

단일 과대 하중에 의한 균열 성장 지연 거동 예측

Prediction of Crack Growth Retardation Behavior by Single Overload

송 삼 흥 (고려대 공대), 최 진 호, 김 기 석 (고려대 대학원)

S. H. Song (Korea Univ), J. H. Choi, K. S. Kim (Graduate School, Korea Univ)

ABSTRACT

Single overload fatigue tests with overload sizes ranging from 50% and 100% have been performed to investigate the fatigue crack growth retardation behavior. A modified and experimental method of Willenborg's model for prediction of crack growth retardation behavior has been developed, based on evaluations of equivalent plastic zone size (EPZS) changing its size along the overload plastic zone boundary. The minimum crack growth rates of each overload size are linearly decreased with overload size increasing, but fatigue lives extended by single overload are increasing much more unlike the crack growth rates. Comparisons of crack growth behavior predicted by EPZS model and Willenborg model have shown that the EPZS model accounts for overload effects better than Willenborg model. These effects include delayed retardation, large retardation region, minimum crack growth rate, and the increase rate of crack growth rate in the region crack growth rate recovered.

Key Words : crack growth rate(균열 성장 속도), single overload(단일 과대 하중), equivalent plastic zone size (EPZS, 동가 소성역 크기), retarded region(지연 구간), Paris' constant ratio(Paris 상수비)

1. 서 론

균열이 발생했을 경우, 압력 용기나 원자력 발전소의 설비, 혹은 항공기와 같은 기계 구조물들은 손상 부위의 수리나 교체가 용이하지 않기 때문에, 어느 정도의 손상이 허용된 채 운전된다. 그러나 그러한 기계 구조물들은 변동 하중, 특히 과대하중에 의한 피해를 받을 수 있는 환경에 노출되어 있으므로, 안전성 판단 및 잔존수명의 평가 등을 위해서는 이러한 과대하중 하에서의 균열성장거동에 대한 연구가 요구된다. 그러나 현재 폭넓게 사용되는 Willenborg 모델⁽¹⁾에 의한 예측결과는 실제 현상과 정량적으로 일치하지 않는다는 보고가 많이 발표되어왔다⁽²⁾⁽³⁾. 따라서 본 연구에서는 이 모델의 정량적 불일치를 개선하고, 단일 과대하중에 의한 균열성장지연거동을 더욱 정확히 예측할 수 있는 모델을 제시하기로 한다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 시편

본 연구에 사용한 재료는 포항 제철(주)에서 생산된 두께 6mm의 고강도강 POSTEN 60 RE이며, 그 화학적 성

분은 Table 1과 같다. KS B 0801의 규정에 의거, 인장시험을 통해 얻은 기계적 성질들은 Table 2에서 보는 바와 같이, 항복강도 542 MPa, 인장강도 638 MPa이었다.

시편은 판재를 Fig. 1의 크기로 가공한 다음 두께 0.5 mm의 휠커터를 사용하여 길이 14 mm의 노치를 낸 편측 노치 시편(Single Edged Notched Specimen)을 가공하여 사용했다(Fig. 1. 참조).

Table 1. Chemical Composition of POSTEN 60 RE

Material \ Comp.	weight percent %				
	C	Si	Mn	P	S
POSTEN 60 RE	0.097	0.268	1.479	0.021	0.0054

Table 2. Mechanical Properties of POSTEN 60 RE

Yield stress (MPa)	542
Ultimate tensile stress (MPa)	638
Young's modulus (GPa)	197.7
Poisson's ratio	0.28

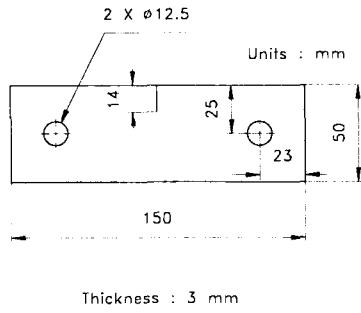


Fig. 1. Specimen Configuration

2.2. 실험 방법

우선 가공된 노치선단에서의 $\Delta K = 24 \text{ MP}\sqrt{\text{m}}$, 응력비 0.2 및 10 Hz의 주파수를 갖는 일정진폭하중을 가하여 피로 균열을 4 mm까지 전파시켰다. 그리고 식 (1)과 같이 정의되는 과대하중비를 50%, 75%, 100%로 변화시켜 가며 단일과대하중을 가한 뒤 다시 피로시험을 행하였다.

$$\text{overload \%} = \frac{K_{OL} - K_{\max}}{K_{\max}} \times 100 \quad (1)$$

한편 COD 캐이저를 시편 측면에 장착하여 변형율신호를, 로드셀로부터 하중신호를 받아 A/D 컨버터를 통해 P C로 처리하여 하중-감산변위 선도를 작성하였으며, 여기서 균열열림하중을 구하여 균열성장지연거동과 균열열림

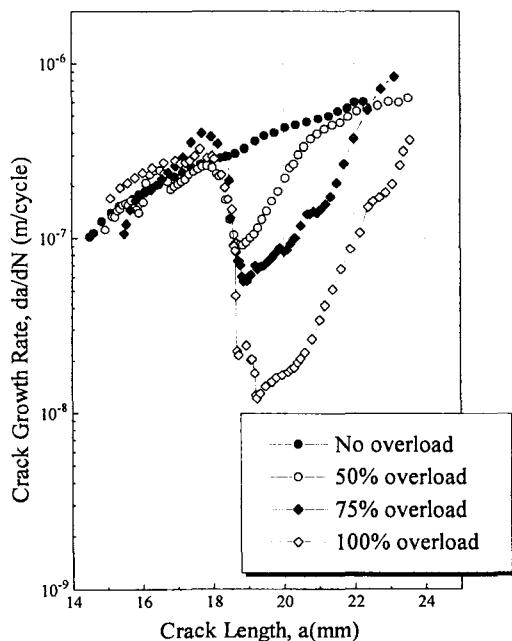


Fig. 2. Crack Growth Rate vs. Crack Length

거동과의 관계를 살펴보았다.

본 실험에 사용된 시험기는 전기유압식 인장압축 피로 시험기 INSTRON 1331이며, 균열길이 측정에는 0.01 mm 까지 측정 가능한 금속현미경을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1. 균열성장속도의 변화

Fig. 2를 보면, 과대하중비가 커짐에 따라 최소 균열성장속도 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 그 변화 경향을 알아보기 위해 최대지연시의 균열성장속도를 과대하중 부과시의 성장속도에 대해 정규화하여 과대하중비에 따라

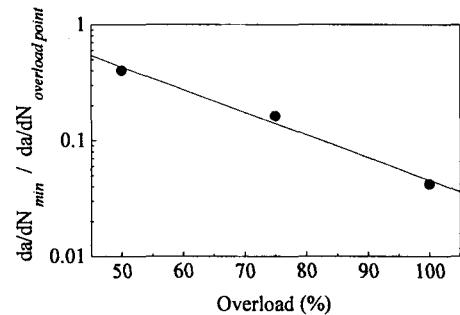


Fig. 3. Minimum Crack Growth Rate vs. Overload %

그려보면 Fig. 3과 같이, 최대지연시의 균열성장속도는 과대하중 비의 증가에 따라 감소하되 선형으로 근사되고 있음을 볼 수 있다.

3.2. 피로수명의 변화

Fig. 4는 피로수명을 균열길이 25 mm까지 정의하고, 과대하중에 의해 지연된 피로수명을 과대하중이 가져지지 않은 시편의 동일 균열길이의 수명에 대한 비로 정리하여 과대하중비에 대해 나타낸 그래프이다. 이때 수명비는 과

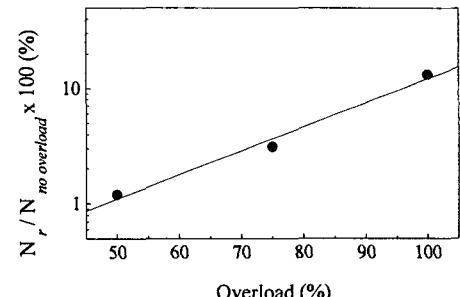


Fig. 4. Retarded Fatigue Life vs. Overload %

대하중비의 증가에 따라 증가하며 직선으로 근사될 수 있

음을 알 수 있다.

3.3. 지연구간의 변화

Fig. 5는 과대하중비에 따른 지연구간의 크기를 100% 과대하중의 지연구간에 대해 정규화하여 나타낸 그래프이

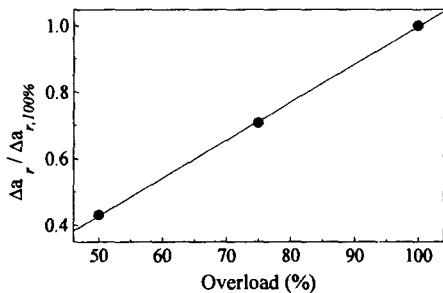


Fig. 5. Retarded Region vs. Overload %

다. 과대하중비의 증가에 따른 지연구간의 증가정도는 선형으로 근사되고 있음을 알 수 있다.

3.4. 균열열림거동

균열성장지연구간에서의 피로균열열림거동은 중요한 의미를 지니고 있다. 열림거동을 관찰함으로써 실제로 균열성장에 관여하는 유효응력확대계수 α , 즉 ΔK_{eff} 의 크기를 조사해 볼 수 있기 때문이다. Fig. 6은 균열길이에 따라 균열열림비가 어떻게 변화하고 있는지를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 균열성장이 지연됨에 따라 균열열림률이 높아져 열림비가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 균열성장에 직접 관계되는 ΔK_{eff} 의 감소로 인해 균열성장속도가 감소되고 있음을 반영한다.

4. 지연구간 내에서의 균열성장거동 예측

Willenborg 모델 및 100% 과대하중의 실험결과를 토대로 균열성장속도 증가부분과 감소부분에 대해 균열성장지연거동을 보다 정확히 예측해 주는 모델을 제시하고, 과대하중비를 달리 하였을 때의 실험결과와 비교함으로써 제시된 모델의 성능을 살펴보도록 한다.

4.1. 균열성장속도 감소구간의 예측

균열성장속도 감소구간에서의 균열성장거동을 예측하기 위해서는 균열성장속도가 가장 낮은 최대지연점의 위치와 그 위치에서의 균열성장속도를 예측할 수 있어야 한다. 왜냐하면 이 부분에 의해 피로수명이 크게 좌우되기 때문이다. 최대지연점에 대해서 언급한 연구⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 중 McEvily에 따르면, 최대지연점은 과대하중 부과 직후가 아니라 과대하중에 의해 발생한 소성역의 중간 지점쯤이며, 이 지점에

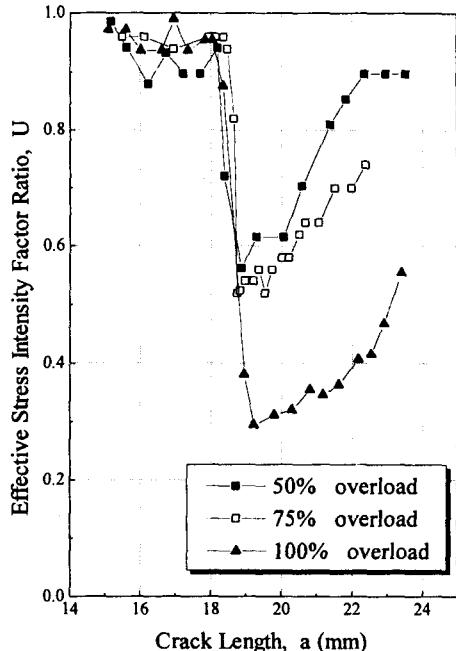


Fig. 6. Effective Stress Intensity Factor Ratio vs. Crack Length

서 균열성장에 따른 잔류변위가 최대가 되고, 이 때 잔류변위의 크기는 100% 과대하중일 경우 CTOD와 같아져 최대지연이 발생한다고 하였다. 그러나 그는 이 모델을 정량적으로 평가하지 못했다.

한편 본 연구의 실험결과도 그러한 경향을 보이고 있는데, 이 점을 Fig. 7의 결과를 통해 수정 모델에 적용해 본다. 우선 실험결과의 균열성장속도로부터 속도 감소구간에 대해 Paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 을 이용하여 ΔK 를 역으로 구한다. 이 값을 이라 하고, 이 값을 이용해 Willenborg 모델의 상당소성역크기(Required PZS)를 구해보면 Fig. 7과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 원(○)으로 표시된 것이 Paris식을 통해 얻은 결과이고, 굵은 실선은 이를 직선근사한 것이다. 파선은 소성역을 원형으로 가정했을 때 과대하중에 의해 발생하는 소성역의 형상을 나타낸 것이다. 그리고 가는 실선은 Willenborg 모델로부터 예측된 상당소성역크기이다. 만약 Willenborg 모델이 정확한 예측모델이라면 이 가는 실선은 원으로 표시한 실험결과와 일치해야 한다.

실험결과를 보면, 최대지연점은 과대하중 소성역 중간지점에 못미치는 지점으로 나타나고 있으나, 역산된 결과의 근사 직선이 과대하중 소성역 중간 지점과 만나고 있다. 이것은 최대지연점을 소성역 중간지점이라고 가정할 경우, 소성역 중앙에서 잔류변위가 최대가 됨에 따라 최대지연이 발생한다는 기존의 연구모델과 일치하는 결과이므로,

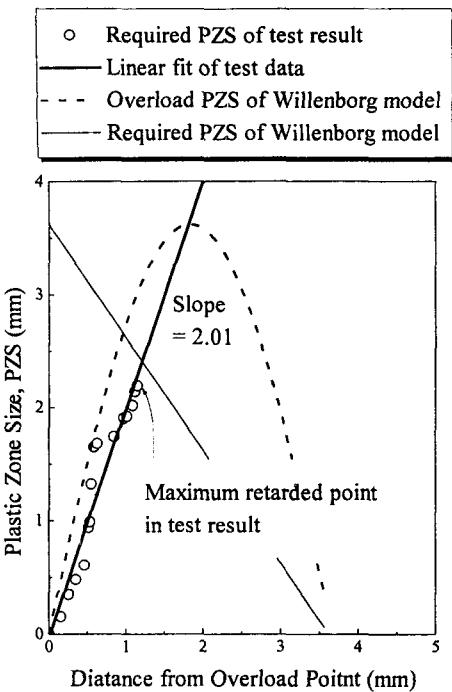


Fig. 7. Plastic Zone Size
vs. Distance from Overload Point
(Test Result from 100% Overload)

Willenborg 모델의 상당 소성역크기가 변하여 이 지점에서 최대가 된다면 최대지연점의 균열성장거동을 과대하중 소성역크기만으로 예측할 수 있게 된다. 따라서 최대지연점에 관한 McEvily의 모델이 실험결과를 과대평가하고는 있지만 그 경향이 물리적 의미와 일치하므로, 최대지연점을 정량적으로 표현하는데 McEvily의 모델을 적용한다.

한편 소성역크기가 직선으로 극사되면 과대하중 부과직후 그 소성역크기는 일정진폭하중의 소성역크기보다 작아져 상당한 구간동안 지연이 일어나지 않게 되므로 이에 대한 보정을 해 주어야 하는 단점을 안고 있다. 따라서 직선으로 보다 잘 극사되지만 과대하중에 의한 소성역크기의 경계와도 유사하게 일치하고 있으므로, 비교적 손쉽게 계산되는 과대하중 소성역 경계를 따라 소성역크기가 변한다고 가정하고 이에 따라 변하는 소성역크기를 등가 소성역크기(Equivalent Plastic Zone Size, EPZS)라 부르기로 하겠다. EPZS는 균열성장속도 감소구간에서 지연을 일으키는 기구들의 효과에 상당하는 소성역크기라는 의미를 지니고 있으며, Willenborg 모델에서의 상당소성역크기 대신 EPZS를 이용하여 속도 감소구간을 예측하기로 한다.

4.2. 균열성장속도 증가구간의 예측

Willenborg 모델은 지연구간을 상당히 과소 평가하여

예측된 피로수명의 오차를 가중시키게 되므로 이 구간에 대해 정확한 모델을 제시해야 한다. 균열성장속도가 증가하는 구간은 과대하중의 영향을 벗어나는 과정으로서 균열성장지연이 일어나고 있기는 하지만, 불안정한 감소구간과 최대지연점을 지나 새롭게 재배열되어 안정된 기지조직의 성질에 영향을 받아 균열이 성장하게 되리라 예측할 수 있다. 실제로 Fig. 8.의 (a)에서 보듯이, 성장속도 증가

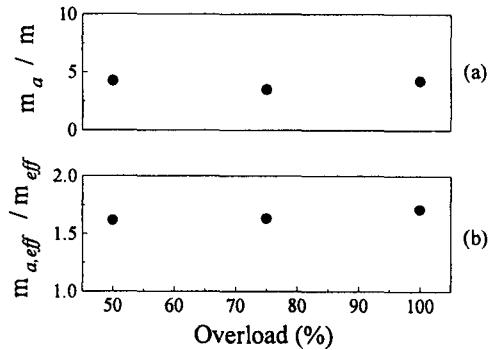


Fig. 8. Paris' Constant Ratio vs. Overload %

구간의 성장속도를 Paris 법칙 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 적용하여 m_a (하첨자 a 는 증가 구간을 의미)를 계산해 본 결과, 과대하중비가 변함에도 불구하고 서로 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다. 더구나 열림하중으로부터 구해진 ΔK_{eff} 를 이용하여 얻은 $m_{a,eff}$ 도 Fig. 8. (b)와 같이 유사한 경향을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 성장속도 증가구간에서의 m_a 가 일정하다고 가정하고, 100% 과대하중의 결과로부터 얻어진 m_a 를 이용하여 균열성장 거동을 예측해 보기로 한다.

4.3. 예측모델의 검토 및 고찰

100% 과대하중의 실험결과를 토대로 만든 균열성장지연거동 예측모델의 성능을 50%, 75% 과대하중 실험결과와의 비교를 통해 살펴보도록 한다.

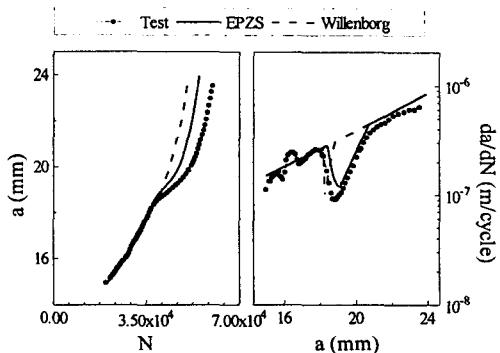


Fig. 9. 50% Overload

5. 결 론

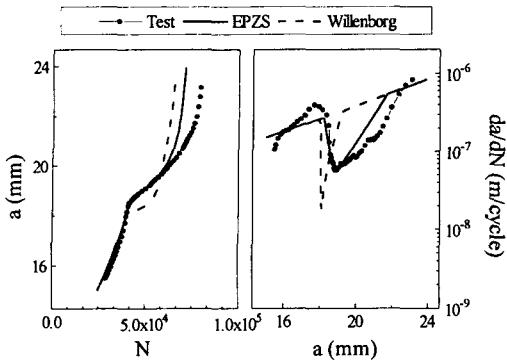


Fig. 10. 75% Overload

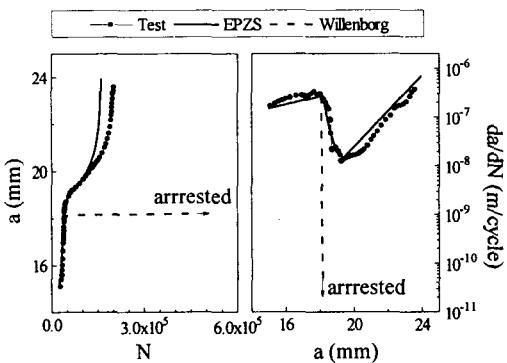


Fig. 11. 100% Overload

Fig. 9, 10, 11은 $a - N$ 선도와 $da/dN - a$ 선도를 통해 실험결과, EPZS 모델, 그리고 Willenborg 모델의 예측 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 EPZS 모델의 결과가 Willenborg 모델보다 실험결과를 보다 정확히 예측한 것을 볼 수 있다.

EPZS모델의 성능향상정도를 구체적으로 살펴보기 위해 Fig. 12, 13에 각 과대하중비에 따른 지연구간과 지연수명을 Willenborg 모델과 비교하여 나타내었다. 지연구간에 있어서 EPZS 모델의 결과가 실험 결과에 75%이상 접근함으로써 우수한 예측성능을 보였던 반면 Willenborg 모델은 상당히 과소평가된 결과를 보여준다. 또한 Willenborg 모델은 100% 과대하중 이상에서 균열정류를 예측하고 있으므로, 100%에 가까운 과대하중을 Willenborg 모델에 적용해 본 결과 지연구간이 어느 값으로 수렴함으로서 지연구간 예측에 한계를 드러내고 있었다. 한편 과대하중에 의해 지연된 피로수명을 N_r 이라 하면, N_r 은 EPZS 모델의 결과가 Willenborg 모델의 결과보다 실험값에 평균 30% 이상 더 가까운 값을 보였는데 100% 과대하중의 경우에도 기존의 정확도를 유지함으로써 과대하중 크기가 클 경우 EPZS 모델이 더욱 효과적임을 확인할 수 있었다.

과대하중비의 변화에 따른 균열성장지연거동을 살펴보고, 단일과대하중의 균열성장을 예측하기 위해 개선된 지연모델을 제시했으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 단일과대하중에 의한 최대지연시의 속도는 과대하중비가 증가함에 따라 선형적으로 감소한다. 그리고 지연수명 및 지연구간은 과대하중비가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.
- (2) 과대하중 소성역 경계로서 정의된 등가 소성역크기(EPZS)와 균열성장속도 증가구간의 m_a 를 이용하여 지연거동을 예측한 결과, 지연구간은 50% 이상, 피로수명에 있어서는 30% 이상의 예측성능 향상을 얻을 수 있었다. 특히 피로수명에 있어서는, Willenborg 모델로 예측 불가능한 과대하중비 100%의 경우에도 EPZS 모델은 그 정확도를 유지함으로써, 높은 과대하중비에서도 예측모델로서 유용하게 사용될 수 있다.

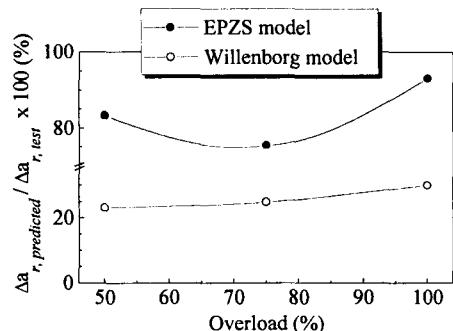


Fig. 12. Retarded Region Ratio vs. Overload %

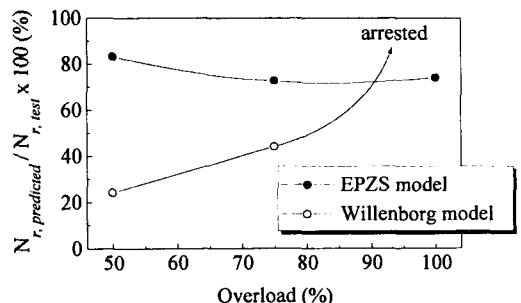


Fig. 13. Retarded Fatigue Life Ratio vs. Overload %