

# 짧은 피로균열의 랜덤하중하의 균열단합 및 진전거동

## (Part I: 균열단합 거동 상세)

이신영\* · 송지호\*\*

### Crack Closure and Growth Behavior of Short Fatigue Cracks under Random Loading (Part I: Details of Crack Closure Behavior)

Shin-Young Lee · Ji-Ho Song

**Key Words :** fatigue crack growth, short cracks, random loading, crack closure, crack opening

#### 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. Artificially prepared two-dimensional, short through-thickness cracks are used. The closure behavior of short cracks under random loading is discussed, comparing with that of short cracks under constant-amplitude loading and also that of long cracks under random loading. Irrespective of random loading spectrum or block length, 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, contrary to the behavior of long cracks that the crack opening load under random loading is nearly the same as or slightly higher than constant-amplitude results. This result indicates that the largest load cycle in a random load history has an effect to enhance crack opening of short cracks.

#### 기호설명

a	균열길이
$a_i$	초기 균열길이
da/dN	균열진전속도
K	응력강도계수
$K_{op}$	균열열림응력강도계수
$K_{max}$	최대응력강도계수
$K_{min}$	최소응력강도계수
$\Delta K$	응력강도계수폭
$\Delta K_{eff}$	유효응력강도계수폭
$\Delta K_{th}$	피로하한계 유효응력강도계수폭
$n_h, N_B$	랜덤하중파형의 단위블록당 사이클수
R	응력비 ( $=K_{min}/K_{max}$ )
U	일정진폭하중하의 균열열림비
U'	랜덤하중하의 균열열림비

#### 1. 서론

미소피로균열문제는 그 공학적 중요성 때문에 광범위한 연구가 이루어져 오고 있으며, 현재 미소피로균열에 관한 정의를 비롯하여 중요한 기본적인 특성도 많이 밝혀져 있는 상태이다[1].

균열단합은 미소피로균열진전에 있어서 매우 중요한 인자이다. 특히 물리적 미소균열의 경우는 단합현상을 고려한 유효응력강도계수폭으로 균열진전속도를 잘 평가할 수가 있다.

물리적 미소균열의 열림점은 균열진전 초기에는 매우 낮으며, 균열이 진전함에 따라 상승하여 결국 긴균열의 균열열림점과 일치하게 되며, 이에 대한 예측방법도 다수 제안되고 있다[2].

그러나 미소균열에 관한 연구의 대부분은 일정진폭하중에 대한 것이며, 근래 변동하중하의 미소균열 진전거동에 관해 관심이 높아지고는 있으나, 연구결과는 그다지 많지 않다.

랜덤하중하의 미소균열의 단합거동을 측정하고

\* 삼성전자, 정회원

\*\* 한국과학기술원, 정회원

균열진전을 검토한 예로는, 유일하게 Vormwald-Seeger의 논문[3]이 있으나, 균열열림점의 결정등이 합리적이지 않으며, 단합거동도 상세히 기술되고 있지 않다.

본 연구에서는 먼저, 랜덤하중하의 미소균열, 특히 물리적 미소균열의 균열단합 거동에 대해 상세하게 검토하였으며, 랜덤하중하의 미소균열의 진전거동 분석 및 예측방법에 대해서는 Part II에서 다루기로 한다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 알루미늄합금 2024-T351이며, 항복강도 및 인장강도는 각각 379MPa 및 480MPa이다.

### 2.2 시험편

시험편은 면내굽힘형이며, 2차원 짧은균열을 인공적으로 작성하여 사용하였다[2]. 먼저 Fig. 1a에 나타낸 것처럼 웨브노치와 측면홈을 가공한 긴균열 시험편에 하중을 가하여 관통 긴균열을 진전시킨다. 이 예비균열에서 불필요한 부분을 제거하여 Fig. 1b와 같은 2차원 짧은균열을 작성하였으며 초기균열길이는 0.18mm에서 0.63mm 정도이다. 시험편의 채취방향은 L-T 방향이다.

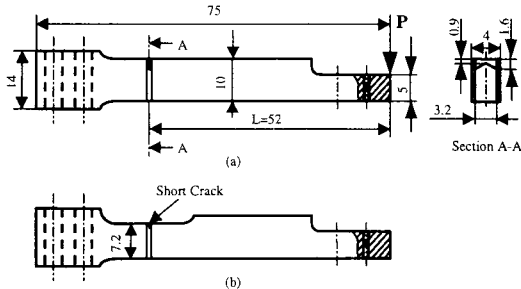


Fig. 1 Specimen configurations of (a) prior to precracking and (b) precracked short crack specimen.

응력강도계수는 삼점굽힘 시험편에 대한 Srawley의 제안식[4]을 사용하였다. 또한 측면홈의 영향을 고려하기 위해 시험편의 전체두께 대신에 유효두께를 평가[5]하여 사용하였다.

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

### 2.3 실험

실험 주파수는 20Hz로 하고, 시험기는 100N 용

량의 소형동전형 굽힘피로시험기[6]를 사용하였다. 일정진폭하중하의 긴균열 및 짧은균열 실험은 이전의 연구결과[2]를 이용하기로 하였으며, 보다 폭넓은 데이터를 얻기 위해, 응력비 0.3, 0.1, 0, -0.5 및 -1에 대해 추가시험을 수행하였다.

랜덤실험에는 컴퓨터 시뮬레이션으로 작성한 유사랜덤파형[7]을 사용하였으며, Fig. 2와 같은 협대역 및 광대역의 두가지 주파수 특성을 갖는다. 단위블록당 사이클수  $n_b$ 는 500과 1000으로 하였다.

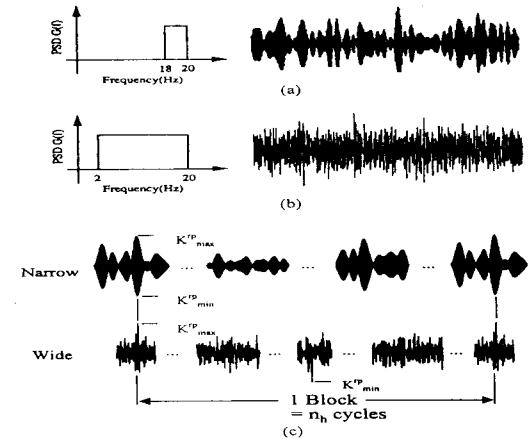


Fig. 2 Random loading histories of (a) narrow band, (b) wide band and (c) their related parameters.

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

예비균열 작성시의 하중이력의 영향을 제거하기 위하여, 진전실험 시작시의 유효응력강도계수폭을 예비균열작성 종료시보다 크게 하였다[8].

균열길이와 균열단합은 배먼스트레인지지를 사용한 제하탄성컴플라이언스법[9]을 이용하여, 실험의 중단 없이, 동시에 연속적으로 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 검토

### 3.1 짧은균열의 일정진폭하중하의 열림거동

Fig. 3은 여러 응력비에서 부하하중을 달리하여 얻어진 균열진전속도  $da/dN$ 을 응력강도계수폭  $\Delta K$ 에 대해 나타낸 것이다. 응력비의 영향을 비교적 크게 받으며, 부하응력의 크기에 따라 진전속도가 조금씩 달라지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 균열열림응력강도계수  $K_{op}$  및 열림비  $U$ 를 최대응력강도계수  $K_{max}$ 에 대해 나타낸 것이다.

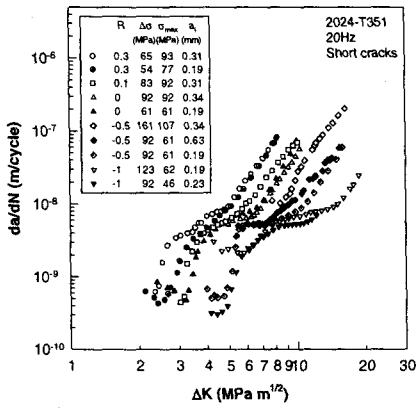


Fig. 3 Growth rates of short fatigue cracks as a function of  $\Delta K$  for constant amplitude loading.

전체적으로 균열이 짧을 때  $K_{op}$ 는 매우 낮으며, 균열이 진전함에 따라 비교적 급격히 증가한다. 진전초기에  $K_{op}$ 가 낮은 것은, 아직 소성역이 성장

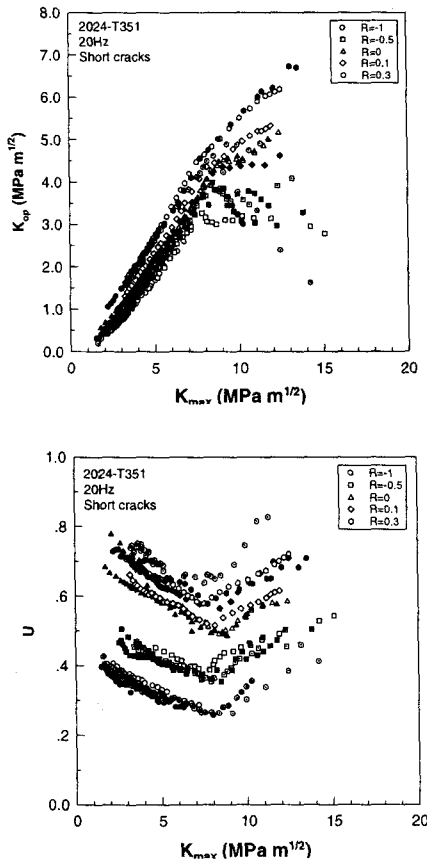


Fig. 4 Crack opening stress intensity factors and crack opening ratios as a function of  $K_{max}$ .

하지 않아 균열단합이 거의 일어나지 않으므로 인장하중이 부하되면 균열이 즉시 열리기 때문이다. 그러나 균열이 진전함에 따라 소성역도 함께 성장하여 균열단합이 발생하며, 이에 따라  $K_{op}$ 가 증가하는 것이다. 이후  $K_{max}=8MPa m^{1/2}$  정도에 도달하면 응력비가 음인 경우에는  $K_{op}$ 가 감소 또는 거의 일정하게 되며, 응력비가 양인 경우에는  $K_{op}$ 의 증가세가 둔화된다. U는  $K_{op}$ 에 대응하여 변화한다.

Figure 5는 짧은균열의 진전속도를 균열단합을 고려한 유효응력강도계수폭  $\Delta K_{eff}$ 로 정리한 것이다. 그림중의 두 실선은 이전의 연구[2]에서 얻어진 긴균열에 대한  $da/dN-\Delta K_{eff}$  결과의 흠어짐 폭을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험결과 는 응력비나 부하응력에 관계없이 비교적 좁은 띠 속에 모여며, 이로부터 짧은균열의 진전속도가 유효응력강도계수폭에 의해 잘 정리됨을 알 수 있다. 특히 진전속도가  $3 \times 10^{-9}$  m/cycle 이상인 영역에서는 짧은균열 및 긴균열의 결과가 매우 잘 일치한다. 한편  $3 \times 10^{-9}$  m/cycle 이하의 속도영역에서는 반대로 짧은균열의 진전속도가 긴균열의 진전속도보다 낮으며, 짧은균열의 균열진전 하한계 값 ( $\Delta K_{eff,th}$ )이 긴균열의 경우보다 크게 나타난다. 이는 짧은균열의 진전에 대한 저항이 긴균열의 경우보다 크게 작용하기 때문에 생기는 특이진전거동으로 보인다.

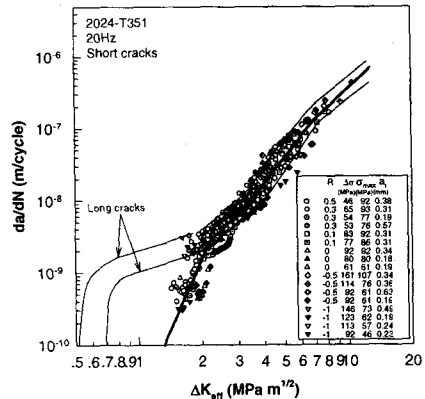


Fig. 5 Growth rates of short cracks as a function of  $\Delta K_{eff}$ .

Figure 6은 짧은균열의 열림비 U를 유효응력강도계수폭  $\Delta K_{eff}$ 에 대해 나타낸 것이다. 가는 실선은 각 응력비에 대한 긴균열 결과의 평균치이며, 실선은 이전 연구[2]에서 제안된 짧은균열에 대한  $U-\Delta K_{eff}$ 의 예측선이다. 모든 응력비에서 짧은균열에 대한 U값이 최소치가 되는 점에서 긴균열의 결과와 교차하고 있으며, 이후에는 긴균열의 결과와 거의 일치한다. 따라서 이 교차점을 경계로 하여 짧은균열과 긴균열을 구별할 수 있다.

응력비가  $R \geq 0$ 인 경우, 거의 하나의 띠를 이루

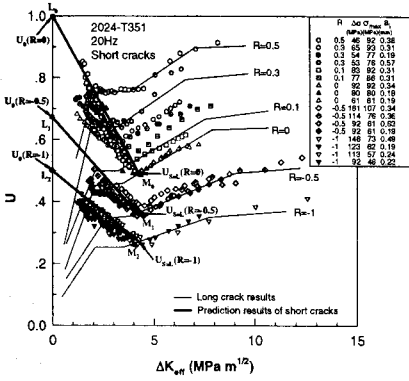


Fig. 6 Comparison of crack opening ratios between long and short fatigue cracks.

는 상태로 변화하나 흠어짐이 비교적 크며, R이 0보다 작은 경우는 대체로 예측선에 따라 감소한다. 한편  $\Delta K_{eff}$ 가 낮은 영역에서는 부하응력이 작으면 U값도 약간 작은 경향이 보인다.

Table 1은 각 시험조건에서 균열열림비의 최소치  $U_{min}$ , 교차점에서의  $\Delta K_{eff}$ 값 및 그 때의 균열길이, 즉 짧은균열거동을 나타내는 최대 균열길이를 구한 것이다.  $U_{min}$ 값은 하중비에 따라 증가하며 부하응력의 영향은 거의 받지 않는다. 한편  $U_{min}$ 에 대응하는  $\Delta K_{eff} U_{S=L}$ 값은 R=-0.5, -1의 경우는  $4.3 MPa m^{1/2}$  정도이며, R이 0보다 큰 경우는 R이 증가함에 따라 감소한다. 짧은균열 영역은 대체로 최대응력에 역비례하여  $\sigma_{max}$ 이 낮아지면 길어진다.

Table 1 Effective stress intensity factor range and crack length at which U of a short crack merges with long crack results.

Test conditions				$U_{S=L}(R, \Delta\sigma) = U_{min}(R, \Delta\sigma)$	$\Delta K_{eff} U_{S=L}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	a/U <sub>S=L</sub> (mm)
R	a(mm)	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)			
-1	0.49	146	73	0.29	4.3	2.69
	0.19	123	62	0.26	4.1	3.25
	0.24	113	57	0.26	4.4	3.43
	0.23	92	46	-	-	-
			mean	<b>0.27</b>	<b>4.3</b>	
-0.5	0.34	161	107	0.39	4.5	1.60
	0.36	114	76	0.36	4.0	2.49
	0.63	92	61	0.35	4.2	3.12
	0.19	92	61	0.35	4.5	3.39
			mean	<b>0.36</b>	<b>4.3</b>	
0	0.34	92	92	0.49	4.1	2.31
	0.18	80	80	0.49	4.0	2.47
	0.19	61	61	0.49	4.2	3.45
			mean	<b>0.49</b>	<b>4.1</b>	
0.1	0.31	83	92	0.52	3.8	2.23
	0.31	77	86	0.56	4.2	2.46
			mean	<b>0.54</b>	<b>4.0</b>	
0.3	0.31	65	93	0.58	3.0	2.01
	0.19	54	77	0.58	3.2	2.59
	0.57	53	76	0.65	2.6	1.71
			mean	<b>0.60</b>	<b>2.9</b>	

표에서 알 수 있듯이, 부하응력이 비교적 큰 경우에도 1mm 이상까지 짧은균열거동이 나타나며, 최대응력이 작은 경우에는 3mm 이상 매우 긴 균열길이까지 짧은균열의 열림거동이 나타난다. 따라서 균열열림거동을 기준으로 긴균열과 짧은균열을 구분할 때에는 균열길이와 함께 부하조건을 고려해야 한다.

### 3.2 짧은균열의 랜덤하중하의 열림거동

Figure 7은 랜덤파형 1블록내에서의 하중-감산변위곡선을 관찰한 예로서, R=-1,  $n_h=1000$ 인 광대역하중의 경우, a=0.8 및 1.8mm일 때의 결과이다. 작은 숫자는 블록내의 하중사이클 순서를 나타내며, 짧은 가로선은 측정된 균열열림점을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구의 범위내에서는 랜덤파형 단위블록내에서의 균열열림점은 일정하다. 이러한 거동은 통상적인 긴균열에 대한 Kikukawa-Jono등[10] 및 Kim-Song[7]의 결과와 거의 같다.

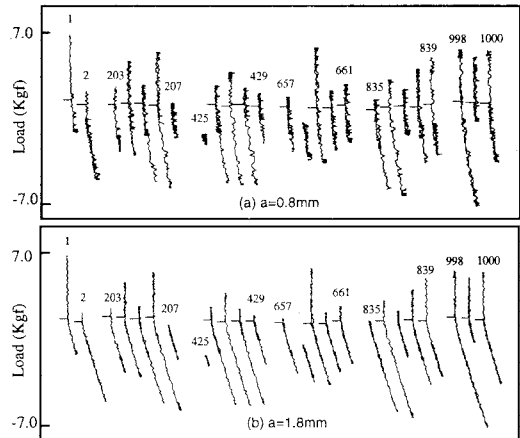


Fig. 7 Crack opening behavior under wide band random loading.

Figure 8은 R=-0.5인 경우, 랜덤하중하의  $K_{op}$  및 U를 최대응력강도계수  $K_{max}^p$ 에 대해 나타낸 것이다. 그림에는 일정진폭하중의 결과도 작은 검은 점으로 함께 나타내고 있으며, 여기서 U는 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$U = \frac{K_{max}^p - K_{op}}{K_{max}^p - K_{min}^p} \quad (3.1)$$

$K_{max}^p$ 가 작은 경우 랜덤하중하의  $K_{op}$ 값은 전체적으로 일정진폭하중에서보다 낮으며,  $K_{max}^p$ 에 따라 완만하게 증가하여 대체로  $K_{max}^p = 10 MPa m^{1/2}$  부근에서 일정진폭하중결과와 교차한다. 교차점 이전에는 랜덤하중하의  $K_{op}$ 가 일정진폭하중하의  $K_{op}$ 보다 낮고, 교차점 이후에는 약간 높거나 거의 같은 경향을 보인다.

U는 초기의 비교적 높은 값에서부터  $K_{max}^p$ 에 따

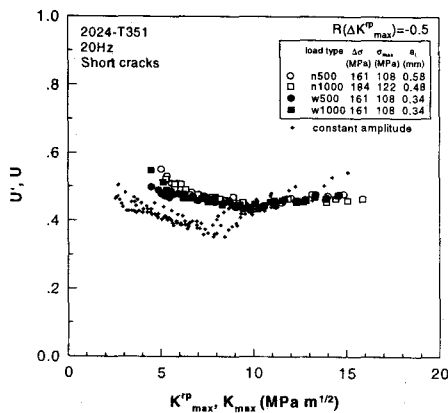
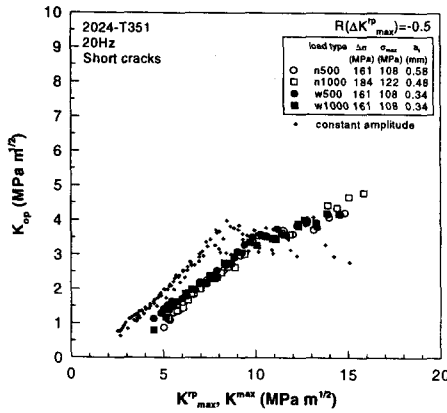


Fig. 8 Crack opening stress intensity factors and crack opening ratios under random loading.

라 완만하게 감소하여, 대체로  $K_{max}^{TP} = 10 \text{ MPa m}^{1/2}$  부근에서 최소치가 되며, 이후는 거의 일정하거나 매우 완만하게 증가한다.  $U'$ 이 최소치가 되는 부근에서 일정진폭시험결과와 교차하며, 이 교차점 이전에는 일정진폭하중하의  $U$ 보다 상당히 높고, 이후에는 반대로 낮아진다.

한편 그림에서 알 수 있듯이 본 연구의 범위내에서는 랜덤파형의 종류 및 길이의 영향은 무시할 정도로 작다. 따라서 랜덤하중하의 짧은균열의 열림점도 긴균열과 마찬가지로, 파형에 관계없이 블록내의 최대사이클에 의해 결정됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 균열이 비교적 짧을 때는 랜덤하중을 부하하면 일정진폭하중의 경우보다 균열열림이 더욱 잘 일어나고, 긴균열이 되면 반대로 일정진폭하중의 경우보다 균열닫힘이 더 많이 일어남을 알 수 있다.

Figure 9는  $U'$ 를 유효응력강도계수폭  $(\Delta K_{max}^{TP})_{eff}$ 에 대해 나타낸 것으로, 파형의 종류 및 블록길이에 관계없이 응력비가 동일한 경우는 같은 기호로 나타내었다. 짧은균열의 일정진폭 시험결과를 작은

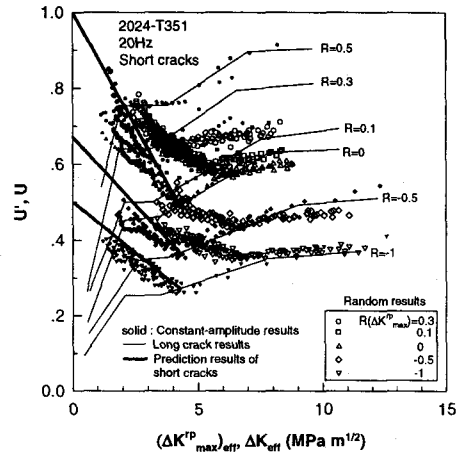


Fig. 9 Comparison of crack opening ratios of short cracks between random and constant-amplitude loading.

검은기호로, 긴균열의 일정진폭시험결과를 가는실선으로 함께 나타내었으며, 굵은 실선은 Fig. 6에서와 같은 일정진폭시험결과와 상한선이다.

Table 2 Effective stress intensity factor range and crack length corresponding to the minimum crack opening ratio.

Test conditions							
R	$a_i$	load type	$(\Delta \sigma_{rp})_{max}$ (MPa)	$(\sigma_{rp})_{max}$ (MPa)	$U'_{min}$	$(\Delta K_{max}^{TP})_{eff}$ at $U'_{min}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	a at $U'_{min}$ (mm)
( $\Delta K_{max}^{TP}$ )	(mm)						
-1	0.23	n500	215	107	0.35	6.6	2.22
	0.23	n1000	215	107	0.35	6.7	2.26
	0.27	w500	215	107	0.35	6.4	2.10
	0.24	w1000	218	109	0.35	6.5	2.07
				mean	<b>0.35</b>	<b>6.6</b>	
-0.5	0.58	n500	161	107	0.44	6.7	2.44
	0.48	n1000	184	122	0.43	6.6	2.02
	0.34	w500	161	107	0.43	6.4	2.33
	0.34	w1000	161	107	0.44	6.3	2.29
				mean	<b>0.44</b>	<b>6.5</b>	
0	0.34	n500	107	107	0.56	6.4	2.71
	0.34	n1000	107	107	0.57	6.6	2.75
	0.34	w500	107	107	0.57	6.5	2.71
	0.34	w1000	107	107	0.57	6.0	2.50
				mean	<b>0.57</b>	<b>6.4</b>	
0.1	0.29	n500	97	107	0.59	5.6	2.49
	0.34	n1000	97	107	0.60	5.4	2.40
	0.29	w500	97	107	0.59	5.3	2.38
	0.34	w1000	97	107	0.59	5.6	2.50
				mean	<b>0.59</b>	<b>5.5</b>	
0.3	0.34	n500	86	123	0.64	4.3	1.86
	0.34	n1000	86	123	0.63	4.2	1.86
	0.34	w500	86	123	0.64	4.3	1.86
	0.34	w1000	86	123	0.65	4.4	1.93
				mean	<b>0.64</b>	<b>4.3</b>	

응력비가 양인 경우의 결과 중,  $U'$ 가  $(\Delta K_{max}^{TP})_{eff}$ 에

대해 감소하는 부분의 결과들이 응력비에 관계없이 잘 일치하여 하나의 띠를 형성하는 양상은 일정진폭하중하에서와 거의 같다.

$U'$ 이  $(\Delta K_{max}^p)_{eff}$ 에 따라 감소하는 영역에서는  $U'$ 이 일정진폭하중하의  $U$ 보다 상당히 높으며, 교차점에서 최소치가 된 후 대체로 일정진폭하중하의  $U$ 보다 작아지는 경향이 있다. 각 시험조건에 대해  $U'$ 의 최소치  $U'_{min}$ , 그에 대응하는  $(\Delta K_{max}^p)_{eff}$ ,  $l'_{U'_{min}}$  값 및 균열길이를 Table 2에 나타내었다.

$U'_{min}$  및  $(\Delta K_{max}^p)_{eff}$ ,  $l'_{U'_{min}}$  값 모두 Table 1의 일정진폭하중하의 결과에 비해 높음을 알 수 있다. 특히  $(\Delta K_{max}^p)_{eff}$ ,  $l'_{U'_{min}}$  값은 응력비  $R(\Delta K_{max}^p)=0, -0.5, -1$ 에 대해 거의 같은  $6.5MPa\ m^{1/2}$  정도이다.

$U'$ 이 최소치가 되는 지점은 일정진폭하중하에서는 긴균열에 해당하는 영역이다. 따라서 균열진전에 따라 균열열림비가 감소하는 영역을 짧은균열의 영역이라고 하면, 랜덤하중하에서는 짧은균열의 범위가 일정진폭하중의 경우보다 더 넓다는 것을 의미한다. 한편 짧은균열 영역의 범위는 부하조건에 따른 일관된 관계는 보이지 않는다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 랜덤하중하에서 짧은균열 열림거동의 특징은, 열림비가 일정진폭하중하에서보다 훨씬 높으며, 균열진전에 따른 변화경향도 일정진폭하중의 경우와는 매우 다르다는 것이다. 따라서 랜덤하중하의 짧은균열의 열림거동을 일정진폭하중하의 결과를 이용하여 예측하는 것은 현재로서는 어려운 일이며, 보다 광범위한 조건에서의 시험과 체계적인 검토가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 일정진폭하중 및 랜덤하중하에서 짧은 피로균열의 균열닫힘 거동에 대하여 연구하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 짧은균열의 진전속도 및 균열열림비는 응력진폭에 의해서 영향을 받으며, 유효응력강도계수폭을 이용하면 짧은균열의 진전속도를 응력비나 응력진폭에 관계없이 잘 정리할 수 있다.
- 2) 랜덤하중 단위블록내에서의 짧은균열의 열림점은 본 연구의 범위내에서는 파형의 종류나 단위블록의 길이에 관계없이 거의 일정하다.
- 3) 랜덤하중하에서 짧은균열의 열림점은 최대응력사이클에 대응하는 일정진폭하중의 경우보다 낮으며, 긴균열의 열림거동과는 매우 다르다.
- 4) 본 연구의 범위내에서는 랜덤하중하의 짧은균열 열림거동은 랜덤하중파형의 종류나 블록길이의 변화에 따라서는 거의 영향을 받지 않으며, 블록내의 최대하중사이클에 의해 지배된다.
- 5) 랜덤하중하에서 짧은균열의 열림비는 유효응력강도계수폭이 증가함에 따라 초기의 높은 값에

서부터 선형적으로 감소하다가 일정진폭하중하에서의 결과와 교차한다.

- 6) 랜덤하중하에서 짧은균열의 열림거동은 일정진폭하중하에서의 긴균열 또는 짧은균열의 거동과는 상당히 다르므로, 일정진폭하중 시험결과로부터 랜덤하중하의 짧은균열의 열림거동을 예측하는 것은 현재로서는 매우 어려운 일이다.

#### 참고문헌

- [1] Ritchie, R.O. and Lankford (Ed.), J., *Small Fatigue Cracks*, Met. Soc. AIME, Warrendale, PA, 1986.
- [2] Pang, C.M. and Song, J.H., Crack growth and closure behavior of short fatigue cracks. *Engng Fracture Mech.*, 1995, **47**, 327-343.
- [3] 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.
- [4] Srawley, J.E., Wide range stress intensity factor expressions for ASTM E399 standard fracture toughness specimens. *Int. J. Fracture*, 1976, **12**, 475-476.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Kim, C.Y. and Song, J.H., Fatigue crack closure and growth behavior under random loading. *Engng Fracture Mech.*, 1994, **49**, 105-120.
- [8] 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.
- [9] Kikukawa, M., Jono, M. and Tanaka, K., Fatigue crack closure behavior at low stress intensity levels. In *Proc. ICM 2*, 1976, pp. 254-277.
- [10] Kikukawa, M., Jono, M., Kondo, Y. and Mikami, S., Fatigue crack closure and estimation method of crack propagation rate under stationary varying loading conditions including random loading (1st report, effects of mean load and study on wave counting method). *Trans. JSME*, 1982, **48**, 1496-1504.