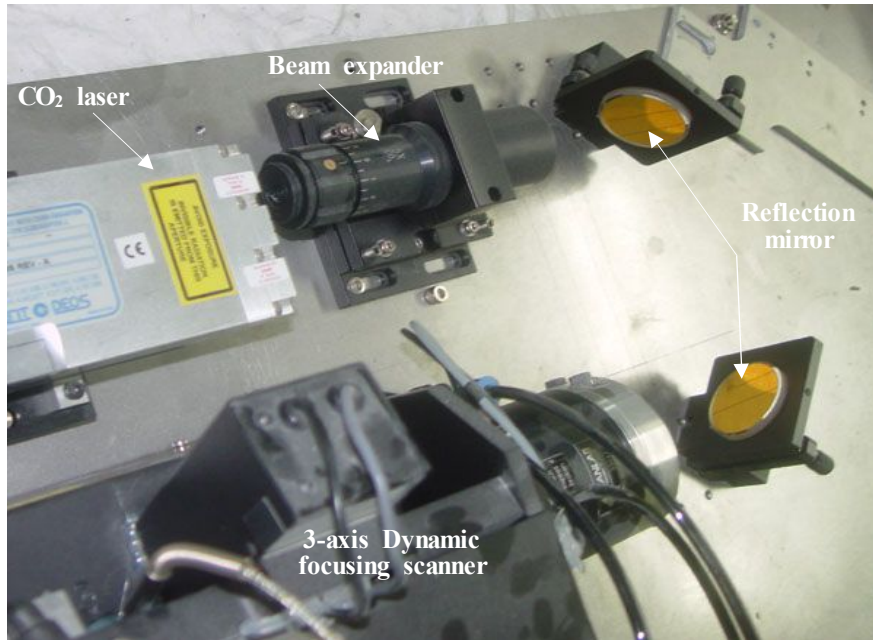


Fig. 3.10 Laser part of SLS system

제 2 절 SLS 시스템의 제어 방법

1. 주사경로 생성 및 레이저 궤적 제어

CO₂ 레이저를 이용하여 폴리머 분말을 소결하기 위해서는 3차원 모델로부터 일정한 높이의 레이어 단위로 2차원 슬라이싱(Slicing) 단면을 획득하고, 단면 정보로부터 X, Y 축에 대한 윤곽선(Contour segment)과 교차점을 구해 레이저 주사 경로를 생성하게 된다.

이때, 레이저 주사간격(Scan space), 주사속도(Scan speed), 레이저 파워, 레이저 초점 제어 등은 최종 가공품의 치수 정밀도에 밀접한 관계를 가지는 변수로 작용하게 된다.

또한 갈바 미러는 직접적으로 레이저의 경로를 제어하는 부분으로 슬라이싱 된 2차원 단면상에서 주사경로 생성 알고리즘(Scan path generating algorithm)에 따라 높은 정밀도를 가지고 제어 되어야 한다.

Fig. 3.11은 본 연구에 사용된 갈바미러의 개념도를 나타내며, 레이저 주사 경로 제어를 위해 2개의 축을 동시에 제어하여 임의의 단면에서 원하는 위치에 레이저가 주사 되도록 알고리즘을 구현하였다.

레이저 주사 경로는 하나의 레이어 안에 존재하는 모든 윤곽선의 교점을 계산하고 주사선(Scan ray)을 일정한 주사간격(Scan space)으로 이동시킴으로서 생성할 수 있으며, SCANLAB사에서 제공하는 3차원 보정파일을 이용하여 2차원 단면으로 맵핑하였다. 이때 생성된 주사 점들은 항상 짝수 개로써, 레이저의 ON/OFF 쌍을 항상 가지게 되고 레이저는 주사(Scan) 시에는 ON, 이동(Jump)시에 OFF 하게 된다.

또한 SLS 공정에서 레이저 주사속도와 주사경로의 생성은 소결 속도와 밀접한 관계를 가지게 된다. Fig. 3.12(a)는 일반적인 레이저 가공 시 사용되고 있는 지그재그(Zigzag) 형태의 주사 경로로 레이저 마크 지점에서 다음 지점까지 이동시 불필요한 점프(Jump) 요소가 많아 소결하고자 하는 3D 모델의 형상이 복잡하거나 큰 경우에는 소결시간이 상당히 길어지게 된다.

본 연구에서는 불필요한 점프요소를 제거하고 레이저 소결 속도를 향상시키기 위해 영역분할 방법을 적용하였다.⁽⁵⁰⁾

Fig. 3.12(b)는 영역분할법의 예로 3차원 형상으로부터 슬라이싱 된 2차 평면을 Region1, Region2, Region3의 영역으로 분할 한 후 분할된 영역을 중심으로 주사경로를 재생성하고 Resion1 → Resion2 → Resion3의 순서로 가장 근거리 이웃하는 주사 영역을 따라 레이저 주사경로가 생성되도록 하였다.

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 래피드폼(Rapidform)을 이용하여 3차원 모델로부터 생성된 2차원 슬라이싱 단면에 Fig. 3.13과 같은 알고리즘에 따라 Fig. 3.14와 같은 레이저 주사경로를 생성하고 레이저 및 스캐너를 제어하였다.

Fig. 3.15와 같이 생성된 레이저 주사 경로가 제어기에 전달되면 스캐너의 갈바 미러가 원점에 위치하게 되고 첫 레이저 주사를 위해 갈바 미러를 정렬한 후 레이저 주사와 이동을 반복하여 하나의 레이어를 소결하게 된다. SLS 공정에서는 이러한 과정을 모든 레이어에 대해 반복 수행함으로써 3차원 형상을 제작하게 된다.

Fig. 3.15(a)는 기계요소 부품의 STL 파일이고, Fig. 3.15(b) 레이저 주사 경로 알고리즘에 따라 생성된 주사 경로를 나타낸다.

Fig. 3.16은 레이저 궤적 제어를 위해 Visual C++ MFC 환경에서 개발된 소프트웨어를 나타내며, Stl 파일뷰어(file viewer), 스캔 패스뷰어(Scan path viewer), 파라미터 입력 패널(Parameter panel) 등으로 구성된다.

레이저 궤적 제어 소프트웨어는 소결 과정의 중요한 변수인 레이저 파워, 주사 속도, 주사 간격, 지연 시간(Delay time) 등을 입력하여, 소결 공정 실험을 통해 최적의 파라미터들을 결정할 수 있도록 하였다.

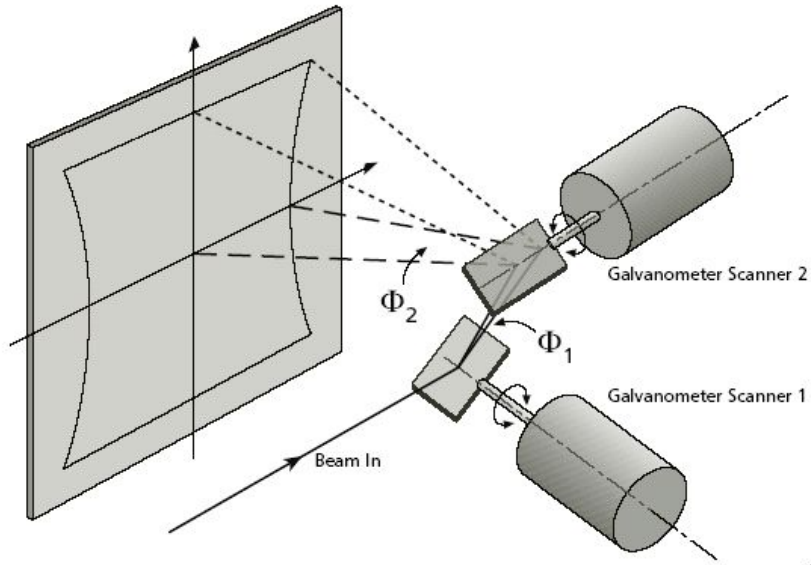


Fig. 3.11 Image field correction of galvanometer scanner

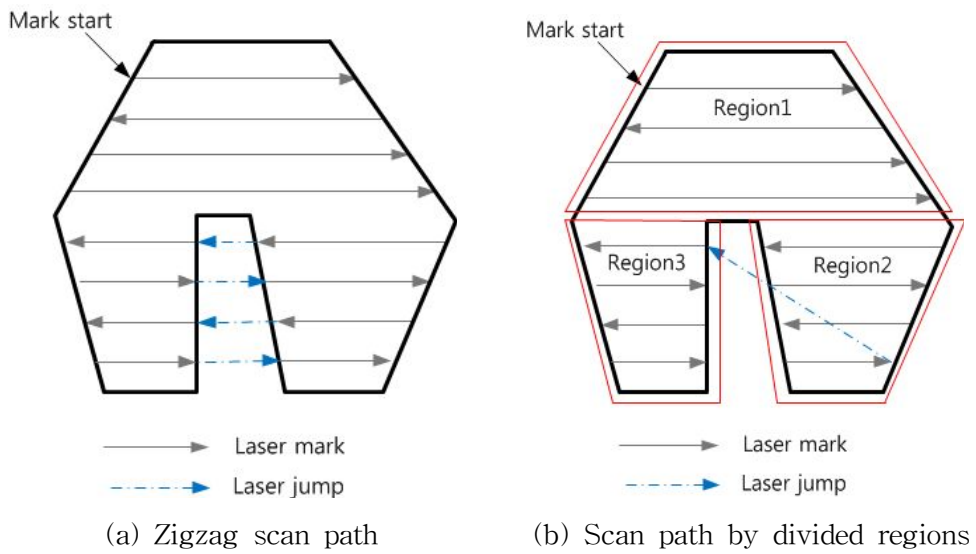


Fig. 3.12 Scan path generation for scan speed improvement

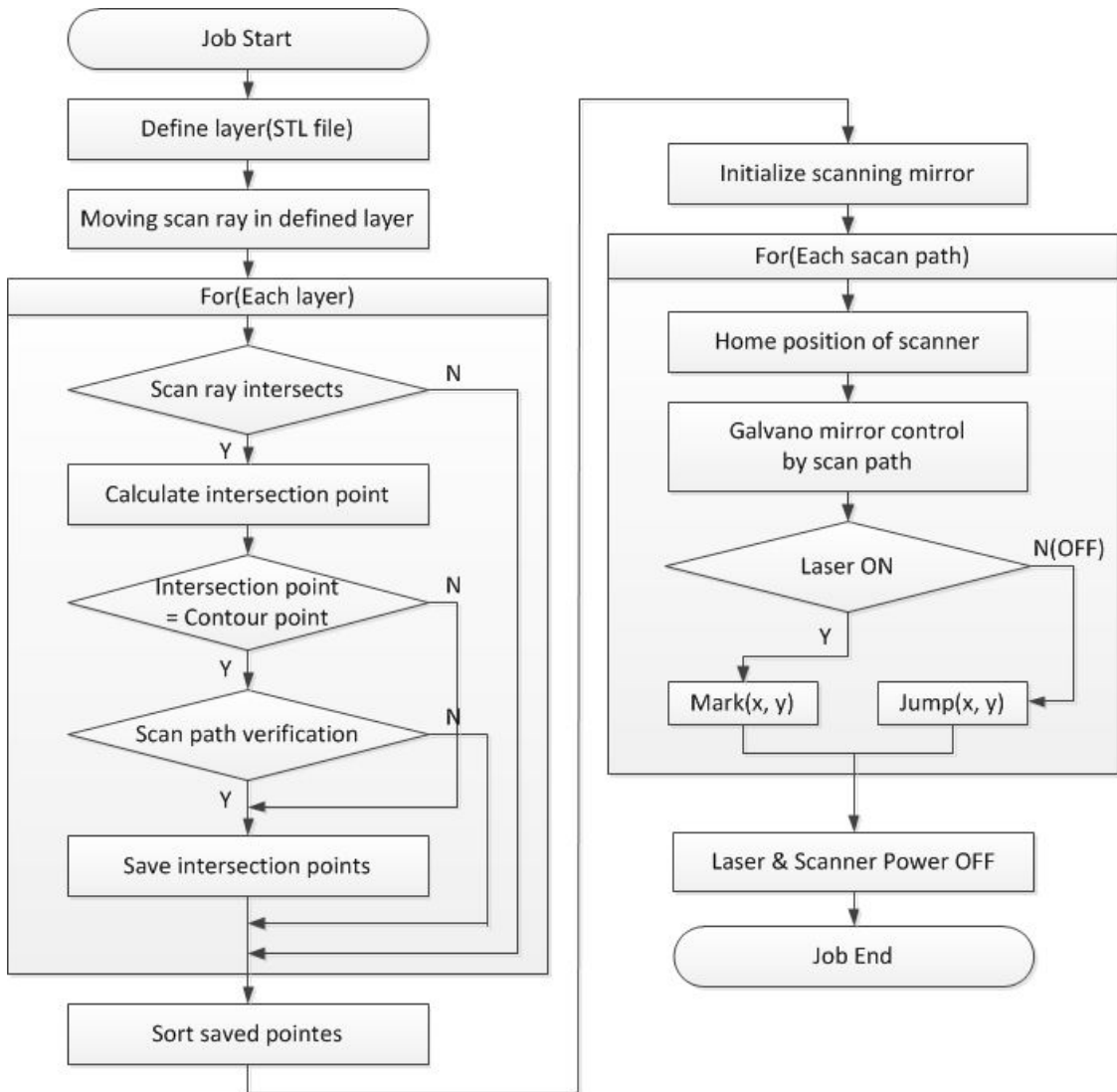
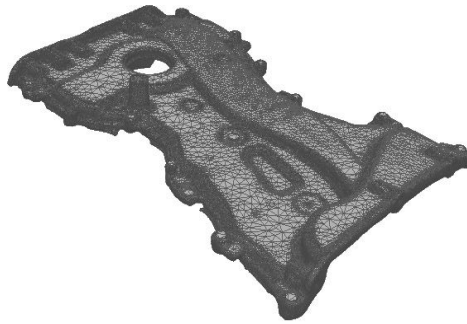


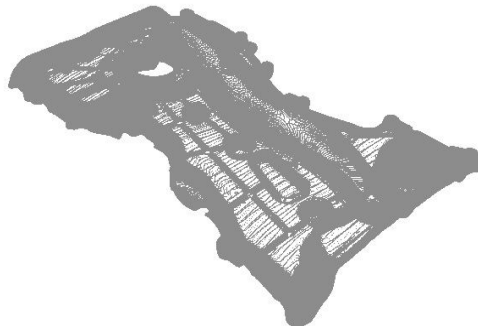
Fig. 3.13 Algorithm for scan path gemination & laser scan control

layer No.	x	y	laser on/off	param. 1	param. 2
0	9.4690	42.2500	0	0	0
0	8.6578	41.7817	1	0	0
0	10.4020	42.5000	0	0	0
0	7.9748	41.0987	1	0	0
0	11.3350	42.7500	0	0	0
	•		•		•
	•		•		•
	•		•		•

Fig. 3.14 Generated scanning path



(a) STL file of mechanical part



(b) Generated laser scan points

Fig. 3.15 Generated laser scan points by STL file

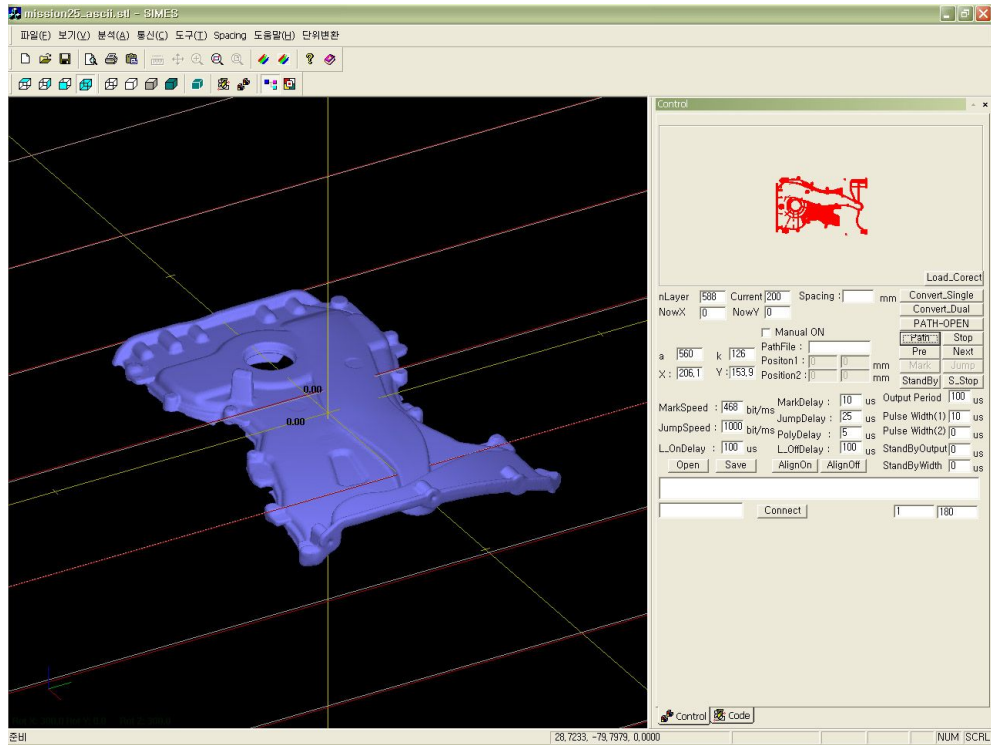


Fig. 3.16 Laser scan S/W and control parameters

2. SLS 시스템 제어

Fig. 3.17은 3차원 모델로부터 폴리머 소결을 통해 제품을 제작하는 SLS의 전체 공정을 나타내며, SLS 공정은 워크룸 내에 질소를 주입하여 95%이상의 질소 분위기(Condition)를 조성하고, 일정 온도로 빌드룸과 피드룸의 폴리머 분말 표면을 예열하는 과정을 거쳐 레이저를 주사하여 한 층씩 폴리머를 소결하게 된다.

Fig. 3.18은 SLS 공정의 스케줄을, Fig. 3.19는 온도에 따른 빌드룸의 적층 공정 제어 흐름을 각각 나타내며, 빌드룸의 폴리머 분말의 표면 온도를 적외선 온도센서(IR sensor)로 측정하여 100°C까지 예열(Preheating) 후 소결 시 변형을 줄이기 위해 100°C에서 일정 수의 레이어를 적층한다. 이 후 적층된 각 레이어의 온도 편차를 줄이기 위해 목표로 하는 소결온도(Sintering temperature) 까지 일정온도 마다 1 레이어를 적층한 후 레이저 소결을 하게 되며, 레이저 소결이 완료되면 다시 일정 수의 레이어를 적층하여 서서히 온도를 하강시켜 소결 후 변형을 방지하고 소결 작업을 완료하게 된다.

Fig. 3.20은 시스템 제어 프로그램과 레이저 제어 프로그램 사이의 메시지(message) 전달 과정을 나타내며, 시스템 제어 프로그램을 통해 레이저 소결 조건이 충족되면 레이저 제어 프로그램에 메시지를 보내 레이저 소결을 하게 되고 레이저 소결 완료 후 시스템 제어 프로그램으로 완료 메시지를 전달하여 SLS 공정이 완료되도록 하였다.

Fig. 3.21은 본 연구에 사용된 PC 기반 제어기의 정보교환 구조를 나타내며, 주제어기는 각 인터페이스 보드들을 이용하여 신호를 입력 받고 적절한 명령을 각 하위 제어기에 전달해 주는 역할을 한다.

주제어기는 MMC, A/D(Analog to Digital), D/A (Digital to Analog) 보드로 구성되며, 이 중 MMC는 DI/DO (Digital Input/Output) 모듈을 포함하고 있어 직접 리미트 (Limit) 센서 신호, 밸브 구동 명령 등을 입출력 한다.

빌드 룸과 피드 룸의 스테이지 제어, 롤러부 이송 제어, 질소 공급부 밸브 제어는 8축 MMC 보드를 통해 이뤄지고, 온도는 주제어기의 온도 제어기와 IR 센서, 열전대를 사용하여 아날로그 입출력 보드를 통해 제어하였고, 레이저 및 스캐너는 SCANLAB사의 RTC보드를 통해 제어된다.

Fig. 3. 22는 SLS 시스템의 제어를 위해 Visual C++ MFC 환경에서 개발된 소프트웨어를 나타내며, 스테이지 및 롤러 이송 제어를 위한 패널, 질소 분위기 조성을 위한 패널, 히터 제어를 위한 패널, 레이저와의 메시지 교환을 위한 패널 등으로 구성된다.

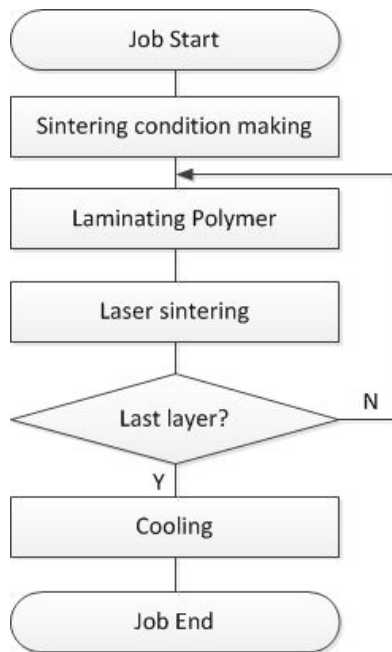


Fig. 3.17 Selective laser sintering Process

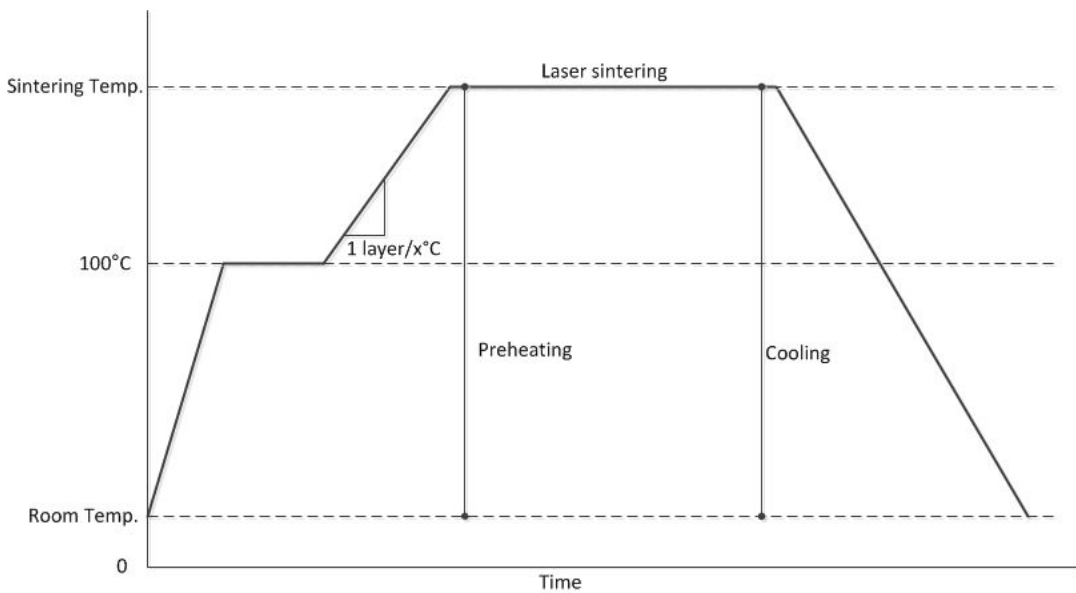


Fig. 3.18 Selective laser sintering schedule

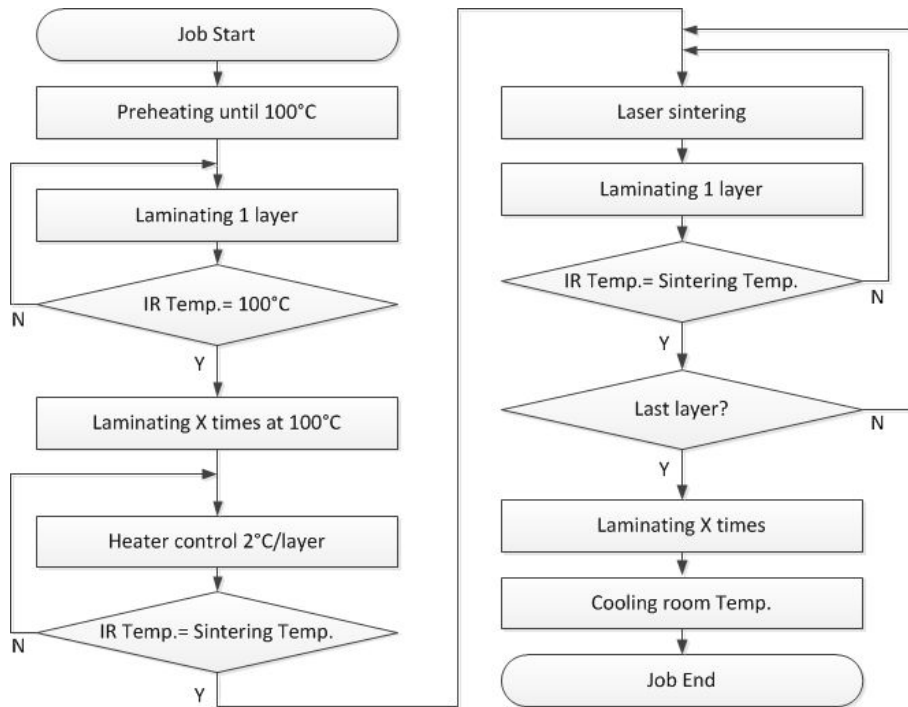


Fig. 3.19 Build room temperature control by laminating process

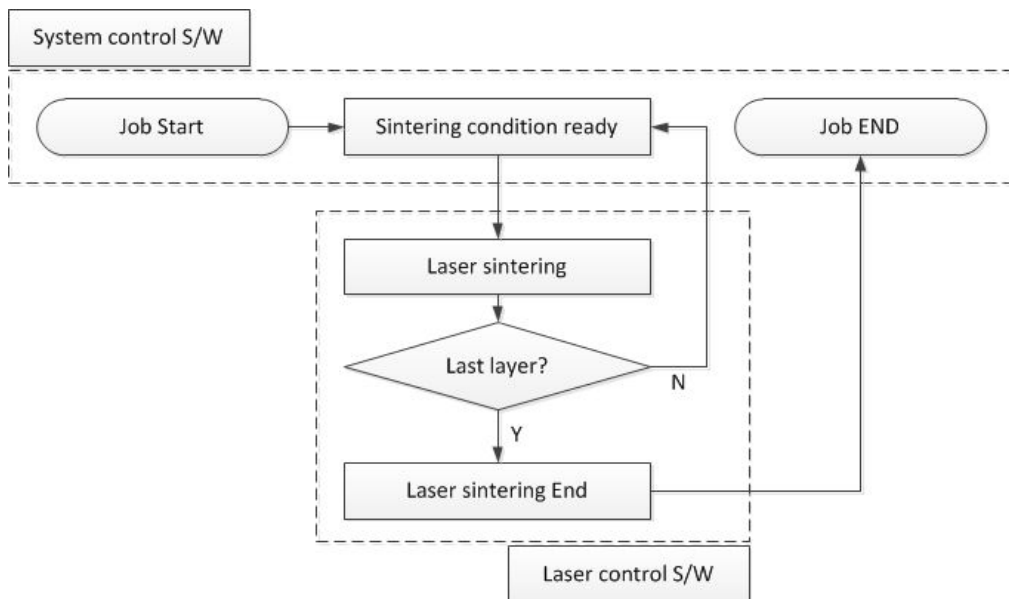


Fig. 3.20 Message exchange of System control & Laser control S/W

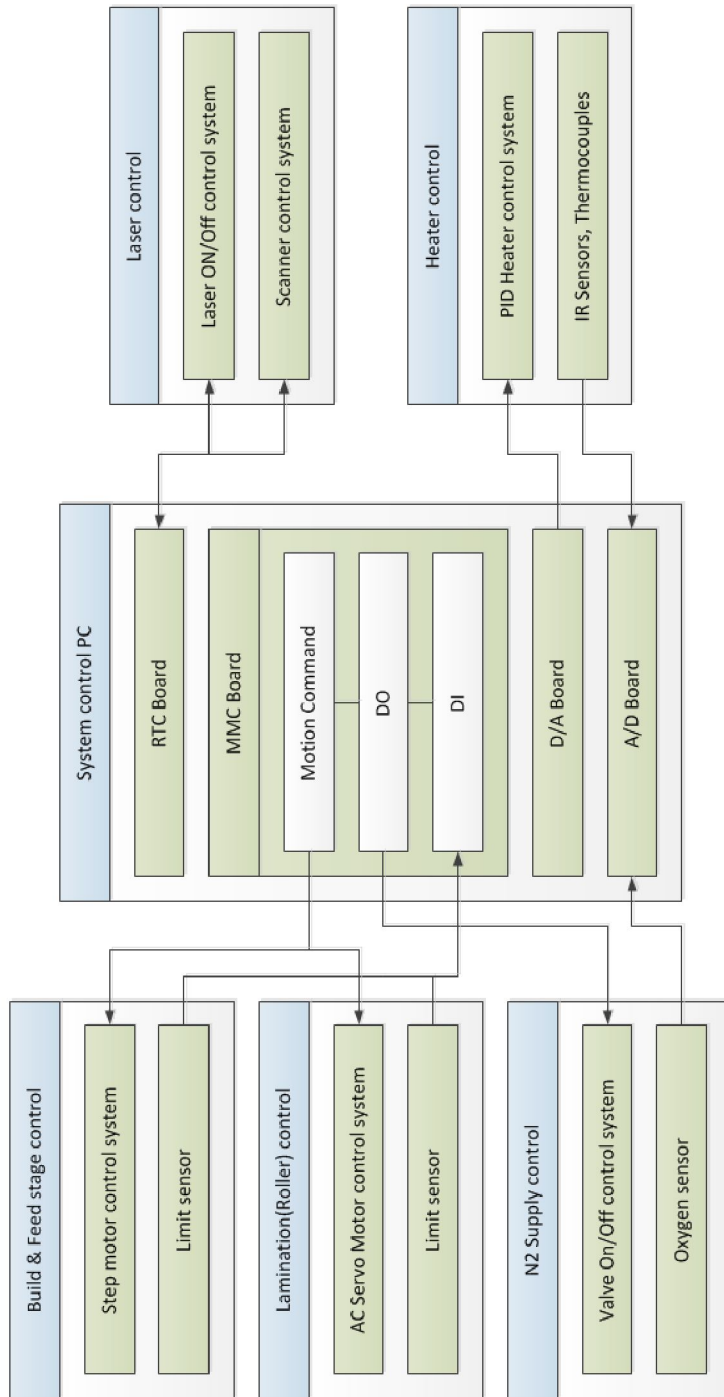


Fig. 3.21 Information structure chart of SLS system controller

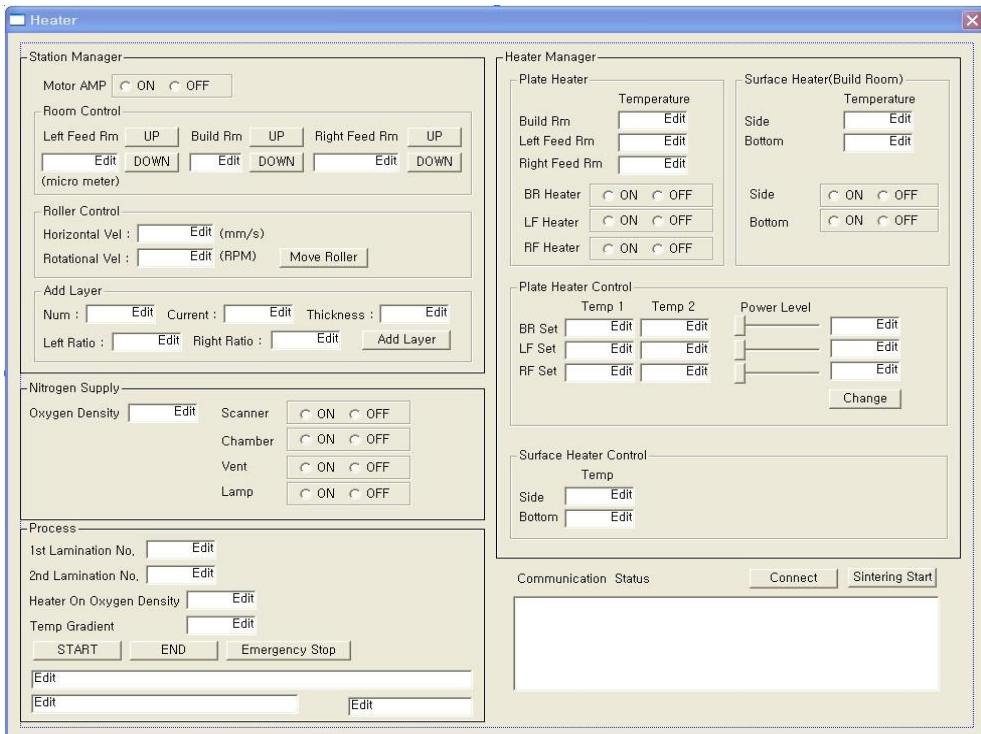


Fig. 3.22 System control S/W of SLS system

제 3 절 소결 공정 설계

1. PA-12 분말의 소결 특성 분석

SLS 공정에 있어 일반적으로 큰 입자보다 작은 입자 즉, 입자의 크기가 작아질수록 입자의 열전달 속도가 향상되므로, 열전달 속도는 레이저로 입자를 소결시키는 데에 큰 영향을 준다. 때문에 입자가 너무 크면 열전달 속도가 충분히 높지 않아 소결되지 않는 입자들이 존재할 수 있다.

또한, 균일하게 작은 입자들을 사용하는 것도 올바른 선택이 아닐 수 있다. 작은 입자들은 열전달 속도는 충분히 높은 값을 가지게 되지만, 자유 유동성을 가지고 있지 않기 때문에 가공성이 떨어지게 된다.

따라서 이러한 작은 입자들의 사용은 열전달 속도 면에서 필요하므로 큰 입자를 도입하여 비교적 분포가 넓은 입자를 사용하는 것이 좋다. 또한 이렇게 크기 분포가 넓은 입자들은 큰 입자 간에 작은 입자가 채워지게 되므로 소결품의 고밀도화를 가질 수 있다. 즉, 같은 물질의 고분자라고 해도 이러한 밀도에 따라 소결된 제품의 물성과 외관이 크게 영향을 받을 수 있기 때문에 입자의 분포는 중요한 요인이라 할 수 있다.

본 연구에서는 우수한 성형성과 물성을 가지고 있어 레이저 소결용 분말로 많이 사용되고 폴리아마이드 12(PA-12)를 출발원료로 선정하였고, SLS 소결 공정에 밀접한 영향을 미치는 화학 구조와 열적특징, 입도 크기와 분포, 입자의 모폴로지 등을 확인하였다.

Fig. 3.23은 화학적 구조를 파악하기 위해 FT-IR을 측정한 결과로, 3300cm^{-1} , 2900cm^{-1} 에서 -NH기의 stretch와 알킬기의 peak을 1650cm^{-1} 에서 C=O, 1600cm^{-1} 에서 N-H기의 bending peak로 전형적인 PA-12의 화학적 구조를 가지고 있음을 확인하였다.

또한 PA-12의 유리전이온도와 용융온도를 확인하기위해 시차주사열량계(DSC, TA Instrument)를 이용하여 측정한 결과 60°C 의 유리전이온도를 가지고 있었고, 184°C 부근에서 용융됨을 알 수 있었다.

Fig. 3.24은 레이저 회절 입도 분석기를 이용하여 입도를 분석한 결과로, 평균 $60\mu\text{m}$ 의 입도를 가지고 있었고, 작은 입자를 상당수 포함한 넓은 입자 분포 가지고 있음을 알 수 있었다. Fig. 3.25는 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 표면을 분석한 결과로 선정된 PA-12의 입자는 구형의 모양을 가지고 있고, 작은 입자들과 큰 입자들이 고르게 분포하고 있음을 확인할 수 있었다.

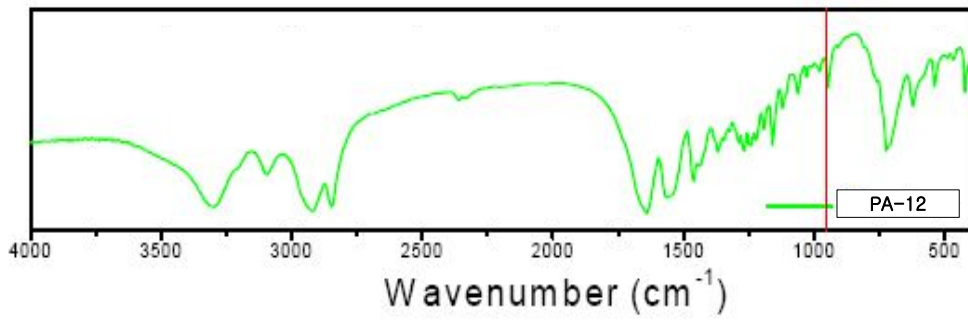


Fig. 3.23 Chemical structure of PA-12

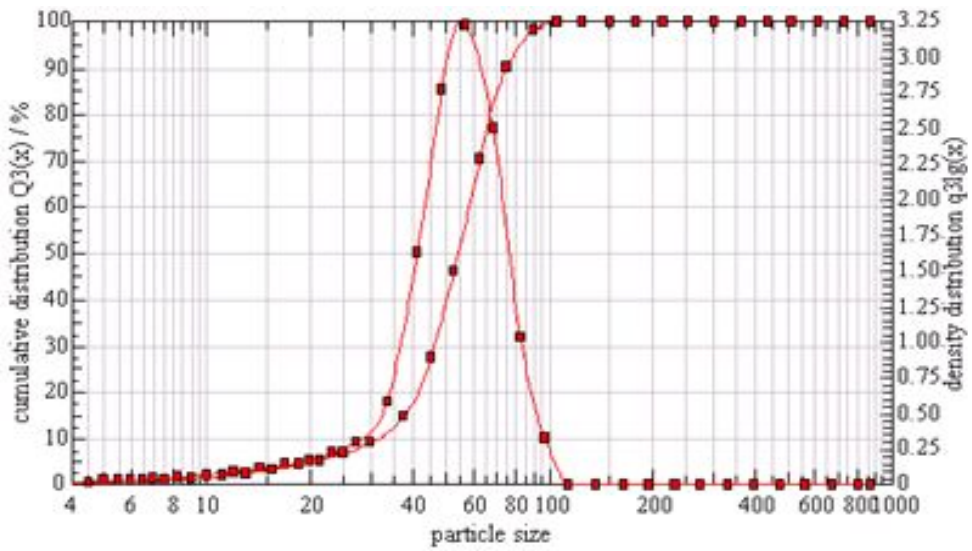


Fig. 3.24 Grain size distribution of PA-12

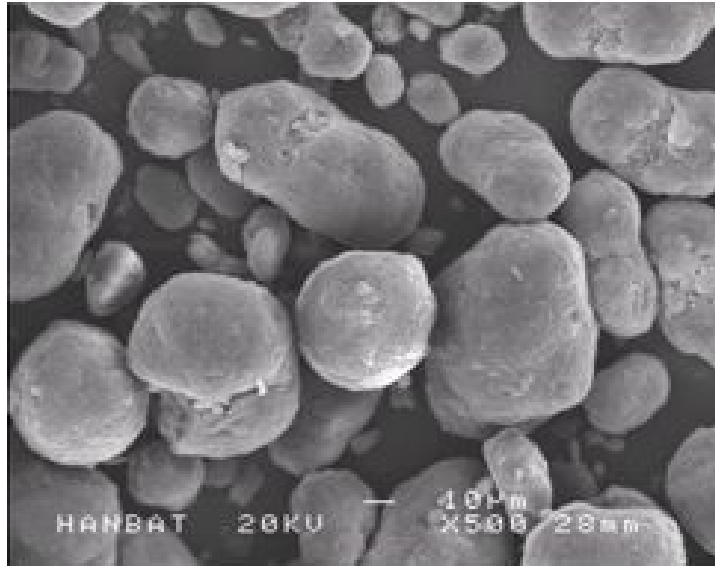


Fig. 3.25 SEM Image of PA-12 powder

2. 소결 공정 설계 및 실험 변수 선정

SLS 전체 공정은 Fig. 3.26과 같이 워크룸에 질소를 공급하고 분말을 예열하여 소결 분위기를 조성하는 전처리 과정과 3D 모델로부터 생성된 레이저 궤적에 따라 소결하고 한 층씩 적층하여 3차원 형상을 제작하는 소결과정, 소결이 끝난 후 소결물의 변형을 방지하기 위한 후처리 과정으로 구성된다.

① 전처리 과정

- a. N₂ GAS supplying
- b. N₂ GAS의 농도가 95%에 도달했을 때, Heater On
- c. Build room surface flatting
- d. 100°C 까지 Preheating 후 20 layer 적층
- e. Build room의 목표 온도까지 2°C 올릴 때 마다 1 layer 씩 적층

② 소결과정

- a. stl file로부터 slicing data 생성 후 scan path 생성
- b. Laser scanner home position
- b. 생성된 scan path로부터 Selective laser sintering 수행

③ 후처리 과정

- a. Cooling 과정에서 발생하는 열변형을 막기 위해 일정 layer 적층
- b. Room temperature 까지 Cool down
- c. Chamber Open
- d. 분말 제거 작업

SLS 공정에 있어 중요한 소결 공정 변수는 빌드룸의 온도, 적층높이, 레이저 빔의 파워, 레이저 스캔 속도, 스캔 간격 등을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 SLS 공정의 경우 다양한 소결 공정 변수를 가지므로 실험 횟수를

최소화하기 위한 방법으로 PA-12 분말 특성 분석 결과와 예비 실험을 통해 소결 공정 실험을 위한 조건을 도출하였다.

Table 3.7에서 알 수 있듯이 PA-12의 용융온도(Melting Temp.)는 약 184°C로 레이저를 주사하여 PA-12 분말의 소결이 가능한 온도범위는 160°C ~ 170°C로 정할 수 있다.

여기서, 소결 분위기 온도가 160°C 미만일 경우 높은 레이저 파워가 요구되고, 170°C 이상으로 PA-12 분말을 예열할 경우 일부 분말이 용융 되거나 분말의 입성장, 분말의 뭉침 현상 등이 발생하게 된다.

따라서 본 연구에서는 실험 횟수를 줄이기 위해 소결 분위기 온도를 165°C로 선정하고 레이저 및 스캐너 관련 변수를 적절히 조절할 수 있도록 소결 변수 실험을 조건을 선정하였다.

Fig. 3.27은 레이저 파워와 스캔 속도의 실험 조건을 선정하기 위해 수행한 예비 실험 과정을 나타내며, 소결 분위기 온도 165°C에서 레이저 파워는 13Watts에 17Watts 까지 1Watts 단위로, 레이저 스캔 속도는 3.5m/s에서 7m/s까지 0.5m/s 간격으로 직선 형태로 레이저를 주사하여 PA-12 분말의 소결 상태를 확인하였다.

레이저 파워 및 스캔속도 예비 실험 결과 우수한 소결특성을 가지는 레이저 파워 15Watts, 16 Watts, 17Watts의 조건과, 스캔 속도는 5m/s와 6m/s 조건을 레이저 소결 공정 변수로 선정하였다. 또한 레이저 스캔 간격은 레이저 광의 에너지 분포가 Gaussian 형태를 가지므로 중첩영역을 고려하여 350µm, 400µm 으로 각각 선정하였다.

Table. 3.8은 PA-12 분말 특성 분석 결과와 예비 실험결과 등을 바탕으로 선정된 소결 공정 변수 실험 조건을 나타낸다.

Table 3.7 Properties of PA-12

Density (g/cm ³)	Grain size (µm)	Glass transition Temp.(°C)	Melting Temp. (°C)
0.59	≒ 60(Ave.)	≒ 60	≒ 184

Table 3.8 Sintering variable test conditions

Temp. (°C)	Laser power (Watts)	Scan speed (m/s)	Scan space (µm)
165	15	5	350
			400
		6	350
			400
	16	5	350
			400
		6	350
			400
	17	5	350
			400
		6	350
			400

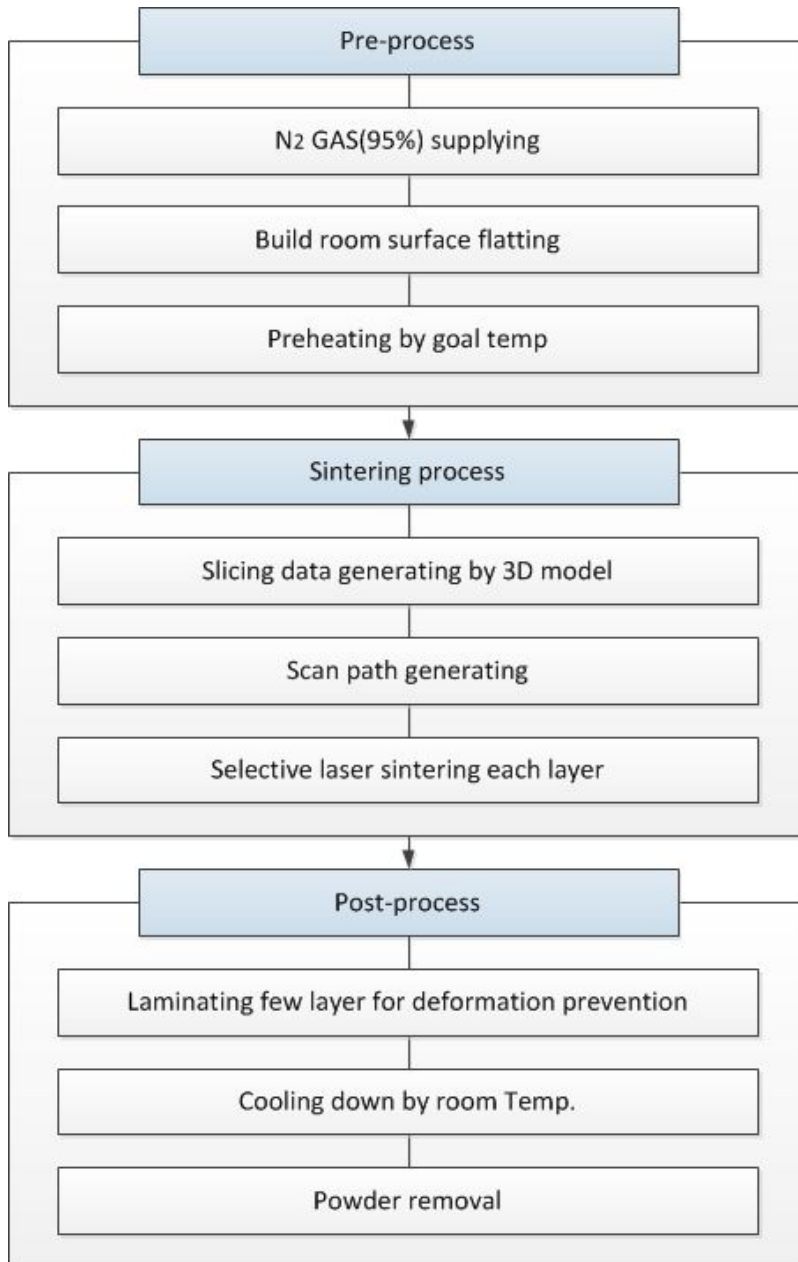


Fig. 3.26 Selective laser sintering process

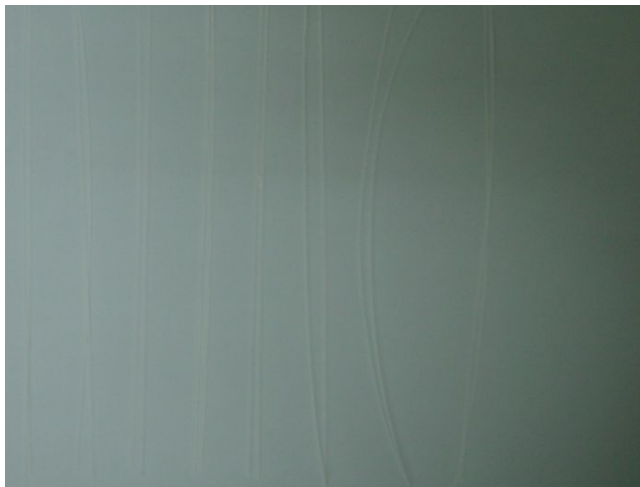


Fig. 3.27 Pre-test of laser scan speed

제 4 장 결과 및 고찰

제 1 절 시스템의 제어 결과 및 고찰

1. 적층 표면 특성

SLS 시스템은 분말을 적층한 후 CO₂레이저를 이용하여 소결하여야 하므로, 빌드 룸에 분말을 공급하고 목표로 하는 높이로 분말의 평탄화 작업을 수행하기 위해서는 롤러의 수평 이송 및 롤러 회전 구동기인 AC 서보 모터(Servo motor)를 일정 속도로 제어해야 한다.

본 연구에서는 AC서보 모터 제어를 위해 PI 제어 기법을 적용하여 제어기를 설계하였고, 제어기가 원하는 응답특성을 갖도록 P 게인 값(Gain value)과 I 게인 값(Gain value)을 최적화하기 위한 실험을 수행하였다.

Fig. 4.1은 수평 이송을 위한 AC 서보 모터의 P 게인 값과 I 게인 값의 변화에 따른 속도 응답 특성을 나타내며, Fig. 4.2(a)는 P 제어기만 사용한 경우로 서보 모터의 응답 특성이 좋지 못함을 알 수 있다. Fig. 4.2(b)는 실험을 통해 PI 게인 값을 조절한 것으로 서보모터의 출력 속도가 입력 속도를 잘 추종하는 것을 확인 할 수 있다.

빌드 룸에 폴리머 분말이 일정 높이로 적층되기 위해서는 빌드 스테이지와 피드 스테이지의 수직 이송 제어, 롤러의 수평 이송과 회전 제어가 필요하다. Fig. 4.2(a)는 빌드 스테이지와 피드 스테이지의 높이를 100 μ 로 하여 적층실험을 한 결과로 빌드 룸에 폴리머 균질하게 도포되지 않았다. Fig. 4.2(b)는 피드 스테이지 높이를 빌드 스테이지 높이의 2배로 하여 분말을 적층한 결과로 원활한 적층을 위해 빌드 스테이지 높이의 최소 2배 이상의 분말이 공급되어야 함을 알 수 있었다.

또한 균질한 분말의 표면을 얻기 위해서 롤러의 수평 이송 속도와 회전 속도의 제어 실험을 반복 수행하였으며, Fig. 4.2(b)와 같이 롤러의 수평이송 속도 250mm/s, 회전속도 11rpm에서 최적의 분말 적층 표면을 얻을 수 있었다.

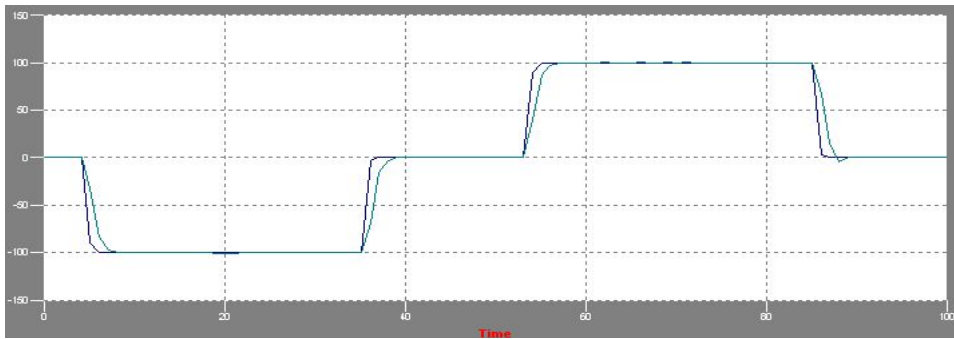
본 연구를 위해 제작된 분말 적층 롤러의 수평 이송거리는 625mm이고 분말적층을 위해 롤러가 왕복 운동을 해야 하므로 식 4.1에 의해 1개의 분말 레이어(Layer)를 적층하기 위해 ≈ 7 sec가 소요된다.

$$Laminating\ time = \frac{H_l \times 2}{H_v} + D_t \quad (4.1)$$

여기서 H_l : 롤러의 수평 이송거리, H_v : 수평 이송속도, D_t : Delay time(2sec) 이다.

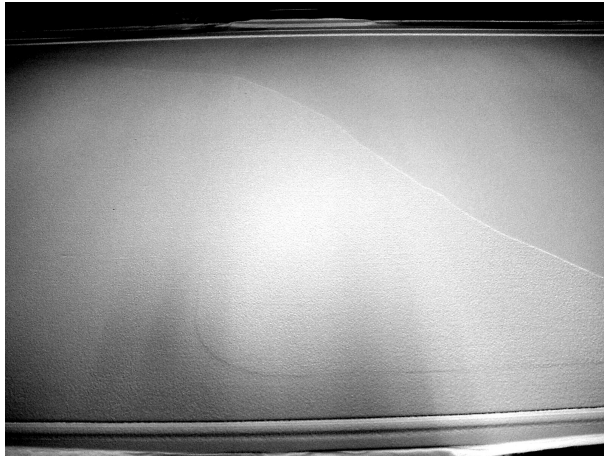


(a) $k_p=3000$, $k_i=0$

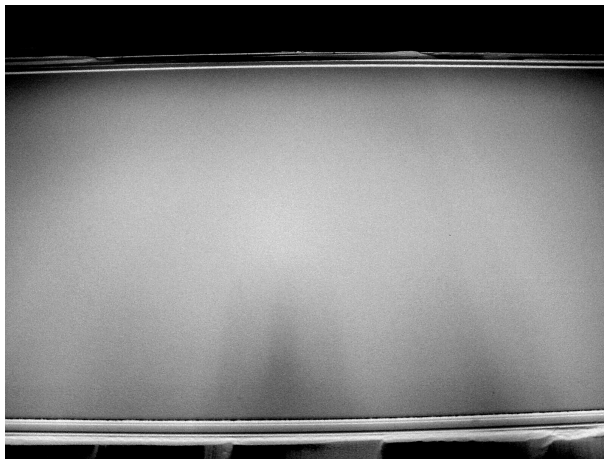


(b) $k_p=500$, $k_i=75$

Fig. 4.1 Speed response characteristic of AC Servo motor by gain value



(a) Feed stage height 100 μ m



(b) Speed=250mm/s, 11rpm

Fig. 4.2 Powder surface by powder supply & roller speed

2. 소결 분위기 온도 제어 특성

SLS 공정에서 분말의 소결온도 중요한 변수로서 CO₂레이저 소결과 소결품의 변형과 밀접한 관계가 있다.

일반적인 SLS 공정에 사용되는 폴리머 분말(PA-11, PA-12)의 용융온도(Melting Temperature)는 Table 4.1과 같고 본 연구에 사용된 폴리머의 경우 용융 온도가 ≒ 184°C로 워크룸의 경우 178°C, 피드룸의 135°C로 하여 Fig. 4.3과 같이 장치를 구성하여 판형 복사 히터의 성능 실험을 수행하였다.

Fig. 4.4는 50min 동안 히터의 성능 실험을 한 결과를 나타내며, 초기 100°C 구간까지는 10°C/min로 빠르게 승온 시키고 100°C 도달 이후 일정 시간 안정화 시킨 후 100°C이후 구간부터 7°C/min로 승온 시키도록 제어 하였다.

피드룸과 빌드룸의 목표 온도 도달이후 ≒20min 가량 PID 제어를 통해 워크룸과 피드룸 온도를 정밀하게 제어하였다.

Fig. 4.5는 목표 온도 도달 이후의 온도변화를 관찰하기 위해 평균치의 변화를 관리하는 \bar{X} 관리도와 편차의 변화를 관리하는 \bar{R} 관리도를 조합한 *X bar R Chart*로 온도 제어 결과를 분석한 결과를 나타낸다.

Fig. 4.5(a)는 피드룸의 온도 제어 결과로 평균 135.3°C로 온도가 제어됨을 알 수 있었고 평균 편차는 0.8059임을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.5(b)는 워크룸의 온도 제어 결과로 평균 178.1°C로 온도가 제어됨을 알 수 있었고 평균 편차는 0.7412임을 확인할 수 있었고, 본 연구에 적용된 판형 복사 히터가 비교적 잘 제어되고 있음을 알 수 있다.

Table 4.1 Thermal characteristic of polyamide powder

Div.	Melting point(°C)
Polyamide 11	≥ 190
Polyamide 12	≥ 179
Polyamide 12(using exp.)	≒ 184

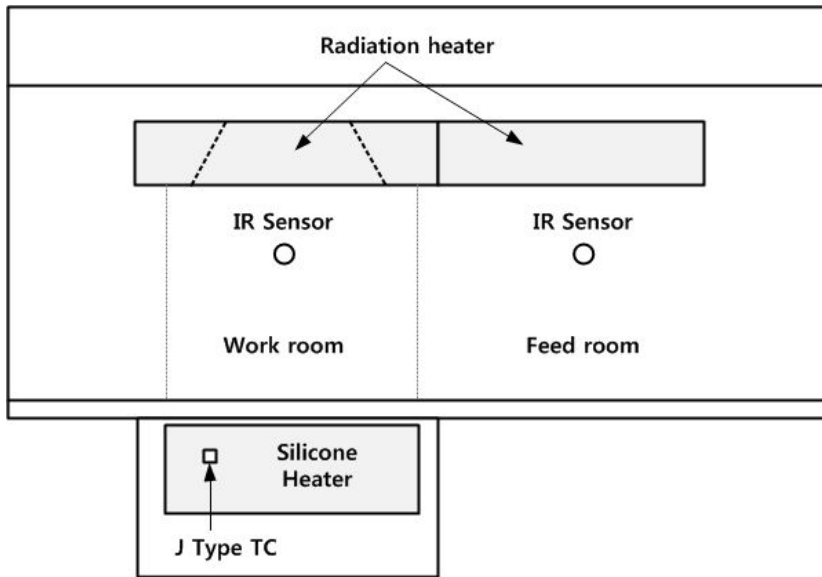


Fig. 4.3 Schismatic diagram of heaters & sensors

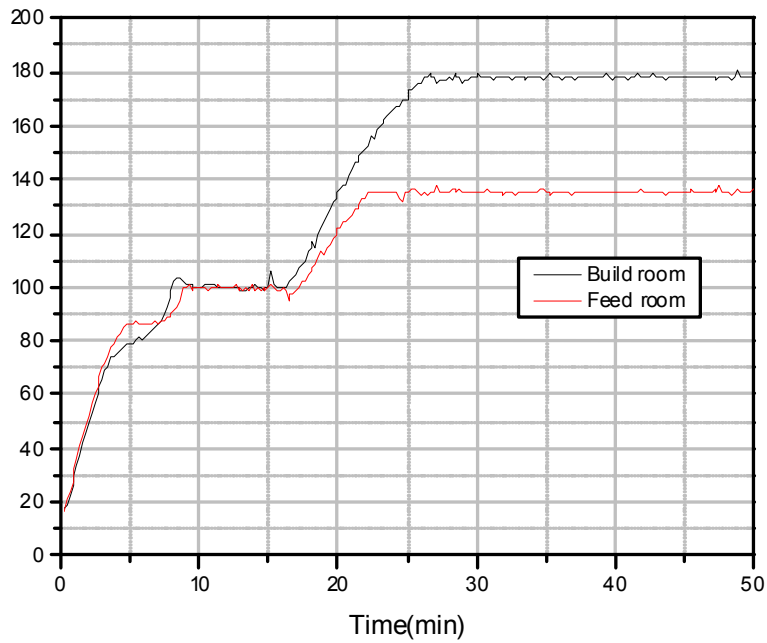
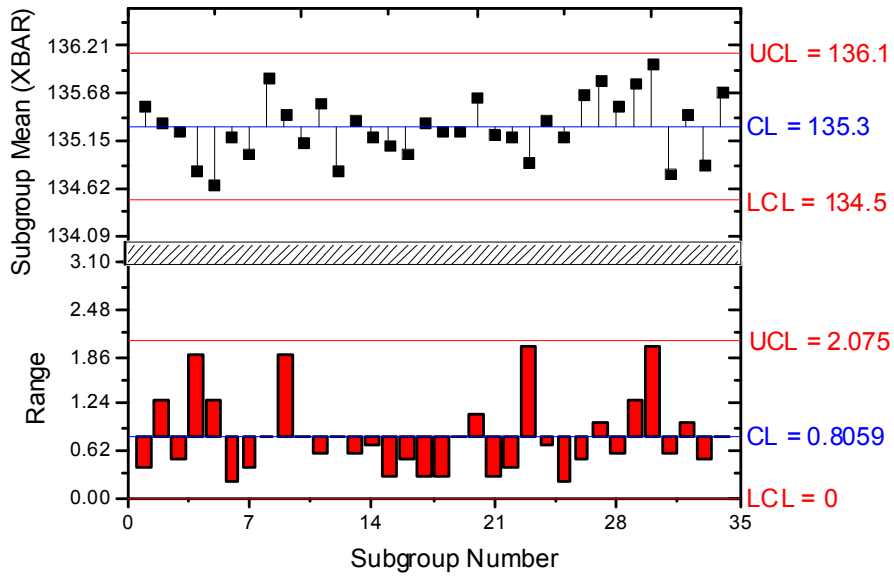
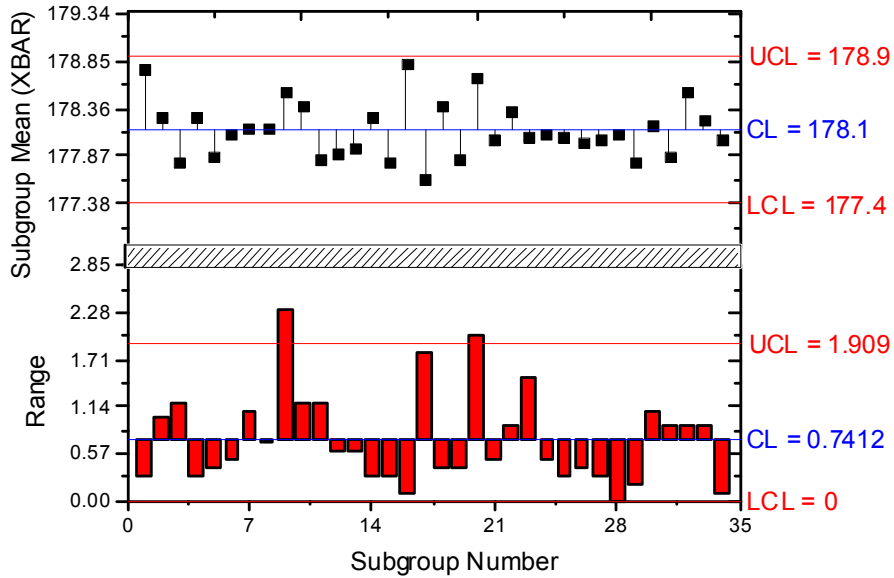


Fig. 4.4 Performance curve of Radiation heater



(a) Feed room temperature



(b) Build room temperature

Fig. 4.5 X bar R Chart of Radiation heater(30min~50min)

3. 레이저 및 광학계 특성

CO₂ 레이저를 사용하는 SLS 공정에서는 레이저 파워는 소결 정밀도 및 소결 밀도에 밀접한 관계를 가지므로 소결 과정 중에 일정한 레이저 파워가 유지되어야 한다.

레이저 유닛의 특성상 소결하고자 하는 분말의 표면에 도달할 때까지 반사미러, 빔 익스팬더, 3축 다이내믹 포커싱 스캐너 렌즈 등의 레이저 유닛을 통과할 때 상당한 손실이 발생하게 되므로, 본 연구에 사용된 CO₂ 레이저의 성능을 분석하기 위해 Fig. 4.6과 같은 레이저 파워 메터(Laser power meter)를 이용하여 펄스폭(Pulse width)에 따른 레이저 파워(Laser power)의 측정실험을 수행하였다.

Fig. 4.7은 CO₂ 레이저에 레이저 유닛을 부착하지 않았을 때와 레이저 유닛을 부착하여 레이저 빔이 분말 표면 위치에 도달하였을 때의 파워를 측정한 그래프로 본 연구에 사용된 50Watts급 CO₂ 레이저가 레이저 유닛을 통과한 후 상당한 손실이 발생됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.7과 같이 측정된 레이저 파워를 Polynomial fit을 이용하여 2차 방정식을 구하면 식 3.6과 같이 나타낼 수 있으며, 펄스폭(x)에 따른 레이저 파워(L_{power})는 식 4.2와 같다.

$$L_{power} = B_2x^2 + B_1x + C \quad (4.2)$$

Table 4.2 Value of Polynomial fit when unused laser unit

C		B ₁		B ₂		R-Square
Value	Error	Value	Error	Value	Error	Value
-0.16235	0.43768	2.18174	0.04919	-0.02638	0.00114	0.98862

Table 4.3 Analysis of Polynomial fit when installation of laser unit

C		B ₁		B ₂		R-Square
Value	Error	Value	Error	Value	Error	Value
-0.85822	0.41861	1.21389	0.04705	-0.01206	0.00109	0.99695



Fig. 4.6 Laser beam power meter

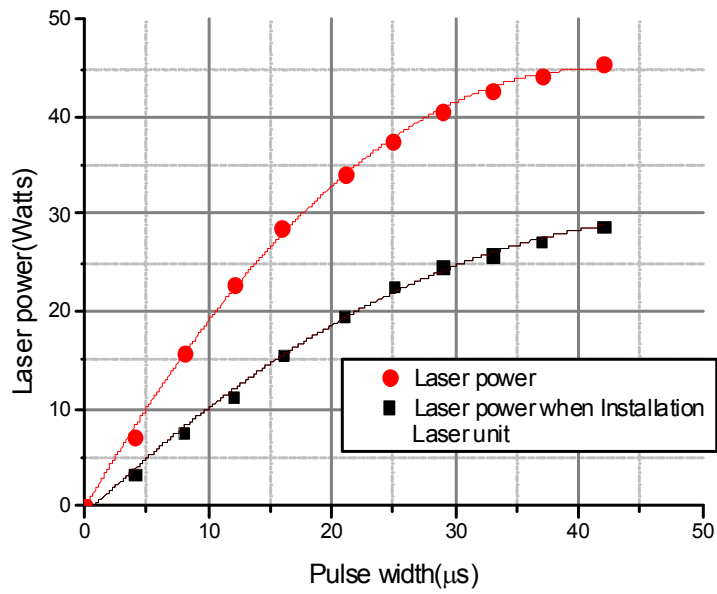


Fig. 4.7 Performance curve of laser unit

제 2 절 소결 공정 특성

1. 소결 공정 변수 특성

Fig. 4.8은 Table 3.8과 같은 조건으로 동일한 시편에 대해 다양한 소결 실험을 수행한 과정을 나타낸다.

Fig. 4.8(a)는 소결 분위기 온도 165°C, 레이저 파워 16 Watts, 스캔 속도 5 m/s, 스캔 간격 350μm로 실험한 결과로 비교적 소결이 잘 되었으나, 스캔 간격에 따른 소결 중첩부가 관찰 되었고 중첩영역은 소결체의 표면 조도를 저하시키게 된다.

Fig. 4.8(b)는 소결 분위기 온도 165°C, 레이저 파워 16 Watts, 스캔속도 6 m/s, 스캔 간격 400μm로 실험한 결과로 가장 우수한 소결 특성을 나타내었으며, 소결 표면 관찰 결과 소결 중첩에 따른 영향은 매우 낮았다.

Fig. 4.8(c)는 소결 분위기 온도 165°C, 레이저 파워 17Watts, 스캔 속도 6m/s, 스캔 간격 400μm로 실험한 결과를 나타내며, 과도한 레이저 파워에 의해 일부 과소결 현상이 발생한 것을 관찰할 수 있었고, 컬링(Curling) 현상이 발생하였다.

Fig. 4.8(d)는 소결 분위기 온도 165°C, 레이저 파워 17Watts, 스캔 속도 5m/s, 스캔 간격 350μm로 지나친 과소결 현상에 의해 컬링 현상이 발생함을 알 수 있었다.

본 실험을 통해 스캔 간격이 좁을 경우 중첩영역이 발생하여 표면 조도를 저하시키고, 레이저 파워 및 속도에 따른 레이저 빔의 밀도가 필요 이상으로 높을 경우 과소결 현상과 컬링이 발생함을 알 수 있었다.

따라서 레이저 소결 공정 변수 실험 실험 결과를 종합해 볼 때 본 연구를 위해 제작된 SLS 시스템은 Table 4.4와 같은 최적 소결조건을 가짐을 알 수 있었다.

Table 4.4 Optimized Sintering condition of SLS system

Temp. (°C)	Laser power (Watts)	Scan speed (m/s)	Scan space (μm)
165	16	6	400

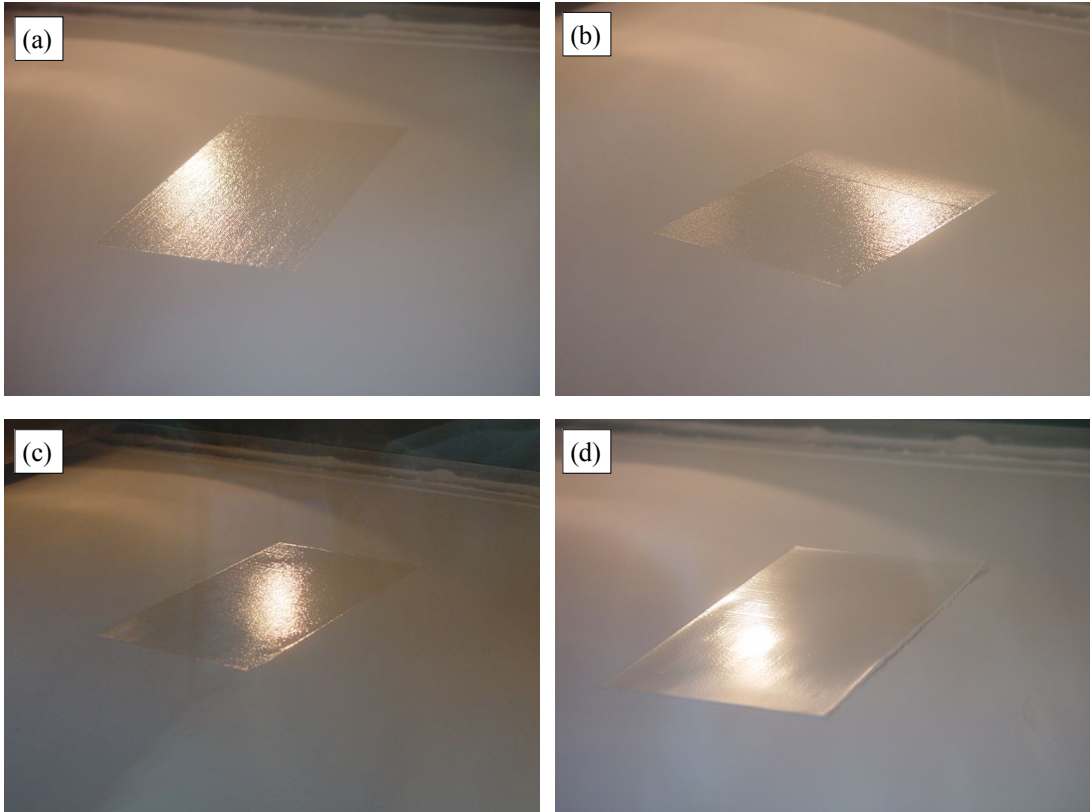


Fig. 4.8 Results of sintering variable

2. 레이저 On/Off 딜레이에 따른 소결 특성

SLS 공정에서 3D 모델로부터 형상의 정밀도 향상을 위해서는 레이저의 주사 경로의 시작점과 끝점에서의 레이저 온/오프 딜레이 시간(On/Off delay time), 레이저 마크 딜레이 시간(Mark delay time), 레이저 소결 시 주사 속도(Mark speed) 등에 대한 정의가 필요하다.

Fig. 4.9(a)는 3D 모델의 레이저 소결 시 시작점과 끝점의 온/오프 딜레이 시간이 길어져 과소결(Over sintering) 현상이 나타난 경우로, 레이저 온/오프 딜레이 시간은 형상정밀도와 가장 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4.9(b)는 Table 4.7과 같은 조건으로 레이저 온/오프 딜레이 시간의 조절 실험을 통해 레이저 온/오프 딜레이를 100 μ s, 마크 딜레이를 10 μ s로 하여 동일 모델을 제작 한 결과로 레이저 소결 시작점과 끝점의 과소결 현상이 사라진 것을 확인할 수 있었다.

Table 4.5 Conditions for sintering precision improvement

Layer thickness (μ m)	Laser power (Watts)	Scan speed (m/s)	Scan space (μ m)	On/off delay (μ s)	Mark delay (μ s)
100	16	6	400	100	10

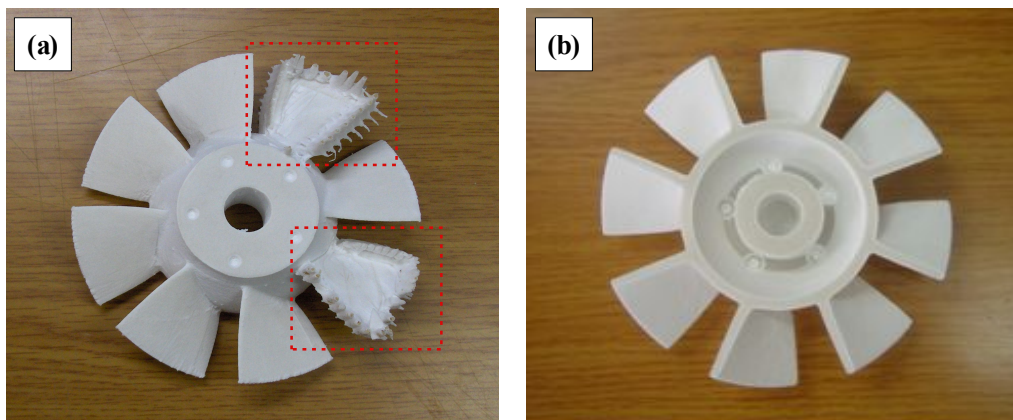


Fig. 4.9 Over sintering phenomenon by laser On/Off delay time

3. 적층 두께에 따른 치수정밀도

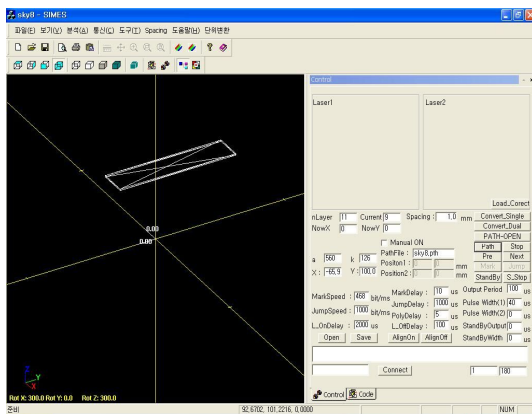
SLS 공정에서 높이 방향의 정밀도는 적층 두께와 밀접한 관계를 가지게 되므로 레이저 소결 시 최적의 적층두께에 대한 선정이 필요하다.

본 연구에 사용된 PA-12 분말의 평균 직경이 60 μ m인 것을 고려하여 적층 두께를 각각 80, 100, 120 μ m로 하여 두께가 6mm인 Fig. 4.10(a)와 같은 3D 모델에 대한 높이 방향의 치수 정밀도를 평가 실험을 수행하였다.

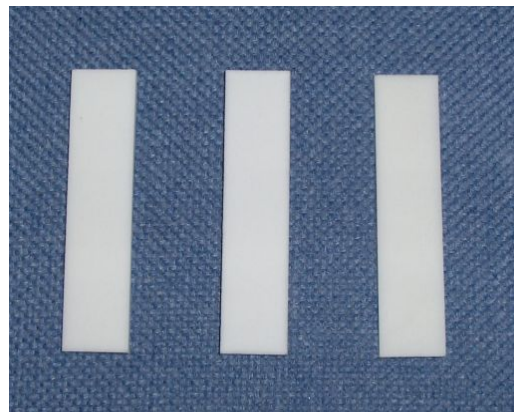
Fig. 4.10(b)는 Table 4.6과 같은 소결 조건에서 제작된 시편으로 디지털 버니어 캘리퍼스(Digital vernier callipers, Mitutoyo)로 각 시편의 위치별로 5번 측정된 결과를 Table 4.7와 Fig. 4.11에 나타내었다. 실험 결과 100 μ m에서 \approx 0.05mm로 가장 작은 치수오차를 가지고 있었고, 적층두께 80 μ m와 100 μ m에서도 작은 치수오차를 가지고 있음을 알 수 있었다.

Table 4.6 Sintering conditions for z-axis precision evaluation

Part size (mm)	Layer thickness (μ m)	Laser power (Watts)	Scan speed (m/s)	Scan space (μ m)
30 \times 120 \times 6	100	16	6	400



(a) 3D Model



(b) Fabricated model

Fig. 4.10 3D model for z-axis precision evaluation by laminating thickness

Table 4.7 Results of precision measurement

Laminating thickness	80	100	120
Number of layers	75	60	50
Layer thickness	≅ 6.11	≅ 6.05	≅ 6.14

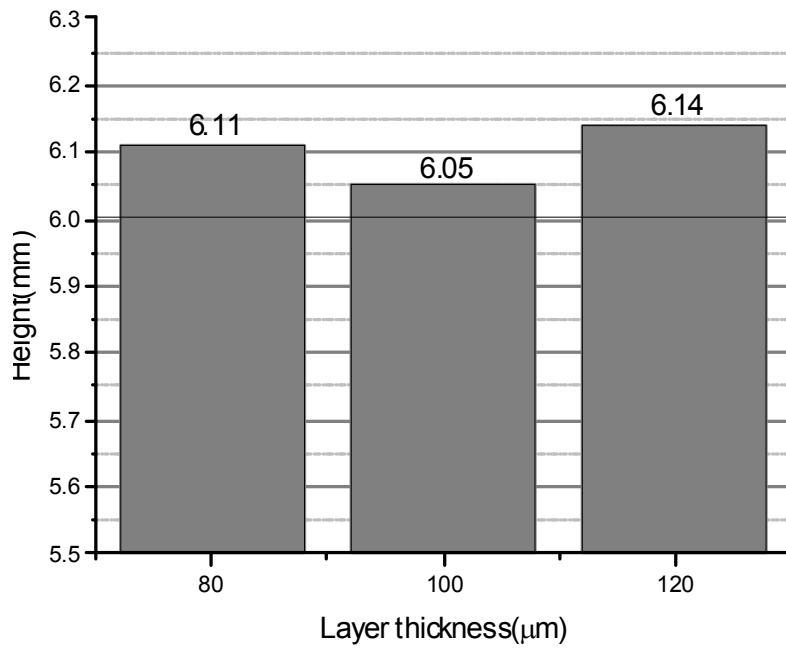


Fig. 4.11 Results of precision measurement

4. 최적 조건에 따른 치수정밀도 검증

본 연구에서는 SLS 시스템의 최적 제어와 소결공정개발을 위해 소결분위기 제어, 레이저 주사경로생성 및 성능, 폴리머 분말의 특성 분석 등의 다양한 실험을 수행하였다.

Table 4.8은 본 연구에서 개발한 SLS 시스템의 최적 소결 공정 조건을 나타내고, 이를 바탕으로 일반적으로 SLS 공정을 사용하는 상용 장비에서 제작치수 검증을 위해 사용되는 스케일 바(Scale bar)를 제작하여 치수검증을 하였다.

Fig. 4.12(a)는 Table 4.8과 같은 조건으로 제작된 스케일 바를 나타내고, Fig. 4.12(b)에 제작된 스케일 바의 치수검증을 위한 측정부위를 도식화하여 나타내었다.

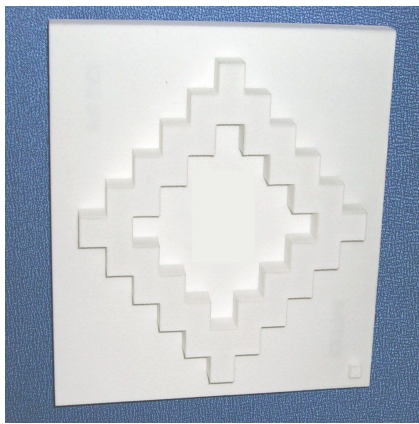
Table 4.9는 Fig. 4.12(a)의 스케일 바를 디지털 버니어 캘리퍼스로 측정한 결과를 나타낸 것으로, 치수 오차 검증 결과 x, y, z 축 모두 $\pm 0.7\text{mm}$ 이내의 제작 오차를 가지고 있어 치수 정밀도가 매우 높은 것을 확인할 수 있었다.

Table 4.8 Optimized sintering conditions of SLS system

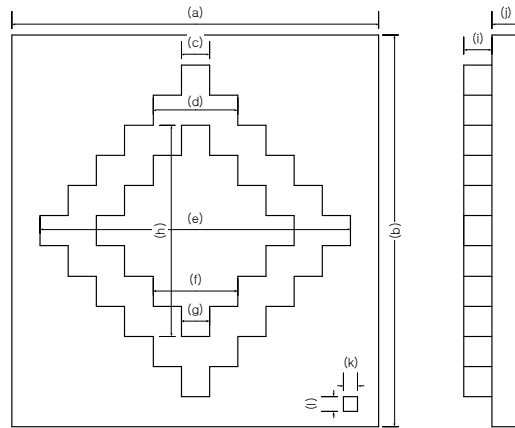
Conditions	Units	Values
Horizontal traverse speed	mm/s	50
Roller rotation speed	rpm	11
Sintering Temperature	°C	165
Layer thickness	μm	100
Laser power	Watts	16
Laser On/Off delay	μs	100
Scan speed	m/s	6
Scan space	μm	400
Scan path	-	Region division

Table 4.9 The results of dimensions measurements

Points	3D model (mm)	scale bar (mm)	Points	3D model (mm)	scale bar (mm)
(a)	160	159.58	(g)	12	11.92
(b)	160	159.61	(h)	84	83.32
(c)	12	11.75	(i)	10	10.36
(d)	36	35.61	(j)	10	10.25
(e)	132	131.52	(k)	6	5.91
(f)	36	35.53	(l)	6	5.93



(a) Fabricated scale bar



(b) Dimensions of scale bar

Fig. 4.12 Fabricated scale bar and dimensions

제 3 절 소결 시편 분석 및 특성 고찰

1. 소결 밀도

일반적으로 소결품의 치밀화(Densification) 정도는 제품의 강도, 경도 등 물리적인 특성과 밀접한 관계를 가지고 있어, PA-12의 사출 성형에 따른 밀도와 SLS 소결 공정을 통해 제작된 성형품의 밀도에 대한 비교 분석이 필요하다.

본 연구에서 제작한 PA-12 소결 시편의 경우 다수의 기공을 포함하고 있어, 흔히 소결 밀도를 측정에 사용되는 아르키메데스(Archimedes) 방법 대신 정밀한 소결 밀도 측정을 위해 시편을 8시간 동안 데시케이터(Desiccator)에서 완전 건조한 후 헬륨가스(He gas)를 사용하는 가스밀도측정기(Gas pycnometer, Ultrapycnometer 1200e, Quantachrome Co.,Ltd.)를 이용하여 소결 밀도를 측정하고 PA-12 분말의 밀도와 비교하였다.

Table 4.10은 실험 결과를 나타내고 소결 시편의 밀도는 1.0957g/cc로 본 연구에 사용된 PA-12 분말의 밀도인 0.59g/cc에 비해 \approx 1.86배 정도 높은 밀도를 가지고 있었다.

또한 일반적으로 사용되고 있는 PA-12의 사출 성형품의 밀도는 \approx 1.15g/cc로 PA-12 분말을 이용하여 제작한 소결 시편과 밀도 차이가 \approx 0.05g/cc인 점을 감안한다면 소결 시편에 일부 기공이 존재하나 SLS 공정을 통해 PA-12 분말이 완전 용융되었음을 알 수 있다.

이를 통해 SLS 공정을 이용하여 제작한 소결제품과 사출제품과의 물리적 특성 큰 차이가 없음을 유추해 볼 수 있다.

Table 4.10 The results of density measurement

Conditions	Units	Values
Weight	g	1.3639
Volume	cc	1.2448
Density	g/cc	1.0957

2. 소결표면 특성 및 미세구조 관찰

SLS 공정을 통해 제작된 시편의 경우 미세한 폴리머 분말을 사용하기 때문에 표면에 미소결 된 분말이 존재할 수 있다. 이러한 미소결 분말은 소결체 표면에 용착되어 표면조도에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 FE-SEM(JSM-7100F, JEOL Co.,Ltd.)을 이용하여 소결 시편의 표면을 관찰하였다. Fig. 4.13은 평면 방향의 표면을 관찰한 결과로 미세한 폴리머 분말들이 시편의 표면에 다수 용착되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

또한 Fig. 4.14는 소결 시편의 높이 방향의 표면을 관찰한 결과로 평면 방향과 달리 일부 미소결 폴리머 분말이 관찰되었으나, 전체적으로 폴리머 분말이 용융되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.15는 표면거칠기측정기(SE-600, KOSAKA Co.,Ltd.)를 이용하여 소결 시편의 표면거칠기를 측정한 F.Profile 결과를 나타내며, Table 4.11과 Table 4.12는 소결 시편의 표면거칠기를 평면 방향과 높이방향으로 각각 3회 측정한 결과를 나타낸다.

표면거칠기 측정결과 평면 방향의 산술평균거칠기(Ra)는 $7.10\mu\text{m}$, 10점 평균 거칠기(Rz)는 $35.51\mu\text{m}$ 이었고, 높이 방향의 산술평균거칠기는 $9.32\mu\text{m}$, 10점 평균 거칠기 $41.56\mu\text{m}$ 로 평면방향보다 높이 방향의 표면거칠기 값이 더 높은 것을 알 수 있었다.

이는 평면 방향의 경우 미세한 폴리머 분말이 고르게 용착되어 있는 것에 비해 높이 방향의 경우 소결 후 표면에 기공이 다수 존재하기 때문으로 판단된다.

Fig. 4.16과 4.17은 소결 시편의 내부에 존재하는 기공(Porosity) 정도를 관찰하기 위해 시편의 절단면을 시험편연마기를 사용하여 연마한 후 금속현미경(DM600M, Leica Co., Ltd.)을 이용하여 관찰한 결과로 평면 방향은 기공의 크기와 수가 적은 반면, 높이 방향에서 더 많은 기공이 관찰되었다.

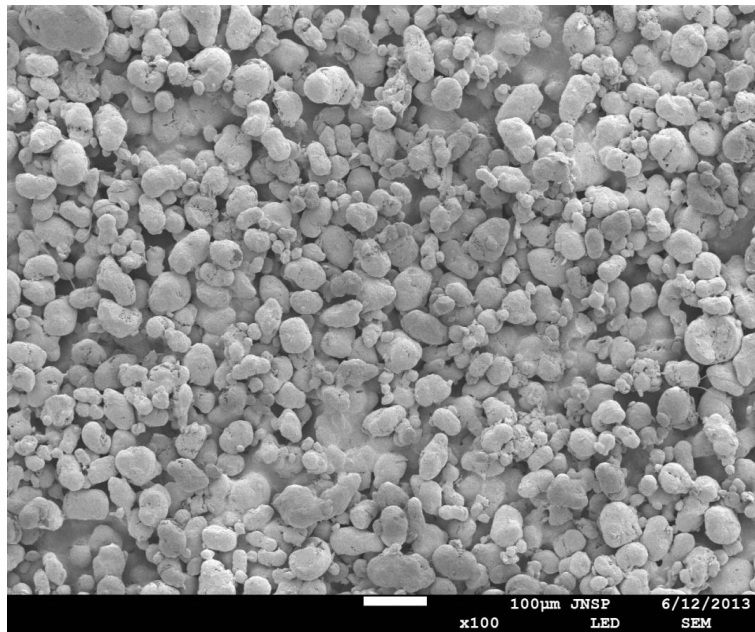
Fig. 4.18은 면적대비 기공률을 계산하기 위한 기공의 계면(Boundary)을 나타내고, Table 4.13과 Table 4.14에 평면방향과 높이방향의 기공률을 각각 3회 측정한 결과를 나타내었다.

면적대비 기공률의 측정 결과 평면방향의 경우 평균 9.3%, 높이 방향의 경우 20.8%로 평면방향에 비해 높이 방향의 기공면적이 2배 이상 높은 것을 알 수 있었으며, 이러한 기공은 폴리머 분말의 적층 공정 시 분말 사이에 공극(Gap) 발생에 의한 것으로 생각된다.

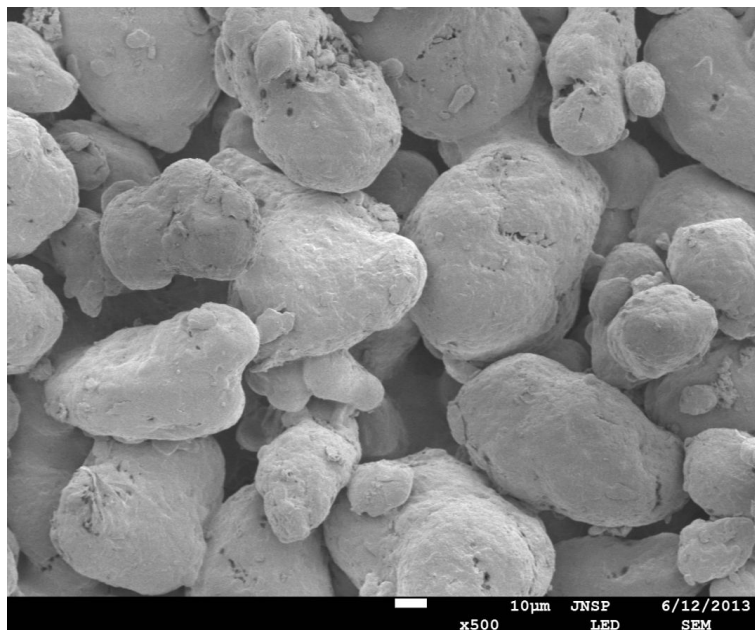
Fig. 4.19와 Fig. 4.20은 소결 시편의 내부 기공에 잔류 폴리머 분말이 존재하고 있는지를 확인하기 위해 평면 방향과 높이 방향의 기공을 FE-SEM을 이용하여 관찰한

결과를 나타낸다. SEM 이미지 분석 결과 기공 내부에 10 μ m 이하의 미소결 된 미세 PA-12 분말들이 상당수 존재하고 있음을 관찰할 수 있었다.

이는 소결실험에 사용된 PA-12 분말의 입도분포가 1~100 μ m으로, 적층과정에서 레이저로 소결한 단면에 발생한 홀(Hole)에 10 μ m이하의 미세 분말이 혼입되고 다시 적층 후 레이저 소결 시 홀 부분에 혼입된 미세 분말이 용융되지 않은 것으로 판단된다.

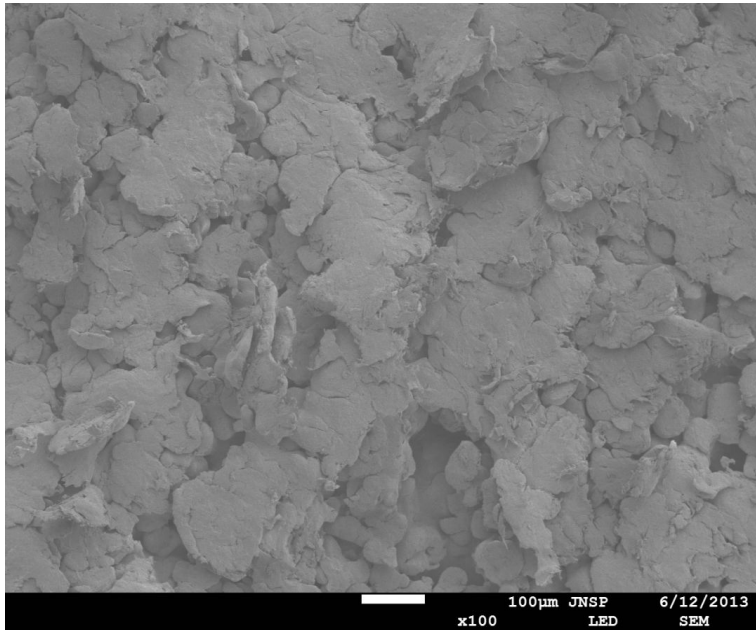


(a) FE-SEM image x100

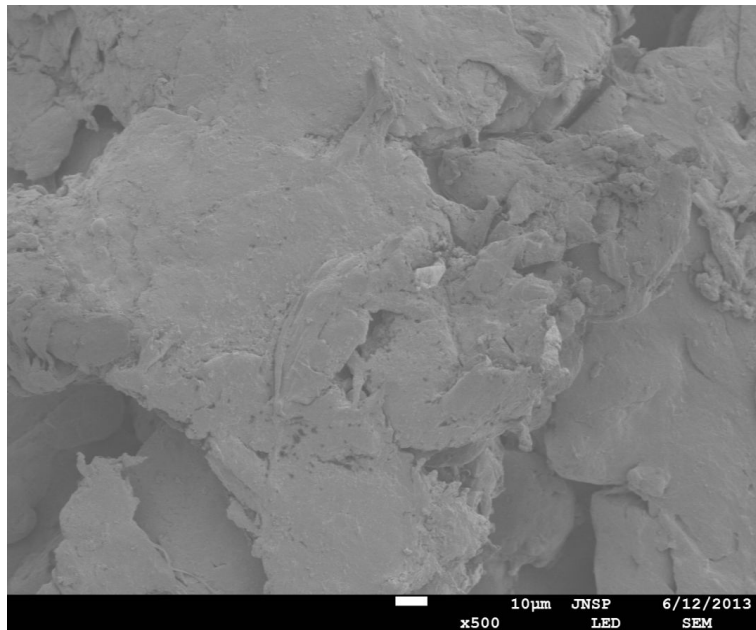


(b) FE-SEM image x500

Fig. 4.13 FE-SEM image of flat direction surface



(a) FE-SEM image x100



(b) FE-SEM image x500

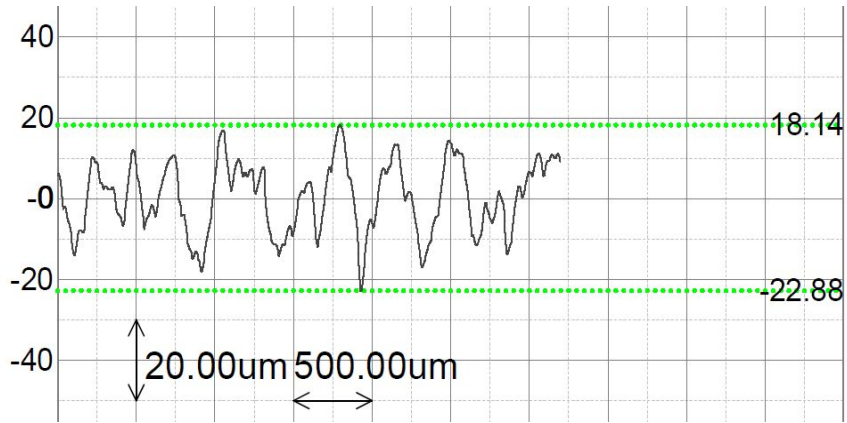
Fig. 4.14 FE-SEM image of high direction surface

Table 4.11 The results of flat direction surface roughness measurement

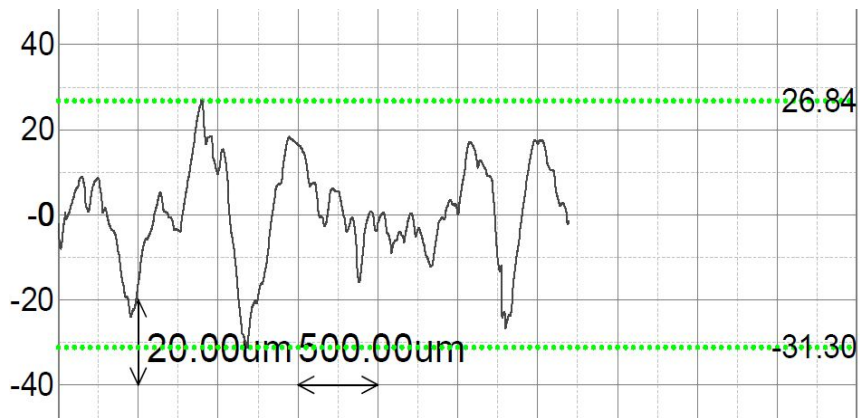
div.	Ra(μm)	Rz(μm)
Position 1	7.35	32.55
Position 2	6.07	33.81
Position 3	7.87	40.17
Max.	7.87	40.17
Min.	6.07	32.55
Mean	7.10	35.51

Table 4.12 The results of hight direction surface roughness measurement

div.	Ra(μm)	Rz(μm)
Position 1	8.93	41.46
Position 2	8.94	39.72
Position 3	10.09	43.49
Max.	10.09	43.49
Min.	8.93	39.72
Mean	9.32	41.56



(a) Flat direction



(b) Hight direction

Fig. 4.15 Results of surface roughness

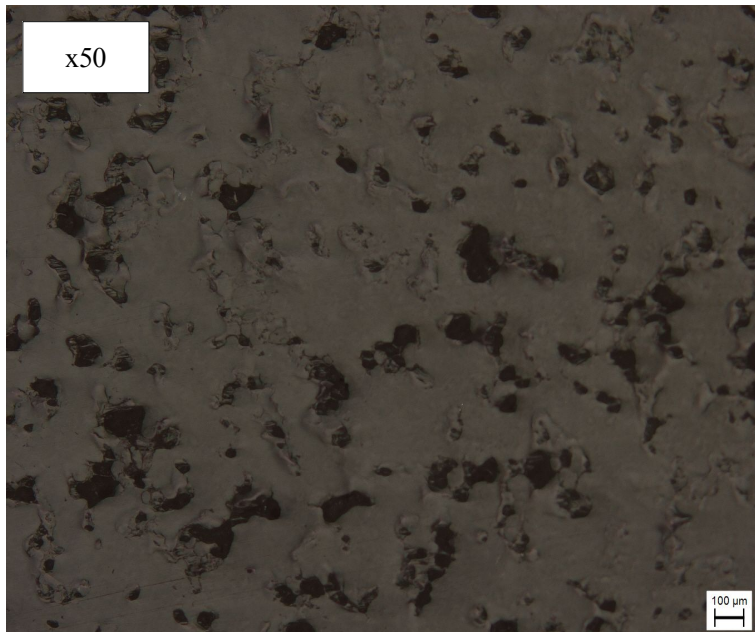


Fig. 4.16 Optical microscope image of Flat direction

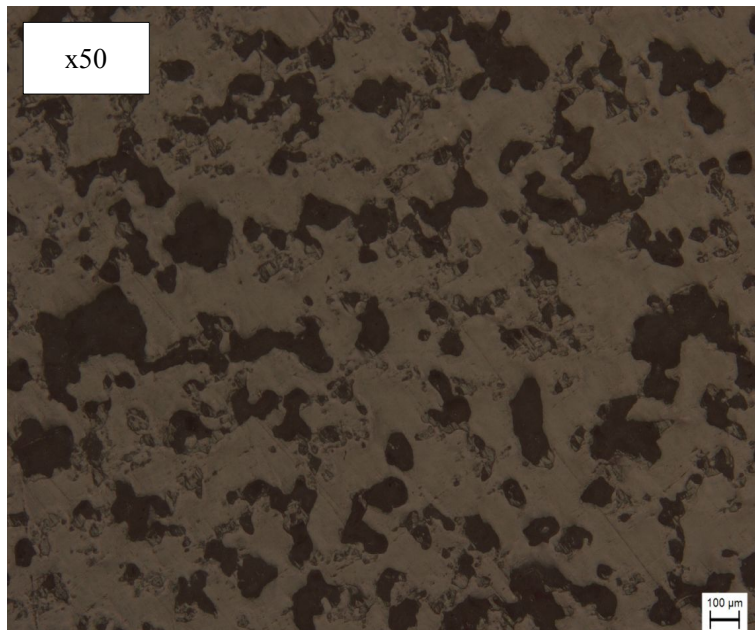


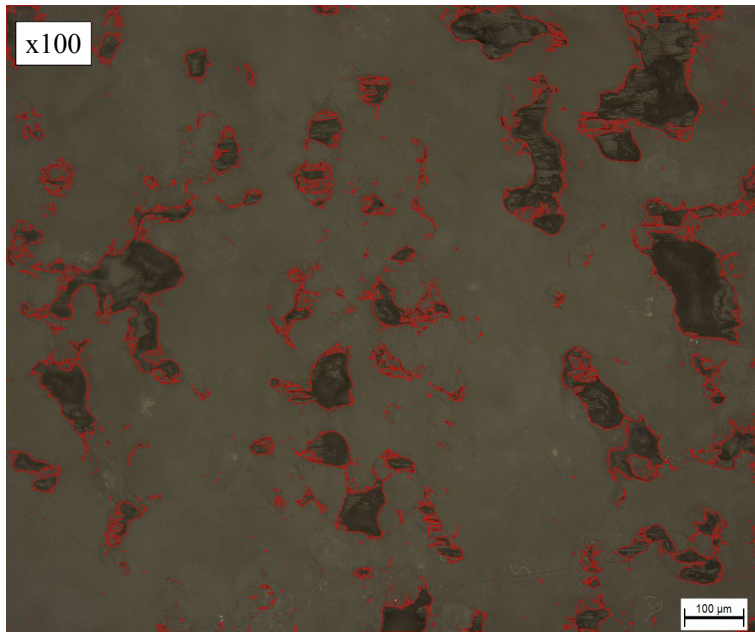
Fig. 4.17 Optical microscope image of Hight direction

Table 4.13 The results of flat direction porosity

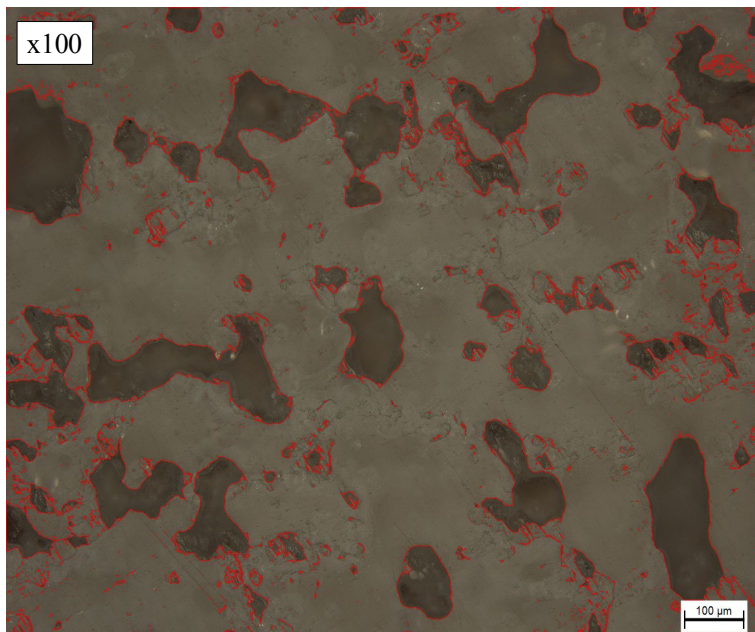
div.	Pore Area(μm^2)	Porosity(%)
Position 1	32819.7	11.3
Position 2	23709.8	8.2
Position 3	24423.9	8.4
Max.	32819.7	11.3
Min.	23709.8	8.2
Mean	26984.5	9.3

Table 4.14 The results of hight direction porosity

div.	Pore Area(μm^2)	Porosity(%)
Position 1	70810.1	24.3
Position 2	53836.7	18.5
Position 3	57377.9	19.7
Max.	70810.1	24.3
Min.	53836.7	18.5
Mean	60674.9	20.8

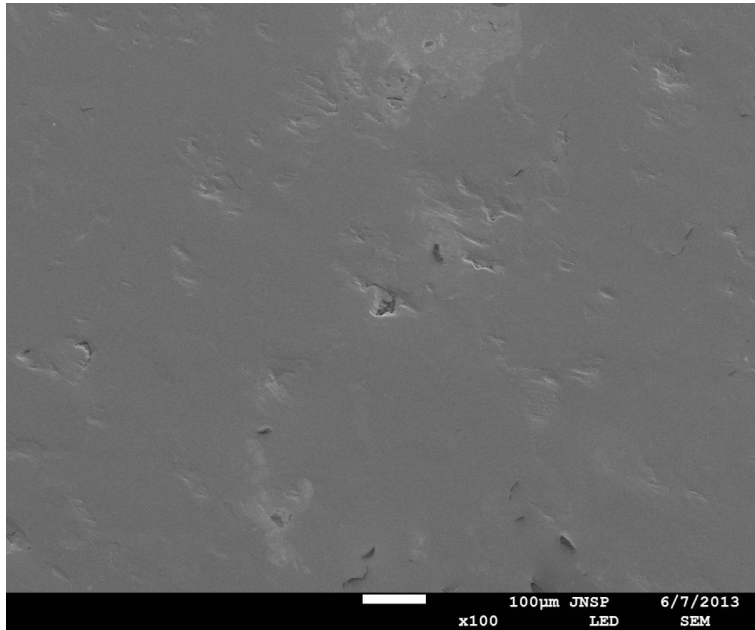


(a) Flat direction

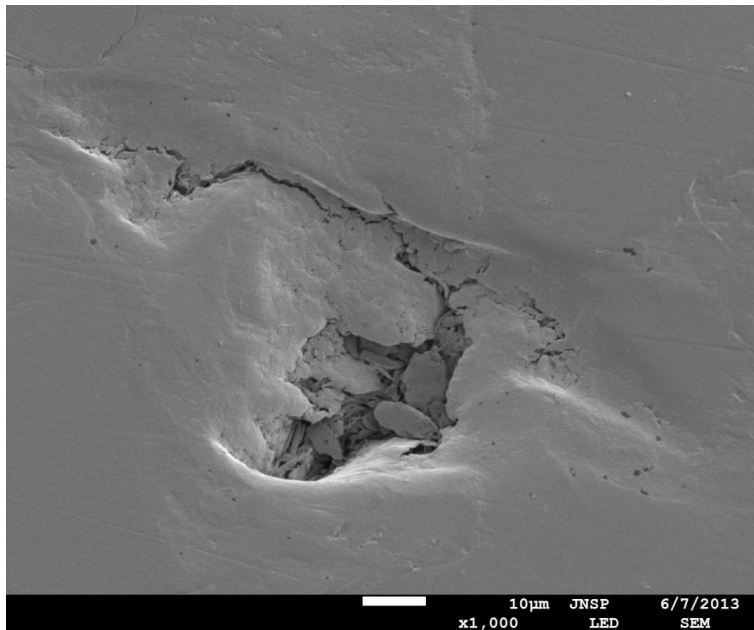


(b) Hight direction

Fig. 4.18 Optical microscope image for porosity measurement

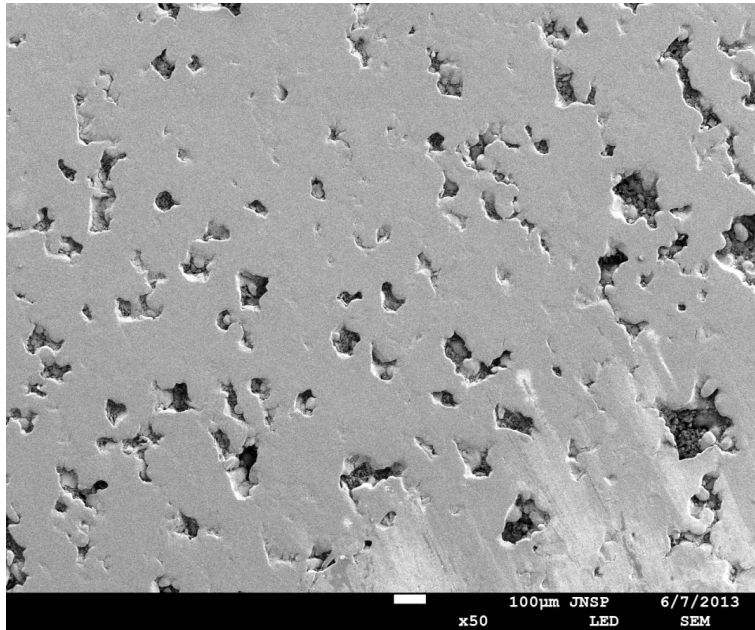


(a) FE-SEM image x100

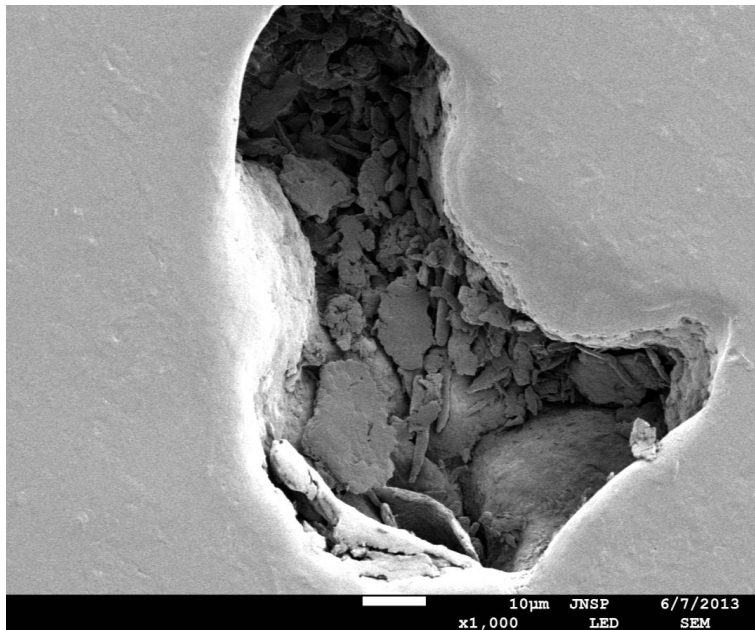


(b) FE-SEM image x1000

Fig. 4.19 FE-SEM image of flat direction porosity



(a) FE-SEM image x50



(b) FE-SEM image x1000

Fig. 4.20 FE-SEM image of high direction porosity

3. 화학적 특성 분석

본 연구에서 사용된 PA-12 분말은 160~170°C의 고온과 질소분위기에서 CO₂ 레이저를 이용해 소결하게 되므로 소결과정에서 화학적 변화가 이뤄지거나, 소결 준비과정 이물질의 혼입 등에 따른 물리적 특성 변화 등이 발생할 수 있다.

Fig. 4.21은 에너지분산형 X-선 분광기(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, AZTec Energy, OXFORD Co.,Ltd.)를 이용하여 소결 시편의 표면을 라인 스펙트럼(Line spectrum)과 포인트 스펙트럼(Point spectrum)으로 분석한 위치를 나타낸다.

Table 4.15와 Fig. 4.22은 라인 스펙트럼의 분석 결과를 나타내고 Table 4.16과 Fig. 4.23은 포인트 스펙트럼의 결과를 나타내며, 원소 검출 결과 소결 시편 표면에는 PA-12 분말의 화학적 구조를 이루고 있는 탄소(C), 산소(O), 질소(N)의 3개 원소만 검출되었다. 이를 통해 이물질 혼입이 없고 소결과정에서 새로운 화합물이 생성되지 않았음을 알 수 있었다.

Fig. 4.24는 탄소와 산소의 EDS 면분석 결과를 나타내며, PA-12 분말의 대부분을 차지하고 있는 탄소와 산소가 고르게 분포하고 있음을 관찰할 수 있었다.

Table 4.17은 X-선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, SmartLab, RIGAKU Co., Ltd.)를 이용하여 소결시편의 화학구조를 분석하기 위한 조건을 나타내며, Table 4.18은 PA-12의 X-선 회절분석 결과 나타난 피크 리스트(Peak list)를 나타낸다.

Fig. 4.25는 PA-12의 화학적 결합을 분석한 결과로 전형적인 PA-12의 화학결합인 (C₉H₁₇NO)_n 결합을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

또한 PA-12이외의 피크는 관찰되지 않은 것으로 보아 SLS 공정을 이용하여 PA-12 분말을 소결할 경우 온도, 질소분위기, CO₂ 레이저 등은 화학적으로 어떠한 영향도 미치지 않음을 알 수 있었다.

Table 4.15 The analysis results of EDS line spectrum

Div.	C(W%)	N(W%)	O(W%)
Line Spectrum	81.46	4.57	13.97

Table 4.16 The analysis results of EDS spectrum

Div.	C(W%)	N(W%)	O(W%)
Spectrum 1	86.98	3.84	9.18
Spectrum 2	80.47	5.74	13.79
Spectrum 3	86.05	3.94	10.01
Spectrum 4	83.76	4.41	11.83
Average	84.32	4.48	11.20

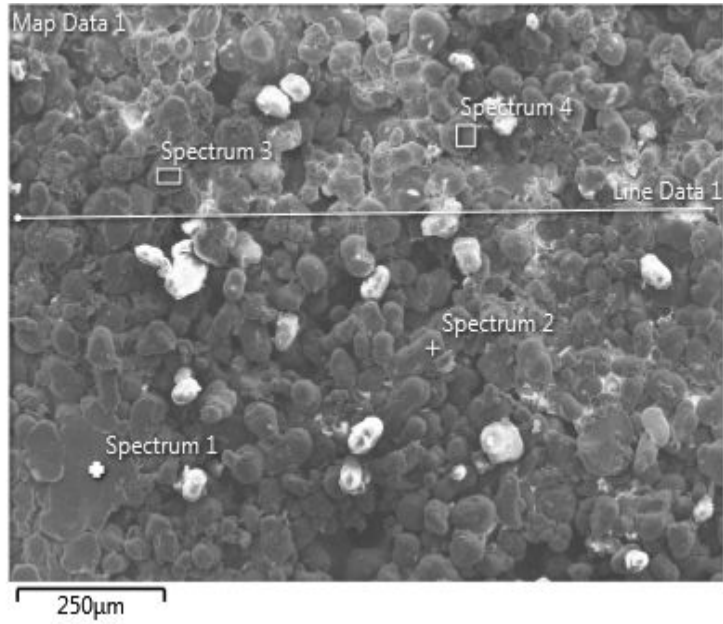


Fig. 4.21 EDS Spectrum for elements analysis

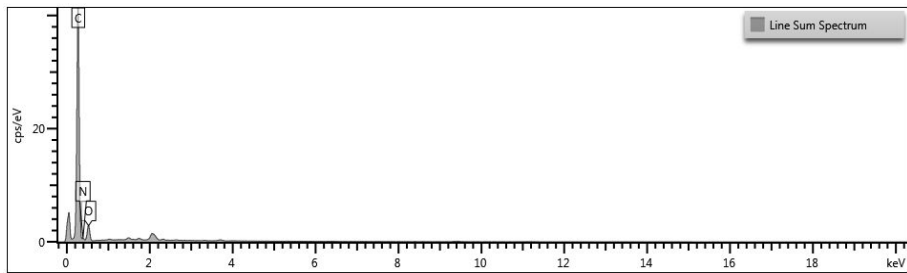
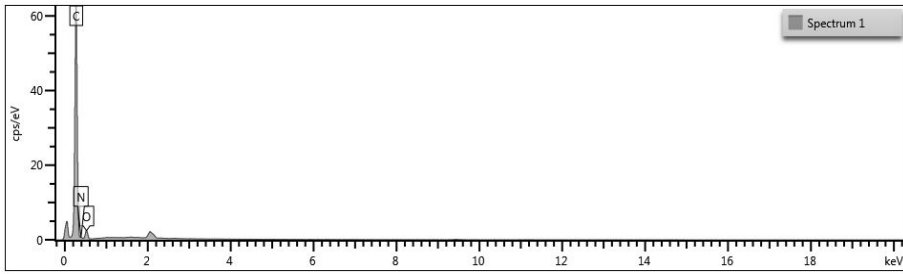
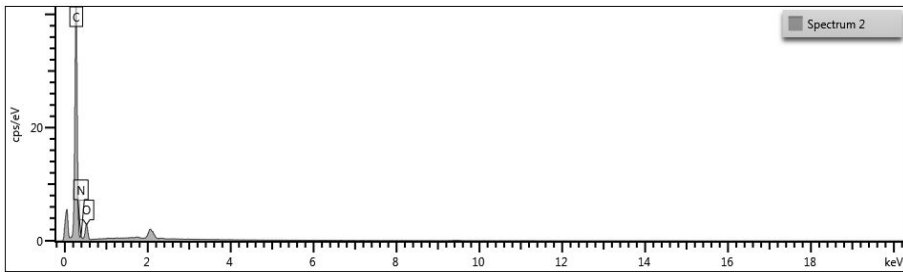


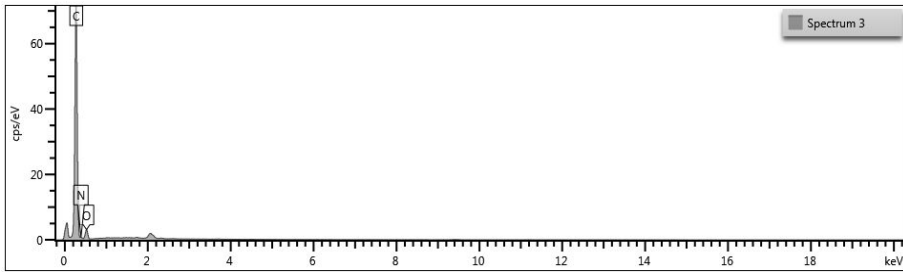
Fig. 4.22 Measurement result of EDS line spectrum



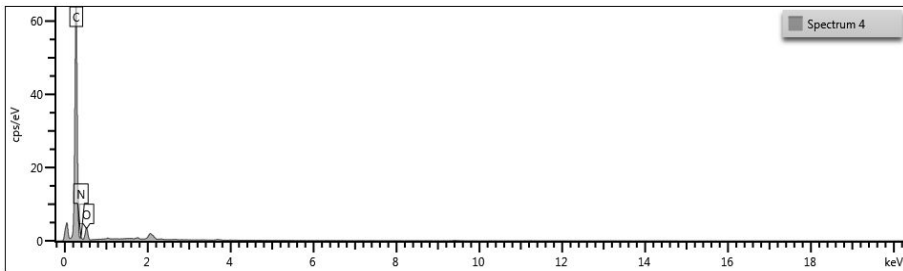
(a) EDS spectrum 1



(b) EDS spectrum 2

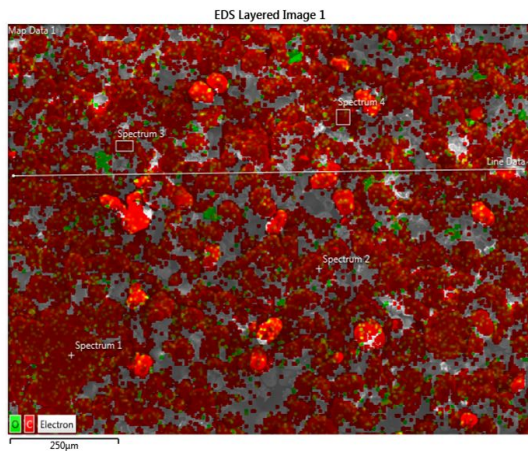


(c) EDS spectrum 3

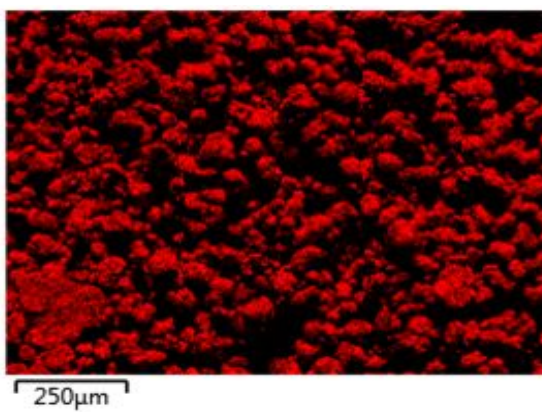


(d) EDS spectrum 4

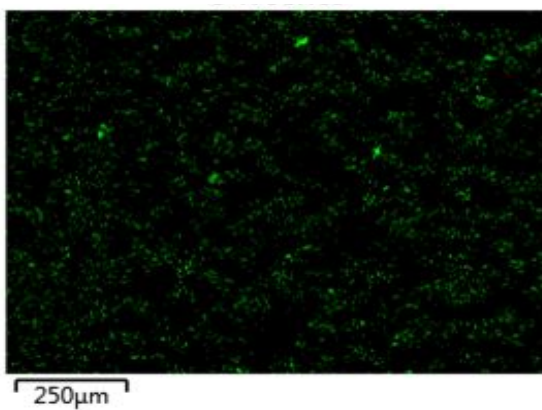
Fig. 4.23 Measurement results of EDS point spectrum



(a) EDS Mapping(C, O)



(b) EDS Mapping(C)



(c) EDS Mapping(O)

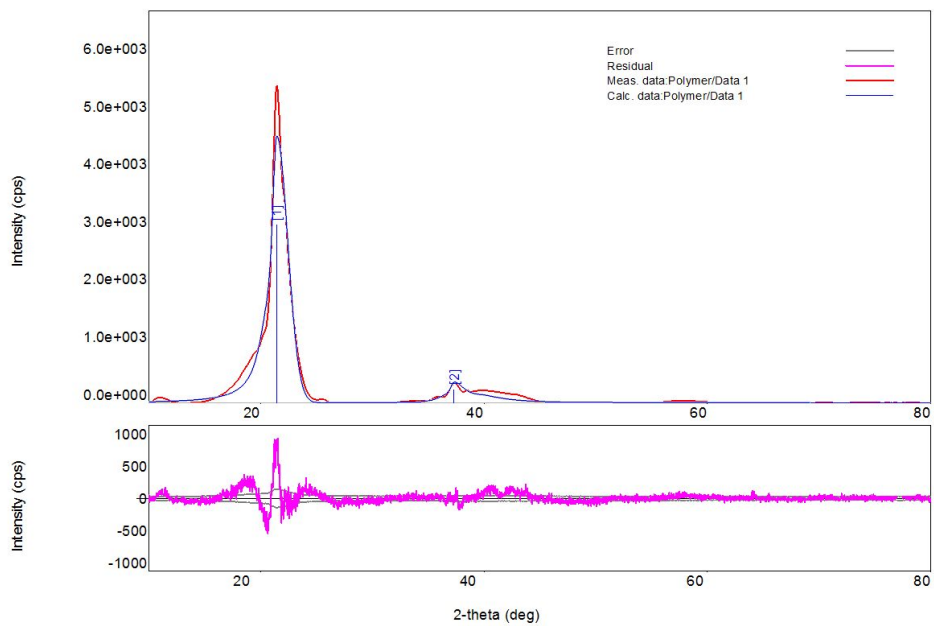
Fig. 4.24 EDS images of elements dispersion

Table 4.17 XRD Measurement conditions

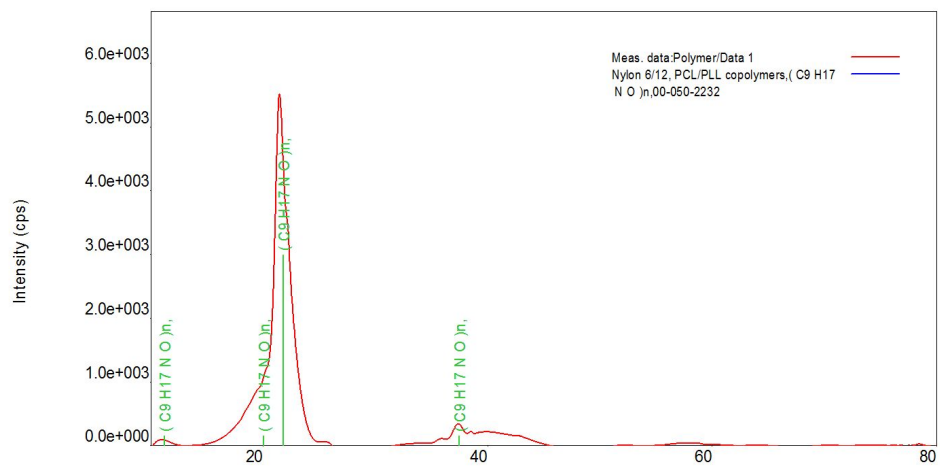
Div.	Value	Div.	Value
X-ray	40 kV, 30 mA	CBO selection slit	BB
Scan speed / Duration time	4.0 deg/min	Incident slit	2/3deg
Step width	0.0200 deg	Scan range	10.0 ~ 80.0deg

Table 4.18 XRD peak list of sintered sample

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)
1	21.42(2)	4.146(4)	3099(102)
2	37.30(8)	2.409(5)	243(28)



(a) Measurement profile



(b) Qualitative analysis result

Fig. 4.25 Results of XRD analysis

4. 열 특성 분석

SLS 공정을 통해 제작된 3차원 모델이 산업현장에 적용되기 위해서는 열팽창에 따른 치수 변화와 열전달 능력 등이 중요한 요소로 작용하게 된다.

본 연구에서는 PA-12 분말을 이용해 제작한 소결시편의 열팽창계수를 측정하기 위해 동적열팽창계수측정기(Thermo Mechanical Analyzer, TMA402F1, NETZSCH Co., Ltd.)를 사용하였다. 열팽창계수 측정을 위한 시편은 7.47×7.86×25.083(W×B×H)mm로 30°C ~ 84°C 까지 5°C/min로 승온 시켜 열팽창 계수를 측정하였다.

Table 4.19와 Table 4.20은 Fig. 4.26은 PA-12 소결시편의 열팽창계수 측정 결과를 나타내며, PA-12 소결 시편의 열팽창계수는 130.5076E-06 1/K으로 일반적인 PA-12의 열팽창계수 값인 100~110E-06 1/K 보다 조금 높은 값을 가지고 있었다.

열전도도는 물질이 전도에 의해 열을 전달할 수 있는 능력을 나타내며, 본 연구에서는 열전도도 측정 방법 중 레이저 플래시 법(Laser flash method)을 이용하는 열전도도 분석기(Thermal Conductivity Analyzer, LFA 447 Nanoflash, NETZSCH Co.,Ltd.)를 이용하여 PA-12 소결 시편의 열전도도를 분석하였다.

열전도도 측정을 위한 시편의 사이즈는 12.5×12.49×2.03(W×B×H)mm로 25°C, 50°C, 100°C의 3개 구간에 대해 각 3회씩 측정하였고, 분석을 위해 Radiation+Pulse correction 모델을 적용하였다.

Table 4.21과 Fig. 4.27은 온도 구간에 따른 열확산도(Diffusivity), 열전도도(Conductivity), 비열(Specific heat)의 측정 결과를 나타낸다.

분석결과 온도가 상승할수록 열확산도와 열전도도는 낮아지고 비열은 높아지는 것을 알 수 있었고, 일반적인 PA-12의 열전도도는 ≈ 0.230 W/m·K, 비열은 ≈ 2.10 J/g·K 인데 비해 PA-12 소결 시편의 경우 열전도도는 0.137~0.112 W/m·K, 비열은 1.186~1.611 J/g·K으로 조금 낮은 값을 가지고 있었다.

PA-12 소결 시편의 열적 특성 분석 결과 일반적으로 사용되고 있는 PA-12에 비해 열팽창계수 값은 높고, 열전도도, 비열 값은 낮은 값을 나타내었으며, 이는 SLS 공정에서 시편 제작 시 발생한 기공과 레이저를 사용하여 용융시키는 과정에서 공유결합의 고리를 연결시키는 2차 결합이 약해진 것으로 판단된다.

Table 4.19 Results of Coefficient of expansion

Parameters	Result	Range (min)	Range (max)
T.Alpha(dL)	130.5076E-06 1/K	30.0 °C	84.0 °C

Table 4.20 Results of Coefficient of expansion by temperature

Temperature (°C)	T.Alpha (1/K)	Temperature (°C)	T.Alpha (1/K)
30.0	77.2177E-06	58.0	115.1980E-06
31.0	79.0640E-06	59.0	116.4392E-06
32.0	80.8271E-06	60.0	117.6438E-06
33.0	82.4271E-06	61.0	118.9159E-06
34.0	83.9408E-06	62.0	120.2642E-06
35.0	85.3883E-06	63.0	121.3558E-06
36.0	86.1302E-06	64.0	122.4901E-06
37.0	87.3963E-06	65.0	123.2286E-06
38.0	88.6815E-06	66.0	124.0523E-06
39.0	89.3108E-06	67.0	124.6823E-06
40.0	91.1096E-06	68.0	125.3890E-06
41.0	92.4885E-06	69.0	125.9927E-06
42.0	93.5439E-06	70.0	126.4798E-06
43.0	94.8076E-06	71.0	126.9922E-06
44.0	95.8714E-06	72.0	127.4605E-06
45.0	97.0540E-06	73.0	127.8721E-06
46.0	98.3130E-06	74.0	128.2817E-06
47.0	99.6800E-06	75.0	128.5871E-06
48.0	101.0297E-06	76.0	128.8871E-06
49.0	102.1543E-06	77.0	129.2550E-06
50.0	103.2710E-06	78.0	129.4084E-06
51.0	104.8761E-06	79.0	129.6949E-06
52.0	106.0974E-06	80.0	129.8013E-06
53.0	107.4677E-06	81.0	129.9311E-06
54.0	109.0712E-06	82.0	130.1303E-06
55.0	110.5207E-06	83.0	130.3502E-06
56.0	111.9980E-06	84.0	130.4680E-06
57.0	113.4956E-06		

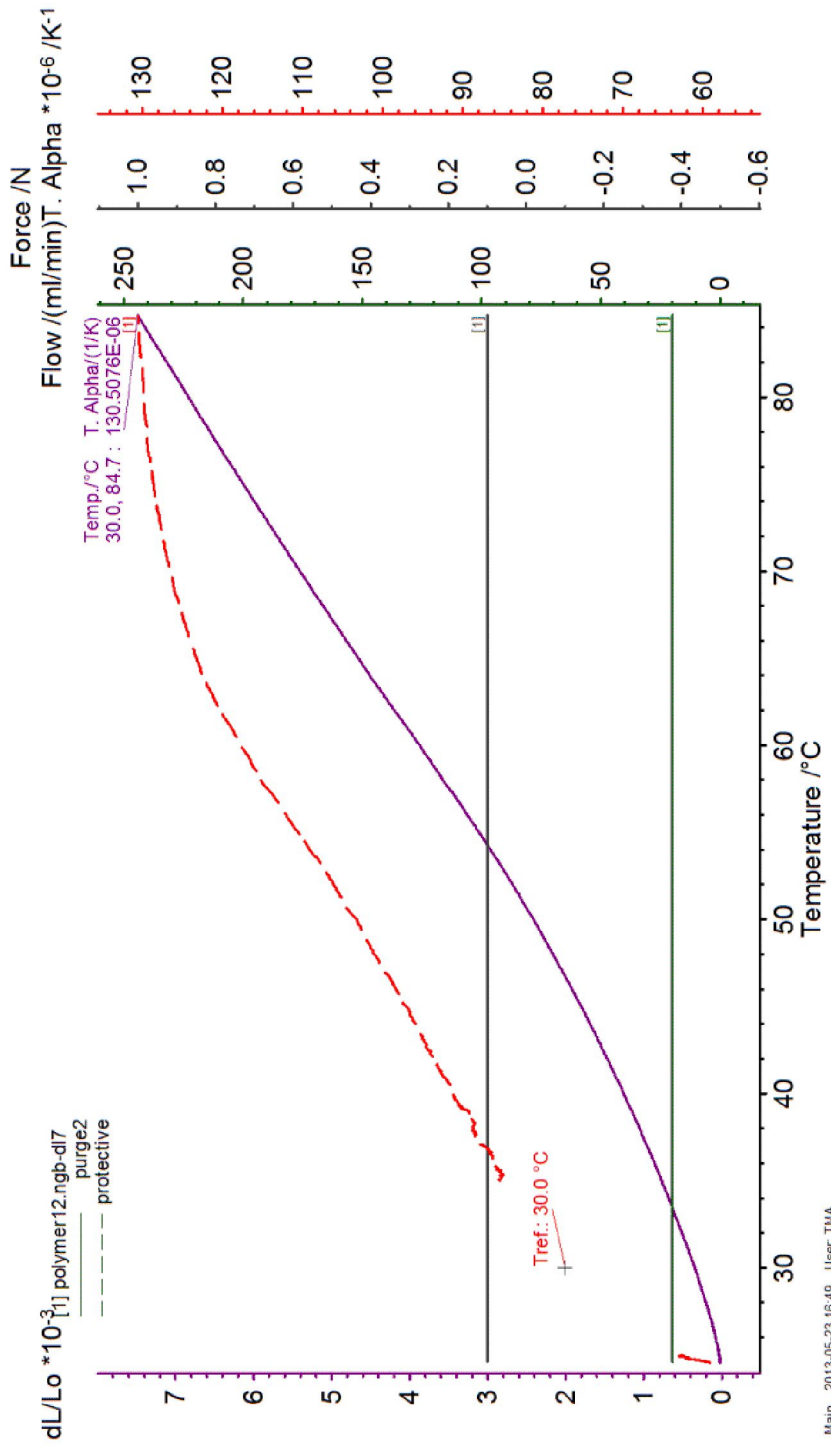


Fig. 4.26 Analysis result of coefficient of expansion

Table 4.21 Results of Thermal conductivity by temperature

Shot No.	Temperature (°C)	Diffusivity (mm ² /s)	Conductivity (W/m·K)	Cp-calc (J/g/K)
1	25.2	0.137	0.150	1.198
2	25.1	0.137	0.150	1.188
3	25.2	0.136	0.149	1.171
Mean	25.2	0.137	0.150	1.186
Std. Dev.	0.1	0.001	0.001	0.014
4	49.9	0.123	0.135	1.305
5	50.1	0.123	0.135	1.351
6	50.1	0.123	0.135	1.307
Mean	50.0	0.123	0.135	1.321
Std. Dev.	0.1	0.000	0.000	0.026
7	100.1	0.105	0.115	1.720
8	100.1	0.102	0.112	1.619
9	100.0	0.099	0.109	1.493
Mean	100.1	0.102	0.112	1.611
Std. Dev.	0.1	0.003	0.003	0.114

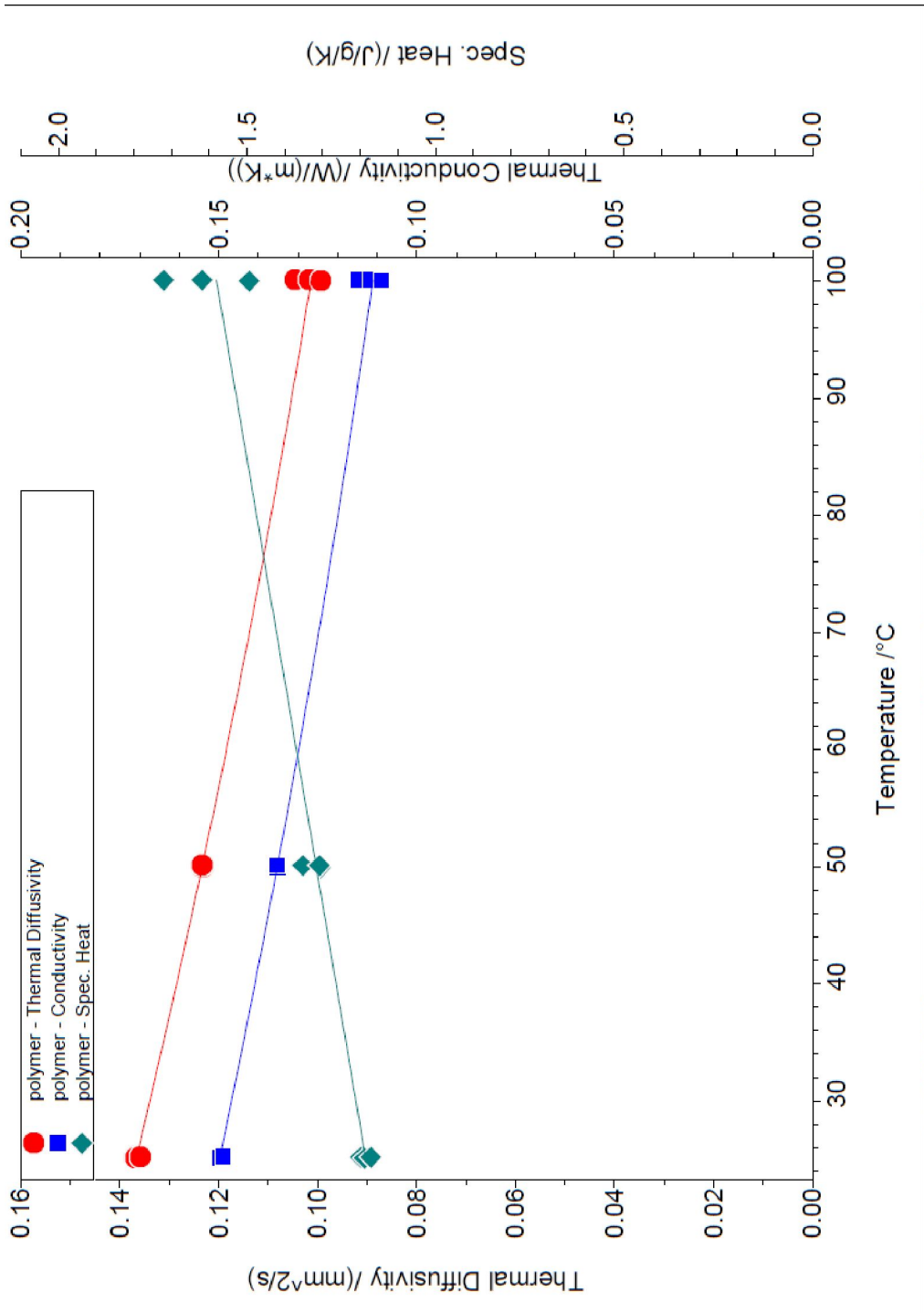


Fig. 4.27 Analysis result of thermal conductivity

제 5 장 결 론

본 논문에서는 선택적 레이저 소결 공정에서 형상 정밀도를 높이기 위해 3축 다이내믹 포커싱 스캐너를 적용한 SLS 시스템을 개발하고, PA-12 분말을 출발원료로 선정하여 최적의 소결공정을 위한 다양한 제어 요소기술에 대해 연구하였다.

또한 치수정밀도 향상을 위한 레이저 주사 알고리즘을 제안하고, CO₂레이저 소결에 따른 미세구조, 화학적 특성 변화 등을 고찰하였다. 본 연구의 세부적인 결과는 아래와 같다.

- 1) 본 연구에서는 선택적 레이저 소결 공정에서 형상 정밀도를 높이기 위해 기존에 사용되고 있는 f θ 렌즈 대신 3축 다이내믹 포커싱 스캐너를 적용하여, 레이저 빔의 사이즈를 소결평면의 모든 위치에서 500 μ m으로 정밀하게 제어 하였다.
- 2) 최적 설계를 통해 SLS 시스템을 개발하고, 시스템 제어 알고리즘을 적용하여 적층 높이 2.5 μ m 단위로, 소결 분위기 온도는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내에서 제어하였다.
- 3) 출발원료로 선정한 PA-12 분말의 화학적 및 열적 특성을 분석하고 소결 변수 실험을 통해 온도 165 $^{\circ}\text{C}$, 레이저 파워 16Watts, 주사속도 6m/s, 주사간격 400 μ m의 최적 소결 공정 조건을 도출하였으며, 스케일 바의 치수 검정 결과 x, y, z 축 모두 $\pm 0.7\text{mm}$ 이내의 제작오차를 가지고 있었다.
- 4) 미세구조 관찰을 통해 소결 시편의 표면 특성과 소결 특성을 규명하였고, 표면에 용착된 PA-12 미세 분말과 표면조도와의 상관관계를 분석하였다.
- 5) 소결 시편의 화학적 성분 분석 결과 전형적인 PA-12의 화학결합인 (C₉H₁₇NO)_n 결합을 가지고 있었으며, SLS 공정을 이용하여 PA-12 분말을 소결할 경우 화학적으로 어떠한 변화도 발생하지 않았다.
- 6) 소결 시편의 열 특성 분석을 위해 열팽창계수와 비열, 열전도도를 측정하였으며, 상용 PA-12의 열 특성과의 관계를 분석하였다.

참고문헌

- (1) Wohlers, T.T, "Wohlers Report 2005," Wohlers Associates. 2005.
- (2) Ikawa, N., Kishinami, T., and Kimura, F., "Rapid Product Development," Proceeding of the ICPE, Hokaido Univ., Sapporo. 1997.
- (3) Kochan, D., "Solid Freeform Manufacturing," Elsevier, Tokyo. 1993.
- (4) Beaman, J.J., "Solid Freeform Fabrication," Kluwer Academic, Boston. 1997.
- (5) Gebhardt A., "Rapid Prototyping," Hanser, Munich. 2003.
- (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., "Temperature Controlled Selective Laser Sintering", Proceeding of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, TX, Vol.5, pp.277-284, 1994
- (9) Festa, R., Manca, O. and Naso, V., "A Comparison between Models of Thermal Fields in Laser and Electron Beam Surface Processing", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.31, pp.99-106, 1998
- (10) Badrinarayan, B., "Study of the Selective Laser Sintering of Metal- polymer powders", PhD Thesis, The University of Texas at Austin, December, 1995
- (11) Chen, K., INTELLIGENT SCANNING IN SELECTIVE LASER SINTERING, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin, 1998.
- (12) Miller,D., Deckard, C., and Williams, J., "Various beam size SLS workstation and enhanced SLS model", Rapid Prototyping Journal, Vol.3, No.1, pp.4-11, 1997.
- (13) Chua C. K., Leong K. F. and Lim C. S., "Rapid Prototyping: Principles and Applications", World Scientific Publishing, 2nd Edition, 2003.

- (14) Park, S.M., Advanced Data Exchange for Solid Freeform Fabrication, Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin, 2000.
- (15) Yang, J., Bin, M., Zhang, X., and Liu, Z., "Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering(SLS)", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 34, pp. 293-300, 2003.
- (16) Ashley, S., "Rapid Prototyping For Artificial Body Parts", Mechanical Engineering, 155(5), 50-53, May 1993.
- (17) Jacobs, P.F., "Rapid Prototyping and Manufacturing Fundamentals of Stereo- lithography," SME, Dearborn. 1992.
- (18) Bennett, G., "Rapid Prototyping and Tooling Research," Mechanical Engineering Publication, UK. 1995.
- (19) Kruth, J.P., "Material increase manufacturing by rapid prototyping techniques," Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 2, pp. 603-614. 1991.
- (20) Upcraft S. and Fletcher R., "The rapid prototyping technologies," Assembly Automation, Vol. 23, No. 4, pp. 318-330, 2003.
- (21) Carter, P.W., "Advances in rapid prototyping and rapid manufacturing," Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 107-114. 2001.
- (22) Jee, H.S., "Application of laser technology to the development of a rapid prototyping system," Ministry of Science and Technology report. 2002.
- (23) Shi Y., Chen J., Wang Y., Li Z. and Huang S., "Study of the selective laser sintering of polycarbonate and post process for parts reinforcement," Proc. IMechE Vol. 221 Part L: J. Materials: Design and Applications, Vol. 221, pp. 37-42, 2006.
- (24) Song J.L., Li Y.T., Deng Q.L. and Hu D.J., "Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 614-618, 2007.
- (25) Chen, K., Crawford, R. H. and Beaman, J. J., "Parametric representation of part contours in SLS process," Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, August 12, pp. 597-608, 1996.

- (26) Kim, D.S, Ahn, Y.J., Lee, W.H., Bae, S.W. and Choi, K.H., "A study of the Solid Freeform Fabrication(SFF) system with dual laser system," JSME International Journal, Series C, Vol. 49, No. 4, pp. 1215-1222, 2006.
- (27) Lee, W.H., Kim, D.S., Ahn, Y.J., Choi, B.O. and Choi, K.H., "Development of industrial SFF system using a new selective dual laser sintering process," Key Engineering Materials, Vol. 326-328, pp. 123-126. 2006.
- (28) Kim, D.S., Bae, S.W. and Choi, K.H. "Application and performance evaluation for the DMS system in the SLS process," International Journal of Modern Physics B, Vol. 22, Nos. 9, 10 & 11, pp.1833-1838, 2008.
- (29) Yang H.J., Hwang P.J. and Lee S.H., "A study on shrinkage compensation of the SLS process by using the Taguchi method," International Journal of Machine Tool and Manufacturing, Vol. 42, pp. 1203-1212, 2002.
- (30) McAlea, K., " Materials and applications for the Selective Laser Sintering Process," Proc. 7th Int. conf. On rapid prototyping, pp.23-33, 1997.
- (31) Johnson, J.L. ,"Principles of computer automated fabrication," PALATINO Press, Irvine. 1993.
- (32) Tang Y., Fuh J.Y.H., Loh H.T., Wong Y.S. and Lu L., "Direct laser sintering of a silica sand," Materials and Design, Vol. 24, pp. 623-629, 2003.
- (33) Raghunath N. and Pandey P.M., "Improving accuracy through shrinkage modeling by using Taguchi method in selective laser sintering," International Journal of Machine Tool Manufacturing, Vol. 47, pp. 985-995, 2007.
- (34) Behrendt, U. and Shellabear, M., "The EOS rapid prototyping concept," Computers in Industry, Vol. 28, pp. 57-61, 1995.
- (35) Das, S., "Direct laser fabrication of Gas Turbine engine component-microstructure and properties," Proceedings of Solid Freeform Fabrication symposium, pp. 1-18, 1998.
- (36) Swann, T. and eicher, D., "Laser Engineering Net Shaping(LENS) technology commercialization," Proceedings of Rapid Prototyping and Manufacturing, pp. 739-757, 1998.

- (37) Charnnarong, J., "The drying shrinkage in three-dimensional printing and its dependence on the properties of the powder and the binder," Ph.D. thesis, MIT press. 1996.
- (38) Cawley, J.D., "Solid freeform fabrication of ceramics," *Int. Materials Review*, Vol 48, No. 6, pp. 341-370. 2003.
- (39) Agarwala, M., Bourell, D.L, Wu, B. and Beaman, J.J., "An evaluation of the mechanical behaviour of bronze-Ni composite produced by selective laser sintering," *International Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, University of Texas at Austin, USA, pp. 193-203, 1993.
- (40) Takanori. H., Takesuke, M., and Yoshio. A., "Laser scanning optical system with plastic lenses featuring high solution," *SPIE color hard copy and graphic arts*, Vol. 1670, pp. 404-415, 1992.
- (41) Kreutz, E.W., " Rapid Prototyping with CO₂ laser radiation," *Applied surface Science*, Vol. 86. pp. 310-316, 1995.
- (42) Mcgurk, M., Aimis, A. A., Potamianos, P., and Goodger, N.M., "Rapid Prototyping Techniques For Anatomical Modelling In Medicine", *Ann. Royal Coll. Surgery Engl.* 79, 167-174, 1997.
- (43) Pommert, J. K. et al., "Three Dimensional Imaging In Medicine: Method And Applications", In *Computer Integrated Surgery* (Eds R.H. Taylor et al.), Ch. 9, 155-174, 1996.
- (44) Swalens, B. and Kruth, J.P., "Medical Application Of Rapid Prototyping Techniques", 4th International conference on Rapid Prototyping, 14-15th June, pp 107-120, 1993.
- (45) Kai, C.C., Jacob, G. G. K., and Mei, T., "Interface Between CAD and Rapid Prototyping Systems. Part 1: A study of Existing Interfaces", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 566-570, 1997.
- (46) R. Swalens, T. Renault, A. Ogale, and A. Bagchi, "Automated Fiber Reinforced Composites", *Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping*, Dayton, OH, June 1994.
- (47) C. F. Kirschman and C. C. Jara-Almonte, "A Parallel Slicing Algorithm for Solid Freeform Fabrication Processes", *Proceedings of the 1992 Solid*

Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, August 3-5, 1992.

- (48) J. Wodziak, G. Fadel, and C. Kirschman, "A Genetic Algorithm For Optimizing Multiple Part Placement To Reduce Build Time", Proceedings of the Fifth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, OH, June 1994.
- (48) Fadel, G.M. and Kirschman, C. " Accuracy Issues in CAD to RP Translations" Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, No. 2. pp 4-17, 1996.
- (49) Bidanda, B. and Hosni, Y.A., "Reverse engineering and its relevance to industrial", Computers Industrial Engineering, 26(2), 343-348, 1994.
- (50) Choi, K. H., Kim, H. C., Doi. Y. H., and Kim. D. S., 2009, "Novel Scan Path Generation Method Based on Area Division for SFFS," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 4, pp. 1102-1111.
- (51) S. M. Hur, "Generation of CAD Data for Rapid Product Development in Reverse Engineering". Ph.D. dissertation, Pusan National University Graduate School, 2002.
- (52) H. C. Kim, "Internet-based Intelligent CAD/CAM System for Rapid Product Development". Ph.D. dissertation, Pusan National University Graduate School, 2003.
- (53) Y. H. Yang, T. J. Loh, H. Fuh and Y. G. Wang, "Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing", Rapid Prototyping Journal, pp. 30-37, 2002.
- (54) K. H. Choi, J. W. Choi, Y. H. Doh, S. J. Cho, S. H. Lee, Y. J. Ahn and D. S. Kim, Generation of "Dual-Laser Scan Paths for the Enhancement of Mechanical Strength". Proceedings of the KSME Fall 2005 Annual Meeting, Gumi, Korea, pp. 1074-1079, 2005.
- (54) J. W. Choi, K. H. Choi, D. S. Kim, Y. H. Doh and S. H. Lee, "Fabrication of Parts and Its Evaluation Using the Dual-Laser Solid Freeform Fabrication System". Trans. of the KSME(A) paper, 30(3), pp. 334-341. 2006.
- (55) K. H. Kim, J. W. Choi, Y. H. Doh, S. H. Lee and D.S. Kim, "Generation of Scan Paths for the Enhancement of Fabrication Efficiency in SFFS". Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Meeting, Jeju, Korea, pp. 623-627, 2006.

- (56) J. C. Nelson, *Selective Laser Sintering: A Definition of the Process and an Empirical Sintering Model*. UMI, 1994.
- (57) Y. G. Bang, K. S. Choi, C. H. Park, H. I. Kim, B. S. Lim and D. S. Kim, "Development of New Polymer Powders for the Industrial SFF system by using SLS Process". *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting, 1973-1978*, (2007).
- (58) Ko, S.H., "Research Status on Flexible Electronics Fabrication by Metal Nano-particle Printing Processes," *Particle and Aerosol Research*, Vol. 6, No. 3, pp131-138. 2010.
- (59) Ko, S.H., Pan, H., Lee, D., Grigoropoulos, C.P. and Park, H.K., "Nanoparticle Selective Laser Processing for a Flexible Display Fabrication," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 2010.
- (60) W. Zhengying T. Yiping, L. Bingheng, "A rapid manufacturing method for water-saving emitters for crop irrigation based on rapid prototyping and manufacturing", *Int. J. Adv. Manu. Technol.*, Vol. 21, pp. 644-648. 2003.
- (61) Y. Ding, H. Lan, J. Hong, D. Wu, "An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping", *Rob. Comput. Integr. Manuf.*, Vol. 20, pp. 281-288. 2004.
- (62) K. Osakada, M. Shiomi, Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 1188-1193. 2006.
- (63) J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers, "Selective laser melting of iron-based powder", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 149, pp. 616-622. 2004.
- (64) I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. Bertrand. I. Smurov, "Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 254, pp. 980-983. 2007.
- (65) J. W. Rho, J. H. Kim, C. K. Lee, "An overview of Selective Laser Sintering", *J. Kor. Weld. Joining. Soc.*, Vol. 26, No. 4, pp. 34-37. 2008.
- (66) A.V. Gusarov, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, I. Smurov, "Heat transfer modeling and stability analysis of selective laser melting, *Appl. Surf. Sci.*,

Vol. 254, pp. 975-979. 2007.

- (67) E. Capello, B. Previtali, "The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire", J. Mater. Process. Technol., Vol. 174, pp. 223-232. 2006.

감사의 글

박사학위 과정을 마무리하는 시점에서 연구자로서 걸어온 지난날들을 돌이켜 보면서 많은 생각을 하게 됩니다. 그리고 오늘의 저를 있게 해준 많은 분들과 학위 과정을 마무리할 수 있도록 도움을 주신 많은 분들께 감사드립니다.

박사 과정동안 세심한 배려와 정성을 다해 지도해 주신 지도교수님이신 김재열 교수님과 논문 심사과정에서 정성어린 충고와 세심한 지도를 해주신 심재기 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁘신 가운데도 논문 심사를 해주시고 완성되도록 도움을 주신 윤성운 교수님, 김홍건 교수님, 이종인 교수님께 감사드립니다.

석사 과정을 통해 연구자의 길을 걷게 동기부여를 해주신 서울시립대 권원태 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 연구과정에 도움을 주신 최경현 교수님과 김동수 교수님, 이민철 교수님, 배상규 팀장님, 이원희 박사님께 감사드리고, 배성우 박사, 김정수 박사, 김형찬 학생에게도 감사드립니다.

늦은 나이에 박사과정을 무사히 마무리 있도록 도움을 준 광이구 교수와 실험실 선·후배님들께 감사드리고, 전남과학기술진흥센터 김보환 센터장님, 정영재 팀장님, 이윤정 책임연구원, 김학형 선임연구원, 박용일 선임연구원, 김민중 연구원, 송재식 연구원, 김상균 연구원에게도 감사의 말씀을 전합니다. 특히, 논문이 완성되도록 시험·분석에 도움을 준 이훈철 연구원, 최원일 연구원에게도 감사의 마음을 전합니다.

어려운 여건 속에서도 오늘이 있기까지 한결같은 사랑과 믿음으로 저를 지켜봐 주신 아버님과 어머니, 장인어른, 장모님께 깊은 감사를 드리고, 재만 형님과 형수님, 동생 미정씨, 친지 분들께도 감사드립니다.

끝으로 결혼 후 많은 것을 해주지 못해 늘 미안한 나의 아내 혜현씨와 아들 지민, 민준에게 다시 한 번 사랑한다는 말을 전합니다.

2013년 8월

안 영 진 드림