

◆ 특집 ◆ 3 차원 임의형상제작 기술 및 응용

UV 경화공정을 이용한 3 차원 Metal Powder 조형기법

A Method of 3D Metal Powder Manufacturing using UV Curing Process

김정수^{1,2}, 김동수^{1,✉}, 이민철³
Jung Su Kim^{1,2}, Dong Soo Kim^{1,✉} and Min Cheol Lee³

1 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 (Nano Mechanical System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials.)

2 부산대학교 지능기계공학과 (Mechanical & Intelligent systems engineering, Pusan National Univ.)

3 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: kds671@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7152

Key Words: UV Curing Process (UV 경화공정), Metal Powder (메탈파우더), Ink-Jet (잉크젯), 3D Manufacturing (3 차원 조형), RODS (임의형상제작시스템), 3DP (3 차원 프린팅)

기호설명

E = UV light exposure

Ec = critical exposure

C = cured depth

Dp= the penetration depth of the resin

1. 서론

최근에는 설계와 실제 제품과의 오차를 줄이고 제품의 개발 시간 단축을 위해 3 차원 임의형상 제작시스템이 많이 사용되어지고 있다. 3 차원 임의형상 제작시스템은 RP(Rapid Prototype) 혹은 SFFS(Solid Freeform Fabrication System)라 불리며 수 시간 이내에 임의형상을 고속 제작하는 시스템이다.^{1,2}

과거 3 차원 임의형상 제작 시스템은 주로 레이저 소결 방법을 이용한 대형 장비였으며 시제품 제작을 위해 사용되는 경우가 많았으나 최근에는 잉크젯 기술의 발전과 더불어서 사무실 환경에 적합한 소형 장비들이 주목을 받고 있다. 이러한 기술은 3DP(Three Dimensional Printing)라고 불리며 다양한 용도의 잉크젯 헤드를 이용하여 매 레이어

마다 접착제 또는 UV 경화성 수지를 선택적으로 분사하여 3 차원 형상을 제작하는 방법이다.

3DP 기술의 활용에 의한 3 차원 임의형상 제작 시스템의 장점은 일반 가정이나 사무실 환경에서 사용자가 요구하는 다양한 형상 제작물을 빠르고 손쉽게 제작하여 줌으로 해서 그 활용도가 급속도로 증가하고 있다.

하지만 3DP 기술의 단점은 레이저 소결 방법의 최고의 장점인 메탈 형상의 3 차원 형상물의 제작은 불가능하다는 것이다. 이것은 메탈 파우더의 경우 워낙 입자의 무게가 무겁고 접착성이 낮아 현재 레이저 소결 방식만이 유일한 대안으로 여겨지고 있다.

본 논문에서는 기존의 레이저 소결방법이 아닌 UV 경화에 의한 3 차원 프린팅 기법으로 메탈 파우더의 접착과 3D 형상 제작 방법에 대해서 연구하였다.

2. 3 차원 제작 공정 기법

2.1 파우더 기반의 3DP 공정

그림 1 은 기존 3DP 방식중 써멀 버블젯 또는 피에조 기반에서 석회나 기타 분말 파우더를 이용

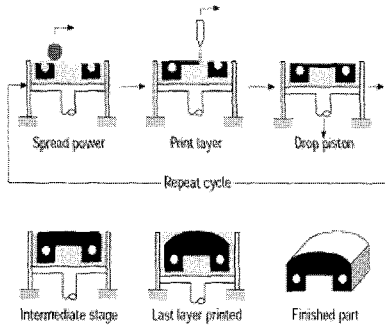


Fig. 1 Sequence of conventional 3DP process



Fig. 2 A manufactured by conventional 3D process

한 3 차원 형상 제작 방법을 보여준다. 이 방법은 롤러를 이용하여 얇은 파우더 층을 형성하고 제작하고자 하는 3 차원 형상의 단면에 해당하는 부분에 접착액을 프린팅하여 이를 반복 적층함으로써 3 차원 형상을 제작하는 방법이다.

파우더 기반의 이 방법은 다른 3DP 공정 기술에 비해 입의 형상을 제작하는 시간이 빠르며 비교적 저가로 원하는 형상물의 제작이 가능하다. 하지만 파우더를 접착하는 방식이기 때문에 형상물의 강도가 약하여 제작 후 강도 향상을 위한 후처리 작업이 존재하며, 이러한 작업을 위해 제작물이 일정 강도를 가지기 위한 건조시간이 프린팅 시간만큼이나 필요로 할 때도 있다.

그림 2 는 자체 제작한 기존 파우더 기반의 3DP 공정을 이용한 3 차원 형상물을 나타내며 상당히 정밀하게 입체 형상을 표현하였다. 하지만 제작 파트에 대한 강도적인 측면에서 아주 약한 단점을 가지고 있다.

2.2 UV 경화를 이용한 3DP 공정

UV curing 공정이란 그림 1 에서 보여진 기존 3DP 방식에서 강도와 기능성이 고려되어 만들어

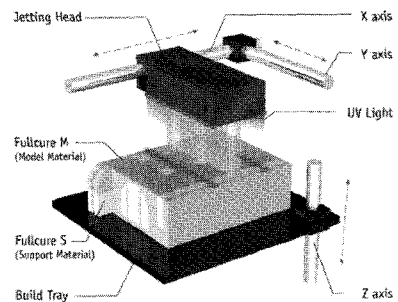


Fig. 3 The sequence of UV curing process

진 공정기법이다. 그림 3 은 UV curing 공정 방법을 나타낸 것으로 이는 파우더가 없이 UV 빛에 반응하는 경화 물질을 제작하고자 하는 3 차원 형상물의 단면 형상을 프린팅하여 적층하는 방법이다.

이러한 기법의 장점은 UV 경화 물질이 UV 램프에 의해 경화반응을 일으킨 후의 강도가 상당히 강하다는 것이며, 이는 곧 제작된 3 차원 형상물의 강도가 상당히 높다고 볼 수 있다. 또한 높은 강도에 의한 접합력에 따라 기계적 구동성을 가진 3 차원 형상물을 제작하고 구동까지 측정해 볼 수 있다는 장점을 가진다.

이 방법의 문제점은 3 차원 형상물 제작 시 그 재질의 다양성이 없다는 문제점과 불투명 형태의 형상물을 제작할 수 밖에 없다는 점, 또한 빌드 재료와 서포트 재료등의 재료비가 높아 제작비용이 높다는 단점이 있다.

2.3 UV 경화를 이용한 파우더 기반의 Hybrid 3DP 공정

본 논문에서는 기존 파우더 접착 기술과 UV 경화 기술이 접목된 Hybrid 방식의 제작 공정에 대해서 제안하고 이를 메탈파우더의 형상조형에 적용함으로써 그 특성의 장점을 평가하였다.

그림 4 는 Hybrid 공정을 나타내며 방식은 기존 파우더 기반의 시스템에 접착액을 UV 경화 물질을 대신 사용하고 이를 UV 경화시켜 파우더의 접착을 이루어 내어 3 차원 형상물을 제작하는 방법이다.

UV 경화성 레진은 자외선에 노출될 경우 자유 라디칼(free radicals)을 생성 시키는 UV 반응 개시제(photoinitiator)를 보통 2~5% 정도 함유하고 있다.

모노머(monomer) 혹은 올리고머(oligomer)는 자유 라디칼에 의해 중합반응을 일으키며 자유 라디

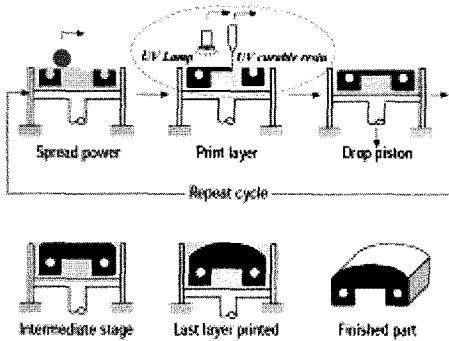


Fig. 4 The sequence of hybrid 3DP process

칼을 생성시키는 에너지원(자외선)을 차단할 경우 여분의 라디칼은 모노머 혹은 올리고머 그리고 산소와의 반응 등을 통해 소모되어 중합반응이 멈추게 된다.^{3,4}

광중합 반응을 이용한 공정에서 경화 레이어는 일반적으로 투사된 빛의 흡수에 의해 결정된다. 자외선은 프린팅된 레진에 수직으로 침투하고, 흡수에 의해서 점차적으로 감쇠된다. 경화율은 Beer-Lambert 의 흡수의 지수법칙에 의해 깊이에 따라 지수적으로 감소한다. 실질적으로 노출량이 경계치 이하이면 중합반응은 일어나지 않는다. 경계치는 산화방지가 주요한 원인이며, 중화반응을 시작하기 위한 최소한의 값을 말한다. 노출량의 경계치는 critical exposure(E_c)라고 하며, UV 빛에 의한 UV 경화성 폴리머의 경화 깊이는 Beer-Lambert 의 법칙으로부터 유도된다. 수학적인 형태에서 보면 레진의 경화 깊이는 자외선 조사량이 E_c 보다 클 때 자연로그에 배례하고, 그렇지 않으면 0 이 된다.³

$$C = \begin{cases} D_p \ln(E/E_c) & E > E_c \\ 0 & E \leq E_c \end{cases} \quad (1)$$

여기서, C는 경화 깊이, E는 자외선 노출량, D_p 는 레진의 고유 침투 깊이이며 이것은 노출량과 상관 없는 레진 자체의 특성이다. 실질적으로 제작에서 평균 노출이 E_c 보다 작으면 경화는 일어나지 않을 뿐만 아니라 $E_{av} < E_c < 2E_c$ 범위에 들면, 제작된 시편은 충분한 기계적인 강도를 가지지 못한다.

이러한 방식의 장점은 다양한 파우더 재료의 사용이 가능하고 UV 경화를 이용한 접착 방식이

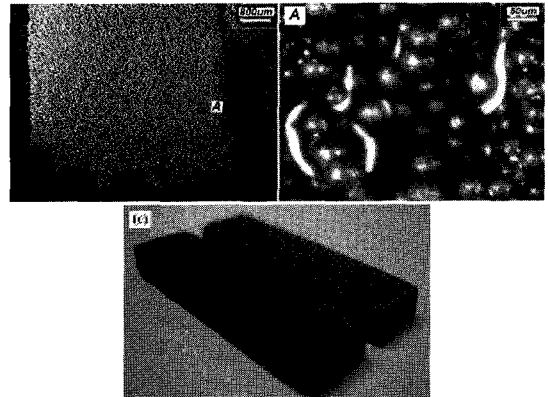


Fig. 5 The specimen of hybrid 3DP process

므로 그 강도를 높게 가져갈 수 있다는 점이다. 또한 제작 시간 또한 추가 건조 및 후처리 과정이 없어 기존 파우더 공정에 비해 상당히 단축 될 수 있다는 점이다.

Hybrid 방식의 단점으로는 시스템 구성의 복잡성(파우더 기반과 UV 경화 기반의 시스템을 모두 포함)과 제작 공정이 어려운 점이라고 할 수 있다.

3. Hybrid 프린팅 실험

3.1 메탈파우더 3차원 조형 실험

Hybrid 기법을 적용하기 위해 3 차원 형상물을 제작하기전에 바 타입의 시편을 제작하여 그 가능성을 측정하였다. 이는 석회 혹은 메탈 파우더등 파우더의 다양성에 따라 UV 경화 물질의 분사량이 달라지기 때문이다. 본 논문에서는 현재 레이저 가공만이 유일한 3 차원 형상제작이 가능한 메탈파우더에 Hybrid 프린팅 기법을 적용하여 실험하였다. 그림 5는 바 타입의 제작 시편과 그 접합성을 마이크로스코프에 의해 찍은 이미지이다.

바 타입의 형상물을 제작한 결과 여러 문제점이 나타나게 되었다. 이는 파우더 타입의 재료에 UV 경화 물질을 프린팅하고 이를 UV 램프로 경화 시킬 경우 경화되는 표면에 나타나는 수축 현상과 열적 변형에 의해 제작 단면의 끝 테두리 부근이 말려 올라가는 현상이다. 이러한 현상은 제작 단면의 초기 레이어 부근에서 많이 발생하여 3 차원 적층이 불가능하며 지금까지 Hybrid 타입의 제작 기법이 나오지 못한 가장 큰 원인이다.

일반적으로 3 차원 형상의 단면을 프린팅 하는 방법은 프린팅 헤드의 개수에 따라 조금씩 달라지

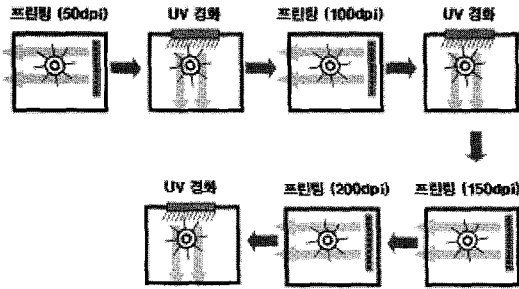


Fig. 6 The hybrid 3DP process

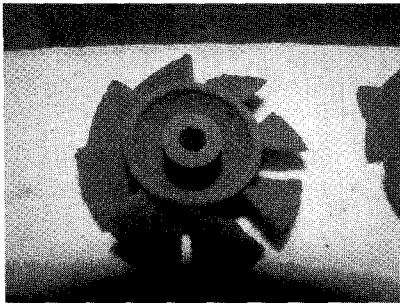


Fig. 7 3D Manufactured Metal Part

는데 이는 프린팅 면적의 해상도와 재료의 분사량에 따라 헤드가 반복적으로 프린팅하여 프린팅 해상도를 맞추게 된다. 따라서 본 논문에서는 단면 프린팅과 UV 경화를 반복적으로 수행함으로써 UV 경화 시 단면의 수축현상과 열변형을 최소화하여 적층하는 기법을 적용하였다

그림 6은 Hybrid 3DP 기법에 대한 것을 나타내었다. 예를 들어 인쇄 단면을 200dpi 를 인쇄 할 경우 헤드 하나가 한번에 인쇄하는 50dpi 를 반복적으로 증첩분사해서 200dpi 의 해상도를 맞추게 된다. 이 경우 100dpi(단면 인쇄량의 1/2 분량)에 해당하는 부분은 인쇄 후 바로 UV 경화를 하고 나머지 1/2 분량의 100dpi 를 분사하는 경우 100dpi 를 다 분사한 후 한번에 경화를 시키는 방법으로 구성되었다.

이러한 기법의 이유는 한 레이어에 분사된 UV 경화 물질이 한번에 UV 경화가 이루어질 경우 큰 수축현상과 열변형이 발생되고 현재 경화되는 레이어의 하위레이어가 딱딱한 표면을 가질 경우는 그 변형이 적기 때문에 현재 레이어에서 어느 정도의 강도를 유지하면서 단면을 형성시키기 위한 이다. 한 레이어의 총 인쇄 분량중 1/2 을 분사하면서 경화, 나머지 1/2 은 분사 후 경화 기법을 사용함은 반복적인 실험을 통해 메탈파우더에 최적

화된 공정 파라미터로 결정되었다.

그림 7은 쿨링팬 형상의 제작된 3 차원 형상을 나타낸다. 메탈파우더를 레이저 소결 방법을 사용하지 않고 잉크젯 기술로 3 차원 형상물을 제작하였으며 기존 석회파우더의 3 차원 조형 방법의 비해 제작 시간 후에 어떠한 추가 시간이 소요되지 않았다.

3.2 강도 측정

강도측정을 위해 3 가지 시편을 이용하여 측정하였다. 공정의 특성을 알기 위해 기존에 파우더 기반에서 사용되는 석회파우더(Zp102 powder)를 기존 공정과 제안된 공정을 이용하여 시편을 제작하였고 메탈 파우더를 이용하여 제안된 공정을 이용하여 시편을 제작하였다.

제작물의 인장강도(tensile strength)와 굽힘강도(bending strength)를 측정하기 위하여 Instron 사의

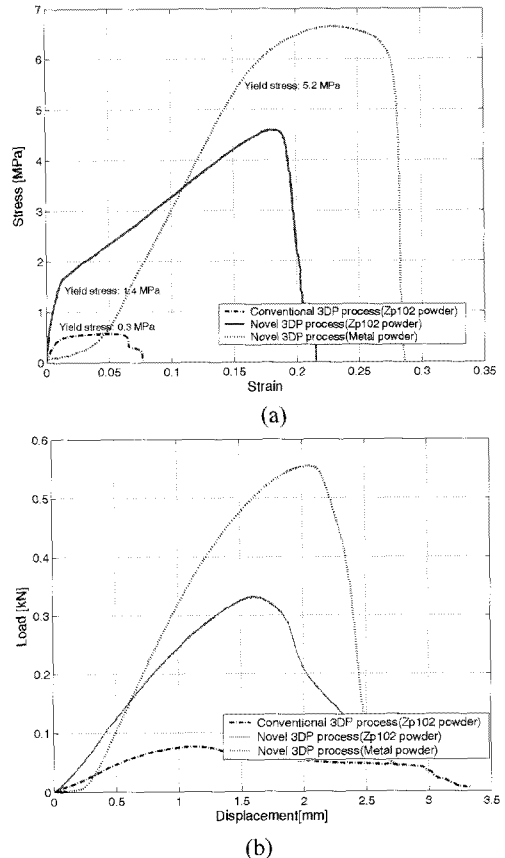


Fig. 8 Strength properties of specimens (a) Strain-Stress curves (tensile test). (b) Bending test curves

IX series 측정 장비를 이용하였다. 실험결과 그림 8(a)와 같이 인장강도에서의 항복응력(yield stress)의 경우 기존공정과 제안한 공정에서 각각 0.3 MPa 과 1.4 MPa 로 4 배 이상 높은 결과를 얻었으며 메탈파우더의 경우 약 5.2MPa 의 높은 결과를 나타내었다. 최대응력 또한 4.6MPa 로 기존공정(약 0.5MPa)보다 약 9 배 이상 높은 강도를 보였으며, 메탈파우더의 경우 6.8MPa 의 결과를 나타내었다.

그림 8(b)는 3 점 굽힘강도 측정결과이며, 최대 부하 또한 320N 으로 기존 공정보다 4 배 이상 높은 강도를 가짐을 확인하였다. 그리고 제안한 공정에서 메탈 파우더를 이용한 실험결과 550N 의 상대적으로 매우 높은 강도를 가짐을 확인하였다.

4. 결론

Hybrid 3DP 기법은 현재 메탈파우더를 프린팅 기법으로 3 차원 형상물을 조형하는 방법이 될 것이다. 메탈 파우더의 조형을 인쇄 기법으로 제작함으로써 그 비용을 레이저 소결방식에 비해 현저히 줄일 수가 있고 제작 장비의 가격도 현저하게 낮출 수 있는 방법을 제공한다. 또한 Hybrid 3DP 기법은 기존 파우더 기반의 3DP 에 비해 강도적인 측면에서는 약 4 배 이상의 향상을 가져올 수 있다. 다만, 제안된 공정의 경우 각 파우더에 따른 UV 경화 특성이 다르기 때문에 UV 경화 공정의 공정 변수(경화 시간과 횟수)를 최적화하여 적용할 때 3 차원 형상물을 얻을 수 있다. 메탈 파우더의 경우 초기 레이어 변형을 피하기 위해 각 레이어의 프린팅 총 횟수의 1/2 을 프린팅 후 바로 경화하고 나머지 1/2 은 프린팅이 완료된 후 한번에 경화 시키는 기법을 사용하였다.

후 기

이 논문은 2009 년도 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. 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.
4. 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.
5. Chang, C. C., "Rapid prototyping fabricated by UV resin spray nozzles," Rapid Prototyping Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 136-145, 2004.
6. Williams, P. A., "A New Process To Fabricate Prototypes Directly From CAD Model," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, pp. 12-17, 1990.
7. Lee, W. H., Kim, D. S. and Lee, M. C., "Development of a SFF System Based on Three Dimensional Printing Process," Society of CAD/CAM Engineers, pp. 550-557, 2005.
8. Lee, E. R., "Microdrop Generation," CRC Press, pp. 15-29, 2003.