

## SS330 용접재에서 재분포 압축잔류응력 및 균열단힘의 영향을 고려한 피로거동에 관한 연구

이용복\*, 정진성\*\*, 김호경\*\*\*, 조남익\*\*\*\*, 박상흠\*\*\*\*\*

### A Study on Fatigue Behavior considering Effects of Redistributing Compressive Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment

Y. B. Lee, C. S. Chung, H. K. Kim, N. I. Cho and S. H. Park

#### Abstract

In this study effect of residual stress and its redistribution in weldment on the fatigue crack propagation was investigated. 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.

Keywords : Residual stress intensity factor(잔류응력확대계수), Residual stress redistribution(잔류응력 재분포), Partial crack opening(부분균열열림)

#### I. 서 론

산업의 발전과 더불어 모든 구조물은 사용 요건이 가혹해지고 대형화되어 가고 있어 항상 사고의 위험이 증가하

고 있다. 대부분 구조물들은 리벳접합, 나사결합 및 용접으로 이루어지고 있으며, 이들 중 작업 공정 및 강도면에서 우수한 용접방법이 점점 그 활용도가 높아지고 있다. 그러나 용접부에는 용접 과정중에 생기는 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열 등 다양한 형태의 결함들이 존

\* 홍익대학교 기계공학과 교수  
\*\* 홍익대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 서울산업대학교 자동차공학과 교수  
\*\*\*\* 전주공업전문대학 기계과 교수  
\*\*\*\*\* 천안공업전문대학 용접기술과 교수

재하기 쉬우며, 이들 결합으로부터 균열이 진전되어 최종 파단에 이르는 경우가 많다. 그리고 용접열로 인하여 열소성변형이 생기고 높은 잔류응력이 용접부위에 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 또한 용접 작업 중 용가제와의 용융상태에서의 화학반응 및 냉각속도 차이에서 오는 조직 변화 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.<sup>(1-5)</sup> 그러나 아직도 용접시의 열소성변형과 구속조건에 따라 분포하는 잔류응력에 의한 피로균열거동에 대한 연구는 정확한 잔류응력 측정의 어려움으로 미흡한 상태이다. 특히 하중반복에 의한 피로균열 진전시 잔류응력의 이완 등은 이들을 해석하는데 많은 어려움을 주고 있다. 용접시 높은 열에 의한 재료의 팽창과 냉각시의 수축 변형은 용접부재에 인장 및 압축 잔류응력을 유발시키고, 인장 잔류응력 영역에서는 균열 진전을 촉진시킬 수 있으며 압축잔류응력 영역인 경우에는 오히려 균열 진전을 지연시키기도 한다.<sup>(6)</sup> 또한 잔류응력 영역에서 피로균열이 진전될 때 잔류응력은 일반적으로 작용 하중의 크기와 반복수 그리고 균열 진전 등으로 인하여 이완되고 재분포된다.<sup>(7)</sup>

본 연구에서는 잔류응력의 재분포를 하중 반복수, 균열 진전의 영향으로 구분하여 고찰하였으며 재분포된 잔류응력을 이용하여 중첩법에 의한 균열진전속도를 정확하게 예측하고 실험을 통해서 비교 고찰하였다. 또한 Elber<sup>(8)</sup>가 제안한 균열단합의 영향을 고려하여 실제 피로거동중에 발생하는 잔류응력의 재분포 현상을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 재료 및 시험편

실험 재료는 일반구조용 압연강재인 SS330을 사용하였으며, 실험에 사용된 재료와 용접봉의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2, 3, 4와 같으며, 용접조건은 Table 5에 나타내었다.

시험편 형상은 Fig. 1과 같이 폭 100mm, 길이 600mm로 하고 길이방향과 압연방향을 같이하여 기계가 공후 전기로에서 550℃로 가열하여 60분 이상 유지시킨 다음 노냉시켜 잔류응력을 제거하고, 용접을 하지 않은

U 시험편(Unwelded specimen)과 두 줄 용접하여 시험편 중앙에 압축잔류응력을 유발시킨 C 시험편(Compressive specimen)으로 각각 제작하였다. C 시험편의 경우는 용접선 가로방향으로 마이크로 비커스 경도계(하중 500g, 작용시간 30초)를 이용하여 용접부의 각 부위(용착부, 열영향부, 모재부)를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

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	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	Hv	Elongation (%)
SS330	353	255.1	133	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	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	Elongation (%)
KC-28	568.9	490.5	27

Table 5 Conditions for MIG welding

$\phi$ (mm)	Number of pass	voltage (V)	current (A)	speed (cm/min)	Ar (%)	CO <sub>2</sub> (%)	flow rate (l/min)
2	1	20	130	300	80	20	20

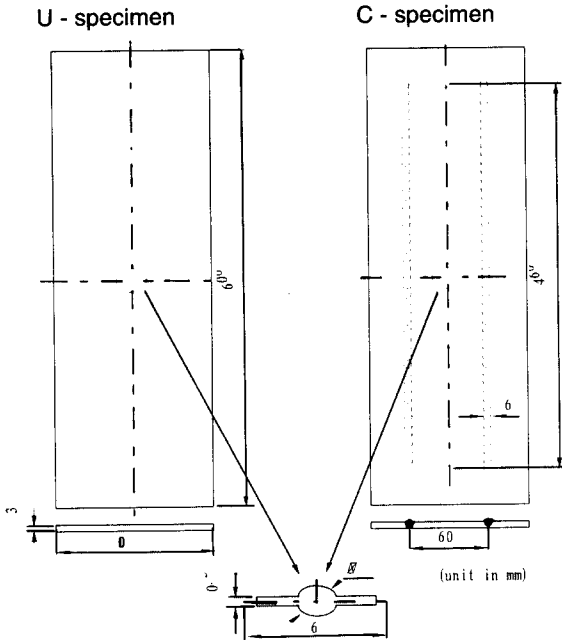


Fig. 1 Configuration of specimen

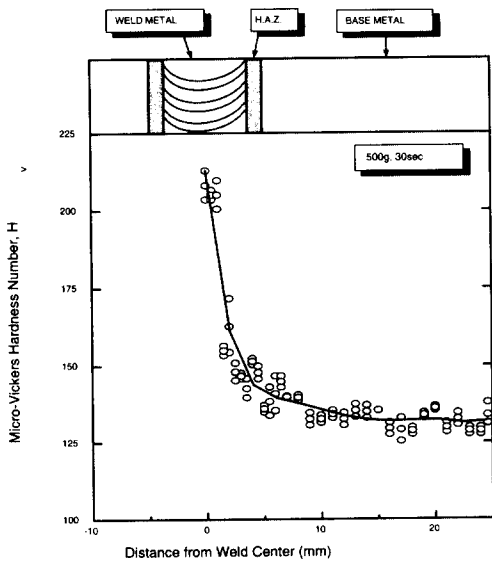


Fig. 2 Hardness distribution in weldments

## 2. 2 실험장치 및 방법

잔류응력은 Mathar<sup>(9)</sup>의 천공법(hole drilling method)과 측정부위에 탐침자(probe)를 직접 접촉시킴으로써 재료에 손상을 입히지 않고 측정할 수 있는 자화식 응력 지시계(magnetizing stress indicator)를 병행 사용하여 측정하였다. 잔류응력의 재분포 현상을 관찰하기 위하여 노치 가공 전에 용접선에 가로방향으로 초기 용접 잔류응력분포를 측정한 후 이로부터 Terada<sup>(10)</sup>가 제안한 잔류응력 분포식과 병행하여 평가하고, 동일 조건의 시편을 실패로 노치를 진전시키면서 일정 길이마다 잔류응력의 변화를 관찰하였다. 한편, 노치가 없는 시험편에 반복하중만을 작용시켜 잔류응력의 변화를 측정하였다.

균열단형평가는 제하 탄성 컴플라이언스법(Unloading elastic compliance method)<sup>(11)</sup>을 사용하였다. COD 게이지를 자체 제작한 팁을 이용하여 시험편에 부착하고 로드 셀(load cell)로부터 검출되는 하중신호와 COD 게이지의 변위 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. 또한 부분 균열열림의 정확한 측정을 위하여 Fig. 3과 같이 스트레인 게이지와 COD 게이지를 동시에 사용하였는데 실험절차는 COD 게이지를 사용할 때와 동일하다.

피로실험을 위하여 25 ton 용량의 전기유압식 만능 재료 시험기 (Instron, 1332 series)를 사용하였으며, 균열길이의 측정은 배율이 20배인 이동현미경을 사용하였다. 실험조건은 Table 6에 나타냈으며 Fig. 4의 실험 절차에 따라 실험을 수행하였다.

Table 6. Conditions for fatigue test

Symbol	$P_{max}$ (N)	$P_{min}$ (N)	Stress ratio	Freq. (Hz.)	Wave form
U	53563	0	R=0	13	Sine
C	53563	0	R=0	13	Sine

### 3. 실험결과 및 고찰

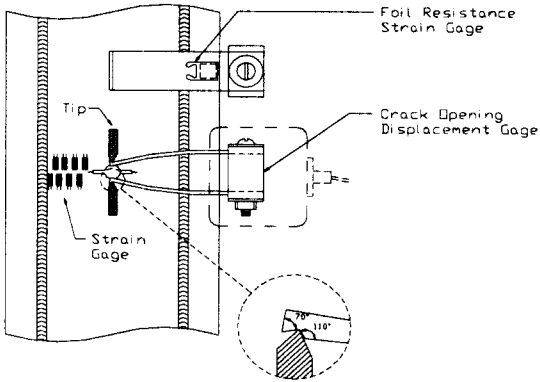


Fig. 3 A schematic drawing of the fatigue crack opening-closure measurement system

#### 3. 1 용접부의 경도분포

일반적으로 용접부의 경도분포는 열영향부(HAZ)가 가장 높게 나타나며 이와 같은 주변의 타 영역과의 경도차로 인하여 용접부의 피로수명을 감소시키는 주요 원인이 된다. 그러나 실험에 나타난 경도분포는 HAZ 영역보다 용착금속부(weld metal zone)의 경도분포가 매우 크게 나타나고 있다. 용착금속부 영역이 HAZ 영역보다 경도가 높게 나타나는 원인은 고장력강용 용접봉을 사용함으로써 용착금속부의 강도(568.9MPa)가 모재(353MPa)에 비해 높게 나타나는 것과 연관되고, 보편적으로 인장강도와 경도가 비례하는 경향과 일치한다. 또한, 강 재료의 경도 및 인장강도를 높여주는 주요원소인 탄소가 모재보다 용착금속부에 6배 이상 함유되었기 때문에 용착금속부의 경도가 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

#### 3. 2 용접 잔류응력의 재분포

인장 잔류응력영역에서 피로균열이 진전할 경우 균열진전으로 인한 잔류응력은 초기에 압축잔류응력이 존재했던 위치까지 균열이 진전해도 균열선단 부근에는 인장잔류응력이 분포한다고 보고되어 있으며,<sup>(12)</sup> 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 인해 잔류응력에 의한 피로균열의 진전을 정확하게 파악하는 것은 매우 어렵다.

두 가지 잔류응력 측정법을 병행하여 균열진전에 의한 시험편 잔여폭(ligament)의 잔류응력 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 압축 잔류응력 영역에서 균열이 진전할 때 균열선단에서는 초기분포와 비슷한 경향을 나타내는 반면 인장 잔류응력 영역에서는 그 절대값이 차츰 감소하여 결과적으로 압축에서 인장으로의 변환점이 균열진전 방향으로 이동하는 것을 보여준다.

하중반복에 의한 잔류응력의 이완을 파악하기 위하여 잔류응력이 분포하는 노치 없는 시험편에 동일한 반복하중을 작용시켜 잔류응력의 변화를 관찰하였다. 이러한 실험은 자화식 응력 지시계와 같이 재료에 손상을 입히지 않는 비파괴적 방법만이 수행 가능하다. 각각의 반복수에서 잔류응력의 재분포 면적을 초기분포의 면적으로 나누

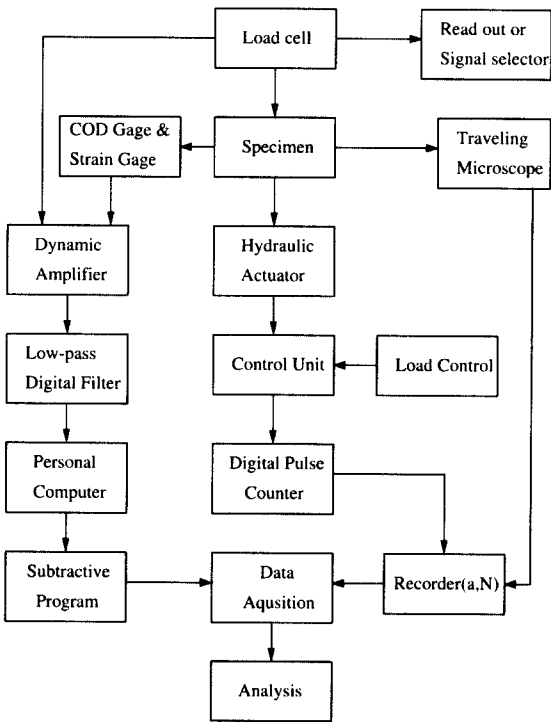


Fig. 4 Block diagram of fatigue test

어 반복수에 의한 잔류응력의 이완량을 Fig. 6에 나타내었는데, 압축 잔류응력은 인장 잔류응력에 비해서 반복하중에 의한 이완이 작은 결과를 나타내었다.

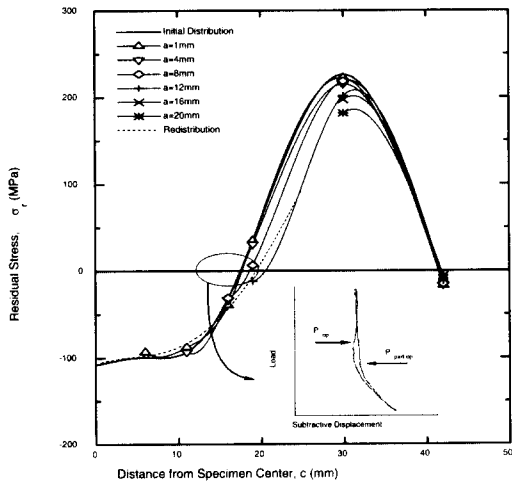


Fig. 5 Redistribution of residual stress caused by crack propagation and partial crack opening

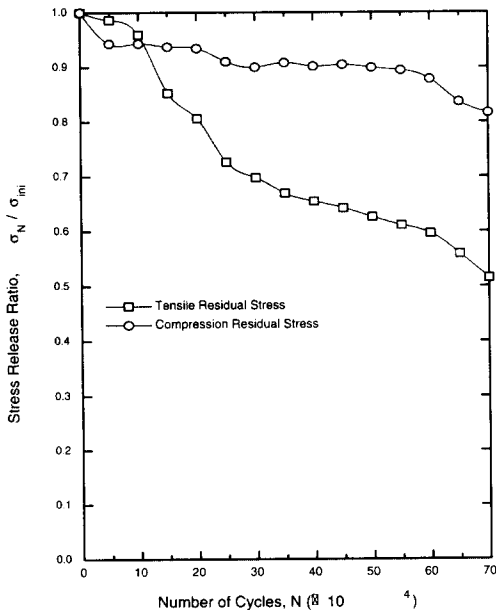


Fig. 6 Stress release ratio vs. number of cycles

### 3. 3 잔류응력 재분포를 고려한 피로거동의 평가

용접재료나 구조물에 분포하는 잔류응력이 피로균열에 미치는 영향에 대하여 많은 연구결과가 발표되었다.<sup>(2-6)</sup> 그러나 지금까지 대부분의 연구는 초기 분포 잔류응력과 외부하중에 의한 잔류응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 주는 것으로 해석하였다. 본 연구는 피로균열이 증가함에 따라 초기잔류응력이 재분포하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 용접잔류응력이 피로균열에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 피로균열에 따른 잔류응력의 재분포를 고려해야 할 필요가 있다.

잔류응력에 의한 응력확대계수값은 Green<sup>(13)</sup>의 함수를 이용하여 다음과 같이 구하였다.<sup>(14)</sup>

$$K_{res} = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_r(x) dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (1)$$

응력확대계수범위  $\Delta K$ 와 용접부에 외부 작용 응력과 잔류응력이 중첩하여 작용할때 전응력확대계수범위  $\Delta K'$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta K' &= K'_{max} - K'_{min} \\ &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) = \Delta K \end{aligned} \quad (3)$$

또한, 응력비와 유효응력비  $R_{eff}$ 는 다음과 같다.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (4)$$

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} = \frac{K'_{min}}{K'_{max}} \quad (5)$$

여기서 유효응력비  $R_{eff}$ 는  $K_{res}$ 의 적분항으로 인하여 다음과 같이 된다.

$$R_{eff} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{res}}{\sigma_{max} + \sigma_{res}} \approx \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (6)$$

그러므로, 유효응력비를  $(\sigma_{min} + \sigma_{res})/(\sigma_{max} + \sigma_{res})$ 로 하여 잔류응력의 초기분포와 재분포로 각각 구하였으며,  $K_{res}$ 로 구한 유효응력비와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8은 모재(U) 및 용접시험편(C)의 하중 반복수에 대한 균열진전길이를 나타낸 것이다.

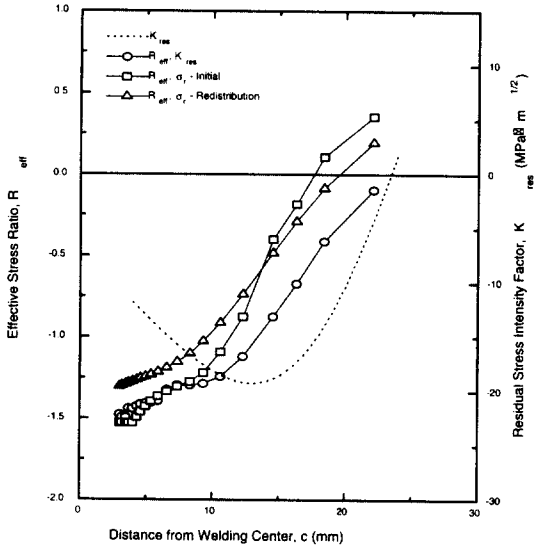


Fig. 7 Stress intensity factor and effective stress ratio

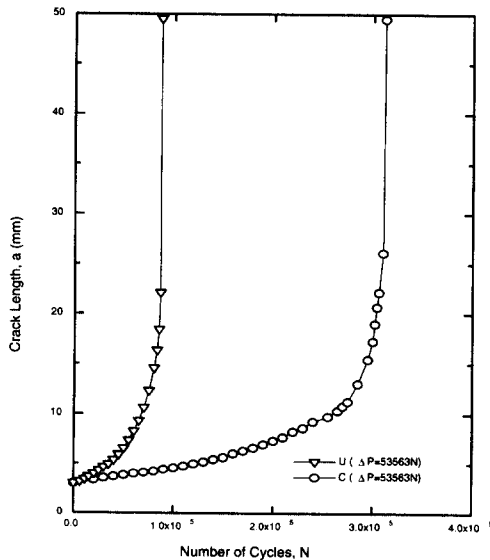


Fig. 8 Crack length vs. number of cycles

Fig. 7, 8의 결과를 Forman식<sup>(15)</sup>에 적용하면 균열진전속도는 Fig. 9와 같다.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R_{eff})K_{cf} - \Delta K} \quad (7)$$

여기서  $K_{cf}$ 는 균열진전율이 불안정하게 되는 순간(최종 파단시)의 응력확대계수이다. Fig. 9에서 재분포된 잔류응력을 고려한 예측선도는 초기 분포에 의한 예측,  $K_{res}$ 의 중첩에 의한 예측보다 실험에 의한 균열진전속도와 일치함을 보여준다.

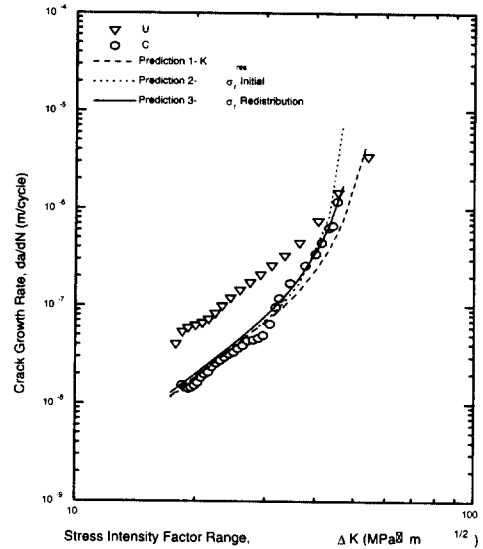


Fig. 9 Crack growth rate vs. stress intensity factor range

### 3. 4 균열단함을 고려한 피로거동의 평가

실제 피로균열의 선단은 일정진폭을 갖는 사이클 중 최소하중부터 개구하중까지는 열리지 않으므로, 피로균열의 COD는 하중에 선형적으로 비례하지 않는다. 균열 선단이 열리지 않으면 피로균열은 전파하지 않고<sup>(16)</sup> 균열 선단이 열리는 하중범위만이 피로수명에 영향을 준다.

균열 개구거동을 고려하여 피로수명을 평가할 때에는 유효 응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 를 사용하는데, 유효 응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 는  $\Delta K$ 와 개구비 U의 곱이므로  $da/dN - \Delta K$  선도의 각 데이터에 U를 곱한 값이

da/dN- $\Delta K_{eff}$  선도의 데이터가 된다. Fig. 11은 용접부와 모재부의  $\Delta K$ 에 실험에 의한 Fig. 10의 U값을 각각 곱하여서 유효응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 와 피로균열진전율 da/dN을 나타낸 것이다. Fig. 11에서 실선은 각각 다른 조건에서의 실험에 의한 U-시험편의 da/dN- $\Delta K_{eff}$  관계를 고려하여 나타낸 것이다.

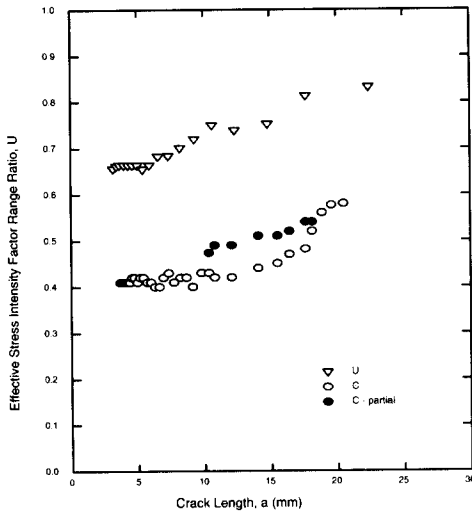


Fig. 10 Effective stress intensity factor range ratio vs. crack length

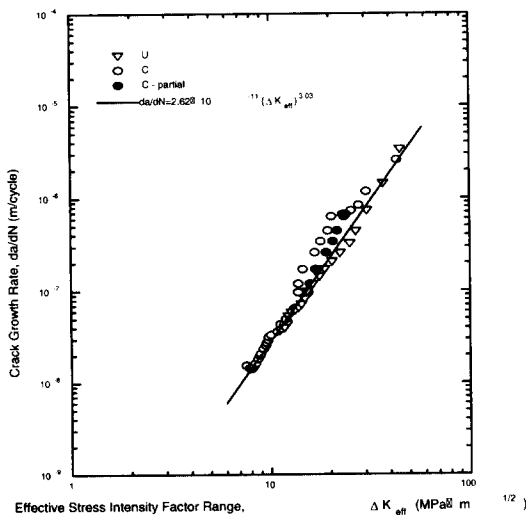


Fig. 11 Crack growth rate vs. effective stress intensity factor range

압축잔류응력장으로부터 균열이 진전하는 경우 접차 인장잔류응력과의 변환점에 가까워지면 Fig. 5에 나타난 것과 같이 하중-감산변위 선도에서 부하선과 재하선이 일치하지 않는 구간이 존재하게 된다. Mukai 등<sup>(17-18)</sup>은 이를 균열의 부분열림에 기인한다고 보고하였다. 여기서, 부분열림이란 하중이 가해질 때 균열후면이 완전히 열리기 전에 균열선단이 먼저 열리는 현상을 말한다. 이상의 결과로부터 하중-감산변위 선도의 부하선과 재하선이 일치하지 않는 경우 강 등<sup>(19)</sup>이 제시한 부분균열열림으로  $\Delta K_{eff} (= K_{max} - K_{part,op})$ 를 평가하였다. 부분균열열림을 고려한 da/dN- $\Delta K_{eff}$  선도에서 용접시험편은 잔류응력에 의한 응력비의 변동에도 불구하고 모재와 서로 일치된 경향을 보였다.

#### 4. 결 론

이상과 같은 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 용접부의 잔류응력은 외부하중의 크기, 하중반복수, 균열진전에 의해 영향을 받아 재분포되며, 잔류응력의 변환점은 피로균열이 진전할 경우 균열진전 방향으로 이동하며 재분포하였다.
- (2) 균열진전에 따라 재분포되는 잔류응력을 고려할 경우의 피로균열예측은 초기 잔류응력 분포에 의한 예측과  $K_{res}$ 로 구한 유효응력비를 사용한 예측보다 실험결과와 잘 일치하였다.
- (3) da/dN- $\Delta K_{eff}$  선도에서 용접시험편의 피로균열진전속도는 부분균열열림을 고려할 경우 잔류응력의 변동에도 불구하고 모재와 일치된 경향을 보였다.

#### 참고문헌

- (1) Masubuchi, K., Analysis of Welded Structure, Pergamon Press, pp. 466~468, 1980.
- (2) Lawrence, F. V., Jr., Burk, J. D. and Yung, J. Y., "Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments," Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, 1982.
- (3) Nelson, D. V., "Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation," Residual

- Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, pp. 172~194, 1982.
- (4) Song, S. H. and Kim, H., "Redistribution of Weld Residual Stress and the Behavior of Fatigue Crack Propagation," Proc. KSME Spring Annual Meeting, pp. 27~30, 1991.
- (5) 송지호, "변동하중하의 피로파괴," 대한기계학회지, 제 30권, 제 2호, pp. 115~130, 1990.
- (6) Kim, S. C. and Lee, Y. B., "The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Reion," J. of Korean Welding Society, Vol. 5, No. 1, pp. 42~56, 1987.
- (7) 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, 第2號, pp. 280~284, 1987.
- (8) Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure," Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP 486, pp. 230~242, 1971
- (9) Mathar, J., "Determination of metal stress by measuring the deformation around drill holes," Trans. ASME, Vol. 86, pp. 249~254, 1934.
- (10) Terada, H., "Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead," Eng. Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 441~444, 1976.
- (11) Kikukawa, M., Jono, M. and Tanaka, K., Proc. ICM-II, Boston, Special Volume, pp. 254~277, 1976.
- (12) Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E. J., "Redistribution of Residual Stress Caused by Crack Propagation Initially through Residual Tensile Stress Field," Trans. of Japanese Welding Society, Vol. 4, No. 1, pp. 154~159, 1987.
- (13) Green, O. V., Trans. of American Society for Steel Treating, Vol. 18, pp. 369, 1930.
- (14) Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Paris Productions, Inc., St. Louis, 1985.
- (15) Forman, R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M., "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures," Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 9, pp. 459, 1967.
- (16) Walker, E. K., "Effect of Environments and Complex Load History on Fatigue Life," ASTM STP 462, pp. 1~4, 1970.
- (17) Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E. J., "Effect of Welding Residual Stress on Fatigue Crack Opening Behavior," Trans. of Japanese Welding Society, Vol. 5, No. 1, pp. 113~119, 1987.
- (18) Mukai, Y. and Nishimura, A., "Opening and Closure Analysis for Fatigue Crack Propagated from Compressive Residual Stress Field," Trans. of Japanese Welding Society, Vol. 5, No. 2, pp. 88~100, 1987.
- (19) Kang, K. J., Song, J. H. and Earmme, Y. Y., "Fatigue Crack Growth and Closure Behavior through a Compressive Residual Stress Field," Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 13, No. 1, pp. 1~13, 1990.