

IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 부식특성에 미치는 pH의 영향

조상근* · 공유식** · 김영대**

*부경대학교 대학원 기계공학과

**부경대학교 기계공학부

The Effects of pH on the Corrosion Characteristics in Dissimilar Friction Welded Zone of IN713LC-SCM440

SANG-KEUN JO*, YU-SIK KONG** AND YOUNG-DAE KIM**

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

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

KEY WORDS: Friction Welding 마찰용접, Torsional Stress Corrosion Test 비틀림응력부식실험, Galvanic Corrosion 갈바닉부식, Corrosion Rate 부식속도, Relative Electrode Potential 상대전극전위, Relative Corrosion Current 상대부식전류, Corrosion Pattern 부식양식

ABSTRACT: The effect of pH on the corrosion characteristics in the dissimilar friction welded zone of IN713LC-SCM440 in the loaded torsional stress was studied. The corrosion experiment was performed for 120 hours on the specimens with five steps of pH. The surface corrosion pattern of the SCM440 area showed global corrosion and narrow pitting, which was caused by galvanic corrosion between friction welded IN713LC and SCM440, but corrosion did not proceed from the IN713LC area. The average relative electrode potential gradually tends to decrease with the elapse of the immersion time in the acidity area. The average corrosion current also gradually tend to decrease. The corrosion rate showed a larger value when the average relative electrode potential was higher and the average relative current was lower. The corrosion rate showed a larger value when the average relative electrode potential was higher in the acidity area, and it showed large when the average relative electrode potential was lower in the alkalinity area.

1. 서 론

선박용 기계 및 해양 구조물의 제작법은 생산원가의 절감, 공정의 단축, 제작상의 성질, 작업의 난이도 등에 지대한 영향을 미친다. 용접분야에 있어서는 고효율, 고강도, 저가격의 혁신적인 마찰용접(friction welding)이 생산성 향상, 가공비 절감, 내구력 향상 등으로 연결되어 경쟁력을 확보한다는 측면에서 주목을 받고 있다(오세규 등, 1999; AWS, 1991).

선박용 디젤엔진 과급기, 선박용 소형 엔진벨브, 원자로의 증기발생기 전열관 등의 재료에는 천연해수, 염수 등 다양한 부식환경에서 응력부식균열(stress corrosion cracking)에 대한 저항성이 큰 인코넬합금을 사용한다(맹완영과 남태운, 1997). 특히 선박용 디젤엔진 과급기 로터 집합체(rotor assembly)의 터빈 휠은 고온·고압 조건에서 활용되기 때문에 일반적으로 IN713C, IN713LC 등의 니켈기초 내열합금을 사용하며, 진공 정밀주조 공정에 의해 일체형으로 제조하므로 일반 내열강에 비해 제조원가가 높아진다. 따라서 고온·고압에 노출되어 우수한 크리프·파단 특성 및 열피로 성질을 요구하는 터빈 휠의

블레이드(blade) 부분은 IN713LC 합금을 사용하는 반면, 높은 강도 및 연성을 필요로 하는 축이나 디스크(disk) 부분은 SCM440 내열강으로 마찰용접법에 의해 대체함으로써 내구성의 확보 및 제조원가 감소를 도모하고 있다. 그러나 이종재 마찰용접부가 천연해수, 염수 등의 부식 환경에 놓이게 되면 용해산소, 온도, 유속, pH, 산용액 등의 인자에 영향을 받으며, 갈바닉부식(galvanic corrosion)이 급속히 진행된다. 중대형 선박용 디젤엔진 과급기의 로터 집합체는 일반적으로 해양의 부식환경에 노출되어 있다(Waskielewski and Lindblad, 1972; 박노광 등, 2003).

본 연구는 선박용 디젤엔진 과급기의 로터 조합체 제작에 널리 사용되고 있는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 전기화학적 부식거동과 부식속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 해수, 염수, 어패류의 체액 등에 풍부하게 존재하는 3.5% NaCl 수용액에 pH를 변화시켜 침지부식실험을 실시하였다. 그 결과를 비교 고찰함으로써 해양환경 하에서 이종재 마찰용접부의 부식거동에 관한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편에 부하된 비틀림응력

시험편에 일정한 비틀림응력을 부하하기 위하여 두께 10 mm

제1저자 조상근 연락처 : 부산광역시 동래구 온천1동 386
051-6060-280 jna4833@hanmail.net

강판을 절단한 다음, 아크용접으로 5개의 고정구(fixture)를 제작하였다. 그리고 2개의 C형 클램프를 사용하여 실험대(testing table)의 가장자리에 고정하였다. 시험편의 한쪽 끝단은 억지끼워맞춤으로 고정하고, 반대쪽 끝단에는 자리파기를 하여 비틀림응력을 부하할 수 있는 길이의 로드(rod)를 장착하였다. 98 N의 원통형 추를 매달아 시험편과 로드와의 거리를 조절하여 비틀림응력을 부하하는 방법을 채택하였다. Fig. 1은 비틀림응력 부식실험장치에 사용된 시험편 고정구의 형상과 치수를 나타낸 것이다. 원통형 추의 무게는 $F(N)$, 시험편과 로드와의 길이가 $L(mm)$ 일 때의 비틀림모멘트는 $T(N\cdot mm)$ 이며, 시험편의 지름 D 는 9.5 mm일 때의 비틀림응력 τ 에 대한 계산식은 식 (1) ~ (3)과 같다.

$$T = F \cdot L, \quad T = \tau \cdot \frac{\pi D^3}{16} \quad (1)$$

$$F \cdot L = \tau \cdot \frac{\pi D^3}{16} \quad (2)$$

$$\tau = \frac{16}{\pi D^3} \cdot F \cdot L = \frac{L}{1.7178} \quad (3)$$

비틀림응력 τ 와 시험편으로부터 수직하중까지의 거리 L 의 관계식을 적용하여 시험편에 비틀림응력을 부하하였다. 300 MPa의 비틀림응력을 부하하기 위해 시험편에서 부하하중까지의 거리 515.34 mm로 조절하였다.

2.2 시험편

본 연구에 사용된 재료는 선박용 터빈엔진 과급기 로터 조립체의 부품 등 다양한 용도로 사용되는 지름 12 mm의 IN713LC 인코넬 합금과 내열성, 내마모성, 고온강도가 우수하여 일반기계, 자동차, 항공기, 선박, 냉간단조품 등에 사용되고 있는 지름 18 mm의 SCM440 합금강재이다. Table 1과 Table 2는 이들 재료의 화학 조성과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

본 실험에서 마찰용접을 시행하여 용접부의 인장시험조건은 KS규격(KS B 0801 14A)에 따라 수직제어선반으로 절삭가공한 후 원통연삭기에서 가공하였다. Fig. 2의 (a)는 마찰용접에 사용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이고, (b)는 침지부식 실험에 사용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

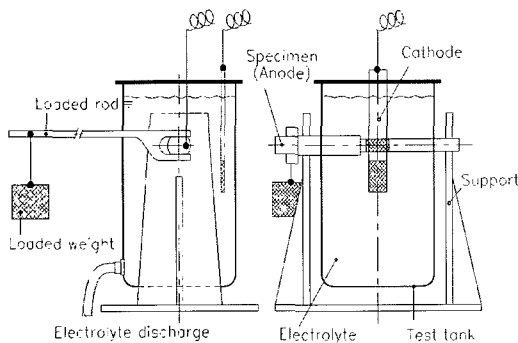


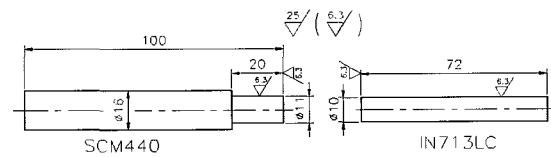
Fig. 1 Detail of corrosion test fixture

Table 1 Chemical compositions of materials(wt. %)

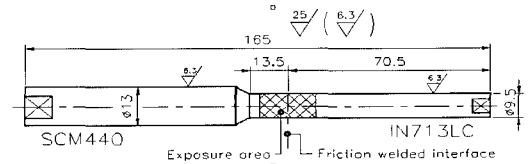
Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb+Ta	Al	Ti	B	Zr	Cu	Co
SCM440	0.41	0.23	0.78	0.01	0.02	1.07	0.18	-	-	-	-	-	0.11	-
IN713LC	0.14	0.50	0.25	-	0.003	13.0	1.50	2.30	6.00	0.75	0.01	0.10	0.50	1.00

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Vickers hardness
	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	(Hv)
IN713LC	809	702	3.0	355
SCM440	1272	1000	10.2	320



(a) Friction welding specimen



(b) Corrosion specimen loaded torsional stress

Fig. 2 Shape and dimension of specimen

2.3 실험장치 및 실험조건

본 실험에 사용된 마찰용접기는 회전축의 지름은 25 mm이고, 슬라이드 축의 지름은 40 mm인 연속 구동 브레이크형(continuous drive brake type)인 TOHO TH-25이다. IN713LC와 SCM440에 대한 봉대봉(bar to bar) 이중재 마찰용접 최적조건을 결정하기 위해 참고문헌(박형동 등, 1999; 공유식 등, 2002; Oh et al., 1999)을 조사하여 회전수, 마찰가열압력, 단조가압력, 단조가압시간, 마찰가열시간 등을 결정하였다. IN713LC 시험편은 회전부의 유압척에, SCM440 시험편은 고정부 유압척에 설치하고, IN713LC-SCM440의 이중재 마찰용접은 강도와 인성을 고려하여 Table 3과 같은 최적 조건에서 실시하였다.

Fig. 3은 비틀림응력 부식실험장치를 나타낸 것이다. 마찰용접 시험편은 IN713LC-SCM440 마찰용접부의 경계면을 기준으로 좌우 방향으로 일정한 거리만큼의 표면적이 600 mm² 되게 남기고, 나

Table 3 Friction welding conditions of IN713LC-SCM440

Rotating speed n (rpm)	Heating pressure P_1 (MPa)	Forging pressure P_2 (MPa)	Heating time t_1 (s)	Forging time t_2 (s)	Total upset U_T (mm)
2000	140	180	5	4	6

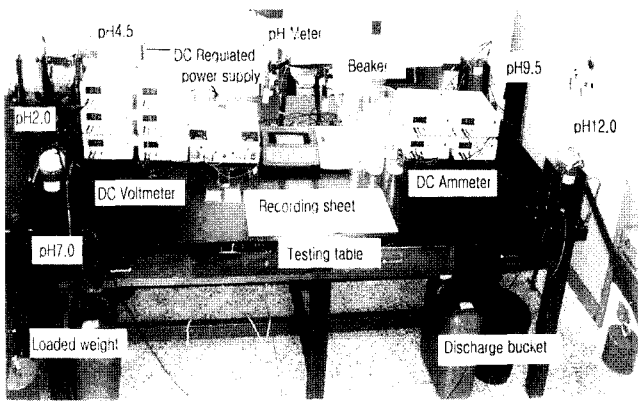


Fig. 3 Experimental apparatus of torsional stress corrosion test

머지 부분을 절연 테이프로 완전 절연하였다. 또한 시험편을 1000 ml 용량의 실험조 중앙에 수평방향으로 설치한 다음, 한쪽 끝단은 고정구에 고정시키고 다른 한쪽은 300 MPa 비틀림응력을 부하하였다. 보조전극(99.9% Cu)은 노출 표면적이 600 mm²가 되도록 절연 테이프로 완전 절연시켜 시험편의 표면으로부터 25 mm 떨어진 위치에 고정하였다. 비틀림응력이 부하된 시험편과 보조전극을 알콜로 탈지하고, 3.5% NaCl 수용액에 20% H₂SO₄와 KOH를 미량 희석시켜 pH12.0, pH4.5, pH7.0, pH9.5, pH12.0이 되도록 pH Meter(Benchtop P25, resolution 0.01, EcoMet)로 조절하여 5개의 실험조에 각각 채웠다.

Fig. 4는 비틀림응력 부식실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험편을 양극(anode)으로, 보조전극은 음극(cathode)으로 한 5개의 실험조와 전류안정화전원장치(DC Regulated power supply, 0~6A, 0~30V, ED-330TD, ED), 직류전압계(Digital DC Voltmeter, 200mV~1000V, DV-101A, ED), 직류전류계(Digital DC Ammeter, 200μA~20A, DA-101B, ED)를 직렬로 연결하여 동시에 침지부식 실험이 가능하게 하였다(조상근 등, 2004).

Fig. 4에서 직류안정화전원장치를 사용하여 회로 전체의 4.0 V를 인가하여 120시간 동안 300 MPa의 비틀림응력 하에서 침지부식 실험을 실시하였다. 이 실험 도중에 매 24시간 단위로 시험편과 보조전극과의 상대전극전위 및 상대전류, 공급전압의 변화를 측정하였다. 실험이 끝난 후 시험편을 실험장치에서 해제하여 물로 세척한 다음, 60 °C로 가열한 20% H₂SO₄ 수용액에 1시간 동안 침지

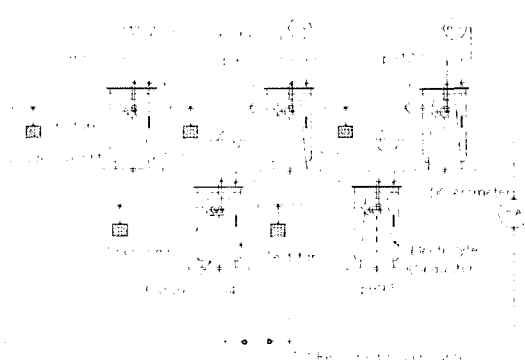


Fig. 4 Schematic diagram of torsional stress corrosion test

시켜 표면에 부착된 산화물을 제거하고 다시 수세하였다. 그리고 시험편에 부착시켰던 절연 테이프를 제거한 다음 알콜로 세척하여 전자저울(Electronic balance, MJ3000, 4.0~3000.0g, d=0.1g, YMC Co. Ltd.)을 사용하여 중량을 계측하였다.

부식속도는 주로 mils per year(mpy) 단위를 사용하므로 본 연구결과에서도 mpy를 사용하였고, 중량감량을 부식속도로 환산하는 식은 식(4)와 같다(안용식 등, 1994).

$$mpy = \frac{(12,000 \times 2.87 \times w)}{(A \times d \times t)} \quad (4)$$

w : 중량감량(gf)

A : 시험편의 표면적(cm²)

d : 시험편의 밀도(gf/cm³), 강은 7.87gf/cm³이다

t : 침지시간(hours)

부식양식은 British Aluminum의 분류를 따랐다(Champion, 1948). 그리고 부식양식을 파악하기 위하여 디지털카메라의 접사기능을 활용하여 용접부의 부식된 표면을 근접 촬영하였다. 마찰용접부의 경도를 파악하기 위하여 마이크로버커스경도기(micro -vickers hardness tester)를 사용하여 시험편의 중심부와 가장자리에서 2 mm 떨어진 위치의 경도값을 측정하였다. 또한 마찰용접부의 미세조직을 관찰하기 위하여 SCM440 부분은 3% Nital 용액에 수 초간 부식시켰고, IN713LC 부분은 Kalling 시약(50 ml HCl, 50 ml CH₂OH, 2.5 g CuCl₂)에 수 초간 부식시켜 깨끗이 세척하여 건조시킨 다음, 마찰용접 경계부, 열영향부, 기지금속부의 조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰용접부의 경도분포와 금속조직적 특성

Fig. 5는 최적의 마찰용접 조건하에서 마찰용접한 시험편의 경도분포를 나타낸 것이다. 경도분포는 시험편의 중심부 및 표면에서 2 mm 깊이에서, 마찰용접 경계면으로부터 0.5 mm 간격으로 측정하였다. IN713LC 영역에서는 마찰용접 경계면(friction welded interface)에서 경도값이 미세하게 증가하다가 1 mm 부근에서 감소하기 시작하여 2.5 mm 위치에서 가장 작았다. 이후에 다시 가하였다가 5 mm 위치에서 350~370(Hv) 정도의 일정한 값을 유지하였다. SCM440 영역에서는 경계면으로부터 1 mm 부근까지는 감소하였다가 2 mm까지 미세하게 증가하였으나 2.5 mm에서 가장 낮게 나타났다. 이후에는 다시 증가하였다가 4 mm 위치에서 300~350(Hv) 정도의 일정한 값을 유지하는 경향을 보였다. 경계면 중심으로 IN713LC 영역의 2.5 mm에서 SCM440 영역의 15 mm까지는 시험편의 중심부보다 표면에서 2 mm 깊이 위치의 경도값이 높은 경향을 보였지만 다른 부위에서는 낮게 나타났다. 마찰용접 경계부의 주변에서는 시험편의 중심보다 표면의 경도값이 높은 것은 마찰용접열에 의한 냉각속도의 차이로 나타난 결과로 사료된다. 일반적으로 급랭된 주조조직인 용접부는 금속조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류응력 등으로 모재부보다 내식성이 낮다. 특히 열영향부에서는 가압 마찰열에 의한 용접열화(weld decay)가 내식성에 큰 영향을 미친다.

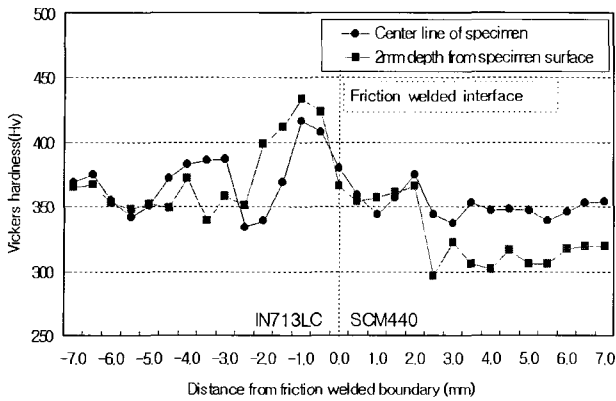


Fig. 5 Distribution of hardness at friction welded zone with micro-vickers hardness tester (weight = 500gf)

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부에서 IN713LC 영역의 기지금속, 열영향부, 용융금속의 미세조직이다. 마찰용접 경계면에서 IN713LC 영역의 2mm 정도까지는 V상의 고용농도 이상으로 상승하여 석출상들이 고용됨에 따라 예칭이 되지 않은 부분으로 남은 것으로 판단된다(박노광 등, 2003). 각 부위별로 결정립 분포와 탄화물 형태가 다르게 나타났고, 마찰용접 부분의 결정립의 크기는 다른 부위에 비해 미세한 결정립을 형성하고 있다. 이는 주조과정에서 열전달과 주형내의 점중처리, 응고속도 등 주조공정상의 변수에 의한 것이라고 판단된다. 결정립의 크기는 피로특성을 향상시켜 주지만 크리프 특성을 저하하므로 적절한 크기의 제어가 요구된다.

Fig. 6의 (d), (e), (f)는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접 시험편 용접부에서 SCM440 영역의 기지금속, 열영향부, 용융금속의 미세조직이다. SCM440 조직은 인성이 큰 소르바이트(sorbite) 조직을 얻기 위해 조질(quenching-tempering) 열처리를 한다. 담금질해서 얻어진 마르텐사이트(martensite) 조직을 530~630°C에서 고온뜨임하면 시멘타이트(cementite)의 미세입자의 응집이 한층 진행된 소르바이트(tempered martensite) 조직이 된다. 이 조직은 페라이트(ferrite)와 시멘타이트의 혼합물로서, 트루스타이트(troostite) 조직과 비교시 그 응집된 양상을 달리하고 있는 조직이다. 트루스타이트에 비해 경도는 낮지만, 인성이 우수하고, 펄라이트(pearlite)에 비해 높은 강도와 경도를 지니고 있다. Fig. 6의 (d)는 시험편 가장자리의 경계면에 가까운 가압에 의한 마찰열에 의해 변화적이고, 과열로 인한 조대한 주조결정이 존재한다. 압접부의 조직은 근본적으로 열간변형법칙을 따른다. 압력과 압력온도에 따라 결정입자의 크기가 결정된다. 용접부의 조대한 입자와 주조조직은 동일한 조성인데도 불구하고 열간변형과 열처리한 기지금속보다 일반적으로 취성을 갖는다. Fig. 6의 (e), (f)는 열영향부에서 재결정영역과 부분변태영역 사이의 조직과 기지금속 조직으로, 열영향부의 오른쪽은 조대화 영역에서 미세조직이고, 왼쪽은 기지금속에 된 가까운 조직이다. 경계면을 중심으로 SCM440 부위는 버(burr)의 형성으로 경계층 3~4mm의 Metal flow가 나타나고, 백색으로 나타난 페라이트와 시멘타이트가 혼합된 소르바이트 조직을 관찰

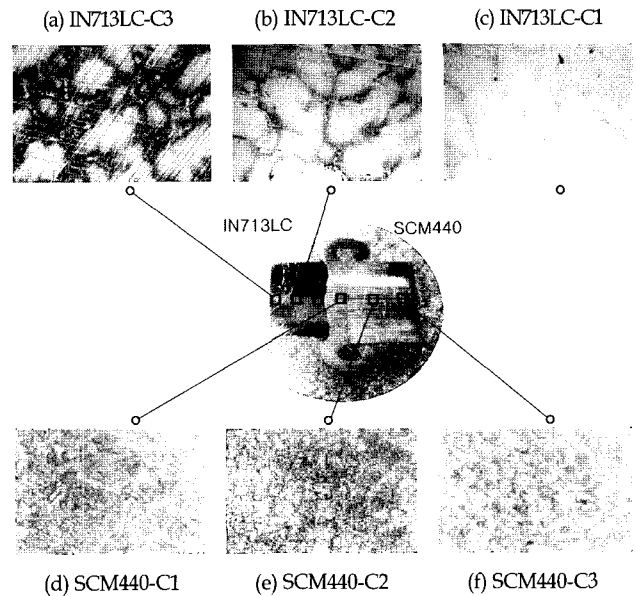


Fig. 6 Micro-structures of IN713LC-SCM440 dissimilar friction welded zone (×100, ×400)

할 수 있으며, 냉각속도가 느린 중심부에서는 일부 베이나이트(bainite) 조직으로 추정되는 상이한 조직을 볼 수 있다. 경계면으로부터 멀어질수록 페라이트와 펄라이트의 혼합조직이 관찰되었고, 경계면에서 2~3mm의 위치의 조직은 다른 부위에 비해 조밀한 결정구조를 형성하고 있다는 것을 알 수 있었다.

3.2 침지시간에 따른 전기화학적 부식거동

Table 4는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 일정한 비틀림응력하의 침지부식실험에서 시험편과 보조전극과의 평균 상대전극전위와 평균 상대전류, 공급전압, 중량감량을 나타낸 것이다. 300 MPa의 일정한 비틀림 응력하에서 pH의 증가와 함께 평균상대전극전위는 작아지는 경향을 보였으나, 이것은 전해액의 저항이 커지기 때문으로 생각되며, pH 9.5에서는 pH 2.0과 비슷하게 높은 값을 나타냈다. 평균부식전류는 pH 2.0과 pH 12.0에서는 아주 낮은 값을 나타냈으며, 그밖의 경우에는 비슷한 경향을 보였다. 부식량은 pH 2.0 시험편에서 15.022 mgf/로 가장 많았고, 다른 시험편에서는 비슷한 경향을 보였다. 평균공급전압은 pH 2.0 시험편과 pH 12.0 시험편에서 0.522 V, 0.758 V로 대체로 작은 값을 나타냈고, 다른 시험편에서는 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 7은 침지시간의 경과에 따른 상대전극전위의 변화를 나타낸 것이다. 초기의 상대전극전위는 pH 농도에 관계없이 0.3~0.4 mV로 일정한 값을 나타냈으나, 점차 감소하였다. pH 2.0 시험편은 12시간까지는 급격히 저하하였다가 -0.12~0 mV 범위에서 일정한 값을 유지하였고, pH 9.5 시험편은 60시간까지 점차 감소하였다가 이후에는 -0.15~-0.35 mV 범위에서 증감을 반복하였다. 그밖의 시험편은 36시간 후에는 대체로 일정한 값을 유지하였다. 초기에는 표면의 상태 또는 노출된 재제물들의 성상 등에 영향을 받기 때문에 전위차가 크게 나타나지만 점차 안정화되었다. 특히, IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부는 갈바닉전지가 형성되어 SCM440

Table 4 Torsional stress corrosion test results of IN713LC-SCM440 friction welded specimens

Specimen No.	pH	Electrode potential (mV/Cu)	Corrosion current (mA)	Weight corrosion (mgf)	Supply voltage (V)
SP-1	pH2.0	-0.030	-0.301	15.022	0.522
SP-2	pH4.5	-0.138	0.019	12.973	0.868
SP-3	pH7.0	-0.158	0.017	12.824	0.899
SP-4	pH9.5	-0.035	0.021	12.692	0.900
SP-5	pH12.0	-0.185	0.007	13.057	0.758

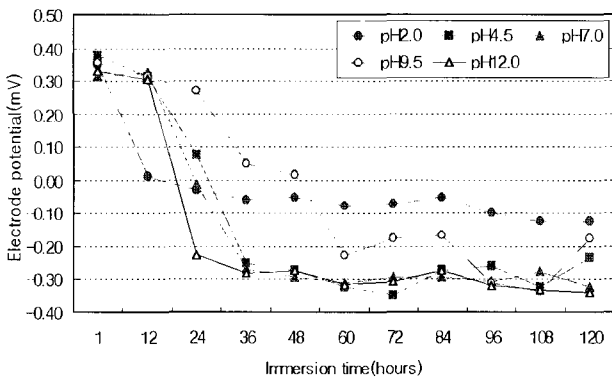


Fig. 7 Electrode potential as a function of immersion time in IN713LC-SCM440 friction welded specimens

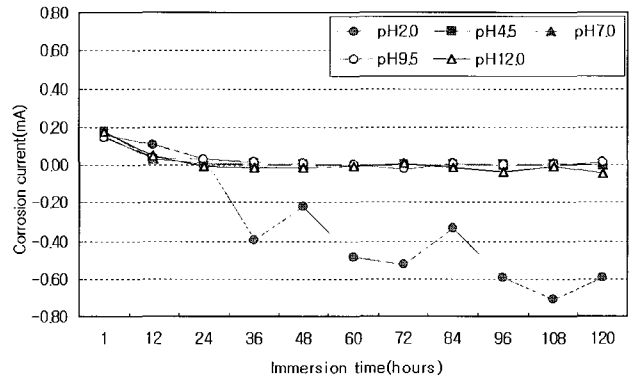


Fig. 8 Corrosion current as a function of immersion time in IN713LC-SCM440 friction welded specimens

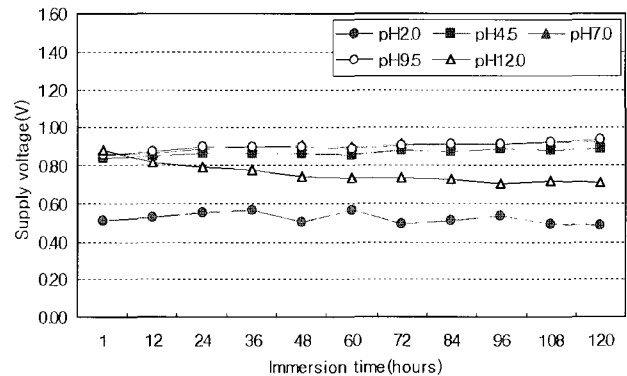


Fig. 9 Supply voltage as a function of immersion time in IN713LC-SCM440 friction welded specimens

영역에서만 부식되었다. IN713LC와 SCM440이 쌍을 이루면 활성(active, negative) 전위를 가진 SCM440이 과잉전자(excess electron)를 +방향의 부식전위를 가진 IN713LC로 이동하게 된다. 귀전위의 IN713LC는 음극이 되어 부식속도가 감소하고, 활성 전위의 SCM440은 양극이 되어 우선적으로 갈바닉부식이 진행되는 것이다(이의호 등, 2002). 또한 철에 대한 포베의 전위-pH 도표(potential-pH pourbaix diagram)에서 모든 pH값에 대해서 수소 전극의 산화 환원 전위가 불변화 구역보다 위쪽에 존재하므로 철은 모든 pH 범위의 수용성 중에서 수소를 발생하면서 용해할 수 있으며, pH 9.4~12.5의 영역에서는 Fe(OH)₂의 부동태층이 형성된다. pH 9.5 부식영역은 알칼리 균열이 일어나는 곳으로, 부식매체에 있어서 산화 환원 전위가 비교적 높은 경우에는 부동태층이 Fe₃O₄나 Fe₂O₃·nH₂O로 되지만, 아주 강한 산화성 알칼리 부식매체 중에서는 철산이온 FeO₄²⁻를 형성하면서 부식이 일어난다(Jones, 1996).

Fig. 8은 침지시간의 경과에 따른 상대전류의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 갈바닉부식의 전기화학적 분석을 위해서는 전류 밀도(current density)보다는 전류(current)를 사용한다(이의호 등, 2002). 시험편과 보조전극 간의 상대전류는 pH 농도의 변화와 관계없이 모든 시험편에서 12시간까지는 감소하는 경향을 보였으나 점차 0 mA 내외의 범위에서 일정하였다. 그러나 pH 2.0 시험편은

-0.2~-0.7 mA의 범위에서 증감을 반복하였으며, 침지시간의 경과와 더불어 감소하는 경향을 보였다. 전류가 증가하면 전위차는 감소하고, pH 농도차에 의한 전해액과 갈바닉부식에 의한 부식생성물, 산화피막 등이 저항을 크게 하므로 상대전류가 작아지는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 pH에 따른 마찰용접 시험편에 공급된 평균전압을 나타낸 것이다. 침지부식실험회로에 전류가 흐르면 시험편과 보조전극 사이의 전해액에 옴저항구배(ohmic resistance gradient)가 발생하게 되고, 그 크기는 용해이온 물질들의 농도(concentration)와 이동성(mobility)에 따라 달라진다. 각 시험조 내에서 시험편과 보조전극 사이에 공급되는 전압은 일반적으로 옴저항을 포함하므로 부식속도와 부식기구를 결정하는데 영향을 미치게 된다(이의호 등, 2002). 따라서 12시간 주기로 측정된 공급전압은 침지시간과 관계없이 초기값을 계속 유지하였다. pH에 따른 변화는 산성영역인 pH 2.0이 가장 작았고, 그 다음으로 알칼리영역인 pH 12.0이었으며, 중성영역에서는 거의 일정한 값을 나타냈다.

3.3 pH에 따른 영역별 부식거동

Fig. 10은 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접 시험편을 120시간(5일간) 실험 후의 표면부식양식을 나타낸 것이다. 일반적으로 마찰용접부의 경계면으로부터 IN713LC 방향으로 2 mm 떨어진 위치

까지는 마찰열에 의한 V상의 완전고용영역이고, 2~5mm 떨어진 위치에서는 수지상간에 존재하는 V상 일부가 고용되지 않은 부분은 고용영역이며, 5mm 이상 떨어진 위치는 IN713LC 기지금속이다. 경계면에서는 금속조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류응력 등으로 기지금속보다 내식성이 낮아진다. 마찰열영향부에서는 예열과 후열에 의한 용접열화가 내식성에 큰 영향을 미친다. 니켈함금 탄화물의 입계석출에 의해서 뿐만 아니라 Cr, Mo, W, Nb 등의 금속 간화합물 석출에 의해서도 용접부식(weld decay)과 칼날선부식(knifeline attack)이 발생할 수 있으며, Ni-Mo 합금에서는 쉽게 일어난다(Jones, 1996).

Fig. 10의 (a)는 pH2.0의 산성영역에서 나타난 표면의 부식양식이다. IN713LC는 갈바니쌍으로 볼 때 SCM440에 비해 귀전위이므로 부식이 진행되지 않은 반면, SCM440 부분은 아주 심한 침식층이 형성되었고, 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 넓은 공식(W)이 나타났고, 마찰용접 경계면에서 2mm 떨어진 위치까지는 보다 심한 침식현상을 확인할 수 있었다. 이 부분은 2000 rpm의 고속회전과 순간적인 가압작용으로 발생한 마찰열이 급랭하면서 금속 조직의 불균질화를 형성하게 됨으로써 300 MPa의 비틀림응력을 받으므로 부식현상이 촉진된 것으로 판단된다. 그리고 IN713LC과 SCM440이 서로 경계면에서 이종금속에 의한 갈바니 형태의 국부 전지가 형성되어 귀전위의 IN713LC 영역에서 보다 SCM440 영역에서 부식이 촉진되어 침식현상이 빠르게 진행되면서 깊은 경계층을 형성한 것으로 판단된다. 침식층의 경사면에 형성된 비틀림응력부식균열을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 표면의 부식양식은 대체로 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났다.

Fig. 10의 (b), (c), (d)는 pH4.5, pH7.0 및 pH9.5의 중성영역에서 나타난 표면의 부식양식이다. 산성영역에서와 마찬가지로 SCM440 영역이 아주 심한 침식층을 형성하였고, 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났다. pH4.5와 pH9.5에서는 침식층의 경사면에 비틀림응력부식균열이 미약하게 나타났고, pH9.5에서 경계면으로부터 2mm까지의 침식정도가 큰 것을 관찰할 수 있었다. pH7.0에서는 불규칙한 요철면을 형성하고 있으나

부식현상이 다른 영역에 비해 더딤을 확인할 수 있다. 중성영역에서의 표면 부식양식은 대체로 균일한 전면부식(Ge)과 작은 공식(N)이 나타났다.

Fig. 10의 (e)는 pH12.0의 알칼리영역에서 나타난 표면의 부식양식이다. 이 영역에서도 SCM440 부분의 침식현상이 두드러졌으며, 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 넓은 공식(W)이 나타났다. 침식층의 경사면에 비틀림응력부식균열이 뚜렷하게 나타났고, pH 2.0에서와 비슷한 침식현상을 나타내고 있으나 보다 심한 요철면을 형성하고 있다. 응력부식균열은 부식환경, 예민한 합금, 인장응력이 동시에 만족되어야 한다(Jones, 1996). 순금속에서는 거의 혹은 전혀 일어나지 않지만 마이크로 갈바니전지에 의해서 국부 부식이 일어날 기회가 많은 2성분 이상의 다성분계 합금에서 잘 일어나며, 양극부식에 의해서 썩기 모양의 단면을 가진 좁은 부식 홈(etch groove)이 생긴다. 이러한 부식홈의 끝부분에 높은 응력의 집중(stress concentration)이 생기므로 금속은 소성변형을 일으키게 된다. 이러한 과정을 반복하면서 부동태산화피막의 형성이 억제되어 부식에 의한 침식이 촉진된다. IN713LC-SCM440 마찰용접부의 경우에는 전극전위가 서로 다른 두 금속의 접촉부분에서 상호 전위차가 발생하여 갈바니부식이 급속히 진행되며, 급격한 부식의 진행으로 파괴된 전해질 수용액의 접촉부분에는 다시 미소 전지가 형성되어 국부부식을 일으키는 것으로 판단된다.

3.4 마찰용접부의 부식속도에 미치는 pH의 영향

Fig. 11은 pH에 따른 마찰용접 시험편의 부식속도와 평균공급 전압을 나타낸 것이다. 부식속도는 산성영역인 pH2.0에서 가장 크고, 그밖의 영역에서는 비슷한 부식속도를 나타냈다. 일반적으로 통기(aeration)되고 있는 물에서 Fe의 부식에 미치는 pH의 영향은 음극환원반응의 변화로 인해서 부식속도가 달라지며, pH4.0과 pH10.0 사이의 중간값에서는 느슨한 다공성의 산화철 침전물이 표면을 보호하게 되고, 침전물 내부는 pH9.5 정도를 유지한다. 이 범위의 pH값에서는 부식속도가 거의 일정하며, 그 값은 침전물을 통한 용존산소의 균일확산에 의해 결정되어진다. pH4.0 이하의 산성용액에서는 산화물이 침전되지 않고 용해되며, 환원반응을 일으킬 수 있는 H⁺이온이 많아질 뿐만 아니라 용존산소의 접근이 용이해지기 때문에 부식속도가 증가한다(이의호 등, 2002).

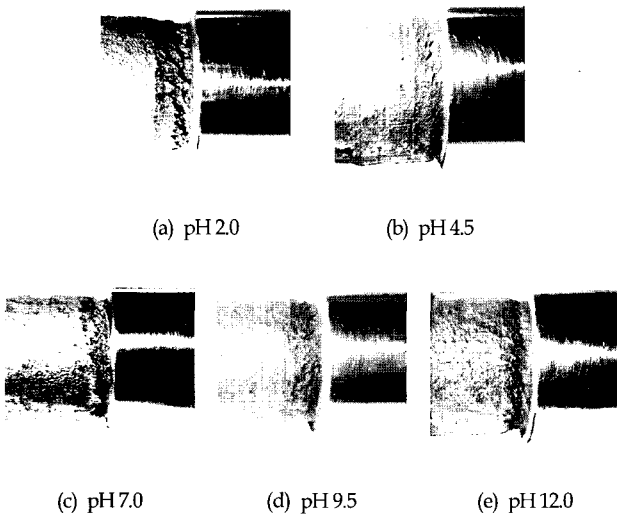


Fig. 10 Corrosion pattern of IN713LC-SCM440 specimens

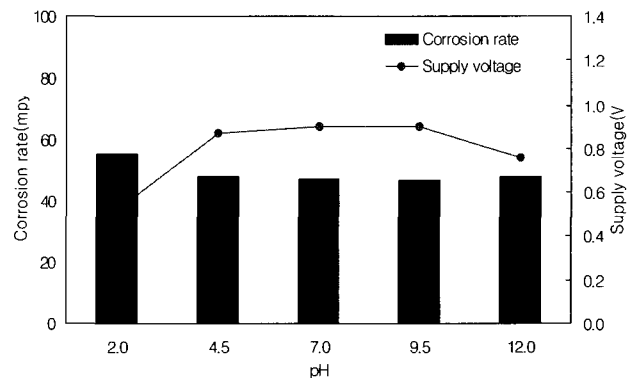


Fig. 11 Corrosion rate and electric potential as a function of pH in IN713LC-SCM440 specimens

실험 중에 각 시험편에 공급된 평균전압은 산성영역인 pH2.0 과 알칼리영역인 pH12.0에서는 작았고, 중성영역인 pH4.5, pH 7.0, pH9.5에서는 높게 나타났다. 부식속도는 산성영역과 알칼리 영역에서 크고 중성영역에서는 작았으나 평균공급전압은 산성영역에서 작았고, 중성영역에서 높게 나타났다. 그러므로 IN713LC-SCM440 마찰용접부의 부식속도는 평균공급전압에 반비례하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12는 pH에 따른 평균전극전위와 평균부식전류를 비교한 것이다. 평균전극전위는 pH2.0와 pH9.5에서는 다소 높게 나타났으며, pH의 증가에 따라 서로 비슷한 값을 나타냈다. 평균부식전류는 pH2.0에서 가장 낮았으나 pH4.5에서 증가하였다가 일정한 값을 유지하였다. 부식속도는 산성영역에서는 상대전극전위가 높을수록 크고, 알칼리영역에서는 상대전극전위가 낮을수록 크게 나타났다. 결국 부식속도는 부식전류가 높고 전극전위가 낮을수록 커지고, 공급전압이 클수록 작았으며, 산성영역과 알칼리영역에서 커짐을 알 수 있었다.

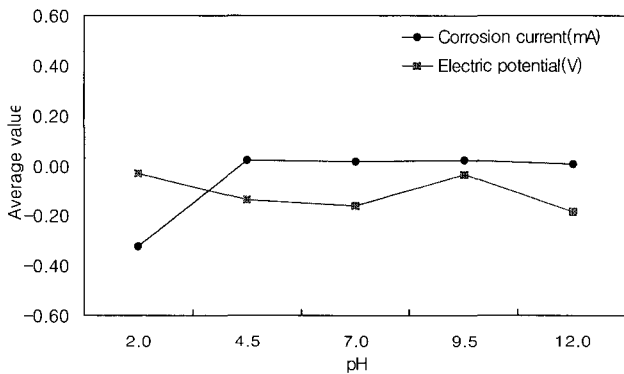


Fig. 12 Electric potential and corrosion current as a function of pH in IN713LC-SCM440 specimens

4. 결 론

300 MPa의 비틀림응력 부하하에서 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 부식특성에 미치는 pH의 영향에 대해 침지부식실험으로 확인하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

IN713LC 영역은 부식이 진행되지 않았으나, SCM440 영역은 갈바닉부식에 의한 급격한 침식현상으로 전면부식과 공식이 발생하였으며, 비틀림 방향으로 크랙이 형성되었다. 침지시간에 따른 상대전극전위는 대체로 변화가 없었지만, 산성영역에서는 점차적으로 낮아졌다. 그러나 상대부식전류는 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 부식속도는 부식전류가 높고 전극전위가 낮을수록 커지고, 공급전압이 클수록 작았다. 특히 산성영역에서는 상대전극전위가 높을수록 부식속도가 크고, 알칼리영역에서는 상대전극전위가 낮을수록 크게 나타남을 알 수 있었다.

후 기

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

참 고 문 헌

공유식, 조상근, 김영대, 오세규 (2002). "플런저용 강재의 이종재 마찰용접과 AE에 의한 실시간 평가", 한국동력기계공학회지, 제6권, 제2호, pp 48-53.

맹완영, 남태운 (1997). "고온·고압 환경하에서 정전위법에 의한 인코넬합금의 입계응력부식 저항성 평가", 대한금속학회지, 제35권, 제8호, pp 1019-1026.

박노광, 염종택, 나영상 (2003). 선박용 과급기 로터 접합체의 접합부 특성 평가 및 후열처리 기술 개발에 관한 연구, 제1단계 보고서, pp 5-7.

박형동, 오세규, 권상우 (1999). "터빈용 내열강의 이종재 마찰용접 최적화와 AE에 의한 품질 실시간 평가에 관한 연구 (I)", 한국해양공학회지, 제13권, 제3호, pp 83-91.

안용식, 박화순, 김영환, 원태연, 이상래 (1994). "AISE 321강의 용접 열영향부의 부식거동에 관한 연구", 한국부식학회지, 제23권, 제4호, pp 233-242.

오세규, 양형태, 김현경 (1999). "자동차 크랭크 축용 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접의 피로강도 특성 및 AE 평가", 한국해양공학회지, 제13권 제2호, pp 74-82.

이의호, 이학렬, 황운석, 김광근 (2002). 부식과 방식의 원리, 도서출판 동화기술,

조상근, 공유식, 김영대 (2004). "A5083-H116 알루미늄 합금재 용접부의 부하응력에 따른 부식특성의 영향", 한국동력기계공학회지, 제8권, 제3호, pp 44-51.

AWS (1991). Welding Handbook, Vol 2, pp 672-763.

Champion, F.A. (1943). "New Methods for the Examination of Corroded Metal", Journal of the Institute of Metals, Vol 69, pp 47-66.

Jones, D.A. (1996). Principles and Prevention of Corrosion, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, pp 50-64, pp 291-364, pp 309-316.

Oh, S.K., Park, H.D. and Lee, B.S. (1999). "Friction Weld Quality Evaluation of Hydraulic Valve Spool Material By Acoustic Emission Technique", International Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol 2, No 1, pp 18-25.

Waskielewski, G.E. and Lindblad, N.R. (1972). "Superalloys Processing", Proc. 2nd. Int. Conf. AIME, MCIC-72-10.

2004년 11월 11일 원고 접수

2005년 3월 16일 최종 수정본 채택