

Al 합금 용접부의 잔류응력 및 피로강도 해석

차용훈\* · 김덕중\*\* · 성백섭\*\*\*

\* 조선대학교 기계공학과(수송기계부품 공장자동화 연구센터)  
 \*\* 동아전문대학 자동차정비과 \*\*\* 조선대학교 기계공학과 대학원

Analysis of the Residual Stresses and Fatigue Strength in Aluminum Alloy Weldments

Y. H. Cha \* · D. J. Kim \*\* · B. S. Sung\*\*\*

ABSTRACT

The objective of this thesis is to investigate the influence of welding residual stresses on the fatigue growth behavior of cracks located transverse to the weld bead. For this purpose, G.T.A. (Gas Tungsten Arc) welding was performed on the Al. Alloy 1100-O plate and the same initial crack is made on HAZ(Heat Affected Zone), weld metal and base metal respectively.

C.T.(Compact Tension) specimens were used as experimental material. Initial welding residual stresses were measured by using strain gage sectioning method. All specimens were tested under constant amplitude load with stress ratio R=0.1.

1. 서론

용접에 의한 접합은 단조나 리벳이음등 다른 접합방법에 비하여 용접시의 재료 및 경비의 절감, 높은 이음효율, 공수의 감소, 뛰어난 유밀성, 기밀성, 수밀성등의 많은 장점들이 있어 조선, 자동차, 차량, 기계, 배관, 압력용기 및 저장탱크등의 기계공업분야에 널리 이용되고 있을 뿐만 아니라 항공기, 로켓, 미사일공업에도 필수적의 수단이 되어 광범위한 분야에 사용되고 있다.<sup>(1)(2)</sup>

그러나 용접시 발생하는 용입불량, 불순물혼합, 기포, 슬래그개재 및 균열 등의 영향으로 용접부위에 균열이 발생되어 취성과괴를 초래하고 있다.

또한 단시간의 국부적인 가열에 따르는 열응력, 냉각시의 수축으로 인한 잔류응력 및 뒤틀림의 발생등이 주된 문제가 되고 있다.<sup>(3)</sup> 특히 잔류응력은 이런 피로균열의 성장거동에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져, 이에 대한 많은 연구가 활발히 진행되어 왔다.<sup>(4)-(5)</sup>

용접부에 존재하는 잔류응력이 피로균열 성장거동에 미치는 영향에 관한 지금까지의 연구들은 예균열(pre-crack)의 위치가 HAZ 부분에 있는 경우에 대하여서만 연구대상으로 삼아 왔다.<sup>(6)-(7)</sup>

그러나 균열이 성장함에 따라 용접부위에 분포되어 있는 용접잔류응력의 재분포 현상을 정량적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 더욱 효율적으로 용접재에서의 피로균열 성장거동을 예측할 수 있도록 한다. 예균열의 위치가 HAZ 부 뿐만 아니라 용접금속 및 모재의 균열에 대해서도 그 연구가 필요하다고 생각된다.

따라서 본 논문에서는 중량에 비하여 강도가 높고 내식성이 우수할 뿐만 아니라 타 금속과 합금이 잘되고 상온 및 고온가공이 용이한 장점 등이 있어 해양구조물, 화학장치산

업 및 항공산업에 많이 쓰이기 시작한 알루미늄합금의 용접재에 대하여 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 실험  
 2.1 시험편

본 연구의 실험 재료는 내산성에 강한 장점이 있어 화학장치산업의 압력용기, 저장탱크 및 연료교환기 제작에 많이 사용되는 풀립열처리 상태의 알루미늄합금 Al.1100-O 판재이며 판두께는 5mm를 사용하였다.

재료의 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 Mechanical properties of aluminum alloy Al.1100-0

Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Young's Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Shear Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )
34	90	35	7031	2637

Table 2 Chemical compositions of aluminum alloy Al.1100-0 (wt.%)

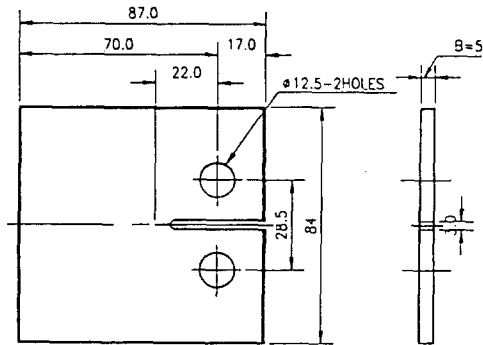
Chemical Composition	Si+Fe	Copper	Mn	Zinc	Other Elements	Al. Total
Content	0.95	0.05~0.02	1.0~1.5	0.10	0.15	99min.

용접 판재로부터의 피로시험용 시험편의 제작은 ASTM E647-83<sup>(8)</sup>에 제시된 C.T.(Compact Tension) 시험편에 준하여 제작하였다. Fig.1은 용접하지 않은 재료(이하 Parent metal)의 피로시험용 시험편의 형상과 치수이며 Fig.2는 용접재 시험편의 형상과 치수이다.

즉, 열영향부(이하 HAZ) 시험편은 예균열이 Fusion line에서 9mm떨어진 시험편이고, 용착부 시험편(이하 Weld metal)은 예균열이 Fusion line에서 2mm떨어진 시험편이다. 그리고 용접재에서의 모재(이하 Base metal)시험편은 예균열

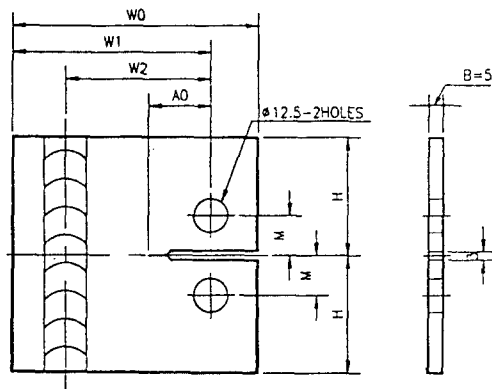
(pre-crack)이 비이드(bead)부에서 34mm 떨어진 시편이다. 이때 예균열은 황동 와이어를 사용하는 와이어 절단기로 가공하였다.

균열길이의 측정을 위해 기계가공된 시험편의 표면을 사포 #1200 까지 연마하고 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 분말을 사용하여 최종연마를 했다. 하이트 게이지(height gage)를 사용하여 예균열선단으로 부터 직각 방향으로 0.5mm 간격으로 표시하여 사용하였으며 용접선을 육안으로 확인하기 위해 20% NaOH (sodium hydroxide) 용액에 반응시켰다.



(UNIT : mm)

Fig. 1 Dimensions and configuration of Parent metal



(UNIT : mm)

Configurations of specimen	W0	W1	W2	H	M	AO
HAZ	87	70	38.5	42	14.25	22
Weld metal	87	70	31.5	42	14.25	22
Base metal	87	70	63.0	42	14.25	22

Fig. 2 Dimensions and configuration of HAZ, Weld metal and Base metal

시험편의 용접은 용접시 용접에 따른 변형의 발생을 억제하기 위하여 지그(jig)를 사용하여 시험편에 구속을 준 상태에서 맞대기용접을 수행하였다.

용접은 비용극식 불활성아아크용접(Gas Tungsten Arc Welding)으로 하였다. 용가재는 모재와 같은 재질의  $\varnothing 2.4$  mm 및  $\varnothing 4.7$  mm의 AWS(American Welding Society) ER. 1100 용접봉을 사용하였으며, 용가재의 화학적 성분은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical compositions of filler metal (wt.%)

Composition	Cu	Mn	Zn	Al
Content	0.05~0.20	0.05	0.1	99.00 min

용접은 Table 4와 같이 A.W.S. CODE<sup>(9)</sup> 규정에 따라 실시하였으며 시일드 가스는 아르곤 가스를 사용하였고 성분은 Table 5와 같다.

Table 4 Conditions of G.T.A. butt welding

Electrode Dia.(mm)	Filler metal Dia.(mm)	Welding position	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/min)	Argon flow (cc/min)
$\varnothing 3.2$	1Pass $\varnothing 2.4$	Flat	260	25.3	200	20
	2Pass $\varnothing 4.7$					

Table 5 Compositions of argon gas

Composition	Purity	Moisture	O	H	N
Content(%)	99.9	0.02	1.002	0.003	0.1

용접이 끝난 판재는 비파괴시험법의 방사선투과시험을 실시하여 KS-D-0242 합격 기준에 따라 용접결함이 없는 시험편을 채취하였다.

시험편의 일부 용접판재는 용접시 발생한 잔류응력을 제거하기 위해서 풀림(annealing)처리를 하였다. 용접후열처리하는 용접상태의 시험편을 가열 속도 180℃/hr로 450℃까지 가열한 후 30분 동안 유지한 다음 냉각하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구에 사용된 시험기는 10톤 용량의 유압식 피로시험기(hydraulic servo fatigue tester ; Shimdzu Co.)이며, 균열길이의 측정은 하이트 게이지(height gage)를 사용하여 0.5mm 간격으로 표시한 시험편을 0.01mm까지 측정이 가능한 이동식 현미경(traveling microscope)을 이용하여 사이클(cycle) 진행에 따른 균열의 성장거동을 관찰하여 균열길이를 측정하였다.

피로시험은  $\Delta P$  일정 피로시험으로써 ASTM E647-83에 준하였으며 일정하중폭(constant load range)하에서 수행하였다.  $P_{max}$ 은 용접재의 약  $0.2\sigma_Y$  이하인 180kg으로 하였으며, 실험실 온도는 상온에서 실험하였다.

피로시험 조건은 Table 6과 같다.

Table 6 Experimental conditions of fatigue test

Specimen type	$P_{max}$ (kg)	$P_{min}$ (kg)	$\Delta P$ (kg)	Load ratio	Frequency (Hz)	Control mode	Wave form	Temperature (°C)
CT	180	18	162	0.1	20	Load	Sine	R.T.

### 2.3 잔류응력 및 경도측정

As weld 상태의 Base metal, HAZ, Weld metal 및 용접 후열처리상태의 Base metal, HAZ, Weld metal 시험편에 대한 균열선단의 잔류응력분포는 절단법(strain gage sectioning method)을 이용하여 하중축방향에 평행인 잔류응력을 측정하였다.

As weld 상태와 용접후열처리상태의 용접시험편에 대하여, 용접 비이드를 중심으로 시험편의 길이방향(하중축 방향)과 균열이 각각 모재, 용접부 및 열영향부내에 위치한 시험편의 균열진전방향의 경도분포를 마이크로비커스경도(microvickers hardness ; Hv)로 측정하였다.

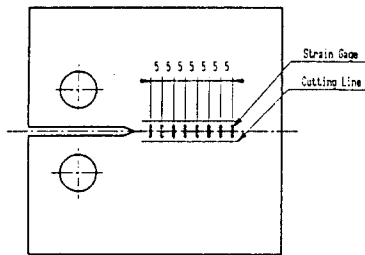


Fig. 3 Measuring method of welding residual stress

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 잔류응력 및 경도의 분포

피로균열이 용접선에 수직으로 성장하는 경우의 용접 시험편과 용접후열처리 시험편의 잔류응력측정은 Fig.3과 같이 절단법(SGSM)에 의하여 각각의 시험편에 대한 잔류응력을 측정하였으며, 측정된 결과는 Fig.4~6과 같다.

Fig.4는 HAZ 시험편 측, Fusion line이 예균열선단으로부터 9mm 떨어진 경우에서의 잔류응력 분포인데 균열선단 근방에서는 압축잔류응력이 분포하고 있으며, 용착부 중앙에서 최고 인장잔류응력값을 갖는다.

Fig.5는 Weld metal 시험편으로 예균열의 위치가 Fusion line에서 2mm 떨어진 경우의 잔류응력 분포인데, 균열선단 근방에서는 압축잔류응력이 분포하고 있지만, 최고 인장잔류응력값은 용접부에서 약간 떨어진 곳에 위치하고 있다.

Fig.6은 Base metal 시험편으로 예균열의 위치가 Fusion line에서 34mm 떨어진 경우에서의 잔류응력 분포로 균열선단 근방에서는 압축잔류응력의 영향을 크게 받으며, 용접부 근방에서는 인장잔류응력이 분포하는데, 이는 잔류응력이 압축잔류응력장에서 인장잔류응력장으로 변화되어가고 있음을 나타낸다. 따라서, 용접재 C.T. 시험편에서의 초기용접잔류응력 분포는 피로균열선단으로부터 용접선이 위치한 거리에 따라 잔류응력의 분포가 달라짐을 알 수 있었다. 대체적으로 균열선단 근방에서는 압축잔류응력장이 형성됨을 알 수 있다.

Fig.4~6에서의 용접후열처리재 시험편에 대한 용접잔류응력을 측정된 결과를 보면, 용접잔류응력은 상당한 정도

까지 완화되었으나, 완전히 제거되지는 않았으며 이때의 용접잔류응력의 분포는 용접상태의 용접잔류응력의 분포 경향과 비슷하게 나타났다.

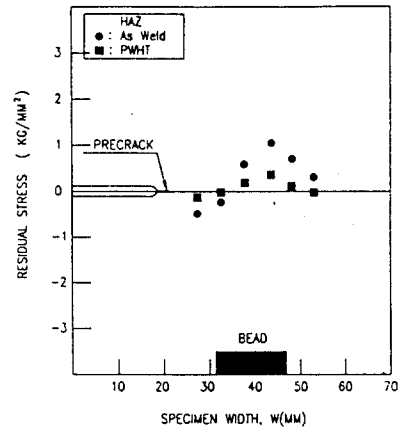


Fig.4 Initial distribution of residual stresses in HAZ

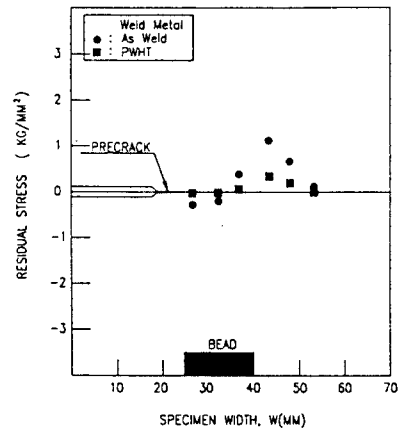


Fig.5 Initial distribution of residual stresses in Weld metal

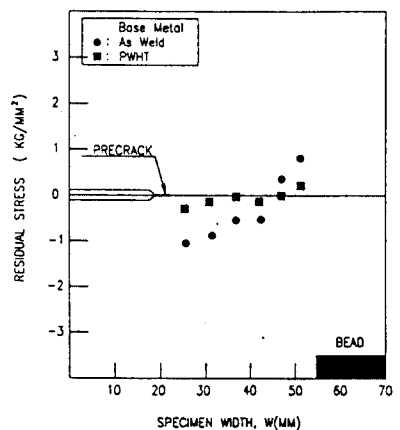


Fig.6 Initial distribution of residual stresses in Base metal

### 3.2 a-N 관계 고찰

피로균열 성장거동의 해석은 피로를 받는 구조물의 최소 피로수명을 예측하고 안전검사 구간을 결정하기 위하여 고려해야 할 중요한 특성으로, 피로파손 양이 균열길이 양으로 직접 표시되고 있다.

Fig.7~8에 각 시험편의 a-N 곡선을 나타냈는데, 여기에서 각 시험편의 최종 파단시까지의 반복수는 Base metal 시험편에서 가장 많고, Parent metal, HAZ 및 Weld metal 시험편 순으로 나타났다.

초기 균열성장 개시에 소요된 반복 사이클(cycle) 수는 용접재의 Base metal 시험편이 가장 많았고 다음은 Parent metal 그리고 Weld metal 및 HAZ 시험편은 비슷하였다. 이와 같이 하중 반복수가 다르게 나타나는 이유는 용접시 열원에 의한 용착부와 열영향부의 조직변화 및 경도차이등 여러가지 요인이 있을 것으로 생각되지만 특히, 균열선단에서의 초기잔류응력의 분포가 주된 요인으로 사료된다.

결론적으로 Base metal 시험편의 경우 초기압축잔류응력의 영향으로 많은 하중 반복수가 소요되었으며, 인장잔류응력의 영향을 받고 있는 열영향부, 용착부의 경우는 모재보다 적은 하중 반복수로 균열이 빠르게 성장하였다.

Fig.9는 용접재(as-weld)와 잔류응력을 제거한 용접후 열처리(PWHT)한 시험편을 Parent metal 시험편과 비교하기 위하여 a-N 선도를 Plot한 것인데, 용접후 열처리재의 경우 HAZ, Weld metal 그리고 Base metal 시험편이 Parent metal 시험편의 피로수명에 거의 근접함을 알 수 있다.

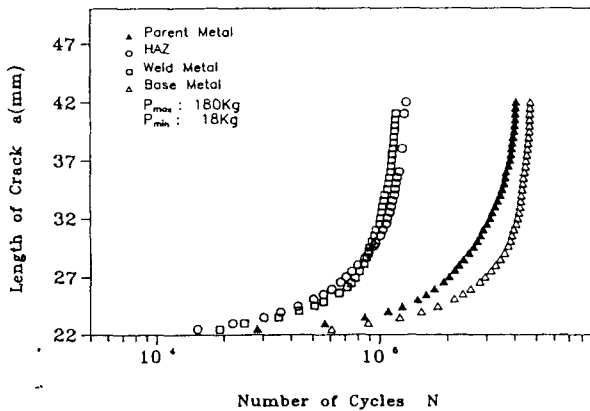


Fig. 7 a-N curves obtained from experiment

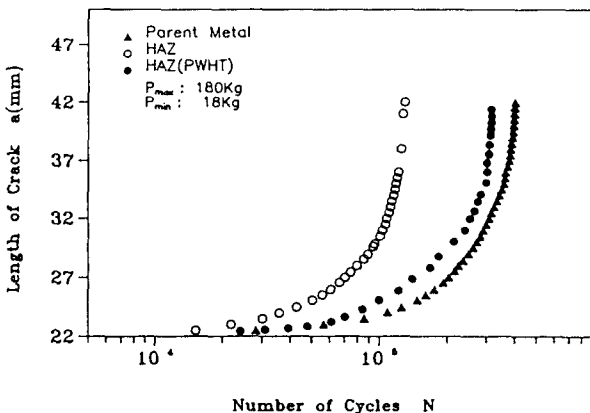


Fig. 8 a-N curves obtained from HAZ experiment

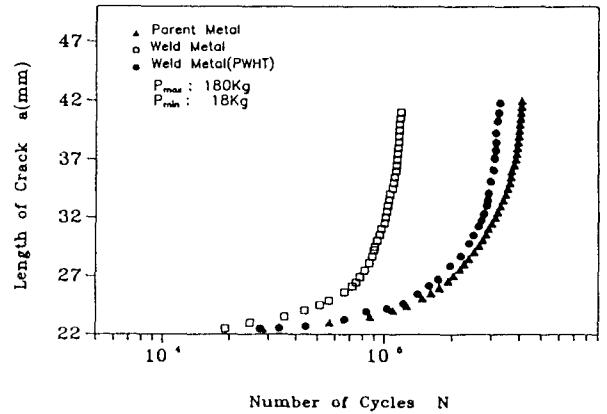


Fig. 9 a-N curves obtained from Weld metal experiment

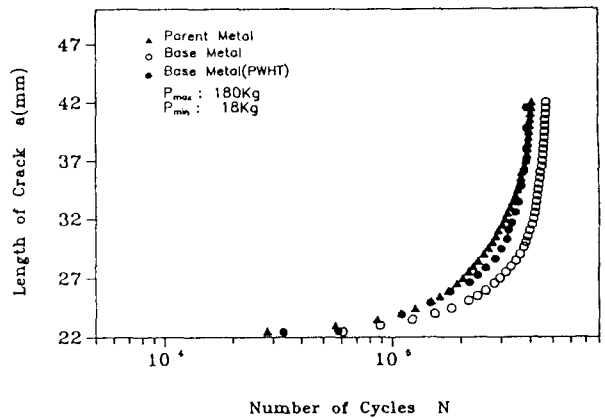


Fig. 10 a-N curves obtained from Base metal experiment

### 3.3 da/dN - ΔK 관계 고찰

Fig.10~11은 용접재 및 용접후 열처리재의 피로시험을 통해 얻어진 a-N 데이터로부터 구한 피로균열 성장속도 (da/dN)를 응력확대계수 변동범위(ΔK)에 대하여 log-log 좌표로 나타낸 것이다.

그림에서 보면 열영향부(HAZ) 및 용착부(weld metal) 시험편의 경우 Parent metal과 비교해보면 동일한 ΔK에서 피로균열 성장속도가 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 균열선단에 존재하는 인장잔류응력의 영향을 받고 있는 것으로 생각된다.

그리고 용접선이 초기균열선단으로 부터 34mm 떨어진 Base metal 시험편에서는 초기압축잔류응력의 영향으로 동일한 ΔK에서 피로균열 성장속도가 Parent metal 시험편 보다 낮게 나타났다. 또한, 균열성장초기에는 압축잔류응력의 영향으로 균열성장속도가 지연되다가 인장잔류응력장에 도달되기 전에 Parent metal 시험편과 비슷한 성장속도를 나타냈는데 이는 반복하중으로 인하여 피로균열이 성장함에 따라 잔류응력이 이완되기 때문이라고 생각된다.

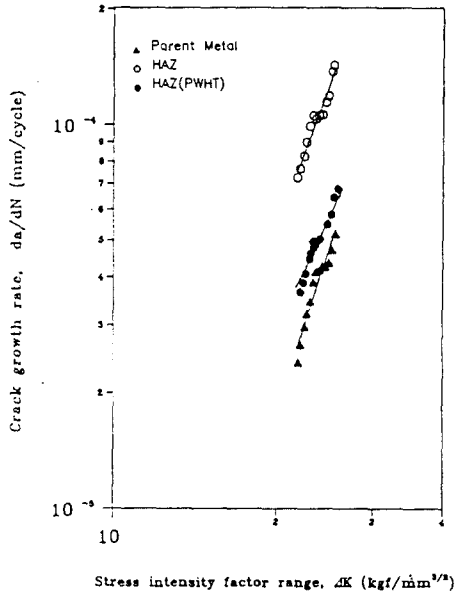


Fig. 11  $da/dN$ - $\Delta K$  relations of HAZ

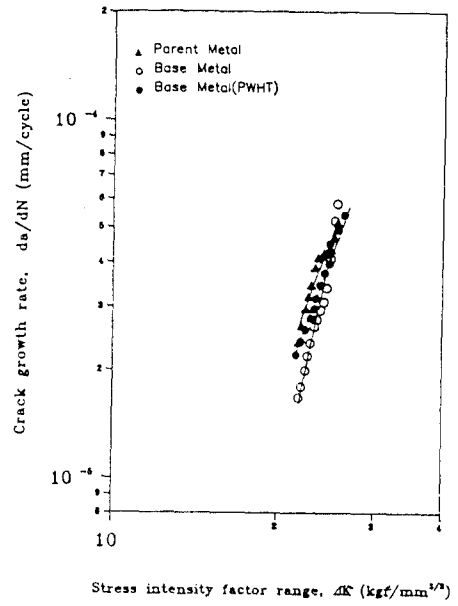


Fig. 13  $da/dN$ - $\Delta K$  relations of Base metal

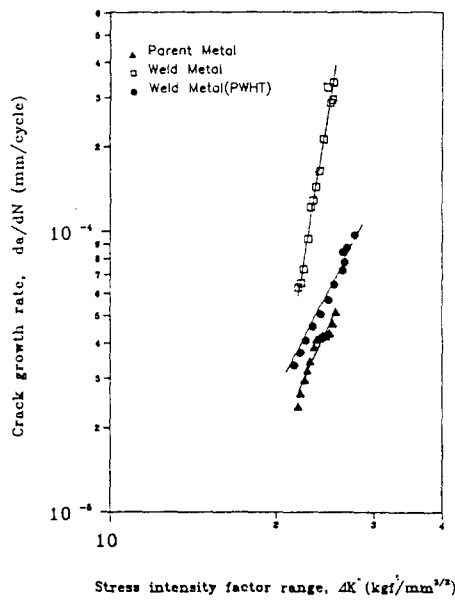


Fig. 12  $da/dN$ - $\Delta K$  relations of Weld metal

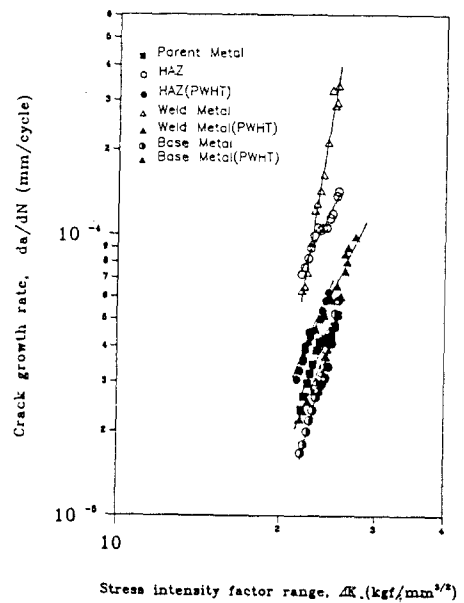


Fig. 14  $da/dN$ - $\Delta K$  relations

#### 4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄합금 Al.1100 -O 판재를 비용극식 불활성 아아크용접하여 피로균열이 용접선에 수직인 C.T. 시험편을 제작한 후 잔류응력측정 및 피로시험을 실시하여 잔류응력이 피로균열 성장거동에 미치는 영향을 고찰한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최종 파단시까지 소요된 반복 사이클 수는 용접선이 Edge 부분에 위치한 Base metal 시험편에서 가장 크게 나타났고, 다음은 Parent metal, HAZ 그리고 Weld metal 시험편 순이었으며, HAZ와 Weld metal 시험편은 큰 차이가 나타나지 않았다.
2. 용접 시험편의 초기잔류응력 분포는 피로균열선단으로 부터 용접선이 위치한 거리에 따라 다르게 나타났다. 즉, 피로균열이 HAZ 및 Weld metal에 위치한 경우는 인장잔류응력의 영향을 받으며, Base metal에 위치한 경우는 압축잔류응력의 영향을 크게 받았다.
3. 용접후열처리재의 경우 모든 시험편의 피로수명 및 균열성장률은 모재와 거의 동일하게 나타났다.

#### 參 考 文 獻

- (1) K.Masubuchi, "Analysis of Welded Structures", International Series on Materials Science and Technology, Vol.33, PP.1-10, 1980.
- (2) W.H.Kearns. "Welding Handbook", American Welding Society, Seventh edition, Vol.5, PP.276-311, 1984.
- (3) 이광주, "疲労強度에 미치는 溶接缺陷의 影響", 大宇造船工業株式會社 技術紙(大宇造船 技術), Vol.3, No.10, PP.19-32, 1986.
- (4) D.V.Nelson, "Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation", ASTM STP8 776, PP.172-194, 1982.
- (5) 車龍勳, "CT形 變厚溶接板8材에서의 疲勞龜裂成長學動에 미치는 殘留應力의 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.
- (6) A.P.Parker, "Stress Intensity Factor, Crack Profiles, and Fatigue Crack Growth Rate in Residual Stress Fields," ASTM STP 776, PP.13-31, 1982.
- (7) R.J.Bucci, "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Rate Measurement", ASTM STP 743, P.28-47, 1981.
- (8) ASTM Designation : E647-83, "Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above  $10^{-8}$  m/cycle", PP.739-755, 1985.
- (9) AWS, Structural Welding Committee, Welding Code-Aluminum, ANSI/AWS D1.2-83, PP.13-48, March 7, 1983.