

研究論文

미소시험편에 의한 강 용접부의 응력부식 균열 평가에 관한 연구

유효선* · 임재규** · 정세희***

A Study on the Stress Corrosion Cracking Evaluation for Weld Joint of Steel by Using Miniaturized Small Specimen

H.S. You*, J.K. Lim** and S.H. Chung***

Key Words : stress corrosion cracking(응력부식균열), small punch-slow strain rate test(소형펀치-저변형률속도시험), susceptibility(감수성), acoustic emission test(음향방출시험), amplitude(진폭), miniaturized specimen(미소시험편), equivalent fracture strain(등가파괴변형률)

Abstract

The conventional SCC(stress corrosion cracking) test methods have much difficulty in evaluating the SCC behaviors of the localized zone like HAZ, bond line and weld metal because of the specimen size. Accordingly, the purpose of this paper is to develop the new SCC test method of the welded zone by evaluating the SCC susceptibility on parent metal and various microstructures of the welded zone by SP(small punch) test method using miniaturized small specimen and SSRT(slow strain rate test) method(SP-SSRT). Besides, this study is to verify the efficiency of the SP-SSRT results through AE(acoustic emission) test which is a useful technique to monitor the microfracture processes of the material. From the results of SCC susceptibility, SEM observation and AE test, it can be concluded that the SP-SSRT test using miniaturized small specimen(10 mm×10mm×0.5mm) will be a good test method to evaluate the SCC susceptibility on the local zone such as the welded zone.

* 정회원, 전북대학교 강사

** 정회원, 전북대학교 기계설계학과

*** 정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

※ 이 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비 지원에 의해 연구되었음

1. 서 론

부식환경에 처해있는 실기 용접구조물의 용접열 영향부(heat affected zone : HAZ)는 용접열 사이클에 의해 변태된 복잡하고 불균일한 조직들의 생성으로 인하여 부식환경내에서 응력부식균열(stress corrosion cracking : SCC) 감수성이 매우 높은 것으로 알려져 있다^{1,2)}. 따라서 특정 부식환경에 대한 용접부 조직의 SCC 감수성 평가는 용접구조물의 건전성 확보에 매우 중요하다고 말할 수 있다.

그러나 지금까지 종래의 SCC 감수성 평가방법인 정변형시험, 정하중시험, 파괴역학적 시험 그리고 저변형률속도시험(slow strain rate test : SSRT)법에 의한 연구보고³⁻⁵⁾는 대부분 철강 모재에 국한된 연구결과로서 실제 부식환경하에 있는 구조물에서 SCC가 발생, 전파되는 용접부위에 대한 보고는 많지 않다. 특히 용접부위 중에서도 가장 SCC에 민감한 용융선(bond line : 이하 B.L) 부위에 대한 연구보고¹⁻⁶⁾는 극히 드문 실정이다. 이는 종래의 SCC 시험방법들은 모두 대형시험편을 사용함으로써 용접부의 국부부위에 대한 SCC 시험편의 채취가 어렵기 때문이다. 이들 시험방법들 중 최근에 개발된 방법의 하나로 인장시험편을 이용한 SSRT법의 경우를 예로 들면, 시험편 가공에 있어 인장시험편의 표점거리(gauge length) 부위에 B.L을 위치시킨다 해도, 최종과단부가 B.L을 따라 과단된다는 것은 매우 불확실하기 때문에 국내외적으로 용접부의 각 미세조직에 대한 SCC 연구보고는 극히 드문 실정이다.

따라서 본 연구에서는 미소시험편(miniaturized

specimen : 10mm×10mm×0.5mm)으로 재료의 파괴강도 평가가 가능한 소형펀치(small punch : SP) 시험법⁷⁾과 위의 저변형률속도시험법을 병행한 소형펀치-저변형률속도시험(이하 SP-SSRT)으로 부식환경내에서 강 용접부의 각 조직 특히 B.L 부위에 대한 SCC 감수성 정도를 정량적으로 평가함으로써, 강 용접부의 국부부위에 대한 새로운 SCC 평가법으로 SP-SSRT시험의 적용 가능성을 조사하고자 한다. 그리고 SP-SSRT시험에 의한 SCC 시험과정에서 음향방출(acoustic emission : AE) 시험법을 도입하여 용접부의 각 조직에 대한 미세파괴과정시 발생하는 AE신호 특성을 비교, 분석함으로써 SP-SSRT의 시험결과에 대한 신뢰성을 조사하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 해양구조물용 고장력강인 HT80강으로서 Table 1에 시험재의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타내었다. 그리고 시험재에 대한 잠호용접(submerged arc welding : SAW)조건은 Table 2와 같다. Fig. 1은 HT80강 용접부의 단면 개략도와 시험편의 채취부위, 시험편의 크기 그리고 B.L 부위의 SP시험편에 대한 부하방식을 나타낸 그림이다. 이때 용접블록으로 부터 SP시험편의 채취는 시험편의 두께방향이 T방향(longitudinal direction)이 되도록 채취하였다.

Fig. 2는 용접블록의 미세조직 사진으로 모재조직은 약간의 마르텐사이트(martensite) 조직을 갖는

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of steel used

Chemical composition(wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
HT80	0.11	0.2	0.7	0.003	0.003	0.2	0.7	0.48	0.39

Mechanical properties

Steel	Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)
HT 80	794	834	30

Table 2 Welding conditions

Steel	Heat input (kJ)	Preheating (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Flux
HT80	30	150	550	30	33	KB-80C

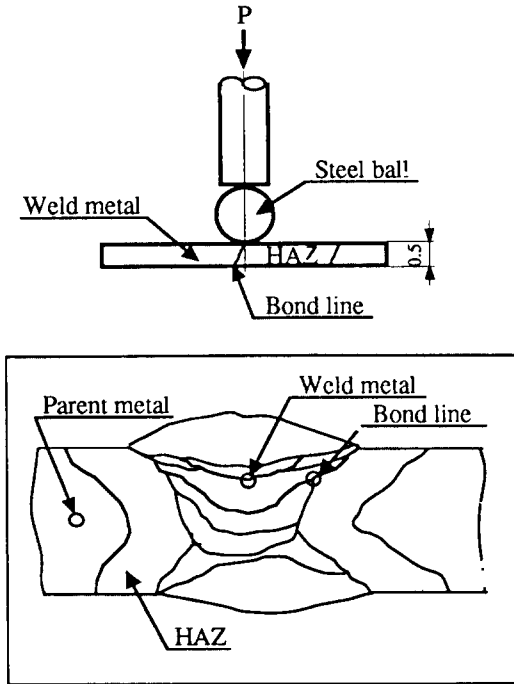


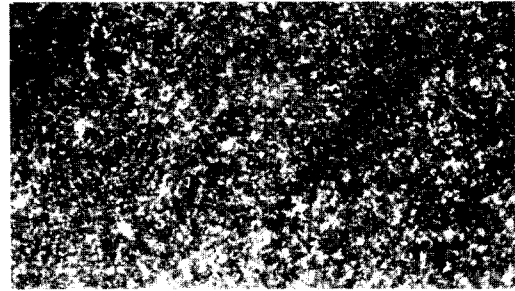
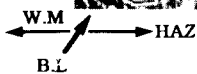
Fig. 1 Schematic illustration showing the extracted position and christening of SP specimen in HT80-weld joint



a) Parent metal



b) Bond line



c) Weld metal

50μm

Fig. 2 Various microstructures of weld joint of HT80 steel

층상 펄라이트(pearlite) 조직으로, B.L 부위의 HAZ조직은 용접열에 의해 취화된 조대한 마르텐사이트(martensite)와 베이나이트(bainite) 조직의 혼합조직으로 구성되어 있음을 관찰할 수 있다. 그리고 용접금속(weld metal : 이하 W.M)조직은 미세한 페라이트(ferrite) 조직으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

2.2 실험방법

SP-SSRT의 실험은 용량 2ton인 저변형률속도시험기를 사용하여 편치선단에 HRC 62~67의 경도를 갖는 2.4mm의 강구를 놓고 이를 통하여 시험편의 상부에 하중을 가하였다. 시험에 선정된 부하속도는 일련의 시험에서 SCC에 민감한 속도로 확인된 3×10^{-4} mm/min로 택하였다⁸⁾. Fig. 3에 SP-SSRT의 시험장치 및 미소시험편 체결부위의 개략도를 나타내었다. 한편, SCC 감수성의 평가인자로서 사용된 SP-에너지(E_{sp})는 미소시험편의 하중-변위곡선의 아래면적으로 계산하였으며, 또 AE시험분석에 있어 사용된 파괴점까지의 등가파괴변형률(equivalent fracture strain : ϵ_{qf})은 아래식으로 부터 산출하였다⁷⁾.

$$\epsilon_{qf} = \ln(t_0/t^*) = \beta(\delta/t_0)^{3/2} \quad (1)$$

여기서 t_0 : 시험편의 초기두께, t^* : 파괴시 시험편의 최소두께, β : 실험상수(=0.15), δ : 변위이다. 또한, 시험후 전자현미경을 통해 시험편들의 거시적, 미시적 파면특성을 관찰하였다. 부식환경은 pH8.2의 표준 인공해수(synthetic sea water : SSW)⁹⁾로 하였으며, 인공해수의 순환속도는 대기 개방상태에서

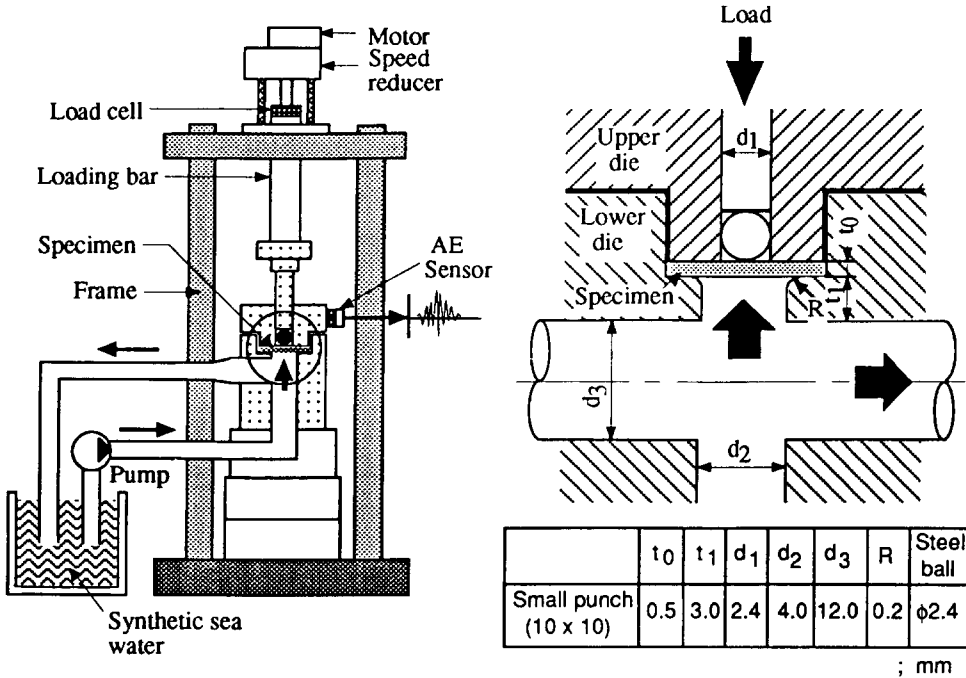


Fig. 3 Schematic illustration of experimental equipments for SP-SSRT

50ml/min의 일정한 속도로 강제순환시키면서 자연 부식전위 (E_{corr})에서 실험을 행하였다. 이때 인공해수의 총량은 30l이며, 해수온도는 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였고, 그 공급과 배출은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 또한 해수중의 불순물을 제거하기 위해 filter를 사용하였으며, 시험중의 pH농도의 변화를 최소화하기 위해 매 12시간마다 pH값을 측정하여 그의 변화량을 보정하였다.

한편, 실험에 사용된 AE장비는 Locan AT AE장비를 사용하였다. AE신호는 Fig. 4에 보여진 AE계측 system을 통하여 분석되어졌으며, 신호검출에 사용된 센서는 넓은 범위의 주파수(50~1000kHz)범위를 감지할 수 있는 광대역형 압전형변환기(piezoelectric transducer : PZT)를 사용하였다. 센서에서 감지된 신호는 총 80dB로 증폭한 뒤 noise제거를 위해 100~1200kHz의 bandpass filtering을 하였다. AE시험시 초기전압(V_{th})값은 주위의 여러 잡음 level을 고려하여 3.55mV로 설정하였다. 그리고 AE센서의 부착은 미소시험편에 직접 부착이 어려우므로 Fig. 3과 같이 시험지그의 상부다이에 부착시켰다. 이때 시험편과 상부다이 사이에 그리고 상부다이와 센서 사이에 high vacuum grease를 바른 후, clamp 및 토크렌치를 사

용하여 일정압력으로 고정하였다.

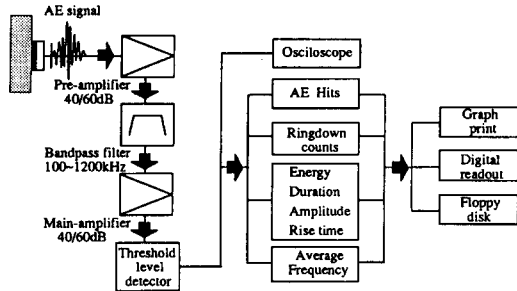


Fig. 4 Block diagram for the AE signal process

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 각 미세조직의 SCC거동

Fig. 5는 대기상태 및 부식환경에서 얻은 용접부 각 미세조직의 하중-변위선도들이다. 먼저 대기상태인 곡선 ①, ②, ③의 경우에 최대하중(P_{max})의 거동을 보면, 곡선 ②, ③의 B.L과 W.M이 곡선 ①의 모재보다

약간 높은 P_{max} 거동을 보이고 있으나, 변위(δ)는 거의 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편, 부식환경에서의 하중-변위선도들을 보면 세 조직 모두 대기상태보다 P_{max} 및 δ 의 저하를 보이고 있으며, P_{max} 를 볼때 그 저하정도는 모재, W.M, B.L 순으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

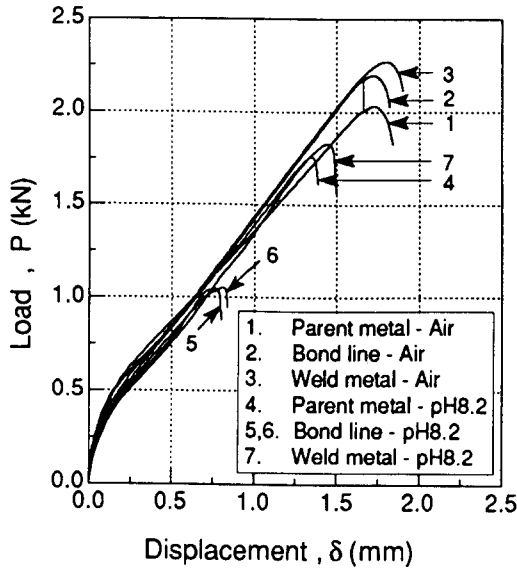


Fig. 5 Load vs displacement curves for HT80 steel-weld joint in air and SSW-pH8.2

이같은 각 미세조직의 하중-변위거동으로부터 계산된 SP-에너지는 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 대기상태의 경우에는 모재, B.L, W.M에 있어 각각 2.31kN·mm, 2.40kN·mm 그리고 2.50kN·mm를 나타내고 있어, 세 조직 모두 높은 E_{SP} 의 거동을 보이고 있다. 이에 반해 부식환경에서는 모재, B.L, W.M조직에 있어 각각 1.50kN·mm, 0.65kN·mm 그리고 1.60kN·mm를 나타내고 있어, 세 조직 모두 대기상태보다 낮은 파괴에너지를 보이고 있다. 특히 세 조직중 B.L이 가장 낮은 파괴강도를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 용접부의 각 미세조직에 대해 부식환경 하에서 SCC 민감도를 용융선을 기점으로 거리에 따라 나타낸 결과이다. 이때 SCC의 민감도는 대기상태와 부식환경에서의 파괴강도의 비를 이용하여 계산된 아래식으로부터 산출하였다¹⁰⁾.

$$SCC \text{ susceptibility} = [1 - (E_{SP-Corr} / E_{SP-Air})] \quad (2)$$

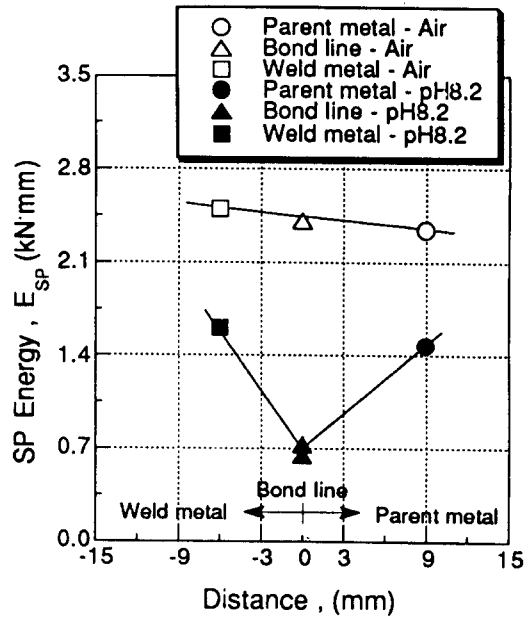


Fig. 6 SP-energy(E_{SP}) distribution along distance from bond line for HT80 steel-weld joint in air and SSW-pH8.2

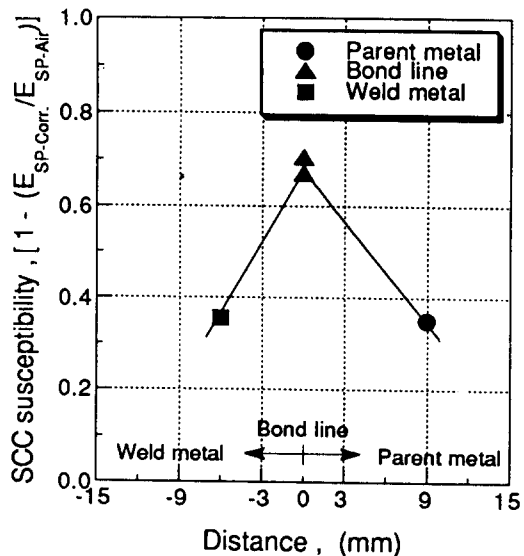


Fig. 7 SCC susceptibility distribution along distance from bond line for HT80 steel-weld joint

따라서 각 미세조직에 대한 SCC 민감도는 모재의 경우에는 0.35, B.L의 경우에는 0.73 그리고 W.M의 경우에는 0.36을 나타내고 있어, 모재 및 W.M에 비해

B.L부위의 조직이 매우 높은 SCC 민감도를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 세 조직중 B.L의 조직이 SCC에 가장 민감함을 정량적으로 알 수 있다.

3.2 용접부 각 미세조직의 파면관찰

부식환경중에서 용접부 각 미세조직들이 어떠한 파괴거동을 보이면서 파단되었는지 알아보기 위해 SEM 관찰을 행하여 얻은 거시적, 미시적 파괴거동을 대기상태와 함께 Fig. 8, Fig. 9에 나타내었다.

먼저 Fig. 8은 대기상태의 거시적인 파괴양상으로, 세 조직 모두 상당량의 소성유동을 한 후 반구 정점부위로부터 멀리 떨어진 부위에서 원둘레 방향으로 균열이 전파되어 연성적으로 파괴되었음을 알 수 있다. 특히 사진 (b)인 B.L의 경우를 자세히 살펴보면, 직선으로 표시된 용융선을 기점으로 원주방향의 균열이 화살표로 표시된 HAZ측 부위에서 크게 전파되었음을 알 수 있다.

한편, 부식환경에서의 거시적 파면양상을 보면, 세 조직 모두 대기상태의 경우보다 소성유동의 정도가 적음을 관찰할 수 있으며, Fig. 5에서 가장 큰 하중-변위거동을 보인 W.M이 타조직에 비해 가장 큰 소성유동을 한후, 대기상태와 같이 부식환경에서도 원주균열이 반구 정점으로부터 멀리 떨어진 위치에서 형성되었음을 알 수 있다. 그리고 모재의 경우에서는 대기상태에서 관찰되지 않은 주균열방향에 수직하게 생성된 2차균열(secondary crack)들도 관찰할 수 있다.

한편, 하중-변위선도의 거동으로부터 SCC 감수성이 가장 크게 나타난 B.L의 경우를 보면, 부식환경에서 세 조직중 가장 적은 소성유동과 함께, 타조직에 비해 반구 정점부위로부터 매우 짧은 거리의 위치에서 원주방향으로 균열이 전파되고 있음을 알 수 있다. 특히 주목할만한 내용은 대기상태와 같이, 직선으로 표시된 용융선을 기점으로 응력부식균열이 W.M측 부위보다 대부분 HAZ측 부위에서 크게 전파되어, HAZ측의 높은 응력부식균열 감수성이 매우 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 반구 정점으로부터 원주균열까지의 거리를 대기상태와 비교해 볼때 그 거리가 짧아 SCC에 의한 빠른 파괴거동을 관찰할 수 있다. 따라서 이러한 거시적으로 관찰된 균열거동으로부터 미소시험편을 사용한 SP-SSRT시험은 좁은 영역에서 불규칙하게 변화하는 용접부의 미세조직에 대한 SCC 감수성 평가시 유

용한 시험방법으로 제안될 수 있다.

또한 Fig. 9에 나타낸 이들 시험편의 미시적 파면 사진을 보면, 대기상태에 있어서는 세 조직 모두 딥플(dimple)의 파면양상을 갖는 연성적 파괴거동을 보이고 있다. 이에 반해 부식환경의 경우를 보면, 모재 및 W.M에서는 딥플파면과 입내파면이 혼재된 의벽개파괴(quasi-cleavage) 양상을, 그리고 B.L의 경우에는 뚜렷한 입내파면을 관찰할 수 있어, 세 조직중 B.L이 가장 민감한 SCC 거동을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

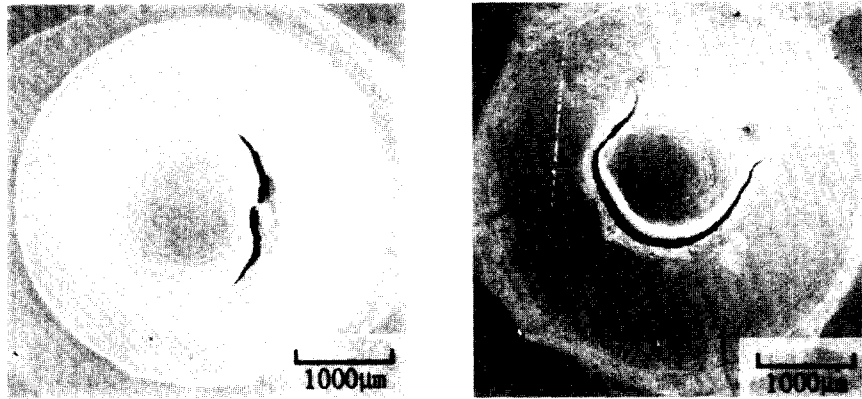
지금까지 대기상태 및 부식환경중에서 SP-SSRT 시험에 의해 살펴본 용접부 각 부위에 대한 하중-변위거동 및 SCC 민감도 그리고 SEM에 의한 거시적, 미시적 파면관찰로부터 부식환경에서 모재 및 W.M의 경우에는 quasi-SCC의 파괴거동으로 그리고 B.L은 뚜렷한 SCC의 파괴거동으로 정리할 수 있다.

따라서 이상의 실험결과(Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9)를 종합하여 고찰해 볼때, 새로이 수행된 SP-SSRT시험은 종래의 시험방법으로는 평가하는데 어려움이 많은 용접부의 각 미세조직에 대한 고유한 SCC 민감도를 정량적으로 그리고 명확하게 평가할 수 있는 매우 유용한 시험방법으로 그 적용 가능성이 높음을 알 수 있다.

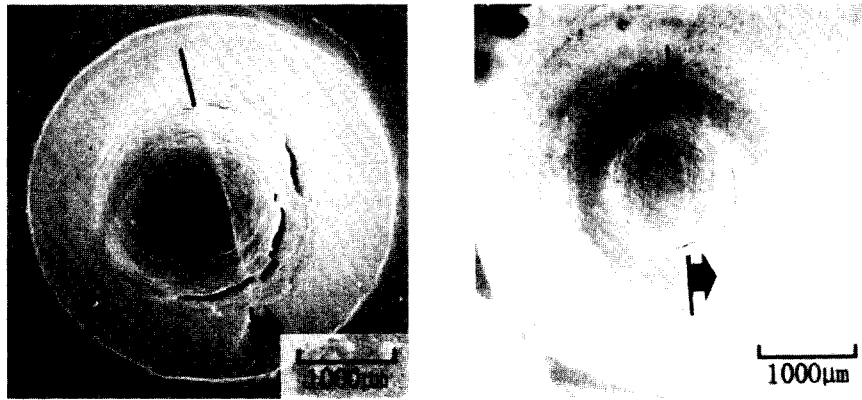
3.3 용접부 각 미세조직의 AE 거동

다음은 미소시험편을 이용한 SCC 시험과정에서 SCC의 발생 및 전파거동에 밀접한 관련이 있는 것으로 확인된 AE신호의 intensity특성¹¹⁾을 이용하여 용접부의 각 미세조직에 대한 SCC의 미시파괴거동을 고찰해 보기로 한다.

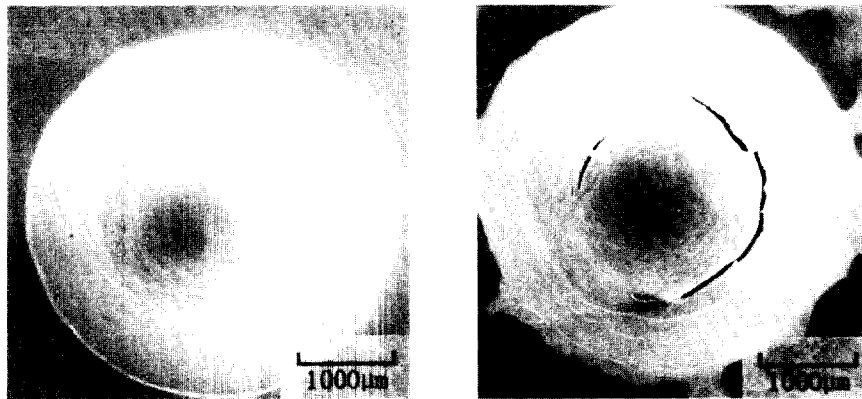
Fig. 10과 Fig. 11은 각 미세조직에 대한 대기상태 및 부식환경중에서 일정시간(40min.)동안 발생된 AE신호의 평균진폭거동을 하중-변위선도와 함께 나타낸 그림이다. 먼저 대기상태인 Fig. 10에서 그림 a)의 모재를 보면, 시험초기부터 파괴점까지 거의 낮은 AE 진폭분포를 보이고 있고, 그림 b)의 B.L의 경우에는 시험전반부인 변위 0.27mm 지점에서 약 2dB의 peak 거동을 보여 모재에 비해 약간의 뚜렷한 peak 거동을 확인할 수 있다. 한편, 그림 c)의 W.M의 경우를 보면, 시험초기부터 시험중반까지 낮은 진폭 거동을 보인 반면 하중 증가의 저하(load capacity's down)를 보인 변위 1.7mm 지점에서 약 7dB이상의 높은 평균진폭거동을 보이고 있다. 따라서 W.M의



a) Parent metal



b) Bond line



c) Weld metal

(A) Air

(B) pH 8.2

Fig. 8 SEM macrofractographs in HT80 steel-weld joint

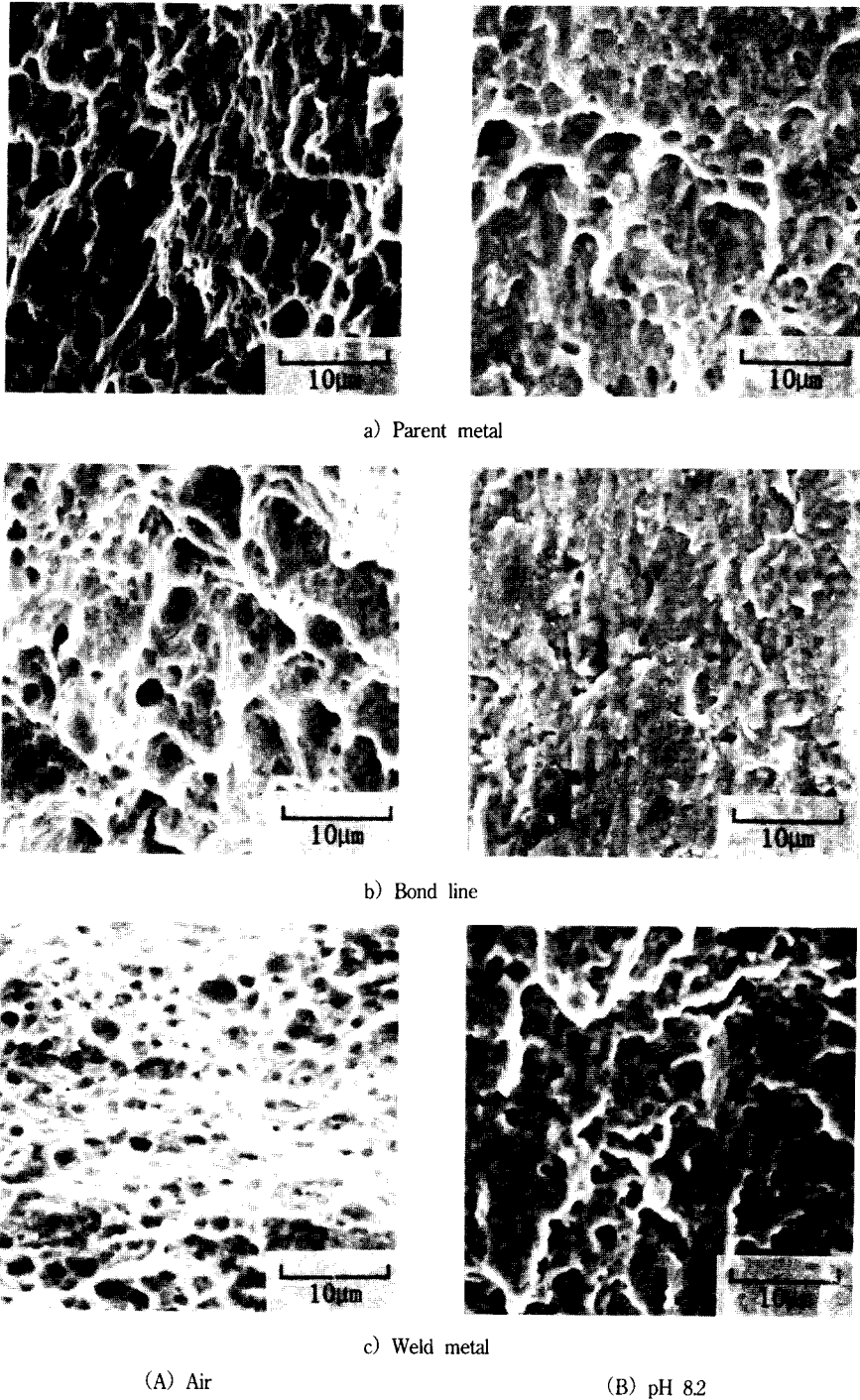


Fig. 9 SEM microfractographs in HT80 steel-weld joint

경우는 P_{max} 부근인 변위 1.7mm 지점에서 비교적 큰 균열이 전파되었음을 알 수 있다.

한편, Fig. 11의 부식환경의 경우를 살펴보면, 먼저

모재의 경우는 P_{max} 부근인 변위 1.25mm 지점에서 미시균열의 진폭특성치로 확인된 5dB의 평균진폭 특성¹¹⁾을 보여, 이 지점에서 응력부식균열이 개시되

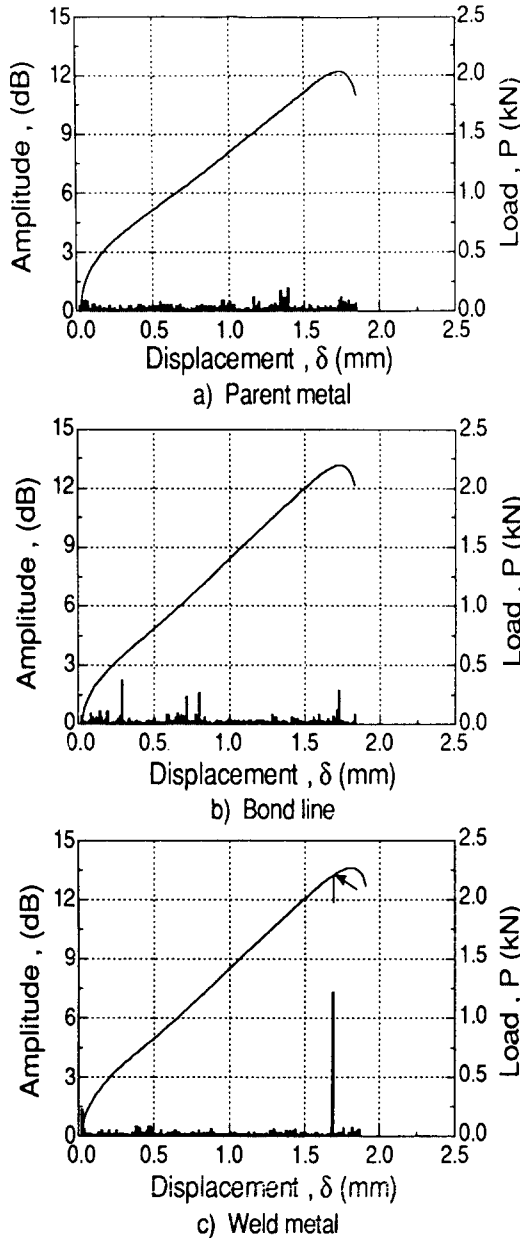


Fig. 10 AE amplitude distribution plotted along with the load vs displacement for HT80 steel-weld joint in air (Total gain : 80dB, Threshold : 3.55mV)

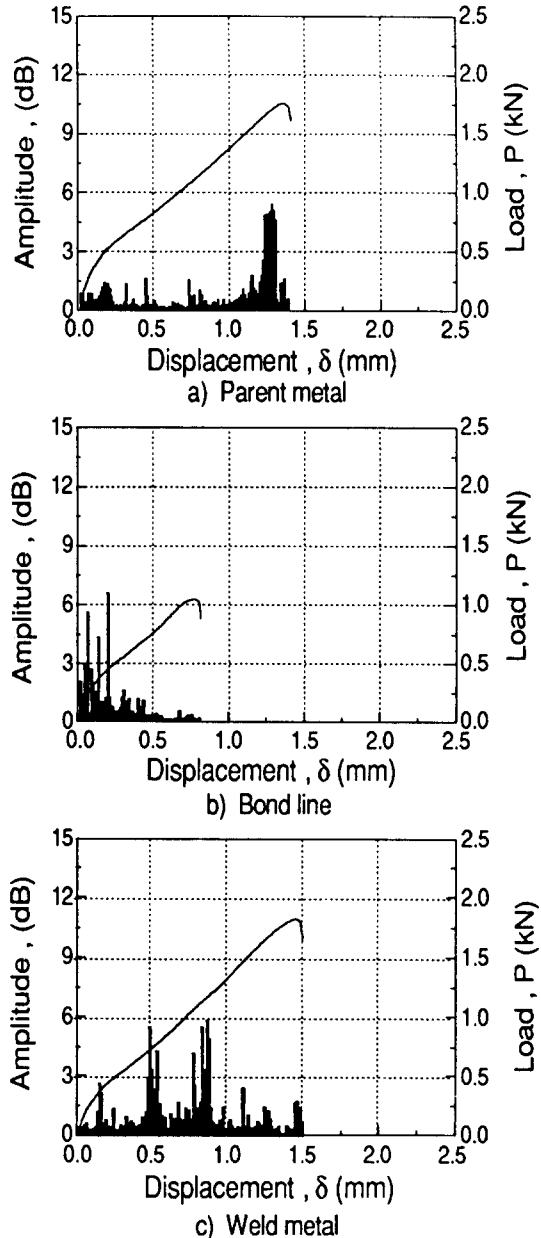
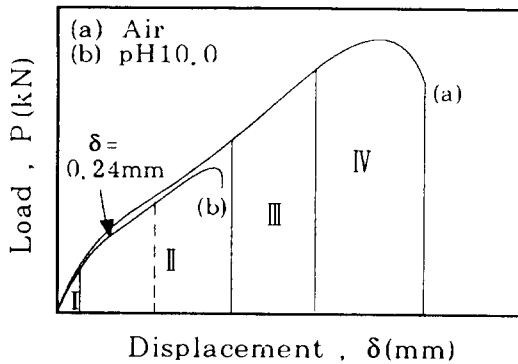


Fig. 11 AE amplitude distribution plotted along with the load vs displacement for HT80 steel-weld joint in SSW-pH8.2 (Total gain : 80dB, Threshold : 3.55mV)

있음을 알 수 있다. 그리고 그림 c)의 W.M의 경우를 보면, 변위 0.5mm 지점과 변위 0.85mm 지점에서 약 5~6dB의 평균진폭의 peak 거동을 보여 W.M이 모재의 경우보다 더 빠르게 균열이 개시되었음을 알 수 있다. 이때 W.M과 모재가 모두 quasi-SCC의 파괴거동을 보이면서 상이한 평균진폭거동을 보이는 것은 W.M의 구성이 선상결합이 많은 acicular ferrite 조직²⁾으로 구성되어 있기 때문이라 생각되며 반면, 이러한 W.M이 가장 큰 하중-변위선도의 거동을 보이는 이유는 세 조직중 입자크기가 가장 작은 2~3 μ m의 미세한 입자로 구성되어 있기 때문이라 생각된다. 한편, 그림 b)의 B.L의 경우를 보면, 타조직에 비해 상당히 이른 시험전반부인 변위 0.08mm 지점에서 미시균열에 따른 평균진폭치인 5dB~6dB의 peak 거동을 보이고 있다. 따라서 이러한 평균진폭거동으로부터 B.L의 조직이 타조직에 비해 매우 빠르게 응력부식균열이 개시되었음을 명확히 알 수 있다.

Fig. 12는 B.L의 높은 SCC 감수성 거동 및 빠른 미시균열의 개시를 확인해 보고자, 시험재의 하중-변위거동중 변위 0.24mm 지점에서 하중을 제하(unloading)하고 시험재의 표면을 관찰한 거시적, 미시적 SEM 관찰 결과이다. 이때 미시적 사진은 좌측의 거시적 표면사진의 화살표 부위를 관찰한 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 용융선을 기점으로 HAZ측의 화살표로 표기된 지점에서 미시균열이 생성되었음을 뚜렷히 확인할 수 있다.

또한 세 조직(모재, B.L, W.M)에 있어 최대 AE 평균진폭치와 그때의 변위지점을 살펴보면 그 결과는 Fig. 13과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 모재, W.M, B.L의 순으로 최대 평균진폭치는 증가하고 있으며, 그때의 변위(δ)는 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉 B.L의 조직(martensite + bainite)이 0.2mm의 가장 적은 변위에서 가장 높은 7dB의 최대 AE 평균진폭치를 나타내고 있어, 세 조직(모재 : pearlite,



- I : Elastic bending region
- II : Plastic bending region
- III : Plastic membrane stretching region
- IV : Plastic instability region

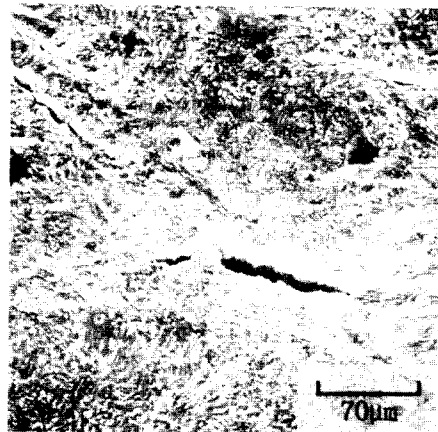
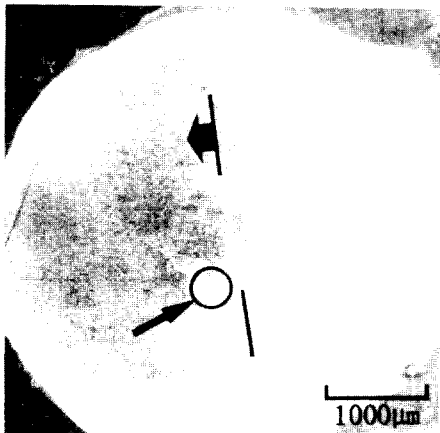


Fig. 12 SEM macro- and microfractographs at $\delta=0.24$ mm for HT80 steel-bond line in SSW-pH8.2

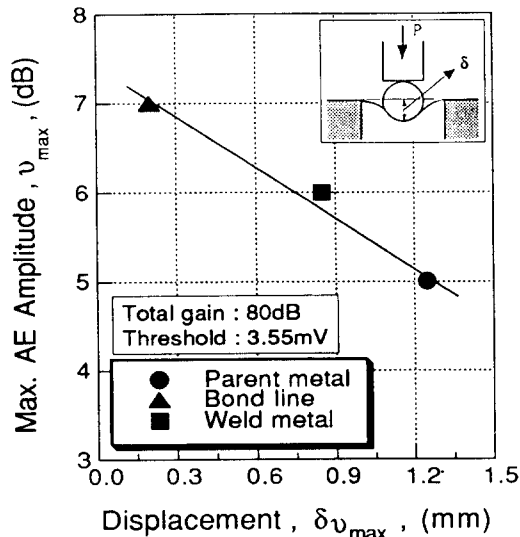


Fig. 13 Relationship between max. AE amplitude and displacement at max. AE amplitude for three microstructures in SSW-pH8.2

B.L : martensite + bainite, W.M : ferrite) 중 부식환경에서 가장 큰 취성적 파괴거동을 보였음을 알 수 있다.

다음은 SP-SSRT 시험에 의해 얻은 용접부의 각 미세조직에 대한 SCC의 민감도와 AE 시험에 의해 얻은 신호의 진폭(amplitude) 거동 사이에 어떤 상관관계가 있는지 알아보려고 한다. 먼저 Table 3에 부식환경에서 SP-SSRT법에 의해 얻은 각 미세조직의 ϵ_{qf} 와 파괴점까지의 시간(time to failure : TTF) 그리고 AE 시험결과를 정리하여 나타내었다. 이때 등가파괴변형률, ϵ_{qf} 는 시험편의 변형개시부터 파괴점까지 소성변형된 입자들의 평균 변형률로서 재결정열처리 방법에 의해 직접적으로 얻을 수 있다. 또한

재결정열처리방법에 의해 얻은 값과 실험적으로 상관관계를 갖는 파괴점까지의 변위를 이용한 식(1)에 의해 얻을 수 있다. 여기서 ϵ_{qf} 는 식(1)에 의해 얻은 값이다. 그리고 $\sum AE$ Avg. Amplitude 값은 SP-SSRT 시험동안 검출된 AE 신호의 일정시간(40min.) 동안 각각의 평균진폭치의 총합을 나타낸다. 한편, $[\sum AE \text{ Avg. Amplitude}]^{1/2}/\epsilon_{qf}$ 와 $[\sum AE \text{ Avg. Amplitude}]^{1/2}/TTF$ 의 인자는 각각 단위 등가파괴변형률당 그리고 단위 시간당 누적 AE 평균진폭값을 나타낸다. 이때 AE data의 분산을 최소화하기 위해 $\sum AE$ Avg. Amplitude 값에 1/2승을 취하였다.

이러한 시험결과치들 중 SCC의 민감도와 단위 등가파괴변형률당 그리고 단위시간당 AE 신호의 누적 AE 평균진폭과의 관계를 도시하면 그 결과는 Fig. 14와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 B.L의 경우는 0.7의 SCC 민감도에 대해 단위 등가파괴변형률당 그리고 단위시간당 AE 신호의 누적 AE 평균진폭 특성치가 각각 25dB와 0.18dB를 보여, 모재 및 W.M의 경우 보다 높은 진폭특성치를 보이고 있다. 즉 SCC의 민감도가 큰 B.L부위의 조직이 단위 등가파괴변형률당 그리고 단위 시간당 평균진폭 특성치가 가장 큼을 알 수 있다. 또한 세 조직에 있어 각각의 두 인자사이에 거의 선형적 관계가 있음을 확인할 수 있다.

따라서 지금까지 살펴본 용접부 각 조직의 미시 파괴과정에 따른 AE 신호 특성 그리고 SCC 민감도와 AE 신호사이의 정량적 관계로부터도 미소시험편을 이용한 SP-SSRT 시험은 강 용접부에 있어, 각 미세조직의 고유한 SCC 감수성을 평가하기 위한 새로운 시험방법으로 그 유효성이 매우 높음을 확인할 수 있다.

Table 3 The SP-SSRT & AE test results for HT80 steel-weld joint in SSW-pH8.2

Structure	ϵ_{qf}	TTF(hr.)	$\sum AE$ Avg. Amplitude (dB)	$[\sum AE \text{ Avg. Amplitude}]^{1/2}/\epsilon_{qf}$ (dB)	$[\sum AE \text{ Avg. Amplitude}]^{1/2}/TTF$ (dB/hr)
Parent metal (pearlite)	0.70	77.2	105	15	0.13
Bond line (martensite + bainite)	0.30	44.4	68	25	0.18
Weld metal (ferrite)	0.78	83.3	147	16	0.15

* ϵ_{qf} : equivalent fracture strain in corrosive environment
 * TTF : time to failure(hr.)

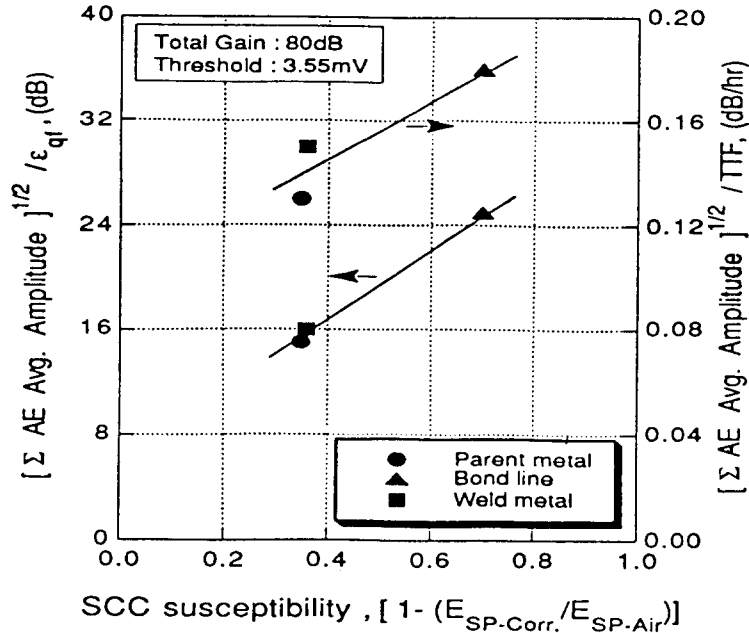


Fig. 14 Relationship between SCC susceptibility and AE signal characteristics per equivalent fracture strain and per unit time(hr.) to failure in HT80 steel-weld joint

4. 결 론

SP-SSRT방법을 이용하여 인공해수의 부식환경하에서 HT80강 용접부의 국부부위에 대한 각 미세조직의 SCC 시험결과 그리고 SP-SSRT의 시험결과에 대한 신뢰성을 높이고자 비교, 검토된 AE시험결과는 다음과 같다.

1. 용접부 각 부위에 대한 하중-변위거동 및 SCC 민감도 그리고 거시적, 미시적 파면관찰로부터 부식 환경에서 모재 및 W.M의 경우에는 quasi-SCC의 파괴거동으로 그리고 B.L은 뚜렷한 SCC의 파괴거동으로 정리할 수 있었다.

2. B.L의 시험재에 있어, 응력부식균열은 용융선을 기준으로 W.M측 부위보다는 대부분 HAZ측 부위에서 크게 전파되어 HAZ측의 높은 응력부식균열 감수성을 명확하게 확인할 수 있었다.

3. 용접부 각 미세조직에 있어, 미시균열의 평균진폭 값인 5~6dB의 peak 거동이 모재의 경우는 P_{max} 부근($\delta=1.25\text{mm}$)에서, W.M은 시험중반부($\delta=0.5\text{mm}$)에서, 그리고 B.L은 시험초반부($\delta=0.08\sim 0.25$

mm)에서 발생하여, B.L이 타 조직보다 빠르게 응력부식균열이 개시되었음을 알 수 있었다.

4. 용접부의 각 미세조직의 SCC 민감도와 각 시험재의 단위 등가파괴변형률당 그리고 단위시간당 누적 AE 평균진폭과는 뚜렷한 선형적 관계가 있으며, SCC 민감도가 가장 큰 B.L부위의 조직이 타 조직에 비해 가장 큰 누적 AE 평균진폭 특성치를 보였다.

5. 이상의 SCC 민감도, SEM 관찰결과 그리고 AE시험결과로부터 SP-SSRT방법은 종래의 시험방법으로는 평가하기 어려운 용접부의 국부조직에 대한 SCC 감수성 평가에 적용 가능성이 높은 우수한 시험방법으로 정리할 수 있다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 93년도 국제협력연구지원 연구비에 의해서 이루어진 연구결과 일부로서, 본 연구를 수행할 수 있도록 지원해주신 재단에 감사드리며, 연구를 수행하는 과정에서 협조해주신 일본의 토호쿠대학 공학부 다카하시 히데아끼(高橋秀明)

교수에게 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

- 1) 松島 巖 : 熔接部の應力腐食割れと對策, 熔接部の腐食(IV), 日本熔接學會誌, 第 61卷, 第 4號, (1991), pp. 269~277.
- 2) E. P. Degarmo and I. Cornet : Effect of Preheating on Stress Corrosion Cracking of Steel Weldments, *Welding J., Research Supplement*, (1985), p. 472s.
- 3) J. F. Andrew : Some Comparisons of Slow Strain-Rate Method with the Constant Strain and Constant Load Methods of Stress Corrosion Testing, *ASTM STP 665*, (1979), pp. 347~362.
- 4) S. R. Navak and S. T. Rolfe : Modified WOL Specimen for K_{ISCC} Environmental Testing, *J. of Materials, JMLSA*, Vol. 4, No.3, (1969), pp. 711~728.
- 5) F. Zucchi, G. TrabANELLI and G. Demertzis : The Intergranular Stress Corrosion Cracking of Sensitized AISI 304 in NaF and NaCl Solutions, *Corrosion Science*, Vol. 28, No. 1, (1988), pp. 69~79.
- 6) *Corrosion of Weldments*, ASM, *Metal Handbook, Corrosion*, Vol. 13, (1978) pp. 344~368.
- 7) JAERI-memo(62-193) : 小型パンチ(SP)試驗法(案), 日本原子力研究所, (1987), pp. 1~135.
- 8) 유효선, 이송인, 임재규, 정세희 : 소형편치시험법에 의한 응력부식균열평가에 관한 연구, 대한기계학회지, 제 17권, 제 8호, (1993), pp. 2033~2042.
- 9) Standard Specification for Substitute Ocean Water, *ASTM-D1141*.
- 10) W. L. Clarke, R. L. Cowan and W. L. Walker : Comparative Methods for Measuring Degree of Sensitization in Stainless Steel, *ASTM STP 656*, (1978), pp. 99~132.
- 11) 유효선, 정세희 : 음향방출시험에 의한 고장력강의 응력부식균열전파 거동에 관한 연구, 한국재료학회지, 제 3권, 제 4호, (1993), pp. 361~371.
- 12) 日本熔接學會熔接冶金研究委員會編 : 熔接部組織寫眞集, (1984), pp. 179~192.