

선박용 디젤엔진 과급기 로터 접합체의 부식특성에 미치는 비틀림응력의 영향

Effects of Torsional Stress on the Corrosion Characteristics in the Rotor Assembly of Marine Diesel Engine Supercharger

조상근 · 공유식 · 김영대

S. K. Jo, Y. S. Kong and Y. D. Kim

Key Words : Friction Welding(FRW, 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 corrosion experiment was performed for 120 hours on the specimens in the natural seawater tank with four steps of the loaded torsional stress. The surface corrosion pattern of SCM440 area was showed global corrosion and narrow pitting, that was cause by galvanic corrosion between friction welded IN713LC and SCM440. But corrosion does not proceeded from IN713LC area. Initially, the average relative electrode potential and corrosion current were decreased suddenly, by and large, it was stabilized gradually tend to decreasing with the elapse of the immersion time. The corrosion rate was decreased by increasing the load stress, but 200 MPa specimen was showed most large value.

1. 서 론

생산기술의 개발, 소요 비용의 절감을 위한 노력, 신뢰성의 확보 등은 기업의 경쟁력 확보에 중요한 요소이며, 용접분야에서는 고효율, 고강도, 저가격의 혁신적인 용접방식인 마찰용접(friction welding)이 주목을 받고 있다^{1,2)}.

선박용 디젤엔진 과급기에 사용되는 로터 접합체(rotor assembly)의 터빈 휠(turbine wheel)은 고온·고압 조건에서 활용하기 때문에 IN713C, IN713LC 등 니켈계 초내열합금을 사용하여 일체형으로 제조하므로 제품의 원가가 높아진다. 따라서 고온·고압에 노출되는 블레이드(blade) 부분은 IN713LC 합금을 사용하고, 높은 강도 및 연성을 필요로 하는 축을 비롯한 디스크(disk) 부분은 SCM440 내열강으로 대체함으로써 내구성을 갖으면서 제조원가를 낮출 수 있다. 중대형 로터 조립체의 접합은 금속을 용해하지 않고 마찰에 의해 형성

되는 마찰열과 고온에서의 소성변형을 동시에 이용하는 접합기술을 활용한다^{3~5)}. 이러한 이종재 마찰용접부는 부식환경에 놓이게 되면 산소확산에 의한 용해산소, 온도, pH, 산용액, 유속, 부하응력 등의 환경적인 인자에 영향을 받으며, 갈바닉부식(galvanic corrosion)이 급속히 진행된다.

본 연구는 선박용 디젤엔진 과급기의 로터 조립체 부품에 널리 사용되는 IN713LC-SCM440 마찰용접부의 천연해수 환경에서의 비틀림응력에 따른 침지부식실험을 실시하여 전기화학적 부식거동과 부식속도에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 시험편에 부하된 비틀림응력

시험편에 일정한 비틀림응력을 부하하기 위하여 두께 10mm의 강판을 절단한 다음, 아크용접에 의해 3개의 고정구(fixture)를 제작하였다. 그리고 2개의 C형 클램프를 사용하여 실험대의 가장자리에 고정구를 장착하였다. 시험편의 한쪽 끝단은 억지끼워맞춤으로 고정하고, 반대쪽 끝단에는 자리파기를 하여 비틀림응력을 부하할 수 있는 길이의 로드(rod)를 장착하였다. 98N의 원통형 추를 매달아 시험편

접수일 : 2004년 12월 7일
조상근(책임저자) : 부경대학교 대학원 기계공학과
E-mail : jsk4833@hanmail.net Tel: 051-607-3885
공유식, 김영대 : 부경대학교 기계공학부

과 로드와의 거리를 조절하여 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa의 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 (MPa)에 대한 계산식은 다음과 같다.

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

$$F \cdot L = \tau \cdot \frac{\pi D^3}{16}$$

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

Table 1은 비틀림응력에 따라 시험편으로부터 부하하중까지의 거리를 나타낸 것이다.

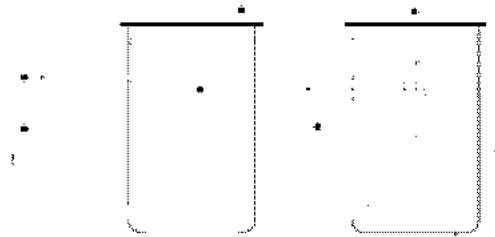


Fig. 1 Detail of corrosion test fixture

Table 1 Torsional stress and loaded distance

Specimens No.	SP 1	SP 2	SP 3	SP 4
Stress(MPa)	0	100	200	300
Distance(mm)	0	172	344	515

3. 실험장치 및 방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 지름 12 mm의 IN713LC 인코넬 합금재와 지름 18 mm의 SCM440 크롬-몰리브덴 합금강재이다. Table 2와 Table 3은 IN713LC와 SCM440 합금강재의 화학 조성과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

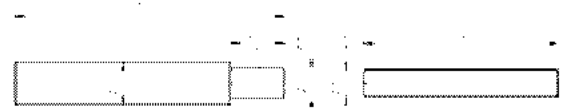
시험편은 마찰용접을 시행하여 용접부의 인장시험조건(KS B 0801 14A)에 따라 수치제어선반으로

Table 2 Chemical compositions of materials(wt. %)

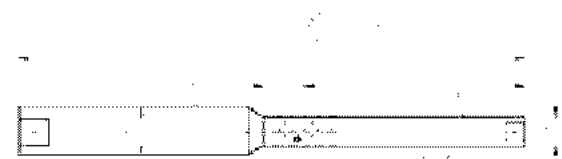
Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb+Ta	Al	Ti	B	Zr	Cu	Co
SCM440	0.41	0.23	0.78	0.01	0.02	1.07	0.18						0.11	
IN713LC	0.14	0.50	0.25		0.003	13.0	1.50	2.30	6.00	0.75	0.01	0.10	0.50	1.00

Table 3 Mechanical properties of materials

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



(a) Friction welding specimen



(b) Loaded torsional stress specimen

Fig. 2 Shape and dimension of specimen

절삭 삭가공한 후 원통연삭기로 연삭하였다. Fig. 2의 (a)는 마찰용접 사용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이고, (b)는 침지부식실험에 사용한 비틀림응력 부식시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

3.2 실험장치 및 실험조건

Fig. 3은 비틀림응력 부식실험장치를 나타낸 것이다. 부식시험편은 마찰용접부 중앙을 기준으로 하여 표면적을 600 mm^2 만큼 남기고 상하부를 절연 테이프 프로 완전 절연하였다. 그리고 고정구의 중앙에 천연해수 전해질용액을 담은 실험조를 고정하고, 바닥면에서 170 mm 위치에 수평방향으로 시험편의 한쪽 끝단은 고정구에 고정시키고, 다른 한쪽은 비틀림하중을 부하할 수 있는 막대(rod)를 설치하여 비틀림응력을 부하하였다. 탈산동으로 제작한 보조전극도 표면적이 600 mm^2 가 되도록 하고, 절연 테이프 프로 완전 절연시켜 시험편의 표면으로부터 25 mm

떨어진 위치에 고정하였다. 그리고 시험편과 보조전극을 알콜로 탈지하고, 1000 ml 용량의 실험조 중앙에 수평으로 설치하였다. Fig. 4는 비틀림응력 부식 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험편을 양극(anode)으로, 보조전극은 음극(cathode)으로 한 4개의 실험조와 직류안정화전원장치(DC Regulated power supply, 0~6A, 0~30V, ED), 직류전압계(Digital DC Voltmeter, 200mV~1000V, ED), 직류전류계(Digital DC Ammeter, 200 μ A~20A, ED)를 직렬로 연결하여 동시에 침지부식실험이 가능하게 하였으며, 천연해수를 채워 부식환경을 조성하였다.

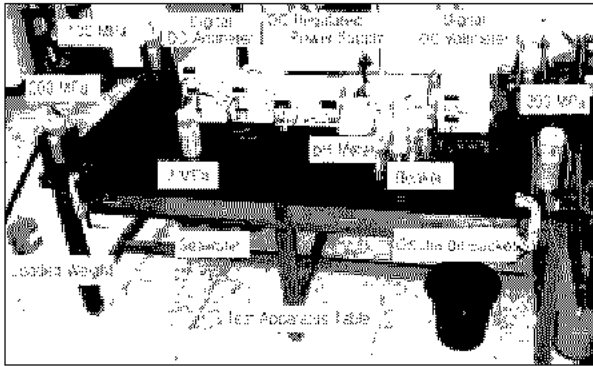


Fig. 3 Experimental apparatus of torsional stress corrosion test

3.3 실험방법

Fig. 4에서, 회로의 전체 인가전압이 3.2V가 되도록 설정하고 120시간 동안 침지부식실험을 실시하였다. 이 실험도중에 매 12시간 단위로 시험편(anode)과 보조전극(cathode)과의 상대전극전위 및 상대전류의 변화를 측정한 다음, 천연해수를 교환하였다.

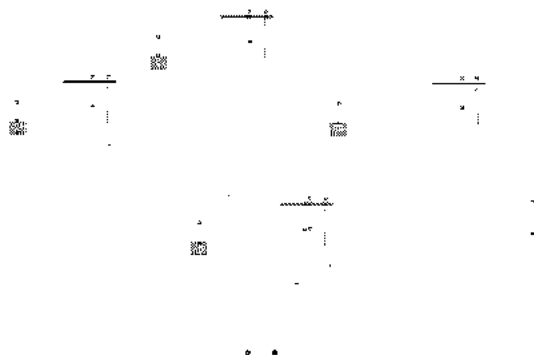


Fig. 4 Schematic diagram of torsional stress corrosion test

이상의 실험이 끝난 후 시험편을 실험장치에서 해체하여 물로 세척한 다음, 60 $^{\circ}$ C로 가열한 20% H₂SO₄ 수용액에 1시간 동안 침지시켜 표면에 부착된 산화물을 제거하고 다시 수세하였다. 그리고 시험편에 부착시켰던 절연 테이프를 제거한 다음 알콜로 세척하여 중량계측기(Electronic balance, MJ3000, 4.0~3000.0g, YMC Co. Ltd.)로 중량을 계측하였다.

부식속도는 주로 mils per year(mpy) 단위를 많이 사용하므로 본 연구에서도 mpy를 사용하였으며, 중량감량을 부식속도로 환산하는 식은 다음과 같다⁶⁾.

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

w : 중량감량(gf) A : 시험편 표면적(cm²)
 d : 시험편 밀도(gf/cm³) t : 침지시간(hours)

부식양식은 British Aluminum⁷⁾의 분류방식을 따라 분류하였다. 그리고 부식양식을 파악하기 위하여 접사렌즈를 부착한 디지털사진기를 사용하여 마찰용접부의 부식된 표면을 근접 촬영하였다. 최적 용접조건으로 용접한 IN713-SCM440의 마찰용접부를 와이어컷방전기공기에서 절단하여 시험편을 채취하여 마이크로비커스 경도시험기(microvickers hardness tester, HM-122, Mitutoyo)를 사용하여 하중 500 gf에서 경도시험을 하였다. 그리고 SCM440 부위는 3% Nital 용액으로, IN713LC 부위는 Kalling 시약(50 ml HCl, 50 ml CH₂OH, 2.5 g CuCl₂)으로 수초간 에칭(etching)한 다음, 금속현미경(metallurgical microscope, OS-MUT, Orion)에서 용융금속부, 열영향부, 기지금속부의 미세조직을 관찰하였다.

본 실험에 사용된 마찰용접기는 회전축의 지름은 25mm이고, 슬라이드 축의 지름은 40mm인 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)인 TOHO TH-25이다. IN713LC-SCM440의 마찰용접은 참고문헌^{8~10)}을 통하여 Table 4와 같이 강도와 인성을 고려한 최적의 조건에서 실시하였다.

Table 4 Various conditions of dissimilar friction welding of SCM440 for IN713LC

Rotating speed <i>n</i> (rpm)	Heating pressure <i>P</i> ₁ (MPa)	Forging pressure <i>P</i> ₂ (MPa)	Heating time <i>t</i> ₁ (sec)	Forging time <i>t</i> ₂ (sec)	Total upset <i>U</i> _T (mm)
2000	140	180	5	4	6

4. 실험결과 및 고찰

4.1 마찰용접부의 경도분포와 금속 조직적 특성

Fig. 5는 시험편의 중심부 및 표면으로부터 2mm 깊이의 경도분포를 나타낸 것이다. IN713LC 영역에서는 경계면(friction welded interface)에서 미세하게 증가하였으나 1mm에서 감소하여 2.5mm 위치에서 가장 작았다. 이후에 다시 증가하였다가 5mm 위치에서부터 350~370(Hv) 정도의 경도값을 유지하였다. SCM440 영역에서는 경계면에서부터 1mm까지는 감소하다가 2mm까지 미세하게 증가한 후 2.5mm에서 가장 낮게 나타났다. 이후에는 다시 증가하였다가 5mm 위치에서부터 300~350(Hv) 정도의 경도값을 유지하였다. 경계면 중심으로 IN713LC 영역의 2.5mm에서 SCM440 영역의 1.5mm까지는 시험편의 중심부보다 표면에서 2mm 깊이 위치의 경도값이 높은 것은 마찰용접열에 의한 냉각속도의 차이로 나타난 결과로 사료된다. 일반적으로 급랭된 주조 조직인 용접부는 금속조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류 응력 등으로 모재부보다 내식성이 낮다. 특히 열영향부에서는 가압 마찰열에 의한 용접열화가 내식성에 큰 영향을 미친다.

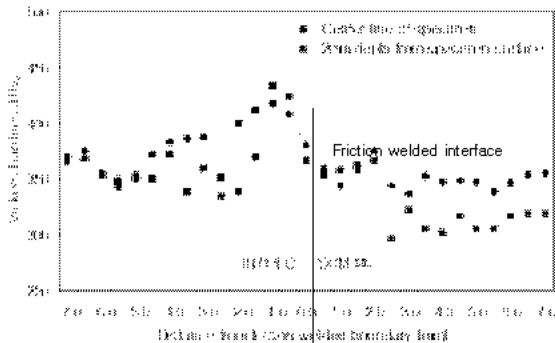


Fig. 5 Distribution of hardness at dissimilar friction welded zone(weight = 500gf)

Fig. 6의 (a), (b), (c)는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부에서 IN713LC 영역의 기지금속, 열영향부, 용융금속의 미세조직이다. 경계면을 중심으로 IN713LC 영역의 2mm 정도까지는 \sqrt{v} 상의 고용온도 이상으로 상승하여 석출상들이 고용됨에 따라 에칭이 되지 않은 부분으로 남은 것으로 판단된다⁵⁾. 부위별로 결정립 분포와 탄화물 형태가 다르게 나타났고, 마찰용접 부분의 결정립 크기는 다른 부위에 비해 미세한 결정립을 형성하고 있다. 이는 주조과정에서 열전달과 주형내의 접촉처리, 응고속도 등 주조공정상의 변수에 의한 것이라고 판단된다.

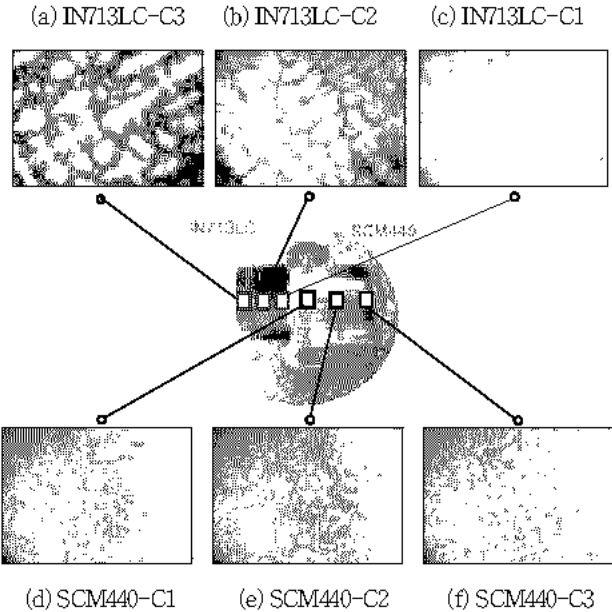


Fig. 6 Microstructures of dissimilar friction welded zone($\times 100$, $\times 400$)

Fig. 6의 (d), (e), (f)는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접 시험편 용접부에서 SCM440 영역의 기지금속, 열영향부, 용융금속의 미세조직이다. Fig. 6의 (d)는 시험편 가장자리의 경계면에 가까운 가압에 의한 마찰열에 의해 변화된 조직이고, 과열로 인한 조대한 주조 결정이 존재한다. 용접부의 조대한 입자와 주조조직은 동일한 조성인데도 불구하고 열간 변형과 열처리한 기지금속보다 일반적으로 취성을 갖는다. Fig. 6의 (e), (f)는 열영향부에서 재결정 영역과 부분변태영역 사이의 조직과 기지금속 조직으로, 열영향부의 왼쪽은 조대화 영역에서 미세조직이고, 오른쪽은 기지금속에 가까운 조직이다. 경계면을 중심으로 SCM440 부위는 버(burr)의 형성으로 경계층 3~4mm의 Metal flow가 나타나고, 백색으로 나타난 페라이트와 시멘타이트가 혼합된 소르바이트 조직을 관찰할 수 있으며, 냉각속도가 느린 중심부에서는 일부 베이나이트(bainite) 조직으로 추정되는 상 이한 조직을 볼 수 있다.

4.2 비틀림응력에 따른 전기화학적 부식거동

Table 5는 IN713LC-SCM440 마찰용접 용접부의 침지부식실험에서 시험편과 보조전극과의 평균 상대전극전위 및 평균상대전류, 공급전압, 부식량을 나타낸 것이다. 비틀림응력의 증가와 더불어 평균 전극전위는 작아지는 경향을 보였으나, 300MPa에서는 다소 증가하였다. 평균부식전류는 무부하 상태

Table 5 Torsional stress corrosion test results of IN713LC-SCM440 specimens

Specimen No.	Electrode potential (mV)	Corrosion current (mA)	Weight corrosion (mgf)	Supply voltage (V)
SP 1	0.104	0.019	4.619	0.800
SP 2	0.216	0.010	4.784	0.792
SP 3	0.242	0.014	4.808	0.797
SP 4	0.224	0.012	4.765	0.839

에서 가장 크고 부하응력 하에서는 비슷한 경향을 보였다.

부식량은 200MPa 응력에서 4.808mgf로 가장 많았고, 무부하 상태에서 가장 작았다. 평균공급전압은 300 MPa 응력에서는 0.839V로 가장 높았고, 다른 시험편에서는 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 7은 침지시간의 경과에 따른 상대전극전위의 변화를 나타낸 것이다. 천연해수 환경에서의 IN713 -SCM440 마찰용접부의 상대전극전위는 초기에 비틀림응력에 관계없이 0.4mV 정도로 거의 일정한 값을 보였으나, 12시간까지는 급격히 저하하였다. 60시간까지는 0~-0.3mV 범위에서 증감을 반복하였다가 그후에는 -0.2~-0.4 mV 범위의 값을 유지하였다. 초기에는 표면의 상태 또는 노출된 계재물들의 성장 등에 영향을 받기 때문에 전위차가 크게 나타나며, 시간의 경과하면서 전극전위가 안정화된다¹¹⁾. 비틀림응력 하에서는 비슷한 부식전위를 나타냈으나, 200MPa에서 가장 작았다. 무부하 상태에서는 다소 높은 부식전위를 나타냈다. IN713LC와 SCM440이 쌍을 이루면 더욱 활성(active, negative) 전위를 가진 SCM440이 과잉전자(excess electron)를 +방향의 부식전위를 가진 IN713LC로 이동하게 된다. 갈바닉 전지에서 귀전위의 IN713LC는 음극이 되어 부식속도가 감소하고, 활성 전위의 SCM440은 양극이 되어 우선적으로 갈바닉 부식에 의해 부식되는 것이다¹²⁾.

Fig. 8은 침지시간의 경과에 따른 상대전류의 변화를 나타낸 것이다. 천연해수 환경에서의 IN713 -SCM440 마찰용접부의 초기의 상대전류는 300 MPa에서 가장 크고 다른 응력하에서는 거의 일정하였으나 12시간까지 급격히 감소하였다. 그 후에는 0~0.02 mA의 범위에서 상승과 하강을 반복하였지만 대체로 일정한 값을 나타냈다. 일반적으로 부식

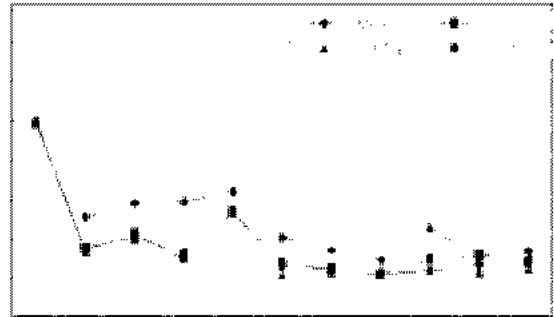


Fig. 7 Electrode potential as a function of immersion time in IN713LC-SCM440 specimens

전류는 침지시간의 경과와 더불어 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 9는 침지시간에 따른 마찰용접 시험편에 공급평균전압을 나타낸 것이다. 침지부식실험 회로에 공급된 전압은 대체로 초기값을 계속 유지하였지만 300MPa 비틀림응력 하에서는 24시간 이후부터 다른응력 하에서보다 다소 높은 전압이 공급되었다.

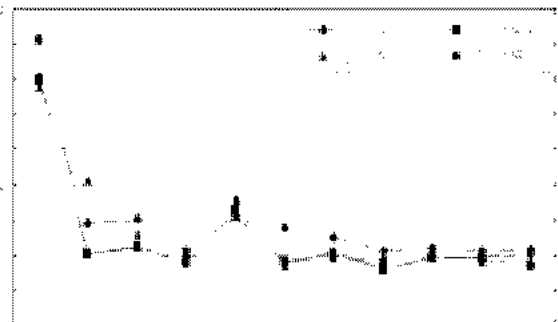


Fig. 8 Corrosion current as a function of immersion time in IN713LC-SCM440 specimens

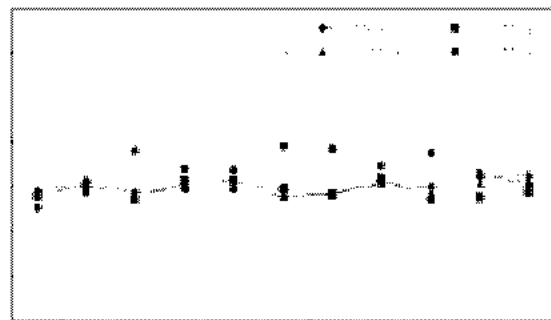


Fig. 9 Supply voltage as a function of immersion time in IN713LC-SCM440 specimens

4.3 비틀림응력에 따른 표면의 부식양식

Fig. 10은 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접 시험편을 120시간(5일간) 실험 후의 표면부식양식을 나타낸 것이다. 금속 조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류응력 등으로 기지금속보다 내식성이 낮아진다. 마찰열영향부에서는 예열과 후열에 의한 용접열화가 내식성에 큰 영향을 미친다. 니켈은 용해산소가 존재하지 않으면 비산화산(nonoxidizing acid)에서 부식을 크게 일으키지 않으며, 실온의 탈기된 물에서 열역학적으로 안정되어 부식되지 않는다. 이것은 Ni(OH)₂가 부식생성물로서 형성되기 때문이며, Ni(OH)₂의 피막은 통기되고 있는 거의 모든 수용액에서 부동태화 된다. 그러나 니켈합금은 탄화물의 입계석출에 의해서 뿐만 아니라 Cr, Mo, W, Nb 등의 금속간화합물 석출에 의해서도 용접부식(weld decay)과 칼날선부식(knifeline attack)이 발생할 수 있으며, Ni-Mo 합금에서는 쉽게 일어난다¹³⁾. 특히, 천연해수 환경에서는 3.5%의 NaCl을 함유하고 있으므로 금속의 부식속도가 크다. 해수에서의 부식 특성에 영향을 미치는 Cl 이온은 Fe, Cr, Ni, Co 등의 부동태를 파괴하거나 부동태의 생성 그 자체를 방해한다. 산화물 피막 내의 기공이나 결함 등을 통해 더욱 쉽게 소지금속으로 도달해 가게 된다. Cl 이온은 용해된 O₂ 또는 OH 등과 경쟁적으로 금속 표면에 흡착하게 되면 금속이온의 수화를 촉진시키고 부동태를 파괴함으로써 국부전지를 형성하게 되어 심한 공식으로 이어진다.

Fig. 10의 (a)는 무부하 상태에서의 표면부식양식이다. IN713LC는 SCM440에 비해 귀전위이므로 부식이 진행되지 않은 반면, SCM440 균일한 전면부식(Ge)과 아주 좁은 공식(N)이 나타났다. 마찰용접 경계면에서 2mm 떨어진 위치까지는 SCM440의 기지금속부에 비해 중위의 공식을 확인할 수 있었다. 이 부분은 2,000 rpm의 고속회전과 순간적인 가압 작용으로 발생한 마찰열이 급랭하면서 불균질한 조직을 형성하게 되어 부식현상이 촉진된 것으로 판단된다. 또한 경계면에서는 갈바닉 형태의 국부전지가 형성되어 귀전위의 IN713LC 영역에서 보다 SCM440 영역에서 침식현상이 빠르게 진행되면서 깊은 경계층을 형성한 것으로 판단된다.

Fig. 10의 (b), (c), (d)는 100 MPa, 200 MPa 및 300 MPa의 비틀림 응력하에서의 표면부식양식이다. 100 MPa의 작은 비틀림응력 하에서는 무부하 상태에서 보다 경계면 부근에서 침식현상의 진행이 느렸으며, 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)

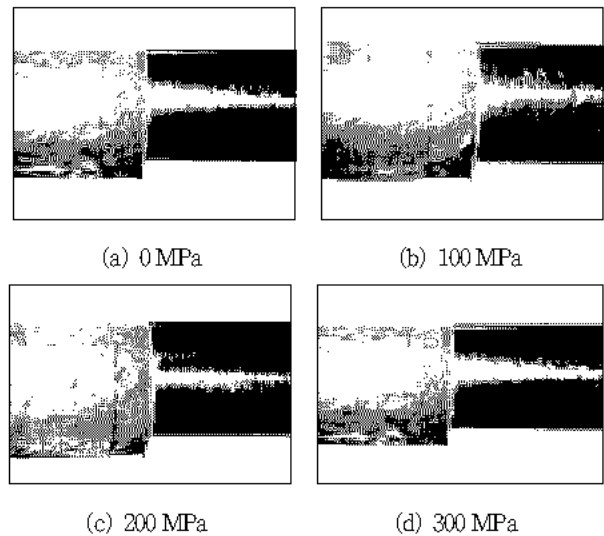


Fig. 10 Corrosion pattern of IN713LC-SCM440 friction welded specimens

이 나타났다. 200 MPa에서는 갈바닉 전지의 형성에 의한 침식층이 형성되었으나 비틀림응력의 영향이 미약한 것으로 판단된다. 300 MPa에서는 경계면으로부터 2mm까지의 침식정도가 다른 부위보다 커서 불규칙한 요철면을 형성하였으며, 침식층의 경사면을 따라 45°방향으로 형성된 부식균열을 미약하게 확인할 수 있다. 표면 부식양식은 대체로 균일한 전면부식(Ge)과 중위의 공식(M)이 나타났다.

4.4 부식속도에 미치는 비틀림응력의 영향

Fig. 11은 비틀림 응력에 따른 마찰용접 시험편의 부식속도와 평균공급전압을 나타낸 것이다. 비틀림 응력이 증가할수록 부식속도와 평균공급전압은 다소 증가하는 경향을 보였다. 평균공급전압은 무부하 상태에서 가장 작았고 300 MPa에서 가장 높게 나타났다. 비틀림응력 하에서의 평균공급전류는 대체로 일정하였지만 공급전압이 적을수록 부식속도가 크게 나타남을 알 수 있었다.

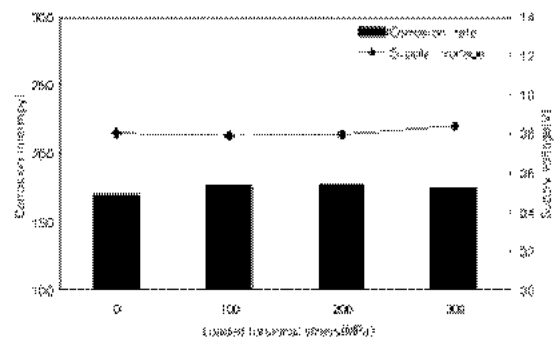


Fig. 11 Corrosion rate and electric potential as function of loaded torsional stress

Fig. 12는 비틀림응력에 따른 평균전극전위와 부식전류를 나타낸 것이다. 평균전극전위는 200 MPa 비틀림응력 하에서 가장 작은 값을 나타냈다. 평균부식전류는 부하응력에 관계없이 대체로 일정하였으나 100 MPa 응력 하에서 부식전류가 가장 작았다. 비틀림응력 하에서는 평균전극전위가 작을수록 평균부식전류는 크게 나타났다. 결국 부식속도는 부식전류가 높고 전극전위가 낮을수록 크고, 공급전류가 클수록 작음을 알 수 있었다.

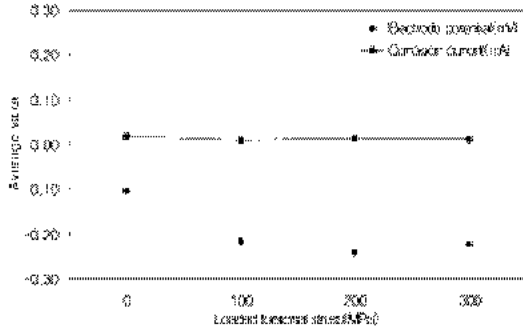


Fig. 12 Electric potential and corrosion current as function of loaded torsional stress

5. 결 론

천연해수 환경에서 IN713LC-SCM440 마찰용접부의 비틀림응력에 따른 침식부식실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

SCM440 영역은 갈바닉부식에 의한 급격한 침식 현상으로 전면부식과 좁은 공식이 발생하였으며, IN713LC 영역은 부식이 진행되지 않았다. 평균전극전위 및 부식전류는 초기에는 불규칙한 변화를 나타냈으나 대체로 감소하는 경향을 나타냈다. 부식속도는 부하응력이 클수록 감소하는 경향을 보였으나, 200 MPa 응력에서 가장 컸다. 결국 상대부식전류가 높고 상대전극전위가 낮을수록 부식속도가 크고, 공급전압이 높을수록 부식속도는 작았다.

참고 문헌

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

- AWS, 1991, "Welding Handbook", Vol. 2, pp. 672~763.
- 김영석 외 3인, 1990, "니켈기 초내열합금 IN713LC의 크리프 성질에 미치는 열처리 및 HIP 처리의 효과", 대한금속학회지, 제28권, 제10호, pp. 866~872.
- G. E. Waskielewski and N. R. Lindblad, 1972, "Superalloys Processing", Proc. 2nd. Int. Conf. AIME, MCIC-72-10.
- 박노광, 염종택, 나영상, 2003, "선박용 과급기 로터 접합체의 접합부 특성 평가 및 후열처리 기술 개발에 관한 연구", 제1단계 보고서, pp. 5~7.
- 안용식 외 4인, 1994, "AISE 321강의 용접 열영향부의 부식거동에 관한 연구", 한국부식학회지, 제23권, 제4호, pp. 233~242.
- F. A. Champion, 1948, "J. Inst. Met.", 37, 48.
- 박형동, 오세규, 권상우, 1999, "터빈용 내열강의 이중재 마찰용접 최적화와 AE에 의한 품질 실시간 평가에 관한 연구(1)-마찰용접 최적화", 한국해양공학회지, 제13권, 제3(1)호, pp. 83~91.
- 공유식 외 3인, 2002, "플런저용 강재의 이중재 마찰용접과 AE에 의한 실시간 평가", 한국동력기계공학회지, 제6권, 제2호, pp. 48~53.
- 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.
- 조상근, 공유식, 김영대, 2004, "A5083-H116 알루미늄 합금재 용접부의 부하응력에 따른 부식 특성의 영향", 한국동력기계공학회지, 제8권, 제3호, pp. 44~51.
- 이의호 외 3인, 2000, "부식과 방식의 원리", 도서출판 동화기술, pp. 217~244.
- Jones, D. A., 1996, "Principles and Prevention of Corrosion", Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, pp. 309~318.