

## 일렉트로슬래용접을 이용한 스테인레스강 클래딩 용접부 특성

충남대학교 이영호, 한국원자력안전기술원 안희성  
충남대학교 강원석, 한국핵연료(주)기술부 박종열\*

### 1.0 서론

일반적으로 원자로 압력용기는 ASME Code Sec. III의 설계 기준에 의거 제작되고 있으며, 고온강도를 갖는 저합금 탄소강의 용기 내부벽에 박판이며 폭이 넓은 Austenite stainless steel 스트립 용가재를 사용하여 클래딩(cladding) 용접 방법으로 피복하여 내식성을 증대시켜 고온 고압하에서 가동하는데 널리 채용되고 있다.

현재까지 Stainless steel strip cladding에 적용되고 있는 Process 중 실제 원자로 압력용기 등에는 SASC(Submerged Arc Strip Cladding)와 ESSC(Electro Slag Strip Cladding) 등이 적용되고 있으나 이중 ESSC는 아직 국내에서는 실제 제작에 적용하지 못한 Process로서 여타 Process에 비해 고입열이나 실제 모재에 주는 열영향은 크지 않으며, 모재 회석율이 SASC의 1/2 정도에 지나지 않고 용착금속의 Cleanliness도 우수한 Cladding 방법이다.

본 연구에서는 이러한 우수한 Cladding 용접방법에 있어서의 스테인레스강층의 화학 성분, Delta ferrite 양, Corrosion rate 그리고 조대입계와 균열과의 관련성을 고찰하고 부식피로에서 중요한 성질인 SCC(Stress Corrosion Cracking) 저항성에 대해 기존의 SASC 용접방법과 상호 비교하여 ESSC 용접부의 용접특성을 고찰하는데 그 주목적이 있다.

### 2.0 실험방법 및 절차

#### 2.1 재료

본 연구에 사용한 재료는 원자로 주가재인 SA 508 CL3 단조강재를 모재로 하여 0.5 X 60 mm 크기의 오스테나이트 스테인레스 스트립과 플럭스를 사용하였다.

#### 2.2 후열 처리

열처리는 610°C, 40시간(실제 원자로 제작에서 적용하고 있는 열처리 조건임) 실시하는 것을 기본으로 하되 부식을 및 입계 부식 시험을 위해 200시간까지 후열 처리 온도에서 유지하여 시편을 제작하였다.

#### 2.3 용접부 평가

##### 가. 화학 성분 분석

As-clad의 시험편을 표면으로부터 0.5mm 씩 밀링해 가면서 chips을 화학 분석하고 산소와 질소는 LECO 분석기로 분석하였다.

##### 나. Delta( $\delta$ ) ferrite 측정

De Long's diagram에서 Delta ferrite 양을 구하고, 또한 Ferrite scope로 Delta ferrite 양을 측정하여 De Long's diagram에서 구한 값과 비교하였다.

##### 다. 모재 회석율 측정

모재 회석율(BMD: base metal dilution) 계산 방법은 클래드의 화학성분 분석 결과값을 이용하여 모재 및 스트립, 클래드에서의 Ni 함유량에 따른 다음식을 사용하였다.

$$\text{Dilution (\%)} = \frac{(\text{Ni s} - \text{Ni wm}) \times 100}{\text{Ni s} - \text{Ni bm}} \quad (1)$$

Legend Ni s : Ni content in strip  
 Ni bm : Ni content in base metal  
 Ni wm : Ni content in weld metal

#### 라. Corrosion rate 측정

ASTM A 262 Practice A (Oxalic acid etch test) 와 Practice C (Huey test) 에 따라 시험을 하여 무게감량으로 평가하였다.

#### 마. 입계 부식 시험

시편의 모재부분을 비등 Nitric acid로 용해 제거한 후 용접금속만을 남게하고 측면을 Polishing한 후 Strauss test를 실시하여 입계부식 상태를 관찰하였다.

#### 바. 용력 부식 시험

U - bend 시험편은 130 X 15 X 3 mm 가 되도록 가공하여 외경이 20mm인 치구로 U-bend forming하여 끝단 용접하여 SCC 시험을 하였다.

### 3.0 실험 결과

#### 3.1 용접방법과 클래드 화학조성

ESSC 와 SASC 스테인레스강 용착부의 성분조사 결과는 Table 1 과 같다. 또한 식 {1} 에 따라 계산된 BMD 는 Table 2 와 같다.

#### 3.2 용접방법과 용접계면 조직

ESSC 용접부와 SASC 용접부의 As-clad 상태에서 용접계면의 조직특성은 모재와 용접부의 계면에서 Cr 탄화물층이 있는데 SASC 용접부가 ESSC 용접부보다 더 큰 폭의 Cr 탄화물층을 보였다.

#### 3.3 Delta ferrite 양의 변화

Table 1 의 화학성분을 가지고 De Long's diagram 을 이용하여 순수 클래드의 Creq, Nieq, Creq/Nieq 로 Delta ferrite 를 계산한 결과와 측정된 Delta ferrite 결과는 Table 3 과 같다.

Fig. 1 에서는 Heat input 에 따른 Delta ferrite 양의 변화를 나타내고 있다.

#### 3.4 용접방법에 따른 부식율

끓는 65퍼센트 질산중에서의 ESSC 용접시험편과 SASC 용접시험편의 Corrosion rate 측정 결과는 Fig. 2 와 같다.

#### 3.5 용접방법에 따른 입계 부식성

Strauss 시험 후 표면으로부터의 입계침식 깊이를 Metallic microscope 에 의해 측정된 결과는 Fig. 3 과 같다.

### 3.6 용접방법에 따른 용력부식성

SASC 용접부와 ESSC 용접부에 대한 U-bend SCC 시험 결과는 Table 4 와 같다. As-clad 상태의 시험편에서는 균열이 발생되지 않았다. PWHT 시험편 경우 SASC 용접부에서는 6 개의 시험편중 3 개에서 다수의 선형 균열이 발생 하였으나 ESSC 용접부에서는 6 개의 시험편중 1 개에서 미세한 선형 균열 밖에 발생되지 않았으므로 SASC 용접부가 SASC 용접부에 비해 보다 높은 SCC 저항성을 보였다.

### 4.0 결론

SA 508 CL 3 탄소강에 60 mm X 0.5 t 크기의 오스테나이트 스테인레스 스트립으로 잠호 아아크 스트립 클래딩 용접 (SASC) 과 일렉트로 슬랙 스트립 클래딩 용접 (ESSC) 을 수행한 후 용접방법, 입열 및 PWHT 시간 변화에 따른 야금학적 현상, 입계 부식성 및 용력부식성 등 용접 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) ESSC 용접부가 SASC 용접부보다 산소함량이 약 3배나 적어 ESSC 용접부가 SASC 용접부보다 훨씬 깨끗한 용접부이었다.

2) ESSC 용접부와 SASC 용접부에서 Heat input 에 따른 Dilution 에 의한 Delta ferrite 양의 변화는 없었다. 그러나 ESSC 용접부가 SASC 용접부보다 Delta ferrite 양이 약 3% 정도 낮았고 Scattering range 도 약 2 배 정도 작았으며 또한 모재 회석율도 약 3 배나 낮아 ESSC 용접경계부가 SASC 용접경계부에 비해 더 큰 폭의 크롬 탄화물층을 보였다.

3) ESSC 용접부의 Corrosion rate 가 SASC 용접부보다 낮아 내부부식성이 보다 더 강한 것으로 평가되었고 또한 클래딩 용접 경계부는 PWHT 에 의하여 탄화물을 석출하고 있으며 PWHT 시간이 길수록 Strauss 시험에 의한 입계부식은 심하였고 SASC 용접부가 ESSC 용접부보다 입계 부식이 심하였다.

4) SASC 용접부나 ESSC 용접부의 SCC 저항성은 다량의 탄화물 생성 때문에 As - clad 상태보다 PWHT 상태에서 더 높았다. 또한 PWHT 상태에서 ESSC 용접부 6개의 시험편중 1개에서 미세한 선형균열이 SASC 용접부는 6 개의 시험편 중 3개에서 다수의 선형균열이 발생되었다. 따라서 ESSC 용접부가 SASC 용접부보다 높은 SCC 저항성을 보였다.

Table 1. Result of chemical analysis

Specimen No.	Chemical composition									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	O
E 1	0.030	0.46	1.36	0.020	0.005	10.60	19.67	0.25	0.040	0.026
E 2	0.052	0.45	1.37	0.017	0.003	10.41	19.23	0.25	0.039	0.021
E 3	0.048	0.43	1.37	0.017	0.003	10.05	19.36	0.24	0.048	0.019
S 1	0.064	0.71	1.38	0.018	0.005	11.26	22.01	0.27	0.050	0.077
S 2	0.068	0.70	1.40	0.017	0.004	10.87	21.51	0.26	0.060	0.068
S 3	0.062	0.62	1.40	0.020	0.005	9.77	20.02	0.25	0.054	0.059

Table 2. Variation of dilution with heat input

Specimen No.	E (J/mm)	Dilution (%)
E 1	212	5.60
E 2	176.5	7.59
E 3	135	11.04
S 1	217.5	15.10
S 2	175	18.25
S 3	135	27.16

Table 3. Variables of Cr eq and Ni eq with heat input

C L A D	Welding specimens					
	E 1 (212 J/mm)	E 2 (176.5 J/mm)	E 3 (135 J/mm)	S 1 (217.5 J/mm)	S 2 (175 J/mm)	S 3 (135 J/mm)
Calculated $\delta$ ferrite	7.8	6.1	6.1	11.6	9.8	8.3
Measured $\delta$ ferrite	7.5	6.2	6.0	11.2	9.9	8.2

Table 4. U-bend test result conducted in autoclave at 400 °C, 160 atm., 300 hr

Cladding process	Samples cracked	
	As - clad	P W H T
S A S C	0 / 3	3 / 6
E S S C	0 / 3	1 / 6

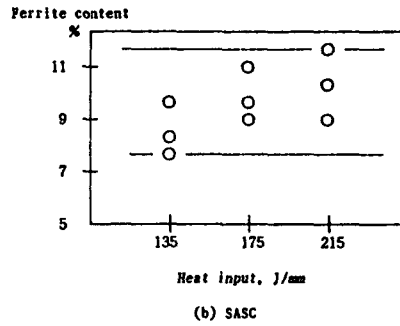
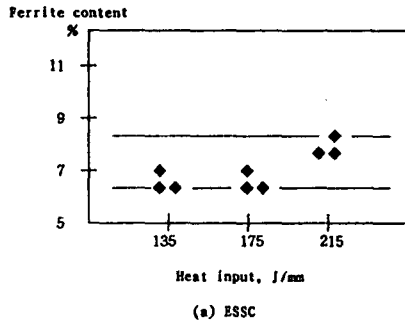


Fig. 1. Effect of heat input on ferrite content in cladding metal

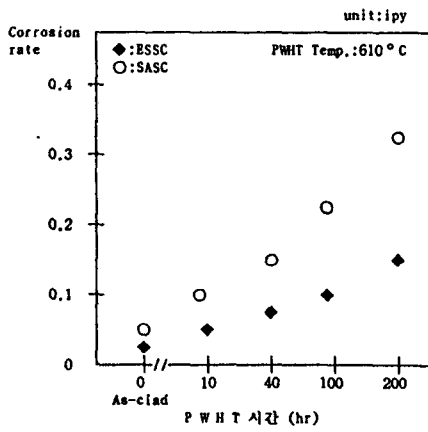


Fig. 2 Corrosion rate test result of weldment in SASC and ESSC

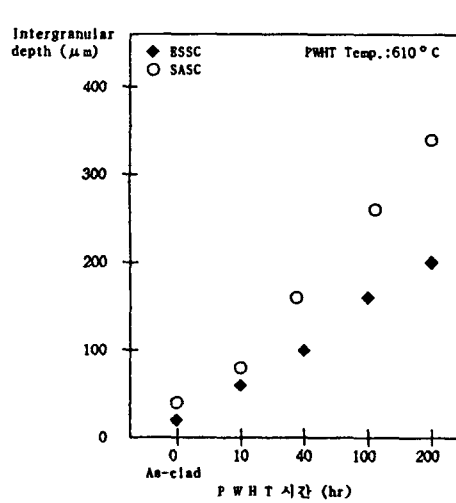


Fig. 3 Intergranular depth results of weldment in ESSC and SASC