

# 단일과대하중이 피로균열성장에 미치는 영향에 관한 연구

김경수\* · 김성찬\*\* · 심천식\* · 박진영\* · 이창환\*

\* 인하대학교 선박공학과

\*\* 인하공업전문대학교 선박해양시스템과

## A Study on the Effect of a Single Overload on Fatigue Crack Retardation

KYUNG-SU KIM\*, SUNG-CAHN KIM\*\*, CHUN-SIK SHIM\*, JIN-YOUNG PARK\* AND CHANG-HWAN LEE\*

\* Dept. of Naval Architecture, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

\*\* Dept. of Ship & Ocean System, Inha Technical Collegue, Incheon, 402-752, Korea

**KEY WORDS:** ESPI system 전자스패클패턴 간섭시스템, Elastic-plastic zone 탄소성 영역, Fatigue crack growth length 피로균열성장 길이, Fatigue crack growth rate 피로균열성장률, Plastic zone size 소성영역크기, Crack retardation effect 균열지연효과

**ABSTRACT:** Ships and ocean structures are generally under random loading. Various type of variable-amplitude loading affects fatigue crack growth and fatigue life. However interaction effects due to irregularity of loading, including random loading have not explained exactly and it is difficult to examined fatigue crack growth behaviour and fatigue life for this reason. Therefore in this paper crack growth tests with constant-amplitude loading including a single overload were conducted to measure plastic zone size near crack tip of DENT specimen. And the observed plastic zone sized were discussed in terms of crack growth rate. As a result of this the effect the plastic zone size due to the overload is examined on the effect on crack growth rate and, consequently, fatigue life.

### 1. 서 론

선체구조의 피로수명예측 기술은 계측, 실험, 해석 및 경험 을 포함하는 광범위하고 포괄적이면서 정밀함을 요구하는 종합기술이지만 여기에는 많은 불확실성이 내포되어 있다. 선박 과 해양구조물과 같은 대형용접구조물의 경우 운영되어지는 설계수명 동안에 일정진폭하중이 아닌 변동하중에 의해서 특 정부분에서 균열이 발생하여 성장하게 된다. 이 때 하중의 변 동성 때문에 균열성장률은 가속되어지기도 하고 감속되어지 기도 한다. 따라서 피로수명예측 개선을 위해서는 이들 하중들간 의 간섭영향을 고려한 균열성장률이 요구되어진다. 특히 선박 과 해양구조물의 전체 피로수명에서 균열성장수명은 약 70% 이상의 비중을 차지하고 있기 때문에 균열성장에 관한 연구는 필요하다.

지금까지 균열성장에 관련하여 균열선단에서의 소성영역 크 기 측정과 균열성장길이 측정을 위하여 변형률 게이지 등을 이용한 여러 가지 시도가 있었지만 만족스러운 결과를 얻고 있지 못하다. 소성영역 크기와 관련된 이론식의 경우 Irwin 이 제안한 식이 널리 사용되고 있으나 평면응력과 평면변형률에 관한 2가지 식으로 제한되어져 있다.

평면응력, 변형률 상태가 아닌 일반적인 시편의 균열성장 거동에 관한 해석이 이루어지기 위해서는 두께의 영향이 고려 되어진 균열선단에 발생하는 소성영역의 크기와 균열성장길이 를 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 균열성장시험에서 ESPI system을 이용하여 인장과대하중이 작용하기 전후에 발생한 균열선단 변 형률 분포로부터 소성영역 크기를 측정한 후 Irwin 이 제 안한 소성영역 크기와 비교하였고 소성영역 크기 계산에 시편 두께에 관한 고려가 필요함을 확인하였다. 또한 균열 성장시험에서 인장과대하중 전후에 발생한 균열성장률 변 화를 측정한 후 이로부터 소성영역 크기를 결정하고 균열 성장률과의 관계를 조사하였다. 또한 소성영역 크기들이 균열성장률에 미치는 영향을 평가하였다.

### 2. 3D-ESPI System

ESPI system 은 레이저의 간섭현상으로 생긴 위상차를 이용 하여 시편 표면에 발생한 변위를 비접촉 영역 측정(noncontact whole-field measurement)하는 장비이다. ESPI system의 반사 경에서 나온 레이저는 시편 표면에서 반사되어진다. 반사되어 진 레이저는 CCD 카메라에 의해서 측정되어지고 이 때 이미 지(fringe image)는 컴퓨터 내부에 저장되어진다. 이러한 과정 은 시편에 하중이 작용하여 변형이 발생하기 전후에 2번 이루 어진다. 이들 2개의 이미지를 비교하여 얻은 결과(subtraction correlation fringe image)를 이용하여 시편 표면에 발생한 변

제1저자 김경수 연락처: 인하대학교 선박해양공학과

032-860-7341 ksukim@inha.ac.kr

형률을 계산하게 된다(김경수, 2001).

Fig. 1은 어느 한 방향으로의 평면 변형을 측정하기 위해 단 순화시킨 개념도이다. Fig. 1(a)에서 보여지는 것과 같이 같은 평면상에 위치하는 2개의 레이저 빔은 시편의 표면에서  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 의 각을 이루면서 반사되고 이들은 CCD 카메라에 의해서 측정되어진다. 카메라 센서에 의해 측정된 광도(intensity)는 다음과 같다.

$$I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{1/2} \cos(\Delta\psi) \quad (1)$$

여기서  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각 레이저 빔에서 산란(scatter)되어진 빛의 광도이고  $\Delta\psi$ 는 2개의 레이저 빔 사이의 위상차(phase difference)이다.

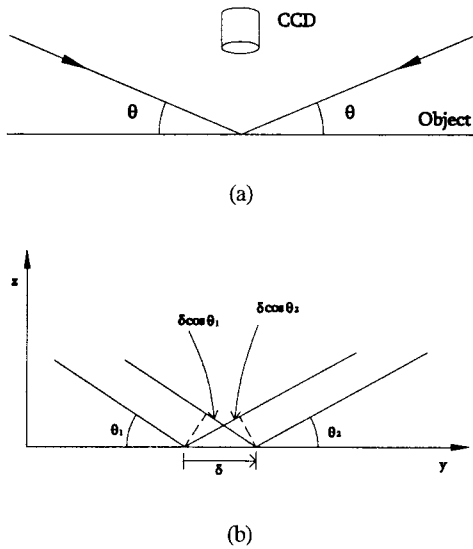


Fig. 1 Illumination configuration for in-plane electronic speckle pattern interferometry analysis

산란되어진 빛의 고유 특성 때문에  $\Delta\psi$ 는 일정하지 않다. 하중이 작용하여 시편 표면에 작은 변위가 발생한 후에  $I_1$ 과  $I_2$  광도는 거의 일정하게 유지된다. 그러나 위상차는  $\Delta\psi + \Delta\psi'$ 로 변한다. 여기서 2개의 이미지를 비교하여 얻은 광도와  $\Delta\psi'$ 를 이용하여 측정위치에서 fringe order,  $N$ 를 결정한다. 만일  $y$  방향으로 변위가 발생하였고 레이저 빔이  $yz$ 면에 있다면 Fig. 1(b)에서 위상차(optical pathlength difference)가  $\delta(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$ 와 같으며, 변위는 식 (2)와 같다.

$$\delta = \frac{N\lambda}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \quad (2)$$

2개의 이미지 사이에 변형률 증분량은  $\Delta\varepsilon = d\delta/dy$ 이고 fringe separation은  $\delta y = dy/dN$ 라 하자. 이 때  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 라 하면 식 (2)는 아래와 같이 된다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\lambda}{2\Delta y \cos \theta} \quad (3)$$

### 3. 균열 지연 효과

일정진폭하중을 받는 부재와는 달리 변동하중을 받는 부재의 피로균열성장은 하중 순서, 크기의 변화에 따라 변하는 것으로 연구 보고되었다. 이러한 하중크기의 순서변화에 따른 피로균열성장률변화의 원인은 다음과 같은 이론적 배경을 갖고 있다.

- (1) 균열선단의 잔류응력과 소성역으로 인한 상호영향
- (2) 균열단합
- (3) 균열 선단 무더짐
- (4) 균열 선단 변형률 강화

일정진폭하중에 비하여 랜덤하중으로 인한 하중 간섭은 피로 균열 성장률과 피로수명에 큰 영향을 미친다. 중요한 하중간섭 효과 중에 한 부분은 Fig. 2와 같은 인장과대하중에 의한 균열 성장률에 일정기간 동안에 나타나는 지연효과이다. Wheeler는 이 기간을 Fig. 3과 같이 과대하중에 의해서 형성되어진 소성역의 변화에 기인한다고 하였다.

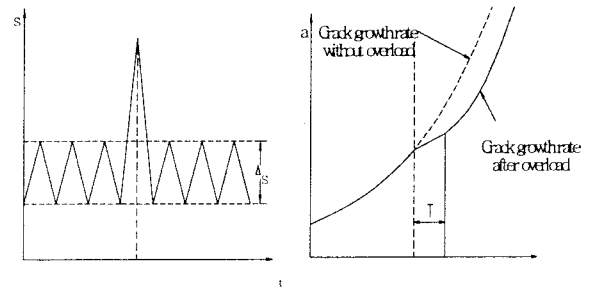


Fig. 2 Crack growth due to overload

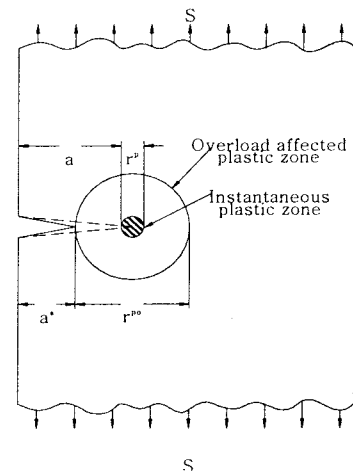


Fig. 3 Crack tip plastic zone in Wheeler model

#### 3.1 Wheeler model

여러 가지 형태의 변동하중 가운데 단일과대하중으로 인해 지연되어진 균열성장을 계산하기 위하여 Wheeler는 다음과 같이 가정하였다. “일정진폭하중에 의해 형성된 소성영역크기

가 과대하중으로 형성되어진 소성영역크기보다 작은 경우에 피로균열성장지연이 발생한다.” 지연되어진 균열성장률과 일정진폭하중하에 발생한 피로균열성장률은 다음과 같은 관계를 갖는다고 제안하였다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{OL} = C_p \left(\frac{da}{dN}\right)_{CA} \quad \begin{matrix} OL: \text{과대하중} \\ CA: \text{일정진폭하중} \end{matrix}$$

여기서,  $C_p$ 는 일정진폭하중에 의한 소성영역크기와 과대하중에 의해서 생성되어지는 소성영역크기에 관한 비의 함수이다.

$$C_p = \left[ \frac{r_p}{(a_0 + r_{p0}) - a} \right]^p = \begin{cases} \left( \frac{r_p}{s-a} \right)^p, & r_p < s-a \\ 1, & r_p \geq s-a \end{cases}$$

여기서,  $r_p$ 는 균열길이  $a$ 에서 일정진폭하중에 의해 형성되어진 소성영역크기이며,  $r_{p0}$ 는 균열길이  $a_0$ 에서 과대하중에 의해 형성되어진 소성영역크기이다.  $s = a_0 + r_{p0}$ 는 과대하중이 작용하는 순간 소성영역 끝단의 위치이다.(Fig. 3) 그리고  $p$ 는 실험상수이다.

### 4. 균열성장시험

#### 4.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 일반 구조용강(SM490B)이며, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2에 보이는 바와 같다. 시험편은 ASTM E338-91에 따라 설계되었고 시험영역 폭( $w$ )이 45mm 이고, 두께( $t$ )가 14mm 인 사각단면을 갖는다. 방전가공을 이용하여 V 형태를 갖는 노치를 시험편 중앙 양쪽면에 만들었다. 시험편에 만들어진 노치에 관한 기하학적 형태는 Fig. 4에 보여지고 있다.

Table 1 Chemical composition of SM490B

Material	Composition (weight %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM490B	0.18	0.55	1.60	0.035	0.035

Table 2 Mechanical properties of SM490B

Yield stress (MPa)	325
Ultimate tensile stress (MPa)	490
Young's modulus (MPa)	202,000
Poisson's ratio	0.3

Double Edge Notched Tension (DENT) Specimen

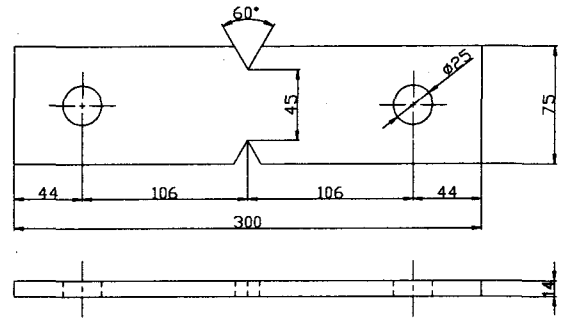


Fig. 4 Geometry of the DENT specimen (unit: mm)

#### 4.2 실험방법

본 연구에서는 상온의 대기 중에서 500kN 최대하중과 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고 있는 유압서보식 만능시험기, 시험영역에서의 변형률 분포 측정이 가능한 3D-ESPI system 그리고 균열길이 0.001mm 까지 측정 가능한 화상 분석 시스템을 이용하여 균열성장시험을 수행하였다.

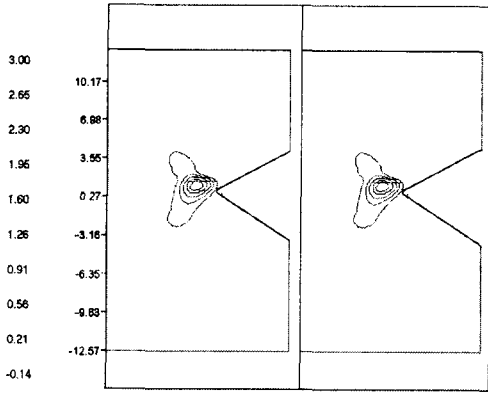
주파수 3Hz, 응력비  $R$ 이 0.2, 평균하중 39kN 하중크기 26kN를 갖는 사인파 형태의 일정진폭하중이 작용 중에 과대하중비 O.L가 75%인 균열성장시험을 수행하였다. 이들 시험 중에 균열길이 성장에 따라 ESPI system을 이용하여 균열선단에 발생한 소성영역 크기 측정을 수행하였다.

ASTM의 균열성장시험에 관한 규정에 따르면 균열전파속도가  $1 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$  이하로 감소할 경우 균열성장속도는 미소구조변화, 균열가지와 같은 균열선단 형상변화 등 많은 인자에 의해 상당히 민감하게 반응하여 변동량이 증가한다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 노치선단 응력확대계수  $\Delta K = 24 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에 기준하여 일정진폭하중의 크기를 결정하고 균열전파속도가  $1 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$  범위 내에서 변화하도록 하였다(ASTM, 1999).

### 5. 균열성장시험결과

#### 5.1 소성영역크기 변화

평면응력, 변형률 상태가 아닌 일반적인 시험편의 균열성장 거동에 관한 해석이 이루어지기 위해서는 두께의 영향이 고려되어진 균열선단에 발생하는 소성영역의 크기를 ESPI System을 이용하여 피로수명 및 균열길이에 따라 균열선단에 발생한 소성영역의 크기를 측정하였다. 피로반복하중이 증가함에 따라 균열선단 주변 변형률 분포 변화는 Fig. 5에 보여지는 것과 같이 ESPI system에 의해서 측정이 가능하다.



(a) at 281,476 cycles (b) at 299,601 cycles

Fig. 5 Change of strain contour measured by ESPI system according to constant amplitude cyclic loading

Fig. 6는 Irwin의 평면응력과 평면 변형률 상태에서의 소성 영역크기 결정식에 의한 값과 ESPI System에 의해 측정된 소성영역크기를 나타낸 것이다. 이는 두계의 영향을 고려한 소성영역 측정의 정확성이 가능하다는 것을 보여준다.(김경수, 2002)

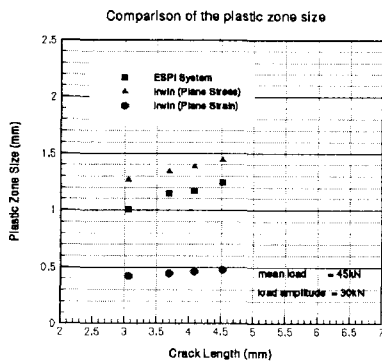


Fig. 6 Comparison of the plastic zone sizes on the basis of the crack length measured by ESPI system

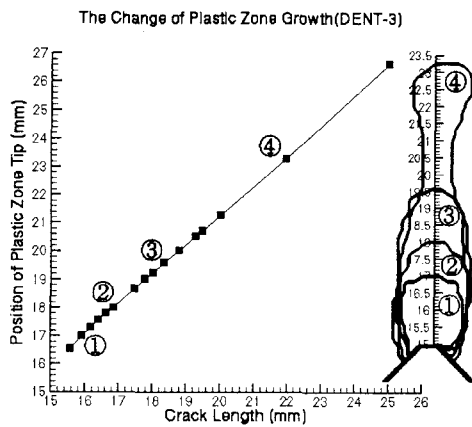


Fig. 7 Change of position of plastic zone tip according to crack growth length

The Change of Plastic Zone Growth(DENT-5)

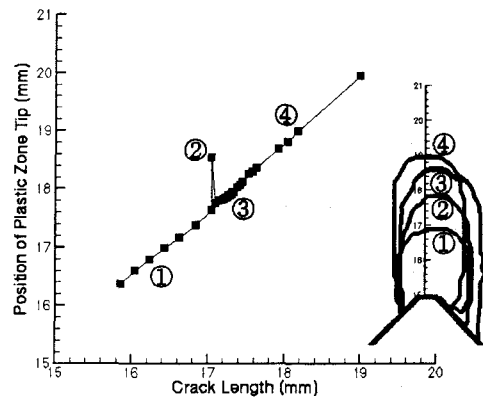


Fig. 8 Change of position of plastic zone tip according to crack growth length

일정진폭하중이 작용하였을 때 Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 Fig. 5의 변형률 분포 결과들로부터 결정된 균열선단에서 소성영역의 끝단은 균열길이가 증가함에 따라 일정한 기울기를 가지고 증가함을 확인하였다. 단일과대하중을 작용하였을 때, Fig. 8과 같은 ESPI System을 이용하여 소성영역크기의 변화를 영역 측정이 가능하다.

### 5.2 균열성장률

화상분석 시스템을 이용하여 과대하중이 없는 일정진폭반복하중이 작용하는 균열선단에서 피로손상이 축적되어짐에 따라 성장하는 균열성장길이를 측정하였다. Fig. 9, 10은 일정진폭하중이 작용하였을 때의 균열성장길이와 균열성장률 변화곡선이다. Fig. 11은 과대하중이 작용하였을 때 피로수명에 대한 균열성장 곡선이며, Fig. 12는 균열성장길이에 대한 균열성장률곡선이다. 과대하중으로 인한 균열성장지연효과를 확인할 수 있다.

Crack Growth Test for DENT-3

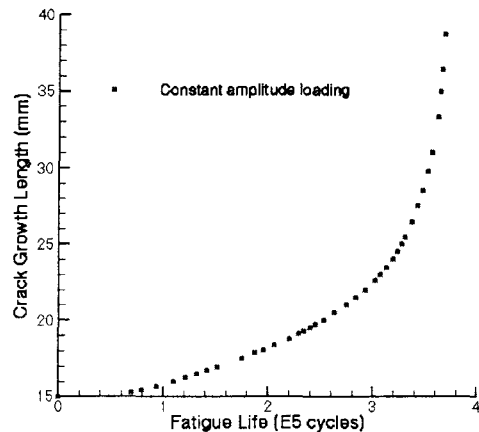


Fig. 9 Crack growth length curve according to fatigue life

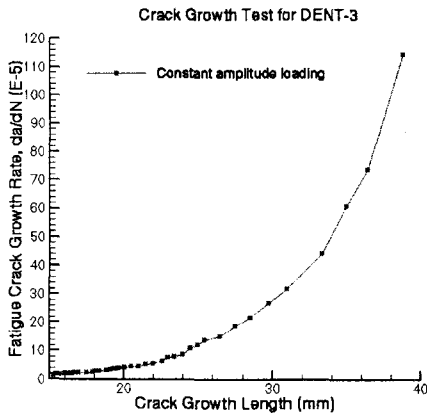


Fig. 10 Fatigue crack growth rate curve according to crack growth length

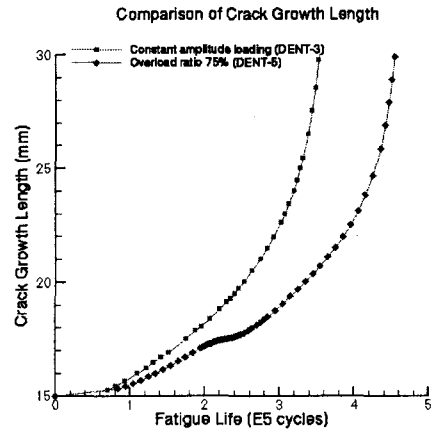


Fig. 13 Comparison of crack growth length curve according to fatigue life

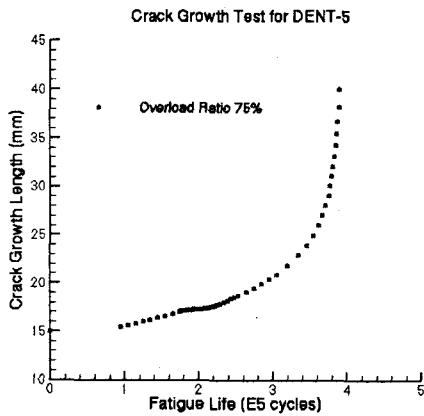


Fig. 11 Crack growth length curve according to fatigue life

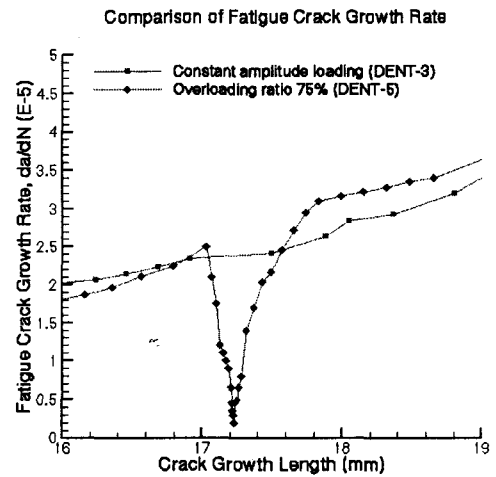


Fig. 14 Comparison of Fatigue crack growth rate curve according to crack growth length

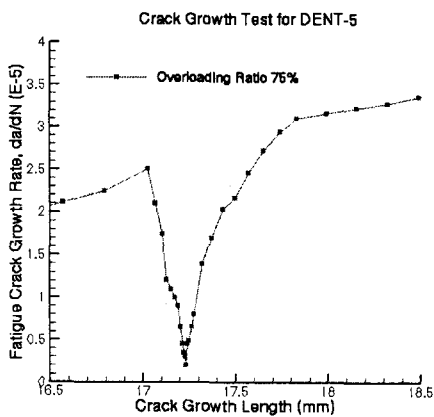


Fig. 12 Fatigue crack growth rate curve according to crack growth length

Fig. 13은 일정진폭하중을 받는 시편과 과대하중비(O.L.)가 75%인 시편에서 피로수명에 따른 균열성장길이 비교곡선이고, Fig. 14는 균열길이에 따른 균열성장률 비교곡선이다. 과대하중으로 인한 균열성장지연효과 뒤에 일정진폭하중으로 인한 균열성장곡선을 따르고 있는 것을 확인할 수 있다.

### 5.3 Wheeler Model과 시험결과 비교

Wheeler model은 일정진폭하중과 과대하중이 작용하였을 때 균열성장률의 차이를 소성영역크기의 함수로 제안한 모델이다. 복잡한 실제 조건을 포함한 균열성장시험의 경우 Fig. 15에서 보여지는 것과 같이 균열성장률 거동에서 잘 일치하지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 16은 Wheeler model로부터 결정한 피로수명에 대한 균열성장길이곡선과 시험결과로부터 얻은 균열지연곡선을 비교한 그래프이다. Wheeler model에서 결정한 균열성장길이와 시험결과가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이는 ESPI system 으로 측정된 소성영역크기가

과대하중으로 인해 발생한 균열성장지연의 지배인자로서 사용될 수 있음을 의미한다.

## 6. 결 론

- 1) ESPI system을 이용하여 시편의 측정영역에서 두께의 영향을 고려한 소성영역 크기 측정이 가능함을 확인하였다.
- 2) 균열성장시험결과와 Wheeler model의 계산결과 비교로부터 ESPI system 으로 측정된 소성영역크기가 과대하중으로 인해 발생한 균열성장지연거동의 지배인자로 사용될 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 황해권수송시스템센터 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김경수, 심천식(2002). "전자스펙클패턴 간섭시스템을 이용한 피로하중을 받는 균열선단에서 탄소성 영역 측정에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제4호, pp13-18
- 김경수, 심천식(2002). "3D-ESPI 시스템을 이용하여 결정된 응력집중계수가 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제1호, pp46-51
- ASTM (1999). "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, No. E647-99
- Anderson T. L. (1995). "Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications", CRC Press
- Dowling N. E. (1993). "Mechanical Behavior of Materials", Prentice Hall

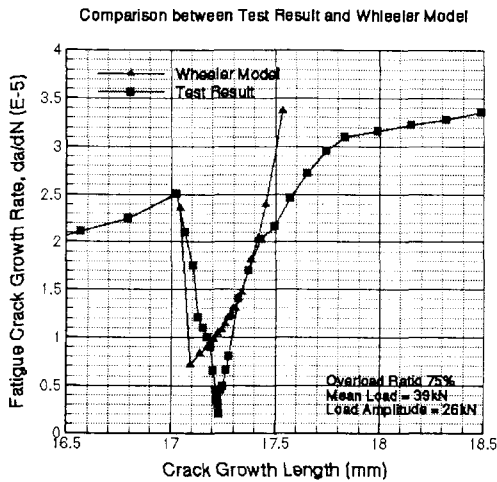


Fig. 15 Comparison between test results and wheeler's model

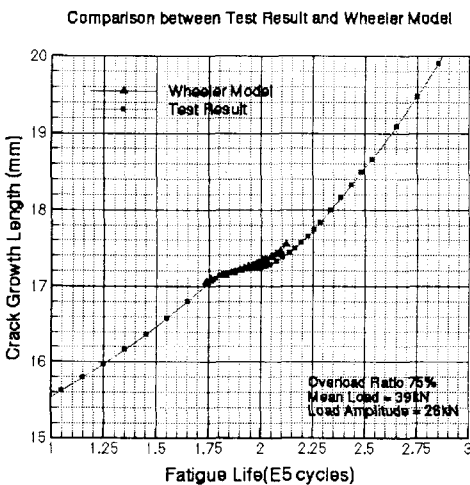


Fig. 16 Comparison between test results and wheeler's model