430 스테인리스강 스트립을 사용한 일렉트로슬래그 클래딩에서 용착거동에 미치는 용접공정변수의 영향 - 실험적 연구

정 재 영^{*,†} · 하 태 권^{**}

^{*}경북대학교 자동차부품소재연구소

^{**}강릉원주대학교 신소재금속공학과

Effects of Welding Parameters on the Overlay Welding Behaviors in Electroslag Cladding by using AISI 430 Stainless Steel Strip - Experimental Study

Jae-Young Jung^{*,†}, and Tae-Kwon Ha^{**}

^{*}Automobile Parts & Materials Research Center, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

^{**}Department of Advanced Metal and Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University,
Gangwon, 25457, Korea

[†]Corresponding author : jaeyjung7@gmail.com

(Received July 23, 2017 ; Revised August 17, 2017 ; Accepted September 26, 2017)

Abstract

In this study, the overlay welding behaviors were evaluated by electro-slag strip cladding process using AISI 430 stainless steel strip according to welding process parameters such as welding current, welding voltage, welding speed and polarity. The changes of the deposited metal and flux were evaluated by measuring bead width, penetration depth, deposition rate and flux consumption. The increase in welding current increased the bead width, penetration depth, flux consumption and weld metal content, but the flux / weld metal ratio decreased. Bead width, amount of weld metal decreased with increasing welding voltage. On the other hand, the penetration depth showed maximum at around 30V, and flux consumption and flux/weld metal ratio were increased. Bead width, flux consumption, amount of weld metal, flux/weld metal ratio decreased with increasing travel speed. However, the penetration depth was the maximum at 25.4cm/min. The changes of the weld metal and flux measured in this study can be generalized by using the heat input. This process was characterized in that the dilution decreased with increasing heat input. However, the amount of deposited metal and depth of heat affected zone increased with increasing heat input. It is presumed that the decrease in the dilution with increasing heat input is due to an increase in flux consumption and an increase in flux conductivity.

Key Words : Electroslag strip cladding, 430 stainless steel strip, Welding parameters, Weld metal, Flux consumption, Martensite stainless steel overlay

1. 서 론

일렉트로슬래그 클래딩 공정¹⁻³⁾(Electroslag Cladding Process)은 대형구조물의 접합에 주로 이용되는 일렉트로슬래그 용접법⁴⁾을 산업구조물의 표면피복에 적합하게 응용한 오버레이 용접공정이다. 이 오버레이 공

법은 스트립을 전극재로 이용하는 서버머지드 아크 클래딩 공정⁵⁾(Submerged Arc Cladding Process)과는 동일한 filler metal을 사용한다는 점 등을 고려하면 외관상으로는 매우 유사하다. 그러나 이들 공법간의 차이는 모재의 용입과 전극재와 플럭스의 용융을 발생시키는 방법에 있다. 일렉트로슬래그 클래딩 공정은 전도성의 용융 슬래그를 통하여 흐르는 전류에 의한 저항열

로부터 필요한 열을 얻는 반면에 서버머지드 아크 클래딩법에서는 전기적인 아크열에 의해 필요한 열량을 공급받는다. 또한 이러한 차이는 적용되는 클래딩 공법에 적합한 스트립 전극재와 플럭스의 적절한 선택에는 차이가 있다. 실제로 용착속도는 일반적으로 60mm(폭) × 0.5mm(두께)의 동일한 스트립재를 사용하는 경우에 일렉트로슬래그 클래딩공정이 약 60~75%정도 서버머지드 클래딩 공정보다 더 증가한다고 알려져 있다. 이는 용융 플럭스의 저항열을 이용하는 일렉트로슬래그 클래딩 공정이 산업적으로 더 효율적임을 보여준다.

오버레이 용접에서 용착금속의 형성속도를 나타내는 용착률과 모재와 전극재간의 혼합정도를 나타내는 희석률은 오버레이 용접에 의한 피복재의 경제성과 금속학적인 특성을 좌우하는 매우 중요한 인자들이다. 그러므로 높은 용착률과 균일한 용입의 낮은 희석률을 유지하는 것은 적절한 생산성을 위하여 중요하다. 스트립을 이용하는 일렉트로슬래그 클래딩법은 저항열을 이용하므로 다른 오버레이 용접법에 비해 용착률/희석률의 비가 매우 높기 때문에 매우 효율적인 오버레이 공법으로 알려져 있다. 일렉트로슬래그 클래딩법은 일렉트로슬래그 용접법이 발명된 시점에서 무려 50년후에 독일에서 개발되었다. 현재 일렉트로슬래그 클래딩법은 서유럽, 일본 그리고 구소련에서 널리 이용되고 있다.

특히 저가 탄소강이나 합금강을 모재로 하여 오스테나이트계 스테인레스강⁶⁻⁹⁾이나 듀플렉스 스테인레스강¹⁰⁾을 표면에 강화하여 저비용으로 고급 성능을 구현하는 경우에 많이 사용된다. 상대적으로 페라이트계나 마르텐사이트계 스테인레스강으로 서버머지드 아크 오버레이 용접은 다수 발표논문¹¹⁻¹³⁾이 있지만, 일렉트로슬래그 클래딩하는 연구논문은 많이 드물다. 다만 국내 논문중에는 조선산업의 대입열 용접에 적용하기 위한 연구가 일부 진행되기도 했다¹⁴⁾.

본 연구에서는 주로 연속주조기의 핵심부품으로 사용되는 연주 가이드롤의 오버레이 용접에 마르텐사이트계 스테인레스강에 일렉트로슬래그 클래딩법을 적용하기

위하여 용접전압, 전류, 용접속도 그리고 극성에 따른 용착금속의 두께, 용착량, 용입의 깊이, 희석률 그리고 플럭스 소모량등과 같은 인자의 변화를 측정하였다. 또한 용착금속내 화학성분에 미치는 영향이 희석률 관점에서 평가되었다. 그리고 다양하고 복잡한 용접공정변수에 따른 용착금속의 특성이 투입 열원의 크기변화에 의해 체계적으로 설명할 수 있다는 점을 고찰하게 되었다. 또한 본 연구에서 수행된 430 스테인레스강 스트립의 일렉트로슬래그 클래딩으로 얻어진 용착금속의 화학성분, 미세조직의 변화는 별도의 논문으로 보고되었다¹⁵⁾.

2. 실험방법

일렉트로슬래그 용접기의 본체는 기존 서버머지드 아크용접용 용접기에 사용되는 1,000A 용량의 Lincoln Weld사의 NA-5이었으며, 스트립을 사용하여 일렉트로슬래그 용접으로 클래딩 작업에 적합하도록 토치 및 와이어송급기를 개조하였다.

스트립 전극재는 Soudo metal사의 제품인 430 스테인레스강 스트립을 이용하였다. 실험에 사용된 모재는 연주 가이드롤에 사용되는 강종과 동일한 두께 ~ 35mm의 SCM440이며 합금성분은 스트립의 화학성분과 함께 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 0.5mm의 두께와 25mm의 폭을 갖는 430 스테인레스강 스트립을 이용하여 일렉트로슬래그 오버레이 용접조건을 도출하였다. 플럭스는 Soudo metal사의 제품으로 EST122을 대상으로 조사하였으며 소결형 플럭스이며 플럭스의 화학조성은 습식분석을 통하여 Table 2에 나타내었다.

본 연구에 적용된 용접법은 용접효율이 매우 높고 희석율이 매우 적은 일렉트로슬래그 용접법을 이용하였고 각각의 용접조건은 Table 3에 종합정리하여 나타내었다. 용접시공은 bead-on-plate형태로 수행되었으며 용접비드를 single bead 형상으로 용접을 수행하였다. 본 연구에서는 일렉트로슬래그 오버레이 용접의 최적

Table 1 The chemical compositions of SCM440 base metal and AISI 430 stainless steel strip electrode (25mm)

Element	C	Cr	Ni	V	Al	Si	Mn	N	P
SCM440	0.368	1.05	0.058	0.002	0.00484	0.247	0.794	0.0063	0.0133
STS430	0.063	15.76	0.18	0.093	0.00216	0.358	0.456	0.0523	0.0166

Table 2 The analyzed chemical compositions of flux

Compounds	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaF ₂	MgO	Na ₂ O	Others
EST122	6.96	24.85	64.92	0.02	2.21	1.04

Table 3 The electroslog strip overlay welding conditions used in this study

No.	Welding voltage (V)	Welding current (A)	Polarity	Weld speed cm/min (in/min)	Heat Input (kJ/cm ²)
1	29	600	Negative	17.78 (7)	23.49
2	29	700	Negative	17.78 (7)	27.40
4	29	800	Negative	17.78 (7)	31.32
3	29	900	Negative	17.78 (7)	35.23
5	29	1000	Negative	17.78 (7)	39.15
6	26	700	Negative	17.78 (7)	24.57
7	33	700	Negative	17.78 (7)	30.24
8	35	700	Negative	17.78 (7)	33.07
9	38	700	Negative	17.78 (7)	35.91
10	29	600	Negative	25.4 (10)	16.44
11	29	600	Negative	38.1 (15)	10.96
12	29	600	Negative	50.8 (20)	8.22
13	29	600	Positive	17.78 (7)	23.49

용접조건을 도출하기 위하여 전압, 전류, 용접속도 그리고 극성을 변화시키면서 용착금속의 폭과 두께변화, 용착량, 희석률 그리고 플럭스 소모량에 미치는 영향을 조사하였다. 이러한 용접조건에 따른 용접비드 특성변화를 조사함으로써 최적 용접조건을 도출하고자 하였다. 특히 희석률은 그 정확도를 확보하기 위하여 모재의 기준선(최초 표면)으로부터 위 및 아래에 있는 용착금속의 면적률을 측정하여 도출되었다.

3. 실험결과

3.1 전류의 영향

전류의 크기는 일렉트로슬래그 공정에서 용착물을 조절하는 가장 중요한 인자의 하나이다. 본 실험에서는 용접전류의 크기에 따른 용착금속과 플럭스 소모량의 변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 29V와 17.78cm/min (7inch/min)의 조건에서 600-1000A 범위에 걸쳐 용접작업을 수행하였다. Fig. 1는 용접전류의 크기에 따른 용착금속의 폭, 최대용입깊이, 용착량 그리고 플럭스 소모량의 변화를 측정한 결과를 도표로 나타낸 것이다. 용접비드의 폭은 전류의 크기가 증가함에 점차 증가하는 경향을 보이지만 최대용입의 정도는 약 700A까지는 다소 증가하다가 700A 이상에서는 거의 일정해지는 경향을 보인다. 또한 전류가 증가함에 따라 단위 길이당 용착금속의 양은 증가하고 플럭스 소모량도 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 단위 용착금속당 플럭스 소모율은 다소 감소하는 경향이 있다. 이 결과는 전

Fig. 1 Variations of characteristics of weld metal and flux as a function of welding current in electroslog strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 29V, 7inch/min and reverse polarity)

류증가에 따른 용착금속과 플럭스 소모량의 증가율에 있어서 상대적인 차이에 기인하는 것이다.

Fig. 2 Stereo-optical micrographs showing the cross-sectional and surface views as a function of welding current in electroslag strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 29V, 7inch/min and reverse polarity)

Fig. 2은 전류 변화에 따른 430계 스테인레스강 클래딩재의 단면 및 표면을 보여주는 사진이다. 전류가 가장 낮은 600A에서 용접한 클래딩재의 단면이나 표면이 가장 우수한 것으로 나타났다. 다만 본 정성적인 외관 평가의 기준은 대칭적이고도 균일한 용착 두께를 보이는 단면을 우수하다고 판단하였고 은빛 금속광택이 많이 유지되어 변색이 없는 표면을 우수하다고 표현하였다. 실제로 금속 표면색깔은 산화막의 두께에 따라 달라진다. Fig. 2의 사진을 보면, 상기의 조건에서 430 stainless steel strip을 SCM440 모재에 클래딩한 표면상태를 보여주는 그림이다. 단면상태는 전류에 무관하게 모두 건전한 상태이고 용접비드 표면의 산화 정도는 전류가 1000A까지 증가함에 따라 점차 증가하는 것으로 나타난다.

Fig. 3은 본 연구의 일렉트로슬래그 클래딩에서 용착 금속, 용착금속 근처의 열영향부, 모재 근처의 열영향부, 모재의 조직을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 용착금속부터 미세조직의 변화는 마르텐사이트와 페라이트 조직의 복합상, 베이나이트, 미세 펄라이트, 조대 펄라이트 조직으로 변화하였다. 각 조직의 상세한 관찰은 다른 논문에서 별도로 상세히 설명하였다¹⁵⁾.

3.2 전압의 영향

일렉트로슬래그 클래딩 공정에서 용접전압에 따른 용착금속의 특성에 관련된 정보를 얻기 위하여 26-38V 범위에서 전압을 변화시키면서 수행하였다. 전압은 일렉

Fig. 3 Optical micrographs showing the cross-sectional views of weld metals in electroslag strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (a) Deposited metal, (b) Heat affected zone 1 near by deposited metal, (c) Heat affected zone 2 near by substrate, (d) Substrate

트로슬래그 공정에서 슬래그 풀안으로 스트립전극재가 침적되는 깊이를 조절하여 결정되는 인자이다. 26V이하의 조건에서는 스트립이 모재와 달라붙는 경향이 있어 정상적인 시험이 어려웠다.

Fig. 4는 용접전압에 따른 용착금속의 폭, 용입깊이,

Fig. 4 Variations of characteristics of weld metal and flux as a function of welding voltage in electrosag strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 700A, 7inch/min and reverse polarity)

용착량 그리고 플럭스 소모량의 변화를 측정된 결과를 도표로 나타낸 것이다. 용접전압이 증가함에 따라 용접 비드의 폭이 점차 감소한다. 이 결과는 일반적인 서버 머지드 아크용접이나 기존의 일렉트로슬래그 클래딩 공법에서 전압에 따른 용접비드 폭의 변화와는 서로 상반되는 결과이다. 이 결과에 대한 이유는 현재 이해할 수 없지만 스트립 재질차이에 의한 것으로 추정된다. 또한 용입의 최대깊이는 26V와 38V의 0.58-0.59mm에 비해 29-35V의 1.15-1.48mm로 상대적으로 큰 값을 갖는다. 또한 전압이 증가함에 따라 단위 길이당 용착 금속의 양은 감소하고 플럭스 소모량은 소량 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 단위 용착금속당 플럭스 소모율은 다소 증가한다. 용접전압과 용입깊이와 관계는 다른 결과와는 달리 직선적인 관계를 갖지 않는다. 이 결과는 주어진 조건하에서 용입이 최대가 되는 용접전압이 존재함을 의미한다.

Fig. 5는 전압 변화에 따른 430계 스테인레스강 클래딩재의 단면 및 외관상태를 보여주는 사진이다. 전압이 가장 낮은 26V에서 용접한 클래딩재의 표면이 가장 우수한 것으로 나타났다. 29V이상의 단면은 26V의 경우와는 달리 균일한 용착 두께를 보이는 영역이 적어졌다. 그리고 용접전압이 증가함에 따라 반구의 물방울 모양으로 변화함을 알 수 있었다. 용접비드 외관은 전압이 38V까지 증가함에 따라 표면산화의 정도가 점차 짙어지는 것으로 나타났다.

Fig. 5 Stereo-optical micrographs showing the cross-sectional and surface views as a function of welding voltage in electrosag strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 700A, 7inch/min and reverse polarity)

3.3 용접속도의 영향

Susan Pak et.al.⁶⁾은 용접속도에 따른 오스테나이트계 스테인레스강 용착시 페라이트 분율, 경도, 미세조직변화와 debonding test를 수행하였으나 본 연구에서처럼 용접공정 변수에 대한 용착금속과 플럭스 소모량의 변화는 보고하고 있지 않다. 일렉트로슬래그 클래딩 공법에서 용융 슬래그 풀과 용융 스트립사이의 충분한 접촉이 있을 때만 안정한 작업이 가능하다. 용접속도에 따른 용착금속의 특성과 플럭스 소모량의 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 용착금속의 폭은 용접속도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 매우 뚜렷하게 나타나며 용입의 깊이는 25.4cm/min(10inch/min)에서 크게 증가하다가 그 이상에서는 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 한편 단위 길이당 용착금속의 용착량은 용접속도가 증가함에 따라 크게 감소하며 플럭스 소모량도 함께 감소한다. 이로 인하여 단위 용착금속당 플럭스 소모율은 다소 완만한 감소를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 용접속도가 17.78cm/min(7inch/min)에서 50.8cm/min(20inch/min)으로 증가함에 따른 용접비드의 단면을 관찰한 사진을 보여준다. 용접속도가 다소 낮은 17.78-25.4cm/min(7-10inch/min)에서 건전한 표면 상태와 비드 형상을 보여주고 있다. 그러나 38.1-50.8cm/min(15-20inch/min)의 용접속도에서는 표면이 매우 거칠 뿐만 아니라 표면산화가 다소

Fig. 6 Variations of characteristics of weld metal and flux as a function of welding velocity in electroslog strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 29V, 600A and reverse polarity)

Fig. 7 Stereo-optical micrographs showing the cross-sectional and surface views as a function of welding velocity in electroslog strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 29V, 600A and reverse polarity)

발생하고 비드 형상도 매우 불규칙적으로 왜곡되어 있음을 관찰할 수 있다. 또한 38.1-50.8cm/min(15-20inch/min)에서 제조한 시편은 undercut이 발생하는 경향이 매우 뚜렷하다. 매우 빠른 용접속도에서는 스트립과 가열되는 슬래그와의 접촉이 불충분하여 산발적인 아크발생과 공정 불안정성의 결과를 초래함을 알 수 있다. 또한 파잉의 용접속도는 용착금속의 두께를 크게 감소시킬 뿐만 아니라 undercutting을 유발하는 단점이 있다. 반면에 너무 느린 용접속도에서는 wetting angle이 너무 급하여 슬래그의 혼입이 용착금속에서 발생할 소지가 높지만, 본 연구범위에서는 관찰되지 않았다.

3.4 극성의 영향

용착금속의 특성과 플럭스 소모량은 또한 전류의 극성에 의해서도 서로 다른 거동을 보이는 것으로 잘 알려져 있다. Fig. 8은 극성변화에 따른 용접비드의 단면을 관찰한 사진이다. 정극성인 경우의 용접비드 폭은 역극성에 비해서 상대적으로 좁아질 뿐만 아니라 용착층의 두께도 증가한다. 그리고 용입깊이도 정극성의 경우가 다소 증가한다.

단위 길이당 용착되는 금속량은 역극성(1.36kg/m)에 비해 정극성(1.62kg/m)인 경우가 보다 크며 플럭스 소모량도 역극성(0.85kg/m)에 비해 정극성(0.92kg/m)이 보다 크다. 그러나 단위 용착금속량당 플럭스 소모율은 0.625에서 0.568로 역극성의 경우가 다소 우수함을 알 수 있다. 그러나 종합적으로는 역극성이 일렉트로슬래그 클래딩에서 보다 더 우수하였다.

4. 고 찰

4.1 용착거동의 투입 열원에 의한 일반화

상기 다양한 용접조건(용접전류, 전압, 용접속도 그리고 극성)에 따른 용착금속 및 플럭스 소모량은 각각

Fig. 8 Stereo-optical micrographs showing the cross-sectional views as a function of polarity in electrosag strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (Other welding variables are 29V, 600A, and 7inch/min)

의 용접조건 변수에 독립적으로 의존하는 것처럼 보인다. 그러나 이러한 변화는 투입 열원(heat input)이라는 통합변수를 이용하여 용착금속과 플럭스 소모량의 변화를 일반화시킬 수 있었다. 여기서 스트립 클래딩에서 투입 열원은 하기와 같이 정의된다.

$$HeatInput(kJ/mm^2) = A \cdot V \cdot 60 / S \cdot 1000 \cdot W \quad (1)$$

단 A는 전류이고 V는 전압, S는 용접속도(mm/min), W는 스트립 폭(mm)이다¹⁶⁾. 용착금속의 용착량과 플럭스 소모량은 Fig. 9(a)(b)에서 보여주는 바와 같이 heat input이 증가함에 따라 플럭스 소모량은 점차 증가하고 용착량은 일정수준까지 증가하다가 비슷하거나 감소하는 경향을 보여준다. 반면에 단위 용착금속당 플럭스 소모율은 투입 열원크기가 증가함에 따라 일정 범위까지는 큰 증가를 보이지 않다가 약 30kJ/cm²에서부터 더 많이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 플럭스 소모율의 변화 경향은 투입 열원크기 증가 효과가 상쇄되는 이유와 연결될 수 있다. 한편 용입깊이의 변화는 Fig. 9(c)(d)에서 보여주는 바와 같이 투입 열원의 영향이 상대적으로 약하지만 거의 일정하거나 다소 감소하는 것으로 보여진다. 반면에 용착금속의 두께는 투입 열원크기가 증가함에 따라 증가하는 경향이 명백하다. 그리고 Fig. 10에서 투입 열원 증가에 따라 희석률은 감소하고 HAZ부는 증가한다는 사실을 보여준다. 이와 같이, 투입 열원이라는 통합지표는 상기의 다양한 용접 공정 변수에 대한 연구결과를 전체적으로 경향을 파악할 수 있도록 잘 표현되고 있다는 사실을 보여주고 있다.

4.2 투입 열원크기와 희석률의 역비례 관계

Fig. 9, 10의 결과에서 투입 열원이 증가함에 따라 용착량과 용착금속 두께가 증가하고 플럭스 소모량이 증가하고 HAZ부 증가는 일반 아크용접에 일반적으로 받아들이고 있는 사실이다. 다만 투입 열원 크기가 증가함에 따라 용입 깊이가 완만하지만 감소하고 희석률은 크게 감소한다는 사실은 받아들이기 어렵다.

그러나 일렉트로슬래그 용접공정에서 본 논문의 연구 결과처럼 투입 열원크기와 희석률의 역비례 관계를 보고하고 있는 논문이 있다¹⁷⁾. 그리고 HAZ(Heat Affected Zone)부 깊이는 본 연구결과와는 다르게 투입 열원크기와 거의 무관하다는 보고를 하고 있다. 이외에 일반적인 문헌에서는 투입 열원크기와 희석률에 대한 관계가 무관하다거나 명확하게 설명하지 않고 있다¹⁸⁻¹⁹⁾. 또 다른 리뷰논문에서는 Arc 파워크기나 filler metal feed rate로 표시하여 희석률이 투입 열원과 직접적인 상관관계가 있는 것으로 나타내었다²⁰⁾. 다시 말해서, 일반

Fig. 9 Variations of characteristics of weld metals and flux as a function of heat input in electroslog strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip. (a) Flux & weld metal weight, (b) Flux/weld metal ratio, (c) Penetration depth, and (d) Weld metal thickness

Fig. 10 Variations of dilution(a) and HAZ depth(b) of weld metals as a function of heat input in electroslog strip cladding by using an AISI 430 stainless steel strip

아크 용접에서는 투입 열원크기가 증가하면 희석률도 증가하는 것으로 보고하고 있다.

Fig. 10의 결과는 일반적인 서버머지드 아크 용접에서 나타나는 경향과는 반대의 결과로써 실제 오버레이

작업에서는 회석을 저감과 용착률 증가를 동시에 달성할 수 있다는 측면에서 산업적으로는 매우 고무적인 결과이다.

그러나 이에 대한 가능한 설명은 투입 열원이 어디로 갑자기 사라지지 않는다는 사실 즉 에너지 보존의 법칙을 근거로 정성적인 설명이 가능할 것으로 보인다. 앞서 언급한 투입 열원의 증가에 따라 용착량과 용착금속 두께, 플럭스 소모량, HAZ부의 증가가 동반되는 현상은 일반적인 아크 용접에서 나타나는 경향과 동일함을 확인할 수 있다. 그러나 만약 투입 열원이 증가할수록 아크 용접에서 나타나는 투입 열원의 집중화 현상 해소를 증가시키는 방향으로 진행된다면 회석물이나 용입깊이가 점차 감소될 수 있을 것으로 예측된다. 다시 말해서 아크 오버레이 용접은 투입 열원이 filler metal에 집중되어 용착금속 형성에 기여하고 일렉트로슬래그 클래딩공정은 투입 열원이 전도성 플럭스 용해에 기여하는 차이에 기인한다는 사실과 연관된다고 해석할 수 있다. 그러한 일렉트로 슬래그 클래딩 공정이 보다 투입 열원의 분산도가 좋을 가능성은 가해진 열원이 플럭스 용해에 먼저 소모되고 용해된 플럭스의 저항열 또는 플럭스 용융체의 열전달에 의해 스트립의 용해로 이어지는 공정 단계와 관련이 있을 것으로 보인다.

그 첫 번째 증거는 Fig. 9(c)에서 보여주는 것처럼 투입 열원크기 증가에도 불구하고 용입깊이가 작지만 감소한다는 것인데 이 사실은 투입 열원이 증가함에 따라 용착량은 증가함에도 불구하고 아크 오버레이 용접처럼 집중화된 형태로 모재를 파고들지 않는다는 사실을 보여준다. 그 두 번째 증거는 Fig. 9(b)에서 보여주는 것처럼 투입 열원증가와 함께 전도성 플럭스 소모량이 증가한다는 것이고 이는 투입 열원이 용착금속 형성에 직접 기여하지 않는다는 사실을 보여준다. 따라서 일렉트로슬래그 클래딩 공정은 아크 용접과는 달리 투입 열원이 증가해도 전도성 플럭스의 우선적인 용해로 인하여 충분한 열 분산을 유도하기 때문으로 판단된다. 그리고 투입 열원이 증가함에 따라 플럭스 소모량이 증가함으로써 투입 열원의 균일한 분산을 가속화하는데 기여한다고 볼 수 있다.

또 다른 원인은 투입 열원 증가가 플럭스 온도 상승과 비례할 것이므로 플럭스의 열전도도는 증가하지만 플럭스 저항열 발생은 작아져 투입열원이 증가함에 따라 용입 깊이나 회석률이 감소하는 것으로 판단된다^{21,22)}. 종합적으로 투입 열원이 증가함에도 불구하고 회석률이 낮아지는 이유는 높은 투입열원에서는 플럭스 소모량이 증가하는 동시에 플럭스의 저항열이 작아지기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 430계 스테인레스강 스트립을 이용하여 용접전압, 용접전류, 용접속도 그리고 극성등과 같은 여러가지 용접공정 변수에 따라 일렉트로슬래그 오버레이 용접하여 용착금속과 플럭스 소모량에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 용접전류를 600-1000A 범위에서 증가시키면 용착금속의 폭, 용입깊이, 용착량 그리고 플럭스 소모량은 증가하는 경향을 보인다. 특히 최대용입 값은 약 700A까지는 다소 증가하다가 700A 이상에서는 거의 일정해진다.

2) 용접전압을 26-38V 범위에서 증가시키면 용착금속의 폭, 용착량은 감소하고 플럭스 소모량은 다소 증가하지만, 용입깊이는 약 30V 근처에서 최대치를 보인다.

3) 용접속도를 17.78cm/min(7inch/min)에서 50.8cm/min(20inch/min)에서 증가시키면 용착금속의 폭, 용착량, 플럭스 소모량은 감소하고 용입깊이는 증가하다가 감소하거나 일정해진다. 그리고 용접속도가 다소 낮은 17.78-25.4cm/min(7-10inch/min)에서 건전한 형상을 보여줬으나 38.1-50.8cm/min(15-20inch/min)의 용접속도에서는 비드 형상이 매우 비정상적으로 불규칙하고 회석률도 크게 증가한다.

4) 정극성인 경우, 역극성 대비 용접비드 폭은 상대적으로 좁아지고 용착층의 두께와 용입깊이는 상대적으로 증가한다. 그러나 단위 용착금속량당 플럭스 소모율은 0.625에서 0.568로 역극성의 경우가 우수하며 종합적으로도 더 우수하다.

5) 용착금속과 플럭스 소모량은 투입 열원(heat input)이라는 통합변수를 이용하여 일반화시킬 수 있었다. 특히 회석률은 투입 열원의 크기가 증가함에 따라 감소하는 특징을 보이고 HAZ부 깊이는 증가한다. 실제 오버레이 작업에서는 회석을 저감과 용착률 증가를 동시에 달성할 수 있다는 측면에서 산업적으로는 매우 고무적인 결과다.

Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부 과제지원으로 이루어졌으며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. S.G.Forsberg, Resistance Electroslag (RES) Surfacing, *Welding J.*, 64(8) (1985), 41-48
2. Y.K.Oh, J.H.Devletian, and S.J.Chen, Low Dilution Electroslag Cladding for Shipbuilding, *Welding J.*, 69(8) (1990), 37-44
3. Thakare Niraj S, Ram Yadav, Electro Slag Strip Cladding

- Process, *Int'l J. of Modern Engineering Research*, 4 (2014), 60-64
4. B.E.Paton, D.A.Dudko, K.A.Yushchenko, I.I.Lychko, and I.I.Sushchuk-Slyusarenko Electroslag welding: A status report, *Welding J.*, 76(12), (1997) 51-58
 5. John Joseph Barger, Apparatus and method for submerged arc strip cladding of metallic work pieces, US Pat. No. 4027135A, (1975)
 6. Susan Pak, Solveig Rigdal, Leif Karlsson and Ann-Charlotte Gustavsson, Electroslag and submerged arc stainless steel strip cladding, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 45(1) (1998), 41-47
 7. M. F. Gittos, Disbonding of Austenitic Stainless Steel Cladding Following High Temperature Hydrogen Service, *Welding in the World*, 52(3-4) (2008), 54-67
 8. N. Venkateswara Rao, G. Madhusudhan Reddy, and S. Nagarjuna, Weld overlay cladding of high strength low alloy steel with austenitic stainless steel - Structure and properties, *Materials and Design*, 32 (2011), 2496-2506
 9. V. V. Satya Prasad, and G. Madhusudhan Reddy, Microstructure and Mechanical Properties of Electroslag Strip and Explosively Clad Low Alloy Steel: Stainless Steel Joints, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65(2) (2012), 135-143
 10. L. Karlsson, Welding duplex stainless steels - A review of current recommendations, *Welding in the World*, 56 (2012), 65-76
 11. Jae Young Jung, Eung Ryul Baek, Sang Ho Ahn, Seong Hun Choo, Sung Hak Lee, and Nack Joon Kim, Effects of C and Cr on the As-Welded Structures and Mechanical Properties of Fe-(12-17)%Cr-(0.19- 0.32)%C Hardfacing Stainless Steels, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 34(10) (1996), 1321-1332 (in Korean)
 12. Jae Young Jung, Eung Ryul Baek, and Sang Ho Ahn, Microstructural Change of Hardfacing Fe-Cr-Ni-C Stainless Steels during Thermal Cycling Fatigue, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 36(3) (1998), 320-328 (in Korean)
 13. Jae Young Jung, Hwan Jin Sung, and Sang Ho Ahn, Thermal Cycling Fatigue Behavior of Hardfacing Heat-Resistant Stainless Steel for Continuous Caster Rolls, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, 36(1) (1998), 33-43 (in Korean)
 14. Ju-Yong Park, Woo-Hyeon Choe, A Study on the Development of High Deposition Automatic Vertical Welding of Erection Stage in Shipbuilding, *J. of Welding and Joining*, 26(5) (2008), 66-73 (in Korean)
 15. Jae Young Jung and Tae Kwon Ha, The Changes of Chemical Composition and Microstructure in Electroslag Cladding Overlays by using AISI 430 Stainless Steel Strip, *J. of Welding and Joining*, in print (2017) (in Korean)
 16. Metrode Products Limited, *Technical Brochure*, Strip Cladding Profile, Nov. (2010), 1-18
 17. W. S. Ricci and T. W. Eagar, A Parametric Study of the Electroslag Welding Process, *Welding Research Supplement*. Dec. (1982), 397s-400s
 18. A. C. Hunt, A. O. Kluken and G. R. Edwards, Heat Input and Dilution Effects in Microalloyed Steel Weld Metals, *Welding Research Supplement*. Jan. (1994), 9s-15s
 19. Hari Om and Sunil Pandey, Effect of heat input on dilution and heat affected zone in submerged arc welding process, *Sadhana*. Dec. 38(6) (2013), 1369-1391
 20. John N. DuPont, ASM Handbook, Volume 6A, Welding Fundamentals and Processes, T. Lienert, T. Siewert, S. Babu, and V. Acoff, ed., ASM International, (2011), 115-121
 21. J.D. Lore, Electrical Conductivity Measurements of Molten-salt Fluxes from an Electroslag Remelting Process, Oak Ridge Y-12 Plant, Jul. (1974)
 22. Yanwu Dong, Zhouhua Jiang, Yulong Cao, Dong Hou, Lianke Liang and Jichao Duan, Effective Thermal Conductivity of Slag Crust for ESR Slag, *ISIJ International*, 55(4) (2015), 904-906