

# 천연가스 수송용 API 5L-X65강 용접부의 부식거동에 관한 연구

조상근\* · 송한섭\*\* · 공유식\*\*\* · 김영대\*\*\*

\*부경대학교 대학원 기계공학과

\*\*서부산공업고등학교

\*\*\*부경대학교 기계공학부

## A Study on Stress Corrosion Behaviors in Welded Zone of the API 5L-X65 Steel for Natural Gas Transmission

SANG-KEUN JO\*, HAN-SEOP SONG\*\*, YOO-SIK KONG\*\*\* AND YUONG-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, Surface Corrosion Pattern 표면부식형태, Stress Corrosion Cracking 응력부식균열

**ABSTRACT:** This study is on the constant-current stress corrosion test related to the load stress in welded zone and non-welded zone of high tensile strength steel for natural gas transmission. The surface corrosion pattern of the welded zone of API 5L-X65 specimens for natural gas transmission showed global corrosion and narrow pitting, and the pitting was increased by increasing the load stress. Initially, the average relative electrode potential and the average relative current of the high tensile strength steel for natural gas transmission specimens was decreased suddenly, and the average relative electrode potential was higher and the average relative current was lower in welded zone than base metal. and the average relative electrode potential was decreased by increasing the load stress, and the average relative current was somewhat increased by increasing the load stress. The corrosion rate was less in welded zone than 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 있으며, 국내에서도 최근 지하에 매설되고 있는 천연가스 수송용 배관의 길이가 크게 증가하고 있다(장재일 등, 1998). 천연가스 수송용 배관은 대체로 도심지역에 공급되므로 도심의 전철 및 전력선 등의 영향에 의한 부식, 여러 시설물의 굴착공사, 초기 시공불량에 의한 결함, 차량 하중 및 응력 등의 영향으로 커다란 사고를 일으키는 원인이 되고 있다(최승천 등, 1000; 김태욱 등, 2000). 도시가스를 공급하고 있는 지하매설배관은 다른 금속구조물과 지하에서 병존하면서 토양이나 지하수 등과 접촉해 부식이 진행된다. 일반적으로 부식현상은 화학반응의 진행 과정에 전자가 참여하게 되고, 전자의 생성과 소모에 따라 금속구조물에 전위의 높낮이 구조가 형성된다(신의수, 1999). 지하매설배관의 가스누출 사고에 미치는 요인은 여러 가지가 있으나, 일반적으로 기계적 요인과 전기화학적 요인의 조합에 의해서 부식전지가 형성되어 배관사고가 발생한다. 냉간가공이나 열처리 혹은 용접한 금속에는 잔류응력이 남는다. 냉간가공된 금속은 가공에 의해서 조직이 변하고 큰 응력이 남으므로 부식 속도가 상당히 증가되나, 항복점 이하의 적은 응력을 받고 있는

금속은 자유에너지의 증가가 아주 적으므로 전면부식을 거의 가속하지 못한다. 그러나 특정한 부식환경 중에 있는 금속은 항복점 이하의 비교적 낮은 응력을 받고 있어도 균열이 일어날 수 있다. 이러한 응력부식균열(stress corrosion cracking; SCC)은 인장응력과 부식전해액이 동시에 존재하게 됨으로써 야기되며, 응력부식균열에 영향을 미치는 중요한 인자는 온도, 용액의 조성, 금속성분 그리고 금속의 조직 등이며, 주로 합금에서 일어나고 순금속에서는 일어나지 않는다(이학열, 1997). 금속구조물의 제작에 있어서 용접은 불가결한 방법이며, 이음의 형상, 시공법, 용접금속의 종류, 열영향, 잔류응력 등이 부식에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 이와 관련된 부식연구가 많이 진행되고 있다. 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 초층을 용접하고, 그 위층은 SMAW(shield metal arc welding) 공정으로 가스배관을 시공하고 있다(백종현 등, 1998). 본 연구는 천연가스 수송용 매설 배관의 재질로 널리 사용되는 API 5L-X65강 용접부의 부하응력에 따른 부식거동을 파악하기 위하여 API 5L-X65강 비용접부를 비교실험 재료로 채택하고, 정전류 부식실험을 실시하였다. 그리고 이 실험에서 나타난 상대전극전위의 변화, 전류의 변화, 재료표면의 부식

양식, 부식속도 등의 결과를 비교 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시료는 직경 760mm, 두께 17mm의 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 용접조건을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical compositions of API 5L-X65 (weight, %)

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 (20°C)

Division	Yield point (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
API 5L-X65	45	54	36
Weld metal	45	56	28

Table 3 Welding conditions of test specimen

Welding wire (mm)	Face	Voltage (V)	Current (A)	Speed (mm/min)	Heat Input (KJ)
AWS E9016-G (Ø3.2)*	F	12~23	80~180	60~200	9.6~31
AWS ER70S-G (Ø2.4)**	F	12~18	80~100	60~100	5~15

\* SMAW Welding Method \*\* GTAW Welding Method

직경 760mm, 두께 17mm의 천연가스 수송용 고장력강 시료에서 시험편을 절취한 후, 용접시험편(WS: welded specimens)과 비용접시험편(NWS: non-welded specimens)의 상하 표면을 머시닝센터(machining center)를 이용하여 가공하였고, 용접시험편은 V-홈의 각도를 60°로 하고, 루트 간격을 1.6mm로 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 피복아크 용접봉을 사용하여 SMAW 공정으로 여러 번의 패스를 주어 마무리 용접을 하였다. 용접된 시료로부터 다시 와이어컷방전가공기를 이용하여 용접부를 중심으로 길이 102mm가 되도록 절취한 다음, 머시닝센터로 상하표면을 각각 1.5mm씩 가공하고, 측면과 길이 부분을 가공하였다. 두께 부분은 GTAW 공정 부분을 2mm,

SMAW 공정 부분을 2.3mm로 하여 전체적으로 시험편의 두께를 4.3mm가 되도록 가공하였다. 각 시험편의 표면조건을 일정하게 하기 위하여 평면연삭기를 이용하여 시험편의 표면을 정삭가공한 다음, No. 600, No. 1000, No. 2000의 사포(sand paper)로 연마하여 두께 4.2±0.01mm, 폭 18±0.01mm, 길이 100mm가 되도록 시험편을 제작하였다. 비용접시험편도 용접시험편과 동일한 방법으로 가공하여 제작하였다. Fig. 1은 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

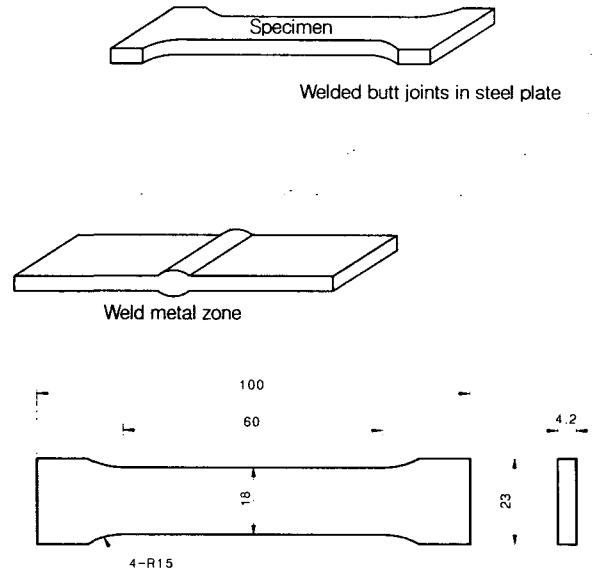


Fig. 1 Dimension of test specimen

시험편 용접접합부의 금속조직적 특성을 파악하기 위하여 응력 부식시험 전에 용접시험편의 양쪽 면을 경면 연마하고, 질산 5mℓ와 에칠알콜 100mℓ로 부식한 후 Union 금속현미경(MCB-1, metallurgical microscope)을 사용하여, 배율 100배로 조직검사를 하였다. 그리고, 용접접합부의 위치별 경도는 Microvikers MXT-a 7e(Digital micro-hardness tester : weight=500gf)를 사용하여 측정하였다.

### 2.2 시험편에 부하된 응력

천연가스 수송용 고장력강 시료의 항복점이 45kgf/mm<sup>2</sup>이므로, 각각의 시험편에 12kgf/mm<sup>2</sup>, 24kgf/mm<sup>2</sup>, 36kgf/mm<sup>2</sup>의 항복점 이내의 인장응력을 부하하기 위하여 6개의 고정구(fixture)를 두께 30mm의 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 강철압입자를 결합하고, '∩' 형태의 아크릴로 제작한 압입자를 시험편과 강철 압입자 사이에 넣어 굽힘응력을 부하하였다. 인장응력을 부하하지 않고 굽힘응력을 부하한 이유는 시료의 인장강도가 커서 토크렌치(torque wrench)를 활용하는 방법으로는 시험에 필요한 수직하중을 부하할 수 없기 때문이다. 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 것이다. Table 4는 용접시험편과 비용접시험편의 응력에 따른 토크를 나타낸 것이다

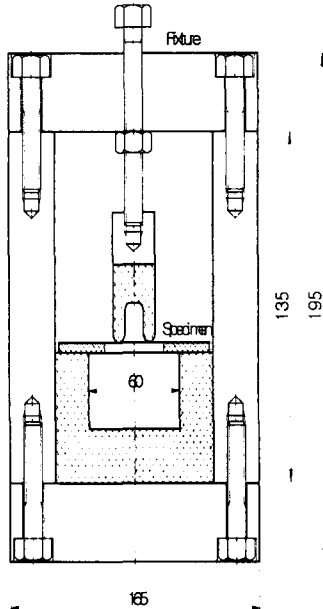


Fig. 2 Detail of corrosion test fixture

Table 4 Stress and torque of specimens

Specimen No.	1	2	3	4
Stress(kgf/mm <sup>2</sup> )	0	12	24	36
Torque(kgf-mm)	0	78.11	156.22	234.33

### 2.3 실험장치 및 실험조건

용접시험편은 용접부 중앙을 기준으로 하여 표면적을 1,332mm<sup>2</sup> 만큼 남기고 상하부를 절연테이프로 완전 절연하였다. 그리고 고정구의 하단에 아크릴 받침대를 설치하고, 시험편이 받침대의 중앙에 위치하도록 올려놓은 다음, 토크렌치를 사용하여 상부의 고정력볼트를 죄어 시험편의 부하응력이 각각 0kgf/mm<sup>2</sup>, 12kgf/mm<sup>2</sup>, 24kgf/mm<sup>2</sup>, 36kgf/mm<sup>2</sup>가 되도록 하였다.

탈산동으로 제작한 보조전극도 표면적이 1,332mm<sup>2</sup>가 되도록 하고, 절연테이프로 완전 절연시켜 시험편의 표면으로부터 25mm 떨어진 아크릴 받침대에 고정하였다. 그리고 응력이 부하된 시험편과 보조전극을 알콜로 탈지하고, 4ℓ용량의 실험조 중앙에 Fig.

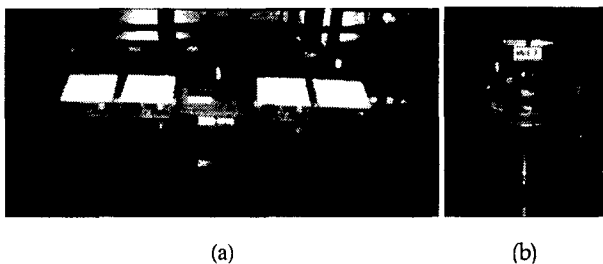


Fig. 3 Experimental apparatus of constant-current corrosion test

3의 (b)와 같이 설치하였다. Fig. 3은 정전류 부식실험장치를 나타낸 것이다. Fig. 4는 정전류 부식실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험편을 양극(anode)으로, 보조전극은 음극(cathode)으로 한 4개의 실험조와 전류안정화전원장치, 직류전류계, 가변저항기를 직렬로 연결하여 동시에 정전류 부식실험이 가능하게 하였다. 그리고 비용접시험편의 부식실험장치도 용접시험편과 동일한 방법으로 설치하였다. 또한 각 시험편과 보조전극 사이의 상대전극전위 변화를 측정하기 위하여 시험편과 보조전극 사이에 전위차계를 병렬로 연결하고 자연해수를 채워 부식환경을 조성하였다. Table 5는 자연해수의 성질을 나타낸 것이다.

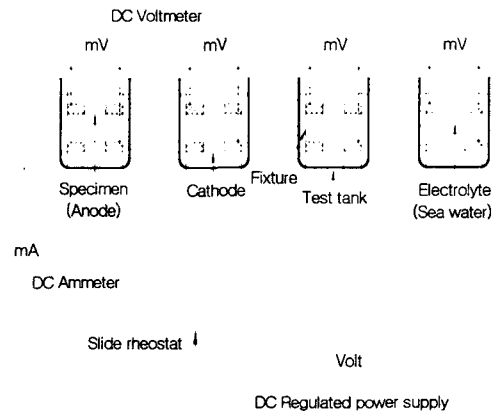


Fig. 4 Schematic diagram of constant-current corrosion test

Table 5 Qualities of natural sea water used for the experiments

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

### 2.4 실험방법

Fig. 4에서, 직류안정화전원장치와 가변저항기를 사용하여 양극의 전류밀도를 0.75mA/cm<sup>2</sup>가 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℃로 가열한 20% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액에 1시간 동안 침지시켜 표면에 부착된 산화물을 제거하고 다시 수세하였다.<sup>19)</sup> 그리고 시험편에 부착시켰던 절연테이프를 제거한 다음 알콜로 세척하여 중량을 측정하였다. 부식속도는 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(cm<sup>2</sup>)  
d : 시험편의 밀도(gf/cm<sup>3</sup>), 일반적으로 강에서는 7.87g/cm<sup>3</sup>  
t : 침지시간(hour)

시험편 표면의 부식양식을 파악하기 위하여 접시렌즈를 부착한 사진기를 사용하여 용접부의 부식된 표면을 촬영하였고, 부식양식은 British Aluminum의 부식양식을 따라 분류하였다(Champion, 1948).

### 3. 실험결과 및 고찰

천연가스 수송용 고장력강 용접부의 용접방법에 따른 위치별 경도분포와 금속조직적 특성을 확인한 다음, 240시간 동안 정전류 용력부식실험을 실시하여 시험편과 보조전극의 상대전극전위 변화, 상대전류 변화, 중량감량에 의한 부식속도, 표면부식양식 등을 파악하였다. 그리고 부하응력에 따른 용접시험편과 비용접시험편의 부식거동을 비교 분석하였다.

#### 3-1. 용접부의 경도분포와 금속조직적 특성

Fig. 5는 용접방법에 따른 용접접합부의 위치별 경도분포를 나타낸 것이다. 경도측정은 500gf 하중에서 용접부의 중심으로부터 GTAW 및 SMAW 위치에서 0.5mm 간격으로 측정하였다. 천연가스 수송용 고장력강 용접부의 경도분포는 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,  $A_1$  변태선 이하의 온도 영역에 해당하는 열영향을 받게 되는 템퍼링(tempering) 영역에 속하고, 템퍼링 온도가 높을수록 경도가 낮아지는 템퍼링효과가 때문으로 사료된다. 열영향부는 용접금속부보다 급랭되어 경화층을 형성하기 때문에 경도가 높게 나타나며, 이 부근에서 용접균열이 쉽게 발생하거나 연성이 저하된다(김영식, 1993; 엄동석, 1982).

木原博(1996) 등에 의하면 저탄소강 용융선부의 냉각속도는 입열량과 반비례한다고 하였다. 이러한 결과에 의하면, Table 3에서 SMAW 공정이 GTAW 공정에 비하여 더 높은 입열량으로 용접되

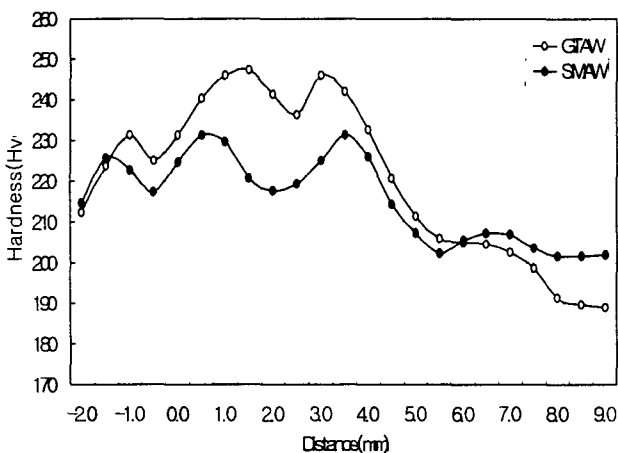


Fig. 5 Distribution of hardness at welded zone for SMAW and GTAW specimens with microvickers hardness tester (weight = 500gf)

었다. 따라서 SMAW 공정이 더 낮은 냉각속도를 나타냄으로써 금속조직이 조대한 페라이트로 형성되어 낮은 경도값을 유지하게 되는 것이다.

Fig. 6의 (a)는 용접시험편의 SMAW 용접부에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 모재부(base metal)는 균질한 페라이트(ferrite) 조직과 펄라이트(pearlite) 조직으로 구성되어 있다. 본드부(bond zone)의 좌측은 열영향부로서 열영향을 받아 다량의 균질한 페라이트와 약간의 펄라이트 조직으로 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. 본드부 좌측의 열영향부는 열영향을 받아 조대화된 영역으로 다량의 페라이트와 약간의 펄라이트 조직이 나타났으며, 우측은 모재부 보다 더욱 미세한 페라이트 조직으로 형성되어 있다. 용접금속부는 오스테나이트 결정립이 조대화되고 이것이 급랭에 의해 미세한 페라이트가 균일한 크기로 형성되어 있다.

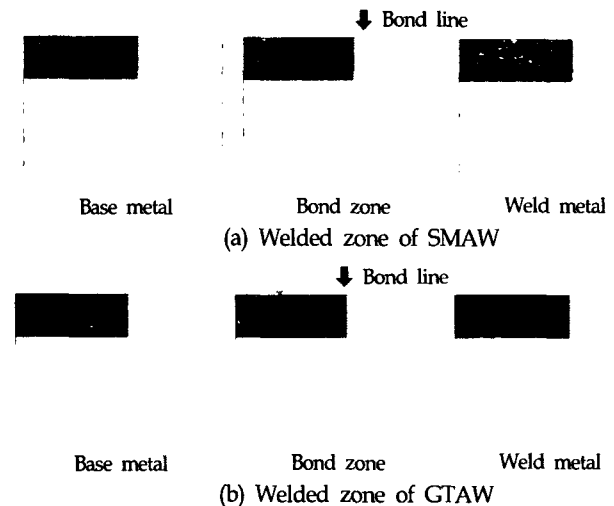


Fig. 6 The microstructures in welded zone of specimens( $\times 100$ )

#### 3.2 부하응력에 따른 용접시험편의 부식거동

Table 7은 용접시험편 용접부의 정전류 부식실험에서 시험편과 보조전극과의 평균상대전극전위와 평균상대전류, 부식감량 및 표면부식양식을 나타낸 것이다.

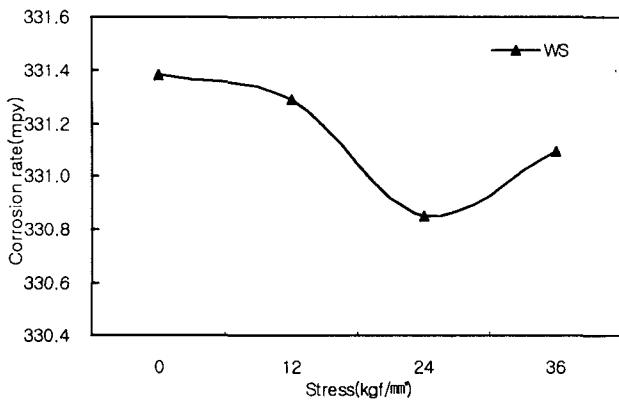
용접시험편 용접부의 평균상대전극전위는 무부하응력에서  $-0.054V$ 로 가장 높았고,  $24kgf/mm^2$ 까지는 부하응력이 증가할수록 감소하는 추세를 보였지만, 항복응력의 80% 하중이 부하된  $36kgf/mm^2$ 에서는 다시 평균상대전극전위가 증가하였다. 평균상대전류는 무부하응력에서 가장 높았고, 부하응력이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보였으나,  $12kgf/mm^2$ 에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 부식감량은 모든 부하응력에서  $2.42gf$  정도로 거의 일정하였으며, 무부하응력에서 부식감량이 가장 크게 나타났다. 전반적으로 부하응력이 증가할수록 부식감량이 작게 나타나는 추세이지만

**Table 7** The constant-current corrosion test results of welded specimens

Specimen No.	Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	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	12	-0.115	0.013	2.4201	Ge, Gu, N
WS-3	24	-0.187	0.017	2.4169	Ge, Gu, M
WS-4	36	-0.117	0.017	2.4187	Ge, Gu, M

36kgf/mm<sup>2</sup>에서는 약간 증가하는 경향을 보였다.

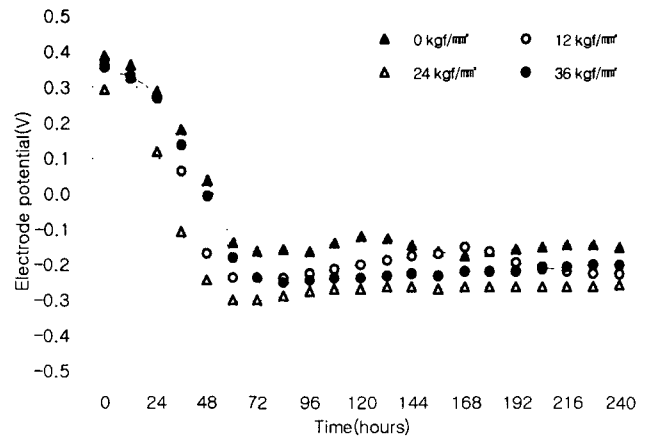
Fig. 7은 부하응력에 따른 용접시험편의 부식속도를 나타낸 것이다. 부식속도는 무부하응력에서 331.384mpy로 가장 크게 나타났고, 24kgf/mm<sup>2</sup>에서 330.850mpy로 가장 작게 나타났다. 부하응력에서보다는 무부하응력에서 부식속도가 크게 나타났으며, 부하응력에서는 부하응력이 증가함에 따라 부식속도가 감소하는 경향을 보이다가 36kgf/mm<sup>2</sup>에서 다시 증가하였는데, 이는 모재부와 용접부의 전위차 및 면적차이가 각기 다르기 때문으로 사료된다.



**Fig. 7** Relation of corrosion rate and stress for welded specimens

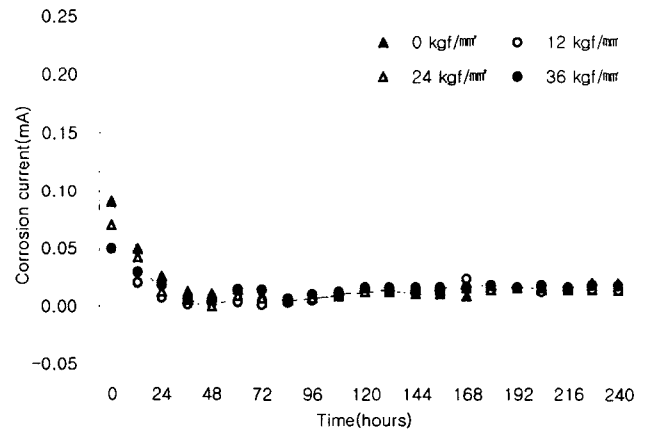
Fig. 8은 침지시간의 경과에 따른 상대전극전위의 변화를 나타낸 것이다. 부하응력의 크기에 관계없이 초기부터 60시간까지는 급격히 감소하고, 그 이후에는 -0.1~0.3V 범위에서 대체로 안정된 전위값을 나타냈다. 그러나 24kgf/mm<sup>2</sup>의 경우에는 초기에 상승을 하다가 12시간 경과 이후 급격히 감소하는 양상을 보였다. 초기에 전위차가 크게 나타난 이유는 시험편의 표면상태 또는 표면에 노출된 재료들의 성상 등에 영향을 받기 때문이며, 시간의 경과와 함께 표면상태의 영향이 점차 사라지고 정상상태에 이르면서 전극전위가 안정화되는 것으로 사료된다. 무부하응력에서 가장 높은 전위값을 나타냈고, 24kgf/mm<sup>2</sup>의 부하응력에서는 가장 낮은 전위값을 나타냈다. 용접시험편의 상대전극전위는 전반적으로 시간의 경과와 더불어 낮게 나타났으며, 부하응력이 증가할수록 낮아지는 경향을 보였으나, 항복응력의 80% 하중이 부하된 36kgf/mm<sup>2</sup>에서는 증가하는 양상을 나타냈다.

Fig. 9는 침지시간의 경과에 따른 상대전류의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 초기부터 48시간까지는 급격한 감소가 이어지고,



**Fig. 8** Relation of electrode potential and time for welded specimens

이후에 소폭의 증가가 나타나며 84시간 경과 이후부터는 점차 안정적인 전류값을 나타냈다. 무부하응력에서 가장 높은 전류값을 나타냈고, 12kgf/mm<sup>2</sup>에서는 초기부터 가장 낮은 전류값을 나타냈다. 용접시험편의 상대전류는 대체적으로 48시간까지 감소현상을 보였으나, 60시간 이후부터는 부하응력이 증가할수록 상대전류값이 증가하는 양상을 나타냈다.



**Fig. 9** Relation of corrosion current and time for welded specimens

Fig. 10은 용접시험편(SMAW 공정 부분)의 240시간(10일간) 실험후의 표면부식양식을 나타낸 것이다. 일반적으로 급랭된 구조조직원 용접금속부는 금속조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류응력 등으로 모재부보다 내식성이 낮다. 열영향부에서는 예열과 후열에 의한 용접열화(weld decay)가 내식성에 큰 영향을 미친다 (임우조 등, 1996). Fig. 10의 (a)는 무부하응력에서 시험편 표면의 부식양식을 나타낸 것이다. 모재부에서는 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났고, 용접금속부에서는 균일한 전면부식(Ge)과 부분적으로 평활한 국부부식(Le)이 나타났다. 시험편의 측면은 용접금속부에서 집중적으로 심한 부식이 진행되어 급격한 침식경계층을 형성하였다. Fig. 10의 (b), (c), (d)는 12kgf/mm<sup>2</sup>, 24kgf/mm<sup>2</sup>, 36kgf/mm<sup>2</sup>의 응력을 부하한 시험편 표

면의 부식양식을 나타낸 것이다. 모재부에서는 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났다. 12kgf/mm<sup>2</sup>에서는 좁은 공식(N)이 나타났고 24kgf/mm<sup>2</sup>에서는 중위의 공식(M)을 나타냈다. 따라서 응력이 증가할수록 모재부에서는 공식이 커짐을 알 수 있었다. 용접금속부에서는 작은 요철이 있는 전면부식(Gu)과 좁은 공식(N)이 나타났다. 12kgf/mm<sup>2</sup>에서는 좁은 공식(N)이 나타났고 36kgf/mm<sup>2</sup>에서는 보다 넓은 중위의 공식(M)을 나타냈다. 따라서 용접금속부에서는 응력이 증가할수록 공식이 커진다는 것을 관찰할 수 있었다. 본드부는 부식량의 차이로 인한 침식층을 형성하고 침식경계층 표면에 다소의 공식을 보이고 있다. 침식경계층은 36kgf/mm<sup>2</sup>에서 가장 크게 나타났고, 24kgf/mm<sup>2</sup>에서 가장 작게 나타났다. 따라서 본드부의 침식경계층은 부하응력의 증가와 더불어 커지는 경향을 나타냈다. 본드부에서는 모재부와 용접금속부의 면적비의 차이로 인한 전위차가 발생하고 상대적으로 면적이 좁은 용접금속부의 전류밀도가 높아지면서 용접금속부가 모재부보다 빠른 속도로 부식이 진행됨으로써 침식경계층이 형성되는 것이다.

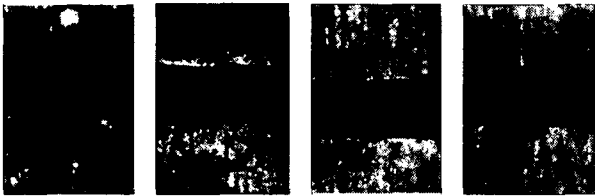


Fig. 10 Corrosion pattern of welded specimens(SMAW, x2)

### 3.3 부하응력에 따른 비용접시험편의 부식거동

Table 8은 비용접시험편의 정전류 부식실험에서 시험편과 보조 전극과의 평균상대전극전위와 평균상대전류, 부식감량 및 표면부식양식을 나타낸 것이다.

Table 8 The constant-current corrosion test results of non-welded specimens

Specimen No.	Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	Electrode potential (V)	Corrosion current (mA)	Weight corrosion (gf)	Corrosion pattern
NWS-1	0	-0.091	0.022	2.4340	Ge, N
NWS-2	12	-0.124	0.030	2.4398	Ge, Le, N
NWS-3	24	-0.161	0.039	2.4393	Ge, Le, N
NWS-4	36	-0.200	0.021	2.4398	Ge, Le, M

비용접시험편의 평균상대전극전위는 무부하응력에서 -0.091V로 가장 높고, 부하응력에서는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 평균상대전류는 부하응력이 증가할수록 증가하는 경향을 보였으나, 36kgf/mm<sup>2</sup>에서는 급격히 감소하여 무부하응력에서와 비슷한 값을 나타냈다. 평균상대전극전위와 평균상대전류는 36kgf/mm<sup>2</sup>에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 부식감량은 무부하응력에서 가장 적고, 부하응력에서는 2.44gf 정도로 거의 비슷하게 나타났다. Fig. 11은 부하응력에 따른 비용접시험편의 부식속도를 나

타낸 것이다. 부식속도는 무부하응력에서 333.191mpy로 가장 작고, 12kgf/mm<sup>2</sup>와 36kgf/mm<sup>2</sup>에서 333.985mpy로 가장 크게 나타났다. 부하응력에서는 응력이 증가함에 따라 부식속도가 감소하는 경향을 보이다가 36kgf/mm<sup>2</sup>에서 다시 증가하는 양상을 보였는데, 이는 결정립의 탈락 깊이가 각기 다르기 때문으로 사료된다.

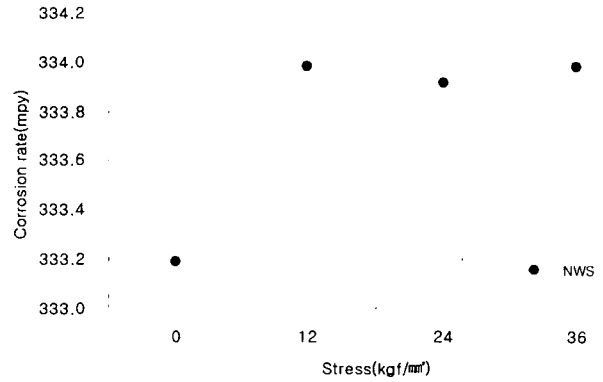


Fig. 11 Relation of corrosion rate and stress for non-welded specimens

Fig. 12는 침지시간의 경과에 따른 상대전극전위의 변화를 나타낸 것이다. 초기에는 모든 시험편에서 급감하였으나 60시간 경과 후에는 -0.18~-0.32V 범위에서 안정되었다. 24kgf/mm<sup>2</sup>에서는 초기에 증가하다가 24시간을 경과하면서 급감하여 60시간 이후에는 안정되었다. 36kgf/mm<sup>2</sup>에서는 부하응력이 가장 큼에도 불구하고 전체적으로도 가장 낮은 전위값을 나타냈다. 비용접시험편의 상대전극전위는 전반적으로 부하응력이 증가할수록 상대전극전위가 감소하는 경향을 보였다.

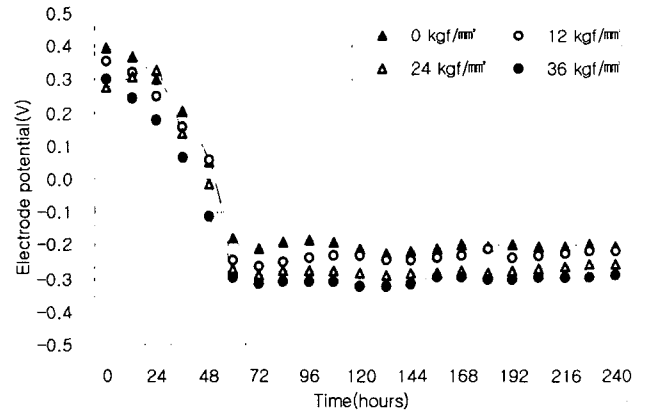


Fig. 12 Relation of electrode potential and time for non-welded specimens

Fig. 13은 침지시간의 경과에 따른 상대전류의 변화를 나타낸 것이다. 부하응력의 크기에 관계없이 초기부터 60시간까지는 급격히 감소했으나 그 이후에는 -0.01~0.04mA 범위 내에서 안정된 전류값을 나타냈고, 96시간 이후에는 전반적으로 다소 상승하는 추세를 보였다. 비용접시험편의 전류는 전반적으로 부하응력이 증가할수록 상대전류값도 증가하는 경향을 보였으나 항복응력의 80% 하중이 가해진 36kgf/mm<sup>2</sup>에서는 부하응력이 가장 큼에도 상대전

류값은 가장 낮은 값을 나타냈다.

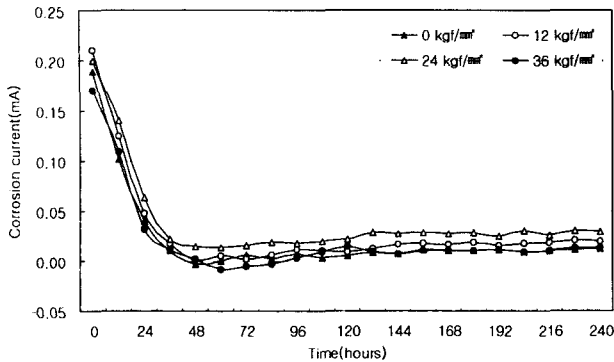
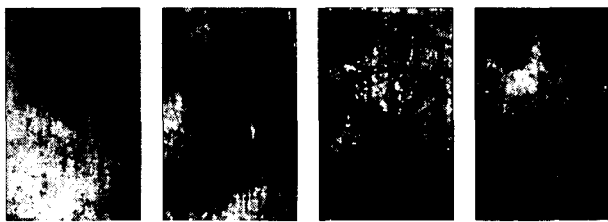


Fig. 13 Relation of corrosion current and time for non-welded specimens

Fig. 14는 비용접시험편의 240시간(10일간) 실험 후의 표면부식 양상을 나타낸 것이다. 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 중위의 공식(M)이 나타났으나, 응력이 증가할수록 좁은 공식(N)에서 중위의 공식(M)으로 공식이 점차 커지는 것으로 관찰되었다.



(a) 0kgf/mm<sup>2</sup> (b) 12kgf/mm<sup>2</sup> (c) 24kgf/mm<sup>2</sup> (d) 36kgf/mm<sup>2</sup>

Fig. 14 Corrosion pattern of non-welded specimens (×2)

### 3.4 부하응력 및 용접 유무에 따른 부식거동의 비교

Fig. 7과 Fig 11의 부하응력에 따른 부식속도를 비교를 비교해 볼 때, 용접시험편이 비용접시험편에 비해서 부식속도가 작음을 알 수 있다. 용접시험편과 비용접시험편은 무부하응력에서 부식속도가 크게 나타났으며, 부하응력이 증가함에 따라 부식속도가 감소하는 경향을 나타냈다. 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. 36kgf/mm<sup>2</sup>에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 용접시험편과 비용접시험편 모두 초기에는 상대전극전위와 상대전류가 급격히 감소하는 반면, 60시간 경과 이후에는 대체로 안정된 값을 나타냈다.

용접시험편의 부식양상은 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, 본드부에서는 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 고장력강(API 5L-X65) 용접부의 부하응력에 따른 정전류 부식실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용접부의 표면부식양상은 전면부식과 좁은 공식이 나타났으며, 응력이 증가할수록 좁은 공식에서 중위의 공식으로 점차 커지는 것으로 나타났다.

(2) 용접 여부에 관계없이 평균상대전극전위와 평균상대전류는 초기에 급감하였으나, 용접부는 비용접부에 비해서 평균상대전극전위는 높고, 평균상대전류는 낮았다. 또한 부하응력이 증가할수록 평균상대전극전위는 감소했으나 평균상대전류는 다소 증가하였다.

(3) 용접부의 부식속도가 비용접부보다 작게 나타났으며, 부하응력이 증가할수록 부식속도는 감소하였다.

## 참 고 문 헌

- 김태욱 외2 (2000). "지하매설배관의 위험성 평가 프로그램 개발", 한국가스학회지, 제4권, 제2호, pp 38.
- 백종현 외3 (1998). "천연가스 수송용 API 5L-X42 강관의 용접법에 따른 용접부 미세조직과 기계적 특성에 관한 연구", 한국가스학회지, 제2권, 제2호, pp 34-35.
- 신익수 (1999). "도시가스 공급배관의 절연과 방식", 한국부식학회보, 제1권, 제2호, pp 108.
- 안용식 외4 (1994). "AISE 321강의 용접 열영향부의 부식거동에 관한 연구", 한국부식학회지, 제23권, 제4호, pp 233-242.
- 엄동석 (1982). 최신용접공학, 문운당, pp 106-109.
- 이종락 (1999). "도시가스배관의 사고사례 및 간섭영향 실태", 한국부식학회보, 제1권, 제2호, pp 113-115.
- 이학열 (1997). 금속부식공학, 연경문화사, pp 3-378.
- 임우조 외3 (1996). 부식과 방식, 원창출판사, pp 330-424.
- 장재일 외2 (1998). "가스배관의 건전성 평가", 한국가스학회지, 제2권, 제1호, pp 74.
- 최송천 외2 (1999). "지하매설 가스배관의 가스누출시 지하 확산거동에 관한 연구", 한국가스학회지, 제3권, 제2호, pp 44.
- 關野昌藏 (1976). 高張力鋼の 熔接性, 金屬, Vol.46, No.1, pp13-19.
- Champion, F.A. (1948). J. Inst. Met. 37, 48.
- R. S. Treseder & T. M. Swanson (1968). "Factors in Sulfide Corrosion Cracking of High Strength Steel, Corrosion", Vol.24, No.2, pp 31-37.