

용접 잔류응력장 중에서의 Aluminum-Alloy 용접재의 피로균열성장거동 연구*

최 용 식** · 정 영 석***

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior of Aluminum Alloy Weldments in Welding Residual Stress Fields

Y. S. Choy**, Y. S. Chung***

Key Words : Applied Stress(작용응력), Stress Intensity Factor(응력 확대 계수), Superposition(중첩), Initial Welding Residual Stress(초기 용접 잔류응력), Linear Elastic Fracture Mechanics ; LEFM(선형탄성파괴역학), Residual Stress Intensity Factor(잔류응력 확대 계수), Effective Stress Intensity Factor Range(유효응력 확대 계수 변동 범위), Effective Stress Ratio(유효응력비), Redistributed Residual Stress(재분포된 잔류응력)

Abstract

The fatigue crack growth behavior in GTA butt welded joints of Al-Alloy 5052-H38 was examined using Single Edge Notched (SEN) specimens. It is well known that welding residual stress has marked influence on fatigue crack growth rate in welded structure. In the general area of fatigue crack growth in the presence of residual stress, it is noted that the correction of stress intensity factor (K) to account for residual stress is important for the determination of both stress intensity factor range(ΔK) and stress ratio(R) during a loading cycle. The crack growth rate(da/dN) in welded joints were correlated with the effective stress intensity factor range(ΔK_{eff}) which was estimated by superposition of the respective stress intensity factors for the residual stress field and for the applied stress. However, redistribution of residual stress occurs during crack growth and its effect is not negligible. In this study, fatigue crack growth characteristics of the welded joints were examined by using superposition of redistributed residual stress and discussed in comparison with the results of the initial welding residual stress superposition.

1. 서 론

용접구조물의 피로강도 및 균열성장거동을 평가

할 때, 역학적인 측면에서 제일먼저 해석되어야 하는 것이 용접잔류응력(Welding Residual Stress)의 영향이다.^{1)~3)} 용접으로 인하여 발생된 잔류

* '87대한용접학회 추계학술대회 발표

** 성균관대학교 기계공학과 교수, 정회원

*** 성균관대학교 대학원 기계공학과, 정회원

용접 잔류응력장 중에서의 Aluminum-Alloy 용접재의 피로균열성장거동 연구

응력은, 다른 어떤인자들 보다도 피로균열성장거동에 영향을 주는, 주된 인자라 하겠다.⁹⁻¹¹ 즉, 압축잔류응력장(Compressive Residual Stress Field)중의 균열은 반복하중을 받을때 균열성장이 지연될 것이며, 인장잔류응력장(Tensile Residual Stress Field)중의 균열은, 성장이 빨라질 것이다.

일반적으로, 균열성장거동에 미치는 잔류응력의 영향을 평가하는 방법으로는, 주로 초기잔류응력(Initial Residual Stress)을 중첩(Superpose)하여 해석하여왔다.⁹⁻¹¹ 그러나 반복하중으로 인하여 피로균열이 성장함에 따라 잔류응력은 재 분포 될 것이며,¹²⁻¹⁵ Crack-Tip부근의 잔류응력의 크기는 초기잔류응력의 크기와는 다소 변하여, 균열성장거동에 주는 영향도 다르게 나타날 것이다. 이 점을 고려하여 본 연구에서는, Al-Alloy용접재의 피로균열성장거동에 관하여, 용접잔류응력의 영향을 다음과 같이, 두 가지의 접근방법으로 해석, 평가하여 보고자한다.

(1) 초기잔류응력에 의한 Kres(Residual Stress Intensity Factor)와, 작용응력에 의한 Kapp(Applied Stress Intensity Factor)를 중첩한 피로 균열성장거동 해석.¹⁶

(2) 반복하중에 따른 피로균열의 성장으로 말미암아, 재 분포된 잔류응력에 의한 Kres와, 작용응력에 의한 Kapp를 중첩한 균열성장거동해석.

2. 관련이론

선형탄성과파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics; LEFM)에서 피로균열성장거동은 다음과 같은 피로균열성장법칙¹⁷⁾(Fatigue Crack Growth Law)을 따른다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

식 (1)에서 C와 m은 재료상수이며, 응력확대계수변동범위(Stress Intensity Factor Range; ΔK)와 응력비(Stress Ratio; R)를 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

$$R = K_{min}/K_{max} \quad \text{여기서 } K_{min} > 0 \quad (2)$$

$$\Delta K = K_{max}$$

$$R = 0 \quad \text{여기서 } K_{min} < 0 \quad (3)$$

만약, 구조물의 잔류응력장(Residual Stress Field)내에 균열이 있을때엔, Crack-Tip부근에서 大韓熔接學會誌, 第7卷1號, 1989年 3月

는 잔류응력에 의한 잔류응력확대계수(Residual Stress Intensity Factor; Kres)가 존재하게 된다. 이 때 구조물이 반복하중을 받게되면, 응력확대계수변동범위와 응력비는, 중첩법을 이용하여 다음과 같이 된다.¹⁸⁾ 여기에서 Kmax, Kmin은 각각의 하중에 의한 응력확대계수의 최대, 최소값이다.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{min}$$

$$R_{eff} = (K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res})$$

여기서 $K_{min} + K_{res} > 0$ -(4)

$$\Delta K_{eff} = K_{max} + K_{res}$$

$$R_{eff} = 0 \quad \text{여기서 } K_{min} + K_{res} < 0 \quad (5)$$

여기에서 ΔKeff는 유효응력확대계수변동범위(Effective Stress Intensity Factor Range)이다. 본 연구에서의 Kres계산에서는 초기잔류응력에 의한 경우, Fig.1과 같이 잔류응력을 Modeling하였고, Koiter의 식¹⁹⁾을 이용하여 다음과 같은 계산식을 사용하였다.

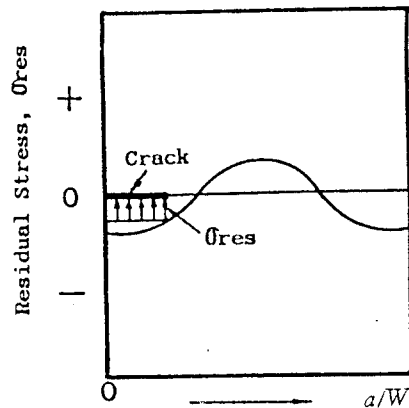


Fig.1 Residual Stress Distribution and Its Modeling for SEN Specimen.

$$K_{res} = 1.1215 \sigma_{res} \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

재분포잔류응력의 경우, Fig.2와 같이 Modeling하고, Koiter와 Benthem의 식을 중첩하여, 다음과 같은 식¹⁹⁾을 사용하여 계산하였다.

$$K_{res} = 0.6825 \sigma_{res} \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

또한, ΔK계산에는 균일인장응력을 받는 SEN(Single Edge Notched)시편에 대하여, a/W ≥ 2에서 0.5%이하의 오차를 갖는 Tada의 수정함수¹⁹를 이용하여, 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\Delta K = (\Delta P / W \cdot t) \sqrt{\pi \cdot W \cdot a} [0.265(1 - \alpha)^4 + (0.857 + 0.265\alpha) / (1 - \alpha)^{3/2}] \quad (8)$$

여기에서, W는 시편의 폭, t는 시편의 두께,

α 는 a/W 이다. 또한, da/dN 계산에는 ASTM E647-83에 제안된, Seven Point Incremental Polynomial Method²⁰⁾를 사용하였다.

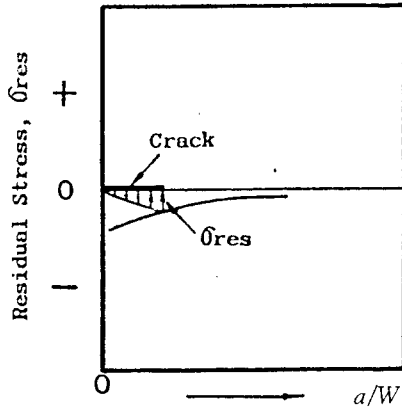


Fig.2 Redistributed Residual Stress Distribution and Its Modeling for SEN Specimen Residual Stress, σ_{res} Crack σ_{res} a/W

3. 실험

본 연구에서 사용한 시험편은, 두께 3mm의 비열처리 가공경화합금인 Al-Alloy 5052-H38이고, 기계적성질과 화학성분은 Table 1, 2와 같다. 시험편의 용접은 비 구속 GTA(Gas Tungsten Arc) 맞대기용접(Butt-Welding)으로 하였고, 용가재(Filler Metal)로는 $\phi 2.4$, A5356을 사용 하였다. 용가재의 화학성분은 Table 3, 용접조건은 Table

4, 용접시험의 기계적성질은 Table 1과 같다.

피로시험용 시험편의 형상과 치수는, 모재(Parent Metal), 용접재(Weld Metal), 열영향부재(HAZ Metal)에 대하여 Fig. 3a, b, c와 같이 하였다. 시험편의 Crack가공은, 두께 0.25mm의 실톱으로 길이가 8mm되도록 기계가공한 후, 2mm의 Pre-crack을 주어 전체 초기균열길이를 10mm로 하였다. 잔류응력 측정은 2축 Strain Gage를 사용하여 Strain Gage Sectioning Method로 부터 측정하였다. 또한, 피로 Crack을 넣어 Crack길이가 10mm, 15mm, 20mm, 25mm되게하여, 재분포잔류응력을 측정하였다. 이러한 시험편은 Weld Metal과 HAZ시험편으로 분류하였다.

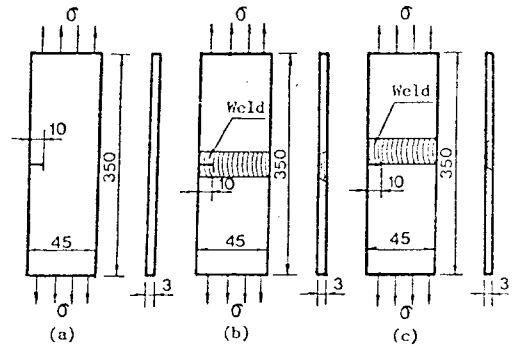


Fig.3 Configurations of Fatigue Test Specimens
(a) Parent Metal Specimen
(b) Weld Metal Specimen
(c) HAZ Specimen

Table 1. Mechanical Properties of Specimens

Specimen	Ultimate Strength (Kg/mm ²)	Yield Strength (Kg/mm ²)	Young's Modulus (Kg/mm ²)	Elongation (%)
Parent Metal	33.16	26.32	6851.66	14
Weld Metal	18.34	16.00	6811.95	15
H A Z	-	-	6815.95	-

Table 2. Chemical Compositions of Aluminum Alloy 5052-H38(Wt.%)

Composition	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
	0.02	0.11	0.32	0.15	2.40	0.02	0.32	0.017	Remainder

Table 3. Chemical Compositions of Filler Metal(Wt.%)

Filler Metal	Cu	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Cr	Al
A5356	0.10	0.20	0.32	0.05	0.10	0.06	0.05	Remainder

용접 잔류응력장 중에서의 Aluminum-Alloy 용접재의 피로균열성장거동 연구
 본 연구에 사용된 시험기는, 25Ton용량의 Dynamic Universal Testing Machine(Instron Co Model 1332)이며, 균열길이의 측정에는, x50인 이동식 현미경을, 1/1000mm의 정밀도를 갖는 Digital Micrometer에 부착하였으며, 또한,

Recorder를 부착하여 측정치가 직접 Print되도록 하였다. 피로시험은 일정하중폭(Constant Load Range)하에, Pmax을 용접재의 약 0.2 σ_y 이하인 400kg, 응력비(R)를 0.1로 하여 행하였으며, 시험조건은 Table 5와 같다.

Table 4. Conditions for GTA Butt Welding

Electrode Dia (mm)	Filler Metal Dia. (mm)	Argon Flow (cmm ³ /min)	Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Number of Pass	Heat Input (J/mm)
2.4	2.4	10	115	20	134	1	1034

Table 5. Experimental Conditions

Specimen Type	Pmax. (Kg)	Pmin. (Kg)	ΔP (Kg)	Pmean (Kg)	Stress Ratio	Test Freq. (Hz)	Control Mode	Wave Form	Temp. (°C)
SEN	400	40	360	220	0,1	25	Load	Sine	24

4. 실험결과 및 고찰

Crack이 없는 시편에 대한 잔류응력 측정결과, Weld Metal과 HAZ시편에서 Fig.4와 같다. 또한, 피로균열전파로 인한 재분포잔류응력의 측정결과, Weld Metal과 HAZ시편에서 각각 Fig.5와 Fig.6과 같다. 잔류응력측정시에는, 특히, Crack-Tip 부근의 잔류응력에 관심을 두고

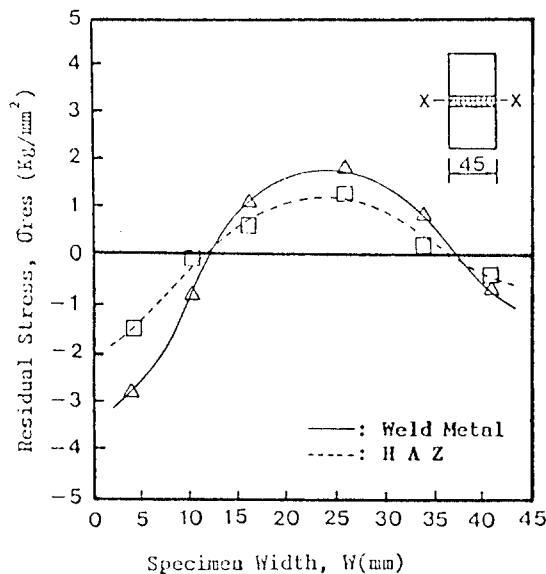


Fig.4 Welding Residual Stress Distributions in Uncracked Weld and HAZ Specimen

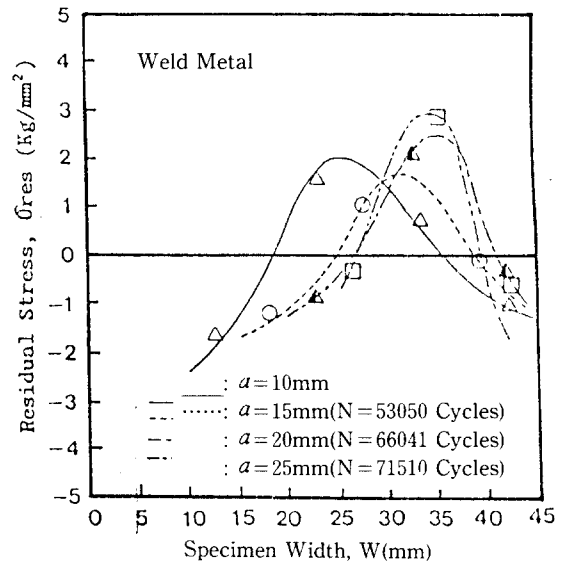


Fig.5 Welding Residual Stress Redistribution in Fatigue Cracked Weld Metal Specimens
 Residual Stress, σ_{res} (Kg/mm²)

측정 하였다. Fig.7은 균열의 성장에 따른 Crack-Tip 부근의 잔류응력의 크기를 Plot한 것이다. Edge부분의 압축잔류응력장으로부터 균열이 성장하는 본 연구에서, Crack이 성장함에 따라, Crack-Tip근방에서는 항상 압축잔류응력이 분포함을 알 수 있으며, 다만, 균열이 성장 할수록 압축 잔류응력의 크기는 감소함을 알 수 있다.

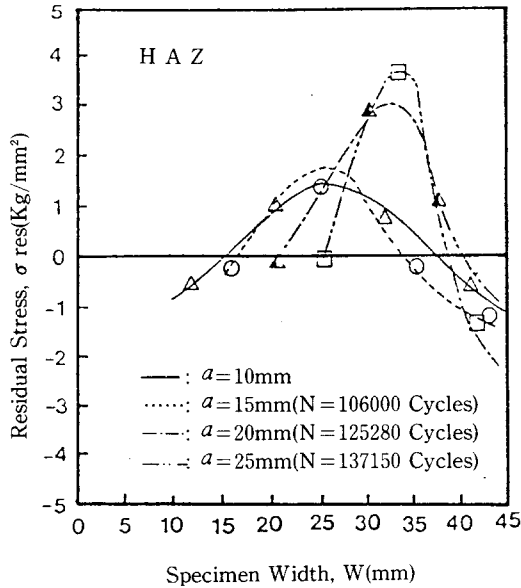


Fig. 6 Weld Residual Stress Redistribution in Fatigue Cracked HAZ Specimens

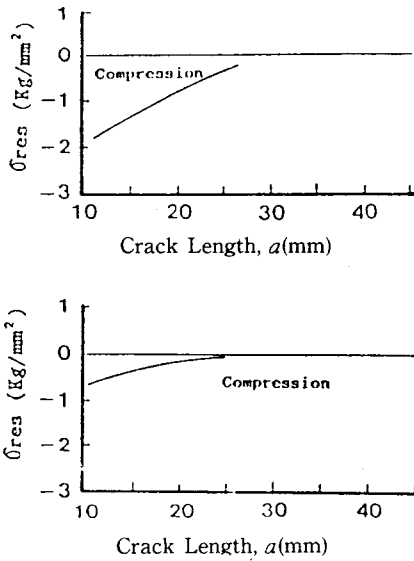


Fig. 7 Welding Residual Stress Change at the Crack Tip during Fatigue Crack Growth
(a) Weld Metal Specimen
(b) H A Z Specimen

Fig. 8은 Parent Metal, Weld Metal, HAZ시편에 대한 피로시험으로부터 얻은 $a-N$ 관계를 Plot한 것이며, 균열성장초기의 균열성장지연현상은, Parent Metal과 비교하여, HAZ시편이 Weld

Metal시편보다 더 크게 나타나고 있다. 이러한 이유는 용접으로 인하여 HAZ와 Weld Metal의 금속조직의 상이로 인한 영향이라고 생각된다.

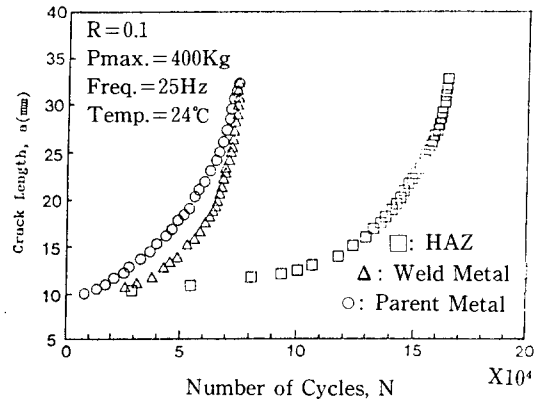


Fig. 8 $a-N$ Curves

Fig. 9와 Fig. 10은 각각, Weld Metal과 HAZ시편에 대하여, 균열길이와 K_{res} 를 무차원화시켜, 균열성장에 따른 K_{res} 관계를 Plot한 것이다. 균열이 성장할수록 압축잔류응력에 의한 영향은 감소하며, 균열길이가 짧을 때, 즉, 균열성장초기에서 그 영향이 큼을 알 수 있다. 또한, Weld Metal이 HAZ보다 그 영향을 크게 받는다.

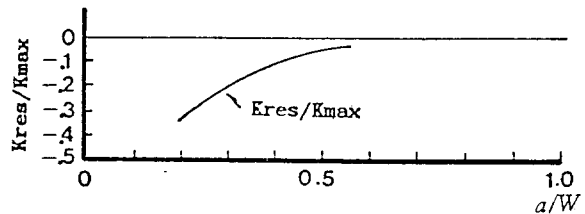


Fig. 9 Changes in Stress Intensity Factor Ranges of Weld Metal Specimen

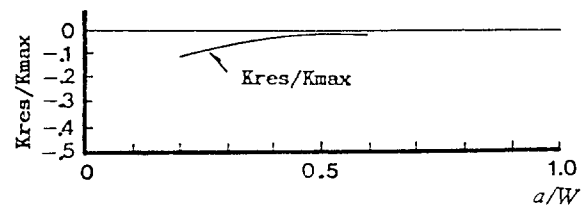


Fig. 10 Changes in Stress Intensity Factor Range of HAZ Specimen

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 Weld Metal과 HAZ시편에 대하여, 균열길이와 무차원화한 ΔK , ΔK_{eff} 와의 관계를 Plot한 것이다. 균열성장초기에는 ΔK_{eff} 가 ΔK 에 비하여 작게 나타나고 있으며, 균열이 성장하여 감에 따라, ΔK_{eff} 는 점점 커져

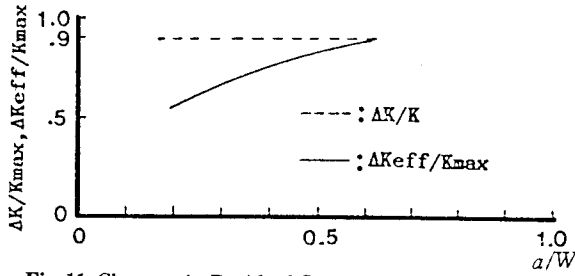


Fig.11 Changes in Residual Stress Intensity Factor of Weld Specimen

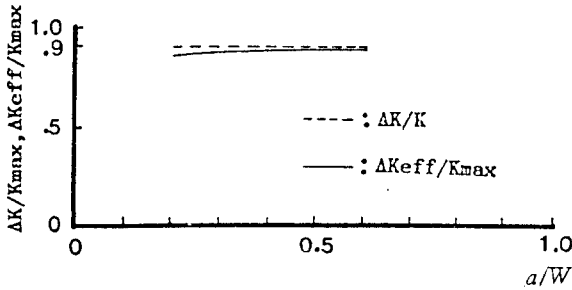


Fig.12 Changes in Residual Stress Intensity Factor of HAZ Specimen

서 ΔK 와 거의 같게 된다. 즉, ΔK 와 ΔK_{eff} 의 차만큼 균열성장이 지연된다고 생각된다. 본 실험에서는 균열길이를 $a/W=0.6$ 까지 측정하였다. Weld Metal에서는 $0.2 < a/W < 0.5$ 에서 $K_{min} + K_{res} < 0$ 이기때문에, 식(5)를 썼고, $a/W > 0.5$ 에서는 $K_{min} + K_{res} > 0$ 이기때문에, 식(4)를 적용하였다. HAZ시편에서는 $0.2 < a/W < 0.3$ 에서 $K_{min} + K_{res} < 0$ 이기때문에, 식(5)를 썼고, $a/W > 0.3$ 에서는 $K_{min} + K_{res} > 0$ 이기때문에, 식(4)를 적용하였다.

Fig. 13과 Fig. 14는 균열성장에 따른 R_{eff} 값의 변화를 Plot한 것이다. 본 실험에서 작용 하중 (Applied Load)의 R값을 0.1로 하였었다. 그러나 잔류응력의 영향으로, Weld Metal에서는 0.

Fig. 15는 균열성장속도(da/dN)와 응력확대계수변동범위(ΔK)와의 관계를 Plot한 것이며, 균열성장초기에는 Parent Metal, Weld Metal, HAZ시 $2 < a/W < 0.5$ 에서 $K_{min} + K_{res} < 0$ 이므로, $R_{eff} = 0$ 이 되고, $a/W > 0.5$ 일 때는 $K_{min} + K_{res} > 0$ 이므로, $a/W > 0.5$ 에서는 $R_{eff} > 0$ 이 될 것이다. HAZ시편에서는, $0.2 < a/W < 0.3$ 에서 $K_{min} + K_{res} < 0$ 이므로 $R=0$ 이 되고, $a/W > 0.3$ 일 때는 $K_{min} + K_{res} > 0$ 이므로 $a/W > 0.3$ 에서는 $R_{eff} > 0$ 이 될 것이다.

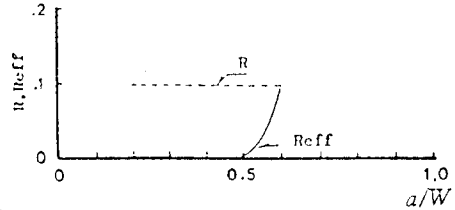


Fig.13 Changes in R Values of Weld Metal Specimen

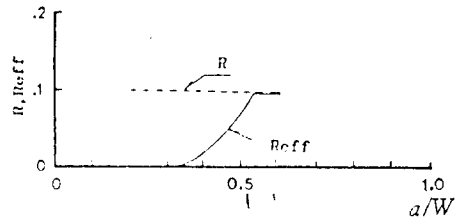


Fig.14 Changes in R Values of HAZ Specimen

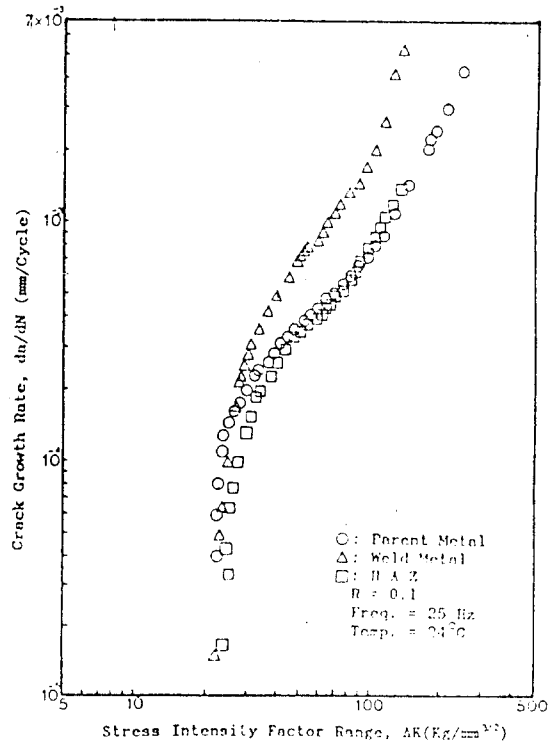


Fig.15 da/dN - ΔK Relation

편에서의 da/dN 은 거의 같으나, $28Kg/mm^{3/2} < \Delta K < 90Kg/mm^{3/2}$ 의 범위에서는, Weld Metal에서의 da/dN 이 가장크고, 다음이 Parent Metal HAZ시편에서의 da/dN 순으로 나타났다. 각 시편에서의 피로균열안정성장구간에서는, Power Law인 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 관계를 잘 만족시켰으며, 이때의 C와 m값은 Table 6과 같다.

Table 6. Dependence of C, m

Specimen	C	m
Parent Metal	5.2×10^{-71}	1.8
Weld Metal	4.6×10^{-71}	2.2
H A Z	9.2×10^{-71}	1.8

여기서, 균열성장거동에 미치는 잔류응력의 영향을 알아보면, Fig. 16은 Crack을 넣지않은 시편(Uncracked Specimen)에서의 초기잔류응력을 감안한 수정응력확대계수변동범위, 즉, $\Delta K_{eff} = \Delta K_{app} + K_{res}$ 를 써서 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 관계를 Plot한 것이다. Fig. 15와 비교하여 볼 때, 균열성장초기에 Weld Metal과 HAZ에서 ΔK 와 ΔK_{eff} 의 차가 약 $3 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 이며, 이는 압축잔류응력으로 인하여, ΔK 가 약 $3 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 정도 증가하여 거동함을 알 수 있으며, 여기서 ΔK_{th} 도 증가함을 추정할 수 있다.

Fig. 17은 피로Crack전과중에 측정된 Crack-Tip부근의 재분포잔류응력에 의한 K_{res} 와, 작용응력에 의한 K_{app} 를 중첩하여 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 관계를 Plot한 것이다. 낮은 ΔK 영역에서 Fig. 15와 비교하여 볼 때, Weld Metal에서는 같은 da/dN 에 해당하는 ΔK 와 ΔK_{eff} 의 차가 약 $12 \text{ Kg/mm}^{3/2}$

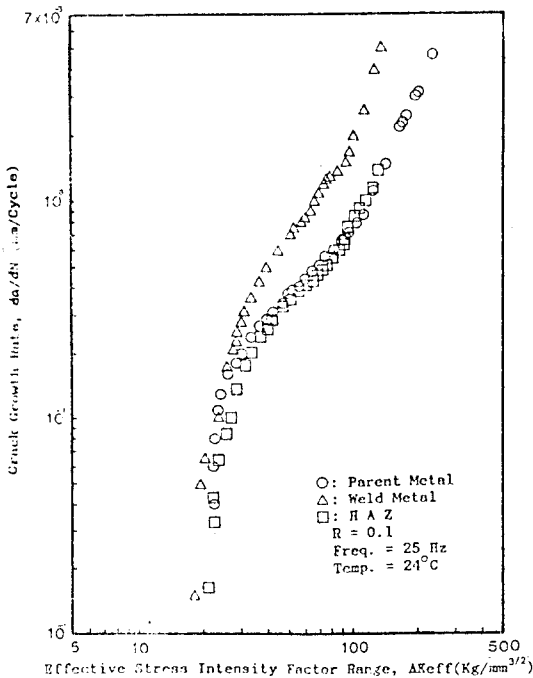


Fig.16 $da/dN - \Delta K_{eff}$ Relation (For Superposition of Initial Welding Residual Stresses)

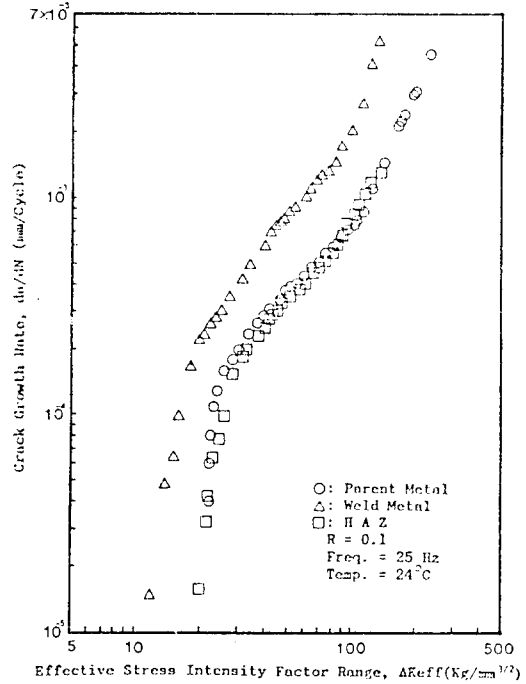


Fig.17 $da/dN - \Delta K_{eff}$ Relation (For Superposition of Redistributed Welding Residual Stresses)

으로서, 초기잔류응력에 의하여 해석한 때 보다도 4배정도 더 크며, 이는 재분포잔류응력으로 해석한 때가, 초기잔류응력으로 해석한 때보다 압축잔류응력의 영향이 더 크게 평가됨을 알 수 있다. HAZ에서는 그 차이가 약 $3 \text{ Kg/mm}^{3/2}$ 으로써, 초기잔류응력에 의하여 해석한 때와 같았다. 특히, HAZ시편에서는 재분포잔류응력에 의한 해석과, 초기잔류응력에 의한 해석의 결과가 거의 같으며, 또한, 두 해석방법에 의한 균열성장거동은 Parent Metal과 거의 같다.

5. 결 론

이상의 고찰로 부터 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 압축잔류응력의 영향으로, ΔK_{eff} 는 계속되는 반복하중에 의하여 ΔK_{app} 로 증가하며, 증가된 폭은 Weld Metal이 HAZ보다 크다.
- (2) 재분포잔류응력으로 해석한 결과, 균열이 성장함에 따라 Crack-Tip근방에는 항상 압축잔류응력이 분포한다.
- (3) Weld Metal에서, 낮은 ΔK 에서의 압축잔류

응력의 영향은 재분포잔류응력으로 해석한 때가, 초기잔류응력으로 해석한 때보다 약 4배 정도 더 크게 나타났다.

(4) HAZ에서는 두 해석방법에 의한 결과가 거의 같다. 따라서 초기잔류응력으로 해석하여 용접구조물의 수명이나, 안전검사시기를 설정할 수 있다.

(5) HAZ에서, 두 해석방법에 의한 피로균열성장거동은 $\Delta K > 22 \text{Kg/mm}^{3/2}$ 인 범위에서 Parent Metal과 거의 같다.

References

- 1) 福田, 渡, 堀川, “疲労き裂傳ばにおよぼす溶接残留應力の影響”, 日本機械學會論文集(A編), 47卷, 416號, 1981, pp.384~389.
- 2) 黒崎, 福田, 堀川, “溶接残留應力場中での疲労き裂進展”, 日本機械學會論文集(A編), 49卷, 441號, 1983, pp.564~570.
- 3) J.M.Bloom, “An Analytical Assessment of the Effects of Residual Stresses and Fracture Properties on Service Performance of Various Weld Repair Processes”, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.103, 1981, pp.373~379.
- 4) H.S.Reemsnyder, “Development and Application of Fatigue Data for Structural Steel Weldment”, ASTM STP 648, 1978, pp.3~21.
- 5) 橋内良雄, “SUS304 鋼およびA533B鋼の溶接継手における疲労き裂傳ば舉動”, 材料, 32卷, 363號, 1987, pp.1376~1382
- 6) G.Glinka, “Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads”, ASTM STP 677, 1978, pp.198~214.
- 7) 橋内良雄, “突合せ溶接材および母材の疲労き裂田ば舉動”, 日本機械學會論文集(A編), 47卷, 419號, 1981, pp.677~688.
- 8) D.V.Nelson, “Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation”, ASTM STP 776, 1982, pp.172~194.
- 9) B.M.Kapadia, “Influence of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation in Electroslag”, ASTM STP 648, 1978, pp.244~260.
- 10) 橋内良雄 外5, STS 42鋼溶接継手の疲労き裂田ば舉動に及ぼす残留應力の影響”, 材料, 36卷, 409號, 1978, pp.1077~1083.
- 11) 小林英男, 轟章, “コンパクト試験片の疲労き裂進展特性に及ぼす溶接残留應力の影響評價”, 材料, 35卷, 391號, 1984, pp.401~406.
- 12) K.Masubuchi, “Analysis of Welded Structures”, International series on Materials Science and technology, Vol.33, 1980, pp.466~468.
- 13) 荒居善雄 外3, 溶接残留應力測定への音彈性法の適用と疲労き裂進展の評価”, 日本機械學會論文集(A編), 53卷, 492號, 1987, pp.1574~1580.
- 14) 本田和男, 鳥居太始之, 戸井詔彦, “熱残留應力發生場にぬるき裂力らの疲労き裂進展舉動”, 材料, 33卷, 375號, 1984, pp.1513~1519.
- 15) 橋内良雄, “軟鋼突合せ溶接継手の疲労き裂傳ば舉動力に及ぼす試験片寸法および形状の影響”, 材料, 32卷, 354號, 1983, pp.304~309.
- 16) 최용식, 정영석, “용접잔류응력장 중에서의 Al-Alloy용접재의 피로균열성장거동(I)”, 성균관대학교 논문집 과학기술편, Vol. 38, No. 2, 1978, pp.297-305.
- 17) P.C.Paris and F.Erdoğan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Trans. of ASTM, 1963, pp.528~534.
- 18) A.P.Parker, “Stress Intensity Factor, Crack Profile, and Fatigue Crack Growth Rate in Residual Stress Fields”, ASTM STP 776, 1982, pp.13~31.
- 19) H.Tada, P.Paris, and G.Irwin, “Stress Analysis of Cracks Handbook”, Del Research Corporation Hellertown, Pennsylvania, 1973.
- 20) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate above $10 \text{m}^{-8}/\text{Cycle}$, In'1985 Annual Book of ASTM Standard', E647-83, Philadelphia, 1985, pp.765~783.