

균열성장 지연현상에 대한 유효 소성역 개념을 사용한 파괴역학적 연구

강용구*.# 이태원*, 박창용**

* 금오공과대학교 기계설계공학과, ** 금오공과대학교 기계시스템공학과

A Fracture Mechanic's Study for Crack Growth Retardation Phenomenon using Effective Plastic Zone Concept

Yong-Goo Kang*.# Tae-Won Lee*, Chang-Yong Park***

*Department of Mechanical Design Eng., KIT UNIV. ,**Department of Mechanical System Eng.,
IT UNIV.

(Received 28 February 2015; received in revised form 31 March 2015; accepted 31 March 2015)

ABSTRACT

In this study, the growth rate of surface cracks (da/dN) during the retardation period was analyzed in terms of effective stress intensity factor range (ΔK_{eff}^*) obtained by using the proposed effective plastic zone concept. Effective stress intensity factors obtained by using the effective plastic zone concept were smaller than those obtained by using Willenborg analysis. On the growth rate of surface cracks analyzed by ΔK , the dependence of overload stress levels appears. On the growth rate by ΔK_{eff} obtained by Willenborg analysis, there is a linear relationship with two different slopes between da/dN and ΔK_{eff} . However, on the growth rate by ΔK_{eff}^* obtained by the proposed effective plastic zone concept, there is a linear relationship between da/dN and ΔK_{eff}^* that coincides with the results of constant amplitude loading.

Key Words : Retardation(균열 성장 지연), Surface Crack(표면 균열), Compressive Residual Stress(압축 잔류응력), Overload(0), Effective Plastic Zone Concept(유효 소성역 개념)

1. 서론

피로하중을 받는 기계, 장치, 구조물 등의 피로수명을 예측하는 수단으로는 S-N 선도를 사용하는 방법^[1], 파괴역학적으로 수명을 예측하는 방법^[2], 변형률과 수명관계 적용법^[3] 등이 소개되어 있으나 파괴

역학적 수명예측방법이 가장 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 파괴역학적 방법은 균열형 결함이 내재되어 있는 부재에서 반복적으로 하중이 작용하면 균열이 성장한다. 이 균열의 성장속도와 파괴역학적 파라미터와의 관계를 사용하여 임계균열길이까지 성장하는데 소요되는 반복수를 계산하여 수명을 예측한다.^[4] 파괴역학적으로 수명을 예측하기 위해서는 피로수명에 큰 영향을 미치는 균열진전평가로 수명이 평가되므로 균열성장 특성에 관한 데이터가 우선적으로 필요

Corresponding Author : ygkang@kumoh.ac.kr

Tel: 82-10-9364-5809 Fax: 82-54-478-7319

하다. 또한, 실제 구조물이 받는 하중은 일정하지 않고 복잡하게 변동하는 경우가 많다.

따라서 변동하중하에서 피로수명을 예측하기 위해서는 과대 하중작용에 따라 발생하는 균열성장 지연현상에 관한 정확한 이해가 필요하다. 균열성장 지연현상을 해석한 대표적 연구로는 Wheeler^[5], Willenborg model^[6] 등이 있다.

Wheeler는 과대 하중으로 발생하는 압축 소성 영역이 균열성장 지연현상의 주된 원인으로 보고 과대 하중 후에 지연되는 균열성장속도를 예측하기 위해 소성 영역의 크기를 수치상으로 계산하였다. 그러나 균열성장 속도의 감소를 결정하는 지연계수는 실험적으로 결정해야 한다.

Willenborg는 일정진폭하중 상태에서 균열이 성장하는 도중에 과대 하중이 한 사이클 작용하면 이로 인해 발생하는 균열선단의 큰 소성 역에 의해 과대 하중작용 이후의 사이클에서는 압축 잔류 응력이 작용하여 유효 작용 응력을 감소시킨다고 보고 지연현상을 해석하였다.

Willenborg모형을 따르면 균열성장 지연현상이 소멸하는 시점은 Wheeler에서와 같이 균열진전방향으로 원형의 두 소성 역의 경계가 일치하는 시점이다. 그러나 이 시점에서 균열진전방향과 수직인 방향에서는 여전히 작은 소성 역이 큰 소성 역내에 존재하여 압축 잔류 응력이 존재한다고 보는 것이 타당하다.

따라서 저자^[7]는 Willenborg와는 달리 균열진전의 수직인 방향에서의 소성 역의 크기를 고려한 유효 소성 역 개념을 제안하여 균열 지연현상에 대한 해석적 연구를 시도하고 균열성장 지연구간의 크기, 압축 잔류 응력의 크기 및 유효 소성 역의 형태 및 크기 등을 Willenborg 모델 해석 결과와 서로 비교, 검토한 바 있다.

또한, 저자^[8]는 과대 하중작용 시 균열의 성장 거동을 응력확대계수범위(ΔK) 및 Willenborg 모델의 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff})를 사용하여 정리하면 균열의 성장 속도(da/dN)와 ΔK 및 ΔK_{eff} 와의 관계에는 과대 하중 의존성 및 약간의 비선형성이 발생함도 확인하였다.

본 연구에서는 과대 하중작용 시 균열의 성장 거

동에 대하여 균열의 성장 속도를 유효 소성 역 개념을 적용한 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)를 사용하여 정리를 시도하고 일정진폭하중 때의 결과 및 Willenborg 모델을 사용한 결과와 비교 검토하여 통일적 정리가 가능한지를 검토하였다.

2. 유효 소성 역 개념^[7]

Willenborg 모델에서는 과대 하중이 작용하여 균열 선단에 큰 소성 역 r_{OL} 이 형성되고 균열이 그 소성 역을 통과하며 성장할 때 균열 길이 a_i 에서의 r_{req} 는 a_i 에서 r_{OL} 경계점을 연결한 직선의 길이이다.

균열이 성장하여 균열선단에 형성되는 소성 역 r_{yi} 가 r_{req} 와 같아지면 압축 잔류 응력 σ_{comp} 이 0이 되어 균열성장 지연현상이 소멸하는 것으로 설정하였다. Fig. 1에는 Willenborg 모델의 r_{req} , r_{yi} 및 r_{OL} 을 도식적으로 나타내었다.

그러나 Fig. 2에서 도식적으로 나타낸 바와 같이 Willenborg 모델에서 제시한 균열성장 지연현상이 소멸하는 시점인 r_{yi} 가 r_{req} 와 같아지는 시점에서는 균열진전방향인 x축 방향으로는 소성 역이 r_{OL} 의 경계에 도달하나 진전방향과 수직인 방향인 y축 방향에서는 여전히 r_{OL} 의 경계 내에 존재한다. 따라서 이 시점에서 y축 방향까지 고려한다면 여전히 압축 잔류응력 σ_{comp} 이 작용하고 있음을 알 수 있다.

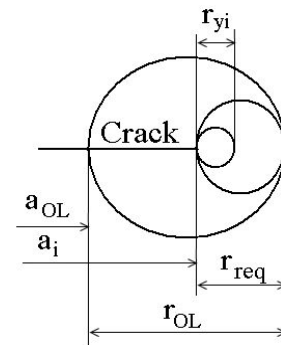


Fig. 1 Schematic of crack tip plastic zones using Willenborg model

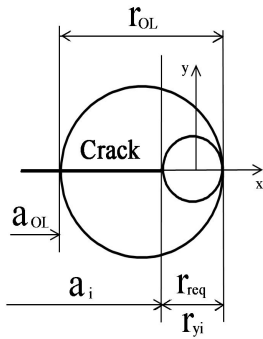


Fig. 2 Schematic of crack tip plastic zones at r_{yi} touches the boundary of the overload plastic zone(r_{yi} equal to r_{req})

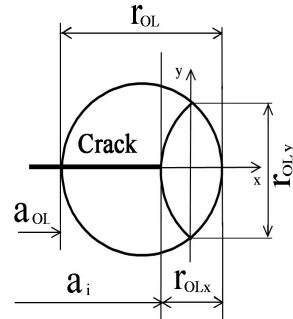


Fig. 3 Schematic illustration of crack tip plastic zone shape using Effective plastic zone concept

다음은 초기 원형의 형태인 r_{OL} 내에서 균열이 진전함에 따라 균열의 진전에 영향을 미치는 균열 앞부분의 소성 영역의 변화를 고려해 보자. 균열이 하중 축에 수직인 방향(x축)으로 성장하는 경우에는 균열 성장에 따라 x축 방향으로의 소성 역의 크기는 과대 하중작용 후 성장한 길이만큼 감소하여 Willenborg 모델에서 제시한 r_{req} 로 된다. 그러나 하중 축 방향 (y축)으로의 소성 역은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 이전에 형성된 r_{OL} 의 외부경계선에 따라 변화한다고 보는 것이 타당하다. 따라서 균열이 성장함에 따라 r_{OL} 의 x축 방향의 소성 역 크기, r_{OLx} 는 감소하여 r_{req} 와 같아지나 y축 방향의 소성 역 크기 r_{OLy} 는 기 형성된 r_{OL} 원의 경계를 따라서 감소한다. 균열의 성장에 따라 소성 역 r_{OL} 은 x, y축 길이가 다른 Fig. 3에서 나타낸 형태(이하 원호대칭형으로 표기함)로 축소, 변화한다. 소성 역 형태변화를 고려하면 균열 길이 a_i 에서 r_{OL} 의 경계에 접하는 소성 역의 크기는 x축과 y축의 소성 역 크기가 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 각각 r_{OLx} , r_{OLy} 로 되며 r_{OLy} 가 r_{OLx} 보다 큰 원호대칭형으로 된다. 이와 같은 경우 과대 하중 작용에 따라 형성되는 압축 잔류 응력이 완전히 소멸하기 위해서는 균열선단에 r_{OLy} 을 직경으로 하는 원형의 소성 역이 형성될 수 있도록 응력을 가하여야 한다. 즉 y축 방향의 소성 역의 크기가 x축 방향보다 크면 압축 잔류 응력이 소멸하기 위해 필요한 r_{req} 는 r_{OLy} 이어야 한다. 이 r_{OLy}

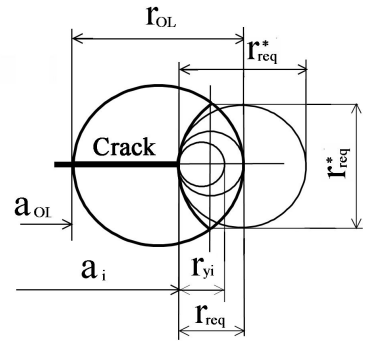


Fig. 4 Comparison of crack tip plastic zones using Willenborg model and Effective plastic zone concept

을 직경으로 하는 소성 역을 유효 소성 역 r_{req}^* 이라 하며 이를 사용하여 균열성장 지연현상을 해석하는 방법을 유효 소성 역 개념이라 정의한다.

유효 소성 역 개념을 적용하면 균열의 성장이 지연되는 시점은 과대하중이 작용한 직후부터이며 균열이 성장함에 따라 균열선단에 형성되는 작은 소성 역의 크기가 증가하여 유효 소성 역의 크기에 도달하면 균열성장 지연현상이 소멸한다. 과대 하중 소성 역

r_{OL} , 유효 소성 역 r_{req}^* , 균열선단 소성 역 r_{yi} 및 Willenborg 모델의 r_{req} 관계를 도식적으로 Fig. 4에 나타내었다.

3. 유효 소성 역 개념을 사용한 균열성장 거동에 대한 파괴역학적 정리

3.1 유효 소성 역 개념 사용 시 지연구간에서의 ΔK_{eff}^* , ΔK_{eff} 및 ΔK 관계

일정진폭하중 작용 중 과대 하중이 한 사이클 작용하면 이후 반복 수에서는 일정 기간 균열의 성장이 지연되는 지연현상이 발생한다. 균열성장 지연현상이 발생하는 구간에 대해 유효 소성 역 개념을 적용하면 과대 하중이 작용한 직후에는 발생하는 압축 잔류 응력의 크기는 Willenborg 모델을 사용한 경우와 같지만 이후 균열이 소성 역내에서 성장하면서 Willenborg 모델을 사용한 경우보다 천천히 감소하여 지연현상이 끝나는 지점에서는 0이 된다. 따라서 지연현상이 발생하는 전 구간에 걸쳐 유효 소성 역 개념을 사용한 경우가 Willenborg 모델을 사용한 경우보다 압축 잔류 응력은 큰 값을 가지며 지연현상이 발생하는 구간도 길어진다. 유효 소성 역 개념을 사용하면 압축 잔류 응력의 크기가 증가하게 되므로 실제 작용하는 응력 범위는 감소하게 되어 유효 응력확대계수범위의 값은 작아진다.

Fig. 5는 다음과 같은 경우에 대하여 균열의 진전에 따른 ΔK_{eff}^* 및 ΔK_{eff} 의 변화를 해석하여 나타낸 그림이다. 여기서 ΔK_{eff}^* 는 유효 소성 역 개념을 사용한 유효 응력확대계수범위이며 ΔK_{eff} 는 Willenborg 모델을 사용한 유효 응력확대계수범위이다.

- 적용 예 -

1. 적용 재: 무한 평판재 중앙에 2a의 관통균열을 내재한 탄소강 판재 ($\sigma_y = 340.5 \text{ MPa}$)
2. 작용 하중: $\sigma_{max} = 320 \text{ MPa}$, $\sigma_{min} = 16 \text{ MPa}$ 의 일 정진폭 피로하중
3. 응력 상태: 평면 응력 상태
4. 작용 과대 하중: 한 사이클 작용

과대 하중 비: 75%, 50% 및 25%

과대 하중 비의 정의는 다음과 같다.

$$\text{과대 하중 비}(\%) = \frac{K_{maxol} - K_{max}}{K_{max} - K_{min}} \times 100$$

여기서 K_{maxol} 는 과대 하중작용시의 최대응력 확대계수이며 K_{max} 및 K_{min} 는 일정진폭하중시의 최대 및 최소응력확대계수이다.

5. 과대 하중작용시점: 균열 길이 $2a = 1.55\text{mm}$

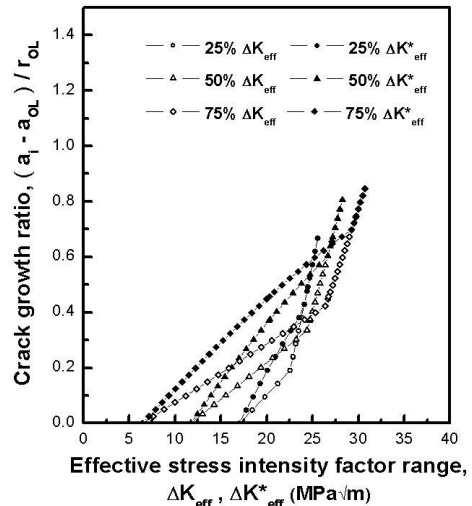


Fig. 5 Variation of effective stress intensity factor ranges ΔK_{eff} , ΔK_{eff}^* with crack growth ratio, $(a_i - a_{OL}) / r_{OL}$

그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열이 큰 소성 역 내에서 성장하는 경우 과대 하중이 작용한 직후에는 ΔK_{eff}^* 나 ΔK_{eff} 는 같은 값을 가지나 균열이 성장함에 따라 ΔK_{eff}^* 는 큰 압축 잔류 응력의 발생에 의해 ΔK_{eff} 보다 작아진다.

75% 과대 하중이 작용한 직후의 ΔK_{eff}^* 는 큰 압축 잔류 응력에 의해 많이 감소하여 $6.42 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이며 균열이 큰 소성 역내에서 성장함에 따라 점진적으로 증가하여 $(a_i - a_{OL}) / r_{OL}$ 이 0.698에 도달하면 균열성장지연현상이 소멸하여 일정진폭하중의 값에 도달한다. ΔK_{eff} 는 과대 하중이 작용한 직후에는 ΔK_{eff}^* 와 같으나 균열의 성장에 따라 빠르게 증가하

여 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 이 0.420에서 균열성장 지연현상이 소멸하여 일정진폭하중 때와 같은 값을 가진다.

50% 과대 하중이 작용한 직후의 ΔK_{eff}^* 나 ΔK_{eff} 는 $11.72MPa\sqrt{m}$ 로 같은 값을 가지나 75% 과대 하중작용 때와 같이 균열의 성장에 따라 증가하여 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 이 각각 0.601, 0.332에서 균열성장 지연현상이 소멸하여 일정진폭하중 때와 같은 값에 도달한다.

25% 과대 하중이 작용한 경우에는 ΔK_{eff}^* 나 ΔK_{eff} 는 초기 $17.02MPa\sqrt{m}$ 나 균열의 성장에 따라 증가하여 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 이 각각 0.402, 0.189에서 균열성장 지연현상이 소멸하여 일정진폭하중의 작용 응력에 도달한다.

과대 하중이 작용한 직후의 유효 응력확대계수범위 값 ΔK_{eff} , ΔK_{eff}^* 및 지연현상이 소멸하는 시점의 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 값을 정리하면 다음과 같다.

75% 과대 하중작용

$$\Delta K_{eff} = 6.42MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.420$$

$$\Delta K_{eff}^* = 6.42MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.698$$

50% 과대 하중작용

$$\Delta K_{eff} = 11.72MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.332$$

$$\Delta K_{eff}^* = 11.72MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.601$$

25% 과대 하중작용

$$\Delta K_{eff} = 17.02MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.189$$

$$\Delta K_{eff}^* = 17.02MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.402$$

위의 정리에서 알 수 있는 바와 같이 크기가 다른 과대 하중이 작용한 경우에도 과대 하중작용 직후에는 ΔK_{eff} 나 ΔK_{eff}^* 나 같은 값을 가지며 균열의 성장에 따라 ΔK_{eff} 가 ΔK_{eff}^* 보다 커지며 상대적으로 작은 균열 길이에서 지연현상이 소멸하여 일정진폭하중의 값에 도달한다.

3.2 유효 소성역 개념 사용 시 지연구간에서의 K_{maxeff}^* , K_{maxeff} 및 ΔK_{eff}^* , ΔK_{eff} 와의 관계

다음은 파괴역학적 파라미터로 유효 응력확대계수범위 대신 유효 최대 응력확대계수를 사용하여 균열의 성장에 따른 변화를 조사하여 Fig. 6에 나타내었

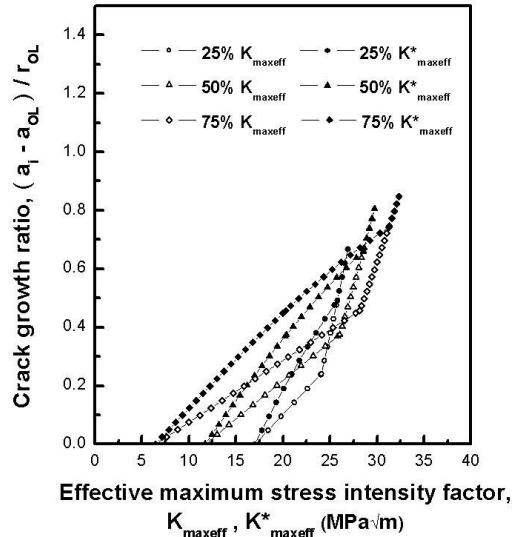


Fig. 6 Variation of effective stress intensity factor range K_{maxeff} , K_{maxeff}^* with crack growth ratio, $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$

다. 여기서 K_{maxeff}^* 는 유효 소성역 개념을 사용한

유효 최대 응력확대계수이며 K_{maxeff} 는 Willenborg 모델을 사용한 유효 최대 응력확대계수이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 균열성장에 따른 유효 최대 응력확대계수 값의 변화는 Fig. 5의 유효 응력확대계수범위의 변화특성과 거의 같은 성향을 나타낸다. 그러나 지연현상이 소멸하는 시점의 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 값은 약간의 차이를 나타낸다. 과대 하중이 작용한 직후의 K_{maxeff} , K_{maxeff}^* 및 지연현상이 소멸하는 시점의 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 값을 구하면 다음과 같다.

75% 과대 하중작용

$$K_{maxeff} = 6.42MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.457$$

$$K_{maxeff}^* = 6.42MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.743$$

50% 과대 하중작용

$$K_{maxeff} = 11.72MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.375$$

$$K_{maxeff}^* = 11.72MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.660$$

25% 과대 하중작용

$$K_{maxeff} = 17.02MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.241$$

$$K_{maxeff}^* = 17.02MPa\sqrt{m}, (a_i - a_{OL})/r_{OL} = 0.492$$

세 가지 크기의 과대 하중이 작용한 경우 유효 응력확대계수범위나 유효 최대 응력확대계수를 사용한 경우 모두 과대 하중의 크기가 같으면 과대 하중이 작용한 직후에는 같은 값을 가진다. 이는 과대 하중이 작용한 직후에는 발생한 압축 잔류 응력이 상당히 큰 값(75% 과대 하중작용 경우, 228MPa)을 갖는 관계로 $K_{min\text{eff}}$ 가 압축 응력이 되며 이때는 0으로 본다. 따라서 과대 하중이 작용한 직후부터 $K_{min\text{eff}}$ 가 0이 되는 구간에서는 $K_{max\text{eff}}^*$, $K_{max\text{eff}}$, ΔK_{eff} 및 ΔK_{eff}^* 가 모두 같은 값을 가진다. 그러나 지연현상이 소멸하는 시점의 $(a_i - a_{OL})/r_{OL}$ 값은 $K_{max\text{eff}}^*$, ΔK_{eff}^* , $K_{max\text{eff}}$, ΔK_{eff} 순으로 작아짐을 알 수 있다. 이는 균열이 지연현상이 소멸하는 시점으로 성장하면 $K_{min\text{eff}}$ 이 0보다 큰 값을 갖기 때문이다.

3.3 과대 하중작용 시 균열성장 거동의 파괴역학적 정리

작은 인공결함(직경 0.5mm, 깊이 0.5mm)을 가공한 보통 탄소 강(SM45C)재 시험편을 사용하여 단일 과대 하중을 일정진폭 피로시험과정 중에 부과하여 과대 하중작용 이전과 후에 나타나는 균열성장 거동의 차이와 균열성장 지연현상이 발생하는 구간의 균열성장 거동을 Willenborg 모델을 적용하여 파괴역학적으로 정리한 이전의 연구결과^[8]와 유효 소성 역 개념을 사용했을 때의 결과를 서로 비교, 검토하였다.

이전의 연구에서 과대 하중의 크기에 따른 균열성장 거동의 차이를 조사하기 위하여 과대 하중 비를 세 가지 크기로 변화시켰으며 균열 길이 1.55mm에서 과대 하중을 한 사이클 부과하였다. 또한, 사용한 파괴역학적 파라미터로는 시험편 크기, 형상 및 균열면 형상에 대해 수정한 Newman-Raju의 응력확대계수관계식^[9]이 사용되었다.

3.3.1 응력확대계수범위(ΔK) 및 Willenborg 모델의 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff})로 정리^[8]

세 가지 크기의 과대 하중이 작용한 경우의 균열성장 속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 파괴역학적으로 정리하여 Fig. 7에 일정진폭하중

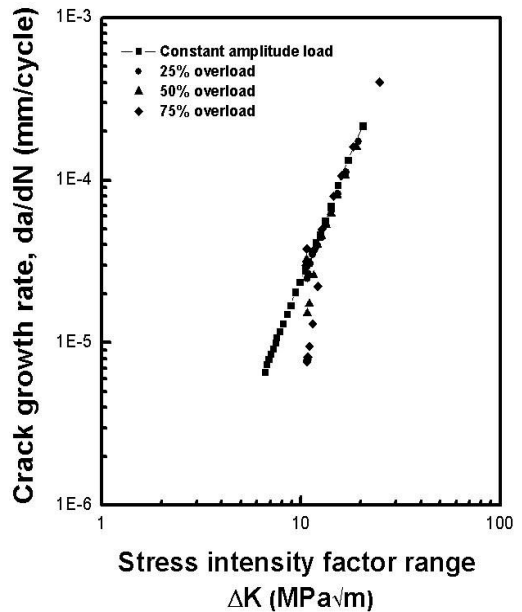


Fig. 7 The relation between da/dN and ΔK [8]

데이터와 중첩하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 과대 하중이 작용하는 경우 균열성장 속도와 응력확대계수범위와의 관계는 과대 하중의 크기에 따라 일정진폭하중의 관계데이터와는 기울기가 다른 직선들로 나타나며 균열지연현상이 소멸하는 시점에서 일정진폭하중의 데이터와 같아진다. 과대 하중 비가 증가할수록 일정진폭하중데이터에서 많이 벗어나는 과대 하중 비에 따른 의존성이 발생하여 통일적 정리가 어려움을 알 수 있다.

Fig. 8은 Willenborg 모델의 유효 응력확대계수범위 ΔK_{eff} 로 균열성장 속도(da/dN)를 정리한 그림이다. 또한, Fig. 8에는 균열성장 특성을 비교하기 위하여 일정진폭하중 시의 데이터도 함께 나타내었으며 데이터의 중심을 연결한 점선을 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 ΔK_{eff} 로 정리하면 균열성장 지연현상이 발생한 시점의 데이터는 일정진폭하중 때의 데이터의 선 좌측으로 이동하며 균열성장 지연현상이 소멸하는 시점의 데이터는 일정진폭하중

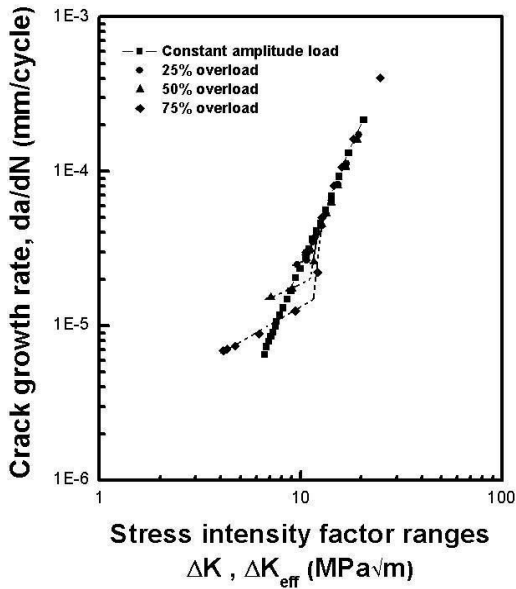


Fig. 8 The relation between da/dN and ΔK , ΔK_{eff} obtained by using Willenborg model^[8]

때의 데이터와 일치한다. 그러나 균열성장 지연현상이 발생한 구간에서의 데이터들은 ΔK 로 정리했을 때 과대 하중 비의 크기에 따라 기울기가 다른 여러 개의 직선으로 나타나는 것과는 달리 ΔK_{eff} 로 정리하면 균열성장 지연현상이 발생한 시점의 데이터는 압축 잔류응력의 영향으로 ΔK_{eff} 값이 현저히 작아져 일정진폭하중 때의 데이터의 선 또는 연장선의 좌측으로 이동한다. 균열이 큰 소성 역내에서 성장함에 따라 일정진폭하중 때와는 다른 기울기를 가지며 증가하여 일정진폭하중 때의 데이터선 우측까지 증가 후 다시 기울기가 변화하며 균열성장 지연현상이 소멸하는 시점에서는 일정진폭하중 때의 데이터와 일치한다. 일정진폭 하중때의 데이터와의 이격도는 지연현상이 발생한 직후 최대가 되며 균열이 성장함에 따라 점차 감소하여 일정진폭하중 데이터와 교차하는 시점에서 0이 된 후 다시 소폭 증가 후 지연현상이 소멸하는 시점에서 일정하중 데이터와 같아지는 비선형적 경향을 나타낸다. 이 비 선형적 경향을 기울기가 다른 두 직선의 조합으로 하여 그림에 나타내었다. 이전 연구에서는 이 관계를 시작점과 끝점을 연결한 곡선관계로 도시한 바 있지만 3.1절의

연구결과를 고려하면 기울기가 다른 두 직선의 조합으로 보는 것이 타당하다. 균열성장 지연현상이 발생하는 구간에서 ΔK_{eff} 는 균열의 성장에 따라 기울기가 다른 두 직선관계로 나타난다. 이 같은 경우에는 3.1절의 해석결과에서와 같이 ΔK_{eff}^* 로 나타내면 하나의 직선관계로 변환할 수 있다고 생각한다.

3.3.2 유효 소성 역(r_{req}^*)을 사용한 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)로 정리

세 가지 크기의 과대 하중이 작용한 경우에 대하여 균열의 성장 속도(da/dN)를 유효 소성 역(r_{req}^*) 개념을 적용한 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)로 정리하여 Fig. 9에 일정진폭하중데이터와 중첩하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유효 소성 역 개념을 사용하여 균열 지연현상이 발생하는 구간에 대한 균열성장 속도를 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)로 정리하면 응력확대계수범위 ΔK 로 정리 시 발생한 과대 하중 비 의존성 및 Willenborg 모델의 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff})로 정리 시 발생한 데이터 분산밴드 및 과대하중 비에 따라 기

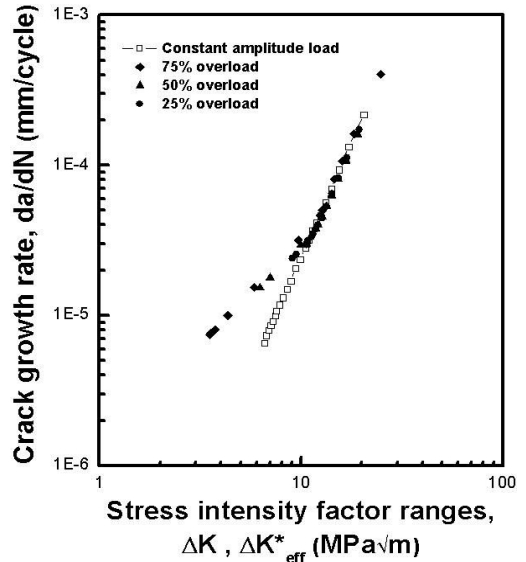


Fig. 9 The relation between da/dN and ΔK , ΔK_{eff}^* obtained by using Effective plastic zone concept

울기가 다른 두 직선의 조합으로 나타난 현상이 모두 소멸하여 데이터들이 하나의 직선상에 모임을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 저자가 제안한 유효 소성 역 개념이 과대하중작용 이후 균열이 소성 역내에서 성장 시 압축 잔류 응력의 변화를 정확히 해석한 결과라 생각된다.

과대 하중작용에 따라 균열 지연현상이 최대로 발생하는 과대 하중작용 직후에는 균열 성장장속도가 크게 감소하며 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)값도 감소한다. 이후 균열이 소성 역내에서 성장함에 따라 각각 증가하여 지연현상이 소멸하는 시점에서는 일정진폭하중 때의 값과 같아진다. 따라서 균열 지연현상이 발생하는 구간에서의 균열성장 속도를 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)로 정리하면 일정진폭하중 때와는 기울기가 다른 직선관계로 되며 이를 Paris의 균열성장 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C'(\Delta K_{eff}^*)^{m'}$$

$$m' = 1.092, C' = 3.0313 \times 10^{-6}$$

4. 결론

본 연구에서는 저자가 제안한 유효 소성 역 개념을 사용하여 과대 하중작용 시 지연현상 발생구간의 균열성장 속도와 본 해석방법을 통하여 얻은 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff}^*)와의 관계를 파괴역학적으로 정리하고 그 결과를 응력확대계수범위 ΔK 및 Willenborg 모델의 유효 응력확대계수범위(ΔK_{eff})로 정리한 결과와 서로 비교, 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지연현상 발생구간의 균열성장 속도를 유효 소성 역 개념을 적용하여 구한 유효 응력확대계수범위로 정리하면 Willenborg 해석방법에 따라 정리한 경우 발생한 과대 하중 비 의존성 및 기울기가 다른 두 직선으로 나타난 현상이 거의 소멸하여 하나의 직선으로 된다.
2. 균열의 성장이 지연되는 구간에 대한 균열성장

식의 지수 m' 은 일정진폭하중 시에 비해 크게 감소하며 계수 C' 는 증가하여 다음과 같이 된다.

$$m' = 1.092, C' = 3.0313 \times 10^{-6}$$

3. Willenborg 해석방법에 따라 정리한 경우 발생한 기울기가 다른 두 직선으로 나타난 현상을 유효 소성 역 개념을 적용하여 규명하였다.

4. 지연현상이 발생하는 구간의 크기는 사용하는 파괴역학적 파라미터에 따라 달라지며 K_{maxeff}^* , ΔK_{eff}^* , K_{maxeff} , ΔK_{eff} 순으로 작아진다.

후기

이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문임

REFERENCES

1. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, Prentice Hall, Inc. pp. 59-88, 2001.
2. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, Prentice Hall, Inc. pp. 120-175, 2001.
3. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, Prentice Hall, Inc. pp. 93-119, 2001.
4. Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, Prentice Hall, Inc. pp. 24-25, 2001.
5. O. E. Wheeler "Spectrum Loading and Crack Growth" ASME, J. Basic Eng., Vol. 94, p. 181 1972.
6. J. Willenborg, R. M. Engle, and H. A. Wood "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept" AFFDL TM-71-1-FBR, Jan, 1971.

7. Yong-Goo Kang, Tae-Won Lee, Dong-Myung Kim , " Study for Retardation Phenomenon, " The Korean Society of Manufacturing Process Engineer, Vol. 12, No. 5, pp. 42-49, 2013.
8. Yong-Goo Kang, Jun-Young Park , " Fracture Mechanic's Approach on Retardation Behaviors under Overloading," The Korean Society of Manufacturing Process Engineer, Vol. 11, No. 5, pp. 13-20, 2012.
9. J. C. Newman and I. S. Raju , "Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies", ASTM STP 791, pp. 238-265, 1983.