

## 용접 잔류응력장에서의 피로균열성장거동에 관한 연구

이재철\* · 김진무 · 주석재  
기계공학과

### <요 약>

본 논문에서는 알루미늄 합금 5052-H38 판재를 비구속 가스 텅스텐 아크 맞대기 용접을 한 후 압축잔류응력장으로부터 균열이 성장할 때 피로균열성장 거동에 대해 조사하였다. 압축 잔류응력 영역에서 피로균열성장이 지연되었고, 이것에 대한 영향을 중첩의 원리로 잔류응력 확대계수에 의하여 고찰하였다.

---

## Study on the Behavior of Crack Propagation in Welding Residual Stress Field

Lee, Jae-Chul · Kim, Jin-Moo · Chu, Seok-Jae  
Dept. of Mech. Eng., UJC. · Dept. of Mech. Eng. · Dept. of Mech. Eng.

### <Abstract>

In this paper, fatigue crack growth behaviors of unrestrained welded aluminum alloy 5052-H38 plates were investigated when cracks were propagated in the compressive residual stress field.

In the regions of compressive residual stress was retarded fatigue crack growth rate, whose effect was analyzed in terms of residual stress intensity factor with superposition concepts.

---

\* 전문대학 기계공학과

## 1. 서 론

오늘날 공업의 발전 추이에 따라 용접은 공업분야에서 가장 중요한 접합법으로서 기계, 항공기, 차량, 선박, 대형구조물에 이용도가 증가되어 가고, 또한 그런 것들은 대형화, 고속화, 경량화가 되어 그 안전성, 내구성 및 경제성이 중요시 되고 있다. 이러한 구조물들에 불가피하게 존재하는 것으로 생각되는 결함부가 하중을 반복하여 받아 균열이 발생, 전파하는 피로거동이 문제가 되는 경우가 많다.

반복하중을 받는 용접구조물이 파괴되는 경우에, 대부분 용접부에 내재하고 있는 기공, 균열 및 슬래그 혼입 등의 여러 가지 결함, 또는 용접작업시 국부적인 열로 인한 모재의 재질변화, 잔류응력 및 뒤틀림 등이 균열을 발생시켜 파괴를 유발한다. 특히, 잔류응력은 조건에 따라서 용접부에 존재하는 각종 결함의 발생과 성장에, 상당한 영향을 미치는 것으로 일찍부터 문제시 되어 왔다. 따라서, 용접으로 인한 잔류응력의 측정방법에 대한 연구<sup>(1-3)</sup>가 활발히 진행되고 있으며, 용접부의 잔류응력분포 및 잔류응력이 피로파괴거동에 미치는 영향에 대한 연구<sup>(4-6)</sup>가 또한 활발히 진행되고 있다.

연강에 비하여 용접성이 낮고 신뢰성 문제로 각종 공업분야에 제한을 받고 있지만, 최근 급속히 개척되고 있는 우주 항공 산업이나 해양공학 분야에서 많이 사용되고 있는 각종 고강도 알루미늄합금 용접부의 잔류응력장에서의 피로균열성장거동에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 강한 내식성이 요구되는 해양구조물이나 항공기의 연료탱크 제작에 많이 이용되는 알루미늄 합금 5052-H38을 비구속 GTA (Gas Tungsten Arc)용접하여, 용접선을 따라 용접선의 직각방향으로 잔류응력을 측정 후 응력장에서의 피로균열의 성장거동을 관찰하였다. 특히 압축잔류응력이 피로균열 성장속도에 미치는 응력비 R의 영향

을 고찰하기 위해 외부하중에 의한 응력비를 각각 0.1, 0.3, 0.5로 하여 피로시험을 수행하였다. 작용응력과 잔류응력에 의한 응력확대계수는 중첩의 원리로 해석하였고, 압축잔류응력 영역에서 인장잔류응력 영역으로 발생하는 피로균열 성장거동을 고찰해 보았다.

## 2. 시험편 및 실험방법

실험에 사용된 재료는 두께가 3mm인 비열처리 가공경화합금인 Al-Alloy 5052-H38을 사용하였다. 시험재료의 기계적성질과 화학적 성분은 각각 Table 1, 2와 같다.

시험편은 비구속 GTA(Gas Tungsten Arc) 맞대기용접으로 하였고, 용가재(Filler Metal)는 직경이 2.4mm인 A5356을 사용하였다.

용접조건은 Root간격을 0, 홈의 각도를 0으로 하였으며, Table 3.과 같다.

용접잔류응력의 측정은 Strain Gauge Sectioning Method를 이용하였다. 사용된 측정기는 KYOWA UCAM-1A다. Fig. 1과 같이 용접선(Welding Line)에 일련의 Strain Gauge를 접착하고 Strain Gauge 주변을 절단하여, 용접선 방향으로 분포된 용접선 직각 방향의 잔류변형률(Residual Strain)만을 측정하고 여기에 Young's Modulus를 곱하여 용접잔류응력을 구하였다. 여기에 사용된 Strain Gauge는 KYOWA KFG-5-120-C1-23이다.

초기 잔류응력을 측정 후 압축잔류응력장에서 피로균열이 발생하여 성장하게 하기 위하여 Notch를 용접선 방향으로 가공한 SEN시험편의 형상과 치수는 Fig. 2와 같이 제작하였다.

시험편의 Notch 가공은 두께 0.3mm의 wire-cutting machine으로 길이 8mm로 가공하고 피로시험시 2mm의 pre-crack을 더 주어 전체 초기균열길이(Initial Crack

Length)를 10mm로 하였다.

본 실험에 사용한 시험기는 MTS사에서 제작된 유압만능시험기(MTS 819)이며, 피로시험에서 균열길이의 측정에는 50배율, 0.01mm의 정밀도인 이동식현미경을 사용하였다.

피로시험은 일정하중폭(Constant Load Range)하에서 응력비(R)를 0.1, 0.3, 0.5로 하여 수행하였고, 피로시험조건은 Table 4.와 같다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1 잔류응력분포

용접시 발생하는 잔류응력은 국부적인 가

열, 냉각에 따른 불균일한 온도 분포에 의하여 발생하는 열소성변형에 기인하는 것으로서, 타부재로부터 받은 구속으로 인해 더욱 증가되며, 그 크기 및 분포가 이음형상, 용접조건 그리고 구조물의 모양 등 여러 인자의 영향으로 인하여 크게 달라진다. Fig. 3은 용접선 방향으로 분포된 용접선 직각방향의 잔류응력을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 시험편의 양 가장자리 부분에는 압축 잔류응력이 분포하고 중심부에는 인장잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 지금까지 보고<sup>7)</sup>된 많은 연구결과와 같은 경향을 나타내고 있다. Curve Fitting으로부터 결정되는 상수는  $C_0=-3.13768$ ,  $C_1=0.0676805$ ,  $C_2=0.0406303$ ,  $C_3=0.00158892$ ,  $C_4=1.6449 \cdot 10^{-5}$ 이고  $\sigma_{res}(x)=C_0+C_1x+C_2x^2+C_3x^3+C_4x^4$ 은 초

Table 1. Mechanical properties of specimens

specimen	Ultimate strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
parent metal	29	25	6850	7
weld metal	20	12	6810	4

Table 2. Chemical compositions of Aluminum Alloy 5052-H38(Wt. %)

Composition	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
A5052-H38	0.02	0.11	0.32	0.15	2.40	0.02	0.32	0.017	Remainder

Table 3. Conditions for GTA Butt Welding

Plate Thickness (mm)	Root Opening (mm)	Electrode Dia. (mm)	Filler Metal Dia. (mm)	Argon Flow (l/min)	Current (A)	Volt (V)	Welding Speed (mm/min)	Number of Pass
3	0	2.4	2.4	13	120	20	132	1

Table 4. Experimental Conditions of Fatigue Tests

Specimen Type	P <sub>max</sub> (kg)	P <sub>min</sub> (kg)	ΔP (kg)	P <sub>mean</sub> (kg)	Stress Ratio	Test Freq. (Hz)	Control Mode	Wave Form
SEN	400	40	360	220	0.1	25	Load	Sine
SEN	514	154	360	334	0.3	25	Load	Sine
SEN	720	360	360	540	0.5	25	Load	Sine

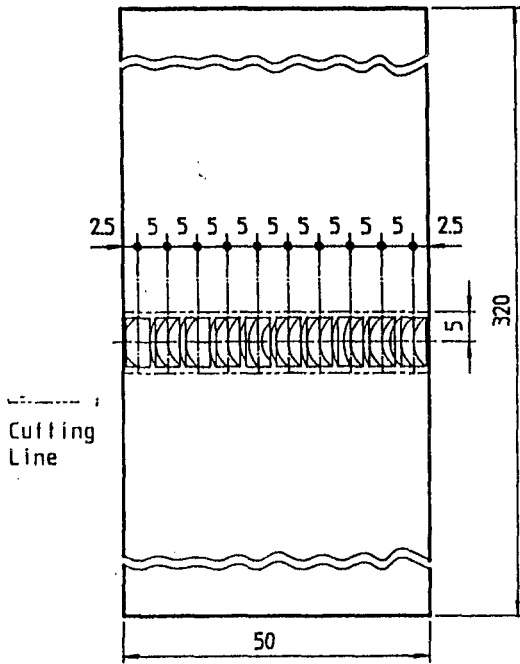


Fig. 1 Strain gage sectioning method for measuring residual stress.

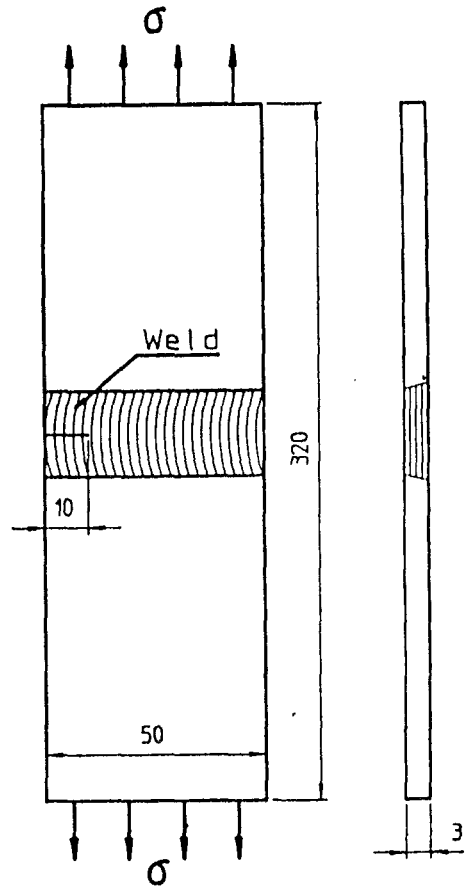


Fig. 2 Configuration of fatigue test specimen.

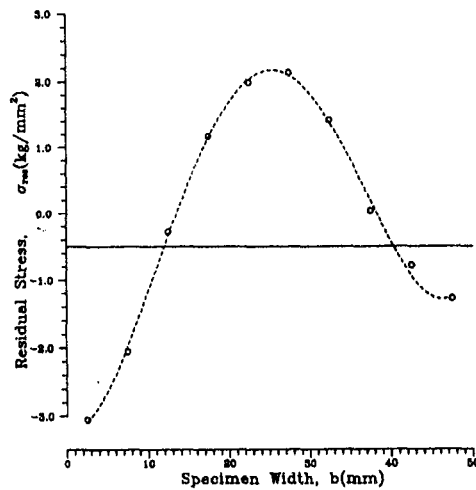


Fig. 3 Residual stress distribution in uncracked weld specimen.

기잔류응력장과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3-2 a-N 관계

Fig. 4는 하중진폭 일정 조건에서 응력비를 변화시킨 경우에 있어서 반복사이클 수 (N)에 대한 균열길이(a)의 관계를 나타내었다.

일반적으로 응력비를 증가시킬수록 최종 파단에 이르기까지의 반복사이클 수 즉, 수명은 감소함을 확인할 수 있다.

R=0.1에서 용접부의 재질변화, 기공, 슬래그 혼입 등의 결함 때문에 Weld Metal 이 Parent Metal보다 최종파단에 이르는 반복사이클 수는 적을 것 같으나 실험결과는 많게 나타났다. 이와같은 원인은 가장자리 부분의 압축잔류응력의 영향으로 인하여 균열성장의 지연현상이 발생되기 때문이라고 생각된다. 이러한 지연현상은 균열선단에 생기는 압축잔류응력장에 의한 균열닫힘 효과, 변형경화, 소성둔화 등이 그 원인으로 알려져 있다.

### 3-3 잔류응력확대계수 ( $K_{res}$ )와 a/b의 관계

Fig. 5는 응력비 0.1, 0.3, 0.5에 대한  $K_{res}/K_{max}$ 와 a/b의 관계를 나타낸 것이다. 잔류응력에 의한 응력확대계수는 균열이 존재하여 잔류응력의 재분포가 일어나도, 균열이 없을 때 존재하던 초기 잔류응력을 균열단면에 반대방향으로 작용시키는 상태로 중첩법을 이용하여 식(1)<sup>(6)</sup>에 의해 구할 수 있다.

$$K_{res}(a) = \int_0^a \sigma_{res}(x) m(x, a) dx \quad (1)$$

여기서, a는 Crack Length, m(x, a)는 Weight Function,  $\sigma_{res}(x)$ 는 Initial Residual Stress Field이다. 그리고 m

(x, a)는 Kaya-Erdogan<sup>(9)</sup>에 의해 밝혀진 SEN strip의 Weight Function으로서 다음과 같다.

$$m(x, a) = \frac{2}{\sqrt{\pi a}} \cdot \frac{G\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{b}\right)}{\left(1 - \frac{a}{b}\right)^{3/2} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}}$$

$$G\left(\frac{x}{a}, \frac{a}{b}\right) = g_1\left(\frac{a}{b}\right) + g_2\left(\frac{a}{b}\right)\frac{x}{a} + g_3\left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{x}{a}\right)^2 + g_4\left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{x}{a}\right)^3$$

$$g_1\left(\frac{a}{b}\right) = 0.46 + 3.06\left(\frac{a}{b}\right) + 0.841\left(1 - \frac{a}{b}\right)^5 + 0.66\left(\frac{a}{b}\right)^2\left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$

$$g_2\left(\frac{a}{b}\right) = -3.52\left(\frac{a}{b}\right)^2$$

$$g_3\left(\frac{a}{b}\right) = 6.17 - 28.22\left(\frac{a}{b}\right) + 34.54\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 14.39\left(\frac{a}{b}\right)^3 - \left(1 - \frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$g_4\left(\frac{a}{b}\right) = -6.63 + 25.16\left(\frac{a}{b}\right) - 31.04\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 14.41\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 2\left(1 - \frac{a}{b}\right)^{\frac{3}{2}} + 5.04\left(1 - \frac{a}{b}\right)^5 + 1.98\left(\frac{a}{b}\right)^2\left(1 - \frac{a}{b}\right)^2$$

Fig. 6은 잔류응력확대계수( $K_{res}$ )와 최대 응력확대계수( $K_{max}$ ), 균열길이(a)와 시험편의 폭(b)을 무차원화하여 나타낸 것이다. 피로 균열이 성장할수록 압축잔류응력에 의한 영향은 감소하고 균열길이가 짧을 때, 즉 균열 성장초기에서 그 영향은 크고, 응력비는 0.1이 가장 큰 영향을 끼치며, 0.3, 0.5의 순서로 영향이 작아짐을 알 수 있다.

### 3-4 da/dN- $\Delta K$ , da/dN- $\Delta K_{off}$ 의 관계

일정 하중진폭 조건에서 응력비를 변화시킨 경우에 있어서 피로균열 성장속도 da/dN과 응력확대계수범위  $\Delta K$ 의 관계를 Fig. 7에 나타내었다.

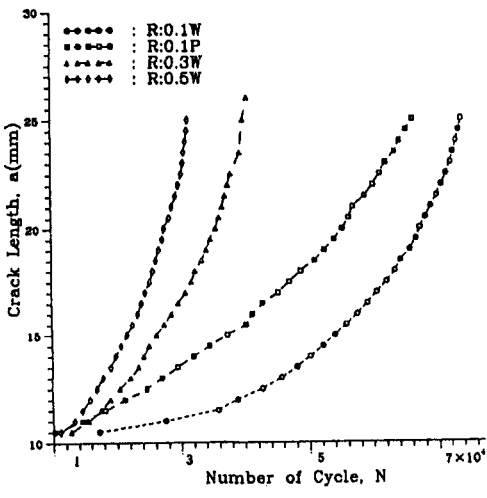


Fig. 4 a-N curve.

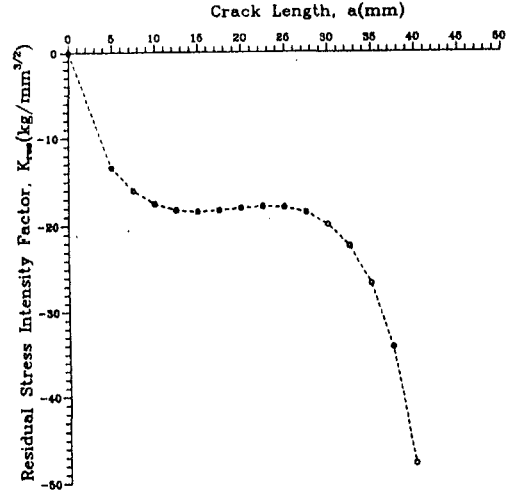


Fig. 5 Variation of Residual Stress Intensity Factor.

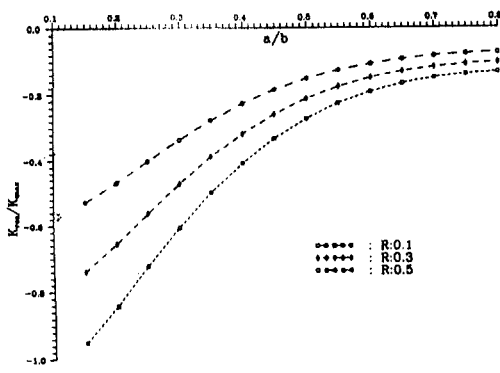


Fig. 6 Changes in residual stress intensity factor range of weld metal specimens.

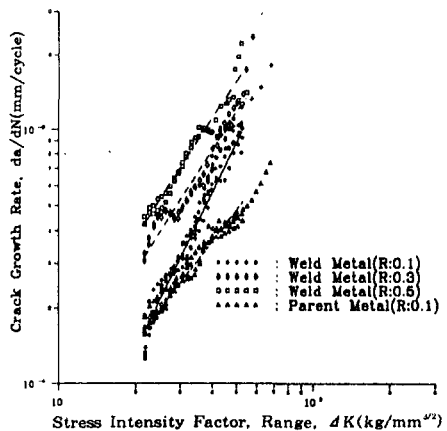


Fig. 7 da/dN-ΔK relations.

응력진폭이 일정할 때 같은 ΔK에서 응력비가 증가할수록 균열성장속도가 증가함을 알 수 있다. 선형탄성파괴역학의 개념은 피로균열성장거동에도 적용된다. 피로균열성장거동은 Paris의 식(2)를 사용하였다.

$$da/dN = c(\Delta K)^m \quad (2)$$

잔류응력에 의한 응력확대계수와 외부하중에 의한 응력확대계수를 중첩하면 다음과

같다.

$$\begin{aligned} (1) \quad K_{min} + K_{res} > 0 \\ \Delta K_{eff} &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) \\ &= K_{max} - K_{min} \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_{eff} = (K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res}) \quad (4)$$

여기서, ΔK<sub>eff</sub>는 유효응력확대계수변동범

위(Effective Stress Intensity Factor Range)이고,  $R_{eff}$ 는 유효응력비(Effective Stress Ratio)이다.

$$(2) K_{min} + K_{res} \leq 0$$

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) \\ &= (K_{max} + K_{res}) - (0) \\ &= K_{max} + K_{res} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R_{eff} &= (K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res}) \\ &= 0 / (K_{max} + K_{res}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 8, 9, 10은 식(2)를 적용해서 응력비 변화에 따른  $da/dN-\Delta K$ ,  $da/dN-\Delta K_{eff}$  관계를 나타낸 것이다.  $\Delta K$ 와 비교하여 볼 때,  $\Delta K$ 와  $\Delta K_{eff}$ 의 차이만큼 균열성장이 지연됨을 알 수 있다. 균열성장초기에 압축 잔류응력의 영향이 크을 알 수 있으며,  $R=0.1$ 일 때가 가장 크고,  $R=0.5$  이상에서는 압축잔류응력의 영향은 무시할 수 있는 것으로 생각된다.  $R=0.3$ 일 때,  $\Delta K > 43.29 \text{ Kg/mm}^{3/2}$  ( $a/b > 0.42$ )에서는  $\Delta K = \Delta K_{eff}$ 로 되어 압축잔류응력의 영향은 무시할 수 있다.  $\Delta K$ 가 증가할수록 피로균열성장 거동에 미치는 압축잔류응력의 영향은 감소

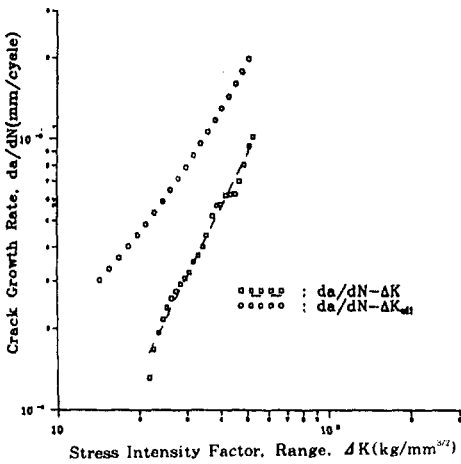


Fig. 8  $da/dN-\Delta K$ ,  $da/dN-\Delta K_{eff}$  relations. (R:0.1).

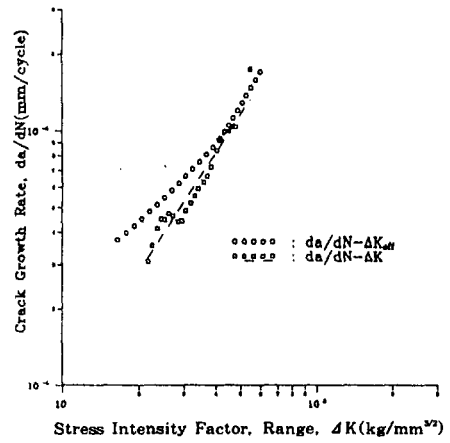


Fig. 9  $da/dN-\Delta K$ ,  $da/dN-\Delta K_{eff}$  relations. (R:0.3).

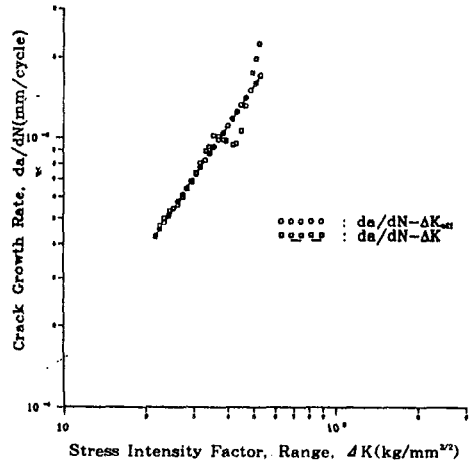


Fig. 10  $da/dN-\Delta K$ ,  $da/dN-\Delta K_{eff}$  relations. (R:0.5).

함을 알 수 있다. 이는  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 반복되는 피로하중에 의하여 압축잔류응력이 완화되기 때문이라고 추정된다.

균일한 인장응력을 받는 SEN(Single Edge Notched) 시험편에 대하여  $a/b \geq 0.2$ 에서 엄밀해(Exact Solution)와 비교하여 0.5% 이하의 오차를 갖는 Tada의 수정함수(9)를 이용하여 다음과 같은 식에 의해 구하였다.

$$\Delta K = \left( \frac{\Delta p}{\sqrt{bt}} \right) \sqrt{\pi \alpha} \left[ 0.265(1 - \alpha)^4 + (0.857 + 0.265\alpha)(1 - \alpha)^{3/2} \right]$$

여기서 b는 시험편의 폭, t는 시험편의 두께, α는 a/b, Δp는 하중증진폭이다.

또한, 피로균열성장속도 da/dN의 계산에는 ASTM E647-88에 제안된 Seven Point Incremental Polynomial Method<sup>(10)</sup>를 사용하였다.

균일한 인장응력하의 SEN 시험편에 대한 Tada의 식을 이용하여 계산된 응력확대계수의 최대, 최소값에 대한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 균열 길이가 증가함에 따라 응력확대계수의 최대, 최소 값은 증가함을 알 수 있다.

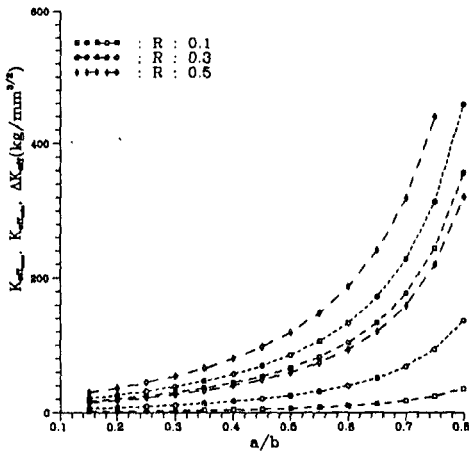


Fig. 11 Variation of stress intensity factor.

Fig. 12, 13는  $K_{max} + K_{res}$ ,  $K_{min} + K_{res}$ ,  $\Delta K_{off}$ 를  $K_{max}$ 에 대해 무차원화하여 a/b의 값에 따른 변화를 나타낸 것이다. a/b의 증가에 따라 이들 값은 각각의  $(K_{max} - K_{min}) / K_{max}$  값에 수렴함을 알 수 있다. 즉, R가 0.1, 0.3, 0.5일 때 각각 0.9, 0.7, 0.5에 수렴하고 있다.

또 이들 값이 일정한 값에 수렴하면 Δ

$K_{eff} = \Delta K$ 로 되고 균열 성장거동에 압축잔류응력은 영향을 미치지 못한다. 균열길이가 작은 영역에서는 응력비가 클수록 압축잔류응력의 영향이 작아짐을 알 수 있다.

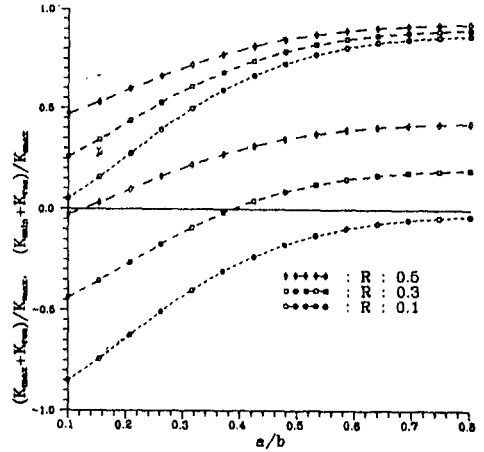


Fig. 12 Changes in residual stress intensity factor of weld metal specimens.

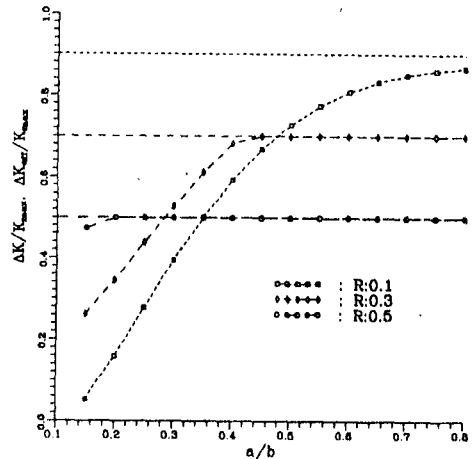


Fig. 13 Changes in  $\Delta K_{off}$  values of weld metal specimens.

Fig. 14는 피로균열성장에 따라 압축잔류응력을 중첩하여 구한 유효응력비( $R_{eff}$ )의 변화를 나타낸 것이다. R=0.1일 때는  $K_{min} + K_{res} < 0$ 이기 때문에 균열성장에 아무런 영향을 미치지 못하므로  $R_{eff}$ 는 0이다.



R=0.3일 때는 균열길이가 21mm(a/b=0.42)이하에서는  $K_{min} + K_{res} < 0$ 되고, R=0.5일 때는 균열길이가 7.5mm(a/b=0.15)이하에서  $K_{min} + K_{res}$ 가 음(-)의 값이 되어  $R_{eff}$ 는 0이된다. R의 값을 증가시킬수록  $R_{eff}$ 의 값은 증가하고, 압축잔류응력의 영향은 감소되어 균열성장속도가 빨라지는 사실을 알 수 있다.  $R_{eff}=0$ 일 때는 압축잔류응력의 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

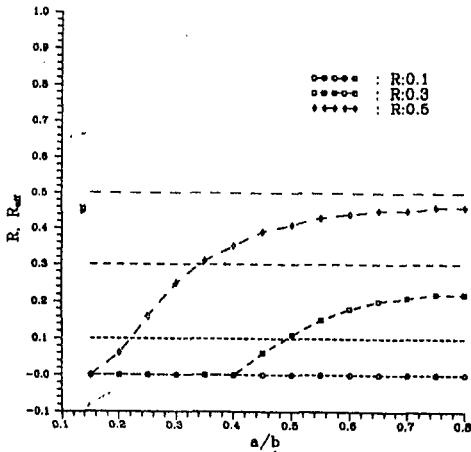


Fig.14 Changes in  $R_{eff}$  values of weld metal specimens.

#### 4. 결 론

Al-Alloy 5052-H38을 비구속 GTA 맞대기 용접하여 제작한 시편에 용접선 방향으로 용착금속에 Notch를 넣어, 균열이 압축잔류응력장으로부터 인장잔류응력장으로 성장할 때 피로균열성장거동에 미치는 초기 잔류응력의 영향을 중첩의 원리를 이용하여 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 시험편의 가장자리 부분의 압축잔류응력으로 인하여 균열 성장 지연 현상이 일어났다.

(2) 압축잔류응력에 의한 균열성장지연은 외력에 의한 응력확대계수( $K_{app}$ )와 잔류응

력에 의한 응력확대계수( $K_{res}$ )의 중첩법으로 해석할 수 있고,  $\Delta K$ 와  $\Delta K_{eff}$ 의 차이만큼 균열성장이 지연됨을 알 수 있다.

(3) 피로균열이 압축잔류응력의 영역에 존재하는 경우 응력비를 증가시킬수록 균열 성장속도는 빨라지고, 피로균열성장에 미치는 압축잔류응력의 영향은 감소함을 알 수 있다. 응력비 0.5이상에서는 압축잔류응력이 피로균열성장에 미치는 영향을 무시할 수 있음을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. Larry J. Vande walle, "Residual Stress for Designers and Metallurgists", International Harvester C., pp.189-208,1980.
2. Kenneth Easterling, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", Butterworths, pp. 33-45, 1983.
3. Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", Pergamon, pp. 189-234. 1980.
4. S.Berge and O.I.Eide, "Residual Stress and Stress Interaction in Fatigue Testing of Weld Joints", ASTM STP 776, pp.115-131, 1982.
5. A. P.Parker, "Stress Intensity Factor, Crack Profiles and Fatigue Crack Growth Rates in Residual Stress Fields", ASTM STP 776, pp. 13-21, 1982.
6. Y.Sumi "Computational crack path prediction for brittle Fracture in welding Residual stress fields", International Journal of Fracture 44, pp. 189-207, 1990.
7. K.Masubuchi, "Effect of Residual Stress on Fatigue Fracture Analysis of Welded Structure", International Series on Materials Science and

- Technology, Vol. 33, pp. 466-468, 1980.
8. D. R. J. Owen and A. J. Fawkes, "Engineering Fracture Mechanics; Numerical Methods and Applications", Pineridge Press Ltd., pp. 22-25, 1983.
  9. H. Tada, P. Paris and Irwin, "The Stress Analysis of Crack Handbook", 2nd Ed., Del Research Corporation, pp. 2-27, 1985.
  10. "Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate", Annual Book of ASTM Standards, E647-88, Philadelphia, pp. 646-665, 1988.