

다중재료 광조형장치 개발

Development of a Multi-material Stereolithography System

김호찬^{1,✉}, 최재원^{2,3}, Ryan Wicker^{2,3}
Ho-chan Kim^{1,✉}, Jae-Won Choi^{2,3} and Ryan Wicker^{2,3}

1 안동대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Andong National Univ.)

2 W.M. Keck Center for 3D Innovation, University of Texas at El Paso

3 Department of Mechanical Engineering, University of Texas at El Paso

✉ Corresponding author: hckim@andong.ac.kr, Tel: 054-810-5269

Manuscript received: 2009.10.21 / Accepted: 2010.1.5

Researchers continue to explore possibilities for expanding additive manufacturing (AM) technologies into direct product manufacturing. One limitation is in the materials available for use in AM that can meet the needs of end-use applications. Stereolithography (SL) is an AM technology well known for its precision and high quality surface finish capabilities. SL builds parts by selectively crosslinking or solidifying photo-curable liquid resins, and the resin industry has been continuously developing new resins with improved performance characteristics. This paper introduces a unique SL machine that can fabricate parts out of multiple SL materials. The technology is based on using multiple vats positioned on a rotating vat carousel that contain different photo-curable materials. To change the material during the process, the build platform is raised out of the current vat, a new vat with a different material is rotated under the platform, and the platform is submerged into the new vat so that the new material can be used. This paper introduces a new vat exchange mechanism, cleaning process, recoating process, resin leveling mechanism and process planning technologies for the implementation of multiple material SL. An overview of the system framework is provided and the system integration and control software is described. In addition, several multiple material test parts are designed, fabricated, and described.

Key Words: Additive Manufacturing (첨삭가공), Rapid Prototyping (쾌속조형), Stereolithography (광조형), Multi-material (다중재료), Photo-curable Resin (광경화성수지)

1. 서론

기존에 쾌속조형(Rapid Prototyping)기술로 잘 알려진 재료를 추가하면서 형상을 만들어 가는 첨가제조(Additive Manufacturing)기술은 제품 개발을 위해 시제품의 제작이나 금형용 마스터모형의 제작 등 직접적인 상품이 아닌 간접생산품을 제작하는데 주로 사용되었다. 그러나, 최근 들어 첨가제조 기술이 더욱 발전하면서 실제 최종의 상품 또는

부품을 직접 생산하는 직접제조(Direct Manufacturing)를 위한 유력한 기술로 활발히 연구되고 있다. 즉시제조(Instant Manufacturing)로도 불리는 직접제조기술은 기존의 대량생산의 장점인 큰 생산량, 저비용, 높은 부품의 교환성, 고품질 및 적은 노동력 투입 등은 유지하면서, 단점인 노동력에 비해 높은 자본 투자와 긴 생산준비 기간 등의 단점을 보완하는 기술이다.

직접제조 기술로 기존의 쾌속조형기술이 활용

되기 위해서는 아직은 여러 기술의 개발이 필요하다. 특히, 소비자 상품들은 대부분 2 개 이상의 이종 재료의 조립체이다. 패속조형 기술은 부품의 형상 복잡도와 무관하게 부품을 제조할 수 있고, 여러 조각의 부품이 조립된 상태로 제조할 수 있는 장점을 갖추고 있다. 하지만 이종의 재료들을 동시에 이용할 수 있는 다중재료 패속조형기술은 비교적 최근에 연구가 시작되었다.¹⁻³

다중재료를 이용하는 공정들 중 일부는 전통적인 공정 분류를 다소 벗어나는 것도 있지만 기반이 되는 기술을 중심으로 분류될 수 있다. 많은 패속조형기술에 대하여 여러 재료를 동시에 이용할 수 있도록 하는 연구가 수행 중에 있다. 이들 중 특히 융착모델링은 공정기술이 원래부터 부품과 지지대에 별도의 소재를 사용하는 다중 노즐을 이용 하였으므로 초기부터 다중재료를 이용하도록 개발되고 있다.^{4,5} 파우더 소결 기반의 다중재료 패속조형 기술은 리코팅 시에 이종의 파우더를 선택적으로 뿌린 후 녹여 굳히거나 소결하는 방법을 주로 선택하였다.^{6,7} 그러나, 광조형 기반의 공정은 소재가 액상의 수지이므로 이를 변경하는 것이 가장 어려워 그 적용 예가 가장 적었지만 투명한 부품을 만들 수 있고 다른 패속조형 기술에 비해 가장 표면 품질이 우수하다는 등의 장점이 있어 꾸준히 연구되고 있다.^{8,9} 본 논문은 광조형을 기반으로 하는 다중재료 패속조형 장치를 개발하는데 필요한 제반 기술 요소들을 밝히고 그 공정계획 방법을 제시함으로써 광조형 기술의 활용범위를 확대하고 나아가 직접제조 기술로 활용될 수 있도록 가능성을 증대시킴을 목표로 하고 있다.

2. 다중재료 광조형 장치

2.1 개요

Wicker¹⁰⁻¹² 등은 2004 년 다중재료 광조형장치를 처음 발표한 이래로 지속적으로 개발하고 개선하여 오고 있다. 다중 재료를 사용하는 것은 융착모델링 기반 패속조형에서 노즐을 하나 더 추가하거나, 분말소결 기반 패속조형에서 선택적으로 분말을 리코팅 함으로서 가능하다. 그러나, 광조형 기반 패속조형 공정은 액상의 광경화성 수지를 사용하므로 이들이 서로 섞여버리게 되어 국부적인 리코팅이 불가능한 어려움이 있다. 따라서 Fig. 1 에 보인 재료교환의 기본 개념과 같이 먼저 한 재료를 적층하고 수지통에서 꺼내어 세척하고 다시 다

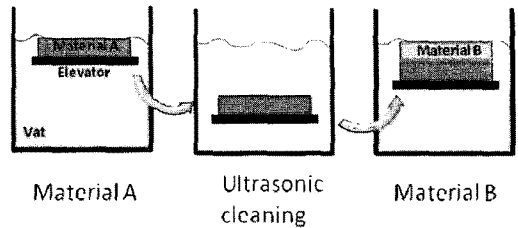


Fig. 1 Material changing concept

른 수지통에 넣어서 가공하는 방식을 채택하였다.¹³

복수의 재료를 한번의 가공에 동시에 이용하면 다색의 부품을 제작하는 것은 물론 서로 물성이 다른 수지를 사용함으로써 좀 더 다양한 기능성 부품을 제작할 수 있으며, 나아가 직접 완제품을 제작할 수 있는 기술로 발전할 것으로 기대된다.

2.2 가공공정

광조형의 재료는 다른 패속조형기술들과는 달리 액상의 수지이므로 사용한 수지를 뽑아 내고 새로운 수지를 부어 넣거나, 수지가 들어 있는 통을 교환하여야 재료의 변경이 가능하다. 물론 이러한 교환 과정 중에서 한 종류의 수지가 다른 수지와 섞이지 않도록 부품을 세척하는 공정이 필수적으로 요구된다. 또한 수지를 변경할 경우 제작 중인 파트와 플랫폼에 묻어 있던 수지는 세척시에 유실되며, 다른 재료에 의해 제작된 만큼의 체적이

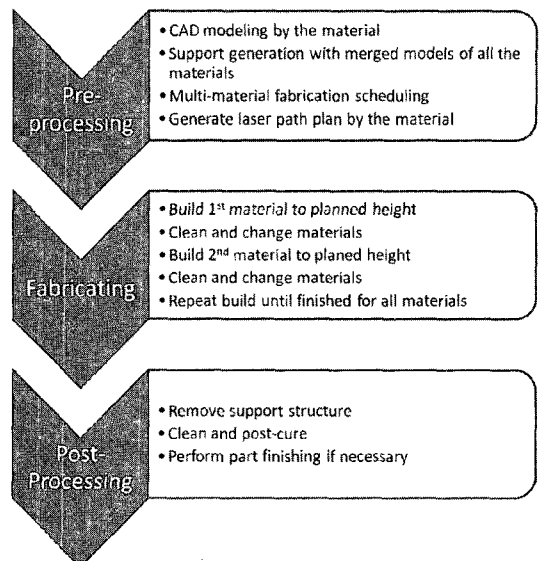


Fig. 2 Overall multiple material fabrication process

부품에 추가되므로 매번 수지의 높이를 다시 맞추어야 정확한 제작이 가능하다. 그러나, 그 이외의 부분은 기존의 단일재료 광조형장치와 대체로 동일한 시스템 구성이 가능하다.

다중재료 광조형 기술의 가공공정은 Fig. 2 에 나타낸 것과 같이 전처리, 제조, 후처리 공정으로 나눌 수 있다. 전처리 공정에서는 각 재료별로 형상을 모델링하여, 이들을 공간 좌표상의 적절한 위치에 배치하고 지지대를 생성하고 스케줄링을 실시한 뒤 레이저 가공의 경로를 생성하는 작업이다. 제조 공정에서는 스케줄링 된 재료 이용 순서에 따라 각 부품을 지정된 높이 만큼씩 적층한다. 이때 재료의 변경시에는 세척공정이 필요하다. 후처리 공정에서는 지지대를 제거하고 세척하고 후경화 한 후에 필요하다면 연마, 코팅 등의 표면 품질 향상을 위한 가공을 수행한다.

2.3 재료의 교환

가공에 사용하는 수지를 교환하기 위해서 Fig. 3 에 보인바와 같이 3 개의 수지통과 1 개의 세척통을 장착하여 회전하는 기구를 이용하였다. 세부적인 재료 교환 과정은 Fig. 4 에 나타낸 바와 같다.

먼저 한 재료를 이용하여 특정 부분을 가공하고 플랫폼을 수지통에서 완전히 빼낸 후 세척통이 플랫폼의 아래에 위치하도록 회전시킨다. 세척통에 플랫폼과 파트가 완전히 잠기도록 충분한 깊이로 넣은 후 초음파 세척을 실시한다. 세척 후 플

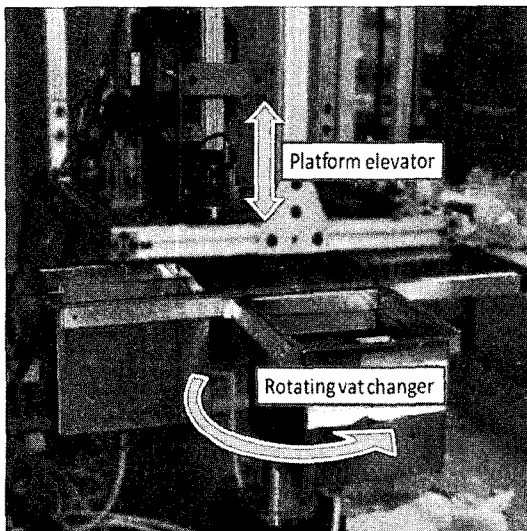


Fig. 3 Multi-material stereolithography

랫폼을 다시 들어 올려서 수지통이 회전할 때 충돌하지 않도록 이동시킨 상태에서 다음 차례로 이용할 재료가 담긴 수지통이 플랫폼 아래에 위치하도록 회전시킨다. 이제 새로운 재료에 플랫폼을 내려 수지의 높이를 조절하고 리코팅하면 다음 재료의 가공 준비가 완료된다.

2.4 리코팅

여러 재료를 사용하는 경우 각 재료의 특성을 고려하여 재료별로 별도의 리코팅 파라미터를 지정할 수 있도록 할 필요가 있다. 즉, 담금(dipping)의 속도, 깊이, 대기시간 등은 각 재료의 성질에 따라 적절한 값을 설정해야 한다. 일반적으로 재료의 점성이 높을 수록 플랫폼을 느리게 움직이면서 깊이를 담금 필요가 있으며, 대기시간도 길게 잡을 필요가 있다. 또한 재료의 변경시 회전하는 수지통과 리코터가 충돌하지 않도록 충분한 간격을 갖도록 설계할 필요가 있다.

재료를 변경할 경우에는 반드시 수지의 양을 재조정하여야 한다. 이전 재료에 의해 제작된 부품의 부피만큼 다음 재료의 수면이 상승하게 되기

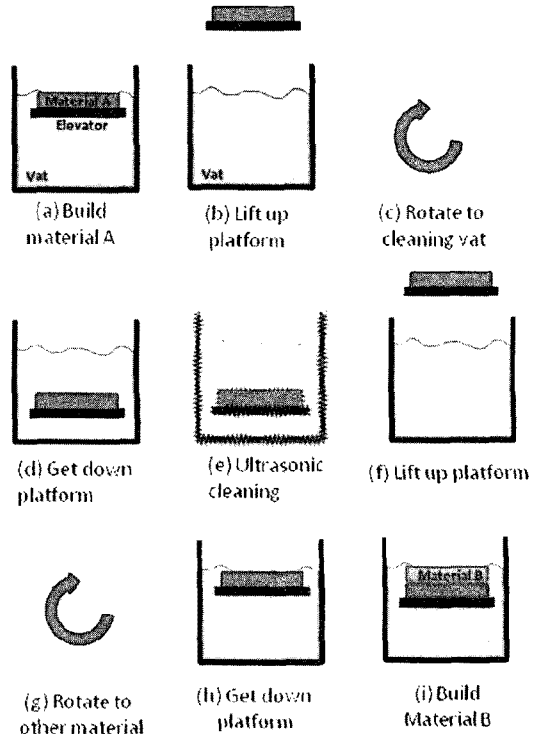


Fig. 4 Detailed Material changing procedure

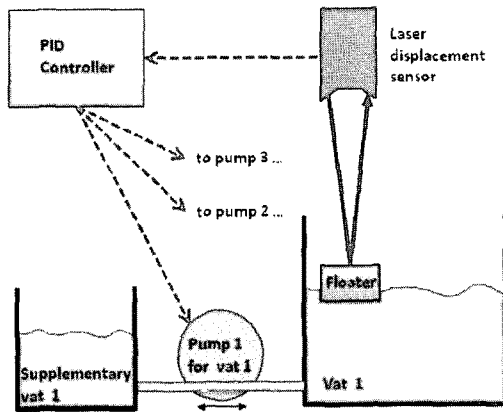


Fig. 5 Resin level control

때문이다. 수지의 높이를 정밀하게 측정하기 위하여 레이저 거리 측정기를 사용하였다. 그러나, 많은 종류의 광경화성 수지가 측정기의 레이저를 충분히 반사시키지 못하기 때문에 부표를 수지에 띄워두고 그곳의 높이를 측정하였다. 그런데 부표의 높이는 실제 수위에 대하여 비중의 차이에 비례한 편차가 있으므로 이를 보정해 주어야 한다.

Fig. 5 에는 수위 조절 장치의 개략도를 보인다. 많은 종류의 광경화성 수지들이 점성이 높으므로 수지를 넣거나 빼더라도 수위가 빠르게 반응하지 않고 표면이 출렁일 수 있으므로 정확하고 빠른 수위 조절을 위하여 비례미분적분 제어 알고리즘을 사용하였다.

3. 공정계획

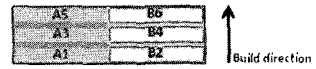
다중 재료를 이용하는 경우의 공정계획에서 지지대 생성이나 단면화, 레이저 조사경로 생성 등의 과정은 단일 재료를 이용하는 기존의 기술을 동일하게 이용할 수 있다. 다만 재료를 변경하는 순서를 결정할 필요가 있다.

3.1 재료 교환의 최소화

여러 종류의 재료를 동시에 이용하는 경우 공정 계획의 작성이 필요하다. Fig. 6 에 보인바와 같이 만일 2 개의 재료 A, B 를 대층 매번 같은 순서(AB-AB-AB-AB...)로 사용하여 n 개 층을 제작한다면 재료의 변경 횟수는 식(1)과 같다.

$$2n - 1 \tag{1}$$

a layer of material A
 a layer of material B



A1 - wash - B2 - wash - A3 - wash - A4 ...

(a) Fixed order fabrication



A1 - wash - B2 - B3 - wash - A4 - A5 ...

(b) Reversing order fabrication

Fig. 6 Comparison of fabrication order

그러나, 이 재료를 대층 반대 순서(AB-BA-AB-BA...)로 사용할 경우에는 식(2)와 같다.

$$n \tag{2}$$

재료의 변경에는 수지통의 회전과 세척 및 기타 대기시간이 소요되므로 이를 줄이는 것은 가공 시간의 단축은 물론 세척시 발생 가능한 변형을 최소화 하여 정밀도의 향상에 도움을 줄 수 있다.

3.2 저점도 수지의 활용

리코팅 시에 별도의 스위핑이 반드시 필요하지 않은 낮은 점도의 수지를 1 개 이상 이용하는 경우에는 재료의 변경횟수를 크게 저감할 수 있다. 재료 변경횟수의 저감은 세척과 대기 시간을 감소시켜 전체적인 제작시간을 줄이게 된다. 즉, Fig. 7 의 예에 보인바와 같이 두 재료 A, B 중 B가 점성이 충분히 낮아 리코팅시에 스위핑을 하지 않아도 적절한 시간 내에 수지 표면이 충분히 평탄해 진다면, 모델의 전체적 크기와 무관하게 단 2 회의 재료 교환으로 해당 모델을 제작할 수 있다.

저점도 수지의 이용에 대한 좀 더 자세한 설명은 저자의 선행연구 논문을 참고하기 바란다.^{13,14}

4. 적용예

개발된 시스템이 실제 작동을 확인하기 위하여

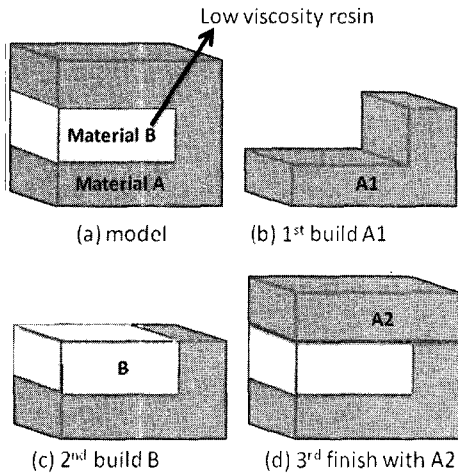


Fig. 7 Process planning with low viscous material

2 개의 재료를 이용하며 직관적으로 확인이 가능한 단순한 형태의 부품을 제작하여 검증을 실시하였다. 제작된 부품의 형상은 Fig. 8 에 보인 바와 같으며, 좌측의 “┌”자 형상은 붉은색 도료를 첨가한 수지를 이용하고 우측의 “┐”자 형상은 투명한 수지를 이용하여 제작하였다. 표 1 에는 사용된 수지와 물리적 크기 등을 나타내었다. 서로 다른 두 수지가 맞닿는 부분의 접착상태는 매우 우수하였으며, 이종 수지의 접합 강도에 대한 자세한 실험은 Lozoya¹²의 결과를 참조하기 바란다.

부품의 형태가 복잡하고 작은 형상을 포함하는 경우에 대한 실험을 위하여 Fig. 9 에 보인 바와 같은 형상에 대하여 실험을 실시하였으며 표 2 에 나타낸 바와 같이 3 가지 종류의 재료를 이용하였다. 이 예의 결과를 통해 본 연구의 시스템이 일반적인 형상을 제작할 수 있음을 보였다. 또한 본 시스템으로 제작된 또 다른 예는 저자의 선행연구의 논문¹³을 참고하기 바란다. 여러 재료를 동시에 이용할 수 있는 캐속조형기술의 개발은 제품의 조립을 위한 시간을 감소시키는 효과는 물론 단일 재료로는 가질 수 없는 기능적 특성을 부여할 수 있는 장점이 있다. 그러나 재료를 교환하는 과정에서 이종 재료가 섞이지 않도록 방지하기 위한 세척공정이 필요하다는 단점이 있다. 세척공정에서 재료가 일부 유실되는 것은 물론 과도하게 세척할 경우 재료가 변형될 수 있다. 따라서 빈번한 세척으로 인한 재료의 유실과 부품의 변형 또는 파손을 줄이기 위하여 세척으로 인한 손상을 파악하는 연구와 재료의 교환 횟수를 줄이는 연구가 필요하다.

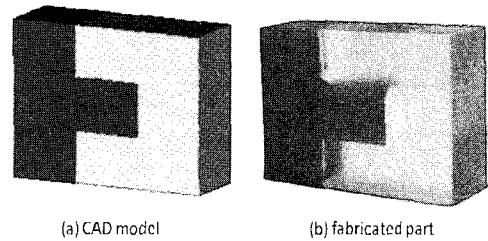
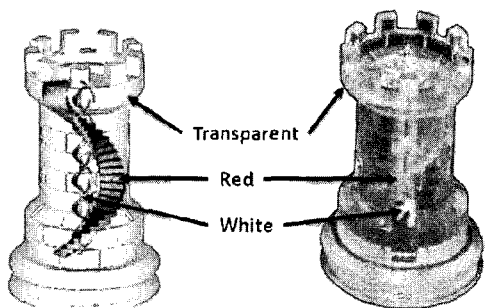
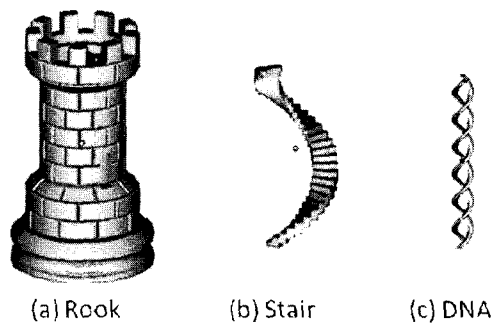


Fig. 8 A simple verification part

Table 1 Simple verification

Item	Description
material A	WaterShed™ 11120(DSM Somos®) color: transparent
material B	ProtoTherm™ 12120(DSM Somos®) color: red
diluent	Propoxylated neopentyl glycol diacrylate(Sartomer Inc.) 50% (w/w)
dimension	38.08×25.4×12.7 mm
layer thickness	0.1016 mm
num. of layer	125
build time	8hr 20min



(d) Actual layout (e) Fabricated part
Fig. 9 Example for actual geometry with three materials

Table 2 Practical example

Item	Description
rook	WaterShed™ 11120(DSM Somos®) color: transparent
stair	ProtoTherm™ 12120(DSM Somos®) color: red
DNA	14120 White(DSM Somos®) color: white
diluent	Propoxylated neopentyl glycol diacrylate(Sartomer Inc.) 50% (w/w)
dimension	73.152×32×32 mm
layer thickness	0.1016 mm
num. of layer	720
build time	46hr

또한 정밀도, 성형방향의 선정이나 리코팅시 스윙핑의 필요성 등 세부적인 항목에 대한 추가적인 고찰이 필요하다.

5. 결론

본 논문은 다중재료 광조형장치의 개발에 대해 기존의 단일재료 광조형장치와의 차이점을 중심으로 각 기능 모듈의 제작공정과 효과적인 공정계획에 중점을 두고 전반적인 사항을 기술하였다. 본 연구에서 3 가지 재료를 동시에 사용할 수 있는 광조형장치를 개발하였으며, 이를 위하여 수지통회전 교환장치와 수위조절 장치를 고안하였으며 세척공정을 추가하였다. 또한 다중재료 광조형을 위한 효율적인 공정계획 방법을 개발하여 소개하였다. 또한 개발된 시스템을 이용하여 제작한 시험부품을 보임으로서 본 연구의 내용이 실제적으로 응용 가능함을 보였다. 향후에는 공정의 효율을 높이기위한 성형방향 선정과 리코팅시 스윙핑의 필요성을 결정짓는 방법 등에 대한 추가적인 연구가 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2009 학년도 안동대학교 국제학술교류보조금에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Sangermano, M., Ortiz, R. A., Urbina, B. A. P., Duarte, L. B., Valdez, A. E. G. and Santos, R. G., "Synthesis of an epoxy functionalized spiroorthocarbonate used as low shrinkage additive in cationic UV curing of an epoxy resin," *European Polymer Journal*, Vol. 44, No. 4, pp. 1046-1052, 2008.
2. Sandoval, F. H. and Wicker, R. B., "Functionalizing stereolithography resins: effects of dispersed multi-walled carbon nanotubes on physical properties," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, No. 5, pp. 292-303, 2006.
3. Chung, C.-M., Kim, J.-G., Kim, M.-S., Kim, K.-M. and Kim, K.-N., "Development of a new photocurable composite resin with reduced curing shrinkage," *Dental Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 174-178, 2002.
4. Nam, S., Khalil, J. and Sun, W., "Multi-nozzle deposition for Construction of 3D biopolymer Tissue Scaffolds," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 9-17, 2005.
5. Jafari, M. A., Han, W., Mohammadi, F., Safari, A., Danforth, S. G. and Langrana, N., "A Novel System for Fused Deposition of Advanced Multiple Ceramics," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 161-174, 2000.
6. Kumar, P., Santosa, J. K., Beck, E. and Das, S., "Direct-write Deposition of Fine Powders Through Miniature Hopper-nozzles for Multi-material Solid Freeform Fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 14-23, 2004.
7. Li, X., Wang, J. and Shaw, L. L., "Laser Densification of Extruded Dental Porcelain Bodies in Multi-material Laser Densification Process," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 11, No. 1, pp. 52-58, 2005.
8. Son, Y., Lim, T. W., Yang, D.-Y., Yi, S. W., Kong, H. J. and Park, S. H., "Study on Process Parameters of a SU-8 Resin in Two-photon Stereolithography for the Fabrication of Robust Three-dimensional Microstructures," *J. of KSPE*, Vol. 25, No. 1, pp. 130-137, 2008.
9. Park, I. B., Ha, Y. M., Kim, M. S. and Lee, S. H., "Development of Dithering Process for Accuracy of Microstructure by Projection Microstereolithography

- based on UV-DMD,” *J. of KSPE*, Vol. 26, No. 8, pp. 7-13, 2009.
10. Wicker, R. B., Medina, F. and Elkins, C. J., “Multiple Material Micro-Fabrication: Extending Stereolithography to Tissue Engineering and Other Novel Application,” *Proc. of 15th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 754-764, 2004.
 11. Arcaute, K., Zuverza, N., Mann, B. and Wicker, R., “Multi-Material Stereolithography: Spatially-Controlled Bioactive Poly(ethylene glycol) scaffolds for Tissue Engineering,” *Proc. of 18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 458-69, 2007.
 12. Lozoya, O. A., “Development and demonstration of a multiple material stereolithography system,” MS Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, The University of Texas at El Paso, 2005.
 13. Kim, H.-C., Choi, J.-W., MacDonald, E. and Wicker, R., “Slice overlap-detection algorithm for process planning in multiple-material stereolithography,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-009-2181-x.
 14. Kim, H., Choi, J.-W. and Wicker, R. B., “A Rule Based Scheduling and Process Planning Method for a Multi-Material Stereolithography System,” *19th International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 26-27, 2008.