

# DED 적층 방식을 활용한 원통면 경사 적층에 관한 연구

김영일\*<sup>#</sup>

\*경상국립대학교 빅데이터혁신공유대학사업단

## A Study on Cladding on an Inclined Cylindrical Surface using DED Additive Manufacturing

Yeoung-Il Kim\*<sup>#</sup>

\*Bigdata Convergence and Open Sharing System, Kyungsang National University

(Received 01 March 2022; received in revised form 11 April 2022; accepted 19 April 2022)

### ABSTRACT

The Directed Energy Deposition (DED) is a representative metal additive manufacturing method. Owing to its strong point of repairment, its application is gradually spreading in aerospace applications, power generation, military components, and mold making. 5-axis cladding is needed to repair damage, such as wear and scratches on cylindrical surfaces to circular-shaped parts, including sleeves and liners. Furthermore, the condition of cladding on inclined parts must also be considered to prevent interference between the nozzle and the part. In this study, the effects of changes in scanning speed due to the 5-axis control system and differences from the height of laser beam irradiation due to inclination are evaluated among the items that should be additionally considered in 5-axis cladding compared to 3-axis cladding. Moreover, the trends of the width and height of the clad are identified by different tilting angles via single line cladding. Lastly, cladding methods on cylindrical surfaces at various angles are proposed to enhance the clad quality and post-processing efficacy. These results can be applied with 5-axis cladding on inclined surfaces, including cylindrical surfaces.

**Keywords :** Additive Manufacturing(적층제조), Directed Energy Deposition(직접분사적층), Cladding on Cylindrical Surface(원통면 적층), 5 Axis Cladding(5축 적층)

### 1. 서 론

기존 부품의 기계적 성질 향상과 보수 등에 장점이 있는 직접분사적층(Directed Energy Deposition, 이하 DED)은 금속적층제조(AM)의 대표적인 방식 중의 하나로써 항공·우주, 발전 산업, 군수부품, 금형 분야에서 점차

그 적용 폭을 넓혀가고 있다<sup>[1-4]</sup>. DED 방식을 활용한 부품 보수를 위해서는 적합한 분말 외에도 다양한 요소들이 고려되어야 하는 데 그중의 하나가 손상 형상이다. 부품 보수의 주요 절차는 손상 부위를 제거한 후 그 부분을 적층으로 메우고 후가공으로 마무리하는 것인데 적층 영역이 3축 적층으로 가능한 경우에 비해 오랜 작동과 이물질 유입 등으로 원통면 일부가 마모되거나 굽힌 슬리브나 라이너 등의 원형 부품 보수를 위해서는 5축 적층이 수반되어야 하며, 노즐 장치와

# Corresponding Author : yeoungil.kim@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-2779, Fax: +82-55-772-2778

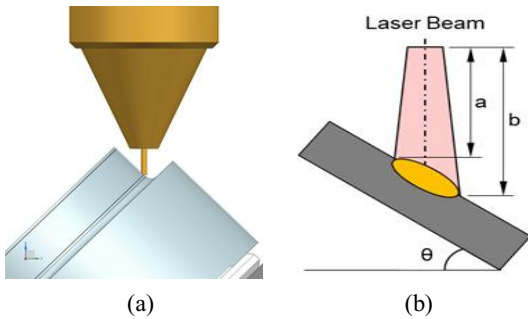


Fig. 1 Issues of cladding on an inclined substrate

부품 간의 간섭이 발생할 경우, Fig. 1 (a)와 같이 경사 적층을 해야 한다. 이 경우, 3축 적층에 비해 여러 가지를 추가로 검토해야 한다. 첫째, 자유곡면의 5축 가공에서 곡면의 곡률이 클수록 역기구해로 구한 NC 데이터와 가공물을 실제 절삭하는 공구 끝점인 CL 데이터 간의 이송률은 큰 차이를 보인다. 이는 5축 제어시스템에서의 이송속도는 CL데이터의 이송속도가 아니라 역변환한 NC 데이터에 의한 이송축의 이송속도를 나타내기 때문이다<sup>[5]</sup>. 5축 가공과 동일한 제어시스템으로 운용되는 5축 적층 역시 같은 개념의 속도 차이가 발생한다. 적층 에너지 밀도와 반비례 관계를 가지는 적층 속도(scanning speed)는 적층 공정의 주요 변수 중 하나이다<sup>[6]</sup>. 따라서 공정 값으로 설정된 속도와 5축 기기에서 운용되는 속도 차이로 인한 적층 품질 평가가 필요하다. 둘째, Fig. 1(b)와 같이 경사 적층시 발생하는 레이저 빔 조사 높이 또한 에너지 밀도에 영향을 미치므로 이에 대한 평가 역시 필요하다. 마지막으로, 동일 적층 조건임에도 경사 각도에 따라 적층 높이가 다를 경우 적층량 부족으로 인한 재적층 작업을 방지하고 과적층으로 인한 후가공량을 최소화하기 위한 경사별 적층 높이를 산정할 필요가 있다. 또한 상향(upward)과 하향(downward) 경사 적층에 대한 품질 평가 역시 필요하다고 판단된다. 이와 관련한 선행연구를 조사한 결과, Metelkova<sup>[7]</sup>은 레이저 빔 조사 높이에 따른 적층 결과를 제시하였으며, Lin과 Hwang<sup>[8]</sup>은 레이저 빔과 적층 단면 형상을 포함한 5가지 측면에서 경사 적층에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Park<sup>[9]</sup>은 경사 평면 적층에 대한 실험을 수행하였다. 그런데 앞서 언급한 5축 경사 적층 관련 내용을 종합적으로 수행한 연구는 부족한 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서는 5축

제어시스템 적용으로 야기되는 적층 속도 차이와 경사 적층에 수반되는 레이저 빔 조사 거리 차이에 의한 적층 결과 평가, 그리고 경사면 단선 적층 결과 분석과 함께 다양한 각도에서 원통면 적층 실험을 수행하여 궁극적으로 적층 품질과 후가공을 고려한 5축 경사 적층 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 환경

### 2.1 분말

본 연구에서 사용한 분말은 기계구조용 합금강 계열인 AISI 4340이며 분말 크기는 45~150 μm이다. AISI 4340은 니켈크롬합금강의 뜨임취성을 방지하기 위해 몰리브덴을 첨가한 것으로서 강도, 인성, 내마모성이 높은 것이 특징이다. Table 1과 Fig. 2는 각각 AISI 4340 분말의 화학 조성표와 분말 확대 사진을 보여주고 있다.

### 2.2 적층 기기 및 조건

본 연구에서는 INSSTEK사의 DED 방식 금속적층제 조용 프린터를 활용하였다. 해당 기기는 Fig. 3과 같이 터닝 테이블의 상면을 중심으로 3개(X, Y, Z)의 주축과 X축을 중심으로 틸팅(tilting)하는 A축, Z축을 중심으로

Table 1 Chemical composition of AISI 4340

| C     | Si    | Mn    | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.400 | 0.268 | 0.811 | 0.035 | 0.004 | 1.721 | 0.782 | 0.212 |

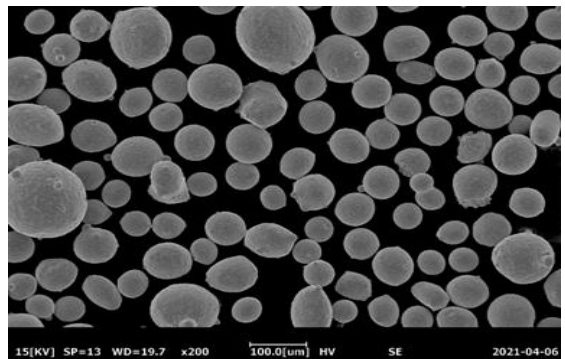


Fig. 2 Particles of AISI 4340

회전하는 C축으로 이루어진 5축 장비이다. 열원은 최대 출력 1,000kW인 이터븀(Ytterbium, Yb) 레이저이며, 빔의 스팟(spot) 직경은 0.8mm이다. Coaxial, Powder, 그리고 Shield 가스용으로는 불활성 기체인 아르곤 가스를 사용하였다. 실험에 적용한 주요 공정변수의 종류와 값은 Table 2와 같다. 실시간 프린팅 상황을 동영상으로 촬영하기 위해 Fig. 4과 같이 기기 내부에 휴대폰용 거치대를 설치하였다.

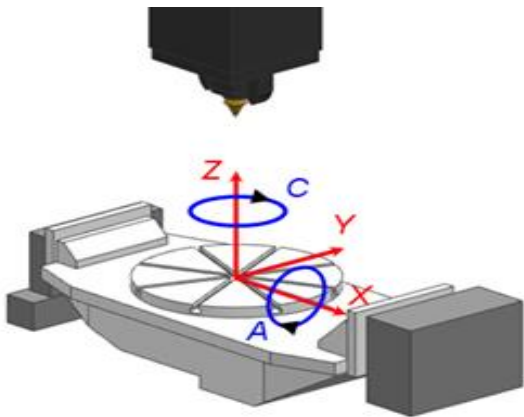


Fig. 3 Coordinate system of 5 axis DED Machine

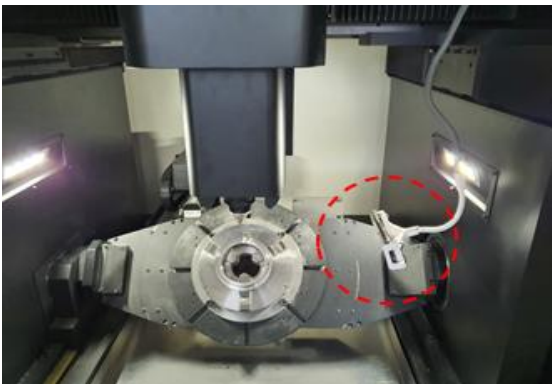


Fig. 4 Device for video shooting of cladding

Table 2 Cladding conditions

| Laser power (W) | Powder feed rate (g/min) | Coaxial gas (L/min) | powder gas (L/min) | Scanning speed (mm/min) |
|-----------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------|
| 400             | 2.5                      | 7.0                 | 3.0                | 850                     |

### 3. 실험 절차 및 분석

#### 3.1 적층 속도 및 레이저 빔 조사 거리별 적층

서론에서 언급한 동시 5축 제어 시의 이송 속도 차이 여부를 원통면 모의 적층으로 확인한 결과, 연구에서 적용한 공정 속도는 850mm/min인 반면, 실제 적층 속도는 제어관을 통해 630mm/min인 것으로 확인되었다. 이송 속도 차이는 장착된 컨트롤러에 따라 다르므로 기기별 확인이 필요하다. 이처럼 5축 CNC의 이송속도 차이점을 인지하지 못한 상태에서 상이한 공정변수 값을 실험이나 현업에 적용하게 되면 일관된 결과를 도출할 수 없다. 또한 모든 공정변수 값은 노즐이 모재와 일정한 높이에서 적층된 결과를 토대로 선정된 점을 고려할 때 노즐 높이의 원점 세팅이 잘못되거나, Fig. 1(b)와 같이 동일 높이로 적층할 수 없는 경사 적층일 경우 적층 품질에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 이를 평가하기 위해 적층 속도는 실제 적층 속도와 공정 속도로 구분하고, Fig. 5와 같은 레이저 빔 조사 높이(Z)는 본 연구에서 활용한 기기의 원점 세팅용 레이저 빔 조사 거리인 9mm와 함께 1mm씩을 가감한 8mm와 10mm로 구분한 후 조건별로 3회씩 단선(single layer) 적층을 실시하였다. 모재로는 AISI 4340과 유사 계열인 AISI 8600H 재질의 150D x 10T mm 원형 판재를 사용하였다. Table 3은 실험조건과 함께 조건별 적층 폭과 높이의 평균값을 나타내고 있다. 적층 속도의 경우, Fig. 6에 도시된 바와 같이 낮은 적층 속도로 인해 상대적으로 에너지 밀도가 높은 630mm/min 속도에서의 적층 폭과 높이가 850mm/min 속도 때보다 크다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 다른 조건은 같고 적층 속도만 다른 경우를 비교할 경우 630mm/min 속도의 적층 생산성이

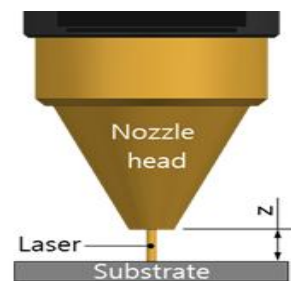
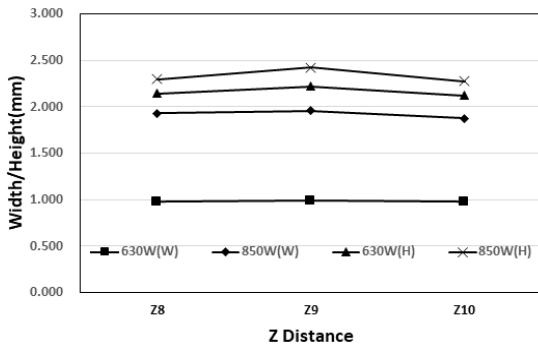


Fig. 5 Height(Z) of laser beam irradiation

**Table 3 Experimental conditions and results**

| No. | Scanning speed (mm/min) | Z dist. (mm) | Width (mm) | Height (mm) |
|-----|-------------------------|--------------|------------|-------------|
| 1   | 630                     | 8.0          | 0.977      | 0.215       |
| 2   | 630                     | 9.0          | 0.990      | 0.260       |
| 3   | 630                     | 10.0         | 0.975      | 0.246       |
| 4   | 850                     | 8.0          | 0.953      | 0.150       |
| 5   | 850                     | 9.0          | 0.967      | 0.195       |
| 6   | 850                     | 10.0         | 0.899      | 0.153       |



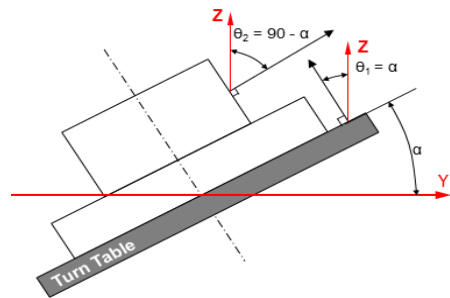
**Fig. 6 Results of scanning speed and Z height**

높다고 판단할 수 있으나, 에너지 밀도 증가로 인한 표면의 산화 현상이 상대적으로 크고, 단일 적층뿐만 아니라 다양한 실험과 분석을 통해 선정된 점을 고려할 때 공정 변수 값인 850mm/min을 고수하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이를 위해 5축 제어 시스템의 이송속도 값, 즉 경로 데이터의 피드(feed, F) 값을 변경하여 공정변수 수준으로 동작할 수 있도록 해야 하는데 이는 제어시스템의 변수값 조정 등의 전문적 작업으로써 본 연구에서는 그것에 대한 필요성만 언급한다. 노즐 높이의 경우는 기준값인 9mm에서 적층 폭과 높이가 제일 높은 것으로 파악되었다. 따라서 적층 전 노즐 높이를 정확하게 셋팅해야 하며, Fig. 1 (b)와 같이 경사로 인해 레이저 스팟 영역 내에서 높이 편차가 큰 경우, 적층의 폭과 높이 평가를 위한 실험이 별도로 실시되어야 할 것으로 판단된다.

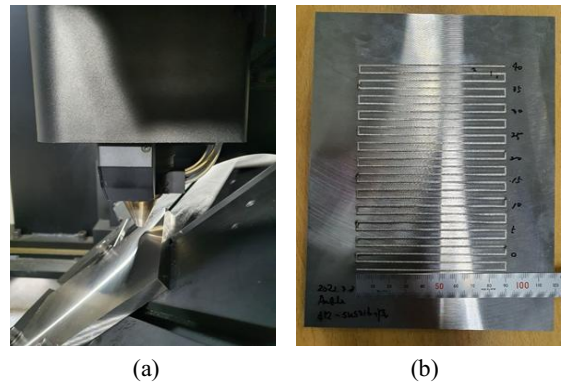
**3.2 경사 단선 적층**

경사 각도별 적층 단면 형상을 파악하고 그 폭과 높이에 대한 경향을 분석하기 위하여 A축을 0°~40°

구간에서 5°간격으로 회전하여 3회 단선 적층을 시행하였다. 경사 각도( $\theta$ )는 적층 기기의 Z축과 적층면의 법선 벡터와의 각도로 정의하였으며, Fig. 7은 회전축 A의 회전량( $\alpha$ )와 적층면 2 개소의 경사 각도를 예시로 보여주고 있다. 200L x 150W x 10T mm 크기의 구조탄소강인 AISI 1045 모재에 90mm 길이로 단선 적층을 지그재그로 실시했다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각 경사 단면 적층 장면과 적층 결과를 보여주고 있다. Fig. 9의 (a)와 (b)는 경사 각도가 각각 0°와 40°의 적층 단면의 한 예를 보여주고 있는데 경사 각도 0°에 비교하여 경사 각도 40°의 단면 형상이 한쪽으로 치우쳐 있음을 확인할 수 있다. Table 4는 실험조건 및 측정 평균값, Fig. 10은 경사별 적층 단면의 폭과 높이에 대한 경향을 보여주고 있다. 적층 폭에서는 경사에 따른 특별한 추이를 관찰할 수 없으나, 적층 높이의 경우에는 경사 각도가 0°인 상태의 적층 높이가 다른 경사에서의 높이보다 전반적으로 큰 것으로 파악되었다.



**Fig. 7 Inclined angle( $\theta$ )**



**Fig. 8 Single layer cladding on a inclined plate**

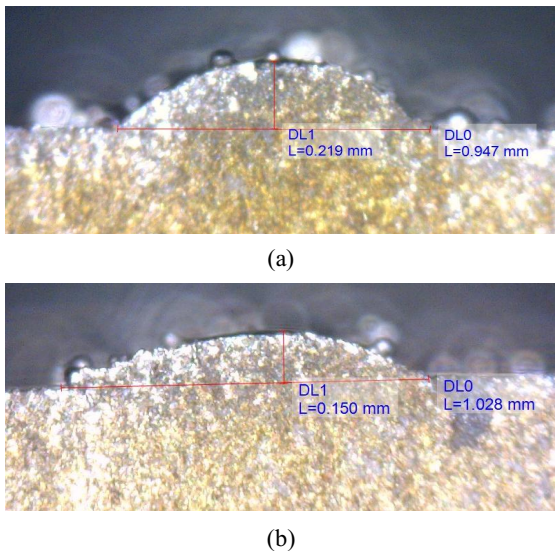


Fig. 9 Cross sections of cladding on inclined plane

Table 4 Experimental conditions and results

| No | Degree (Deg.) | Width (mm) | Height (mm) |
|----|---------------|------------|-------------|
| 1  | 0             | 0.962      | 0.192       |
| 2  | 5             | 0.946      | 0.128       |
| 3  | 10            | 1.003      | 0.141       |
| 4  | 15            | 0.906      | 0.138       |
| 5  | 20            | 0.906      | 0.142       |
| 6  | 25            | 0.982      | 0.136       |
| 7  | 30            | 0.964      | 0.142       |
| 8  | 35            | 0.923      | 0.163       |
| 9  | 40            | 0.967      | 0.151       |

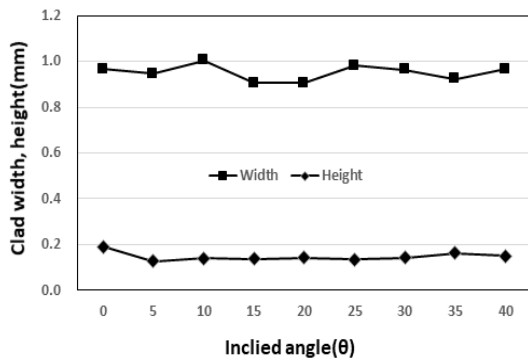


Fig. 10 Results of clad width and height

### 3.3 원통면 경사 적층

경사 각도가 원통면 적층량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Fig. 11(a), (b)와 같이 경사 각도가 0°와 37.5°인 상태로 동시 5축 경사 적층을 한 후 적층 부위를 연삭 가공하였다. 2단 원통면 중에서 직경이 126.86mm인 작은 원통면에 각도별로 각각 폭이 10mm인 영역에 대해 경로 간격 0.5mm, 층간 노즐의 높이는 0.25mm로 설정하여 두 층(two layer)으로 적층을 하였다. 각도별 적층 영역을 다시 폭 5mm씩 나누어 Fig. 11(c), (d)와 같이 하향(downward) 적층과 상향(upward) 적층 영역으로 구분하고 적층 회전 방향은 C축 중심으로 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)으로 번갈아 360°회전하며 적층을 실시했다. Fig. 12(a)는 적층 후의 형상을 보여주고 있는데 윗쪽과 아래쪽 띠 형상이 원통면을 각각 0°와 37.5°의 경사 각도에서 적층한 것이다. 37.5°경사 각도의 적층 영역을 육안검사한 결과, 표면 거칠기와 산화로 인한 색깔 변화가 상향 적층보다 하향 적층이 더 우수한 것으로 파악되었다. 적층 동영상을 확인한 결과, 이러한 현상은 상향 적층의 경우 기존 아래쪽에 적층된 부위가 이후 적층 과정에서 열원의 영향을 하향 적층보다 상대적으로 많이 받는 것에서 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 12(b)는 적층 부위를 4~5 μm 수준으로 연삭 가공한 결과를 보여주고 있다. 0°와 37.5°적층 영역의 직경은 각각 127.610mm와 127.415mm로 측정되었다. 이 결과는 다른 경사 각도에 비해 0°에서의 적층 높이가 상대적으로 크다는 3.2절의 결과와 부합되는 내용이다.

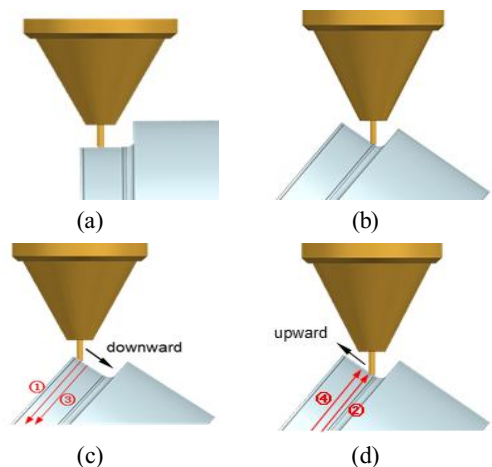


Fig. 11 Cladding angle and direction

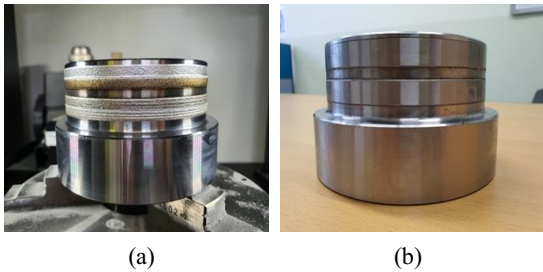


Fig. 12 Results of cladding and grinding

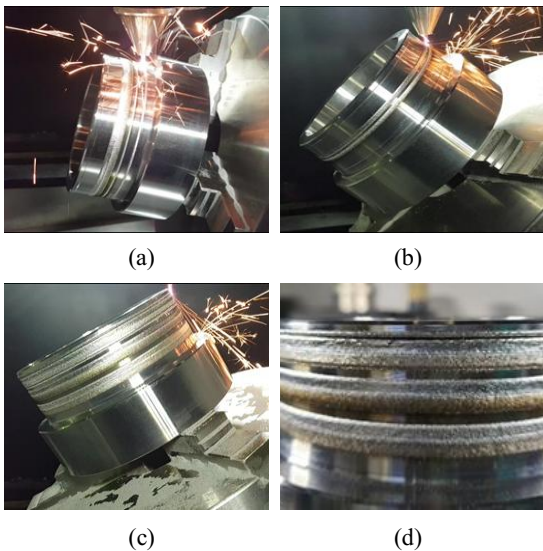


Fig. 13 Examples of cladding and results

원통 반경 기준, 0.098mm의 적층 높이 차이는 부품의 정삭 가공량을 상회하는 유의한 수준이므로 경사면 적층 시에는 수평면 적층보다 더 많은 적층 횟수가 필요하며, 필요 적층량을 고려하여 적층 회수를 산출해야 할 것으로 판단된다. 마지막으로 경사별 적층 결과를 확인하기 위하여 Fig. 13(a), (b), (c)와 같이 동일 원통면에 3가지 경사 각도 (15°, 37.5°, 75°)로 적층을 실시하였다. Fig. 13(d)는 아래에서부터 15°, 37.5°, 75° 순의 적층 결과를 보여준다. 육안검사 결과, 레이저 빔의 입사각이 상대적으로 작은 75°에서는 용융물의 흘러내림과 유사한 현상을 관찰할 수 있었다. 또한, 이전 원통면 경사 적층에서 보인 결과와 동일하게, 하향 적층이 상향 적층보다 우수하다는 것을 재확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기울어진 원통면에 5축 적층을 위해 고려해야 하는 항목을 서술하고 실험 결과를 바탕으로 각 항목이 적층에 미치는 영향을 평가하였으며, 그 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 제어시스템의 이송 속도는 이송축의 속도로 적용되기 때문에 5축의 경우에는 실제 적층 속도와의 차이가 발생한다. 이로 인하여 공정 적층 속도가 제대로 적용되지 않아 예상과 다른 적층 결과를 얻을 수 있다. 따라서 제어시스템의 특성을 파악하여 공정 속도로 운영될 수 있도록 조치를 해야 한다.

둘째, 경사 각도에 따라 발생하는 레이저 빔 조사 거리의 차이 역시 적층의 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 정해진 레이저 빔 조사 거리로 원점 세팅을 하는 것이 중요하며 경사가 심한 영역은 별도의 실험을 통해 별도의 적층 조건을 설정하는 것 또한 적층 품질 향상을 위한 대안이라고 할 수 있다.

셋째, 경사 각도를 달리하며 단선 적층 실험을 실시한 결과, 적층 폭과는 특별한 상관관계를 파악할 수 없었는데 선행연구를 진행한 Lin과 Hwang<sup>[8]</sup>의 결과 또한 이와 유사한 경향을 보인다. 높이의 경우, 수직 적층이 다른 각도에 비해 상대적으로 큰 것으로 파악되어 모재의 경사가 적층에 미치는 영향이 유의한 것으로 판단된다. 이러한 실험 결과를 토대로 향후 다층 적층 등의 추가 실험을 실시한다면 경사와 적층 형상과의 상관관계를 더 명확하게 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 원통면을 대상으로 2가지 각도에서 적층 실험을 시행하여 상향보다는 하향 적층의 결과가 상대적으로 우수하며, 적층 부위의 연삭 가공을 통하여 수직 적층에 가까울수록 적층 높이가 높다는 결론을 도출하였다. 또한 뚜렷한 차이를 보이는 3가지 경사 각도에서 적층을 실시한 후 육안검사를 통하여 하향 적층이 상향 적층 대비 우수함을 재확인하였다.

향후 경사면을 포함한 5축 적층의 원활하고 효율적인 현업 적용을 위해서는 본 연구의 결과를 바탕으로 주제별 심도 있는 연구가 진행되어 궁극적인

로는 CNC 절삭가공용 공정별 DB와 같은 조건별 적층 데이터 구축체계가 확립되어야 할 것이다.

## REFERENCES

1. Kang, M. C., Ye, D. H. and Go, G. H., "International Development Trend and Technical Issues of Metal Additive Manufacturing," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 34, No. 4, pp. 9-16, 2016.
2. Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R. and Babu, S. S., "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing," *Journal of International materials reviews*, Vol. 61, No. 5, pp. 315-360, 2016.
3. Thompson, M. K., et al., "Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints," *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 65, No. 2, pp. 737-760, 2016.
4. Abdulhameed, O., et al., "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-27, 2019.
5. Hwang, J. D., Oh, J. Y., and Jung, Y. G., "A Study on the Improvement of Surface Roughness of Impeller by Selection of Tool Path and Posture and Control of Feedrate," *J. of The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 32, No. 12, pp. 1088-1095, 2008.
6. Shim, D. S., et al., "Effect of layer thickness setting on deposition characteristics in direct energy deposition (DED) process," *Optics & Laser Technology*, Vol. 86, No. 1, pp. 69-78, 2016.
7. Metelkova, J., et al., "On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L," *Additive Manufacturing*, Vol. 23, No. 1, pp. 161-169, 2018.
8. Lin, J. and Hwang, B., "Coaxial laser cladding on an inclined substrate," *Optics & Laser Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 571-578, 1999.
9. Park, H. J. et al., "Deposition angle-dependent bead geometry in directed energy deposition process," *Proceedings of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 2019, No. 2, p. 257, 2019.
10. Chua, C. K., et al., "Lasers in 3D printing and manufacturing," *World Scientific*, pp. 87-107, 2018.