아크열원을 이용한 Inconel 718의 금속적층에서 SS 275 모재로의 대체 가능성 평가

이 태 현^{*,**} · 오 제 훈^{**} · 감 동 혁^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}한양대학교 기계설계공학과

Evaluation of SS 275 Substrate Substitutability in Arc and Wire Additive Manufacturing of Inconel 718

Tae Hyun Lee^{*,**}, Je Hoon Oh^{**}, and Dong-Hyuck Kam^{*,†}

^{*}Joining R&D group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

^{**}Dept. of mechanical design engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

[†]Corresponding author : kamdong@kitech.re.kr

(Received November 29, 2018 ; Accepted January 3, 2019)

Abstract

Additive manufacturing of novel metals has received much attention as an alternative to traditional manufacturing because of its high material efficiency, shorter lead time and higher design flexibility. However for most additive manufacturing base substrate were not considered in the calculations. Generally, the base substrate is applied in the same material or similar chemical component alloys. This is in addition to the feedstock and the cost of use since it is discarded after the process in the process of removing the base substrate after the process. Therefore, it is very important to minimize the cost of the base substrate and the use of cheaper and different materials should be considered. In this study, substitution of base substrate in the production of arc and wire additives using gas metal arc welding (GMAW) was evaluated. Inconel 718 was deposited on two different substrates (SS275, Inconel 718). In SS275 substrate, we observed that after three layers of deposition, the deposition width is similar to the thickness of the Inconel 718 substrates. It has also been found that dilution from the fourth deposition layer with respect to the SS275 substrate by examining the dilution from the viewpoint of the deposition layer can be solved by cutting the first three layers of the dilution problem.

Key Words : 3D printing, GMAW, Inconel 718, SS 275, Substrate

1. 서 론

3D 프린팅은 3차원 형상정보를 기반으로 하여 소재를 적층하여 제품을 생산 하는 방식으로써, 기존의 생산방식과 비해 제품의 설계에서부터 생산까지 시간을 단축이 가능하기 때문에 시제품 제작부터 완전제품화 단계에 이르기 까지 주목을 받고 있는 제조 공법이다¹⁾. 금속 3D 프린팅은 항공 부품과 발전용 부품, 의료용 부품 등 다품종 소량생산이 필요한 제품에 적합하다.

특히 니켈계 합금과 티타늄 합금과 같은 고가의 재료의 적용제품에 대하여 제품형상의 자유도의 확대와 재료소모의 저하로 인한 생산비용의 절감으로 인하여 3D 프린팅 기법 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁻⁵⁾.

금속 3D 프린팅은 사용되는 적층 방식에 따라 PBF (Powder Bed Fusion), DED (Direct Energy Deposition) 공법으로 분류된다⁶⁾. 그 중 DED 공법은 고 에너지의 열원을 조사하여 적층부에 소재를 직접 공급하여 적층 제조하는 방식을 말하며, PBF 방식에 비해 높은 생산속도와 재료효율을 가진다. DED 공법은 일반

적으로 고출력 에너지 밀도를 가지는 레이저 열원과 분말형태의 금속이 사용된다. 용착량의 증대를 통한 생산성 확보를 목적으로 파우더 형태의 소재 대신 금속 와이어를 적용하는 기법이 연구되고 있다^{4,5,7,8)}. 또한 생산비용의 절감을 위하여 고비용의 레이저 열원을 고 입열이 가능한 아크열원의 적용이 제안되고 있다⁹⁻¹¹⁾.

금속 3D 프린팅은 Substrate에 소재를 적층한 후 제품의 형상을 제외한 부분을 가공한 후 substrate 제거를 통하여 제품을 완성한다. 적층 후 제거된 substrate는 폐기되거나 재 사용된다. 하지만 재 사용된 substrate는 열영향으로 인하여 열변형이 발생되어 적층 경로 형성에 어려움이 발생할 뿐만 아니라 적층 구조물의 응력 집중을 발생시킬 수 있다. 재사용의 문제를 해결하기 위해서는 공정마다 새로운 substrate의 사용이 필요하나 생산비용이 증가한다. 특히 티타늄 합금과 니켈계 합금과 같이 고비용의 소재를 적층한 경우 동일 소재의 substrate의 사용으로 인한 생산비용 증가의 문제가 증대된다. 이를 해결하기 위해서는 저비용의 substrate의 대체가 필요하지만 이에 대한 연구는 미비하다.

본 연구에서는 GMAW를 이용한 Inconel 718합금의 금속 적층에서 구조용 강인 SS 275소재를 substrate로 대체 가능성을 평가하고자 하였다. Inconel 718 소재를 이중 소재인 substrate에 적층하고 Inconel 718 소재를 동종의 Inconel 718 substrate에 적층한 시편과 비교하였다. Inconel 718와이어로 적층된 적층 구조물임을 고려하여 Inconel 718의 성분의 함량기준을 확보하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 적층소재는 니켈계 합금인 Inconel 718이다. 적층을 수행하기 위하여 1.2mm 직경의 ERNiFeCr-2 솔리드 와이어를 사용하였다. Substrate는 소재로150 × 150 × 10 mm 크기의 Inconel 718과 SS 275를 사용하였다. 사용된 소재의 화학적 조성은 Table 1에 나

Table 1 Chemical compositions of materials

Element \ Metal	ER Ni FeCr-2	Inconel 718	SS 275
C	0.05	0.05	0.06
Si	0.06	0.04	0.06
Mn	0.03	0.23	1.78
P	-	-	0.01
Cr	17.55	18.3	-
Ni	52.78	52.3	-
Mo	3.08	3.04	-
Fe	19.8	18.5	Bal
Nb	5.1	4.96	-

Fig. 1 Schematic illustration of experimental variable

Table 2 experimental condition

Solid wire	Substrate	Shielding gas (L/ min)	Welding direction (°)
ERNiFeCr-2 1.2 mm	Inconel 718 SS275	20 (Ar 99.999 %)	90
CTWD (mm)	Travel speed (m/min)	Wire feeding rate (m/min)	Layer (n)
15	0.3 ~ 0.7	7 ~ 9	1
	0.5	7	1~5

타내었다.

사용된 용접기는 기계적 단락이행 제어가 가능한 Fronius사의 TPS-3200이다. 보호가스는 Ar 으로 유량은 20 l/min으로 사용하였다. Substrate에 따라 적층비드 형상을 평가하기 위한 실험으로써 입열변화에 따른 BOP (Bead On Plate) 테스트를 통한 비드형성 평가를 실시하였다. 공정 변수로써 용접속도, 와이어 송급속도를 선정하였다. 실험 조건은 Table 2에 정리하여 나타내었다. Substrate를 SS275소재로 대체함에 따른 적층성을 평가하기 위해 Fig. 1과 같이 substrate에 5Layer의 적층을 실시하였다. 용접부의 단면 평가를 실시하기 위하여 광학현미경을 사용하여 적층 비드의 높이, 폭, 용입깊이를 측정하였다. 적층비드의 dilution을 평가하기 위하여 SEM-EDS를 이용하여 화학적 조성을 확인하였다.

3. 실험결과

3.1 공정변수에 따른 비드형성 평가

Substrate의 변화에 따라 실험 변수가 비드형상에 미치는 영향을 파악하기 위한 BOP 용접을 실시한 후 Fig. 3와 같이 에 동일 입열 조건과 같이 단면평가를 진행하였으며, 와이어 송급속도와 용접속도에 따른 비드 폭, 높이, 용입깊이를 평가하여 Fig. 2에 도시하였다. Substrate가 Inconel 718인 경우 비드 높이는

Fig. 2 Bead section analysis for experimental conditions (a) Inconel 718 substrate (b) SS 275 substrate

Fig. 3 Cross section after Bead on plate test (travel speed: 0.3m/min Wire feed speed: 9m/min) (a) Inconel 718 (b) SS 275

1.6~2.9 mm 의 변화를 보였으나, SS 275의 경우 1.9~3.8 mm가 형성되었다. 이와는 대조적으로 비드의 폭은 Inconel 718인 경우 5.2~14.8 mm, SS275의 경우 2.9~8.1 mm로 형성되었다. 용입 깊이는 Substrate

가 Inconel 718의 경우 0.5~2.2 mm, SS 275의 경우 0.44~1.9 mm으로 확인되었다. 이는 동일 입열 조건에서도 substrate로써 Inconel 718을 대신하여 SS 275 를 substrate로 사용하였을 경우 용착 된 비드의 형상이 변하는 것이 확인된다. Substrate의 변화에 따른 적층 비드 형상이 상이하게 형성되는 원인을 확인 하기 위하여 Fig. 4에 substrate의 변화에 따라 고속 촬영을 통해 촬영된 용융풀의 거동을 도시하였다. 본 실험에 사용된 용접기 TPS 3200은 단락제어를 사용하기 때문에 단락제어가 일어나는 한 주기에 해당하는 7ms 이내의 이미지를 나타내었다. 동종의 Inconel 718을 사용하였을 경우 용융풀의 시작부분에서 접촉각이 발생하지 않고 넓은 형태로 용융풀이 형성되는 것이

Fig. 4 High speed camera image during one pulse current cycle (a) Inconel 718 substrate (b) SS 275 substrate

확인된다. 하지만 substrate가 SS 275의 경우 용융풀은 모재로부터 초기 형성단계부터 높게 솟아 오르며 폭은 좁게 형성되어 있는 것이 확인된다. 이러한 용융풀의 거동의 차이가 일어난 원인은, 용융풀과 substrate와의 젖음성의 차이로 인해 나타난 것으로 판단된다. 액체로 존재하는 용융풀의 거동에서 고상인 substrate와의 부착력 보다 액체의 응집력이 강해지면 접촉각은 증가하게 되어 용융풀은 응집하게 된다. Substrate 가 Inconel 718인 경우 용융풀의 거동은 모재의 용융부와 용융된 와이어는 혼입이 이루어지는 것이 확인되지만, SS275의 경우 모재의 용융부와 혼입이 되지 않는 현상이 발생한다. 이는 SS 275에서 아크열원으로 인해 용융되는 영역은 더 넓은 면적을 가지지만 용융풀의 응집력이 더 높기 때문에 퍼지지 못하는 것으로 보여진다. 따라서 SS 275를 사용할 경우 표면장력으로 인한 젖음성 저하로 용융풀의 응축이 일어나기 때문에 Inconel 718인 경우보다 비드형상 보다 높고 좁게 형성되는 것으로 판단된다.

3.2 substrate에 따른 적층부 형상

금속 적층 제조에서 공정 중 안정적인 적층 비드 형상은 제품의 형상을 구현을 가능하게 한다. 과입열로 인하여 적층 중 적층부의 형상이 무너지거나 layer가 증가 됨에 따라 적층성이 상이하다면 제품의 형상 구현에 어려움이 발생한다. 또한 아크열원을 이용한 금속적층은 적층부 표면조도가 높은 것으로 알려져 있으며, 적층부 표면을 가공하는 공정이 요구된다. 따라서 안정적인 적층비드 형성은 적층부의 표면 조도를 최소화 한 재료소모의 감소와 제품 형상을 구현하기 위하여 유효폭의 확보는 필수적이다¹²⁾. Substrate의 변화에 따라 적층 구조물의 형성 과정을 이해하기 위하여 substrate에 변화에 따라 총 5 layer의 적층을 수행하였다. 적층 구조물의 안정적인 적층을 수행하기 위하여 각 층이 적층된 후 공냉을 통하여 상온까지 냉각을 실시하였다. Fig. 5에 적층이 진행됨에 따른 적층부 단면을 도시하였다. Substrate가 Inconel 718의 경우 안정적인 적층의 수행이 가능한 것이 확인 된다. 하지만 Substrate가 SS 275의 경우 3 Layer까지 적층비드의 폭이 증가되는 경향을 보이며 비드 폭이 증가됨에 따라 발산하는 형태의 적층부 형상이 나타난다. 하지만 4layer 이후부터 적층부의 폭이 수렴하는 것을 확인하였으며, Substrate가 Inconel 718경우의 적층부의 형상과 유사한 형태를 보인다. 이는 Substrate를 SS 275로 적용할 경우 모재로부터 3 layer를 사용할 경우 표면가공의 범위가 넓어지며 후 가공으로 인한 재료소모가 증가

Fig. 5 Crosss-section of deposition sample for increasing deposit layer

하게 됨을 보여진다. 따라서 적층을 4layer 이후를 사용하게 되면 3layer까지 적층부를 소모하게 되지만, 적층부의 유효폭을 증가시킬 수 있는 효과를 가질 수 있다. 따라서 적층부의 형상이 안정되는 구간과, 표면가공에서 발생하는 재료소모의 저감을 고려하였을 경우 적층 후 모재를 포함한 3layer의 제거가 필요할 것으로 판단된다.

3.3 적층부 희석량 평가

금속 적층 공정에서 substrate로 이종소재를 사용할 경우 적층 부에 모재 성분의 희석으로 인한 성분변화가 일어난다. 하지만 초기 층을 제외한 적층부는 이전 적층된 부분을 기초로 하여 적층이 이루어지게 된다. Fig. 5에 도시된 적층 과정을 보게 되면 층이 증가될 때 이전 층에 용입이 발생되며 이전 층의 성분이 희석된다. 따라서 적층 수 가 증가될수록 substrate성분의 희석량이 감소된다.

(a)

(b)

Fig. 6 Distribution of dilution rate for deposition direction (a) Inconel 718 substrate (b) SS 275 substrate

적층시편에 대하여 substrate부터 적층방향으로 성분 평가를 실시한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Substrate가 Inconel 718인 동종의 경우 적층 방향에 따라 성분의 변화는 관찰되지 않았다. Substrate가 SS 275인 이종의 경우 substrate에서 적층 진행방향으로 Ni, Cr 성분의 증가와 Fe성분의 감소가 확인되었다.

Fig. 6의 적층부의 성분 측정결과에서 Ni 성분의 결과값이 부분적으로 편차가 크게 나타나는 것을 확인되었다. 이는 Inconel 718 적층부에서 형성된 Nb성분의 영향으로 판단된다. Fig. 7에 적층부 단면의 SEM으로 촬영된 사진을 나타내었으며, 적층부 단면에서 수지상의 입계를 따라 Nb성분이 석출된 것을 확인하였다. Inconel 718의 용접부에서 수지상정의 입계를 경계로 Nb성분의 석출로 laves phase 및 Nb-C phase가 석출된다고 알려져 있다¹³⁾. 적층부의 입계를 따라 석출된 Nb성분의 석출물로 인하여 적층부 성분 평가에서 성분함량의 편차를 보이는 것으로 판단된다. 적층 계면의 SEM-EDS 맵핑을 통하여 적층부 내에 성분 분포가 고르게 분포됨이 확인되었다. 이는 용융풀의 유동으로 인하여 계면을 제외한 전 영역에서 고르게 분포된 것으로 보여진다 Fig. 8에 나타난 substrate와의

Fig. 7 SEM image of deposited materials

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Fig. 8 SEM-EDS mapping analysis interfacial region for SS 275 substrate specimen (a) Scanning position (b) SEM image (c) Ni component (d) Fe component (e) Cr component

계면부분의 성분 맵핑을 확인하게 되면 계면 부분에서 Ni, Cr 성분의 저하되는 것을 볼 수 있으나, 적층부에서 고르게 분포된 것을 확인할 수 있다. 층별 구간을 분류하여 성분의 평균을 계산하여 Table 3에 나타내었다. 성분의 함량 기준은 ASTM B 637에 명시된 Inconel 718의 성분표를 근거로 평가를 실시하였다. 동종 substrate의 경우 적층이 진행됨에 따라 변하지 않음을 확인 가능하였다. Substrate가 SS275의 경우 첫번째 층에서 Cr 15.65%, Ni 43.53%로 substrate성분이 다량 희

Table 3 The average chemical composition 5 layer specimen after 5 layer deposited.(wt %)

composition	Inconel 718			SS 275		
	Cr	Fe	Ni	Cr	Fe	Ni
5 layer	18.43	20.74	52.40	18.21	20.69	51.74
4 layer	18.34	20.88	52.85	18.04	20.82	52.14
3 layer	18.49	20.32	52.40	17.91	21.69	50.90
2 layer	18.57	20.76	52.62	17.56	24.16	49.29
1 layer	18.38	20.52	52.37	15.65	32.47	43.53
ASTM B 637 : Ni 50-55 %, Cr 17-21%, Fe Bal						

석이 된것으로 확인된다. 이후 두번째 층에서 Cr의 함량은 17.56%로 증가하며 Ni의 경우 49.29%로 성분기준에 미달되었다. 3번 층에서는 Ni 성분이 50.90%로 Inconel 718의 Ni 성분의 최소 기준에 만족하였다. 4번 층에서 Ni 성분의 함량은 52.14 %로 증가하는 것이 확인 되었으며, 이는 실험에 사용된 와이어의 성분에 근접한 것을 확인이 가능하다. 따라서 substrate를 SS 275를 사용하여 금속적층을 수행하더라도 3layer부터 적층구조물의 성분은 Inconel 718 허용 성분 이내로 수렴하게 되기 때문에 substrate 함께 2 layer까지 동시에 제거를 통하여 3layer 이후의 적층부를 사용하면 성분의 함량기준에 만족되는 적층 구조물의 제작이 가능하다.

4. 결 론

Inconel 718 와이어의 아크열원을 이용한 금속적층에서 substrate의 대체체로써 SS275소재로의 적용 가능성을 평가하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 적층부의 형상은 substrate를 SS 275를 적용하였을 경우 좁고 높은 형상을 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 용융풀의 젖음성의 차이로 인하여 발생된 것으로 확인되었다.

2) Substrate가 SS275인 경우의 적층부의 형상은 적층이 진행됨에 따라 적층부의 폭은 증가되고 4layer 이후 적층부의 폭은 증가되지 않음을 확인하였다.

3) 적층부의 회석량이 Inconel 718의 성분의 기준에 수렴한 구간은 3 layer 이다. 따라서 substrate를 2 layer 이전까지 제거함으로써 Inconel 718 성분의 기준은 만족하는 적층부의 제작이 가능하다.

ORCID: Tae Hyun Lee: <https://orcid.org/0000-0003-0010-972X>

ORCID: Dong Hyuck Kam: <http://orcid.org/0000-0002-4027-3973>

References

1. W. E. Frazier, Metal Additive Manufacturing, A Review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6) (2014), 1917-1928
<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
2. B. Baufeld, E. Brandl and O. Van Der Biest, Wire based additive layer manufacturing, Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6) (2011), 1146-1158
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.018>
3. E. Brandl, B. Baufeld, C. Leyens and R. Gault, Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire, comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications, *Physics Procedia*, 5 (2010), 595-606
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.087>
4. E. Brandl, A. Schoberth and C. Leyens, Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM), *Materials Science and Engineering, A*, 532 (2012), 295-307
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.10.095>
5. S. H. Mok, G. Bi, J. Folkes and I. Pashby, Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics, *Surface and Coatings Technology*, 202(16) (2008), 3933-3939
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.02.008>
6. J. J. Lewandowski and M. Seifi, Metal Additive Manufacturing, A Review of Mechanical Properties, *Annual Review of Materials Research*, 46(1) (2016), 151-186
7. A. Heralić, A.-K. Christiansson, M. Ottosson and B. Lennartson, Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements, *Optics and Lasers in Engineering*, 48(4) (2010), 478-485
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.012>
8. M. Kottman, S. Zhang, J. McGuffin-Cawley, P. Denney and B. K. Narayanan, Laser Hot Wire Process, A Novel Process for Near-Net Shape Fabrication for High-Throughput Applications, *Jom*, 67(3) (2015), 622-628
<https://doi.org/10.1007/s11837-014-1288-1>
9. P. A. Colegrove, H. E. Coules, J. Fairman, F. Martina, T. Kashoob, H. Mamash and L. D. Cozzolino, Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(10) (2013), 1782-1791
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012>
10. D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31 (2015), 101-110
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>

11. F. Wang, S. Williams, P. Colegrove and A. A. Antonysamy, Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44(2) (2012), 968-977
<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>
12. P. Kazanas, P. Deherkar, P. Almeida, H. Lockett and S. Williams, Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(6) (2012), 1042-1051
<https://doi.org/10.1177/0954405412437126>
13. G. P. Dinda, A. K. Dasgupta and J. Mazumder, Texture control during laser deposition of nickel-based superalloy, *Scripta Materialia*, 67(5) (2012), 503-506
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.06.014>