論文 한국공작기계기술학회지 제 6 권 제 3 호 1997. 9
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

A106 GrB강 용접부의 염수중 부식피로특성

김철한*, 조선영*, 배동호**

Corrosion Fatigue Characteristics of A106-GrB Steel Weldments in NaCl solution

Cheol-Han Kim*, Sun-Young Cho*, Dong-Ho Bae**

Abstract

The horizontal corrosion fatigue tester has been developed for investigating environmental strength. Using this tester, we investigated about corrosion fatigue caracteristics for A106-Gr B steel weldments in 3.5% synthetic seawater and room temperature. Considered parameter is only frequency of 1, 3 and 5Hz.. and Corrosion fatigue crack length was measured by DC potential difference method.

From the results, we could find that the horizontal corrosion fatigue tester could be well applied to estimation of fatigue strength. and, In case of 5Hz., corrosion fatigue crack growth path of A106-Gr B steel weldment was transgranular, and of 1 and 3Hz. showed that transgranular and intergranular was mixed. Also, Material constants of corrosion fatigue crack growth estimated in each frequency were $C=9.33\times10^{-9}$ and $m=2.93$ in 1Hz., $C=9.77\times10^{-10}$ and $m=3.47$ in 3Hz., $C=1.02\times10^{-10}$and $m=4.05$ in 5Hz

Keywords : Weldment(용접부), Synthetic seawaer(인공해수), Corrosion fatigue(부식피로), Crack growth characteristics(균열성장특성), Fracture mechanics(파괴역학), DC potential difference method(직류전위차법)

1. 서 론

용접구조물은 일반 대기중에서 뿐만 아니라 석유화학시설, 해양구조물, 원자력발전시설등과 같이 가혹한 부식성 환경하에서 운용되는 경우가 많은데, 이 경우에는 각종 환경의 영향으로 부터 야기된 용접부의 열화(degradation)

* 성균관대학교 대학원 기계공학과
** 성균관대학교 기계공학부

현상에 의해 강도가 저하되고 수명이 단축되기도 한다. 이러한 현상은 재료의 조성, 결정구조, 용접결함등의 금속학적인 측면과 pH, 온도, 용존산소(fusened oxygen) 등의 전기화학적(electro-chemical)인 측면 및 하중의 형태, 하중비, 하중반복속도, 잔류응력등의 역학적인 측면이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 알려져 있다. 게다가, 구조물파괴의 90%정도가 피로(fatigue)에 의한 것임을 함께 감안한다면, 용접부의 부식피로(corrosion fatigue, CF)에 대한 정량적인 해석은 매우 중요함을 알

Table 1 Chemical composition of A106 GrB weldment and basemetal

A106 Gr B		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr+Mo	Ni+Cu
GTAW + SMAW	WELD	0.08	0.96	0.33	0.011	0.006	0.08	0.05	0.36
	HAZ	0.09	0.86	0.21	0.009	0.004	0.10	0.05	0.38
	B/M	0.10	0.86	0.21	0.010	0.004	0.10	0.06	0.39

Table 2 Mechanical properties of A106 Gr B

Al06 GrB	Tensile			Hardness			Remark
	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)	W/M	HAX	B/M	
GTAW	385	504	38.2	188	170	160	HV5kg
GTAW +SMAW	367	486		144	140	150	HV5kg

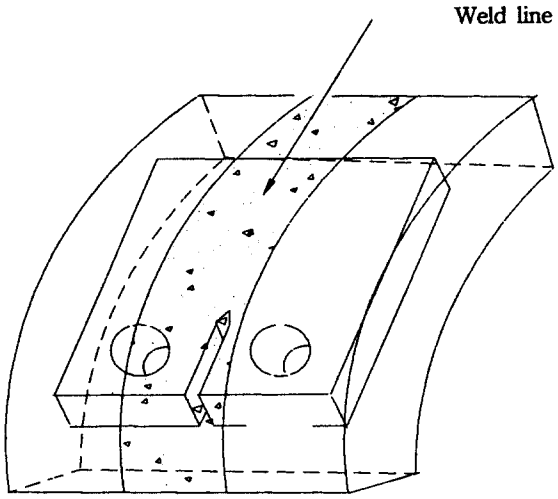


Fig. 1 Position of specimen

수 있다. 지금까지, 많은 연구자들이 용접부 안전설계 및 건전성평가의 수단으로써 파괴역학을 이용한 피로균열성장 특성에 관한 연구가 진행되어 왔지만, 재료용접부의 환경강도평가에 대한 연구성과는 아직도 미흡한 실정이다.[1]~[6] 그 주된 이유는 용접부 부식피로에 있어서, 금속조직적, 역학적 및 환경적 요인과 같은 균열성장을 지배하는 변수가 다양하고, 시험방법이 복잡하며, 데이타 획득과정이 까다롭기 때문인 것으로 생각된다. 따라서, 재료와 환경 및 하중형태에 따른 부식피로강도 데이타의 체계적인 축적과 이를 위한 경제적이고 합리적인 실험방법의 개선이 요구되고 있다.[7][8]

본 연구에서는 재료의 환경강도 평가용으로 수평식 저속 부식피로시험기를 개발하고, 이의 실용성 검증차원에서 직류전위차법을 이용하여 A106-GrB강 용접배관재에서 채취된 시편에 대해 공기중 피로시험과 염수중에서의 부식피로시험을 수행하여 $da/dN-\Delta K_{CF}$관계를 구하고, 고, 하중반복속도의 변화에 따른 부식피로균열성장특성을 파괴역학적으로 고찰하였다.

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 산업현장에서 널리 쓰이고 있는 A106-Gr B강으로서, 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다. 시험편은 Fig. 1과 같이 용접된 관(pipe)의 용접방향에 평행하게 채취하였으며, 관의 치수는 외경 254㎜, 두께 25.4㎜이다. 용접은 75° V-Groove를 기계가공한 후에 수동 GTAW(gas tungsten arc welding)와 SMAW(shield metal arc welding)로 다층용접하였으며, 이음부의 형상, 용접조건 및 용접 Fig.2, Table 3과 같다.

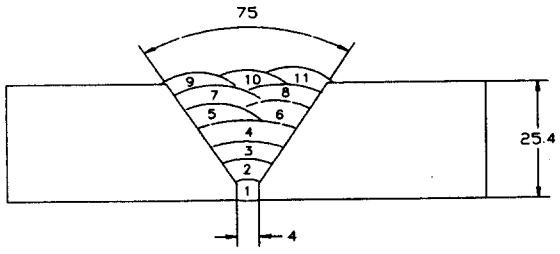


Fig. 2 Multi-path welding

Table 3 Welding conditions and processes

A 106 Gr B		GTAW	GTAW+SMAW	
			GTAW	SMAW
Gas (%)		Ar 99.99	Ar 99.99	Ar 99.99
flow rate (ℓ/min)		15~20	15~20	15~20
Filler metal	Class	ER70S-G	ER70S-G	E7016
	Dia.(㎜)	2.0	2.0	3.2
Current	Type polarity	DCSP	DCSP	AC/DCRP
	Range(A)	80~240	80~140	110~180
Volts Range(V)		9~14	9~13	22~28
Travel speed(㎝/min)		8~12	6~9	3~7

시험편 형상은 ASTM E647 -93에 의거 Fig.3과 같은 CT(compact tension)시편으로 제작되었는데, 기계가공된 노치(machined notch)는 12㎜이고, 예비균열(precrack)은 5㎜로 하였으며, 위치는 용접부와 평행하게 중앙으로 하였다. 예비균열을 위한 하중조건과 방법은 하중감소법에 의해 실험하중의 최대치보다 20%가 높은 하중에서 시작하여 균열이 1㎜ 진전할 때마다 하중을 5%씩 떨어뜨려 최종균열길이의 1㎜전부터는 실험하중과 같도록 하였다. 그리고, 예비균열을 위한 하중반복속도는 20Hz., 응력비($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)는 0.1 그리고 하중의 형태는 정현파이며, 10ton용량을 가진 Saginomiya사의 서어보유압식 피로시험기가 사용되었고, 균열길이의 측정은 50배율의 이동식 광학현미경을 사용하였다. 그리고, 공기중에서와는 달리 부식환경에서는 시편표면의 상태가 부식의 주요인자들중의 하나이므로, 시편표면을 #1500 사포(sand paper)로 연마하여 각각의 시편이 일정한 표면조건을 유지하도록 하였다. 그리고, 부식환경이 시편표면 및 균열면에 충분히 반영될 수 있도록 아세톤(aceton)을 이용하여 시편표면의 유지성분을 초음파 세척하였다.

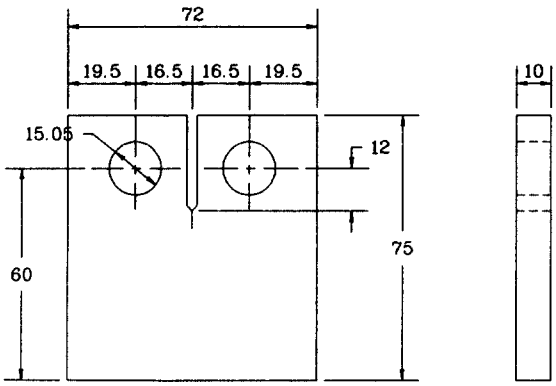


Fig. 3 Geometry of Specimen

2.2 부식피로실험장치 제작

실험장치는 서어보 유압기구를 이용하여 자체 제작된 1ton용량의 수평식 부식피로시험기이다. 본 시험기는 유지, 보수 및 부식피로시험의 편의성에 주안점을 두고 제작되었으며, 제어방식은 서어보 유압기구에 의한 하중제어를 채택하였다. 시험기의 전체적인 구성은 Fig.4와 같으며, 제어흐름은 Fig.5와 같다.

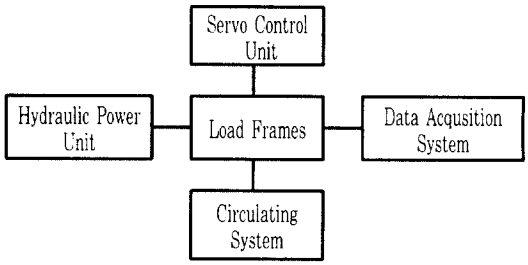


Fig. 4 Simplified block diagram of the servohydraulic horizontal corrsion fatigue tester

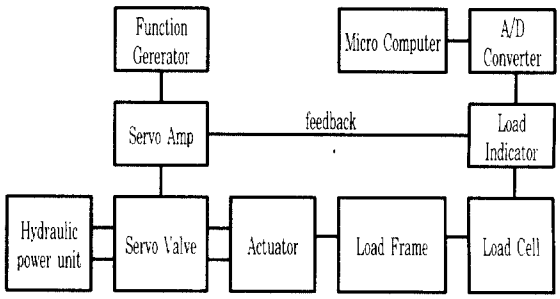


Fig. 5 Block diagram of the servohydraulic control unit

그리고, 본체는 분해, 조립 및 내구성을 생각하여 Fig.6과 같이 제작하였고, 침적식의 염수중 부식피로시험에 있어서 부식용액의 화학적평형을 유지시키기 위해 Fig.7과 같은 부식액 순환장치를 부착하였다. 부식조는 아크릴판으로 제작하였으며, 시편 그립(grip) 및 액츄에이터(actuator)는 부식액과의 접촉을 막고 통전된 전류의

누설을 방지하기 위하여, 그립을 실리콘 코팅(silicon coating)하고 액츄에이터와 부식조 사이를 고무로 된 플렉시블 튜브(flexible tube)로 연결하였다.

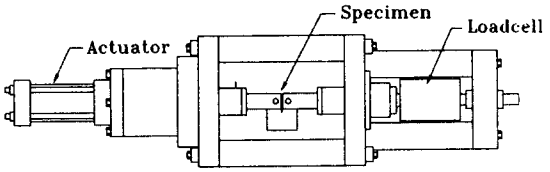


Fig. 6 Major components of the horizontal conrroshion fatigue tester

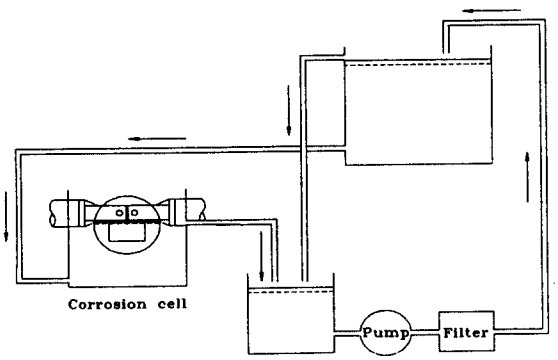


FIg. 7 Major components of the circulating system

2.3 균열길이 측정장치

공기중 피로시험에 있어서, 하중 반복회수에 따른 균열길이의 측정은 50배율의 이동식 광학현미경을 이용하여 시편 전·후면을 동시에 측정하고 평균값을 취했다. 또한, 부식피로시험시 균열길이측정을 위하여 사용될 직류전위차의 교정곡선을 얻기 위해 균열진전에 따른 전위증가의 변화량을 data 획득장치로 부터 매번 10회 측정하여 최대값을 유효데이타로 기록하였다. 이를 바탕으로 염수중 부식피로시험에서의 균열길이는 실험중 부식피로균열의 성장에 따른 전위변화량과 교정곡선으로부터 계산하였다. 직류전위차법에 있어서 실험중 입력전류의 변화가 출력데이타에 미치는 영향을 최소화 하기 위해 직류전원 공급장치(DC power regulator)를 통하여 일정한 전류를 공급하는 한편, 그립을 통한 전류의 누설을 방지하기 위해서는 시편 고정핀과 그립의 내면을 절연테이프와 실리콘판으로 절연하였다. 실험중 부식피로균열의 성장에 따른 전위변화량을 측정하기 위한 리드선의 부착위치선정은 전류 공급선과 부식액의 접촉을 막기 위하여 Hicks와 Pickard[9]의 방법을 택하여 Fig.8와 같이 하였으며, 리드선(lead wire)은 전위의 변화와 표면의 산화로 인한 전위의 누설를 막기 위해 ϕ1㎜의 피복동선을 사용하고, ϕ1㎜×4㎜의 구멍을 뚫어 고정하였다.

2.4 경도측정

본 연구에서는 미세하게 연마(polishing)된 시험편의 표면을 마이크로 누프경도계(micro knoop hardness tester)를 사용하여 용접선에 수직한 방향으로 경도를 측정함으로써, 다층용접시 입열량에 의한 용접열영향부의 범위를 파악하였다. 경도 측정간격은 4㎜, 시험하중은 100 g_f이다. 또한 각각의 시편에 대한 금속학적인 파괴특성을 파악하기 위하여 파단면을 전자주사현미경(scaning electron microscope)을 이용하여 540배로 촬영하였다.

2.5 실험 조건

실험하중의 선정은 ASTM E647-93에 의거 하였다. 균열관찰길이가 a/W =0.7일 때 K_{max}를 결정하고 Srawley의 식(1)[10]을 이용해 최대유효하중 P_{max}를 구한 다음 P_{max}의 40%정도인 800 Kg_f를 최대실험하중으로 선정하였으며, 이 때의 응력비($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$)는 0.1로 하여 ΔP 일정조건하에서 피로시험을 수행하였다. 그리고, 전위차법의 사용에 있어서, 사용전류는 전위차의 측정 가능성과 과전류로 인한 시편의 가열을 고려하여 10A의 전류를 선택하였으며, 염수중 부식피로시험에 있어서의 부식환경은 증류수에 시약용 NaCl을 섞어 만든 3.5% 염수로서, Fig.8의 리드선이 부식용액에 의해 부식되는 것을 방지하기 위해 시편의 실질측정부분만을 부식액중에 침적시킨 상태에서 실험이 진행되었으며, 부식액의 순환은 Fig.7의 순환장치를 사용하여 실험중 부식용액의 화학적 평형을 유지토록 하였다. 이상의 실험조건은 Table 4와 같다.

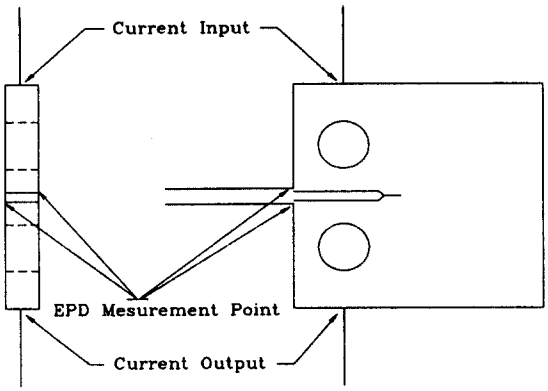


Fig. 8 Electric potential wire location of specimen

Table 4 Condition of test

구분	내 용	
하중조건	하중 형태	정현파
	응력비(R)	0.1
	최대 하중	800kg
	하중반복속도	1, 3, 5Hz(용액중) 5Hz(공기중)
환경조건	부식 용액	H_2O(96.5%wt) + NaCl(3.5%wt)
	pH	3.0
	실험 온도	23℃(실온)
	순환 속도	1 ℓ/min

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+\alpha)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}}(0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2 +14.72\alpha^3-5.6\alpha^4) \quad \text{--------- (1)}$$

3 실험결과 및 고찰

3.1 경도 분포 및 파면관찰

경도 분포는 Fig.9에서 보는 바와 같이 열영향부를 통과하면서 급격히 증가하여 용접부에 이르러 최대치를 나타내는 일반적인 경향을 나타내었다.

Fig.10은 2.5절에서 설정한 각 실험조건에서 수행된 부식피로시편의 파단면을 나타낸 것이다. 하중반복속도가 5Hz.에서는 균열진전특성이 공기중과 비슷한 입내진전(transe-granular) 형태를 보이고 있으며, 1Hz.와 3Hz.의 하중반복속도가 낮은 범위에서는 균열진전면이 입계(inter-granular)와 입내가 혼합된 형태를 보였다. 이는

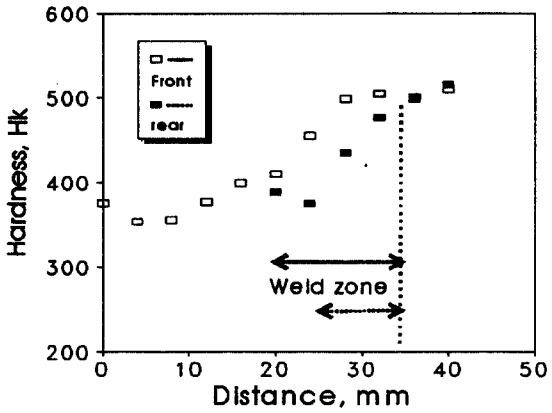
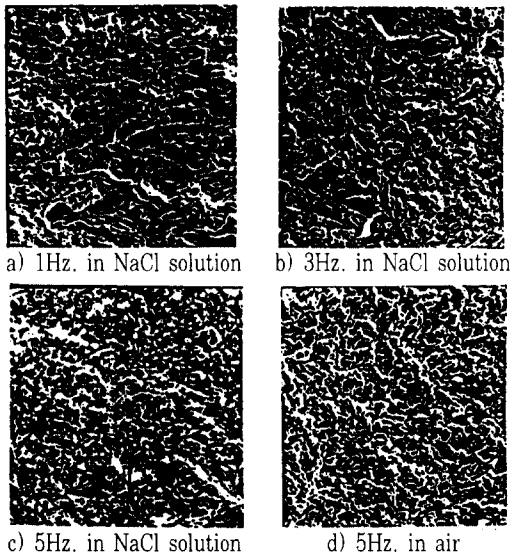


Fig. 9 Distribution of hardness

A106-GrB강의 모재가 본래 내식성이 강하고, SCC에 대한 저항성이 상당히 큰 것으로 알려져 있기 때문에, 본 실험에서 실시한 하중반복속도 범위에서는 환경의 영향에 의한 부식정도가 크지 않기 때문인 것으로 간주된다. 따라서, A106 GrB강의 모재와 용접부의 부식피로특성을 충분히 파악하기 위해서는 하중반복속도를 1Hz.미만의 저속으로 할 필요가 있다고 사료된다. 한편, 부식피로균열 진전에 있어서, 파단면에서의 부식생성물에 의한 쐐기효과(wedge effect)의 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.



a) 1Hz. in NaCl solution b) 3Hz. in NaCl solution

c) 5Hz. in NaCl solution d) 5Hz. in air

Fig. 10 Fractograph of specimen

3.2 $(\frac{a}{W})-(\frac{V}{V_r})$ 관계

Fig μV.11은 균열길이 증가에 따른 전위차 변화곡선으로서, 입력전류 10A에 대하여 DCPD 0.1당 0.036%의 a/W의 증가를 보여주고 있는데, 이것은 J.K. Donald[12]의 결과와 비교 할 때 전체적으로 큰 값을 나타내고 있다. 그 이유는 10A의 입력전류에 대한 초기전압의 차이에 기인한 것으로 간주된다. 그리고, 이 측정치를 바탕으로 구해지는 ASTM E647-93에 추천된 $(\frac{a}{W})-(\frac{V}{V_r})$교정곡선함수는 다음과 같다.

$$\frac{a}{W}=-0.337068+1.17495(\frac{V}{V_r})-0.808825(\frac{V}{V_r})^2$$
$$-0.258991(\frac{V}{V_r})^3 \quad \text{---------- (2)}$$

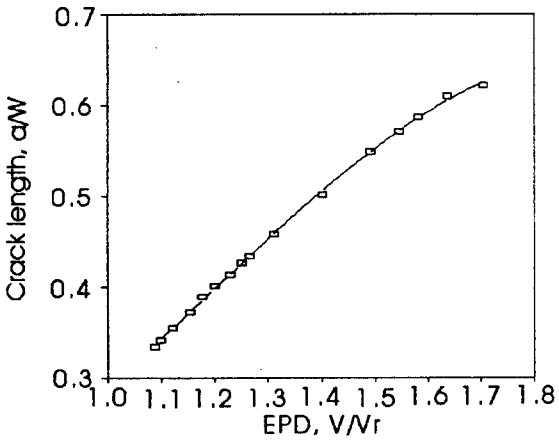


Fig. 11 Experimental curve of EPD and crack length

3.3 $a-N$ 관계

Fig.12는 Table 4의 부식환경조건하에서 피로하중반복속도를 1Hz., 3Hz., 5Hz.로 변화시키고, 각각에 대한 ΔP-일정피로시험을 수행하여 얻어진 부식피로 균열길이(a)와 하중반복회수(N)의 관계를 나타낸 것이다. 부식피로시험 결과와 공기중의 피로시험 결과를 비교해 볼 때, 피로하중반복속도가 5Hz.에서는 부식피로수명이 대기중의 피로시험결과와 거의 일치하고, 균열성장특성도 현미경조직에서 관찰된 바와 같이 공기중에서의 전형적인 형태를 나타내고 있기 때문에, 피로균열의 성장에 있어서 환경인자의 영향보다는 역학적 인자의 영향이 지배적이었음을 알 수 있다. 그리고, 하중반복속도가 감소함에 따라 피로수명의 저하를 볼 수 있는데, 이는 환경인자의 지배도가 역학적 인자의 지배도에 가중되어 부식피로균열의 성장을 촉진시키는 방향으로 영향을 미쳤기 때문으로 간주되며, 하중반복속도가 느릴수록 그 영향이 커짐을 알 수 있다.

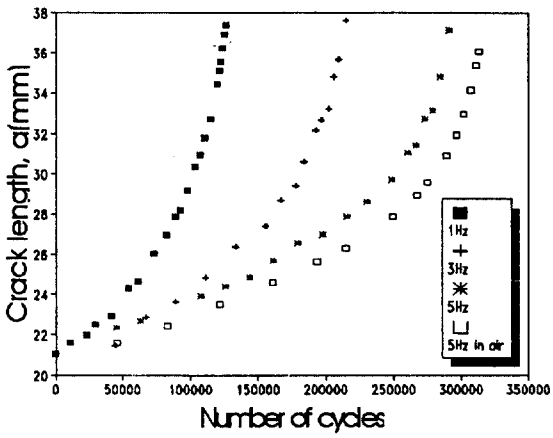


FIg. 12 Expcrimental a - N curve

3.4 $da/dN-\Delta K$관계

Fig.13은 A106-GrB강의 용접부에 대해 공기중 피로시험과 염수중에서의 부식피로시험을 수행하여 얻은 $da/dN-\Delta K_{CF}$관계를 나타낸 것이다.

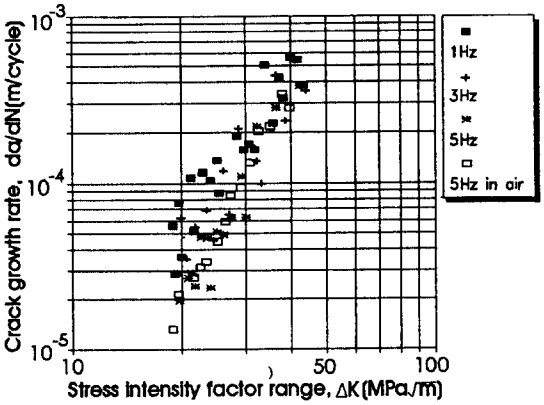


Fig. 13 da/dN - ΔK relation

데이터의 분산폭이 비교적 큰 이유는 균열길이측정에 직류전위차법을 사용하였기 때문에 파면의 쇼트, 표면산화물등이 균열길이측정의 척도인 전위차에 영향을 미친 때문인 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 최소자승법을 이용하여 회귀분석한 데이터를 균열성장거동 평가의 척도로 삼았다.

그리고, 3.1절의 파면관찰결과와 시편재료의 내환경특성으로부터, 파단면에서의 부식생성물에 의한 쐐기효과(wedge effect)의 영향은 크지 않은 것으로 간주하여 본 연구에서는 쐐기효과를 고려한 유효응력확대계수범위(ΔK_{eff})에 의하지 않고 ΔK_{CF}로써 A106 GrB강 용접부에 대한 파괴특성을 해석하였다. Fig.13은 $da/dN-\Delta K_{CF}$관계를 나타낸 부식피로균열성장 특성곡선으로서, 안정성장구간에서 Paris law의

$$da/dN=C(\Delta K)^m \quad \text{---------} \quad (3)$$

로 부터, 부식환경중에서 각각의 하중반복속도에 대한 C, m값을 Table 5와 같이 얻었다.

Table. 5 Experimental cstimation of C, m

	1Hz	3Hz	5Hz	In air
C	9.33×10^{-9}	9.77×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.74×10^{-10}
m	2.93	3.47	4.05	3.91

Table 5에서 보는 바와 같이 공기중 5Hz.에서는 균열성장특성의 미소한 차이만을 보여주고 있는데, 이는 Fig.10의 파면사진의 결과에서 보는 바와 같이 두 경우가 유사한 입내균열진전형태를 가지고 있는 것으로 설명될 수 있다. 이로부터, A106 Gr B강 용접부의 경우 본 연구에서 주어진 환경하에서는 염수중이라 하더라도 하중반복속도가 5Hz.이상이 되면 환경의 영향이 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나, 염수중에서 하중반복속도가 5Hz., 3Hz., 1Hz.로 늦어짐에 따라 동일 ΔK상에서의 균열성장속도는 가속화되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 하중반복속도가 감소할수록, 균열성장을 유도하는 역학적인자(여기서, 용접부 근방의 잔류응력은 고려되지 않음)이외에 금속과 부식환경간의 전기화학적인 반응시간이 길어짐으로 인해서, 결국 환경과 하중의 조합된 영향이 균열성장을 지배하기 때문으로 간주된다. 이러한 고찰은 Fig.10의 파면사진에서 하중반복속도가 느려짐에 따라 파괴의 양상이 입내균열진전형태에서 입계균열진전형태로 변화하는 것으로 뒷받침할 수 있을 뿐만 아니라 일반적으로 부식피로에 있어서 하중반복속도의 변화에 따른 균열성장속도는 불활성환경에 비해 반복속도가 늦어짐에 따라 가속화된다는 R.D.Achilles와 J.H.Bulloch의 연구결과[3]와도 일치되고 있다.이상의 결과로부터 A106 GrB강 용접구조물이 2.5절과 같은 조건의 부식환경과 저속의 반복하중을 받는 경우, 일단 용접부에서 균열이 발생 및 성장하게 되면 피로균열의 성장속도가 빠르게 되므로, 잔류수명성장예측과 합리적인 검사주기의 설정은 이러한 용접부에서의 부식피로균열성장특성을 충분히 고려하여 결정해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

공기중과 3.5% 염수중에서 ΔF-일정 피로시험을 수행하여 A106-GrB강 용접부의 하중반복속도 변화에 따른 부식피로균열 성장특성을 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 개발된 수평식부식피로시험기는 재료의 환경강도평가를 위해 효과적으로 적용될 수 있다.
2) 염수중 5Hz.에서는 균열진전면이 공기중과 비슷한 입내진전형태를 보이고, 1Hz.와 3Hz.에서는 입계와 입내가 혼합된 진전형태를 보였다.
3) A106 GrB강 용접부의 피로균열성장특성 평가시 빠른 하중반복속도(5Hz.이상)의 부식피로 시험은 불합리하므로 저속의 실험조건설정이 요구된다.
4) 하중반복속도에 따른 부식피로균열성장 특성치는 1Hz.의 경우 $C=9.33\times10\text{-}9.$, $m=2.93$, 3Hz.의 경우 $C=9.77\times10\text{-}10$, $m=3.47$, 5Hz.에서는 $C=1.02\times10\text{-}10$, $m=4.05$로 추정된다.

* 본 연구는 1996년도 성균학술연구지원비로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 日本機械學會, "機械構造物の破壞事例と解析技術", pp.185-230, 1984
2. 石井正義, "石油精製工業における事例とその對策", 金屬

の割れ破壞, 昭和プリント, pp.179-187, 1980
3. R.D.Achilles and J.H.Bulloch, "The Effect of Frequency and Environment on the Fatigue Crack Growth Behavior of SA508Cl.Ⅲ RPV Steel", Int. J. Pressure. vessel & Piping, vol.30, pp.171~192, 1987
4. 河合末男, "3% 食鹽水中の低 ΔK 領域の疲勞き裂傳ぱに及ぼす應力比の影響", 日本機械學會論文集(A編), 第47卷 421號, pp.859~866, 1980
5. "Environment Effect on Fatigue Crack Propagation", ASTM Metals Hand Book, vol.8, pp.403~411, 1981
6. J.M.Austen and E.F.Walker, "Conference on The Influence of Environment of Fatigue", I Mech E, C98, 1977
7. R.P.Wei and R.L.Brazill, "An Assessment of AC and DC Potential Systems for monitoring Fatigue Crack Growth", ASTM STP 738, pp.103~119, 1979
8. K.J.Marsh, R.A.Smith and R.O.Ritchie, "Fatigue Crack Measurement", EMAS, pp.11~37, 1990
9. M.A.Hicks and A.C.Pickard, "A Comparision of Theoretical and Experimental Methods of Calibrating The Electrical Potential Drop Technique for Crack Length Determination", International Journal of Fracture, vol.20, pp.91~101, 1982
10. J.E.Srawley, "Wide Range Stress Intensity Factor Expression for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens", International Journal of Fracture Mechanics, vol.12, pp.475~476, 1976
11. J.k. Donald and J. Ruschau, "Direct Current Potential Difference Fatigue Crack Measurement Techniques", Fatigue Crack Measurement, pp.11~37, 1990