

<論 文>

## 단일 과대하중에 의한 균열지연거동에 관한 연구

송삼홍\* · 권윤기\*\*

(1994년 8월 25일 접수)

### A Study on Crack Retardation Behavior by Single Overload

S. H. Song and Y. K. Kwon

**Key Words :** Crack Retardation(균열지연), Specimen Thickness(시험편두께), Overload Ratio(과대하중비), Plastic Zone Size(소성역크기), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Crack Tip Branching(균열가지), Crack Tip Branching Angle(균열가지각), Finite Element Analysis(유한요소해석), Striation(스트라이에이션)

#### Abstract

Single overload tests performed to examine the crack retardation behavior for the specimen thickness and overload ratios. Delayed crack length was tend to increase in small thickness and big overload ratio but was difference between delayed crack length and plastic zone size that expected in specimen thickness. So retardation behavior that estimated in plastic zone size, was not sufficient. Crack tip branching and striation distribution, secondary mechanisms that effected in retardation behavior, was examined by experiment and finite element analysis. Crack tip branching was affected by micro structure, and appeared the more complicatedly according to increasing damage by overload and decreasing crack driving force in base line stress level. And crack tip branching effected in retardation toward decreasing crack driving force in base line stress level. According to increasing the branching angle decreased crack driving force in the crack tip. And a characteristic of the fractography on retardation zone was that striation distribution did not appear due to decreased crack driving force.

#### 기 호 설 명

$\sigma_{1max}$ : 일정진폭시 최대응력	$da/dN$ : 균열전파속도
$\sigma_{2max}$ : 단일 과대하중시 최대응력	$J$ : $J$ 적분값
$\sigma_y$ : 항복강도	$J_\theta$ : 균열가지각 $\theta$ 에서의 $J$ 적분값
$R_{OL}$ : 과대하중비	
$a_o$ : 과대하중 작용점에서 균열길이	
$a_R$ : 지연된 균열길이	
$N_d$ : 지연된 하중반복수	
$\theta$ : 균열가지각	
$(r_y)_{OL}$ : 과대하중에 의한 소성역크기	

#### 1. 서 론

피로균열 성장과정중에 단일 과대하중을 받게되면, 균열의 전파속도가 급격히 감소하는 지연현상이 나타나게 된다.

현재까지의 연구에서 제시되고 있는 지연현상을 설명하는 기구로는 균열선단 무더짐,<sup>(1)</sup> 균열선단

\*정회원, 고려대학교 기계공학과

\*\*고려대학교 대학원

변형경화, <sup>(2)</sup> 균열선단 가지현상, <sup>(3-5)</sup> 균열선단의 압축잔류응력<sup>(6)</sup> 그리고 소성유기 균열단합<sup>(7,8)</sup> 등을 들 수 있다.

이와같은 지연현상에 영향을 미치는 기구들은 변동하중 하에서 나타나는 피로균열의 거동 특성을 이해하고 수명예측을 하는데 기초가 된다고 할 수 있다. 따라서 이와같은 기구들은 과대하중에 의해 나타나는 지연현상의 연구에 있어서 주된 관심사였고, 아직도 활발히 연구되어지고 있다.

그러나 지연현상에 대한 대부분의 연구가 실험 및 해석의 어려움으로 인해 다른 기구들은 배제되고, 균열선단 압축응력과 소성유기 균열단합현상 등만을 고려하여 이루어지고 있는 실정이다.

Wheeler와 Willenborg<sup>(9,10)</sup> 등은 과대하중에 의해 균열선단에 형성되는 압축 잔류응력장을 기초로 하여 지연현상을 설명하는 모델을 제시하였는데, 이 모델에서는 지연현상을 과대하중에 의해 균열선단에 형성되는 압축잔류 응력장이 균열의 성장을 저지한다는 것으로 설명하고 있다. 그러나 이 모델은 몇가지 문제점을 노출하고 있는데, 이 모델로는 두께가 얇은 시험편에서 일반적으로 관찰되는 지체 지연현상을 설명할 수 없다.<sup>(11)</sup> 또한 무엇보다도 대부분의 실험 결과에서 나타나듯이 지연현상은 과대하중에 의해 형성된 소성역을 넘어서 구간까지도 나타나게 되는데, 이와같은 현상은 과대하중에 의해 유기된 소성역에 의한 압축응력장을 기초로 하는 Wheeler와 Willenborg 모델이 전혀 설명할 수 없는 부분이다.<sup>(3,12)</sup>

또한 Elber<sup>(7,8)</sup> 등은 소성유기 균열단합현상을 기초로 지연현상을 설명하는 모델을 제시하고 있는데, 이 모델에서는 과대하중에 의해 균열선단에 큰 인장 소성변형이 형성되게 되고, 형성된 소성역은 균열이 이 영역을 통과하게 될때 균열 개구비를 감소시키는 역할을 하여 지연현상을 초래한다는 것이다.

이 모델은 Wheeler-Willenborg 모델에선 설명을 하지 못했던 지체지연현상은 설명하고 있지만, 이 모델을 이용한 지연현상의 설명에도 많은 문제점이 지적되고 있다. 7075-T6 알루미늄 합금재를 이용한 Chanani 등<sup>(13)</sup>의 결과에서 보면, 지연구간과 균열 개구비의 관계가 정량적으로 일치하지 않고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 이외에도 여러 연구결과에서 개구비의 변화가 끝난 구간에서도 지연현상이 계속 일어나고 있는 현상 등을 보고하고 있는데,<sup>(3,14-16)</sup>

이와같은 요인들은 소성유기 균열단합현상으로는 지연현상을 정량적으로 설명할 수 없음을 나타내주는 결과라고 할 수 있다.

따라서 균열지연현상을 설명하는데 있어서 과대응력의 작용에서 초래되는 소성변형에 의해 형성되는 압축 잔류응력장과 소성유기 균열단합현상이 중요한 인자임에는 틀림없지만, 그 자체만 가지고 과대하중 이후의 상황을 설명하는 데는 무리가 있고 그 외의 기구들에 대한 연구검토가 요망된다고 할 수 있다.

한편 Schijve와 Powell<sup>(4,5)</sup> 등은 지연현상을 설명하는 또 다른 기구로 균열선단 가지현상을 제시하고 있다. 즉 과대하중후 균열선단에 형성되는 균열 가지가 균열의 성장모드를 변화시켜 균열선단에서의 균열 진전력을 감소시키게 되고, 이와같은 균열 진전력의 감소가 지연현상에 영향을 미친다는 것이다.

그러나 이들에 대한 연구의 대부분이 정성적인 연구에만 치우쳐있고, 균열선단 가지현상이 실제적으로 지연현상에 얼마만큼의 영향을 미치는가에 대한 평가는 그리 많지 않다. 따라서 좀더 구체성을 갖는 정량적 연구가 요망된다고 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 변동하중에 의한 균열지연현상을 고찰하고 이에 영향을 미치는 기구들을 평가하기 위하여, 단일 과대하중을 변동하중 모델로 설정하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 시험편의 두께와 과대하중비를 변화시켜 지연현상을 살펴보았다. 또한 이의 실험결과를 통해 지연현상을 설명하는 기구로 균열선단 소성역의 역할을 검토해 보았다.

둘째, 지연현상을 설명하는 또 다른 기구로 균열선단 가지현상을 실험과 수치해석을 통해 고찰해 보았고 지연현상에 미치는 균열가지의 영향을 살펴 보았다.

셋째, 지연현상이 나타나는 구간에서의 파면특성을 관찰함으로써 지연구간에서의 피로균열의 거동특성을 고찰해보았다.

## 2. 실험 및 해석

본 연구에서 사용한 시험편은 SS41로 960°C에서 1시간 동안 normalizing 처리를 하였고, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다. 시험편의 형상은 같은 크기의 과대응력에서 다른

**Table 1** Chemical composition(wt%) of the testing material

Material	Composition				
	C	Si	Mn	P	S
SS41	0.16	0.18	0.66	0.029	0.042

**Table 2** Mechanical properties of the testing material

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Mean hardness (H <sub>vm</sub> )
280	432	36.97	55.05	162.44

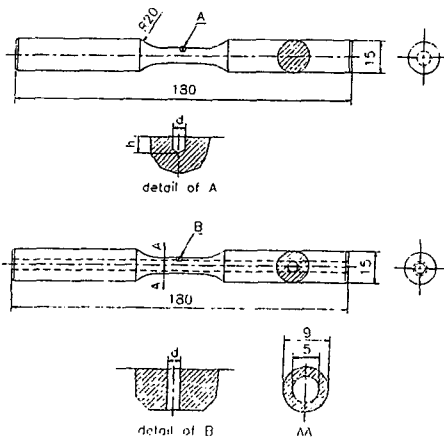
크기의 소성역을 형성하는 중실형과 중공형으로 가공하였으며, 그 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

변동하중의 모델은 단일 과대하중 모델을 사용했고, 단일 과대하중의 크기는 식(1)로 나타나는 과대하중비  $R_{OL}$ 를 정의하여 구하였는데, 본 실험에서는 과대하중비를 1.5, 2.0로 변화시켰다.

$$R_{OL} = \frac{\sigma_{2max}}{\sigma_{1max}} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{1max}$ 는 일정 진폭하중시 최고응력을 나타내고  $\sigma_{2max}$ 는 단일 과대하중작용시 최고응력을 나타낸다.  $\sigma_{1max}$ 는 150 MPa로 하였고  $\sigma_{2max}$ 를 225 MPa, 300 MPa로하여 과대하중비  $R_{OL}$ 을 변화시켰다.

이때 과대응력의 부하는 균열의 발생기와 성장기



**Fig. 1** Geometry of fatigue test specimen

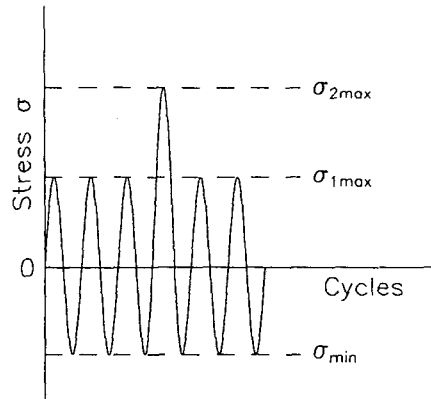
로 나누어서 부하하였는데, 과대하중 부하시점에서의 균열길이를  $a_R$ 라 정의하였고, 그 크기는 200 ~ 300  $\mu\text{m}$ 와 1.5 mm였다. 또한 과대하중 부하시간은 0.01 Hz였다.

과대응력을 부하한후 지연현상이 발생할 때 지연하중반복수  $N_d$ 와 지연된 균열길이  $a_R$ 를 측정하였는데, 균열길이의 측정은 이동현미경과 접안이동측미계를 사용하였다.

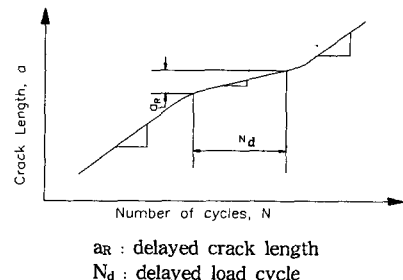
Fig. 2는 단일 과대하중의 모식도이고, Fig. 3은 지연된 균열길이  $a_R$ 과 지연된 하중반복수  $N_d$ 를 정의한 것이다.

또한 지연구간 내에서의 균열거동을 살펴보기 위해 시험편을 5% 나이탈용액으로 부식하여 금속조직의 영향을 살펴보고, 주사 전자현미경(SEM)을 사용하여 과대하중 전후의 파면을 관찰하였다.

그리고 본 연구에서는 과대하중에 의한 지연구간 내에 발생하는 균열선단 가지현상의 영향을 평가하기 위하여, 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하



**Fig. 2** Schematic representation of stress model



**Fig. 3** The definition of delayed load cycle( $N_d$ ) and crack length( $a_R$ )

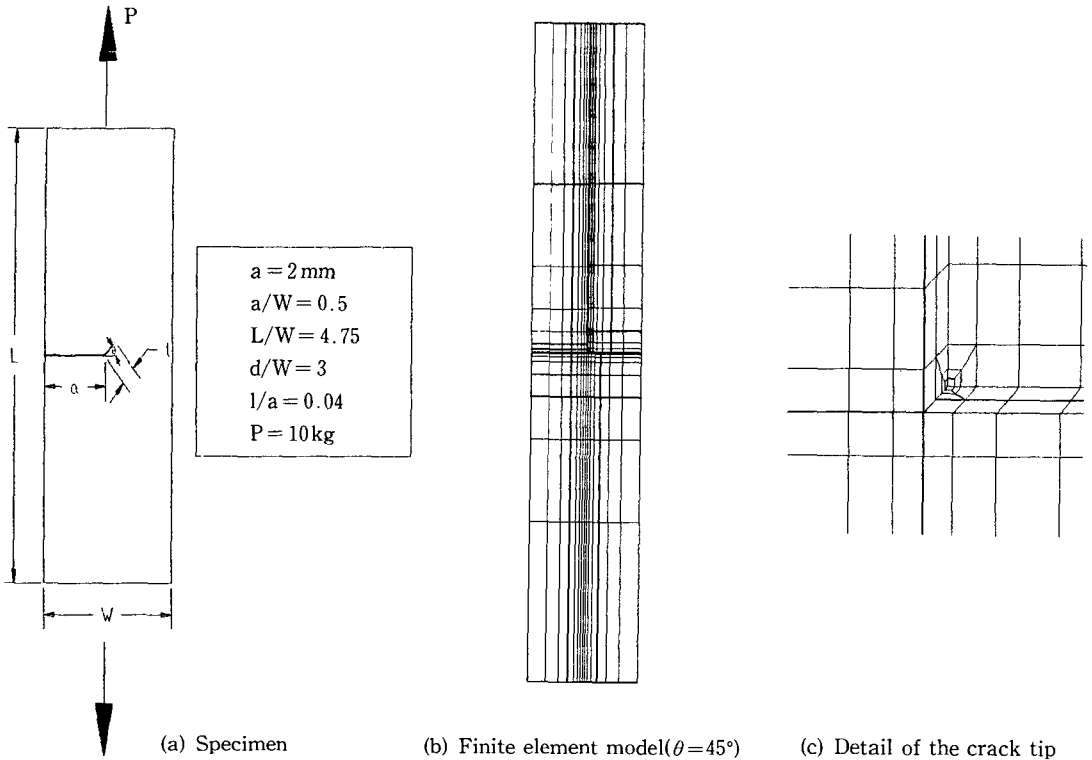


Fig. 4 Finite element analysis model

였다. Fig. 4는 해석모델을 보여주고 있고, 여기서 균열가지는 균열가지각  $\theta$ 를 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°로 변화시켰다. 사용된 요소는 8절점 사각 요소이고, 균열선단에서는 특이성을 고려하여 균열 선단 주위의 절점을 균열선단 방향으로 1/4 강제가 동시킴, 특이요소를 사용하였다. 사용된 요소의 총 수는 220~236이었고, 절점의 수는 739~793개였다. 해석은 유한요소해석을 위한 범용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 하중비 및 두께변화에 따른 균열지연현상

균열지연현상의 일차적인 원인은 과대하중작용에 의해 균열선단에 형성되는 소성역이 과대하중 제거 후 압축잔류 응력장을 형성하여, 균열전파를 저지하는 역할을 하는데서 기인된다. 따라서 과대하중의 크기는 형성되는 소성역의 크기와 직접적인 관련이 있다.

그러므로 지연현상에 있어 소성역의 크기와 밀접

한 관련이 있는 과대하중비  $R_{OL}$ 와 시험편의 두께는 중요한 변수로 작용하는데, Hillbery 등은 2024-T3 Al에서 과대하중비가 2.3 이상이면 균열이 정지함을 보고하고 있고,<sup>(17)</sup> Wei 등은 Ti-6Al-4V에서 2.8 이상에서 정지함을 보고하고 있다.<sup>(18)</sup> 본 연구에서는  $R_{OL}$ 을 1.5, 2.0으로 변화시켰고, 시험편의 두께는 중실형과 중공형으로 변화시켜 각각의 변화에 따른 지연특성을 살펴보고 있다.

이때의 실험결과를 Table 3에 나타내었다.

여기서 과대응력에 의해 형성되는 소성역의 크기는 시험편의 두께를 고려하여, 식(2)을 사용하여 구하였다.<sup>(19)</sup>

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

$$\beta = 1 : B < 2.5 (K_{2max} / \sigma_{ys})^2$$

$$\beta = 2 : B \approx 2.5 (K_{2max} / \sigma_{ys})^2$$

$$\beta = 3 : B > 2.5 (K_{2max} / \sigma_{ys})^2$$

$K_{2max}$ : 과대응력에 의한 응력확대계수

$B$ : 시험편두께

$\sigma_{ys}$ : 항복강도

이때 식(2)를 사용하여 소성역의 정확한 크기를 계산하기에는 다소 무리가 따르므로, 시험편의 두께와 과대하중비  $R_{OL}$ 을 고려한 각각의 경향을 알아 보는데 의미가 있다.

**Table 3** Result of overload tests

a(mm)	Type	$R_{OL}$	$N_d$ (cycle)	$a_R$ (mm)	$r_y$ (mm)
0.3	Solid	1.5	$3.6 \times 10^5$	0.5	0.032
		2.0	$4.6 \times 10^5$	0.6	0.057
	Hollow	1.5	$2.3 \times 10^5$	0.42	0.048
		2.0	$3.6 \times 10^5$	0.54	0.086
1.5	Solid	1.5	$2.6 \times 10^5$	0.58	0.16
		2.0	$4.5 \times 10^5$	0.97	0.43
	Hollow	1.5	$9.0 \times 10^4$	0.8	0.48
		2.0	$9.0 \times 10^4$	1.22	0.86

a : Crack length

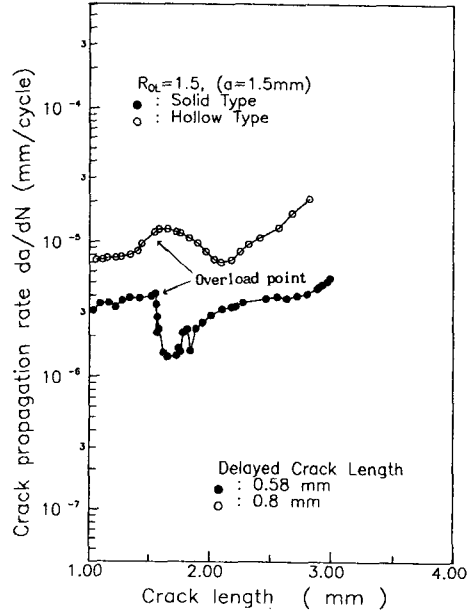
$R_{OL}$  : Overload ratio

$N_d$  : Delayed load cycle

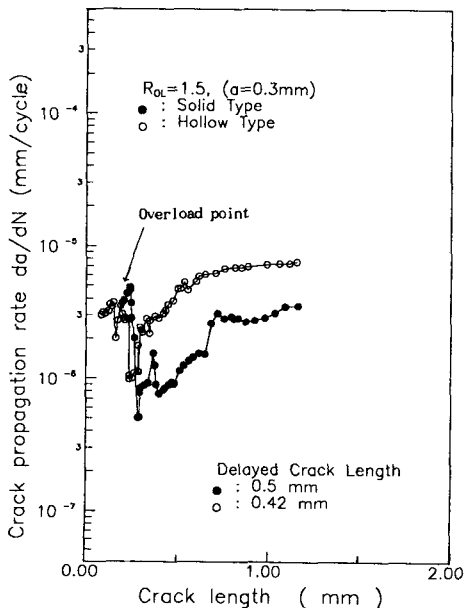
$a_R$  : Total delayed crack length

$r_y$  : Plastic zone size at overload

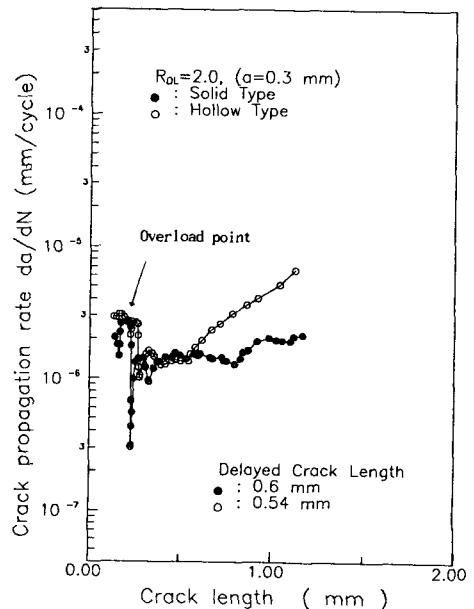
Fig. 5~Fig. 8은 과대하중 부하후 나타나는 지연 현상을 보여주는 그림이다. Fig. 5는 과대하중비  $R_{OL}=1.5$ 이고, 과대하중 작용균열길이  $a_o=0.3$ mm에서 단일 과대하중을 부하하였을때, 균열의 전파



**Fig. 6** Relation between crack propagation rate and crack length at  $R_{OL}=1.5$ ,  $a_o=1.5$  mm



**Fig. 5** Relation between crack propagation rate and crack length at  $R_{OL}=1.5$ ,  $a_o=0.3$  mm



**Fig. 7** Relation between crack propagation rate and crack length at  $R_{OL}=2.0$ ,  $a_o=0.3$  mm

에 따른 전파속도의 변화를 보여주는 결과이다.

과대하중 부하후 균열전파속도가 급격히 감소하였다가 서서히 증가하고 있는 지연현상이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 지연된 균열길이는 중실형과 중공형에서 별 차이없이 나타나고 있다. 그러나 과대하중 부하후 나타나는 균열전파속도의 감소의 정도는 중실형 시험편에서 더 큰폭으로 감소하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은  $a_o=1.5$  mm인 안정성장 구간에서 과대하중비  $R_{OL}=1.5$ 의 크기로 단일 과대하중을 부하하였을때의 결과이다.

이 경우에서도 Fig. 5의 경우와 같이 과대하중의 부하와 함께 급격한 균열전파속도의 감소가 나타나고 이후 서서히 증가하게 되는 지연현상이 나타나고 있다. 이때 지연구간은 Fig. 5와는 달리 중공형에서 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은  $a_o=0.3$  mm, 1.5 mm에서 과대하중비  $R_{OL}=2.0$ 의 크기로 단일 과대하중을 부하하였을때 나타나는 결과이다. Fig. 5와 Fig. 6의  $R_{OL}=1.5$ 일때의 경우와 비교해 볼때, 지연구간은 중실형과 중공형 모두  $R_{OL}=2.0$ 의 경우에서 더 크게 나타나고 있다. 또한 과대하중 부하후 균열전파속도의 감소폭 또한  $R_{OL}=1.5$ 의 경우와 같이 중공형보다 중실형에서 더 큰폭으로 감소되어지고 있

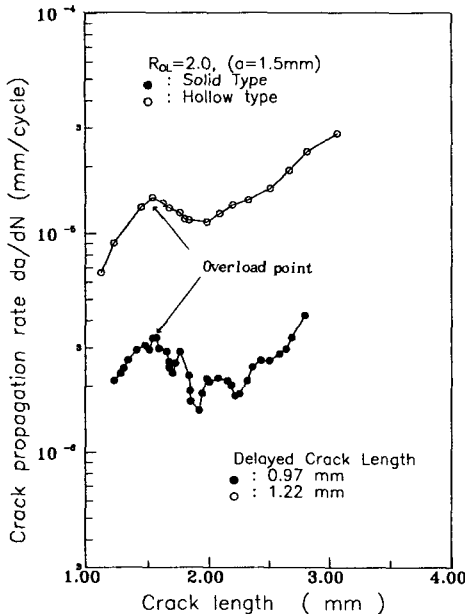


Fig. 8 Relation between crack propagation rate and crack length at  $R_{OL}=2.0$ ,  $a_o=1.5$  mm

다.

이상과 같이 각각의 경우에서 나타나는 지연현상을 구체적으로 고찰하기 위하여, 지연된 균열길이  $a_R$ 과 지연하중 반복수  $N_d$ 를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9의 지연된 균열길이  $a_R$ 과  $a_o$ 와의 관계를 살펴보면,  $a_R$ 은  $a_o$ 가 작은 초기균열의 경우에 있어서는 중실형과 중공형 시험편에서 별 차이가 없이 나타나고 있다.

또한  $a_o=1.5$  mm인 안정 성장구간에서의 지연된 균열길이  $a_R$ 은 과대하중비  $R_{OL}=1.5$ 의 경우 중실형 시험편에서 0.58 mm 중공형에선 0.8 mm로 나타나고 있고, 과대하중비  $R_{OL}=2.0$ 의 경우는 중실형 시험편의 경우 0.97 mm 중공형의 경우는 1.22 mm로 나타나고 있는것을 볼 수 있다. 즉 지연된 균열길이  $a_R$ 이 중실형 시험편보다 중공형 시험편에서 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이와같이 지연된 균열길이  $a_R$ 이 시험편의 두께에 따라 다르게 나타나고 있는 이유는, 과대하중에 의한 소성역의 크기를 표현하는 식(2)로 잘 설명할 수 있다. 식(2)에서 과대하중에 의해 형성되는 소

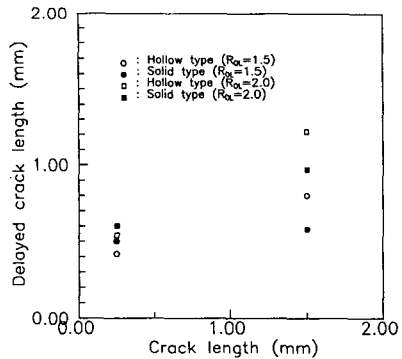


Fig. 9 Variation of the delayed crack length

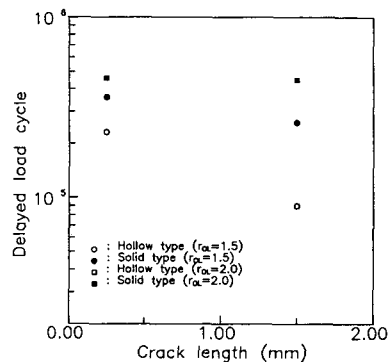


Fig. 10 Variation of the delayed load cycle

소성역의 크기는 시험편의 두께에 반비례하게 된다. 즉 두께가 얇은 시험편에서 과대하중에 의한 소성역의 크기가 더 크게 형성되게 되고, 과대하중의 제한에 따라 나타나는 압축 응력장의 크기 또한 그만큼 커지게 된다. 따라서 지연구간 또한 더 길게 나타나게 된다. 또한 과대하중비  $R_{ol}$ 이 증가함에 따라 지연된 균열길이  $a_R$ 은 증가하고 있는데, 이와같은 원인 또한 식(2)로 설명된다. 과대하중비  $R_{ol}$ 이 1.5에서 2.0으로 증가하게 되면 식(2)에서  $K_{2max}$ 가 증가하게 되므로 그만큼 형성되는 소성역의 크기 또한 증가하게 되고, 따라서 더 큰 지연구간을 기대할 수 있다. 그러므로 상대적으로 더 큰 소성역을 형성하는 과대하중비  $R_{ol}=2.0$ 의 경우가  $R_{ol}=1.5$ 의 경우보다 더 큰 지연된 균열길이  $a_R$ 을 형성한다고 할 수 있다.

이와같이 지연구간의 평가시 과대하중에 의해 형성되는 소성역의 크기는 어느정도 의미를 갖고 있다고 볼 수 있다. 그리고 이와같은 결론은 기존의 여러 연구에서도 확인되어지고 있다. 그러나 전술한바와 같이 Table 3에서와 같이 지연구간과 과대하중에 의한 소성역의 크기를 정량적으로 비교해보면, 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.

가장 근소한 차이를 보이는 경우가  $a_o=1.5$  mm 이고 시험편의 형태가 중공형 일때 과대하중비  $R_{ol}=2.0$ 에서 지연된 균열길이  $a_R=1.22$  mm이고, 그때의 과대하중에 의해 형성된 소성역의 크기  $(r_y)_{ol}=0.86$  mm로  $a_R$ 이  $(r_y)_{ol}$ 보다 크게 나타나고 있다. 다른 대부분의 경우에서는 더 많은 차이를 보이고 있는데, 이와같이 지연된 균열길이  $a_R$ 과 과대하중에 의해 형성되는 소성역의 크기  $(r_y)_{ol}$ 에 대한 정량적 비교에서 나타나는 불일치는 지연구간을 소성역만으로 평가하는 데는 상당한 무리가 따른다는 결론과, 아울러 과대응력에 의해 형성되는 소성역에 의한 압축 잔류응력장 이외에 지연현상에 관계하는 또다른 기구들이 존재하고 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

그리고 Fig. 10의 지연하중 반복수  $N_d$ 와  $a_o$ 와의 관계를 살펴보면,  $N_d$ 는  $R_{ol}$ 의 증가에 따라  $a_R$ 이 증가하면 대체적으로 증가하고 있지만, 시험편의 형상에 따라 살펴보면 중실형의 경우가 중공형에 비해 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

이와같은 현상은 과대하중 부하후의  $da/dN$  변화를 나타낸 Fig. 5~Fig. 8에서 설명되어 진다. Fig. 5에서 과대하중 부하후 균열전파속도  $da/dN$

의 변화의 정도를 살펴보면,  $a_o=0.3$  mm, 과대하중비  $R_{ol}=1.5$ 의 경우 과대하중 부하직전의 균열 전파속도  $da/dN$ 은 중공형 시험편의 경우  $3.8 \times 10^{-5}$  mm/cycle였고, 중실형의 경우는  $da/dN=4.0 \times 10^{-5}$  mm/cycle로 별 차이가 없음을 나타내고 있다. 그러나 과대하중 부하후 나타나는 지연거동시 도달된 최소의 균열전파속도는 중공형의 경우  $da/dN=9 \times 10^{-6}$  mm/cycle이고, 중실형의 경우  $da/dN=5 \times 10^{-6}$  mm/cycle로 중실형의 경우가 중공형의 경우보다 더 큰폭으로 균열 전파속도의 감소가 나타나고 있다. 이와같은 경향은 Fig. 6~Fig. 8에서도 나타나고 있는데, 이와같이 중실형의 경우가 중공형의 경우보다 과대하중 부하후 상대적으로 더 낮은 곳까지 감속이 일어나기 때문에, 과대하중 작용 전의 균열전파속도로 다시 회복하는데도 지연구간이 더 짧음에도 불구하고 지연된 하중 반복수  $N_d$ 는 더 크게 나타나고 있다.

과대하중비와 시험편의 두께를 고려한 이상의 결과들을 종합해 볼때, 단일 과대하중에 의한 지연현상의 평가시 과대하중에 의해 균열선단에 형성되는 소성역이 어느정도 중요한 의미는 가지고 있다고 할 수 있다. 그러나 지연거동을 완전히 설명하는데는 다소 무리가 있음을 알 수 있었고, 따라서 지연현상에 영향을 미치는 미시기구에 대한 검토가 요망된다고 할 수 있다.

### 3.2 지연현상에 대한 균열가지의 영향

과대하중에 의해 형성되는 소성역에 의한 압축잔류 응력장은 지연현상을 설명하는데 있어서 지연현상을 초래하는 지배기구로 논란의 여지가 없다. 그러나 전절에서 살펴본 정량적 비교 결과와 다른 연구자들의 결과를 종합해 볼때 그 한계도 명확히 나타난다. 그러나 지연현상을 규명하는 대부분의 연구들이 과대하중에 의해 형성되는 소성역에 의한 압축 응력장의 크기나 압축응력에 의해 나타나는 소성유기 균열단합현상의 변화 등만으로 지연현상을 설명하고 있다. 특히 변동하중하에서 수명예측 모델인 Wheeler의 모델<sup>(9)</sup>과 미공군에서 항공기 설계에 지침으로<sup>(20)</sup> 사용하고 있는 Willenborg 모델 등<sup>(10)</sup>도 지연현상을 평가하는데 단지 과대응력에 의한 압축잔류 응력장만을 고려하고 있다. 따라서 이들 모델을 이용하여 지연구간을 예측하면 지연구간이 실제보다 훨씬 작게 나타난다.<sup>(3,12)</sup> 이와같이 과대응력에 의한 압축잔류 응력장은 지연현상을 설

명하는 여러기구중 하나에 불과하지 그것만으로 지연현상 전체를 설명하고 평가하는데는 문제가 있다고 판단되어진다. 따라서 지연현상을 좀더 정확히 이해하기 위해서는 압축잔류 응력장이나 소성유기 균열단합현상 이외의 지연현상에 영향을 미치는 또 다른 기구들에 대한 연구가 수행되어야 한다고 사료된다.

본 절에서는 단일 과대하중 작용후 나타나는 피로균열의 거동특성 중 대표적인 현상인 균열선단가지 현상을 살펴보고 균열가지가 지연현상에 미치는 영향을 고찰한다.

Fig. 11은 과대하중 작용이후 균열선단에 형성되는 균열가지를 보여준다.

Bucci와 Lankford<sup>(21,22)</sup> 등은 단일 과대하중에 기인하여 나타나는 균열가지의 형태를 한쪽으로 구부

러지는(kinked) 형태와 양쪽으로 구부러지는(forked) 형태로 분류하였다. 본 연구에서도 Fig. 11에서 보여지듯이 (a), (b)는 양쪽으로 구부러지는(forked) 형태로 나타나고 있고, (c), (d)는 한쪽으로 구부러지는(kinked) 형태로 나타나고 있다. 그리고 이때 각 경우에 있어서 균열가지 발생의 정도는 균열의 성장기보다는 발생기에서, 그리고 과대하중비가 증가할수록 더 심하게 나타나고 있다. 즉 과대응력에 의해 발생하는 균열가지는 과대응력 작용전의 균열진전력이 작을수록, 그리고 과대하중에 의한 영향의 정도가 클수록 더 심하게 나타나고 있다. 이때 균열가지의 발생과 금속조직과의 관계를 살펴본 그림이 Fig. 12이다.

Fig. 12(a)는 과대하중 부하후 나타나는 균열가지의 형성과정을 보여주는 그림으로, 과대하중 작용

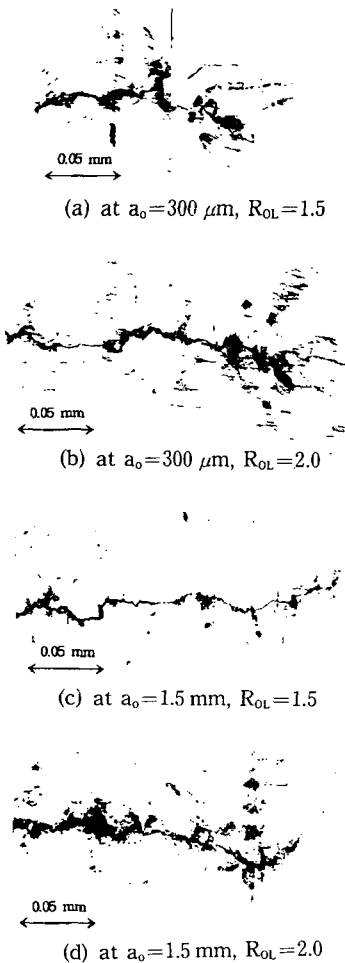


Fig. 11 The shape of crack branching( $\times 600$ )

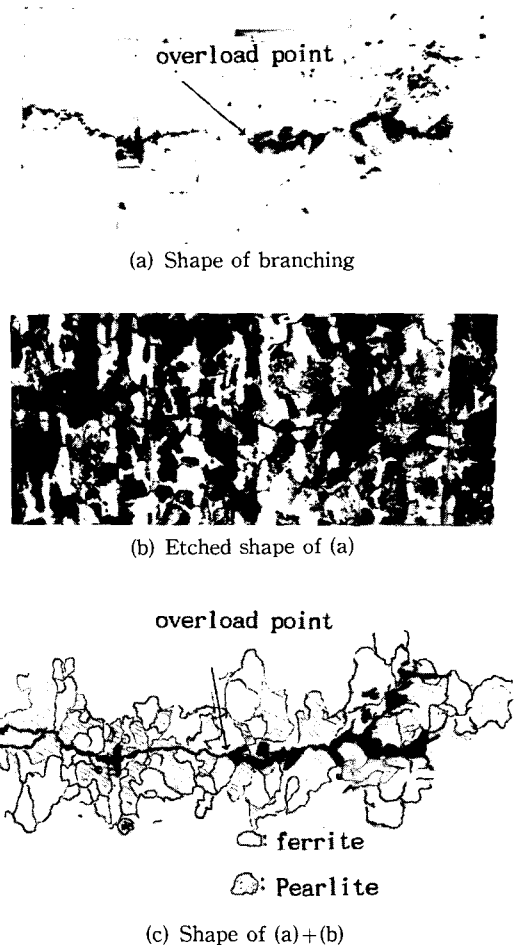


Fig. 12 The crack branching and microstructure( $\times 600$ )



후 균열가지가 형성되고 있는 것을 볼 수 있다. 이때 균열가지의 형성은 과대하중 부하직후 즉시 나타나지 않고, 먼저 일정 크기만큼의 균열선단 무더짐이 나타나고, 이후 균열가지가 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

균열가지현상은 일반적으로 균열진전력이 아주 낮을때 나타나는 균열거동 특성으로, Fig. 12(a)에서 나타나는 균열가지는 그림에서와 같이 균열선단 무더짐에 의한 균열선단의 응력집중의 완화와, 과대응력에 의해 균열선단에 형성된 압축 잔류응력장 등에 의한 균열진전력의 감소로 인해 발생한다고 할 수 있다. Fig. 12(b)는 균열가지의 형성과 미시조직과의 관계를 알아보기 위한 것으로, 균열가지가 나타나는 시험편의 표면을 5% 나이탈 용액으로 부식한 그림이다. 그림에서 검은 부분은 펄라이트 조직을 나타내고, 흰 부분은 페라이트 조직을 나타낸다. 과대하중 부하전의 균열의 전파형태는 미시조직에 별로 영향을 받지않고 전파하고 있는 것을 볼 수 있지만, 과대하중 부하후 균열의 거동 형태는 페라이트와 펄라이트의 입계를 따라 균열가지가 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 이와같은 현상은 (a)와(b)를 겹친 Fig. 12(c)에서 잘 알 수 있다. Fig. 12(c)에서 과대하중 작용이후의 균열의 거동은 먼저 몇개의 페라이트에서 균열선단 무더짐이 발생하고 있는 것을 볼 수 있고, 이후 펄라이트 입계를 따라 전파하는 입계파괴의 형태로 균열가지를 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉 균열가지의 발생 형태는 미시조직에 영향을 받는다고 할 수 있는데, 따라서 균열가지의 발생시 균열가지의 기울어지는 정도인 균열가지각은 가지가 발생하는 지점에서의 미시조직에 많은 영향을 받는다고 판단되어 진다.

균열선단 가지현상은 일반적으로 균열의 진전력이 아주 낮을때 나타나는 균열의 거동특성인데, Fig. 12의 (c)와 같이 과대하중 부하 후 나타나는 균열가지의 발생원인으로는 과대하중에 의한 균열선단에서의 진전력의 감소가 균열의 거동 형태를 전파하는 인장형 모드가 아닌 발생형태의 전단형 모드로 바꾸어 놓았기 때문이라고 할 수 있다. 따라서 형성되는 균열가지의 형태도 균열 발생기에서와 같이 미시조직에 많은 영향을 받게되어, Fig. 11에서 보여지는 것과 같이 여러가지 형태로 나타나게 된다. 또한 이렇게 발생한 균열가지는 균열선단에서의 응력상태에도 영향을 주게되어 균열 진전력에도 변화를 주게 되는데, 본 연구에서는 균열가

지의 각도변화에 따른 균열진전력의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 4와 같이 균열가지를 모델링하여, 유한요소법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 13은 균열가지의 기울어진 각도  $\theta$ 의 변화에 따른  $J$ 적분값의 변화를 보여주는 그림이다.

각각의 변화된 균열가지에서의  $J$ 적분값인  $J_{\theta}$ 를 균열가지가 발생하지 않았을 때의  $J$ 적분값인  $J_{\theta=0}$ 로 나누어 무차원시킨 그림이다. 균열가지각  $\theta$ 의 증가에 따라 균열 진전력이 감소하고 있는 것을 볼 수 있는데,  $\theta=45^\circ$ 인 경우 균열진전력이 약 30% 감소하고 있음을 볼 수 있다.

이와같이 균열가지의 기울어진 각도  $\theta$ 의 변화에 따른 균열진전력의 감소는 기준응력 레벨에서의 진전력 감소를 의미하는 것으로, 균열가지가 지연거동에 미치는 영향의 정도를 보여주는 것이라 할 수 있다. 즉 과대하중후 형성되는 균열가지는 기준응력 레벨에서 균열진전력을 감소시켜 지연거동에 영향을 미치게 되는데, 그 정도가 Fig. 12의 결과에서처럼 무시하지 못할 정도로 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이와같이 균열가지현상은 과대하중에 의해 나타나는 지연현상에 영향을 주는 인자로 중요한 의미를 갖고있고, 따라서 지연현상의 평가시 균열가지현상 또한 고려해야 할 중요한 인자 중의 하나라 할 수 있다.

3.3 균열지연거동과 스트라이에이션의 분포변화

Fig. 14는 파단후 파면사진으로 지연구간을 나타내는 형상을 발견 할 수 있다.

이 그림은 지연구간과 그 외의 구간에서의 균열의 진전력의 변화가 있었음을 보여주는 그림으로, 과대하중에 의해 지연구간에서 균열성장 거동형태

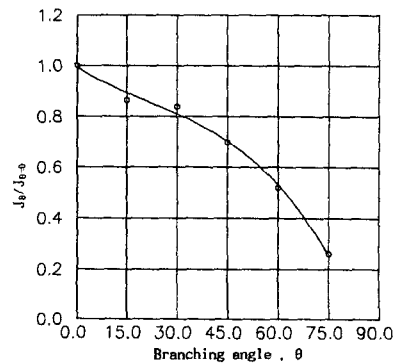
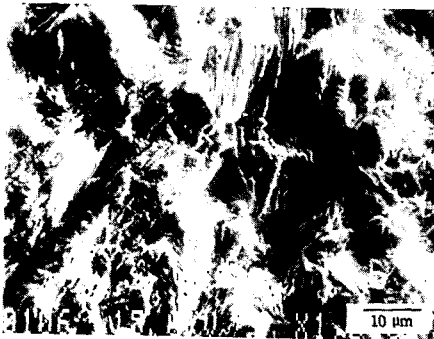


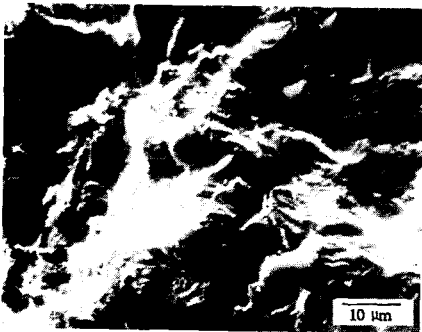
Fig. 13 Relation between branching angle  $\theta$  and crack driving force



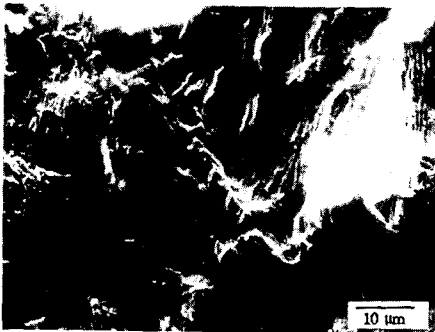
Fig. 14 The shape of retardation zone



(a) Before overload zone



(b) Retardation zone



(c) Steady state zone after retardation

Fig. 15 Fractography of the retardation process

의 변화가 있었음을 의미하고 있다. 이와같은 진전력의 차이는 파면의 주사 전자현미경(SEM) 사진에서 잘 나타난다. Fig. 15는 Fig. 14에서의 과대하중 작용전과 지연구간 그리고 지연구간이 끝나 다시 정상적 성장을 하는 세 부분에서의 파면사진으로, 그림 (a)는 과대하중 부하 전단계에서의 파면의 형상으로 여러 곳에서 스트라이에이션이 관찰되고 있다.

그림 (b)는 지연구간에서의 파면 형상으로 스트라이에이션이 거의 관찰되고 있지않다. 또한 그림 (c)는 지연구간이 끝나 안정적 성장을 하는 구간으로, 스트라이에이션의 모습이 폭넓게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 이와같이 지연구간을 제외한 구간에서만 스트라이에이션이 관찰되어지고, 지연구간에서는 스트라이에이션이 관찰되지 않는 이유는 지연구간에서 균열의 성장 거동형태에 변화가 있었음을 보여주는 결과라 할 수 있다. 이와같이 지연구간에서 안정성장 구간에서의 피로파면의 일반적 형태라 할 수 있는 스트라이에이션의 분포가 관찰되지 않는 이유는, 단일 과대하중에 의한 압축 잔류 응력과 균열선단 무더짐 그리고 잔가지현상 등에 의한 균열선단에서의 진전력 감소 등에 의해 전반적으로 균열선단에서의 균열진전력을 감소하게 되고, 이와같은 균열 진전력의 감소는 결국 균열의 거동 형태를 stage II의 성장 형태에서 stage I의 발생 형태로 바꾸어 놓았기 때문이다. 이후 지연현상이 끝난 후 안정적인 성장구간에서의 파면은 피로균열의 거동이 다시 stage II의 성장형태로 복귀하기 때문에, 그림 (c)와 같이 스트라이에이션이 폭넓게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

두께와 과대하중비를 변화시켜 단일 과대하중에 의한 지연현상에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지연구간은 대체적으로 두께가 작고 과대하중비가 클수록 크게 나타났지만, 소성역의 증가에서 기대할 수 있는 크기와는 차이가 있었다. 또한 지연하중 반복수는 두께가 크고 과대하중비가 클수록 더 크게 나타났다.

(2) 지연구간을 과대하중 부하후 형성되는 소성역의 크기만으로 설명하는데는 다소 무리가 있음을 알았고, 그외 기구들에 대한 평가의 필요성을 확인

하였다.

(3) 과대하중 부하후 형성되는 균열가지는 과대 응력 작용선의 균열진전력이 작을수록 과대하중에 의한 영향의 정도가 클수록 복잡하게 나타났다. 그리고 발생한 균열가지는 기준응력 레벨에서의 균열 진전력을 감소시켜 지연현상을 촉진 시킨다. 이때 균열가지각  $\theta$ 가 증가할수록 균열 진전력의 감소는 증가하게 되어, 균열가지각  $\theta=45^\circ$ 에서 30% 균열 진전력 감소를 초래했다.

(4) 지연구간에서의 파면특성은 압축잔류응력에 의한 기준응력의 감소와 균열가지에 의한 균열진전력의 감소로 인해 균열의 발생기의 파면특성과 같이 스트라이에이션의 분포가 잘 발견되지 않고 있다.

### 참고문헌

- (1) Fleck, N. A., 1988, "Influence of Stress State on Crack Growth Retardation," *ASTM STP 924*, pp. 157~183.
- (2) Knott, J. F. and Pickard, A. C., 1977, "Effects of Overloads on Fatigue Crack Propagation: Aluminum Alloys," *Met. Sci.*, 11, pp. 399~404.
- (3) Suresh, S., 1983, "Micromechanisms of Fatigue Crack Growth Retardation Following Overloads," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 18, No. 3 pp. 577~593.
- (4) Schijve, J., 1974, "Fatigue Damage Accumulation and Incompatible Crack Front Orientation," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 6, pp. 245~252.
- (5) Powell, P. M. and Forsyth, P. J. E., 1981, "The Effect of Overloading on Fatigue Crack Propagation in Two Aluminium Alloys and Austenitic Stainless Steel," *Advances in Fracture Research, Proceedings, 5TH ICF*, Vol. 4, pp. 1781~1788.
- (6) Jones, R. E., 1973, "Fatigue Crack Growth Retardation After Single-Cycle Peak Overload in Ti-6Al-4V Titanium Alloy," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 5, pp. 585~604.
- (7) Elber, W., 1970, "Fatigue Crack Closure Cyclic Tension," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 2, pp. 37~45.
- (8) Elber, W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure in Damage Tolerance in Aircraft Structure.," *ASTM STP. 486*, pp. 230~242.
- (9) Wheeler, O. E., 1972, "Spectrum Loading and Crack Growth," *J. Basic Engng. Trans. ASME, Series D94(1)*, pp. 181~186.
- (10) Willenborg, J., Engel, R. M. and Wood, H. A., 1971, "Acrack Retardation Model Using an Effective Stress Concept," *AFFDL TM-71-1-FBR*, Jan.
- (11) Von Euw, E. F. J., Hertzberg, R. W. and Roberts, R., 1972, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation," *ASTM STP 513.*, pp. 230~259.
- (12) Fleck, N. A., Smith, I. F. and Smith, R. A., 1983, "Closure Behavior of Surface Crack," *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 6, No. 3, pp. 225~239.
- (13) Chanani, G. R. and Mays, B. J., 1977, "Observation of Crack Closure Behavior After Single Overload Cycles in 7075-T6 Single Notched Specimens," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 9, pp. 65~73.
- (14) Robin, C. and Louah, M., 1983, "Influence of An Overload on the Fatigue Crack Growth in Steels," *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 6, No. 1., pp. 1~13
- (15) 송삼홍, 이경로, 1993, "짧은균열 및 긴균열의 전파에 미치는 단일 과대하중의 영향," '93년 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 105~108.
- (16) 김정규, 박병훈, 류석현, 1989, "7075-T73 알루미늄 합금의 피로균열 진전거동 및 지연현상에 미치는 두께의 영향," 대한기계학회논문집, 제13권, 4호, pp. 670~679.
- (17) Probst, E. P. and Hillbery, B. M., 1974, *Journal, American Institute of Aeronautics and Astronautics*, No. 12, pp. 330~335.
- (18) Wei, R. P., Shih, T. T. and Fitzgerald, J. H., 1973, "Load Interaction Effects on Fatigue Crack Growth in Ti-6Al-4V Alloy," *NASA, CR-2239*.
- (19) Veccio, R. S. and Hertzberg, R. W., 1984, "On The Overload Induced Fatigue Crack Propagation Behavior in Aluminium and Steel Alloys," *Fatigue of Engineering Material and Structure*, Vol. 7, No. 3, pp. 181~194.
- (20) Chang, J. B., Engel, R. M. and Stolpestad, J.,

- 1981, "Fatigue Crack Growth Behavior and Life Prediction for 2219-T851 Aluminium Subjected to Variable~Amplitude Loadings," *ASTM STP 743*, pp. 3~27.
- (21) Bucci, R. J., et al, 1980, "Ranking 7xxx Aluminium Alloy Fatigue Crack Growth Resistance under Constant Amplitude and Spectrum Loading," *ASTM STP 714*, pp. 41~78.
- (22) Lankford, J. and Davidson, D. L., 1976, "Fatigue Crack Tip Plasticity Associated with Overloads and Subsequent Cycling," *J. Engng. Mat. Tech. Trans. ASME 98*, pp. 17~23.