

Butt 銲接板材에서의 疲勞龜裂成長舉動에 미치는  
殘留應力の 影響에 關한 研究

A Study on the Influence Residual Stresses on Fatigue Crack  
Growth Behaviors in the Butt Welded Plate

차용훈\* · 정종안\*\* · 채경수\*\* · 김하식\*\*

Young-Hoon Cha · Jong-An Jung · Gyung-Soo Chae · Ha-Sig Kim

ABSTRACT

In this study, the purpose is to investigate the influence of initial residual stresses on the fatigue crack growth behaviors after the distribution of initial residual stresses is measured when the crack is growing from the compressive residual stresses field to the tensile residual stress field. Also, the influence of the variation of residual stress distribution on the fatigue crack growth behaviors at the crack tip is studied when the initial crack is applied on base metal, weld metal and HAZ respectively.

1. 서 론

금속의 접합법인 용접은 공업의 발전에 대단히 중요한 역할을 하고 있으며, 기계제품의 생산과 수리의 주된 수단 중의 하나가 되고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 용접시 발생하는 용입불량(lack of penetration), 불순물혼입(foreign inclusion), 기포(blow hole), 슬래그개재(slag inclusion) 및 균열(crack) 등의 영향으로 용접부위에 균열이 발생되어 취성파괴를

초래하기도 한다. 또한 단시간의 국부적인 가열에 따르는 열응력, 냉각시의 수축(shrinkage during the cooling)으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림의 발생 등의 주요 문제가 되고 있다.<sup>2)~4)</sup> 이 중에서도 특히 용접잔류응력의 문제가 파괴역학적인 해석의 주요 대상이 되고 있다. 구조물의 용접후에는 반드시 잔류응력이 존재하게 되는데 이 잔류응력은 좌굴강도의 저하, 응력부식균열, 파괴강도의 저하 등의 원인이 된다. 용접잔류응력의 발생은 오래전부터 문제시되어 왔으며, 이에 대하여 많은 연구가 활발히

\* 조선대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

진행되어 왔지만 아직도 미해결의 문제점들이 많이 남아있는 실정이다. 이와 관련하여 많은 연구자들은 용접시에 발생한 잔류응력의 해석 및 측정방법을 제시하여 왔다.<sup>5)~6)</sup> 이에 본 논문에서는 일반구조용 압연강재인 S41강을 맞대기용접(butt-welding)하고 피로균열성장거동에 미치는 용접잔류응력의 영향에 관하여 다음과 같은 사항들을 연구하고자 한다. 균열이 압축잔류응력장으로부터 인장잔류응력장으로 성장할 때, 초기 잔류응력의 분포를 측정한 후, 초기잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향을 고찰하고, 용접시험편에 대한 피로시험을 행하고 초기잔류응력의 영향을 고려한 유효응력확대계수 변동폭  $\Delta K_{eff}$ 와  $da/dN$ 관계를 고

찰하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

본 실험에 사용한 시험편의 재료는 판두께 12mm 인 일반구조용 압연강재인 SS41강으로써, 재료의 기계적 성질을 파악하기 위해서 KS B 0851에 따른 제 13B 호 인장시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다.

SS41강의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다.

Table 1 Chemical compositions of SS41 steel (Wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V
0.517	0.116	0.441	0.0116	0.0150	0.051	0.068	0.091	0.003

Table 2 Mechanical properties of SS41 steel

Yield Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation(%)	Reduction of Area(%)
31.82	42.67	33.43	45.94

피로시험에 사용할 용접시험편을 얻기 위하여 12mm 두께의 압연강판을 각각 120mm×130mm 크기로 절단하여 용접부위를 홈(groove)의 각도가 60° X(double vee)형 홈이 되도록 모서리를 가공하였고, 피복아아크용접기를 사용하여 판재의 전, 후면을 각각 2pass씩 압연방향에 직각으로 용접하였으며, 용접변형을 방지하기 위하여 지그(zig)로 구속한 상태에서 용접하였다.

용접에 사용한 용접봉은 고려용접봉(주)제의 직경 3.2mm인 저수소계 (low hydrogen type KS

E4316) KH-500LF 용접봉을 사용하였고, 용접봉의 화학적 성분은 Table 3과 같다. 용접봉은 300°C 정도로 가열하여 충분히 건조시킨 후 사용하였고, 용접조건은 Table 4와 같다.

Table 3 Chemical compositions of welding electrode(Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.07	0.46	0.97	0.012	0.009	Remainder

Table 4 Welding procedure

Welding Method	Welding Position	Welding Current(A)		Welding Voltage(V)		Welding Speed(mm/min)		Number of Pass	
		1Pass	2Pass	1Pass	2Pass	1Pass	2Pass	Fore side	Back side
SMAW	Flat	150	140	22	22	120	100	2	2

용접이 끝난 일부의 판재는 용접시 발생한 잔류응력을 제거하기 위해서 풀림(annealing)처리를 하였다. 용접후열처리(PWHT)는 As Weld 상태의 시험편을 가열속도 180°C/hr로 650°C까지 가열한

후, 60분 동안 유지한 다음 노냉하였다.

용접시험편은 ASTM E647-83에 제시된 CT (compact tension) 시험편에 준하여 제작하였으며, 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

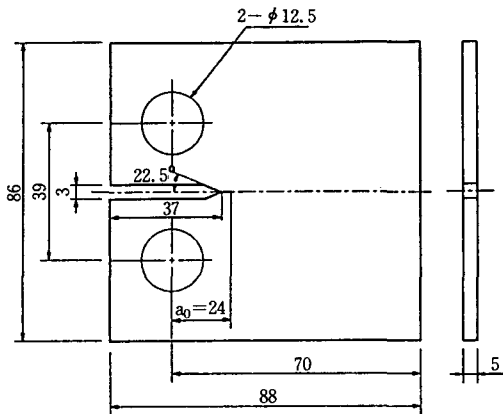


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

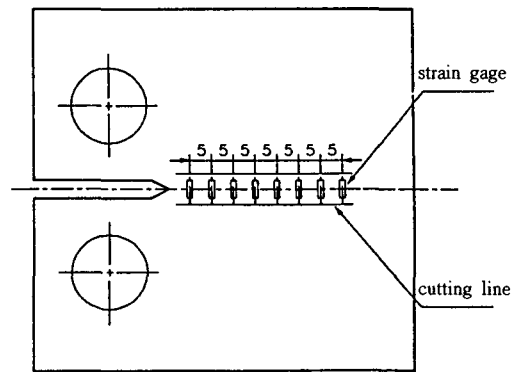


Fig. 2 Strain gage sectioning method for measuring residual stress

### 2.2 경도측정 및 용접잔류응력 측정

시험편의 경도는 As Weld 상태의 base metal, HAZ, weld metal 및 PWHT 상태의 base metal, HAZ, weld metal에서 microvickers 경도계(Hv)로 측정하였다.

피로균열이 용접선에 평행하게 성장하는 경우의 용접시험편과 용접후 열처리(PWHT) 시험편의 잔류응력측정은 Fig. 2와 같이 strain gage sectioning method(S. G. S. M)에 의하여 각각의 시험편에 대한 잔류응력을 측정하였다.

### 2.3 피로시험

피로시험은 ΔP 일정 피로시험으로서 ASTM E647-83<sup>7)</sup>에 준하였으며, load control은 정현파형(sine wave)으로, 하중비(R)를 0.1 및 0.2로 하여 수행하였고, 하중반복수는 10Hz, 실험실 온도는 22℃(실온)로 하였다.

피로시험시 pre-cracking은 본 시험시의 최대하중보다 20% 큰 하중에서 5%씩 감소시키면서, 기계가공 notch로 부터 약 2mm의 pre-crack을 넣었다. 전체 초기 균열길이를 하중점으로부터 24mm로 한 다음 본실험에 들어갔다. 피로시험 조건은 Table 5와 같다.

Table 5 Experimental conditions of fatigue tests

Specimen Type	P <sub>max</sub> (Kg)	P <sub>min</sub> (Kg)	ΔP (Kg)	Load Ratio	Test Freq. (Hz)	Control Mode	Wave From	Tem. (°C)
C T	400	40	360	0.1	10	Load	Sine	22
	400	80	320	0.2	10	Load	Sine	22

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 경도 분포 및 잔류응력의 분포

Fig. 3은 as weld재 및 PWHT재에 대하여 microvickers 경도계로 측정한 경도 분포를 나타낸 것으로, 그림에서 보면 as weld재의 경우는 weld metal 부의 경도 분포가 HAZ 및 base metal 보다는 훨씬 높게 나타났으며, 최고 경도치를 갖는다. 용접잔류응력을 제거한 PWHT재의 경우에도 경도치는 As weld재 보다는 낮게 나타났으나, 경도 분포는 비슷

한 양상을 보여주고 있다.

피로균열이 용접선에 평행하게 성장하는 경우의 용접시험편과 PWHT 시험편의 잔류응력측정은 Fig. 2와 같이 strain gage sectioning method(S. G. S. M.)에 의하여 각각의 시험편에 대한 잔류응력을 측정하였으며, 측정된 결과는 Fig. 4와 같다.

### 3.2 a-N 관계 고찰

Fig. 5는 as weld 상태에서의 base metal, weld metal 및 HAZ에 대한 a-N 관계를 나타내었다. as

weld재에 있어서 하중비가 0.1과 0.2인 경우의 균열길이에 대한 하중반복수는 weld metal 및 HAZ에서도 base metal과 마찬가지로 하중비가 0.1인

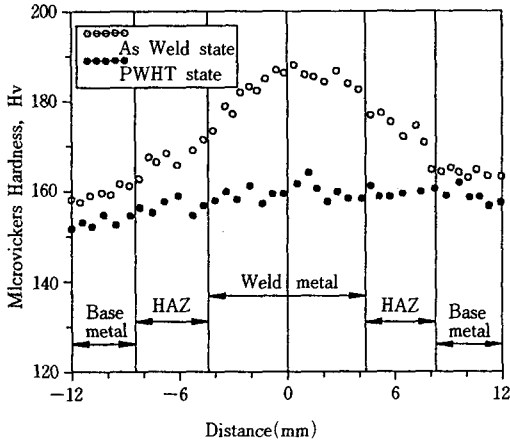


Fig. 3 Hardness distribution in welded plate

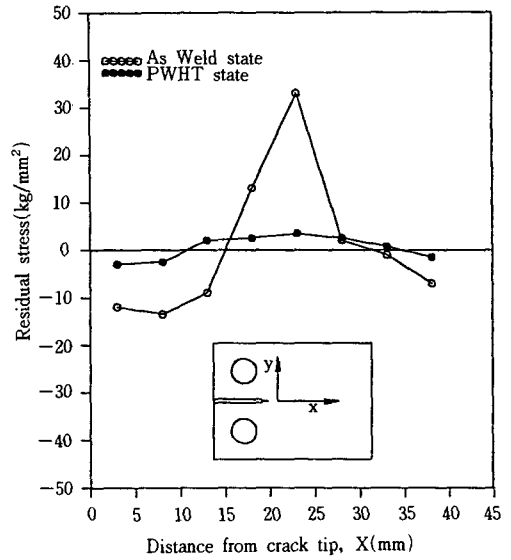


Fig. 4 Residual stress distribution

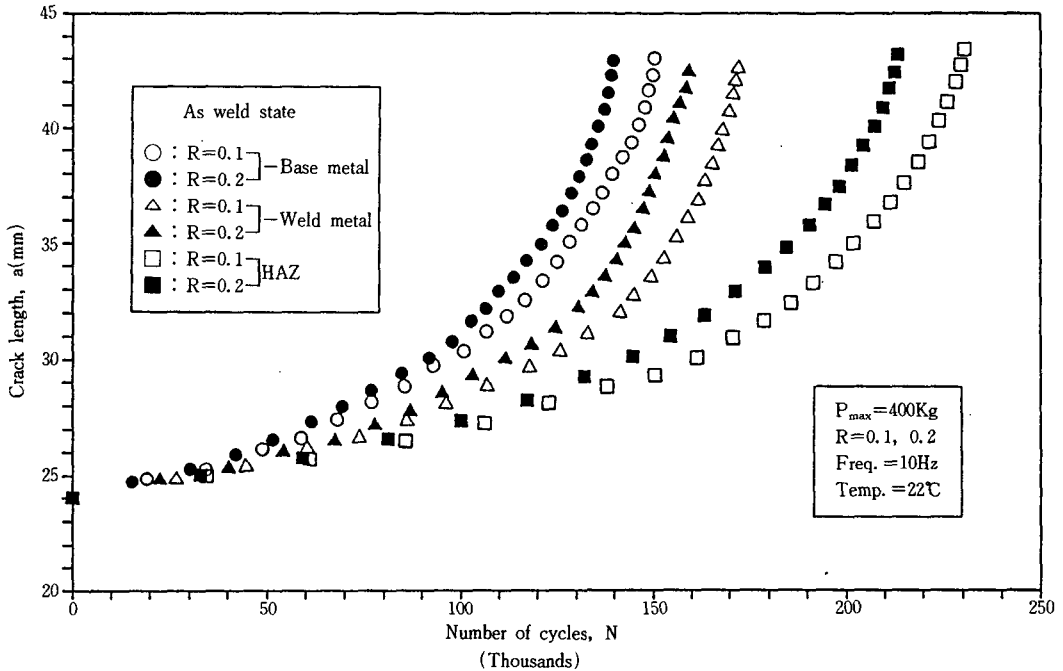


Fig. 5 Experimental a-N curves (as weld state)

경우에서 하중반복수가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, base metal, weld metal 및 HAZ에서의 a-N관계는 하중비에 관계없이 base metal이 가장

짧았고, weld metal보다는 HAZ에서의 하중반복수가 길게 나타났다. 이와 같이 하중반복수가 다르게 나타나는 이유는 여러가지 요인이 있을 것으로 생

각되며, 용접시 열원에 의한 weld metal과 HAZ의 조직변화와 경도분포 등도 피로균열성장애 큰 영향을 미칠뿐만 아니라, 특히 weld metal과 HAZ의 균

열선단에서 초기잔류응력의 분포에서 나타난 압축 잔류응력의 영향으로 인하여 균열성장초기에 많은 하중반복수가 소요되기 때문이라 사료된다.

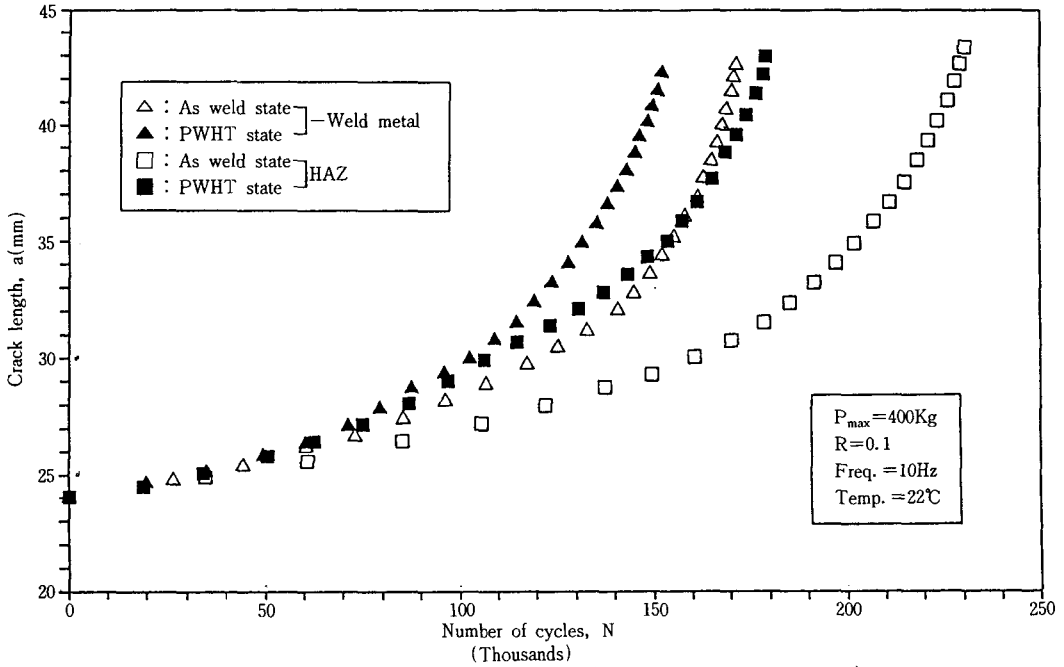


Fig. 6 Experimental a-N curves for  $R=0.1$  (As weld state, PWHT state)

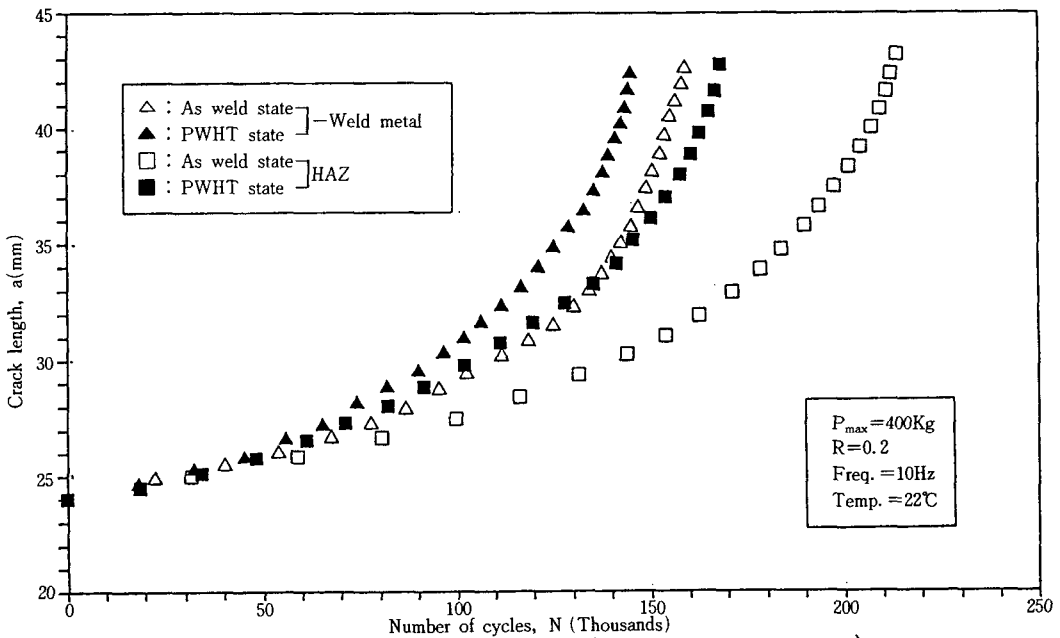


Fig. 7 Experimental a-N curves for  $R=0.2$  (As weld state, PWHT state)

Fig. 6과 Fig. 7은 하중비가 각각 0.1과 0.2인 경우의 as weld재와 잔류응력을 제거한 용접후열처리(PWHT) 시험편을 비교하기 위하여 a-N 선도를 Plot한 것인데, PWHT재의 경우 weld metal 및 HAZ가 모두 피로수명이 감소하는데, weld metal의 경우는 base metal의 피로수명에 거의 근접함을 알 수 있다. 그리고 HAZ의 경우는 weld metal에 비하여 하중반복수가 더 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

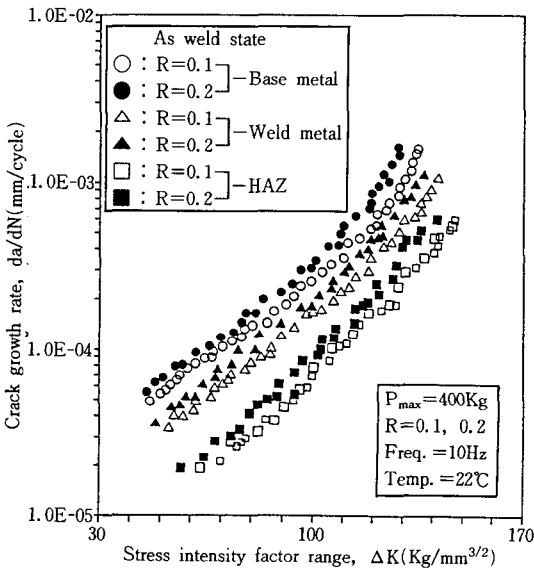


Fig. 8 da/dN-ΔK relationship for weld specimens

### 3.3 da/dN-ΔK 관계 고찰

Fig. 8은 as weld재에 대하여 하중비(R)가 0.1 및 0.2인 경우의 da/dN-ΔK를 표시하였으며, 동일한 ΔK값에 대하여 피로균열성장속도 da/dN이 base metal, weld metal 및 HAZ의 순서로 낮게 나타났다. 이것은 균열선단에 존재하는 압축잔류응력의 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다. 또한 피로균열성장속도는  $8 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$  (mm/cycle)에서 power law인  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 잘 만족하고 있다.

As weld 상태의 base metal, weld metal 및 HAZ에 대한 da/dN-ΔK 관계에서의 직선부분의 기울기 m 값은 3.786~4.295로 비슷하고, 계수 C 값만 다르게 나타났다. As weld재에서 da/dN-ΔK

관계로부터 구한 C와 m 값은 Table 6에 나타내었다.

Table 6 m values from da/dN-ΔK relations(As weld state)

Region	R	C	m
base metal	0.1	$9.6872 \times 10^{-10}$	3.786
	0.2	$2.8576 \times 10^{-10}$	3.898
weld metal	0.2	$5.2481 \times 10^{-11}$	3.927
	0.2	$3.4570 \times 10^{-11}$	4.105
HAZ	0.1	$9.4411 \times 10^{-11}$	4.173
	0.2	$3.2273 \times 10^{-11}$	4.295

피로균열의 안정성장구간인 II 영역에서는 m 값이 가장 큰 의미를 갖고 있으므로, 피로균열이 안정성장구간에 들어서면 base metal의 data로써 weld metal, HAZ의 피로균열성장의 예측이 가능하다고 할 수 있다.

PWHT재에서는 하중비가 0.1 및 0.2인 경우의 각각에 대하여 Fig. 9 및 Fig. 10에 표시하였다. 그림에서 보면 weld metal 및 HAZ의 피로균열 성장거동은 동일한 ΔK값을 기준으로 할 때, 피로균열성장속도는 weld metal의 경우 base metal과 거의 일치하였으며, 이 때의 m 값은 3.718~4.295로 나타났다. PWHT재에서 da/dN-ΔK 관계로부터 구한 C와 m 값은 Table 7에 나타내었다.

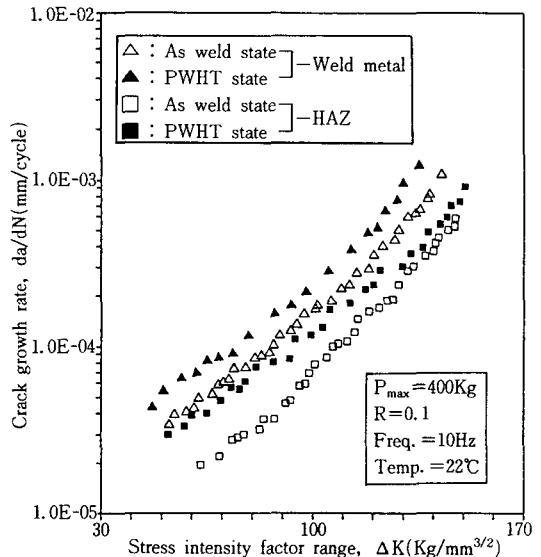


Fig. 9 da/dN-ΔK relationship for R=0.1 (As weld state, PWHT state)

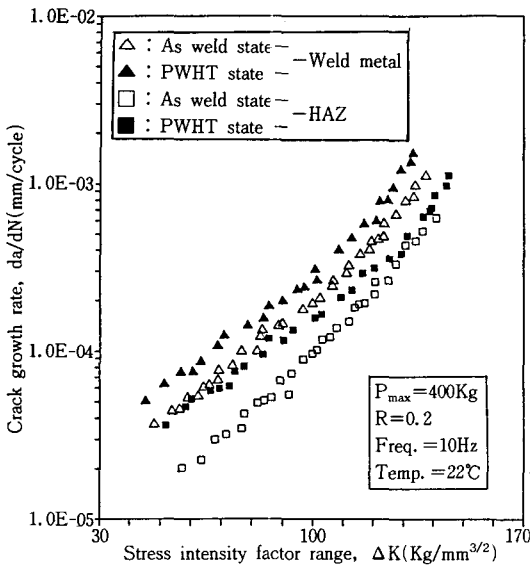


Fig. 10 da/dN- $\Delta K$  relationship for R=0.2(As weld state, PWHT state)

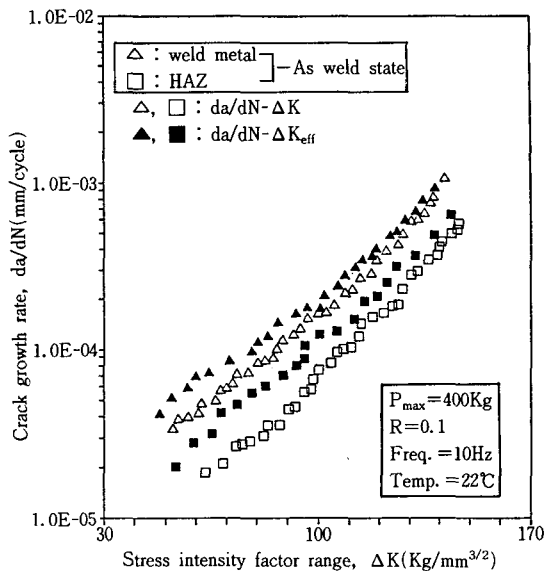


Fig. 11 da/dN- $\Delta K$ , da/dN- $\Delta K_{eff}$  relationship(R=0.1)

As weld재와 PWHT재의 분포는 3.718~4.295로 거의 비슷하다고 할 수 있으며, 다만 C 값에만 차이가 있었다. 따라서 잔류응력은 기울기 m 값에는 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

Table 7 C, m values from da/dN- $\Delta K$  relations (PWHT state)

Region	R	C	m
weld metal	0.1	$3.4009 \times 10^{-11}$	3.756
	0.2	$1.7442 \times 10^{-11}$	3.802
HAZ	0.1	$6.0828 \times 10^{-11}$	3.718
	0.2	$1.3983 \times 10^{-11}$	3.862

### 3.4 da/dN- $\Delta K$ 와 da/dN- $\Delta K_{eff}$ 사이의 관계 고찰

Fig. 11 및 Fig. 12는 하중비(R)가 0.1과 0.2인 경우에 대하여 as weld재의 weld metal과 HAZ의 초기균열선단에 존재하는 용접잔류응력에 의한  $K_{res}$ 를  $\Delta K$ 에 중첩시켜  $\Delta K_{eff}$ 값을 구한 다음,  $\Delta K$ 값과 비교하여 da/dN- $\Delta K$ 와 da/dN- $\Delta K_{eff}$  관계를 plot한 것이다. 균열성장초기에 압축잔류응력의 영향으로 동일한 da/dN에 대한  $\Delta K_{eff}$ 값은  $\Delta K$ 값보다 낮게 나타났다.  $\Delta K$ 값과  $\Delta K_{eff}$ 값의 차이는 낮은  $\Delta K$  영역에서는 크게 나타났으나, 균열이 점차

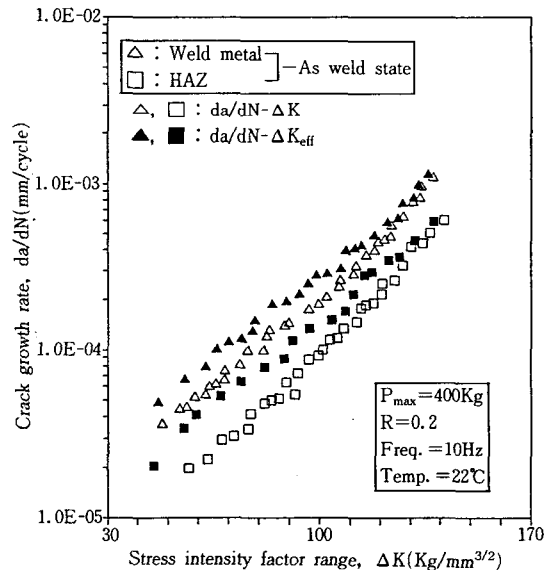


Fig. 12 da/dN- $\Delta K$ , da/dN- $\Delta K_{eff}$  relationship(R=0.2)

증가함에 따라 감소하였다. 이것은  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 반복되는 피로하중에 의하여 압축잔류응력이 완화되기 때문으로 생각할 수 있다. 이는 Bucci<sup>8)</sup>의 연구결과와 잘 일치한다.

그림에서 보면  $da/dN - \Delta K_{eff}$  관계에서 피로균열 성장속도는 base metal에 근접하고 있다. 따라서  $K_{res}$ 의 개념을 도입하여  $da/dN - \Delta K_{eff}$  관계를 추정함으로써 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있다.

하중비가 0.2인 경우의 weld metal과 HAZ에 대한 피로균열성장초기에서의 압축잔류응력의 영향은 하중비가 0.1인 경우 보다는 다소 완화되었음을 알 수 있다. 이것은 응력비가 클수록 피로균열성장거동에 미치는 압축잔류응력의 영향이 감소하기 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 일반구조용 압연강재인 SS41강을 SMAW 용접을 한 후, As Weld재 및 PWHT재에 대하여 각각 초기잔류응력을 측정된 후, 하중비(R)를 0.1 및 0.2로 하고 피로시험을 실시하여 피로균열성장거동에 미치는 초기잔류응력의 영향을 파괴역학적으로 고찰하여, 피로균열성장거동에 미치는 초기잔류응력의 영향을 파괴역학적으로 고찰하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) As weld재의 경우 하중비(R)가 0.1 및 0.2인 경우 하중비에 관계없이 피로수명은 base metal이 가장 짧게 나타났으며, weld metal과 HAZ순으로 피로수명이 증가하였다.
- PWHT재의 경우는 weld metal과 HAZ가 base metal과 HAZ가 base metal의 피로수명에 근접하였다. 이는 균열선단의 압축잔류응력의 영향으로 사료된다.
- 2) 균열선단에 존재하는 초기잔류응력의 분포를 측정하여, 용접재의 균열성장지연(crack growth retardation)을 용접잔류응력확대계수  $K_{res}$ 의 중첩법으로 해석이 가능하였다.
- 3) 피로균열의 안정성장구간인 II 영역에서는 power law인  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 잘 만족하였으며, 또한 잔류응력은 기울기  $m$  값에는 거의 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.
- 4) 용접잔류응력확대계수  $K_{res}$ 를  $\Delta K$ 에 중첩시켜 계산한  $\Delta K_{eff}$ 값은 동일한  $da/dN$ 에서  $\Delta K$ 값보

다 낮게 나타났으나, 높은  $\Delta K$ 영역에서는 거의 비슷한 값으로 나타났다. 또한 하중비가 0.2인 경우의 weld metal 및 HAZ가 0.1인 경우보다는 초기 압축잔류응력의 영향이 완화되었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 이광주, 疲勞強度에 미치는 銲接缺陷의 影響, 大宇造船工業株式會社技術部(大宇造船 技術), Vol. 3, No. 10, pp. 19~32, 1986.
- 2) W.H. Kearns, Welding handbook, American welding society, Seventh Edition, Vol. 5, pp. 276~311, 1984.
- 3) T. Kanazawa and A.S. Kobayashi, Significance of defects in welded structures, Proceedings of the Japan-U.S Seminar, 1973, Tokyo, pp. 96~103, pp. 127~182, 1974.
- 4) 車龍勳, CT形 變厚銲接板材에서의 疲勞龜裂成長舉動에 미치는 殘留應力の 影響에 關한 破壞力學的 研究, 成均館大學校 博士學位論文, 1991.
- 5) C.S. Barrett, Internal Stress-a Review, Metals and Alloys, Vol. 5, p. 131, 1944.
- 6) B.E. Gorden, Jr., Measurement of applied and residual stresses using an ultrasonic instrumentation system, ISA Transation, Vol. 19, p. 33, 1978.
- 7) Y. Ueda and T. Yamakawa, Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during welding by finite element method, Trans. of JWS2-2, pp. 186~196, 1971.
- 8) G. Glinka, Effect of residual stresses on fatigue crack growth in steel weldments under constant and variable amplitude loads, ASTM STP 677, pp. 198~214, 1979.
- 9) D.V. Nelson, Effect of residual stress on fatigue crack propagation, ASTM STP 776, pp. 172~194, 1982.
- 10) K. Masubuchi and H. Kihara, Effect of residual stress on brittle fracture, Welding journal 38(4), Research Suppl, pp. 159~168, 1959.