

스테인리스강 용접부의 잔류응력이 피로특성에 미치는 영향

권종완*, 양현태**

Effect of Residual Stress on Fatigue Characteristics at the Welds of Stainless Steel

Jong-Wan Kwon*, Hyun-Tae Yang**

Abstract

In the weldments, the crack propagation rate is changed due to the residual stress. The crack propagation rate is high in the region with the residual stress. However it shows the same behavior with the base metal in the region that does not include the residual stress. The fatigue crack growth rate for the material with residual stresses can be predicted more precisely by using the effective stress ratio. The difference between experimental results and prediction results seems to be due to the redistribution of the residual stresses and microstructural change.

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Crack Opening Stress(균열개구응력), Residual Stress Intensity Factor(잔류응력확대계수), Crack Opening Stress Intensity Factor(균열개구응력확대계수)

1. 서론

국내·외에서 교량, 건축물, 가스시설 등 구조물의 파괴로 인하여 많은 인명과 재산파해를 겪고 있으며, 현 구조물들은 산업의 발달로 인하여 그 사용환경이 더욱 가혹해지고 있는 실정이다. 그리하여, 산업발전과 더불어 구조물의 안전성에 대한 각계각층의 관심이 날로 증가하고 있는 추세이다.

특히, 원자력, 화력 발전설비, 화학설비 등의 압력용기,

보일러, 배관 등의 주요기기는 운전연한이 증가함에 따라 기기에 가해지는 고응력 및 피로 등의 하중과 열, 부식 및 침식 등 환경의 영향으로 인해 기기의 건전성이 저하될 경우, 산업설비 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 산업설비의 수명기간중 주요 기기의 건전성을 확인하기 위한 검사 프로그램이나 온라인 모니터링을 통한 기기의 운전 중 감시 프로그램이 수행되어지고 있다.

이러한 산업기기들의 대부분은 접합에 의하여 이루어지는데, 접합방법 중에서도 용접에 의한 접합은 근대 과학기

* 경일대학교 기계공학부(jwkwon@bear.kyungil.ac.kr)
** 경일대학교 기계기술연구소

술의 발달과 더불어 공업기술분야에서 아주 중요한 역할을 담당하는 기술이며, 최근의 용접기술은 더욱 다양화·전문화되어 작업공정시간과 비용이 아주 절감되고, 접합강도와 효율성이 더욱 향상되어 그 이용이 날로 증가되고 있는 추세이다.

하지만, 이러한 용접구조물에는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 균열 등과 같은 여러 가지 결함이 존재하며, 이러한 결함으로부터 균열이 진전되어 최종과단에 이르는 경우가 빈번히 발생되고있다. 또한, 용접과정에서 용접입열로 인하여 용접부에 불균일한 온도분포와 열응력이 발생되며, 용접 후 냉각과정에서는 비선형적인 소성변형을 일으킴으로써 용접부에 잔류응력이 남게 된다.

용접에 의하여 발생된 잔류응력의 크기는 열영향부의 경우 항복강도 수준에 이른다. 이러한 잔류응력장(residual stress field)에 반복하중이 가해지면, 용접에 의한 작은 결함으로부터 균열이 진전되어 파괴에 이르게 된다^(1,2). 결함이나 균열 등은 육안이나 비파괴검사로서 검출이 가능하나, 잔류응력은 구속조건이나 열영향에 따라서 다양하게 발생함으로 정확한 해석 및 측정이 어려운 상태이다.

이러한 이유로 모든 분야에서 잔류응력을 측정하는 방법이 요구되어 왔다. 그리하여 현재까지 이론적 해석법을 비롯하여, X선 회절법^(3,4), 초음파 측정법⁽⁵⁾, 자기적 측정법⁽⁶⁾, 응력이완 법으로써 Gunnert법⁽⁷⁾, 절단법(Sectioning)⁽⁸⁾ 및 구멍뚫기법(Hole Drilling Method, 이하 HDM)^(9,10) 등 여러 가지 실험법이 제안되어 왔다. 특히, HDM은 다른방법에 비하여 측정과정이 간단하면서 정확하고 신뢰성이 있는 결과를 얻을 수 있어 많이 이용되고 있다.

또한, 반복하중에 의해 균열이 진전할 경우, 잔류응력의 재분포^(1,2) 등은 피로와 잔류응력의 관계를 해석하는데 많은 어려움을 줄뿐만 아니라, 인장잔류응력영역에 결함이 있을 경우에는 균열진전을 더욱 가속화시키는 작용을 한다. 그래서 용접부 잔류응력장 내에 존재하는 결함의 거동에 영향을 미치는 잔류응력과 피로균열거동특성을 해석하고 평가하는 것은 용접구조물의 안전설계와 손상예방을 위해 매우 중요한 과제가 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 용접배관의 길이 방향으로 발생된 균열에서 성장하는 피로균열진전 특성에 대해 평가하기 위하여, 현재 원자력 발전소 배관재로 사용되고 있는 304 스테인리스강 용접부의 잔류응력을 측정하였다. 또한, 모재와 용접재의 피로시험결과와 해석결과와를 비교함으로써 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향에 대해서도 파악해 보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 시험재료 및 시험방법

본 연구에는 304 스테인리스강을 이용하였으며, 이 재료는 18Cr-8Ni의 오스테나이트계 스테인리스강으로, 가공성과 내식성, 내열성이 우수하여 주로 원자력 배관용, 화학 플랜트의 배관 또는 용기, 열 교환기 등에 이용된다. 용접 시험편제작에 이용되는 용접봉으로는 ER 308을 이용하였다.

304 스테인리스강과 ER 308 용접봉의 화학적 조성 및 기계적 특성을 Tables 1, 2에 나타내었다. 용접방법은 TIG 용접으로 용접조건은 Table 3에 나타내었다. 시험 가공과정에서 발생할 수 있는 잔류응력을 제거하기 위하여, 용접 전 350℃ 전기로 분위기에서 1시간 유지시킨 후 공냉⁽¹¹⁾시켰으며, 이 재료를 모재로 이용하였다. 용접 시험편은 균일성을 확보하기 위하여 자동용접기로서 단층용접하였으며, 용접 후 용접비드의 폭은 4.5mm였다.

용접 시험편 제작시, 지그를 체결하고, 용접 후 지그에서 2시간 정도 유지함으로써, 재료의 변형으로 인한 용접잔류응력의 이완을 최대한 억제하였다. 또, 용접 시험편이 충분히 크지 않을 경우, 용접잔류응력은 모서리부근에서는 단말효과(edge effect)에 의해 이완되므로, 이를 억제하기 위하여, 용접 시험편의 폭을 150mm로 하였다.

Table 1 Chemical Composition of STS 304 and ER 308 (Wt.%)

	C	S	Mn	Ni	S	P	Cr
STS 304	0.03	0.59	1.57	8.5	0.005	0.005	19.3
ER 308	0.06	0.31	2.28	10.0	0.02	0.01	19.8

Table 2 Mechanical Properties of STS 304 and ER 308

	Ultimated Strength	Yielding Strength	Elongation
STS 304	751MPa	319MPa	62.2%
ER 308	549MPa	470MPa	35%

Table 3 Welding Conditions(Tig Welding)

Voltage	Current	Welding Speed	Flow Gas Rate
25V	153A	9mm/sec	15 l/min

잔류응력 측정방법은 사용이 용이하고 비교적 정확한 값을 얻을 수 있는 HDM을 이용하였다. HDM에 이용되는 스트레인게이지는 잔류응력측정용 062RK-120, 062UM-120(Micro-Measurements Group)을 사용하였으며, 구멍뚫기에는 동사에서 제작된 RS-200 밀링가이드에 고속 공기터빈커터를 부착하여 가공하였다. 가공 후 이완되는 변형률은 스트레인 메타를 이용하여 측정하였다.

HDM에 의하여 용접선 중앙으로부터 5mm간격으로 스트레인의 변형량을 측정하였고, 이로부터 잔류응력의 분포를 식(1)⁽¹²⁾을 이용하여 구하였다.

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{4A} m \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2) + (\epsilon_2 - \epsilon_3)}$$

$$\tan \gamma = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2}{2(\epsilon_1 - \epsilon_3)} \quad (1)$$

여기서, $\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \bar{a}$, $\bar{B} = -\frac{1}{2E} \bar{b}$ 이고,
 \bar{a} , \bar{b} : 구멍의 깊이와 지름에 따른 계수 (Micro-Measurements Group TN-503⁽¹³⁾ 참고)이고,
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$: 각 게이지에서 구한 변형률,
 E, ν : 시험편의 탄성계수 및 포아송비이다.

피로시험에는 유압식 만능재료시험기(SHIMADZU : EFD-ED10-20L)를 이용하여 Table 4와 같은 조건하에서 시험을 행하였다. 균열 길이 측정에는 20배 이동식 현미경을 이용하였으며, da 가 1mm를 초과하지 않게 하였다. 피로시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 초기노치는 와이어

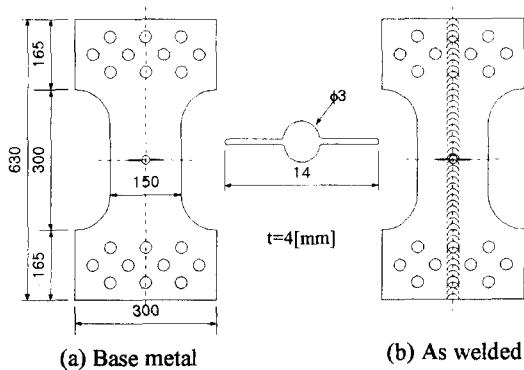


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimens

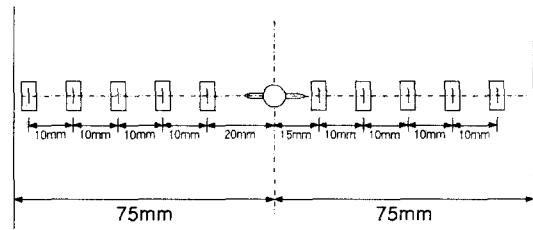


Fig. 2 Positions of strain gage

커팅기를 이용하여 가공응력을 최소화하였다.

파괴균열진전을 지배하는 중요한 인자인 균열개구응력 σ_{op} 을 측정하기 위하여, Fig. 2와 같이 폭방향으로 10개의 스트레인 게이지를 시험편에 부착하고, 동적 스트레인 메타와 데이터 획득장치를 이용하였다.

2.2 잔류응력, 균열개구응력 및 응력확대계수

평균응력과 하중비가 균열길이에 함수적으로 변화하는 경우에는 Forman 식이 널리 사용되고 있다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{A(\Delta K)^n}{(1-R)K_C - \Delta K} \quad (2)$$

윗식은 Paris 식을 균열선단에서 응력확대계수의 최대값 (K_{max}) 이 재료의 파괴인성치에 도달하면 균열전파속도는 무한히 커진다는 것과, 응력비 R의 영향을 고려하여 수정한 식이다.

본 연구에서는 외부작용응력, 잔류응력 및 균열개구응력의 중첩으로 인한 균열성장속도 증가에 대하여 알아보기 위해 식(2)를 아래와 같이 이용하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{A(\Delta K_{eff})^n}{(1-R_{eff})K_C - \Delta K_{eff}} \quad (3)$$

여기서, ΔK_{eff} 는 유효응력확대계수 폭이며, R_{eff} 는 유효응력비이다. 본 연구에서는 작용응력과 잔류응력을 고

Table 4 Experimental Conditions

σ_{\max}	σ_{\min}	Test Freq.	Stress Ratio	Control Mode	Wave Form
98(MPa)	9.8(MPa)	10Hz	0.1	Load	Sine Wave

러한 경우(방법 1), 방법 1에 대하여 균열개구용력을 고려한 경우(방법 2)에 대하여 각각 해석하였다.

외부작용용력에 의한 응력확대계수(K) 및 잔류응력에 의한 응력확대계수(K_{res})는 Glinka⁽¹⁴⁾에 의해 해석된 다음 식을 이용하였다.

$$K = \sigma\sqrt{a}Y = \sigma\sqrt{a}[1.77 + 0.227(a) - 0.51(a)^2 + 2.7(a)^3] \quad (4)$$

$$K_{res} = \int_{-a}^a \sigma_{res}(x) \left[\frac{2 \sin\left\{ \frac{\pi(a+x)}{W} \right\}}{W \sin \frac{2\pi a}{W} \sin \frac{\pi(a-x)}{W}} \right]^{1/2} dx \quad (5)$$

여기서, α 는 $(2a/W)$ 로써, a 는 균열길이의 반이며, W 는 시험편의 폭이다. x 는 용접부 중앙으로부터 거리이며, $\sigma_{res}(x)$ 는 거리(x)에 따른 잔류응력분포이다.

$\sigma_{res}(x)$ 는 무한평판의 맞대기 용접에서 발생하는 잔류응력의 분포를 표현하기 위해 Terada⁽¹⁵⁾가 제안한 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$\sigma_{res}(x) = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] \quad (6)$$

여기서, σ_0 는 용접부의 최대잔류응력이며, b 는 용접부 중앙으로부터 인장잔류응력까지의 길이이다.

식(3)에 나타난 유효응력확대계수는 방법 1, 2에 따라 식(7)과 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, 각각의 경우 유효응력확대계수 폭은 식(9)와 식(10)과 같다.

$$\begin{cases} K_{eff,1,max} = K_{max} + K_{res} \\ K_{eff,1,min} = K_{min} + K_{res} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_{eff,2,max} = K_{max} + K_{res} \\ K_{eff,2,min} = K_{op} + K_{res} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta K_{eff,1} = (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) = K_{max} - K_{res} = \Delta K \quad (9)$$

$$\Delta K_{eff,2} = (K_{max} + K_{res}) - (K_{op} + K_{res}) = K_{max} - K_{op} \quad (10)$$

그러므로, 식(3)에서 나타난 유효응력비는 방법 1, 2에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{eff,1} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (11)$$

$$R_{eff,2} = \frac{K_{op} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (12)$$

이상과 같이 구한 결과를 식(3)에 대입함으로써 용접재의 균열전파속도를 예측할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

모재와 용접재의 피로균열성장속도를 응력확대계수에 대하여 대수좌표로 나타내면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서, 용접재는 초기에 모재보다 빠른 균열성장속도를 보이고, 균열이 상당히 전파한 후에는 모재와 같은 균열성장속도를 보이고 있다. 이것은 용접재에 존재하는 잔류응력의 영향이다. Fig. 4와 같이 균열길이(a)에 따른 균열성장속도(da/dN)를 나타내었으며, Fig. 4에서 균열길이가 40mm정도 일 때 용접재와 모재의 균열성장속도가 같아짐을 확인하였다.

HDM을 이용하여 용접재의 잔류응력을 계산한 결과와 Terada가 제안한 식으로 계산된 결과를 함께 Fig. 5에 나타내었다. 두 결과는 다소 차이를 보이고 있다. 본 연구에서 식(5)에는 정확한 잔류응력분포식을 대입하여야 예측 결과의 신뢰성을 확보할 수 있으므로, Terada의 식을 수정하여 잔류응력분포식(σ_{res}), 식(13)을 구하였다. 그 결과를 Fig. 5에 함께 나타내었다. 식(13)의 결과에 의하면 인장잔류응력은 용접선 중앙에서부터 약22mm까지 분포하며, 압축잔류응력은 약22~40mm사이에 분포함을 알 수 있다.

$$\sigma_{res}(x) = 62.64 \cdot \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^3 \right] \text{Exp} \left[-\frac{1}{1.6} \left(\frac{x}{b} \right)^{4.5} \right] \quad (13)$$

위의 결과로 Fig. 4에서 보여진 모재보다 빠른 균열성장속도를 보인 0~40mm의 구간은 용접잔류응력을 가진 구간이며, 잔류응력이 균열성장속도에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 피로균열이 전파하여 압축잔류응력이 존재하는 영역에서의 균열성장속도는 모재보다 늦어져야

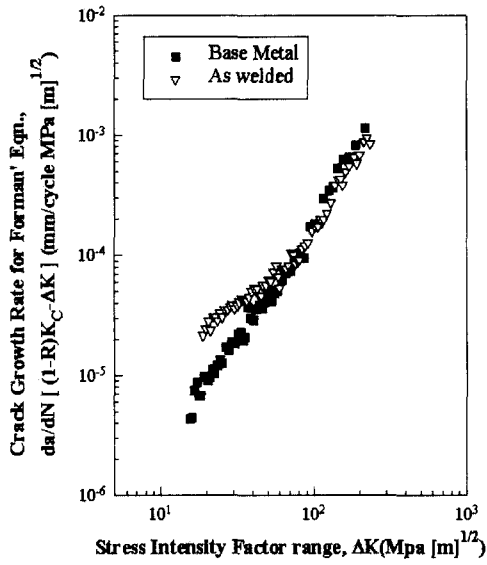


Fig. 3 Characteristic curves of fatigue crack growth rate

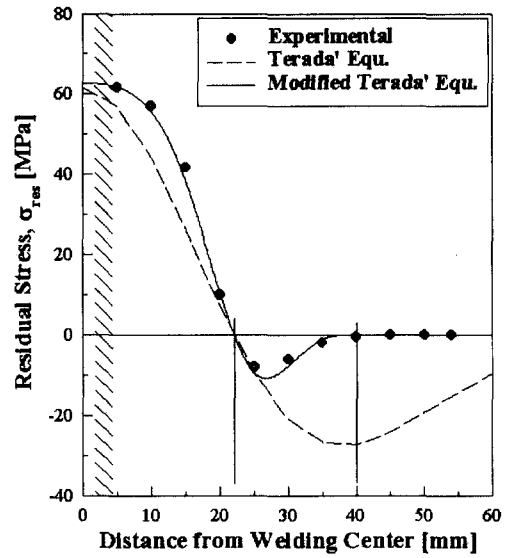


Fig. 5 Distribution of longitudinal residual stress

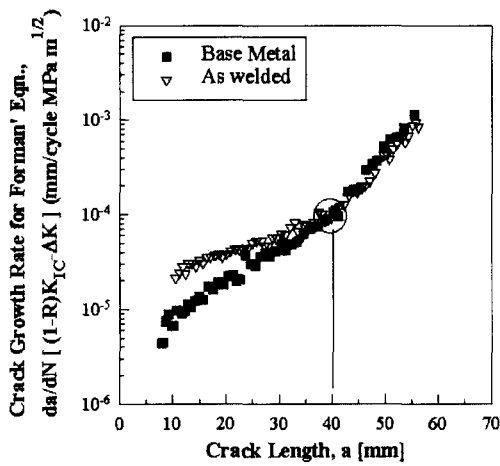


Fig. 4 Fatigue crack growth rate vs. crack length

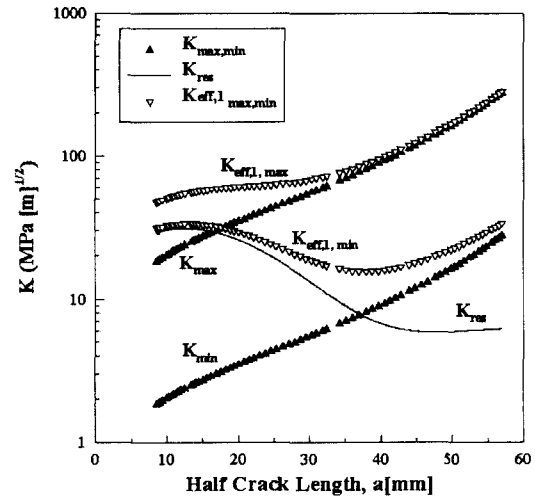


Fig. 6 Stress intensity factors for residual stress

함에도 불구하고, 모재보다 빠른 결과를 보이고 있다. 이것은 균열이 진전하면서 잔류응력이 재분포하여 항상 균열선단에는 인장잔류응력이 존재하게 되며, 또한, 반복하중에 의하여 잔류응력이 이완된다는 잔류응력 재분포^{(1),(2)}에 의한 영향으로 보여진다.

잔류응력 분포식, 식(13)을 식(5)에 대입하여 잔류응력

확대계수를 계산한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 외부작용 응력과 잔류응력을 중첩한 유효응력확대계수의 변화를 함께 나타내었다.

피로시험시, 용접 시험편에 부착한 스트레인게이지를 이용하여, 임이의 균열길이에서 측정된 스트레인 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 응력-스트레인 변화에서 측정된 균

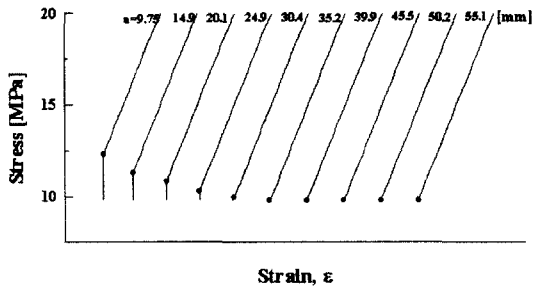


Fig. 7 Crack opening stress for crack growth

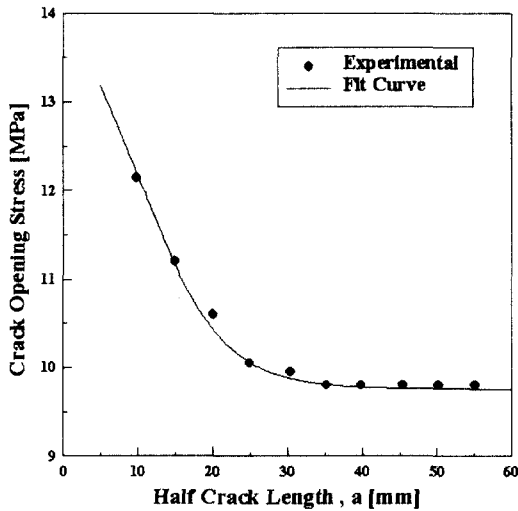


Fig. 8 Crack opening stress for crack length

열개구응력을 균열길이에 대하여 Fig. 8에 나타내었으며, 그 변화를 다음과 같은 근사식으로 나타내었다.

$$COS = -2.4 \times \text{Tanh}(5.74 \times a) + 12.16 \quad (14)$$

여기서 COS는 균열개구응력(crack opening stress [MPa])이며, a는 균열길이[mm]이다.

외부작용응력, 잔류응력, 균열개구응력을 중첩하여 균열길이에 따른 유효응력확대계수를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 잔류응력을 이용한 경우보다 초기에 좀 더 높은 K_{eff} 를 보이고 있다.

Fig. 10에는 식(11), (12)에서 계산된 유효응력비 ($R_{eff,1}, R_{eff,2}$)의 변화에 대하여 나타내었다.

이상의 결과를 Forman 식에 적용하여 각각의 방법에 대한 예측된 결과를 Fig. 11, 12에 나타내었다. Fig. 11, 12에서 예측결과와 용접재 시험결과를 비교하면, 초기부분에서는 잘 일치하고 있으나, 균열이 진전하면서 예측결과가 시험결과보다 낮은 성장속도를 보이고 있다. 이것은 균열

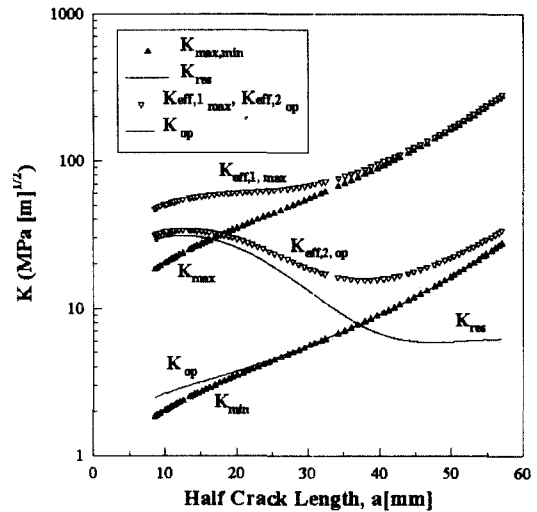


Fig. 9 Stress intensity factors for residual stress and crack opening stress

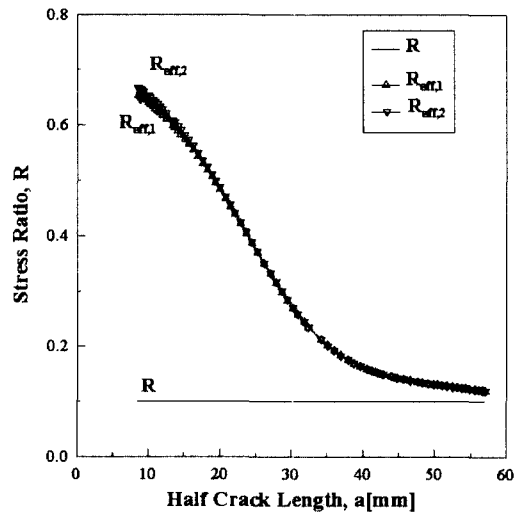


Fig. 10 Effective Stress Ratio

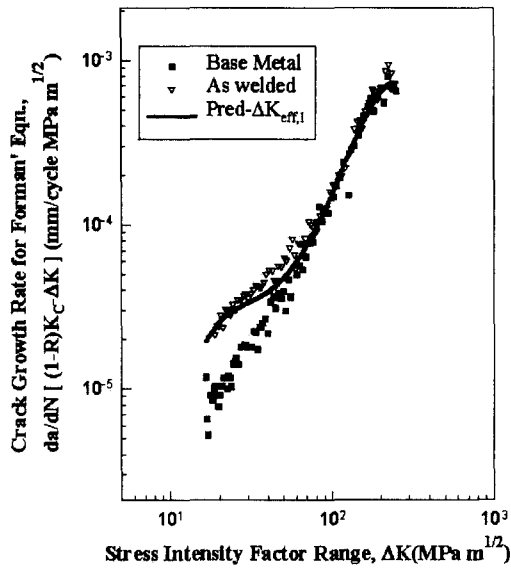


Fig. 11 Characteristic curves of fatigue crack growth rate for $\Delta K_{eff,1}$

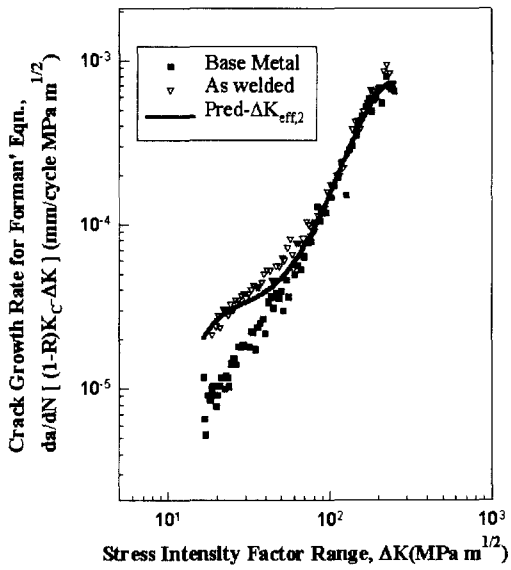


Fig. 12 Characteristic curves of fatigue crack growth rate for $\Delta K_{eff,2}$

의 진전에 따른 잔류응력의 재분포에 의한 영향으로 보여진다. 균열성장 초기에 방법 1, 2의 예측결과에는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 균열성장속도에 균열개구용

력보다 잔류응력이 더 큰 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

이상과 같은 시험 및 해석결과를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모재와 용접재의 피로균열성장속도는 초기에는 잔류응력의 영향으로 용접재가 빠른 균열성장속도를 보이며, 균열의 진전에 따라 그 차이는 감소한다.
- (2) 균열성장속도는 잔류응력을 내포한 영역에서만 모재보다 증가하며, 잔류응력이 존재하지 않는 영역에서는 모재와 같은 경향을 보인다.
- (3) 잔류응력, 균열개구용력을 Forman 식에 적용하여 피로균열성장속도를 예측한 결과, 용접재의 피로시험 결과와 잘 일치하였다.
- (4) 용접재의 피로균열성장속도의 증가는 균열개구용력에 의한 영향보다 잔류응력에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타났다.
- (5) 반복하중 및 균열성장에 의한 잔류응력의 재분포 특성이 명확히 규명이 된다면, 용접부의 균열성장속도를 더욱 정확히 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 向井喜彦, 西村新, "溶接残留应力場の再分布と疲労き裂傳播方向に関する研究", 溶接學會論文集, 第5巻 2號, pp. 280~284, 1987.
- (2) 이용복, 조남익, "피로균열이 진전할 때 용접잔류응력의 재분포와 그 영향", 대한용접학회지, 제13권 4호, pp. 410~416, 1995.
- (3) G. Maeder, et al, "Present Possibilities for the X-Ray diffraction Method of Stress Measurement", NDT International, Vol.14, No.10, pp. 235~247, 1981.
- (4) M. Ceretti., H. Michaua, "Residual Stress Measurement in a Plasma Semi-Transferred Arc(PTA) Coating by Neutron and X-Ray Diffraction", Exp. Tech., Vol.19, No.3, pp. 17~21, 1995.
- (5) B. J. Ratcliffe, "A Review of the Technique using Ultrasonic Waves for the Measurement", British J. of NDT, Vol.11, No.5, pp. 48~58, 1969.

- (6) G. Langman, "Some Comparisons between the Measurement of Stress in Mild Steel by Means of Barkhausen Noise and Rotation of Magnetization", NDT International, Vol.20, No.2, pp. 93~99, 1987.
- (7) R. Gunnert, "Residual Welding Stresses, Method for Measuring Residual Stress and Its Application to a Study of Residual Welding Stresses", Stockholm, Almqvist, Wicksell, 1955.
- (8) N. Tebedge, G. Alpsten and L. Tall, "Residual-Stress Measurement by the Sectioning Method", Experimental Mechanics, Vol.13, No.3, pp. 88~96, 1973.
- (9) "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method" Measurements Group Tech Note 503-3, 1988.
- (10) G. S. Schajer, "Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using the Hole-drilling Method : Part I -Stress Calculation Procedures", ASME Transaction, Vol.110, pp. 338~343, 1988.
- (11) 長谷川正義, "스테인리스강 편람", 1992.
- (12) "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM Standard E837- 92, Amer. Soc. for Test. and Mat., 1992.
- (13) "Measurement of Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", Tech. Note TN-503-4, Micro-Measurement Group, Inc. Raleigh, NC, 1993.
- (14) G. Glinka, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments Under Constant and Variable Amplitude Loads", ASTM STP 677, pp. 198~214, 1979.
- (15) H. Terada, "Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead", Engineering Fracture Mechanics, Vol.8, pp. 441~444 1976.