

# 짧은 피로균열의 랜덤하중하의 균열단합 및 진전거동 (Part II : 진전거동 및 진전수명예측)

이신영\* · 송지호\*\*

## Crack Closure and Growth Behavior of Short Fatigue Cracks under Random Loading (Part II : Growth Behavior and Growth Life Prediction)

Shin-Young Lee · Ji-Ho Song

**Key Words :** fatigue crack growth(피로균열진전), short cracks(짧은균열), random loading(랜덤하중), growth life prediction(진전수명예측), crack opening(균열열림)

### Abstract

Crack closure and growth behavior of physically short fatigue cracks under random loading are investigated by performing narrow- and wide-band random loading tests for various stress ratios. The importance of the crack closure phenomenon is examined by predicting the growth lives of short cracks using obtained crack opening behavior. Artificially prepared two-dimensional, short through-thickness cracks are used. The crack opening load of short cracks is much lower under random loading than under constant-amplitude loading corresponding to the largest load cycle in a random load history. This result indicates that the largest load cycle in a random load history has an effect to enhance crack opening of short cracks. Most of the life prediction ratios are within the factor of 2 scatter band except several data at very short crack sizes, indicating that crack growth predictions based on the measured crack opening data are excellent. From the results obtained in this study, it can be concluded that crack closure is the primary factor governing fatigue crack growth of short cracks under random loading as well as under constant-amplitude loading.

#### 기호설명

a	균열길이
a <sub>0</sub>	초기 균열길이
da/dN	균열진전속도
K	응력강도계수
K <sub>op</sub>	균열열림응력강도계수
K <sub>max</sub>	최대응력강도계수
K <sub>min</sub>	최소응력강도계수
ΔK	응력강도계수폭
ΔK <sub>eff</sub>	유효응력강도계수폭
n <sub>n</sub> , N <sub>B</sub>	랜덤하중파형의 단위블록당 사이클수
R	응력비 (=K <sub>min</sub> /K <sub>max</sub> )
U	일정진폭하중하의 균열열림비
U'	랜덤하중하의 균열열림비

#### 1. 서론

널리 알려져 있는 바와 같이 미소피로균열은 동일한 응력강도계수폭에 대하여 긴균열보다 빠르게 진전하며, 긴균열의 하한계응력강도계수폭 이하에서도 진전하는 특성을 가지고 있다. 미소피로균열의 진전거동에 관한 연구는 Pearson[1] 이래 많은 연구자들에 의하여 진행되어, 현재는 미소피로균열에 관한 정의를 비롯하여 중요한 기본적인 특성이 많이 밝혀져 있는 상태이며, 긴균열은 물론 미소피로균열의 경우에도 균열단합현상이 균열진전을 지배하는 가장 중요한 현상으로 받아들여지고 있다. 특히 손상허용설계개념을 실제 기기나 구조물의 설계에 적용하는 최근의 동향에 비추어 볼 때, 미소피로균열의 진전거동을 평가하는 것은 필수적이며, 특히 미소균열의 진전특이성을 고려하여 매우 낮은 하중에서의 평가가 필요하다.

한편 실제 기기나 구조물에 작용하는 하중은 랜

\* 삼성전자, 정회원

\*\* 한국과학기술원, 정회원

덤하중이다. 따라서 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 랜덤하중하에서, 특히 미소균열의 진전 거동을 평가해야 한다. 현재까지의 미소균열에 관한 대부분의 연구는 일정진폭하중에 대한 것이며, 랜덤하중하의 미소균열의 닫힘거동을 측정하고 균열진전을 검토한 예로서, Vormwald-Seeger 의 논문 [2]이 있으나, 균열열림점의 결정등이 합리적이지 않으며, 닫힘거동도 상세히 기술되고 있지 않다.

본 논문의 선행연구로서 Part I[3]에서 일정진폭 하중 및 랜덤하중하에서 짧은 피로균열의 균열닫힘 거동 및 실험방법에 대해 상세하게 언급한 바 있다. 앞서 언급한 바와 같이 랜덤하중하에서의 균열열림거동은 일정진폭하중하에서와 매우 다르므로, 일정진폭하중하에서 얻은 결과를 그대로 이용하여 랜덤하중하의 거동을 예측하는 것은 불가능하다.

본 연구에서는 랜덤하중하의 미소균열, 특히 물리적 미소균열의 진전거동에 대해 상세하게 검토하였다. 또한 Part I 에서 얻은 균열열림거동을 이용하여 랜덤하중하에서 미소균열의 진전수명을 예측함으로써, 예측방법의 타당성과 균열열림거동의 중요성을 확인하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 알루미늄합금 2024-T351 이며, 항복강도 및 인장강도는 각각 379MPa 및 480MPa 이다.

### 2.2 시험편

시험편은 면내굽힘형이며, 2 차원 짧은균열을 인공적으로 작성하여 사용하였다[4]. 먼저 Fig. 1a 에 나타낸 것처럼 웨브노치와 측면홈을 가공한 긴 균열 시험편에 하중을 가하여 관통 긴균열을 진전시킨다. 이 예비균열에서 불필요한 부분을 제거하여 Fig. 1b 와 같은 2 차원 짧은균열을 작성하였으며 초기균열길이는 0.18mm 에서 0.63mm 정도이다. 시험편의 채취방향은 L-T 방향이다.

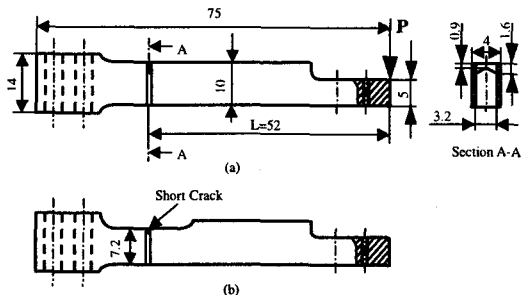


Fig. 1 Specimen configurations of (a) prior to precracking and (b) precracked short crack specimen.

응력강도계수는 삼점굽힘 시험편에 대한 Srawley 의 제안식[5]을 사용하였다. 또한 측면홈의 영향을 고려하기 위해 시험편의 전체두께 대신에 유효두께를 평가[6]하여 사용하였다.

부하응력은 가능한 한 낮게 하였으며, 랜덤하중의 경우에도 그 최대공칭응력을  $\sigma_{max}/\sigma_y=0.32(\sigma_y$  는 0.2% 내력) 정도로 하여, 선형탄성적인, 물리적 짧은균열(physically short, linear elastic crack)의 닫힘 및 진전거동을 검토할 수 있도록 하였다.

### 2.3 실험

실험 주파수는 20Hz 로 하고, 시험기는 100N 용량의 소형동전형 굽힘피로시험기[7]를 사용하였다.

실험에는 컴퓨터 시뮬레이션으로 작성한 유사랜덤파형[8]을 사용하였으며, Fig. 2 와 같은 협대역 및 광대역의 두가지 주파수 특성을 갖는다. 단위블록당 사이클수  $n_b$  는 500 과 1000 으로 하였다.

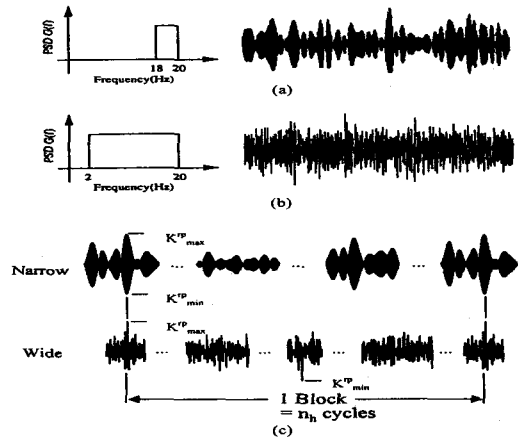


Fig. 2 Random loading histories of (a) narrow band, (b) wide band and (c) their related parameters.

랜덤하중시험은 각 랜덤하중의 단위블록을 반복 부하하여 수행하였다. 랜덤하중의 응력비는 단위블록에서의 최대하중, 즉 최대레인지페어 하중사이클  $\Delta K^p_{max} = K^p_{max} - K^p_{min}$  에 대한 응력비  $R(\Delta K^p_{max})$  를 사용하였으며,  $R(\Delta K^p_{max})=0.3, 0.1, 0, -0.5$  및  $-1$  에 대하여 실험을 수행하였다.

예비균열 작성시의 하중이력의 영향을 제거하기 위하여, 진전실험 시작시의 유효응력강도계수폭을 예비균열작성 종료시보다 크게 하였다[9].

균열길이와 균열닫힘은 배면스트레인게이지를 사용한 제하탄성 컴플라이언스법[10]을 이용하여, 실험의 중단 없이, 동시에 연속적으로 측정하였다.

시험편 및 실험에 관해서는 이미 Part I 에서 상세하게 나타낸 바 있다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 짧은균열의 랜덤하중하의 진전거동

Fig. 3 은 랜덤하중하에서 얻은 균열진전곡선의 예이다. 하중조건이 같은 경우에 단위랜덤파형의 길이  $n_h$  가 500 및 1000 일 때의 결과로서 (a)는 협대역 파형, (b)는 광대역 파형의 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이, 협대역 파형의 경우 단위랜덤파형 길이가 1000 사이클인 경우가 500 사이클인 경우보다 균열진전이 현저하게 빠르는데 비해, 광대역인 경우는 랜덤파형길이가 500 인 경우와 1000 인 경우의 균열진전거동이 거의 같다. 이로부터 파형종류에 따라 파형길이가 균열진전에 미치는 영향이 다르다는 것을 알 수가 있다. 이러한 결과는 랜덤블록내의 레인지폭어 사이클 분포의 차이에 의해서 생긴다. 즉, 본 연구의 범위 내에서는 블록길이가 증가함에 따라 균열진전에 영향을 미칠 만큼 큰 하중사이클이 광대역랜덤보다는 협대역랜덤의 경우에 더 많이 존재한다.

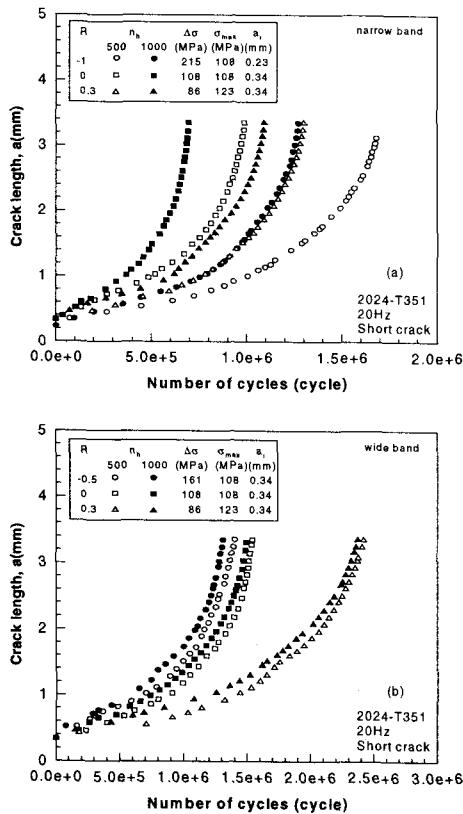


Fig. 3 Growth curves of short fatigue cracks under narrow and wide band random loading.

Fig. 4 는 하중조건이 같고 또한 단위랜덤파형 길이가 같은 경우의 파형종류에 따른 균열진전 결과로서, (a)는 파형길이  $n_h$  가 500 인 경우, (b)는  $n_h$  가 1000 인 경우이다.

파형길이에 관계없이 협대역 파형의 경우가 광대역인 경우에 비해 균열진전이 빠르다. 균열진전 거동에 미치는 랜덤파형 종류의 이와 같은 영향은 다음과 같은 이유에 기인한다. Part I 에서 이미 나타낸 바와 같이, 균열진전의 초기단계에서 협대역 랜덤하중하의 균열열림비는 광대역랜덤하중하에서 보다 약간 높다. 다시 말하면, 협대역랜덤하중의 경우는 광대역랜덤하중에 비하여 이웃하는 하중사이클의 변동폭이 작아 균열진전 지연효과를 적게 받기 때문이다.

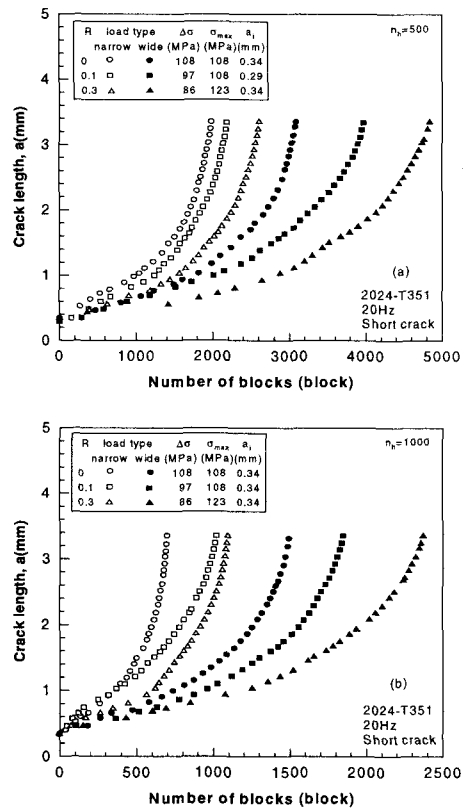


Fig. 4 Growth curves of short fatigue cracks for  $n_h=500$  and 1000.

#### 3.2 짧은균열의 랜덤하중하의 열림거동

랜덤하중하에서 짧은균열의 열림거동 및 파형특성의 영향에 대해서는 이미 Part I에서 자세하게 언급하였으므로, 여기에서는 균열진전 수명의 예

측에 직접 사용할  $U^-(\Delta K_{max}^p)_{eff}$  관계(Fig. 5)에 대해서만 간단히 설명하기로 한다.

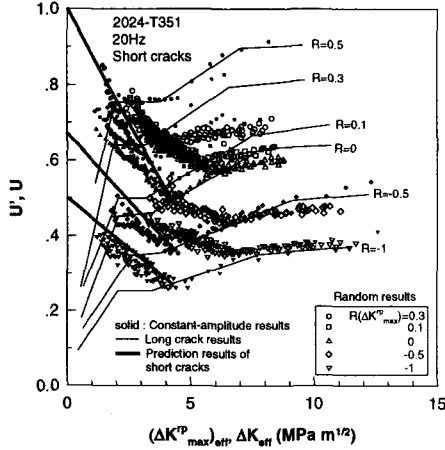


Fig. 5 Comparison of crack opening ratios of short cracks between random and constant-amplitude loading.

그림에서 파형의 종류 및 블록길이에 관계없이 응력비가 동일한 경우는 같은 기호로 나타내었다. 짧은균열의 일정진폭 시험결과를 작은 검은기호로, 긴균열의 일정진폭시험결과를 가는실선으로 함께 나타내었으며, 굵은 실선은 일정진폭시험결과와 상한선이다.

그림에서 알 수 있듯이 랜덤하중하에서 짧은균열 열림비는 일정진폭하중하에서보다 훨씬 높으며, 균열진전에 따른 변화경향도 일정진폭하중의 경우와는 매우 다르다. 또한  $U^+$ 이 최소치가 되는 지점은 일정진폭하중하에서는 긴균열에 해당하는 영역이다. 따라서 랜덤하중하에서는 짧은균열의 범위가 일정진폭하중의 경우보다 더 넓음을 알 수 있다.

이상으로부터 랜덤하중하의 짧은균열의 진전수명을 일정진폭하중하의 열림거동을 이용하여 예측하는 것은 불가능함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험에서 얻은 랜덤하중하의 짧은균열의 열림거동을 진전수명 예측에 직접 이용하였다.

### 3.3 짧은균열의 랜덤하중하의 진전수명 예측

랜덤하중하의 피로균열진전은 균열단합을 고려한 유효응력강도계수폭  $\Delta K_{eff}$  를 이용하여 다음과 같은 균열진전식에 의해 평가할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad (3.1)$$

여기서  $C$  와  $m$  은 일정진폭하중시험으로부터 얻어지는 재료상수이며, 본 연구에서는 일정진폭하중시험에서 얻은  $da/dN$  과  $\Delta K_{eff}$  관계를 3 개의 직

선구간으로 나누어 평균값으로 구하여 사용하기로 한다.

진전예측을 위해 먼저 각 랜덤하중파형에 대해 ASTM E1049 의 “Simplified rainflow counting for repeating histories”[11]를 사용하여 파형을 계수하고, 각 하중레인지페어에 대해 측정된 균열열림점을 이용하여 유효응력강도계수폭  $\Delta K_{eff,i}$  를 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta K_{eff,i} = \begin{cases} K_{max,i} - K_{op,i} & \text{for } K_{op,i} \geq K_{min,i} \\ K_{max,i} - K_{min,i} & \text{for } K_{op,i} < K_{min,i} \end{cases} \quad (3.2)$$

여기서  $K_{op,i}$  는 시험에서 측정된  $i$  번째 하중사이클에 대한 균열열림응력강도계수이다. 이 값을 이용하여  $i$  번째 하중사이클에 의한 균열진전량  $\Delta a_i$  를 식(3.1)로부터 구하면

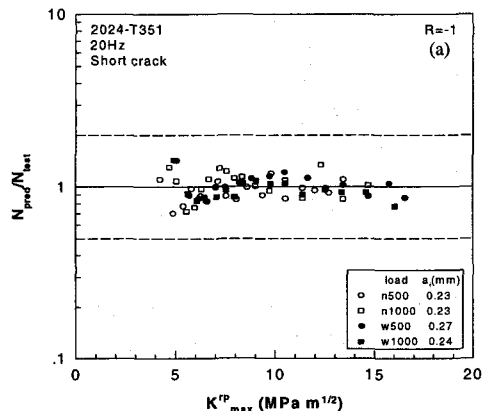
$$\Delta a_i = C(\Delta K_{eff,i})^m \quad (3.3)$$

와 같다.  $N$  사이클이 지난 후의 균열길이는 다음식에 의하여 구한다.

$$a_N = a_0 + \Delta a_{total} = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \quad (3.4)$$

위 식에 의하여 일정한 균열길이  $\Delta a_{total}$  만큼(약 0.1-0.2mm) 진전하는데 필요한 사이클수  $N_{pred}$  를 계산하고, 이 결과를 시험에서 측정된 사이클수  $N_{test}$  와 비교하여 균열진전 예측비를 구하였으며, 이 결과를  $K_{max}^p$  에 대하여 Fig. 6 에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 것처럼 랜덤하중의 형태나 블록의 길이에 따라서는 두드러진 차이를 나타내지 않는다. 각 응력비에 대한 예측비의 범위는 응력비 -1 인 경우 0.70~1.43, -0.5 인 경우 0.58~2.42, 0 인 경우 0.64~2.18, 0.1 인 경우 0.64~3.24 이며 0.3 인 경우는 0.59~1.58 이다. 균열진전의 경우 factor 2 를 기준으로 예측의 타당성을 평가하는 일반적인 기준을 고려해 볼 때 대체적으로는 합리적인 예측이 가능함을 알 수 있으며, 이처럼 측정된 균열열림거동을 바탕으로 하는 균열진전 예측방법이 타당함을 알 수 있다.



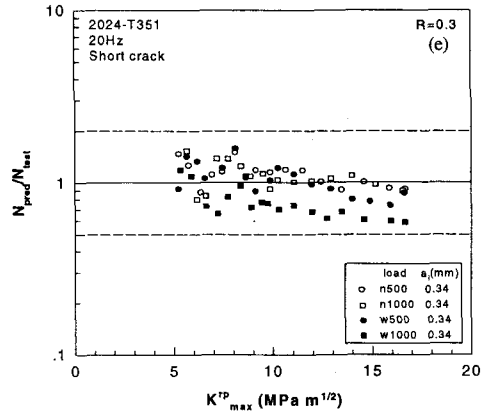
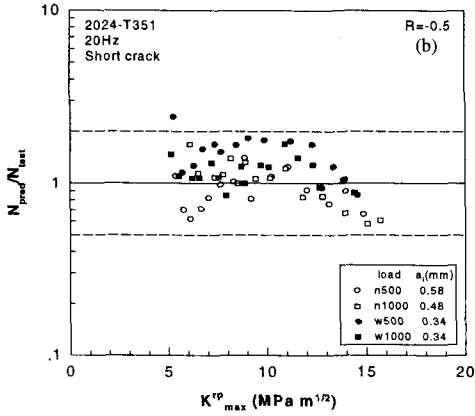


Fig. 6 Crack growth predictions based on the measured crack opening data under random loading.

위에 나타난 구간별 예측결과를 바탕으로 하여 시험 종료시의 균열길이까지 누적한 하중블록 수를 시험에서 측정한 블록 수와 비교하여 나타내면 Fig. 7 과 같다. 대체적으로 보아 매우 양호한 예측비를 나타내고 있으며 예측비의 범위는 약 0.84 ~ 1.54 정도이다.

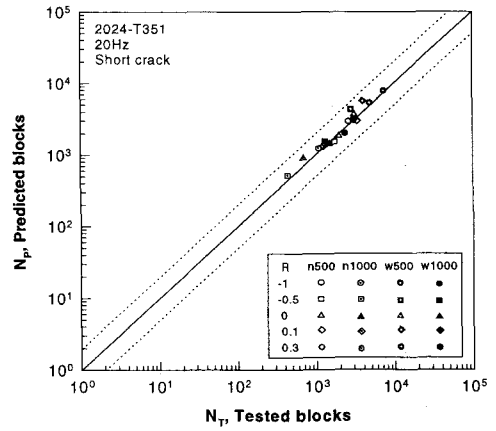
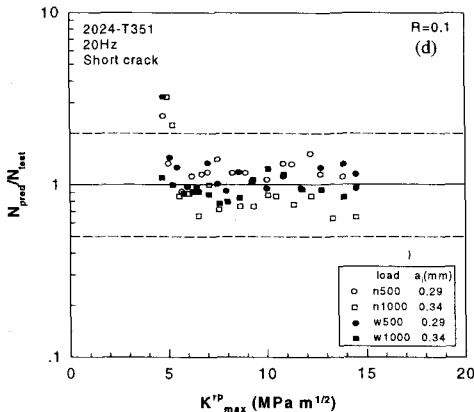
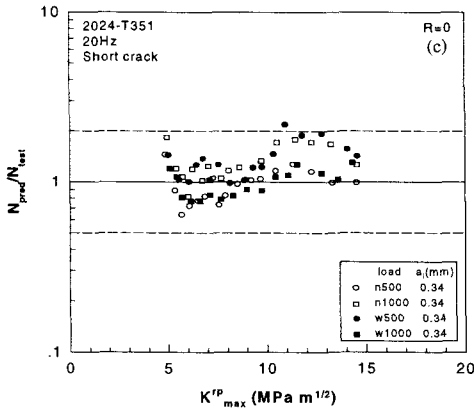


Fig. 7 Comparisons of tested and predicted random blocks under various random loadings.

이상의 결과로부터 일정진폭하중하에서 뿐 아니라 랜덤하중하에서도 짧은균열의 균열진전을 지배하는 일차적인 파라미터는 균열담합현상이라는 것을 알 수 있다. 따라서 랜덤하중하의 피로수명을 정확히 예측하기 위해서는 균열열림거동의 파악이 필수적이다. 그러나 현재까지의 연구결과로 미루어 볼 때 일정진폭하중에 대한 균열열림거동을 이

용하여 랜덤하중하의 균열진전수명을 예측하는 것은 매우 어려운 일이며, 따라서 보다 많은 시험과 체계적인 검토과정을 통한 상호 연관관계의 구축이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 랜덤하중하에서 짧은 피로균열의 균열닫힘 및 진전거동을 검토하고, 얻어진 균열열림 거동을 이용하여 랜덤하중하에서 짧은 균열의 진전수명을 예측함으로써, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 랜덤파형의 종류에 따라 짧은 균열의 진전에 미치는 파형길이의 영향이 다르게 나타난다. 이는 랜덤블록내의 레인지페어 사이클 분포의 차이에 의해서 생긴다.
- 2) 파형길이에 관계없이 짧은 피로균열은 광대역 랜덤하중하에서보다 협대역하중하에서 빠르게 진전한다. 이는 균열진전의 초기단계에서 협대역랜덤하중하의 균열열림비가 광대역랜덤하중하에서보다 약간 높은 데 기인하며, 협대역랜덤하중하의 경우가 광대역랜덤하중에 비하여 이웃하는 하중사이의 변동폭이 작아 균열진전 지연 효과를 적게 받기 때문이다.
- 3) 실험에서 측정된 균열열림거동을 바탕으로 랜덤하중하의 짧은 균열의 진전수명을 평가하였다. 랜덤하중의 형태나 블록의 길이에 따라 예측비의 두드러진 차이는 나타나지 않았으며, 대체로 factor 2 이내의 비교적 양호한 결과를 얻었다.
- 4) 수명예측을 통하여 랜덤하중하에서도 짧은 피로균열의 진전거동은 균열닫힘현상에 의해 지배됨을 확인하였으며, 실험에서 측정된 균열열림거동을 바탕으로 본 연구에서 사용한 균열진전 예측방법이 타당함을 알 수 있다.
- 5) 일정진폭하중 및 랜덤하중하에서 짧은 피로균열의 닫힘 및 진전거동은 서로 상당히 다르므로 일정진폭하중에 대한 균열열림거동을 이용하여 랜덤하중하의 균열진전수명을 예측하는 것은 매우 어려운 일이며, 따라서 보다 많은 시험과 체계적인 검토과정을 통한 상호 연관관계의 구축이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] Pearson, S., Initiation of fatigue cracks in commercial aluminum alloys and subsequent propagation of very short cracks. *Engng Fracture Mech.*, 1975, 7, 235-247.
- [2] Vormwald, M. and Seeger, T., The consequences of short crack closure on fatigue crack growth under variable amplitude loading. *Fatigue Fracture Engng*

*Mater. Struct.*, 1991, 14, 205-225.

- [3] Lee, S.Y. and Song, J.H., Crack closure and growth behavior of short fatigue cracks under random loading (Part I: Details of crack closure behavior). In *Proc. KSME 2000 Spring Annual Meeting A*, 2000, pp. 79-84.
- [4] Pang, C.M. and Song, J.H., Crack growth and closure behavior of short fatigue cracks. *Engng Fracture Mech.*, 1995, 47, 327-343.
- [5] Srawley, J.E., Wide range stress intensity factor expressions for ASTM E399 standard fracture toughness specimens. *Int. J. Fracture*, 1976, 12, 475-476.
- [6] Kim, J. and Song, J., Investigation of plane strain fatigue crack growth behavior by using side-grooved specimens. *Trans. KSME*, 1992, Korea 16, 63-69.
- [7] Song, J.H., Shin, Y.S. and Im, Y.S., Construction of small-sized, electro-dynamic type bending fatigue testing machine. *Trans. KSME*, 1989, Korea 13, 199-203.
- [8] Kim, C.Y. and Song, J.H., Fatigue crack closure and growth behavior under random loading. *Engng Fracture Mech.*, 1994, 49, 105-120.
- [9] Jono, M., Song, J. and Itoh, H., Fatigue crack growth and closure of a high tensile strength steel containing short precracks. *Trans. JSME*, 1985, 51, 2554-2559.
- [10] Kikukawa, M., Jono, M. and Tanaka, K., Fatigue crack closure behavior at low stress intensity levels. In *Proc. ICM 2*, 1976, pp. 254-277.
- [11] ASTM, ASTM E1049-85: Standard practice for cycle counting in fatigue analysis. 1995, 03.01, pp. 726-734.