

인공해수의 pH에 따른 강 용접부의 응력부식균열거동에 관한 연구

A Study on the Stress Corrosion Cracking Behaviors for Weldment of Steel with Various pH Values in Synthetic Sea Water

유효선 (전북대)
임재규 (전북대 기계설계학과)
정세희 (전북대 정밀기계공학과)

1. 서론

금속재료의 응력부식균열(stress corrosion cracking : SCC) 현상에 영향을 미치는 인자들 중 환경적 인자에는 부식용액의 산도(acidity : pH), 전위(potential), 온도 그리고 부식액의 유동속도 및 이온의 농도(concentration) 등의 변수들이 있으며, 이들 인자들은 상호 관련성을 갖고 응력부식거동에 큰 영향을 미친다¹⁾. 그러므로 부식환경하에서 이들 인자들이 SCC 거동에 미치는 영향을 평가하는 것은 재료의 환경강도 평가에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히 부식환경에 놓여 있는 실기 대형 구조물에서 강 용접부의 용접열영향부(heat affected zone : HAZ) 조직, 특히 용융선(fusion line : F.L)부위의 조직(이하 용융선조직)은 환경인자의 변화에 따른 재료의 SCC거동은 모재조직과는 상당한 차이를 보일 것으로 시료된다.

따라서 본 연구에서는 미소시험편을 사용한 SCC의 새로운 평가방법의 확립을 목적으로, 소형편치(small punch : SP)시험법을 이용하여 강 용접부의 조직을 대상으로 부식액의 pH농도에 따른 SCC의 감수성을 평가하여 모재조직의 SCC 특성과 비교, 고찰해 보고자 한다. 그리고 음향방출(acoustic emission : AE)시험에 의해 SCC 민감도와 AE 신호 특성 그리고 초기파괴(incipient failure)점의 상호관계를 조사해 보고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용된 강재는 HT80강재로서 시험편은 용접블록의 모재 및 용융선 부위에서 SP시험편의 크기(10×10×0.5³mm)로 채취하였다. SP-SCC 시험에 선정된 부하속도는 일련의 실험에서 SCC 평가에 유효한 부하속도로 확인된 3×10⁻⁴mm/min로 하였다²⁾. SCC 감수성 평가인자로서 사용된 SP-에너지(E_{sp})는 미소시험편의 하중-변위곡선의 아래면적으로 계산하였다. 시험의 부식환경은 인공해수(synthetic sea water : SSW)로 하였으며, 인공해수의 순환속도는 50ml/min으로 하였다. 이때 pH의 조절은 25%의 HCl과 0.1N NaOH용액을 이용하여 각각 pH6.0, pH8.2 그리고 pH10.0으로 하였다. 시험후 전자현미경을 이용하여 거시적, 미시적 파면특성을 관찰하였다.

한편, AE시험에서 사용된 센서는 50~1000kHz의 범위를 감지할 수 있는 압전형 변환기를 사용하였다. AE신호 처리에 있어 총 이득(total gain)은 80dB로 하였으며, 잡음(noise)의 제거를 위해 100~1200kHz의 대역 필터링을 행 하였다. 그리고 초기전압은 71dB(3.55mV)로 설정하였다. AE시험의 평가인자는 AE 신호의 파형특성인 진폭(amplitude)으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. pH의 변화에 따른 SCC 거동과 SEM 관찰

모재와 용융선조직을 대상으로 pH농도가 각기 다른 세 종류의 인공해수중에서 얻은 하중-변위선도들을 대기상태의 경우와 함께 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 모재조직인 곡선 ①, ②, ③, ④를 보면 pH농도가 산성쪽으로 갈수록 하중-변위거동은 감소하고 있어, 모재조직의 파괴거동은 뚜렷한 pH농도의 의존성을 보이고 있다. 이에 대해 곡선 ⑤, ⑥, ⑦의 용융선조직의 경우는 세 종류의 pH농도에 있어 모두 곡선 ⑤의 대기상태에 비해 매우 낮은 하중-변위거동을 보이고 있다. 또한 이러한 결과는 Fig. 2에 나타난 두 조직의 SCC 민감도의 결과에서도 관찰할 수 있다. 여기서 각 조직의 SCC 민감

도는 대기상태와 부식환경에서의 파괴에너지의 비를 이용한 아래식으로부터 계산하였다³⁾.

$$SCC \text{ susceptibility} = [1 - (E_{SP-Corr.} / E_{SP-Air})]$$

이때 $E_{SP-Corr.}$ 와 E_{SP-Air} 는 각각 부식환경과 대기상태에서의 SP-에너지이다. 따라서 모재조직의 SCC 민감도는 pH6.0, pH8.2 그리고 pH10.0의 경우에 각각 0.58, 0.35, 그리고 0.04를, 용융선조직은 거의 같은 0.73을 나타내고 있다. 이상의 실험결과들을 정리하면 모재조직의 경우는 부식용액의 pH농도에 따라 뚜렷한 SCC 거동의 차이를 나타내고 있는 반면, 용접부의 용융선조직은 약산성의 해수뿐만 아니라 pH10.0의 알칼리성 부식환경에서도 SCC 감수성 정도가 매우 높게 나타나, pH농도의 차이에 관계없이 모두 민감한 SCC 감수성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이때 pH10.0의 알칼리성 인공해수중에서 모재의 경우는 SCC가 관찰되지 않은 반면, 용융선조직의 경우는 뚜렷한 SCC 거동을 보인 이유는 두 조직의 미세조직의 차이로 생각할 수 있다. 즉, 퍼얼라이트 조직으로 구성된 모재조직에 대해 용융선조직은 용접열에 의한 열처리 효과에 의해 취화된 불 균일한 마르텐사이트 조직으로 구성되어 있으며 또한, 모재조직에 비해 약 3~4배 정도 큰 80~100 μ m의 조대한 입자로 구성되어 있기때문에 알칼리성 해수중에서도 높은 SCC 거동을 나타내는 것으로 생각된다.

모재 및 용융선 조직의 파면에 대한 SEM 관찰 결과들중 pH10.0의 거시적 파단 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 모재의 거시적 파단사진을 보면, 시험편은 상당량의 소성유동을 한후 파괴되어 연성적인 파괴거동을 관찰할 수 있다. 이에 반해 용융선조직은 굵은선으로 표시된 용융선을 기준으로 응력부식균열은 HAZ측 부위에서 원주방향으로 크게 전파되어, HAZ측의 용융선조직이 용착 금속조직보다 높은 SCC 감수성을 나타내고 있음을 명확히 확인할 수 있다.

또한, 미시적 파면사진으로부터 모재조직은 pH6.0, pH8.2, pH10.0의 경우에 각각 입내파면, 의벽개파면 그리고 딥플파면이 관찰되어 SCC, quasi-SCC 그리고 No SCC의 파괴거동으로 정리할 수 있었다. 반면, 용융선조직의 경우는 세 종류의 pH농도에 있어 모두 입내파면을 보여 뚜렷한 SCC 파괴거동임을 알 수 있었다.

3-2. pH의 변화에 따른 AE 거동

Fig. 4는 모재조직의 경우 일정시간(40min.)동안에 검출된 AE신호의 평균진폭거동을 하중-변위 선도와 함께 나타낸 그림이다. 여기서 농도 pH8.2의 결과는 생략하였다. 먼저 pH6.0의 경우를 보면, 변위 0.62mm 지점에서 SCC에 의한 초기파괴(incipient failure)의 평균진폭 특성치로 확인된⁴⁾ 약 5dB의 평균진폭 거동을 보여, 이 지점에서 미시균열의 개시가 이루어졌음을 알 수 있다. 그리고 pH10.0의 경우는 변위 1.25mm 지점에서 약 5dB의 진폭거동을 보이고 있다. 따라서 이상의 두 pH 농도에서 검출된 신호의 평균진폭 거동을 볼 때, 산성에 가까운 pH6.0의 경우가 pH10.0의 경우보다 SCC가 빠르게 개시되었음을 알 수 있다. 또한 각 pH농도에서 평균진폭의 총 누적은 각각 110dB와 68dB의 값을 보여, SCC 민감도가 큰 pH6.0에서 높은 누적 평균진폭 특성을 보였다.

한편, Fig. 5의 용융선조직의 경우를 보면, 두 종류의 pH농도에 있어 모두 시험전반부에서 초기 파괴의 평균진폭 특성치 및 그 이상의 값을 보여, 용융선조직은 약산성 및 알칼리성 해수분위기에 있어 모두, 빠르게 응력부식균열이 개시, 전파되었음을 평균진폭 거동으로부터 알 수 있다. 그리고 pH6.0과 pH10.0에서 평균진폭의 peak 치를 보면 각각 9dB와 7.5dB를 나타내고 있어 약산성 해수에서 보다 높은 평균진폭의 peak 치를 보이고 있다.

이상의 모재 및 용융선조직에 있어 AE시험결과로부터 얻은 각 조직의 초기파괴점(δ)과 SP시험에 의해 얻은 SCC 민감도 사이의 결과를 비교해 보면 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 SCC 민감도가 증가함에 따라 초기파괴점은 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히할만한 사실은 각 테이타점을 이은 선도상에 변곡점이 존재한다는 사실이며, 그리고 이러한 변곡점의 위치는 Quasi-SCC가 일어난 pH8.2의 모재조직임에 주목할 필요가 있다.

따라서 지금까지 살펴본 각 미세조직의 미시파괴과정에 따른 AE시험결과들로부터 환경인자 변화에 의한 SCC 감수성 평가에 있어 AE시험의 적용 가능성을 확인할 수 있으며, 또 모재 및 용융

선조직의 SP시험결과의 유효성 및 신뢰성을 확인할 수 있다.

4. 결 론

1. pH6.0, pH8.2, pH10.0에서 모재조직의 SCC 민감도는 각각 0.58, 0.35, 0.04를 나타내어, pH값이 감소함에 따라 높은 SCC 민감도를 보였다. 반면, 용융선조직은 세종류의 pH농도에서 거의 같은 0.73을 나타내고 있어, 약산성의 부식환경 뿐만 아니라 pH10.0의 알칼리성 부식환경하에서도 높은 SCC 민감도를 보였다.
2. 모재조직의 경우 pH6.0, pH8.2, pH10.0의 인공해수 중에서 AE신호의 초기파괴의 평균진폭 특성치를 보인 변위는 pH농도가 약산성쪽으로 저하함에 따라 즉, SCC 민감도가 증가할수록 시험편의 변형단계 전반부에 가까워짐을 알 수 있었다.
3. 용융선조직의 경우는 모두 시험전반부에서 초기파괴의 평균진폭 특성치 및 그 이상의 값을 보여, 약산성 및 중성 그리고 알칼리성 해수분위기에서 모두 빠르게 균열이 개시, 전파되었음을 알 수 있었다.
4. 이상의 모재 및 용융선조직에 대한 하중-변위거동, SCC 민감도, SEM 관찰 그리고 AE시험의 미시파괴거동, SCC 민감도와 AE에 의한 초기파괴점과의 상관관계 등의 고찰로부터 SP 시험은 환경인자의 변화에 대한 SCC 평가시 우수한 시험방법임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Townsend, 1972, "Hydrogen Sulfide SCC of high Strength Steel Wire", Corrosion, Vol.28, p.39.
- (2) 유효선, 이송인, 임재규, 정세희 1993, "소형편치시험법에 의한 SCC 평가에 관한 연구", 대한기계학회, 제 17권, 제 8호, pp. 2033~2042.
- (3) Clarke, W. L., and Walker, W. L., "Comparative Methods for Measuring Degree of Sensitization in Stainless Steel", ASTM STP 656, pp. 99~132.
- (4) 유효선, 정세희, 1993, "음향방출시험에 의한 고장력강의 응력부식균열전파 거동에 관한 연구", 한국재료학회, 제 3권, 제 4호, pp. 361~371.

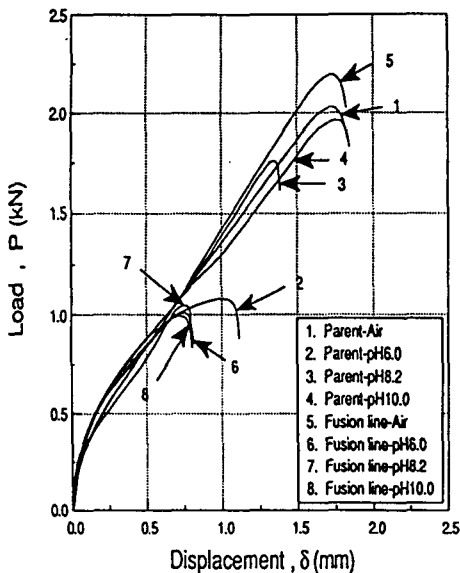


Fig. 1 Load vs displacement curves for HT80 steel weldment in SSW-pH6.0, pH8.2 and pH10.0

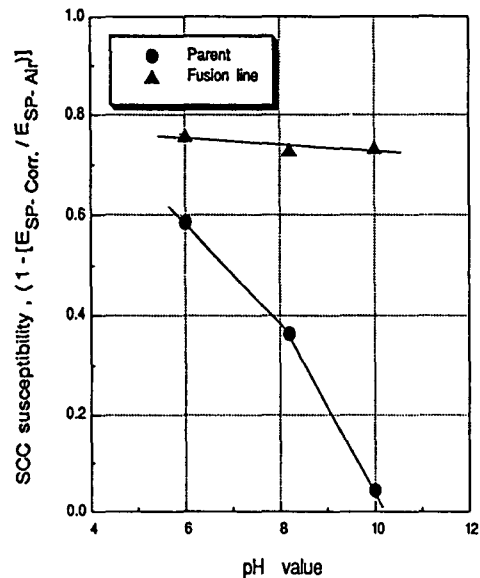


Fig. 2 Relationship between SCC susceptibility and various pH values in HT80 steel-parent and fusion line

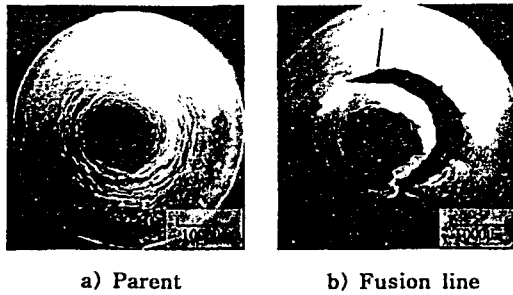


Fig. 3 SEM macrofractographs for HT80 steel-parent and fusion line in SSW-pH10.0

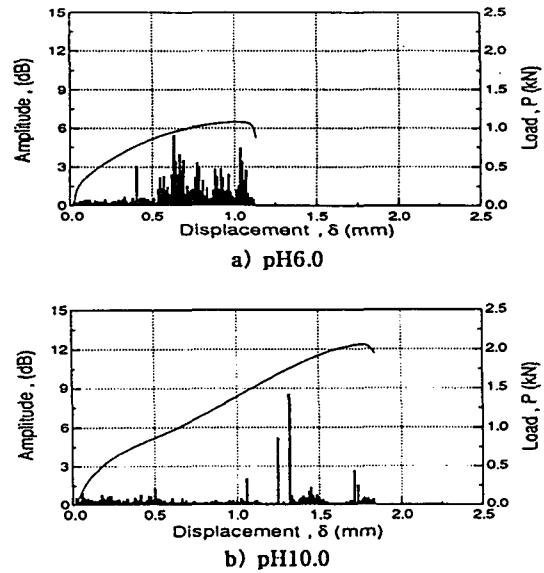


Fig. 4 AE amplitude distribution for HT80 steel-parent in SSW-pH6.0 and pH10.0

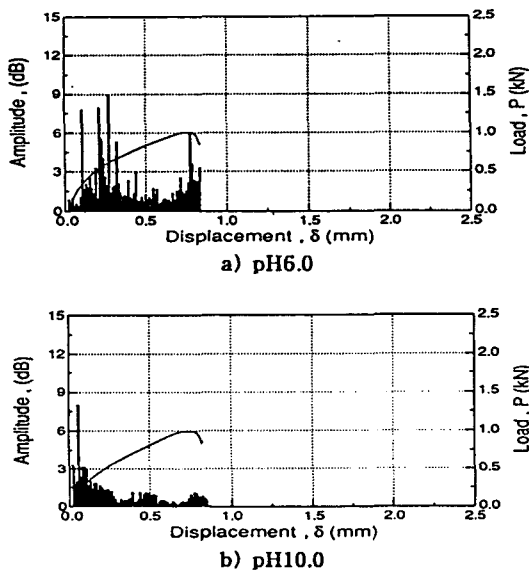


Fig. 5 AE amplitude distribution for HT80 steel-fusion line in SSW-pH6.0 and pH10.0

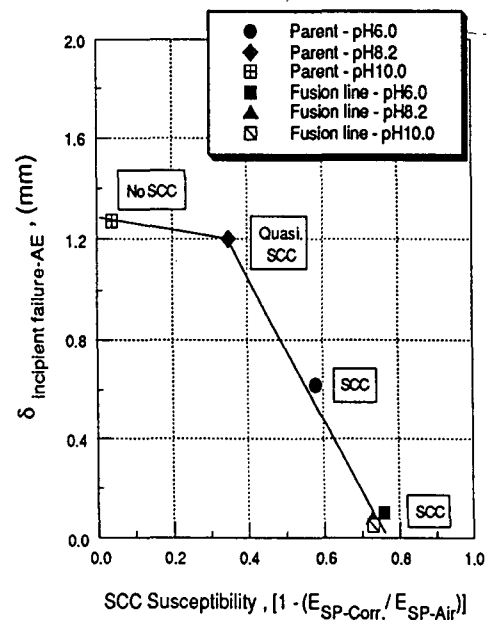


Fig. 6 Relationship SCC susceptibility and $\delta_{\text{incipient failure-AE}}$ with the pH values in HT80 steel weldment