

천연가스 수송용 API 5L-X65강 용접부의 부식거동에 관한 연구

조상근* · 송한섭** · 공유식*** · 김영대***

*부경대학교 대학원 기계공학과

**서부산공업고등학교

***부경대학교 기계공학부

On Corrosion Behaviors in Welded Zone of API 5L-X65 Steel for Natural Gas Transmission

SANG-KEUN JO*, HAN-SEOP SONG**, YU-SIK KONG*** AND YOUNG-DAI KIM***

*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

**Seobusan Technical High School, Busan, Korea

***School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Constant-Current Corrosion Test 정전류부식실험, Corrosion Rate 부식속도, Relative Electrode Potential 상대전극전위, Relative Corrosion Current 상대부식전류, Surface Corrosion Pattern 표면부식양식, Stress Corrosion Cracking 응력부식균열

ABSTRACT: This study is on the constant-current stress corrosion test, related to the load stress, in both the welded and non-welded zones of high tensile strength steel that is used for natural gas transmission. The surface corrosion pattern of the welded zone of API 5L-X65 specimens for natural gas transmission showed general corrosion and narrow pitting, and the pitting was increased with load stress. Initially, the average relative electrode potential and the average relative current of the high tensile strength steel, used for natural gas transmission specimens, were decreased rapidly, and the average relative electrode potential was higher and the average relative current was lower in welded zone, compared to base metal. The average relative electrode potential was decreased with load stress, and the average relative current was somewhat increased by increasing the load stress. The corrosion rate was less in welded zone, compared to base metal, and the corrosion rate was decreased by increasing the load stress.

1. 서 론

액화천연가스는 높은 효율을 가진 청정에너지로서의 장점 때문에 세계적으로 그 사용량이 꾸준히 증가하고 있다. 천연가스를 공급하고 있는 지하매설배관은 다른 금속구조물과 병존하면서 토양이나 지하수 등의 접촉에 의한 부식, 도심의 전철 및 전력선 등의 영향에 의한 부식, 여러 시설물의 굴착공사, 초기 시공불량에 의한 결함, 차량하중 및 응력 등의 영향으로 커다란 사고를 일으키는 원인이 되고 있다(김태욱 등, 2000). 부식현상은 화학반응의 진행 과정에 전자가 참여하게 되고, 전자의 생성과 소모에 따라 금속구조물에 전위의 높낮이 구조가 형성된다(신익수, 1999). 지하매설배관의 가스누출 사고에 미치는 요인은 여러 가지가 있으나, 일반적으로 기계적 요인과 전기화학적 요인의 조합에 의해서 부식전지가 형성되어 배관사고가 발생한다.

항복점 이하의 적은 응력을 받고 있는 금속은 자유에너지의 증가가 아주 적으므로 전면부식을 거의 가속하지 못하지만, 특정한 부식환경에서는 항복점 이하의 비교적 낮은 응력을 받고

있어도 균열이 일어날 수 있다. 이러한 응력부식균열(stress corrosion cracking)은 인장응력과 전해질수용액이 동시에 존재하게 됨으로써 야기된다(Denny, 1991). 응력부식균열에 영향을 미치는 중요한 인자는 온도, 용액의 조성, 금속성분, 금속의 조직 등이며, 주로 합금에서 일어난다. 금속구조물의 제작에 있어서 용접은 불가결한 방법이며, 잔류응력, 확산성 수소, 구속도 등 역학적인 인자와 야금적인 인자의 복합 작용에 의해 용접균열이 발생하므로 종합적으로 검토해야 한다(정호신 등, 1999). 특히 용접부가 부식환경에 노출되었을 때에는 부식피로, 응력부식균열, 수소취화, 황화물균열 등이 생기기 쉬운 결합이 있으며, 이음의 형상, 시공법, 용접금속의 종류, 열영향, 잔류응력 등이 부식에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 이와 관련된 부식연구가 많이 진행되고 있다(Masayosi, 1976; Keizan, 1976; Treseder et al., 1968).

국내의 천연가스는 공급압력에 따라 API 5L-X65, X42 등 두 종류의 배관을 통하여 각 지역으로 공급되고 있다. 이 배관은 GTAW(gas tungsten arc welding) 공정에 의해 초층 용접하고, 위층은 SMAW(shield metal arc welding) 공정으로 가스배관을 시공하고 있다(백종현 등, 1998).

따라서 본 연구는 천연가스 수송용 매설 배관의 재질로 널리 사용되는 API 5L-X65강 용접부의 부하응력에 따른 부식거동을

제1저자 조상근 연락처: 부산광역시 남구 대연4동 918

051-607-3885 jsk4833@hanmail.net

파악하기 위하여 정전류 침지부식실험을 실시하였다. 그리고 이 실험에서 나타난 상대전극전위의 변화, 전류의 변화, 부식 양식, 부식속도 등의 결과를 비교 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시료는 직경 760 mm, 두께 17 mm의 천연가스 수송용 고장력강(API 5L-X65)을 사용하였다. Table 1과 Table 2는 시험편 제작에 사용한 천연가스 수송용 고장력강의 화학적 조성과 기계적 성질을 나타낸 것이고, Table 3은 시험편 제작시의 용접조건이다.

천연가스 수송용 고장력강 시료에서 시험편을 절취한 후, 용접시험편 (WS: welded specimens)과 비용접시험편 (NWS: non-welded specimens)의 머시닝센터를 이용하여 가공하였고, 용접시험편은 V-홈의 각도를 60°로 하고, 루트 간격을 1.6 mm로 가공한 다음 맞대기 용접을 하였다. 용접시험편은 건설현장에서 천연가스 수송용 매설 배관을 시공할 때의 용접방법과 동일하게 하기 위해서 저수소계 용접봉 ER70S-G를 사용하여 초층을 GTAW 공정으로 용접하고, 그 위에 고인성, 고강도의 저수소계 용접봉인 E7016과 E9016-G 피복아크용접봉을 사용하여 SMAW 공정으로 여러 번의 패스를 주어 마무리 용접을 하였다. 용접된 시료로부터 용접부를 중심으로 길이 102 mm가 길이 부분을 가공하였다. 두께 부분은 GTAW 공정 부분을 2 mm, SMAW 공정 부분을 2.3 mm로 하여 전체적으로 시험편의 두께를 4.3 mm가 되도록 가공하였다. 각 시험편의 표면조건을 일정하게 하기 위하여 평면연삭기를 이용하여 시험편의

Table 1 Chemical compositions of API 5L-X65 (wt. %)

Division	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	V
API 5L-X65	0.084	0.279	1.220	0.014	0.001	0.030	0.002	0.046	0.055
Weld metal	0.073	0.525	1.060	0.021	0.005	0.046	0.003	0.021	0.016

Table 2 Mechanical properties of API 5L-X65

Division	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation ϵ (%)
API 5L-X65	441	530	36
Weld metal	441	549	28

Table 3 Welding conditions of test specimen

Welding wire	Face	Voltage (V)	Current (A)	Speed (mm/min)	Heat input (KJ)
AWS E9016-G*	F	12~23	80~180	60~200	9.6~31
AWS ER70S-G**	F	12~18	80~100	60~100	5~15

*SMAW welding method($\phi 3.2$) **GTAW welding method($\phi 2.4$)

표면을 정삭가공한 다음, No. 600, No. 1000, No. 2000의 사포 (sand paper)로 연마하여 두께 4.2 ± 0.01 mm, 폭 18 ± 0.01 mm, 길이 100 mm가 되도록 시험편을 제작하였다. 비용접시험편도 용접시험편과 동일한 방법으로 가공하여 제작하였다. Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

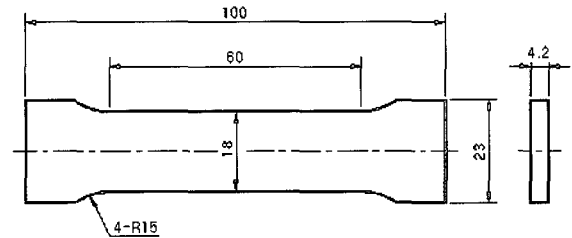


Fig. 1 Dimension of test specimen(mm)

용접접합부의 조직 특성을 파악하기 위하여 용력부식실험 전에 용접시험편의 양쪽 면을 경면 연마하고, 질산 5 ml와 에틸알콜 100 ml로 부식한 후 Union 금속현미경 (MCB-1, metallurgical microscope)을 사용하여, 배율 100배로 조직검사를 하였다. 용접접합부 중앙으로부터의 위치별 경도는 Microvikers MXT-a7e(Digital micro-hardness tester)를 사용하여 0.5 mm 간격으로 측정하였다.

2.2 시험편에 부하된 응력

천연가스 수송용 고장력강 시료의 항복점이 441 MPa이므로, 각각의 시험편에 118 MPa, 235 MPa, 353 MPa 등 항복점 이내의 인장응력을 부하하기 위하여 6개의 고정구(fixture)를 두께 30 mm의 강판을 사용하여 제작하였다. 그리고 고정구 하단에 아크릴(acrylic)로 제작한 받침대(block)를 설치하고 시험편을 올려놓은 다음, 시험편 용접부의 중앙에 균일분포하중을 부하하기 위하여 M12 고장력볼트의 끝에 강철 압입자를 결합하고,

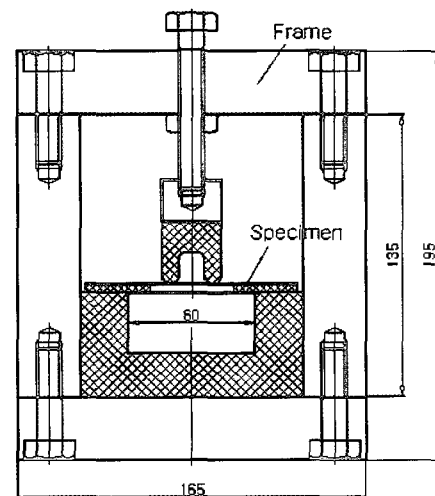


Fig. 2 Schematic of corrosion test fixture

n형태의 아크릴로 제작한 압입자를 시험편과 강철 압입자 사이에 넣어 굽힘응력을 부하하였다. 굽힘하중이 작용하는 배면은 인장하중을 받고, 정면은 압축하중을 받기 때문에 중앙부의 인장하중을 활용하기 위하여 이 방법을 채택하였다. Fig. 2는 정전류 부식실험장치에 사용된 시험편 고정구의 형상과 치수를 나타낸 것이고, Table 4는 용접시험편과 비용접시험편의 응력에 따른 토크를 나타낸다.

Table 4 Loaded stress and torque of specimens

Specimen No.	1	2	3	4
Loaded stress(MPa)	0	118	235	353
Torque(N-mm)	0	765	1,531	2,296

2.3 실험장치 및 실험조건

용접시험편은 용접부 중앙을 기준으로 하여 표면적을 1,332 mm² 만큼 남기고 상하부를 절연테이프로 완전 절연하였다. 그리고 고정구의 하단에 아크릴 받침대를 설치하고, 시험편이 받침대의 중앙에 위치하도록 올려놓은 다음, 토크렌치를 사용하여 상부의 고정력볼트를 죄어 부하응력이 각각 0 MPa, 118 MPa, 235 MPa, 353 MPa가 되도록 하였다.

탈산동으로 제작한 보조전극도 표면적이 1,332 mm²가 되도록 하고, 절연테이프로 완전 절연시켜 시험편의 표면으로부터 25 mm 떨어진 아크릴 받침대에 고정하였다. 그리고 응력이 부하된 시험편과 보조전극을 알콜로 탈지하고, Table 5와 같이 자연해수를 채운 4ℓ용량의 실험조 중앙에 Fig. 3의 (b)와 같이 설치하였다. Fig. 3은 정전류 부식실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험편을 양극(anode)으로, 보조전극은 음극(cathode)으로 한 4개의 실험조와 전류안정화 전원장치, 직류전류계, 가변저항기를 직렬로 연결하여 동시에 정전류 부식실험이 가능하게 하였다. 비용접시험편의 부식실험장치도 동일한 방법으로 설치하였다.

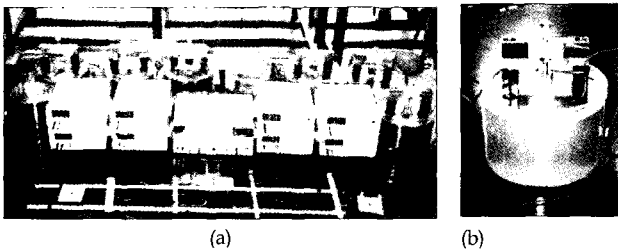


Fig. 3 Experimental apparatus of constant-current corrosion test

Table 5 Quality of natural sea water used for experiments

Water temp. (°C)	Specific gravity	Specific resistance (Ω-cm)	pH	Total hardness (ppm, CaCO ₃)	Chloride ppm(Cl)
20	1.0231	21.5	7.2	3.555	115

2.4 실험방법

Fig. 4에서, 직류안정화전원장치와 가변저항기를 사용하여 양

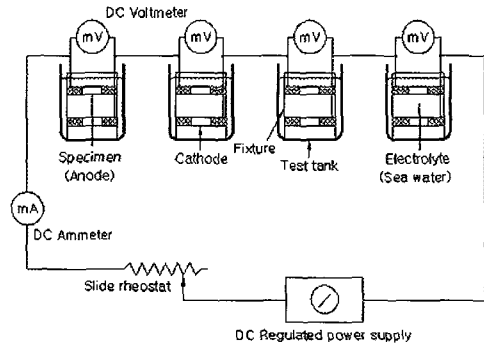


Fig. 4 Schematic diagram of constant-current corrosion test

극의 전류밀도를 0.75 mA/cm²가 되도록 조절하면서 240시간 동안 정전류 부식실험을 실시하였다. 이 실험 도중에 매 12시간 단위로 시험편(양극)과 보조전극(음극)과의 상대전극전위 및 상대전류의 변화를 측정하였다. 이상의 실험이 끝난 후 시험편을 실험장치에서 해체하여 물로 세척한 다음, 60 °C로 가열한 20 % H₂SO₄ 수용액에 1시간 동안 침지시켜 표면에 부착된 산화물을 제거하고 다시 수세하였다. 그리고 시험편에 부착시켰던 절연테이프를 제거한 다음 알콜로 세척하여 중량을 계측하였다. 부식 속도는 mils per year(mpy) 단위를 사용하였고, 중량감량을 부식속도로 환산하는 식은 다음과 같다(안용식 등, 1994).

$$mpy = \frac{(12,000 \times 287 \times w)}{(A \times d \times t)}$$

- w : 중량감량(gf)
- A : 시험편의 표면적(cm²)
- d : 시험편의 밀도(gf/cm³), 일반적으로 강에서는 7.87(gf/cm³)
- t : 침지시간(hours)

시험편 표면의 부식양식을 파악하기 위하여 접사렌즈를 부착한 사진기를 사용하여 부식된 표면을 촬영하였고, 부식양식은 British Aluminum의 부식양식을 따라 분류하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 경도 분포와 금속 조직 특성

Fig. 5는 용접방법에 따른 용접접합부의 위치별 경도분포를 나타낸 것이다. 용접금속부와 열영향부에서는 GTAW가 SMAW보다 전반적으로 높은 경도값을 유지했으나, 모재부에서는 다소 낮거나 비슷한 경향을 보였으며, 열영향부에서 모재부로 천이되는 경계구역에서는 상당한 경도감소가 관찰되었다. 이 구역은 오스테나이트 입계를 따라 페라이트상이 석출되는 천이구역으로, A1 변태선 이하의 온도 영역에 해당하는 열영향을 받게 되는 템퍼링(tempering) 영역에 속하고, 템퍼링 온도가 높을수록 경도가 낮아지는 템퍼링효과 때문에 사료된

다. 열영향부는 용접금속부보다 급랭되어 경화층을 형성하기 때문에 경도가 높게 나타나며, 이 부근에서 용접균열이 쉽게 발생하거나 연성이 저하된다. 저탄소강 용융선부의 냉각속도는 입열량과 반비례한다. 이러한 결과에 의하면, SMAW 공정이 GTAW 공정에 비하여 더 높은 입열량으로 용접되었다. 따라서 SMAW 공정이 더 낮은 냉각속도를 나타냄으로써 급속조직이 조대한 페라이트로 형성되어 낮은 경도값을 유지하게 되는 것이다.

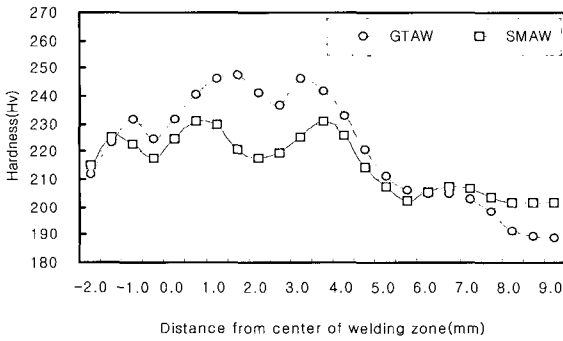


Fig. 5 Distribution of hardness at welded zone with micro-vickers hardness tester (weight=500gf)

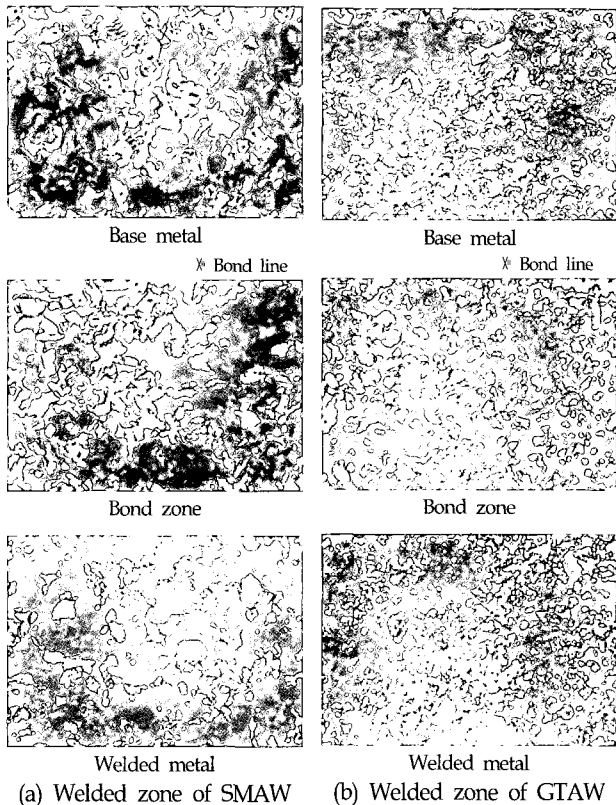


Fig. 6 Micro-structures in welded zone of specimens($\times 100$)

Fig. 6의 (a)는 용접시험편의 SMAW 용접부에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 모재부(base metal)는 균질한 페라이트(ferrite)

조직과 펄라이트(pearlite) 조직으로 구성되어 있다. 열영향부(bond zone)의 좌측은 열영향을 받아 다량의 균질한 페라이트와 약간의 펄라이트 조직이 형성되어 있고, 우측은 조대화된 마르텐사이트(martensite) 조직으로 구성되어 있다. 용접금속부(weld metal)는 용접에 의한 열영향을 받아 조대화된 영역으로 오스테나이트(austenite)를 따라 페라이트가 석출한 조직과 급랭으로 인한 마르텐사이트 조직이 혼합되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6의 (b)는 용접시험편의 GTAW 용접부에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 모재부는 조대한 페라이트와 펄라이트의 조직으로 구성되어 있다. 열영향부 좌측은 열영향을 받아 조대화된 영역으로 다량의 페라이트와 약간의 펄라이트 조직이 나타났으며, 우측은 모재부 보다 더욱 미세한 페라이트 조직이 형성되어 있다. 용접금속부는 오스테나이트 결정립이 조대화되고 이것이 급랭에 의해 미세한 페라이트가 균일한 크기로 형성되어 있다.

3.2 부하응력에 따른 용접시험편의 부식거동

Table 6은 부하응력에 따른 용접시험편의 정전류 침지부식시험 결과를 나타낸 것이다. 용접시험편의 평균상대전극전위는 무부하응력에서 -0.054 V로 가장 높았고, 235 MPa까지는 부하응력이 증가할수록 감소하는 추세를 보였지만, 항복응력의 80% 하중이 부하된 353 MPa에서는 다시 평균상대전극전위가 증가하였다. 평균상대전류는 무부하응력에서 가장 높았고, 부하응력이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보였으나, 118 MPa에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 부식량은 모든 부하응력에서 2.42 gf 정도로 거의 일정하였지만 무부하응력에서 부식량이 가장 크게 나타났다. 전반적으로 부하응력이 증가할수록 부식량이 작아지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 모재부와 용접부의 전위차 및 면적차이가 각기 다르기 때문으로 사료된다.

Table 6 Corrosion test results of welded specimens

Specimen No.	Loaded stress (MPa)	Electrode potential (V)	Corrosion current (mA)	Weight corrosion (gf)	Corrosion pattern
WS-1	0	-0.054	0.018	2.4208	Ge, Le, N
WS-2	118	-0.115	0.013	2.4201	Ge, Gu, N
WS-3	235	-0.187	0.017	2.4169	Ge, Gu, M
WS-4	353	-0.117	0.017	2.4187	Ge, Gu, M

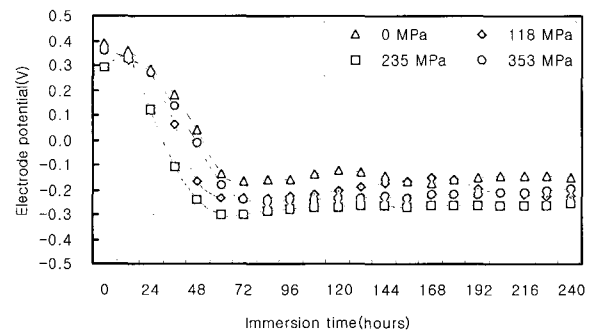


Fig. 7 Electrode potential with immersion time for welded specimens

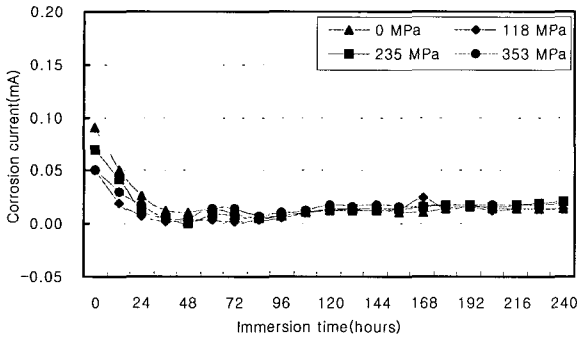


Fig. 8 Corrosion current with immersion time for welded specimens

Fig. 7은 침지시간에 따른 상대전극전위의 변화를 나타낸 것이다. 부하응력의 크기에 관계없이 초기부터 60시간까지는 급격히 감소하고, 그 이후에는 -0.1~-0.3V 범위에서 대체로 안정된 전위값을 나타냈다. 그러나 235 MPa의 경우에는 초기에 상승을 하다가 12시간 경과 후에 급격히 감소하는 양상을 보였다. 전위차가 초기에 크게 나타난 이유는 시험편의 표면상태 또는 표면에 노출된 계재물들의 성상 등에 영향을 받기 때문이며, 시간의 경과와 함께 표면상태의 영향이 점차 사라지고 전극전위가 안정화되는 것으로 사료된다. 상대전극전위는 무부하응력에서 가장 높았고, 235 MPa의 부하응력에서는 가장 낮았다. 용접시험편의 상대전극전위는 전반적으로 시간의 경과와 더불어 낮게 나타났으며, 부하응력이 증가할수록 낮아지는 경향을 보였으나, 항복응력의 80% 하중이 부하된 353 MPa에서는 증가하는 양상을 나타냈다.

Fig. 8은 침지시간에 따른 상대전류의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 48시간까지는 급격하게 감소하지만, 이후 소폭으로 증가하다가 84시간 이후부터는 점차 안정적인 전류값을 나타냈다. 상대전류는 무부하응력에서 가장 높고, 118 MPa에서는 초기부터 가장 낮은 값을 나타냈다. 용접시험편의 상대전류는 대체적으로 48시간까지 감소현상을 보였으나, 60시간 이후부터는 부하응력이 증가할수록 상대전류값이 증가하는 양상을 나타냈다.

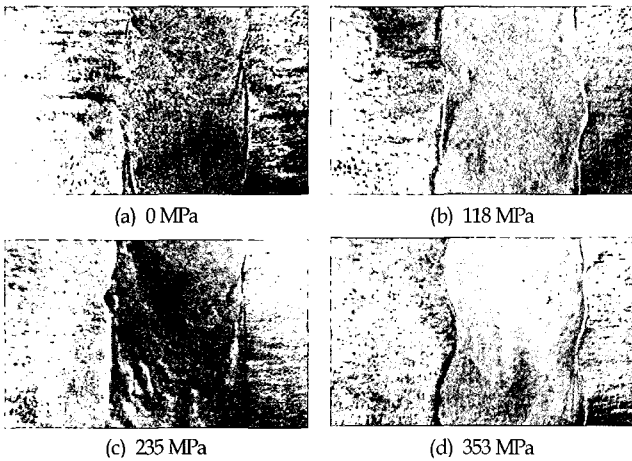


Fig. 9 Corrosion pattern of welded specimens(SMAW, ×2)

Fig. 9는 용접시험편(SMAW 공정)을 240시간(10일간) 침지부식실험 후의 표면 부식형태를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 무부하 상태로, 모재부에서는 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났고, 용접금속부에서는 균일한 전면부식(Ge)과 부분적으로 평활한 국부부식(Le)이 나타났다. 맞대기용접이 완료된 용접부는 용접금속 내에 높은 인장응력이 작용하지만 주위의 모재부는 상당한 크기의 압축응력이 존재하고, 가열 중의 열팽창과 연화는 용융부 근처의 모재부에 소성변형을 일으키게 되며, 응고와 열수축으로 인해 응고된 용접금속 내부와 인접영역에 항복점까지의 인장응력이 가해지게 되는 것이다(Denny, 1996). 이러한 잔류응력과 응력집중은 환경기인균열(environmentally induced cracking)에 취약점이 되어 부식환경에 노출되었을 때 집중적으로 심한 부식이 진행되어 급격한 침식경계층을 형성하게 되는 것으로 사료된다. Fig. 9(b), (c), (d)는 118 MPa, 235 MPa, 353 MPa의 응력을 부하한 경우로, 모재부에서는 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났고, 118 MPa에서는 좁은 공식(N)이 나타났으며, 235 MPa에서는 중위의 공식(M)을 나타냈다. 용접금속부에서는 작은 요철이 있는 전면부식(Gu)과 좁은 공식(N)이 나타났다.

118 MPa에서는 좁은 공식(N)이 나타났고 353 MPa에서는 넓은 중위의 공식(M)이 관찰되었다. 열영향부에서는 부식량의 차이로 인한 침식 경계층이 형성되었다. 따라서 용접시험편은 전반적으로 부하응력의 증가와 더불어 공식이 커지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 모재부와 용접금속부의 면적비의 차이로 인한 전위차가 발생하고, 상대적으로 면적이 좁은 용접금속부의 전류밀도가 높아지면서 모재부보다 빠른 속도로 부식이 진행됨으로써 침식경계층이 형성되는 것으로 사료된다.

3.3 부하응력에 따른 비용접시험편의 부식거동

Table 7은 부하응력에 따른 비용접시험편의 정전류 침지부식 실험 결과를 나타낸 것이다. 비용접시험편의 평균상대전극전위는 무부하응력에서 -0.091 V로 가장 높고, 부하응력에서는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 평균상대전류는 부하응력이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으나, 353 MPa에서는 급격히 감소하였다. 평균상대전극전위와 평균상대전류는 353 MPa에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 부식감량은 무부하응력에서 가장 적고, 부하응력 하에서는 거의 비슷한 경향을 보였다.

Table 7 Corrosion test results of non-welded specimens

Specimen No.	Loaded stress (MPa)	Electrode potential (V)	Corrosion current (mA)	Weight corrosion (gf)	Corrosion pattern
NWS-1	0	-0.091	0.022	2.4340	Ge, N
NWS-2	118	-0.124	0.030	2.4398	Ge, Le, N
NWS-3	235	-0.161	0.039	2.4393	Ge, Le, N
NWS-4	353	-0.200	0.021	2.4398	Ge, Le, M

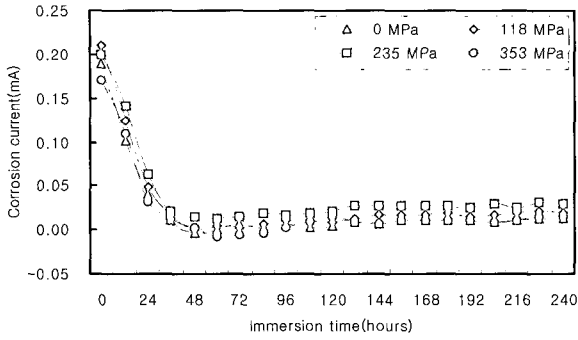


Fig. 10 Corrosion current with immersion time for non-welded specimens

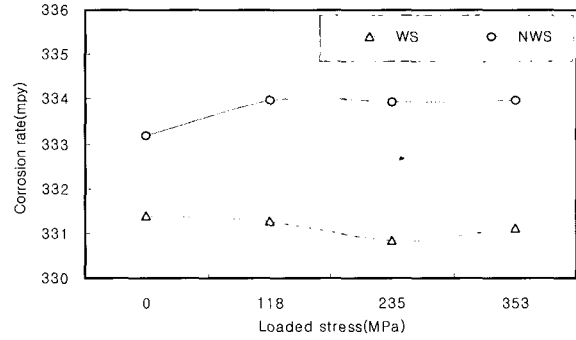


Fig. 12 Comparison of corrosion rate vs. loaded stress for welded and non-welded specimens

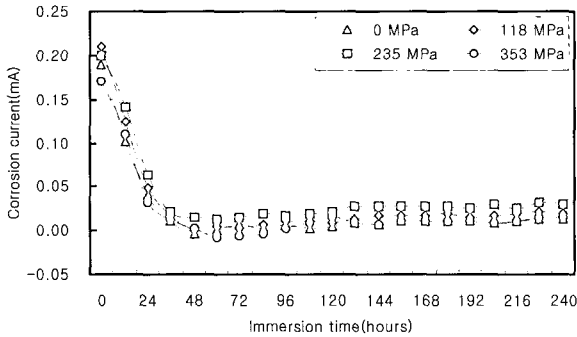


Fig. 11 Corrosion current with immersion time for non-welded specimens

Fig. 10은 침지시간의 경과에 따른 상대전극전위의 변화를 나타낸 것이다. 초기에는 모든 시험편에서 급감하였으나 60시간 경과 후에는 $-0.18 \sim -0.32$ V 범위에서 안정되었다. 353 MPa에서는 부하응력이 가장 큼에도 불구하고 전체적으로도 가장 낮은 전위값을 나타냈다. 비용접시험편의 상대전극전위는 전반적으로 부하응력이 증가할수록 상대전극전위가 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 11은 침지시간의 경과에 따른 상대전류의 변화를 나타낸 것이다. 모든 시험편에서 60시간까지는 급격히 감소했으나 그 이후에는 $-0.01 \sim 0.04$ mA 범위 내에서 안정된 전류값을 나타냈으며, 96시간 이후에는 전반적으로 다소 상승하는 경향을 보였다. 전반적으로 부하응력이 증가할수록 상대전류값도 증가하는 경향을 보였으나 항복응력의 80% 하중이 가해진 353 MPa에서는 부하응력이 가장 큼에도 상대전류값은 가장 낮은 값을 나타냈다.

비용접시험편의 부식양식은 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 중위의 공식(M)이 나타났으나, 응력이 증가할수록 좁은 공식(N)에서 중위의 공식(M)으로 공식이 점차 커지는 경향을 보였다.

3.4 부하응력 및 용접 유무에 따른 부식거동의 비교

Fig. 12는 부하응력 및 용접 유무에 따른 부식속도를 비교한 것이다. 용접시험편은 부하응력의 증가에 따라 부식속도가 감

소하는 경향을 보이다가 353MPa에서 다시 증가하였다. 비용접 시험편은 부하응력이 증가함에 따라 부식속도가 증가하는 양상을 보였다. 항복점 이하의 부하응력하에서 API 5L-X65강의 부식속도는 부하응력의 증가와 더불어 부식속도가 증가하였으며, 용접시험편이 비용접시험편에 비해 부식속도가 다소 작은 경향을 보였다. 이 점에 대해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

용접시험편의 평균상대전극전위와 평균상대전류는 무부하응력에서 가장 높은 값을 나타냈고, 부하응력이 증가할수록 감소하는 추세를 보였다. 비용접시험편의 평균상대전극전위와 평균상대전류는 평균상대전극전위는 무부하응력에서 가장 높고, 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 353MPa에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 용접시험편과 비용접시험편 모두 초기에는 상대전극전위와 상대전류가 급격히 감소하는 반면, 60시간 경과 이후에는 대체로 안정된 값을 나타냈다.

용접시험편의 부식양식은 모재부에서 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났고, 용접금속부에서는 균일한 전면부식(Ge)과 부분적으로 평활한 국부부식(Le)이 나타났다. 응력이 증가할수록 모재부에서는 공식이 다소 큰 경향을 보였고, 열영향부에서는 부식량의 차이로 인한 침식층을 형성하고 침식경계층은 응력이 증가할수록 크게 나타났다. 비용접시험편은 응력이 증가할수록 좁은 공식(N)에서 중위의 공식(M)으로 공식이 점차 커지는 것으로 나타났으며, 부분적으로 평활한 국부부식(Le)을 나타냈다.

4. 결 론

천연가스 수송용 API 5L-X65강 용접부의 부하응력에 따른 정전류 부식실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접부의 표면부식양식은 전면부식과 좁은 공식이 나타났으며, 응력이 증가할수록 좁은 공식에서 중위의 공식으로 점차 커지는 것을 알 수 있었다.
- (2) 용접부는 비용접부에 비해서 평균상대전극전위는 높고, 평균상대전류는 낮았다. 또한 부하응력이 증가할수록 평균상대전극전위는 감소했으나 평균상대전류는 다소 증가하였다.
- (3) 항복점 이하의 부하응력하에서 API 5L-X65강의 부식속도

는 부하용력의 증가와 더불어 증가하였으나, 용접부가 비용접 부보다 다소 작은 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 두뇌한국 21사업에 의하여 일부 지원되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김태욱, 성준식, 조용현 (2000). "지하매설배관의 위험성 평가 프로그램 개발", 한국가스학회지, 제4권, 제2호, pp 37-46.
- 백종현, 김철만, 김영표, 김우식 (1998). "천연가스 수송용 API 5L-X42 강관의 용접방법에 따른 용접부 미세조직과 기계적 특성에 관한 연구", 한국가스학회지, 제2권, 제2호, pp 34-35.
- 신익수 (1999). "도시가스 공급배관의 절연과 방식", 한국부식학회지, 제1권, 제2호, pp 108-112.

- 안용식, 박화순, 김영환, 원태연, 이상래 (1994). "AISE 321강의 용접 열영향부의 부식거동에 관한 연구", 한국부식학회지, 제23권, 제4호, pp 233-242.
- 정호신, 엄동석, 이해우(1999). "후판용접부의 황균열 발생방지에 관한 연구(1)", 한국해양공학회지, 제13권, 제3호, pp 49-56.
- Denny A.J. (1991). Principles and Prevention of Corrosion, MacMillan Publishing Co., pp 235-238.
- Denny A.J. (1996). Principles and Prevention of Corrosion, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, pp 309-316.
- Keizang, D. (1976). "Hydrogen Embitterment of High Strength Steel", Metal, Vol 46, No 4, pp 15-19.
- Masayosi, S. (1979). "Weldability of High Strength Steel", Metal, Vol 46, No 1, pp 13-19.
- Treseder, R. S. and Swanson T.M. (1968). "Factors in Sulfide Corrosion Cracking of High Strength Steel", Corrosion, Vol 24, No 2, pp 31-37.

2004년 7월 5일 원고 접수

2004년 9월 16일 최종 수정본 채택