

과대하중비가 균열성장지연에 미치는 영향에 관한 연구

김경수* · 김성찬** · 심천식* · 박진영* · 조형민*

*인하대학교 선박해양공학과

**인하공업전문대학 선박해양시스템과

A Study on the Effect of the Overload Ratio on the Fatigue Crack Growth Retardation

KYUNG-SU KIM*, SUNG-CHAN KIM**, CHUN-SIK SHIM*, JIN-YOUNG PARK* AND HYUNG MIN CHO*

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

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

KEY WORDS: Overload 과대하중, Crack growth retardation 균열성장지연, ESPI system 전자스패클간섭시스템, Plastic zone size 소성영역크기, Crack growth length 균열성장길이, Crack growth rate 균열성장률, Overload ratio 과대하중비

ABSTRACT: A growing fatigue crack is known to be retarded on application of an overload cycle. The retardation may be characterized by the total number of cycles involved during retardation and the retarded crack length. The overload ratio plays an important role to influence the retardation behavior. The objective of the present investigation is to study the effect of different overload ratio on the retardation behavior. For DENT(double edge notched tension) specimens and ESET(eccentrically-loaded single edge crack tension) specimens, fatigue crack growth tests are conducted under cyclic constant-amplitude loading including a single tensile overloading with different overload ratios. The proposed crack retardation model predicts crack growth retardation due to a single tensile overloading. The predictions are put into comparison with the experimental results to confirm the reliability of this model.

1. 서 론

선박과 해양구조물과 같은 대형용접구조물의 경우 운영되어 지는 설계수명 동안에 일정진폭하중이 아닌 변동하중에 의해서 특정부분에서 균열이 발생하여 성장하게 된다. 따라서 피로수명예측 개선을 위해서는 이들 하중들간의 간섭효과를 고려한 균열성장해석이 요구되어진다. 이 때 하중의 변동성 때문에 균열성장률은 가속되어지기도 하고 감속되어지기도 한다. 따라서 피로수명예측 개선을 위해서는 이들 하중들간의 간섭영향을 고려한 균열성장률 계산이 요구되어진다. 특히 최근에 선박이 경량화 대형화되어짐에 따라 응력집중부에 작용하는 하중은 점점 커지고 균열성장해석에 대한 관심이 날로 높아지고 있다(김경수 등, 2002).

균열성장면에서 하중간섭영향을 고려한 몇 가지 방법들이 개발되어졌다. Elber(1971)는 피로균열면에서의 압축잔류응력이 균열단합을 일으킨다는 개념을 바탕으로 유효응력을 이용하여 과대하중에 의한 균열성장지연 해석에 적용하였다. Willenborg

(1971)와 Toyosada(1997)는 과대하중에 의하여 균열선단에 발생한 소성영역내에서의 유효응력을 정의하여 균열성장률을 예측하는 모델을 제안하였다. Wheeler(1972)는 과대하중이 균열 끝단에 큰 소성영역을 유발하기 때문에 과대하중 후에 압축잔류응력이 발생한다고 주장하였다.

본 연구에서는 ESPI system으로 측정된 균열끝단의 소성영역을 이용하여 과대하중에 의해 발생하는 하중간섭영향을 고려한 균열성장지연모델을 제안하였다. 이 모델은 균열길이에 대한 형상함수를 포함시켜 균열지연구간에서 균열감속부분과 가속부분을 정확히 설명할 수 있도록 하였다. 그리고 다른 과대하중비를 포함하는 일정진폭하중하에서 피로균열성장시험을 수행한 후 제안한 균열성장지연모델을 이용하여 예측한 결과와 비교하였고 이로부터 모델의 신뢰성을 확보하였다.

2. 균열지연효과

일정진폭하중을 받는 부재와는 달리 변동하중을 받는 부재의 피로균열성장은 하중 순서, 크기의 변화에 영향을 받는 것으로 연구 보고되었다. 본 논문에서 제안되어진 피로균열성장지연 모델은 인장과대하중으로 인한 균열성장지연을 예측하였다. 이 모델은 과대하중에 의해 발생하는 큰 소성영역에 의해

제1저자 김경수 연락처: 인하대학교 선박해양공학과

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

균열성장지연이 발생한다는 점에서 제안되어졌다. 인장과대하중이 작용한 후, 일정진폭하중에 의해 발생하는 소성영역이 과대하중에 의해 발생한 소성영역안에 존재할 때 균열지연효과가 발생한다. 즉, 균열성장률은 균열끝단에서 발생하는 소성영역의 상호영향과 관계한다는 것을 알 수 있다.

이들은 경험상수를 포함한 균열성장길이에 대한 형상함수로 표현되어질 수 있다. Wheeler는 일정진폭하중이 작용하였을 때의 피로균열성장률을 수정하여 과대하중이 작용한 후 발생하는 균열성장률지연을 예측하였다. 지연되어진 균열성장률과 일정진폭하중하에 발생한 피로균열성장률은 다음과 같은 관계를 갖는다고 제안하였다[5].

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{OL} = C_p \left(\frac{da}{dN}\right)_{CA} \quad \begin{array}{l} OL: \text{과대하중} \\ CA: \text{일정진폭하중} \end{array} \quad (1)$$

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

$$C_p = \left[\frac{r_p}{(a_0 + r_{p0}) - a} \right]^p = \begin{cases} \left(\frac{r_p}{s-a} \right)^p, & r_p < s-a \\ 1, & r_p \geq s-a \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $s = a_0 + r_{p0}$ 는 과대하중이 작용하는 순간 소성영역 끝단의 위치이다. 그리고 p 는 형상함수이다.

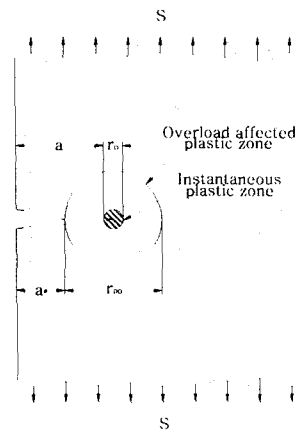


Fig. 1 Crack tip plastic zone under overloading

$$\text{For } a_i \leq a \leq a_{\min} \quad p = \frac{C}{(a_{\min} - a_i)^2} (a - a_i)^2 \quad (3)$$

$$\text{For } a_{\min} \leq a \leq a_e \quad p = \frac{C}{(a_{\min} - a_e)^2} (a - a_e)^2 \quad (4)$$

여기서, a 는 균열길이이고, a_i 는 과대하중이 작용하였을 때의 균열길이, a_{\min} 는 균열성장률이 가장 작은 값을 가질 때

의 균열길이, a_e 는 균열지연효과가 사라졌을 때의 균열길이이다. C 는 과대하중비에 의해 영향을 받는 경험상수이다.

Wheeler's model의 경우, 균열성장지연구간에서 실험결과와 차이가 있음을 확인 할 수 있다. 본 논문에서 이를 보정하기 위해 경험상수 p 값을 균열성장길이의 형상함수 p 로 변경하여 도입하였다. 균열길이의 형상함수, p 를 포함하여 제안되어진 균열성장지연모델은 균열지연구간에서 균열성장거동을 잘 설명하는 것을 알 수 있다. 제안된 모델은 균열성장지연구간에서 균열성장감속구간과 균열성장가속구간으로 나뉘어진다. Fig. 2에 보여지는 것과 같이 두 구간 중 균열성장률이 감소하여 최소값에 이를 때까지 형상함수 P 값이 증가함을 알 수 있고 반대로, 균열성장률이 증가하여 과대하중이 없었을 때의 균열성장률까지 회복할 때까지 경험상수 값은 감소함을 알 수 있다. 이로부터 균열길이에 대한 형상함수 P 값은 균열지연구간에서 포물선형태를 띠고 있음을 확인할 수가 있다.

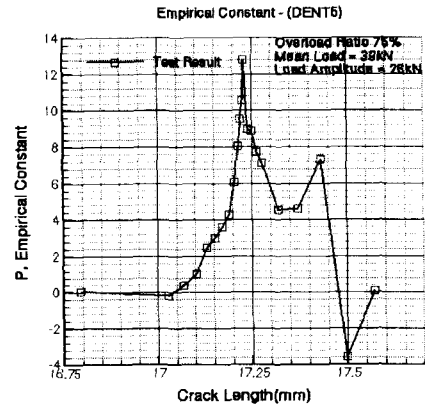


Fig. 2 Change of an empirical constant during the retarded crack growth

3. 실험 과정

3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 일반 구조용강(SM 490B)이며, 재료의 화학 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 보이는 바와 같다. 시험에 사용되어진 시험편은 ASTM E338-91과 ASTM E647-99에 기준하여 DENT시험편과 ESET시험편이 설계되었고 시험영역폭(w)과 두께(t)가 Fig. 4와 같은 사각단면을 갖는다. 방전가공을 이용하여 V형 노치를 시험중앙에 갖는 DENT시험편과 ESET시험편을 제작하였다.

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

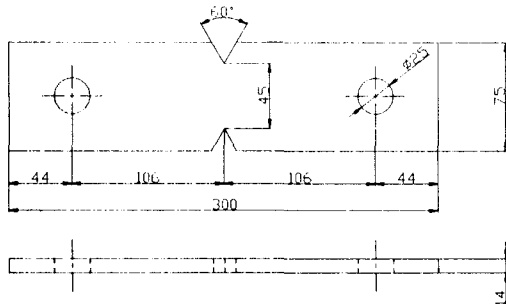


Fig. 3 Geometry of the DENT specimen(unit:mm)

Standard Eccentrically-Loaded Single Edge Crack Tension Specimen

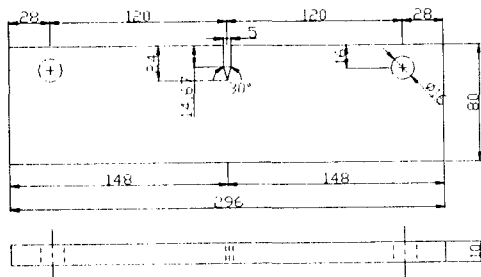


Fig. 4 Geometry of the ESET specimen(unit:mm)

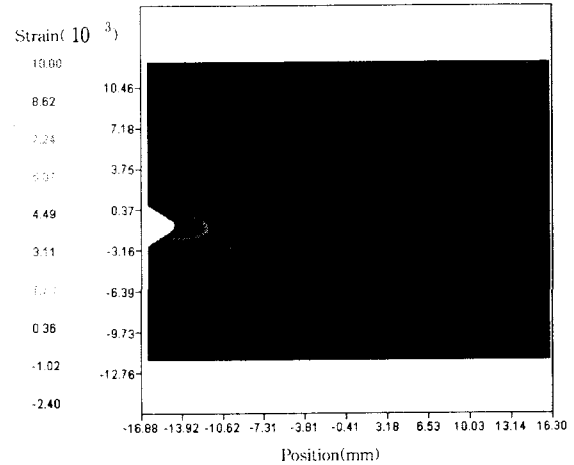
3.2 실험방법

본 연구에서는 상온의 대기중에서 500kN 최대하중과 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고 있는 유압서어보식 만능시험기, 시험영역에서의 변형률 분포측정이 가능한 3D-ESPI system 그리고 균열길이 0.001mm까지 측정 가능한 화상분석시스템을 이용하여 균열성장시험을 수행하였다.

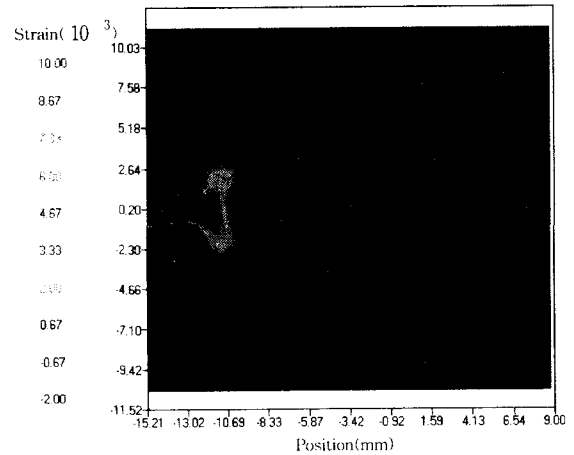
DENT시편은 주파수 3Hz, 평균하중 39kN, 하중크기 26kN을 갖는 사인파 형태의 일정진폭하중이 작용중에 최대하중비 OLR가 75%인 균열성장시험을 수행하였으며, ESET시편의 경우에는 주파수 3Hz, 평균하중 8.25kN, 하중크기 6.75kN을 갖는 사인파 형태의 일정진폭하중이 작용중에 최대하중비 OLR이 50%와 75%인 균열성장시험을 수행하였다.

$$OLR(\%) = \left(\frac{P_{OL} - P_{max}}{P_{max}} \right) \times 100 \quad (5)$$

P_{OL} 은 최대하중크기이고, P_{max} 는 일정진폭하중의 최대하중크기이다. 이들 시험 중에 균열길이 성장에 따라 ESPI system을 이용하여 균열선단에 발생하는 소성영역 크기 측정을 수행하였다(Fig. 5).



(a) DENT specimen - 174,250 cycles (overloading)



(b) ESET specimen - 163,721 cycles (overloading)

Fig. 5 Strain distribution measured by ESPI system according to cyclic loading

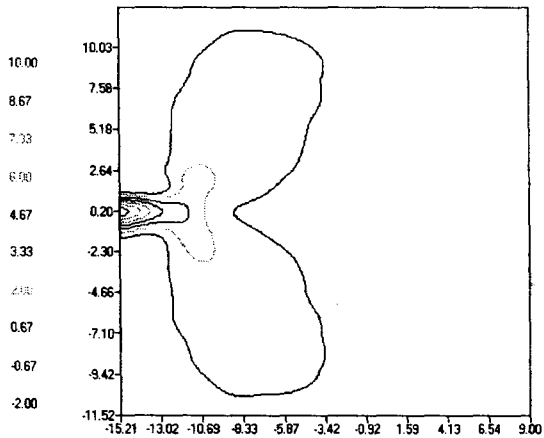
ASTM의 균열성장시험에 관한 규정에 따르면 균열전파속도가 $1 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 이하로 감소할 경우 균열성장속도는 미소구조변화, 균열가지와 같은 균열선단 형상변화 등 많은 인자에 의해 상당히 민감하게 반응하여 변동량이 증가한다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 노치선단 응력확대계수 $\Delta K = 24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 기준하여 일정진폭하중의 크기를 결정하고 균열전파속도가 $1 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle} \sim 1 \times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

4. 균열성장시험결과 및 예측

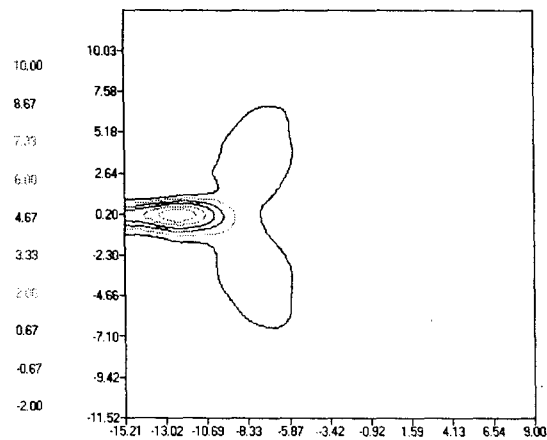
피로균열성장시험은 일정진폭반복하중이 작용하는 경우와 과대하중비 50%와 70%인 단일인장과대하중을 포함하는 일정진폭하중이 작용하는 경우로 나누어 수행하였다.

4.1 소성영역

단일인장과대하중을 포함하는 일정진폭반복하중이 작용하는 균열성장시험에서 소성영역크기와 균열성장지연과의 관계를 조사하기 위하여 ESPI system을 이용하여 균열끝단에서 소성영역크기를 측정하였다(김경수 등, 2002). 소성영역형상의 변화는 Fig. 6에 보여지는 것과 같이 ESPI system으로 측정된 변형률 곡선의 변화와 같으며, 이로부터 소성영역크기가 결정된다. Fig. 7에서는 다른 과대하중이 작용하는 시편에서 균열길이에 따라 소성영역끝단의 위치변화를 나타내고, 소성영역크기가 균열성장지연에 미치는 영향을 보여주고 있다.

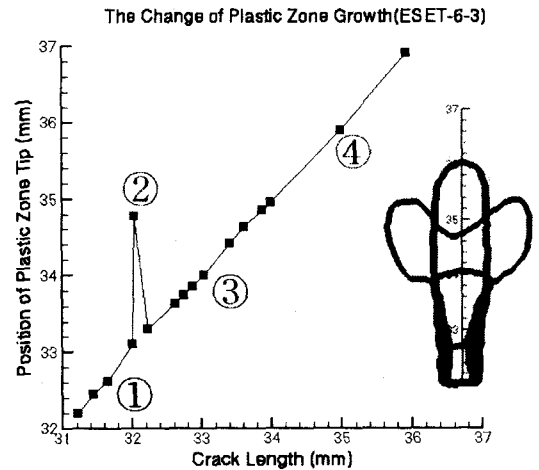


(a) at 173,614 cycles(overload)

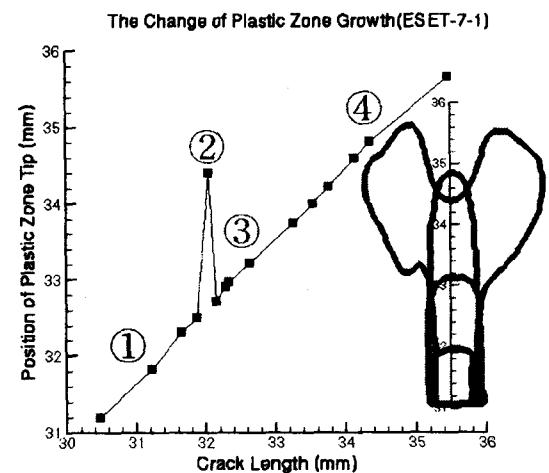


(b) at 203,237 cycles(after overload)

Fig. 6 Plastic zone shape on ESET-6-3 specimen surfaces using ESPI system



(a) ESET-6-3 specimen (OLR=50%)

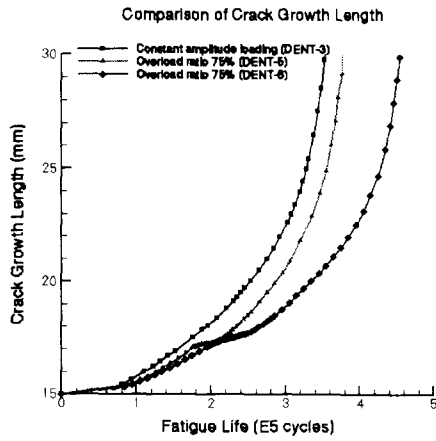


(b) ESET-7-1 specimen (OLR=75%)

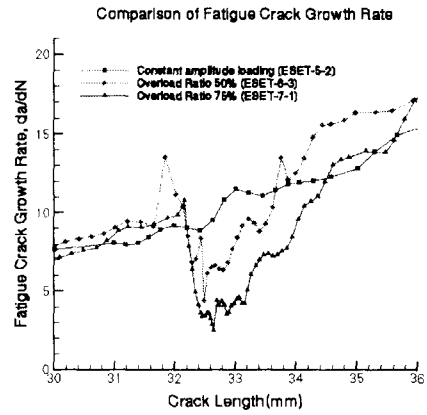
Fig. 7 Position of plastic zone tip according to crack length

4.2 균열성장률

화상분석시스템을 이용하여 피로균열성장시험중 균열끝단까지의 균열성장길이를 측정하였다. Fig. 8은 피로수명에 따른 균열성장길이에 대한 곡선이며, Fig. 9는 균열성장길이에 따른 균열성장률에 대한 곡선이다. 이 곡선은 DENT시편과 ESET시편에 대한 지연된 균열성장거동을 나타낸다. Fig. 8에서 DENT-3과 ESET-5-2의 균열성장률은 피로손상의 축적에 따라 지속적으로 증가하였으며, 과대하중으로 인한 균열성장거동변화를 비교하기 위한 기본 자료로 사용되었다. 균열성장지연에 대한 과대하중비의 영향은 Fig. 8과 Fig. 9에 보여진다. 지연된 균열성장률은 과대하중비에 민감하다는 것을 알 수 있고, 과대하중비가 증가함에 따라 균열성장률도 증가함을 알 수 있다. Fig. 9에서 과대하중비가 증가함에 따라 균열성장지연이 증가함을 알 수 있다.

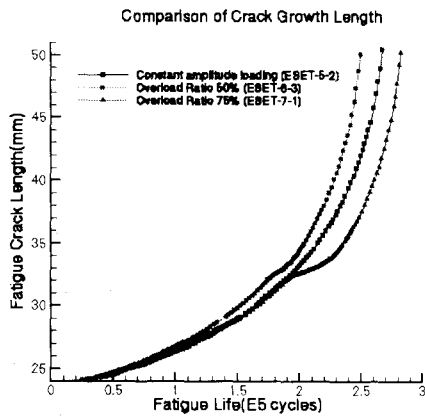


(a) DENT specimens



(b) ESET specimens

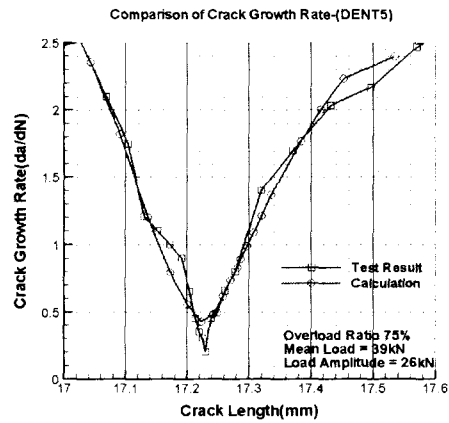
Fig. 9 Comparison of crack growth rate curve according to crack growth length



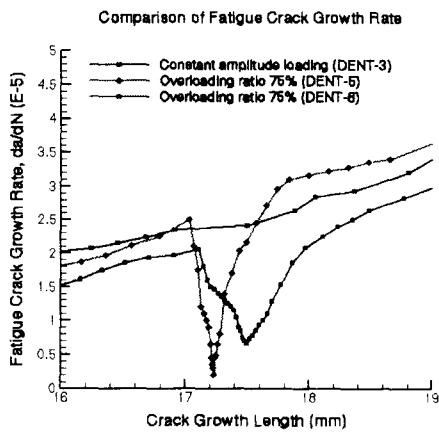
(b) ESET specimens

Fig. 8 Comparison of crack growth length curve according to fatigue life

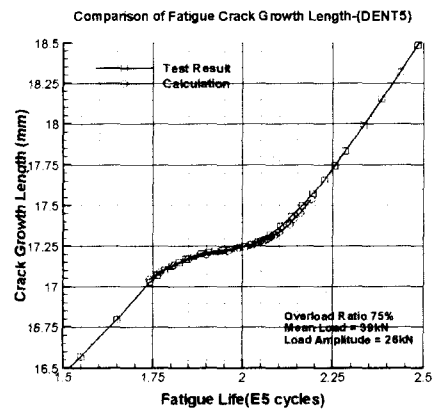
4.3 계산되어진 예측결과와 시험 결과의 비교



(a) Crack growth rate



(a) DENT specimens



(b) Crack growth length

Fig. 10 Comparison of crack retardation model with test result for DENT-5

Fig. 10은 DENT-5의 결과를 나타낸 것이며, Fig. 11은 ESET-6-3과 ESET-7-1의 결과를 나타낸 것이다. 그 중 Fig. 10(a)과 Fig. 11(a)은 균열성장길이에 따른 균열성장률에 대한 곡선이다. 그리고 Fig. 10(b)과 Fig. 11(b)은 피로수명에 따른 균열성장길이에 대한 곡선이다. Wheeler 모델과 비교해보았을 때, 새로운 예측모델의 형상함수는 균열지연구간에서 발생하는 소성으로 유발되어진 균열단합현상을 설명하고 있음 알 수 있다. 그러므로 ESPI system으로 측정된 소성영역을 이용한 예측 모델은 관찰된 균열성장률과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 모델은 피로 수명 평가를 개선하는데 있어서 유용한 경험 식으로 사료된다.

5. 결 론

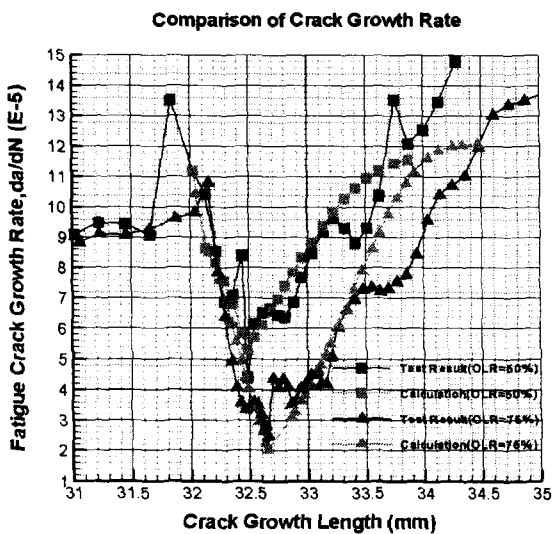
- 1) 소성영역은 인장과대하중으로 인한 균열성장지연거동을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다.
- 2) 균열끝단에서의 소성영역크기가 과대하중비에 비례하기 때문에 과대하중이 커질수록 균열지연효과가 커짐을 확인하였다.
- 3) 다른 과대하중비를 갖는 하중이 작용하였을 때, 제안되어진 균열성장지연모델은 균열성장률과 피로수명 측면에서 균열 성장지연거동을 잘 설명하고 있음을 확인하였다.
- 4) 제안되어진 균열성장지연모델은 피로수명평가를 개선하는데 있어서 유용한 경험식으로 사료된다.

후 기

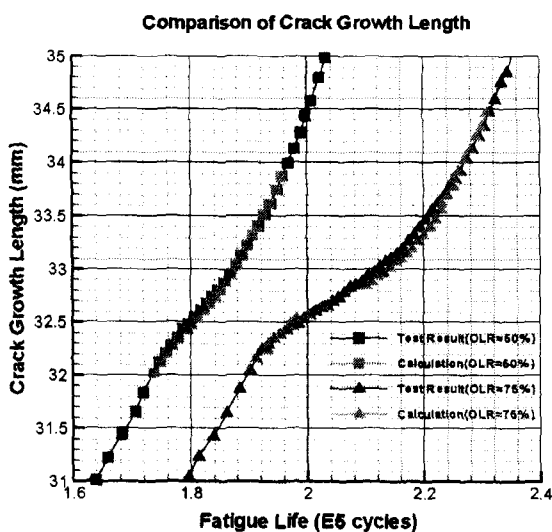
본 연구는 한국과학재단의 황해권수송시스템연구센터 과제(00A-09-02-02-2)의 일부로 수행된 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김경수, 심천식(2002). "전자스펙클패턴 간섭시스템을 이용한 피로하중을 받는 균열선단에서 탄소성 영역 측정에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제4호, pp 13-18
- 김경수, 심천식(2002). "3D-ESPI 시스템을 이용하여 결정된 응력집중계수가 피로수명에 미치는 영향에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제1호, pp 46-51
- ASTM E338-91, (1991). "Standard Test Method of Sharp-Notch Tension Testing of High-Strength Sheet Materials", In: Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia, pp 379-387
- 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
- Elber, W. 1971 "The significance of crack closure", ASTM STP 486, pp 230-242.
- Wheeler, O. E. (1972). "Spectrum loading and crack growth", J. bas. Engng 90
- Willenborg, J., Engle, R., and Wood, H. A. 1971 "A crack retardation model using an effective stress concept", Technical Memorandum 71-1 FBR, Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- Toyosada M., Niwa, T. and Sakai, J. 1997 "Physical meaning of and fatigue crack propagation in the residual stress distribution field", Int. J. Fatigue Vol. 19, No. 1, pp 161-166



(a) Crack growth rate



(b) Crack growth length

Fig. 11 Comparison of crack retardation model with test result for ESET specimens