

COD(Crack Opening Displacement) 측정에 의한 강재표면의 피로균열진전속도 평가

Evaluation of Fatigue Crack Growth Rate on the Surface of Steel Members Using COD(Crack Opening Displacement) Measurement

김 광 진¹⁾ 김 인 태^{2)*}
Kim, Kwang Jin Kim, In Tae

Abstract

Steel structures have been allowed to have fatigue damage tolerance in fact. If it would be assessed whether fatigue crack is growing or not and How fast fatigue crack is propagating, we should make a rational decision on methods and a period of reinforcement in the maintenance. In this study, fatigue crack growth tests on two kinds of through-thickness cracked steel plates and a out-of-plane gusset welded joint were conducted to evaluate fatigue crack growth rate using the COD(Crack Opening Displacement), and COD measurement using strain gauges was examined to offer a practical method. As a result, we proposed a reasonable assessing method for fatigue crack growth rate using the COD and it was experimentally proved practical to estimate the COD through measuring strains.

Keywords : Fatigue crack, Crack growth rate, COD(Crack opening displacement), Crack length, Stress intensity factor

1. 서 론

강구조물의 적절한 피로검토에도 불구하고, 강교량의 피로에 의한 손상은 계속해서 보고되고 있다. 이것은 설계단계에서 고려하지 못한 2차응력의 발생, 과적차량, 제작오차나 용접불량 등이 주요원인이다. 그리고 고강도 강재의 사용으로 사하중의 경감에 따른 활하중의 비중 증가는 구조를 더욱 피로에 취약하게 만듦으로, 앞으로도 피로손상은 강교량에서 지속적인 열화요인이 될 것으로 판단된다.

Fig. 1은 강거더 교량의 대표적인 피로균열을 나타낸 것이다(K. Nishikawa et al., 1998). 손상사례 대부분은 주부재와 부부재의 연결부에서 발생된다. 이러한 피로균열이 주요원인이 되어 낙교가 되거나 교량이 교체되는 사례는 현재까지 찾아볼 수 없다(일본도로협회, 2004). 이러한 측면에서 강교량은 피로균열에 대해서 사실상 손상을 허용하고 있지만, 그것에 대한 적절한 평가는 이루어지고 있지 않고 있는 실정이다.

피로검토를 위한 대표적인 방법중 S-N 곡선은 손상되

지 않은 부재에 적용되며, 이음 형태와 작용하중 등의 특정한 경계조건에 따라 사용이 제한적이다(한국도로교통협회, 2005). Fig. 1과 같이 피로균열이 발견된 구조물의 상태를 파악하기 위한 적절한 수단은 파괴역학으로 판단된다. 그러나 토목구조물의 건전성 평가를 위해 파괴역학을 현장에서 적용한 사례는 찾아볼 수 없다. 이것은 시설물의 관리주체에서 파괴역학에 대한 이해의 부족과 적용의 어려움이 원인인 것으로 사료된다.

피로균열에 대한 진전·비진전성의 판단과 진전속도의 평가가 피로손상부위에 직접적으로 수행된다면, 보수·보강의 방법이나 수준 및 시행시기가 합리적으로 결정될 수 있을 것이다. 이러한 목적으로 실험실에서 적용되는 파괴역학이 강구조물의 점검시 현장에서 적용될 수 있도록 합리적이고 간편한 방법의 개발이 필요하다.

토목구조물의 실용적인 건전성 평가를 위한 초기 단계로서, 본 연구는 COD(Crack Opening Displacement)를 이용한 강부재 표면에서의 균열진전속도 평가에 관한 것이다. 선행된 연구(김광진 등, 2010)에서 도출된 균열진전속도의 평가를 위한 파라미터 $\Delta COD / \sqrt{r}$ 에 대한 타

1) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
2) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수

* Corresponding author : itkim@pusan.ac.kr 051-510-2497

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2011년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

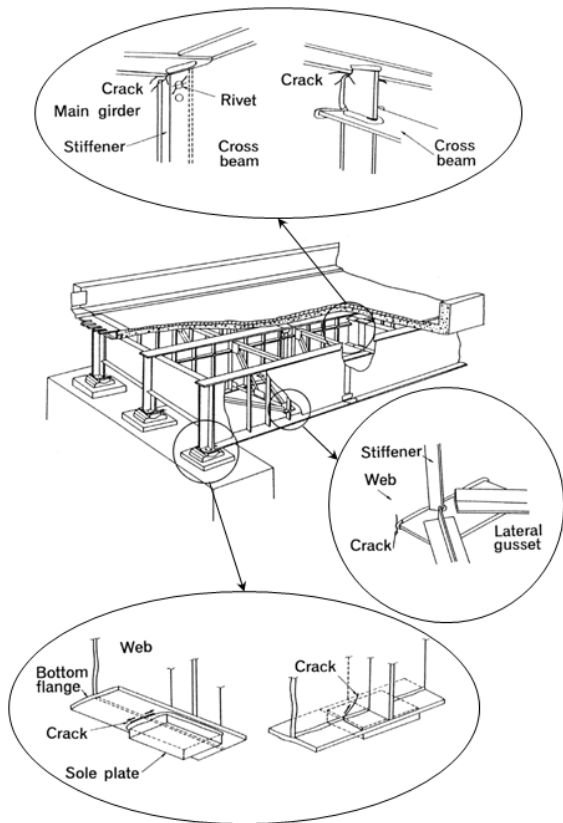


Fig. 1 Typical Fatigue Cracks in Steel Bridges(K. Nishikawa et al., 1998)

당성을 확인하고, 보다 실용적인 COD의 측정을 위해 변형률 게이지를 이용하는 방법에 대하여 검토하였다. 그리고 피로취약부인 용접이음의 균열진전속도 평가를 위해, 면외거셋 용접이음에 대한 COD를 이용한 균열진전속도 평가법을 적용하였다.

2. 관통균열 시험편의 균열진전시험

2.1 시험방법

2.1.1 시험편

2종류의 관통균열 시험편에 대한 치수와 노치상세를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 피로균열을 유도하기 위한 노치는 지름 0.25mm의 튼을 이용하여 기계가공 하였다.

관통균열 시험편의 제작에 사용된 SM400B 강재의 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1과 2와 같다.

2.1.2 반복하중의 부하(loading)조건

중앙균열 시험편(CCT) 1개와 편측균열 시험편(SECT)

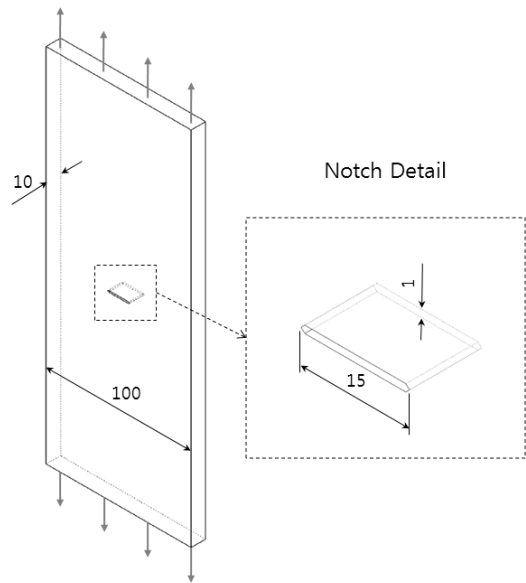


Fig. 2 Center Cracked Plate Tension Specimen(CCT)

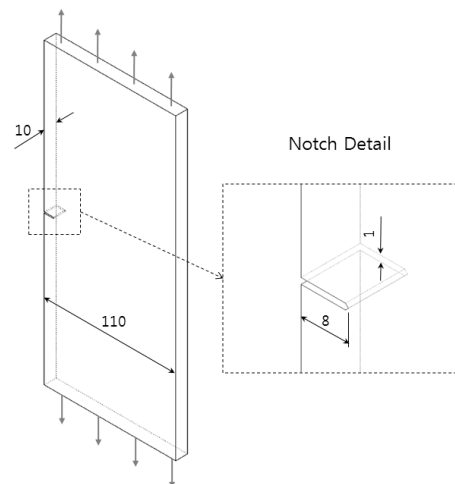


Fig. 3 Single Edge Cracked Plate Tension Specimen(SECT)

Table 1 Chemical Composition of Through-thickness Cracked Steel Plates

Material	Chemical Composition (%)				
	C	Si	Mn	P	S
SM400B	0.15	0.16	0.91	0.019	0.009

Table 2 Mechanical Properties of Through-thickness Cracked Steel Plates

Material	Mechanical Properties		
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
SM400B	280	430	30

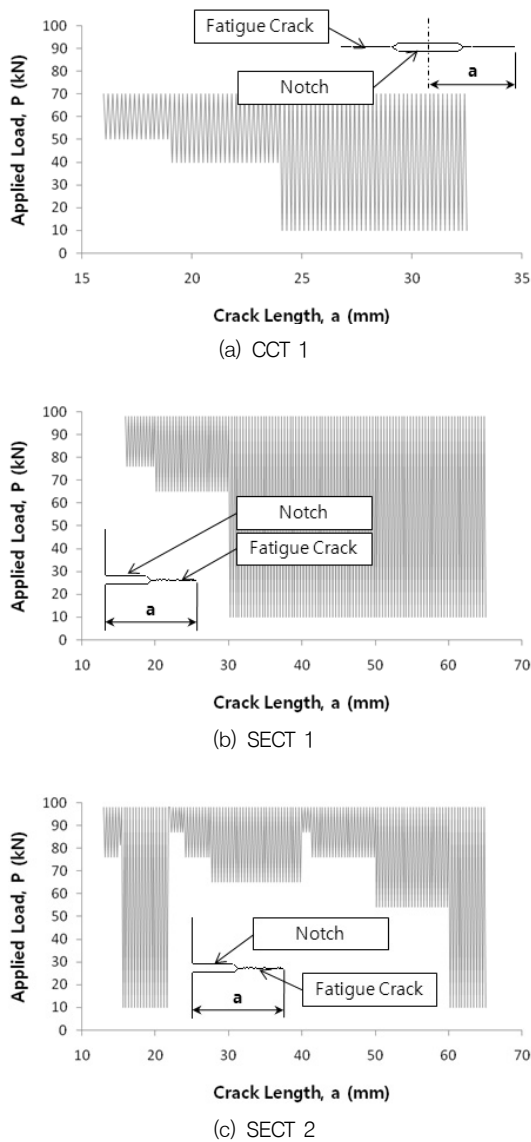


Fig. 4 Applied Load Conditions of Through-thickness Cracked Steel Plates

2개에 대해 실시된 관통균열 시험편의 균열진전시험에서 반복하중의 범위와 공칭응력범위를 Fig. 4와 Table 3에 정리하였다. 다양한 균열길이와 균열진전속도에서 COD를 측정할 목적으로, 3개의 관통균열 시험편 모두 균열의 진전길이에 따라 공칭응력범위의 변화를 주었다. 균열진전시험에서는 $\pm 1000\text{kN}$ 용량의 피로시험기가 사용되었으며, 반복하중의 재하속도는 약 16 Hz이다.

2.1.3 COD의 측정방법

본 균열진전시험에서의 COD 측정은 디지털 현미경과 변형률 게이지(strain gauge)를 이용한 2가지 방법으로 시도하였다.

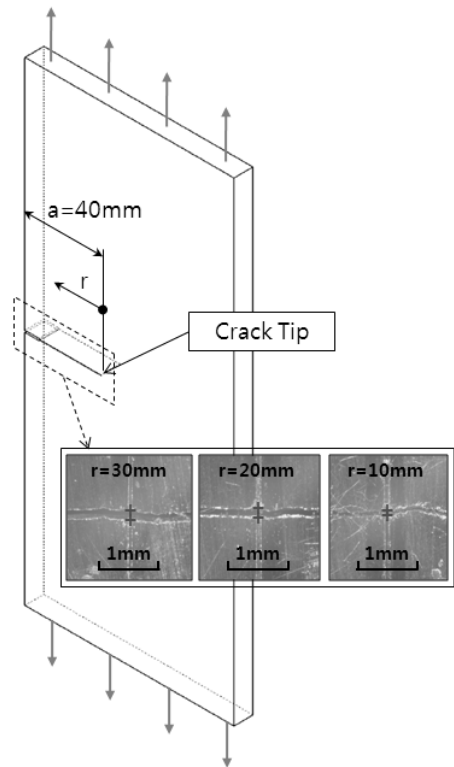


Fig. 5 COD Measurement Using a Microscope

Table 3 Applied Load Conditions of Through-thickness Cracked Steel Plates

Specimen	P_{\max} (kN)	P_{\min} (kN)	$\Delta\sigma$ (MPa)
CCT 1	70	10 ~ 50	20 ~ 60
SECT 1	98	10 ~ 76	20 ~ 80
SECT 2	98	10 ~ 87	10 ~ 80

Table 3에서의 CCT 1과 SECT 1에서 수행된 COD의 측정은 디지털 현미경을 이용하여 저배율($\times 200$)로써 측정하였다. 그 중 SECT 1의 균열길이 $a=40\text{mm}$ 일 때, 측정위치 r 에 따른 COD의 측정 예를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 일정한 균열길이 a 마다 균열선단으로부터 거리 r (균열진전방향의 역방향)에 따른 COD의 변화를 측정하였다.

현장에서 보다 실용적인 COD의 측정방법을 모색하기 위해 SECT 2에서는 변형률 게이지를 이용하여 Fig. 6과 같이 COD를 측정하고, 그 타당성을 분석하였다.

2.2 시험결과

2.2.1 측정된 COD와 해석된 COD의 비교

Fig. 8에는 SECT 1의 균열길이 $a=40\text{mm}$, 최대하중 $P_{\max}=98\text{kN}$ 이 작용할 때, 본 균열진전시험에서 측정된

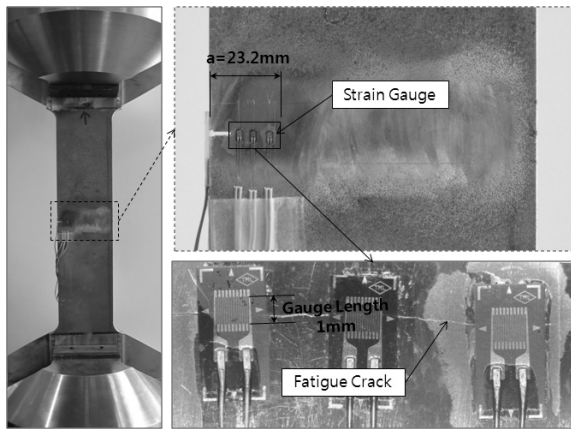


Fig. 6 COD Measurement Using Strain Gauges

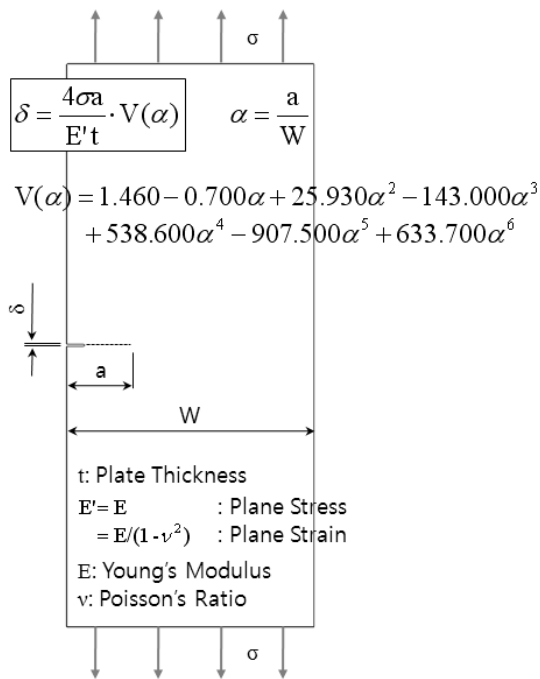


Fig. 7 COD Formula for SECT(Y. Murakami, 1987)

COD와 동일한 시험편에 대해 계산된 COD를 비교예로서 나타내었다.

Fig. 7의 COD 계산식은 평면응력상태와 평면변형률상태로 구분되는 2차원 해석해이다. 그리고 시험편의 노치가 가공된 edge에서의 COD 계산식만이 제안되어 있기 때문에 Fig. 8의 COD 측정위치 $r=40\text{mm}$ 에만 계산값이 표시되어있다(Y. Murakami, 1987).

Fig. 8의 FEM 해석에는 COSMOSM(solver)을 사용하고, 3차원 솔리드 요소를 이용하여 균열부근의 절점간격은 0.5mm 로 모델링 하였다. FEM은 3차원 해석으로서 평면응력상태와 평면변형률상태가 시험편에 공존하게 된

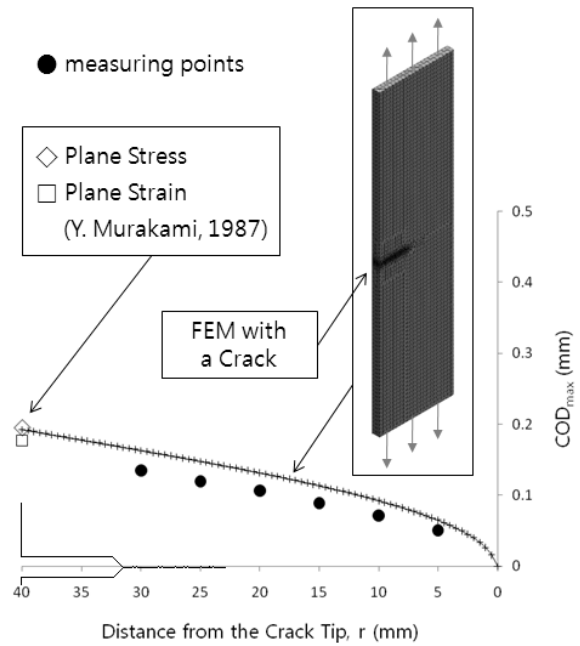


Fig. 8 Comparison between Measured COD and Analytical Studies

다. 그러므로 Fig. 8의 edge위치($r=40\text{mm}$)에서 유한요소해석의 결과값은 Fig. 7의 기존 제안식에 의한 2개의 응력상태에 따른 COD 계산값의 사이에 놓이게 됨으로 타당하다.

Fig. 8에서와 같이 본 균열진전시험에서 측정된 COD는 유한요소해석에 의한 COD보다 작은 것이 확인되었다. 피로균열은 절단균열(saw cut crack)과는 다르게 균열이 진전한 후 균열선단 후방으로 잔류인장변형(residual plastic deformation)이 형성된다. 이것 때문에 피로균열의 COD는 절단균열보다는 작게 된다(W. Elber, 1971).

이렇게 해석된 COD와는 다른 측정된 COD를 이용해서 Fig. 9와 같이 일정한 균열길이 a 에서 COD의 측정위치 r (Fig. 5 참조)에 따른 ΔCOD 의 변화를 나타내었다. 여기서, ΔCOD 는 Fig. 4에서와 같이 최대하중 P_{max} 이 작용할 때의 COD_{max} 과 최소하중 P_{min} 이 작용할 때의 COD_{min} 의 차를 나타낸다. Fig. 9에는 SECT 1에서 균열길이 $a=17\text{mm}$, 27.5mm , 그리고 40mm 일 때만을 예로서 나타내었으며, 모든 균열길이 a 에서 균열선단으로부터 거리 r 에 따른 ΔCOD 의 크기는 \sqrt{r} 에 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 특징을 이용해서 COD의 측정위치에 영향이 적고, 직접측정으로부터 얻어지는 파라미터 $\Delta\text{COD}/\sqrt{r}$ 을 도출하였다(김광진 등, 2010).

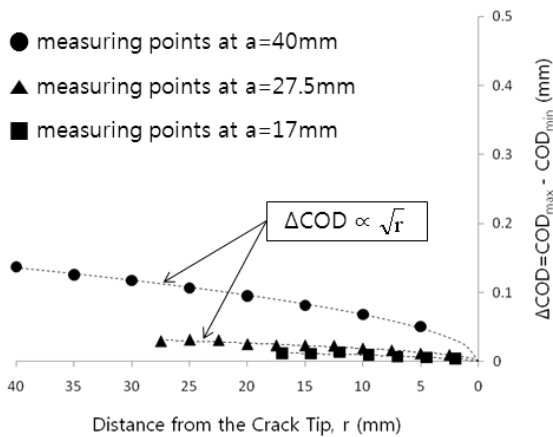


Fig. 9 Opening Shapes of the Fatigue Crack in SECT 1(김광진 등, 2010)

2.2.2 Strain Gauge를 이용한 COD의 측정

본 연구는 강구조물에 피로균열이 발견된 경우, 현장에서 균열에 대한 직접적이고 즉각적인 균열진전속도의 평가를 목표로 하고 있다. 따라서 디지털 현미경으로 측정된 영상을 이용하는 방법이나 클립형 게이지를 이용하여 피로균열의 COD를 측정하는 것이 가능하지만, 보다 실용적인 측정방법의 제안을 위해 변형률 게이지를 이용한 COD 측정법에 대하여 검토하였다.

변형률 게이지에 의한 COD 측정이 적절한 방법인지를 가늠하기 위하여, 유한요소해석을 통하여 시험편에 작용하는 응력의 상태를 확인하였다. Fig. 10은 균열길이 a=45mm, 공칭응력범위 $\Delta\sigma=20\text{MPa}$ 일 때에 SECT 2에 대한 응력해석 결과를 나타낸다. Fig. 10의 등응력면은 동일한 크기의 응력을 연결한 면이며, 응력의 작용방향은 외력의 작용방향과 같이 균열면에 직각이다. 유한요소해석에는 COSMOSM(solver)을 사용하고, 3차원 솔리드 요소를 이용하여 균열부근의 절점간격은 0.5mm로 모델링 하였다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 변형률 게이지가 균열선단 부근에 부착되더라도 게이지 길이(Fig. 6 참조) 부분에는 작용응력의 10%도 영향을 미치지 못한다. 더욱이 게이지의 중심이 부착되는 균열면의 법선응력은 발생되지 않는다. 그러므로 게이지의 변형률에 기여하는 대부분은 COD가 된다.

변형률 계산식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

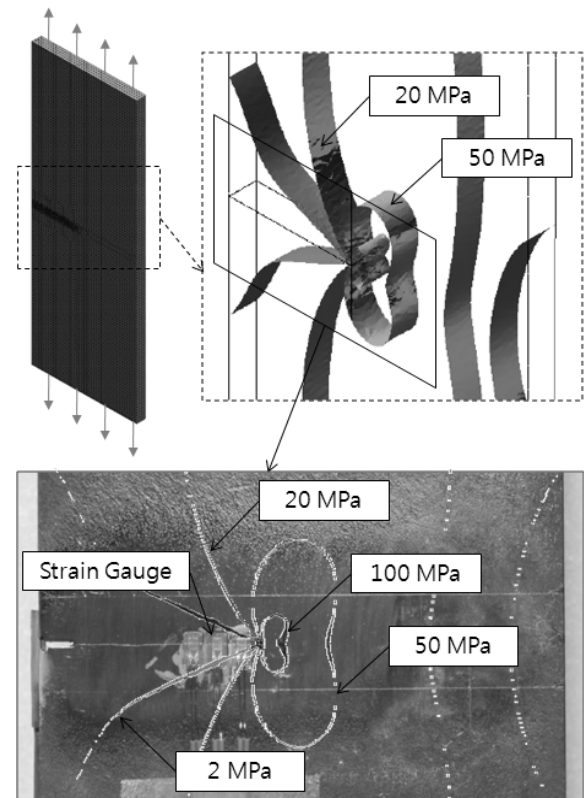


Fig. 10 Stress State in the Vicinity of the Strain Gauges

여기서, ϵ 는 변형률, L은 초기길이(mm), ΔL 는 변형된 길이(mm)이다.

식(1)을 반복하중이 작용할 때 ΔCOD 를 계산하는 식으로 다시 정리하면 식(2)와 같다.

$$\Delta\text{COD} = \epsilon L_g \quad (2)$$

여기서, L_g 은 게이지 길이(mm)이다.

2.2.3 균열진전속도 da/dN과 $\Delta\text{COD}/\sqrt{r}$ 의 관계

Fig. 11에는 SECT 1과 CCT 1의 균열진전시험으로부터 얻어진 균열진전속도 da/dN과 $\Delta\text{COD}/\sqrt{r}$ 의 관계를 나타내었다. da/dN - $\Delta\text{COD}/\sqrt{r}$ 관계는 da/dN - ΔK (Stress Intensity Factor Range)의 관계와 같이 대수(log) 눈금 그래프에서 선형적인 데이터 분포를 보이는 것이 실험결과 확인되었다.

그리고 선형탄성파괴역학에서 COD와 응력확대계수 K와의 관계는 식(3)과 같이 정의된다(장동일, 2000).

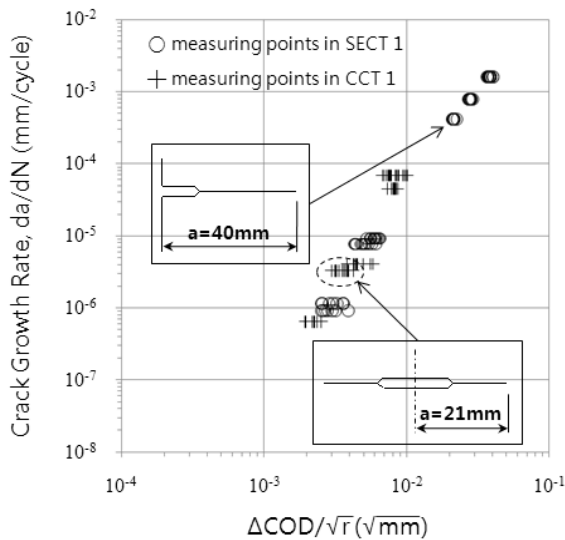


Fig. 11 Relationship between da/dN and $\Delta COD/\sqrt{r}$

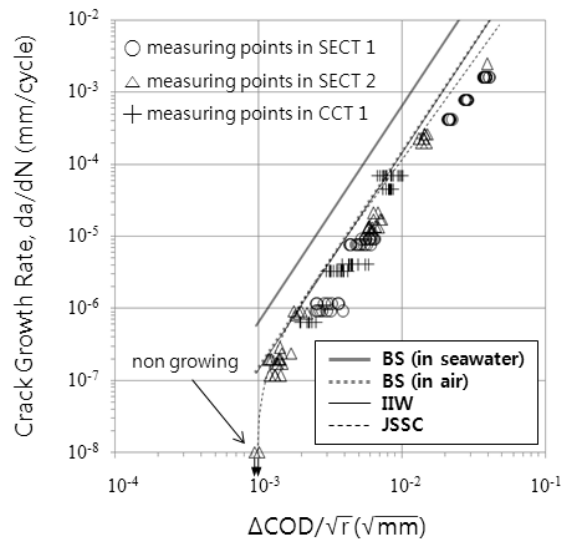


Fig. 12 Comparison between Measured Data and Guidelines

Table 4 Recommended values for C and m

Guidelines	C (unit)	m	ΔK_{th} (unit)	Formula
BS (in seawater)	2.3×10^{-12} (N, mm)	3	-	5-1
BS (in air)	5.21×10^{-13} (N, mm)	3	-	5-1
IIW	5.0×10^{-13} (N, mm)	3	-	5-1
JSSC	2.7×10^{-11} (N, m)	2.75	2.0 (MPa \sqrt{m})	5-2

$$COD = \frac{\chi + 1}{2\pi G} K \sqrt{2\pi r} \quad (3)$$

여기서, $\chi = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$ (평면응력), $3 - 4\nu$ (평면변형률)

$$\nu : \text{Poisson's ratio}, G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

응력확대계수 K는 경계조건만 결정된다면 좌표계와 무관하게 균열이 존재하는 구조의 상태를 나타내는 일정한 값이 된다. 그러면 식(3)의 COD와 \sqrt{r} 은 비례하지만 균열전단의 부근에서만 유효하다. 그러나 Fig. 9에서와 같이 본 관통균열 시험편의 균열진전시험에서는 균열의 전영역에서 $\Delta COD \propto \sqrt{r}$ 의 관계가 성립하였다.

그러므로 반복응력이 작용할 때 식(3)을 ΔCOD 에 관해 다시 정리하면 식(4)와 같다.

$$\Delta COD / \sqrt{r} = \frac{\chi + 1}{2\pi G} \Delta K \sqrt{2\pi} \quad (4)$$

균열진전속도 da/dN 의 평가를 위해 기존에 응력확대 계수범위 ΔK 가 이용되었으며, 대표적인 제안식은 다음과 같다(D. Radaj et al., 1998).

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (5-1)$$

$$da/dN = C [(\Delta K)^m - (\Delta K_{th})^m] \quad (5-2)$$

여기서, C와 m은 재료상수, ΔK_{th} 는 균열진전하한계이다.

Table 4에는 식(5)를 이용한 da/dN 의 계산을 위해 BS(British Standards Institution), IIW(International Institute of Welding), 그리고 JSSC(Japan Society of Steel Construction)에서 제안하는 재료상수 C와 m의 값과 사용된 $da/dN - \Delta K$ 관계식을 정리하였다(D. Radaj et al., 1998; A.F. Hobbacher, 2009; 일본강구조협회, 2000). 그러나 ΔK 로부터 da/dN 을 추정하기 위해서는 Fig. 1에서와 같이 균열이 포함된 복잡한 경계 조건에 대한 ΔK 의 평가가 선행되어야 한다.

식(4)를 이용하면 ΔK 를 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 로 변환할 수 있다. 따라서 Table 4와 식(5)로부터 가이드라인에서 제안하는 $da/dN - \Delta K$ 관계를 $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$ 관계로 변환(이하 "변환된 가이드라인"이라 칭함)할 수 있다.

이렇게 변환된 가이드라인과 본 관통균열 시험편의 균

Table 5 Chemical Composition of the Welded Joint

Material	Chemical Composition (%)				
	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.16	0.19	0.87	0.015	0.004

Table 6 Mechanical Properties of the Welded Joint

Material	Mechanical Properties		
	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
SS400	302	455	29

열진전시험 결과를 Fig. 12에 함께 나타내었다. $da/dN - \Delta K$ 관계에서처럼 $da/dN - \Delta COD / \sqrt{r}$ 관계에서도 변환된 가이드라인의 우측으로 분 포로시험에서 측정된 데이터들이 분포하게 된다. 이것은 가이드라인에서 제안하는 재료상수로 계산되는 da/dN 이 실측치의 평균값보다 빠르게 평가됨으로써, 구조의 건전성평가에서 안전측의 결과를 가져오기 위한 본래의 목적에 부합한다.

Fig. 12에서 SECT 2의 측정데이터는 Fig. 6과 10에서처럼 변형률 게이지로 측정된 변형률을 식(2)를 이용하여 ΔCOD 로 변환한 값을 이용한 것이다. 실측된 데이터의 분포에서 COD의 측정방법(디지털 현미경, 변형률 게이지)에 따른 특성은 찾아보기 어렵다. 그리고 non growing이라 표시된 부분에서는 분해능 1 μ m 디지털 현미경으로 반복 하중 200만회 이상에서 균열진전을 확인할 수 없었다.

3. 면외거셋 용접이음의 균열진전시험

3.1 시험방법

3.1.1 시험편

Fig. 1과 같이 용접이음부가 강교량에서는 피로에 취약한 부분이다. 피로균열이 용접부근에 위치할 경우에 $\Delta COD / \sqrt{r}$ 를 이용한 da/dN 의 평가가 타당한지를 판단하기 위하여 면외거셋 용접이음에 대하여 균열진전시험을 실시하였다.

용접이음의 형상과 치수를 Fig. 13에 나타내었다. 균열진전시험에 사용된 용접이음의 모재의 화학성분 및 기계적 성질을 Table 5와 6에 정리하였다.

3.1.2 COD 측정방법 및 하중조건

SECT 2에서와 같이 변형률 게이지를 이용하여 COD

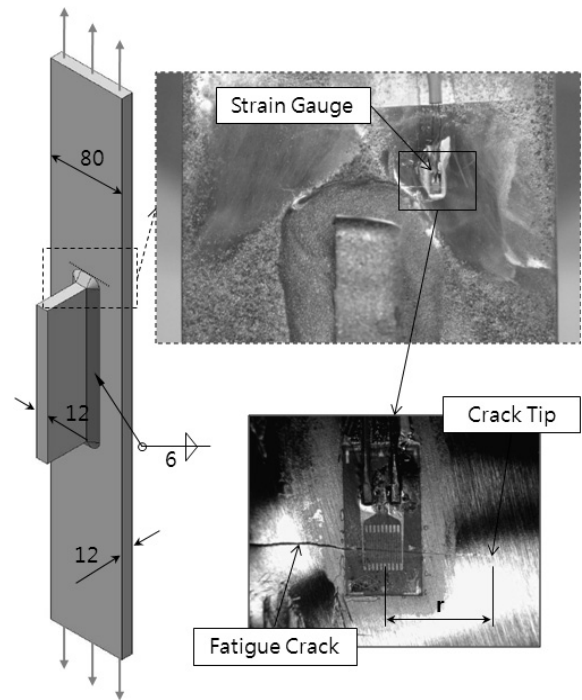


Fig. 13 COD Measurement in the Out-of-plane Gusset Welded Joint

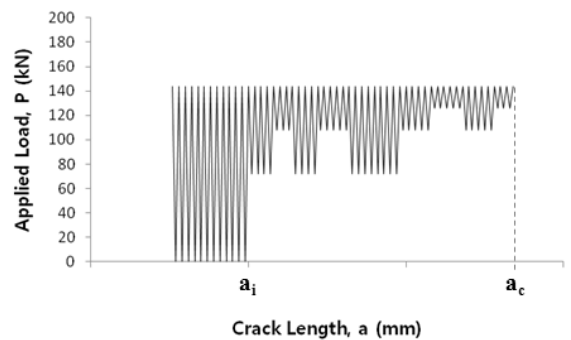


Fig. 14 Applied Load Conditions of the Welded Joint

를 측정하였으며, Fig. 13에 변형률 게이지를 이용한 시험편 표면에서의 COD 측정 예를 나타내었다.

다양한 da/dN 에서 $\Delta COD / \sqrt{r}$ 를 측정하기 위하여 Fig. 14에서와 같이 반복하중범위를 변화시켰다. da/dN 와 $\Delta COD / \sqrt{r}$ 의 최초 측정은 Fig. 15의 a_i 에서 실시되었으며, a_c 에서 마지막으로 측정되었다. Fig. 14의 반복인장하중의 변화로부터 야기된 비치마크(beach mark)가 Fig. 15의 파단면에 선명하게 남아있다.

3.2 시험결과

Fig. 15의 파단면에서 확인할 수 있듯이 피로균열이 용접지단에 발생하여 모재를 관통하는 동안, Fig. 13에서

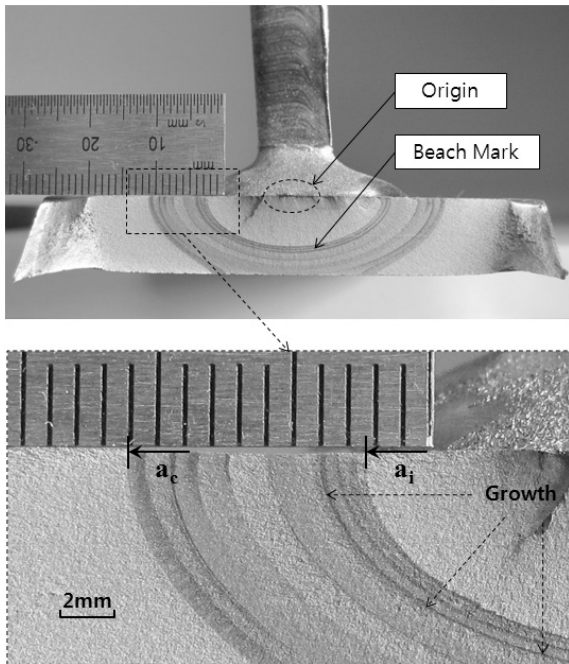


Fig. 15 Fracture Surface in the Welded Joint

럼 표면의 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 와 da/dN 를 측정하였다. 균열이 진행되는 동안 16차례의 측정이 이루어졌다.

이렇게 본 용접이음의 균열진전시험으로부터 얻어진 $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$ 관계의 측정데이터를 식(4)를 이용하여 $da/dN - \Delta K$ 관계로 변환하고, 일본의 금속재료기술연구소 NRI(M National Research Institute for Metal)에 의한 $da/dN - \Delta K$ 관계곡선과 비교하여 Fig. 16에 표시하였다(일본강구조협회, 2000). 본 피로시험으로부터 측정된 데이터는 NRI의 평균회귀곡선 mean과 같은 분포경향을 보이며, 모든 측정데이터는 $mean \pm 2S$ 의 범위에 속하였다. 이것은 피로균열에서 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 이 ΔK 의 다른 형태라는 것을 나타내며, 더욱이 본 연구의 피로시험에서처럼 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 은 피로균열이 존재하는 곳에서 측정을 통해 쉽게 획득되는 값이다.

Fig. 17에는 Fig. 12에서와 같이 $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$ 관계로 변환된 가이드라인과 용접이음의 균열진전시험으로부터 측정된 데이터를 함께 나타내었다. 측정데이터의 분포는 BS, IIW, 그리고 JSSC로터 계산된 $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$ 관계곡선보다 오른쪽에 위치한다. 그러므로 변환된 가이드라인을 이용하여 균열진전속도를 평가할 경우, 실측치의 평균보다 da/dN 을 크게 평가함으로써 안전측의 구조건전성 평가가 이루어진다. 예로서 Fig. 17의 점 A에서 측정된 da/dN 을 동일한

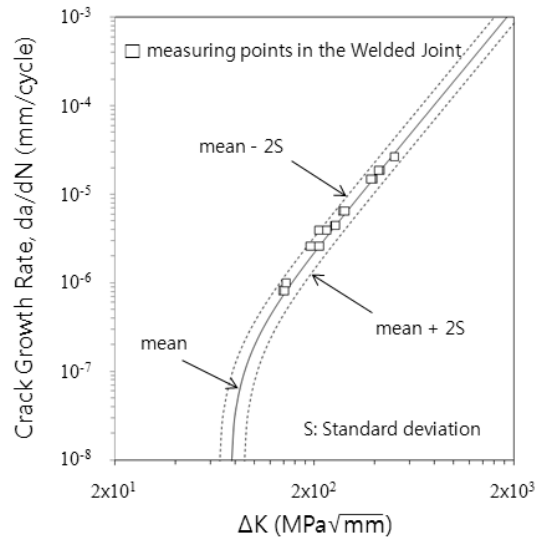


Fig. 16 Comparison between Measured Data and Existing Data from NRI

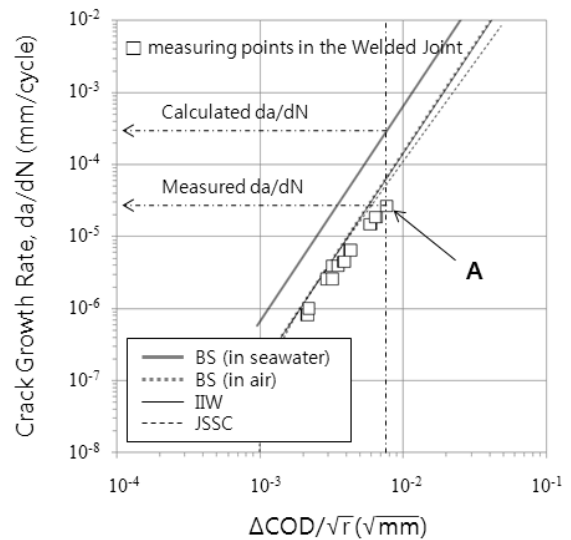


Fig. 17 Assessment of da/dN using Guidelines

$\Delta COD/\sqrt{r}$ 에 대해 변환된 가이드라인을 이용해서 구한 da/dN 과 함께 Table 7에 정리하였다. 변환된 가이드라인을 이용하여 계산된 da/dN 이 측정된 da/dN 보다 크게 평가되므로 구조의 건전성 평가시에 안전측의 결과가 유도된다.

Fig. 12와 17의 측정데이터 분포에서 시험체의 종류(CCT, SECT, 면외거셋 용접이음)에 따른 측정데이터의 분포 특성이나 균열의 형상(관통균열, 용접이음의 반타원형 균열)에 따른 측정데이터의 분포 특성은 발견할 수 없다. 이러한 특징 또한 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 이 ΔK 의 다른 형태임을 나타낸다.

Table 7 Calculated and Measured da/dN for Point A

Guidelines or Test Data	$\Delta COD/\sqrt{r}$ ($\sqrt{\text{mm}}$)	da/dN (mm/cycle)
BS (in seawater)	7.66×10 ⁻³	2.94×10 ⁻⁴
BS (in air)		6.66×10 ⁻⁵
IIW		6.39×10 ⁻⁵
JSSC		5.45×10 ⁻⁵
Test Data		2.66×10 ⁻⁵

SECT 2에서 수행된 변형률 게이지를 이용한 COD 측정법을 면외거셋 용접이음의 균열진전시험에서도 Fig. 13에서와 같이 적용하였다. Fig. 12에서처럼 Fig. 16과 17에서도 COD 측정방법(디지털 현미경, 변형률 게이지)에 따른 데이터의 분포특성은 발견할 수 없다. 그리고 변형률 게이지에 의한 현장계측은 이미 적용빈도가 크므로, 손상이 허용되는 구조물의 건전성 평가시 활용도가 높을 것으로 기대된다.

4. 결론

피로균열이 존재하는 강부재 표면에서 COD를 이용한 균열진전속도의 평가를 목적으로, 2종류의 관통균열 시험편과 면외거셋 용접이음을 이용한 균열진전시험으로부터 얻어진 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

- 1) da/dN - $\Delta COD/\sqrt{r}$ 관계는 da/dN - ΔK 관계처럼 시험편의 형상(CCT, SECT, 면외거셋 용접이음)이나 균열의 형상(관통균열, 용접이음의 반타원형 균열)에 상관없이 대수(log) 눈금 그래프에서 선형적인 데이터 분포를 보이므로, ΔK 와 같이 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 은 da/dN의 평가를 위한 파라미터가 된다.
- 2) 피로균열의 $\Delta COD \propto \sqrt{r}$ (r은 COD의 측정위치) 특징으로 인하여 식(4)와 같이 $\Delta COD/\sqrt{r}$ 과 ΔK 가 상호변환이 가능해진다.
- 3) $\Delta COD/\sqrt{r}$ 은 균열이 존재하는 곳에서 바로 측정이 됨으로, 기존에 제시된 가이드라인(BS, IIW, JSSC 등)의 da/dN - ΔK 관계식이나 그래프를 da/dN - $\Delta COD/\sqrt{r}$ 관계로 변환하여 da/dN을 평가할 수 있다.
- 4) COD를 이용한 균열진전속도 평가법은 변형률 게이

지를 이용한 COD 측정과 선형누적피해법칙의 적용으로 변동하중이 작용하는 강구조물에 활용도가 높을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0070378).

참고문헌

1. 김광진, 김인태, "관통균열의 개구변위측정을 통한 균열진전속도 추정에 관한 실험적 연구", 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 2010, pp.177-178.
2. 일본강구조협회(JSSC), 강구조물의 피로설계지침·동해설, 과학기술, 서울, 2000, pp.314-335.
3. 일본도로협회, 강교의 피로와 보수보강, 구미서관, 서울, 2004.
4. 장동일, 구조공학에서의 파괴와 피로, 동명사, 서울, 2000, pp.139-176.
5. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 건설정보사, 서울, 2005, pp.69-78.
6. 大倉一郎, 강교의 피로, 건설도서, 서울, 1998, pp.143-144.
7. 城野政弘, 피로균열, 인터비전, 서울, 2006, pp.17-24.
8. A. F. Hobbacher, "The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components - A comprehensive code recently updated", International Journal of Fatigue, Volume 31, Issue 1, 2009, pp. 50-58.
9. D. Radaj and C. M. Sonsino, Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, Abington, Cambridge, 1998, pp.274-316.
10. K. J. Kim and I. T. Kim, "Experimental Study on Crack Opening Displacement Approach to Assess Crack Growth Rate of Through-thickness Cracked Plates", The 10th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges, Nagasaki University, Nagasaki, Japan, 2009.
11. K. Nishikawa, J. Murakoshi and T. Matsuki, "Study on the fatigue of steel highway bridges in Japan", Construction and Building Materials, Vol. 12, Issues 2-3, 1 March 1998, pp.133-141.
12. W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, 1971, pp.230-242.
13. Y. Murakami, Stress intensity factors handbook, Pergamon Press, Vol.1, 1987, pp.9-10.

(접수일자 : 2010년 9월 28일)

(수정일자 : 2010년 11월 15일)

(심사완료일자 : 2010년 11월 24일)

요 지

강부재의 피로가 주요원인이 되어 구조물이 붕괴되거나 교체되는 사례를 찾아보기 어렵다. 이처럼 사실상 피로에 대해서는 손상을 허용하고 있지만, 발견되는 피로균열에 대한 직접적인 상태평가는 이루어지지 않고 있다. 피로균열에 대한 진전·비진전성의 판단 및 균열진전속도의 평가가 이루어져야만, 합리적인 보수·보강 공법의 선정과 시행시기가 결정될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 측정되는 COD(Crack Opening Displacement)를 통한 피로균열진전속도 평가법을 검토하기 위하여, 2종류의 관통균열 시험편과 면외거셋 용접이음 시험편의 균열진전시험을 실시하였다. 그리고 실용적인 COD의 측정을 위해 변형률 게이지를 이용하는 방법에 대해 검토하였다. 그 결과, COD 측정을 통한 균열진전속도의 합리적인 평가법을 제안하였고, 변형률 게이지를 이용한 성공적인 COD 측정을 실험적으로 증명하였다.

핵심 용어 : 피로균열, 균열진전속도, 개구변위, 균열길이, 응력확대계수
