



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

工 學 碩 士 學 位 論 文

船舶用 構造 鎔接材의 腐蝕 및
疲勞破壞 強度 研究



2007年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

鄭 朱 和

工 學 碩 士 學 位 論 文

船舶用 構造 鎔接材의 腐蝕 및
疲勞破壞 強度 研究

指導教授 朴 卿 東

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007년 2月

釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

鄭 朱 和

목 차

Nomenclature	iv
제 1 장 서론	1
제 2 장 이론적 배경	2
2.1 피로시험의 개념 및 목적	2
2.2 피로시험법 및 피로시험기	3
2.2.1 피로시험법(S-N곡선)	3
2.2.2 전피로영역	5
2.2.3 피로시험기	13
2.3 피로균열의 파괴역학적 개념	15
2.4 피로균열진전거동	19
2.5 금속부식의 이론	22
2.5.1 이종금속의 부식	22
2.5.2 부식속도에 미치는 요인	25
2.5.3 부동태	27
제 3 장 실험장치 및 방법	29
3.1 시험편	29
3.2 실험장치	31

3.3 실험방법	32
제 4 장 실험결과 및 고찰	33
4.1 경도관찰	33
4.2 침지 1440시간의 무게감량	34
4.2.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 무게감량	34
4.2.2 6% FeCl ₃ 수용액에서 용접별 무게감량	36
4.3 침지 2160시간의 무게감량	38
4.3.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 무게감량	38
4.3.2 6% FeCl ₃ 수용액에서 용접별 무게감량	41
4.4 침지 4320시간의 무게감량	43
4.4.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 무게감량	43
4.4.2 6% FeCl ₃ 수용액에서 용접별 무게감량	45
4.5 침지 1440시간 동안의 부식전위변화	47
4.5.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 전위변화	47
4.5.2 6% FeCl ₃ 수용액에서 용접별 전위변화	48
4.6 침지 2160시간 동안의 부식전위변화	49
4.6.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 전위변화	49
4.6.2 6% FeCl ₃ 수용액에서 용접별 전위변화	50
4.7 침지 4320시간 동안의 부식전위변화	51
4.7.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 전위변화	51

4.7.2 6% FeCl_3 수용액에서 용접별 전위변화	52
제 5 장 용접별 2160시간의 부식피로강도 결과	53
5.1 3.5% NaCl 수용액에서 2160시간의 부식피로강도	53
5.1.1 SMAW에 의한 용접재의 결과	53
5.1.2 FCAW에 의한 용접재의 결과	54
5.1.3 SAW에 의한 용접재의 결과	55
5.1.4 용접방법별 결과	56
5.1.5 3.5% NaCl 수용액에서 피로파괴강도비교	58
5.2 6% FeCl_3 수용액에서 2160시간의 부식피로강도	60
5.2.1 SMAW에 의한 용접재의 결과	60
5.2.2 FCAW에 의한 용접재의 결과	61
5.2.3 SAW에 의한 용접재의 결과	62
5.2.4 용접방법별 결과	63
5.2.5 6% FeCl_3 수용액 피로파괴강도비교	65
제 6 장 결론	67
참고문헌	70
Abstract	72
감사의 글	74

Nomenclature

da/dN	: Fatigue crack growth rate
S	: Stress
ΔK	: Stress intensity factor range
$\Delta \varepsilon_p$	: Plasticity transformation range
P	: Load
L	: Length of specimen
N_f	: Repeat number of till fracture
σ_K	: Critical stress
δ_T^u	: Repeat yield point
σ_{yn}^u	: Repeat elasticity limit
σ_P^H	: Dynamic yield point
σ_w	: Time strength

제 1 장 서 론

용접은 작업의 용이성, 구조물의 단순화 등의 이유로 선박, 차량 등의 부품이나 구조물 접합방법 중 하나로 널리 사용되고 있다. 그러나, 용접은 국부적으로 단시간에 가열, 냉각되어 이루어지기 때문에 용접부의 변형수축이 발생되고, 용접된 재료에 잔류응력이 생겨 균열발생 또는 균열전파로 인해 안전성에 악영향을 미치게 된다. 이와 같이 용접부에 강도를 저하시키는 요인이 많으므로 이들을 개선하고자 많은 연구가 진행되고 있지만, 용접구조물의 부식과 반복적인 하중의 작용으로 용접구조물의 약 80%이상이 피로에 의한 파괴가 일어나고 있다고 한다. 그러나 피로의 진행은 외형상의 변화를 거의 수반하지 않고 파괴가 갑자기 일어나므로 큰 사고의 원인이 되는 것이 많다.^(1,2) 특히, 선박 구조물의 경우 모재보다는 용접부에서 결함이 발생할 확률이 높아서 안정성 평가에 있어서 가장 중요한 인자로 자리 잡고 있다. 이는 용접부의 경우 각종 초기결함, 국부적 응력, 변형집중, 잔류응력, 열영향부의 재료의 국부적인 열화 등 복잡한 야금학적, 역학적 특성^(3,4)을 지니고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 선박 구조물의 용접부의 부식 및 부식피로 특성을 정량화하기 위해 용접방법 및 용접부 형상에 따른 부식 및 부식피로실험을 실시하여 용접부위에 대한 파괴 성장거동 및 잔류수명^(5,6)을 평가하고자 한다. 이처럼 부식피로하중 하에서 각각 시험편의 S-N선도를 산출해 현재 선박 구조물에서 문제점으로 지적되고 있는 각종 용접부에 대한 부식특성 및 부식피로수명을 구하여 작업성의 효율증대와 이러한 연구결과로 인해 피로파괴로 인한 안전사고를 예방하고 유지보수 비용 절감 및 적절한 보수주기를 결정 및 설계에 기여하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 피로시험의 개념 및 목적

바늘은 1회만 굽히면 부러지지 않지만, 몇 번의 굽힘을 반복한 뒤에는 재질이 견고하고, 동시에 여리게 된다. 이와 같이 반복되는 부하에 의한 재질의 변화를 피로(fatigue)라고 한다. 그리고 어떤 한도까지 피로를 진행하면 파단한다. 이것이 피로파괴(fatigue fracture)이다. 실용재료는 완전 무결한 것이 아니라, 많거나 적거나 내부결함이나 불균질성, 또는 원자배열의 흐트러짐을 포함하고 있으며, 작은 응력이 있어도 완전한 탄성거동을 나타내지 않는다. 항복점 이하의 응력에서도 반복하여 부하하면 미시적으로 변형이 축적되어 재질의 변화가 일어난다. 이것이 피로의 기구이다.⁽⁷⁾

운동상태에 있는 기계는 사용시간이 경과함에 따라서 피로가 진행된다. 한편 기계부품은 사용 중에 마모가 진행되고, 점차로 경도가 저하된다. 이것이 서서히 진행되므로 사고를 미연에 방지하는 것이 비교적 용이하다. 그러나 피로의 진행은 외형상의 변화를 거의 수반하지 않고, 따라서 파괴가 갑자기 일어나므로 큰 사고의 원인이 되는 것이 많다. 마모 및 피로파괴가 실제 기계부품의 파손 원인의 대부분을 차지하지만, 피로파괴에 대한 완전성의 확보는 기계설계상의 최대중요사항의 하나이다. 실용기계부품은 복잡한 변동응력을 받지만 단순반복응력하에서 피로하기 어려운 재료는 복잡한 응력의 반복 상태에서도 대체로 강하다⁽⁸⁾고 생각되기 때문에 특별한 경우를 제외하고, 각종 재료의 피로강도의 평가는 단순한 반복응력에 대한 시험을 하여 정한다.

이처럼 피로시험이란 일반적으로 금속의 피로특성을 정량화 하기위한 시험으로써 재료가 어떤 응력 범위의 반복 하중을 받을 때 파단되는 회수를 구하여 피로 수명을 평가하는 것이다.

2.2 피로시험법 및 피로시험기

2.2.1 피로시험법(S-N곡선)

단순반복하여 응력을 부하하는 데는 Fig. 1과 같이 평균응력이 0인 경우(보통 이것을 양진이라고 한다)나 최대응력 또는 최소응력의 한쪽이 0 또는 일정 값으로, 한방향의 힘만이 반복하여 가해지는 경우(편진)등 각종 형식이 있으나 양진⁽⁹⁾은 시험편의 치수변화가 일어나지 않으므로 양진시험을 하는 것이 가장 보편적이다.

세로축에 응력진폭(또는 최대응력) S를 취하고, 횡축에 피로 파단하기까지의 응력반복수 N을 취하여 Fig. 2와 같이 실험값을 정리한 것을 S-N곡선이라고 한다. 데이터가 될 수 있는 한 직선상에 오도록 N은 대수눈금으로 취하지만, S도 또한 대수눈금으로 취한 쪽이 편리할 때도 있다.⁽¹⁰⁾

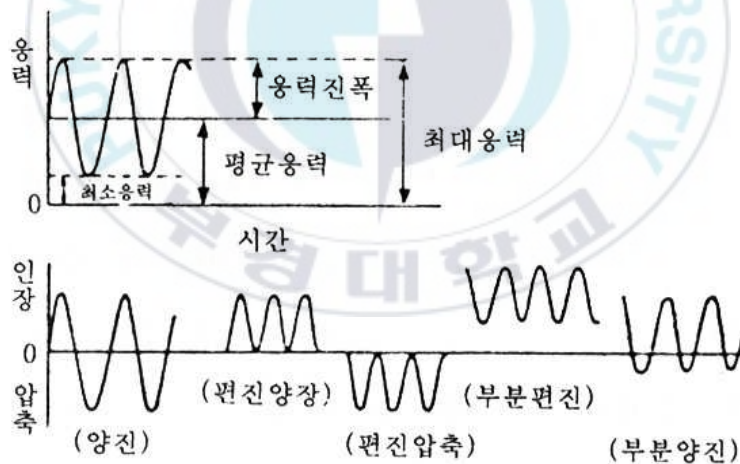


Fig. 1 Kind of simple repeated stress

Fig. 2의 예와 같이 S 가 작을수록 N 은 크지만, 어떤 한계의 S 이하의 응력에서 급격히 N 이 커지고, 파단은 사실상 일어나지 않게 된다고 생각되는 경우가 철강재료에서 종종 발견된다. 이 한계응력을 내구한도(endurance limit) 또는 피로한도(fatigue limit)라고 한다. 철강재료 이외에는 명확한 피로한도를 나타내지 않는 경우가 많다. Fig. 2의 (b)는 모넬메탈(Ni-Cu합금)의 S - N 선도이다. 이와 같은 경우는 N 이 10^8 또는 10^7 이 되는 S 를 내구한도이라고 할 때가 많다. 또한 피로한도보다 높은 반복응력에서 지정된 횟수의 반복에 견디는 응력의 상한을 시간강도라고 하고 이것을 $\sigma_w(10^5)$ 와 같이 나타낸다. 피로한도, 시간강도의 총칭을 피로강도라고 한다.^(11,12) 반복응력을 받는 기계설계에 있어서는 피로한도 이상의 응력을 가하지 않도록 해야 하므로, 피로시험은 실용적으로 훨씬 중요하다.

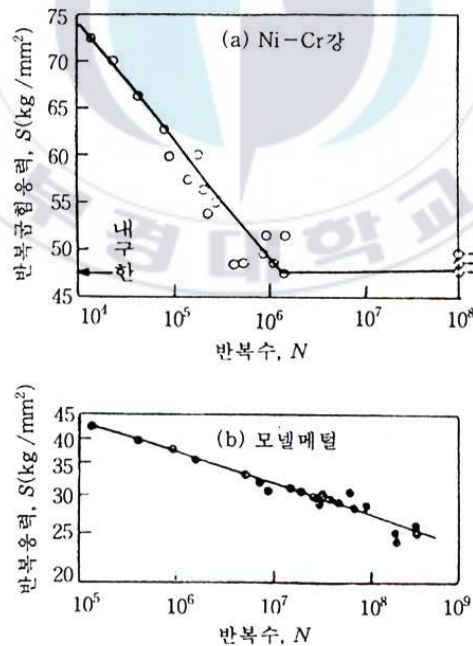


Fig. 2 Example of S - N diagram

인자양도와 같은 정적 강도에서 피로한도까지의 응력범위에 이르는 완전 피로곡선을 개략적으로 나타내면 Fig. 3과 같이 많은 특징적 부분과 굴곡점이 있으나 주로 저사이클 피로영역과 고사이클 피로영역으로 구분되며 이들의 경계는 동적 항복점, 즉 피로시험에 의해 결정되는 항복점이다.

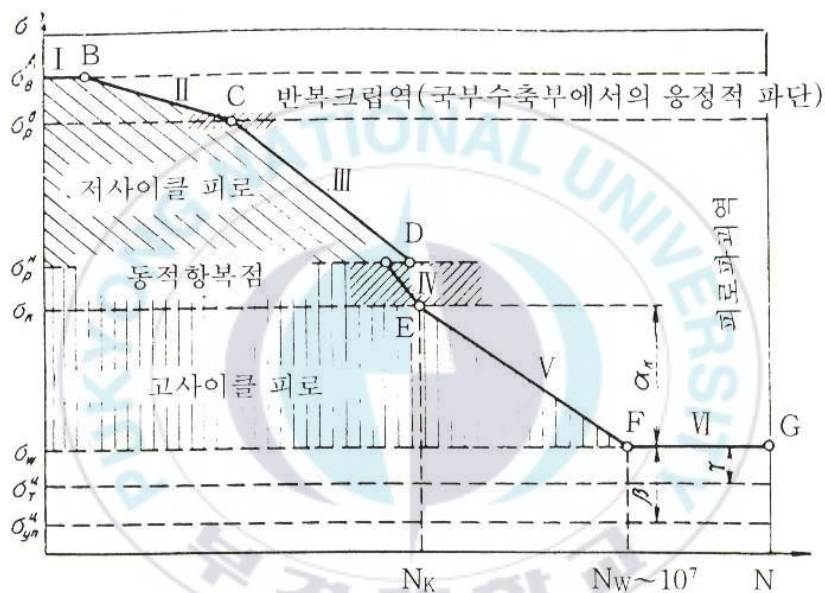


Fig. 3 Whole fatigue zone

저사이클 피로영역은 그림에서 ABCE인 $\sigma_B > \sigma_P^B \sigma_P^H$ 응력범위이며 이런 응력의 작용하에서는 적용된 에너지가 최초 사이클로부터 미시균열 발생에 소비되고 이 영역에서는 한 사이클당 소성변형과 파괴까지의 반복수 간에 어떤 관계가 있다. 저사이클과 고사이클 피로인 σ_P^H 와 σ_K 의 응력 간에 피로파괴의 천이영역이 존재하며 여기서 σ_P^H 는 동적 항복점과 같다고 본다. 천이영역 이하 응력에서의 피로파괴는 고사이클 피로영역 내에 들어가며 고사이클 피로영역 이하의 $\sigma < \sigma_w$ 에서는 무해한 손

상영역이 존재하고 이 영역 내에서는 반복항복점 δ_T^u 와 반복탄성한 σ_{yn}^u 가 있다.

가) 피로곡선의 굴곡점과 불연속점

저사이클에서 고사이클 피로로의 천이에 있어서 전 피로곡선 상에 몇 번 나타나는 굴곡점과 불연속점 중에서 우선 굴곡점이 존재하는 가능성에 대해 Weibull이 처음으로 밝혔으며 그는 피로곡선은 양대수 좌표에서 보통 하나의 직선으로 표시되나 다수 시험편에 의한 통계적 종합결과는 엄밀히 불연속점을 갖는 직선들의 집합이라 하였다. 또한 불연속점에 대해서는, 피로곡선의 불연속점과 굴곡점은 동일한 과정에서, 즉 어느 부하 사이클에서 초미시적 또는 미시적 크기의 균열이 생기는 정도의 응력에 달하면 소성변형과 파괴가 촉진되는 과정이 나타난다고 본다. 이것은 시험편의 온도 상승과 손상과정의 급격화를 수반하며 다른 한편에서는 경화과정의 격화(전위밀도 상승과 동적 변형시효에 의한 전위의 고착)를 수반한다. 이런 과정이 모두 곡선의 불연속이 되며 이에 따라 저사이클 피로와 전형적인 피로파괴 영역은 피로의 임계응력 부근 천이영역에 의해 연속성을 상실한다.

이상의 해석으로부터 다음과 같은 불연속점의 규칙성이 제안되고 있다.

- 1) 수명증가나 수명감소 쪽으로 이행하는 두 가지 형상의 불연속점이 존재한다.
- 2) 재료의 구조상태, 응력의 반복속도와 형식, 시편형상, 시험온도 및 표면상태 등의 많은 인자가 불연속점의 원인이 된다.
- 3) 불연속점의 원인을 설명하는 많은 가설이 제기되었으며 그 예로 샤파린의 공공설, Williams의 표면층설, Mori 등의 조직변화설, 피로의 임계응력 σ_K 에서 굴곡점이 나타난다는 설 및 응력상태 반복과 불연속점의 출현을 관계한 설 등이 있다.^(13,14)
- 4) 굴곡점이나 불연속점이 출현하는 응력수준은 그 피로한의 위치를

어느 정도 변화시킨다.

관찰된 굴곡점에 대한 수명이 102~106의 넓은 주기 범위에서 확인 한 점을 고려하면 몇 가지 본질적으로 다른 굴곡점이나 불연속점이 존재한다는 결론에 달한다.

일반적인 경우, 전피로곡선에는 세 곳의 천이영역(불연속점, 굴곡점)이 나타난다.

첫 번째 위치는 Fig. 3에서 저사이클 피로영역 II와 III의 사이 점 C 부근이다. 여기서는 반복변형과 피로손상의 집적과정이 서로 영향을 미치며 국부수축에 피로균열이 나타난다. 이 천이구간의 폭은 재료 및 사이클형상에 따라 다르다.

두 번째 위치는 동적 항복점(점D) 부근에 존재하는 것으로 불연속점에 대응하는 반복수는 넓은 범위에서 변화하며 그 특성과도 별도이다.

세 번째 위치는 동적 항복점과 일치하는 정도의 임계응력 σ_K 부근에 존재하며 그 이상에서는 최초 주기에서부터 초기균열이 발생하고 표면층에서는 진행의 우세에 의해 피로의 잠복기가 존재하지 않는다. 이때의 초기균열 수는 많지 않고 재료의 연화 경향은 아직 없다.

나) 저사이클 피로영역

저사이클 피로영역은 Fig. 3에서 I, II, III의 세 부분으로 나누어지며 제 I 영역인 응정적 파단부는 최초 부하사이클 또는 100회 이내에서 파단되는 점이다. 여기서 정적 인장강도에 대응하는 점 A와 이 수준에서의 반복수명 점 B와의 비교는 어렵다. 그것은 인장강도로서 국부수축형성부의 진파단응력이 아니고 시편의 초기 단명에 의한 최대 파괴응력을 취하고 있기 때문이다.

제 II영역인 반복 creep 부분에서는 소성변형의 축적이 반복수에 따라 연속적으로 증가함이 특징이다.^(15,16) 파괴는 응정적(凝靜的) 양상을 나타내어 국부수축 형성을 수반하여 이 부분에서 파괴는 1회 부하에서의 파괴와 외견상 정도 차이는 없다. 그러나 국부수축부에서는 모두 피

로균열자리가 보이며 그 길이는 사이클형상, 시편형상 및 재료상태 등에 의해 결정된다. 경화하는 재료에서는 변형의 축적이 없어 반복 creep부가 없는 피로파괴부만 보인다.

제 III영역인 거시적 반복소성변형을 수반하는 피로파괴부에서는 반복 creep시 보다 소성변형의 수축이 적고 파괴에 앞서 피로균열이 생성된다. 이 변형과정에서 경화하는 재료는 응력이 증가하고, 연화하는 재료는 응력이 감소가 일어나며 최종 파단부가 시편 중심부에 있음이 저사이클 피로파단의 특징이다.

저사이클 영역에서 반복부하에 의한 재료의 거동에 관해서는 상세히 연구되어 왔으며 이를 열거하면 다음과 같다.

- 1) 반복경화와 연화의 해석
- 2) 정적 변형에서의 최대 변형과 반복 부하 하에서 재료의 거동 간 상호관계
- 3) 정적 부하시 재료의 기계적 특성에 미치는 반복 부하의 영향
- 4) 반복 부하에서의 파괴와 변형확대 에너지 량

위의 1), 2), 3)은 hysteresis loop에 의해 결정된 소성변형의 측정이나 수학적 기술에 기초를 두며, 4)는 재료의 열역학적 특성에 기초를 두고 있다.

반복 부하와 정적 부하에 있어서 재료의 거동관계를 조사한 Manson 과 Coffin은 각각 저사이클 피로에서의 소성변형폭($\Delta \epsilon_p$)과 파괴까지의 반복수(N_f)간의 관계를 구하였다.

다) 고사이클 피로영역

σ_K 에서부터 σ_W 까지의 응력범위에서 피로과정은 많은 기간과 단계로 나누어지며 일반적으로 tempering한 금속을 예로 들면 피로과정은 Fig. 4에서와 같이 조직과 물성변화에 따라 4단계로 나누어 볼 수 있다.

V-1 ; 결정격자의 왜곡이 일어나는 잠복기(0~3곡선)

V-2 ; 초미시균열 발생과 확대로 금속의 연속성이 상실되는 연화기
(3~4곡선)

V-3 ; 임계 크기의 거시균열까지 균열 확대기(4~5곡선)

V-4 ; 최종 파단기(5~6곡선)

피로의 잠복기(V-1)은 경우에 따라 다시 세 단계로 구분된다.

1) 반복 미소향복단계(0~1곡선)

최초 주기에서 1곡선까지의 영역으로, 이 단계에서는 일반 기계적 성질은 변하지 않으며 전위밀도는 입계를 따라 증가하고 부결정립계에서는 새로운 전위가 발생하여 이에 따른 미시적 소성변형이 나타난다. 또한 주목할 만한 특징은 최초 부하사이클에서 결정립 깊이의 표면층에 매우 격심한 소성변형을 보이며 이러한 원인규명은 일부 시도되고 있다.

2) 반복 항복단계(1~2곡선)

반복 항복단계의 초기는 거시적 변화, 즉 hysteresis loop의 폭이 현저히 증가함과 관련이 있다. 그러나 거시적 연화단계에서는 다시 아주 미미한 경화가 일어나며 이것이 연화속도를 감소시킨다. 이 때 재료 전체에서는 거시적 소성변형이 진행되고, 입계나 개재물 주위에서는 전위밀도가 급격히 증가하며, 교차전위도 다수 발생한다. 표면층의 전위는 직선적으로 집적되며 경우에 따라서, 부하가 계속됨에 따라 피로 slip band가 형성된다. 이 단계의 종료 후에도 표면층에서는 큰 전위밀도가 유지된다.

3) 반복 경화단계(2~3곡선)

tempering 재의 반복경화 단계에 있어서는 전위밀도의 증가기간이 보다 길고 현저히 발달된 전위 cell 구조가 형성되고 표면층에서는 부동 slip band가 발달하여, 이 단계 최후에는 slip band에 최초의 초미시균열이 나타나기 시작하여 항복점과 순간적 탄성율은 증가하나 재료의 연성은 다소 감소한다. 전위구조 및 물리적, 기계적 특성이 변화하고 초미시균열 발생이 시작되며 피로과정 잠복기의 종료를 나타낸다.

4) 초미시균열 발생에서 거시적 크기까지의 확대단계(3~4곡선)

여기서는 표면의 부동 slip band 수가 서서히 증가하고 slip band에 존재하는 초미시균열이 합체되어 결정립 크기를 넘지않는 미시균열로 성장한다. 이러한 slip band에 인접한 영역에서는 동적 변형시효와 경화과정이 일어나므로 그 후의 반복부하는 균열확대에 영향을 미치지 않는다. 이 시기는 불가역적 손상의 집적이 시작하는 때로 4곡선 근처에서 끝난다. 초미시균열의 발생과 확대시기는 부동 slip band상에서 slip band의 확대와 초미시균열의 확대에 의해 전위구조의 재편성이 일어나며 새로운 slip band가 발생함에도 불구하고 재료의 물리적, 기계적 특성 전체에는 다소의 변화밖에 미치지 않는다.

5) 임계 크기의 거시균열까지의 균열 확대단계(4~5곡선)

이 시기에서는 입계를 가로 지르는 미시균열이 발생하고 균열 선단에서 평면변형상태가 되는 조건이 일어나며 부하방향에 수직인 면 상을 미시균열이 전파하기 시작한다. 균열전파 단계에서는 파면에 줄무늬가 형성되며 균열은 평면변형조건에 있는 균열선단에서 낮은 응력확대계수치로 전파한다.^(17,18)

6) 최종 파단단계(5~6곡선)

피로균열의 불안정 성장에서 시작하며 최종 파단응력은 응력수준과 처음의 응력집중에 의존하지 않고 고유의 것이 있다고 본다. 최종 파단강도는 진응력에 가깝다. 표면층의 전위밀도는 파괴에 이를 때까지 계속 변화하지 않으며 최종 파단은 균열개구가 임계치에 달할 때 갑자기

파단한다.

이상의 전파로영역에서 반복 부하응력의 크기에 따라 처음 전위 발생
에서부터 최종 파단에 이르는 연속적 진행과정을 현상적으로 도시한 예
를 보면 Fig. 4와 같다.

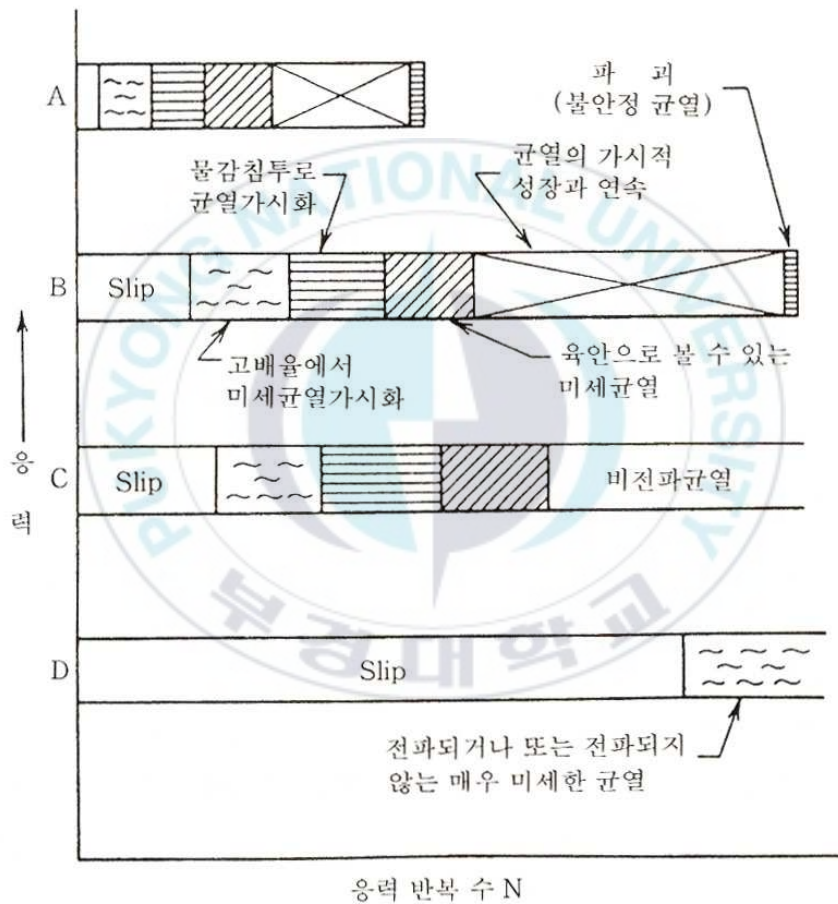


Fig. 4 Process of fatigue crack

시험법 및 시험편의 형상, 치수는 규정에 따라야 하며, 각각의 시험법은 아래의 규정에 따라 시험한다..

① BS

- BS. 3518 : 피로 시험 방법

Part 1 : 일반 원리

Part 2 : 회전 굽힘 피로 시험

Part 3 : 직접 응력 피로 시험

Part 4 : 비틀림응력 피로 시험

Part 5 : 통계의 응용

② ASTM

ASTM E206 : 피로 시험 및 자료의 통계적 처리에 관한 관련 용어 정의

ASTM E466 : 금속 재료의 일정 진폭 피로 시험 방법

ASTM E467 : 축방향 피로 시험기에서의 일정 진폭의 동적 하중 검증

ASTM E468 : 금속 재료의 일정 진폭 피로 시험 결과에 대한 정리

ASTM E513 : 일정 진폭 저주파 피로 시험에 관련된 용어 정리

ASTM E606 : 일정 진폭 저주파 피로 시험 방법

ASTM E739 : S-N 및 ϵ -N 피로 *data*의 통계적 해석 방법

2.2.3 피로시험기

A. 반복응력의 종류에 따른 분류

- (a) 굽힘 : 실제의 피로파단은 반복되는 굽힘에 의해 일어나는 것이 많다. 환봉시험편의 경우는 회전굽힘, 각주, 편상시험편의 경우는 평면굽힘을 한다.
- (b) 비틀림 : 헬리컬 스프링이나 차축, 토션바 등은 반복 비틀림파단이 문제가 되며 실용상 중요하지만, 시험편의 장치기구가 복잡하기 때문에 그다지 많이 하지는 않는다.
- (c) 인장압축 : 이 형식의 피로파단이 일어나는 것은 실용상 비교적 적지만, 시험편 단면에서 응력구배가 거의 없으므로 기초적 연구용에 적합하다. 가느다란 선재나 박판 시험편에서는 압축과정에서 휘므로 편진인장시험을 하는 것이 많다. 예를 들면 실제의 경우에 가깝게 굽힘과 비틀림을 동시에 부하하도록 조합시켜 응력 시험을 하는 것도 있다.

B. 구동방식에 따른 분류

- (a) 기계식 : 크랭크 기구를 사용하거나, 중추를 회전시켜 원심력을 이용한다. 또한 환봉시험편에 굽힘하중을 가하면서 시험편을 회전시킨다. 회전굽힘 피로시험기는 이것에 속한다. 이 경우, 직경 d 의 시험편 표면에서 최대 인장응력은

$$\sigma = 16PL/\pi d^3 \dots\dots\dots (1)$$

으로 주어진다. 전동기에서 축을 매분 1500~3000회전시킨다. 정지상태에서 큰 하중을 부하하면, 시험편이 휘므로 회전시키고 나서 서서히 부하해야 한다.

- (b) 유압식 : 대용량 피로시험기에 이 형식의 것이 많다. 진동수는 일반적으로 작다.

(c) 전자석 : 전자석에 흐르는 전류의 주파수를 조절함으로써, 시험편을 포함하는 시험기 본체의 고유진동수에 대응하는 진동하중을 주고, 공진상태로 하여 원하는 하중을 부하하는 경우가 많다. 먼저 상부의 핸들을 돌려 조절 스프링들을 상하시키고, 링 스프링을 통하여 시험편에 원하는 평균하중을 가한다. 전자석에 공진주파수의 교류를 흘리는 것에 의해 시험편에 진동하중이 주어진다. 이것에 따라서 역량계가 신축하고, 반사경이 최진진동하여 스케일 판상에 빛이 투영된다. 이것에 의해 최대 최소 하중을 읽어 들일 수 있다. 진폭의 제어는 빛의 폭이 너무 커지지 않도록 한다. 즉 빛이 넓게 광전관에 들어가면, 그 신호를 받아 전자석에 흐르는 전류가 작아지도록 회로를 설치해 놓는다. 또 고유 진동수는 중추의 무게를 증가시키면 작아진다.

이런 종류의 장치 이점은 (1)비교적 작은 입력의 반복에 의해 큰 부하를 가할 수 있다. (2)100Hz 정도의 고속진동을 주는데 적합하며, 단시간 시험이 가능하다. (3)차광판을 프로그램대로 움직이게 함으로써 복잡한 진폭변동을 시킬 수 있는 것 등이다. 한편 결점으로는 (1)대형 시험편에 의한 시험에 적합하지 않다. (2)큰 소음을 발생한다. (3)고온의 금속이나 스테인리스강과 같이 감쇠능이 큰 재료에 대하여는 큰 입력이 필요하다는 것 등을 들 수 있다.

특수한 구동방식으로서 압축공기의 분사를 사용하는 방법도 있다. 공업적으로는 실제의 피로현상에 가깝게 하기 위한 장치를 연구하여 중박 반복응력이나 변동응력을 가하여 실험을 하는 것이 있다.

앞절에서 설명한 것과 같이 피로시험은 반복응력 S 와 파단까지의 반복수 N 의 관계를 구하는 것이 많지만, 반복변형 진폭과 파단까지의 반복수의 관계를 구하는 것도 있다.

2.3 피로균열의 파괴역학적 개념

파괴라는 이론적 현상은 미시적 조직이나 파괴기구의 영향을 강하게 받기 때문에 여러 가지 학문적 수법이 요구된다.

재료의 부재나 구조물을 연속체로 보고 파괴의 현상을 거시적인 입장에서 다루는 선형탄성파괴역학(L.E.F.M : Linear Elastic Fracture Mechanics)은 균열 또는 예리한 노치를 갖는 부재 혹은 구조물의 강도나 변형을 선형탄성론으로부터 얻어진 결과를 기초로 하여 취급하는 분야의 하나이다⁽⁴⁾.

길이 $2a$ 인 관통 균열이 있는 무한판이 균일인장응력 σ 를 받고 있는 경우를 생각해 보면 균열 선단으로부터 거리 r 인 곳에 있는 요소 dx, dy 는 응력 σ_x, σ_y 및 τ_{xy} 등을 받는데 이들은 Fig. 5의 좌표계로서는 다음과 같이 표시할 수 있다⁽⁵⁾.

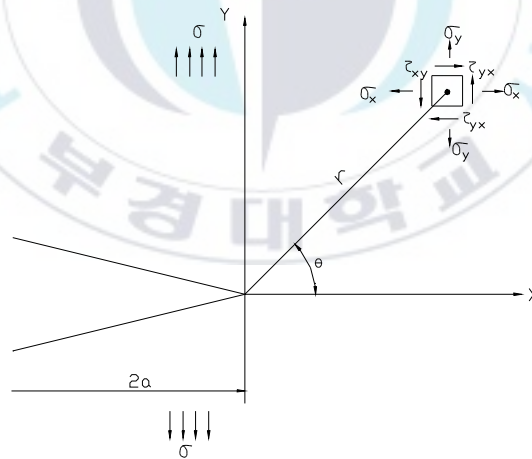


Fig. 5 The coordinate system of a crack in an infinite plate

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right] \\
\sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2} \theta \right] \text{ -----(2)} \\
\tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3}{2} \theta \\
\sigma_z &= 0 (\text{plane stress})
\end{aligned}$$

파괴가 Mode I 에서 발생할 때 식 (2)에서 $\theta = 0$ 일 때 균열선단에
 서의 σ_y 의 분포는 $\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}}$ 가 되고 이를 Fig. 6에 표시하면 응력
 확대계수 $K_I^{(6)}$ 은

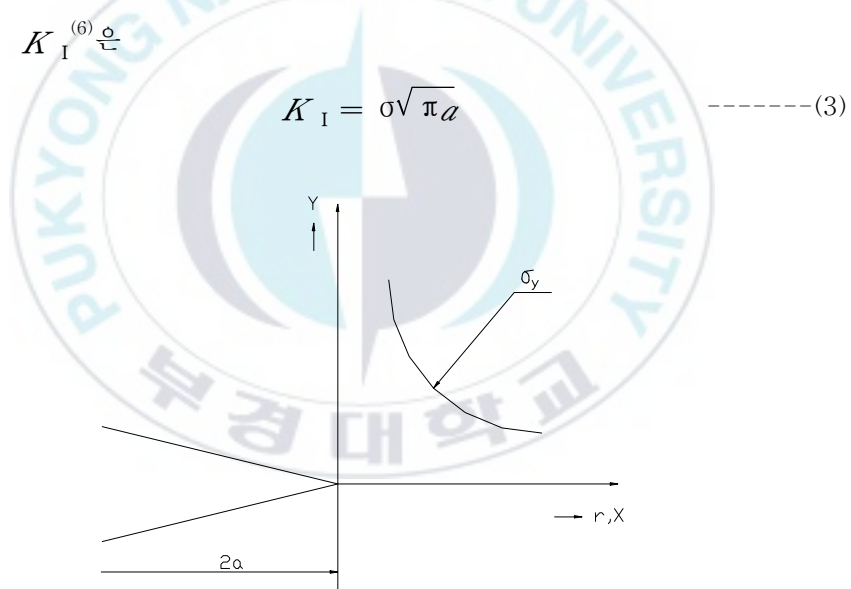


Fig. 6 Elastic stress at the crack tip

그러므로 식 (2)는 일반적으로 K_I 을 사용하여

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \mathcal{K}(\theta) \text{ -----(4)}$$

로 표시할 수 있다.

식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 균열 선단에서 응력의 크기 σ_y 는 K_I 에 의존함을 알 수 있고 균열 진전거동도 K_I 의 영향을 크게 받을 것임을 용이하게 단정할 수가 있다.

본 연구에서는 응력확대계수 K 의 이러한 성질을 이용하여 균열 길이에 대한 K 값을 제어하여 실험을 행하였다.

선형과괴역학은 균열 선단부근의 소성역의 크기가 작은 소규모항복상태에 운용이 되며 균열 선단부근의 소성역의 크기를 고려하는 경우 응력확대계수 K 는 보정이 필요하다.

탄성과 소성의 경계조건 즉, σ_y 를 항복강도 σ_{js} 로 대치하면 $\Theta = 0$ 에서 식 (4)는

$$\sigma_{js} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p^*}} \quad \text{-----}(5)$$

로 표시되며 여기서 r_p^* 는 이론상의 소성역의 크기이다.

일반적으로 역학적 평형조건으로부터 실제의 소성역의 크기 r_p 는 $r_p = 2r_p^*$ 가 됨이 밝혀져 있다(Fig. 7). 즉,

$$r_p^* = \frac{1}{2\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{js}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(6)$$

로 표시할 수 있으며

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{js}^2} \text{ (plane stress)} \quad \text{-----}(7)$$

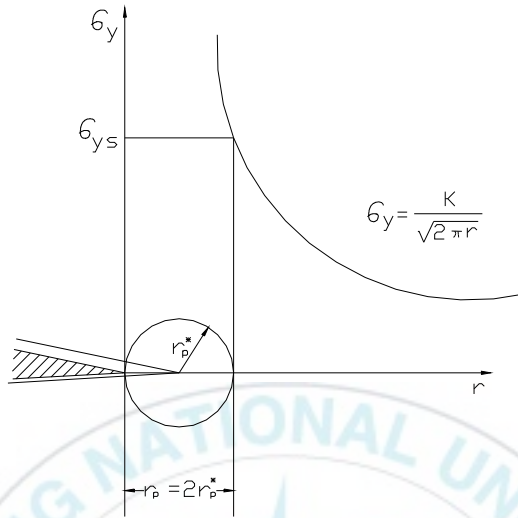


Fig. 7 Plastic zone at the crack tip

소성역의 반경 r_p^* 를 고려한 균열 길이 즉 $a + r_p^*$ 를 유효 균열 길이
라 하며 이것을 고려한 응력확대계수 K 를 유효응력확대계수 K_{eff} 라
고 한다. 식 (6)을 식 (3)에 대입시키면

$$K_{eff} = \sigma \sqrt{\pi \left[a + \frac{1}{2\pi} (K_I^2 / \sigma_{ys}^2) \right]} \quad \text{-----}(8)$$

이 되며, 이것을 다시 정리하면

$$K_{eff} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\left[1 - \frac{1}{2} (\sigma / \sigma_{ys}^2)^2 \right]^{1/2}} \quad \text{-----}(9)$$

로 표시된다.

2.4 피로균열 진전거동

균열선단에서 응력-변형률이 금속의 거동을 지배한다는 피로역학의 개념은 이미 존재해 있는 균열로부터 해석한다는 의미에서는 피로파괴 성장과 같다.

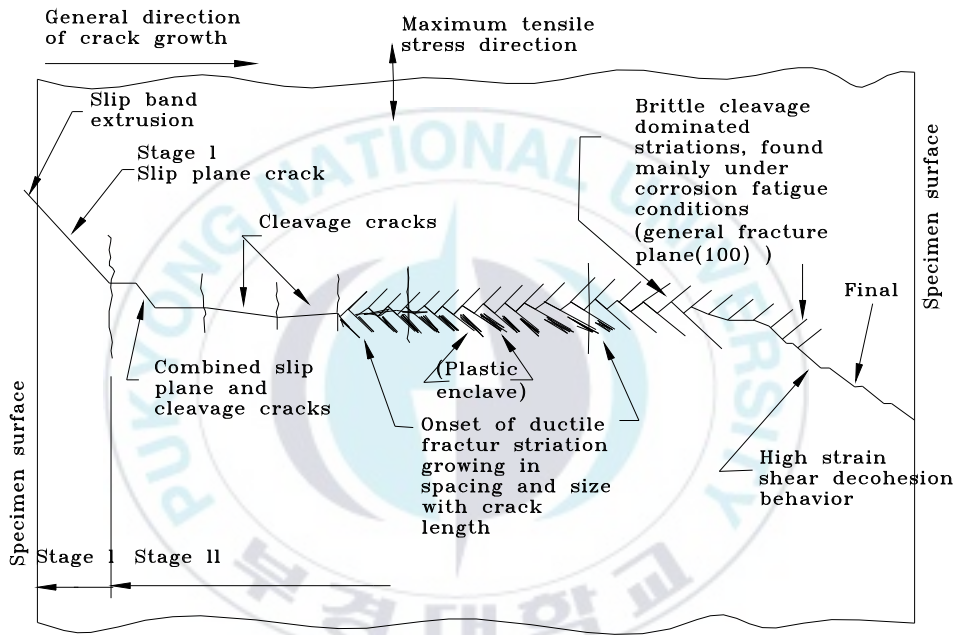


Fig. 8 Schematic illustration of the various modes of fatigue fracture

여기서 균열선단에서의 응력-변형률의 성질은 응력확대계수(Stress intensity factor) K 로 표시되고, 반복 응력확대계수와 피로균열진전속도와도 관계가 있다. 한편 균열의 성장률을 표시하면 Fig. 8과 같이 3개의 분리된 영역으로 나타난다.

이처럼 균열의 성장률을 나타냄으로서 주어진 하중에서 어느 정도 크기의 균열까지는 안전한가 또는 주어진 균열크기에 어느 하중까지는 알

마동안 안전한가 등 여러 가지 공학적 중요한 문제를 해결하는데 이용할 수 있다. 여기서 C 와 m 은 각각 재료상수, 피로균열진전지수이고 보통 m 은 0.5~0.8의 넓은 범위에서 변화한다. 그러나 식 (10)는 실험 재료를 총괄적으로는 나타내지 못한다. 실제로 Fig. 9에서 da/dN 와 ΔK 의 관계는 S형 모양을 갖거나 부분적으로 다른 기울기를 가진다.

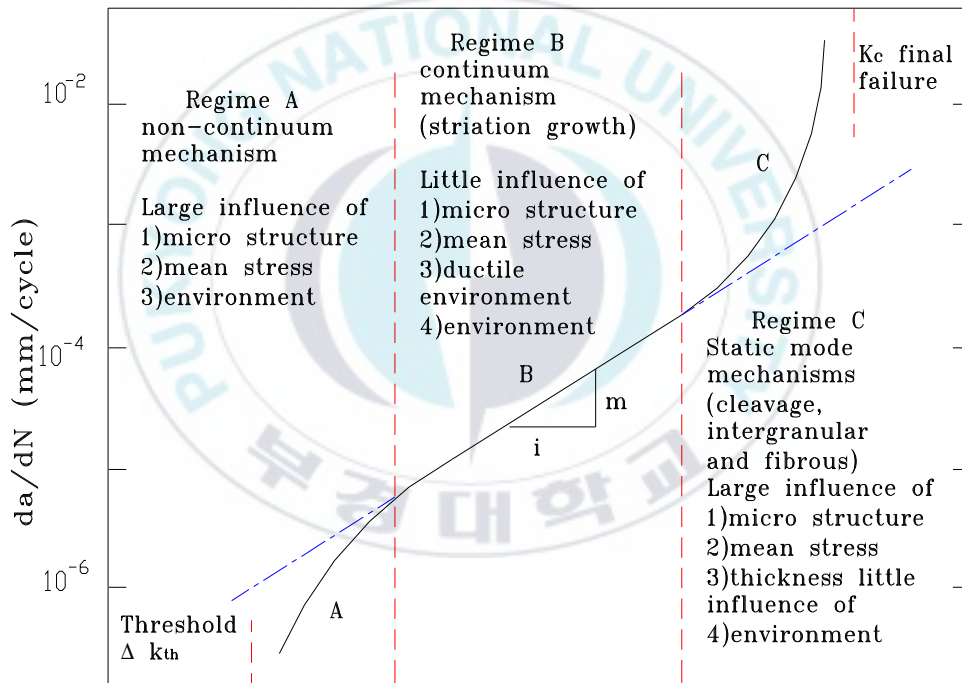


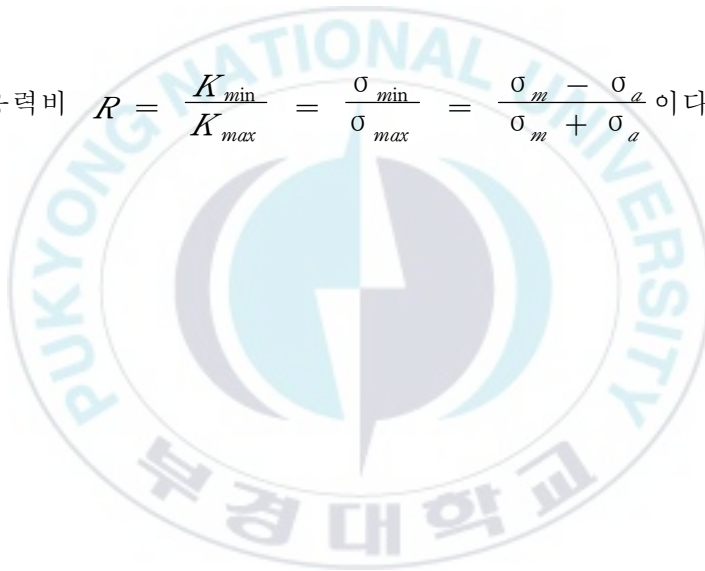
Fig. 9 Primary fracture mechanisms with variation of fatigue crack propagation rate da/dN with stress intensity factor range ΔK

ΔK 범위의 최상부 끝을 벗어남은 da/dN 가 유한으로 되어야 하는 균열이 임계값에 도달하는 것일 때 예상될 수 있다. 최종 파괴는 사이클 동안에 응력확대계수 K_{Ic} 에 도달한 상태에서 일어난다.

최대응력확대계수 K_{max} 및 응력비 R 의 영향도 고려해 넣으면 다음과 같이 일반화된다. 즉,

$$\frac{da}{dN} = f_1(K_{max}, \Delta K) = f_2(R, \Delta K) \quad \text{-----}(10)$$

여기서 응력비 $R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$ 이다.



2.5 금속부식의 이론

2.5.1 이종금속의 부식

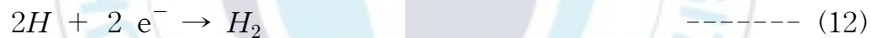
갈바닉 부식을 방지하기 위해서 이종금속 사이에 절연물질을 사용하거나 전해액과 금속이 접촉되지 않도록 도장을 하는 등의 방법도 사용되고 있다. 그렇지만 갈바닉 부식은 여전히 중대한 문제로 남아 있다. 실제로 많은 경우에 효과적인 설계를 위해서는 이종금속의 사용이 요구되어지고 있다. 그 이유는 설계과정에서 강도, 가공성, 가격, 유용성 등 여러 다른 인자가 부식문제보다 더 중요성을 가지는 경우가 많기 때문이다. 입계부식(intergranular corrosion), 공식(pitting corrosion), 응력부식균열, 틈부식(crevice corrosion)^(21,22)과 같은 국부부식도 갈바닉 부식에 관계가 된다. 갈바닉 부식은 가장 일반적이며, 가장 심한 형태의 부식이다. 갈바닉 부식의 크기는 이종금속의 전위차이 뿐만 아니라, 교환 전류밀도, 타펠기울기(Tafel slope)등과 같은 속도론적인 인자, 양극과 음극의 면적비 등도 영향을 미친다. 갈바닉 부식에서 가장 위험한 조건은 소양극-대음극(small anode-large cathode)이다. 양극 면적에서의 전류밀도가 높을수록 부식속도는 커지게 된다. 갈바닉 부식을 방지 또는 감소시키기 위한 방법으로는 이종금속을 함께 사용할 경우에 가능한 한 갈바닉 계열에서 가까이 위치하고 있는 금속 또는 합금을 선택해야 한다. 그리고 소양극-대음극의 위험 원리를 기억해야 하고, 가능하면 이종금속은 절연시키거나 도장해야 한다. 갈바닉 접촉을 이루고 있는 두 금속보다 활성전위를 가진 희생양극(sacrificial anode)을 설치한다.

갈바닉쌍을 이루고 있는 금속 또는 합금 사이의 전위차는 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 아는 것이 대단히 중요하다.

혼합전위이론에 의하면 쌍을 이루지 않은 상태에서 아연(zinc; Zn)은 부식전위를 가지며, 플라티늄(platinum; Pt)은 수소반응에 대한 반전전위를 가진다. 두 금속이 쌍을 이루게 되면, 즉 전기적으로 서로 연결되면 (-)방향의 전위를 가진 아연으로부터 (+)방향의 반전위를 가진 플라티늄으로 전자들이 이동하게 된다. 갈바닉쌍으로부터 흐르는 전류는 외부 인가전류에서와 마찬가지로 아연과 플라티늄의 표면을 분극시킨다. 아연으로부터의 전자 흐름은 식(11)과 같이 아연 용해반응의 양극분극을 야기시킨다.



아연에서 흘러나온 전자들은 플라티늄 표면으로 흘러 들어가면서 식(12)와 같이 수소 환원반응을 음극적으로 분극시킨다.



두 금속 표면은 계속 분극 되어 환원전류와 산화전류가 같은 값이 된다. 갈바닉쌍의 분극곡선에는 전류밀도 대신 전류값이 사용되어야 한다. 전류밀도를 얻기 위해서는 양극금속에서의 양극 전류값을 양극면적으로 나누어 주어야 하며, 이 전류밀도는 부식속도에 비례한다. 그리고 수소환원반응에 대한 교환전류밀도가 낮은 금속이 활성화되며, 상대적인 표면적도 갈바닉 부식속도에 영향을 미친다. 음극면적이 클수록 환원반응을 위한 면적이 더 커지기 때문에 이에 대응하기 위하여 양극 용해전류가 증가해야 한다. 따라서 두 금속으로 이루어진 갈바닉쌍에서 갈바닉 전위는 항상 쌍을 이루지 않았을 때의 두 금속의 부식전위 값의 사이에 위치한다. 활성화전위를 가진 금속은 양극이 되어 부식속도가 항상 증가하고, 귀전위를 가진 금속은 음극이 되어 부식속도가 항상 감소

한다. 이러한 양극의 부식속도를 증가시키면서 음극의 부식속도가 감소하는 현상은 희생양극(sacrificial anode)에 의한 음극방식(cathode protection)의 근거가 된다. 두 금속이 쌍을 이루었을 때, 내식성이 적은 금속의 부식속도는 항상 증가하지만 내식성이 강한 금속의 부식속도는 항상 감소하는 것이다.



2.5.2 부식속도에 미치는 요인

공업적인 관점에서 가장 관심을 끄는 것은 부식속도(corrosion rate) 또는 부식되는 정도(extent)이다. 부식계(corrosion system)는 평형에 있지 않기 때문에 열역학적 계산은 적용될 수 없다. 금속의 부식속도에 미치는 요인으로서는 회로저항, 전위, 분극, 양극면적 등을 들 수 있다. 금속과 용액으로 만들어진 폐회로에 생기는 부식전류는 분극한 양극과 음극의 전위의 차를 회로의 금속 부분과 용액 부분의 저항으로 나눈 값이다. 오염되어 있지 않은 빗물과 같이 전기전도도가 낮은 액 속에서는 접촉에 의한 전위분포는 급격히 떨어진다. 전류분포 역시 접촉점을 떨어짐과 동시에 급감하고, 부식분포도 동일한 형태가 되어서 접촉부에서 가까운 곳이 국부부식을 일으킨다. 해수와 같은 전도성이 높은 액 속에서는 전위분포는 경사가 완만하고, 전류분포 및 부식은 양극 전면에 일정하게 일어난다. 그러나 양극전류에 의한 부식은 국부부식이 되는 수가 많다. 벌레가 파먹은 것과 같은 부식은 전식의 특징이다.

전위는 분극(polarization)에 의해서 변화한다. 분극의 중요한 요인은 음극 복극제로 작용하는 용존산소이다. 산소가 전극면으로 확산하는 속도가 비교적 느리고, 음극 금속의 종류에 따라 접촉에 의한 부식전류의 크기는 산소의 확산속도에 의해서 정해진다. 용존산소량이 많아지면 음극 금속에 의한 차가 나타난다. 접촉부식전류는 양극의 부식을 가속하지만, 반대로 음극의 부식은 접촉부식전류에 따라서 감소한다. 그렇지만 음극에서의 환원 반응을 위하여 음극이 부식을 일으키는 수가 있다.

접촉하는 이종금속의 면적은 분극의 영향을 받아 발생전류가 커지고, 부식속도에 변화를 준다. 양극의 상대면적이 부식전류에 미치는 영향은 분극의 지배형식에 따라 다르다. 양극면적을 일정하게 하고 음극면적을 바꿨을 때에 양극의 전류밀도는 달라진다. 음극지배일 때는 발생전류는 음극면적에 거의 비례해서 증가하므로, 양극의 전류밀도는 음극면적에 비례해서 증가한다. 그러나 양극지배일 때는 전류는 음극면적에 관계없이 일정하므로 양극전류밀도도 일정하다. 혼합지배일 때는 중간 형태

이다. 음극면적은 일정해서 양극면적을 바꿨을 때의 양극 전류밀도의 변화는 음극지배에서는 양극의 면적을 바꿔도 발생전류의 크기는 바뀌지 않으므로, 양극면적이 작아짐과 동시에 그 전류밀도는 급격히 감소한다. 양극지배에서는 발생전류는 양극면적에 거의 비례하므로 양극의 전류밀도는 양극면적과는 관계없이 일정하다. 전류밀도는 부식속도와 직접 관련이 있다. 양극에서의 실용상 필요한 부식속도에 미치는 양극면적의 영향은 면적이 큰 음극과 이어진 작은 면적의 양극 금속의 부식은 그 계가 음극지배라면 치명적인 손상이 생기지만 양극지배라면 그 정도는 아니다. 또 양극의 면적이 증가함으로써 부식량이 증가한 경우에는 양극의 침식량은 변하지 않지만, 음극면적이 커져 부식량이 증가한 경우에는 양극의 침식도는 커져 피해가 크다.

이종금속을 동시에 사용하는 것은 가급적 피해야 한다. 그러나 특정의 물리적 또는 화학적 성질이 필요하거나 혹은 경제상의 이유 등으로 여러 종류의 금속을 혼용하는 것을 피할 수 없는 경우가 있다. 접촉 부식전류를 적게 하려면 음극과 양극의 개로 전위차를 적게 하거나 회로저항을 크게 해야 하며, 분극을 크게 한다. 개로 전위차를 적게 하려면 갈바닉 계열에서 가급적 떨어져 있지 않은 금속 및 합금을 선택한다. 개로 전위차는 있어도 금속이 접촉하고 있지 않으면 전류는 발생하지 않으므로, 접촉부를 절연하여 준다. 금속 접촉과 동시에 전해질을 통하여 개회로가 완성되어 있는 것도 전류발생의 필요조건이므로 금속면에 도장을 하는 것은 회로저항을 증가하는 방법이다.

2.5.3 부동태

부동태는 부식용액 내에서 어떤 금속 또는 합금이 대단히 얇은 산화 보호피막을 그 표면에 생성할 때 생겨나는 현상이다. 양극분극이 큰 산화성 조건하에서 얇은 표면피막이 생성됨에 따라 내식성을 가지게 되는 것이다. 포베 도표를 살펴보면 대부분의 금속은 하나 또는 그 이상의 산화물이 산화성 용액의 귀전위에서 안정하다는 사실을 알 수 있다. 철의 경우는 산화물인 Fe_2O_3 와 FeO_4 가 넓은 범위의 전위와 pH에 걸쳐 안정하다. 부동태 피막은 식 (13)과 같은 전기화학 반응으로부터 직접 생성된다.



용해 또는 재침전 등에 의해 생성된 불용성 화합물은 산화에 의해 금속 표면에 생성된 산화물만큼 견고하거나 보호적이지 못하다. 부동태 피막이 생성되기 시작하면 금속 표면에 가시적인 증거는 나타나지 않지만 부식속도는 현저히 감소한다.

대단히 높은 산화성 조건인 진한 질산용액에서 철은 아무 반응을 일으키지 않지만 물을 첨가하여 산용액을 묽게 하여도 반응을 일으키지 않는다. 그러나 표면에 가벼운 자국을 내게 되면 갈색의 아산화질소 기체를 내면서 격렬하게 부식된다. 1849년경 이 실험을 처음 행했던 페러데이(Faraday)는 진한 질산용액에서 미리 생성된 눈에 보이지 않는 표면산화피막은 묽은 질산용액에서 불안정하며, 자국을 내는 등 기계적인 손상을 입게 되면 파괴된다고 하였다. 부동태 피막은 대단히 얇고 부서지기 쉽기 때문에 그 조직을 정의하는 것이 쉽지 않다. 육안으로 관찰하면 1~10nm 두께의 치밀하고 투명한 피막을 확인할 수 있다. 부동태 피막에 수소가 존재한다는 것이 확인되었는데, 이것은 수산화물 또는 수화물이 있음을 나타내는 것이다.

크롬(Cr)을 철(Fe), 니켈(Ni) 등의 금속에 합금원소로 첨가하면 산화성이 약한 분위기에서도 대단히 안정되고 얇으며 내식성이 큰 표면 피막을 생성한다. 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 티탄(Ti), 탄탈(Ta), 니오브(Nb) 등의 금속도 부동태의 정의를 만족시키는 표면 피막을 생성한다. 부동태의 정의를 만족시키는 금속 및 합금은 전위의 증가에 따라 특이한 거동을 나타낸다. 탈기된 산용액은 낮은 전위값에서 양극 전류밀도에 의한 부식속도가 높으며, 활성상태(active state)에서 전위의 증가에 따라 부식속도는 증가한다. 전위가 기본부동태전위(primary passive potential) 이상으로 증가하면 안정된 부동태 피막이 생성되면서 부식속도는 부동태 상태의 아주 낮은 값으로 감소한다. 또한 산성도(acidity)와 온도가 증가하면 부동태 영역은 감소하며 모든 전위에서 전류밀도와 부식속도는 증가한다. 활성상태에서는 산화제의 농도가 증가하면 부식속도와 부식전위가 증가한다. 부동태 상태에서 부식속도는 낮게 유지되며 농도가 더욱 증가하면 부동태 통과영역으로 들어서면서 부식속도가 다시 증가한다. 일단 부동태 피막이 생성되면 그 피막은 부동태 피막을 위해 필요했던 농도보다 더 낮은 온도에서도 그대로 유지한다. 표면에 어떤 불안이 존재할 경우 부동태 피막이 파괴되고 부식속도는 활성상태로 된다.

제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 구조용 강으로 사용되는 탄소강(JIS G 3456)으로서 모재의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2 같다. 용접은 V 홈의 양쪽 경사각이 40°가 되도록 시험편을 가공하여 1G자세(아래보기자세)로 용접을 실시하였으며, 시험편을 가공하여 SMAW(Shielded Metal Arc Welding : 실드아크용접 - 수동용접)와 FCAW(Flux Cored Arc Welding : 플럭스코어용접 - 반자동용접) 및 SAW(Submerged Arc Welding : 서브머지드아크용접 - 자동용접)^(23,24)를 실시하였고, 각 용접방법에 따른 용가제의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1, 2에 나타내었다. 그리고 각 용접방법별 피로시험을 하기 위한 시험편의 형상과 치수를 Fig.10에 나타내었다.

Table. 1 Chemical composition of base metal and filler metals(wt, %)

Material	C	Si	Mn	P	S
Base metal	0.15	0.19	0.65	0.016	0.005
SMAW	0.07	0.53	0.98	0.014	0.010
FCAW	0.040	1.29	0.49	0.010	0.009
SAW	0.07	1.45	0.4	0.013	0.012

Table. 2 Mechanical properties of base metal and filler metals

	<i>Tensile Strength (MPa)</i>	<i>Yield Strength (MPa)</i>	<i>Elongation (%)</i>
Base metal	443	309	29
SMAW	558	490	32
FCAW	582	548	28
SAW	540	440	31

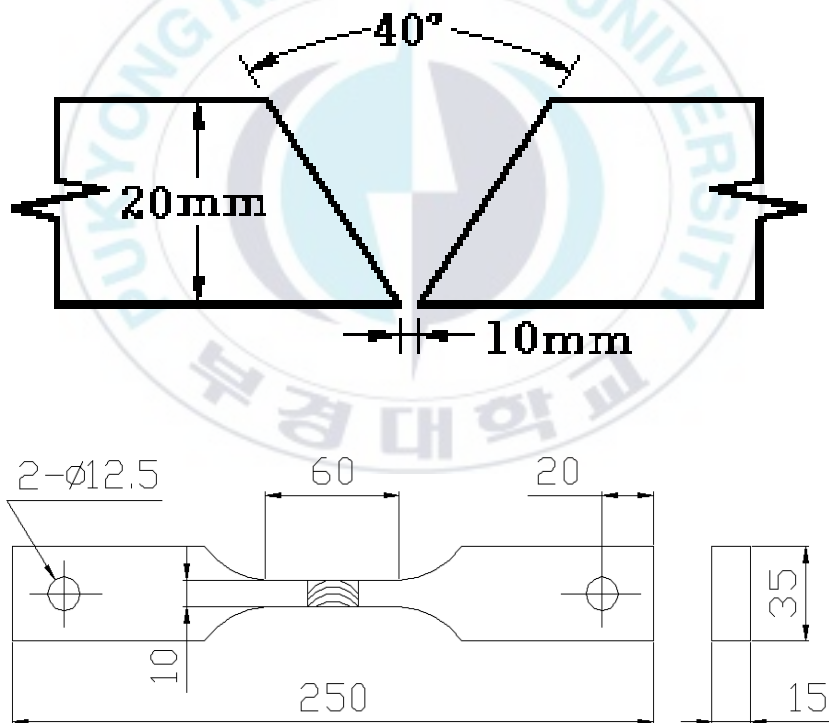


Fig. 10 Dimension of specimen (unit:mm)

3.2 실험장치

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용 하중 파형은 정현파(사인파)로 하고 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열진전 사이클 측정은 시험기에 연결된 컴퓨터로 측정하였다. 본 실험은 ASTM E 466에 따라 실험하였으며 Fig. 11은 전기유압서보 피로시험기이다.

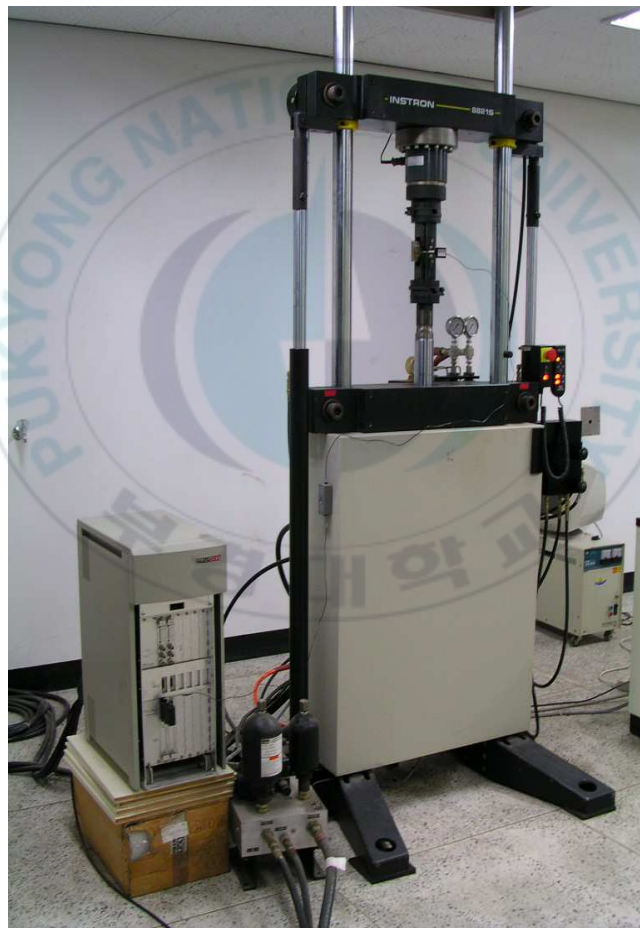


Fig. 11 Apparatus of fatigue test machine(Instron, 8821S)

3.3 실험 방법

용접방법에 따른 용접부의 경도분포를 조사하기 위해 로크웰경도시험기(AKASHI 600)로 경도를 측정 하였다.

부식 침지실험을 위한 장치로 부식환경조에 탈기처리하지 않은 두 가지 부식수용액(6% FeCl_3 , 3.5% NaCl)에서 90일 동안 시험편을 침지시켰다.

피로실험은 전기유압서보 피로시험기(INSTRON 8821S, 100KN)를 이용하여 ASTM E466시험법에 따라 하중제어방식으로 실험을 하였다⁽⁷⁾. 피로하중 파형은 인장-인장 형태의 정현파로 하였고 주파수는 10Hz로 하였다. 피로파단 사이클 수는 컴퓨터와 연결된 소프트웨어에 의해 측정하였다. 각 용접방법에 따른 피로수명을 측정하기 위하여 모재와 용접시험편을 대상으로 S-N선도를 통해 피로한도를 구하였으며 피로실험은 2×10^6 cycle까지에서 미파단 시험편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가면서 시험을 수행하였다⁽²⁵⁾. 시험편의 피로균열 발생 및 전파 예상경로를 명확히 하고 노치의 영향을 최소화하기 위해 편이 걸리는 부분을 샌드페이퍼 #1200으로 매끄럽게 연마한 후에 피로실험을 실시하였다.

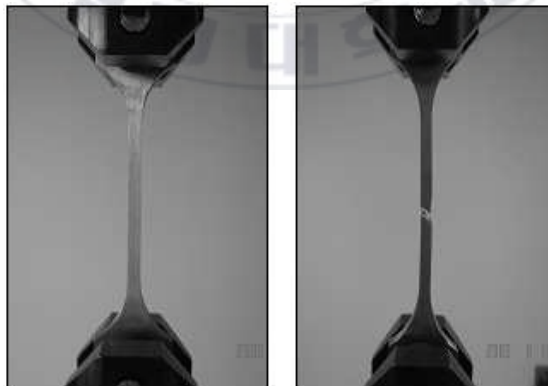


Fig. 12 specimens before and after fracture by fatigue test

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 경도 관찰

모재(Base metal)와 SMAW, FCAW, SAW에 의한 용접재(이하, 혼동의 여지가 없는 범위내에서 각 용접 용어로 지칭하여 사용한다)의 경도분포를 조사하기 위하여, 시험편의 단면부를 채취하여 열경화성 수지에 고정하고 폴리싱한 후, 측정하중은 500g을 적용하여 압흔간격을 1mm로 하였다. 측정된 값을 Fig. 13에 나타내었다. 용접부에 있어서는 SMAW가 85.4(HrB)로 가장 높았고, FCAW, SAW순으로 나타났다.

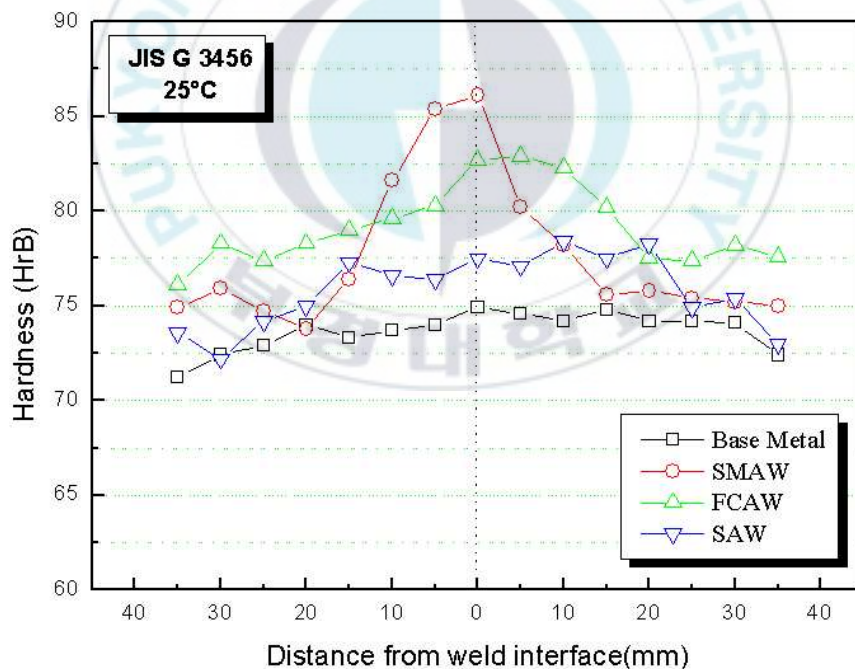


Fig. 13 Results of vickers hardness test

4.2 침지 1440시간의 무게감량

4.2.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 무게감량

3.5% NaCl 수용액에서 1440시간(60일) 동안 침지 후 무게 감소량을 SMAW에 의한 용접재와 FCAW에 의한 용접재 그리고 SAW에 의한 용접재와 모재를 부식전 무게와 부식후의 무게 및 무게감소량을 Table 3에 각각 나타내었다. 그리고 이 결과를 이용하여 무게감소량과 부식수용액에 침지한 시간과의 관계를 SMAW, FCAW, SAW와 모재를 비교하여 Fig. 14에 나타내었다.

Table 3 Weight loss of 3.5% NaCl solution

용접방법 \ 무게	부식 전 무게 (g)	1440시간 부식 후 무게 (g)	감소량 (mg)
Base Metal	176.4194	176.37155	47.85
SMAW	199.2333	199.04515	188.15
FCAW	198.8391	198.6026	236.5
SAW	217.449	217.022	242.7

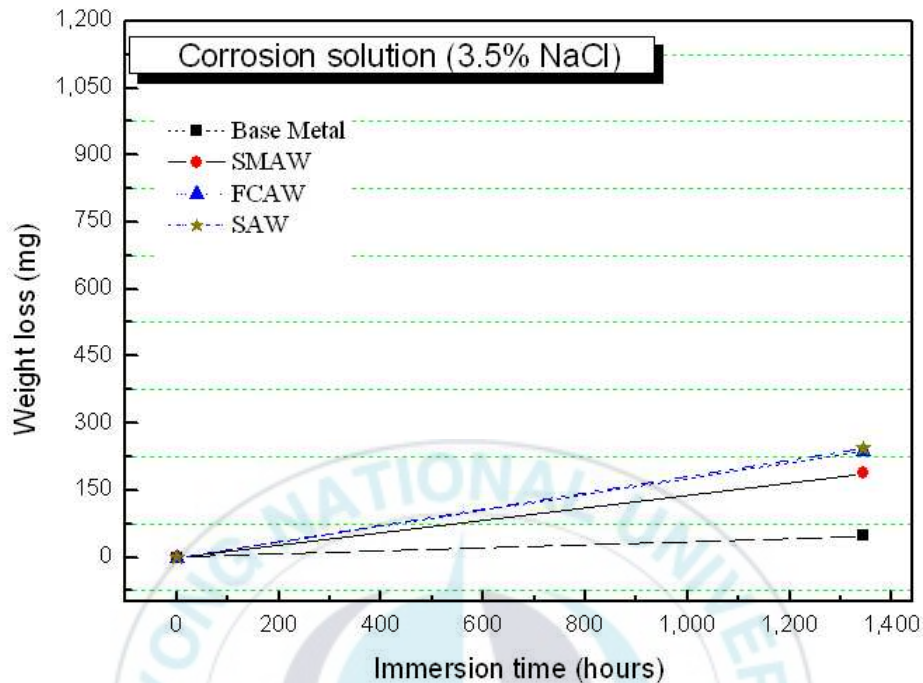


Fig. 14 Weight loss versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

이 결과를 보면 SAW에 의한 용접재가 242.7mg으로 가장 많은 무게 감소량을 나타내었으며 다음이 FCAW에 의한 용접재가 236.5mg의 감소량을 보였으며 SMAW에 의한 용접재가 가장 낮은 무게감소량 188.15mg을 나타내었고, 모재는 47.85mg으로 가장 적은 부식에 의한 무게감소량을 보여 Fig. 14와 같이 1440시간에서는 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 이와 같은 경향은 용접법에 따라 동일한 경향으로 나타났다. 무게감소량을 보면 SAW>FCAW>SMAW>Base metal의 순으로 나타났다. 이 결과를 보면, 자동용접에 의한 용접재가 가장 무게 손실량이 많았다.

4.2.2 6% FeCl₃ 수용액에서 용접별 무게감량

6% FeCl₃ 수용액에서 1440시간(60일)동안 침지 후, SMAW에 의한 용접재와 FCAW에 의한 용접재 그리고 SAW에 의한 용접재와 모재와의 부식에 의한 무게감소량을 측정한 결과를 Table 4에 나타내었다.

이 결과를 보면 SAW가 2240.8mg, SMAW가 2142.1mg, FCAW가 2066mg 모재가 843.6mg의 부식에 의한 무게감소량을 나타내었다.

6% FeCl₃ 수용액에서 1440시간 부식 후 무게감소량을 Fig. 15에 나타내었다.

Table 4 Weight loss of 6% FeCl₃ solution

용접방법 \ 무게	부식 전 무게 (g)	1440시간 부식 후 무게 (g)	감소량 (mg)
Base Metal	176.6149	175.7713	843.6
SMAW	199.3276	197.1855	2142.1
FCAW	199.0973	197.0313	2066
SAW	217.3059	215.0651	2240.8

Fig. 15는 6% FeCl_3 수용액에서 부식시간 1440시간까지의 부식에 의한 무게감소량을 SMAW, FCAW, SAW와 모재의 결과를 비교하여 나타내었다. 이 결과를 보면, 모재가 가장 적은 무게감소량을 보였고 SAW에 의한 용접재가 가장 많은 무게감소량을 나타내었다. 그리고 무게의 감소량의 경향은 각 용접방법별로 동일하게 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

동일 부식시간 1440시간에서 3.5% NaCl 수용액과 6% FeCl_3 수용액의 무게감량을 비교하면 6% FeCl_3 수용액의 경우가 약 9~10배의 부식 무게감량을 나타내었다.

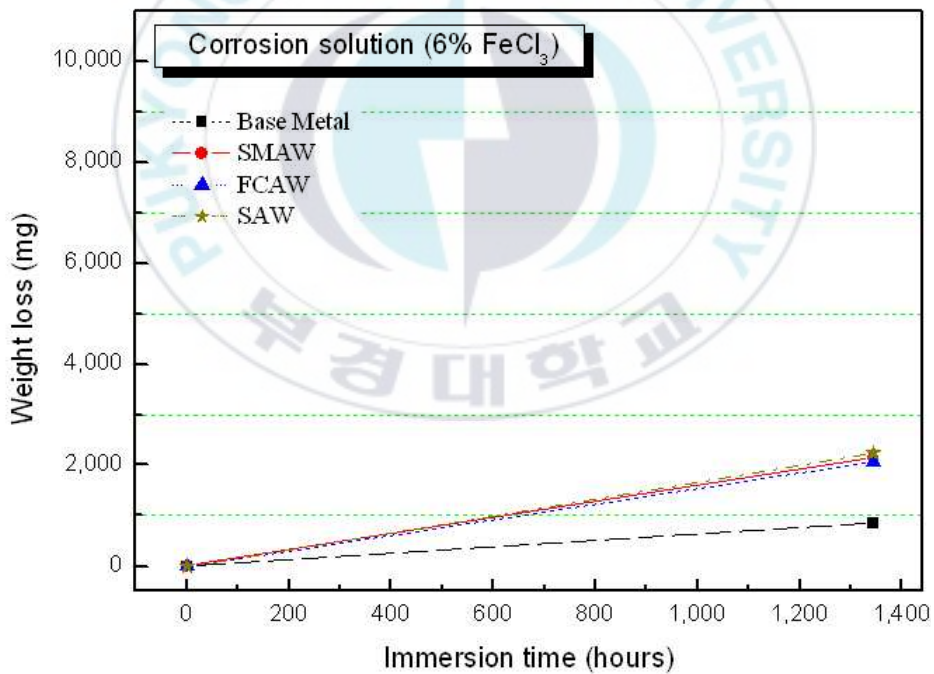


Fig. 15 Weight loss versus immersion time of specimens in 6% FeCl_3 solution

4.3 침지 2160시간의 무게감량

4.3.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 무게감량

3.5% NaCl 수용액에 2160시간(90일) 동안 침지하여 부식에 의한 무게감소량을 SMAW에 의한 용접재, FCAW에 의한 용접재, SAW에 의한 용접재와 모재의 부식 전 무게와 부식 후 무게 그리고 무게감소량의 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Weight loss of 3.5% NaCl solution

용접방법 \ 무게	부식 전 무게 (g)	2160시간 부식 후 무게 (g)	감소량 (mg)
Base Metal	176.4194	176.2278	191.6
SMAW	199.2333	198.8205	412.8
FCAW	198.8391	198.32885	510.25
SAW	217.449	216.928	521

Table 5에서 2160시간 부식 후 무게 감량을 보면 SAW에 의한 용접재가 521mg, FCAW에 의한 용접재가 510.25mg, SMAW에 의한 용접재가 412.8mg 그리고 모재가 191.6mg의 무게감소량을 각각 나타내었다. 이 결과에서도 1440시간 부식한 결과와 같이 SAW가 가장 무게 감

량이 많고 다음이 FCAW이고, SMAW가 용접재 중에서 가장 무게감소량이 적게 나타났으며 용접재의 경우가 모재에 비하여 2~3배의 부식무게감량을 나타내었다.

이 결과를 보면, 선박재료의 부식에 의한 여러 가지 메커니즘을 알 수 있는 결과로 생각되며 해수에 의한 선박 및 선체의 부식특성을 알 수 있을 것으로 생각된다. 이의 용접방법에 의한 기간별 무게감량의 역학적 원인 등을 종합적인 결과에 기록하도록 하겠다. 그리고 2160시간 동안 3.5% NaCl 용액에 침지 후, 무게감량을 용접방법별로 측정하여 시간별 무게감량의 관계를 Fig. 16에 나타내었다.

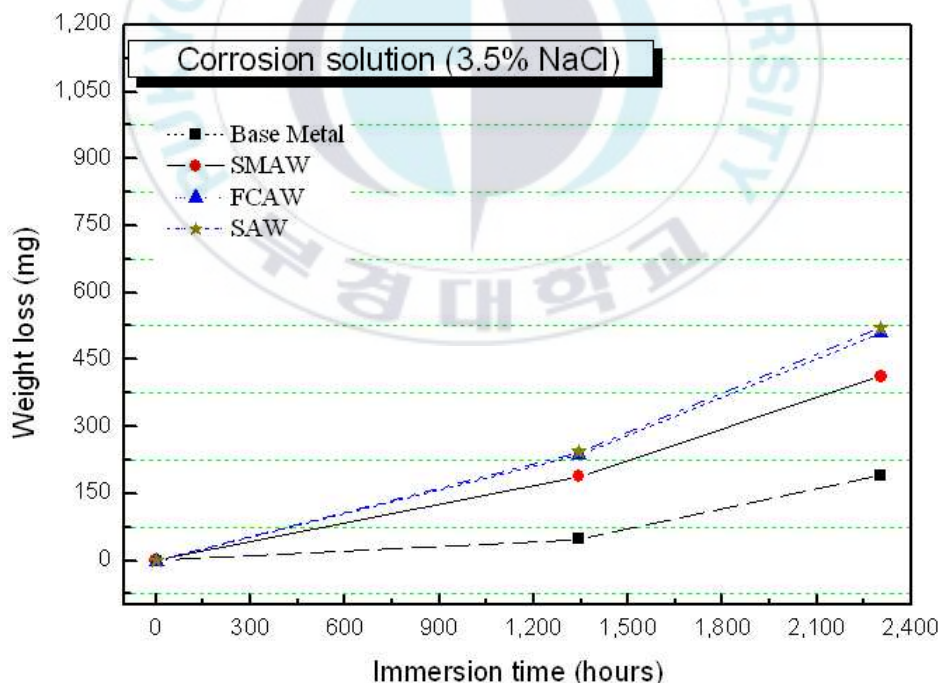
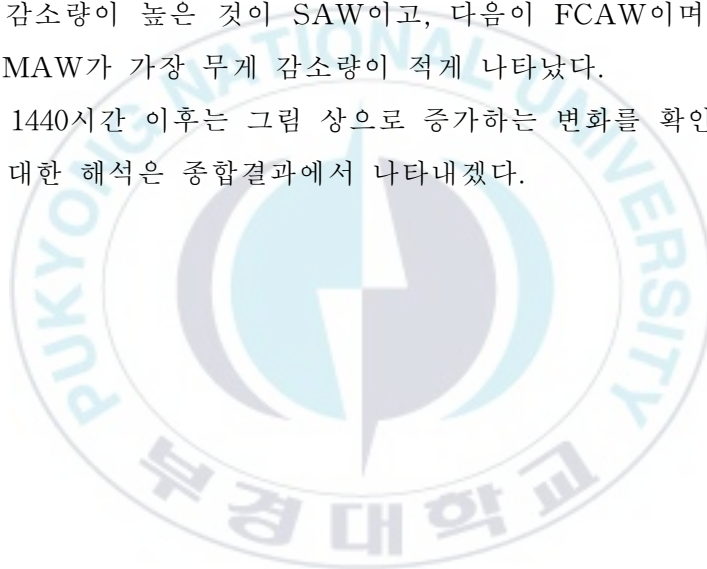


Fig. 16 Weight loss versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

Fig. 16을 보면 1440시간 까지는 직선적으로 무게감소를 나타내었으며 모재가 가장 무게감소량이 적고 그 다음이 SMAW에 의한 용접재가 용접재로는 가장 무게감소량이 적으며 FCAW 및 SAW의 경우 거의 비슷한 무게감소량을 나타내었고, 특이한 것은 각 용접법에 의한 용접재의 무게감량이 부식시간이 1440시간까지는 직선적으로 증가하였으나 1440시간 이후부터는 기울기가 변화하여 직선적으로 증가하는 것으로 나타났으며, FCAW와 SAW의 무게감소량이 조금 차이를 보였다. 그리고 가장 감소량이 높은 것이 SAW이고, 다음이 FCAW이며, 용접재중에서는 SMAW가 가장 무게 감소량이 적게 나타났다.

그러나 1440시간 이후는 그림 상으로 증가하는 변화를 확인 할 수 있다. 이에 대한 해석은 종합결과에서 나타내겠다.



4.3.2 6% FeCl₃ 수용액에서 용접별 무게감량

6% FeCl₃ 수용액에서 2160시간 침지 후 부식에 의한 무게감소량을 용접방법별로 부식 전 무게와 2160시간 부식 후 무게 및 무게감소량을 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Weight loss of 6% FeCl₃ solution

용접방법 \ 무게	부식 전 무게 (g)	2160시간 부식 후 무게 (g)	감소량 (mg)
Base Metal	176.6149	175.14405	1470.85
SMAW	199.3276	194.5243	4803.3
FCAW	199.0973	194.3595	4737.8
SAW	217.3059	212.02585	5280.05

그 결과를 보면 1440시간 부식 후의 무게감량과 비교하면 약 2~2.5배의 무게감소량이 나타났으며 특이한 사항은 지금까지는 FCAW가 SMAW보다 무게감소량이 높았으나, 여기서는 SMAW가 FCAW보다 극히 소량의 무게 감소량이 높은 결과를 나타내었으며, 용접방법별 무게감량은 큰 차이를 나타나지 않고, 미소량의 차이를 보였으나 모재와

용접재를 비교하면, 용접재가 모재보다 3배 이상의 차이를 보였다.

6% FeCl_3 수용액에서 2160시간 침지 후 부식 무게감량을 시간과 관계하여 용접방법별로 Fig. 17에 나타내었다.

이 결과도 모재를 제외한 용접재의 경우 1440시간 이후부터 무게 감소량이 증가하는 변화결과를 나타내었으나 모재는 직선적인 변화를 보여 3.5% NaCl 수용액과 차이를 나타내었다.

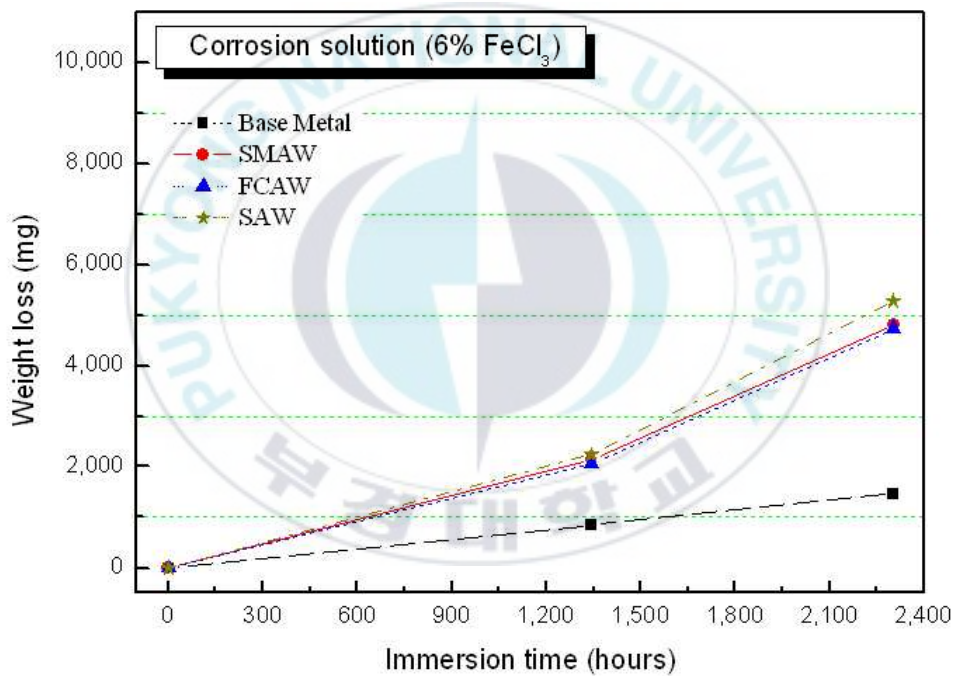


Fig. 17 Weight loss versus immersion time of specimens in 6% FeCl_3 solution

4.4 침지 4320시간의 무게감량

4.4.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 무게감량

3.5% NaCl 수용액에서 4320시간(180일)동안 침지 부식 후 각 용접방법별 용접재와 모재의 부식 전 무게와 4320시간 부식 후 부식에 의한 무게 그리고 무게 감소량을 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Weight loss of 3.5% NaCl solution

용접방법 \ 무게	부식 전 무게 (g)	4320시간 부식 후 무게 (g)	감소량 (mg)
Base Metal	176.4194	175.95125	468.15
SMAW	199.2333	198.39625	837.05
FCAW	198.8391	197.71975	1119.35
SAW	217.449	216.263	1186

이에 의하면, SAW에 의한 용접재가 1186mg, FCAW에 의한 용접재가 1119.35mg, SMAW에 의한 용접재가 837.05mg 그리고 모재가 468.15mg의 부식에 의한 무게 감소량을 보였다.

그리고, 1440시간(60일)의 부식감량과 4320시간(180일) 침지 후 부식에 의한 무게감량을 각 용접방법별로 비교하면, SMAW가 648.9mg,

FCAW가 88.285mg, SAW가 943.3mg의 무게감소량을 보여 시간의 경과에 따라서 용접방법에 따라 부식에 의한 무게감량이 증가함을 보였으며, SAW가 가장 많은 무게감소량을 보였다.

Fig.18에 4320시간(180일) 침지 후 용접방법별 용접재의 침지시간과 무게의 감소량을 나타내었다. 이 결과를 보면 모재 및 SMAW가 무게감소량이 적었음을 나타내었으며 FCAW와 SAW가 거의 비슷한 무게감소량을 보였으며, 1400시간까지는 직선적으로 증가하였으나 1440시간 이후는 직선적으로 증가하여 4320시간까지는 거의 동일한 경향으로 증가함을 나타내었다. 이결과를 볼 때 부식 메카니즘이 용접방법별로 동일한 경향임을 알 수 있다.

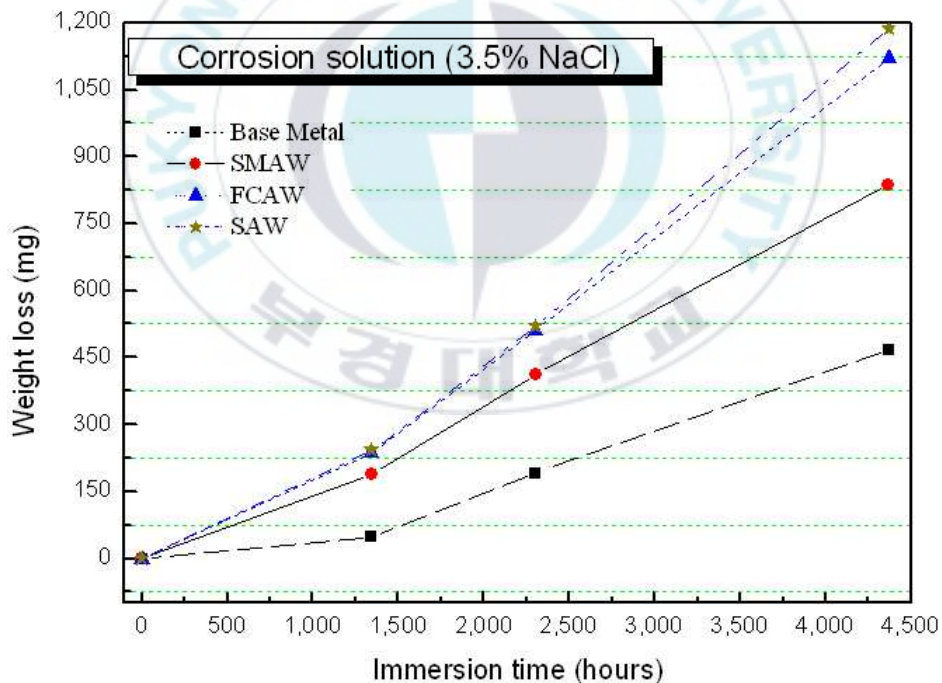


Fig. 18 Weight loss versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

4.4.2 6% FeCl₃ 수용액에서 용접별 무게감량

Table 8은 SMAW, FCAW, SAW 그리고 모재를 6% FeCl₃ 수용액에서 4320시간 침지 후, 무게 그리고 무게감소량을 나타내었다.

부식형태 및 증류수는 공식을 나타내었으며 3.5% NaCl수용액보다 높은 부식 무게감소량을 나타내었다.

Table 8 Weight loss of 6% FeCl₃ solution

용접방법 \ 무게	부식 전 무게 (g)	4320시간 부식 후 무게 (g)	감소량 (mg)
Base Metal	176.6149	172.33575	4279.15
SMAW	199.3276	189.28845	10039.15
FCAW	199.0973	189.1065	9990.8
SAW	217.3059	206.92085	10385.05

용접방법별로는 무게감소량은 앞의 결과와 같이 SAW의 경우 10385.05mg, SMAW의 경우 10039.15mg, FCAW의 경우가 9990.8mg의 무게감소량을 보여 3.5% NaCl수용액에서 무게감소량에서는 SAW가 가장 높은 무게감소량을 FCAW가 다음 무게감소량을 나타낸 것과 다른

결과를 나타내었으나 모재가 가장 낮은 무게감소량을 나타내어 타 경향은 3.5% NaCl 수용액에서 경향과 동일하였다.

Fig. 19는 6% FeCl_3 수용액에서 SMAW, FCAW, SAW와 모재의 시험재를 4320시간(180일)동안 침지 후 시간에 따른 무게감량을 나타내었다. 결과에서 모재가 가장 동일하며, SAW가 가장 높게 나타났다. 모재의 경우는 2160시간까지는 직선적으로 증가하다가 2160시간부터는 무게감소량이 증가하는 경향이며 SMAW, FCAW, SAW의 경우는 앞의 3.5% NaCl 수용액과 같이 1440시간까지는 직선적으로 증가하다가 1440시간 이후부터는 급증하는 경향을 용접방법별 동일한 이 결과를 볼 때 모재보다는 용접재의 경우가 심한 공식의 영향을 나타낸 것으로 동일한 경향을 보였다.

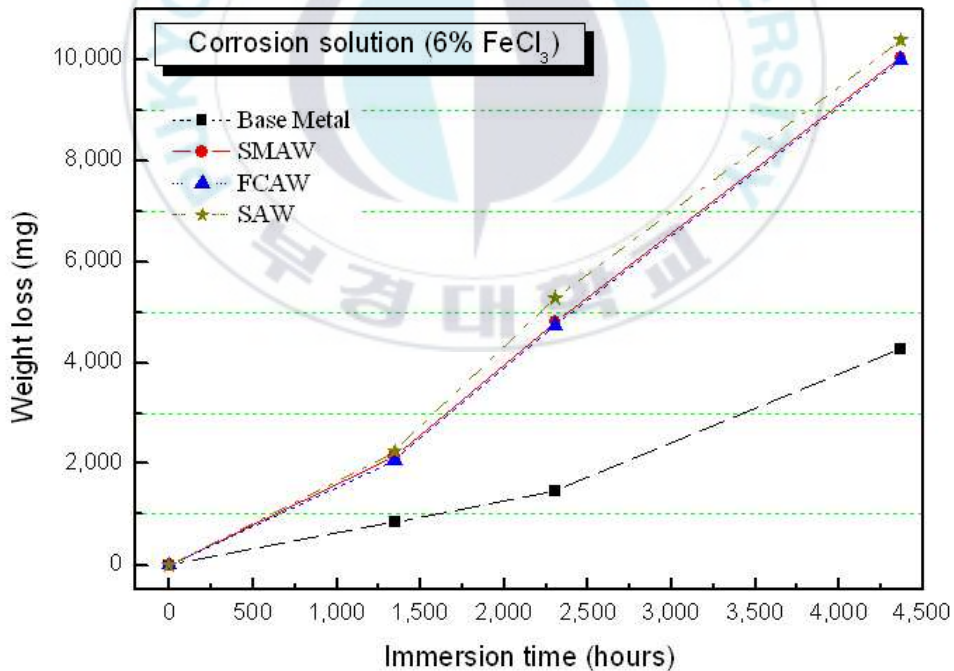


Fig. 19 Weight loss versus immersion time of specimens in 6% FeCl_3 solution

4.5 침지 1440시간 동안의 부식전위 변화

4.5.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 전위 변화

Fig. 20은 3.5% NaCl 수용액에서 1440시간(60일) 침지시켜 SMAW, FCAW, SAW 그리고 모재의 부식전위의 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 부식전위의 측정은 수용액에 침지시킨 다음 10분 동안 안정화시킨 후에 측정하였다. 이 결과를 보면 부식시간의 경과에 따라 모재를 제외하고 용접재의 경우는 부식전위가 증가함을 나타내었다. 그러나 SAW의 경우 낮은 전위에서 시간의 경과에 따라 급격히 증가하는 경향을 보였으나 SMAW와 FCAW의 경우 완만한 증가의 전위증가 경향을 나타내었다. 부식 용접재의 경우 시간의 경과에 따른 전위의 증가는 동일한 경향을 나타내었다. 이 결과로 각 용접방법에 의한 용접재의 부식 경향을 알 수 있다.

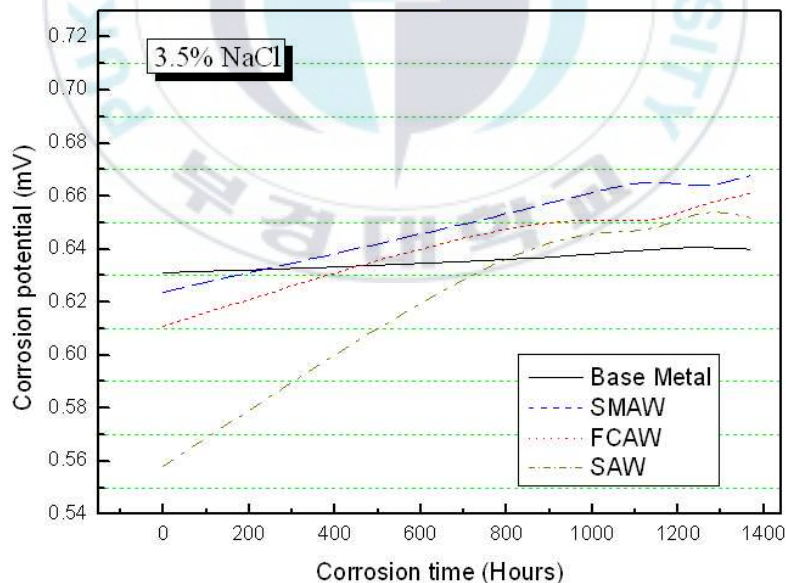


Fig. 20 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

4.5.2 6% FeCl₃ 수용액에서 용접별 전위변화

Fig. 21은 6% FeCl₃ 수용액에서 1440시간(60일)동안 침지시켜 부식전위의 변화양상을 SMAW, FCAW, SAW 그리고 모재의 측정결과를 나타낸 것이다.

이 결과를 보면 모재와 FCAW, SAW는 부식시간의 경과에 따라 (+)측 방향 전위가 증가하였다. 그러나 SMAW의 경우는 (-)측 방향으로 전위가 감소하였다가 부식시간 1000시간을 지나서 부터는 증가하는 경향을 나타내어 각 용접재와 모재 모두 1000시간 이후부터는 전위가 증가하는 동일한 경향을 나타내었다. SMAW의 경우 순간적으로 부식에 대한 저항성을 나타낸 것으로 판단된다.

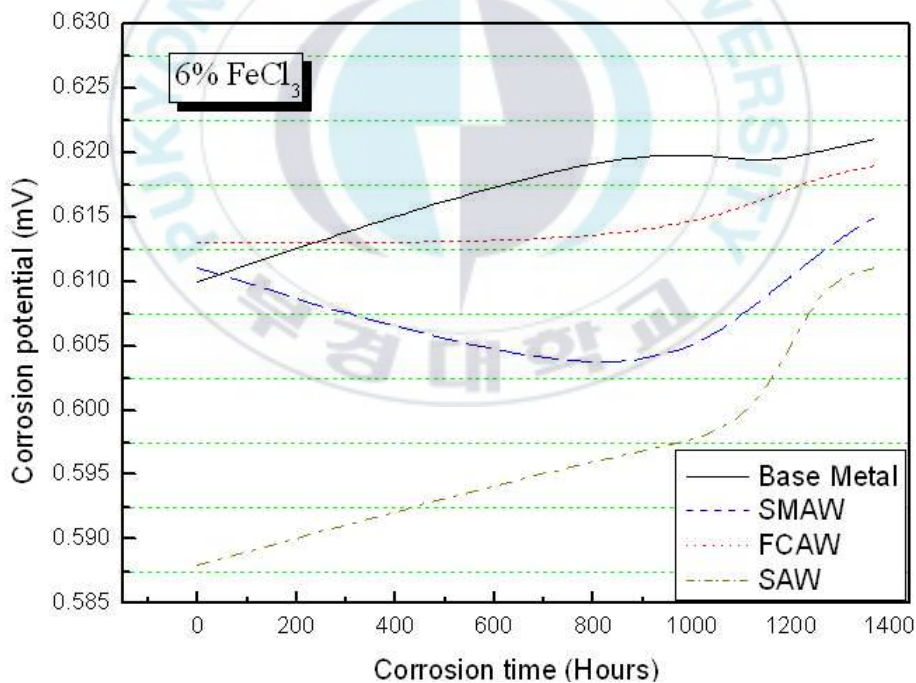


Fig. 21 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 6% FeCl₃ solution

4.6 침지 2160시간 동안의 부식전위변화

4.6.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 전위변화

Fig.22는 3.5% NaCl 수용액에서 SMAW에 의한 용접재, FCAW에 의한 용접재, SAW에 의한 용접재 그리고 모재를 2160시간(90일)동안 침지시켜 측정한 부식전위의 값을 나타낸 것이다.

모재의 경우 1500시간까지는 거의 변화가 없고, 1500시간 이후부터는 부식전위가 (+)방향으로 증가하였다. 그러나 용접재의 경우 모두가 1500시간까지는 증가하였다가 감소하다가 2000시간 이후부터는 다시 (+)방향으로 증가하는 양상을 나타내었다. 이 경향은 3가지 용접재의 경우 동일한 경향을 보였다. 이러한 경향은 1500시간부터 2000시간 까지 거의 변화가 없는 것은 이 시간 사이에는 재료에 부동태 피막이 생성된 것으로 부식이 덜 진행되는 것으로 나타났다.

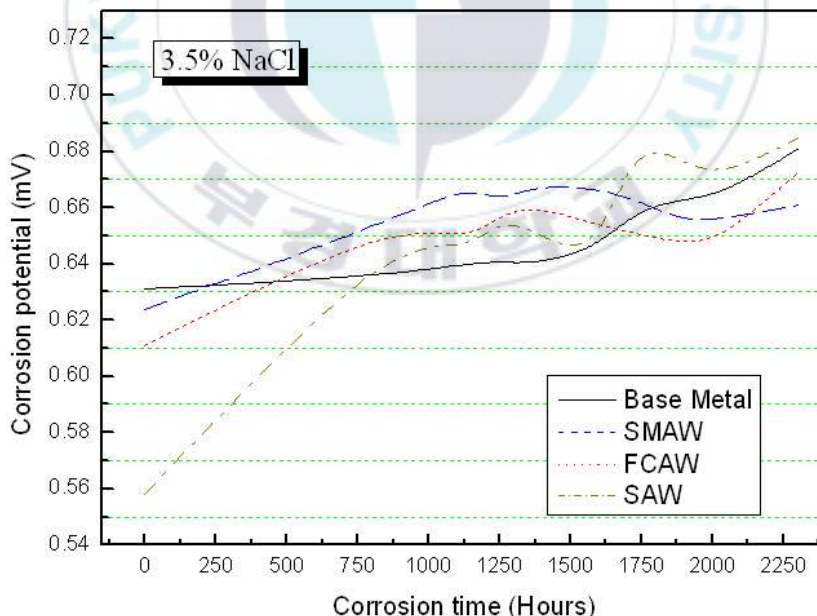


Fig. 22 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

4.6.2 6% FeCl₃ 수용액에서 용접별 전위변화

Fig. 23은 6% FeCl₃ 수용액에서 SMAW, FCAW, SAW와 모재에 대하여 2160시간(90일)동안 침지시켜 시간의 경과에 따른 부식전위의 변화양상을 용접방법별로 비교하여 나타낸 것이다.

6% FeCl₃ 수용액에서의 부식전위양상은 초기에는 시험편 표면에 Cl⁻ 이온의 농도가 증가함에 따라 공식이 나타난 것으로 알 수 있었다. 그러므로 공식이 개시 이후는 전위의 양상이 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 SMAW의 경우는 약간 감소하는 차이를 보였다. 그러다 1250시간 이후부터는 더욱 증가하다가 1750시간 이후 다시 감소하였다. 2160시간 이후는 다소 증가함을 나타내었다.

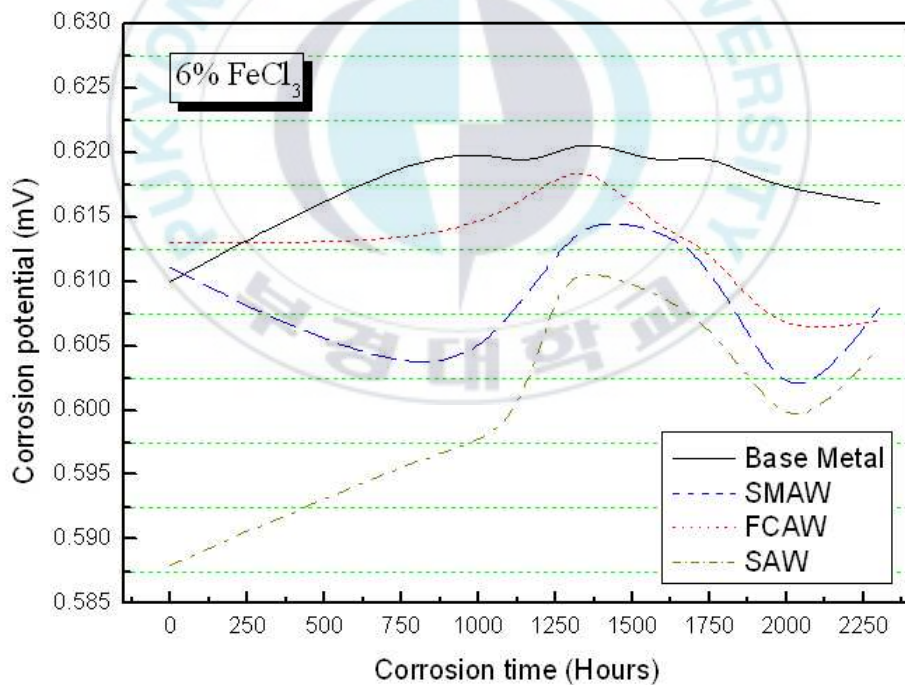


Fig. 23 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 6% FeCl₃ solution

4.7 침지 4320시간 동안의 부식전위 변화

4.7.1 3.5% NaCl 수용액에서 용접별 전위변화

Fig. 24는 4320시간(180일)동안 3.5% NaCl 수용액 침지 후 SMAW, FCAW, SAW 그리고 모재의 부식시간의 경과에 따른 부식전위의 변위 양상을 나타내었다. 전반적으로 침지 초에는 재료표면에 산화피막의 형성과 더불어 피막내 염소이온의 증가로 인해 1440시간 이후 감소하는 경향을 보이다가 SAW를 제외하고 타 용접재의 경우 2000시간 이후 점차 안정되는 경향을 보여 부식전위의 큰 변화를 보이지 않았다.

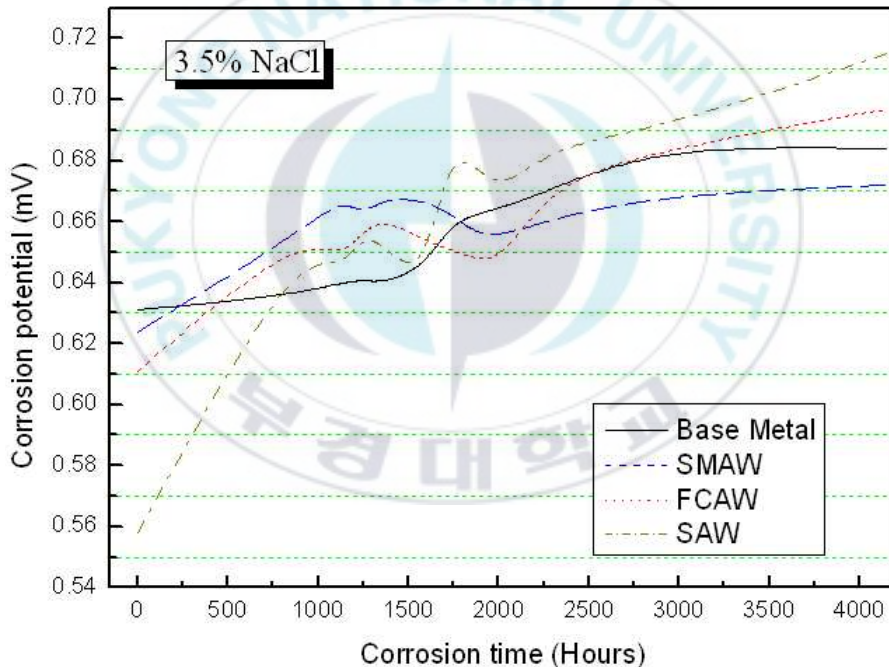


Fig. 24 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

4.7.2 6% FeCl₃ 수용액에서 용접별 전위변화

Fig. 25는 6% FeCl₃ 수용액에서 SMAW, FCAW, SAW와 모재를 4320시간(180일) 동안 침지 후 부식전위를 변화양상을 나타내었다.

결과를 보면 부식시간 2500시간까지는 시험편 표면 Cl⁻이온의 농도 증가도 공식이 크게 증가함으로 부식전위의 증가감소의 경향을 나타냈다. 그러나 부식전위 2500시간 이후부터는 부식전위가 약간 증가하며 안정되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 3가지 용접재와 모재가 동일한 경향을 보였다.

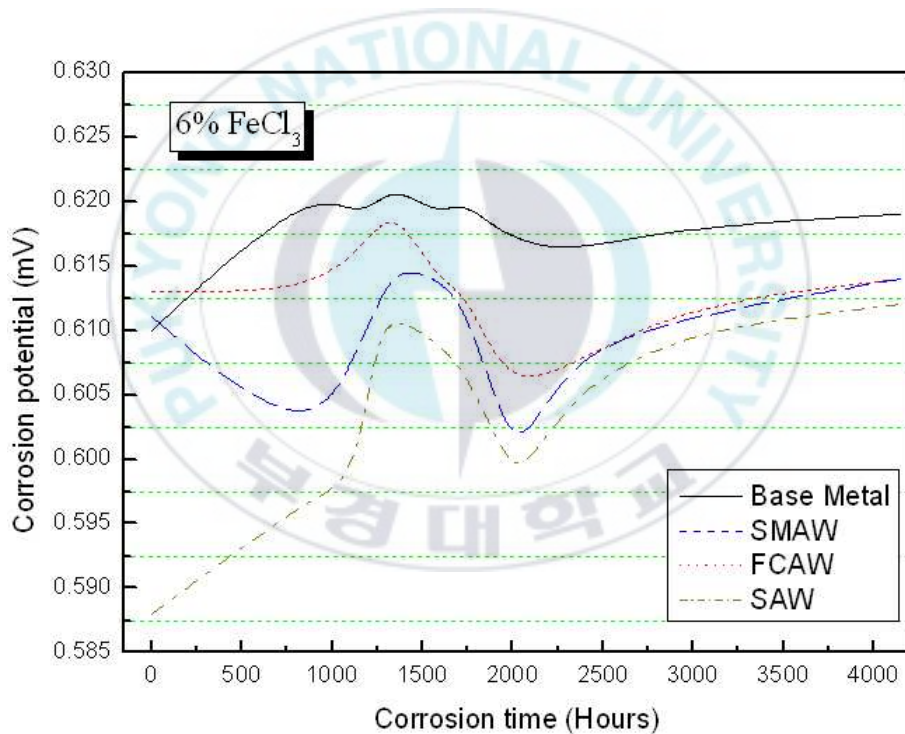


Fig. 25 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 6% FeCl₃ solution

제 5 장 용접별 2160시간의 부식피로강도 결과

5.1 3.5% NaCl 수용액에서 2160시간 부식피로강도

5.1.1 SMAW에 의한 용접재의 결과

Fig. 26은 3.5% NaCl 수용액에 2160시간(90일) 동안 침지 후 부식피로강도 시험결과를 작용응력 (σ)와 반복회전수(N_f)의 관계를 SMAW와 모재의 결과와 비교하여 표시하였다. 이 결과를 보면 부식에 의한 피로 시험 시간강도의 경우와 피로강도 모두 SMAW보다 모재가 높게 나타났다. SMAW의 부식피로강도가 13.87kg/mm^2 로 알 수 있었다.

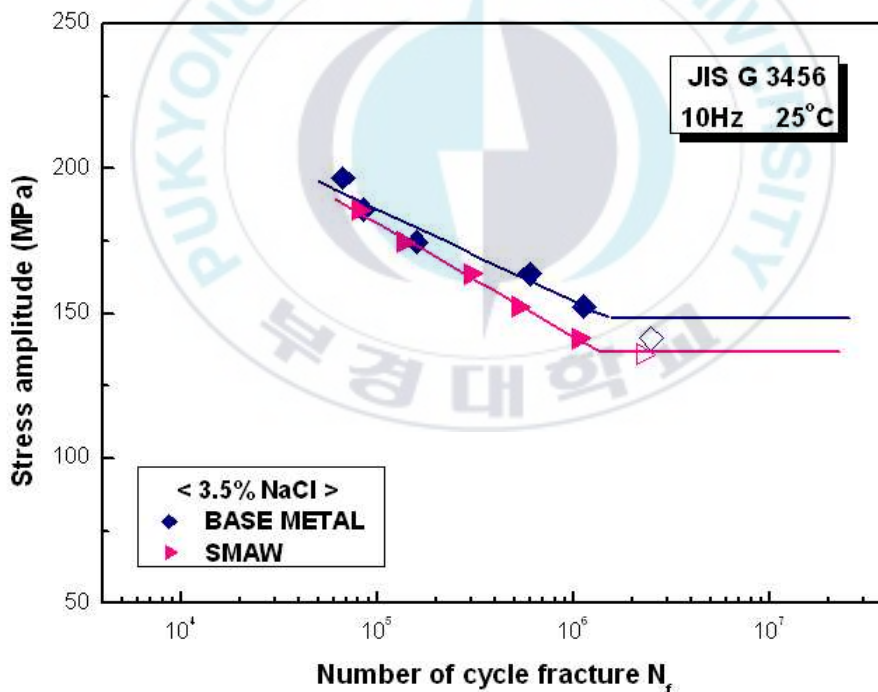


Fig. 26 Fatigue test results of Base Metal and SMAW (2160 hours immersion in 3.5% NaCl solution)

5.1.2 FCAW에 의한 용접재의 결과

Fig. 27은 3.5% NaCl수용액에 2160시간(90일) 동안 침지한 후 부식 피로강도시험을 한 FCAW의 작용응력과 피로파괴강도의 결과를 나타내었다.

이 결과 SMAW보다 FCAW가 시간강도 및 피로강도가 약간 낮게 나타났으며, 역시 FCAW보다 모재가 시간강도와 부식피로강도가 높게 나타났다. 이 경향은 SMAW와 동일한 경향으로 나왔으며 FCAW의 부식피로강도는 12.76kg/mm^2 로 SMAW보다 피로강도가 1.1kg/mm^2 낮게 되었다.

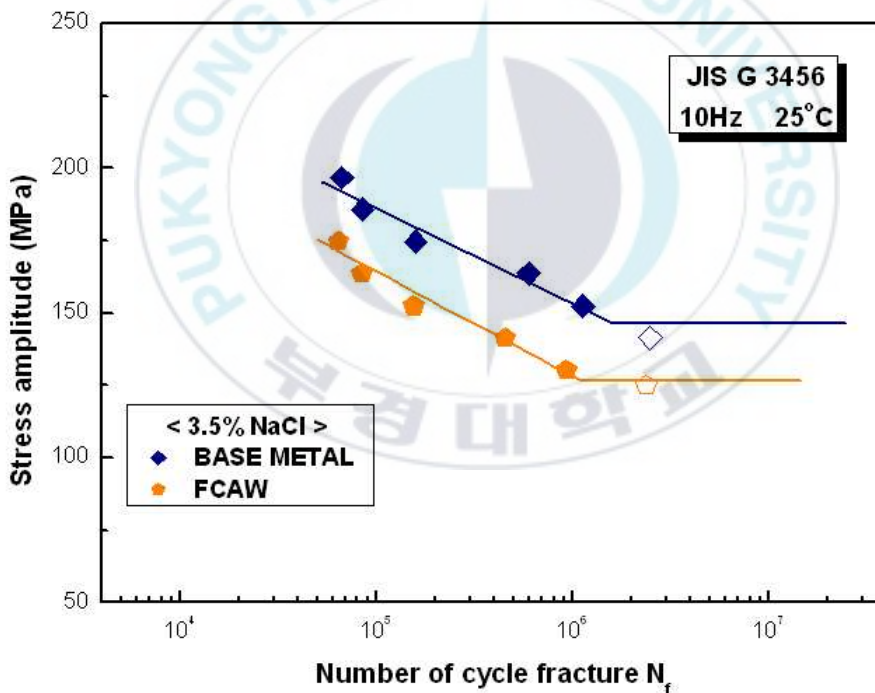


Fig. 27 Fatigue test results of Base Metal and FCAW (2160 hours immersion in 3.5% NaCl solution)

5.1.3 SAW에 의한 용접재의 결과

Fig. 28은 3.5% NaCl수용액에 2160시간(90일) 동안 침지 후 부식피로강도 시험을 한 SAW에 의한 용접재의 결과를 작용응력과 반복회수(N_f)의 관계를 나타낸 것이다.

이 결과를 보면 SAW의 시간강도보다 모재의 시간강도가 높게 나타났으며 부식피로강도 역시 SAW보다 모재의 피로강도가 높게 나타났으며 SAW에 의한 용접재의 피로강도가 12.193 kg/mm^2 로 모재의 부식피로강도 14.428 kg/mm^2 보다 2.235 kg/mm^2 낮게 나타났다.

이 결과를 보면 SMAW, FCAW, SAW가 동일한 경향을 보였다.

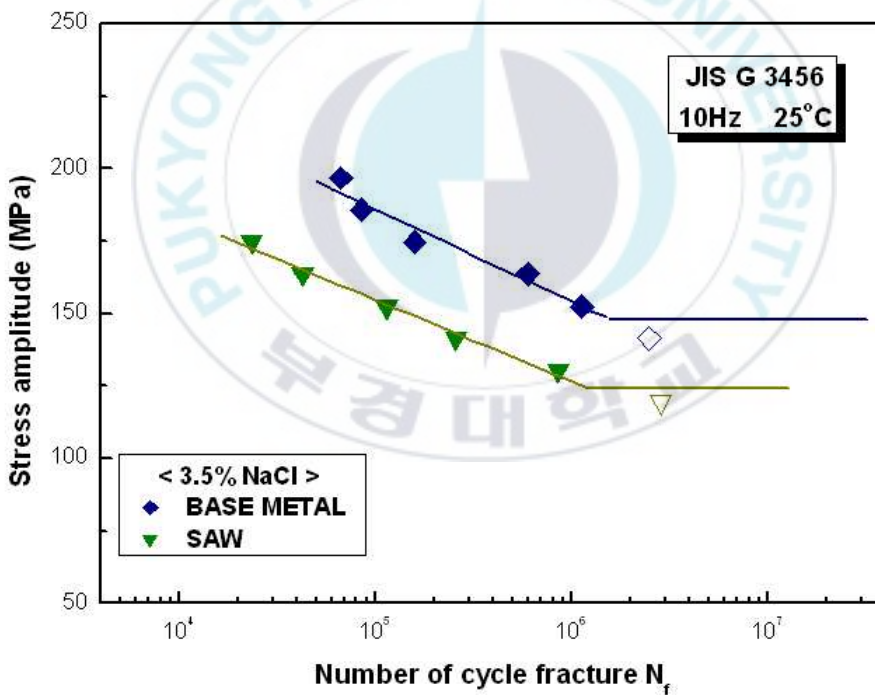


Fig. 28 Fatigue test results of Base Metal and SAW (2160 hours immersion in 3.5% NaCl solution)

5.1.4 용접방법별 결과

Table 9에는 3.5% NaCl 수용액에 2160시간(90일) 동안 침지 후 SMAW, FCAW, SAW와 모재의 피로강도 결과를 나타내었다.

이 결과 용접방법별로 비교해 보면, SMAW>FCAW>SAW로 SMAW에 의한 용접재가 가장 높은 부식피로강도를 보였으며, 용접재보다 모재가 가장 높게 나타났다. 이 결과를 이용하여 이 분야 용접부식피로강도의 설계자료로 이용할 수 있으며, SMAW의 피로강도가 가장 높게 나타남을 알았다.

Table 9 Fatigue limit of Base Metal and Welding method (2160 hours immersion in 3.5% NaCl solution)

Welding method	Date	Fatigue Limit	
Base Metal	141.4MPa	14.428kg/mm ²	
SMAW	135.9MPa	13.867kg/mm ²	
FCAW	125MPa	12.755kg/mm ²	
SAW	119.5MPa	12.193kg/mm ²	

또 Fig. 29는 3.5%NaCl 수용액에서 2160시간(90일) 동안 침지 후 SMAW, FCAW, SAW의 부식피로강도와 모재의 부식피로강도를 비교하여 표시했다.

이 결과를 보면 모재의 시간강도가 가장 높고 다음 SMAW이고 FCAW와 SAW는 부식피로 시간강도의 차이는 크게 나타나지 않았다. 마찬가지로 부식피로강도도 시간강도의 결과와 동일하게 나타났다.

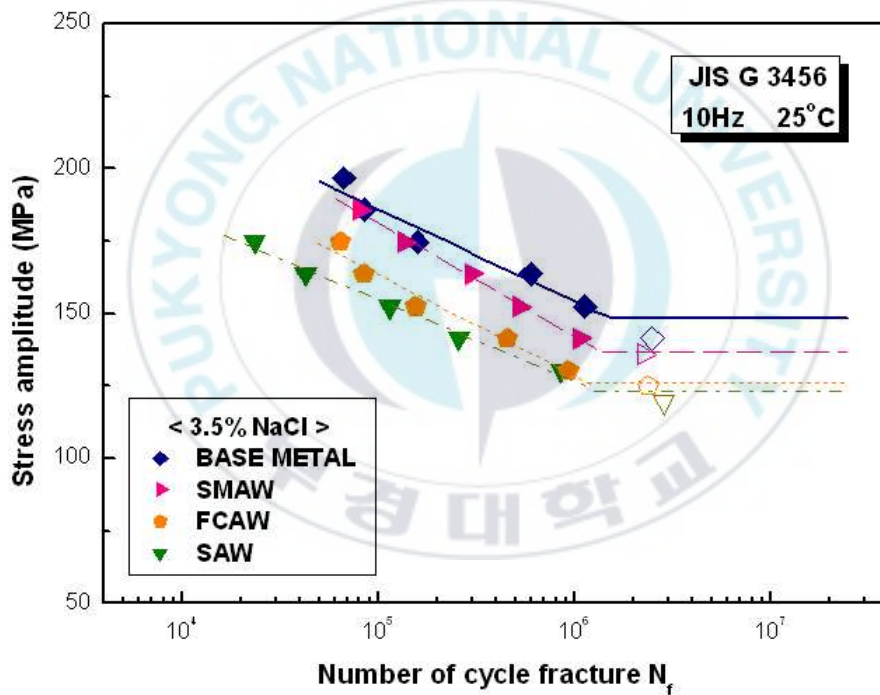


Fig. 29 Fatigue test results according to welding methods in 3.5% NaCl

5.1.5 3.5% NaCl 수용액에서 피로파괴강도비교

Fig. 30은 3.5% NaCl 수용액에서 2160시간(90일) 동안 침지 후 SMAW, FCAW, SAW와 모재에 대하여 작용응력 고응력에서 174.7 MPa와 중응력 151.4MPa, 저응력 130.4MPa의 응력에서 각각 피로강도 즉 반복회수(N_f)의 관계를 용접방법별로 비교하여 표시한 것이다.

이 결과를 보면 Base Metal의 경우가 피로강도인 반복회수가 가장 길고 다음이 SMAW이고, SAW의 결과가 가장 낮은 피로강도를 보였다. 그러나 고응력에서는 FCAW와 SAW의 차이가 나타났으나 중응력 및 저응력에서는 큰 차이가 없었고 특히 저응력은 거의 일치하였다.

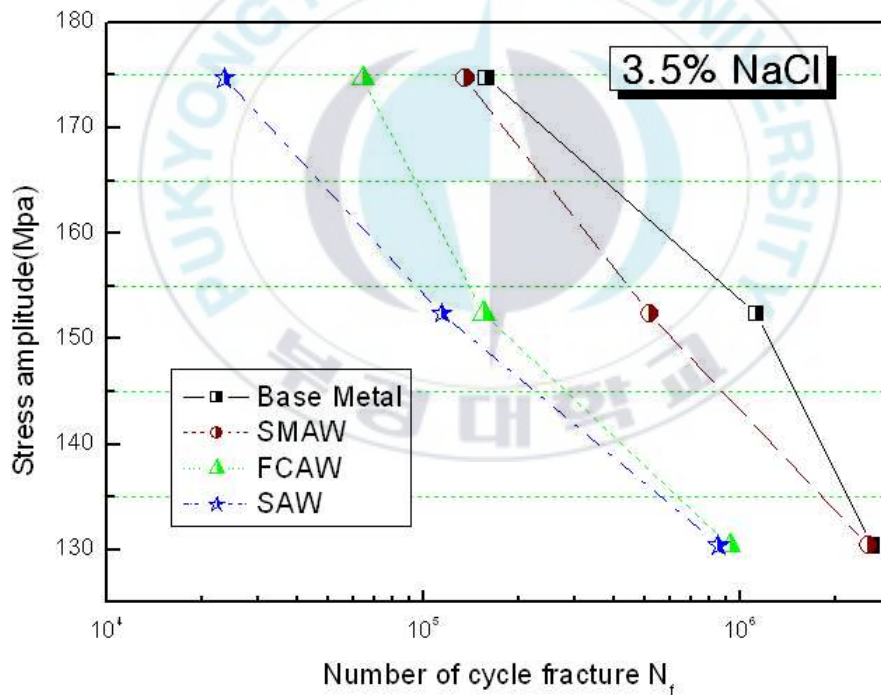


Fig. 30 Comparison of number of cycle according to welding methods in three stress point of low, middle, high (3.5% NaCl)

Table 10은 3.5% NaCl 수용액에서 2160시간(90일) 동안 침지 후 각 용접방법별로 고응력 174.7 MPa 강도비 80%, 중응력 151.4 MPa 강도비 70%, 저응력 130.4 MPa 강도비 60% 에 해당되는 응력을 작용할때의 부식피로강도 즉 작용응력에 대한 반복회수를 나타내었다.

이 결과를 보면 각 모든 응력에서 SMAW의 부식피로강도가 가장 높고, 다음 FCAW이며, SAW가 가장 낮게 나타났다. 역시 모재가 각 응력에서 용접재보다 높은 부식피로강도를 보였다.

Table 10 Stress and cycle comparison after 3.5% NaCl corrosion

stress Welding method	130.4 (60%)	151.4 (70%)	174.7 (80%)
Base Metal	2,615,400	1,125,400	157,761
SMAW	2,541,210	517,277	135,421
FCAW	926,481	154,645	64,187
SAW	851,242	114,151	23,457

5.2 6% FeCl₃ 수용액에서 2160시간 부식피로강도

5.2.1 SMAW에 의한 용접재의 결과

Fig. 31은 6% FeCl₃ 수용액에서 SMAW에 의한 용접재를 2160시간 (90일) 동안 침지 후 용접재의 부식피로강도를 작용응력과 반복회수 (N_f)와의 관계를 나타내었다.

이 결과를 보면 SMAW와 모재의 부식시간강도의 차이는 크지 않으나 모재의 시간강도가 약간 높게 나타났다. 그리고 피로강도의 차이도 역시 모재가 약간 높게 나타났으나 SMAW보다는 큰 차이가 없었다. SMAW의 피로강도는 12.7 kg/mm²로 나타나 모재의 피로강도 13.306 kg/mm² 보다는 0.551 kg/mm² 낮게 나타났다.

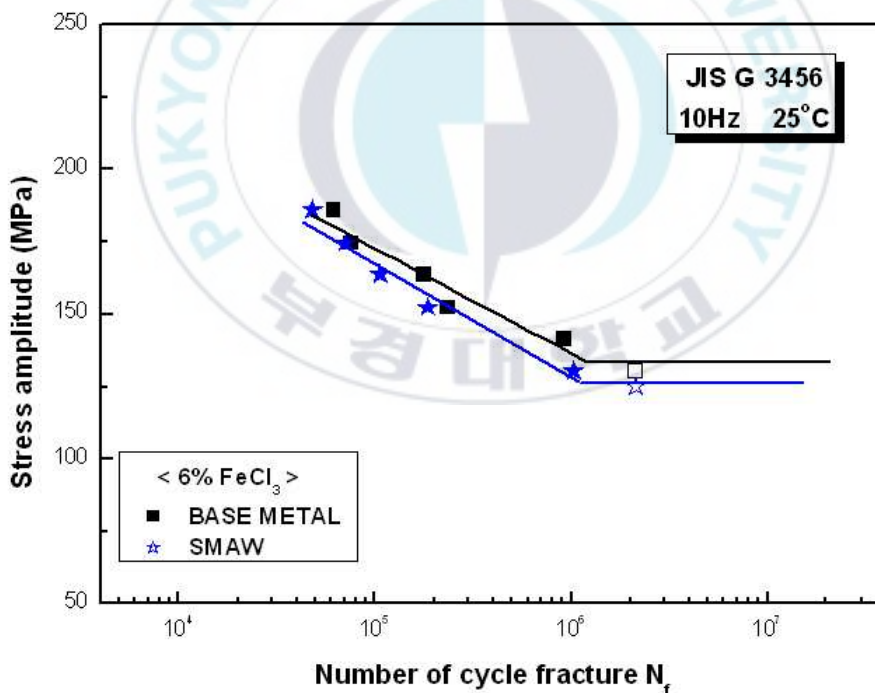


Fig. 31 Fatigue test results of Base Metal and SMAW (2160 hours immersion in 6% FeCl₃ solution)

5.2.2 FCAW에 의한 용접재의 결과

Fig. 32는 FCAW에 의한 용접재를 6% FeCl_3 수용액에 2160시간(90일) 동안 침지 후 부식피로강도시험을 실시하여 작용응력과 반복회수(N_f)의 관계를 모재와 비교하여 나타냈다.

이 결과를 보면 앞의 SMAW와 동일한 경향으로 FCAW와 모재의 시간강도는 모재가 높았으나, FCAW의 피로강도는 SMAW보다는 높지 않았다. 그리고 부식피로강도도 역시 FCAW의 피로강도보다 모재의 피로강도가 높았다. FCAW의 피로강도는 12.193 kg/mm^2 로 SMAW의 부식피로강도가 0.562 kg/mm^2 FCAW보다 높았다. 역시 모재의 피로강도가 가장 높게 나타났다.

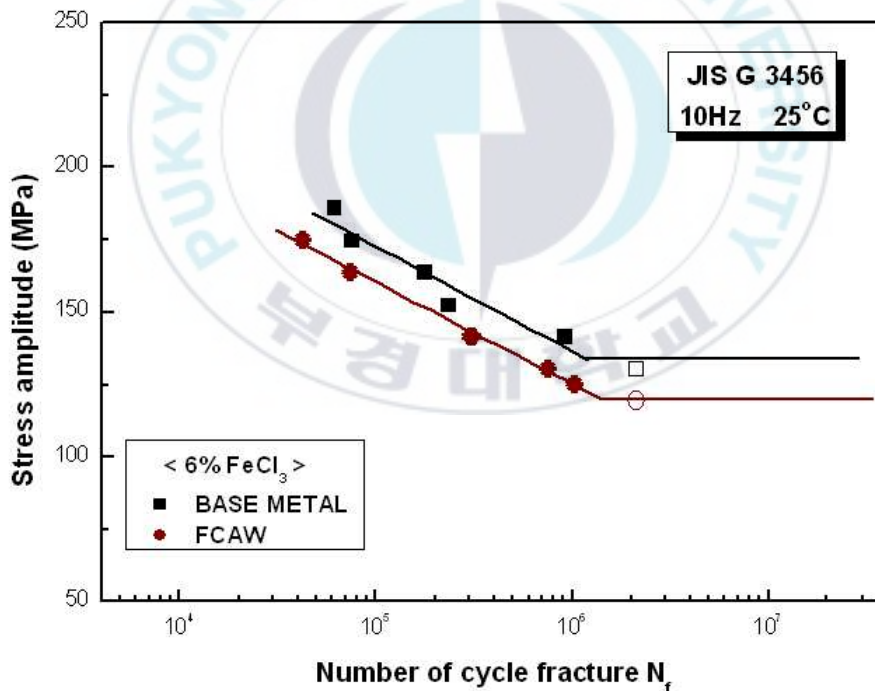


Fig. 32 Fatigue test results of Base Metal and FCAW (2160 hours immersion in 6% FeCl_3 solution)

5.2.3 SAW에 의한 용접재의 결과

Fig. 33은 SAW의 피로시험편을 6%FeCl₃ 수용액에서 2160시간(90일) 동안 침지부식 후, 부식피로강도와 모재의 피로강도를 작용응력과 반복회수와의 관계를 나타내었다.

이 결과 역시 시간강도는 모재의 시간강도보다 낮았으며 부식피로강도 역시 모재보다 낮게 나타났다. SAW의 피로강도는 11.071 kg/mm²로 모재보다 2.235 kg/mm² 낮았으며 피로강도 및 시간강도의 경향은 SMAW, FCAW 그리고 SAW와 동일한 경향으로 나타났다.

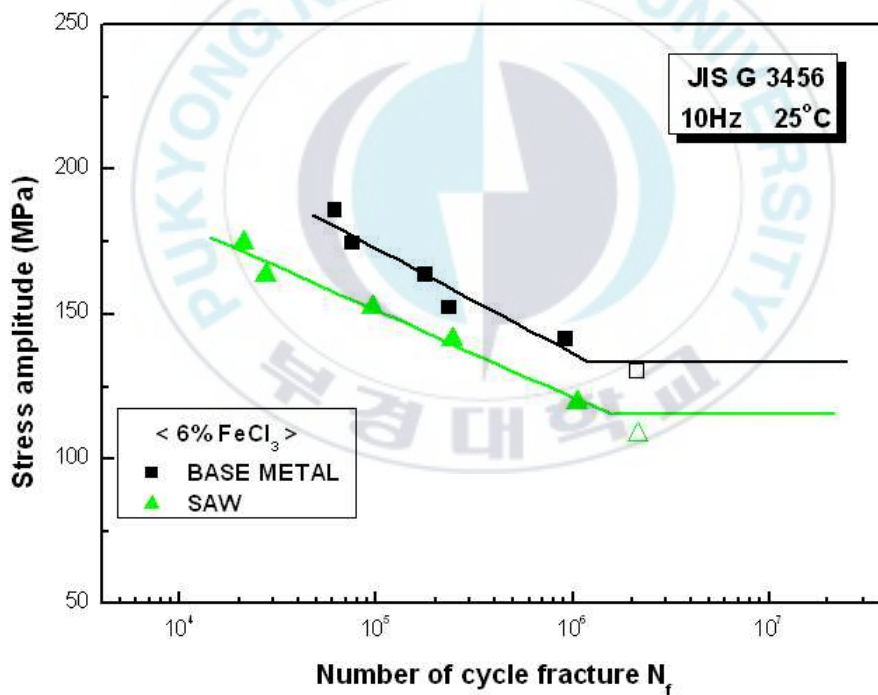


Fig. 33 Fatigue test results of Base Metal and SAW (2160 hours immersion in 6% FeCl₃ solution)

5.2.4 용접방법별 결과

Table 11은 SMAW에 의한 용접재와 FCAW에 의한 용접재 그리고 모재의 6%FeCl₃ 수용액에서 2160시간 침지 부식 후 부식피로파괴 강도 시험을 한 결과를 나타내었다.

이 결과에서 SMAW가 피로강도가 가장 높았고, 다음 FCAW이며, SAW가 가장 낮게 나타났다. 그러므로 3가지 용접방법 중에서는 수동 용접인 SMAW에 의한 용접재의 경우가 가장 높은 부식피로파괴강도를 보였다.

Table 11 Fatigue limit of Base Metal and Welding method (2160 hours immersion in 6% FeCl₃ solution)

Date Welding method	Fatigue Limit	
Base Metal	130.4MPa	13.306kg/mm ²
SMAW	125MPa	12.755kg/mm ²
FCAW	119.5MPa	12.193kg/mm ²
SAW	108.5MPa	11.071kg/mm ²

Fig. 34는 6% FeCl_3 수용액에서 SMAW, FCAW, SAW 그리고 모재를 2160시간 침지 부식 후 피로시험을 실시하여 그 결과를 작용응력과 반복회수(N_f)와의 관계를 나타내었다.

이 결과를 보면 시간강도의 경우 모재가 가장 높고, 다음 SMAW, 그리고 FCAW이고, SAW가 가장 낮게 나타났다. 이 결과를 보면, 역시 SMAW가 용접재 중 부식피로강도가 가장 높아 3가지 용접법중에서는 부식피로강도 설계에 가장 좋은 용접법으로 생각된다.

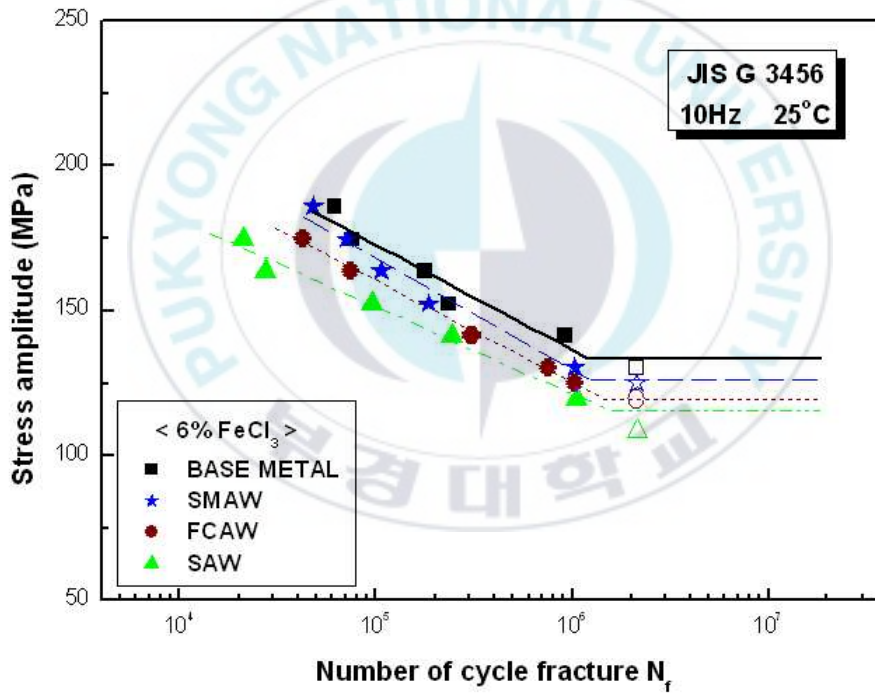


Fig. 34 Fatigue test results according to welding methods in 6% FeCl_3

5.2.5 6% FeCl₃ 수용액 피로파괴강도비교

Fig. 35는 6% FeCl₃ 수용액에 2160시간 침지 부식한 SMAW, FCAW, SAW와 모재에 대하여 고응력 174.7 MPa, 중응력 151.4 MPa, 저응력 130.4 MPa 하에서 부식피로강도 시험을 실시하여 작용응력과 반복회수의 관계를 나타냈다.

이 결과에서는 각 응력에서 모재가 가장 파괴강도가 높고 용접재료는 SMAW가 가장 높았다. SMAW의 경우 고응력에는 모재와 큰 차이가 없었으나 저응력에서는 차이를 보였으며 SAW가 각 응력에서 가장 낮은 부식피로강도를 보였다.

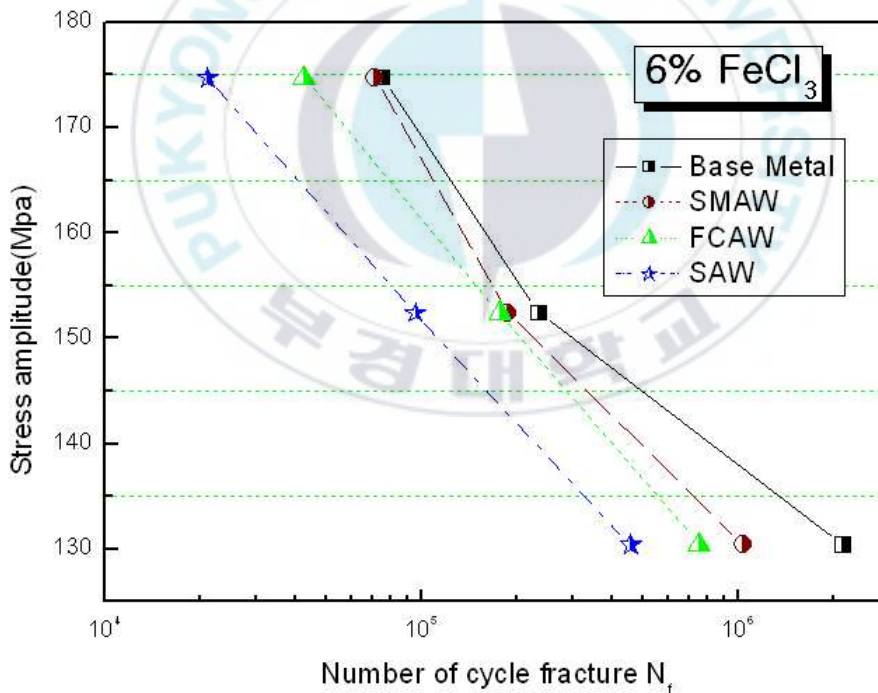


Fig. 35 Comparison of number of cycle according to welding methods in three stress point of low, middle, high (6% FeCl₃)

Table 12는 6% FeCl₃ 수용액에서 각 용접방법별로 2160시간 동안 침지 부식 후 고응력, 중응력, 저응력 하에서 피로강도시험을 한 결과를 표시했다.

이 결과를 보면 각 응력 레벨에서 모두 SMAW의 피로강도가 가장 높았고, 다음 FCAW이며, SAW가 각 응력에서 가장 낮은 부식피로강도를 나타내었다.

이 결과를 볼 때 6% FeCl₃ 수용액에서 부식강도를 용접재 별로 차이를 보였고 SAW의 경우는 낮은 피로강도를 보여, 실제 선박의 부식에 적용하는 설계자료로 이용될 것으로 생각된다.

Table 12 Stress and cycle comparison after 6% FeCl₃ corrosion

stress Welding method	130.4 (60%)	151.4 (70%)	174.7 (80%)
Base Metal	2,142,460	234,656	75,613
SMAW	1,030,550	187,193	71,136
FCAW	752,123	176,036	42,563
SAW	456,762	95,452	21,079

제 6 장 결 론

선박 구조물 용접부의 부식 및 부식피로파괴강도를 정량화할 수 있도록 용접방법에 따른 부식 및 부식피로실험을 실시하여 용접부에 대한 피로파괴성장거동 및 잔류수명을 평가하기 위해 부식에 의한 용접재의 무게감소량과 전위량 변화, 그리고 3.5% NaCl 수용액과 6% FeCl₃ 수용액에서 침지 후 피로파괴강도시험을 실시하여 S-N선도를 얻었으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 3.5% NaCl 수용액에 SMAW(수동용접에 의한 용접재), FCAW(반자동용접에 의한 용접재), SAW(자동용접에 의한 용접재) 그리고 모재에 대한 1440시간 침지 후, 부식무게감소량은 SAW가 242.7mg으로 가장 높았고, SMAW가 188.15 mg으로 용접재중 가장 낮은 무게감소량을 나타내었다. 이는 SMAW가 공식의 영향을 적게 받는 것으로 생각된다.
2. 3.5% NaCl 수용액에서 2160시간 및 4320시간 침지 후, SMAW, FCAW, SAW 모두 SAW의 무게감소량이 가장 높았으며, SMAW가 가장 낮아 무게감소량의 순서는 SAW>FCAW>SMAW의 순으로 나타났다. 이는 SMAW가 공식의 영향이 가장 낮으며 SAW가 가장 많은 영향을 받은 것으로 생각된다.
3. 6% FeCl₃ 수용액에서 SMAW, FCAW, SAW와 모재를 1440시간, 2160시간, 4320시간 침지 후, 부식에 의한 무게감소량을 측정한 결과 역시 SAW가 가장 부식 무게감소량이 높았으며, FCAW가 가장 낮아 3.5% NaCl 수용액의 결과와 차이를 나타내었다. 이는 6% FeCl₃ 수용액에서의 Cl⁻¹ 이온의 영향으로 생각된다.

4. 3.5% NaCl 수용액의 부식전위 변화는 처음 1440시간에는 공식의 부식전위로 나타났으며, 1500시간에서 2000시간 사이에는 부식전위의 변화가 일정하게 나타나 재료에 부동태 현상이 나타나 부식진행이 덜 진행된 것으로 보여진다.
5. 6% FeCl₃ 수용액에서의 부식전위 양상을 초기에는 시험편 표면에 Cl⁻¹ 이온의 농도가 높아 농도가 증가하여 부식전위의 양상이 약간 증가하는 경향을 나타내었다.
6. 3.5% NaCl 수용액에 2160시간 침지 후, SMAW, FCAW, SAW의 시강강도 및 피로강도시험을 실시하여 SMAW가 13.867 kg/mm², FCAW가 12.755 kg/mm², SAW가 12.193 kg/mm², 모재가 14.428 kg/mm²의 피로강도 결론을 얻었다. 이 결과 SMAW의 부식피로강도가 가장 높고 SAW의 피로강도가 가장 낮아 무게감소량과 같은 경향으로 나타났다.
7. 6% FeCl₃ 수용액에서 2160시간 침지한 SMAW, FCAW, SAW와 모재의 부식피로강도 결과가 SMAW가 12.755 kg/mm², FCAW가 12.193 kg/mm², SAW가 11.071 kg/mm², 모재가 13,306 kg/mm²로 3.5% NaCl 수용액과 같이 SMAW의 피로강도가 가장 높고, SAW가 가장 낮아 동일한 경향을 얻었으며, 6% FeCl₃ 수용액에서의 부식피로강도가 3.5% NaCl 수용액에 비해 약 1~1.5% 피로강도가 낮아 부식 영향이 크게 나타났음을 알았다.

이와 같은 본 연구의 결과로부터 용접부의 기계적 성질은 모재보다 저하되는 점이 있지만, 전체적으로 수동용접이 반자동 및 자동용접에 비해 부식 및 피로파괴강도가 우수하게 나타남을 알 수 있다.

따라서, 본 연구의 실험결과에 의하면, 선박용 구조물에 있어서 특히 부식 및 피로파괴에 주의하여야 하는 부분의 용접작업은 수동용접을 통한 작업에 우선순위를 두어야 할 것으로 판단되고, 자동용접의 용접효과를 높이기 위해 수동용접 조건을 최대한 응용할 수 있는 자동용접장치의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

그러나, 이와 같은 결과는 본 연구의 제한된 실험과 고찰에 의한 것으로서, 통상 자동용접의 우수성에 대한 보고와 대치되는 일면을 보여주고 있으므로, 용접재, 용접방법, 실험방법 및 고찰방법에 대해 더욱 정밀한 접근이 필요한 것임을 밝혀 두고자 한다.

※ 참고문헌

- (1) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, pp. 1~31, 1999.
- (2) 김영표, 김우식, “배관 용접부에 존재하는 결함의 피로수명 평가”, 대한용접학회지 제 19권 제 5호, pp. 460~465, 2001.
- (3) 방명성, 차영철, 박종건, 신편 재료시험법, 원창출판사, p. 139, 2002.
- (4) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, 1999.
- (5) P. C. Paris and F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528~534, 1963.
- (6) H. Liebowitz, Fracture. Vol. III, 1971.
- (7) ASTM E466, "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials", 1996.
- (8) 이강용, “재료강도학” pp 82~84, 1999.
- (9) 권기태, 건설기계와 시공, 동명사, pp. 11~20, 2002.
- (10) 구병춘, 김재훈, 양승용, 서정원, 정홍채, SM490A 용접 이음부의 피로시험 및 수명예측, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, p. 879, 2004.
- (11) 한승호, 신병천, 이 웅, 최전호, 고장력 강판 부분용입 맞대기 용접부의 피로균열진전수명 평가, Journal of KWS, Vol. 21, No. 1, 2003.
- (12) 석동현, 김지현, 한태진, 건설기계 공학, 동진출판사, pp. 437~444, 1998.
- (13) 김창주, 금속기계 재료시험, 학문사, p. 351, 1993.
- (14) 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학, 원창출판사, pp. 119~121, 1992.

- (15) R. I. Stephens, A. Fatemi, R. R. Stephens, H. O. Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 196~205, 2001.
- (16) 小林英男, 破壊力學, 東京, 共立出版株式會社, pp. 57~63, 131~135, 1993.
- (17) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp. 10~16, 1989.
- (18) 禹興植 외 2명, 재료파괴공학, 서울, 보성문화사, pp. 147~170, 265~273, 1993.
- (19) S. Han, B. Shin and J. Han, *Fatigue Strength and Remaining Life in the Butt Welds Containing Penetration Defects*, 5th Pacific Structural Steel Conference, Seoul, Korea, Oct, pp. 153~158, 1998.
- (20) D. H. Ekstrom and W. H. Munse, *The Effect of Internal Weld Defects the Fatigue Behavior of Welded Connections*, ICHRP No. 137, 1973.
- (21) Y. Paik and Y. Chang, *Fatigue Life Assessment of Steel Bridge Butt Joint Weld with Defects*, Journal of KWS, pp. 204~212, 2000.
- (22) F. V. Lawrence and Y. Tobe, *Fatigue Crack Propagation Strength in Butt Welds Containing Penetration Defects*, Welding Research Supplement, pp. 221~225, 1973.
- (23) L. W. Zachary and C. P. Burger, *Stress Concentration in Double Welded Partial Joint Penetration Butt Welds*, Welding Research Supplement, pp. 77~82, 1976.
- (24) 이수진, 금속재료 규격 데이터 북, 골드출판사, pp. 32~35, 2003.
- (25) 미텍엔지니어링, 강릉대학교 금속공학과, 한국기계연구원, 금속손상 진단, 진영사, pp. 49~107, 2002.

A Study on Corrosion and Fatigue Strength of Ship Structure Welding Steel

Ju-Hwa Jeong

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

Abstract

There is a strong probability that welding structure, which is particularly used for ship-building, produces defect not in its base metal but in its welding part. This Study has executed digestion of welding agents upon 3 ways of welding such as SMAW, FCAW and SAW in the solution of 3.5% NaCl and 6% FeCl₃ for 60 days, 90 days and 180 days, respectively to make quantitative analysis of the corrosion and fatigue characteristics of the weldment and, consequently, grasped for the tendency by the three welding methods through investigating its Corrosion Weight Loss and Corrosion Potential characteristics, and executed digesting the said three welding agents in two solutions for 90 days and carried out Corrosion Fatigue Test for them in the air and, thereby, made enabled to predict fatigue life and strength by drawing out S-N curve. As the result of this test, the mechanical property of the welding agents was getting lower than the base metal and, whereas, showed that SMAW is, in general, more excellent than FCAW and

SAW in corrosion and fatigue strength. This study, of course, needs additional review through investigating its more concreted test plan and inquiry and, on the one hand, it is suggestive from the test result of this study that auto welding device to make best application of manual welding conditions be developed for the purpose of raising up the effect of auto welding for the areas, which need special attention to their corrosion & fatigue strength, like ship structure.

Key Words : Fatigue Test(피로시험), Weight loss(무게감량), Corrosion Potential(부식전위), SMAW(Shielded Metal Arc Welding; 수동용접), FCAW(Flux Cored Arc Welding; 반자동용접), SAW(Submerged Arc Welding; 자동용접)

감사의 글

2005년 백승준 변리사님의 권유와 지원으로 시작된 배움에 대한 재충전의 주행이 어느덧 목적지에 이르렀습니다. 여러모로 모자란 저임에도 불구하고 시간과 정신적으로 아낌없이 배려해주신 변리사님께 지면을 통해서나마 깊은 감사의 인사를 드립니다.

학문적으로 많이 부족한 저를 물심양면으로 지도하여 주신 박경동 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 교수님께서서는 단순한 지도를 떠나 저의 미진한 학습과 시간부족을 채워주시기 위해 많은 시간과 정열을 쏟으셨습니다. 배움의 결과물을 내어놓는 과정이 얼마나 힘든지를 알 수 있었지만, 이와 같은 결과는 교수님의 지도가 이루어지지 않았다면, 불가능하였을 것입니다. 그리고 저의 부족한 점으로 인해 박경동 교수님의 지도를 충분하게 반영하지 못한 점을 너그럽게 지적하여 주신 김민남, 이수종 교수님께도 감사드리며, 저의 배움을 지도해주신 기계공학부 모든 교수님들과 조교님들께 지면을 통해서나마 감사드립니다.

또한, 저의 대학원 생활과 본 논문을 위한 학습 및 실험을 위해 끊임 없이 지원을 아끼지 않은 연구실의 동욱, 주영 및 종완 학우에게 감사드리고, 사무소의 바쁜 업무 중에도 지원을 아끼지 않은 시현, 한수, 지현씨에게 감사드립니다.

마지막으로, 지금까지도 자식으로서 다하지 못하지만 끝까지 믿음을 잃지 않으시고 기다려주시는 어머니와, 항상 곁에서 저를 배려해주고 이해해주는 아내 조유진과, 건강하고 명량하게 커가는 아들 승조에게 고마움을 표시하며 감사의 글을 전하고자 합니다.

2007년 2월

정주화 배상