기 술 논 문

압연 및 용접방향이 같은 맞대기 용접강판의 하중방향에 따른 피로균열 진전특성

이 용 복* · 김 성 엽** · 오 병 덕**

*홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과
**홍익대학교 대학원 기계공학과

Characteristics of Fatigue Crack Propagations with Respect to Loading Directions in Butt-Welded Steel Plates with the Same Direction of Rolling and Welding Bead

Yong-Bok Lee*, Sung-Yeup Kim** and Byung-Duck Oh**

*Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Hongik University Graduate School, Seoul 121-791, Korea

Abstract

Most of the welding steel plate structures have complicated mechanical problems such as rolling directional characteristics and residual stresses caused by manufacturing process. For the enhancement of reliability and safety in those structures, therefore, a systematic investigation is required. SS400 steel plate used for common structures was selected and welded by FCAW butt-welding process for this study, and then it was studied experimently about characteristics of fatigue crack propagations with respect to rolling direction and welding residual stress of welded steel plates. When the angles between rolling direction and tensile loading direction in base material are increased, their ultimate strength not show a significant difference, but yielding strength are increased and elongations are decreased uniformly. It is also shown that fatigue crack growth rate can be increased from those results. When the angles between welding bead direction and loading direction in welded material are increase, fatigue crack growth rate of them are decreased and influenced uniformly according to the conditions of residual stress distribution. In these results, it is shown that the welded steel plate structures are needed to harmonize distributed welding residual stress, rolling direction and loading direction for the improvement of safety and endurance in manufacture of their structures.

* Corresponding author : yblee@wow.hongik.ac.kr (Received September 14, 2005)

Key Words : Rolling direction, Loading direction, Welding residual stress, Fatigue crack propagation, Base material, Welded material, Ultimate strength, Yielding strength, Elongation, Fatigue crack growth rate

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 모든 기계나 산업구조물들의 설계상 더 안전하고, 경제적인 설계를 위하여 정밀성 기능성, 효율성 및 내구성 향상에 대한 필요성이 증대되고 있다. 대부분의 강구조물은 제조과정에서 압연 인발 및 압출 등의 공정을 거치게 되고, 이들 과정에 의하여 제조된 강판재와 형강재를 사용하여 나사결합 리벳결합 및 용접의 가공과정을 통하여 제작되고 있다. 이러한 과정들 중에서 압연된 강판재를 용접하여 제작하는 방법이 많은 비중을 차지하고 있다[2]. 이들 구조물 재료의 제조과정 및 가공과정에서 발생하는 결함의 존재여부는 물론 재료의 압연방향과 용접 잔류응력을 정확하게 파악하고, 이들을 고려하여 구조물을 설계하는 것은 안전상 매우 필요하다[3-5]. 따라서 이러한 제조과정과 가공에 대한 개선방법이 꾸준히 진행되고 있으나, 사용조건이 더욱 가혹해지고, 산업재해 문제가 크

Copyright (C) 2006 NuriMedia Co., Ltd.

게 대두되면서 설계상 안전성 및 신뢰성 확보에 어려움을 겪고 있다[6-7]. 재료의 제조과정으로부터 유발되는 압연에 의한 방향성이 기계적 성질과 피로특성에 미치는 영향, 용접으로 인한 국부적인 잔류응력의 존재 외부 작용하중의 크기 및 방향과 관련한 피로균열 특성 등 복잡한 역학적 관계로 특히 용접구조물상의 안전설계를 위하여는 종합적이고, 체계적인 연구가 필요하다[8].

이와 관련하여 본 연구에서는 먼저 압연강판재의 압연방향에 따른 기계적 특성과 피로특성을 파악하고, 이를 기초로 하여 용접재료에서의 하중방향에 대한 용접비드 방향 및 압연방향을 같이 하여 용접 잔류응력이 피로균열 진전에 끼치는 영향을 실험적으로 규명하고, 효율적이며 안전한 용접구조물 설계방법에 대하여 고찰해보고자 하였다.

2. 실 험

2.1 시험편의 준비

본 연구를 위하여 Table 1의 화학성분을 갖는 일반 강구조물 재료로 많이 사용하고 있는 3mm 두께의 열간 압연강재 SS400을 선택하였고, 인장시험을 위하여 하중방향에 대하여 압연방향을 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°가 되도록 채취하였다. 그리고 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 KS 5호 규격에 따라 0.01mm 이내의 오차범위로 와이어 절단(wire cutting)으로 가공하였다. 모재 피로균열 시험편은 Fig. 2의 규격으로 인장시험편과 같이 하중방향에 대하여 압연방향 각도를 주어 와이어 절단가공하였다. 또한, 용접재의 피로균열 시험편은 Fig. 3에 나타낸 바와 같으며, 강판의 압연방향과 같은 방향으로 용접비드 방향을 잡고, 용접으로 인한 재료의 과대변형을 막기 위하여 용접재료를 지그로 고정시킨 후 앞 뒤 양쪽을 FCAW(flux cored arc welding) 법으로 맞대기 용접하였다. 용접조건은 Table 2와 같으며, 230A의 전류와 26V의 전압으로 12L/min의 송출유량의 혼합가스 분위기에서 40cm/min의 속도로 용접을 수행하였다.

Table 1 Chemical compositions of specimen

Material	Chemical compositions (wt.%)				
	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.13	0.14	0.70	0.003	0.045

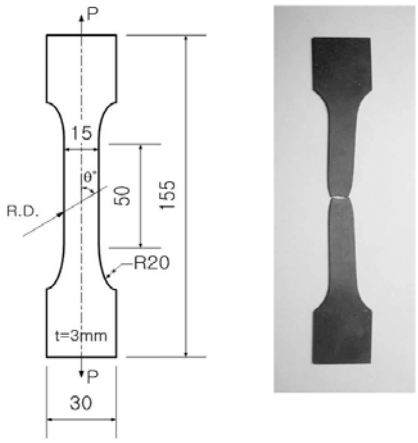

Fig. 1 Configuration of tensile specimen

Table 2 FCAW condition for fatigue specimen

Voltage (V)	Electric Current (A)	Electrode (Dia.mm)	Gas Flux (L/min)	Velocity (cm/min)
26	230	1	12	40

2.2 시험 방법

모재 시험편의 압연방향에 따른 기계적 특성을 알아보기 위하여 Fig. 4에 나타낸 10톤 용량의 재료시험기(UTM, MODEL T48-0)를 사용하였고, Fig. 1의 시

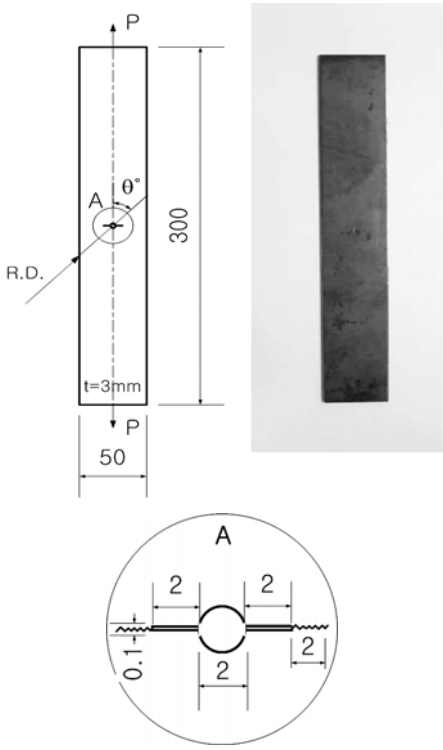

Fig. 2 Configuration of base metal specimen for fatigue test

Copyright (C) 2006 NuriMedia Co., Ltd.

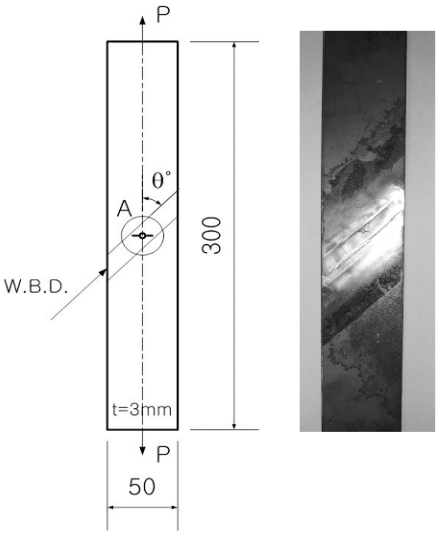

Fig. 3 Configuration of welded steel plate specimen for fatigue test

Fig. 4 Apparatus for tensile test(UTM: MODEL T48-0)

험편 규격에 따라 하중방향에 대한 압연방향 각도가 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°로 구분하여 가공한 4편씩의 시험편을 표점길이 50mm로 표시하여 준정적하에 인장시험을 하였고, 공칭응력 변형률 선도를 구하였다. 피로균열 진전시험을 위하여 Fig. 5에 나타낸 5톤 용량의 피로시험기(Instron 8511)를 사용하였고, 앞에서 설명한 바와 같이 준비한 시험편을 하중방향에 대한 압연방향별로 3편씩 사용하여 Table 3에 나타낸 바와 같이 응력비 R=0, 최대하중 24.5kN, 반복수 10Hz로 피로균열 진전시험을 하였다. 이 때 일정하중 싸이클마다 광학현미경으로 1/100mm의 정확도로 균열진전 길이를 측정하였다. 용접재에 대한 시험은 먼저 자기식 응력측정기로 용접부의 잔류응력을 여러번 측정하여 타

Fig. 5 Apparatus for fatigue test(Instron 8511)

Table 3 Conditions of fatigue test

Frequency of loading (Hz)	Maximum load (kN)	Minimum load (kN)	Stress ratio $R=\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$	Temperature (℃)
10	24.5	0	0	15

당성 있는 잔류응력 분포도를 Terada 식과 결부시켜 구하고, 모재의 피로균열 진전 시험편과 동일조건 하에서 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재의 압연방향에 따른 기계적 성질 및 피로특성

모재 시험편 재료의 압연방향 각도에 따른 인장시험 결과를 종합적으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 인장강도는 하중방향에 대한 재료의 압연방향이 45° 및 90°의 경우가 0°, 30°, 60°의 경우보다 6~7%의 높은 값을 나타나고 있으나 전반적으로 큰 차이는 없고, 항복강도는 전체적으로 18~25%의 높이 차이로 인장강도의 경우보다 큰 차이를 보이고 있으며, 45°의 경우 약간의 차이를 제외하고, 하중방향과 압연방향 각도가 클수록 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그리고 연신률은 압연방향 각도가 클수록 낮게 나오는 경향을 보이고 있는데, 이 결과는 항복강도가 높을수록 연신률은 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 피로균열 진전특성은 Fig. 7과 같으며, Paris law[9]로부터 구한 재료상수 값을 나타내면 Table 4와 같다. 재료의 압연방향 각도가 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°로 증가함에 따라 피로균

Copyright (C) 2006 NuriMedia Co., Ltd.

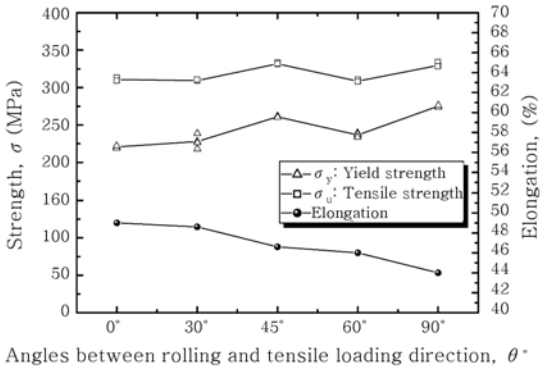

Fig. 6 σ_y, σ_u and elongation vs. angles between rolling and tensile loading direction

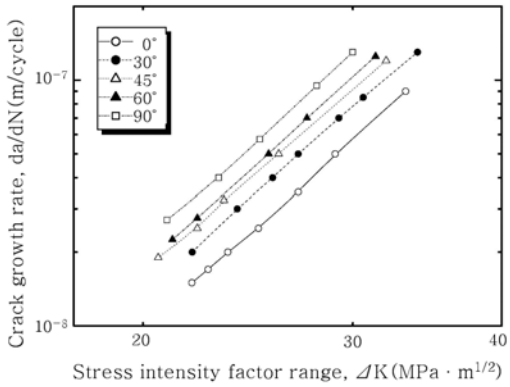

Fig. 7 Crack growth rate vs. stress intensity factor range

Table 4 Material constants by Paris law

	C	m
0°	2×10^{-14}	4.3575
30°	3×10^{-14}	4.2985
45°	5×10^{-14}	4.2148
60°	3×10^{-14}	4.3807
90°	2×10^{-14}	4.5529

열 진전속도는 높게 나타나고 있음을 알 수 있고, 이와 같은 결과는 재료의 항복강도가 높을수록, 그리고 연신률이 낮을수록 피로균열 진전속도는 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 또한, 인장강도는 압연방향에 별로 영향을 받지 않으므로, 동일재료에서의 피로균열 진전속도는 인장강도와 관련지을 수 없음을 알 수 있다. 따라서 동일재료에서의 압연방향에 따른 피로균열 진전속도는 인장강도와는 거의 관계가 없고, 항복강도의 증가 및 연신률의 감소에 따라 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

3.2 용접재의 피로균열 진전특성

용접시험편의 잔류응력 분포는 Fig. 8과 같고, 용접

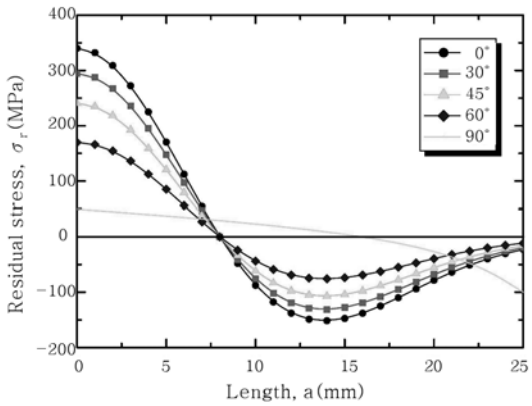

Fig. 8 Distribution of residual stress in weldments

비드 방향이 하중방향(시험편의 길이방향)과 일치(Θ=0°)하는 경우 높은 잔류응력 분포로부터 두 방향 사이의 각도가 커질수록 하중방향에 대한 잔류응력 분포는 낮게 나타나는데, 이 분포도는 Θ=0°인 경우를 기준으로 Terada의 용접 잔류응력 분포식과 측정값을 결부시켜 나타낸 것이다[10]. 용접재의 피로균열 진전은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 CCT(center cracked test specimen) 시험편이므로 재료 중앙으로부터 양쪽으로 균열이 진전하도록 되어 있고, 용접 잔류응력의 영향을 받게 되므로 응력확대계수는

$$K_{res} = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma_r(x)}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx$$

로부터 구할 수 있다. 여기에서

$$\sigma_r(x) = \sigma_o[1 - (\frac{x}{b})^2] e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{b})^2} + \sigma_a$$

이며, σ_o는 용접선 중앙의 최대 인장 잔류응력값이고, b는 용접선 중앙에서 인장 잔류응력으로부터 압축 잔류응력으로 변하는 변곡점까지의 거리, σ_a 는 작용응력이다. 또한 a는 균열길이를 나타낸다. 유효 응력확대계수는

$$\Delta K = (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) = K_{max} - K_{min}$$

이며, 유효 응력비는

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}}$$

따라서, 이들 값을 Forman's equation[11]

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^m}{(1 - R_{eff})K_{cf} - \Delta K}$$

Copyright (C) 2006 NuriMedia Co., Ltd.

에 대입함으로써, 용접재의 피로균열 진전특성을 나타낼 수 있다. 위 식에서 c와 m은 모재시험의 피로시험 결과로부터 얻은 재료상수값으로 Table 4의 값을 취하였고, K_{cf}값은 피로시험시 급속파손 때의 K_I의 임계 값을 대입하였다. 용접시험편에 대한 피로균열 진전시험 결과는 모재 시험편의 피로균열 진전시험 결과를 바탕으로 작용응력과 용접 잔류응력의 중첩에 의한 피로균열 예측선과 함께 하중방향에 대한 용접 및 압연방향 각도에 따라 균열진전 속도를 Fig. 9~Fig. 13에 나타내었다. 용접재 시험편에서의 피로균열 진전속도는 초기 인장 잔류응력 지역에서 모재 시험편의 경우보다 높게 나타나고 균열이 진전됨에 따라 모재의 균열진전 속도와 접근하여 나중에는 같은 균열 진전속도로 나타난다. 이와 같은 경향은 초기에 시험편 중앙부의 높은 인장 잔류응력 영향을 받아 용접 시험편의 피로균열 진전속도가 빠르게 진전하여 점점 균열이 진전되면서 인장 잔류응력이 줄어들어 그 영향이 감소하고, 인장 잔류응력이 끝나는 지역으로부터는 용접 잔류응력 영향을 받지 않기 때문인 것으로 생각된다[2]. 이러한 경향은 하중방향에 대한 용접선 방향의 각도가 다른 모든 시험편에서 동일하게 나타나며, 하중방향에 대한 용접선 각도가 커짐에 따라 균열진전 방향에 분포하는 잔류응력은 감소하여 균열진전 속도에 대한 그 영향은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 결과로부터 용접재에서의 피로균열 진전은 용접 잔류응력 분포에 예민하게 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 따라서 용접에 의한 구조물들의 안전사용 및 안전설계를 위하여 잔류응력의 분포를 정확하게 파악하고 하중방향과 용접방향 그리고 재료의 압연방향을 잘 조화시켜 고려하는 것이 중요하다고 사료된다.

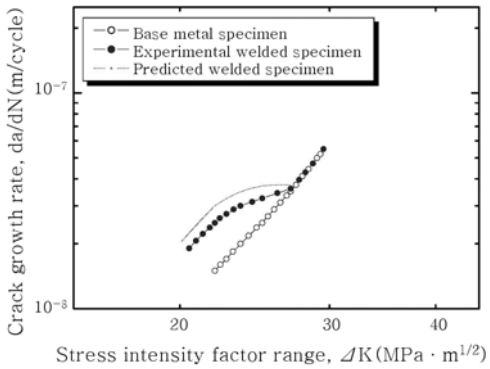

Fig. 9 Crack growth rate, da/dN vs. S.I.F.R. $\Delta K[\Theta=0]$

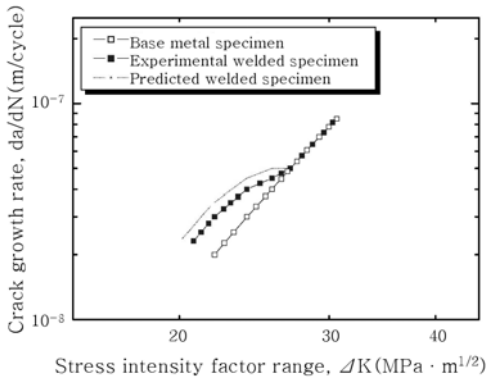

Fig. 10 Crack growth rate, da/dN vs. S.I.F.R. $\Delta K[\Theta=30^\circ]$

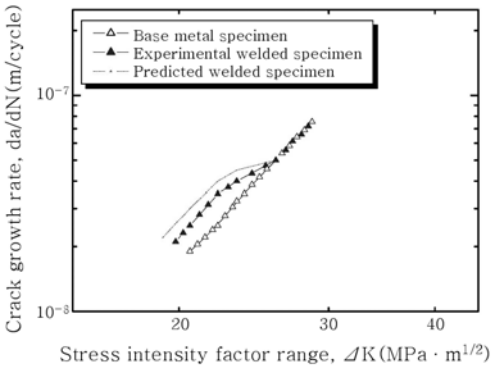

Fig. 11 Crack growth rate, da/dN vs. S.I.F.R. $\Delta K[\Theta=45^\circ]$

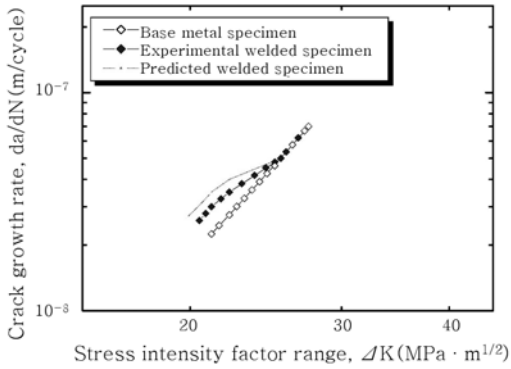

Fig. 12 Crack growth rate, da/dN) vs. S.I.F.R. $\Delta K[\Theta=60^\circ]$

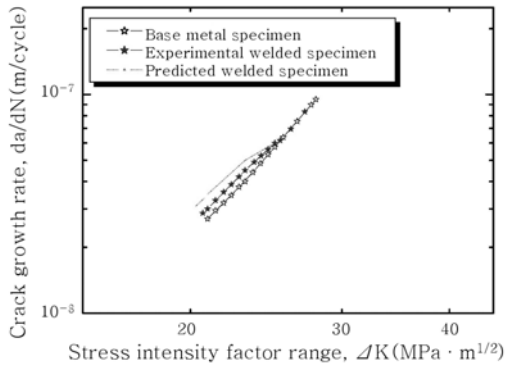

Fig. 13 Crack growth rate, da/dN vs. S.I.F.R. $\Delta K[\Theta=90^\circ]$

Copyright (C) 2006 NuriMedia Co., Ltd.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 강구조물로 많이 사용하는 SS400 강재를 선택하여 구조재료의 압연방향과 용접으로 인한 잔류응력의 영향을 고려하여 피로균열 진전특성을 파악하고, 강용접구조물의 안전설계를 위한 방법에 대하여 실험적으로 고찰해 보고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 하중방향에 대한 재료의 압연방향이 커짐에 따라 항복점은 대체적으로 증가하며, 연신률은 일률적으로 감소하는 경향이 있고, 피로균열 진전속도는 높게 나타나는 경향을 보인다.

2) 용접재에서의 피로균열진전은 전반적으로 용접 잔류응력 분포상태에 따라 일률적이고, 예민하게 영향을 받으며, 하중방향에 대한 용접선 방향이 클수록 잔류응력의 영향은 감소한다.

3) 종합적으로 용접구조물의 안전설계를 위하여는 용접에 의한 잔류응력 분포를 정확하게 파악하고, 하중의 크기와 방향 그리고 재료의 압연방향을 잘 조화시켜 고려하는 것이 중요하다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2004년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. O.V. Green : Trans. of American Society for Steel Treating, 18 (1930), 369
2. G. R. Irwin : Analysis of Stress and Strain near the End of a Crack Traversing a Plates, Trans. ASME, 24 (1957), 361
3. Yong Bok Lee and Byung Duck Oh : Characteristics of Fatigue Crack Propagations with respect to the Angles between Rolling and Tensile Loading Directions of Steel Plates, J. of KSMTE, 14-3 (2005), 74-80 (in Korean)
4. Yong Bok Lee, Chin Sung Chung and Nam Il Cho : A Study on Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Tensile Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment, J. of KSME(A), 20-7 (1996), 2234-2245 (in Korean)
5. Yong Bok Lee, Chin Sung Chung, Ho Kyung Kim, Nam Il Cho and Sang Heup Park : A Study on Fatigue Behavior concidering Effects of Redistributing Compressive Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment, J. of KSMTE, 6-2 (1997), 26-33 (in Korean)
6. R.C. Juvinall : Engineering Considerations of Stress Strain and Strength, McGRAW HILL BOOK Co., 1967
7. M. Isida : On the Determination of Stress Intensity Factors for Some Common Structural Problems, Eng. Fracture Mechanics, 2-1 (1930), 61
8. Yong Bok Lee, Nam Il Cho and Kang Eun Park : A Study on Surface Fatigue Crack Behavior of SS400 Weldment, J. of KWS, 14-2 (1996), 124-129 (in Korean)
9. P. Paris and F. Erdogan : A Critical Analysis of Crack Propagation Law, J. of Basic Eng., Trans. of ASME, 8 (1963), 528-534
10. Sang Chul Kim, Yong Bok Lee : The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region, J. of the Korean Welding Society, 5-1 (1987), 42-56 (in Korean)
11. R. G. Forman and V.E. Kearney : Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures, J. of Basic Eng., Trans. of ASME, 9 (1967), 459-46
12. Yong Bok Lee, Chin Sung Chung, Young Keun Park and Ho Kyung Kim : Effect of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behavior of SS330 Weldment, Int. J. Fatigue, 20-8 (1998), 565-573

Copyright (C) 2006 NuriMedia Co., Ltd.