

### 3 차원 금속 프린팅을 위한 다중 3 차원 적층 알고리즘(3DL)<sup>§</sup>

류 수 아\* · 지 해 성\*\*†

\* 홍익대학교 기계공학과, \*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

### Three Dimensional Layering Algorithm for 3-D Metal Printing Using 5-axis

Sua Ryu \* and Haeseong Jee \*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Hongik Univ.

(Received April 21, 2014 ; Revised May 27, 2014 ; Accepted May 27, 2014)

**Key Words:** 3-D Printing(3 차원 프린팅), 5-Axis(5 축기반), 3-D Layering (3 차원 적층), Radial Gradient(방사형 기울기), Auto-Partitioning (은유적 자동 분할)

**초록:** 5 축 기반 3 차원 금속 프린팅에서는 파트형상에 overhang/undercut 형상이 존재하여도 tilting 과 rotating 의 2 축을 이용하여 파트형상의 조형 방향을 자유롭게 바꾸어 지지구조물(support structure) 형상 근처의 추가 없이 3-D 적층(3DL: 3-D layering)이 가능하게 된다. 이를 위해서는 overhang/undercut 의 형상 근처에서 국부적으로 tilting 과 rotating 정보에 맞는 조형 층 적층 정보를 제공하는 새로운 전처리기(preprocessor) 기능이 필요하게 된다. 본 논문에서는 overhang/undercut 과 같은 형상들을 자동으로 진단하고 검출하여 3 차원 layering 이 가능할 수 있도록 방사형 기울기 측정법(calculation of radial gradient: CRG) 과 은유적 자동 분할 알고리즘(implicit auto-partitioning algorithm: IAP)을 통해 다중 적층 알고리즘(Multi-part Layering Algorithm: MPL)을 구현함을 제시하고 이를 실제 STL 형상파일에 적용하여 제시된 이론을 검증하고자 하였다.

**Abstract:** The purpose of three-dimensional (3-D) metal printing using 5-axis is to deposit metal powder by changing the orientation of the deposited structure to be built for the overhang or undercut feature on part geometry. This requires a complicated preprocess functionality of providing three dimensionally sliced layers to cover the required part geometry. This study addresses the overhang/undercut problem in 3-D metal printing and discusses a possible solution of providing 3-D layers to be built using the DMT® machine.

- 기호설명 -

### 1. 서론

- $n$  : 3 차원 금속 프린팅 층 단면의 번호
- $C$  : 층단면정보의 도심
- $D$  : 도심이 일치하지 않는 경우의 두 도심의 평균값
- $Set_n(x, y)_i$  :  $n$  번째 층정보를 방사형 기울기 측정법을 통해 분할한 후  $x, y$  좌표의 집합

일반적으로 오버행(overhang)/언더컷(undercut) 형상을 포함하고 있는 3-D 파트 형상을 3 차원 금속 프린팅 기술을 통해 적층 가공을 수행하기 위해서는 powder bed 기반의 공정을 선택하거나 조형공간 내에 지지구조물을 필요로 한다. 그러나 5 축 기반 3 차원 금속 프린팅 기술은 기존의 2.5-D 적층 공법에서 한 걸음 더 나아가 3-D 적층이 가능하며 이에 따라 기존의 단순한 2-D 층 단면화 이론에서 한 단계 진화된 층 단면화 기술이 필요하다. 본 연구에서는 2-D 층 단면화 방법을 통해 얻어진 서로 인접한 층 정보를 비교하여 오버행/언

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, [jacobjee@hongik.ac.kr](mailto:jacobjee@hongik.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

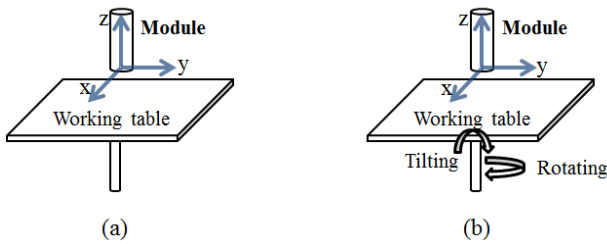


Fig. 1 Direct 3D metal printing; (a) 3-axis (b) 5-axis

더컷 형상을 검출하는 방사형 기울기 측정법을 통해 전체파트 형상을 진단하고 오버행/언더컷 형상을 지지구조물 없이 적층 조형하기 위한 은유적 자동 분할 알고리즘을 통해 3 차원 적층 알고리즘을 구현하고 그 과정을 기술한다.

## 2.5 축기반 3 차원 금속 프린팅

### 2.1 5 축기반 3 차원 금속 프린팅 적층 모듈

일반적인 3 차원 프린팅 공정에서의 조형틀은 Fig. 1(a)에 도시된 바와 같이 작업대(working table)가 놓여진 x, y 평면에서의 이동과 적층 방향인 z 축 이동만으로 공정이 수행된다.<sup>(1-3)</sup> 그러나 5 축기반의 3 차원 금속 프린팅 적층 기기는 Fig. 1.b에 도시된 바와 같이 작업대에 기울임(tilting), 회전(rotating) 축이 추가되므로 다양한 적층 방향 제어를 통하여 복잡한 형상이 포함된 파트형상도 지지구조물 없이 적층 조형이 가능하다.<sup>(5-7)</sup>

일반적인 3 축 기반의 3-D 금속 프린팅 공정만을 지원하는 전처리기는 z 축 방향벡터를 기준으로만 2-D 층 단면 정보를 생성하기 때문에 오버행/언더컷 형상을 처리하기 위해서는 지지구조물을 추가하여야 한다.<sup>(8-11)</sup> 5 축기반 3 차원 금속 프린팅 공정에서는 파트 형상이 오버행/언더컷 형상을 포함하고 있다 하더라도 작업대의 기울임과 회전의 2 축을 이용하여 조형 방향을 자유롭게 제어함으로써 지지구조물 형상의 추가 없이도 3-D 적층이 가능하다.<sup>(12,13)</sup> 또한 Fig. 2에 도시된 바와 같이 적층 방향과 함께 적층 두께도 동시에 제어함으로써 3 차원상에서 자유롭게 파트형상을 적층 조형하는 3 차원 적층 알고리즘을 구현하는 것이 가능하다.

### 3.3 차원 적층(3-D layering:3DL) 알고리즘

본 논문에서 제안하는 3 차원 적층 알고리즘은 5 축기반 3 차원 금속 프린팅 공정을 전제로 구축

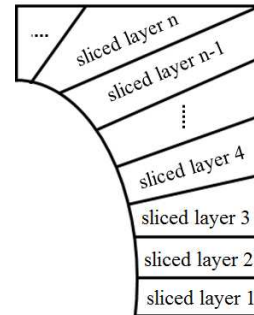


Fig. 2 An example of 3-D layering for overhang/undercut

되었으며 이 알고리즘의 적용을 위해서 오버행/언더컷을 진단하기 위한 방사형 기울기 측정법의 적용과 이를 통해 하나의 파트형상 내에서 다중 적층 알고리즘을 수행하는 과정을 기술하고자 한다.

### 3.1 방사형 기울기 측정법(Calculation of radial gradient: CRG)

방사형 기울기 계산은 실제 STL 파트형상에 포함된 오버행/언더컷 형상을 진단, 검출하기 위한 알고리즘이다. 이를 위해 우선 전체 파트 형상을 기존의 2-D 층 단면화 과정을 수행하고 서로 인접한 두 개의 층 단면정보를 기준으로 그 부위의 형상파트 외곽에서의 언더컷 형상의 유무를 검출한다. 이를 위해서는 각 층 단면의 바깥 경계선(contour loop)의 안쪽 평면면적의 도심을 계산하여 이 도심을 기준으로 방사선방향의 ray를 설정하면 서로 인접한 두 개의 층 단면의 방사선 방향의 z 축 기울기(radial gradient)를 알 수 있게 된다. Fig. 3의 언더컷 형상을 포함한 파트 형상을 예시로 기술하면 다음과 같다.

(1) Fig. 3(a)의 예시 파트 형상을 기준으로 Fig. 3(b)와 같이 일반적인 2-D 층 단면화 과정을 통한 slicing 작업을 수행한다. 이 때 인접한 각 층들이 이루는 적층 높이는 60~500  $\mu\text{m}$  정도로 매우 미소하며, 이 후 각각의 2-D 층 단면정보는 2-D contour loop를 구성하는 점들의 집합으로 정의된다.

(2) 각 2-D 층 단면정보의 contour loop 내부의 평면 면적의 도심을 계산한다. 이 때 서로 인접한 두 개의 2-D 층 단면 정보를 구성하는 contour loop node 점의 개수는 일반적으로 같지 않으므로 이들의 도심 또한 일반적으로 서로 일치하지 않는다. 그러므로 인접한 두 개의 층 단면 정보에 대한 통일된 도심은 평균값으로 정의한다. 즉, Fig. 4에 도시된 바와 같이 각 도심 C, C'의 x, y 좌표값의 평균좌표를 평균도심으로 정의하게 된다.

(3) 평균 도심  $D$  를 중심으로 두 개의 층 단면의 방사선방향의  $z$  축 기울기(radial gradient) 를 계산하는 데 이를 위해서 Fig. 5 와 같이 각 층 단면의 평균도심을 중심으로 일정한 각도 간격으로 방사선 방향의 ray 들을 설정하면 contour loop 와 교차하는 점들이 계산되는데 서로 인접한 두 개의 contour loop 가 동일한 ray 에 대하여 교차하는 점들을 Fig. 6 과 같이 하나의 set point pair 로 정의한다. 각각의 set point pair 를 생성하기 위해 방사선 방향의 ray 를 투사할 때 시작점의 위치는 임의로 결정되지만 임의로 결정된 시작 위치로부터 일정하게 지정된 각도를 따라 방사선으로 교차점을 찾으며 이를 각각 순차적으로 번호를 매겨 저장하게 된다.

(4) 이들 각각의 set point pair 를 하나의 벡터로 정의하면 벡터방향과  $z$  축 조형 축과의 상대적 방향을 계산하여 오버행/언더컷의 발생 여부를 진단, 검출한다. 또한 이 알고리즘을 통해 처리하는 3-D 파트 형상은 입체도형의 기하학적 최소 단위인 삼각형으로 구성되어 있는 STL 형식으로 삼각형의 세 꼭지점의 좌표와 각 삼각형의 법선 벡터의 정보를 담고 있다. 따라서 이를 토대로 형상의 내부와 외부를 구분할 수 있기 때문에 파트형상의 복잡한 정도에 관계 없이 오버행/언더컷을 진단할 수 있다.

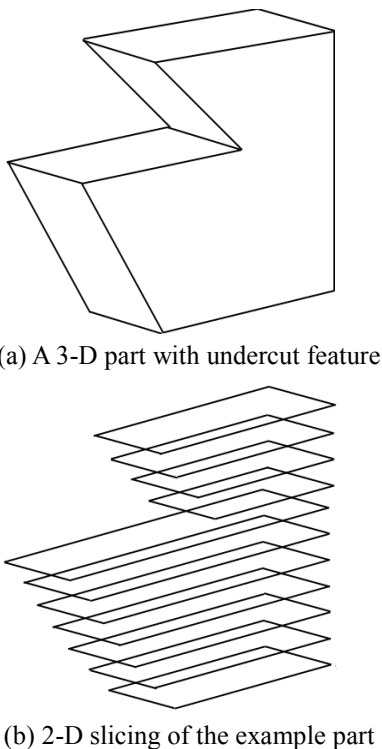


Fig. 3 2-D slicing with undercut features

3.2 은유적 자동 분할 알고리즘(Implicit auto-partitioning algorithm: IAP)

본 절에서는 3.1 절의 방사형 기울기 측정법을 통해 파트형상 내의 오버행/언더컷이 진단, 검출된 후에는 이 부분 주위로 파트형상을 분할함으로써 적절한 작업대의 기울임, 회전축의 제어를 통해 지지구조물 없이 적층 가공을 수행할 수 있다.

(1) 방사형 기울기 측정법을 통해 오버행/언더컷이 발생하는 위치를 진단, 검출한 후에는 Fig. 7(a)와 같이  $n$  번째 층에서  $n+1$  번째 층으로 진행할 때  $n$  번째 층의 loop 를  $n+1$  번째 층 높이로 투영하여 각 층 정보가 교차하는 좌표를 찾고 저장한다.

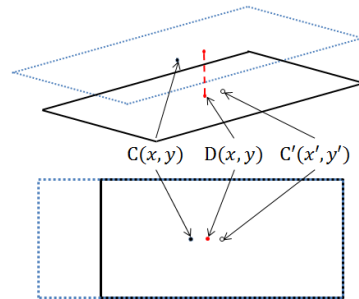


Fig. 4 Calculation of mass center between two adjacent layer loops

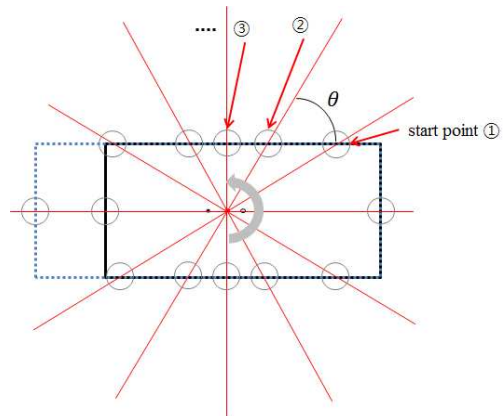


Fig. 5 Calculation of radial gradient(CRG)

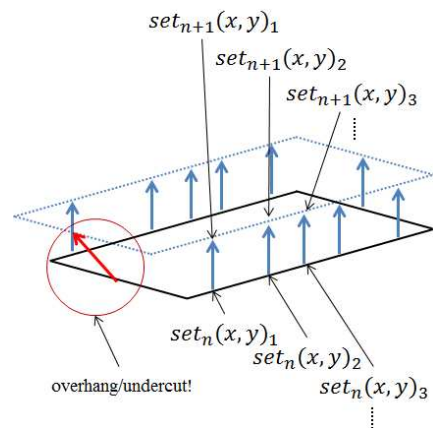


Fig. 6 Assignment of set point pairs for CRG

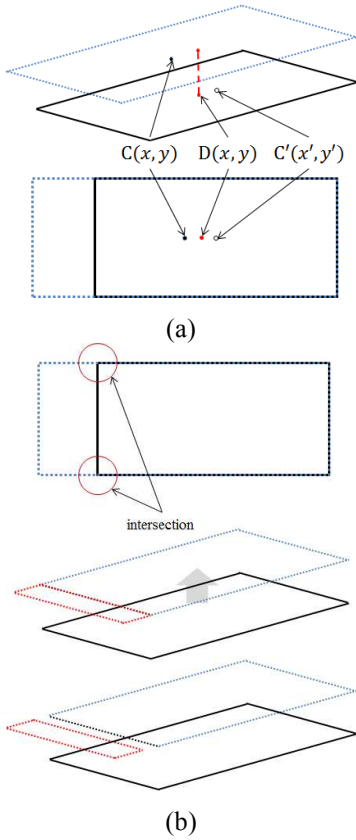


Fig. 7 Partitioning of one layer into two zones

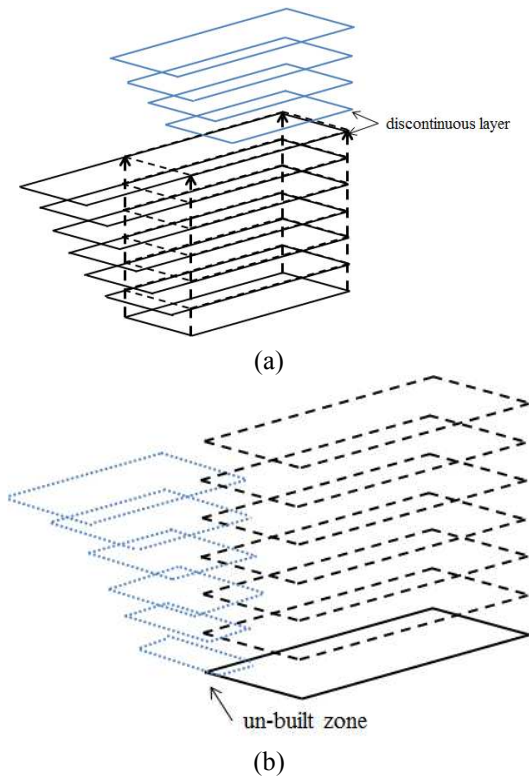


Fig. 8 Partitioning of the part into two

(2) 인접한 두 층 정보의  $n+1$  번째 층 정보를 Fig. 7(a)에서 검출된 교점을 토대로 직선으로 연결하고 적층 zone 과 미적층 zone 으로 구분하여 별도로 저장한다. 이는 별도로 저장된 미적층 zone 의 분할면을 평면으로 처리하기 위함이다

(3) 이 과정을 반복하면 Fig. 7(b)와 같이 적층 zone 과 미적층 zone 끼리 서로 다른 파트형상의 일부분으로 나뉘어 저장되게 되는데 이것이 은유적 자동 분할 알고리즘이다.

(4) 분할된 파트 중에서 미적층 zone 들이 모여서 구성된 미적층 파트는 이후 새로운 조형축 방향으로 적층되어야 한다. Fig. 8(a)에서는 미적층 zone 들이 모여서 구성된 미적층 파트(연한 점선)가 도시되어있다. 이 후 이 미적층 파트는 Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 미적층 zone 을 구성하는 set point 들을 2-D slicing 을 통해 새로운 적층 방향에서의 적층을 위한 층 단면정보로 생성된다.

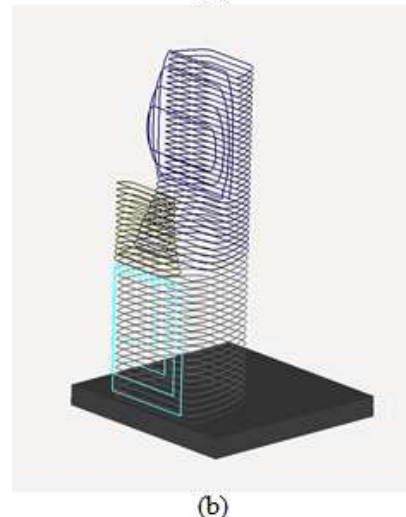
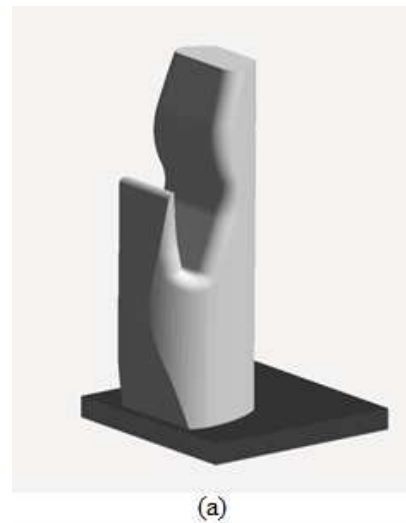


Fig. 9 An example part; (a) STL (b) 3-D sliced layers

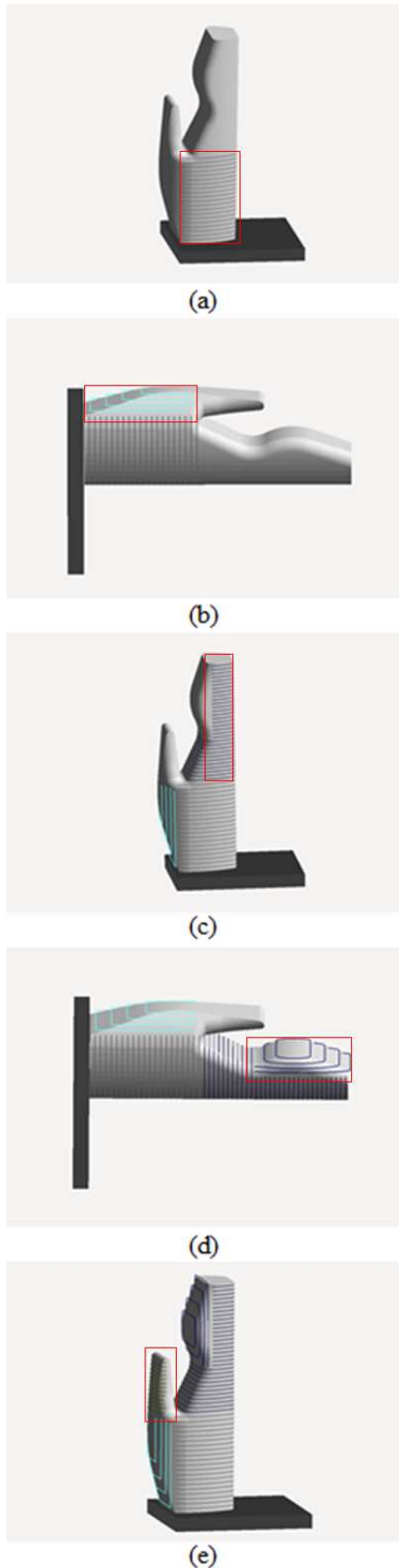


Fig. 10 Visualization of MPL procedure (a) Part I (b) Part II (c) Part III (d) Part IV (e) Part V

### 3.3 다중 적층 알고리즘(Multi-part Layering Algorithm: MPL)

3.1 절의 방사형 기울기 측정법과 3.2 절의 은유적 자동분할 알고리즘을 예제 파트형상을 기준으로 적용하여 다중 3 차원 적층 알고리즘을 적용한 결과가 Fig. 9 와 같다. Fig. 9(a)에 제시된 파트 형상은 이후 서로 다른 5 개의 적층 방향에서 조형이 이루어져 Fig. 9(b)에 도시된 바와 같이 최종 형상으로 적층된다. 서로 다른 조형 축 방향의 구분을 용이하게 하기 위해서 조형 층간의 간격을 일부러 넓게 도시하였음을 밝혀둔다.

Fig. 10 에 도시된 것처럼 알고리즘을 통해 형상 파트를 적층하는 과정은 다음과 같다.

(1) 먼저 방사형 기울기 측정법을 통해 오버행/언더컷 발생 위치를 검출하고 첫 번째 파트공간 I의 적층을 수행한다(Fig. 10(a)).

(2) 파트 공간 I의 적층을 수행한 후에는 평면으로 분할된 파트공간 II의 적층을 위해 작업대의 기울임 축을 90도 회전하여

파트 공간 II의 적층을 수행한다(Fig. 10(b)).

이 90도 방향은 중력의 영향을 받는 방향과 독립적이기 때문이다.

(3) 파트 공간 II의 적층을 모두 수행한 후에는 파트 공간 III의 비연속 층을 적층하기 위해서 원래대로 작업대를 90도 회전하여 복귀한 뒤 새로운 적층을 수행한다(Fig. 10(c), 10(d)).

(4) 파트 공간 III의 적층까지 마치면 더이상 파트 공간 IV와 V는 오버행/언더컷이 아니게 되므로 먼저 작업대를 90도 회전하여 파트 공간 IV의 적층 조형을 수행하고 이후 작업대를 90도 되돌림 회전하여 복귀한 후, 나머지 파트 공간 V의 적층 공정을 수행하고 공정을 종료한다(Fig. 10(e)).

## 4. 결론

본 연구에서는 5 축 기반의 3 차원 금속 프린팅을 위한 다중 3 차원 적층 알고리즘(3-D Layering: 3DL)을 제시하고자 하였으며 이를 뒷받침하기 위해 방사형 기울기 측정법(calculation of radial gradient: CRG)과 은유적 자동 분할 알고리즘(implicit auto-partitioning algorithm: IAP), 그리고 다중 적층 알고리즘(Multi-part Layering Algorithm: MPL)등 3 가지 이론을 예제 파트형상에 적용하여 제시된 이론을 검증하고자 하였다.

본 연구의 의의는 기존의 논문들에서 제안되었던 층 단면화 알고리즘들과는 달리 하나의 파트형상을 여러 개의 조형 공간으로 분할하여 조형방향



을 자유롭게 제어함으로써 오버행/언더컷과 같은 형상들도 지지구조물 없이 조형할 수 있도록 하였다. 이는 5 축 기반 3 차원 금속 프린팅 기기의 효율적인 운용을 위해 매우 중요하게 활용될 수 있다.

향후 보다 효율적인 이론의 정립을 위해서는 2 차원 평면 상태인 현재의 분할면 정의 방법을 추후에는 3 차원 자유 형상면 정의방식으로 개선해 나갈 계획이다.

### 후 기

본 논문의 연구는 2013-2014 민군겸용기술개발사업의 세부 과제인 “분산환경에서의 레이저 적층 직접금속조형의 e-manufacturing 기술 구현”의 지원을 받아 수행되었음.

### 참고문헌 (References)

- (1) Mohib and Cho, C., 2005, "Printing the Products: An Overview of the Three Dimensional Printing(3DP) Process," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, pp. 576~579
- (2) Kim, J. H. and Kim, J. J., 1998, "Slicing Using Orthogonal Arrays for Rapid Prototyping," *J. Precis. Eng. Manuf*, Vol. 17, No. 6, pp.169~174.
- (3) Prabhjot, S. and Dutta, D., 2001, "Multi-Direction Slicing for Layered Manufacturing," *Journal of Computing and Information Science in Engineering* Vol. 1, No. 2, pp.129~142.
- (4) Lan, R., Sparks, T., Ruan, J. and Liou, F., 2010, "Integrated Process Planning for a Multi-axis Hybrid Manufacturing System." *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp.021006-1~021006-7.
- (5) Liou, F., Slattery, K., Kinsella, M., Newkirk, J., Chou, H.-N. and Landers, R., 2007, "Applications of a Hybrid Manufacturing Process for Fabrication of Metallic Structures," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 13, No. 4, pp.236~244.
- (6) Zhang, J. and Liou, F., 2013, "Multi-Axis Planning of a Hybrid Material Deposition and Removal Combined Process," *Journal of Machinery Manufacturing and Automation*, Vol. 2, No. 3., pp.46~57
- (7) Jianzhong, R., Sparks, T. E., Panackal, A. and Liou, F. W., 2007, "Automated Slicing for a Multi-axis Metal Deposition System," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp.303~310.
- (8) Zhang, J. and Liou, F., 2004, "Adaptive Slicing for a Multi-Axis Laser Aided Manufacturing Process," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 126, pp.254~261.
- (9) Sriram, P., and F. Liou, W., 2011, "Feasibility of Building an Overhang Structure Using Direct Metal Deposition," *Proceeding of the 5<sup>th</sup> Annual ISC Research Symposium*, pp.1~6.
- (10) Banerjee, A. G., Kumar, A., Tejavath, S. and Choudhury, A. R., 2009, "Adaptive Slicing with Curvature Considerations," *International Journal of CAD/CAM*, Vol. 3, No. 1.
- (11) Zhiwen, Z. and Luc, Z., 2000, "Adaptive Direct Slicing of the Solid Model for Rapid Prototyping," *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 1, pp69~83
- (12) Justin, T. and Böhn., J. H., 1998, "Local Adaptive Slicing," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4, No. 3, pp118~127
- (13) Weiyin, M., But, W.-C. and He, P., 2004, "NURBS-Based Adaptive Slicing for Efficient Rapid Prototyping," *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 13, pp1309~1325