特輯 : 쾌속 시작 기술

직접식 금속 쾌속조형공정

양 동 열 · 손 현 기

Rapid Prototyping Processes for Direct Metal Fabrication

D. Y. Yang and H. K. Sohn

양동열/한국과학기술원 기계공학과/1950년생/ 소성가공, CAE 및 쾌속조형

손현기/한국과학기술원 기계공학과/1969년생/ 쾌속조형 및 CAE

1. 서 론

제품개발에 있어서 시작공정은 제품 경쟁력에 결정적인 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 특히, 다품종 소량생산체제 하에서는 제품의 시작공정에서 소요되는 비용과 시간을 절감하여 저렴한 가격으로 신속하게 제품을 시장에 출하하는 것이 제품의 경쟁력을 제고하는데 필수적이라 할 수 있다.

미국, 일본, 유럽 등의 여러 선진국에서는 제품의 CAD 모델에서부터, 금형(die)이나 몰드(mold)를 제작하지 않고, 직접 시작품(prototype)을 빠르게 제작할 수 있는 쾌속조형(Rapid Prototyping RP) 기술이 전자, 항공, 자동차 등의 주요한 제조업 전반에 도입되어 제품의 시작공정에 소요되는 비용과 시간을 크게 절감함으로써, 제품의 경쟁력을 제고하는데 기여하고 있다.

쾌속조형공정은 제품의 CAD 데이터로부터 광경화성 수지(photopolymer), 플라스틱, 종이 등의 비기능성 재료 및 세라믹, 금속 등의 기능성 재료(functional materials)를 사용하여 시작품을 제작하는 공정으로써, 제작 공정의 특성으로 인하여 복잡한 형상을 쉽고, 빠르게 만들 수 있다. 개발 초기에는 주로 설계된 제품의 디자인 검증이 주된 용도였으나, 쾌속조형 기술과 쾌속조형장비(Rapid Prototyping machines) 성능이 향상되고, 재료의 특성이 급속히 개선되어 쾌속조형공정으로 제작된 형상의 치수정밀도가 크게 향상됨으로써, 현재는 여러 가지 다양한 2차공정(secondary processes)에 사용되는 마스터 원형(master pattern) 제작에 주로 응용되고 있다. 쾌속조형공정으로 원형을 제작하고, 제작된 원형을 2차공정에 이용하여 양산재질의 시작품 제작뿐만 아니라, 소량생산을 위한 몰드와 금형의 제작이 가능하게 되었다 이와 같이 쾌속조형공정과 2차공정의 결합을 통하여 기존의 시작공정에서 소요되는 비용과 시간을 크게 절감할 수 있다

쾌속조형공정과 2차공정을 이용하여 금속 시작품이나 금형을 제작하는 경우에는 먼저, 쾌속조형공정으로 원형을 제작하고, 이 원형을 이용하여 2차공정에서 몇 단계의 역전공정(reverse process)을 거쳐서 금형을 만들거나, 원형에 세라믹 현탁액(slurry)을 발라서 세라믹 쉘(ceramic shell)을 제작하고, 열처리 한 후에 용탕(molten metal)을 주조하여 금속 시작품이나 금형을 제작하게 된다. 이와 같이 쾌속조형공정과 2차공정을 결합하여 금속 시작품이나 금형을 제작하는 경우는 비교적 여러 단계를 거쳐야만 하므로 단계가 진행되는 과정에서 제품의 치수정밀도를 유지하기가 어렵고, 또한 수 개의 기능성 시작품을 제작하고자 하는 경우는 2차공정을 이용하여 여러 단계를 통해서 금속 시작품이나 금형을 만드는 것은 비용과 시간 면에서 비효율적 공정이 될 수 있다. 이러한 비효율성을 해결하고 보다 빠른 시간 내에 금속 시작품, 금형 등을 제작

하기 위해서 금속재료를 이용하여 직접 금속 시작품 또는 금형을 제작하는 직접식 금속 쾌속조형공정에 대한 연구가 국내외 여러 대학, 연구기관, 기업체 등지에서 활발하게 진행되고 있다

현재까지 국내외에서 개발된 대부분의 금속 쾌속조형공정은 분말(powder), 선(wire), 판재 등 다양한 형태의 금속재료와 레이저, 아크(arc), 전자빔(electron beam) 등의 여러 가지 열원을 이용하여 금속재료를 용착(deposition)하여 3차원의 형상을 제작하는 방식과 금속재료를 용착시킨 후에 연삭, 밀링 등의 기계가공을 통해서 형상을 제작하는 방식으로 크게 분류할 수 있으며, 그밖에도 여러 가지 직접식 금속 쾌속조형공정들이 연구되고 있다

본 글에서는 국내외에서 개발된 여러 가지 직접식 금속 쾌속조형공정들의 특징에 대해 살펴보고자 한다

2. 직접식 금속 쾌속조형공정

현재까지 개발된 직접식 금속 쾌속조형공정은 그 기본 원리 상 다음과 같이 크게 두 가지 형태로 나누어 볼 수 있다 즉, 레이저, 아크, 전자빔 등 여러 가지 열원을 사용하여 금속재료를 원하는 형상으로 용착시켜서 금속 시작품, 금형을 만드는 1)금속 용착 방식과 치수정밀도의 향상을 위해 금속 용착 공정에 기계가공을 부가한 2)금속 용착 및 기계가공 방식이 그것이다 금속 용착 공정과 기계가공을 결합한 방식에서는 금속 용착된 층의 두께, 또는 층의 두께와 윤곽부분을 매번 가공하는 방법으로 형상을 제작하게 된다

직접식 금속 쾌속조형공정에 관한 연구는 주로 대학이나 연구소를 중심으로 이루어지고 있다. 1998년 미국의 Optomec사의 의해서 최초로 상용화된 LENS™ (Laser Engineered Net Shaping) 공정도 미국의 Sandia 국립 연구소에서 개발된 것이다. 다음에서 직접식 금속 쾌속조형공정의 대표적인 몇몇 공정을 소개하고자 한다

2.1 금속 용착을 이용한 직접식 금속 쾌속조형공정

금속 용착을 이용한 직접식 금속 쾌속조형공정에는 다음과 같은 여러 가지 공정들이 있다

Nd YAG 레이저를 이용하여 금속 표면에 국부적으로 용탕풀(melt pool)을 만든 후에 형성된 용탕풀 내에 아르곤(argon) 가스를 이용하여 금속분말을 투입시켜서 결합시킴으로써 원하는 형상을 제작하는 공정이 LENS™ 공정이다(Fig 1 참조)[12] 금속 기저(substrate)는 X-Y table 위에 설치되어 있으며, 한 층의 제작이 끝나면 레이저 헤드가 한 층 두께만큼 상승하게 된다 스테인리스강, 공구강, 티탄늄 등의 재료를 이용하여 금속 시작품을 제작할 수 있다 그러나, 지지대를 사용하지 않기 때문에 외팔보 형태를 지닌 시작품은 금속분말을 지지대로 이용하여 제작하게 된다[3] 현재 LENS™ 공정이 적절히 응용될 수 있는 분야는 사출금형의 제작과 국부적으로 파손된 금형의 수리 등이다 사출금형은 사각형 상자 형태이며,돌출부가 없으므로 LENS™ 공정의 적용이 용이하다고 할 수 있다 최근에 연구에 의하면, 기존 직선 냉각수로(cooling channel)에 비해 몰드 캐비티(cavity)의 형상을 따라가면서 냉각수로를 설치하는 순응(conformal) 냉각수로의 냉각효과가 더욱 뛰어난 것으로 알려져 있다 LENS™ 공정을 이용하면 몰드 내에 순응 냉각수로를 쉽게 만들 수 있다 또한 몰드 내에 온도와 압력을 측정하기 위한 센서(sensor)를 설치하는데도 적합하다. 공정 중 산화를 막기 위해 공정은 아르곤(argon) 가스 분위기에서 이루어진다

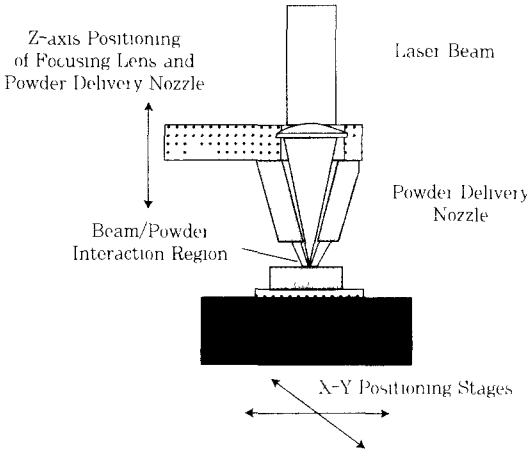


Fig. 1 The LENS Process[11]

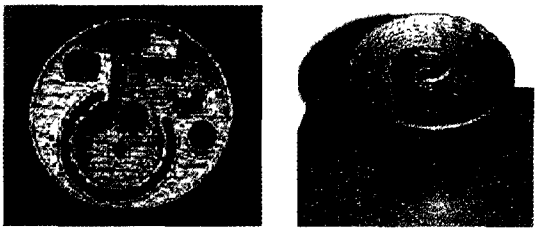


Fig. 2 The LENS Parts[13]

미국 Ann Arbor의 미시간 대학에서 개발된 Direct Metal Deposition(DMD) 공정은 CO_2 레이저를 이용하여 금속재료의 표면에 용탕풀을 만들고 용탕풀 내에 금속분말이나 금속선(metal wire)을 공급하여 형

상을 제작한다[4]

ink-jet 원리를 이용하여 미세한 구 형태의 금속 방울을 제작하고자 하는 형상대로 한 층씩 떨어뜨려서 용착시킴으로써 형상을 제작하는 Liquid Metal Jetting(LMJ) 공정은 미국 Arlington의 텍사스 대학에서 개발하여 연구하고 있다. LMJ 공정은 용사공정(spray forming)과는 달리 미세한 구(microball) 형태의 용융 금속방울들을 하나씩 조정하여 정확한 위치에 떨어뜨린다 이 공정은 3차원 부품제작 뿐만 아니라 전기 회로 제작에도 응용될 수 있다[5].

MIT에서 개발된 Electron Beam Solid Freeform Fabrication(EBSFF) 공정은 고에너지밀도의 전자빔을 사용하여 용탕풀을 생성한 후, 용탕풀 내로 전선 형태의 금속재료를 공급하여 형상을 제작한다(Fig 3 참조) EBSFF 공정은 평판 형태의 금속 표면뿐만 아니라 Fig 3에서와 같이 환형(annular type)의 금속 표면에 대해서도 적용할 수 있다 또한, 고에너지밀도의 빔을 사용하기 때문에 기존의 가공방법으로 가공하기 어려운 재료를 사용할 수 있다[6] EBSFF 공정은 금속 용착률(deposition rate)이 높아서 비교적 크기가 큰 제품을 만드는데 적합하다 그러나, EBSFF 공정이 진공 중에서 수행되므로 큰 진공챔버(vacuum chamber)가 필요하며, 전자 가속기, 복사 방지막 등의 고가 설비가 필요하기 때문에 장비를 제작하는데 많은 비용이 드는 문제점이 있다

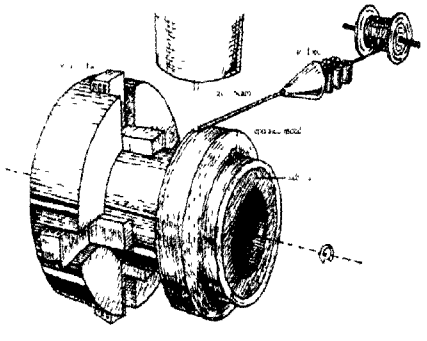


Fig. 3 The EBSFF Process[6]

Directed Light Fabrication(DLF) 공정은 미국의 Los Alamos 국립 연구소에서 개발된 것이다.

DLF 공정에서는 레이저빔의 초점지역(focal zone)을 이동시킬 수 있도록 3축 내지는 5축의 다축 위치조절 시스템이 사용된다 금속분말은 아르곤 가스를 이용하여 초점지역에 형성된 용탕풀 내에 투입되어 3차원의 형상을 형성하게 된다 (Fig 4 참조). 레이저빔의 초점지역이 이동함에 따라 용탕풀은 계속적으로 이동하게 된다 DLF 장비는 4개의 분말 공급장치가 있

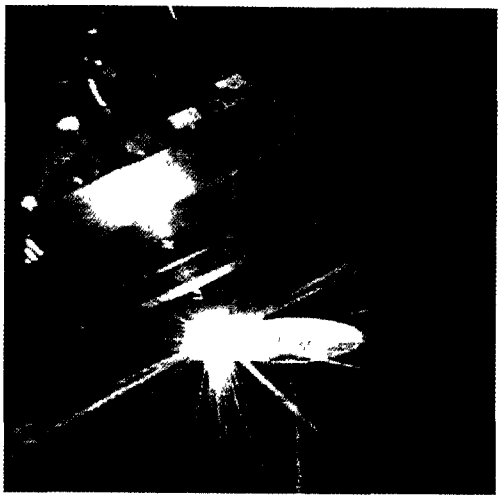


Fig. 4 The DLF Process[7]

어서 각 공급장치의 재료를 서로 다르게 하여 합금 부품을 제작할 수도 있다 Fig 5에서는 DLF 공정으로 제작된 제품들을 나타내었다[7]

금속 용착을 이용한 직접식 금속 쾌속조형공정은 레이저, 전자빔 등의 열원을 이용하여 금속 표면에 미세한 용탕풀을 만들고, 용탕풀 속으로 분말 또는 선 형태의 금속 재료를 투입하는 방식으로 3차원의 형상을 제작하게 된다. 용융된 금속재료가 응고되면서 형상이 만들어지기 때문에 날카로운 형상부분의 제작이 어려우며, 따라서 제작 후에 형상 및 치수정밀도 확보를 위해 연마가공(polishing)이 필요하게 된다

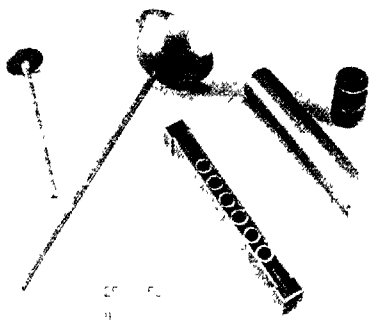


Fig. 5 Representative DLF Parts and Assemblies[7]

2.2 금속 용착과 기계가공을 결합한 직접식 금속 쾌속조형공정

금속 용착과 기계가공을 결합한 공정에는 다음과 같은 것들이 있다

MD 공정은 미국의 Carnegie Mellon 대학에서 개발된 공정으로 일종의 금속용사(metal spraying)공

정이다 기본원리는 금속 용착이 가능한 마스크(mask)를 금속 표면 위에 두고 그 위로 금속재료를 용사하면 마스크에 새겨진 형상대로 한 층이 제작된다 사용된 마스크에는 제작하고자 하는 형상이 미리 새겨져 있다 다음에 밀링이나 연삭 작업을 통하여 용착된 층을 원하는 두께로 가공한다 그리고 원하는 형상이 완성될 때까지 이 공정을 반복하게 된다[8].

Stanford 대학과 Carnegie Mellon 대학에서 연구하고 있는 Shape Deposition Manufacturing (SDM) 공정에서는 먼저 레이저, 플라즈마 (plasma) 등의 열원을 이용하여 금속재료를 한 층 용착시킨다 용착된 금속재료가 응고되면, CNC, 연삭, EDM 등의 기계가공을 이용하여 용착된 층을 원하는 두께와 윤곽형상을 가지도록 가공한다 금속재료는 부품재료와 지지재료 두가지가 사용된다 부품재료와 지지재료가 용착되는 순서는 기계가공이 불가능한 형상 즉, 언더컷(undercut)이 생기지 않도록 정해진다 한 층의 용착 및 기계가공이 끝나면, 응력을 제거하기 위해 shot peening 공정을 표면에 대해서 실시한다 금속재료를 용착하는 사이에 필요한 경우에는 센서 등을 내부에 설치할 수 있다 이와 같은 공정들은 제작하고자 하는 형상이 완성될 때까지 반복하고, 완성된 후에는 지지대 부분을 제거하여 최종형상을 얻게된다(Fig 6 참조) SDM 공정을 이용하여 순응 냉각수로가 있는 사출금형, 기능성 시작품, 센서가 내부에 설치된 구조물, 등을 제작할 수 있다. Fig 7과 8에서 SDM 공정으로 제작된 부품을 보여주고 있다[9,10]

독일의 Fraunhofer Institute of Production

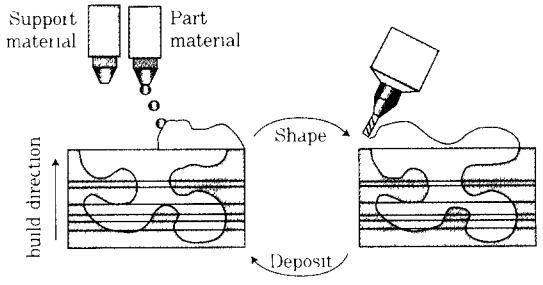


Fig. 6 The SDM Process

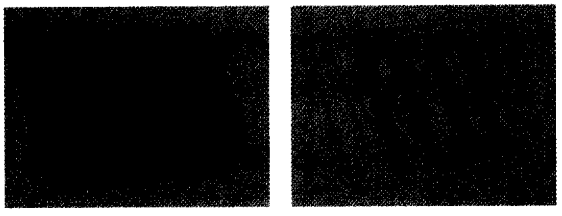


Fig. 7 SDM Part - A die with an internal Cooling channel inside the tool

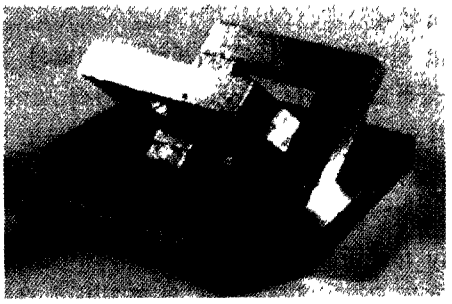


Fig. 8 SDM Part tilted frames

Technology IPT, Aachen에서 연구하고 있는 직접식 금속 쾌속조형공정은 Laser Generating(LG)과 고속 밀링머신을 결합한 공정이다[11] 금속분말이 가스를 이용하여 이송되어 레이저빔의 초점지역으로 들어가는 순간 용융되어 바닥 표면에 떨어져서 접착된다 (Fig 10 참조) 노즐이 바닥에 대해 상대적으로 이동하면서 연속적으로 미세한 비드(bead)를 만드는 방식으로 한 층을 만들게 된다 한 층을 도포한 후에 응력해소를 위해 잠시 방치한 후에 다음 층을 도포한다 LG 공정 만으로는 제작된 형상의 윤곽에서 원하는 치수정밀도를 얻기가 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해 LG를 이용하여 금속재료를 한 층 용착하고 다음에 밀링을 이용하여 용착된 금속 층의 표면과 모서리 윤곽을 가공하게 된다(Fig 9 참조) Fig. 11에서 LG와 고속 밀링을 결합한 공정에 의해 제작된 형상이 나타나 있다 LG 공정은 공정의 원리상 레이저 용착 용접(laser deposition welding)에 근간을 두고 있다

금속 용착 공정에 기계가공을 부가한 직접식 금속 쾌속조형공정은 한 층을 용착한 후에 층의 두께와 윤곽부분을 가공하기 때문에 형상 및 치수정밀도가 비교적 좋은 금속 시작품 또는 금형을 제작할 수 있으나, 전체 작업 시간이 길어지는 단점이 있다

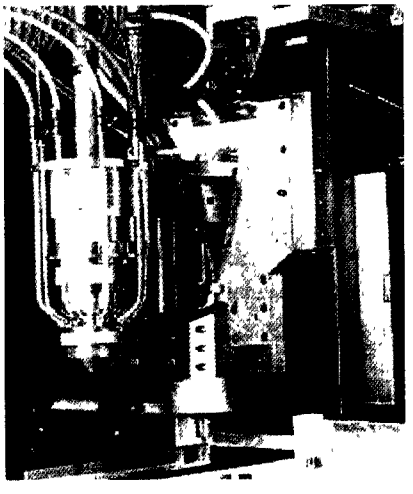


Fig. 9 Powder nozzle and high-speed milling head[11]

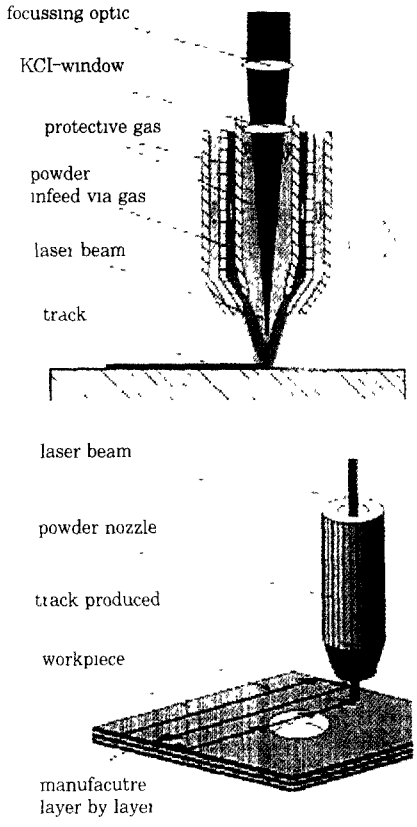


Fig. 10 Schematic diagram of LG[11]

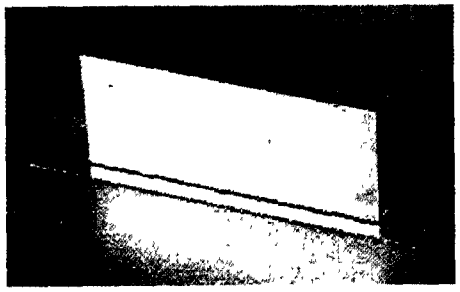


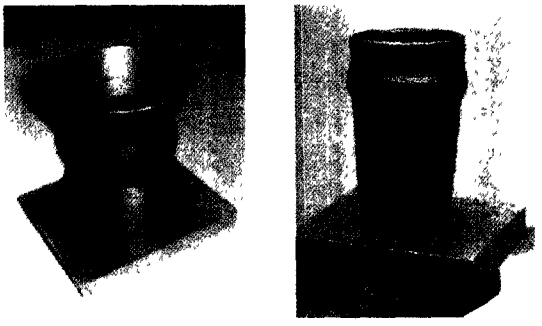
Fig. 11 Part of LG and high-speed milling[11]

3. 용접 공정을 이용한 직접식 금속 쾌속조형공정

1960년대 독일에서 용접을 이용하여 3차원 형상을 제작하려는 연구가 시도되었으며, 그 후에 Krupp사, Thyssen사, Shulzer사 등이 3차원 용접(3D Welding)을 이용하여 압력용기와 같은 간단한 형상을 지닌 큰 부품들을 제작하였다. 그 밖에 니켈계 합금과 티탄늄계 합금 등 고가의 재료를 기계가공 했을 때 발생하는 손실을 절감하기 위해 3차원 용접을 이용하여 항공기 부품을 성공적으로 제작한 사례도 있었다[12]

최근에 3차원 용접을 이용한 직접식 금속 쾌속조형공정에 대한 연구는 국외에서는 영국의 Nottingham 대학[13], 호주의 Wollongong 대학[14], 미국 Dallas의 Southern Methodist 대학[12] 등지에서 이루어지고 있으며, 국내에서는 한국과학기술원, 한국과학기술연구원 등에서 연구가 진행되고 있다 Fig. 12에서 Wollongong 대학에서 3차원 용접을 이용하여 제작한 형상을 보여주고 있다 Fig 12에서 (a)의 높이는 200 mm, 중량은 3 kg(받침판 제외) 이다. 제품의 설계 두께는 5 mm 였으나 제작된 제품은 ±0.2 mm 치수오차를 보였다 (b)는 높이 180 mm, 중량 3 kg 이다 설계 두께는 6 mm 였으나 실제 치수는 (a)와 마찬가지로 ±0 2 mm 치수오차를 보였다. Fig. 12의 제품은 용접 후에 연마 가공을 한 상태이다

한국과학기술연구원에서는 3차원 용접과 밀링공정을 결합한 공정을 개발하였다 이 공정에서는 용접을 이용하여 한 층을 적층한 후에 밀링을 이용하여 층의 표면과 윤곽을 가공하는 공정이다[15]



(a) bow tie (b) pint glass

Fig. 12 3D Welding Parts[14]

앞서 살펴 본 직접식 금속 쾌속조형공정 외에도 국내외 대학 및 연구소에서 여러 가지 다양한 직접식 금속 쾌속조형공정들이 개발되어 연구되고 있다 한국과학기술원에서는 용융금속의 응고 시 발생하는 열변형을 최소화하기 위해 도포된 금속분말을 선택적으로 용융점 직하의 온도까지 예열하고, 예열된 금속분말 사이에 용융된 금속재료를 떨어뜨려서 실시간으로 용침(infiltration)을 이용하여 3차원 형상을 제작하는 선택적 용침 공정(Selective Infiltration Manufacturing SIM)이 개발되어 연구되고 있다

4. 결 론

쾌속조형공정은 제품의 CAD 데이터로부터 2차원 단면 형상의 얇은 층을 반복적으로 제작, 적층하는 공정으로써, 제작 공정의 특성으로 인하여 복잡한 형상의 제품을 쉽고, 빠르게 만들 수 있다 다양한 2차공정

과의 결합을 통해서 양산재질의 시작품 제작뿐만 아니라, 소량생산을 위한 몰드와 금형의 제작이 가능하게 됨으로써 미국, 일본, 유럽 등의 여러 선진국에서는 다양한 분야에서 쾌속조형공정과 2차공정을 도입하여 제품개발의 시작공정에서 소요되는 비용과 시간을 절감함으로써 제품의 경쟁력을 크게 제고하는 성과를 얻고 있다

시작 공정에서 금속 시작품 및 시작 금형을 CAD 모델로부터 직접 제작할 수 있는 직접식 금속 쾌속조형공정을 이용하여 금속 시작품 및 시작 금형을 제작한다면 2차공정을 이용하는 경우에 비해 시간과 비용을 혁신적으로 절감할 수 있으므로 관련된 제조업 전반의 제품 경쟁력을 현저하게 제고할 수 있을 것이다 현재까지 국내외에서 개발된 직접식 금속 쾌속조형공정들은 공통적으로 용융된 금속이 응고 시 발생하는 열변형으로 인해서 제작된 부품의 치수정밀도를 유지하기 어려운 점과 금속용착과 기계가공을 결합한 경우 제작시간이 증가하는 점이 해결해야 할 시급한 당면과제라고 할 수 있다 국내외에서 직접식 금속 쾌속조형공정에 대한 요구가 증가하고 있고, 또한 개발로 인한 제조업 전반에 걸친 파급효과를 고려해 볼 때 직접식 금속 쾌속조형공정에 대한 더욱 많은 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다

참 고 문 헌

1 M. L Griffith, D M Keicher, C L Atwood, J A Romero, J E Smugeresky, L D Harwell and D L Greene, "Free Form Fabrication of Metallic Components using Laser Engineered Net Shaping (LENSTM)", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 125-131, 1996

2 M L Griffith, M E Schlienger, L D Harwel, M S Oliver, M D Baldwin, M. T Ensz, J E Smugeresky, M Essien, J Brooks, C V Robino, W H Hofmeister, M J Weit, D V Nelson, "Thermal Behavior in the LENS Process", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 89-96, 1998

3 E Schlienger, M Griffith, M Oliver, J. A Romero, J Smugeresky, "Sacrificial Materials for the Fabrication of Complex Geometries With Lens", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 205-210, 1998

4 J Mazumder, J. Choi, K Nagarathnam, J Koch, and D Hetzner, "The Direct Metal Deposition of H13 Tool Steel for 3-D Components", JOM, Vol 49, No 5, pp 55-60, 1997

5. J. W Priest, C Smith and P DuBois, "Liquid Metal Jetting for Printing Metal Parts", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 1-9, 1997

6 V R Dave, J E Matz, and T W Eagar, "Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 64-71, 1995

7 G K. Lewis, J O Milewski, D B Thoma and R B Nemec, "Properties of Near-Net Shape Metallic Components Made by the Directed Light Fabrication Process", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 513-520, 1997

8 L E Weiss, F B Prinz and D. P Siewiork, "A Framework for Thermal Spray Shape Deposition The MD* System", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp.178-186, 1991

9 J R Fessler, R. Merz, A H Nickel, F B Prinz and L E Weiss, "Laser Deposition of Metals for Shape Deposition Manufacturing", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 117-124, 1996

10 A G Cooper, S. Kang, J W Kietzman, F B Prinz, J L Lombardi, L Weiss, "Automated Fabrication of Complex Molded Parts Using Mold SDM", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 721-788, 1998

11. F. Klocke and H Wirtz, W Meiners,

"Direct Manufacturing of Metal Prototypes and Prototype Tools", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 141-148, 1996.

12. R Kovacevic and H Beardsley, "Process Control of 3D Welding as a Droplet-Based Rapid Prototyping Technique", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp.57-64, 1998

13 P Dickens, R Cobb, Gibson, M Pridham, "Rapid Prototyping Using 3D Welding", J of Design and Mfg, 1993

14 A F. Ribeiro, P. D Calvert, "Rapid Prototyping Process Using Metal Directly", Proc. of Solid Freeform Fabrication Symposium, The Univ of Texas at Austin, pp 249-256, 1996.

15 Y Song, S Park, K Hwang, D. Choi, H Jee, "Welding and Milling for Direct Prototyping of Metallic Parts", Proc of Solid Freeform Fabrication, The Univ of Texas at Austin, pp.495-502, 1998