

# 박판합금재료의 피로균열 전파특성에 대한 피로수명에측과 활용

이역섭\*, 김승권#

## Prediction and Application of Fatigue Life on Characteristics of Fatigue Crack Propagation of Thin Sheet Alloy

Ouk Sub Lee\* and Seung Gwon Kim#

### ABSTRACT

In fatigue life prediction, it is important that fatigue life is affected by crack closure phenomenon in thin sheet Al alloy. In this research, we attempt to (1)analyze the characteristics of fatigue crack propagation in constant loading condition for thin sheet Al 2024-T3 alloy which is generally used in transportation structures, (2)identify the crack closure phenomenon in thin sheet comparing experimental results of thin and thick sheet specimen under same fatigue loading condition. In using the fatigue related material constants from these fatigue crack propagation analysis, we attempt to (3)operate the fatigue life estimating process with considering crack closure phenomenon and (4)analyze the experimental and prediction results of fatigue life in thin sheet Al alloy.

**Key Words** : Fatigue crack propagation(피로균열전파), Fatigue crack growth rate(피로균열성장률), Crack closure phenomenon(크랙닫힘현상), Image method(이미지방법), Automatic measurement(자동측정), C-language(C-언어)

#### 기호설명

- $a$  = Crack Length
- $N$  = Fatigue Life
- $K$  = Stress Intensity Factor
- $\sigma$  = Stress
- $2W$  = Width of Specimen
- $R$  = Load Ratio
- $m, C$  = Material Constant by Fatigue Experiment
- $U$  = Factor by Crack Closure Theory

- CCD = Charge Coupled Device
- exp = Result of Experiment
- pre = Result of Prediction

### 1. 서론

박판 Al 합금에서 나타날 수 있는 균열닫힘현상이 피로수명에 미치는 영향은 피로수명에측에 있어서 중요한 부분이다. 본 연구에서는 (1)일정진폭 하중을 받는 수송기기 구조물에 널리 사용되고

접수일: 2006 년 3 월 14 일; 게재승인일: 2006 년 11 월 20 일

\* 인하대학교 기계공학부

# 교신저자: 인하대학교 대학원 기계공학전공

E-mail [kimsg@inhaian.net](mailto:kimsg@inhaian.net) Tel. (032) 860-7315

있는 박판 AI 2024-T3 합금의 피로균열 전파특성을 실험을 통하여 파악하고, (2)동일한 피로하중조건 하에서 박판과 후판 시험편에 대한 피로시험 결과를 서로 비교하여 박판에서 나타나는 균열단합현상을 확인해본다. 이러한 피로시험으로부터 얻어지는 피로관련 재료상수를 활용하여 (3)균열단합현상을 고려한 피로수명 예측과정을 거친 후 (4)박판 AI 합금재료의 피로수명에 대한 실험결과와 예측 결과를 서로 비교분석하고자 한다.

일정진폭 하중하에서 행해지는 피로시험을 통하여 재료의 피로파괴특성인  $m$  과  $C$  가 얻어진다.  $m$  과  $C$  는  $da/dN$  과  $\Delta K$  로 이루어지는 그래프의 각 축을 log-scale 화하여 구할 수 있으며 작용하중에서의 피로파괴특성을 나타내는 대표적인 피로관련 재료상수이다. 이렇게 해서 얻어지는  $m$  과  $C$  는 피로해석에 널리 쓰이는 적절한 관계식의 핵심인자로서 작용하며 또한 계산에 의한 피로수명 예측에 사용될 수 있다. 본 연구에서는 이를 계산함에 있어서 반복되는 계산상의 복잡함을 해결하고 시간적인 효율성을 고려하여 보다 효과적인 피로수명예측에 근접하기 위해 language program 을 계산과정에 활용하였다. 피로수명예측을 위한 대표적인 관계식으로는 Paris' Law<sup>1</sup> 가 있으며 사용된 language program 은 C-언어<sup>11</sup>이다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 일정진폭 하중하에서의 피로균열전파에 대한 개념

일정진폭 하중하에서의 피로균열 성장을,  $da/dN$  은 다음과 같이 계산된다.

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

여기서,

$N_i$  와  $N_{i+1}$ :  $i$  와  $i+1$  번째의 하중 반복수  
 $a_i$  와  $a_{i+1}$ :  $N = N_i$  와  $N = N_{i+1}$ 의 균열길이

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

$$\Delta K = \Delta K_{app} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(g) \quad 12$$

$$f(g) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \cdot (\text{polynomial term})$$

여기서,

$\Delta K_{app}$  : 작용응력 확대계수 범위

$\Delta \sigma$  : 작용응력 범위

$a$  : 균열길이의 1/2

$2W$  : 시편의 폭

하중비  $R$ <sup>1,8,9,10</sup> 은 다음과 같다.

$$R = \frac{\text{Min.load}}{\text{Max.load}} = \frac{\text{Min.stress}}{\text{Max.stress}}$$

$da/dN$  과  $\Delta K_{app}$  의 관계는 Paris' Law<sup>1</sup> 를 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^{m \ 1,7,8,9}$$

여기서,

$m, C$  : 재료상수

그리고 균열선단에 생성되는 Plasticity(소성)의 영향을 고려한 Crack Closure Phenomenon(균열단합현상)<sup>1,2,3</sup> 에 의거해 Elber<sup>1,3</sup> 에 의해 제안된 Modified Paris' Law 를 사용하게 되면 다음과 같다.

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$$

여기서,

$$U = 0.5 + 0.4R^1 \quad (-0.1 \leq R \leq 0.7)$$

이로부터 Modified Paris' Law<sup>1,2,3</sup> 는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^m$$

위 식은 피로수명예측을 위한 프로그램에 사용된다.

## 2.2 Language program 을 활용한 피로수명예측 과정

피로관련 재료상수  $m, C$  값을 활용하여 피로수명예측과정을 진행하는데에 적합한 language program 으로 자연과학, 공학 등의 수치해석분야에서 Fortran 과 함께 널리 활용되는 C-언어<sup>11</sup>를 사용하였으며, 버전은 Visual studio 6.0 professional 에 포함된 Visual C++를 사용하였다.

피로수명예측과정에서 반복되는 계산에 의한 피로균열성장률을 획득하는데 일반 공학용계산기는 용량과 속도 등 기능적인 한계가 있으며 이를 극복하고자 C-언어를 기반으로 하는 컴퓨터를 활용해보았다.

C-언어의 효율적인 기능 가운데 한 요소로서 함수의 기능을 꼽을 수 있으며, 본 연구의 피로수명예측을 위한 프로그램에도 main 함수와 종속함수를 적절히 배분하여 피로균열성장률에 대한 각 함수의 역할배분에 효율성을 기하였다.

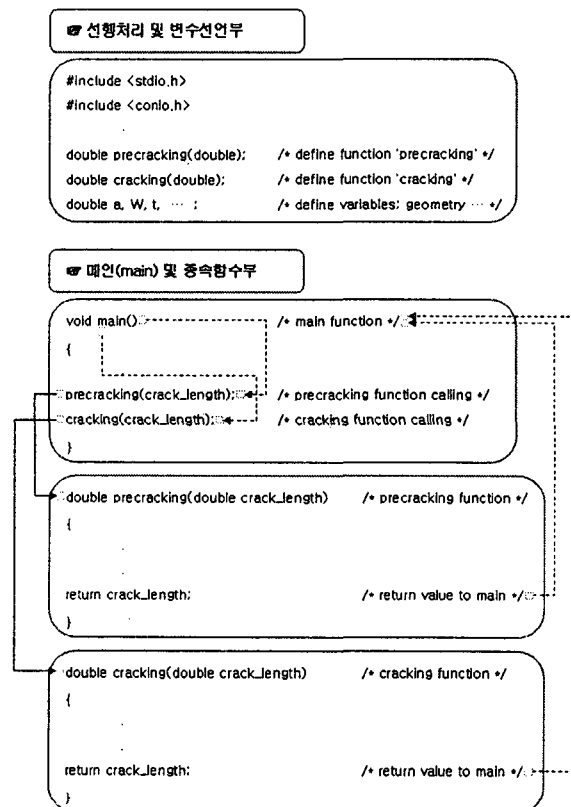


Fig. 1 Structural diagram of program

우선 예를들어 균열길이( $a$ )와 같은 프로그램 전반에 쓰이는 변수는 글로벌변수로 선언하였고, 종속함수부를 이루는 precracking 과 cracking 의 연산을 수행하는 함수를 각각 precracking(), cracking() 으로 종속함수화하여 main 함수와 별개로 위치시킨 다음 main 함수에서 필요시에 종속함수를 호출하여 연산을 수행한 후 그 결과값을 main 함수에 반환하도록 구성하였다. 여기서 precracking 은 시편의 가공균열로부터 피로균열형성을 위한 과정이며 precracking 으로부터 생성된 자연피로균열은 cracking 과정의 시작점인 초기균열길이  $a_{ini}$  가 된다.

Fig. 1 은 피로수명예측 프로그램의 code 를 구조도로 나타낸 것으로 주요변수와 종속함수의 선언 그리고 main 함수에서의 호출과 종속함수의 연산결과값 반환에 대한 흐름을 보이고 있다.

precracking 및 cracking 함수에서 피로균열성장률 을 구현하기 위한 예로 Modified Paris' Law 를 code 화 하는 과정을 살펴보면 실험전반에 적용되어지는 일정진폭하중에 의한 피로균열성장률

$\frac{da}{dN} (= C \cdot \Delta K_{eff}^m)$  과 균열길이  $a(i)$  그리고 소성영역  $r_y(i)$  의 함으로부터 Fig. 2 의 판단문에 의해 반복되는 피로하중에 대한 피로균열성장 균열길이를 계산하게 된다.

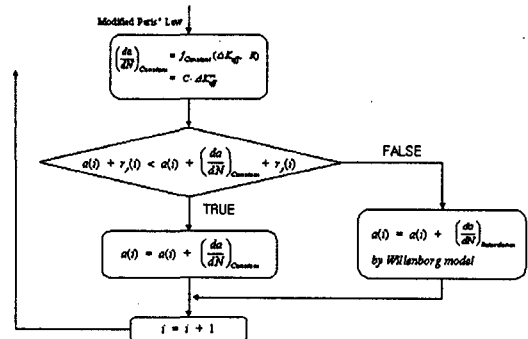


Fig. 2 Flowchart of decision algorithm

다음은 피로수명예측 프로그램의 일부로 변수 선언부를 비롯, main 함수에서 피로균열성장률과 관련한 부분을 개략적으로 나타내보았다.

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include<conio.h>
    
```

```

FILE *fp_filename ;
char *txtfilename = "tlc4.txt" ;
char *sourcefilename = "tlc4.cpp" ;

/* declaration of variables */

/* Geometry */
double a_0=0.00632, a, a_p=0.007166667, a_f=0.02379167 ;
double W=0.03, B=0.001016 ;

...

void main(void)
{
...
Y_TypeA_MP = pow(10, logY_TypeA_MP) ;
m_TypeA = slope_TypeA ;
...
/* Crack propagation in Modified Paris' Law*/
...
R_TypeA_MP = P_min_TypeA_MP/P_max_TypeA_MP ;
U_TypeA_MP = 0.5 + (0.4*R_TypeA_MP) ;
delta_K_TypeA_MP = K_max_TypeA_M - K_min_TypeA_MP ;
delta_K_eff_TypeA_MP = U_TypeA_MP * delta_K_TypeA_MP ;
da_TypeA_MP = C_TypeA_P * pow(delta_K_eff_TypeA_MP,
m_TypeA) ;
...
if(a_r_y_range_TypeA_MP < a_r_y_range_fore_TypeA_MP)
{
a_r_y_range_tank_TypeA_MP = a_r_y_range_fore_TypeA_MP ;
}
if(P_Willenborg_TypeA_MP == 1){
a_r_y_range_switch_TypeA_MP = a_r_y_range_tank_TypeA_MP ;
}
else{
a_r_y_range_switch_TypeA_MP = a_r_y_range_de_energy_TypeA_MP ;
r_req = a_r_y_range_switch_TypeA_MP - (a_TypeA_MP -
da_TypeA_MP) ;
if(r_req <= 0){
r_req = 0 ;
}
else{
}
...
if(only_one_count_first_AMP == NN_AMP){
if(only_one_count_second_AMP == 0){
a_TypeA_MP = a_Over[i_AMP] ;
a_r_y_range_TypeA_MP = a_TypeA_MP +
r_y_TypeA_MP ;
a_r_y_range_fore_TypeA_MP =
a_r_y_range_TypeA_MP ;
NN_AMP++ ;
i_AMP++ ;
j_AMP = i_AMP - 1 ;
}
else{
a_r_y_range_fore_TypeA_MP = a_r_y_range_TypeA_MP ;
}
}
else{
a_r_y_range_fore_TypeA_MP = a_r_y_range_TypeA_MP ;
}
}
...

```

피로수명 예측방법과 관련한 프로그램의 flowchart 는 3.2 절에 나타내었다.

### 3. 시험편과 실험방법 및 예측방법

#### 3.1 박판에 대한 일정진폭 하중하에서의 피로 균열 전파실험

본 연구에서 사용한 시험편 재료는 Al 2024-T3 합금이며 화학적 조성<sup>6</sup>을 Table 1에, 기계적 성질<sup>4,6</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>5</sup>의 모양은 CCT(Center Cracked Tension) 형으로 중앙에 지름 1 mm인 원공을 가공한 후 폭 0.4 mm인 싹으로 양쪽에 노치를 가공하고 일정 진폭 피로하중하에서 자연피로균열을 1 mm 정도 성장시킨 균열선단까지를 초기균열길이  $2a_{ini}$ 로 채택하였다. 시험편의 형상은 Fig. 3에 자세히 나타내었으며 시험편의 길이방향이 압연방향과 일치하게 제작되었다.

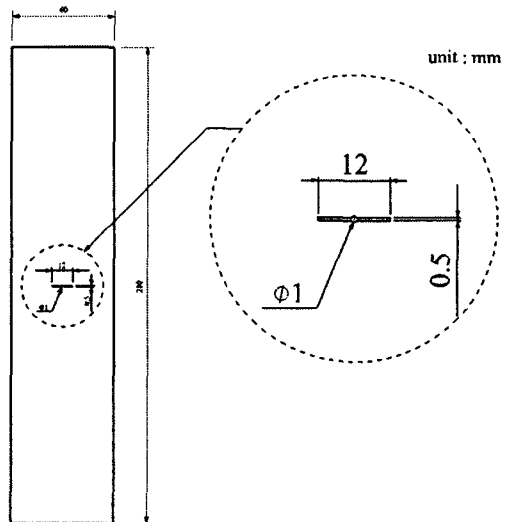


Fig. 3 Geometry of specimen

모든 실험은 10 ton 용량의 서보유압 시험기를 사용하였으며 반복하중 주파수는 10 Hz 이고 하중 조건은 다음과 같다.

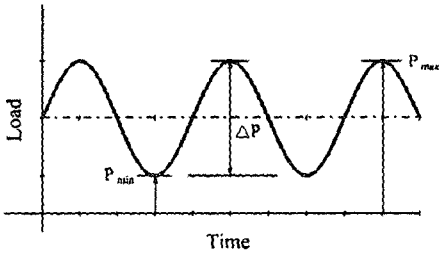


Fig. 4 Constant load type of sine wave

$\Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$   
 $(\sigma_{\max} = 64.304 \text{ MPa}, \sigma_{ys} \text{ 의 } 18.6 \%)$   
 응력비  $R = 1/4$

Fig. 4 는 본 실험에서 사용된 일정진폭 하중의 파형을 나타내었다. 모든 실험은 상온에서 수행되었고 균열성장은 CCD(Charge Coupled Device) 카메라를 이용하여 일정간격으로 균열을 포함한 시편의 형상을 이미지화하는 컴퓨터를 통한 이미지방법을 이용하여 자동측정하였으며 Basic Macro Program 을 사용하여 Sharpen Filtering 과정을 거쳐 균열선단을 보다 선명하게 한 후 Phase Filtering 으로 시편표면의 조도차이를 두드러지게 하여 균열선단의 위치를 정밀하게 파악하고 균열의 길이를 측정하였다. 균열길이 측정간격은 5,000 cycle 이었으며 모두 6 개의 시험편을 사용하였다.

박판합금재료의 피로에서 나타날 수 있는 균열 단합현상을 확인하고자 두께 1.016 mm 의 Al 2024-T3 합금재료 시험편을 네차례 실험하였으며 두께가 두 배인 2.032 mm 의 시험편을 사용하여 두 차례의 실험을 실시하였다. 시험편의 형상 및 하중조건 등 두께를 제외한 전반적인 실험조건은 동일하게 하였다.

### 3.2 피로균열전파 수명예측

Fig. 5 는 피로균열전파 수명예측을 위한 code 의 flowchart 이다.

Flowchart 중앙부에 있는 true/false 를 판단하는 영역에서는 일정진폭하중조건 하에서의 피로시험의 경우 피로균열성장 지연거동이 나타나지 않게 되며 항상 true 값을 유지하면서 시편의 파단시까지

균열은 성장을 계속하게 된다.

피로균열성장률인  $da/dN$  의 경우 Modified Paris' Law 관계식을 적용하여 code 화 하였다.

일정진폭하중조건과 함께 과대하중이 포함된 실험조건인 경우에는 과대하중에 의한 소성영역으로부터 피로균열성장 지연거동이 나타날 수 있으며 판단부에서는 false 값이 되어 피로균열성장 지연거동과 관련한 유효한 model<sup>2</sup>로부터 지연의 정도를 예상할 수 있다.

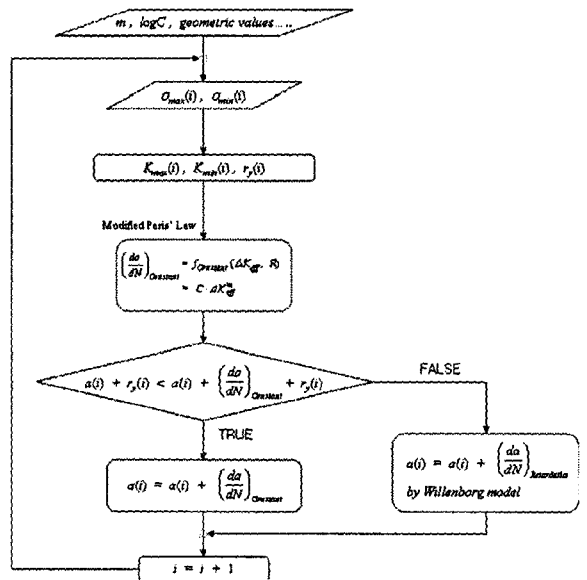


Fig. 5 Flowchart of program

## 4. 실험결과 및 검토

### 4.1 일정진폭 하중하에서의 피로균열 진전거동

박판 Al 합금재료의 피로에서 나타날 수 있는 균열단합현상에 의한 피로균열 성장지연현을 확인하고자 행한 두께 1.016 mm Al 합금재료에 대한 피로시험의 결과로 얻어지는 하중반복 사이클수  $N$  과 균열길이  $a$  의 관계를 Fig. 6 에 나타내었다. 일반적인 피로시험에서 보여주는 경향과 같이 실험테이블들이 산만히 분포하고 있음을 알 수 있다.

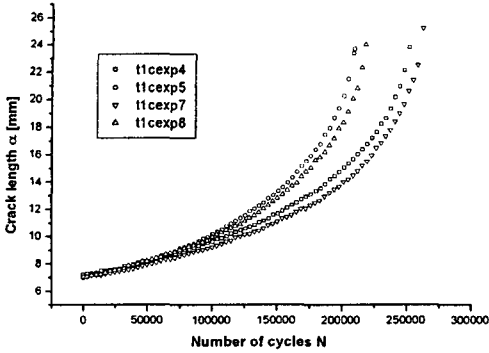


Fig. 6 Crack length plotted against the number of repeated cycles in Al 2024-T3 alloy,  $t = 1.016 \text{ mm}$

다음은 두께가  $2.032 \text{ mm}$  인 Al 합금재료의 하중 반복 사이클수  $N$  과 균열길이  $a$  의 관계를 Fig. 7 에 나타내었으며, 응력확대계수  $\Delta K$  와 피로균열 성장률  $da/dN$  의 관계를 Fig. 8 에 나타내었다.

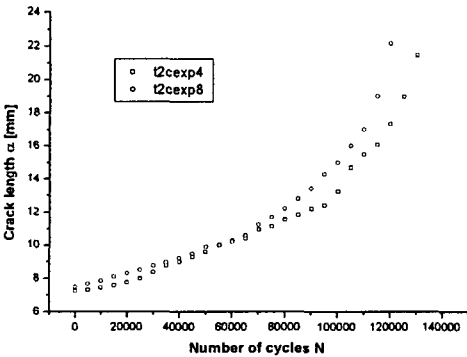


Fig. 7 Crack length plotted against the number of repeated cycles in Al 2024-T3 alloy,  $t = 2.032 \text{ mm}$

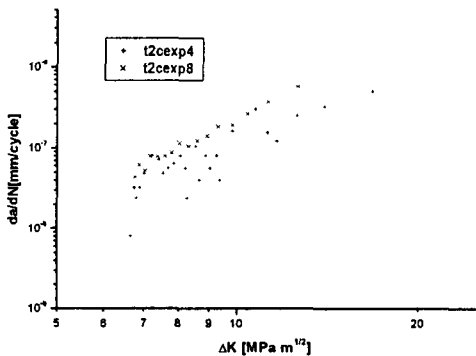


Fig. 8 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in Al 2024-T3 alloy,  $t = 2.032 \text{ mm}$

다음 Table 3 에는 피로관련 재료상수를 나타내었다.

Table 3 Mean value of  $m, C$

Al 2024-T3	$R = 1/4, \Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$	
	$m$	$\log C$
	3.8798	-10.37265

$m$  과  $\log C$  값은  $\frac{da}{dN} - \Delta K$  선도에서 최소자승법에 의한 Linear fitting 을 통하여 구하였다.

동일한 하중조건의 피로시험에서 박판의 피로수명이 후판에 비해 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있으며, 이로부터 박판 Al 합금재료(Al 2024-T3 alloy)의 피로균열 성장에 영향을 미치는 인자 중 하나로서 균열단합현상이 존재함을 확인하였다.

#### 4.2 일정진폭 하중하에서의 피로균열 진전거동에 대한 실험치와 예측치의 비교

두께  $2.032 \text{ mm}$  시험편에 대한 피로시험으로부터 얻어지는 재료상수  $m, \log C$  값을 참조하여 두께  $1.016 \text{ mm}$  시험편에 대한 피로수명예측을 실시하였다. 피로균열성장률인  $da/dN$  에는 균열단합현상을 적용시키고자 Modified Paris' Law 관계식을 사용하여 code 화 하였으며, 예측결과를 다음의  $a - N$  선도를 사용하여 나타내었다.

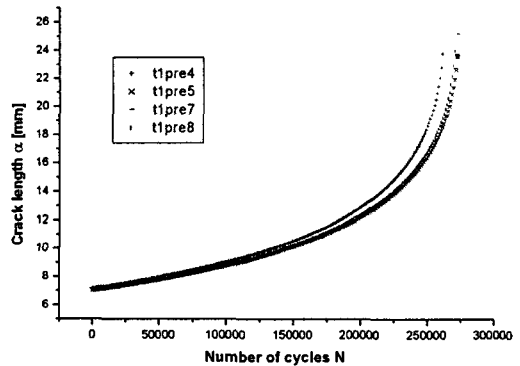


Fig. 9 Crack length plotted against the number of repeated cycles obtained by prediction; constant amplitude loading condition

두께  $1.016 \text{ mm}$  시험편에서 실험에 의한 피로수명 평균값은 235,325 cycle 이며 균열단합현상을 고려한 Modified Paris' Law 를 사용한 피로수명 예측결과는 268,968 cycle 로 오차율은 약 14.3 % 이

다. 이에 대한 경향은 Fig. 6 과 Fig. 9 에 각각 나타내었다.

## 5. 결 론

항공기와 같은 대형수송구조물에 쓰이는 박판 Al 합금재료의 피로균열 전파특성을 파악하기 위해 실시한 일정진폭 하중조건에서의 피로시험과 이의 예측과정으로부터,

- (1) 동일한 피로하중조건에서 박판재료의 균열달림 현상이 피로균열 성장지연의 한 원인임을 확인할 수 있었고, 본 피로시험에서 사용된 두께 2.032 mm 피로시험편에 대한 두께 1.016 mm 피로시험편에서의 피로수명 연장률은 약 87.4 % 이다.
- (2) 균열달림현상을 고려한 Modified Paris' Law 를 사용하여 작성한 피로수명 예측프로그램과 이로부터 구해지는 피로수명 예측값은 실험에 의한 피로수명과 비교하여 약 14.3 % 의 오차율을 보인다. 두께 2.032 mm 시험편에서 피로파괴특성을 나타내는  $m$ ,  $\log C$  값을 얻기위해 다수의 피로시험이 요구되어지며 이로부터 보다 정확한 피로관련 재료상수를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.
- (3) 피로시험의 특성상 많은 시간과 노력을 통하여 축적되어지는 피로관련 자료로부터 재료의 피로파괴특성을 파악해보고, 이를 분석하여 얻어지는 재료상수를 활용하여 Elber 에 의해 제안된 Modified Paris' Law 와 같은 유효한 관계식에 대입, 피로수명을 예측해봄으로써 박판에서 나타날 수 있는 균열달림현상이 피로수명에 영향을 미치는 한 원인임을 파악할 수 있었다.
- (4) 박판합금재료의 피로에서 균열달림현상이 보이는 피로균열 성장지연에 대한 일반적인 경향을 파악하기 위하여 동일한 하중조건하에서 보다 다양한 두께의 시험편에 대한 피로시험의 수행과 분석이 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Anderson, T. L., "Fracture Mechanics," CRC Press Inc., Vol. 1, No. 1, pp. 513-528, 1995.
2. Dominguez, J., "Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures," Elsevier Science B. V., Vol. 2, No. 1, pp. 970-975, 1994.
3. Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall Inc., Vol. 1, No. 1, pp. 101-113, 1990.
4. Park, C., "Fatigue Life Prediction by Statistical Approach under Constant Amplitude Loading Condition," Inha Univ., Vol. 1, No. 1, pp. 11-12, 1996.
5. ASTM Designation : 647-95, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Vol. 1, No. 1, pp. 578-614, 1995.
6. ASTM Designation : B209-95, "Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate," Vol. 1, No. 1, pp. 125-151, 1995.
7. Song, S. H. and Lee, J. M., "Effect by Applying Mode of Single Overload on Propagation Behavior of Fatigue Crack," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 109-116, 2004.
8. Sim, D. S., Kim, K. B., Kim, J. K. and Song, S. H., "Fatigue Life Prediction for High Strength Al-alloy under Variable Amplitude Loading," Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 24, No. 8, pp. 2074-2082, 2000.
9. Sim, D. S., Hwang, D. Y. and Kim, J. K., "Prediction of Crack Growth in 2124-7851 Al-alloy under Flight Simulation Loading," Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 26, No. 8, pp. 1487-1494, 2002.
10. Seo, C. M. and Kim, K. R., "Fatigue Crack Growth Properties of Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel," Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 21, No. 10, pp. 1674-1682, 1997.
11. Woo, K., Kang, D. J. and Kim, E. J., "C++ by Dissection," ITC, Vol. 1, No. 1, pp. 85-153, 2004.
12. Zahavi, E., "Fatigue Design - Life Expectancy of Machine Parts," CRC Press, Vol. 1, No. 1, pp. 141-149, 1996.