

SLS 공정을 이용한 산업용 SFFS 개발

김성중, 김광영, 주영철, 백영중, 박혁성 | 한국기계연구원 외

1. 서 론

산업용 임의형상제작시스템(SFFS, Solid Freeform Fabrication System)은 신제품 개발 과정에서 이루어지는 프로토타입의 제작 및 수정을 할 수 있는 시스템으로써 그 공정에는 LOM, SLA, SLS 등 여러 가지 방법이 있다. 그 중에서 SLS(Selective Laser Sintering) 공정이 많이 사용되고 있으며 정확도가 우수한 특징을 가지고 있다. 특히, 최근에는 글로벌 생산 체제가 확산되면서 서로 떨어진 지역 간의 협업(collaboration)을 위하여 정보공유가 필수적인 조건이 되어서 쾌속 3차원 형상제작에 대한 요구가 더욱 증대되고 있다.

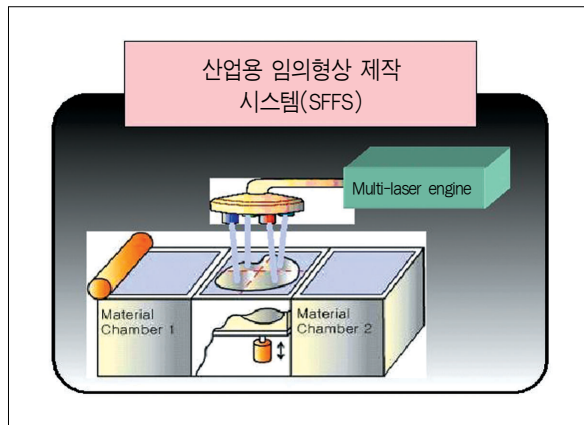


그림 1. 산업용 SFFS 장비의 개략도

SLS는 일반적인 공정하고 다르다. 즉, 재료를 가공함으로써 최종적인 형상을 얻었던 전형적인 기계가공과는 달리 레이저에 의해서 파우더 입자를 선택적으로 녹임(fusing)으로써 어떠한 부품을 생성하는 공정이다.^{[1]-[5]}

그림 1은 산업용 실물 복제기의 개념도를 보여주고 있다. 아래의 그림에서 보면 알 수 있듯이 산업용 SFFS 장비는 레이저부, 챔버를 지나가는 롤러 및 분말 공급장치부, 온도부, 질소공급부 등으로 구분하여 생각할 수 있다.

2. 기구부 개념설계

2.1 분말장치 개념설계

챔버에서 적층장치로 분말을 균일하게 이송하는 방법으로 원통형의 롤러를 사용하였다. 롤러의 직경은 분말이 잘 밀착되도록 수평면과 롤러의 각도를 고려하여 $\phi 80\text{mm}$ 로 하였다. 소결할 층두께를 0.1mm 로 설정했을 때 롤러가 분말을 이송하는 각도는 롤러 전진방향에 1mm 두께의 분말이 있다고 가정하면 롤

러와 분말이 접하는 호의 각도는 63°가 되고, 롤러접선방향의 각도는 31°가 된다. 이 각도가 너무 커지거나 작으면 분말이 뭉치거나 끌고루 소결층위에 밀착되지 않는다.

롤러는 회전시키면서 진행하는 것이 바람직하데 회전방향은 진행방향과 반대가 되도록 하였다. 즉, 롤러를 회전시키면서 진행시킨다. 이는 공작기계인 밀링커터의 상향절삭과 유사해서 분말이 불필요하게 압축되지 않도록 하는 효과를 가져온다.

레이저로 소결한 분말을 일정한 간격으로 하향시키는 장치를 설계하였으며 소결할 층의 두께를 0.1-1mm의 범위로 가변시킬 수 있도록 하였다. 수직방향으로 하향하는 진폭도를 0.01로 설정하여 장치에 무리가 가지 않도록 하였다. 이 적층장치는 밑부분의 손잡이를 돌리면 나사방식으로 상하로 이동하게 되어 있고, 손잡이 1회전당 상하 이동거리를 0.1mm로 설계하였다. 앞으로 이 장치의 정밀도를 높이고 가변제어가 용이한 유압장치를 사용할 계획이며 상부에는 롤러가 이송할 때 남는 분말을 수거할 수 있도록 홈을 만들어서 분말을 재사용할 수 있도록 하였다.

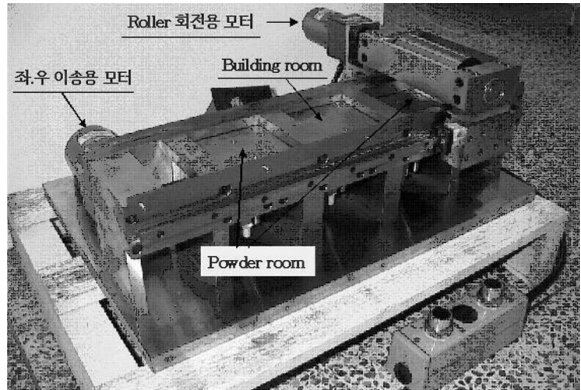


그림 2 분말재료 이송 및 공급장치 시제품

2.2 질소 공급장치 개념설계

안정된 소결을 위해서 챔버를 질소 환경으로 만들 필요가 있다. 즉 질소는 부품이 레이저로 소결되는 동안 산소에 의한 산화를 방지하기 위해서 사용되고 또한 렌즈에 분말가루가 묻는 것을 방지할 목적으로 사용된다. 질소공급장치는 그림 3처럼 구성되어 있다. 이러한 질소 공급장치는 장비에 내장할 수도 있고 외부에 설치할 수도 있다. 질소 공급장치는 대기중의 에어를 필터에 통과시켜 수분 및 불순물을 제거한 다음 레귤레이터로써 압력을 일정하게 유지시킨다. 레귤레이터를 통과한 질소는 제어밸브의 제어에 의해 적층 챔버로 공급된다. 제어밸브는 전용 제어장치에 의해 제어되며 보다 정밀한 압력과 유량을 제어하고 또한 작업시작과 끝날 때 적층 챔버에 질소가 차단되도록 하는 역할을 한다. 질소의 압력은 절대압력 1.01-1.02 kgf/cm²로 설정하여 공급하고 챔버의 압력이 만약 상승하면 제어밸브를 통하여 유출시킨다.

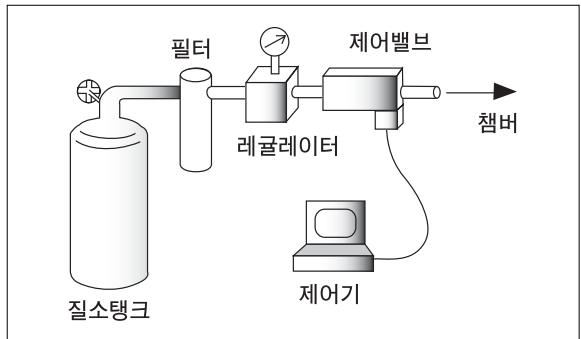


그림 3 질소공급장치

23 레이저 옵틱스

산업용 SFFS의 가장 핵심 부품중의 하나인 레이저 옵틱스 부분은 양질의 레이저 빔을 대면적의 작업대에 빠른 속도로 전달하는 역할을 한다. 이를 위해서 레이저를 x-y table로 움직이는 방법, 작업대를 x-y table로 움직이는 방법, x-y galva mirror를 이용한 스캔 방법의 세가지 방법이 있으나, 이중 작업 속도를 고려한다면 x-y galva mirror가 가장 우수할 것이다.

X-y galva mirror를 이용한 스캔 방법은 레이저에서 발진한 레이저 빔을 정렬을 위해 두 번 방향전환 한 후 x-y galva mirror가 소폭의 회전운동을 하면서 레이저 빔의 회전 각도를 변화시켜 원하는 작업 필드 위의 지점에 조사한다. 이때 x-y galva mirror에서 작업 필드 위의 지점까지의 거리는 x-y galva mirror의 바로 아래 부분이 제일 가깝고 거기에서 멀어질수록 거리가 멀어진다. 다양한 초점거리에 모두 초점이 잘 잡히도록 하기 위해서 x-y galva mirror 아래에 다초점 렌즈인 $f-\theta$ 렌즈를 설치하는데 $f-\theta$ 렌즈 덕분에 작업 필드 위의 모든 영역에서 레이저 빔의 초점이 잘 잡히기는 하지만 $f-\theta$ 렌즈 바로 밑부분에서는 초점이 원형인 반면에 작업필드의 끝부분에서는 초점이 타원이 되면서 빔의 강도가 약해지는 단점이 있다. 따라서 기존의 상용 x-y galva mirror는 최대 field size가 100×100 mm 이고 이 조차도 업체에서는 성능이 떨어져서 별로 추천하지 않는 사양이다. 그림 4는 레이저 옵틱스의 개념도를 보여주고 있다.

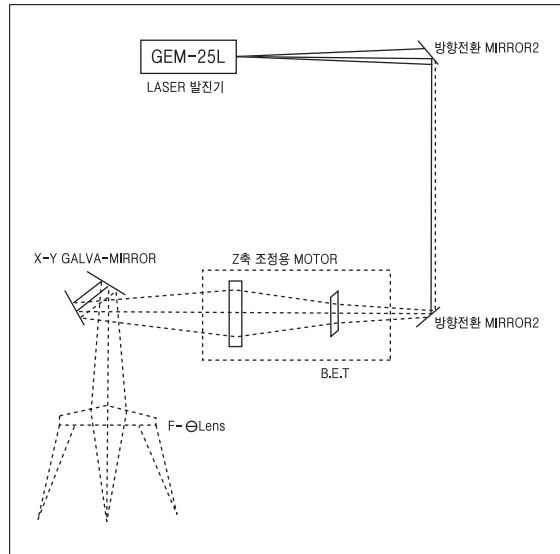


그림 4. 레이저 옵틱스 개념도

이때 x-y galva mirror에서 작업 필드 위의 지점까지의 거리는 x-y galva mirror의 바로 아래 부분이 제일 가깝고 거기에서 멀어질수록 거리가 멀어진다. 다양한 초점거리에 모두 초점이 잘 잡히도록 하기 위해서 x-y galva mirror 아래에 다초점 렌즈인 $f-\theta$ 렌즈를 설치하는데 $f-\theta$ 렌즈 덕분에 작업 필드 위의 모든 영역에서 레이저 빔의 초점이 잘 잡히기는 하지만 $f-\theta$ 렌즈 바로 밑부분에서는 초점이 원형인 반면에 작업필드의 끝부분에서는 초점이 타원이 되면서 빔의 강도가 약해지는 단점이 있다. 따라서 기존의 상용 x-y galva mirror는 최대 field size가 100×100 mm 이고 이 조차도 업체에서는 성능이 떨어져서 별로 추천하지 않는 사양이다. 그림 4는 레이저 옵틱스의 개념도를 보여주고 있다.

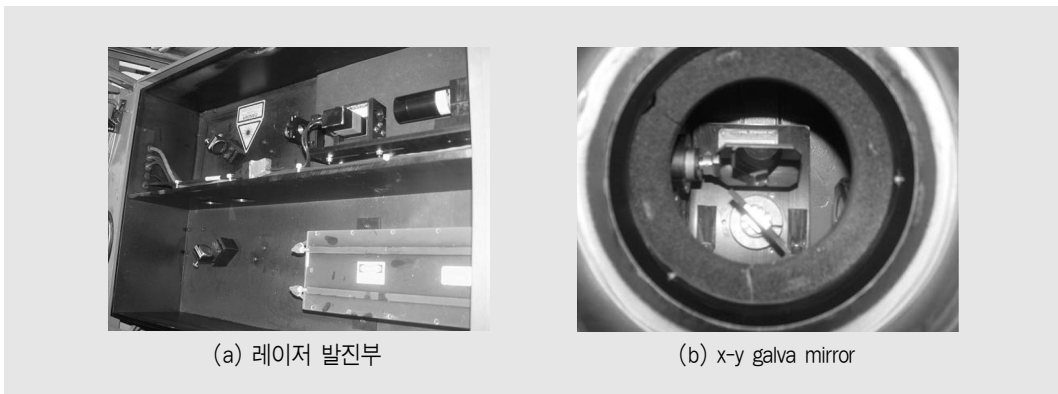


그림 5. 레이저 옵틱스의 형상

본 연구에서 산업용 임의형상제작시스템을 개발하기 위해서는 대면적의 field size를 갖는 galva mirror를 개발하여야 한다. $f-\theta$ 렌즈만으로는 대면적의 field size에 초점을 맞추기가 힘들므로 기존의 x-y galva

mirror)에 z 방향으로 레이저빔을 조절할 수 있는 beam expander telescope(BET)를 개발하였다. 그림 5에서 보여지는 것과 같이 BET는 두 번째 방향전환 거울과 x-y galva mirror 사이에 위치하여 스텝 모터로 렌즈를 전후로 움직여서 $f-\theta$ 렌즈에 도달하는 빔의 크기를 변환시켜 $f-\theta$ 렌즈가 대면적의 작업 필드에 정확한 빔의 초점을 잡을 수 있도록 해준다. 현재 field size 500×500 mm 가 가능한 레이저 옵틱스를 개발하고 있는 중이다.

3. S/W 시스템의 개념 설계

산업용 SFFS의 제어는 4단계로 나뉠 수 있다. CAD시스템과의 Interface를 통한 용융주사 데이터를 확보하고 주사 데이터를 제어 데이터(Position, Velocity, Path)로 변환한다. 다음은 4개의 용융 영역에 대한 각각의 작업부분 할당 및 스케줄링을 하고, 마지막으로 4개의 영역별 제어과정들을 병렬제어 시스템으로 실행한다. 그림 6은 산업용 SFFS의 제어 개념도를 보여주고 있다.

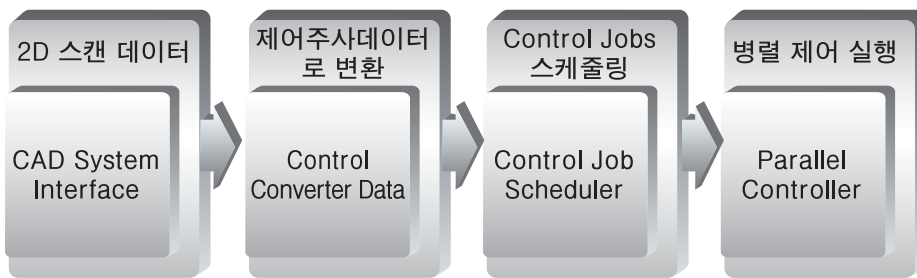


그림 6. 산업용 SFFS의 제어 개념

MLSE(Multi Laser Scan Engine)의 경우에는 CAD데이터에서 4개의 할당되어진 작업영역을 Multiple DSP제어 시스템을 통하여 4개의 레이저로 동시에 할당 작업 영역에서 가공을 하게 된다. 가공시의 작업 영역의 위치와 이송상황 등은 DSP와 Interface되어진 I/O모듈에 의해서 모니터링 된다. 이 모든 상황은 통합 자동제어 시스템 S/W에 의해 제어된다.

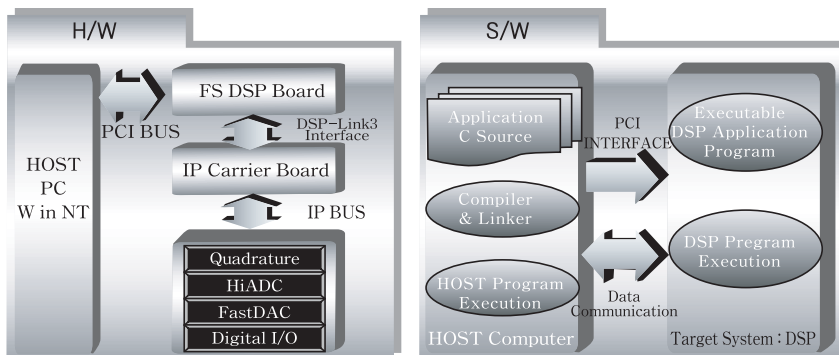


그림 7. 제어자동화 S/W & H/W의 개발 방법

H/W는 IBM호환 Windows NT시스템에서 TMS320C44 DSP가 내장된 F5 DSP Board가 PCI인터페이스로 내장되어 있다. F5DSP보드는 내장된 1개의 DSP와 3개를 확장할 수 있는 TIM-40 Module로 이루어져 있으며 3개 확장시 Multiple DSP 시스템을 구현할 수 있다. DSP Board는 IP Carrier Board와 인터페이스된다. IP Carrier Board는 여러 가지 I/O 모듈을 내장할 수 있는데, 본 SFFS에는 Quadrature(Counter Module), HiADC(ADC Module), FastDAC(DAC Module), Digital-48(DIO Module)이 장착 되어 있다. S/W는 Host Compiler에서 C code로 코딩되어 컴파일되고 실행되며 DSP타겟 시스템에 지령을 줄 수 있도록 되어 있다. 또한 I/O모듈의 DATA Acquisition상황을 Host Compiler에서 확인이 가능하다.

그림 7은 제어자동화 소프트웨어와 하드웨어의 개발 방법을 도식화해 놓은 그림이다.

에뮬레이션 실험환경은 AC 서보모터에 의한 2자유도 시스템을 Multiple DSP방식으로 구현된 제어 시스템에서 PID에 의한 모터제어 구현 및 CAD시스템과 주변장치의 인터페이스 형태로 이루어진다. MISE의 에뮬레이션 실험은 One-laser와 X-Y테이블을 Four-laser시스템으로 에뮬레이션 하는 것으로서 각각 할당되어진 작업부분의 연결제어 분석과 주사선 제어의 전체 시간 예측 분석이 이루어졌다.

멀티레이저 소결 방식(MLSE: Multi-Laser Sintering Engine)의 산업용 SFFS 개발을 위해 S/W 개발부에서는 산업용 SFFS를 위한 뷰어 구축과 오류보정, 단면생성 그래픽 S/W 개발에 대하여 연구하였다.

산업용 SFFS S/W 개발 과정은 그림 9에서 보여지는 것 처럼 GUI(Graphic User Interface)가 지원되는 3D 뷰어의 구축 과정과, 단면을 추출하여 주사선을 재구성하는 과정으로 나누었다. 3D 뷰어의 입력으로 사용할 STL 파일을 RPI 구조로 재구성하고, RPI 파일을 입력받아 다양한 형태로 디스플레이 할 수 있는 3D 뷰어를 구축하여 실행 결과를 비주얼하게 확인할 수 있다. 또한 단면을 추출하여 3D 뷰어에 디스플레이하고 추출된 단면에 주사선을 주사하여 단면을 재구성한다.

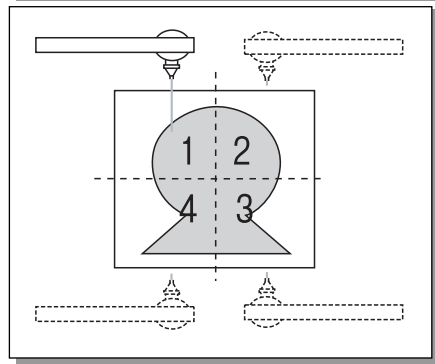
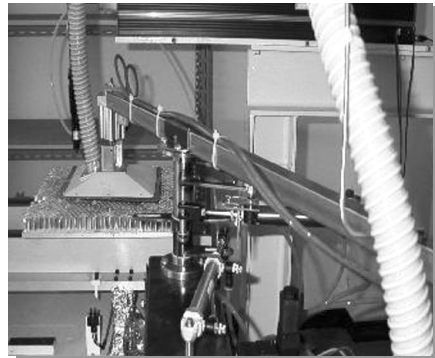


그림 8. SFFS 제어 시스템의 에뮬레이션 실험

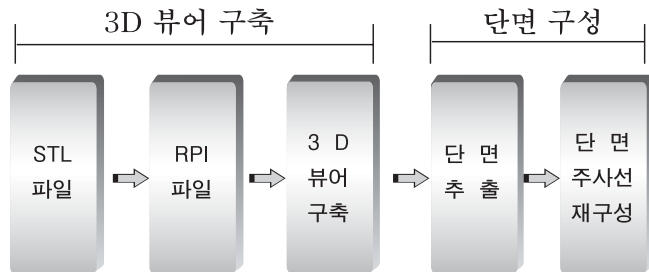


그림 9. GUI 지원 SFFS S/W 구축과정

단면 주사선 재구성은 슬라이싱에 의해 추출된 단면에 주사선 알고리즘을 적용하였다. 본 연구에 사용된 단면 주사선 재구성 알고리즘은 표 1과 같다. 그리고, 그림 10은 단면 주사선 재구성 알고리즘에 의해 생성된 결과이다

표 1. 단면 주사선 재구성 알고리즘

- (1) 슬라이싱에 의해 생성된 단면 정보를 입력받아 Y값 순서로 정렬하여 Edge List(EL)을 구성한다.
 - a. EL의 데이터는 $\{y_1, y_2, x_c, d_x\}$ 의 형태로 구성
 - b. y_1, y_2 은 두 꼭지점으로 이루어진 변의 y좌표, $d_x = 1/m$
($m =$ 두 꼭지점의 기울기)
- (2) 응집도(Coherence)성질을 이용하여 현재 주사선과 교차하는 변의 목록 Active Edge List(AEL)을 구성한다.
- (3) 매 주사선 y_k 에서
 - a. AEL의 갱신 : AEL에서 $y_2 < y_k$ 인 Edge를 삭제, EL에서 $y_1 = y_k$ 인 Edge를 삽입한다. AEL과 EL에 더 이상 Edge가 없으면 종료한다.
 - b. 각 Edge의 교차점 계산을 한다. 교차점 계산식은

$$x_c = x_c + d_x$$
 이다.
 - c. 교차점 x값을 정렬한 후 각 쌍을 결정하여 그 사이를 채운다.

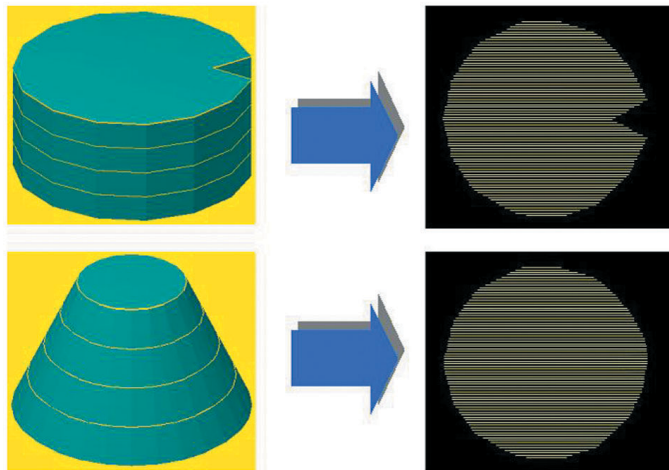


그림 10. 단면 주사선 재구성 결과

4. 향후계획

산업용 SFFS 장비를 이용하여 시제품을 제작하고자 한다. 지금까지 수행한 결과를 이용하여 실제 제작을 해보고 그에 상응하는 문제점을 파악해 나가는 것이 중요하다. 특히, 산업용 RP장비는 설계자의 요구를 만족시켜 주기 위해서 제작 시간 단축 및 시제품의 품질이 우수해야 하므로 각종 제어 부분 및 기구부의 제작에 신중함이 필요하다.

지금까지 설명한 바와 같이 산업용 SFFS장비는 여러 가지 복합적인 이슈를 가지고 있다. 레이저 소결방식을 사용하기 위해서 레이저의 성능이 보장되어야 함은 물론 x-y galva mirror의 제어도 정확해야 한다. 그리고, building room에서 작업을 수행하는 동안 시제품의 온도가 항상 일정해야 되는데 만약 일정한 온도로 제어하지 못한다면 제품의 질이 상당히 나빠질 것이다. 또한, building room에서 레이저로 작업하는 동안 적당한 양의 질소가 유입되어야만 제품이 레이저에 의해서 타는 현상을 방지할 수 있다. 즉 질소의 양이 너무 많으면 레이저에 의해서 소결될 때에 불량이 많이 발생할 것이고 질소의 양이 너무 적으면 레이저에 의해서 너무 많이 소결되므로 역시 불량이 발생하게 된다. 이러한 질소의 양을 조절하는 것도 중요한 이슈중의 하나이다.

이러한 복합적인 이슈를 모두 고려하여 향후 정밀한 산업용 SFFS 장비를 개발할 것이며 이를 이용하여 설계자의 요구조건을 충족시켜줄 수 있도록 노력할 것이며 단순한 프로토타입만을 제작하는 것이 아니라 금형으로 만들어 대량 생산을 할 수 있도록 그 기반을 다질 것이다.

참 고 문 헌

- [1] John D. Williams and Carl R. Deckard, "Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process", Rapid Prototyping Journal, Vol.4, No.2, pp.90-100, 1998
- [2] Agarwala, M., Bourell, D.L., Wu, B. and Beaman, J.J., "An evaluation of the mechanical behavior of bronze-NI composites produced by selective laser sintering", Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, TX, Vol.4, pp.193-203, 1993
- [3] Benda, J., "Temperature controlled selective laser sintering", Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, TX, Vol.5, pp.277-284, 1994
- [4] Berzins, M., Childs, T.H.C., Dalgarno, K.W., Ryder, G.R. and Stein, G., "Densification and distortion in selective laser sintering of polycarbonate", Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas at Austin, TX, Vol.6, pp.196-203, 1995
- [5] 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, 1988



김 성 종

- 한국기계연구원 첨단산업기술연구부 연구원
- 관심분야 : 산업용 RP 장비, 연료전지시스템, 구조 및 열유체해석
- E-mail : sjkim200@kimm.re.kr



김 광 영

- 한국기계연구원 첨단산업기술연구부 책임연구원
- 관심분야 : 전자디스플레이용 기능성 프린팅, Nano Contact 프린팅
- E-mail : ds5bks@kimm.re.kr



주 영 철

- 순천향대학교 기계공학과 교수
- 관심분야 : Rapid Prototyping, MEMS, 디스플레이 장비, 열전달 등
- E-mail : ychjoo@sch.ac.kr



백 영 종

- 성광정기(주) 대표이사
- 관심분야 : 최첨단 공작기계 보급으로 기계산업에 기여
- E-mail : skem1@unitel.co.kr



박 혁 성

- 휴모봇(주) 대표이사
- 관심분야 : 제어기 설계, 메카트로닉스
- E-mail : phsok@orgo.net