

# AISI 304L Clad Steel 용접부의 고온균열에 미치는 용접조건의 영향

대우조선공업(주) 기술연구소  
정 하택, 한 종만, 한 용섭

## 1. 서 론

내부식성을 향상시킨 Stainless Clad 강(Table 1)의 용접에는 일반적으로 Shielded Metal Arc 용접(SMAW)이 사용되고 있으나, 최근에는 생산성을 향상시키기 위해 Stainless 강 용접부에 Flux Cored Arc 용접(FCAW)이 적용되고 있다. 당사에서 이의 적용을 위해 Table 2와 같은 용접 방법으로 용접성 시험을 6건 실시 하였으나 3건은 합격하고, 나머지 3건(C1, C2, D1)은 Bending 시험시 Photo. 1에서 보듯이 Stainless 용착금속과 탄소강의 용융선에서 Crack이 발생하였다.

이에 본 연구에서는 Crack 발생 원인을 조사하고 그 대책을 수립하고자, Crack 발생 부위에 대한 각종 시험과 용접조건에 따른 용접부의 특성을 조사하였다.

## 2. Crack 발생원인의 조사

EDS로 분석한 Crack 주위의 Stainless 강 용접금속의 화학성분 (Table.3)을 Schaeffler Diagram에 표기하면 Fig.1의 C1,C2,D1점과 같다. Crack이 발생한 모든 시편에서 Crack부의 용착금속부는 Austenite, Martensite와 Ferrite의 혼합 미세조직을 갖게 되고, Ferrite의 양이 3% 이하로 나타내어 고온균열이 발생할 수 있는 영역과 Martensite 조직의 생성으로 인해 조직이 경화되어 경화균열이 발생할 수 있는 영역에 속하게 된다. Fig. 1에서 이들 용접의 탄소강 희석율을 산출하면 C1과 D1은 46%, C2는 38%이다.

Crack 주위의 경도 분포를 나타낸 Table 4를 보면 Stainless 강 용착금속에서 400Hv 이상의 경도값을 나타내 위에서 언급 하였듯이 Martensite 조직이 생성되었음을 확인할 수 있었다.

Photo. 2,3은 Crack를 인위적으로 Opening 시켜 SEM으로 파단면을 관찰한 것으로 Crack들은 고온균열 파면을 나타내고 있다.

이러한 실험결과들을 볼 때 Bending 시험시 발생된 Crack은 용접시 발생한 미세한 고온균열이 Bending 시험시 성장한 것으로 판단된다. 용접중 발생된 균열은 매우 미세하여 방사선 투과 시험에서 발견되지 않았다.

## 3. 용접조건에 따른 Stainless 강 용접부의 Ferrite 양 측정

용착금속 내의 Ferrite의 양은 용접조건에 따라 크게 변화하므로 본 실험에서는 Flux Cored Wire를 사용하여 용접속도와 용접전류를 변수로 하여 입열량을 변화시키면서 탄소강 위에 Bead on Plate 용접을 하였을 때 육성용접부의 Ferrite 양을 측정하여 적정 용접조건을 구하고자 하였다.

용접재료는 직경이 1.2mm인 YF309MoLC Flux Cored Wire이며, Table 5의 용접조건으로 아래보기 자세 용접을 하였다.

Fig. 2는 입열에 따른 희석율을 나타낸 것이다. 전류 (160A)와 전압 (28V)를 고정시키고 용접속도를 변화시킨 결과를 보면 용접속도가 감소할수록 희석율도 감소한다. 이는 입열량이 증가할수록 희석율이 감소함을 의미한다. 용접속도를 45cm/min로 고정시키고 용접전류를 변화시킨 경우는 전류가 증가할수록 희석율도 증가한다. 이 경우에는 입열량이 증가할수록 희석율도 증가함을 보이고 있어, 입열량만으로 희석율을 검토하는 것은 잘못된 것이다.

입열에 따른 Ferrite 양의 관계를 나타낸 Fig. 3을 보면, 용접속도를 변화시킨 경우에는 용접속도가 증가할수록 Ferrite양이 감소하며, 용접전류를 변화시킨 경우는 용접전류가 증가할수록 Ferrite양이 감소한다.

Fig. 4는 희석율에 따른 Ferrite의 양을 나타낸 것으로 용접속도를 변화시킨 경우와 용접전류를 변화시킨 경우 모두 다 희석율이 증가할수록 Ferrite 양이 감소함을 볼 수 있고, 희석율이 40% 정도이면 Ferrite가 거의 없음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 1의 C1,C2,D2 점에서 희석율과 Ferrite양의 상호 관계와 일치한다.

일반적으로 Clad 강 용접시 30% 이하의 희석율을 요구하는데 Fig. 4에 의하면 희석율 30% 이하에서는 용착금속 내에 Ferrite가 약 6% 이상을 갖게 되어 고온균열에 대한 높은 저항성을 나타낼 것으로 예상된다. 이러한 희석율에 대한 규제는 Clad 강 용접시에 발생할 수 있는 고온균열을 방지할 수 있으므로 용접 시공시에는 이를 필히 준수해야 한다.

실제 용접은 Groove 내에서 용접이 되므로 Bead on Plate 용접보다는 희석율이 높다. 용접 시험에서 사용한 용접조건(160A, 28V, 45cm/min)에서, 실제 초층용접에서는 희석율이 38%와 46%을, Bead on Plate 용접에서는 희석율이 22% 정도이므로 Groove 내에서의 용접이 Bead on Plate 용접보다 더 높은 희석율을 나타내고 있다.

그러므로 본 Clad 강의 용접조건을 전류 160A, 전압 28V에서 용접속도를 16-22cm/min 정도로 하면 희석율이 30% 정도로 낮아지게 되어 고온균열의 저항성을 증가시킬 것이다. 또한 용접속도를 45cm/min에서 22cm/min 정도로 낮추면 용접 Bead는 더 미려하게 되는 장점도 있다.

#### 4. 결 론

- (1) Stainless 강의 희석율을 낮추기 위해서는 용접속도를 늦추든가, 용접전류를 감소시켜야 하며, 희석율이 감소하면 Ferrite 양은 증가하므로써 고온균열의 저항성은 증가하게 된다. 희석율은 용접조건에 따라 변화하므로 용접 시공전에 희석율이 30%이하가 되도록 적정 용접조건을 수립해야 한다.
- (2) 고온균열을 방지하기 위해서는 용접성 시험에서 사용한 전류 160A, 전압 28V에 용접속도를 45cm/min 에서 16-22cm/min로 낮추어야 한다.

Table 1. Chemical composition of base metal

(wt %)

Description	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
AISI 304L	0.012	0.37	1.66	0.036	0.002	10.41	18.12
ASTM A516 Gr. 70	0.190	0.25	1.18	0.007	0.006	0.24	0.15

Table 2. Welding conditions for stainless steel of weldability test

Test No.	Filler Metal	Current [A]	Voltage [V]	Speed [cm/min]	Heat Input [KJ/cm]
A1	YF309MoLC	160	30	45-46	6.3
	E308LT-1	160	30	47-48	6.1
B2	YF309MoLC	150	28-30	45	5.8
	E308LT-1	150-160	30	47-48	5.9
C1	YF309MoLC	150-160	30	34-54	5.3-8.4
	E308LT-1	160	30	41-58	5.0-7.1
C2	YF309MoLC	150	26	27-36	6.5-8.7
	E308LT-1	150	26	48	4.9
D1	YF309MoLC	150	30	35-50	5.4-7.7
	E308LT-1	150	30	40-55	4.9-6.8
D2	YF309MoLC	150	26	33-38	6.2-7.1
	E308LT-1	150	26	35-55	4.3-6.7

Table 3. Chemical compositions of weld metal in the vicinity of crack by EDS quantitative analysis.

(wt %)

Test No.	Fe	Mn	Ni	Cr	Mo	Si	Ni(eq)	Cr(eq)
C1	70.6	1.91	6.75	13.2	1.21	0.49	8.8	15.1
D1	75.1	2.17	7.27	12.8	1.21	0.65	9.4	15.0
C2	61.3	1.65	7.96	14.5	1.69	0.57	9.8	17.1

$$* Ni(eq) = \%Ni + 30 \times \%C + 0.5 \times \%Mn$$

$$Cr(eq) = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$$

Table 4. Microhardness distribution in the vicinity of crack

(Hv)

Test No.	Right (Weld metal)				Left (HAZ)			
C1	416	441	474	345	294	256	268	256
D1	310	408	294	416	317	292	338	356
C2	335	276	409	278	309	246	295	291

\* Force : 2N

Table 5. Welding conditions for stainless steel overlay

Description	No.	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/cm)
Variation of welding speed	A	160	28	12	22.4
	B	160	28	16	16.8
	C	160	28	22	12.2
	D	160	28	35	7.7
	I	160	28	45	6.0
	E	160	28	60	4.5
	F	160	28	80	3.4
Variation of welding current	G	130	25	45	4.3
	H	160	28	45	6.0
	J	220	32	45	9.4
	K	260	33	45	11.4

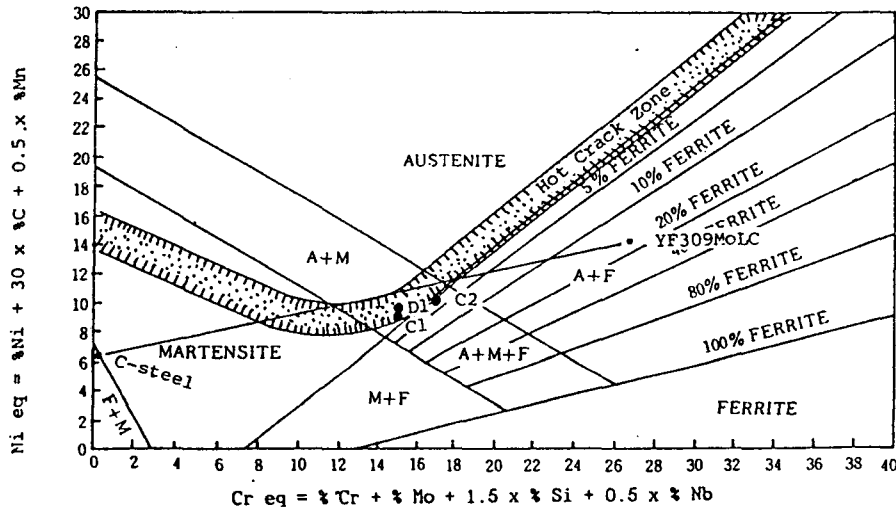


Fig. 1 Schaeffler diagram

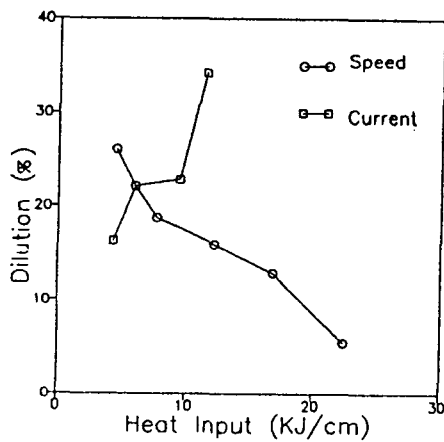


Fig.2 Effect of heat inputs on dilution with variation of welding speed and current

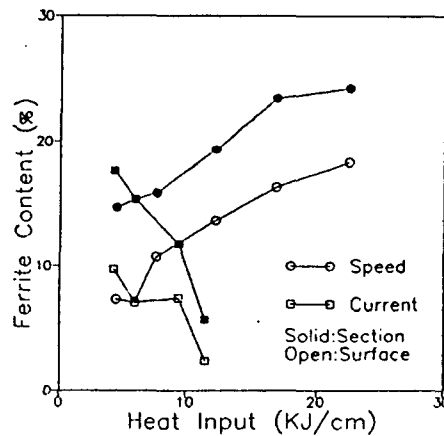


Fig.3 Effect of heat inputs on ferrite content with variation of welding speed and current

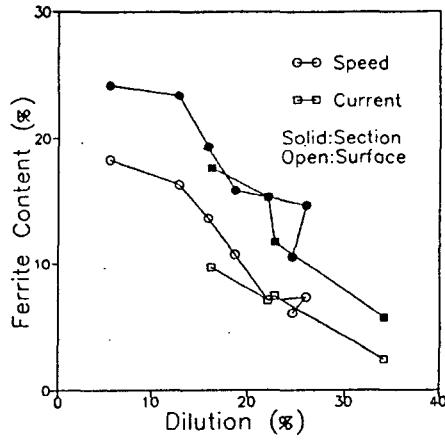


Fig. 4 Variation of ferrite content in weldments with dilution



Photo. 1 Macrographs of cracks occurred in the fusion line after bending test.

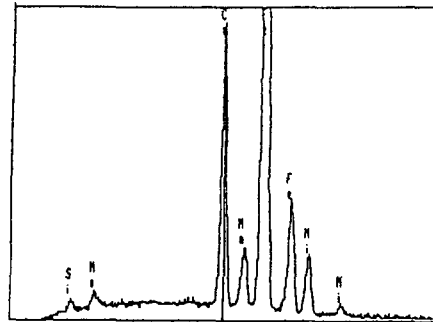
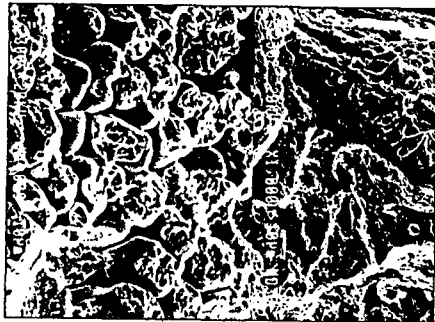


Photo. 2 SEM fractographs and EDS spectrum of crack surfaces in the fusion line of stainless steel weldment.

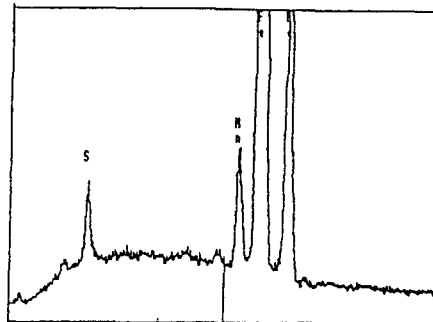


Photo. 3 SEM fractograph and EDS spectrum of crack surface in the fusion line of carbon steel