

工學碩士 學位論文

IN713LC-SCM440 異種材 摩擦鎔接部の
비틀림應力에 따른 腐蝕舉動

2006年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

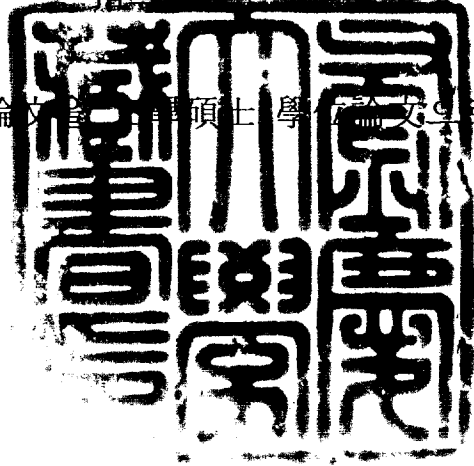
俞 善

工学碩士 學位論文

IN713LC-SCM440 異種材 摩擦銲接部の
비틀림應力에 따른 腐蝕舉動

指導敎授 金 瑩 大

이 論文을 工学碩士 學位論文으로 提出함



2006年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

俞 善

이 論文을 俞 善의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2005年 12月

主審 教授 朴 卿 東



委員 教授 金 亨 資



委員 教授 金 榮 大



목 차

List of tables	ii
List of figures	ii
Nomenclature	iv
Abstract	1
1. 서 론	3
2. 이론적 고찰	6
2-1 갈바닉 부식	6
2-2 시험편에 부하된 비틀림응력	10
3. 실험방법	13
3-1 시험편	13
3-2 실험장치 및 실험조건	15
3-3 실험방법	18
4. 실험결과 및 고찰	23
4-1 마찰용접부의 경도분포와 금속조직적 특성	23
4-2 침지시간에 따른 전기화학적 부식거동	29
4-3 비틀림응력에 따른 표면의 부식양식	35
4-4 부식속도에 미치는 비틀림응력의 영향	39
5. 결 론	42
참고문헌	43

List of tables

Table 1 Relation of torsional stress and loaded distance	12
Table 2 Chemical composition of SCM440 and IN713LC materials	13
Table 3 Mechanical properties of SCM440 and IN713LC materials	13
Table 4 Properties of natural seawater used in the experiments	17
Table 5 The classification of corrosion pattern in british aluminum	19
Table 6 Various conditions of dissimilar friction welding of SCM440 for IN713LC40	22
Table 7 Results of corrosion test using various torsional stress	29

List of figures

Fig. 1 Detail of corrosion test fixture	12
Fig. 2 Shape and dimension of specimens	14
Fig. 3 Experimental apparatus of corrosion test with various torsional stress	16
Fig. 4 Schematic diagram of corrosion test with various torsional stress	17

Fig. 5 Friction welding zone	21
Fig. 6 TOHO TH 25 friction welding machine	22
Fig. 7 Distribution of hardness at friction welded zone micro-Vickers hardness tester(weight=500gf)	25
Fig. 8 Micro-structures of IN713LC-SCM440 dissimilar friction welded zone ($\times 100$, $\times 400$)	28
Fig. 9 Electrode potential as a function of immersion time with various torsional stress	32
Fig. 10 Corrosion current as a function of immersion time with various torsional stress	33
Fig. 11 Supply voltage as function of immersion time with various torsional stress	34
Fig. 12 Corrosion pattern of friction welder specimens with various torsional stress	38
Fig. 13 Corrosion rate and supply voltage as function of loaded torsional stress	40
Fig. 14 Electric potential and corrosion current as function of loaded torsional stress	41

Nomenclature

- T : Torsional moment (N-mm)
 F : Normal load (N)
 L : Length of rod (mm)
 τ : Loaded torsional stress (MPa)
 ϕ : Angle of torsional ($^{\circ}$)
 D : Diameter of specimen (mm)
mpy : Mils per year (mpy)
 w : Corrosion weight of specimen (gf)
 A : Exposure surface area of specimen (cm^2)
 d : Density of specimen (gf/cm^3)
 t : Immersion time of specimen (hr)
 n : Revolution per minute (rpm)
 P_1 : Frictional forging pressure (MPa)
 P_2 : Frictional heating pressure (MPa)
 t_1 : Heating time (s)
 t_2 : Forging time (s)

Corrosion Behavior Related to Various Torsional Stress in Dissimilar Friction Welded Zone of IN713LC-SCM440

Sun You

*Department of Mechanical Design
Graduate School of Industry
Pukyong National University*

Abstract

The effect of the loaded torsional stress on corrosion characteristics in the dissimilar friction welded zone of IN713LC-SCM440, in the seawater was studied. 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 supply voltage, corrosion rate, electrode potential, current, and corrosion pattern, etc. were examined for the specimens with the elapse of the time.

The main results derived from this study are;

- (1) The surface corrosion pattern of SCM440 area are 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.

- (2) Initially, the average relative electrode potential and corrosion current are decreased suddenly, by and large, it was stabilized gradually tend to decreasing with the elapse of the immersion time.
- (3) The corrosion rate was decreased by increasing the load stress. But 200 MPa specimen was showed most large value in the average relative electrode potential was higher and the average relative current was lower.
- (4) The corrosion pattern of the dissimilar friction welded zone indicates that the depth and width of the pitting become increasing with the increasing loaded torsional stress.

1. 서 론

기계 및 구조물의 제작에 있어서, 그 방법의 선택은 생산원가의 절감, 공정의 단축, 제작상의 성질, 작업의 난이도 등에 지대한 영향을 미친다¹⁾. 산업현장에서 이러한 문제의 해결은 생산성 향상, 가공비 절감, 내구력의 향상 등으로 연결되어, 경쟁력을 확보할 수 있다. 용접분야에 있어서, 용접에 소요되는 비용의 절감이 기업 경쟁력 확보에 중요한 요소로 자리잡게 되었다. 따라서 무엇보다 기술개발을 통한 양질의 제품을 생산할 수 있는 능력과 신뢰성을 확보해야만 한다. 이러한 기술의 일환으로 마찰용접(friction welding)은 고효율, 고강도, 저가격의 혁신적인 용접방식으로 주목받고 있다^{2) 3), 4)}.

IN713LC 합금은 고온강도와 내산화성이 우수할 뿐만 아니라 특히, 주조성이 양호하며, IN713C 합금의 우수한 크리프-파단 특성을 활용하고, 인장강도 및 연성을 보다 향상시킨 소재이다⁵⁾. 따라서 부품의 부위별 두께와 주조시의 냉각속도에 따른 특성의 변화를 최소화 할 수 있도록 합금이 설계되었기 때문에 터빈 휠(turbine wheel)과 같이 부위별 두께 차이가 큰 부품에 많이 사용된다. 선박용 디젤엔진의 과급기에 사용하는 로터 집합체(rotor assembly)는 축(shaft)과 터빈 휠로 구성되어 있으며, 터빈 휠은 고온·고압 조건에서 활용하기 때문에 일반적으로 IN713C, IN713LC 등 니켈계 초내열합금을 사용하여, 진공 정밀주조 공정에 의해 일체형으로 제조한다. IN713LC 초내열합금은 일반 내열강에 비해 가격이 매우 고가이며, 제품의 제조원가가 높아진다.

따라서 직접적으로 고온·고압에서 우수한 크리프-파단 특성 및 열피로

성질을 요구하는 노출된 블레이드(blade) 부분은 IN713LC 합금을 사용하고, 높은 강도 및 연성을 필요로 하는 축을 비롯한 디스크(disk) 부분은 SCM440 내열강으로 대체함으로써, 내구성을 갖추면서 제조원가를 낮출 수 있다⁶⁾. 선진 엔진 제작사에서 주로 이용하고, 있는 중대형 로터 조립체의 접합은 금속을 용해하지 않고, 마찰에 의해 형성되는 마찰열과 고온에서의 소성변형을 동시에 이용하는 접합기술을 활용한다. 이러한 마찰용접 기술은 접합표면을 중심으로 극히, 제한된 부위에서만 발열이 일어나므로 화염을 이용하는 용접법에 비해 10~20%의 작은 에너지로 접합할 수 있고, 접합면의 기계적 성질이 우수함과 공정변수가 축하중, 회전속도, 업셋량 등으로 비교적 관리가 용이하기 때문에 자동화가 가능하다는 장점이 있다⁷⁾. 마찰용접법은 국내에서도 자동차 부품, 공구 및 기계 부품 제작 등에 많이 이용되고 있으며, 일반적으로 다양한 부식환경에 노출되어 있다.

부식(corrosion)이란 금속이 환경의 성분과 전기 화학적 또는 화학적 반응에 의해 화합물의 변화에 따라 소모되어, 금속제품의 성능이 저하하는 현상⁸⁾이며, 전기화학적 기구에 의해 발생하는 금속의 부식은 금속원자가 금속결정격자를 떠나 그들의 본래 상태인 산화물로 되돌아 갈려는 본질적인 성질 또는 자연경향이라고 할 수 있다. 강의 부식은 일반적으로 금속표면의 산소화산에 의한 용해산소, 온도, pH, 산용액, 유속, 부하응력 등의 환경적인 인자에 영향을 받는다⁹⁾. 인코넬합금은 다양한 부식환경에서 강한 응력부식균열(stress corrosion cracking, SCC) 저항성 때문에 원자로의 증기발생기 전열관 및 압력용기 헤드 관통관의 재료로 사용되고 있다¹⁰⁾. 이러한 기계부품이나 기계 구조물의 제작에 있어서, 재료의 절감이나 가공비의 절감 등을 이유로 마찰용접법을 채택하고 있다. 일반적으로 이음의 형

상, 시공법, 마찰용접 금속의 종류, 열영향, 잔류응력, 부하응력 등이 부식에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있어, 이와 관련된 부식연구가 많이 진행되고 있다¹¹⁾. 이와 같은 기계부품의 마찰용접부에 미치는 여러가지 영향을 고려한 연구보고 중에서 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 천연해수 분위기에서의 비틀림응력에 따른 전기화학적 부식거동과 부식속도에 미치는 비틀림응력의 영향을 명확하게 규명한 것은 찾아보기 어려웠다.

본 연구는 선박용 디젤엔진 과급기의 로터 조합체 부품제작에 널리 사용되는 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 천연해수 분위기에서 비틀림응력에 따른 부식거동을 파악하기 위하여, 침지부식실험을 실시하였다. 그리고 이 실험에서 나타난 상대전극전위 및 부식전류의 변화, 통전전압의 변화, 표면의 부식양식, 부식속도 등을 비교 고찰함으로써, 이종재 마찰용접부의 부식거동에 관한 연구의 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2-1 갈바닉 부식¹²⁾

기계 부품이나 구조물의 제작에 있어서, 기계적 또는 경제적인 이유로 인하여 서로 다른 금속 또는 합금을 동시에 사용해야 되는 경우가 대단히 많다. 그러나 서로 다른 금속 사이의 전기적 접촉이 이루어지게 되고 심한 부식문제를 야기시킨다. 기전력 계열(EMF series)은 모든 금속에 대한 표준산화-환원전위를 순서대로 배열한 것이다. 금속은 정(positive)의 값이 클수록 귀(noble)하고, 부(negative)의 값이 클수록 천(basic)하다거나 활성(active)이라고 한다. 기전력 계열에 표시된 전위는 전해액에서의 그 금속 이온의 농도가 단위 활동도(activity)이고, 그 이온과 평형상태에 있을 때의 평형전위(equilibrium potential)이다. 일반적으로 이온의 농도가 단위 활동도와 같을 때 전지를 이루고 있는 두 금속 중에서 기전력 계열에서 더욱 활성인 금속이 양극이 된다. 그렇지만 금속염의 용해도는 한정되어 있기 때문에 금속이온의 농도가 단위 활동도와 같게 되기는 거의 불가능하다. 따라서 어떤 금속이 다른 금속에 비해서, 양극적(anodic)인지 음극적(cathodic)인지를 기전력 계열로서, 판단하게 되면 많은 오류를 범하기 쉽다. 실제로 어떤 금속과 평형상태를 이루는 이온의 활동도는 환경에 따라서 크게 달라진다. 갈바닉 계열은 어떤 주어진 환경에서 실제 측정된 전위에 따라 금속과 합금을 차례대로 배열한 것이다. 갈바닉 계열에는 금속 뿐만 아니라 합금 및 부동태 상태의 금속도 포함하고 있다. 기전력 계열은 오직 하나 밖에 없지만 갈바닉 계열은 여러 개가 존재할 수 있다.

각 환경에 따른 특수한 갈바닉 계열이 존재한다. 그러한 계열에서의 금속의 상대적 위치는 환경에 따라 변한다. 두 금속이 쌍을 이루었을 때 발생하는 부식현상은 그들 금속이 갈바닉 계열에서 얼마나 서로 멀리 떨어져 있느냐 하는 것에 의존하지 않으며, 그들 금속의 상대적인 면적, 분극정도, 그 외 많은 인자들에 의존한다. 부동태 현상이 갈바닉 부식거동에 영향을 미친다. 부동태 상태의 스테인레스강은 활성상태에 비해 훨씬 귀한 위치에 있다. 그러므로 인코넬합금(inconel alloy)은 스테인레스 니켈이라 할 수 있다. 이종금속이 전해질 용액 속에 침적되면 전위차가 존재하게 되어, 이들 사이에 전자의 이동이 일어난다. 귀전위(noble potential)를 가진 금속은 음극이 되어 부식속도(corrosion rate)는 감소되고, 활성전위(active potential)를 가진 금속은 양극이 되어 부식속도를 촉진하게 된다. 이러한 형태의 부식을 갈바닉 부식(galvanic corrosion) 또는 이종금속 접촉부식(dissimilar materials contact corrosion)이라 한다. 두 이종금속 사이의 가역전위 차이(reversible potential difference)는 갈바닉 계열의 기전력이 되며, 부식경향을 예측하는 기준이 된다.

2개 혹은 그 이상의 원소를 포함하는 합금에 대해서는 가역전위를 측정하는 것이 불가능하며, 따라서 기전력 계열에는 합금을 나타낼 수 없다. 실제 부식문제에서 금속들이 그들의 이온과 평형을 유지하면서 갈바닉 쌍을 이루기는 대단히 힘들다. 대부분의 갈바닉 효과는 부식되고 있는 두 금속의 전기적인 접촉에서부터 생겨난다. 갈바닉 부식은 전혀 예상하지 않은 곳에서 발생하는 경우가 많다. 어떤 장비를 설계할 경우에는 이러한 갈바닉 부식발생의 가능성을 항상 염두에 두고, 재료선택에 특히, 유의해야 한다.

갈바닉 부식을 방지하기 위해서, 이종금속 사이에 절연물질을 사용하거

나 전해액과 금속이 접촉되지 않도록 도장을 하는 등의 방법도 사용되고 있다. 갈바닉 부식은 여전히 중대한 문제로 남아 있다. 실제로 많은 경우에 효과적인 설계를 위해서는 이종금속의 사용이 요구되고 있다. 그 이유는 설계과정에서 강도, 가공성, 가격, 유용성 등 여러가지 다른 인자가 부식문제보다 더 중요성을 가지는 경우가 많기 때문이다. 입계부식, 공식, 응력부식균열, 틈부식과 같은 국부부식은 갈바닉 부식에 관계된다. 갈바닉 부식은 가장 일반적이며, 가장 심한 형태의 부식이다. 갈바닉 부식의 크기는 이종금속의 전위차이 뿐만 아니라 금속의 교환 전류밀도 및 타펠 기울기(tafel slope) 같은 속도론적인 인자의 양극과 음극이 면적비 등에도 의존하기 때문이다. 갈바닉 부식에서 가장 위험한 조건은 소양극-대음극(small anode-large cathode)이다. 양극 면적에서의 전류밀도가 높을수록 부식속도는 상승된다. 갈바닉 부식을 방지 또는 감소시키기 위한 방법으로는 이종금속을 함께 사용할 경우에 가능한 한 갈바닉 계열에 가까운 위치에 있는 금속 또는 합금을 선택해야 한다. 그리고 소양극-대음극의 위험한 상태를 피하고, 가능하면 이종금속은 절연 또는 도장하거나 갈바닉 접촉을 이루고 있는 두 금속보다 활성전위를 가진 희생양극(sacrificial anode)을 설치한다.

갈바닉쌍을 이루고 있는 금속 또는 합금 사이의 전위차이는 갈바닉 부식을 위한 구동력을 나타내는 반면 갈바닉쌍에서 흐르는 전류는 갈바닉 부식의 양극 용해속도를 나타낸다. 갈바닉 전류를 양극면적으로 나누면 전류밀도가 되며, 이 값은 평균부식속도에 비례한다. 양극의 어떤 주어진 점에서 갈바닉 부식속도를 예측하기 위해서는 양극에서의 전류분포를 숙지 하는 것이 대단히 중요하다.

혼합전위이론에 의하면 쌍을 이루지 않은 상태에서 아연(Zn)은 부식전위

를 가지며, 플라티늄(Pt)은 수소반응에 대한 반전전위를 가진다. 두 금속이 쌍을 이루게 되면 즉, 전기적으로 서로 연결하여 $\ominus$ 방향의 전위를 가진 Zn 으로부터 $\oplus$ 방향의 반전위를 가진 Pt의 전자들이 이동하게 된다. 갈바닉쌍 으로부터 흐르는 전류는 외부 인가전류에서와 마찬가지로 Zn과 Pt의 표면을 분극시킨다. Zn으로부터의 전자흐름은 Zn 용해반응의 양극분극을 야기시킨다. Zn에서 흘러나온 전자들은 Pt 표면으로 흘러 들어가면서, 수소 환원반응을 음극적으로 분극시킨다. 두 금속은 계속 분극되어 환원전류와 산화전류가 같은 값이 된다. 갈바닉쌍의 분극곡선에는 전류밀도 값 대신 전류값이 사용되어야 한다. 전류밀도값을 얻기 위해서는 양극금속에서의 양극전류값을 양극면적으로 나누어 주어야 하며, 이 전류밀도값은 부식속도에 비례한다. 그리고 수소 환원반응에 대한 교환전류밀도가 낮은 금속이 활성화된다. 상대적인 표면적도 갈바닉 부식속도에 영향을 미친다. 음극 면적이 클수록 환원반응을 위한 면적이 더 커지기 때문에 위에 대응하기 위하여, 양극 용해전류가 증가해야 한다. 두 부식금속으로 이루어진 갈바닉쌍에서 갈바닉 전위는 항상 쌍을 이루지 않았을 때의 두 금속의 부식전위 값의 사이에 위치한다. 활성전위를 가진 금속은 양극이 되어, 부식속도가 항상 증가하고, 귀전위를 가진 금속은 음극이 되어 부식속도가 항상 감소한다. 양극금속의 부식속도를 증가시키면서, 음극 금속의 부식속도가 감소하는 현상은 희생양극에 의한 음극방식(cathodic protection)의 근거가 된다. 두 금속이 쌍을 이루었을 때 내식성이 적은 금속의 부식속도는 항상 증가하는 반면 내식성이 강한 금속의 부식속도는 항상 감소한다.

2-2 시험편에 부하된 비틀림응력

크롬-몰리브덴 합금강재 SCM440과 인코넬 IN713LC의 시료를 최적의 조건에서 마찰용접하여, 3.5 % NaCl 전해질 수용액 중에서 비틀림응력에 의한 부식거동을 알아보았다. SCM440과 IN713LC의 항복강도가 각각 1000 MPa, 702 MPa 이므로 IN713LC-SCM440 이종재 용접부의 기계적 특성을 만족하도록 탄성한도 범위의 비틀림응력을 부하하였다.

시험편의 한쪽 끝단은 억지끼워맞춤으로 고정하고, 반대쪽 끝단에 자리과기를 하여, 비틀림응력을 부하할 수 있는 길이의 로드(rod)를 장착하였다. 시험편에 탄성한도 내의 특정하중을 부하하기 위하여, 시험편과 로드와의 거리를 조절하여 98 N, 의 원통형 추를 매달아 정하중을 부하하는 방법을 채택하였다. 시험편에 0 MPa, 100 MPa, 200 MPa, 300 MPa 등의 항복점 이내의 비틀림응력을 부하하기 위하여, 4개의 고정구(fixture)를 두께 10 mm의 강판을 사용하여, 제작하였다. Fig. 1은 비틀림응력 부식실험장치에 사용된 시험편 고정구의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

시험편에 부하한 비틀림응력(τ)에 대한 계산식은 다음과 같다¹³⁾. 길이 L 인 원형 단면축의 한끝을 고정하고, 다른 끝에 비틀림하중을 작용하면, 축선에 평행한 표면 위의 임의의 선분은 비틀림각 ψ 만큼 회전하여, 위치 이동을 한다. 이 과정에서 발생하는 비틀림모멘트에 의하여, 축 중심선에 직각인 단면에는 비틀림응력이 발생한다. 추에 의해 작용하는 수직하중을 F (N) 로드의 길이를 L (mm)라고 하면 시험편에 작용하는

비틀림모멘트 T (N-mm)는

$$T = F \cdot L \quad \dots\dots\dots (1)$$

비틀림모우멘트에 의해 생기는 시험편의 전단응력은

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

$$T = \tau \cdot \frac{\pi D^3}{16} \dots\dots\dots(2)$$

식 (1), 식 (2)에서

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

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

추의 무게 F 는 98 N, 시험편의 지름 D 는 9.5 mm로 설정되었으므로 시험편에 작용시킬 비틀림응력 τ 와 시험편으로부터 수직하중까지의 거리 L 의 관계식으로 정리하면,

$$\tau = \frac{L}{1.7178} \dots\dots\dots(4)$$

식 (4)에 의해 시험편에 부하할 비틀림응력을 구하여 적용하였다. Table 1은 비틀림응력에 따라 결정되는 Loaded의 길이이다.

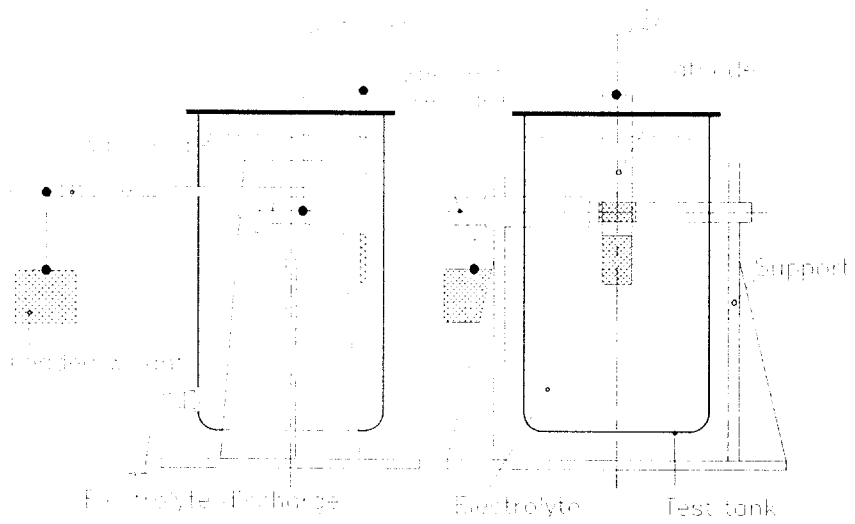


Fig. 1 Detail of corrosion test fixture

Table 1 Relation of torsional stress and loaded distance

Specimens No.	SP-1	SP-2	SP-3	SP-4
Torsional stress(MPa)	0	100	200	300
Loaded distance(mm)	0	172	344	515

3. 실험방법

3-1 시험편

본 연구에 사용된 시료는 선박용 터빈엔진의 부품 등 다양한 용도로 사용되는 지름 10 mm의 IN713LC 인코넬합금과 내열성, 내마모성, 고온강도가 우수하여, 일반기계, 자동차, 항공기, 선박, 냉간 단조품 등에 사용되고 있는 지름 13 mm의 SCM440 크롬-몰리브덴 합금강재이다. Table 2와 Table 3은 시험편 제작에 사용한 인코넬 IN713LC와 SCM440 합금강재의

Table 2 Chemical compositions of SCM440 and IN713LC materials

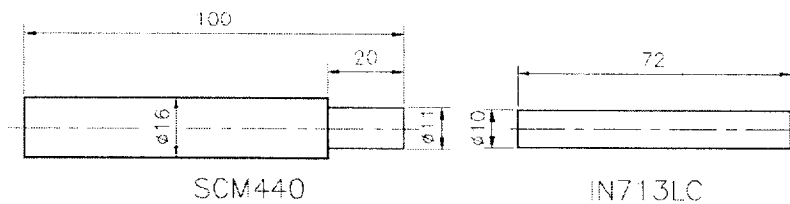
Division	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb+ Ta	Al	Ti	B	Zr	Cu	Co
SCM440	0.408	0.234	0.778	0.0125	0.0154	1.072	0.176	-	-	-	-	-	0.107	-
IN713LC	0.14	0.50	0.25	-	0.003	13.00	1.50	2.30	6.00	0.75	0.01	0.10	0.50	1.00

Table 3 Mechanical properties of SCM440 and IN713LC materials

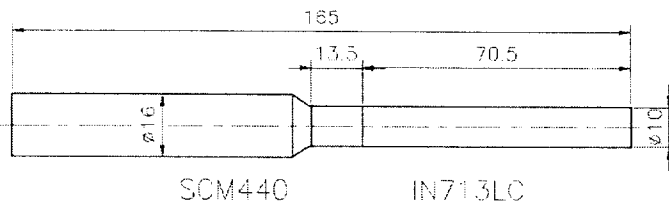
Division	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Reduction of area δ (%)	Vickers hardness (Hv, 500gf)
SCM440	1,272	1,000	10.2	35.2	320
IN713LC	809	702	3.0	34.4	355

화학적 조성과 기계적 성질을 나타낸 것이다.

본 실험에서 마찰용접의 최적화를 위한 용접조건을 구하기 위하여 용접부의 인장 시험조건은 KS규격(KS B 0801 14A)에 따라 수치제어 선반으로 절삭 가공한 후 원통 연삭기로 연삭하였다. Fig. 2의 (a)는 마찰용접에 사용한 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이며, (b)는 비틀림응력을 부하하는 침지부식실험에 사용한 시험편의 형상과 치수를 나타내고 있다.



(a) Friction welding specimen



(b) Corrosion specimen loaded torsional stress

Fig. 2 Shape and dimension of specimens

3-2 실험장치 및 실험조건

부식시험편은 마찰용접부 중앙을 기준으로 하여, 표면적을 600 mm^2 만큼 남기고, 상·하부를 절연 테이프로 완전 절연하였다. 그리고 고정구의 중앙에 전해질로 사용할 천연해수를 담은 실험조를 고정하고, 바닥면에서 170 mm 위치에 수평방향으로 시험편의 한쪽 끝단은 고정구에 고정시키고, 다른 한쪽은 비틀림하중을 부하할 수 있는 막대를 설치하여, 시험편에 비틀림응력이 각각 0, 100, 200, 및 300 MPa이 되도록 하였다. 탈산동으로 제작한 보조전극도 표면적이 600 mm^2 가 되도록 하고, 절연 테이프로 완전 절연시켜 시험편의 표면으로부터 25 mm 떨어진 위치에 고정하였다. 그리고 응력이 부하된 시험편과 보조전극을 알콜로 탈지하고, 1000 ml 용량의 실험조 중앙에 수평으로 설치하였다. Fig. 3은 비틀림응력 부식실험장치를 나타낸 것이다. 시험편을 양극(anode)으로 보조전극은 음극(cathode)으로 한 4개의 실험조와 직류 안정화 전원장치, 직류 전류계를 직렬로 연결하여, 동시에 침지부식실험이 가능하게 하였다^{14), 15)}. 또한 각 시험편과 보조전극 사이의 상대전극전위 변화를 측정하기 위해 시험편과 보조전극 사이에 전위차를 병렬로 연결하고 천연해수를 채워 부식환경을 조성하였다. Fig. 4는 비틀림응력 부식실험장치의 개략도를 나타낸 것이며, Table 4는 천연해수의 성질을 나타낸 것이다.

비틀림응력 부식실험에 사용된 계측기는 직류전압계(digital DC voltmeter, range 200mV~1000V, model DV-101A, ED), 직류전류계(digital DC ammeter, range $200\mu\text{A}$ ~20A, model DA-101B, ED), 직류안정화전원장치(DC regulated power supply, range 0~6A, 0~30V, model

ED-330TD, ED), 중량감량측정기(electronic balance, model MJ3000, range 4.0~3000.0g, d=0.1g, YMC Co. Ltd.), pH Meter(benchtop model P25, range 0~14, resolution 0.01, EcoMet), 전위차계(digital oscilloscope DS-1150, probe HP-9250, 250MHz, ref/x1/x10, EZ digital Co) 등을 사용하였다.

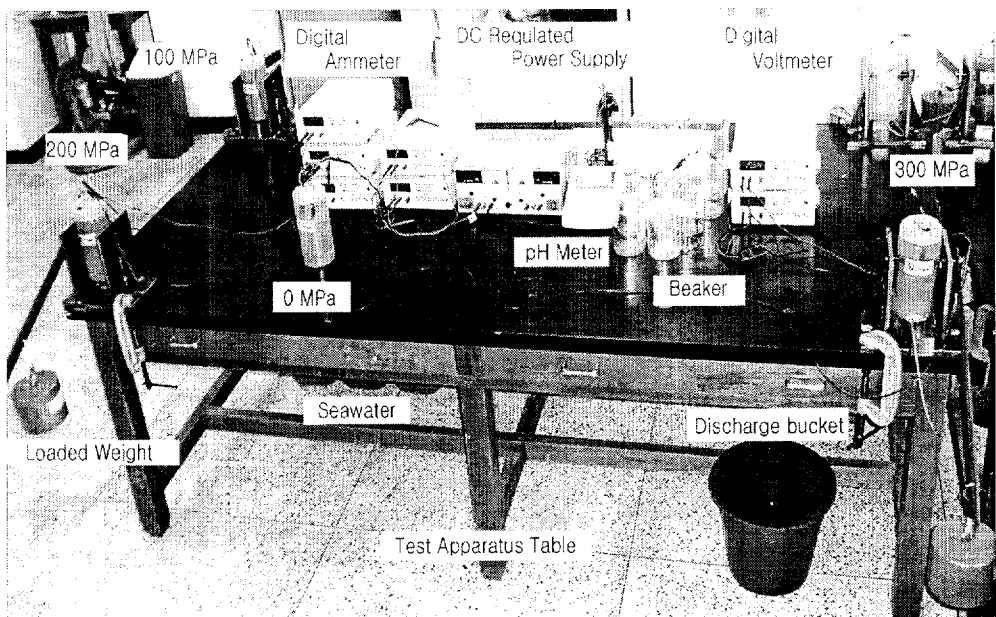


Fig. 3 Experimental apparatus of corrosion test with various torsional stress

3-3 실험방법

Fig. 4에서 직류안정화전원장치를 사용하여, 회로 전체의 전압이 3.2 V가 되도록 조절하면서, 120시간 동안 침지부식실험을 실시하였다. 이 실험중에 매 12시간 주기로 시험편(양극)과 보조전극(음극)과의 상대전극전위 및 상대전류의 변화를 측정하였다.

이상의 실험이 끝난 후 시험편을 실험장치에서 분리채하여, 물로 세척한 다음 60 ℃로 가열한 20 % H₂SO₄ 수용액에 1시간 동안 침지시켜, 표면에 부착된 산화물을 제거하고 다시 수세하였다¹⁶⁾. 그리고 시험편에 부착시켰던 절연 테이프를 제거한 다음 알콜로 세척하여, 중량을 계측하였다.

부식속도의 비교는 mils per year(mpy) 단위를 많이 사용하므로 본 연구 결과에서도 mpy를 사용하였으며, 중량감량을 부식속도로 환산하는 식은 다음과 같다¹⁷⁾.

$$\text{mpy} = \frac{(12,000 \times 287 \times w)}{(A \times d \times t)} \dots\dots\dots(5)$$

w : 중량감량(gf)

A : 시험편의 표면적(cm²)

d : 시험편의 밀도(gf/cm²), 일반적으로 강에서는 7.87 gf/cm²이다.

t : 침지시간(hr)

부식양식은 British Aluminum의 부식양식 분류에 따라 Table 5와 같이 분류하였다^{18), 19)}.

Table 5 The classification of corrosion pattern in british aluminum

Division	No.	Corrosion pattern	Remarks
General corrosion	1	Ge	even general corrosion
	2	Gu	uneven gernal corrosion
	3	Le	even semi-local corrosion
	4	Lu	uneven semi-local corrosion
Pitting	5	W	wide pitting($\text{dia} \div \text{depth} \leq 6 \text{ mm}$)
	6	M	medium pitting($\text{dia} \div \text{depth} \leq 1 \text{ mm}$)
	7	N	narrow pitting($\text{dia} \div \text{depth} \leq 0.25 \text{ mm}$)
Etc	8	K	corrosion bulge
	9	Y	intergranular corrosion
	10	Ex	exfoliation corrosion
	11	P	perforation
	12	B	blister
	13	S	leakage
	14	T	splinter
	15	La	layer exfoliate

그리고 부식양식을 파악하기 위하여, 접사렌즈를 부착한 디지털 사진기를 사용하여, 마찰용접부의 부식된 표면을 근접 촬영하였다. 최적 용접조건으로 용접한 IN713LC-SCM440의 용접부를 채취하여, 와이어컷 방전가공기에서 중앙을 절단한 경도 측정용 시험편을 제작하여 하중 500 gf인 다이아몬드 압입자를 사용하여, 경도시험을 하였다. 이때 측정 위치는 시험편의

중심부(center line)와 가장자리에서 2 mm 떨어진 위치의 마찰용접 접합면(welding interface)에서 0.5 mm 간격으로 좌·우 6 mm의 경도값을 측정하였다. 마찰용접부의 현미경 조직검사를 하기 위한 시험편은 경도시험과 같이 최적 용접조건으로 용접한 상태의 것을 사용하였다. 부식 방법으로는 SCM440 부분은 3 % Nital 용액에 수 초간 부식시켰으며, IN713LC 부분은 Kalling 시약(50 ml HCl, 50 ml CH₂OH, 2.5 g CuCl₂)에 수 초간 부식시켜, 깨끗이 세척한 후 건조기(dryer)로 건조하였다. 조직 검사는 마찰용접 시험편의 중심부와 표면으로부터 2 mm 깊이의 마찰용접 경계부, 열영향부, 기지금속부를 각각 관찰하였다. Fig. 5는 IN713LC-SCM440 재료의 마찰용접된 형상이다.

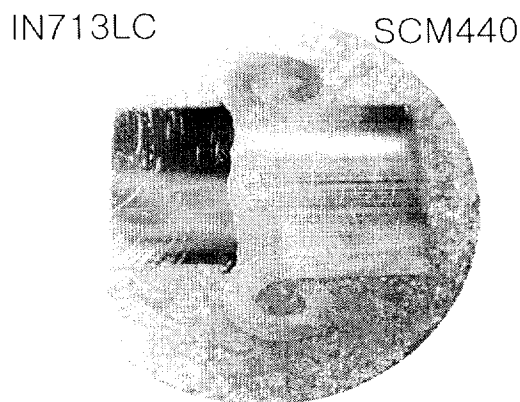


Fig. 5 Friction welding zone

봉대봉(bar to bar) 마찰용접에 사용된 마찰용접기(friction welding machine)는 Fig. 6과 같이 용량이 최대 재료치수로서, 회전축의 지름은 25 mm이고, 슬라이드 축의 지름은 40 mm인 연속 구동 브레이크형(continuous drive brake type)인 TOHO TH-25 이다.

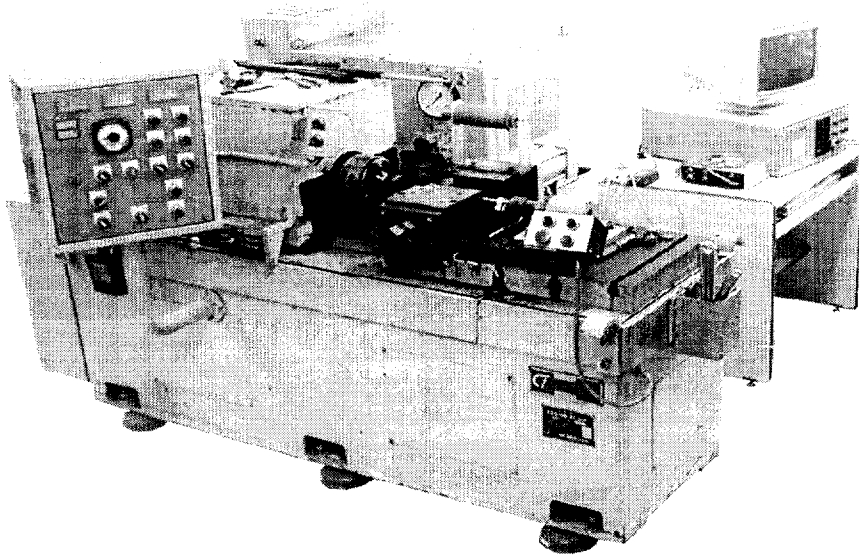


Fig. 6 TOHO TH 25 friction welding machine

본 실험에서는 사용된 마찰 용접재는 IN713LC와 SCM440에 대한 봉대 봉 이중재 마찰용접 최적조건을 결정하기 위해 참고문헌^{20), 21)}을 조사하여 회전수(n)를 결정 후 마찰 가열압력(P_1), 단조 가압력(P_2)을 결정하고, Table 5와 같이 여러 번 실험을 하여서 단조 가압시간(t_2)을 선택 후 마찰 가열시간(t_1)을 다양하게 변화시켜 실험하였다. 이음부의 강도는 인장강도 인장 흡수 에너지, 연신율 등을 계산하여 용접부의 강도와 인성이 모재보다 우수한 t_1 범위를 선정해서 최적 가열시간(t_1)을 결정하였다. IN713LC 시험편은 회전부의 유압척에 SCM440 시험편은 고정부 유압척에 고정 설치하여 마찰용접을 하였다. IN713C-SCM440의 이중재 마찰용접 최적의 조

건은 강도와 인성을 고려하여 Table 6과 같이 실험적으로 확인되었다²²⁾.

Table 6 Various conditions of dissimilar friction welding of SCM440 for
IN713LC

Rotating speed $n(\text{rpm})$	Heating pressure $P_1(\text{MPa})$	Forging pressure $P_2(\text{MPa})$	Heating time $t_1(\text{s})$	Forging time $t_2(\text{s})$	Total upset $U_T(\text{mm})$
2,000	140	180	5	4	6

4. 실험결과 및 고찰

IN713LC-SCM440 마찰용접부의 위치별 경도분포와 금속조직적 특성을 확인한 다음, 천연해수 환경에서, 비틀림 응력의 변화에 따라 120시간 동안 침지부식실험을 실시하였다. 그리고 시험편과 보조전극의 상대전극전위, 상대전류, 통전전압 등의 침지시간에 따른 변화, 중량감량에 의한 부식속도, 표면의 부식양식 등을 파악하여, 비교 분석하였다.

4-1 마찰용접부의 경도분포와 금속 조직적 특성

Fig. 7은 최적의 마찰용접 조건하에서, 마찰용접한 시험편의 경도분포를 나타낸다. 마이크로 비커스경도는 시험편의 중심부(center line) 및 표면에서 2 mm 깊이에서, 두 재료의 마찰용접 경계면(welded interface)으로부터 0.5 mm 간격으로 측정하였다. IN713LC 부위에서는 마찰용접 경계면에서, 미세경도 값이 증가중에 1 mm 부근에서 감소하기, 시작하여 2.5 mm 위치에서, 가장 작은 값을 나타냈다. 이후에 다시 증가 중에 5 mm 위치에서, 350~370(Hv) 정도의 일정한 값을 유지하였다. SCM440 부위에서는 경계면으로부터 1 mm 부근까지는 감소하여 2 mm까지 미세한 증가를 보이며 2.5 mm에서, 가장 낮은 값을 나타냈다. 이후에는 다시 증가하여, 4 mm 위치에서 300~350(Hv) 정도의 일정한 값을 유지하는 경향을 보였다. 경계면 중심으로 IN713LC 부위의 2.5 mm에서 SCM440 부위의 1.5 mm까지는 시험편의 중심부보다 표면에서 2 mm 깊이 위치의 경도값이 높은 경향을 보였지만 다른 부위에서는 낮은 경도값을 나타냈다. 마찰용접 경계부의 주변에서는 시험편의

중심보다 표면의 경도값이 높은 것은 마찰용접열에 의한 냉각속도의 차이로 나타난 결과로 사료된다.

일반적으로 급랭된 주조 조직인 용접부는 금속조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류응력 등으로 모재부보다 내식성이 낮다. 특히, 열영향부에서는 가압 마찰열에 의한 용접열화(weld decay)가 내식성에 큰 영향을 미친다²³⁾. IN713LC는 우수한 응력-파단 및 인장특성을 가진 Ni 기지의 초내열 합금이다. 이 합금은 주로 주조상태에서, 주로 사용되며, Fe의 양을 최소화하고, 열처리를 하거나 주조시 집중재를 사용함으로써 인장특성을 향상시키기도 한다.

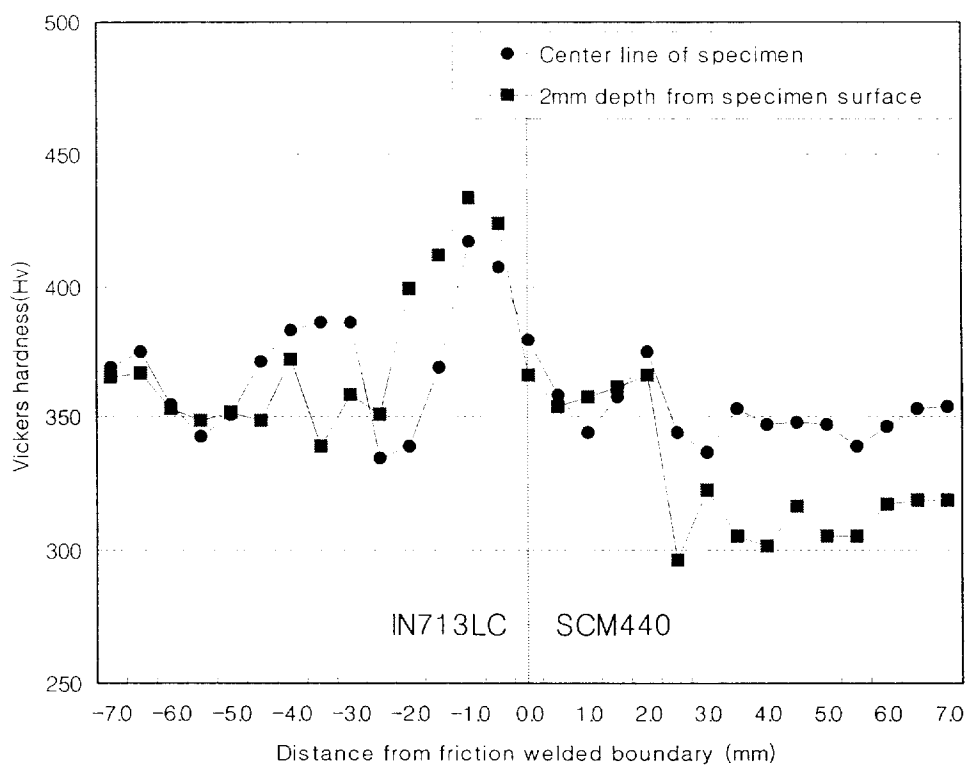


Fig. 7 Distribution of hardness at friction welded zone micro
 -Vickers hardness tester(weight=500gf)

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접부의 IN713LC 영역의 부위별 미세조직을 나타낸 것이다. 각 부위별로 결정립 분포와 탄화물 형태가 다르게 나타났으며, 마찰용접 부분의 결정립의 크기는 다른 부위에 비해 미세한 결정립을 형성하고 있다. 이는 주조과정에서 열전달과 주형내의 집중처리, 응고속도 등 주조 공정상의 변수에 의한 것이라고 판단된다. 결정립의 크기는 피로특성을 향상시켜 주며, 크리프 특성을 저하하므로 적절한 결정립의 크기의 제어가 요구된다.

SCM440은 일반적으로 높은 경화층, 높은 피로저항, 내마모성, 내충격성을 가지는 Cr-Mo 중탄소강으로 자동차, 선박용 등의 부속품, 기어, 볼트, 축, 플랜지, 펜치 등에 광범위하게 사용된다. 이 조직의 열처리는 인성이 큰 소르바이트(sorbite) 조직을 얻기 위한 조질처리(quenching-tempering)로서, 담금질(quenching)과 고온뜨임(tempering) 후 급랭된다. SCM440은 담금질하여, 얻어진 마르텐사이트(martensite)조직을 530~630℃에서 고온뜨임하면 시멘타이트(cementite)의 미세입자의 응집이 한층 진행된 조직이 된다. 이를 소르바이트(sorbite; tempered martensite)라고 한다. 소르바이트 조직은 페라이트(ferrite)와 시멘타이트의 혼합물로서, 트루스타이트(troostite)조직과 비교한 그 응집된 양상을 달리하고 있는 조직이다. 트루스타이트에 비해 경도는 낮지만 인성이 우수하고, 펄라이트(pearlite)와 비교해서, 높은 강도와 경도를 지니고 있다.

Fig. 8의 (d), (e), (f)는 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접부의 SCM440 영역의 부위별 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 8의 (d)는 시험편 가장자리의 경계면에 가까운 가압에 의한 마찰열에 의해 변화된 조직이고, 과열로 인한 조대한 주조결정이 존재한다. 압접부의 조직은 근본적으로 열간변형

법칙을 따른다. 압력과 압력온도에 따라 결정입자의 크기가 결정된다. 용접부의 조대한 입자와 주조조직은 동일한 조성인데도 불구하고 열간변형과 열처리한 기지금속보다 일반적으로 취성을 갖는다²⁴⁾.

Fig. 8의 (e), (f)는 열영향부에서 재결정 영역과 부분 변태영역 사이의 조직과 기지금속 조직으로 열영향부의 오른쪽은 조대화 영역에서 미시조직이고, 왼쪽은 기지금속에 가까운 조직이다²⁵⁾. 경계면을 중심으로 SCM440 부위는 버(burr)의 형성으로 경계층 3~4 mm의 Metal flow가 나타나고 백색으로 나타난 페라이트와 시멘타이트가 혼합된 소르바이트 조직을 관찰할 수 있으며, 냉각속도가 느린 중심부에서는 일부 베이나이트(bainite) 조직으로 추정되는 상이한 조직을 볼 수 있다. 경계면으로부터 멀어질수록 페라이트와 펄라이트의 혼합조직이 관찰되었으며, 경계면에서 2~3 mm의 위치의 조직은 다른 부위에 비해 조밀한 결정구조를 형성하고 있다는 것을 알 수 있었다.

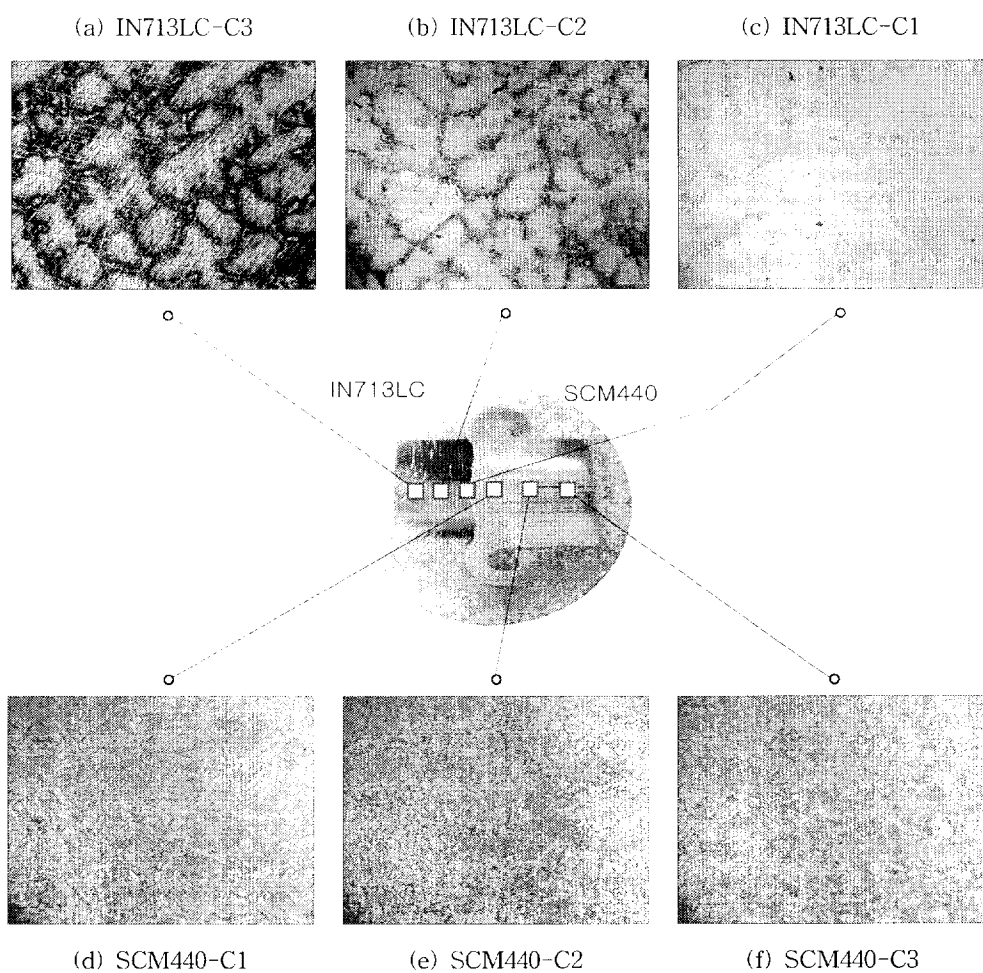


Fig. 8 Micro-structures of IN713LC-SCM440 dissimilar friction welded zone ($\times 100$, $\times 400$)

4-2 비틀림응력에 따른 전기화학적 부식거동

Table 7은 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접 용접부의 비틀림응력에 따른 침지부식실험에서 시험편과 보조전극과의 평균 상대전극전위와 평균 상대전류, 공급전압, 부식량 및 표면부식양식을 나타낸 것이다.

Table 7 Results of corrosion test using various torsional stress

Specimen No.	Torsional stress (MPa)	Electrode potential (V)	Corrosion current (mA)	Weight corrosion (mg)	Supply voltage (V)	Corrosion pattern
SP-1	0	-104	0.019	4.619	0.800	Ge, N
SP-2	100	-216	0.010	4.784	0.792	Ge, N
SP-3	200	-242	0.014	4.808	0.797	Ge, N
SP-4	300	-224	0.012	4.765	0.839	Ge, M

비틀림응력이 증가함에 따라 평균전극전위는 낮아지는 경향을 보였으나 300 MPa에서는 약간 증가하였다. 평균부식전류는 무부하상태에서 0.019mA 로써 가장 크고, 비틀림응력을 부하하였을 때에는 0.012mA 전후로 비슷한 경향을 보였다. 부식량은 200MPa에서는 4.808mg으로 가장 많았으며, 무부하 상태에서는 4.619mg으로 가장 작았다. 평균공급전압은 무부하 상태와 300MPa 부하응력에서는 0.800V, 0.839V로 대체로 높은 값을 나타냈으며, 다른 시험편에서는 0.79V 정도의 경향을 보였다.

Fig. 9는 침지시간의 경과에 따라 변화하는 상대전극 전위를 나타낸 것이다. 천연해수 환경에서의 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접부의 상대

전극전위는 초기에 비틀림응력에 관계없이 400 mV 정도로 거의 일정한 값을 보였으나, 12시간까지는 -200mV까지 급격히 저하하였다. 60시간까지는 0~-300mV 범위에서 상승과 하강을 반복하는 불안정한 값을 유지하였다가 그 후에는 -200~-400 mV 범위에서 대체로 일정한 값을 유지하였다. 초기에는 표면상태 또는 표면에 노출된 계재물들의 성상 등에 영향을 받기 때문에 전위차가 크게 나타으며, 시간이 경과하면서, 전극전위가 안정화 된다²⁶⁾. 비틀림응력이 작용하는 상태에서는 비슷한 부식전위를 나타냈으나, 200 MPa에서 가장 낮은 전위를 나타내지만, 무부하 상태에서는 다소 높은 부식전위를 나타냈다. 어떤 금속이나 합금은 부식 전해액에서, 그 자신의 특유한 부식전위를 가진다. IN713LC와 SCM440이 쌍을 이루면 더욱 활성(active negative)인 부식전위를 가진 SCM440이 과잉전자(excess electron)를 ⊕방향의 부식전위를 가진 IN713LC로 이동하게 된다. 갈바닉 전지에서 귀전위를 가진 IN713LC는 음극이 되어 부식속도가 감소하고, 활성전위를 가진 SCM440은 양극이 되어 우선적으로 갈바닉 부식에 의해 부식이 진행된다²⁷⁾.

Fig. 10은 침지시간의 경과함에 따라 변하는 상대전류를 나타낸 것이다. 천연해수 환경에서의 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접부의 초기의 상대전류는 300 MPa에서는 0.12mA 정도로 가장 크고, 다른 응력하에서는 0.10mA 정도로 일정하였으나 12시간까지는 0.04~0mA 정도로 급격히 감소하는 경향을 보였으며, 그 후 0~0.02 mV의 범위에서 상승과 하강을 반복하였지만 대체로 일정한 값을 나타냈다. 일반적으로 부식전류는 침지시간의 경과와 더불어 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 11은 침지시간에 따라 마찰용접 시험편에 공급된 평균전압을 나타

낸 것이다. 침지부식실험 회로에 공급된 전압은 대체로 초기값을 계속 유지하였지만 300 MPa 비틀림응력하에서는 24시간 이후부터 다른 응력하에
서보다 0.1V내의 높은 전압이 공급된 것으로 나타났다.

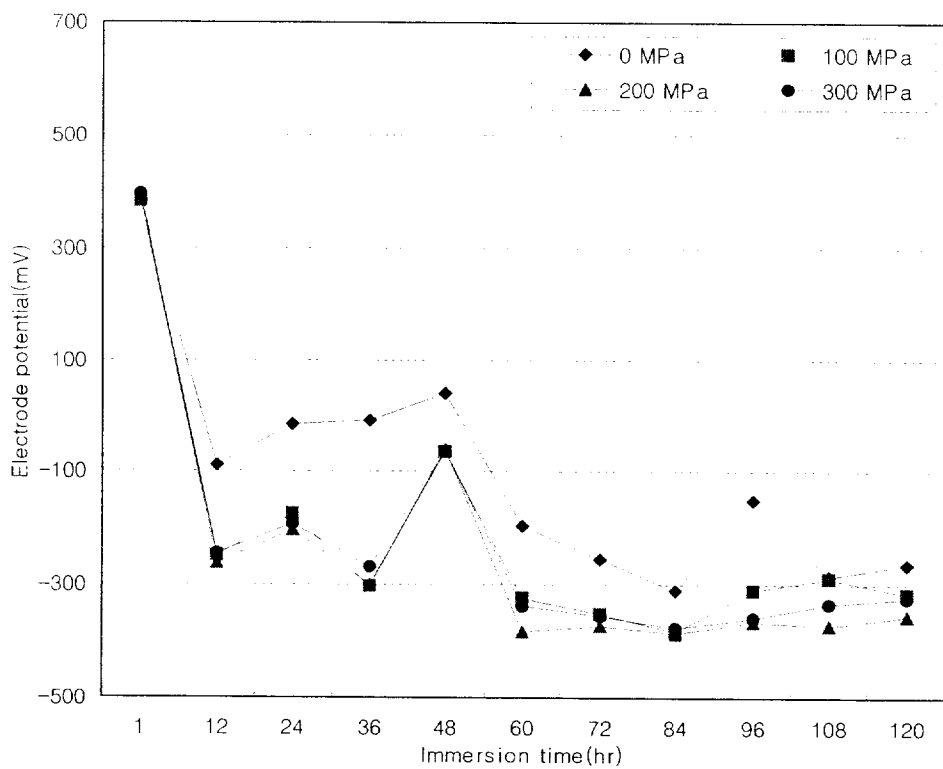


Fig. 9 Electrode potential as a function of immersion time with various torsional stress

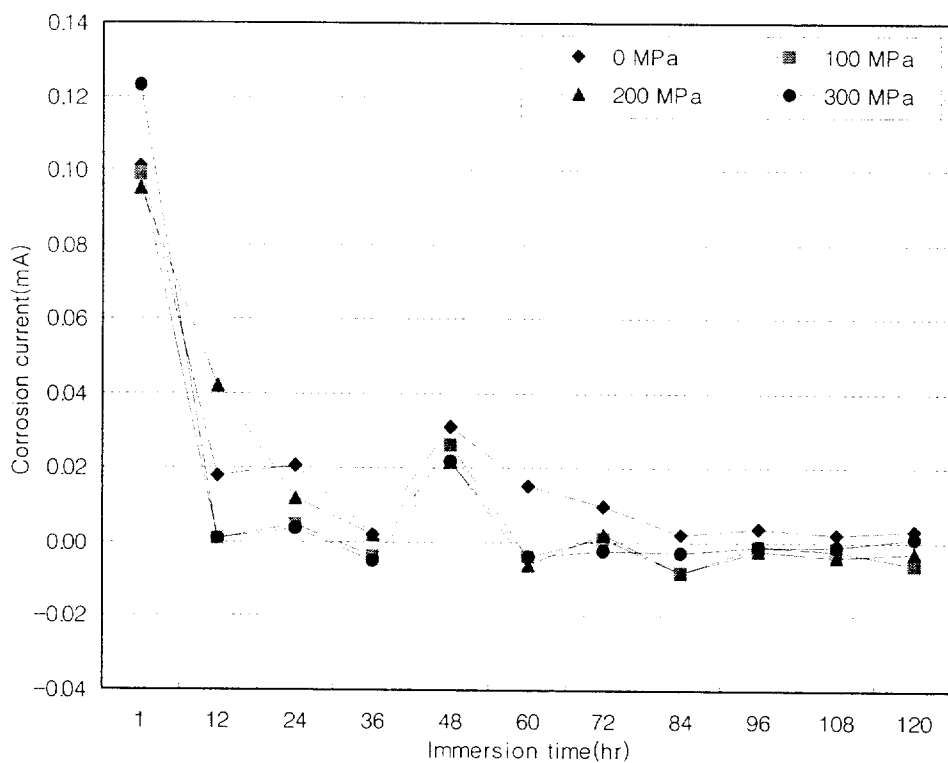


Fig.10 Corrosion current as a function of immersion time with various torsional stress

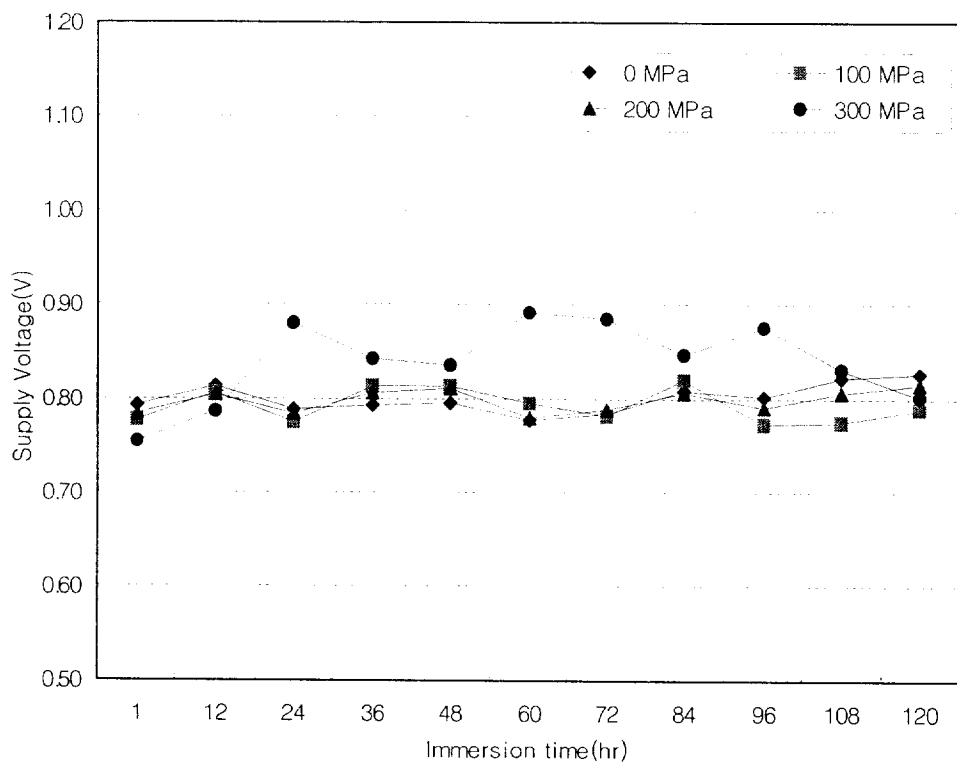


Fig. 11 Supply voltage as function of immersion time with various torsional stress

4-3 비틀림응력에 따른 표면의 부식양식

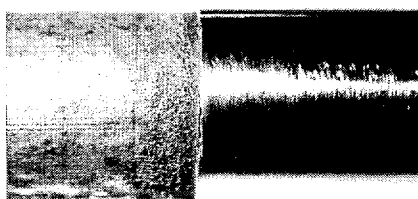
Fig. 12는 IN713LC-SCM440 이중재 마찰용접 시험편을 120시간(5일간) 비틀림응력 부식시험 후의 표면 부식양식을 나타낸 것이다. 일반적으로 마찰용접부의 경계면으로부터 IN713LC 영역의 2mm 떨어진 위치까지는 마찰열에 의한 γ' 상의 완전 고용영역이고, 2~5mm 떨어진 위치에서는 수지상간에 존재하는 γ' 상 일부가 고용되지 않은 부분 고용영역이며, 5mm 이상 떨어진 위치는 IN713LC의 기지조직이다. 금속 조직적 차이와 결정립의 조대화 및 잔류응력 등으로 기지금속보다 내식성이 낮아진다. 마찰 열영향부에서는 예열과 후열에 의한 용접열화(weld decay)가 내식성에 큰 영향을 미친다. 니켈(Ni)은 기전력 계열에서 수소전극보다 활성전위가 존재하며, 철(Fe)보다 귀방향의 전위를 가지고 있다. 그러므로 용해산소가 존재하지 않으면 비산화산(nonoxidizing acid)에서 부식을 크게 일으키지 않으며, 실온의 탈기된 물에서 열역학적으로 안정되어, 부식되지 않는다. 이것은 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 가 부식 생성물로서 형성되기 때문이며, $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 의 피막은 통기되고 있는 거의 모든 수용액에서 부동태화된다. 그렇지만 천연해수에 노출되면 공식(pitting)을 일으키게 된다²⁸⁾. 니켈합금은 탄화물의 입계석출에 의해서 뿐만 아니라 Cr, Mo, W, Nb 등의 금속간화합물 석출에 의해서도 용접부식(weld decay)과 칼날선 부식(knifeline attack)이 발생할 수 있으며, Ni-Mo 합금에서는 쉽게 일어난다²⁹⁾. 특히, 천연해수 환경에서는 3.5%의 NaCl을 함유하고, 있으므로 금속의 부식속도가 크다. 해수에서의 부식특성에 영향을 미치는 가장 중요한 원소는 Cl 이온이다. 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 O_2 또는 OH 등과 경쟁적으로 금속 표면에 흡착하게 되면 금속이온의 수화를 촉진시킴으로써, 금속이온이 더욱 용액 속으로 들어가게 되어, 부동태를 파괴한다. 이러한 부동태 파괴현상은 국부전지를 형성하게 되면서, 심한 공식으로 이어진다³⁰⁾.

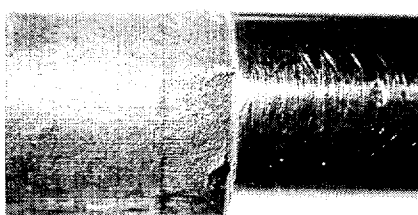
Fig. 12의 (a)는 무부하 상태에서의 표면부식양식이다. IN713LC는 갈바닉쌍으로 볼 때 SCM440에 비해 귀전위이므로 부식이 진행되지 않은 반면, SCM440 부분은 아주 심한 침식층이 형성되었고, 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 아주 좁은 공식(N)이 나타났다. 마찰용접 경계면에서 2 mm 떨어진 위치까지는 SCM440의 기지금속부에 비해 중위의 공식을 확인할 수 있었다. 이 부분은 2000 rpm의 고속회전과 순간적인 가압작용으로 발생한 마찰열이 급랭하면서, 금속조직의 불균질화를 초래하였으며, 천연해수 분위기에서 부식현상이 촉진된 것으로 판단된다. 그리고 IN713LC와 SCM440이 용접부의 경계면에서는 이종금속에 의한 갈바닉 형태의 국부전지가 형성되어, 귀전위의 IN713LC 영역에서 보다 SCM440 영역에서 부식이 촉진되어, 침식현상이 빠르게 진행되면서 깊은 경계층을 형성한 것으로 판단된다.

Fig. 12의 (b), (c), (d)는 100 MPa, 200 MPa 및 300 MPa의 비틀림응력하에서의 표면부식양식이다. 100 MPa의 작은 비틀림 응력하에서는 무부하상태에서 보다 경계면 부근에서 침식현상의 진행이 느렸으며, 경계면을 따라 형성되는 갈바닉 전지나 국부전지의 형성에 의해 작용하는 침식현상이 찾아볼 수 없었으며, 전반적으로 균일한 전면부식(Ge)과 좁은 공식(N)이 나타났다. 200 MPa에서는 갈바닉 전지의 형성에 의한 침식층이 형성되었으며, 이는 비틀림응력이 부식양식에 미약하게 영향을 미친 것으로 판단된다.

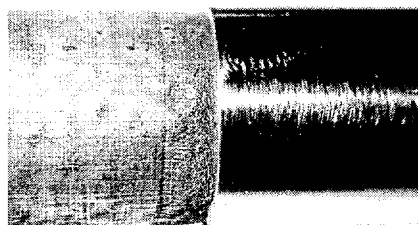
300 MPa에서는 경계면으로부터 2 mm까지의 침식정도가 다른 부위보다 커서 불규칙한 요철면을 형성함을 관찰할 수 있다. 또한 침식층의 경사면에 45°방향으로 형성된 비틀림 응력부식균열을 미약하게 확인할 수 있다. 표면 부식양식은 대체로 균일한 전면부식(Ge)과 중위의 공식(M)이 나타났다.



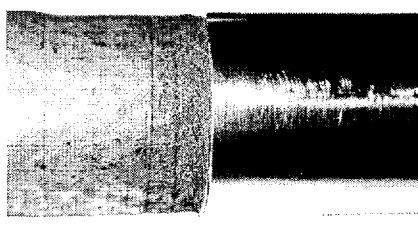
(a) 0 MPa



(b) 100 MPa



(c) 200 MPa



(d) 300 MPa

Fig. 12 Corrosion pattern of friction welded specimens with various torsional stress

4-4 부식속도에 미치는 비틀림응력의 영향

Fig. 13은 비틀림 응력에 따른 마찰용접 시험편의 부식속도와 평균공급 전압을 나타낸 것이다. 비틀림응력이 증가할수록 부식속도와 평균공급전압은 다소 증가하는 경향을 보였다.

침지부식실험 중에 시험편에 공급된 평균전압은 무부하 상태에서 가장 작았고, 300 MPa에서는 가장 높게 나타났으나, 비틀림응력 하에서의 평균공급 전류는 거의 차이가 없었다. 하지만 공급전압이 적을수록 부식속도가 크게 나타남을 알 수 있었다. 비틀림응력 하에서 부식속도가 가장 작은 300 MPa에서는 가장 큰 평균전압이 공급되었다. 전체적으로 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 부식속도는 평균공급전압에 반비례하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 비틀림응력에 따른 평균전극전위와 평균부식전류를 나타낸 것이다. 평균전극전위는 무부하 상태에서 가장 크게 나타났고, 부식속도가 가장 큰 200 MPa 비틀림응력 하에서 가장 작은 값을 나타냈다. 평균부식 전류는 0.01mA 정도로 부하응력에 관계없이 거의 일정한 값을 나타냈었으며, 무부하 상태에서는 평균전극전위는 -0.10mV 정도이고, 비틀림응력 하에서는 -0.2~0.24mV 정도로 나타났다. 평균전극전위가 작을수록 평균부식 전류는 크게 나타났다. 결국 부식속도는 부식전류가 낮고, 전극전위가 높거나, 또는 부식전류가 높고, 전극전위가 낮을수록 커지고, 공급전압이 높을수록 부식속도는 작음을 알 수 있었다.

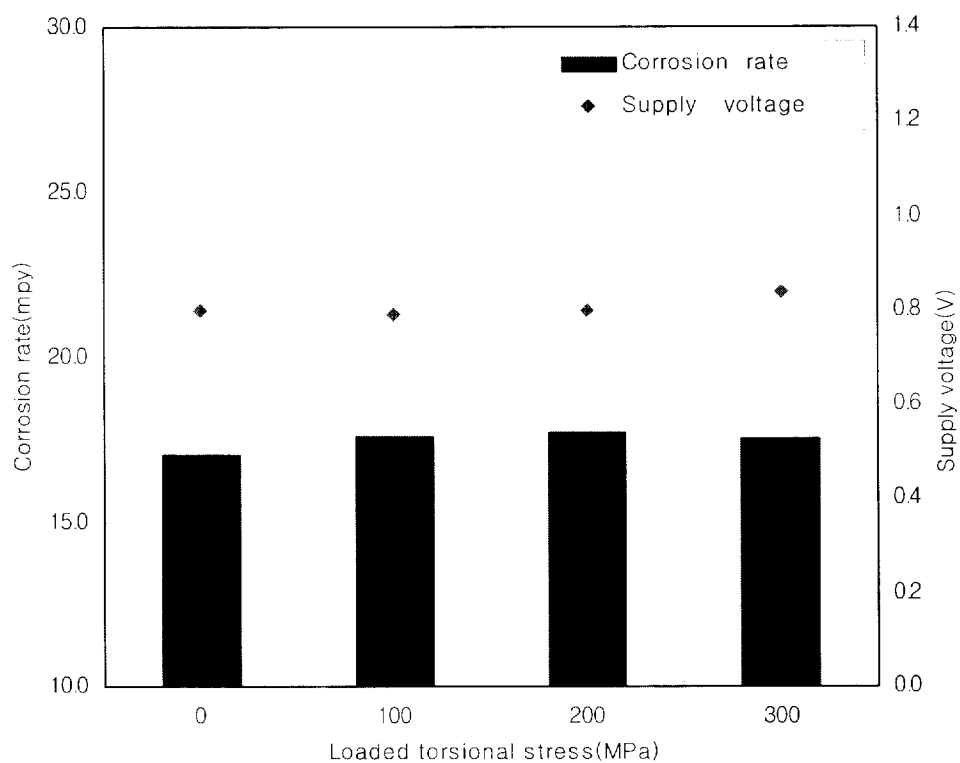


Fig. 14 Corrosion rate and supply voltage as function of loaded torsional stress

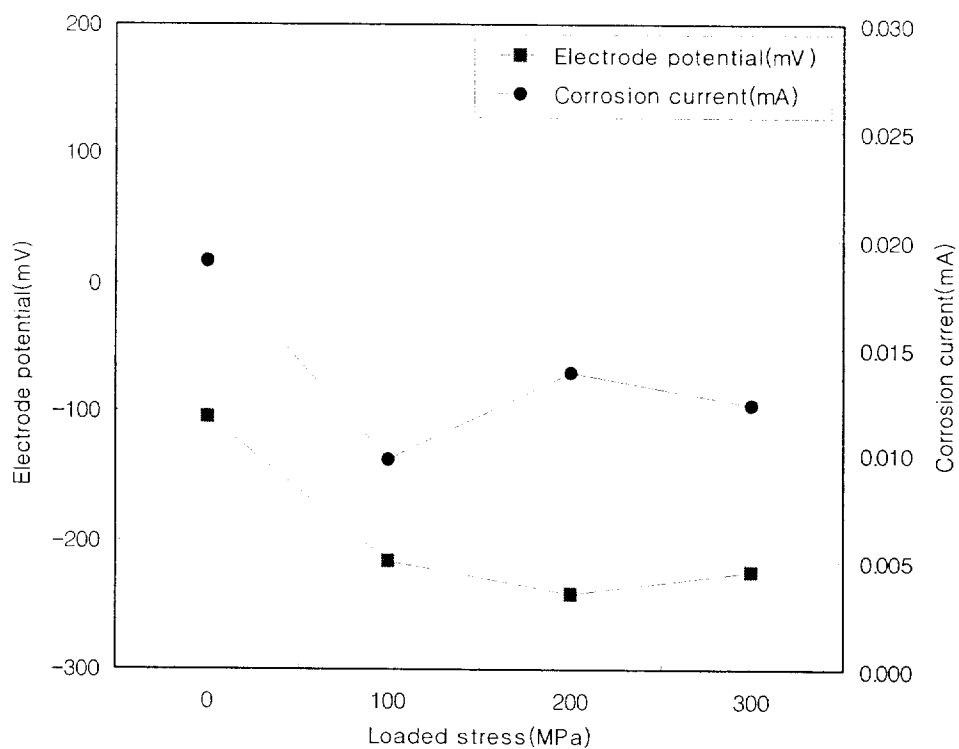


Fig. 14 Electric potential and corrosion current as function of loaded torsional stress

5. 결 론

천연해수 환경에서 IN713LC-SCM440 이종재 마찰용접부의 비틀림 응력에 따른 침식부식실험을 실시한 결과는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SCM440 영역은 갈바닉 부식에 의한 급격한 침식현상으로 전면부식과 좁은 공식이 발생하였으며, IN713LC 영역은 부식이 진행되지 않았다.
2. 평균전위 및 부식전류는 초기에는 불규칙하게 변화하며, 대체적으로 감소하는 경향을 보이면서 안정되었다.
3. 부식속도는 부하응력이 클수록 감소하는 경향을 보였으나, 200 MPa 응력에서 가장 크게 나타났다.
4. 상대부식전류가 낮고, 전극전위가 높을수록 부식속도가 크고, 공급전압이 높을수록 부식속도는 작았다.

참고 문헌

- 1) 오세규, 양형태, 김현경, 자동차 크랭크 축용 강재의 봉대봉 동종재 마찰용접의 피로강도 특성 및 AE 평가, 한국해양공학회지, 제13권 제2호, pp. 74~82, (1999).
- 2) 摩擦壓接研究會, 摩擦壓接, コロナ社, pp. 46, pp. 145~150, 184, (1976).
- 3) 日本摩擦壓接協會, 摩擦壓接協會 20年誌, pp. 1~106, (1984).
- 4) AWS, Welding Handbook, Vol. 2, pp. 747, pp. 672~763, (1991).
- 5) 김영석, 김승언, 박노광, 김학민, 니켈기 초내열합금 IN713LC의 크리프 성질에 미치는 열처리 및 HIP 처리의 효과, 대한금속학회지, Vol. 28, No. 10, pp. 866~872, (1990).
- 6) G. E. Waskielewski and N. R. Lindblad : Superalloys Processing, Proc. 2nd. Int. Conf. AIME, MCIC-72-10, (1972).
- 7) 박노광, 염종택, 나영상, 선박용 과급기 로터 접합체의 접합부 특성 평가 및 후열처리 기술 개발에 관한 연구, 제1단계 보고서, pp. 5~7. (2003).
- 8) 전대회 ; 부식과 방식의 관리, 도서출판 일중사, p. 7, (1985).
- 9) 이학렬, 금속부식공학, 연경문화사, pp. 3~4, pp. 221~237, (1995).
- 10) 맹완영, 남태운, 고온·고압 환경하에서 정전위법에 의한 인코넬합금의 입계응력부식 저항성 평가, 대한금속학회지, Vol. 35, No. 8, pp. 1019~1026, (1997).
- 11) 임우조 외3 ; 부식과 방식, 원창출판사, pp. 99~101, pp. 330~336, (1996).
- 12) 이학렬, 금속부식공학, 연경문화사, pp. 90~95, (2000).

- 13) 정선모, 표준기계설계학, 동명사, pp. 46~65, (1982).
- 14) 이학열 ; 금속부식공학, 연경문화사, pp. 351~378, (1997).
- 15) 임우조 외3 ; 부식과 방식, 원창출판사, pp. 397~425, (1996).
- 16) 이학열 ; 금속부식공학, 연경문화사, pp. 372~373, (1997).
- 17) 안용식 외4 ; AISE 321강의 용접 열영향부의 부식거동에 관한 연구,
한국부식학회지, Vol. 23, No. 4, pp. 233~242, (1994).
- 18) Champion, F. A. ; J. Inst. Met., 37, 48, (1948).
- 19) 임우조 외3 ; 부식과 방식, 원창출판사, pp. 423~424, (1996).
- 20) 摩擦壓接研究會, “摩擦壓接”, コロナ社, pp. 46, pp. 145~150, pp. 184,
(1976).
- 21) 日本摩擦壓接協會, “摩擦壓接協會 20年誌”, pp. 31, (1984).
- 22) 박형동, 오세규, 권상우, 터빈용 내열강의 이종재 마찰용접 최적화와
AE에 의한 품질 실시간 평가에 관한 연구(I)-마찰용접 최적화, 한국
해양공학회지, 제13권, 제3(I)호, pp. 83~91, (1999).
- 23) 임우조 외3 ; 부식과 방식, 원창출판사, pp. 330~336, (1996).
- 24) 김석윤, 김정근, 김창주, 이순인, 금속조직학, 학문사, pp. 271~276, (1993).
- 25) 오범석, 최병진, 용접야금학, 원창출판사, pp. 67~92, 2002.
- 26) 조상근, 공유식, 김영대, “A5083-H116 알루미늄 합금재 용접부의
부하응력에 따른 부식특성의 영향”, 한국동력기계공학회지, 제8권,
제3호, pp. 44~51, (2004).
- 27) 이의호, 이학렬, 황운석, 김광근, 부식과 방식의 원리, 도서출판 동화기
술, pp. 217~244, (2003).
- 28) 이학렬, 금속부식공학, 연경문화사, pp. 274~277, (2000).

- 29) 이의호, 이학렬, 황운석, 김광근, 부식과 망식의 원리, 도서출판 동화기술, pp. 363~398, (2002).
- 30) 이학렬, 금속부식공학, 연경문화사, pp. 163~169, (2000).

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 여러 가지 부족한 저에게 많은 격려와 용기를 주시고 높은 식견으로 세심한 지도를 해 주신 金榮大 指導教授님께 머리숙여 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 중에도 논문심사를 맡아 많은 지도와 조언을 하여주신 金亨資 教授님, 朴卿東 教授님께 감사드리며, 아울러 언제나 아낌없이 많은 가르침을 베풀어주신 機械設計學科 教授님들께 깊은 감사를 드립니다.

그동안 본 연구를 수행함에 있어서 실험장치 제작에서부터 실험방법, 자료정리, 실험결과 및 고찰에 이르기까지 많은 도움을 주신 부산공업고등학교 조상근 선생님 바쁜 학교 업무에도 불구하고 수고한 김병각님 에게도 진심으로 감사를 드립니다.

저의 학업이 원만히 이루어 질 수 있도록 아낌없는 격려와 시간적 배려로 지원해주신 한전기공(주) 당진사업소 조한섭 소장님과 모든 직원 동료분께 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 물심양면으로 도와주신 큰형님을 비롯하여, 형제자매 모든분께 감사드리며, 멀리서 또는 가까이에서 도움과 격려를 아끼지 않은 친척들과 지인 모두에게 감사의 마음 전하고자 합니다.

2005年 12月

俞 善 拜上