

〈논 문〉

SS330 용접재에서 재분포 잔류응력 및 균열닫힘영향을 고려한 피로거동에 관한 연구

이용복* · 정진성** · 조남익***

(1996년 2월 12일 접수)

A Study on Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Tensile Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment

Y. B. Lee, C. S. Chung and N. I. Cho

Key Words : Residual Stress Intensity Factor(잔류 응력확대계수), Residual Stress Redistribution(잔류응력 재분포), Effective Stress Ratio(유효응력비), Magnetizing Stress Indicator(자화식 응력지시계), Applied Stress(작용응력), Crack Closure(균열닫힘)

Abstract

In this study residual stress in weldment was considered about the effect on the fatigue propagation and about the effect of redistribution of residual stress. Then, fatigue tests were conducted by the center notched specimens machined with welded plate. The residual stress and its redistribution after the crack growth were measured by the magnetizing stress indicator and hole-drilling method. Fatigue crack propagation was estimated by the specimens having residual stress redistributed after the cracks growth and having the effects of crack closure. Crack growth rates were predicted and compared with experimental results. It had been found that the predicted crack propagation rates have a good agreement with experimental results when the redistribution of residual stress was considered.

1. 서 론

최근 국내에서는 항공, 선박, 지하철, 가스 시설, 건축물, 교량 등 구조물의 대형사고가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산의 손실을 겪고 있다. 이러한 현상은 부실시공과 관리미숙 등의 원인에 의한 것으로 밝혀졌다.

산업의 발전과 더불어 모든 구조물은 사용요건이 가혹해지고 대형화되어 가고 있어 사고의 위험이

증가하고 있다. 제 2차 세계대전 동안 유럽에서는 2500여척의 수송선이 건조되었는데 그중 1/3에 해당되는 845여척이 아무런 공격도 받지않고 운항 중이거나 부두에 정박된 상태에서 균열이 생겨 들로 분리되거나 부분적으로 파손되어 많은 인명과 재산의 피해를 입었던 경험이 있었고⁽¹⁾ 이외에 철도, 교량, 항공기, 공장 설비 등 시설물의 급작스런 파괴 경험들이 보고되었다.⁽²⁻⁴⁾ 이들 파괴 중 대부분은 접합부에서 발생하였고, 특히 용접부에서의 균열에 의해 발생되었음이 밝혀졌다.

대부분 구조물들은 리벳접합, 나사결합 및 용접으로 이루어지고 있으며, 이들 중 작업공정 및 강도면에서 우수한 용접방법이 점점 그 활용도가 높

*회원, 홍익대학교 기계공학과

**회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과

***회원, 전주공업전문대학 기계과

아지고 있다. 그러나 용접부에는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 고온균열 등 여러 형태의 결함이 존재하기 쉽고 이들 결함들로부터 균열이 진전되어 최종파단에 이르는 경우가 많다. 그리고 용접열로 인하여 국부적으로 팽창 및 수축 등의 열소성 변형이 생기고 뒤틀림이나 높은 잔류응력이 용접부위에 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 또한 용접 작업중 용가재와의 용융상태에서의 화학반응 및 냉각속도 차이에서 오는 조직변화 등 많은 변수들은 용접부재를 취약하게 하고 안전사용이나 안전설계에 어려움을 주고 있다.

이상과 같이 용접부에는 많은 취약조건들이 존재하며 파괴의 주 원인이 되고 있어 이들에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 따라서 용접재료, 용접조건 및 용접방법 등을 개선함으로써 여러 방면에서 좋은 결과를 얻고 있다. 그러나 아직도 용접시의 열소성 변형과 구속조건에 따라 분포하는 잔류응력에 의한 피로균열거동에 대한 연구는 정확한 잔류응력 측정의 어려움으로 인하여 미흡한 상태이다. 용접시 높은 열에 의한 재료의 팽창과 냉각시의 수축 변형은 용접부재에 인장 및 압축잔류응력을 유발시키고, 인장잔류응력은 균열을 촉진시킬 수 있으며 압축잔류응력은 균열을 지연시키기도 한다. 또한 잔류응력영역에서 피로균열이 진전될 때 잔류응력은 일반적으로 작음 하중의 크기와 반복수 그리고 균열진전 등으로 인하여 이완되고 재분포된다.

Mukai 등^(5, 6)은 용접잔류응력의 인장 및 압축 영역에서 균열진전 및 톱날절삭(saw-cutting)에 따른 잔류응력의 재분포에 대하여 규명하였고, Muracami 등⁽⁷⁾은 용접잔류응력장에서 균열 초기에 균열단형거동을 실험적으로 규명하였다. 그리고, Oda 등⁽⁸⁾은 균열을 갖는 용접재에서 기계적 응력 완화의 영향에 대하여 연구하였다. 또한 Lawrence Jr.,⁽⁹⁾ Nordmark,⁽¹⁰⁾ Madox⁽¹¹⁾는 용접잔류응력이 피로균열에 미치는 영향에 대하여 연구하였고, 이외에도 Masubuchi⁽¹²⁾는 하중상태에 따른 잔류응력의 이완에 대하여, Nelson⁽¹³⁾은 균열단형을 고려하고 피로균열에 대한 잔류응력의 영향에 대하여 고찰하였다. 한편, 개구비에 영향을 미치는 인자를 파악하려는 연구가 보고되고 있다. 田中 등⁽¹⁴⁾은 개구비가 응력비와 응력확대계수 범위의 영향을 받는다고 하였으며, Hudak 등⁽¹⁵⁾은 개구비가 최대

응력확대계수의 영향만을 받는다고 하였다. 그러나 최대 응력확대계수(K_{max})가 증가할 때, 개구비가 증가한다거나⁽¹⁶⁾ 일정하다거나⁽¹⁷⁾ 또는 감소한다는 결과⁽¹⁸⁾ 등 일치된 견해가 없다. 이와 같이 용접재의 피로거동에 대한 많은 연구 결과가 발표되어 있지만 앞에서 언급한 바와 같이 잔류응력의 정확한 측정이 어렵고 피로균열시 잔류응력의 재분포특성과 균열단형 영향의 정확한 파악이 곤란하여 아직도 이에 대한 연구가 미흡한 상태이다. 따라서 이에 대한 깊이 있는 연구가 더 필요하다고 생각된다.

이상의 결과를 감안하여 본 연구에서는 용접성이 우수하여 용접 구조물로서 많이 사용되고 있는 인장(SS330)을 선택하여 용접하고 인장잔류응력 영역으로부터의 균열진전 및 시험하중의 반복수에 따른 잔류응력의 재분포 경향과 그에 따른 피로특성을 파악하고, 이때 균열단형 영향을 고려하여 정확하게 피로거동을 평가하는 방법에 대하여 고찰하고자 하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

시험재료는 일반 구조물 재료로서 많이 활용되고 용접성이 양호한 구조용강(SS330)을 사용하였으며, SS330 재료와 용접봉에 대한 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2, 3, 4에 나타내었다. 시

Table 1 Chemical compositions of the base metal (Wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr
SS330	0.017	0.12	0.53	0.01	0.01	0.18

Table 2 Mechanical properties of the base metal

Material	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	Elongation(%)
SS330	3537	355.1	38

Table 3 Chemical compositions of the welding wire(Wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S
KC-28	0.11	0.69	1.78	0.014	0.016

Table 4 Mechanical properties of the welding wire

Welding wire	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	Elongation (%)
KC-28	568.9	490.5	27

Table 5 Conditions for MIG welding

ϕ (mm)	Number of pass	Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)	Ar (%)	CO ₂ (%)	Flow rate (l/min)
2	1	20	130	300	80	20	20

험편 형상은 Fig. 1과 같이 폭 100 mm, 길이 600 mm로 하고 길이방향과 압연방향을 같이 하여 CCT 시험편(center cracked tension specimen)으로 가공하였다. 기계가공 등으로 인하여 존재할 가능성이 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로에서 550°C로 가열하여 60분 이상 유지시킨 다음 냉시켰다. 이때 잔류응력이 ± 20 MPa 범위안에 있는 것을 모재 시험편(U-specimen)으로 사용하였으며, 모재 시험편 중앙에 길이방향으로 MIG 용접(Table 5)하여 인장 잔류응력 유발 시험편(T-specimen)을 제작하였다. 각각의 시험편 중앙에 직경 2 mm의 구멍을 뚫은 후 열응력이 발생하지 않도록 천천히 실패로 노치가공을 하고 피로시험기를 이용하여 예비균열을 진전시켰고, 전 초기균열 길이는 용접폭과 같이 6 mm로 하여 시험편으로 사용하였다.

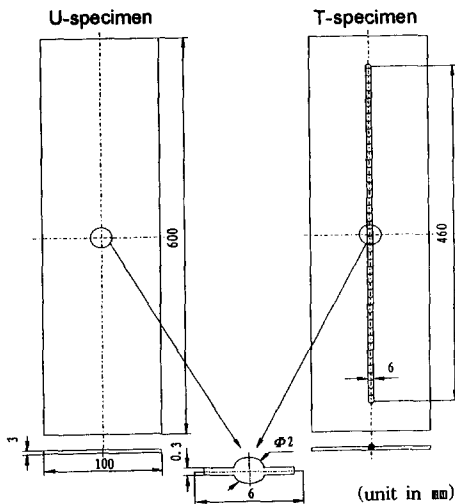


Fig. 1 Configuration of specimen

2.2 실험장치 및 실험방법

잔류응력 측정방법은 현재 알려진 바에 의하면 20여가지가 있으나, 본 연구에서는 측정방법이 비교적 간단하고 정확한 값을 얻을 수 있는 Mathar⁽¹⁹⁾의 천공법(hole drilling method)과 최근에 개발되었고 측정 부위에 탐침자(probe)를 직접 접촉시킴으로써 재료에 손상을 입히지 않고 측정할 수 있는 자화식 응력 지시계(magnetizing stress indicator)를 사용하여 용접선에 수직방향으로 측정하였다. 먼저 자화식 응력 지시계로 특정부위의 잔류응력을 측정한 후 천공법을 이용해서 자화식 응력 지시계에서 얻은 값을 교정(calibration)하였다. 두가지 방식으로 측정된 값을 Terada⁽²⁰⁾가 제안한 잔류응력 분포식과 병행하여 분석하고 하중반복수와 틱날 절삭에 의한 잔류응력의 재분포현상을 파악하였다. 잔류응력의 재분포현상을 관찰하기 위하여 먼저 시험편의 노치가공 전의 초기 용접잔류응력분포를 측정하고 실패로 노치를 진전시키면서 일정 길이마다 잔류응력의 변화를 관찰하였고, 또한 노치없는 시험편에 반복응력만을 작용시켜 잔류응력 변화를 측정하였다.

반복하중은 25 ton 용량의 전기유압식 만능재료시험기(dynamic universal testing machine, Instron, Model-1332 series)를 사용하여, 하중제어방식으로 13 Hz의 정현파형(sine wave form)을 일정하게 가하였으며, 응력비($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$)는 최대하중($P_{max} = 42085$ N)을 일정하게 고정한 상태에서 최소하중을 변화시켜 각각 $R=0$, $R=0.1$, $R=0.2$, $R=0.3$ 으로 차등을 두어 응력비의 영향을 고려할 수 있도록 실험하였다.

균열길이는 배율이 20배인 이동식 현미경을 시험편 전면에 설치하여 1/100 mm 오차 범위내에서 실험중 수시로 측정하였으며, 초기 균열의 측정을 용

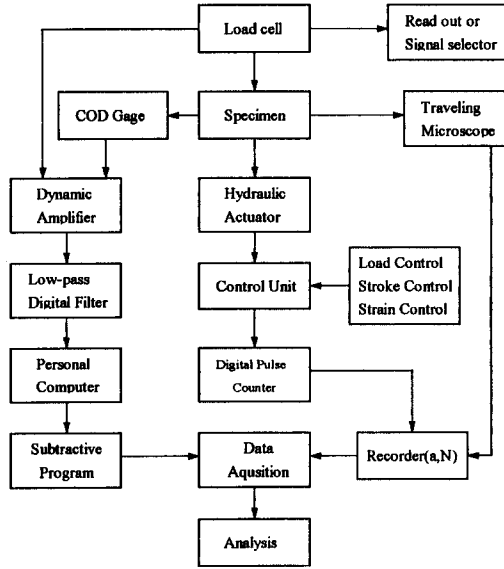


Fig. 2 Block diagram of fatigue test

이하에 하기 위하여 연마지(emery paper)로 #2000 까지 연마한 후에 산화크롬(Cr_2O_3) 분말을 사용하여 연마(buffing)하였다. 균열의 전파길이를 측정할 때는 항상 양쪽을 모두 측정하고, 이 두 값의 평균 값을 사용하여 피로균열진전속도(fatigue crack growth rate) da/dN 을 산출하였다.

균열단형 평가는 제하 탄성 킴플라인스법을 사용하였다. C.O.D. 게이지를 팁을 이용하여 시험편에 부착하고 낮은 주파수에서 로드 셀(load cell)로부터 검출되는 하중신호와 C.O.D. 게이지의 변형률 신호를 동시에 저주파 여과기(low pass filter, Kyowa, LF-308A)로 여과(filtering)하여 PC에 연결된 데이터 획득 장치(data acquisition system)를 이용하여 얻은 데이터로부터 감산변위(subtractive displacement)를 구하였다.

Fig. 2는 실험의 흐름도이며, 이 절차에 따라 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접잔류응력의 재분포

용접부의 열소성에 의한 잔류응력은 재료의 피로 강도에 상당한 영향을 주고 때로는 재료의 항복강도보다 높게 분포할 수 있으며,⁽²¹⁾ 그 부위에 균열이나 결함이 있을 때 파손의 원인이 될 수 있다. 이와같이 재료내의 잔류응력은 복잡한 요인에 따라

분포하며 재료의 파괴에 영향을 미치므로 잔류응력의 분포를 정확히 파악하고, 이로 인한 파괴특성을 고찰하는 것은 매우 중요하다. Terada⁽²⁰⁾는 무한 평판의 맞대기 용접에서 발생하는 잔류응력에 대한 분포를 다음과 같은 관계식으로 설명하고 있다.

$$\sigma_r(x) = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{b} \right)^2} \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 용접부의 최대 잔류응력값이고, b 는 인장잔류응력의 반폭이다. 또한 외부응력이 작용할 경우 응력분포식은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \quad \sigma_r(x) \leq \sigma_{ys} \quad (|x| \geq a)$$

$$\sigma_r'(x) = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{b} \right)^2} + \sigma_a \quad (2)$$

여기에서 $\sigma_r'(x)$ 는 새로운 응력분포를 나타내고, α 는 새로운 응력분포가 재료의 항복응력과 같아지는 위치이다. 또한 σ_a 는 가해진 외부응력이다.

$$\textcircled{2} \quad \sigma_r(x) > \sigma_{ys} \quad (0 < |x| < a)$$

$$\sigma_0 \left[1 - \left(\frac{\alpha}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{b} \right)^2} = \sigma_{ys} - \sigma_a \quad (3)$$

여기서, α 는 $\sigma_r(x)$ 가 σ_{ys} 와 같아질 때의 x 값이다.

본 연구에서는 시편의 길이방향으로 충분한 구속이 존재하도록 자체 제작한 지그(zig)를 사용하였으며, 스트롱 백(strong back) 등의 변형방지를 위하여 용접후 지그 고정상태에서 충분히 방치하였다. 자화식 응력 지시계를 사용하여 구한 시험편의 길이(longitudinal)방향의 초기 용접잔류응력분포는 Fig. 3과 같다. 여기서 길이방향 잔류응력은 중앙부위에서 인장응력이 최대가 되며 대칭성을 갖는 것을 알 수 있다.

인장잔류응력 영역에서 피로균열이 진전할 경우 균열진전으로 인한 잔류응력은 초기에 압축잔류응력이 존재했던 위치까지 균열이 진전해도 균열선단 부근에는 인장잔류응력이 분포한다고 보고되어 있으며,⁽²²⁾ 잔류응력과 작용응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 미치는데 외부하중의 크기와 반복수에 따라 피로균열에 미치는 영향의 정도가 다르며 피로균열이 진전됨에 따라 잔류응력의 분포도 수시로 변하게 되어 그 영향이 달라진다. 이와 같은 복잡한 요인으로 잔류응력에 의한 피로균열의 진전을 정확하게 파악하는 것은 매우 어렵다. 잔류응력 측정법 중 가장 많이 사용되는 Mathar⁽¹⁹⁾의 천공법

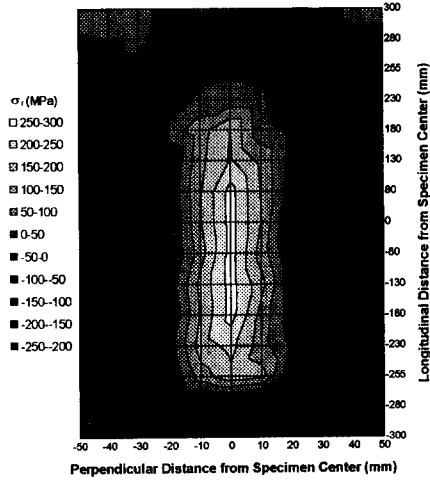


Fig. 3 Initial distribution of residual stress in the whole specimen

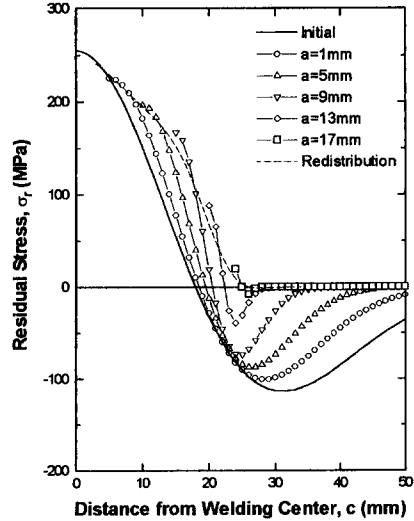


Fig. 4 Redistribution of residual stress caused by crack propagation

은 시험편을 파손하면서 잔류응력을 측정해야 하기 때문에 수많은 시험과 시간이 요구된다. 반면 자화식 응력 지시계를 사용하여 잔류응력을 측정할 경우 수시로 잔류응력 변화 및 분포상태를 간단하게 측정할 수 있지만, 탐침자(probe) 전체면적(200 mm²)에 대한 통합응력이 측정되므로 시험편에 불연속 구간이 존재할 경우는 측정오차가 커지는 단점이 있다. 본 연구에서 잔류응력의 재분포는 하중의 크기, 하중반복수, 균열의 진전에 영향을 받는다는 가정하에 각각의 영향에 대해서 고찰하고 중첩법을 적용하여 실제 피로거동중에 발생하는 잔류응력의 재분포 현상을 파악하였다.

3.1.1. 균열진전에 따른 용접잔류응력의 재분포

균열길이 증가에 의한 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 용접시험편 중앙에 노치를 만들고 실험을 이용하여 슬릿형태의 노치길이를 증가시키면서 잔여 시험편에서의 잔류응력 변화를 측정하고, 이로부터 Terada⁽²⁰⁾가 제안한 잔류응력 분포식을 이용하여 Fig. 4에 나타내었다. 균열진전에 따른 잔류응력의 재분포 측정시에 자화식 응력 지시계를 사용하면 재료에 손상을 입히지 않고 측정할 수 있는 장점이 있지만 균열선단의 응력측정에는 오차가 크므로, 균열선단의 국부적인 응력상태를 정확히 평가할 수 있는 천공법의 데이터를 사용하였다. Fig. 4는 균열이 차츰 진전하여 갈수록 인장잔류응력 영역에서는 그 절대값이 증가하여 재분포 되고

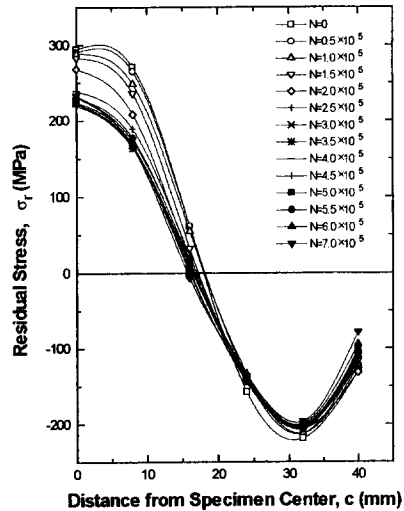


Fig. 5 Redistribution of residual stress caused by repeated load

압축잔류응력 영역에서는 잔류응력이 이완되는 것을 보여준다.

3.1.2. 반복하중에 따른 용접잔류응력의 재분포

잔류응력이 피로균열에 주는 영향을 정확히 파악하기 위하여 잔류응력이 분포하는 시험편에 노치 없이 반복하중을 작용시켜 동일한 하중조건하에서 잔류응력의 변화를 관찰하였다. 그 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 10⁵ 사이클까지는 잔류응력 변화

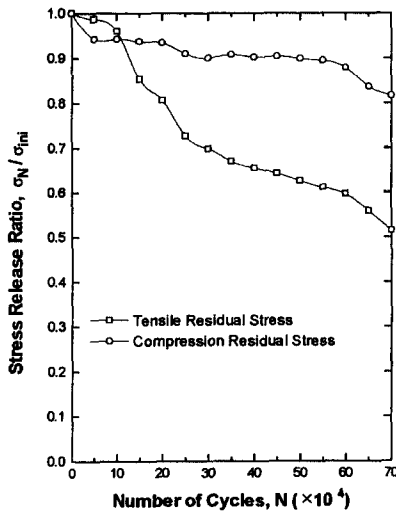


Fig. 6 Stress release ratio vs. number of cycles

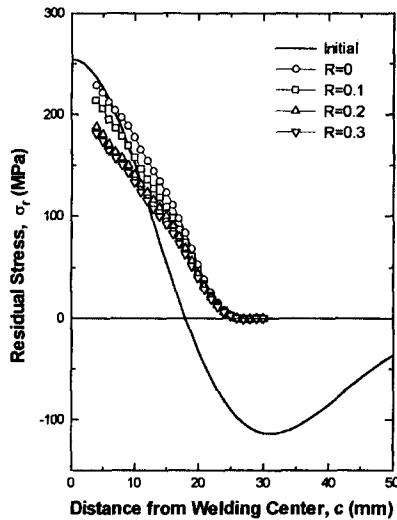


Fig. 7 Redistribution of tensile residual stress

가 미소하였지만 그 후부터는 잔류응력이 차츰 이완되어 재분포함을 알 수 있었다. Fig.5에서 각각의 반복수에서의 피로균열진전을 가속시키는 인장 잔류응력의 재분포 면적을 초기분포의 면적으로 나누어 반복수에 의한 잔류응력의 이완량을 Fig.6에 나타내었다. 이러한 실험은 자화식 응력 지시계와 같이 재료에 손상을 입지 않는 비파괴적 방법만이 수행 가능하며 천공법과 같이 파괴적인 방법으로는 수행이 곤란하다.

이와 같은 결과로부터 각 하중조건하에서 용접부

의 잔류응력 변화는 균열진전에 따른 재분포와 하중반복수에 의한 재분포를 중첩하므로서 Fig.7에서 나타난 바와 같이 평가할 수 있다. 즉, 균열이 진전됨에 따라 초기 잔류응력은 계속 변하여 재분포하고 또한 하중반복수에 의해서 이완된다. 그러므로 최대응력을 고정된 상태에서 응력비를 증가시킬 경우 긴 피로수명을 갖게 되고 하중반복수에 의한 응력이완이 증가하게 된다.

3.2 잔류응력 재분포를 고려한 피로거동의 평가

용접재료나 구조물에 분포하는 잔류응력이 피로균열에 미치는 영향에 대하여 많은 연구결과가 발표되고 있으며, 잔류응력을 초음파법에 의해 비파괴적으로 측정하여 FEM 탄소성해석으로 발표된 연구보고⁽²³⁾도 있다. 그러나, 지금까지 대부분의 연구는 초기분포 잔류응력과 외부하중에 의한 작용응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 주는 것으로 해석이 되었다. 본 연구에서의 실험결과는 앞절에서 언급한 바와 같이 피로균열이 증가함에 따라 초기 잔류응력이 재분포하고 있음을 보이고 있다. 따라서, 용접잔류응력이 피로균열에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 피로균열에 따른 잔류응력의 재분포를 고려해야 할 필요가 있다.

응력확대계수 범위 ΔK 와 용접부에 외부작용력과 잔류응력이 중첩하여 작용할때 전 응력확대계수범위 $\Delta K'$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \Delta K' &= K'_{max} - K'_{min} \\ &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) \\ &= K_{max} - K_{min} = \Delta K \end{aligned} \tag{5}$$

또한, 응력비와 유효응력비 R_{eff} 는 다음과 같다.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \tag{6}$$

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} = \frac{K'_{min}}{K'_{max}} \tag{7}$$

Fig. 8은 초기분포된 잔류응력에 의한 응력확대계수값과 유효응력비의 변화를 나타낸 것이며, 잔류응력에 의한 응력확대계수 값은 Green⁽²⁴⁾의 함수를 이용하여 다음과 같이 구하였다.⁽²⁵⁾

$$K_{res} = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_r(x) dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} \tag{8}$$

여기서, K_{res} 는 초기 잔류응력분포의 정적분의

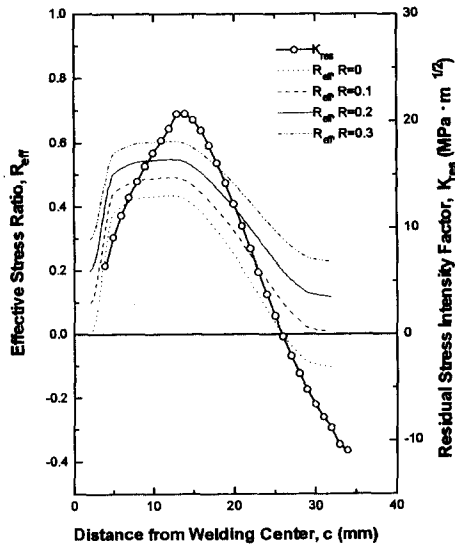


Fig. 8 Stress intensity factor and effective stress ratio

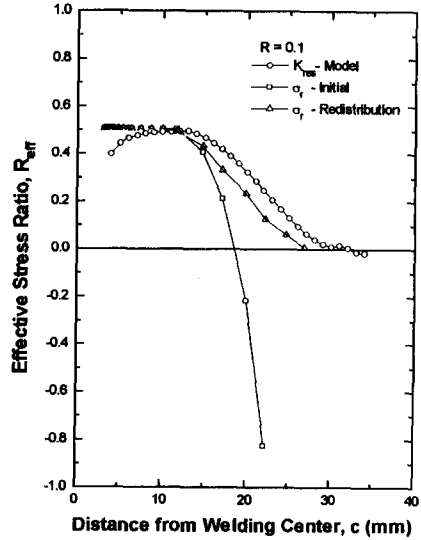


Fig. 10 Effective stress ratio vs. distance from welding center as R=0.1

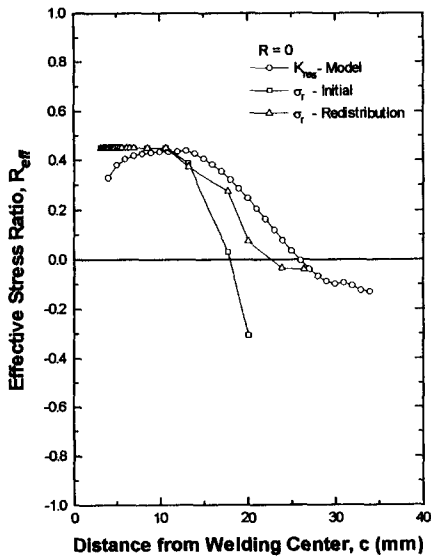


Fig. 9 Effective stress ratio vs. distance from welding center as R=0

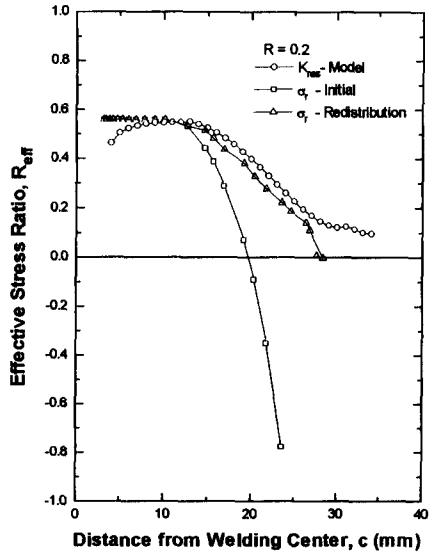


Fig. 11 Effective stress ratio vs. distance from welding center as R=0.2

항으로 표현되기 때문에 최고값이 균열방향으로 이동하여 10~15 mm에 있게 된다. 한편, 식 (7)을 이용하여 구한 유효응력비 R_{eff} 는 작용 응력비의 증가에 따라 값이 커지는데, 이것은 K_{res} 가 일정한 반면 응력비의 증가에 따라 K_{min} 이 증가하기 때문이다. 여기서, 유효응력비는 $(K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res})$ 을 사용하였으나 K_{res} 의 적분항으로 인하여

다음과 같은 문제가 발생하게 된다.

$$R_{eff} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{res}}{\sigma_{max} + \sigma_{res}} \neq \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (9)$$

그러므로, 유효응력비를 $(\sigma_{min} + \sigma_{res}) / (\sigma_{max} + \sigma_{res})$ 로 하여 잔류응력 초기분포와 재분포로 각각 구하였으며, K_{res} 로 구한 유효응력비와 비교하여 $R=0$

일 때는 Fig. 9, $R=0.1$ 일 때는 Fig. 10, $R=0.2$ 일 때는 Fig. 11, $R=0.3$ 일 때는 Fig. 12에 각각 나타내었다. 여기서, 초기 잔류응력으로 구한 유효응력비는 10 mm 이상부터 급격히 감소하는 반면 재분포되는 잔류응력으로 구한 값은 K_{res} 로 구한 유효응력비 보다 낮은 값을 가지며 완만하게 감소하게 된다. 이로부터 초기 잔류응력의 경우보다 피로균열진전에 따른 재분포의 경우가 높은 응력비를 갖게 되어 실제로 피로균열진전에 더 많은 영향을 주

고 있음을 알 수 있다. Fig. 13은 모재 및 용접시험편의 하중반복수에 대한 균열진전길이를 나타낸 것이다. 여기서 용접시험편의 경우 용접부 중앙으로부터 피로균열이 진전될 때 균열선단에 분포하는 인장 잔류응력이 피로균열진전에 기여함으로써 재료의 피로수명을 단축시킨 결과임을 알 수 있다. Fig. 14는 용접재의 수명을 모재의 수명으로 나눈 값으로 응력비의 증가에 따라 그 값이 증가한다($R=0$ 일 때는 0.499, $R=0.1$ 일 때는 0.567, $R=0.2$

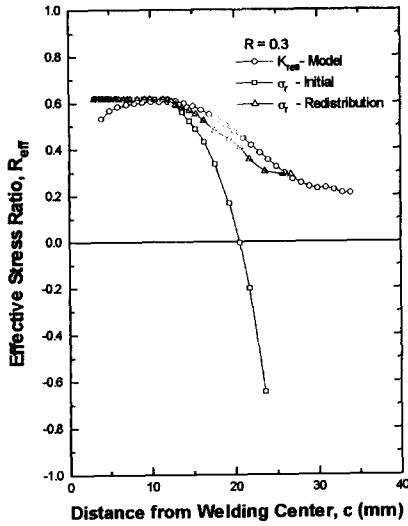


Fig. 12 Effective stress ratio vs. distance welding center as $R=0.3$

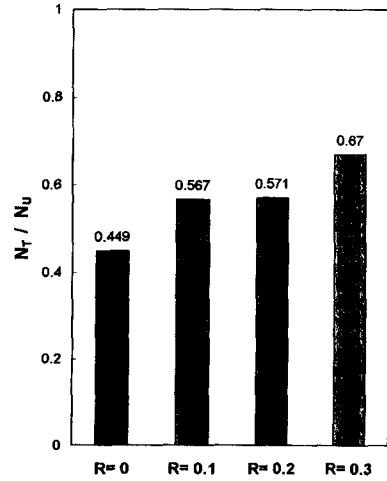


Fig. 14 Comparison of fatigue life ratio

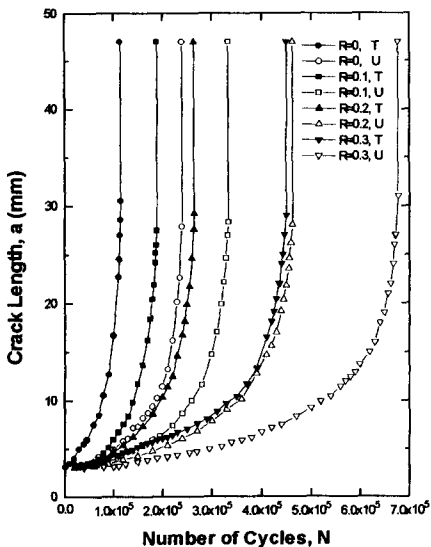


Fig. 13 Crack length vs. number of cycle

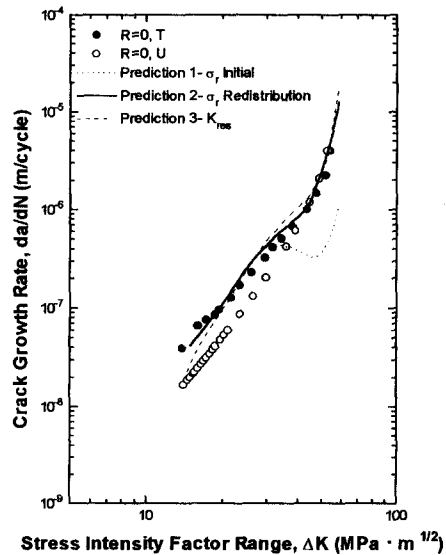


Fig. 15 Crack growth rate vs. stress intensity factor range as $R=0$

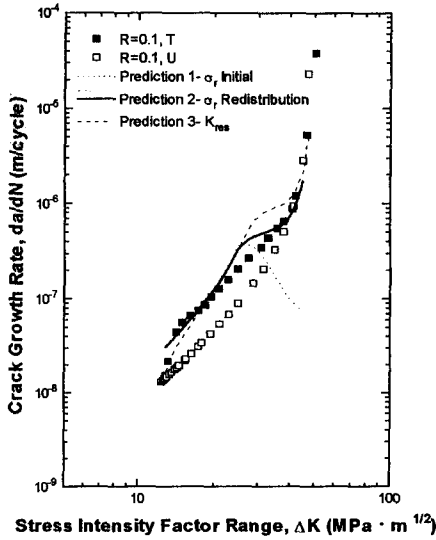


Fig. 16 Crack growth rate vs. stress intensity factor range as R=0.1

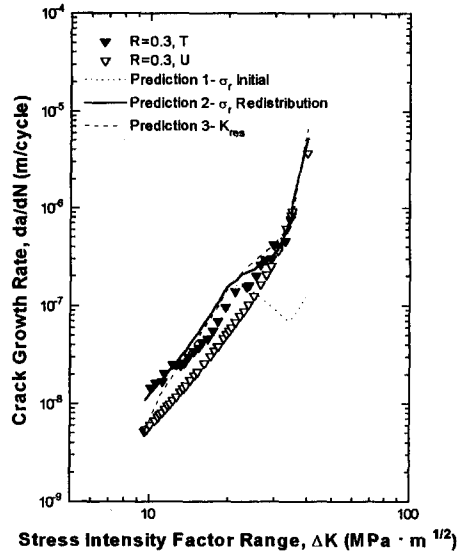


Fig. 18 Crack growth rate vs. stress intensity factor range as R=0.3

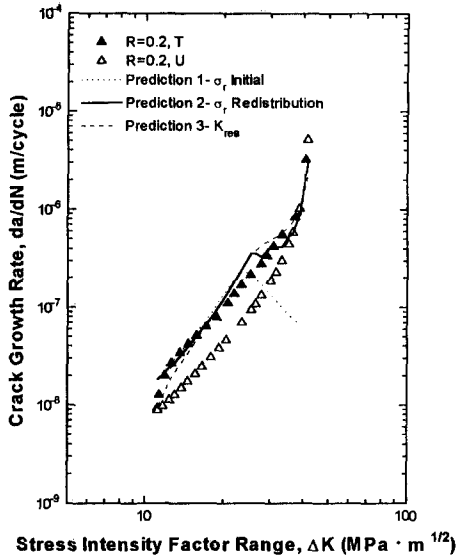


Fig. 17 Crack growth rate vs. stress intensity factor range as R=0.2

일 때는 0.571, R=0.3일 때는 0.67). 이는 하중 반복수의 증가에 의한 잔류응력의 이완에 의한 것임을 알 수 있다.

다른 응력비 조건에서 모재 및 용접시험편의 결과를 Forman식⁽²⁶⁾에 적용하면 균열진전속도는 각각 Figs. 15, 16, 17, 18과 같다.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R_{eff})K_{Cf} - \Delta K} \quad (10)$$

여기서, K_{Cf} 는 균열진전율이 불안정하게 되는 순간(최종 파단시)의 응력확대계수이다. 그림에서 모재의 피로균열진전속도에 비하여 용접시험편의 피로균열진전속도가 높게 나타나고 있는데 이러한 현상은 인장잔류응력이 피로균열진전에 현저하게 영향을 주고 있는 결과이며, 초기에는 용접선 중앙부의 높은 인장잔류응력 영향을 받아 균열진전속도가 모재의 경우보다 매우 높게 나타나고 균열이 진전함에 따라 잔류응력이 점점 감소하여 모재의 균열진전속도에 접근하는 경향을 보여주고 있다. K_{res} 로 구한 유효응력비를 사용한 균열진전예측은 재분포한 잔류응력을 고려한 균열진전속도보다 다소 높게 나타나며 균열안정성장단계(Ⅱ영역) 후반부로 갈수록 오차가 증가하게 된다. 초기 잔류응력 분포에 의한 균열진전예측은 잔류응력이 재분포하는 경우에 비하여 응력비의 영향이 균열안정성장단계(Ⅱ영역) 후반부로 갈수록 급격히 낮게 나타나고 이로 인해서 피로균열진전속도가 감소하게 되므로 오차가 심하게 되고 재분포된 잔류응력을 고려한 예측선도는 실험에 의한 균열진전속도와 잘 일치함을 보여준다.

3.3 균열단함을 고려한 피로거동의 평가

일정진폭 반복하중하에서 피로균열 전파는 피로

균열 안정성장단계(Ⅱ 영역)에 한하여 Paris⁽²⁷⁾의 식으로 설명된다. 그러나 피로균열 전파속도가 응력비, 미시조직, 환경등의 영향을 받는 피로균열 초기성장단계(Ⅰ 영역)의 경우, 피로균열이 단일과 대하중이나 랜덤하중들의 변동하중을 받는 경우, 잔류응력장내에서 피로균열이 발생 전파하는 경우 등에서 나타나는 피로균열전파는 Paris식으로 설명될 수 없다. 따라서, 이러한 경우들을 해석하기 위

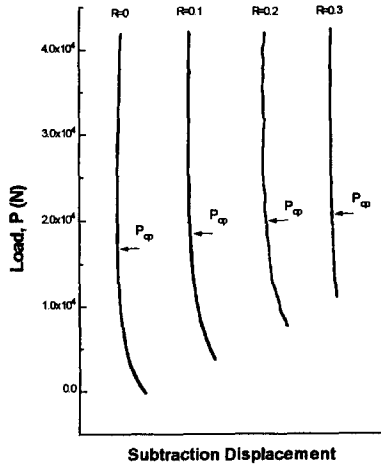


Fig. 19 Typical load-subtraction displacement curves showing the crack closure levels for various stress ratio

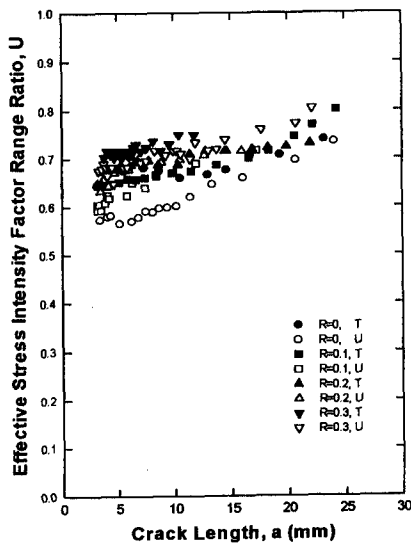


Fig. 20 Effective stress intensity factor range ratio vs. crack length

하여 많은 연구자들은 균열개구거동을 고려하고 있다.

실제 피로균열의 선단은 일정진폭을 갖는 사이클 중 최소하중부터 개구하중까지는 열리지 않으므로, 피로균열의 COD는 하중에 선형적으로 비례하지 않는다. 균열선단이 열리지 않으면 피로균열은 전파하지 않고⁽²⁸⁾ 균열선단이 열리는 하중범위만이 피로수명에 영향을 준다.

Fig. 19는 균열열림하중 P_{op} 를 결정하기 위하여 하중과 감산변위를 나타낸 것이며, 여기에서 하중·감산변위곡선 기울기의 변곡점이 균열열림과 단합점이다.

용접부의 균열진전속도가 모재부보다 큰 것은 용접시험편의 실제 작용응력, 즉 $K_{max} - K_{op}$ 이 더 크기 때문이다. Fig. 20으로부터 용접부의 개구비가 모재보다 초기 성장상에서는 크게 나타나지만 점차적으로 모재부에 접근함을 알 수 있다.

균열 개구거동을 고려하여 피로수명을 평가할 때에는 유효응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 를 사용하는데, 유효응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 는 ΔK 와 개구비 U 의 곱이므로, $da/dN - \Delta K$ 선도의 각 데이터에 U 를 곱한값이 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 선도에 평행이동한 형태로 나타나게 된다. Fig. 21은 용접부와 모재부의

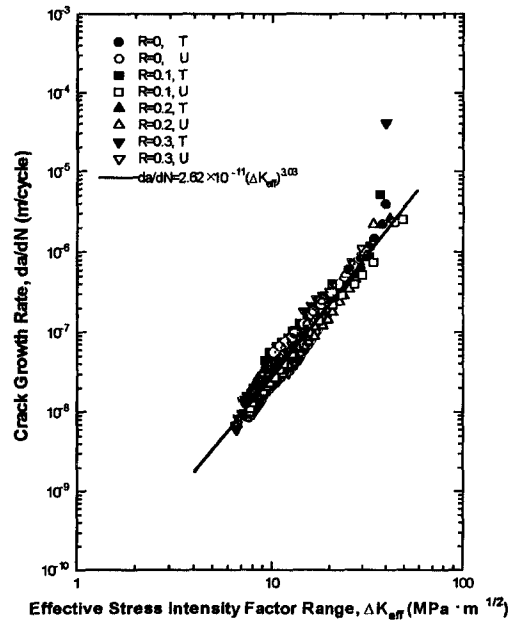


Fig. 21 Crack growth rate vs. effective stress intensity factor range

ΔK 에 Fig. 20의 U 값을 각각 곱하여서 유효응력화 대계수범위 ΔK_{eff} 와 피로균열진전율 da/dN 을 나타낸 것이며 응력비의 변동에도 불구하고 피로균열진전율 da/dN 의 값이 서로 일치된 경향을 보이게 된다.

4. 결 론

결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 용접부의 잔류응력은 외부하중의 크기, 하중 반복수, 균열진전에 의해 영향을 받아 재분포되며, 균열선단의 최대 잔류응력값과 인장잔류응력에서 압축잔류응력으로의 변환점은 인장잔류응력 영역으로부터 피로균열이 진전할 경우 균열진전방향으로 이동하며 재분포하였다.

(2) 최대 하중을 일정하게 고정한 상태에서 응력비(R)를 증가시킬 경우 ΔK 의 감소로 인하여 피로수명은 증가하였다. 또한 용접재는 응력비를 증가시킬 경우 잔류응력의 이완이 심해지므로 피로수명이 증가하였다.

(3) 균열진전에 따라 재분포되는 잔류응력을 고려할 경우의 피로균열예측은 초기 잔류응력 분포에 의한 예측과 K_{res} 로 구한 유효응력비를 사용한 예측보다 실험치와 잘 일치하였다.

(4) 균열단침의 영향을 고려한 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 선도는 잔류응력으로 인한 응력비의 영향이 줄어들었고, 또한 응력비의 변동에도 불구하고 피로균열진전속도(da/dN)의 값이 일치된 경향을 보였다. 그 결과는 다음과 같다.

$$da/dN = 2.62 \times 10^{-11} (\Delta K_{eff})^{3.03}$$

참고문헌

- (1) Ewalds, H. L. and Wanhil, R. J. H., 1986, *Fracture Mechanics*, Edward Arnold, pp. 14.
- (2) Shank, M. E., 1965, "A Critical Survey of Brittle Fracture in Carbon Steel Structures other than Ships," *Weld. Res. Coun. Bull.*, pp. 17.
- (3) Parker, E. R., 1957, *Brittle Behavior of Engineering Structures*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- (4) Boyd, G. M., 1970, *Brittle Fracture in Steel Structures*, Butterworths.
- (5) Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E. J., 1986, "Redistribution of Residual Stress Caused by Crack Propagation Initially Throgh Residual Tensile Stress Field," *Trans. of Japan Welding Society*, Vol. 4, No. 1, pp. 154~159.
- (6) Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E. J., 1986, "Redistribution of Residual Stress Caused by Crack Propagation Initially Throgh Residual Tensile Stress Field," *Trans. of Japan Welding Society*, Vol. 4, No. 1, pp. 634~639.
- (7) Richi, M. and Koichi, A., 1986, "An Explanation for Near-Threshold Fatigue Crack Closure Phenomenon," *Trans. of Japan Welding Society*, Vol. 4, No. 2, pp. 442~447.
- (8) Isamu, O., Sakamoto, H. and Yamamoto, M., 1992, "Effect of Mechanical Stress Reliving on Deformation Fields near a Crack in Weldment," *Trans. of Japan Welding Society*, Vol. 10, No. 3, pp. 373~377.
- (9) Lawrence, F. V. Jr., Burk J. D. and Yung, J-Y., 1982, "Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments," *Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP776, American Society for Testing and Materials*, pp. 33~43.
- (10) Nordmark, G. E., Muller L. N. and Kelsley, R. A., 1982, "Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Rates in Weldments of Aluminum Alloy 5456 Plate," *Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP776*, pp. 44~62.
- (11) Madox, S. J., 1982, "Infomation of Tensile Residual Stress on the Fatigue Behavior of Welded Joints in Steel," *Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP776*, pp. 63~96.
- (12) Masubuchi, K., 1980, *The Strength of Welded Structures*, Analysis of Welded Structures, pp. 328~330.
- (13) Nelson, D. V., 1982, "Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation," *Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP776*, pp. 172~194.
- (14) 田中洋一, 征矢勇夫, 1987, "疲勞き裂 開閉口に及ぼす應力比と應力擴大係數範圍の影響について," *熔接學會論文集 第5卷, 第1號*, pp.

- 119~126.
- (15) Stephan, J., Hudak, Jr. and Davision, 1988, "The Dependence of Crack Closure on Fatigue Loading Variables," *ASTM STP 982*, pp. 121~138.
- (16) Strivastava, Y. P. and Garg, S. B., 1985, "Influence of R on Effective Stress Range Ratio and Crack Growth," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 22, pp. 915~926.
- (17) Katchner, M. and Kaplan, M., 1974, "Effect of R-Factor and Crack Closure on Fatigue Crack Growth Rate for Aluminum and Titanium Alloy," *ASTM STP 559*, pp. 264~282.
- (18) Unangst, K. D., Shih, T. T. and Wei, R. P., 1977, "Crack Closure in 2219-T851 Aluminum Alloy," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp. 725~735.
- (19) Mathar, J., 1934, "Determination of Metal Stress by Measuring the Deformation around Drill Holes," *Trans. ASME*, Vol. 86, pp. 249~254.
- (20) Terada, H., 1976, "Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 8, pp. 441~444.
- (21) Masubuchi, K., 1980, *The Magnitude and Distribution of Residual Stresses in Weldments*, pp. 189~233.
- (22) 向井喜彦, 西村新, 1986, "引張残留應力場からき裂が傳播する場合の溶接残留應力場の再分布に関する研究," *溶接學會論文集*, 第 4卷, 第 1號, pp. 154~159.
- (23) 小田 勇, 木村 由史: き裂を有する溶接材の變形舉動に 及ぼす残留應力の影響, *溶接學會論文集*, 第 8卷, 第 3號, (1990), pp. 409~414.
- (24) Green, O. V., 1930, "Transactions, American Society for Steel Treating," Vol. 18, pp. 369.
- (25) Tada, H., Paris, P. C., and Irwin, G. R., 1985, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Paris Productions, Inc., St. Louis.
- (26) Forman, R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures," *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Vol. 9, pp. 459.
- (27) Paris, P. and Erdogan, 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," *J. of Basic Eng., Trans. of ASME*, pp. 528~534.
- (28) Walker, E. K., 1970, "Effect of Environments and Complex Load History on Fatigue Life," *ASTM STP 462*, pp. 1~4.