

| |
|---------|
| 研 究 論 文 |
|---------|

大韓熔接學會誌
 第11卷第3號1993年9月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol. 11. No.3 Sep., 1993

강 용접부의 응력부식크랙 감수성 평가에 관한 연구(II)

— 음극방식에서의 파괴거동 —

임재규* · 조정운** · 나익균***

Evaluation of SCC Susceptibility of Welded HAZ in Structural Steel(II)

— Fracture Behavior in Cathodic Protection —

J. K. Lim*, J. W. Cho* and E. G. Na***

Key Words : SCC(응력 부식균열), Strain Rate(변형률 속도), Friction Welded Joint(마찰용접부), SSRT(저변형률속도 시험), Cathodic Potential(음극전위).

Abstract

The cause of corrosion failure found in structures or various components operating in severe corrosive environments has been attributed to stress corrosion cracking(SCC) which is resulting from the combined effects of corrosive environments and static tensile stress. Cathodic protection is an electrochemical method of corrosion control that is widely used in marine environment and primarily on carbon steel. A number of criteria are used to determine whether or not a structure is cathodically protected. In practice, -0.8V versus Ag/AgCl is the most commonly used for marine structures.

This paper showed the combined effects of cathodic potential and slow, monotonic straining on the tensile ductility and fracture morphology of parents and friction welded joints for SM45C, SCM440 and SM20C steels in synthetic sea water(S.S.W., pH : 8.2). For the parent materials in cathodic potentials, the higher tensile strength is, the more susceptible SCC is. And the welded HAZ is more susceptible than the parent materials.

* 정회원, 전북대학교 기계설계학과

** 비회원, 전북대학교 대학원

*** 정회원, 군산대학교 기관학과

1. 서 론

부식환경에 놓여있는 구조물들은 기계적, 전기화학적 작용으로 응력부식균열(stress corrosion cracking SCC)현상이 발생한다¹⁻³⁾ 금속재료의 응력부식에 의한 파괴현상은 공업의 고도화, 구조물의 대형화, 사용재료의 고강도화 그리고 환경의 가혹화 추세로 인하여 구조물의 안정성에 있어서 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 이 부식의 특징은 균열 속도가 빨라 비교적 짧은 시간안에 대형구조물이나 시설등이 불안정 파괴되는 위험이 있다^{4, 5)}. 종래의 SCC의 평가법으로 일정하중시험(constant load test)과 일정 변형률시험(constant strain test)등이 이용되어 왔으나 재료의 SCC에 대한 감수성을 평가하기 위하여 많은 시간과 재현성등의 문제점이 있다^{6, 7)}. 저변형률속도 시험(slow strain rate test : SSRT)법은 종래의 시험방법에 비하여 SCC와 수소취화에 대한 재료의 감수성을 계속적인 기계적 변형으로 생성된 부동태 피막의 파괴를 통하여 신생면(fresh surface)을 부식환경에 노출시킴으로써 짧은 시간에 효과적으로 평가할 수 있는 시험법으로 연구 보고되고 있다^{6, 7)}. 특히 저자 등은 본 시험과 같은 재료에 대하여 재료 특성과 변형률의 SCC 민감성에 관한 연구결과, SSRT법이 효과적인 것으로 보고한 바 있다⁸⁾.

일반적으로 용접부는 용접열이력에 의한 재질의 변화에 따라 복잡하고 다양한 조직이므로 부식환경에서 응력부식 파괴거동에 관한 연구가 모재와 함께 이루어져야 한다고 생각된다. 또한 음극방식은 해양 환경에 널리 이용되는 전기화학적인 부식 제어 수단으로 이용되며 주로 탄소강에 대하여 사용되고 있다.⁹⁻¹³⁾

따라서 본 연구에서는 SSRT법을 이용하여 고강도 기계 구조용강인 SM45C, SCM440과 저탄소강인 SM20C의 모재와 마찰용접재를 대상으로 인공해수중에서 음극전위의 변화에 따른 재료의 강도특성에 미치는 응력부식의 감수성과 파괴거동에 관하여 저변형률 시험과 파면관찰을 통하여 고찰하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

시험에 사용된 재료는 구조용강인 SM45C, SCM440 및 SM20C의 모재와 마찰용접재를 대상으로 하였다. 화학적 성분 및 기계적인 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다. Table 3은 마찰용접의 조건을 나타낸다. 사용된 시험편은 직경 13mm의 인발봉재를 가공하여 모재의 경우 게이지 길이 20mm, 직경 4mm의 인장시험편을 제작하였고, 용접재는 마찰용접한 후 용접면(welded joint)을 가운데 두고 곡률반경이 11.5mm, 중앙의 직경이 4mm가 되도록 가공하여 제작하였다. 모재와 용접재의 시험편의 형상 및 치수는 전보⁸⁾에서 보여주고 있다.

시험에 사용된 재료의 마찰용접부는 용융 주조 조직인 용융선(fusion line), 조대 결정 조직인 용접 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ), 모재조직과 용접 HAZ의 중간조직인 subcritical HAZ로써 기계적 성질에서도 차이가 나타나는 영역과 미세조직으로 구분된다.

용접 조직에 따른 기계적 성질의 차이를 알아보기 위해 용접 접합부를 중심으로 그 부분의 경도분포를

Table 1 Chemical composition(wt.%)

| Material | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo |
|----------|------|------|------|-------|--------|------|------|
| SM45C | 0.45 | 0.25 | 0.75 | <0.03 | <0.035 | - | - |
| SM20C | 0.20 | 0.21 | 0.52 | <0.03 | <0.032 | - | - |
| SCM440 | 0.41 | 0.25 | 0.73 | <0.03 | <0.035 | 1.05 | 0.23 |

Table 2 Mechanical properties

| Material | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (H _{RC}) |
|----------|------------------------|----------------|-----------------------------|
| SM45C | 907 | 10.0 | 27 |
| SM20C | 580 | 16.5 | 15 |
| SCM440 | 729 | 13.0 | 20 |

Table 3 Friction welding conditions

| Material | Friction time (sec) | Welding time (sec) | Friction pressure (kgf/mm ²) | Upset pressure (kgf/mm ²) |
|----------|---------------------|--------------------|--|---------------------------------------|
| SM45C | 5 | 3 | 4 | 8 |
| SM20C | 4 | 3 | 4 | 4 |
| SCM440 | 7 | 5 | 4 | 12 |

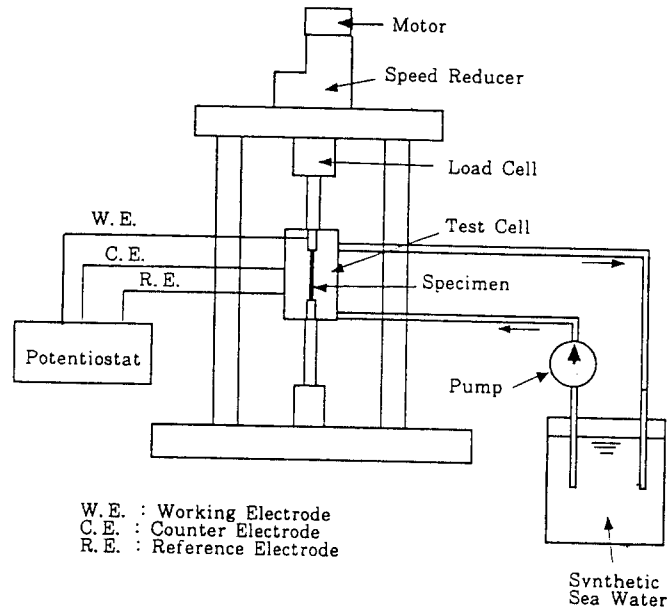


Fig. 1 Schematic drawing of slow strain rate tester

미소경도계(microvikers : weight=100gf)를 이용하여 측정된 결과를 Fig. 1에 보여주고 있다. 그림에서 SM45C의 경우 접합면에서 최대치를 보이고, 그로부터 3mm떨어진 곳에서 subcritical point가 나타나고 있다. 또한 SCM440의 경도는 약 2mm까지 높은 경도치를 보이며, SM20C는 접합부 근처의 경도치가 오히려 모재보다도 낮은 경향을 보이고 있다.

2.2 실험장치 및 방법

실험에 사용된 시험기는 Fig. 1과 같이 프레임(frame), 로드셀(load cell), 감속장치 등으로 구성된 인장시험기와 인공해수의 방식전위를 일정하게 유지하도록 포텐쇼스타트(potentiostat)를 이용하였다. 용량은 2ton이고, 구동원은 AC소형모터이다. 특히 감속장치를 사용하여 저변형률속도(slow strain rate)로 시험할 수 있도록 하였다. 이때 crosshead speed의 범위는 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ mm/min이다.

일반적으로 철강재료에 대한 저변형률속도 시험은 10^{-6} s⁻¹ 변형률 속도에서 응력부식에 대한 감수성이 큰것으로 보고되고 있다^{8, 14)}. 음극방식은 해양환경에 널리 이용되며 주로 탄소강에 대하여 사용되고 있다. 또한 해양구조물의 방식전위는 실제로 -0.8V(또는

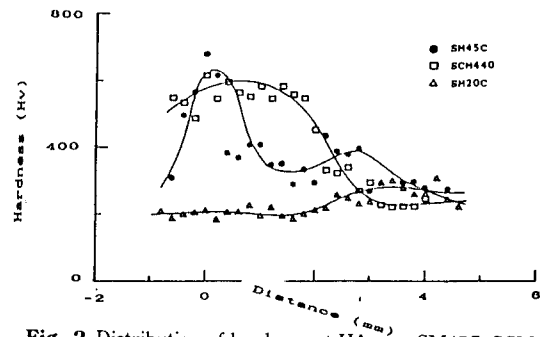


Fig. 2 Distribution of hardness at HAZ of SM45C, SCM440 and SM20C with micro-vickers hardness tester(weight : 100g)

Table 4 The composition of synthetic sea water (in 10 liter water)

| Composition | Quantity(g) |
|-------------------------------------|-------------|
| NaCl | 245.34 |
| MgCl ₂ 6H ₂ O | 111.11 |
| Na ₂ SO ₄ | 40.94 |
| CaCl ₂ | 11.58 |
| KCl | 6.95 |
| NaHCO ₃ | 2.01 |
| KBr | 1.01 |
| SrCl ₂ 6H ₂ O | 0.42 |
| H ₃ BO ₃ | 0.27 |
| NaF | 0.03 |

그 이하)(Ag/AgCl)가 주로 사용되고 있다.^{14~18)}

따라서 본 실험에서도 변형률 속도를 10^{-6}s^{-1} 로 유지하고, 각 재료의 모재와 용접재에 대하여 인공해수의 음극전위를 -0.8V , -0.9V , -1.0V , -1.2V (vs. Ag/AgCl)로 변화 시키면서 전위 의존성을 시험하였다. 사용한 인공해수(pH : 8.2)는 ASTM-D1141에 따라 제조하였으며 인공해수의 성분은 Table 4에 표시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 모재의 음극전위 효과

Fig. 3~Fig. 5는 SM45C, SCM440, SM20C모재를 대상으로 인공해수중 방식전위를 -0.8V , -0.9V , -1.0V , -1.2V 로 시험하여 얻은 하중-변위곡선이다. 이때 변형률속도는 $1.0 \times 10^{-6}\text{S}^{-1}$ 로 행하였다.

Fig. 3은 SM45C의 하중변위선도이며, 전위가 낮아짐에 따라 최대하중(P_{\max}) 이후의 변형량은 큰 차이를 보이고 있으나, 최대하중의 변화는 크게 나타나지 않고 있다. Fig. 4는 SCM440의 하중-변위선도이며, 전위에 따라 약간의 최대하중의 변화를 보이고, 최대하중 이후의 변형량도 조금씩 차이가 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 SM20C의 하중변위 선도이며, 전위에 따라 최대하중의 차이가 있으며, 특히 방식상태에서는 대기중과 비교하여 최대하중까지의 변형량이 훨씬 감소함을 볼 수 있다.

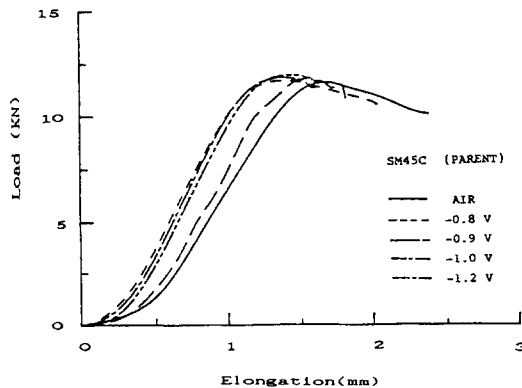


Fig. 3 The load-elongation diagrams of SM45C parent under cathodic potentials in S.S.W. (strain rate : $1.0 \times 10^{-6}\text{S}^{-1}$)

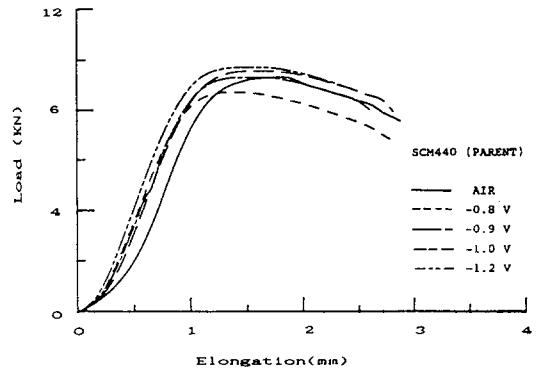


Fig. 4 The load-elongation diagrams of SCM440 parent under cathodic potentials in S.S.W. (strain rate : $1.0 \times 10^{-6}\text{S}^{-1}$)

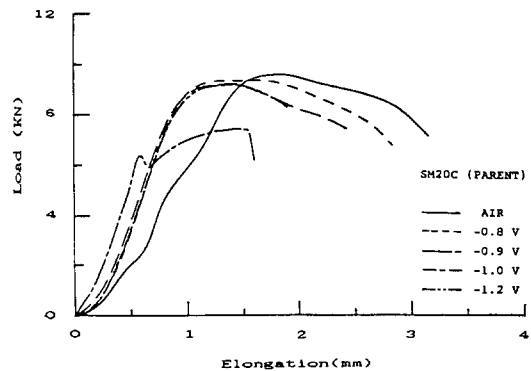


Fig. 5 The load-elongation diagrams of SM20C parent under cathodic potentials in S.S.W. (strain rate : $1.0 \times 10^{-6}\text{S}^{-1}$)

Fig. 6~Fig. 7은 각 재료의 인공해수중 모재에 대한 음극전위 의존성을 공기중에서 시험한 것과 비교하여 단면수축율과 최대하중에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 6에서 각 재료에 대하여 전위가 낮아짐에 따라 단면수축율(reduction of area : ROA)도 감소하는 경향을 보인다. 각 재료의 단면수축율은 공기중에 비하여 SM45C의 경우 -0.9V , SCM440은 -1.0V , SM20C는 -1.2V 에서 각각 단면수축율의 변화가 크게 낮아짐을 보인다. 또한 인장강도가 높은 SM45C는 SM20C에 비하여 전위에 대한 감수성이 높게 나타나고 있다. Fig. 7은 각 재료의 최대하중의 변화를 살펴본 것으로, SM45C, SCM440은 최대하중의 변화는 거의 나타나지 않지만, SM20C의 경우는 처음에는 감소하다가 다시 증가함을 보인다.

이와 같이 방식상태에서 음극전위 변화에 따른 최대하중과 연성의 변화는 방식상태에서 시편표면에서 발생하는 수소의 침입으로 소성변형시 전위(dislocation)의 이동에 영향을 미치는 것으로 생각되며^{16~18)}, 또한 시험재료의 인장강도가 높을 수록 전위에 대한 감수성이 큰 경향을 보이고 있다.

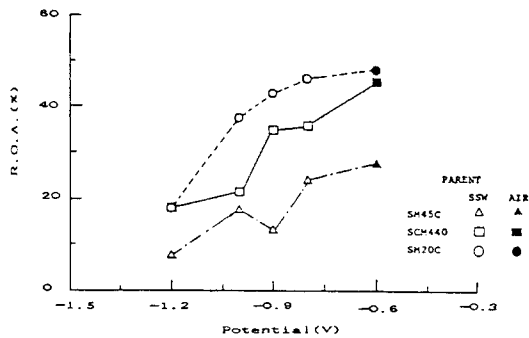


Fig. 6 Relationship between the cathodic potential and the reduction of area(ROA) of SM45C, SCM440, SM20C parents (strain rate : $1.0 \times 10^{-6} \text{S}^{-1}$)

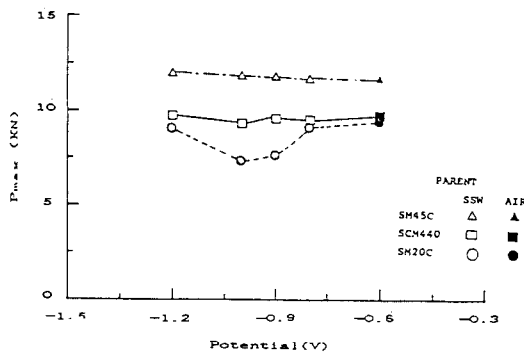


Fig. 7 Relationship between the cathodic potential and the maximum load(P_{max}) of SM45C, SCM440, SM20C parents (strain rate : $1.0 \times 10^{-6} \text{S}^{-1}$)

Fig. 8~Fig. 10은 각 모재를 시험후 주사형전자현미경(SEM)으로 파단면과 넥킹(necking)부의 표면을 관찰한 사진이다. Fig. 8에서 SM45C의 파면 및 넥킹부의 표면사진으로 (a)의 -0.8V 에서는 연성파면을 보이지만, (b)의 -1.2V 에서는 벽개파면을 나타내며, (c)와 같이 넥킹부의 표면에 균열이 보이고 있다. 한편 SCM440, SM20C는 Fig. 9, 10(a), (b)와 같이 전위의 변화와 관계없이 모두 연성파면이 나타났으며, (c)와 같이 넥킹부 표면에서는 균열이 보이고 있다. 그림에서 화살표는 파괴의 개시점으로

보이는 곳을 나타내고 있다.

3.2 용접재의 음극전위 효과

Fig. 11~Fig. 13은 SM45C, SCM440, SM20C 용접재를 대상으로 인공해수중 방식전위를 -0.8V , -0.9V , -1.0V , -1.2V 로 변화시켜 시험하여 얻은 하중-변위선도이다. 이때 cross head 속도는 $1.2 \times 10^{-3} \text{mm/min}$ 로 시험하였다.

Fig. 11, 12는 고강도 구조용 강재인 SM45C, SCM440 용접재의 하중-변위선도로써, 모두 하중의 최대점에서 파단이 일어났으며, 방식상태에서는 대기중에서보다 최대하중(P_{max})이 모두 감소함을 보이고 있다. 한편 Fig. 13은 저탄소강인 SM20C 용접재의 하중-변위선도이며, 모두 최대하중 이후의 소성변형을 동반하여 파괴되었고, 방식상태에서는 대기중에 비하여 최대하중 이후의 변형량이 크게 감소하고 있다. 특히, -1.2V 에서는 최대하중까지의 연율이 상당히 저하하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 14는 각 재료의 방식상태에서 전위에 따른 최대하중의 변화를 비교한 것으로, SM45C, SCM440은 -1.2V 에서 최대하중이 급격한 변화를 보이지만, SM20C의 경우는 최대하중이 거의 변화하지 않음을 보이고 있다. 한편 Fig. 15는 전위의 변화에 따른 파단까지의 시간을 나타낸 것으로, 파단까지의 시간은 SM45C, SCM440은 최대하중의 변화와 거의 같은 경향을 보이지만, SM20C는 전위가 -0.9V 에서 파단까지 걸린 시간이 크게 줄어들고 있음을 보여준다.

이와 같이 SM45C, SCM440의 용접부에서 용접시의 열로 인하여 조직의 변화와 경도값이 모재보다 훨씬 높게 나타난 것은 마찰용접으로 인한 접합부의 잔류응력 등의 영향으로 생각된다. 한편 SM20C의 경우는 용접부에서 경도값이 모재보다 오히려 낮지만 역시 조직의 변화와 잔류응력 등으로 인하여 공기중에서 시험한 것보다 연율이 훨씬 적게 나타남을 알 수 있다. 또한 모재와 같이 용접재에서도 재료의 인장강도가 높은 것일수록 용접부에서 음극전위에 민감한 경향이 나타나고 있다.

Fig. 16~Fig. 18은 SM45C, SCM440, SM20C 용접재를 대상으로 인공해수중 방식전위 -0.8V , -0.9V , -1.0V , -1.2V 로 시험한 재료의 파면을 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다.

Fig. 16은 SM45C의 파면사진으로, 모든 전위에서

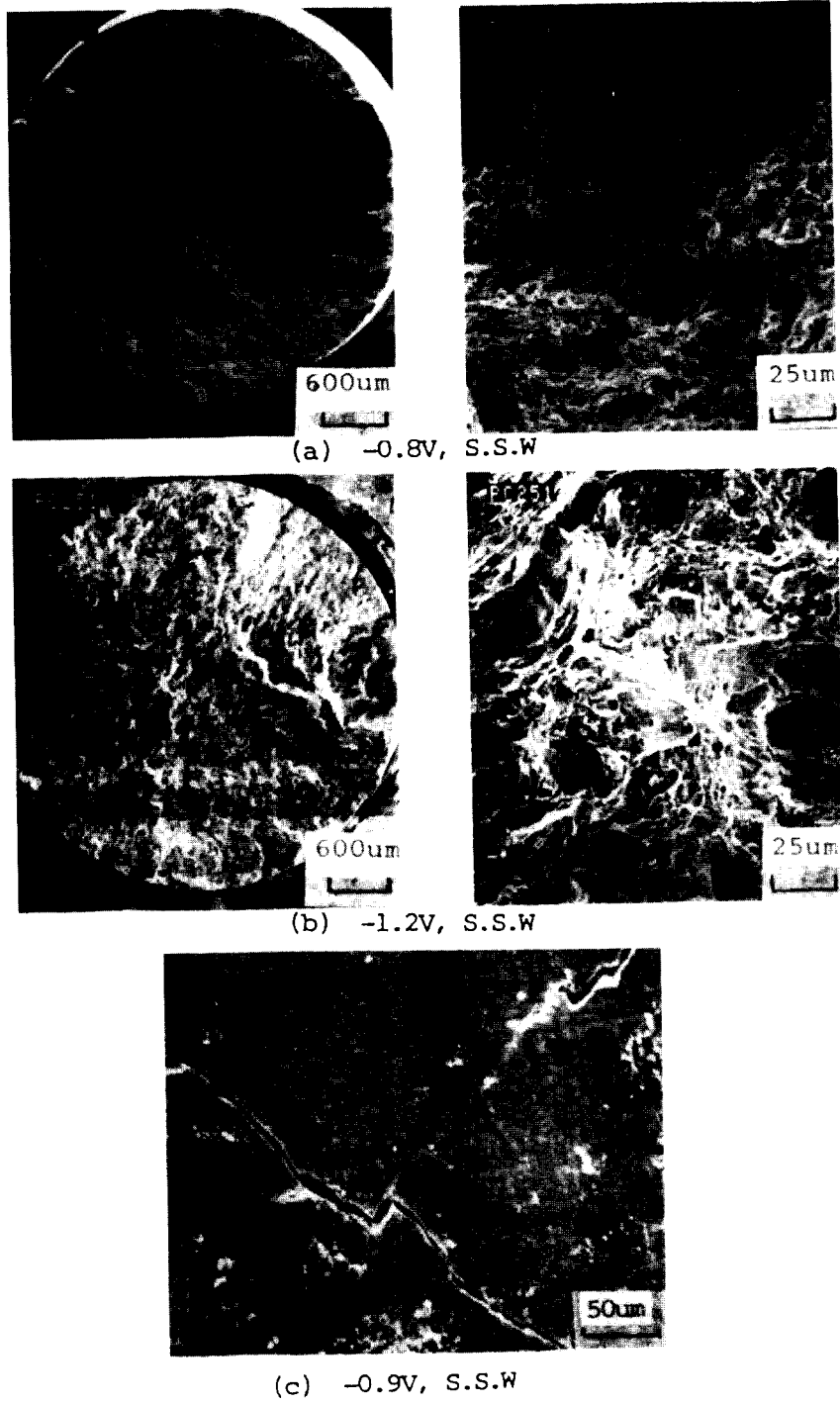
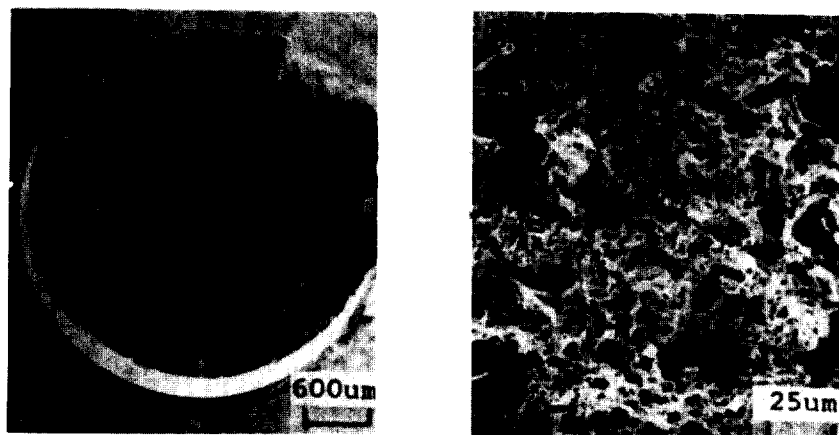
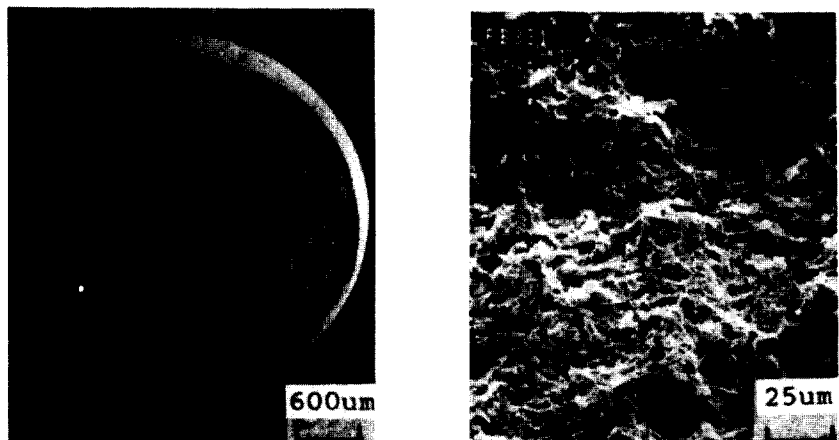


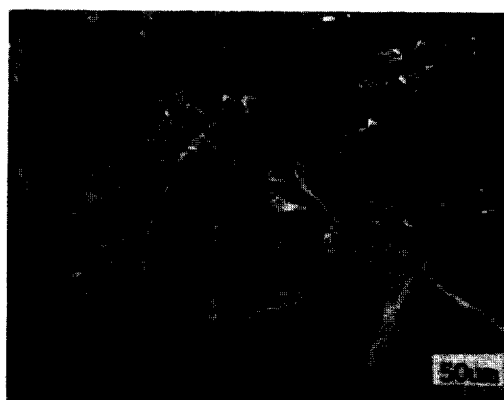
Fig. 8 Micrographs of fracture cross-section and surfaces of SM45C parent under cathodic protection in S.S.W. (strain rate : $1.0 \times 10^{-6} \text{S}^{-1}$)



(a) -1.0V, S.S.W



(b) -0.8V, S.S.W



(c) -0.9V, S.S.W

Fig. 9 Micrographs of fracture cross-section and surfaces of SCM440C parent under cathodic protection in S.S.W.
 (strain rate : $1.0 \times 10^{-6} \text{S}^{-1}$)

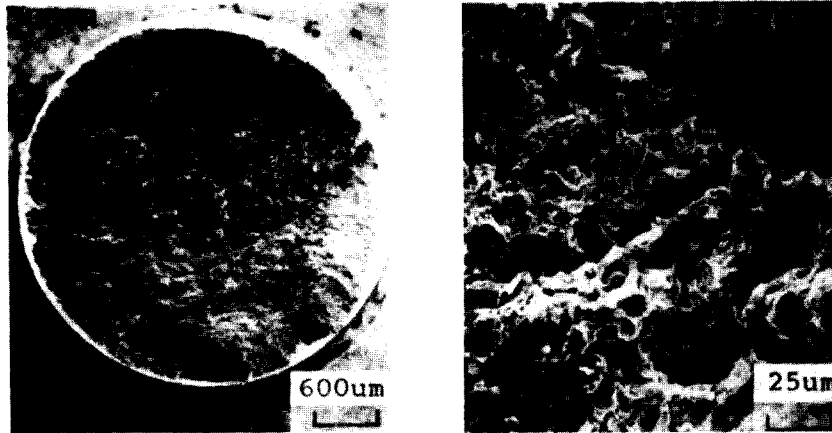
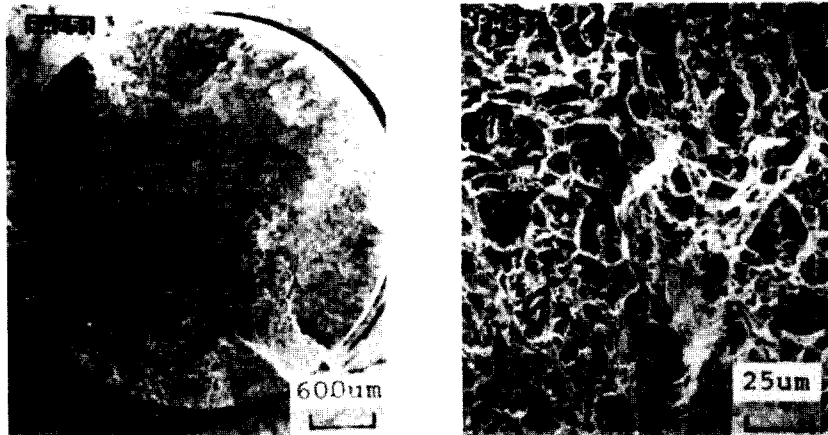
(a) $-0.8V$, S.S.W(b) $-1.2V$, S.S.W(c) $-1.2V$, S.S.W

Fig. 10 Micrographs of fracture cross-section and surfaces of SM20C parent under cathodic protection in S.S.W.
(strain rate : $1.0 \times 10^{-6}S^{-1}$)

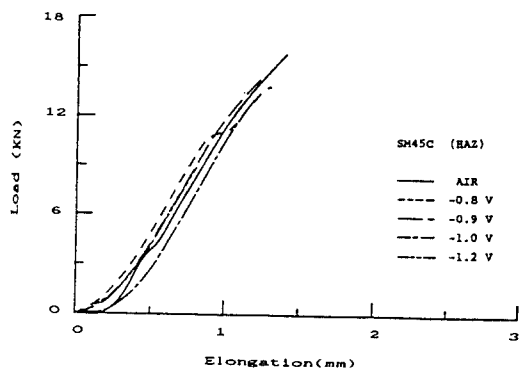


Fig. 11 The load-elongation diagrams of SM45C welded joint under cathodic potentials in S.S.W.
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

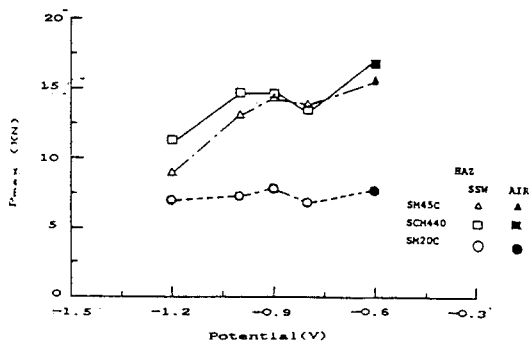


Fig. 14 Relationship between the cathodic potential and the maximum load(P_{max}) of SM45C, SCM440, SM20C welded joints in S.S.W.
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

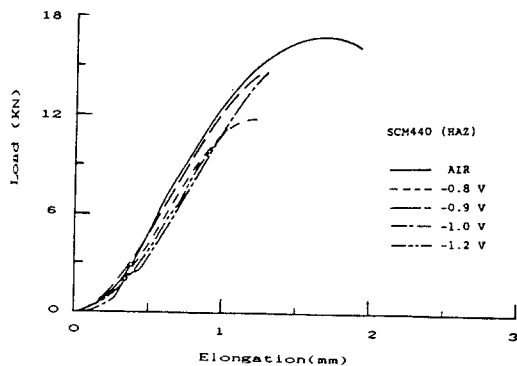


Fig. 12 The load-elongation diagrams of SCM440C welded joint under cathodic potentials in S.S.W.
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

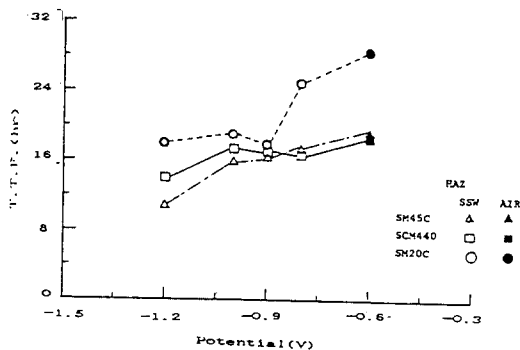


Fig. 15 Relationship between the cathodic potential and the time to failure(TTF) of SM45C, SCM440, SM20C welded joints in S.S.W.
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

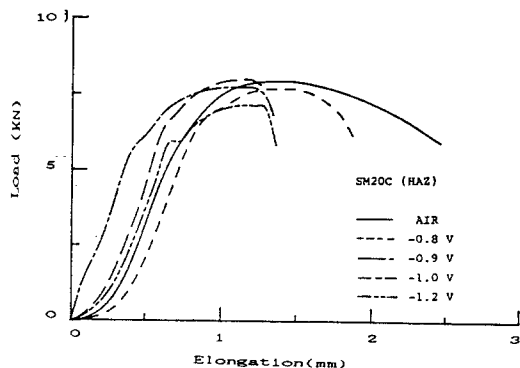


Fig. 13 The load-elongation diagrams of SM20C welded joint under cathodic potentials in S.S.W.
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

벽개파단면이 나타나고 있다. 특히 (a), (c)는 마찰 용접시 형성된 소용돌이 모양이 거시적 파면에서 보이고 있으며, (b)의 경우는 크랙의 발생과 동시에 급속한 진전에 의한 파괴가 나타나고 있다. Fig. 17은 SCM440의 파면사진으로 미시적 파면의 형태는 모두 연성파면으로 나타나고 있다. 또한 거시적인 파면형태는 (a) cup & cone 형태를 보이지만, (b)에서는 크랙이 발생후 급속히 진전된 형태를 보이고, (c)에서는 불규칙한 형태의 파면이 나타나고 있다. Fig. 18은 SM20C 파면 사진으로 미시적 파면은 모두 연성파면으로 나타났으며, (b), (c)의 파면형태는 마찰용접시 압력과 회전으로 형성된 소용돌이 형상이 뚜렷이 나타나고 있다.

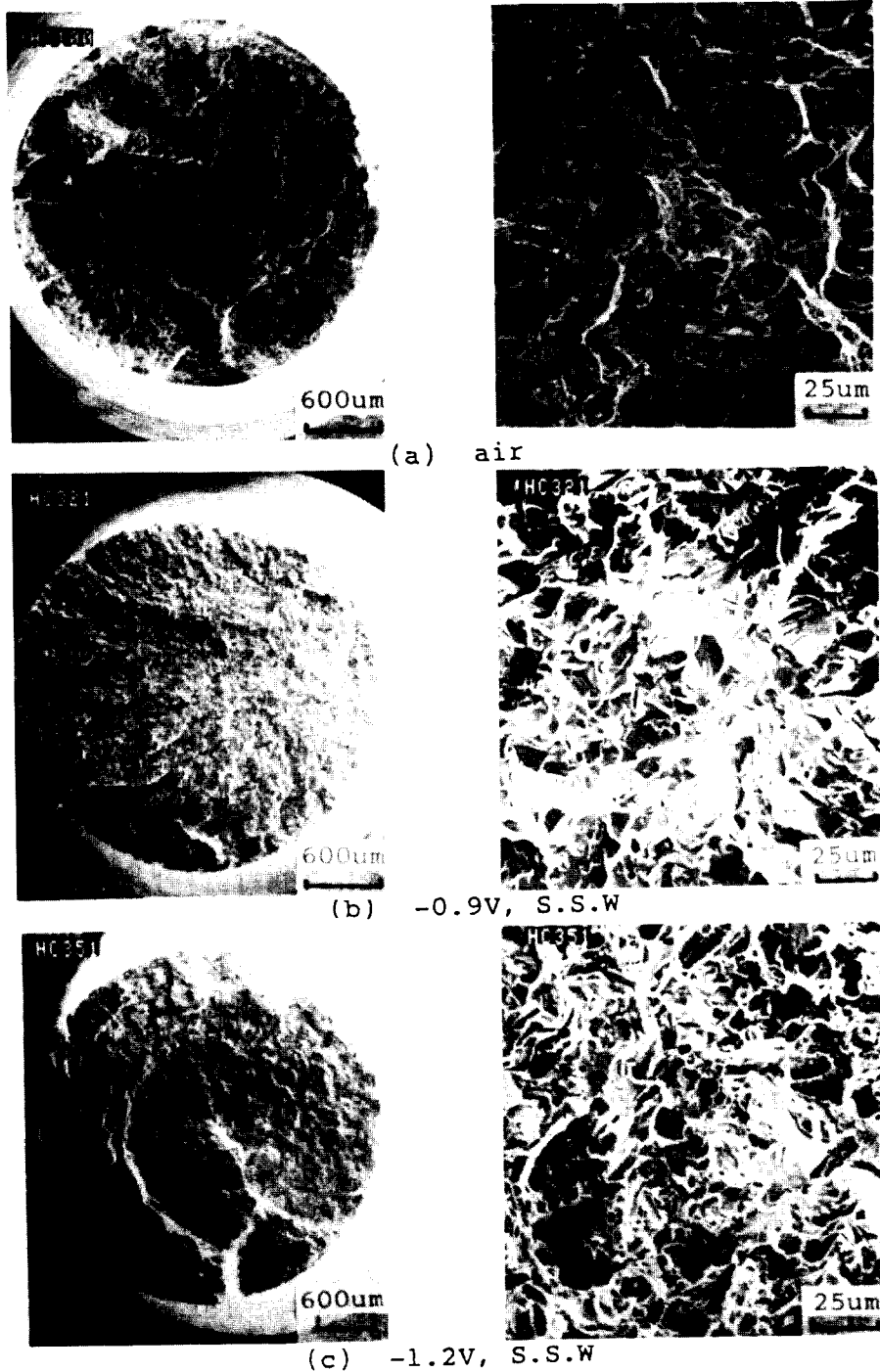


Fig. 16 Micrographs of fracture cross-section and surfaces of SM45C welded joint under cathodic protection in S.S.W. and in air
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

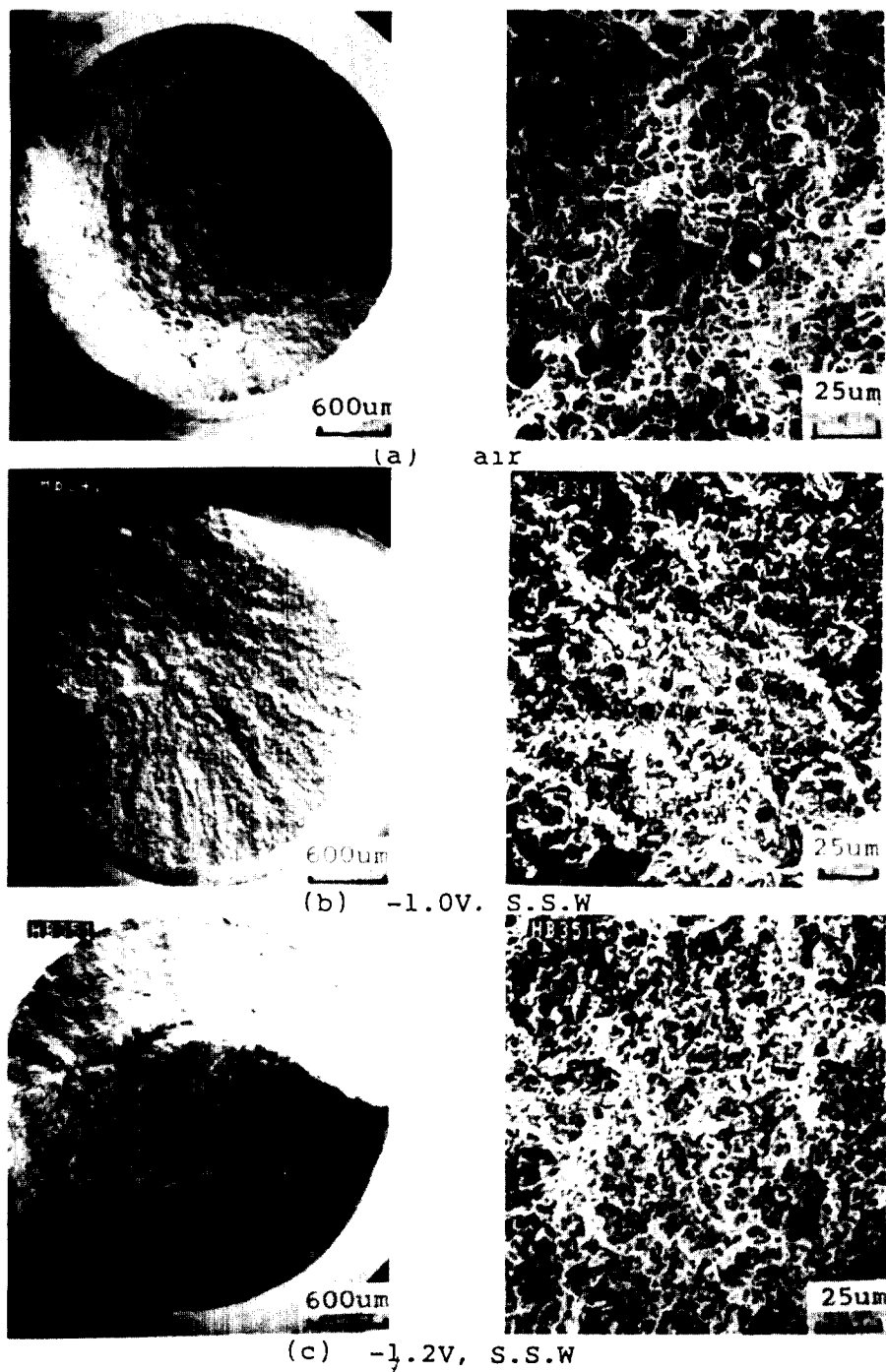


Fig. 17 Micrographs of fracture cross-section and surfaces of SCM440 welded joint under cathodic protection in S.S.W. and in air
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

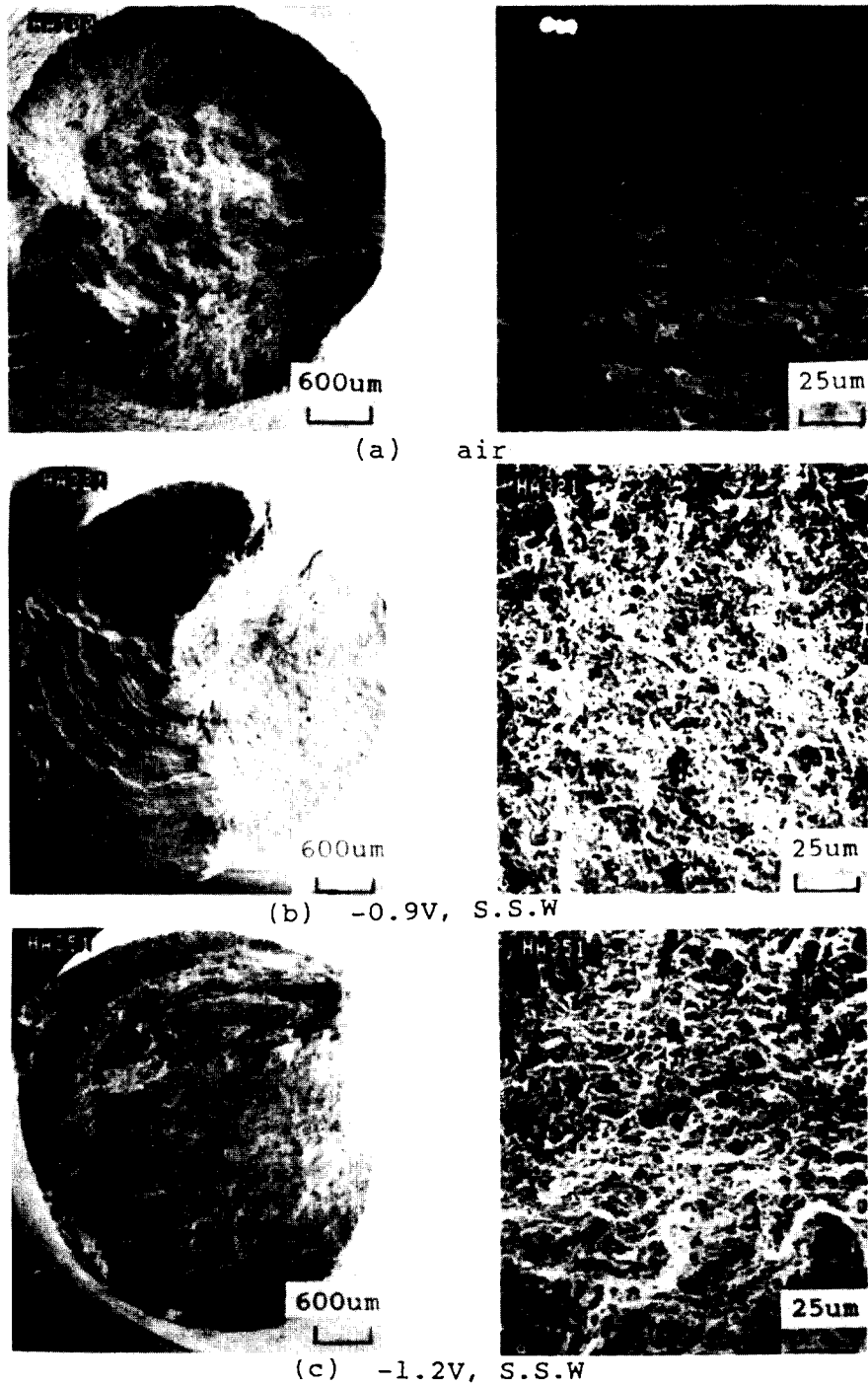


Fig. 18 Micrographs of fracture cross-section and surfaces of SM20 welded joint under cathodic protection in S.S.W. and in air
(cross head speed : 1.2×10^{-3} mm/min)

3.3 모재와 용접재의 SCC감수성 평가

상온의 인공해수중에서 음극전위의 변화에 따른 저변형률속도 시험결과 SM45C, SCM400, SM20 모재와 용접재를 비교하면 다음과 같다.

SM45C의 모재는 최대하중까지의 변형량, 파단까지의 총변형량 및 단면수축율이 대기중에서 보다 방식상태에서 시험한 것이 모두 감소 하였으며, 파면관찰에서는 시편 네킹부 표면에서 균열의 발생과 파면에서는 연성과 취성파면이 관찰되었다. 용접재의 경우 대기중과 방식중의 시험 모두 최대하중에서 파단이 발생했고, 방식상태에서 최대하중과 변형량의 값이 대기중에서 보다 모두 감소했으며, 파면 관찰을 통하여 파단면이 취성파면으로 나타났으며 미소균열이 표면에 발생후 빠른속도로 진전해가는 것을 알수 있었다.

SCM440의 하중과 변형량에 대하여 모재와 용접재 모두 SM45C재와 비슷한 경향을 보이지만, 특히 용접재의 경우 방식중의 하중과 변형량이 대기중에서 보다 크게 감소함을 보인다. 파면관찰에서는 모재의 시편표면에서 균열이 발생하였고 용접재의 경우 균열이 급속히 진전해가는 형태가 나타났다. SM20C의 경우 모재는 최대하중까지의 변형량 및 파단까지의 변형량 등이 대기중에서 보다 감소 하였다. 한편 최대하중은 감소하다 증가하는 경향을 보이는데 SM45C, SCM440의 모재에서는 최대하중의 변화는 보이지 않았다. 파면에서는 모두 연성파면이 관찰되었다. 용접재는 방식상태에서 하중과 변형량이 대기중에 비하여 크게 감소하며, 파면에서는 용접시 변형된 부분에서 파단된 것이 관찰되었다.

이상의 모재와 용접재의 고찰을 통하여 방식전위가 낮을수록, 인장강도가 높을수록 재료의 SCC의 민감성이 증가 하였고, 용접재의 경우 조직의 변화와 잔류응력등의 영향으로 균열의 발생과 파단이 모재보다 불안정하게 나타났다.

4. 결 론

고강도강인 SM45C, SCM440 및 SM20C의 모재와 용접재를 대상으로 인공해수중 음극 방식 전위 의 존성을 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모재에 대한 음극전위의 감수성 정도는 SM45C, SCM440, SM20C 순서로 재료의 인장강도가 클수록 민감한 반응을 보여 고강도재료일수록 응력부식 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.
2. 용접재에 대한 음극전위의 감수성 정도는 SM45C와 SCM440의 용접재는 전위가 감소함에 따라 최대하중이 대기중에서 보다 1/2정도로 급감했으며, SM20C의 모재와 비슷한 경향이 나타났다.
3. 모재와 용접재의 음극전위에 대한 SCC에 의한 파괴거동은 파면관찰 등을 통하여 볼 때 용접재와 고강도강에서 더 민감하게 나타났다.

후 기

본 연구는 1990년도 한국과학재단 연구비(901-09 07-028-2) 지원하에 이루어진 것중 일부이며 동재단 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Hwang S. H. : "Stress Cracking Phenomena and Hydrogen-Dislocation Interaction", Corrosion Science Society of Korea, Vol. 9, No. 3. (1990)
2. Parkins R.N. : "Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of Iron Base Alloys, N. A.C.E., Houston(1977), p. 601
3. Hartt W.H. : Proc. Int. Corros. Forum, No. 81-105 (1981), pp. 1~13
4. 江原, 山田, 小澤, 石黒, 三菱重工技報 18-5(1981) pp.633~638
5. Parkins R.N. : "Development of strain-rate testing and its implications." ASTM STP 665, (1979), pp.5~25
6. Andrew J. F., et al : "Some Comparison of Slow Strain Rate Method with the Constant Strain and Constant Load Methods of Stress Corrosion Testing", ASTM STP 665, (1979), pp.347~362
7. Einer B., Proc. Scaninavian Corrosion Congr. 7th (1975), pp.259~278
8. 임재규 외2 ; "강 용접부의 응력부식크랙 감수성 평가에 관한 연구(I)", 대한 용접학회 논문집 Vol.11, No.3(1993) 게재중
9. 松田 : 溶接冶金學, 日刊工業社 (1975), p. 196

10. Entrekin, Jr : "Effect of Stress Relief on Microalloyed Weld Metal Impact Properties," *Welding Journal*, Aug(1983), pp.197~203
11. Grosse-Wördemann, J. and Dittrich, S. : "Prevention of Temper Embrittlement in 2¼ Cr-1 Mo Weld Metal by Metallurgical Actions," *Welding Journal*, May(1983)
12. 駒井 : "日本における 鉄鋼の海洋環境強度研究の現状", 亞細亞太平洋 材料強度 評價會 論文集 Vol. 1, (1984) pp.26~41
13. 益本, 赤石 : "鋼材および" 溶接継手の3% NaCl 水溶液 腐蝕液れに 關する研究(第1報)" 日本溶接學會誌, 44卷 3號(1975), pp.236~240
14. 壓子 외 4 : 海洋環境下における 高張力鋼應力腐食割れ挙動の SSRT 法による 評價", 日本機械學會 論文集(A) Vol. 54, No. 502(1988), pp.746~752
15. ASTM : *Metals Handbook 9th Ed, Corrosion*, Vol. 13, (1987), p.893~926
16. La Que F.L. : *Behavior of Metals and Alloys in Sea Water*(in *Corrosion Handbook*), John Wiley and Sons Inc., New York, (1948), p. 383
17. Hinton B.R. and Proter R.P. : "The Effect of Strain Rate and Cathodic Potential on the Tensile Ductility of X-65 Pipeline Steel.", *Corrosion Science*, Vol 23, No.2, (1983), pp.101~123
18. Margot-Marette H, et al : "The Application of the Slow Strain Rate Test Method for Development of Line pipe Steels Resistant to Sulphide Stress Cracking", *Corrosion Science*, Vol. 27, No. 10/11, (1987), pp.1009~1026