



용접조건과 전류밀도에 따른 페라이트 스테인리스강의 수소취성에 관한 연구

임우조* · †최병일

*부경대학교 기계공학부 · 워러썸 엔지니어링
(2006년 2월 14일 접수, 2006년 3월 23일 채택)

The Study on the Hydrogen Embrittlement of Ferrite Stainless Steel with Welding Conditions and Current Density

Uh Joh Lim* · †Choi Byung il

*School of Mechanical Engineering, Pukyong Nat. University, Pusan 608-739, Korea
Watertherm Engineering, Seoul 137-891, Korea
(Received 14 February 2006, Accepted 23 March 2006)

요 약

스테인리스 강재 STS 444에 있어서 용접조건에 따른 수소취성의 민감도와 인가 전류밀도에 따른 수소취성의 영향을 고찰하고자 0.5M H₂SO₄ + 0.001M As₂O₃ 수용액에서 전기화학적 부식시험장치로 전류밀도를 5, 10, 15, 20 mA/cm²로 인가하여 U 밴드 시험편의 수소취성에 관해 연구하였다. 이때 파괴되는 시간을 조사하여 수소취성을 고찰하였으며, 금속조직 현미경 사진을 비교하여 금속조직적인 연관 특성을 고찰하였다. STS 444 강재에 있어서 용접조건 즉 보호가스량의 변화에 따라서 수소취성에 대한 큰 영향을 받고 있으며, 전류밀도에 따라서도 많은 영향을 받고 있다. 특히 인가전류밀도가 높아짐에 따라 수소균열이 급격히 빨라지고 있음을 알 수 있다.

Abstract – This study attempted to examine how the hydrogen embrittlement susceptibility of the STS 444 stainless steel varies under different welding conditions and how its effect on hydrogen embrittlement differs by the impressed current density levels. For doing so, U bend test specimens was used to impress the current density at 5, 10, 15, and 20 mA/cm² in the 0.5M H₂SO₄ + 0.001M As₂O₃ solution with an electrochemical corrosion tester. The hydrogen embrittlement was assessed by observing the time to failure, and then the microphotographs of metal structures were compared to investigate the metal-related structural properties. The study findings suggest that the effect on hydrogen embrittlement for the STS 444 steel significantly depends on both the welding conditions, or variations in the amount of shield gas, and the levels of current density. In particular, as the impressed current density increases, the hydrogen embrittlement increases rapidly.

Key words : Boiler, Stainless steel, Hydrogen embrittlement, Current density

I. 서 론

보일러재료로는 일반적으로 강재를 사용해 왔고 지금도 보일러 재료의 주를 이루고 있으나 내식성이 떨어져 수명이 짧은 단점이 있다. 그동안 스테인리스강재와 같은 내식성이 우수한 강재가 개발되어 점차적으로 스테인리스강재로 대체되고는 있으나 일부의 부식환경

에서 결함을 보이고 있는 것이 사실이다[1,2].

오스테나이트계 스테인리스 강재 STS 304 L과 STS 316L은 바닷가나 섬 지역 등 Cl 이온이 포함된 수질에서 응력부식균열을 일으키는 문제가 발생되어 적용에 제한을 받고 있다[2-4].

이러한 문제를 보완하고자 STS 430을 기본으로 하여 탄소함유량을 낮추고 안정화 원소로 Ti와 Nb를 첨가한 페라이트계 스테인리스 강재 STS 444가 개발되어 보일러 재료는 강재에서 스테인리스강재로 대체되

*주저자:cb5701@korea.com

고 있는 추세에 있다. 페라이트 스테인리스강재 STS 444는 응력부식균열에 대한 저항성은 대단히 우수하여 응력부식균열에 대한 문제는 해결된다고 할 수 있으나 수소균열이라는 다른 문제를 안게 되었다[4-7].

STS 444는 기계가공이 까다롭고 용접에서도 주의를 기울이지 않으면 언제라도 결함이 나타나는 등적용에 많은 어려움이 있다. 특히 용접 결함 중에는 수소균열 문제가 있는데 전체적인 보일러 고장에서 차지하는 비중은 그리 크지 않다. 그러나 보일러에서의 균열문제는 치명적인 문제를 야기하므로 중요하게 다루지 않을 수 없는 것이다[3,5,6].

수소균열은 음극분극을 통해서 실험적으로 응력부식 균열과 구별할 수 있으며, 음극분극은 수소발생에 의해서 수소균열은 더 성장하지만, 응력부식균열은 억제되는 것으로 보고되고 있다[6,8,10].

따라서 본 연구는 용접조건에 따라 제작된 각각의 U 벤드 시험편을 0.5M H₂SO₄+0.001M As₂O₃ 수용액 중에서 전기화학적 부식시험장치로 음극분극시켜 수소를 침투시켰으며 이때 파괴되는 시간을 조사하였다. 용접 조건에 따른 파괴시간과 전류밀도 변화에 따른 파괴시험을 동시에 진행하여 각각의 조건에 따른 수소취성 민감도를 고찰하였다.

II. 시험재료 및 실험방법

2.1. 시험 재료 및 제작 방법

본 실험에 사용된 시험재료는 Table 1과 같은 화학 성분과 기계적 성질을 가진 페라이트계 스테인리스강재 STS 444이다.

시험편 제작은 TIG 자동용접설비를 이용하였으며 세부 작업조건은 Fig. 1과 같다. 용접조건은 보호가스량을 변화시키면서 Table 2와 같은 조건으로 용접하였다. 재료 표면은 알카리계 탈지제(Super cleanser #1001) 1% 수용액을 100°C로 가열하여 10분간 담근 후 물로 세척하고 150°C에서 60분간 건조시켰다.

시험편은 Table 2와 같은 용접조건으로 용접한 후 Fig. 2와 같이 기계가공하여 Press machine에서 Fig. 3과 같이 절곡하여 M6 스테인리스 볼트 너트로 압축시켰다.

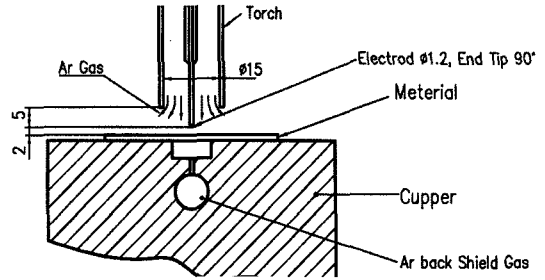


Fig. 1. Electrode and torch.

Table 2. Welding condition.

		Unit	A1	A2	A3	A4
Thickness		mm	2.0			
Welding current		A	140			
Voltage		V	20			
Frequency		Hz	0			
Shield gas	Argon	%	99.9			
	Torch	l/min	20	15	10	5
	Back	l/min	20	15	10	5
Welding speed		cm/min	50			
Polarity			DCSP			
Cleaning status of material surface			Super cleanser #1001, 1% solution, 100°C, 10			

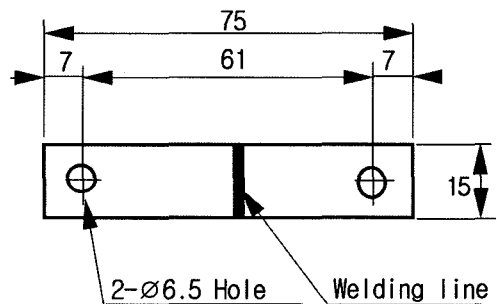


Fig. 2. Unfold U-bend specimen for hydrogen cracking test (mm).

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of STS 444.

Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N	Nb
	0.006	0.23	0.3	0.014	0.001	18.04	1.78	0.005	0.35
Mechanical properties	Tensile strength (kg/mm ²)		Elongation (%)		Hardness Hv		Density (kg/m ³)		
	50.8		34		175		7.79 × 10 ³		

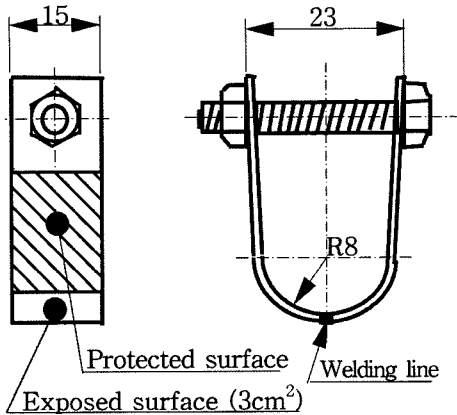
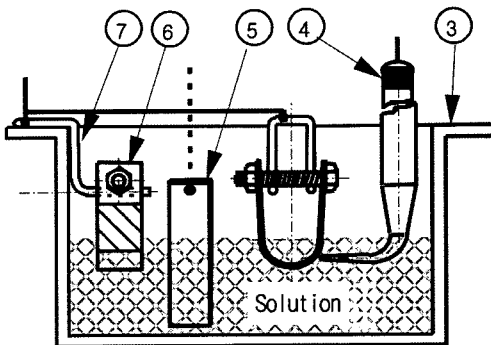
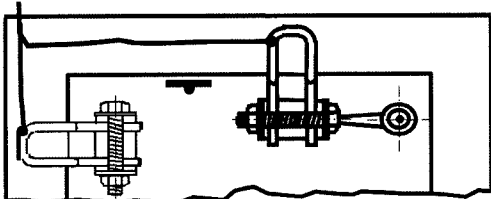
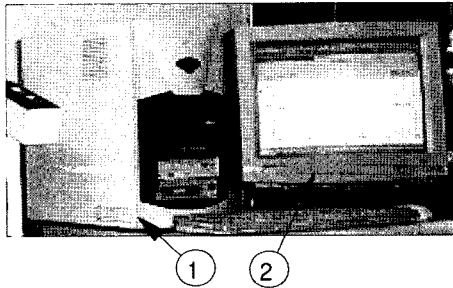


Fig. 3. U bend specimen for hydrogen cracking test (mm).



- ① Potentiostat/Galvanostat /PC
- ② Monitor ③ Corrosion testing cell
- ④ Reference electrode
- ⑤ Counter electrode (Pt)
- ⑥ Specimen ⑦ Supporter of specimen

Fig. 4. Schematic diagram of polarization test equipment.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험은 용접조건과 인가전류에 따른 U 밴드 시험편의 수소취성에 관한 연구를 하기 위해서 Fig. 4와 같은 전기화학적 분극시험장치를 이용하였다.

시험편은 Fig. 3과 같이 노출되는 부분은 1차로 CC-120w 샌드페이퍼로 연마하고 2차로 CC-400w 샌드페이퍼로 연마하였다.

용접부분을 중심으로 3 cm²만 노출되도록 하기 위해서 나머지 부분은 에폭시 수지 및 테이프로 절연시켰다.

실험은 U 밴드 시험편을 시험편 보조대에 걸쳐놓고 전선으로 Potentiostat/Galvanostat/ PC에 연결하여 접촉에 의해서 전기적으로 통하게 하였다.

수소 침투를 가속시키기 위해서 0.5M H₂SO₄ + 0.001M As₂O₃ 수용액에서 실시하였으며 U 밴드 시험편 노출면이 3 cm 잠길 정도로 수면을 유지시켰다. 여기서, 수용액은 0.5 pH이며 실험은 상온에서 실시하였다.

음극분극전류밀도는 5, 10, 15, 20 mA/cm² 4단계로 변화시켰으며 각 전류밀도를 인가했을 때 파괴되는 시간을 10분 간격으로 측정하였고 파괴형상을 광학현미경으로 촬영하였다.

용접조건별 용접 건전성과 수소취성과의 연관 특성은 금속조직 현미경 사진을 통해서 고찰하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접조건별 수소취성에 대한 민감도

Fig. 5는 0.5M H₂SO₄ + 0.001M As₂O₃ 수용액에서 용접조건에 대한 파괴시간에 미치는 전류밀도변화를

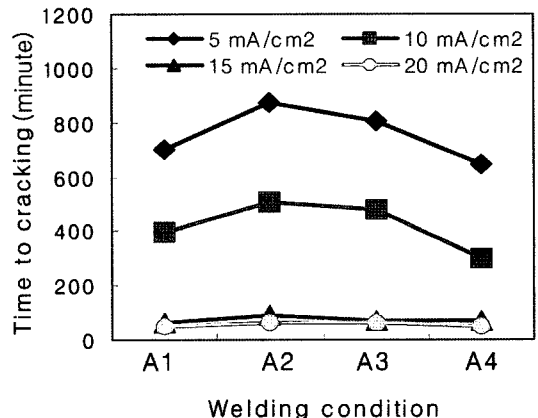


Fig. 5. Time vs. welding condition of current density in 0.5M H₂SO₄ + 0.001M As₂O₃ solution.

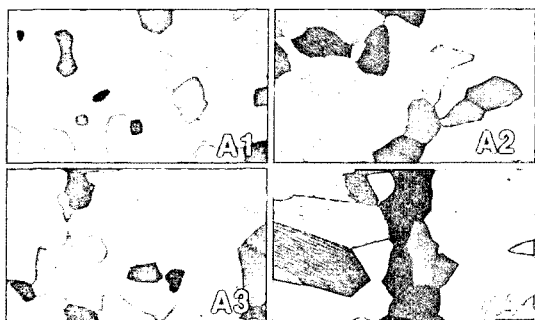


Fig. 6. Microstructures of weld zone with welding condition A1-A4(an 100-power).

나타낸 것이다.

전체적으로 전류밀도에 따라 파괴시간에 큰 차이를 보이고 있으나 용접조건에 따라서는 파괴시간에 차이가 있음을 알 수 있다.

용접조건 A2가 전류밀도에 대한 파괴시간의 민감도가 가장 적으며, $A3 < A1 < A4$ 의 순으로 파괴시간의 민감도가 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 보호가스 양이 너무 적어도 수소취성에 민감하지만 너무 많아도 수소취성에 민감해 진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 금속조직 광학현미경 사진이다. Fig. 5에서 고찰한 바와 같이 수소취성에 가장 민감한 용접조건 A4의 조직이 많이 성장해 있음을 알 수 있는데 이는 보호가스양이 적기 때문에 냉각이 충분치 않아 조직이 크게 성장 되었고 수소취성 또한 민감하게 나타난 것으로 판단된다. 보호가스양이 많은 용접조건 A1은 냉각이 심하게 이루어져 입열양 부족으로 유동성이 떨어졌으며 그로 인하여 용접건전성이 나빠져 수소취성에 민감한 것으로 사료된다[4,11].

3.2 전류밀도에 따른 수소취성의 특성

Fig. 7은 $0.5M H_2SO_4 + 0.001M As_2O_3$ 수용액에서 전류밀도변화에 대한 파괴시간에 미치는 영향을 용접조건별로 나타낸 것이다.

전류밀도가 작으면 파괴시간은 길어지고 전류밀도가 크면 파괴시간이 짧아질 것이라는 것은 쉽게 예측할 수 있으나 Fig. 7은 그 변화 정도가 직선적이지 않음을 알 수 있다. 전류밀도 5와 10, 15 mA/cm^2 를 비교하면 선형적인 변화를 보이지만 전류밀도 15와 20 mA/cm^2 는 크게 변화되지 않음을 알 수 있다.

즉 15 mA/cm^2 이하의 전류밀도에서는 수소균열이 선형적인 지연 형태를 나타내지만, 15 mA/cm^2 이상의 전류밀도에서는 수소균열이 급격히 일어나는 것으로 판단된다. 이와 같이 수소균열은 인가전류밀도가 높아

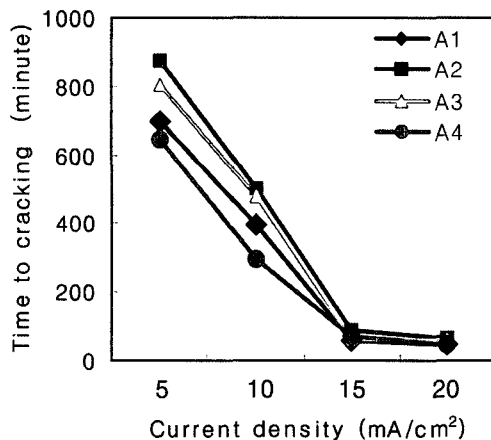


Fig. 7. Time vs. current density of welding condition A1-A4 in $0.5M H_2SO_4 + 0.001M As_2O_3$ solution.

짐에 따라 파단시간은 빨라지지만 응력부식균열은 억제될 것으로 추정된다.

3.3 파단 양상

Fig. 8은 Table 2에 있는 용접조건 A1으로 제작된 U 밴드 시험편을 $0.5M H_2SO_4 + 0.001M As_2O_3$ 수용액에서 전류밀도 $15mA/cm^2$ 로 인가했을 때 파괴된 시험편 표면양상이다.

응력부식시험시의 U 밴드 시험편의 파괴형태는 잔가지가 많은 균열을 보이고 시간경과에 따라 균열이 서서히 진행되는 반면 본 시험의 경우는 Fig. 8에 나타난 것과 같이 용착금속부를 지나면서 거의 직선으로 균열이 진행되는 양상을 보이고 있다[13].

이 수소균열진행은 주위에서 소리를 들을 수 있을 정도의 크기로 “딱” 하는 소리를 내는 동시에 거의 다 균열이 진전된다.

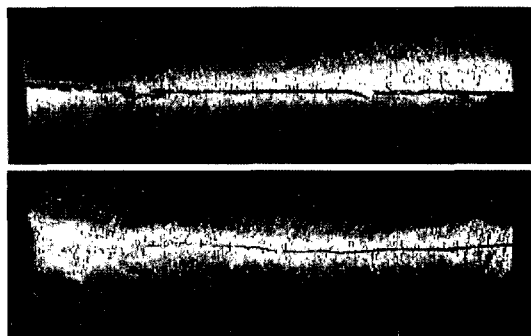


Fig. 8. Fracture surface of U bend specimen in $0.5M H_2SO_4 + 0.001M As_2O_3$ solution.

IV. 결 론

STS 444 강재에 있어서 용접조건과 전류밀도가 수소취성에 미치는 특성을 연구한 결과 보호가스양에 따라서 수소취성의 민감도가 크게 영향을 받고 있으며, 인가전류밀도가 높아짐에 따라 수소균열이 급격히 빨라지고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 伊藤伍郎, 腐蝕と防蝕, 機械工學全書6, コロナ社, 197-206, (1986)
- [2] A. John Sedriks, Corrosion of Stainless Steels, Electrochemical Society, 271-282, 293-296, (1996)
- [3] 임우조 외 5인 공역, 부식과 방지, 원창출판사, 200-208, (1996)
- [4] 한국철강협회 스테인리스클럽, 스테인리스강의 용접, 비오스코퍼레이션, 15-17, 179-183, 192-199, (1999)
- [5] Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Publishing Co., 234-242, 248-253, 278-285, (1992)
- [6] 長谷川正義 監修, 스테인리스鋼 便覽, 230-235, 239-240, (1992)
- [7] 임우조, 최병일, 페라이트 스테인리스강 용접부에 대한 수소취성의 기계적 특성에 관한 연구, *한국가스학회지*, 9(4), 11-16, (2005)
- [8] 吉澤四郎, 山川宏二, 片桐 晃, 金屬の腐食防食序論, 化學同人, 110, (1989)
- [9] 李鶴烈, 金屬腐蝕工學, 淵鏡文化社, 156-160, (1997)
- [10] 임우조, 최병일, 용접조건에 따른 페라이트 스테인리스강에 대한 수소취성의 전기화학적 분석특성에 관한 연구, *한국가스학회지*, 9(4), 30-35, (2005)
- [11] 이진희, 용접 기술 실무, 21세기사, 91-99, 464-478, (2001)
- [12] Mars G. Fontana, CORROSION ENGINEERING, Third Edition, 143-152, (1987)
- [13] 임우조, 금속구조물의 응력과 부식, *한국박용기관학회지*, 10(1), (1986)