

용접부의 인장 및 압축잔류응력에 관한 피로균열 전파거동

Fatigue Crack Propagation Behaviors on Tensile and Compression Residual Stresses in Weld Zone

이 하 성*·강 동 명*

Ha-Sung Lee·Dong-Myeong Kang

ABSTRACT

Effects of tensile and compression residual stresses in the welded SS41 and Al7075-T6 on fatigue crack propagation behavior are investigated when a crack propagates from residual stresses region. We propose the fatigue crack growth equation on tensile and compression residual stresses in welded metal.

The results obtained in this experimental study are summarized as follows :

- 1) A fatigue crack growth equation which applied fatigue fracture behavior of the welded metal is proposed.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta (1-R_{eff})^\delta (\Delta K - \Delta K_1)^\alpha}{[(1-R_{eff})K_{cf} - \Delta K]}$$

where, α , β , γ and δ are constants, and R_{eff} is effective stress ratio [$R_{eff} = (K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res})$], K_{cf} is critical fatigue stress intensity factor. The constants are obtained from nonlinear least square method. The relation between crack length and number of cycles obtained by integrating the fatigue crack growth rate equation is in agreement with the experimental data.

- 2) The experimental results confirmed that the cause of crack extension and retardation by residual stresses has relation to the phenomenon of crack closure.
- 3) The relaxing trend of residual stresses by the crack propagation was greater in case of compressive residual stress than that of tensile residual stress in the welded metal.

1. 서 론

용접 구조물의 사용수명에 영향을 주는 여러 원

인 가운데 용접부의 잔류응력은 구조물내에 인장 및 압축응력으로 분포되며, 피로하중이 작용하는 용접구조물에 이들 잔류응력은 작용응력과 중첩하여 피로균열전파속도를 가속 또는 지연시키는 등

* 유한전문대학 금형설계과

피로파괴거동에 큰 영향을 끼친다^{1~3)}.

규칙적인 반복이 작용할 때에 일반적으로 모델링이 되는 피로시험 방법으로 일정응력진폭시험이 있는데 이 방법에 의한 피로균열성장거동은 3단계 영역(Threshold region, Stable region, Unstable region)으로 나누어진다. 대개의 용접구조물의 피로 균열성장속도에 대한 해석은 부분적인 영역(Stable region, Unstable region)에 대하여 이론과 모델 등이 제안 되어있다^{4,5)}.

용접부의 안전수명 평가 및 공학적 응용을 위해서는 피로균열전파거동의 3단계 전 영역에 대하여 동시에 적용할 수 있는 피로균열 성장속도의 관계식이 요구되며 각영역 상호간에 연관성을 체계화 하는 연구가 요구된다.

본 연구에서는 모재에 대한 기본실험으로 응력비를 달리하는 일정응력진폭시험을 행하여 피로균열전파거동의 3단계 영역에 적용할 수 있는 실험식을 구하고, 용접부의 인장 및 압축잔류응력으로부터 피로균열이 전파할 때 이 실험식을 토대로 용접부의 피로균열전파거동을 나타낼 수 있는 실험식을 제안하였다.

2. 용접 및 실험방법

본 연구에 사용한 재료는 일반구조용 압연강(SS41)과 고강도 알루미늄 합금강(Al7075-T6)이며 만능 재료 시험기(Toyo Baldwin Co. : 10 Ton)를 사용하여 구한 각 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties for base metal

materials	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	elongation(%)
SS41	315	440	25
Al7075-T6	539	573	8.5

실험에 사용한 재료의 용접을 위해 각 재료 공히 압연방향과 시험편 길이 방향이 일치하도록 하고 연강판 및 알루미늄 합금강의 크기는 각각 250*120*4 및 250*120*13mm 로 채취하였다. 용접은 ASM Metals Handbook에 규정하고 있는 범위에서 V-groove의 양쪽 경사각이 60°가 되도록 각 시험편을 가공하였다. 용접기는 연강(SS41)은 피복아크용접기, 알루미늄(Al7075-T6)은 TIG용접기를 사용하였고, 용접봉은 연강(SS41)은 E4301,

알루미늄(Al7075-T6)은 ER 5356을 사용하였으며 용접조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Welding conditions

ϕ (mm)	current (A)	voltage (V)	speed (mm/min)	number of passes	remark
3.2	80	100	150-170	4	covered arc
3.2	320-350	30	120-150	5	TIG

용접재료는 용접 후의 변형을 고려하여 약 5도의 역변형을 주어 양쪽 끝에 가접을 하였으며, 용접방법은 구속 상태 하에서 아래보기 자세의 맞대기 용접을 하였다. 용접이 끝난 재료는 실내온도에서 구속 상태하에서 서서히 냉각시켰고, 용접부 위의 이상유무를 관찰하고자 X-Ray 검사를 하여

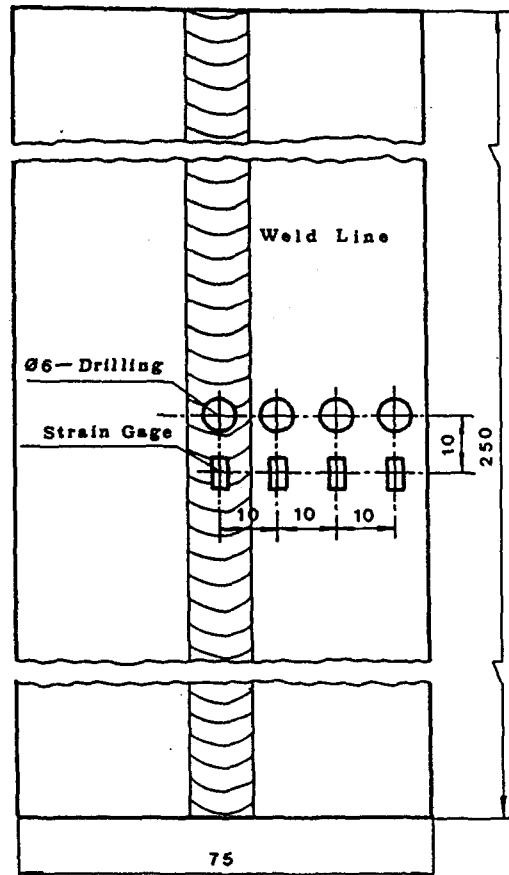


Fig. 1 Configuration of residual stresses measuring method

양호한 것만을 시험편으로 선택하였다.

잔류응력은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Mathar의 hole drilling method로 용접선에 대하여 가로 방향으로 측정하였다⁶⁾.

각 재료의 기본 피로시험으로 응력비 R=0.05, R=0.2 및 R=0.4의 3가지 조건으로 일정응력 진폭시험을 행하였으며 실험 조건은 Table 3과 같다.

Table 3 Experimental conditions for base metal

materials	P _{max} (KN)	P _{min} (KN)	R
SS41	30.5	1.5	0.05
	31.3	6.3	0.2
	33.3	13.3	0.4
Al7075-T6	28.9	1.4	0.05
	30	6	0.2
	32.5	13	0.4

용접 피로시험편은 CCT(center cracked tension) 시험편과 SEN(single edge notched) 시험편 두 가지로 제작하였는데, 피로균열이 인장잔류응력 영역에서 압축 잔류응력 영역으로 진전할때

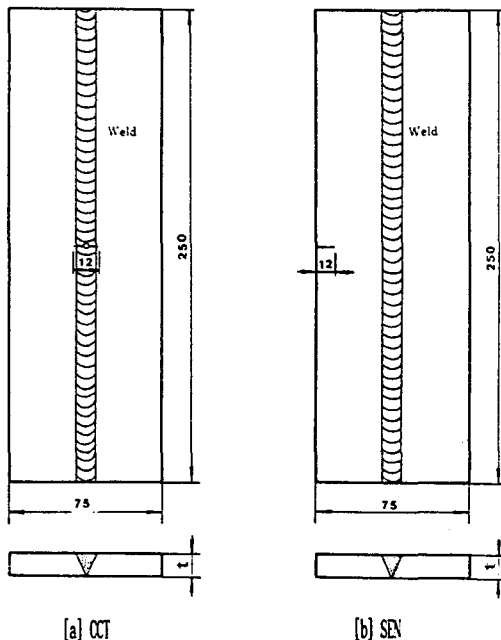


Fig. 2 Configuration of fatigue test specimens
 [a] Center Cracked Tension Specimen
 [b] Single Edge Notched Specimen

(CCT)와 압축잔류응력 영역에서 인장 잔류응력 영역으로 진전할때(SEN)로 구분하여 피로균열 전파거동에 대한 잔류응력의 영향을 실험하였다. Fig. 2에는 각 피로시험편을 나타내었으며 실험 조건은 Table 4와 같다.

Table 4 Experimental conditions for weld metal

materials	specimen type	P _{max} (KN)	P _{min} (KN)	R
SS41	CCT	30.5	1.5	0.05
	SEN	34.1	1.7	0.05
Al7075-T6	CCT	28.9	1.4	0.05
	SEN	30.5	1.5	0.05

용접재의 피로시험시 잔류응력에 의한 균열전파의 가속 및 지연의 영향을 균열닫힘(crack closure) 현상과의 관계로 조사하기 위하여 감산회로 장치를 구성하고, 이 장치를 거친 뒤 나온 하중-감산변위를 AD 변환기를 통하여 컴퓨터에 저장하였다⁷⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔류응력에 의한 응력확대계수

Hole drilling method로 측정된 잔류응력을 Tera-da 식에 적용시켜 구한 재료의 잔류응력 분포식은 다음과 같다⁸⁾.

$$\sigma_r(x) = \sigma_0 [1 - (x/b)^2] \exp[-0.5(x/b)^2] \dots (3-1)$$

여기서, σ_0 는 용접부의 최대 잔류응력으로 용접 결과 연강판(SS41)은 약 175MPa, 알루미늄합금판(Al7075-T6)은 30MPa의 값을 나타내었다. 또한, x는 가로 방향의 길이, b는 인장잔류응력의 반폭이며 SS41은 b=13mm, Al7075-T6는 b=12mm이다.

각 재료의 잔류응력(σ_{res})의 분포와 균열의 길이로 잔류응력확대계수(K_{res})를 다음과 같이 구하였다.

3.1.1 CCT 시험편에 대한 잔류응력확대계수 (K_{res})

$$K_{res} = 2(a/\pi)^{1/2} \int_0^a \frac{\sigma_{res}(x)}{(a^2 - x^2)} dx \dots (3-2)$$

또한, 잔류응력에 의한 유효응력확대계수($\Delta K_{r,eff}$)는

$$\begin{aligned} \Delta K_{r,eff} &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) \\ &= K_{max} - K_{min} = \Delta K \dots (3-3) \end{aligned}$$

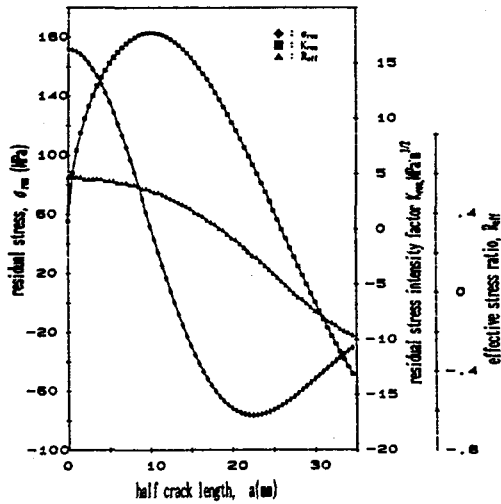


Fig. 3 Residual stress intensity factor and effective stress ratio by residual stress for CCT specimen(SS41)

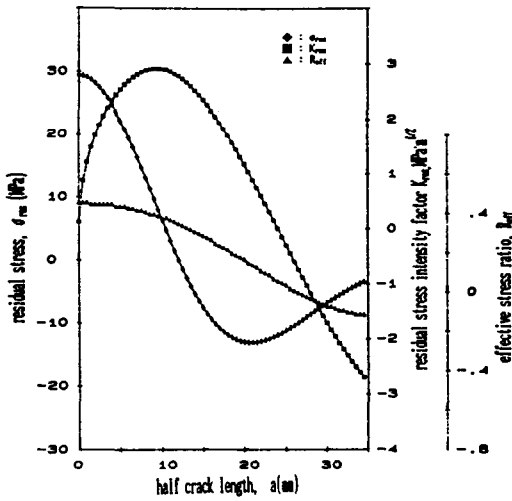


Fig. 4 Residual stress intensity factor and effective stress ratio by residual stress for CCT specimen(Al7075-T6)

이며, 유효응력비 R_{eff} 는

$$R_{eff} = (K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res}) \dots \dots \dots (3-4)$$

로 하였다⁹⁾.

3.1.2 SEN 시험편에 대한 잔류응력확대계수

$$K_{res}(x) = (2/a\pi)^{1/2} \int_0^a \frac{\sigma_{res}(x)x^{1/2}}{(a-x)^{1/2}} dx \dots \dots \dots (3-5)$$

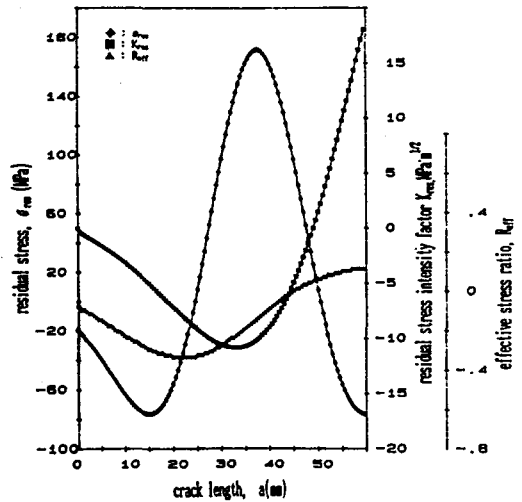


Fig. 5 Residual stress intensity factor and effective stress ratio by residual stress for SEN specimen(SS41)

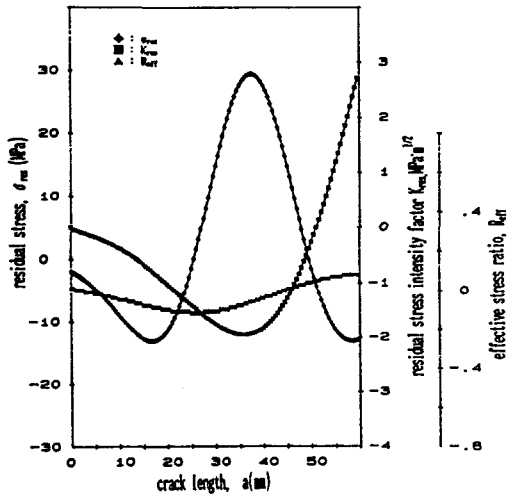


Fig. 6 Residual stress intensity factor and effective stress ratio by residual stress for SEN specimen(Al7075-T6)

그리고, 잔류응력에 의한 유효응력확대계수폭 ($\Delta K_{r,eff}$)과 유효응력비(R_{eff})는 CCT에서와 동일한 방법에 의하여 구한 식을 사용하였다¹⁰⁾.

Fig. 3~Fig. 4에는 CCT 시험편에 대한 인장잔류응력과 잔류응력확대계수 및 유효응력비를 SS41과 Al7075-T6에 대하여 각각 나타내었고, SEN 시험편에 대한 인장잔류응력과 잔류응력확대계수 및 유효응력비는 Fig. 5~Fig. 6에 SS41과 Al7075-T6의 경우를 각각 나타내었다.

3.2 모재의 피로시험

Fig. 7~Fig. 8에는 응력비를 달리한 일정응력 진폭시험의 결과를 피로균열 성장속도(da/dN)와 응력확대계수폭(ΔK)의 관계로 나타내었다.

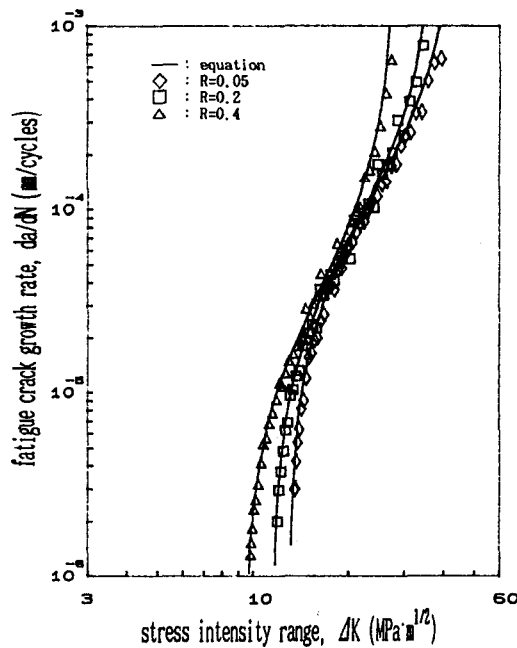


Fig. 7 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range for SS41

그림에 나타난 바와 같이 각 재료의 피로균열성장거동은 3단계 영역으로 나타나며, 본인등은 이미 3단계 영역에 적용할 수 있는 실험식을 제안하였는데 그 식은 다음과 같다¹¹⁾.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta(1-R)^\delta (\Delta K - \Delta K_t)^\alpha}{[(1-R)K_{cf} - \Delta K]} \dots\dots (3-6)$$

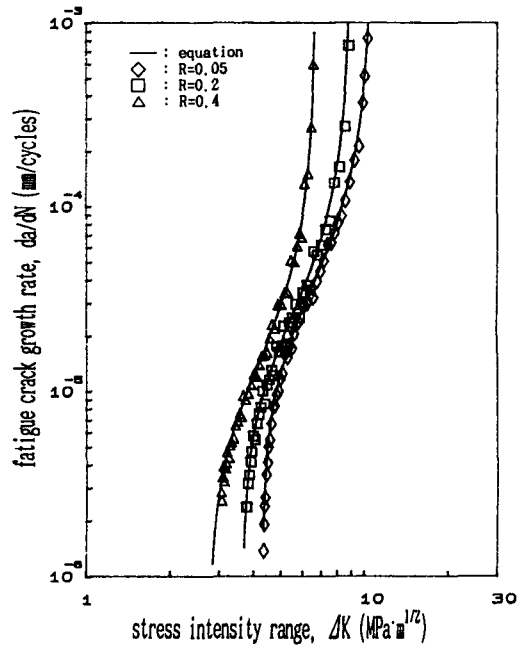


Fig. 8 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range for Al7075-T6

여기서, K_{cf} 는 임계피로응력확대계수이며, ΔK_t 는 피로균열성장속도가 충분히 낮은 ΔK 영역에서의 대략적인 ΔK 값이다. ΔK_t 는 $\Delta K_t = K_{t0}(1-R)^\gamma$ 로 나타내며, K_{t0} 는 $R=0$ 일때 ΔK_t 이다.

또한 α , β , γ 및 δ 는 상수이며 비선형 최소제곱법(nonlinear least square method)에 의하여 구할 수 있으며 본 실험 결과에 의하여 구한 상수는 Table 5와 같다.

Table 5 Results of nonlinear least square method

materials	α	β	γ	δ	K_{t0}	K_{cf}
SS41	0.97	2.8E-04	0.70	2.78	13.5	47.0
Al7075-T6	0.68	1.0E-04	0.94	2.45	4.5	11.2

위 상수에 의하여 구한 피로균열성장속도(da/dN)는 Fig. 7~Fig. 8에 실선으로 나타내었다.

3.3 용접재의 피로시험

3.3.1 CCT 시험편

Fig. 9와 Fig. 10에는 SS41과 Al7075-T6에 대한

용접재의 피로시험 결과를 모재와 함께 피로균열 성장속도(da/dN)과 응력확대계수(ΔK)와의 관계로 나타내었다. 피로균열이 인장잔류응력영역에서 압축잔류응력 영역으로 전파되어 가는 경우 인장잔류응력 영역에서는 작용응력과 인장잔류응력의 중첩에 의하여 균열진전이 빠르게 나타나며 압축잔류응력 쪽으로 접근함에 따라 점차적으로 모재의 피로균열전파속도와 접근함을 보인다. 앞에서 언급 하였듯이 용접부의 잔류응력의 효과는 식(3-4)의 유효응력비의 변화로써 나타낼 수 있으며 식(3-6)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다^{9,10}.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta(1-R_{eff})^\delta (\Delta K - \Delta K_t)^\alpha}{[(1-R_{eff})K_{cf} - \Delta K]} \dots\dots (3-7)$$

단, $\Delta K_t = K_{t0}(1-R_{eff})^\gamma$ 이다.

식(3-7)에 의하여 구한 값은 Fig. 9와 Fig. 10에 실선으로 나타내었다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 균열성장초기에 피로균열전파속도를 보면 실험치와 실험식에 의한 값이 차이가 없으나 균열이 성장할수록 실험치가 실험식의 값보다 낮아지는 경향을 보이면서 모재의 피로균열전파속도와 접근한다. 이것은 되풀이 되는 하중과 피로균열진전에

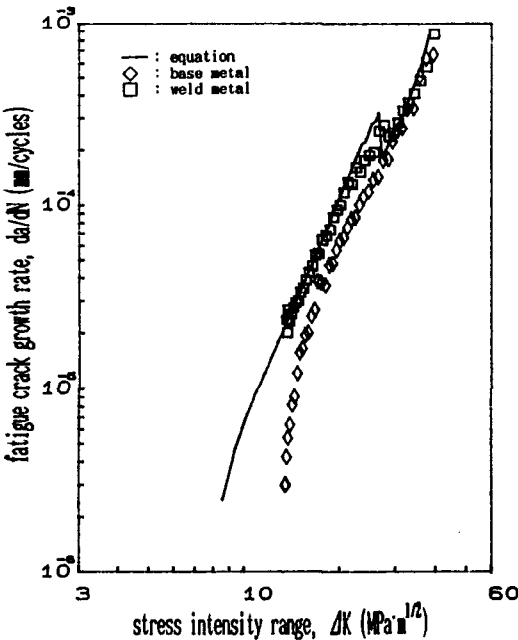


Fig. 9 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range for SS41(CCT specimen)

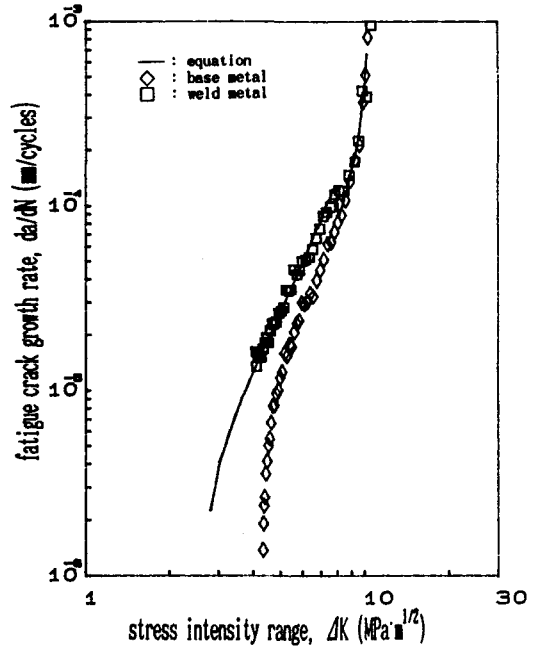


Fig. 10 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range for Al7075-T6(CCT specimen)

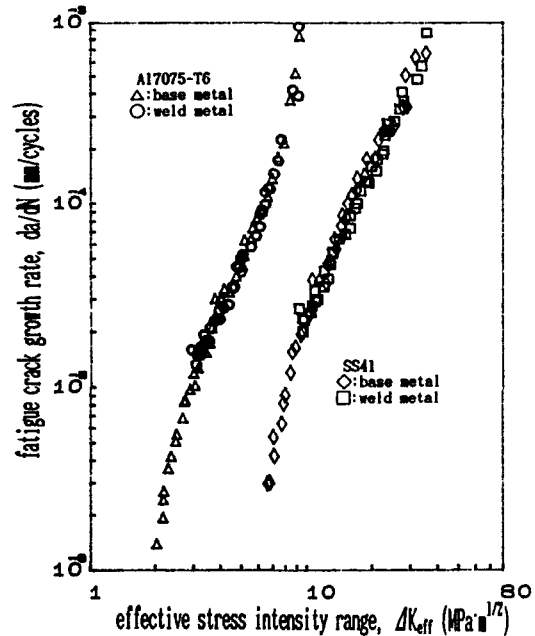


Fig. 11 Fatigue crack growth rate vs. effective stress intensity range(CCT specimen)

따라 잔류응력이 이완되기 때문이라 생각된다. 잔류응력에 의한 균열진전의 가속 혹은 지연의 효과를 균열단함영향과의 관계로 조사하기 위해 Fig. 11에 $da/dN - \Delta K_{eff}(=U\Delta K)$ 와의 관계로 나타내었는데 여기서 U는 균열 열림율이다. 그림에 나타난 바와 같이 용접재의 시험 결과는 모재의 시험 결과와 같은 선상에 나타남을 보이는데 이는 잔류응력에 의한 피로 균열진전의 가속 혹은 지연의 현상이 균열단함현상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

용접재의 피로균열전파거동을 나타내는 식 (3-7)을 다음과 같이 적분하면 균열 길이에 대한 하중반복회수와와의 관계를 구할 수 있다. 즉,

$$\int da = \int \frac{[(1-R_{eff})K_{cl} - \Delta K]}{\beta(1-R_{eff})^\delta (\Delta K - \Delta K_t)^\alpha} da \dots (3-8)$$

Fig. 12에는 실험치와 비교하기 위해 식 (3-8)을 이용하여 얻은 값을 실선으로 함께 나타내었다.

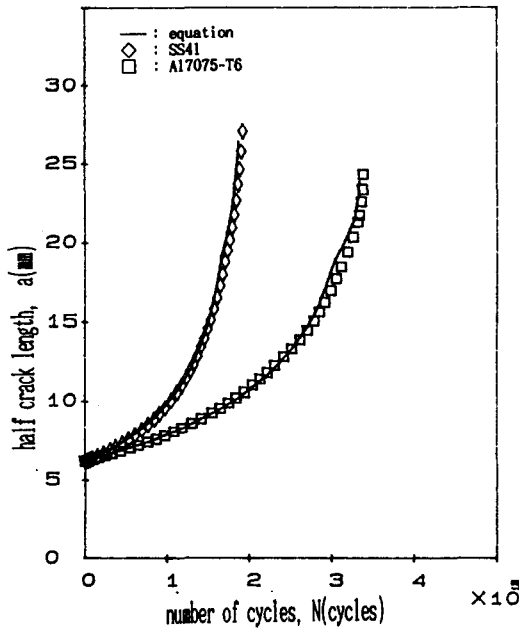


Fig. 12 Half crack length vs. number of cycles(CCT specimen)

3.3.2 SEN 시험편

SS41과 Al7075-T6에 대한 용접재(SEN)의 피로 시험 결과를 모재와 함께 피로균열성장속도 (da/dN)와 응력확대계수(ΔK)와의 관계로 Fig.

13와 Fig. 14에 나타내었다. 피로균열이 압축잔류 응력영역에서 인장잔류응력영역으로 전파되어 가는 경우 작용응력과 압축잔류응력의 중첩에 의하여 균열진전이 느리게 나타나며 인장잔류응력 쪽으로 접근함에 따라 점차적으로 모재의 피로균열 전파속도와 접근함을 보인다. 압축잔류응력의 효과는 식 (3-5)와 식 (3-3)를 이용한 식 (3-4)의 유효응력비의 변화로써 나타낼 수 있으며 식 (3-7)에 의하여 구한 값은 Fig. 13와 Fig. 14에 실선으로 나타내었는데 이 그림을 인장잔류응력하의 시험 (CCT 시험편)결과인 Fig. 9~Fig. 10의 그림과 비교하여 보자. 용접재의 피로균열전파속도를 모재의 균열전파속도와 비교하여 보면 피로균열이 압축잔류응력 영역에서 인장잔류응력 영역으로 진전된 시험편(SEN)의 피로균열전파속도가 인장잔류응력 영역에서 압축잔류응력 영역으로 진전된 시험편(CCT)의 균열전파속도 보다 모재에 접근 함이 빠르게 나타남을 볼 수 있는데 이는 반복하중 에 의하여 잔류응력의 이완되는 경향이 압축잔류 응력(SEN) 때가 인장잔류응력(CCT) 때보다 큼 을 의미한다¹²⁾.

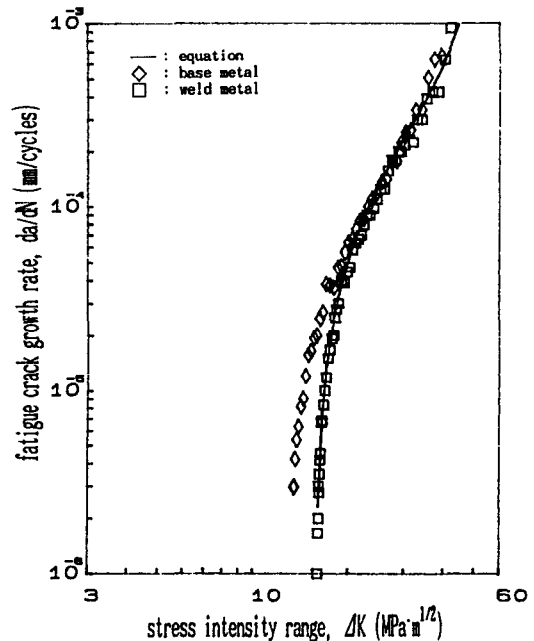


Fig. 13 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range for SS41(SEN specimen)

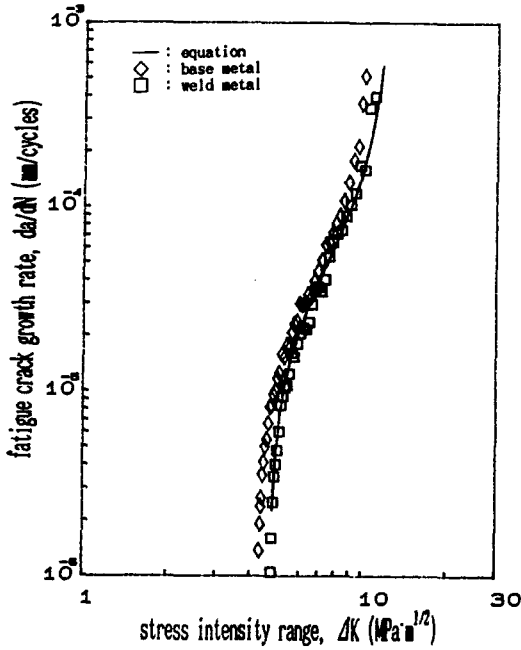


Fig. 14 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity range for Al7075-T6(SEN specimen)

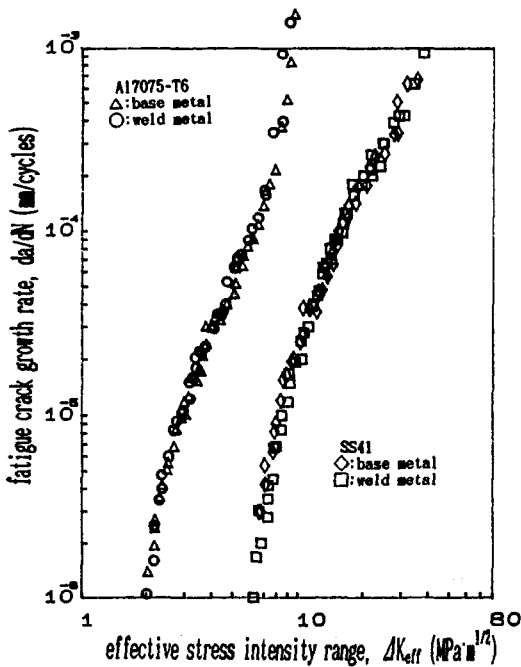


Fig. 15 Fatigue crack growth rate vs. effective stress intensity range(CCT specimen)

Fig. 15에는 잔류응력에 의한 피로균열진전거동을 균열단합영향과의 관계로 조사하기 위해 $da/dN - \Delta K_{eff}(=U\Delta K)$ 와의 관계로 나타내었다. 용접재와 모재의 시험 결과가 같은 선상에 나타남을 보이는데 이는 잔류응력에 의한 피로 균열진전 거동이 균열단합 거동과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

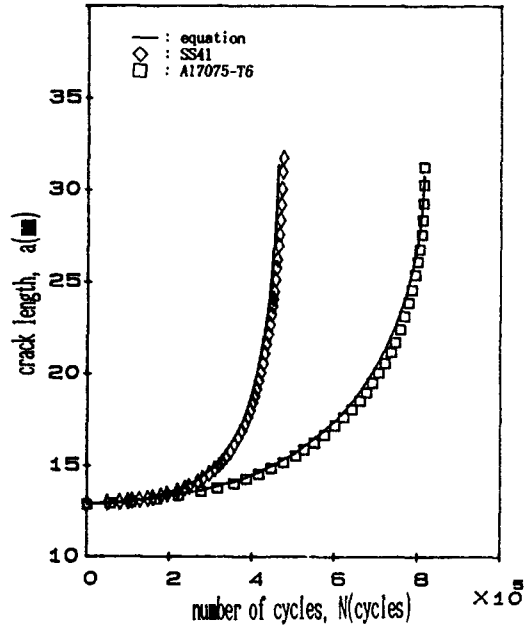


Fig. 16 Crack length vs. number of cycles(SEN specimen)

이 시험 역시 용접재의 피로균열전파거동을 적분한 식 (3-8)을 이용하여 균열길이에 대한 하중반복회수와의 관계로 Fig. 16에 실험치와 실선으로 함께 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반구조용강(SS41)과 알루미늄합금(Al7075-T6)을 용접하여 용접부에 나타나는 인장 및 압축잔류응력이 피로균열전파거동에 미치는 영향을 조사하였고, 용접재의 피로균열전파거동을 나타낼 수 있는 실험식을 제안하였다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 인장 및 압축 잔류응력이 존재하는 용접재의 피로균열전파거동을 피로균열진전의 3단계 영역에 적용할 수 있는 실험식을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{\beta(1-R_{eff})(\Delta K - \Delta K_t)^\alpha}{[(1-R_{eff})K_{cf} - \Delta K]}$$

- 단, $K_t = K_{t0}(1-R_{eff})$, R_{eff} 는 유효응력비 [$R_{eff} = (K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res})$]이며, α , β , γ 및 δ 는 상수이며 비선형 최소제곱법 (nonlinear least square method)에 의하여 구할 수 있다. 또한, 이 식을 적분하여 균열길기와 하중반복회수와의 관계로 나타내었을 때 실험치와 잘 일치하였다.
2. 인장 및 압축잔류응력에 의한 피로 균열진전의 가속 혹은 지연의 현상은 균열달림현상과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.
 3. 용접재의 피로균열진전시 잔류응력의 이완되는 경향은 압축잔류응력 (SEN) 때가 인장잔류응력 (CCT) 때보다 크게 나타났다.

본 연구는 유한 산업과학기술연구소의 학술연구지원에 의하여 수행 되었으며 연구소 관계자들에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Parker, A.P., Stress Intensity Factors, Crack Profiles, and Fatigue Crack Growth Rates in Residual Stress Fields, ASTM STP 776, pp.13-31, 1982.
- 2) Wilson, W.M., and Hao, C.C., Residual Stresses in Welded Structures, 26(5), Research Supplement, pp.295-320, 1974.
- 3) Nelson, D.V., Review of Fatigue Crack Growth Prediction Method, Exp. Mech., Vol. 17, No. 2, p.41, Feb. 1977.

- 4) Glinka, G., Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments Under Constant and Variable Amplitude Loads, ASTM STP 667, pp.198-214, 1979.
- 5) Nelson, D.V., Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 776, pp.172-194, 1982.
- 6) Nawwar, A. M., Malachlan, K. and Shewchuk, J., A modified Hole Drilling Technique for Determine Residual Stresses in Thin Plates, Experimental Mechanics, pp.226-232, 1976.
- 7) Kikukawa, M., Use of Mini-Computer for Accurate Automatic Measurement in Fatigue Test, J. Soc. Mater. Sci. Japan 29, pp.1240-1246, 1980.
- 8) Terada, H., An analysis of the Stress Intensity Factor of a crack Perpendicular to the Welding Bead, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 8, pp.441-444, 1976.
- 9) Tada, H., The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corporation, p.8, 1973.
- 10) Vaidyanathan, S. and Finnie, I., Determination of Residual Stresses from Stress Intensity Factor Measurements, Transaction of the ASME, June, pp.242-246, 1973.
- 11) D.M. Kang and S. C. Kim, An Experimental Equation on the Fatigue Crack Growth Rate Behavior, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 8, No. 2, pp.27-35, 1991.
- 12) S.C. Kim and Y.B. Lee, The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region, Journal of the Korean Welding Society, Vol. 5, No. 1, pp.42-48, Mar. 1987.