

본 연구는 한국과학재단지정 인하대학교 황해권 수송시스템 연구센터의 지원에 의한 것입니다.

# 일정진폭 및 과대하중 하에서의 피로 균열 성장 수명 예측

이억섭\*, 김승권\*\*

## Prediction of Fatigue Crack Propagation Life under Constant Amplitude and Overloading Condition

O. S. Lee\* and S. G. Kim\*\*

### ABSTRACT

Ship structures and aircraft structures are consisted of thin sheet alloy, so it is very important to understand the characteristics of fatigue crack propagation of that material and to establish the data base. The data for fatigue crack propagation behavior scatter very much even under identical experimental conditions with constant loading. The behavior of fatigue crack propagation under regular and irregular cyclic loadings is known to be highly affected by complicated factors such as plastic zone developed at the vicinity of crack tip and reduction of cross sectional area. In this paper, the controlled stress amplitude and overload fatigue crack propagation tests have been conducted to investigate the effect of varying factors such as plastic zone size near the crack tip and area reduction factor (AF) on the fatigue crack propagation behavior. A better simulation of fatigue crack propagation behavior is found to be obtainable by using Wheeler and Willenborg models with AF effect.

**Key Words :** Wheeler model(휠러모델), Willenborg model(윌렌보그모델), Fatigue crack propagation(피로 균열 전파), Fatigue crack growth rate(피로 균열 성장률), AF(단면적 변화율), Image method(이미지 방법), Automatic measurement(자동 측정)

### 1. 서론

선박 및 항공기 구조물은 박판합금으로 구성되어 있으므로 이들 박판의 피로 균열 전파 특성을 정밀하게 파악하고 자료를 구축하는 것은 피로 손상 해석에 매우 중요하다. 이러한 수송 구조물의 피로 손상 해석은 복잡한 반

복 하중을 받는 선박 및 항공기 설계 시 안전성 확보 및 피로 수명 예측에 필요한 기술이다.

특히 선박 및 항공기 구조물과 같은 대형 구조물의 설계시 최적 설계 개념의 도입으로 이루어지고 있는 경량화 추세는 피로 파괴에 대한 정밀한 안전 설계의 중요성을 더욱 요구하고 있으며 피로 수명의 연장과 구조물에 작용

\* 인하대학교 기계·항공·자동화 공학부  
\*\* 인하대학교 대학원 기계공학전공

하는 하중을 최소화시키는 조건을 찾는 것은 자주 발생되는 실용적인 문제점들이다. 그러나 이러한 구조물에 대한 피로 균열의 발생원인을 완전히 제거하기 위해서 허용 하중을 감소시킬 수는 없다.

요즘은 해양구조물이나 항공기 등의 거대 구조물들에 대한 신뢰도를 높이기 위하여 이러한 구조물에 존재하는 균열들이 임계 균열 길이에 도달하기 전에 또는 거대한 재난이 발생하기 전에 피로 균열을 탐지하는 검사 과정이 수행되고 있다. 대형 구조물에 있어서 피로 균열 성장률의 예측에 대한 정확한 분석 방법이 발달된다면 충분하고 신뢰할 만한 검사시간을 수립할 수 있을 것이다.

기구나 구조물에 작용하는 실제 하중은 진폭이 불규칙하게 변화하는 변동 하중 (random loading) 이므로 파괴 강도 설계시 이러한 변동 하중하의 피로균열 전파양상에 관하여 충분히 고려할 필요가 있다.

변동 하중하에서의 피로 문제가 근래 국내의 산업현장에서도 그 중요성이 점차 인식되고 있음을 감안하여 본 연구에서는 수송기기 구조물에 쓰이는 박판 Al 2024-T3 합금에 대한 피로균열 전파특성에 관한 데이터를 구축하기 위하여 하중진폭 프로그래밍이 가능한 10ton 용량의 피로시험기를 이용하여 일정 및 과대 하중하에서 피로균열 전파실험을 수행하였다.

본 연구의 목적은 일정 진폭 하중하에서 수송기기 구조물에서 많이 사용되고 있는 박판 Al 2024-T3 합금에 대한 피로 균열 전파 특성을 파악하고 수송기기 구조물의 피로 손상 해석에 필요한 자료를 구축하며 일정 진폭 및 과대 하중하에서의 실험 결과를 Wheeler 모델<sup>(2,3,4,5)</sup> 및 Willenborg 모델<sup>(3,4)</sup>에 의한 결과와 비교하고 그 효용성을 규명하는 것이다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 일정 진폭 하중하에서의 피로 균열 전파에 대한 개념

일정 진폭 하중하에서의 피로 균열 성장률,  $da/dN$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (1)$$

여기서,

$N_i$ 와  $N_{i+1}$  ;  $i$ 와  $i+1$ 번째의 하중 반복수.

$a_i$  and  $a_{i+1}$  ;  $N=N_i$ 와  $N=N_{i+1}$ 에서의 균열길이.

본 연구에서 사용한 CCT (Center Cracked Tension) 시험편에 대한  $\Delta K$ 는 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \Delta K_{app} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a \cdot \sec(\pi a / W)} \quad (2)$$

여기서,

$\Delta K_{app}$  = 작용응력 확대계수 범위.

$\Delta \sigma$  = 작용응력 범위.

$a$  = 균열길이의 1/2.

$W$  = 시편의 폭.

하중비  $R$ 은 다음과 같다.

$$R = \frac{Min.load}{Max.load} = \frac{Min.stress}{Max.stress} \quad (3)$$

$da/dN$ 과  $\Delta K_{app}$ 의 관계는 Paris' law<sup>(2)</sup> 및 Forman's law<sup>(1,9)</sup>를 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K^m \quad (4)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_2 \Delta K_{eff}^n}{(1 - R_{eff})K_c - \Delta K_{eff}} = \frac{C_2 \Delta K_{eff}^n}{(1 - R_{eff})K_c - \Delta K_{eff}} \quad (5)$$

여기서,

$K_c$  = 임계응력 확대계수.

$\Delta K_{eff}$  = 유효응력 확대계수 범위.

$R_{eff}$  = 유효 응력비.

$C_1, C_2, m, n$  = 재료상수.

위 식의 결과로 얻어지는  $C_1, C_2, m, n$  등의 재료상수는 Table 3에 나타내었고 피로수명 예측을 위한 프로그램에 사용된다.

### 2.2 과대 하중하에서의 피로 균열 전파에 대한 개념

실제 하중 (service loading) 은 하중의 크기 및 주파수가 복잡하게 변동하는 랜덤 하중 (random loading) 인 경우가 많다. 실제의 기계 구조 요소의 피로 수명을 실험적으로 평가할 필요가 있을 경우에는 실제 작용하는 랜덤 하중을 사용하여 실험하는 것이 가장 바람직하나, 일

반적으로 실험상 및 경제적 측면에서 어려운 점이 많으므로 본 연구에서는 과대 하중이 작용되었을 경우에 재료에 나타나는 피로 균열 성장 지연거동에 관한 사항을 중점적으로 규명하였다.

과대 하중하의 피로 균열 진전 문제에서 중요한 것 중의 하나가 하중 변동에 의한 간섭 효과로서 나타나는 균열 진전의 지연과 가속 현상에 대한 합리적인 평가이다. Wheeler 는 인장 과대 하중이 부하 되면 균열 진전이 지연되나 진전 속도가 최소치가 되는 것은 과대 하중 부하 직후가 아닌, 균열이 어느 정도 진전한 후인 사실을 상세히 검토하였으며 이러한 현상을 지체 지연 현상이라고 하였다. 인장 과대 하중이 부하 된 이후의 균열 진전 지연 현상은 경우에 따라 공학적으로 이용이 가능한 매우 유리한 현상이므로 이에 관한 실용적인 연구가 많이 이루어지고 있다.

균열진전 지연현상의 원인으로는 인장 과대 하중의 부하에 의한 ( i ) 균열 선단에서의 압축 잔류 응력 형성, ( ii ) 균열 선단에서의 소성영역 크기, ( iii ) 균열 선단 둔화 (blunting) 등이 지적되고 있으며 지연현상을 평가하는 여러가지 모델들이 제안되고 있다.

### 2.3 Wheeler 모델<sup>(2,3,4,5)</sup> 을 이용한 피로 수명 예측

그 동안 변동하중하에서 균열의 성장에 영향을 미치는 원인을 실험을 통하여 규명하고자 많은 모델들이 제시되어져 왔다.

앞서 설명되어진 바와 같이 이러한 모델들이 근거하는 이론으로는 크게 ( i ) 소성역의 크기에 의한 경우와 ( ii ) 균열 선단에서의 압축 잔류 응력에 의한 경우 등으로 볼 수 있다.

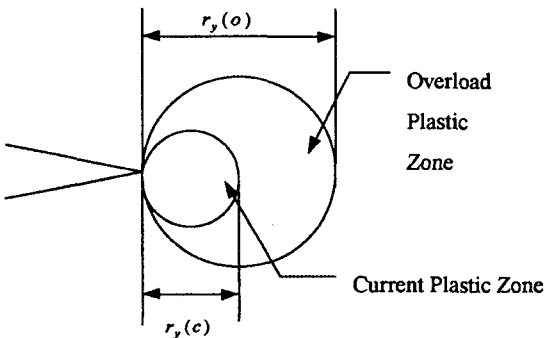


Fig. 1 Plastic zone sizes corresponding to overload and regular fatigue loadings

이 중 Wheeler 모델에서는 전자에 해당하는 변동하중하에서 균열 선단의 소성영역이 균열 성장에 미치는 영향을 잘 설명해주고 있다.

Fig. 1 에서 알 수 있듯이 과대하중이 만들어내는 소성영역(1)의 크기를  $r_y(o)$ 로 놓고, 이보다 작은 균열길이와 소성영역을 생성하는 하중구간에서의 균열의 성장은  $r_y(o)$ 에 의해 영향을 받는다는 지연계수(retardation factor)을 이용한 모델을 제시하였다.

$$\phi_R = \left( \frac{\Delta a + r_y(c)}{r_y(o)} \right)^\gamma \quad (6)$$

여기서,  $\gamma$  는 피팅 패러미터 (fitting parameter)이다.

### 2.4 Willenborg 모델<sup>(3,4)</sup> 을 이용한 피로 수명 예측

Willenborg 모델에서는 위에서 제시된 조건중 후자에 해당하는 것으로, 과대 하중이 작용했을때 균열 선단에서의 압축잔류응력에 의한 피로균열성장의 지연거동을 잘 설명해주고 있다. 과대 하중의 작용시 형성되는 소성역  $r_y(o)$ 와 균열 길이의 합을 기준으로  $r_{req}$ 를 구하여 압축 잔류응력  $\sigma_{comp}$ 를 산정하고, 이렇게 해서 얻어진  $\sigma_{comp}$ 를 이용하여 다음과 같은 식으로 실제 균열 선단에 적용되어지는 유효한 파괴인성치와 응력비를 계산해 낼 수 있다.

$a_o$  : 과대하중이 작용한 시점에서의 균열길이,

$a_i$  : 과대하중이 작용한 후  $i$ 번째 사이클에서의 균열길이

$$r_{req} = a_o + r_y(o) - a_i \quad (7)$$

$$\sigma_{req} = \left( \left( \frac{r_{req} \cdot \beta}{a_i} \right) \cos \left( \frac{\pi \cdot a_i}{W} \right) \right)^{1/2} \cdot \sigma_{ys}, \quad \sigma_{comp} = \sigma_{req} - \sigma_{max} \quad (8)$$

$$\sigma_{max}^{eff} = \sigma_{max} - \sigma_{comp}$$

$$\sigma_{min}^{eff} = \sigma_{min} - \sigma_{comp}$$

$$K_{max}^{eff} = f(\sigma_{max}^{eff}, a_i) \quad (9)$$

$$K_{min}^{eff} = f(\sigma_{min}^{eff}, a_i)$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max}^{eff} - K_{min}^{eff}, \quad R_{eff} = K_{min}^{eff} / K_{max}^{eff} \quad (10)$$

이 값들을 Forman's law<sup>(1,9)</sup>와 같은 균열성장 관련식에 대입하면 피로균열이 성장 또는 지연되는 현상을 예측할 수 있게 된다.

### 3. 시험편 및 실험 방법<sup>(6)</sup>

#### 3.1 박판에 대한 일정 진폭 및 과대 하중하에서의 피로균열 전파실험

본 연구에서 사용한 시험편 재료는 Al 2024-T3 합금이며 화학적 조성<sup>(7)</sup>을 Table 1에, 기계적 성질<sup>(8)</sup>을 Table 2에 각각 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Al 2024-T3 aluminum alloy

(wt.%)								
Si	Fe	Cu	Mn	mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.11	0.23	4.46	0.58	1.44	0.04	0.03	0.02	Bal

Table 2 Mechanical properties of Al 2024-T3 aluminum alloy

Yield strength (MPa) (0.2% offset)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
345	500	17

시험편<sup>(6)</sup>의 모양은 CCT (Center Crack Tension) 형으로 중앙에 지름이 1mm인 원공을 가공한 후 폭이 0.6mm인 싹뚝으로 양쪽에 노치를 가공하고 일정진폭 피로하중하에서 자연피로 균열을 1mm정도 성장시킨 균열 선단까지를 초기 균열 길이( $2a_{in}$ )로 채택하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2에 자세히 나타내었으며 시험편의 길이 방향이 압연 방향과 일치한다. 모든 실험은 10ton 용량의 서보유압 시험기를 사용하였으며 반복하중 주파수는 10Hz이고 하중조건은 다음과 같다.

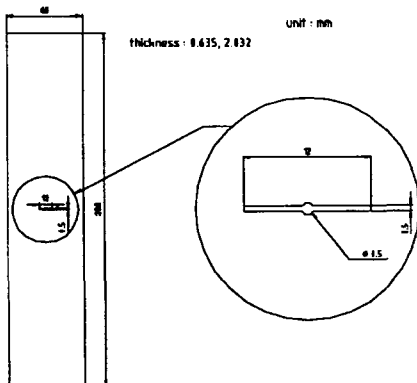


Fig. 2 Geometry of specimen

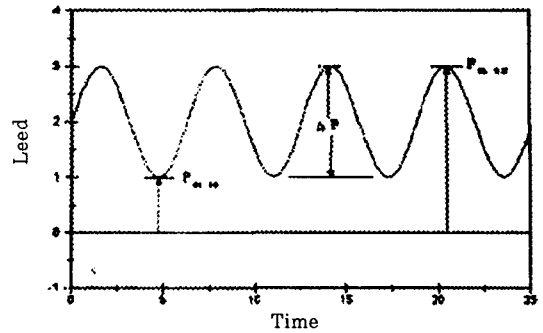


Fig. 3 Constant load type of sine wave

$$\Delta\sigma = 46.781\text{MPa}$$

$$(\sigma_{\max} = 62.375\text{MPa} - \sigma_{ys} \text{의 } 18\%)$$

$$\Delta\sigma = 48.228\text{MPa}$$

$$(\sigma_{\max} = 64.304\text{MPa} - \sigma_{ys} \text{의 } 18.5\%)$$

$$\text{응력비 } R = 0.25$$

Fig. 3와 Fig. 4에는 본 실험에서 사용된 일정진폭 하중과 과대하중의 파형을 나타내었다. 모든 시험은 상온에서 수행되었고 균열 성장은 CCD (Charged Coupled Detector) 비디오 카메라를 이용하여 일정 간격으로 균열을 포함한 시편의 형상을 이미지화하는 퍼스널 컴퓨터의 이미지 방법을 이용하였으며 Basic Macro Program을 사용하여 Sharpen Filtering 과정을 거쳐 균열 선단을 보다 선명하게 한 후 Phase Filtering으로 시편 표면의 조도 차이를 이용하여 균열 선단의 위치를 정밀하게 파악하여 균열의 길이를 측정하였다. 균열길이 측정간격은 5000 cycle이었으며 10개의 시험편을 사용하였다.

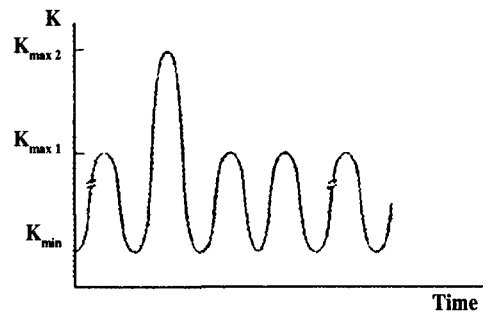
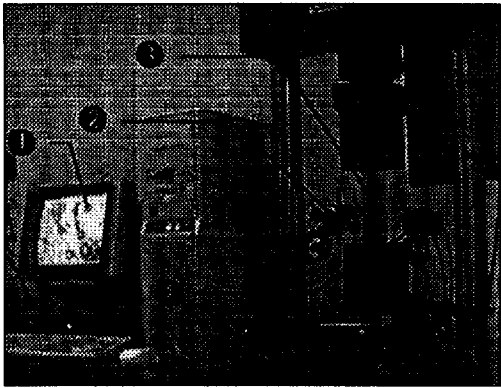


Fig. 4 Single overloading wave



① Personal computer      ② Traveling microscope  
③ Al 2024-T3 specimen    ④ CCD camera

Fig. 5 General view of experimental setups

### 3.2 Wheeler 모델 및 Willenborg 모델을 이용한 피로균열 전파수명 예측

각종 문헌에 제시되어있는 이론들을 바탕으로 피로수명 예측 프로그램을 만드는 과정에서 몇 가지 보완사항이 필요하게 되었다. Wheeler 모델 및 Willenborg 모델에서 일정 진폭 하중조건에서의 피로 수명 예측결과가 실험결과에 비해 크게 산정되는 것이 확인되었기 때문에 이러한 과산정 (overestimation) 을 보완하기 위해 각각의 모델에 대한 프로그램의 알고리즘에 수정을 가하여 실험결과에 보다 접근하는 예측결과를 얻을 수 있도록 하였다.

피로 수명 예측모델에서 소성역의 크기와 함께 높은 비중을 차지하는 재료상수와 같은 인자는 변경 없이 그대로 사용하였고, 다만 균열이 성장함에 따라 그 크기가 증가하는 하는 균열길이를 중심으로 균열길이를 포함하는 시편의 단면적 변화율 (area reduction factor, AF)을 식으로 표현하여 균열성장에 적용하였다.

단면적 변화율 (AF) 을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$AF = \frac{W - a_{ini}}{W - a_i} \quad (11)$$

여기서, W= 시편폭

$a_{ini}$  = 초기 균열 길이의 1/2

$a_i$  = 균열길이의 1/2

Fig. 5 는 피로수명예측 프로그램의 기본 순서도(2,3,4,5)를 간략히 나타낸 것이다.

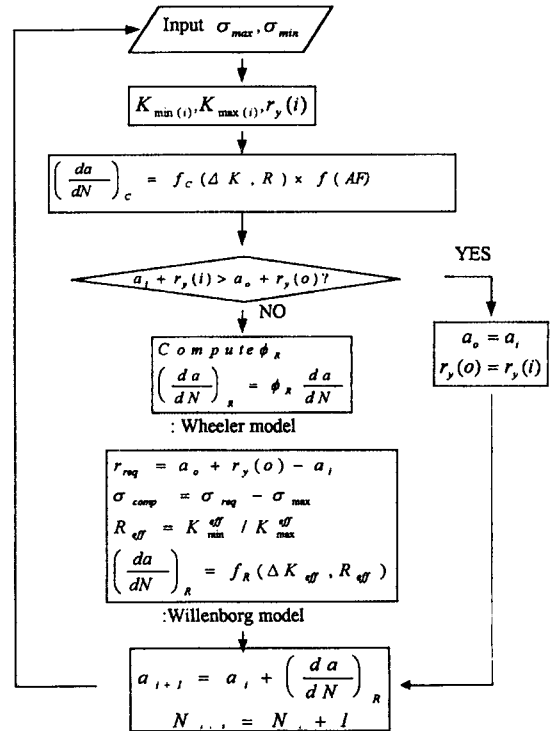


Fig. 5 Flow chart of fatigue crack propagation life prediction program

## 4. 실험 결과 및 검토

### 4.1 일정 진폭 하중의 피로 균열 진전 거동

Fig. 6에 하중반복사이클수 N과 균열길이 a의 관계를 나타내었으며 실험데이터들이 산만히 분포된 사실을 알 수 있다.

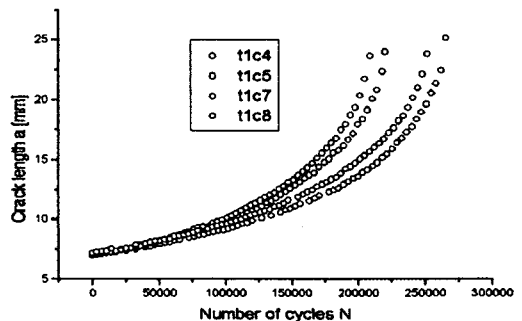


Fig. 6 Crack length plotted against the number of repeated cycles in Al 2024-T3 alloy, R=1/4

Fig. 7에는 응력확대계수폭  $\Delta K$ 와 피로균열 성장률  $da/dN$ 의 관계를 나타내었다.

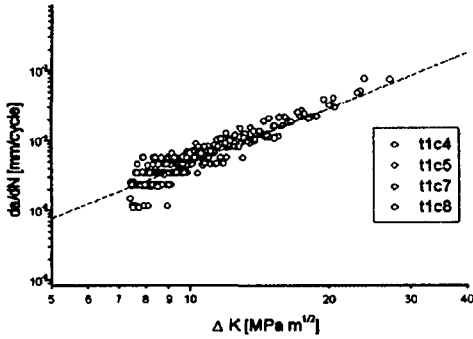


Fig. 7 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range,  $R=1/4$

다음 Table 3에는 식(4)와 식(5)에 나타나는 재료상수의 평균값(mean value)을 나타내었다.

Table 3 Mean value of  $m$ ,  $\log C_1$  and  $n$ ,  $\log C_2$

Al 2024-T3	$m$	$n$	$\log C_1$	$\log C_2$
$R=1/4, \Delta\sigma = 48.228\text{MPa}$	2.7	3.7	-7.02	-6.3

#### 4.2 일정 진폭 및 과대 하중하에서의 피로 균열 진전 거동에 대한 실험치와 예측치의 비교

일정진폭 하중조건에서의 실험 결과와 프로그램을 이용한 예측결과를 서로 비교하기 위해서 다음의  $a - N$  곡선을 사용하였다.

Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 일정진폭 하중조건에서 실험결과와 AF를 고려한 예측결과가 서로 근사한 경향을 나타내고 있다.

일정 진폭 하중 실험으로부터 얻어진 재료상수  $C$ ,  $m$ 의 평균값을 과대하중을 받는 경우의 수명예측 프로그램에 적용하였고, 과대 소성역의 크기  $r_y(o)$ 를 기준으로하여 각각의 모델을 서로 비교하여 Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

### 5. 결론

1) 단면적 변화율 (AF)를 적용한 예측결과가 그렇지 않은 결과보다 실험치에 잘 근접하는 것을 확인할 수 있

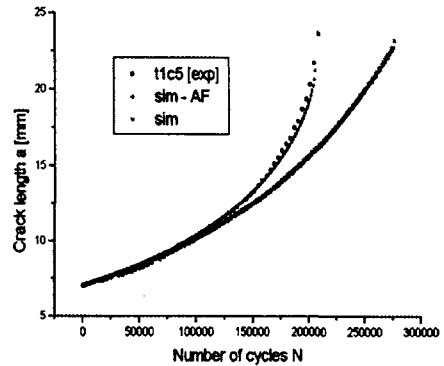


Fig. 8 Comparison between three results obtained by experiment and simulations - constant amplitude loading condition

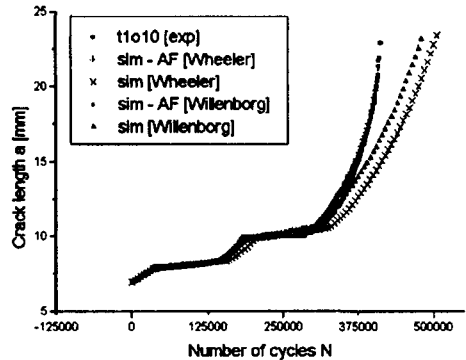


Fig. 9 Comparison between three results obtained by experiment and simulations - overloading condition

exp : 실험결과

sim-AF : AF(Area Factor)를 고려한 예측결과

sim : AF(Area Factor)를 고려하지 않은 예측결과

었다. Wheeler 모델을 사용하는 경우 Willenborg 모델에 의한 예측결과에 비해서 실험결과에 보다 근접하게 된다는 사실이 밝혀졌는데 이것은 Wheeler 모델이 갖는  $\gamma$  (fitting parameter)를 적절히 조절하여 가능했던 것으로 Al 2024 - T3에 대한 의 평균값은 0.9이다.

2) 비록 Willenborg 모델에 의한 예측 결과가 다소 만족스럽지 못한 점도 있으나 Wheeler 모델에서의  $\gamma$ 와 같은 피팅 파라메타 (fitting parameter)를 필요로 하지 않는다는 점에서 어느 정도 보완과정을 거친다면 보다 일반적으로 사용될 수 있는 유용한 모델이라 생각된다.

참 고 문 헌

1. J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall, Inc., pp. 96-98, 1990.
2. T. L. Anderson, "Fracture Mechanics," CRC Press, Inc., pp. 513-539, 1995.
3. J. Dominguez, "Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures," Elsevier Science B. V., pp. 971-974, 1994.
4. D. Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics," Martinus Nijhoff Pub, pp. 276-282, 1986.
5. E. Zahavi, "Fatigue Design - Life Expectancy of Machine Parts," CRC Press, pp. 163-173, 1996.
6. ASTM Designation : E647 - 95, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1995.
7. ASTM Designation : B209 - 95, Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate, 1995.
8. 박찬, "통계적 방법에 의한 일정진폭 하중하에서의 피로수명 예측," 인하대학교 대학원 석사논문, pp. 11-12, 1996.
9. C. M. Hudson, P. E. Lewis, J. B. Chang, Rockwell International, in *Part -Through Crack Fatigue Life Prediction, ASTM STP 687*, American Society for Testing and Materials, pp. 121-123, 1979.