

랜덤하중 하에서 피로균열진전예측 방법들의 비교

최병익* · 강재윤† · 이학주* · 김정엽**

A comparative study of methods to predict fatigue crack growth under random loading

Byung-Ik Choi, Jae-Youn Kang, Hak-Joo Lee and Chung-Youb Kim

Key Words : Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Crack Closure(균열단합), Random Loading(랜덤하중), Crack Growth Retardation(균열진전지연)

Abstract

Methods to predict fatigue crack growth are compared in a quantitative manner for crack growth test data of 2024-T351 aluminum alloy under narrow and wide band random loading. In order to account for the effect of load ratio, crack closure model, Hater's equation and NASGRO's equation have been employed. Load interaction effect under random loading has been considered by crack closure model, Willenborg's model and Wheeler's model. The prediction method using the measured crack opening results provides the best result among the prediction methods discussed for narrow and wide band random loading data.

1. 서론

경량화를 통한 고성능화나 고도의 신뢰성이 요구되는 항공기 및 발전설비의 설계에 있어서는 사용중에 피로 또는 부식으로 인한 손상이 일어나더라도 운전중에 일어날 수 있는 하중에 견딜 수 있으며 정기적인 검사시기까지 결함이나 균열의 성장을 허용하는 손상허용설계(damage tolerance design)개념이 사용된다. 따라서 설계대상물이 실제 상황에서 받고있는 하중에 대한 피로균열진전 예측은 매우 중요하다. 사용중에 구조물에 작용하는 하중은 응력비와 진폭이 불규칙하게 변화하는 랜덤하중으로, 이러한 랜덤하중하의 피로균열진전 거동에 대하여 검토할 필요가 있다. 피로균열진전에 관한 연구는 Paris⁽¹⁾의 연구 이후로 많은 연구가 체계적으로 이루어져 오고있다. 특히 본 연구에서는 응력비의 영향을 고려하기 위해서 Harter⁽²⁾

의 방법과 미국 항공우주국(NASA)의 균열진전 예측프로그램(NASGRO)에서 사용되는 방법⁽³⁾이 사용되었으며, 과대하중에 의한 균열진전지연 현상을 설명하기 위해서 Willenborg 모델⁽⁴⁾ 및 Wheeler 모델⁽⁵⁾이 사용되었다.

한편 Elber⁽⁶⁾가 균열단합현상에 의해서 응력비의 영향 및 변동하중 하에서 균열진전의 가속 및 지연효과가 설명될 수 있음을 밝힌 이후로, 균열단합현상은 피로균열진전거동을 지배하는 주요 파라미터로 알려져 왔다. 따라서 랜덤하중 하에서의 피로균열진전예측 방법들의 비교를 위해서 균열단합현상을 이용한 균열진전예측 방법도 사용되었다.

본 연구에서는 위에서 언급한 방법들을 이용하여 랜덤하중 하에서 균열진전수명을 예측하고, 정량적인 평가방법을 도입하여 예측결과들을 비교평가 하였다.

2. 피로균열진전 시험

균열진전시험에 사용된 재료는 2024-T351 알루미늄합금이며, 0.2% 오프셋 항복강도는 379 MPa, 인장강도는 480 MPa, 연신률은 19.6 %, 단면 수축률은 17.0%이다.

† 한국기계연구원 기계구조부
E-mail : jykang@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7850 FAX : (042)868-7884

* 한국기계연구원 기계구조부

** 여수대학교 기계자동차공학부

일정진폭 균열진전시험에는 측면홈이 있는 중앙균열 시험편 M(T)와 측면홈이 있는 면내 굽힘 SEB 시험편이 사용되었으며, 랜덤하중 균열진전시험에는 측면홈이 있는 중앙균열 시험편 M(T)이 사용되었다⁽⁷⁾. 랜덤하중과형으로는 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 광대역 및 협대역 주파수특성을 갖는 유사랜덤과형을 이용하였으며, 단위블럭당 사이클수는 2000 사이클이다. Fig. 2(a)는 응력비에 따른 일정진폭 균열진전시험 결과이다.

3. 균열단합현상을 고려한 수명예측

균열단합모델은 균열진전을 지배하는 주요인자는 Paris 식에서와 같은 응력강도계수폭 ΔK 가 아닌 균열이 완전히 열린 부분의 응력강도계수폭, 즉 ΔK_{eff} ,

$$\Delta K_{eff} = \begin{cases} K_{max} - K_{op} & \text{for } K_{op} \geq K_{min} \\ K_{max} - K_{min} & \text{for } K_{op} < K_{min} \end{cases} \quad (1)$$

이며, 균열진전속도는

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^n \quad (2)$$

와 같이 계산할 수 있다는 것이다. 또한 균열단합현상에 의해서 응력비의 영향 및 변동하중 하에서 균열진전의 가속 및 지연효과가 설명될 수 있다^(6,7). Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 유효응력강도계수폭 ΔK_{eff} 로 정리하면 응력비에 따른 균열진전 곡선이 하나의 곡선으로 모이는 것을 알 수 있다.

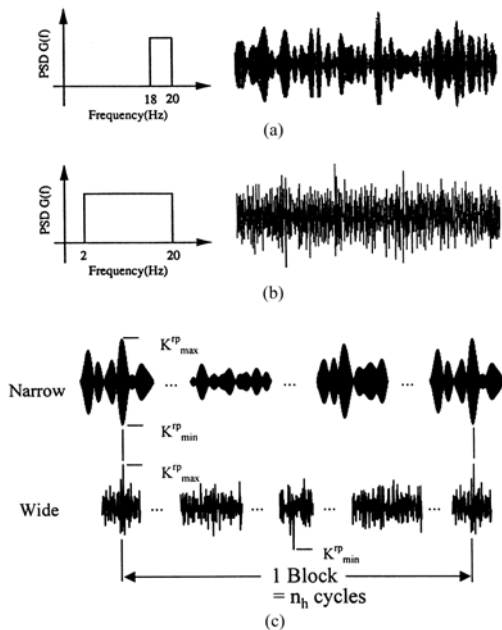


Fig. 1 Random loading histories of (a) narrow band, (b) wide band and (c) definitions.

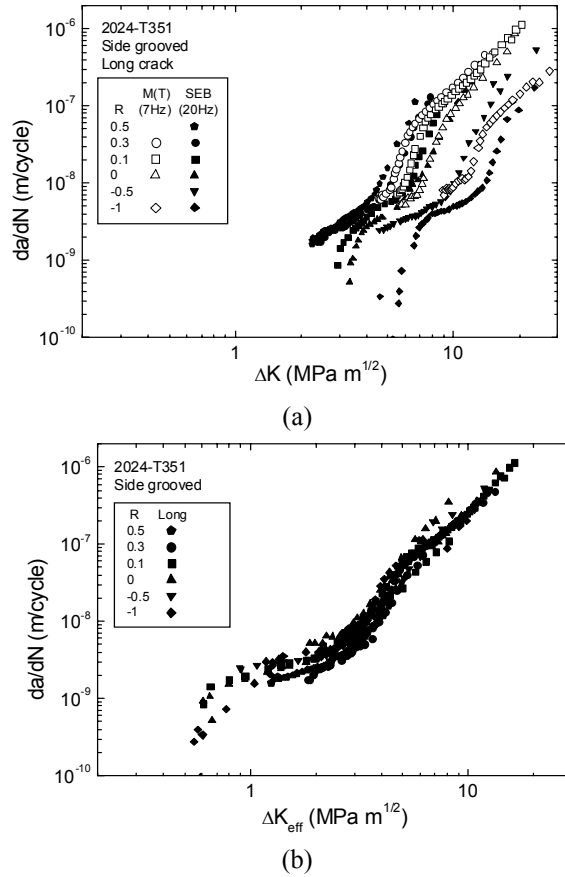


Fig. 2 Crack growth rates under constant amplitude loading

4. 응력비의 영향을 고려한 균열진전식

4.1 Harter T 방법

Harter T 방법⁽²⁾은 다음의 Walker⁽⁸⁾의 식

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K]^m$$

$$\Delta K = \Delta K_{R=0} (1 - R)^{(1-m)} \quad \text{for } R \geq 0 \quad (3)$$

$$\Delta K = K_{max} = \Delta K_{R=0} (1 - R)^{(m-1)} \quad \text{for } R < 0$$

에서 m 값을 균열진전을 $\frac{da}{dN}$ 값에 따라서 변화시키는 방법이다.

m 값은 다음과 같이 계산된다.

$$m = \begin{cases} 1 + \left[\frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta K_1}{\Delta K_2}\right) / \log_{10}\left(\frac{(1-R_2)}{(1-R_1)}\right)}{\log_{10}\left(\frac{K_{max1}}{\Delta K_2}\right) / \log_{10}\left((1-R_1)(1-R_2)\right)} \right] & \text{for } R_1 \text{ and } R_2 \geq 0 \\ 1 + \left[\frac{\log_{10}\left(\frac{K_{max1}}{\Delta K_2}\right) / \log_{10}\left((1-R_1)(1-R_2)\right)}{\log_{10}\left(\frac{\Delta K_1}{\Delta K_2}\right) / \log_{10}\left(\frac{(1-R_2)}{(1-R_1)}\right)} \right] & \text{for } R_1 < 0 \text{ and } R_2 \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

미 공군의 균열진전예측 프로그램⁽²⁾(AFGROW)은 AI 2024-T3 를 포함한 여러 재질에 대하여 식 (3)에 사용되는 재료상수 값들의 데이터베이스를 제공하고 있다.

본 연구에서는 AFGROW 의 데이터베이스에 있는 재료상수 값을 이용하여 랜덤하중 하에서 균열진전을 평가한 경우를 Harter T 방법이라 하고, Fig. 2(a)에 있는 응력비에 따른 일정진폭 균열진전시험 결과를 이용하여 AFGROW 에 의해서 식 (3)에 사용되는 재료상수를 다시 계산하여 균열진전예측을 한 경우를, AFGROW 에서 명명한 Tabular Look-Up 방법이라고 하였다.

4.2 NASGRO 방법

NASA 의 균열진전수명 예측프로그램⁽³⁾(NASGRO)에서 사용되는 식은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (5)$$

여기서 C,n,p,q 는 재료상수이며, NASGRO 의 재료물성 데이터베이스에서 제공된다.

$$f = \frac{K_{op}}{K_{max}} = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1R + A_2R^2 + A_3R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1R & -2 \leq R < 0 \\ A_0 - 2A_1 & R < -2 \end{cases} \quad (6)$$

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} S_{max} / \sigma_0\right) \right]^{\frac{1}{\alpha}}$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) S_{max} / \sigma_0$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

이며, α 는 평균변형률인 경우 6, 평균응력인 경우 2 이며, S_{max} 는 최대응력, σ_0 는 flow stress 이다. 또한 하한계 응력강도계수 ΔK_{th} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta K_{th} = \frac{\Delta K_0 \left(\frac{a}{a+a_0} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1-f}{(1-A_0)(1-R)} \right)^{(1+C_{th}R)}} \quad (7)$$

여기서

ΔK_0 -응력비 R=0 에서의 하한계 응력강도계수

a -균열길이

a_0 -기본 균열길이(38.1 mm)

C_{th} -하한계 계수이다.

$\Delta K_0, C_{th}$ 는 각 재료에 대한 NASGRO 의 재료물성 데이터베이스에서 제공되는 값이다.

NASGRO 식은 다음의 임계응력강도계수 K_{crit} 을 이용하여, 두계영향을 고려하고있다.

$$\frac{K_{crit}}{K_{Ic}} = 1 + B_k e^{-\left(A_k \frac{t}{t_0} \right)} \quad (8)$$

여기서

K_{Ic} -평균변형률 파괴인성치(Mode I)

A_k -재료상수

B_k - 재료상수

t -두께

t_0 -기준두께(평균응력조건)= $2.5(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ 이다.

K_{Ic}, A_k 와 B_k 는 각 재료에 대한 NASGRO 의 재료물성 데이터베이스에서 제공된다.

5. 균열진전지연 모델

5.1 Willenborg 모델

Willenborg 모델⁽⁴⁾은 과대하중에 의한 소성역을 기초로 한 것으로, 이 소성역에 의해서 유효응력강도계수 값이 감소한다는 개념이다. AFGROW 에서 사용되는 Willenborg 모델의 공식은 다음과 같다.

$$K_{max(eff)} = K_{max} - K_{red}$$

$$K_{min(eff)} = K_{min} - K_{red}$$

$$R_{(eff)} = K_{min(eff)} / K_{max(eff)}$$

$$K_{red} = \phi \left(K_{max}(ol) \sqrt{1 - \frac{(x-x(ol))}{Ry(ol)}} - K_{max} \right) \quad (9)$$

$$\phi = (1 - \Delta K_{Threshold} / K_{max}) / (SOLR - 1)$$

$$Ry(ol) = \left(\frac{K_{max}(ol)}{yield} \right)^2 \left(\frac{1}{PSX\pi} \right)$$

여기서

x - 균열길이

x(ol) -과대하중에서의 균열길이

$\Delta K_{Threshold}$ -R=0 에서 하한계 응력강도계수

SOLR - 정지 과대하중비

yield - 항복응력

PSX - 2(평균응력), 6 (평균변형률)

ol - 과대하중을 나타내는 기호이다.

AFGROW 는 압축응력의 영향을 고려하기 위해

서 다음의 방법을 사용한다.

$$R_y(ol) = \left(1 - 0.9 \text{abs} \left(\frac{\sigma_{compress}}{\sigma_{overload}} \right) \right) R_y(ol) \quad (10)$$

AFGROW 에서는 몇 종류의 재료에 대하여 SOLR 값을 다음과 같이 정리하였다.

알루미늄: 3.0

티타늄: 2.7

철강: 2.0

5.2 Wheeler 모델

Wheeler 모델⁽⁵⁾은 균열진전지연은 과대하중의 작용으로 생긴 균열선단의 소성역을 균열이 진전하기 때문이라고 생각하여, 지연이 일어나는 경우의 진전속도와 정상적인 일정진폭하의 균열진전속도의 관계는 다음 같이 주어진다 모델이다.

$$\frac{da}{dN} = C_p \left(\frac{da}{dN} \right) \quad (11)$$

여기서

$$C_p = \left(\frac{R_y}{X_{eff} - X} \right)^m$$

X - 균열길이

X_{eff} - 균열길이+소성역 크기

$$R_y = \left(\frac{K_{max}}{yield} \right)^2 \left(\frac{1}{\pi PSX} \right)$$

PSX - 2(평면응력), 6(평면변형률)

m-0 에서 1 사의 값을 갖는 Wheeler 계수이다.

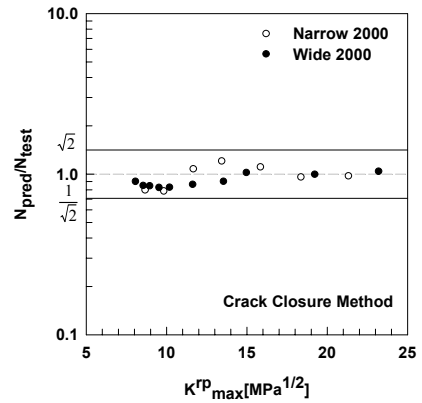
6. 균열진전예측 결과

앞에서 설명한 방법들 이용하여 광대역 및 협대역 랜덤하중 하에서 균열진전을 예측하고, 그 결과를 실험결과와 비교하여 Fig. 3 에 나타내었다. Fig. 3 은 예측방법들의 정밀도와 정확도에 관하여 정량적 평가보다는 정성적으로 좋은 정보를 주고 있다. 각 방법의 정량적 평가를 위해서 다음의 세 항목(error criterion, mean value, coefficient of variance) 이 사용되었다.

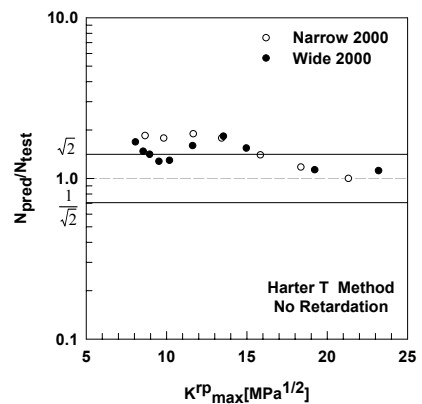
$$E_f(s = \sqrt{2}) = \frac{\text{Number of data falling within } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \frac{N_{pred}}{N_{test}} \leq \sqrt{2}}{\text{Number of total data}} \quad (12)$$

$$\text{Mean value} = \left(\frac{N_{pred}}{N_{test}} \right) \quad (13)$$

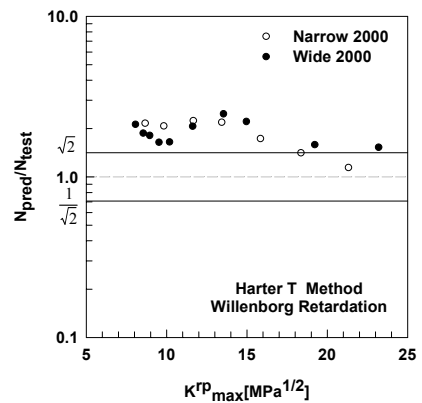
$$C.V.(\text{Coefficient of Variance}) = \frac{\text{Standard deviation}}{\text{Mean}} \quad (14)$$



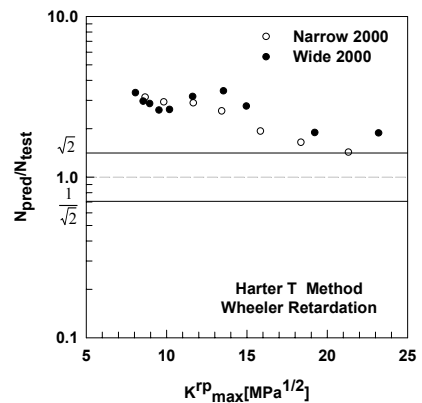
(a)



(b)



(c)



(d)

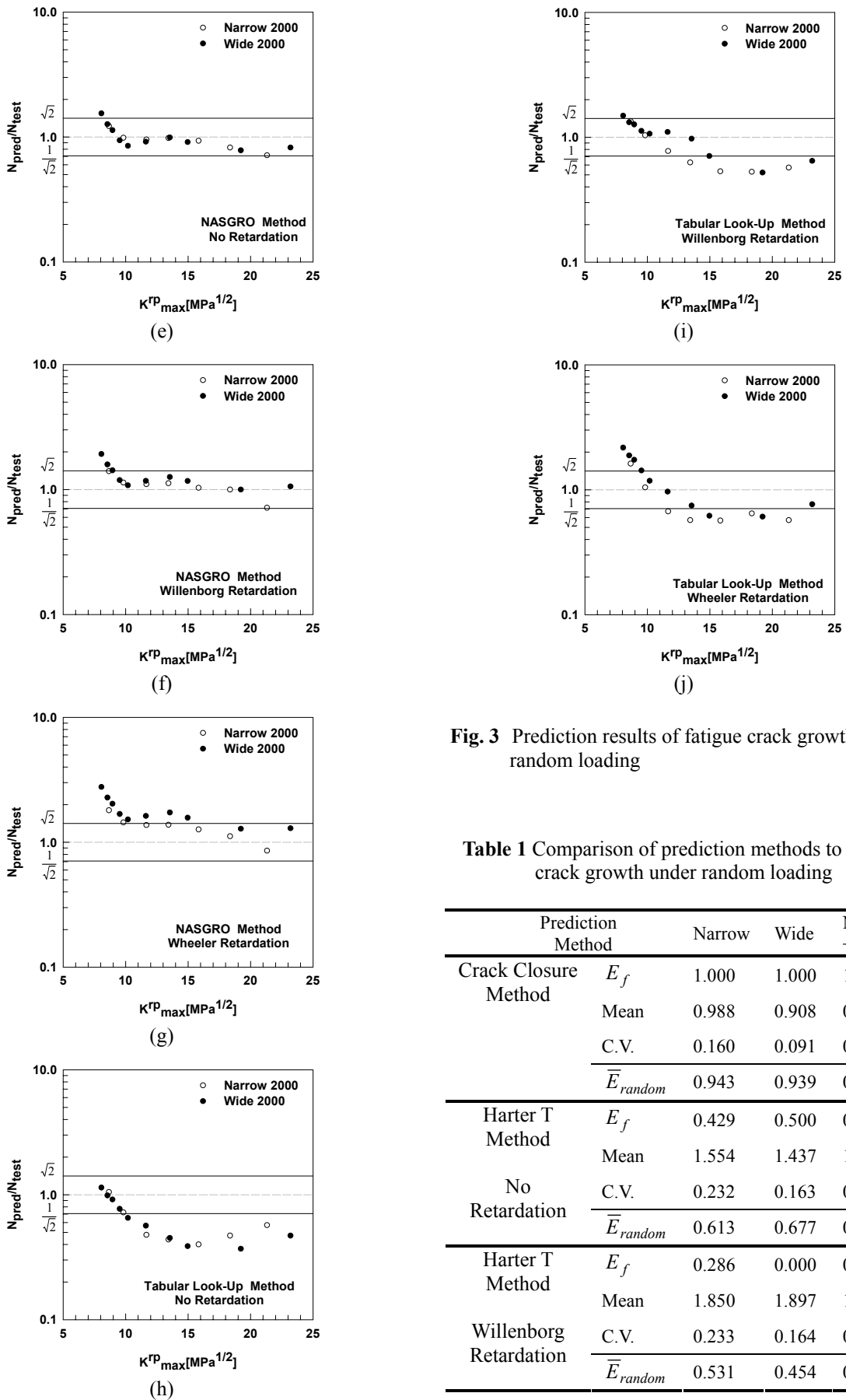


Fig. 3 Prediction results of fatigue crack growth under random loading

Table 1 Comparison of prediction methods to predict crack growth under random loading

Prediction Method		Narrow	Wide	Narrow +Wide
Crack Closure Method	E_f	1.000	1.000	1.000
	Mean	0.988	0.908	0.941
	C.V.	0.160	0.091	0.130
	\bar{E}_{random}	0.943	0.939	0.937
Harter T Method	E_f	0.429	0.500	0.471
	Mean	1.554	1.437	1.485
	C.V.	0.232	0.163	0.194
	\bar{E}_{random}	0.613	0.677	0.650
No Retardation	E_f	0.286	0.000	0.118
	Mean	1.850	1.897	1.878
	C.V.	0.233	0.164	0.188
	\bar{E}_{random}	0.531	0.454	0.487

Harter T Method	E_f	0.000	0.000	0.000
	Mean	2.367	2.759	2.597
Wheeler Retardation	C.V.	0.291	0.195	0.237
	\bar{E}_{random}	0.377	0.389	0.383
NASGRO Method	E_f	1.000	0.900	0.941
	Mean	0.945	1.017	0.987
No Retardation	C.V.	0.166	0.233	0.208
	\bar{E}_{random}	0.926	0.883	0.907
NASGRO Method	E_f	1.000	0.700	0.824
	Mean	1.074	1.287	1.199
Willenborg Retardation	C.V.	0.191	0.221	0.225
	\bar{E}_{random}	0.914	0.752	0.811
NASGRO Method	E_f	0.714	0.200	0.412
	Mean	1.320	1.780	1.590
Wheeler Retardation	C.V.	0.221	0.260	0.286
	\bar{E}_{random}	0.750	0.501	0.585
Tabular Look-Up Method	E_f	0.286	0.400	0.353
	Mean	0.590	0.671	0.638
	C.V.	0.389	0.404	0.393
No Retardation	\bar{E}_{random}	0.496	0.556	0.533
	Tabular Look-Up Method	E_f	0.429	0.700
Mean		0.774	1.022	0.920
C.V.		0.399	0.305	0.355
Willenborg Retardation	\bar{E}_{random}	0.601	0.791	0.717
	Tabular Look-Up Method	E_f	0.143	0.400
Mean		0.813	1.210	1.047
C.V.		0.483	0.468	0.505
Wheeler Retardation	\bar{E}_{random}	0.491	0.586	0.582

E_f 는 예측방법의 정확도를 평가하기 위해서 자주 사용되는 평가기준으로, 1 에 근접하면 예측결과는 좋은 것이다. 다른 두 항목에 대해서도 유사한 방법으로 평가하기 위해서 다음의 평가기준이 도입되었다.

$$E_{mean} = \begin{cases} mean & \text{for } mean \leq 1 \\ \frac{1}{mean} & \text{for } mean > 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$E_{C.V.} = 1 - C.V. \quad (16)$$

$$\bar{E}_{random} = \frac{E_f + E_{mesn} + E_{C.V.}}{3} \quad (17)$$

Table 1 에서 알 수 있듯이, \bar{E}_{random} 을 평가기준으로 하면, 랜덤하중 파형의 종류, 즉 광대역 및 협대역 파형에 관계없이 균열단힘현상을 고려한 균열진전예측 방법이 가장 좋은 결과를 주고 있으며, 균열지연을 고려하지 않은 NASGRO 의 예측 방법이 다음으로 좋은 결과를 주고있다. Harter T 방법의 경우 균열진전수명을 과대평가하고 있으며, 특히 Wheeler 지연효과를 고려할 경우 과대평가 정도가 매우 크고 평가기준 \bar{E}_{random} 값도 10 개의 방법 중에서 가장 작다.

7. 결 론

AI 2024-T351 재료에 대하여 블럭당 사이클 수가 2000 인 협대역 및 광대역 랜덤하중으로 균열진전 시험을 해서 얻은 결과를 이용하여, 랜덤하중 하에서 균열진전예측 방법을 정량적으로 비교 평가하였다. 균열단힘현상을 이용한 균열진전예측방법이 가장 좋은 평가결과를 주었다. Harter T 방법과 NASGRO 방법의 경우에는 랜덤하중하의 균열지연효과를 고려할 경우 수명을 과대평가하고 평가기준 \bar{E}_{random} 값도 지연효과를 고려하지 않은 경우보다 작았다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어사업인 “스마트무인기 기술개발 사업”의 일환으로 수행된 결과이다.

참고문헌

- (1) Paris and Erdogan, 1963, “A Critical Analysis of Crack Propagation laws,” Trans. ASME, J Basic Engng, Vol. 85, pp. 528-534.
- (2) Harter, J.A., 2002, AFGROW User Guide and Technical Manual.
- (3) Johson, L.B., 2000, NASGRO Reference Manual, Ver. 3.0.
- (4) Willenborg, J., Engle, R.M. and Wood H.A., 1971, A Crack Growth Model Using an Effect Stress Concept, AFFDL-TM-71-1-FBR.
- (5) Wheeler, O.E., 1972, “Spectrum Load and Crack Growth,” Trans. ASME, J. Basic Engng, Vol. 94, pp. 181-186.
- (6) Elber, W., 1971, “The Significant of Fatigue Crack Closure,” ASTM STP 486, pp.236-250.
- (7) Kim, C.Y. and Song, J.H., 1994, “Fatigue Crack Closure and Growth Behavior under Random Loading,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 49, pp.105-120.