

# Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM)에서 적층 비드(Bead) 형상 정확도 및 기계적 특성 향상을 위한 가변 가압장치 개발

황예한\*, 이춘만\*\*,#, 김동현\*\*\*,#

\*창원대학교 스마트제조융합동과정, \*\*창원대학교 기계공학부, \*\*\*창원대학교 메카트로닉스연구원

## Development of Variable Rolling Pressure Device for Bead-Shape Accuracy and Mechanical Property Enhancement in WAAM

Ye-Han Hwang\*, Choon-Man Lee\*\*,#, Dong-Hyeon Kim\*\*\*,#

<sup>\*</sup>Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon Nat 'l University,

<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Changwon Nat 'l University,

<sup>\*\*\*</sup>Mechatronics Research Center, Changwon Nat 'l University

(Received 18 May 2022; received in revised form 24 May 2022; accepted 30 June 2022)

### ABSTRACT

Metal additive manufacturing (AM) has revolutionized several manufacturing industries. AM can generate large-scale metal components and produce complex geometries close to net-shapes. WAAM is an AM technology that has garnered considerable interest among industries owing to its economics and relatively high deposition rates. However, the heat accumulation in the weld bead during deposition triggers distortion and residual stress. To address these problems, various methods of interpass pressure rolling systems have been suggested in recent research. In addition, combining the rolling and WAAM processes can mitigate residual stresses. The constant-pressure rolling of the interlayer also affect the microstructure. The coarse microstructure of the as-deposited sample was altered to finer equiaxed grains via these methods. However, the bead-shape accuracy of the interlayer constant-pressure method does not consider the heat accumulation in each layer. Therefore, this study develops an interpass variable pressure rolling system that considers the heat accumulation of each layer. The interpass variable pressure rolling system comprises deposition, detection, pressure, and transport units. Finally, verification tests are performed on the interpass variable-pressure rolling system (at 500 kg) with the WAAM process, and the obtained results are discussed.

**Keywords :** Additive Manufacturing(적층 제조), Variable-Pressure(가변 가압), WAAM(와이어 아크 적층 제조), Bead Shape(비드 형상), Mechanical Property(기계적 특성)

## 1. 서 론

# Corresponding Authors : cmlee@changwon.ac.kr(C.M.Lee),

dkim@changwon.ac.kr(D.H.Kim)

Tel: +82-55-213-3622, Fax: +82-55-267-1160

적층 제조는 전통적인 절삭가공에 비해 제품의 형상 자유도가 높고, 소재 낭비가 적은 장점을 가진다.

금속 적층 기술은 크게 Directed Energy Deposition(DED) 방식과 Powder Bed Fusion(PBF) 방식으로 나눌 수 있다. DED 방식은 공급 재료(Feedstock)에 따라 와이어(Wire)형태의 재료를 이용하는 방식과 분말(Powder)을 이용하는 방식으로 나뉜다. 와이어 아크 적층 제조(Wire Arc Additive Manufacturing)는 아크를 열원으로 사용하고 공급 재료로 금속 와이어를 사용하며 기존의 용접 장비와 로봇으로 구성할 수 있어 초기 구축 비용이 다른 방식에 비해 저렴하여 경제성과 높은 적층 효율로 인해 최근 연구가 활발히 진행 중이다<sup>[14]</sup>.

적층 제조 중 발생하는 높은 입열(Heat input)은 적층 비드(Bead)에 축적되어 부품의 잔류응력(Residual stress)을 발생시키고 부품 결함의 원인이 된다. 또한, 적층 공정 특성상 응고하는 방향인 적층 방향으로 미세조직을 관찰하면 조대한 주상성(Columnar) 조직이 관찰되는데 이는 기계적 특성의 이방성(Anisotropy)의 원인이 된다. 이런 문제들을 해결하기 위해 몇몇 연구에서는 다양한 형태의 가압장치를 제시하였고, 적층 비드를 가압함으로써 잔류 응력이 줄어들고 주상성 조직이 등축성(Equiaxed) 조직으로 바뀌어 이방성이 줄어드는 경향을 발견했다<sup>[5-9]</sup>.

Duarte 등은 열간 단조 방법을 적층 공정과 접목시켜 WAAM 적층과 동시에 원통형의 망치를 통해 비드에 압력을 가하는 형태의 가압장치를 소개했다<sup>[10]</sup>. Martina 등은 적층 비드를 상온까지 식힌 후 25kN~75kN의 고압을 가하는 상온가압 방법을 접목시켜 가압하는 방법과 롤러의 형태가 적층 비드의 형상 및 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하였다<sup>[11]</sup>. Zhang 등은 적층과 동시에 가압을 하는 고온가압 방법을 적용하였는데, 매우 낮은 압력을 통해 실험을 진행하였고, 롤러와 용접 토치와의 거리의 최적점을 찾는데 연구의 중점을 두었다<sup>[12]</sup>. Honnige 등은 기존 연구와 달리 적층 비드 위에서 가압하는 평면 가압방식에서 벗어나 평면과 측면을 모두 가압하는 복합 가압장치를 연구하였다<sup>[13]</sup>. Silva 등은 높은 레이어로 갈수록 적층 비드에 축적되는 열로 인해 적층 비드의 형상 정확도가 떨어지는 것이 확인되었다<sup>[14]</sup>.

하지만 기존 실험들은 모든 레이어(Layer)에 같

은 압력을 가하는 고정압력 가압방식(Interlayer constant-pressure)을 이용하여 실험을 진행했다. 고정압력 가압방식은 레이어 별로 다른 열 축적을 고려하지 못하여 모든 레이어에 똑같은 압력을 가하는 문제를 포함하고 있다.

이에 본 연구는 적층 비드의 형상 정밀도 및 기계적 특성 향상을 위한 가변 가압 시스템 개발로써 레이어 별로 다른 열 축적을 고려하여 가변압력을 줄 수 있는 가변 가압장치를 구축하고자 한다.

## 2. 가압의 필요성

WAAM을 통해 제조한 제품은 적층 방향을 따라 나타나는 조대한 주상 조직(Columnar grains), 방향에 따라 기계적 특성이 달라지는 이방성을 가지며 공정 중 적층 비드에 축적되는 열 축적(Heat accumulation)으로 인해 발생하는 잔류응력은 제품이 휘어지는 왜곡(Distortion)의 원인이 된다.

하지만 최근 이런 문제들을 해결하기 위해 여러 가지 가압방법이 연구되었다. 기존 연구들은 WAAM 적층 중 가압하는 고온 가압방법과 적층 후 상온에서 가압하는 상온 가압방법이 있다. 금속은 온도가 증가함에 따라 인성은 늘어나고 소성 변형에 필요한 힘은 낮아지기 때문에 적층과 동시에 가압하는 고온 가압방법의 경우 상온 가압보다 매우 적은 힘으로 가압할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 금속 적층 중 반복적으로 발생하는 열 축적으로 인해 적층 비드의 온도는 지속해서 상승하며 이는 비드 형상 정확도를 저하시킨다.

Silva 등의 연구에 따르면 WAAM 적층 중 발생하는 열 축적으로 인해 적층 비드의 온도는 점점 상승하며 이로 인해 상부 레이어의 비드는 하부 레이어에 비해 비드의 높이가 낮고 폭은 넓어졌다<sup>[14]</sup>. 기존의 고온 가압 방법은 모든 레이어에 동일한 압력을 가하기 때문에 상부 레이어의 높은 열 축적을 고려하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 열 축적을 고려하여 레이어 별로 다른 압력을 가하는 가변 가압장치를 개발하였다.

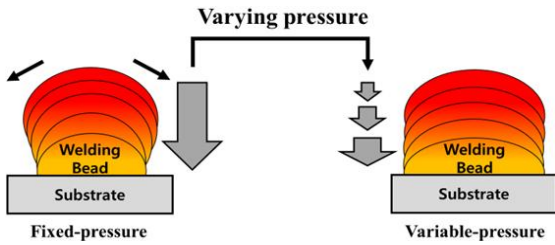


Fig. 1 Concept diagram of the interpass constant-pressure rolling system(left) and interpass variable-pressure rolling system(right)

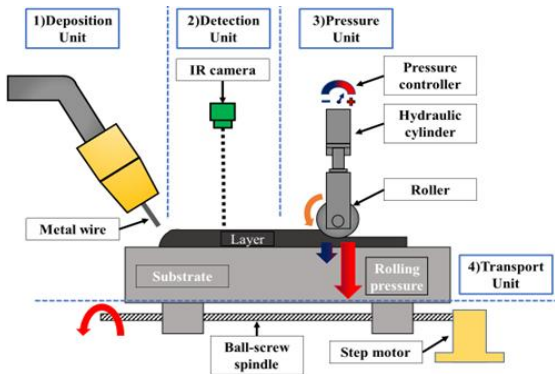


Fig. 2 Schematic diagram of 1) Deposition unit 2) Detection unit 3) Pressure unit 4) Transport unit in interpass variable-pressure rolling system

### 3. 가변 가압장치 제작

#### 3.1 가변 가압장치 설계

가변 가압장치는 Fig. 2와 같이 적층부, 검출부, 가압부, 이송부로 구성되어 있다. 적층부는 ABB사의 6축 다관절 로봇(IRB 6700)과 Fronius사의 용접기(TPS 500i)로 구성되었다. 검출부는 FLIR사의 적외선 카메라(T640)으로 구성되었다. 가압부는 하이드로텍사의 최대 160bar의 출력을 갖는 유압모터와 중심부에 홈이 파여있는 원형 롤러로 구성되었다. 원형 롤러는 고온의 환경에서도 강도가 유지되는 AISI H13이 채워졌고 Table 1은 AISI H13의 조성표이다. 이송부는 볼 스크류 스펀들과 스텝 모터로 구성되어 있다.

Table 1 Chemical composition of AISI H13 steel

Elements	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
wt(%)	0.32	0.20	0.80	0.80	1.10	0.80
	~0.45	~0.60	~1.25	~1.25	~1.75	~1.20

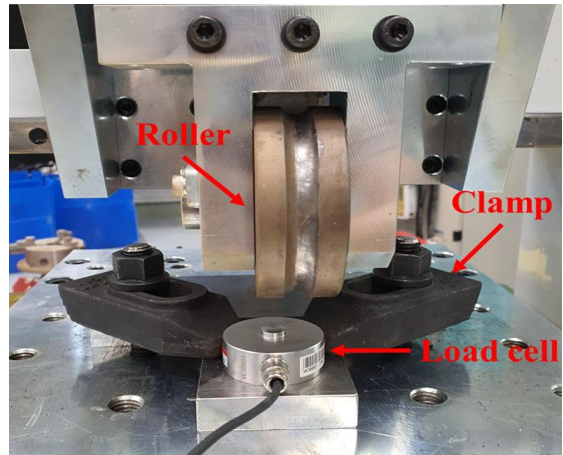


Fig. 3 Measuring pressure with a load cell

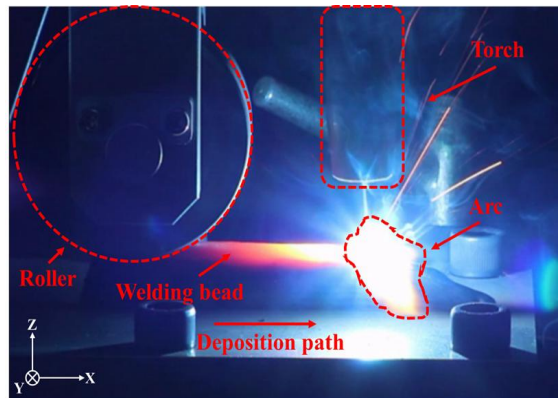


Fig. 4 Depositing AISI 304 and pressing bead by roller

Table 2 Chemical composition of AISI 304 steel

Elements	C	Si	Mn	P	S
wt(%)	0.42	0.15	0.60	0.03	0.035
	~0.48	~0.35	~0.90	less	less

**Table 3 Process parameters for WAAM**

Process parameters	Details
Deposition current	140 A
Arc voltage	13.4 V
Travel speed	7 mm/s
Wire feed speed	3.8 m/min
Contact tip to work piece distance	25 mm
Flow rate of argon	20 L/min
Contact tip to roller distance	70 mm
Deposited layers	10 layers

### 3.2 가변 가압장치 검증

제작 후 가변 가압장치의 압력 성능을 검증하기 위해 봉신로드셀 사의 압축 로드셀(CBL-3T)이 사용되었으며 가압장치 베드(Bed)에 Fig. 3과 같이 지그(Zig)로 고정되었다.

적층부와 가압부의 연동 및 제어를 검증하기 위해 금속 적층과 적층 비드 가압이 동시에 수행되었으며 용접 토치와 가압 롤러는 고정되고 이동 테이블에 고정된 모재가 이동하며 금속 적층과 가압이 Fig. 4와 같이 수행되었다.

금속 적층 공정에 사용된 모재와 와이어의 소재는 AISI304가 사용되었으며 조성표는 Table 2와 같으며 Table 3의 공정 변수로 적층 공정이 수행되었다.

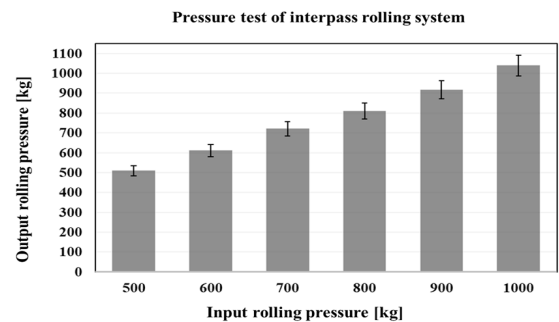
## 4. 결과 및 토론

Fig. 6는 가변 가압장치의 압력 테스트 결과를 나타낸 그래프다. 최소 500kg부터 최대 1000kg의 압력 신호를 유압유닛에 입력하였으며 로드셀을 통해 출력 압력을 검증하였다. 압력 검증 테스트는 압력별로 3회씩 반복 하였으며 평균 오차를 5% 미만의 반복 정밀도가 확인되었다.

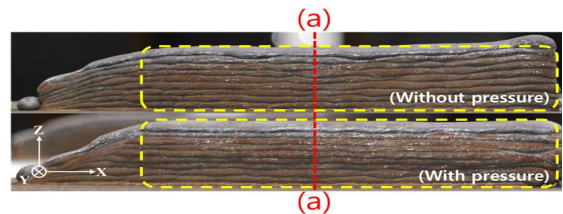
Fig. 7은 금속 적층과 가압이 동시에 수행된 적층 비드를 나타냈다. 위 사진에 표시된 단순 적층 비드의 높이는 26mm, 평균 폭은 6mm로 측정되었다. 아래 사진은 적층과 동시에 롤러를 통해 가압이 적용된 비드의 사진이다. 가변 가압 시스템의 최소 압력인 500kg의 압력을 가했으며 측정된 비

드의 높이는 21.8mm로 평균 폭은 7.2mm로 나타났다.

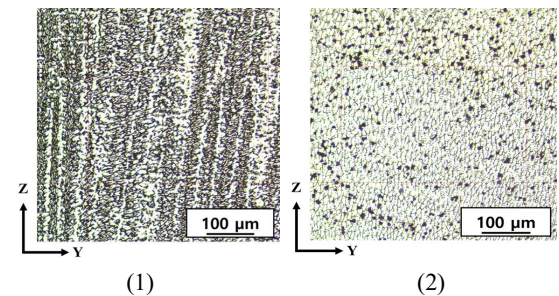
Fig. 8은 적층된 비드의 (a)-(a)단면을 광학 현미경으로 측정된 사진이다. 단순 적층한 비드의 단면은 Fig. 8(1)와 같이 적층 방향으로 조대한 주상성 결정립이 관찰되었고, 적층과 동시에 압력이 가해진 비드의 단면은 Fig. 8(2)와 같이 조밀한 등축성 결정립이 관찰되었다.



**Fig. 6 The verification test results of each pressure**



**Fig. 7 Comparison test of (1) WAAM as-deposited and (2) WAAM with pressure(at 500kg)**



**Fig. 8 Microstructure of cross sections (a)-(a) from (1) WAAM as-deposited and (2) WAAM with pressure (at 500 kg)**

## 5. 결 론

본 연구에서는 가변 가압장치를 개발하여 가압부의 압력 및 반복 정밀도 기초 검증 및 가압부와 적층부의 연동 및 제어가 검증되었다. 수행 및 검증한 내용은 다음과 같다.

1. 금속 적층된 제품은 조대한 주상 조직으로 인해 방향에 따라 기계적 특성이 달라지는 이방성을 가지며 열 축적으로 인해 발생하는 잔류응력과 왜곡을 해결하기 위해 최소 500kg부터 최대 1ton의 가변 압력을 가할 수 있는 가변가압장치가 제작되었다.
2. WAAM을 위한 가변 가압장치의 가압부는 각각 다른 압력에 대해 5% 이내의 압력 반복 정밀도를 나타냈다.
3. 가변 가압 시스템과 WAAM 공정을 연동 및 제어를 확인하였고 적층 비드의 형상 변화와 미세조직의 변화를 확인하였다.

향후 연구에서는 본 시스템을 활용하여 이중 소재 적층 및 소재별 특성을 고려한 가변 가압을 통해 기계적 특성과 비드 형상도를 향상시킬 계획이다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A5A8083201)

## REFERENCES

1. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Huijun, Li., "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 81, pp. 465-481, 2015.
2. Bintai Wu, Zengxi Pan., "Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 35, pp. 127-139, 2018.
3. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T., "Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing," Additive Manufacturing, Vol. 22, pp. 672-686, 2018.
4. Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., Oliveira, J. P., "Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)," Materials, Vol. 12, No. 7, 2019.
5. Colegrove, P. A., Martina, F., Roy, M. J., Szost, B. A., Terzi, S., Williams, S. W., Withers, P. J., & Jarvis, D., "High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components," Advanced Materials Research, Vol. 996, pp. 694-700, 2014.
6. Zhang, T., Li, H., Gong, H., Wu, Y., Ahmad, A. S., & Chen, X., "Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at ambient and elevated temperatures," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 884, 2021.
7. Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., Williams, S., "Grain refinement in an unalloyed tantalum structure by combining Wire+Arc additive manufacturing and vertical cold rolling," Additive Manufacturing, Vol. 32, 2020.
8. Fu, Y., Zhang, H., Wang, G., & Wang, H., "Investigation of mechanical properties for hybrid deposition and micro-rolling of bainite steel," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 250, pp. 220-227, 2017.
9. Ye-Han Hwang, Dong-Hyeon Kim, Choon-Man Lee., "A Basic Study on the Determination of Bead-Shaping Pressure in Wire Arc Additive Manufacturing(WAAM)", KSME, Vol. 311, pp. 57, 2022.
10. Duarte, V. R., Rodrigues, T. A., Schell, N., Miranda, R. M., Oliveira, J. P., & Santos, T. G., "Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)," Additive Manufacturing, Vol. 35, 2020.
11. Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairman, J., Martina, F., Kashoob, T., Mamash, H., & Cozzolino, L. D., "Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively

- manufactured parts through high-pressure rolling,”  
Journal of Materials Processing Technology, Vol.  
213, pp. 1782-1791, 2013.
12. Zhang, H., Wang, X., Wang, G. and Zhang, Y,  
"Hybrid direct manufacturing method of metallic  
parts using deposition and micro continuous  
rolling," Rapid Prototyping Journal, Vol. 19, pp.  
387-394, 2013.
  13. Hönnige, J. R., Colegrove, P. A., Ganguly, S.,  
Eimer, E., Kabra, S., Williams, S., "Control of  
residual stress and distortion in aluminium wire +  
arc additive manufacture with rolling," Additive  
Manufacturing, Vol. 22, pp. 775-783, 2018.
  14. da Silva, L. J., Souza, D. M., de Araújo, D. B., Reis,  
R. P., & Scotti, A., "Concept and validation of an  
active cooling technique to mitigate heat  
accumulation in WAAM," The International Journal  
of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 107,  
pp. 2513-2523, 2020.