

◆특집◆ 디지털 3차원 실물복제기

UV 경화를 이용한 3차원 임의형상 시스템 개발

김정수*, 이민철**, 김동수***

Development of 3D Freeform Fabrication System Using an UV Curing Process

Jung Su Kim*, Min Cheol Lee** and Dong Soo Kim***

Key Words : 3DP (3차원프린팅), SFF (임의형상제작시스템), Ink-jet (잉크젯), UV curing (광경화)

1. 서론

최근에는 CAD로 디자인 된 3차원 모델을 빠른 시간에 입체 형상으로 구현이 가능한 기술 중의 하나인 3차원 프린팅 기술이 산업 전반에 크게 활용되고 있다. 이는 RP(Rapid Prototyping) 혹은 SFF(Solid Freeform Fabrication) 시스템이란 이름으로 산업용과 오피스용으로 각각의 환경에 적합하게 개발되고 있으며 주로 산업용은 부품 파트로써 대체가 가능한 입체 형상물의 제작이 가능하며 오피스용은 컨셉 모델로써 입체 형상의 외형을 파악하기 위한 목적으로 이용되고 있다.

본 논문에서는 이중 오피스 타입의 시스템으로써 개발되고 있는 3차원 프린팅 기술을 소개하고 그 기술을 개선한 시스템을 개발한다. 3차원 프린팅 기술은 현재 여러 가지 방법이 이용되고 있지만 대표적으로 크게 2가지 기술로 나눌 수가 있다. 첫째는 MIT에서 개발된 파우더 기반의 3차원 프린팅 기술로써 점성이 물에 가까운 접착액을 이용하여 이를 layer by layer 방식으로 3차원 모델의 형상의 단면을 프린팅 기법을 이용하여 파우더를 접착해서 쌓아가는 방식이다. 다른 하나는 현재 이스라엘에

서 개발된 poly jet 방식으로 photopolymer resin을 이용하여 플레이트 바닥에 입체 형상의 단면을 프린팅하고 그 위에 UV 빛을 조사하여 굳게 만들어서 적층하는 방식이다. 본 논문에서는 현재 이용되는 오피스 환경에서의 여러 가지 공정 특성에 대한 분석과 새로운 공정 방법에 대해 제시 한다.

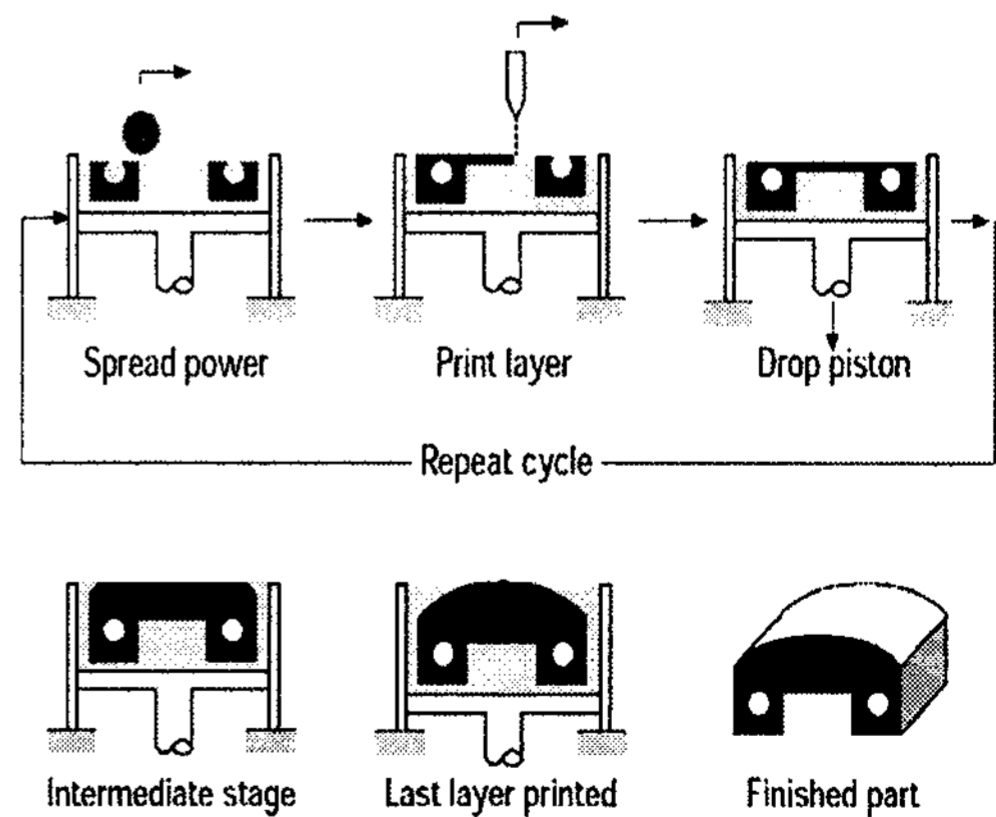


Fig. 1 The sequence of conventional 3DP process

2. UV경화를 이용한 3차원 프린팅 공정

2.1 3차원 프린팅 공정

Fig. 1은 최초 MIT에서 제안된 3D 프린팅 방식을 나타낸다. 이는 파우더 기반에서 빌드룸과 피드룸이 존재하며 1 layer를 최소 100 μ m이상으로 적층

* 부산대학교 지능기계공학과 대학원
 ** 교신저자: 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
 E-mail: mclee@pusan.ac.kr Tel. 051-510-2439
 *** 한국기계연구원 나노기계연구본부

시켜 3차원 형상을 구현한다. 공정 프로세서는 최초 파우더를 피드룸으로부터 공급받고 빌드룸 위에 1 layer에 해당하는 단면을 써멀 버블젯 헤드를 이용하여 물의 점성에 가까운 점착제를 분사한다. 그 후 빌드룸이 약 100 μ m 하강을 하고 다시 피드룸으로부터 파우더를 공급받는 과정을 반복적으로 수행하는 것이다. 이와 같은 방법은 현재 나온 3차원 임의형상 제작 시스템 중 가장 적절한 정밀도를 가지며 빠른 속도로 제작이 가능하다. 기존의 3D 프린팅 공정이 가진 단점을 보완한 개선된 3D 프린팅 공정 기법을 Fig. 2에 나타낸다. 개선된 3D 프린팅 공정은 기존 공정과 약간의 차이를 보인다.

기존 공정에서는 파우더를 점착하기 위해 점착제를 사용하여 프린팅 한 반면 개선된 3D 프린팅 공정에서는 UV 경화가 가능한 광경화성 수지를 분사하여 파우더를 점착 시킨다. 즉, 각 layer의 단면을 광경화성 수지로 프린팅하고 UV 램프를 조사시

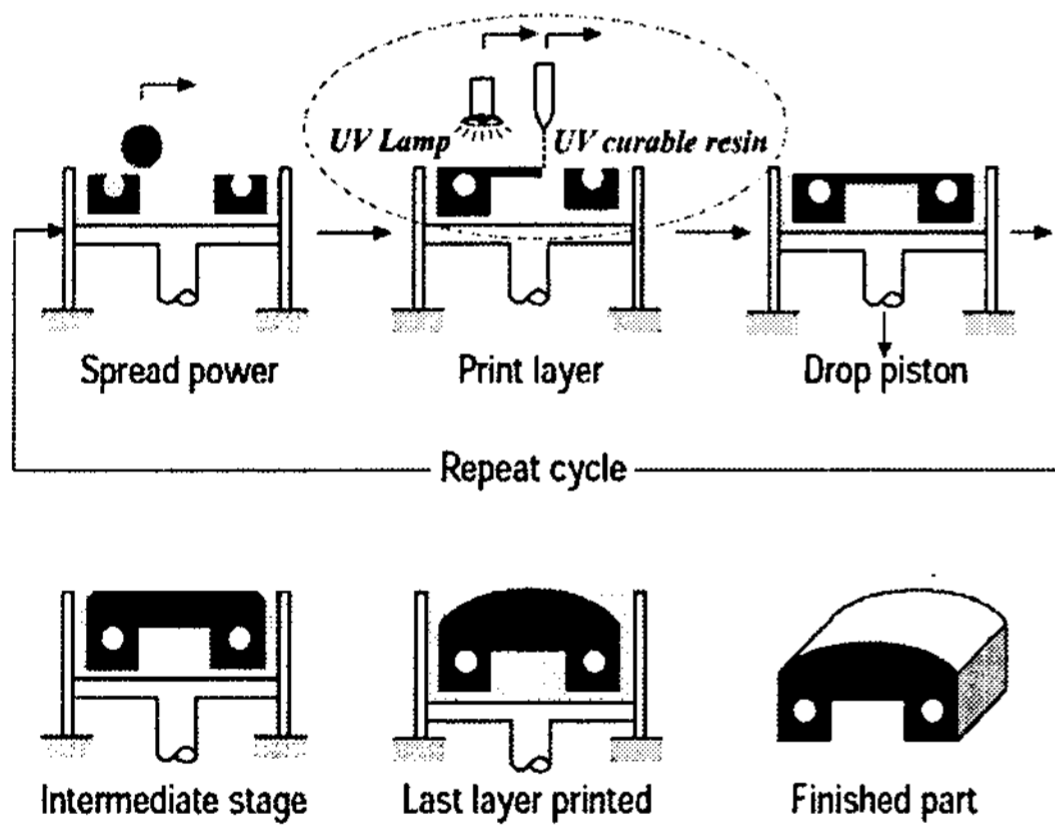


Fig. 2 The sequence of new 3DP process

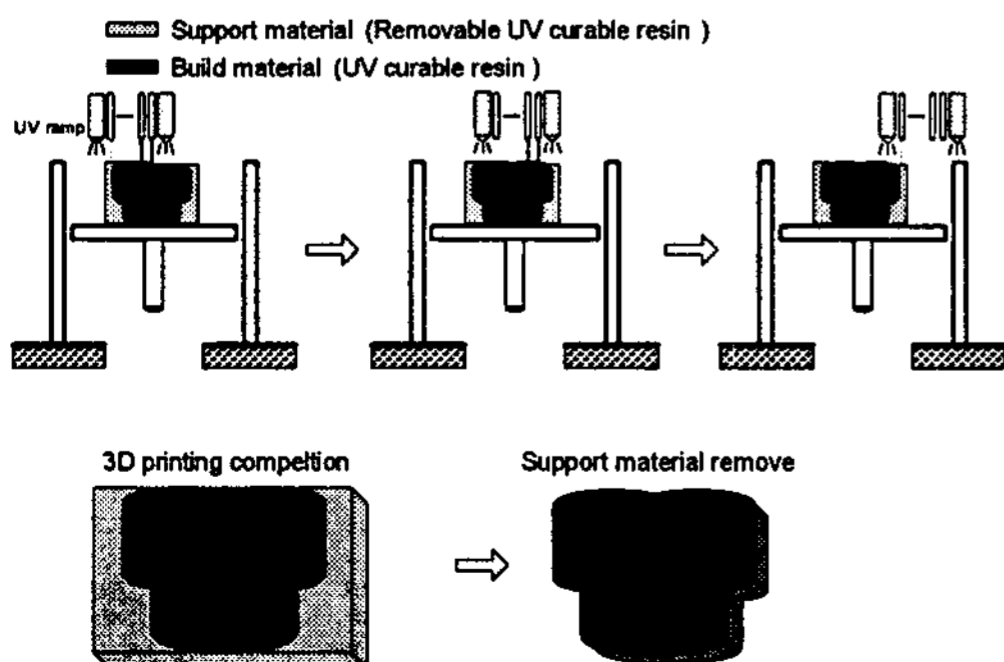


Fig. 3 The sequence of UV curing 3DP process

켜 순간적으로 파우더와 함께 광경화성 수지를 경화시켜 적층하는 방법이다.

개선된 3D 프린팅 기술은 기존의 공정과는 달리 광경화성 수지가 함께 경화되어 기존에 비해 파우더가 높은 강도로 결합을 하고 있는 장점이 있다. 이 경우 후처리 공정이 존재하지 않으며 제작 후 바로 형상을 꺼낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 개선된 공정의 경우 공정 기술 최적화가 어려워 미세한 임의형상을 제작하기 어려운 단점을 가지고 있다.

UV 경화를 이용한 3차원 프린팅 기법은 Fig. 3과 같은 poly jet 방식으로 평평한 플레이트 바닥면에 CAD로부터 추출된 3차원 입체 형상에 대한 단면을 photopolymer resin으로 프린팅을 한 후 그 위에 UV 램프를 이용하여 경화를 하고 다시 그 위에 다음 층의 단면을 프린팅 한 후 경화를 시켜 쌓아 올라가는 방법이다. UV 경화를 이용한 3차원 프린팅 기법은 파우더 기반에서 점착액의 프린팅을 통한 3차원 프린팅 기법에 비해 그 강도가 우수하고 후처리 공정이 존재하지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 제작된 3차원 형상물의 기계적 구동성을 구현할 수 있어 최근의 SFF system 시장에서 크게 각광을 받는 기술이다. 하지만 UV 경화 시스템의 경우 photopolymer resin의 높은 점성으로 인해 피에조

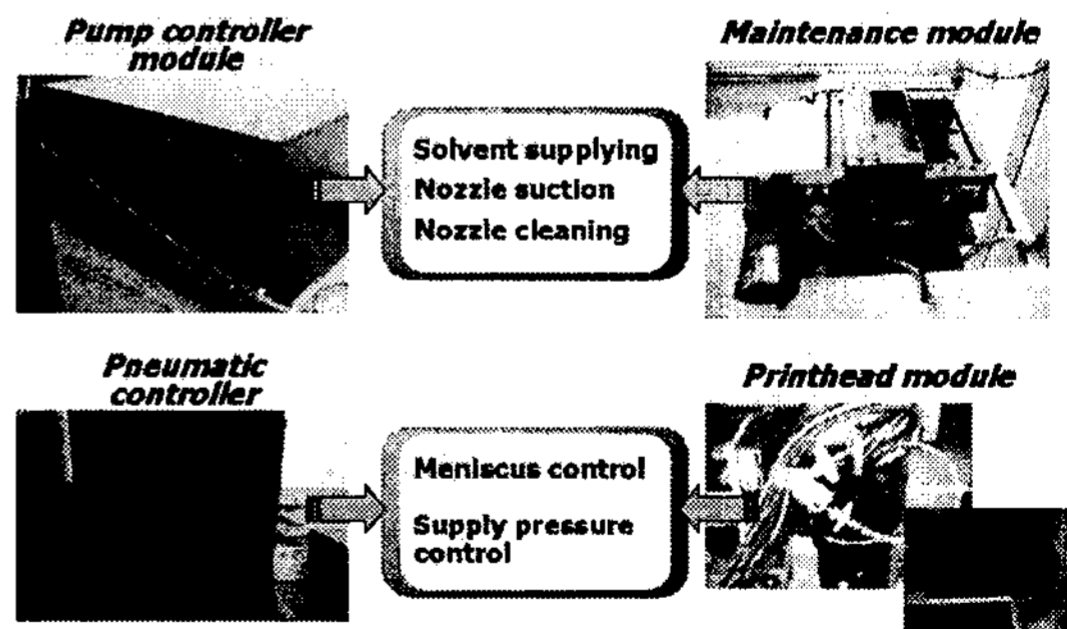


Fig. 4 System utility modules

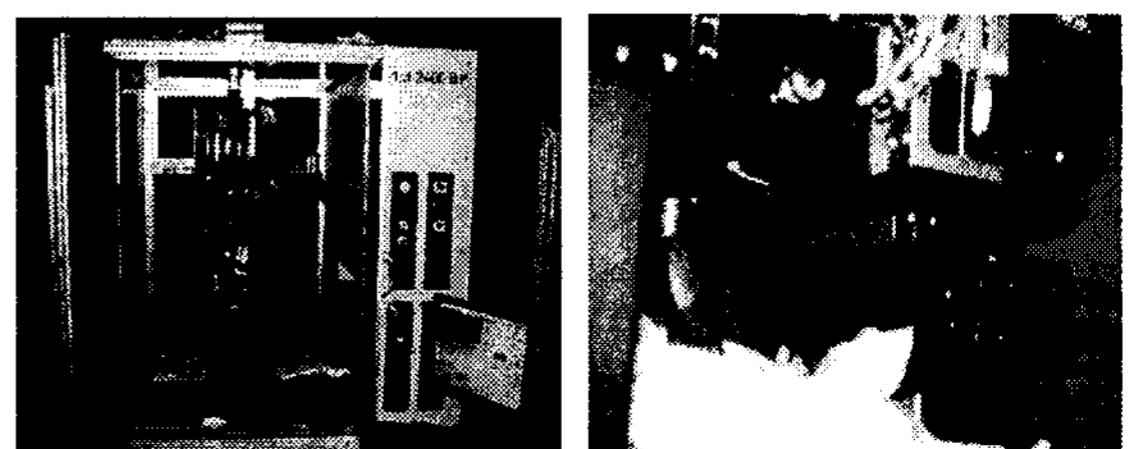


Fig. 5 2-head SFF system using UV curing method

프린트 헤드 시스템을 사용해야 하며 이는 장비의 구조적 복잡함과 기술적 어려움으로 나타난다.

2.2 UV 경화 시스템의 구성

UV 경화를 이용한 3차원 프린팅 기법을 적용한 SFF 시스템의 경우 피에조 헤드를 사용하기 때문에 공압 제어 장치와 헤드 제어 장치를 포함한다. 또한 헤드 표면의 매니스커스를 유지하기 위하여 분사 드롭 측정 장치와 분사량 조절을 위한 AWG(Arbitrary Waveform Generation) 제어 장치를 포함 하였다.

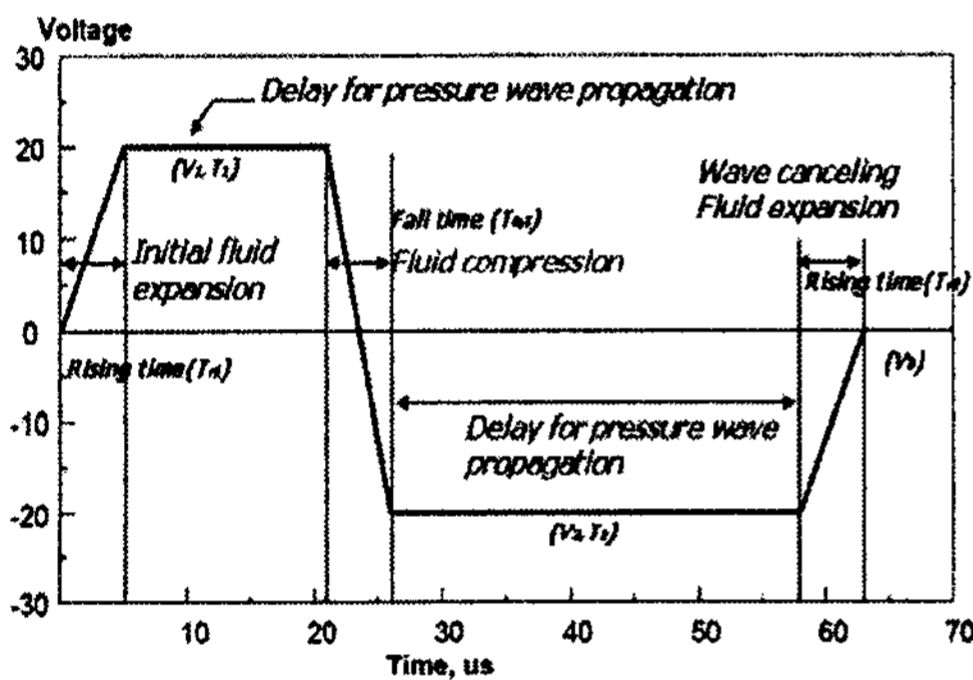


Fig. 6 Bipolar AWG Pulse

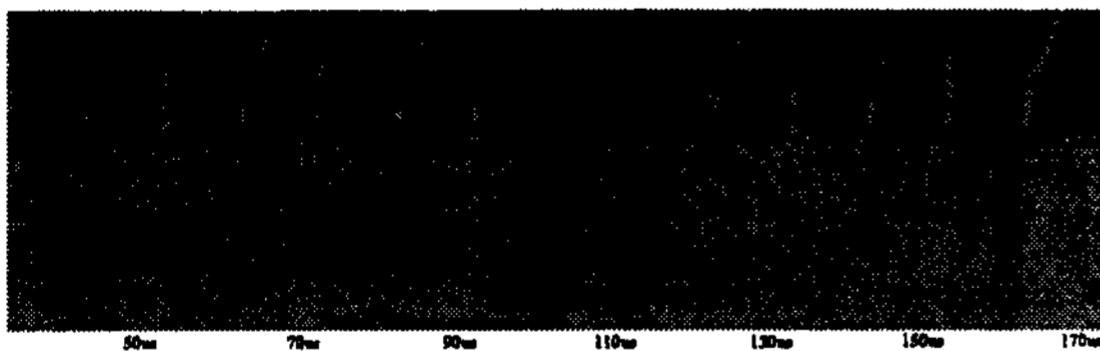


Fig. 7 Single nozzle jetting experiment

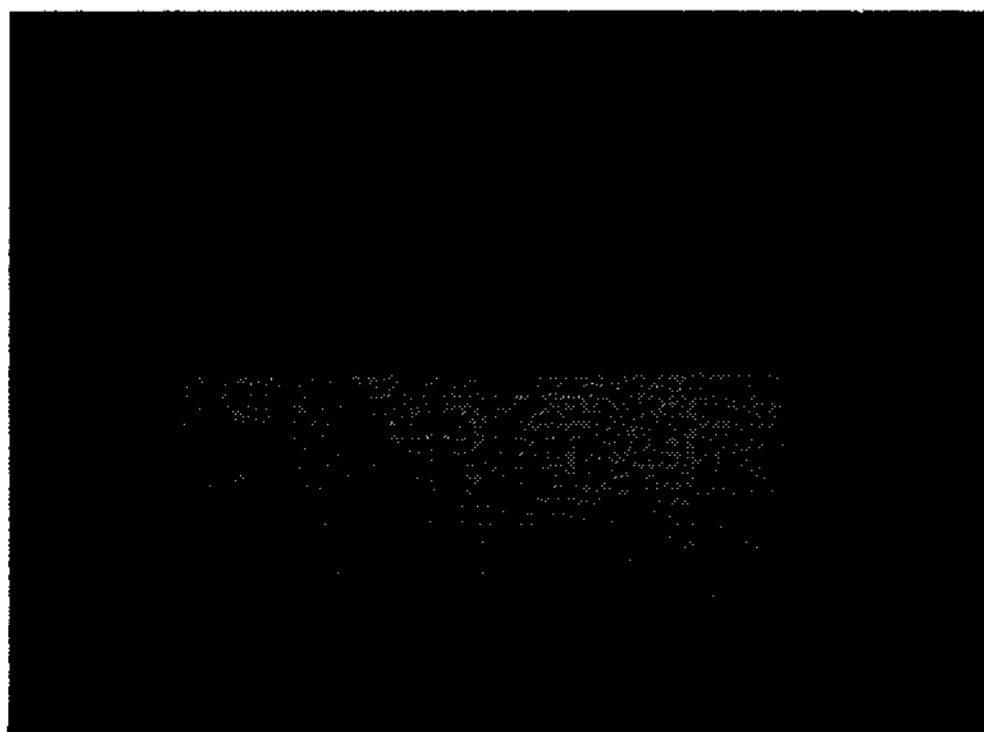


Fig. 8 Single head(128nozzle) UV jetting experiment

Fig. 4는 시스템의 각 구성부를 나타낸다. 공압 조절 장치를 통해 photopolymer resin이 피에조 효과에 의해 분사 될 수 있도록 노즐 관내에서 매니스커스를 유지하도록 컨트롤 된다. Fig. 5는 2개의 프린트 헤드로 구성된 SFF 시스템을 나타낸다. 헤드양쪽 측면에 각각 UV 램프를 부착하여 프린팅 후에 바로 경화가 일어날 수 있도록 구현 하였으며 헤드 표면 측정을 위한 카메라 시스템을 추가하였다.

2.3 UV 분사 실험

Fig. 6은 바이폴라 형태의 AWG 펄스의 형태를 나타내었다. AWG는 분사 드롭의 양을 제어 할 수 있고 그 형태를 가장 이상적으로 구현 할 수 있는 메커니즘을 가지고 있다. 즉, 피에조 헤드에서 가해지는 입력 전압의 펄스의 형태를 가변하여 원하는 드롭의 형태로 구현하는 것이다.

UV 분사 실험에서는 초기에 싱글 노즐을 이용하여 AWG에 의한 드롭 형태를 최적화 시키고 이를 적용하여 128노즐인 싱글헤드의 UV 분사 실험을 수행하였다. Fig. 7은 싱글노즐에서의 분사 드롭을 나타낸 것이며 Fig. 8은 싱글헤드의 UV 분사 드롭을 나타낸 것이다. Table 1은 UV 분사 실험의 AWG 펄스 값을 나타낸 것이다.

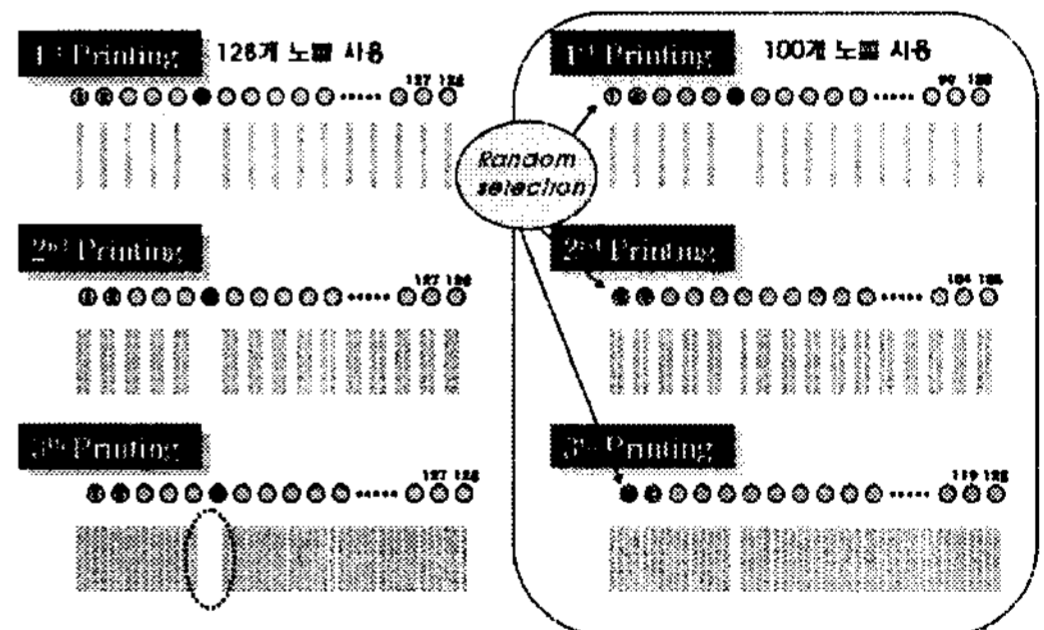


Fig. 9 Random nozzle shift process

Table 1 Condition of UV jetting experiment

Jetting temperature	90℃
Rising time of jetting pulse	1.5us
Duration time	1.5us
Falling time	1.5us
Delay time	3us
Jetting frequency	1Khz

3. 임의형상 제작 실험

3.1 랜덤 노즐 쉬프트 프로세서

3차원 형상물을 제작하기 위해서는 기본적으로 프린트 헤드로부터 photopolymer resin의 분사량을 조절하고 그에 따른 특성을 분석하여야 한다. 앞서 AWG를 적용하여 최적의 드롭 형태를 구현하였으나 메인 드롭 이외에도 발생하는 새틀라이트 드롭이 존재하고 장시간 분사에 따라 멀티 노즐의 경우 노즐 막힘 현상이라든지 드롭 양의 불규칙적인 요소가 발생하는 현상이 나타난다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점의 해결 방안으로 멀티 노즐에 대해 랜덤 프린팅 기법을 제안하였다. 이는 각 레이어의 프린팅 마다 헤드노즐을 랜덤하게 쉬프트 시켜서 불량 노즐에 대해 혹은 불규칙적인 드롭양에 대해서도 안정적인 프린팅 표면을 가지는 효과를 보여준다. Fig. 9는 랜덤 프린팅 기법을 나타낸다.

시스템에 사용된 헤드의 경우 헤드당 128개의 노즐을 가지고 있으며 이중 100개의 노즐을 프린팅에 사용하고 28개에 대해 랜덤하고 쉬프트 시켜 프린팅 하는 방법을 구현하였다.

3.2 임의형상 제작 실험

Fig. 10은 제작된 3차원 형상 모델을 나타내며 제작 조건은 Table 2와 같다. AWG는 최대 분사량의 조건으로 선정하였으며 이는 140V의 피에조 공급전압과 5us의 rising, duration time, 6.5us의 delay time의 펄스 파형이 결정 되었다. 프린팅 스피드는 한 레이어당 약 20초 정도가 소요되었으며 프린팅 분해능은 600x1600dpi로 프린팅하였고 왕복 프린팅 당 롤러로 표면에 압력을 가하여 각 레이어당 20um의 두께를 가지도록 구현하였다.

제작 결과 3차원 입체 형상물은 잘 제작이 되었으나 느린 속도로 인해 약 30분의 제작 시간 동안 1.2mm 정도의 높이를 보였다. 이는 시스템은 2헤드



Fig. 10 Fabricated 3D part

로 구성되었으나 임의의 3차원 형상물을 얻기 위해서는 하나의 빌드 재료와 다른 하나의 서포트 재료로 분사를 해야 하기 때문에 실제로는 싱글 헤드 로 형상물을 제작해야 했고 레이어 두께가 약 20um로 정밀하기 때문에 나타난 결과로 헤드수를 늘리면 제작시간을 줄일 수 있다.

Table 2 Fabrication condition

Print Head	Spectra SL 128 (max. 90pl)
Jetting voltage	140V (Max.)
Rising & Duration Time	5us
Delay Time	6.5us
Photopolymer Resin	Fullcure720(Objet)
Printing Speed	20sec/layer
Printing Resolution	600x1600dpi
Roller Contact	1회/왕복프린팅
Layer Thickness	20um
Layer Count	60layer

4. 강도 측정 실험

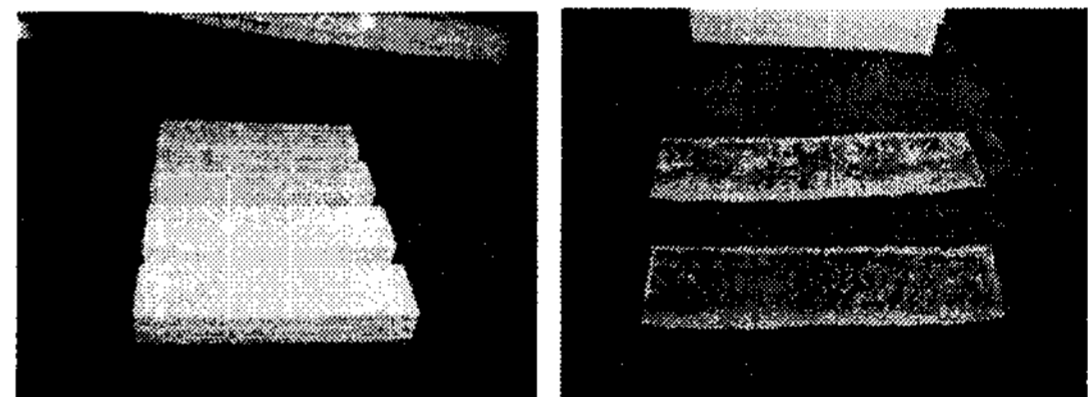


Fig. 11 Test specimens of general 3D printing (left) and UV curing (right)



Fig. 12 Tensile (left) and flexile (right) testing

Fig. 11은 일반적인 3DP 공정과 UV 경화 공정을 통해 제작된 강도 측정용 시편을 나타낸다. UV 경화 공정을 이용하여 제작된 테스트 시편의 경우 표면 상태가 고르지 못한 것은 단순히 강도 측정을 위하여 제작하였기 때문에 임의형상 제작을 위한 패턴링 작업을 거치지 않고 순수히 재료를 UV 경

화 시켜 만든 시편이기 때문이다.

Fig. 12는 시편의 기계적 강도를 측정하기 위하여 사용된 A series IX®automatic material testing system을 나타내며 실제로 UV 경화 시편의 flexile 테스트와 tensile 테스트를 수행하였다. 또한 일반적인 3DP 공정을 이용한 시편도 역시 같은 테스트를 수행하였다.

Fig. 13은 tensile 테스트의 결과를 나타낸다. 일반적인 3DP 공정의 경우 600kpa 정도의 힘에서 부서진 반면 UV 경화 공정으로 제작된 시편의 경우 약 3300kpa의 힘에서 부서졌다. 이는 3DP 공정이 약 5배 이상 우수한 강도 특성을 보임을 나타낸다.

Fig. 14는 flexile 테스트의 결과를 나타낸다. Flexile 테스트는 일반적인 3DP 공정의 경우 최대 0.08kN이하에서 부서지는 결과를 나타내었다. 하지만 UV 경화 공정의 경우 0.01kN 이하에서 늘어나는 현상을 보였는데 이는 UV resin이 유연한 물성을 가지고 있기 때문으로 보여진다.

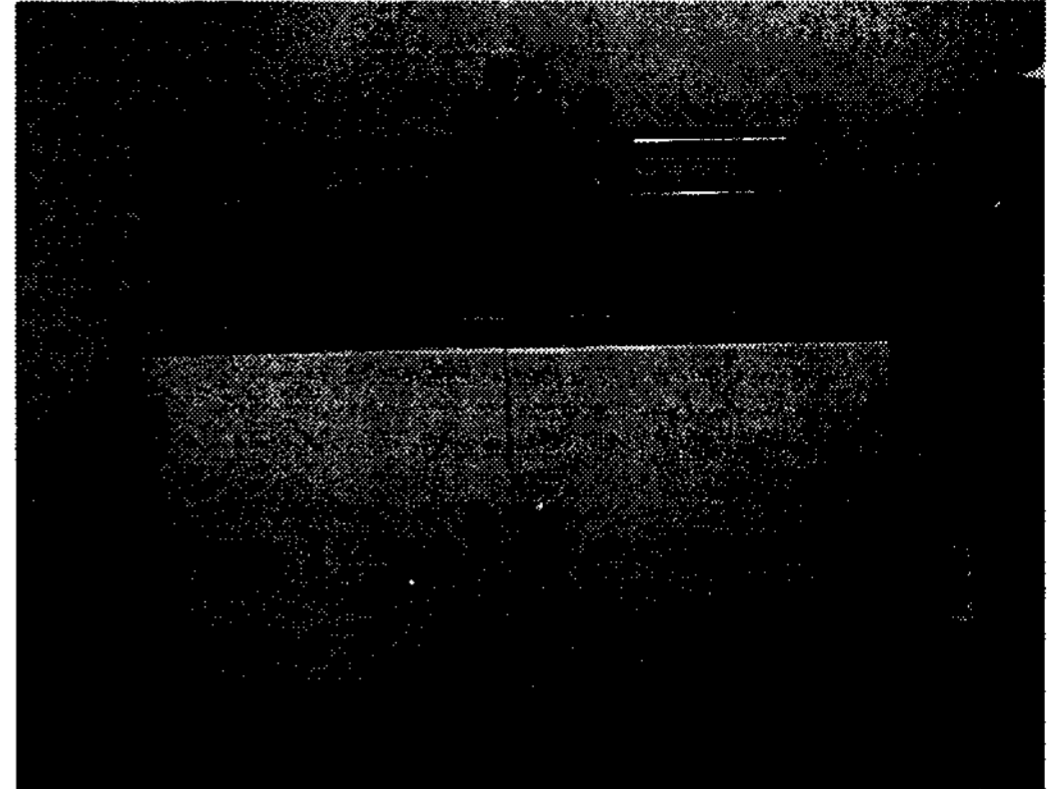


Fig. 15 Multi-head(8-head) UV curing system

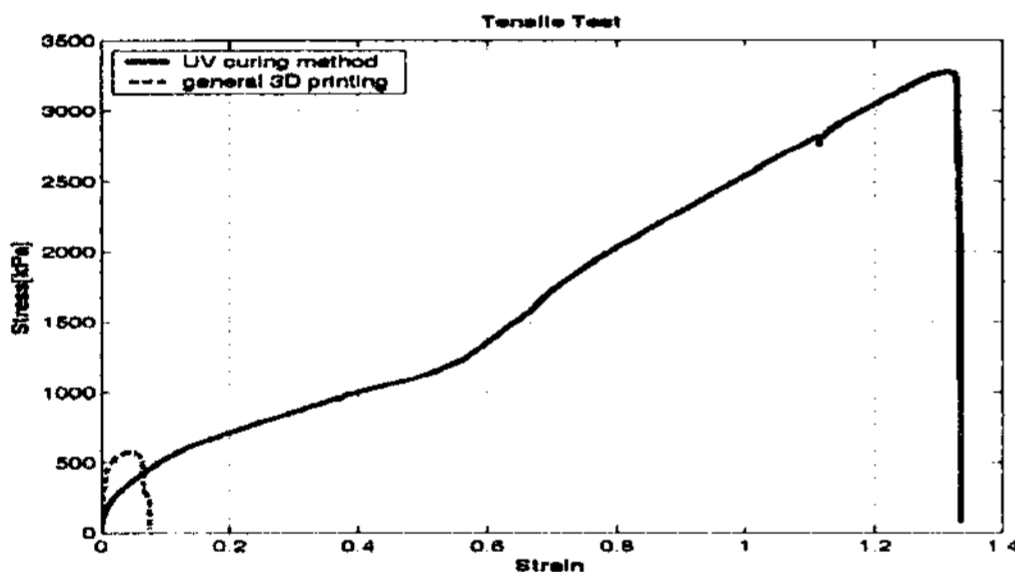


Fig. 13 Tensile test result

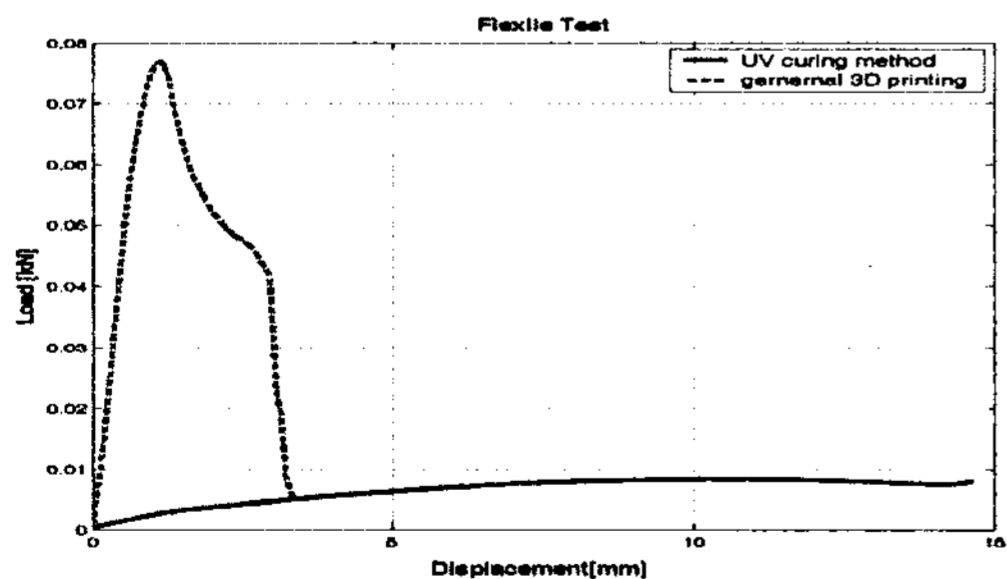


Fig. 14 flexile test result

5. 멀티 헤드 시스템

Fig. 15는 멀티 헤드 즉, 4개의 빌드와 4개의

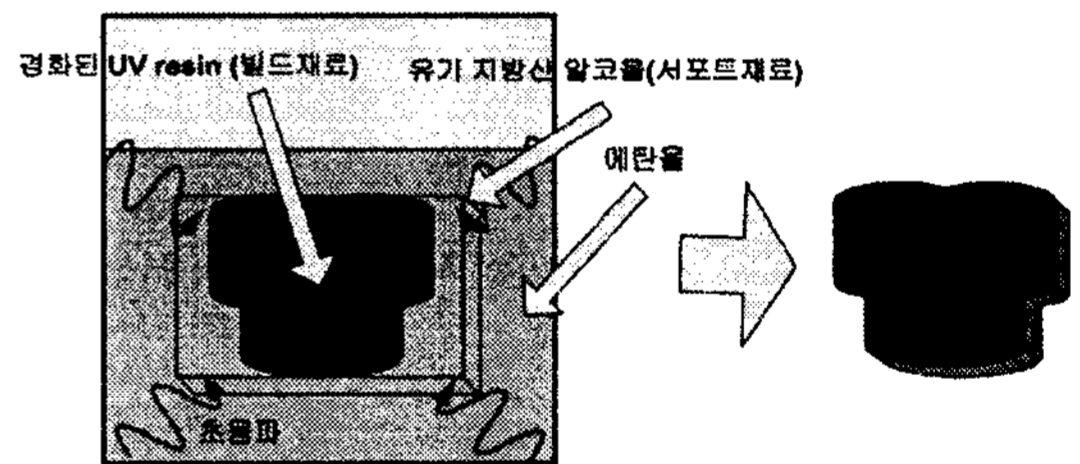


Fig. 16 Novel support material remove process

서포트를 분사할 수 있는 시스템을 제작하였다.

멀티 헤드 시스템의 경우 각각의 헤드를 패턴링 할 수 있는 멀티 패턴 드라이버를 포함하여 고속의 제작과 정밀한 형상을 제작하도록 설계되었으며 랜덤 쉬프트 프로세스가 적용되어 기존 2헤드 시스템의 장점이 그대로 이식되었다. 현재 멀티 헤드 시스템의 경우 새로운 서포트 제거 기법이 적용 중에 있으며 이는 유기 지방산 알코올을 이용하여 서포트를 생성하고 이를 가열된 에탄올과 초음파를 이용하여 자동적으로 용해되어 제거되는 기법을 적용 중에 있다.

이 기법은 사람의 손을 거치지 않고 서포트 재료의 제거 시 빌드 재료의 형상의 손상을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 논문에서는 UV 경화 기법을 이용한 3차원 프린팅 기술을 구현한 임의 형상 시스템을 개발 하였다. AWG를 이용하여 피에조 헤드를 이용한 UV 분사시의 드롭 양을 제어 하였으며 이를 이용한 멀티 헤드 임의형상제작 시스템을 구현하였다. 또한 노즐 랜덤 쉬프트 프로세스를 도입하여 노즐의 막힘에 대비하도록 하였으며 임의 형상제작 실험 결과 그 우수성이 입증 되었다. 강도 측정 실험에서는 UV 경화 기법의 경우 기존 일반적인 3DP 공정에 비해 약 5배 이상의 강도의 우수성을 보였으며 인장 테스트에서는 유연한 물성을 가짐을 알 수 있었다. 끝으로 새로운 서포트 제거 기법을 제시 하여 향후 지속적인 연구를 통해 기존 UV 경화 시스템의 단점인 서포트 제거의 어려움과 빌드 재료의 손상을 극복 할 수 있을 것으로 기대 된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. M60602000002-06E0200-00210).

참고문헌

1. Wohlers, T. T., "Wohlers Report 2003," Wohlers Associates, 2003.
2. Yan, X. and Gu, P., "A review of rapid prototyping technologies and systems," Compute Aided Design, Vol. 28, No. 4, pp. 307-318, 1996.
3. Williams, P. A., "A New Process To Fabricate Prototypes Directly From CAD Model," PhD. Thesis, MIT, pp. 2-3, 1990.
4. Chang, C. C., "Rapid prototyping fabricated by UV resin spray nozzles," Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 136-145, 2004.
5. Fuh, J. Y. H., Lu, L., Tan, C. C., Shen, Z. X. and Chew, S., "Curing characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process," Rapid Prototyping Journal, Vol. 5, No. 1, pp. 27-34, 1999.
6. Tanaka, T. and Isono, Y., "New development of a grinding wheel with resin cured by ultraviolet light," J. Materials Processing Technology, Vol. 113, No. 1, pp. 385-391, 2001.
7. Yan, X. and Gu, P., "A review of rapid prototyping technologies and systems," Compute Aided Design, Vol. 28, No. 4, pp. 307-318, 1996.
8. Lee, E. R., "Microdrop Generation," CRC press, pp. 15-29, 2003.