

국산 Flux-Cored Wire를 이용한 반자동 CO₂ 용접이음재에서의 피로파괴 특성*

엄동석**, 강성원**, 김하진***

A Study on the Fatigue Crack Growth of
Mild Steel Weldments Using Flux Cored Wire CO₂ Welding

D. S. Um**, S. W. Kang**, H. J. Kim**

Key Words : Stress Intensity Factor Range (응력 확대 계수 범위), Fatigue Crack Propagation (피로균열전파), Crack Opening Displacement (균열 개구량), Elastic-Plastic Fracture Toughness (탄소성 파괴 인성), Stable Fracture Resistance Curve, R (안정파괴 저항곡선), Blunting Line (소성둔화직선)

Abstract

The application of fracture mechanics is being increased gradually to assess the safety of welded structures containing crack.

Fatigue crack propagation behavior and elastic-plastic fracture toughness J_{IC} of home made flux cored wire (1.2mm) CO₂ weldments was discussed.

Especially fatigue crack propagation test was carried out by ΔK control instead of load control and elastic-plastic fracture toughness J_{IC} was obtained by ASTM-R curve method on C.T. specimen in transverse direction of weldments.

The results obtained are as follows ;

- (1) Weld metal presented an almost complete similarity to base metal on fatigue crack propagation rate in transverse direction.
- (2) Weld metal was more than base metal on J_{IC} value in transverse direction.
- (3) F.C.W. CO₂ weldments had an excellent characteristic of fatigue crack propagation rate and J_{IC} in less than 50kg/mm² steel grade, this would result from that weld metal had good static strength.

* 이 논문은 1988년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.
1988년 추계 학술 발표대회 발표논문

** 부산대학교 공과대학, 정회원

::* * 소년의 집 공고, 정회원

I. 서 론

오늘날 강구조물과 조선용접에서는 용접시공방법의 개선에 의한 생산량 향상을 꾀하기 위하여 용접의 자동화가 강력히 추진되어 기존의 피복아크용접법은 사용율이 떨어지고 가스피복인 CO₂용접의 이용이 급속히 증대되어 가고있는 실정이다.

이러한 CO₂용접에서도 용접외관을 양호하게 하고 스펙터링을 줄일 수 있는 장점 때문에 초기의 solid wire CO₂ 용접에서 flux cored wire (이하, F.C.W.)CO₂ 용접으로 그 수요가 크게 변화되고 있으며, 국내 조선용접에서는 50kg/mm²급강재 용접시공인 경우 거의 대부분이 solid wire대신 F. C. W. CO₂ 용접법을 채택하고 있다. 또한 F. C. W. CO₂용접에 쓰이는 F. C. W. 는 국내에서 생산되어 산업현장에 대량으로 실용화되어 국내 전체 수요의 절반을 점하기에 이르렀다.

그러나, 현재까지 이방면에 대한 연구는 주로 이음성능에 대한 야금학적 연구 이었다¹⁾. 최근 용접강구조물의 신뢰성 확보라는 관점에서 관심이 증대되고 있는 피로강도에 대해서는 F. C. W. CO₂ 용접이음재를 대상으로한 연구가 최소하다.

따라서 본 연구에서는 이미 국내생산되어 산업현장에서의 수요가 급증하고있는 F. C. W. CO₂용접법으로 압연강재를 다층맞대기 용접한 이음재를 대상으로 하였다. 실험은 일정응력확대계수범위(이하, ΔK)제어에 의한 균열개구변위(Crack

Opening Displacement)법으로 피로균열전파(이하 F. C. P.) 시험을 실시하고, 제하컴플라이언스(Compliance)법으로 탄소성파괴인성(J_{1c}) 시험을 실시하였다. 실험결과로부터 용접선에 대한 횡방향에서의 피로파괴특성을 규명하여 용접구조물 설계의 기초자료를 제시코자 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 용접 이음재

실험에 사용된 시험편은 두께 30mm의 국산 조선용 압연강재로서 그화학조성 및 기계적 성질은 Table.1과 같다.

강재를 맞대기용접하기 위하여 20° V형 용접홈을 가공하고 중형으로 충분히 가용접한 상태에서 층간온도 100℃ 정도로 27패스 F. C. W. CO₂다층용접으로 시공하였다.

용접에 사용된 F. C. W. 는 국내에서 생산된 저탄소계 지름 1.2mm와이어로써 용착금속의 화학조성및 기계적 성질은 Table.2와 같다. Table.3과같은 용접조건으로 반자동 F. C. W. CO₂용접하여 Fig.1과 같은 이음재를 5블록 제작 하였다.

이음재로부터 경도측정용 시험편을 채취하여 가압하중 500g, 가압시간 20초 조건에서 마이크로 비커어스 경도시험기로 경도 측정된 결과 용접선에 대한 횡방향의 경도분포는 Fig.7과 같음을 알

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of testing materials

Material	Chemical composition(wt%)									Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	El. (%)
KR-RD32	.15	.39	.138	.16	.07	.17	.2	.1	.053	38.09	54.1	25

Table 2. Chemical compositions and mechanical properties of welded metal

Wire rod dia (mm)	Chemical composition(wt%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	El (%)
1.2	.05	.6	1.4	.018	.014	55	62	27

Table 3. Welding condition of F.C.W.CO₂ welding

Pass no.	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Flux cored wire dia(mm)	CO ₂ gas (l/min)	Welding position
1-2	210	26	30	10.92	1.2	25	D. C. R. P.
3-27	250	28	30	14.0			

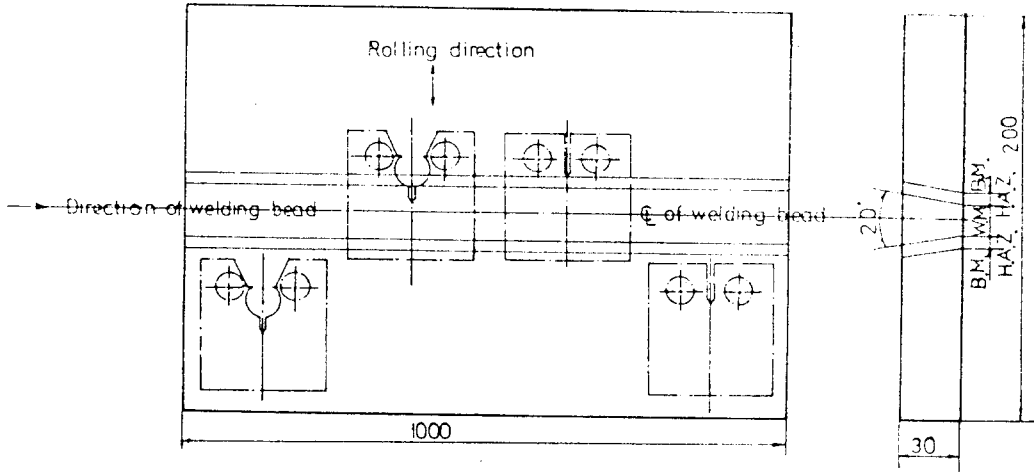


Fig. 1 Configuration of weldment and models of C. T. specimen

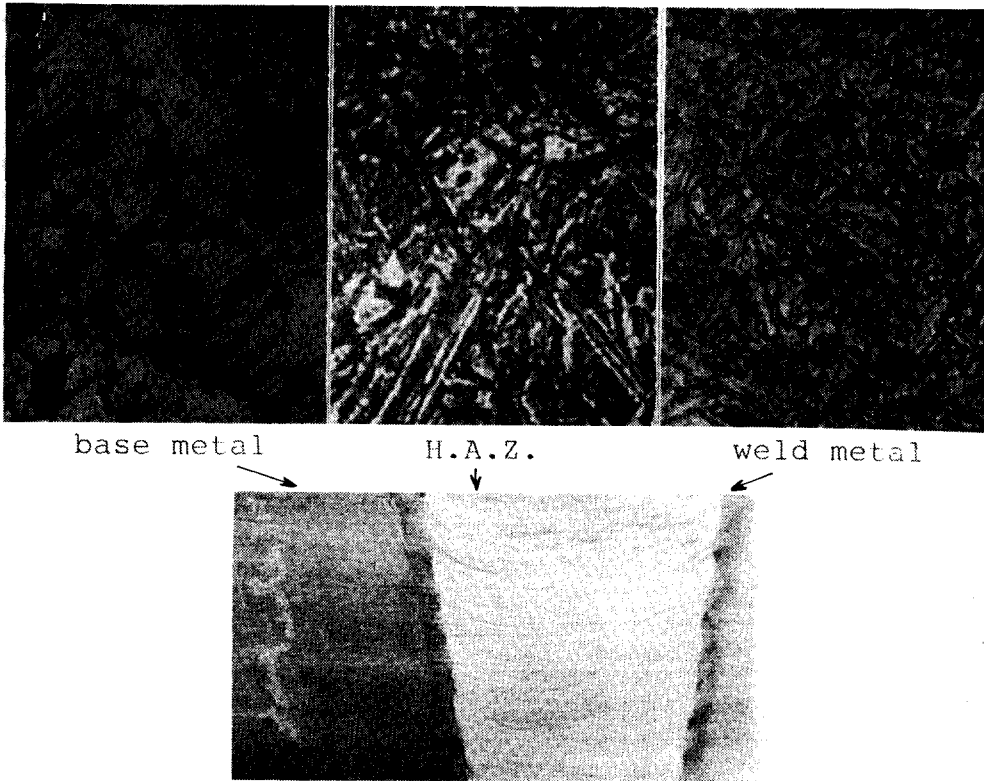


Photo. 1. Microstructures of ECAW

왔고, Photo.1은 이음재 표면에서의 금속조직사진이다.

2.2 시험편

Fig.1과 같은 이음재로부터 용접 비이드 및 각

변형을 제거한후 두께25.4mm로 연삭하여 Fig.2와같은 F.C.P. 시험용 C.T. (Compact tension type) 시험편과 Fig.3과 같은 J_{1c} 시험용 C.T. 시험편을 제작하였다. 이때 F.C.P. 시험 및 J_{1c} 시험때의 예균열길이를 예상하여 이음재로부터 시험편

국산 Flux-Cored Wire를 이용한 반자동 CO₂용접이음재에서의 피로파괴 특성

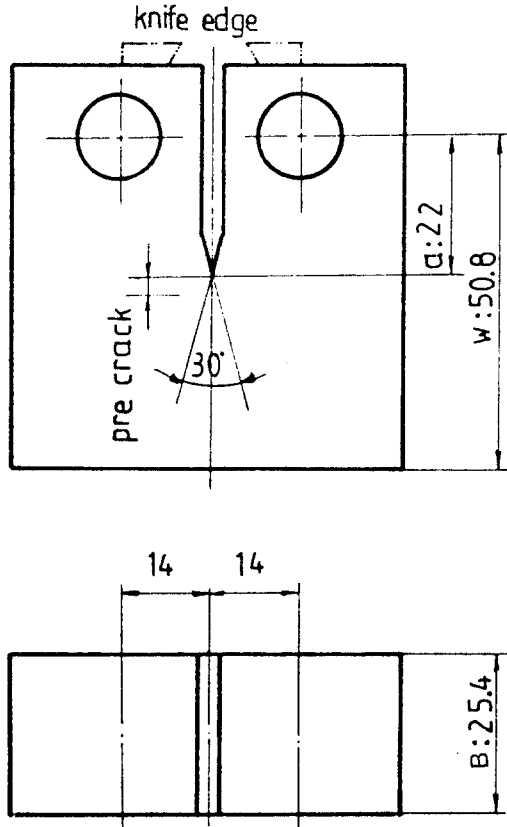


Fig. 2. Configuration of C.T. Specimen for F.C.P. test

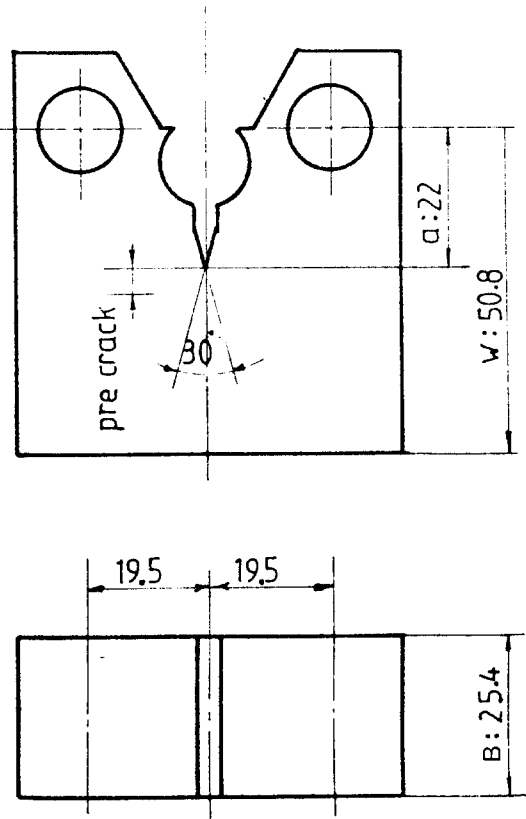


Fig. 3. Configuration of C.T. Specimen for elastic-plastic fracture toughness test

Table 4. Testing condition of F.C.P. and Pre-crack

Dynamic capacity (ton)	Stress ratio	Load wave	Frequency (Hz)
20	0.1	sine	10

채취위치를 결정 하였다.

시험편의 기계가공 노치부는 폭3mm인 평갯타를 날각도30°로 성형하여 사용하므로써 피로균열의 발생을 유도하였고, 그형상은 ASTM E647-83의 규정에 따랐다.

기계가공한 노치부의 가공도를 관찰하기 위하여 실리콘고무(Exaflex)로써 노치 끝부분 형상을 채취한후 20배 확대경으로 관찰하여 노치선단각도 $30^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$, 선단곡률반지름 0.15mm미만의 조건을 만족하는 시험편만을 실험대상으로 하였다. 그리고 미소균열의 발생과 전파를 확대경으로 육안관찰이 용이하게 하기 위해 노치선단으로부터 횡방향의 가늘실선을 그어두었다. 이와같은 시험편을 용착금속부및 모재부에서 F.C.P및 J_{IC}시험할수있

도록 충분한 수의 시험편을 제작하였다.

2.3 시험방법

본 실험에 사용된 시험기는 마이크로컴퓨터가 장치된 축방향 인장압축 유압식 피로시험기이다. 그리고 시험조건은 Table.4와 같으며 시험기의 작동과 제어는 컴퓨터에 의하여 이루어 졌다.

2.3.1 피로균열전파 시험

Fig.2의 나이프에지(Knife edge)에 설치한 개구량측정장치(extensometer)로 나이프에지선단에서의 개구량변위값을 측정하고, 시험기 유압작동부에서의 하중측정장치(load cell)로부터 하중값을 측정하였다. 이 측정값으로 ΔK및 균열길이 a

가 (2)식 및 (3)식으로 컴퓨터에 의해 ΔK 등간격에서 계산되므로 ΔK 제어에 의한 정확하고 안정된 피로균열전파시험을 실시하였다. 따라서 기존의 일정하중 제어방식의 피로균열전파시험시 피로균열길이 측정오차와 데이터 취득위치 결정의 문제점에 기인하던 해석상의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다.

기계 가공 노치선단 으로부터 2~3mm 정도의 예균열을 진전시켜 피로균열의 전파가 정상상태로 안정 되었을때 ΔK 제어 피로균열전파시험을 행하였다. 이때 ΔK 제어는 균열전파속도가 중간 및 낮은 영역에서 효과적인 것으로 알려진 ΔK 점감 (decrease) 방식을 택하였다³⁾. 즉, 실험 목표 ΔK 의 상한과 하한(60MPa \sqrt{m} ~ 10MPa \sqrt{m})을 등간격($d\Delta K$: 1.5MPa \sqrt{m})으로 등분하여 점점 감소시키고, 구간내에서는 ΔK 가 일정한 값을 유지하게 하였다. 시험기에서 측정되는 개구변위량 및 하중값을 A/D 변환장치 (Analog Digital Converter)를 거쳐 컴퓨터에 전송하면 컴퓨터는 식(1), (2), (3)에 의해 매구간에서의 Δa , da/dn 및 ΔK 를 계산하고, 시험완료후 da/dn - ΔK 선도를 도형화하게 하였다^{2)~5)}.

$$C = V/P \dots\dots\dots (1)$$

C ; compliance, P ; load, V ; 나이프에지 선단에서의 하중방향 개구변위량

$$a = W [A_0 + A_1 \cdot (U_x) + A_2 \cdot (U_x)^2 + A_3 \cdot (U_x)^3 + A_4 \cdot (U_x)^4 + A_5 \cdot (U_x)^5] \dots\dots\dots (2)$$

$$U_x = 1 / \{ (B \cdot E \cdot C)^{1/2} + 1 \}$$

W ; 시험편의 폭, B ; 시험편의 두께, E ; 시험재의 종탄성계수, $A_0 \sim A_5$; 계수

$$\Delta K = \Delta P \cdot Y / (B \cdot W^{1/2}) \dots\dots\dots (3)$$

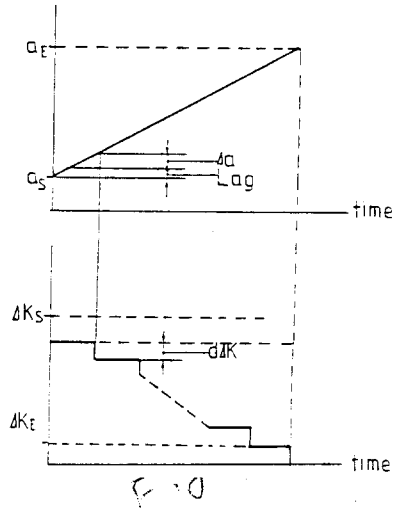
$$Y = \frac{2 + \frac{a}{W}}{(1 - \frac{a}{W})^{3/2}} \cdot [0.886 + 4.64 (\frac{a}{W}) - 13.]$$

$$32 (\frac{a}{W})^2 + 14.72 (\frac{a}{W})^3 - 5.6 (\frac{a}{W})^4]$$

ΔK ; 응력확대계수범위, ΔP ; 하중범위, a ; 균열길이

이때 F.C.P. 시험은 $\frac{a}{W} = 0.5 \sim 0.75$, $\Delta K = 60 \text{ MPa}\sqrt{m} \sim 10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 의 범위에서 수행되었다.

또한, 예균열 과정에서 시험기에서 측정되는 값으로부터 (2)식에 의해 계산되는 균열길이와 실제 시험중의 시험편에서 20배 확대경으로 관측되는 균열길이와 오차가 클때는 컴퓨터에 실측 균열



division
 $n = \frac{a_E - a_s}{a + \text{Lag}}$ end in ΔK control
 $d\Delta K = \frac{\Delta K_E - \Delta K_s}{n}$ $\Delta K_s, \Delta K_E$: K at start & end in ΔK control
 a_s, a_E : a at start & Lag : delay length for stable next stage

Fig. 4 Schematic drawing of 4k control in F. C. P. Test

길이값을 수정입력하였고, 시험기 유압작동부에서 컴퓨터모니터에 전송되는 하중값을 실제 시험편상에 부착된 스트레인게이지의 스트레인변화량으로부터 환산되는 하중값으로 검증하였다.

이와같은 방법으로 용접선에 대한 횡방향의 용착금속부 및 모재부에서 각각 F.C.P. 시험을 실시하였다.

Fig. 4는 컴퓨터제어상태(C.P.U mode)에서 수행되는 F.C.P. 시험의 ΔK 제어방식을 나타내고 있다.

2.3.2 탄소성파괴인성(J_{IC}) 시험

구조물의 용접부는 용접열의 영향으로 강도와 인성이 저하하는 것으로 알려져있다. 특히, 용접부에 결함이 존재할 경우에는 파괴에 대한 저항은 매우 감소되므로 용접이음부에서의 파괴인성에 대한 평가는 매우 중요한 문제가 된다.

소규모항복의 조건에서는 파괴저항으로 평면변형율파괴인성(K_{IC}) 시험이 유효하지만, 용접이음재와 같이 불안정파괴에 앞서 큰 소성변형이 있게

국산 Flux-Cored Wire를 이용한 반자동 CO₂용접이음재에서의 피로파괴 특성

되는 경우에는 파괴저항으로 탄소성파괴인성(J_{1c}) 시험을 실시하는것이 일반적인 경향이이다^{2),6),7)}.

중래 J_{1c} 시험은 하중제어방식에 의한 제하컴플라이언스법이 사용되었으나^{6),7)}, 본 실험에서는 개구량중분제어방식에 의한 제하컴플라이언스법으로 ASTM E-813규정에 따라 R-curve법을 택하여 소성둔화직선과 안정파괴저항곡선의 교점으로부터 파괴인성값을 구하였다.

먼저 예균열의 도입조건을 아래의 (4), (5), (6) 식을 만족하는 조건에서 일정하중제어방식으로 실시하였다²⁾.

$$P_{Lmax} < 0.4 P_L \dots\dots\dots (4)$$

$$P_L = B \cdot b^2 \cdot \sigma_{ts} / (2W + a), \quad b = W - a_0, \quad \sigma_{ts} = (\sigma_{ts} + \sigma_{yp}) / 2$$

W ; 하중작용점에서 C.T. 시험편 끝단까지의 거리, B ; 시험편의 두께, P_{Lmax} ; 예균열 도입시의 최대반복하중, P_L ; 공칭 균열선단의 항복응력, a₀ ; 기계가공에 의한 초기균열길이, σ_{ts} ; 시험재의 유효응력, σ_{ts}, σ_{yp} ; 시험재의 인장강도 및 항복응력

$$(\Delta K/E) \leq 0.005 \text{ mm}^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

ΔK ; 응력확대계수범위, E ; 시험재의 종탄성계수,

$$a_r \geq 1.25 \text{ mm}, \quad a_r \geq 0.05 a_0 \dots\dots\dots (6)$$

a_r ; 예균열의 길이

이와같은 방법으로 예균열의 성장이 완료된 시험편을 대상으로 J_{1c} 시험을 실시하였다. 시험완료 후 파면검사서에서 예균열에서 발생한 균열길이의 두께방향 최대편차가, 0.07배의 a₀보다 작은것 만을 J_{1c} 시험편으로써 유효한것으로 간주하였다.

J_{1c} 실험은 Fig.5와같이 나이프에지개구량 측정 장치의 최대측정범위 7mm보다 적은 5mm를 30개 구간으로 만들고 매구간마다 부하(loading)→정지(holdingtime)→제하(unloading) 과정을 반복하게 하였다.

또한, 균열길이와 J값은 (2)식 및 (8)식에 의해 컴퓨터가 매구간마다 계산케 하였다.

$$J = f \left(\frac{a}{W} \right) \cdot A/B \cdot b \dots\dots\dots (8)$$

$$f \left(\frac{a}{W} \right) = 2(1 + \alpha) / (1 + \alpha)^2, \quad \alpha = \left\{ \left(\frac{2a}{b} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{2a}{b} \right) + 2 \right\}^{1/2} - \left(\frac{2a}{b} + 1 \right)$$

b=W-a, A ; load-COD곡선하의 면적

Fig.6은 단일시험편 제하컴플라이언스법에 의

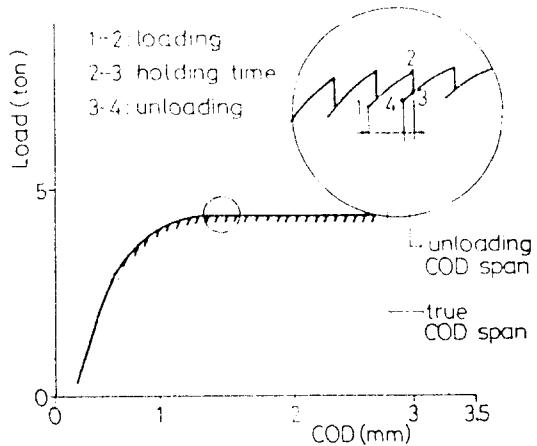


Fig.5 Relation between load and COD in J_{1c} test

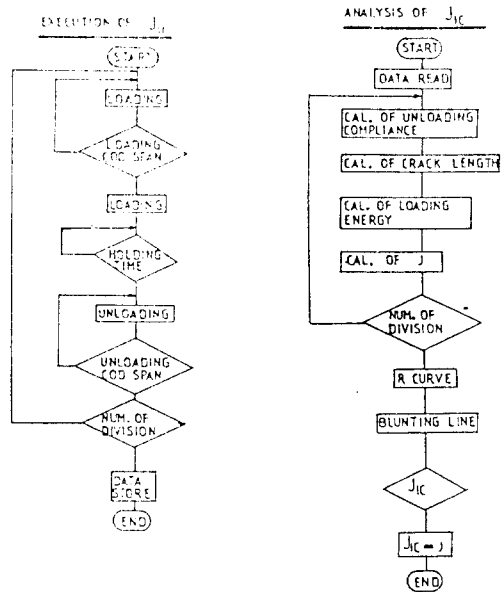


Fig.6 Flow chart of J_{1c} execution and analysis

한 J_{1c} 시험과 그로부터 얻은 데이터로 J_{1c}를 해석하는 과정을 나타내는 흐름도(flow-chart)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 경도분포 및 금속조직

Fig.7은 용접이음재를 상하양면 연삭후 마이크 로비커어스 경도시험기로 용접중심선에서 0.5mm 간격으로 측정한 횡방향의 경도분포를 나타내고 있다.

경도분포는 열영향부(H. A. Z.)에서 가장 높게 나타났으며 그 값이 250MH, 정도이고, 용착금속

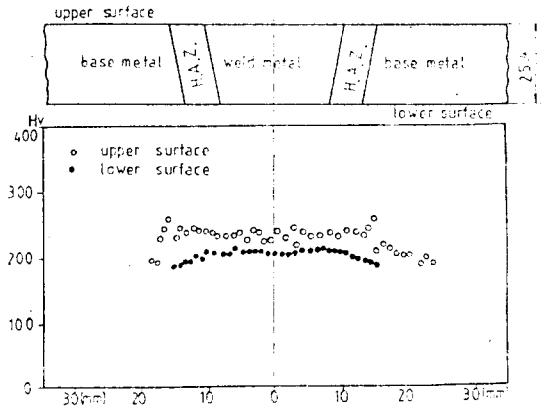


Fig. 7 Distribution of micro-vickers hardness in weldments

부(W. M.)에서는 230mH_v 정도로 모재부(B. M.)의 200mH_v 정도보다는 다소 높은 값을 보이고 있었다. 비이드 상하면에서의 경도값 차이는 약 20 mH_v 정도이고, 이와같은 차이를 나타내는 원인으로서는 용접층수의 중첩에 따른 입열량의 영향과 용접홈 아랫면에 부착된 뒷면덮개판(back plate)으로 인하여 냉각속도가 더디게된 것이 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

photo. 1은 용접이음재의 금속조직사진으로 용접비이드의 형상과 용접이음재에서의 모재부, 열영향부, 용착금속부의 현미경조직사진이다. 열영향부의 폭은 3mm 정도이고, 모재부는 결정의 크기가 크고 페라이트(ferrite)의 기지에 퍼얼라이트(pearlite)의 결정체가 산재한 모양으로 일반적인 강의 조직을 나타내고 있다. 그러나 열영향부에서는 용접열의 영향으로 결정이 크게 성장하였으며 결정의 크기가 매우 불균일한 모양을 나타내고 있다. 용착금속부는 미세한 크기의 결정으로 치밀한 조직을 이루고 있으나 결정의 크기는 다소 불균일한 모양을 나타내고 있다.

3.2 피로균열전파 시험

Fig. 8 및 Fig. 9는 모재부 및 용착금속부에서의 횡방향 피로균열전파시험 결과이다.

Fig. 8 및 Fig. 9에서의 균열전파 제2영역을 최소자승법으로 직전화시켜 Paris의 법칙에 따라 수식화 처리하면 식(9)와 같다.

$$\frac{da}{dn} = C \cdot (\Delta K)^m \dots\dots\dots (9)$$

모재부 : C=8.6×10⁻¹³, m=3.55

용착금속부 : C=9.5×10⁻¹³, m=3.45

식(9)에서 용착금속부는 모재부와 거의 비슷한

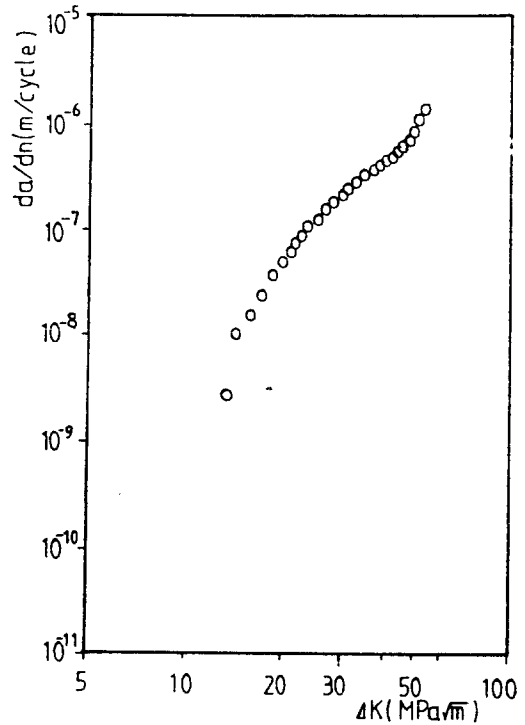


Fig. 8 da/dn versus 4k by F. C. P. on base metal transverse direction

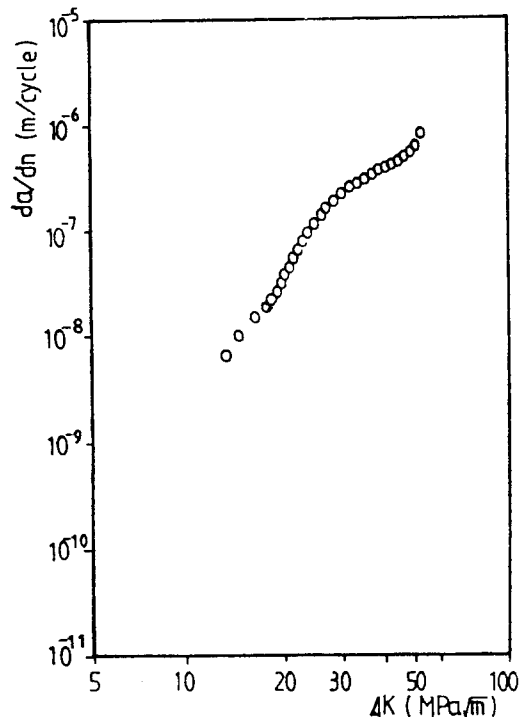


Fig. 9 da/dn versus 4k by F. C. P. on weldmetal transverse direction

국산 Flux-Cored Wire를 이용한 반자동 CO₂용접이음재에서의 피로파괴 특성

균열전파속도를 나타내고 있다. 정적인 인장강도는 용착금속이 모재보다 높지만 피로균열전파속도는 거의 비슷한 값을 나타내고 있는데 그 원인으로서는 용접비이드의 형성방향과 모재부보다 다소 높은 값으로 분포한 용착금속부의 횡방향 정도분포가 횡방향의 피로균열전파속도를 촉진시키게되어 정적인 인장강도의 상대적 우수성을 상쇄시킨 것으로 생각된다.

Fig. 10은 본 실험에서 수행한 F. C. W. 용접이음재와 125[A], 25[V], 17[cm/min], 11[KJ/cm]의 조건에서 연강판을 지름 1.6mm solid wire CO₂ bead on plate용접이음한 이음재 용착금속부 횡방향에서의 F. C. P. 시험결과⁹⁾를 비교한것이다. F. C. W. CO₂ 용접이음재는 solid wire CO₂용접이음재와 거의 비슷한 피로균열전파속도를 나타내고 있다.

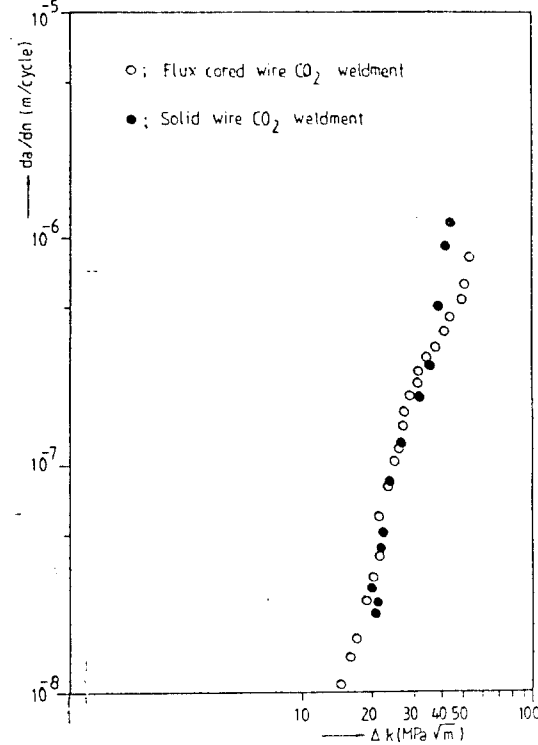


Fig. 10 Compare with F. C. W. CO₂ weldment and solid wire CO₂ weldment in F. C. P. test

3.3 탄소성파괴인성 (J_{1c}) 시험

F. C. W. CO₂용접이음재의 횡방향에 대한 모재부 및 용착금속부에서의 J_{1c}실험을 ASTM-R curve법에 따라 시험한 결과로 구해진 소성둔화곡선은 (10)식의 조건을 만족하였다. 실험결과로

부터 Fig. 11과 같이 소성둔화곡선을 각각 0.15 mm 및 1.5mm평행이동시킨 off-set선 범위안에서 (11)식의 조건을 만족할 수 있도록 J-Δa_p선도에서 R곡선을 구하였다.

Fig. 11에서와 같이 소성둔화곡선과 R곡선이 교차하는 점에서의 J값을 J_{IN}으로 결정하고, R곡선 상에 (12)식을 만족하는 4개이상의 유효데이터점이 (+35%)~(-25%)범위로 존재할때 J_{IN}값을 J_{1c}라고 판정하였다.

$$J = 2 \cdot \sigma_{fs} \cdot \Delta a_p \dots\dots\dots (10)$$

$$b \geq 25 (J_{IN} / \sigma_{fs}), \quad dJ / da \leq \sigma_{fs} \dots\dots\dots (11)$$

$$\xi_B \leq \xi_A / 3 \dots\dots\dots (12)$$

Fig. 12 및 Fig. 13은 F. C. W. CO₂용접이음재의 횡방향에대한 모재부 및 용착금속부 J_{1c}시험결과이다. 모재부에서는 J_{1c}값이 19.8kg/mm정도이고, 용착금속부에서는 J_{1c}값이 25.4kg/mm정도이다.

용착금속부는 용접입열의 영향으로 J_{1c}값이 일반적으로 저하하는 것으로 알려졌지만 F. C. W. CO₂이음재의 용착금속부는 정적인 인장강도가 우수하여 J_{1c}값의 저하는 우려할 정도가 아니고 오히려 모재부보다 다소 우수한 것으로 나타났다.

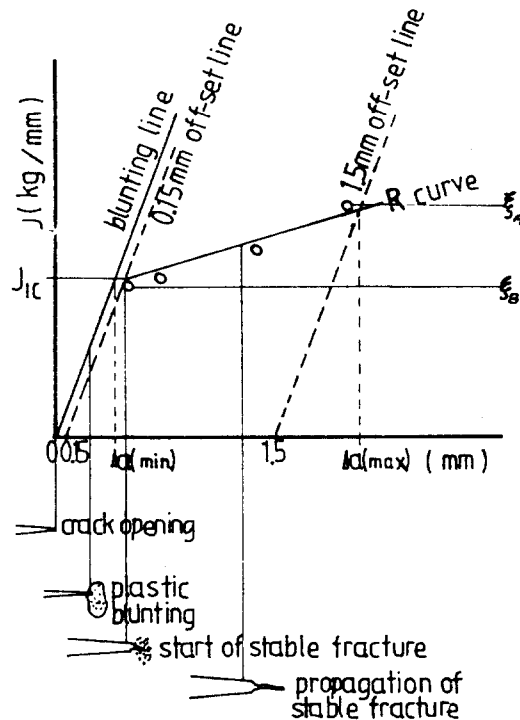


Fig. 11 Schematic drawing of static fracture blunting line, R curve and J_{1c}

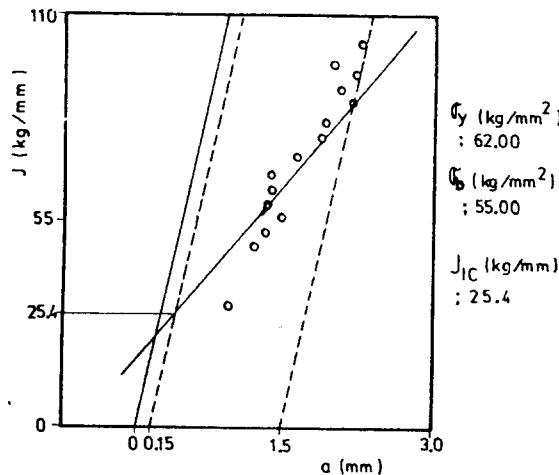
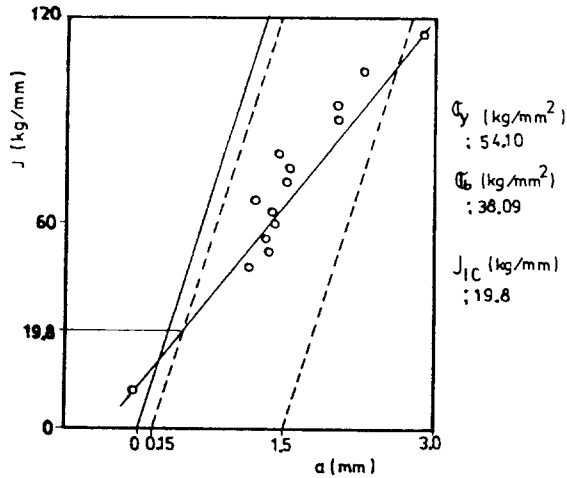


Fig. 12 J versus 4a and J_{IC} in base metal transverse direction

4. 결 론

조선용압연강재 KR-RD32판재를 지름 1.6mm 인 국산 flux cored wire CO₂ 맞대기 다층용접한 이음재를 대상으로 용접선 횡방향에 대한 피로균열전파시험과 탄소성파괴인성시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 피로균열전파속도는 용착금속부가 모재부와 거의 비슷한 값을 보이고 있으며, 본 실험에서 채택한 ΔK 제어방식에 의한 피로균열전파시험은 ΔK 등간격에서 시험데이터를 취득할 수 있어 비교적 정확하고 객관성있는 $da/dn-\Delta K$ 선도를 얻을 수 가 있었다.

(2) 탄소성파괴인성값은 용착금속부가 모재부에서 보다 오히려 높은 값을 보이고 있으며, 본 실험

험에서 채택한 제하컴플라이언스 R-curve 단일시험편법은 적은 수의 시험편으로도 간편하게 파괴인성값을 효과적으로 구할 수 있는 실험방법 이었다.

(3) 용착금속부는 용접의 영향으로 모재부에 비해 피로특성이 떨어지는 것으로 알려져 있으나 50 kg/mm²급이하의 용접구조용강재를 F.C.W.CO₂ 용접 이음한 이음재에서는 용착강의 정적인 인장강도가 모재에 비해 우수하기 때문에 다른 용접시공법을 채택하였을 때에 비해 이음재의 피로특성이 우수한 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) 박대식의2인, flux cored wire용접의 문제점, 대한용접학회 춘계논문발표개요집(1986), pp. 124-129.
- 2) 國尾式 外3人;破壊力學實驗法, 朝倉書店, (1984)
- 3) R.J.Bucci; Development of Proposed ASTM standard test method for near threshold fatigue crack growth rate measurement, ASTM STP 738, Part 1, (1981), pp.5-16.
- 4) Ashok, Saxena and S.J.Hudak Jr; Review and extension of compliance information for common crack growth specimens, Int'l J of Fracture, Vol.14, No.5, October, 1978.
- 5) Yozo Sawaki, Shuji Tada, Shigeharu Hashimoto and Tadashi Kawasaki; Fatigue fracture toughness and crack propagation rate, Int'l J of Fracture, Vol.35(1987), pp.125-137.6) 弾塑性 破壊靱性 J試驗法, JSME S001-1981, 日本機械學會.
- 7) 오세욱의 2인; SB내강 잠호용접부의 평활및 측면흡 C.T. 시험편의 Jc평가, 대한용접학회지, 4권1호(1986), pp. 47-51.
- 8) P.Will, B.Michell and U.Zerbst, ; J-contrd crack growth-modification of J-R testing and failure assesment diagram, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, No.2, (1987) pp. 197-201.
- 9) 엄동석, 강성원, 김하진, 熔接殘留應力場에서의 疲勞龜裂傳播特性에 대한 연구, 釜山工大大 研究報告33輯, (1987), pp. 63-73.