

스테인레스강 용접부의 피로균열 전파속도 예측에 관한 연구

이용복* · 정진성** · 박영근** · 김호경***

A Study on the Prediction of Fatigue Crack Growth Rate in Stainless Steel Weldments

Y. B. Lee*, C. S. Chung**, Y. K. Park**, H. K. Kim***

Abstract

Welding structure contains residual stress due to thermal-plastic strain during welding process, and its magnitude and distribution depend on welding conditions. Cracks initiate from various defects of the weldment, propagate and lead to final fracture. The crack initiation and propagation processes are affected by the magnitude and distribution. Therefore, the magnitude and distribution of weldment residual stress should be considered for safety design and service of welding structures. Also it is very important that more accurate assessment method of fatigue crack growth must take into account the redistributing the residual stress quantitatively, because the residual stress in weldment has characteristics of its redistribution with loading magnitude, number of cycles and fatigue crack propagation. In this study, fatigue crack behavior of STS-304 weldment was investigated during crack propagation into tensile residual stress region or compressive residual stress region. Crack growth rates were predicted and compared with experimental results.

1. 서 론

최근 용접기술의 발달은 눈부시며, 접합방법으로서 점점 그 중요성이 높아지고 있다. 용접의 응용은 작게는 미소 전자 부품에서 크게는 선박, 교량, 항공기, 원자로 등

의 제품에 까지 미치고 있다. 그러나 용접부에는 용접시 발생하는 결함과, 용접열에 의한 영향으로 잔류응력이 존재하게 되어 용접부의 파괴 및 피로 강도 저하의 요인이 되고 있어, 용접부에 존재하는 취약조건들을 줄이는 방법으로 용접재료, 용접조건 및 용접방법 등을 개선하는 많은

* 홍익대학교 기계공학과
** 홍익대학교 대학원 기계공학과
*** 서울산업대학교 자동차공학과

연구가 진행되어왔다.^(1,2) 한편, 용접시 발생하는 열에 의한 소성변형과 구속조건에 따라 발생하는 잔류응력에 의한 피로균열거동은 잔류응력 측정의 어려움으로 인하여 체계적인 연구가 미흡한 편이다. 잔류응력의 특성상 인장 잔류응력이 분포하면 그 주위에는 압축 잔류응력이 분포하게 되며 인장 잔류응력분포 영역에 결함이 있을 경우에는 균열 진전에 크게 영향을 줄 수 있다.⁽³⁾ 그러나 잔류응력장에서 피로균열이 진전하는 경우 균열 성장에 따라 잔류응력의 분포가 변화하게 되고,⁽⁴⁻⁷⁾ 작용하중의 크기와 반복수에 의해서도 잔류응력의 분포는 이완되어 변화한다.

본 연구에서는 주로 고온환경 및 화학공업 분야에서 사용되고 있는 STS304를 선택하여 시험편을 제작하고, 인장 및 압축 잔류응력 영역으로부터의 균열진전에 따른 잔류응력의 재분포 경향과 그에 따른 피로균열거동을 파악하였다. 또한, 균열단합의 영향을 고려하여 정확하게 피로거동을 평가하는 방법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 18Cr-8Ni의 오스테나이트계 스테인레스강으로서, 모재와 용접봉의 화학적 성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1, 2, 3, 4에, 용접 조건은 Table 5에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of the base metal (Wt. %)

Material	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
STS304	0.5	0.56	1.09	8.56	0.004	0.029	18.55

Table 2. Mechanical properties of the base metal

Material	σ_u (MPa)	σ_v (MPa)	Elongation(%)
STS304	751.5	319	62.2

Table 3. Chemical compositions of the welding wire (Wt. %)

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni
ER 308	0.05	0.41	1.78	19.8	9.8

Table 4. Mechanical properties of the welding wire

Welding wire	σ_v (MPa)	Elongation(%)
ER 308	580	57

Table 5. Conditions for MIG welding

ϕ (mm)	Number of pass	Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)	Ar flow rate (l/min)
2	1	22	150	260	20

시험편 형상은 Fig. 1과 같이 폭 100mm, 길이 600mm로 하고 길이 방향과 압연 방향을 같이 하여 가공하였으며, 기계가공 등으로 인하여 존재할 가능성이 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 열처리 하였다. 시험편의 종류는 잔류응력을 ± 20 MPa 범위 내의 것을 용접을 하지 않은 U(unwelded)시험편, 시험편 중앙에 인장잔류응력을 유발하기 위하여 한줄 용접한 T(tensile)시험편, 시험편 중앙에 압축잔류응력을 유발하기 위하여 두줄 용접한 C(compressive)시험편으로 각각 제작하여 모든 시험편 중앙에 직경 2mm의 구멍을 뚫고 실톱으로 노치 가공 후

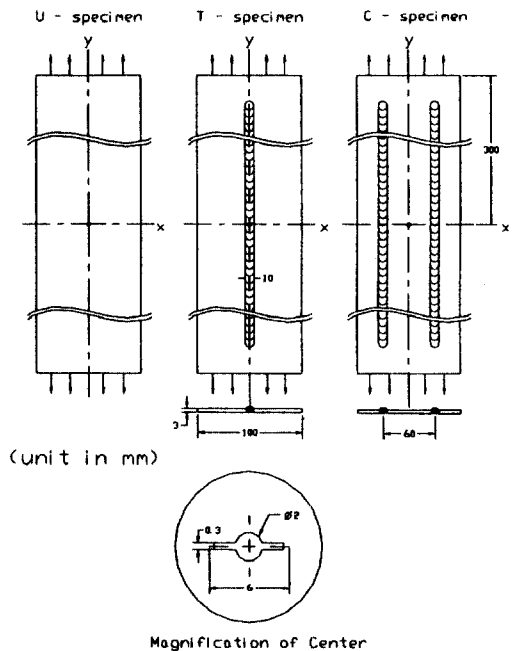


Fig. 1 Configuration of test specimen

예비균열을 진전시켜 CCT(center crack tension)형 상으로 하였다. 용접시에는 시편의 넓이 방향으로 충분한 구속이 존재하도록 자체 제작한 지그(jig)를 사용하였으며, 굽힘변형 등의 방지를 위하여 용접 후 지그로 고정한 상태에서 충분히 방치하였다.

2.2 실험장치 및 방법

잔류응력 측정 방법은 여러가지가 있으나, 본 연구에서는 비교적 간단하게 정확한 값을 얻을 수 있는 천공법(hole drilling method)을 사용하여 용접선에 수직방향으로 측정하였다. 측정된 값을 Terada⁽⁶⁾가 제안한 잔류응력 분포식과 병행하여 잔류응력의 재분포 현상을 파악하였다. 균열전파에 의한 잔류응력의 재분포 현상을 평가하기 위하여 실험을 사용하여 슬릿형태의 노치를 일정 길이 진전시켜 잔여폭에서의 잔류응력의 변화를 관찰하는 방법⁽⁵⁾을 사용하였다.

피로하중은 25ton 용량의 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron, 1332)를 사용하여, 하중제어 방식으로 10 Hz의 정현파형을 일정하게 가하였으며, 응력비($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$)는 최대하중($P_{max} = 56450N$)을 일정하게 고정된 상태에서 최소하중을 변화시켜 각각 $R=0$, $R=0.3$ 으로 차등을 두어 응력비의 영향을 고려할 수 있도록 실험하였다.

균열길이는 배율 20배의 이동식 현미경을 시험편 전면에 설치하여 $\pm 1/100mm$ 오차 범위내에서 실험중 수시로 측정하였으며, 초기 균열의 측정을 용이하게 하기 위하여 연마지로 #2000까지 연마한 후에 산화크롬(Cr_2O_3)분말을 사용하여 연마하였다. 균열의 전파길이를 측정할 때는 항상 양쪽을 모두 측정하였고, 7점증분다항식법을 이용하여 수치해석적으로 피로균열전파속도 da/dN 을 결정하였다.

균열단합평가는 C.O.D. 게이지를 이용한 제하 탄성 컴플라이언스법을 사용하였다. 낮은 주파수에서 로드 셀로부터 검출되는 하중신호와 C.O.D. 게이지의 변형 신호를 동시에 저주파 여과기(low pass filter)로 여과하여 PC에 연결된 데이터 획득 장치(data acquisition system)

를 이용하여 얻은 데이터로부터 감산변위(subtractive displacement)를 구하였다. 피로실험의 조건은 Table 6 과 같다.

3. 응력확대계수와 피로균열전파속도

Terada⁽⁸⁾는 무한평판의 맞대기 용접에서 발생하는 잔류응력에 대한 분포를 다음과 같은 관계식으로 설명하고 있다.

$$\sigma_r(x) = \sigma_0 \left[1 - \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{b} \right)^2} \quad (1)$$

여기서, σ_0 는 용접부의 최대 인장잔류응력값이고, b 는 인장잔류응력의 반폭이다.

균열이 존재하는 재료의 파괴에 가장 중요한 변수는 응력확대계수이며 일반식은 다음과 같다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F \left(\frac{2a}{W} \right) \quad (2)$$

$$F \left(\frac{2a}{W} \right) = \left[1 - 0.025 \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 0.06 \left(\frac{2a}{W} \right)^4 \right] \sqrt{\sec \left(\frac{\pi a}{W} \right)}$$

여기서, F 는 균열의 형상과 그 주위의 경계조건으로부터 결정되는 보정함수로, (2)식은 CCT 시험편의 경우이다.

균열면에 내압 P 혹은 균열 중심에 대하여 분포응력을 받을 때 응력 확대 계수는 Green⁽⁹⁾의 함수를 응용하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\begin{aligned} K_{res} &= \int_0^a \left[\sqrt{\frac{a+x}{a-x}} + \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} \right] P dx \\ &= 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{\sigma(x)}{\sqrt{a^2-x^2}} dx \end{aligned} \quad (3)$$

한편, 유효응력비(R_{eff})는

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (4)$$

이며, 이들 값을 Forman 식⁽¹¹⁾에 적용하면 균열전파속도는 다음과 같다.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^n}{(1 - R_{eff}) K_{cf} - \Delta K} \quad (5)$$

여기서 K_{cf} 는 균열 전파속도가 불안정하게 되는 순간(최종파단시)의 응력확대계수이고, 균열단합을 고려한 유

Table 6. Fatigue test conditions

Stress ratio	$P_{max}(N)$	$P_{min}(N)$	$J(P(N))$	Test freq.(Hz.)	Wave form
$R=0$	56,450	0	56,450	10	Sine
$R=0.3$	56,450	16,950	39,500	10	Sine

효용력확대계수폭(ΔK_{eff})은

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{op} + K_{res}) \\ &= K_{max} - K_{op} \end{aligned} \quad (6)$$

이고, 개구비 U(Effective stress intensity factor range ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{(K_{max} - K_{op})}{(K_{max} - K_{min})} \quad (7)$$

Elber⁽¹²⁾가 제안한 ΔK_{eff} 와 da/dN 의 관계는 다음과 같다.

$$da/dN = c'(U\Delta K)^{m'} = c'(\Delta K_{eff})^{m'} \quad (8)$$

상기의 식으로 잔류응력 및 균열단침영향을 고려한 피로균열특성을 고찰할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 균열의 전파에 따른 용접잔류응력의 재분포

잔류응력분포의 측정과 잔류응력에 의한 피로균열거동을 평가하고 예측하는 연구는 오래전부터 계속되어 왔다. 그러나, 잔류응력 재분포 특성의 정확한 파악이 어렵기 때문에 균열전파에 의한 재분포된 잔류응력에 관한 연구가 아직 미흡하다. 인장잔류응력영역에서 피로균열이 진전할 경우 균열진전으로 인한 잔류응력은 초기에 압축잔류응력이 존재했던 위치까지 균열이 진전해도 균열선단 부근에는 인장잔류응력이 분포한다⁽¹³⁾고 보고되어 있다. 잔류응력과 작용응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 미치는데 외부하중의 크기와 반복수에 따라 피로균열에 미치는 영향의 정도가 다르며 피로균열이 진전됨에 따라 잔류응력의 분포도 수시로 변화하게 되어 그 영향이 달라진다.⁽¹⁴⁾ 따라서, 균열길이가 증가할때 잔류응력의 변화를 알아보기 위하여 용접시험편 중앙에서 실험을 이용하여 노치를 진전시키는 방법으로 노치길이가 다른 각각의 잔여 시험편에서의 잔류응력을 측정하여 그 결과를 Fig. 2, 3에 나타내었다. T-시험편의 경우 초기의 인장잔류응력은 슬릿의 진전에 의해서 잔류응력의 최고값이 점점 낮아지고 같은 위치에서 초기 잔류응력보다 그 절대값은 증가하는 재분

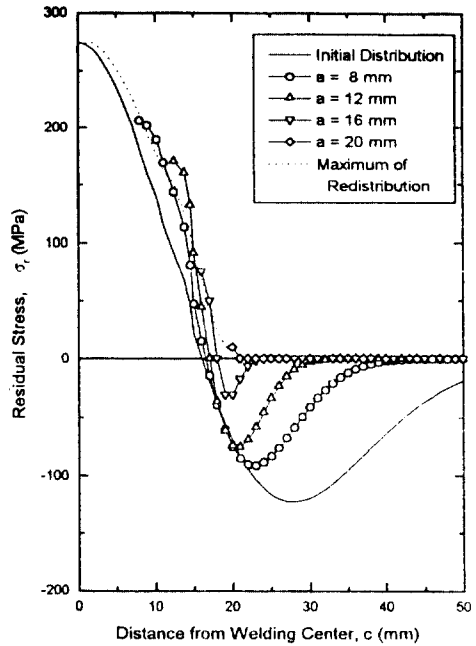


Fig. 2 Redistribution of residual stress for T-specimen

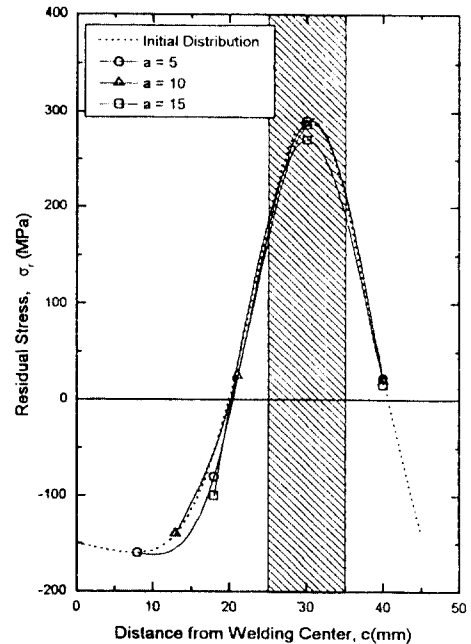


Fig. 3 Redistribution of residual stress for C-specimen

포경향이 뚜렷하다. 또한, C-시험편의 경우 양쪽 용접 비드의 영향을 받아 재분포 양은 적으나 T-시험편과 비슷한 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 시험편 중앙에서 슬릿으로 인하여 잔류응력이 이완될 때, 초기분포 잔류응력의 인장-압축평형상태가 깨어지면서 평형상태를 유지하기 위한 균열선단 주변의 응력변화에 기인하는 것으로 사료된다.

4.2 재분포된 잔류응력을 고려한 피로균열 전파특성

용접재료나 구조물에 분포하는 잔류응력이 피로균열에 미치는 영향에 대한 기존의 연구는 초기분포 잔류응력과 외부하중에 의한 잔류응력이 중첩되어 피로균열에 영향을 주는 것으로 해석하였다. 본 연구에서의 실험결과는 앞절에서 언급한 바와 같이 피로균열이 증가함에 따라 초기잔류응력은 재분포하고 있음을 보이고 있다. 따라서, 용접잔류응력이 피로균열에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서는 잔류응력의 재분포를 고려해야 할 필요가 있다. Fig. 4, 5는 T, C-시험편의 잔류응력에 의한 응력확대계수값과 유효응력비를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 초기 잔류응력분포에 비하여 균열전파에 따른 재분포 잔류응력폭

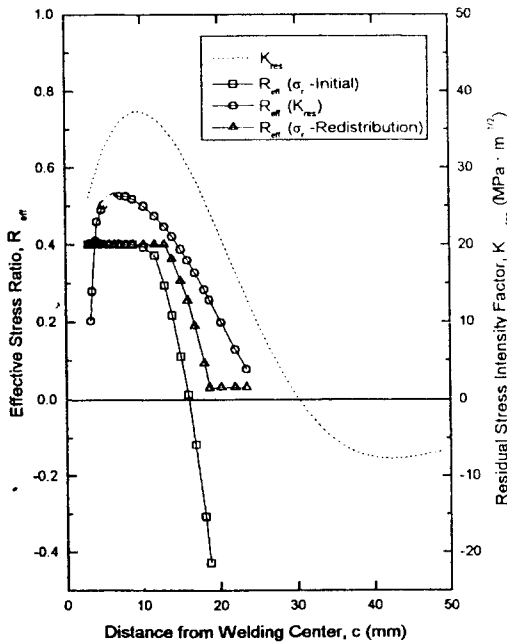


Fig. 4 Stress intensity factor and effective stress ratio for T-specimen

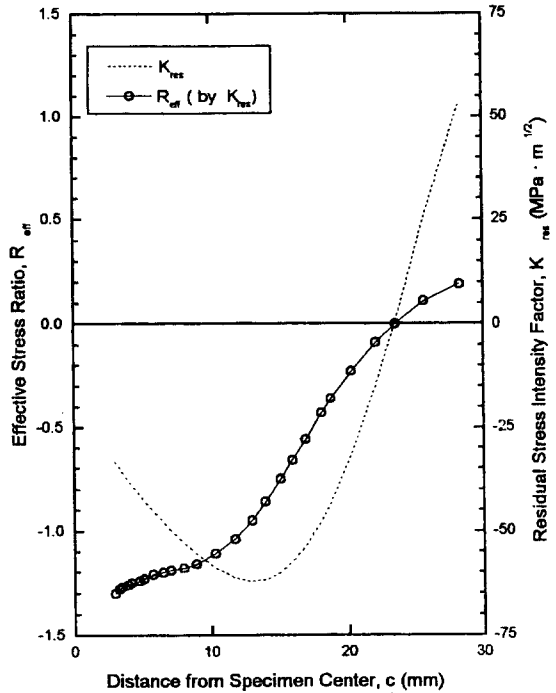


Fig. 5 Stress intensity factor and effective stress ratio for C-specimen

이 시험편 중앙으로부터 넓게 나타나는데, 이것은 균열이 성장하면서 잔류응력이 재분포되어 인장으로부터 압축잔류응력으로의 전환점(잔류응력이 0인 위치)이 균열선단으로부터 균열전파방향으로 이동하기 때문이다.

그리고, 그 결과로부터 응력비 값은 높게 나타나고 응력확대계수는 완만하게 변하고 있음을 나타낸다. 이로부터 초기잔류응력의 경우보다 균열전파에 따른 재분포의 경우가 높은 응력비를 갖게 되어 실제로 피로균열전파에 더 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 응력비의 영향을 고찰하기 위해서 진폭을 고정하고 평균응력을 변화시키는 방법이 사용된다. 낮은 ΔK 영역에서의 피로거동 평가를 위하여 Fig. 6과 같이 최대응력을 고정하고 최소응력을 증가시키는 방법을 사용하였다. Fig. 7은 각 시험편의 하중 반복수에 대한 균열길이를 나타낸 것이다. 결과적으로 시험 중앙으로부터 피로균열이 전파할때 중앙부에 분포하는 인장잔류응력이 피로균열전파에 기여함으로써 재료의 피로수명을 단축시킨 반면, 압축잔류응력은 피로균열전파를 지연시켰다. Forman 식⁽¹¹⁾을 적용한 균열전파 예측의 타당성을 검증하기 위한 응력비를 달리한 U-

시험편의 실험결과는 Fig. 8과 같다. 여기서 응력비(R)가 0인 실험결과로부터 Forman 식의 재료상수를 구하고, 이를 유효응력비와 함께 식(5)에 대입하여 예측한 예측선은 실험결과(R=0.3)와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

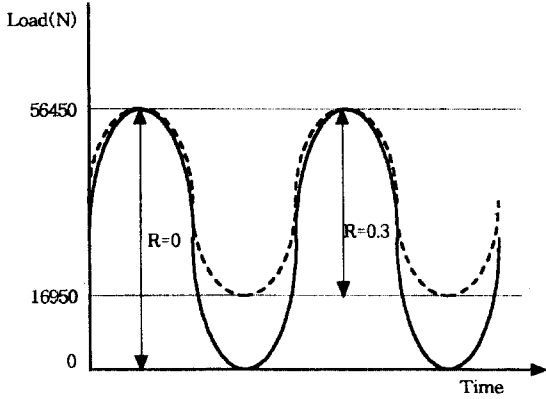


Fig. 6 Sine wave for constant amplitude cyclic loading

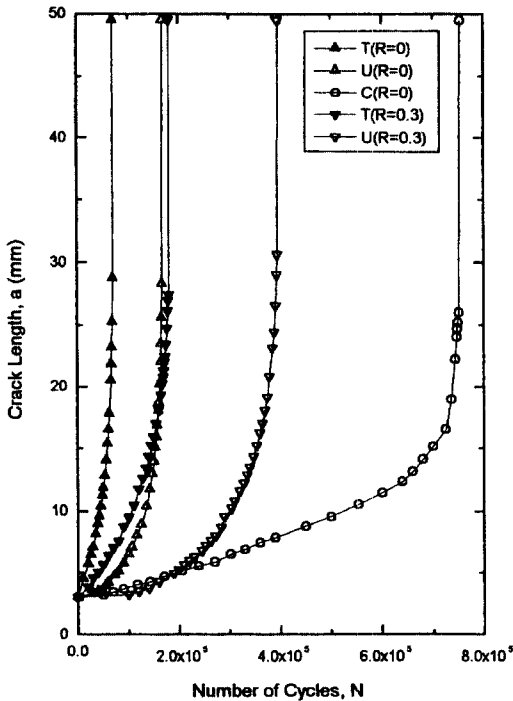


Fig. 7 Crack length vs. number of cycles

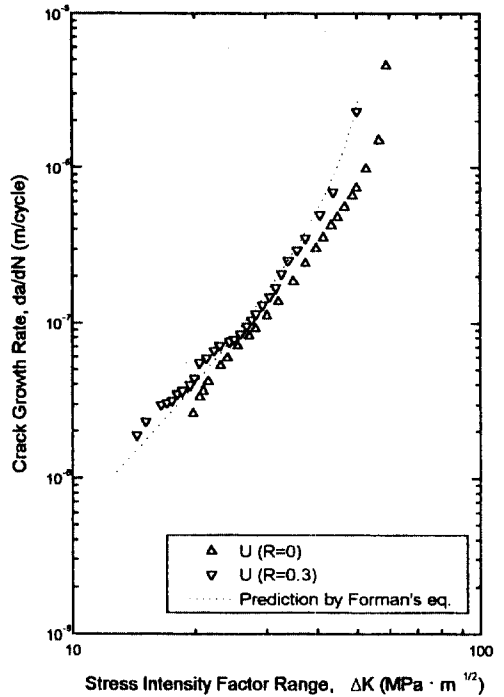


Fig. 8 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for U-specimen

Fig. 9에서 U-시험편의 피로균열전과속도에 비하여 T-시험편의 피로균열전과속도가 높게 나타나고 있는데, 이러한 현상은 인장잔류응력이 피로균열전과에 현저하게 영향을 주기 때문에 발생한다. 예측선도 2는 응력확대계수값 K_{res} 으로 구한것인데, 여기서 K_{res} 는 초기 잔류응력 분포의 정적분으로 표현되기 때문에 Fig. 4에서처럼 최고 값이 균열방향으로 10mm 부근에 있게 된다. 기존의 연구에서는 유효응력비를 $(K_{min} + K_{res}) / (K_{max} + K_{res})$ 로 사용하였으나 K_{res} 의 적분항으로 인하여 다음과 같은 문제가 발생하게 된다.

$$R_{eff} = \frac{\sigma_{min} + \sigma_{res}}{\sigma_{max} + \sigma_{res}} \approx \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (9)$$

그러므로, 유효응력비를 $(\sigma_{min} + \sigma_{res}) / (\sigma_{max} + \sigma_{res})$ 로 하여 잔류응력의 초기분포와 재분포로 각각 구하였으며, K_{res} 로 구한 유효응력비와 비교하여 나타내었다. K_{res} 로 구한 예측선도 2는 실험결과 보다 상당히 높게 나타나며, 초기잔류응력분포를 이용한 예측선도 1은 균열전과 초기에는 어느 정도 일치하나 균열이 인장잔류응력장을 벗어

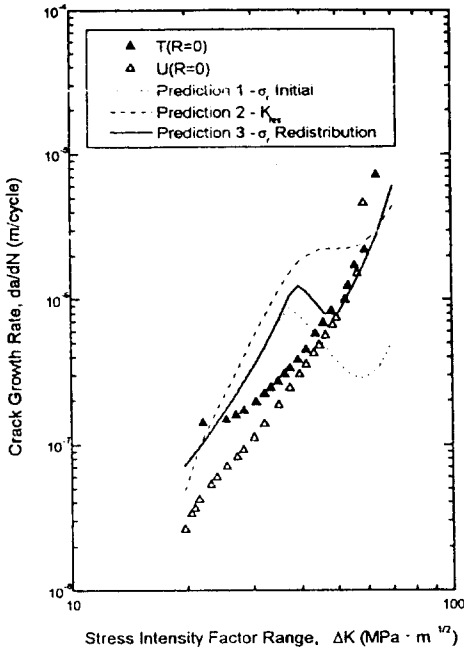


Fig. 9 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for U and T-specimen

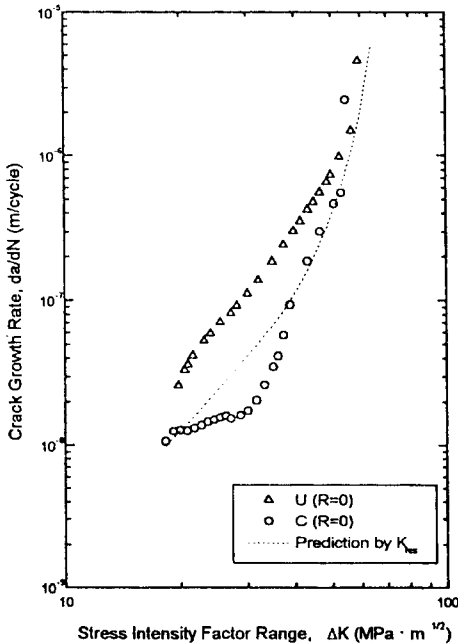


Fig. 10 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for U and C-specimen

난 후에 압축잔류응력장에서는 균열전파속도가 급격히 감소하는 것으로 나타난다. 균열전파초기에는 인장잔류응력의 영향으로 예측선도 1과 2가 비슷한 추세를 보이고 있으나 재분포의 영향으로 균열성장부 중반 이후 실험에 의한 균열전파속도와 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 균열이 진전됨에 따라서 인장잔류응력의 영향이 점점 감소하고 있다는 것을 보여주는데, 이러한 현상은 첫째 작용하중과 높은 인장 잔류응력의 중첩에 의하여 균열선단 주변의 소성역이 확대되어 균열을 지연시켰고, 둘째 반복하중에 의한 잔류응력의 이완이 급격히 진행되었기 때문에 발생한 것으로 판단되어진다. Fig. 10은 C-시험편에서 잔류응력확대계수(K_{res})를 중첩한 유효응력비(R_{eff})를 사용한 균열전파예측과 실험에 의한 값을 보여준다. 이 예측은 공학적 측면에서 안전한 예측이 될 수 있으나, 정확성과는 상당히 벗어나 있으며 이것은 용접으로 인한 형상과 재료 특성의 변화에 기인한 것으로 볼 수 있다.⁽¹⁵⁾

4.3 균열단합영향을 고려한 피로균열 진전특성

피로균열전파거동은 피로균열선단의 국부적인 응력장을 규정하는 ΔK 와 밀접한 관련이 있으며, Elber⁽¹²⁾에 의해 처음 제안된 균열단합 현상은 탄소성 재료의 피로거동 평가에 급속한 발전을 가져왔다. 유효응력확대계수(ΔK_{eff})은 실측이 가능한 하나의 공학적인 역학량으로써 균열전파속도를 평가하는데 중요한 파라미터가 되고 있다.

균열단합 현상의 종류로는 균열선단에 형성된 소성역에 의하여 균열이 특정한 응력확대계수 값, 즉 K_{op} 까지 열리지 않는 소성 유기형(Plastic-induced crack closure), 균열면이나 균열선단에서 부식이나 산화로 인한 침전물의 발생에 기인한 산화물 유기형(Oxide-induced crack closure), 거친 균열면 사이의 불연속적인 접촉에 기인한 파면거칠기 유기형(roughness-induced crack closure) 등이 보고⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 되고 있다. 또한 이들 인자외에도 역학적 인자인 응력비 및 최대 응력확대계수 K_{max} 등의 영향이 존재하는 경우⁽¹⁹⁾도 있다.

한편, 많은 연구자들은 ΔK_{eff} 를 정확하게 구하기 위해 다양한 측정법을 제안하고 있다. 예를 들면 컴플라이언스(compliance)법, 광탄성법, 전위차법, AE(Acoustic Emission)측정법, 초음파법, 사진판독에 의한 직접측정법, 레이저(laser)를 이용한 간섭변위 측정법 등이 있으며, 각각의 측정 방법들은 장단점이 있고 그 결과들은 측정법에 따라 상이한 값을 나타낼 수 있다. 아울러 유한요

소법(FEM)을 이용한 방법도 균열단합 해석에 사용되고 있으나 이 경우는 올바른 구성방정식 선택과 국부변형이 집중되는 균열선단 영역에서 미세한 메쉬(mesh)의 사용이 요구되는 등 선행되어야 할 필수조건이 뒤따른다.

실제 잔류응력장내에서 피로균열이 발생하여 전파시, 피로균열의 선단은 일정진폭을 갖는 사이클 중 최소하중부터 개구하중까지는 열리지 않으므로, 피로균열전파속도는 Paris⁽²⁰⁾식으로 설명될 수 없다. 한편, 피로균열의 C.O.D.는 하중에 선형적으로 비례하지 않는다. 균열 선단이 열리지 않으면 피로균열은 전파하지 않고⁽²¹⁾ 균열 선단이 열리는 하중범위만이 피로균열에 영향을 준다.

균열전파속도는 a-N 선도상에서 그 기울기를 의미하고, Fig. 7의 결과를 균열길이 a와 응력확대계수폭 ΔK 에 대해서 정리하면 각각 Fig. 11, 12와 같다. Fig. 11에서 동일한 균열길이에서 R=0.3일때가 R=0일때보다 균열전파속도가 낮게 나타나지만 Fig. 12에서 동일한 ΔK 일 때 그 결과는 역전된다. 그 이유는 R=0.3일때 작용 응력폭 $\Delta\sigma$ 가 감소하였기 때문이다.

Fig. 13은 응력확대계수범위(ΔK) 대 개구비(U)를 나타낸 것으로 초기균열성장에서 그 차이가 크게 나타나지만 점차적으로 U-시험편에 접근한다. 균열 개구거동을 고려하여 피로수명을 평가할 때에는 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 를 사용하는데, 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 는 ΔK 와 개구비 U의 곱이므로, $da/dN-\Delta K$ 선도의 각 데이터에 U를 곱한값이 $da/dN-\Delta K_{eff}$ 선도에 평행이동한 형태로 나타나게 된다. Fig. 14는 용접부와 모재부의 ΔK 에 Fig. 13의 U값을 각각 곱한 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 와 피로균열전파속도 da/dN 와의 관계를 나타낸 것으로 응력비의 변동에도 불구하고 피로균열전파속도 da/dN 의 값이 $1.31 \times 10^{-11} \Delta K_{eff}^{2.90}$ 에 접근한다. Fig. 14에서 T-시험편과 C-시험편의 초반부에서 일반적인 균열전파속도와 불일치하는 구간이 존재한다. 이것은 T-시험편의 경우 균열이 아직 용접비드와 열영향부를 통과하지 못한 구간으로 재료특성의 변화에 기인한 것으로 판단되며, C-시험편의 경우는 양쪽 용접비드에서 모재와 다른 탄성계수와 프야송의 비 등 기계적인 성질변화에 의해서 균열선단은 복잡한 응력상태에 놓여지므로 발생한다고 사료되나 추후 자세한 연구가 요망된다.

4.4 소성역의 크기와 균열단합의 영향

균열단합에 영향을 주는 기계적 성질중 중요한 인자는

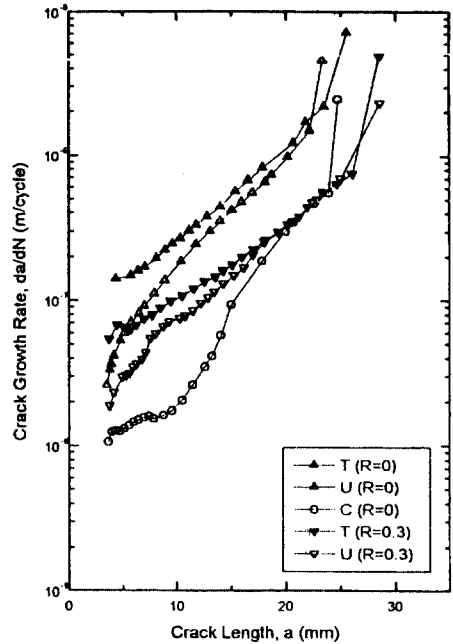


Fig. 11 Crack length vs. crack growth rate

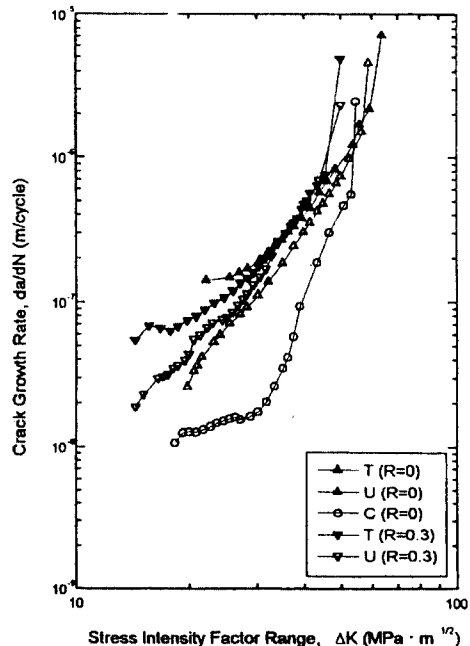


Fig. 12 Crack growth rate vs. stress intensity factor range

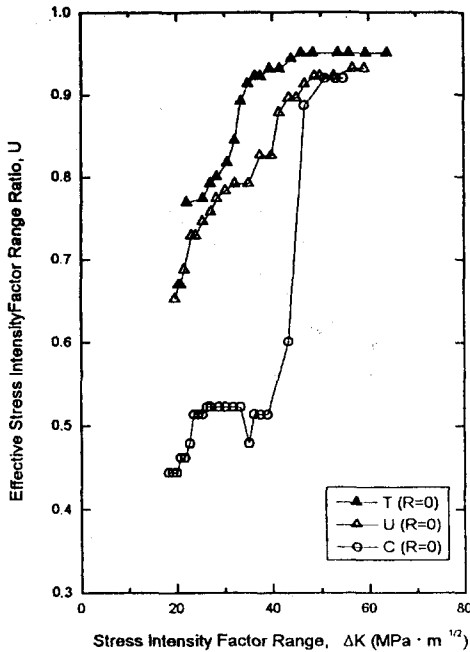


Fig. 13 Effective stress intensity factor range ratio vs. stress intensity factor range

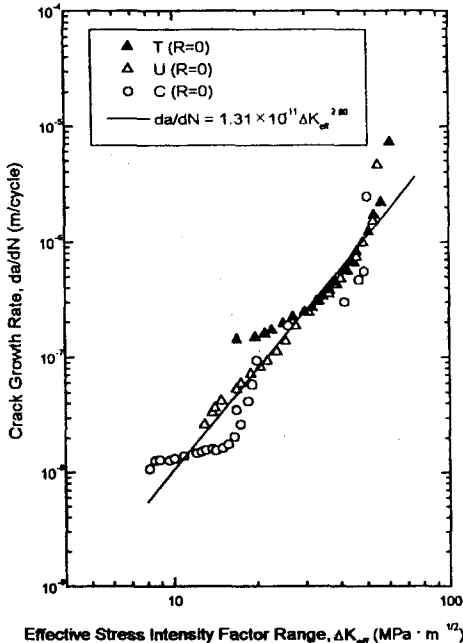


Fig. 14 Crack growth rate vs. effective stress intensity factor range

항복강도, 인장강도, 탄성계수, 연신을 및 반복경화 또는 연화 계수 등이 있으며, 가장 일반적인 소성 유기형의 경우 기계적 성질의 차이가 균열단형상에 뚜렷한 영향을 미치며, 피로균열선단에 발생하는 소성역에 의해 균열단형이 발생한다.⁽²²⁾ 균열단형은 피로하중 부하과정에 발생하는 단순 소성역(monotonic plastic zone) 또는 전방 소성역(forward plastic zone) 보다 실질적으로 피로하중 제하과정시 발생하는 역 소성역(reversed plastic zone) 또는 반복 소성역(cyclic plastic zone)의 영향을 받는다.⁽²³⁾ 따라서 개구비 U와 반복 소성역의 크기 $\Delta\gamma_p$ 와의 관계를 규명해야 한다. 단순 소성역과 반복 소성역의 크기는 각각 다음과 같다.

$$\gamma_p = \frac{1}{\beta\pi} \left[\frac{K_{\max}}{\sigma_y} \right]^2 \quad (\text{단순소성역})$$

$$\Delta\gamma_p = \frac{1}{\beta\pi} \left[\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right]^2 = \frac{1}{4\beta\pi} \left[\frac{K_{\max}}{\sigma_y} \right]^2 \quad (\text{반복소성역}) \quad (10)$$

여기서, 평면 응력의 경우 $\beta=1$, 평면 변형의 경우 $\beta=3$ 이 된다. 또한, McClung⁽²²⁾은 균열단형을 고려하여 ΔK_{eff} 을 도입한 다음식을 유도하였다.

$$\Delta\gamma_p = \left[\frac{\Delta K_{eff}}{2\sigma_y} \right]^2 \quad (11)$$

Fig. 15는 (10)식과 (11)식으로 구한 개구비 U에 대한 $\Delta\gamma_p/\gamma_p$ 와의 관계를 나타내며 잔류응력에 의한 응력비의 영향이 없으므로 U값을 간단하게 평가 가능하다. 또한, 최대작용응력 σ_{\max} 과 개구비 U의 관계를 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_{\max} = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi} \cdot U \quad (12)$$

Fig.12, 13의 결과로부터 최대작용응력을 계산하고 서로 비교하여 균열선단에서 균열진전중에 실제로 영향을 미치는 잔류응력의 크기를 Fig.16에 나타내었다. Fig.16을 Fig.2, 3과 비교하면 스테인레스강에서 인장반복하중의 작용으로 균열이 전파할 때 인장잔류응력 영역에서는 균열전파와 더불어 잔류응력이 급격히 이완되고, 압축잔류응력장에서는 잔류응력의 이완이 거의 일어나지 않고 균열의 지연에 많은 영향을 주며, 균열길이 18mm 이후부터 급격히 이완되었다.

이상의 결과로 볼 때 스테인레스강은 용접으로 인하여

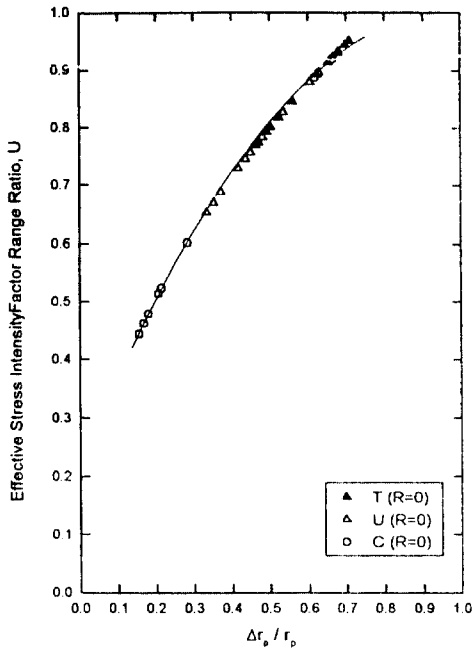


Fig. 15 Relationship between U and $\Delta r_p / r_p$

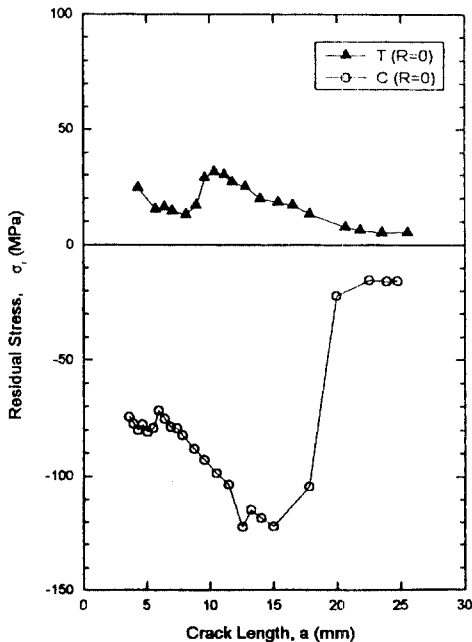


Fig. 16 Amount of applied residual stress during crack growth

많은 양의 잔류응력을 내포할 수 있으며 그 영향은 잔류응력의 측정과 그 재분포 양상의 다양성으로 인하여 균열전파속도 예측에 어려움이 있으나, 용접잔류응력의 재분포 특성을 파악하고, 균열담힘 등을 평가함으로써 예측가능하다.

5. 결 론

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 스테인레스강 용접재에서 잔류응력은 균열전파에 의해 재분포하는데, 외부 하중이 없는 상태에서 슬릿을 진전시킨 경우에 잔류응력의 분포는 평형상태를 유지하기 위하여 인장-압축 변환점이 슬릿 진전 방향으로 이동하면서 재분포 한다.
2. STS304 용접재의 균열선단에 인장잔류응력이 존재할 때 중첩법에 의한 균열전파속도 예측은 잔류응력의 중첩에 의한 소성영역의 변화와 반복하중에 의한 잔류응력의 급격한 이완에 의해 상당한 오차를 나타내었다.
3. 압축잔류응력장에서 피로균열이 전파할 때는 인장반복하중에 의한 압축잔류응력의 이완이 매우 작기 때문에 이로 인한 유효응력비의 영향으로 매우 낮은 균열전파속도를 나타내었다.
4. 균열담힘과 반복 소성영역의 관계로부터 피로균열전파 중 균열선단에 실제로 영향을 미치는 잔류응력의 재분포 특성을 파악 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Masubuchi, K., 1980, "Analysis of Welded Structure," Pergamon Press, pp. 466~468.
2. Lawrence, F. V. Jr., Burk, J. D. and Yung, J. Y., 1982. "Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments," Residual Stress Effects in Fatigue, ASTM STP 776.
3. 이용복, 김상철, 1987. "용접잔류응력 영역에서의 피로균열전파에 대한 Forman식의 적용," 대한용접학회지, 제 5권, 제 1호, pp. 42~56.
4. 송삼홍, 김현, 1991. "잔류응력의 재분포와 피로크랙 전파거동," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 (I), pp. 27~30.

5. Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E.J., 1986, "Redistribution of Residual Stress Caused by Crack Propagation Initially Through Residual Compressive Stress Field," Japan Welding Society Transactions, Vol. 4, No. 3, pp. 150~155.
6. 이용복, 조남익, 1995, "피로균열이 진전할 때 용접잔류응력의 재분포와 그 영향," 대한용접학회지, 제 13권, 제 4호, pp.410~416
7. 이용복, 정진성, 김호경, 조남익, 박상흠, 1996, "SS330 용접재에서 재분포 압축잔류응력 및 균열단합의 영향을 고려한 피로거동에 관한 연구," 한국공작기계기술학회지, 제 6권, 제 2호, pp. 26~33.
8. Terada, H., 1976, "Analysis of the Stress Intensity Factor of a Crack Perpendicular to the Welding Bead," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 8, pp. 441~444.
9. Green, O. V., 1930, Transactions of American Society for Steel Treating, Vol. 18, pp. 369.
10. Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R., 1985, The Stress Analysis of Cracks Handbook, Paris Productions, Inc., St. Louis.
11. Forman, R. G., Kearney, V. E. and Engle, R. M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures," Trans. ASME, J. Basic Eng., Vol. 89, pp. 459.
12. Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," Damage Tolerance in Aircraft Structure, ASTM STP486, pp. 230~242.
13. Mukai, Y., Nishimura, A. and Kim, E.J., 1986, "Redistribution of Residual Stress Caused by Crack Propagation Initially Through Residual Tensile Stress Field," Japan Welding Society Transactions, Vol. 4, No. 1, pp. 154~159.
14. 이용복, 정진성, 조남익, 1996, "SS330용접재에서 재분포 잔류응력 및 균열단합영향을 고려한 피로거동에 관한 재분포에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제 20권, 제 7호, pp. 2234~2245.
15. 이용복, 조남익, 김호경, 정진성, 김영훈, 1996, "연강용접재의 피로거동에 관한 연구," 대한기계학회 추계 학술대회논문집(A), pp. 12~17.
16. Minakawa, K., Nakamura, H. and McEvily, A.J., 1984, "On the Development of Crack Closure with Crack Advance in a Ferritic Steel", Scripta Metallurgica, Vol. 18, pp. 1371~1374.
17. Ritchie, R.O., Suresh, S. and Moss, C.M., 1980, "Near-Threshold Fatigue Crack Growth in 2-1/2 Cr-Mo Pressure Vessel steel in Air and Hydrogen", Journal of Engineering and Materials Technology, Trans. ASME H, Vol. 102, pp. 293~299.
18. Suresh, S. and Ritchie, R.O., 1982, "A Geometric Model for Fatigue Crack Closure Induced by Fracture Surface Roughness", Metallurgical Trans. A, Vol. 13, pp. 1627~1631.
19. Bachmann, V. and Munz, D., 1975, "Crack Closure in Fatigue of a Titanium Alloy", Int. J. of Fracture, Vol. 11, pp. 713~716.
20. Paris, P. and Erdogan, 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," J. of Basic Eng., Trans. of ASME, pp. 528~534.
21. Walker, E. K., 1970, "Effect of Environments and Complex Load History on Fatigue Life," ASTM STP 462, pp. 1~4.
22. McClung, R. C., 1991, "Crack Closure and Plastic Zone Sizes in Fatigue," Fatigue of Eng. Materials & Structures, Vol. 14, No. 4, pp. 455~468.
23. 김태형, 1994, "순수Ti과 2024-T3 Al합금의 항복응력 및 과대하중이 피로균열 진전거동에 미치는 영향," 동아대학교 박사학위논문.