

# COD(Crack Opening Displacement) 측정을 통한 강재의 피로균열진전속도 추정에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Evaluation of Fatigue Crack Growth Rate of Steel Plates using Crack Opening Displacement

김 광 진<sup>1)</sup> · 김 인 태<sup>2)†</sup> · 류 용 열<sup>3)</sup>  
*Kim, Kwang Jin · Kim, In Tae · Ryu, Yong Yeol*

**요약** : 강구조물의 점검시 피로균열이 발견되는 경우에는 보수·보강 시행의 결정과 구조물의 점검주기 결정을 위한 균열의 현재 상태평가와 앞으로의 균열진행 정도에 대한 정량적인 예측이 요구된다. 피로균열에 대한 손상도 평가는 파괴역학 파라미터를 이용한 균열진전속도와 취성파단의 여부 결정이 대표적인 방법으로 파괴역학에 관한 전문적인 지식과 함께 수치해석 프로그램의 활용능력이 필요하다. 이에, 본 연구에서는 피로손상도 평가 방법에 관한 다양성을 확보하고, 파괴역학에 대한 전문적인 지식이 없는 기술자가 피로균열에 의한 강구조물의 손상도를 간편하게 평가할 수 있는 방법을 개발하기 위한 첫 단계로, 판통균열 시험편을 이용한 균열진전시험을 실시하였다. 그리고 피로균열 표면으로부터 측정된 COD(Crack Opening Displacement)의 크기와 측정위치를 이용하여, 균열진전속도를 추정하기 위한 파라미터를 도출하고, 그 타당성을 분석하였다. 그리고 판통균열이 있는 시험편의 형상, 응력범위, 그리고 응력비에 상관없이 COD를 이용하여 피로균열진전속도를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

**ABSTRACT** : Steel structures have a higher probability of being damaged by fatigue than by other causes of deterioration. As such, their maintenance to prevent fatigue damage is essential to sustain their safety and performance during their service period. In their maintenance, the current state of their fatigue cracks must be assessed to determine appropriate reinforcement methods and the suitable time intervals of periodic inspections when fatigue cracks are detected. Determining the crack growth rate is a successful method of predicting fractures, but it requires technical knowledge on fracture mechanics and experience in numerical methods and software for finite element analysis. In this study, a fatigue crack growth test on through-thickness cracked steel plates was conducted to assess the crack growth rate without superior technical knowledge and experience. The relationship between the Crack Opening Displacement (COD) and the crack growth rate was found in relatively long fatigue cracks.

**핵심용어** : 피로균열, 균열진전속도, 개구변위, 균열길이, 응력범위, 응력비

**KEYWORDS** : fatigue crack, crack growth rate, COD(crack opening displacement), crack length, stress range, stress ratio

### 1. 서론

최근의 강구조물은 고강도 강재의 사용과 경량화에 의해 구조물에 작용하는 활하중의 부하 비중이 크고, 미적경관을 주 요시하는 사회적 요구에 따라 더욱 복잡해지는 경향을 보이고 있다. 여기서 활하중의 비중 증가는 강구조 부재에 작용

하는 응력범위를 증가시키고, 복잡한 구조형상은 다양한 형태의 응력집중을 유발시킴으로써 피로손상 가능성 또한 높아질 것으로 예상된다. 이에 다양한 피로손상에 대한 지속적인 대책수립이 필요하다고 사료된다.

일반적인 강구조물의 피로설계 및 조사에는 반복응력을 받는 부재와 이음부의 상세범주에 따른 피로설계곡선(S-N 선

1) 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정(bridgcare@pusan.ac.kr)  
2) 교신저자. 부산대학교 사회환경시스템공학부 부교수, 공학박사  
(Tel: 051-510-2497, Fax: 051-513-9596, E-mail: itkim@pusan.ac.kr)  
3) 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정(ryu4243@pusan.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회담을 게재하겠습니다.

도)이 널리 사용되고 있다(한국도로교통협회, 2005). 그러나 S-N선도를 이용하는 방법은 피로균열이 존재하지 않는 이음부의 피로수명을 간편하게 평가할 수 있다는 장점이 있지만, 단순 인장반복응력의 작용과 기존에 제시된 상세범주에 대해서만 한정적으로 적용할 수 있다.

피로균열이 발생한 강구조물의 균열진전속도 추정에는 균열의 응력확대계수를 이용한 Paris의 균열진전법칙(식 (1))이 널리 사용되고 있으며, 잔존피로수명평가는 식(1)을 적분하여 해석적으로 추정할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

- 여기서, a: 균열길이
- N: 반복횟수
- $\Delta K$ : 응력확대계수범위
- C, m: 재료상수

식 (1)을 이용한 균열진전속도 평가 및 잔존피로수명 추정을 위해서는 우선 응력확대계수의 산정이 필요하다. 그러나 이음부의 형상 및 응력상태가 단순하지 않은 경우에는 이음부의 단순화 또는 유한요소해석의 모델링 등과 같이 파괴역학에 대한 전문적인 지식 및 수치해석 프로그램의 활용능력이 필요하게 된다.

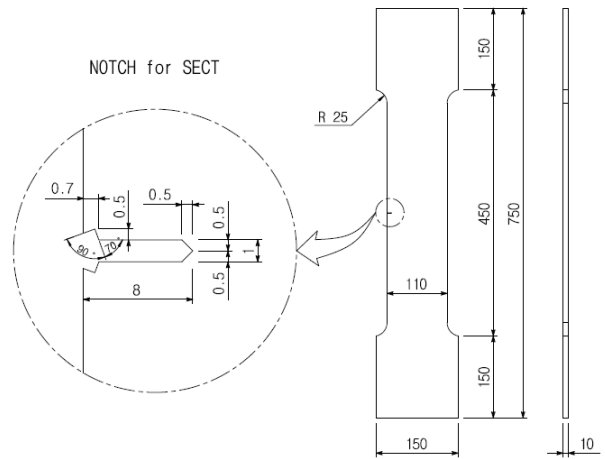
균열진전속도를 추정하는 또 다른 대표적인 방법으로서 균열선단개구변위(김민진 등, 1993; Blochwitz 등, 2003)를 이용하는 방법이 제안되어 있다. 그러나 현재 이 방법은 재료단위의 육안식별이 어려운 마이크로 크랙에 한정적으로 적용되며, 균열선단개구변위를 측정하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscope)과 같은 고가의 대형장비가 필요하게 되어 강구조물에 직접 적용하는 것은 곤란하다. 따라서 피로균열이 발생한 강구조물의 균열진전속도 추정을 위해서는 응력확대계수의 산정이 요구되지만, 현장의 여건에 따라서 이러한 방법의 적용이 곤란하거나 추정값의 정도가 낮을 가능성이 있어 적절한 대안이 요구된다.

본 논문에서는 피로균열이 발생한 강구조물에서 직접측정을 통해 균열진전속도를 비교적 높은 정도로 평가할 수 있는 방법을 개발하기 위한 첫 단계로서 2종류의 관통균열 시험편을 이용한 균열진전시험과 균열형상추정을 실시하였다. 그 결과, 강재의 표면으로부터 측정된 COD(Crack Opening Displacement)의 크기와 측정위치를 이용하여 균열진전속도를 정도 높게 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

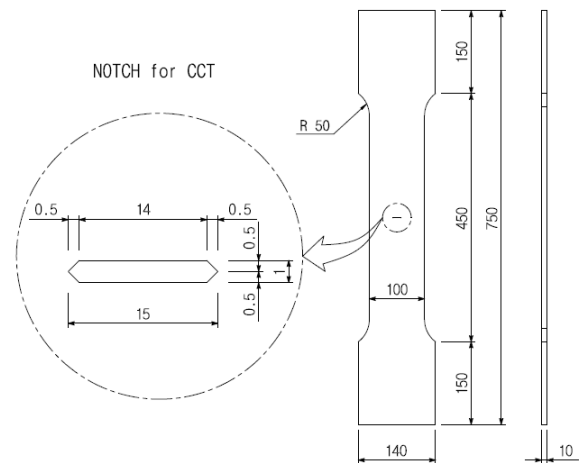
## 2. 균열진전시험 및 균열형상추정의 방법

### 2.1 시험편

본 피로시험은 균열진전시험과 균열형상추정으로 구성되며, 그림 1에서와 같이 시험편의 편측과 중앙에 관통균열을 가지는 2종류의 시험편을 이용하였다. 시험편에 초기 피로균열을 유도하기 위하여 지름 0.25mm의 톱을 이용하여 노치를 기계가공 하였다. 그리고 편측균열 시험편의 경우, 그림 1(a)와 같이 노치 후방 끝부분(edge)에는 COD를 측정하기 위한 클립형 변위계의 부착을 위한 지그를 정밀 기계 가공하였다.



(a) 편측균열 시험편



(b) 중앙균열 시험편

그림 1. 시험편의 형상 및 치수(mm)

균열진전시험 및 균열형상추정에 사용된 SM400B 강재의 화학성분 및 기계적 성질을 표 1과 2에 각각 정리하였다. 그리고 시험편 및 시험조건을 표 3에 정리하였다. 균열진전시험에는 편측균열 시험편(EC 시험편) 5개와 중앙균열 시험편(CC 시험편) 3개를 이용하였으며, 그중 EC5와 CC3은 균열진전시험과 균열형상추정에 모두 사용되었다.

표 1. 화학성분

강 종	화학성분(%)				
	C	Si	Mn	P	S
SM400B	0.15	0.16	0.91	0.019	0.009

표 2. 기계적 성질

강 종	기계적 성질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	탄성계수 (GPa)
SM400B	280	430	30	206

표 3. 시험편 및 시험조건

시험체	최대하중 Pmax (kN)	최소하중 Pmin (kN)	공칭응력범위 $\Delta\sigma$ (MPa)	응력비 R	비 고	
편측균열	EC1	98	10	80	0.10	Edge에서 COD 측정
	EC2	186	98	80	0.53	"
	EC3	142	10	120	0.07	"
	EC4	186	10	160	0.05	"
	EC5	98	균열성장에 따른 변화 (그림 3 참조)			균열형상추정
중앙균열	CC1	80	10	70	0.13	Center에서 COD 측정
	CC2	150	10	140	0.07	"
	CC3	70	균열성장에 따른 변화 (그림 3 참조)			균열형상추정

## 2.2 균열진전시험의 방법

COD 측정을 통한 균열진전속도의 추정을 목적으로 표 3과 같이 편측균열 시험편 5개와 중앙균열 시험편 3개를 이용하여 균열진전시험을 실시하였다. 그림 2에는 1000kN UTM을 사용한 중앙균열 시험편의 균열진전시험 전경을 나타내었으며, 반복하중의 재하속도는 약 16~20 Hz로 하였다.

표 3의 편측균열 시험편 EC1~EC4와 중앙균열 시험편 CC1과 CC2는 초기균열  $a_1$ 부터 시험편의 파단까지 공칭응력범위를 일정하게 유지하였으며, EC5와 CC3은 그림 3과 같이 균열의 진전과 함께 공칭응력범위를 변화시켰다.

노치 선단에 도입되는 피로균열의 초기 성장에서 발생할 수 있는 노치효과를 배제하기 위해서 그림 4와 같이 노치선단으로부터  $a_p=2\text{mm}$ 의 예비피로균열을 편측균열 시험편과 중앙균열 시험편에 각각 도입시켰다(경갑수 등, 1996). 예비피로균열 도입시의 최대하중과 공칭응력범위는 균열진전시험시보다 작게하여 예비균열 도입시의 응력확대계수가 균열진전시험시의 응력확대계수보다 작게 되도록 주의하였다.

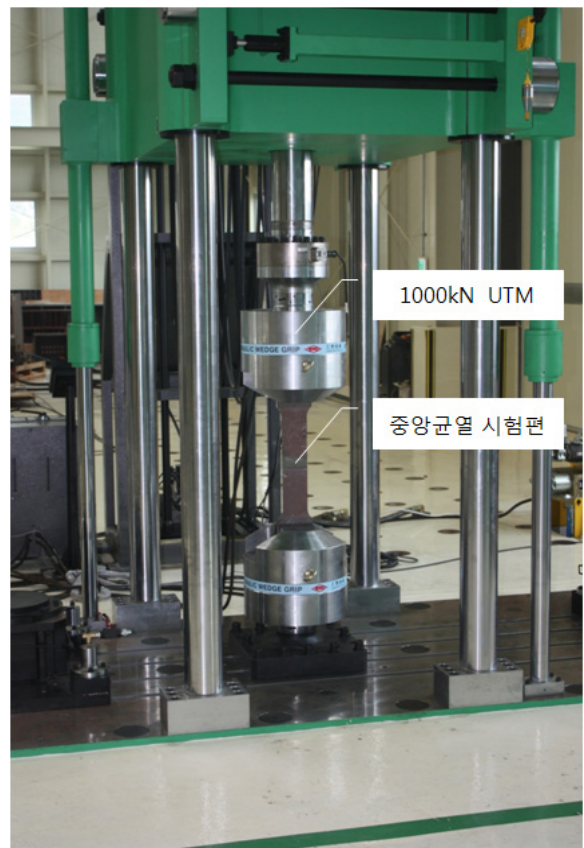


그림 2. 균열진전시험의 전경(중앙균열 시험체)

균열진전시험을 위한 초기균열  $a_i$ 는 노치의 가공길이에 예비피로균열을 더한 길이로서 그림 4와 같다. 균열길이의 측정시에는 디지털 현미경(50~200 배율)을 이용하여 피로균열의 선단을 확인하였다.

COD의 측정은 중앙균열 시험편의 경우, 디지털 현미경을 이용하여 200배 확대된 영상으로써 시험편 중앙(그림 4(b)의 C.L.위치)에서 실시하였다. 편측균열 시험편의 경우는 그림 5와 같이  $1 \times 10^{-3}/\text{mm}$  민감도의 클립형 변위계와 디지털 현미경을 이용하여 지그가공위치(시험편의 edge)에서 COD를 측정하였다.

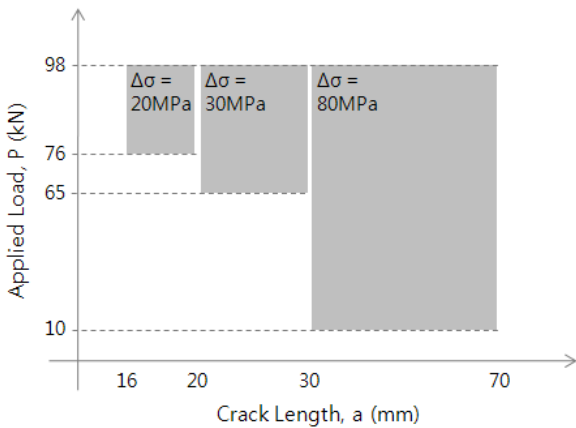
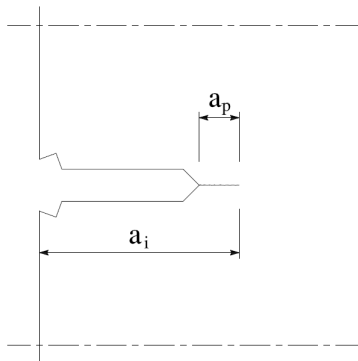
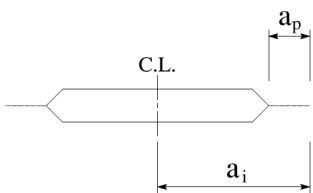


그림 3. 균열길이에 따른 공칭응력범위의 변화 예(EC5)



(a) 편측균열 시험편



(b) 중앙균열 시험편

그림 4. 예비피로균열 및 초기균열

### 2.3 균열형상측정의 방법

균열형상측정에서는 균열진전속도를 추정하기 위한 파라미터를 도출할 목적으로, 표 3의 EC5와 CC3을 이용하여 그림 6과 같이 일정한 균열길이  $a$ 마다 균열선단으로부터 거리  $r$ (균열진전방향의 역방향)에 따른  $\Delta\text{COD}$ (반복하중에 의한 최대 COD와 최소 COD의 차)의 변화를 측정하였다.

피로균열의 진전을 위해 1000kN UTM을 사용하여 재하 속도 20 Hz의 반복인장하중을 작용시켰다. 다양한 균열진전 속도에서  $\Delta\text{COD}$ 를 측정하기 위해 피로균열의 진전길이에 따라 일정진폭하중에 의한 공칭응력범위를 그림 3과 같이 3단계로 변화시켰다.

그림 6에는 디지털 현미경을 사용하여 EC5의 균열길이  $a=40\text{mm}$ 일 때 균열선단으로부터 거리  $r$ 에 따른  $\Delta\text{COD}$ 의 측정 예를 나타내었다. 다양한 균열길이  $a$ 와 공칭응력범위에서  $r$ 에 따른  $\Delta\text{COD}$ 를 측정하였다.

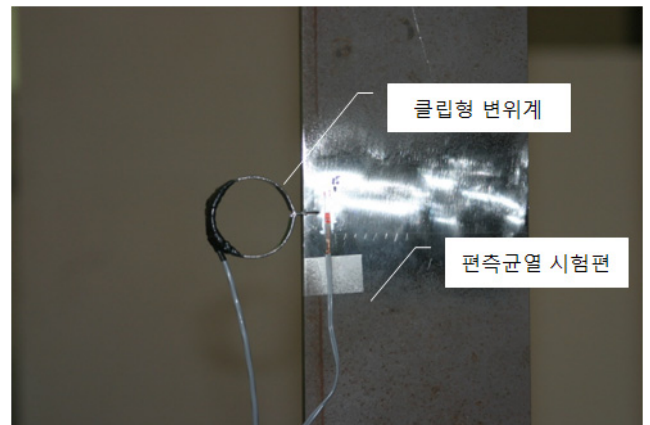


그림 5. 클립형 변위계를 이용한 COD 측정

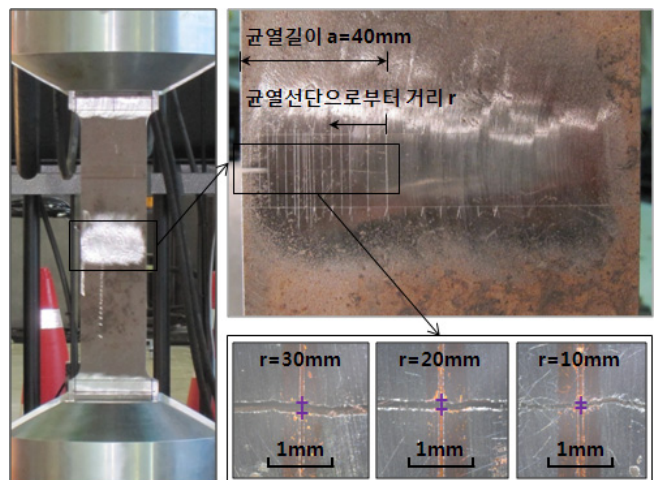


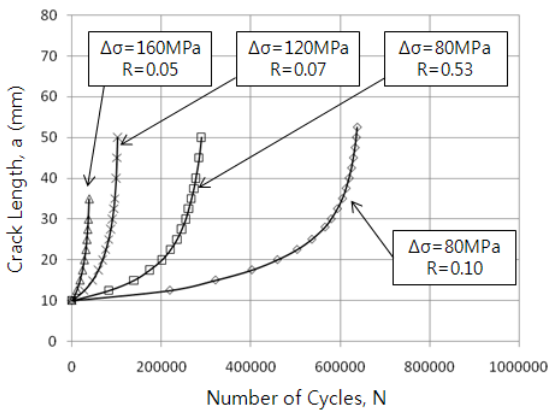
그림 6. 균열형상측정의  $\Delta\text{COD}$  측정 예(균열길이  $a=40\text{mm}$ )

### 3. 균열진전시험 및 균열형상측정의 결과

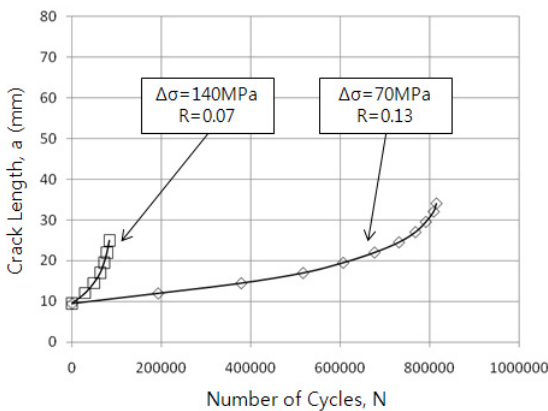
#### 3.1 균열진전시험의 결과

##### 3.1.1 균열길이와 하중반복횟수의 관계

초기균열  $a_i$ 부터 시험편의 파단까지 공칭응력범위를 일정하게 유지한 편축균열 시험편 EC1~EC4와 중앙균열 시험편 CC1과 CC2의 하중반복횟수 N에 따른 균열길이 a의 변화를 그림 7에 나타내었다. 잘 알려진 것과 같이 거의 동일한 응력비에서는 공칭응력범위가 증가할수록 피로수명은 짧아지는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 7(a)의 편축균열 시험편에서 동일한 공칭응력범위 80MPa의 경우, 응력비가 높은 R=0.53인 시험편의 피로수명이 R=0.10인 시험편보다 짧다. 이것은 동일한 응력범위의 경우, 응력비가 높을수록 균열진전속도가 크다는 것을 의미한다.



(a) 편축균열 시험편



(b) 중앙균열 시험편

그림 7. 균열길이 a와 하중반복횟수 N의 관계

##### 3.1.2 측정된 ΔCOD와 해석된 ΔCOD의 비교

피로균열은 균열선단에 발생되는 소성영역뿐만 아니라 균열선단에 형성된 소성영역속을 균열이 진전하기 때문에 균열진전방향의 후방에도 소성영역이 형성된다. 이러한 피로균열의 ΔCOD는 소성영역이 고려되지 않는 탄성해석에서의 ΔCOD와는 다를 것으로 판단된다(城野政弘 등, 2006).

편축균열 시험편 EC1의 실측된 ΔCOD와 계산식에 의한 ΔCOD를 비교하여 그림 8에 나타내었다. COD 계산식은 식 (2)와 같으며 시험편을 평면응력상태와 평면변형상태로 구분하고, 반복하중의 최대 COD와 최소 COD로부터 ΔCOD를 계산할 수 있다(Murakami, 1987). 피로균열의 성장과 함께 계산에 의한 ΔCOD와 본 균열진전시험에서 측정한 ΔCOD에는 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 비교적 간단한 관통균열의 경우에도 재료의 소성이 고려되지 않은 탄성해석에 의한 ΔCOD는 실제 피로균열의 ΔCOD와는 차이가 있음이 확인되었다.

$$COD = \frac{4\sigma a}{E't} V(\alpha) \quad , \quad \alpha = \frac{a}{W} \quad (2)$$

$$V(\alpha) = 1.46 - 0.70\alpha + 25.93\alpha^2 - 143.00\alpha^3 + 538.60\alpha^4 - 907.50\alpha^5 + 633.70\alpha^6$$

여기서,  $\sigma$ : 공칭응력,  $a$ : 균열길이,  $t$ : 판두께  
 $\nu$ : Poisson's Ratio,  $W$ : 판폭  
 $E$ : Young's Modulus  
 $E' = E$  : 평면응력상태  
 $E/(1-\nu^2)$  : 평면변형상태

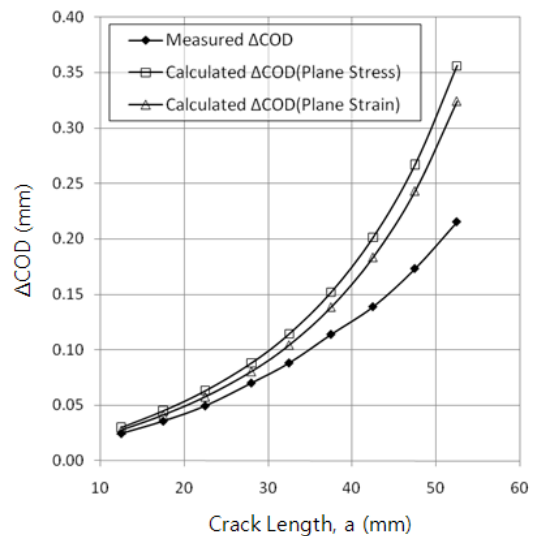


그림 8. 측정된 ΔCOD와 계산된 ΔCOD의 비교(EC1)

### 3.2 균열형상측정의 결과

균열형상측정에서는 EC5와 CC3을 이용하여 일정한 균열 길이 a마다 균열선단으로부터 거리 r에 따른 ΔCOD의 변화를 그림 6과 같이 측정하고, 균열진전속도의 추정을 위한 파라미터를 도출하였다.

3.1.2항은 균열길이 a의 성장에 따른 측정된 ΔCOD와 계산된 ΔCOD와의 차이를 설명한 것이며, 일정한 균열길이에서 균열선단으로부터 거리 r의 변화에 따른 피로균열의 실측된 ΔCOD와 탄성해석에 의한 계산된 ΔCOD에도 차이가 있을 것으로 판단된다. 이에, 시험편 EC5의 일정한 균열길이에서 균열선단으로부터 거리 r에 따른 ΔCOD의 변화를 측정하고, 동일한 형상과 균열길이에 대해 FEM 해석 결과와 비교하였다. 그림 9는 균열길이 a=40mm에 대한 균열선단으로부터 거리 r에 따른 측정된 ΔCOD와 FEM 해석에 의한 ΔCOD를 비교한 것이다. FEM 해석에는 COSMOSM(solver)이 사용되었으며, 3차원 솔리드 요소를 이용하여 균열부근의 절점간격은 0.5mm로 모델링 하였다. 소성영역의 균열닫힘 효과가 고려되지 않은 FEM 해석에 의한 ΔCOD는 실측된 ΔCOD 보다 큰 값을 보인다.

그림 10은 그림 9에서와 같이 EC5의 균열길이 a=27.5mm와 40mm일 때의 균열선단으로부터 거리 r에 따른 ΔCOD 변화를 예로서 나타낸 것이다. 측정된 ΔCOD는 균열선단으로부터 거리 r의 제곱근에 비례하는 특징이 있으며, 균열선단부근뿐만 아니라 균열의 전체길이에서 ΔCOD는 √r에 비례하는 특징이 나타났다. 다른 균열길이 a=17~60mm에서 측정된 균열형상에서도 이러한 √r에 비례하는 특징이 확인되었다.

그림 10에서와 같은 피로균열의 개구형상에서 균열선단으로부터 거리에 따른 ΔCOD의 크기를 r이 독립변수인 함수의 형태로 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta COD = k \sqrt{r} \tag{3}$$

여기서, k: ΔCOD의 크기를 결정하는 상수

식 (3)은 식 (4)의 형태로 표현할 수 있다.

$$\Delta COD / \sqrt{r} = k \tag{4}$$

식 (4)에서 ΔCOD/√r은 k와 같이 측정위치에 무관한 값이 된다. 그림 10에서의 균열길이 a=27.5mm와 40mm일 때의 균열선단으로부터 거리 r에 따른 ΔCOD/√r의 크기

변화를 그림 11에 나타내었다. 균열선단으로부터의 ΔCOD 측정위치와 상관없이 ΔCOD/√r 값은 일정하였다.

그림 10에서와 같이 측정된 ΔCOD와 균열진전속도 da/dN의 관계를 EC5의 균열길이 a=17~60mm, CC3의 a=17~30mm에 대하여 그림 12(a)에 나타내었다. ΔCOD와 da/dN을 비교할 경우, ΔCOD의 측정위치에 따라 동일한 da/dN에서도 ΔCOD의 편차가 크게 나타났다. 그러나 da/dN을 ΔCOD/√r로 나타내면 그림 12(b)와 같이 측정 데이터의 편차가 감소되었다. 즉, ΔCOD/√r의 이용으로 ΔCOD의 측정위치에 상관없이 거의 동일한 da/dN을 추정할 수 있다.

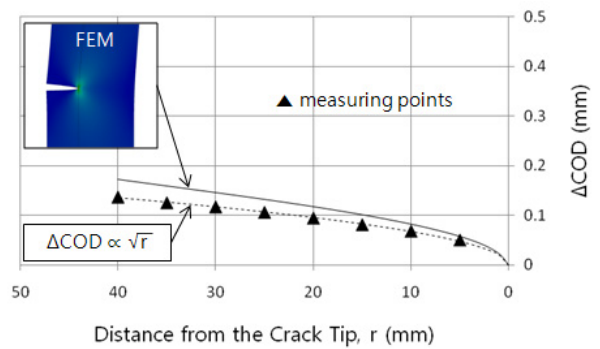


그림 9. 측정된 ΔCOD와 FEM 해석의 ΔCOD 비교(a=40mm)

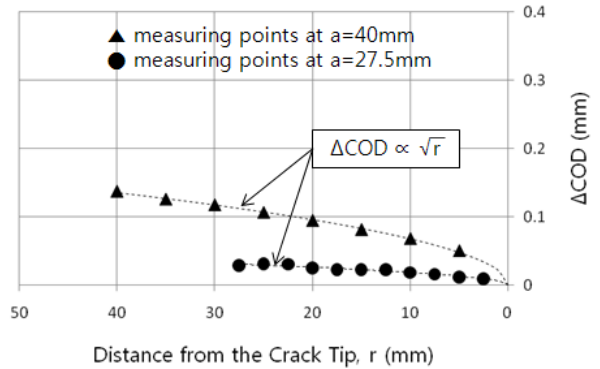


그림 10. ΔCOD 측정 결과 예

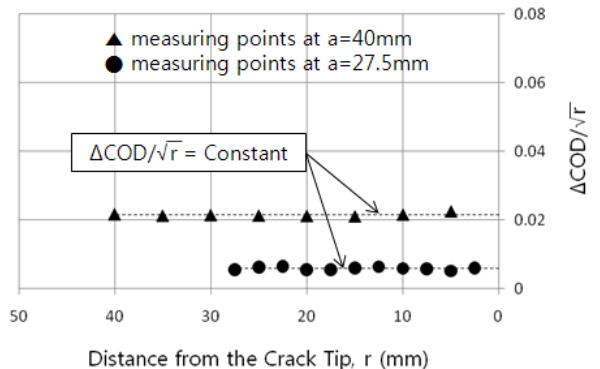


그림 11. ΔCOD/√r 계산 예

#### 4. COD를 이용한 균열진전속도의 추정

파괴역학에서 COD와 응력확대계수 K와의 관계는 식 (5)와 같이 정의된다. 이 식에서 COD는 균열선단으로부터 거리 r의 제곱근에 비례하지만, 식 (5)는 선형파괴역학에서 균열 선단부근에서만 유효하다(장동일, 2000). 그러나 균열의 개구형상을 나타낸 그림 10에서와 같이 피로균열의 ΔCOD는 시험편의 균열길이 전체에 걸쳐  $\sqrt{r}$ 에 비례하는 것을 본 논문에서 실험적으로 확인하였다. 그러므로 식(5)는 피로균열에서 균열의 선단부근뿐만 아니라 균열의 진행방향 후방으로 상당부분 유효할 것으로 판단된다.

$$COD = \frac{\chi + 1}{2\pi G} K \sqrt{2\pi r} \quad (5)$$

여기서,  $\chi = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$  : 평면응력상태

$3 - 4\nu$  : 평면변형상태

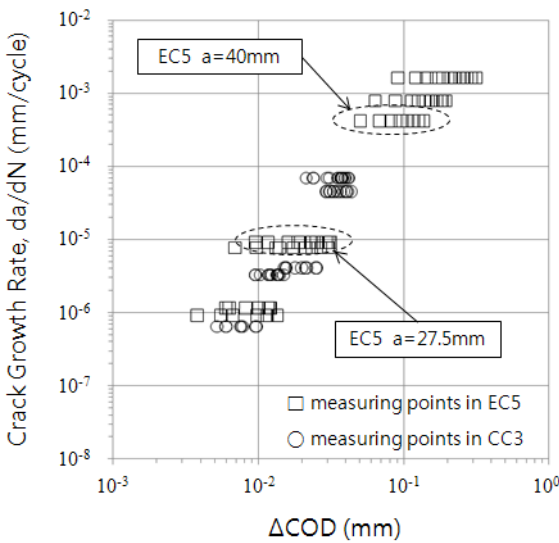
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

반복응력이 작용할 때의 ΔCOD와 ΔK에 관해 식(5)를 다시 정리하면 식(6)과 같이 된다.

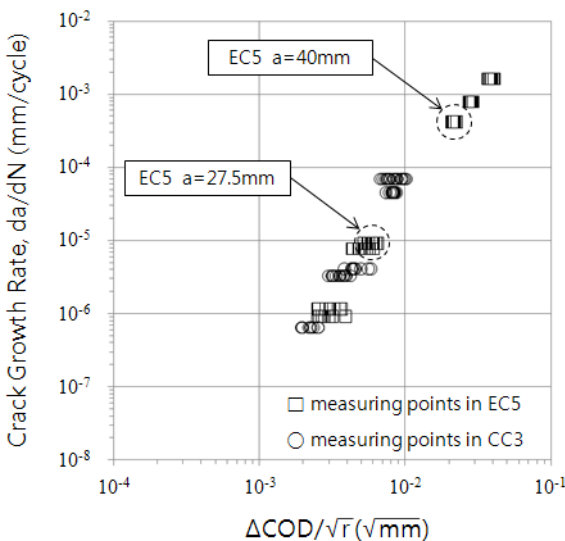
$$\Delta COD / \sqrt{r} = \frac{\chi + 1}{2\pi G} \Delta K \sqrt{2\pi} \quad (6)$$

$\Delta COD / \sqrt{r}$ 은 3.2절에서 균열진전속도 da/dN의 평가를 위한 파라미터로서의 가능성이 확인되었으며, 식(6)을 이용하면 ΔK를  $\Delta COD / \sqrt{r}$ 로 변환할 수 있다. 따라서 da/dN의 추정을 위한 기준에 제시된 da/dN-ΔK 관계를 da/dN- $\Delta COD / \sqrt{r}$  관계로 변환해서 활용하는 것이 가능해진다.

그림 13은 JSSC(Japan Society of Steel Construction)와 IIW(International Institute of Welding)에서 제안하는 da/dN-ΔK 곡선(우측)을 식(6)을 이용하여 da/dN- $\Delta COD / \sqrt{r}$  곡선(좌측)으로 변환한 것이다. JSSC는 용접이음과 모재의 균열진전시험으로부터 획득된 데이터를 취합한 것이며, 평균설계곡선은 da/dN의 평균값, 안전설계곡선은 da/dN의 안전측 평가를 위해 제안된 것이다. 그리고 IIW는 용접이음의 da/dN 평가를 위한 것이다(일본강구조협회, 2000: A.F. Hobbacher, 2009).



(a) da/dN - ΔCOD 관계



(b) da/dN -  $\Delta COD / \sqrt{r}$  관계

그림 12. 파라미터  $\Delta COD / \sqrt{r}$ 의 적용

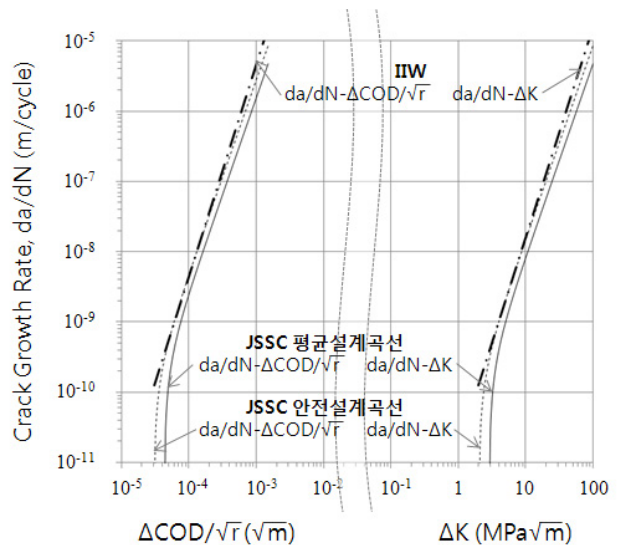


그림 13. da/dN-ΔK를 da/dN- $\Delta COD / \sqrt{r}$ 로 변환

그림 13에서 변환된  $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$  곡선과 본 논문의 균열진전시험에서 측정된 데이터를 그림 14에 함께 나타내었다. 균열진전시험에서 측정된 데이터는 JSSC 평균설계곡선과 잘 일치하며, JSSC 안전설계곡선이나 IIW보다 아래쪽에 분포된다. 그러므로  $\Delta COD/\sqrt{r}$  을 이용한  $da/dN$  의 평균값 추정에는 JSSC 평균설계곡선을 이용하고,  $da/dN$  의 평균값보다 높게 평가되는 JSSC 안전설계곡선나 IIW를 이용해서  $da/dN$  의 안전측 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

균열진전시험에서  $\Delta COD/\sqrt{r}$  의 계산을 위해 적용된  $r$  의 크기는 12~60mm로써 다양하지만,  $r$  의 크기에 상관없이  $da/dN$  평가가 가능함이 그림 14의 측정 데이터 분포에서 확인된다. 이것은 3.2절에서 도출된 COD의 측정위치에 무관하게  $da/dN$  을 평가할 수 있는 파라미터  $\Delta COD/\sqrt{r}$  의 유용성을 다시 확인시켜주는 결과이다.

그림 14의 측정 데이터는 편측균열과 중앙균열을 가지는 2 종류의 관통균열 시험편을 이용하여 표 3에서와 같은 다양한 응력범위와 응력비를 적용한 균열진전시험의 결과이다. 그러므로 파라미터  $\Delta COD/\sqrt{r}$  을 이용하여 균열시험편의 타입, 응력범위, 그리고 응력비에 무관하게  $da/dN$  을 평가할 수 있음이 확인되었다. 이것으로  $\Delta COD/\sqrt{r}$  을 이용한  $da/dN$  추정에서는 균열이 존재하는 구조물의 형상이나 하중상태와 상관없이  $\Delta COD$ 와  $r$ (균열선단으로부터  $\Delta COD$  측정위치)의 측정만으로  $da/dN$  의 평가가 가능할 것으로 판단된다.

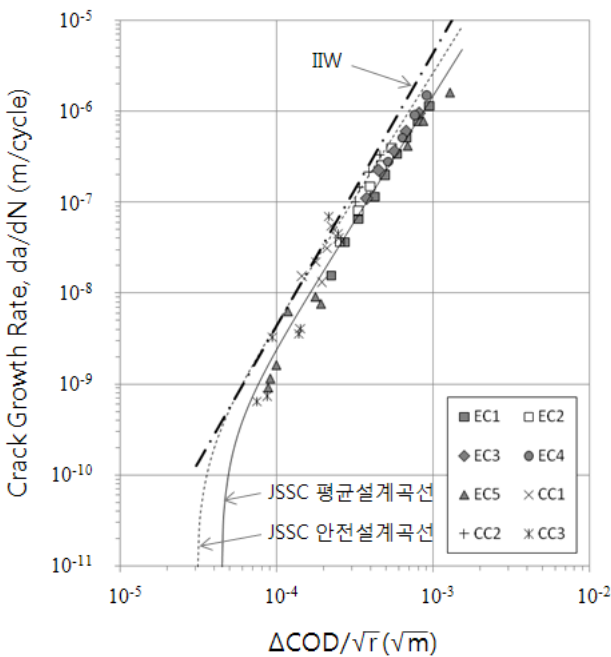


그림 14. 변환된  $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$  과 측정 데이터의 비교

## 5. 결론

균열진전속도 추정에 관한 방법의 다양성을 확보하고, 실용적인 평가법의 개발을 목적으로  $\Delta COD$ 와  $r$ (균열선단으로부터  $\Delta COD$  측정위치)을 이용한 균열진전속도 추정법에 대해 검토하였으며, 편측균열 시험편과 중앙균열 시험편의 피로시험으로부터 얻어진 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 육안식별이 가능한 매크로 피로균열에 대해  $\Delta COD$ 는 균열선단부근뿐만 아니라 균열진전방향의 후방 대부분에서 균열선단으로부터의 거리  $r$ 의 제곱근에 비례하는 특징을 확인하였다.
- (2)  $\Delta COD$ 의 측정위치에 따라 동일한 균열진전속도에서도  $\Delta COD$ 의 편차가 크게 발생할 수 있으나,  $\Delta COD/\sqrt{r}$ 의 이용으로  $\Delta COD$ 의 측정위치에 상관없이 거의 동일한 균열진전속도를 추정할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.
- (3) 기존의 JSSC나 IIW에서 제안하는  $da/dN - \Delta K$  관계를 그림 13과 같이  $da/dN - \Delta COD/\sqrt{r}$  관계로 변환하고,  $\Delta COD/\sqrt{r}$  을 이용해서  $da/dN$  의 평균값 추정에는 JSSC 평균설계곡선,  $da/dN$  의 안전측 평가에는 JSSC 안전설계곡선나 IIW를 이용하면 될 것으로 판단된다.
- (4) 파라미터  $\Delta COD/\sqrt{r}$  의 이용으로 관통균열의 타입, 응력범위, 그리고 응력비에 무관하게  $\Delta COD$ 와  $r$ (균열선단으로부터  $\Delta COD$  측정위치)의 측정만으로 균열진전속도  $da/dN$  의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- 경갑수, 최영재(1996) 강구조부재의 피로균열성장에 미치는 제인자에 관한 연구(I), 한국강구조학회논문집, 제8권, 제2호, pp.263-271.
- 김광진, 김인태(2009) 개구변위를 이용한 강재의 피로균열진전속도 추정에 관한 기초적 연구, 제35회 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.377-380.
- 김민진, 지정근(1993) CRACK 개구변위에 기초한 미소피로크랙 전파법칙의 고찰, 강원대학교 산업기술연구소 논문집,



- 제3권, pp.49-57.
- 장동일(2000) 구조공학에서의 파괴와 피로, 동명사, pp.139-176.
- 한국도로교통협회, 도로교설계기준 2005, 건설정보, pp.69-78.
- 城野政弘, 송지호(2006) 피로균열, 인터뷰전.
- 大倉一郎(1998) 강교의 피로, 건설도서.
- 일본강구조협회(2000) 강구조물의 피로설계지침·동해설, 과학 기술.
- Blochwitz, C., Tirschler, W., and Weidner, A. (2003) Crack opening displacement and propagation rate of microstructurally short cracks, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 357, Issues 1-2, pp. 264-269.
- Elber, W. (1971) The Significance of Fatigue Crack Closure, *ASTM STP 486*, pp.230-242.
- Hobbacher, A.F. (2009) 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, pp.50-58.
- Kim, K.J. and Kim, I.T. (2009) 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.
- Murakami, Y. (1987) Stress intensity factors handbook, *Pergamon Press*, Vol.1, pp.9-10.
- Richter, R., Tirschler, W., and Blochwitz, C. (2001) In-situ scanning electron microscopy of fatigue crack behaviour in ductile materials, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 313, Issues 1-2, pp. 237-243.
- (접수일자 : 2010. 5. 26/ 심사일 2010. 6. 1/  
게재확정일 2010. 11. 25)