

# 파괴역학 기반 피로 수명 평가를 위한 피로 균열 진전 파라미터에 관한 연구

김현수\* · 박태종\* · 이동주\* · 신상범\*<sup>†</sup> · 김명현\*\*

\*현대중공업 생산기술연구소

\*\*부산대학교 조선해양공학과

## A Study on Fatigue Crack Growth Parameters for Fatigue Life Assessment based on Fracture Mechanics

Hyeon-Su Kim\*, Tae-Jong Park\*, Dong-Ju Lee\*, Sang-Beom Shin\*<sup>†</sup> and Myung-Hyun Kim\*\*

\*Industrial Technology Institute, Hyundai Heavy Industries CO., LTD., Ulsan 44032, Korea

\*\*Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46239, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : str@hhi.co.kr

(Received June 18, 2016 ; Revised July 18, 2016 ; Accepted October 24, 2016)

### Abstract

Recent studies on the fatigue assessment of high strength steel weld based on the fracture mechanics have frequently raised the problems related to the conservatism in the fatigue crack growth rate specified in the relevant design code. The purpose of this study is to evaluate the effect of the fatigue crack growth parameter on the fatigue life for the low carbon steel weld. In order to do it, the fatigue tests with the constant stress ratio were performed to evaluate the fatigue crack growth rate in the butt weld of SM490. And the fatigue crack growth parameters of the weld were evaluated in accordance with ASTM E647. From the comparative fatigue assessment results, it was found that the fatigue crack growth rate specified in the relevant design code was too conservative to estimate the residual fatigue life of welded structure. So, in order to get the more reliable results, it was recommended that the fatigue life estimation based on the fracture mechanics be performed with the fatigue crack growth parameter specified by test.

Key Words : Fatigue crack growth parameters, Fatigue crack growth analysis, BS7910

### 1. 서 론

선박 및 해양 구조물과 같은 대형 용접 구조물의 경우 재료의 초기 결함뿐만 아니라 제작 과정 또는 사용 중에 결함 또는 균열이 불가피하게 발생할 가능성이 있다. 일반적으로 구조물에 발생된 결함은 구조물 전체의 건전성을 저하시킬 가능성이 높기 때문에 정량적인 구조 건전성 평가를 통하여 해당 구조물의 사용 적합성(fitness for service, FFS) 여부를 신속하게 판단할 수 있어야 한다. 이는 결함을 갖는 구조물이라 하더라도 설계 운전 기간 또는 정기 점검 기간 내 구조물의

기능 저하 또는 구조 안전성에 문제가 없을 경우에는 불필요한 조치를 피함으로써 보다 합리적인 구조물의 운용을 도울 수 있기 때문이다<sup>1)</sup>. 따라서 최근 용접 구조물의 잔여수명 평가를 피로 손상의 누적분을 고려한 평가보다는 파괴역학 기반의 균열 진전 수명 평가를 통하여 수행되고 있다.

결함을 갖는 구조물에 대한 구조 건전성 평가는 파괴역학에 기초한 설계 기법들이 이용되고 있으며, 대표적인 파괴 역학적 설계 기법으로는 BS7910에서 규정하고 있는 공학적 한계 분석(engineering critical assessment, ECA)이 있다<sup>2)</sup>. ECA는 파괴 역학 기반의 피로 평가를 통해 결함을 갖는 구조물의 건전성을 평가

하는 방법으로 먼저 초기 결함의 형상 및 크기를 정의하고, 결함 부위에 작용하는 응력과 재료의 파괴 역학 파라미터인 피로 균열 진전 파라미터(fatigue crack growth rate)를 이용하여 피로 균열 진전 해석을 통해 결함을 갖는 용접부의 잔여 수명을 평가하게 된다. 특히 BS7910 코드에서는 비파괴 검사법에 따른 신뢰성 기반의 초기 결함의 형상 및 크기와 일반적인 강 용접부에 대한 설계 피로 균열 진전 파라미터를 제시하고 있다. 그러나 기존 연구결과에서는 파괴 역학 기반의 피로 평가시 BS7910 규정에서 규정하고 있는 설계 피로 균열 진전 파라미터를 이용할 경우 매우 보수적인 결과를 얻을 수 있다고 보고된 바 있다<sup>3)</sup>. 따라서, 파괴 역학 기반 피로 평가시 정확한 피로 수명 예측을 위하여 적정 피로 균열 진전 파라미터의 적용이 매우 중요하다.

본 연구에서는 파괴 역학 기반의 피로 평가시 BS7910에서 규정하는 피로 균열 진전 파라미터의 적용 타당성을 확인하기 위하여 용접 시편을 이용하여 일정 응력비(stress ratio)에서 피로 시험을 수행하고 실 용접부의 피로 균열 진전 거동을 확인하였다. 또한 피로 균열 진전 속도 시험을 통해 구축한 피로 균열 진전 파라미터를 이용하여 피로 균열 진전 해석을 수행하였고 그 결과를 BS7910의 피로 균열 진전 파라미터를 적용한 결과와 비교 하였다.

## 2. 피로 균열 진전 속도 시험

### 2.1 시험재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 굴삭기 작업 장치에 주로 사용되는 SM490A 강이며, 사용된 시편은 Fig. 1과 같이 두께가 10mm인 CT (Compact Tension) 시편이며, 기계 노치의 위치는 Fig. 2와 같이 용접부(weld center)와 열영향부 (HAZ, Fusion line + 0.5mm)에 각각

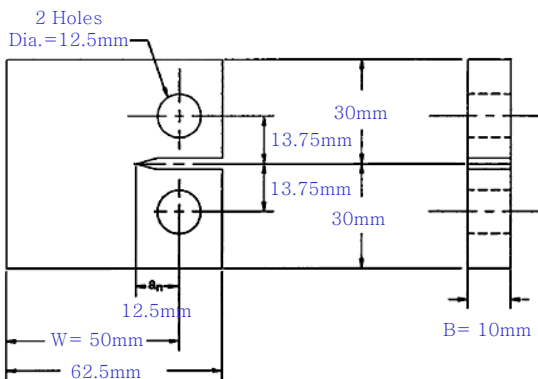


Fig. 1 Test specimen (ASTM E647)

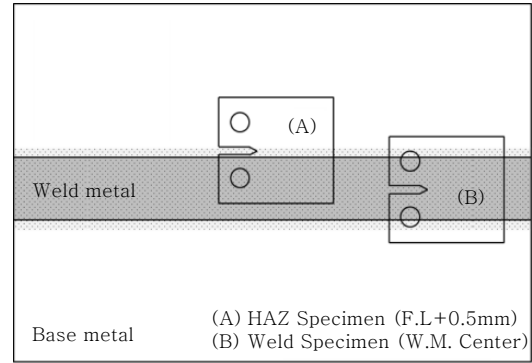


Fig. 2 Notch location of test specimen

생성하였다. 용접 시편 제작시 사용된 용접재는 AWS A5.18 ER70S-G이며, 용접 기법은 GMAW (Gas Metal Arc Welding)를 적용하였다.

### 2.2 시험 조건 및 방법

피로 균열 진전 속도 시험은 Fig. 3과 같이 ±10톤 용량의 유압피로시험기를 이용하여 ASTM E647 규정에 따라 평가하였다<sup>4)</sup>. 시험 조건은 Table 1과 같이 응력 확대계수 범위 제어 ( $\Delta K$ -control) 방법을 이용하였다. 즉, 예비 피로 균열(fatigue precrack) 생성시 피로 균열

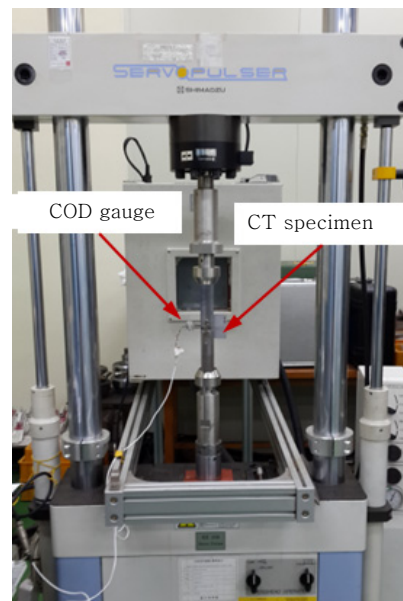


Fig. 3 Machine for fatigue crack growth rate (FCGR) test

Table 1 FCGR test condition

Specimen Type	CT (Compact Tension)
Notch location	Weld/HAZ(F.L.+0.5mm)
Control Mode	$\Delta K$ -Control
Stress Ratio, R	0.1/0.3/0.5
Frequency	15Hz

선단의 블런팅 (blunting) 효과를 최소화하기 위하여  $\Delta K$ -감소법( $\Delta K$ -decreasing method)을 이용 하였고, 피로 균열 진전 속도 시험에서는  $\Delta K$ -증가법( $\Delta K$ - increasing method)을 이용 함으로써, 1개의 시편으로 보다 넓은  $\Delta K$  범위의 시험 데이터를 획득하였다.

시편의 피로 균열 진전량은 COD(Crack Opening Displacement) 게이지를 이용한 컴플라이언스(compliance) 법을 이용하여 측정 하였으며, 시험 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 노치의 위치와 응력비에 따라 각각 5개의 시편을 이용하여 시험을 수행하였다. 피로 예비 균열은 시편의 치수와 ASTM E647 규정에 따라 최소 3.0mm 이상으로 생성하였다.

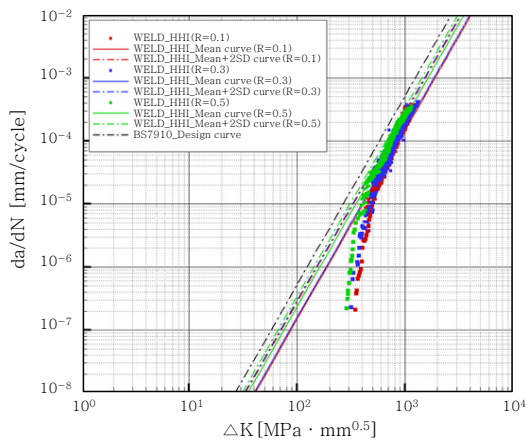
### 2.3 피로 균열 진전 속도 시험 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 노치 위치에 따른 응력비별 피로 균열 진전 속도 시험 결과를 식 (1)의 Paris's law를 이용하여  $da/dN$ - $\Delta K$ (log-log scale) 선도로 도시한 것이다.

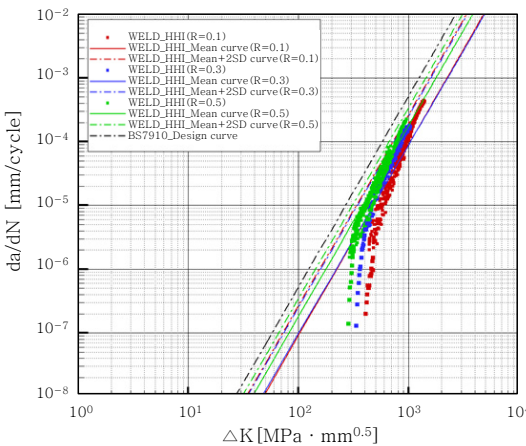
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

여기서,  $da/dN$  : 피로 균열 진전 속도  
 $\Delta K$  : 응력확대계수 범위  
 $C, m$  : 재료상수

BS7910에서는 일반적인 강 용접부의 경우 설계 피로 균열 진전 파라미터인  $m(da/dN$ - $\Delta K$  선도의 기울기) 값을 3.0으로 규정하고 있기 때문에 Fig. 4의  $da/dN$ - $\Delta K$  선도는 기울기( $m$ )를 3.0으로 고정하여 도시하였고, Fig. 5의 경우 시험 데이터로부터 선형 회귀 분석 (linear regression)을 통해 얻은 실제 기울기( $m$ =best linear fit)를 이용하여 도시하였다. Fig. 4와 Fig. 5 모두 노치 위치에 상관없이 응력비가 증가함에 따라 피로 균열 진전 속도가 증가함을 확인 할 수 있으며, Fig. 5와 같이 시험 데이터로부터 얻은 선도의 실제 기울기는 BS7910에서 규정하고 있는 3.0과는 차이가 있음을 알 수 있다.

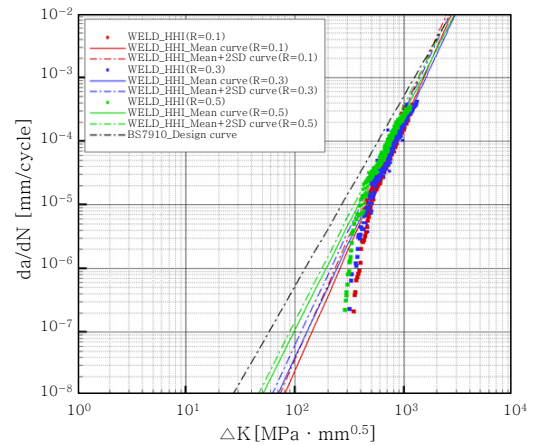


(a) Weld

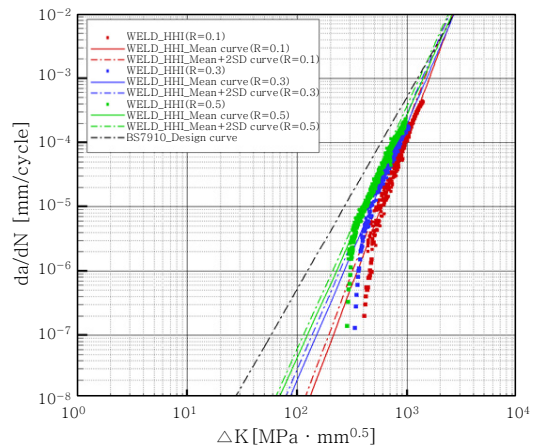


(b) HAZ

Fig. 4 Fatigue crack growth rate of SM490A weldment and HAZ ( $m=3.0$ )



(a) Weld



(b) HAZ

Fig. 5 Fatigue crack growth rate of SM490A weldment and HAZ ( $m$ = best linear fit)

**Table 2** Comparison results of the fatigue crack growth rate (m=3.0)

Material	Location of notch	Stress ratio	Fatigue crack growth parameter (Mean+2SD)					
			C	m	SD	C	m	SD
SM490A (SM-70G)	Weld	0.1	$2.44 \times 10^{-13}$	3.0 (Fix)	0.230	$5.55 \times 10^{-16}$	3.9	0.089
		0.3	$2.49 \times 10^{-13}$		0.144	$2.84 \times 10^{-15}$	3.7	0.098
		0.5	$3.40 \times 10^{-13}$		0.134	$2.32 \times 10^{-14}$	3.4	0.068
	HAZ	0.1	$2.74 \times 10^{-13}$	3.0 (Fix)	0.136	$3.46 \times 10^{-18}$	4.6	0.099
		0.3	$2.89 \times 10^{-13}$		0.130	$2.88 \times 10^{-16}$	4.0	0.082
		0.5	$3.40 \times 10^{-13}$		0.082	$1.52 \times 10^{-15}$	3.8	0.068
Steel <sup>1)</sup>	Weld (BS7910)	0.5	$5.21 \times 10^{-13}$	3.0	-	-	-	-

Note: <sup>1)</sup> 0.2% offset yield strength  $\leq 600$ MPa at the operation temperature up to 100 °C

Table 2는 평가된 피로 균열 진전 속도를 BS7910에서 규정한 설계 피로 균열 진전 파라미터 (Mean plus two standard deviation, Mean+2SD)와 비교하여 나타낸 것이다. BS7910에서는 강 용접부의 피로 균열 진전 파라미터의 경우 용접 잔류 응력에 의한 평균 응력을 고려하여 응력비(R)를 0.5로 사용하도록 규정하고 있다. 따라서 Table 2와 같이 동일한 응력비(R=0.5)에서 기울기를 3.0으로 고려할 경우 BS7910의 피로 균열 진전 속도는 시험을 통해 평가된 피로 균열 진전 속도에 비하여 다소 빠름을 확인할 수 있다. 이는 BS7910에서 규정하고 있는 설계 피로 균열 진전 파라미터를 사용하여 피로 평가를 수행할 경우 보수적인 피로 수명 결과를 얻을 수 있음을 의미한다. 또한 시험 데이터의 실제 기울기를 고려한 피로 균열 진전 파라미터(C)는 BS7910의 파라미터와 매우 큰 차이를 보이기 때문에 파괴 역학 기반의 피로 수명 평가시 어느 기울기를 고려한 파라미터를 적용하는 것이 타당한지 검증할 필요가 있다.

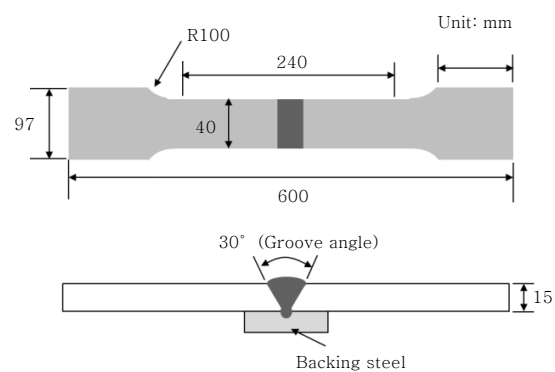
따라서 본 연구에서는 Table 2의 피로 균열 진전 파라미터를 이용하여 파괴 역학 기반의 피로 수명을 평가하고 그 결과를 비교함으로써 적정 피로 균열 진전 파라미터를 제시하고자 하였다

### 3. 파괴 역학 기반 피로 평가

#### 3.1 초기 결함 정의

파괴 역학 기반의 피로 평가를 위한 초기 결함은 용접부 피로 시험 결과를 이용하여 정의 하였다. 피로 시편은 CT시편과 동일한 강재 및 용접 기법을 적용하여 제작하였으며, 시편의 형상 및 치수는 Fig. 6과 같다.

Fig. 7 (a)는 피로 시편의 파면 형상을 나타낸 것으로 초기 결함은 용접 피로 시편의 파면 형상을 고려하



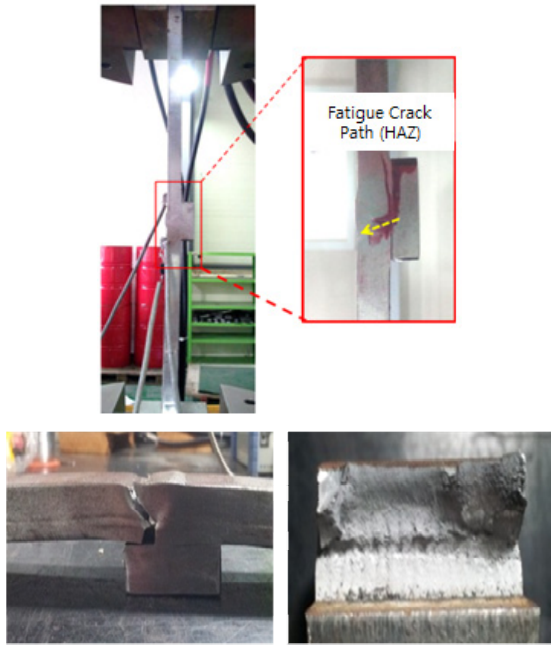
**Fig. 6** Fatigue test specimen geometry

여 정의하였다. 피로 시편의 파면 형상은 Fig. 7 (b)와 같이 BS7910에서 규정하는 extended surface flaw와 유사하므로 이를 초기 결함의 형상으로 정의하였다. 이때 초기 결함의 크기는 피로 시험 간 광학 현미경을 통해 최초로 관측된 피로 균열 길이인 0.2mm( $1.0 \times 10^5$  cycles)로 정의하였고, 피로 균열 진전량은 Fig. 8과 같이 시험 종료시까지 주기적으로 측정하여 기록하였다. 이때 피로 시험에 사용된 하중 조건은 공칭 응력 범위( $\Delta\sigma_{nom}$ ) 기준으로 220MPa이며, 최대 및 최소 응력의 비는 0.5이다.

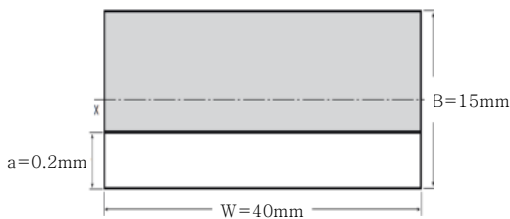
#### 3.2 피로 균열 진전 해석용 하중 선정

Fig. 9는 피로 균열 진전 해석시 사용될 응력 수준을 정의하기 위한 피로 시편의 유한 요소 해석 결과를 나타낸 것이다.

해석은 피로시험 조건인 공칭응력 범위 기준으로 220MPa에 해당하는 인장 하중을 부가하여 실시하였고, 피로 균열 진전 방향을 고려하여 열영향부를 따라 두께 방향으로 응력 선형화 (stress linearization)를 수행하였다. 응력 선형화 평가 결과, 1차 면내응력 범위( $\Delta\sigma_m$ )와



(a) Fracture surface of test specimen



(b) Extended surface flaw (BS7910)

Fig. 7 Initial defect shape and size

1차 굽힘응력 범위 ( $\Delta\sigma_b$ )가 각각 200MPa과 20MPa 수준으로 나타났으며, 이를 피로 균열 진전 해석을 위한 응력으로 선정하여 매 사이클 마다 반복되는 것으로 고려하였다.

### 3.3 피로 균열 진전 해석

피로 균열 진전 해석은 BS7910 규정에 따라 식 (1) 과 식(2)를 이용하여 수행하였다.

$$\Delta K_I = (Y\Delta\sigma)_p \sqrt{\pi a} \tag{2}$$

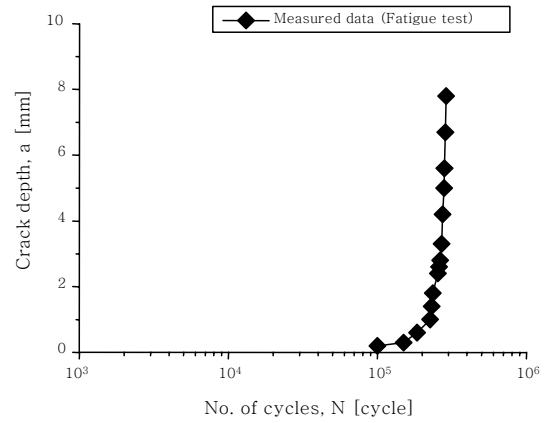


Fig. 8 Fatigue crack growth of test specimen

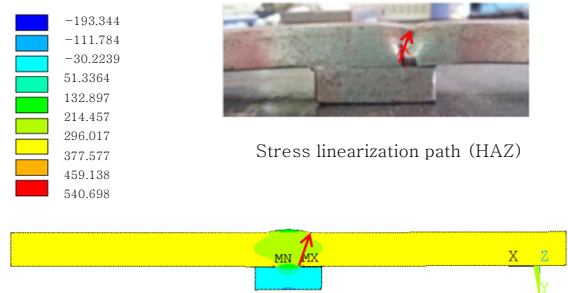


Fig. 9 Stress analysis results

$$(Y\Delta\sigma)_p = Mf_w \left[ k_{tm} M_{km} M_m \Delta\sigma_m + k_{tb} M_{kb} M_b (\Delta\sigma_b + (k_m - 1)\Delta\sigma_m) \right]$$

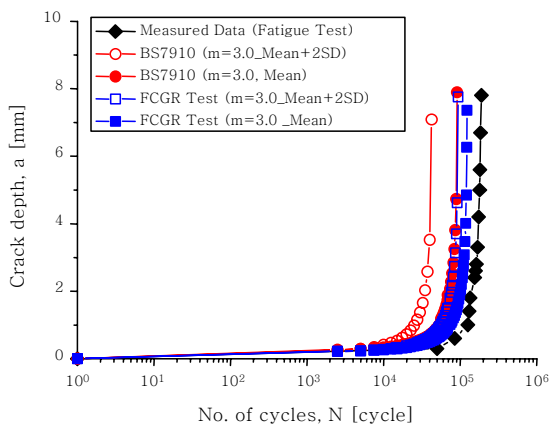
초기 결함의 크기는 Table 3과 같고 Table 4는 피로 균열 진전 해석에 사용된 피로 균열 진전 파라미터로 BS7910 규정과 같이 기울기를 3.0으로 고려한 경우와 피로 균열 진전 속도 시험 결과를 통해 얻은 데이터의 기울기 ( $m=3.8$ )를 고려한 파라미터(C)를 나타내었으며, 이때 파라미터는 평균 선도의 값(Mean curve)과 설계 값(Mean plus two standard deviation, Mean +2SD)을 이용하여 평가하였다. Fig. 10 과 Fig. 11은 피로 균열 진전 해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 10과 같이 BS7910의 피로 균열 진전 파라미터를 이용하는 경우가 가장 보수적인 피로 수명 결

Table 3 Fatigue crack growth analysis condition

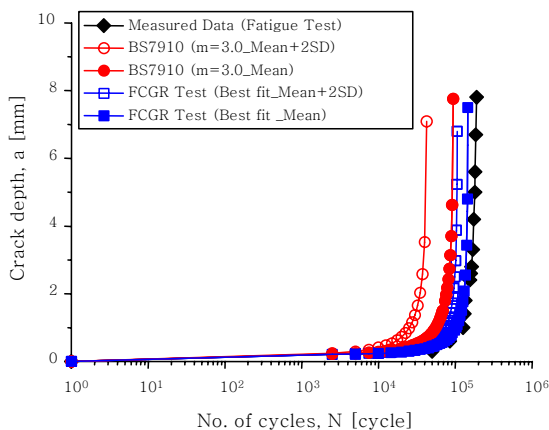
Initial defect type (extended surface flaw)	a [mm]	B [mm]	W [mm]	L [mm]	Linearized stress [MPa]	
					$\Delta\sigma_m$	$\Delta\sigma_b$
	0.2	15.0	40.0	8.0	200.0	20.0

**Table 4** Fatigue crack growth analysis condition

Notch location	$\Delta K_{th}$ [MPa $\sqrt{mm}$ ]	Fatigue crack growth parameters					
		BS7910			FCGR test		
		$da/dN=C(\Delta K)^m$			$da/dN=C(\Delta K)^m$		
HAZ	63	C	m	remark	C	m	remark
		$2.36 \times 10^{-13}$	3.0	Mean	$1.80 \times 10^{-13}$	3.0	Mean
					$3.41 \times 10^{-13}$		Mean+2SD
		$5.21 \times 10^{-13}$	3.0	Mean+2SD	$1.11 \times 10^{-13}$	3.8	Mean
$1.52 \times 10^{-13}$	Mean+2SD						



**Fig. 10** Fatigue crack growth analysis results (BS7910 vs. FCGR test, m=3.0)



**Fig. 11** Fatigue crack growth analysis results (m=3.0 vs. m=best linear fit)

과를 나타냄을 확인할 수 있으며, 실제 피로 시험을 통해 얻은 피로 균열 진전 양상과는 매우 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다. 이와 유사하게 피로 균열 진전 속도 시험으로부터 얻은 파라미터를 이용하는 경우에도 실제 피로 시험 결과에 비해 다소 보수적인 피로 수명 결과를 나타내었다. 그러나 Fig. 11과 같이 피로 균열

진전 속도 시험 데이터를 이용한 실제 기울기 (FCGR Test(best fit\_Mean))를 이용하는 경우 피로 시험 결과와 가장 유사한 피로 균열 진전 양상을 보였으며, 이는 실제 용접부의 피로 균열 진전 거동을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 피로 균열 진전 속도 시험을 통한 피로 균열 진전 파라미터의 재정의가 필요함을 의미한다.

#### 4. 결 론

파괴 역학 기반의 피로 수명 평가시 피로 균열 진전 속도 시험과 피로 균열 진전 해석을 수행하고 이를 실제 용접 시편의 피로 시험 결과와 비교하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

피로 균열 진전 속도 시험을 통해 SM490강의 용접부 및 열영향부의 설계 피로 균열 진전 파라미터를 구축하고, 용접부 피로 시험을 통해 실 용접부의 피로 균열 진전 특성을 확인하였다.

피로 시편의 실제 균열 형상을 고려하여 파괴 역학 기반의 피로 균열 진전 해석을 수행한 결과, BS7910의 피로 균열 진전 파라미터를 적용하는 경우 실제 용접 시편의 피로 수명보다 매우 보수적으로 평가됨을 확인하였으며, 피로 균열 진전 속도 시험을 통해 얻은 파라미터 (시험 데이터의 기울기(m), 평균 선도의 파라미터 (C))를 적용하는 경우 용접 시편의 피로 균열 진전 거동과 가장 유사함을 확인하였다.

따라서 파괴 역학 기반의 피로 수명 평가를 통해 운용중인 용접 구조물의 사용 적합성 평가를 수행하는 경우 해당 용접부에 대한 피로 균열 진전 속도 시험 결과를 이용하여 보다 정확한 평가를 통해 사용 적합성 여부를 판단하는 것이 타당하다.

#### References

1. KwangJin Kim, Evaluation of Fatigue Crack Growth

- Rate on the Surface of Steel Members Using COD (Crack Opening Displacement) Measurement, *Journal of Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection*, 15-2 (2011), 179-288 (in Korean)
2. BS7910, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, (2013)
  3. Olaf Doerk, Sang-Beom Shin, Gyu-Beak An, Design Impact of Fracture Mechanics Properties of High Toughness YP47 Welds, *Proceedings of the International Ocean and Polar Engineering Conference*, (2014)
  4. ASTM E647, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, (2015)