

- A106 Gr B강 용접열영향부에서의 피로균열성장특성 -

(Fatigue Crack Propagation Characteristics in HAZ of A106 Gr B Steel Weldments)

김철한*, 조선영*, 김복기**, 배동호***

(*성균관대 대학원, **명지전문대학, ***성균관대)

Abstract

With HAZ of A106 Gr B steel weldment, fatigue test in air, electrochemical polarization test and corrosion fatigue test in 3.5wt.% NaCl solution were performed changing load ratio. Obtained results are as follows.

- 1) K_{op} was independent of K_{max} and load ratio in fatigue crack growth.
- 2) In variation of load ratio, the scatter band of crack growth curve was reduced by half considering crack closure
- 3) In the result of electrochemical polarization test, current density was increased abruptly when potential was larger than corrosion potential.
- 4) Fatigue crack growth rate in corrosive environment was markedly higher than the rate in air because of corrosion characteristics of the material and anodization of inner surface crack.

1. 서 론

용접잔류응력장에서의 피로균열진전거동(Fatigue Crack Growth Behavior)은 잔류응력 뿐만 아니라 용접입열로 인한 재료물성의 변화 등으로부터 매우 복잡한 양상을 띠게 된다. 게다가, 용접구조물의 거의 대부분이 부식성환경에서 운용되며, 이 경우 역학적인자, 금속학적 인자와 더불어 전기화학적 인자들이 피로균열 진전거동에 큰 영향을 준다는 점을 감안한다면 용접구조물의 안전설계나 신뢰성평가를 위한 용접부의 피로해석에는 보다 세심한 주의가 필요하다.⁽¹⁾⁽²⁾

이를 위한 대표적인 연구수단으로는 선형탄성 파괴역학(LEFM)이 널리 이용되고 있는데, 1970년

Elber⁽³⁾에 의해 균열단합현상을 고려한 유효응력확대계수(Effective Stress Intensity Factor, K_{eff})가 제안된 이후에 잔류응력장에서의 피로균열진전거동을 좀 더 합리적으로 평가할 수 있게 되었다.

일반적으로, 균열단합현상은 균열전단의 소성역(Plastic Zone), K_{max} , 파면의 상태, 부식생성물, 잔류응력 등의 다양한 요인으로부터 발생하므로, 균열단합현상에 대한 고려는 피로균열진전거동을 연구하는데 있어서 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 발전 및 중화학 플랜트 등에 널리 이용되고 있는 A106 Gr B강 배관용접부에서 열영향부의 부식피로균열성장특성을 해석하기 위한 기초 연구로서, 용접잔류응력 및 열영향부 내에 존재하는 균열의 진전시 발생하는 균열단합현상을 해석하고, 이를 통하여 공기중 피로균열성장 특성 곡선을 재정리였다. 또한, 부식이 환경과 재료간의 전기화학적 반응이라는 점에 기초하여 분극시험을 수행하여 재료의 부식특성을 평가하고, 분극시험과 같은 환경에서 부식피로시험을 수행하여 그 특성을 평가하였다.

2. 용접잔류응력해석

본 연구에서는 먼저 A106 Gr B강 배관 용접부에 분포하는 용접잔류응력을 해석하기 위해 유한요소법에 의한 수치해석과 HDM(Hole Drilling Method)을 이용한 실험해석을 병행하였다.

Table 1. Chemical composition of A106 Gr B

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

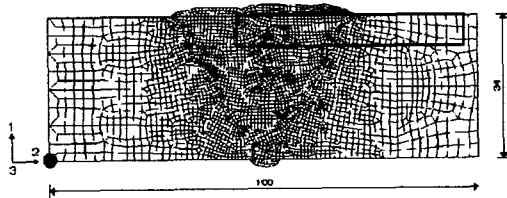
Table 2. Mechanical properties of A106 Gr B

A 106 Gr B	Tensile	
	Y.S.	T.S
	367MPa	486MPa

Table 3. Welding conditions and process

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

해석대상은 석유화학시설에 널리 쓰이고 있는 A106-Gr B강으로서, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2와 같다. 관의 치수는 두께 33mm, 외경 275mm이다. 용접은 60° V-Groove를 기계가공한 후에 수동 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)와 SMAW(Shield Metal Arc Welding)로 다층용접하였으며, 용접조건 및 용접과정은 Table 3과 같다.



B.C at ● : $U_2 = 0$

Fig. 1 FEM model for residual stress analysis

Fig. 1의 2차원 유한요소 모델은 6절점 평면변형을 요소로 사용하였으며, 해석결과의 정확도를 높이기 위해서 용접금속부를 세밀하게 분할하였다. 그리고 본 해석에 사용된 프로그램은 HKS사의 ABAQUS이며, 수치해석결과와 HDM에 의한 실험

해석결과를 Fig. 2에 비교 도시하였다.

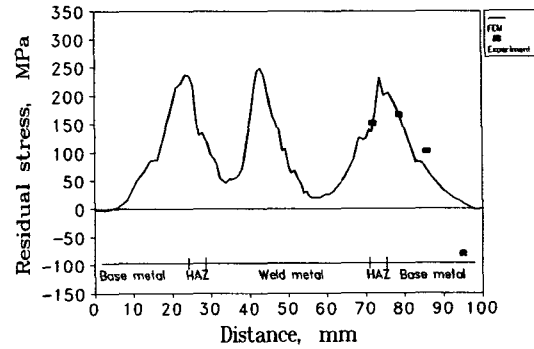


Fig. 2 Axial residual stress distribution on surface of the weldment

3. 실험

3.1 실험 방법

3.1.1 공기중 피로시험

재료는 FEM해석에서와 동일한 A106 Gr B강 배관용접부이고, Fig. 1에 표시된 바와 같이 열영향부가 용접선에 평행하고 균열진전면과 일치되도록 채취하였다. 이곳은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 높은 인장응력이 작용하고 있으며, 용접시 소성변형으로 인해 응력집중부가 형성되는 곳이다. 시험편은 ASTM E647에 의거 Fig. 3과 같이 CT시험편의 형상으로 제작하였다.

피로시험장치는 10ton용량의 Instron 8516 유압식 피로시험기이며, 하중형태는 정현파를 사용하였고, 하중비(R)의 변화에 따른 피로균열진전특성 및 균열단합거동의 파악을 위하여 0.05, 0.1, 0.25, 0.4, 0.5의 여러 가지 하중비에서 실험을 수행하였다.

실험하중은 15696 N에서 시작하여 8831 N까지 하중을 감소시키며 실험을 진행하였으며 이 때, 균열길이의 측정은 50배율의 이동식광학현미경을 이용하였으며, 균열열림시점(Crack Opening Point)의 측정을 위해서는 측정범위 2mm의 정밀 COD 게이지를 부착하고, A/D변환기를 이용하여 시험기에서 나오는 하중값과 COD값을 300Hz의 속도로 컴퓨터에 기록하였다.

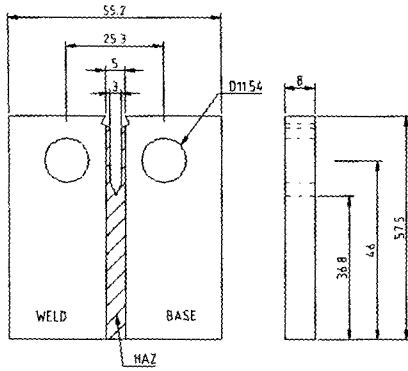


Fig. 3 Configuration of specimen

또한, 실험하중의 선정을 위한 ΔK 의 계산에는 ASTM E647⁽⁴⁾에 의거 다음의 식을 이용하였다.

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

3.1.2 전기화학적 분극시험

본 연구에서는 ASTM G5⁽⁵⁾에 제안된 전기화학적 분극시험을 통하여 부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(i_{corr}), 부동태 전류밀도(i_p), 기본부동태전위(E_{pp}), 임계양극 전류밀도(i_c), 임계공식전위(E_B) 등을 측정함으로써 A106 Gr B강 배관용접열영향부의 부식특성을 평가하였다. 이 실험을 통해 얻은 부식전류밀도로부터 다음과 같이 부식속도(corrosion rate)를 구할 수 있다.

$$\text{부식속도(mpy)} = \frac{0.13 \times i_{corr} (\mu A/cm^2) \times E.W}{\text{밀도}(g/cm^3)} \quad (2)$$

$E.W.$ (equivalent weight) = $\sum f_i M_i / n_i$,
 f_i : 원자분율, M_i : 원자량, n_i : 원자가

위 식에서 부식전류밀도(corrosive current density)는 Tafel 외삽법에 의하여 구하였다.³⁾

시편은 10×10×10mm의 정육면체로 제작한 후, Struers사의 에폭시(epoxy)수지를 사용하여 마운팅(mounting)하였고, 표면과 마운팅의 간극에 Ameron 사의 Amer coat 90으로 페인팅(painting)

한 후 24시간 상온에서 건조하였다. 시편은 모두 600-grit SiC paper로 연마하였으며, 부식조 내에서 자연전위상태(open-circuit potential)로 15초간 유지한 후 분극실험을 시작하였고, 동전위 분극실험(potentiodynamic polarization)의 주사 속도(scan rate)는 0.166mV/s로 하였다. 이 때 사용된 분극실험장치는 Schlumberger사의 Potentiostat(SI 1286)이었으며 Fig. 4에 부식조의 형상을 나타내었다

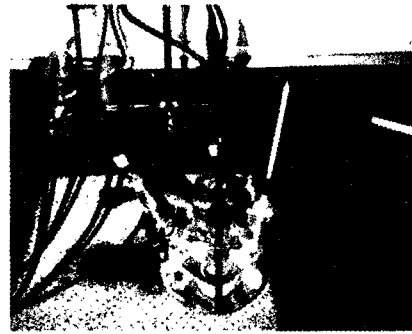


Fig. 4 Corrosion cell for polarization test

부식액은 3.5wt.%의 NaCl수용액을 사용하였으며, 실험온도는 실온(room temperature)이다.

3.1.3 부식피로시험

부식피로시험에 이용된 시험편은 공기중 피로시험과 동일하며, 부식환경은 전기화학적 분극시험에 서와 같다. 부식피로시험시 하중반복속도는 0.2Hz의 사다리꼴파를 사용하였다.

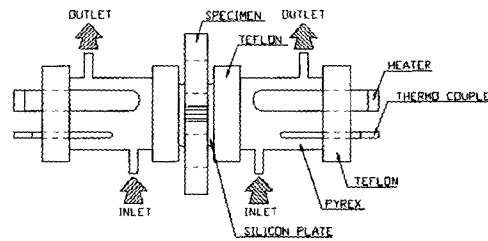


Fig. 5 Configuration of corrosion cell

그리고, 부식피로시험에 사용된 부식조는 각종 게이지의 부착이 용이하게 Fig. 5에서 보는 바와 같이 시험편 표면에 부착하도록 하였다. 또한, 25 0℃의 내열성을 가지며, 피로시험시 부식용액과 전기화학적 반응을 일으키지 않도록, 실리콘

(silicon), 테프론, 내열유리 등의 비금속 내열재료만을 사용하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

3.2.1 공기중 피로시험

Fig. 6는 시험중 한 시점에서의 하중 P 와 ΔV (Offset Displacement)의 관계를 나타낸 것이다. 여

g 는 게인(Gain)을 나타낸다. 위의 관계로부터 Fig. 6의 선도상에서 직선부와 곡선부가 만나는 지점을 균열이 열리는 지점으로 결정하였다.

Fig. 7은 K_{max} 를 일정하게 유지시키고 하중비를 변화시켰을 때 각각의 경우에 대한 K_{max} 와 K_{op} 의 관계를 나타낸 것이다. $R=0.4$, $R=0.5$ 인

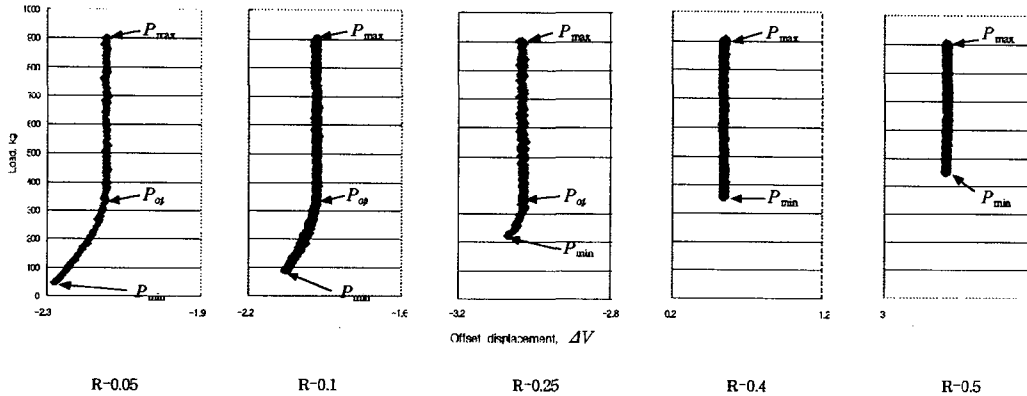


Fig. 7 Comparison of crack opening point

기에서 ΔV 는 식(3), (4)의 개구변위 V 와 그 때의 하중 P 와의 상관관계로부터 얻어진다.

$$V = CP \quad (3)$$

$$\Delta V = g(V - CP) \quad (4)$$

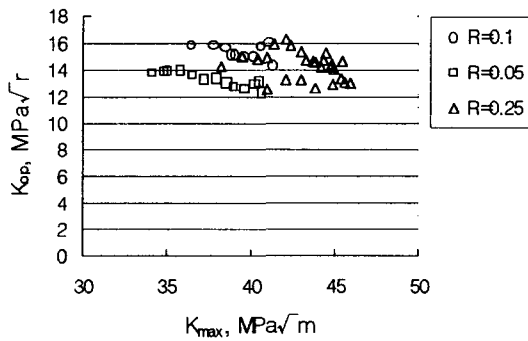


Fig. 7 Relation of K_{op} and K_{max}

여기에서, C 는 컴플라이언스(Compliance)이며,

경우에는 K_{min} 이 K_{op} 보다 크게 되어 균열단합현상은 관찰되지 않았으며, 하중비가 이보다 낮은 경우에는 K_{max} 에 독립적인 경향을 나타내었다. 일반적으로 균열단합현상의 주원인이 Elber⁽²⁾등이 제안한 균열선단의 소성역에 의한 것이라면 K_{op} 이 K_{max} 에 비례적인 관계를 가지게 되지만, 본 연구와 유사하게 잔류응력장에서 실험을 수행한 Shi⁽⁶⁾나 Bucci⁽⁷⁾등의 연구결과를 종합하여 볼 때 인장잔류응력과 하중이력(loading history)의 영향에 의해 Fig. 7과 같은 결과를 보이는 것으로 판단된다. 또한, 하중비의 변화에도 K_{op} 이 독립적인 경향을 나타내고 있는데, 이는 K_{op}/K_{max} 가 하중비의 1차 혹은 2차에 비례한다는 연구결과와 비교된다.⁽⁸⁾

Fig. 8은 응력확대계수범위와 균열성장속도와의 관계를 나타낸 것이다. 하중비가 증가함에 따라 균열성장곡선이 왼쪽으로 이동하는 일반적인 현상을 보여주고 있지만, 이상에서 언급된 바와 같이 하중비가 낮은 경우에는 K_{op} 이 K_{min} 보다 크게 되어

실제 시험편에 작용하는 응력비는 K_{min}/K_{max} 가 아니라 K_{op}/K_{max} 가 된다. 이를 고려하여 유효 응력확대계수(ΔK_{eff})을 사용하여 균열성장곡선을 재정리하면 Fig. 8에 나타난 바와 같이 하중비가 균열열림비보다 낮을 경우에는 선도를 왼쪽으로 이동시키게 되어, 하중비의 변화에 따른 균열성장곡선의 분산폭이 균열단합현상을 고려하지 않았을 때보다 약 50%가량 줄어든다.

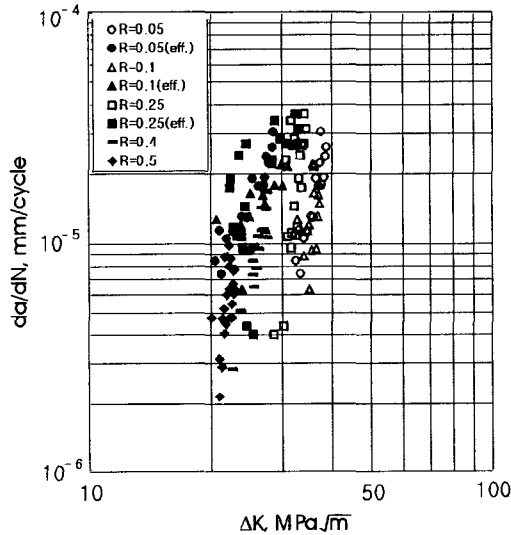


Fig. 8 Relation of $da/dN-\Delta K$

즉, 균열단합현상을 고려하지 않을 경우에는 낮은 하중비의 실험데이터를 실제 설계나 신뢰성평가에 적용할 시에는 실제의 균열성장속도가 과소평가 될 수 있다는 것을 나타낸다.

또한, 균열성장특성을 가늠하는 Paris' law의 m 값이 5.27로 보통의 강재보다 훨씬 크게 나타났다. 이러한 경우는 급냉열처리된 강에서 보이는 현상⁽⁹⁾으로서, 용접시 발생된 높은 입열과 공기중에서의 급속한 냉각으로 인한 금속학적인 변화가 주원인으로 보인다.

3.2.2 전기화학적인 분극시험

Fig. 9는 동전위 분극시험에서 전류밀도와 전위와의 관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와

같이 부식전위(E_{CORR})인 -420 mV 보다 높은 전위를 가지는 경우에는 미량의 전위증가에도 급격한 전류밀도의 증가를 보여주고 있으며, 반대로 전류밀도가 0.17 A/Cm^2 이상인 경우에는 미소한 전류밀도의 증가에도 심한 전위증가를 보이고 있다.

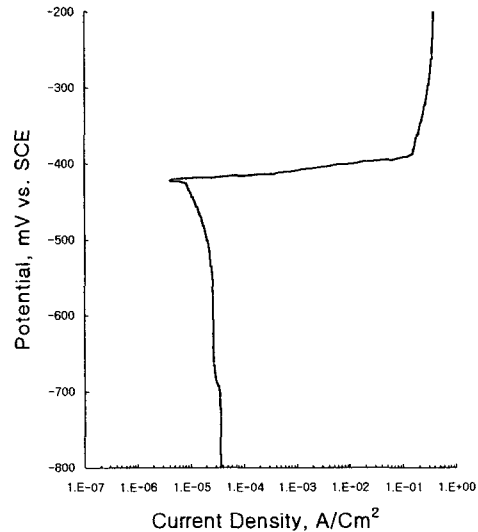


Fig. 9 Potentiodynamic polarization curve

즉, 해수와 같이 본 시험조건과 같은 부식환경에서 운용중인 A106 Gr B강 용접열영향부는 안정적인 부동태층(passive film)을 형성하지 못하며, 국부적인 양극(anode)이 형성되었을 때 그 피해정도는 매우 심각하므로 지속적인 부식전위측정을 통한 감시가 필요함을 알 수 있다.

또한, 부식전위보다 낮은 영역에서는 전류밀도의 변화가 미소하므로, 방식방법으로는 음극방식(cathodic protection)이 유용할 것임을 알 수 있다.

그리고, Tafel의 외삽법으로 구한 부식전류밀도, i_{cor} 값은 $8.16\ \mu\text{A/Cm}^2$ 이었으며, 이 값을 식(2)에 대입하여 얻은 부식속도는 3.7344 mpy 이었다.

3.2.3 부식피로시험

Fig.10은 염수중 부식피로시험을 수행한 후 얻은 $da/dN-\Delta K$ 선도이다. 공기중에서 비해 현저한 균열성장속도의 증가를 보여 주고 있는데 이는 분극시험결과에서 살펴본 바와 같이 A106 Gr B강은 본 실험환경에서는 보호피막이 형성되지 않기 때

문에 환경의 영향이 균열진전을 지속적으로 가속화시키는 데다가, 일반적으로 균열의 내부는 산소 농도 부족등의 이유로 인해 양극(anode)화되는 경향을 가지므로 Fig. 9의 결과로 미루어 볼 때 균열 선단의 부식속도는 외표면에 비해 매우 빠르게 되기 때문인 것으로 생각된다.

게다가, 균열단합현상을 고려하게 되면 동일 ΔK 상에서의 균열성장속도가 훨씬 더 빨라지게 되므로, 부식피로균열의 성장속도 예측은 세심한 주의가 필요하다.

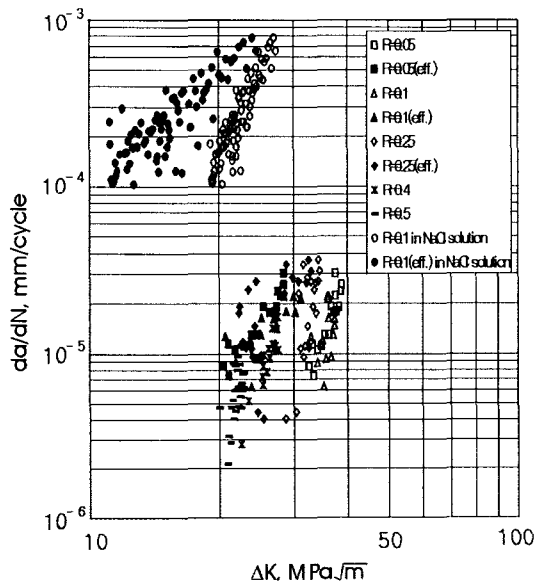


Fig. 10 $da/dN - \Delta K$

5. 결론

A106 Gr B강 용접열영향부를 대상으로 하여, 하중비 변화에 따른 공기중 피로시험, 3.5wt.% NaCl 수용액에서의 분극시험과 부식피로시험을 수행한 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 공기중 피로균열진전에 있어서 K_{op} 은 K_{max} 와 하중비에 모두 독립적이었다.
- 2) 균열단합현상을 고려하면 하중비변화에 따른 균열성장곡선의 분산폭을 반정도로 줄일 수 있었다.
- 3) 전기화학적인 분극시험결과로부터 전위가 부식

전위 보다 조금이라도 크면 전류밀도는 급격히 증가한다는 것을 알았다.

- 4) 부식피로균열성장속도는 공기중에 비해 현저히 빠르며 이는 본 재료의 부식특성과 균열내부의 양극화현상때문인 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) "腐食と破壊", 日本機械學會, pp.71.74, 1985
- 2) YOSHIO KITSUNAI, et al "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Behavior of STS 42 Steel Weldment" JSME Vol. 36-409, pp. 33-38, 1987.
- 3) W. Elber, "Fatigue Crack closure Under Cyclic Tension", Engineering Fracture Mechanics, 2, pp37-45, 1970
- 4) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", 1994, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E647-93
- 5) "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurement", ASTM G5, pp3-76, 1987
- 6) Y. W. SHI, et al "Effect of Welding Residual Stress on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Welds of a Pipeline Steel" EFM Vol. 36, No. 6, pp. 893-902, 1990
- 7) R. J. Bucci, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Rate Measurement", ASTM STP743, pp27-47, 1980
- 8) S.Banerjee, "A Review of Crack Closure", 1983
- 9) "Fatigue and Fracture", ASM HANDBOOK vol.19, pp.637-639, 1996