

## 과대하중이 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구

김경수<sup>†\*</sup>, 신병천<sup>\*\*</sup>, 심천식<sup>\*</sup>, 박진영<sup>\*</sup>, 조형민<sup>\*</sup>

인하대학교<sup>\*</sup>, 한국기계연구원<sup>\*\*</sup>

### A Study on the Effect of Overloading on Fatigue Life

K. S. Kim<sup>\*</sup>, B. C. Shin<sup>\*\*</sup>, C. S. Shim<sup>\*</sup>, J. Y. Park<sup>\*</sup> and H. M. Cho<sup>\*</sup>

Inha University<sup>\*</sup>, Korea Institute of Machinery & Materials<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

Ships and ocean structures are subjected to random loads caused by irregular waves. The irregularity of amplitude from random loading affects on fatigue crack growth and fatigue life. However the effects of irregularity of loading on fatigue including random loading have not been explained exactly. Therefore in this paper crack growth tests on DENT specimens under constant-amplitude loading including a single tensile overload are conducted to investigate the effect of overload on crack growth rate. The size of plastic zone and crack growth rate before and after a single tensile overloading are measured using ESPI system. Crack growth retardation model that is characterized by crack growth length and the size of plastic zone was proposed and compared with test result. From the research, the validity of proposed model is examined on crack growth retardation, and consequently fatigue life.

※Keywords: ESPI(전자스펙클패턴 간섭시스템), Overloading(과대하중), Crack retardation effect(균열지연효과), Size of plastic zone(소성영역크기), Crack growth rate(균열성장률)

#### 1. 서언

선체구조의 피로수명예측 기술은 계측, 실험, 해석 및 경험을 포함하는 광범위하고 포괄적이면서 정밀함을 요구하는 종합기술이지만 여기에는

많은 불확실성이 내포되어 있다. 선박과 해양구조물과 같은 대형용접구조물의 경우 운영되어지는 설계수명 동안에 일정진폭하중이 아닌 변동하중에 의해서 특정부분에서 균열이 발생하여 성장하게 된다. 이 때 하중의 변동성 때문에 균열성장률은 가속되어지기도 하고 감속되어지기도 한다. 따라서 피로수명예측 개선을 위해서는 이들 하중들간의 간섭영향을 고려한 균열성장률이 요구되어진다.

접수일: 2002년 11월 25일, 승인일: 2003년 5월 24일

†주저자. E-mail: ksukim@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7341

특히 최근에 선박이 경량화 대형화되어짐에 따라 응력집중부에 작용하는 하중은 점점 커지고 균열성장에 대한 관심이 날로 높아지고 있다.

변동진폭하중 작용시 피로균열성장에 대한 해석을 위하여 여러 가지 모델들이 제안되어졌다. Eiber(1971)는 피로균열면에서의 압축잔류응력이 균열달항을 일으킨다고 주장하였다. 또한 이 개념에 기초를 둔 유효응력을 이용하여 과대하중에 의해 유발되어지는 균열성장지연 해석에 적용하였다. Willenborg(1971)와 Toyosada(1997)는 과대하중에 의하여 균열선단에 발생한 소성영역내에서의 유효응력을 정의하여 균열성장률을 예측하는 모델을 제안하였다. Wheeler(1972)는 과대하중이 균열끝단에 큰 소성영역을 유발하기 때문에 과대하중 후에 압축잔류응력이 발생한다고 주장하였다. 김창욱 등(2001)은 변동하중 하의 피로균열전파 거동을 해석함에 있어 균열의 개폐구 거동을 고려한 해석적 수치 모델을 개발하여 여러 가지 하중상태에 대한 수치계산을 수행하였다.

한편 균열성장해석의 일부인 과대하중에 의한 균열성장지연에 관한 연구가 이루어지기 위해서는 균열선단에 발생한 소성영역크기 측정이 요구된다. 그러나 지금까지 균열성장에 관련하여 균열선단에서의 소성영역 크기 측정과 균열성장길이 측정을 위하여 변형을 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(Dowling 1993).

본 연구에서는 균열성장시험에서 ESPI system을 이용하여 인장과대하중이 작용하기 전후에 발생한 균열선단 변형을 분포로부터 소성영역 크기를 측정한 후 Irwin 이 제안한 소성영역크기와 비교하였다. 균열성장시험에서 인장과대하중 전후에 발생한 균열성장을 변화를 측정한 후 이로부터 소성영역 크기를 결정하고 균열성장률과의 관계를 조사하였다. 또한 균열성장길이와 소성영역크기를 인자로 하는 균열성장지연모델을 제안한 후 균열성장시험결과와 비교하였다. 이로부터 제안한 균열성장지연모델의 유효성을 평가하였다.

## 2. ESPI System

ESPI system 은 홀로그래픽 기록 물질 대신 CCD(charge coupled device) 카메라를 이용한 영상 홀로그래피 기술을 기본으로 하고 레이저의 간섭현상으로 생긴 위상차를 이용하여 시편 표면에 발생한 변위를 비접촉 영역 측정(noncontact whole-field measurement)하는 장비이다. ESPI system의 반사경에서 나온 레이저는 시편 표면에 반사되어진다. Fig. 1에서 도식적으로 보여지는 것과 같이 반사되어진 레이저는 CCD 카메라에 의해서 측정되어지고 이 때 이미지(fringe image)는 컴퓨터 내부에 저장되어진다. 이러한 과정은 시편에 하중이 작용하여 변형이 발생하기 전후에 2번 이루어진다. Fig. 1 에 보여지는 이들 2개의 이미지를 비교하여 얻은 결과(subtraction correlation fringe image)를 이용하여 시편 표면에 발생한 변형률을 계산하게 된다(김경수/심천식, 2002).

Fig. 2은 어느 한 방향으로의 평면 변형을 측정하기 위해 단순화시킨 개념도이다. Fig. 2(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.

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

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

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

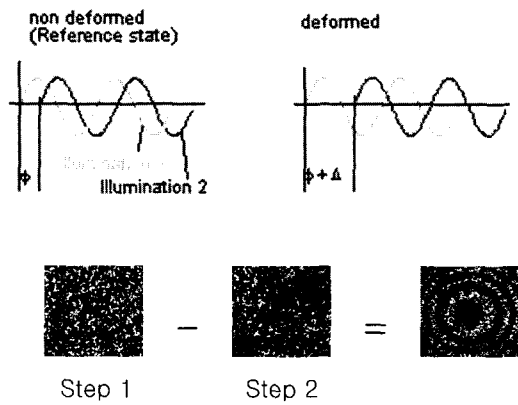
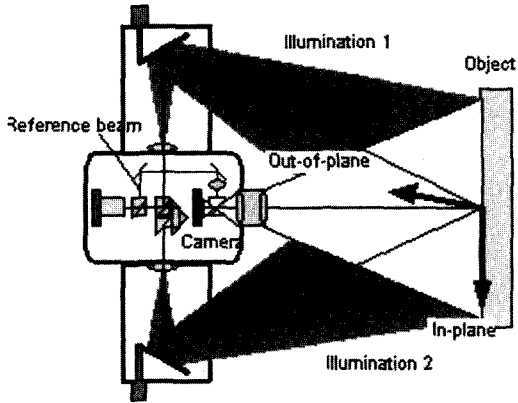


Fig. 1 Principle of ESPI system, wave profile and speckle pattern images

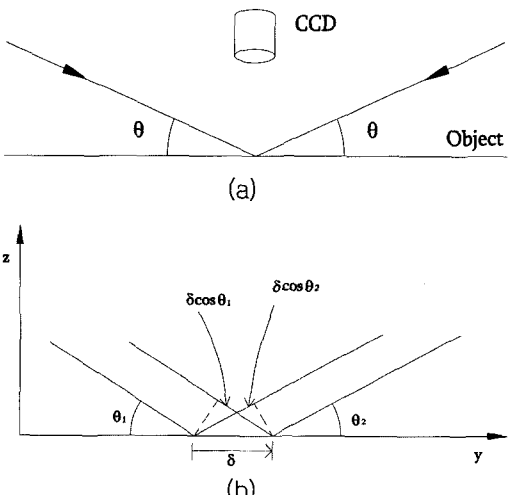


Fig. 2 Illumination configuration for in-plane electronic speckle pattern interferometry analysis

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

2개의 이미지 사이에 변형을 증분량은  $\Delta \epsilon = d\delta / dy$  이고 fringe separation 은  $\delta y = dy / dN$  라 하자. 이 때  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$  라 하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 된다.

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

본 연구에 사용되어진 ESPI System 을 이용한 변형을 측정방법은 균열선단, 노치부 등을 포함하는 관심영역 전체의 변형을 측정할 수 있으며 장치의 이동, 설치 및 조작이 간편한 여러 장점들을 가지고 있는 반면 태양빛의 직사광선과 열 등은 레이저의 간섭에 영향을 미치기 때문에 현장에서 변형을 측정하고자 하는 경우 환경적인 제약이 따를 수 있다. 사용레이저의 파장이 측정 기준이 되므로 영점조정이 필요없고, 정보가 수치적으로 처리되기 때문에 기록 및 컴퓨터 인터페이스가 쉬운 특징들을 가지고 있다. 또한 본 시스템은  $0.03 \mu m$ 의 측정감도를 가지며 CCD 카메라의 해상도는  $768 \times 583 pixel$ 을 가지고 있으며 변형을 측정가능 영역은 최대  $25 \times 35 mm^2$ 이다.

3. 균열 지연 효과

일정진폭하중을 받는 부재와는 달리 변동하중을 받는 부재의 피로균열성장은 하중 순서, 크기의 변화에 따라 변하는 것으로 연구 보고되었다. 이러한 하중크기의 순서에 따른 피로균열성장을 변화의 원인은 다음과 같은 이론적 배경을 갖고 있다 (Dowling 1993; Anderson 1995).

- (1) 균열선단의 압축잔류응력과 소성영역으로 인한 상호영향
- (2) 균열달힘
- (3) 균열 선단 무더짐
- (4) 균열 선단 변형을 강화

일정진폭하중에 비하여 랜덤하중으로 인한 하중 간섭은 경우에 따라 피로균열성장률과 피로수명에 큰 영향을 미친다. 중요한 하중간섭효과 중에 하나는 Fig. 3과 같은 인장과대하중에 의하여 일정 기간 동안 균열성장률에 나타나는 균열성장지연효과이다. Wheeler(1972)는 인장과대하중이 작용하

는 경우 균열선단에 큰 소성영역이 형성되어지기 때문에 하중이 제거되어지면서 압축잔류응력이 형성되어지고 이 응력에 의하여 발생하는 균열성장 지연 기간은 Fig. 4와 같이 인장과대하중에 비하여 상대적으로 작은 하중에 의하여 발생한 작은 소성영역이 인장과대하중에 의해서 형성되어진 큰 소성영역을 벗어나기 전까지 발생한다고 주장하였다.

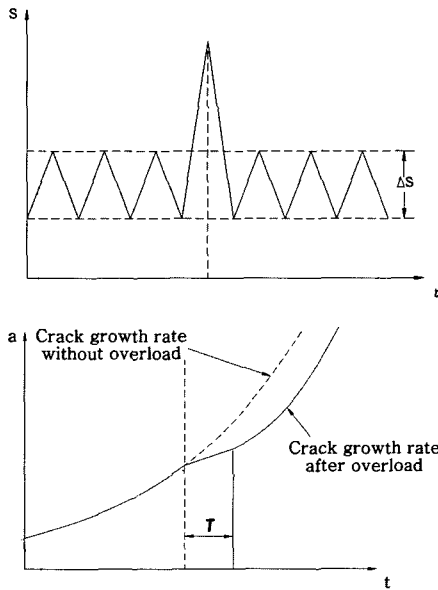


Fig. 3 Crack retardation effect due to overload

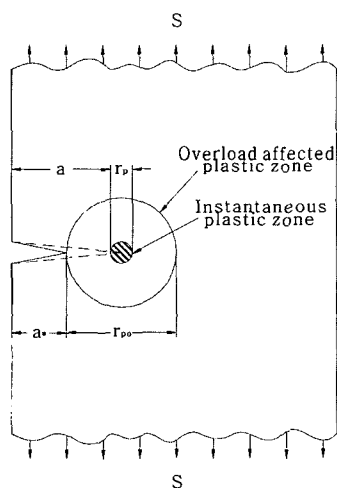


Fig. 4 Plastic zone due to overload at crack tip

3.1 균열성장지연모델

여러 가지 형태의 변동하중 가운데 과대하중으로 인해 지연되어진 균열성장거동을 계산하기 위하여 다음과 같이 가정하였다. "일정진폭하중에 의해 형성된 소성영역크기가 과대하중으로 형성되어진 소성영역크기보다 작은 경우에 피로균열성장 지연이 발생한다." 본 논문에서는 지연되어진 피로균열성장률과 일정진폭하중하에 발생한 피로균열성장률 사이에 식 (4)와 같은 관계를 갖는 Wheeler's model(Wheeler 1972)에서 형상함수  $p$ 를 사용하는 변형되어진 균열성장지연모델을 제안하였다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{OL} = C_p \left(\frac{da}{dN}\right)_{CA}$$

$$\begin{aligned} OL &: \text{과대하중} \\ CA &: \text{일정진폭하중} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $C_p$ 는 일정진폭하중에 의한 소성영역크기와 과대하중에 의해서 생성되어지는 소성영역크기에 관한 비를 이용하여 과대하중과 일정진폭하중에 의해 발생한 균열성장률 사이의 감소비를 나타내는 함수이다.

$$\begin{aligned} C_p &= \left[ \frac{r_p}{(a_0 + r_{p0}) - a} \right]^p \\ &= \begin{cases} \left(\frac{r_p}{s-a}\right)^p, & r_p < s-a \\ 1, & r_p \geq s-a \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

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. 4). 그리고  $p$  는 전자스패클패턴 간섭시스템으로부터 측정되어진 균열길이를 인자로 하는 다음과 같은 형상함수이다. 이 함수는 최저 균열성장률을 갖는 순간의 균열길이  $a_{min}$  를 기준으로 균열성장률의 감소구간과 가속구간의 형상을 표현하도록 하였다.

$$\text{For } a_i \leq a < a_{min} \\ p = \frac{C}{(a_{min} - a_i)^2} (a - a_i)^2 \quad (6)$$

$$\text{For } a_{min} \leq a \leq a_e \\ p = \frac{C}{(a_{min} - a_e)^2} (a - a_e)^2 \quad (7)$$

여기서  $a$  는 균열길이이고  $a_i$ ,  $a_{min}$  그리고  $a_e$  는 각각 과대하중이 작용하는 순간, 균열성장률이 최저가 되는 순간 그리고 균열성장지연 효과가 사라지는 순간의 균열길이들이다.  $C$  는 과대하중비에 영향을 받는 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. 5 에 보여지고 있다.

##### 4.2 실험방법

본 연구에서는 상온의 대기 중에서 500kN 최대

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

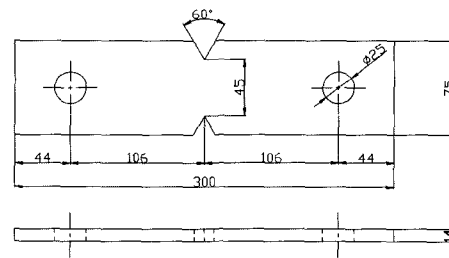


Fig. 5 Geometry of the DENT specimen (unit: mm)

하중과 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고 있는 유압서어보식 만능시험기, 시험영역에서의 변형을 분포 측정이 가능한 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 26kN을 갖는 사인파 형태의 일정진폭하중이 작용하는 중에 균열길이 17mm에서 과대하중비 O.L.가 75% ( $P_{OL} = 113.75kN$ )인 단일인장과 대하중을 작용시키는 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  $\Delta K = 24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 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

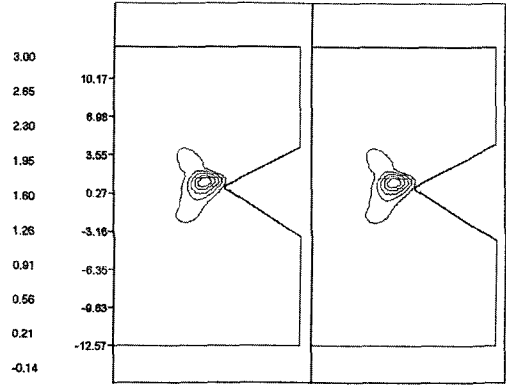
#### 5.1 소성영역크기 변화

평면응력, 변형률 상태가 아닌 일반적인 시편의 균열성장 거동에 관한 해석을 위해 두께의 영향이 고려되어진 균열선단에 발생하는 소성영역 크기를 균열성장길이 변화에 따라 ESPI system을 이용하여 측정하였다.

피로반복하중이 증가함에 따라 균열선단 주변 변형률 분포 변화는 Fig. 6에 보여지는 것과 같이 ESPI system에 의해서 측정이 가능하다.

Fig. 7은 Irwin의 평면응력과 평면 변형률 상태에서의 소성영역크기 결정식에 의한 값과 ESPI system에 의해 측정된 소성영역크기를 비교한 그래프이다. 측정되어진 소성영역 크기가 Irwin의 계산결과범위 내에 있는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 ESPI system으로 측정한 소성영역 크기에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다(김경수/심천식, 2002).

일정진폭하중이 작용하였을 때 Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 Fig. 6의 변형률 분포 결과들로부터 결정한 균열선단에서 소성영역의 끝단은 균열 길이가 증가함에 따라 일정한 기울기를 가지고 증가함을 확인하였다. 또한 ESPI system을 이용하여 측정한 단일과대하중 작용 전후의 변형률 분포로부터 소성영역크기 변화 측정이 가능함을 확인하였다(Fig. 9).



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

Fig. 6 Change of strain contour measured by ESPI system according to constant amplitude cyclic loading

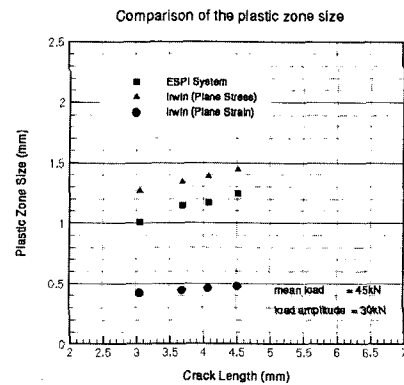


Fig. 7 Comparison of the plastic zone sizes on the basis of the crack length measured by ESPI system

#### 5.2 균열성장률

화상분석 시스템을 이용하여 과대하중이 없는 일정진폭반복하중이 작용하는 균열선단에서 피로 손상이 축적되어짐에 따라 성장하는 균열성장길이를 측정하였다. Fig. 10 and 11은 일정진폭하중이 작용하였을 때의 균열성장길이와 균열성장률 변화 곡선이다. Fig. 12는 과대하중이 작용하였을 때 피로수명에 대한 균열성장길이 곡선이며, Fig. 13은 균열성장길이에 대한 균열성장률곡선이다. 이

들 그래프로부터 인장과과대하중으로 인한 균열성장 지연효과를 확인할 수 있다.

Fig. 14는 일정진폭하중을 받는 시편과 과대하중비(O.L.)가 75%인 시편에서 피로수명에 따른 균열성장길이 비교곡선이고, Fig. 15는 균열길이에 따른 균열성장률 비교곡선이다. 과대하중으로 인한 균열성장지연효과 뒤에 균열성장거동이 일정진폭하중으로 인한 균열성장거동을 따르고 있는 것을 확인할 수 있다.

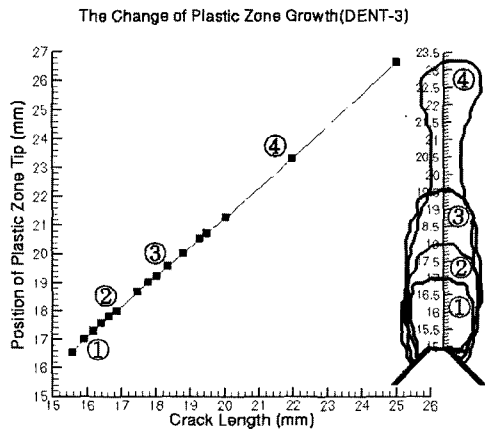


Fig. 8 Change of position of plastic zone tip according to crack growth length

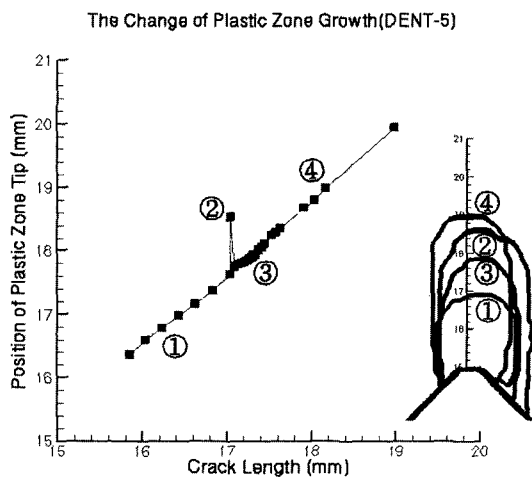


Fig. 9 Change of position of plastic zone tip according to crack growth length

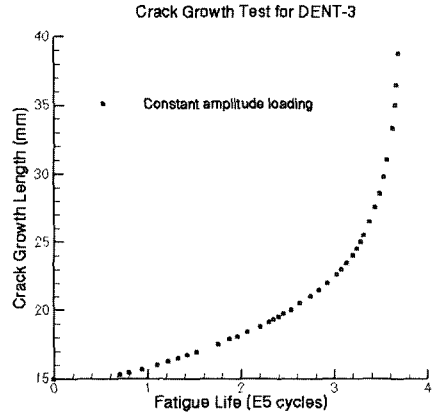


Fig. 10 Crack growth length curve according to fatigue life

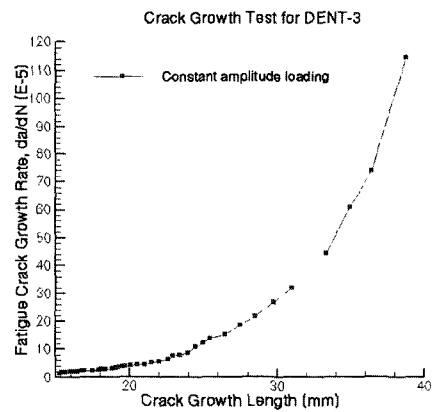


Fig. 11 Fatigue crack growth rate curve according to crack growth length

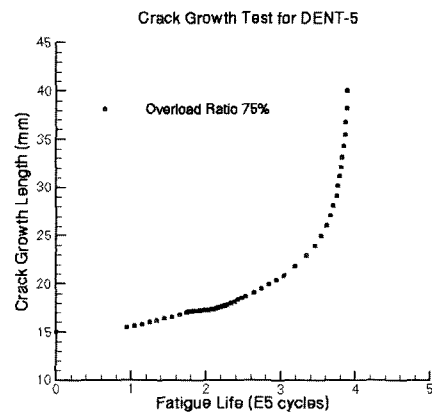


Fig. 12 Crack growth length curve according to fatigue life

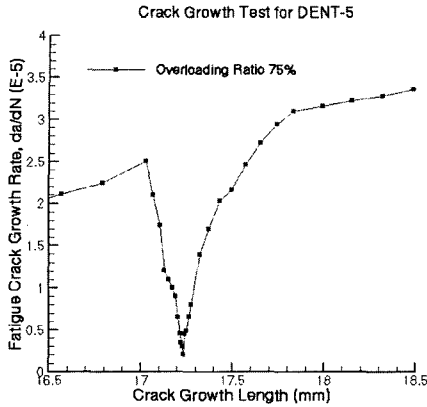


Fig. 13 Fatigue crack growth rate curve according to crack growth length

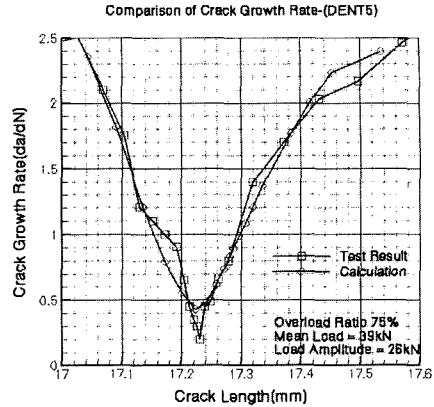


Fig. 16 Comparison of crack retardation model with test result in crack growth rate

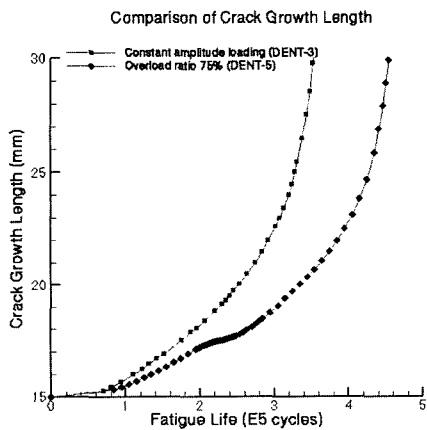


Fig. 14 Comparison of crack growth length curve according to fatigue life

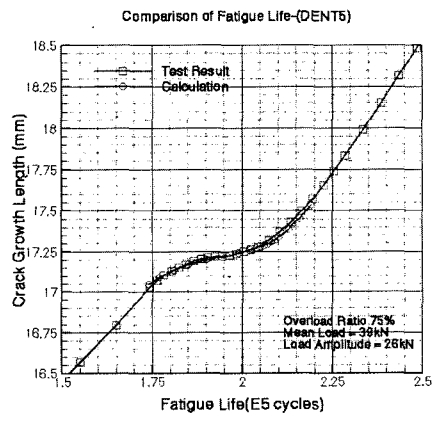


Fig. 17 Comparison of crack retardation model with test result in fatigue life

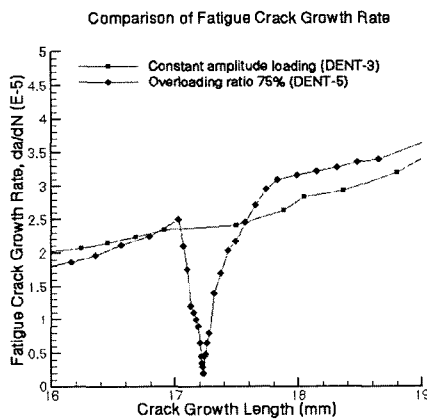


Fig. 15 Comparison of fatigue crack growth rate curve according to crack growth length

### 5.3 균열성장지연모델과 시험결과 비교

제안되어진 균열성장지연모델은 일정진폭하중에 의한 균열성장률과 과대하중으로 인한 균열성장률 사이의 관계를 소성영역크기와 균열성장길이의 함수로 제안한 모델이다. 인장과과대하중이 작용하는 균열성장시험의 경우 Fig. 16에서 보여지는 것과 같이 균열성장률거동에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 17은 제안되어진 균열성장지연모델을 이용하여 결정한 피로수명에 대한 균열성장길이곡선과 시험결과로부터 얻은 균열지연곡선을 비교한 그래프이다. 제안되어진 모델을 이용하여 결정한 균열성장길이 결과와 시험결과가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이는 ESPI



system을 이용하여 측정된 소성영역크기가 과대하중으로 인해 발생한 균열성장지연의 지배인자로서 사용될 수 있음을 의미하며 또한 제안되어진 균열성장지연모델이 과대하중으로 인한 균열성장지연거동을 예측하는데 사용되어질 수 있음을 보여주고 있다.

### 6. 결론

- 1) ESPI system을 이용하여 시편의 측정영역에 발생한 소성영역 크기 측정이 가능함을 확인하였다.
- 2) 일정진폭하중에 포함된 인장과과대하중은 균열 성장을 지연시키는 효과가 있음을 확인하였다.
- 3) ESPI system 으로 측정된 소성영역크기가 과대하중으로 인해 발생한 균열성장지연거동의 지배인자로 사용될 수 있음을 확인하였다.
- 4) 제안되어진 균열성장지연모델에 의한 계산결과와 균열성장시험결과의 비교로부터 제안되어진 균열성장지연모델이 인장과과대하중으로 인해 지연되어진 균열성장거동 예측에 사용될 수 있음을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실과제(99-J00-00-015-00)인 "대형용접구조물의 피로수명 예측기술개발" 사업의 연구결과 일부이며, 황해권수송시스템센터 연구비(00A-09-02-02-2) 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 김경수, 심천식, 2002, "전자스패클패턴 간섭시스템을 이용한 피로하중을 받는 균열선단에서 탄소성 영역 측정에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제 16권, 제 4호, pp. 3-18.
- 김경수, 심천식, 2002, "3D-ESPI 시스템을 이용하여 결정된 응력집중계수가 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제 16권, 제 1호, pp. 46-51.

- 김경수, 신병천, 심천식, 박진영, 조형민, 2002, "과대하중이 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 345-348.
- 김창욱, 노인식, 도관수, 신병천, 2001, "균열개폐구 거동을 고려한 피로균열전파 해석 모델의 개발: 수치계산," 대한조선학회논문집, 제 38권 제 3호, pp. 84-92.
- ASTM E647-99 1999, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," In: Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 591-630.
- Anderson T. L., 1995, "Fracture Mechanics-Fundamentals and Applications," CRC Press
- Dowling N. E., 1993, "Mechanical Behavior of Materials," Prentice Hall
- Elber W., 1971, "The significance of crack closure," ASTM STP 486, pp. 230-242.
- Toyosada M., Niwa T. and Sakai J., 1997, "Physical meaning of  $\Delta K_{RP}$  and fatigue crack propagation in the residual stress distribution field," Int. J. Fatigue Vol. 19, No. 1, pp. 161-166.
- Wheeler O. E., 1972, "Spectrum loading and crack growth," J. Bas. Engng. Trans ASME 94, pp. 181-186.
- Willenborg J., Engle R. and Wood H. A. 1971 "A crack retardation model using an effective stress concept," Technical Memorandum 71-1FBR, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio



< 김 경 수 > < 신 병 천 > < 심 천 식 >