

마르텐사이트계 경화 육성용접부의 희석을 해석을 통한 Cr함량 예측에 대한 연구

김 봉 훈^{*,†} · 김 춘 환^{**}

^{*}대구대학교 기계·자동차공학부

^{**}대구대학교 대학원 기계공학과

Prediction of Cr Content in the Martensitic-hardfaced Weldment Utilizing Dilution Rate Analytically Estimated

Bong-Hun Kim^{*,†} and Chun-Hwan Kim^{*}

^{*}Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

^{**}Dept. of Mechanical Engineering, Graduate school, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

[†]Corresponding author : bhkim@daegu.ac.kr

(Received August 29, 2014 ; Revised December 8, 2014 ; Accepted December 17, 2014)

Abstract

High-temperature corrosion resistance of martensitic-hardfaced weldment is generally evaluated by the Cr content depending on dilution rate. Present study used a commercial program(SYSWELD) applying three-dimensional heat flow analysis to predict temperature distribution of weld. Configuration of weld bead can be determined by the contour of melting temperature and simultaneously dilution rate is calculated to predict Cr content. Experimental study also has been conducted to measure Cr content of harfaced surface welded by FCAW. Results indicated that computational results were well matched with those obtained from experiments.

Key Words : Hardfacing, SYSWELD, FCAW, Dilution rate, Corrosion resistance, Chromium content

- 기호설명 -

A	: Area [mm ²]
D	: Dilution rate [%]
n	: Pass Number
$P(i)_{WM,n}$: Property of weld metal
$P(i)_{BM,n-1}$: Property of base metal
$P(i)_W$: Property of welding wire

1. 서 론

경화 육성용접이란 내마모 성능과 내식성이 떨어지는 모재의 표면에 해당 특성을 보강한 용접재료를 균일하게 용착시켜 재료의 표면성질을 향상시키는 표면처리

방법이다. 제철, 화학, 시멘트, 제지설비 등 산업 전반에 널리 이용되고 있으며¹⁾, 본 연구와 관련하여 제철소 압연롤의 경우 최종표면층의 Cr함량을 관리함으로써 마르텐사이트계 스테인레스강의 특성이 확보되도록 용접 시공을 실시하고 있다.

경화 육성용접의 희석율과 Cr함량에 대한 연구는 주로 실험에 의존하여 왔다. Han등²⁻³⁾은 용접전류, 전압의 변화에 따른 희석율과 스패터 등의 비드형상 및 육성용접 특성에 대한 연구를 하였다. 실험적인 방법을 이용한 Cr함량 확인은 많은 시간과 비용이 소요된다. 그러나 이러한 문제점을 개선할 수 있는 해석방안에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 SYSWELD⁴⁾를 이용한 용접부의 열유동 모델링을 통하여 용접비드형상을 설정하고 경화

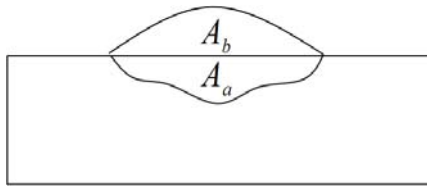


Fig. 1 Graphical representation of dilution rate

육성용접부의 희석율과 용접층에 따른 Cr함량을 추정할 수 있는 예측 방법을 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 희석율

희석율은 Fig. 1에 도시된 것처럼 모재와 용접부의 혼합된 정도를 나타낸다. 식(1)의 D 는 모재에 대한 희석율을 나타낸 것으로, 용접금속 총면적(A)에 대한 모재층 용융부(A_a) 면적비로 정의된다⁵⁾.

다층용접이 이루어지면 용접금속의 물성(밀도, 열전도도, 비열, 크롬함량 등)은 패스(n)에 따라서 식(3)으로 표시할 수 있다^{6,7)}. $P(i)_{BM,n-1}$ 는 이전 용접패스의 용접금속의 물성을 나타내며 $P(i)_W$ 는 용접부의 물성을 나타낸다. 결과적으로 $P(i)_{WM,n}$ 은 희석율에 따라서 특정 용접패스에서 해당 용접금속의 물성을 나타낸다.

$$\text{희석율}(D) = \frac{A_a}{A_a + A_b} \times 100 \quad (1)$$

$$A = A_a + A_b \quad (2)$$

$$P(i)_{WM,n} = P(i)_{BM,n-1} \times D_n + P(i)_W \times (1 - D_n) \quad (3)$$

$i=1$: 밀도 [kg/m³]

$i=2$: 열전도도 [W/m·K]

$i=3$: 비열 [J/kg·K]

$i=4$: Cr함량 [%]

2.2 물성 추정

경화 육성용접에서는 용접부의 성분과 모재의 성분이 희석되어 용착금속에는 마르텐 사이트계 합금이 형성되며 용접해석에 영향을 주는 열물성(열전도도, 비열, 밀도)은 희석율에 따라서 변화 될 수 있다. 합금성분의 정확한 열물성을 적용하기 어렵기 때문에 각 패스별 물성은 모재인 SCM440의 물성값과 용접부 성분인 마르텐사이트계 스텐레스강의 물성값을 희석율에 따라서 선

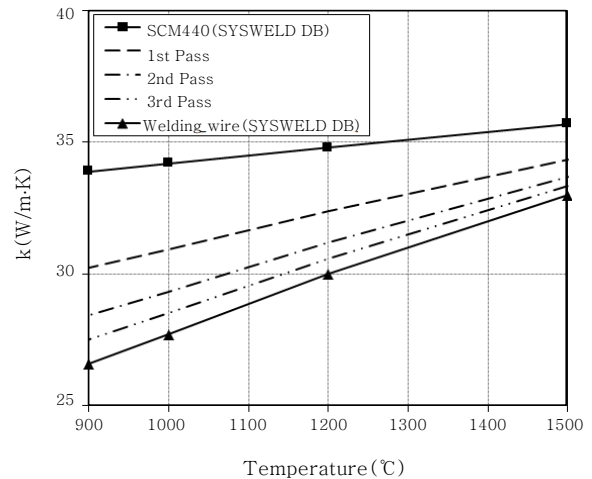


Fig. 2 Thermal conductivity versus temperature for each pass

형적으로 근사한 식(3)을 사용하여 추정하였다. 일반적인 오버레이 용접에서 희석율은 15- 40%를 제시하고 있다¹⁾. 고온 내마모성을 요구하는 압연롤 경화 육성용접의 경우 기존 현장에서 사용하는 롤의 비드형상을 분석한 결과 50%정도의 수치를 적용하였다.

Fig. 2는 모재 및 용접부와 식(3)을 사용하여 추정한 용접패스별 온도에 따른 열전도도 양상을 나타내고 있다. 용접부(STS410기준)과 모재(SCM440)의 물성값은 온도에 따라 선형적으로 증가되는 특성을 나타낸다. 용접부와 용접패스의 물성값을 비교해 보면 900°C에서는 4 [W/m·K]의 차이를 보였으며 용융온도인 1500°C에서는 1.3 [W/m·K]으로 차이가 줄어들며 고온영역으로 갈수록 물성값의 차가 작아지는 것을 볼 수 있다. 다른 물성인 비열의 경우에도 열전도도와 동일한 경향을 보였으며 1500°C에서 모재가 용접부보다 70 [J/kg·K] 더 큰 값을 나타내었다. 열전달 해석에서 열전도율(k)의 열용량(ρc_p)에 대한 비를 나타낸 열확산율(α)은 열물성치의 영향을 확인할 수 있으며 그 식은 다음과 같다⁸⁾.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4)$$

용접비드 형상을 결정하는 고온(1500°C)영역의 열확산율 계산 결과 모재 60.4×10^{-7} [m²/s]에서 첫 번째 패스 64.6×10^{-7} [m²/s], 두 번째 패스 66.9×10^{-7} [m²/s], 세 번째 패스 68×10^{-7} [m²/s], 용접부 68.2×10^{-7} [m²/s]으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 고온영역에서 열확산율의 증가는 패스가 증가할수록 고온영역이 커질 것으로 예측할 수 있다.

3. 실험 및 해석 방법

회석을 및 Cr함량 산정과 관련하여 실험과 해석 (SYSWELD 예측) 방법을 Table 1과 같이 분류하였다. 회석율 산정은 먼저 실험과 SYSWELD 예측 모두 i-solution⁹⁾에서 실험 시편 및 해석결과 이미지를 치수 보정 한 후 측정 기능을 이용하여 비드형상을 측정하여 이미지의 픽셀당 면적을 구하였다. 용접금속의 총면적 (A)과 모재측 용융부 면적(A_a)를 측정한 후 식(1)을 사용하여 회석율을 계산하였다. 실험에서 Cr함량 산정은 식(3)을 이용하여 산정하는 방법(M1)과 X선-형광 분석기(XRF)를 이용한 측정¹⁰⁾하는 방법(M2)을 사용하였다. 해석에서 Cr함량 산정은 SYSWELD로 예측된 회석율을 식(3)에 대입하여 계산하는 방법(M3)을 적용하였다.

실험용 시편을 제작하기 위하여 모재는 SCM 440 재질의 환봉시편($\varnothing 50\text{mm} \times 250\text{mm}$)을 사용하였으며 용접봉은 $\varnothing 1.2\text{mm}$ 마르텐사이트계 플럭스코드 와이어(AWS A5.22 E410NiMoT-4)를 사용하였다. 모재와 용접봉의 금속성분은 Table 2와 3에 제시되어 있다.

3.1 실험방법

실험에 필요한 장비는 Fig. 3과 같이 자동용접 장치, 턴테이블 등이며, 350A급 GMAW용접기로 보호가스



Fig. 3 Experimental setup

Table 4 Welding conditions

Pass	Current (A)	Voltage (V)	Rotational speed (rpm)	Wire feeding speed (mm/s)
1st	230	25	1.39	115
2nd	210	25	1.28	111
3rd	210	25	1.16	111

(CO₂ 20%, Ar 80%)를 사용하여 실험을 실시하였다. 실험조건은 Table 4와 같으며 패스별 회석율 변화를 확인하기 위해 용접 시편은 Fig. 4와 같이 제작하였다. 두 번째 패스부터는 굴곡진 형상을 가진 이전 용접패스에 용접이 이루어지며 용접 시 풀이 모여 흘러내릴 수 있기 때문에 입열량을 줄여서 적용하였다. 턴테이블에 모재를 고정한 후 자동이송장치를 이용하여 용접 비드 피치가 9-10mm 간격으로 2-3mm 오버랩 되도록 용접하였으며 층간 온도는 300°C이하를 유지하였다. 연속 용접 시 시편채취 및 비드형상 관찰이 어려워 그 용

Table 1 Meanalysis and experiment

No.	Classification	Method	
		Dilution (%)	Cr(%)
M1	Experiment	Weld bead i-solution measurement	Analytical calculation Eq.(3)
M2	Experiment		XRF measurement
M3	SYSWELD Prediction	Prediction of bead i-solution measurement	Analytical calculation Eq.(3)

Table 2 Chemical composition of wire (AWS A5.22 E410NiMoT-4)

원소	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
함량 (%)	0.04	0.23	0.36	12.2	4.1	0.7

Table 3 Chemical composition of base metal (SCM440)

원소	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
함량 (%)	0.41	0.25	0.73	0.03	0.03	1.05	0.23

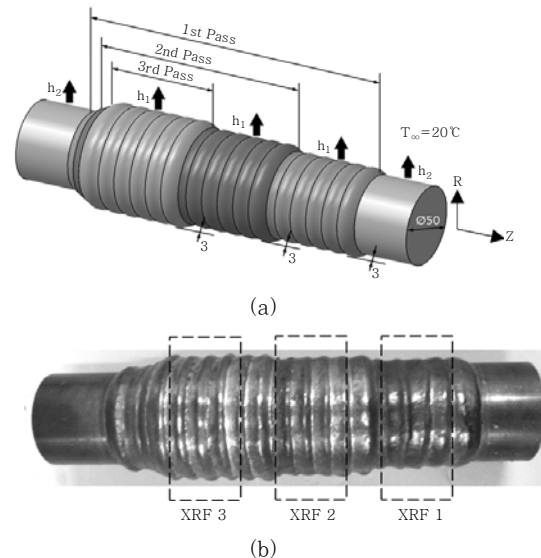


Fig. 4 Schematic model: (a) SYSWELD analysis (b) Experiment

이성을 위하여 연속용접을 하지 않고 한 회전씩 단속 용접을 실시하였다.

회석을 산정 및 XRF 측정 시편은 평균적인 실험결과를 얻기 위하여 Fig. 4의 (b)와 같이 각 패스에서 두 번째 회전 비드부터 25mm영역을 시편으로 사용하였다. 첫 번째 패스의 반경방향 단면을 보면 Fig. 5의 (a)와 같이 모재 측 용융부(A_a)가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이를 토대로 회석을 산정을 위한 면적 측정위치로 중간지점인 B영역의 축방향 단면을 분석하였다. 원주 방향의 용접비드 단면을 선명하게 관측하기 위하여 나이탈(3%질산+에탄올)로 부식 시킨 후 Fig. 6과 같이 i-solution을 이용하여 비드 폭 22mm 영역의 모재측 용융부(A_a) 및 비드 육성부(A_b) 면적을 측정하였다. XRF측정용 시편은 Fig. 5의 (a)에서 C지점의 비드 육성부(A_b)를 반경방향으로 1-2mm 가공하여 평면 3포인트에 대하여 Cr함량을 측정하였다.

3.2 해석 방법

SYSWELD를 이용하여 회석율을 산정하기 위해 비

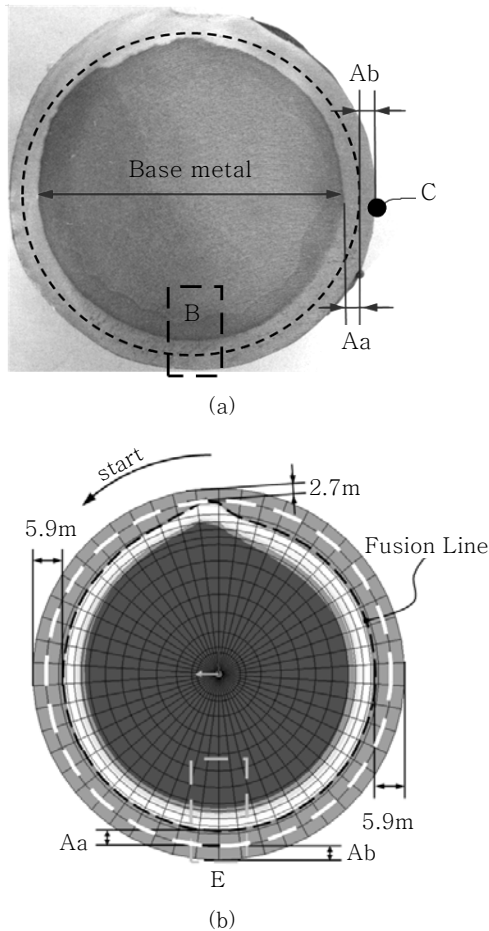


Fig. 5 Location of test section : (a) Experiment (b) SYSWELD prediction

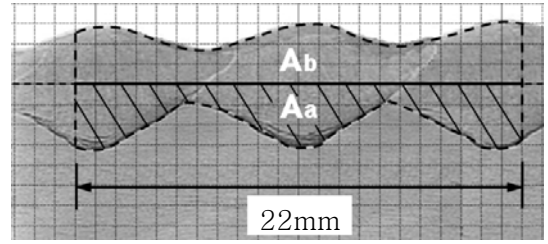


Fig. 6 Area measurement of bead using i-solution

드형상을 예측하여 해석에 적용하였다. 비드형상 예측은 Fig. 7에 나타난 변수에 대한 시행착오법을 적용하였다. 그 방법은 각 패스의 비드폭(W)과 비드 육성 높이(h_b)를 가정하여 모델링한 후 메시를 나누어 3D 모델링을 하였다. 3D 모델링의 비드와 모재부에 물성값을 입력해 주고 경계조건(용접속도, 표면 냉각조건)과 열원변수, 입열량을 입력하여 주면 조건에 따른 온도분포 결과를 얻을 수 있다. 모델에 입력된 물성값은 Fig. 2와 같이 식(3)을 이용한 물성산정 과정을 통해 얻어진 데이터와 SYSWELD에 내재된 물성 데이터를 적용하였다. 경계조건은 표면 전체에 복사열손실이 적용되고 있으며, Fig. 4와 같이 용접이 이루어지는 부분에는 강제대류($h_1 = 50 \text{ W/m}^2\text{C}$)를 그 외 부분에는 자연대류($h_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{C}$)를 적용하였다¹¹⁾. FCAW 용접부의 비드형상을 예측하기 위한 열원은 3D 원뿔형 가우스 모델¹²⁾을 적용하였으며 열원의 윗부분 폭과 아랫부

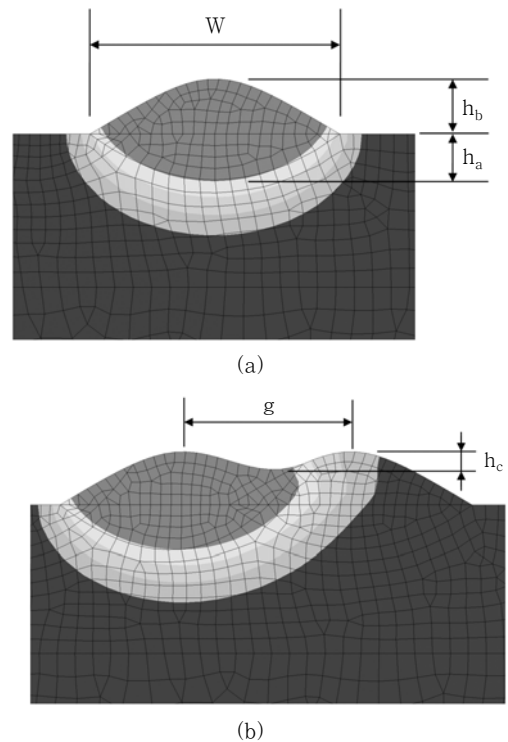


Fig. 7 Geometric parameters to configure overlapped bead in SYSWELD analysis : (a) 1st pass 1st-turn, (b) 1st pass 2nd-turn

분 폭, 열원깊이를 입력하였다. 변수분석 방법은 Kim 등¹³⁾이 제시한 열원모델의 변수분포 변화법을 적용하였다. 입열량은 Table 4의 조건을 적용하였으며, 입열량 계산은 전압과 전류의 곱을 용접속도로 나누어 주어 구하였으며 비드 간 예열온도는 300°C로 일정하게 유지하는 조건을 설정하였다. 아크효율은 일반적인 GMAW에서는 66~85%로 제시되고 있으며^{14,15)} 본 연구에서는 70%를 적용하였다. 입열조건과 경계조건을 입력하고 온도분포 결과를 확인하였을 때 용융영역인 1510°C 선이 비드의 토우부보다 작게 형성되며 비드형상 변수 값을 줄여 다시 해석을 실시한다. 반대로 용융영역이 비드 토우부 보다 크면 비드형상 변수 값을 키워 해석을 실시한다. 가정된 비드의 토우부와 1510°C선이 일치할 때 까지 반복하여 적절한 비드형상을 예측하였다.

그 결과 첫 번째 회전용접의 비드폭(W)과 비드 육성부 높이(h_b)는 첫 번째 패스에서 W는 6.8mm, h_b 는 3mm로 결정하였으며 두 번째 세 번째 패스에서 W는 6.5mm, h_b 는 3mm로 결정하였다. 두 번째 회전용접부터는 비드형상이 변하는 것을 예측하기 위해 Fig. 7의 (b)와 같이 첫 번째 회전용접에서 구한 적정 비드형상을 오버랩하는 작업을 수행 하였다. 오버랩 간격(g)은 9.5mm로 결정하였으며 겹쳐진 면적만큼 오버랩부분에 보상을 하여 오버랩부 높이(h_c)값을 0.5, 1, 1.5mm로 변화시켜 적정 h_c 를 구하였다. 이후 적용되는 패스에서는 첫 번째 패스에서 구한 h_b 를 기준으로 해석을 실시

하여 비드폭의 변화와 희석율의 변화를 관찰하였다.

해석에서 비드형상을 조사하는 위치를 선정하기 위하여 Fig. 5와 같이 원주방향 용접부를 따라서 용융되는 양상을 분석하였다. 반경방향 비드단면을 보면 Fig. 5의 (b)와 같이 마르텐사이트계 스테인레스강의 녹는점인 1510°C선이 용접 시작부에서는 2.7mm로 좁게 시작되다가 용접이 진행됨에 따라 5.9mm로 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상을 토대로 희석율 산정을 위한 용융부 면적 측정 위치를 중간지점 E영역으로 지정하였다. 효율적인 희석율 산정을 위하여 Fig. 4와 같이 z방향으로 네 개의 비드를 이용하여 해석을 실시하였다. E영역의 축방향 비드 단면에서 폭 22mm 영역을 A_a 및 A_b 로 나누어 측정하였다. 측정된 면적을 식(1)에 대입하여 희석율을 산정하고 그 결과를 식(3)을 적용하여 Cr함량을 예측하였다.

4. 실험 및 해석 결과

실험 M1, M2와 예측 M3의 축방향 비드단면의 패스별 형상과 비드의 평균적인 면적을 얻기 위하여 비드 폭 22mm 영역의 용접금속 총면적(A)와 모재측 용융부 면적(A_a)를 i-solution을 이용하여 측정된 결과와 식(1)을 적용한 희석율 산정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그리드 한 칸의 크기는 1mm이며 예측 결과(M3)

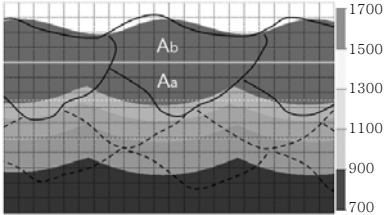
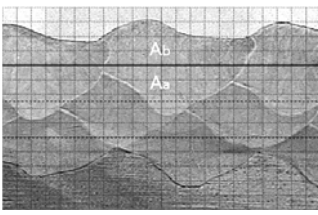
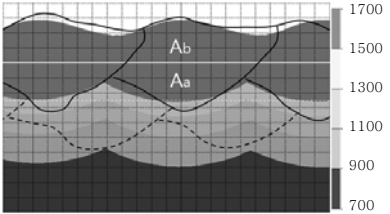
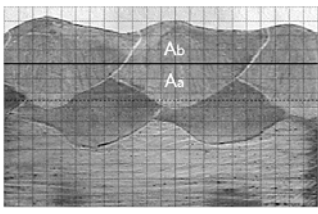
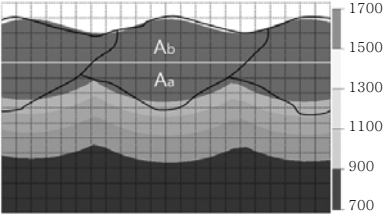
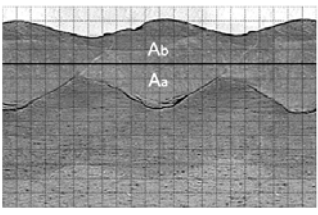
Pass	SYSWELD Prediction (M3)	Experiment (M1, M2)		M3	M1, M2	Error(%)
3rd			A	104.6	105.2	1
			Aa	52.4	52.3	0.2
			D	50.1	49.7	0.8
2nd			A	104.2	105.6	1.3
			Aa	50.9	51.2	0.6
			D	48.8	48.5	0.6
1st			A	104.4	105.8	1.3
			Aa	49	49.4	0.8
			D	46.9	46.7	0.4

Fig. 8 Comparison of bead shape obtained by SYSWELD prediction and experiment

Table 5 Comparison of bead shape obtained by experiment and SYSWELD prediction

Pass		W/2 (mm)	ha (mm)	hb (mm)	hc (mm)	g (mm)
1st	Experiment	6.8	3.2	3	1.2	10
	SYSWELD	6.8	2.5	3	1.1	9.5
2nd	Experiment	6.5	3.3	3	0.8	9
	SYSWELD	6.5	2.6	2.8	1.1	9.5
3rd	Experiment	6	3.4	3	1.2	9
	SYSWELD	6.5	2.8	2.8	1.1	9.5

에서 실선은 실험의 비드형상을 나타낸 것이며 예측비드형상은 용융영역 1510℃를 기준으로 나타내었다.

M1, M2의 비드형상을 보면 용접패스가 증가 할수록 오버랩 부위가 오목한 형상에서 평평하게 변하는 양상을 나타내고 있다. 용접패스가 증가하면 모재의 두께도 증가하므로 모재의 냉각속도가 느려져 용접비드의 냉각속도가 느려져 나타난 결과이다. 냉각속도의 변화는 Table 5와 같이 용입 깊이(h_2)의 증가와 비드 폭(W)이 좁아지는 영향을 미쳐 용접금속 총면적(A)에 비해 용융부 면적(A_a)의 비율이 커진 것을 볼 수 있다.

M3의 경우 입열 조건에서 이상적인 비드형상을 모델링하였기 때문에 비슷한 비드형상을 나타내고 있다. 그 변화를 확인하기 위하여 Table 5를 보면 패스가 증가할수록 냉각속도가 느려지고 물성의 영향으로 용입깊이(h_a)가 깊어지는 것을 볼 수 있으며 비드육성부 높이(h_b)와 비교하였을 때 면적비율이 증가하면서 희석율이 커지는 양상을 나타내고 있다.

Fig. 8에 나타나듯이 오버랩에서는 개별적인 비드형상이 실험조건 및 환경에 따라 변하기 때문에 예측에 어려움이 있다. 하지만 실험과 예측의 평균면적을 측정하여 비교한 결과 용접금속부(A)는 1-1.3%의 오차를

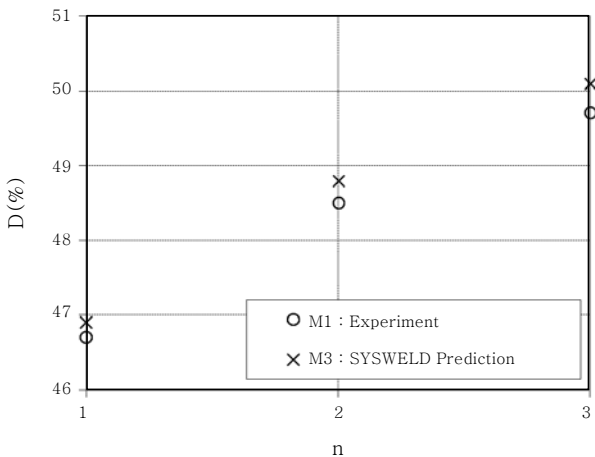


Fig. 9 Variation of dilution rate for each pass

나타내며 모재 측 용융부(A_a)는 0.2-0.8%의 오차를 나타내고 있다. 이론식(3)을 이용하여 희석율을 계산한 결과 0.2-0.6% 오차를 나타내었으며 이는 평균면적을 이용한 희석율 예측 방법으로 적절한 것으로 볼 수 있다.

4.1 희석율 산정 결과

M1실험과 M3예측의 패스에 따라 희석율을 산정한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 패스가 증가하면서 희석율은 선형적인 증가양상을 나타내고 있으며 M1은 46.7%에서 49.7%로 3% 증가 하였으며 M3는 46.9%에서 50.1%로 3.2% 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 용접패스가 증가하면서 용접시 냉각속도가 느려지고 물성값의 열확산율이 증가하면서 용입이 증가하여 나타난 결과로 볼 수 있다.

M1과 M3의 희석율 오차는 Fig. 8과 같이 0.4-0.8%이며 이는 이상적인 비드형상을 나타낸 SYSWELD 예측의 비드형상과 실험 비드형상에서 발생하는 면적차로 인하여 나타난 결과로 볼 수 있다.

4.2 Cr함량 산정 및 측정 결과

식(3)을 이용하여 희석율에 따른 Cr함량 산정을 한 M1, M3와 XRF 측정용 M2의 용접패스 증가에 따른 희석율과 CR함량의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 용접패스가 증가하면 각 패스별 희석율과 Cr함량도 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며 동일한 패스에서 실험 M1과 예측 M3의 희석율 오차는 0.2-0.4%이며 Cr함량은 0.02%의 차이를 나타내었다.

패스에 따른 실험과 예측의 Cr함량의 변화를 나타낸 Fig. 11을 보면 패스가 증가 할수록 Cr함량이 7%에서

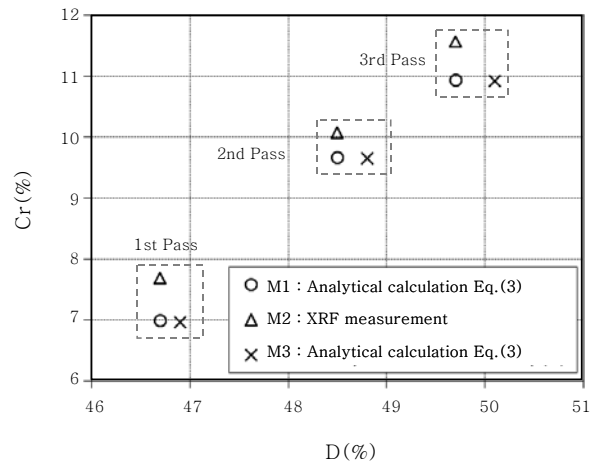


Fig. 10 Cr content versus dilution rate for each pass

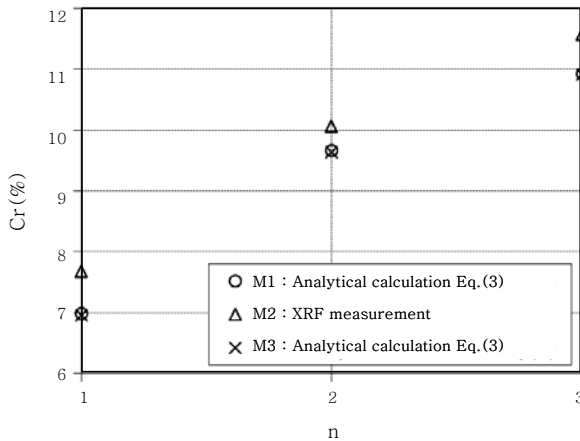


Fig. 11 Variation of Cr content for each pass

10.9%로 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 모재 SCM440의 Cr함량은 Table 3과 같이 1.05%이며 패스가 증가하면 용접부의 Cr함량도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 증가 폭은 첫 번째 패스에서 6%, 두 번째 패스에서 2.7%, 세 번째 패스에서 1.3%로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 용접패스가 증가하면 모재의 Cr함량도 1.05%에서 7%, 9.6%로 증가하면서 Table 2에 나타나 있는 용접봉의 Cr함량 12.2%와의 차이가 줄어들어 나타난 결과로 볼 수 있다.

M1과 M3의 이론식을 이용한 Cr함량 예측 결과는 0.08-0.12%의 차이로 거의 같은 값을 나타내는 것을 볼 수 있으며 XRF 측정 결과를 나타낸 M2와는 0.6-0.8% 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이론식과 XRF 측정의 오차는 M2의 경우 모재와 용접봉의 Cr성분의 희석뿐만 아니라 오버랩 된 비드의 성분이 더해진 용접 패스를 XRF 측정을 하면서 이론적인 방법과 오차가 발생한 것으로 판단된다. 마지막 패스의 목표 Cr함량 12.2%를 비드형상 예측에서 산정한 M3의 Cr함량과 비교 하였을 때 1.4% 차이를 나타내었으며 실험오차를 감안하였을 때 신뢰할 수 있는 결과로 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 SYSWELD를 이용한 압연롤 경화육성 용접부의 희석율과 용접층에 따른 Cr 성분 예측 방법론을 제시하였으며 같은 조건의 실험을 통하여 검증하였다.

1) 물성추정 공식을 이용하여 각 패스별 합금의 물성값을 가정하였으며, 물성값의 차이는 열확산율 계산 결과 패스가 증가 할수록 커지는 것을 확인 할 수 있다.

2) 비드형상 예측방법론에 따라 각 패스별 비드형상

을 예측하였으며 실험결과와 비교하였을 때 개별적인 비드형상의 예측에는 어려움이 있다. 하지만 용접 금속부(A)의 평균면적을 비교한 결과 1-1.3%의 오차를 나타내었으며 희석율을 계산한 결과 0.2-0.6%의 오차를 나타낸 것을 보았을 때 평균면적을 이용한 예측 방법이 적절한 것으로 볼 수 있다.

3) 같은 조건의 실험결과와 예측결과를 비교하였을 때 Cr함량은 패스가 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며, 그 증가 폭은 첫 번째 패스에서 6%, 두 번째 패스에서 2.7%, 세 번째 패스에서 1.3%로 감소하는 경향을 나타내었다.

4) 예측 마지막 패스의 Cr함량이 목표로 했던 12.2%에 1.4% 차이를 나타내었으며 이는 실험 오차로 인한 차이로 볼 수 있다. 이러한 점을 감안 했을 때 본 연구에서 제시한 예측방법론이 경화 육성용접에서 패스에 따른 Cr함량을 효과적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

Reference

1. KWJS editorial department : Technology in Overlay Welding, Welding and Joining Handbook, KWJS, **3** (2007), 319-362 (in Korean)
2. K.H. Han and H.B. Chae : GMA hardfacing weldability of Fe-Cr-C metal cored wire, KWS-Autumn, 2004
3. K.H. Han and J.K. Kim : Effects of GMA Welding conditions on the bead shape of hardfacing overlay welding, Journal of KWJS, **25-5** (2007), 58-63 (in Korean)
4. J.K. Lee and K.H. Lee : Welding technology for the process optimization by the computer code SYSWELD. Journal of KWS, **15-2** (1997), 36-45 (in Korean)
5. Howard B. Cary : Modern welding technology (Fifth edition), Pearson Education Korea, 2002, 728-734
6. J.Y. Lee : Analysis of Flux's conduct by bead welding in SAW, Korea Aerospace University, 2004, 9-12
7. B.Y. Lee : Beitrag zur Untersuchung der Schweißguteigenschaften beim UP-Mehrlagenschweißen hochfester Feinkornbaustähle, Technische Universität Berlin, 1984, 5
8. Frank P. Incropera and David P. Dewitt : Introduction to Heat Transfer, Wiley, 2003, 55-59
9. IMT i-Solution Inc. : I-Solution user manual, 95-130.
10. KATS : General rules for X-ray fluorescence spectrometric analysis of iron and steel, KS D 1654, KS, 2003, 1-11 (in Korean)
11. J.I. Lee and I.C. Park : Prediction of penetration and heat affected zone by using finite element method in CO₂ arc welding, Journal of KWS, **10-4** (1992), 222-229 (in Korean)
12. N. Siva Shanmugam and G. Buvanashkaran : A transient finite element simulation of the temperature

and bead profiles of T-joint laser welds, *Materials and Design*, **31-9** (2010), 4528-4542

13. B.H. Kim and C.H. Kim: Prediction of optimal welding condition for the fillet weld using SYSWELD, *Abstracts of KWJS*, **54** (2010), 174 (in Korean)

14. J. N. Dupont and A. R. Marder: Thermal efficiency of arc welding processes, *Welding Journal*, **74** (1995), 406s-416s

15. C. D. Yoo and S. J. Na: Arc welding, *KWJS*, 2011, 96-97 (in Korean)



- 김봉훈
- 1958년생
- 대구대학교 기계.자동차공학부
- 용접부 열유동 및 변형해석, 하드페이징
- e-mail : bhkim@daegu.ac.kr



- 김춘환
- 1984년생
- 대구대학교 대학원 기계공학과
- 용접부 열유동 및 변형해석
- e-mail : spbright@nate.com