

용접잔류응력장에서의 피로균열 성장거동에 관한 연구(I)

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior in Welding Residual Stress Field(I)

최 용 식* 김 영 진** 우 흥 식***
Y. S. Choy Y. J. Kim H. S. Woo

ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the effect of residual stresses on the ΔK_{th} and fatigue crack growth behavior of butt weldments. For this purpose, transverse butt submerged arc welding was performed on SM50A steel plate and CT(compact tension) specimens which loading direction is perpendicular to weld bead were selected. Welding residual stresses distribution on the specimen was determined by hole drilling method.

The case of crack located parallel to weld bead, the states of as weld and PWHT, ΔK_{th} of specimens(HAZ, weld zone) was higher than that of the base metal probably because of the compressive residual stresses of crack tip. In low ΔK region, it is estimated that the effects of residual stresses for da/dN are great. In region II, the da/dN of weldments in as weld state was lower than that of the base metal. Though da/dN of Weldments in PWHT state was similar to that of the base metal. The constant of power law, m in two states consisted with the base metal. Therefore, it is estimated that the value of m is not affected by residual stresses. Fatigue crack growth behavior of weldments consisted with the base metal considering the effective stress intensity factor range(ΔK_{eff}) included the effect of initial residual stress(K_{res}). Thus, we can predict the fatigue crack growth behavior of weldment by knowing the distribution of initial residual stress at the crack tip.

Key Word : Fatigue Crack Growth Behavior (피로균열 성장거동), Threshold Stress Intensity Factor Range(임계응력확대계수 폭), PWHT(용접후열처리), Residual Stress Intensity Factor(잔류응력 확대계수), Effective Stress Intensity Factor Range(유효응력확대 계수 폭)

* 正會員 : 성균관대학교 기계공학과

** 正會員 : 성균관대학교 기계설계학과

*** 正會員 : 성균관대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

일반 구조물 및 기계요소에서 발생한 파괴의 90%는 피로에 기인한다고 알려지고 있으며[1], 그 중에서도 특히, 용접부 부근에서 발생하여 진파한 피로균열에 의한 파괴는 선형탄성파괴역학의 관점에서 연구가 꾸준히 계속되어 왔다[2-7].

한편, 용접재의 안전설계나 보수관리를 위해서는 용접재의 피로균열성장 특성에 미치는 영향인자를 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이 영향인자로서는 잔류응력, 응력집중, 기계적 성질과 금속조직학적 성질의 변화등이 있다. 특히 잔류응력은 가장 중요한 인자로서, 구조물이 작동중에 혹은 가공될 때 부분적으로 이완되어 치수의 변화와 변형을 유발시키는 원인이 되기도 한다. 또한 국부적으로 남아있는 인장잔류 응력은 구조물이 받는 하중과 중첩하여 취성파괴의 원인이 되기도 하고, 피로거동도 큰 영향을 미치고 있다[8-10].

따라서, 본 연구에서는 SM50A강에 대하여 맞대기 잠호용접(butt submerged arc welding)을 실시한 후에, as weld재 및 용접후열처리(post weld heat treatment : PWHT)재에 대하여 잔류응력이 ΔK_{th} 및 $da/dN - \Delta K$ 에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 또한 초기잔류응력의 분포를 측정한 후, 중첩의 원리를 이용하여 용접잔류응력과 피로균열성장거동과의 관계를 정량적으로 해석, 평가함으로써 용접 구조물의 안전설계, 수명예측 및 건전성 평가에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 관련이론

(잔류응력에 의한 응력확대계수 K_{res} 의 계산)

균열이 성장함에 따라서 잔류응력으로 인한 균열선단에서의 잔류응력확대계수, K_{res} 가 변동하는데, 이를 계산하기 위하여 중첩의 원리를 이용할 수 있다. 균열이 없을 때의 잔류응력을 초기잔류응력,

σ_{R0} 라고 정의하면, 초기잔류응력장은 균열이 진전함에 따라서 변화하여, 균열면상의 잔류응력은 해방되고, 나머지 부분의 잔류응력은 재분포하게 된다. 이때의 중첩의 원리는 Fig. 1에 제시되었다.

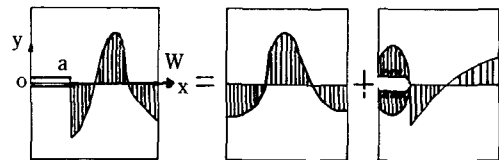


Fig. 1 Superposition of initial residual stress field

따라서 weight function을 이용하여 다음과 같은 K_{res} 계산식을 사용할 수 있다.[11].

$$K_{res} = \int_0^a \sigma_{R0}(x) m(a, x) dx \dots\dots\dots(2.1)$$

여기서 $\sigma_{R0}(x)$ 는 초기잔류응력의 분포, $m(a, x)$ 는 weight function이다.

그러나 compact tension시편인 경우, 기계가공된 예비균열(a_0)에 의하여 초기잔류응력(σ_{R0})은 균열 선단 부위에서 재분포하게 된다. 이때의 잔류응력을 재분포잔류응력(σ_{R1})이라 하면, Fig. 2와 같이 중첩을 할 수 있다.

따라서 초기예비균열(a_0)에서 재분포한 잔류응력을 이용하여 (2.1)식을 변형하면 다음과 같다.

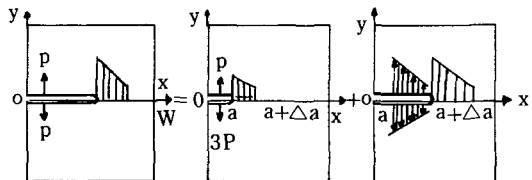


Fig. 2 Superposition of redistributed residual stress field

$$K_{res} = \int_0^a \sigma_R^i(x) m(a, x) dx \dots\dots\dots(2.2)$$

여기에서 x 는 force line을 원점으로 한 균열면상의 좌표이다.

Compact tension시편의 weight function, $m(a, x)$ 에는 Newam[12]에 의하여 제시된 다음식을 이용하였다.

$$m(a, x) = \frac{2}{\sqrt{\pi(a-x)}} \frac{1 + A_1\Delta + A_2\Delta^2}{(1-\Delta)^{3/2}} \dots\dots\dots(2.3)$$

여기서

$$A_1 = 3.57 + 12.5\left(1 - \frac{a}{W}\right)$$

$$A_2 = 5.1 - 15.32\left(\frac{a}{W}\right) + 16.58\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 5.97\left(\frac{a}{W}\right)^3$$

$$\Delta = \frac{a-x}{W-x}$$

식(2.2)에서 $\sigma_R^i(x)$ 는 잔류응력분포로부터 결정되는 함수로서, 본 연구에서는 실험으로부터 추정된 잔류응력분포를 curve fitting을 하여, 실험치와 가장 일치하는 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\sigma_R^i(x) = D_0 + D_1x + D_2x^2 + D_3x^3 \dots\dots\dots(2.4)$$

여기에서 $D_0 - D_3$ 은 curve fitting으로 결정되는 상수이다.

따라서, 이상의 이론식을 바탕으로 K_{res} 를 구한 다음, ΔK_{eff} 를 결정하였다.

3. 실험

3.1 시편의 재료 및 시편의 용접

본 실험에 사용된 재료는, 국내 시판중인 판 두께 11mm의 용접구조 용강판(SM50A)으로, 화학적 성분은 Table 1에, 상온에서의 기계적 성질은 Table 2에 제시되어 있다. 용접시편을 얻기 위하여 강판을

Tabel 1. Chemical composition of SM50A (weight %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.14	0.41	1.32	0.16	0.05	Remainder

Tabel 2. Mechanical properties of SM50A

Metal	Yield strength (Kg/mm ²)	Tensile strength (Kg/mm ²)	Elongation (%)
Base	38	53	29

50mm×100mm의 크기로 절단하고, 압연방향과 직각으로 60°V-groove를 기계가공한 후에, 잠호용접기(submerged arc welding equipment)를 사용하여, 용접재의 전, 후면을 각각 1 pass씩 용접하였으며, second pass를 실시하기 전에 arc air gou-

Tabel 4. Chemical composition of welding wire (weight %)

C	Si	Mn	Fe
0.12	0.03	1.93	Remainder

Tabel 3. Welding procedure

Material	Welding method	Welding current(A)	Welding Voltage(V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)	Number of pass	
						1st weld side	2nd weld side
SM50A	Submerged Arc	500	30	50	18	1	1

ging을 실시하여, 용접시에 발생할지도 모르는 용입불량을 방지하였다. 용접조건은 Table 3과 같으며, 사용된 용접봉은 시판중인 서한개발(주)제품의 연강 및 50kg급 고장력강용인 H-14($\phi=4\text{mm}$)이었고, flux는 동 회사제품의 bonded-type flux이었다. 용접봉의 화학적 성분은 Table 4와 같다.

3.2 시편의 형상

용접판으로부터 시편의 채취는 Fig. 3과 같이 하

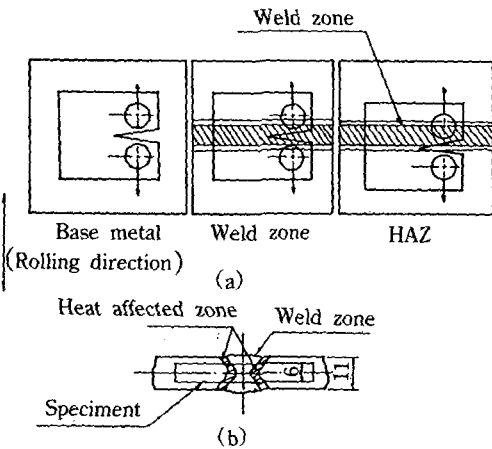


Fig. 3 Specimen orientation

- (a) CT specimens prepared for fatigue tests from the three different locations
- (b) Orientation of fatigue specimens.

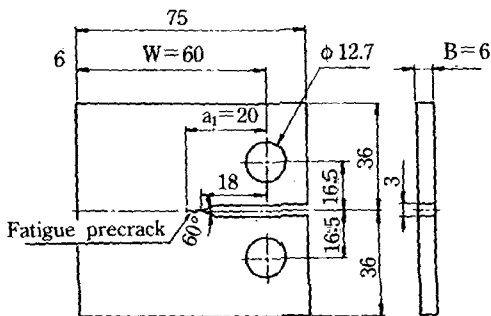


Fig. 4 Geometry of CT specimen (unit : mm)

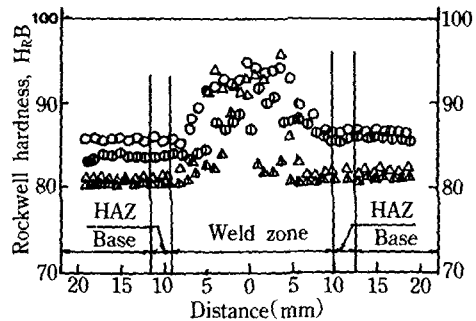
였고, 용접bead에 평행으로 crack이 모재(base metal), 용접부(weld zone), 열영향부(HAZ) 부위에 위치하도록 Fig. 4와 같이 ASTM E 647-83규격에 따라 CT시편으로 가공하였다. 용접잔류응력을 제거하기 위한 PWHT는 as weld상태의 시편을 가열 속도 200°C/hr로 650°C 까지 가열한 후, 100분동안 유지한 다음, 방치, 노냉하였다.

3.3 시험기와 측정장치

본 연구에 사용된 시험기는 25ton용량의 dynamic universal testing machine(Instron Model 1332)이며, 피로균열길이는 배율이 $\times 25$ 인 digital식 이동 현미경을 사용하여 측정하였다.

3.4 경도측정과 용접잔류응력의 측정

As weld상태와 PWHT상태의 용접시편에 대하여, 용접bead를 중심으로 시편의 길이방향(하중축 방



- As Weld state
- Front surface
- ⊙ Back surface
- PWHT state
- △ Front surface
- ⊔ Back surface

Fig. 5 Hardness distribution in weldment (perpendicular to weld zone)

향)과, 균열이 각각 모재, 용접부 및 열영향부내에 위치한 시편의 균열진전방향의 경도분포를, Rockwell Hardness(Bscale)로 측정하였다. 측정결과는 Fig. 5, 6에 제시하였다. As weld 상태의 HAZ, weld zone 및 PWHT상태의 HAZ, weld zone시편에 대한 균열선단의 잔류응력분포는, Mathar[13]의 hole drilling method를 이용하여 하중축 방향에 평행인 잔류응력성분을 측정하였다. 이때의 strain gage 및 구멍의 위치는 Fig. 7과 같다.

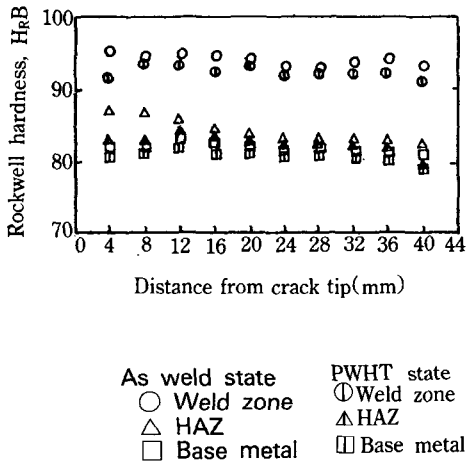


Fig. 6 Hardness distribution in weldment (parallel to weld zone)

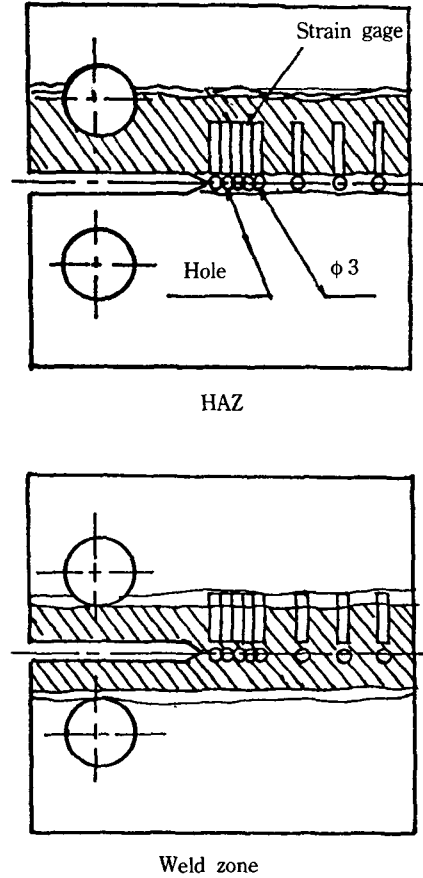


Fig. 7 Positions of strain gage and holes drilled for detecting residual stresses

3.5 피로시험

3.5.1 ΔP-일정 피로시험

ΔP-일정 피로시험은 ASTM E 647-83에 준하였으며, 사용된 시편의 형상과 치수는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 이때의 load control은 정현파, 하중비 ($R = P_{min}/P_{max}$)는 0.05, 하중반복수는 30Hz, 실험실 온도는 23°C (실온)이었다. Pre-cracking은, 본 실험

시의 최대하중보다 20% 큰 하중에서부터 5%씩 하중을 감소시키면서, 기계가공 notch로부터 약 2 mm의 fatigue pre-crack을 넣었다. 그리고 피로균열이 0.2-0.3mm 증가할 때마다, 시편의 전, 후면을 동시에 측정하여 그 평균값을 균열길기로 취하였다.

3.5.2 ΔK-감소 피로시험

ΔK_{th}값을 결정하기 위한 시험법에는 여러가지

방법[14, 15]들이 있으나, 본 실험에서는 Amzallag [14]가 제시한 방법을 채택하였다. 즉, ΔP -일정 피로시험시의 시편과는 별개의 시편으로, a/W 가 0.45에 도달할 때까지는 ΔP -일정 피로시험을 수행하고, $0.45 < a/W < 0.55$ 구간에서 균열길이가 0.2-0.3 mm성감함에 따라 5%씩 하중폭을 감소시켜, ΔK 를 감소시키면서 da/dN 이 10^{-7} mm/cycle이하가 될 때에 실험을 끝냈다.

3.5.3. ΔK 의 계산

ΔP -일정 피로시험에서 얻은 데이터로 $a-N$ 관계곡선을 구하고, K 의 계산에는 ASTM E647-83에 제시된 다음식을 사용하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+\alpha)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}} \quad \dots(3.1)$$

$$(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

여기에서 α 는 a/W , B 는 시편의 두께, W 는 시편의

폭을 나타낸다. da/dN 값은 $a-N$ 관계로부터, seven point incremental method로 계산하여 $da/dN-\Delta K$ 관계를 구하였다. 저 ΔK 구간의 $da/dN-\Delta K$ 관계는 ΔK -감소 피로시험에서 얻은 $a-N$ 관계곡선으로부터 secant method를 이용하여 얻었다.

잔류응력을 고려한 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 관계는, 2장의 관계식에 따라 수치해석적인 방법으로 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 잔류응력분포 및 경도분포

As weld상태의 base metal, HAZ, weld zone 및 PWHT 상태의 weld zone, HAZ에 대한 균열진전면의 하중축 방향의 잔류응력분포는 Fig. 8과 같다. 용접판에서 CT형상으로 시편을 채취할 경우는 weld zone, HAZ에서 균열선단부근 및 시편의 끝부근에 압축잔류응력이, 시편의 중간부위에 인장잔류응력이

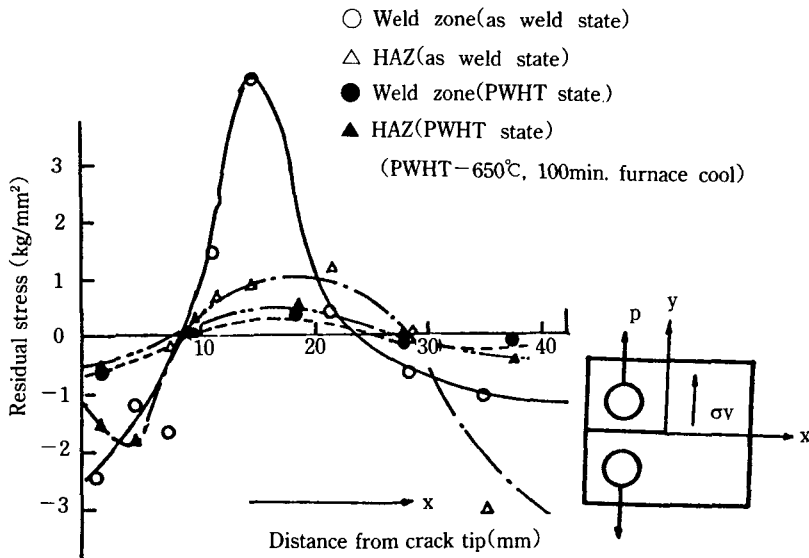


Fig. 8 Residual stress distribution(σ_r)

분포하고 있음을 알 수 있는데, 이는 다른 연구자들의 연구결과와도 잘 일치한다[6, 7]

PWHT시편에서의 잔류응력은 상당한 정도까지 완화할 수 있었으나 완전한 제거에는 미치지 않았다. 또한, 이때의 잔류응력분포는 as weld 상태의 잔류응력분포의 경향과 비슷하게 나타났다.

Fig. 5, 6은 Rockwell Hardness, H_R (B scale)의 분포를 나타낸 것으로 시편 전, 후면의 경도분포는 차이를 보여주고 있다. 시편 전면의 경도치가 후면과 비교하여 상당히 작게 나타나는 이유는, 2nd pass 용접시의 용입열에 의하여 부분적으로 열처리가 된 것에 기인된다고 생각된다. 그러나, 잔류응력을 제거하기 위한 PWHT재의 경우에도, 경도치는 as weld재와 비슷한 양상을 보여주고 있다.

본 연구에서의 weld zone, HAZ시편에서는 저 ΔK 영역인 near threshold부근에서 시편 전, 후면

균열길이의 차이가 1-1.2mm정도 나타났으나, ΔP -일정 피로시험에 의한 고 ΔK 영역에서의 균열 길이는 양면이 거의 일치하였다. 특이한 사항은 near threshold부근에서 잔류응력이 상당량 이완된 PWHT재의 weld zone, HAZ시편에서도 역시 균열 길이의 차이가 1-1.2mm정도가 되었는데, 이는 시편 전, 후면 경도의 차이에서 추측할 수 있는 바, 용접에 의한 금속조직의 차이와 두께방향의 잔류응력의 변화가 복합되어서 피로균열성장거동에 영향을 준 것이라고 생각된다.

4.2 잔류응력이 ΔK_{th} 에 미치는 영향

Figs. 9, 10은 as weld재와 PWHT재에서의 $da/dN - \Delta K$ 관계곡선을 보여 주고 있다. Fig. 9에서 보여주듯이 as weld재에서는 base metal, HAZ, weld zone순으로 ΔK_{th} 값이 커지고 있다. 이는 Fig. 8에

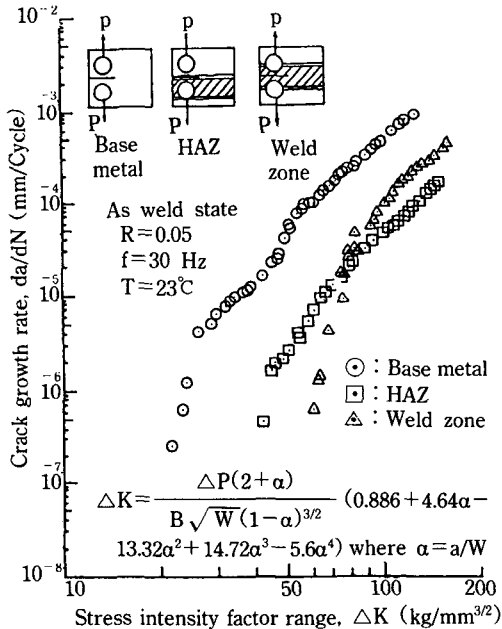


Fig. 9 Comparison of fatigue crack growth data obtained by ΔP -const. with ΔK -decreasing fatigue test for SM50A(as weld state)

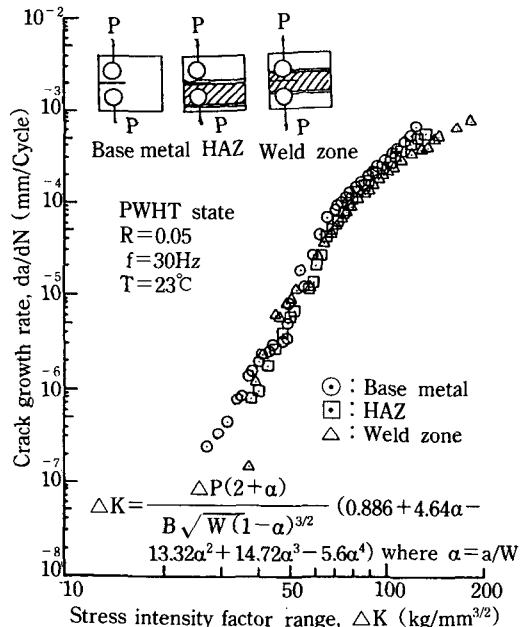


Fig. 10 Comparison of fatigue crack growth data obtained by ΔP -const. with ΔK -decreasing fatigue test for SM50A (PWHT state)

제시된 바와 같이, 균열선단에서의 초기잔류응력분포에 나타난 압축잔류응력의 영향이라 볼 수 있다. 즉, HAZ, weld zone에서는 base metal에 비하여 ΔK_{th} 값이 커지고, weld zone에서는 HAZ에 비하여 균열선단의 압축잔류응력이 큼으로써 ΔK_{th} 값은 커진다고 볼 수 있다. Weld zone에서의 ΔK_{th} 값은 base metal에 비하여 거의 3배정도 크게 나타났다. PWHT재에서는 잔류응력이 Fig. 8에서와 같이 상당량 이완된 것으로 나타나 있다. 그러나 잔류응력이 다소 잔재하고 있어, 이것이 Fig. 10에서와 같이 near threshold 부근의 $da/dN - \Delta K$ 관계에 큰 영향을 주는 것으로 나타나 있다. Fig. 8에서와 같이 weld zone, HAZ의 균열선단에는 비슷한 크기의 압축잔류응력이 존재하여, 이들 부위에서의 ΔK_{th} 는 비슷하나, base metal에 비교하여서는 거의 1.6배 정도가 크다. 따라서 균열선단의 잔류응력은 near threshold 부근의 피로균열성장거동에 크게 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

Figs. 11은 Weld zone, HAZ에 대하여 초기잔류응력의 분포를 고려한 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 관계를 나타낸다. 그림에서와 같이 $\Delta K_{th, eff}$ 는 base metal의 ΔK_{th} 와 거의 일치함으로서, ΔK_{th} 는 재료의 특성치임을 알 수 있다. 또한, 용접재에서는 ΔK 에 잔류응력을 고려한 ΔK_{eff} 를 적용하는 것이 타당하다고 하겠다.

4.3 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향

As weld재나 PWHT재에서의 $da/dN - \Delta K$ 관계 곡선은 Figs. 9, 10에서와 같이, da/dN 이 $4 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$ 에서는 power law[16]인 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 잘 만족하고 있다. As weld재의 경우, Fig. 9에서와 같이 weld zone, HAZ에서는 base me-

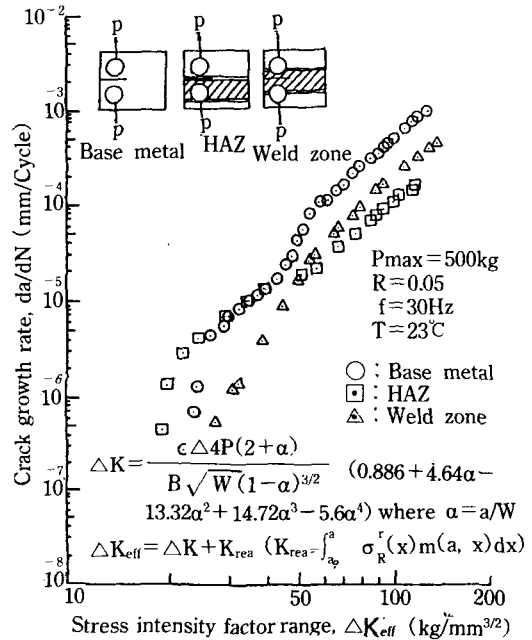


Fig. 11 $da/dN - \Delta K_{eff}$ relations (as well state)

Table 5. ΔK_{th} , C and m data

Zone	R	* Δk_{th} (kg/mm ^{3/2})	C	m
Base metal(as weld)	0.05	22	1.34×10^{-9}	2.62
HAZ(as weld)	0.05	43	2.32×10^{-10}	2.72
Weld zone(as weld)	0.05	62	1.52×10^{-10}	2.95
Base metal(PWHT)	0.05	23	1.01×10^{-9}	2.65
HAZ(PWHT)	0.05	38	9.85×10^{-10}	2.50
Weld zone(PWHT)	0.05	39	7.89×10^{-10}	2.60

$$* \Delta K = \frac{\Delta P(2+\alpha)}{B \sqrt{W} (1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.64\alpha^4)$$

where $\alpha = a/W$

tal과 비교하여 동일한 ΔK 값에 대하여 피로균열성장속도 da/dN 이 작게 나타난 것으로 미루워 볼 때, 균열선단의 압축잔류응력의 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다. Katapia[5], Ohta[6], Kobayashi[7], Murakami[17] 등에 의하면, 피로균열전방의 잔류응력 재분포형상은 초기잔류응력의 분포형상과 같은 경향을 보여주며, 균열이 진전함에 따라 점차로 감소되어 나간다고 하였는데, 본 연구결과는 이들의 연구결과와 잘 일치하고 있다.

As weld상태의 base metal, HAZ, weld zone에 대한 $da/dN-K$ 관계에서의 직선부분의 기울기 m 값은, Table 5에 제시된 바와 같이 2.62-2.95로 비슷하고, 다만 계수 C 값만 달라졌다. 이는 SM50A강의 모재 및 용접재의 m 값은 2.8이라고 밝힌 Kit-sunai[18]의 연구결과와 대체로 일치한다. 피로균열의 안정성장구간인 II영역에서는 m 값이 가장 큰 의미를 갖고 있으므로 일단, 피로균열이 안정성장구간에 들어서면 base metal의 data로서 weld zone, HAZ의 피로균열성장의 예측이 가능하다고 하겠다.

PWHT재에서는 Fig. 10과 같이 base metal, weld zone, HAZ의 피로균열거동은 동일한 ΔK 를 기준으로 할 때, 피로균열성장속도는 모재와 일치하였으며, 이때의 m 값은 2.50-2.65이었다. As weld재와 PWHT재의 m 값의 분포는 2.50-2.95로 거의 비슷하다고 할 수 있으며, Table 5에 제시된 것과 같이 C 값에만 차이가 있었다. 따라서 잔류응력은 기울기

m 값에는 거의 영향을 주지 않는다고 보아도 되겠다. 이상에서와 같이 전술 4.3에서 언급된 I영역에서의 잔류응력의 영향과 비교하면, II영역에서의 잔류응력의 영향은 그다지 크지 않다고 할 수 있겠다.

Fig. 11은 as weld 상태의 weld zone, HAZ의 초기균열선단에 존재하는 용접잔류응력에 의한 K_{res} 를 ΔK 에 중첩시켜 ΔK_{eff} 값을 구한 다음, ΔK 값과 비교하여 $da/dN-\Delta K$, $da/dN-\Delta K_{eff}$ 관계를 plot한 것이다. Weld zone, HAZ는 모두가 균열선단부근의 압축잔류응력에 의하여, 동일한 da/dN 에 대한 ΔK_{eff} 값은 ΔK 값보다 낮게 나타났다. ΔK 값과 ΔK_{eff} 값의 차이는 저 ΔK 영역에서는 크게 나타났으나, 균열이 점차 증가함에 따라 차이는 감소하였다. 또한 Fig. 11에서 보듯이, 안정성장구역에서의 피로균열 성장거동도 base metal과 근접하고 있다. 이때의 m 값 및 C 의 값은 Table 6에 제시하였다. 따라서 ΔK_{eff} 개념은 도입하여 $da/dN-\Delta K$ 관계를 추정함으로써, 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다고 하겠다.

5. 결 론

본 연구에서는 용접구조용강인 SM50A강을 맞대기 잠호용접(submerged arc welding)을 한 후, as weld재 및 PWHT재에 대하여 각각 잔류응력을 측

Tabel 6. $\Delta K_{th, eff}$, C and m data

Zone	R	** $\Delta K_{th, eff}$ (kg/mm ^{3/2})	C	m
Base metal(as weld)	0.05	22	1.34×10^{-9}	2.62
HAZ(as weld)	0.05	20	9.53×10^{-10}	2.72
Weld zone(as weld)	0.05	27	7.21×10^{-10}	2.73

$$** \Delta K_{eff} = \Delta K + K_{res}$$

$$(K_{res} = \int_{a_0}^a \sigma_R^r(x) \cdot m(a, x) dx)$$

정한 후 ΔK -감소 피로시험과 ΔP -일정 피로시험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) As weld재나 PWHT재에서는 모두가 초기균열선단에 크기의 차이는 있으나, 압축잔류응력이 존재한다. 이때문에 잔류응력의 존재를 고려하지 않는 균열판재의 ΔK 식을 쓸 때, ΔK_{th} 값을 포함한 저 ΔK 영역의 피로균열성장거동은 잔류응력의 영향을 크게 받는 것으로 나타나고, 압축잔류응력이 큰 weld zone, HAZ의 ΔK_{th} 값은 압축잔류응력이 상대적으로 작은 base metal의 ΔK_{th} 값에 비하여 훨씬 크게 나타났다.
- (2) ΔK 의 계산에 잔류응력으로 인한 ΔK_{res} 를 중첩시킨 ΔK_{eff} 로 da/dN 을 정리하면 base metal, HAZ, weld zone에서의 $\Delta K_{th, eff}$ 는 거의 같은 값으로 나타난다.
- (3) $da/dN=C(\Delta K)^m$ 관계가 성립하는 II영역에서는 as weld재의 m 값은 base metal(2.62), weld zone(2.95), HAZ(2.72), PWHT재의 m 값은 base metal(2.65), weld zone(2.60), HAZ(2.50)로 나타났으나, 이 차이는 무시할 수 있는 값이며, 따라서 m 값은 잔류응력의 영향을 거의 받지 않는다고 할 수 있겠다.
- (4) 균열선단의 초기 잔류응력의 분포를 측정함으로써, base metal의 피로시험데이터로서 용접재의 피로균열성장거동을 추정할 수 있다. 즉, $\Delta K_{eff}=\Delta K+K_{res}$ 로 da/dN 을 해석하는 것으로 충족될 수 있다.

후 기

본 연구는 1987년도 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 87-0307-2)에 의해서 수행되었으며 동재단 관계자 여러분께 감사드립니다.

参 考 文 献

1. 中村 廣 外 3, '機械の疲勞壽命設計', pp. 1-26, 1983
2. 최용식, 김영진, 우홍식, "Butt용접부에서 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구(I)", 대한용접학회, 6권 4호, pp. 27-34, 1988
3. 최용식, 김영진, 우홍식, "Butt용접재의 피로균열성장거동 및 ΔK_{th} 결정에 관한 연구", 성균관대학교 논문집(과학기술편), 38집, No. 2, pp. 331-340, 1987
4. 최용식, 김영진, 우홍식, "Butt용접재의 ΔK_{th} 결정 및 피로균열성장거동에 관한 연구(II)", 성균관대학교 논문집(과학기술편), 39집, No. 1, pp. 75-84, 1988
5. B. M. Katapia, "Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds", ASTM STP 648, pp. 244-260, 1978
6. Akihito Ohta and Satoshi Nishijima, "Fatigue Crack Growth and Threshold Stress Intensity Factor for Weld Joints", Material Research, Vol. 1, 'Current Research on Fatigue Cracks', Threshold Stress Intensity Factor for Weld Joints", The Society of Materials Science, Japan, pp. 157-174, 1985
7. 小林英男, 轟章, "ユニパワト試験片の疲勞き裂進展特性に及ぼす殘溜應力緩和の影響", 日本材料學會 論文集, 第34卷, 第377號, pp. 202-207, 1985
8. 'Welding Inspection', American Welding Society, Second Edition, pp. 543-591, 1980
9. R. J. Bucci, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Rate Measurement", ASTM STP 743, pp. 28-47, 1981
10. W. H. Muns, "Fatigue of Weldments-Tests,

- Design and Service”, ASTM STP 648, pp. 89-112, 1978
11. 小林英男, 轟章, “殘留應力場の疲勞き裂傳ば速度の豫測”, 日本機械學會 論文集(A編), 54卷, 497號, pp. 30-37, 1987
 12. J. C. Newman, Jr. and S. Mall, “The Dugdale Model for Compact Specimen”, Fracture Mechanics : 16th Symposium, ASTM STP 868, pp. 113-128, 1985
 13. K. Masubuchi, ‘Analysis of Welded Structures’, International Series on Materials Science and technology, Vol. 33, pp. 111-119, 1980
 14. C. Amzallag, P. Rabbe, C. Bathias, D. Benoit and M. Truchon, “Influence of Various Parameters on the Determination of the Crack Arrest Threshold”, ASTM STP 738, pp. 29-44, 1981.
 15. R. J. Bucci “Development of a Proposed ASTM Standard Test Method for Near Threshold Fatigue Crack Growth Rate Measurement”, ASTM STP 738 , pp. 22-44, 1981
 16. 최용식, “파괴역학”, 대한기계학회지, Vol. 13, No. 1, pp. 15-25, 1973.
 17. 村上理一, 秋園幸一, “熔接殘留應力場での疲勞き裂傳ば速度における殘留應力緩和の影響”, 日本機械學會 論文集, 34卷, 377號, pp. 202-207, 1985
 18. 橋内良雄, “軟鋼突合せ熔接단手の疲勞き龜裂傳ば舉動に及ぼす試験片寸法および形狀の影響”, 日本材料學會, 第32卷, 第324號, pp. 304-309, 1981