

〈論 文〉

직접측정법에 의한 피로크랙 개구거동의 해석

송삼홍* · 김 현**

(1992년 3월 14일 접수)

Analysis of Fatigue Crack Opening Behavior Using Direct Measuring Method

Sam Hong Song and Hyun Kim

Key Words : Crack Opening Displacement (크랙개구변위), Opening Load (개구하중), Opening Ratio (개구비), Stress Ratio (응력비), Effective Stress Intensity Factor Range (유효응력확대계수범위), Direct Measuring Method (직접측정법)

Abstract

The purpose of this study is to identify the effects of loading variables on fatigue crack opening behavior, using structural steel SS41. To use various stress ratios, three kinds of the methods varying stress ratio were used; ΔP const., P_{max} const., and P_{min} const.. To measure the opening load, the direct measuring method which measures the distance between two micro indentations $20\mu\text{m}$ behind crack tip and the elastic compliance method were used. As the results of present study, the following conclusions are obtained. First, using the direct measuring method, it was possible to measure the COD at any location behind crack tip. Second, as measuring point becomes farther from crack tip, opening load becomes smaller. Third, the acceleration of da/dN near notch is due to crack opening behavior. Finally, opening ratio is a function of not only R , but ΔK .

기 호 설 명

a : 크랙길이 (mm)

α : 유의도 수준

da/dN : 피로크랙 전파속도 (m/cycle)

ΔK : 응력확대계수범위 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)

ΔP : 하중범위 (kN)

K : 응력확대계수 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)

p : 확률

P : 하중 (kN)

r : 상관계수

r^2 : 설명변량

R : 응력비 ($=P_{min}/P_{max}$)

σ : 응력 (MPa)

U : 개구비 ($=\Delta K/\Delta K_{eff}$)

W : 시편의 폭 (mm)

Z : 표준점수

하첨자

eff : 유효

I : Mode I

max : 최대

min : 최소

op : 개구

1. 서 론

*정회원, 고려대학교 기계공학과

**정회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

로크랙 안정성장단계(stage II)에 국한하여 Paris의 식⁽¹⁾으로 설명된다. 그러나, 피로크랙 전파속도가 응력비, 미시조직, 환경등의 영향을 받는 피로크랙 초기성장단계(stage I)의 경우, 피로크랙이 단일 과대하중이나 랜덤하중등의 변동하중을 받는 경우, 잔류응력장내에서 피로크랙이 발생 전파하는 경우 등에서 나타나는 피로크랙 전파는, 엄밀하게 Paris 식으로 설명될 수 없다. 따라서, 이러한 경우들을 해석하기 위하여 많은 연구자들은 크랙개구거동을 고려하고 있다.

선형탄성 파괴역학의 관점에서 보면, 피로크랙의 크랙개구변위(crack opening displacement, COD)는 하중에 선형적으로 비례하여, 부하시에는 증가하고 재하시에는 감소한다. 그러나 실제 피로크랙의 선단은 일정진폭을 갖는 사이클중의 최소하중부터 개구하중까지의 하중범위에서는 열리지 않으므로, 피로크랙의 COD는 하중에 선형적으로 비례하지 않는다. 피로크랙의 선단은 개구하중이하에서 닫혀있다가 개구하중이상에서 열리기 시작하는데, 이러한 크랙개구가 생기는 원인으로서는 크랙면 주위의 잔류소성변위, 크랙면내의 산화물, 크랙면 거칠기, 상변태 등을 들 수 있다.⁽²⁾ 크랙선단이 열리지 않으면 피로크랙은 전파하지 않으므로⁽³⁾ 크랙선단이 열리는 하중범위만이 피로수명에 영향을 미치며, 크랙개구거동을 고려하여 피로수명을 계산할 때에는 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 를 사용한다. 일반적으로 피로수명 계산에 사용되는 응력 확대계수범위 ΔK 는 하중진폭과 크랙길이등으로 계산되는데, 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 는 하중진폭 대신 크랙선단이 열리는 하중범위와 크랙길이등으로 계산된다. 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 를 피로수명 계산에 사용하면 보다 정확한 피로수명의 예측이 가능하다.⁽⁴⁾

크랙개구거동에 대한 기존의 연구결과중 일부는 다음과 같다. (1)개구비는 응력비만의 함수이다. (2)피로크랙은 동일한 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 에서 응력비에 무관하게 일정한 전파속도를 가진다. 그러나 이상과 같은 결과에서, 개구비가 응력비만의 함수라는 결과에는 문제가 있다고 생각된다. 예를 들면, 응력비를 변화시키면서 여러가지 피로시험을 했을 때, 낮은 응력확대계수범위에서의 피로크랙 전파속도는 응력비에 따라서 차이가 많은 반면에, 높은 응력확대계수범위에서의 피로크랙 전파속도는 응력비에 관계없이 거의 같다. 이러한 현상은 개구비가 응력비만의 함수라는 결과에 대치된

다. 이에 대한 구체적인 설명은 다음과 같다. 일반적으로, ΔK 가 작은 영역에서는 피로크랙 전파속도의 응력비 의존성이 많이 나타나는 반면, ΔK 가 큰 영역에서는 피로크랙 전파속도에 대한 응력비의 영향이 없다.⁽⁵⁾ 피로크랙 전파속도를 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 의 함수로 설명하면 이러한 응력비 의존성이 없어져야 되는데, 개구비를 응력비만의 함수로 가정하면 이러한 응력비 의존성이 없어지지 않는다. 왜냐하면 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 는 ΔK 에 개구비 U 를 곱한 값으로 정의되기 때문에, da/dN - ΔK 선도의 각 데이터는 da/dN - ΔK_{eff} 선도에서 U 를 곱한 값으로 평행이동한다. 따라서, da/dN - ΔK_{eff} 의 선도중 ΔK_{eff} 가 작은 영역에서는 크랙전파속도의 응력비에 대한 의존성이 사라지는 반면, ΔK_{eff} 가 큰 영역에서는 크랙전파속도가 응력비의 영향을 받게 된다. 따라서, 개구비를 응력비만의 함수로 가정했을 때, 피로크랙은 동일한 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 에서 응력비에 무관하게 일정한 피로크랙 전파속도를 가지지 못하게 된다. 그러므로 개구비가 응력비만의 함수라는 결과에는 문제점이 있다고 본다.

또, 개구비가 응력비만의 함수라고 발표한 연구들의 대부분^(2,4,12,14)은 응력비가 0보다 크거나 작거나 관계없이, 응력확대계수범위 ΔK 를 최대 응력확대계수 K_{max} 와 최소 응력확대계수 K_{min} 의 차로 정의하고 있다. 그러나, Mode I에서의 응력확대계수 K_I 은 크랙을 가진 물체가 크랙직각 방향으로 인장하중을 받고 있을 경우에 한해서만 물리적인 의미를 가지며, 압축하중하에서는 물리적인 의미를 잃는다. 따라서 응력비가 0이하인 경우의 응력확대계수범위 ΔK 는 K_{max} 로 정의되어야 하고⁽⁶⁾, 이들 연구결과에 대한 재검토가 필요하다고 생각된다.

한편, 개구비에 영향을 미치는 또 다른 인자를 찾기 위한 연구가 소수 있다. 田中⁽⁵⁾는, 개구비가 응력비와 응력확대계수범위의 영향을 받는다고 하였으며, Hudak등⁽⁷⁾은, 개구비가 최대응력확대계수의 영향만을 받는다고 하였다. 그러나, 개구비의 최대응력확대계수 K_{max} 에 대한 의존성 여부에는 일관된 경향이 없다. 최대응력확대계수 K_{max} 가 증가하면, 개구비가 증가한다는 결과⁽⁸⁾ 및 일정하다는 결과⁽⁹⁾와 감소한다는 결과⁽¹⁰⁾등이 있어, 이에 대한 구체적인 연구가 필요하다. 이와 같이 개구비에 영향을 미치는 인자에 대하여 일치된 견해가 없으므로, 개구비에 영향을 미치는 인자에 대한 더 많은

연구가 필요하다고 생각된다.

또한, 개구하중을 정확히 측정하기 위해서 우선 COD를 정확히 측정해야 한다. 왜냐하면 하중과 측정된 COD의 관계선도에서 변곡점을 찾고, 그 변곡점에 의해 개구하중이 측정되기 때문이다. 그런데, COD의 측정위치와 하중-COD선도에서 변곡점을 결정하는 방법에 대하여 다음과 같은 논란이 있다. 첫째, COD의 측정위치가 크랙선단에 가까울수록, 또 시편 내부보다 표면에서 높은 개구하중이 측정된다고 한다.^(14,16) 따라서, 어느 위치에서 COD를 측정해야 정확한 개구하중이 측정되는가에 대해 의문을 가질 수 있다. 둘째, 하중-COD선도에서 나타나는 관계선도에서 변곡점을 결정하는 방법이 연구자에 따라 다르다. Elber⁽⁴⁾는 하중-COD선도에서 제하시 최대하중으로부터 일정한 기울기를 가지는 선의 끝점을, Carmen⁽¹¹⁾ 등은 하중-COD선도에서 부하시 최대하중으로부터 일정한 기울기를 가지는 선의 끝점을, Sharpe⁽¹²⁾ 등은 초기강성에 따른 기울기를 가진 선과 최대하중으로부터 일정한 기울기를 가지는 선이 만나는 점을, 각각 변곡점이라 보고 이에 해당하는 하중을 개구하중이라고 하였다. 하중-COD선도에서 개구하중을 결정하는 방법이 연구자들마다 다른 것은 초기강성에 의해 나타나는 선(크랙선단이 닫혀있을 때 나타나는 선)과 개구하중에서 최대하중까지 일정한 기울기를 가지는 선(크랙선단이 하중의 증가에 따라 열리고 있을 때 나타나는 선) 사이에 비선형구간이 있기 때문이라고 생각된다. 이러한 비선형구간은 크랙선단 부위를 벗어난 위치에서 COD를 측정하기 때문에 생기며, 비선형 구간때문에 정확한 변곡점을 찾기 어렵게 된다.

이와 같이 COD를 측정하는 위치와 변곡점을 결정하는 방법에 따라서 서로 다른 개구 하중이 측정되므로, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 크랙선단의 COD를 측정하여, 실제로 크랙선단이 열리는 하중을 개구하중으로 결정하는 것이 가장 바람직하다. 그러나, 실험적으로 피로크랙 선단의 COD를 측정하는 것은 거의 불가능하다. 하지만 크랙선단에 매우 가깝고, 크랙선단으로부터 일정한 거리에서 COD를 측정하는 것은 가능하다. 따라서 COD를 측정하는 위치를 크랙선단에 매우 가깝게 하고 크랙선단으로부터 항상 일정한 거리에서 COD를 측정하는 것이, 보다 정확하게 개구하중을 측정하는 방법이라고 생각된다. 그러나 이러한 측

정법을 사용하여 크랙개구거동을 고찰한 연구는 매우 부족하다. 개구하중을 측정하기 위해 현재까지 개발된 방법에는 여러가지가 있다. 우선 탄성 컴플라이언스법이 생각되는데, 이 방법은 COD 게이지나 스트레인 게이지를 사용하여 COD의 변화를 측정하는 것이다. 탄성 컴플라이언스법을 사용하면 신호대 잡음비가 커서 개구하중을 결정하기 힘든 때도 많으며,⁽¹³⁾ 그랙선단에 가까이 게이지를 부착하기 힘들기 때문에 크랙선단의 개구를 정확히 관찰하는 데 무리가 있다. 그러나 Laser Interferometric Strain Displacement Gage를 사용하는 방법(이하 레이저 간섭법이라 칭함)을 사용하면 크랙선단영역에서의 COD를 정확히 측정할 수 있다. 레이저 간섭법은 크랙면 상부에 압입한 비커스 압자에서 반사된 레이저 광의 간섭무늬를 관찰함으로써 COD를 측정하는 것이다. 레이저 간섭법을 사용하면 약 0.01 μ m의 변위량을 측정할 수 있기 때문에,⁽¹²⁾ 크랙선단 부근의 COD와 미소크랙의 COD를 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 레이저 광의 크기(약 2~5 mm)때문에, 전파하는 피로크랙의 크랙선단 영역에서 연속적으로 COD를 측정한다든지, 크랙면이 열리는 형상등을 관찰하기가 매우 힘들다.

따라서 개구거동을 보다 정확히 파악하기 위하여, 다음과 같은 요건을 충족시킬 수 있는 측정법의 개발이 필요하다고 생각된다. 첫째 요건은 레이저 간섭법만큼 정확히 미소변위를 측정할 수 있어야 한다는 것이고, 둘째 요건은 크랙선단 근방이나 임의의 위치에서 COD를 측정할 수 있어야 한다는 것이며, 셋째 요건은 피로크랙이 전파함에 따라 크랙선단의 개구를 계속해서 관찰할 수 있어야 한다는 것이다.

본 연구에서는 크랙선단의 소성변형에 의해 발생하는 소성유기 크랙개구거동을 검토하기 위하여, 크랙선단 최인점 영역에서 COD를 측정할 수 있는 직접 측정법을 개발 사용하고 (1) 직접측정법의 적용범위와 크랙선단의 개구거동 (2) 측정위치에 따른 개구하중의 변화 (3) 개구비에 영향을 주는 하중변수등에 대하여 고찰하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 및 실험시기

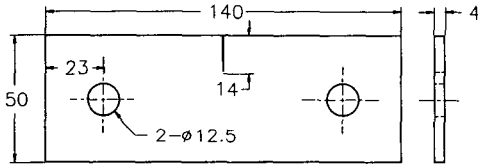
실험에 사용한 재료는 국산 일반구조용 압연강재

Table 1 Chemical compositions of SS41 steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.13	0.25	0.06	0.019	0.010

Table 2 Mechanical properties of SS41 steel (annealed at 860°C for 1hr and furnace cooling)

Yield Stress	(MPa)	297.23
Tensile Stress	(MPa)	393.08
Young's Modulus	(GPa)	198.3
Poisson's Ratio		0.3
Hardness	(Hv)	165.1

**Fig. 1** Dimensions of SEN specimen (unit:mm)

SS41이다. 재료는 조직의 균질화를 위하여 860°C에서 1시간 유지후 노냉시키는 방법으로 어니얼링 처리되었다. 열처리한 SS41의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1, 2에 제시하였다. 사용한 시편은 Fig.1과 같은 형태의 SEN시편(single edge notched specimen)이다. 모든 시편은 피로크랙이

압연직각방향으로 전파하도록 설계되었다. 사용한 실험기기는 전기유압식 인장압축 피로시험기 Instron 1331이다.

2.2 실험 응력조건

본 연구에서는 소성유기 크랙개구거동에 영향을 미치는 일정진폭 피로하중의 변수를 조사하기 위하여 여러가지 응력비를 사용하였다. 응력비를 변화시킨 방법으로는, (1)최대응력 일정한 조건에서 응력비를 변화시키는 방법, (2)최소응력 일정한 조건에서 응력비를 변화시키는 방법 및 (3)응력진폭 일정한 조건에서 응력비를 변화시키는 방법등이 있는데, 이 방법들을 사용하였다. 시편의 명칭과 응력 조건은 Table 3과 같다. 피로하중은 주파수 10 Hz의 정현파를 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 배율 100배의 이동현미경을 사용하여 피로크랙의 길이를 측정하였으며, Fig.2에는 실험장치를 개략적으로 나타내었다. 개구하중은 탄성 컴플라이언스법(elastic compliance method)과 직접 측정법(direct measuring method)을 사용하여 측정하였다. 여기서 직접 측정법이란 COD를 측정하기 위하여, 크랙선단부근의 크랙면상하에 비커스압자를 압입한 뒤, 크랙선단의 압자를 촬영한 필름상에서 압자간 간격을 측정하는 것이다. 직접 측정법을 사용하여 개구하중을 결정하는 순서는 다음과 같다. 우선, 피로시험중 피로크랙이 임의의 크기로 성장하면 시편을 실험기로부터 분리시키고, 비커스 경도계를 사용하여 크랙선단 부근의 크랙면

Table 3 Specimens with varying stress ratio

Specimen	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	ΔP (kN)	R	Case
B1	9.8	0.98	8.82	0.1	ΔP constant
B2	13.23	4.41	8.82	0.33	
B3	17.64	8.82	8.82	0.5	
B4	19.6	3.92	15.68	0.2	P_{min} constant
B5	11.76	3.92	7.84	0.33	
B6	7.84	3.92	3.92	0.5	
B1	9.8	0.98	8.82	0.1	P_{max} constant
B8	9.8	2.94	6.86	0.3	
B9	9.8	4.9	4.90	0.5	

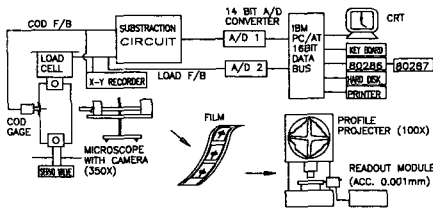


Fig. 2 Schematic diagram of testing apparatus

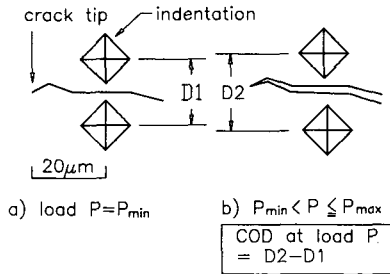


Fig. 3 Location of Vicker's indentations and definition of COD in direct measuring method

상하에 미소압자를 하중 25 g, 유지시간 5의 조건으로 압입한다. 다시 시편을 실험기에 정착시키고, 하중을 최소하중부터 최대하중까지 하중진폭의 5~10%씩 단계적으로 증가시키며, 각 하중에서 크랙선단 부위를 배울 약 350배의 자체제작 카메라 부착 이동현미경으로 사진 촬영한다. 그리고 배울 100배, 측정가능 길이 0.001 mm의 윤곽투영기를 사용하여 필름상에 나타난 압자 중심선간의 간격을 3회씩 측정한다. Fig.3에 나타낸 바와 같이, 임의의 하중에서의 압자중심간 간격 D2에서 최소하중 상태에서의 압자중심간 간격 D1을 빼면, 임의의 하중에서의 COD가 얻어진다. 위의 순서로 측정된 크랙선단 부위의 COD와 하중과의 관계선도에서 COD가 변화하기 시작하는 하중, 즉 크랙선단 부근이 열리기 시작하는 하중을 개구하중으로 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 직접측정법과 크랙개구거동

본 연구에서 개발·사용한 직접측정법의 측정 정밀도는 Fig.4에 나타낸 바와 같다. Fig.4는 크랙선단 영역을 촬영한 210장의 필름에서 압자간의 간격을 3회씩 측정하여 평균값을 구하고, 측정치가 가

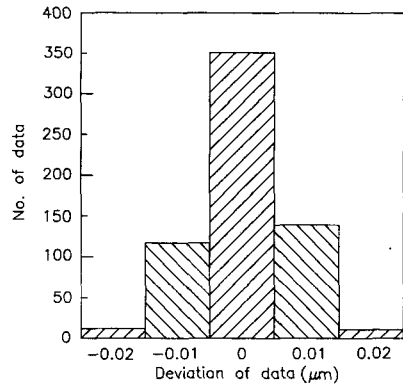


Fig. 4 Histogram of deviation of data obtained by direct measuring method

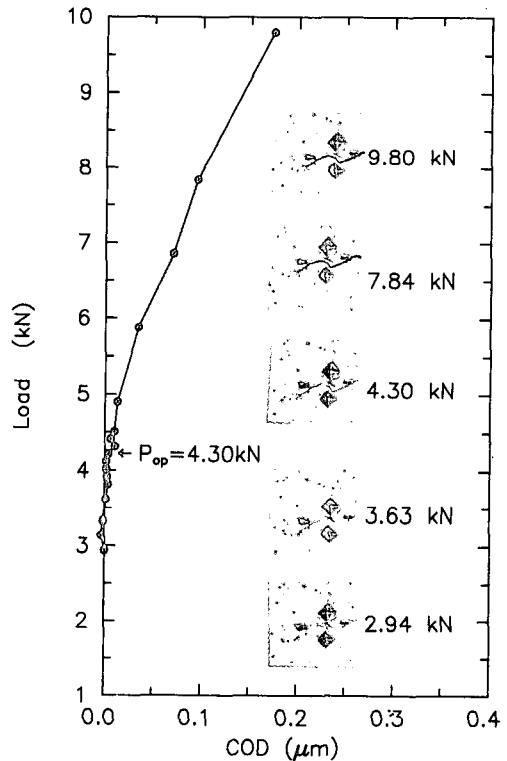


Fig. 5 Typical relations between load and COD (B8 specimen, crack length=1 mm)

지는 편차를 빈도분포로 나타낸 것이다. 직접측정법으로 측정된 각 측정치의 편차량은 대부분이 $\pm 0.01\mu m$ 사이에 있으며, 레이저 간섭법의 편차량은 $\pm 0.005\mu m$ 이므로, 직접측정법을 사용하면 레이저 간섭법과 비교할 만큼 정확하게 COD의 측정이 가능하다.

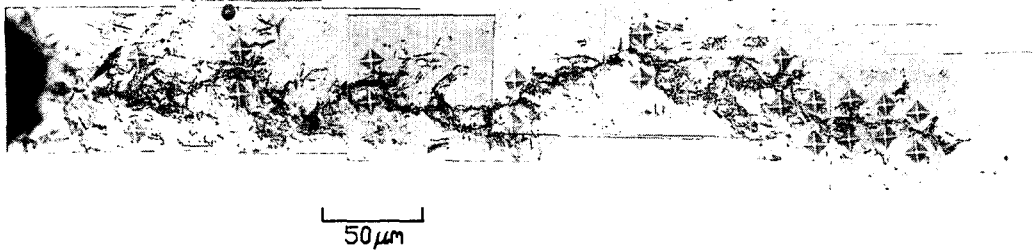


Fig. 6 Vicker's indentations in a wake of crack

Fig.5는 하중과 크랙선단 20 μm후방에서 측정된 COD의 관계선도이다. 이와 같이 직접 측정법을 사용하면 크랙선단이 개구되는 하중이 확실히 나타나기 때문에(Fig.5 참조), 개구하중을 정밀하게 측정할 수 있다. 한편, 미소압자를 압입하기 이전의 개구하중과 미소압자를 압입한 후의 개구하중을 탄성컴플라이언스법으로 구해 비교하면 거의 차이가 없으므로, 압자가 개구하중에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

또한 직접측정법을 사용하면 Fig.6과 같이 임의의 위치에 압자를 압입하여 그 위치에서의 COD를 측정할 수 있으며, 미소압자의 크기(본 실험재료인 경우 약20 μm)가 매우 작아서 크랙선단 부근의 COD도 측정할 수 있다. Fig.6의 각 압자 위치에서 측정된 COD와 하중간의 관계를 Fig.7에 제시하였다. 적용하중이 개구하중보다 작은 3.92 kN, 4.3 kN에서는 크랙선단 근처만이 단혀있으며, 하중이 증가함에 따라 단혀있는 부분이 줄어들음을 알 수 있다. 또 직접측정법은 임의의 거리에서 하중에 따른 COD변화량을 측정할 수 있기 때문에, Weight Function⁽¹⁵⁾을 도입하여 복잡한 형상의 부재나 잔류응력을 가진 부재의 응력확대계수 산정이 용의해질 것으로 생각된다.

Fig.6의 각 압자위치에서 측정된 COD와 하중의 관계선도를 구하여 개구하중을 측정하면, Fig.8에 나타난 것과 같이 측정위치가 크랙선단에 가까울수록, 측정되는 개구하중이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 크랙선단의 개구하중은 좀 더 클 것으로 예상되나, 큰 차이는 없을 것으로 생각된다. 또 탄성컴플라이언스법으로 측정된 개구하중은 3.33 kN으로, 크랙선단 근방에서 직접측정법으로 측정된 개구하중(4.7 kN)보다 작으며, 노치선단에서 직접측정법으로 측정된 개구하중(3.3 kN)과 비슷하다.

측정위치가 크랙선단에서 멀어질수록 측정되는 개구하중은 작지만, 일정거리 이상에서 측정하면 거의 일정한 개구하중이 측정된다. 크랙선단에서 두께방향으로 개구하중을 측정했을 때, 표면에서 측정된 개구하중이 두께중심부에서 측정된 그것보다 크다고 한다⁽¹⁶⁾. 따라서 표면에서의 측정위치가 크

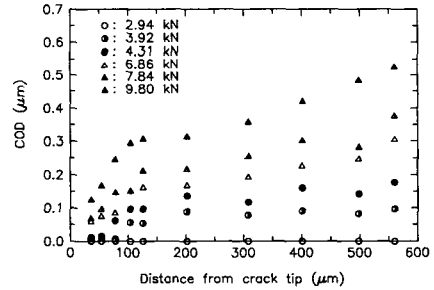


Fig. 7 COD vs. distance from crack tip (crack length=14.6 mm, R=0.3, ΔK=12.4 MPa·m^{1/2})

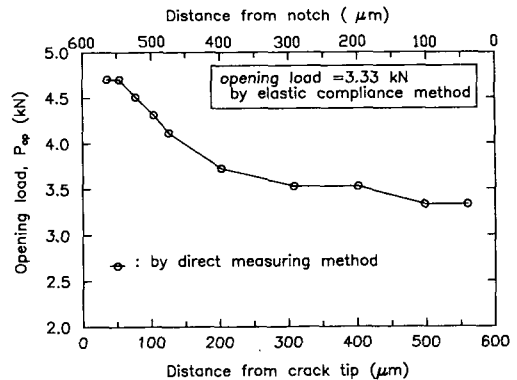


Fig. 8 Variation of opening load with measurement location (crack length=14.6mm, R=0.3, ΔK=12.4MPa·m^{1/2})

랙선단에서 멀어지면 시편두께방향 중심부의 작은 개구하중때문에 측정되는 개구하중은 작아진다고 생각된다.

3.2 피로크랙 전파속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 및 유효응력확대계수범위 ΔK_{max} 의 관계

피로크랙 전파속도 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 의 관계를 나타낸 것이 Fig.9이다. 여기에서 피로크랙이 노치에서 초기성장할 때 생기는 가속현상을 관찰할 수 있다. 피로크랙 초기 성장구간을 제외하고, 안정성장구간에 대해서는 식(1)로 정리된다.

$$da/dN = C (\Delta K)^m \tag{1}$$

여기서 실험상수인 C 는 $7.96 \times 10^{-14} \sim 1.33 \times 10^{-11}$ 의 범위내에 있고, 실험상수인 m 은 2.24~4.15의 범위내에 있다. K 는 다음 식(2)로 구하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} (1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha - 21.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4) \tag{2}$$

여기서, $\alpha = a/W$ 이다.

또, 개구비 U 와 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 의

정의는 식(3), (4)와 같다.

$$U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min}) \tag{3}$$

$$\Delta K_{eff} = U(\Delta K) = K_{max} - K_{op} \tag{4}$$

식(3), (4)를 이용하여 구한 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 와 피로크랙 전파속도 da/dN 의 관계는 Fig.10, 11에 제시하였다. 피로크랙이 노치에서 초기 성장할 때 생기는 가속현상은 크랙개구거동을 고려한 $da/dN - \Delta K_{eff}$ 선도에서 나타나지 않는다. 그러므로 이러한 가속현상은 크랙개구에 원인이 있음을 알 수 있다. 그리고 유효응력확대계수범위 ΔK_{eff} 와 피로크랙 전파속도 da/dN 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$da/dN = C' (\Delta K_{eff})^{m'} \tag{5}$$

직접측정법을 사용하면 $m' = 2.67$, $C' = 8.98 \times 10^{-12}$ 을 얻었다. 그런데 Fig.10과 같이 피로크랙 전파속도 da/dN 이 빠른 구간(10^{-8} m/cycle 이하의 피로크랙 전파속도 구간)에서는 직접측정법을 사용하는 것이 탄성 킴플라이언스법을 사용하는 것보다 좁은 산포(scatter)를 보인다. 따라서 느린 피로크랙 전파속도구간에서는 직접측정법을 사용하면 더 좋은 결과가 얻어짐을 유추할 수 있다. 본 연구에서는 이를 통계적으로 검증하기 위하여 우선 10^{-8} m/cycle의 피로크랙 전파속도를 기준으로 하여 피로크랙 전파속도가 이보다 빠른 구간과 느린 구간으로 나누어 각 구간에서 피로크랙 전파속도와 유효응력확대계수범위의 상관계수(coefficient of correlation, r)를 구하였다. 그리고 두 방법에서 나타난 상관계수의 차이가 통계적으로 유의한지를 검증하기 위하여 Fisher의 $r-Z$ 변환(Fisher's r to Z transformation)⁽¹⁷⁾을 사용하였다. $r-Z$ 변환은 각 상관계수를 표준점수(standard score, Z)로 변환시켜 두 표준점수값이 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 직접 비교할 수 있는 방법이므로 데이터수에 따른 결과의 오인을 방지할 수 있다.

$r-Z$ 변환에 의해 10^{-8} m/cycle 이상의 피로크랙 전파속도 구간에서 각 방법을 통해 구한 데이터의 상관계수를 비교해 보면, 두 상관계수의 차이값 Z 에 대한 확률(probability, p)은 0.278이다. 따라서 유의도수준(significance level, α)을 0.001로 했을 때 두 상관계수의 차이가 없다는 가설은 기각되지 않으므로 두 방법간의 차이가 없다고 볼 수 있다. 그러나 10^{-8} m/cycle 이하의 피로크랙 전파속도 구

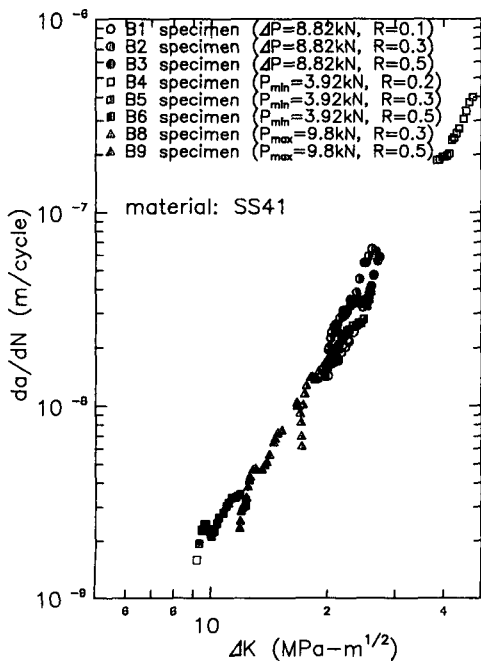


Fig. 9 $da/dN - \Delta K$ relations for steel SS41

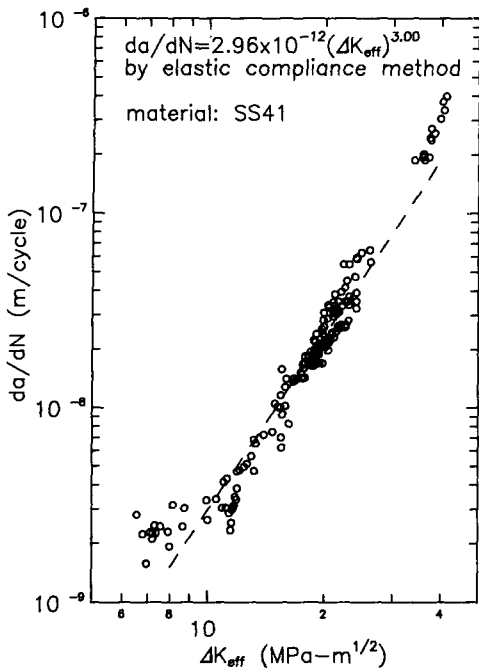


Fig. 10 $da/dN - \Delta K_{eff}$ relations (by elastic compliance method)

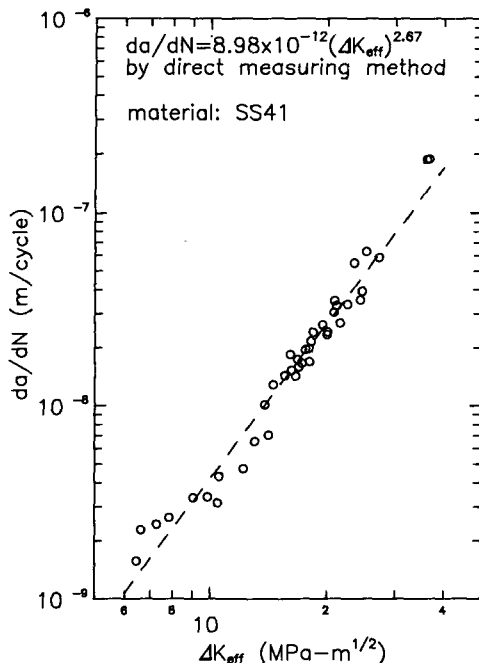


Fig. 11 $da/dN - \Delta K_{eff}$ relations (by direct measuring method)

간에서 직접측정법으로 구한 크랙전파속도와 유효 응력확대계수범위의 상관계수는 0.96이고, 탄성 컴플라이언스법으로 구한 상관계수는 0.24이다. 이때 두 상관계수의 차이값 Z에 대한 확률은 0.00003으로, 유의도 수준을 0.001로 했을 때, 두 상관계수가 차이가 없다는 가설은 기각된다. 따라서 직접측정법과 탄성컴플라이언스법으로 얻은 데이터의 상관계수는 통계적으로 유의한 차이가 있다. 그러므로 피로크랙 전파속도 da/dN 이 빠른 구간(10^{-8} m/cycle이상의 피로크랙 전파속도 구간)에서는 두 방법의 차이가 거의 없어 어떤 측정법을 사용해도 동일한 결과를 얻을 수 있으나, 피로크랙 전파속도가 10^{-8} m/cycle이하일 때는 탄성컴플라이언스법보다 직접측정법을 사용하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

3.3 개구비에 영향을 미치는 인자

소성유기 크랙개구거동은 크랙선단의 소성변형에 의해 생기므로, 피로하중에 의한 영향이 크다고 생각된다. 피로하중을 특징지을 수 있는 하중변수는 응력비, 최소하중, 최하중, 하중범위등이며, 이들 변수는 파괴역학적으로 응력비, 최소응력확대계수, 최대응력확대계수, 응력확대계수범위와 직접 관련이 있다. 본 연구에서는, 피로하중에 따른 각 변수가 개구비에 미치는 영향을 검토하기 위해, 실험에서 얻은 데이터를 통계 패키지인 SAS(statistical analysis system)로 처리하였다. 응력비, 최대응력확대계수, 최소응력확대계수, 응력확대계수범위와 그 역수들을 개구비에 영향을 미치는 변수라고 가정하고, 이 8개의 변수들중에서 설명변량이 가장 높은 변수의 조합을 구하기 위해 변수선택법중의 하나인 변수증감법(stepwise method)을 사용하였다. 이 8개의 변수이외에 다항식으로 설명되는 변수들도 고려할 수 있으나, 현재까지 발표된 문헌들의 대부분이 8개의 변수를 사용하여 개구비를 설명하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이들 결과와 비교검토하기 위해 위의 8개 변수만을 선택하여 해석하였다. 변수증감법으로 변수를 선택한 결과 응력비 R과 응력확대계수범위의 역수인 $1/\Delta K$ 가 설명변량 0.94로 가장 높은 설명변량 값을 가짐을 알 수 있었다. 그리고 Hudak등의 결과⁽¹⁶⁾와 비교하기 위해 개구비를 최대응력확대계수의 역수만으로 된 함수라고 가정했을때, 얻은 설명변량은 0.92이다. 따라서 개구비를 응력확대계수범위의 역수와 응력

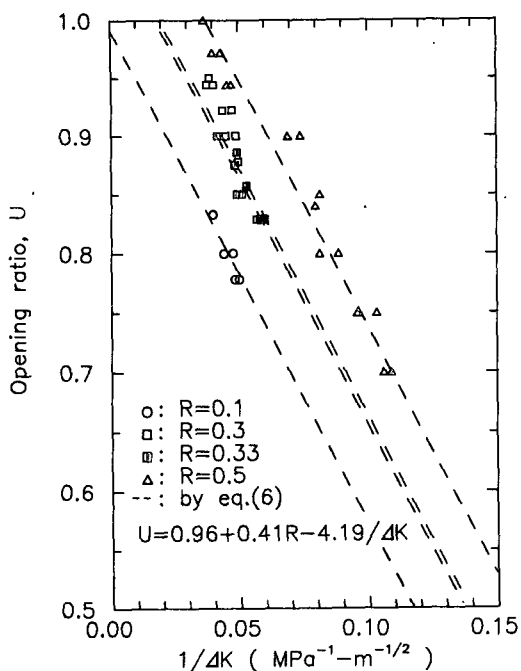


Fig. 12 U-1/ΔK-R relations for steel SS41

비의 함수로 정의하는 것이 가장 좋으며, 이 관계를 나타낸 것이 Fig.12와 식(6)이다.

$$U = 0.96 + 0.41R - 4.19/\Delta K \quad (0.1 \leq R \leq 0.5) \quad (6)$$

식(6)과 같이 개구비를 정의하였을때, 오차항의 표준편차는 0.02이며 변동계수는 2.31%이다. 식(6)을 이용하여 개구비가 응력확대계수범위와 응력비가 증가함에 따라 증가하는 것을 정량적으로 설명할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 크랙선단의 소성변형에 의해 발생하는 소성유기 크랙개구거동을 검토하기 위하여, 직접측정법을 개발 사용하고 여러가지 응력비에서 일반구조용 압연강재 SS41의 크랙개구거동을 고찰하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 직접측정법을 사용하면 크랙선단으로부터 임의의 거리에서 하중에 따른 COD의 변화량과 개구하중을 정밀하게 측정할 수 있다. 또한 측정위치가 크랙선단에서 멀어지면 측정되는 개구하중이 작아지나, 일정거리 이상에서는 일정한 개구하중이 측

정된다.

(2) 피로크랙 초기성장 단계에서 생기는 가속현상은 크랙개구에 원인이 있다. 유효 응력확대계수범위 ΔK_{eff} 와 피로크랙 전파속도 da/dN 의 관계는 다음과 같다.

$$da/dN = 8.98 \times 10^{-12} (\Delta K_{eff})^{2.67}$$

(3) 개구비를 응력확대계수범위의 역수와 응력비의 함수로 정의하는 것이 가장 좋으며, 개구비는 응력확대계수범위와 응력비의 증가에 따라 증가한다. 이러한 관계는 다음의 식으로 정량적으로 설명된다.

$$U = 0.96 + 0.41R - 4.19/\Delta K$$

$$(0.1 \leq R \leq 0.5)$$

참고문헌

- (1) Paris, P.C. and Erdogan, F. 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," J. of Basic Eng. Trans. ASME, pp. 528~534.
- (2) Jaap Schijve, 1988, "Fatigue Crack Closure: Observations and Technical Significance," ASTM STP 982, pp. 5~34.
- (3) Nisitani, 1985, "Behavior of Small Crack," Current Research on Fatigue Crack, pp. 1~22.
- (4) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," ASTM STP 486, pp. 230~242.
- (5) 田中洋一, 征矢勇夫, 1987, "疲勞き裂 開閉口に及ぼす應力比と應力擴大係數範圍の影響について," 溶接學會 論文集 第5卷 第1號, pp. 119~126.
- (6) David Broek, 1982, "Elementary Engineering Fracture Mechanics," Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, pp. 11~12.
- (7) Stephen, J., Hudak, Jr. and Davison, 1988, "The Dependence of Crack Closure on Fatigue Loading Variables," ASTM STP 982, pp. 121~138.
- (8) Srivastava, Y.P. and Garg, S.B., 1985, "Influence of R on Effective Stress Range Ratio and Crack Growth," Engineering Fracture Mechanics, Vol.22, pp. 915~926.
- (9) Katchner, M. and Kaplan, M., 1974, "Effect of R-Factor and Crack Closure on Fatigue Crack

- Growth Rate for Aluminum and Titanium Alloy," ASTM STP 559, pp. 264~282.
- (10) Unangst, K.D., Shih, T.T. and Wei, R.P., 1977, Crack Closure in 2219-T851 Aluminium Alloy, Engineering Fracture Mechanics, Vol.9, pp. 725~735.
- (11) Davis Canmen C., Christopher Turner. C. and Ben, M.Hillberry, 1988, "Method for Determining Crack Opening Load from Load-Displacement Data," ASTM STP 982, pp. 214~221.
- (12) Sharpe, W.N. Jr. and Su, X. 1990, "COD Measurements at Various Positions Along a Crack," Experimental Mechanics, Vol.30, pp. 74~79.
- (13) Anderson, T.L. 1991, Fracture Mechanics, CRC Press, Florida, pp. 641~644.
- (14) Macha, D.E., Corbly, D.M. and Jones, J.W., 1979, "On the Variation of Fatigue Crack Opening Load with Measurement Location," Experimental Mechanics, Vol.19, pp. 207~213.
- (15) Rooke, D.P. Baratta, F.I. and Cartwright, D.J. 1981, "Simple Methods of Determining Stress Intensity Factors," Engineering Fracture Mechanics, Vol.14, pp. 397~426.
- (16) Ray, S.K. and Allen, F. Grandt, Jr., 1988, "Comparison of Methods for Measuring Fatigue Crack Closure in a Thick Specimen," ASTM STP 982, pp. 197~213.
- (17) Hays, W.L., 1988, Statistics, 4th ed., Holt, Rinehart and Winston Inc., Fort Worth, pp. 588~592.