

'02 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Type 347 스테인레스 강 용접부의 J-R 특성에 미치는 미세조직의 영향

Effect of Microstructure on J-R Fracture Properties of Type 347
Stainless Steel Weldment

윤지현, 박순동, 이봉상

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

유완, 박성호

한국전력기술주식회사, 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압기 밀림관에 사용되는 Type 347 스테인레스 강 용접부의 J-R 특성 값에 영향을 미치는 미세조직의 영향을 알아보기 위해, 각기 다른 3가지 용접봉을 이용해 동일한 용접절차를 통해 용접부 시편을 제작하고 J-R 파괴저항시험을 수행한 후, 각 용접부의 미세조직을 분석하였다. 용접부에 대한 화학조성 분석을 통해, J-R 특성이 나쁜 용접재에 탄소함량이 높은 것을 확인하였다. 탄소함량이 높을 수록 Nb계 탄화물이 많이 생성되어, J-R 특성을 저하시킨 것으로 판단된다. J-R 특성이 좋았던 용접부에는 상대적으로 δ - ferrite 함량이 적었으며, 이는 J-R 특성에 좋은 영향을 미친 것으로 판단된다.

Abstract

The microstructures of three Type 347 stainless steel weldments for pressurizer surge line, which were welded with each different filler metals, were analysed after J-R fracture resistance tests to investigate the relationship between J-R characteristics and the microstructures of weldments of the pressurizer surge line piping. It was observed the carbon contents was relatively high in the weldment of low J-R fracture resistance and δ -ferrite phase fraction was relatively low in an weldment of high J-R fracture resistance.

1. 서론

한국 표준형 원자력발전소의 주배관 및 가압기 밀림관의 설계에는 안전성과 경제성의 제고를 위하여 탄소성파괴역학에 근거한 LBB (leak-before-break, 파단전누설) 개념을 적용하고 있다. 냉각계통의 주배관은 LBB 개념의 적용에 필요한 충분한 파괴저항특성을 확보하고 있으나, Type 347 스테인레스강으로 제조하는 가압기 밀림관의 용접부는 요구조건이 엄격하고 재료간의 파괴저항특성의 편차가 크기 때문에 경우에 따라서는 LBB 개념을 배관에 적용하는데 필요한 J-R 파괴저항특성을 만족치 못할 가능성이 있다. 이러한 문제점들은 가압기밀림관 용접부의 미세조직적인 문제에 기인한 것으로 예상되어 왔다. 따라서, 실제 발전소에 사용되는 것과 동일한 가압기 밀림관 용접부를 모사하여 용접부의 J-R 파괴저항특성에 영향을 미치는 미세조직적 인자들을 파악하는 연구는 매우 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서는 Type 347 스테인레스 강 용접부의 고온 J-R 특성값에 영향을 미치는 미세조직적 특성을 파면, 미세조직, 화학성분 분석 등을 통하여 파악하여 가압기 밀림관의 파괴저항특성을 제고할 수 있는 방안을 도출하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험방법

(1) 용접재 및 시험편

본 연구에 사용된 재료들은 각각 다른 3가지 용접봉을 써서 GTAW (gas tungsten arc welding) 용접된 Type 347 스테인레스 용접재들이다. 용접재에 대한 화학조성은 POSCO 기술연구소에서 습식분석 방법으로 분석되었다. 화학분석 결과를 표 1에 나타냈다.

J-R파괴저항시험은 316°C에서 탄성해중법(elastic unloading compliance method)으로 수행되었다. 시험으로는 1인치 두께의 표준 C(T) 시험편을 사용하였다.

(2) 미세조직분석

석출물의 종류를 확인해 보기 위해서 용접부를 연마 후, 약하게 전해에칭하여 SEM-EDS (energy dispersive spectroscopy) 분석을 하였다. 사용된 장비는 SEM(JEOL 6300, 20kV)-EDX(Oxford) 였다.

용접부내의 δ -ferrite 상분율을 측정하기 위해 자기적 측정기인 Magne-gage (Ferit-scope, Fisher)를 이용하였다.

3. 실험결과

(1) J-R 특성

그림 1에는 시험된 모든 시편에 대한 J-R곡선 결과를 도시하였다.

각 용접재의 J-R 파괴특성은 WELD-1, WELD-2, WELD-3의 순으로 좋았다. 결과를 정량화하기 위해 표 2와 같이 LBB (leak-before-break, 파단전누설) 해석에 있어 가장 중요한 인자인 dJ/da 를 각 용접재에 대해 구하였다.

그림 2은 SEM (scanning electron microscope, 주사전자현미경)으로 관찰한 파면사진이다. WELD-1에 비해, WELD-3의 경우에는 상대적으로 dimple의 크기가 작고 치밀하며 균열진전 방향으로 변형이 되어 있는 전형적인 ductile tearing 파면을 보이고 있다.

이상의 광학현미경 및 SEM 관찰을 통해 확인한 용접재간 파괴특성의 차이는 J-R시험 결과와 일치하는 것이다.

(2) 미세조직적 특성

그림 3 의 (a), (b), (c)는 각각의 용접부를 전해에칭하여 광학현미경으로 관찰한 1000 배 배율사진이다. 모든 용접재에 길쭉한 형태의 δ -ferrite가 조밀하게, 상당량 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한 주로 austenite/ δ -ferrite 경계 부근에 탄화물로 예상되는 석출물이 많이 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 조대한 용접 개재물이나 결함은 관찰할 수 없었다.

SEM (scanning electron microscope, 주사전자현미경)을 이용하여 용접부 내에 생성된 석출물을 좀 더 명확히 관찰할 수 있었다. 그림 4의 SEM 사진은 δ -ferrite 주위에 생성된 석출물들을 보여주고 있다. 각 용접재에 공통적으로 $1\mu\text{m}$ 내외의 비교적 큰 석출물과 그 보다 훨씬 미소한 크기의 석출물들이 생성되어 있었다.

그림 5에 나타낸 J-R 시험된 시편의 파면 아래에서 석출물과 기지조직의 경계가 분리되면서 공공이 생성된 것을 볼 수 있다. 또한 공공 내부에 있는 일부 석출물들은 응력을 받아 절단되어 있는 것도 관찰할 수 있었다.

석출물의 종류를 확인해 보기 위해서 SEM-EDS (energy dispersive spectroscopy) 분석을 하였다. 사용된 장비는 SEM(JEOL 6300, 20kV) - EDX(Oxford) 였다. 그림 5에 표시된 공공 내부의 석출물에 대해 점분석 (point analysis)를 실시하였으며 사진 아래에 분석된 화학조성을 정리하였다. 분석기기의 beam size 가 약 $1\mu\text{m}$ 정도여서 정확한 정량분석은 힘들었으나, Cr 및 Nb 과 N 함량이 상당히 높게 나타난 것으로 미루어 분석된 석출물은 Nb(C, N) 계 탄화물인 것으로 판단된다.

4. 토의

(1) 용접부의 화학조성과 J-R 파괴특성의 관계 분석

스테인레스 강 용접부의 파괴와 같은 연성파괴는 미소공공 (micro void)의 생성, 성장,

합체 (nucleation, growth, coalescence of micro voids) 의 연속적인 과정을 통해서 일어난다는 이론이 널리 받아들여지고 있다. 재료 내에서 공공이 생성되기 위한 자리로써는 탄화물과 같은 제 2상 입자(second phase particle)가 중요한 역할을 하게 된다 [1, 2].

GTAW 용접부는 청정도가 매우 높으므로 용접개재물의 영향을 배제할 수 있다. 따라서 파괴특성에 영향파괴특성에 영향을 줄 수 있는 가장 큰 제 2상 입자는 탄화물이다. 실험된 Type 347 스테인레스 강 용접부에서는 Nb계 탄화물들이 J-R 특성에 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

탄화물들의 함량에 대해서는 별도의 정량분석이 진행중이나, 용접부의 화학조성으로부터 탄화물 생성량의 차이를 유추할 수 있다.

표 1에 나타낸 바와 같이 WELD-1, WELD-2, WELD-3의 탄소함량이 각각, 0.045, 0.031, 0.030 wt%로 J-R파괴저항성이 가장 나쁜 WELD-1의 탄소함량이 가장 높았다. 탄소함량이 많은 재료에서 Nb계 탄화물이 많이 생성되어 J-R 파괴특성을 저하된 것으로 판단된다. Nb 함량에 있어서도 각 용접재간에 차이가 크지만, Nb은 C함량의 10배 이상일 경우 잉여로 존재하게 되므로, 여기서는 탄화물 생성량에 영향을 미치지 않은 것으로 예측된다 [3-4].

(2) δ -ferrite 분율이 J-R 특성에 미치는 영향

스테인레스 강 용접부 내에 존재하는 δ -ferrite는 고온균열을 방지하는 역할을 하고 강도를 향상시키는 한편, 연성은 감소시켜 J-R 특성과 같은 연성파괴특성은 악화시킨다. 스테인레스 강내의 δ -ferrite 상분율은 실험식에 의해 구할 수 있다. Fe-C 평형상에서 Cr은 ferrite상을 안정화시키고, Ni은 austenite 상을 안정화시키는 역할을 한다. 또한 여기에 첨가되는 미량 원소 및 그 양에 따라 austenite-ferrite 간의 상분율이 달라지게 된다.

식 (1)에 나타낸 W. T. DeLong의 식에 화학성분을 대입하여 Cr과 Ni당량을 구할 수 있다 [5].

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 30 \times \%N + 0.5 \times \%Mn$$

표 3에 각 용접재에 대한 Cr/Ni당량비를 나타내었다. 대동소이하지만 파괴저항성이 좋은 WELD-3 시편 용접부의 Cr/Ni당량비가 가장 낮게 나타났다. WELD-3 시편에서 δ -ferrite가 상대적으로 적게 생성될 것이라는 예측을 가능케 한다.

표 4에는 Magne-gage(Ferit-scope, Fisher)를 이용해 실측한 각 용접재의 δ -ferrite 상분율을 정리하였다. WELD-3의 경우, 다른 용접부에 비해 약 1% 이상 δ -ferrite상이 적었다.

이러한 결과로 볼 때 탄화물의 양이 비슷할 것으로 추정됨에도 불구하고 WELD-2와 WELD-3 시편간에 다소 J-R 특성의 차이가 생긴 원인은 δ -ferrite 함량의 차이인 것으로

추정된다. 즉, WELD-2 시편에 비해 WELD-3시편 용접부의 δ -ferrite 상분율이 상대적으로 적었기 때문에 WELD-3 시편의 J-R특성이 더 우수했던 것으로 사료된다.

5. 결론

- 1) 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 J-R 시험 후의 시편 파면을 분석한 결과, 각 용접재별 J-R 특성 차이는 파면에 나타난 파괴양상과 일치함을 확인하였다.
- 2) 용접부에 대한 화학조성 분석을 통해, J-R 특성이 나쁜 용접재에 탄소함량이 높은 것을 확인하였다. 탄소함량이 높을 수록 탄화물이 많이 생성되어, J-R특성을 저하시킨 것으로 판단된다.
- 3) SEM-EDS 분석을 통하여 파괴의 시작점으로 작용하는 석출물은 Nb와 N등이 결합한 탄화물로 밝혀졌다.
- 4) J-R 특성이 좋았던 용접부에는 상대적으로 δ - ferrite 함량이 적었으며, 이는 J-R특성에 좋은 영향을 미친 것으로 판단된다.

* 감사의 글

본 연구는 한국전력기술주식회사의 협조로 과학기술부 원자력중장기사업의 파괴특성평가 및 향상기술개발 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. R. O. Ritchie and A. W. Thompson, Metallurgical Transaction A, Vol. 16A, Feb. (1985) 233-248
2. J.H. Yoon, B.S. Lee and J.H. Hong, J. Kor. Inst. Met & Mater., Vol. 38, No. 12 (2000) 1586-1592
3. W. M. Rainforth et al., Acta Materialia 50 (2002) 735-747
4. D. Hauser and J. A. Vanecho, Welding Journal, Feb. (1982) 37-44
5. W. T. Delong, Welding Journal, July (1974) 274-286

Table 1. Chemical composition of various weldments of surge line pipes.

Heat	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	N
WELD-1	0.045	0.519	1.27	0.017	0.014	0.143	9.23	18.74	0.151	0.58	0.047
WELD-2	0.030	0.411	2.28	0.020	0.001	0.250	9.87	18.98	0.258	0.82	0.037
WELD-3	0.031	0.360	2.23	0.025	0.001	0.247	9.96	18.99	0.248	0.85	0.039

Table 2. dJ/da values of various weldments of surge line pipes

Heat	dJ/da (MJ/m ³)
WELD-1	123.6
WELD-2	175.5
WELD-3	223.2

Table 3. Cr_{eq}/Ni_{eq} values of various weldments of surge line pipes.

Heat	Cr_{eq}/Ni_{eq}
WELD-1	1.60
WELD-2	1.56
WELD-3	1.53

Table 4. δ -ferrite contents of various weldments of surge line pipes.

Heat	δ -ferrite (%)
WELD-1	11.53
WELD-2	11.29
WELD-3	10.11

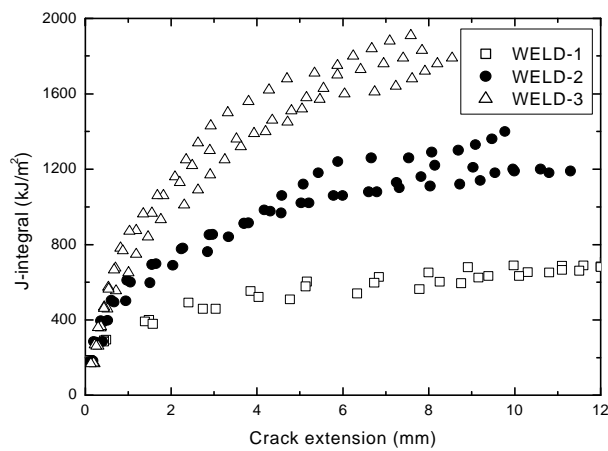


Fig. 1. J-R curves for various Type 347 SS weldments (tested at 316°C).

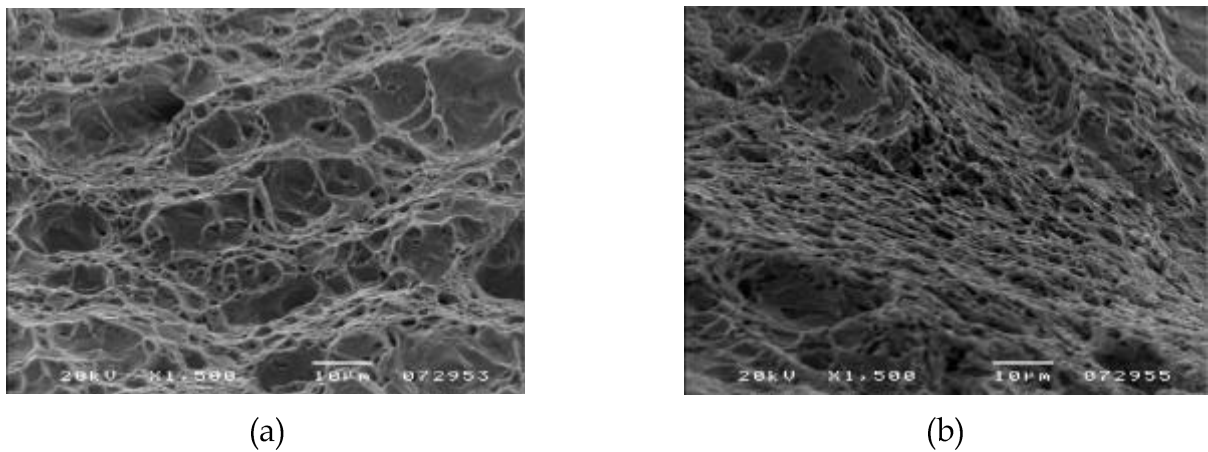


Fig. 2. SEM micrographs of fracture surfaces of (a) WELD-1 and (b) WELD-3.

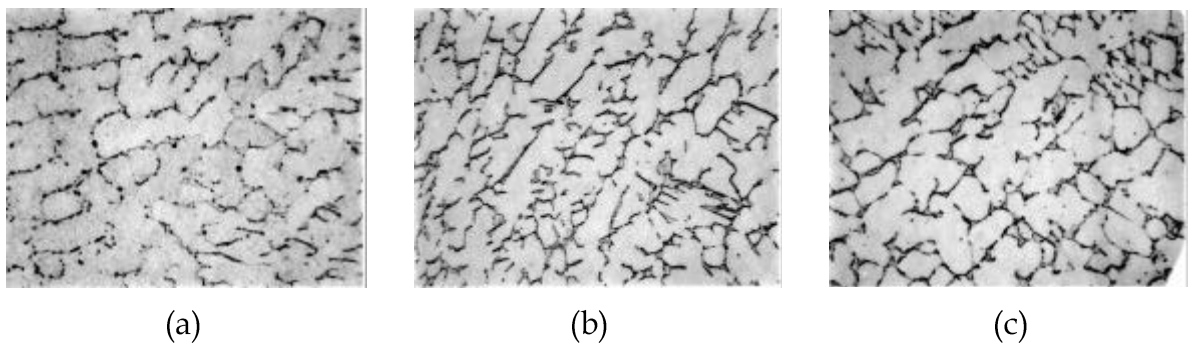


Fig. 3. Optical micrographs ($\times 1000$, reduced 50% on reproduction) of weldments of surge line pipes; (a) WELD-1, (b) WELD-2 and (c) WELD-3.

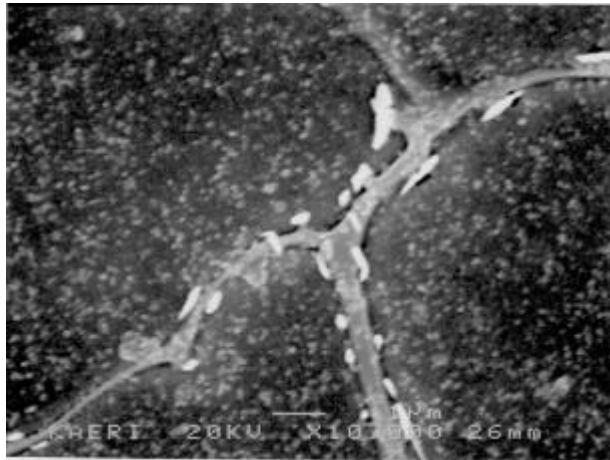


Fig. 4. SEM micrograph shows ppts near δ -ferrites.

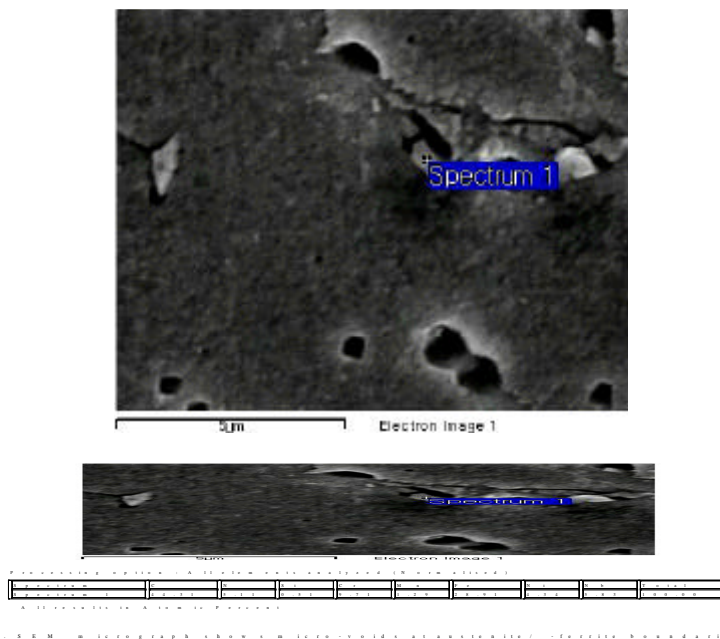


Fig. 5. SEM-EDX point element analysis for ppts near δ -ferrites in Type 347 SS weldment.