

# 단일과대하중하에서 피로균열진전지연거동 및 지연수명의 확률론적 해석

심 동 석\* · 김 정 규\*\*  
(1998년 11월 13일 접수)

## A Stochastic Analysis for Crack Growth Retardation Behavior and Prediction of Retardation Cycle Under Single Overload

Dong Suk SHIM and Jung Kyu KIM

**Key Words:** Fatigue Crack Growth Retardation(피로균열진전 지연), Single Overload(단일과대하중), Delayed Retardation(지체지연), Retardation Coefficient(지연계수), Retardation Cycle(지연수명), Variability(변동성),

### Abstract

In this study, to investigate the fatigue crack retardation behavior and the variability of retardation cycles, fatigue crack growth tests were conducted on 7075-T6 aluminum alloy under single tensile overload. A retardation coefficient,  $D$  was introduced to describe fatigue crack retardation behavior and a random variable,  $Z$  to describe the variability of fatigue crack growth. The retardation coefficient was separately formulated according to retardation behavior which is composed of delayed retardation part and retardation part. The random variable,  $Z$  was evaluated from experimental data which was obtained from fatigue crack growth tests under constant amplitude load. Using these variables, a probabilistic model was developed on the basis of the modified Forman's equation, and retardation behavior and cycles were predicted under certain overload condition. The predicted retardation curve well agrees with the trend of experimental crack retardation behavior. And this model well predicts the scatter of experimental retardation cycles.

### 1. 서 론

기계·구조물은 운용 중에 다양하게 변동하는 하중이력을 경험하게 된다. 이러한 변동하중하에서 재료의 피로거동은 일정진폭하중과는 다른 양상을 나타낸다. 이중 인장과대하중에 의한 균열진전의 지연현상은 재료의 피로수명에 많은 영향을 미치므로 이의 거동을 묘사하고 피로수명을 예측하기 위하여 많은 연구<sup>(1~4)</sup>가 행하여져 왔다. 그러나 지연거동의 복잡성으로 인하여 만족할 만한 결론에 이르지 못하고 있다.

균열진전의 지연현상에 있어서 Elber<sup>(1)</sup>의 균열단합 모델은 균열단합의 정확한 측정이 어렵고 하중이력에 따라 균열단합의 양이 다르므로 이를 정량화 하기 어렵다. Wheeler<sup>(2)</sup>의 소성영역 모델은 지체지연(delayed retardation)을 예측할 수 없고 지연계수의 결정은 실험에 의존한다는 문제점이 있다. 또한 Willenborg<sup>(3)</sup>의 압축잔류응력 모델은 과대하중의 발생과 동시에 지연이 일어난다고 가정함으로써 지체지연을 묘사할 수 없고 지연수명을 과대평가 하는 경향이 있다.

지체지연을 포함하는 지연의 전과정을 묘사하기 위하여 Lu와 Li<sup>(4)</sup>는 실험적인 새로운 모델을 제시하였다. 그들은 지연과정중 균열진전속도가 최소가 되는 지점을 경계로 감속부와 가속부로 나누고, 두 부분을 각각 선형 함수로 가정하여 균열진전의 지연과정을 예측하였다. 이 모델은

\* 회원, 한양대학교 대학원

\*\* 회원, 한양대학교 기계공학부

균열진전지연의 전 과정을 묘사할 수 있는 장점이 있으나 시험편의 두께 및 과대부하의 위치에 따른 지연거동의 변화에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않았다.

한편, 전보<sup>(5,6)</sup>에 밝힌 바와 같이 피로균열진전에는 재료의 불균질성으로 인한 많은 변동성이 존재하며 이는 두께가 얇을수록 지수적으로 증가한다. 그러므로 피로균열진전 지연거동 및 지연수명의 정확한 예측을 위해서는 재료의 불균질성을 고려한 통계적인 기법의 도입이 요구된다.<sup>(7)</sup>

본 연구에서는 과대하중비와 과대하중 부하의 위치에 따른 피로균열진전 지연거동을 고찰하고

이를 예측하기 위한 확률론적 모델을 제시하였다.

## 2. 확률론적 피로균열진전지연 모델

인장의 과대하중에 의하여 발생하는 피로균열진전의 지연은 균열가지, 균열단합, 균열둔화, 변형률경화 등의 현상이 복합적으로 연관되어 일어나므로 이를 모두 수식적으로 표현하기는 매우 어렵다. 그러나 거시적인 관점에서 균열진전속도가 최소로되는 지점을 경계로 하여 지체지연부와 지연부로 나누어 수식화 하면 균열진전의 지연거동은 쉽게 수식화 될 수 있다.

먼저 지연계수를 일정진폭하중에서의 균열진전속도  $(da/dN)_{CA}$  와 지연시의 균열진전속도  $(da/dN)_{retard}$  의 대수비로 정의하면 식 (1)과 같다.

$$D = \frac{\log\left(\frac{da}{dN}\right)_{CA}}{\log\left(\frac{da}{dN}\right)_{retard}} \quad (1)$$

과대하중의 부하 전과 지연이 끝났을 때는 지연현상이 없으므로 지연계수는 식 (2a)에서와 같이  $D=1$ 이다. 과대하중 후의 지연계수는 지연거동에 대한 이전의 연구결과<sup>(8,9)</sup>로부터 수식화 할 수 있다. 과대부하 직후에 균열진전속도가 선형적으로 급격히 감소하는 지체지연부는 식 (2b)와 같이 1차함수로 나타낼 수 있다. 그리고 지연부는 2차곡선 형태를 그리며 균열진전속도가 증가하므로 식 (2c)와 같이 1/4타원을 가정하여 수식화 할 수 있다. Fig. 1은 이를 도식적으로 나타내고 있다.

$$D = 1 \quad (a < a_o \text{ or } a > a_d) \quad (2a)$$

$$D_1 = \frac{D_{min} - 1}{a_{min} - a_o} (a - a_o) + 1 \quad (a_o \leq a \leq a_{min}) \quad (2b)$$

$$D_2 = D_{min} + (1 - D_{min}) \sqrt{1 - \left(\frac{a_d - a}{a_d - a_{min}}\right)^2} \quad (a_{min} < a \leq a_d) \quad (2c)$$

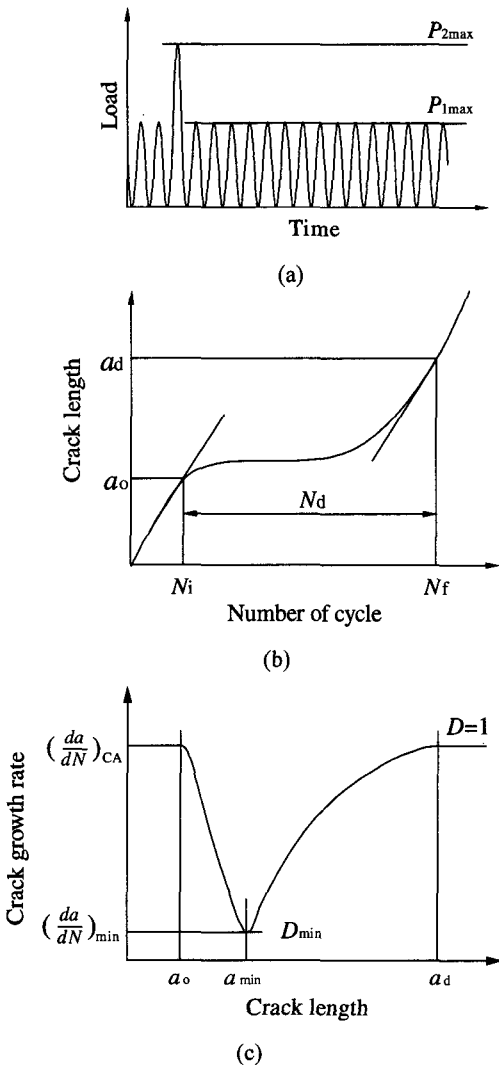


Fig. 1 Fatigue crack growth behavior after an overload

식 (2)에서  $D_{\min}$  은 지연계수의 최소값으로 Lu와 Li<sup>(4)</sup>의 연구에 따르면 이는 과대하중비의 함수로서 정의 될 수 있다. 그리고  $a_0$  는 과대하중 부하 시의 균열길이이고,  $a_{\min}$  은 균열진전속도가 최소로 되는 균열길이이다. 알루미늄 재료에 대한 Vardar,<sup>(10)</sup> Fleck<sup>(11)</sup> 등의 연구에 의하면  $a_{\min}$  은  $a_0 + 0.24 r_{OL}$  로 보고되고 있다.  $a_d$  는 균열진전의 지연이 끝날 때의 균열길이로  $a_0 + r_{OL}$  이다.  $r_{OL}$  은 과대하중으로 인한 소성영역의 크기로 식 (3)과 같다.

$$\gamma_{OL} = \frac{1}{\beta\pi} \left( \frac{K_{2max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

여기서  $K_{2max}$  는 과대하중시의 최대응력확대 계수이며  $\sigma_{ys}$  는 항복강도 이다. 그리고 소성영역의 보정계수,  $\beta$  는 평면응력 상태에서는 2이고 평면변형률 상태에서는 6이다.

이상에서와 같이 정의 된 지연계수를 이용하면 변동성을 포함하는 피로균열진전의 지연거동 뿐만 아니라 지연수명의 확률분포를 예측할 수 있다. 전보(6)에 보고한 확률론적 피로균열진전법칙은 식 (4)와 같다.

$$\frac{da}{dN} = Z \cdot \frac{C(\Delta K - \Delta K_0)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (4)$$

여기서  $C$ ,  $m$  은 재료상수이고  $K_c$  는 피로파괴인성이며  $K_0$  는 응력확대계수범위의 초기 값으로, 이 이하의 값에서는 균열의 진전이 일어나지 않는다. 그리고  $Z$  는 재료의 불균질성으로 인한 확률변수이며, 이에 대수를 취한  $\log Z$  는 잔류치로 평균이 0이고 정규분포를 따른다.

이의 식 (4)를 식 (1)에 대입하면 지연시의 피로균열진전 법칙은 다음과 같다.

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_{\text{retard}} = \left( Z \cdot \frac{C(\Delta K - \Delta K_0)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \right)^{1/D} \quad (5)$$

확률변수  $Z$  는 일정진폭하중하의 실험결과로부터 얻어지는  $\log Z$  의 확률적 성질을 이용하여 구할 수 있다.  $\log Z$  는 평균이 0이고 정규분포

를 따르므로  $Z$  의  $\gamma$  백분위수(percentile)인  $Z_\gamma$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma &= 1 - \Phi \left[ \frac{\log Z_\gamma - \mu_{\log Z}}{\sigma_{\log Z}} \right] \\ &= 1 - \Phi \left[ \frac{\log Z_\gamma}{\sigma_{\log Z}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\log Z_\gamma = \sigma_{\log Z} \cdot \Phi^{-1} [1 - \gamma] \quad (7)$$

$$Z_\gamma = 10^{\sigma_{\log Z} \cdot \Phi^{-1} [1 - \gamma]} \quad (8)$$

여기서  $\Phi$  는 표준 정규분포함수이다.

식 (8)에서 얻어진  $Z_\gamma$  를 식 (5)에 대입하여 수치적분하면 변동성을 포함하는 지연거동 및 지연수명의 확률분포를 식 (9)로부터 예측 할 수 있다.

$$\begin{aligned} N_d = & \int_{a_0}^{a_{\min}} \left( \frac{1}{Z_\gamma} \cdot \frac{(1-R)K_c - \Delta K}{C(\Delta K - \Delta K_0)^m} \right)^{1/D_1} da + \\ & \int_{a_{\min}}^{a_d} \left( \frac{1}{Z_\gamma} \cdot \frac{(1-R)K_c - \Delta K}{C(\Delta K - \Delta K_0)^m} \right)^{1/D_2} da \end{aligned} \quad (9)$$

### 3. 실험방법

#### 3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 항공기 구조용으로 사용되고 있는 7075-T6 고강도 알루미늄 합금이며, 이 재료의 기계적 성질 및 화학적 조성은 전보<sup>(6)</sup>와 같다. 시험편은 ASTM E647-93<sup>(12)</sup>에 따른 폭( $W$ )이 50.8 mm인 CT(compact tension)형이며 시험편의 두께는 1.6 mm와 9.8 mm의 2가지이다. 또한 시험편

Table 1 Loading condition.

Thickness, B (mm)	1.6	9.8
Max. load, $P_{\max}$ (kN)	0.3	1.8
Stress ratio, R	0	
Frequency, f (Hz)	5	
Wave form	sine	

의 채취 방향은 압연 방향과 부하 방향이 평행하고 균열 진전 방향이 이에 수직인 L-T방향이다.

3.2 피로시험

상온의 대기 중에서 100 kN용 유압서어보식 피로시험기에 마이크로컴퓨터를 사용한 제어시스템을 구성하고, ASTM E647-93<sup>(12)</sup>의 규정에 따라 피로균열진전 시험을 행하였다. 작용하중은 두께에 관계없이 동일한 균열길이에서 균열선단의 응력이 일치하도록 Table 1과 같이 하였다.

단일과대하중은 과대하중비와 부하의 위치를 달리하여 부하 하였다. 과대하중비는 식 (10)과 같이 정의하여 이의 비를 60, 80, 100, 120 %로

하였다. 과대하중은 균열길이가 24, 26, 28, 30 mm 에 도달하였을 때 수동으로 부하 하였다.

$$\% O.L. = \frac{P_{2\max} - P_{1\max}}{P_{1\max}} \times 100 \quad (10)$$

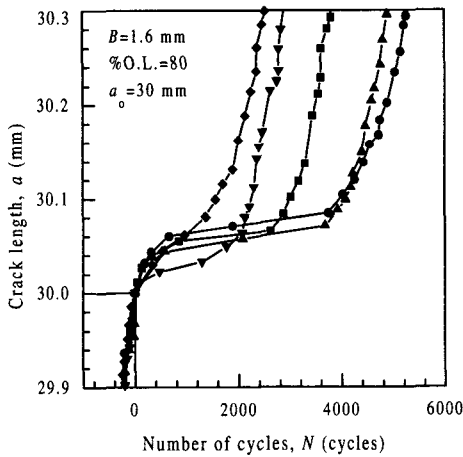
여기서,  $P_{2\max}$ 는 과대하중시의 최대 하중이며  $P_{1\max}$ 는 일정진폭 하중의 최대 하중이다.

균열길이의 측정은 컴플라이언스법(compliance method)을 사용하였으며, 균열길이가 0.01 mm 증가할 때마다 시험데이터를 컴퓨터에 자동적으로 기록하도록 하였다. 피로균열진전속도는 시컨트법(secant method)에 의하여 구하였다. 그리고 지연수명,  $N_d$ 은 Fig. 1의 (b)와 같이 과대하중의 부하 전과 후의 균열진전속도가 같아지는 지점을 기준으로 산정하였다.

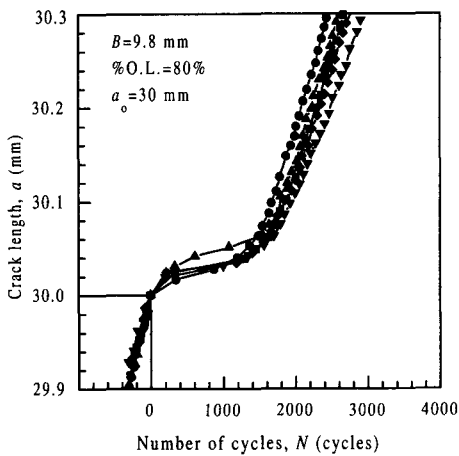
4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로균열진전 지연거동

Fig. 2는 과대하중비 80 %로 균열길이 30 mm 에서 단일과대하중을 가한 후에  $a-N$ 곡선의 변화를 나타낸 그래프이다. (a)는 두께 1.6 mm의 결과이고 (b)는 두께 9.8 mm의 결과이다.  $a-N$ 곡선은 과대하중으로 인하여 기울기가 완만한 지연부를 나타내고 있다. 또한 동일한 조건에서 과대하중을 부하 하였음에도 불구하고 재료의 불균질



(a) Thickness, B=1.6 mm



(b) Thickness, B=9.8 mm

Fig. 2  $a-N$  curves after an overload.

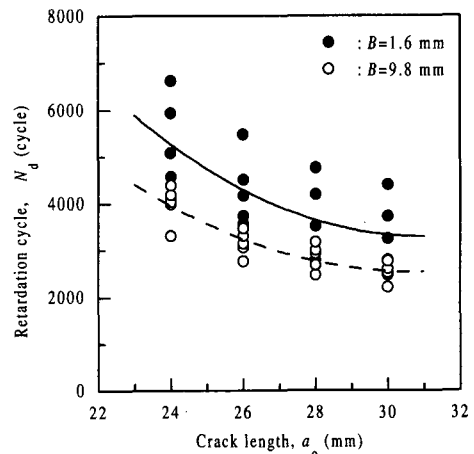


Fig. 3 Variation of retardation cycle with crack length at overloading.

성으로 인하여 많은 변동성을 나타내고 있다. 이의 경향은 두께가 얇을수록 현저함을 알 수 있다. 이는 일정진폭하중에 대한 전보<sup>(6)</sup>의 결과와 동일한 경향이다.

Fig. 3은  $a$ - $N$ 곡선으로부터 지연수명을 구하고 이를 과대하중 부하시의 균열길이에 대하여 나타낸 것이다. 지연수명은 두께 1.6 mm의 경우가 9.8 mm 보다 크며, 과대하중 부하시의 균열길이가 증가함에 따라 지연수명은 감소하고 있다. 그리고  $a$ - $N$ 곡선의 변화로 인하여 동일한 균열길이에서도 지연수명은 많은 변동성을 나타내고 있다. 따라서 균열진전 지연수명의 정확한 예측을 위해서는 지연거동의 정확한 묘사뿐만 아니라 변동성을 고려할 수 있는 확률론적인 방법이 요구된다.

4.2 지연영역의 평가

단일과대하중에 의한 균열진전의 지연이 일어나는 영역의 실험결과는 식 (3)으로 계산되는 소성영역의 크기보다는 크게 평가되는 경우가 많다.<sup>(13-15)</sup> Fig. 4는 실험에서 얻어진 지연영역의 크기,  $(a_d - a_0)$ 와  $(1/\pi)(K_{2max}/\sigma_{ys})^2$ 로 계산된 소성영역의 크기를 비교한 것이다. 검은 점은 두께 1.6 mm의 결과이며 흰 점은 두께 9.8 mm의 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험결과와 계산결과는 선형적인 연관성을 나타내고 있으며, 회귀선의 기울기인 보정계수,  $\beta$ 는 1.6 mm의 경우에 2이고 9.8 mm의 경우에는 2.5이다.

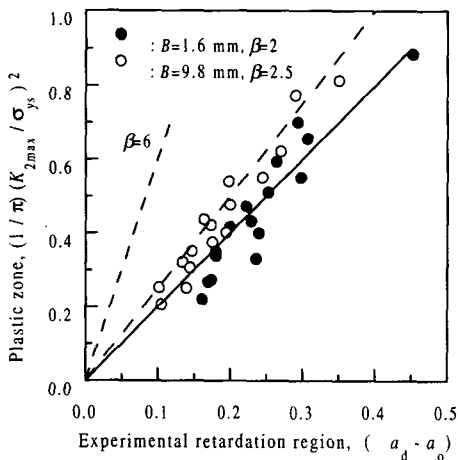


Fig. 4 Relationship between  $(a_d - a_0)$  and  $(1/\pi)(K_{2max}/\sigma_{ys})^2$ .

두께 1.6 mm의 경우에는 평면응력 조건에 부합하므로, 실험에서 얻어진 보정계수는 식 (3)의 소성영역 보정계수와 일치한다. 그러나 평면변형률에 가까운 9.8 mm의 경우에는 소성영역 보정계수가 6임에도 불구하고 실험에서 얻어진 보정계수는 평면응력에 가까운 2.5를 나타내고 있다. 이는 김<sup>(15)</sup> 등이 보고한 바와 같이 단일과대하중에 의한 균열진전의 지연현상은 시험편의 내부보다는 평면응력 상태인 표면의 영향이 지배적이기 때문이다. 따라서 과대하중에 의한 지연영역의 크기는 평면변형률 상태에서 계산된 소성영역의 크기보다는 크게 나타난다.

4.3 지연계수의 계산

과대하중의 영향을 받는 지연영역에서 지연거동의 묘사를 위해서는 이를 표현하기 위한 지연계수의 수식화가 요구된다. Fig. 5는 Fig. 2 (a)로부터 균열진전속도를 구한 후, 식 (1)로 정의한 지연계수를 계산하여 균열길이에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지연계수는 과대하중의 부하 후 선형적으로 급속히 감소되고 있으며, 최소값,  $D_{min}$ 에 이른 후 2차곡선의 형태로 다시 증가하고 있다. 따라서 지연계수의 변화에 대한 식 (2)의 가정은 타당하며  $D_{min}$ 의 값을 알면 균열진전 지연의 전 과정에 대한 지연계수의 평가가 가능하다. 그리고 이에 의해서 피로 균열진전의 지연거동을 예측할 수 있다.

Lu와 Li<sup>(4)</sup>는 단일과대하중에 의한 최대지연은

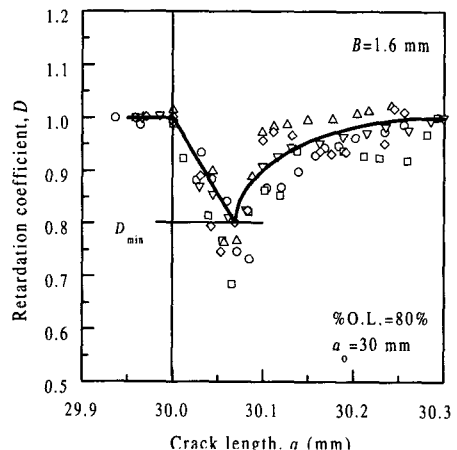


Fig. 5 Variation of retardation coefficient due to the overload.

과대하중비에 의존한다고 보고하고 있다. Fig. 6은 본 연구에서 얻어진  $D_{min}$ 의 값을 과대하중비에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이  $D_{min}$ 의 값은 과대하중비가 증가함에 따라 선형적으로 감소하고 있으며, 두께 1.6 mm와 9.8 mm에서 동일한 결과를 보이고 있다. 식 (11)은 이의 선형 회귀식이다.

$$D_{min} = 1.0325 - 0.0029(\% O.L.) \quad (11)$$

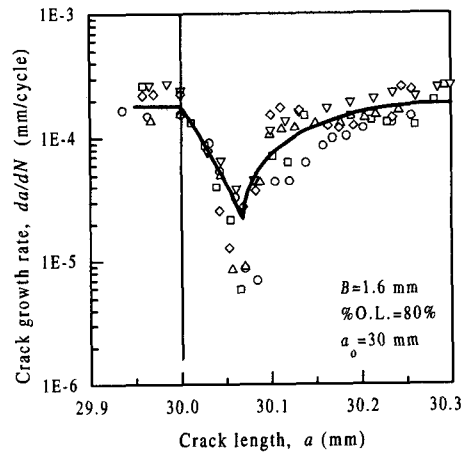
회귀식 (11)에서 과대하중이 가해지지 않은 경우 과대하중비는 0이므로 이를 대입하면  $D_{min} \approx 1$ 이다. 따라서 식 (11)은 과대하중비에 따른  $D_{min}$ 의 값을 합리적으로 묘사한다고 할 수 있다. 그리고 이를 이용하면 식 (2)의 지연계수를 계산할 수 있다.

#### 4.4 피로균열진전 지연거동의 예측

식 (2)에 의해서 지연계수를 계산하고, 지연영역에 대하여 식 (5)의 균열진전법칙을 적용하면 균열진전의 지연거동을 정확히 예측할 수 있다. 지연계수의 최소값,  $D_{min}$ 은 식 (11)로부터 계산되며, 지연영역의 크기는 실험에서 얻어진 보정계수를 이용하여 얻을 수 있다. Fig. 7은 과대하중비 80%, 초기균열길이 30 mm인 경우에 대하여 실험결과와 예측곡선을 함께 나타낸 것이다. 식 (5)에서 요구되는 재료상수는 전보<sup>(6)</sup>의 결과를

이용하였으며, 대표적인 지연거동을 예측하기 위해서 확률변수,  $Z$ 는 1로 하였다.

Fig. 7 (a)는 두께 1.6 mm의 결과이다. 지연영역의 크기가 평면응력 조건의 소성영역 크기와 같으므로  $\beta$ 는 2로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 예측결과는 균열진전의 대표적인 지연거동을 잘 묘사하고 있다. Fig. 7 (b)는 두께 9.8 mm의 결과이다. 점선은 평면변형률 조건에 의하여  $\beta$ 는 6으로 하여 예측된 것이다. 지연영역을 과소평가함으로써 예측결과는 실험결과와 큰 편차를 나타내고 있다. 그러나 소성영역 보정계수를 실험값인  $\beta=2.5$ 로 대입한 예측결과는 실험결과



(a) Thickness,  $B=1.6$  mm

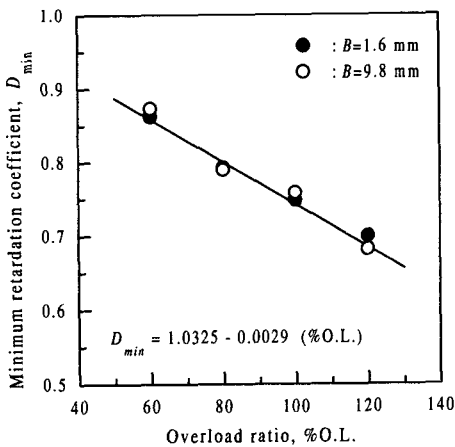
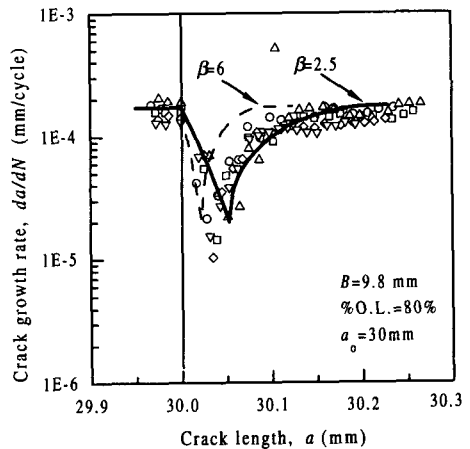


Fig. 6 Relationship between overload ratio and minimum retardation coefficient.



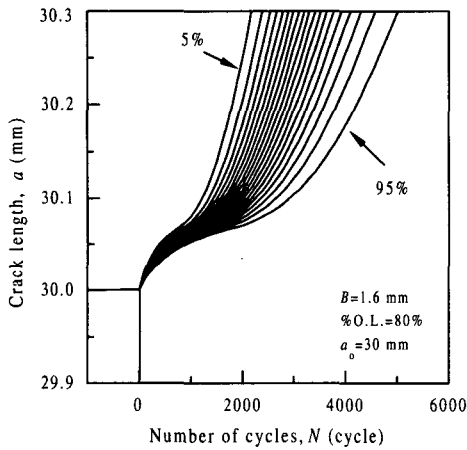
(b) Thickness,  $B=9.8$  mm

Fig. 7 Comparison of experimental results and curve predicted by this model.

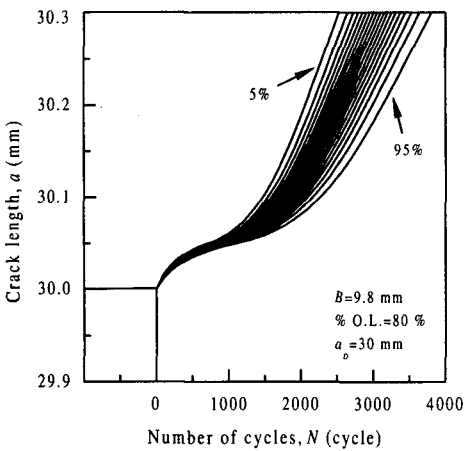
와 일치하고 있다. 이는 앞에서도 밝힌바와 같이 평면변형을 상태하에서도 균열진전의 지연은 표면부의 영향이 지배적이기 때문이다.

Fig. 8은 식 (3)에 실험으로 얻어진 소성영역 보정계수를 대입하고,  $Z_7$ 를 5%에서 95%까지 5%간격으로 구하여 식 (5)로부터  $a-N$ 곡선을 예측한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 예측된  $a-N$ 곡선은 Fig. 2의 실험결과와 일치하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 제시된 모델은 단일과대하중에 의한 피로균열진전의 지연거동 및 변동성을 잘 예측하고 있다고 할 수 있다.

4.5 지연수명의 예측



(a) Thickness,  $B=1.6$  mm



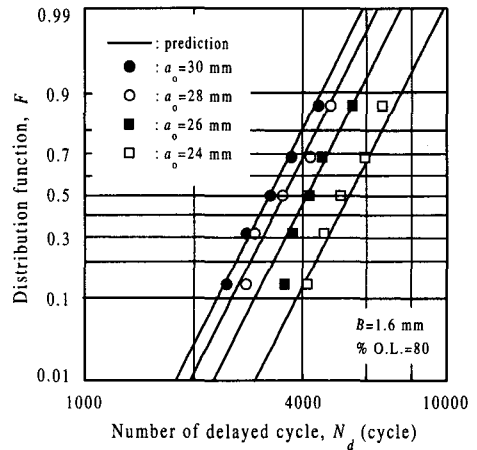
(b) Thickness,  $B=9.8$  mm

Fig. 8  $a-N$  curves predicted by this model.

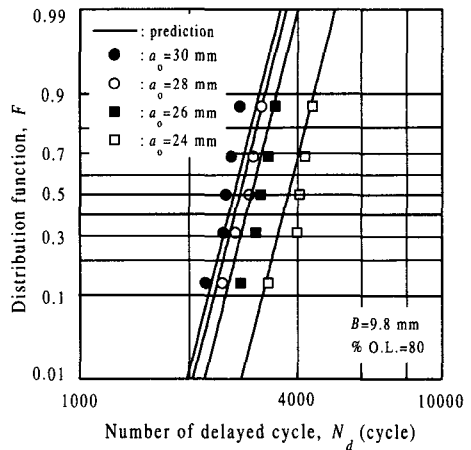
단일과대하중에 의한 균열진전의 지연수명은 지연거동의 변화에 따라 많은 변동성을 나타내므로, 지연수명의 확률론적 예측은 피로수명의 평가에 중요한 요소이다. 확률변수  $\log Z$ 는 피로균열진전의 변동성을 나타내고 있으며 이는 평균이 0고 정규분포를 따른다. 그리고  $\log Z$ 의 분산은 전보(6)에 보고한 바와 같이 두께가 감소함에 따라 지수적으로 증가한다.<sup>(6)</sup>

$$\sigma_{\log Z}^2 = \lambda \cdot B^\gamma \tag{12}$$

여기서  $\lambda$ 와  $\gamma$ 는 재료상수로 본연구에 사용된



(a) Thickness,  $B=1.6$  mm



(b) Thickness,  $B=9.8$  mm

Fig. 9 Distribution of retardation cycle predicted by this model.

재료에서는  $\lambda=0.0143$ ,  $\gamma=-0.792$  이다.

식 (12)로부터 두께에 따른  $\log Z$ 의 분산을 구하고 이를 이용하여 식 (6)~(8)로부터  $Z$ 의  $\gamma$ 백분위수(percentile)인  $Z_\gamma$ 를 1%간격으로 구하여 식 (9)에 대입하면 지연수명의 확률분포를 예측할 수 있다. Fig. 9는 이의 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 예측된 확률분포는 두께에 관계없이 실험결과와 잘 일치하고 있으며 과대하중 부하시의 균열길이에 따른 지연수명의 감소 또한 잘 예측하고 있다.

Fig. 10은 본 연구에서 제시된 모델에 의하여 예측된 지연수명과 실험에서 얻어진 지연수명을

비교하여 나타낸 것이다. 예측된 지연수명은 실험결과와 일치하는 경향을 나타내고 있으며, 모든 실험결과가 일정진폭하중하에서 얻어진 확률변수  $Z$ 의 1%와 99%의 예측 곡선 내에 존재한다. 따라서 단일과대하중하에서의 지연수명의 변동은 일정진폭하중하에서 피로균열진전의 변동폭 내에 존재한다.

### 5. 결론

본 연구에서는 7075-T6 알루미늄 합금에 대하여 단일 과대하중의 피로시험을 행한 후 균열진전의 지연에 대한 새로운 확률론적 모델을 제시하고 지연거동 및 지연수명을 예측하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

① 피로균열진전의 지연은 일정진폭하중하의 결과와 같이 재료의 불균질성으로 인한 많은 변동성을 나타내고 있으며 이는 두께가 얇을수록 현저하다.

② 단일과대하중에 의한 피로균열진전의 지연거동은 균열진전속도가 최소로 되는 균열길이를 경계로 하여 균열진전속도가 선형적으로 급감하는 지체지연부와 2차곡선의 형태로 균열진전속도가 다시 증가하는 지연부로 구분하여 해석될 수 있다.

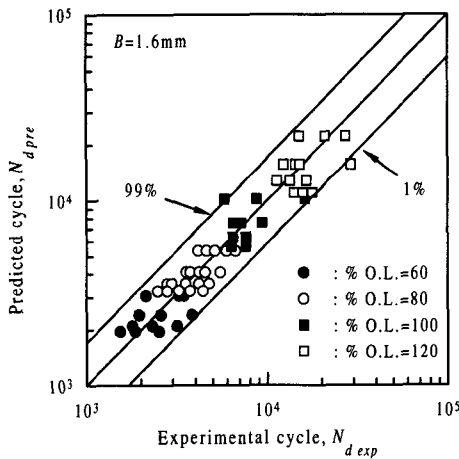
③ 최대지연이 일어나는 균열길이에서의 지연계수  $D_{min}$ 은 과대하중비가 증가함에 따라 선형적으로 감소하며 이는 두께에 관계없이 일정하다.

$$D_{min} = 1.0325 - 0.0029(\% \text{ O.L.})$$

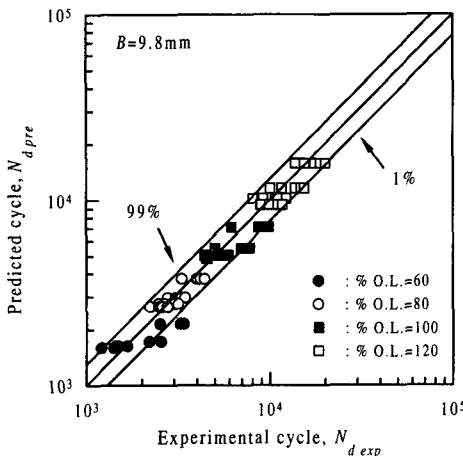
④ 일정진폭하중하에서 얻어진 확률변수  $Z$ 의 확률론적 성질을 적용하면 변동성을 포함하는 피로균열진전의 지연수명의 확률분포를 예측할 수 있다. 이를 제시된 모델에 적용하여 예측한 피로수명의 확률분포는 실험결과와 잘 일치하고 있다.

### 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학분야 : ME 96-C-25)에 의하여 수행된 연구결과와 일부이며, 이에 관계자 여러분들께



(a) Thickness,  $B=1.6$  mm



(b) Thickness,  $B=9.8$  mm

Fig. 10 Comparison of experimental results & retardation cycle predicted by model.



감사드리는 바입니다.

### 참고문헌

- (1) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," *ASTM STP* 486, pp. 230~242.
- (2) Wheeler, O. E., 1972, "Spectrum Loading and Crack Growth," *J. of Basic Eng., Trans. ASME, D*, Vol. 94, pp. 181~186.
- (3) Willenborg, J., Engle, R. M. and Wood, H. A., 1971, "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept," *AFFDL-TM-71-1-FBR*.
- (4) Lu Yichi and Li Kangxian, 1993, "A New Model for Fatigue Crack Growth after a Single Overload," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 46 No. 5, pp. 849~856.
- (5) 김정규·심동석, 1996, "7075-T6 Al 합금의 피로균열진전의 변동성에 대한 확률론적 해석," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권, 제7호, pp. 2159~2166.
- (6) 김정규·심동석, 1998, "두께변화에 따른 피로균열진전의 변동성에 대한 확률론적 해석," *대한기계학회논문집(A)*, 제22권, 제8호, pp. 1523~1532.
- (7) 김선진, 남기우, 김종훈, 이창용, 박은희, 서상하, 1997, "강의 피로균열진전거동에 미치는 과대하중의 영향과 통계적 변동에 관한 연구," *한국해양공학회지*, 제11권, 제3호, pp. 76~88.
- (8) Von Euw, E. F. J., Hertberg, R. W. and Roberts, Richard, 1972, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation," *ASTM STP* 513, pp. 230~259.
- (9) Ward-Close, C. M., Blom, A. F. and Ritchie, R. O., 1989, "Mechanism Associated with Transient Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading : An Experimental and Numerical Study," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 32, No. 4, pp. 613~638.
- (10) Tur Y. K. and Vardar O., 1996, "Periodic Tensile Overloads in 2024-T3 Al-alloy," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 53, No. 1, pp. 69~77.
- (11) Fleck N. A., 1985, "Fatigue Crack Growth Due to Periodic Underloads and Overloads," *Acta metall.* Vol. 33, No. 7, pp 1339~1354.
- (12) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," *ASTM E647-93*.
- (13) Vardar, O., 1988, "Effect of Single Overload in FCP," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 30, No. 3, pp. 329~335.
- (14) Sheu, B. C., Song, P. S. and Hwang, S., 1995, "Shaping Exponent in Wheeler Model under a Single Overload," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 1, pp. 135~143.
- (15) 김정규·박병훈, 1990, "7075-T73 알루미늄 합금의 피로 균열진전의 지연현상과 이의 기구," *대한기계학회논문집*, 제14권, 제4호, pp. 883~891.