

研究論文

# SUS-304강 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향

이 택 순\* · 양 현 태\*\*

## Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth Rate at Welds of SUS-304 Steel

Taik-Soon Lee\* and Hyun-Tae Yang\*\*

**Key Words** : Residual Stress, Fatigue Life, Effective of Stress Ratio, Residual stress Intensity factor, Abrassive Jet Machine

### Abstract

In the weldments, the crack propagation rate is changed due to the residual stress. The crack propagation rate is high in the region with the residual stress. However it shows the same behavior with the base metal in the region that does not include the residual stress.

The fatigue crack growth rate for the material with residual stresses can be predicted more precisely by using the effective stress ratio. The difference between experimental results and prediction results in the initial stage seems to be due to the redistribution of residual stresses and microstructural change

### 1. 서 론

용접은 근대 과학기술의 발달과 더불어 공업기술분야에서 중요한 역할을 담당하는 주목할만한 기술이며, 그 응용범위는 현재 방위산업, 교량, 조선, 원자력 발전, 석유화학, 항공기 등 열거할

수 없을 정도로 광범위하고 다양하다. 용접기술이 더욱 다양화·전문화되어 작업공정시간과 비용이 아주 절감되고, 접합강도와 효율성이 더욱 높아 그 이용이 날로 증가하고 있는 추세이다. 하지만 이러한 용접구조물에도 여러 가지 결함이 존재한다. 기포, 슬래그 혼입, 언더컷, 피트, 균열 등 이러한 결함들로부터 균열이 진전되어 최종파단에

\* 1997년 6월 19일 접수

\* 정회원, 영남대학교 기계공학과

\*\* 비회원, 영남대학교 기계공학과

이르는 경우가 종종 있다. 또한 용접열로 인하여 국부적으로 팽창·수축 등의 열소성변형이 생긴다. 하지만 구속이나 어떤 힘에 의하여 용접부 주위에 높은 잔류응력이 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 잔류응력과 피로와의 관계에 대하여 여러 분야의 연구자들이 실험적으로 규명해 놓았으나, 그의견이 분분하다. 하지만 중요한 한가지는 용접구조물에는 작은 균열이 존재하며, 그 균열로부터 피로파괴가 일어난다는 것이다. 그러한 이유로 재료 내에 결함이나 균열 등이 존재하는 경우 육안이나 비파괴검사로 파괴특성의 평가가 가능하나 구속조건이나 열영향으로 인하여 발생하는 잔류응력은 아직 정확한 파악과 해석이 미흡한 상태이며, 특히 정확한 잔류응력의 측정기술과 반복하중에 의한 피로균열 진전시 잔류응력의 이완 등은 이들을 해석하는데 많은 어려움을 주고 있다. 하지만 아직도 용접부의 잔류수명이 저하하는 요인을 뚜렷이 밝혀내지는 못하는 실정이며, 이러한 이유로 현재 용접구조물의 안전설계 및 안전성평가를 위하여 각 분야에서 많은 노력을 기울이고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 원자력 발전소 배관 재료 사용되고 있는 SUS-304강 용접부의 잔류응력을 측정하고, 또한 모재와 용접재의 피로시험결과와 해석결과와를 비교함으로써 용접부의 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향에 대하여 파악해

보았다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 원자력 배관용이나, 화학 Plant의 배관 또는 용기, 열 교환기 등에 일반적으로 사용되는 SUS-304이다. 이 재료는 18Cr-8Ni의 오스테나이트계 스테인리스강으로, 가공성과 내식성, 내열성이 좋아 여러 공업분야에 많이 이용된다.

SUS-304의 화학적 조성 및 기계적 특성을 Table-1, 2에 나타내었다. 또한 용접에 이용한 용접봉의 화학적 조성 및 기계적 특성을 Table-3, 4에, 용접조건을 Table-5에 나타내었다. 용접 전 모재에 존재할 수 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 전기로에서 350℃로 가열하여 1시간 정도 유지시킨 다음 공냉시켰다<sup>2)</sup>. 각각의 용접재에서 용접의 균일성을 기하기 위하여 용접에는 자동용접기를 이용하였으며 용접시험편에 충분한 구속을 주기 위하여 용접 후 Jig에 2시간 정도 유지시킨 뒤 Jig를 제거하였다. 용접한 시험편의 크기와 단면을 Fig. 1에 나타내었다.

**Table 1.** Chemical Composition of SUS-304 (Wt. %)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
0.03	0.59	1.57	8.5	0.005	0.005	19.3

**Table 2.** Mechanical Properties of SUS-304

Young's Modulus	Ultimated Strength	Yielding Strength	Elongation
196Gpa	751Mpa	319Mpa	62.2%

**Table 3.** Chemical Compositins of ER-308 (Wt. %)

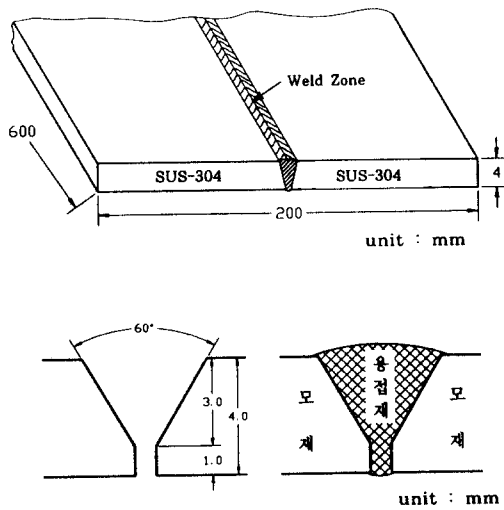
C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
0.06	0.31	2.28	19.8	10.0	0.01	0.02

**Table 4.** Mechanical Properties of ER-308

Ultimated Strength	Yielding Strength	Elongation
549MPa	470mPA	35%

**Table 5.** Welding Condition (Tig Welding)

Voltage	Current	Welding Speed	Flow Gas Rate
25V	153A	9mm/sec	15 l / min



**Fig 1.** Schematic Diagram for one side one run Tig Welding

2.2 잔류응력측정

잔류응력을 측정하는 방법에는 X선 회절법, 초음파법, 자기적 측정법 등 여러 가지 방법이 알려져 있으나, 본 실험에서는 측정이 용이하고 비교적 정확한 값을 얻을 수 있는 Hole Drilling Method(아래 HDM)를 이용하였다.

또한 Hole Drilling시 발생할 수 있는 기계적, 열적 잔류응력을 최소화하기 위하여 AJM (Abrasive Jet Machine)<sup>3)</sup>을 사용하였으며, 잔류응력 측정용 Gage로는 M-M사의 062RK-120, 062UM-120을 이용하였다.

본 시험편에서 잔류응력의 측정은 용접선 중심에서 5mm간격으로 행하였으며, 그 해석은

ASTM E837-92<sup>4)</sup>에 따라 실시하였다. 박판에서의 잔류응력분포는 구멍의 깊이와 지름에 따른 계수  $\bar{a}\bar{b}$ 는 M-M사의 TN-503<sup>5)</sup>를 이용하여 식 (1)에 적용하였다.

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} \mp \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2) + (\epsilon_2 - \epsilon_3)} \dots\dots (1)$$

$$\tan\gamma = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3 - \epsilon_2}{2(\epsilon_1 - \epsilon_3)}$$

여기서,  $\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \bar{a}$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E} \bar{b}$$

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  : 각 gage 에서 구한 변형률  
 E,  $\nu$  : 시험편의 탄성계수 및 포아송비

Terada<sup>6)</sup>는 무한평판의 맞대기 용접에서 발생하는 잔류응력의 분포를 아래와 같은 관계식(식(2))으로 설명하고 있다.

$$\sigma_{res}(x) = \sigma_0 \left[ 1 - \left( \frac{x}{b} \right)^2 \right] \text{Exp} \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{x}{b} \right)^2 \right\} \dots\dots (2)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 시편에 존재하는 최대잔류응력이며, b는 잔류응력 중 인장잔류응력 만의 폭이다.

2.3 피로 시험

피로시험에는 유압식 만능재료시험기 (SHIMADZU : EFD-ED10-20L)를 이용하였으며, 최하하중을 6,000kgf, 최상하중을 600kgf(응력비

0.1)로 하였고, 실온에서 정현파를 이용하여 진동수를 10Hz로 일정하게 하였다. 균열 길이 측정에는 20배 이동식 현미경을 이용하여 da는 10mm를 초과하지않게 하였다. 실험조건을 Table-6에 상세하게 나타내었다. 피로시험에 사용한 시험편의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 6. Experimental Condition

Pmax (kgf)	Pmin (kgf)	Test Freq.	Stress Ratio	Control Mode	Wave Form
6,000	600	10	0.1	Load	Sine

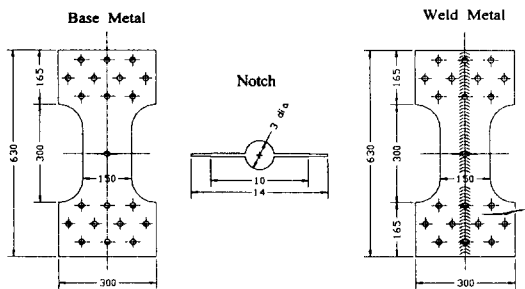


Fig 2. Center Notched Specimens for Fatigue

Glinka<sup>7)</sup>는 이론적 해석에서 외부 작용응력에 의한 응력확대계수, K를 식(3)과 같이 나타내었으며, 잔류응력에 의한 응력확대계수, Kres를 식(4)와 같이 나타내었다. 유효응력확대계수는 이 두 식을 중첩함으로써 얻어진다(식(5)).

$$K = \sigma \sqrt{aY} = \sigma \sqrt{a} [1.77 + 0.227(\alpha) - 0.51(\alpha)^2 + 2.7(\alpha)^3] \dots\dots (3)$$

$$K_{res} = \int_a^{-a} \sigma_{res}(x) \left[ \frac{2 \sin \left\{ \frac{\pi(a+x)}{W} \right\}}{W \sin \frac{2\pi a}{W} \sin \frac{\pi(a-x)}{w}} \right]^{1/2} dx \dots\dots (4)$$

$$K_{eff} = K + K_{res} \dots\dots (5)$$

여기서, a는 (2a/W)이며, a는 균열길이의 반이며, W는 시험편의 폭이다. x는 판 중심으로부터의 거리이며,  $\sigma_{res}(x)$ 는 잔류응력분포(식 2 참조)이다.

여기서, 피로균열성장률거동을 해석하기 위하여 유효응력비를 이용한다.

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \dots\dots (6)$$

$$R_{eff, 1} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{res}}{\sigma_{max} + \sigma_{res}} \dots\dots (7)$$

$$R_{eff, 2} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{res}}{\sigma_{max} + \sigma_{res}} \dots\dots (8)$$

유효응력비에서의 잔류응력확대계수가 식(4)와 같이 정의되므로 식(6)은 식(7), 식(8)과 같이 다르게 정의된다. 이 두가지에 대하여 해석해 볼 필요가 있을 것 같다. 이 유효응력비(Reff, 1, Reff, 2)를 이용하여 식(9) (Forman 식)에 적용하여 피로균열성장 거동을 예측해 보았다. 그리고 그 결과를 용접재의 시험결과와 비교, 분석해 보았다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{A (\Delta K)^n}{(1 - R_{eff}) K_C - \Delta K} \dots\dots (9)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

HDM을 이용하여 잔류응력의 분포를 측정할 결과 용접부선단에서 최대값인 61MPa의 값을 나타내었다. 인장 잔류응력은 용접선 중심으로부터 22mm까지 분포하였으며, 압축잔류응력은 22~40mm사이에 분포(최소값:-12MPa)하였다. Fig. 3에 HDM을 이용한 잔류응력 실험결과와 Terada 식에 의한 결과를 나타내었다.

피로시험결과, 모재와 용접재의 피로균열 성장 거동을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 용접재가 모재보다 약 2배정도 빠른 피로파괴를 보였다.

Fig. 5에서는 모재와 용접재의 피로균열 성장률 거동을 나타내고 있다. 여기서 용접재는 초기에 모재보다 빠른 균열성장을 보이지만 어느정도 균열이 진전하면 모재와 같은 균열 성장 속도를 보인다. 모재와 같은 균열 성장속도를 보이는 부분을 알아보기 위하여 Fig. 6에 균열진전에 따른 균열성장속도에 대하여 도시하였다. Fig. 6에서 영역 I은 시험편 중심에서부터 약41~42mm 정도의 지점으

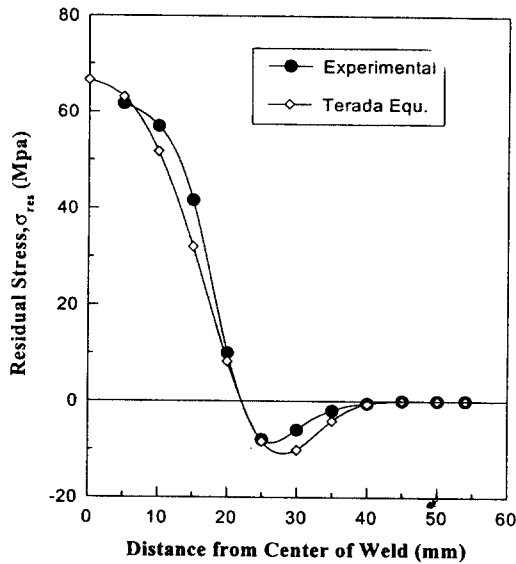


Fig 3. Distribution of Residual Stress

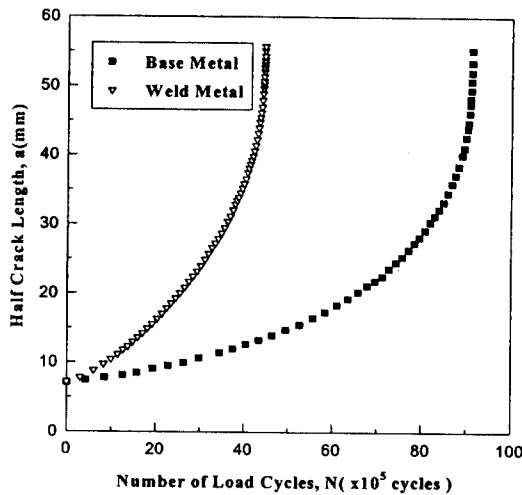


Fig 4. Fatigue Crack Growth Behavior

로 Fig. 3에서 보여지듯이 잔류응력이 분포하는 영역으로 나타난다. 즉 잔류응력으로 인하여 피로균열진전속도가 빨라졌다고 볼 수 있다.

그리하여, 잔류응력의 영향을 분석하기 위하여 유효응력비를 Forman 식에 적용하였다. 우선 실험에 의한 잔류응력분포와 Terada 식에 의한 분포

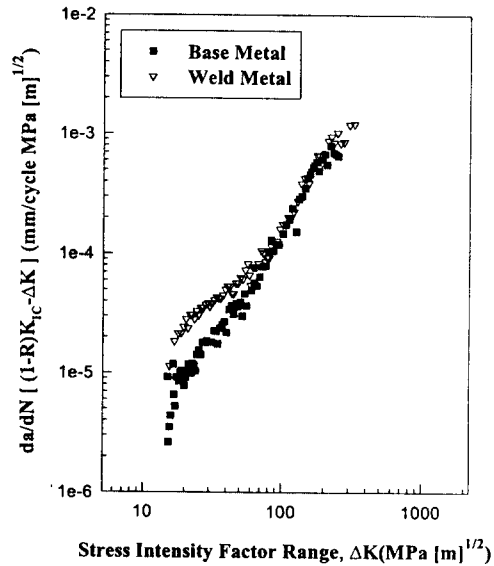


Fig 5. Fatigue Crack Growth Rate Behavior

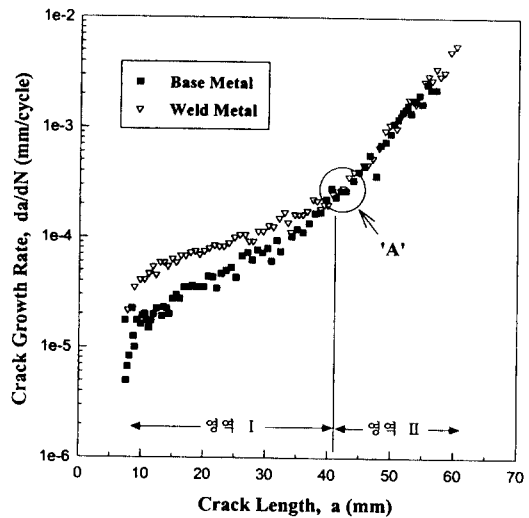


Fig 6. Fatigue Crack Growth Rate for Crack Length

가 거의 같이 나타났으므로 잔류응력확대계수 ( $K_{res}$ ) (식 (4))를 구하기 위하여 Terada 식(식 (2))을 이용하였다. 외부하중에 의한 응력확대계수와 잔류응력에 의한 유효응력확대계수(식 (5))를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 8에는  $K$ 와  $K_{res}$ 값을 중첩하여 구한 유효응

력비 ( $R_{eff,1}$ )와 작용응력과 잔류응력의 중첩으로써 구한 유효응력비 ( $R_{eff,2}$ )를 도출하였다.

Fig. 9에 모재와 용접재의 시험결과를 나타내었으며, 또한 모재의 피로균열성장률 곡선에 유효응력비 ( $R_{eff,1}$ ,  $R_{eff,2}$ )를 Forman 식에 적용하여 해석한 결과를 나타내었다. Fig. 9에서 보여지듯이 용접재의 균열성장률거동과 유효응력비 (1) ( $R_{eff,1}$ )을 적용한 결과가 거의 같음을 볼 수 있다. 또한 유효응

력비 (2) ( $R_{eff,2}$ )를 이용한 경우는 용접재의 결과와 많은 차이를 많이 보이고 있다. 유효응력비 (1) ( $R_{eff,1}$ )을 사용하여 구한 결과에서 초기에 약간의 차이를 보이는 이유는 용접시험편이 모재와는 다른 미세구조를 포함하고 있기 때문으로 사료된다. 또한 그것과 더불어 잔류응력의 재분포에 의한 영향으로 사료된다.

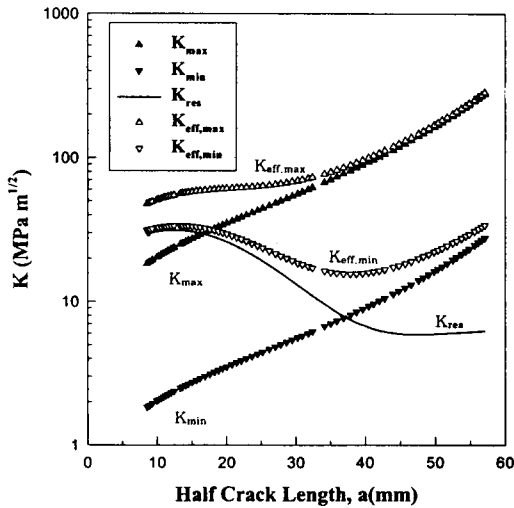


Fig 7. Stress Intensity Factor

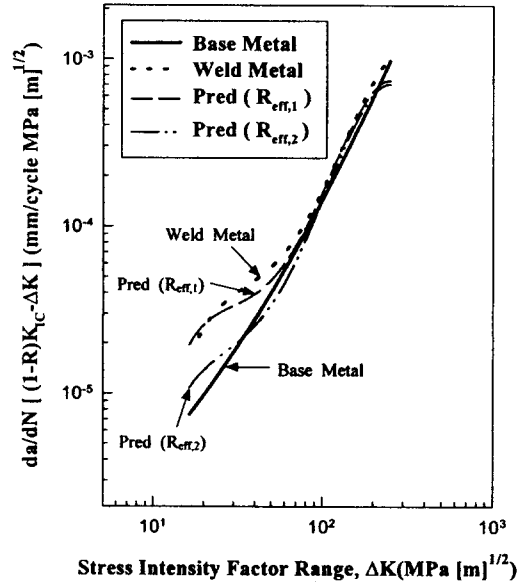


Fig 9. Fatigue Crack Growth Behavior

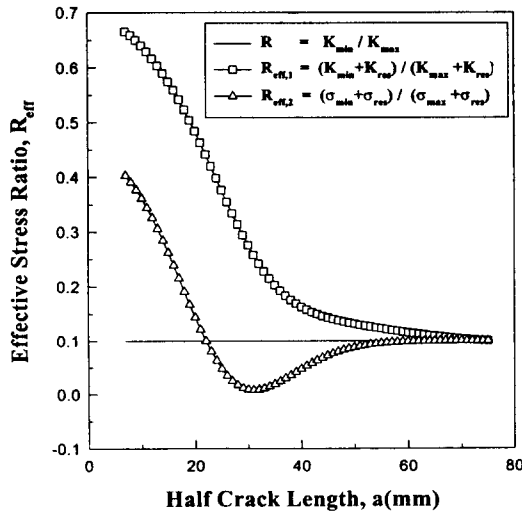


Fig 8. Effective Stress Ratio

#### 4. 결 론

본 연구에서는 구조물에서의 용접이 잔류응력을 발생시는데, 발생된 잔류응력이 피로균열진전에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

SUS-304강을 이용하여 용접재에서 인장·압축 잔류응력이 피로균열진전속도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 잔류응력에 의한 유효응력비의 영향을 고려한 피로균열진전속도 예상치와 실험결과를 비교하여 보았다. 이에 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 용접재의 피로균열진전 특성은 잔류응력을 내포한 구간에서는 균열진전속도가 빠르다가, 잔류응력이 없는 구간에서는 모재와 같은 거동을 보이고 있다. 즉 잔류응력으로 인하여 피로

균열진전속도가 모재보다 증가한다.

2. 잔류응력확대계수 ( $K_{res}$ ) 값을 응력비에 적용하고, 이 응력비 ( $R_{eff}$ )를 모재에 대한 Forman 식에 적용하여 잔류응력을 가진 재료의 피로균열성장률 거동을 해석하였다. 그 해석결과가 용접재의 균열성장률 거동과 거의 일치하는 결과를 보였다. 즉 잔류응력을 가진 재료의 피로균열진전속도는 유효응력비의 영향을 고려함으로써 그 예측이 가능하다.
3. 인장잔류응력 영역에서의 균열전파속도는 Forman식에 의한 예상치보다 실험치가 초기에 더욱 높게 나타났다. 이것은 잔류응력의 재분포와 미세구조변화에 의한 영향으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME96-C-16)에 의해 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 조창희, 김상태, 권재도, "복합응력장 하의 균

- 열부재에 대한 잔류수명 평가방법 개발", 대한기계학회 추계학술대회, 1996, pp. 138~143
2. 長谷川正義, "스테인리스강 편람", 1992, pp. 427~447
3. 최병길, 박영조, 이택순, 전상운, "AJM을 이용한 HDM에 의한 잔류응력 계측에 관한 연구", 대한용접학회지, Vol. 8, No. 4, 1990, 12, pp. 76~82
4. "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", ASTM Standard E837- 92, Amer. Soc. for Test. and Mat., 1992
5. "Measurement of Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", Tech. Note TN-503-4, Micro-Measurement Group, Inc. Raleigh, NC, 1993
6. 이용복, 조남익, "피로균열이 진전할 때 용접 잔류응력의 재분포와 그 영향", 용접 학회지, 제13권 4호, 1995, pp. 410~416
7. G. Glinka, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments Under Constant and Variable Amplitude Loads", ASTM STP 677, 1979, pp. 198~214
8. J. Woodtli and W. Muster, "Residual Stress Effects in Fatigue Crack Growth", Eng. Frac. Mech., Vol. 24, 1986, pp. 399~412,