가변극성을 이용한 알루미늄 5183 와이어의 아크 적층 공정에서 EP/EN 비율의 영향 평가

황승연^{*,**} · 이태현^{*} · 김철희^{*} · 현승균^{**} · 강민정^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}인하대 신소재공학과

The Effect of EP/EN Cycle Ratio on the Deposition Characteristics of Al 5183 Aluminum Alloys Fabricated by Variable Polarity WAAM

Henry Hwang^{*,**}, Tae-Hyun Lee^{*}, Cheolhee Kim^{*}, Soong Keun Hyun^{**} and Minjung Kang^{*,†}

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

^{**}Department of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

[†]Corresponding author : kmj1415@kitech.re.kr

(Received December 26, 2019 ; Revised January 16, 2020 ; Accepted February 5, 2020)

Abstract

The present study addresses the wire arc additive manufacturing (WAAM) of Al 5183 aluminum alloy using variable polarity mode arc welding on a 16 mm thick Al 5083 substrate. The effect of the EP/EN cycle ratio on the deposition characteristics and microstructure were investigated and described. At the high EN polarity ratio condition, the roughness was enhanced and the weld beads consisted of a fine equiaxed grain. The lower hardness values measured at high EP cycle ratio conditions resulted from the high heat input which formed a columnar microstructure. The WAAM with variable polarity is beneficial for increasing the deposition rate with low heat input compared to a conventional DC arc welding source.

Key Words : Variable polarity, EP/EN cycle ratio, Wire arc additive manufacturing (WAAM), Deposition characteristics, Aluminum 5183

1. 서 론

와이어 아크 적층 공정 (Wire+Arc additive manufacturing, WAAM) 은 분말금속을 활용하는 공정에 비해 빠른 적층 속도와 저렴한 가격으로 주목되어 왔다. 그러나 상대적으로 낮은 형상 정밀도, 표면 마감 불량, 고입열로 인한 잔류 응력 및 변형 같은 문제점으로 인해¹⁾ 생산현장에서 주목을 받지 못하였다. 그러나, CMT (Cold metal transfer) 용접 전원의 개발과 GMAW의 전원 파형에 대한 연구가 진행되며 본격적으로 이를 적층에 활용한 연구가 시작되었다.

Kumar 등과²⁾ Park 등은³⁾ AC pulsed GMAW 용

접 중 극성의 방향에 따른 아크의 집중을 분석하고 입열량과의 관계에 대해 고찰하였으며, 역극성에서 입열량이 줄고 경도 값이 증가하였다고 보고하였다. 이와 같이 일반적인 용접에서는 정극성 아크의 입열 효율이 역극성인 경우보다 더 높은 것으로 알려져 있으나, 최근의 몇몇 가변 극성 아크 알루미늄 용접 연구에서는 역극성 비율이 증가할수록 입열이 증가한다는 결과가 보고된 바 있다^{4,5)}.

Horgar 등은⁶⁾ DC GMAW 를 이용하여 와이어 아크 적층을 실시하였으며, 적층시편에서 조직의 분석을 하여 고상계면과 가까운 곳에서 주상정 (Columnar grain) 이 생성되고, 고상계면에서 멀어질수록 등축정 (Equiaxed grain) 이 생성된다고 보고하였다. Zhang 등은⁷⁾ 알루

미늄 5183 와이어를 사용하여 적층하고, 적층 위치에 따른 결정립의 크기와 그에 따른 경도 값을 분석하였다. CMT 프로세스를 활용하여 WAAM 공정을 수행하고, 공정변수에 따른 조직 및 기계적 물성을 비교하는 연구결과 또한 다수 발표되었다⁸⁻¹⁰⁾. Zhang 등은¹⁰⁾ CMT, CMT-pulsed 공정을 적용하여 시험편을 제작하고, 형성된 미세 조직을 비교하였다. CMT-pulsed 공정을 적용한 경우에는 주상정 조직과 등축정 조직의 혼합조직이 확인된 반면, 가변극성 사용이 가능한 CMT-Advanced (Adv.)을 사용한 경우에는 등축정의 비율이 상대적으로 높고 적층 방향에 따른 인장응력의 이방성이 적다고 주장하였다.

이러한 연구 결과들을 종합한 결과, 가변극성을 활용한 입열량 조절로 최종 적층물의 물성을 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 발표된 연구 결과들은 공정 변화에 치중하여 CMT-Adv.의 입열량이 GMAW 등에 비해 적다는 사실을 증명하였을 뿐, 가변극성 파형을 적용하였음에도 불구하고 EP/EN 파형의 비율이 용접특성에 미치는 영향은 확인하지 않았다. 해당연구에서는 가변극성 CMT-Adv. 공정을 적용하여 적층을 진행하고 EP/EN의 비율의 변화가 비드형성 및 미세조직 구성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에서는 16 mm 두께의 Al 5083과 1.2 mm 직경의 Al 5183 와이어를 사용하여 Fig. 1에 나타난 바와 같이 비드용접(Bead on plate, BOP) 및 적층 실험을 실시하였다. 사용한 모재와 와이어의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다. 가변극성을 부여하기 위해 오스트리아 Fronius 社의 CMT-Adv. 용접기를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 작업각이 0°가 되도록 설치하였다. 용접길이는 100 mm으로 고정하였다. Table 2에 BOP 및 WAAM을 위한 용접조건을 나타내었다. EP/EN 파형의 비율($nW_{EP/EN}$)을 주요 변수로 설정하여 용

Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Chemical compositions of the substrate and filler wire (wt%)

Contents	Al 5083, 16 mm (substrate)	Al 5183, 1.2mm (filler wire)
Si	0.40	0.40
Mn	0.4-1.0	0.50-1.0
Cr	0.05-0.25	0.05-0.25
Cu	0.1	0.02
Zn	0.25	0.25
Mg	4.0-4.9	4.3-5.2
Fe	0.4	0.4

Table 2 Welding conditions applied in the BOP welding and WAAM

Variables	BOP welding	Additive manufacturing
Wire feed rate (m/min)	9	9
Welding speed (m/min)	0.3, 0.5, 0.7	0.5
EP/EN cycle ratio (EP:EN)	1:1, 5:5, 10:10, 15:15, 25:1, 17:3, 3:17, 1:25	
Layer (path)	-	5
Interlayer wait time (s)	-	20

접을 실시하였으며, 보호가스 (Ar 20 l/min), CTWD (15 mm) 및 AlMg5 (C1515 Adv.) 파형을 사용하여 진행하였다.

실험에 적용한 파형은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 양극과 음극이 교차하는 파형을 반복하는데, 한번의 주기 반복을 1 cycle로 정의하였다. 또한 극성에 무관하게 하나의 파형을 Fig. 2에 나타난 바와 같이 1 pulse로 정의하였다. 그림에 나타난 바와 같이 펄스 파형의 극성에 따른 최대 전류 및 기저 전류에는 차이가 존재한다. 조건에 따라 양극 또는 음극의 파형을 반복할 수 있는데, Fig. 3의 예시로 나타난 바와 같이 하나의 cycle를 구성하는 각 극성의 파형 비율을 $nW_{EP/EN}$ 으로 정의

(1) Short circuit current [A]	80.0
(2) Peak current [A]	244.0
(3) Droplet detachment current [A]	80.0
(4) EN*_short circuit current [A]	70.0
(5) EN_peak current [A]	176.0
(6) EN_droplet detachment current [A]	70.0

Fig. 2 Schematic diagram of CMT-advanced waveform

Fig. 3 Definition of EP/EN cycle ratio ($nW_{EP/EN}$)

하였다.

BOP 및 적층으로 제작된 시험편은 폴리싱 후 에칭하여 조직 및 젖음각을 분석하였다. 비드 표면의 거칠기는 용접방향과 평행하게 시험편을 절취한 후, 광학현미경으로 분석하여 평균높이를 제시하였다. 비드의 평균 높이는 용접시작점과 끝점으로부터 10 mm를 제외하고 임의의 5점에서 측정하여 평균값을 산출하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도계를 사용하여, 제작된 적층물을 대상으로 0.2 mm 간격으로 300 gf의 힘으로 10 s 유지시간을 설정하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 EP/EN cycle ratio 별 CMT-Adv. BOP 시험편의 단면 및 거칠기 특성

EP와 EN의 비율변화에 따른 영향을 분석하기 위해 1:25, 3:17, 17:3, 25:1 4가지 조건을 선정하였으며, 주기 내 파형 개수에 따른 영향을 보기 위해 1:1, 5:5, 10:10, 15:15의 조건을 추가로 선정하였다.

$nW_{EP/EN}$ 변수에 따른 비드 외관 및 단면 사진을 Fig. 4와 5에 나타내었다. EN의 비율이 높아지고, 주기 내 파형의 개수가 증가할수록 비드 외관에 리플이 뚜렷이 나타났다 (Fig. 4(a), (h)). EP의 비율이 증가할수록 젖음각의 평균값 또한 132.2° 에서 87.7° 까지 지속적으로 감소하는 경향성을 확인하였다 (Fig. 5 (a) - (d)). 그러나 주기 내 파형개수에 따른 젖음각의 변화는 경향성이 확인되지 않았다 (Fig. 5 (e) - (h)). EN의 비율이 증가하면 역극성 구간에서 보다 낮은 입열이 부여되기 때문에 용적의 온도가 낮아 젖음각이 증가한 반면⁶⁾, EP/EN의 비율을 고정시키고 cycle의 수를 증가시킨 경우에는 조건간의 입열량이 유사하기 때문에 젖음각에서 유의미한 결과가 도출되지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 4 Bead appearances of BOP specimen according to EP/EN cycle ratios (a) 1:25 (b) 3:17 (c) 17:3 (d) 25:1 (e) 1:1 (f) 5:5 (g) 10:10 and (h) 15:15. The wire feed rate and welding speed were 9 m/min and 0.5 m/min, respectively

Fig. 5 Macro sectional images of BOP specimen according to the EP/EN cycle ratio; (a) 3:17, (b) 17:3, (c) 25:1, (d) 1:1, (e) 5:5, (f) 10:10 and (g) 15:15. The wire feed rate and welding speed were 9 m/min and 0.5 m/min, respectively. The red letters indicate wetting angle between the substrate and the deposition material

Fig. 6 Average deposition height for the BOP specimens depending on the welding speeds and the EP/EN cycle ratios

조건별 표면 거칠기를 비교하기 위하여 $nW_{EP/EN}$ 에 따른 BOP 시험편의 평균 높이를 측정하여 Fig. 6 (a), (b)에 나타내었다. 용접속도가 증가하거나 EP 비율이 증가하는 경우에서 적층 높이가 감소하는 경향이 확인되었다. $nW_{EP/EN}$ 가 3:17 일 때 평균 높이는 5.0 mm으로 측정되었으나, 25:1 조건에서는 3.5 mm로 감소하였다. 표준 편차 또한 0.24에서 0.03으로 큰 폭으로 감소하였다. 반면, $nW_{EP/EN}$ 가 1:1 일 때와 15:15 일 때의 평균 높이가 3.7 mm과 3.9 mm으로 큰 차이를 보이지 않았다.

3.2 EP/EN cycle ratio 별 CMT-Adv. 적층시험편의 단면 및 거칠기 특성

적층용접을 시행하여 $nW_{EP/EN}$ 에 따른 비드외관 및 단면을 Fig. 7 과 같이 비교하였다. BOP 실험과 마찬가지로 동일한 8조건의 EP/EN 비율을 사용하였다. 총 5층을 쌓았으며, 수직 방향에서 바라본 비드 외관 및 단면형상은 Fig. 7, 8과 같다. EP의 비율이 증가할수록 BOP 실험과 마찬가지로 적층 높이가 감소하는 경

Fig. 7 Bead appearances in normal direction for the WAAM specimen under the variable EP/EN cycle ratio (a) 3:17, (b) 17:3, (c) 25:1, (d) 1:1, (e) 5:5, (f) 10:10 and (g) 15:15. The wire feed rate and welding speed were 9 m/min and 0.5 m/min, respectively

Fig. 8 Macro sectional images of WAAM specimens according to the EP/EN cycle ratio (a) 3:17, (b) 17:3, (c) 25:1, (d) 1:1, (e) 5:5, (f) 10:10 and (g) 15:15. The wire feed rate and welding speed were 9 m/min and 0.5 m/min, respectively

항이 나타났다. $nW_{EP/EN}$ 이 3:17 일 때 19.7 mm, 10:10 일 때 15.7 mm, 17:3 일 때 13.3 mm, 25:1 일 때 12.0 mm으로 측정되었다. 이것은 EN 비율의 증가로 인한 용적의 온도 감소에 의한 효과로 추정된다^{2,3)}. EP/EN 비율을 고정시키고 주기 내 $nW_{EP/EN}$ 을 변화시키는 경우, 1:1 일 때 16.2 mm, 5:5 일 때 15.3 mm, 10:10 일 때 15.7 mm, 15:15일 때 15.0mm으로 큰 차이가 확인되지 않았다. $nW_{EP/EN}$ 가 15:15 인 경우, 비드 표면의 거칠기가 컸음에도 불구하고 후속 적층형상에 큰 영향을 미치지 않았다.

적층시편 측면의 거칠기를 수치화하기 위하여 시편 중앙에서부터 1 mm 간격으로 적층시편의 너비를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a) 에 나타나듯, EN 비율이 증가 할수록 평균 너비 값은 줄어들고 적층시편 측벽의 편차 (Δw)는 증가하는 경향이 나타났다. 앞선 실험결과와 마찬가지로 $nW_{EP/EN}$ 가 평균 너비와 Δw 에 미치는 영향은 확인되지 않았다.

(a)

(b)

Fig. 9 Average deposition height for the WAAM specimens with the variable EP/EN cycle ratio The wire feed rate of 9 m/min and welding speed of 0.5 m/min were fixed

3.3 EP/EN cycle ratio 별 CMT-Adv. 적층 단면 조직 특성

Fang 등에⁹⁾ 의하여 전류과형에 기인한 조직 및 물성이 보고된 바 있으나, EP/EN 비율이 미세조직에 미치는 영향은 보고된 바 없다. 적층시편의 조직을 확대하여 Fig. 10에 나타내었다. $nW_{EP/EN}$ 이 3:17 과 25:1인 경우, Fig. 10 (a) 와 (b) 와 같이 입열량 차이에 의해 구성 조직의 차이가 나타났다.

$nW_{EP/EN}$ 이 3:17인 조건에서는 등축 결정립이 층과 층 사이에 분포하는 것으로 분석되었으나 (Fig. 10 (a)), 25:1인 조건에서는 주상정의 성장이 확인되었다 (Fig. 10 (b)). 역극성에서는 아크 집중이 와이어로 이루어져 용융풀 열원중심에서 고액계면까지의 온도구배가 작고³⁾, 가변극성의 사용으로 인해 용융풀이 교반되기 때문에 핵생성이 많이 일어나 등축정의 생성이 유리하기 때문으로 예측된다¹⁰⁾. $nW_{EP/EN}$ 이 1:1 과 15:15인 경우에도 구성 조직의 차이가 존재하는 것이 확인되었다. 1:1 조건에서는 주상정이 층과 층사이에 분포하였으나 (Fig. 10 (c)), $nW_{EP/EN}$ 이 15:15인 조건에서는 등축정의 분포가 우세한 것이 관찰되었다 (Fig. 10 (d)). 이를 통해 가변극성으로 인한 용융풀 교반으로 인한 효과보다, 고액계면에서의 온도구배가 조직형성에 보다 큰 영향을 미침을 예측할 수 있다.

이러한 경향은 Fig. 11에 제시한 용접방향으로 절단한 시편에서 보다 뚜렷이 관찰된다. $nW_{EP/EN}$ 이 1:1인 조건에서는 Fig. 11 (a) 와 같이 결정립의 성장이 위쪽으로 길게 이어져 있지만, 15:15 인 조건에서는 결정립의 성장이 명확히 나타나지 않았다 (Fig. 11 (b)).

Fig. 10 Microstructural images where highlighted in Fig. 8. The EP/EN cycle ratio were (a) 3:17 (b) 25:1, (c) 1:1 (d) 15:15

적층시편의 경도를 측정하여, Fig. 12에 제시하였다. EN의 비율이 증가할수록 경도 값이 증가하는 경향이

Fig. 11 Longitudinal macro sectional images of BOP specimen using differential EP/EN cycle ratio (a) 1:1 and (b) 15:15

Fig. 12 Measured average hardness of WAAM samples depending on EP/EN cycle ratio. The specimens were fabricated under 9 m/min of wire feed rate and 0.5 m/min of welding speed condition

나타났는데, 이것은 입열량이 감소함에 따라 결정립이 성장이 억제되기 때문에 미세 경도 값이 다소 증가된 것으로 판단된다⁶⁾. 경도 값의 편차는 주상정 결정립의 비율이 높은 조건으로 제작한 시험편에서 보다 크게 측정되었다. 이러한 결과를 종합하였을 때, CMT-Advanced의 변수 중 EP/EN Cycle Ratio를 통하여 입열량을 조절하게 되면 결정립 크기 및 기계적 물성 제어가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 가변극성 아크용접기를 이용하여 알루미늄 5183의 적층에 대해 연구하였다. EP/EN 파형의 비율에 따른 비드 외관과 적층시편의 표면 거칠기를 BOP 실험과 적층실험을 통해 관찰하고자 하였다. 또한 EP/EN 파형의 비율이 미세조직과 경도에 미치는 영향에 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) EP/EN 비율의 변화가 적층시편의 최종 형상에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. EN의 비율이 증가할수록 적층물의 평균 너비 값은 줄어들고 높이는 증가하였다. EP/EN 비율에 따라 비드외관의 형상이 다르게 나타났으나, 비드외관의 높이 편차가 적층 시 미치는 영향은 미미한 것으로 확인되었다. 그러나 EN의 비율이 높아질수록 적층 너비의 편차 (Δw)가 커져서 후가공 손실량 줄이기 위해서는 최적화된 파형의 설계가 필요할 것으로 판단된다.

2) EP/EN 비율의 변화가 미세조직에 영향을 미치는 것을 확인하였다. EN 비율이 증가할수록 등축정의 비율이 증가하였으며, EP 비율이 증가할수록 층간에 주상정 결정립의 비율이 증가하였다. 주상정 결정립의 비율이 증가하면 경도 값의 편차가 커지는 경향이 관찰되어, 균일한 물성을 확보하기 위해서는 등축정의 비율을 향상시킬 수 있는 역극성을 강화시킨 조건이 정극성이 주도적인 조건에 비해 유리한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원과 한국연구재단 기본연구 (과제번호: 2019R1F1A1057315) 지원을 받아 수행되었습니다.

ORCID: Tae-Hyun Lee: <http://orcid.org/0000-0003-0010-972X>
 ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>
 ORCID: Soong Keun Hyun: <http://orcid.org/0000-0002-3434-8465>
 ORCID: Minjung Kang: <http://orcid.org/0000-0003-1894-4301>

References

1. D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, Wire-feed additive

- manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 81(1-4) (2015) 465-481.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
2. R. Kumar, U. Diltthey, D. K. Dwivedi and P. K. Ghosh, Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding. *Mater. Des.* 30(2) (2009) 306-313.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.073>
3. H. J. Park, D. C. Kim, M. J. Kang and S. Rhee, The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66(5-8) (2012) 867-875.
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4371-1>
4. J. Cho, Weldability increase of aluminum by variable polarity arc. *J. Weld. Join.* 32(1) (2014) 108-111.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.1.108>
5. M. A. R. Yarmuch and B. M. Patchett, Variable AC polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminum. *Weld. J.* 86(7) (2007) 196.
6. A. Horgar, H. Fostervoll, B. Nyhus, X. Ren, M. Eriksson and O. M. Akselsen, Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *J. Mater. Process. Technol.* 259 (2018) 68-74.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014>
7. B. Zhang, C. Wang, Z. Wang, L. Zhang and Q. Gao, Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer. *J. Mater. Process. Technol.* 267 (2019) 167-176.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.011>
8. B. Cong, R. Ouyang, B. Qi and J. Ding, Influence of cold metal transfer process and its heat input on weld bead geometry and porosity of aluminum-copper alloy welds. *Rare Met. Mater. Eng.* 45(3) (2016) 606-611.
[https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)30080-7](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)30080-7)
9. X. Fang, L. Zhang, G. Chen, X. Dang, K. Huang, L. Wang and B. Lu, Correlations between Microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes. *Materials* 11(11) (2018) 2075.
<https://doi.org/10.3390/ma11112075>
10. C. Zhang, Y. Li, M. Gao and X. Zeng, Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source. *Mater. Sci. Eng. A*, 711 (2018) 415-423.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.084>