

중첩법에 의한 용접잔류응력장에서의 피로크랙전파거동의 고찰

송 삼 홍\*, 김 현\*\*, 배 준 수\*\*\*

The Study of Fatigue Crack Propagation Behavior in the Welding Residual Stress Field by Superposition Method

Sam-Hong Song\*, Hyun Kim\*\*, Joon-Soo Bae\*\*\*

ABSTRACT

This study investigates the crack propagation behavior to examine the effect of welding residual stress by the superposition method.

Especially, as the crack propagation behavior is affected by the applied stress and the stress ratio in compressive residual stress field, it is studied for three cases as follows ; (1)  $K_{min}$  is smaller than  $|K_r|$ , (2)  $K_{min}$  is smaller than  $|K_r|$  in the later stage, (3)  $K_{min}$  is larger than  $|K_r|$ .

The results show that the superposition method is very useful in all the three cases of compressive residual stress field, but is inappropriate in predicting the crack propagation behavior in tensile residual stress field.

Key Words : Residual Stress(잔류응력), Superposition Method(중첩법), Crack Propagation Rate(크랙전파 속도), SEN(Single Edge Notched specimen)

기호설명

- P : 작용하중
- $P_{max}$  : 최대작용하중
- $P_{min}$  : 최소작용하중
- K : 응력확대계수
- $K_{max}$  : 최대응력확대계수
- $K_{min}$  : 최소응력확대계수
- $\Delta K$  : 응력확대계수범위
- $K_r$  : 잔류응력에서의 응력확대계수
- $K_{max}^f$  : 잔류응력의 영향을 고려한 최대응력확대계수
- $K_{min}^f$  : 잔류응력의 영향을 고려한 최소응력확대계수
- $\Delta K_r$  : 잔류응력의 영향을 고려한 응력확대계수범위

$$R : \text{응력비} \left( = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \right)$$

$$R_{eff} : \text{잔류응력의 영향을 고려한 응력비} \\ (= (K_{min} + K_r) / (K_{max} + K_r))$$

1. 서 론

기계나 구조물을 접합하는 방법에는 여러가지가 있지만 그 중 용접이 차지하는 비중은 상당히 높다. 용접이음은 강도가 높고 능률적인 것 등의 여러가지 장점이 있으나 기공이나 수축크랙등이 발생할 가능성이 있고 잔류응력이 발생하는 것 등의 단점을 가지고 있다. 용접시 생기는 잔류응력

\* 고려대학교 기계공학과 교수  
 \*\* 삼성중공업 중장비 사업본부 시험연구팀  
 \*\*\* 고려대학교 대학원 기계공학과

은 이론적으로 용접비드부에서 거의 항복강도 수준으로 응력이 높으므로 기계나 구조물의 수명에 많은 영향을 미친다. 따라서 잔류응력이 피로수명에 미치는 효과를 정확히 파악하여, 이를 재료나 구조물의 설계에 적용하고 사용 수명을 예측하는 일은 대단히 중요한 일이다. 잔류응력의 영향을 살펴보는 방법에는 개구하중의 측정을 통한 것, 중첩에 의한 것 등이 있는데 그 중에서 중첩에 의한 방법을 살펴보기로 한다. 중첩법이란 식(1-1)과 같이 잔류응력장에 의한 응력확대계수에 작용하중에 의한 응력확대계수를 더하여 크랙의 전파거동에 영향을 미치는 응력확대계수를 구하는 방법이다.

$$K = K_{app} + K_r \quad (1-1)$$

여기서,  $K_{app}$  = 작용하중에 의한 응력확대계수,

$K_r$  = 잔류응력에 의한 응력확대계수

중첩법의 장점은 잔류응력의 영향을 살펴보기 쉽고 모재에서 실험한 기존의 데이터를 이용하여 잔류응력을 가진 시편의 피로거동을 예측할 수 있는 것 등이다.

중첩의 방법으로 잔류응력의 영향을 고찰한 Parker<sup>(1)</sup>는 전체적인 재료의 거동이 탄성이라면 중첩을 통하여 피로 크랙전파속도를 예측할 수 있다고 하였다. 또한 크랙이 진전함에 따라 잔류응력이 재분포하더라도 중첩법을 사용할 수 있다고 하였다. Glinka<sup>(2)</sup>는 CCT시편에서 인장잔류응력장에 노치를 내어 실험하였는데, 응력비의 변화를 고려하여 중첩을 사용하여 예측한 값과 실험치가 잘 일치한다고 하였다. 그러나 Nelson<sup>(3)</sup>은 크랙개구하중을 측정하여 계산한 방법과 Glinka의 방법을 비교하고, 중첩에 의한 방법보다는 크랙개구하중을 통한 방법이 더 정확하다고 하였다.

중첩에 대한 기존의 논문들은 잔류응력을 너무 간단히 가정하여 계산하였든지, 작용하중과 응력비의 변화에 따른 잔류응력의 효과를 관찰하기 위해 여러 작용하중을 주어 실험한 것이 적고, 실험치와 계산치를 자세히 비교하여 제시하지 않아 중첩의 정확성을 파악하는데 미흡하다고 생각된다. 그리고 중첩의 방법으로 잔류응력의 영향을 설명할 수 없는 경우에 대해서도 더 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

중첩의 방법은 잔류응력의 효과를 살펴보기 위한 간편한 방법이지만 항상 적용할 수 있는 방법은 아니며, 크랙의 전파에 따른 잔류응력의 재분포로 인해 그 정확성에 있어

서도 논란의 여지가 있다. 잔류응력의 측정시 생기는 오차, 잔류응력을 측정할 시편과 피로시험을 시행한 시편의 잔류응력의 차이, 용접상태의 차이 등으로 중첩의 정확성을 아주 정확히 살펴보는 것은 매우 힘들다. 그러나 잔류응력의 영향을 평가하는데 중첩의 방법은 매우 유용하므로 중첩의 방법을 사용했을 경우 실험치와 예상치의 오차가 어느 정도인지를 살펴보는 것과 중첩의 방법이 성립되지 않는 경우를 살펴보는 것은 중요한 일이라고 생각된다.

본 연구에서는 중첩법에 의해서 잔류응력장에서의 피로 크랙전파거동을 고찰하기 위하여, 압축 및 인장 잔류응력장을 갖는 각각의 경우의 피로크랙전파 특성을 실험, 고찰하려고 한다. 특히 압축잔류응력은 작용하중의 크기와 응력비에 따라 피로크랙전파거동에 영향을 주므로, 우선

- 1)  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 작을 때( $K_{min} + K_r < 0$ )
- 2)  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 작다가 같아질 때
- 3)  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 클 때( $K_{min} + K_r > 0$ ) 등의 구간에서 잔류응력이 피로크랙전파에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

본 실험에서 사용한 재료는 KS D 3503의 규정에 의해 포항제철(주)에서 생산된 탄소함량 0.13%의 일반구조용 압연강재 SS41이다. 이 재료의 화학적 성분은 X선 스펙트라 분석법에 의해 구하였으며, 그 결과는 Table 2-1과 같다. 인장실험과 경도실험을 통해 구한 재료의 기계적 성질은 Table 2-2와 같다. 시험편은 한 쪽 방향으로만 균열이 진전하는 SEN(Single Edge Notched Specimen)시편을 사용하였다.

Table 2-1. Chemical Composition of SS41(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.13	0.25	0.6	0.019	0.010

Table 2-2. Mechanical Properties of SS41 Steel

Yield Stress	297(MPa)
Tensile Stress	393(MPa)
Young's Modulus	198(GPa)
Poisson's Ratio	0.3
Hardness(Hmv)	165

Table 2-3. Welding Condition

	Voltage(v)	Current(A)	Speed(cm/min)
Fore	35	450	35
Back	30	400	35

류응력의 측정에는 Sectioning법을 사용하였으며, 사용한 스트레인 게이지는 5mm, 350.Ω의 일축 게이지이다. 스트레인게이지를 8-10mm 간격으로 나란히 붙인 후 절환 평형기(Switching and balance unit, model 225)와 정적 스트레인미터(Static strain indicator, model 120)에 연결하고 시편을 절단하여 스트레인의 변화량을 측정하여 잔류응력을 계산 하였다. 그 결과는 Fig.2-3이다.

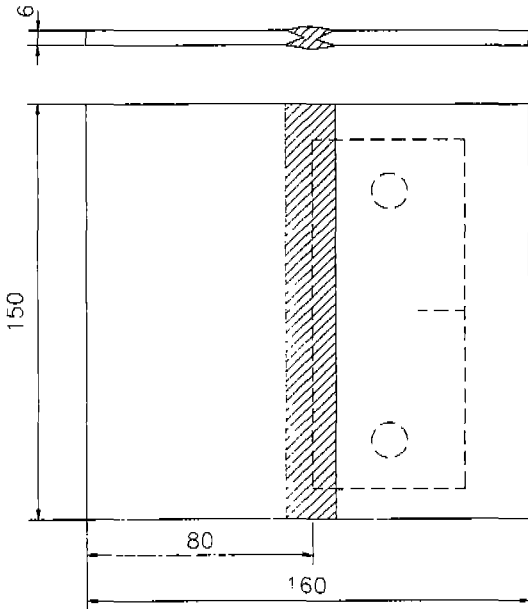


Fig. 2-1 Position of specimen in the welding plates

시험편은 용접잔류응력이 있는 시편과 잔류응력이 없는 모재시편으로 나뉜다. 용접잔류응력장을 갖는 시험편을 제작하기 위하여, Fig.2-1과 같이 압연 방향으로 길이 150mm, 폭 80mm, 두께 6mm인 평판을 I자형 맞대기 이음으로 용접하였다. 용접으로 인해 판재내에 생기는 잔류응력의 크기 및 분포가 재현성을 갖도록 하기 위해, 입열량을 임의로 일정하게 조절할 수 있는 서브머지드 아아크 용접기를 사용하여 구속상태에서 용접하였다. 사용한 용접와이어는 지름 4mm의 EH-14이며, 용접조건은 Table 2-3과 같다. 용접한 판재의 중앙을 절단하여 시편을 Fig.2-2와 같이 가공하였다. 노치의 길이는 14mm이며, 10mm까지는 1mm의 휠 커터를 사용하였고 10mm부터 14mm까지는 0.14mm의 휠 커터를 사용하였다. 최종적으로 시험편은 #100-#1500의 연마지를 사용하여 수작업으로 연마한 후, 0.3μm의 입도를 갖는 산화알루미나로 버핑하였다. 잔

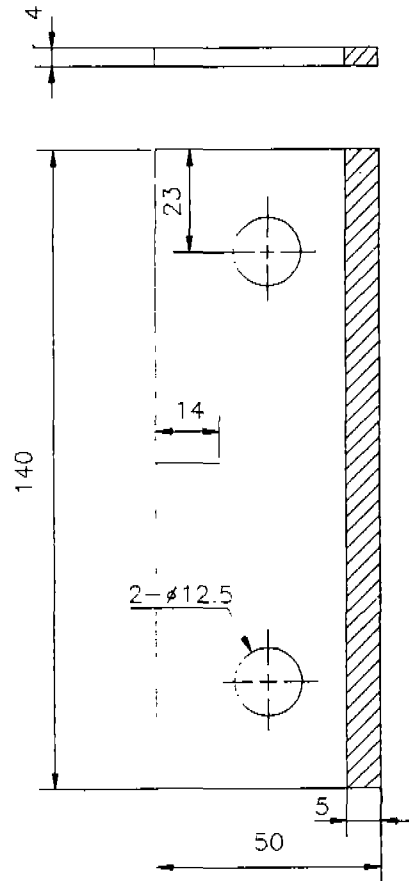


Fig. 2-2 Geometries of fatigue test specimen

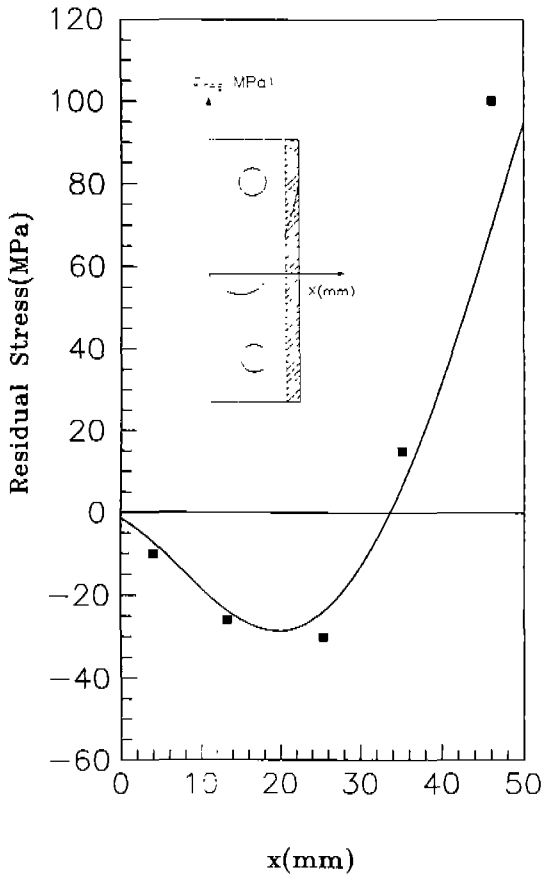


Fig. 2-3 Residual stress distribution

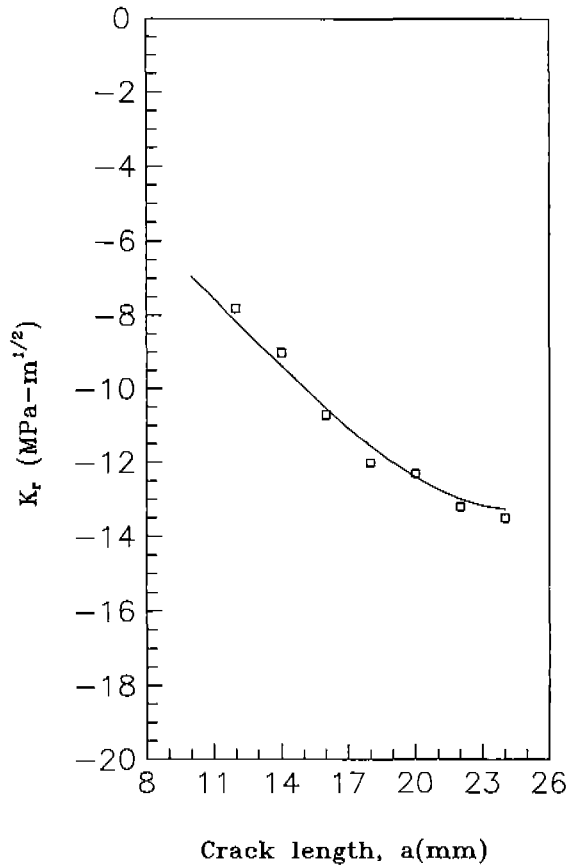


Fig. 3-1 Stress intensity factor for residual stress field

### 3. 실험결과 및 고찰

중첩법을 사용하기 전에 먼저 잔류응력장에서의 응력확대계수를 구하여야 하는데 잔류응력장에서 응력확대계수를 구하는 방법으로는 Kanazawa<sup>(4)</sup>, Terada<sup>(5)</sup>, Tada와 Paris<sup>(6)</sup> 등이 사용한 것과 같이 weight function을 이용한 것과, 유한요소법을 이용하여 구하는 것 등이 있다. 본 논문에서는 유한요소법으로 잔류응력장에서의 응력확대계수를 구하였으며, 압축잔류응력장에서의 응력확대계수는 Fig. 3-1이다.

#### 3. 1. 압축잔류응력장에서의 피로거동

압축잔류응력장이 피로크랙전파거동에 미치는 영향은 응력확대계수범위와 응력비를 변화시키는 경우, 응력비만을 변화시키는 경우로 나누어 질 수 있다. 각각의 경우에 대해 피로크랙전파속도의 예측방법이 다르므로 다음 세가지 경우에 대해 고찰하였다.

##### 3. 1. 1. 피로크랙이 전파하는 동안 $K_{min}$ 이 $K_r$ 의 절대값보다 작은 경우( $K_{min} + K_r < 0$ )

작용하중의 응력확대계수에 잔류응력장의 응력확대계수를 중첩시켰을 때, 결과적으로 시편이 받는 응력확대계수와 응력확대계수범위는 다음 식(3-1)과 같다.

$$K_{max}^r = K_{max} + K_r, \quad K_{min}^r = K_{min} + K_r$$

$$\Delta K_r = K_{max}^r - K_{min}^r = K_{max} + K_r - (K_{min} + K_r) \quad (3-1)$$

그리고, 잔류응력의 영향으로 인한 응력비의 변화는 식 (3-2)와 같다.

$$R_{eff} = (K_{min} + K_r) / (K_{max} + K_r) \quad (3-2)$$

$K_{min}^r$ 이 0보다 작을 때, 즉  $K_{min} + K_r < 0$  일 때, 잔류응력을 고려한 응력확대계수범위( $\Delta K_r$ )는 음수의 부분을 갖는다. 크랙이 전파하는 전 구간에 걸쳐  $\Delta K_r$ 이 음수인 부분을 갖도록 다음과 같이 작용하중을 주었다.

작용하중 :  $R=0.1$ ,  $P_{max}=11.76\text{kN}$  (B1, C1시편)

$R=0.1$ ,  $P_{max}=9.8\text{kN}$  (B2, C2시편)

여기서 B1, B2는 잔류응력이 없는 모재시편이고, C1, C2는 잔류응력이 있는 시편이다.

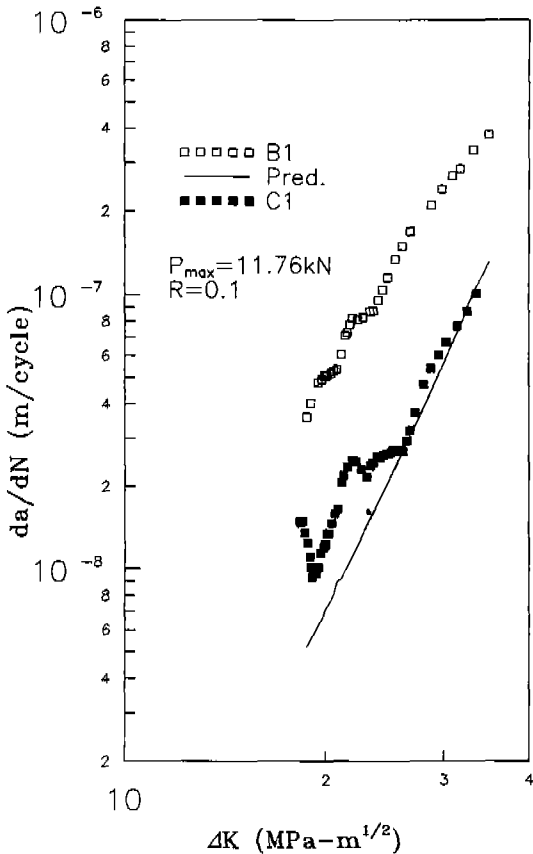


Fig. 3-2 da/dN- $\Delta K$  relations for B1, C1 specimen

Fig.3-2는 최대하중 11.76kN, 응력비  $R=0.1$ 일 때 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와 피로크랙전파속도  $da/dN$ 을 정리한 선도이다. 직선은 모재시편(B1)에서 얻은 실험치와 잔류응력의 측정값을 이용하여 중첩법으로 피로크랙전파속도를 예상한 것인데, 예상선도를 구한 방법은 다음과 같다.

먼저 모재시편의  $da/dN$ - $\Delta K$ 의 실험치를 Paris의 식 (3-3)으로 정리했을 때  $C=5.90 \times 10^{-13}$ ,  $m=3.80$ 를 얻었다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (3-3)$$

한편, 잔류응력을 고려한 응력확대계수  $\Delta K_r$ 을 구하기 위하여 작용하중에 의한 응력확대계수와 잔류응력장의 응력확대계수를 식(3-1)과 같이 더하였다. 작용하중에 의한  $K_{max}$ 과  $K_{min}$ 은 Fig.3-3에 나타내었다. 식(3-1)로 구한  $K_{min}^r$ 이 0보다 작게 되므로 응력확대계수범위가 0보다 작은 부분을 갖게 된다. 그런데 응력확대계수가 음인 경우

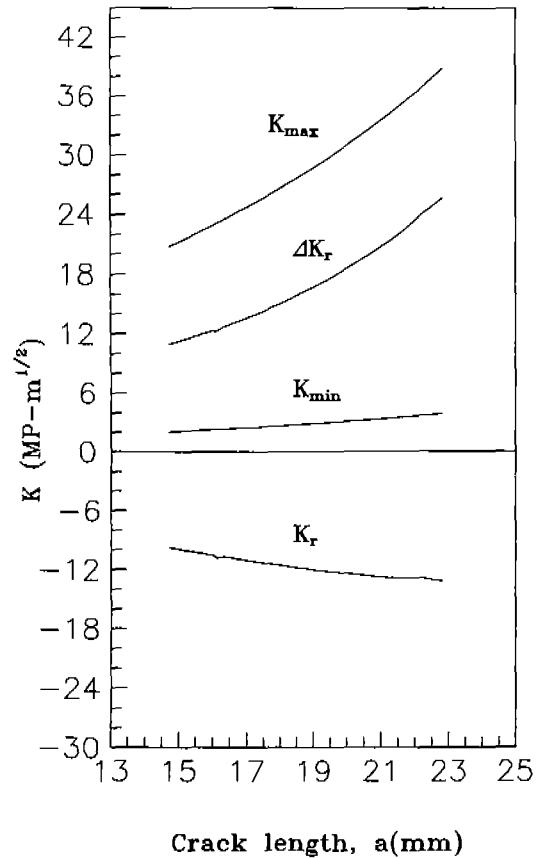


Fig. 3-3 a-K relations for C1 specimen

는 그 물리적 의미를 잃기 때문에 0보다 큰 부분만 잔류응력을 고려한 응력확대 계수범위로 하였다. 이렇게 구한  $\Delta K_r$ 을 Fig.3-3에 나타내었다. 이  $\Delta K_r$ 을 다음 식(3-4)와 같이 식(3-3)의  $\Delta K$  대신 대입하여 예상 피로크랙전파속도를 구하였다.

$$da/dN = C(\Delta K_r)^m \quad (3-4)$$

Fig.3-2의 실험치와 예상치는 약간의 차이는 있지만 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. C1시편의 경우 낮은  $\Delta K$ 영역에서  $da/dN$ 이 급격히 감소하는 부분이 나타나는데 이것은 노치효과에 의한 것이다. 실험치와 예상치가 약간의 차이를 보이는 이유에는, 비록 자동잡호용접을 하기는 했지만 잔류응력을 측정할 시편과 C1시편의 잔류응력의 크기가 정확히 일치하지는 않기 때문인 것도 있다. Fig.3-4는

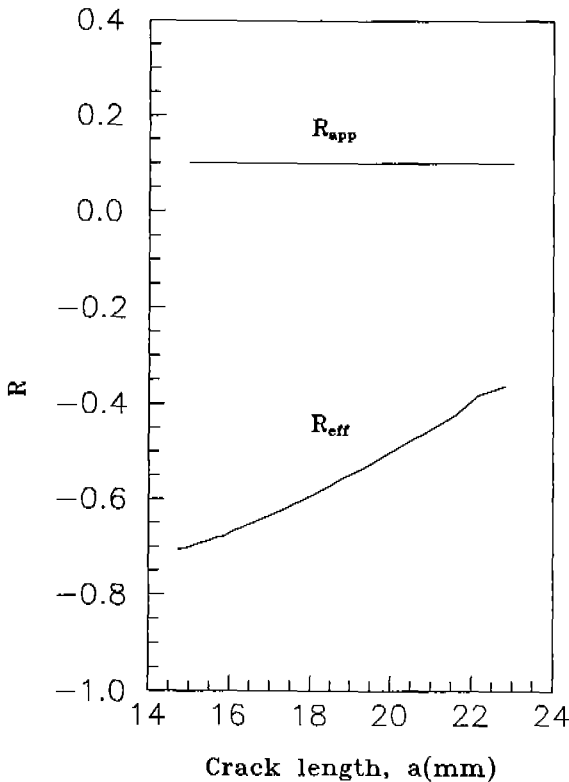


Fig. 3-4 a-R relations for C1 specimen

잔류응력에 의한 응력비의 변화를 나타낸 것이다.  $R_{app}$ 는 작용하중의 응력비를 나타내는데 여기서는 0.1이다. 작용하중은  $R=0.1$ 로 일정하지만 시편 내에 있는 잔류응력의 영

향에 의한 유효응력비  $R_{eff}$ 는 약 -0.7에서 약 -0.4까지 변화한다.

한편, 실험치와 중첩을 통해 예상한 피로수명을 비교하기 위해 다음 식(3-5)과 같이 피로수명을 구하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

$$dN = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (3-5)$$

여기서,  $a_i$  = 초기크랙길이  
 $a_f$  = 최종크랙길이

피로수명의 계산은 피로크랙전파속도가 급속히 감소를 하는 노치효과를 고려하지 않기 위해 초기 2mm를 계산에 넣지않고  $a_i=16mm$ 부터 하였다. 식(3-5)를 사용하여 구한 cycle수는 실험치가 약  $2.1 \times 10^5$  cycle이고 예상치는 약  $1.79 \times 10^5$  cycle로 오차는 약 15%정도이다.

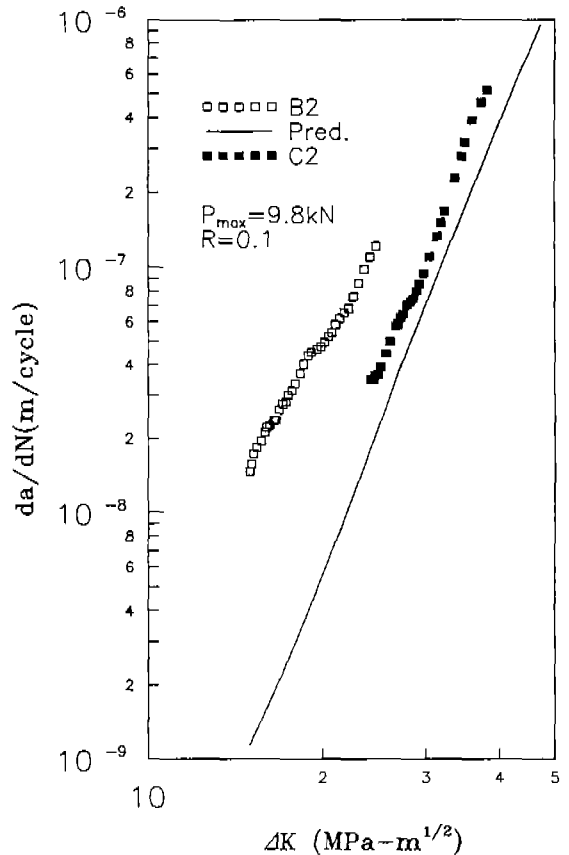


Fig. 3-5  $da/dN$ - $\Delta K$  curve ( $R=0.1$ ,  $P_{max}=9.8kN$ )

Fig.3-5는 최대하중  $P_{max}=9.8kN$ , 응력비  $R=0.1$ 의 작용하중을 주어 실험치와 예상치를 비교한 것이다. 모재시편(B2)에서 얻은 실험치는  $C=4.74264 \times 10^{-13}$ ,  $m=3.85733$ 이며 나머지 방법은 3.1.1의 경우와 같다. 이 경우도 약간의 차이를 보이기는 하지만 실험치와 예상치가 거의 평행으로 잘 일치함을 볼 수 있다. 이 때 실험치의 피로수명은 약  $6.16 \times 10^5$  cycle이고 식(3-5)으로 구한 예상치는 약  $7.87 \times 10^5$  cycle로 오차는 약 28%였다.

3. 1. 2 피로크래이 전파하는 동안  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 작다가 같아지는 경우

이 경우는 3.1.1과 같은 방법으로 피로크랙전파속도를 예상한 경우이나 실험결과를 더욱 상세히 살펴보기 위하여 나눈 것이다.  $K_{min}^r$ 이 3.1.1과 마찬가지로 음수의 값을 가지나, 점점 0으로 가까워지다가 마지막에서는 0이 되는 경우이다. 이러한 응력상태를 만들기 위해 다음과 같은 하

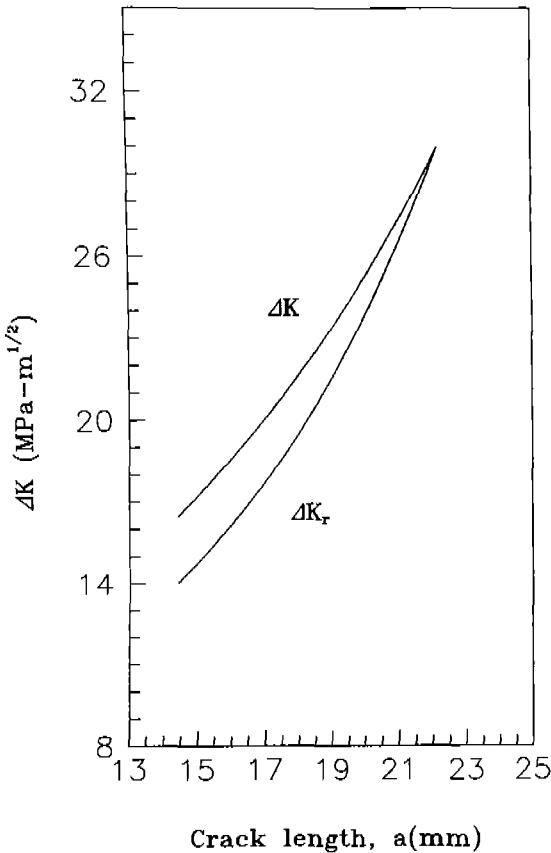


Fig. 3-6 a- $\Delta K$  relations for B3, C3 specimen

중을 주었다.

작용하중 :  $R=0.3$ ,  $P_{max}=13.72kN$  (B3, C3 시편)

여기서 B3는 잔류응력이 없는 모재시편이고 C3는 잔류응력이 있는 시편이다.

최대하중  $P_{max}=13.72kN$ , 응력비  $R=0.3$ 일 경우  $\Delta K$ 와  $\Delta K_r$ 의 계산치는 Fig.3-6과 같다. 잔류응력을 고려한  $\Delta K_r$ 이 처음에는 작용하중에 의한  $\Delta K$ 보다 작다가 크랙이 성장함에 따라 같아지게 된다. 따라서 피로크랙전파속도의 실험치도 잔류응력이 있는 시편(C3)이 모재시편(B3)보다 처음에는 느리다가 나중에는 같아지리라고 예상할 수 있다

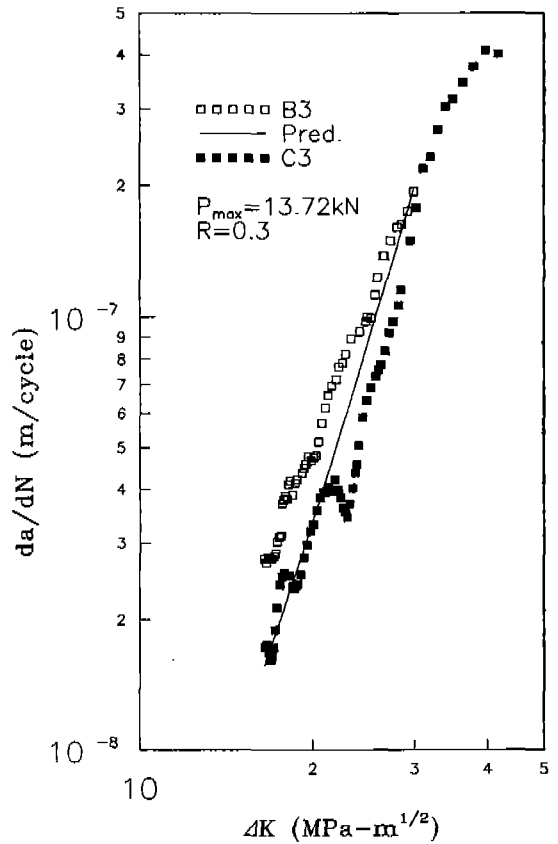


Fig. 3-7  $da/dN$ - $\Delta K$  relations for B3, C3 specimen

Fig.3-7 피로크랙전파속도의 실험치와 예상치를 나타낸 것이다. C3시편의 경우가 B3시편의 경우보다 초기에는 피로크랙전파속도가 느리다가 그 차이가 감소하여 최종적으로 일치함을 볼 수 있다. 모재시편(B3)에서 얻은 실험치는  $C=2.40342 \times 10^{-12}$ ,  $m=3.32432$ 이며 3.1.1과 같은 방법

으로 예상선도를 계산하였는데 실험치와 예상치는 잘 일치함을 볼 수 있다. Fig.3-8은 응력비의 변화를 나타낸다. 작용하중은 응력비  $R_{app}=0.3$ 으로 일정하게 가해지나 시편내부의 잔류응력의 영향에 의한 유효응력비  $R_{eff}$ 는 약 -0.2에서 0까지 변한다. 피로수명의 실험치와 식(3-5)으로 구한 예상치는  $1.73 \times 10^5$  cycle과  $1.49 \times 10^5$  cycle로 오차는 약 14%였다.

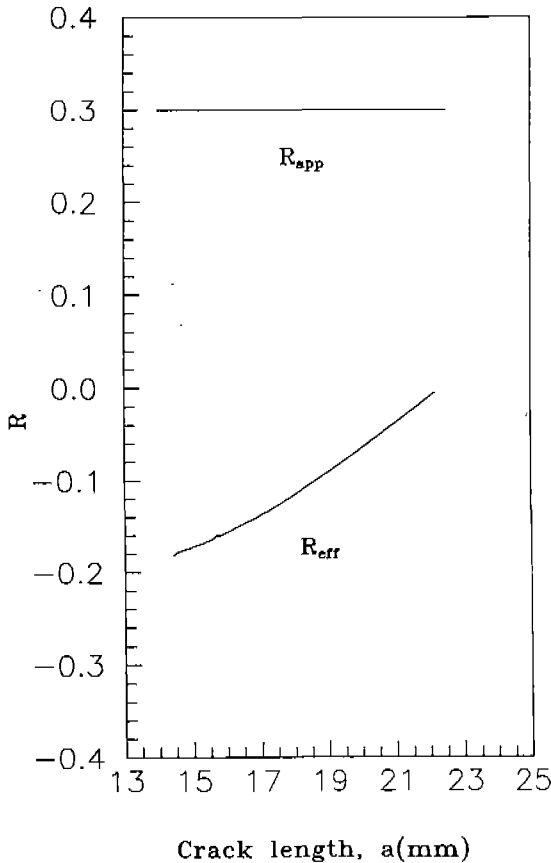


Fig. 3-8 a-R relations for B3, C3 specimen

3. 1. 3.  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 큰 경우( $K_{min} + K_r > 0$ ) 이 경우는  $K_{min}^r$ 이 0보다 큰 경우로 이 때의 잔류응력의 효과를 고려한 응력확대계수범위는 식(3-6)과 같다.

$$\Delta K_r = K_{max} + K_r - (K_{min} + K_r) = \Delta K \quad (3-6)$$

식(3-6)에서와 같이 잔류응력의 효과를 고려한 응력확대계수 범위  $\Delta K_r$ 과 작용하중에 의한 응력확대계수범위는 같기 때문에, 잔류응력이 미치는 효과는 응력비의 변화뿐

이어서 잔류응력의 효과가 적거나 없어지리라고 예상되는 경우이다. 이러한 하중조건을 만족시키기 위하여 다음과 같은 작용하중을 주었다.

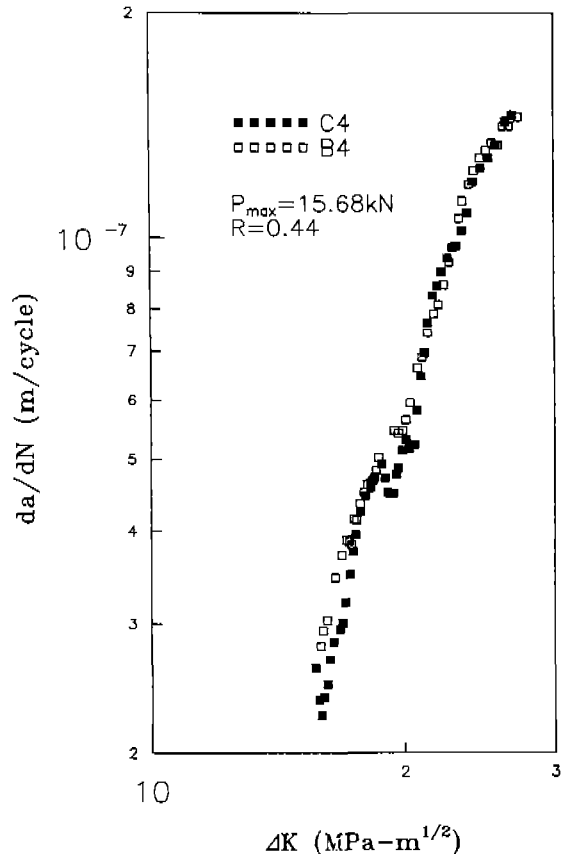


Fig. 3-9 da/dN- $\Delta K$  relations for B4, C4 specimen

작용하중 :  $R=0.44$ ,  $P_{max}=15.68kN$  (B4, C4 시편)  
여기서 B4는 잔류응력이 없는 모재시편이고 C4는 잔류응력이 있는 시편이다. Fig.3-9는 모재시편(B4)과 압축잔류응력을 가진 시편(C4)의 da/dN- $\Delta K$ 관계를 나타낸 것이고, Fig.3-10은 응력비 R의 변화를 나타낸 것이다.

Fig.3-9를 보면 B4시편과 C4시편의 선도가 전 구간에 걸쳐서 거의 일치함을 볼 수 있다. 이 하중조건에서는 압축잔류응력의 효과가 없음을 알 수 있다. 응력비의 변화를 Fig. 3-10에서 살펴보면  $R_{eff}$ 는 약 0.12에서 약 0.25까지 변함을 볼 수 있다. 하중 진폭이 같을 때  $R=0.1 \sim 0.5$ 에서는 응력비가 피로크랙전파속도에 거의 영향을 미치지 않으므로 이 하중조건에서 피로크랙전파속도가 같으리라는 것을 예측할



수 있다. 피로수명의 실험치와 식(3-5)로 구한 예상치는 각각  $2.09 \times 10^5$  cycle과  $1.75 \times 10^5$  cycle로 오차는 약 16%였다.

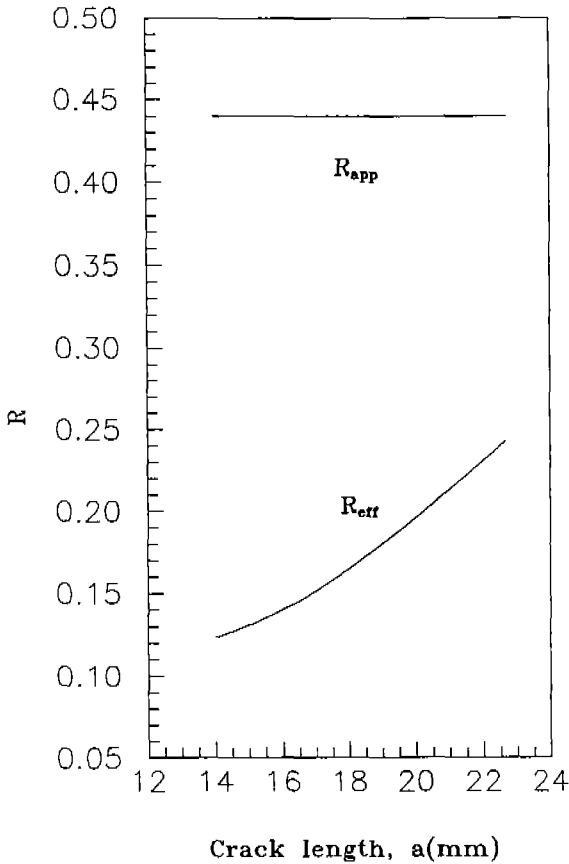


Fig. 3-10 a-R relations for B4, C4 specimen

3. 2 인장잔류응력장에서의 피로거동

인장잔류응력의 효과를 알아보기 위하여 용접선 근방에 노치를 내어 크랙이 인장잔류응력장에서 전파하도록 하였고 작용하중은 최대하중  $P_{max}=7.84\text{kN}$ , 응력비  $R=0.1$ (B5, T5시편)과 최대하중  $P_{max}=11.76\text{kN}$ , 응력비  $R=0.1$ (B6, T6시편)의 두가지로 하였다.

인장잔류응력장에 작용하중이 인장-인장으로 가해질 때 결과적으로 크랙전파에 영향을 미치는 응력확대계수는 다음 식(3-7)과 같다.

$$\Delta K_r = (K_{max} + K_r) - (K_{min} + K_r) = \Delta K \quad (3-7)$$

식(3-7)에서와 같이 잔류응력이 인장일 때 피로크랙전파거동에 영향을 미치는 응력확대계수범위는 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우 모두 같고, 잔류응력은 응력비를 높여주는 효과만을 주게 된다. 따라서 중첩의 관점에서 보았을 때, 인장잔류응력장에서는 응력확대계수범위는 같고 응력비가 높아진 만큼 피로크랙전파속도가 빨라야 한다.

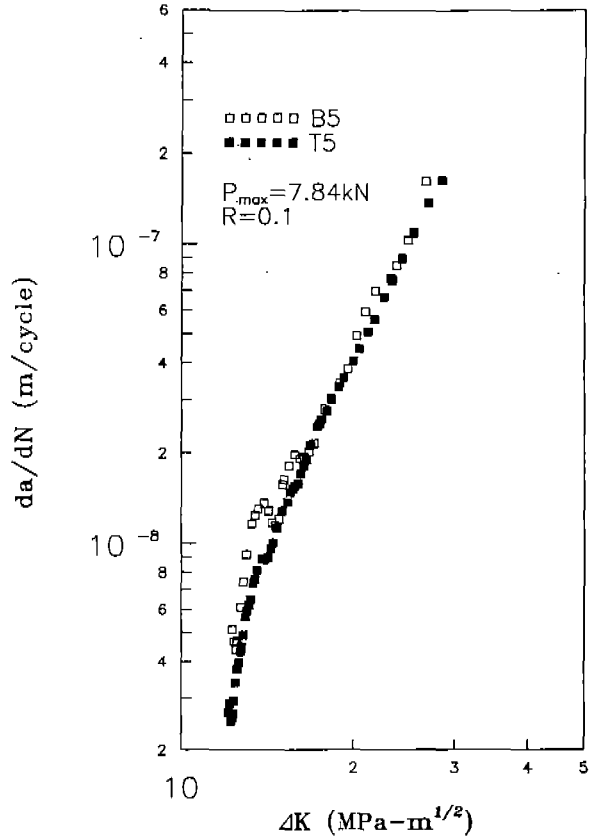


Fig. 3-11 da/dN-ΔK relations for B5, T5 specimen

Fig.3-11은 최대하중  $P_{max}=7.84\text{kN}$ , 응력비  $R=0.1$ 일 때 잔류응력이 없는 모재시편(B5)과 인장잔류응력이 있는 시편(T5)에서 실험한 응력확대계수범위와 피로크랙전파속도의 관계이다. 인장잔류응력의 영향으로 응력비가 높아진 만큼 크랙은 빨리 진전하여야 하나, Fig.3-11에 나타난 것과 같이 인장잔류응력이 있는 시편과 없는 시편의 피로크랙전파속도가 거의 일치함을 볼 수 있다. 이 경우 단순하게 중첩의 관점으로는 잔류응력의 영향을 설명할 수가 없다.

인장잔류응력장에서 피로크랙전파속도가 더 빨라지지 않은 이유는, 인장잔류응력이 크기 때문에 잔류응력이 없는 경우보다 커진 소성역에 의한 압축잔류응력 때문이다.<sup>(7)</sup>

위와 같이, 인장잔류응력장에서 실험한 결과들은 중첩의 관점으로 잔류응력의 효과를 살필 수 없음을 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 중첩법에 의해서 잔류응력장에서의 피로크랙전파거동을 고찰하기 위하여, 압축 및 인장잔류응력장을 갖는 각각의 경우에서 피로크랙전파특성을 알아보았는데, 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 압축잔류응력장에서, 피로크랙이 전파하는 동안  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 작을 때( $K_{min} + K_r < 0$ ),  $da/dN - \Delta K$  선도는 예상치와 실험치가 잘 일치하였으며, 피로수명 예상치와 실험을 통해 구한 피로수명의 오차는 약 15%(C1 시편)와 약 28%(C2 시편)였다.
- (2) 압축잔류응력장에서,  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 작다가 갈아질 때 역시  $da/dN - \Delta K$  선도의 예상치와 실험치가 잘 일치하였으며, 피로수명의 예상치의 오차는 약 14%(C3 시편)였다.
- (3) 압축잔류응력장에서,  $K_{min}$ 이  $K_r$ 의 절대값보다 클 때( $K_{min} + K_r > 0$ )는 압축잔류응력의 효과가 없으리라고 예상되는 경우로서 실험에서도 잔류응력의 효과가 나타나지 않았다. 피로수명의 예상치의 오차는 약 16%(C4 시편)였다.
- (4) 인장잔류응력장에서의 피로크랙전파속도는 작용하중이 클수록 모재에서의 피로크랙전파속도보다 느렸다. 따라서 인장잔류응력장내에서 크랙의 전파특성은 중첩법으로 설명될 수 없다.

#### 참 고 문 헌

1. Parker, A.P., 1982, "Stress intensity factors, crack profiles, and fatigue crack growth rates in residual stress fields", Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776, pp.13-31
2. Glinka, G., 1979, "Effect of residual stresses on fatigue crack growth in steel weldments under constant and variable amplitude loads", Fracture Mechanics, ASTM STP 677, pp.198-214

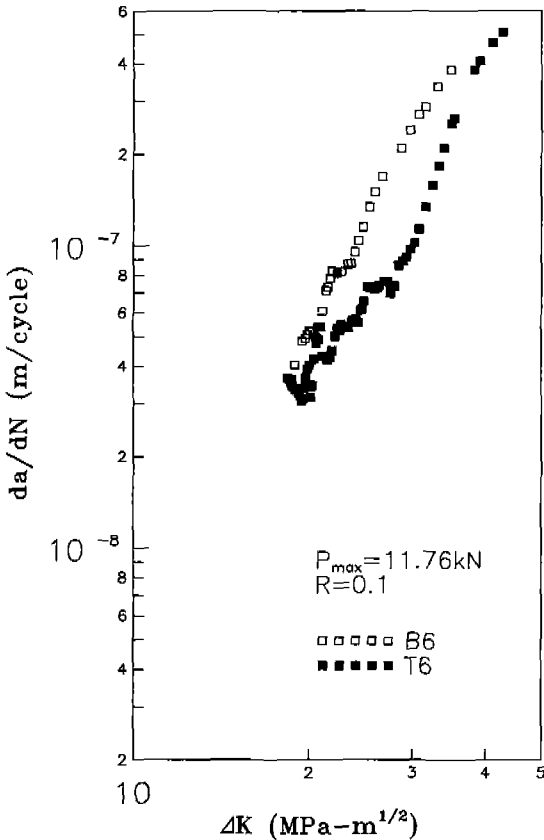


Fig. 3-12  $da/dN - \Delta K$  relations for B6, T6 specimen

Fig.3-12는 최대하중 11.76kN, 응력비  $R=0.1$ 인 경우의 잔류응력이 없는 모재시편(B6)과 인장잔류응력이 있는 시편(T6)에서 실험한 응력확대계수와 피로크랙전파속도의 관계이다. 이 경우 인장잔류응력이 없는 모재 시편보다 오히려 인장잔류응력이 있는 시편의 피로크랙전파속도가 늦음을 볼 수 있다.

Fig.3-11과 Fig.3-12를 비교해 보면 작용하중이 큰 경우 피로크랙전파속도가 모재보다 더 늦어짐을 볼 수 있다. 이는 작용하중이 클수록 크랙선단의 소성역이 커지기 때문이다.

3. Nelson,D.V., 1982, "Effect of residual stress on fatigue crack propagation", Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP776, pp.172-194
4. Kanazawa,T.,Oba,H. and Mahida,S., 1961, "The effect of welding residual stress on brittle fracture propagation", Society of Naval Architects of Japan Journal, No.109, pp.359-369
5. Terada,H., 1979, "An analysis of the stress intensity factor of a crack perpendicular to the welding bead", Engineering Fracture Mechanics Vol.8, pp.441-444
6. Hiroshi Tada and Paul C. Paris, 1983, "The stress intensity factor for a crack perpendicular to the welding bead", Int. Journal of Fracture 21, pp. 279-284
7. 김 현, 1992, "용접잔류응력장을 갖는 재료의 피로크랙 개구거동에 관한 연구", 박사학위논문, 고려대학교 대학원