

研究論文

SP-SSRT법에 의한 TMCP강 용접부의 응력부식균열 평가에 관한 연구

유효선* · 정희돈** · 유대영*** · 정세희*

A Study on the Stress Corrosion Cracking Evaluation for Weld Joint of TMCP Steel by SP-SSRT Method

H. S. Yu*, H. D. Jeong**, D. Y. Lyu*** and S. H. Chung*

Key words : TMCP, Accelerated cooling(가속냉각), Stress corrosion cracking(응력부식균열), SP-SSRT(소형펀치-저변형률시험), Heat affected zone(열영향부), Bond line(용융선), proeutectoid ferrite(초석페라이트)

Abstract

The object of this paper is to evaluate SCC(stress corrosion cracking) susceptibility for parent metal and bond line region of weld joints which have the various weld heat input conditions in TMCP(thermo-mechanical control process) steel by SP-SSRT(small punch-slow strain rate test) method. And the SCC test results of TMCP steel are compared with those of the conventional HT 50 steel which has the almost same tensile strength level like TMCP steel. The loading rate used was 3×10^{-4} mm/min and the corrosive environment was synthetic sea water. According to the test results, in the case of parent metal, TMCP steel showed higher SCC susceptibility than HT50 steel because of the high plastic strain level of ferrite microstructure obtained by accelerated cooling. And in the case of bond line, the both TMCP steel and HT50 steel showed low load-displacement behaviors and higher SCC susceptibility above 0.6. These results may be caused by the embrittled martensite structure on HT50 steel and by the coarsened grain and the proeutectoid ferrite structure obtained by the impart of accelerated cooling effect on TMCP steel.

* 정희원, 전북대학교 기계공학부

** 정희원, 포항산업과학기술연구원 설비공정실

*** 정희원, 전주공업전문대학 금형설계과

1. 서 론

최근 해양 및 선박 등의 구조용 강재를 제작하는 중공업 분야에 있어서 용접구조물의 중량경감에 따른 재료의 절약, 에너지 절감 및 구조물의 사용 성능의 향상을 목적으로 고장력강재의 적용이 증가하고 있다. 그러나 고장력강재를 이용한 대형 구조물의 제작에 있어 대입열용접은 생산성 향상의 측면에서 매우 필요한 시공방법이나 종래의 높은 탄소당량(carbon equivalent, C_{eq})을 갖는 고장력강을 대입열 용접할 경우, 제작된 용접부의 인성은 크게 저하되므로 구조물의 안전성 측면에서 그의 적용이 제한되고 있는 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 새로운 제어압연 공법에 의해 제조 개발된 강이 TMCP(thermo-mechanical control process)강재이다¹⁾. 이 강재는 열간 제어압연과 제어냉각의 공정을 합리적으로 결합하여 제조된 강재로, 선박 및 해양구조물 등의 중공업분야에서 그 관심과 사용이 증가하고 있는 강재이다. 특히 가속냉각형(accelerated cooling type) TMCP강재는 낮은 C_{eq} 을 갖는 강재이므로, 용접시 종래의 강재에 비해 열영향부의 취화를 억제시킬 수 있다는 큰 장점이 있다²⁾.

이러한 우수한 용접성을 갖는 TMCP강재는 주로 해양환경에서 사용되는 구조용 강재이기 때문에 부식성 해양환경하에서 TMCP강재에 대한 기계적 성질의 평가는 구조물의 안정성에 있어 매우 중요하다 할 수 있다. 그러나 지금까지 TMCP강재의 연구보고들 중 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC)에 대한 보고는 매우 적고, 더우기 용접부에 대한 SCC의 보고는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 용접부의 각 미세조직에 대한 SCC평가에 있어 유효성이 입증된 소형펀치-저변형률시험(small punch-slow strain rate test, SP-SSRT) 방법^{3,4)}을 이용하여 용접입열량이 다른 가속냉각형 TMCP AH36강재의 본드선(bond line, B.L) 부위의 조직을 대상으로 SCC 감수성을 평가하고, 그 결과를 모재조직과 함께 비교하고자 한다. 그리고 이들의 SCC시험결과를 TMCP강재와 같은 급의 인장강도를 갖는 종래의 HT50강재의 시험결과와 비교 평가하였다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 두께 20mm의 가속냉각형 TMCP AH36강재와 HT50강재이며, 두 강재의 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 여기서 TMCP강재를 대상으로 시험에 사용될 용접블록을 얻기 위해 각각 80kJ/cm, 120kJ/cm 그리고 180kJ/cm의 입열량 조건으로 잠호용접(submerged arc welding, SAW)을 하였다. TMCP강재와 HT50강재의 상세한 SAW 용접조건은 Table 2에 나타나 있다. Fig. 1은 TMCP강재와 HT50강재에 대한 거시적인 용접부 단면사진으로, SP시험편을 사진에 표시된 모재부와 B.L부의 조직에서 표준 시험편의 규격(10×10×0.5mm)에 준하여 제작하였다⁵⁾. Fig. 2에 B.L부의 SP시험편에 대한 부하방식과 시험편의 크기를 나타내었다.

SP-SSRT법에 의한 SCC 평가시 부하속도는 3×10^{-4} mm/min의 속도로 하였으며⁶⁾, 부식환경은 pH 8.2인 표준 인공해수로 하였다. 시험후 SEM을 통하여 시험편의 거시적, 미시적 파면관찰을 행하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of steels used

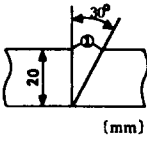
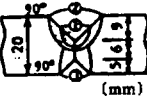
Chemical composition. (wt. %)

Steel	C	Si	Mn	P	S
TMCP AH36	0.11	0.3	1.44	0.016	0.002
HT 50	0.15	0.44	1.42	0.009	0.001
Steel	Cu	Ni	Cr	Mo	V
TMCP AH36	0.02	0.01	0.02	0.01	0.003
HT 50	0.19	0.27	-	-	-

Mechanical properties.

Steel	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
TMCP AH36	412	527	24.7
HT 50	392	539	27.0

Table 2. Welding conditions for steels used

Steel	Heat input (kJ/cm)	Preheating (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Flux	Groove shape
TMCP AH36-A	80	25	930	36	25	36S705EF	
TMCP AH36-B	120	25	L 930	36	25	36S705EF	
			T 470	36	25		
TMCP AH36-C	180	25	L 1050	40	26	36S705EF	
			T 900	40	26		
HT 50	50	-	750	36	32	NF-310	

Carbon equivalent, $C_{eq} = C + 1/6(Mn) + 1/5(Cr + Mo + V) + 1/15(Cu + Ni)$

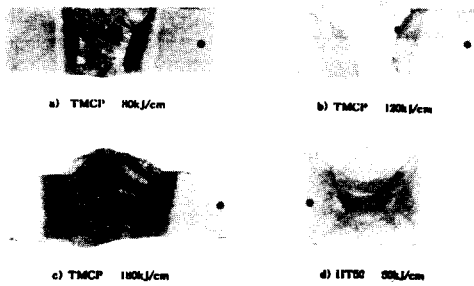


Fig. 1 Macro-etched photographs of weld joint in TMCP AH36 and HT 50 steels.

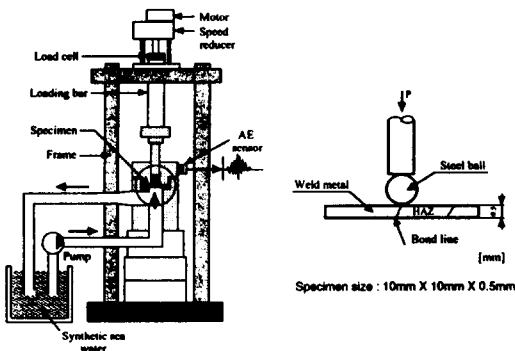


Fig. 2 Schematic diagram of SP-SSRT apparatus and loading method

3. 실험결과 및 고찰

3.1 조직관찰과 경도분포

Fig. 3과 Fig. 4는 시험에 사용된 강재의 미세조직 사진으로, 먼저 Fig. 3의 TMCP강재의 경우를 보면, 모재조직은 강 변태점 $A_3 \sim A_1$ 에서 가속냉각 효과로 기지(matrix)에 페라이트(ferrite) 핵생성처의 증가에 의한 미세한 페라이트조직과 함께 소량의 펄라이트(pearlite) 조직으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이에 반해 용접열영향부(heat affected zone, HAZ)측의 B.L부의 조직들은 높은 용접입열량에 의해 가속냉각효과가 소실되어, 입계에서는 조대화된 초석페라이트가 생성되었음을 그리고 입내에서는 펄라이트조직과 약간의 저온 변태조직인 베이나이트(bainite) 조직으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 용접입열량이 증가함에 따라 조직의 조대화와 함께 용착금속과 모재조직의 융합 정도가 증가하여 B.L이 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 초석페라이트(proeutectoid ferrite)의 석출 증가와 함께 저온변태조직인 베이나이트 조직도 다소 증가하였음을 관찰할 수 있다.

한편, Fig. 4의 HT50강재의 경우, 모재조직에서는 페라이트와 band형태의 펄라이트조직을, 그리고 HAZ측의 B.L부 조직에서는 용접열에 의해 취화된 마르텐사이트(martensite) 조직을 관찰할 수 있다.

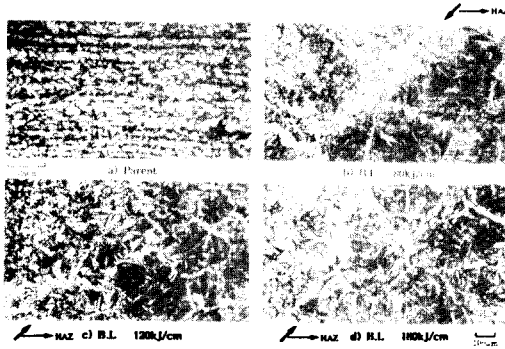


Fig. 3 Various microstructures of weld joint with weld heat input in TMCP AH36 steel

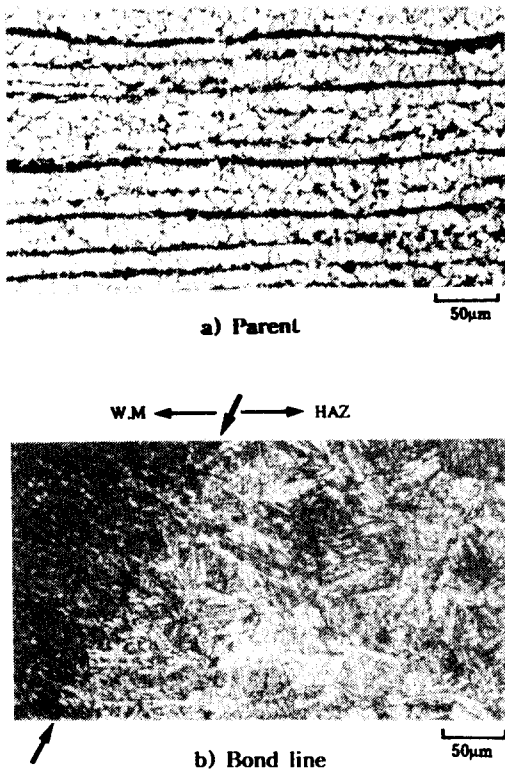


Fig. 4 Various microstructures of weld joint in HT 50 steel

Fig. 5는 비커스 경도기(vickers hardness tester)를 이용하여 10kg의 작용하중을 가했을때 얻은 TMCP강재의 B.L부에 대한 경도분포로서, 그림에 나타낸 경도값은 5회 측정하여 얻은 평균 경도값

이다. 비교를 위해 모재조직의 경도값도 함께 나타내었다. 여기서 모재부는 약 181정도의 경도값을 보였으며, 입열량이 80kJ/cm와 120kJ/cm의 경우는 B.L.부에서 모재부와 거의 같은 경도값을 보이고 있으나, 180kJ/cm의 경우는 이보다 높은 약 187의 경도값을 보이고 있다. 이는 높은 입열량에 의해 저온변태생성물인 베이나이트의 형성정도가 다른 두 경우보다도 다소 크기 때문이라고 사료된다. HAZ부의 경우는 높은 입열량에 의해 가속냉각효과의 소실정도가 증가하여 모재부보다 경도가 낮은 연화(softening)현상을 관찰할 수 있고, 그 연화폭도 상당히 넓음을 관찰할 수 있다.

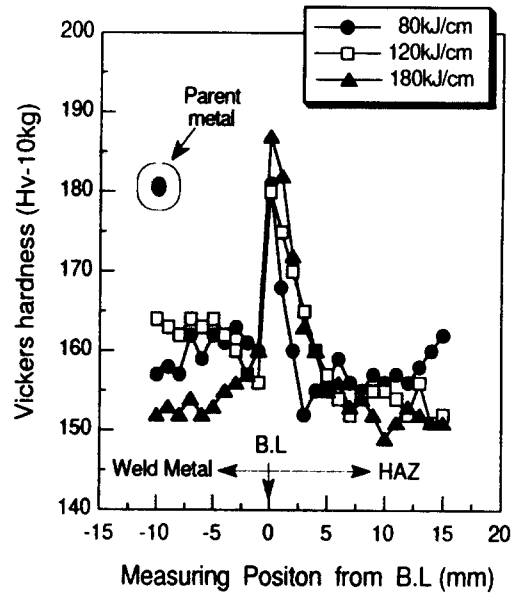


Fig. 5 Vickers hardness distribution of weld joint in TMCP AH36 steel

3.2 모재부와 B.L.부의 SCC파괴거동

Fig. 6은 TMCP강재의 모재부 및 각 입열량 조건으로 용접된 B.L.부를 대상으로 대기상태 및 인공해수 중에서 얻은 하중-변위선도들이다. 먼저 대기상태의 경우에 하중-변위거동을 살펴보면, 곡선 ①인 모재부의 경우에 최대하중(Pmax)과 변위(displacement; δ)는 각각 1.47kN과 1.85mm를 나타내고 있다. 반면, 입열량이 각기 다른 곡선 ②,

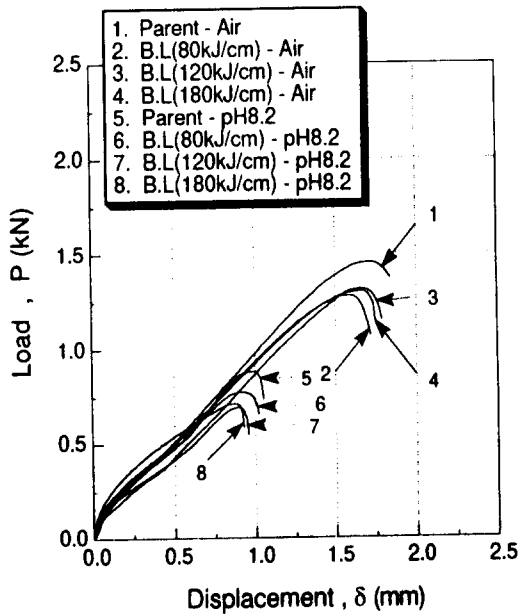


Fig. 6 Load vs displacement curves for TMCP AH36 steel in air and SSW-pH8. 2

③, ④의 경우를 보면, 80kJ/cm의 경우가 120kJ/cm와 180kJ/cm의 경우보다 약간 낮은 하중-변위 거동을 보이고 있으나, B.L부의 조직 모두 모재조직보다 낮은 하중-변위거동을 보이고 있다.

한편, pH8.2인 부식환경의 경우를 보면, 모재부의 경우 P_{max} 와 δ 는 각각 0.87kN과 1.08mm를 나타낸 반면, B.L부 중 입열량이 80kJ/cm인 경우에는 0.78kN과 1.01mm를 그리고 120kJ/cm과 180kJ/cm의 경우에는 거의 같은 0.74kN과 0.91mm를 나타내고 있다. 따라서 B.L부의 조직들은 모재조직의 경우보다 비교적 낮은 하중-변위거동을 보이고 있다. 그러나 부식환경에서의 전체적인 하중-변위거동을 볼 때, 모재부와 B.L부의 하중-변위거동은 그 차이가 적어, 모재조직도 부식환경에서 민감한 SCC 감수성 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 강 용접부의 B.L부에 대한 하중-변위거동들만 비교해 보았을 때, 그 정도는 작지만 용접입열량이 120kJ/cm와 180kJ/cm인 경우가 80kJ/cm의 경우보다 낮은 하중-변위거동을 보이고 있음을 관찰할 수 있다.

한편, TMCP강재와 같은 약 500MPa급의 인장강도를 갖는 종래의 HT50강에 있어 대기상태와 인

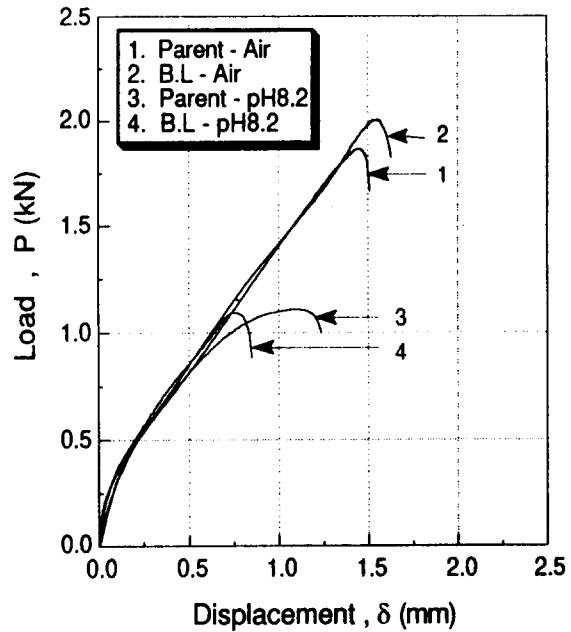


Fig. 7 Load vs displacement curves for HT50 steel in air and SSW-pH8. 2

공해수중에서 하중-변위거동의 결과는 Fig. 7과 같다. 먼저 대기상태의 경우를 보면, B.L부가 모재부의 경우보다 높은 P_{max} 와 δ 의 거동을 보이고 있다. 이에 반해 부식환경의 경우를 보면, 모재조직은 P_{max} 와 δ 가 각각 1.1kN과 1.24mm를 그리고 B.L부의 조직은 각각 1.1kN과 0.82mm를 보여 P_{max} 는 두 조직이 거의 같은 거동을 보이고 있으나, 변위는 B.L부의 조직이 모재조직보다 매우 적은 값을 보이고 있다. 따라서 부식환경하에서 용접열에 의해 생성되는 조대한 취화조직의 기계적 특성을 관찰할 수 있다.

다음은 이러한 HT50강재의 하중-변위거동들을 TMCP강재의 경우와 비교해 보기로 한다. 먼저 대기상태에서 모재부의 경우를 보면, P_{max} 는 HT50강재가 TMCP강재보다 높은 최대하중을 보인 반면, 변위는 TMCP강재의 경우가 더 큼을 관찰할 수 있다. 이러한 결과의 이유중에 하나는 두 강재의 조성에 따른 탄소당량의 차이에 의한 결과로 생각된다. 즉 두 강재의 탄소당량을 비교해 보면, TMCP강재는 0.35인 반면 HT50강재는 0.41임을 알 수 있어, 최대하중은 탄소당량이 높은 HT50강

재의 경우가 더 높고, 변위는 탄소당량이 낮은 TMCP강재의 경우가 더 큰 변위거동을 보이는 것으로 생각된다.

한편, B.L부의 경우, Pmax는 마르텐사이트조직이 관찰된 HT50강의 경우가 TMCP강의 경우보다 높게 나타났으며, 변위의 경우는 TMCP강의 경우가 약간 크게 나타났는데 이는 초석페라이트의 기지조직에 기인한 결과라고 사료된다.

다음은 부식환경의 경우를 살펴보기로 한다. 먼저 모재조직에 있어 Pmax거동은 대기상태와 같이 HT50강재가 TMCP강재보다 더 높은 거동을 보이고 있다. 그러나 변위거동을 보면, 모재부의 경우에 TMCP강재보다 HT50강재의 경우가 더 크게 나타나고 있어 대기상태의 변위거동과는 정 반대의 결과를 나타내고 있다. 이는 TMCP강재의 미세조직의 특성에 의한 결과로 생각할 수 있다. 즉, TMCP강재는 탄소당량이 낮고, 구성조직이 가속냉각에 의해 펄라이트의 생성을 억제하여 얻은 미세하고 연한 페라이트조직으로 대부분 구성되어 있기 때문에 대기상태 및 부식환경 중에서 소성변형이 일어나기 쉽고 따라서, 시험재의 표면부에서 slip step의 형성이 용이하게 될 것이다. 이러한 이유로 시험재 표면에 형성된 산화피막의 용이한 파괴와 활성적인 전기화학적 양극용해반응에 의해 부식환경 중에서 응력부식균열의 감수성 거동이 클 것으로 사료된다. 그리고 B.L부의 경우, Pmax거동에 있어서는 HT50강재가 높은 탄소당량에 의해 TMCP강재보다 큰 거동을 보이고, 변위에 있어서는 HT50강재는 용접열에 의해 조대하고 취화된 마르텐사이트 조직에 기인하여 그리고 TMCP강재는 높은 입열량에 의한 조직의 조대화 및 초석페라이트에 기인하여 두 강재 모두 낮은 값을 보이는 것으로 사료된다.

Fig. 8은 앞서 설명한 TMCP강재의 SP파괴에너지(E_{SP})를 용접입열량의 변화에 대해 나타낸 그림이다. 이때 E_{SP} 는 시험초기 부터 파괴점까지의 소요된 파괴에너지로 정의하며⁵⁾, SP시험시 얻어지는 하중-변위곡선의 아래면적으로 계산된다. 비교를 위해 모재조직과 HT50강재의 경우도 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 대기상태에 있어, 모재부의 경우는 두 강재 모두 높은 E_{SP} 을 나타내고 있다. 이에 반해 부식환경하에서는 HT50강재의 경우는 1.0kN.mm의 E_{SP} 를 나타낸 반면,

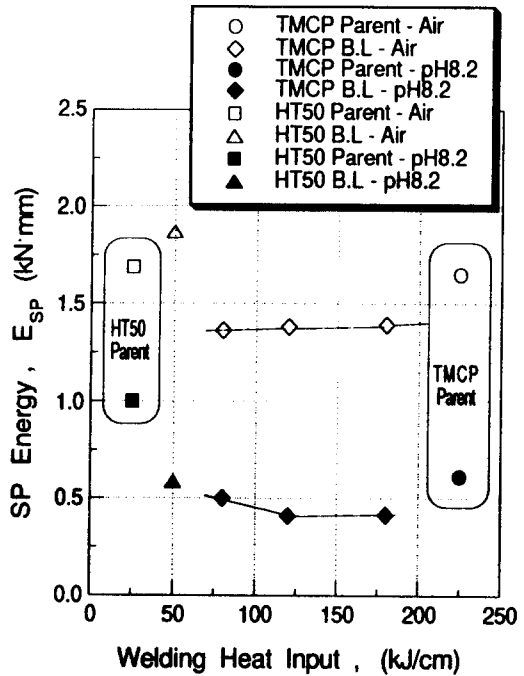


Fig. 8 Relationship between weld heat input and SP energy (E_{SP}) for weld joint of TMCP AH36 and HT50 steel in air and SSW-pH8.2

TMCP강재는 0.61kN.mm를 보여 열간압연과 가속냉각에 의해 제조된 TMCP강재가 HT50강재보다 부식환경하에서 낮은 기계적 성질을 보이고 있다.

한편, B.L부의 조직에서도 대기상태의 경우에는 뚜렷하게 HT50강재가 TMCP강재보다 높은 E_{SP} 를 나타내고 있고, 또한 부식환경의 경우에서도 HT50강재가 TMCP강재보다 약간 높은 E_{SP} 을 나타내고 있어, B.L 조직에서도 TMCP강재가 종래의 HT50강재보다 낮은 파괴강도 특성치를 보이고 있다. 그리고 부식환경하에서 입열량에 따른 E_{SP} 의 거동을 보면, 그 차이는 작지만 80kJ/cm의 입열량인 경우보다 120kJ/cm, 180kJ/cm의 경우에 E_{SP} 가 감소하고 있어 입열량의 증가에 따른 낮은 파괴강도를 관찰할 수 있다.

지금까지의 E_{SP} 거동으로부터 계산된 각 미세조직의 SCC 민감도를 용접입열량에 따라 나타낸 결과는 Fig. 9와 같다. 비교를 위해 모재조직과 HT50강재의 경우도 함께 나타내었다. 그림에서 보

면, 모재조직의 경우 HT50강의 SCC 민감도는 0.41인 반면, TMCP강재는 0.63을 나타내고 있어 TMCP강재의 모재조직은 높은 SCC 민감도를 보이고 있다. 한편, B.L 부위의 조직의 경우를 보면, TMCP강재 및 HT50강재에 있어 모두 높은 SCC 민감도를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 입열량에 따른 SCC 민감도는 80kJ/cm의 경우보다 120kJ/cm 및 180kJ/cm의 경우가 약간 높은 값을 보여 입열량의 증가에 따른 SCC 민감도의 증가를 관찰할 수 있다. 이같은 결과의 원인은 평균 100 μ m의 입자 크기를 갖는 80kJ/cm의 입열량에 대해 120kJ/cm 및 180kJ/cm의 경우에는 평균 150~200 μ m의 조대화된 조직과 연성의 성질을 지닌 초석페라이트 조직의 증가 때문이라고 사료된다. 물론 입열량이 증가함에 따라 경도가 높은 저온 변태생성물인 베이나이트조직이 생성되기는 하지만 시험편이 하중을 받아 변형할때 slip거동은 초석페라이트조직 부위에서 보다 용이하게 발생하게 될 것이며,

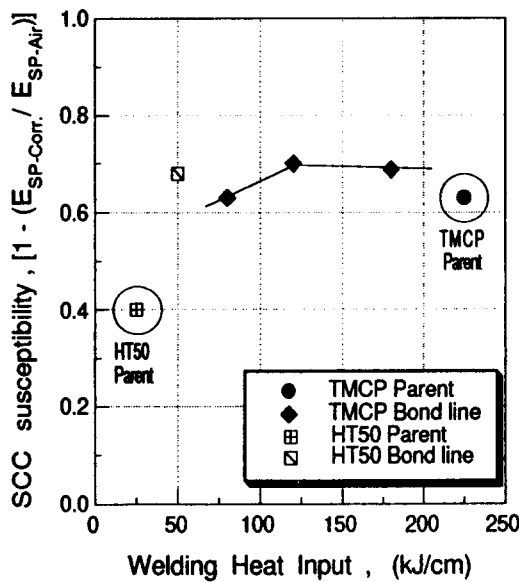


Fig. 9 Relationship between weld heat input and SCC susceptibility in weld joint of TMCP AH 36 and HT50 steels.

따라서 부식환경 중에서 높은 SCC 민감도를 보이는 것으로 생각된다.

3.3 모재부와 B.L부의 파단면 관찰

Fig. 10과 Fig. 11은 대기상태 및 부식환경하에서 TMCP강재의 모재부 및 B.L부 조직들의 거시적 파면을 SEM에 의해 관찰한 사진이다. 먼저 Fig. 10의 대기상태의 경우를 보면, 모재부 및 B.L부의 경우 모두 상당량의 소성유동을 한 후 파단되었음을 알 수 있다. 이에 반해, Fig. 11의 부식 환경의 경우는 모두 적은 양의 소성유동과 함께 주 균열은 주로 HAZ측에서 전파되었음을 관찰할 수 있다. 일 예로 180kJ/cm의 경우, B.L을 기점으로 용착금속(weld metal, W.M)측과 HAZ측 부위의 표면부를 좀더 자세히 살펴보면 Fig. 12와 같다. 사진에서 알 수 있듯이 용착금속측 부위의 표면부에서는 약간의 소성유동만을 관찰할 수 있으나 HAZ측 부위에서는 상당히 큰 균열들이 원주방향 및 두께방향으로 전파되었음을 관찰할 수 있어서, 용착금속보다 HAZ측이 SCC에 상당히 민감함을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 관찰로부터 SP-SSRT법은 용접부의 B.L 부위에 대한 SCC 평가시 매우 유용한 시험방법임을 TMCP강재의 경우에서

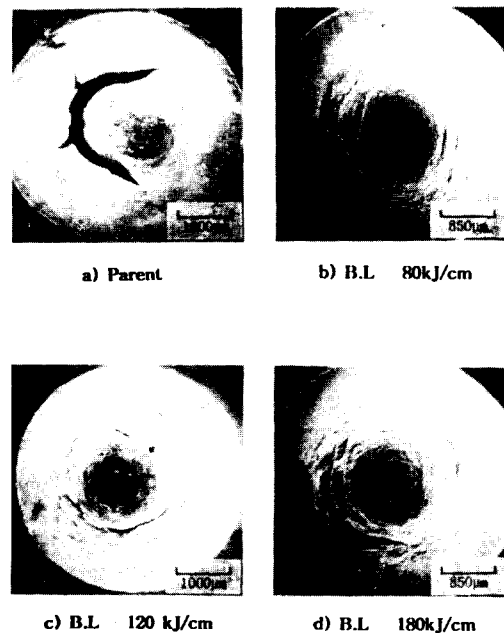


Fig. 10 SEM macrofractographs for weld joint of TMCP AH36 steel in air

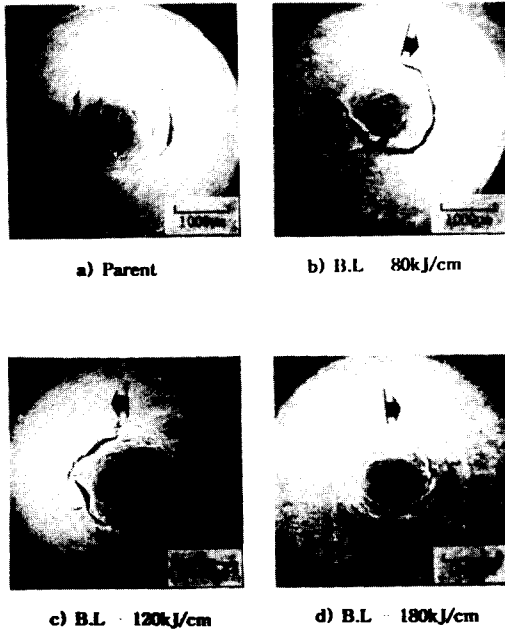


Fig. 11 SEM macrofractographs for weld joint of TMCP AH36 steel in SSW pH8.2

도 확인할 수 있다. 또한 주목할 만한 내용은 Fig. 10의 대기상태에서는 용접입열량이 증가할수록 원주방향으로 전파된 주균열 길이가 증가하고 있는 반면, Fig. 11의 부식환경에서는 감소하는 상이한 결과를 관찰할 수 있다. 이는 입열량이 증가함에 따라 B.L 부위의 조직은 가속냉각효과의 소실정도가 증가하게 되어, 대기상태에서는 시험재의 표면부에서 소성변형 정도가 크게 되고, 따라서 주균열이 크게 전파된다고 생각한다. 그러나 부식환경에서는 이러한 큰 소성변형도의 결과로 인해 시험재의 HAZ측의 국소부위에서 slip step의 형성이 용이하게 되어, 이 지점에서 국부적인 양극용해 현상이 상당히 크게되고 따라서 시험편 두께방향의 균열전파속도가 커, 짧은 원주방향의 균열크기에서도 파단된다고 생각된다.

그리고 Fig. 13은 HT50강재의 모재부와 B.L부에 있어, 대기상태 및 부식환경에서의 거시적인 파면사진이다. 대기상태에서는 TMCP강재와 같이 두 조직 모두 큰 소성유동과 함께 파단되었음을, 그리고 부식환경에서는 두 조직 모두 적은 소성유동을 한 후 파단되었음을 관찰할 수 있다. 또한 B.

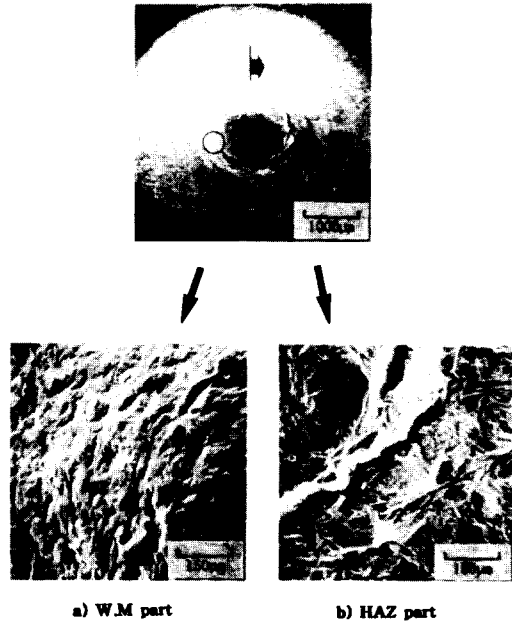


Fig. 12 SEM microfractographs for bond line of TMCP AH36 steel

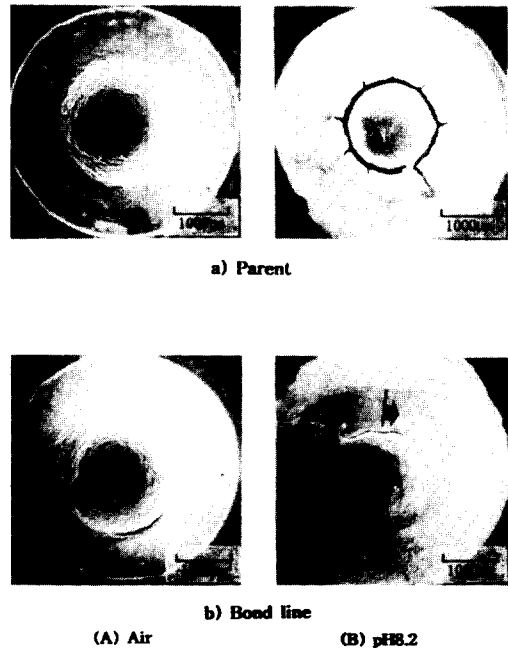


Fig. 13 SEM macrofractographs for parent metal and bond line of HT50 steel in air and SSW-pH8.2

L 부위의 조직에 있어서는 HAZ측 부위에서 전과 된 균열이 용착금속측 부위에서 생성된 균열길이 보다 크을 알 수 있다. Fig. 14는 여러 시험재중 TMCP강의 180kJ/cm와 HT50강의 B.L부에 대한 대기 및 부식환경에서의 미시적 파면관찰사진이다. 두 경우 모두 대기상태에서는 연성적 dimple 파면을, 부식환경에서는 전형적인 입내파괴거동을 관찰할 수 있어, 미시파면사진으로 부터도 SCC의 파괴거동을 확인할 수 있다.

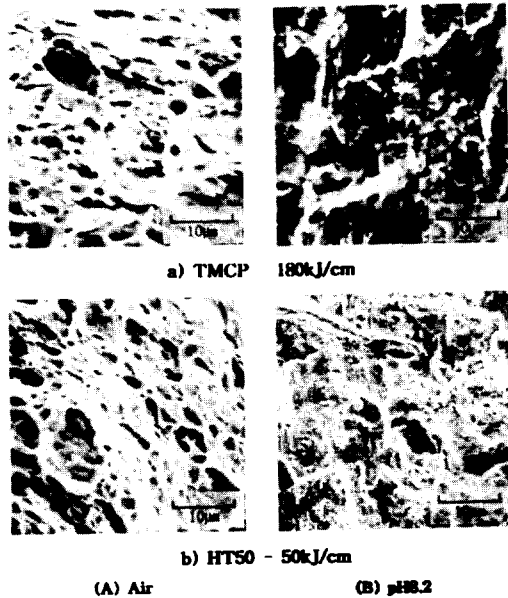


Fig. 14 SEM microfractographs for bond line of TMCP AH36(180kJ/cm) and HT50 steels in air and SSW-pH8.2

4. 맺음 말

SP-SSRT방법을 이용하여 가속냉각형 TMCP AH36강재와 종래의 HT50강재의 모재부 및 용접부의 B.L부를 대상으로 행한 응력부식균열(SCC) 시험결과는 다음과 같다.

1. 모재조직의 경우, 새로운 TMCP 공법으로 제조된 TMCP AH36강재는 제어압연과 가속냉각 효과에 의해 생성되는 페라이트조직의 큰 소성변형도에 기인하여 부식환경하에서 종래의 HT50강재보다 더 민감한 SCC 거동을 보였다.

2. B.L부의 경우 HT50강재는 용접열에 의해 조대하고 취화된 마르텐사이트 조직에 기인하여 그리고 TMCP강재는 대입열용접에 의한 가속냉각 효과의 소실로 야기되는 조직의 조대화 및 초석페라이트조직에 기인하여 두 강재 모두 모재조직보다 낮은 하중-변위 거동과 함께 0.6이상의 높은 SCC 민감도를 보였다.

3. TMCP강 용접부에 있어서 80kJ/cm의 입열량인 경우보다 120kJ/cm, 180kJ/cm의 입열량인 경우에 그 정도는 작지만 입열량 증가에 따른 SCC 민감도의 증가를 보이는데, 이는 입열량이 증감함에 따라 구성되는 B.L부의 조대하고 연한 초석페라이트조직의 증가가 주요한 원인이라 사료된다.

4. TMCP강재의 경우, 용접입열량이 증가할수록 대기상태에서는 원주방향으로 전파되는 주균열 길이가 증가하고 있는 반면, 부식환경에서는 주균열 길이가 감소하는 상이한 결과는 용접입열량의 증가에 따른 시험재의 표면부에서 소성변형정도가 크기 때문이라고 사료된다.

참고 문헌

1. 日本鎔接學會鎔接冶金研究委員會 : TMCP鋼의鎔接冶金, (1985), pp. 1~250.
2. 百合 岡信孝 : TMCP鋼의鎔接, 日本鎔接學會, 第 61卷, 第 4號, (1992), pp. 288~301.
3. 유효선, 임재규, 정세희 : 미소시험편에 의한 강 용접부의 응력부식균열 평가에 관한 연구, 대한용접학회지, 제 12권, 제 4호, (1994), pp. 411~423.
4. 유효선, 나의균, 정세희 : 인공해수의 pH에 따른 강 용접부의 응력부식균열거동에 관한 연구, 대한용접학회지, 제 13권, 제 1호, (1995), pp. 510~520.
5. 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.
6. 유효선, 이송인, 임재규, 정세희 : 소형편치시험법에 의한 응력부식균열평가에 관한 연구, 대한기계학회지, 제 17권, 제 8호, (1993), pp. 2033~2042.
7. 광정균 : PILAC TMCP강의 제조조건 및 품질 특성, 대한용접학회-TMCP강제 Symposium, (1990), pp. 1~30.